



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

제주도 하천 관측자료 기반 유출특성  
매개변수 도출 및 홍수유출량 산정

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

鄭 宇 列

2013年 8月

# 제주도 하천 관측자료 기반 유출특성 매개변수 도출 및 홍수유출량 산정






指導教授 楊 城 基

鄭 宇 列

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

20013年 8月

鄭宇列의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	김 남 령	
委 員	김 상 진	
委 員	박 원 배	
委 員	김 동 수	
委 員	양 성 기	

濟州大學校 大學院

20013年 8月

The Estimation of Parametric Runoff  
Characteristics and Flood Discharge based on  
Riverine In-situ Measurements in Jeju Island

Woo-Yeol Jung

(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Engineering

2013. 8.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Nam-Hyeong Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Sang-Jin Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Won-Bae Park , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Dong-Su Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Sung-Kee Yang , Prof. of Civil engineering

August. 2013

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY



## 目 次

目 次 .....	i
LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vii
Summary .....	x
I. 서 론 .....	1
1. 연구의 배경 및 목적 .....	1
2. 연구의 동향 .....	3
3. 연구의 방법 .....	6
II. 이론적 배경 및 유출량 계측기기 .....	8
1. 이론적 배경 .....	8
1.1 강우-유출 모형 .....	8
1.2 유역평균 강우량 .....	14
1.3 유효우량을 산정하기 위한 수문학적 손실 .....	17
1.4 합성단위도법 .....	24
1.5 하도추적방법 .....	34
2. 유출량 계측기기 .....	41
2.1 이동식 전자과표면유속계 .....	41
2.2 고정식 전자과표면유속계(Kalesto) .....	42
2.3 ADCP .....	43
2.4 LSPIV .....	45
III. 연구대상 유역 및 호우사상 별 유출량 관측 결과 .....	46
1. 연구대상 유역 .....	46
1.1 유역 형상 및 지형적 특성 .....	47
1.2 유역의 표고 및 경사 분석 .....	47
2. 호우사상 별 유출량 관측 결과 .....	51
2.1 현장 유출량 관측 결과 .....	52

2.2 고정식 유출량 관측 결과 .....	56
IV. 유출량 산정 모형의 분석 및 적용 .....	60
1. 유역평균 강우량 .....	60
1.1 Thiessen 방법과 등우선법을 이용한 유역평균 강우량 산정 .....	60
1.2 Thiessen 방법과 등우선법 변환식 개발과 적용 .....	67
2. 유역의 초기손실 추정 .....	74
2.1 NRCS-CN 방법을 이용한 유효우량 산정 .....	74
2.2 관측자료와 NRCS-CN 방법을 이용한 유역의 초기손실 분석 .....	83
3. Muskingum 하도추적법 매개변수 산정 .....	86
3.1 하도추적구간 선정 .....	86
3.2 Muskingum 매개변수 ( $K, x$ ) 산정 .....	87
4. 매개변수 민감도 분석 .....	101
4.1 Muskingum 매개변수 .....	101
4.2 Clark 단위도법 매개변수 .....	104
5. Clark 단위도법 매개변수 조합에 따른 유출량 분석 .....	107
5.1 유출곡선지수(CN), 도달시간( $T_c$ ), 저류상수( $K$ ) 조합 결정 .....	107
5.2 최적 매개변수 조합 선정 .....	111
5.3 기존 유출량 산정방법과 연구결과 비교·분석 .....	158
6. 연구결과의 과거 호우사상 적용 .....	165
6.1 무강우 이후 강우-유출 사상 .....	165
6.2 선행강우 이후 강우-유출 사상 .....	168
V. 결 론 .....	170
참고문헌 .....	172

## List of Figures

Fig. 1.1 Runoff zone defined for the water-budget calculation on the Island of Hawaii (USGS,2011) .....	5
Fig. 1.2 Flow chart on the study .....	7
Fig. 2.1 Arithmetic average method .....	14
Fig. 2.2 Thiessen polygon method .....	15
Fig. 2.3 Isohyetal method .....	16
Fig. 2.4 Concept map of Green-Ampt model(Yoon, 1999) .....	18
Fig. 2.5 Concept map of Snyder synthetic unit hydrograph(Yoon, 2007) .....	26
Fig. 2.6 Dimensionless hydrograph of NRCS(Yoon, 2007) .....	28
Fig. 2.7 Concept map of Clark synthetic unit hydrograph(Jung, 2007) .....	30
Fig. 2.8 Stream channel storage-discharge relation graph(Jung, 2007) .....	35
Fig. 2.9 Change of stream channel storage form of flood level rise and fall (Jung,2007) .....	35
Fig. 2.10 Prism storage and wedge storage of natural stream channel(Jung, 2007) .....	36
Fig. 2.11 Relation of stream channel storage-inflow-discharge(Jung, 2007) .....	38
Fig. 2.12 Decision of stream channel storage constant( $K$ )(Jung, 2007) .....	38
Fig. 2.13 Observation of discharge using a Microwave Water Surface Current Meter: a) Principle of Microwave Water Surface Current Meter; b) Commercialized mobile Microwave Water Surface Current Meter (Mutronics MU2720) .....	42
Fig. 2.14 Kalesto water level-current meter .....	43
Fig. 2.15 Observation of discharge using ADCP: a) Principle of ADCP ; b) ADCP equipped with 9 beams (SonTek RiverSurveyor M9); c) Management of ADCP in scene .....	44
Fig. 2.16 Observation of discharge using LSPIV: a) Principle of LSPIV ; b) Continuous image shooting of water surface using a video camera in scene .....	45
Fig. 3.1 Basins for the study .....	46
Fig. 3.2 Altitude and slope analysis of Han stream watershed .....	48
Fig. 3.3 Altitude and slope analysis of Oaedo stream watershed .....	49
Fig. 3.4 2nd Dongsan bridge of Han Stream .....	51
Fig. 3.5 Microwave water surface stream meter and LSPIV .....	53
Fig. 3.6 Measurement of 2nd Dongsan bridge cross section .....	53
Fig. 3.7 Flood discharge hydrograph of typhoon "Muifa" .....	53
Fig. 3.8 Picture of heavy rainfall scene in November .....	55
Fig. 3.9 Hydrograph of heavy rainfall in November .....	55
Fig. 3.10 Flood discharge hydrograph of typhoon "Khanun" .....	56
Fig. 3.11 Flood discharge hydrograph of heavy rainfall in April 2011(2nd Dongsan	

bridge-stationary) .....	57
Fig. 3.12 Flood discharge hydrograph of heavy rainfall in April 2011(Oaedo water purification plant-stationary) .....	58
Fig. 3.13 Flood discharge hydrograph of typhoon "Khanun" in 2012(Oaedo water purification plant-stationary) .....	59
Fig. 4.1 AWS Thiessen polygon method graph of Jeju weather center .....	61
Fig. 4.2 Mean areal rainfall by heavy rain concept using Thiessen method .....	63
Fig. 4.3 Rainfall chart shown high in upstream direction of watershed .....	64
Fig. 4.4 Rainfall chart shown high in downstream direction of watershed .....	65
Fig. 4.5 Rainfall chart shown high in left and right direction of watershed .....	65
Fig. 4.6 Mean areal rainfall by heavy rain concept using isohyetal method .....	67
Fig. 4.7 Mean areal rainfall by heavy rain concept using isohyetal method .....	69
Fig. 4.8 Comparison of Thiessen method and isohyetal method results of Han Steam .....	71
Fig. 4.9 Comparison of Thiessen method and isohyetal method results of Oaedo Steam .....	72
Fig. 4.10 Thiessen-isohyetal method transformation of Han Stream .....	73
Fig. 4.11 Thiessen-isohyetal method transformation of Oaedo Stream .....	73
Fig. 4.12 Land use map and soil map of Han Stream .....	75
Fig. 4.13 Land use map and soil map of Oaedo Stream .....	77
Fig. 4.14 Effective NRCS rainfall of Han stream(2008-2012) .....	81
Fig. 4.15 Effective NRCS rainfall of Oaedo stream(2008-2012) .....	82
Fig. 4.16 Effective rainfall according to change of initial abstraction(Han stream watershed) .....	84
Fig. 4.17 Effective rainfall according to change of initial abstraction(Oaedo stream watershed) .....	84
Fig. 4.18 Routing section of Muskingum watershed .....	87
Fig. 4.19 Inflow-discharge hydrograph of Han Stream watershed .....	88
Fig. 4.20 Inflow-discharge hydrograph of Oaedo Stream watershed .....	90
Fig. 4.21 Decision of stream channel storage constant( $K$ )(Jung, 2007) .....	90
Fig. 4.22 Weighted discharge-accumulated discharge graph of Han Stream watershed .....	93
Fig. 4.23 Weighted discharge-accumulated discharge graph of Oaedo Stream watershed .....	98
Fig. 4.24 Calculation of Muskingum parameter .....	99
Fig. 4.25 Result of Muskingum K sensitivity analysis .....	102
Fig. 4.26 Result of Muskingum x sensitivity analysis .....	103
Fig. 4.27 Result of Clark unit hydrograph method time of concentration $T_c$ sensitivity analysis .....	105
Fig. 4.28 Result of Clark unit hydrograph method time of concentration K sensitivity	

analysis .....	106
Fig. 4.29 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination(Heavy rainfall in October 2011) .....	115
Fig. 4.30 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination(Heavy rainfall in October 2011) .....	116
Fig. 4.31 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination(Heavy rainfall in October 2011) .....	117
Fig. 4.32 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination(Heavy rainfall in October 2011) .....	118
Fig. 4.33 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012) .....	122
Fig. 4.34 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012) .....	123
Fig. 4.35 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012) .....	124
Fig. 4.36 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012) .....	125
Fig. 4.37 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011) .....	129
Fig. 4.38 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011) .....	130
Fig. 4.39 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011) .....	131
Fig. 4.40 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011) .....	132
Fig. 4.41 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012) .....	136
Fig. 4.42 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012) .....	137
Fig. 4.43 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012) .....	138
Fig. 4.44 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012) .....	139
Fig. 4.45 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012_Oaedo Stream) .....	143
Fig. 4.46 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination	

(Heavy rainfall in April 2012_Oaedo Stream) .....	144
Fig. 4.47 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012_Oaedo Stream) .....	145
Fig. 4.48 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012_Oaedo Stream) .....	146
Fig. 4.49 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012_Oaedo Stream) .....	150
Fig. 4.50 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012_Oaedo Stream) .....	151
Fig. 4.51 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012_Oaedo Stream) .....	152
Fig. 4.52 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012_Oaedo Stream) .....	153
Fig. 4.53 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after no rainfall .....	156
Fig. 4.54 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after antecedent rainfall .....	158
Fig. 4.55 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study_Han Stream .....	160
Fig. 4.56 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study_Oaedo Stream .....	161
Fig. 4.57 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study_Han Stream .....	161
Fig. 4.58 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study_Oaedo Stream .....	163
Fig. 4.59 Result applying past event_rainfall-runoff events after no rainfall .....	167
Fig. 4.60 Result applying past event_rainfall-runoff events after antecedent rain .....	169

## List of Tables

Table 2.1 Characteristics of lumped, distributed type rainfall-discharge model(Benavides, 2005) .....	10
Table 2.2 Discharge calculation method of HEC-HMS model(HEC, 2000) .....	12
Table 2.3 Weather data calculation method of HEC-HMS model(HEC, 2000) .....	13
Table 2.4 Green-Ampt model parameters by soil(Yoon, 1999) .....	20
Table 2.5 Categorization of infiltration by soil type(Lee, 2008) .....	22
Table 2.6 Runoff curve number(Lee, 2008) .....	22
Table 2.7 AMC condition in NRCS method(Lee, 2008) .....	24
Table 2.8 Value of NRCS dimensionless hydrograph according to time(Yoon, 2007) .....	28
Table 2.9 Ratio of mean current speed and celerity of flood wave according to stream channel cross section type(Jung, 2007) .....	39
Table 3.1 Geological features of basin for study .....	47
Table 3.2 Altitude analysis result of Han Stream watershed .....	48
Table 3.3 Slope analysis result of Han Stream watershed .....	49
Table 3.4 Altitude analysis result of Oaedo Stream watershed .....	50
Table 3.5 Slope analysis result of Oaedo Stream watershed .....	50
Table 3.6 Rainfall of typhoon "Muifa" by observed points before 5 days of rainfall(mm) .....	52
Table 3.7 Rainfall of typhoon "Khanun" by observed points before 5 days of rainfall(mm) .....	55
Table 4.1 Rainfall observatory .....	60
Table 4.2 Thiessen polygon are according to AWS observation point .....	61
Table 4.3 Mean areal rainfall using Thiessen method .....	62
Table 4.4 Rainfall according by year in observed point (mm) .....	64
Table 4.5 Mean areal rainfall using isohyetal method .....	66
Table 4.6 Error according to calculation methods of mean areal rainfall(Han Stream) .....	68
Table 4.7 Error according to calculation methods of mean areal rainfall(Oaedo Stream) .....	68
Table 4.8 Error of total rainfall according to rainfall events of Thiessen method and isohyetal method .....	70
Table 4.9 Thiessen-isohyetal method transformation .....	73
Table 4.10 Analysis result of land cover in Han Stream watershed .....	75
Table 4.11 Analysis result of soil map in Han Stream watershed .....	76
Table 4.12 Analysis result of land cover in Han Stream watershed .....	77
Table 4.13 Analysis result of soil map in Oaedo Stream watershed .....	78
Table 4.14 CN(AMC-II) on land cover categorization items .....	79

Table 4.15 Runoff curve number CN(AMC-II) of Han Stream watershed and Oaedo Stream watershed .....	80
Table 4.16 Runoff curve number according to advanced soil moisture condition .....	81
Table 4.17 Calculation of NRCS effective rainfall of Han Stream watershed .....	82
Table 4.18 Calculation of NRCS effective rainfall of Oaedo Stream watershed .....	82
Table 4.19 Calculation of effective rainfall according to change of initial abstraction of Han Stream watershed .....	85
Table 4.20 Calculation of effective rainfall according to change of initial abstraction of Oaedo Stream watershed .....	85
Table 4.21 Calculation of Muskingum parameters( $K, x$ ) .....	100
Table 4.22 Runoff curve number according to AMC condition .....	107
Table 4.23 Calculation of time of concentration according to watershed .....	108
Table 4.24 Calculation of storage constant according to calculation method of time of concentration .....	109
Table 4.25 Clark Decision of unit hydrograph method parameters .....	111
Table 4.26 Applied rainfall event .....	112
Table 4.27 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(heavy rainfall in October 2011) .....	113
Table 4.28 Results according to parameter combination(heavy rainfall in October 2011) .....	119
Table 4.29 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Heavy rainfall in April 2012) .....	120
Table 4.30 Results according to parameter combination(Heavy rainfall in April 2012) .....	126
Table 4.31 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Typhoon "Muifa" in 2011) .....	127
Table 4.32 Results according to parameter combination(Typhoon "Muifa" in 2011) .....	133
Table 4.33 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Typhoon "Khanun" in 2012) .....	134
Table 4.34 Results according to parameter combination(Typhoon "Khanun" in 2012) .....	140
Table 4.35 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Heavy rainfall in April 2012_Oaedo Stream) .....	141
Table 4.36 Results according to parameter combination(Heavy rainfall in April 2012_Oaedo Stream) .....	147
Table 4.37 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Typhoon "Khanun" in 2012_Oaedo Stream) .....	148
Table 4.38 Results according to parameter combination(Typhoon "Khanun" in 2012_Oaedo	



Stream) .....	154
Table 4.39 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after no rainfall .....	155
Table 4.40 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after antecedent rainfall .....	157
Table 4.41 Existing method and discharge calculation method from the results of this study .....	159
Table 4.42 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study_Han Stream .....	160
Table 4.43 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study_Oaedo Stream .....	161
Table 4.44 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study_Han Stream .....	163
Table 4.45 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study_Oaedo Stream .....	164
Table 4.46 Rainfall-runoff events after no past rainfall .....	165
Table 4.47 Result applying past event_rainfall-runoff events after no rain .....	167
Table 4.48 Rainfall-runoff events after past antecedent rainfall .....	168

## Summary

There were limits to apply the flood discharge calculation method, which is domestically applied, directly in the streams of Jeju Island that has different hydrological · geological characteristics from interior lands and the characteristics of Jeju Island are not being reflected because domestic methods are being directly applied Jeju Island stream master plans. In this study, discharge characteristic parameters are deducted based on scene observation data during rainfalls to calculate the flood discharge of Jeju Island streams.

Subject to Jeju Island Han Stream 2nd Dongsan bridge during runoff, mobile microwave water surface current meter, LSPIV, and ADCP were used for discharge observation and the mean areal rainfall was applied by developing the isohyetal method by transforming the Thiessen polygon method. Initial abstraction of NRCS-CN method to calculate effective rainfall was estimated by using observations( $I_a = 0.4S$ ), and mapping analysis was used to deduct Muskingum parameters  $K$ ,  $x$ . By setting the range of Clark unit hydrograph parameters( $T_c$ ,  $K$ ) and runoff curve number  $CN$ , the optimum combination(discharge after no rainfall:  $CNII$ , KravenII, Sabol, discharge after antecedent rainfall:  $CN55$ , KravenII, Sabol) was calculated.

Results were deducted by categorizing events of discharge occurring after no rainfall and after antecedent rainfall. Calculating discharge by the method used in existing stream master plans and the method applied in this study, mean areal rainfall reduced 3.7~8.1%, time of concentration by Clark unit hydrograph method( $T_c$ ), peak leakage by discharge constant( $K$ ) each reduced 2.42~6.87% and 12.5~28.3%, and it was analyzed that total abstraction had increased about 25~35% due to initial abstraction( $I_a = 0.4S$ ).

To calculated flood discharge of Jeju Island streams more accurately in the future, it is thought that development of various parameter deduction equations reflecting hydrological characteristics of Jeju Island and stream discharge characteristic analysis based on basic data is required.

# I. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

### 1.1 연구의 배경

우리나라 최다우 지역인 제주도는 한라산에 의한 지형적인 강우특성과 해양성기후로 인하여 연 평균 강우량이 2,061mm에 달하지만 경사가 매우 급하고 유로연장이 짧고 투수성이 매우 높은 지질학적인 특성으로 인하여 평상시 대부분의 하천은 건천의 상태로 유지되고 있다(Jung과 Yang, 2009).

제주도의 하천은 한라산 백록담을 중심으로 남·북사면으로 발달해 있어 경사가 급하고 20km 미만의 짧은 유로연장으로 인하여 강우에 의한 홍수 유출은 지속시간이 매우 짧다. 유출은 일정한 강우가 도달해야만 발생하게 되며, 강우에 의해서 점진적으로 유출량이 증가하는 육지부 하천과는 달리 투수성이 양호한 하상의 상태로 인하여 하천표층이 포화된 후 갑작스럽게 일어나는 특징을 보인다. 이와 같은 하천특성은 국내 내륙지역과는 매우 상이하여 일반적으로 사용되는 유역의 강우-유출 해석으로는 정확한 유출량을 산정하기 어려운 실정이다(Jung 등, 2011).

하천수를 수원으로 이용하는 국내 내륙지역과는 달리 제주도민의 생활 및 산업활동에 필요한 모든 용수는 전적으로 지하수에 의존하고 있다. 그동안 제주도 수자원에 관한 연구 및 조사는 지하수를 중심으로 진행되어 왔으며, 지표수에 대한 연구 및 조사는 지하수 함양량을 산정하기 위하여 일부 하천에 대한 유량 관측이 이루어져 왔을 뿐이다(Jung과 Yang, 2013). 또한, 유역의 홍수 피해를 경감시키고 하천의 이용도를 향상시키기 위하여 수립하는 제주도 하천정비기본계획의 설계홍수량은 육지 내륙지역에서 적용하는 방법을 그대로 적용하여 제주도의 하천특성을 반영하지 못하고 있으며, 과업을 수행하는 용역회사별로 홍수량을 산정하는 방법이 상이하여 일관성 있는 하천정비기본계획을 수립하지 못하고 있는 실정이다.

향후 기후변화로 강우량 및 강우강도의 증가로 인해 집중호우가 지속적으로 증가

하고 도시화 면적 확대에 의한 불투수 면적 증가로 홍수유출량의 변화가 발생할 것으로 예측되고 있어 제주도의 특성을 반영한 정밀한 홍수유출량을 산정하는 연구가 필요하다.

정밀한 홍수유출량을 산정하기 위해서는 기초자료(하천유량 관측자료, 강우량 자료, 토양자료 등)가 필요하다. 제주도와 한국수자원공사(2003)에서는 봉부자를 이용하여 호우 시 유출량을 산정한 결과를 도출하였으나 관측결과의 정확도는 매우 떨어지며, 2007년도 이후에 제주특별자치도 수자원본부에서는 주요 하천에 대하여 고정식 수위-유속계(Kalesto)를 설치하여 유량관측을 시행하고 있으나 예산 및 인력 부족으로 인하여 고정된 하천의 1지점에서 관측되는 수위-유속 데이터를 이용하여 유량을 관측하고 있는 실정이다.

유출이란 지표상에 떨어진 강우의 일부분이 지표면 또는 하천에 흘러들어 최종적으로 해양으로 유출되는 과정을 말한다. 강우가 해당유역에 발생하면 토양의 종류, 토지이용 상태, 식생 피복, 하천유역의 지형적인 특성 등 복합적인 요소들에 따라서 유출량이 결정된다. 따라서 유출은 유역 내 발생한 강우에 대하여 유역의 모든 요소들이 복합적으로 작용한 결과이며, 이러한 복잡한 과정의 결과를 해석하기 위하여 과거부터 수문학자들은 다양한 강우-유출 모델을 개발하여 유출현상을 분석하여 왔다(하 등, 2009).

강우-유출 모델의 기본적인 목적은 유출현상을 예측하기 위한 것으로서 치수 목적으로는 시간 단위의 단기 호우 사상 모델, 이수 목적으로는 일 단위 이상의 장기 유출 모델이 주로 사용되고 있으며, 일반적으로 치수의 목적으로 하천정비기본계획의 설계홍수량을 산정하기 위하여 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System) 모델이 사용되고 있다. HEC-HMS 모델을 이용하여 단기 호우 사상에 대한 유출량을 산정하기 위해서는 강우, 손실, 단위도, 유역추적 등의 방법을 적용하여야 하며, 각 방법에서 필요한 매개변수를 도출하여야 한다.

## 1.2 연구의 목적

본 연구에서는 제주시 중심에 위치한 한천 유역을 대상으로 유출 발생 시 다양한 관측기기를 사용하여 현장 유량관측을 실시하여 유출특성을 도출하고, 관측자료에 기반한 강우량, 유역의 손실, 유역추적 매개변수, 단위도법 매개변수 등 제주도의

수문특성을 반영한 매개변수를 도출하여 홍수유출량을 산정하고자 한다. 또한 홍수 유출량 산정결과를 현장 관측자료를 이용하여 검증하고, 기존 제주도 하천정비기본 계획의 산정방법과 본 연구의 방법을 비교·분석하여 제주도에 적합한 홍수유출량 산정 방법을 제시하고자 한다.

국내외에서 단기 호우 사상 예측에 가장 일반적으로 사용되며 현재 제주도내의 하천관련 계획에 사용되는 HEC-HMS 모델을 이용하여 홍수유출량을 산정하였으며, 본 연구 결과는 향후 기후변화에 대응하여 하천 홍수재해로부터 안전한 제주도를 구축하는데 가장 기초적인 연구가 될 것으로 판단되며, 현재 수립되고 있거나 예정 중인 유역종합치수계획, 하천정비기본계획 등에 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구의 동향

제주도 하천의 유출과 관련한 연구는 호우 시 짧은기간동안 발생하는 현상으로 인한 관측의 어려움, 연간 5~15회의 유출발생 횟수 등의 이유로 거의 이루어지지 못하다가 2000년대 이후 제주특별자치도 수자원본부에서 제주도 주요하천에 대하여 수위관측 및 유량측정을 실시하면서 하천과 관련한 연구가 활발해지기 시작했다 (Jeju Province and Korea Water Resources Corporation, 2003; Moon 등, 2004; KIGAM and Jeju Province, 2005; Ha 등, 2008; Jung과 Yang, 2008; Park과 Moon, 2010, Kim 등, 2012).

제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Jeju Province과 K-Water, 2003)에서는 홍수 발생 시 하천을 통한 유출량과 유출특성을 파악하기 위하여 강정천, 외도천, 한천, 중문천 등 4개 하천을 대상으로 봉부자를 이용하여 홍수 시 유량 측정을 실시하고 유출특성을 분석하였다. Moon 등(2004)은 제주도에서 조사된 주요하천에 대한 수위-유량관계식을 정리하고 상시 유출되는 6개 하천에 대하여 수위 변화곡선을 도출하였다. Moon 등(2005)은 제주도 주요 4개 하천(외도천, 강정천, 연외천, 옹포천)을 대상으로 수위관측 및 기저유출 성분에 대한 유속측정 자료를 기초로 기저유출특성과 기저유출량을 산정하였다. Jung과 Yang(2009)은 제주도 주요하천(천미천, 외도천, 옹포천, 연외천)에 SWAT (soil & water assessment tool) 모델을 적용하여 장기간 일 유출량을 모의하였으며, Han과 Yang(2009)은 SWAT 모델을 이용하

여 제주도 외도천 유역의 토지이용변화에 따른 유출량을 산정하였다. Kim 등(2009)은 SWAT-MODFLOW 결합모형을 이용하여 제주 표선유역에 대하여 지표수-지하수 연계 해석을 수행하였다.

Park 등(2008~2010)은 하천 유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구를 수행하여 한천, 화북천, 효례천을 대상으로 OTT Hydrometric사 Kalesto를 설치하여 수위-유속을 측정하여 관측자료를 이용한 유출특성을 도출하였다. Jung 등(2012)은 제주도 유출분석을 위한 한계유출 모의기법을 개발하여 SWAT-K 모형에 적용하였으며, 한천유역에 적용하여 장기간동안의 유역의 유출량을 산정하였다. Jung 등(2013)은 제주도 도심하천 유역의 유출특성을 해석하기 위하여 SWAT 모형을 이용하여 장기간동안의 유출량을 산정하고 선행강우와 지표유출과의 관계를 도출하였으며, HEC-HMS 모형을 이용하여 단기간 호우 사상에 대하여 모의하였다. Kim 등(2013)은 제주 천미천 유역의 간헐하천에 대하여 유출특성을 모의하기 위하여 제주도 하천을 국내 내륙지역과는 달리 강우에 의한 유출은 전량이 지표면 유출로 기인하는 현상을 SWAK-K에 적용하여 천미천 유역의 유출량을 산정하였다.

USGS(United States Geological Survey; 미국 지질조사소)(2011)에서는 제주도와 가장 유사한 수문지질학적 조건을 가진 하와이의 물수지 분석을 수행하기 위하여 유출량 분석을 수행하였다. 유출분석을 위하여 하와이섬을 기후, 지형, 수위관측지점, 기존 물수지분석 연구 결과 등에 근거하여 17개 유출구역으로 세분하였으며, 관측자료를 기반으로 유출량을 산정하였다(Fig. 1.1).

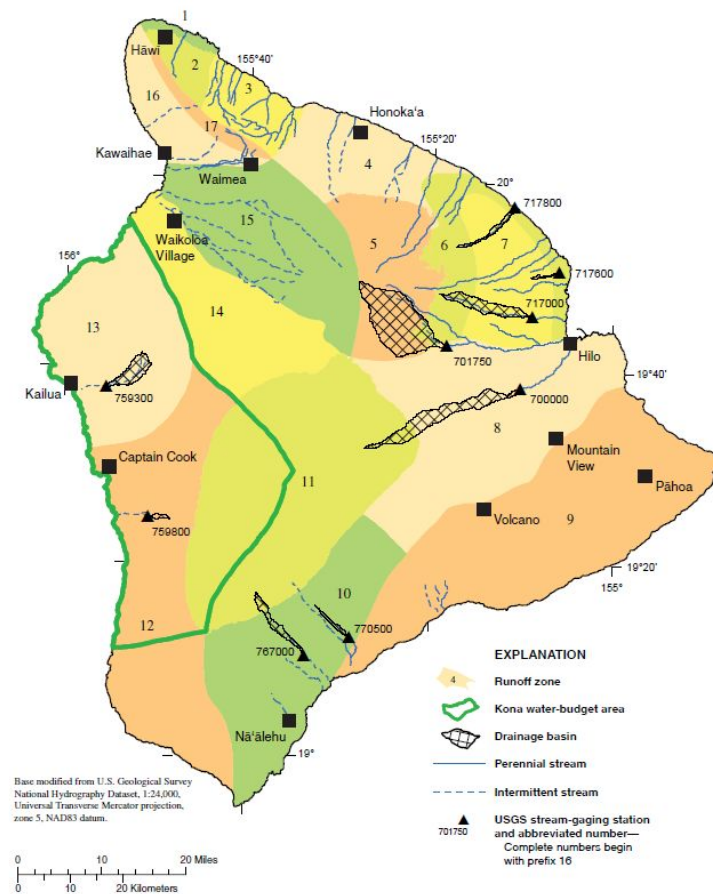


Fig. 1.1 Runoff zone defined for the water-budget calculation on the Island of Hawaii(USGS,2011)

제주도 하천에 관한 연구는 관측자료를 이용하여 유역의 유출특성을 해석하는 연구와 모델링(SWAT) 기법을 이용하여 유역의 유출량을 산정하는 연구가 진행되어 왔으며, 제주도와 유사한 하와이에서는 물수지 분석을 수행하기 위하여 관측자료를 이용해 유출량을 산정하여 왔다. 그러나 제주도는 모든 하천이 각각 해안으로 직접 유출되고 하천유역의 모양특성이 상이하여 전체 하천을 대상으로 상·중·하류의 유출량을 관측하고 특성을 해석하는 것은 예산 및 인력부족으로 불가능하며, 기존 모델링(SWAT) 기법은 일 단위로 유역의 유출량을 산정하므로 단시간에 유출량의 변화가 매우 큰 제주도 하천의 홍수 피해를 경감시키기 위한 치수의 목적으로는 사용하기 어렵다. 따라서 제주도 하천의 홍수 피해 경감 등의 치수 목적으로 홍수유출량을 산정하기 위해서는 관측자료를 이용한 단기사상(분 단위, 시간 단위)에 대한 유출량을 산정할 수 있는 모델을 적용하여야 한다.



제주도 유역종합치수계획, 하천정비기본계획 등에서는 확률강우량을 산정하고 단 기사상 모델(HEC-HMS)을 이용하여 유역의 설계홍수량을 산정하고 있으나 국내 내륙지역에서 적용하는 방법을 그대로 적용하여 제주도의 특성을 반영하지 못하고 있다.

### 3. 연구의 방법

유출량을 산정하기 위하여 제주도 도심부에 위치한 한천, 외도천 유역을 연구대상 유역으로 선정하였다. 정밀한 하천 유량 관측자료를 확보하기 위하여 2011년부터 2012년까지 호우 발생 시 한천 제2동산교 지점에서 이동식 전자과표면유속계, ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler), LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)를 이용하여 유량 관측을 수행하였으며, 외도천 유역에 대해서는 제주도 고정식 Kalesto 자료를 이용하였다.

유역 최종 출구에서 유출량을 산정하기 위하여 HEC-HMS의 모델의 적용되는 강우, 손실, 단위도법, 하도추적 등의 방법에 대하여 기존 제주도 하천정비기본계획에서 사용되는 방법이 아닌 제주도의 특성을 반영할 수 있는 방법들을 적용하였다.

유역 면적평균 강우량은 기존 티센다각형법 방법을 이용하여 제주도의 고도에 따른 강우의 영향을 고려할 수 있는 등우선법 변환 식을 개발하고 등우선법으로 산정하였으며, 유역의 손실 계산은 NRCS-CN 방법을 이용하였다. NRCS-CN 방법의 초기손실을 관측자료를 이용하여 추정하였으며, 유출곡선지수 CN을 유역의 대푯값으로 산정하는 방법이 아닌 경사가 급한 제주도 특성에 적합하도록 소유역별 경사에 따른 보정을 수행하여 계산하였다. 소유역의 유출은 Clark 합성단위도법을 이용하여 산정하였으며 Clark 방법의 매개변수인 도달시간  $T_c$ 와 저류상수  $K$ 는 경험공식을 이용하여 최적조합(CN,  $T_c$ ,  $K$ )을 도출하여 적용하였다. 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였으며 하도의 저류상수( $K$ ) 및 가중계수( $x$ )는 일반적으로 제시되는 값이 아닌 제주도 하천의 상·하류 관측자료를 이용하여 도출하였다. 또한 유출량을 산정하기 위한 매개변수 민감도분석을 수행하여 제주도 하천에 지배적인 매개변수를 제시하였다.



최종적으로 산정된 유출량과 관측자료의 유출수문곡선 분석, 첨두유량 오차 분석, 목적함수 계산 등의 과정을 통하여 적합성을 판단하였으며, 기존 홍수량 산정방법과 본 연구결과를 비교·분석하였다. 또한 본 연구결과에 적용된 각 방법들을 이용하여 과거사상의 관측 자료를 이용하여 검증하였다. 본 연구내용의 흐름도는 Fig. 1.2 와 같다.

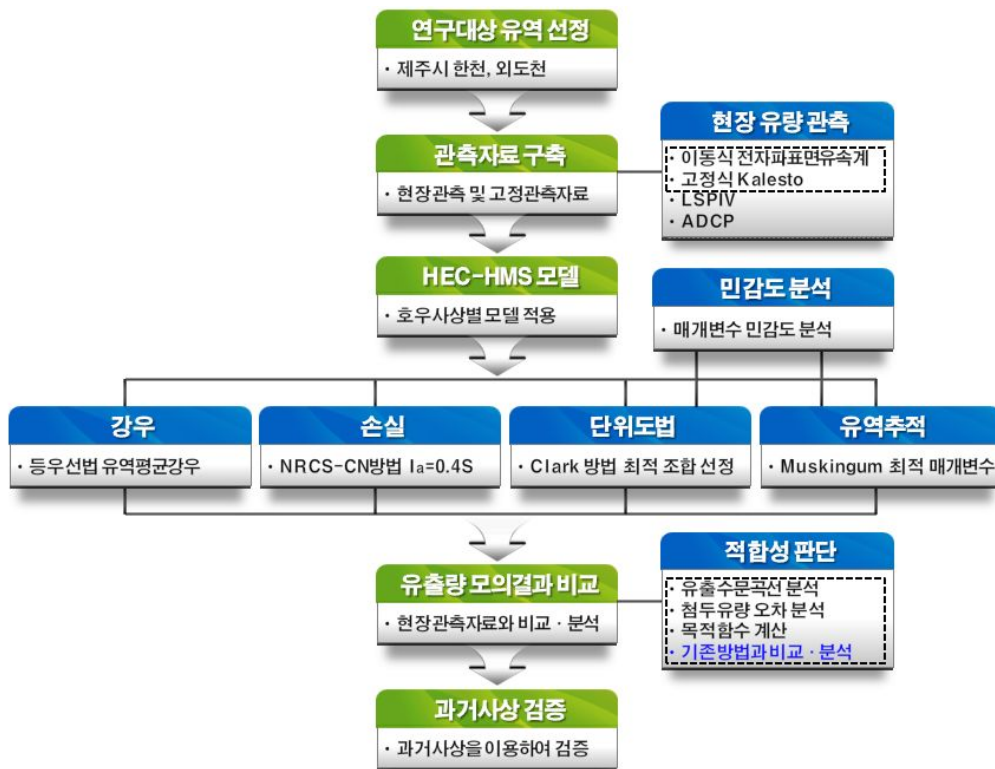


Fig. 1.2 Flow chart on the study

## Ⅱ. 이론적 배경 및 유출량 관측장비

### 1. 이론적 배경

#### 1.1 강우-유출 모형

##### 1.1.1 강우-유출 모형의 분류

수문학적 강우-유출 모의란 호우 사상 기간 동안에 발생하는 일련의 수문사상 (Hydrologic events)에 대한 수문시스템의 반응을 수학적으로 서술하는 것이라 정의한다(윤용남, 2007). 일정 기간 동안의 강우로 인한 일, 월 혹은 계절 유출용적을 계산하거나, 실제로 발생한 단기간 동안의 호우사상이나 혹은 설계호우로 인한 유출수문곡선을 계산하는 것을 의미한다.

강우-유출 모형이란 수문순환의 각 과정을 물리적, 수학적 방법으로 모의할 수 있도록 구축한 모형으로 정의되며 일반적으로 물리적 기반의 강우-유출모형과 개념적 기반의 강우-유출모형으로 구분할 수 있다. 물리적 기반의 강우-유출모형은 유역의 수문순환과정에 대한 일련의 이론적인 원리를 수학적 공식으로 산정할 수 있도록 구성된 모형을 의미하며(Grayson 등, 1992), 이러한 물리적 시스템이 경험적으로 유도된 매개변수들로 단순화된 모형을 개념적 기반의 강우-유출모형이라 하며 물리적 원리보다는 상당한 보정작업을 거친 후 결과를 산정하게 된다(Vieux, 2001).

강우-유출모형은 공간적인 변동성을 어떻게 고려하는지에 따라서도 집중형 모형 (lumped-model)과 분포형 모형(distributed-model)로 구분된다(Bedient와 Huber, 2002). 집중형 모형의 경우 입·출력 자료로 어떠한 공간적 변동성도 고려하지 않으며, 구축된 유역이 여러 소유역으로 분할되어 있어도 각각의 소유역별로 평균화된 수문학적 매개변수가 입력될 뿐이다(Molnar와 Julien, 2000). 이러한 집중형 모형의 단순화는 장점이 될 수도 있지만, 수문학적 모의과정 중 내부적으로 영향을 미치는 인자를 파악하는 부분에서 응용성이 제한된다고 말할 수 있다(Muzik, 1996).

집중형 모형은 일반적으로 수문순환의 개념적 관계들을 통하여 강우사상에 대한

유역의 유출반응을 묘사한다. 집중형 모형의 가장 일반적인 모형인 개념적 강우-유출(Conceptual Rainfall-Runoff, CRR) 모형은 강우에서부터 유출까지의 일련의 물리적인 수문과정을 개념적인 강우-유출과정으로 묘사 후 각 단계별로 일련의 수학적 관계공식으로 표현하여 유출을 모의한다. 여기서, 수학적 관계공식이란 개념적으로 묘사된 강우-유출과정의 각 단계별 물리현상에 근거한 경험적 또는 물리적으로 산정된 공식을 의미한다. CRR 모형에서 가장 일반적으로 사용되는 모델은 미육군공병단의 수문공학연구소에서 개발한 HEC-1, HEC-HMS, TR-20 및 EPA-SWMM 등이 있다.

이러한 모형들은 실제 관측된 자료에 대한 보정작업을 필요로 하며, 이러한 보정작업은 공간적으로 변동하는 매개변수들의 대표적인 값을 결정하기 위하여 수행된다. 하지만 이러한 과정은 자료획득과 관측 자료를 통합하는 방법 등에서 오차를 발생 시킬 수 있으며(Colosomo와 Mendicino, 1996), 매개변수 간의 불확실한 영향을 미치는 구간에서 비체계적인 매개변수 관계를 얻어낼 수 있다. 이러한 결과는 근본적으로 각각의 매개변수에 해당하는 제약조건이 부족하고 목적함수 값만으로는 수문곡선의 보정과정 어렵기 때문이다(Vieux, 2001). 또한, 각각의 매개변수는 모형의 각 단계별 특정과정만을 표현하지만, 이러한 매개변수간의 상호관계가 산정되는 결과에 영향을 미치기 때문이다(Dunn과 Lilly, 2001). 물리적 공식을 바탕으로 유출해석을 수행하는 물리적 기반의 분포형 모형을 사용하더라도 물리적 공식으로 유추할 수 없는 오차가 발생되며 과대한 매개변수가 산정될 수 있다.

분포형 모형은 집중형 모형과는 반대로 공간적 변동성을 반영하여 전형적인 질량보전방정식, 운동량보전방정식 및 에너지방정식을 통하여 수문학적 과정을 묘사한다(Vieux, 2001). 분포형 모형은 집중형 방식이 아닌 동일한 성질의 매개변수를 갖는 상호관의 연관된 격자형태로 구성된다(Colosomo와 Mendicino, 1996). 많은 분포형 모형들은 각각의 매개변수들을 확률변수가 아닌 물리적 기반의 형태로 완전한 확정론적 모형을 추정한다(Abbott 등, 1986). 이러한 물리적 기반의 분포형 모형은 분석적인 계산이 가능한 수학적 공식인 유한차분법 혹은 유한요소법을 통하여 개별적으로 계산된다. 하지만 비선형적인 공식들은 알 수 없는 경계조건에서 분석적으로 계산되기 어렵기 때문에 특정 확률분포의 확률변수를 갖는 추계학적 매개변수들이 사용되게 된다(Woolhiser, 1996). 이러한 단순화는 모형의 세분화, 해상도, 모형의 범위가 모의과정 및 모의시간에 미치는 영향을 해소하기 때문에 정당화 된다.

결론적으로 분포형 모형의 세분화의 정도와 계산과정은 상반관계를 갖게 된다.

집중형 모형과 분포형 모형의 구분은 모형의 사용자가 집중형 모형을 사용할 때 공간적 변동성을 고려하는지에 따라 모호해질 수 있다(Olivera와 Maidment, 1999). 일반적인 예로 HEC-1의 사용자는 유역의 공간적 변동성을 고려하기 위하여 더 많은 소유역 분할을 고려할 수 있다. 또한 HEC-HMS의 Modified Clark 방법의 경우 격자별로 유역홍수추적법을 적용하며 분포형 강우자료의 사용기능을 제공한다. 이러한 모형은 집중형 모형뿐만 아니라 분포형 모형의 기능까지 포함한다고 할 수 있기 때문에 준분포형 모형(semi-distributed model)이라고 정의된다. Table 2.1에 일반적으로 사용되는 집중형 모형 및 분포형 모형의 특징을 나타내었다.

Table 2.1 Characteristics of lumped, distributed type rainfall-discharge model (Benavides, 2005)

Model	Author	Summary
TR-20	Soil Conservation Service(1965)	집중형 모형, 단기유출모형, 다양한 유역의 설계 홍수수문곡선을 산정하기 위한 개념적 단순 모형
NWS-RFS	Burnash(1975)	집중형 모형, 대하천유역의 하천예보를 위한 장기유출모형으로 보정과정, 예보과정 및 앙상블예측기법으로 구성
HEC-1 HEC-HMS	HEC(1968, 2001); Feldman(1981)	물리적 기반의 집중형 모형, ModClark의 사용 시 준분포모형으로 고려되며 가장 일반적으로 사용되는 강우-유출모형
SWMM	Metcalf 등(1971); Huber와 Dickinson(1988); Huber(1995)	준분포형모형, 도시유출해석을 위한 장기유출 모형으로 도로 및 관로유출고려가 가능
TOPMODEL	Beven과 Kirkby(1979)	물리적 기반의 분포형 모형, 장기유출모형으로 주로 동일한 수문학적 거동을 갖는 지형학적 특성분류를 통하여 토양수분 변화량을 모의
SHE	Abbot 등(1986a); Parkin(1996); DHI(1998); Vazquez 등(2002)	물리적 기반의 분포형 모형, 격자형태를 기반한장기유출 및 유사모의 모형, MIKE-SHE와SHE-TRAN의 2가지 버전으로 하천유량 및 유사량을 모의
CASC2D	Julien과 Saghafian(1991)	물리적 기반의 분포형 모형, 단기유출모형이며 주로 유한차분법을 통한 2차원 확산과 방정식을 이용하여 지표유출해석을 수행
Vflo	Vieux(1994, 2001 and 2002)	물리적 기반의 분포형모형, 운동량방정식을 바탕으로 유한요소해석법을 이용하여 지표 및 하도유출을 해석하며, 격자별로 경사, 조도계수, 침투량, 강우량 및 흐름방향이 고려

### 1.1.2 HEC-HMS 모형

HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System)는 1995년 미육군공병단에서 개발한 강우-유출 모형으로 기존의 모형인 HEC-1 모형을 윈도우화 하여 발전시킨 모델이다. 기존 HEC-1 모형은 1967년 미육군공병단 수문공학연구소에 의해 개발된 모형으로 1984년에 처음으로 PC 버전이 개발되었으며, HEC-HMS 모형은 개인용 컴퓨터의 성능이 고도화됨에 따라 개발되었다.

HEC-HMS 모형을 이용한 모의는 수문요소들로 구성된 유역을 표현하는 것이며, 수문요소에는 소유역, 하도구간, 저수지, 합류점, 분류점, 수원점, 함몰점 등 7가지가 있다. 유역의 강우입력 지정은 여러 가지 방법으로 가능하며, 관측지점의 점강우량을 이용하는 방법, 레이더를 이용하여 작성된 격자형 강우자료를 이용하는 방법, 계산된 확률강우량을 이용하는 방법 등이 있다.

미육군공병단의 HEC-HMS 모형은 강우에 의한 유역의 지표면 유출을 모의하기 위하여 강우-유출 현상의 수리, 수문학적 과정을 상호 연결하여 유역의 응답을 나타내도록 설계된 모형으로서 각 수리·수문학적 과정은 일반적으로 소유역이라 불리는 유역 일부분에서의 강우-유출과정을 모식화하며, 각 과정은 지표면 유출이나 하도유출, 저수지 유출 등을 모의하게 된다. 또한 HEC-HMS 모형은 기존의 HEC-1 모형과 비교하여 입출력 자료의 GIS 작업가능, User Interface화, 다중작업 수행, GIS 자료를 이용한 분포형 모형 개념의 도입, 빈도강우의 형성 및 모의 등의 다양한 측면에서 보완된 모형이다.

HEC-HMS 초기에는 HEC-1 프로그램에 포함되어 있는 단위도 및 수문학적 홍수추적 옵션 이외에도 격자형 강우자료(레이더 데이터)를 이용하여 적용할 수 있는 유사분포 유출변환(quasi-distributed runoff transformation)과 장기 연속모의(continuous simulation)에 적용할 수 있는 간단한 수문감소(moisture depletion) 등을 추가적으로 초함하고 있으며, GUI(Graphical User Interface) 환경, 통합 수문분석 성분, 자료 저장 및 관리능력, 그래픽 처리 및 리포트 출력 기능 등으로 구성되어 있다.

HEC-HMS 모형의 실행을 위한 관리요소는 크게 유역의 특성인자와 매개변수를 설정하는 Basin Model Manager, 강우와 같은 수문기상 요소를 설정하는 Meteorologic Model Manager, 그리고 모형의 시간에 관련되는 모든 정보를 취급하는 Control Specifications Manager로 구성된다. 또한 이들 관리요소는 Time-Series

Data Manager, Paired-Data Manager, Grid Data Manager 등과 함께 사용된다. 본 연구에서는 국내에서 가장 일반적으로 사용되며 제주도 하천정비기본계획에서 사용된 HEC-HMS 모델을 이용하여 제주도 하천의 홍수유출량을 산정하였다.

### (1) Basin Model

Basin Model은 HEC-HMS 내에서 유역의 유출계산방법의 설정 및 유역특성인자와 매개변수 입력을 담당한다. 유역에서 유출계산과정은 크게 수문학적 손실산정, 단위도법, 기저유출량산정, 홍수추적과정으로 구성되며, 수문학적 손실산정방법의 경우 Green and Ampt, Gridded Green and Ampt, Gridded SCS Curve Number, SCS Curve Number 등이 있고, 단위도법은 Clark Unit Hydrograph, Kinematic Wave, ModClark, SCS Unit Hydrograph, Snyder Unit Hydrograph 등이 있고, 기저유출량 산정방법은 Constant Monthly, Linear Reservoir, Nonlinear Boussinesq 등이 있으며, 홍수추적방법은 Kinematic Wave, Lag, Muskingum, Muskingum-Cunge 등이 있다. HEC-HMS 모형의 유출계산방법의 구성을 Table 2.2에 나타내었다

Table 2.2 Discharge calculation method of HEC-HMS model(HEC, 2000)

유출계산과정	유출계산방법
수문학적 손실	Deficit and Constant, Green and Ampt Gridded Deficit Constant, Gridded Green and Ampt Gridded SCS Curve Number Initial and Constant, SCS Curve Number 등
단위도법	Clark Unit Hydrograph, Kinematic Wave, ModClark SCS Unit Hydrograph ,Snyder Unit Hydrograph 등
기저유출량	Constant Monthly, Linear Reservoir Nonlinear Boussinesq 등
홍수추적	Kinematic Wave, Lag, Modified Puls Muskingum, Muskingum-Cunge 등

## (2) Meteorological Model

Meteorologic Model은 HEC-HMS 내의 기상자료를 구성하는 역할을 한다. 기상 자료에는 강우(precipitation), 증·발산(evapotranspiration), 용설(snowmelt) 부분이 포함되어 있다. 또한, 기상자료는 직접 입력할 수도 있고 HEC-1의 자료저장시스(DSS :Data Storage System) file로부터 불러와 사용할 수도 있다. 기상자료 입력 시 강우부분은 Frequency Storm, Gage Weights, Gridded Precipitation, Inverse Distance, Specified Hyetograph 등의 방법이 있고, 증발산 부분은 Gridded Priestley-Taylor, Monthly Average 등이 있으며, 용설 부분은 Gridded Temperature Index, Temperature Index가 있다. 기상자료 입력 시 사용하는 계산 방법을 Table 2.3에 나타내었다.

Table 2.3 Weather data calculation method of HEC-HMS model(HEC, 2000)

기상자료	계산방법
강우	Frequency Storm
	Gage Weights
	Gridded Precipitation
	Inverse Distance
	Specified Hyetograph
	Standard Project Storm
증발산	Gridded Priestley-Taylor
	Monthly Average
	Priestley-Taylor
용설	Gridded Temperature Index
	Temperature Index

## (3) Control Specifications

Control Specifications은 HEC-HMS 모형의 시작시간과 날짜, 종료시간과 날짜, 모의 계산 시간간격 등 시간에 관련되는 정보를 담당한다. HEC-1에서는 프로그램을 실행할 때마다 모델링에 관계되는 모든 자료를 독립 자료군(data set)으로 입력해야하지만 HEC-HMS에서의 Control Specifications로 입력자료의 구성을 쉽게 할 수 있다.또한 HEC-HMS는 장기간에 걸친 연속적인 수문곡선 모의가 가능하다.



## 1.2 유역평균 강수량

강우관측소에서 강수량은 한 지점에서 발생한 강수량에 대하여 관측한 것으로서 이를 점 강수량이라고 하며, 이러한 점 강수량은 유역 전체의 강수량을 대표하는 값으로는 사용할 수 없으므로 면적평균 강수량으로 변환시켜야 한다. 강우-유출모형에서는 일반적으로 입력자료로서 유역(basin) 또는 소유역(subbasin)의 평균강수량을 이용하게 된다. 면적평균 강수량을 산정하는 방법에는 산술평균법(arithmetic average method), 티센다각형법(Thiessen polygon method), 등우선법(isohyetal method)이 사용되고 있다.

### 1.2.1 산술평균법

면적평균 강수량을 산정하는 방법 중 가장 간단한 방법이 산술평균법이며 유역 내에 있는 강수량 자료를 단순히 산술평균하는 방법으로 각 관측소마다 동일한 가중치를 부여하여 평균 강수량을 계산하는 방법이다.

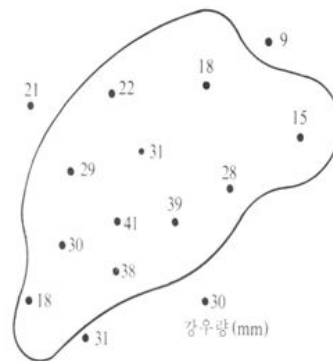


Fig. 2.1 Arithmetic average method

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.1)$$

$P_m$ : 면적평균 강수량,  $P_1, \dots, P_n$ : 유역 내  $n$ 개 관측소의 점 강수량

산술평균법은 평야지역에서 우량관측소가 균등하게 분포되어 있고, 각 관측소의 관측치가 유역의 평균치와 크게 벗어나지 않을 때 비교적 정확한 결과를 도출할 수



있다. 즉, 강우에 대한 산악효과나 우량관측소의 분포상태, 밀도 등에 대한 고려 없이 모든 관측소의 점 강우량 값을 동일한 조건으로 고려하므로 비교적 평야지역이나 강우분포가 균일한 경우에 사용하며, 제주도와 같이 산간지역에서는 산술평균법은 사용하기 힘들다.

### 1.2.2 티센다각형법

티센다각형법은 각 관측소에서 관측된 강우량에 유역의 관측소 주위로 작도한 티센다각형의 면적 비를 가중치로 부여하여 평균 강우량을 산정하는 방법으로 국내에서 일반적으로 사용하는 방법이다. 티센다각형을 작도하는 방법은 처음 Fig. 2.2의 점선처럼 각 인접 관측소끼리 정삼각형에 가깝도록 직선으로 연결하고 그 다음 관측소 연결 직선을 수직이등분하여 서로 연결시키면 관측소 주위로 다각형이 형성된다. 각 관측소 별로 다각형의 면적 즉, 관측소의 관할 면적을 계산하여 사용한다.

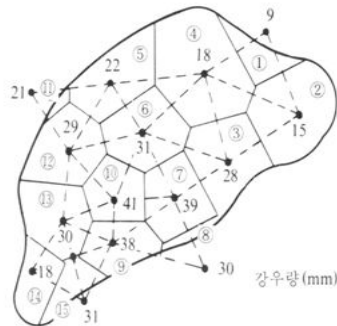


Fig. 2.2 Thiessen polygon method

$$P_m = \frac{A_1 P_1 + A_2 P_2 + \dots + A_n P_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.2)$$

$P_m$ : 면적평균 강우량,  $P_1, \dots, P_n$ : 유역 내  $n$ 개 관측소의 점 강우

$A_1, \dots, A_n$ : 각 관측점의 지배면적

티센다각형법은 각 관측소마다 지배면적에 가중치를 부여하여 평균 강우량을 산정하게 되며, 이 방법은 유역 내 우량관측소의 상대적인 위치와 관측망의 상대적인

밀도 등을 고려하고 있어 산술평균법보다는 좋은 결과를 주지만 고도에 따른 강수의 변화, 즉 산악효과를 고려하지 못한다는 단점이 있다.

### 1.2.3 등우선법

등우선법은 각 우량관측소에서 관측된 점 강우량자료와 관측소 사이의 강우량을 보간하는데 필요한 정보를 이용하여 등우선을 작도한 후 등우선 간의 면적을 구하여 지역의 평균 강우량을 산정하는 방법으로 산악효과를 고려할 수 있다. 등우선을 잘도할 때 강우는 고도와 밀접한 관계가 있으므로 등고선 자료는 중요한 정보가 된다. 등우선간의 면적을 구하고 이를 등우선 간의 평균 강우량에 가중치를 부여함으로써 전유역의 평균강우량을 계산한다.

이 방법은 면적을 가중인자로 한다는 것이 티센방법과 유사하나 관측된 강우량에 직접 가중치를 부여하는 것이 아니라 등우선간의 평균 강우량에 면적 가중치를 주어 산정하는 것이 다르다.

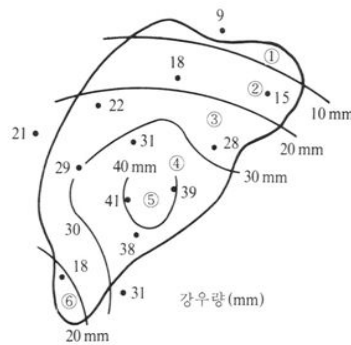


Fig. 2.3 Isohyetal method

$$P_m = \frac{A_1 P_{1m} + A_2 P_{2m} + \dots + A_n P_{nm}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_{im}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.3)$$

$P_m$ : 면적평균 강우량,  $P_{1m}, \dots, P_{nm}$ : 두 인접 등우선간 면적에 대한 평균 강우량

$n$ : 등우선에 구분되는 면적구간의 수  $A_1, \dots, A_n$ : 등우선에 의해 구분되는 면적

등우선법은 산악효과를 고려할 수 있는 방법으로 제주도와 같이 고도에 따른 강

우의 변화가 많은 지역에서 적합한 방법이다. 그러나 강우-유출 해석 시 시간 강우량 자료를 이용하여 매 시간마다 등우선을 작도하는 일은 매우 많은 시간을 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 연구대상 호우사상의 시간 강우량 자료를 이용하여 티센다각형법과 등우선법과의 상관관계를 분석하고 티센다각형법의 면적평균 강우량을 등우선법으로 환산하는 회귀식을 개발하여 유역 평균 강우량을 산정하였다.

### 1.3 유효우량을 산정하기 위한 수문학적 손실

#### 1.3.1 초기손실 및 일정손실율법

초기손실은 유역의 토양수분부족이 충족될 때까지 침투되는 초기 강우량이다. 따라서 초기손실이 충족될 때까지는 유출이 발생하지 않으며 초기손실 이후에는 손실이 일정한 경우이다. 초기손실 이후의 손실은 일정 손실율을 적용한다. 이 방법은 유역이 비교적 건조한 상태에 있을 경우 비교적 정확한 결과를 나타낸다. 여기서 초기손실은 강우가 시작하여 차단, 요부저류 및 침투로 인하여 유출이 시작되기까지 유출로 나타나지 않는 초기 강우부분을 말한다. 유출이 시작된 후에 유출로 나타나지 않는 강우부분을 실제보유수량(Actual Retention) 또는 총 손실이라 하며, 이것을 주로 침투로 구성된다. 따라서 총강우량, 직접유출, 실제보유수량, 초기손실로 분리되며 이들의 관계식은 다음과 같다.

$$F = P_t - Q \quad (2.4)$$

$F$ : 실제보유수량,  $P_t$ : 총 강우량,  $Q$ : 직접유출량

한편, 일정비손실우량(constant rainfall loss fraction)은 각 시간 구간별 강우량의 일정비율에 해당하는 강우량이 손실되고 나머지가 유효강우량이 되는 경우로 유출계수 개념을 연장한 방법이며, 선행강우로 유역이 거의 포화상태인 경우 비교적 정확한 결과를 제공한다. 일정량손실우량법(constant rainfall loss rate)은 강우기간동안 손실 또는 침투능이 일정한 경우로서  $\phi$ -index 방법과 같은 개념을 갖는다. 이 방법은 선행 토양함수량이 많고 큰 호우를 대상으로 하는 경우에 적절하다.

### 1.3.2 Green-Ampt 손실모형

Green-Ampt 모형은 물리적인 개념에 의한 기법으로 Darcy의 법칙을 이용한 Richard 방정식의 간략 해를 얻기 위하여 개발되었다. Green-Ampt 모형의 특성은 모형이 다른 방법들에 비하여 비교적 간단하며, Darcy 법칙의 이론적 근거로 유도되었고, 모형의 매개변수는 흙의 성질로부터 계산될 수 있는 물리적 의미를 갖는다. 그리고 다양한 토양조건에 대하여 비교적 양호한 결과를 제공한다는 것이다. Green-Ampt 모형의 개념도는 Fig. 2.4와 같다.

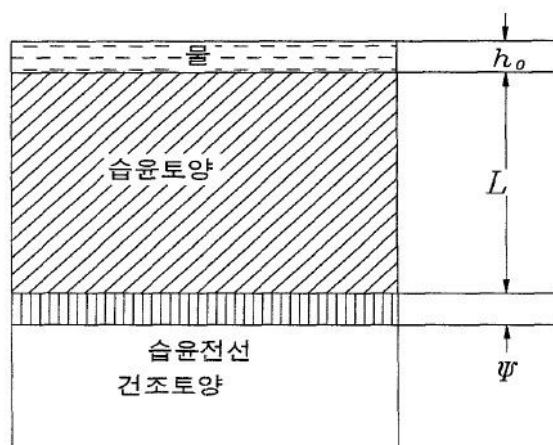


Fig. 2.4 Concept map of Green-Ampt model(Yoon, 1999)

위 그림에서 초기에 균일한 함수비  $\theta_1$ 를 갖고 깊이가 무한한 균일 토양기둥을 고려하여 습윤전선이 하향 진행함에 따라 함수비는  $\theta_1$ 에서 포화함수비  $\theta_s$ 로 증가하고, 지표면에 물이 고이는 수심인 담심(ponding depth)  $h_0$ 는  $t=0$ 에서부터 진행되는 것으로 가정하면 습윤영역의 깊이는 침투가 진행됨에 따라서 진행된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f = \frac{k_e(h_0 + \psi + L_d)}{L_d} \quad (2.5)$$

$k$ : 투수계수,  $h_0$ : 담심,  $\psi$ : 습윤전선에서 모관흡입수두

$L_d$ : 습윤전선의 깊이

한편, 총 침투량  $F_p$ 는 토양내 누가 침투깊이의 함수로 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$F_p = (\theta_s - \theta_i)L_d = \Delta\theta L_d \quad (2.6)$$

$\Delta\theta$ : 초기 함수비,  $\theta_i$ : 포화 함수비,  $\theta_s$ 의 차이로 토양수분부족량

한편 담심이 매우 작다고 가정하면  $h_0 \cong 0$  이고 식 (2.5)를 이용하면 식 (2.6)은 식 (2.7)과 같이 쓸 수 있다.

$$f = k_c \left( 1 + \frac{\Delta\theta\psi}{F_p} \right) \quad (2.7)$$

여기서,  $f = \frac{dF_p}{dt}$  이므로  $t=0$ 에서  $F_p=0$ 인 조건에서 식 (2.7)을 적분하면 누가 침투량  $F_p$ 는 식 (2.8)과 같이 얻어진다.

$$F_p = k_c t + \Delta\theta\psi \ln \left( 1 + \frac{F_p}{\Delta\theta\psi} \right) \quad (2.8)$$

Green-Ampt 모형의 매개변수는 투수계수  $k_c$ , 모관 흡입수두  $\psi$ , 포화 함수비  $\theta_s$ , 초기 함수비  $\theta_i$  등이다. 여기서, 초기 함수비는 실측에 의하여 결정되고,  $\theta_s$ ,  $\psi$ ,  $k_c$ 의 값은 Table 2.4에 제시하였다.

Table 2.4 Green-Ampt model parameters by soil(Yoon, 1999)

토양종류	공극률 ( $\theta_s$ )	유효공극율 ( $\theta_e$ )	습윤전선의 흡인수두 $\psi$ (cm)	투수계수 $k_e$ (cm/h)
Sand	0.437	0.471	4.95	11.78
Loamy sand	0.437	0.401	6.13	2.99
Sandy loam	0.453	0.412	11.01	1.09
Loam	0.463	0.434	8.89	0.34
Silt loam	0.501	0.486	16.68	0.65
Sandy clay loam	0.398	0.330	21.85	0.15
Clay loam	0.464	0.309	20.88	0.10
Silty clay loam	0.471	0.432	27.30	0.10
Sandy clay	0.430	0.321	23.90	0.06
Silty clay	0.479	0.423	29.22	0.05
Clay	0.475	0.385	31.63	0.03

### 1.3.3 NRCS-CN 모형

#### (1) NRCS-CN

NRCS(Natural Resources Conservation Service: 미국자연자원보호청)에서 개발한 방법으로 유출량 자료가 없는 경우에도 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 유효우량을 산정할 수 있도록 개발한 방법이다. NRCS-CN 모형은 유역의 유출특성 조건에 따른 강우량과 유출량과의 관계를 미리 설정하여 사용하는 방법으로 미계측유역의 유효우량 산정에 널리 사용되고 있다.

총강우량  $P$  는 직접유출량(유효우량)  $Q$ , 초기손실(Initial Loss)  $I_a$ , 유출이 시작된 후에도 유출로 나타나지 않는 강우 부분인 실제보유수량  $F$  로 구성되고 실제보유수량  $F$  는 침투로 구성되는 총 손실이다. 유출이 시작된 후 총강우량  $P$  가 증가함에 따라  $Q$  와  $F$  는 증가하며  $F$  는 최대잠재보유수량  $S$  에 도달하여 총강우량  $P$  는 식 (2.9), 실제보유수량  $F$  는 식 (2.10)으로 산정된다.

$$P = (P - I_a) \quad (2.9)$$

$$F = (P - I_a) - Q \quad (2.10)$$

직접유출량  $Q$  를 산정하는 경우 실제보유수량  $F$  와 최대잠재보유수량  $S$  의 비는

직접유출량  $Q$  와 총 강우량  $P$  의 비와 같다는 비례가정을 도입하면 직접유출량  $Q$  는 식 (2.11)로 산정된다

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P \geq I_a \quad (2.11)$$

$$Q = 0 \quad P < I_a$$

$P$ : 호우별 총 강우량(mm),  $I_a$ : 초기손실(mm)

$S$ : 유역의 최대잠재보유수량(mm),  $Q$ : 직접유출량에 해당하는 유효우량(mm)

유출이 시작되기 전 발생하는 차단, 지면저류, 침투 등에 대한 초기손실  $I_a$  가  $0.2S$  의 관계를 가진다고 가정하면 식 (2.11)는 NRCS 방법의 총우량-유효우량 산정하는 식 (2.12)이 된다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P \geq 0.2S \quad (2.11)$$

$$Q = 0 \quad P < 0.2S$$

수문학적 토양-피복형의 성질을 대변하는 유출곡선지수  $CN$ 을 고려한 최대잠재보유수량  $S$  는 식 (2.12)로 산정된다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (2.12)$$

여기서,  $CN$  값은 1에서 100범위를 갖는다. 만일  $CN$ 이 100일 경우  $S=0$  이며,  $CN=1$ 일 경우  $S=25,146$ 이다. 즉,  $CN=100$ 일 때 손실은 불가능하고  $CN=1$ 일 때 모든 강우량은 손실로 나타나 유출은 0이 된다. 이 모형은 작은 농경유역에서는 비교적 만족할 만한 침투량을 제공하며, 토지이용변화의 영향을 평가하기 위하여 사용된다.

(2) 수문학적 토양군 및 토지피복도의 분류

수문학적 토양군은 Table 2.5와 같이 A, B, C, D의 4개 형태로 분류되며 토양군별 침투능의 크기는 A, B, C, D 순이나 유출률은 D, C, B, A의 순이다. 우리나라의 경우 토양군 분류는 농촌진흥청의 개량토양도 또는 정밀토양도를 이용하고 있다. 토양도상에 토양군을 A, B, C, D로 구분한 후 이를 지형도상에 분포시켜 토양군별 면적으로 구분한다. 본 연구에서는 토양도를 이용하여 연구대상구역의 토양을 토양통별로 구분하여 수문학적 토양군을 구분하였다.

토양도상의 토양군별 면적 구분과 지형도상의 피복형별 면적 구분을 중첩시켜서 동일 토양군-피복형별 면적으로 구분한다. 동일 토양군-피복형별 면적에 대하여 Table 2.6과 같은 기준에 따라 CN 값을 부여한 다음, 면적 가중평균 하여 구역의 평균 유출곡선지수를 산정한다. Table 2.6에서 산정한 유출곡선지수는 토양함수비가 중간정도인 AMC-II일 때의 값이며 토양이 건조한 AMC-I 혹은 습윤한 AMC-III 조건의 CN 값은 CNII 값을 일정한 양식에 따라 조정하여 산정하여야 한다.

Table 2.5 Categorization of infiltration by soil type(Lee, 2008)

수문학적 토양군	토양의 성질	침투율(mm/hr)
A	유출율이 매우 낮음 침투율이 크고, 모래와 자갈질 토양 배수가 매우 양호	7.62-11.43
B	침투율이 대체로 크고, 세사와 자갈 배수 대체로 양호	3.81-7.62
C	침투율이 대체로 작고, 세사질 토양층 배수 대체로 불량	1.27-3.81
D	침투율이 대단히 작고, 점토질 토양층 배수 매우 불량	0-1.24

Table 2.6 Runoff curve number(Lee, 2008)

토지이용상태	피복처리상태	수문학적 조건	토양군별 CN			
			A	B	C	D
논	담수재배형 수도경작	-	79	79	79	79
조식작물 경작지	직선이랑식 경작	불량	72	81	88	91



	등도선식 경작	양호	67	78	85	89
		불량	70	79	84	88
	혼합식 경작	양호	65	75	82	86
		불량	66	74	80	82
소맥작물 경작지	직선이랑식 경작	양호	62	71	78	81
		불량	65	76	84	88
	등도선식 경작	양호	63	75	83	87
		불량	63	74	82	85
밀과두류작물 경작지	혼합식 경작	양호	61	73	81	84
		불량	61	72	79	82
	직선이랑식 경작	양호	59	70	78	81
		불량	66	77	85	89
밭과두류작물 경작지	등도선식 경작	양호	58	72	81	85
		불량	64	75	83	85
	혼합식 경작	양호	55	69	78	83
		불량	63	73	80	83
방목지	가축 방목을 위한 초지	양호	51	67	76	80
		보통	68	79	86	89
		양호	49	69	79	84
목초지	건초 생산을 위한 영구 초지	양호	39	61	74	80
임야	담수재배형 수도경작	-	30	58	71	78
도시화 지구	상업 및 사무실지역	-	79	79	79	79
	공업지역	-	89	92	94	95
도시형주거지구	150평 이하	-	81	88	91	93
	150-300평	-	77	85	90	92
	300-400평	-	61	75	83	87
	400-600평	-	57	72	81	86
도로	포장도로(도로용지 제외)	-	54	70	80	85
	포장도로(도로용지 포함)	-	98	98	98	98
	자갈도로(도로용지 포함)	-	83	89	92	93
	흙 길(도로용지 포함)	-	76	85	89	91
불투수 지역	포장된 주차장, 지붕	-	72	82	87	89
개발중인 지역	택지개발 등	-	98	98	98	98
		-	77	86	91	94

### (3) 선행토양함수조건

총강우량과 유효우량의 관계에서 5일 또는 30일 선행강우량은 유역의 선행토양함수조건을 대변하는 지표로서 사용되고 있다. NRCS에서는 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)을 성수기(Growing Season)와 비성수기(Dormant Season)으로 구분하여 3가지 조건을 부여하였다. Table 2.7은 NRCS

방법에서 AMC 분류 기준을 나타낸 것이다.

