



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

표면영상유속계(SIV)를 이용한 산지형
하천의 홍수유출량 측정방법 연구

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金湧錫

2017年 2月

표면영상유속계(SIV)를 이용한 산지형 하천의 홍수유출량 측정방법 연구

指導教授 楊 城 基


金 湧 錫

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함


2016年 12月

金湧錫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 등 수 

委 員

양 섬 기 

濟州大學校 大學院

2016年 12月



Development of Measurement Method of Flood Runoff Production
Mountainous Stream using Surface Image Velocimeter(SIV)

Yong-Seok Kim
(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

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

2017. 2.

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

February. 2017

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

目 次

目 次	i
LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
Summary	ix
I. 서 론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
2. 연구 동향	4
2.1 국외 연구 동향	4
2.2 국내 연구 동향	6
3. 연구 방법 및 범위	8
II. 이론적 배경	11
1. 자연하천의 유량조사 방법	11
1.1 유량관측	11
1.2 유량관측 방법	11
1.3 유량조사법 선정	14
2. 표면영상유속계(SIV)를 이용한 표면유속 측정과 유량산정	15
2.1 하천흐름의 영상획득	18
2.2 영상좌표계 변환과정	19
2.3 유속벡터에 의한 표면유속	25
2.4 홍수유출량 산정	27
III. 제주도 간헐천의 표면영상유속계(SIV) 적용	29
1. 연구대상 하천 및 유출영상 관측지점	29
1.1 계측 구역의 홍수유출량 분석	30
1.2 미계측 구역의 홍수유출량 분석	33
1.3 표면영상유속계(SIV)의 적용	35

2. 야간 하천유출영상의 정확도 개선	36
3. 영상좌표계 변환설정에 따른 오차율 분석	41
4. 유출영상 이미지의 추적입자 상호상관계수 해석	44
IV. 홍수유출량 관측방법 개선 및 고도화	49
1. 주·야간 홍수유출영상의 정확도 비교 및 분석	49
1.1 야간 유출영상 분석을 위한 현장개선 효과	49
1.2 주간 유출영상의 유속망 분석	50
1.3 야간 유출영상의 유속망 분석	53
1.4 유속벡터의 정확도 비교 및 분석	56
2. 영상좌표계 변환시 참조점 설정에 따른 오차율 분석 및 개선	58
2.1 원거리 및 근거리 변화에 의한 실거리 변화율 계산	58
2.2 표면영상유속계(SIV)와 Kalesto의 산정유량 비교	60
2.3 참조점 변화에 의한 유속과 유량의 변동	63
3. 연속 유출영상 이미지의 상호상관계수 분석	67
3.1 주간 유출영상을 이용한 유속분석	67
3.2 야간 유출영상을 이용한 유속분석	72
4. 다양한 홍수유출사상의 표면영상유속계(SIV) 현장적용	78
4.1 계측 및 미계측구역의 호우사상별 유출율	79
4.2 계측 및 미계측구역의 강우-유출특성 분석	87
5. 홍수유출 특성을 고려한 유출량측정 고도화 연구	144
5.1 간헐천의 홍수유출량 현장관측 방법의 개선	144
5.2 산지형 하천의 홍수유출량 측정시스템 제안	145
V. 결 론	149
참고문헌	151

List of Figures

Fig. I -1. Flow chart on the study.....	10
Fig. II -1. Natural bubbles in mountainous stream; a) slow velocity ; b) fast velocity.....	15
Fig. II -2. Analysis of SIV process; a) process of setting the default; b)reference point setting; c) Program Set analysis section(Create a grid network); d) Velocity vector.....	17
Fig. II -3. Analysis procedure of Surface Image Velocimetry (Kim, 2008).....	18
Fig. II -4. Surface image acquisition for SIV(Roh, 2005).....	19
Fig. II -5. Examples of distorted image(Roh, 2005).....	20
Fig. II -6. Image distortion caused by camera position(Roh, 2005).....	21
Fig. II -7. The relationship between Physical-coordinate and mage-coordinate(Fujita, 1998).....	23
Fig. II -8. Reference points for image transformation (Fujita et al, 1998).....	23
Fig. II -9. Calibration images(Roh, 2005)	24
Fig. II -10. Cross correlation method technique(Kim, 2002)	26
Fig. III-1. Observation point of the runoff image scene.....	29
Fig. III-2. Observation point of the Han-stream(Han-cheon stream).....	30
Fig. III-3. Observation point of the Oe-do stream(Oe-do water treatment plant).....	31
Fig. III-4. Observation point of the Cheon-mi Stream(Seong-eup bridge).....	32
Fig. III-5. Observation point of the Han-Stream(Han-buk bridge)	32
Fig. III-6. Observation point of the Byeong-mun stream(Sam-o bridge).....	33
Fig. III-7. Observation point of the Byeong-mun stream(O-bong bridge)	34
Fig. III-8. Observation point of the Hwa-buk stream(Byeol-do bridge)	35
Fig. III-9. MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry); a) Program Set analysis section(Create a grid network); b) Velocity vector	36
Fig. III-10. CCTV system for outflow of the image acquisition at Seong-eup bridge; (a) CCTV; (b) the illumination equipment.....	38
Fig. III-11. eference points for the coordinate transform.....	39
Fig. III-12. Cross sectional areas for discharge calculation and mini diver for the water level observation.....	39
Fig. III-13. The position of DIVER-water gauge.....	40
Fig. III-14. Kalesto installed at Seong-eup bridge.....	41
Fig. III-15. Pixel shift method; (a)Long-distance, (b)Short-distance.....	43
Fig. III-16 All cases velocity result; (a)Long-distance, (b)Short-distance.....	44
Fig. III-17. Reference point for Image coordinate transformation	46
Fig. III-18. Cross sectional areas for discharge calculation	47
Fig. III-19. The position of DIVER-water gauge	47
Fig. III-20. Discharge observation method using the ADCP.....	48
Fig. IV-1. Outflow image of night-time.....	50
Fig. IV-2. Analysis result of day-time flow image of the SIV; a~h) Overall flow network analyzed with the SIV; a'~h') Visualized data of each flow velocimetry in	

the overall flow network for the comparison of the SIV and Kalesto.....	53
Fig. IV-3. Analysis result of night-time flow image of the SIV; a~h) Overall flow network analyzed with the SIV; a'~h') Visualized data of each flow velocimetry in the overall flow network for the comparison of the SIV and Kalesto	56
Fig. IV-4. One-to-one relationships of velocity measurement between the Kalesto and the CCTV system(SIV).....	58
Fig. IV-5. The actual distance rate of change calculated by the reference point changes	59
Fig. IV-6. Analysis process of surface image velocimeter(SIV); (a)grid mesh setting, (b)results of the flow velocity vector.....	61
Fig. IV-7. Velocity changes due to changes in the reference point.....	66
Fig. IV-8. Discharge observation results of ADCP.....	67
Fig. IV-9. Result of flow velocity vector for SIV(day-time).....	68
Fig. IV-10. Results of correlation coefficient filtering(day-time): a) using all data; b)filtering the range of 0.6 to 0.7; c)filtering the range of 0.7 to 0.8; d)filtering the range of 0.8 to 0.9.....	71
Fig. IV-11. Comparison of discharge using observation devices (day-time).....	72
Fig. IV-12. Result of flow velocity vector for SIV (night-time).....	73
Fig. IV-13. Results of correlation coefficient filtering(night-time): a) using all data; b)filtering the range of 0.6 to 0.7; c)filtering the range of 0.7 to 0.8; d)filtering the range of 0.8 to 0.9.....	76
Fig. IV-14. Comparison of discharge using observation devices (night-time).....	76
Fig. IV-15. Runoff-rate of rainfall events.....	79
Fig. IV-16. Runoff-rate of rainfall events(Han-chen stream).....	80
Fig. IV-17. Runoff-rate of rainfall events(Oe-do stream).....	82
Fig. IV-18. Runoff-rate of rainfall events(Cheon-mi stream).....	83
Fig. IV-19. Runoff-rate of rainfall events(Han-buk stream).....	84
Fig. IV-20. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream).....	85
Fig. IV-21. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream).....	86
Fig. IV-22. Runoff-rate of rainfall events(Byeol-do stream).....	87
Fig. IV-23. Hydrograph and comparison of discharges(April 21, 2012).....	88
Fig. IV-24. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012).....	89
Fig. IV-25. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012).....	90
Fig. IV-26. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012).....	91
Fig. IV-27. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012).....	92
Fig. IV-28. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 30, 2012).....	93
Fig. IV-29. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)	94
Fig. IV-30. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013).....	95
Fig. IV-31. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 6, 2014).....	96
Fig. IV-32. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014).....	97
Fig. IV-33. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014).....	98

Fig. IV-34. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)	99
Fig. IV-35. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)·····	100
Fig. IV-36. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 30, 2012)·····	101
Fig. IV-37. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)	102
Fig. IV-38. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)·····	103
Fig. IV-39. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)·····	104
Fig. IV-40. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)·····	105
Fig. IV-41. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 20, 2014)·····	106
Fig. IV-42. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2014)·····	107
Fig. IV-43. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)	108
Fig. IV-44. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)·····	109
Fig. IV-45. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)·····	110
Fig. IV-46. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)	111
Fig. IV-47. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)·····	112
Fig. IV-48. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)·····	113
Fig. IV-49. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 20, 2014)·····	114
Fig. IV-50. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 24, 2014)·····	115
Fig. IV-51. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)	116
Fig. IV-52. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)·····	117
Fig. IV-53. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)·····	118
Fig. IV-54. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)	119
Fig. IV-55. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 21, 2012)·····	120
Fig. IV-56. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)·····	121
Fig. IV-57. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)·····	122
Fig. IV-58. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)·····	123
Fig. IV-59. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)·····	124
Fig. IV-60. Low-quality video of Disaster Monitoring CCTV system·····	124
Fig. IV-61. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 30, 2012)·····	125
Fig. IV-62. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)	126
Fig. IV-63. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)·····	127
Fig. IV-64. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)·····	128
Fig. IV-65. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)·····	129
Fig. IV-66. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 21, 2012)·····	130
Fig. IV-67. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)·····	131
Fig. IV-68. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)·····	132
Fig. IV-69. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)·····	133
Fig. IV-70. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)·····	134
Fig. IV-71. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)·····	135
Fig. IV-72. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)·	136
Fig. IV-73. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 6, 2014)·····	137
Fig. IV-74. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)·····	138

Fig. IV-75. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 21, 2012)·····	139
Fig. IV-76. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)·····	140
Fig. IV-77. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)·····	141
Fig. IV-78. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)·····	142
Fig. IV-79. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)·	143
Fig. IV-80. Low-quality video of Disaster Monitoring CCTV system·····	143
Fig. IV-81. Example of discharge observation system·····	145
Fig. IV-82. Example of installation of discharge observation system at the site (front view)·	146
Fig. IV-83. Installation example of lighting equipment (Bridge lower part-front view)·····	147
Fig. IV-84. Installation example of lighting equipment (Bridge lower part-side view)·····	147

List of Table

Table III-1. Data for the input of the reference point	43
Table IV-1. Comparison of surface velocities	56
Table IV-2. Changes in the actual distance by the long-distance pixels movement.....	59
Table IV-3. Changes in the actual distance by the short-distance pixels movement.....	59
Table IV-4. Velocity vector and discharge calculation results(SIV).....	62
Table IV-5. Result error rate of the surface velocity and discharge.....	66
Table IV-6. Comparison of surface velocities among observation devices (day-time).....	68
Table IV-7. Comparison of relative error rate among observation devices(day-time).....	72
Table IV-8. Comparison of surface velocities among observation devices (night-time).....	73
Table IV-9. Comparison of relative error rate among observation devices (night-time).....	77
Table IV-10. Analysis summary table using Surface Image Velocimeter.....	78
Table IV-11. Runoff-rate of rainfall events.....	79
Table IV-12. Runoff-rate of rainfall events(Han-chen stream).....	81
Table IV-13. Runoff-rate of rainfall events(Oe-do stream).....	82
Table IV-14. Runoff-rate of rainfall events(Cheon-mi stream).....	83
Table IV-15. Runoff-rate of rainfall events(Han-buk stream).....	84
Table IV-16. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream).....	85
Table IV-17. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream).....	86
Table IV-18. Runoff-rate of rainfall events(Byeol-do stream).....	87
Table IV-19. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012).....	88
Table IV-20. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012).....	89
Table IV-21. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012).....	90
Table IV-22. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012).....	91
Table IV-23. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012).....	92
Table IV-24. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 30, 2012).....	93
Table IV-25. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012).....	94
Table IV-26. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013).....	95
Table IV-27. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 6, 2014).....	96
Table IV-28. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014).....	97
Table IV-29. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014).....	98
Table IV-30. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014).....	99
Table IV-31. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012).....	100
Table IV-32. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 30, 2012).....	101
Table IV-33. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012).....	102
Table IV-34. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013).....	103
Table IV-35. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014).....	104
Table IV-36. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014).....	105

Table IV-37. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 20, 2014)····	106
Table IV-38. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2014)····	107
Table IV-39. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)····	108
Table IV-40. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)····	109
Table IV-41. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)····	110
Table IV-42. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)····	111
Table IV-43. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013)······	112
Table IV-44. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)·····	113
Table IV-45. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 20, 2014)····	114
Table IV-46. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 24, 2014)····	115
Table IV-47. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)····	116
Table IV-48. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014)·······	117
Table IV-49. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)·····	118
Table IV-50. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)····	119
Table IV-51. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)·····	120
Table IV-52. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)·····	121
Table IV-53. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)·····	122
Table IV-54. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)····	123
Table IV-55. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)····	124
Table IV-56. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 30, 2012)····	125
Table IV-57. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)····	126
Table IV-58. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013)·····	127
Table IV-59. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014)·······	128
Table IV-60. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)·····	129
Table IV-61. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)·····	130
Table IV-62. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)·····	131
Table IV-63. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)·····	132
Table IV-64. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)····	133
Table IV-65. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)····	134
Table IV-66. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)····	135
Table IV-67. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)····	136
Table IV-68. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 6, 2014)·······	137
Table IV-69. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)·····	138
Table IV-70. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)·····	139
Table IV-71. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)·····	140
Table IV-72. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)·····	141
Table IV-73. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)····	142

Summary

Flood runoff was calculated from continuous surface velocity data by applying SIV (Surface Image Velocimeter) to various flood runoff events in ephemeral streams of Jeju Province. In the process of analyzing surface velocity of collected runoff images, a method of improving analytical accuracy of nighttime runoff images, the biggest weakness of SIV, was proposed to improve the limit and compare accuracy of daytime and nighttime runoff images. In addition, error rate was analyzed by calculating variables for far distance and near distance from the collected runoff images during conversion of image coordinate system. Cross-correlation coefficient of SIV was analyzed to present a post-processing method for improved accuracy of runoff calculation. Runoff images of disaster monitoring CCTVs installed in streams of Jeju Province were used to analyze runoff of measured and non-measured watersheds. Advanced technology for runoff observation was studied by considering rainfall-runoff characteristics of ephemeral streams.

Based on comparison of surface velocity analysis on nighttime runoff images with observed surface velocity of Kalesto, coefficient of determination R^2 was 0.848. Daytime runoff images had R^2 of 0.891. Lighting device of 1,000W installed to make up for weakness of nighttime runoff images was extremely effective in increasing accuracy of analysis on nighttime runoff images of streams in Jeju Province, which have narrow stream width.

Runoff, calculated by rate of velocity change (16.77%~317.69%) from input error of far distance reference point in the process of setting reference point for SIV, had range of 0.82%~338.63%. If runoff is calculated using SIV in inland streams with wide stream width, minor reference point input error can lead to greater velocity error. Error rate must be reduced in the process of setting reference point.

Cross-correlation coefficient of continuous image analyzed using SIV was interpreted to propose an appropriate filtering value for the collected runoff

images. For daytime runoff images, 61.0% of 59 velocity vectors corresponded to correlation coefficient range of 0.9~1.0. For nighttime runoff images, the ratio of vectors in correlation coefficient range of 0.9~1.0 was 17% lower. This indicates that quality of nighttime runoff images is lower than daytime runoff images. Therefore, reasonable filtering of correlation coefficient is necessary on runoff images obtained during calculation of runoff using SIV.

A runoff observation system that accounts for peculiar runoff characteristics of ephemeral streams was proposed based on field observation experience and the results of using SIV on various flood runoff images in ephemeral streams caused by heavy rains and typhoons. To improve accuracy of observed runoff data, observation angle of cameras and effective installation of 1,000W lighting device were presented. This increased accuracy of nighttime runoff image analysis, which is a weakness of the conventional SIV. In addition, ephemeral streams of Jeju Province that have extremely narrow stream width compared to inland streams showed advantage of using CCTV. Water bubbles formed on water surface during flood runoff functioned as tracer particles appropriate for surface velocity analysis.

Future studies shall be conducted on continued runoff observation and creation of an optimal observation system that accounts for peculiar hydrological characteristics and runoff phenomena in ephemeral streams of Jeju Province.

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

1.1 연구 배경

물은 지구상에 존재하는 모든 생명의 근원이며 자연적, 사회적 그리고 경제적 시스템과 밀접하게 연관되어 국가의 흥망성쇠에 막대한 영향을 미치는 소중한 자원이다. 그러나 최근 전 세계적인 이상기후의 영향으로 과거의 강우기록을 갱신하는 초대형 태풍과 돌발성 집중호우가 빈번하게 발생하여 인명 및 재산피해가 해마다 증가하는 실정이다. 날로 가속화되는 이상기후의 영향과 지역 특수성에 최적화된 이수·치수관리가 체계적으로 구축되어있지 않으면 후손들의 시대에는 상당한 피해가 발생할 수도 있다. 특히 자연재해의 많은 피해 원인 중 수해에 의한 피해규모가 가장 크게 나타나고 있어 지역적·유역적 특성이 반영된 치수 목적의 대응방안과 수자원의 효율적인 이용 및 관리를 위한 이수 목적의 대책수립이 필요하다.

수문현상이 특수한 지역을 대상으로 치수 및 이수 목적의 대응방안을 수립하기 위해서는 가장 기본적인 수문자료인 유량자료의 관측 및 수집과 분석과정은 매우 중요하다. 하천유량자료는 특정 유역의 물순환 해석 및 유출특성 해석, 강우-유출 모델의 검·보정, 치수계획, 방재차원 등 가장 기본적으로 활용되기 때문이다. 그러나 지속적이고 신뢰성이 높은 유량자료의 측정 업무에는 여전히 큰 어려움이 난제들이 산적해 있다. 또한 우리나라의 수자원 관련 기술은 시스템적인 분야에서는 많은 발전을 보이고 있지만 이를 뒷받침하는 중·장기적인 현장 유량자료의 관측과 분석 및 활용에 대해서는 매우 부족한 실정이다(Choo, 2002). 따라서 지역적 특수성을 고려한 유량관측방법의 개발과 지속적인 유량관측 및 분석과정은 가장 기본적이며 필수적이다.

제주도는 연평균 강우량이 약 2,061mm에 달하는 우리나라 최다우 지역이지만 화산암질의 투수성이 높은 지질구조로 인해 전체 143개의 하천 중 9개의 상시하천을 제외한 모든 하천이 평상시 물이 흐르지 않는 간헐천을 형성하고 있다(Yang,

2007). 하천 분포현황은 대부분의 하천이 한라산을 중심으로 경사가 급한 남·북부 사면을 따라 제주시와 서귀포시를 중심으로 분포하고 있으며 상대적으로 경사가 완만한 동·서부지역은 하천 발달이 매우 빈약한 특징이 있다(Yang et al., 2011).

제주도내 9개 상시하천 중 제주시 지역 2개(외도천, 옹포천) 하천을 제외한 7개 하천(창고천, 예래천, 중문천, 강정천, 악근천, 연외천, 동홍천)이 주로 서귀포 지역의 남부 중앙부에 형성되어 있으며 중산간 지역의 강수가 지하수로 함양되어 해안변에서 기저유출형태로 발생하고 있는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2014).

간헐천의 유출 특성은 집중호우 및 태풍의 영향에 의해 선행강우가 약 65mm 이상의 누적강우량(Yang et al., 2014)과 약 40~50mm의 집중호우의 영향(Jeju Development Institute, 2009) 때 약 3~4m/sec의 평균유속을 동반한 홍수유출의 형태로 발생한다. 유출시간이 수 시간 내지 1일 정도로 매우 짧은 유출특성을 보이므로 일반적인 하천관측 방법으로는 유출량 관측이 매우 난해하고 대부분 불가능한 지역이다(Yang et al., 2011). 특히 제주도 간헐천의 홍수유출은 주로 태풍이나 집중호우 때 악기상을 동반한 향천시만 발생하고 산지하천의 홍수유출 특성을 고려한 유량관측법의 부재로 인해 현장 관측 자료의 수집은 거의 전무한 실정이다.

기존의 하천 유량조사 및 유속측정은 주로 접촉식 방법인 변환식 유속계로서 프로펠라형 및 프라이스식 등이 있으며, 홍수시 부자(浮子)를 이용한 방법도 사용되었다. 그러나 돌발성 홍수유출을 관측하는 과정에서 관측자의 위험이 따르며 많은 시간과 인력이 필요한 단점이 있다. 특히 제주도의 간헐천을 대상으로 기존 접촉식 유속측정방법을 적용한 결과 간헐천의 특수성이 고려되지 못해 매우 부적합하다는 결론을 내린바 있다(Kim et al., 2014). 이에 보다 간편하면서 정밀하게 유속을 측정할 수 있는 다양한 연구와 시도가 있었다(Kim et al., 2011).

최근 비접촉식 유속관측방법에는 도플러 편차를 이용하는 전자파표면유속계가 한 국수자원공사에서 개발되어 사용되고 있다. 또한 국내외에서 이미지 분석기법(Image processing method)을 적용한 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimeter)가 많은 연구가 진행되고 있다. 두 관측장비는 기존의 접촉식 유속측정방법의 단점을 보완한 최신 비접촉식 관측기법으로써 수표면의 유속을 관측하여 유량으로 환산하는 공통점이 있다. 또한 관측된 유속을 유량으로 산정하는 과정에서 관측된 표면유속에 수심평균유속환산계수인 0.85를 일률적으로 적용하도록 제시되고 있다.

일반적으로 개수로의 유속은 단면 전체에 대한 평균유속을 의미하지만 실제 자연

하천과 같은 개수로의 유속은 관측지점의 단면의 형상과 하도의 조도, 상류부의 굴곡부 등의 영향으로 균일하게 분포하지 않는 특징을 나타낸다. 또한, 각각의 개별적인 하천에 따라 다른 유속분포의 흐름을 나타낸다. 특히 최신 유량관측법들은 비접촉식으로 운영되며 유량 산정과정에서 관측 단면의 일부분의 유속을 이용하여 전체 단면에 적용하므로 기존 유량관측방법의 적용성에 대한 검토와 간헐천의 특이한 유출특성이 고려된 유량관측방법의 도입과 고도화기술 개발이 무엇보다 필요한 실정이다.

현재 제주도의 유량관측 현황은 상시하천을 대상으로 2011년부터 2015년까지 제주수자원연구단에서 최신유량관측 장비인 ADCP, ADC, Flo-mate를 활용한 유량관측이 실시되었으나, 지속적인 유량관측이 필요한 실정이다. 또한 간헐천의 홍수유출량 관측 현황은 2007년부터 제주도 간헐천의 주요지점 47개소에 고정식 전자과표면유속계(Kalesto)가 설치되어 홍수유출시 연속적인 수위·유속이 관측하지만 1지점 고정식 수위·유속 관측에 인한 한계점과 관측 자료의 품질 및 운영 관리에 문제가 있다.

내륙지역의 하천은 강우에 의해 점진적인 유량이 증가하지만 제주도 하천은 태풍 및 집중호우의 영향으로 하천표층이 포화된 후 돌발성 홍수유출이 발생한다. 특히 약기상시의 홍수유출 현장관측 여건이 매우 난해한 특수지역이며, 홍수유출량측정시 기존 유량관측 방법의 선정과 적용에 한계가 있다. 따라서 제주형 하천 수문특성에 적합한 유량관측법 선정과 적용기술의 검토 및 개발은 매우 부족한 실정이다.

지속적인 유량관측은 치수·이수계획에 가장 기본적이고 필수적이므로 제주도 하천과 같은 산지형 하천의 특이한 홍수유출특성을 고려한 홍수유출량 측정방법의 개선이 필요하다. 이 과정에서 제주도 간헐천을 대상으로 최신 유량관측방법인 비접촉식 전자 및 영상에 의한 유속관측법의 도입·적용이 필요하다.

1.2 연구 목적

이 연구는 제주도 간헐천의 홍수유출시 표면영상유속계(SIV; Surface Image Velocimeter)를 다양한 유출사상에 적용하여 연속적인 표면유속자료로부터 홍수유출량을 산정하였다. 수집된 유출영상의 표면유속 분석과정에서 표면영상유속계(SIV)의 최대 단점인 야간유출영상의 분석 정확도 향상을 위한 현장개선 방안을 제

시하여 한계점 개선과 주·야간 유출영상의 정확도를 비교·분석하였다. 또한, 영상 좌표계의 변환과정에서 수집된 유출영상의 원거리와 근거리의 변수를 계산하여 오차를 분석하고, 표면영상유속계(SIV)의 상호상관계수 분석하여 유량산정 결과의 확도 향상을 위한 후처리 방법을 제시하였다. 그리고 제주도 하천에 설치된 하천 재난감시용 CCTV의 유출영상을 활용하여 계측 및 미계측구역의 유출량 분석하여 간헐천의 강우-유출 특성을 고려한 유량관측방법의 개선과 고도화기술을 연구하였다.

2. 연구 동향

2.1 국외 연구 동향

2.1.1 국외 유량측정 기술

최근 외국의 유량측정 조사 및 기술 개발 현황은 관측자의 안전과 관측 유량의 품질향상을 위한 자동유량측정 방법으로 연구가 활발하게 진행되고 있다.

미국은 1980년도에 해양분야의 수리동역학적인 특성을 규명하기 위한 ADCP 센서 개발과 소프트웨어의 지속적인 발전을 토대로 실제 하천유량관측을 통해 관련 기술을 축적해 오고 있다. 최근에는 ADCP를 활용한 유량관측 기술의 안정화에 의해 미국 USGS에서 약 57%의 주요 유량 관측소에 설치하여 운용하는 실정이다(Muste et al., 2007; Kim et al., 2011; Jung, 2013). USGS는 관측유량의 품질 향상을 위해 관측 지점에서 최저 4회의 계측을 수행하고 관측 자료에 5%의 이상의 오차가 있는 경우는 재관측하여 평균한 값을 실측 유량으로 사용하고 있다(하천유량관측의 신시대, 2010). 또한 영상분석기법의 일환인 LSPIV(Large-Scale Particle Image Velocimetry)에 관련한 연구가 지속적으로 개발되고 있으며 레이저를 이용한 표면 유속 측정 등 자동유량측정의 방향으로 개발되고 있다(과학기술부, 2004).

일본은 부자에 의한 접촉식 유속관측법을 활용하여 홍수시의 유량을 관측하고 장기간의 관측 자료를 기반으로 수위-유량관계곡선식을 유도하여 사용하고 있다. 하지만 기존의 접촉식 유속관측법의 단점과 측정자료의 불확실성으로 인해 1990년대부터 하천의 표면유속을 계측할 수 있는 비접촉식 유속관측법에 대한 연구가 진행되었다. 대표적으로 종래부터 제안하여 온 LSPIV 기법을 열악한 조건에서도 관측할

수 있는 새로운 STIV(Space-Time Particle Image Velocimetry) 기법을 Fujita(1994) 등에 의해 제안되었다. 또한 접촉식 유속계측법으로 ADCP가 유효한 관측법으로 인식되면서 연구자와 실무자에 관계없이 많은 측정사례 및 관련 연구가 진행중이다.

중국은 1998년도 대홍수피해에 의해 중국정부에 의한 수자원 분야의 투자가 확대되어 수문관측소 전산화, 수문관측 항목, 조사기술 및 관측 방법, 자동화 기술면에서 많은 발전을 이루고 있다. 특히 프로펠라형 유속계, 프라이스 유속계 등 계측기기의 기술개발이 국제수준에 도달하였으며, 접촉식 유속관측법 외에도 초음파 유속계, 전자파 유속계, 초음파 도플러 유속계(ADCP) 등 외국의 첨단 계측기기를 사용하고 있다(Yu, 2005).

2.1.2 국외 표면영상유속계(SIV)의 연구 동향

표면영상유속계(SIV)의 유속산정 원리는 연속된 이미지의 추적입자 이동거리와 시간 간격을 이용하여 계산된다. 이 같은 연속된 이미지를 활용한 연구는 Leese 등(1971)에 의해 정지 위성 데이터를 이용한 구름의 유동장 해석 연구에서 최초로 시도되었다. 이후 유체역학에 관련된 실험을 위해 영상처리 기술을 활용한 입자 이미징 기술(Imaging techniques)이 Adrian(1991)에 의해 적용되었다.

Fujita and Komura(1994)는 영상 분석 방법을 실제 하천의 유속분포 산정을 위한 적용 과정에서 수집된 영상의 이미지 왜곡 현상에 대한 보정식을 개발하고 나가라 강의 하류에 적용하여 속도벡터를 분석하여 양호함을 나타냈다.

Aya et al.(1995)는 Yodo 강의 표면유속 분포를 측정하는 과정에서 이미지 분석방법을 개발하여 고층빌딩에서 촬영한 유출영상을 분석하여 홍수 흐름에 대한 표면유속을 성공적으로 적용하였다.

J. Le Coz et al.(2010)은 고정된 카메라로 관측된 유출 영상을 활용하여 LSPIV에 적용하고 원거리 영상에서 누락된 유속벡터에 대한 솔루션을 제시하였다.

Sameh A. Kantoush et al.(2011)은 LSPIV를 활용하여 플로우 조건을 8가지 케이스로 설정하고 분석과정의 적용성을 연구하였다. 그 결과는 바람, 수면 표고, 자연 및 인공조명의 변화에도 불구하고 LSPIV의 적용성을 성공적으로 확인하였으며 신뢰성 있고 고가의 유속관측 장비에 비해 저렴한 유량 관측 방법임을 입증하였다.

Qi-hua Ran et al.(2016)은 산악 지대에 형성된 하천을 대상으로 돌발성 홍수유출 모니터링 시스템을 개발하여 적용하였다. 적용과정에서 3차원 지형을 재구성하기

위해 스테레오 이미지 기반의 가상폴(virtual pole)방법을 개발하고 주요 매개변수인 수위 및 수면 그래디언트를 고려하였다.

2.2 국내 연구 동향

2.2.1 국내 유량측정 기술

기존 유량관측방법은 저수시 도섭법을 이용한 유속-면적법과 홍수시 봉부자 방법을 사용하여 수위-유량관계곡선식에 의존하였으나 최근 들어 유량관측기기의 첨단 기술을 이용한 자동화 방향의 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 주요 하천의 유량 관측지점을 대상으로 수위를 관측하고 유량으로 환산하는 수위-유량곡선이 사용된다. 첨단장비를 이용한 유량측정 방법에는 도플러 효과를 이용한 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler), ADVN(Acoustic Doppler Velocity Meter), 음파 도달시간차를 이용한 UVM(Ultrasonic Velocity Meter), 영상처리 기법을 이용하여 표면유속을 측정하는 영상유속계(Surface Image Velocimeter), 레이더 표면유속계 등이다. 특히 국내 유량조사사업단의 2009년~2015년도의 ADCP 측정성과를 살펴보면 2009년 7.8%에서 2015년 69.0%로 사용률 증가를 나타내며 기존의 유속계와 부자 측정성과를 넘고있다. 또한 ADVN 또는 UVM을 활용한 자동유량측정시설을 통해 2015년 관측지점의 연평균 자료취득이 95%를 상회하고 있다(Kim et al., 2016). 그러나 제주도의 상시하천을 대상으로 지속적인 유량관측은 거의 전무한 실정이며 산지하천의 급경사와 짧은 유하거리, 자갈 및 암반하상으로 형성된 간헐천의 특수성으로 인해 기존의 접촉식 관측방법의 현장적용이 매우 어렵다. 또한 유량조사사업단에서 활용되는 자동유량관측도 홍수유출시 부목과 자갈을 포함한 부유물에 타격을 받아 제주도 하천에는 적용이 불가능한 실정이다(Yang et al., 2015).

2.2.2 표면영상유속계(SIV)의 연구 동향

국내의 표면영상유속계(SIV)에 대한 연구는 김미영(1999) 등이 PIV(Particle Image Velocimetry)를 응용한 SF-PIV(Surface flow-PIV) 기법을 사용하여 해류표면의 속도를 계측하는 연구를 수행하였다. 윤병만(2003) 등은 LSPIV 기법을 수리학 분야에 적용성을 연구하고 괴산댐 하류의 표면유속을 분석하고 유량을 산정하였다. 고석현(2005) 등은 영상분석 기법을 활용하여 수리모형 실험과 광주천, 증심사천에 적용하

여 표면 유속장을 측정하고 정밀도가 있음을 입증하였다.

류권규(2008) 등은 보정된 카메라를 이용하여 3차원의 실제 좌표를 평면 좌표로 추정하는 방법을 개발하여 현장에 적용에 성공하였다. 그 결과 표면유속을 분석하는 과정에서 추가적인 참조점 설정과정에서 평면 측량과정이 생략되므로 유속 측정 작업의 효율성을 높이는 연구를 수행하였다. 또한 류권규(2008) 등은 표면영상유속계를 적용하여 표면유속을 분석하는 과정에서 흔들리는 영상에 대한 표면 유속을 측정하는 알고리즘을 개발하였다.

김서준(2010) 등은 수집된 유출영상의 연속된 이미지의 수면 움직임을 명암값으로 나타내어 이미지 시간간격 변화에 따른 표면영상유속계의 정확도를 분석하고 시간간격 결정을 위한 기준을 제시하였다. 또한 김서준(2011) 등은 고정식 표면영상유속계(FSIV)를 달천 수전교에 설치하여 연속적인 유량 측정을 실시하였다. 분석 결과는 댐 방류량과 비교하여 5~10%의 오차를 확인하고 영상분석기법의 적용성을 판단하였다.

김서준(2013) 등은 영상유속계를 활용한 분석과정에서 인공영상을 이용하여 상관영역 크기 변화에 따른 오차 분석방법을 제시하였다.

류권규(2014) 등은 표면영상유속계의 추적입자 이동거리를 계산하는 과정에서 기존의 휘도 경사 텐서법을 이용한 유속 산정 방법의 한계를 검토하고 개선방안으로 상호상관법을 이용한 유속 측정 방법을 개발하였다. 또한 류권규(2015) 등은 스마트폰의 카메라와 방향 센서, CPU 등을 활용하여 실시간 하천 표면유속을 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 현장 적용 결과 5% 이내의 오차를 나타냈다.

이 연구에서는 국내외에서 진행된 영상분석기법의 일환인 표면영상유속계(SIV)의 연구동향을 선행연구로 참고하였다. 그러나 기존의 연구에서는 이론 및 실내실험 중심의 연구가 진행되었으며, 상대적으로 실제 자연하천을 대상으로 한 연구는 비교적 부족한 실정이다.

따라서 제주도의 상시하천과 간헐천을 대상으로 최신 관측기기를 실제 자연하천에 적용하여 특정 하천의 유속분포 범위와 관련된 흐름 특성을 분석하고, 다양한 유출사상에 대한 간헐천의 유출영상을 표면영상유속계(SIV)에 적용하는 과정에서 발생하는 한계점과 오차율에 대한 해석이 필요하다.

3. 연구 방법 및 범위

제주도 산지형 하천의 홍수유출량 측정방법 개선 및 고도화 연구를 위하여 다양한 유출영상을 관측(2011. 4. 21~2015. 9. 23), 표면영상유속계(SIV)에 적용하여 야간유출영상 분석 정확도 향상, 좌표변환계 설정에 따른 오차율 분석과 연속 이미지의 상호상관계수 해석, 계측·미계측유역의 강우-유출특성을 해석하였다.

(1) 주·야간 홍수유출영상의 정확도 비교 및 분석

2013년 5월 27일 집중호우에 의한 홍수유출시 제주도 천미천의 성읍교를 대상으로 주·야간의 유출영상자료에 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유속을 분석하고 유출량을 산정하였다. 분석과정에서 야간유출영상 분석의 문제점을 보완하기 위해 150Lux 이상의 자연광에 가까운 1000W 조명 장치와 최저조도 카메라를 현장에 설치하여 야간영상의 문제점에 대한 개선방안을 제시하였다.

(2) 영상좌표계 변환시 참조점 설정에 따른 오차율 분석

2012년 9월 17일 제16호 태풍 산바의 내습에 의한 홍수유출시 제주도 천미천(성읍교)의 유출영상을 분석하여 참조점 설정에 따른 실거리의 변화율을 계산하고 원거리, 근거리의 입력오류에 의한 유속 오차율을 계산하고 관측구간 하천의 참조점 입력범위 값을 제시하였다.

(3) 연속된 이미지의 상호상관계수 분석

2013년 5월 27일 집중호우에 의한 홍수유출시 제주도 외도천(외도정수장)의 유출영상을 표면영상유속계(SIV)에 적용하는 과정에서 연속된 이미지의 상호상관계수를 분석하였다. 분석과정에서 유속을 결정하기 위한 최대 상관계수를 계산한 후 일정 범위로 필터링 하면서 ADCP 측정 유량과 Kalesto 유량 산정 결과와 비교·분석하여 적정 상관계수를 제시하고 표면영상유속계의 유속산정 정확도를 개선하였다.

(4) 계측·미계측유역의 강우-유출특성 해석

표면영상유속계(SIV)를 활용한 제주도 간헐천의 유출량산정 과정에서 다양한 형태의 유출영상 수집을 위해 사용목적이 다른 하천 재난감시용 CCTV의 4개 지점(한

천교, 삼오교, 오봉교, 별도교)과 제주수자원연구단 CCTV의 3개 지점(외도정수장, 성읍교, 한북교)의 유출영상을 분석하였다. 산정된 결과는 동시간 관측된 전자식 표면유속계(Kalesto)의 자료와 비교·검토하고 해당 하천 구역의 강우-유출특성을 분석하여 표면영상유속계(SIV)의 정확도와 활용성을 모색하였다.

(5) 홍수유출 특성을 고려한 유량측정 고도화기술 연구

현재 제주도는 홍수유출시 전자과를 이용하여 표면유속을 관측하는 Kalesto가 설치·운영되고 있으나 초기 유속이 과대하게 산정되는 문제와 저유속의 흐름일 때 정확도가 낮은 문제점이 있다. 또한 기존의 표면영상유속계(SIV)는 분석되는 기본 데이터가 유출영상을 이용하는 방식이므로 수집되는 유출영상의 화질에 따라 산정된 결과가 많은 오차변동을 나타내며 영상 분석에 적합한 양질의 야간유출영상을 수집하기 어려운 단점이 있다. 따라서 제주도 간헐천을 대상으로 기존 유량관측방법의 단점을 보완하고 유출특성을 고려한 유량측정 고도화기술을 연구하였다.

