



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](#)

碩士學位論文

강우량 증가에 따른 홍수량 변동 및
홍수범람에 미치는 영향 분석

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

康 普 盛

2014 年 8 月

강우량 증가에 따른 홍수량 변동 및
홍수범람에 미치는 영향 분석

指導教授 楊 城 基

康 普 盛

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2014 年 8 月

康普盛의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2014 年 8 月

Analysis on Flood Discharge Variation
according to increasing Precipitation and
Effects of Flooding

Bo-Seong Kang

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2014. 8.

This thesis has been examined and approved.

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차	i
표 목 차	iii
그 립 목 차	iv
Summary	vi
I. 서론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 동향	3
3. 연구의 방법	5
II. 이론적 배경	7
1. 확률강우량 산정	7
1.1 확률분포형 선정	8
1.2 확률분포형의 매개변수 추정	11
1.3 적합도 검정	12
2. 설계홍수량 산정	15
2.1 HEC-HMS 모델의 소개	15
2.2 HEC-HMS 모델의 이론적 배경	16
3. 설계홍수위 산정	20
3.1 HEC-RAS 모델의 소개	20
3.2 HEC-RAS 모델의 이론적 배경	23
III. 연구대상 유역	27
1. 연구대상 유역	27
2. 유역의 지형특성	29

2.1 표고분석.....	29
2.2 경사분석.....	31
IV. 결과 및 고찰.....	33
1. 확률강우량 산정.....	33
2. 설계홍수량 산정.....	42
3. 설계홍수위 산정.....	50
4. 기후변화 시나리오를 적용한 범람 위험 분석.....	58
V. 결론.....	60
참고문헌.....	62
감사의 글.....	64

표 목 차

Table III-1. Basin characteristics of Oedo stream	29
Table III-2. Altitude analysis of Oedo stream	30
Table III-3. Slope analysis of Oedo stream	31
Table IV-1. Probable rainfall by duration when Typhoon "Nari" occurs	33
Table IV-2. Areal rainfall quantiles in Case 1	36
Table IV-3. Areal rainfall quantiles in Case 2	36
Table IV-4. Areal rainfall quantiles in Case 3	36
Table IV-5. Areal rainfall quantiles in Case 4	37
Table IV-6. Design flood estimation in Case 1	43
Table IV-7. Design flood estimation in Case 2	44
Table IV-8. Design flood estimation in Case 3	45
Table IV-9. Design flood estimation in Case 4	46
Table IV-10. Compare design flood of 100 years duration	48
Table IV-11. Design flood stage estimation in Case 1	52
Table IV-12. Design flood stage estimation in Case 2	53
Table IV-13. Design flood stage estimation in Case 3	54
Table IV-14. Design flood stage estimation in Case 4	55
Table IV-15. Peak flood stages of each Case	57
Table IV-16. Mean annual precipitation according to RCP 8.5 climate change scenario in Jeju-si	59

그림 목차

Fig. I -1. Flow chart on the study	6
Fig. II -1. Method of probability precipitation	7
Fig. II -2. Rainfall-runoff simulation process of HEC-HMS	16
Fig. II -3. The concepts of Clark Unit Graph	16
Fig. II -4. Prism and wedge storage in natural channel	19
Fig. II -5. Explanatory diagram of energy equations	23
Fig. II -6. Separate section of HEC-RAS	24
Fig. III-1. Location of the Oedo stream	28
Fig. III-2. Altitude analysis of Oedo stream	30
Fig. III-3. Slope analysis of Oedo stream	32
Fig. IV-1. Rainfall observing point	34
Fig. IV-2. 100 years return period probability precipitation of Case 1	38
Fig. IV-3. 100 years return period probability precipitation of Case 2	39
Fig. IV-4. 100 years return period probability precipitation of Case 3	40
Fig. IV-5. 100 years return period probability precipitation of Case 4	41
Fig. IV-6. Design flood estimation in Case 1	43
Fig. IV-7. Design flood estimation in Case 2	44
Fig. IV-8. Design flood estimation in Case 3	45
Fig. IV-9. Design flood estimation in Case 4	46
Fig. IV-10. Comparison of flood discharges for a 100-year return period	48
Fig. IV-11. The increase and decrease rates in accordance with the duration of a 100-year return period	49
Fig. IV-12. 3D model of Oedo stream, using HEC-RAS	50
Fig. IV-13. Cross-section and flood discharge of Oedo stream, using HEC-RAS	51
Fig. IV-14. Simulation results of design flood discharges with the use of	

HEC-RAS	51
Fig. IV-15. Design flood stage estimation in Case 1	52
Fig. IV-16. Design flood stage estimation in Case 2	53
Fig. IV-17. Design flood stage estimation in Case 3	54
Fig. IV-18. Design flood stage estimation in Case 4	55
Fig. IV-19. Cross-section of Woldae bridge over Oedo stream	56
Fig. IV-20. Peak flood stage according to return periods by case	57
Fig. IV-21. Changes in rainfall up to 2100 according to RCP 8.5 scenario	59

Summary

As global warming has accelerated to weather in recent years, have frequently appeared and resultant natural disasters are significantly increased. The frequent floods are creating heavy rains and typhoons followed by considerable damage in Jeju. Recently, there have taken been many heavy rainfall events that are exceeding the previous records. It is required to establish appropriate structured and unstructured measures by estimating flood discharge which changing the climatic parameters and increasing trend of rainfall are considered in order to reduce flood damage. In this context, this study estimated design flood discharges and flood stage in Jeju, considering climate change in connection with RCP scenario, the 5th IPCC Report recently published. It also analyzed the period which might be subject to the risk of flooding in downstream of Oedo Stream. As a result, it has analyzed that there might be a risk of flooding when there were 80 years or more rainfall events in 35 years that rainfall would have increased by 10%, 69 years that 100 years or more heavy rain and rainfall would have increased by 20%, and 104 years that 100 years or more heavy rain and rainfall would have increased by 20%. It is expected that this study results of rainfall increasing trend caused by climate change will be helpful to minimize the damage of floods which will secure the future of Jeju.

I. 서론

1. 연구의 배경

최근 지구온난화에 의한 기후변화가 심각한 사회적 문제로 대두되고 있으며, 이에 따른 자연재해의 발생빈도가 증가하고 있다. 자연재해 중에서도 특히 인명 및 재산 피해를 가장 크게 유발하는 홍수의 발생 빈도가 급증하고 있으며, 이는 집중호우 및 태풍과 같은 강우유출사상과 직접적인 관련이 있다.

제주도는 연 평균 2,061 mm의 강우가 발생하고 있는 국내 최다우 지역이지만 연 강우량의 2/3 이상이 여름철에 집중되고 있다(Jung과 Yang, 2009). 또한, 대부분의 하천은 한라산을 중심으로 남북사면을 따라 발달해 있어 경사가 급하고, 유로 연장이 짧으며, 평상시 건천의 형태와 독립적인 유역을 형성하고 있다(Yang, 2007). 이와 같이 내륙과는 크게 다른 제주도만의 지질적 특성과 기후 특성으로 인하여 호우 및 태풍에 의한 홍수 발생 시 많은 피해가 발생하고 있으며 대부분의 도심지가 하천이나 해안 주변에 위치하고 있어 더욱 큰 피해가 나타나고 있다.

제주도는 최근 기후변화에 의한 집중호우 및 태풍의 발생 빈도가 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 지난 2007년에는 제주시 도심지를 중심으로 일 최고 563.5mm의 폭우가 내린 태풍 나리로 인하여 14명의 인명과 약 1600억여 원의 재산상 피해가 발생하였다. 태풍 나리의 호우기록을 뛰어넘은 2011년 태풍 무이과는 일 최고 700mm 이상의 집중호우가 한라산 산간에 내려 크고 작은 피해가 발생하였다. 2012년에는 제 7호 태풍 카눈을 시작으로 제 16호 태풍 산바까지 초대형 태풍들이 상륙하였고, 그중에서도 14호 태풍 덴빈, 15호 태풍 볼라벤, 16호 태풍 산바의 경우 3개의 태풍이 연이어 제주도에 상륙하면서 많은 피해가 발생하였다(국가태풍센터, 2013).

홍수재해로 인한 피해를 막거나 억제하는 일은 어려운 부분이지만 전 세계적으로 홍수에 대한 피해를 저감하고자 하는 노력은 과거부터 꾸준히 시행되어 왔

으며, 현대에 이르러서는 각종 구조·비구조적인 방안이 수립되고 있다.

2007년 태풍 나리 발생 이후 제주도에서는 홍수재해의 피해를 줄이기 위해서 유역종합치수계획 및 하천기본계획 등에서 설계빈도를 50년에서 100년으로 상향 조정하여 확률강우량 및 설계홍수량을 산정하고 수공구조물의 규모를 높이고 있다.

본 연구에서는 강우량 증가가 홍수량 변동 및 홍수범람에 미치는 영향을 분석하기 위하여 최근 발생한 호우사상들의 강우량 자료를 활용하여 확률강우량, 설계홍수량 및 설계홍수위를 산정하고, 기후변화 시나리오와 연계하여 외도천의 하류부에서 홍수범람 위험시기를 분석하였다. 이와 같은 연구는 특이한 수문환경을 가진 제주도 하천의 수공구조물에 대한 적절한 설계빈도를 결정하는데 참고자료로 활용할 수 있으며 홍수로 인한 범람을 사전에 대비함으로써 홍수재해로 인한 피해를 저감할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구의 동향

집중호우에 의한 홍수량의 변동 및 홍수범람과 관련된 연구는 1980년대 초반부터 활발하게 진행되어 왔다. 최근에는 특히 기후변화의 영향으로 홍수 및 태풍의 크기가 점차 대형화됨에 따라 많은 인명 및 재산 피해가 발생하고 있어 더욱 많은 관심과 대비책이 요구되고 있다.

국외의 경우, Evans와 Lany(1983)는 영국의 Whitham강에서 범람한 홍수파의 해석을 위하여 1차원 음해 유한차분 모형을 이용하여 홍수 범람에 관한 모의를 실시하였으며, HEC-RAS와 HEC-FDA를 개발한 미 육군 공병단 수리공학센터(1992)에서는 HEC-2 모형과 GRASS를 연계하여 홍수 범람에 관한 연구를 수행하였다.

국내에서 안재현 등(2000)은 기후변화로 인해 설계 빈도를 상회하는 홍수가 발생하는 경향을 보이고 있어 자료 기간에 따라 달라질 수 있는 설계빈도 분석을 실시하여 대부분의 지점에서 확률강우량의 증가 경향을 파악하였고, 오태석 등(2009)은 이상기후의 영향에 의한 확률강우량의 변화 특성에 대한 연구를 실시하였다. 김정환 등(2002)은 확률강우량의 상승 혹은 감소와 관련하여 홍수량과 홍수위에 대한 영향성을 분석하였고, 확률강우량의 증가로 인하여 홍수량과 홍수위가 동일한 추세로 변동하는 결과를 보였으나, 통계적인 유의수준을 벗어나는 값은 아니었다는 결과를 보였다. 이와 비슷한 연구를 진행한 진호수 등(2012)은 확률강우량 증가에 따른 홍수량과 홍수위의 변화를 분석을 통해 이상강우의 영향에 따른 확률강우량의 증가는 홍수량과 비슷한 양상으로 변화하지만 홍수량은 홍수위와 동일한 양상으로 변화하지 않는다고 분석하였다.

장인수 등(2005)은 HEC-RAS 모형을 이용하여 남한강 충주댐의 수위변동을 모의하였고, 임종철 등(2007)은 탄천의 조도계수 산정을 위해 HEC-RAS 모형을 적용하여 수위변화에 따른 조도계수의 보정에 관한 개선방안을 제시하였다. 또한, 신현석 등(2000)은 HEC-HMS 모형과 HEC-RAS 모형을 이용하여 부산 수영강의 홍수위와 교량이 홍수위에 미치는 영향을 분석하였고, 박경범(2004)은 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 연계하여 홍수 발생 시 작동할 수 있는 홍수

예·경보 시스템의 모형을 제시하였다. 홍승진 등(2009)도 HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용하여 소양강 댐에 가능최대강수량이 발생한다고 가정하고 댐이 붕괴할 경우 두 모형간의 소양강댐 직하류의 유출량을 산정해 그 결과를 비교하였다. 이상호 등(2008)은 HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용하여 지리산 달궁 유역의 침수를 모의를 하고, 모의결과를 바탕으로 ArcView를 이용하여 침수지도를 작성하였다.

3. 연구의 방법

제주도 외도천 지역의 하류부에서 강우량의 증가가 홍수량 변동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 제주기상청에서 관측하고 있는 강우자료 중 관측시기가 10년 미만인 태풍센터 지점을 제외한 제주기상청 관할 4개 기상대(제주, 서귀포, 성산, 고산)의 ASOS(Automatic Synoptic Observation System) 자료와 19개소의 AWS(Automatic Weather System) 자료로 지점별 연최대치 강우자료를 구축하였다. 이와 같이 구축한 강우자료를 임의로 30%까지 증가시키면서 4가지 Case로 구분하고 각각의 Case에 대하여 면적확률강우량, 홍수량 및 홍수위를 산정하고, 외도천 하류부에서 범람 가능한 위험시기를 예측하였다.

먼저 확률강우량 산정을 위한 확률분포형은 수문자료 해석에 일반적으로 사용되는 8가지 분포형에 대하여 분석을 실시하였고, 그 중 Gumbel 분포형을 채택하여 산정하였다. 매개변수의 추정에 있어서는 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법 중 확률가중모멘트법을 채택하였다. 국내에서 가장 일반적으로 사용하는 방법인 티센다각형법을 사용하지 않고, 고도를 고려할 수 있는 등우선법을 이용하여 면적확률강우량을 산정하였다. 설계홍수량 산정시 지역의 손실계산은 NRCS-CN 방법을 이용하였고, 유출량은 Clark 단위도법을 이용하여 계산하였다.

이와 같이 산정된 결과 값을 최근 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change : 기후변화에 대한 정부간 협의체)에서 발표한 RCP 8.5 시나리오의 강우자료를 분석한 결과와 비교하여 범람 위험시기를 파악하였다.

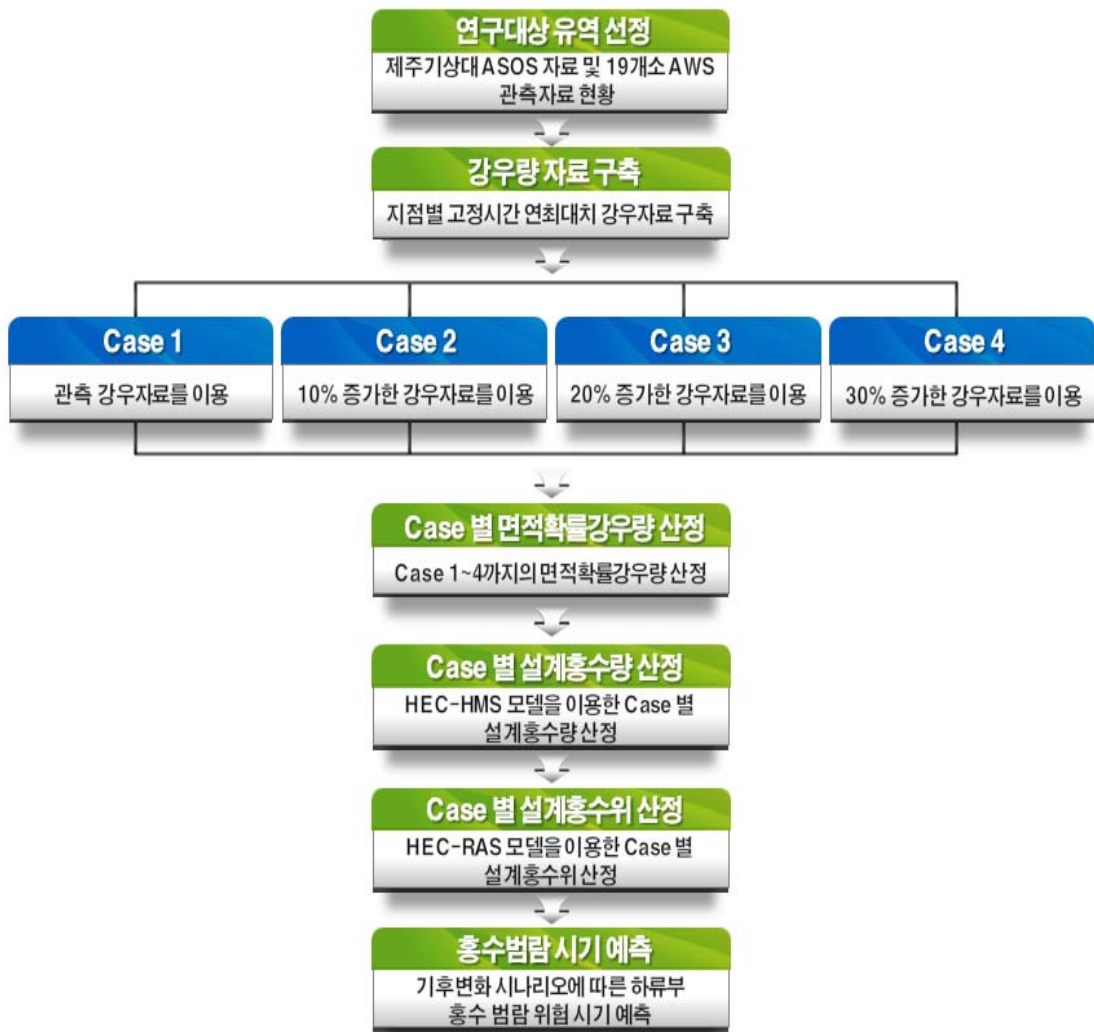


Fig. I -1. Flow chart on the study.

II. 이론적 배경

1. 확률강우량 산정

이수 및 치수 목적을 위한 수자원 시스템은 예측할 수 없는 크기의 수문사상에 대해 미리 계획하고, 수문학적 분석을 통하여 어떤 특정 초과확률에 대응하는 수문량을 추정하여 수자원 설계 시스템에 반영하기 위하여 강우빈도해석이 필요하다. 이러한 수문자료의 해석절차를 확률론적 방법이라 통칭하며, 특히 강우나 홍수의 발생빈도를 확률론적으로 예측하는 방법을 빈도해석이라고 한다.