Table 2.7 AMC condition in NRCS method(Lee, 2008)

AMC 조건	5일 선행강우량(mm)	
	비성수기	성수기
I	$P_5 < 12.70$	$P_5 < 35.56$
II	$12.70 < P_5 < 27.94$	$35.56 < P_5 < 53.34$
III	$P_5 > 27.94$	$P_5 > 53.34$

AMC-II 조건으로 산정된  $CN_{II}$  값은 AMC 조건에 따라 조정이 필요하며 AMC-I 조건의  $CN_I$  이나 AMC-III 조건의  $CN_{III}$ 로의 변환은 식 (2.13) 과 식 (2.14)를 사용한다.

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (2.13)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (2.14)$$

NRCS-CN 모형은 국내에서 유효우량을 산정하기 위하여 가장 일반적으로 사용되며, 국토해양부 설계홍수량 산정지침(안)에서도 권장하고 있는 방법이다. 본 연구에서도 NRCS-CN 모형을 이용하여 유역의 유효우량을 산정하였으며, 관측자료를 이용하여 제주도의 초기손실( $I_o$ )를 추정하고, 경사가 급한 제주도 유역에 대하여 경사보정을 수행하여 적용하였다.

#### 1.4 합성단위도법

HEC-HMS 모형에서는 Clark 방법, Snyder 방법 그리고 NRCS 방법을 사용하여 합성단위도를 유도한다. 합성단위도의 매개변수는 최적화 기법을 통한 측정자료로부터 결정하거나 경험적인 방법을 이용하여 결정한다.

### 1.4.1 Snyder 방법

미국 애팔래치아 산맥지역에서 유역면적이,  $30 \sim 30,000 \text{ km}^2$ 인 유역을 대상으로 여러 계측유역에 대한 분석으로 개발되었으며 단위도의 침투홍수량의 크기 및 발생시각과 단위도의 기저시간 길이를 유역의 지형특성인자와 상관시키는 경험공식이다. 기저폭 또는 기저시간  $T$ , 침투유량  $Q_p$ , 지체시간  $t_p$ 의 3개 매개변수로 매끈하게 연결시켜 단위도를 작성하는 방법이다.

$$T_L = C_t (LL_{ca})^{0.3} \quad (2.15)$$

여기서,  $T_L$ 은지체시간(hr)이고,  $C_t$ 는 유역경사에 따른 유역특성 상수로서 낮은 수치일수록 급경사를 나타내며 광역적 범위는  $0.3 \sim 6.0$  이나 일반적인 범위는  $1.35 \sim 1.65$ ,  $L$ 은 유역의 본류연장(km),  $L_{ca}$ 는 유역출구지점으로부터 유역중심에서 본류에 내린 수선의 교차점까지의 거리(km)이다.

$$Q_p = C_p \frac{A}{T_L} \quad (2.16)$$

여기서,  $Q_p$ 는 침투유량( $\text{m}^3/\text{sec}$ )이고  $C_t$ 값에 반비례하는  $C_p$ 는 유량의 저류용량에 따른 유역특성 상수로서 유효강우가  $1\text{cm}$ 인 경우  $1.5 \sim 11.9$ 의 범위이며,  $A$ 는 유역면적( $\text{km}^2$ ),  $T_L$ 은 지체시간(hr)이다.

$$t_r = \frac{T_L}{5.5} \quad (2.17)$$

이와 같은 식에서 계산된 강우지속기간( $t_r$ )과 실제 강우지속기간( $t_R$ )이 상이할 경우에는 유역 지체시간( $T_L$ )과 침투유량( $Q_p$ )은 다음과 같이 조정하여야 한다.

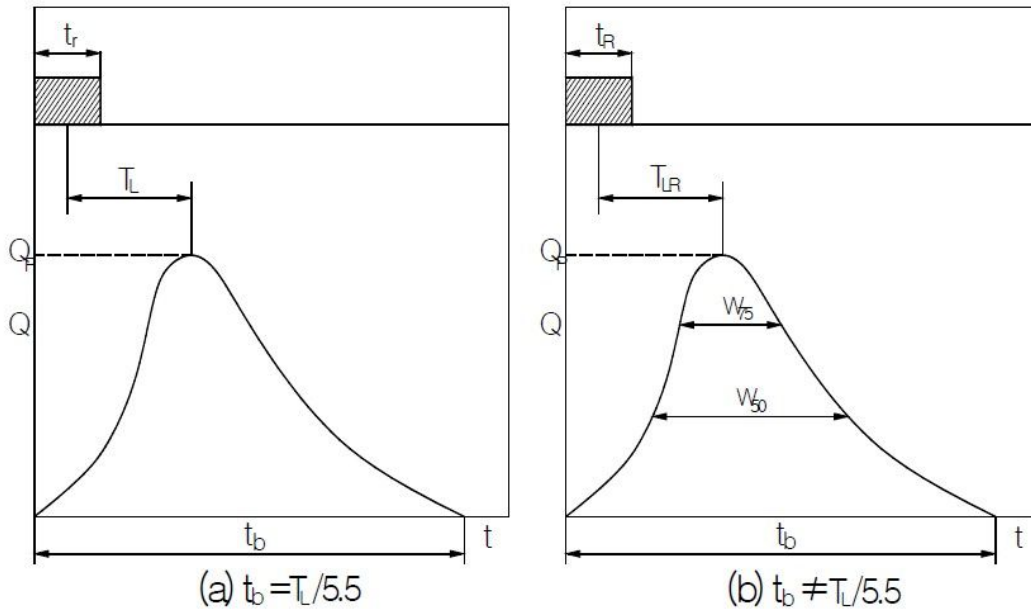


Fig. 2.5 Concept map of Snyder synthetic unit hydrograph (Yoon, 2007)

$$T_{LR} = T_L + \frac{1}{4}(t_R - t_r) \quad (2.18)$$

$$Q_{PR} = Q_P \frac{T_L}{T_{LR}} \quad (2.19)$$

여기서,  $T_{LR}$ 은 조정된 지체시간(hr),  $T_L$ 은 계산된 지체시간(hr),  $t_R$ 은 실제 강우지속기간(hr),  $t_r$ 은 계산된 강우지속기간(hr),  $Q_{PR}$ 은 조정된 첨두유량( $m^3/sec$ ),  $Q_P$ 는 계산된 첨두유량( $m^3/sec$ )이다. 기저시간  $t_b$ 는 다음 첫 번째 식으로 계산한 다음, 기저시간이 너무 클 경우에는 두 번째 식으로 계산한다.

$$t_b = 72 + 3T_{LR} \quad (2.20)$$

$$t_b = \frac{5.56A}{Q_{PR}} \quad (2.21)$$

여기서,  $t_b$ :단위도의기저시간(hr),  $T_{LR}$ :조정된 지체시간(hr)

이와 같이 결정된 3개 좌표점(0,0),( $T_{LR} + 0.5t_R, Q_{PR}$ ) 및 ( $t_b, 0$ )을 매끈하게 연결하되

스케치 된 단위도 아래의 면적이 1cm의 직접 유출고가 되도록 작도한다. 미국 육군 공병단에서는 3개점을 사용하여 단위도를 스케치 할 때 발생하는 주관적인 오차를 줄이기 위해 다음과 같은 경험식을 제안하였으며 이와 같이 4개점을 추가함으로써 보다 더 객관적인 스케치가 가능하게 된다.

$$W_{50} = 2.14 \left( \frac{Q_{PR}}{A} \right)^{-1.08} \quad (2.22)$$

$$W_{75} = 1.22 \left( \frac{Q_{PR}}{A} \right)^{-1.08} \quad (2.23)$$

여기서,  $W_{50}$  와  $W_{75}$  는 각각 침투유량의 50% 및 75% 되는 유량에 해당하는 단위도의 시간폭(hr)이며 해당 유량에 대하여 침투 발생시간 전에 1/3, 후에 2/3를 배분,  $Q_{PR}$ 은 조정된 침투유량( $m^3/sec$ ),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ )이다. 이와 같이 Snyder 방법은 유역특성에 따른 상수  $C_p$ 와 조정된 지체시간  $T_{LR}$ 을 입력인자로 하는 2 매개변수 합성단위도 방법이다. 한편, 우리나라의 경우 Snyder 방법에 의한 결과는 통상 다른 단위도 방법에 의한 결과와 많은 차이를 나타내며 또한 이를 적절히 조정할 방안이 마땅히 없는 등의 이유로 인하여 현실적인 적용성이 매우 낮으므로 실무에서는 거의 사용하지 않고 있으며, 본 연구에서 홍수유출량을 산정하기 위한 방법에서도 제외하였다.

#### 1.4.2 NRCS 방법

NRCS 방법은 합성단위유량도를 작성하기 위하여 고안된 방법으로서 무차원 단위도의 이용에 근거를 두고 있다(Fig. 2.6).

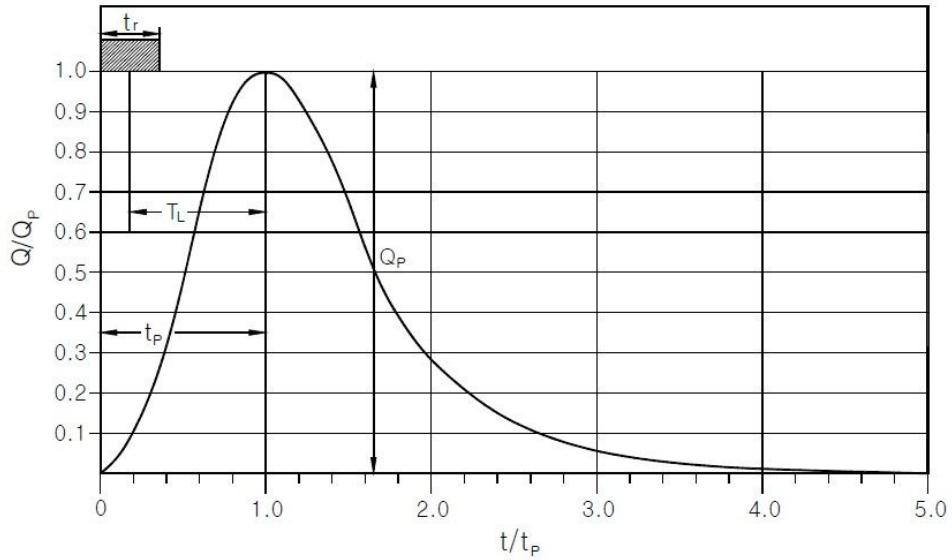


Fig. 2.6 Dimensionless hydrograph of NRCS(Yoon, 2007)

Table 2.8 Value of NRCS dimensionless hydrograph according to time(Yoon, 2007)

$t/t_P$	$Q/Q_P$	$t/t_P$	$Q/Q_P$	$t/t_P$	$Q/Q_P$
0	0.000	1.1	0.990	2.4	0.147
0.1	0.030	1.2	0.930	2.6	0.107
0.2	0.100	1.3	0.860	2.8	0.077
0.3	0.190	1.4	0.780	3.0	0.055
0.4	0.310	1.5	0.680	3.2	0.040
0.5	0.470	1.6	0.560	3.4	0.029
0.6	0.660	1.7	0.460	3.6	0.021
0.7	0.820	1.8	0.390	3.8	0.015
0.8	0.930	1.9	0.330	4.0	0.011
0.9	0.990	2.0	0.280	4.5	0.005
1.0	1.000	2.2	0.207	5.0	0.000

이 무차원 수문곡선은 미국 내 여러 지방의 대소유역으로부터 얻은 실제의 단위도를 해석하여 얻은 것이므로 유역의 특성에 별 관계없이 적용할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법에 의한 단위도의 합성을 위해서는 단위도의 첨두유량  $Q_p$ 와 첨두유량의 발생시간  $t_p$ 를 결정하여야 하며  $Q_p$ 와  $t_p$ 가 결정되면 무차원 곡선을 사용하여 단

위도를 합성 하게된다. NRCS는  $Q_p$ 와  $t_p$ 를 산정하기 위한 식으로 다음 식 (2.24)와 식 (2.25)를 추천하고 있다.

$$t_p = \frac{1}{2}t_r + T_L \quad (2.24)$$

$$Q_p = \frac{2.083A}{t_p} \quad (2.25)$$

여기서,  $t_p$ 는 강우시작부터 첨두유량까지 시간(hr),  $t_r$ 은 강우지속기간(hr),  $T_L$ 은 우량중심으로부터 첨두유량까지의 시간인 유역 지체시간(hr),  $Q_p$ 는 1cm유효우량시 첨두유량( $m^3/sec$ ),  $A$ 는유역면적( $km^2$ )이다. 따라서 유역의 유출량( $Q_i$ )은 단위유량도  $j$ 시간의 값( $U_j$ )과  $i-j+1$ 시간에서의 유효우량( $X_{i-j+1}$ )에 의해서 식 (2.25)와 같은 기본식으로 결정된다.

$$Q_i = \sum_{j=1}^i U_j \cdot X_{i-j+1} \quad (2.26)$$

NRCS 모형의 경우 입력자료로는 유역의 면적, 유로연장, 유역경사, CN값, 강우지속시간 등이 있다. 이 값들을 이용하여 식 (2.24)과 식 (2.25)를 이용하여 단위도의 첨두발생시간  $t_p$ , 단위도의 첨두유량  $Q_p$ , 지체시간  $T_L$ , 즉, 우량의 질량중심으로부터 첨두유량점까지의 시간 등을 구한다. NRCS 단위도 모형은 미국 내 여러 유역의 자료를 이용하여 얻은 단위도를 이용하여 도출된 방법이므로 제주도와 같이 투수성이 좋은 지질구조에 적용하기에는 한계가 있다.

### 1.4.3 Clark 방법

이 방법은 유역의 도달시간-누가면적 관계를 이용하여 유역 내에 내리는 순간단위 유효우량으로 인한 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간 단위유량도를 유도하는 방법으로 강우로 인한 유수의 전이뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려하므로 자연하천에서의 적용에 적합한 방법이다(Fig. 2.7).

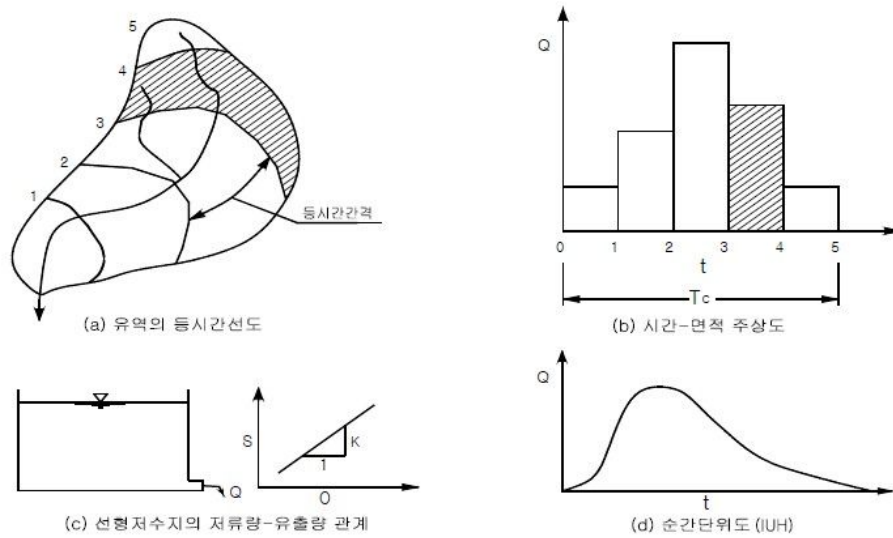


Fig. 2.7 Concept map of Clark synthetic unit hydrograph(Jung, 2007)

선형수로에 의한 유출의 전이효과는 유역 전반에 순간적으로 내린 단위유효우량인 순간단위유효우량(instantaneous unit effective rainfall, 1 cm 또는 1 mm)으로 인한 유출을 시간-면적곡선을 이용한 단순전이에 의해 계산함으로써 고려한다. 이와 같이 계산된 선형수로의 유출수문곡선은 선형저수지의 유입수문곡선이 된다. 선형저수지에 의한 유역의 저류효과는 유입수문곡선에 대하여 유역과 동등한 저류특성을 갖는 선형저수지( $S=KO$ )의 홍수추적을 실시함으로써 고려하며, 이와 같이 계산된 선형저수지의 출력은 유역의 순간단위도(IUH)가 된다.

유역의 총 도달시간을 시간구간의 수로 구분하고 각 구간에 대하여 총 도달시간에 대한 비율을 다음 식 (2.27)로 계산한다.

$$T_i = \frac{t_i}{t_c} \quad (2.27)$$

$T_i$ : 총 도달시간에 대한  $i$ 번째 시간구간의 비

$t_c$ : 유역의 총 도달시간,  $t_i$ : 고려하는 시간구간

만일 실제 유역에 대한 시간면적 곡선이 없다면 누가 TA 곡선은 다음과 같이 구할 수 있다.



$$TA_i = 1.414T_i^{1.5} \quad (0 \leq T_i \leq 0.5) \quad (2.28)$$

$$1 - TA_i = 1.414(1 - T_i)^{1.5} \quad (0.5 \leq T_i \leq 1.0) \quad (2.29)$$

$TA_i$ : 시간면적곡선의 누가치

$T_i$ : 총 도달시간에 대한  $i$ 구간의 비

TA곡선이 준비되면 두 번째 단계로 저류상수  $K$ 와 함께 선형저수지 개념을 통해 TA를 추적함으로써 Clark 단위도를 얻게 된다. 추적계수(Routing coefficient)  $C$ 는 저류상수  $K$ 를 사용하여 다음 식과 같이 결정한다.

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (2.30)$$

$C$ : 선형추적계수,  $K$ : Clark의 저류상수(time),  $\Delta t$ : 시간구간(time)

Clark 저류상수  $K$ 는 관측된 수문곡선의 감수부 변곡점의 평균유량을 변곡점의 기울기로 나눈 값과 같으며, 유량관측 자료가 없을 경우에는 다양한 경험공식을 이용하여 계산한다. 앞에서 산정한 추적계수  $C$ 와 TA 곡선을 이용한 순간단위도 (IUH)를 다음과 같이 유도한다.

$$IUH_i = \overline{CTA_i} + (1 - C)IUH_{i-1} \quad (2.31)$$

$IUH_i$ : 순간단위도의 종거,  $C$ : 추적계수

$\overline{TA_i}$ : 시간구간  $i$ 에서의 평균 시간면적 종거(=  $0.5(TA_i + TA_{i-1})$ )

최종적인 합성단위도는 시간구간  $\Delta t$  차이가 나는 두 개의 순간단위도를 평균함으로써 얻어지게 된다.

$$UH_i = \frac{1}{2}(IUH_i + IUH_{i-1}) \quad (2.32)$$

$IUH_i$ : 순간단위도의 시간구간  $i$ 에서의 종거

$UH_i$ : 합성단위도의 시간구간  $i$ 에서의 종거

본 연구에서는 Clark 방법을 이용하여 유역의 홍수유출량을 산정하였으며, Clark 방법의 매개변수인 도달시간  $T_c$ 와 저류상수  $K$  및 유출곡선지수  $CN$ 의 최적조합을 선정하여 제주도 하천에 적용하였다.

#### 1.4.4 Clark 방법의 매개변수

##### (1) 도달시간

유역에 내리는 강우에 따라 침투유량이 발생하는 시간적 특성이나 수리학적으로 유역이 어떠한 반응이 일으키는지를 시간으로 나타낸 것을 유역반응시간이라고 하며 이 유역 반응시간을 나타내는 인자는 집중시간(time of concentration), 지체시간(lag time), 평형시간(time of equilibrium), 침투발생시간(time of peak), 도달시간(time of travel), 담수발생시간(time to pounding) 등이 있다.

도달시간( $T_c$ ) 산정은 아직까지 기준이 명확하게 정립되어 있지 않으며, 도달시간은 민감도가 매우 높은 요소이므로 산정 시 가장 신중하게 채택하여야 한다. 유입 시간 산정의 경우 자연유역이나 우수관거의 설계에서 모두 기준으로 제시되고 있는 표준값을 이용하거나 경험공식을 사용하게 되나 매우 주관적으로 채택되고 있는 실정이다. 홍수유출량 산정 시 중요하게 여겨지는 도달시간에 대한 경험 공식은 Kirpich 공식, Rziha 공식, kraven I 공식, kraven II 공식, SCS 공식 등과 같은 경험공식들을 주로 사용하고 있다.

-Kirpich 공식: 농경지 소유역을 대상으로 유도된 공식

$$T_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2.33)$$

-Rziha 공식: 자연하천의 상류부( $S \geq 1/200$ )에 적용되는 공식

$$T_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}} \quad (2.34)$$

-Kraven I 공식: 자연하천의 하류부( $S < 1/200$ )에 적용되는 공식

$$T_c = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}} \quad (2.35)$$

-Kraven II 공식: 자연하천의 경사별 유속을 적용하는 공식

$$T_c = 16.667 \frac{L}{V} \quad (2.36)$$

( $S \leq 1/200 : V = 2.1m/s$ ,  $1/200 < S < 1/100 : V = 3.0m/s$ ,  $S \geq 1/100 : V = 3.5m/s$ )

-SCS 공식: SCS 지체시간 공식을 변환한 공식( $8km^2$ 이하 소유역에서만 가능)

$$T_C = \frac{L^{0.8}(2,540 - 22.86CN)^{0.7}}{0.56149CN^{0.7}S^{0.5}} \quad (2.37)$$

여기서,  $T_c$ :유하시간(min),  $L$ :유로연장(km),  $S$ :무차원 하천평균경사

$V$ :유속(m/s), SCS 공식의  $T_c$ :도달시간(min), CN: 유출곡선지수

## (2) 저류상수

우리나라의 경우 적절한 실측자료가 부족하여 이론적인 방법에 의하여 저류상수를 결정하기는 어려운 실정이며, 현재 실무에서 저류상수 결정 시는 도달시간과의 관계를 이용하는  $K = \alpha T_c$  방법을 주로 채택하고 있고, 계수  $\alpha$ 는 0.8-1.2 범위로서 통상 1.0을 채택하고 있다.

이와 같이 저류상수를 도달시간만의 관계로 결정하는 방법은 유역형상을 전혀 고려하지 못하는 문제점과 계수  $\alpha$ 는 채택된 값에 따라 유출량이 50% 이상 차이가 날 수도 있을 정도로 민감도 높은 인자이나 이의 결정시 임의성이 큰 문제점 등을 가지고 있다. 현재 저류상수의 산정에는 다음과 같은 공식들이 사용되고 있다.

-Clark 공식

$$K = \frac{cL}{\sqrt{S}} \quad (2.38)$$

-Linsley 공식

$$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}} \quad (2.39)$$

-Russel 공식

$$K = \alpha T_c \quad (2.40)$$

-Sabol 공식

$$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A}} \quad (2.41)$$

여기서,  $K$ :저류상수(hr),  $L$ :유로연장(km),  $A$ :유역면적( $km^2$ ),

$S$ :평균 하천경사(%),  $c$ :상수(0.5-1.4),  $b$ :상수(0.01-0.03),

$T_c$ :도달시간(hr) ,  $\alpha$ :상수(0.2-1.2),  $\frac{L^2}{A}$ :형상계수의 역수

연구대상유역인 한천과 외도천 유역의 하천정비기본계획(2009)에서 Clark 단위도법의 매개변수인 도달시간( $T_c$ ) Kraven I 공식을 사용하여 산정하였으며, 저류상수( $K$ )는 Russel 공식을 이용하였다. 그러나 제주도 하천에 대하여 Clark 단위도법의 매개변수에 대한 선행연구가 존재하지 않으며 각 경험공식에 대한 적용성이 입증되지 않았다. 본 연구에서는 Clark 단위도법의 매개변수를 산정하는 경험공식에 대하여 다양한 조합을 구성하여 적용하였으며, 관측자료와 비교·분석하여 최적조합을 도출하였다.

## 1.5 하도추적방법

하도추적(channel routing)은 어떤 하도구간으로 들어오는 유입수문곡선을 하도구간에서 나가는 유출수문곡선으로 전환하는 절차이다. 하도구간의 저류량과 유출량간의 관계는 저수지와 같이 단일 관계가 성립되지 않고 Fig. 2.8과 같이 환형(loop type) 관계로 나타나므로 복잡하다. 또한, 동일 유출량의 경우에도 홍수위 상승시 저류량은 홍수위 하강 시 저류량보다 크게 된다. 홍수위 상승 및 하강시의 하도구

간 저류량의 형태 변화는 Fig. 2.8과 같이 나타나며, 하상에 평행한 선 아래에 있는 저류량을 대형저류량(prism storage)이라 하고 위에 있는 저류량을 썰기저류량(wedge storage)이라 한다.

썰기저류에 대해 살펴보면 Fig. 2.9와 같이 홍수위 상승시에는 구간 출구점의 유출량이 증가되기 이전에 많은 양의 썰기저류가 생기므로 썰기저류가 (+)가 되고 홍수위 하강시에는 구간 출구점의 유출량보다 유입량이 적으므로 썰기저류는 (-)가 된다. 따라서 동일 유출량에 대한 저류량과 수면경사는 홍수위 상승시가 홍수위 하강시보다 크게 되는 것이다. 이와 같은 썰기저류량이 유출량에 미치는 영향을 저류량-유출량 관계에 포함시킴으로써 하도구간의 홍수를 해석적으로 추적할 수 있게 된다.

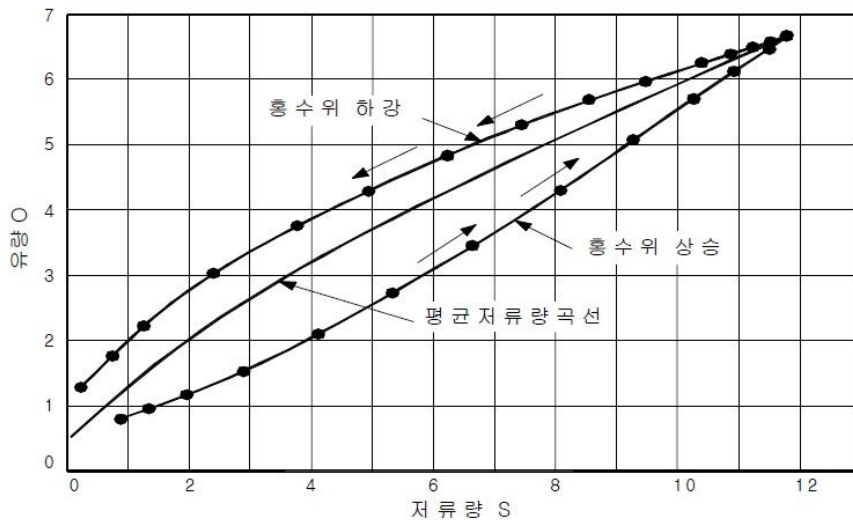


Fig. 2.8 Stream channel storage-discharge relation graph(Jung, 2007)

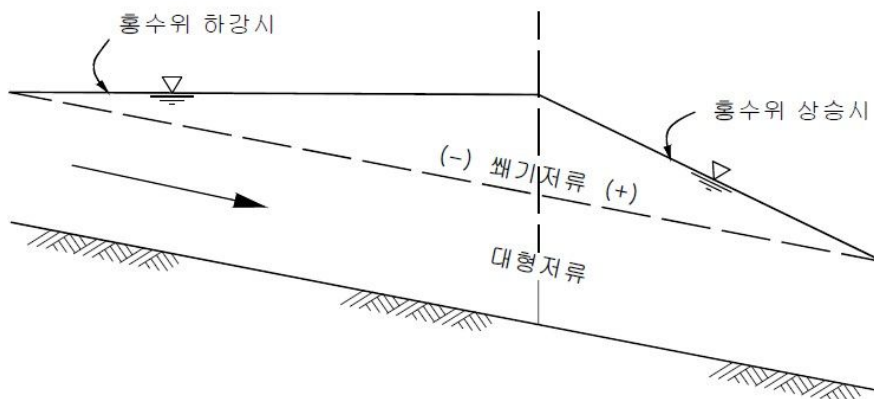


Fig. 2.9 Change of stream channel storage form of flood level rise and fall (Jung,2007)

## 1.5.1 Muskingum 방법

### (1) 기본방정식

Muskingum 방법은 McCarthy가 미국 육군공병단 산하의 Muskingum Conservancy District의 홍수조절계획의 수립을 위해 사용한 홍수추적 방법이다. 하천의 추적구간내 저류량에 미치는 홍수유입량의 영향을 고려하기 위하여 구간내의 총저류량을 Fig. 2.10과 같이 대형저류량과 썰기저류량으로 구분하고, 대형저류량은 유출량에만 비례하나 썰기저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정하면, 총저류량은 대형저류량과 썰기저류량의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$S = KO + Kx(I - O) \quad (2.42)$$

$$= K[xI + (1-x)O]$$

여기서,  $K$ :구간 내 저류량의 유출량에 대한 비를 나타내는 저류상수(hr)

$x$ :추적구간의 총저류량에 기여하는 유입량과 유출량의 상대적 중요성을 표현하는 무차원 가중계수

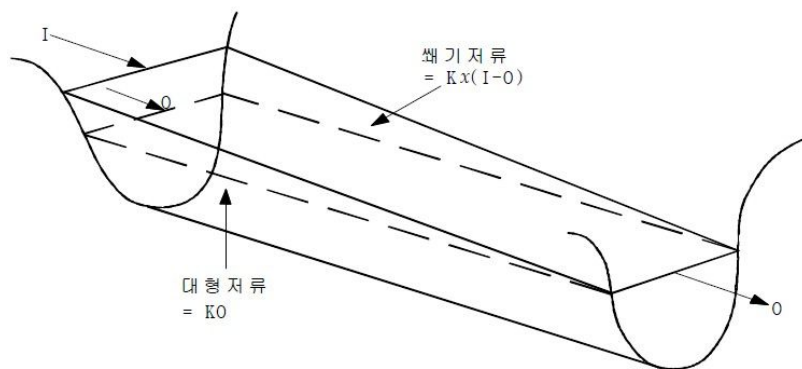


Fig. 2.10 Prism storage and wedge storage of natural stream channel(Jung, 2007)

이와 같은 관계를 저류방정식에 대입하여 추적구간 상류단의 유입수문곡선으로부터 하류단의 유출수문곡선을 축차적으로 계산하는 것이 Muskingum 방법이다. 이와 같은 식을 임의 추적기간에 대해 정리하고 이를 저류방정식(2.43)의 우변에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = S_2 - S_1 \quad (2.43)$$

$$S_2 - S_1 = K[x(I_2 - I_1) + (1-x)(O_2 - O_1)]$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = K[x(I_2 - I_1) + (1-x)(O_2 - O_1)] \quad (2.44)$$

여기서,  $I$ :유입량,  $O$ :유출량,  $S$ :저류량,  $K$ :저류상수,  $x$ :가중 계수  
 $\Delta t$ :계산 시간간격, 첨자 1, 2: 한 추적기간의 시점과 종점

이와 같은 식을 에 관하여 풀면 다음과 같이 정리되며, Muskingum 방법에 의한 홍수추적은  $\Delta t, K, x$ 등을 먼저 결정하고 다음 식을 축차적으로 풀어 나가는 방법을 채택하고 있다.

$$\begin{aligned} O_2 &= C_o I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \\ C_o &= \frac{-(Kx - 0.5\Delta t)}{K - Kx + 0.5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \\ C_2 &= \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}, \quad C_o + C_1 + C_2 = 1 \end{aligned} \quad (2.45)$$

이론적으로 계산 시간간격  $\Delta t$ 는 추적기간으로서 저류상수  $K$ 와 같다고 볼 수 있으나, 이러한 저류상수  $K$ 를 결정하기 어려운 경우에는 통상 추적구간의 평균유속에 의한 도달시간인  $T_c$ 의 약 1/2~2/3를  $K$ 로 간주할 수 있다. 운동파 이론(kinematic wave theory)에 의하면 계수  $C_o, C_1, C_2$ 는 모두 양(+)의 값을 가지도  $\Delta t$ 를 선정하여야 한다. 그러나  $C_1, C_2$ 는 음의 유출량이 계산될 정도로 정확도에 영향을 미치지 않는 경우라면 음(-)인 것도 가능하나  $C_o$ 는 반드시 양(+)이 되어야 한다. 이에 따라 하도 홍수추적의 시간간격  $\Delta t$ 는 다음과 같은 조건을 만족시키는 것이 필요하다.

$$2Kx < \Delta t \leq K \left( \approx \frac{2}{3} T_c \right) \quad (2.46)$$

(2) 계측구역의 매개변수( $K, x$ ) 결정

유입 및 유출수문곡선을 사용하여 저류량의 증감변화와 저류량의 누가곡선을 Fig. 2.11과 같이 작성한다. 무차원 가중계수  $x$ 를 가정하여 Fig. 2.12와 같이  $[xI+(1-x)O]$ 와 저류량의 누가곡선이 가장 직선에 가까워지는  $x$ 를 채택하고 그 직선의 기울기를  $K$  값으로 결정한다.

한편 이와 같은 그래프와 작도에 의한 방법은 다소 주관적인 요소가 있으므로 통계학적인 방법(statistical method)을 사용하기도 한다.

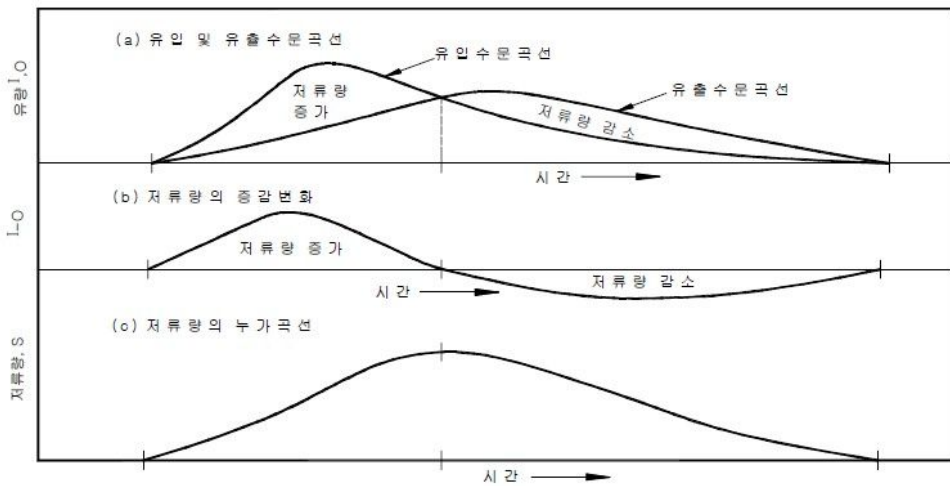


Fig. 2.11 Relation of stream channel storage-inflow-discharge(Jung, 2007)

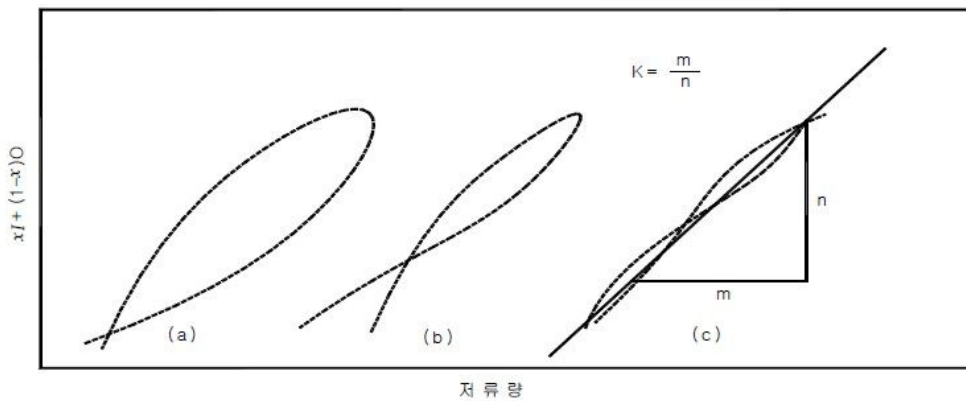


Fig. 2.12 Decision of stream channel storage constant( $K$ )(Jung, 2007)



### (3) 미계측유역의 매개변수( $K, x$ ) 결정

일반적으로 저류상수  $K$ 값으로 추적구간의 홍수파(flood wave) 통과시간을 주로 사용하며, 홍수파 통과시간은 홍수파의 질량중심(mass center)이 구간의 상류단으로부터 하류단까지 통과하는데 소요되는 시간으로 정의되며, 간혹 첨두홍수량의 구간 통과시간을 근사값으로 사용하기도 한다. 여기서, 홍수파의 전파속도를 사용하는 홍수파의 통과시간은 평균유속을 사용하는 도달시간과는 다름에 유의하여야 한다. 홍수파의 전파속도를 산정하는 방법에는 수위-유량관계곡선을 이용하는 방법과 평균유속과 홍수파 전파속도의 비를 이용하는 방법이 있다.

Seddon은 추적구간내 대표지점의 수위-유량관계곡선(rating curve)의 경사를 이용하여 홍수파의 전파속도(flood wave velocity)를 계산하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$V_w = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dy} \quad (2.47)$$

여기서,  $V_w$ :홍수파의 전파속도,  $B$ :흐름단면의 수면 폭

$dQ/dy$ :수위-유량관계곡선의 경사

하도 단면형별 평균유속과 홍수파의 전파속도의 비는 경험적으로 Table 2.9와 같고 자연하천의 경우 평균적으로 1.5가 추천되고 있다. 여기서 평균유속은 도달시간을 산정하는 경험공식을 이용하거나 수면곡선계산 결과 등의 유속을 참고하여 결정할 수 있다.

Table 2.9 Ratio of mean current speed and celerity of flood wave according to stream channel cross section type(Jung, 2007)

하도 단면형	홍수파 전파속도( $V_w$ )/평균유속( $V$ )	비 고
광폭 구형수로	1.67	자연하천의 경우 통상 1.5를 추천
광폭 포물선형 수로	1.44	
삼각형 수로	1.33	

이와 같이 저류상수는 추적구간의 홍수파 통과시간이므로 추적구간의 거리를 평

균유속이 아닌 홍수파의 전파속도로 나누어 산출하여야 한다.

$$K = \frac{L}{V_w} \quad (2.48)$$

여기서,  $K$ :저류상수,  $L$ :구간거리,  $V_w$ :홍수파의 전파속도

여기서, 홍수파의 전파속도는 자연하천의 경우 평균유속의 1.5배이므로 저류상수는 평균유속을 적용한 도달시간에 비해 2/3로 작아지게 됨에 유의하여야 한다. 따라서 현재 실무에서 추적구간의 평균유속을 적용한 도달시간( $T_c$ )을 저류상수로 사용하고 있는 부분은 개선되어야 한다.

홍수의 저류효과(attenuation) 정도를 결정하는 무차원 가중계수  $x$ 값은 0-0.5의 범위를 가지며,  $x$ 값이 0이면 최대 저류효과가 나타나고  $x$ 값이 0.5이면 저류효과는 전혀 나타나지 않고 단지 지체효과만이 나타나게 된다. 한편, 저수지의 경우 저류량에 대한 유입량의 영향을 무시할 수 있으므로  $x$ 값이 0이며 저류량은 유출량과 선형( $S=KO$ ) 관계이다. 대부분의 무차원 가중계수 하천에서  $x$ 값은 0.0~0.3의 범위를 나타내며,  $x$ 값은 민감도가 아주 낮으므로 평균값인 0.2를 채택하면 무난하다.

현재까지 제주도 하천정비기본계획(2009, 2001, 1992)에서 매개변수  $K$ ,  $x$  는 일반적으로 제시하는 값(평균유속을 적용한 도달시간 개념)을 이용하였으며, 무차원 가중계수에 대하여 평균값(0.2)을 사용하여 설계홍수량을 산정하였다. 그러나 제주도 하천에 대하여 Muskingum 매개변수  $K$ ,  $x$ 를 도출한 선행연구가 없으므로 본 연구에서는 관측자료가 존재하는 추적구간에 대하여 도시적 해석법을 이용하여 매개변수를 도출하였다.

## 2. 유출량 계측기기

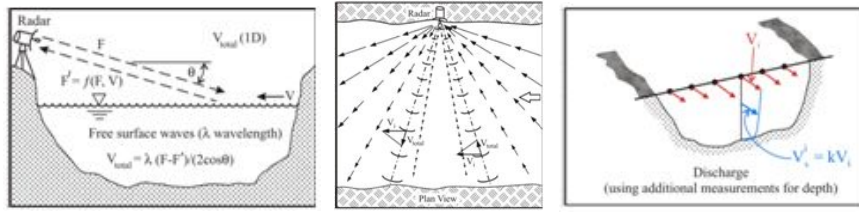
### 2.1 이동식 전자파표면유속계

전자파표면유속계는 Fig. 2.13에 도시된 것과 같이 약 10GHz의 마이크로웨이브를 수표면에 전송하여 흐름 표면에서 산란되어 반송되는 신호의 도플러 변위를 측정하여 흐름 방향의 표면 유속을 산출하는 방식이다. 그리고 측정된 표면유속을 표면유속과 평균유속 보정계수 (일반적으로 0.85)를 적용하여 평균유속을 간접 계산하고 미리 관측된 단면 면적자료와의 곱으로 유량을 산출한다. 기존 유속계와 비교할 때 비접촉식으로 비교적 안전하고 홍수기 등의 유량이나 유속값이 평시보다 매우 클 경우나 야간 관측에 유용하게 활용될 수 있다 (정성호, 2002). 전자파표면유속계의 도플러 변위와 이를 활용한 유속 측정 공식은 다음과 같다 (Lee, 2006).

$$(2.48)$$

여기서  $f_d$  = 도플러 변위,  $v_s$  = 표면 유속,  $\lambda$  = 전자파 파장,  $\theta$  = 수표면과 전자파 입사 각도 (부각),  $\phi$  = 평면에서 흐름방향과 전자기파 입사각의 차이 (편각)이다 (Fig. 2.13(a)). 전자파표면유속계를 활용하여 단면 방향으로 단수 및 복수 지점에서의 유속을 측정하여 유량을 계산한다. 국내에서는 수자원공사에서 실용화를 연구하여 상용화하였고 (수자원공사, 1998), 민간 업체에 기술 이전되어 Fig. 2.13(b)와 같이 평갈수용 전자파표면유속계 (MU2720)로 성능이 향상되었다(뮤트로닉스, 2010). 가능 측정 유속범위는 0.03~20.0 m/s 이며 이동형으로 사용될 수 있다.

제주시 한천 제 2동산교에서 이동식 전자파표면유속계를 이용(하천단면 5지점 유속 관측)하여 유량관측을 수행하였으며, 관측자료를 이용하여 홍수유출량 모델을 검증하였다.



(a)



(b)

Fig. 2.13 Observation of discharge using a Microwave Water Surface Current Meter:  
 a) Principle of Microwave Water Surface Current Meter; b) Commercialized mobile Microwave Water Surface Current Meter (Mutronics MU2720)

## 2.2 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)

레이더식 자동 수위/유속 측정기(Kalesto)는 비접촉식 센서로서 수위 및 유속을 측정하는데 사용된다. 비접촉식 측정원리를 가지고 있으며 실트 축적이나 암설로이 안한 피해가 없다. 12V DC 전력공급으로 낮은 전력 소비로 작동이 가능하다는 장점이 있으며 유지비가 저렴하여 비용이 절감 된다.

데이터 전달 방법은 RS 485 interface(data line up to 1.0m), optional SDI 12 signal (RS 485 SDI 12 converter)를 이용하고 있으며 낙뢰 방지 기능이 첨부되어 있다. 레이더식 자동 수위/유속 측정기는 알루미늄 본체로서 UV 플라스틱 커버를 하고 있으며 해상도는 1mm, 정확도는 1cm이다. 센서 테크놀로지는 FMC (Frequency Modulated Continuous Waves)방식을 사용하며 레이다 빔 범위는 24, 125 GHz를 사용한다.

Kalesto 레이더식 유속계는 비접촉식 센서로서 하천의 표면 유속을 측정하기 때문에 홍수시에 비교적 신속하고 안전하게 유량을 측정할 수 있다. 이러한 특징으로

인하여 제주특별자치도 수자원본부의 10개 하천유출량 관측소와 한국지질자원연구원의 5개 관측소에서 설치되어 사용되고 있다(Fig. 2.14).



Fig. 2.14 Kalesto water level-current meter

한국건설기술연구원에서 충청북도 괴산군 달천에 위치한 수전교에 설치하여 댐방류량 및 동시유량측정 성과와 비교한 결과 댐 방류량의  $-1.0\% \sim +18.3\%$  정도의 오차를 보였다. 비교적 오차 범위가 크다는 단점을 가지고 있지만 저유량과 고유량에서 모두 측정이 가능하기 때문에 활용범위는 비교적 넓은 편이며 표면유속을 측정하기 때문에 홍수시 빠른 유속을 안전하고 신속하게 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Kalesto 유속계가 하천의 표면 유속만을 측정하기 때문에 연직유속분포를 결정하는 보정계수가 매우 중요하다. 현재까지 제주특별자치도에서 수행되어진 하천유출량 관측 연구와 제주특별자치도 수자원본부, 한국지질자원연구원에서 관측하는 수위-유속 관측기기에 대한 분석을 한 결과 전자기식 유속계, 레이더식 수위-유속계가 거의 대부분 사용되고 있으며, 그 외에 유속을 측정하는 방법으로 봉부자를 이용하여 관측된 연구결과가 있다.

### 2.3 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)

1980년대 이래 음파 속도측정기들의 등장은 하천에서의 수리동역학적인 특성을 규명하는 능력을 급속히 향상시켜왔다. ADCP는 비접촉식으로 3차원 유속과 수심 자료를 매우 효율적이고 빠르게 측정하며 그 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 속도측정방법과 비교하여 매우 세밀하다. ADCP를 활용한 유량관측은



현존하는 유량 관측 기법 중 매우 정확한 기법으로 알려져 있으며 미국의 경우 지리조사국 (USGS)에서의 약 57%의 유량관측소에서 수위-유량 곡선 구성을 선박, 케이블, 교량 등에서 실시한 ADCP 관측을 통해 이루어지고 있으며 그 비중은 계속 높아지고 있다 (Muste 등, 2007). 기계식의 프로펠러미터가 하천의 한 지점에서의 유속을 제한적으로 측정하는 반면에 ADCP는 선박에 장착해 횡단 운항함으로써 하천 단면의 수천~수만 지점에서 3차원 유속을 매우 신속하게 측정하여 제공한다(Fig. 2.14). ADCP는 20~30도 정도 기울어진 3~4개의 빔을 기하학적으로 위치시키고 (Janus Configuration) 약 200kHz-3MHz 분포의 초음파를 발사하여 하천의 부유물질에 반사된 음파의 도플러 편차를 이용하여 주어진 깊이 (2-100cm) 단위로 빔 진행방향의 유속을 측정하고 각각의 빔에서의 유속을 수학적 방법으로 전환하여 3차원 유속을 측정한다(RDI, 1996; SonTek, 2000). 그리고 각각의 빔에서 부가적으로 수심 정보도 제공한다. 본 연구에서는 ADCP 중 SonTek 사의 RiverSurveyor M9이 사용되었다. RiverSurveyor M9은 다양한 ADCP 기기들 중 저수심과 고수심 모두에 사용하도록 설계되었고 수심측정기를 별도로 장착한 9개의 빔으로 구성되어있다 (Fig. 2.15(b)).

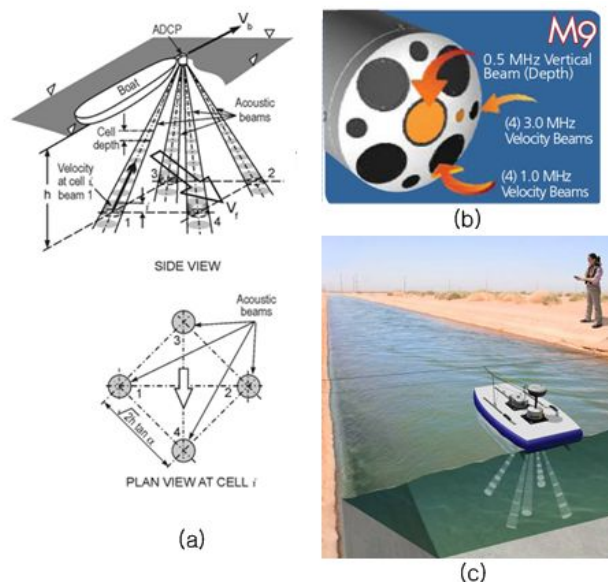


Fig. 2.15 Observation of discharge using ADCP: a) Principle of ADCP ; b) ADCP equipped with 9 beams (SonTek RiverSurveyor M9); c) Management of ADCP in scene

## 2.4 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)

ADCP가 주어진 3차원 하천 단면에 분포한 점에서의 순간적인 유동속도를 제공하는 반면 수표면의 연속된 이미지를 바탕으로 한 이미지 유속계 (Large-Scale Particle Image Velocimetry; LSPIV)는 2차원 공간에 분포한 유동장을 동일한 시점에서 자세히 제공할 수 있다 (Creutin 등, 2002). 이 개념은 기존의 실험실에서 사용된 PIV방식을 현장으로 확장한 기법으로 1990대 중반에 최초로 도입되었다 (Aya 등, 1995). 그리고 수표면 유속장과 별도로 측정된 수심자료를 기반으로 실시간으로 유량정보를 제공할 수 있다 (Hauet 등, 2008). 이미지 유속계는 비접촉식으로 인해 특히 홍수시의 접근 위험 지역의 유속장을 안전하게 측정하는 데 장점이 있다.

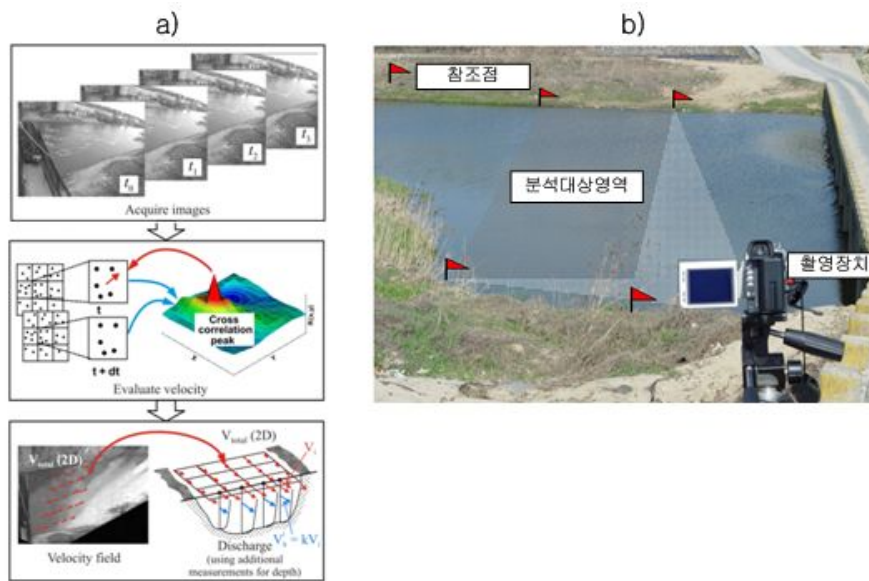


Fig. 2.16 Observation of discharge using LSPIV: a) Principle of LSPIV ; b) Continuous image shooting of water surface using a video camera in scene

본 연구에서는 HEC-HMS 결과와 비교·분석하기 위하여 직접 현장에서 다양한 관측기기로 관측된 결과들 중에서 이동식 전자파 표면유속계를 이용하여 관측한 결과와 제주시청 및 수자원본부에서 운영하는 제2동산교, 제4한천교, 한천교, 외도정 수장의 유량 관측 자료를 이용하였다.

### Ⅲ. 연구대상 유역 및 호우사상 별 유출량 관측 결과

#### 1. 연구대상유역

제주도의 하천은 한라산 정상부를 중심으로 경사가 급한 남·북부 지역에 주로 분포하고 있으며, 동·서부 지역은 한라산 능선의 말단부에 위치하여 사면경사가 완만할 뿐만 아니라 비교적 평탄한 용암대지로 이루어져 있어서 상대적으로 하천의 발달이 미약한 편이다. 제주시와 서귀포시를 중심으로 남·북부 지역에는 지방하천과 소하천을 포함하여 총 143개의 하천이 분포하고 있다.

본 연구에서는 제주 도심부에 위치한 한천을 대상으로 호우 시 유량을 직접 관측하였으며, 유출량을 산정하기 위한 강우, 손실, 단위도, 유역추적 방법들을 관측자료를 이용하여 변경 적용하였다. 또한 하류지역에서 용천수에 의한 흐름을 형성하는 외도천의 제주특별자치도 수자원본부의 관측자료를 이용하고 한천과 동일한 방법으로 유출량을 산정하여 비교·분석하였다(Fig. 3.1).

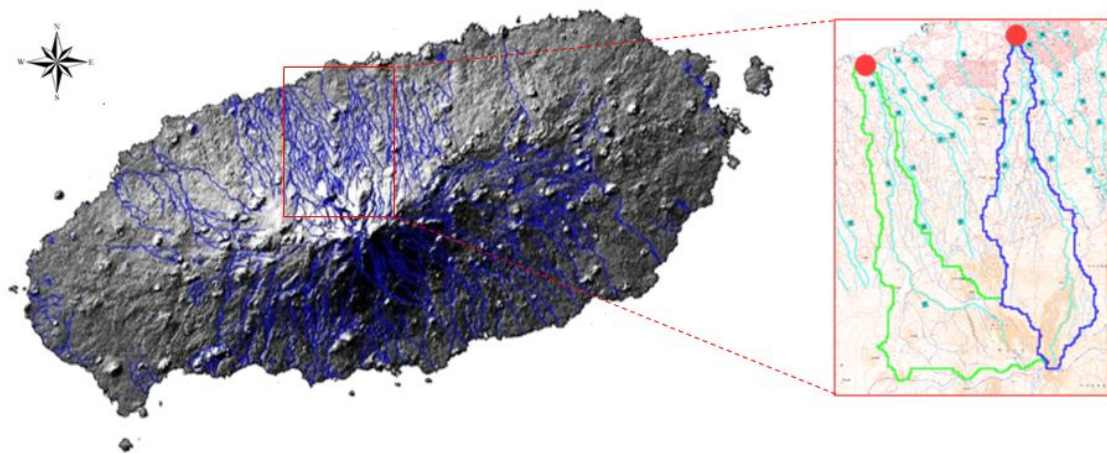


Fig. 3.1 Basins for the study



## 1.1 유역 형상 및 지형적 특성

연구대상 유역의 지형적 특성을 파악하기 위하여 1/5,000 제주도 수치지도를 이용하여 유역면적, 유로연장, 유역평균폭, 유역형상 등을 GIS 분석하였다(Table 3. 1). 유역의 형상은 지도의 평면상에 투시된 형태로 유출특성에 상당한 영향을 미치며, 형상계수가 클수록 유출의 집중성향이 높아지므로 첨두유출량이 증가하게 된다. 한천유역의 유역면적은 유량관측지점인 한천 제2동산교(경도: 33° 29' 44.53", 위도:126° 30' 44.09")를 출구점으로 선정하여 33.68km<sup>2</sup>으로 산정되었으며, 유로연장 19.01km, 유역평균폭 1.77, 형상계수 0.09로 각각 분석되었다. 외도천 유역의 유역면적은 제주특별자치도 수자원본부의 유량관측지점인 외도천 외도정수장(경도: 33° 29' 31.15", 위도:126° 26' 6.74")을 출구점으로 선정하여 44.47km<sup>2</sup>으로 산정되었으며, 유로연장 20.64km, 유역평균폭 2.15, 형상계수 0.10으로 각각 분석되었다.

Table 3.1 Geological features of basin for study

Watershed	Watershed Area (km <sup>2</sup> )	Stream Length (km)	Average width (A/L)	Form factor (A/L <sup>2</sup> )
Han stream	33.68	19.01	1.77	0.09
Oaedo stream	44.47	20.64	2.15	0.10

## 1.2 유역의 표고 및 경사 분석

### 1.2.1 한천 유역

유역의 표고는 강수량 및 증발산량에 영향을 미치는 인자이며, 경사는 강우의 침투량과 유출량 결정 및 지표면 유출속도에 영향을 주는 유역의 기울기로 지표류의 유속, 유역의 침식능 및 지역적인 바람 등에 의하여 영향을 받는다. 한천유역을 대상으로 표고 및 경사 분석을 수행하였으며, 분석 결과는 Fig. 3.2와 같다.

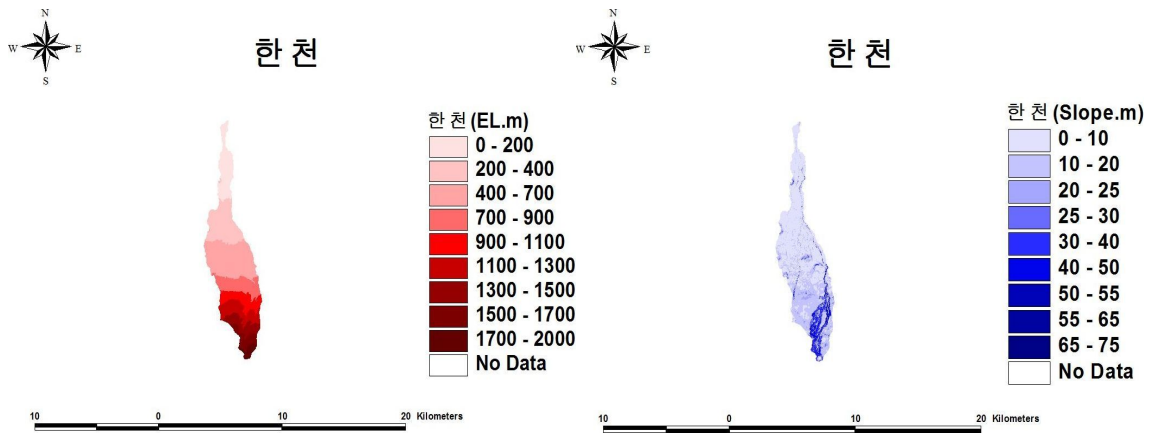


Fig. 3.2 Altitude and slope analysis of Han stream watershed

한천 유역의 표고분석 결과, 해발 200m이하 지역은 유역 전체의 12.76%를 차지하고 있고, 200~600m 지역은 37.97%, 600~1000m 지역은 22.83%, 1000m이상인 지역은 26.44%로 분석되었다(Table 3.2).

Table 3.2 Altitude analysis result of Han Stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
< 200	4.5	12.76	4.5	12.76
200 ~ 600	13.39	37.97	17.89	50.74
600 ~ 1000	8.05	22.83	25.94	73.57
1000 <	9.32	26.44	35.26	100

한천 유역의 경사 분석 결과를 보면, 5°이하의 평탄지역은 전체면적의 23.06%, 5~10°인 완경사지는 49.83%, 토지의 활용도가 높은 경사 20°이하 지역은 83.35%로 분석되었다(Table 3.3).

Table 3.3 Slope analysis result of Han Stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
< 5	8.13	23.07	8.13	23.06
5 ~ 10	9.44	26.76	17.57	49.83
10~ 15	7.52	21.33	25.09	71.16
15 ~ 20	4.3	12.2	29.39	83.35
20 <	5.87	16.64	35.26	100

### 1.2.2 외도천 유역

동일한 방법을 이용하여 외도천유역의 표고 및 경사 분석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 3.3과 같다.

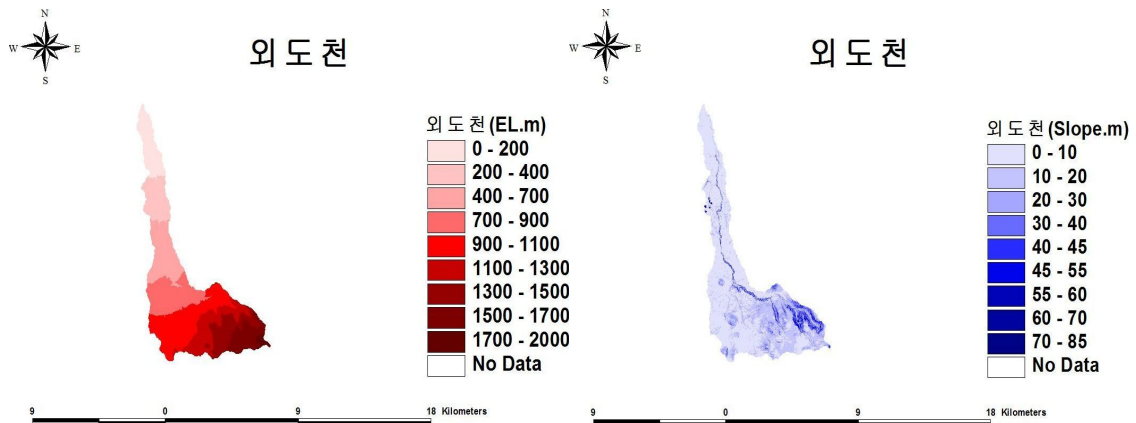


Fig. 3.3 Altitude and slope analysis of Oaedo stream watershed

외도천 유역의 표고분석 결과, 해발 200m이하 지역은 유역 전체의 9.6%를 차지하고 있고, 200~600m 지역은 17.45%, 600~1000m 지역은 32.08%, 1000m이상인 지역은 40.88%로 분석되었다(Table 3.4).

Table 3.4 Altitude analysis result of Oaedo Stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
< 200	4.1	9.6	4.1	9.6
200 ~ 600	7.45	17.45	11.55	27.06
600 ~ 1000	13.69	32.08	25.24	59.12
1000 <	17.45	40.88	42.69	100

외도천 유역의 경사 분석 결과를 보면, 5°이하의 평탄지역은 전체면적의 25.06%, 5~10°인 완경사지는 56.88%, 토지의 활용도가 높은 경사 20°이하 지역은 83.30%로 분석되었다(Table 3.5).

Table 3.5 Slope analysis result of Oaedo Stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
< 5	10.7	25.07	10.7	25.06
5 ~ 10	13.58	31.81	24.28	56.88
10~ 15	6.98	16.35	31.26	73.23
15 ~ 20	4.3	10.07	35.56	83.3
20 <	7.13	16.7	42.69	100

## 2. 호우사상 별 유출량 관측 결과

홍수기 유출량 자료는 홍수해석이나 방재 등에 매우 중요한 자료이고 다양한 강우-유출 모델의 검·보정에 활용되기 때문에 자료의 확보 및 관측 정확도의 향상이 평수기 유출자료보다 더 중요하지만 홍수기의 기상악화 및 빠른 유속으로 현장 관측은 매우 어렵다. 또한 제주도의 경우 평상시 건천 상태이며 집중 호우 시에 짧은 기간(1~2일) 동안만 유출이 발행하고 그 횟수도 연평균 유출횟수는 12.5회(Park 등, 2009)이므로 하천의 유량관측이 매우 힘든 지역이다.

본 연구에서는 한천 제 2동산교에서 유출 발생 시 현장 유량 관측을 수행하였으며, 관측자료를 이용하여 모델을 검증하였다(Fig. 3.4).

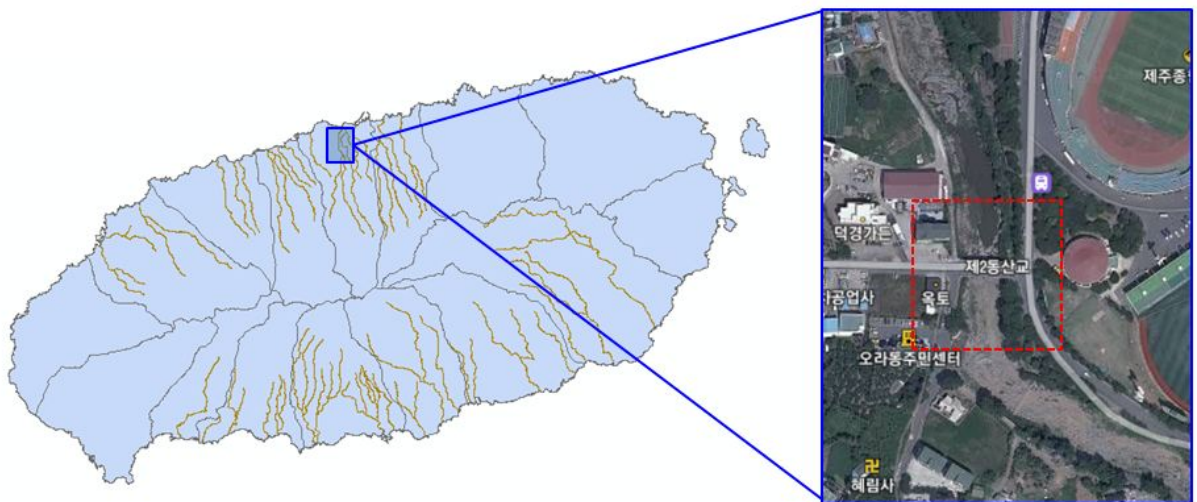


Fig. 3.4 2nd Dongsan bridge of Han Stream

한천 제2동산교 지점은 한천 1지류인 토천이 합류되어 유역의 최종 출구점으로 향하는 지점에 위치하고 있어 유역전체의 유량을 확보하기 좋은 위치이며, 관측지점의 하상은 현무암질 암반으로 구성되고 자갈이 다소 분포되어 있다.

2011년과 2012년에 발생한 사상 중에서 현장유량관측을 수행한 3개의 사상과 제주시에서 운영하는 고정식 수위-유속 관측자료 1개의 사상을 이용하여 한천 유역에 모델을 적용하였으며, 외도천 유역에는 제주특별자치도 수자원본부에서 운영한 고

정식 수위-유속 관측자료 2개 사상을 이용하였다. 정과 양(2013)의 연구결과 제주도 간헐천 유역에서는 선행강우가 존재하지 않거나 매우 작을 경우 특정 강우에는 유출이 발생하지 않으며, AMC-III 조건(53.34mm) 이상의 사전 선행강우가 발생한 경우에는 작은 강우에도 유출이 발생하는 결과를 도출하였다. 정과 양(2013)의 연구결과를 이용하여 본 연구에서는 장기간 무강우 상태에서 유출이 발생하는 사상과 AMC-III 조건 이상의 선행강우가 발생한 후 유출이 발생하는 사상으로 구분하여 모델을 적용하였다.

## 2.1 현장 유출량관측 결과

### 2.1.1 2011년 9호 태풍 “무이파”

2011년 9호 태풍 “무이파”는 8월 7일 제주도에 상륙하였으며, 하천 유출은 오전 6시 경부터 시작되어 약 14시간 동안 지속되었다. 태풍의 영향권으로 접어든 8월 6일 이전 5일 동안의 각 지점에서 관측된 선행 강우는 Table 3.6 과 같으며, 111.10mm 의 유역평균 강우량이 사전에 발생하였다.

Table 3.6 Rainfall of typhoon “Muifa” by observed points before 5 days of rainfall(mm)

일시	제주	아라	어리목	윗세오름	진달래밭
8월 1일	1.5	21.0	122.5	218.5	154.5
8월 2일	0.0	0.5	15.0	27.0	19.5
8월 3일	0.0	0.0	0.5	7.0	9.0
8월 4일	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
8월 5일	0.5	0.5	0.0	0.5	1.0

태풍 “무이파” 로 인하여 유출 발생 시에는 이동식 전자파표면유속계(5지점)과 LSPIV를 활용하여 홍수 유량을 시간 단위로 관측하였다(Fig. 3.5). 하천의 수위는 현장에서 목측 및 사진으로 촬영하고 압력식 자동 수위관측기기를 이용하여 산정하였으며, 관측된 수위-유속자료 및 하천 단면 측량자료(Fig. 3.6)를 이용하여 시간대별 유량을 산정하고 홍수수문곡선을 작성하였다(Fig. 3.7).



Fig. 3.5 Microwave water surface stream meter and LSPIV

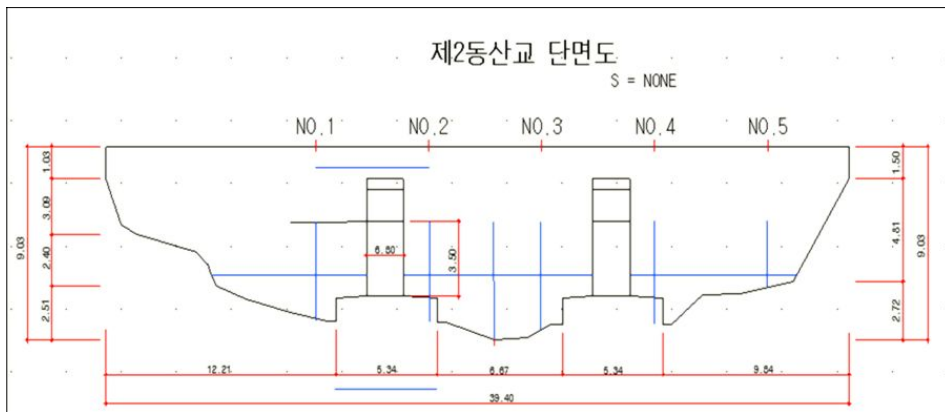


Fig. 3.6 Measurement of 2nd Dongsan bridge cross section

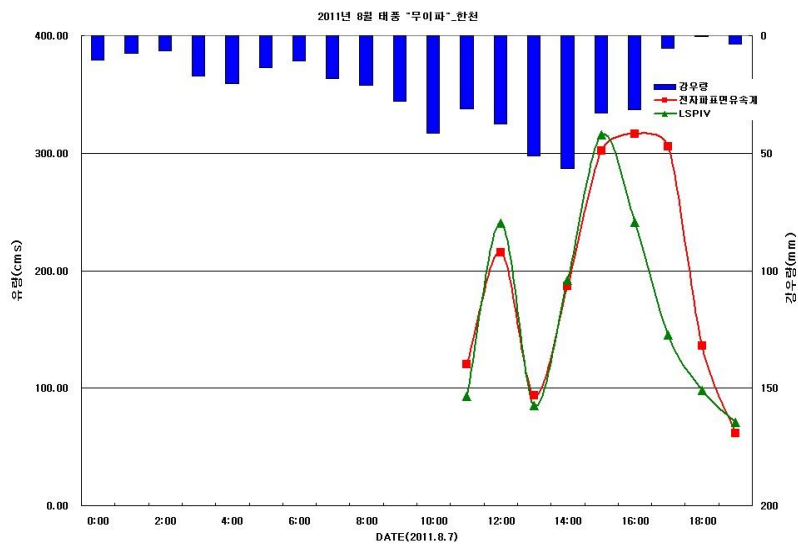


Fig. 3.7 Flood discharge hydrograph of typhoon "Muifa"



한천 제 2동산교에서 유출은 8월 7일 오전 7시 경부터 시작되었으며, 유출이 발생되기 전(8월7일 오전 6시)까지 유역내 98.64mm의 유역평균 강우량이 발생하였다. 각 지점별로 제주 61mm, 아라 91.5mm, 어리목 110.5mm, 진달래밭 103.5mm, 윗세오름 177.5mm가 발생하여 유출이 시작되었으며, 유출지속시간은 26시간, 유출이 발생한 후 첨두 유량까지 도달하는 시간은 9시간으로 분석되었다.