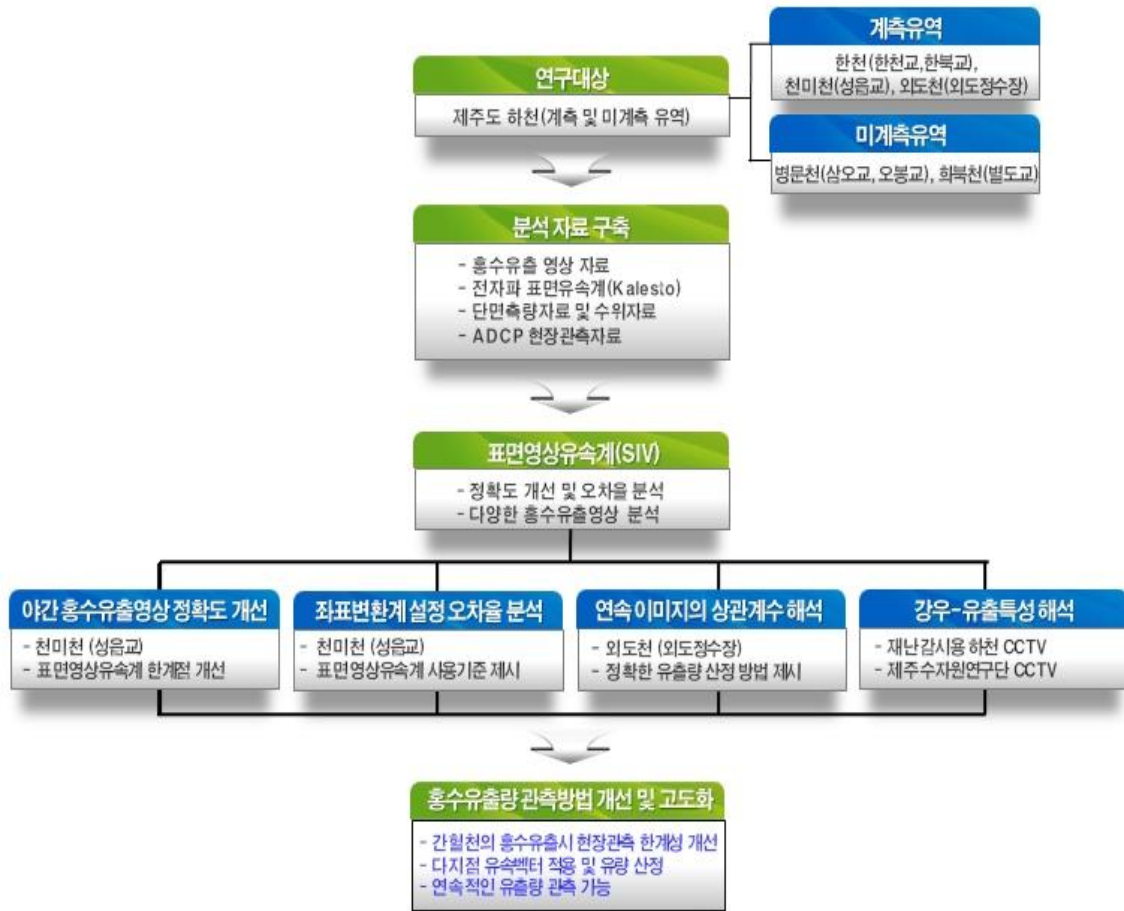


Fig. I -1. Flow chart on the study

II. 이론적 배경

1. 자연하천의 유량측정 방법

1.1 유량관측

최근 인구증가와 산업발달은 생활용수, 공업용수, 농업용수 등 하천유지용수 및 지수자원의 공급 확대 문제가 중요하다. 하천의 유량측정작업은 수자원의 효율적인 관리를 위한 가장 기초적인 작업이며, 무엇보다 현장 특성을 고려한 장기적이고 신뢰성 있는 유량자료의 관측 및 해석은 중요하다.

하천의 유량이란 단위시간 동안 임의의 횡단면을 통과하는 물의 양을 의미한다. 따라서 하천의 유량은 식 (II-1)과 같이 해당 횡단면의 면적과 이를 통과하는 물의 속도로부터 구할 수 있다.

$$Q = AV \quad (\text{II-1})$$

여기서, Q 는 유량(m^3/sec), A 는 통수단면적(m^2), V 는 유속(m/sec)이다.

일반적으로 하천의 한 지점에 흐르는 유량을 한 번에 측정하기는 어려우므로, 하천 단면을 여러 개의 측선으로 구분하여 각 측선의 단면적과 유속을 측정하고 구간별 유량을 산정한 후, 이를 합산하여 식 (II-2)와 같이 단면의 전체 유량을 산정한다.

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i \bar{V}_i \quad (\text{II-2})$$

1.2 유량관측 방법

1.2.1 부자에 의한 방법

부자(浮子)의 종류에는 봉부자와 표면부자가 있으며, 주로 홍수시에 적용된다.

적용방법은 하천의 수표면에 부자를 투하하여 일정 구간을 유하하는 시간을 측정하여 해당 구간의 평균유속을 구하는 방법이다.

부자에 의한 유속관측은 특정 구간을 이동하는 매체의 종류에 따라 현장의 관측여건을 고려하여 적절한 부자 투하방법의 필요하다. 기존에는 교량을 이용하여 교량 상부의 측선에 따라 투하는 방법과 하천을 횡단하는 케이블에 부자 투하장치를 설치하는 방법이 이용된다. 또한 하폭이 넓은 경우 배를 이용하여 부자를 투하는 방법이 사용되나 홍수시에는 관측자의 안전을 고려하여 지양한다.

일반적으로 부자를 사용하여 유속을 측정하는 경우 유하거리는 50~100 m로 하며 부자의 투하위치는 부자를 투하한 후 흘수(吃水)를 고려하여 상류방향으로 30 m 이상 고려한다. 또한 저유속의 하천 유량을 관측할 경우 측정거리가 너무 길면 시간 변화에 따른 수위변화의 영향으로 관측결과의 오차를 수반할 수 있으므로 관측 현장의 유속에 따라 부자의 유하상태에 주의하여 관측한다.

$$V = \beta V_0 = \beta \frac{L}{t} \quad (\text{II-3})$$

여기서, β 는 보정계수, L 은 제1측정단면과 제2측정단면 사이의 거리, t 는 제1측정단면에서 제2측정단면까지 부자가 유하하는데 걸린 소요시간을 나타낸다.

1.2.2 유속계에 의한 방법

하천 유량관측시 지점 유속계의 종류에는 회전축이 흐름에 평행인 회전식 유속계, 회전축이 흐름에 수직인 회전식 유속계, 전자기식 유속계가 사용되었다. 회전축이 흐름에 평행인 회전식 유속계는 평판형과 프로펠라형 유속계가 있으며, 관측시 하천 흐름의 방향에 평행하지 않으면 정확한 측정이 안된다. 또한 회전축이 흐름에 수직인 회전식 유속계에는 프라이스 유속계 및 소형 프라이스 유속계가 있으며, 프라이스 유속계가 가장 널리 쓰이고 있다. 프라이스 유속계는 지점 유량 관측시 하천 흐름 방향의 관측 각도가 비뚤어져도 큰 오차를 일으키지 않으나 관측시에는 항상 유량 방향의 유속을 관측해야 한다. 전자기식 유속계는 현장 관측시 관측치를 별도의 계산과정 없이 직접 디지털로 확인할 수 있는 장점이 있다.

$$V = a + bN \quad (\text{II-4})$$

유속관측은 컵이 회전할 때마다 발생하는 신호음을 관측자가 일정 시간동안 청취한 신호음의 수를 환산하여 유속을 관측한다.

여기서 a, b 는 검정계수, N 은 유속계 컵의 초당 회전수를 나타낸다.

1.2.3 전자파표면유속계에 의한 방법

전자파표면유속계는 비접촉식 유속측정 방법으로써 흐름방향으로 전자파를 발사한 후 반사되는 전자파의 도플러 효과를 이용하여 하천 수표면의 유속을 관측한다. 관측된 표면유속은 평균유속을 환산하고 관측 단면적의 수위에 따른 면적을 적용하여 유량을 산정한다.

전자파표면유속계는 기존의 유속측정 방법에 비해 비접촉식으로 표면유속을 관측하므로 홍수 유출시 관측하기 어려운 지점의 유속을 효과적으로 관측할 수 있는 장점이 있다. 또한 도플러효과를 이용하므로 주·야간 구분 없이 연속적인 유속측정이 가능하다. 그러나 고유속 관측에 비해 유속이 작고 파랑의 영향이 큰 지점에서는 관측결과의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 전자파표면유속계를 활용한 유속측정 원리는 식(II-5)와 같이 나타낸다.

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos\theta \quad (\text{II-5})$$

여기서, f_d 는 도플러 주파수, v 는 물체의 속도(표면유속), λ 는 전자파의 파장, θ 는 이동하는 물체의 속도 방향과 전자파의 방향이 이루는 각도로써 통상 20~40° 사이의 각도 사용한다. 전자파표면유속계는 뛰어난 현장 적용성을 바탕으로 실무에서 많이 사용되고 있으며, 제주도의 주요하천에는 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)가 교량에 설치되어 집중호우 및 태풍의 영향에 의한 홍수유출시 관측·운영되고 있다.

1.2.4 초음파 유속분포 측정기

최근 많은 현장적용과 연구가 진행되는 초음파 유속분포 측정기는 관측 단면의 3차원 유속분포를 측정하기 위해 초음파의 도플러 효과를 응용한 기기로서 대표적으

로 ADCP(Acoustic Doppler current Profiler)가 있다. 측정방식은 초음파 유속분포 측정기를 관측지점의 규모에 따라 배나 보트 등에 탑재하여 횡단방향으로 운항함으로써 연직단면의 유량을 단시간에 관측할 수 있다.

측정원리는 도플러 효과를 이용하며 일정 주파수의 초음파를 물 속으로 전송할 경우, 수중의 부유하는 입자(산란체)의 영향으로 반사파의 주파수가 변화하는데 이 주파수의 변화량을 계산한다.

초음파 유속분포 측정기는 유속성분을 합성함으로서 3차원의 유속분포를 관측하천의 측정단면의 유하방향 유속성분을 적분함으로서 유량을 계산하며, 관측기기 센서의 송수파기에 따른 유속벡터를 합성하여 3차원 유속분포를 관측한다(수문관측매뉴얼, 2004).

하천용 초음파 유속분포측정기는 기기의 초음파 주파수에 따라서 $300kHz$, $600kHz$, $1,200kHz$, $2,400kHz$ 의 기종이 있으며, 산란체의 영향에 의해 관측결과에 즉각적인 영향을 나타내므로 밀도가 높은 흐름조건이나 깊은 수심, 고유속일 경우에는 투과성이 높은 저주파수의 유속분포 측정기를 이용한다(수문관측매뉴얼, 2004).

1.3 유량조사법 선정

특정 하천의 유량을 측정하는 방법은 일반하천, 소하천 및 감조하천 등 하천의 형태와 저수기, 평수기, 홍수기 등 유량 크기 따라 관측현장 조건을 고려하여 적합한 측정방법을 선택하여야 한다. 하천의 형태에 따라 유량조사법의 선정은 일반하천에서 유수단면적을 기준으로 일정 간격으로 유속을 측정하고 수위에 따른 유수단면적을 곱하여 유량을 산정한다. 이때 접촉식 유속관측으로 회전식 유속계, 전자식 유속계, 비접촉식으로 전자파표면유속계 등을 이용하거나 홍수시에는 부자를 사용하여 유속을 관측한다.

본 연구대상 지역인 제주도는 전체 143개의 하천 중 9개의 상시하천을 제외한 모든 하천이 간헐천을 형성하고 있으므로 선행강우와 집중호우의 영향에만 홍수유출이 발생한다. 또한 홍수유출시 짧은 유하거리와 급경사의 영향은 강우-유출시 현장 관측이 매우 어려운 조건을 형성하고 있으므로 기존의 유속(유량)관측방법의 적용에는 한계가 있다.

2. 표면영상유속계(SIV)를 이용한 표면유속 측정과 유량산정

표면영상유속계(SIV; Surface Image Velocimeter)는 집중호우 및 태풍의 내습에 의한 홍수유출시 유출영상을 이용하여 수집된 영상의 추적입자 이동거리와 연속된 이미지의 시간간격을 계산하여 유속을 산정하는 비접촉식 유속측정방법이다. 따라서 홍수유출시 표면영상유속계(SIV)를 적용하는 과정에서 분석에 적합한 양질의 유출영상을 수집하는 과정이 매우 중요하다. 특히 수집된 유출영상의 입자이동거리를 계산하기 위한 추적입자의 분포 정도가 분석된 유속 분석결과의 신뢰성을 판단하는 기준이 된다.

제주도 산지형 하천의 홍수유출시 저유속과 고유속일 때 [Fig. II-1]과 같이 수표면의 하천 거품이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 홍수유출시 수표면 거품의 발생원인은 하천의 조도와 저질, 경사 등 흐름특성과 관련된 자연인자원 영양염류 및 용존유기탄소(DOC)의 영향에 의해 발생되며 하천 거품의 유동은 표면유속과 같은 속도로 유동한다(Miyamoto. H., 2007., Fujita et al., 2011). 따라서 산지형 하천의 홍수유출시 발생하는 하천거품은 표면영상유속계(SIV) 분석에 적합한 자연추적입자이며, 돌발성 홍수유출량을 관측하는 방법으로 표면영상유속계(SIV)가 다른 관측장비에 비해 적용성이 매우 높다.



(a)

(b)

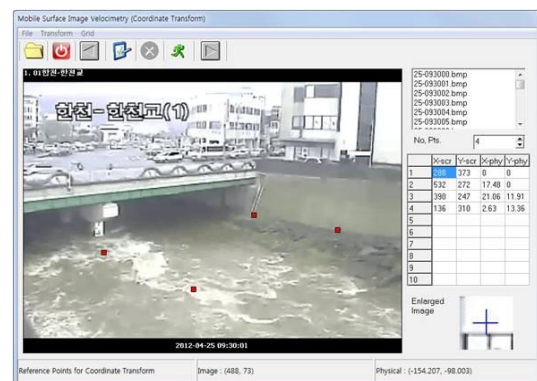
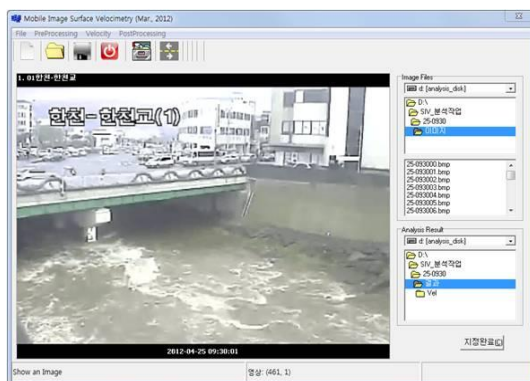
Fig. II-1. Natural bubbles in mountainous stream; a) slow velocity ; b) fast velocity

홍수유출시 표면영상유속계(SIV)를 활용한 하천 표면유속 분석의 기본 원리는 유동가시화(Flow visualization) 기반의 영상 분석기법을 이용하는 PIV(Particle Image Velocimetry)와 같이 수표면의 추적입자 이동거리를 추적하여 유속벡터를 계산하는 기본원리가 동일하다.

실제 하천의 3차원 공간 흐름을 휴대용 캠코더, CCTV 등 영상장치를 사용하여 레코딩할 경우 평면상의 2차원 영상으로 저장된다. 저장된 영상은 각각의 영상저장장치의 기록 제한에 따라 일정 시간간격으로 연속된 이미지가 저장된다. 수집된 2차원 디지털 영상정보(이미지)는 최소단위의 픽셀(Pixel)로 저장되며 영상저장장치의 해상도에 따라 전체 화면을 구성한다. 연속된 픽셀의 구성은 각각의 화소에 따른 명암 등급으로 기록되며 연속된 이미지의 명암 등급의 변화는 수집된 영상내에서 추적입자의 역할을 한다. 따라서 표면영상유속계(SIV)를 활용한 영상의 유속 분석은 수집 영상의 연속된 이미지 시간간격과 영상 내의 추적입자의 이동거리를 각각의 연속된 이미지의 명암 등급의 변화를 분석하여 화소 이동 방향과 거리를 판별하고 분석하여 유속을 계산한다.

초기의 PIV 분석방법은 하천의 넓은 영역에 적용하는 방법으로 개발되어 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)라는 명칭이 사용되고 있다. 하지만 본 연구에 적용된 분석 프로그램은 동의대학교 류권규에 의해 개발된 표면영상유속계(SIV)를 사용하였으며, 표면영상유속계(SIV)는 분석하는 영상에서 입자(particle)가 없는 경우에도 표면유속분석이 가능하므로 표면영상유속계(SIV; Surface Image Velocimeter)라는 용어를 공통적으로 사용하였다(Kim, 2013).

하천의 유출영상을 활용한 표면영상유속계(SIV)의 위한 분석 과정은 [Fig. II-2]와 같다.



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. II-2. Analysis of SIV process; a) process of setting the default; b)reference point setting; c) Program Set analysis section(Create a grid network); d) Velocity vector

집중호우 및 태풍의 내습에 의한 홍수유출 발생시 수집된 유출영상을 이용하여 표면유속을 분석한다. 수집된 유출영상을 연속된 이미지로 분할하여 한 쌍의 영상(이미지)를 표면영상유속계(SIV)에 적용하고 영상 레코딩 시간을 고려하여 기본 설정을 한다. 다음 사전에 관측대상에 측량된 참조점을 입력하고 분석하고자 하는 유속망을 설정한 후 탐색영역을 설정하고 영상분석을 실시한다. 최종적으로 분석된 자료의 후처리 작업 후 유속분석 결과물을 단면의 수위에 따른 단면적을 적용하여 중앙단면법으로 유량을 산정한다 [Fig. II-3].

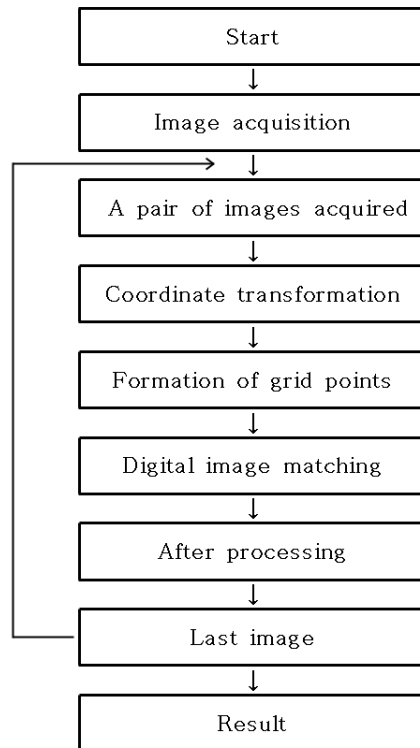


Fig. II-3. Analysis procedure of Surface Image Velocimetry (Kim, 2008)

2.1 하천 흐름의 영상획득

표면영상유속계(SIV)는 홍수유출시 수표면의 유속을 유출영상을 이용하여서 전체 유속망을 분석하는 프로그램으로써 분석에 적합한 양질의 영상을 기록하고 수집하는 과정이 분석결과에 상당한 영향을 미친다. 홍수유출시 영상기록은 [Fig. II-4]와 같이 분석 대상 하천 부근의 측면이나 교량, 제방 등에 홍수유출 영상기록에 적합한 위치를 선정하여 휴대용 캠코더나 CCTV 등 영상저장장치를 설치하고 영상을 수집한다. 촬영 위치 선정과정에서 영상저장장치의 수집되는 화면을 기준으로 수집된 영상(이미지) 내에서 최소 4개의 참조점 설정 위치를 포함할 수 있는 관측지점을 선정하여 관측 현장을 고려하여 유출영상을 기록한다. 최근 영상저장장치의 발전에 의해 해상도가 높은 고화질의 영상을 기록할 수 있으므로 관측 현장의 특징을 고려하여 고정식 영상저장장치를 설치하여 연속적인 유출영상을 기록하는 방법도 좋은 대안이 된다.

유출영상을 수집하기 위한 위치 선정시 흐름방향으로 수직 또는 수평방향으로 설

치하는 것이 촬영각도에 의한 왜곡현상을 보정하는 과정에서 분석결과의 오차를 줄일 수 있다(Kim, 2008). 또한 가능한 높은 곳에 영상저장장치를 설치하여 전체 영역을 화면에 기록할수 있도록 관측 현장을 최대한 고려하여 유출영상을 기록한다.

수집된 유출영상은 영상저장장치의 레코딩 제원에 따라 연속된 이미지의 시간간격이 유속결과에 적용되므로 초당 촬영 매수를 계산하여 표면영상유속계(SIV)에 적용한다.

표면영상유속계(SIV)의 유속망 분석에 적합한 영상저장장치는 레코딩 해상도와 연속된 이미지의 초당 촬영 매수에 영향이 있으며, 관측현장의 여건에 따라 영상저장장치의 관측 높이, 각도 등을 고려해야 한다. 이 과정에서 수집된 영상의 해상도와 영상의 초당 촬영 매수는 일반적인 영상저장장치를 사용하여도 문제되지 않는다. 그러나 수집된 영상에서 영상저장장치의 촬영 높이와 각도에 따라 왜곡이 발생하고 이를 표면영상유계(SIV)의 분석과정에서 보정되어 유속이 계산되지만 많은 오차가 발생할 수 있으므로 제한사항이 필요하다(Kim, 2013).

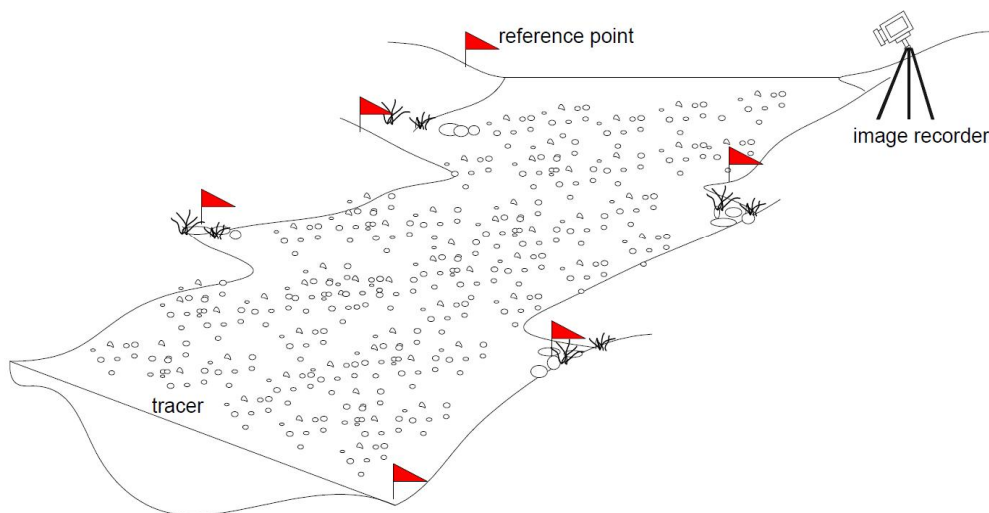


Fig. II-4. Surface image acquisition for SIV(Roh, 2005)

2.2 영상좌표계 변환과정

3차원의 실제 하천을 영상저장장치로 기록하는 과정에서 2차원의 영상(이미지)로 저장된다. 이 과정에서 원근 및 카메라 각도에 의한 영상 왜곡현상의 보정작업이 필요하다. 실제 3차원의 하천은 동일한 거리라도 카메라의 설치 위치 및 각도, 화면

의 앵글에 따라 왜곡이 발생하므로 화면내의 최소 4개의 참조점을 관측하여 3차원의 실제좌표계(physical coordinate)와 2차원의 영상좌표계(image coordinate)의 관계를 이용하여 수집된 영상의 왜곡을 보정하여 유속을 계산한다. 3차원의 실제 좌표계(physical coordinate)는 하천의 관측대상에서 각 지점들의 물리적 좌표계를 나타내며, 수집된 영상내의 2차원 좌표를 영상 좌표계(image coordinate)라고 한다.

영상의 왜곡 현상은 [Fig. II-5]와 같이 정사형의 동일한 길이라도 카메라의 관측 앵글의 위치에 따라 X, Y의 2차원 화면을 기준으로 원거리는 근거리에 비해 짧은 길이로 저장된다. 표면영상유속계(SIV)의 유속산정 과정에서 화면내의 추적입자의 이동거리와 이미지의 시간간격을 계산하여 유속으로 산정되므로 이 같은 2차원 영상의 왜곡 현상은 추적입자의 이동거리가 실제의 하천 이동거리와 차이가 발생하므로 영상좌표계의 변환 과정을 통해 보정작업이 반드시 필요하다.



Fig. II-5. Examples of distorted image(Roh, 2005)

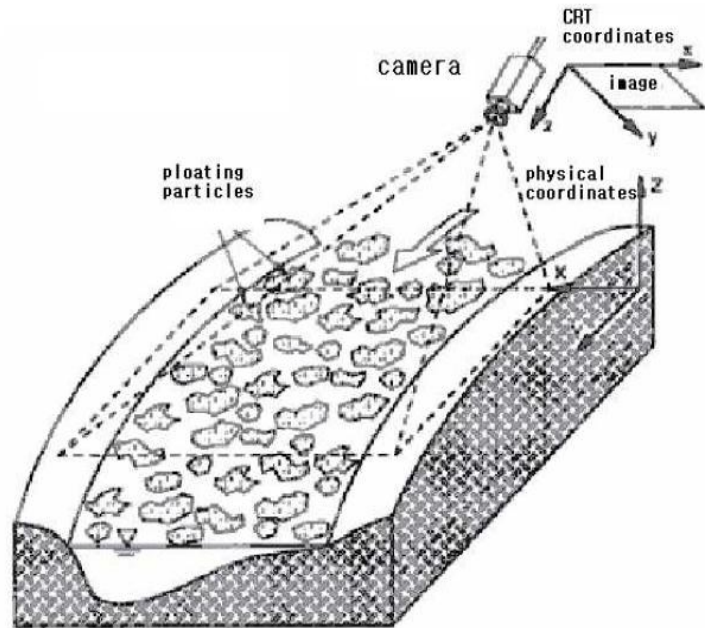


Fig. II-6. Image distortion caused by camera position(Roh, 2005)

수집된 영상의 왜곡을 보정하는 과정에 2차원 투영좌표 변환법(2-D projective coordinate transformation)이 적용된다. 2차원 투영좌표 변환법은 보정과정에서 8개의 맵핑계수를 이용하므로 8-매개변수 변환이라고도 하며, 각각의 좌표를 이용하여 x, y 의 평면에 투영한 자료를 분석하여 계산할 수 있다. 2차원 투영좌표 변환법은 왜곡된 이미지(영상)에서의 특정 x, y 좌표를 평면상의 X, Y 의 물리 좌표로 계산하는데 가장 많이 사용된다(Kim, 2013).

2차원 투영좌표 변환법에 의한 물리좌표계(X, Y)와 각 영상의 영상좌표계(x, y)간의 관계식은 다음 식(II-6)과 식(II-7)과 같다(Fujita et al, 1998)에 의해 유도되었다.

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1} \quad (\text{II-6})$$

$$Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (\text{II-7})$$

여기서 X, Y는 실제 좌표계(physical coordinate)의 좌표, x, y는 영상 좌표계(image coordinate), $b_i(i=1,2,\dots,8)$ 수집된 영상상의 좌표보정을 위한 변환계수(mapping계수)를 나타낸다. 실제 좌표계의 좌표는 지표면상의 기준점이 되고, 영상 좌표계는 실제 좌표의 기준으로 부터 왜곡된 영상상의 좌표가 계산된다. 따라서 식(II-6)과 식(II-7)으로부터 실제좌표계의 X, Y 좌표를 이용하여 수집된 영상의 왜곡현상을 x, y 좌표를 보정하여 계산할 수 있으며 8개의 미지수가 적용되므로 최소 4개의 기준점이 사용된다.

변환계수는 식 (II-8)~(II-10)을 활용하며 실제 좌표계(physical coordinate)의 n개의 기준점 $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ 과 영상좌표계(image coordinate)의 n개의 대응점 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 를 이용하여 최소자승법에 의해 결정된다.

변환계수는 식 (II-8)의 관계가 성립하며, 계수 행렬과 벡터는 식 (II-9), (II-10)과 같다.

$$TB = Z \quad (II-8)$$

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_8]^T, \quad Z = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (II-9)$$

$$T = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & -x_n X_n & -x_n Y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & X_1 & Y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -y_n X_n & -y_n Y_n & X_n & Y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (II-10)$$

여기서, B는 변환계수 벡터(8×1)이며, Z는 물리 좌표 벡터(2n×1), C는 변환 행렬(2n×8)이다.

실제 좌표계(physical coordinate)와 영상 좌표계(image coordinate)의 관계는 [Fig. II-7]과 같다. 실제 좌표의 기준점은 측량작업을 통해 기준점 사이의 거리에 따라 적용되며 화면을 기준으로 최소 4개의 참조점을 선정하여 측량작업을 수행하며, 기준점으로부터 식(II-7)과 식(II-7)를 반복 계산하여 나머지 좌표에 대한 변환을 수행하게 된다(Kim, 2010).

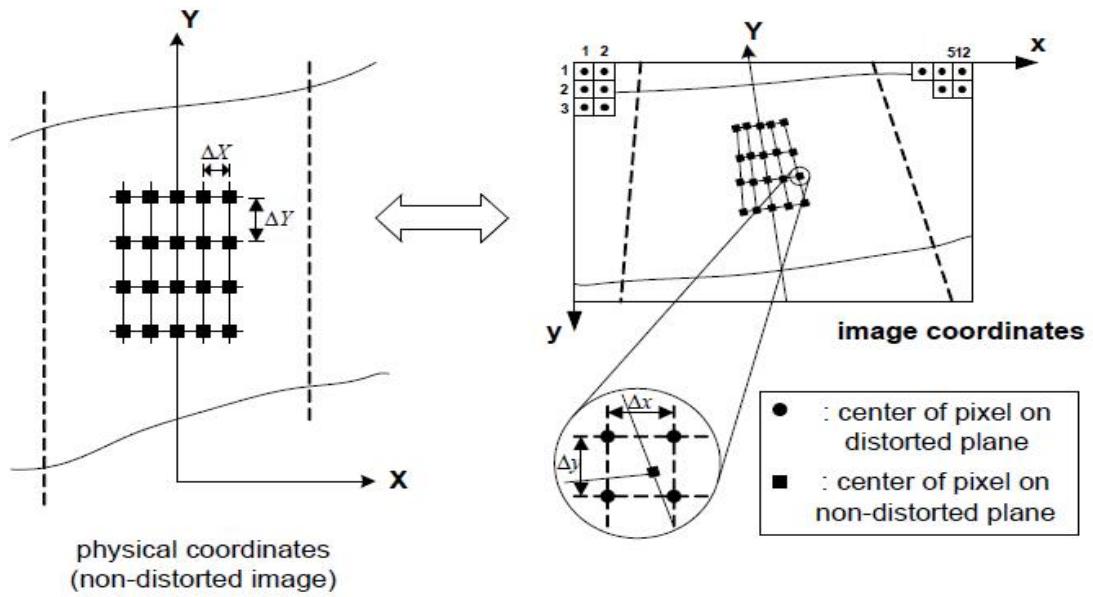


Fig. II-7. The relationship between Physical-coordinate and Image-coordinate(Fujita, 1998)

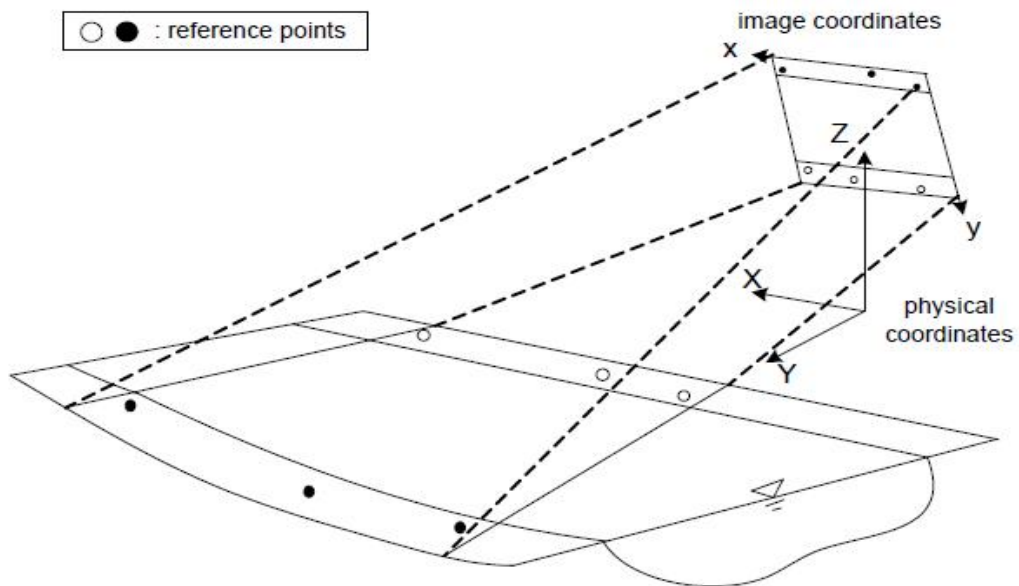


Fig. II-8. Reference points for image transformation (Fujita et al, 1998)

이러한 영상 좌표계와 실제 좌표계의 관계를 이용하여 [Fig. II-5]의 왜곡된 영상을 보정한 결과는 [Fig. II-9]와 같다.

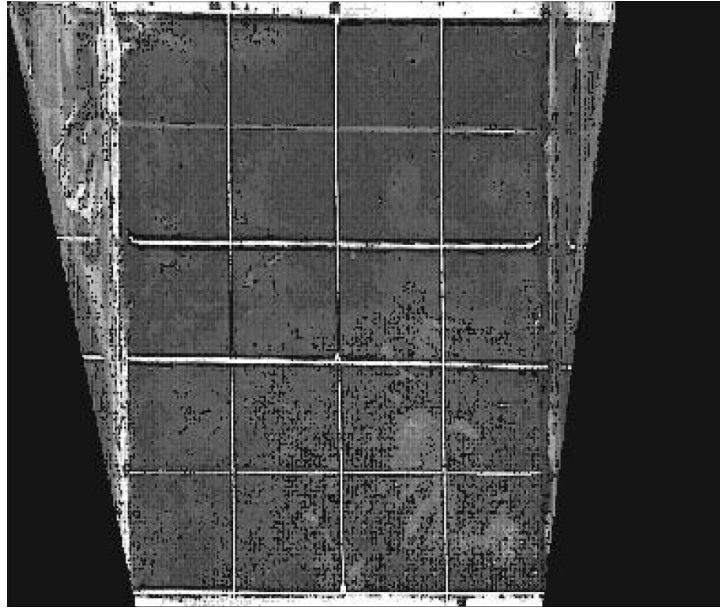


Fig. II-9. Calibration images(Roh, 2005)

왜곡 보정에 적용되는 식(II-6)과 식(II-6)은 측량 후 실제 좌표계의 X, Y의 함수로 적용되므로 높이에 대한 정보가 생략된다. 이는 분석 과정에서 실제 좌표계의 기준점이 Z방향으로는 같은 값으로 가정하며, 이러한 단점은 다음 식 (II-11)의 관계가 적용된다.

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1}, \quad y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (\text{II-11})$$

식 (II-11)의 변환계수 $A_1 \sim A_4$, $B_1 \sim B_4$, $C_1 \sim C_3$ 은 다음의 최소 제곱법에 의해 계산할 수 있다.

$$E = (F^T F)^{-1} F^T G \quad (\text{II-12})$$

식 (II-12)에서

$$F = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_m & Y_m & Z_m & 1 & -x_m X_m & -x_m Y_m & -x_m Z_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_m X_m & -y_m Y_m & -x_m Z_m & X_m & Y_m & Z_m & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

$$G = (x_1 x_2 \cdots x_m y_1 y_2 \cdots y_m)^T \quad (\text{II-14})$$

$(x_1, y_1) \sim (x_m, y_m)$ 은 각 기준점의 이미지 좌표를 나타내며, $(X_1, Y_1, Z_1) \sim (X_m, Y_m, Z_m)$ 은 대응하는 실제 좌표를 나타낸다. 또한 수표면은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z = D_1 X + D_2 Y + D_3 \quad (\text{II-15})$$

여기서, $D_1 \sim D_3$ 은 수면의 3점 이상의 좌표를 적용하여 계산된다. 수면이 환경사인 경우 $Z \doteq D_3$ 으로 적용되며 식 (II-11)을 식 (II-15)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다(Kim, 2010).

$$x = \frac{(A_1 + A_3 D_1)X + (A_2 + A_3 D_2)Y + (A_3 D_3 + A_4)}{(C_1 + C_3 D_1)X + (C_2 + C_3 D_2)Y + (C_3 D_3 + 1)} \quad (\text{II-16})$$

$$y = \frac{(B_1 + B_3 D_1)X + (B_2 + B_3 D_2)Y + (B_3 D_3 + B_4)}{(C_1 + C_3 D_1)X + (C_2 + C_3 D_2)Y + (C_3 D_3 + 1)} \quad (\text{II-17})$$

2.3 유속벡터에 의한 표면유속

표면영상유속계(SIV)를 활용한 유속 벡터의 계산은 수집된 유출영상을 연속된 이미지로 분할하고 카메라 왜곡 보정과 연속 이미지의 시간간격을 적용하여 산정된다. 수집된 이미지 상의 이동 거리를 계산과정에서 연속 이미지의 추적입자의 크기를 상관영역(interrogation area)이라 하며, 연속 이미지의 유사한 입자군을 찾기 위한 영역을 탐색영역(searching area)이라 한다(Kim, 2013). 따라서 표면영상유속계(SIV)를 활용한 수표면의 유속벡터 산정 원리는 수집된 유출영상의 탐색영역 내에서 추적입자군의 도심 이동거리를 연속된 다음 이미지에서 추적하여 계산하고, 수집되는 영상저장장치의 시간간격을 나누어 유속벡터를 계산한다.

본 연구의 분석에 적용된 표면영상유속계(SIV)는 추적입자의 이동거리를 계산하는 방법으로 상호상관기법(cross correlation method; Steven & Coates, 1994)이 적용된다. 상호상관기법은 설정된 상관영역과 탐색영역 내에서 연속되는 이미지의 동일한 입자군을 판별하여 계산하는 과정에서 디지털 영상판별기법(digital image matching)이 적용되어 이미지 명암값 특성의 유사도를 평가하고 특성 일치의 여부를 상관계수를 이용하여 판단하는 방법이다(Kim, 2013).

[Fig. II-10]과 같이 수집된 영상의 표면 유속의 정도를 파악하여 상관영역을 설정하고, 탐색영역에서 연속된 이미지의 추적입자 이동거리를 산정하는 상호상관기법식 (II-18)과 같이 상관계수 R_{ab} 를 산정하고 가장 큰 R_{ab} 값을 갖는 입자군을 분별하여 이동거리를 계산한다.