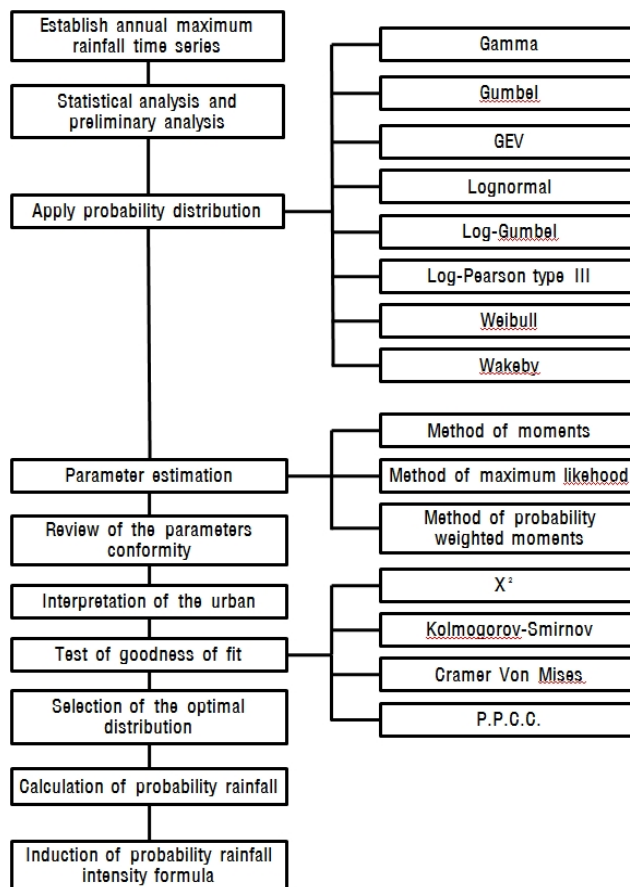


Fig. II-1. Method of probability precipitation

1.1 확률분포형 선정

(1) Gamma 분포형

대부분 수문자료의 확률밀도함수가 왜곡되어 있기 때문에 수문자료 해석에는 Gamma 분포를 자주 사용하는데, Gamma 분포형의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)$$

$$\alpha > 0 \text{이면 } x_0 \leq x < \infty, \alpha < 0 \text{이면 } -\infty < x \leq x_0$$

α : 축척매개변수(scale parameter), β : 형상매개변수(shape parameter)

x_0 : 위치매개변수(location parameter)

(2) Gumbel 분포형

GEV-1 분포로도 알려져 있고 자료의 극치중에서도 최대치에 해당하는 연 최대홍수량 및 강우량 자료의 분석에 많이 이용되고 있는 우리나라 강우자료의 대표적인 확률분포형으로써, Gumbel 분포형의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right], \quad -\infty < x < \infty$$

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right\}$$

α : 축척매개변수(scale parameter) (>0)

x_0 : 위치매개변수(location parameter)

(3) GEV(General Extreme Value) 분포형

홍수나 가뭄 같은 사상의 빈도해석에 많이 사용되는 분포함수으로써 형상매개변수에 따라 3가지 형태로 구분될 수 있으며, GEV 분포형의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}-1} \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]$$

α : 축척매개변수(scale parameter)

β : 형상매개변수(shape parameter)

x_0 : 위치매개변수(location parameter)

(4) Lognormal 분포형

3개의 매개변수를 가지는 lognormal 분포형은 아래와 같으며, $x_0=0$ 으로 놓으면 2변수 Lognormal 분포형이 된다. Lognormal 분포형의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} (x-x_0)\sigma_y} \exp \left[- \frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right]^2 \right], \quad x_0 < x < \infty$$

x_0 : x 의 하한치

μ_y : $\ln(x-x_0)$ 의 평균

σ_y : $\ln(x-x_0)$ 의 표준편차

(5) Log-Gumbel 분포형

GEV분포에서 $\beta < 0$ 인 GEV-2 분포이며, Frechet 분포로도 잘 알려져 있다. Log-Gumbel 분포형의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{\beta}{(x-x_0)} \left(\frac{\theta-x_0}{x-x_0} \right)^\beta \exp \left[- \left(\frac{\theta-x_0}{x-x_0} \right)^\beta \right]$$

$$\beta > 0, \quad x_0 < \theta, \quad x_0 < x < \infty$$

(6) Log-Pearson type III 분포형

Log Pearson type III 분포형은 미국에서 홍수자료해석에 추천되고 있는 분포형으로 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)x} \left[\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha} \right]$$

$\alpha > 0$ 이면 $e^{y_0} \leq x < \infty$, $\alpha < 0$ 이면 $0 < x \leq e^{y_0}$

α : 축척매개변수(scale parameter)

β : 형상매개변수(shape parameter)

y_0 : 위치매개변수(location parameter)

(7) Weibull 분포형

GEV분포에서 $\beta > 0$ 인 GEV-3분포이며, 갈수량의 빈도해석에 많이 사용되고 있는 Weibull 분포는 처음에 재료의 안정성과 수명시험을 모의하기 위하여 제안되었으며 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{x - x_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

α : 축척매개변수(scale parameter) (>0)

β : 형상매개변수(shape parameter) (>0)

(8) Wakeby 분포형

Wakeby 분포는 다음과 같이 역함수 형태로 나타나게 되며 확률가중모멘트법에 의해서 매개변수를 구하게 된다.

$$x = m + a[1 - (1 - F)^b] - c[1 - (1 - F)^{-d}]$$

m, a, b, c, d : 매개변수(parameters), F : 누가확률밀도함수

1.2 확률분포형의 매개변수 추정

(1) 모멘트법(Method of moments)

모멘트법은 간단하여 가장 많이 사용되었던 방법 중의 하나로, 모집단의 모멘트(population moments)와 관측 자료의 모멘트(sample moments)를 같다고 가정하여 매개변수를 추정하는 방법이다. 하지만 관측 자료인 경우 자료의 크기가 모집단에 비해 작고 대부분의 수문자료가 1보다 작은 왜곡된 형태를 보일 수 있으므로 부정확한 결과를 얻게 된다. 이러한 결과는 고차 모멘트로 갈수록 더욱 두드러지게 나타난다.

(2) 최우도법(Method of maximum likelihood)

최우도법은 추출된 표본자료가 나올 수 있는 확률이 최대가 되도록 매개변수를 추정하는 것으로 관측된 표본에 가장 적합한 모집단의 매개변수를 구하는 방법이다. 일반적으로 가장 효율적인 추정치를 얻을 수 있으며 표본자료의 크기가 충분히 클 때 다른 매개변수 추정방법에 의한 추정치의 효율성을 비교하는 기준으로 사용된다.

(3) 확률가중모멘트법(Method of probability weighted moments)

확률가중모멘트법은 모멘트법과 마찬가지로 모집단의 확률가중모멘트와 표본자료의 확률가중모멘트가 같다고 가정하여 각 변수 값을 크기순으로 나열하고 작은 값에는 작은 가중치를 큰 값에는 큰 가중치를 부여하여 매개변수를 추정하는 방법이다. 이 방법은 표본자료가 왜곡되거나 크기가 작은 경우에도 보다 안정적인 결과값을 얻을 수 있어 최근 가장 많이 쓰이는 매개변수 추정방법이다.

확률가중모멘트의 일반식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_{p, r, s} = E[X^p F^r(x) \{1 - F(x)\}^s]$$

여기서 p, r, s 는 양의 지수이고, $E[\]$ 는 기대값, $F(x)$ 는 X 의 누가확률밀도함수(비초과확률), $1 - F(x)$ 는 초과확률이다.

일반적으로 확률가중모멘트는 일반적인 모멘트보다 작은 자료 수에 의한 영향을 덜 받으며, 안정적이고 극대 강우사상이 포함된 자료계열에도 큰 왜곡 특성이 나타나지 않는다는 장점을 가지고 있다.

1.3 적합도 검정

(1) χ^2 검정

χ^2 검정은 수문자료와 특정 확률분포형의 적합성을 판단하는 정량적인 방법으로 관측 자료의 주상도와 이론적인 확률분포와의 차이를 구해 유의수준에 따른 한계값과 비교하여 선택여부를 결정하는 것이다. 관측자료가 각 계급구간에서 실제로 나타난 수와 이론적으로 나타나야 하는 수의 차를 구해 계급구간마다 합산하여 실제와 이론과의 차이를 정량적으로 나타내게 된다. χ^2 검정의 통계량 χ^2 은 다음 식과 같이 정의한다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

n_i : 계급구간 i 에 속한 자료의 수

n : 자료의 총 수

p_i : 계급구간 i 에서의 이론적인 확률

(2) Kolmogorov-Smirnov 검정

Kolmogorov-Smirnov 검정은 표본자료의 누가확률분포 $F_n(x)$ 와 이론확률의 누가확률분포 $F(x)$ 를 비교하는 것으로서, 두 분포간의 차이를 구해 최대로 나타나는 값과 한계치를 비교하여 판단하는 것이다. 표본의 크기와 유의수준에 따라 결정되는 한계편차보다 크면 분포는 기각되며, 최대편차 D_n 은 다음과 같이 표시된다.

$$D_n = \text{Max}|F_n(x) - F(x)|$$

여기서, D_n 은 $F_n(x)$ 와 $F(x)$ 두 값의 최대 차로 정의되며, n 의 크기에 따라 좌우되는 확률변수이다.

Kolmogorov-Smirnov 검정방법은 자료를 계급구간으로 나누어, 이론분포를 표시하기 위한 매개변수를 계산할 필요가 없기 때문에 비매개변수적 방법이라고 하며 χ^2 검정방법보다 유리한 검정방법이다.

(3) Cramer Von Mises 검정

Kolmogorov-Smirnov 검정방법과 마찬가지로 누가분포함수에 대하여 검정하는 방법으로, 관측 수문자료 x_1, x_2, \dots, x_n 이 누가확률분포함수 $F_x(x; \theta)$ 로 정의되는 확률분포형을 모집단으로 한다는 가정을 검정하는데 사용된다. 여기서 θ 는 표본자료의 크기가 N 인 자료에서 추정된 매개변수의 집합이라고 할 때, Cramer Von Mises 검정통계량 W 는 다음과 같이 계산된다.

$$W = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[F_x(x; \theta) - \frac{2i-1}{2n} \right]^2$$

여기서, $F_x(x; \theta)$ 는 크기순으로 재배열한 $X = x_i$ 위치에서의 누가확률분포함수이며, 유의수준 α 에서 $W < W_{1-\alpha}(n)$ 을 만족하면 선정된 확률분포형이 표본자료에 대하여 적합하다고 할 수 있다.

(4) PPCC(Probability Plot Correlation Coefficient) 검정

확률도시 상관계수(PPCC) 검정은 자료의 크기와 유의수준에 의한 검정 통계량을 유도하여 적합도를 검정하는 방법으로 검정 확률분포형과 관측 수문자료계열 X_i 로부터 구한 이론적 수문자료 계열 값인 M_i 의 상관관계는 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$\gamma_c = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}$$

γ_c : 적모멘트상관계수(product moment correlation coefficient)

X_i : 관측 수문자료계열, \bar{X} : 관측 수문자료계열의 평균

M_i : 이론적인 수문자료계열, \bar{M} : 이론적인 수문자료계열의 평균

2. 설계홍수량 산정

2.1 HEC-HMS 모델의 소개

HEC-HMS(Hydrologic Modeling System)은 미국 육군공병단 수문연구소에서 개발된 강우-유출 해석 프로그램으로 여러 가지 기능을 제공하며, 기존 강우-유출 해석 프로그램이었던 HEC-1을 보완한 후속 버전으로 개발된 프로그램이다.

HEC-HMS 초기 버전에는 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 수분감소 등을 추가적으로 포함하고 있다.

HEC-HMS는 GUI(Graphical User Interface) 환경, 통합 수문분석 성분, 자료 저장 및 관리 능력, 그래픽 처리 및 리포트 출력 기능 등으로 구성되어 있다.

HEC-HMS 모형은 크게 유역의 특성인자와 매개변수를 설정하는 Basin Model Manager, 강우와 같은 수문기상 요소를 설정하는 Meteorologic Model Manager, 모형의 시간에 관련되는 모든 정보를 취급하는 Control Specifications Manager로 구성되어 있으며, 모형 내의 모든 계산은 SI 단위계로 이루어지나, 입력 자료에는 SI 단위계와 영국 단위계를 모두 사용할 수 있으며, 출력 자료의 단위계도 사용자가 선택할 수 있도록 되어 있다.

2.2 HEC-HMS 모델의 이론적 배경

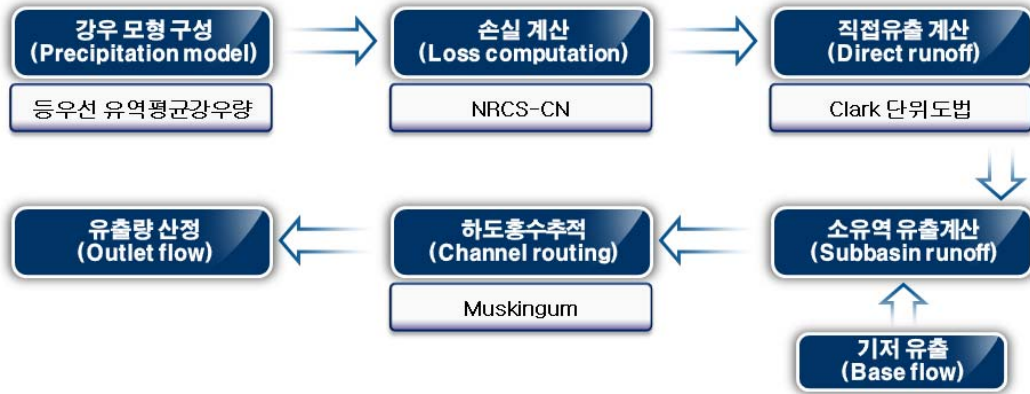


Fig. II-2. Rainfall-runoff simulation process of HEC-HMS

(1) Clark 단위도

Clark 단위도의 작성은 유역추적방법으로, 해당유역의 출구에 1개의 저수지가 있다고 가정하여 유역 전반에 순간적으로 내린 순간단위 유효우량으로 인한 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간 단위유량도를 작성하는 방법으로, 강우로 인한 유수의 전이(translation) 뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려하므로 자연유역의 적용에 적합하며 그 개념은 Fig. II-3과 같다.

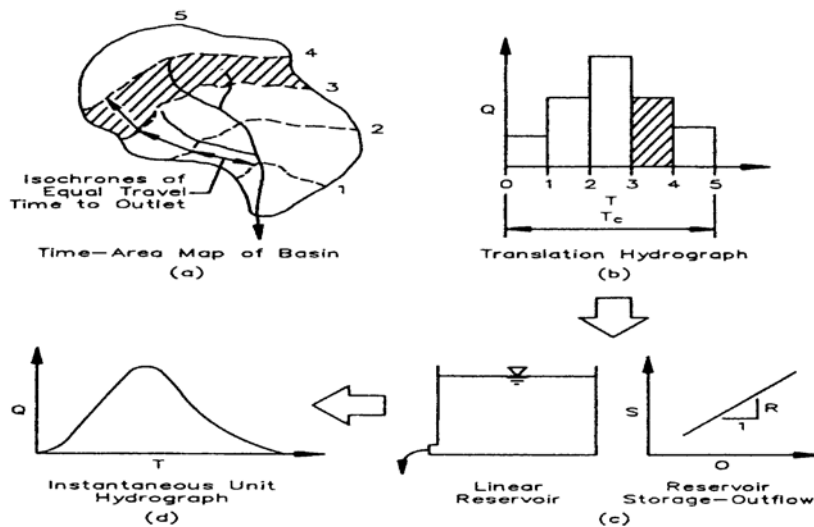


Fig. II-3. The concepts of Clark Unit Graph

유역의 순간단위유량도가 계산되면 원하는 지속기간에 대한 단위도로의 변환은 정수배 방법에 의하여 쉽게 이루어지며 이를 설계우량주상도에 적용함으로써 설계 홍수수문곡선을 계산할 수 있다.

Clark 단위도는 도달(집중)시간 T_c 와 저류상수 R 등 두 개의 매개변수를 토대로 하고 있다. 우리나라의 경우 자료부족으로 인하여 이론적인 방법으로 이러한 매개변수들을 정확히 산출하기는 어려운 실정이므로 실무에서는 다음과 같은 방법을 주로 사용한다.

① 도달시간(T_c)

도달시간(time of concentration)은 하도의 최상류부에서 최하류단까지 유수가 도달하는 시간으로 아래와 같이 Rziha, Kraven, Kirpich 공식 등 경험식을 주로 사용하고 있다.

가. Rziha 공식 ; 자연하천의 상류부($S \geq 1/200$)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.0139 \frac{L}{S^{0.6}}$$

나. Kraven - II 공식 ; 자연하천의 하류부($S < 1/200$)에 적용되는 공식

$$T_c = \frac{L}{3.6V}$$

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

다. Kirpich 공식 ; 농경지 소유역을 대상으로 유도된 공식

$$T_c = 0.0110 \frac{L^{0.77}}{S^{0.5}}$$

여기서, T_c : 도달시간(hr), L : 유로연장(km), S : 평균경사

② 저류상수(K)

실무에서 저류상수는 주로 0.8~1.2 범위로서 통상 1.0을 채택하여 사용하고 있으나 도달시간(T_c)만의 관계로 결정하는 것은 유역 형상을 고려하지 못한 경우가 존재하기 때문에 다음과 같은 식들을 참조하여 결정하고 있다.

가. Clark 공식

$$K = \frac{cL}{\sqrt{S}}$$

나. Linsley 공식

$$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}}$$

다. Sabol 공식

$$T_c/K = 1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A}$$

라. Russel 공식

$$K = \alpha T_c$$

여기서, K: 저류상수(hr), L: 유로연장(km), A: 유역면적(km²), S: 평균경사(%),
c: 0.5~1.4, b: 0.01~0.03, α : 0.2~1.2의 값을 가지는 상수이다.

(2) Muskingum 방법

추적구간내 저류량에 미치는 홍수유입량의 영향을 고려하기 위하여 구간내의 총 저류량을 Fig. II-4와 같이 대형(prism) 저류량과 썩기(wedge) 저류량으로 구분하고, 대형 저류량은 유출량에만 비례하나 썩기 저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정하는 홍수추적 방법이다.

총저류량은 대형 저류량과 썩기 저류량의 합으로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} S &= KO + Kx(I - O) \\ &= K[xI + (1-x)O] \end{aligned}$$

여기서, K: 추적구간내 저류량의 유출량에 대한 비를 나타내는 저류상수(hr)

x: 추적구간이 총저류량에 기여하는 유입량과 유출량의 상대적 중요성을 표시하는 무차원 상수

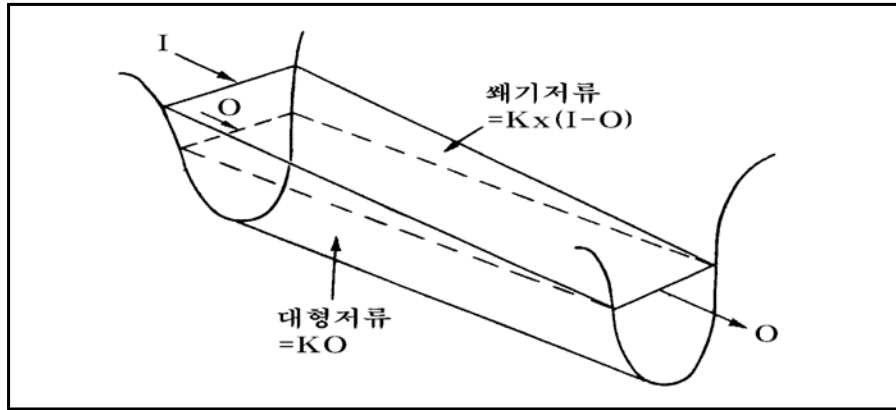


Fig. II-4. Prism and wedge storage in natural channel

미계측 유역의 경우 저류상수 K 값으로는 추적구간의 홍수와 통과시간을 주로 사용하며, 홍수와 통과시간은 홍수파의 질량중심(mass center)이 구간의 상류단으로부터 하류단까지 통과하는데 소요되는 시간으로 정의되며 간혹 첨두홍수량의 구간 통과시간을 근사치로 사용하기도 한다.