Fig. 3.7에서 이동식 전자파 표면유속계와 LSPIV는 강우에 따른 전반적인 유량을 잘 포착하고 있으며, 유출수문곡선에서 상승기(13:00 PM)의 그래프가 하강하는 이유는 한천 상류부에 위치한 재난방지용 저류지가 가동되고 실제 11시의 유역평균 강우량이 하강하고 다시 상승하였기 때문이다. 한천 제 2저류지의 수위자료를 확보하고 직사각형 위어 경험식(Kindsvater-Carter식)을 이용하여 한천 제2저류지의 유입량을 산정한 결과 제 2저류지에 약 75만톤이 유입되었으며, 수문곡선의 첨두 유량은  $316.37m^3/sec$ 으로 오후 4시경에 발생하였다.

현장 관측에 활용된 이동식 전자파 표면유속계와 LSPIV 관측 자료 중에서 제주도에 운영 중인 고정식 수위-유속계와 동일한 관측방법인 이동식 전자파 표면유속계 관측 자료를 이용하여 모델의 결과를 검증하였다.

### 2.1.2 2011년 11월 집중호우

2011년 11월 18일에는 제주 산간지역(진달래밭: 419.5mm, 윗세오름 346.5mm)에 많은 강우로 인하여 유출이 발생하였다(Fig. 3.8). 5일 선행강우는 무강우 상태였으며, 각 지점별로 제주 84.5mm, 아라 107.5mm, 어리목, 109.0mm, 진달래밭 205.5mm, 윗세오름 175.5mm의 강우량이 발생하고 121.18mm의 유역 평균 강우량이 발생하여 오전 9시부터 유출이 시작되었다. 호우기간동안 205.6mm의 유역 평균 강우량이 발생하였으며, 유출은 25시간 진행되었으며 첨두유량( $50.11m^3/s$ )까지 도달시간은 4시간으로 분석되었다.

유출 발생 이전 5일 이상 무강우 상태가 진행되었으며, 오후 12시에 관측을 시작하여 30분 간격으로 유량을 관측하고 수위는 하천의 목자판 수위를 이용하여 유량 관측을 수행하였다. 관측 결과  $20\sim 50m^3/sec$ 의 저유량이 관측되었으며, 관측 결과는 Fig. 3.9 와 같다.





Fig. 3.8 Picture of heavy rainfall scene in November

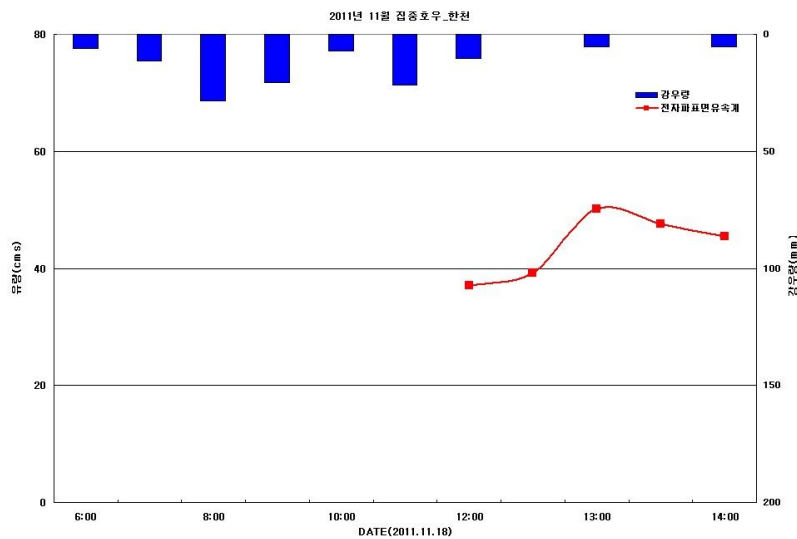


Fig. 3.9 Hydrograph of heavy rainfall in November

### 2.1.3 2012년 7호 태풍 “카눈”

2012년 제 7호 태풍 “카눈”은 7월 18일에 제주도에 상륙하였으며, 호우기간동안 유역평균 강우량이 266.3mm이 발생하였다. 한천 제 2동산교에서 유출은 오후 1시경에 시작되었으며, 유출이 발생하기 전까지 유역내 105.3mm의 유역평균 강우량이 발생하였다. 각 지점별로 제주 78.9mm, 아라 79.5mm, 어리목 87.5mm, 진달래밭 139.0mm, 윗세오름 324.5mm가 발생하여 유출이 시작되었으며, 유출 지속시간은 22시간, 유출이 발생한 후 첨두 유량까지 도달하는 시간은 9시간으로 분석되었다. 선형강우와 오전 7~8시경에 집중된 강우로 유출이 시작되었으나, 오후 2시까지 5mm 미만의 강우로  $4m^3/s$  이하의 저유량이 관측되었다. 오후 3시부터 시간당 10.28~30.92mm의 강우가 집중되어 오후 7시경에 유출이 급격하게 증가하였으며, 오후 10

시경에 첨두유량( $120.52 \text{ m}^3/\text{s}$ )이 발생하였다(Fig. 3.10).

7월 18일 이전 5일 동안 각 지점에서 관측된 선행 강우는 Table 3.7과 같으며, 124.61mm의 유역평균 강우량이 사전에 발생하였다. 이동식 전자과표면유속계를 활용하여 홍수유량을 30분 단위로 관측해 유출수문곡선을 작성하였다.

Table 3.7 Rainfall of typhoon "Khanun" by observed points before 5 days of rainfall(mm)

일시	제주	아라	어리목	윗세오름	진달래밭
7월 13일	21.2	13.5	18.5	32.5	33.5
7월 14일	4.9	5.5	27.5	52.5	50.5
7월 15일	0.0	11.0	29.5	48.5	42.5
7월 16일	0.1	0.5	0.0	0.5	0.0
7월 17일	74.0	63.5	43.0	61.5	64.5

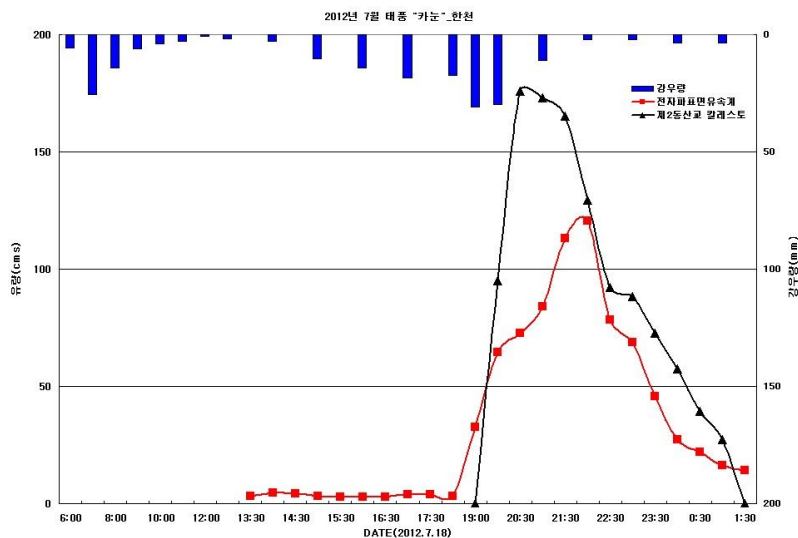


Fig. 3.10 Flood discharge hydrograph of typhoon "Khanun"

## 2.2 고정식 유출량 관측 결과

### 2.2.1 한천유역

현장관측 결과를 제외하고 2012년 4월 21일 발생한 사상에 대하여 제2동산교에 위치한 고정식 수위-유속 관측기기의 유량관측 결과를 이용하여 모델의 결과와 비교·분석하였다.

2012년 4월 21일에 발생한 호우 사상은 무강우 상태에서 발생한 강우로 인하여 유출이 발생하였다. 유출은 120mm의 유역평균 강우량이 발생하여 오전 7시경에 시작되었으며, 각 지점별로 제주 45.5mm, 아라 101.5mm, 어리목 52mm, 진달래밭 290.5mm, 윗세오름 236mm가 발생하여 유출이 시작되었다. 유출지속시간은 22시간, 첨두유량까지 도달시간은 4시간이었으나, 강우의 영향으로 2차 첨두유량( $139.55 \text{ m}^3/\text{s}$ )이 발생하였다(Fig. 3.11). 오후 2시경에 강우가 종료되면서 유출수문곡선은 하강하였으며 4월 22일 오전 5시에 유출은 종료되었다.

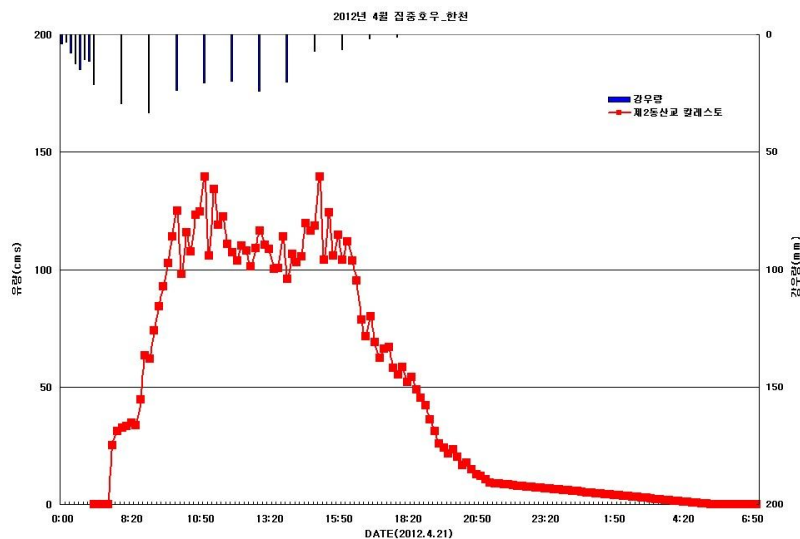


Fig. 3.11 Flood discharge hydrograph of heavy rainfall in April 2011(2nd Dongsan bridge-stationary)

## 2.2.2 외도천 유역

외도천 유역의 최종 출구지점에 위치한 외도 정수장의 고정식 수위-유속 관측 자료를 이용하여 무강우 이후 강우-유출 사상은 2012년 4월 21일 집중호우, 선형강우 이우 강우-유출 사상은 태풍 “카눈”으로 선정하여 모델의 결과와 비교·분석하였다.

2012년 4월 21일 집중호우로 인하여 외도천 유역에서는 오전 11시경에 유출이 시작되었다. 유출이 시작되기 전까지 유역평균 강우량 133.0mm가 발생하였으며, 지점별로 제주 61.0mm, 유수암 77.0mm, 어리목 120.5mm, 윗세오름 309.5mm가 발생하였다. 유출이 시작되기 전 오전 7시부터 시간당 14.26 ~ 34.20mm의 강우가 오후 4시까지 집중되었으며, 오후 6시에 강우는 종료되었다. 유출지속시간은 20시간, 첨두

유량까지 도달시간은 5시간으로 분석되었다. 외도천 외도정수장에 설치된 고정식 Kalesto로 홍수유출 수문곡선을 도출한 결과는 Fig 3.12 와 같다. 첨두유량은 오후 3시경에  $156.66m^3/sec$ 으로 관측되었으며, 10분 단위로 관측되는 자료지만 많은 결측치를 포함하고 있었다.

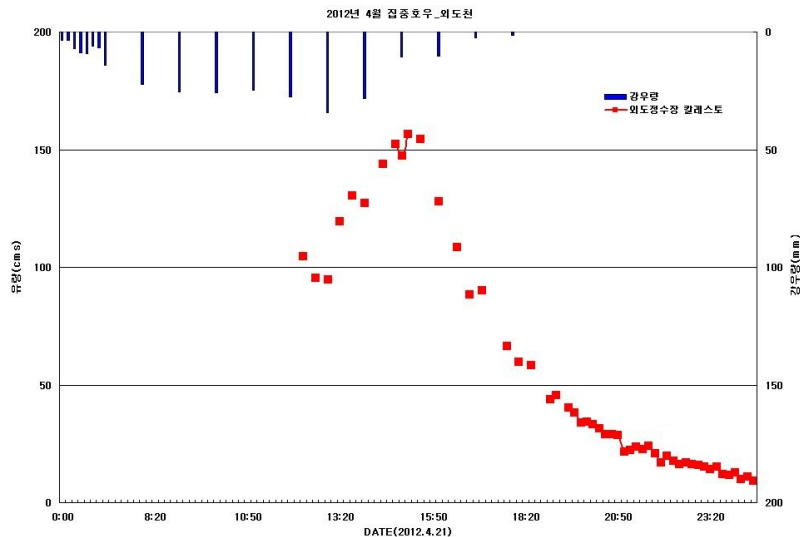


Fig. 3.12 Flood discharge hydrograph of heavy rainfall in April 2011(Oaedo water purification plant-stationary)

선행강우 이후 강우-유출 사상에 대하여 2012년 7호 태풍 “카눈”에 대하여 관측 자료를 구축하였다. 태풍 “카눈” 발생 전 유역 내 71.98mm의 5일 선행강우가 존재하였으며, 103.2mm의 강우로 유출이 시작되었다. 오전 7시부터 시간당 31.42 ~ 11.66mm의 강우가 오전 10시까지 발생하였으며, 강우가 감소하다가 오후 4시경에 부터 점차 증가하여 유출수문곡선이 상승하였다. 유출지속시간은 20시간, 첨두유량 도달시간은 3시간으로 분석되었다. 고정식 Kalesto로 홍수유출 수문곡선을 도출한 결과는 Fig 3.13 와 같으며, 첨두 유량은 오후 9시 경에  $147.15m^3/sec$ 로 관측되었다.

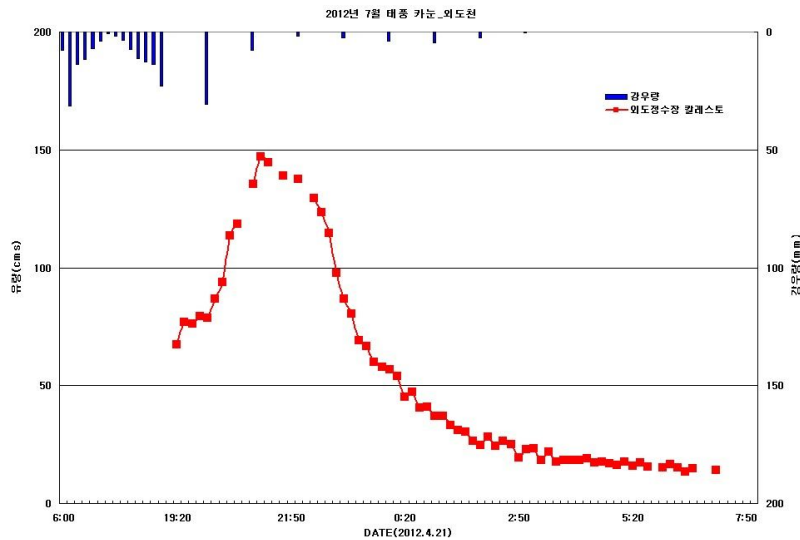


Fig. 3.13 Flood discharge hydrograph of typhoon "Khanun" in 2012(Oaedo water purification plant-stationary)

한천과 외도천 유역의 6개의 호우 사상을 이용하여 유출량을 관측한 결과 유출 지속시간은 20~26시간, 첨두유량 도달시간은 3~9시간으로 분석되었다. 유출 시작 시점에서의 누적강우량을 분석한 결과 무강우 이후 강우-유출 사상은 120.0~133.0mm, 선행강우 이후 강우-유출 사상은 98.6~105.3mm로 나타났다. 선행강우가 존재하지 않을 경우에는 평균적으로 약 18%의 강우량이 추가로 발생하여야 유출이 시작되었다. 그러나 이러한 결과는 보다 많은 사상의 자료를 활용하여 결과를 분석하여야 정확한 결과를 도출할 것이라 판단된다.

본 연구에서 유출량을 산정하기 위하여 적용된 강우, 손실, 유역추적매개변수, 단위도 매개변수 조합의 결과를 적용하여 산정된 유출량과 비교·분석하기 위하여 다지점에서 현장 관측한 자료를 최대한 이용하였으며, 그 외 사상에 대하여는 제주도에서 운영하는 1지점 Kalesto 자료를 이용하였다. 1지점에서 관측하는 자료는 태풍 및 집중호우 시 무인 실시간 유량 관측이 가능해 수위 관측만으로 수위-유량관계곡선을 이용한 유량 산정이 어려운 제주도 하천의 특성을 고려할 때 적합한 방법이다. 그러나 1개 지점의 수위-유속을 측정하여 유량 산정에 오차가 발생하는 원인이 되므로 향후 관측자료의 정밀도를 향상할 수 있는 다지점 관측자료를 확보하여 1지점-다지점 관측자료의 보정식을 개발하여야 한다.

## IV. 유출량 산정 모형의 분석 및 적용

### 1. 유역평균 강우량

#### 1.1 Thiessen 방법과 등우선법을 이용한 유역평균 강우량 산정

기존 제주도 하천의 기본계획 수립 시에는 30년 이상의 강우량 자료를 보유하고 있는 관측소를 채택하여 확률 강우량을 산정하였으며, 연구대상유역내의 제주관측소를 기준으로 고지대(월평, 성판악, 어승생)의 자료를 이용하여 고도에 따른 강우량 증가계수를 도출하고 제주 관측소의 확률강우량을 보정하여 이용하였다.

이러한 방법은 과거 강우량 자료의 부족에 의하여 사용한 방법이며, 일반적으로 유역의 강우량 관측지점의 지점 강우량 자료를 이용하여 Thiessen 다각형을 도출하고 유역평균 강우량을 산정한다. 그러나 Thiessen 방법은 앞서 제시한 바와 같이 고도에 따라 강우량의 영향을 크게 받는 지역에서는 정확도가 매우 떨어지며, 제주도와 같이 고도에 따라 강우량이 증가하는 지역에서는 등우선법을 이용하여 유역평균 강우량을 산정하여야 한다. 그러나 강우-유출 해석 시 시간 강우량 자료를 이용하여 매 시간마다 등우선을 작도하는 일은 매우 많은 시간을 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 연구대상 호우사상의 시간 강우량 자료를 이용하여 티센다각형법과 등우선법과의 상관관계를 분석하고 티센다각형법의 면적평균 강우량을 등우선법으로 환산하는 식을 개발하여 유역평균 강우량을 산정하였으며 사용된 강우량 관측소는 Table 4.1 과 같다.

Table 4.1 Rainfall observatory

관측소명	AWS 지점	표고(m)	경도	위도
제주	184	20	33.514	126.530
아라	329	375	33.456	126.562
어리목	753	965	33.393	126.495
유수암	727	423	33.410	126.393
진달래밭	870	1,489	33.370	126.556
윗세오름	871	1,673	33.362	126.518

### 1.1.1 Thiessen 방법을 이용한 유역평균 강수량 산정

제주 지방 기상청 관할 20개의 AWS 관측지점 자료를 이용하여 Thiessen 망을 구축하였다(Fig. 4.1). 한천유역의 면적평균 강수량은 제주, 아라, 어리목, 윗세오름, 진달래밭 관측소의 자료를 이용하였으며, 외도천유역은 제주, 유수암, 어리목, 윗세오름 관측소 자료를 이용하였다. AWS 관측소별 Thiessen 다각형의 면적은 Table 4.2와 같다.

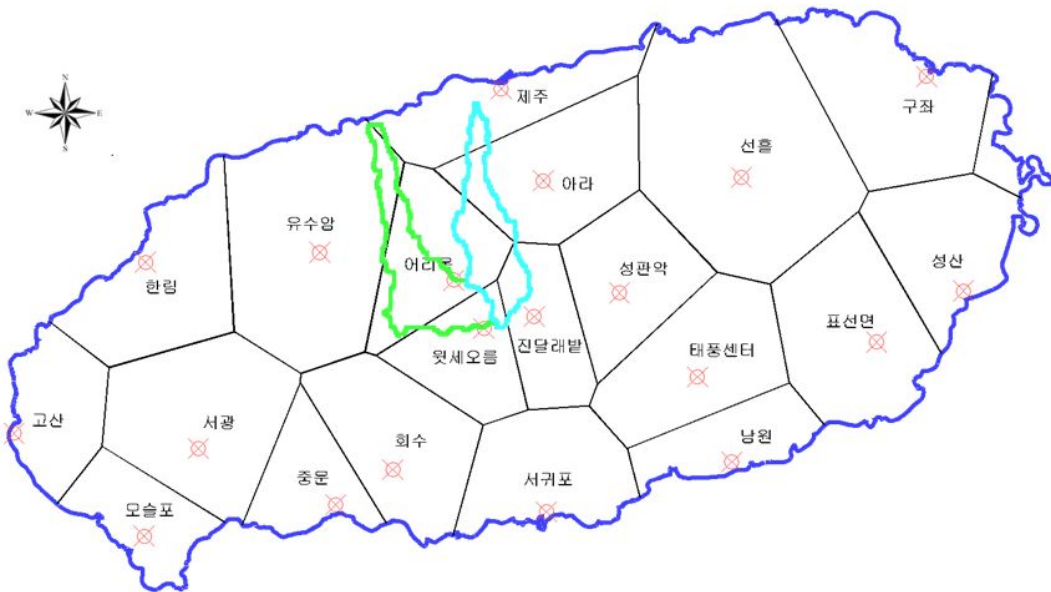


Fig. 4.1 AWS Thiessen polygon method graph of Jeju weather center

Table 4.2 Thiessen polygon are according to AWS observation point

관측소명	한천유역( $m^2$ )		외도천유역( $m^2$ )		비고
	티센 다각형 면적( $m^2$ )	비율 (%)	티센 다각형 면적( $m^2$ )	비율 (%)	
제주	3,078,178	8.39	485,450	1.09	
아라	9,199,844	25.08	-	-	
어리목	14,770,753	40.27	7,781,798	64.54	
유수암	-	-	28,702,089	17.50	
진달래밭	6,806,291	18.55	-	-	
윗세오름	2,826,841	7.71	7,502,933	16.87	
합계	36,681,907	100	44,472,269	100	

한천유역의 Thiessen 다각형 면적은 어리목 AWS 관측지점이 40.27%로 가장 많

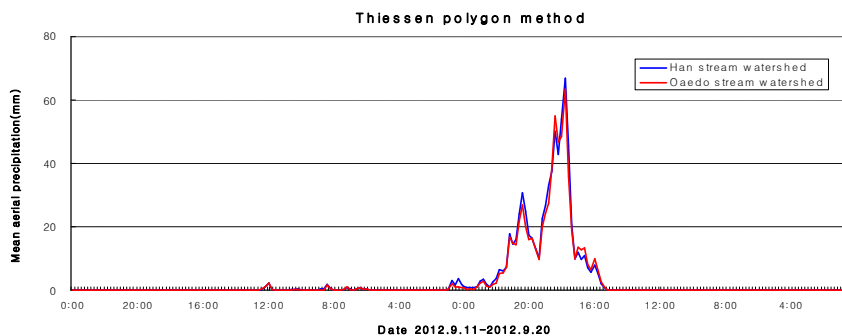
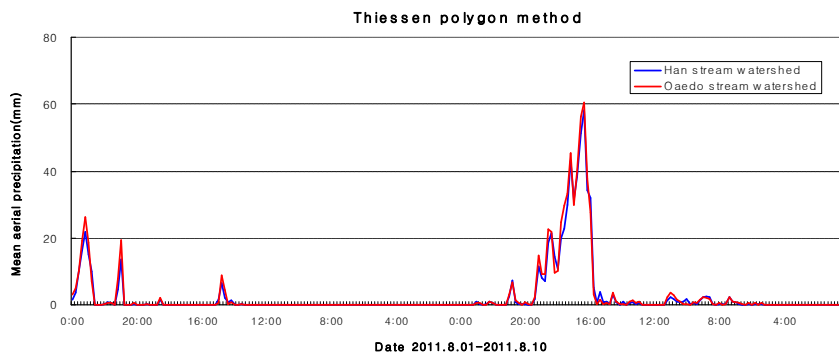


은 영향을 미치고 있으며, 아라, 진달래밭 순으로 높은 비율을 차지하고 있다. 외도천유역의 Thiessen 다각형 면적은 어리목 지점이 64.54%로 가장 많은 영향을 미치고 있으며, 유수암, 윗세오름 순으로 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

구축된 Thiessen 망을 이용하여 한천유역과 외도천유역의 5개의 강우사상 별 유역평균 강우량을 산정하였다(Table 4.3, Fig. 4.2). 태풍 “볼라벤, 덴빈”과 “산바” 사상은 모델의 결과 비교에 사용되지 않았으나 다양한 강우사상을 이용하여 등우선법 개발식을 적용하기 위해 강우분석에는 포함되었다.

Table 4.3 Mean areal rainfall using Thiessen method

강우사상	한천유역(mm)	외도천유역(mm)	비고
2011.08.01 - 08.10	629.59	680.72	태풍 “무이과”
2012.04.15 - 04.24	328.47	311.47	집중호우
2012.07.15 - 07.24	341.25	346.93	태풍 “카눈”
2012.08.22 - 09.02	1,093.65	1,076.54	태풍 “볼라벤, 덴빈”
2012.09.11 - 09.20	717.65	680.77	태풍 “산바”





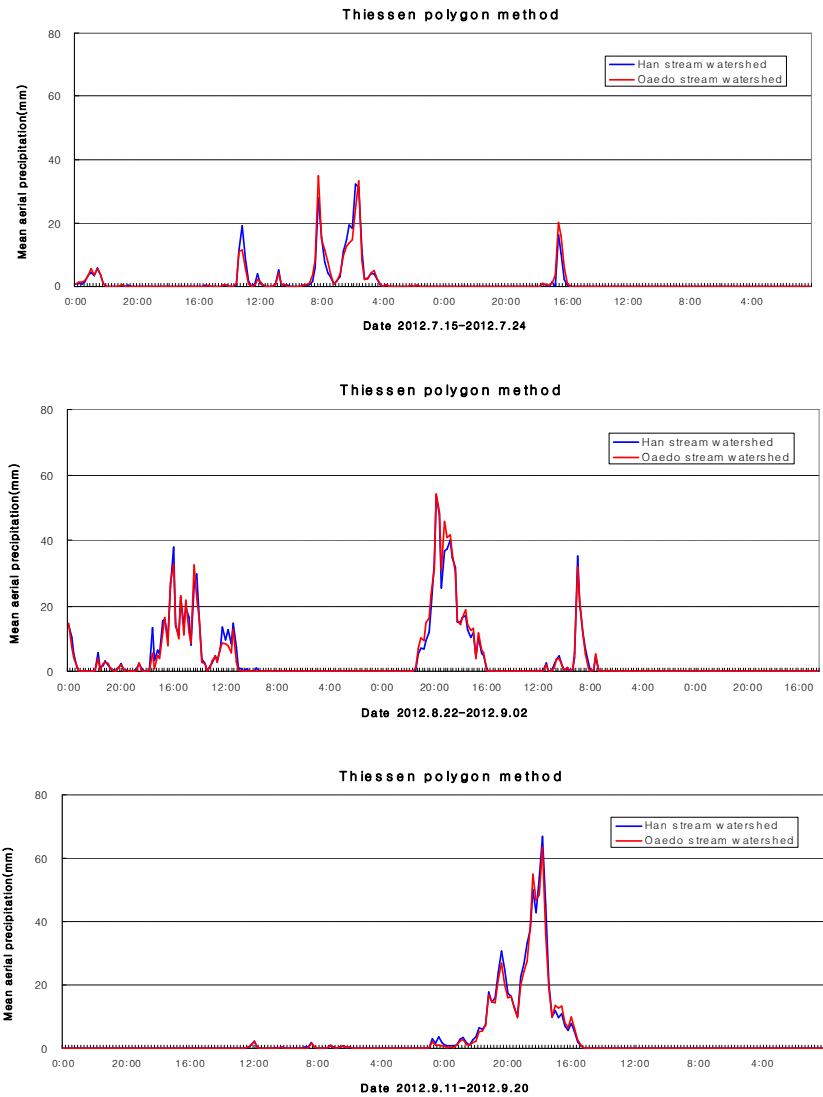


Fig. 4.2 Mean areal rainfall by heavy rain concept using Thiessen method

### 1.1.2 등우선법을 이용한 유역평균 강수량 산정

등우선법은 각 AWS 관측소에서 관측된 강우자료와 관측소 사이의 강우량을 보간하는데 필요한 정보를 이용하여 등우선을 작도한 후 등우선 간의 면적을 구하여 유역평균 강우량을 산정하는 방법으로 산악 효과를 고려할 수 있다.

본 연구에서 사용된 6개의 제주기상청 AWS 관측 지점 중에서 진달래밭과 윗세오름은 표고 1,000m 이상의 고지대에 위치한다. 2008년~2012년 강우량 관측자료에 의하면 표고가 높은 관측지점에서 많은 강우량이 관측되었으며(Table 4.4), 일반적으로 표고에 따라서 강우량은 증가하게 된다.

Table 4.4 Rainfall according by year in observed point (mm)

년도	제주	아라	어리목	유수암	진달래밭	윗세오름
2008년	1,305	1,756	2,167	2,167	3,224	2,576
2009년	1,296	1,692	2,373	1,668	4,468	4,411
2010년	1,585	2,367	4,016	2,281	6,455	7,562
2011년	1,479	2,197	3,737	1,922	6,454	5,617
2012년	2,248	3,462	4,452	2,809	7,319	6,762

Thiessen 방법으로 산정된 5개의 강우사상의 시간 강우량자료를 이용하여 AWS 5개 관측지점의 등우선도를 작성하였다. 등우선도는 제주도의 가장 일반적인 강우량 분포경향인 고도가 높은 상류지역으로 크게 나타나는 경향을 보였으며, 상류지역보다 제주, 아라, 유수암 등의 중·하류지역의 강우량이 크게 발생한 경우에는 하류지역 방향 및 중류 좌우 방향으로 크게 나타나는 경향을 보였다(Fig. 4.3~4.5).

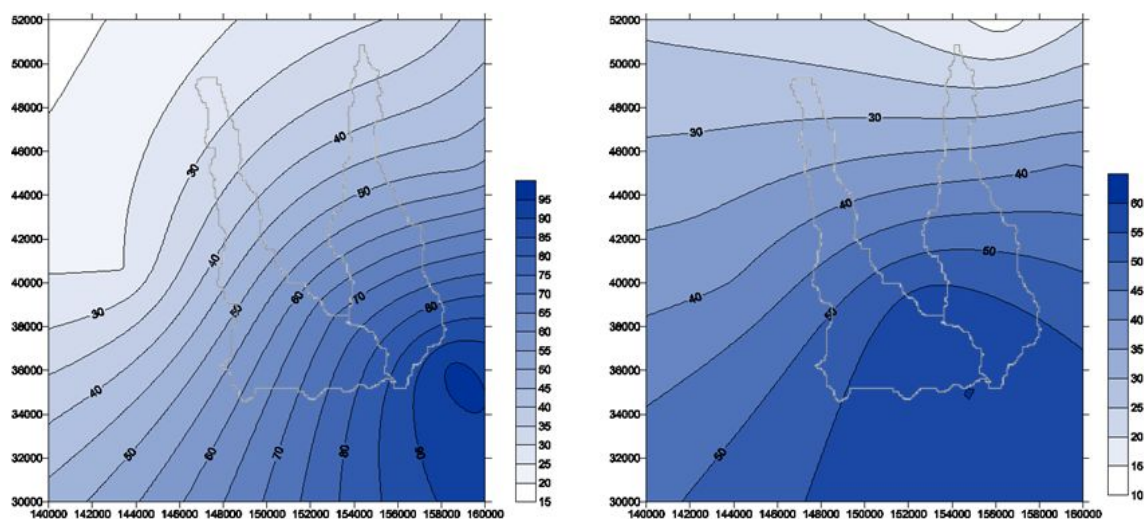


Fig. 4.3 Rainfall chart shown high in upstream direction of water shed

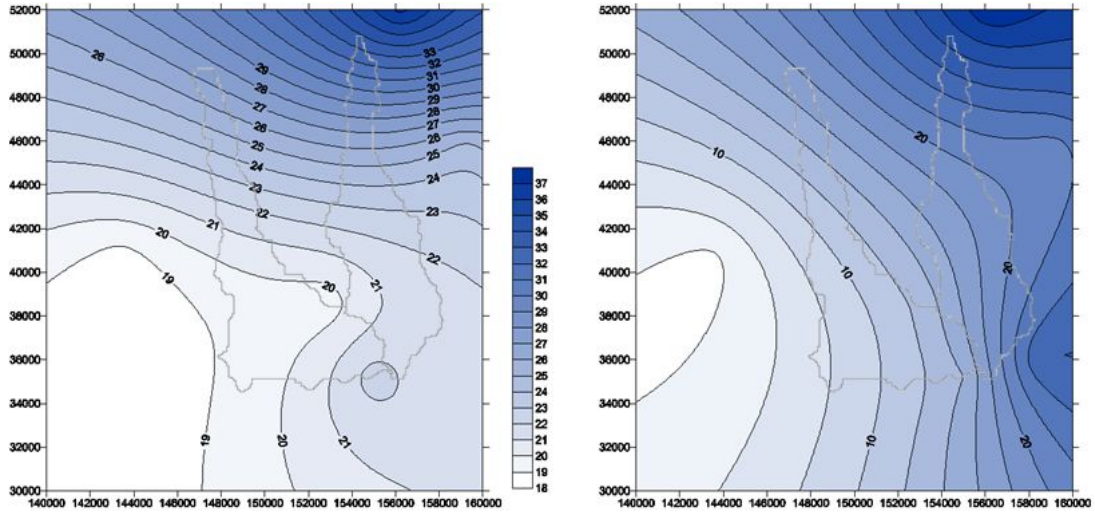


Fig. 4.4 Rainfall chart shown high in downstream direction of watershed

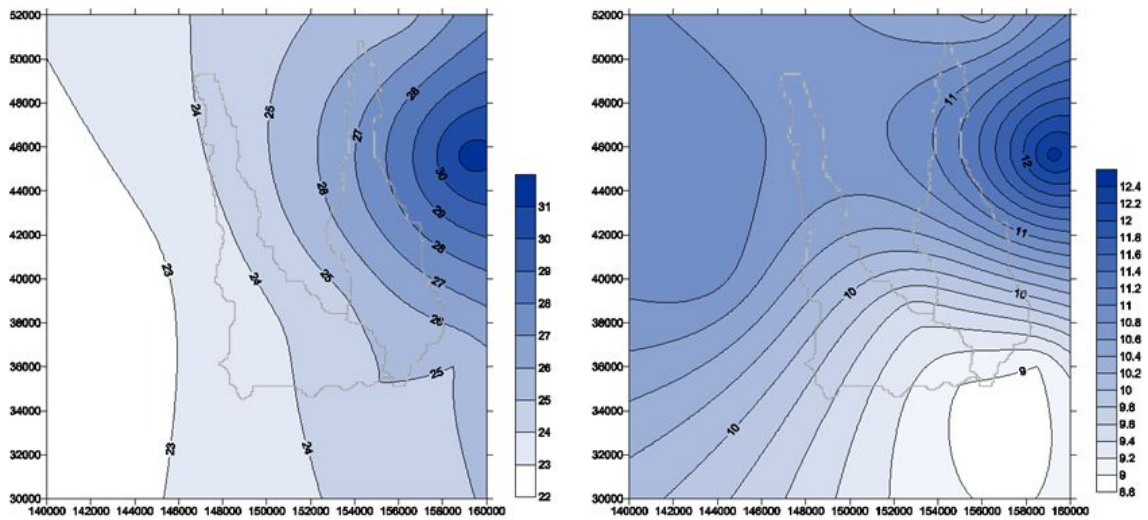
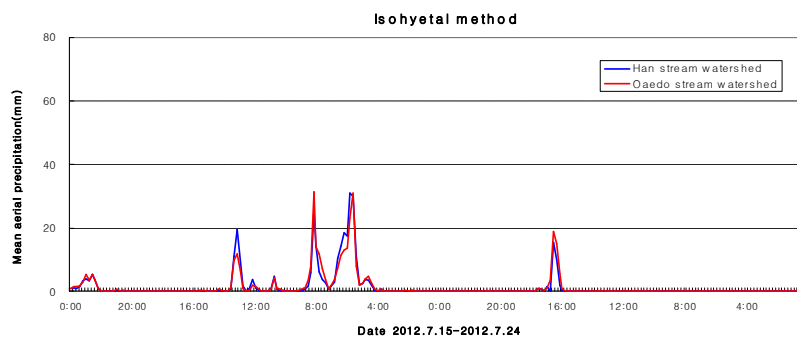
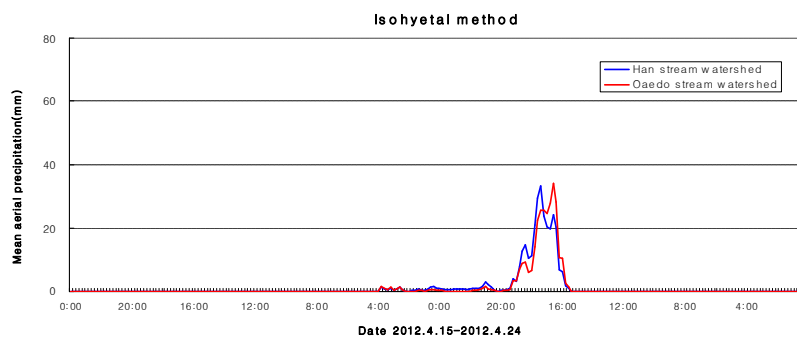
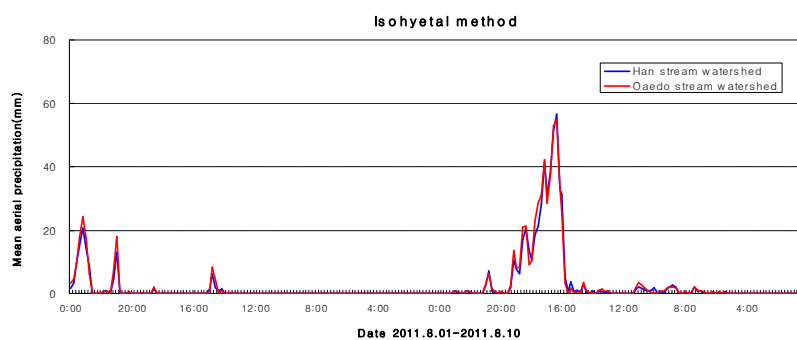


Fig. 4.5 Rainfall chart shown high in left and right direction of watershed

등우선도를 이용하여 유역평균 강우량을 산정한 결과 강우의 공간분포경향에 따라서 다양한 형태의 등우선도가 작성되었다. 이러한 결과는 호우사상에 상관없이 동일한 비율로 유역평균 강우량을 산정하는 Thiessen 방법보다 등우선법이 제주도의 특성을 반영하는 것이라 판단할 수 있으며, 호우사상 별 등우선법을 이용하여 유역평균 강우량을 산정한 결과는 Table 4.5 및 Fig. 4.6과 같다.

Table 4.5 Mean areal rainfall using isohyetal method

강우사상	한천유역(mm)	외도천유역(mm)	비고
2011.08.01 - 08.10	599.29	633.62	태풍 “무이파”
2012.04.15 - 04.24	307.03	288.99	집중호우
2012.07.15 - 07.24	320.59	324.15	태풍 “카눈”
2012.08.22 - 09.02	1,034.25	1,017.10	태풍 “볼라벤, 덴빈”
2012.09.11 - 09.20	685.85	633.41	태풍 “산바”



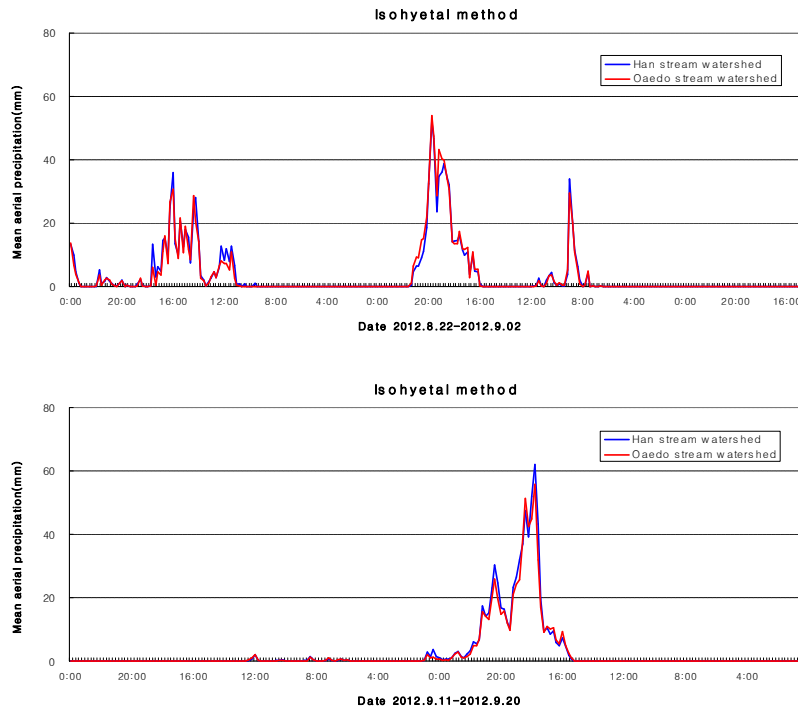


Fig. 4.6 Mean areal rainfall by heavy rain concept using isohyetal method

## 1.2 Thiessen 방법과 등우선법 변환식 개발과 적용

제주도와 같이 고도에 따른 강우량의 증가경향이 나타나는 지역에서는 사상에 따른 다양한 변화가 발생하는 현상을 고려할 수 있는 등우선법을 이용하여 유역평균 강우량을 산정하여야 한다. 그러나 앞서 설명한 것처럼 각 사상의 시간 강우량 자료를 이용하여 매 시간별로 등우선도를 작성하는 일은 매우 많은 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 Thiessen 방법과 등우선법의 상관관계를 분석하여 Thiessen-등우선 변환식을 도출하였다.

변환식을 도출하기 위하여 각 지점별 시간강우량을 Thiessen 방법으로 한천을 기준으로 1.0mm~66.68mm 값을 계산하였다. Thiessen의 시간강우량 결과를 기준으로 산술평균법, 등우선법의 시간강우량을 각각 산정하여 오차를 도출하였으며, 대표적인 결과는 Table 4.6-4.7과 같다.

Table 4.6 Error according to calculation methods of mean areal rainfall(Han Stream)

Thiessen (mm)	산술평균법 (mm)	등우선법 (mm)	Thiessen-산술평균 오차(%)	Thiessen-등우선 오차(%)
1.05	1.08	1.00	-2.86	4.76
2.24	2.20	1.99	1.79	11.16
3.05	3.70	3.13	-21.31	-2.62
3.52	3.42	3.60	2.84	-2.27
5.15	4.90	5.26	4.85	-2.14
7.08	8.26	6.11	-16.67	13.70
7.69	12.78	6.05	-66.19	21.33
8.80	11.12	9.32	-26.36	-5.91
10.89	9.30	9.66	14.60	11.29
14.48	13.62	14.31	5.94	1.17
16.04	17.78	14.42	-10.85	10.10
19.04	21.46	19.33	-12.71	-1.52
22.77	24.98	23.41	-9.71	-2.81
26.47	26.30	26.52	0.64	-0.19
31.54	32.26	32.02	-2.28	-1.52
35.28	36.20	33.28	-2.61	5.67
39.97	39.50	38.90	1.18	2.68
47.80	48.88	46.55	-2.26	2.62
58.31	53.40	56.43	8.42	3.22
66.68	65.38	62.15	1.95	6.79

Table 4.7 Error according to calculation methods of mean areal rainfall(Oaedo Stream)

Thiessen (mm)	산술평균법 (mm)	등우선법 (mm)	Thiessen-산술평균 오차(%)	Thiessen-등우선 오차(%)
1.01	1.40	1.23	-38.61	-21.78
3.83	2.50	2.94	34.73	23.24
6.33	3.38	5.06	46.60	20.06
8.10	6.00	6.68	25.93	17.53
11.44	13.98	11.66	-22.20	-1.92
14.79	13.13	14.90	11.22	-0.74
15.43	13.70	14.20	11.21	7.97
16.55	17.30	15.82	-4.53	4.41
21.63	17.20	19.04	20.48	11.97
24.25	24.38	24.33	-0.54	-0.33
25.23	21.00	22.41	16.77	11.18
30.14	32.20	30.67	-6.83	-1.76
35.97	31.58	31.95	12.20	11.18
40.77	39.23	40.06	3.78	1.74
48.60	47.10	47.49	3.09	2.28
54.09	55.08	53.88	-1.83	0.39
55.08	42.53	51.34	22.79	6.79
56.35	47.13	52.94	16.36	6.05
60.46	48.63	54.99	19.57	9.05
63.24	51.85	55.97	18.01	11.50



한천유역의 Thiessen 방법과 등우선법으로 산정된 유역평균 강우량을 분석한 결과 시간 강우량의 두 방법 오차는  $-5.9\% \sim 21.3\%$ 로 나타났으며, 외도천 유역은  $-21.8\% \sim 23.4\%$ 로 나타났다. 산술평균법은 Thiessen방법과 등우선법에 비하여 너무 많은 오차를 포함하고 있어 제주도의 유역평균 강우량을 산정하기에 적합하지 않았다.

Thiessen-등우선 변환식을 도출하기 위하여 각 사상별로 나타는 등우선을 분석하였다. Fig. 4.7(a)와 같이 유역의 상류방향으로 크게 등우선이 생성될 경우 Thiessen 방법의 유역평균 강우량이 등우선법 보다 크게 산정되었으며, Fig. 4.7(b)와 같이 유역의 하류방향으로 크게 등우선이 생성될 경우 Thiessen 방법의 유역평균 강우량이 등우선법 보다 작게 산정되었다. Fig. 4.7(c)와 같이 유역의 좌우방향으로 등우선이 생성될 경우에는 Thiessen 방법과 등우선법의 유역평균 강우량의 차이가 없는 것으로 나타났다.

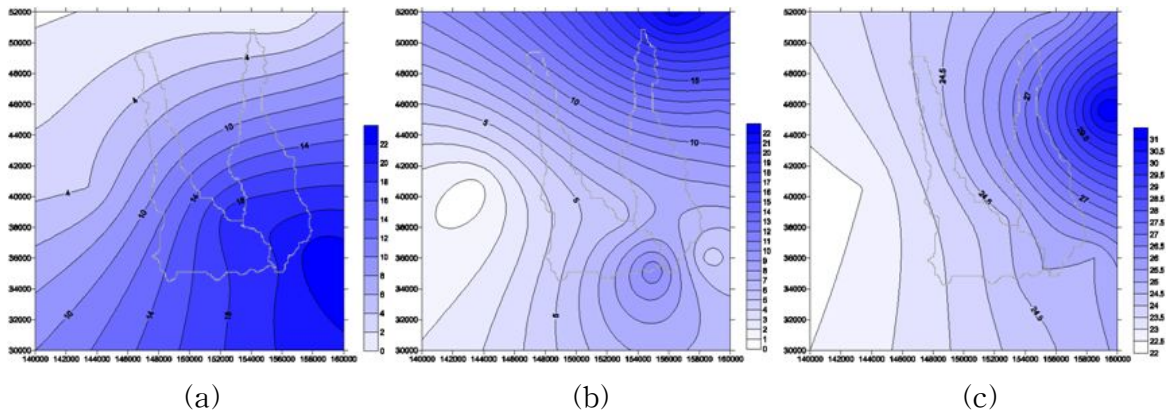


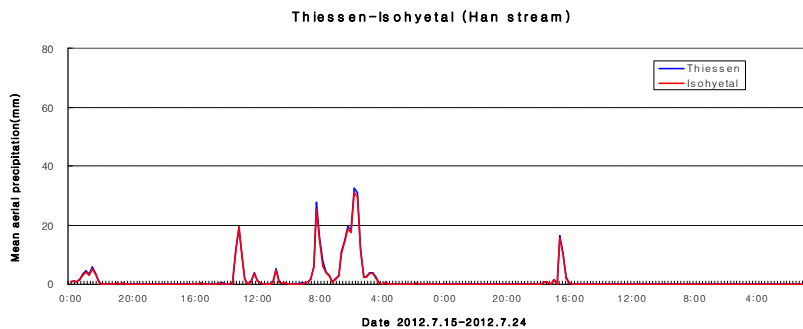
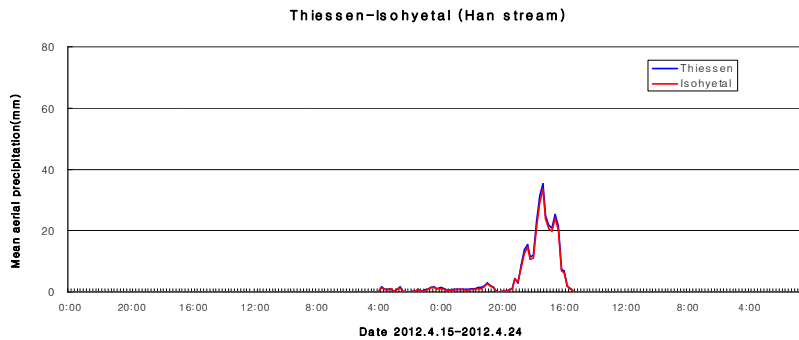
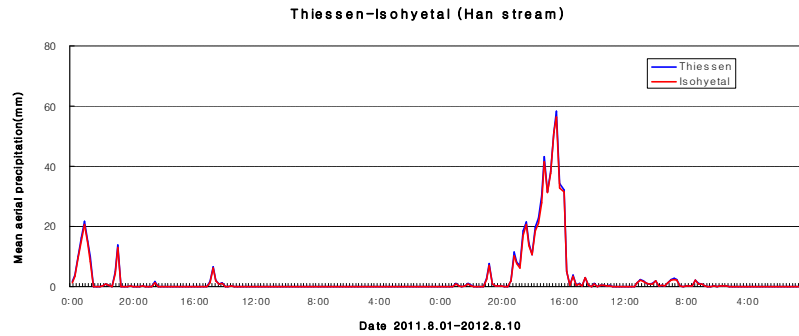
Fig. 4.7 Mean areal rainfall by heavy rain concept using isohyetal method

강우 사상에 따른 총 강우량의 Thiessen방법과 등우선법의 오차는 한천의 경우  $4.4\% \sim 6.5\%$ 로 분석되었으며, 외도천의 경우  $5.5\% \sim 7.2\%$ 로 분석되었다(Table 4.8). 전체적으로 Thiessen 방법에 의한 유역평균 방법이 등우선법에 의한 방법보다 크게 산정되었으며, 이러한 결과는 Thiessen 다각형의 분포 면적 중에서 고지대에 위치한 관측지점 (어리목, 윗세오름, 진달래밭)이 높은 비율(한천 66.53%, 외도천 81.41%)을 차지하고 있기 때문이다. 한천유역과 외도천유역의 두 방법의 유역평균 강우량을 산정한 결과는 Fig 4.8 ~ Fig. 4.9와 같다.



Table 4.8 Error of total rainfall according to rainfall events of Thiessen method and isohyetal method

강우사상	한천유역			외도천유역		
	Thiessen (mm)	등우선 (mm)	오차 (%)	Thiessen (mm)	등우선 (mm)	오차 (%)
2011.08.01 - 08.10	629.59	599.29	4.8	680.72	633.62	6.9
2012.04.15 - 04.24	328.47	307.03	6.5	311.47	288.99	7.2
2012.07.15 - 07.24	341.25	320.59	6.1	346.93	324.15	6.6
2012.08.22 - 09.02	1,093.65	1,034.25	5.4	1,076.54	1,017.10	5.5
2012.09.11 - 09.20	717.65	685.85	4.4	680.77	633.41	7.0



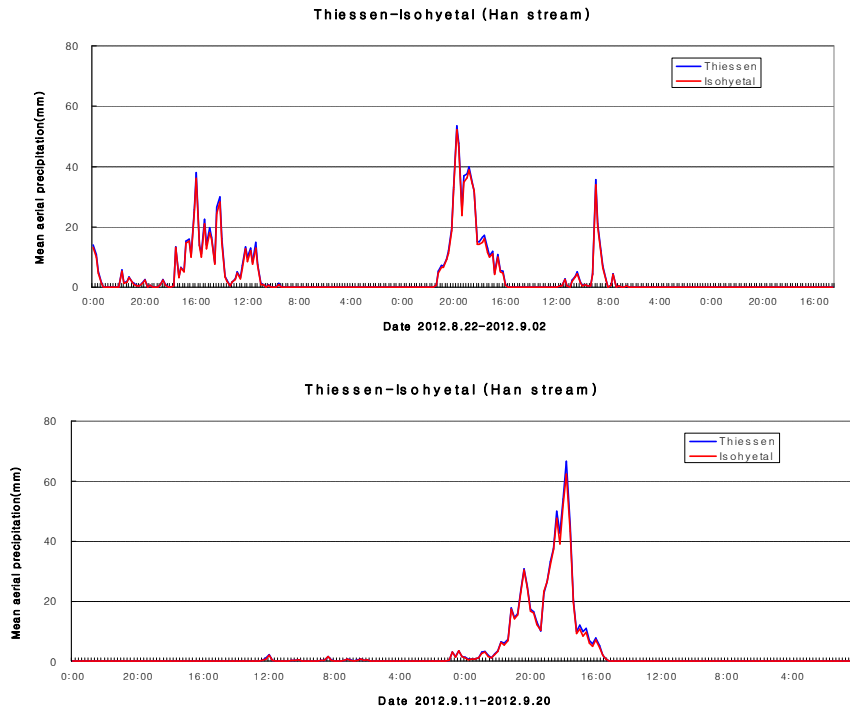
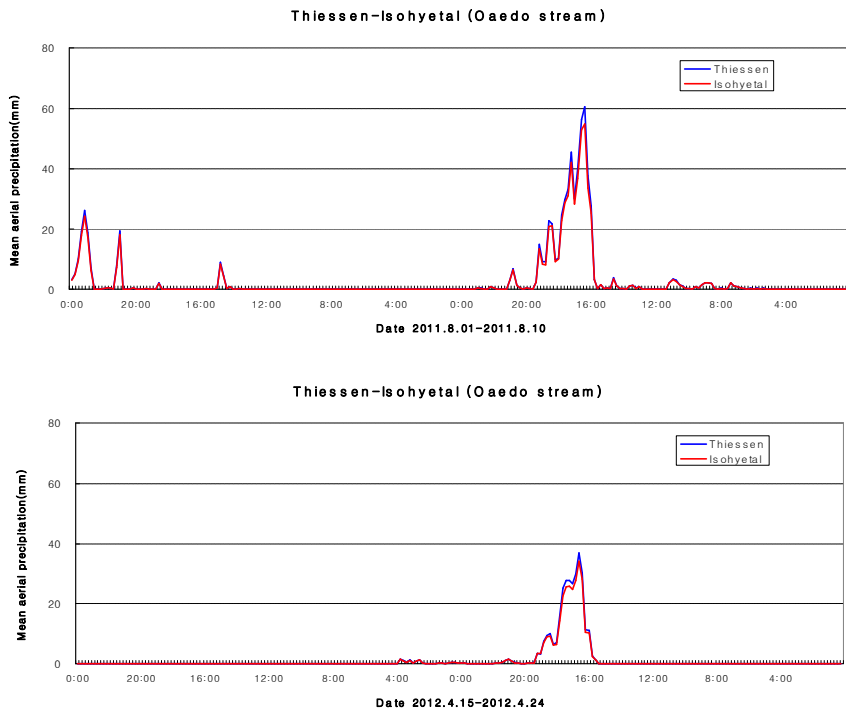


Fig. 4.8 Comparison of Thiessen method and isohyetal method results of Han Steam



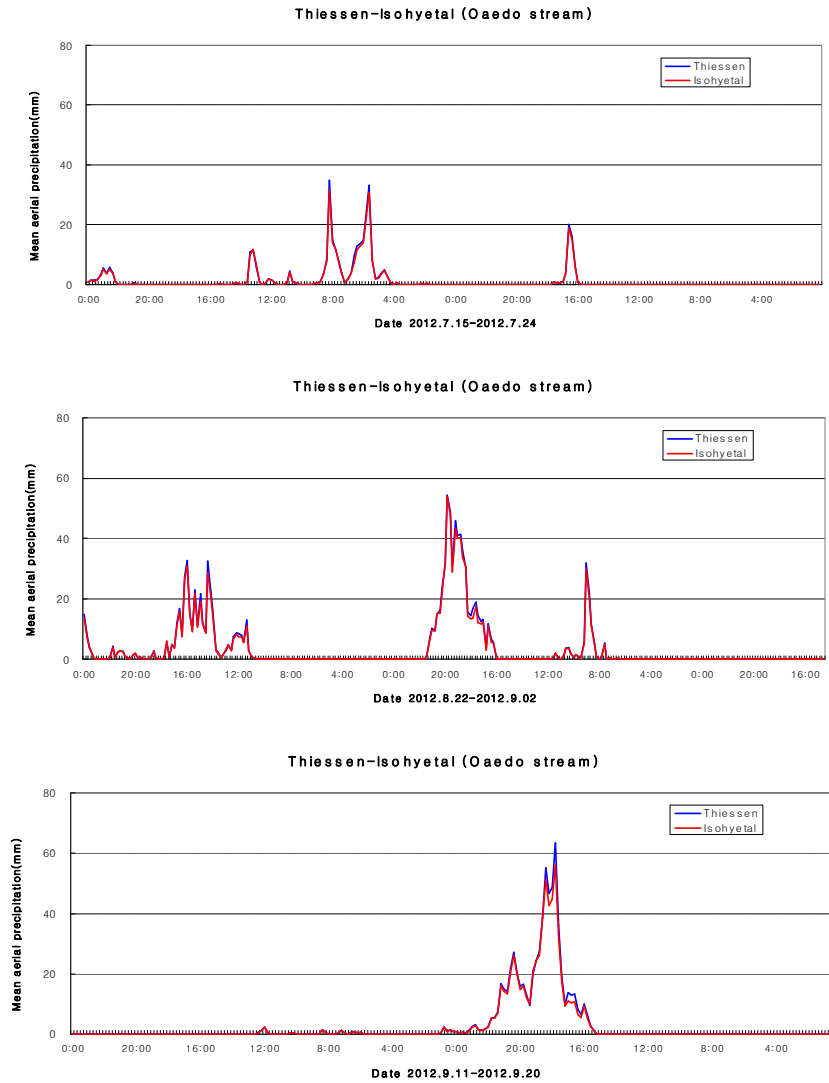


Fig. 4.9 Comparison of Thiessen method and isohyetal method results of Oaedo Steam

한천유역과 외도천유역의 Thiessen방법과 등우선법을 비교·분석한 결과를 이용하여 각 유역의 Thiessen-등우선 변환식을 도출하였다(Fig. 4.10 ~ Fig. 4.11). 한천유역의 변환식은  $R_i = 0.8996R_t^{1.0174}$  으로 도출되었으며, 결정계수  $R^2$ 은 0.997 이며, 외도천 유역의 변환식은  $R_i = 0.9526R_t^{0.9923}$ 이며 결정계수  $R^2$ 은 0.992로 산정되었다. 여기서,  $R_i$ 는 등우선법에 의한 유역평균 강우량이며,  $R_t$ 는 Thiessen 방법에 의한 유역평균 강우량이다(Table 4.9).

제주도는 대부분의 호우 사상이 Fig. 4.7의 (a)의 경향을 보이고 있으며, 본 연구에서 산정된 Thiessen-등우선 변환식은 Fig. 4.7의 (a), (b), (c) 의 모든 경우에 대

하여 통합적으로 산정된 결과이다. 통합적으로 산정된 결과이지만 (a)의 경향이 대부분 반영된 결과이며, 향후 다양한 강우사상의 관측자료를 수집하고 등우선도를 작도하여 (b), (c)의 경향에 대한 산정식을 도출하여야 할 것으로 판단된다.

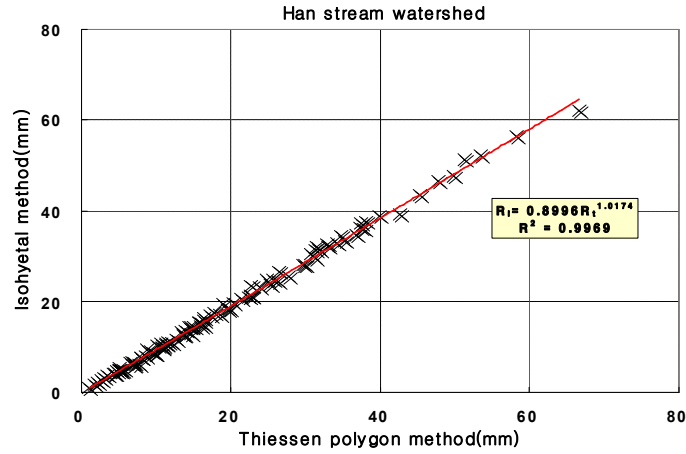


Fig. 4.10 Thiessen-isohyetal method transformation of Han Stream

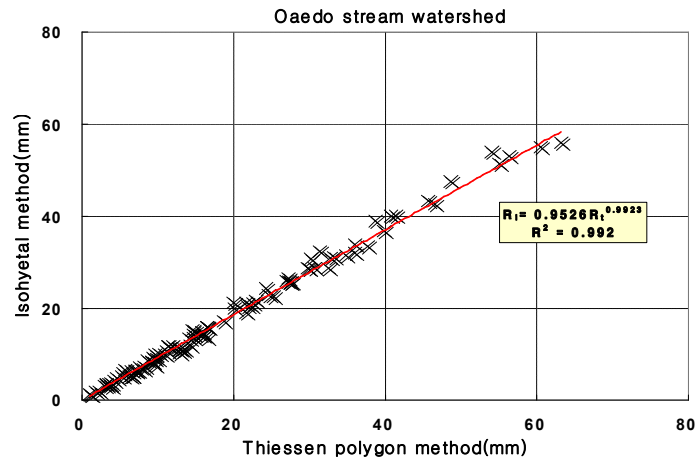


Fig. 4.11 Thiessen-isohyetal method transformation of Oaedo Stream

Table 4.9 Thiessen-isohyetal method transformation

구분	적용 강우 (Thiessen)	Thiessen-등우선 변환식	$R^2$
한천유역	$1.05\text{mm} < R < 66.68\text{mm}$	$R_i = 0.8996R_t^{1.0174}$	0.997
외도천유역	$1.17\text{mm} < R < 63.24\text{mm}$	$R_i = 0.9526R_t^{0.9923}$	0.992

## 2. 유역의 초기손실 추정

### 2.1 NRCS-CN 방법을 이용한 유효우량 산정

NRCS(미국자연환경보호청)에서 개발한 방법으로 유출량 자료가 없는 경우에도 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 직접유출량을 산정할 수 있도록 개발한 방법이며, NRCS는 총우량과 직접유출량과의 관계를 식 (4.1)과 같이 나타냈다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P \geq I_a \quad (4.1)$$

$$Q = 0 \quad P < I_a$$

$P$ : 호우별 총 강우량(mm),  $I_a$ : 초기손실(mm)

$S$ : 유역의 최대잠재보유수량(mm),  $Q$ : 직접유출량에 해당하는 유효우량(mm)

#### 2.1.1 유출곡선지수 CN 산정

NRCS 방법에서는 총우량 중에서 유효우량에 영향을 미치는 토양의 종류 및 지표의 이용 상태를 고려하여 유출곡선지수 CN을 결정한 후 직접유출량을 산정하고 있다. 유출곡선지수 CN을 산정하기 위하여 토지피복현황은 환경부 중분류 토지피복자료를 이용하여 분석하였으며, 토양도는 농업과학기술원의 토양통 분류자료를 이용하여 분석하였다(Fig. 4.12).

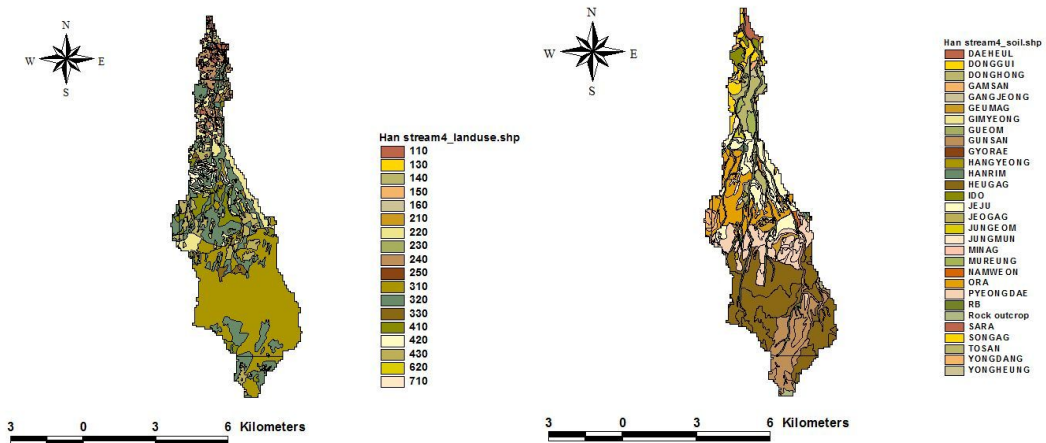


Fig. 4.12 Land use map and soil map of Han Stream

Table 4.10 Analysis result of land cover in Han Stream watershed

중분류 토지구분	토지이용구분	면적( $m^2$ )	비율(%)
310	활엽수림	15,683,536	42.76
320	침엽수림	8,594,100	23.43
220	밭	3,351,657	9.14
430	기타초지	2,758,898	7.52
410	자연초지	1,891,614	5.16
240	과수원	1,676,167	4.57
420	골프장	817,878	2.23
110	주거지역	492,869	1.34
150	교통지역	396,079	1.08
330	혼효림	366,905	1.00
620	기타나지	222,626	0.61
기타	기타	429,577	1.17
합 계		36,681,907	100

한천유역의 토지피복자료를 분석한 결과 산림이 66.18%, 초지 12.68%, 밭 9.14%, 과수원 4.57%로 나타났으며(Table 4.10), 토양도를 분석한 결과 흑악토 29.40%, 균산토 12.35%, 평대토 10.93%, 오라토 10.34%로 나타났다(Table 4.11).

Table 4.11 Analysis result of soil map in Han Stream watershed

토양통	면적	비율(%)	수문학적 토양군
HEUGAG	10,782,797	29.40	A
GUNSAN	4,531,801	12.35	B
PYEONGDAE	4,011,071	10.93	C
ORA	3,791,482	10.34	C
JEJU	3,478,189	9.48	C
RB	2,319,219	6.32	C
DONGHONG	1,957,829	5.34	C
DONGGUI	1,182,504	3.22	C
JUNGMUN	788,477	2.15	C
GEUMAG	672,543	1.83	A
IDO	568,464	1.55	C
MUREUNG	442,934	1.21	D
GAMSAN	385,017	1.05	A
SONGAG	340,188	0.93	C
SARA	319,239	0.87	B
HANRIM	144,194	0.39	A
YONGDANG	113,300	0.31	B
기타	852,660	2.32	-
합계	36,681,907	100	-

한천유역의 수문학적 토양군을 분석한 결과 침투율이 대체로 작고, 세사질 토양층이며 배수가 대체로 불량한 C 그룹의 토양이 50.81%로 나타났으며, A 그룹의 토양이 32.88%, B 그룹의 토양이 14.75%, D 그룹의 토양이 1.56%로 나타났다.

외도천 유역도 한천유역과 함께 토지피복현황을 환경부 중분류 토지피복자료를 이용하여 분석하였으며, 토양도는 농업과학기술원의 토양통 분류자료를 이용하여 분석하였다(Fig. 4.13).