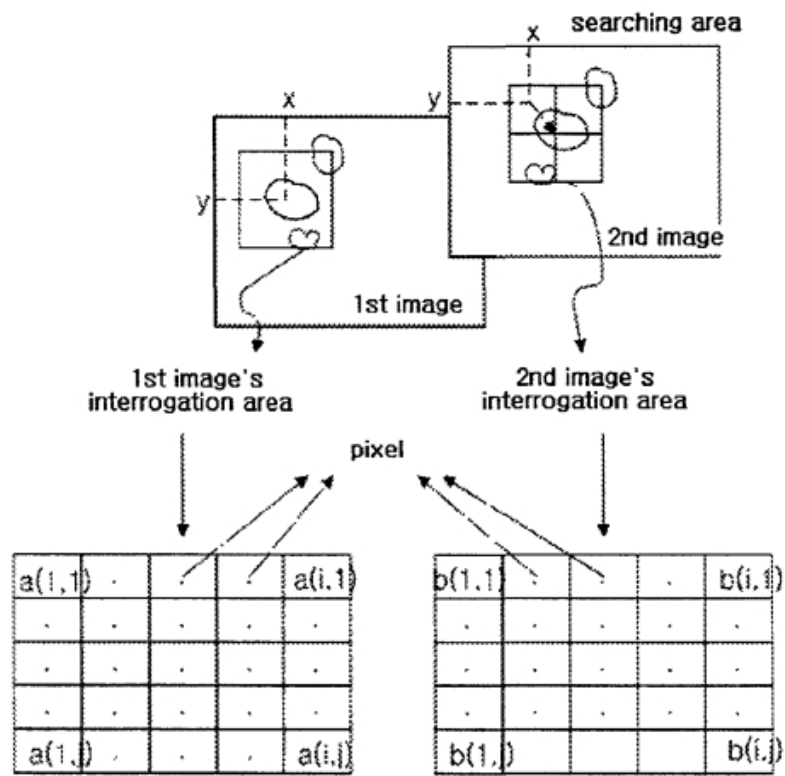


Fig. II-10. Cross correlation method technique(Kim, 2002)

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{II-18})$$

연속 이미지의 상관계수 R_{ab} 의 계산은 검색 영역내의 상관영역을 화소단위로 이동하면서 모든 상관영역에 대해 계산된다. MX 와 MY 는 표면영상유속계(SIV)분석과정에서 상관영역의 크기를 나타내며, $\overline{a_{ij}}$ 와 $\overline{b_{ij}}$ 는 이미지 상의 명암 등급 값 평균, a_v , b_v 는 각각 dt 시간 간격의 명암 등급값을 나타낸다(Kim, 2002). 따라서 연속된 이미지의 설정된 상관영역간의 상관계수 R_{ab} 는 상관영역 내 명암 등급값 a_{ij} 와 b_{ij} 로부터 계산되며, 상관계수가 가장 큰 R_{ab} 값을 갖는 입자군을 동일한 입자군으로 판단하여 이동거리를 산정하여 유속망에 대한 유속벡터를 계산한다(Kim, 2008).

표면영상유속계(SIV)의 유속벡터는 상관영역의 x 방향, y 방향 이동거리와 연속된 이미지의 시간간격을 이용하여 식 (II-19)와 식(II-20)에 의해 계산된다.

$$u = \alpha \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2}}{\Delta t} = \alpha \frac{\Delta dx}{\Delta t} \quad (\text{II-19})$$

$$v = \alpha \frac{\sqrt{(y_2 - y_1)^2}}{\Delta t} = \alpha \frac{\Delta dy}{\Delta t} \quad (\text{II-20})$$

여기서, u , v 는 이미지의 x , y 방향에 대한 표면유속을 나타내며, α 는 실제좌표와 영상좌표의 변환계수, Δt 는 연속된 이미지의 시간간격, x_1 , y_1 은 유속벡터 분석 지점의 첫 번째 이미지의 도심 좌표, x_2 , y_2 는 두 번째 이미지에서 상관계수가 가장 높은 상관영역의 도심 좌표를 나타낸다(Kim, 2013).

2.4 홍수유출량 산정

수집된 영상의 연속된 이미지 상의 추적입자 이동거리와 시간간격을 계산하여 순간 유속장이 결정되고, 분석되는 이미지 매수에 따라 연속적인 순간 유속장이 계산된다. 연속된 이미지 사이의 분석결과는 실제 좌표점 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) 의 값과 영상 좌표점인 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 값, X 방향의 유속값 u , Y 방향의 유속값 v , 상호상관계수의 결과가 분석된다(MSIV manual, 2007).

분석된 u , v 의 순간 유속장은 오류벡터를 포함할 수 있으므로, 오류벡터의 보정이 필요하다. 따라서 유량산정에 적용되는 최종적인 유속장은 여러 매수의 이미지 간의 순간 유속장의 변화를 시간 평균하여 계산된다. 오류벡터의 제거는 연속된 이미

지의 시간평균과정에서 수집 영상의 입자 또는 명암등급 분포가 조밀하지 못하거나 잡음성분으로 인해 발생하는 오류벡터를 제거한다(Kim, 2008).

오류벡터는 시간평균과정에서 연속 이미지 사이의 상관계수에 대해 기준범위를 0.70~0.99로 설정하며, 범위를 벗어나는 유속벡터에 대해서는 시간평균에 포함되지 않도록 하였다. 또한 x 방향과 y 방향의 유속 범위를 지정하여 필터링을 하도록 하였다(Yun et al, 2007, Kim, 2008).

표면영상유속계(SIV)에 의한 유속 분석결과를 유량으로 산정하는 과정은 동시간의 수위에 따른 단면적을 계산하여 중간단면법을 적용한다.

Ⅲ. 제주도 간헐천의 표면영상유속계(SIV) 적용

1. 연구대상 하천 및 유출영상 관측지점

표면영상유속계(SIV)를 활용한 제주도 간헐천의 유출량산정 과정에서 집중호우 및 태풍의 내습에 의한 유출발생시 다양한 유출영상의 수집을 위해 사용목적이 다른 하천 재난감시용 CCTV(제주특별자치도 운영) 4개소와 제주수자원연구단에서 설치한 CCTV 3개소의 유출영상을 표면영상유속 분석에 이용하였다([Fig. III-1]).

전체 7개 지점의 유출량을 산정하는 과정에서 기존 수위-유속 및 유량관측 자료가 없는 미계측유역 3개 지점(삼오교, 오봉교, 별도교 지점)과 Kalesto 관측이 실시되는 4개 지점(한천교, 외도정수장, 성읍교, 한북교)을 구분하여 분석하였다. 또한 분석과정에서 외도정수장 유출영상의 연속된 이미지-상호상관계수를 분석하여 유출량 산정의 정확도 개선하였으며, 성읍교 지점의 유출영상을 활용하여 영상좌표변환 설정에 따른 오차율 분석과 표면영상유속계(SIV) 적용시 야간유출영상의 정확도 개선을 위한 대안을 제시하였다.

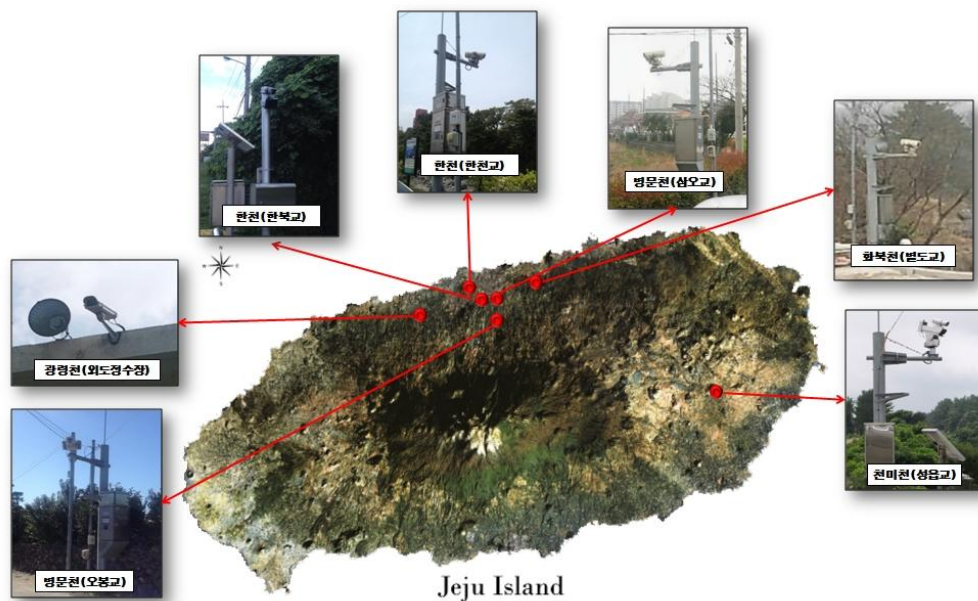


Fig. III-1. Observation point of the runoff image scene

표면영상유속계(SIV)를 제주도 간헐천에 적용하는 과정에서 다양한 형태의 유출영상을 수집하기 위해 하천 재난감시용 CCTV 4개 지점(한천교, 삼오교, 오봉교, 별도교)과 연구단 CCTV 3개 지점(외도정수장, 성읍교, 한북교)의 자료를 분석하였다.

제주도 전역의 재난감시용 CCTV는 전체 52개소가 설치되어 있으며 이 중 하천감시용은 35개소, 월파감시용은 10개소, 적설감시용은 7개소가 설치되어 제주도 재난종합상황실에서 운영·관리하고 있다. 재난감시용 CCTV는 도서지역의 재난관리와 월파 감시, 하천유출 상황 판단 및 수위 감시 목적으로 이용되고 있다. 실시간 감시하면서 재난발생시 신속한 대처와 재난경보의 발령, 인명 및 재산피해 예방 등에 활용되고 있다.

1.1 계측 구역의 유출량 분석

1.1.1 한천(한천교)

제주도 제주시 용담2동에 위치한 한천교 지점에는 하천 재난감시용 CCTV가 설치되어 운영되고 있다. [Fig. III-2]과 같이 관측지점에 설치된 CCTV는 SMASUNG SHC-745 기종이며, 영상 녹화시 30.303fps으로 저장된다. 재난감시용 하천CCTV의 유출량 분석결과는 동일 지점을 관측하고 있는 한천교 Kalesto자료의 유출량 산정값과 비교·분석하였다.



Fig. III-2. Observation point of the Han-stream(Han-cheon stream)

1.1.2 외도천(외도정수장)

제주시 내도동에 위치한 외도정수장의 유량관측을 목적으로 CCTV를 구축하였다. [Fig. III-3]과 같이 관측지점에 설치된 CCTV는 SMASUNG SRD-44X 기종이며, 영상 녹화시 7.092fps으로 저장된다. 유출영상 저장과 관련된 제원은 표면영상유속계(SIV)의 분석과정에 적용되며, 연구단 CCTV의 유출량 분석결과는 동일 지점을 관측하고 있는 외도정수장의 Kalesto자료의 유출량 산정결과와 비교·분석하였다.



Fig. III-3. Observation point of the Oe-do stream(Oe-do water treatment plant)

1.1.3 천미천(성읍교)

연구 대상하천인 천미천은 제주도 한라산을 기준으로 동남부에 위치한 수지형 하천으로써 평상시 물이 흐르지 않는 간헐천을 형성하고 있다. 하천의 발원지점은 한라산 동쪽 상부지점인 표고 1,400 m일대의 오름과 사라오름으로 조사되며 유출발생시 동쪽방향으로 흐르다가 북서쪽에서 남동쪽 방향으로 전환되어 표선면 하천리의 해안으로 유입되는 하천이다(Kim, 2012). 평상시에는 제주도 하천의 특징인 간헐천을 형성하고 있으며, 집중호우 시에만 짧은 시간에 유출이 발생하고 종료된다. 특히 천미천 유역은 삼다수 및 제주퓨어워터의 물산업 기업이 위치하여 정확한 유출량 산정이 물수지 분석시 매우 중요한 지역이다.

[Fig. III-4]와 같이 천미천 성읍교에 설치된 CCTV는 SMASUNG SRD-440 기종

이며, 영상 녹화시 30.303fps으로 저장된다. CCTV 유량관측 결과와 동일 지점을 관측하고 있는 성읍교 Kalesto 관측결과를 비교·분석하였다.

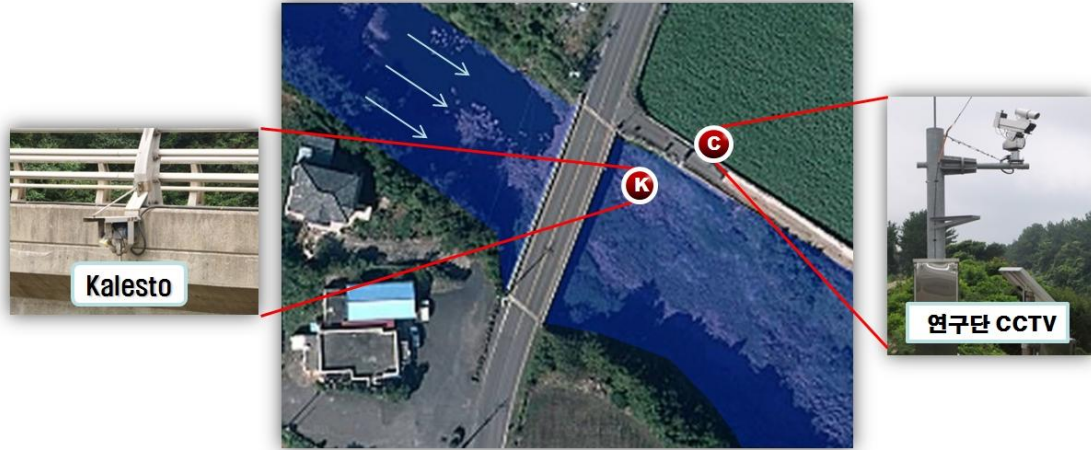


Fig. III-4. Observation point of the Cheon-mi Stream(Seong-eup bridge)

1.1.4 한천(한북교)

[Fig. III-5]과 같이 한천 한북교에 설치된 CCTV는 SMASUNG SCP-2270 기종이며, HD의 고화질 영상과 최저조도 0.00004Lux를 지원한다. 또한 유출영상 녹화시 30.303fps으로 저장되며 이러한 카메라의 제원은 표면영상유속계(SIV) 분석에 적용된다. CCTV를 활용하여 분석한 유출량은 동일 지점에 위치한 Kalesto 관측 자료와 비교·분석하여 표면영상유속계(SIV)의 적용성을 분석하였다.

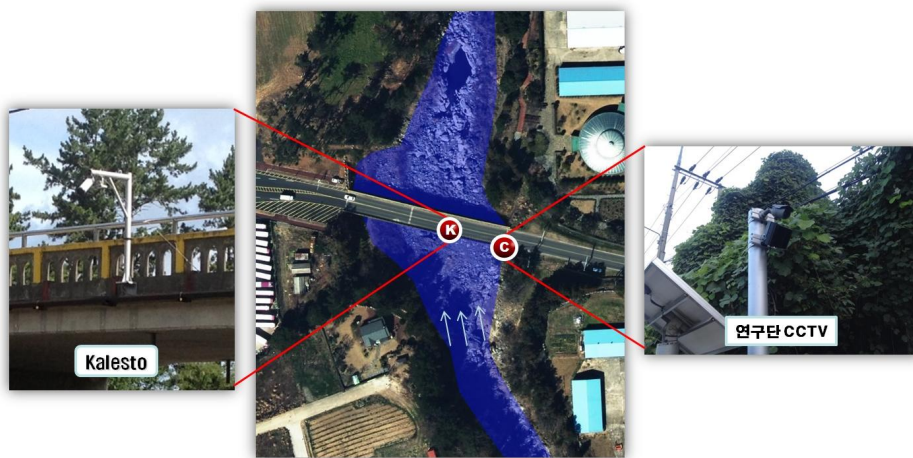


Fig. III-5. Observation point of the Han-Stream(Han-buk bridge)

1.2 미계측 구역의 유출량 분석

1.2.1 병문천(삼오교)

제주도 한라산 1,500m 고지에서 발원하여 용담동 해안으로 흘러가는 병문천은 제주 시가지의 서쪽 지역을 가로질러 형성된 하천으로 홍수 시 많은 재산 및 인명 피해가 발생하는 하천이다. 하천 재난감시용 CCTV는 [Fig. III-6, 7]과 같이 삼오교와 오봉교 지점에 설치되어 홍수범람 및 위험요소에 대한 감시를 실시하고 있다. 삼오교와 오봉교의 관측지점에 설치된 CCTV는 SMASUNG SHC-745 기종이며 영상 녹화시 30.303fps으로 저장된다. 삼오교의 분석결과는 관측지점에서부터 상류방향으로 하천길이 약 476m지점([Fig. III-6, B])의 제2신성교 Kalesto 유출량 산정값과 비교·분석하였다.

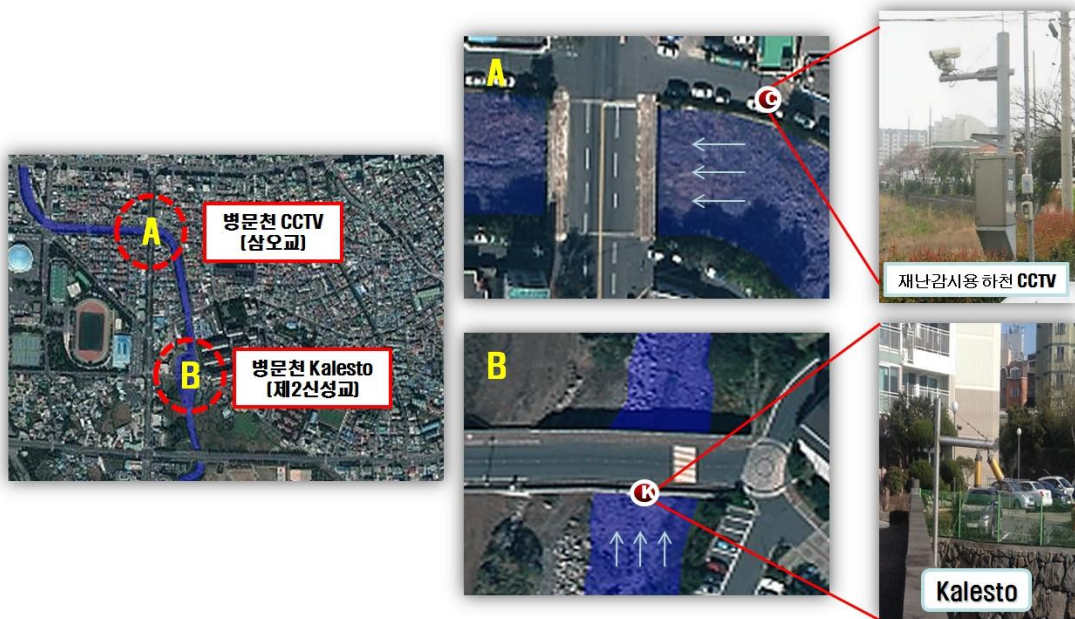


Fig. III-6. Observation point of the Byeong-mun stream(Sam-o bridge)

1.2.2 병문천(오봉교)



Fig. III-7. Observation point of the Byeong-mun stream(O-bong bridge)

1.2.3 화북천(별도교)

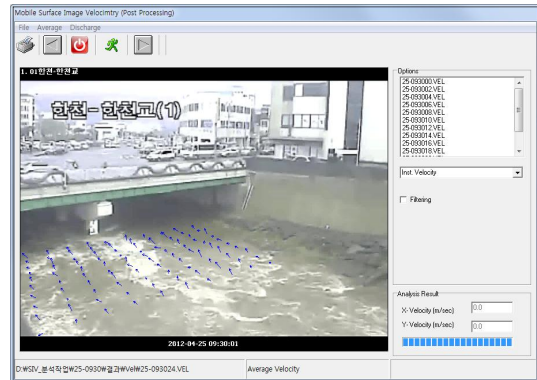
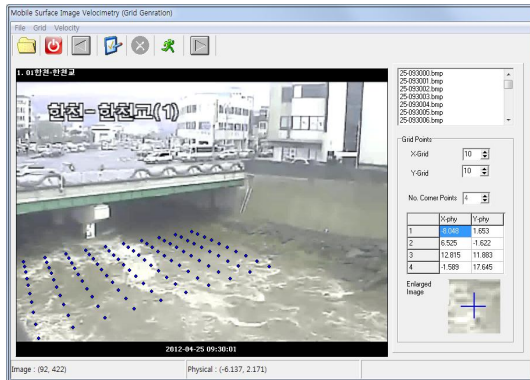
제주도 한라산의 흙붉은오름 일대에서 발원하여 별도봉 동쪽으로 휘돌아 해안으로 흘러가는 화북천은 제주 시가지의 동쪽 지역에 형성된 하천이다. 화북천 유역에는 하천 재난감시용 CCTV가 [Fig. III-8, A]와 같이 별도교에 위치하며, [Fig. III-8, B]와 같이 하류방향으로 하천길이 750m 지점의 별도2교에 Kalesto가 설치되어 홍수범람 및 위험요소에 대한 감시를 실시하고 있다. 감시목적에 국한되는 별도교의 재난감시용 CCTV 유출영상을 수집하여 집중호우 및 태풍에 의한 유출사상에 대한 유출량을 산정하고 [Fig. III-8, B]의 제2별도교 지점의 Kalesto 유출특성과 비교·분석하였다.



Fig. III-8. Observation point of the Hwa-buk stream(Byeol-do bridge)

1.3 표면영상유속계(SIV)의 적용

표면영상유속계(SIV)는 영상분석기법을 적용하여 하천의 표면유속을 측정하기 위한 분석 프로그램이다. 비디오카메라 같은 영상저장장치를 이용하여 하천의 수표면의 유동을 촬영하고 저장된 영상을 연속된 프레임으로 분할하여 영상 변위를 구한 다음 영상과 실상과의 축척 관계를 이용하여 최종적으로 표면 유속을 구하는 방법이다(Kim, 2008). 표면영상유속계(SIV)의 분석은 동의대학교 류권규에 의해 개발된 프로그램을 사용하였다.



(a)

(b)

Fig. III-9. MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry); a) Program Set analysis section(Create a grid network); b) Velocity vector.

하천 재난감시용 CCTV의 유출영상을 활용하여 표면영상유속계(SIV)를 적용한 실제 하천의 표면유속 측정과정은 다음과 같다.

획득된 유출영상 자료를 사용된 카메라의 초당 프레임값을 고려하여 연속된 이미지로 분할하고 시간에 따른 각각의 한 쌍의 영상을 획득한다. 하천 재난감시용 CCTV의 촬영 위치에 따라 3차원 공간의 실제 흐름을 영상으로 전환할 경우 2차원의 평면 형태로 기록되므로 원근에 따른 영상 왜곡 현상을 보정하여 계산하기 위해 좌표 변환작업을 실시한다. 좌표변환 과정에서 왜곡영상 보정방법은 2차원 투영좌표 변환법(2-D perspective coordinate transformation)이 사용되며 획득되는 영상에서 최소 4개의 기준점이 필요하나 오차를 줄이기 위해서는 4개 이상의 기준점을 두는 것이 좋다(Kim, 2008). 다음 영상분석 구간에 대해 격자점을 형성하고 영상분석에 의한 유속을 산정한다. 이 때 산정되는 유속벡터는 연속되는 두 영상의 검색영역 내에서 각 입자군의 상관계수를 계산하여 최대 상관계수를 갖는 입자군을 동일 입자군으로 판별하고 입자군간 도심의 이동거리를 두 영상의 시간간격으로 나누어 유속벡터를 계산한다. 재난감시용 CCTV의 유출영상 분석 시 관측지점의 입력값을 통일시키고 적합한 탐색영역과 상관영역을 적용하기 위해 2012년 총 7회의 유출영상을 수위 기준으로 상승기, 하강시, 주간, 야간영상으로 구분하여 반복적으로 분석하였으며 최종적으로 적정 상관영역범위를 결정하고 전체 영상에 적용하여 최종유출량을 산정하였다. 표면영상유속계(SIV)로 산출된 결과는 관측구간의 전체적인 유속장을 분석하였으나 Kalesto의 관측 결과와 비교·분석하기 위해 Kalesto가 관측하는 포인트에 맞추어 유속벡터 라인을 단면에 적용하였다.

2. 야간 하천유출영상의 정확도 개선

표면영상유속계측법(SIV)은 영상저장장치를 이용하여 유출영상을 기록하고 연속되는 이미지 상의 추적입자의 이동을 계산하여 유속을 산정하는 기법이다(Kim et al., 2010). 그러나 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유량을 산정하는 과정에서 분석자료

가 영상을 이용하므로 수집된 유출영상의 화질이 좋지 못하면 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 특히 자연광이 없는 야간상태 유출영상은 하천표면의 추적입자를 인식하지 못하는 원인으로 인해 자료의 분석이 불가능한 한계점이 있다.

표면영상유속계(SIV)를 활용한 연속적인 홍수유출량 산정과정에서 야간유출영상의 분석정확도 개선을 위한 연구로는 류권규 등(2015)이 원적외선 카메라의 적용성을 검토하기 위한 연구가 수행되었다. 연구내용은 유출영상을 원적외선 카메라를 활용하여 분석하고 동시 촬영한 보통의 가시광선 카메라와 근적외선 카메라를 활용하고 소형 프로펠러 유속계에 의한 유속 측정 자료와 비교분석하여 원적외선 카메라의 적용이 가능한 것으로 확인되었다.

이 연구에서는 제주도 간혈천을 대상으로 2013년 5월 27일 집중호우에 의한 유출 발생 시 제주도 천미천의 성읍교를 대상으로 주·야간의 유출영상자료에 표면영상 유속계(SIV)를 적용하여 유속을 분석하고 유출량을 산정하였다. 동시에 동일지점의 Kalesto의 유속과 수위를 적용하여 산정된 유출량과 비교·분석하고 해당 구역의 강우-유출량 관계에 대한 유출특성을 해석하였다. 특히 야간유출영상의 문제점을 보완하기 위해 자연광에 가까운 조명 장치와 최저조도 카메라를 현장에 설치하여 야간영상의 문제점에 대한 개선방안을 제시하였다.

2.1 연구 방법

야간 영상의 개선을 위한 기존의 연구는 실내 수리실험을 통하여 빛의 밝기에 따른 표면영상유속계의 정확도를 분석한 사례가 있다. 그 결과 표면영상유속계의 현장 적용 시 최소한 150 lux 이상의 밝기가 필요함을 도출하였다(Kim et al., 2010).

천미천 성읍교의 야간 유출영상은 화면상에서 유출영상의 표면흐름을 확인 할 수 없는 영상을 기록하였다. 획득된 영상에서 추적입자의 이동거리를 계산하여 유속을 산정하는 표면영상유속계는 현장개선 없이 영상을 분석하기에 매우 부적합하다. 이 같은 현장 적용의 문제점을 보완하기 위해 기존의 실내 수리실험의 결과를 응용하여 150 lux 이상의 자연광에 가까운 1000w의 조명장치를 설치하였다.

2.2 관측 자료

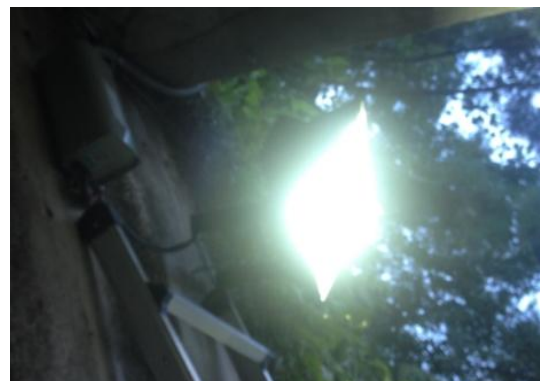
표면영상유속계(SIV)를 활용한 유속분석 과정에서 야간유출영상의 정확도 비교·분석을 위한 관측 자료는 3.2 관측 자료 내용과 동일하다.

2.2.1 유출영상자료 수집을 위한 CCTV 설치

제주도 천미천의 성읍교 부근의 유출영상을 기록하기 위해 제주수자원연구단에서 [Fig. III-10(a)]와 같이 30.303 fps로 영상이 기록되는 Samsung SRD-440 기종 CCTV를 설치하였으며 카메라의 영상저장에 관한 제원은 표면영상유계의 유속 산정에 적용된다. 또한 야간유출시 분석에 적합한 유출영상을 수집하기 위해 150 lux 이상의 자연광에 가까운 1000W의 조명장치를 설치하였다[Fig. III-10(b)].



(a)



(b)

Fig. III-10. CCTV system for outflow of the image acquisition at Seong-eup bridge; (a) CCTV; (b) the illumination equipment

2.2.2 참조점 선정을 위한 거리측정

관측구간인 천미천 성읍교는 실제 3차원의 공간이지만 영상을 기록하고 수집되는 과정에서 2차원의 평면 상태로 저장된다. 이 과정에서 영상저장장치의 촬영 각도와 사물의 원근에 대한 왜곡이 발생하므로 획득한 영상에 대해 보정을 위한 변환과정이 필요하다. 변환작업은 획득된 영상(이미지)의 영상좌표(image coordinate)를 물리좌표(physical coordinate)로 변환할 참조점을 지정한다. CCTV 화면상의 참조점을 기준으로 측량을 실시하고 실제 측점 사이의 거리에 대한 x, y좌표 참조점을 분석에 적용한다([Fig. III-11]).

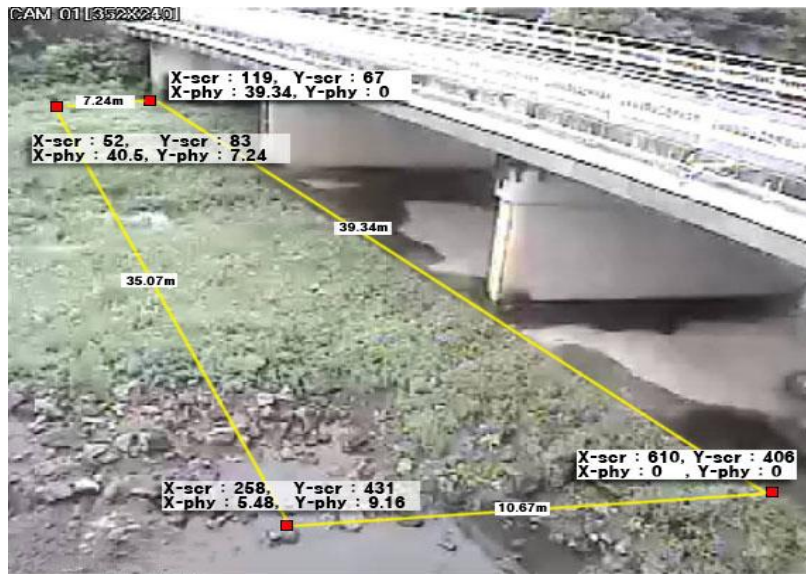


Fig. III-11. Reference points for the coordinate transform

2.2.3 단면측량 자료

유출량 산정에 적용되는 하천단면은 고정식 전자파표면유속계인 Kalesto가 관측하고 있는 단일 지점을 기준으로 단면측량을 실시하였으며, 교량 하부의 기둥을 중심으로 하류방향으로 약 5m지점의 단면을 적용하였다. 관측지점인 성읍교의 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)를 기준으로 상류방향의 하상이 하류방향의 하상에 비해 불규칙적인 암반을 형성하고 있다. 이로 인해 유출발생 시 교란된 흐름을 형성하므로 단일지점을 관측하는 고정식 전자파표면유속계의 오차발생을 최소화하기 위해 하류방향을 향하여 설치된 것으로 판단된다.

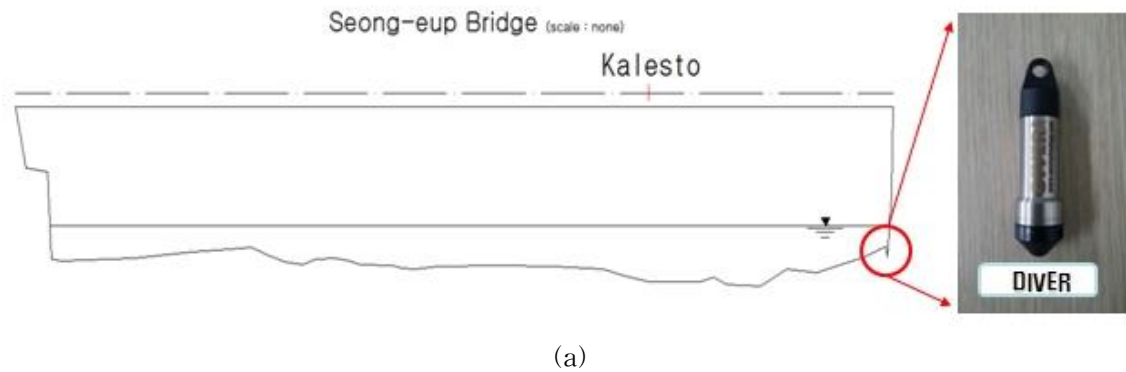


Fig. III-12. Cross sectional areas for discharge calculation and mini diver for the

2.2.4 다이버 수위계 자료

집중호우 및 태풍의 내습에 의한 제주도 간헐천의 유출발생 시 수위 관측을 위해 [Fig. III-19]와 같이 DIVER 수위계를 설치하였다. 설치 위치는 유출 발생 시 관측 장비의 손실을 방지하기 위해 유출시 운동에너지에 직접 영향을 받지 않는 교대 하부 지점을 선정하여 설치하였다. 관측된 수위자료는 관측 지점의 횡단면 자료를 이용하여 유출 시간에 따른 수위-면적을 계산하고, 중간단면법을 적용하여 유량을 산정하였다.



Fig. III-13. The position of DIVER-water gauge

2.2.5 고정식 전자파표면유속계(Kalesto) 관측 자료

성읍교에 설치된 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)는 관측구간이 하상단면의 좌안을 기준으로 9.5 m에 1개 지점에서 표면유속을 계측한다. 단일구간의 유속자료를 이용하므로 계측된 유속이 과소, 또는 과측정되는 경우 유량산정 시 오차를 포함할 수 있다(Yang et al., 2012). 하지만 간헐천의 돌발성 홍수유출시, 기존 접촉식 유속계로 측정이 어려운 경우 가장 효과적으로 측정할 수 있으며 주·야간 구분없이 무인으로 연속적인 수위 유속자료를 확보할 수 있는 장점이 있다.



Fig. III-14. Kalesto installed at Seong-eup bridge

3. 영상좌표계 변환설정에 따른 오차율 분석

표면영상유속계(SIV)를 활용한 실내 실험 및 현장적용과 관련된 연구는 많이 이뤄졌으나 오차 발생 요인들을 고려한 정량적인 오차 분석에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이 같은 이유로 표면영상유속계를 이용한 유속 측정 시 오차 발생 요인들에 대한 사용 기준이 마련되지 못하여 일반 사용자들이 쉽게 사용하기 어렵고, 측정 불확도가 정립되어 있지 않아 표면영상유속계로 측정한 유속값의 정확도와 신뢰도를 제시하기 어렵다는 한계를 가지고 있다(Kim, 2013).

특히 표면영상유속계를 활용한 유속 산정 과정에서 사용기준에 대한 정량적인 제시가 미흡함에 따라 동일한 유속의 흐름에 대해서도 사용자마다 획득한 영상이 다르고, 영상 분석 방법이 다르기 때문에 표면영상유속계를 이용한 유속 산정 결과에 차이가 발생하게 되는 문제점을 가지고 있다. 또한 산정한 유속의 오차를 정량적으로 평가할 방법이 없기 때문에 산정한 유속에 대한 오차를 제시하기 어렵다는 한계를 가지고 있다. 그 결과 유속 측정 장비로서 표면영상유속계의 장점이 아무리 많다고 하여도 유속 측정 결과를 신뢰하기 어렵기 때문에 현장 적용이 활발하게 진행되지 못하고 있는 실정이다. 표면영상유속계를 이용한 유속 산정 결과를 믿고 신뢰할 수 있도록 유속 산정 결과에 영향을 미치는 오차 요인들에 대한 정량적인 오차 분석이 선행되어야 할 것이며, 더 나아가 표면영상유속계의 사용 기준 마련을 위한 연구가 필요하다. 따라서 2012년 9월 17일 제16호 태풍 산바의 내습에 의한 제주도 천미천(성읍교)의 유출발생 시 최대 수위 3.94 m를 기록한 9시 00분 유출영상을 기준으로 참조점 설정에 따른 실거리의 변화율을 계산하고 원거리, 근거리의 입력오

류에 의한 유속 오차율을 계산하여 관측구간 하천의 참조점 입력범위 값을 제시하였다.

3.1 연구 방법

표면영상유속계의 유속산정 방법은 영상의 추적 입자 이동거리와 시간을 이용하므로 분석과정 중 분석자의 참조점 설정에 미세한 오류가 발생한다면 분석에 이용되는 실제 거리가 변경되어 오류를 포함한 유속이 계산된다. 따라서 표면영상유속계를 활용한 유속분석 시 참조점 설정과정에서 분석자에 의한 오류발생범위를 확인하고 현장에 적합한 크기의 참조점 표시판 설치하여 오류발생 가능성을 줄이는 방안이 필요하다.

영상 왜곡에 의한 보정 작업인 참조점 설정과정에서 카메라 화면의 중심을 기준으로 원거리 참조점 입력값과 근거리 입력값의 변수를 입력하여 유속을 분석하였다. 참조점 입력과정의 변수계산은 수집된 영상에서 흐름방향을 기준으로 4개의 참조점 중 [Fig. III-14]과 같이 노란색으로 표기한 참조점을 이동하면서 각각 개별로 분석하고 유속변화를 분석하였다. 또한 표면영상유속계(SIV)의 참조점 설정 시 분석프로그램에 표기되는 참조점 pixel 크기는 10×10 pixel로 생성된다.

3.1.1 참조점 설정에 따른 원거리 변수계산

[Fig. III-15(a)]와 같이 원거리 참조점의 설정변수는 X축 방향(분석과정에서 영상 좌표는 흐름방향을 기준으로 X축을 설정하였으므로 보편적인 X-Y축과 반대방향으로 설정됨) 14 pixel, Y축 방향으로 77 pixel의 이동 가능한 거리를 나타낸다. 1회 분석을 실시할 때 10×10 pixel의 크기로 생성되는 참조점은 X축 방향으로 2 pixel, Y축 방향으로 11 pixel 씩 이동하며 X-Y방향으로 발생할 수 있는 참조점 설정변수는 6개(마지막 7번째 설정변수는 중첩됨)로 구분된다. 따라서 원자료와 비교한 설정변수는 6개의 케이스로 구분되어 비교되는 것이 타당하지만 본 논문에서는 5개의 케이스만 구분한 결과만 사용하였다([Table III-1]).

3.1.2 참조점 설정에 따른 근거리 변수계산

[Fig. III-15(b)]와 같이 근거리 참조점의 설정변수는 X축 방향 38 pixel, Y축 방향으로 418 pixel의 이동 가능한 거리를 나타낸다. 1회 분석을 실시할 때 10×10 pixel

의 크기로 생성되는 참조점은 X축 방향으로 1 pixel, Y축 방향으로 11 pixel 씩 이동하며 X-Y방향으로 발생할 수 있는 참조점 설정변수는 37개(마지막 38번째 설정변수는 중복됨)로 구분된다. 따라서 원자료와 비교한 설정변수는 37개의 케이스로 구분되어 비교되는 것이 타당하지만 본 논문에서는 25개의 케이스로 구분한 결과만 사용하였다([Table III-1]).

원거리, 근거리의 설정변수 중 각각 5개, 25개의 케이스를 사용한 결과만 사용한 이유는 [Fig. III-14]과 같이 전체 케이스에 따른 분석결과의 유속변화를 비교했을 시 일정한 경향으로 지나친 과유속이 산정됨을 보이므로 본 논문에서는 제외하였다.