3. 설계홍수위 산정

3.1 HEC-RAS 모델의 소개

사용자가 일차원 정상류 흐름, 비정상류 흐름, 침전물 운반 등을 계산 할 수 있는 모형으로, HEC-RAS의 모델링 시스템은 수문 공학 소프트웨어인 “Next Generation”의 한 부분에서 발전된 시스템이다.

HEC-RAS는 다중작업과 다중 사용자망의 환경에서 서로 상호작용 할 수 있도록 설계된 통합 시스템이며 그래픽 사용자 공유(GUI), 분리된 수리학적 해석 요소, 데이터 저장, 관리 기능과 그래픽, 리포팅 능력을 가지고 있다.

HEC-RAS 시스템은 1차원 수리학적 해석 요소 3개를 포함하고 있다.

- 정상류 수면형의 계산
- 비정상류 시뮬레이션
- 이동하는 침전물 운반 계산

세 구성 요소에서 중요한 요소는 일반적인 기하데이터 표현, 일반적인 기하와 수리 계산 과정을 사용할 것이다. 세 개의 해석요소에 더해서 시스템은 기본 수면형이 계산되었을 때 나타낼 수 있는 수리 디자인 지형을 포함한다.

(1) User Interface

사용자는 그래픽 사용자 공유(GUI)를 통해 HEC-RAS를 사용한다. Interface를 디자인한 주요 목적은 높은 수준의 효과를 계속 유지하고 사용자가 소프트웨어를 쉽게 사용하도록 하기 위한 것이다. Interface는 File management, Data entry and editing, Hydraulic analysis, Tabulation and graphical displays of input and output data, Reporting facilities, On-line help와 같은 기능을 가지고 있다.

(2) Hydraulic Analysis Component

① 정상류 수면형

모델링 시스템의 요소는 정상류의 다양한 수면형에 대해 계산하는 것으로, dendritic system, 단일 하천 유역, 수로의 모든 망을 다룬다. 정상류는 상류, 사류, 혼합류의 수면형을 모델링 할 수 있다.

기본 계산과정은 일차원 에너지 방정식의 해에 기초를 둔다. 에너지 손실은 마찰(Manning 공식), 수축 팽창(속도 수두 변화에 다중화된 계수)에 의해 구해진다. 운동량 방정식은 수면형이 빠르게 변화하는 환경에 적용된다. 이러한 환경은 교량의 수리, 하천 영향에 의해 측정된 형(흐름 교차점), 혼합류의 계산(도수)에 포함된다.

② 비정상류 수면형

HEC-RAS 모델링 시스템의 요소는 개방 수로의 전체망을 통해 일차원 비정상류 흐름을 모의 실험할 수 있는 기능이 있다. 비정상류 방정식 풀이는 Dr. Robert의 UNET 모델(Barkau, 1992 and HEC, 1993)로부터 적용되어질 것이다. 비정상류 흐름 요소는 사류 흐름 체계 계산에서 우선 적용되어졌다.

정상류 흐름 요소가 적용된 단면, 교량, 암거 그리고 다른 수리 구조물의 수리 계산은 비정상류 흐름모델에 통합된다. 추가적으로 비정상류 흐름 요소는 storage areas, navigation dams, tunnels, pumping stations, levee failures를 설계할 수 있다.

③ 침전물 운반과 변화하는 경계 계산

모델링 시스템의 요소는 적당한 시간을 통해 퇴적 침식으로 인한 일차원 침전물 운반, 변화하는 경계계산을 모의 실험한다.

침전물 운반 포텐셜은 수리학적 분류, 외경의 시뮬레이션을 따라서 자갈 크기의 조각으로 계산되어진다. 주요 형태는 모든 망의 흐름, 준설 수로, 다양한 독, 침식지를 모델링 할 수 있는 기능을 가지고 있고 침전물 운반 계산에 각각의 다른 방정식을 사용한다.

모델은 물의 유출과 저류의 기간 동안 또는 수로 기하 수정함으로써 결과된 긴 기간의 흐름을 실험하도록 설계되었다. 이 시스템은 고정된 수로에 유사를 보정하고 큰 홍수 동안 가능한 최대 침식을 구하고 퇴적물에 의해 준설영향을 예

측하고 침식깊이를 유지하는데 요구되는 수로 축소를 디자인하고 저수지 안에 퇴적을 구하는데 사용된다.

(3) 데이터 저장과 관리

데이터 저장은 “flat”(ASCII, binary) 파일을 사용하여 실행시킬 수 있다. 사용자 입력 데이터는 project, plan, geometry, steady flow, unsteady flow, sediment 데이터의 분리된 형태로 flat에 저장된다. 출력 데이터는 분리된 binary 파일에 저장된다.

데이터 관리는 데이터 interface로 실행된다. 설계사는 개발된 프로젝트에 단일 파일명을 입력해야 한다. 프로젝트명이 입력되면 자동적으로 모든 파일은 만들어지고 interface에 의해 이름 지어진다. interface는 기본 프로젝트에 의해 프로젝트와 파일에 새 이름으로 옮겨지고 지우는 기능을 가지고 있다.

(4) Graphics and Reporting

그래픽은 하천 시스템, 단면, 형, 곡선율, 수리 그래프, 많은 다른 수리 요소의 x, y 좌표를 포함한다. 다른 단면의 3차원 좌표도 제공된다. 도표의 출력도 이용할 수 있다. 모든 그래픽과 표의 출력은 스크린에 나타나고 프린트로 보내지고 워드프로세서나 스프레드시트와 같은 다른 소프트웨어에 보낼 수 있다. 리포팅 기능은 입력 데이터뿐만 아니라 출력 데이터도 출력할 수 있다. 원하는 정보의 양과 형을 형식화 할 수 있다.

3.2 HEC-RAS 모델의 이론적 배경

(1) 기본방정식

각 단면에서의 미지의 수위를 계산하기 위하여 다음의 두 방정식을 표준축차법(standard step method)에 의해서 반복적으로 계산한다.

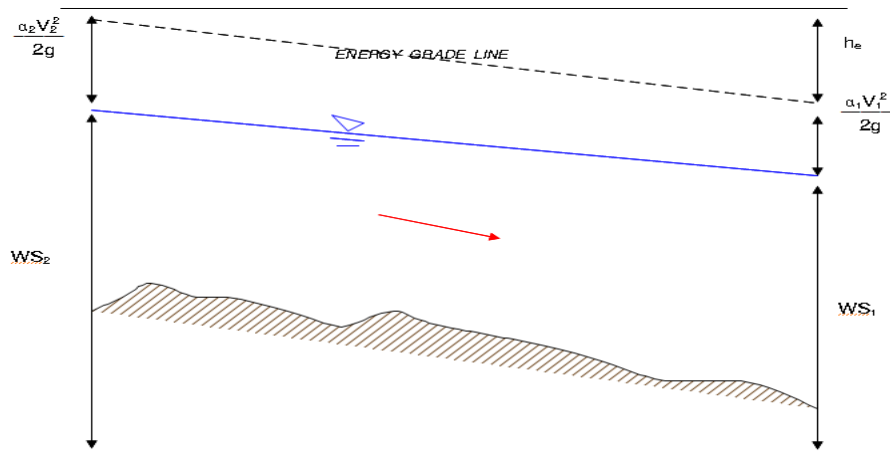


Fig. II-5. Explanatory diagram of energy equations

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

WS_1, WS_2 : 구간 양단에서의 수위

V_1, V_2 : 구간 양단에서의 평균유속(총 유량/총 유수단면적)

α_1, α_2 : 구간 양단에서의 흐름 유속계수

g : 중력가속도, h_e : 에너지 손실 수두

L : 유량 가중 구간 길이, \bar{S}_f : 구간에서의 대표 마찰 경사 값

C : 단면 확대 또는 축소에 의한 손실계수

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}}$$

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : 좌측 제방, 본수로, 우측 제방에서의 흐름에 대한 구간 길이

$\overline{Q_{lob}}, \overline{Q_{ch}}, \overline{Q_{rob}}$: 좌측 제방, 본수로, 우측 제방 한 구간 양단에서의 평균 유량

(2) 단면분할

흐름을 유속 분포가 균일한 단면 요소로 분할하여 유속계수와 총 통수능을 산정하는 과정은 다음과 같다.

$$k = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}}$$

k : 개별 분할 영역의 통수능, n : 개별 분할 영역의 Manning 계수
 A : 개별 분할 영역의 유수단면적, R : 개별 분할 영역의 동수반경

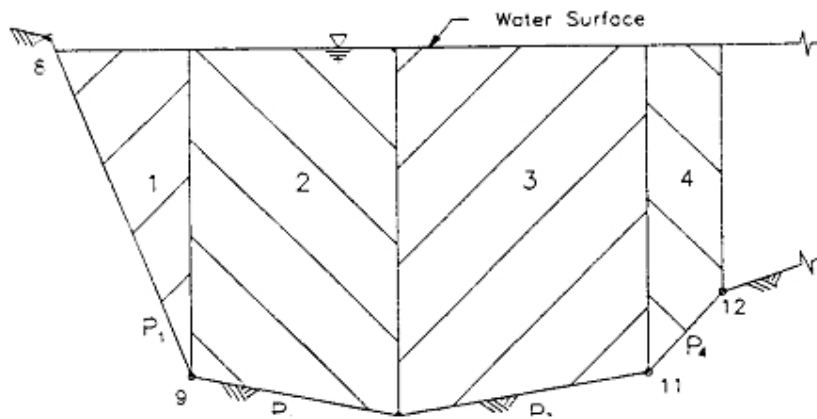


Fig. II-6. Separate section of HEC-RAS

(3) 유속계수

유속계수 α 는 3개의 흐름 요소(좌측 제방, 우측 제방, 수로)에 대한 각각의 통수능을 이용하여 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

A_t : 총 유수단면적

A_{lob} , A_{ch} , A_{rob} : 각각 좌측 제방, 수로, 우측 제방의 유수단면적

K_t : 총 통수능

K_{lob} , K_{ch} , K_{rob} : 각각 좌측 제방, 수로, 우측 제방의 통수능

(4) 마찰손실

마찰손실은 \bar{S}_f 와 L의 곱으로 계산되며, 여기서 \bar{S}_f 는 구간에 대한 대표 마찰경사이며, \bar{S}_f 를 계산할 때 이용되는 공식은 다음과 같다.

① 평균 통수능 공식

$$\bar{S}_f = \left[\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right]^2$$

② 평균 마찰경사 공식

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2}$$

③ 기하평균 마찰경사 공식

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} \cdot S_{f2}}$$

④ 조화평균 마찰경사 공식

$$\bar{S}_f = \frac{2S_{f1} \cdot S_{f2}}{S_{f1} + S_{f2}}$$

위의 공식들 중에서 HEC-RAS 모형에서 사용하는 기본 설정 공식은 평균 통수능 공식이다.

(5) 계산절차

- ① 상류 단면(사류 수면곡선을 계산한다면, 하류 단면)에서의 수위를 가정한다.
- ② 가정된 수위에 근거해서, 이에 상응하는 총 통수능과 속도수두를 계산한다.
- ③ 위의 단계에서 계산된 값을 이용하여 $\overline{S_f}$ 를 계산하고, 기본방정식의 h_e 를 계산한다.
- ④ 위의 단계에서 계산된 값과 기본방정식을 이용해서 WS_2 를 계산한다.
- ⑤ 계산된 WS_2 값과 가정한 값을 비교한 후 오차가 0.01ft(또는 0.01m) 이내가 될 때까지 반복한다.

Ⅲ. 연구대상 유역

1. 연구대상 유역

제주도는 한반도의 남서해상에서 약 90km 지점인 동경 126° 08' ~ 126° 58', 위도 33° 06' ~ 34° 00' 에 위치한 우리나라 최대의 화산섬으로, 동·서간 거리는 73.3km, 남·북간 거리는 41.0km에 이르며, 부속 도서를 포함할 경우 동·서간 거리는 동단 우도에서 서단 차귀도까지 77.2km, 북단 횡간도에서 남단 마라도까지 100.1km에 이르는 지리적 특성을 갖고 있다.

지형적 특성은 표고 1,950m의 한라산을 중심으로 원추형의 순상화산의 특성을 보이고 있으며, 동서사면은 3 ~ 5°의 매우 완만한 경사를 이루고 있고, 남북사면은 5° 정도로 급한 경사를 이루고 있다.

본 연구에서는 대부분의 도심이 하천과 해안가 주변에 입지해 있는 점을 고려하여 도심을 가로지르면서 경사가 급한 남북사면으로 유역이 형성되어 있는 외도천을 연구대상 유역으로 선정하였다.

제주도 북서부 해안에 위치한 외도천은 한라산 중산간에서 발원하여 북부 해안으로 유입되는 하천으로 유역면적 44.64km², 유로연장 20.56km, 유역평균경사 0.106로 비교적 급한 경사의 지형 형태를 보인다. 투수성이 좋은 제주도의 하천은 지질 특성상 건천이 대부분이지만, 연구대상인 외도천은 제주도 전역에 존재하는 9개의 상시하천 중 하나로서 하류부에서는 항시 유출이 발생하고 있다. 평상시에는 하류부의 용천수에 의한 하천유지용수가 있지만, 태풍이나 집중호우로 인한 돌발홍수 발생 시 하천범람의 위험이 있는 지역이다(Fig. III-1).

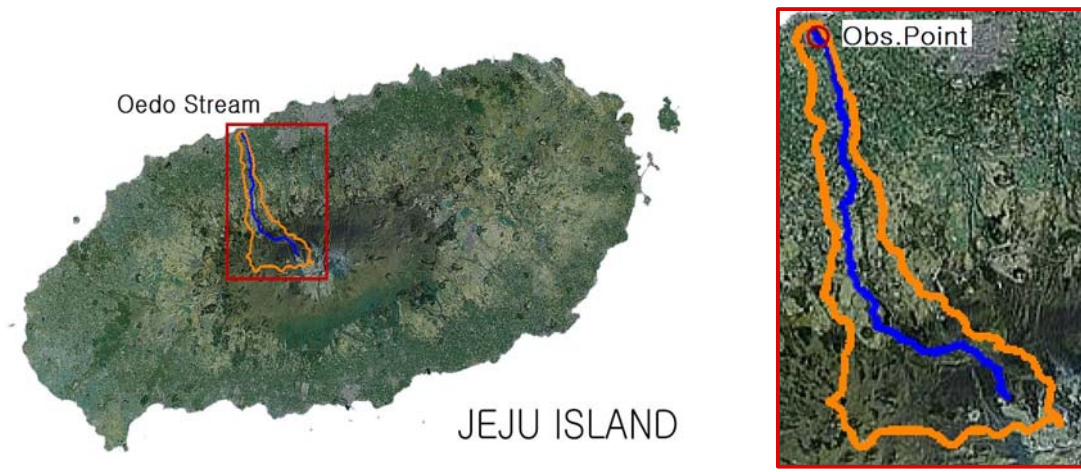


Fig. III-1. Location of the Oedo stream

2. 유역의 지형특성

유역의 특성을 이해하고 수문사상을 분석하는 데 있어 가장 중요한 요소인 유역특성인자들을 Table III-1에서 보이고 있다. 유역면적과 유로연장은 앞서 언급한 바와 같이 각각 $44.64km^2$ 와 $20.56km$ 이며, 유역평균폭은 $2.17km$ 로 조사되었다. 유역의 형태를 나타내고 무차원 단위를 갖는 형상계수는 그 크기가 클수록 유출의 집중성향이 커지게 되므로 첨두 홍수량이 크게 발생하고, 형상계수가 작을수록 유출의 집중성향도 작아지게 되어 첨두 홍수량이 비교적 적게 발생하게 된다. 또한 1.0에 가까울수록 유역의 형상이 정방향에 근접하게 되는데, 외도천의 경우 형상계수가 0.106으로 분석되었기 때문에 유출의 집중성향이 비교적 낮은 것으로 판단되었다.

Table III-1. Basin characteristics of Oedo stream

하 천	유역면적 $A(km^2)$	유로연장 $L(km)$	유역평균폭 $A/L(km)$	형상계수 A/L^2
외도천	44.64	20.56	2.17	0.106

2.1 표고분석

외도천 유역의 표고분석 결과, 해발 200m 미만인 지역은 유역 전체의 10.86%를 차지하고 있고, 200m 이상 400m 미만인 지역은 10.14%, 400m 이상 600m 미만인 지역은 11.17%, 600m 이상 800m 미만인 지역은 14.72%, 800m 이상 1000m 미만인 지역은 18.37%, 1000m 이상 1200m 미만인 지역은 15.39%, 1200m 이상 1400m 미만인 지역은 10.26%, 1400m 이상인 지역은 9.10%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다(Table III-2, Fig. III-2).

Table III-2. Altitude analysis of Oedo stream

표고(m)	유역면적(km^2)	비율(%)	누적비율(%)
0 ~ 200	4.85	10.86	10.86
200 ~ 400	4.53	10.14	21.00
400 ~ 600	4.98	11.17	32.16
600 ~ 800	6.57	14.72	46.89
800 ~ 1000	8.20	18.37	65.25
1000 ~ 1200	6.87	15.39	80.64
1200 ~ 1400	4.58	10.26	90.90
1400 ~ 1600	3.17	7.10	98.00
1600 ~ 1800	0.89	2.00	100.0

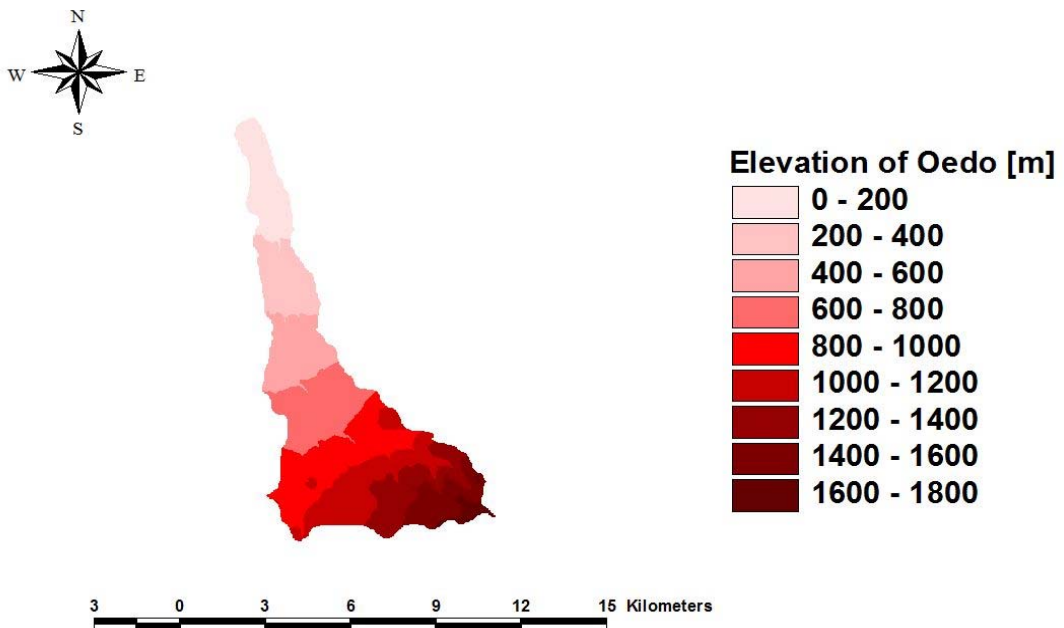


Fig. III-2. Altitude analysis of Oedo stream

2.2 경사분석

외도천 유역의 경사분석 결과, 10° 미만인 지역은 유역 전체의 61.19%를 차지하고 있고, 10° 이상 20° 미만인 지역은 23.94%이며, 20° 이상 30° 미만인 지역은 8.49%, 30° 이상 40° 미만인 지역은 4.39%, 40° 이상인 지역은 1.98%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다(Table III-3).