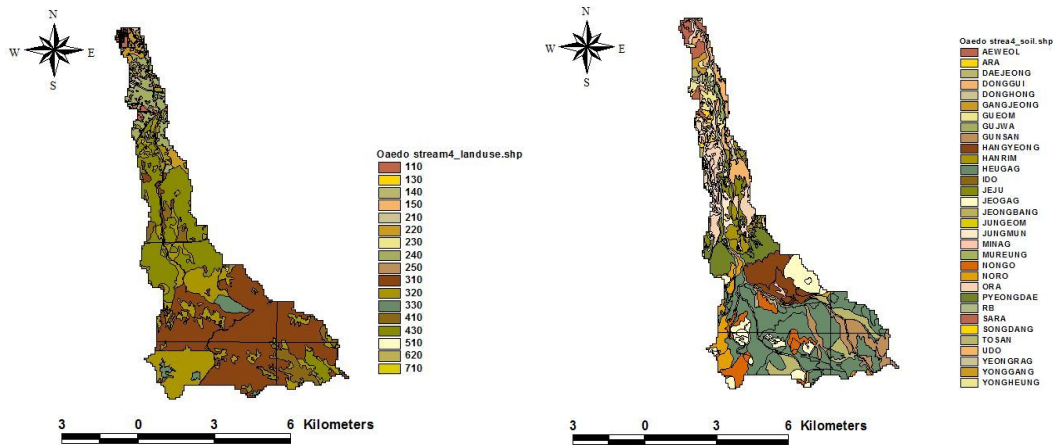


Fig. 4.13 Land use map and soil map of Oaedo Stream

Table 4.12 Analysis result of land cover in Han Stream watershed

중분류 토지구분	토지이용구분	면적 ( $m^2$ )	비율 (%)
310	활엽수림	16,914,062	38.03
320	침엽수림	9,643,407	21.68
430	기타초지	9,596,162	21.58
240	과수원	2,676,956	6.02
410	자연초지	1,845,189	4.15
220	밭	1,165,659	2.62
330	혼효림	939,805	2.11
110	주거지역	627,036	1.41
150	교통지역	369,096	0.83
620	기타나지	311,810	0.70
기타	기타	383,088	0.86
합 계		44,472,269	100

한천유역의 토지피복자료를 분석한 결과 산림이 59.72%, 초지 25.73%, 과수원 6.02%, 밭 2.62%로 나타났으며(Table 4.12), 토양도를 분석한 결과 흑악토 27.55%, 적악토 6.93%, 오라토 6.77%으로 나타났다(Table 4.13).

Table 4.13 Analysis result of soil map in Oaedo Stream watershed

토양통	면적	비율(%)	수문학적 토양군
HEUGAG	12,253,031	27.55	A
JEOGAG	3,080,720	6.93	A
ORA	3,011,535	6.77	C
HANGYEONG	2,973,512	6.69	B
GUNSAN	2,807,863	6.31	B
PYEONGDAE	2,495,464	5.61	C
TOSAN	2,035,565	4.58	C
NONGO	1,996,623	4.49	B
NORO	1,816,855	4.09	B
RB	1,801,047	4.05	C
HANRIM	1,576,242	3.54	A
JUNGMUN	1,481,144	3.33	C
JEJU	1,443,035	3.24	C
DONGGUI	1,161,997	2.61	C
YONGHEUNG	1,018,426	2.29	D
UDO	738,527	1.66	D
SARA	521,367	1.17	B
기타	2,259,317	5.08	-
합계	36,681,907	100	-

외도천유역의 수문학적 토양군을 분석한 결과 유출율이 매우 낮고, 침투율이 크고, 모래와 자갈질 토양이며, 배수가 매우 양호한 A 그룹의 토양이 39.47%로 나타났다. C 그룹의 토양이 31.80%, B 그룹의 토양이 23.10%, D 그룹의 토양이 5.63%로 나타났다.

농업과학기술원(2006)에서 우리나라 토양에 대한 객관적이고 실질적인 수문학적 토양유형 분류를 위해서 토양의 침투 및 투수속도 측정자료에 기반하여 정정화 등(1995)에 의한 토양도의 투수성을 보완하였다. 본 연구에서는 농업과학기술원의 자료를 이용하였으며, 한국지질자원연구원(2011)의 “제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴 보고서”의 토지피복분류항목에 대한 CN(AMC-II)값을 적용하였다(Table 4.14).

Table 4.14 CN(AMC-II) on land cover categorization items

토지피복코드	토지피복	A	B	C	D
110	주거지역	58	73	82	86
130	상업지역	95	96	97	97
140	위락시설지역	95	96	97	97
150	교통지역	89	91	93	94
160	공공시설지역	81	88	91	93
210	논	78	78	78	78
220	밭	64	75	82	86
230	하우스재배지	98	98	98	98
240	과수원	44	66	77	83
250	기타재배지	59	74	82	86
310	활엽수림	47	67	78	85
320	침엽수림	46	68	79	86
330	혼효림	47	68	79	86
410	자연초지	30	58	71	78
420	골프장	52	70	80	85
430	기타초지	52	70	80	85
510	내륙습지	98	98	98	98
620	기타나지	77	86	91	94
710	내륙수	100	100	100	100

한국지질자원연구원, 2011, 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴 보고서

NRCS에서 개발한 유출곡선지수 CN값은 미국의 중서부 지역과 같이 경사도 5% 미만에서의 유출량 산정에 적합한 방법으로 이보다 경사가 큰 지역에서는 지형경사도에 대한 보정이 필요하다. 지형 경사도를 고려한 CN값 보정에 대해서는 국내외 여러 연구자들에 의해서 연구되었으며, 대표적인 경험식으로는 Sharpley and Williams(1990)에 의해서 개발된 식(4.3)과 Huang et al.(2006)에 의한 식(4.4)가 있다.

$$CN_{II\ S} = \frac{(CN_{III} - CN_{II})}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot slp)] + CN_{II} \quad (4.2)$$

$$CN_{II\alpha} = CN_{II} \frac{322.79 + 15.63(\alpha)}{\alpha + 323.52} \quad (4.3)$$

$\alpha$ : 지형경사(%)

본 연구에서는 Sharpley and Williams(1990)에 의하여 개발된 식을 이용하였으며, 고도에 따른 소유역을 구분하여 5% 이상의 경사지역에 대하여 CN을 보정하여 적용한 결과는 Table 4.15와 같다.

Table 4.15 Runoff curve number CN(AMC-II) of Han Stream watershed and Oaedo Stream watershed

구분	한천			외도천	
	소유역1 (경사 3.2%)	소유역2 (경사 6.1%)	소유역3 (경사 13.3%)	소유역1 (경사 4.6%)	소유역2 (경사 11.7%)
고도보정 전 CNII	81.20	76.32	63.60	76.07	59.93
고도보정 후 CNII	81.20	76.87	67.34	76.07	63.47

한천은 3개의 소유역으로 분할하여 CN에 대하여 경사 보정을 수행하였으며, 소유역1 지점은 경사가 5% 미만이므로 경사 보정을 수행하지 않았다. 소유역2 지점에서는 CN이 0.55 증가하고, 소유역3 지점에서는 CN이 3.74 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 외도천은 총 2개의 소유역으로 분할하여 경사 보정을 수행하였으며, 경사가 5% 이상인 소유역2 지점을 대상으로 보정한 결과 CN이 3.54 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 유출곡선지수 CN은 경사가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 제주도와 같이 경사가 급한 유역에서는 반드시 경사보정을 수행하여야 한다.

산정된 선행토양함수조건(AMC-II)의 CN값을 이용하여 AMC-I, AMC-III 조건으로의 변환식을 이용하여 각 소유역별 선행토양함수조건에 따른 유출곡선지수를 계산하였다.

Table 4.16 Runoff curve number according to advanced soil moisture condition

AMC 조건	한천			외도천	
	소유역1	소유역2	소유역3	소유역1	소유역2
AMC-I	64.46	57.51	42.32	57.18	42.19
AMC-II	81.20	76.87	67.34	76.07	63.47
AMC-III	90.85	88.11	80.07	87.97	79.98

### 2.1.2 NRCS-CN 방법을 이용한 유효우량 산정

각 유역의 토지이용상태 및 토양형별 CN값에 해당하는 면적 가중인자로 곱하여 합산한 후 해당 토지이용면적 상태로 나누어 토지이용상태별 CN값(AMC-II)을 산정하였으며, 선행함수조건 별 CN 값을 도출하여 2008년-2012년까지 5개년도 기간에 대하여 NRCS-CN 방법을 이용하여 유효우량을 산정하였다(Fig. 4.14~4.15). 각 유역의 초기손실을 0.2S로 설정하여 계산하였으며, 해당기간 동안의 각 유역별 수문총량에 따른 유출율은 Table 4.17~4.18과 같다.

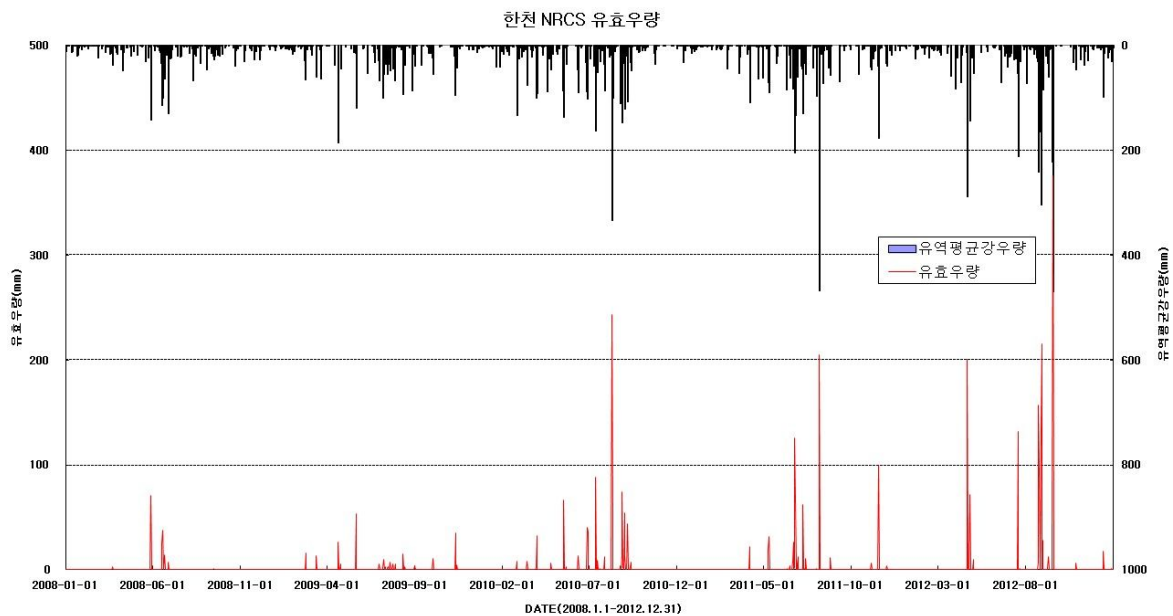


Fig. 4.14 Effective NRCS rainfall of Han stream(2008-2012)

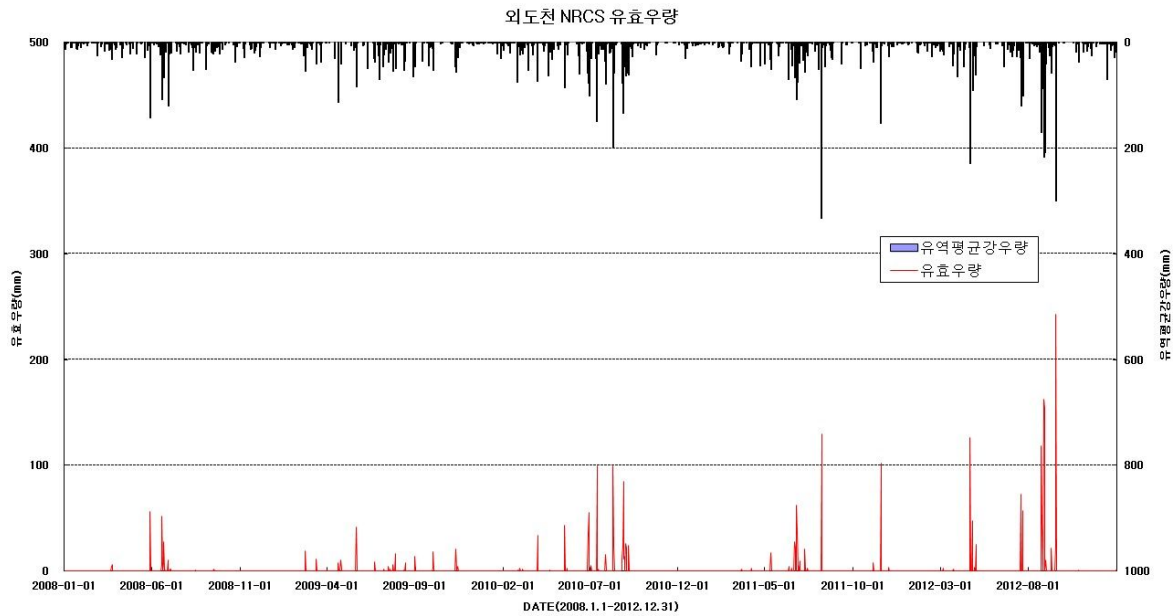


Fig. 4.15 Effective NRCS rainfall of Oaedo stream(2008-2012)

Table 4.17 Calculation of NRCS effective rainfall of Han Stream watershed

년도	한천 유역		
	유역평균강우량(mm)	유효우량(mm)	유출율(%)
2008	2,115.6	164.15	7.76
2009	2,546.7	232.12	9.11
2010	3,982.6	833.23	20.92
2011	3,685.1	731.34	19.85
2012	4,592.9	1,521	33.13

Table 4.18 Calculation of NRCS effective rainfall of Oaedo Stream watershed

년도	한천 유역		
	유역평균강우량(mm)	유효우량(mm)	유출율(%)
2008	1,946.5	178.95	9.19
2009	1,973.4	199.79	10.12
2010	2,940.6	645.14	21.94
2011	2,391.4	461.5	19.30
2012	3,306.6	1,115.9	33.75

한천 유역의 NRCS 유효우량을 산정한 결과 7.76~33.13%까지의 유출율을 나타내고 있으며, 외도천 유역은 9.19~33.75% 까지 유출율을 보이고 있다.

## 2.2 관측자료와 NRCS-CN 방법을 이용한 유역의 초기손실 분석

NRCS에서 초기손실  $I_a$ 는 유출이 시작되기 전에 생기는 차단, 침투, 지면저류 등을 포함하며 최대 잠재보유수량  $S$ 와는 식 (4.4)와 같은 관계를 가진다고 가정하였다. 현재 제주도에서 유효우량 즉, 직접유출량을 산정하는 방법으로 NRCS 방법을 주로 채택하여 사용하고 있으며, 식 (4.4)를 이용하여 초기손실을 산정하고 있다.

$$I_a = 0.2S \quad (4.4)$$

그러나 국토해양부 설계홍수량 산정요령(안)에서는 제주도와 같이 투수성이 좋은 지질학적 특성을 가진 지역에서는 NRCS-CN 방법을 이용하여 유효우량을 산정할 경우 초기손실에 대하여 기존  $I_a = 0.2S$  에서 대폭 상향조정하는 방법을 도입하는 것을 추천하고 있다.

본 연구에서는 2008년부터 2012년까지 제주도의 관측자료를 이용하여 유량(수문 곡선 전체가 보유된 사상)의 총합과  $I_a = 0.2S$  로 산정된 유효우량(1지점 수위-유속 관측자료가 보유된 사상)의 총합을 비교·분석하여 제주도에 적합한 초기손실  $I_a$ 와 최대 잠재보유수량  $S$ 와의 관계를 추정하였다. 초기손실을  $I_a = 0.2S$ 에서부터 5%의 비율로 증가시켜 관측값의 총합과 계산된 유효우량의 총합을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 4.16~4.17과 같다.

년도별 유효우량을 산정하여 연도별 유출량과 비교하여 초기손실을 비교하면 보다 정확한 초기손실을 추정할 수 있으나, 현실적으로 관측자료의 결측치가 존재하여 년단위로 비교할 수 없다. 또한 NRCS 유효우량은 5일 선행강우에 따른 토양함수조건을 고려하여 일단위 유효우량을 도출하지만, 실제 하천의 유출이 발생하면 1일에 끝나지 않는 경우가 많아서 총합으로 비교·분석하였다.



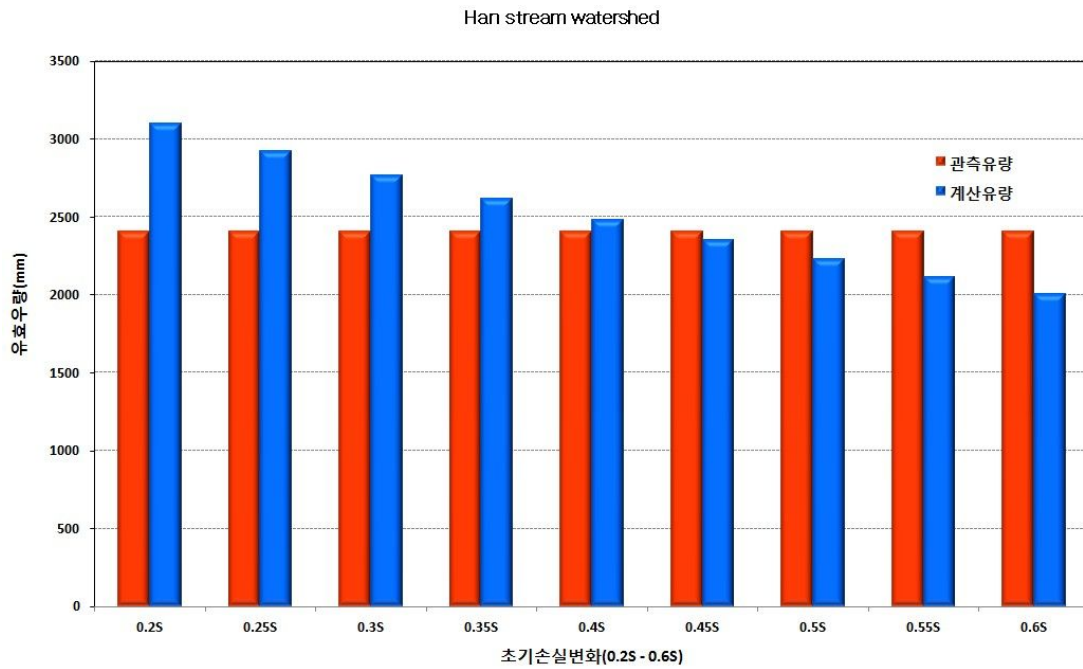


Fig. 4.16 Effective rainfall according to change of initial abstraction(Han stream watershed)

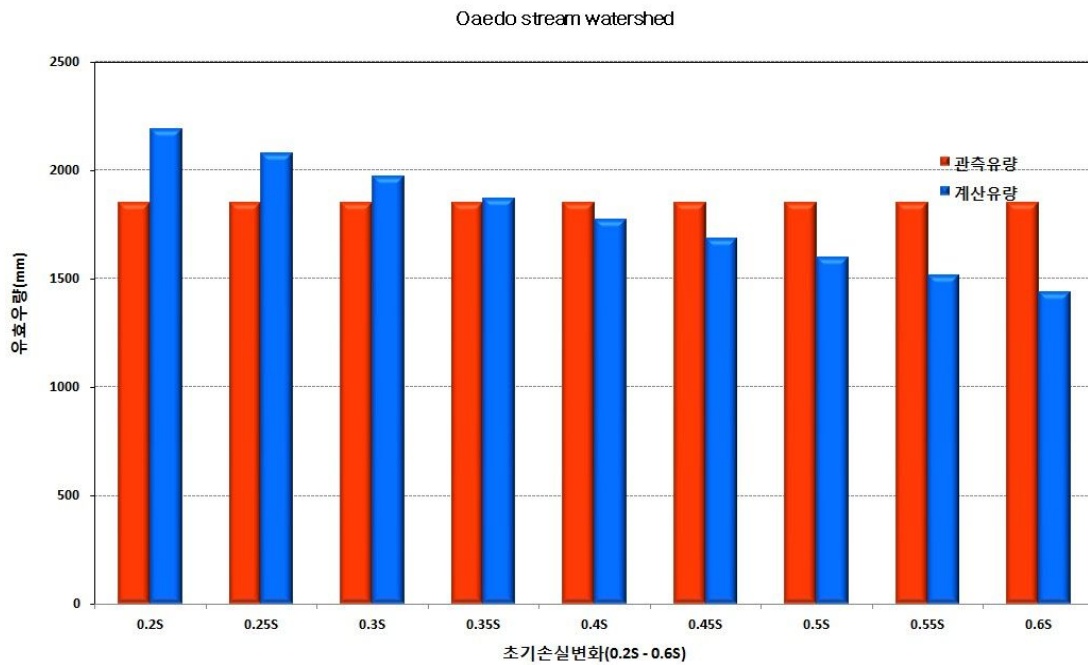


Fig. 4.17 Effective rainfall according to change of initial abstraction(Oaedo stream watershed)

한천유역의 초기손실 변화(0.2S~0.6S)에 따른 관측유량과 계산유량을 비교한 결과 오차가 5% 미만으로 발생하는 구간은 0.4S~0.45S 로 나타났으며, 외도천 유역의 오차가 5% 미만으로 발생하는 구간은 0.35S~0.4S 로 나타났다.

국내 내륙지역의 하천은 평상시 기저유량으로 인하여 유출이 유지되고 있기 때문에  $I_a = 0.2S$ 를 적용하여 유효우량을 산정한다. 그러나 제주도와 같은 간헐천 유역에서는  $I_a = 0.2S$ 를 적용할 경우 최대잠재보유수량( $S$ )의 20% 손실이 발생한 후에도 유출은 발행하지 않기 때문에 그대로 적용할 수 없다. 본 연구에서는 관측자료를 기반으로 추정된 초기손실( $I_a = 0.4S$ )을 모델에 적용하였다. 향후 강우-초기손실-유출 관계를 규명하기 위한 다양한 토양수분 변화량 관측을 수행하여 도출하여야 보다 정확한 제주도의 초기손실을 규명할 수 있을 것이다.

Table 4.19 Calculation of effective rainfall according to change of initial abstraction of Han Stream watershed

초기손실 변화	관측유량(mm)	계산유량(mm)	오차
0.2 S	2409.83	3098.45	-28.58%
0.25 S	2409.83	2925.33	-21.39%
0.3 S	2409.83	2766.62	-14.81%
0.35 S	2409.83	2619.25	-8.69%
0.4 S	2409.83	2482.06	-3.00%
0.45 S	2409.83	2352.77	2.37%
0.5 S	2409.83	2231.32	7.41%
0.55 S	2409.83	2117.07	12.15%
0.6 S	2409.83	2008.45	16.66%

Table 4.20 Calculation of effective rainfall according to change of initial abstraction of Oaedo Stream watershed

초기손실 변화	관측유량(mm)	계산유량(mm)	오차
0.2 S	1852.46	2191.63	-18.31%
0.25 S	1852.46	2076.97	-12.12%
0.3 S	1852.46	1969.33	-6.31%
0.35 S	1852.46	1868.38	-0.86%
0.4 S	1852.46	1774.12	4.23%
0.45 S	1852.46	1684.38	9.07%
0.5 S	1852.46	1598.67	13.70%
0.55 S	1852.46	1517.23	18.10%
0.6 S	1852.46	1439.12	22.31%

### 3. Muskingum 하도추적법 매개변수 산정

#### 3.1 하도추적구간 선정

Muskingum 방법은 하도의 추적구간내 저류량이 미치는 홍수유입량의 영향을 고려하기 위하여 구간내 총 저류량을 대형저류량과 썰기저류량으로 구분하여 대형저류량은 유출량에만 비례하나 썰기저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정하여 하도추적하는 방법이다.

Muskingum 하도추적은 식(2.43)에서 식(2.45)까지 이용하여 이루어지며, 유입량과 유출량, 계산시간간격까지는 이미 정해져 있는 값이므로 매개변수  $K$ 와  $x$ 값만 기왕의 홍수자료로부터 결정하면 홍수추적이 가능하다.

국토해양부 설계홍수량 산정요령(안)에서는 매개변수  $K$ 는 Muskingum 방법의 저류상수로서 추적구간의 홍수와 통과시간을 주로 사용하며, 자연하천의 홍수와 통과시간은 하도의 유하시간의 2/3을 적용한다. 홍수의 저류효과 정도를 결정하는 무차원 가중계수  $x$ 값은 0-0.5 범위를 가지며,  $x$  값은 민감도가 아주 낮으므로 평균값인 0.2를 채택하면 무난하다고 제시하고 있다.

그동안 제주도 한천 및 외도천 유역의 하천기본계획 수립 시 2001년도 수립 당시까지는 하도추적 방법에 대한 어떠한 내용도 서술되지 않았으며, 2009년도 수립시에 미계측 유역에서 사용하는 방법을 이용하여 유역 추적구간의 평균유속을 적용한 도달시간( $T_c$ )을 저류상수로 사용하여 하도추적을 수행하였다.

본 연구에서는 현재 하천정비기본계획 및 유출량 산정 관련 다양한 연구에서 추천하고 실제 제주도 하천에 적용된 Muskingum 방법을 이용하여 하도추적을 수행하였으며, 실제 제주도 하천의 Muskingum 방법 매개변수를 산정하여 모델에 적용하였다. 2007년도 이후에 제주도에서 설치·운영 중인 1지점 수위-유속 관측자료의 상하류 추적구간내 관측자료를 이용하여 Muskingum 방법의 매개변수  $K$ 와  $x$ 를 산정하였다.

매개변수  $K$ 와  $x$ 를 산정하기 위하여 한천유역에서는 제4한천교, 한천교의 1지점 수위-유속 관측 자료 중에서 유출수문곡선 전체가 관측된 사상을 대상으로 매개변

수를 산정하였으며, 외도천유역에서는 제2광령교, 외도정수장 관측자료를 이용하여 산정하였다(Fig. 4.18). 한천유역의 2지점을 하도추적구간으로 선정한 이유는 중류부에서 한천에 제1지류인 토천이 합류되기 때문에 상류지역의 관측지역으로부터 하류부까지의 하도추적은 불가능하다고 판단되었기 때문이며, 외도천 유역은 상류부 지역의 제2광령교 지점과 하류부 외도정수장까지 지류가 존재하지 않기 때문에 하도추적구간으로 선정하였다.

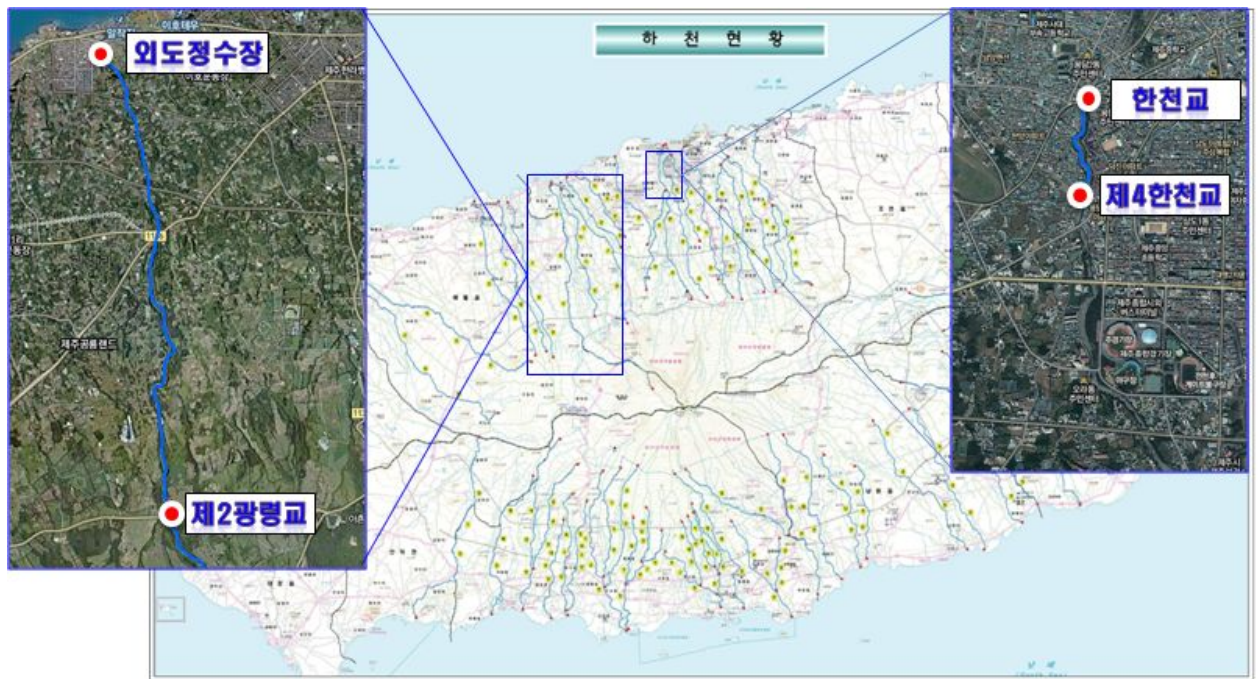


Fig. 4.18 Routing section of Muskingum watershed

## 3.2 Muskingum 매개변수( $K, x$ ) 산정

### 3.1.1 유역별 유입-유출곡선 구축

한천과 외도천의 하도추적구간의 관측자료를 이용하여 유입-유출수문곡선을 구축하였으며, 관측자료 중에서 유출수문곡선이 확보되는 사상을 대상으로 구축하였다. 제4한천교 지점은 2007년부터 1지점 수위-유속을 관측하고 있으나 한천교 지점은 2012년부터 관측을 수행하고 있어 유입-유출수문곡선을 구축하기 위하여 2012년 사상을 대상으로 유출수문곡선을 확보하였다(Fig 4.19).

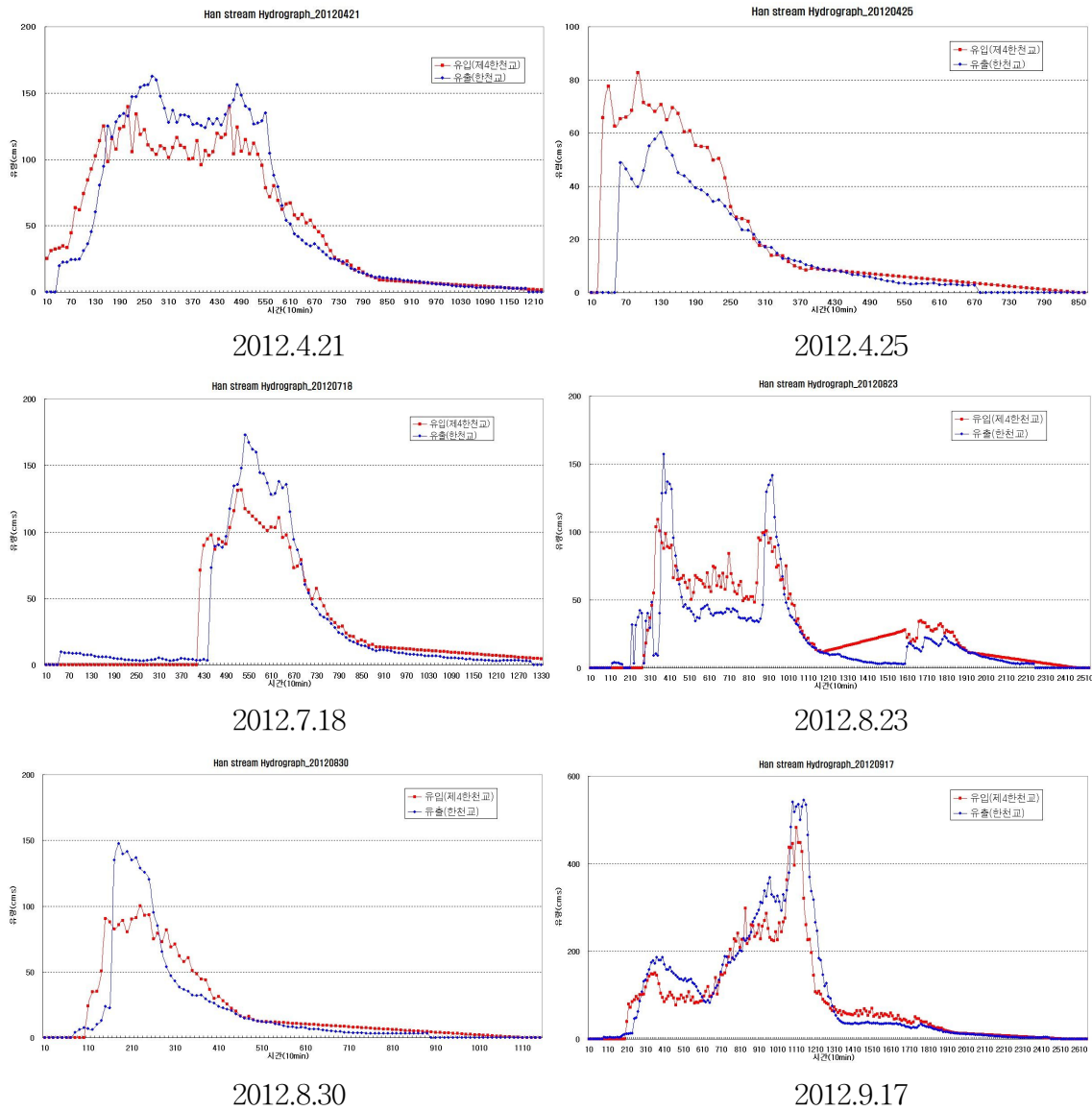
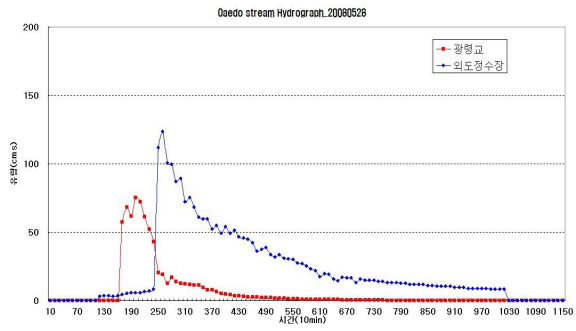


Fig. 4.19 Inflow-discharge hydrograph of Han Stream watershed

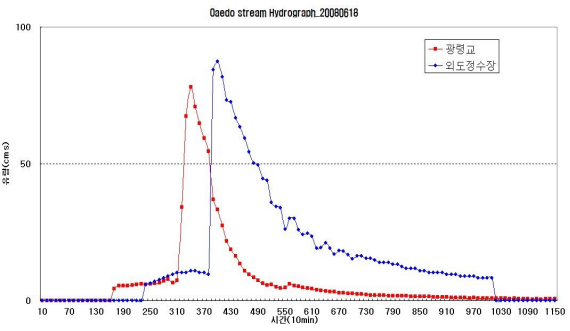
2012년 관측된 사상 중에서 유출수문곡선 전체를 확보할 수 있는 사상을 대상으로 유입-유출수문곡선을 작성하였다. 전 사상에 대하여 유입(제4한천교)-유출(한천교) 수문곡선이 비슷한 경향을 보이고 있으며 이는 홍수추적구간 유로길이가 550m 정도로 매우 가깝기 때문이다.

외도천 유역의 제2광령교와 외도정수장 유역의 관측자료를 2008년부터 2012년까지 확보하였으며, 관측자료 중에서 상승기와 하강기 전체유출수문곡선이 결측치 없이 확보되는 사상에 대하여 유입-유출수문곡선을 구축하였다(Fig. 4.20).

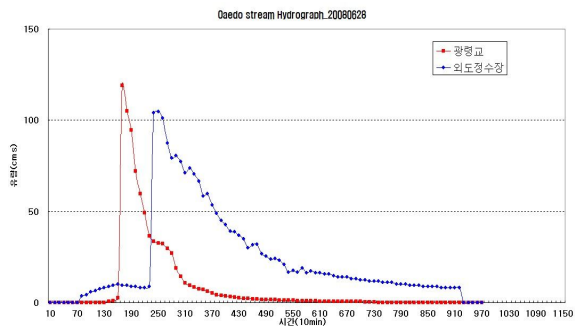




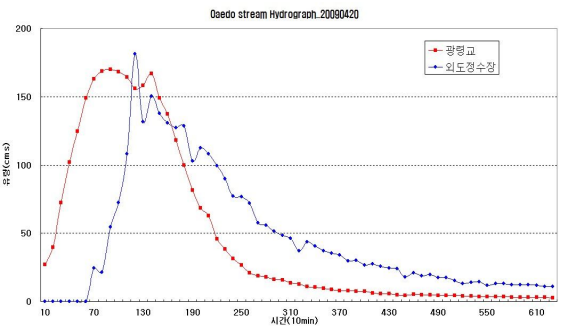
2008.5.18



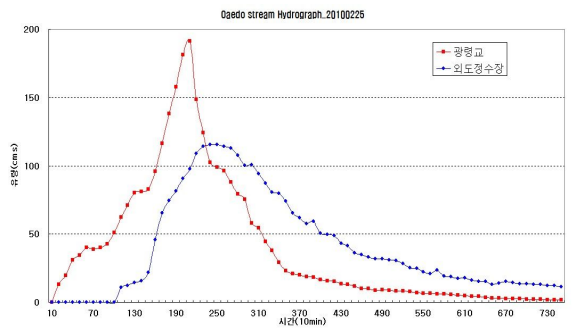
2008.6.18



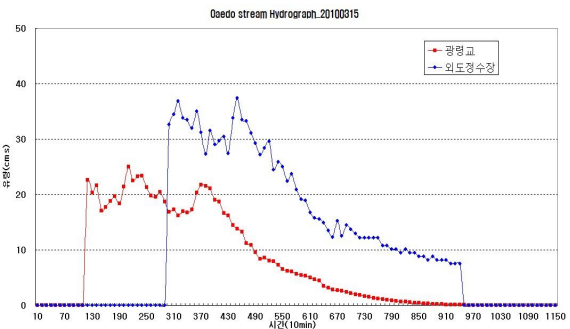
2008.6.28



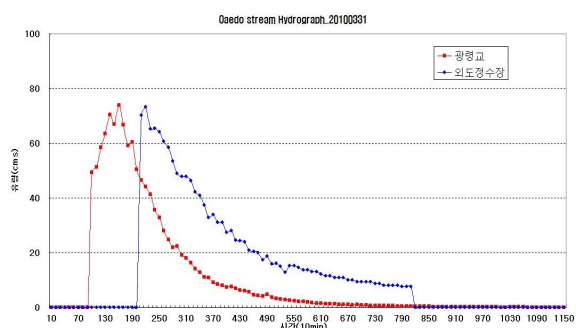
2009.4.20



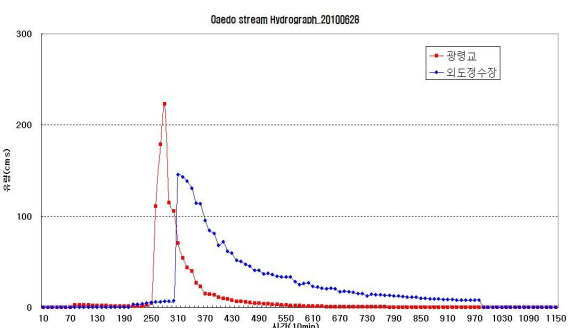
2010.2.25



2010.3.15



2010.3.31



2010.6.28

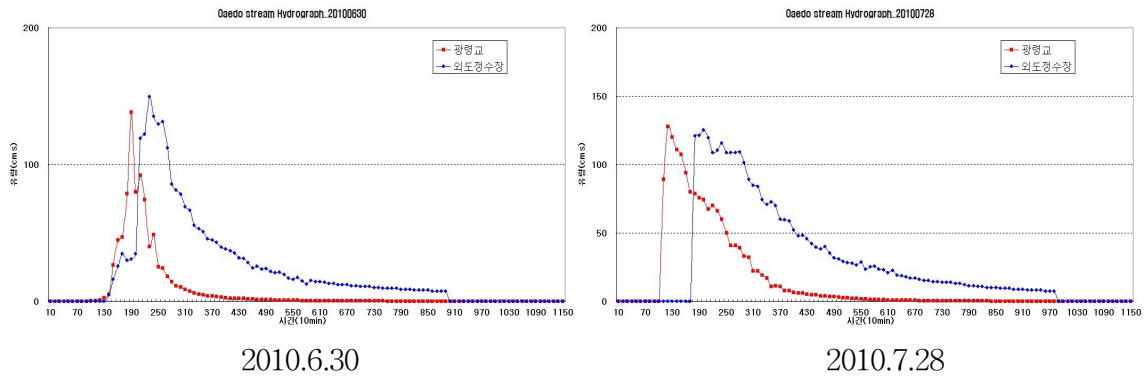


Fig. 4.20 Inflow-discharge hydrograph of Oaedo Stream watershed

제2광령교와 외도정수장 지점에서 2008년-2012년까지 발생한 사상 중에서 두 지점의 유출수문곡선 전체가 확보되는 사상에 대하여 유입-유출 수문곡선을 구축하였다. 지점간의 거리가 약 10km 차이가 나는 두 지점의 수문곡선 구축 결과 선정된 사상의 수문곡선의 약간의 시간 차이를 두며 비슷한 경향을 보이고 있다.

### 3.1.2 가중저류량과 누가저류량에 따른 매개변수 결정

유입-유출수문곡선을 이용하여 Muskingum 방법의 매개변수  $K$ 와  $x$ 를 산정하는 방법은 유입-유출수문곡선을 사용하여 저류량의 증감변화와 저류량의 누가곡선을 작성하고 무차원 가중계수  $x$ 를 가정하여 Fig. 4.21과 같이  $[xI+(1-x)O]$ 와 저류량의 누가곡선이 가장 직선에 가까워지는  $x$ 를 채택하고 그 직선의 기울기를  $K$  값으로 결정한다.

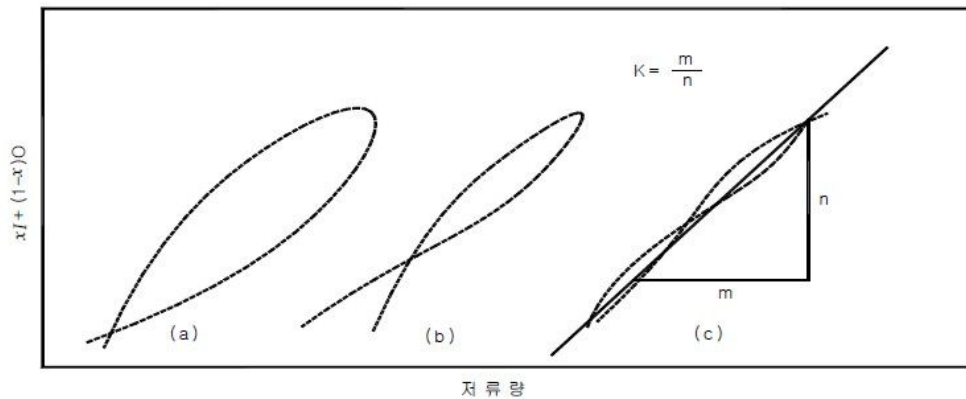
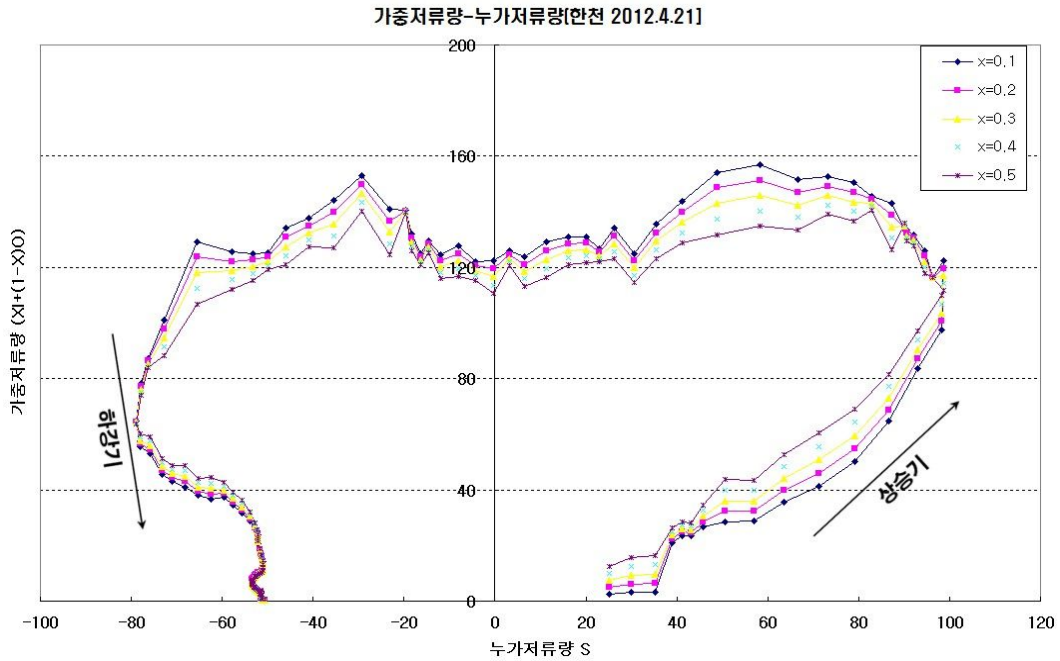


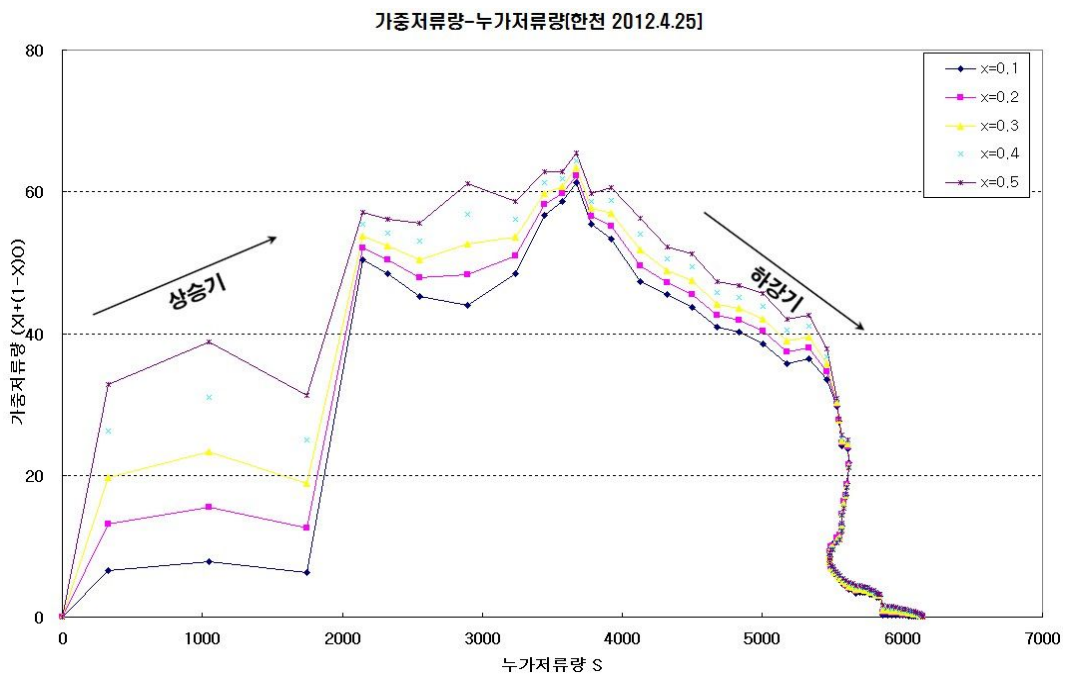
Fig. 4.21 Decision of stream channel storage constant( $K$ )(Jung, 2007)

구축된 유역별 유입-유출수문곡선을 이용하여 시간구간별 평균저류량을 계산하고

이를 누가하여 누가저류량  $S$ 를 산정하였으며, 시간구간별 가중 저류량  $[xI+(1-x)O]$ 를 구하여 누가저류량  $S$ 와 함께 도시하였다. 무차원가중계수  $x$ 를 0.1 - 0.5까지 변화시키며 가중저류량과 누가저류량이 직선에 가까워질 때까지 반복적으로 도시하였다. 한천유역의 6개 사상에 대하여 가중저류량과 누가저류량을 도시한 결과는 Fig. 4.22와 같다.



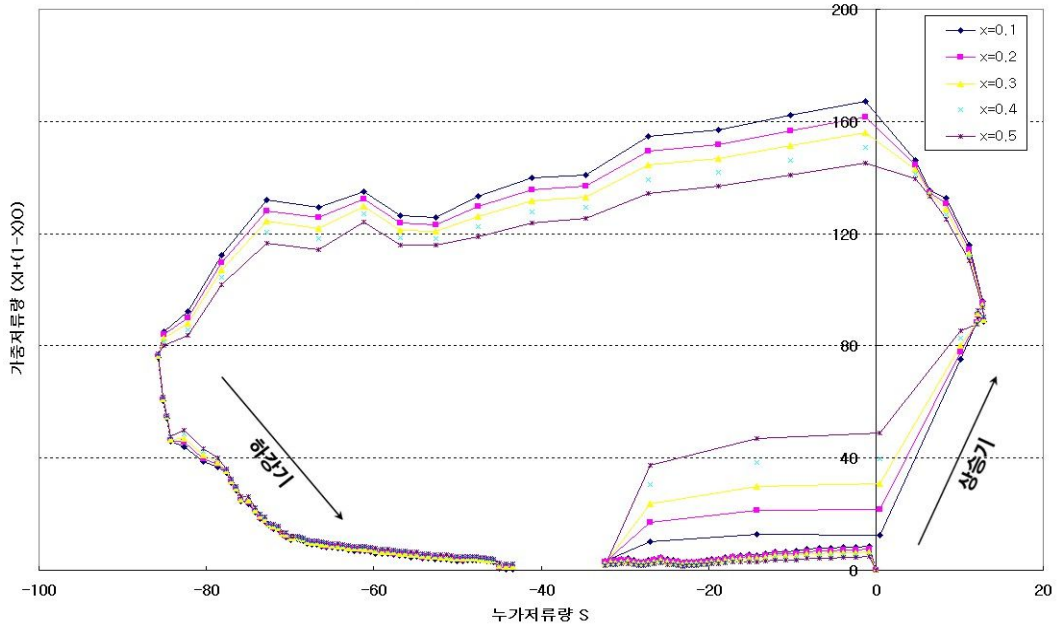
(a) 2012.4.21



(b) 2012.4.25

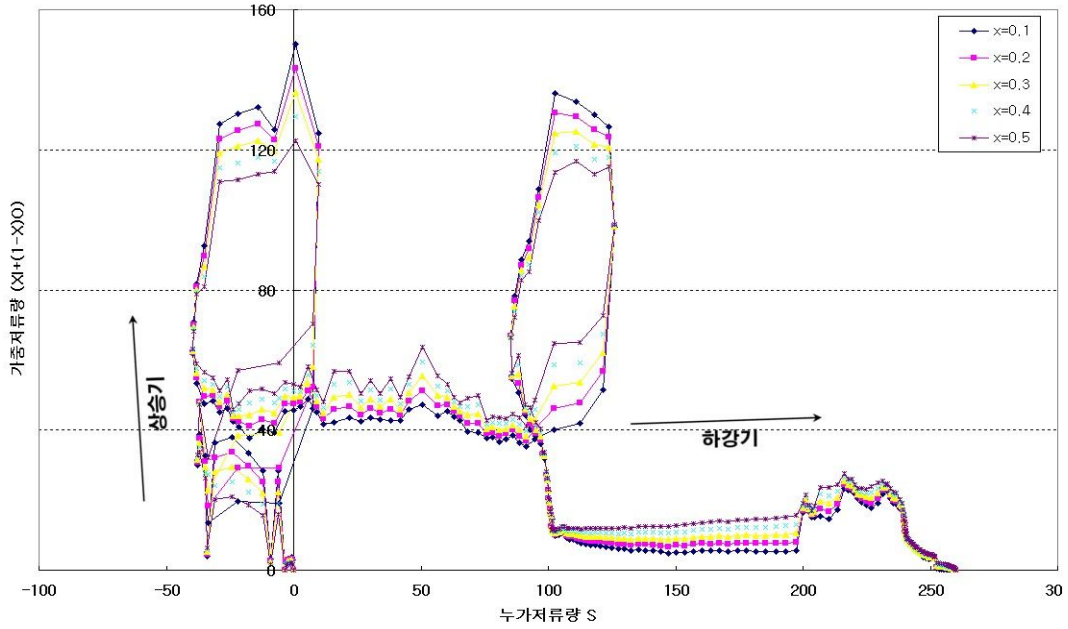


가중저류량-누가저류량[한천 2012.7.18]

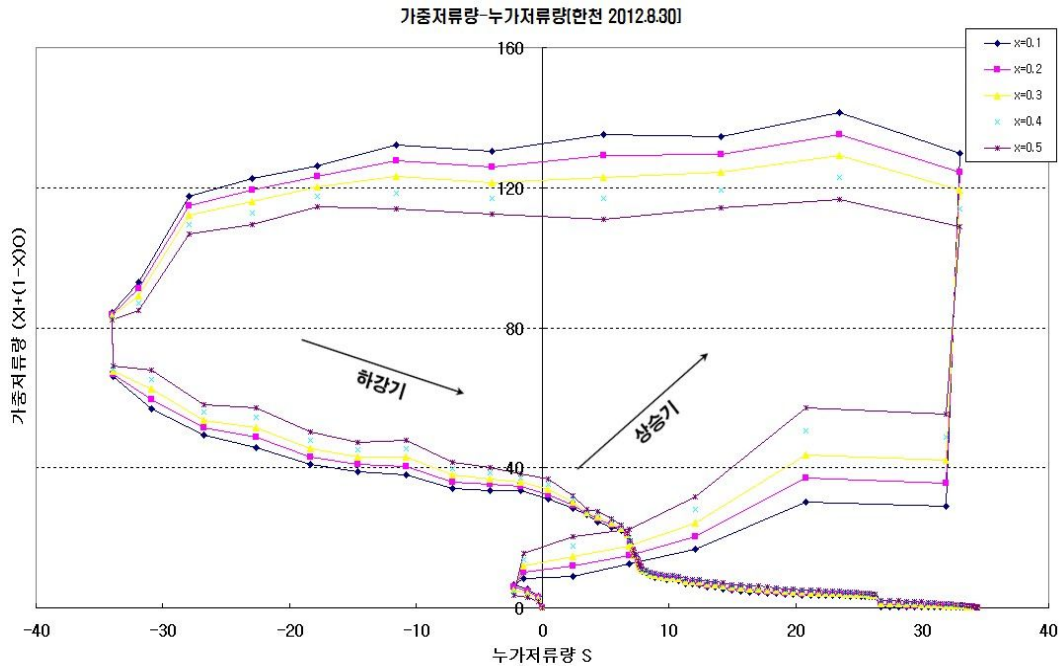


(c) 2012.7.18

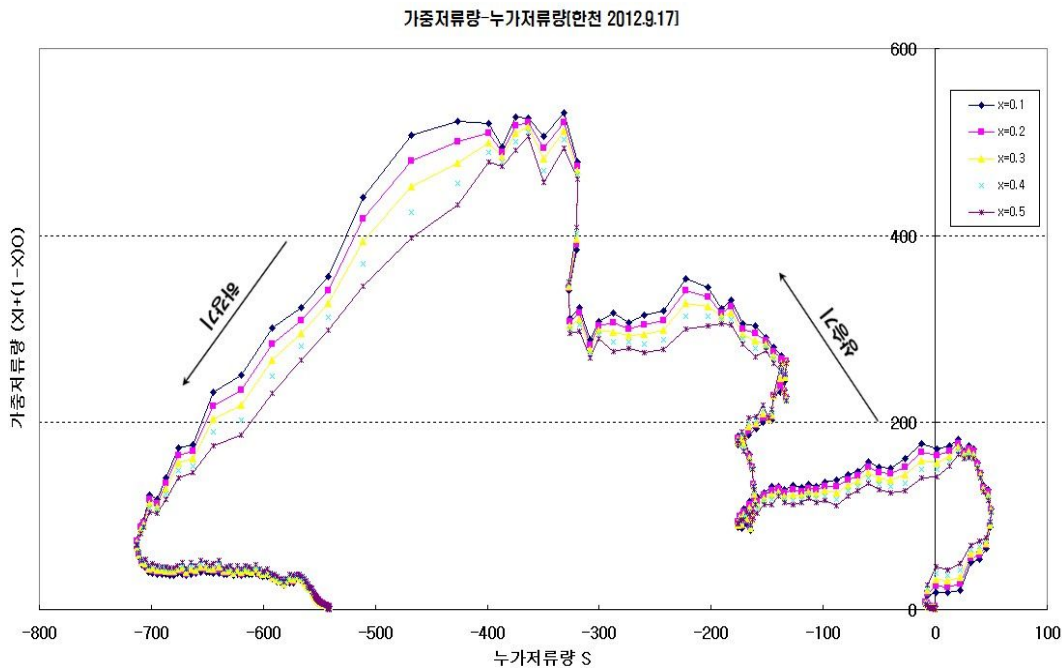
가중저류량-누가저류량[한천 2012.8.23]



(d) 2012.8.23



(e) 2012.8.30



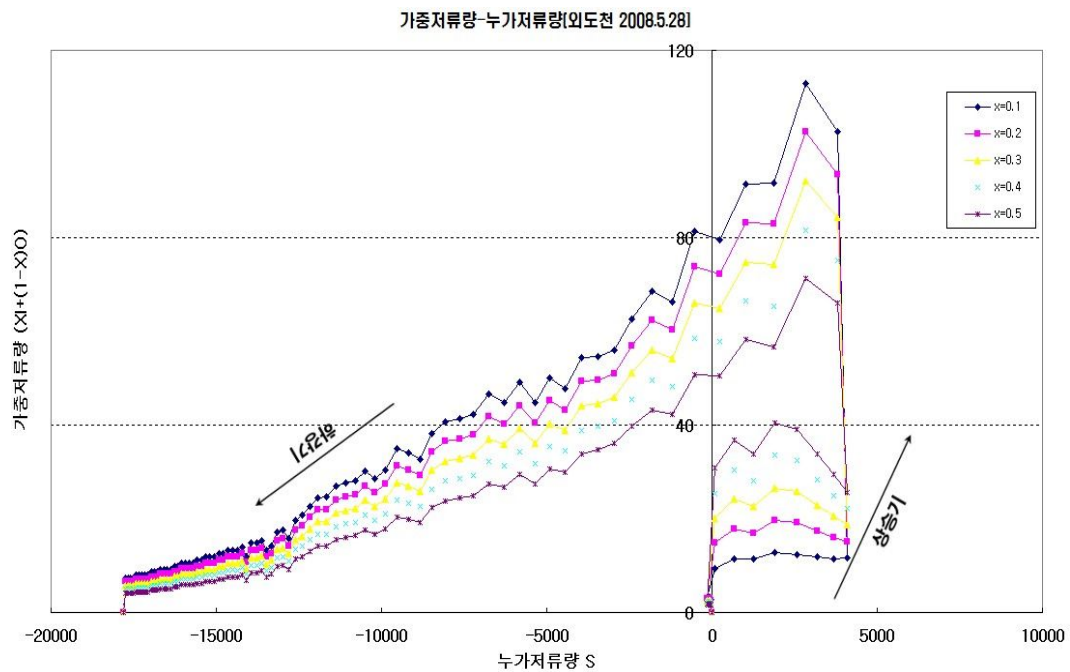
(f) 2012.9.17

Fig. 4.22 Weighted discharge-accumulated discharge graph of Han Stream watershed

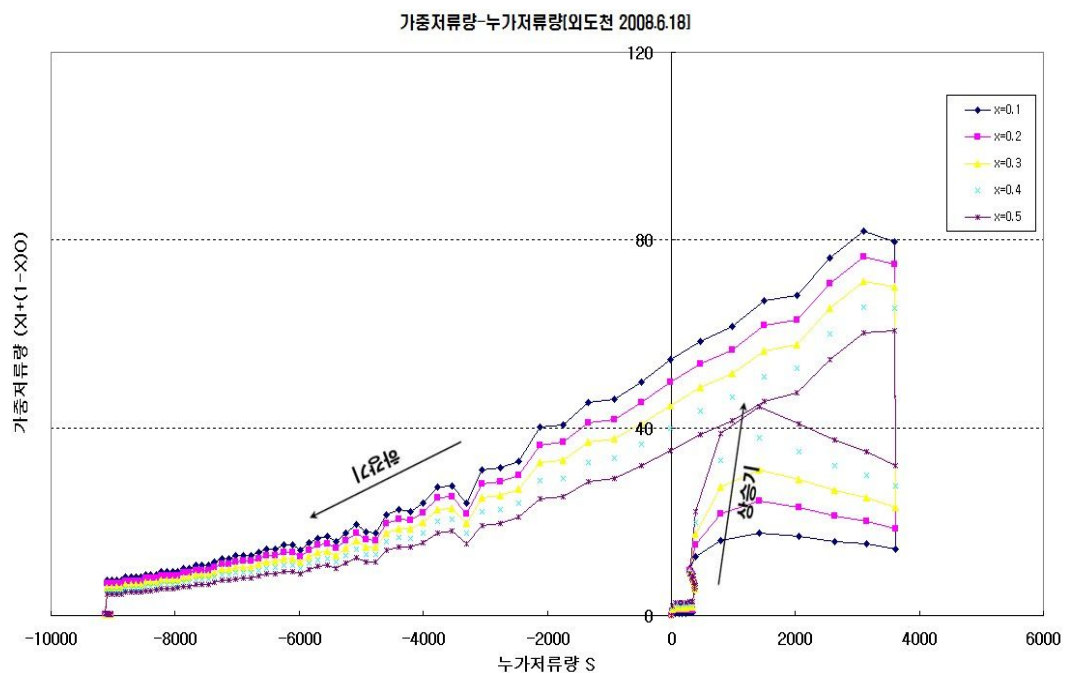
한천유역의 가중저류량과 누가저류량곡선을 이용하여 6개 사상에 대하여 도시한 결과 실제 매개변수를 결정할 수 있는 직선에 가까운 식을 도출할 수 없었다. 이러한 문제는 제4한천교와 한천교 지점에서 연속으로 관측하는 1지점 수위-유속 관측

자료의 결함 및 하도추적 구간 내에 유입되는 우수관로의 영향으로 판단된다. 향후 보다 많은 사상에 대한 관측자료와 유역 내 우수관로에 대한 정보를 구축한다면 도시적 해석법으로 Muskingum 매개변수( $K, x$ )를 결정할 수 있을 것이다.

외도천 유역의 구축된 유입-유출수문곡선을 이용하여 10개 사상에 대하여 가중저류량과 누가저류량을 도시한 결과는 Fig. 4.23과 같다.