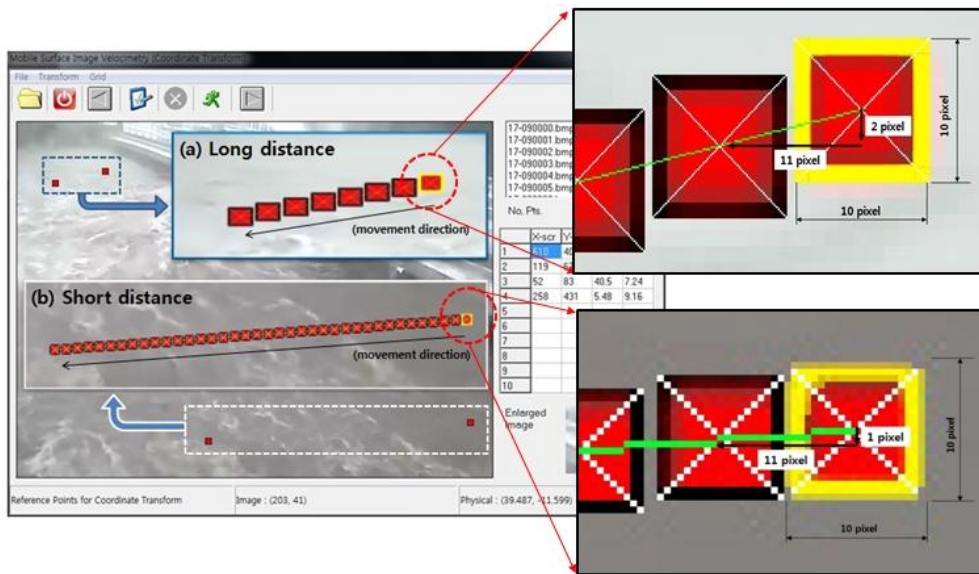
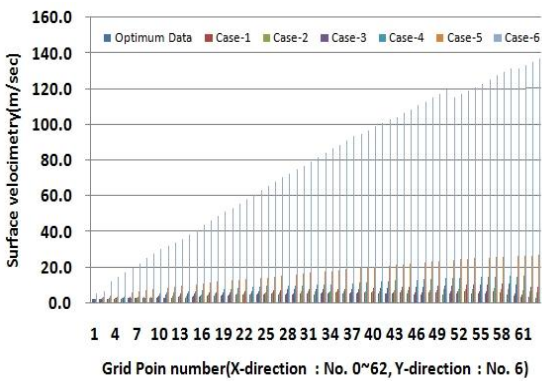


Fig. III-15. Pixel shift method; (a)Long-distance, (b)Short-distance

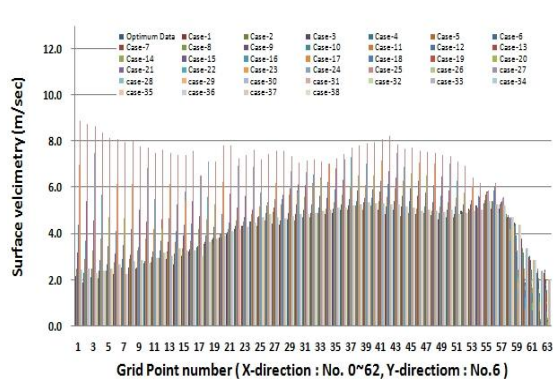
Table III-1. Data for the input of the reference point

Analysis criterion	Case-No.	Reference point(Image coordinate)			
		1(X-Yscr)	2(X-Yscr)	3(X-Yscr)	4(X-Yscr)
Long distance	Original Data	610-406	119-67	52-83	258-431
	case-1	610-406	108-69	52-83	258-431
	case-2	610-406	97-71	52-83	258-431
	case-3	610-406	86-73	52-83	258-431
	case-4	610-406	75-75	52-83	258-431
Short distance	case-5	610-406	64-77	52-83	258-431
	case-1	599-407	119-67	52-83	258-431
	case-2	586-408	119-67	52-83	258-431
	case-3	575-409	119-67	52-83	258-431
	case-4	564-410	119-67	52-83	258-431
	case-5	553-411	119-67	52-83	258-431
	case-6	542-412	119-67	52-83	258-431
case-7	531-413	119-67	52-83	258-431	

case-8	520-414	119-67	52-83	258-431
case-9	509-415	119-67	52-83	258-431
case-10	498-416	119-67	52-83	258-431
case-11	487-417	119-67	52-83	258-431
case-12	476-418	119-67	52-83	258-431
case-13	465-419	119-67	52-83	258-431
case-14	454-420	119-67	52-83	258-431
case-15	443-421	119-67	52-83	258-431
case-16	432-422	119-67	52-83	258-431
case-17	421-423	119-67	52-83	258-431
case-18	410-424	119-67	52-83	258-431
case-19	399-425	119-67	52-83	258-431
case-20	388-426	119-67	52-83	258-431
case-21	377-427	119-67	52-83	258-431
case-22	366-428	119-67	52-83	258-431
case-23	355-429	119-67	52-83	258-431
case-24	344-430	119-67	52-83	258-431
case-25	333-431	119-67	52-83	258-431
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



(a)



(b)

Fig. III-16. All cases velocity result; (a)Long-distance, (b)Short-distance

3.4.2 관측 자료

표면영상유속계(SIV)를 활용한 유속분석 과정에서 영상좌표계 변환시 참조점 설정에 따른 오차율 분석 및 개선을 위한 관측 자료는 2.3.2 관측 자료 내용과 동일하다.

4. 유출영상 이미지의 추적입자 상호상관계수 해석

표면영상유속계측법(SIV)은 영상분석기법의 일종으로 하천 표면의 유동을 영상저장장치로 기록하고 연속되는 이미지상의 입자이동을 계산하여 유속을 산정하는 방

법이다. 표면영상유속계에 의한 유속 측정은 캠코더와 같은 촬영장치와 분석 프로그램만을 이용하므로 매우 경제적이며, 기존 측정방법에 비해 관측자의 안전과 측정 시간을 약 1/10로 단축할 수 있는 장점이 있다. 또한 전체 흐름의 유속장을 가시화함으로써 하천 구조물 주변의 흐름변화를 파악하기 용이하다(Kim et al., 2008).

그러나 표면영상유속계를 활용한 유속분석과정에서 현장 상황에 따라 많은 오차 요인들이 있을 수 있기 때문에 계산한 유속 산정 결과를 그대로 사용하면 정확도가 낮아질 수 있다. 특히 야간 영상과 같은 영상의 화질이 떨어지는 경우에는 유속 산정 결과를 필터링해서 사용해야 한다. 이는 순간 유속장을 분석하는 과정에서 획득된 이미지에 따라 분석된 유속벡터가 평균 유속보다 과다하게 크거나 상관계수 값이 너무 작은 경우가 포함되기 때문이다.

4.1 연구 방법

2013년 5월 27일 외도천 하류부의 외도정수장 부근에서 집중호우에 의한 홍수 유출시 실시간 감시가 가능한 제주 수자원연구단 CCTV의 유출영상을 표면영상유속계(SIV)에 적용하였다. 특히 하천 유량 산정 시 적정 상관계수 이하의 유속측정 결과를 제거하여 유량 산정 결과를 개선하고자 한다. 분석방법은 표면영상유속계를 이용하여 주·야간 하천 유출영상을 분석하였으며, 각 측정마다 유속을 결정하기 위한 최대 상관계수를 계산 한 후 이를 일정 범위를 주어 필터링 하면서 동시에 초음파 도플러유속계(ADCP)로 측정한 유량과 Kalesto 유량산정 결과와 비교하였다. 또한, 이러한 결과를 이용하여 표면영상유속계의 유속 산정 필터링을 위한 적정 상관계수를 제시하여 표면영상유속계의 유속산정 정확도를 개선하였다.

4.2 관측 자료

4.2.1 유출영상자료 수집을 위한 CCTV 설치

2013년 5월 27일 집중호우에 의한 유출발생시 외도천 하류부의 외도정수장에서 27일 14시30분부터 28일 9시00분까지 유출영상을 기록하고 수집하였다. 외도정수장에 설치한 제주수자원연구단 CCTV는 Samsung SRD-440 기종이며 영상 녹화 시

30.303 fps로 영상이 저장된다. 카메라의 영상저장에 관한 제원은 표면영상유계의 유속 산정 시 주요 입력자료로 사용된다.

4.2.1 참조점 선정을 위한 거리측정

표면영상유속계(SIV)는 실제 하천의 3차원 공간영상을 2차원의 평면 상태로 변환하여 분석하므로 원근에 대한 왜곡을 보정하기 위해 [Fig. III-17]과 같이 현장의 참조점을 지정하고 측량을 실시하여 분석에 적용한다.



Fig. III-17. Reference point for Image coordinate transformation.

4.2.3 단면측량 자료

표면영상유속계(SIV)로 분석된 유속과 관측된 고정식 전자파표면유속계의 유속으로 유량을 산정하기 위해 관측지점의 단면 측량을 실시하였다. 비교를 위한 관측구간의 단면 자료는 SOKKIA사의 CX-105 모델을 이용하였으며 유량계산 시 중간단면법을 적용하여 유출량을 산정하였다. 관측대상 구간은 하폭 43.1 m이며 우안의 제방 상부에 Kalesto가 설치되어 좌안 방향으로 3.3 m위치의 수위와 유속을 관측하고 있다.

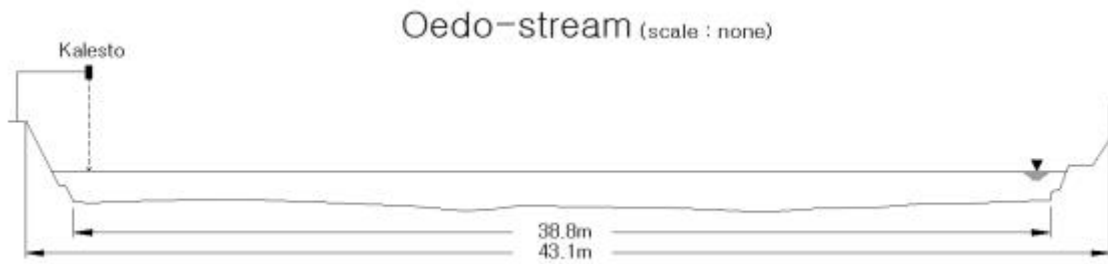


Fig. III-18. Cross sectional areas for discharge calculation.

4.2.4 다이버 수위계 자료

집중호우 및 태풍의 내습에 의한 홍수유출시 외도정수장 관측지점의 실시간 수위를 기록하기 위해 Schlumberger사의 압력식 수위계인 Diver를 설치하였다([Fig. III-19]). 유출량 계산 시 관측된 수위에 따라 AutoCAD를 활용하여 중간단면법으로 유출량을 산정하였다.



Fig. III-19. The position of DIVER-water gauge

4.2.5 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 관측 자료

본 연구에서는 ADCP를 활용하여 계측을 실시하는 과정에서 관측자의 안전과 효과적인 계측을 위해 [Fig. III-20]과 같이 하천을 횡단하는 로프를 설치하여 운영하였으며, 시간에 따라 왕복 4회 실시하여 자료를 수집하였다.



Fig. III-20. Discharge observation method using the ADCP

4.2.6 고정식 전자파표면유속계(Kalesto) 관측 자료

외도천 하류부의 외도정수장에는 실시간 수위·유속관측 기기인 고정식 전자파표면유속계(Kalesto; OTT Hydrometric)가 설치되어 운영되고 있다. 전자파표면유속계는 고주파(30 kHz ~ 300 GHz)의 극초단파를 수표면에 전송하여 반송되는 신호의 도플러 변위를 이용하여 표면의 유속을 산정하는 계측기기다(Yang et al., 2012). 고정식 전자파유속계의 장점은 주·야간 구분없이 비접촉식으로 실시간 유속을 측정하므로 관측자의 안전을 보장할 수 있으며 표면유속이 평시보다 클 경우 유용하게 사용된다. 하지만 하천단면의 단일지점의 유속과 전체 단면을 이용하여 유량을 산정하므로 과대 또는 과소 산정되어 오차가 발생할 수 있는 단점과 유출초기에 유속이 과대하게 산정되는 문제가 있다(Kim et al., 2013).

IV. 홍수유출량 관측방법 개선 및 고도화

1. 주·야간 홍수유출영상의 정확도 비교 및 분석

2013년 5월 27일 16시 30분부터 28일 16시 30분까지 전체 유출시간에서 주간(27일 16시30분~19시00분, 28일 6시30분~16시30분)과 야간(27일 19시30분~28일 6시00분)유출영상으로 구분하고 표면영상유속계(SIV)에 적용하여 유속망을 분석하였다. 동시에 동일지점의 Kalesto의 유속과 수위를 적용하여 산정된 유출량과 비교·분석하고 해당 구역의 강우-유출량 관계에 대한 유출특성을 해석하였다. 특히 야간유출영상의 문제점을 보완하기 위해 자연광에 가까운 조명 장치와 최저조도 카메라를 현장에 설치하여 야간영상의 문제점에 대한 개선방안을 제시하였다.

1.1 야간유출영상 분석을 위한 현장개선 효과

표면영상유속계(SIV)는 연속된 이미지 상의 추적입자 이동거리를 계산하여 분석 유속에 적용하므로 관측 현장의 특성을 고려한 분석에 적합한 양질의 유출영상을 수집하는 과정이 매우 중요하다.

[Fig. IV-1(a)]는 표면영상유속계(SIV) 관측지점(천미천 성읍교)의 현장개선 전의 유출영상을 나타낸다. 현장개선 전의 수집된 유출영상을 연속된 이미지로 분할하여 각개의 이미지의 특성을 분석한 결과 전체 144,000 Pixel를 나타냈으며, RGB 채널의 0~255까지 Level 분포 범위 중 어두운 계열의 색분포인 28~78의 Level(RGB 색상 코드 #1C0000~#4E0000) 범위에 집중적으로 분포된 유출영상이 수집되었다. 전체 255의 색상에서 평균 65.22를 나타내며 표준편차 43.49, 중간값이 47(RGB 색상 코드 #2F0000)를 나타냈다([Fig. IV-1(a')]).

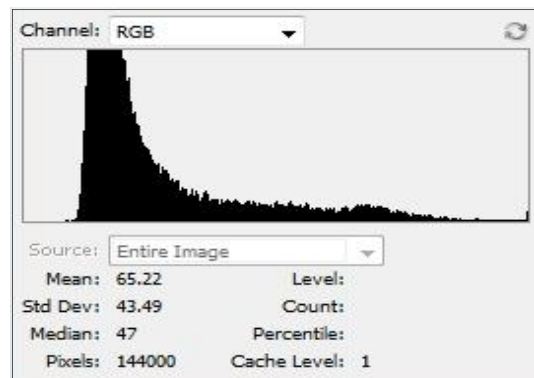
[Fig. IV-1(b)]는 1000W의 조명장치를 설치하여 표면영상유속계(SIV)에 적합한 유출영상을 이미지로 분할하여 각개의 이미지의 특성을 나타낸다. 현장개선을 통한 수집영상은 전체 144,000 Pixel를 나타내고 있으며, RGB Level의 분포 범위 중 41~47 Level(RGB 색상 코드 #290000~#2F0000) 범위가 높게 분포하지만 전체적으로 15~255 Level 까지 현장개선 전의 수집 유출이미지에 비해 전체적인 분포를 나타

났다. 또한 전체 255의 색상에서 평균 118.36를 나타내며 표준편차 67.98, 중간값이 107(RGB 색상 코드 #6B0000)를 나타냈다([Fig. IV-1(b')]).

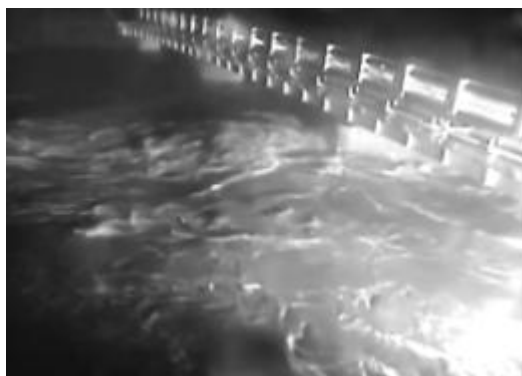
현장개선 전의 RGB 평균 분포 값 65.22에서 현장개선 후 RGB 평균 분포 값 118.36으로 확장된 결과는 1000W의 조명장치의 설치 효과가 강우에 따른 연속적인 유출량을 분석하는 과정에서 표면영상유속계(SIV)의 분석에 적합한 양질의 야간 유출영상을 활용할 수 있음을 나타낸다.



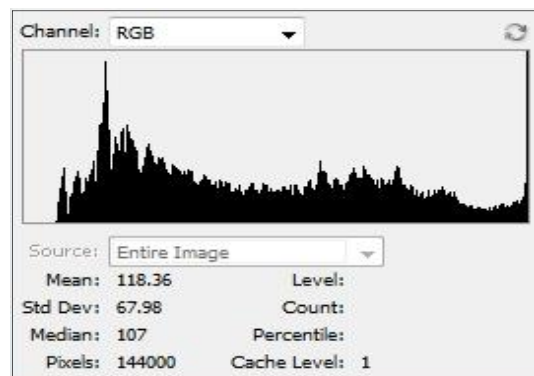
(a)



(a')



(b)



(b')

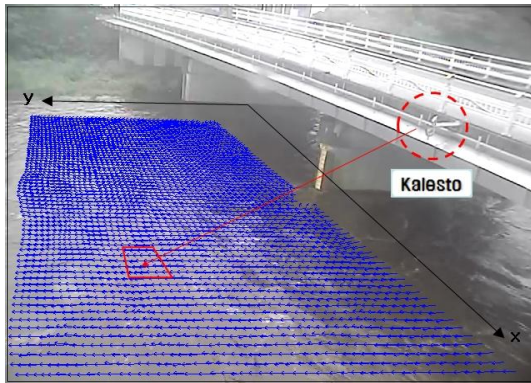
Fig. IV-1. Outflow image of night-time

1.2 주간유출영상의 유속망 분석

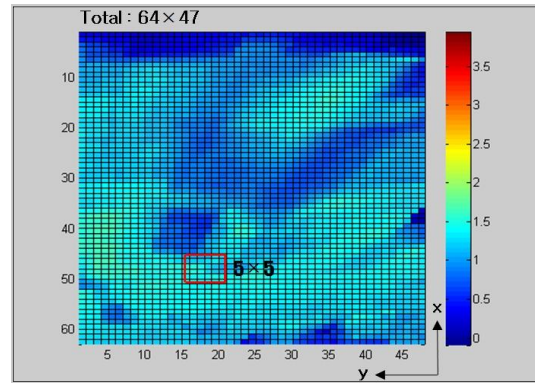
표면영상유속계(SIV)를 주간유출영상(27일 16시30분~19시00분, 28일 6시30분~16시30분)에 적용하여 유속망 분포를 분석하였다. [Fig. IV-2(a)~(h)]는 주간 유출영상자료를 표면영상유속계로 분석한 전체 유속망을 나타내며, [Fig. IV-2(a)'~(h)']

은 동시간에 각각의 유속 벡터를 Matlab에 적용하여 전체 유속을 가시화한 그래프를 나타낸다.

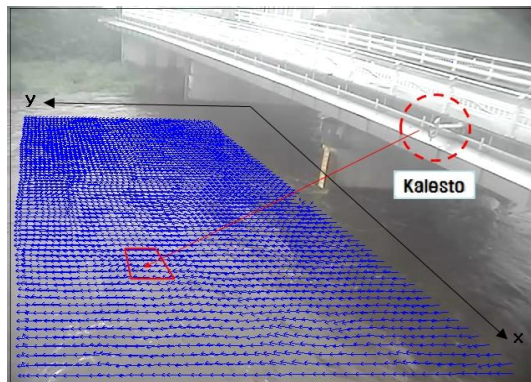
유출영상에 표면영상유속계를 적용하여 유속을 분석하는 과정에서 Kalesto의 관측 유속과 비교하기 위해 유속 격자망 설정을 63×47 으로 최대한 조밀하게 설정하여 [Fig. IV-2(a)~(h)], [Fig. IV-2(a)~(h)]와 같이 전체 유속망을 분석하였다. 유속 비교는 Kalesto가 관측하는 지점을 설정하는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 표면영상유속계로 분석된 유속망 내에서 Kalesto가 관측하는 지점을 중심으로 5×5 의 격자망 내의 유속을 평균하여 비교하였다.



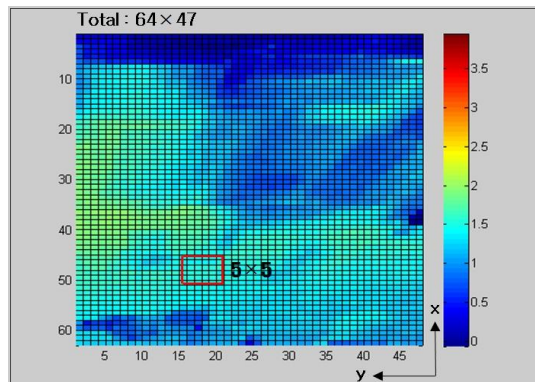
(a)



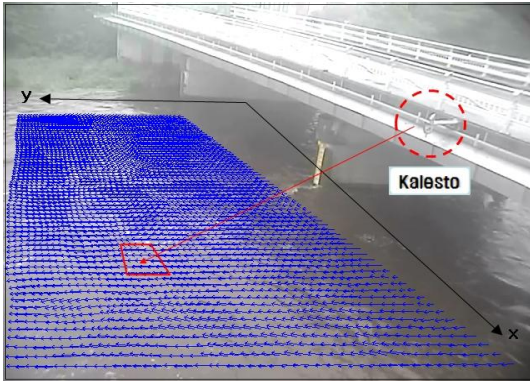
(a')



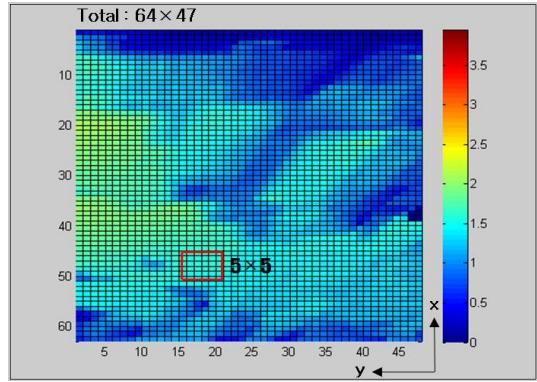
(b)



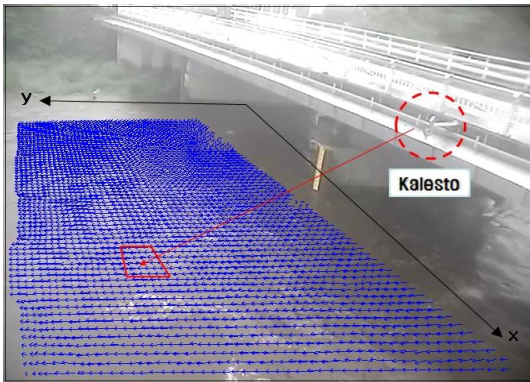
(b')



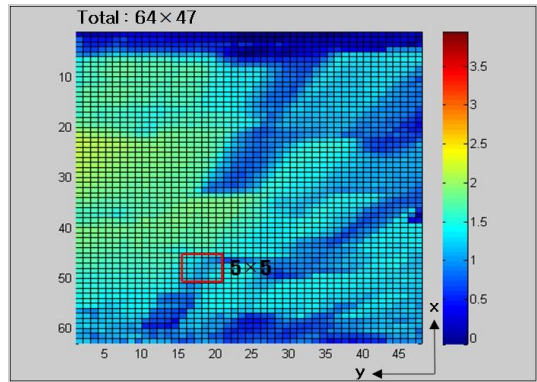
(c)



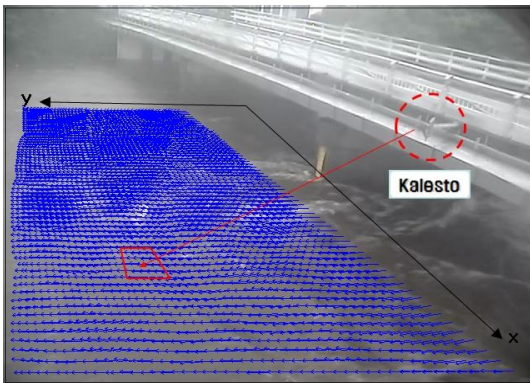
(c')



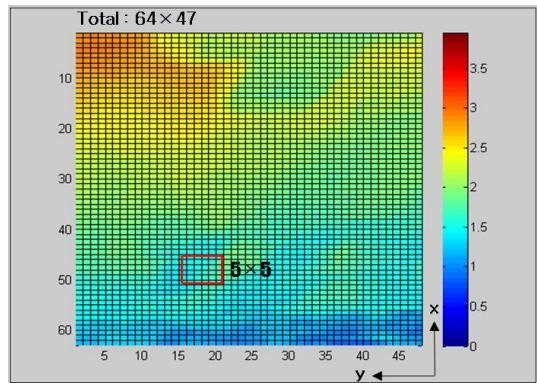
(d)



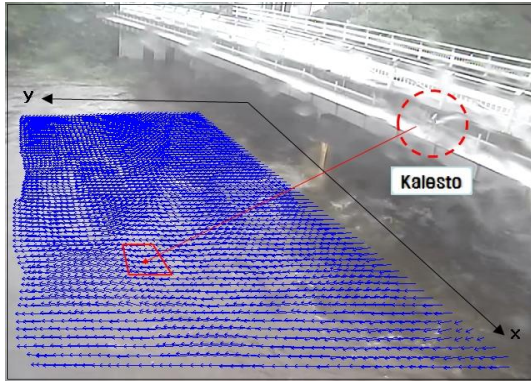
(d')



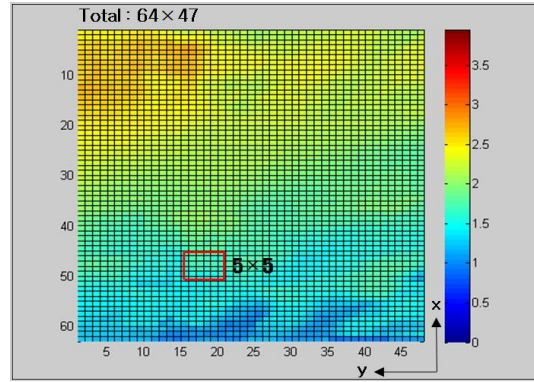
(e)



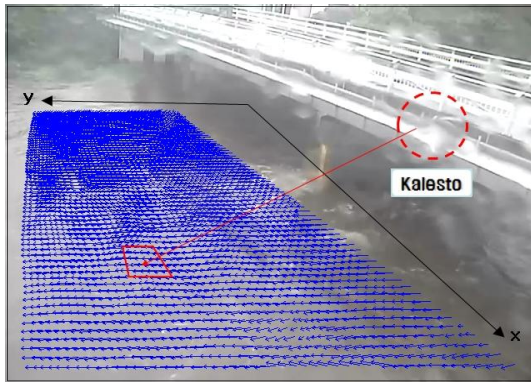
(e')



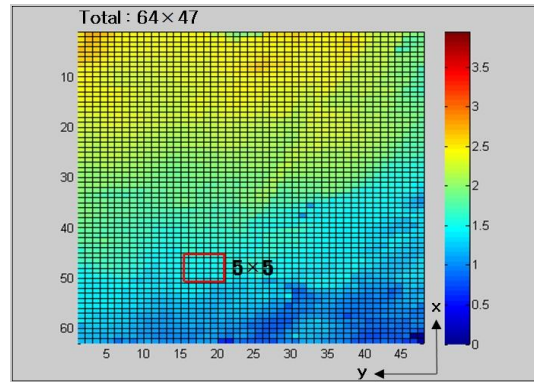
(f)



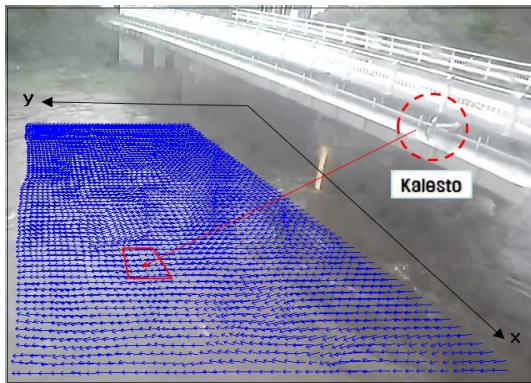
(f')



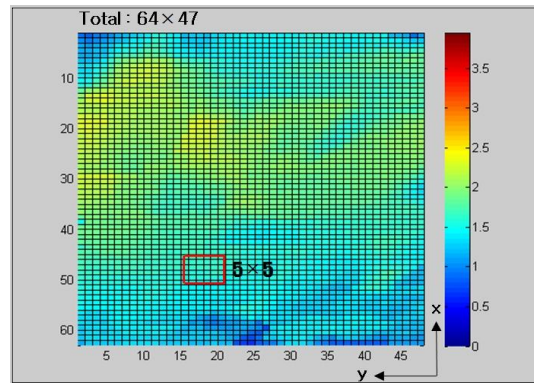
(g)



(g')



(h)

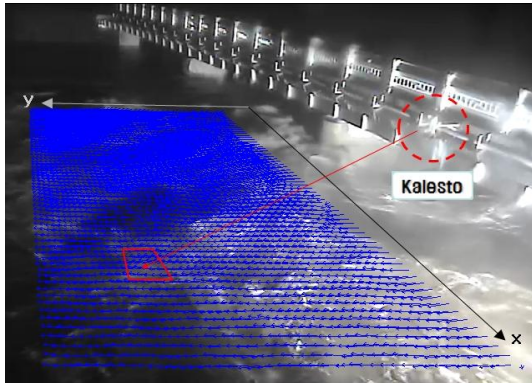


(h')

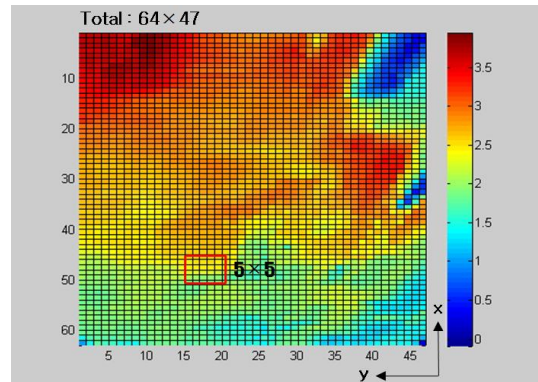
Fig. IV-2. Analysis result of day-time flow image of the SIV; a~h) Overall flow network analyzed with the SIV; a'~h') Visualized data of each flow velocimetry in the overall flow network for the comparison of the SIV and Kalesto

1.3 야간 유출영상의 유속망 분석

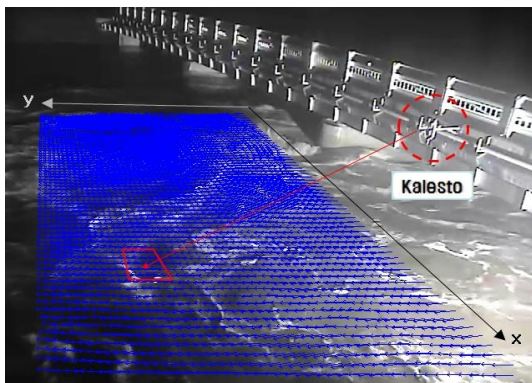
표면영상유속계(SIV)를 야간유출영상(27일 19시30분~28일 6시00분)에 적용하여 유속망 분포를 분석하였다. 야간유출영상을 수집하는 과정에서 표면영상유속분석에 적합한 양질의 영상을 획득하지 못하는 현장의 단점을 보완하기 위해 150 lux이상의 조명효과를 얻을 수 있는 1000 W의 조명 장치를 설치하여 유출영상을 기록하였다.



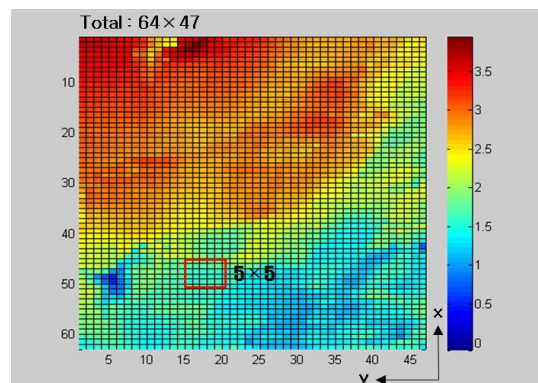
(a)



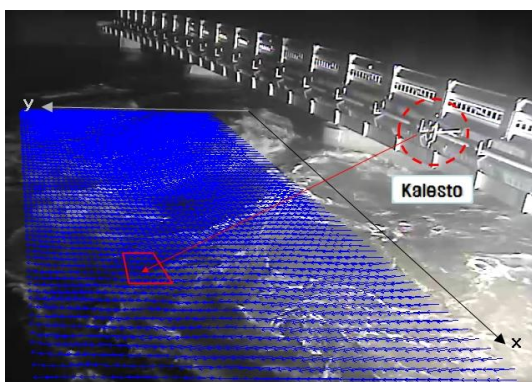
(a')



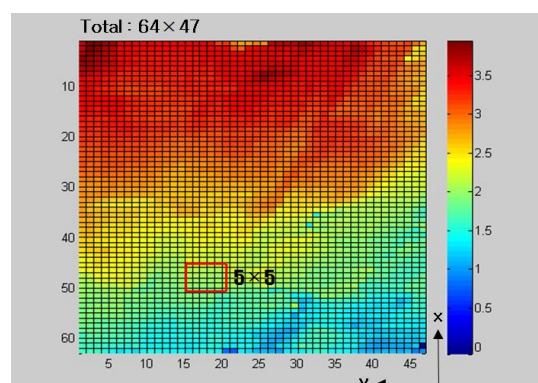
(b)



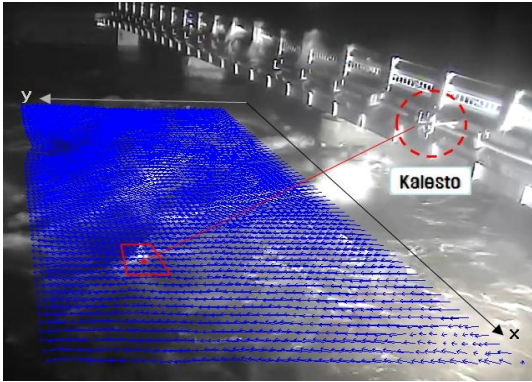
(b')



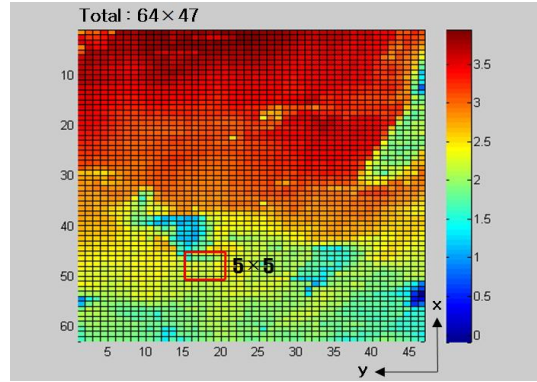
(c)



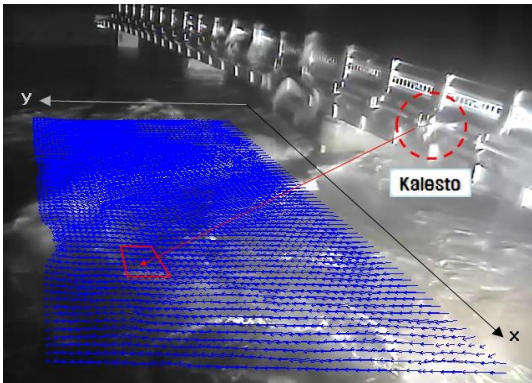
(c')



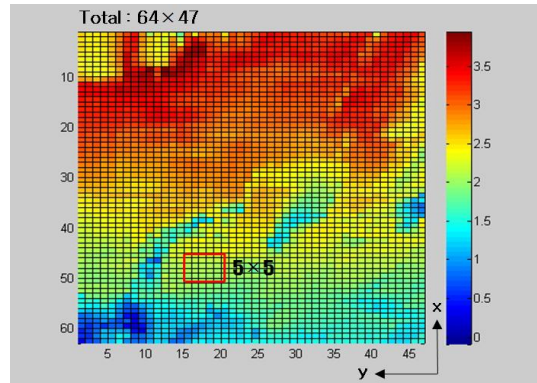
(d)



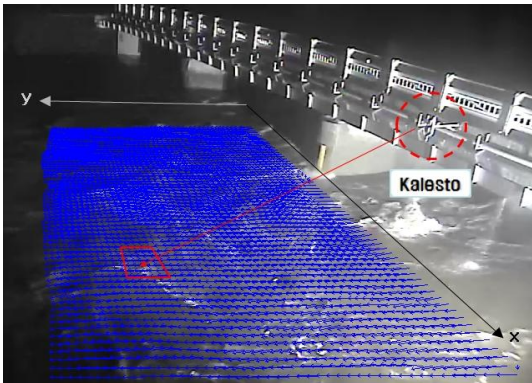
(d')



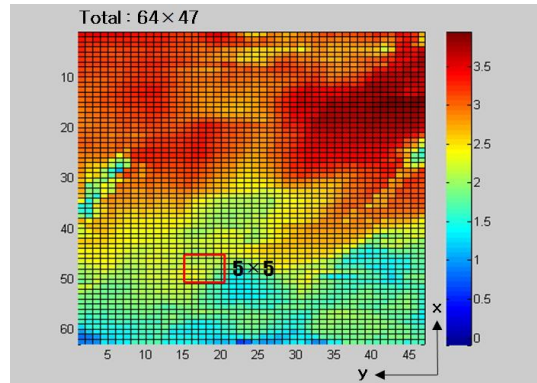
(e)



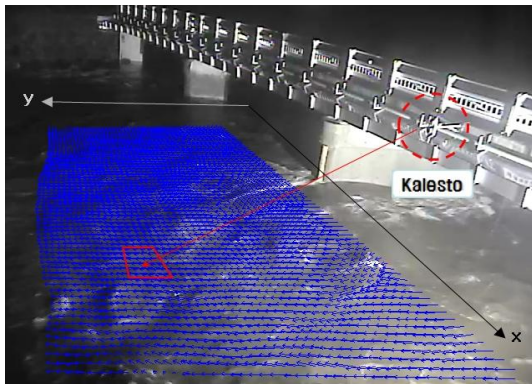
(e')



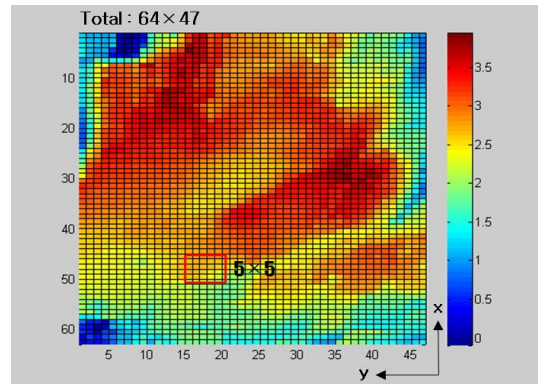
(f)



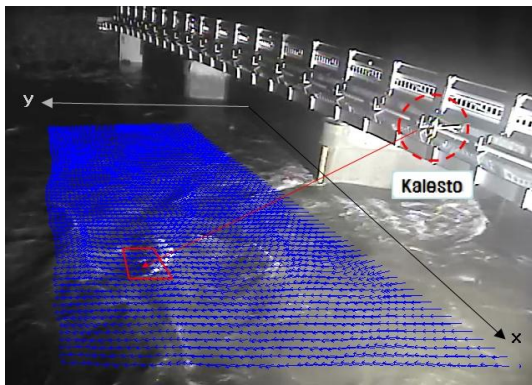
(f')



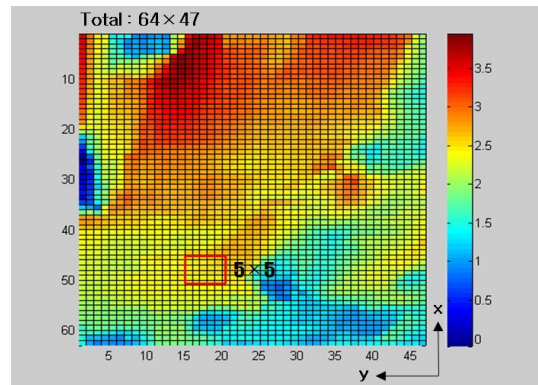
(g)



(g')



(h)



(h')

Fig. IV-3. Analysis result of night-time flow image of the SIV; a~h) Overall flow network analyzed with the SIV; a'~h') Visualized data of each flow velocimetry in the overall flow network for the comparison of the SIV and Kalesto

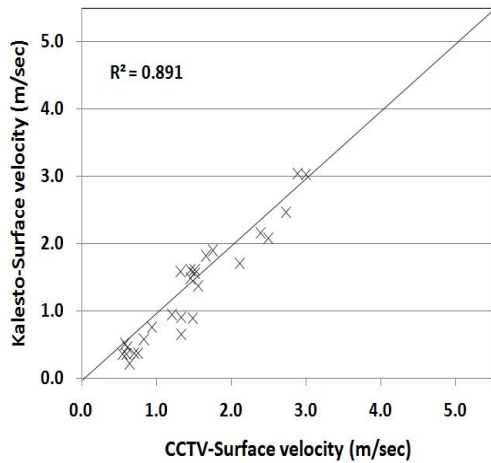
1.4 유속벡터의 정확도 비교 및 분석

표면영상유속계(SIV)와 Kalesto로 관측한 표면유속의 비교결과는 [Table IV-1]과 같으며, 주간유출영상의 분석 결과는 결정계수 R^2 가 0.891, 야간유출영상은 결정계수 R^2 가 0.848의 상관성을 나타냈다([Fig. IV-4]).