외도천 유역의 85.13%가 20° 미만으로 분석된 것은 남북사면이 짧은 제주도의 지형적 특성이 그대로 나타났음을 알 수 있으며, 다른 하천에 비해 유역이 남북사면으로 길게 형성되어있어 전체적인 유역 경사가 급한 것으로 분석되었다(Fig. III-3).

Table III-3. Slope analysis of Oedo stream

경사(°)	유역면적(km^2)	비율(%)	누적비율(%)
0 ~ 10	27.32	61.19	61.19
10 ~ 20	10.69	23.94	85.14
20 ~ 30	3.79	8.49	93.63
30 ~ 40	1.96	4.39	98.02
40 ~ 50	0.74	1.67	99.69
50 ~ 60	0.11	0.25	99.93
60 ~ 70	0.02	0.05	99.99
70 ~ 80	0.01	0.01	100.0

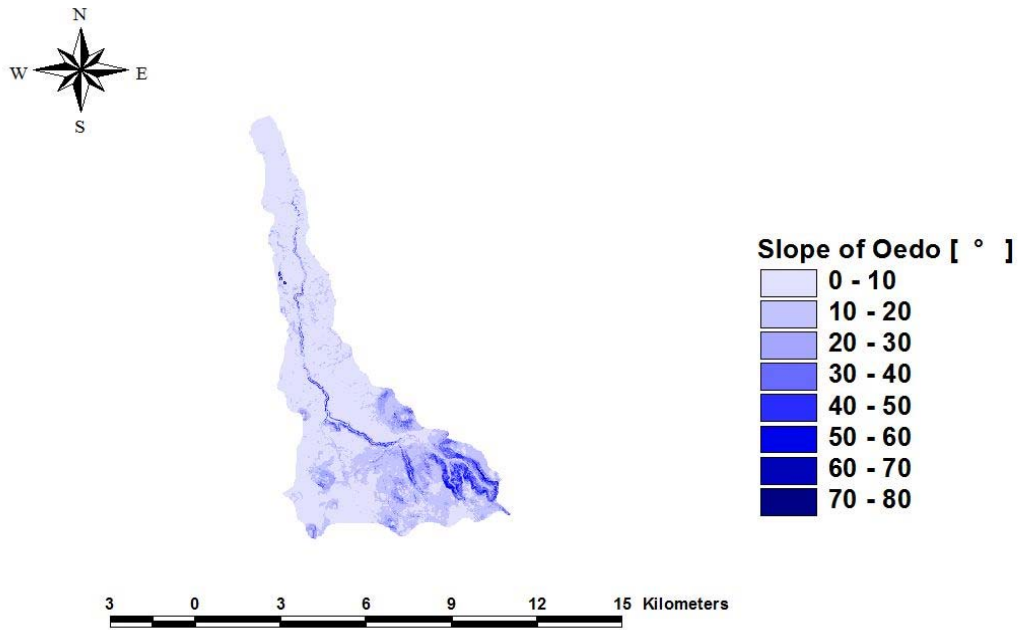


Fig. III-3. Slope analysis of Oedo stream

IV. 결과 및 고찰

1. 확률강우량 산정

2007년 9월 제주도는 태풍 나리로 인해 많은 인명 및 재산 피해가 발생하였다. 그 때 당시, 지역적으로 내린 비는 일 최대 542mm로 기록적인 강우를 기록하였고, 태풍 나리 내습시의 강우 자료를 이용하여 확률강우량을 산정한 결과(Table IV-1)를 살펴보면, 재현기간이 1000년 빈도를 상회하는 호우사상으로 분석되었다.

Table IV-1. Probable rainfall by duration when Typhoon "Nari" occurs(Lee, 2007)

재현기간(년)	지속시간별 확률강우량(mm)					
	60분	120분	180분	360분	720분	1440분
20	76.7	103.5	124.6	172.0	233.8	298.2
30	82.2	111.0	133.8	184.9	252.1	321.9
50	89.1	120.4	145.2	201.0	274.8	351.6
80	95.5	129.1	155.8	215.7	295.7	378.8
100	98.4	133.2	160.7	222.7	305.6	391.7
200	107.7	145.8	176.2	244.3	336.2	431.6
500	120.0	162.5	196.6	272.8	376.6	484.3
1000	129.3	175.1	212.0	294.4	407.2	524.1
제주관측소 실측강우량	70.5	115.0	153.0	288.0	410.5	421.0

제주도에서 2007년 이전까지는 하천의 홍수 범람으로 인한 피해가 크게 발생하지 않았었기 때문에 하천정비기본계획 및 유역종합치수계획 등에서도 설계빈도를 50년으로 설정하고 있었지만, 태풍 나리 때 많은 피해가 발생한 이후 재현기간을 100년으로 상향 조정하여 지금까지 정비하고 있다.

특히, 최근 기후변화에 인한 강우의 증가로 태풍 나리 때 호우기록을 뛰어넘는 호우사상들이 발생하였고, 이와 같은 호우사상의 증가는 확률강우량 및 설계홍수량이 증가하는 결과로 나타나고 있다. 이에 꾸준한 연구가 필요한 실정이며, 본 연구에서도 강우 증가 경향을 고려한 홍수량을 분석하기 위한 첫 번째 과정으로 최근 호우사상들이 포함되어 있는 강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였다.

우선, 강우자료의 구축에 있어서 안재현 등(2000)은 분산의 변동이 작은 안정된 확률강우량을 산정하기 위해서는 강우 자료가 최소 30년 이상 관측되어야 한다고 제시하고 있으나, 제주도의 경우 관측시기가 짧아 대부분 관측 자료의 보유 년 수가 30년을 넘지 못하는 실정이다. 외도천 유역의 확률강우량을 산정하기 위한 자료는 이러한 문제점을 감안하여, 최소 10년 이상 관측이 이루어진 지점에 한하여 사용하였다. 즉, 제주기상청에서 관측하고 있는 강우자료 중에서 관측시기가 10년 미만인 태풍센터 지점을 제외한 제주기상청 관할 4개 기상대(제주, 서귀포, 성산, 고산)의 ASOS 자료와 19개소의 AWS 자료를 사용하였다(Fig. IV-1). 또한, 각 관측지점에 대한 지속기간 및 시간 강우자료를 수집하여 임의시간을 1시간 간격으로 연 최대치 강우자료를 구축하였다.



Fig. IV-1. Rainfall observing point

확률분포형은 수문자료 해석에 일반적으로 사용되는 8가지 분포형에 대하여 분석을 실시하였고, 그 중 설계홍수량 산정요령(2012, 국토교통부)에서 지역적 불연속이 발생하는 것을 방지하기 위하여 통일하고, 확률강우량도 개선 및 보완 연구(2011, 국토교통부)에서 추천한 바 있는 Gumbel 방법을 확률분포형으로 채택하여 산정하였다.

또한 매개변수의 추정에 있어서 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법 중에서 본 연구와 같이 관측 자료의 기간이 짧은 경우에도 오차의 크기가 크지 않으며 다른 방법에 비해 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있는 장점을 가진 확률가중모멘트법을 채택하였다.

확률분포에 대한 적합도 검정은 확률분포의 상대도수함수와 누가분포함수의 이론값과 표본 값을 비교하여 그 정도를 판별하게 되는데, 이에 대한 검정방법으로 X^2 검정, Kolmogorov-Smirnov(KS) 검정, Cramer Von Mises(CVM) 검정, Prob. Plot Corr. Coeff(PPCC) 검정 등 4개의 방법으로 시행하였다.

각 Case의 면적확률강우량을 산정하면, 실제 관측된 강우자료를 이용한 Case 1의 경우 81.7 ~ 936.0 mm의 범위로 분석되었고, 강우량을 10% 증가시킨 Case 2의 경우 89.9 ~ 1029.6 mm, 강우량을 20% 증가시킨 Case 3의 경우 97.9 ~ 1122.8 mm, 강우량을 30% 증가시킨 Case 4의 경우에는 106.0 ~ 1214.1 mm의 범위로 분석되었다.

다음 Table IV-2, 3, 4, 5는 각 Case별 면적확률강우량을 산정한 결과 값이다.

Table IV-2. Areal rainfall quantiles in Case 1

(단위 : mm)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10	81.7	133.9	173.6	214.6	249.1	285.5	430.2	488.7	527.5
20	92.4	153.3	200.1	248.4	289.6	332.8	506.6	577.3	624.0
30	98.5	164.5	215.3	268.1	312.7	359.8	550.4	628.4	679.7
50	106.2	178.6	234.3	292.4	341.7	394.0	605.4	692.1	748.5
80	113.3	191.3	251.8	314.7	368.2	425.0	655.7	750.9	812.2
100	116.6	197.4	260.0	325.2	380.7	439.7	679.7	778.1	842.6
200	127.0	216.2	285.5	357.9	419.8	485.3	753.2	864.3	936.0

Table IV-3. Areal rainfall quantiles in Case 2

(단위 : mm)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10	89.9	147.2	191.0	236.0	274.2	313.9	473.1	538.8	580.0
20	101.7	168.7	220.1	273.4	318.4	365.9	557.2	635.2	686.0
30	108.4	181.0	236.8	294.7	343.9	395.9	605.8	691.9	747.0
50	116.9	196.3	257.8	321.5	375.9	433.2	666.5	761.5	823.6
80	124.6	210.5	277.0	346.1	404.9	467.5	721.1	826.0	893.5
100	128.4	217.2	285.9	357.8	418.8	483.8	747.9	856.1	926.9
200	139.7	237.8	314.1	393.9	461.6	534.1	828.6	950.4	1029.6

Table IV-4. Areal rainfall quantiles in Case 3

(단위 : mm)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10	97.9	160.5	208.3	257.5	298.8	342.3	516.0	586.2	632.6
20	110.9	183.9	240.1	298.1	347.2	399.3	608.1	693.3	747.9
30	118.2	197.4	258.3	321.4	375.1	431.8	660.8	754.1	814.6
50	127.5	214.1	281.1	350.7	409.7	472.5	726.2	830.6	898.5
80	135.9	229.6	302.1	377.5	441.7	509.9	786.8	900.7	974.7
100	139.9	236.7	311.9	390.2	456.7	527.6	815.2	933.7	1010.8
200	152.3	259.3	342.6	429.3	503.5	582.6	903.7	1036.7	1122.8

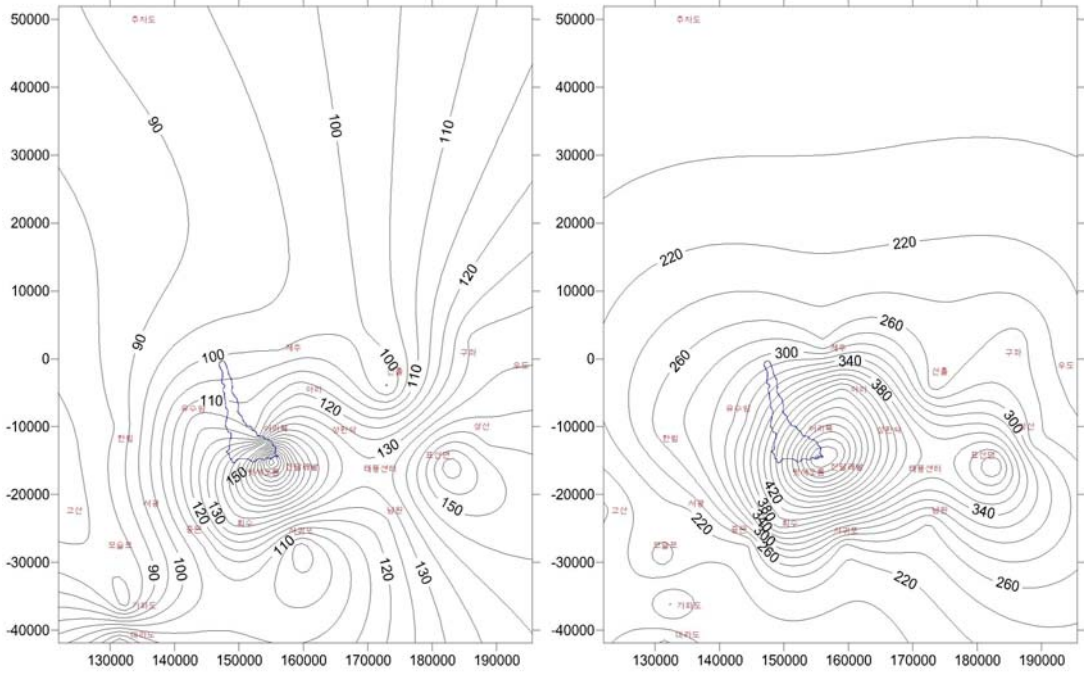
Table IV-5. Areal rainfall quantiles in Case 4

(단위 : mm)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10	106.0	173.6	225.3	278.4	323.0	370.1	558.3	634.1	683.8
20	119.8	198.9	259.5	322.3	375.6	431.8	658.1	749.3	808.7
30	127.9	213.3	279.3	347.4	405.6	466.8	714.7	815.5	881.2
50	137.8	231.6	304.0	379.2	443.2	511.0	786.3	898.4	971.3
80	146.9	248.2	326.6	408.0	477.7	551.5	851.6	974.1	1053.9
100	151.3	256.7	337.2	422.0	493.9	570.6	882.1	1009.8	1093.2
200	164.7	280.4	370.5	464.3	544.5	630.1	978.4	1121.4	1214.1

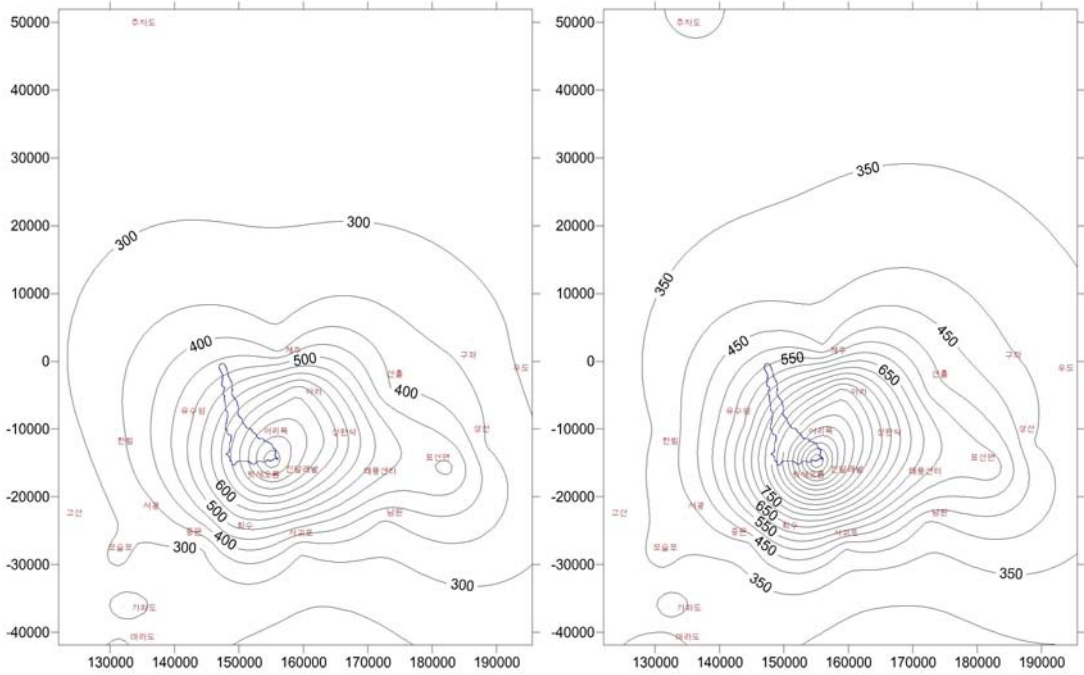
본 연구에서는 실제 관측된 강우 자료(raw data)를 기준(Case 1)으로, 강우량을 10%씩 30%까지 증가시키면서 4가지 경우(Case 1 ~ 4)로 구분하여 면적확률강우량을 산정하였다. 이와 같이 산정된 각 Case의 면적확률강우량 결과 값들을 Case 1(raw data)의 면적확률강우량에 10%, 20%, 30% 증가시킨 결과 값들과 비교해보면, 그 차이가 최소 -0.42, 최대 0.25로 큰 차이 없이 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 외도천의 경우 강우량이 증가할 때 면적확률강우량 역시 똑같은 비율로 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 태풍 나리 내습 시 강우 자료를 이용하여 확률강우량을 산정한 결과와 비교해 보면 불과 6~7년 사이에 0.09 ~ 22.41% 증가한 것으로 분석되는데 이러한 결과는 기후변화로 인한 강우의 증가가 뚜렷하며, 강우강도가 증가하고 있으며, 호우사상들이 과거에 비해 커지고 있다는 것으로 판단할 수 있다.

다음 그림 자료들은 면적확률강우량을 산정하기 위한 과정으로, Case 별 100년 빈도의 확률강우량을 등우선법으로 나타낸 것이다(Fig. IV-2, 3, 4, 5).