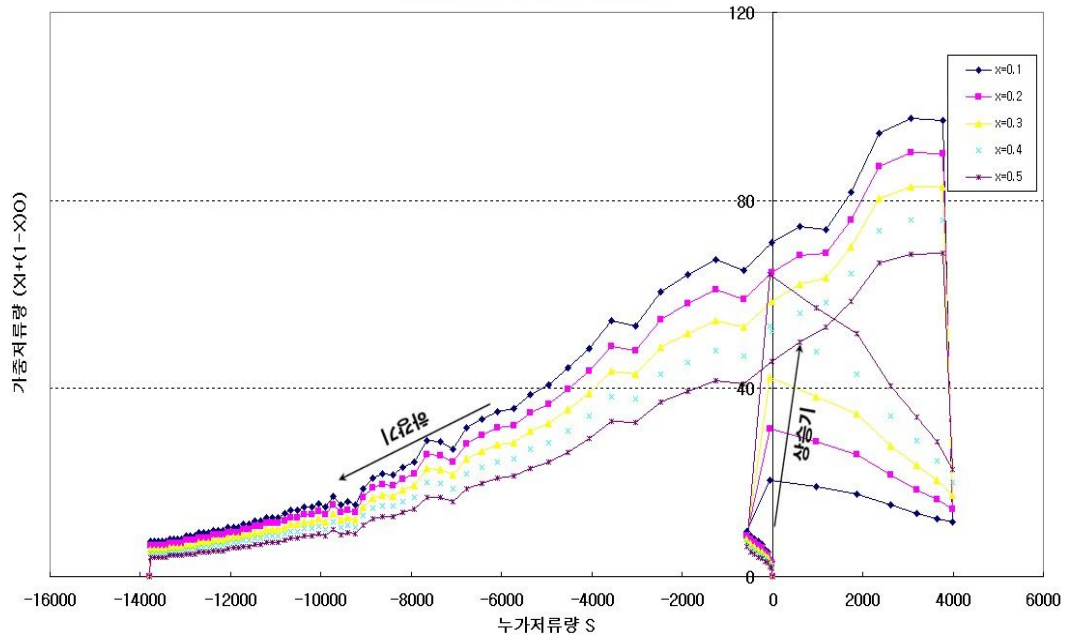


(a) 2008.5.28



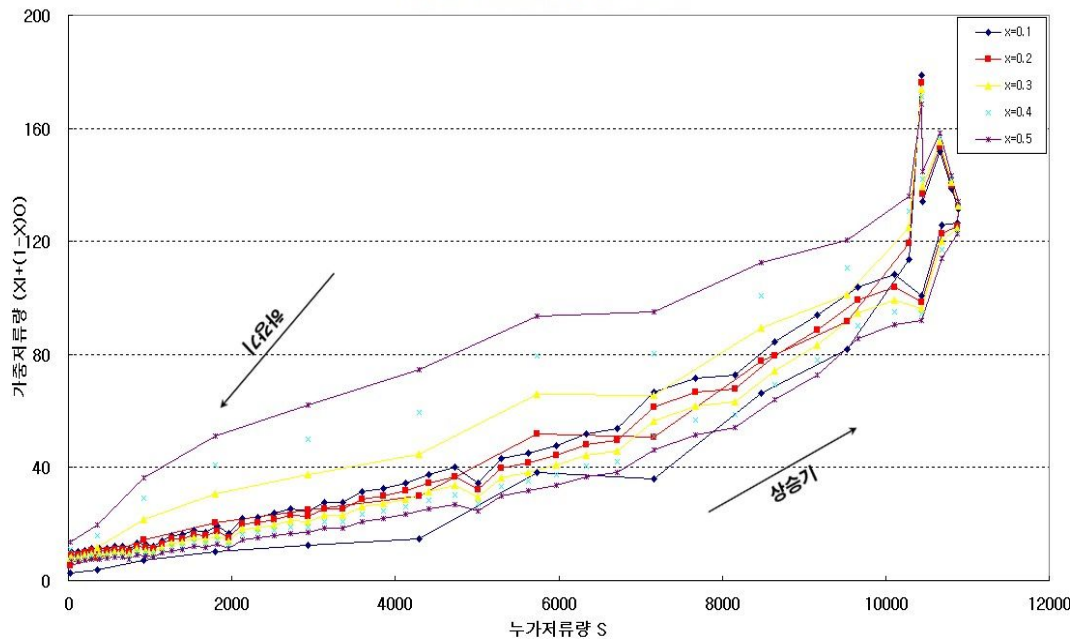
(b) 2008.6.18

가중저류량-누가저류량(외도전 2008.6.28)

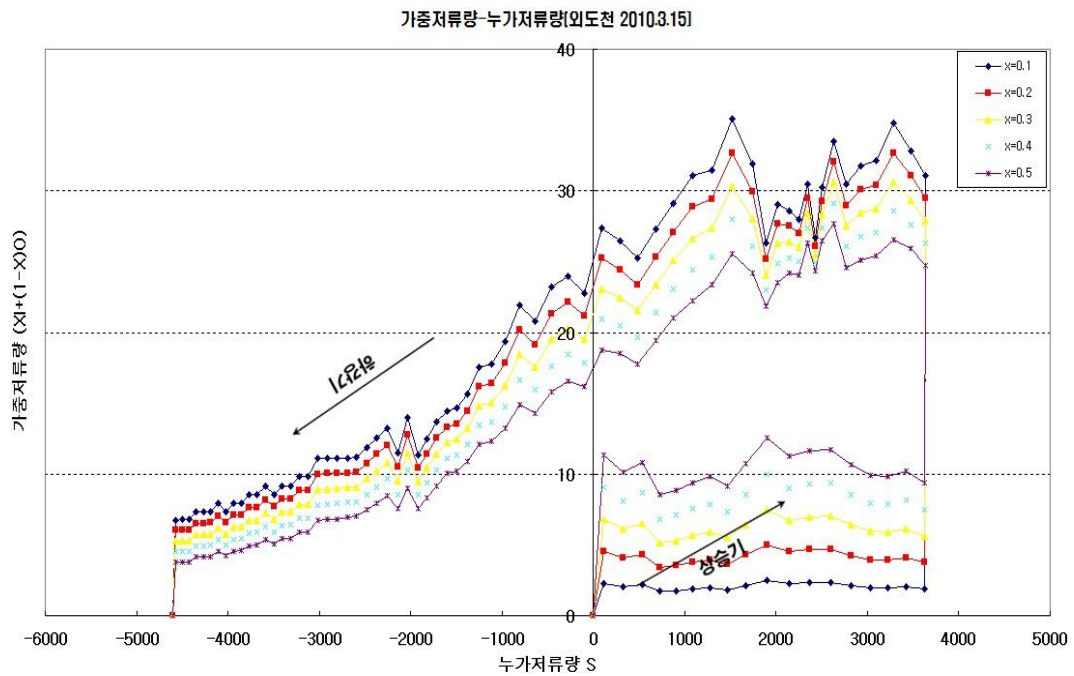
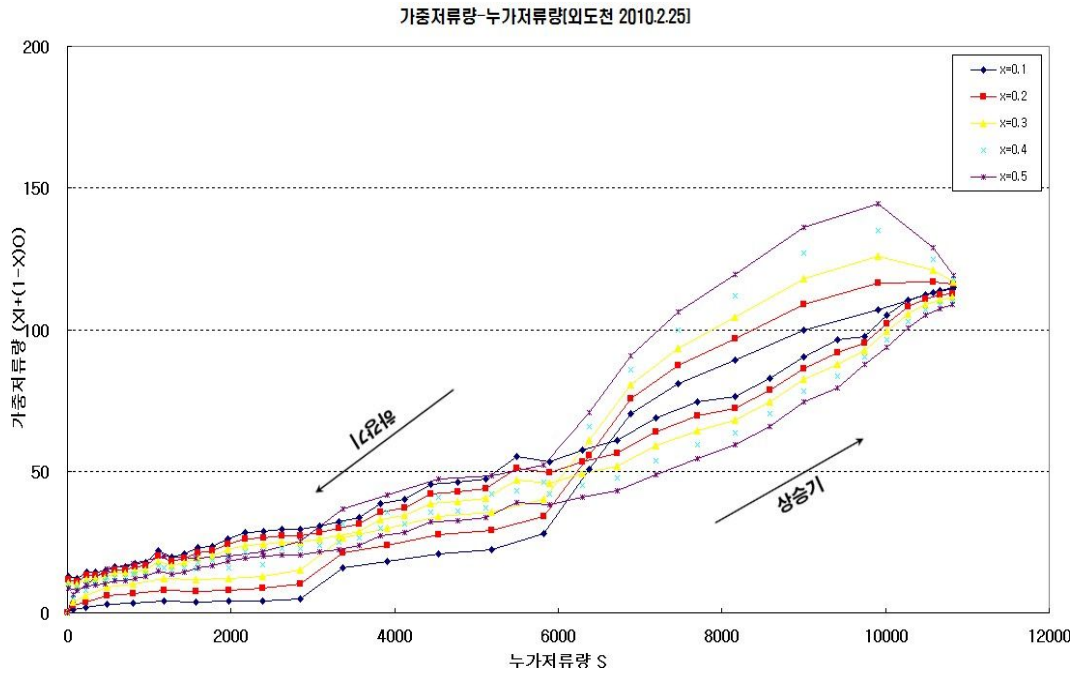


(c) 2008.6.28

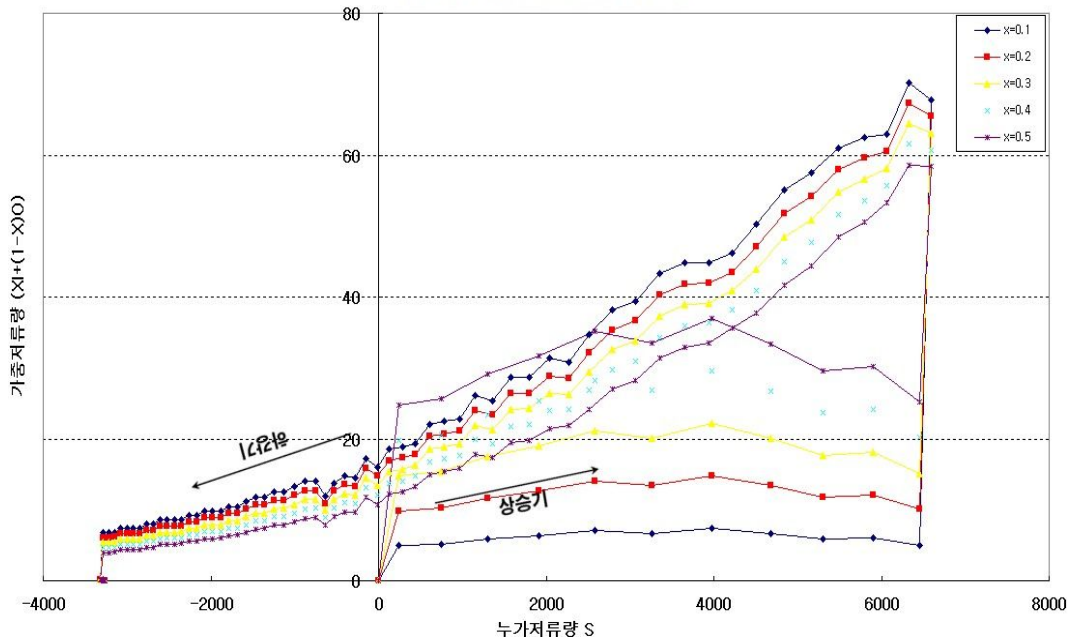
가중저류량-누가저류량(외도전 2009.4.20)



(d) 2009.4.20

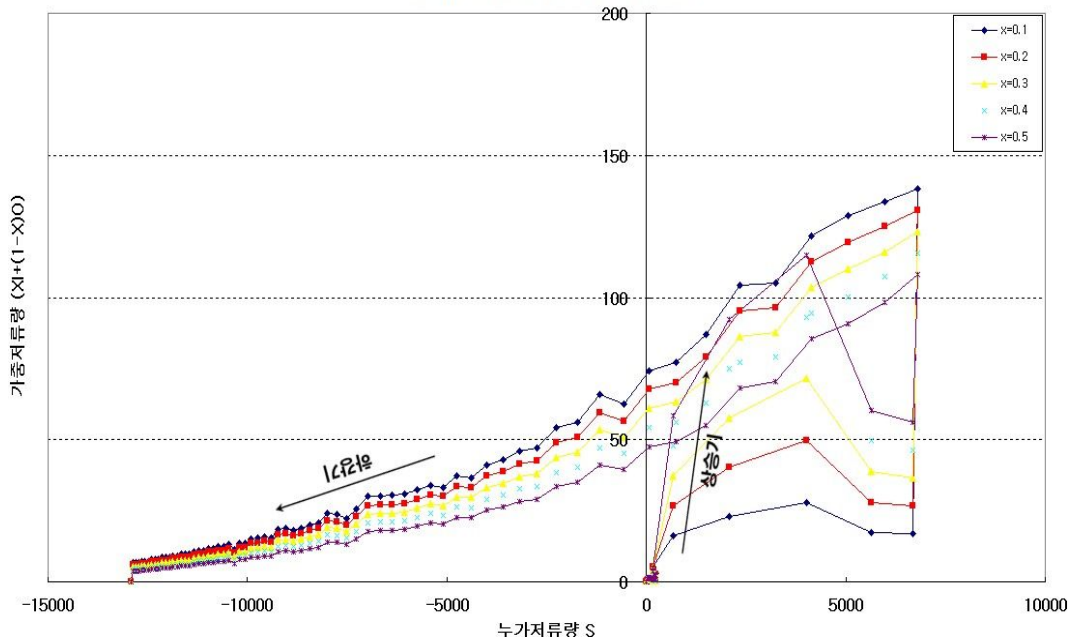


가중저류량-누가저류량(외도천 2010.3.31)



(g) 2010.3.31

가중저류량-누가저류량(외도천 2010.6.28)



(h) 2010.3.31



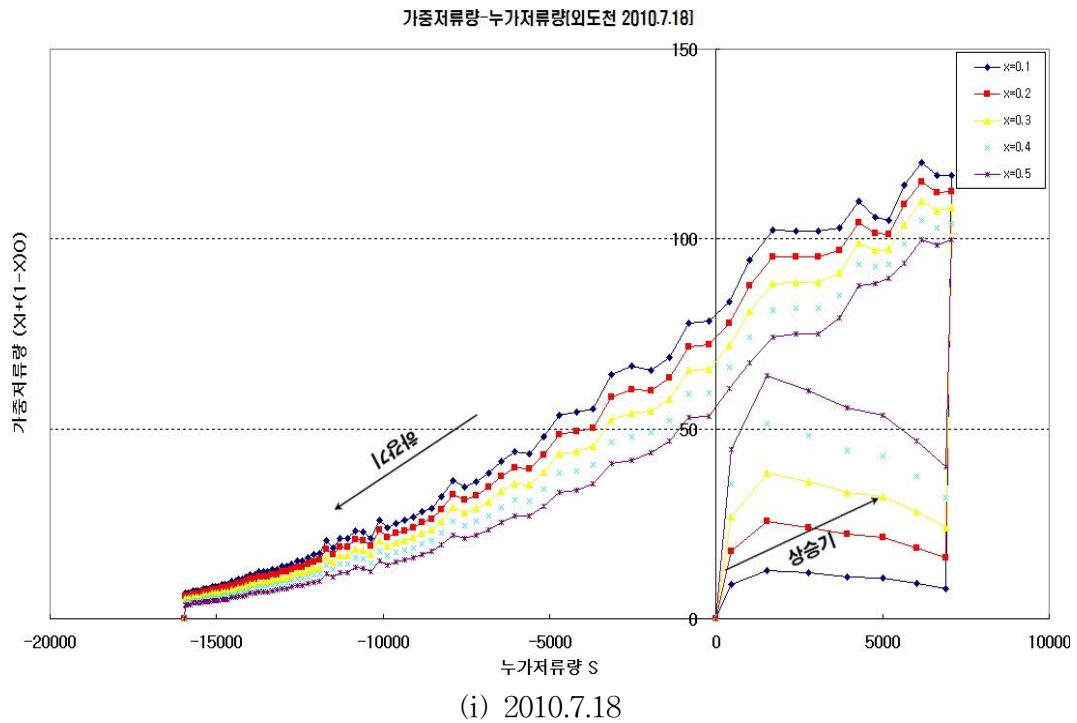
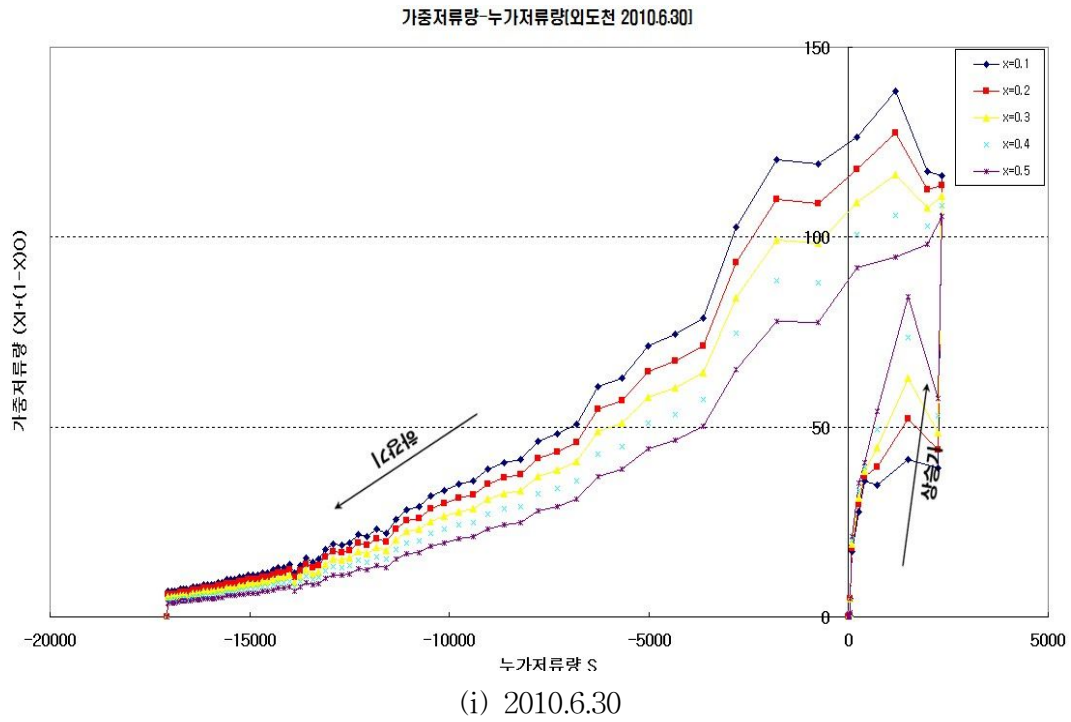


Fig. 4.23 Weighted discharge-accumulated discharge graph of Oaedo Stream watershed

외도천유역의 가중저류량과 누가저류량곡선을 이용하여 10개 사상에 대하여 도시

한 결과 2개 사상에 대하여 직선에 가까운 식을 도출하였다. 2009년 4월 20일과 2010년 2월 25일 발생한 사상의 무차원 가중계수  $x$ 가 0.2일 때 가장 직선에 가까운 식이 도출되었다(Fig. 4.24).

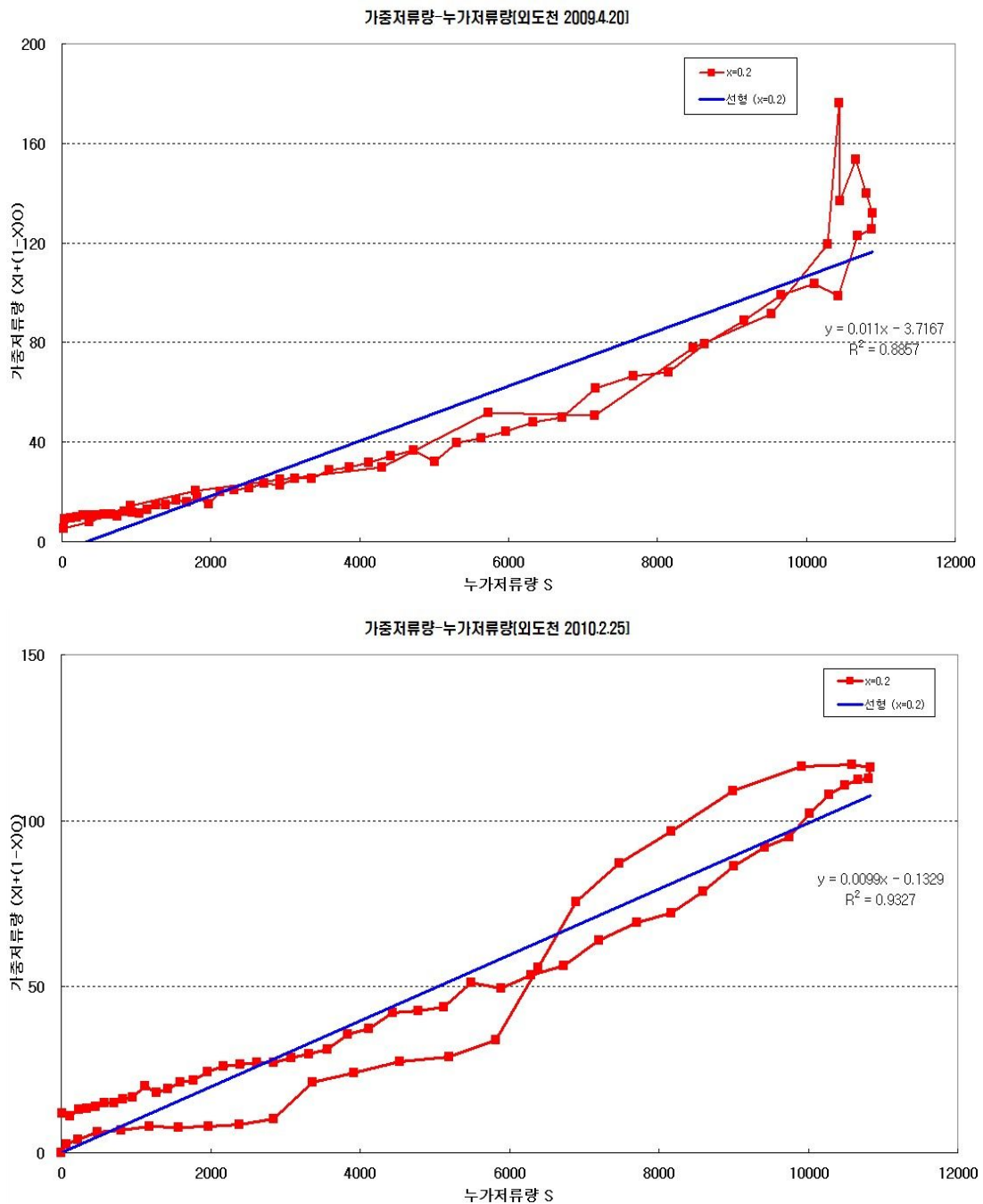


Fig. 4.24 Calculation of Muskingum parameter

2009년 4월 20일에 발생한 사상에 대하여 무차원 가중계수  $x$ 가 0.2일 때 직선의



기울기를 이용하여 Muskingum  $K$ 를 산정한 결과  $K=1.62hr$ 이며, 2010년 2월 25일 발생한 사상에 대하여 Muskingum  $K$ 를 산정한 결과  $K=1.34hr$ 로 나타났다 (Table 4.21).

Table 4.21 Calculation of Muskingum parameters( $K, x$ )

유출사상	무차원 가중계수 $x$	Muskingum $K$ (hr)
2009. 4. 20	0.2	1.62
2010. 2. 25	0.2	1.34

일반적으로 관측된 유입 및 유출수문곡선이 없는 경우에는 일반적으로  $K$ 는 홍수파의 이동시간,  $x$ 는 0.2를 택하게 되며, 실제 관측자료를 이용하여 도출한 결과  $K$ 는  $1.48hr$ ( $K$ 산정결과 평균),  $x$ 는 0.2로 산정되어 모델에 적용하였다. 유역 추적구간의 관측자료를 이용하여 도출한 결과와 일반적으로 사용되는 값과의 큰 차이를 확인할 수 없었다. 제주도 하천에 최초로 도시적 해석법을 이용하여 Muskingum 매개변수를 도출하였으나, 외도천 유역의 제2광령교와 외도정수장의 추적구간은 9km에 이르는 장거리이므로 측방유입으로 인한 오차는 존재할 것이다. 그러나 현재로서는 Muskingum 매개변수를 산정하기 위한 관측자료가 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 추적구간내에서 도출된 결과를 이용하여 모델에 적용하였다.

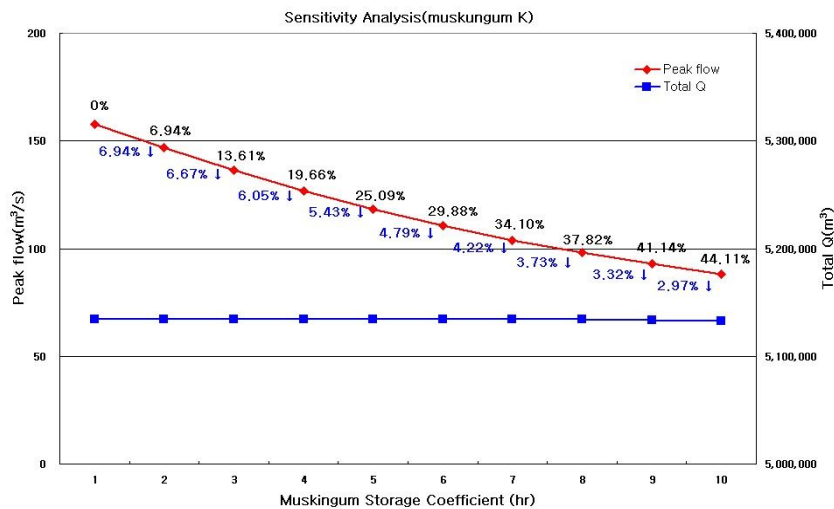
## 4. 매개변수 민감도 분석

수치적 민감도 분석은 시스템 출력의 변화가 모형 매개변수를 약간 수정하여 모형화된 시스템을 가장 잘 나타내주기 위해 모형 모개변수를 섭동하여 모의 결과와의 관계를 분석하는 것이다. 민감도 분석의 기본 목적은 특별하게 민감한 모형 매개변수를 식별하는 것이며, 가장 비슷한 값으로 잘 수행하는 해를 선택하고 더 정확하게 매개변수를 추정하여 효율성을 높이는 것이다.

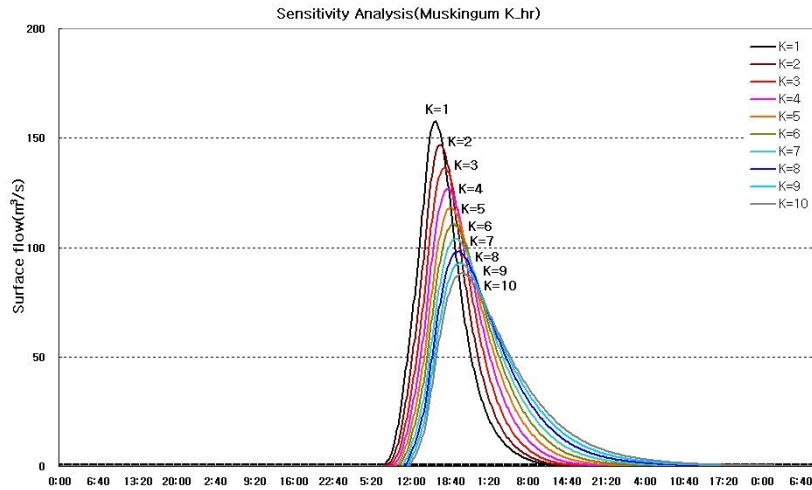
Si와 Song(2009)의 연구에서 수행된 민감도 분석 방법을 이용하여 본 연구에서는 수문곡선의 대표적 매개변수 중 민감하게 반응할 것으로 판단되는 Muskingum K, x와 Clark 단위도법의 Tc, K를 대상으로 매개변수 민감도 분석을 수행하였다.

### 4.1 Muskingum 매개변수

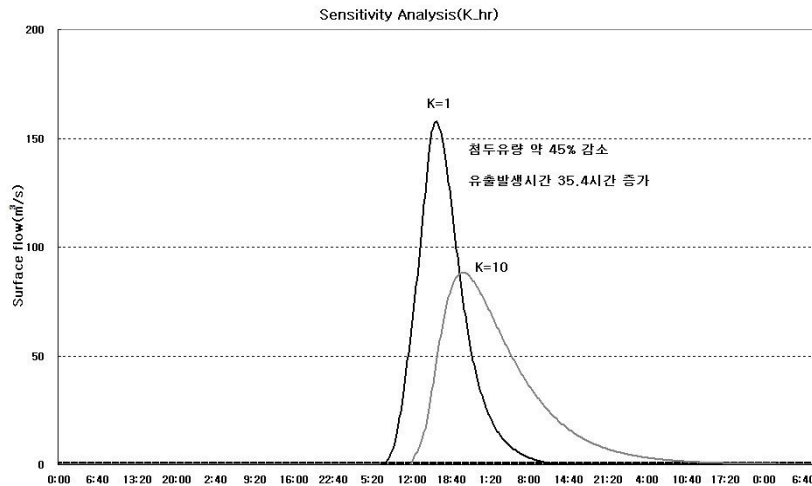
Muskingum 하도추적법의 매개변수(상수 K, x)에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 다른 매개변수 값을 고정하고 Muskingum 저류상수 K에 대하여 1~10(hr) 범위 내에서 변화시키면서 침투유량, 유출총량, 수문곡선, 유출발생 시간 등의 값을 산정하여 이 변수에 따른 영향을 검토하였다. 또한 무차원가중계수 x에 대하여 0.1 ~ 0.5 범위 내에서 변화시키면서 동일하게 분석하였다.



(a)



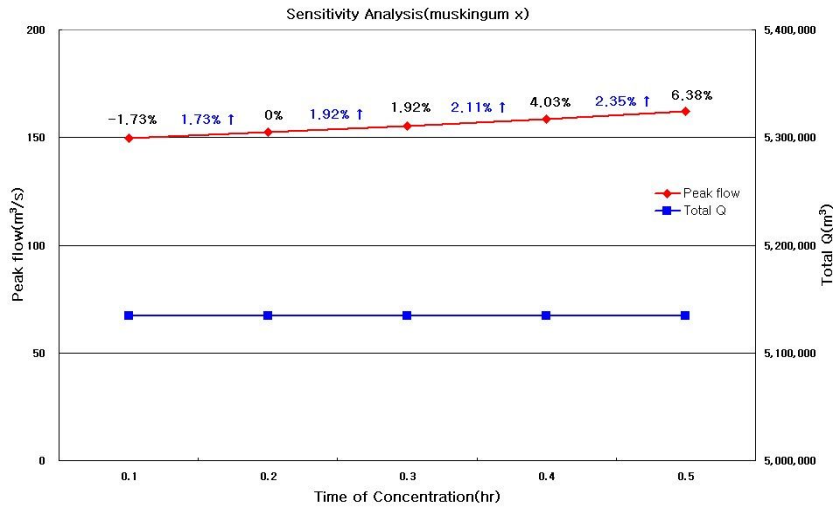
(b)



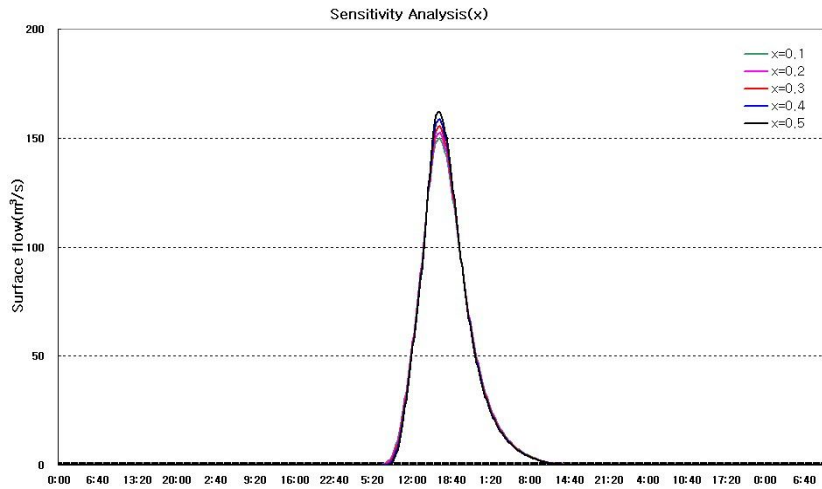
(c)

Fig. 4.25 Result of Muskingum K sensitivity analysis

Fig. 4.25 (a)에서 Muskingum 저류상수 K의 민감도 분석결과 저류상수가 1시간씩 증가할 때 마다 6.94~2.97% 첨두유량이 감소하는 것으로 나타났으며, 유출총량의 변화는 발생하지 않았다. 또한 1시간씩 증가할 때 마다 지표면유출의 발생부터 끝나는 지점까지의 시간인 기저시간은 4~8시간까지 증가하였으며, 첨두유량 발생 시간도 20~30분씩 선형적으로 증가하였다. 이러한 결과는 하도 내에서 저류하는 시간이 증가함에 따라 유역의 최종 출구지점에 유량이 도달하는 시간이 지체되어 발생하는 현상이다.



(a)



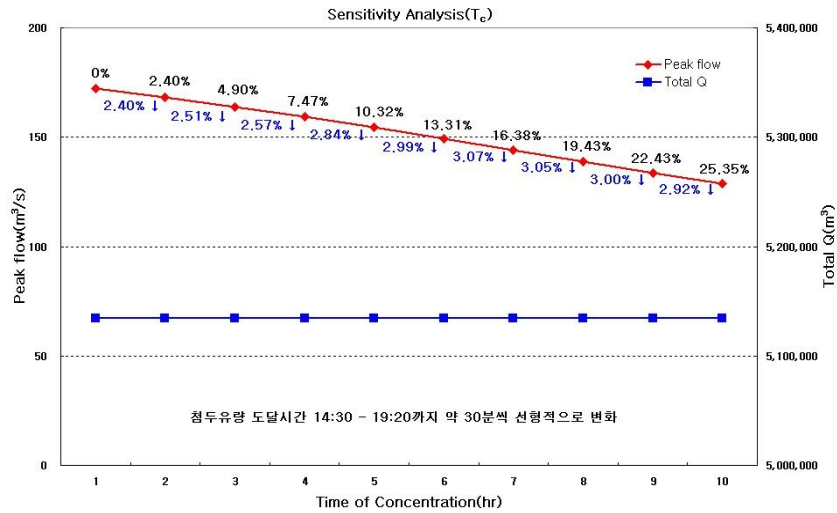
(b)

Fig. 4.26 Result of Muskingum x sensitivity analysis

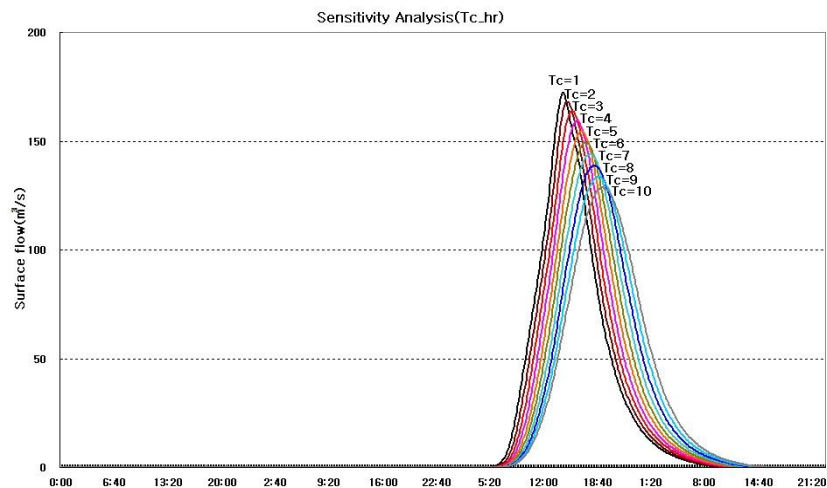
Fig. 4.26 (a)에서 무차원가중계수  $x$ 가 0.1씩 증가함에 따라 첨두유량은 1.92~6.38% 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량의 변화는 없었다. Fig. 4.26 (b)에서 무차원가중계수  $x$ 가 증가함에 따라 유출수문곡선의 기저시간은 크게 변화하지 않았다. 국토해양부 설계홍수량 산정요령(안)에서 제시하는 것처럼 실제 제주도 하천에서도 홍수의 저류효과 정도를 결정하는 무차원 가중계수의 민감도는 낮게 나타났으며, 본 연구에서 적용한 0.2를 채택하면 무난할 것으로 판단된다.

## 4.2 Clark 단위도법 매개변수

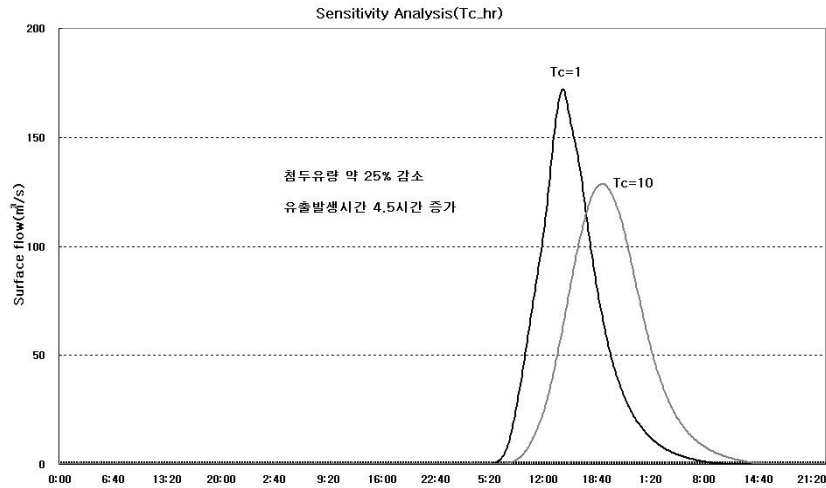
Clark 단위도법의 매개변수(도달시간  $T_c$ , 저류상수  $K$ )에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 다른 매개변수 값을 고정한 후 도달시간 및 저류상수에 대하여 1~10(hr) 범위 내에서 변화시키면서 침투유량, 유출총량, 수문곡선, 유출발생 시간 등의 값을 산정하여 이 변수에 따른 영향을 검토하였다.



(a)



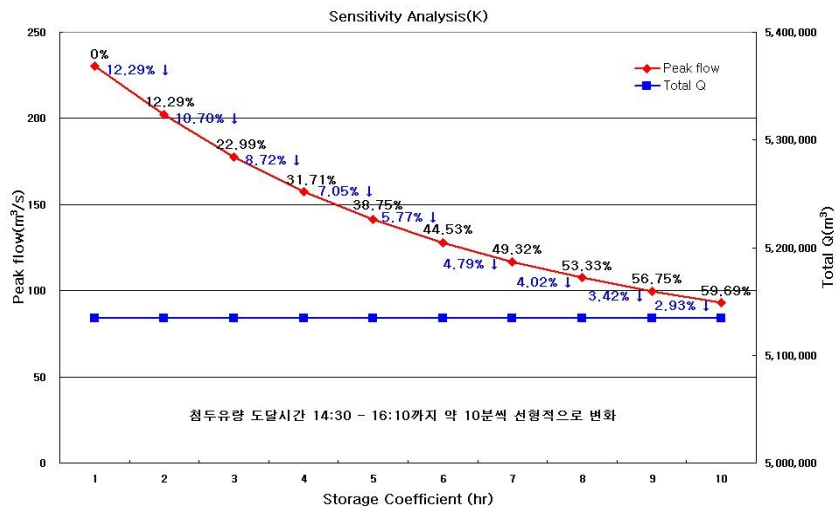
(b)



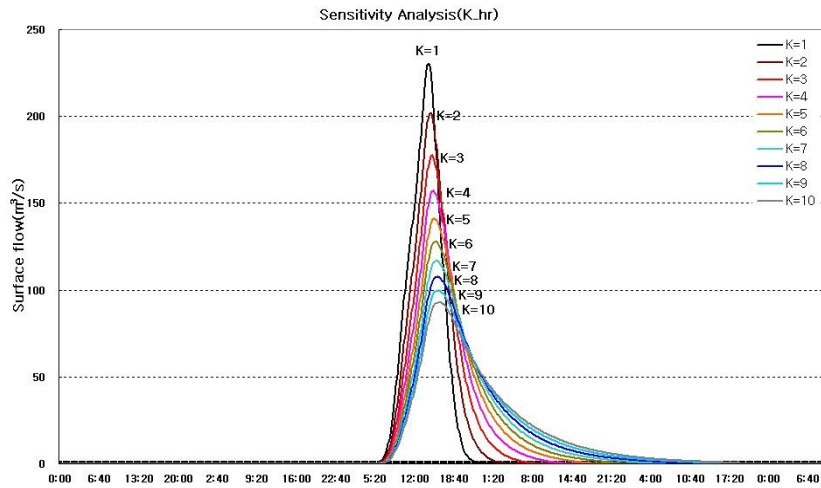
(c)

Fig. 4.27 Result of Clark unit hydrograph method time of concentration  $T_c$  sensitivity analysis

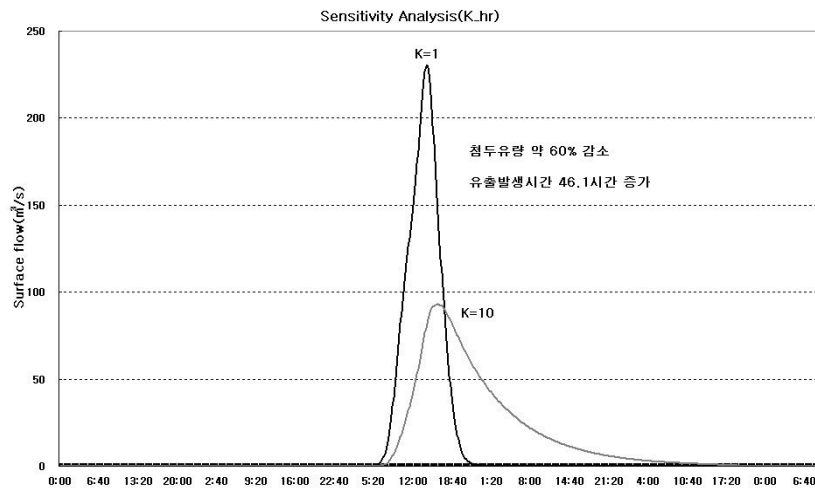
Fig. 4.27 (a)에서 Clark 단위도법  $T_c$ 의 민감도 분석결과 도달시간이 1시간씩 증가할 때 마다 침투유량은 2.4 ~ 3.07% 감소하는 것으로 나타났으며, 유출총량의 변화는 발생하지 않았다. Fig. 4.27 (b)에서 도달시간이 1시간씩 증가할 때 마다 침투유량 발생시간은 30~40분씩 증가하였으며, 기저시간 역시 30~40분씩 증가하였다. Fig. 4.27 (c)는 도달시간이 1시간일 경우와 10시간 경우의 유출수문곡선을 보이고 있다. 유역의 도달시간이 증가할수록 침투유량은 감소하며 침투유량 발생시간이 지체되고 기저시간이 증가한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.28 Result of Clark unit hydrograph method time of concentration K sensitivity analysis

Fig. 4.28 (a)에서 Clark 단위도법 K의 민감도 분석결과 저류상수가 1시간씩 증가할 때 마다 침투유량은 12.29 ~ 2.93% 감소하였으며, 유출총량의 변화는 발생하지 않았다. Fig. 4.28 (b)에서 저류상수가 1시간씩 증가할 때 마다 침투유량 발생시간은 10~20분씩 증가하였으며, 기저시간은 230~270분씩 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 4.28 (c)는 K가 1시간일 경우와 10시간일 경우의 유출수문곡선을 나타내고 있으며, 침투유량이 약 60% 감소하고 기저시간은 46.1시간 증가한다. Clark 단위도법은 강우시작부터 유역의 총 도달시간간의 시간구간별로 기여하는 면적을 결정함으로써 단위유량도를 생성하는 방법으로 유역의 총 도달시간이 증가할수록 침투유량은 감소하고 기저시간은 증가하는 것이다.

## 5. Clark 단위도법 매개변수 조합에 따른 유출량 산정

### 5.1 유출곡선지수(CN), 도달시간(Tc), 저류상수(K) 조합 결정

#### 5.1.1 유출곡선지수(CN) 범위 설정

유출량을 산정하기 위하여 필요한 인자 중에서 유출곡선지수(CN) 값을 사용함에 있어 AMC 조건을 반드시 선택하여야 하지만 현재까지는 적절한 AMC 조건에 대한 선택 기준은 없으며 필요에 따라 AMC-II 조건을 선택하거나 AMC-III 조건을 선택하여 적용하고 있다. 실제 유출기록을 기준으로 평가할 경우 최적의 AMC 조건 CN 값에 비하여 AMC-II 조건은 과소하게 산정할 수 있고, AMC-III 조건은 과대하게 산정할 수 있다. 따라서 AMC 조건 선택 시 제주도에 최적의 유출곡선지수를 선정하기 위하여 범위를 Table 4.22와 같이 설정하였다.

Table 4.22 Runoff curve number according to AMC condition

AMC 조건	한천			외도천	
	소유역1	소유역2	소유역3	소유역1	소유역2
CN-II	81.20	76.87	67.34	76.07	63.47
CN-55	86.03	82.49	73.71	82.02	71.73
CN-37	87.96	84.74	76.25	84.40	75.03
CN-III	90.85	88.11	80.07	87.97	79.98

CN-II는 AMC-II 조건에서의 CN을 의미하고 CN-III은 AMC-III 조건에서의 CN을 의미한다. CN-55 및 CN-37 법은 CN-II의 유출량이 과소하게 산정되고 CN-III의 유출량이 과대하게 산정되는 걸 방지하기 위하여 적용된 식으로서 다음과 같이 산정한다.

$$CN_{55} = CN_{II} \times 0.5 + CN_{III} \times 0.5, \quad CN_{37} = CN_{II} \times 0.3 + CN_{III} \times 0.7$$



### 5.1.2 도달시간( $T_c$ ) 범위 설정

Clark 단위도법의 매개변수인 도달시간( $T_c$ )은 민감도가 매우 높은 요소이지만 아직까지 국내에서 명확하게 정립되어 있지 않다. 기존 제주도 하천정비기본계획에서는 2001년 계획 당시 Clark 단위도법을 이용하여 홍수량을 산정하였으나 매개변수에 대한 내용은 수록되어 있지 않았으며, 2009년 기본계획 수립 시에는 Clark 단위도법의 도달시간은 Kraven I 공식을 사용하였다.

미계측 유역의 도달시간을 산정하는 방법으로는 현재 사용되고 있는 경험 공식으로는 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven I 공식, Kraven II 공식 등이 있다. 각 공식을 이용하여 도달시간을 산정하는 방법은 2장에서 제시하였으며, 각 방법을 이용하여 도달시간을 산정한 결과는 Table 4.23과 같다.

유역의 경사는 도달시간을 산정에 미치는 영향이 매우 큰 인자이므로 적절한 방법의 채택이 필수적이며 경사 산정에는 전체유역을 하나로 산정하는 단순경사, 구간별 경사를 고려하는 등가경사(equivalent slope) 방법이 있다. 본 연구에서는 등가경사를 이용하여 유역의 도달시간을 산정하였다.

Table 4.23 Calculation of time of concentration according to watershed

산정방법	한천유역		외도천유역	
	도달시간 (hr)	도달시간별 평균유속(m/s)	도달시간 (hr)	도달시간별 평균유속(m/s)
Kirpich	1.73	3.05	1.79	3.21
Rziha	1.25	4.24	1.29	4.46
Kraven I	0.53	9.92	0.55	10.36
Kraven II	1.51	3.50	1.64	3.50

현재 국내에서 사용되는 경험공식을 이용하여 도달시간을 산정한 결과 각 방법에서의 도달시간은 한천유역 0.53~1.73hr, 외도천유역 0.55~1.79hr 로 산정되었으며, 도달시간별 평균유속은 한천유역 3.05~9.92  $m/s$ , 외도천유역 3.21~10.36 $m/s$ 으로 산정되었다.

산정 방법 중에서 Kirpich, Rziha, Kraven I 공식은 유로연장과 등가경사만을 이용하여 산정하는 방법이며, Kraven II 공식은 자연하천의 경사별 유속을 적용하여 산

정하는 공식이다. Table 4.23에서 Kraven II 공식의 유속은 경사가 1% 이상이 지역에서 사용하는  $3.5m/s$ 를 사용한 결과이다.

경험 공식을 이용하여 각 구역의 도달시간을 산정하여 도달시간 방법별 평균유속을 산정한 결과 Kraven I ( $9.92\sim 10.36m/s$ ) 공식을 이용한 결과는 제주도에 적합하지 않은 것으로 판단되어 도달시간 범위에 포함하지 않았으며, Kraven II 공식의 유속은 현장에서 관측된 유속을 바탕으로 사상별로 다르게 적용하여 산정하였다. 최종적으로 도달시간을 산정하는 방법은 Kirpich, Rziha, Kraven II을 적용하였으며, 사상별 관측자료를 이용하였다.

### 5.1.3 저류상수(K) 범위 설정

Clark 단위도법의 매개변수인 저류상수(K)는 민감도가 매우 높은 요소이지만 현재 국내에서는 적절한 실측자료가 부족하여 이론적인 방법에 의한 저류상수를 결정하기는 매우 어려운 실정이다. 기존 제주도 하천정비기본계획에서는 2001년 계획 당시까지는 저류상수에 대한 내용이 수록되지 않았으며, 2009년 기본계획 수립 시에는 Clark 단위도법의 저류상수는 Russel 방법을 이용하여 유출량을 산정하였다.

현재 국내에서 사용되는 저류상수 산정 방법에는 Clark 공식, Linsley 공식, Russel 공식, Sabol 공식 등이 있다. 각 방법을 이용하여 저류상수를 산정하는 방법은 2장에서 제시하였으며, 각 방법을 이용하여 도달시간별 저류상수를 산정한 방법은 Table 4.24와 같다.

저류상수를 산정하는 방법 중에서 Russel 공식, Sabol 공식은 구역의 도달시간을 산정한 결과에 따라서 결과값이 변하게 되며, Clark 공식에서 상수 C는 0.5를 사용하였으며, Linsley 공식에서 상수 b는 0.01을 사용하였다. Russel 공식에서  $\alpha$ 는 자연하천지역에서 사용하는 1.0를 채택하여 적용하였다.

Table 4.24 Calculation of storage constant according to calculation method of time of concentration

도달시간 산정방법	저류상수 산정방법	한천유역 (hr)	외도천유역 (hr)
Kirpich	Clark	3.46	3.60
	Linsley	0.42	0.48
	Russel	2.60	2.68
	Sabol	2.86	2.83
Rziha	Clark	3.46	3.60
	Linsley	0.42	0.48
	Russel	1.87	1.93
	Sabol	2.06	2.04
Kraven II	Clark	3.46	3.60
	Linsley	0.42	0.48
	Russel	2.26	2.46
	Sabol	2.49	2.60

각 경험식을 이용하여 저류상수를 산정한 결과 유역의 저류상수는 도달시간 Kirpich 공식을 이용하여 산정한 결과 0.42~3.46 hr, Rziha 공식을 이용하여 산정한 결과 0.42~3.46 hr, Kraven II 공식을 이용하여 산정한 결과 0.42~3.46 hr로 각각 산정하였다. Clark 방법과 Linsley 방법은 유로연장, 유역면적, 평균하천경사(%)를 이용하여 계산하므로 도달시간 산정방법에 따라서 값이 변하지 않으며, Russel방법과 Sabol 방법은 도달시간 산정 결과에 따라 값이 변하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Clark, Russel, Sabol 방법을 이용하여 저류상수를 산정하였으며, Linsley 방법은 제외하였다.

#### 5.1.4 단위도법 적용 매개변수 조합 선정

본 연구에서 산정된 유역평균강우량, 유역의 초기손실, Muskingum 매개변수를 이용하여 Clark 단위도법에 의한 유출량을 산정하기 위하여 유출곡선지수 CN, 도달시간  $T_c$ , 저류상수  $K$ 의 매개변수 조합을 Table 4.25와 같이 선정하였다.

Table 4.25 Clark Decision of unit hydrograph method parameters

<i>CN</i>	$T_c$	<i>K</i>	구분	<i>CN</i>	$T_c$	<i>K</i>	구분
<i>CN</i> II	Kirpich	Clark	CNII-A1	<i>CN</i> 37	Kirpich	Clark	CN37-A1
		Russel	CNII-A2			Russel	CN37-A2
		Sabol	CNII-A3			Sabol	CN37-A3
	Rziha	Clark	CNII-B1		Rziha	Clark	CN37-B1
		Russel	CNII-B2			Russel	CN37-B2
		Sabol	CNII-B3			Sabol	CN37-B3
	Kraven II	Clark	CNII-C1		Kraven II	Clark	CN37-C1
		Russel	CNII-C2			Russel	CN37-C2
		Sabol	CNII-C3			Sabol	CN37-C3
<i>CN</i> 55	Kirpich	Clark	CN55-A1	<i>CN</i> III	Kirpich	Clark	CNIII-A1
		Russel	CN55-A2			Russel	CNIII-A2
		Sabol	CN55-A3			Sabol	CNIII-A3
	Rziha	Clark	CN55-B1		Rziha	Clark	CNIII-B1
		Russel	CN55-B2			Russel	CNIII-B2
		Sabol	CN55-B3			Sabol	CNIII-B3
	Kraven II	Clark	CN55-C1		Kraven II	Clark	CNIII-C1
		Russel	CN55-C2			Russel	CNIII-C2
		Sabol	CN55-C3			Sabol	CNIII-C3

유출곡선지수 *CN*은 AMC-II ~ AMC-III 조건까지 범위를 설정하였으며, 도달시간을 산정하는 경험식 중에서 유속이 과다하게 산정되는 Kraven I 을 제외하고 Kirpich, Rziha, Kraven II 방법을 채택하였다. 또한 저류상수를 산정하는 경험식 중에서는 Clark, Russel, Sabol 방법을 채택하여 호우사상별로 총 36개의 조합별로 침투유량(Peak flow) 오차, 유출수문곡선 비교, 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error), NSE(Nash-Sutcliffe efficiency) 등을 비교하여 제주도에 최적의 조합을 선정하였다.

## 5.2 최적 매개변수 조합 선정

호우사상에 대하여 장기간 무강우 상태에서 강우-유출이 발생하는 사상과 AMC-III 조건 이상(성수기 53.34mm)의 선행강우 이후 강우-유출이 발생하는 사상으로 구분하여 현장관측자료 및 제주도 고정식 수위-유속 관측자료를 구분하여 모델의 결과와 비교·분석하였다(Table 4.26).

Table 4.26 Applied rainfall event

하천	구분	호우사상	유역평균 5일 선행강우 (mm)
한천	무강우 이후 강우-유출	2011년 11월 집중호우	0
		2012년 4월 집중호우	4.11
	선행강우 이후 강우-유출	2011년 8월 태풍 “무이파”	111.1
		2012년 7월 태풍 “카눈”	124.6
외도천	무강우 이후 강우-유출	2012년 4월 집중호우	3.73
	선행강우 이후 강우-유출	2012년 7월 태풍 “카눈”	71.98

한천유역 무강우 이후 강우-유출 사상에 대하여 2011년 11월 집중호우시 현장관측결과를 이용하였으며, 2012년 4월 집중호우는 제주도 관측자료를 이용하였다. 선행강우 이후 강우-유출 사상에 대하여 2011년 8월 태풍 “무이파”와 2012년 7월 태풍 “카눈” 내습 시 현장 유량관측결과를 이용하였다. 외도천 유역의 무강우 이후 강우-유출 사상에 대하여 2012년 4월 집중호우 사상, 선행강우 이후 강우-유출 사상은 2012년 7월 태풍 “카눈” 사상에 대하여 제주도 관측자료를 이용하였다.

Kim과 Jung(2013) 등은 제주 지역은 큰 호우가 발생한 우기에만 하천유출이 발생하고 평상시에는 하천에 물이 흐르지 않는 간헐천이며, 간헐천은 하천유출 발생시 중간유출 및 지하수유출이 발생하지 않고 하천유출의 전량이 직접유출로 기인한다는 결과를 제시하였다. 평상시 건천이며 호우 시에만 유출이 발생하는 제주도 하천의 유출량은 직접유출이므로 HEC-HMS 모델을 이용하여 단일사상에 대한 유출량을 산정할 경우 기저유량은 고려하지 않았다.

### 5.2.1 매개변수 조합에 따른 호우사상별 유출량 산정 결과

#### (1) 한천유역 무강우 이후 강우-유출 사상

##### 가. 2011년 11월 집중호우

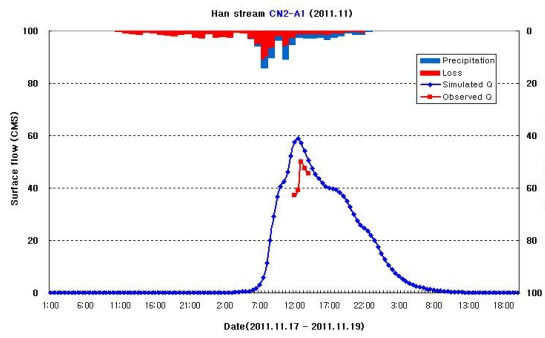
2011년 11월 18일에 유역평균강우량 176.5mm 가 발생하여 한천유역에 유출이 발생하였으며, 현장관측 수행결과 첨두 유량은  $50.11m^3/sec$ 으로 관측되었다. 관측자료

를 이용하여 매개변수를 계산하였으며, 계산 결과는 Table 4.27과 같다.

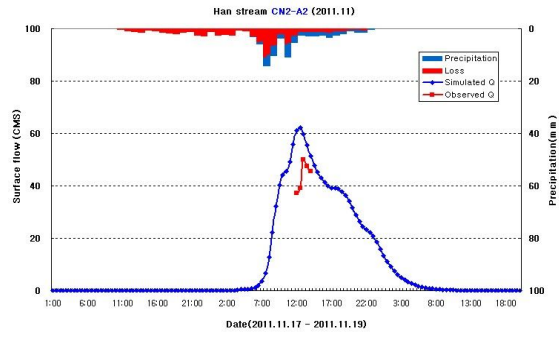
Table 4.27 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(heavy rainfall in October 2011)

기호	유역명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	NRCS	Clark			
			CN	Tc(hr)		K(hr)	
CNⅡ-A1	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNⅡ-A2	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNⅡ-A3	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CNⅡ-B1	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNⅡ-B2	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNⅡ-B3	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNⅡ-C1	한천	36.68	69.65	KravenⅡ	3.30	Clark	2.99
CNⅡ-C2	한천	36.68	69.65	KravenⅡ	3.30	Russel	4.95
CNⅡ-C3	한천	36.68	69.65	KravenⅡ	3.30	Sabol	5.44
CN55-A1	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CN55-A2	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CN55-A3	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CN55-B1	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN55-B2	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN55-B3	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN55-C1	한천	36.68	76.86	KravenⅡ	3.30	Clark	2.99
CN55-C2	한천	36.68	76.86	KravenⅡ	3.30	Russel	4.95
CN55-C3	한천	36.68	76.86	KravenⅡ	3.30	Sabol	5.44
CN37-A1	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CN37-A2	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CN37-A3	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CN37-B1	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN37-B2	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN37-B3	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN37-C1	한천	36.68	79.74	KravenⅡ	3.30	Clark	2.99
CN37-C2	한천	36.68	79.74	KravenⅡ	3.30	Russel	4.95
CN37-C3	한천	36.68	79.74	KravenⅡ	3.30	Sabol	5.44
CNⅢ-A1	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNⅢ-A2	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNⅢ-A3	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CNⅢ-B1	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNⅢ-B2	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNⅢ-B3	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNⅢ-C1	한천	36.68	84.07	KravenⅡ	3.30	Clark	2.99
CNⅢ-C2	한천	36.68	84.07	KravenⅡ	3.30	Russel	4.95
CNⅢ-C3	한천	36.68	84.07	KravenⅡ	3.30	Sabol	5.44

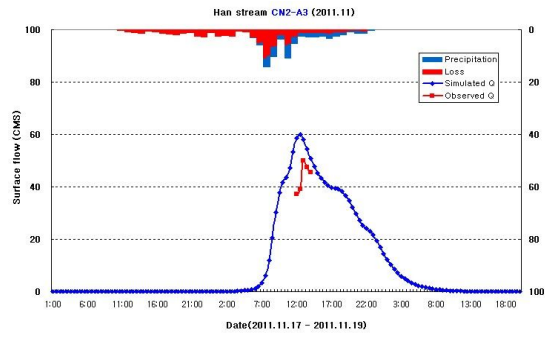
계산된 단위도법 매개변수를 이용하여 HEC-HMS 모델에 적용하였으며, 매개변수 조합에 따른 모델 결과는 Fig. 4.29~Fig. 4.32와 같다.



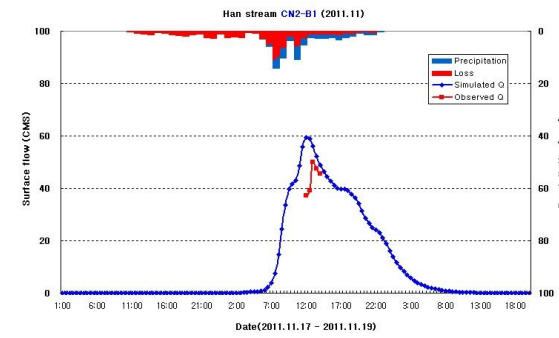
CNII-A1



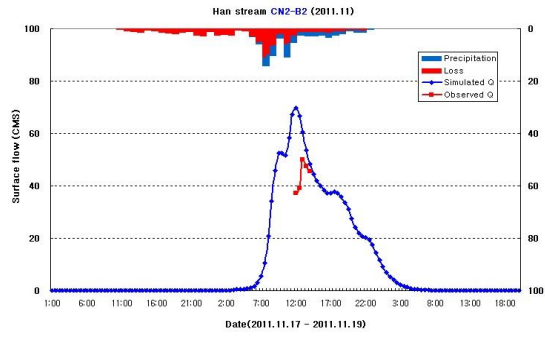
CNII-A2



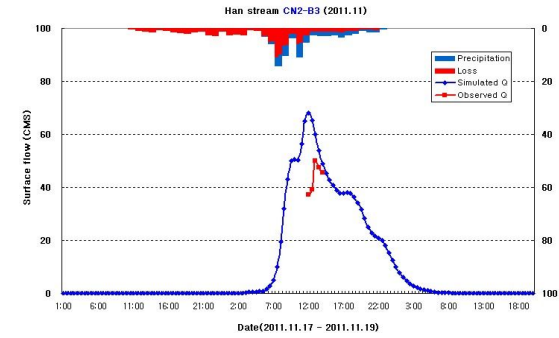
CNII-A3



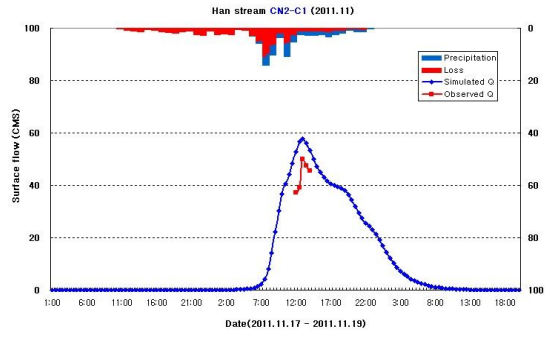
CNII-B1



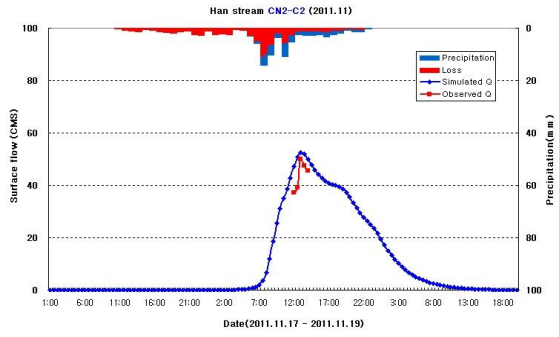
CNII-B2



CNII-B3

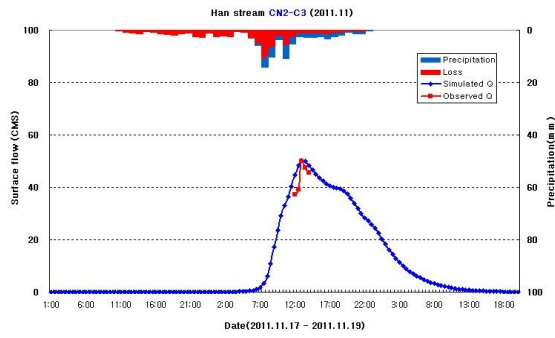


CNII-C1



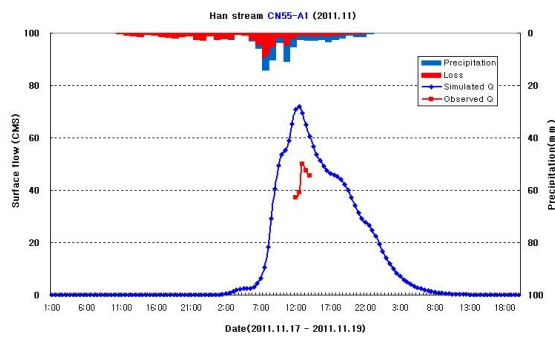
CNII-C2



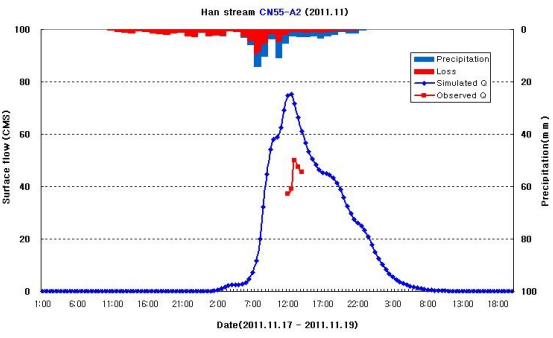


CNII-C2

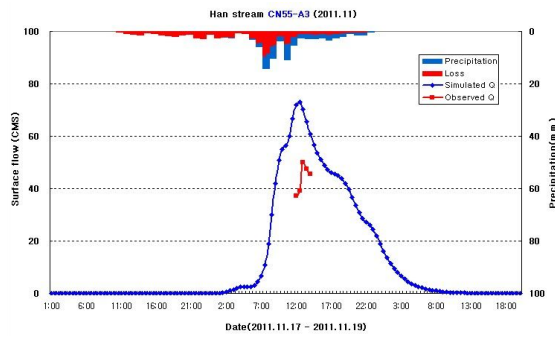
Fig. 4.29 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Heavy rainfall in October 2011)



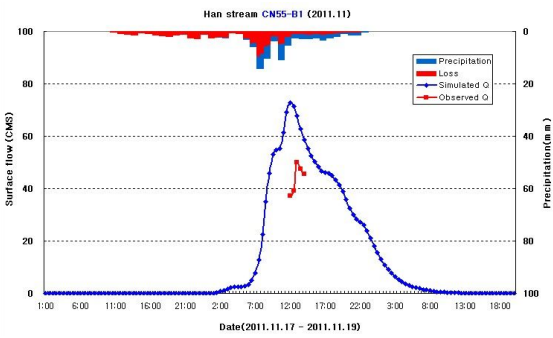
CN55-A1



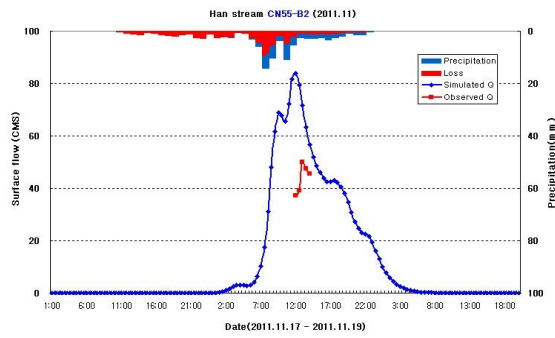
CN55-A2



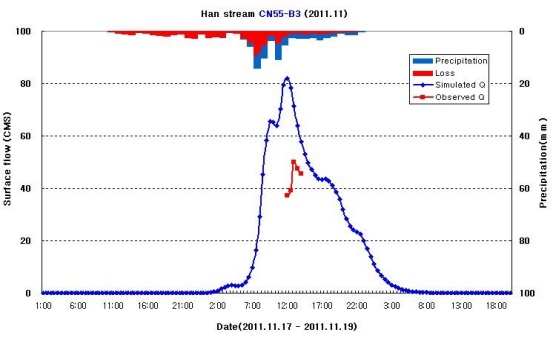
CN55-A3



CN55-B1



CN55-B2



CN55-B3



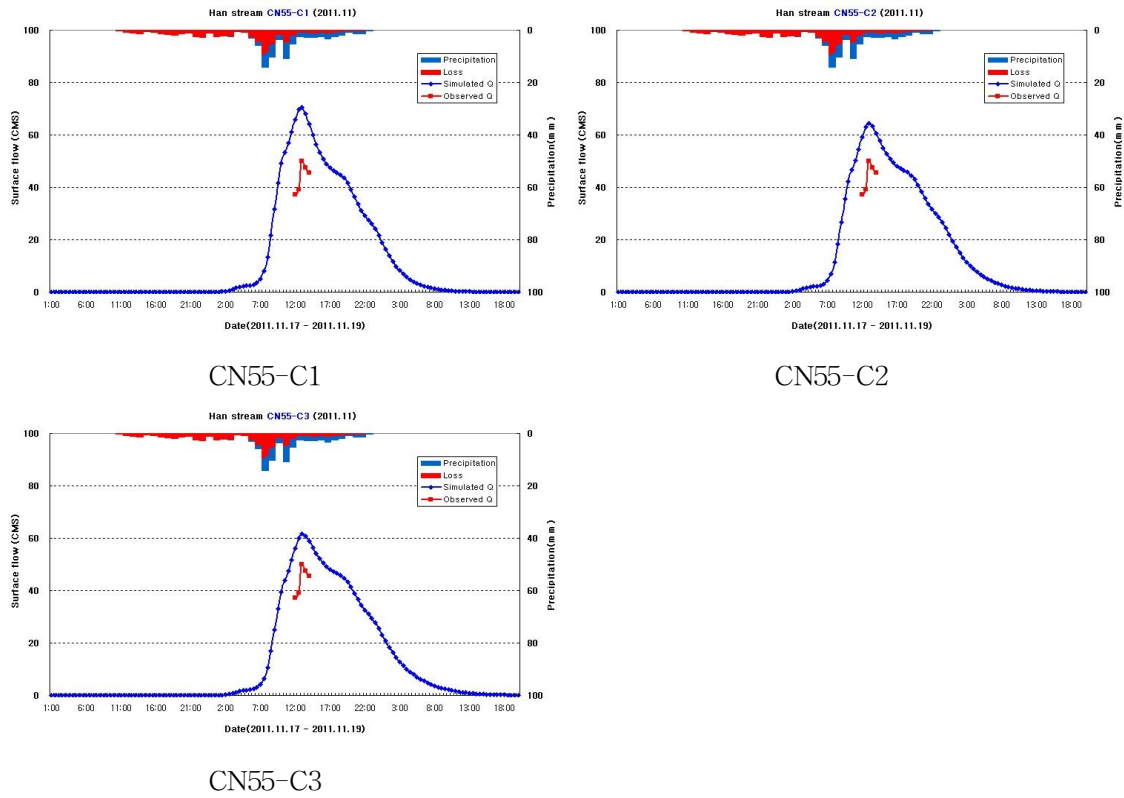
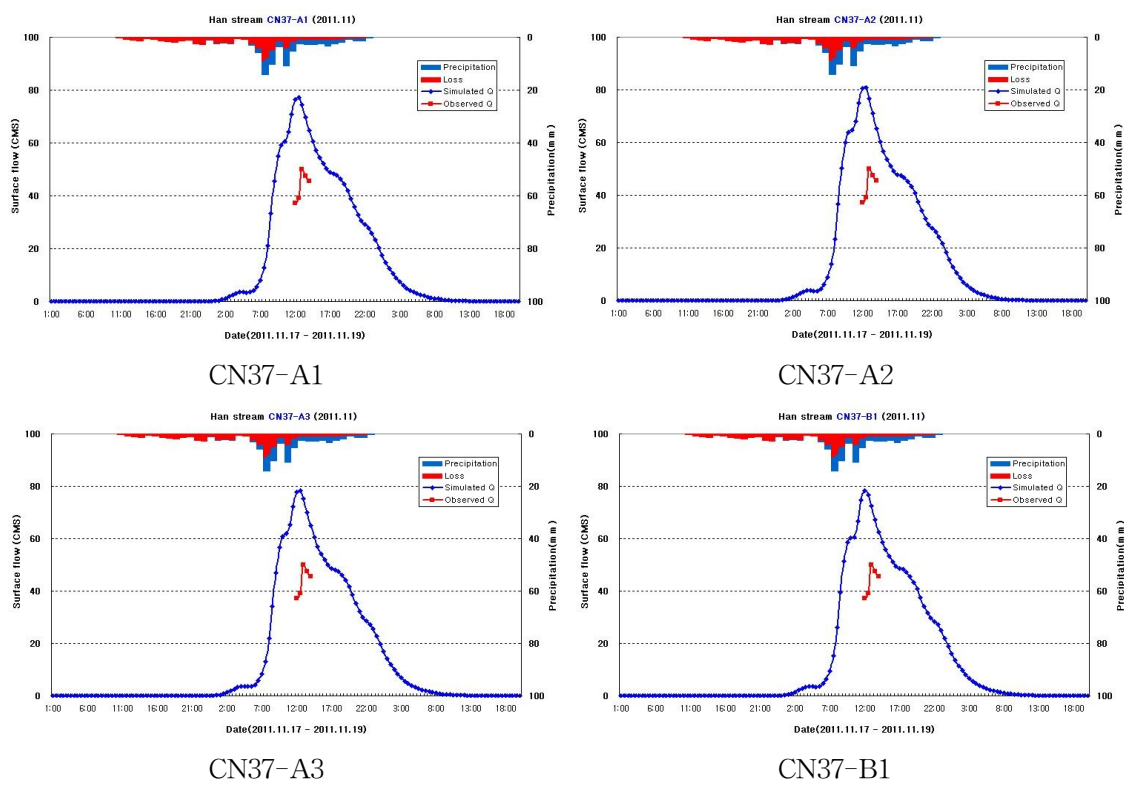


Fig. 4.30 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination(Heavy rainfall in October 2011)



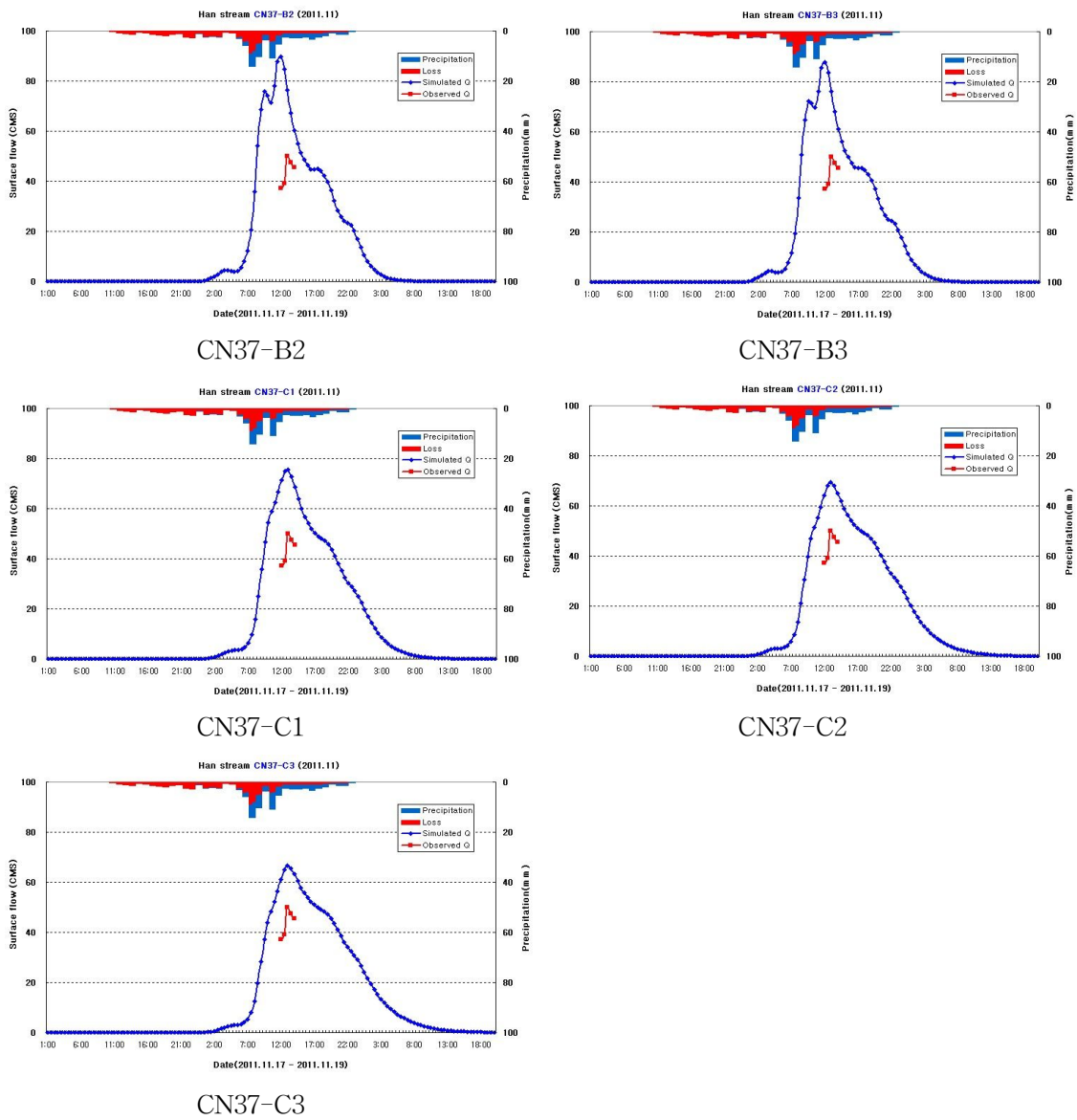
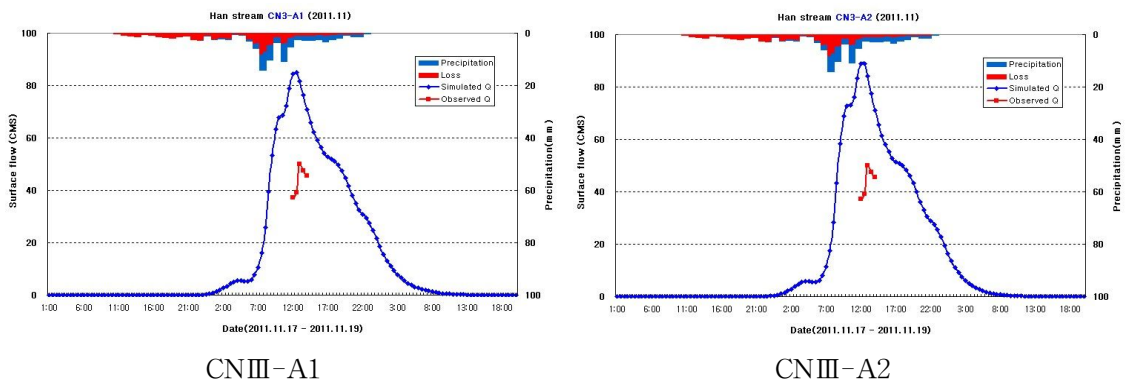


Fig. 4.31 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Heavy rainfall in October 2011)



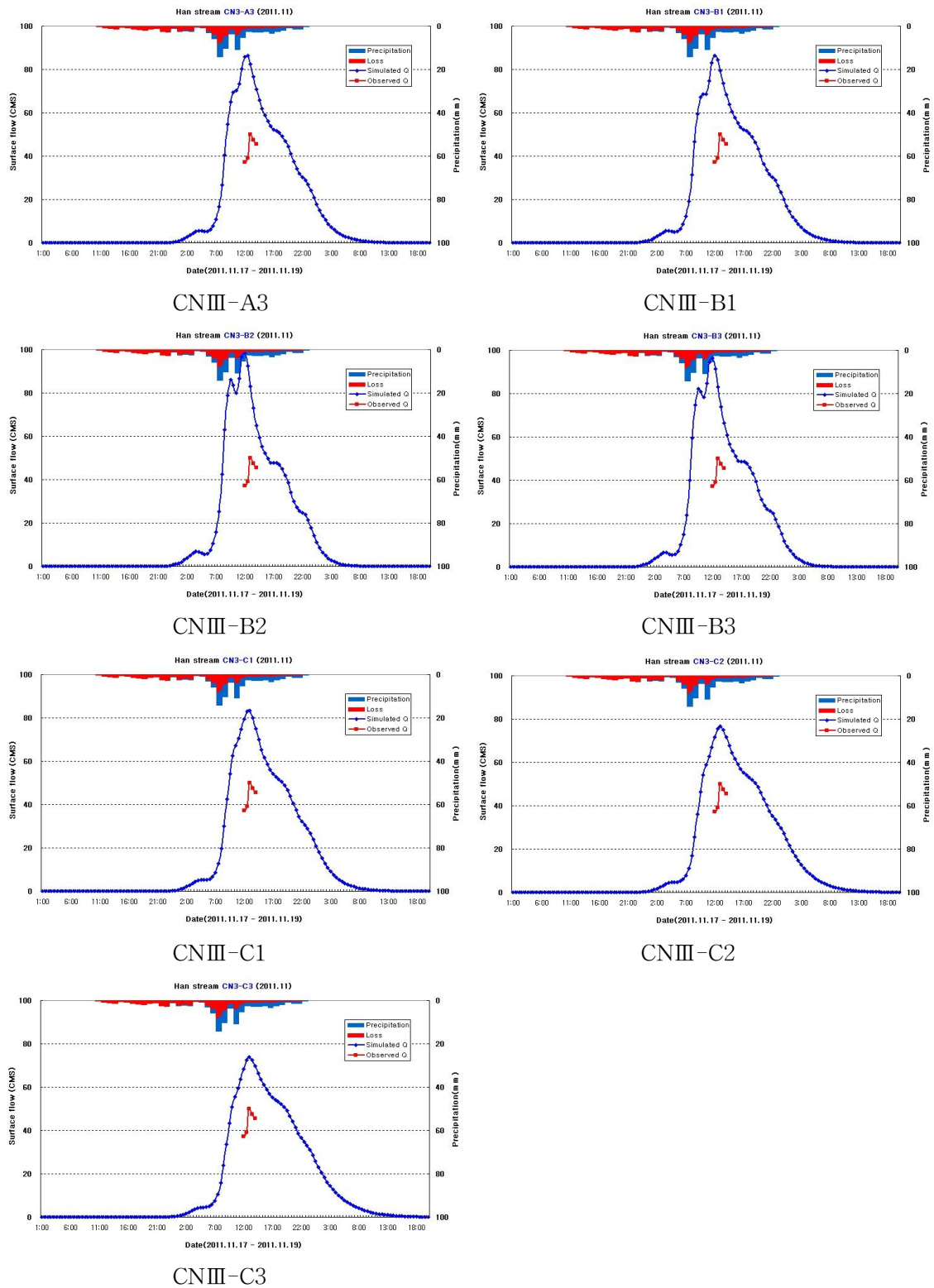


Fig. Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination(Heavy rainfall in October 2011)

무강우 이후 발생한 2011년 11월 집중호우 사상에서는 CNII-C3 조합이 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 4.28). AMC-II 조건의 유출곡선지수 CNII와 유속을 도입한 도달시간 산정방법인 KravenII, 유역형상을 고려한 저류상수 산정방법인 Sabol 방법의 조합이 관측유량 대비 첨두유량 오차가 0.10%, RMSE가 5.54 로 가장 적합한 조합으로 나타났다.