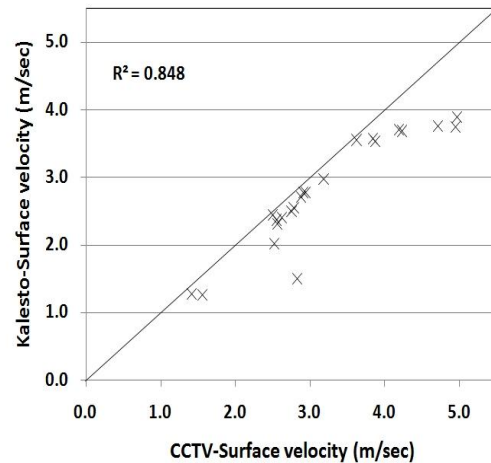
Table IV-1. Comparison of surface velocities

Time	Velocimetry(m/sec)		Comparison of vector-line		Remark
	CCTV (5×5 Average)	Kalesto	MIN	MAX	
16:30:00 PM	1.59	1.32	1.15	2.34	Day time
17:00:00 PM	1.60	1.45	1.04	2.37	
17:30:00 PM	1.89	1.75	1.04	2.48	

18:00:00 PM	1.62	1.52	0.71	2.21	
18:30:00 PM	1.57	1.52	0.61	2.25	
19:00:00 PM	1.48	1.45	0.95	2.89	
19:30:00 PM	1.26	1.56	0.48	2.74	
20:00:00 PM	1.28	1.41	0.75	2.29	
20:30:00 PM	1.50	2.16	1.61	2.97	
21:00:00 PM	3.57	3.84	2.11	4.92	
21:30:00 PM	3.70	4.19	2.59	4.49	
22:00:00 PM	3.75	4.95	2.52	4.48	
22:30:00 PM	3.89	4.97	3.04	4.93	
23:00:00 PM	3.75	4.71	2.16	4.69	
23:30:00 PM	3.67	4.23	2.95	4.00	
00:00:00 AM	3.54	3.87	1.95	4.29	
00:30:00 AM	3.54	3.63	2.70	4.29	Night
01:00:00 AM	2.97	3.19	2.02	3.68	time
01:30:00 AM	2.77	2.94	1.72	3.80	
02:00:00 AM	2.50	2.76	1.58	3.34	
02:30:00 AM	2.40	2.62	1.72	3.06	
03:00:00 AM	2.36	2.55	1.43	3.12	
03:30:00 AM	2.02	2.52	1.20	3.04	
04:00:00 AM	2.45	2.5	1.50	3.09	
04:30:00 AM	2.32	2.56	1.33	3.11	
05:00:00 AM	2.55	2.79	1.56	3.43	
05:30:00 AM	2.71	2.88	1.65	3.21	
06:00:00 AM	2.77	2.91	1.96	3.33	
06:30:00 AM	3.05	2.88	2.25	3.99	
07:00:00 AM	3.04	3.00	1.66	3.51	
07:30:00 AM	2.47	2.73	1.53	3.03	
08:00:00 AM	2.09	2.49	1.29	2.66	
08:30:00 AM	2.17	2.39	1.65	2.81	
09:00:00 AM	1.71	2.11	1.28	2.25	
09:30:00 AM	1.81	1.66	1.25	2.40	
10:00:00 AM	1.38	1.56	0.61	2.04	
10:30:00 AM	0.91	1.33	0.33	1.37	
11:00:00 AM	0.90	1.48	0.66	1.24	Day
11:30:00 AM	0.66	1.33	0.22	1.07	time
12:00:00 PM	0.95	1.21	0.59	1.20	
12:30:00 PM	0.77	0.94	0.36	1.07	
13:00:00 PM	0.57	0.84	0.22	1.13	
13:30:00 PM	0.39	0.75	0.19	1.07	
14:00:00 PM	0.45	0.61	0.29	0.73	
14:30:00 PM	0.38	0.70	0.16	0.66	
15:00:00 PM	0.36	0.55	0.26	0.57	
15:30:00 PM	0.51	0.58	0.39	0.99	
16:00:00 PM	0.36	0.60	0.15	0.89	
16:30:00 PM	0.21	0.64	0.11	0.71	



(a) day-time



(b) night-time

Fig. IV-4. One-to-one relationships of velocity measurement between the Kalesto and the CCTV system(SIV)

2. 영상좌표계 변환시 참조점 설정에 따른 오차율 분석 및 개선

2.1 원거리 및 근거리 변화에 의한 실거리 변화율 계산

[Fig. IV-5]은 연구대상 구역인 천미천 성읍교 부근의 유출영상을 기준으로 측량된 참조점 실제좌표 입력값을 나타낸다. [Fig. IV-5]과 같이 원거리와 근거리의 변수를 x축 방향과 y축 방향으로 pixel 이동에 따른 실거리의 변화율을 계산한다.

참조점 입력과정에서 원거리 입력값의 X축 방향으로 2 pixel 이동함에 따라 실거리 오차는 0.42 m가 발생하고, Y축 방향으로 11 pixel 이동함에 따라 0.94 m의 실거리 오차를 발생한다([Table IV-9]). 근거리의 참조점 입력과정에서 X축 방향으로 1 pixel 이동함에 따라 실거리 오차는 0.02 m가 발생하고, Y축 방향으로 11 pixel 이동함에 따라 0.28 m 씩 실제 거리의 오차율이 발생한다([Table IV-2]).

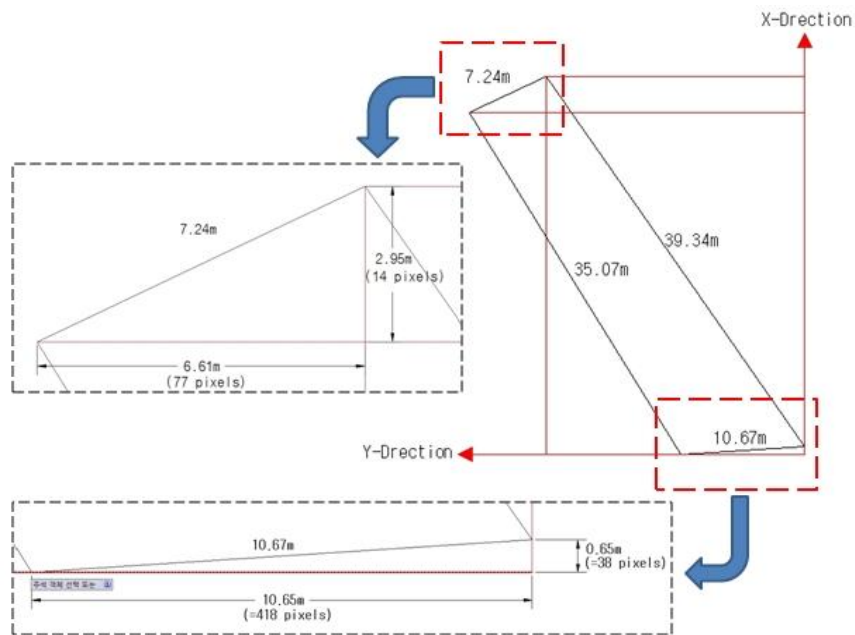


Fig. IV-5. The actual distance rate of change calculated by the reference point changes

Table IV-2. Changes in the actual distance by the long-distance pixels movement

X-direction				Y-direction			
Total pixel count (pixels) ①	Actual distance (m) ②	Pixel shift variable (pixels) ③	Rate of change (m) (②×③)/①	Total pixel count (pixels) ①	Actual distance (m) ②	Pixel shift variable (pixels) ③	Rate of change (m) (②×③)/①
14	2.95	2	0.42	77	6.61	11	0.94
		4	0.84			22	1.89
		6	1.26			33	2.83
		8	1.69			44	3.78
		10	2.11			55	4.72
		12	2.53			66	5.67
		(14)	(2.95)			(77)	(6.61)

Table IV-3. Changes in the actual distance by the short-distance pixels movement

X-direction				Y-direction			
Total pixel count (pixels) ①	Actual distance (m) ②	Pixel shift variable (pixels) ③	Rate of change (m) (②×③)/①	Total pixel count (pixels) ①	Actual distance (m) ②	Pixel shift variable (pixels) ③	Rate of change (m) (②×③)/①

		1	0.02			11	0.28
		2	0.03			22	0.56
		3	0.05			33	0.84
		4	0.07			44	1.12
		5	0.09			55	1.40
		6	0.10			66	1.68
		7	0.12			77	1.96
		8	0.14			88	2.24
		9	0.15			99	2.52
		10	0.17			110	2.80
		11	0.19			121	3.08
		12	0.21			132	3.36
		13	0.22			143	3.64
		14	0.24			154	3.92
		15	0.26			165	4.20
		16	0.27			176	4.48
		17	0.29			187	4.76
		18	0.31			198	5.04
38	0.65	19	0.33	418	10.65	209	5.33
		20	0.34			220	5.61
		21	0.36			231	5.89
		22	0.38			242	6.17
		23	0.39			253	6.45
		24	0.41			264	6.73
		25	0.43			275	7.01
		26	0.44			286	7.29
		27	0.46			297	7.57
		28	0.48			308	7.85
		29	0.50			319	8.13
		30	0.51			330	8.41
		31	0.53			341	8.69
		32	0.55			352	8.97
		33	0.56			363	9.25
		34	0.58			374	9.53
		35	0.60			385	9.81
		36	0.62			396	10.09
		37	0.63			407	10.37
		(38)	(0.65)			(418)	(10.65)

2.2 표면영상유속계(SIV)와 Kalesto의 산정유량 비교

표면영상유속계를 활용하여 유출영상을 분석하는 과정에서 [Fig. IV-9]와 같이 유속분석 범위를 63×10 으로 설정하였다. 격자망의 설정 기준은 유출영상의 흐름방향을 기준으로 X축 방향 63개의 격자망을 설정하여 최대한 조밀하게 구성하고 Y축 흐름방향의 유속을 산정하였으며, Y축으로 10의 격자망을 구성하여 유량계산에 적용되는 유속벡터라인의 전후를 비교하였다. [Fig. IV-9(a)]와 같이 6번째의 붉은색 유속벡터 라인을 단면적에 적용하여 중간단면법으로 유량을 산정하였으며, 참조점

설정변수에 따른 유속결과를 적용하는 라인으로 구분하였다. [Fig. IV-9(b)]는 표면 영상유속계의 분석결과 설정된 격자망을 기준으로 분석된 전체 유속망을 나타낸다. 또한 격자망의 6×8위치는 단일지점을 관측하는 Kalesto의 관측지점을 나타낸다.

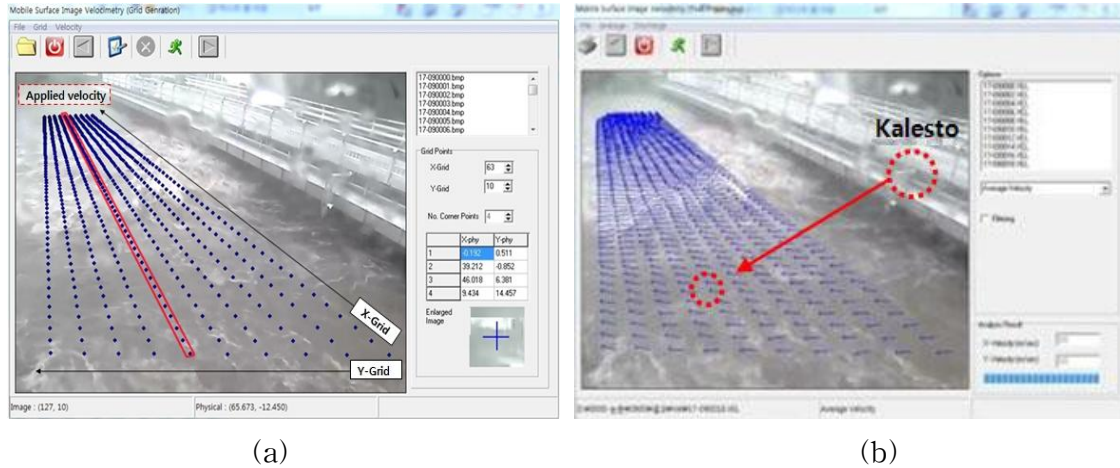


Fig. IV-6. Analysis process of surface image velocimeter(SIV); (a)grid mesh setting, (b)results of the flow velocity vector

[Table IV-4]는 2012년 9월 17일 제16호 태풍 산바의 내습에 의한 제주도 천미천의 유출발생 시 최대 수위 3.94 m를 기록한 9시 00분의 하천단면적과 표면영상유속계로 분석한 63개의 유속을 적용하여 유량을 산정한 결과를 나타낸다.

표면영상유속계(SIV)로 분석된 표면유속에 표면유속-수심평균유속환산계수 0.85를 적용하여 동일시간의 수위에 따른 면적을 적용한 중간단면법으로 유량을 산정하였으며 산정된 유량은 $413.29 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 나타났다. [Table IV-4]에서 1번과 63번의 유속벡터에 적용되는 단면적이 다른 유속벡터 적용 단면적과 차이가 나는 이유는 수집된 유출영상의 분석 화면에서 단면의 손실되는 부분을 포함한 단면을 적용하였기 때문이다.

동일지점의 단일구간 유속을 관측하는 칼레스토(Kalesto)의 유량산정 결과는 관측 표면유속 $4.20 \text{ m}/\text{sec}$ 에 표면유속-수심평균유속환산계수인 0.85를 적용하고 동일시간의 전체 하천단면적인 120.79 m^2 에 적용하여 유출량이 $431.22 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 산정되었다.

표면영상유속계(SIV)의 다지점 유속벡터를 적용하여 유량을 산정한 결과와 Kalesto의 단일지점 유속과 전체 면적을 적용하여 산정한 유량은 $17.93 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 차이를 나타낸다.

각각의 하천에 유출특성에 따라 표면유속-수심평균유속환산계수는 다른 계수가 적용되는 것이 타당하지만 본 연구의 유량산정과정에서는 기존의 0.85를 사용하였으며 향후 관측하천에 따른 표면유속-수심평균유속환산계수에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 제주도는 댐 방류량과 같은 유출량의 참값이 존재하지 않기 때문에 이 같은 결과는 단일지점의 유속을 관측하는 Kalesto의 관측결과만 의존하여 제주도의 유출량을 산정하기에는 문제가 있다고 판단된다.

Table IV-4. Velocity vector and discharge calculation results(SIV)

Grid mesh Number	Surface velocity (m/sec) *0.85	Stream Section Area (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Grid mesh Number	Surface velocity (m/sec) *0.85	Stream Section Area (m ²)	Discharge (m ³ /sec)
1	1.71	4.23	7.22	33	3.97	0.91	3.61
		0.86	1.47			0.91	3.61
2	1.58	0.86	1.36	34	4.06	0.91	3.69
		0.86	1.36			0.91	3.69
3	1.62	0.86	1.39	35	4.12	0.91	3.75
		0.86	1.39			0.91	3.75
4	1.70	0.86	1.46	36	4.19	0.91	3.81
		0.86	1.46			0.91	3.81
5	1.54	0.85	1.31	37	4.16	0.91	3.79
		0.85	1.31			0.91	3.79
6	1.89	0.85	1.61	38	4.18	0.91	3.80
		0.85	1.61			0.91	3.80
7	1.98	0.84	1.66	39	4.14	0.91	3.76
		0.84	1.66			0.91	3.76
8	1.90	0.84	1.59	40	4.14	0.91	3.77
		0.83	1.57			0.91	3.77
9	2.09	0.83	1.73	41	4.13	0.91	3.76
		0.82	1.71			0.91	3.76
10	2.25	0.82	1.85	42	4.12	0.91	3.75
		0.81	1.83			0.91	3.75
11	2.27	0.81	1.84	43	4.02	0.92	3.70
		0.80	1.82			0.92	3.70
12	2.22	0.80	1.78	44	3.98	0.92	3.66
		0.80	1.78			0.92	3.66
13	2.40	0.79	1.90	45	4.02	0.92	3.70
		0.79	1.90			0.93	3.74
14	2.16	0.79	1.71	46	3.95	0.93	3.67
		0.78	1.69			0.93	3.67
15	2.61	0.81	2.11	47	3.94	0.95	3.75
		0.75	1.96			0.96	3.79
16	2.73	0.77	2.10	48	4.05	0.97	3.93
		0.78	2.13			0.98	3.97
17	2.87	0.80	2.30	49	3.90	0.99	3.86
		0.82	2.36			1.01	3.94
18	3.00	0.84	2.52	50	3.94	1.02	4.02
		0.86	2.58			1.02	4.02

19	3.10	0.87	2.70	51	4.00	1.02	4.08
		0.88	2.73			1.02	4.08
20	3.21	0.89	2.86	52	4.23	1.02	4.32
		0.90	2.89			1.02	4.32
21	3.35	0.89	2.98	53	4.29	1.02	4.38
		0.87	2.92			1.02	4.38
22	3.54	0.85	3.01	54	4.41	1.02	4.50
		0.85	3.01			1.02	4.50
23	3.63	0.85	3.08	55	4.47	1.02	4.56
		0.85	3.08			1.00	4.47
24	3.51	0.86	3.02	56	4.31	0.99	4.27
		0.86	3.02			1.02	4.40
25	3.50	0.88	3.08	57	4.26	1.04	4.43
		0.89	3.12			1.04	4.43
26	3.63	0.90	3.27	58	3.84	1.05	4.04
		0.90	3.27			1.05	4.04
27	3.69	0.90	3.32	59	3.59	1.05	3.77
		0.90	3.32			1.05	3.77
28	3.71	0.92	3.34	60	3.16	1.05	3.32
		0.91	3.38			1.03	3.25
29	3.77	0.92	3.47	61	2.53	1.00	2.53
		0.93	3.51			0.97	2.46
30	3.83	0.93	3.56	62	1.90	0.94	1.78
		0.93	3.56			0.93	1.76
31	3.89	0.92	3.58	63	1.95	0.94	1.84
		0.92	3.58			12.79	24.98
32	3.95	0.91	3.59	Total discharge		413.29m³/s	
		0.91	3.59				

2.3 참조점 변화에 의한 유속과 유량의 변동

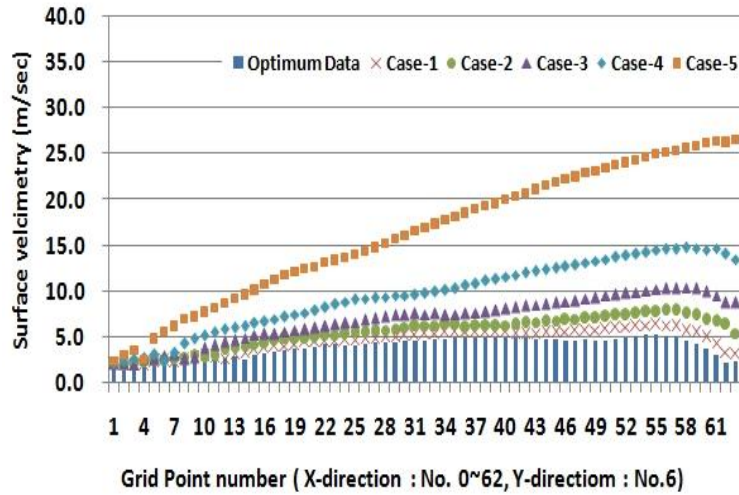
[Fig. IV-10]는 원거리 및 근거리의 참조점 변화에 따른 유속변화를 나타낸다. 그래프의 x축은 유속분석에 적용된 63개의 격자망을 나타내며, y축은 각각 격자망의 유속을 나타낸다. 막대그래프는 정확한 참조점 입력에 의한 유속 산정 결과를 나타내며 각각의 케이스별로 분석된 유속 비교 시 기준이 된다. 또한 각각의 케이스별로 유속을 산정한 결과를 표식을 통해 구분하였다.

[Fig. IV-10(a)]는 카메라의 원근을 기준으로 원거리의 참조점을 5개의 케이스로 구분하여 산정한 유속결과를 나타내며, [Fig. IV-10(b)~(f)]는 근거리의 참조점을 25개의 케이스로 구분하여 산정한 결과를 나타낸다.

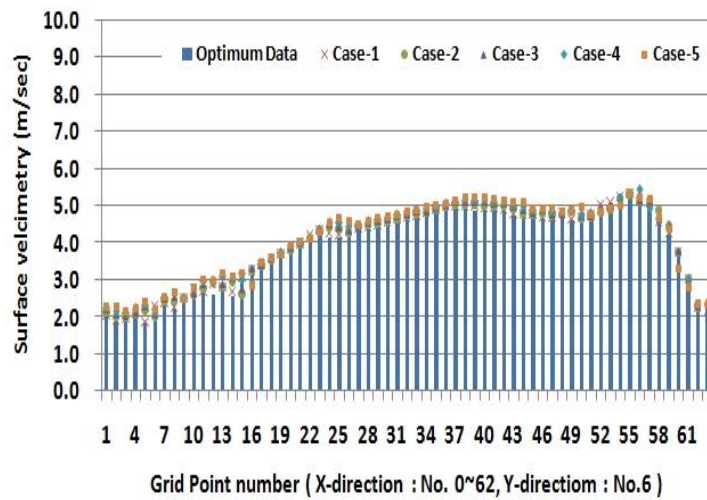
원거리 참조점 변경에 의한 [Fig. IV-10(a)]의 분석 결과를 보면 Case-1부터 Case-5까지 유속백터가 근거리 참조점 변경에 비해 오차율이 16.77~317.69%로 큰 변동 폭을 나타낸다. 이 같은 유속백터의 변동 폭은 유량 계산 시 최소 16.86%에서

최대 338.63%로 과대 산정되는 문제가 발생 할 수 있다.

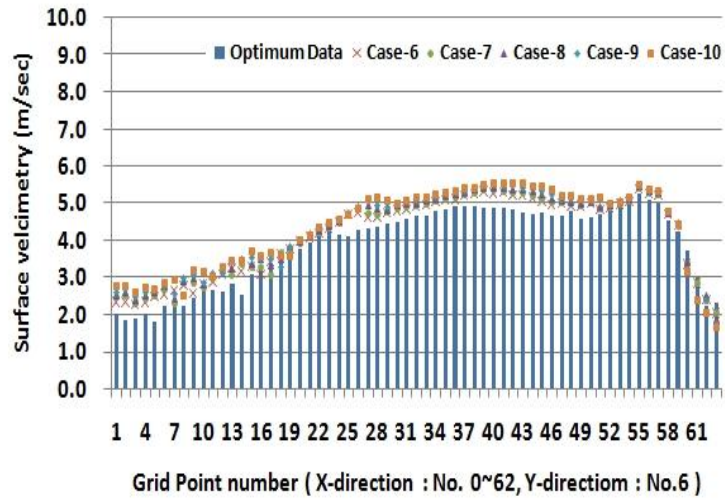
근거리 참조점 변경에 의한 [Fig. IV-10(b)~(f)]의 분석 결과를 보면 Case-1부터 Case-25까지 유속벡터가 최소 1.10%에서 최대 74.47%의 변동 폭을 나타냈으며, 유량환산 시 최소 0.82%에서 최대 59.28%의 변동 폭을 나타냈다([Table IV-8]).



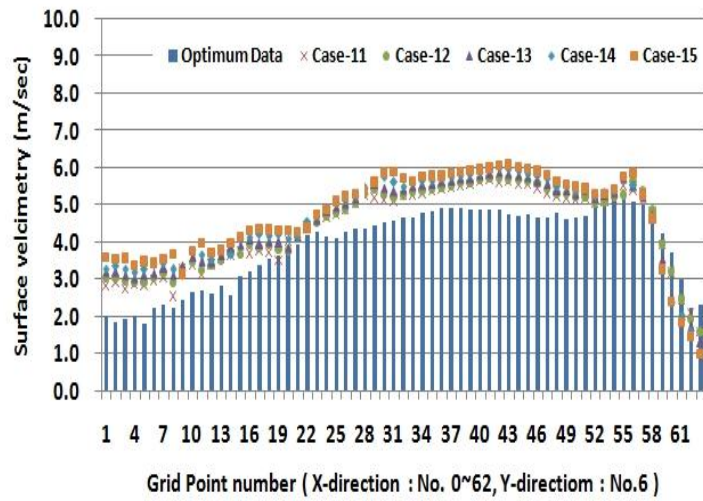
(a)



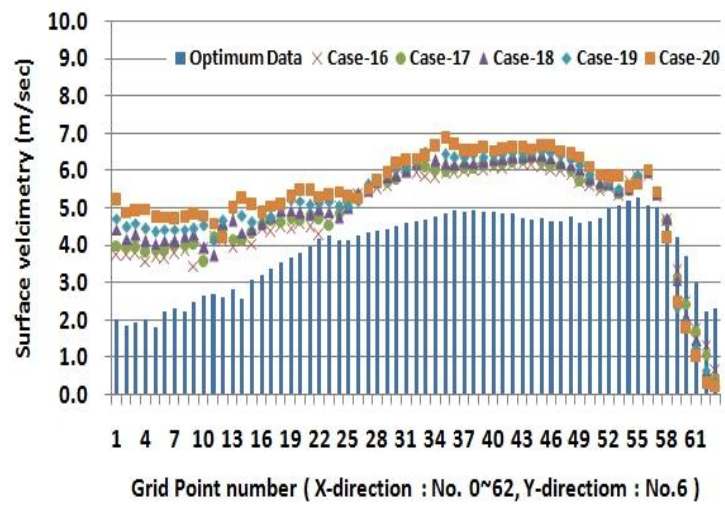
(b)



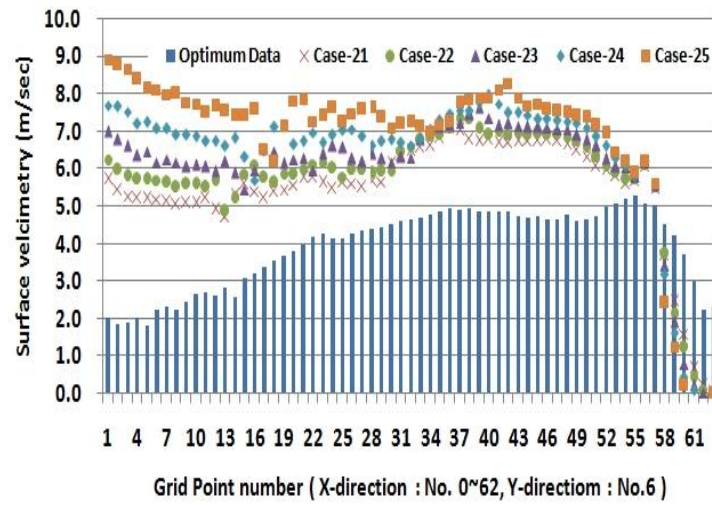
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. IV-7. Velocity changes due to changes in the reference point.

Table IV-5. Result error rate of the surface velocity and discharge

Analysis criterion	Case-No.	Discharge (m ³ /sec)	Mean surface velocity (m/sec)	Error factor (%)	
				discharge	surface velocity
	Original Data	413.29	3.90	-	-
Long distance	case-1	482.95	4.55	16.86	16.77
	case-2	594.28	5.49	43.79	40.71
	case-3	763.76	6.95	84.80	78.14
	case-4	1059.40	9.61	156.33	146.52
	case-5	1812.83	16.29	338.63	317.69
Short distance	case-1	416.66	3.94	0.82	1.10
	case-2	420.62	3.97	1.77	1.70
	case-3	426.37	4.02	3.16	3.00
	case-4	427.56	4.04	3.45	3.63
	case-5	431.06	4.08	4.30	4.57
	case-6	432.32	4.13	4.61	5.89
	case-7	436.47	4.17	5.61	6.94
	case-8	439.81	4.23	6.42	8.42
	case-9	442.17	4.27	6.99	9.42
	case-10	446.31	4.32	7.99	10.72
	case-11	450.51	4.38	9.01	12.25
	case-12	456.89	4.44	10.55	13.92
	case-13	461.88	4.53	11.76	16.17
case-14	466.59	4.61	12.90	18.20	
case-15	474.06	4.70	14.70	20.43	
case-16	481.01	4.81	16.38	23.32	
case-17	486.99	4.90	17.83	25.26	
case-18	496.34	5.01	20.10	28.40	

case-19	507.57	5.14	22.81	31.89
case-20	522.46	5.30	26.41	35.94
case-21	536.56	5.47	29.83	40.30
case-22	556.99	5.71	34.77	46.45
case-23	580.92	5.98	40.56	53.41
case-24	615.85	6.36	49.01	63.16
case-25	658.27	6.80	59.28	74.47
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

3. 연속된 유출영상 이미지의 상호상관계수 분석

3.1 주간 영상을 이용한 유속분석

[Fig. IV-8]는 2013년 5월 27일 17시 00분 집중호우에 의한 유출발생시 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 사용하여 관측단면의 유량을 관측한 결과를 나타낸다. 관측된 결과를 보면 좌안부터 우안까지 118셀로 관측되었으며 깊이에 따른 유속을 나타낸다. 전체 유량은 $36.55 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 관측되었으며, 유속의 분포는 최소 0.13 m/sec 부터 최대 1.75 m/sec 로 나타났다. 또한 주로 우안 방향으로 평균 약 1.50 m/sec 의 유속이 분포되어 한쪽으로 편중된 흐름을 나타낸다.

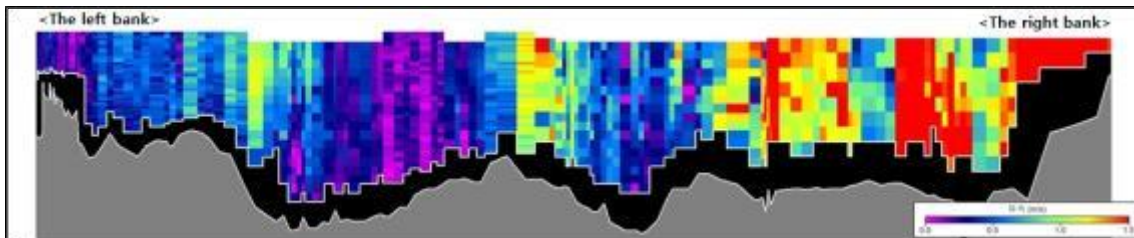


Fig. IV-8. Discharge observation results of ADCP

표면영상유속계(SIV)는 [Fig. IV-9]와 같이 하천 단면을 기준으로 59×3 의 격자망을 구성하여 표면유속을 분석하였다. 동시에 ADCP로 관측된 118셀의 표면유속과 단일지점을 관측하는 Kalesto의 관측유속 비교·분석하였다. 동시간에 산정된 유속 결과는 최소 0.17 m/sec 부터 최대 2.01 m/sec 까지 산정되었으며, 유속 분포는 ADCP의 관측결과처럼 평균 1.71 m/sec 의 유속이 우안 방향으로 편중되는 흐름이 관측되었다.

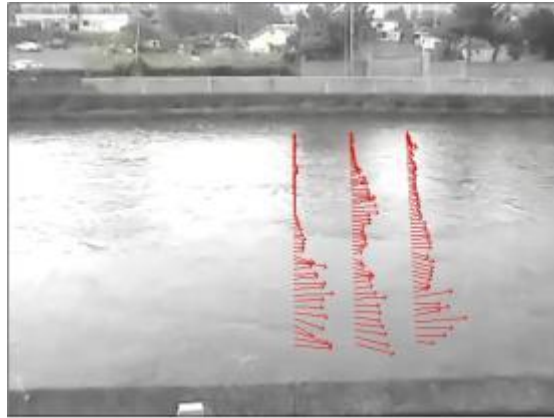


Fig. IV-9. Result of flow velocity vector for SIV(day-time).

[Table IV-6]은 각각의 관측장비의 결과를 비교하기 위해 188셀로 관측된 ADCP의 표면유속과 표면영상유속계(SIV)로 분석된 59개의 표면유속벡터, 그리고 Kalesto는 하천단면에서 1지점의 유속을 나타낸다. 표면영상유속계로 분석된 주간유출영상의 상관계수 범위를 보면 0.6~0.7범위에 해당하는 유속이 전체 59개의 유속벡터 중 6.8%로 나타났으며, 0.7~0.8범위가 13.6%, 0.8~0.9범위가 18.6%, 0.9~1.0범위가 61.0%를 차지한다. 전체적으로 상관계수의 낮은 범위가 높은 범위에 비해 적게 분석된것을 비교할 수 있다. 이와 같이 상관계수의 분포 범위가 0.8~1.0에서 약 80%를 차지하는 결과는 외도정수장에서 획득된 주간 유출영상이 표면영상유속계에 적용되는 분석자료로 적합함을 의미한다.

Table IV-6. Comparison of surface velocities among observation devices (day-time)

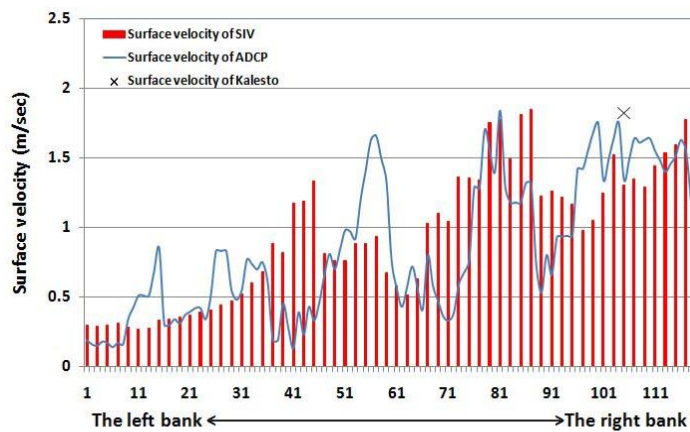
No.	ADCP	SIV		Kalesto	No.	ADCP	SIV		Kalesto
	Surface Veolcity (m/sec)	Surface Veolcity (m/sec)	Correlation Coefficient			Surface Veolcity (m/sec)	Surface Veolcity (m/sec)	Correlation Coefficient	
1	0.17	0.30067	0.99493	-	60	0.57			
2	0.16				61	0.72	0.57747	0.6887	-
3	0.34	0.28857	0.99396	-	62	0.56			
4	0.42				63	0.41	0.51784	0.70859	-
5	0.51	0.30022	0.99297	-	64	0.8			
6	0.51				65	0.58	0.63302	0.75251	-
7	0.51	0.30902	0.9919	-	66	0.47			
8	0.68				67	0.36	1.03105	0.88652	-
9	0.85	0.28244	0.99139	-	68	0.33			
10	0.30				69	0.38	1.10317	0.89749	-
11	0.31	0.26536	0.991	-	70	0.59			
12	0.34				71	0.67	1.04671	0.9172	-

13	0.31	0.2735	0.99048	-	72	0.76			
14	0.37				73	1.29	1.36096	0.93188	-
15	0.39	0.33022	0.98925	-	74	1.28			
16	0.42				75	1.70	1.35837	0.94023	-
17	0.42	0.33849	0.98821	-	76	1.55			
18	0.34				77	1.4	1.34144	0.94482	-
19	0.51	0.35492	0.98695	-	78	1.84			
20	0.83				79	1.29	1.75605	0.91348	-
21	0.83	0.3666	0.98591	-	80	1.18			
22	0.83				81	1.18	1.77306	0.92862	-
23	0.55	0.38832	0.98367	-	82	1.18			
24	0.48				83	1.32	1.49306	0.90949	-
25	0.55	0.40397	0.98082	-	84	1.32			
26	0.77				85	0.73	1.80812	0.9161	-
27	0.73	0.44089	0.97408	-	86	0.53			
28	0.70				87	0.80	1.84602	0.96117	-
29	0.75	0.46883	0.96439	-	88	0.66			
30	0.61				89	0.93	1.22802	0.97328	-
31	0.19	0.52417	0.95695	-	90	0.93			
32	0.19				91	0.94	1.2587	0.98176	-
33	0.45	0.60298	0.93964	-	92	0.94			
34	0.28				93	1.42	1.22073	0.98368	-
35	0.13	0.68396	0.91886	-	94	1.42			
36	0.39				95	1.55	1.16463	0.98226	-
37	0.23	0.88136	0.92613	-	96	1.68			
38	0.43				97	1.75	0.97637	0.98138	-
39	0.33	0.82	0.93053	-	98	1.34			
40	0.46				99	1.49	1.04908	0.98184	-
41	0.66	1.1736	0.84699	-	100	1.64			
42	0.81				101	1.75	1.24584	0.97921	-
43	0.70	1.18775	0.82586	-	102	1.34			
44	0.84				103	1.49	1.72078	0.96982	-
45	0.98	1.33329	0.80337	-	104	1.64			
46	0.97				105	1.61	1.30414	0.95465	1.82
47	0.92	0.80966	0.86556	-	106	1.63			
48	1.20				107	1.64	1.35128	0.94698	-
49	1.41	0.76025	0.8431	-	108	1.55			
50	1.63				109	1.48	1.28683	0.94867	-
51	1.66	0.75757	0.72667	-	110	1.40			
52	1.49				111	1.45	1.44564	0.94732	-
53	1.63	0.8846	0.70681	-	112	1.48			
54	1.66				113	1.40	1.53631	0.93894	-
55	1.49	0.88167	0.6894	-	114	1.45			
56	1.33				115	1.51	1.59	0.92241	-
57	0.76	0.93489	0.68306	-	116	1.63			
58	0.56				117	1.55	1.77208	0.91544	-
59	0.43	0.67737	0.67711	-	118	1.18			

[Fig. IV-10]은 수집된 유출영상에 따른 유속의 상관계수를 기준으로 필터링을 실시한 결과를 나타낸다. [Fig. IV-10(a)]는 표면영상유속계로 산정된 유속을 필터링 과정 없이 ADCP의 표면유속과 비교한 결과를 나타내며 (b)~(d)는 상관계수가 각

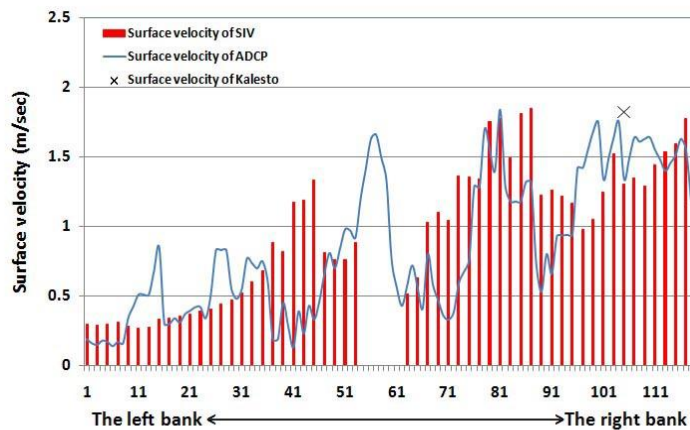
각 0.1~0.7(case-2), 0.1~0.8(case-3), 0.1~0.9(case-4)범위에 해당하는 값을 필터링 하여 비교한 결과를 나타낸다.

두 관측장비의 표면유속은 좌안과 우안에서 유사한 경향을 나타내지만 ADCP관측자료가 최소 약 0.2 m/sec에서 최대 0.5 m/sec 과대 산정되었음을 확인할 수 있다. 또한 단면 중심에서 ADCP가 표면영상유속계에 비해 약 0.8 m/sec의 유속이 크게 관측되었다.