60min

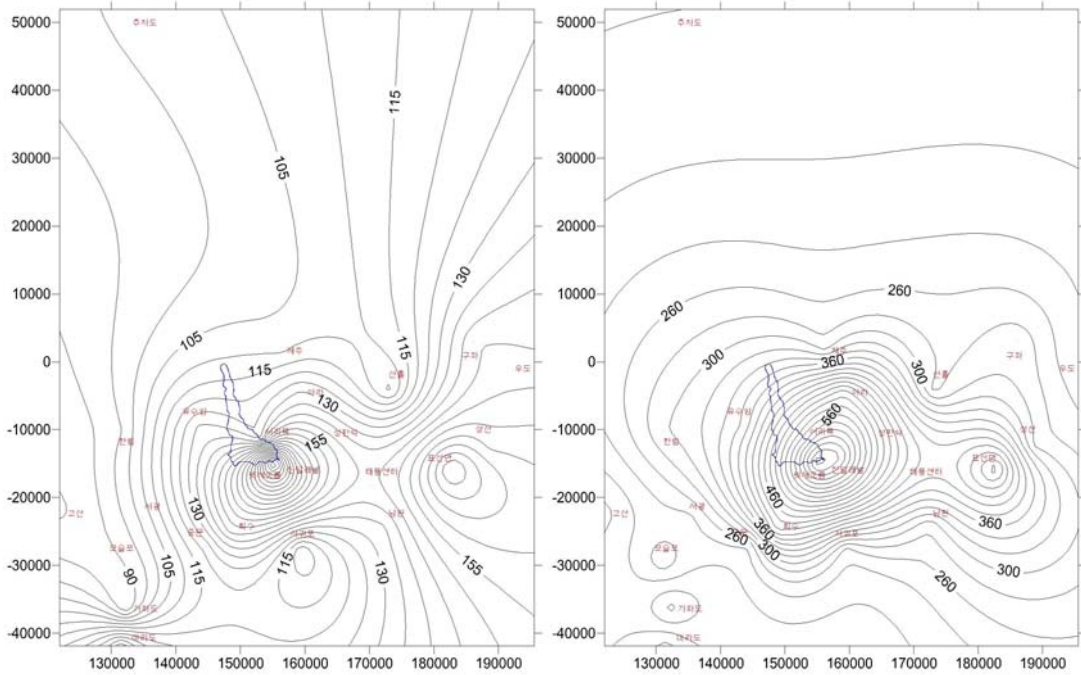
360min



720min

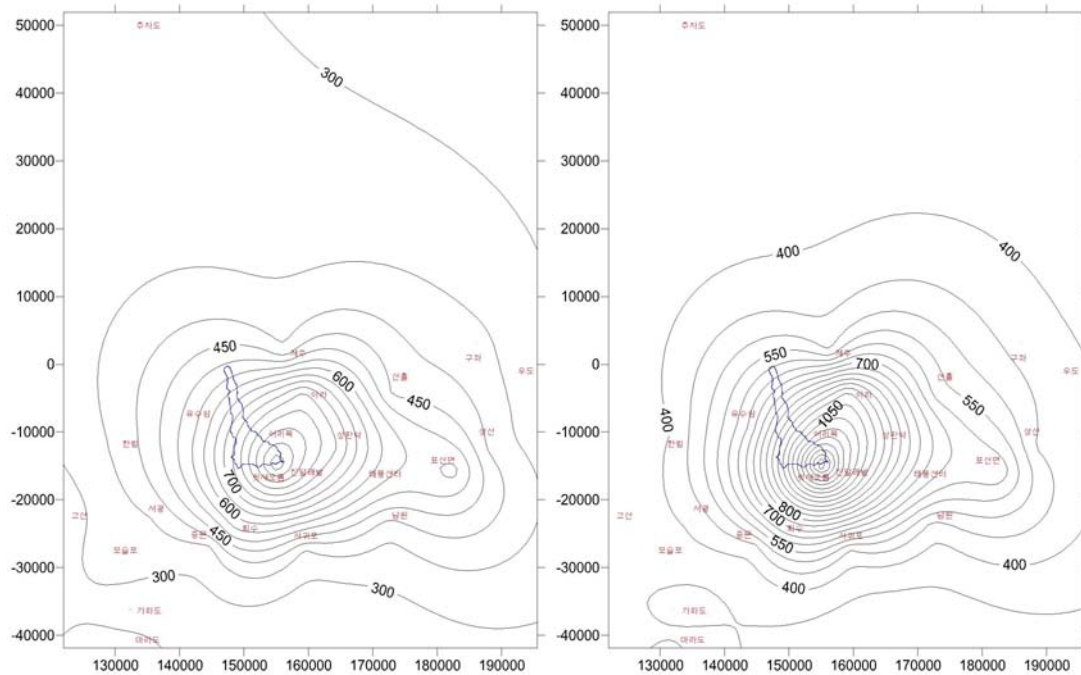
1440min

Fig. IV-2. 100 years return period probability precipitation of Case 1



60min

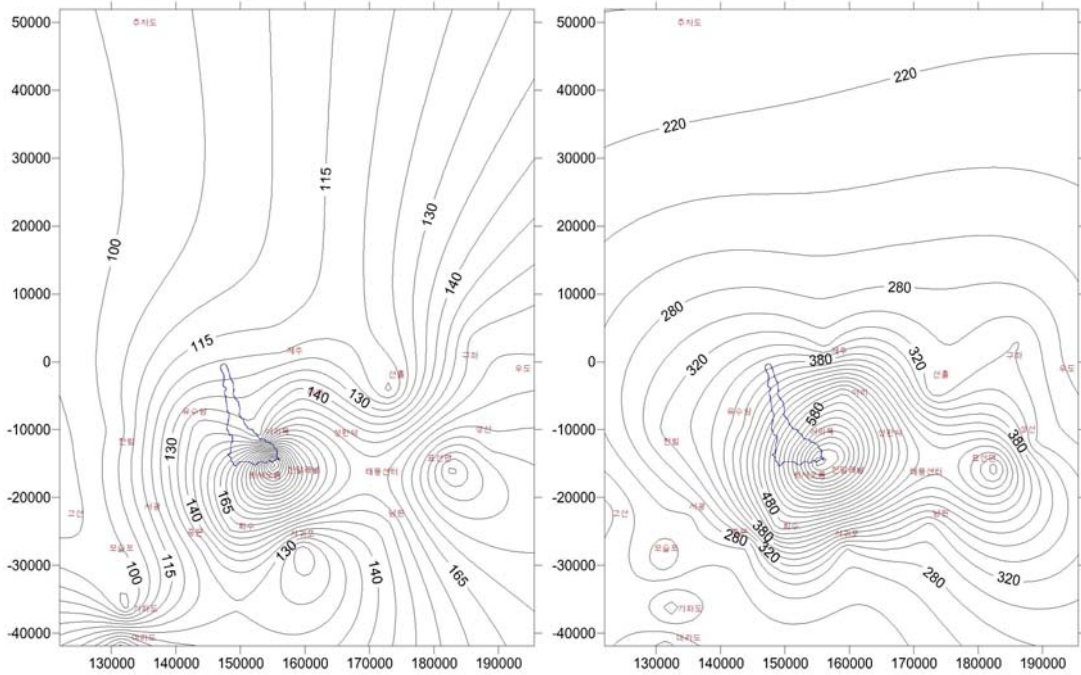
360min



720min

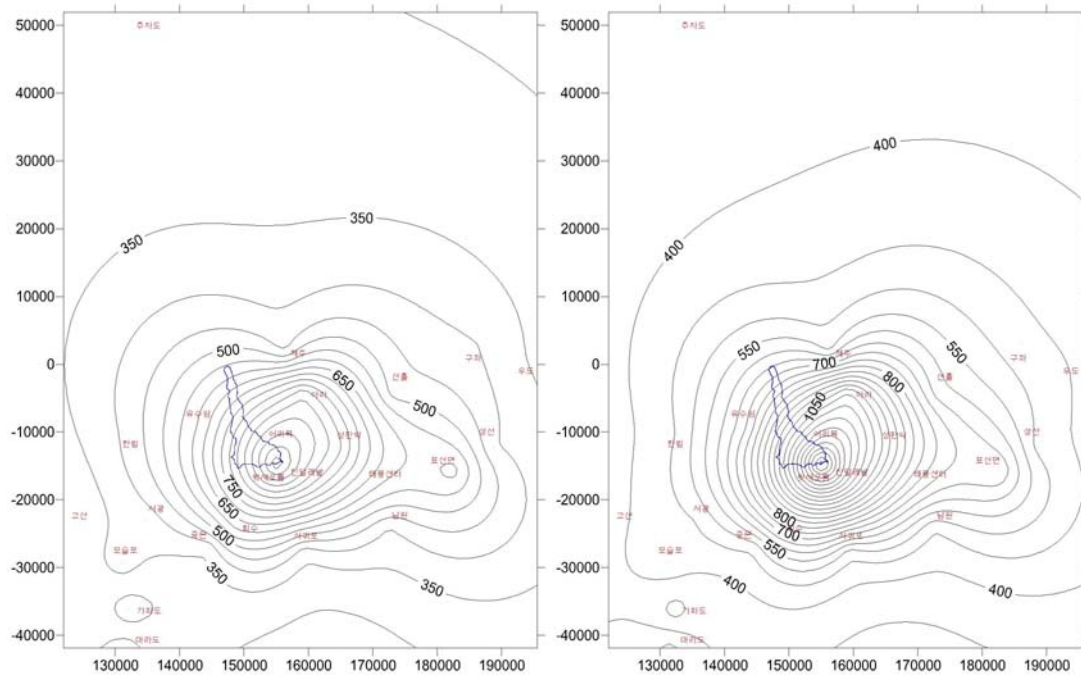
1440min

Fig. IV-3. 100 years return period probability precipitation of Case 2



60min

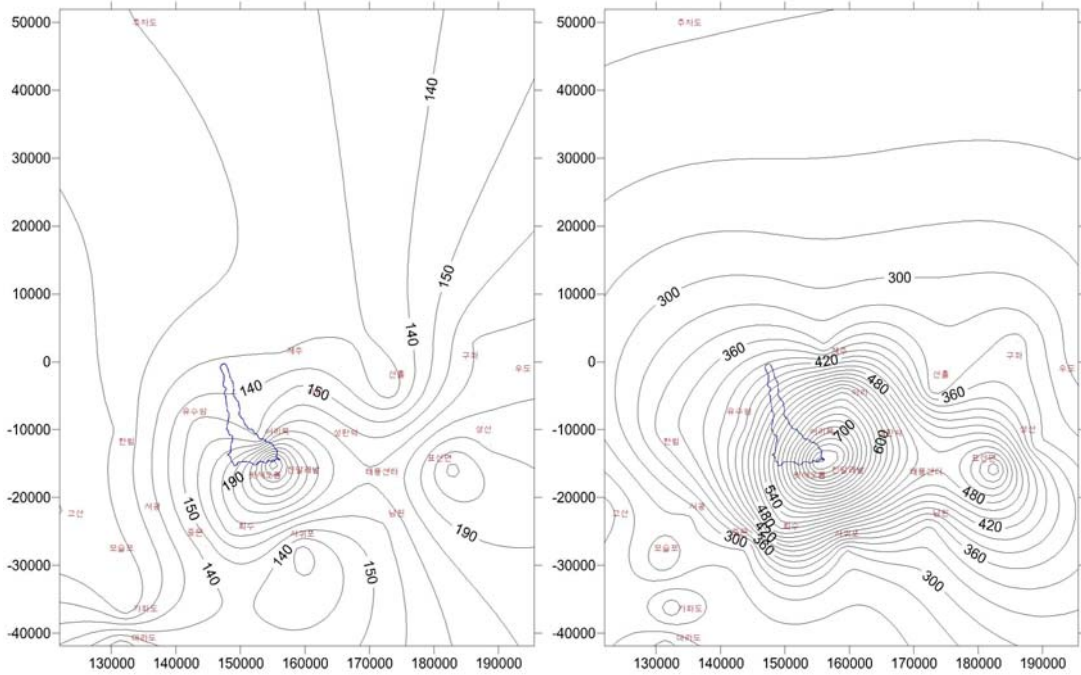
360min



720min

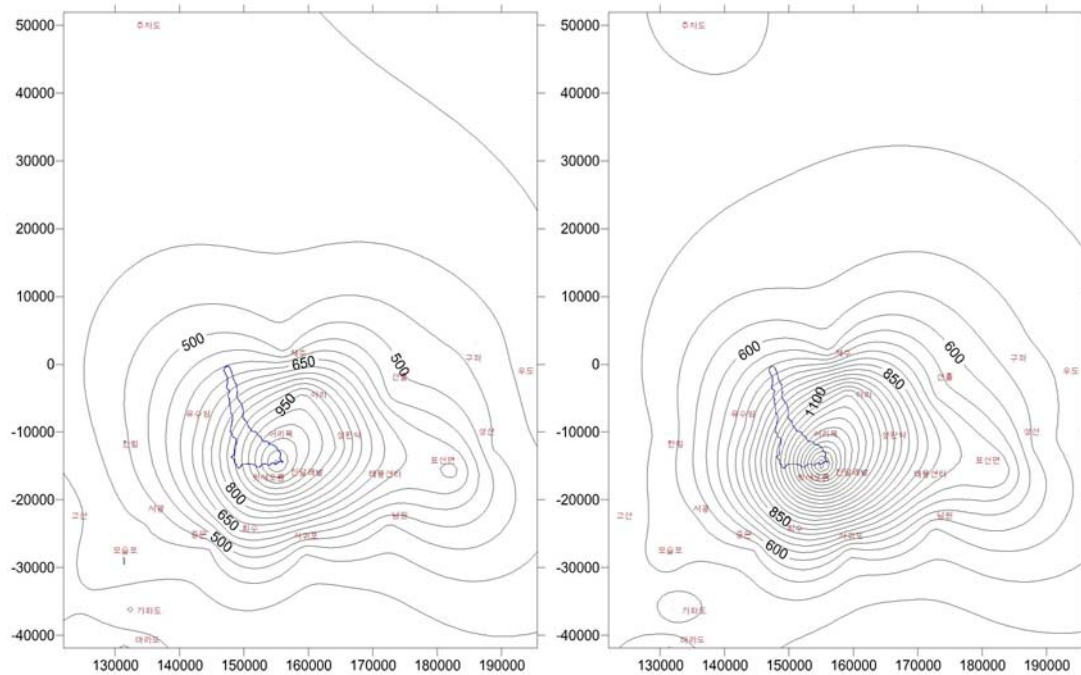
1440min

Fig. IV-4. 100 years return period probability precipitation of Case 3



60min

360min



720min

1440min

Fig. IV-5. 100 years return period probability precipitation of Case 4

2. 설계홍수량 산정

설계홍수량 산정 시 유역의 지역특성인자 및 개발정도 등을 고려하고, 합리적인 강우-유출 모형을 적용하여 유역에 필요한 설계빈도를 산정하게 되는데, 현재 제주에서는 2007년 태풍 나리 이후 치수 계획 규모를 100년 빈도로 설정하여 실무에서 적용하고 있다.

외도천 유역의 설계홍수량을 산정하기 위해서 홍수량 산정 모델인 HEC-HMS를 이용하였으며, 홍수량을 산정하기 위한 매개변수 중에서 일 강우량의 시간분포는 실무에서 가장 많이 사용하고 있고 재해영향평가에서도 사용되고 있는 Huff 방법을 적용하였고, 수자원 계획체계 개선방안 연구와 설계홍수량 산정요령(2012, 국토교통부)에서 통일하여 적용하도록 제시한 바 있는 3분위를 선정하였다. 강우의 손실량 계산은 SCS 유출곡선지수를 사용하였으며, 유효우량계산은 지역성을 띄지 않으면서 객관적인 방법인 Clark 단위도법을 적용하였다.

도달시간(T_c)은 「하천설계기준 및 해설, 2009」에서 제시하고 있는 Kripich, Rziha, Kraven - I, Kraven - II 등과 같은 경험공식을 적용하였고, 본 연구에서는 Kraven - II 공식을 이용하였다. 또한, 저류상수(S_c)를 산정함에 있어 도달시간만의 관계로 결정하는 것은 타당하지 못한 경우가 많고, 산정 방법에 따라 많은 값의 차이를 보이고 있기 때문에 Linsley, Sabol, Russel, USACE 등과 같은 경험공식을 적용하였으며, 본 연구의 대상유역인 외도천에서는 Sabol 공식을 채택하여 저류상수를 산정하였다.

실측 강우자료를 이용한 Case 1의 설계홍수량을 산정한 결과는 Table IV-6과 Fig. IV-6에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수량의 변동은 45.25 ~ 934.48 m^3/s 로 분석되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수량은 10년일 경우 478.34 m^3/s , 20년일 경우 585.98 m^3/s , 30년일 경우 647.64 m^3/s , 50년일 경우 725.04 m^3/s , 80년일 경우 795.57 m^3/s , 100년일 경우 829.13 m^3/s , 200년일 경우 934.48 m^3/s 로 산정되었다.

Table IV-6. Design flood estimation in Case 1

(단위 : m^3/s)

지속시간(분) \ 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	45.25	127.50	196.28	267.11	326.73	373.28	477.08	459.49	416.81
20년	60.45	163.25	247.76	334.17	406.17	462.48	585.14	559.80	504.71
30년	69.71	184.32	278.45	373.64	452.44	514.13	646.92	617.25	555.33
50년	81.94	212.24	317.06	423.20	510.89	578.90	724.32	689.20	618.71
80년	93.69	238.01	353.17	469.20	564.80	638.48	794.81	754.44	675.89
100년	99.29	250.26	370.77	491.0	590.57	666.74	828.39	785.63	703.48
200년	117.51	289.31	424.80	559.81	671.13	755.84	933.94	883.06	788.47

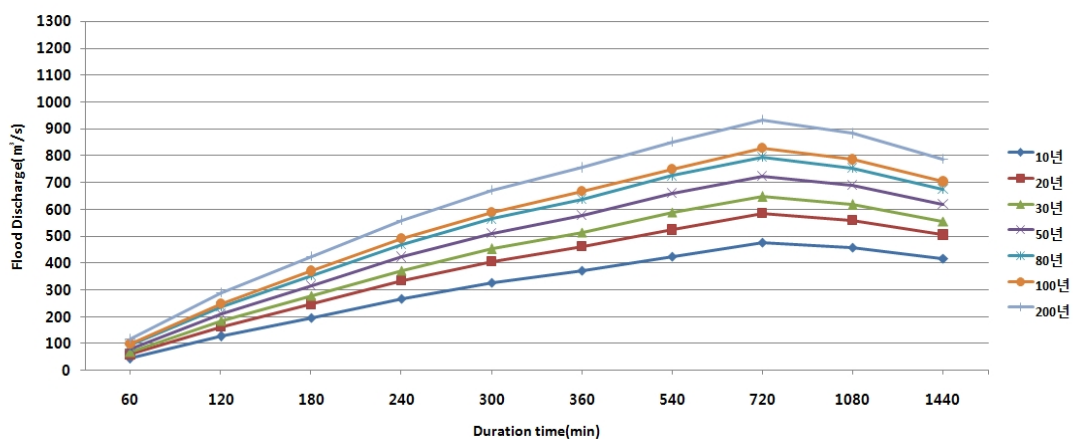


Fig. IV-6. Design flood estimation in Case 1

강우자료를 10% 증가시킨 Case 2의 설계홍수량을 산정한 결과는 Table IV-7과 Fig. IV-7에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수량의 변동은 $56.78 \sim 1040.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 분석되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수량은 10년일 경우 $538.10 \text{ m}^3/\text{s}$, 20년일 경우 $656.38 \text{ m}^3/\text{s}$, 30년일 경우 $725.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 50년일 경우 $810.21 \text{ m}^3/\text{s}$, 80년일 경우 $888.42 \text{ m}^3/\text{s}$, 100년일 경우 $925.70 \text{ m}^3/\text{s}$, 200년일 경우 $1040.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 산정되었다.