Table 4.28 Results according to parameter combination(heavy rainfall in October 2011)

구분	Peak flow		Error (%)	RMSE (cms)	구분	Peak flow		Error (%)	RMSE (cms)
	Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)				Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)		
CNII-A1	59.00	50.11	15.07	13.61	CN37-A1	77.24	50.11	35.12	29.74
CNII-A2	62.09	50.11	19.29	16.00	CN37-A2	80.74	50.11	37.94	32.39
CNII-A3	60.00	50.11	16.48	14.39	CN37-A3	78.38	50.11	36.07	30.61
CNII-B1	59.39	50.11	15.62	13.81	CN37-B1	78.20	50.11	35.92	29.19
CNII-B2	69.80	50.11	28.21	19.84	CN37-B2	89.86	50.11	44.23	35.07
CNII-B3	67.94	50.11	26.24	18.89	CN37-B3	87.87	50.11	42.97	34.31
CNII-C1	57.84	50.11	13.36	12.24	CN37-C1	75.64	50.11	33.75	29.25
CNII-C2	52.53	50.11	4.60	7.48	CN37-C2	69.43	50.11	27.82	23.41
<b>CNII-C3</b>	<b>50.16</b>	<b>50.11</b>	<b>0.10</b>	<b>5.54</b>	CN37-C3	66.58	50.11	24.74	20.74
CN55-A1	71.89	50.11	30.30	24.91	CNIII-A1	85.12	50.11	41.13	36.89
CN55-A2	75.28	50.11	33.44	27.52	CNIII-A2	88.87	50.11	43.61	39.60
CN55-A3	72.99	50.11	31.35	25.77	CNIII-A3	86.31	50.11	41.94	37.79
CN55-B1	72.67	50.11	31.05	24.55	CNIII-B1	86.35	50.11	41.97	36.07
CN55-B2	84.01	50.11	40.36	30.54	CNIII-B2	98.42	50.11	49.08	41.74
CN55-B3	82.05	50.11	38.93	29.72	CNIII-B3	96.40	50.11	48.02	41.08
CN55-C1	70.42	50.11	28.84	24.20	CNIII-C1	83.33	50.11	39.87	36.72
CN55-C2	64.45	50.11	22.25	18.61	CNIII-C2	76.79	50.11	34.75	30.56
CN55-C3	61.74	50.11	18.83	16.08	CNIII-C3	73.77	50.11	32.07	27.70

#### 나. 2012년 4월 집중호우

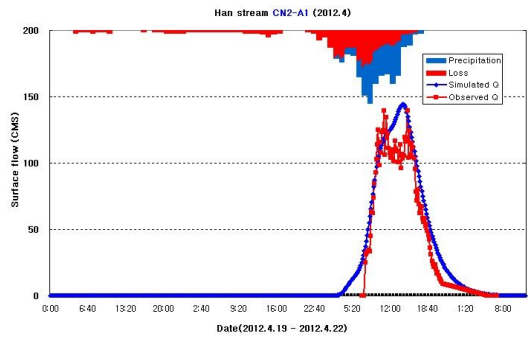
2012년 4월21일에 유역평균강우량 287.95mm가 발생하여 한천유역에 유출이 발생하였으며 제주시 관측자료를 이용하였다. 유량을 산정한 결과 첨두유량은 139.55  $m^3/sec$ , 도달시간 관측유속은 2.83  $m/sec$ 로 나타났다. 관측자료를 이용하여 매개변

수 조합을 계산하였으며, 계산 결과는 Table 4.29와 같다.

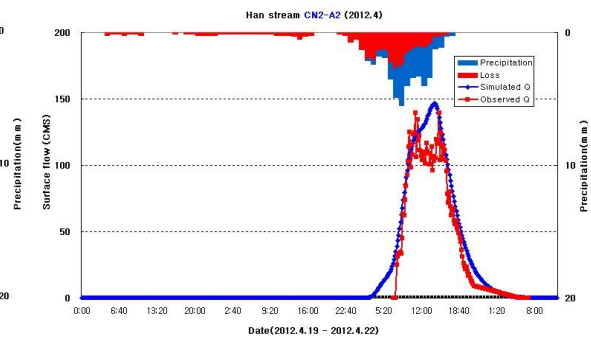
Table 4.29 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Heavy rainfall in April 2012)

기호	유역명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	NRCS	Clark			
			CN	Tc(hr)		K(hr)	
CNII-A1	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNII-A2	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNII-A3	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Sabol	2.85
CNII-B1	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNII-B2	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNII-B3	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNII-C1	한천	36.68	69.65	Kraven II	1.87	Clark	2.99
CNII-C2	한천	36.68	69.65	Kraven II	1.87	Russel	2.80
CNII-C3	한천	36.68	69.65	Kraven II	1.87	Sabol	3.08
CN55-A1	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.55	Clark	2.99
CN55-A2	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.55	Russel	2.60
CN55-A3	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.55	Sabol	2.85
CN55-B1	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN55-B2	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN55-B3	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN55-C1	한천	36.68	76.86	Kraven II	1.87	Clark	2.99
CN55-C2	한천	36.68	76.86	Kraven II	1.87	Russel	2.80
CN55-C3	한천	36.68	76.86	Kraven II	1.87	Sabol	3.08
CN37-A1	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.55	Clark	2.99
CN37-A2	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.55	Russel	2.60
CN37-A3	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.55	Sabol	2.85
CN37-B1	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN37-B2	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN37-B3	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN37-C1	한천	36.68	79.74	Kraven II	1.87	Clark	2.99
CN37-C2	한천	36.68	79.74	Kraven II	1.87	Russel	2.80
CN37-C3	한천	36.68	79.74	Kraven II	1.87	Sabol	3.08
CNIII-A1	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.55	Clark	2.99
CNIII-A2	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.55	Russel	2.60
CNIII-A3	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.55	Sabol	2.85
CNIII-B1	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNIII-B2	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNIII-B3	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNIII-C1	한천	36.68	84.07	Kraven II	1.87	Clark	2.99
CNIII-C2	한천	36.68	84.07	Kraven II	1.87	Russel	2.80
CNIII-C3	한천	36.68	84.07	Kraven II	1.87	Sabol	3.08

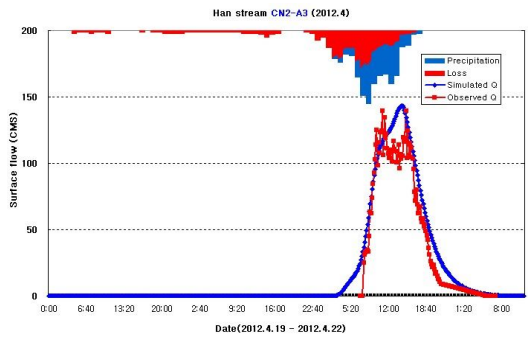
계산된 단위도법 매개변수를 이용하여 HEC-HMS 모델에 적용하였으며, 매개변수 조합에 따른 모델 결과는 Fig. 4.33~Fig. 4.36과 같다.



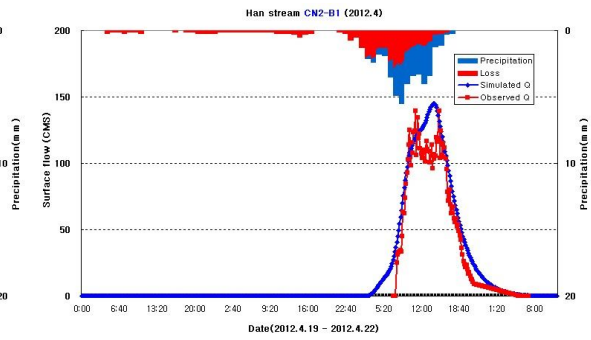
CNII-A1



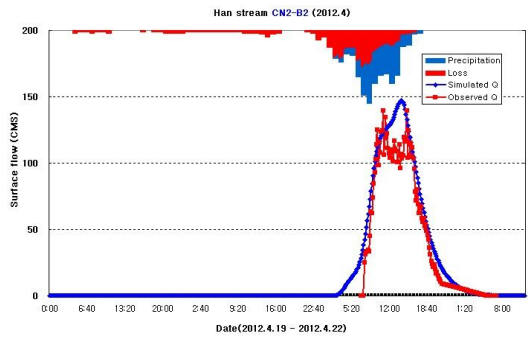
CNII-A2



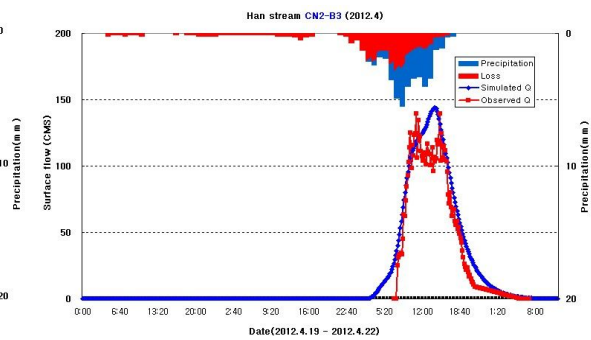
CNII-A3



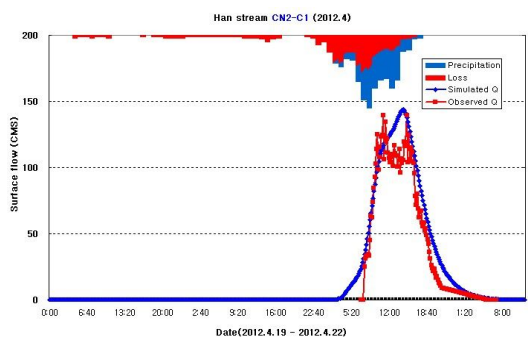
CNII-B1



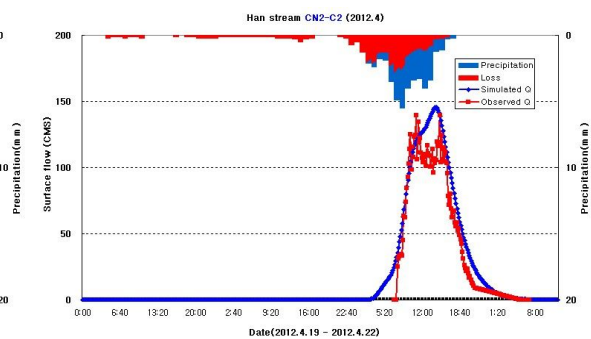
CNII-B2



CNII-B3

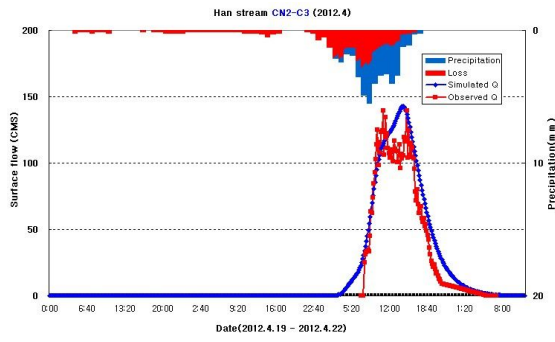


CNII-C1



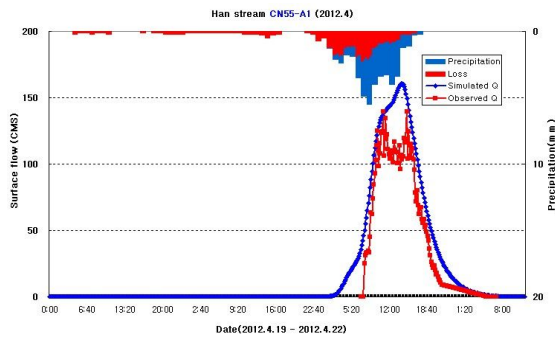
CNII-C2



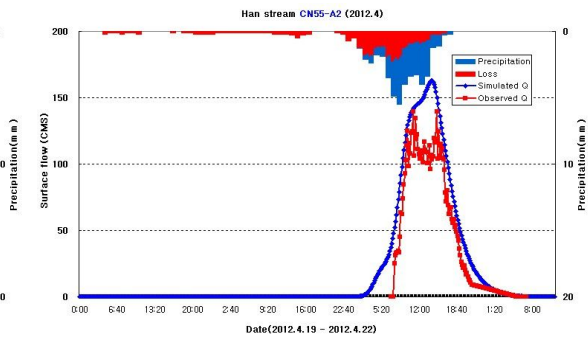


CNII-C3

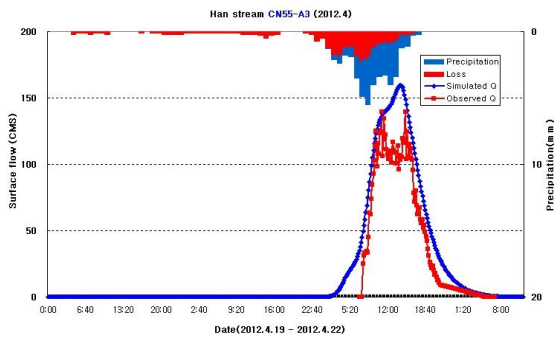
Fig. 4.33 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012)



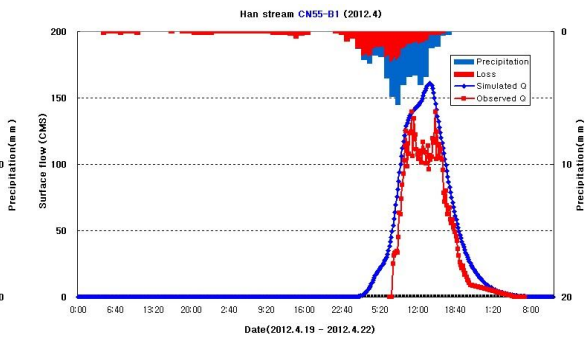
CN55-A1



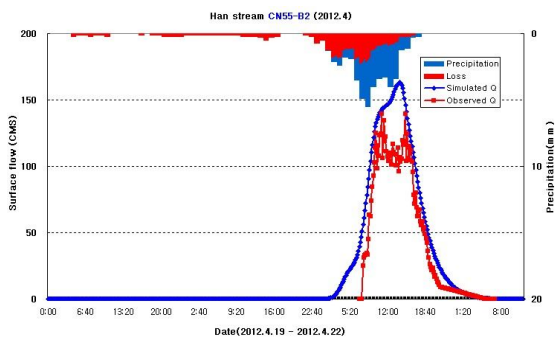
CN55-A2



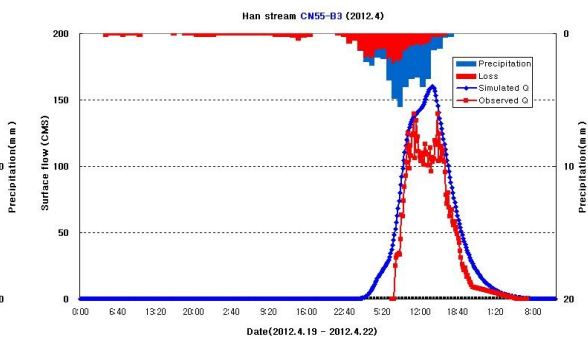
CN55-A3



CN55-B1



CN55-B2



CN55-B3



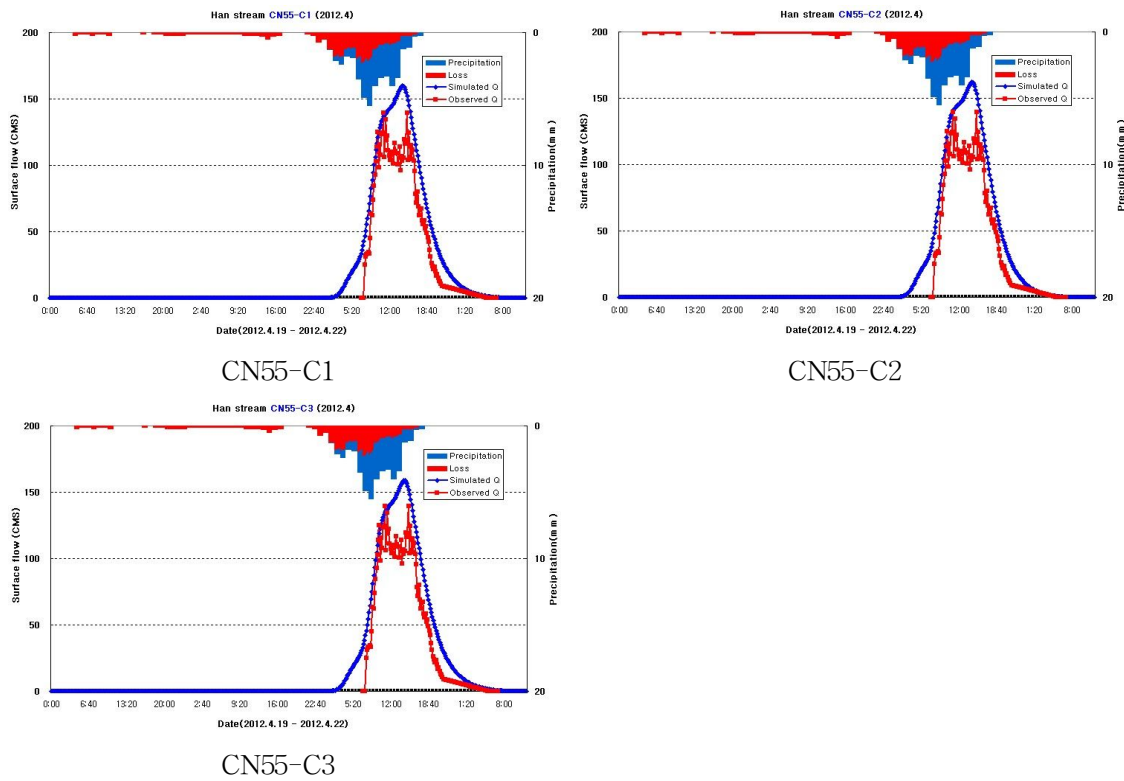
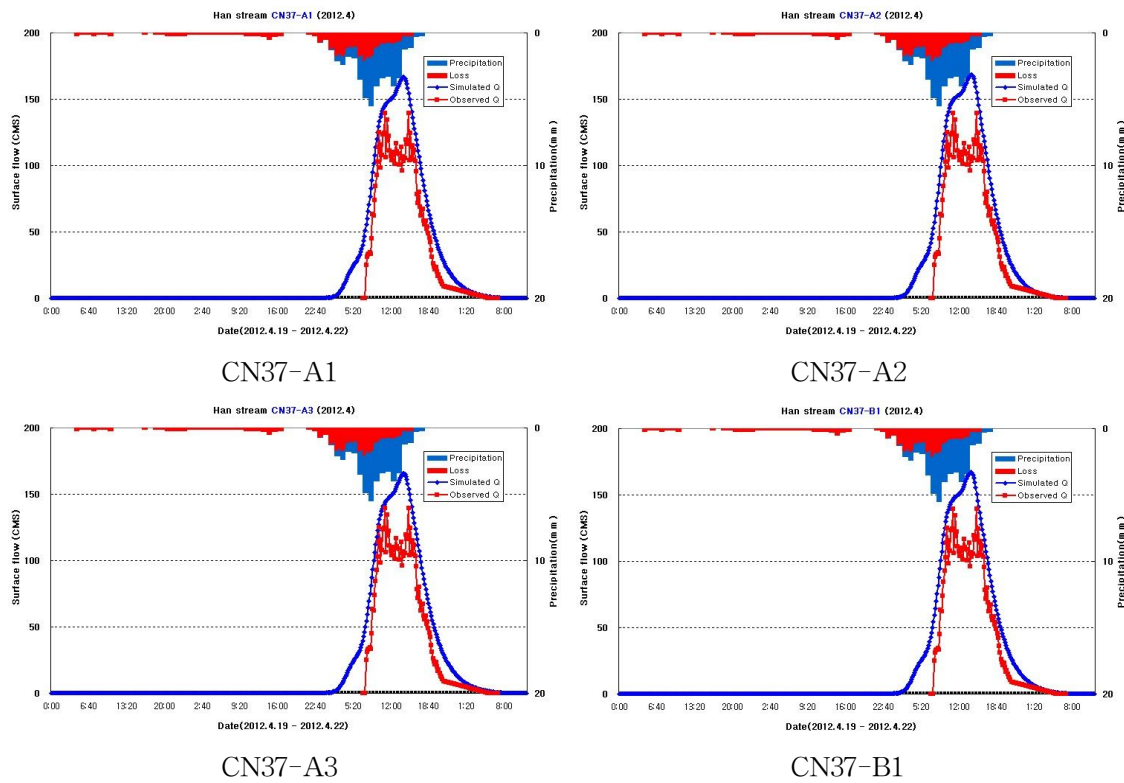


Fig. 4.34 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012)



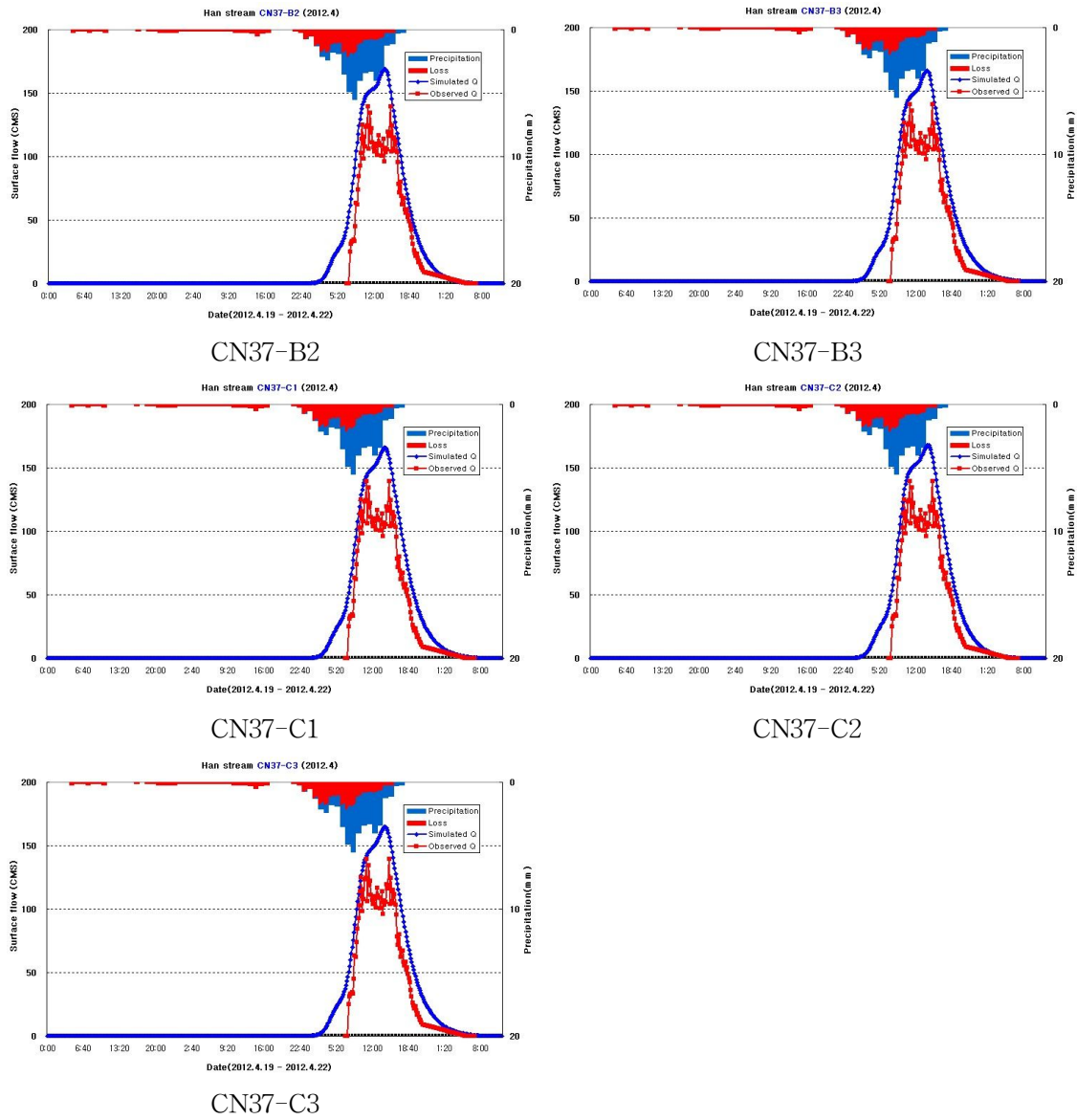
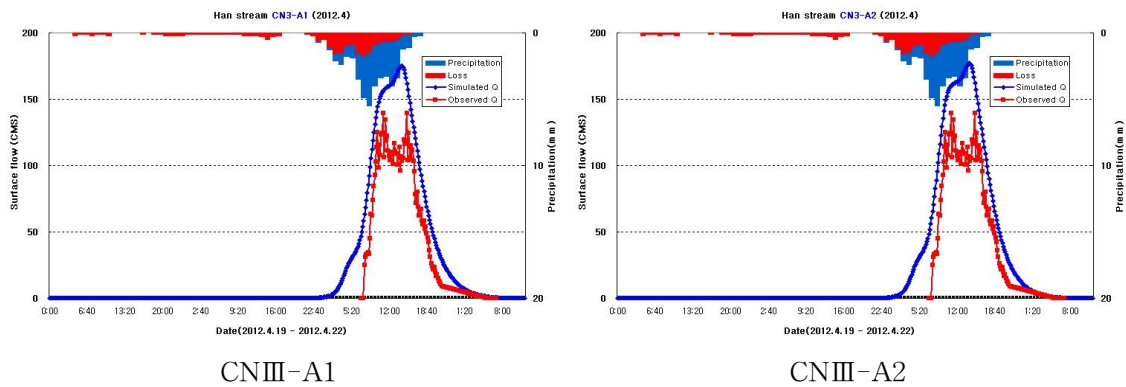


Fig. 4.35 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012)



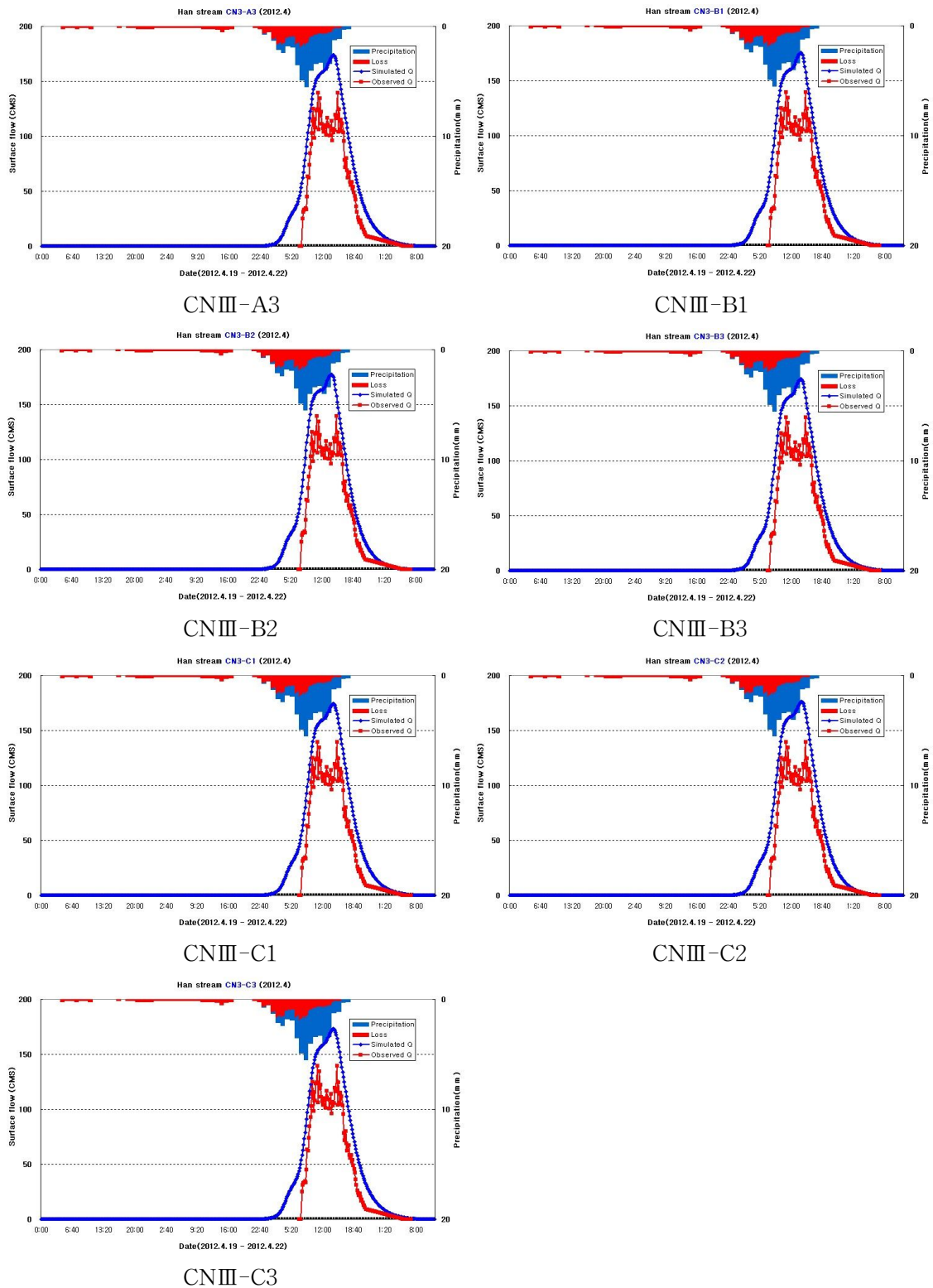


Fig. 4.36 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination(Heavy rainfall in April 2012)

무강우 이후 발생한 2012년 4월 집중호우 사상에서는 AMCⅡ 조건의 유출곡선지수 CNⅡ, 도달시간 산정방법 KravenⅡ, 저류상수 산정방법 Sabol 의 조합이 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 4.30). 제주도 관측유량 대비 첨두유량 오차가 2.19%, RMSE가 14.78로 2011년 11월 집중호우와 동일한 조합이 최적의 조합으로 분석되었다.

Table 4.30 Results according to parameter combination(Heavy rainfall in April 2012)

구분	Peak flow		Error (%)	RMSE (cms)	구분	Peak flow		Error (%)	RMSE (cms)
	Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)				Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)		
CNⅡ-A1	144.42	139.55	3.37	15.62	CN37-A1	166.44	139.55	16.16	28.12
CNⅡ-A2	146.49	139.55	4.74	15.77	CN37-A2	168.55	139.55	17.21	28.89
CNⅡ-A3	143.41	139.55	2.69	15.63	CN37-A3	165.44	139.55	15.65	27.81
CNⅡ-B1	144.88	139.55	3.68	15.47	CN37-B1	166.97	139.55	16.42	28.29
CNⅡ-B2	146.99	139.55	5.06	15.84	CN37-B2	169.00	139.55	17.43	29.19
CNⅡ-B3	143.86	139.55	3.00	15.38	CN37-B3	165.97	139.55	15.92	27.91
CNⅡ-C1	143.66	139.55	2.86	16.13	CN37-C1	165.84	139.55	15.85	28.14
CNⅡ-C2	145.71	139.55	4.23	16.04	CN37-C2	167.92	139.55	16.89	28.75
<b>CNⅡ-C3</b>	<b>142.68</b>	<b>139.55</b>	<b>2.19</b>	<b>14.78</b>	CN37-C3	164.82	139.55	15.33	27.90
CN55-A1	160.51	139.55	13.06	24.35	CNⅢ-A1	174.89	139.55	20.21	33.74
CN55-A2	162.58	139.55	14.17	25.01	CNⅢ-A2	176.95	139.55	21.14	34.62
CN55-A3	159.52	139.55	12.52	24.10	CNⅢ-A3	173.88	139.55	19.74	33.36
CN55-B1	161.04	139.55	13.34	24.47	CNⅢ-B1	175.30	139.55	20.39	33.96
CN55-B2	163.11	139.55	14.44	25.28	CNⅢ-B2	177.28	139.55	21.28	34.96
CN55-B3	160.03	139.55	12.80	24.15	CNⅢ-B3	174.33	139.55	19.95	33.52
CN55-C1	159.86	139.55	12.70	24.46	CNⅢ-C1	174.27	139.55	19.92	33.66
CN55-C2	161.96	139.55	13.84	24.94	CNⅢ-C2	176.29	139.55	20.84	34.42
CN55-C3	158.83	139.55	12.14	24.28	CNⅢ-C3	173.27	139.55	19.46	33.35

## (2) 한천유역 선행강우 이후 강우-유출 사상

### 가. 2011년 8월 태풍 “무이파”

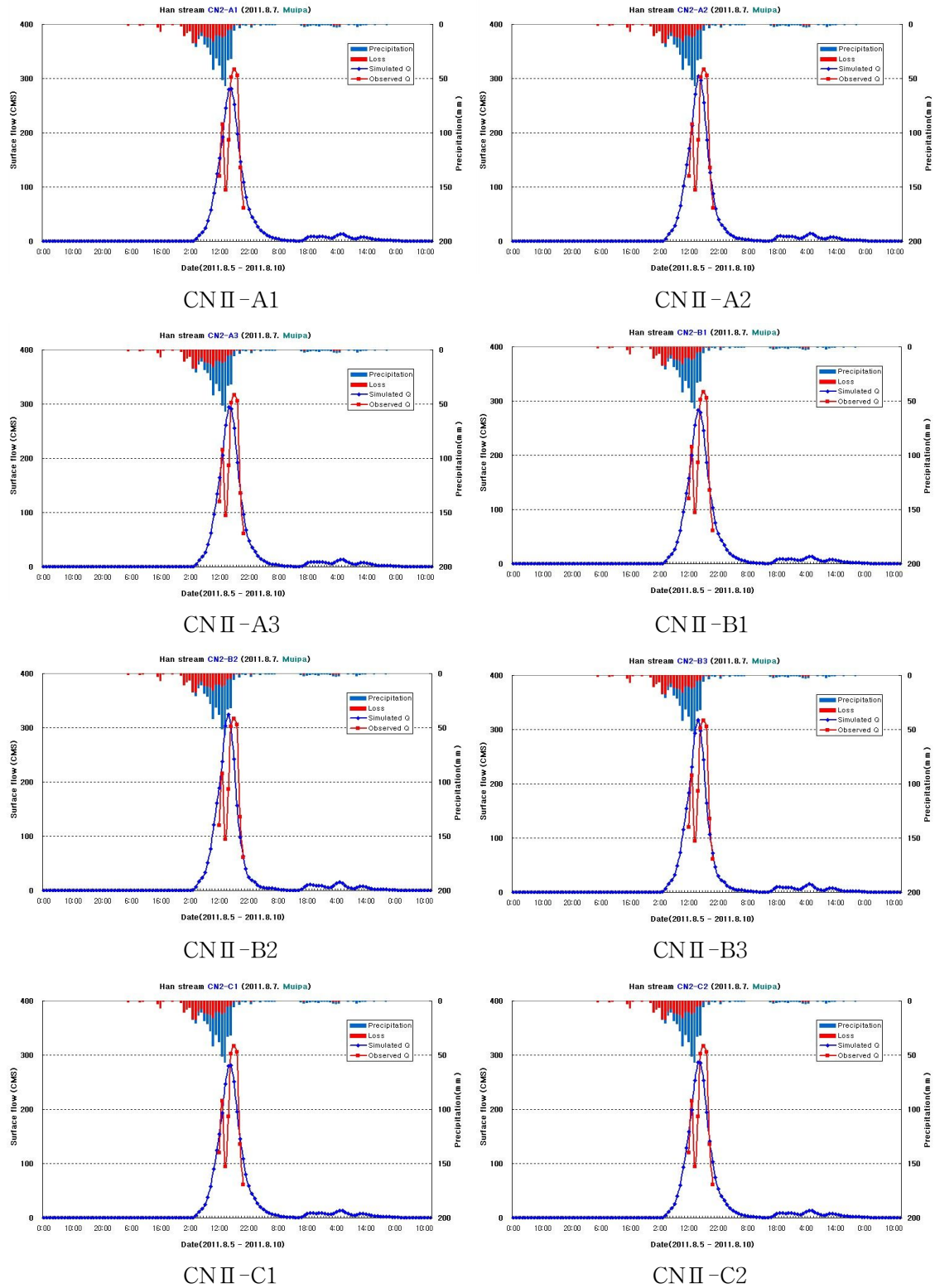
2011년 제9호 태풍 “무이파”는 8월 7일 제주도에 상륙하였으며, 유역평균강우량 467.93mm가 발생하여 유출이 발생하였으며, 태풍의 영향권으로 접어든 8월 6일 이전 5일 동안 선행강우는 111.10mm가 발생하였다. 유량관측결과 첨두유량은 316.37

$m^3/sec$ , 도달시간 관측유속은  $3.5m/sec$ 로 관측되었으며, 오전 11시 반경에 한천 저류지가 개방되어 수문곡선 하강현상이 나타났다. 관측자료를 이용하여 매개변수 조합을 계산하였으며, 계산 결과는 Table 4.31과 같다.

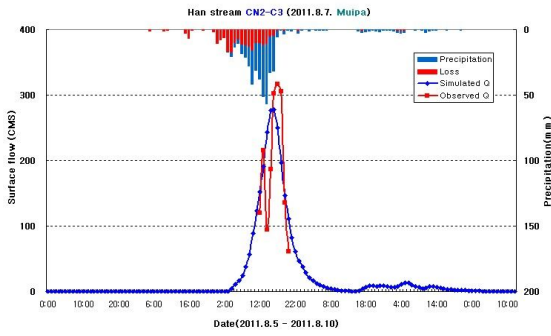
Table 4.31 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Typhoon "Muifa" in 2011)

기호	유역명	유역면적 ( $km^2$ )	NRCS CN	Clark			
				Tc(hr)		K(hr)	
CNII-A1	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNII-A2	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNII-A3	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CNII-B1	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNII-B2	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNII-B3	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNII-C1	한천	36.68	69.65	Kraven II	1.51	Clark	2.99
CNII-C2	한천	36.68	69.65	Kraven II	1.51	Russel	2.26
CNII-C3	한천	36.68	69.65	Kraven II	1.51	Sabol	2.49
CN55-A1	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CN55-A2	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CN55-A3	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CN55-B1	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN55-B2	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN55-B3	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN55-C1	한천	36.68	76.86	Kraven II	1.51	Clark	2.99
CN55-C2	한천	36.68	76.86	Kraven II	1.51	Russel	2.26
CN55-C3	한천	36.68	76.86	Kraven II	1.51	Sabol	2.49
CN37-A1	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CN37-A2	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CN37-A3	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CN37-B1	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN37-B2	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN37-B3	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN37-C1	한천	36.68	79.74	Kraven II	1.51	Clark	2.99
CN37-C2	한천	36.68	79.74	Kraven II	1.51	Russel	2.26
CN37-C3	한천	36.68	79.74	Kraven II	1.51	Sabol	2.49
CNIII-A1	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNIII-A2	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNIII-A3	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CNIII-B1	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNIII-B2	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNIII-B3	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNIII-C1	한천	36.68	84.07	Kraven II	1.51	Clark	2.99
CNIII-C2	한천	36.68	84.07	Kraven II	1.51	Russel	2.26
CNIII-C3	한천	36.68	84.07	Kraven II	1.51	Sabol	2.49

계산된 단위도범 매개변수를 이용하여 HEC-HMS 모델에 적용하였으며, 매개변수 조합에 따른 모델 결과는 Fig. 4.37~Fig. 4.40과 같다.

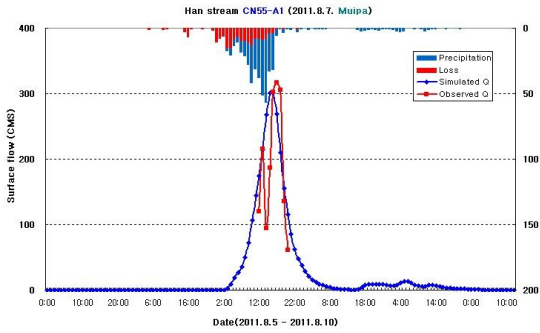




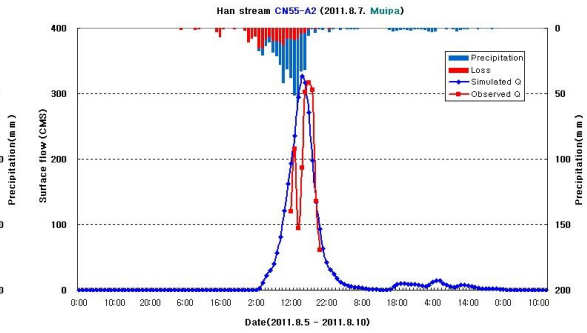


CNII-C3

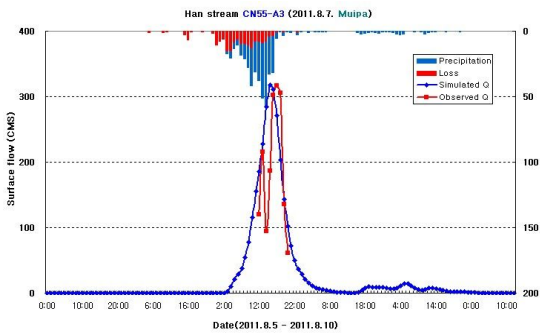
Fig. 4.37 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011)



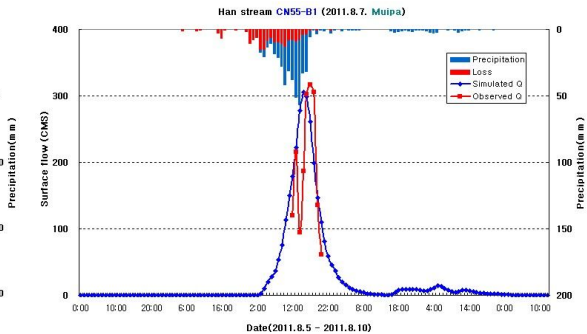
CN55-A1



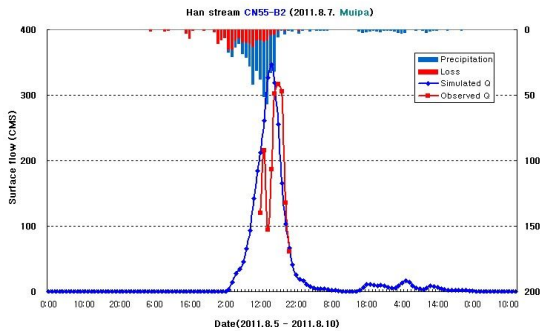
CN55-A2



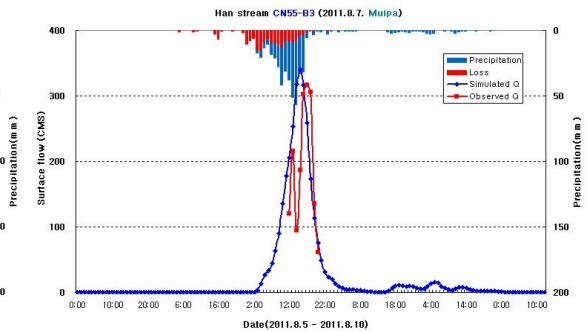
CN55-A3



CN55-B1



CN55-B2



CN55-B3



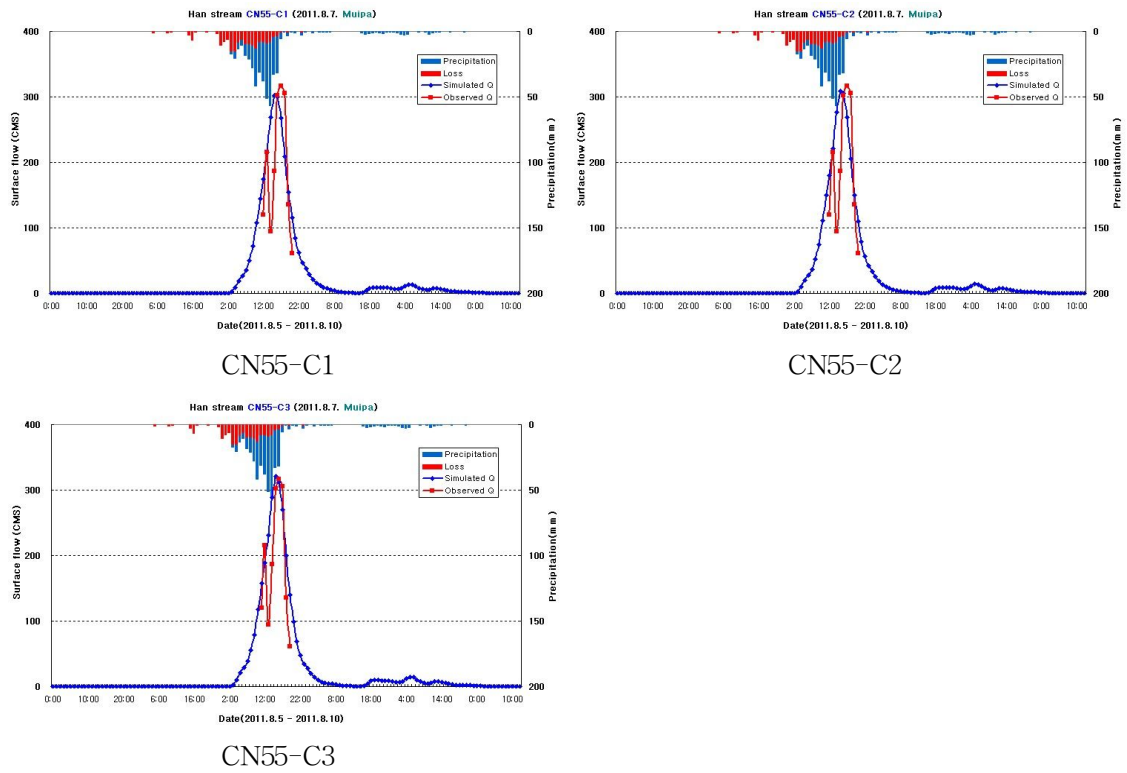
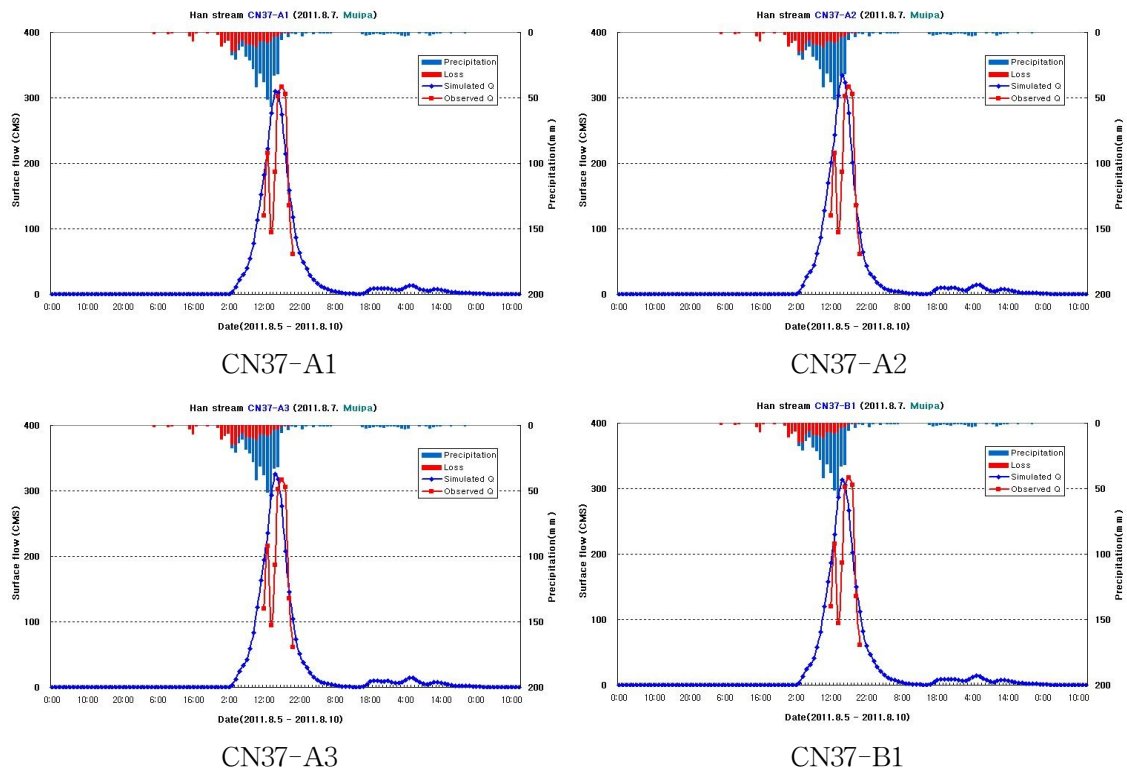


Fig. 4.38 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011)



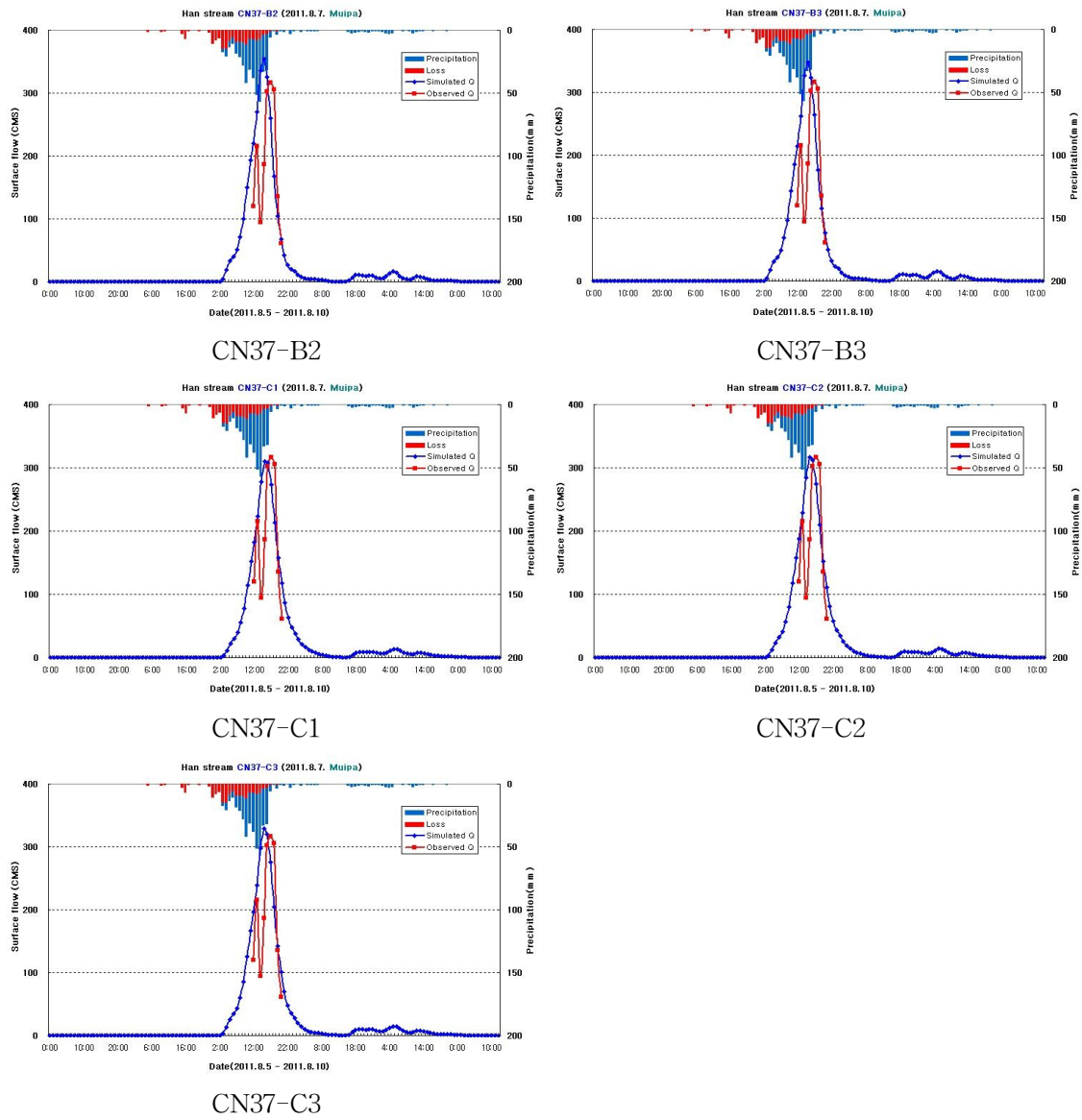
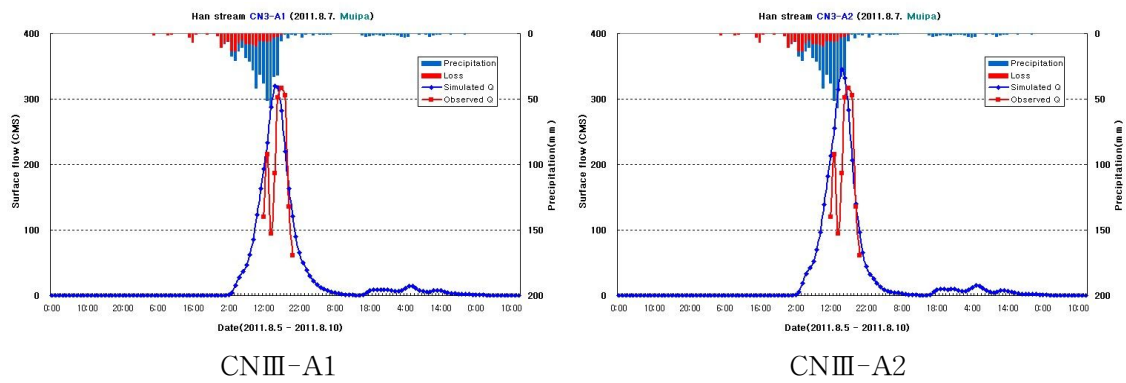


Fig. 4.39 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011)



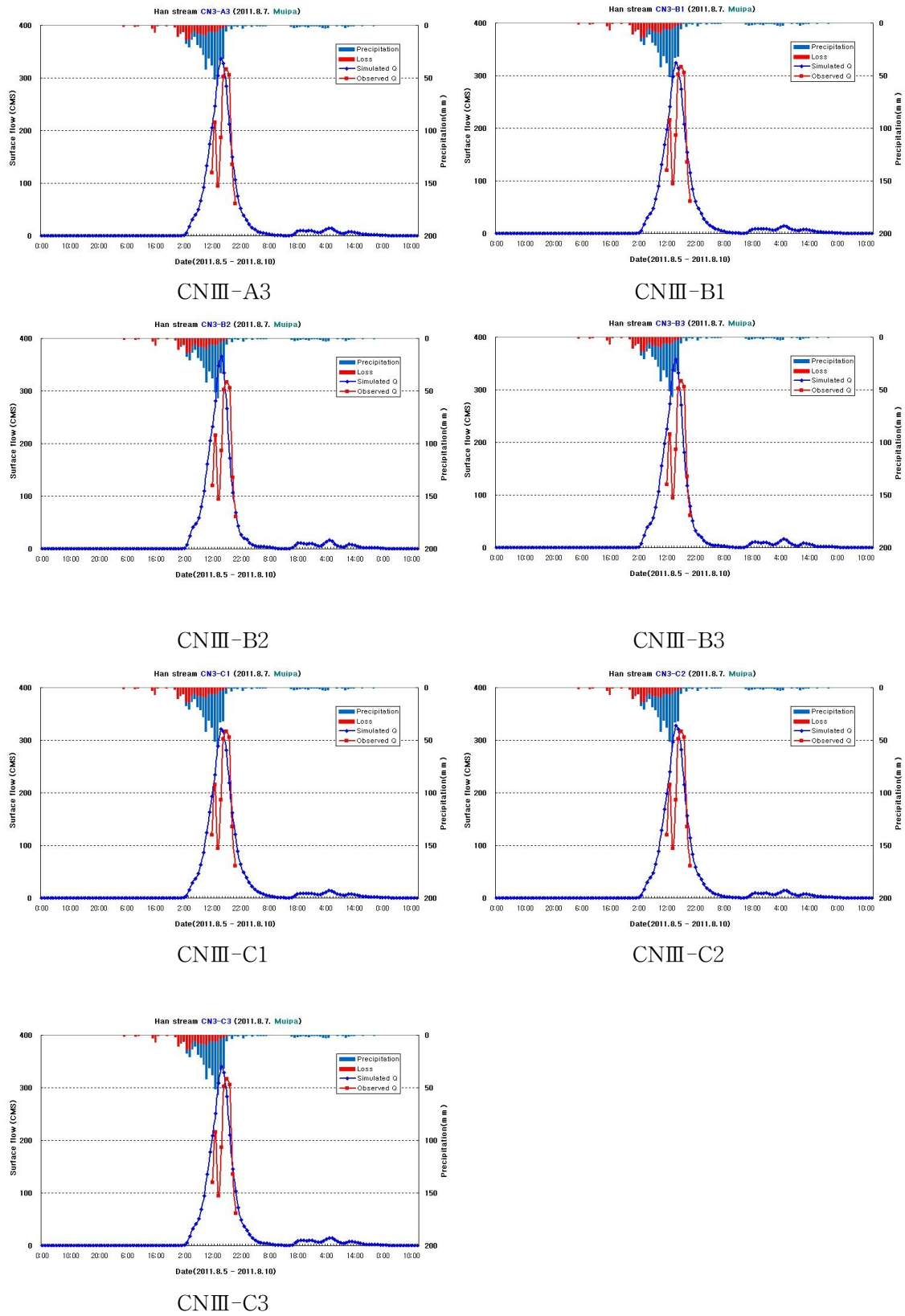


Fig. 4.40 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Typhoon "Muifa" in 2011)

AMCⅢ 조건 이상의 선행 강우 이후 발생한 태풍 “무이파” 사상에서는 CN55, KravenⅡ, Sabol 방법의 조합이 첨두유량 발생시간을 고려하여 가장 적합한 것으로 나타났다. 현장 관측유량 대비 오차가 1.40%로 나타났으며, 저류지 효과로 인하여 관측치와 모델결과의 RMSE 검토는 고려하지 않았다. Table 4.32에서 CNⅡ-B3, CN55-A3, CN37-C2, CNⅢ-C1 조건에서 오차가 0.19~1.43%로 매우 적게 나타났으나 Fig 4.32~4.36에서 보면 첨두유량 발생시간 오차가 최소 2시간 이상 발생하여 최적의 조합으로 결정하지 않았다.

Table 4.32 Results according to parameter combination(Typhoon "Muifa" in 2011)

구분	Peak flow		Error (%)	구분	Peak flow		Error (%)
	Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)			Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)	
CNⅡ-A1	280.82	316.37	-12.66	CN37-A1	309.58	316.37	-2.19
CNⅡ-A2	303.95	316.37	-4.09	CN37-A2	334.56	316.37	5.44
CNⅡ-A3	294.92	316.37	-7.27	CN37-A3	325.41	316.37	2.78
CNⅡ-B1	283.58	316.37	-11.56	CN37-B1	313.39	316.37	-0.95
CNⅡ-B2	324.52	316.37	2.51	CN37-B2	354.61	316.37	10.78
CNⅡ-B3	317.40	316.37	0.32	CN37-B3	347.58	316.37	8.98
CNⅡ-C1	280.63	316.37	-12.74	CN37-C1	310.05	316.37	-2.04
CNⅡ-C2	286.70	316.37	-10.35	CN37-C2	316.96	316.37	0.19
CNⅡ-C3	278.18	316.37	-13.73	CN37-C3	328.85	316.37	3.80
CN55-A1	301.65	316.37	-4.88	CNⅢ-A1	320.52	316.37	1.29
CN55-A2	326.56	316.37	3.12	CNⅢ-A2	345.54	316.37	8.44
CN55-A3	317.42	316.37	0.33	CNⅢ-A3	336.40	316.37	5.95
CN55-B1	305.55	316.37	-3.54	CNⅢ-B1	324.18	316.37	2.41
CN55-B2	346.80	316.37	8.77	CNⅢ-B2	365.26	316.37	13.38
CN55-B3	339.72	316.37	6.87	CNⅢ-B3	358.31	316.37	11.70
CN55-C1	302.14	316.37	-4.71	CNⅢ-C1	320.97	316.37	1.43
CN55-C2	309.01	316.37	-2.38	CNⅢ-C2	327.92	316.37	3.52
<b>CN55-C3</b>	<b>320.86</b>	<b>316.37</b>	<b>1.40</b>	CNⅢ-C3	339.83	316.37	6.90

#### 나. 2012년 7월 태풍 “카눈”

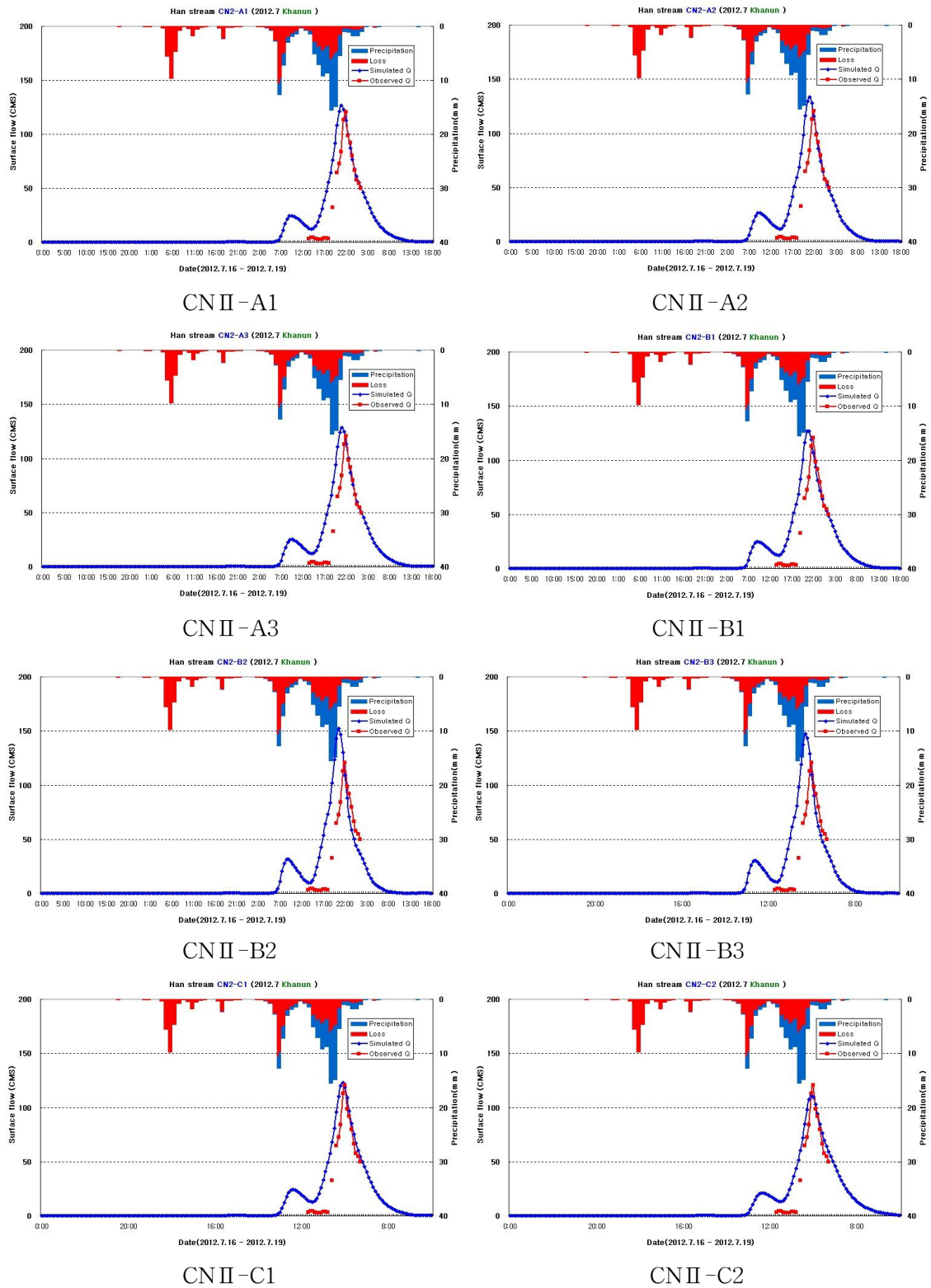
2012년 제7호 태풍 “카눈” 은 7월 18일 제주도에 상륙하였으며, 유역평균강우량 212.69mm 가 발생하고 5일 선행 유역평균강우량이 124.6mm가 발생하였다. 유량관

측결과 첨두유량은  $120.52m^3/sec$ , 도달시간 관측유속은  $2.1m/sec$ 로 관측되었으며, 유량관측은 오후 1시부터 19일 오전 2시까지 수행하였다. 관측자료를 이용하여 매개변수 조합을 계산하였으며 계산 결과는 Table 4.33과 같다.