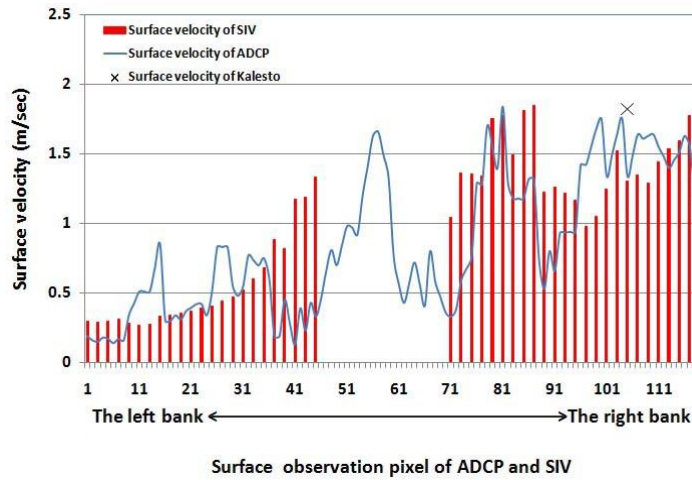
Surface observation pixel of ADCP and SIV

(a) case-1

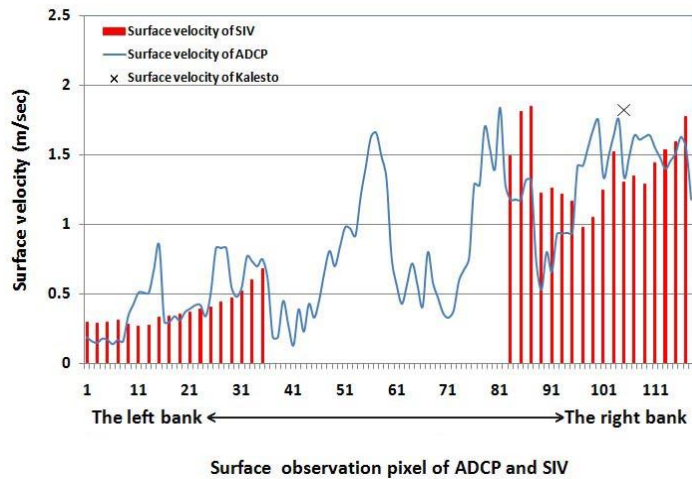


Surface observation pixel of ADCP and SIV

(b) case-2



(c) case-3



(d) case-4

Fig. IV-10. Results of correlation coefficient filtering(day-time): a) using all data; b)filtering the range of 0.6 to 0.7; c)filtering the range of 0.7 to 0.8; d)filtering the range of 0.8 to 0.9

표면영상유속계(SIV)를 활용하여 각각의 case에 따라 중간단면법을 적용하여 유량을 산정한 결과는 [Fig. IV-11]과 같다. 유량을 산정하는 과정에서 필터링된 유속에 적용되는 단면적은 인접한 유속에 적용하여 산정하였다. ADCP로 관측된 유량은 $36.55 \text{ m}^3/\text{sec}$, Kalesto로 산정된 유량은 $73.10 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 산정되었으며, 표면영상유속계(SIV)는 최대 $54.97 \text{ m}^3/\text{sec}$ (case-1)에서 최소 $43.62 \text{ m}^3/\text{sec}$ (case-4)로 필터링된 결과에 따라 $11.35 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 차이를 나타냈다.

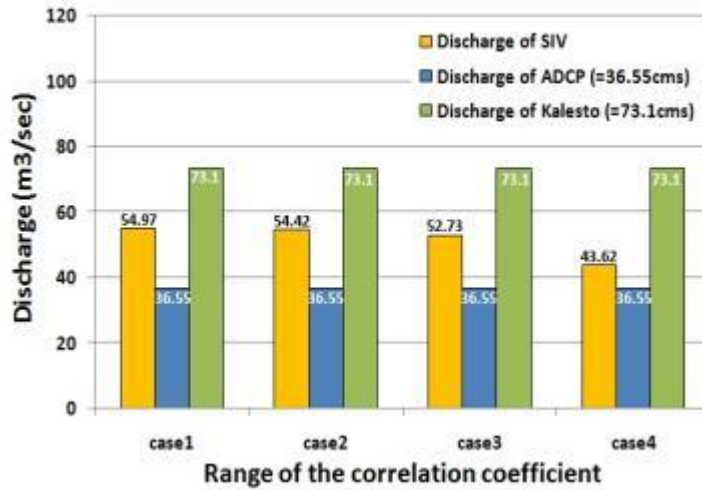


Fig. IV-11. Comparison of discharge using observation devices (day-time).

산정된 유량의 정량적인 비교과정에서 제주도는 육지부의 댐 방류량과 같은 정확한 유량값이 없는 특수성에 기인하므로 표면영상유속계(SIV)의 산정결과를 참값(기준)으로 가정하고 각각의 관측 자료와 오차율을 비교하였다. 표면영상유속계와 ADCP의 오차율은 필터링한 결과에 따라 최대, 최소 오차율이 약 31% 변동을 나타냈으며, Kalesto는 약 15%의 변동을 나타냈다([Table IV-7]).

Table IV-7. Comparison of relative error rate among observation devices(day-time)

No.(remark)	SIV	ADCP	Kalesto	Error(%)	
	Discharge (m³/sec)	Discharge (m³/sec)	Discharge (m³/sec)	SIV & ADCP	SIV & Kalesto
case-1.(all)	55.51			50.42	24.80
case-2.(0.7이하 필터링)	51.23	36.55	73.10	48.91	25.55
case-3.(0.8이하 필터링)	48.53			44.28	27.86
case-4.(0.9이하 필터링)	42.50			19.35	40.33

3.2 야간 영상을 이용한 유속분석

[Fig. IV-12]은 2013년 5월 27일 22시 30분 표면영상유속계의 야간유출영상에 대한 유속벡터를 나타낸다. 하천 단면에서 흐름방향으로 유속벡터가 일정하게 분포되어 보이지만 분석된 유속과 상관계수를 비교하면 우안측의 상관계수 값이 0.5~0.6로 낮게 분석되었다([Table IV-3]).



Fig. IV-12. Result of flow velocity vector for SIV (night-time).

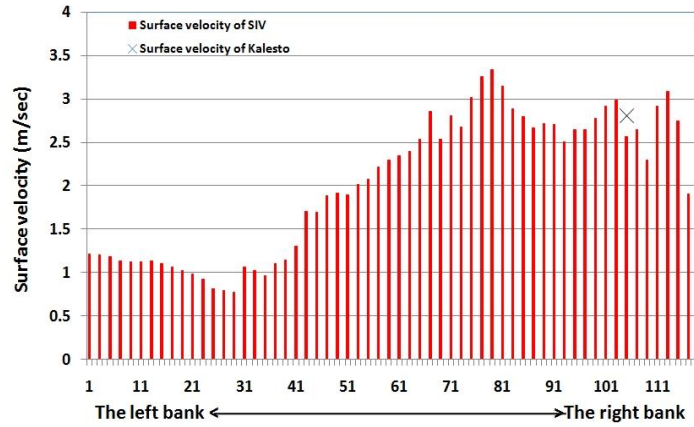
표면영상유속계로 분석된 야간유출영상의 상관계수 범위를 보면 0.6~0.7범위에 해당하는 유속이 전체 59개의 유속벡터 중 13.6%로 나타났으며, 0.7~0.8범위가 10.6%, 0.8~0.9범위가 32.2%, 0.9~1.0범위가 44%를 차지한다. 상관계수의 분포 범위를 주간유출영상과 비교해보면 0.6~0.7범위에 해당하는 상관계수가 6.8% 높게 분석되었으며, 반대로 0.9~1.0범위에 해당하는 상관계수는 17% 낮게 분석되었다. 이와 같은 결과는 야간유출영상이 주간유출영상에 비해 영상의 질이 떨어짐을 나타내며 야간유출영상 분석결과에 대해서 적합한 필터링 과정이 필요함을 의미한다 ([Table IV-8]).

Table IV-8. Comparison of surface velocities among observation devices (night-time)

No.	SIV		Kalesto Surface Veolcity (m/sec)	No.	SIV		Kalesto Surface Veolcity (m/sec)
	Surface Veolcity (m/sec)	Correlation Coefficient			Surface Veolcity (m/sec)	Correlation Coefficient	
1	1.21248	0.62296	-	31	2.34144	0.77415	-
2	1.19826	0.77365	-	32	2.39944	0.78017	-
3	1.18275	0.67632	-	33	2.5394	0.80748	-
4	1.13665	0.61851	-	34	2.85475	0.81367	-
5	1.12435	0.61762	-	35	2.54001	0.81597	-
6	1.11891	0.61529	-	36	2.81141	0.82568	-
7	1.13287	0.69722	-	37	2.67816	0.80784	-
8	1.10334	0.70444	-	38	3.01677	0.82274	-

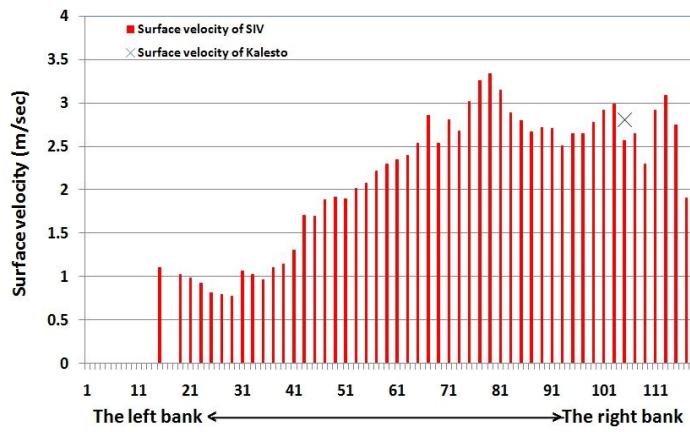
9	1.06198	0.69887	-	39	3.25915	0.82417	-
10	1.01994	0.71288	-	40	3.33482	0.85259	-
11	0.98471	0.74349	-	41	3.14669	0.91191	-
12	0.92475	0.76018	-	42	2.88552	0.94667	-
13	0.81456	0.80099	-	43	2.79578	0.90466	-
14	0.79655	0.81839	-	44	2.66872	0.91307	-
15	0.76851	0.75067	-	45	2.71348	0.92646	-
16	1.06023	0.74241	-	46	2.70716	0.92393	-
17	1.02024	0.83873	-	47	2.51047	0.90193	-
18	0.9652	0.83865	-	48	2.65145	0.92124	-
19	1.10379	0.84013	-	49	2.64926	0.93082	-
20	1.13919	0.72674	-	50	2.78164	0.91527	-
21	1.30596	0.72066	-	51	2.91803	0.91826	-
22	1.70534	0.75601	-	52	2.98378	0.91013	-
23	1.69879	0.74905	-	53	2.56478	0.8606	2.81
24	1.88692	0.76298	-	54	2.64908	0.85465	-
25	1.9138	0.75688	-	55	2.29384	0.84601	-
26	1.8973	0.74573	-	56	2.91528	0.82567	-
27	2.01482	0.74603	-	57	3.0899	0.81585	-
28	2.07421	0.75287	-	58	2.74341	0.83355	-
29	2.21836	0.75922	-	59	1.90525	0.8363	-
30	2.29545	0.75636	-				

[Fig. IV-13]은 야간유출영상에 대한 필터링 결과를 나타낸다. ADCP를 현장 적용하는 과정에서 27일 18시 00분부터 단시간에 수위가 급격히 증가하고 유속이 점차 약 3.5 m/sec 까지 증가함에 따라 표면 유동이 심하게 변화되었다. 이 같은 현장상황의 변화는 일부구간에서 과유속의 영향으로 ADCP가 수면 아래로 잠기거나 반대로 수면 위로 튀어오르는 등 관측 자료에 오차를 포함하는 여건이 발생되었다. 또한 강우량의 증가 등 현장관측 상황이 악화되어 관측자의 안전을 위해 야간관측을 중단하였다. 따라서 이 연구에서는 분석된 표면영상유속계의 유량에 대해 1지점을 관측하는 Kalesto의 유속자료와 비교하였다. 우안측에서 관측하는 Kalesto는 표면영상유속계의 동일 지점에서 약 3 m/sec의 유속차이를 나타냈다. 특히 case-3, 4와 같이 주간영상에 비해 낮은 범위의 상관계수가 많이 분포하여 필터링되는 유속이 많이 분석되었다.



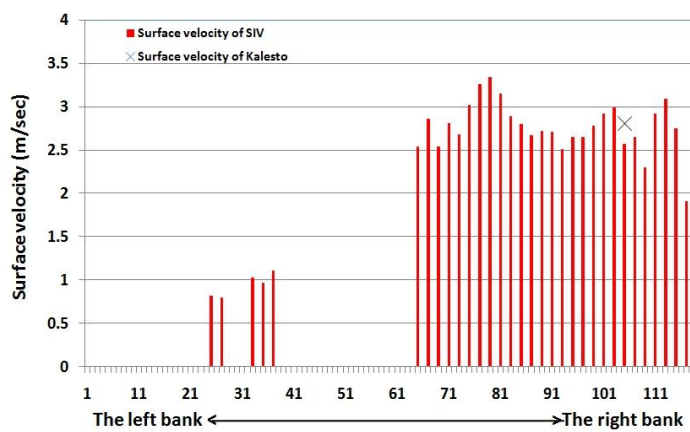
Surface observation Kalesto and SIV

(a) case-1



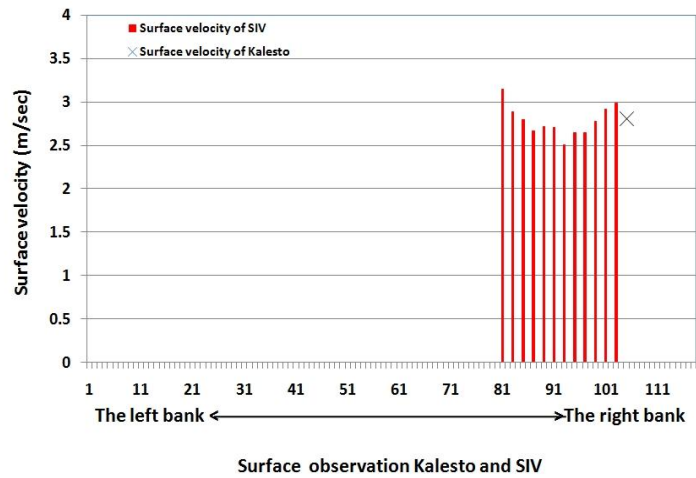
Surface observation Kalesto and SIV

(b) case-2



Surface observation Kalesto and SIV

(c) case-3



(d) case-4

Fig. IV-13. Results of correlation coefficient filtering(night-time): a) using all data; b)filtering the range of 0.6 to 0.7; c)filtering the range of 0.7 to 0.8; d)filtering the range of 0.8 to 0.9

야간유출영상을 이용하여 유량을 산정한 결과는 [Fig. IV-14]와 같다. 표면영상유속계(SIV)의 필터링을 적용하지 않은 경우는 $126.60 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 Kalesto로 산정된 유량에 비해 $25.88 \text{ m}^3/\text{sec}$ 작게 산정되었다. 필터링된 유속에 따라 최대 $192.35 \text{ m}^3/\text{sec}$ (case-4), 최소 $117.59 \text{ m}^3/\text{sec}$ (case-2)로 필터링된 결과에 따라 $74.76 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유량 차이를 나타냈다. 산정된 유량 변동을 보면 case-4의 경우 우안측의 과유속지점을 제외한 대부분의 유속벡터가 제거되었으므로 상대적으로 많은 유량이 산정되었다.

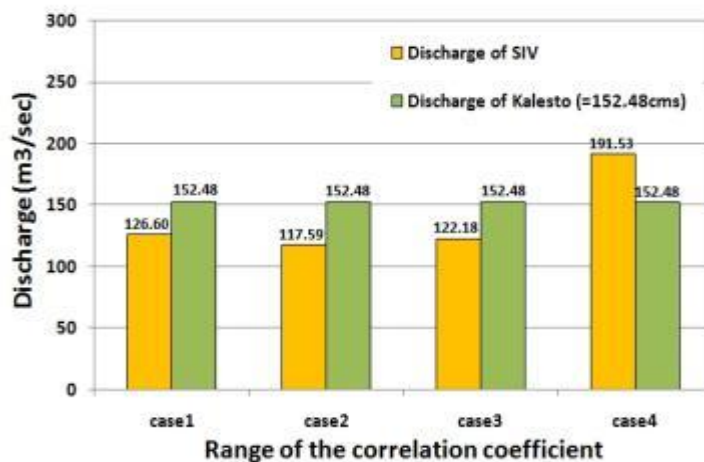


Fig. IV-14. Comparison of discharge using observation devices (night-time).

표면영상유속계와 Kalesto의 오차율은 필터링한 결과에 따라 최대, 최소 오차율이 약 5.9% 변동을 나타냈으며, Kalesto는 약 15%의 변동을 나타냈다([Table IV-9]).

Table IV-9. Comparison of relative error rate among observation devices (night-time)

No.(remark)	SIV Discharge (m ³ /sec)	ADCP Discharge (m ³ /sec)	Kalesto Discharge (m ³ /sec)	Error (%)
case-1.(all)	126.60			16.97
case-2.(0.7이하 필터링)	117.59	-	152.48	22.87
case-3.(0.8이하 필터링)	122.18			19.87
case-4.(0.9이하 필터링)	191.53			20.39

4. 다양한 홍수유출사상의 표면영상유속계(SIV) 현장적용

제주도 간헐천을 대상으로 집중호우 및 태풍의 영향에 의한 홍수유출발생시 다양한 유출사상의 유출영상을 기록·수집하여 표면영상유속계(SIV)의 적용성 및 강우-유출특성을 분석하였다. 표면영상유속계(SIV)에 적용되는 유출영상은 제주수자원연구단 CCTV와 제주특별자치도에서 운영하는 하천 재난감시용 CCTV의 영상을 분석하였다. 2012년부터 2014년 까지 집중호우 및 태풍의 내습에 의한 제주도 간헐천의 유출현상은 전체 14회가 발생하였으며 간헐천의 관측지점에 따라 표면영상을 분석하여 적용성을 확인하였다([Table IV-10]).

Table IV-10. Analysis summary table using Surface Image Velocimeter

날짜	한천 (한천교)	병문천 (삼오교)	병문천 (오봉교)	화북천 (별도교)	외도천 (외도정 수장)	천미천 (성읍교)	한천 (한북교)	비고
2012.4.21	○	○	○	○				집중호우
2012.4.25	○	○	○	○				집중호우
2012.7.18	○	○	○	○	○			카눈
2012.8.23	○	○	○			○		집중호우
2012.8.28	○	○	○	○		○		볼라벤
2012.8.30	○	○	○	○	○			텐빈
2012.9.16	○	○	○	○	○	○		산바
2013.5.27	○	○		○	○	○		집중호우
2014.7.6	○		○					집중호우
2014.7.9	○	○			○		○	너구리
2014.8.2	○	○	○		○	○	○	나크리
2014.8.20	○				○	○		집중호우
2014.8.23					○	○		집중호우
2014.9.23	○				○	○	○	풍영

4.1 계측 및 미계측구역의 호우사상별 유출율

집중호우 및 태풍내습에 의한 제주도 홍수유출시 강우량에 따른 계측·미계측 구역의 7개 연구대상 하천의 유출율은 [Fig. IV-15]와 [Table IV-11]과 같다. 유출사상에 따라 강우량 대비 유출율은 최소 7.0 ~ 20.4%(2012. 4. 25)에서 최대 10.4 ~ 47.7%(2012. 9. 16)로 각각의 하천에 따라 큰 변동을 나타내고 있다. 연구대상 하천 중 한천 한천교 지점의 평균 유출율이 약 31.0%로 많은 유출율을 나타냈으며 병문천 오봉교 지점이 약 4.6%로 작은 유출율을 보였다. 이 같은 결과는 강우 사상별 홍수유출시 강우 강도 및 강우의 분포의 영향에 의한 차이를 고려할 수 있으며, 각각 독립된 구역의 영향으로 하천별로 각각의 유출특성이 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 제주도 하천을 대상으로 유출량 관측 시 각각의 관측 하천에 따라 관측현장에 따른 독립된 유출량 관측 시스템이 필요함을 의미한다.

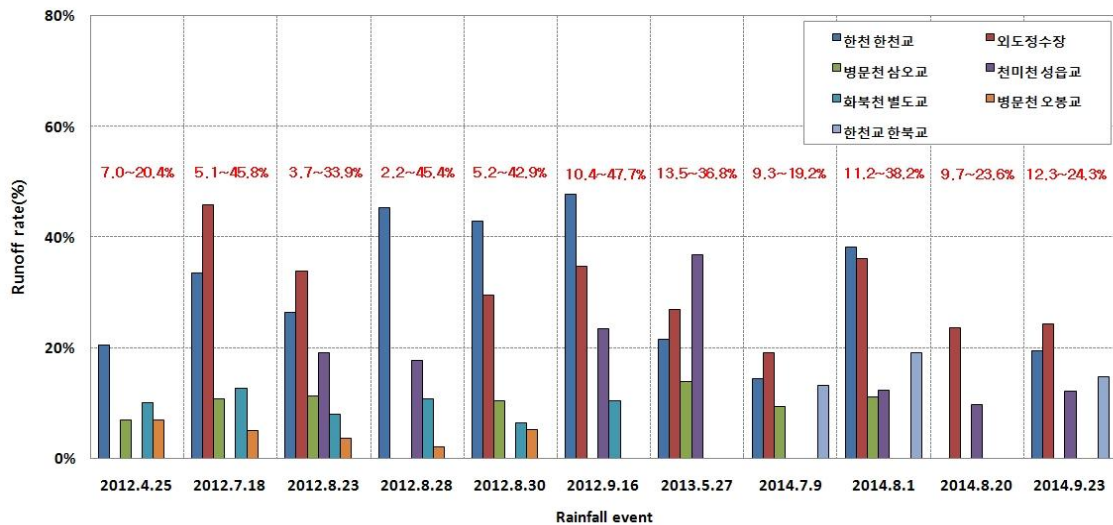


Fig. IV-15. Runoff-rate of rainfall events

Table IV-11. Runoff-rate of rainfall events

호우사상	한천교	외도정수장	성읍교	한북교	삼오교	오봉교	별도교
2012.4.21	20.4%	-	-	-	7.0%	7.0%	10.2%
2012.4.25	33.5%	45.8%	-	-	10.8%	5.1%	12.7%

2012.7.18	26.5%	33.9%	19.1%	-	11.4%	3.7%	8.0%
2012.8.23	45.4%	-	17.8%	-	-	2.2%	10.8%
2012.8.28	42.9%	29.5%	-	-	10.4%	5.2%	6.5%
2012.8.30	47.7%	34.7%	23.4%	-	-	-	10.4%
2012.9.16	21.5%	27.0%	36.8%	-	13.9%	-	-
2013.5.27	14.5%	19.2%	-	13.2%	9.3%	-	-
2014.7.6	38.2%	36.2%	12.4%	19.1%	11.2%	-	-
2014.7.9	-	23.6%	9.7%	-	-	-	-
2014.8.1	19.5%	24.3%	12.3%	14.8%	-	-	-
2014.9.23	-	-	-	-	-	-	-

4.1.1 계측구역의 호우사상별 유출율

(1) 한천(한천교)

한천교 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은 [Fig. IV-16]와 [Table IV-12]와 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은 Kalesto로 관측한 유출량이 34.8%, 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이 31.7%로 Kalesto로 관측한 유출량이 약 3.1% 높게 산정되었다.

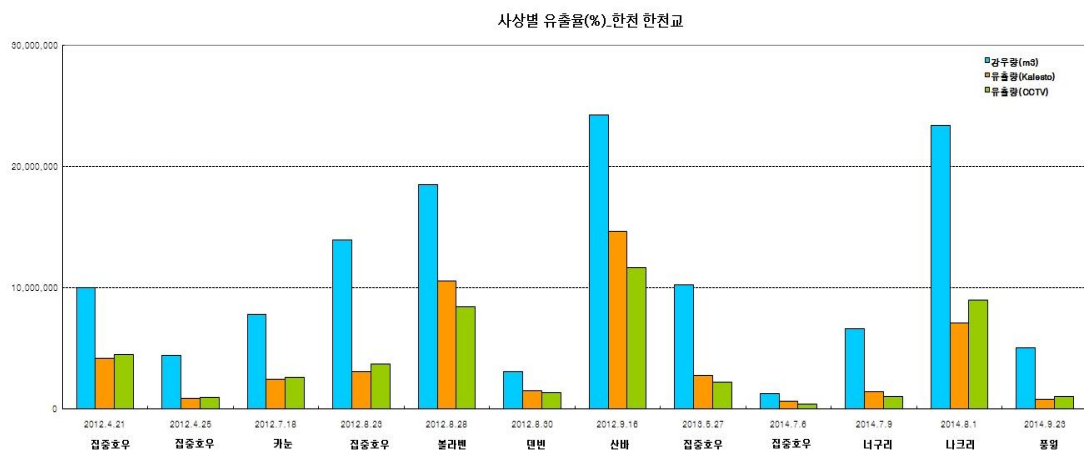


Fig. IV-16. Runoff-rate of rainfall events(Han-chen stream)

Table IV-12. Runoff-rate of rainfall events(Han-chen stream)

호우사상	수문총량 (m ³)	Kalesto (m ³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m ³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2012.4.21	9,990,898	4,163,145	41.7	4,429,724	44.3	집중호우
2012.4.25	4,395,226	793,044	18.0	898,254	20.4	집중호우
2012.7.18	7,725,248	2,430,451	31.5	2,591,204	33.5	카눈
2012.8.23	13,944,555	3,012,376	21.6	3,689,746	26.5	집중호우
2012.8.28	18,462,499	10,514,647	57.0	8,383,579	45.4	블라벤
2012.8.30	3,030,339	1,442,109	47.6	1,299,234	42.9	덴빈
2012.9.16	24,262,980	14,596,757	60.2	11,584,378	47.7	산바
2013.5.27	10,241,588	2,717,047	26.5	2,203,232	21.5	집중호우
2014.7.6	1,240,949	601,014	48.4	326,090	26.3	집중호우
2014.7.9	6,561,660	1,347,937	20.5	950,734	14.5	너구리
2014.8.1	23,366,375	7,078,671	30.3	8,922,395	38.2	나크리
2014.9.23	4,995,709	740,736	14.8	975,868	19.5	풍영

(2) 외도천(외도정수장)

외도정수장 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은 [Fig. IV-17]과 [Table IV-13]과 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은 Kalesto로 관측한 유출량이 45.4%, 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이 30.5%로 Kalesto로 관측한 유출량이 약 15% 높게 산정되었다. 이 같은 유출율의 큰 차이는 외도정수장에 설치된 Kalesto가 홍수유출시 우안에 편중된 강류지점의 유속을 관측하므로 과대 산정된 결과를 나타낸다.

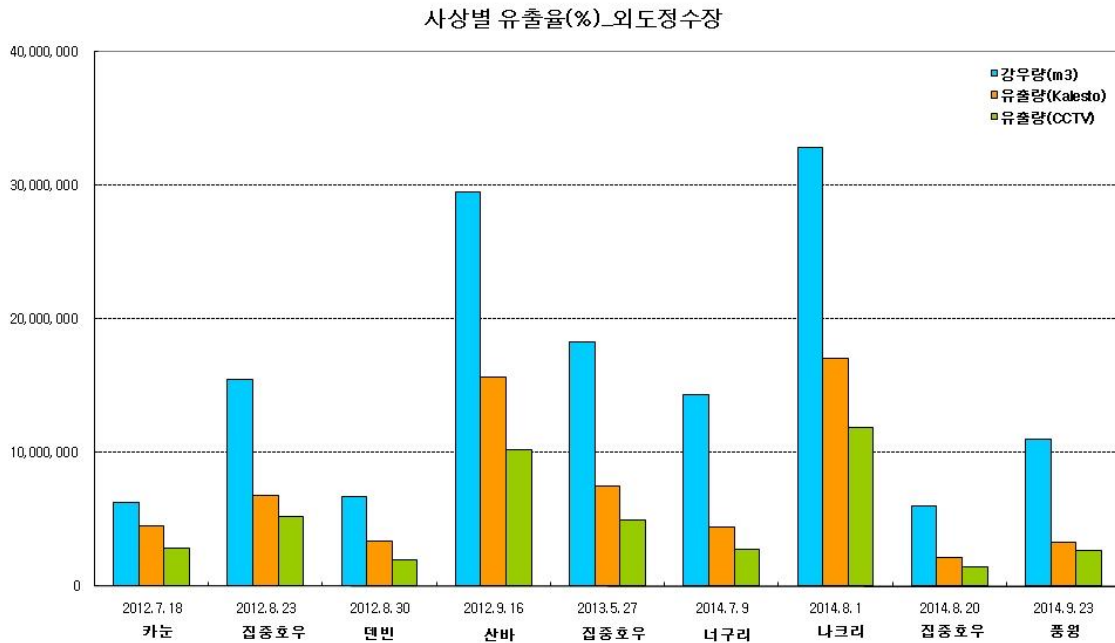


Fig. IV-17. Runoff-rate of rainfall events(Oe-do stream)

Table IV-13. Runoff-rate of rainfall events(Oe-do stream)

호우사상	수문총량 (m³)	Kalesto (m³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2012.7.18	6,240,794	4,521,334	72.4	2,860,944	45.8	카눈
2012.8.23	15,517,709	6,803,796.3	43.8	5,256,547.9	33.9	집중호우
2012.8.30	6,692,088	3,365,637	50.3	1,976,018	29.5	덴빈
2012.9.16	29,491,341	15,631,521	53.0	10,236,372	34.7	산바
2013.5.27	18,303,452	7,487,606.7	40.9	4,942,861.2	27.0	집중호우
2014.7.9	14,364,988	4,440,400.1	30.9	2,756,657.6	19.2	너구리
2014.8.1	32,809,861	17,086,254.2	52.1	11,869,973.0	36.2	나크리
2014.8.20	6,023,769	2,122,142.6	35.2	1,422,469.6	23.6	집중호우
2014.9.23	10,980,203	3,309,359.4	30.1	2,668,552.2	24.3	풍영

(3) 천미천(성읍교)

천미천 성읍교 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은 [Fig. IV-16]와 [Table IV-12]와 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은

Kalesto로 관측한 유출량이 27.0%, 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이 17.7%로 Kalesto로 관측한 유출량이 약 9.3% 높게 산정되었다.

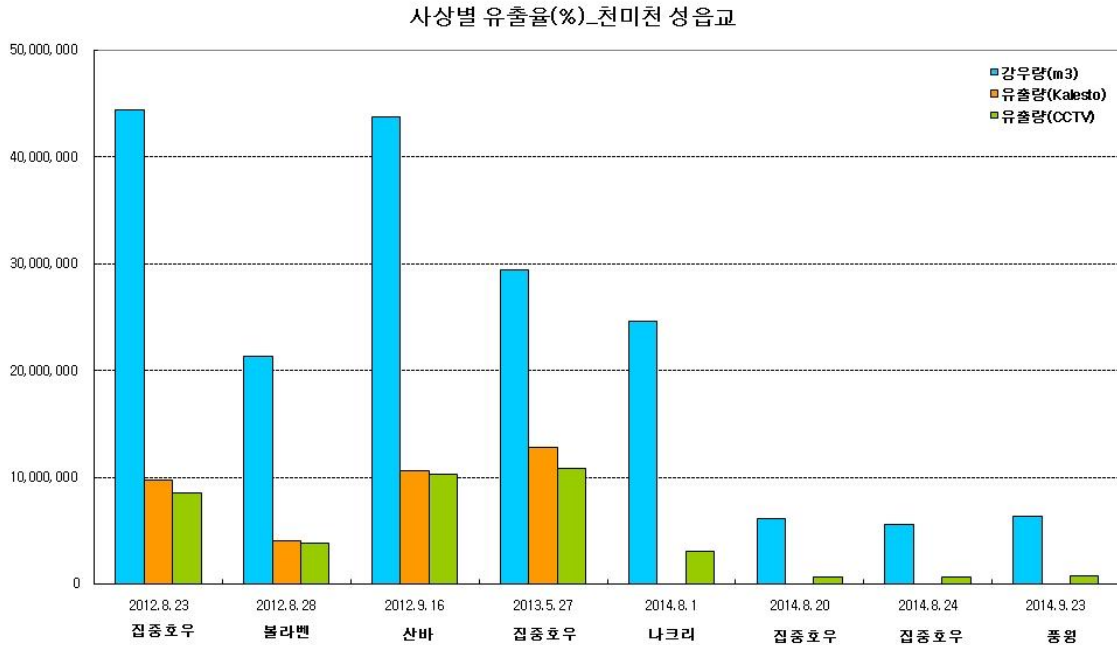


Fig. IV-18. Runoff-rate of rainfall events(Cheon-mi stream)

Table IV-14. Runoff-rate of rainfall events(Cheon-mi stream)

호우사상	수문총량 (m³)	Kalesto (m³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2012.8.23	44,338,052	9,662,751	21.8	8,462,302	19.1	집중호우
2012.8.28	21,291,770	3,992,521	18.8	3,781,294	17.8	불라벤
2012.9.16	43,737,851	10,570,574	24.2	10,244,788	23.4	산바
2013.5.27	29,354,537	12,757,468	43.5	10,796,297	36.8	집중호우
2014.8.1	24,566,245	-	-	3,050,129	12.4	나크리
2014.8.20	6,020,446	-	-	585,032	9.7	집중호우
2014.8.24	5,501,159	-	-	562,226	10.2	집중호우
2014.9.23	6,245,777	-	-	765,352	12.3	풍형

(4) 한천(한북교)

한천 한북교 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은 [Fig. IV-19]와 [Table IV-15]와 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은 Kalesto로 관측한 유출량이 13.5%, 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이 15.7%로 Kalesto로 관측한 유출량이 약 2.2% 작게 산정되었다.

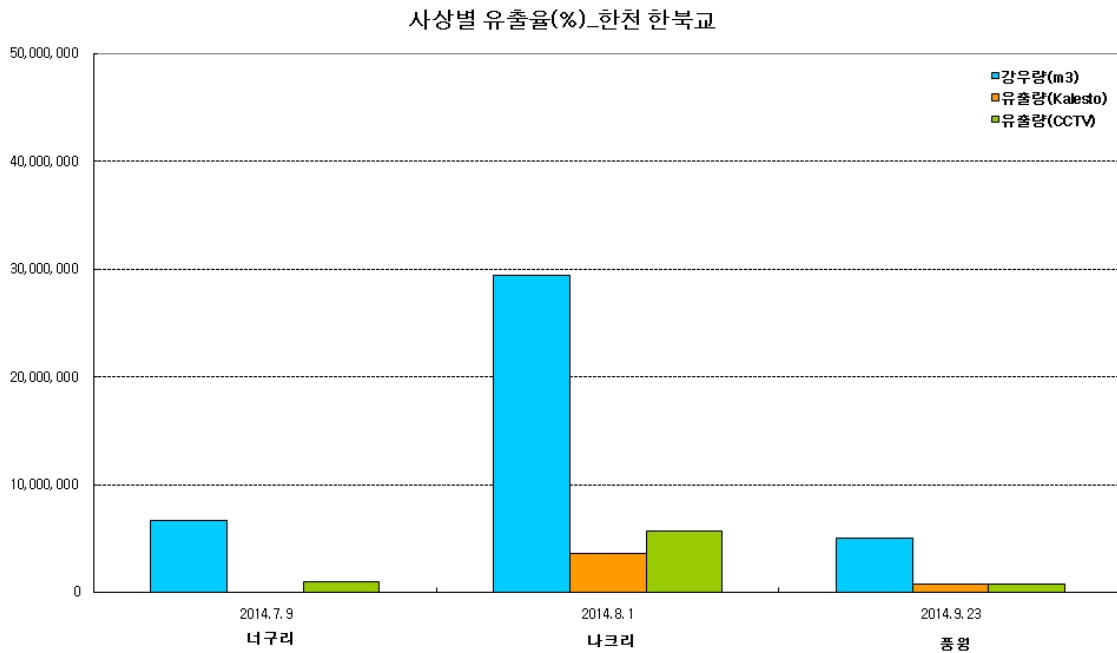


Fig. IV-19. Runoff-rate of rainfall events(Han-buk stream)

Table IV-15. Runoff-rate of rainfall events(Han-buk stream)

호우사상	수문총량 (m³)	Kalesto (m³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2014.7.9	6,636,857	-	0.0	876,358	13.2	너구리
2014.8.1	29,421,824	3,596,857	12.2	5,630,510	19.1	나크리
2014.9.23	4,995,709	740,736	14.8	738,268	14.8	풍영

4.1.2 미계측구역의 호우사상별 유출율

(1) 병문천(삼오교)

병문천 삼오교 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은 [Fig. IV-16]와 [Table IV-12]와 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은 Kalesto로 관측한 유출량이 15.0%, 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이

10.9%로 Kalesto로 관측한 유출량이 약 4.0% 높게 산정되었다.

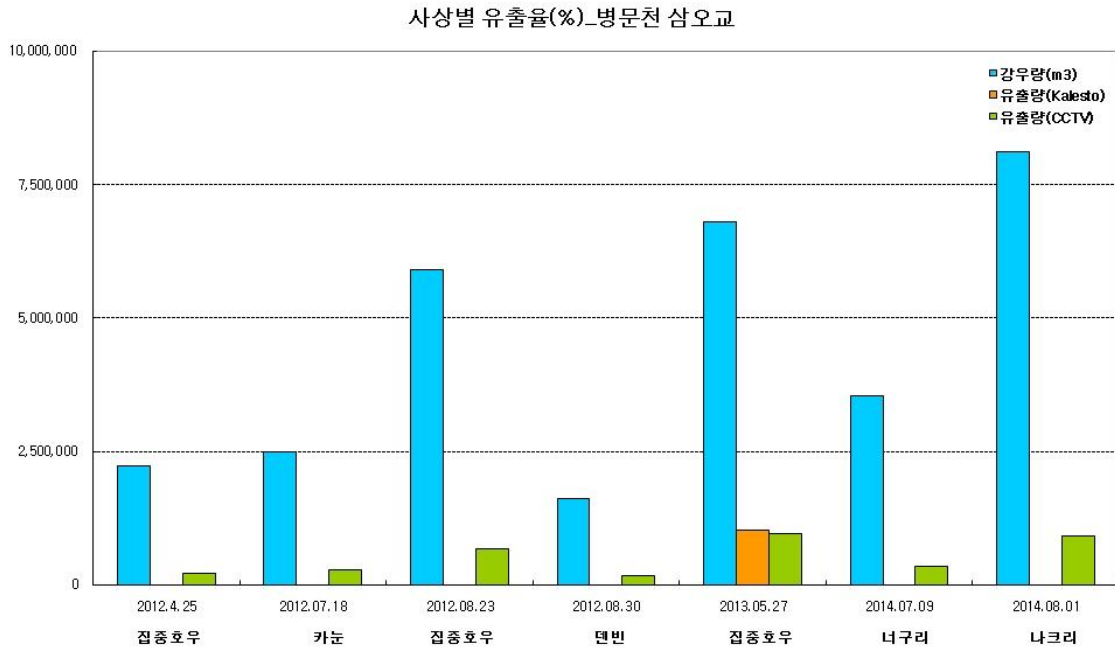


Fig. IV-20. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream)

Table IV-16. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream)

호우사상	수문총량 (m³)	Kalesto (m³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2012.4.25	2,213,785	-	-	213920.5	9.7	집중호우
2012.07.18	2,488,215	-	-	268524.7	10.8	카눈
2012.08.23	5,904,332	-	-	671134.1	11.4	집중호우
2012.08.30	1,607,864	-	-	166597.0	10.4	덴빈
2013.05.27	6,795,042	1016994.2	15.0	944920.5	13.9	집중호우
2014.07.09	3,524,632	-	-	328530.3	9.3	너구리
2014.08.01	8,111,833	-	-	909907.6	11.2	나크리

(2) 병문천(오봉교)

병문천 오봉교 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은 [Fig. IV-16]와 [Table IV-12]와 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이 최소 2.2%에서 최대 7.0%의 유출율을 나타냈다.