Table IV-7. Design flood estimation in Case 2

(단위 : m^3/s)

지속시간(분) \ 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	56.78	151.61	229.98	309.49	375.05	426.58	537.24	514.66	465.71
20년	74.72	192.89	288.19	384.59	463.92	525.52	655.57	624.43	561.96
30년	85.53	217.03	322.01	428.13	515.68	583.10	724.75	687.96	616.99
50년	99.81	248.21	365.73	483.72	580.50	654.62	809.65	766.85	686.66
80년	113.23	277.13	406.28	534.84	640.30	720.69	887.81	839.57	750.75
100년	120.02	291.42	425.44	559.39	669.09	752.36	925.41	874.0	780.81
200년	140.74	335.48	486.05	635.39	757.49	849.47	1039.61	979.80	873.62

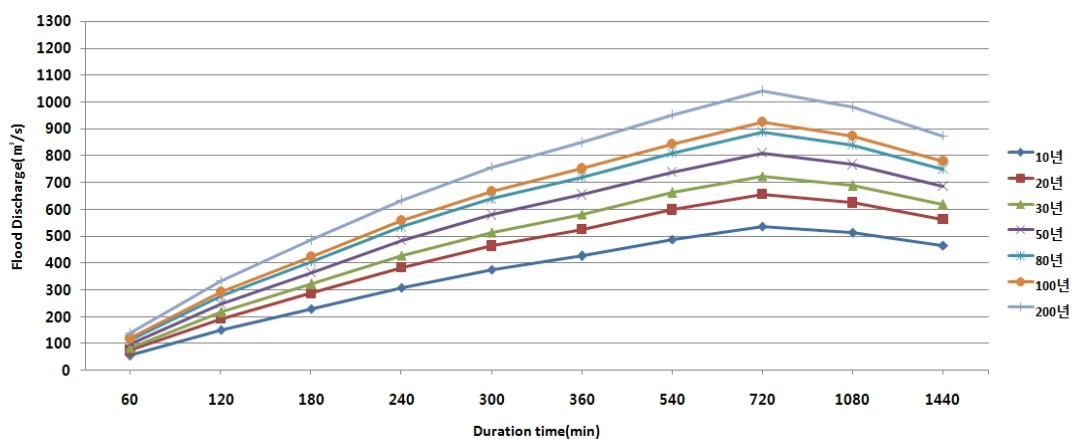


Fig. IV-7. Design flood estimation in Case 2

강우자료를 20% 증가시킨 Case 3의 설계홍수량을 산정한 결과는 Table IV-8 과 Fig. IV-8에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수량의 변동은 68.78 ~ 1146.61 m^3/s 로 분석되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수량은 10년일 경우 598.60 m^3/s , 20년일 경우 728.57 m^3/s , 30년일 경우 801.82 m^3/s , 50년일 경우 894.96 m^3/s , 80년일 경우 981.32 m^3/s , 100년일 경우 1021.44 m^3/s , 200년 일 경우 1146.61 m^3/s 가 산정되었다.

Table IV-8. Design flood estimation in Case 3

(단위 : m^3/s)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	68.78	176.98	263.94	352.23	424.42	480.41	597.81	570.01	514.24
20년	89.67	222.65	328.83	434.92	522.08	588.65	727.34	690.21	619.89
30년	102.04	250.26	366.99	483.52	579.08	651.93	802.02	758.58	679.15
50년	118.40	284.66	415.21	544.48	650.02	729.76	893.59	843.93	754.99
80년	133.68	317.83	460.16	601.11	716.28	803.05	980.21	923.75	824.54
100년	141.11	333.32	481.51	627.76	747.07	836.80	1019.95	960.94	857.69
200년	164.75	382.12	548.02	711.32	844.47	944.58	1146.49	1077.26	959.0

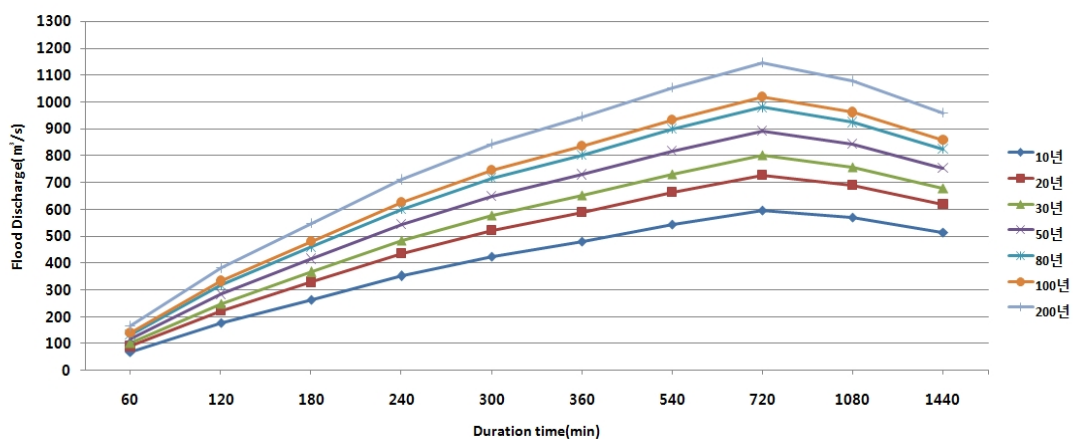


Fig. IV-8. Design flood estimation in Case 3

강우자료를 30% 증가시킨 Case 4의 설계홍수량을 산정한 결과는 Table IV-9 과 Fig. IV-9에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수량의 변동은 81.61 ~ 1252.42 m^3/s 로 분석되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수량은 10년일 경우 659.06 m^3/s , 20년일 경우 799.26 m^3/s , 30년일 경우 879.38 m^3/s , 50년일 경우 981.03 m^3/s , 80년일 경우 1072.59 m^3/s , 100년일 경우 1116.55 m^3/s , 200년 일 경우 1252.42 m^3/s 가 산정되었다.

Table IV-9. Design flood estimation in Case 4

(단위 : m^3/s)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	81.61	202.33	298.58	394.77	473.05	533.13	656.14	622.97	560.60
20년	104.81	253.13	369.51	485.59	580.09	651.74	797.26	753.21	674.53
30년	119.12	283.40	411.38	538.19	641.71	719.72	877.68	828.08	740.72
50년	137.20	322.12	464.03	604.70	719.13	804.98	978.48	921.17	822.47
80년	154.33	358.04	513.36	666.17	790.80	884.0	1070.96	1006.46	897.01
100년	162.80	376.85	536.23	695.33	824.79	921.51	1115.02	1047.28	933.0
200년	189.27	429.06	609.36	786.40	930.13	1037.76	1250.40	1171.77	1041.60

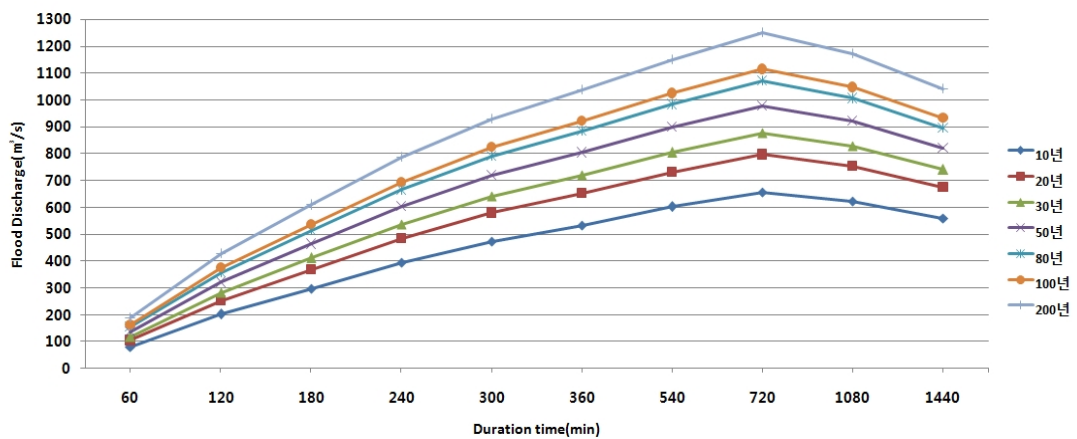


Fig. IV-9. Design flood estimation in Case 4

일반적으로, 홍수량에 영향을 미치는 초기손실량(CN), 도달시간(T_c), 저류상수(S_c) 등의 조건은 동일시하고 강우량만 증가시킨다고 가정하였을 때, 홍수량의 증가는 강우량과 비례할 것으로 판단하게 된다. 그러나 본 연구의 각 Case 별 홍수량의 변동을 증가율로 분석하면 Case 2가 Case 1에 비해 11.32 ~ 25.48 % 증가한 것으로 분석되었고 실제 10% 증가한 것과 비교하면 1.32 ~ 15.48 %가 더 증가하였음을 알 수 있다. Case 3의 경우 Case 1보다 22.70 ~ 52.0 % 증가한 것으로 분석되었으며, 이는 실제 20% 증가량보다 2.70 ~ 32.0 %가 더 증가하였음을 알 수 있다. Case 4의 경우 Case 1보다 34.02 ~ 80.35% 증가한 것으로 분석되었으며, 실제 증가율인 30%보다 4.02 ~ 50.35%가 더 증가하였음을 알 수 있다.

Case 1부터 4까지 각 Case 별 첨두유량을 살펴보면, 기준이 되는 Case 1의 경우 478.34 ~ 934.48 m^3/s 로 분석되었다. Case 2인 경우 538.10 ~ 1040.22 m^3/s 로 분석되었으며 Case 2 첨두유량의 실제 증가율은 11.32 ~ 12.50 %로 약 1.32 ~ 2.50 %가 더 증가하였다. Case 3의 첨두유량은 598.60 ~ 1146.61 m^3/s 로 분석되었고, 실제 증가율은 12.70 ~ 15.14 %로 약 2.70 ~ 5.14 %가 더 증가하였다. Case 4의 첨두유량은 659.06 ~ 1252.42 m^3/s 로 분석되었고, 실제 증가율은 14.02 ~ 17.78 %로 약 4.02 ~ 7.78 %가 더 증가한 결과를 나타내었다.

Table IV-10과 Fig. IV-10은 하천정비기본계획 및 유역종합치수계획 등에서 설계빈도로 설정하고 있는 100년 빈도의 설계홍수량을 각 Case 별로 비교한 것이다. 이와 같은 비교를 통하여, 강우의 증가율이 커질수록 실제 증가율과 각 Case 별 설계홍수량과의 오차는 커지지만, 재현기간이 크고 지속시간이 길수록 실제 증가율과 설계홍수량의 오차가 줄어든다는 것을 확인할 수가 있다(Fig. IV-11).

Table IV-10. Compare design flood of 100 years duration

하천명	지속시간(분)	홍수량(m^3/s)	100년 빈도 홍수량 (m^3/s)		
			Case 2(10%)	Case 3(20%)	Case 4(30%)
외도천	60	99.29	120.02 (20.88% ▲)	141.11 (42.12% ▲)	162.80 (63.96% ▲)
	120	250.26	291.42 (16.45% ▲)	333.32 (33.19% ▲)	376.85 (50.58% ▲)
	180	370.77	425.44 (14.74% ▲)	481.51 (29.87% ▲)	536.23 (44.63% ▲)
	240	491.0	559.39 (13.93% ▲)	627.76 (27.85% ▲)	695.33 (41.62% ▲)
	300	590.57	669.09 (13.30% ▲)	747.07 (26.50% ▲)	824.79 (39.66% ▲)
	360	666.74	752.36 (12.84% ▲)	836.80 (25.51% ▲)	921.51 (38.21% ▲)
	720	828.39	925.41 (11.71% ▲)	1019.95 (23.12% ▲)	1115.02 (34.60% ▲)
	1080	785.63	874.0 (11.25% ▲)	960.94 (22.31% ▲)	1047.28 (33.30% ▲)
	1440	703.48	780.81 (10.99% ▲)	857.69 (21.92% ▲)	933.0 (32.63% ▲)

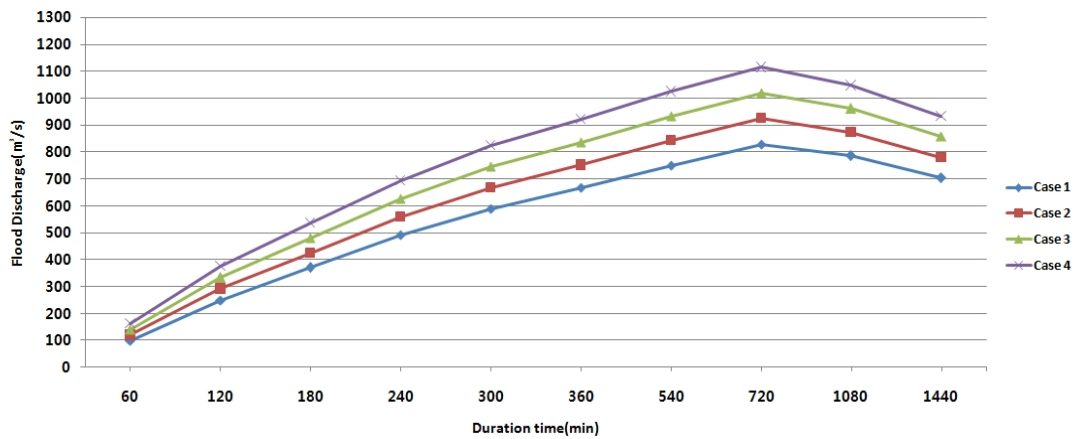


Fig. IV-10. Comparison of flood discharges for a 100-year return period

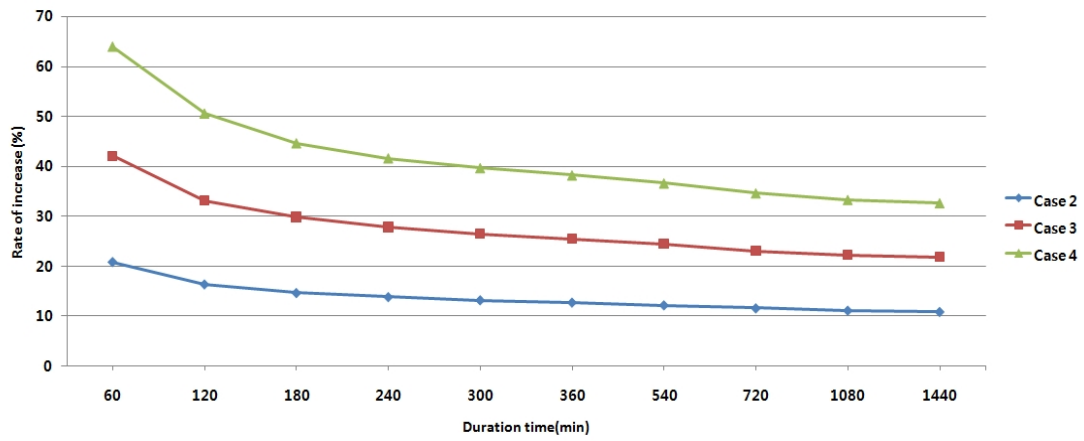


Fig. IV-11. The increase and decrease rates in accordance with the duration of a 100-year return period

3. 설계홍수위 산정

본 연구에서는 설계홍수위를 산정하기 위해 HEC-RAS 모델을 이용하였다. 강우의 증가 경향을 고려하기 위하여 강우량을 10%씩 30%까지 증가시킨 4가지 Case로 구분하고 각각의 빈도별 홍수량을 산정하였으며, 그 결과 값들을 이용하여 연구대상 하천인 외도천의 홍수위를 산정하였다.

HEC-RAS 모델에서 사용한 외도천 유역의 하상단면 측량 자료는 광령천 외 12개 하천기본계획수립(제주시, 2009)의 자료를 이용하였다. 계획하폭 중앙선의 측점간 거리는 20m로 설정하였으며, 하폭이 급변하거나 교량과 같은 하천 횡단 구조물이 설치되어 있는 지점, 혹은 하상경사가 급한 구간 등에서는 추가 측점을 설치하여 하상 단면을 구성하였다. Fig. IV-12는 이와 같은 방법으로 구성한 외도천의 하상단면을 3D로 나타낸 것이며, Fig. IV-13은 외도천의 상류부에 HEC-HMS 모델을 이용하여 산정한 홍수량을 입력하였을 때의 지속시간별(60, 120, 180, 240, 300, 360, 720, 1080, 1440분) 홍수위를 나타내고 있다. Fig. IV-14는 Fig. IV-13의 모의 결과를 수치로 나타낸 것이다.