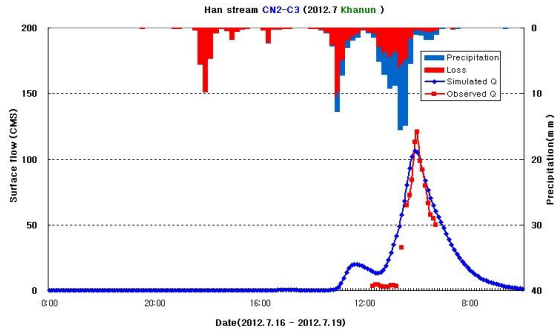
Table 4.33 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Typhoon "Khanun" in 2012)

기호	유역명	유역면적 ( $km^2$ )	NRCS	Clark			
			CN	Tc(hr)		K(hr)	
CNII-A1	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNII-A2	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNII-A3	한천	36.68	69.65	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CNII-B1	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNII-B2	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNII-B3	한천	36.68	69.65	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNII-C1	한천	36.68	69.65	Kraven II	2.51	Clark	2.99
CNII-C2	한천	36.68	69.65	Kraven II	2.51	Russel	3.77
CNII-C3	한천	36.68	69.65	Kraven II	2.51	Sabol	4.15
CN55-A1	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CN55-A2	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CN55-A3	한천	36.68	76.86	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CN55-B1	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN55-B2	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN55-B3	한천	36.68	76.86	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN55-C1	한천	36.68	76.86	Kraven II	2.51	Clark	2.99
CN55-C2	한천	36.68	76.86	Kraven II	2.51	Russel	3.77
CN55-C3	한천	36.68	76.86	Kraven II	2.51	Sabol	4.15
CN37-A1	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CN37-A2	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CN37-A3	한천	36.68	79.74	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CN37-B1	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Clark	2.99
CN37-B2	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Russel	1.87
CN37-B3	한천	36.68	79.74	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CN37-C1	한천	36.68	79.74	Kraven II	2.51	Clark	2.99
CN37-C2	한천	36.68	79.74	Kraven II	2.51	Russel	3.77
CN37-C3	한천	36.68	79.74	Kraven II	2.51	Sabol	4.15
CNIII-A1	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Clark	2.99
CNIII-A2	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Russel	2.60
CNIII-A3	한천	36.68	84.07	Kirpich	1.73	Sabol	2.86
CNIII-B1	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Clark	2.99
CNIII-B2	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Russel	1.87
CNIII-B3	한천	36.68	84.07	Rziha	1.25	Sabol	2.06
CNIII-C1	한천	36.68	84.07	Kraven II	2.51	Clark	2.99
CNIII-C2	한천	36.68	84.07	Kraven II	2.51	Russel	3.77
CNIII-C3	한천	36.68	84.07	Kraven II	2.51	Sabol	4.15

계산된 단위도법 매개변수를 이용하여 HEC-HMS 모델에 적용하였으며, 매개변수 조합에 따른 모델 결과는 Fig. 4.41~Fig. 4.44와 같다.

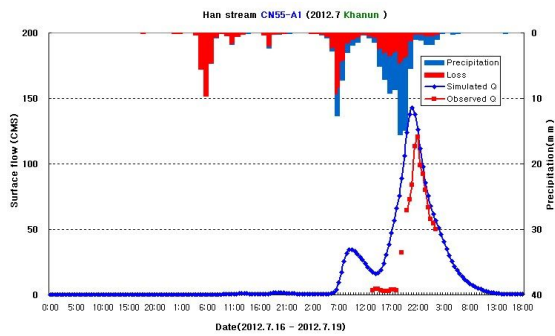




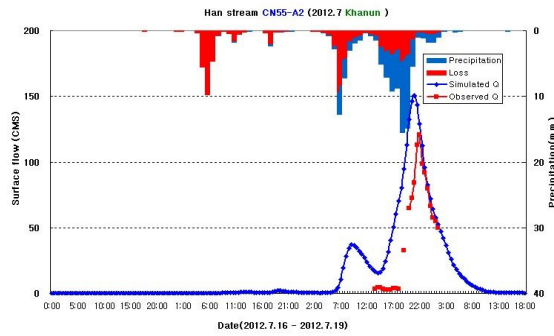


CNII-C3

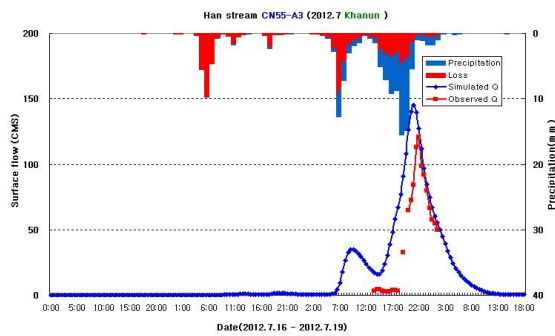
Fig. 4.41 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012)



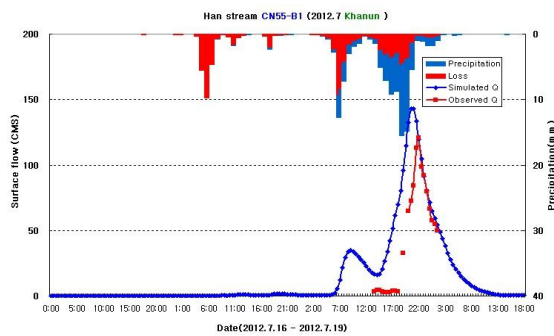
CN55-A1



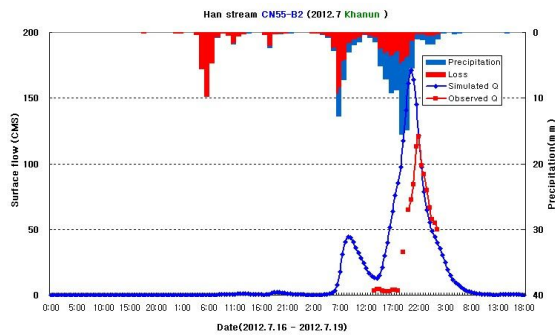
CN55-A2



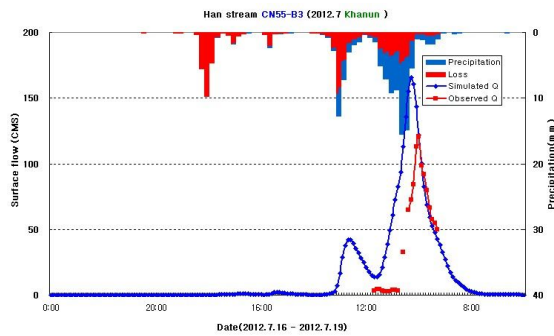
CN55-A3



CN55-B1

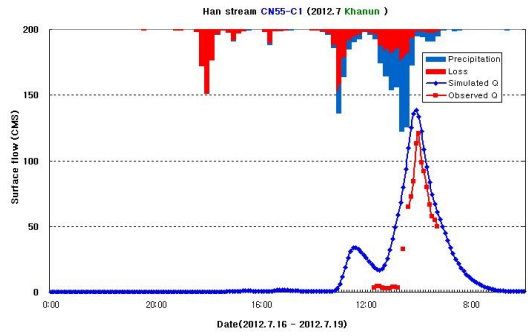


CN55-B2

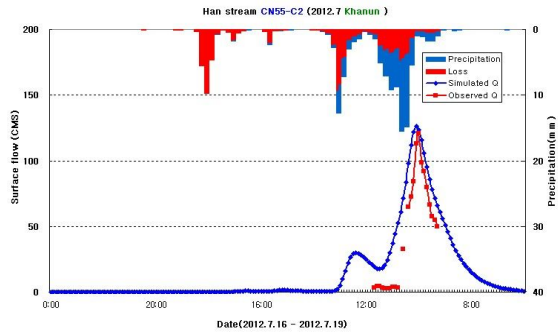


CN55-B3

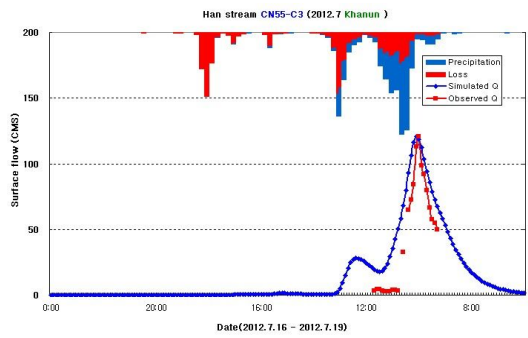




CN55-C1

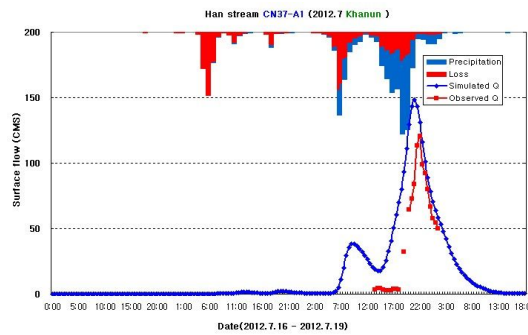


CN55-C2

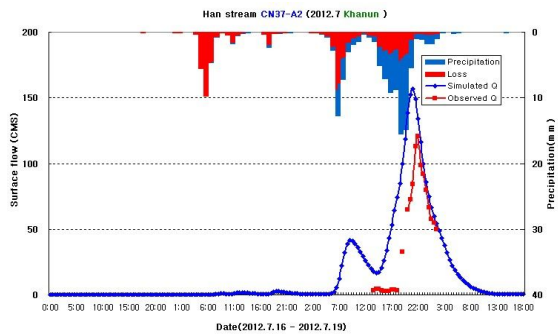


CN55-C3

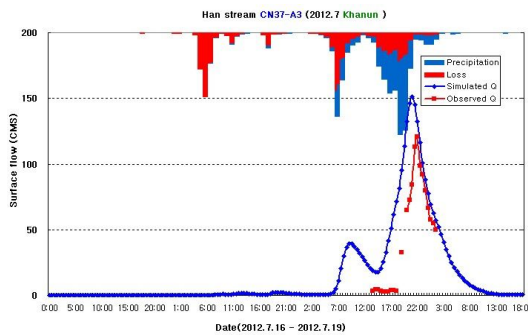
Fig. 4.42 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012)



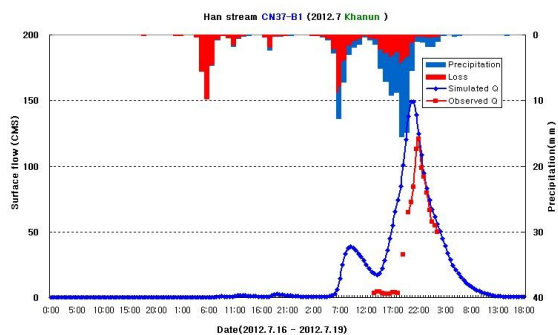
CN37-A1



CN37-A2



CN37-A3



CN37-B1

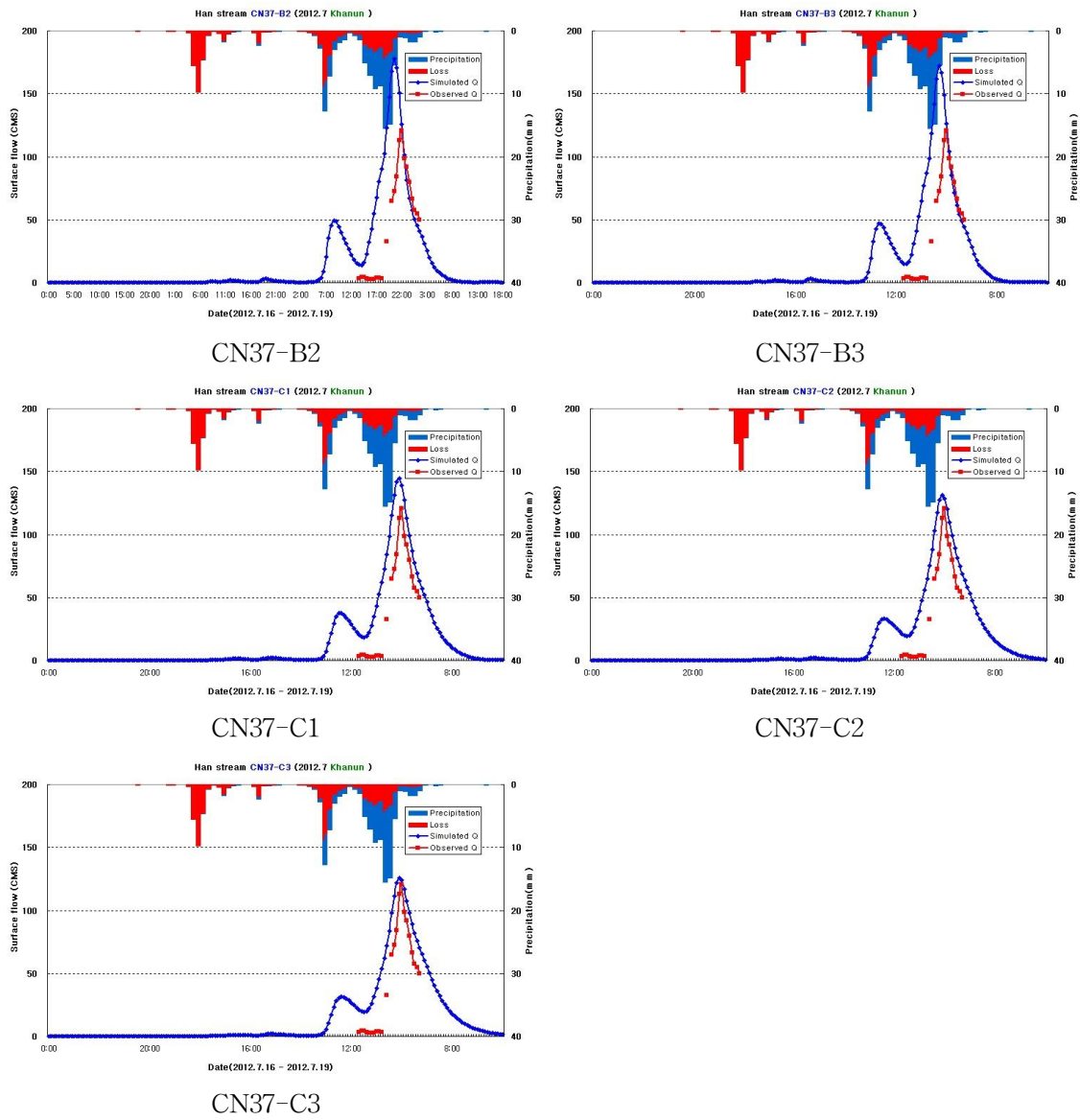
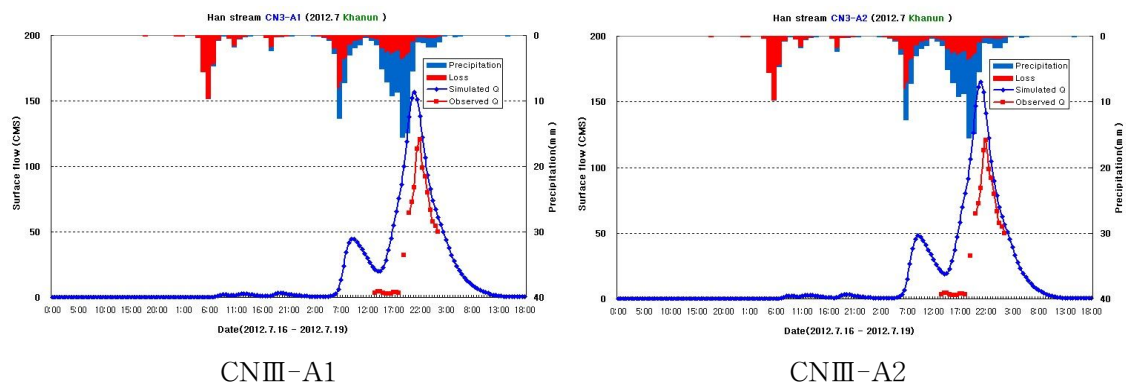


Fig. 4.43 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012)



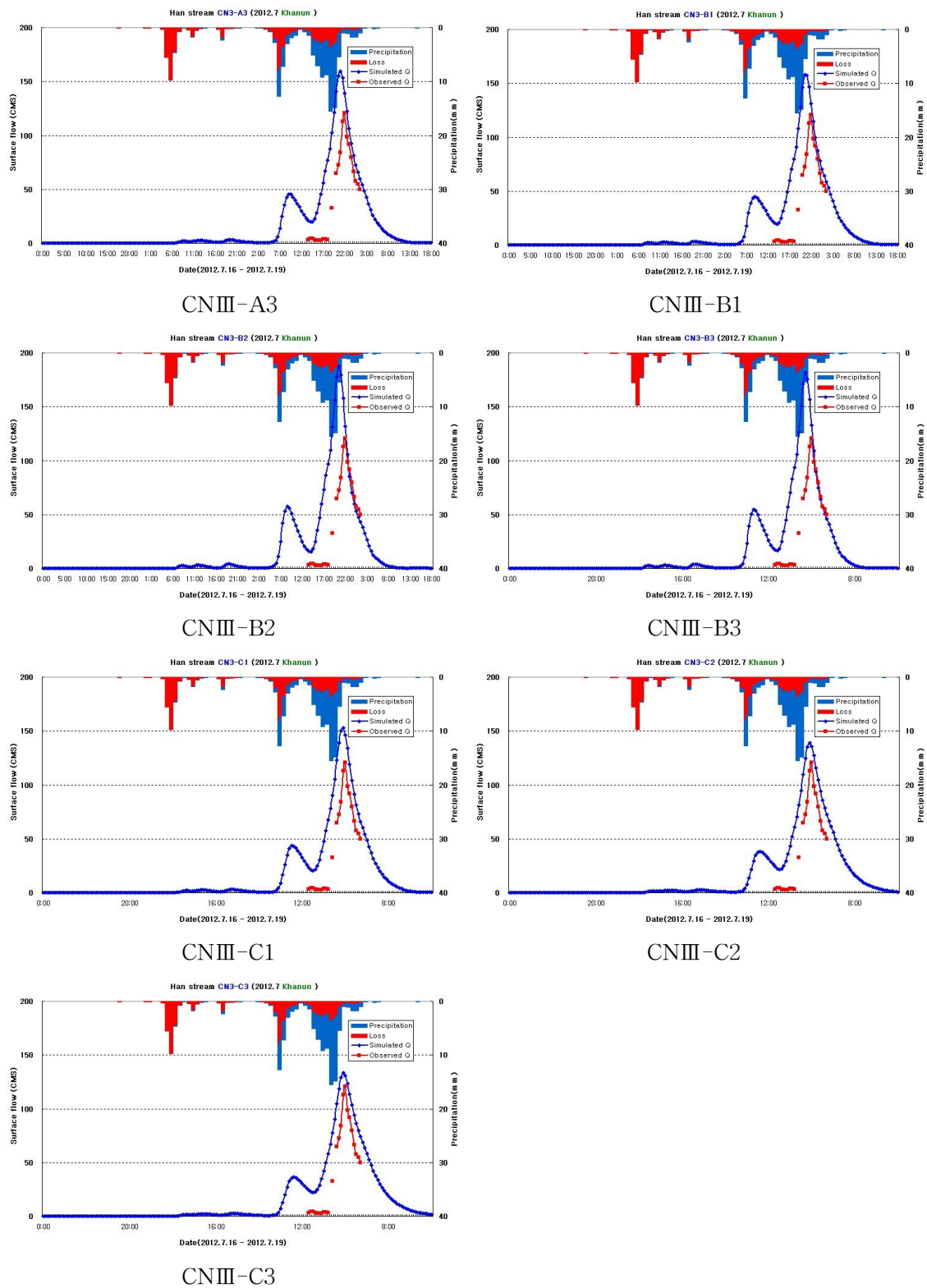


Fig. 4.44 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012)

AMCⅢ 조건 이상의 선행 강우 이후 발생한 태풍 “카눈” 사상에서는 CN55, KravenⅡ, Sabol 방법의 조합이 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 4. 34). 제주도 관측유량 대비 첨두유량 오차가 0.07%, RMSE가 26.07로 태풍 “무이파” 사상과 동일한 조합이 최적 조합으로 분석되었다.

Table 4.34 Results according to parameter combination(Typhoon "Khanun" in 2012)

구분	Peak flow		Error (%)	RMSE (cms)	구분	Peak flow		Error (%)	RMSE (cms)
	Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)				Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)		
CNⅡ-A1	126.45	120.52	4.69	28.47	CN37-A1	148.49	120.52	18.84	39.93
CNⅡ-A2	133.73	120.52	9.88	31.82	CN37-A2	156.58	120.52	23.03	40.76
CNⅡ-A3	128.77	120.52	6.41	30.00	CN37-A3	151.07	120.52	20.22	38.52
CNⅡ-B1	127.10	120.52	5.18	31.59	CN37-B1	149.25	120.52	19.25	39.71
CNⅡ-B2	152.49	120.52	20.97	41.72	CN37-B2	177.98	120.52	32.28	51.30
CNⅡ-B3	147.46	120.52	18.27	39.51	CN37-B3	172.39	120.52	30.09	48.87
CNⅡ-C1	123.08	120.52	2.08	25.79	CN37-C1	144.49	120.52	16.59	34.27
CNⅡ-C2	111.42	120.52	-8.17	23.06	CN37-C2	131.47	120.52	8.33	29.76
CNⅡ-C3	106.42	120.52	-13.3	22.32	CN37-C3	125.87	120.52	4.25	28.06
CN55-A1	142.54	120.52	15.45	36.62	CNⅢ-A1	156.88	120.52	23.18	44.80
CN55-A2	150.43	120.52	19.88	38.11	CNⅢ-A2	165.26	120.52	27.07	44.73
CN55-A3	145.06	120.52	16.92	35.95	CNⅢ-A3	159.56	120.52	24.47	42.38
CN55-B1	143.17	120.52	15.82	37.25	CNⅢ-B1	157.86	120.52	23.65	43.42
CN55-B2	171.13	120.52	29.57	48.54	CNⅢ-B2	187.62	120.52	35.76	55.36
CN55-B3	165.69	120.52	27.26	46.15	CNⅢ-B3	181.84	120.52	33.72	52.88
CN55-C1	138.72	120.52	13.12	31.68	CNⅢ-C1	152.65	120.52	21.05	38.21
CN55-C2	126.04	120.52	4.38	27.55	CNⅢ-C2	139.15	120.52	13.39	33.24
<b>CN55-C3</b>	<b>120.60</b>	<b>120.52</b>	<b>0.07</b>	<b>25.07</b>	CNⅢ-C3	133.33	120.52	9.61	31.28

### (3) 외도천유역 무강우 이후 강우-유출 사상

#### 가. 2012년 4월 집중호우

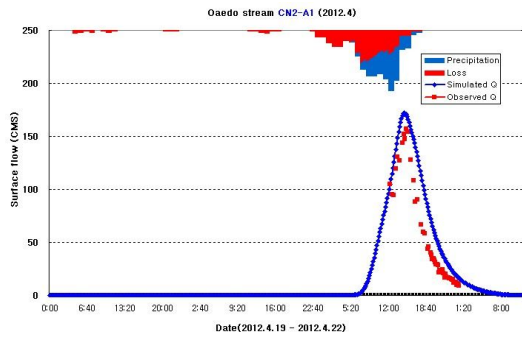
2012년 4월21일에 외도천 유역에 평균강우량 229.51mm 가 발생하여 유출이 발생하였으며, 사전 선행강우는 무강우 상태였다. 외도정수장의 1지점 유량관측자료를 이용하였으며, 유량을 계산한 결과 첨두유량 156.66m<sup>3</sup>/sec, 도달시간 관측유속은 2.6 m/sec로 나타났다. 관측자료를 이용하여 매개변수 조합을 계산하였으며, 계산 결과

는 Table 4.35와 같다.

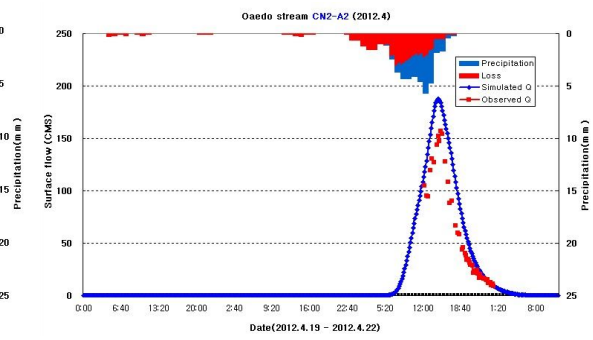
Table 4.35 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Heavy rainfall in April 2012\_Oaedo Stream)

기호	유역명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	NRCS	Clark			
			CN	Tc(hr)		K(hr)	
CNII-A1	외도천	44.47	66.73	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CNII-A2	외도천	44.47	66.73	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CNII-A3	외도천	44.47	66.73	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CNII-B1	외도천	44.47	66.73	Rziha	1.29	Clark	3.36
CNII-B2	외도천	44.47	66.73	Rziha	1.29	Russel	1.93
CNII-B3	외도천	44.47	66.73	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CNII-C1	외도천	44.47	66.73	Kraven II	2.29	Clark	3.36
CNII-C2	외도천	44.47	66.73	Kraven II	2.29	Russel	3.44
CNII-C3	외도천	44.47	66.73	Kraven II	2.29	Sabol	3.64
CN55-A1	외도천	44.47	74.46	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CN55-A2	외도천	44.47	74.46	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CN55-A3	외도천	44.47	74.46	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CN55-B1	외도천	44.47	74.46	Rziha	1.29	Clark	3.36
CN55-B2	외도천	44.47	74.46	Rziha	1.29	Russel	1.93
CN55-B3	외도천	44.47	74.46	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CN55-C1	외도천	44.47	74.46	Kraven II	2.29	Clark	3.36
CN55-C2	외도천	44.47	74.46	Kraven II	2.29	Russel	3.44
CN55-C3	외도천	44.47	74.46	Kraven II	2.29	Sabol	3.64
CN37-A1	외도천	44.47	77.55	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CN37-A2	외도천	44.47	77.55	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CN37-A3	외도천	44.47	77.55	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CN37-B1	외도천	44.47	77.55	Rziha	1.29	Clark	3.36
CN37-B2	외도천	44.47	77.55	Rziha	1.29	Russel	1.93
CN37-B3	외도천	44.47	77.55	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CN37-C1	외도천	44.47	77.55	Kraven II	2.29	Clark	3.36
CN37-C2	외도천	44.47	77.55	Kraven II	2.29	Russel	3.44
CN37-C3	외도천	44.47	77.55	Kraven II	2.29	Sabol	3.64
CNIII-A1	외도천	44.47	82.19	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CNIII-A2	외도천	44.47	82.19	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CNIII-A3	외도천	44.47	82.19	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CNIII-B1	외도천	44.47	82.19	Rziha	1.29	Clark	3.36
CNIII-B2	외도천	44.47	82.19	Rziha	1.29	Russel	1.93
CNIII-B3	외도천	44.47	82.19	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CNIII-C1	외도천	44.47	82.19	Kraven II	2.29	Clark	3.36
CNIII-C2	외도천	44.47	82.19	Kraven II	2.29	Russel	3.44
CNIII-C3	외도천	44.47	82.19	Kraven II	2.29	Sabol	3.64

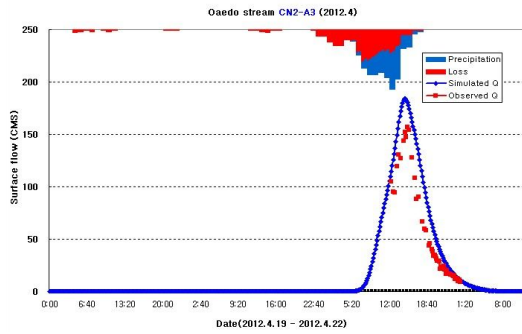
계산된 단위도법 매개변수를 이용하여 HEC-HMS 모델에 적용하였으며, 매개변수 조합에 따른 모델 결과는 Fig. 4.45~Fig. 4.48과 같다.



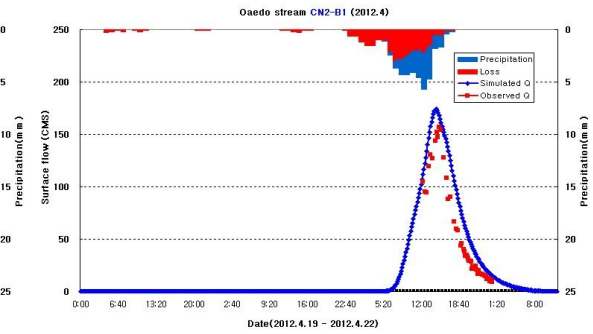
CNII-A1



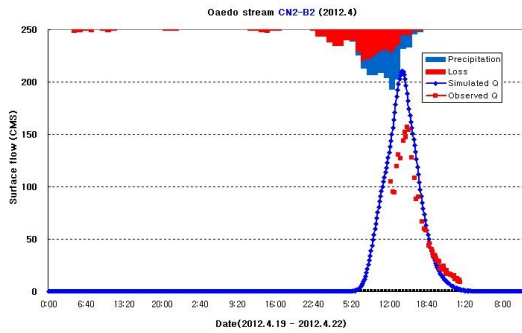
CNII-A2



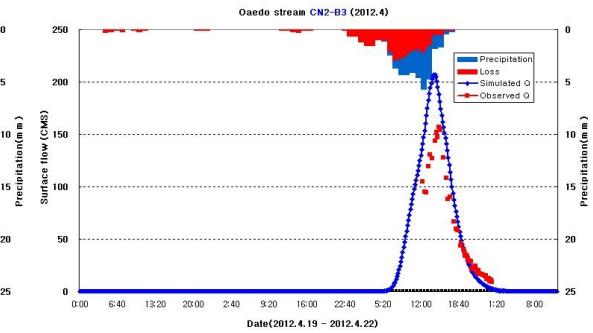
CNII-A3



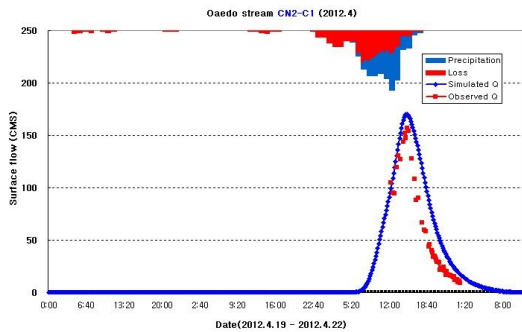
CNII-B1



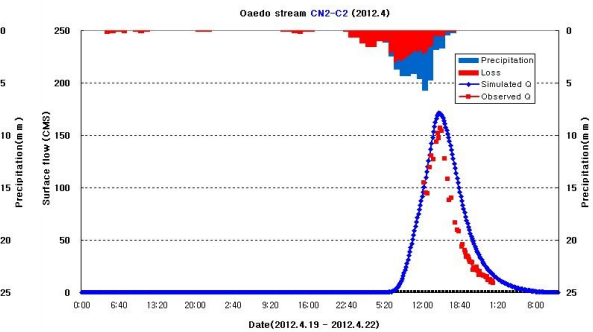
CNII-B2



CNII-B3

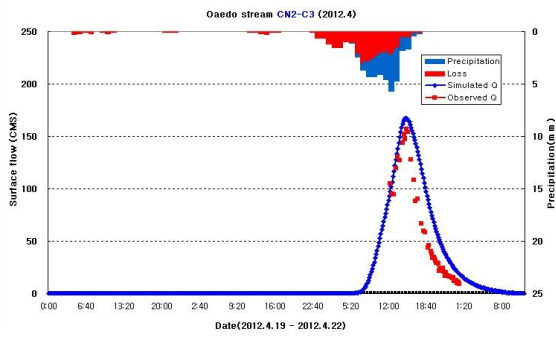


CNII-C1



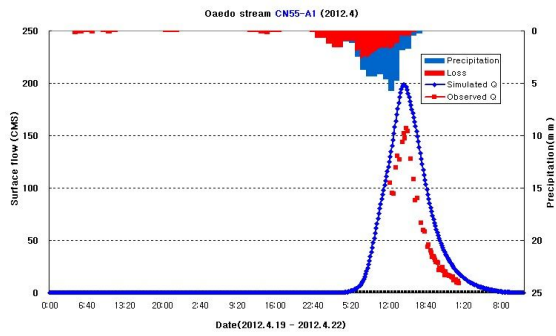
CNII-C2



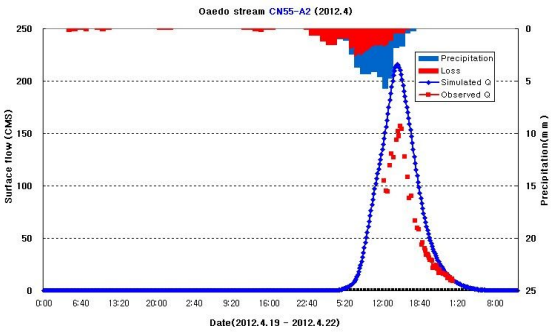


CNII-C3

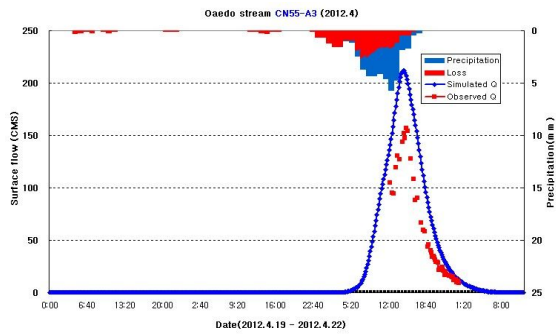
Fig. 4.45 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012\_Oaedo Stream)



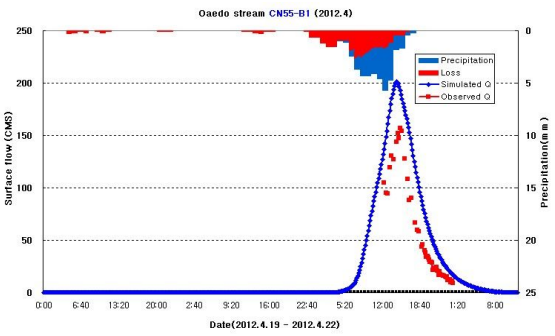
CN55-A1



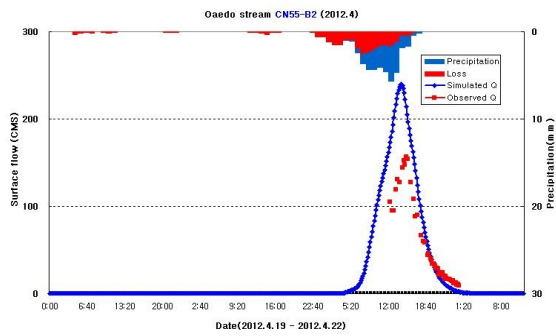
CN55-A2



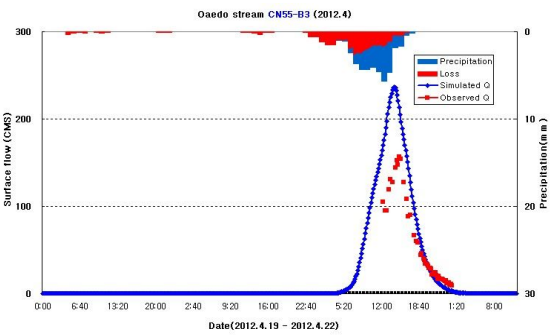
CN55-A3



CN55-B1



CN55-B2



CN55-B3



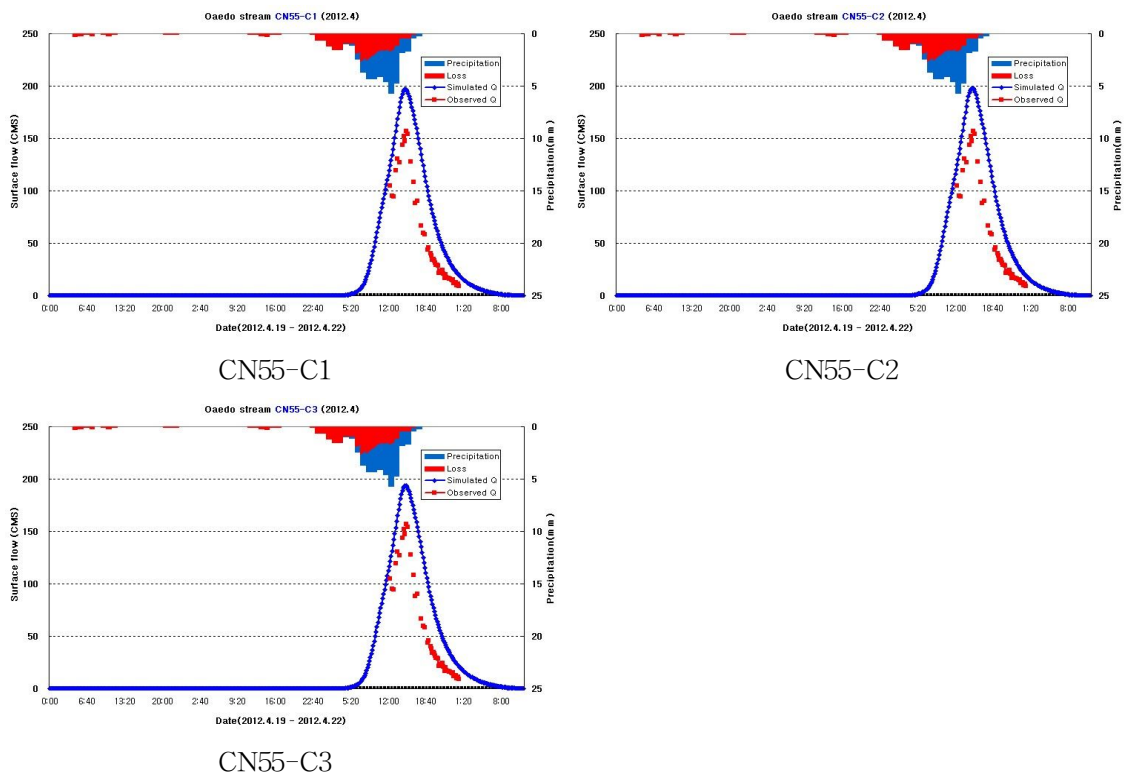
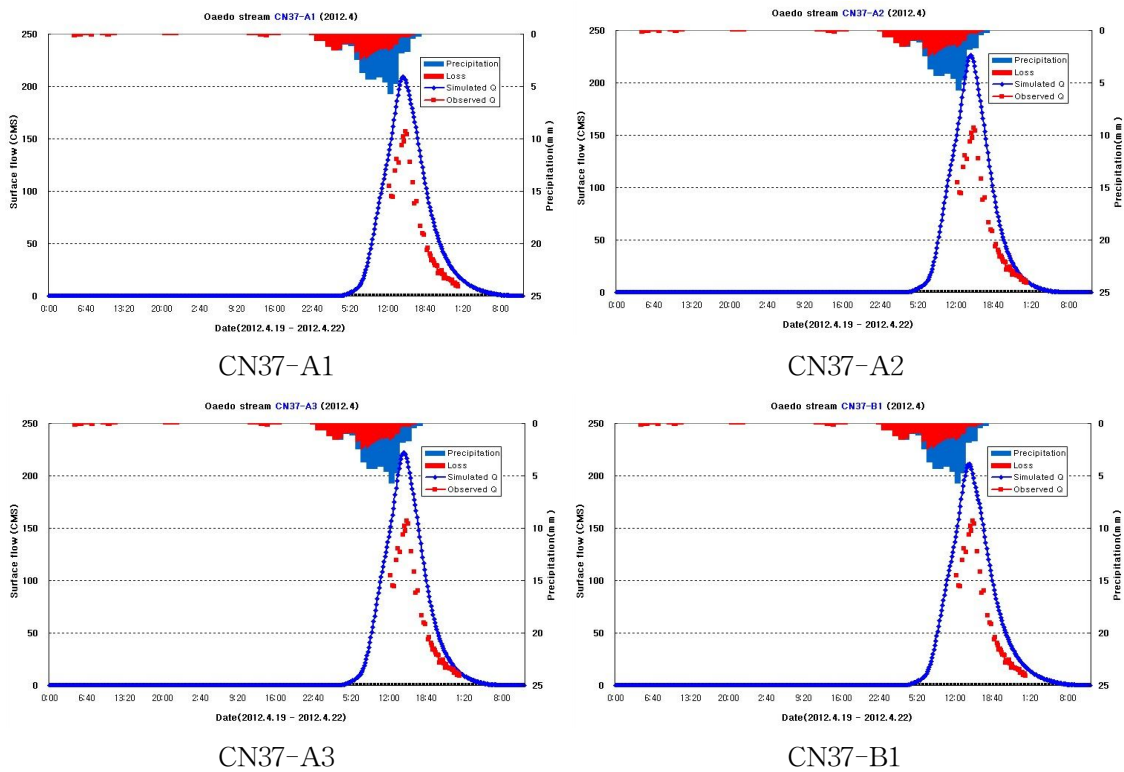


Fig. 4.46 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012\_Oaedo Stream)



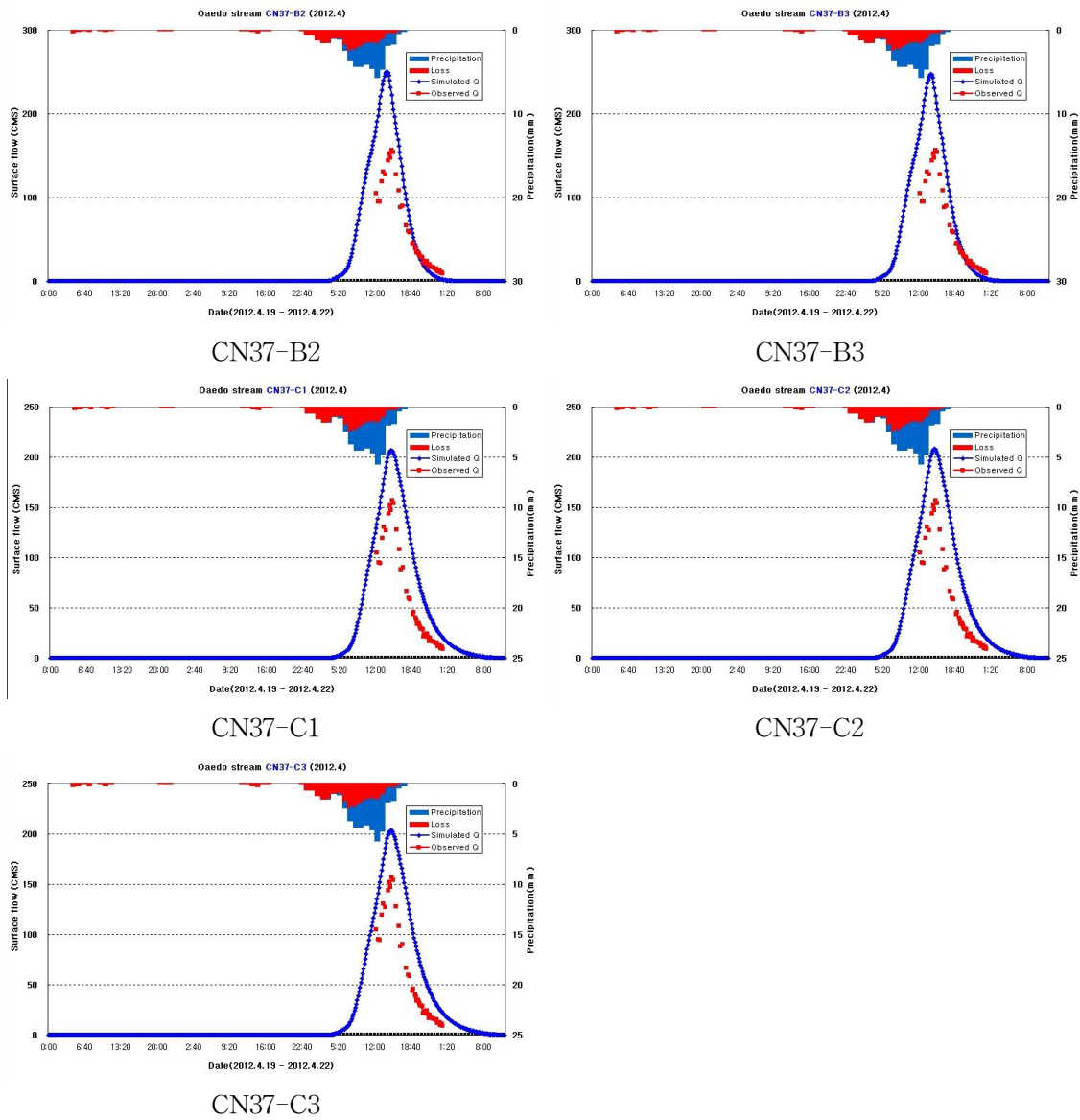
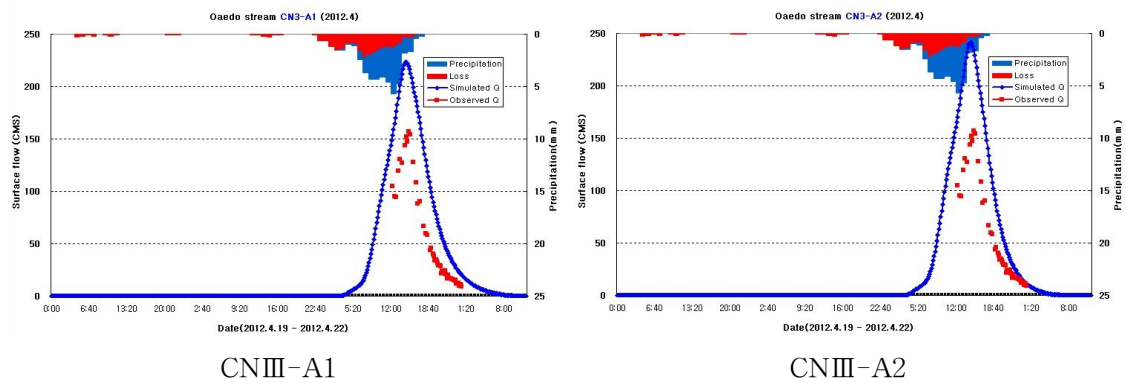


Fig. 4.47 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012\_Oaedo Stream)



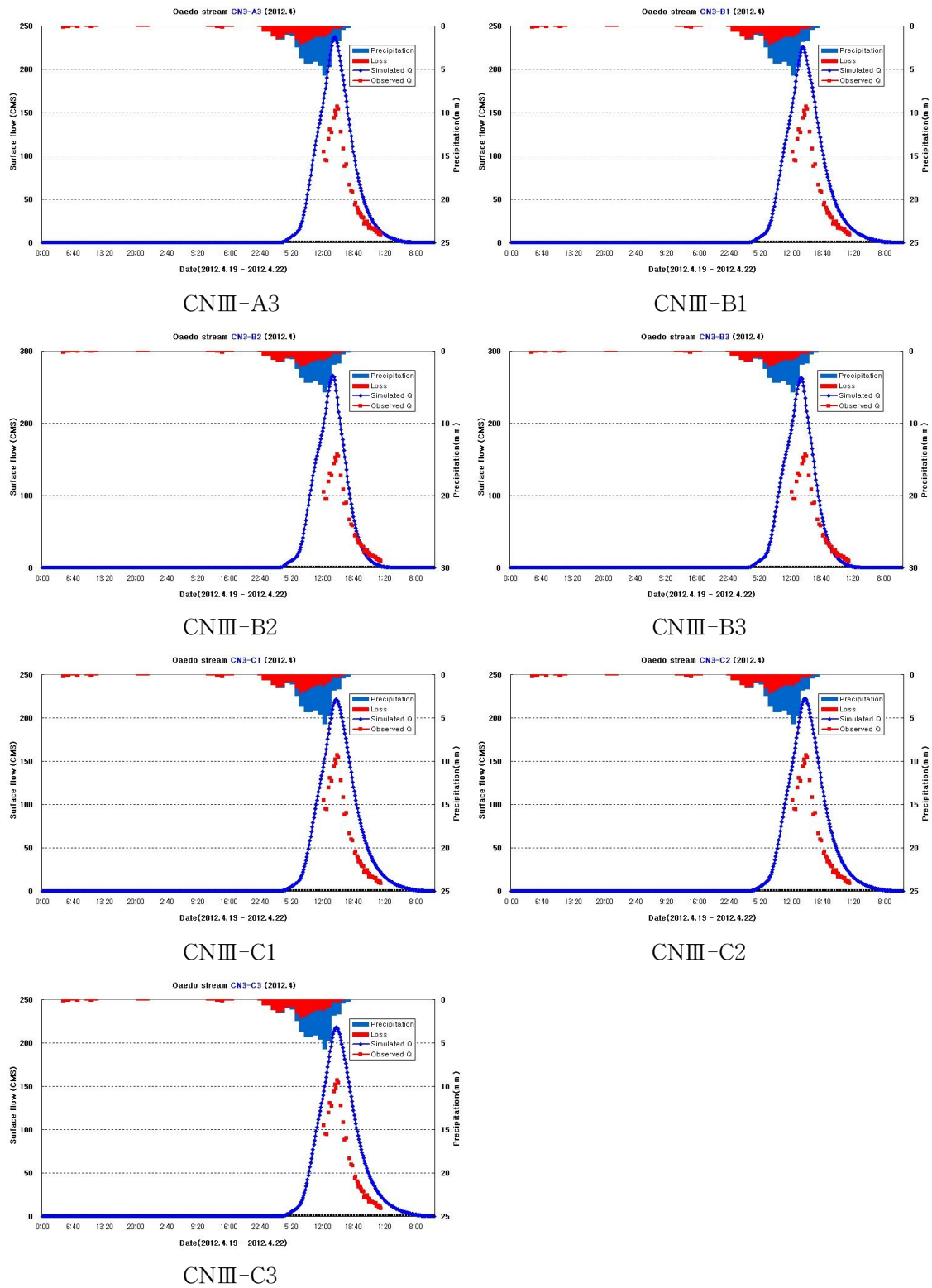


Fig. 4.48 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Heavy rainfall in April 2012\_Oaedo Stream)

무강우 이후 발생한 외도천유역의 2012년 4월 집중호우 사상에서는 AMC-II 조건의 유출곡선지수 CNII, 도달시간 산정방법 KravenII, 저류상수 산정방법 Sabol의 조합이 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 4.36). 외도정수장 지점 관측유량 대비 첨두유량 오차가 6.38%로 산정되었으며, 관측자료의 결측치가 많고 비정상적으로 관측된 자료를 제거하여 RMSE는 산정하지 않았다.

Table 4.36 Results according to parameter combination(Heavy rainfall in April 2012\_Oaedo Stream)

구분	Peak flow		Error (%)	구분	Peak flow		Error (%)
	Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)			Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)	
CNII-A1	172.00	156.66	8.92	CN37-A1	208.89	156.66	25.00
CNII-A2	187.54	156.66	16.47	CN37-A2	226.41	156.66	30.81
CNII-A3	183.89	156.66	14.81	CN37-A3	222.37	156.66	29.55
CNII-B1	174.11	156.66	10.02	CN37-B1	211.33	156.66	25.87
CNII-B2	210.27	156.66	25.50	CN37-B2	250.85	156.66	37.55
CNII-B3	207.12	156.66	24.36	CN37-B3	247.62	156.66	36.73
CNII-C1	170.17	156.66	7.94	CN37-C1	206.94	156.66	24.30
CNII-C2	171.19	156.66	8.49	CN37-C2	208.09	156.66	24.72
<b>CNII-C3</b>	<b>167.33</b>	<b>156.66</b>	<b>6.38</b>	CN37-C3	203.66	156.66	23.08
CN55-A1	198.88	156.66	21.23	CNIII-A1	223.29	156.66	29.84
CN55-A2	215.91	156.66	27.44	CNIII-A2	241.36	156.66	35.09
CN55-A3	211.93	156.66	26.08	CNIII-A3	237.26	156.66	33.97
CN55-B1	201.16	156.66	22.12	CNIII-B1	225.88	156.66	30.64
CN55-B2	239.97	156.66	34.72	CNIII-B2	266.21	156.66	41.15
CN55-B3	236.74	156.66	33.83	CNIII-B3	262.99	156.66	40.43
CN55-C1	196.95	156.66	20.46	CNIII-C1	221.24	156.66	29.19
CN55-C2	198.07	156.66	20.91	CNIII-C2	222.41	156.66	29.56
CN55-C3	193.74	156.66	19.14	CNIII-C3	217.88	156.66	28.10

#### (4) 외도천유역 선행강우 이후 강우-유출 사상

##### 가. 2012년 7월 태풍 “카눈”

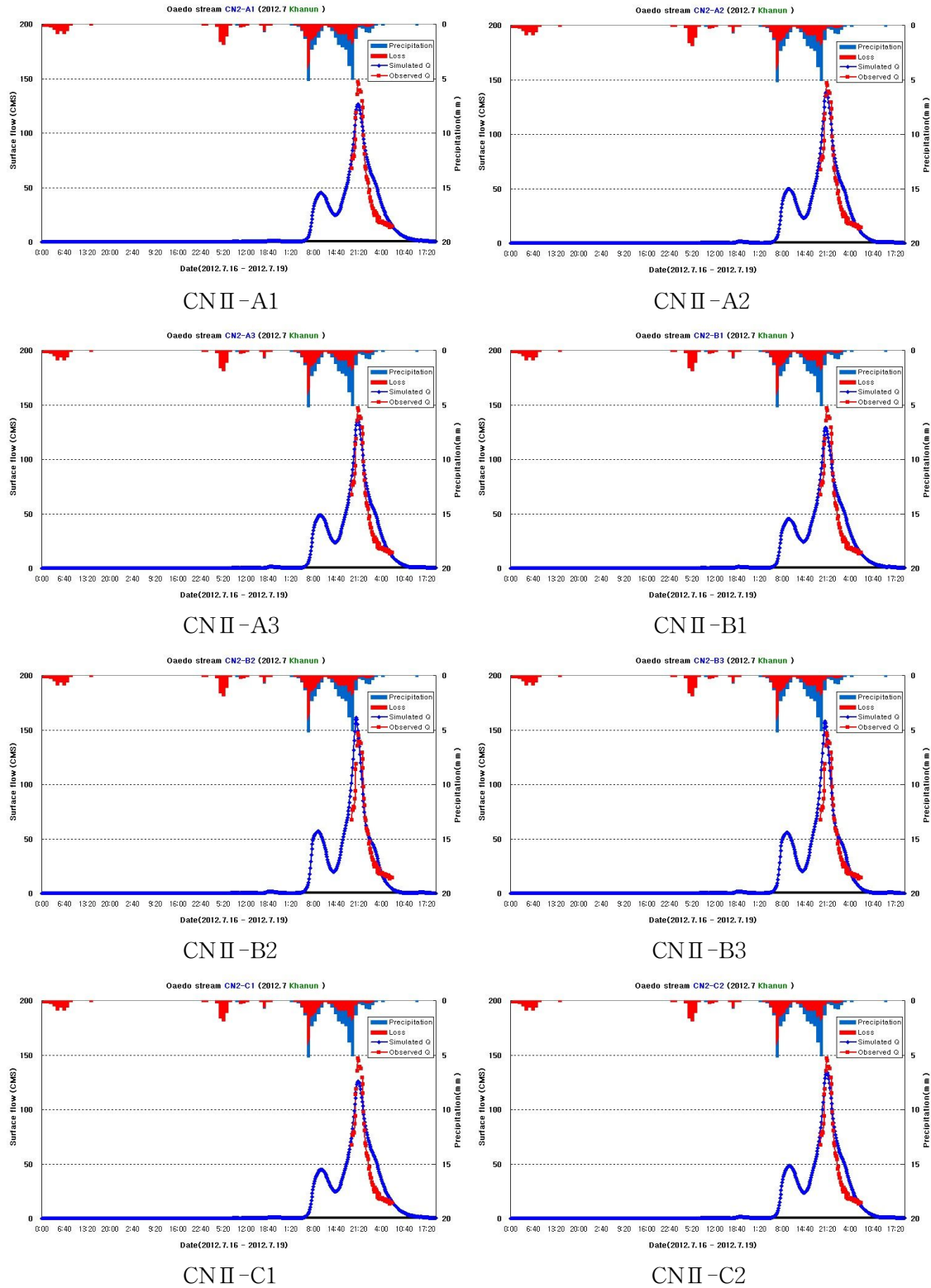
2012년 제7호 태풍 “카눈” 은 7월 18일 제주도에 상륙하였으며 유역평균강우량 119.83mm가 발생하고 사전 선행강우 71.98mm가 발생하였다. 자동관측자료를 이용

하여 유량을 계산한 결과 첨두유량은  $147.15m^3/sec$ , 도달시간 관측유속은  $2.55m/sec$ 로 나타났으며, 관측자료를 이용하여 매개변수 조합을 계산한 결과는 Table 4. 37과 같다.

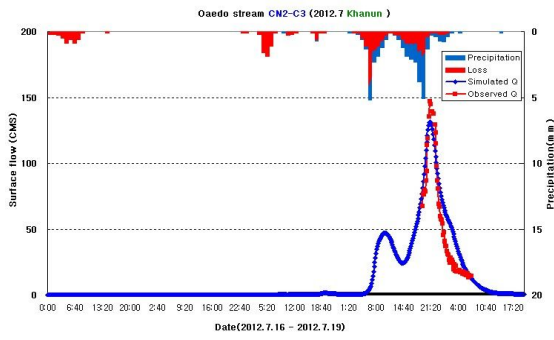
Table 4.37 Calculation of Clark unit hydrograph method parameters(Typhoon "Khanun" in 2012\_Oaedo Stream)

기호	유역명	유역면적 ( $km^2$ )	NRCS CN	Clark			
				Tc(hr)		K(hr)	
CNII-A1	외도천	44.47	66.73	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CNII-A2	외도천	44.47	66.73	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CNII-A3	외도천	44.47	66.73	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CNII-B1	외도천	44.47	66.73	Rziha	1.29	Clark	3.36
CNII-B2	외도천	44.47	66.73	Rziha	1.29	Russel	1.93
CNII-B3	외도천	44.47	66.73	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CNII-C1	외도천	44.47	66.73	Kraven II	2.25	Clark	3.36
CNII-C2	외도천	44.47	66.73	Kraven II	2.25	Russel	3.37
CNII-C3	외도천	44.47	66.73	Kraven II	2.25	Sabol	3.57
CN55-A1	외도천	44.47	74.46	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CN55-A2	외도천	44.47	74.46	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CN55-A3	외도천	44.47	74.46	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CN55-B1	외도천	44.47	74.46	Rziha	1.29	Clark	3.36
CN55-B2	외도천	44.47	74.46	Rziha	1.29	Russel	1.93
CN55-B3	외도천	44.47	74.46	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CN55-C1	외도천	44.47	74.46	Kraven II	1.91	Clark	3.36
CN55-C2	외도천	44.47	74.46	Kraven II	1.91	Russel	3.37
CN55-C3	외도천	44.47	74.46	Kraven II	1.91	Sabol	3.57
CN37-A1	외도천	44.47	77.55	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CN37-A2	외도천	44.47	77.55	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CN37-A3	외도천	44.47	77.55	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CN37-B1	외도천	44.47	77.55	Rziha	1.29	Clark	3.36
CN37-B2	외도천	44.47	77.55	Rziha	1.29	Russel	1.93
CN37-B3	외도천	44.47	77.55	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CN37-C1	외도천	44.47	77.55	Kraven II	1.91	Clark	3.36
CN37-C2	외도천	44.47	77.55	Kraven II	1.91	Russel	3.37
CN37-C3	외도천	44.47	77.55	Kraven II	1.91	Sabol	3.57
CNIII-A1	외도천	44.47	82.19	Kirpich	1.79	Clark	3.36
CNIII-A2	외도천	44.47	82.19	Kirpich	1.79	Russel	2.68
CNIII-A3	외도천	44.47	82.19	Kirpich	1.79	Sabol	2.83
CNIII-B1	외도천	44.47	82.19	Rziha	1.29	Clark	3.36
CNIII-B2	외도천	44.47	82.19	Rziha	1.29	Russel	1.93
CNIII-B3	외도천	44.47	82.19	Rziha	1.29	Sabol	2.04
CNIII-C1	외도천	44.47	82.19	Kraven II	1.91	Clark	3.36
CNIII-C2	외도천	44.47	82.19	Kraven II	1.91	Russel	3.37
CNIII-C3	외도천	44.47	82.19	Kraven II	1.91	Sabol	3.57

계산된 단위도범 매개변수를 이용하여 HEC-HMS 모델에 적용하였으며, 매개변수 조합에 따른 모델 결과는 Fig. 4.49~Fig. 4.52와 같다.