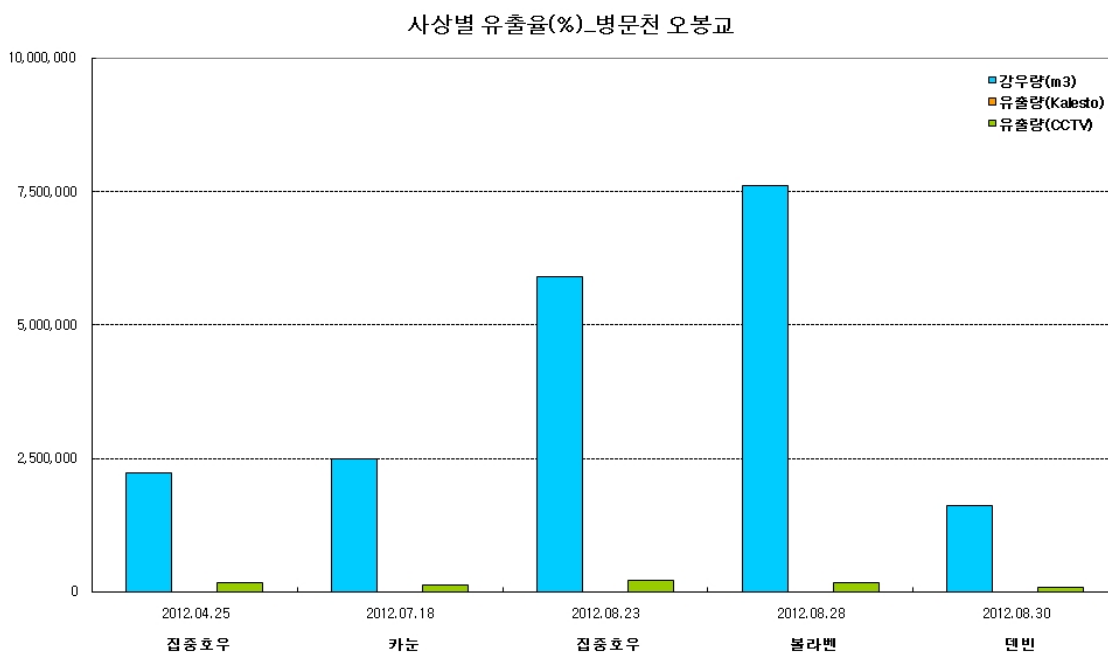


Fig. IV-21. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream)

Table IV-17. Runoff-rate of rainfall events(Byeong-mun stream)

호우사상	수문총량 (m³)	Kalesto (m³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2012.04.25	2,213,785	-	-	154111.3	7.0	집중호우
2012.07.18	2,488,215	-	-	127094.0	5.1	카눈
2012.08.23	5,904,332	-	-	218204.5	3.7	집중호우
2012.08.28	7,611,880	-	-	166597.0	2.2	불라벤
2012.08.30	1,607,864	-	-	83383.6	5.2	덴빈

(3) 화북천(별도교)

화북천 별도교 지점의 Kalesto와 하천 재난감시용 CCTV의 강우 사상별 유출율은

[Fig. IV-16]와 [Table IV-12]와 같다. 강우 사상별로 수문총량 대비 평균 유출율은 Kalesto로 관측한 유출량이 13.4%, 하천 재난감시용 CCTV로 산정한 유출량이 12.8%로 Kalesto로 관측한 유출량이 약 0.6% 높게 산정되었다.

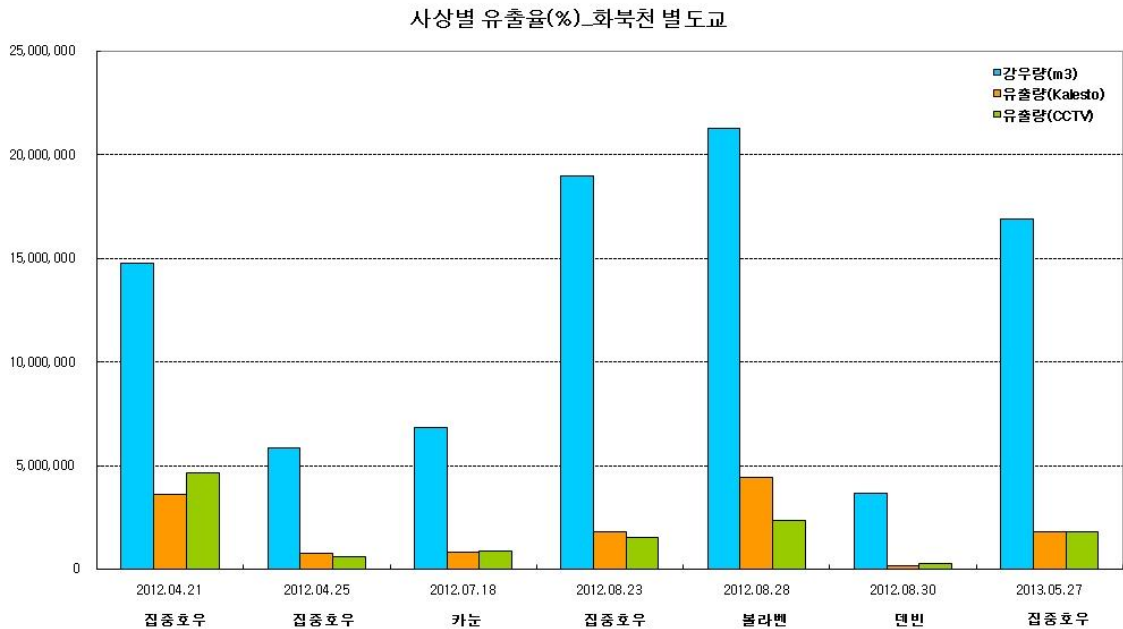


Fig. IV-22. Runoff-rate of rainfall events(Byeol-do stream)

Table IV-18. Runoff-rate of rainfall events(Byeol-do stream)

호우사상	수문총량 (m³)	Kalesto (m³)	Kalesto 유출율 (%)	CCTV (m³)	CCTV 유출율 (%)	비고
2012.04.21	14,759,962	3,593,423.7	24.3	4,633,633.4	31.4	집중호우
2012.04.25	5,817,491	765,087.1	13.2	592,138.6	10.2	집중호우
2012.07.18	6,806,911	782,668.7	11.5	862,112.9	12.7	카눈
2012.08.23	18,982,479	1,760,101.0	9.3	1,511,374.4	8.0	집중호우
2012.08.28	21,276,743	4,402,528.0	20.7	2,301,351.5	10.8	블라벤
2012.08.30	3,645,727	163,972.4	4.5	236,643.0	6.5	덴빈
2013.05.27	16,901,970	1,771,383.5	10.5	1,758,469.6	10.4	집중호우

4.2 계측 · 미계측 강우-유출특성 분석

4.2.1 계측구역의 강우-유출특성 분석

(1) 한천(한천교)

① 2012년 4월 21일 집중호우

[Fig. IV-23]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월 21일 8시00분부터 21시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 유출누적강우량은 20일 24시00분부터 7시30분까지 7.5시간 동안 85.05mm를 나타냈으며, 10시00분부터 10시30분까지 두 관측장비가 약 $90m^3/sec$ 에서 125 cms로 35 cms의 급격한 유출량을 나타냈다. 침투유량은 12시00분에 재난감시용 CCTV가 $172.36m^3/sec$, Kalesto가 동시간에 $162.36m^3/sec$ 를 나타냈다.

5일 선행강우량이 119.7mm, 유효강우량은 272.4mm로 단시간에 높은 강우량을 나타냈으며, 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 41.7%, 재난감시용 CCTV는 44.3%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다([Table IV-19]).

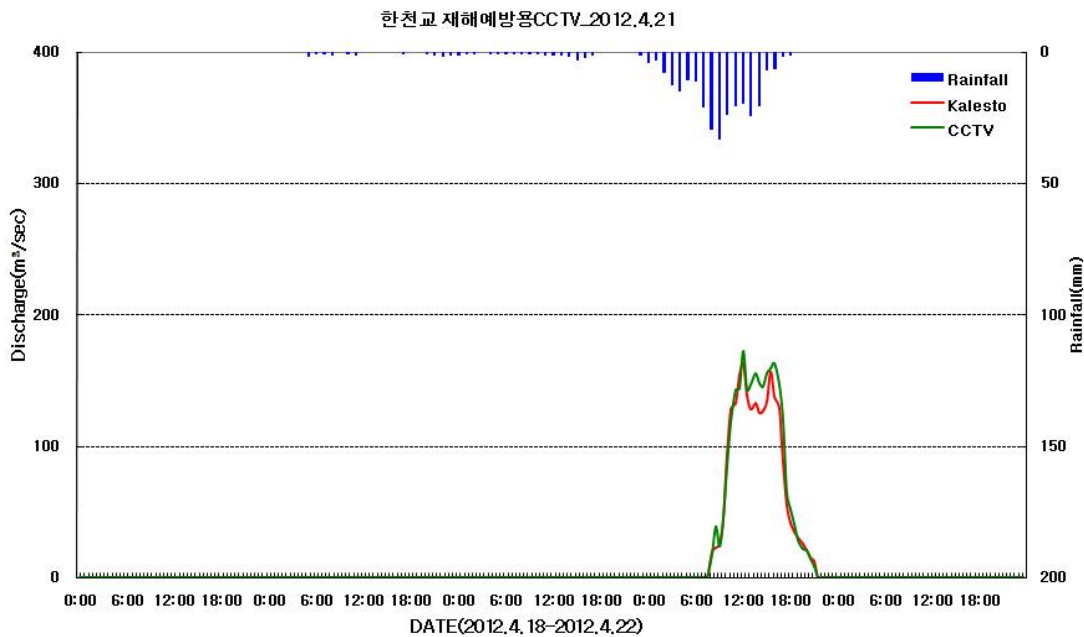


Fig. IV-23. Hydrograph and comparison of discharges(April 21, 2012)

Table IV-19. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
119.7	272.4	36,681,907	9,990,898	4,163,145	4,429,724	41.7	44.3

② 2012년 4월 25일 집중호우

[Fig. IV-24]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월 25일 8시30분부터 16시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 5일 선행강수량은 4월21일 유출사상의 영향으로 400.6mm의 높은 강우량을 나타내지만 유효강수량은 25일 2시00분부터 8시00분까지 6시간동안 106.41mm를 나타내 비교적 짧은 시간에 유출이 끝나는 경향을 나타냈다. 침투유량은 10시00분에 재난감시용 CCTV가 $60.98m^3/sec$, Kalesto가 동시간에 $54.42m^3/sec$ 를 나타냈다.

강수량 대비 Kalesto는 유출률이 18.0%, 재난감시용 CCTV는 20.4%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다([Table IV-20]).

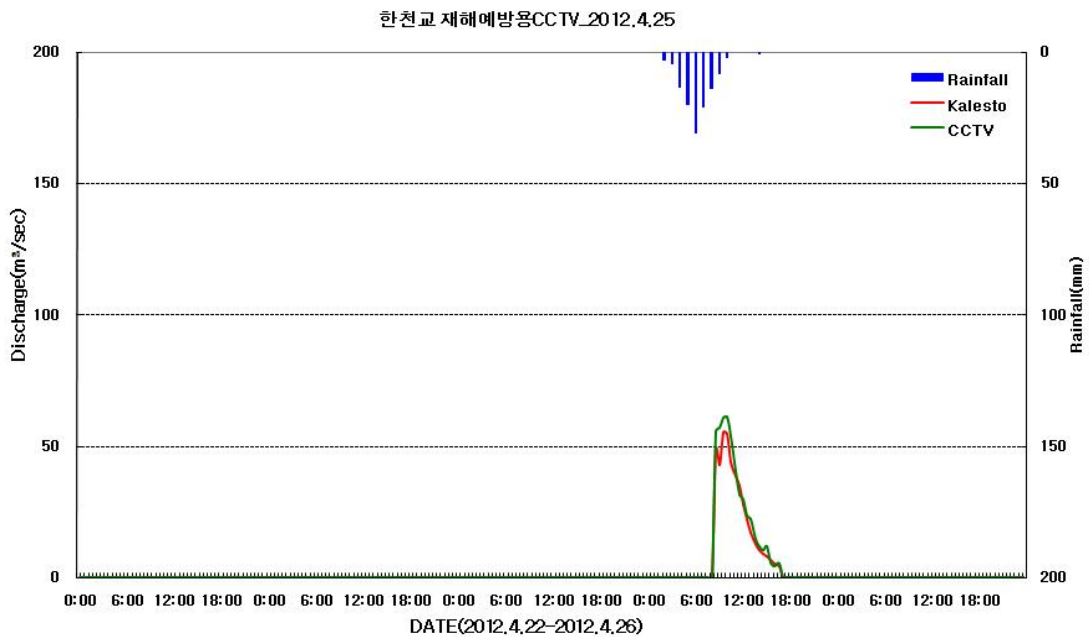


Fig. IV-24. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)

Table IV-20. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)

5일 선행강수량 (mm)	강수량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
400.6	119.8	36,681,907	4,395,226	793,044	898,254	18.0	20.4

③ 2012년 7월 18일 제7호 태풍 “카눈”

[Fig. IV-25]는 제7호 태풍 카눈의 영향에 의한 유출발생 시 7월 18일 12시30분부터 19일 9시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 유출누적강우는 5시00분부터 12시00분까지 7시간동안 60.08mm를 나타냈으며 첨두 유량은 재난감시용 CCTV가 21시00분에 161.16m³/sec, Kalesto가 167.36m³/sec로 유사한 결과를 나타냈다.

강우량 대비 Kalesto는 유출률이 31.5%, 재난감시용 CCTV는 33.5%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다([Table IV-21]).

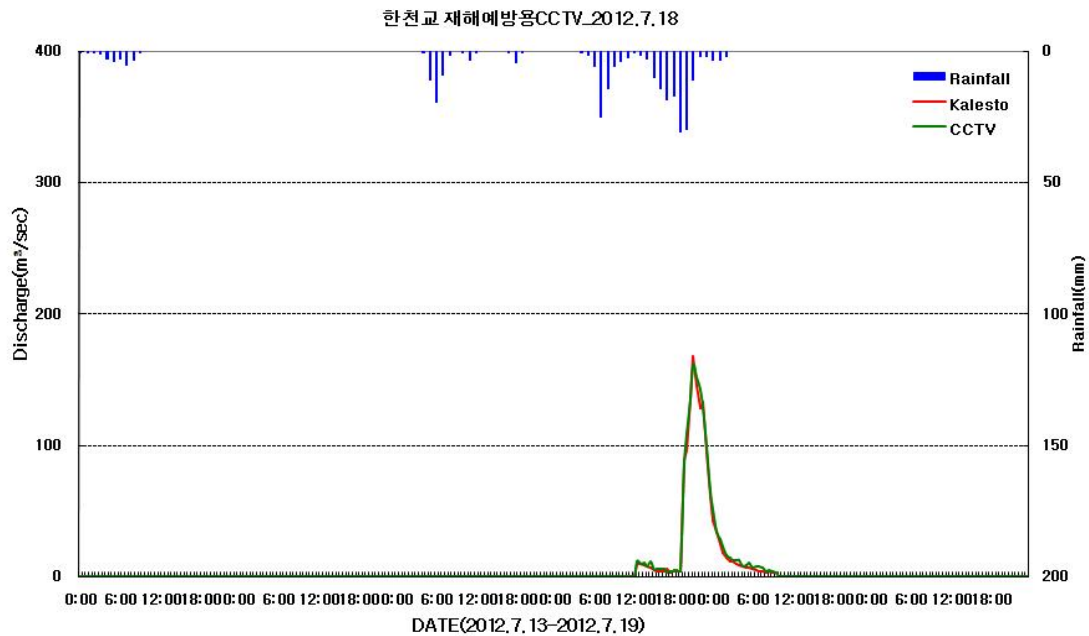


Fig. IV-25. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)

Table IV-21. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
183.7	210.6	36,681,907	7,725,248	2,430,451	2,591,204	31.5	33.5

④ 2012년 8월 23일 집중호우

[Fig. IV-26]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 8월 23일 15시30분부터 25일 1시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 유출누적강우는 8시00분부터 15시00분까지 7시간동안 91.71mm를 나타냈으며, 침투유량은 재난감시용 CCTV가 18시30분에 $178.41m^3/sec$, Kalesto가 $136.86m^3/sec$ 를 나타냈으며, 이후 23일 24시00분부터 2시00분까지 66.77mm의 집중강우의 영향으로 3시00분에 재난감시용 CCTV가 $152.46m^3/sec$, Kalesto가 $134.36m^3/sec$ 의 두 번째 침투유량을 나타냈다.

강우량 대비 Kalesto는 유출률이 21.6%, 재난감시용 CCTV는 26.5%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다([Table IV-22])

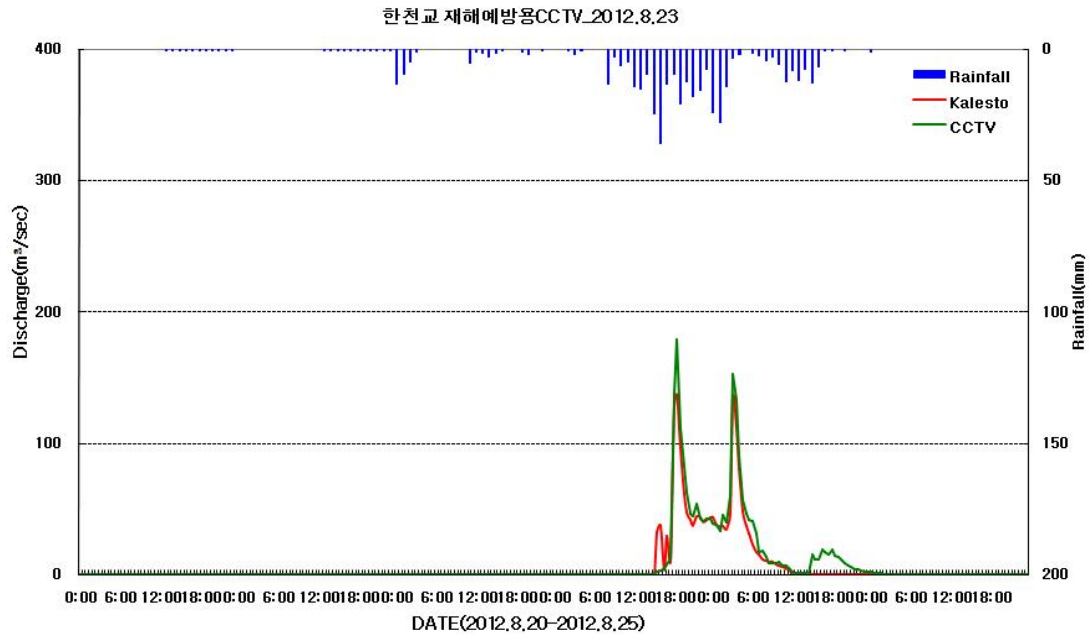


Fig. IV-26. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)

Table IV-22. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
184.0	380.1	36,681,907	13,944,555	3,012,376	3,689,746	21.6	26.5

⑤ 2012년 8월 28일 제15호 태풍 “볼라벤”

[Fig. IV-27]은 제15호 태풍 볼라벤의 영향에 의한 유출발생 시 8월 27일 14시00분부터 20시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 첨두유량은 23시00분에 재난감시용 CCTV가 285.05 m^3/sec , Kalesto가 동시간에 431.82 m^3/sec 로 두 관측장비의 유출량이 약 146 m^3/sec 의 차이를 나타냈다.

[Table IV-23]은 태풍 볼라벤의 영향에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 한천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 521.4mm, 유효강우량이 503.3mm로 유출발생과 동시에 많은 양의 강우가 내렸음을 확인할 수 있다. 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 57.0%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 45.4%로 나타났다.

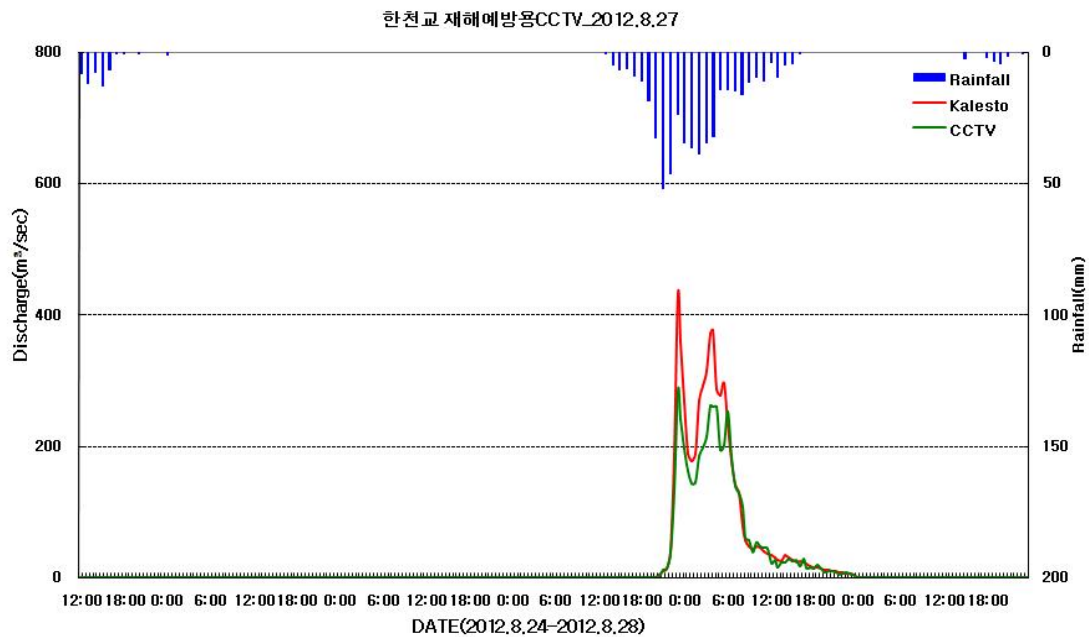


Fig. IV-27. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)

Table IV-23. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
521.4	503.3	36,681,907	18,462,499	10,514,647	8,383,579	57.0	45.4

⑥ 2012년 8월 30일 제14호 태풍 “덴빈”

[Fig. IV-28]는 제14호 태풍 덴빈(TEMBIN)의 영향에 의한 유출발생 시 4시30분부터 17시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. Kalesto는 유출 초기에 $38.62m^3/sec$ 의 유출이 발생하였으나 동시간대의 재난감시용 CCTV를 확인한 결과 유속이 과대 산정되어 높은 유출량을 나타낸다고 판단된다. 두 관측장비가 5시30분부터 6시00분까지 약 $20m^3/sec$ 에서 $135m^3/sec$ 로 약 $115m^3/sec$ 의 돌발성 유출이 발생하였음을 확인할 수 있다.

[Table IV-24]은 강우량에 따른 한천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 559.1mm, 유효강우량이 82.6mm로 나타났으며 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 47.6%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 42.9%로 두 관측장비가 유사하게 나타났다.

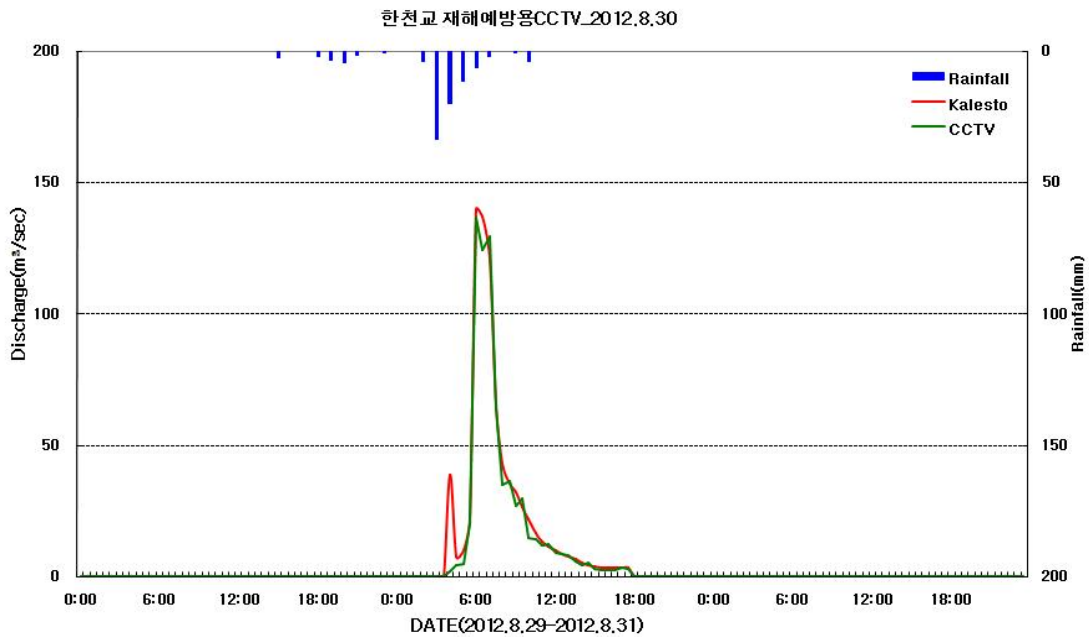


Fig. IV-28. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 30, 2012)

Table IV-24. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 30, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
559.1	82.6	36,681,907	3,030,339	1,442,109	1,299,234	47.6	42.9

⑦ 2012년 9월 16일 제16호 태풍 “산바”

[Fig. IV-29]은 제16호 태풍 산바(SANBA)의 영향에 의한 유출발생 시 9월 16일시 19시30분부터 9월17일 18시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출 수문곡선이다. 침투유량은 재난감시용 CCTV가 9시00분에 385.30 m^3/sec , Kalesto가 동시간에 544.69 m^3/sec 로 159.39 m^3/sec 의 유량차이를 나타냈다. 5일 선행강우량은 183.3mm, 강우량이 661.4mm로 나타났으며, 강우량 대비 Kalesto는 60.2%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 기존의 유출률과 유사한 47.7%로 나타냈다([Table IV-25])

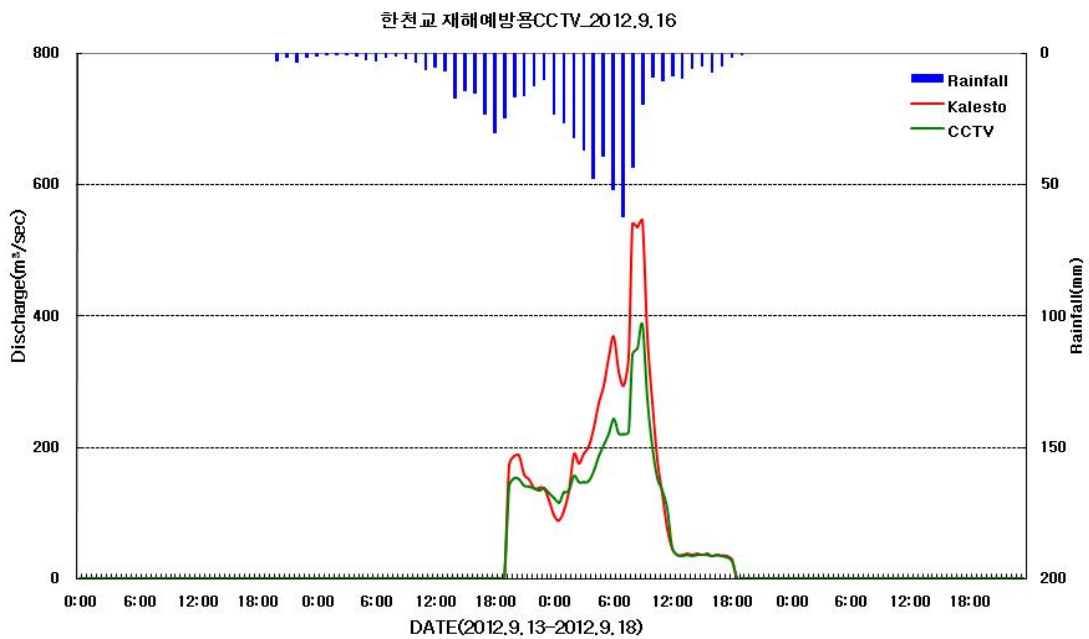


Fig. IV-29. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)

Table IV-25. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
183.3	661.4	36,681,907	24,262,980	14,596,757	11,584,378	60.2	47.7

⑧ 2013년 5월 27일 집중호우

[Fig. IV-30]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 5월27일 13시30분부터 5월28일 13시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비가 유출발생 시점부터 끝나는 시점까지 유사한 경향을 나타내고 있으나 20시30분에 Kalesto는 $126.5m^3/sec$, 재난감시용 CCTV는 $97.86m^3/sec$ 로 약 $30m^3/sec$ 의 첨두유량 유량차이를 나타냈다.

[Table IV-26]은 강우량에 따른 한천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 164.4mm, 유효강우량이 443.4mm로 나타났으며 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 16.7%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 13.5%로 두 관측장비가 유사하게 나타났지만 다른 유출사상에 비해 적은 유출을 나타냈다.

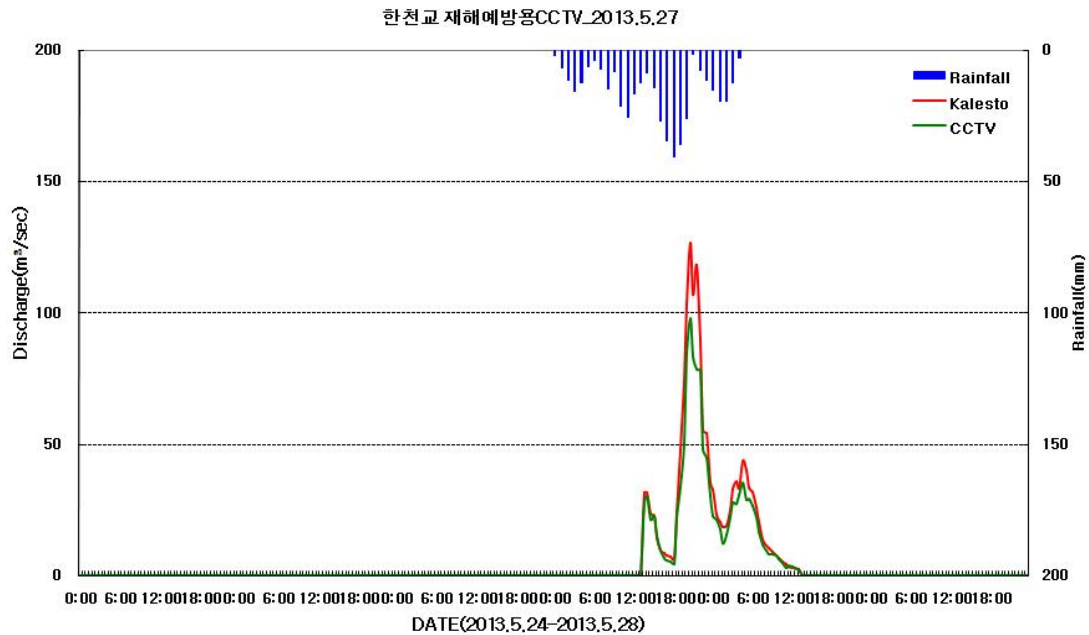


Fig. IV-30. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)

Table IV-26. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
164.4	443.4	36,681,907	16,262,924	2,717,047	2,203,232	16.7	13.5

⑨ 2014년 7월 6일 집중호우

[Fig. IV-31]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 7월 6일 9시30분부터 18시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 13시30분에 24.58 m^3/sec , Kalesto는 11시00분에 58.20 m^3/sec 의 첨두유출량을 나타냈다. Kalesto관측 결과는 시간변화에 따라 홍수유출량이 큰 폭으로 변동하는 것을 확인할 수 있다. 특히 7월 6일 10시00분부터 10시30분까지 30분 사이에 강우량이 점차 증가하는 형태를 나타지만 유출량이 54.79 m^3/sec 에서 7.96 m^3/sec 로 급작스럽게 감소하는 경향을 나타냈으며 관측 오류값으로 판단된다.

5일 선행강우량은 154.6mm, 강우량이 33.8mm로 나타났으며 강우량 대비 유출률은 Kalesto가 48.4%, 재난감시용 CCTV가 26.3%로 나타났다[Table IV-27].

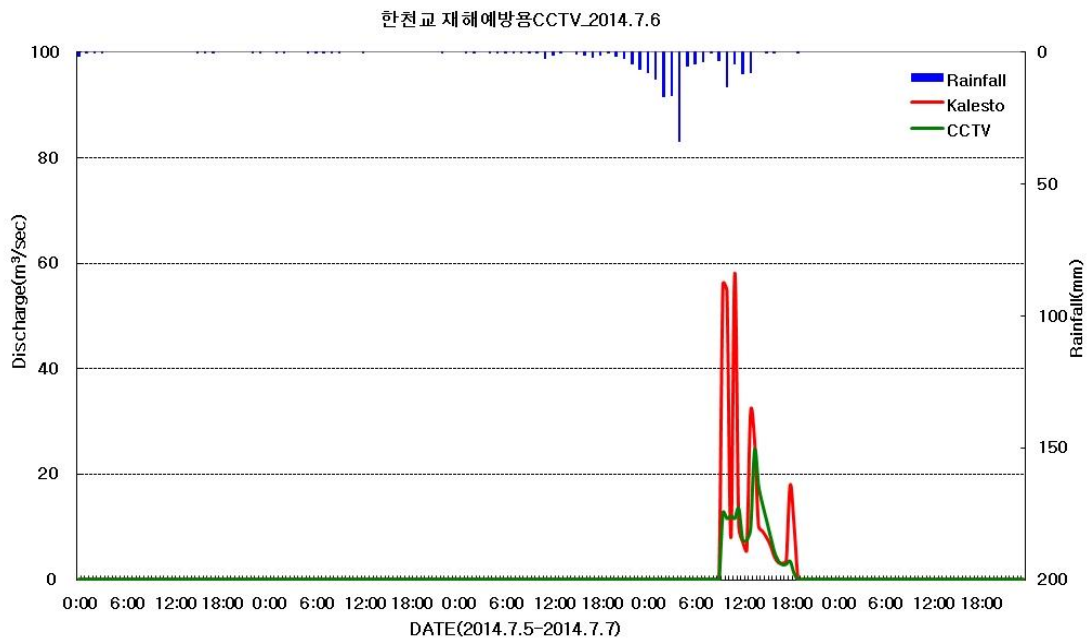


Fig. IV-31. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 6, 2014)

Table IV-27. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 6, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
154.6	33.8	36,681,907	1,240,949	601,014	326,090	48.4	26.3

⑩ 2014년 7월 9일 제8호 태풍 “너구리”

[Fig. IV-32]는 제8호 태풍 너구리(NEOGRI)의 영향에 의한 유출발생 7월 9일시 10시00분부터 7월10일 12시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출 수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 14시30분에 38.79m³/sec, Kalesto는 14시00분에 45.77m³/sec의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 273.1mm, 강우량이 178.9mm로 나타났으며 강우량 대비 유출률은 Kalesto가 20.5%, 재난감시용 CCTV가 14.5%로 나타났다([Table IV-28]).

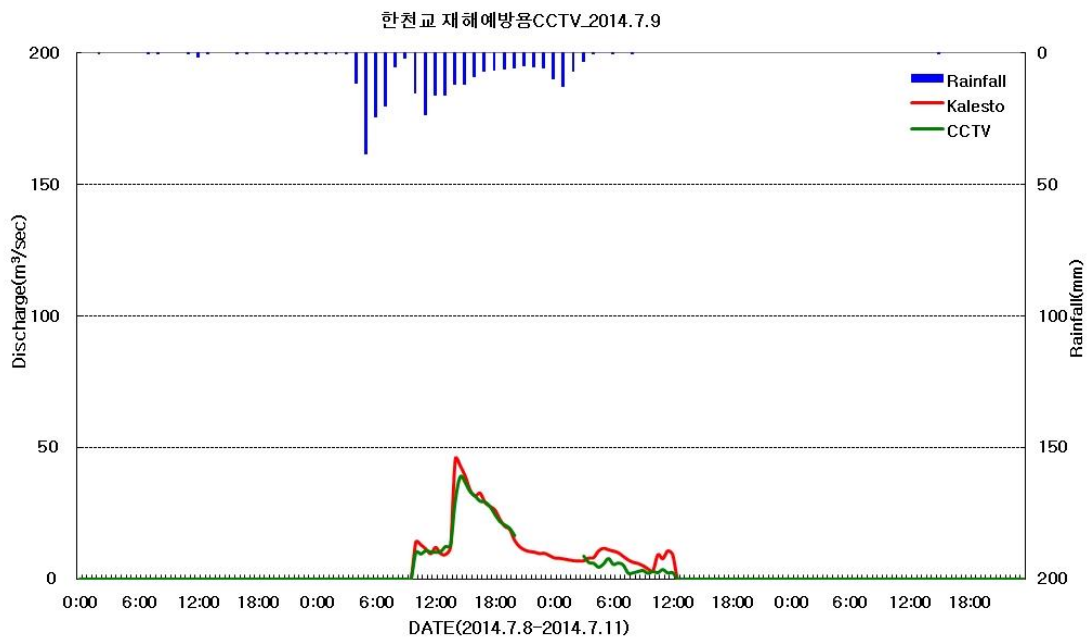


Fig. IV-32. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)

Table IV-28. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
273.1	178.9	36,681,907	6,561,660	1,347,936	950,734	20.5	14.5

① 2014년 8월 2일 제12호 태풍 “나크리”

[Fig. IV-33]는 제12호 태풍 나크리(NAKRI)의 영향에 의한 유출발생 8월 2일시 5시00분부터 8월 3일 20시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수 문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 9시00분에 331.55 m^3/sec , Kalesto는 8시00분에 257.83 m^3/sec 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 213.6mm, 강우량이 802.1mm로 나타났으며 강우량 대비 유출률은 Kalesto가 24.1%, 재난감시용 CCTV가 30.3%로 나타났다([Table IV-29]).