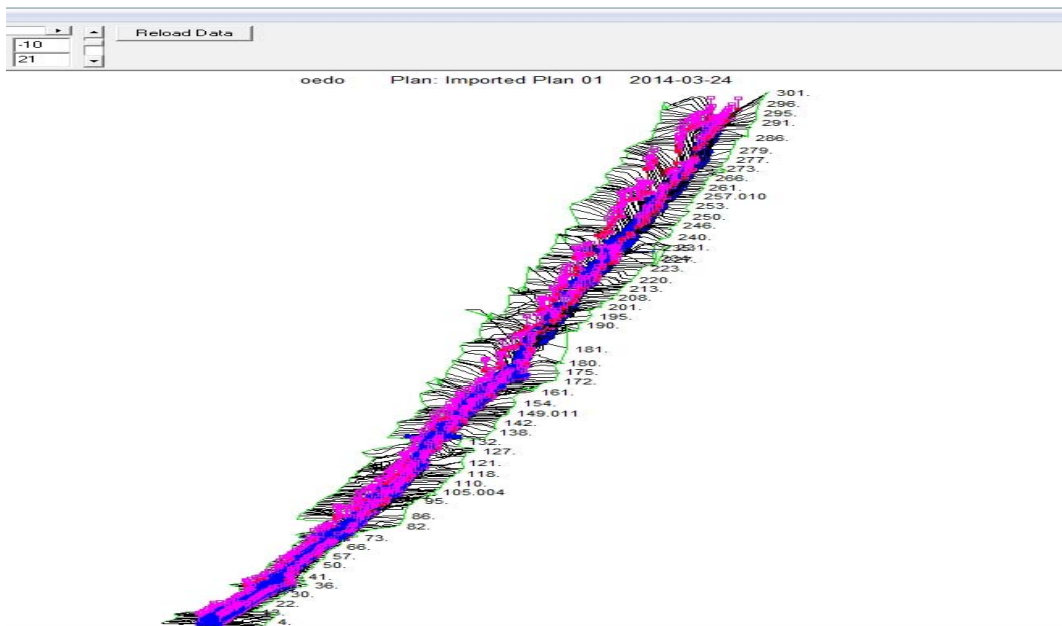


Fig. IV-12. 3D model of Oedo stream, using HEC-RAS

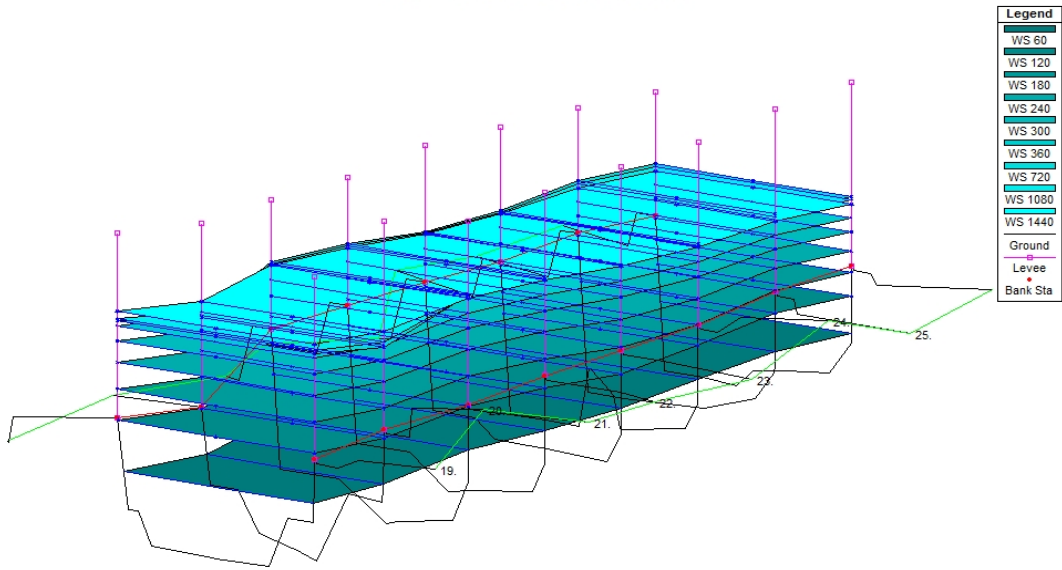


Fig. IV-13. Cross-section and flood discharge of Oedo stream, using HEC-RAS

HEC-RAS Plan: Imported Pla River: RIVER-1 Reach: Reach-1													Relo
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	
Reach-1	301	60	189.37	234.20	236.48	236.48	237.49	0.013833	4.44	42.64	21.19	1.00	
Reach-1	301	120	426.51	234.20	237.98	237.98	239.55	0.012437	5.55	76.79	24.47	1.00	
Reach-1	301	180	604.32	234.20	238.86	238.86	240.75	0.012030	6.09	99.31	26.41	1.00	
Reach-1	301	240	780.07	234.20	239.63	239.63	241.77	0.011659	6.48	120.32	28.10	1.00	
Reach-1	301	300	924.74	234.20	240.21	240.21	242.53	0.011423	6.75	137.06	29.50	1.00	
Reach-1	301	360	1035.25	234.20	240.63	240.63	243.07	0.011302	6.92	149.58	30.65	1.00	
Reach-1	301	720	1297.19	234.20	241.64	241.54	244.23	0.010469	7.13	181.91	33.46	0.98	
Reach-1	301	1080	1262.70	234.20	241.41	241.41	244.08	0.011110	7.24	174.41	32.83	1.00	
Reach-1	301	1440	1153.52	234.20	241.06	241.06	243.61	0.011146	7.08	162.90	31.84	1.00	
Reach-1	300	60	189.37	233.87	236.17	236.17	237.18	0.014102	4.45	42.53	21.18	1.00	
Reach-1	300	120	426.51	233.87	237.68	237.68	239.25	0.012677	5.56	76.70	24.29	1.00	
Reach-1	300	180	604.32	233.87	238.57	238.57	240.46	0.012208	6.09	99.24	26.19	1.00	
Reach-1	300	240	780.07	233.87	239.34	239.34	241.49	0.011882	6.49	120.12	27.83	1.00	
Reach-1	300	300	924.74	233.87	239.92	239.92	242.26	0.011708	6.78	136.41	29.05	1.00	
Reach-1	300	360	1035.25	233.87	240.33	240.33	242.80	0.011588	6.97	148.50	29.92	1.00	
Reach-1	300	720	1297.19	233.87	241.22	241.22	243.99	0.011364	7.37	176.09	31.82	1.00	
Reach-1	300	1080	1262.70	233.87	241.11	241.11	243.84	0.011376	7.32	172.62	31.59	1.00	
Reach-1	300	1440	1153.52	233.87	240.74	240.74	243.35	0.011527	7.17	160.89	30.79	1.00	
Reach-1	299	60	189.37	232.65	235.34	235.34	236.41	0.013867	4.59	41.29	19.39	1.00	
Reach-1	299	120	426.51	232.65	236.95	236.95	238.54	0.012503	5.59	76.34	24.02	1.00	
Reach-1	299	180	604.32	232.65	237.88	237.88	239.75	0.011982	6.05	99.83	26.68	1.00	
Reach-1	299	240	780.07	232.65	238.66	238.66	240.76	0.011653	6.42	121.54	28.92	1.00	
Reach-1	299	300	924.74	232.65	239.23	239.23	241.50	0.011470	6.68	138.53	30.56	1.00	
Reach-1	299	360	1035.25	232.65	239.64	239.64	242.03	0.011315	6.84	151.30	31.73	1.00	
Reach-1	299	720	1297.19	232.65	240.87	240.52	243.18	0.009262	6.74	192.50	35.26	0.92	
Reach-1	299	1080	1262.70	232.65	240.54	240.42	243.02	0.010371	6.98	180.95	34.31	0.97	
Reach-1	299	1440	1153.52	232.65	240.06	240.06	242.55	0.011161	7.00	164.71	32.92	1.00	
Reach-1	298	60	189.37	231.83	234.65	234.65	235.76	0.014066	4.67	40.54	18.22	1.00	
Reach-1	298	120	426.51	231.83	236.32	236.32	238.00	0.012904	5.74	74.30	22.11	1.00	
Reach-1	298	180	604.32	231.83	237.29	237.29	239.27	0.012426	6.23	96.93	24.37	1.00	
Reach-1	298	240	780.07	231.83	238.11	238.11	240.35	0.012202	6.63	117.58	26.26	1.00	
Reach-1	298	300	924.74	231.83	238.73	238.73	241.15	0.011951	6.89	134.25	27.69	1.00	
Reach-1	298	360	1035.25	231.83	239.16	239.16	241.71	0.011821	7.07	146.48	28.70	1.00	
Reach-1	298	720	1297.19	231.83	240.10	240.10	242.92	0.011596	7.44	174.30	30.86	1.00	
Reach-1	298	1080	1262.70	231.83	239.98	239.98	242.77	0.011603	7.39	170.82	30.60	1.00	
Reach-1	298	1440	1153.52	231.83	239.60	239.60	242.27	0.011725	7.25	159.14	29.70	1.00	

Fig. IV-14. Simulation results of design flood discharges with the use of HEC-RAS

실측 강우자료를 이용한 Case 1의 설계홍수위를 산정한 결과는 Table IV-11과 Fig. IV-15에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수위의 변동은 0.67 ~ 5.18 m로 산정되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수위는 10년일 경우 3.38m, 20년일 경우 3.64m, 30년일 경우 3.89m, 50년일 경우 4.19m, 80년일 경우 4.47m, 100년일 경우 4.63m, 200년일 경우 5.18m 로 분석되었다.

Table IV-11. Design flood stage estimation in Case 1

(단위 : m)

지속시간(분) \ 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	0.67	1.28	1.72	2.13	2.44	2.67	3.16	3.08	2.88
20년	0.80	1.52	2.02	2.48	2.83	3.10	3.64	3.53	3.29
30년	0.87	1.65	2.19	2.68	3.05	3.33	3.89	3.77	3.51
50년	0.96	1.82	2.39	2.91	3.32	3.61	4.19	4.05	3.78
80년	1.05	1.97	2.58	3.13	3.55	3.86	4.47	4.31	4.0
100년	1.09	2.03	2.66	3.23	3.66	3.96	4.63	4.44	4.11
200년	1.21	2.25	2.92	3.53	3.98	4.32	5.18	4.92	4.45

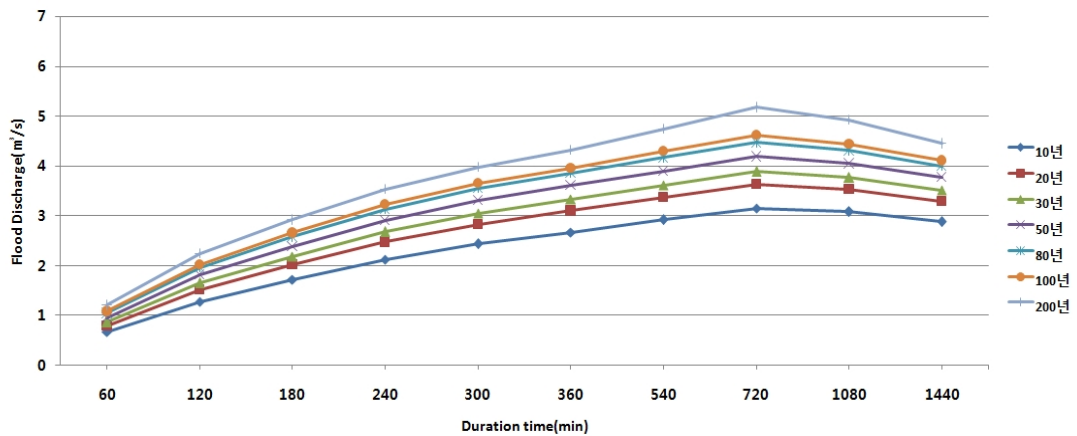


Fig. IV-15. Design flood stage estimation in Case 1

10% 증가시킨 강우자료를 이용한 Case 2의 설계홍수위를 산정한 결과는 Table IV-12와 Fig. IV-16에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수위의 변동은 0.77 ~ 5.70 m로 산정되었으며, 재현기간에 따른 침투홍수위는 10년일 경우 3.54m, 20년일 경우 3.92m, 30년일 경우 4.20m, 50년일 경우 4.53m, 80년일 경우 4.95m, 100년일 경우 5.14m, 200년일 경우 5.70m 로 분석되었다.

Table IV-12. Design flood stage estimation in Case 2

(단위 : m)

지속시간(분) \ 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	0.77	1.44	1.92	2.35	2.68	2.93	3.43	3.34	3.11
20년	0.91	1.70	2.24	2.73	3.10	3.38	3.92	3.80	3.54
30년	0.99	1.85	2.42	2.94	3.34	3.63	4.19	4.05	3.77
50년	1.09	2.03	2.64	3.20	3.62	3.92	4.53	4.36	4.04
80년	1.18	2.19	2.83	3.42	3.86	4.18	4.95	4.71	4.30
100년	1.23	2.26	2.92	3.53	3.97	4.30	5.14	4.88	4.42
200년	1.37	2.49	3.21	3.84	4.32	4.76	5.70	5.40	4.88

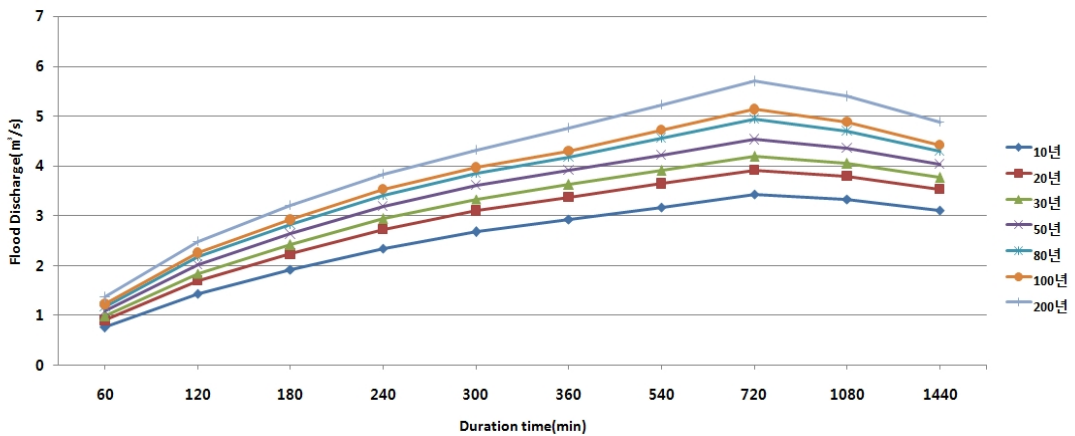


Fig. IV-16. Design flood stage estimation in Case 2

20% 증가시킨 강우자료를 이용한 Case 3의 설계홍수위를 산정한 결과는 Table IV-13과 Fig. IV-17에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수위의 변동은 0.86 ~ 6.24 m로 산정되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수위는 10년일 경우 3.86m, 20년일 경우 4.21m, 30년일 경우 4.50m, 50년일 경우 4.98m, 80년일 경우 5.41m, 100년일 경우 5.61m, 200년일 경우 6.24m 로 분석되었다.

Table IV-13. Design flood stage estimation in Case 3

(단위 : m)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	0.86	1.61	2.11	2.57	2.92	3.18	3.69	3.57	3.33
20년	1.02	1.88	2.45	2.97	3.37	3.65	4.20	4.06	3.78
30년	1.11	2.03	2.64	3.20	3.61	3.91	4.50	4.33	4.01
50년	1.22	2.23	2.88	3.47	3.90	4.21	4.98	4.73	4.31
80년	1.32	2.40	3.09	3.70	4.16	4.50	5.41	5.13	4.61
100년	1.37	2.48	3.19	3.81	4.28	4.66	5.60	5.31	4.80
200년	1.53	2.72	3.48	4.14	4.73	5.23	6.24	5.89	5.30

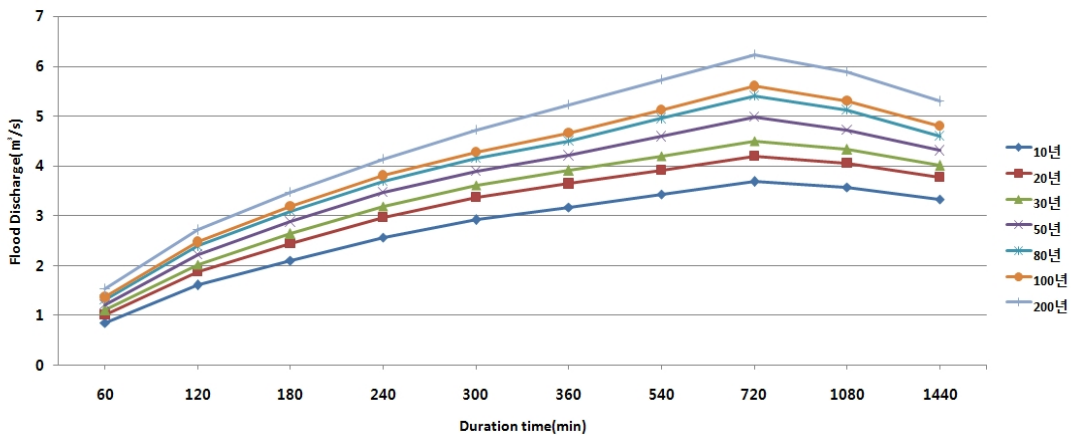


Fig. IV-17. Design flood stage estimation in Case 3

30% 증가시킨 강우자료를 이용한 Case 4의 설계홍수위를 산정한 결과는 Table IV-14와 Fig. IV-18에서 보이고 있다. Huff 3분위의 시간분포를 가진 홍수위의 변동은 0.96 ~ 6.77 m로 산정되었으며, 재현기간에 따른 첨두홍수위는 10년일 경우 4.02m, 20년일 경우 4.49m, 30년일 경우 4.91m, 50년일 경우 5.41m, 80년일 경우 5.87m, 100년일 경우 6.09m, 200년일 경우 6.77m 로 분석되었다.

Table IV-14. Design flood stage estimation in Case 4

(단위 : m)

지속시간(분) 재현기간(년)	60	120	180	240	300	360	720	1080	1440
10년	0.96	1.76	2.30	2.78	3.14	3.42	3.92	3.79	3.53
20년	1.12	2.05	2.66	3.21	3.62	3.91	4.48	4.31	3.99
30년	1.23	2.22	2.86	3.44	3.87	4.17	4.90	4.62	4.26
50년	1.35	2.42	3.10	3.72	4.17	4.51	5.40	5.12	4.60
80년	1.46	2.60	3.33	3.96	4.46	4.93	5.86	5.54	4.99
100년	1.51	2.69	3.43	4.08	4.81	5.12	6.08	5.74	5.17
200년	1.68	2.94	3.74	4.44	5.16	5.79	6.76	6.36	5.71

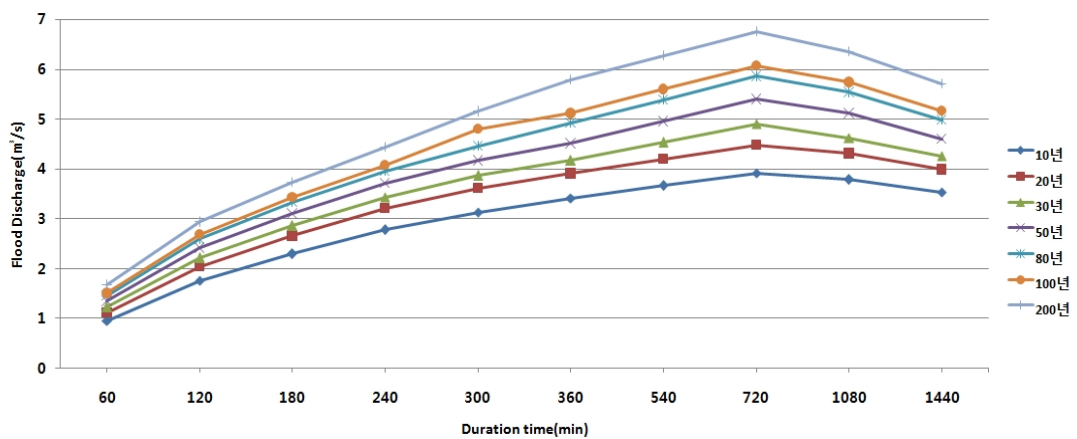


Fig. IV-18. Design flood stage estimation in Case 4

각 Case 별 첨두홍수위를 살펴보면, 실제 관측된 강우자료를 활용하여 기준이 되는 Case 1의 경우 3.38 ~ 5.18m 로 분석되었다. Case 1에서 강우량을 10% 증가시켜서 산정한 Case 2의 홍수위는 3.54 ~ 5.70m 로 분석되었으며 실제 증가율은 4.73 ~ 11.02 %로 -5.27 ~ 1.02%가 증감하였다. Case 1에서 강우량을 20% 증가시켜서 산정한 Case 3의 홍수위는 3.86 ~ 6.24m 로 분석되었고, 실제 증가율은 14.20 ~ 21.17%로 -5.80 ~ 1.17%가 증감하였다. 강우량을 30% 증가시켜서 산정한 Case 4의 홍수위는 4.02 ~ 6.77m 로 분석되었고, 실제 증가율은 18.93 ~ 31.53% 로 -11.07 ~ 1.53%가 증감한 결과를 나타내었다(Table IV-15, Fig. IV-20).

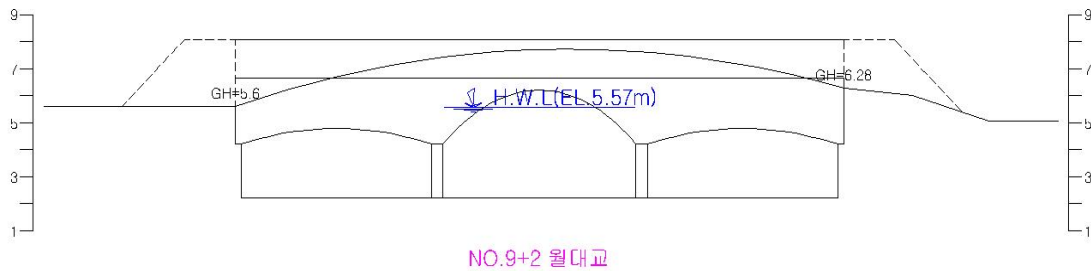


Fig. IV-19. Cross-section of Woldae bridge over Oedo stream

외도천 하류부에 위치한 월대교의 계획홍수위는 5.57m이며, 교량 높이를 측량한 결과 6.07m 로 관측되었다(Fig. IV-19). 만약 유출이 발생하여 홍수위가 계획홍수위인 5.57m를 넘을 경우 범람의 위험이 있으며, 교량 높이인 6.07m 까지 홍수위가 올라갈 경우에는 외도천 하류부 일대가 전부 침수되어 홍수 피해가 발생하게 된다.