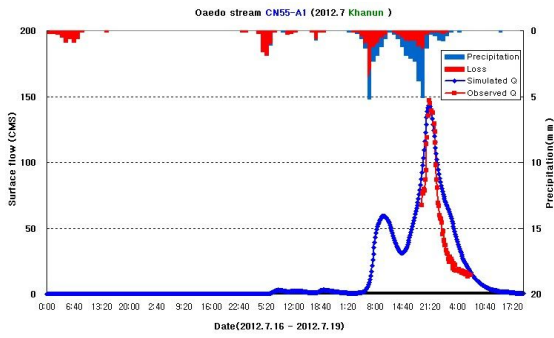




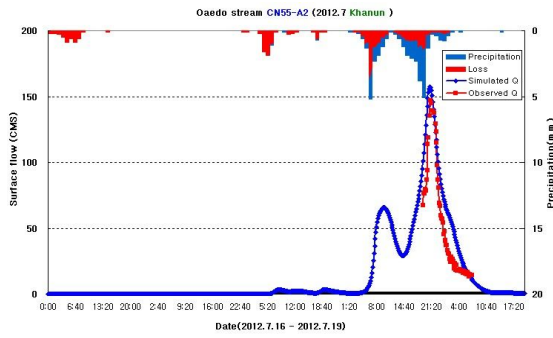


CNII-C3

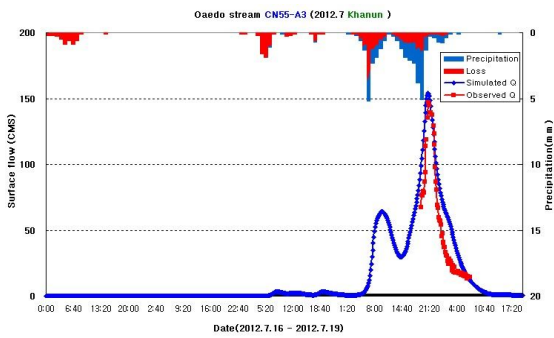
Fig. 4.49 Calculation of discharge according to CNII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012\_Oaedo Stream)



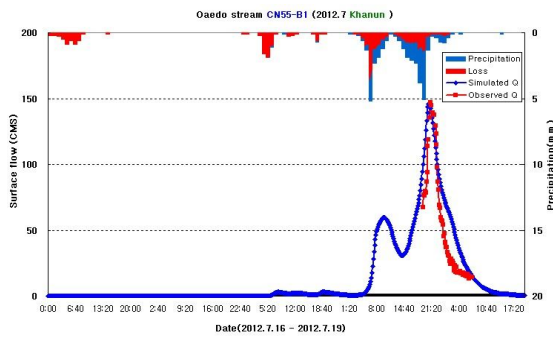
CN55-A1



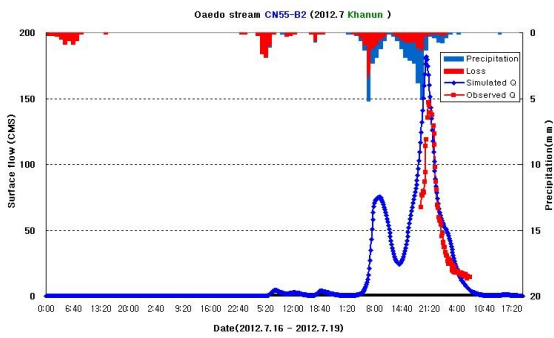
CN55-A2



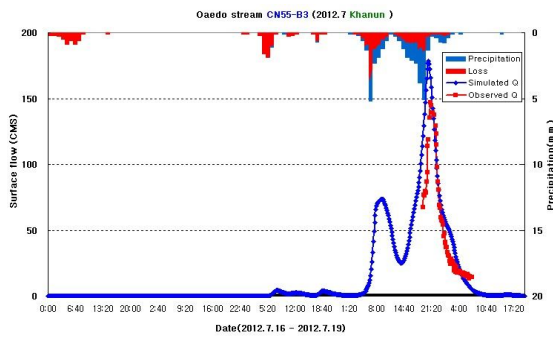
CN55-A3



CN55-B1



CN55-B2



CN55-B3



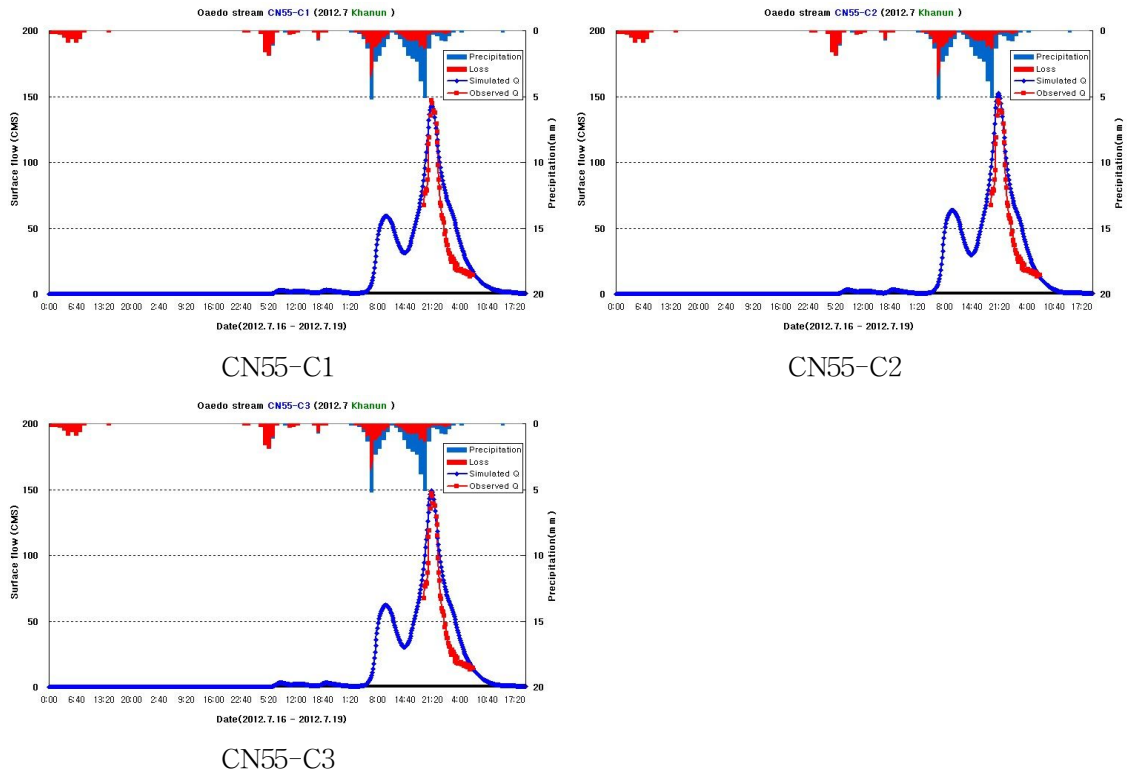
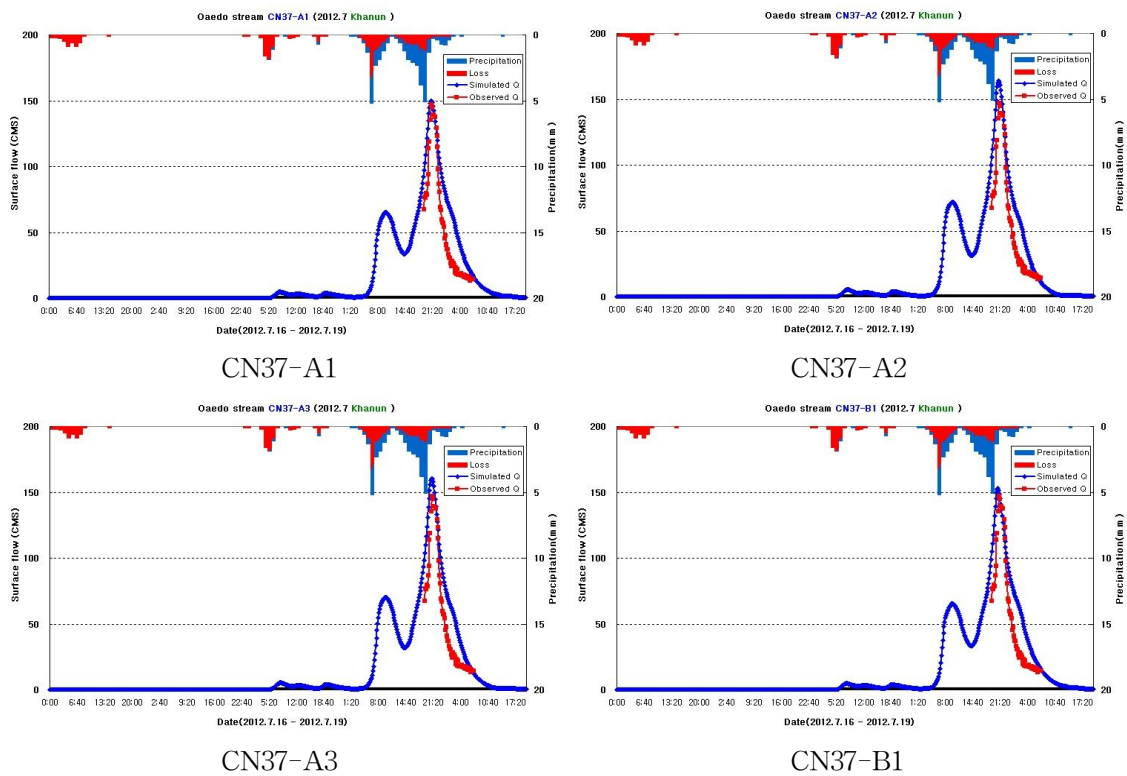


Fig. 4.50 Calculation of discharge according to CN55 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012\_Oaedo Stream)



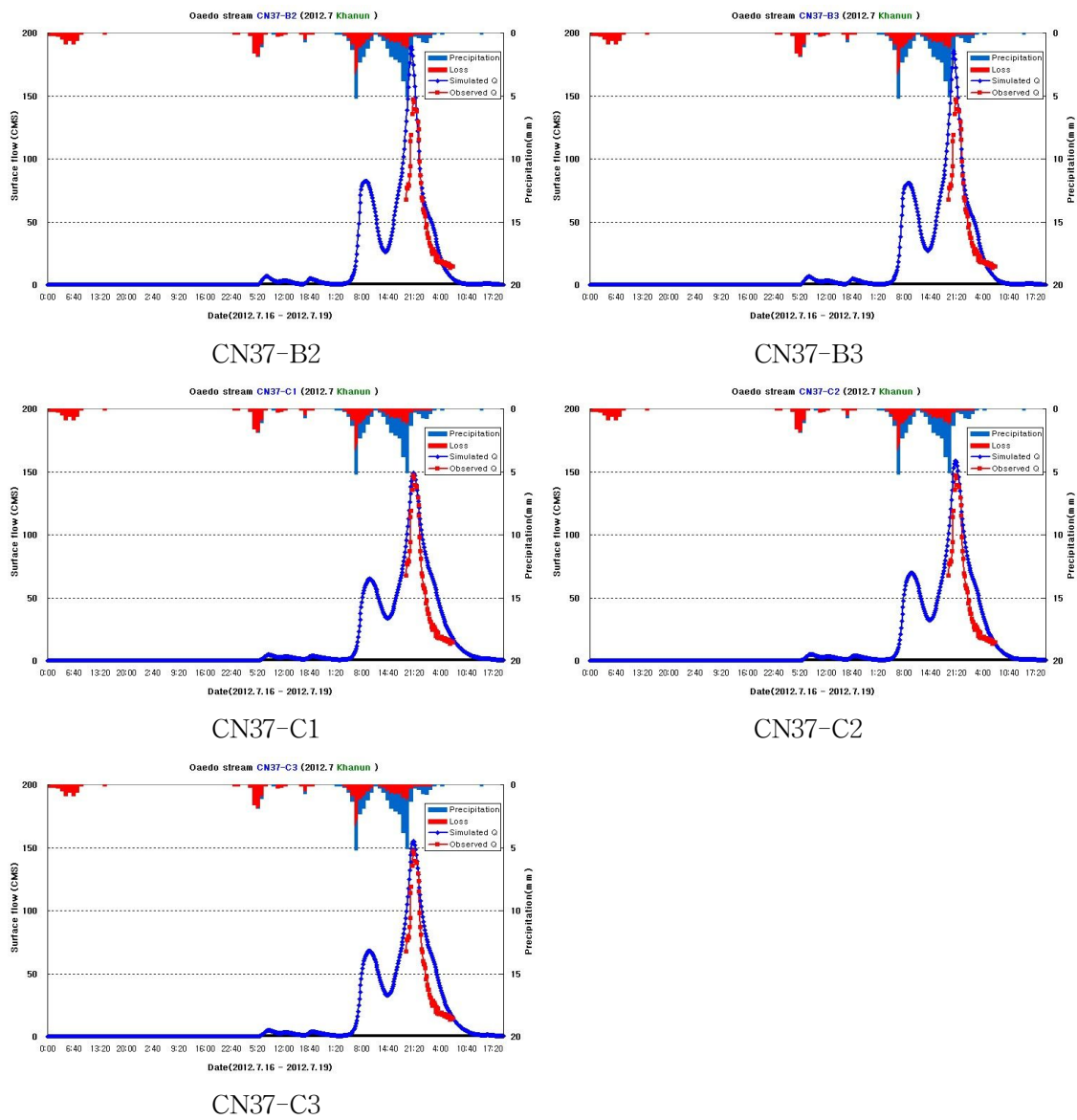
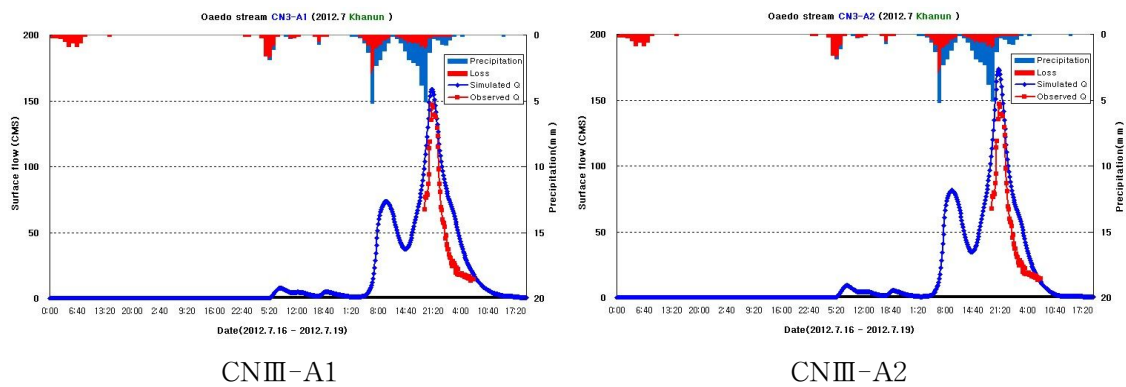


Fig. 4.51 Calculation of discharge according to CN37 condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012\_Oaedo Stream)



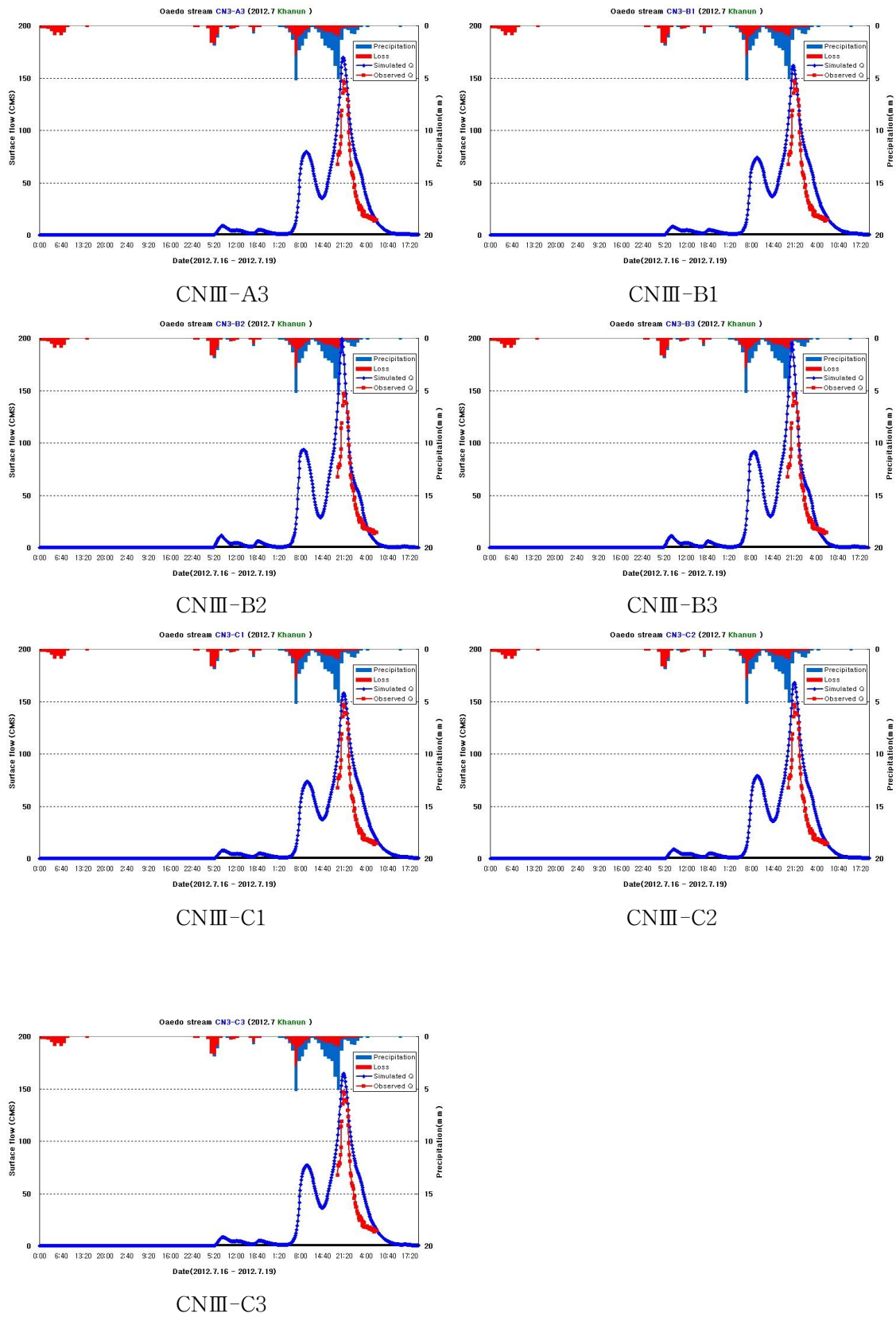


Fig. 4.52 Calculation of discharge according to CNIII condition parameter combination (Typhoon "Khanun" in 2012\_Oaedo Stream)

AMCⅢ 조건 이상의 선행 강우 이후 발생한 외도천 유역 태풍 “카눈” 사상에서는 CN55, KravenⅡ, Sabol 방법의 조합이 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 4.38). 제주도 관측유량 대비 첨두유량 오차가 1.29%로 산정되었으며, 한천유역의 AMCⅢ 조건 이상의 선행 강우 이후 발생한 강우-유출 사상의 최적조합과 같은 결과가 나타났다.

Table 4.38 Results according to parameter combination(Typhoon “Khanun” in 2012\_Oaedo Stream)

구분	Peak flow		Error (%)	구분	Peak flow		Error (%)
	Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)			Simulated Q (cms)	Observed Q (cms)	
CNⅡ-A1	126.54	147.15	-16.29	CN37-A1	149.80	147.15	1.77
CNⅡ-A2	138.86	147.15	-5.97	CN37-A2	163.88	147.15	10.21
CNⅡ-A3	135.83	147.15	-8.33	CN37-A3	160.48	147.15	8.31
CNⅡ-B1	129.05	147.15	-14.03	CN37-B1	152.80	147.15	3.70
CNⅡ-B2	161.07	147.15	8.64	CN37-B2	189.12	147.15	22.19
CNⅡ-B3	157.91	147.15	6.81	CN37-B3	185.55	147.15	20.70
CNⅡ-C1	125.93	147.15	-16.85	CN37-C1	149.19	147.15	1.37
CNⅡ-C2	134.41	147.15	-9.48	CN37-C2	158.71	147.15	7.28
CNⅡ-C3	131.51	147.15	-11.89	CN37-C3	155.46	147.15	5.35
CN55-A1	143.60	147.15	-2.47	CNⅢ-A1	158.52	147.15	7.17
CN55-A2	157.22	147.15	6.41	CNⅢ-A2	173.21	147.15	15.05
CN55-A3	153.92	147.15	4.40	CNⅢ-A3	169.69	147.15	13.28
CN55-B1	146.47	147.15	-0.46	CNⅢ-B1	161.70	147.15	9.00
CN55-B2	181.68	147.15	19.01	CNⅢ-B2	199.52	147.15	26.25
CN55-B3	178.21	147.15	17.43	CNⅢ-B3	195.81	147.15	24.85
CN55-C1	142.99	147.15	-2.91	CNⅢ-C1	157.91	147.15	6.81
CN55-C2	152.24	147.15	3.34	CNⅢ-C2	167.78	147.15	12.30
<b>CN55-C3</b>	<b>149.08</b>	<b>147.15</b>	<b>1.29</b>	CNⅢ-C3	164.41	147.15	10.50

## 5.2.2 최적 매개변수 조합 선정

### (1) 무강우 이후 강우-유출 사상

한천과 외도천 유역에 무강우 이후 강우-유출 사상은 2011년 11월 집중호우, 2012년 4월 집중호우로서 최적 조합은 Table 4.39 와 같다.

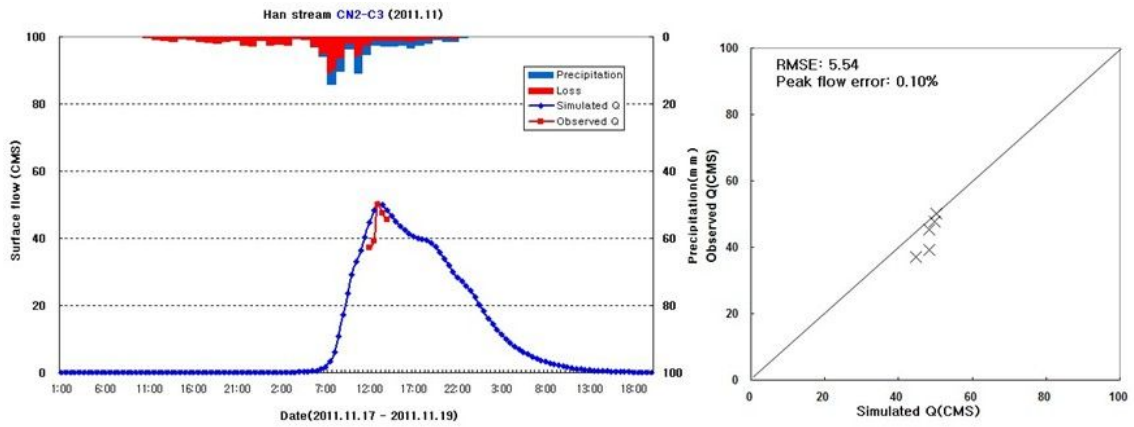
Table 4.39 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after no rainfall

하천	호우사상	AMC 조건	도달시간	저류상수
한천	2011년 11월 집중호우	AMC II	Kraven II	Sabol
	2012년 4월 집중호우	AMC II	Kraven II	Sabol
외도천	2012년 4월 집중호우	AMC II	Kraven II	Sabol

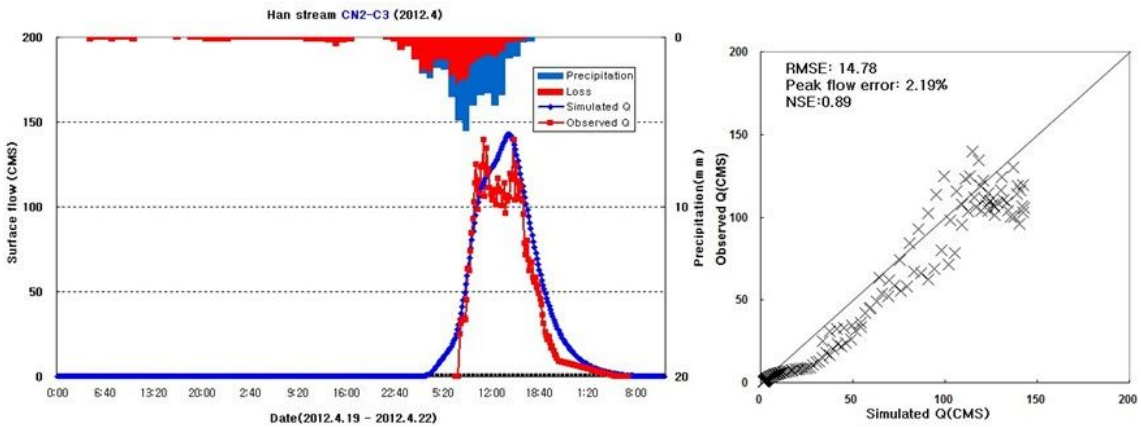
무강우 이후 강우-유출 사상에 대해서는 AMC II 조건의 CN2, 유속을 도입한 도달시간 산정방법인 Kraven II, 유역형상 및 도달시간을 고려한 저류상수 산정방법인 Sabol 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다.

선행강우가 존재하지 않을 경우 유출이 발생하기 위한 누적강우량이 약 18% 증가하기 때문에 선행토양함수조건으로 AMC II 조건이 적합하다고 판단된다. 도달시간 산정 경험식 중에서 Kirpich 공식과 Rziha 공식은 농경지 소유역을 대상으로 유도된 공식으로 유로연장과 경사만을 매개변수로 도출하는 방법으로 제주도에는 적합하지 않으며, 자연하천의 경사별 유속을 적용하는 Kraven II 공식이 제주도의 경사별 유속을 적용하여 합리적인 값을 도출한다. 유역의 저류상수는 홍수유출량에 가장 지배적인 매개변수로서 유로연장과 경사를 매개변수로 도출하는 Clark 공식과 도달시간과 같은 개념으로 판단하는 Russel 공식은 제주도와 같이 유역의 형상이 직류형에 가깝고 경사가 급한 지역에는 적합하지 않으며 유역의 도달시간과 형상을 동시에 고려하여 산정하는 Sabol 방법이 가장 적합하다.

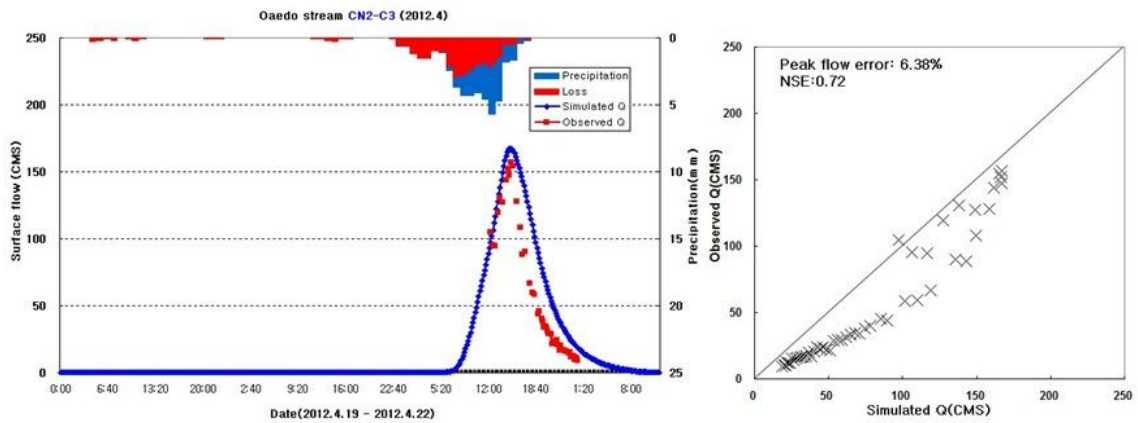
한천유역의 2011년 11월 집중호우 사상 첨두유량 도달시간은 18일 13시 30분으로 관측값과 일치하고, 첨두유량 오차가 0.10%, RMSE가 5.54로 가장 적합한 조합으로 분석되었으며, 2012년 4월 집중호우 사상 첨두유량 도달시간은 21일 14시 50분으로 관측치와 20분 차이로 가장 일치하고, 첨두유량 오차 2.19%, RMSE 14.78, NSE 0.89로 가장 적합하였다. 외도천 유역의 2012년 4월 집중호우 사상 첨두유량 도달시간은 15시이며 관측치와 10분 차이로 가장 일치하고, 첨두유량 오차 6.38%, NSE 0.72로 가장 적합하였다(Fig. 4.53).



(a) 2011년 11월 집중호우\_한천유역



(b) 2012년 4월 집중호우\_한천유역



(c) 2012년 4월 집중호우\_외도천유역

Fig. 4.53 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after no rainfall

(2) 선행강우 이후 강우-유출 사상

한천과 외도천 유역의 선행강우 이후 강우-유출 사상은 2011년 8월 태풍 “무이



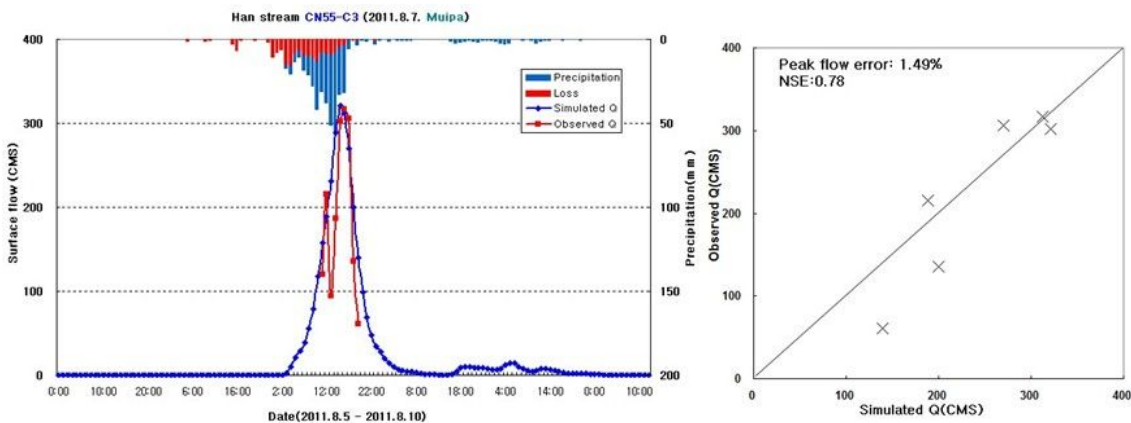
파”, 2012년 7월 태풍 “카눈” 으로 최적조합은 Table 4.40과 같다.

Table 4.40 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after antecedent rainfall

하천	호우사상	AMC 조건	도달시간	저류상수
한천	2011년 8월 태풍 “무이파”	AMC55	Kraven II	Sabol
	2012년 7월 태풍 “카눈”	AMC55	Kraven II	Sabol
외도천	2012년 7월 태풍 “카눈”	AMC55	Kraven II	Sabol

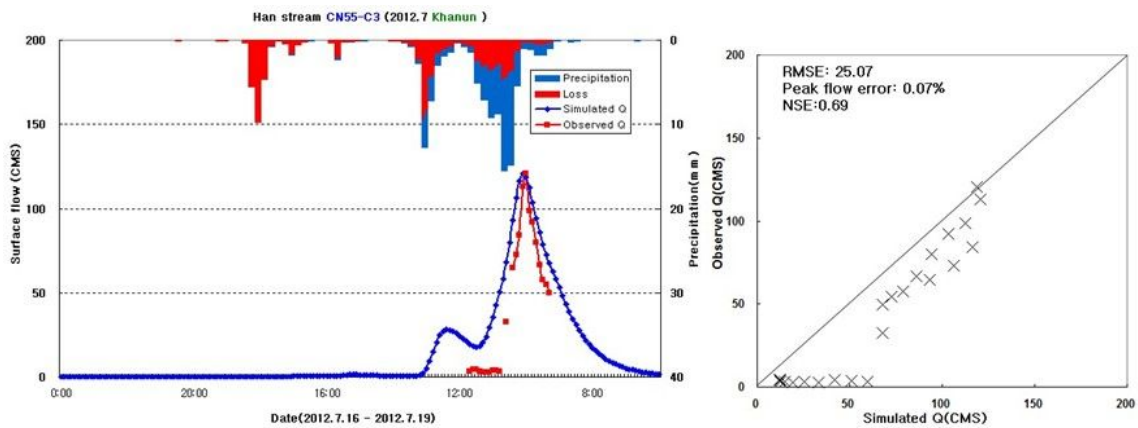
선행강우 이후 강우-유출 사상에 대해서는 AMCⅡ와 AMCⅢ 조건을 50% 씩 반영한 CN55, 유속을 도입한 도달시간 산정방법인 KravenⅡ, 유역형상 및 도달시간을 고려한 저류상수 산정방법인 Sabol 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다.

한천유역의 2011년 8월 태풍 “무이파” 사상 첨두유량 도달시간은 8일 15시로 관측치와 1시간 차이로 가장 일치하고, 첨두유량 오차 1.49%, NSE 0.78로 가장 적합한 조합으로 분석되었으며, 2012년 7월 태풍 “카눈” 사상 첨두유량 도달시간은 18일 21시 30분으로 관측치와 30분 차이로 가장 일치하고, 첨두유량 오차 0.07%, RMSE 25.07, NSE 0.69로 가장 적합하였다. 외도천 유역의 태풍 “카눈” 사상 첨두유량 도달시간은 21시 10분으로 관측치와 일치하고, 첨두유량 오차 1.29%, NSE 0.70으로 가장 적합하게 분석되었다(Fig. 4.54).

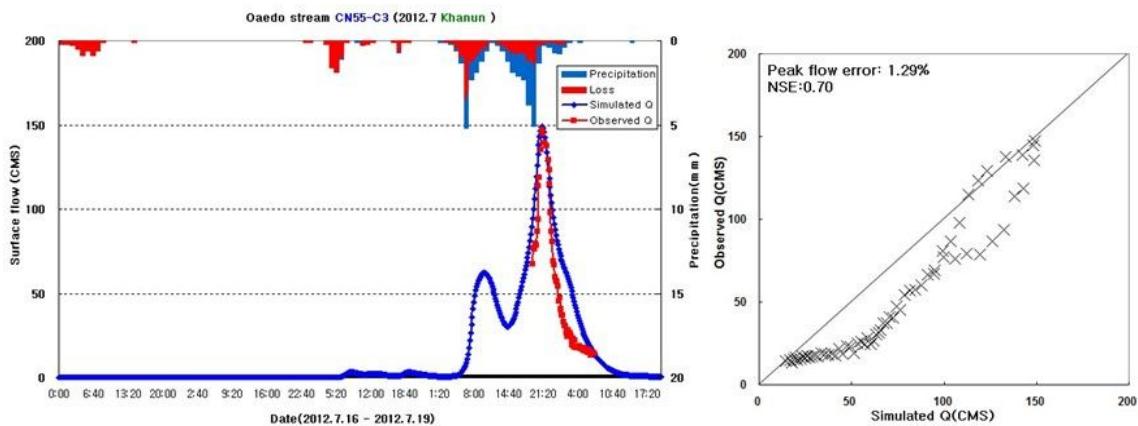


(a) 2011년 8월 태풍 “무이파”\_한천유역





(b) 2012년 7월 태풍 “카눈”\_한천유역



(c) 2012년 7월 태풍 “카눈”\_외도천유역

Fig. 4.54 Optimum parameter combination of rainfall-runoff after antecedent rainfall

### 5.3 기존 유출량 산정방법과 연구결과 비교 · 분석

산정된 Clark 단위도의 최적 매개변수 조합의 결과와 기존 하천정비기본계획 및 유역종합치수계획에서 사용된 홍수량 산정 방법(한천 외 3개 하천기본계획, 2009 및 하천수계별 유역종합치수계획, 2009)과 비교 · 분석을 수행하였다. 기존 설계홍수량 산정방법에서는 Thiessen 다각형 방법을 이용하여 선정된 강우 관측지점(제주, 성산포, 고산, 서귀포)의 확률강우량을 산정하여 고도에 따른 보정을 수행하여 강우량을 산정하고, 초기손실  $I_u = 0.2S$ 를 적용하여 유효우량을 산정하였다. Muskingum 매개변수  $K$ ,  $x$ 는 일반적인 값을 사용하고, Clark 합성단위도법의 매개변수  $T_c$ 는 Kraven I,  $K$ 는 Russel 방법을 채택하여 유출량을 산정하였다(Table 4.41).

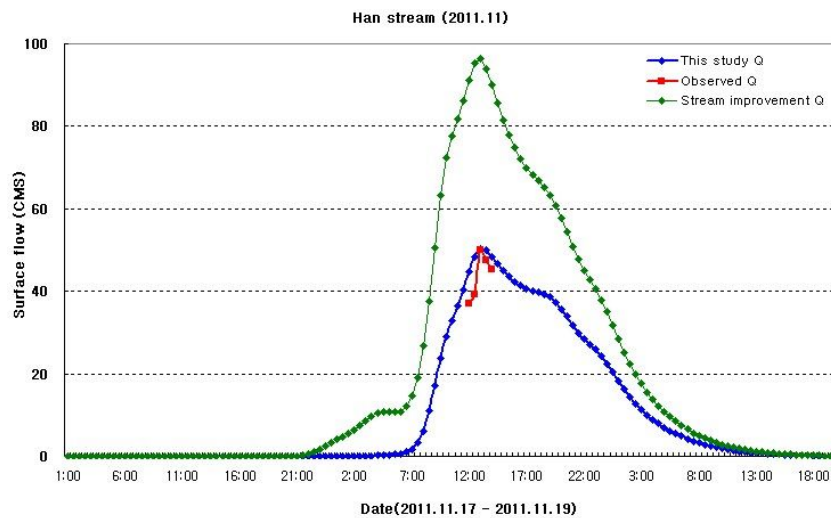
Table 4.41 Existing method and discharge calculation method from the results of this study

구분	기존방법 (한천정비기본계획, 2009)	본 연구
유역평균강우량	Thiessen 다각형법을 이용한 확률강우량 산정	등우선법
유효우량	초기손실 $I_a = 0.2S$	초기손실 $I_a = 0.4S$
CN	소유역별 대푯값	소유역별 대푯값 경사보정
Muskingum $K, x$	일반적인 값 $K = 1.5, x = 0.2$	관측자료를 이용하여 추정 $K = 1.48, x = 0.2$
Clark $T_c, K$	$T_c$ : Kraven I, $K$ : Russel	최적조합으로 산정 $T_c$ : Kraven II, $K$ : Sabol

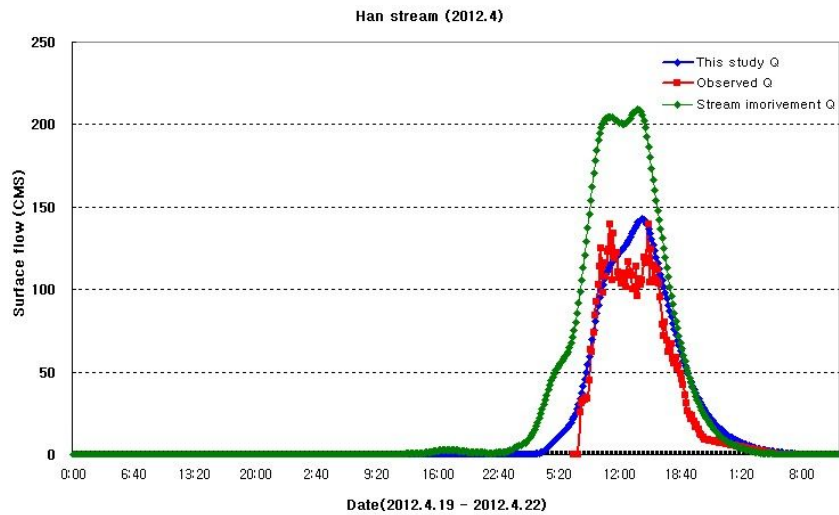
### 5.3.1 무강우 이후 강우-유출 사상

#### (1) 한천 유역

한천유역의 무강우 이후 강우-유출 사상인 2011년 11월 집중호우, 2012년 4월 집중호우 사상을 대상으로 기존방법과 본 연구방법을 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 4.55, Table 4.42와 같다.



(a) 2011년 11월 집중호우\_한천유역



(b) 2012년 4월 집중호우\_한천유역

Fig. 4.55 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study\_Han Stream

Table 4.42 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study\_Han Stream

구분	2011년 11월 집중호우		2012년 4월 집중호우	
	기존방법	본 연구	기존방법	본 연구
총 강우량(mm)	220.40	206.00	313.52	293.59
손실(mm)	96.72	145.18	126.15	202.76
침투유량(cms)	96.29	50.11	208.93	142.68
유출율(%)	56.12	29.52	59.76	30.93

기존방법을 이용하여 유출량을 산정한 결과 2011년 11월 집중호우 사상에 대하여 총 강우량은 220.40mm, 손실 96.72mm, 침투유량 96.29 cms, 유출율은 56.12%로 산정되었으며 2012년 4월 집중호우 사상에 대하여 총강우량은 313.52mm, 손실 126.15mm, 침투유량 208.93 cms, 유출율 59.76%로 산정되었다. 본 연구결과에 비하여 강우량은 14.4~19.93mm, 침투유량은 46.18~66.25cms, 유출율은 26.6~28.83% 크게 산정되었으며, 손실은 48.46~76.61mm 작게 산정되었다. 이러한 결과는 기존 유출량 산정 방법이 실제 관측유량에 비하여 과도하게 산정되는 것을 의미한다.

## (2) 외도천 유역

외도천유역의 무강우 이후 강우-유출 사상인 2012년 4월 집중호우 사상을 대상으로 기존방법과 본 연구방법을 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 4.56, Table 4.43과 같다.

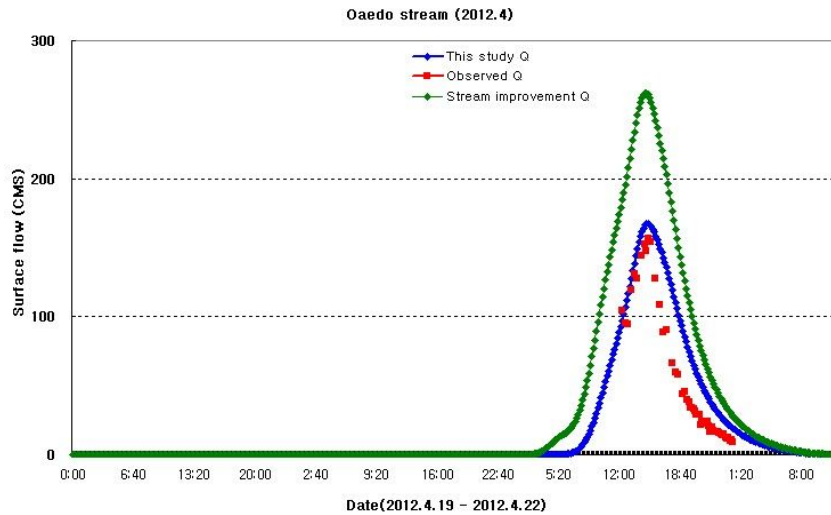


Fig. 4.56 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study\_Oaedo Stream

Table 4.43 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after no rainfall and results of this study\_Oaedo Stream

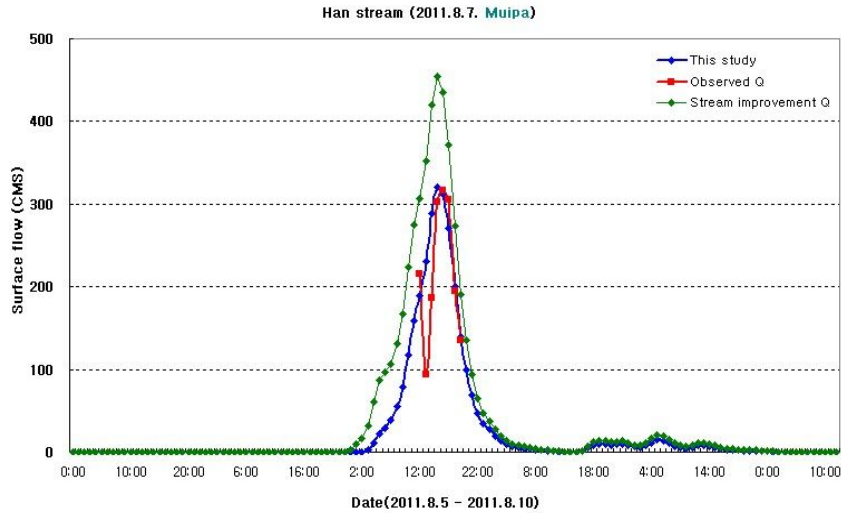
구분	2012년 4월 집중호우	
	기존방법	본 연구
총 강우량(mm)	311.40	287.40
손실(mm)	122.65	190.19
침투유량(cms)	262.23	167.33
유출율(%)	60.61	33.82

외도천유역의 기존방법을 이용하여 유출량을 산정한 결과 2012년 4월 집중호우 사상에 대하여 총강우량은 311.40mm, 손실 122.65mm, 침투유량 262.23cms, 유출율 60.61%로 산정되었다. 본 연구결과에 비하여 강우량은 24mm, 침투유량은 94.90cms, 유출율은 26.79% 크게 산정되었으며, 손실은 67.54mm 작게 산정되었다.

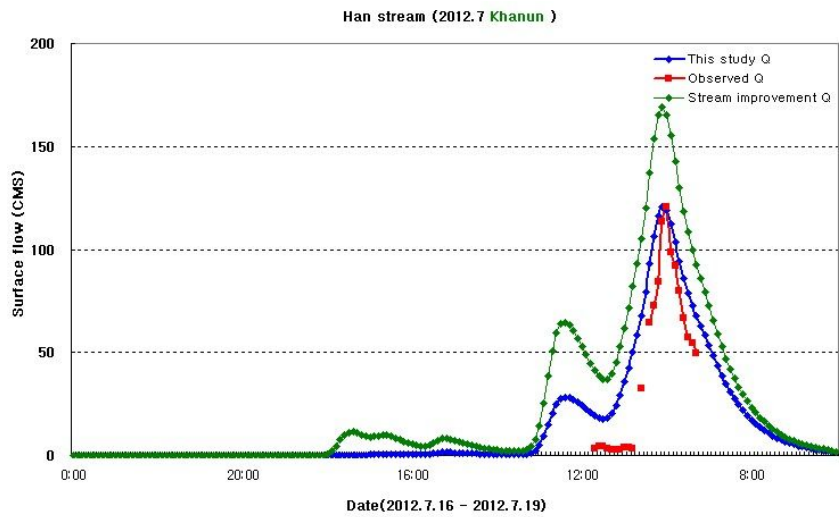
### 5.3.2 선행강우 이후 강우-유출 사상

#### (1) 한천 유역

한천유역의 선행강우 이후 강우-유출 사상인 2011년 태풍 “무이파”, 2012년 태풍 “카눈” 사상을 대상으로 기존방법과 본 연구방법을 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 4.57, Table 4.44와 같다.



(a) 2011년 8월 태풍 “무이파”\_한천유역



(b) 2012년 7월 태풍 “카눈”\_한천유역

Fig. 4.57 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study\_Han Stream

Table 4.44 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study\_Han Stream

구분	2011년 8월 태풍 “무이과”		2012년 7월 태풍 “카눈”	
	기존방법	본 연구	기존방법	본 연구
총 강우량(mm)	466.99	451.99	271.5	256
손실(mm)	114.88	240.8	90.75	169.52
침투유량(cms)	453.78	320.86	169.05	120.6
유출율(%)	75.40	46.72	63.90	32.39

기존방법을 이용하여 유출량을 산정한 결과 2011년 8월 태풍 “무이과” 사상에 대하여 총 강우량은 466.99mm, 손실 114.88mm, 침투유량 453.78cms, 유출율 75.40%로 산정되었으며, 2012년 7월 태풍 “카눈” 사상에 대하여 총 강우량은 271.5mm, 손실 90.75mm, 침투유량 169.05cms, 유출율은 63.90%로 산정되었다. 본 연구결과에 비하여 강우량 15~15.5mm, 침투유량 48.45~132.92cms, 유출율 28.68~31.51% 크게 산정되었으며, 손실은 78.77~132.92mm 작게 산정되었다.

## (2) 외도천 유역

한천유역의 선행강우 이후 강우-유출 사상인 2012년 태풍 “카눈” 사상을 대상으로 기존방법과 본 연구방법을 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 4. 58, Table 4.45와 같다.

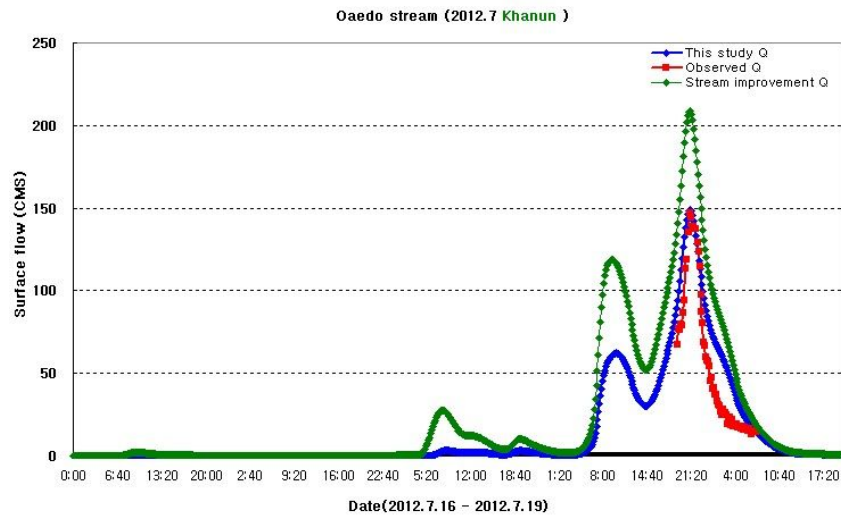


Fig. 4.58 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study\_Oaedo Stream

Table 4.45 Comparison of existing method of rainfall-runoff events after antecedent rain and results of this study\_Oaedo Stream

구분	2012년 7월 태풍 “카눈”	
	기존방법	본 연구
총 강우량(mm)	296	277.8
손실(mm)	90.42	167.23
침투유량(cms)	208.49	149.08
유출율(%)	69.45	39.78

기존방법을 이용하여 유출량을 산정한 결과 2012년 7월 태풍 “카눈” 사상에 대하여 총 강우량은 296mm, 손실 90.42mm, 침투유량 208.49cms, 유출율은 69.45%로 산정되었다. 본 연구결과에 비하여 강우량 18.2mm, 침투유량 59.41cms, 유출율 29.67% 크게 산정되었으며, 손실은 59.41mm 작게 산정되었다.

기존 방법과 본 연구방법을 이용하여 유출량을 산정하고 비교·분석한 결과 기존 방법이 본 연구에 비하여 유출량이 크게 산정되는 이유는 다음과 같다.

- Thiessen 방법으로 산정한 유역평균강우량보다 등우선법으로 산정한 유역평균 강우량이 3.7~8.1% 감소하여 총 유출량 감소
- Clark 단위도법 도달시간 산정방법(Kraven I)이 본 연구에서 최적조합으로 산정된 방법(Kraven II)에 비하여 민감도분석결과 침투 유량이 2.42~6.87% 감소
- Clark 단위도법 저류상수 산정방법(Russel)에 비하여 본 연구에서 산정된 방법(Sabol)이 민감도분석결과 침투 유량이 12.5~28.3% 감소
- 기존 적용된 초기손실( $I_a = 0.2S$ )에 비하여 본 연구에서 초기손실( $I_a = 0.4S$ )로 인하여 전체 손실량 약 25-35% 증가



## 6. 연구결과의 과거 호우사상 적용

제주도 하천의 유출량을 산정한 본 연구에 도입된 각 방법을 이용하여 과거 호우 사상에 대하여 적용하였다. 과거 호우사상은 무강우 이후 강우-유출 사상과 선행강우 이후 강우-유출 사상으로 구분하여 적용하였으며, 관측자료는 유출수문곡선 전체가 관측된 제주도 1지점 유량 관측자료를 이용하였다.

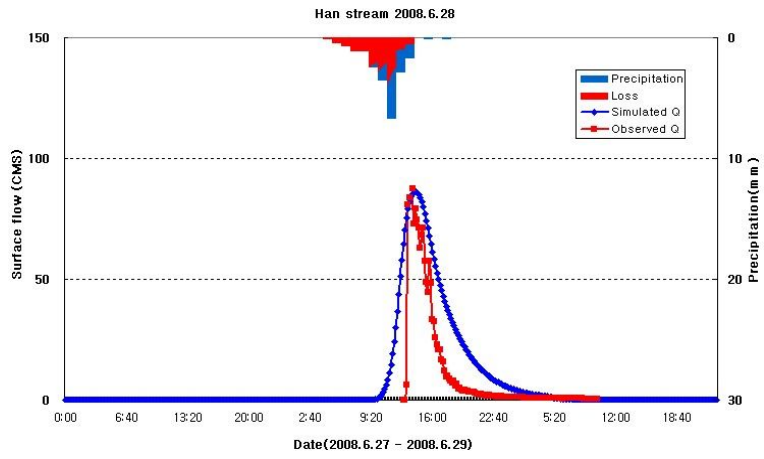
### 6.1 무강우 이후 강우-유출 사상

과거 관측자료가 존재하는 사상 중에서 선행강우가 발생하지 않고 유출수문곡선 전체가 확보되는 사상(Table 4.46)에 대하여 본 연구결과를 적용하였으며, 1지점 유량 관측자료를 이용하여 침투유량 오차 및 유출수문곡선, RMSE,  $R^2$ 을 산정하였다.

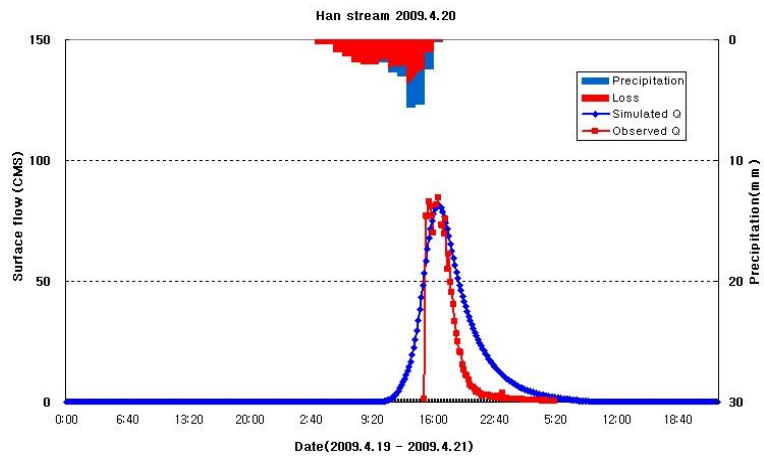
Table 4.46 Rainfall-runoff events after no past rainfall

일시	유역평균 5일 선행강우량 (mm)	유역평균 총강우량 (mm)
2008.6.27 - 6.29	3.52	125.60
2009.4.19 - 4.21	0	177.73
2009.8.27 - 8.29	4.19	91.67
2010.2.25 - 2.27	0.31	136.54

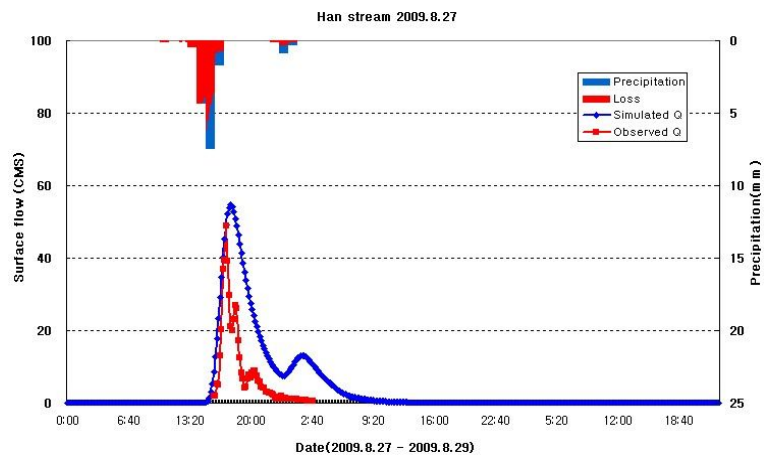
각 사상에 대하여 연구결과를 이용하여 모델에 적용하였으며, 적용결과는 Fig. 4.59와 같다.



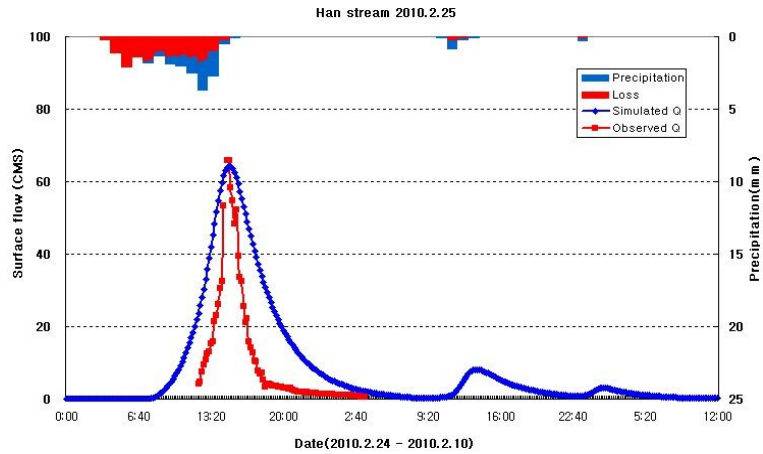
(a) 2008.6.27 - 6.29



(b) 2009.4.19 - 4.21



(c) 2009.8.27 - 8.29



(d) 2010.2.24 - 2.10

Fig. 4.59 Result applying past event\_rainfall-runoff events after no rainfall

Fig. 4.59에서 전체적으로 첨두유량 및 첨두유량 도달시간은 비슷한 값을 보이고 있으며 상승기와 하강기의 유량은 비슷한 경향을 보이지만 모델의 결과는 점진적으로 상승하고 하강하는 결과를 보이고 있다. 이러한 오차는 향후 다지점 유량관측자료 구축 및 제주도 하천의 상승기와 하강기 유출특성에 대한 연구 등으로 해결할 수 있을 것이라 판단된다.

각 사상에 대하여 첨두유량 오차, 첨두유량 도달시간 오차, RMSE, NSE 등에 대하여 산정한 결과는 Table 4.47과 같다.

Table 4.47 Result applying past event\_rainfall-runoff events after no rain

호우사상	첨두유량(cms)			첨두유량 도달시간			RMSE	NSE
	모의값	관측값	오차 (%)	모의값	관측값	오차 (min)		
2008.6.28	86.17	87.55	1.61	14:10	13:50	20	14.74	0.62
2009.4.20	81.54	84.77	3.97	16:30	16:30	0	15.20	0.61
2009.8.27	54.65	48.96	10.42	17:50	17:20	30	16.55	-
2010.2.25	64.34	65.87	2.38	15:00	15:00	0	24.12	-

과거사상에 대하여 적용한 결과 첨두유량 오차는 1.61 - 10.42%로 비교적 적합하게 나타났으며, 첨두유량 도달시간은 0~20분, RMSE 14.74~24.12, NSE 0.61~0.62

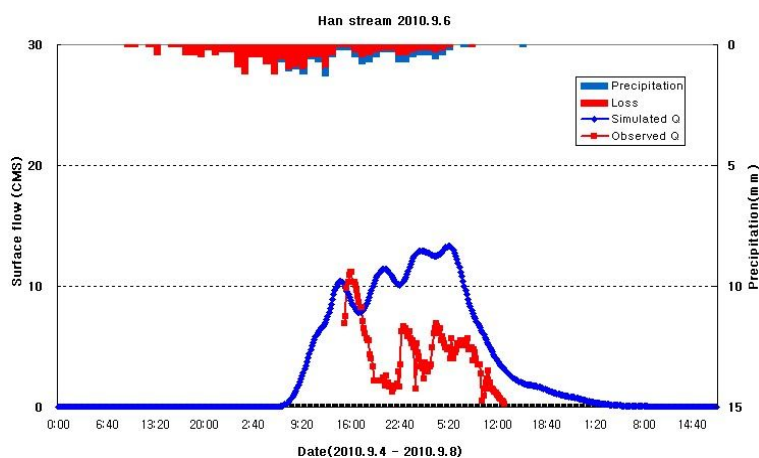
로 전반적으로 적합하게 나타났다.

## 6.2 선행강우 이후 강우-유출 사상

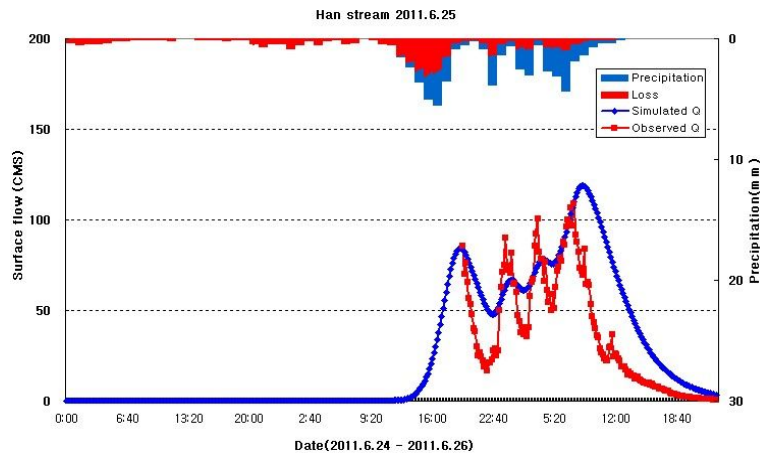
과거 관측자료가 존재하는 사상 중에서 선행강우(AMCⅢ 조건 이상)가 발생한 이후에 유출이 발생하는 사상(Table 4.48)에 대하여 본 연구결과를 적용하였으며 1지점 유량 관측자료를 이용하였다. 각 사상에 대하여 연구결과를 이용하여 모델에 적용하였으며, 적용결과는 Fig. 4.60과 같다.

Table 4.48 Rainfall-runoff events after past antecedent rainfall

일시	유역평균 5일 선행강우량 (mm)	유역평균 총강우량 (mm)
2010.9.4 - 9.6	107.76	140.66
2011.6.23 - 6.26	205.75	358.29



(a) 2010.9.4 - 9.8



(b) 2011.6.24 - 6.26

Fig. 4.60 Result applying past event\_rainfall-runoff events after antecedent rain

선행강우 이후 발생한 사상에 대하여 연구결과를 적용한 결과 관측치와 모델의 결과가 상이하게 나타났다. 2010년 9월 6일 발생한 사상은 실제 관측 유량이 10cms 내외의 매우 작은 관측결과가 도출되어 실제 오차는 크지 않으며, 2011년 6월 25일에 발생한 2011년 제5호 태풍 “메아리” 사상은 상류부에 저류지가 가동되어 하류부 관측값의 상승·하강이 여러번 반복되는 것으로 관측되었다. 현재까지 제주도내 저류지에 대한 매뉴얼 및 운영방안에 대한 시스템이 구축되지 않아 과거 사상에 대한 저류지 가동여부는 확인되나 시간 및 저류량 등은 확인 할 수 없었다.

과거사상에 대하여 적용한 결과 첨두유량은 오차가 10% 이내로 비슷한 값을 보이고 있으나, 유출수문곡선의 상승기와 하강기에는 관측값과 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 향후 다양한 사상에 대한 다 지점의 기초 관측자료를 확보하고 홍수 유출량의 첨두 유량뿐만 아니라 상승기와 하강기의 유출특성에 대한 추가적 연구가 필요하다고 판단된다.

## V. 결 론

제주도 하천은 매우 특이한 수문·지질학적 특성을 보이고 있어 국내에서 적용되는 하천유출량 산정법을 그대로 적용하기에는 많은 한계가 있으나 제주도하천정비 기본계획 등에서는 국내 산정법을 그대로 적용하여 있어 제주도 수문환경의 특수성을 반영하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 제주도 하천을 대상으로 현장관측에 기반한 하천유출 특성과 강우량, 유역의 손실, 단위도법 매개변수, 유역추적 매개변수 등을 적용하여 홍수유출량을 산정한 결과는 다음과 같다.

1) 연구대상유역은 제주시 중심부에 위치한 한천과 외도천 유역으로 선정하였다. 유출 발생 시 한천 제2동산교에서 현장 유량관측을 수행하였으며, 관측지점은 5지점 이상 확보하여 유출시 이동식 전자파표면유속계, LSPIV, ADCP 등을 사용하였다. 관측결과 유출지속시간은 22~26시간, 첨두유량 도달시간 4~9시간, 첨두유량  $50.11 \sim 316.37 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 분석되었다.

2) 유역 면평균 강우량은 기존 Thiessen 다각형 방법을 이용하고, 고도에 따른 강우의 영향을 고려할 수 있는 등우선법 변환 식을 개발하여 산정하였다. 유효우량을 산정하기 위한 NRCS-CN 방법의 기존 초기손실 계산방법( $I_u = 0.2S$ )을 관측자료를 이용하여 추정된 방법( $I_u = 0.4S$ )을 적용하였다.

3) Muskingum 하도추적법을 적용하였으며, 매개변수  $K$ ,  $x$ 에 대하여 유역추적 구간의 유입-유출 수문곡선을 이용한 도식방법으로 산정한 결과( $K=1.48\text{hr}$ ,  $x=0.2$ )를 모델에 적용하였다. Clark 단위도의 매개변수( $T_c$ ,  $K$ ) 및 유출곡선지수  $CN$ 의 범위를 설정하여 최적의 조합을 선정하였다. 무강우 이후 강우-유출이 발생하는 사상에서는 AMCII 조건의  $CN_{II}$ , KravenII, Sabol 방법이 가장 적합하였으며, 선행강우 이후 강우-유출이 발생하는 사상에서는 AMCII와 AMCIII 조건을 50% 씩 반영한  $CN_{55}$ , KravenII, Sabol 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다.

4) 기존 제주도하천정비기본계획의 홍수유출량 산정방법과 본 연구방법을 적용한

결과 유역평균 강우량은 3.7~8.1% 감소하였다. 민감도분석결과를 이용하여 Clark 단위도법의 도달시간( $T_c$ ), 저류상수( $K$ )를 분석한 결과 침투 유량이 각각 2.42~6.87%, 12.5~28.3% 감소하였다. 또한 초기손실이 기존 방법에서는  $I_a = 0.2S$ 이었으나, 본 연구에서는  $I_a = 0.4S$ 를 적용한 결과 전체 손실량은 약 25~35% 증가하였다.

5) 이상과 같은 홍수유출량 산정방법을 최근 대표적인 4개 호우사상에 적용하여 검정한 결과 침투유량 오차는 1.61~10.42%, 침투유량 도달시간은 0~20분, RMSE 14.74~24.12, NSE 0.61~0.62로 나타나 적합한 결과를 보였다.

제주도 하천의 현장관측자료와 수위-유속 관측자료를 사용하여 제주도 하천의 유출량을 산정한 결과와 유역특성 매개변수를 도출하여 홍수유출량을 산정한 결과는 전반적으로 우수한 결과를 보이고 있다. 따라서 이와 같은 연구결과들은 실제로 제주도 유역종합치수계획, 하천정비기본계획, 치수 및 방재계획수립 등에 적용 및 활용이 가능할 것이다.

향후 보다 정밀한 하천유출량을 산정하기 위해서는 불확실도가 적은 다 지점을 선정하고, 장기간 유량관측자료의 구축, 강우 및 차단으로 발생하는 손실부분에 대한 정확한 관측 및 추정이 필수적이다. 제주도 하천 현장관측자료에 기반한 하천유출특성 해석(상승기, 하강기, 침투유량), 수문지질학적인 특성을 반영한 유역추적, 도달시간, 저류상수 등 다양한 제주형 매개변수와 유도식 개발 등 많은 연구가 필요하다.



## 참고문헌

- 양성기, 김동수, 정우열, 류권규, 2011, 다양한 침단 유량 계측기기를 활용한 제주도 하천 유출 비교 분석, 한국환경과학회지, 20(6), pp.783-788.
- 정일문, 이정우, 김지태, 나한나, 김남원, 2011, 제주도 유출분석을 위한 한계유출 모의기법 개발, 한국환경과학회지, 20(10), pp. 1347-1355.
- 정우열, 양성기, 이준호, 2013, 제주도 도심하천 구역의 유출특성 해석, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 555-562.
- 김남원, 정일문, 나한나, 2013, 제주 천미천 구역의 간헐하천 유출특성 모의 방안, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 523-531.
- 한국지질자원연구원, 2011, 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴, 광역경제권 선도산업 육성사업 보고서, pp. 2-108-2-119.
- 하규철, 박원배, 문덕철, 2009, 제주도 토지이용변화에 따른 직접유출량 변화 추정, 자원환경지질 42(4), pp. 343-356.
- 윤현찬, 2010, 수문학적 토양군의 분류기준에 따른 유출특성, 경상대학교 대학원 공학석사학위논문, pp.15-21.
- 윤태훈, 1999, 응용수문학, 청문각, pp. 152-381.
- 제주도·한국수자원 공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ, pp. 18~28.
- 제주시, 2009, 한천 외 3개 하천기본계획
- 제주시, 2001, 지방2급 하천정비기본계획 보고서
- 제주시, 1992, 하천정비기본계획
- 국토해양부, 2012, 설계홍수량 산정요령(안), pp. 16-20.
- 정승민, 2003, 유출곡선지수에 따른 홍수량 민감도 분석, 수원대학교 대학원 공학석사학위논문, pp. 1-35.
- 문덕철, 양성기, 고기원, 박원배, 2005, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 한국환경과학회지, 14(4). 405-412.
- 문덕철, 하규철, 고기원, 박기화, 2004, 제주도 하천의 수위-유량 변동특성연구, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회 논문집, 422-425.

- 한용규, 양성기, 2009, SWAT 모형에 의한 제주도 외도유역의 토지이용변화에 따른 유출량 산정, 한국환경과학회지, 18(9), 1057-1063.
- 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기, 2009, 제주 지역 지표수-지하수 연계 해석, 한국환경과학회지 18(9), 1017-1026.
- 박원배, 문덕철, 2010, 하천유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구-한천·화북천·효례천을 중심으로-, 제주발전연구원 정책연구집, 2010-3.
- 박원배, 문덕철, 2009, 제주지역 하천유출수 활용을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, 제주발전연구원 정책연구집, 2009-11.
- 박원배, 문덕철, 2008, 하천유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, 제주발전연구원 정책연구집, 2008-11.
- 윤용남, 2007, 수문학, 청문각
- 이동훈, 2012, 유출분석을 위한 소유역 분할에 대한 연구, 아주대학교 대학원 공학석사학위 논문, pp. 14-20.
- 김강지, 2002, 설계홍수량에 영향을 미치는 매개변수 민감도 분석, 인천대학교 대학원 공학석사학위논문, pp. 9-12.
- 정우열, 2008, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 제주대학교 대학원 공학석사학위논문, pp. 63-64.
- 이재수, 2008, 수문학, 구미서관
- 정종호, 윤용남, 2007, 수자원설계실무, 구미서관
- 정남선, 2000, 지형정보자료와 HEC-HMS를 이용한 유출량 산정, 조선대학교 대학원 공학박사학위 논문, pp. 8-17.
- 윤태훈, 1999, 응용수문학, 청문각
- 윤성준, 2008, 중소하천 유역에서의 확률홍수량 분석, 한밭대학교 대학원 공학석사학위 논문, pp. 6-12.
- 정성호, 2002, 전자과표면유속계를 이용한 홍수기 유량 측장에 관한 연구, 밀양대학교 산업대학원 석사학위 논문, pp. 12-24.
- 시강, 송기현, 2009, 강우-유출 모형의 매개변수 결정에 따른 홍수량 분석, 국가위기 관리학회보 제1권, pp. 140-148.
- 한국수자원공사, 1998, 전자과 표면 유속계의 실용화 연구, WRRI-기획-98-3.
- 뮤트로닉스, 2010, 평갈수용 전자과 표면 유속계, 특허출원 10-2010-89895.

- Grayson, R. B., I. D. Moore, et al., 1992, "Physically based Hydrologic Modeling. 2. Is the Concept Relistic?", *Water Resources Reserach* 26(10), pp. 2659-2666.
- Vieus, B. E., 2001, *Distributed Hydrological Modeling Using GIS*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Bedient, P. B. and W. C. Huber, 2002, *Hydrology and Floodplain Analysis*. New York, Addison Wesley.
- Molnar, D. K. and P. Y. Julien, 2000, "Grid-Size Effects on Surface Runoff Modeling", *Journal of Hydrologic Engineering* 5(1), pp. 8-16.
- Muzik, I., 1996, *Lumped Modeling and GIS in Flood Prediction*. Geographical Information Systems in Hydrology. V. P. Singh and M. Fiorentio. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Colosimo, C. and G. Mendicino, 1996, *GIS for Distributed Rainfall-Runoff Modeling*. Geographical Information Systems in Hydrology. V. P. Singh and M. Fiorentio. Dordrecht. Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Dunn, S. M. and Lilly, 2001, "Investigating the Relationship Between Soils Classification and the Spatial Parameters of a Conceptual Catchment-Scale Hydrological Model", *Journal of Hydrology* 252, pp. 157-173.
- Abbott, M., J. C. Bathurst, et al., 1986, "An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE"; 1. History and philosophy of a physically based distributed modelling system", *Journal of Hydrology* Vol. 87, pp. 45-59.
- Woolhiser, D. A., 1996, "Search for Physically Based Runoff Model - A Hydrologic El Dorado", *Journal of Hydraulic Engineering* 123(3), pp. 122-129.
- Olivera, F. and Maidment, 1999, "Geographic Information systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing", *Water Resources Research* 35(4), pp. 1155-1164.
- Benavides, J. A., 2005, *Advanced methods for improving the lead-time and accuracy of a flood alert system in an urban watershed*, Ph.D thesis, Rice University.
- Lee, L., S., Julien, P.Y., 2006, *Electromagnetic Wave Surface Velocimetry*, *Journal*

- of Hydraulic Engineering, 132(2), pp. 146-153.
- Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R. and Oberg, K. (2007). Acoustic Velocimetry for Riverine Environments,” Journal of Hydraulic Engineering, 115, 925-936.
- RDI, 1996, Acoustic Doppler Current Profilers – Principle of operation, A Practical Primer. San Diego, CA, RDI Instruments.
- SonTek, 2000, Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications, SonTek Newsletter, 6(1), SonTek, San Diego, CA.
- Creutin JD, Muste M and Li Z, 2002, Traceless Quantitative Alternatives for Measurements in Natural Streams, Proceedings Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM).
- Aya S., Fujita I., Yagyu M., 1995, “Field Observation of Flood in a River by Video Image Analysis”, Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE, 39, pp. 447 - 452.
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J-D., Wilson, M., 2008, “Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method”, Journal of Hydrology, 13(2), pp.105-110.
- Hydrologic Engineering Center, HEC-HMS : Hydrologic Modeling System, User’s Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2001.
- Hydrologic Engineering Center, HEC-HMS : Hydrologic Modeling System, Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2000
- USGS, 2011, A Water-Budget Model and Assessment of Groundwater Recharge for the Island of Hawai’i, pp.15 - 20.

## 국내외 학술지 게재 논문

- 정우열, 양성기, 2008, 제주도 하천에 대한 SWAT 모형의 적용, 한국환경과학회지 17(9)
- 정우열, 양성기, 2009, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 한국환경과학회지 18(9)
- 양성기, 정우열, 한웅규, 2010, 토지피복도 변화에 따른 제주도 주요 하천의 유출변화 분석, 한국산학기술학회지
- 양성기, 김동수, 정우열, 류권규, 2011, 다양한 첨단 유량 계측기기를 활용한 제주도 하천 유출 비교 분석, 한국환경과학회지 20(6)
- 양성기, 김동수, 류권규, 정우열, 강명수, 이준호, 강명수, 유호준, 2012, 전자파와 수 표면 영상을 이용한 산지하천 홍수유량 및 유속 계측 비교·연구, 한국환경과학회지 21(6)
- 양성기, 정우열, 한웅규, 정일문, 2012, Impact of land\_use change on stream runoff in Jeju island, Korea, African Journal of Agricultural research 7(46)
- 정우열, 양성기, 이준호, 2013, 제주도 도심하천 구역의 유출특성 해석, 한국환경과학회지 22(5)
- 강명수, 양성기, 정우열, 김동수, 2013, 제주도 남부지역의 유출 특성, 한국환경과학회지 22(5)
- 고재욱, 양성기, 정우열, 양원석, 박철수, 2013, 산지형 하천의 토양침식 및 토사유출량 산정, 한국환경과학회지 22(5)
- 김동수, 양성기, 김수정, 정우열, 2013, ADCP 다중심 수심계측자료의 위상학적 보정 알고리즘 개발, 한국환경과학회지 22(5)