이러한 침수 피해가 발생할 것으로 예상되는 것은 강우량이 10% 증가(Case 2) 하였을 때 200년 빈도의 호우사상이 발생할 경우, 강우량이 20% 증가(Case 3) 하였을 때 100년 빈도의 호우사상이 발생할 경우, 강우량이 30% 증가(Case 4) 하였을 때 80년 빈도 이상의 호우사상이 발생할 경우 범람의 위험성이 생기게 되며, 강우량이 20% 증가(Case 3)하였을 때 200년 빈도 이상의 호우사상과 강우량이 30% 증가(Case 4)하여 100년 빈도 이상의 호우사상이 발생할 경우에는 하류부 전체에서 침수로 인한 피해가 나타날 수 있다는 결과를 보였다.

Table IV-15. Peak flood stages of each Case

(단위 : m)

재현기간(년) Case	10	20	30	50	80	100	200
Case 1	3.38	3.64	3.89	4.19	4.47	4.63	5.18
Case 2	3.54	3.92	4.20	4.53	4.95	5.14	5.70
Case 3	3.86	4.21	4.50	4.98	5.41	5.61	6.24
Case 4	4.02	4.49	4.91	5.41	5.87	6.09	6.77

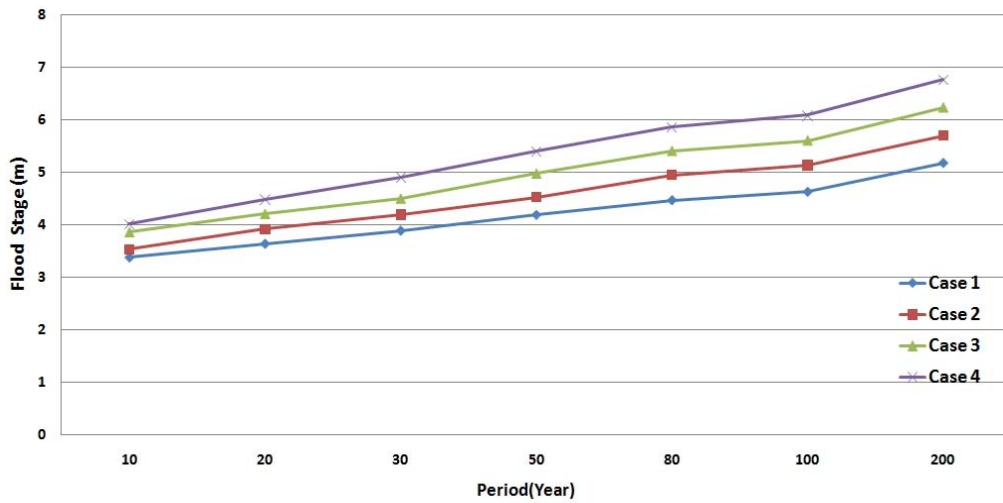


Fig. IV-20. Peak flood stage according to return periods by case

4. 기후변화 시나리오를 적용한 범람 위험 분석

최근 제주도에서는 태풍 및 집중호우가 점차 대형화 되어감에 따라 돌발홍수가 자주 발생하고 있고 이에 따른 홍수피해 역시 늘고 있다. 홍수 빈도 및 강도가 증가하는 것은 기후변화로 인한 강우량의 증가로 분석되고 있는데, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change : 기후변화에 대한 정부간 협의체) 보고서 및 기상청의 분석에 따르면 우리나라의 연평균 기온과 강수량은 증가할 것으로 전망하고 있다.

IPCC 4차 평가보고서(2007)에서 사용된 온실기체 증배출 시나리오인 ‘SRES A1B’에서는 제주지역의 과거 2001~2010년 사이 10년간 관측 값에 비하여 2011~2040년 기간에는 연강수량이 약 14%, 2041~2070 기간에는 약 9.7%, 2071~2100년 기간에는 약 6.8%가 감소할 것으로 전망(기상청, 2011)된다고 분석하였다. 연강수량이 과거부터 지속적으로 증가하고 있는 경향을 보이는 것과는 다른 결과로 분석되었는데, 이와 같은 결과는 이번에 새로 나온 IPCC 5차 평가보고서의 강우 시나리오와 전혀 다른 양상을 보이고 있다.

최근 많은 기술 발전으로 기존의 시나리오보다 신뢰할 수 있고, 정확도가 향상된 IPCC 5차 평가보고서(2013)가 발표되었으며, IPCC 5차 평가보고서인 RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도의 변화경향을 반영한 것으로 SRES 시나리오(4차 평가보고서)의 미래사회 구조 기반이었던 온실가스 농도 산출과정의 사회경제적 가정을 기후변화 대응정책의 수행여부로 변경한 것이다.

수많은 기후변화 시나리오 중 본 연구에서 사용한 IPCC 5차 평가보고서의 RCP 8.5는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도가 저감 없이 현재 추세로 온실가스를 배출하는 경우를 가정하여 분석한 시나리오이다.

Table IV-16. Mean annual precipitation according to RCP 8.5 climate change scenario in Jeju-si (단위 : mm)

기간	2000 ~2010	2011 ~2020	2021 ~2030	2030 ~2040	2041 ~2050	2051 ~2060	2061 ~2070	2071 ~2080	2081 ~2090	2091 ~2100
강수량	2128.1	2285.8	2427.6	2276.9	2472.1	2558.8	2368.4	2582.0	2538.5	2894.3
		2330.1			2466.4			2671.6		

앞서 강수량 증가에 따른 외도천의 설계홍수량과 홍수위를 산정하였고 하류부에서 범람의 위험이 있는 홍수위를 산정하였다. 이러한 결과 값들을 기후변화 시나리오와 연계하여 위험시기를 분석하기 위해 2100년까지의 강수량 변동을 분석하였다.

그림 IV-21은 2000년부터 2100년까지 RCP 8.5 시나리오에 따른 강수량의 변동을 나타낸 것으로, 2000년을 기준으로 10년마다 2.87%씩 증가할 것으로 분석되었다. 이 결과를 가지고 범람시기를 예측해보면, 강수량이 10% 증가(Case 2) 하는 35년 후 200년 빈도 이상의 호우사상이 발생할 경우, 강수량이 20% 증가(Case 3) 하는 69년 후 100년 빈도 이상의 호우사상이 발생할 경우, 강수량이 30% 증가(Case 4) 하는 104년 후에는 80년 빈도 이상의 호우사상이 발생할 경우 범람의 위험성이 생기는 것으로 분석되었다.

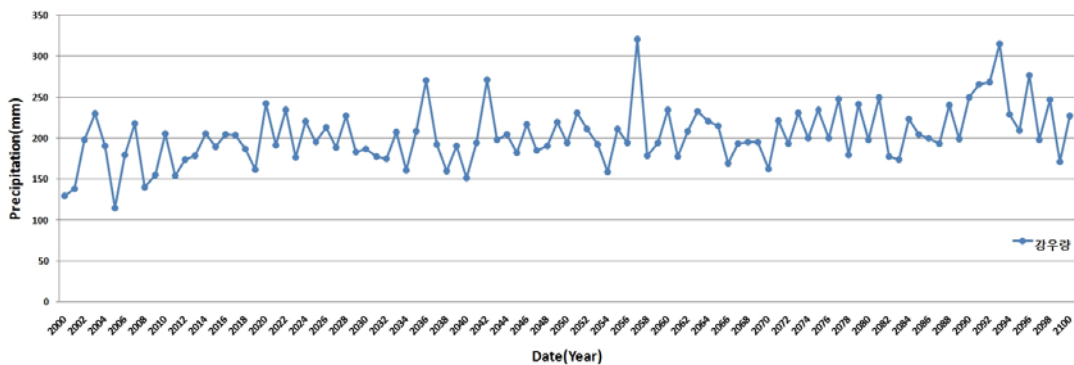


Fig. IV-21. Changes in rainfall up to 2100 according to RCP 8.5 scenario

V. 결론

지구온난화로 인한 이상기후의 영향으로 홍수발생 빈도가 잦아지고 집중호우 및 태풍의 크기가 점차 커지고 있기 때문에 홍수에 의한 피해가 매년 발생하고 있다. 특히, 제주도는 대부분의 도심지가 해안가 혹은 하천 주변에 입지하고 있어 더욱 큰 피해가 발생하고 있으며, 홍수 피해를 줄이기 위한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 홍수에 의한 피해를 사전에 대비하고 최소화하기 위하여 제주도의 강우량 증가에 따른 홍수량 변동 및 홍수범람에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해, 최근 발생한 호우사상들의 자료를 활용하여 확률강우량, 설계홍수량 및 설계홍수위를 산정하여 하천의 하류부에서 홍수범람의 위험시기를 분석한 연구 결과는 다음과 같다.

1) 실측 강우자료를 임의로 10%씩 30%까지 증가시킨 후 면적확률강우량을 산정한 결과와 실측 강우자료를 이용한 면적확률강우량을 기준으로 10%, 20%, 30% 증가시킨 결과의 차이를 살펴보면, 최소 -0.42, 최대 0.25로 큰 차이가 없었으며, 외도천의 경우 강우량의 증가율이 면적확률강우량의 증가율과 일치하는 것으로 분석되었다.

2) 태풍 “나리” 내습 시 강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정한 결과와 비교해 보면 불과 6~7년 사이에 0.09 ~ 22.41% 증가한 것으로 분석되었고, 이는 기후변화로 인한 강우 및 강우강도의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 호우사상들이 과거에 비해 훨씬 대형화되고 있다는 것으로 판단할 수 있다.

3) 본 연구의 각 Case 별 홍수량을 보면 실측 강우자료를 활용한 Case 1의 경우 45.25 ~ 934.48 m^3/s 의 범위로 산정되었고, 강우를 10% 증가시킨 Case 2의 경우 56.78 ~ 1040.22 m^3/s , 강우를 20% 증가시킨 Case 3의 경우 68.78 ~ 1146.61 m^3/s , 강우를 30% 증가시킨 Case 4의 경우 81.61 ~ 1252.42 m^3/s 로 산정되었다. Case 별 홍수량 변동률을 살펴보면, Case 2가 Case 1에 비해 실제

10% 증가율보다 1.32 ~ 15.48 %가 더 증가한 것으로 분석되었고, Case 3은 Case 1에 비해 실제 증가율인 20%보다 2.70 ~ 32.0 %가 더 증가한 것으로 분석되었으며, Case 4인 경우 실제 증가율인 30%보다 4.02 ~ 50.35%가 더 증가한 것으로 분석되었다.

강우량의 증가에 따른 홍수량 산정 결과, 홍수량은 증가하는 것으로 분석이 되었으나, 증가율은 강우량과 비례하지 않았으며, 재현기간이 크고 지속시간이 길 수록 증가율의 오차는 감소하였다.

4) 각 Case 별 침투홍수위를 살펴보면, Case 1의 경우 3.38 ~ 5.18m 로 분석되었다. Case 2의 홍수위는 3.54 ~ 5.70m 로 분석되었으며 실제 10% 증가율보다 -5.27 ~ 1.02%가 증감하였다. Case 3의 홍수위는 3.86 ~ 6.24m 로 분석되었고, 실제 20% 증가율보다 -5.80 ~ 1.17%가 증감하였다. Case 4의 홍수위는 4.02 ~ 6.77m 로 분석되었고, 실제 30%의 증가율보다 -11.07 ~ 1.53%가 증감하였다. 외도천 하류부에서 강우량이 20% 증가(Case 3)하고 200년 빈도의 호우사상이 발생할 경우 외도천 하류부에서 침수가 일어날 수 있고, 강우량이 30% 증가(Case 4)하여 100년 빈도 이상의 호우사상이 발생할 경우 역시 침수피해가 일어날 수 있는 것으로 분석되었다.

5) RCP 8.5 시나리오에 따르면, 2000년부터 2100년까지 10년마다 2.87%씩 증가할 것으로 분석되었으며, 강우량이 10% 증가(Case 2) 하는 35년 후 200년 빈도 호우사상이 발생할 경우, 강우량이 20% 증가(Case 3) 하는 69년 후 100년 빈도 호우사상이 발생할 경우, 강우량이 30% 증가(Case 4) 하는 104년 후에는 80년 빈도 호우사상이 발생할 경우 범람의 위험성이 생기는 것으로 분석되었다.

본 연구를 통하여, 강우의 증가 경향을 고려한 수공구조물의 적절한 설계빈도 결정뿐 아니라 재정비에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대하며, 홍수에 대한 적절한 대책을 마련하여 피해를 최소화 할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 향후 기후변화 시나리오는 더욱 보완되어 정도 높게 예측될 것이기 때문에 지속적인 자료의 확보를 통한 다양한 연구가 꾸준히 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 정우열, 양성기, 이준호, 2013, 제주도 도심하천 유역의 유출특성 해석, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 555-562.
- 고재욱, 양성기, 양원석, 정우열, 박철수, 2013, 산지형 하천의 토양침식 및 토사 유출량 산정, 한국환경과학회지 22(5), pp. 599-608.
- 국가태풍센터(<http://typ.kma.go.kr>)
- 건설교통부, 2000, 한국확률강우량도 작성
- 국토해양부, 2011, 확률강우량도 개선 및 보완 연구
- 국토해양부, 2012, 설계홍수량 산정요령
- 진호수, 2012, 확률강우량 증가에 따른 홍수량 및 홍수위 변화 분석, 서경대학교 대학원 석사학위 논문
- 전계원, HEC-RAS를 이용한 오십천위 수위변화 해석 : 태풍산바의 영향을 중심으로, 한국콘텐츠학회논문지, 13(2), pp. 498-504.
- 김정환, 2002, 확률강우량의 상승과 감소에 관련하여 : 홍수량과 홍수위에 대한 영향 분석, 수원대학교 대학원 석사학위 논문
- 제주특별자치도 제주시, 2009, 광령천 외 12개 하천기본계획수립(변경)
- 이상호, 김동엽, 안수정, 마호섭, 임상준, HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용한 지리산 국립공원 달궁 유역 침수 모의, 농업생명과학연구, 42(2), pp. 21-29.
- 제주지방기상청, 2011, 지역기후변화보고서
- 국립기상연구소 제주지방기상청, 2011, 기후변화 이해하기 VI(제주의 기후변화)
- 이윤영, 2007, 태풍 '나리(NARI)'에 의한 제주도 홍수피해 원인분석 및 대책, 한국수자원학회논문집, 40(11), pp. 77-83.
- 제주발전연구원, 2013, RCP 8.5 시나리오에 따른 제주지역 기후변화 전망, JDI 포커스, No. 176.
- 황태하, 장대원, 김형수, 서병하, 2004, HEC-GeoRAS & HEC-RAS를 이용한 홍수범람 연구, 한국수자원학회 학술발표회, pp. 737-741.
- 제주도, 2013, 제주도 수자원관리종합계획

- 윤태훈, 1999, 응용수문학, 청문각, pp. 152-381.
- 윤용남, 2007, 수문학, 청문각
- 양원석, 양성기, 2013, 도서지역 건천의 홍수유출 시 흐름 해석, 한국환경과학회지 22(5), pp. 571-580.
- 한국수자원학회, 2004, HEC-HMS의 이론과 실무 적용, HEC-RAS의 이론과 실무 적용, 제13회 수공학 Workshop 교재
- 한국수자원학회, 2007, FARD 2006을 활용한 강우빈도 해석, 제17회 수공학 Workshop 교재
- 이재수, 2007, 수문학
- 정종호, 윤용남, 2008, 수자원설계실무
- 한국수자원학회, 2009, 하천설계기준 · 해설
- U.S. Army Corps of Engineers Davis, 1997, HEC-HMS User's Manual(draft), Hydrologic Engineering Center.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., and Wallis, J. R., 1979, Probability Weighted Moments : Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse form, Water Resources Research, Vol. 15, No. 5, pp. 1049 - 1054.
- F. Pappenberger, K. Beven, M. Horritt, and S. Blazkova, 2005, Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations, Journal of Hydrology, Vol. 302, pp.46-49.

감사의 글

대학교를 졸업하고 사회 초년생으로 첫 발을 내딛을 것만 같았던 저에게 우연찮게 다가온 대학원이라는 길은 인생의 전환점이었습니다. 현재는 그 길을 1년 6개월 동안 열심히 달려 어느덧 졸업이라는 하나의 문을 지나고 또 다른 시작을 준비하고 있습니다.

부족한 점이 많은 저의 석사학위 논문이 완성되기까지 많은 지도를 해주시고 격려를 아끼지 않으신 양성기 교수님께 깊은 감사의 말씀 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문을 심사해 주신 박상렬 교수님, 김상진 교수님께도 감사의 말씀 드립니다. 뿐만 아니라 많은 학문적 배움을 주신 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 이동욱 교수님께도 감사의 말씀 드립니다.

또한 지난 학부 1년 2개월, 대학원 1년 6개월이라는 기간 동안 함께 동거동락 하면서 지낸 수자원 연구실 선·후배님들께 감사의 인사를 드립니다. 항상 동생들을 챙겨주고 무심한 듯 하지만 관심을 가지고 신경써주시는 연구실의 맏형이면서 인생의 선배인 우열이형, 연구실 내에서 힘든 일에 항상 먼저 앞장서 주시는 준호형, 매일 밤늦게까지 밤잠 줄여가면서 연구하느라 고생하시는 용석이형, 제일 늦게 연구실에 들어왔지만 막내인 입장에서 가장 많은 의지가 되는 민철이형까지 정말 감사합니다. 지금은 비록 연구실에서 함께 하고 있지 않지만 진심어린 조언을 많이 해주셨던 원석이형, 밝은 미소와 함께 에너지 넘쳤던 명수형에게도 감사드리고, 내 동기였던 현준이에게도 감사의 말을 전합니다.

아울러 저의 잔소리를 듣느라 정말 고생했을 동국, 재석, 그리고 광배, 진혁, 그리고 먼 타지로 와서 열심히 공부하고 있는 kanak에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 세상에서 가장 사랑하는 나의 가족. 아빠, 엄마, 그리고 하나뿐인 동생 혜정아. 진심으로 감사하고 사랑합니다.

다 큰 아들이지만 한 없이 작은 아이로 바라보시어 매일 걱정해 주시는 세상에 하나뿐인 아빠, 엄마. 아프지 마시고 오래오래 함께 행복하게 살아요.

걱정만 끼치고 예쁜 행동이라곤 한 적 없는 못난 아들이지만 앞으로 열심히 해서 착하고 멋진 아들로 거듭나겠습니다.

2014 년 8 월

강 보 성 배상