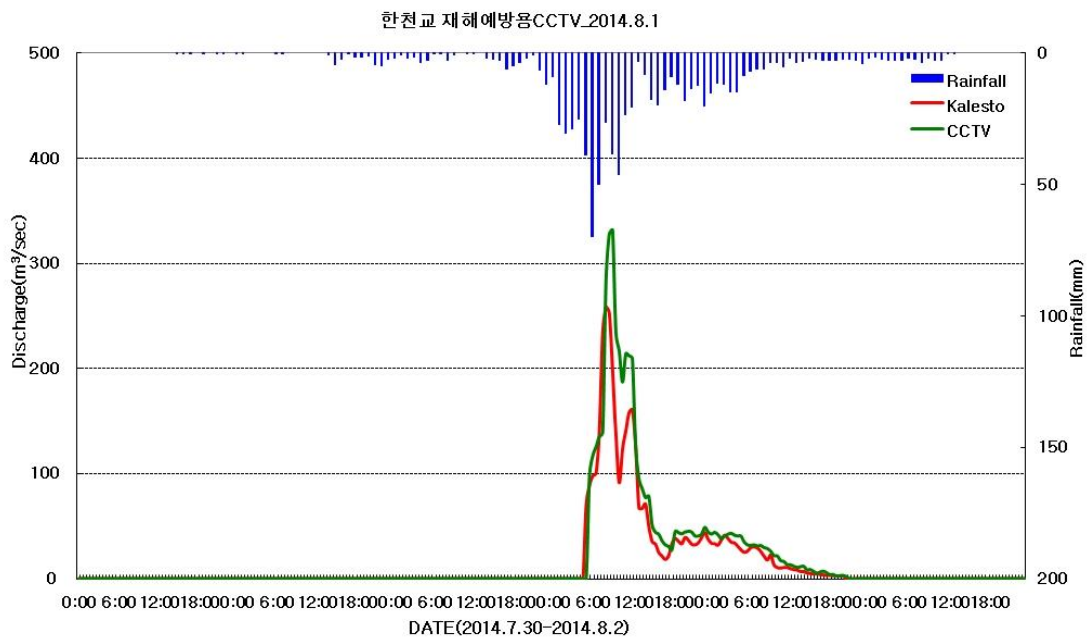


Fig. IV-33. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)

Table IV-29. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
213.6	802.1	36,681,907	29,421,824	7,078,671	8,922,395	24.1	30.3

⑫ 2014년 9월 23일 제16호 태풍 “풍잉”

[Fig. IV-34]는 제16호 태풍 풍잉(FUNG-WONG)의 영향에 의한 유출발생 9월 23일 23시30분부터 9월 24일 15시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 5시00분에 $34.64m^3/sec$, Kalesto는 동시간에 $32.84m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 160.1mm, 강우량이 136.2mm로 나타났으며 강우량 대비 유출률은 Kalesto가 14.8%, 재난감시용 CCTV가 19.5%로 나타났다([Table IV-30]).

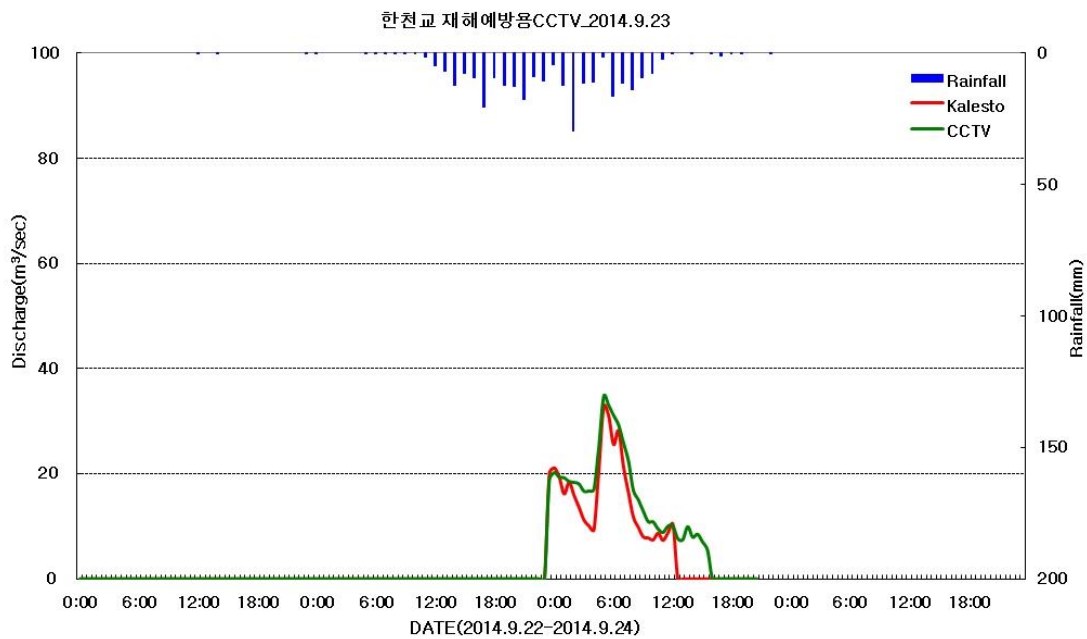


Fig. IV-34. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)

Table IV-30. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
160.1	136.2	36,681,907	4,995,709	740,735	975,867	14.8	19.5

(2) 외도천(외도정수장)

① 2012년 7월 18일 제7호 태풍 “카눈”

[Fig. IV-35]은 제7호 태풍 카눈의 영향에 의한 유출발생 시 7월 18일 19시30분부터 19일 07시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비가 21시00분경에 약 $70m^3/sec$ 의 유량이 급증하는 경향을 나타내며, 연구단CCTV는 21시30분에 $215.67m^3/sec$, Kalesto는 동시간에 $239.56m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다.

[Table IV-31]은 강우량에 따른 외도천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. Kalesto는 유출률이 72.4%로 연구단 CCTV로 산정된 유출률(45.8%)보다 높은 유출률을 나타냈다.

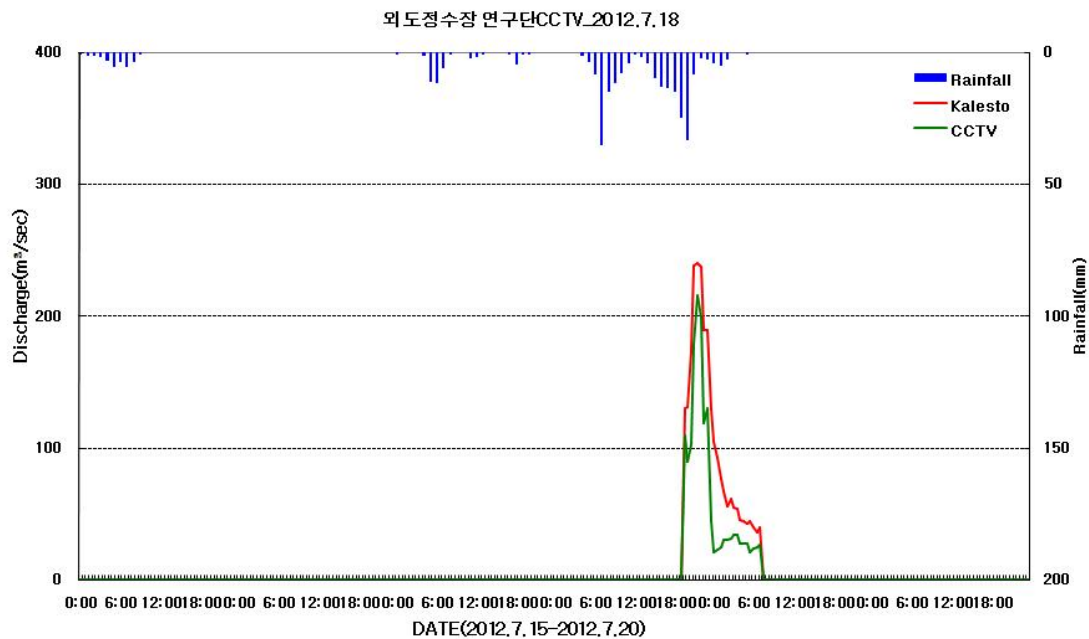


Fig. IV-35. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)

Table IV-31. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
284.2	140.3	44,472,269	6,240,794	4,521,334	2,860,944	72.4	45.8

② 2012년 8월 30일 제14호 태풍 “덴빈”

[Fig. IV-36]는 제14호 태풍 덴빈(TEMBIN)의 영향에 의한 유출발생 시 8월 30일 4시30분부터 16시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비가 5시30분에서 6시00분 사이에 약 $32m^3/sec$ 에서 $150m^3/sec$ 로 유출량이 급증하는 경향을 나타냈다. 8월30일 2시00분부터 4시00분까지 약 60mm의 강우량을 나타냈으며, 단시간의 집중강우량의 영향으로 연구단 CCTV는 6시30분에 $147.24m^3/sec$, Kalesto는 6시00분에 $186.49m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다.

[Table IV-32]은 강우량에 따른 외도천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. Kalesto는 유출률이 91.2%로 강우량 대비 매우 높은 유출을 나타냈으며, 연구단 CCTV는 53.5%의 유출률을 나타냈다.

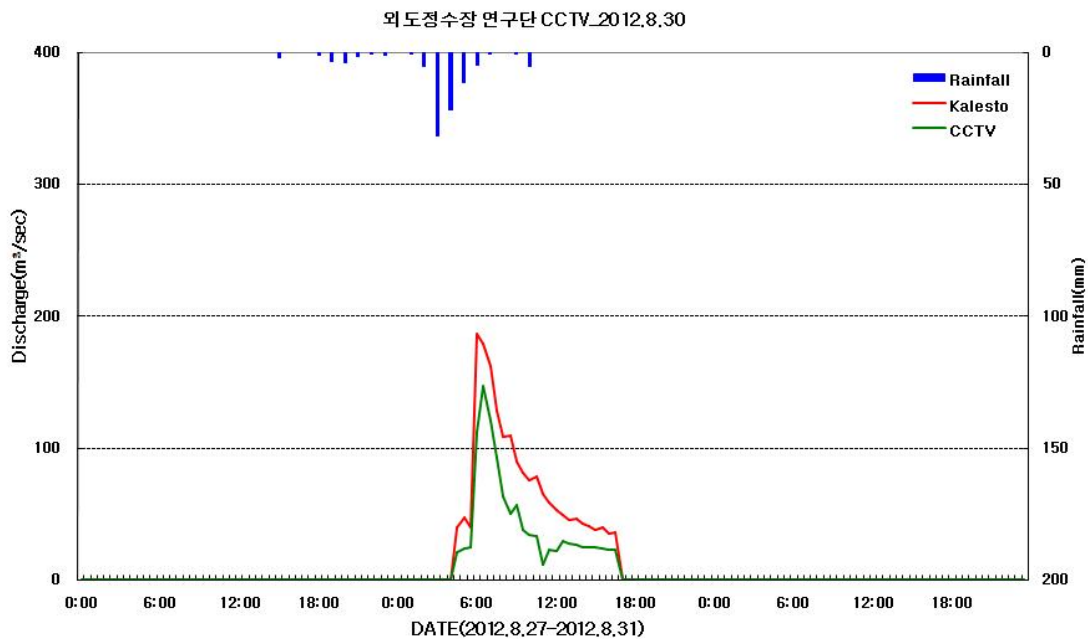


Fig. IV-36. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 30, 2012)

Table IV-32. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 30, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
649.4	98.5	44,472,269	4,382,297	3,365,637	1,976,018	76.8	45.1

③ 2012년 9월 16일 제16호 태풍 “산바”

[Fig. IV-37]은 제16호 태풍 산바(SANBAN)의 영향에 의한 유출발생 시 9월 16일 20시00분부터 17일 18시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수 문곡선이다. 두 관측장비가 20시00분에서 20시30분 사이에 약 $56m^3/sec$ 에서 $150m^3/sec$ 로 약 $100m^3/sec$ 의 유출량이 급증하는 경향을 나타냈다. 유효강우량은 9월16일 4시00분부터 17일 18시00분까지 663.1mm의 높은 강우량을 나타냈으며, 연구단 CCTV는 6시30분에 $250.21m^3/sec$, Kalesto는 7시00분에 $322.96m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. [Table IV-33]은 강우량에 따른 외도천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 태풍 산바의 영향으로 유효강우량이 663.1mm의 높은 강우량을 나타냈으며, Kalesto는 유출률이 53.0%, 연구단 CCTV는 34.7%의 유출률을 나타냈다.

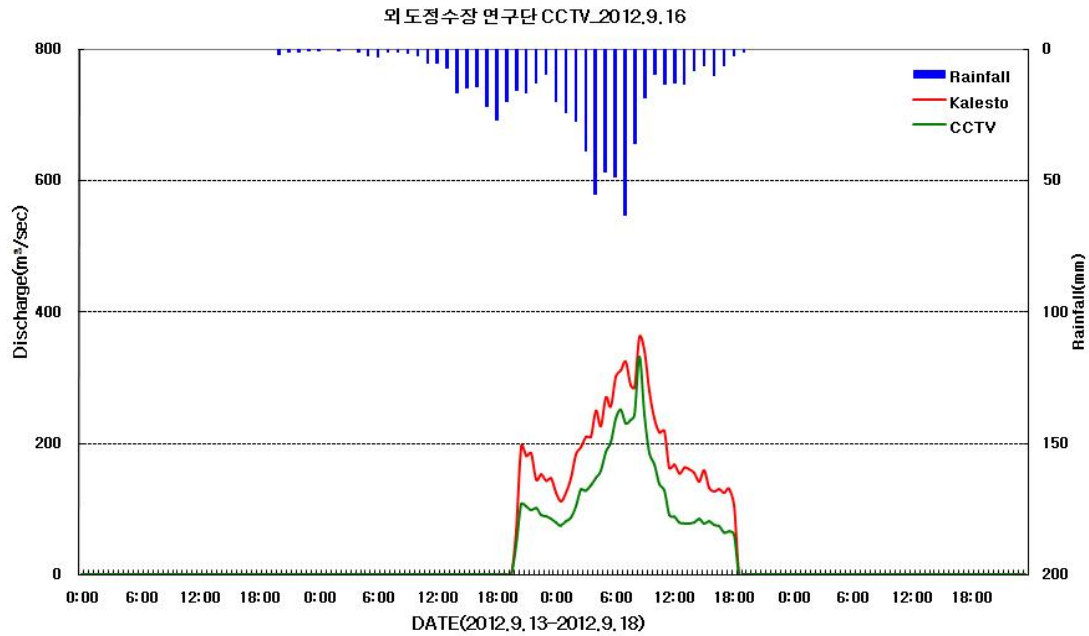


Fig. IV-37. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)

Table IV-33. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
163.1	663.1	44,472,269	29,491,341	15,631,521	10,236,372	53.0	34.7

④ 2013년 5월 27일 집중호우

[Fig. IV-38]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 5월27일 14시30분부터 5월28일 11시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 연구단 CCTV는 20시00분에 $231.88m^3/sec$, Kalesto는 21시00분에 $259.58m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 296.6mm, 강우량이 411.6mm의 높은 강우량을 나타냈으며, Kalesto는 40.9%, 연구단 CCTV는 27.0%의 유출률을 보였다([Table IV-34]).

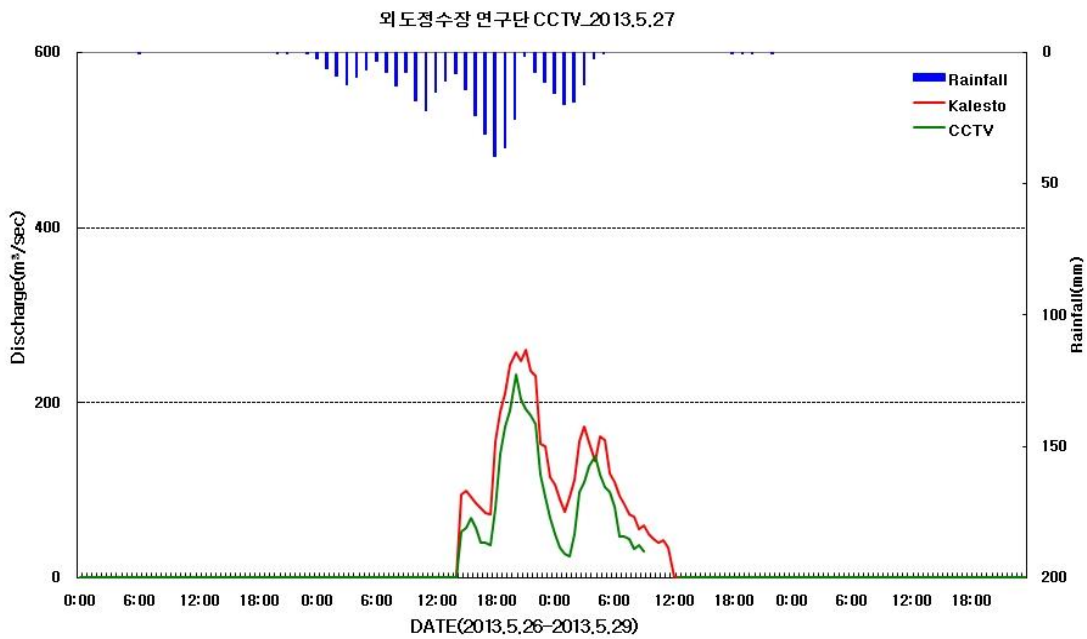


Fig. IV-38. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)

Table IV-34. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
296.6	411.6	44,472,269	18,303,452	7,457,606	4,942,861	40.9	27.0

⑤ 2014년 7월 9일 제8호 태풍 “너구리”

[Fig. IV-39]는 제8호 태풍 너구리(NEOGRI)의 영향에 의한 유출발생 7월 9일시 11시00분부터 7월10일 11시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출 수문곡선이다. 연구단 CCTV는 14시30분에 85.53m³/sec, Kalesto는 15시30분에 103.70m³/sec의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 282.3mm, 강우량이 323.0mm의 높은 강우량을 나타냈으며, Kalesto는 30.9%, 연구단 CCTV는 19.2%의 유출률을 보였다([Table IV-35]).

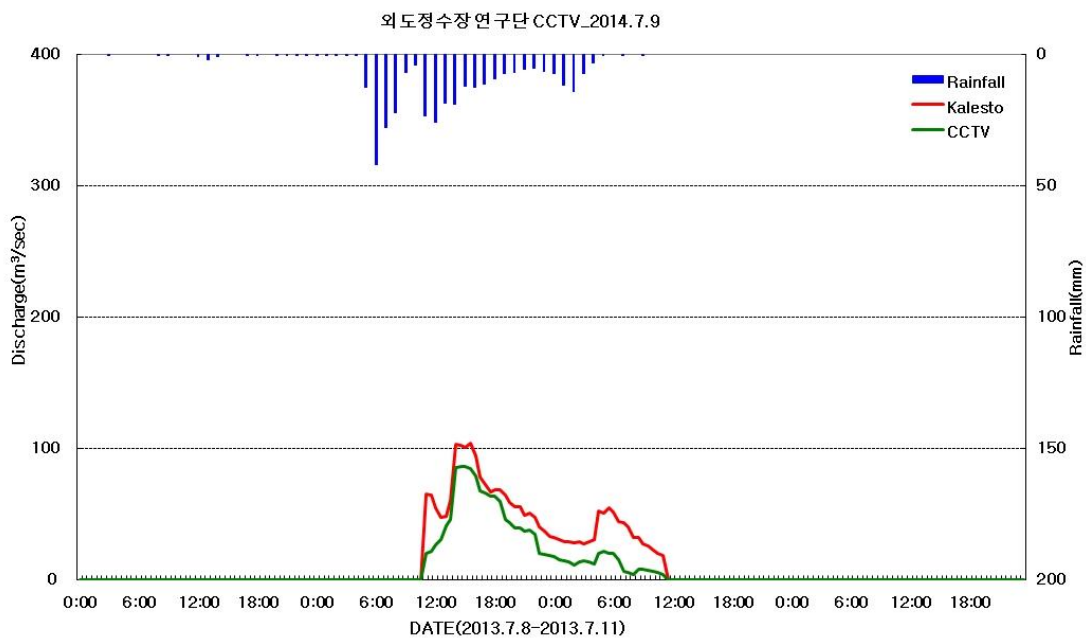


Fig. IV-39. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)

Table IV-35. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
282.3	323.0	44,472,269	14,364,988	4,440,400	2,756,657	30.9	19.2

⑥ 2014년 8월 2일 제12호 태풍 “나크리”

[Fig. IV-40]은 제12호 태풍 나크리(NAKRI)의 영향에 의한 유출발생 8월 2일시 5시00분부터 8월 3일 15시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 연구단 CCTV는 8시00분에 $274.08m^3/sec$, Kalesto는 동시간에 $312.33m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 230.2mm, 강우량이 910.4mm의 높은 강우량을 나타냈으며, Kalesto는 42.2%, 연구단 CCTV는 29.3%의 유출률을 보였다[Table IV-36].

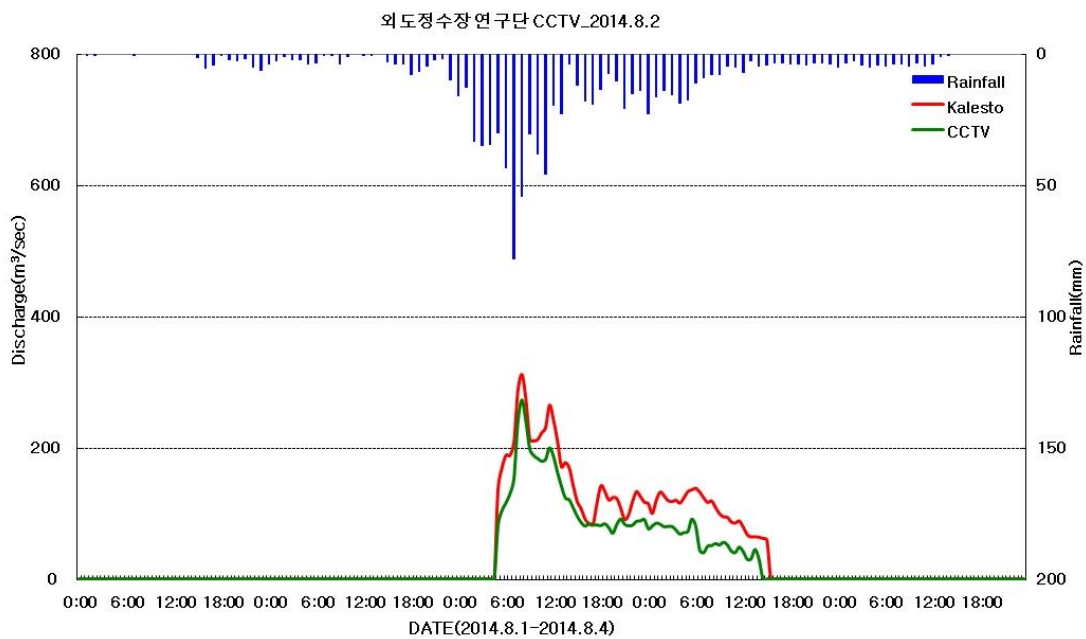


Fig. IV-40. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)

Table IV-36. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
230.2	910.4	44,472,269	40,487,109	17,086,254	11,869,973	42.2	29.3

⑦ 2014년 8월 20일 집중호우

[Fig. IV-41]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 8월 20일 9시 30분부터 8월 21일 2시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 연구단 CCTV는 16시00분에 $52.94m^3/sec$, Kalesto는 동시간에 $77.46m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 144.8mm, 강우량이 135.5mm를 나타냈으며, Kalesto는 35.2%, 연구단 CCTV는 23.6%의 유출률을 보였다([Table IV-37]).

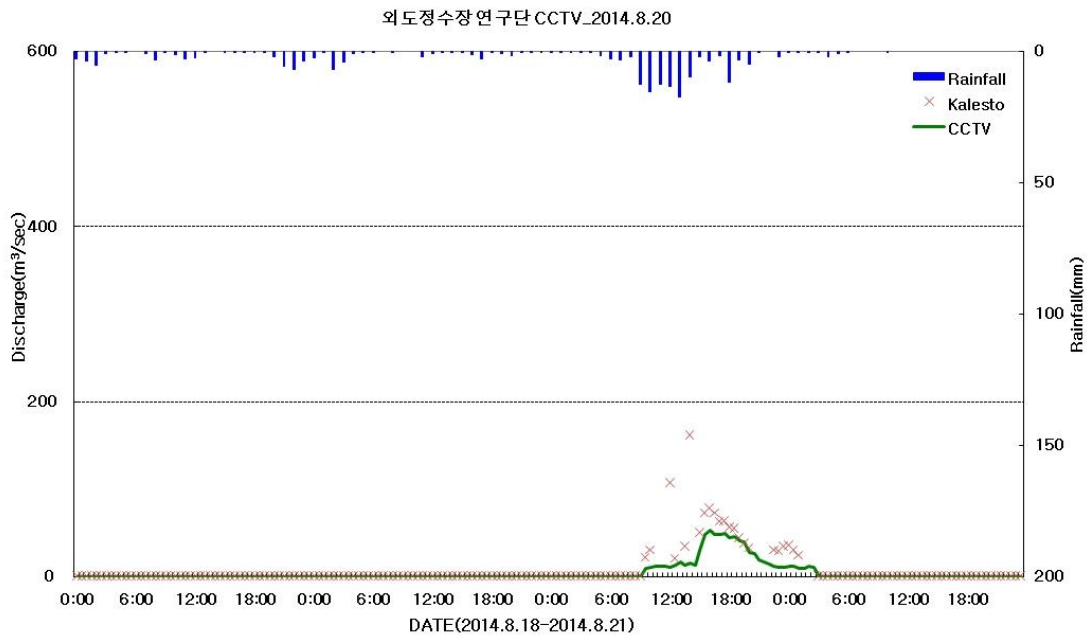


Fig. IV-41. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 20, 2014)

Table IV-37. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 20, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
144.8	135.5	44,472,269	6,023,769	2,122,142	1,422,469	35.2	23.6

⑧ 2014년 8월 24일 집중호우

[Fig. IV-42]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 8월 24일 14시 30분부터 8월 24일 19시 30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 연구단 CCTV는 14시00분에 $25.11m^3/sec$, Kalesto는 14시30분에 $61.97m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 231.3mm, 강우량이 74.0mm의 강우량을 나타냈으며, Kalesto는 14.5%, 연구단 CCTV는 10.3%의 유출률을 보였다([Table IV-38]).

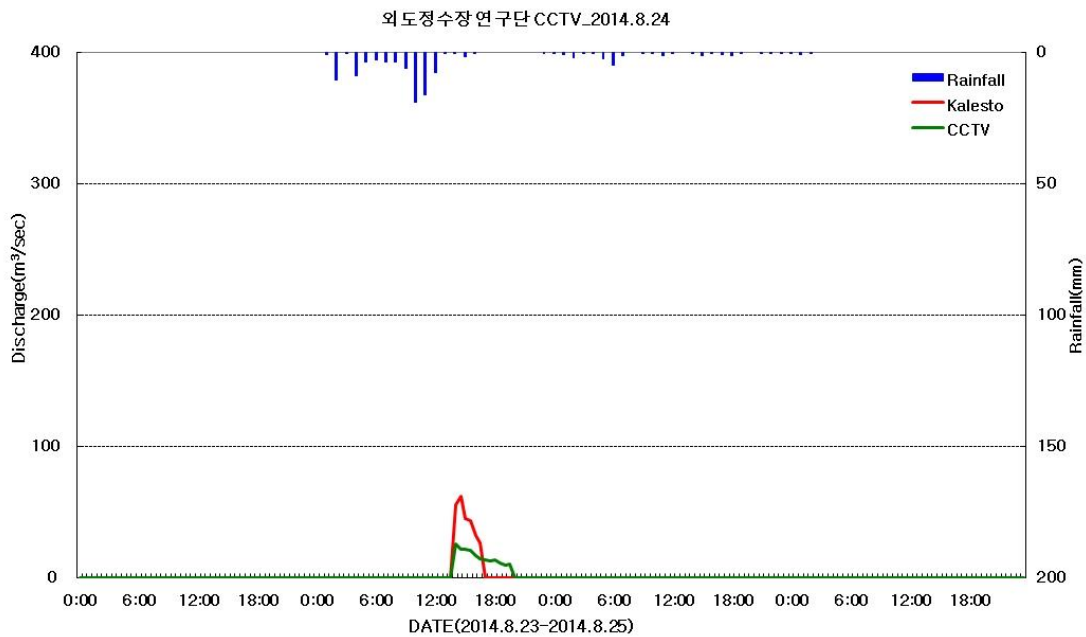


Fig. IV-42. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2014)

Table IV-38. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
231.3	74.0	44,472,269	3,289,614	475,566	339,109	14.5	10.3

⑨ 2014년 9월 18일 제16호 태풍 “풍잉”

[Fig. IV-43]은 제16호 태풍 풍잉(FUNG-WONG)의 영향에 의한 유출발생 9월 18일 일시 5시 00분부터 9월 18일 19시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 연구단 CCTV는 5시00분에 107.06 m^3/sec , Kalesto는 동시간에 120.32 m^3/sec 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 182.8mm, 강우량이 246.9mm의 높은 강우량을 나타냈으며, Kalesto는 30.1%, 연구단 CCTV는 24.3%의 유출률을 보였다([Table IV-39]).

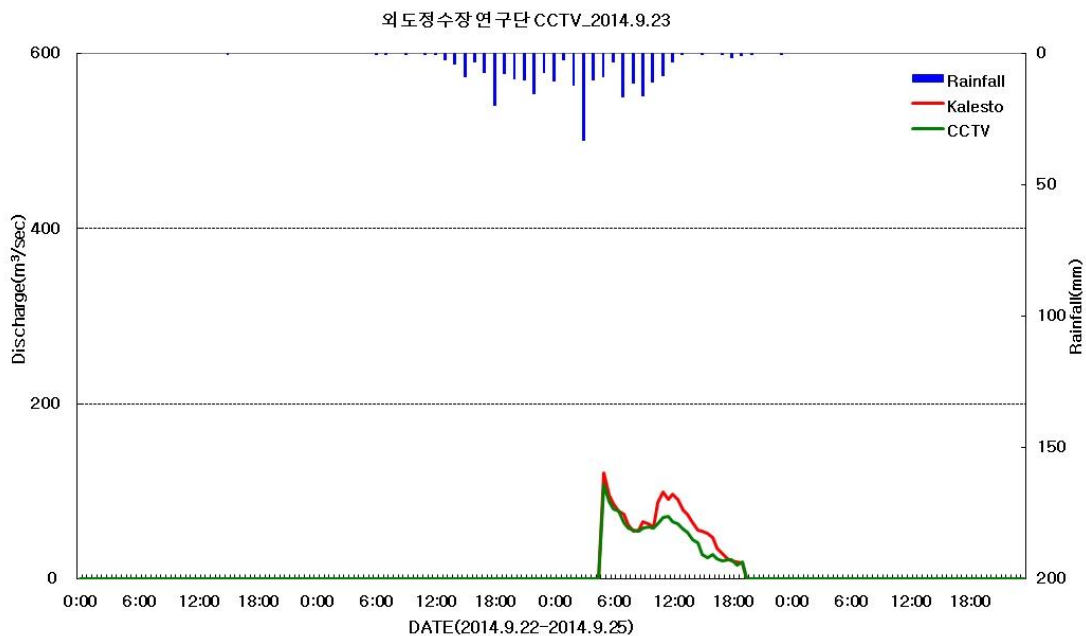


Fig. IV-43. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)

Table IV-39. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
182.8	246.9	44,472,269	10,980,203	3,309,359	2,668,552	30.1	24.3

(2) 천미천(성읍교)

① 2012년 8월 23일 집중호우

[Fig. IV-44]는 8월 23일 집중호우의 유출수문곡선이다. 연구단 CCTV는 19시30분에 $135.98m^3/sec$, Kalesto는 20시00분에 $140.62m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다. 이후 점차 감소하는 경향을 보이다가 24일 1시00분부터 2시00분까지 58.96mm의 강우의 영향으로 연구단 CCTV가 $119.70m^3/sec$, Kalesto가 $127.98m^3/sec$ 의 두 번째 첨두유량을 보이는 것으로 관측되었다. 5일 선행강우량은 181.9mm, 강우량이 432.9mm로 나타났으며, 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 21.8%, 연구단 CCTV는 19.1%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다([Table IV-40]).

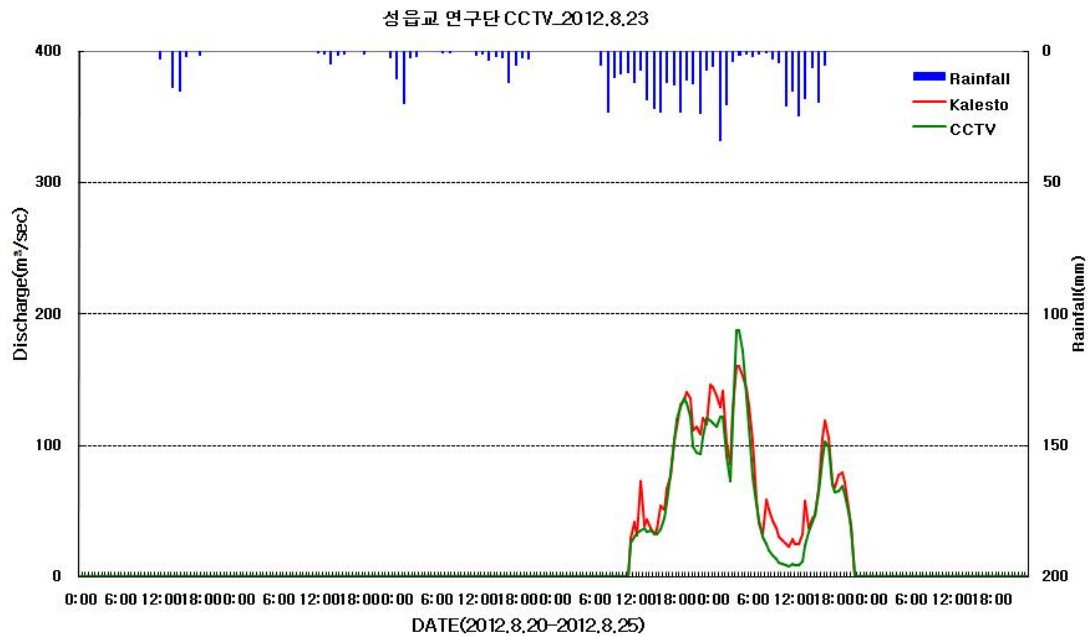


Fig. IV-44. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)

Table IV-40. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
181.9	432.9	102,423,369	44,338,052	9,662,751	8,462,302	21.8	19.1

② 2012년 8월 28일 제15호 태풍 “볼라벤”

[Fig. IV-45]은 제15호 태풍 볼라벤(BOLAVEN)의 영향에 의한 유출발생 시 8월 27일 23시00분부터 28일 13시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비가 23시00분에서 23시30분 사이에 약 $70m^3/sec$ 에서 $100m^3/sec$ 로 약 $30m^3/sec$ 의 유출량이 급증하는 경향을 나타냈다. 연구단 CCTV는 1시00분에 $157.71m^3/sec$, 동시간에 Kalesto는 $157.32m^3/sec$ 로 두 관측장비가 유사한 첨두유량을 나타냈다.

[Table IV-41]은 태풍 볼라벤의 영향에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 천미천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 478.9mm, 유효강우량은 207.9mm로 나타냈으며, 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 18.8%, 연구단 CCTV는 17.8%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다.

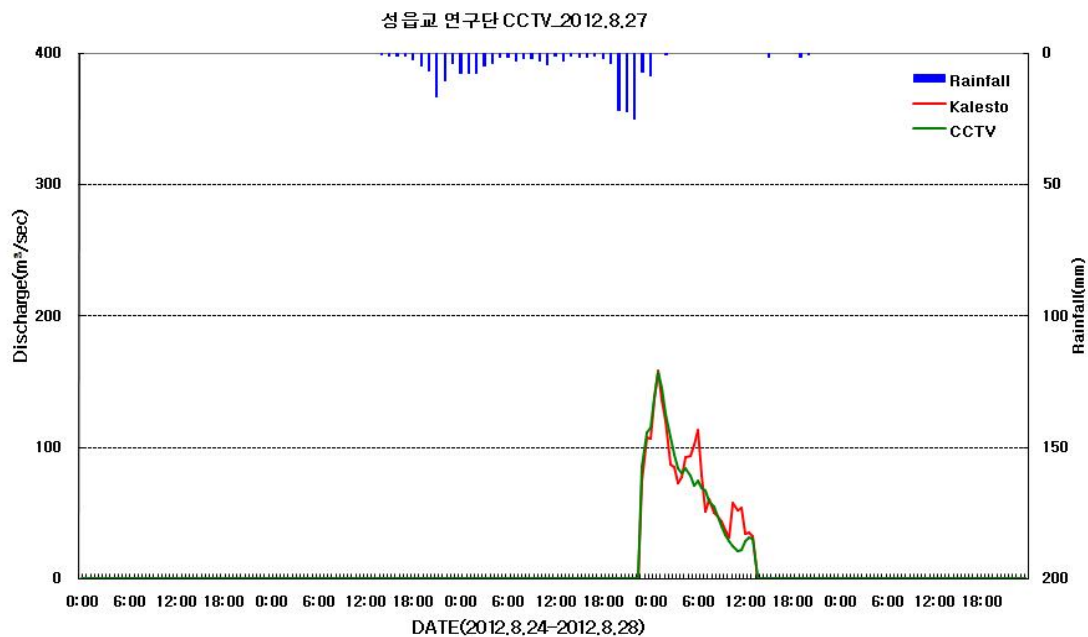


Fig. IV-45. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)

Table IV-41. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
478.9	207.9	102,423,369	21,291,770	3,992,521	3,781,294	18.8	17.8

③ 2012년 9월 16일 제16호 태풍 “산바”

[Fig. IV-46]는 제16호 태풍 산바(SANBA)의 영향에 의한 유출발생 시 9월 17일 6시30분부터 18시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이 다. 첨두유량은 10시30분에 연구단 CCTV가 476.84m³/sec, Kalesto가 동시간에 517.13m³/sec를 나타냈다.

[Table IV-42]은 태풍 산바의 영향에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 천미천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 328.7mm, 유효강우량은 427.0 mm로 나타냈으며, 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 24.2%, 연구단 CCTV는 23.4%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다.

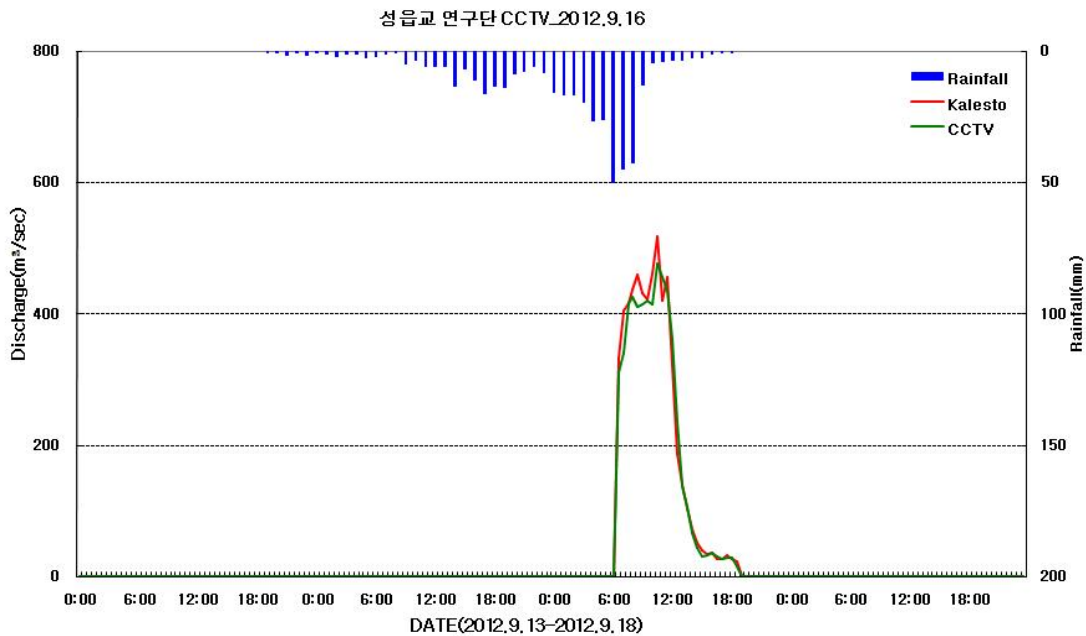


Fig. IV-46. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)

Table IV-42. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
328.7	427.0	102,423,369	43,737,851	10,570,574	10,244,788	24.2	23.4

④ 2013년 5월 27일 집중호우

[Fig. IV-47]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 5월 27일 16시30분부터 28일 16시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 유효강우량은 5월27일 7시00분터 16시00분까지 9시간 동안 93.54mm의 유출누적강우를 나타냈으며, 첩두유량은 22시30분에 연구단 CCTV가 325.72m³/sec, Kalesto가 동시간에 406.90m³/sec를 나타냈다.

[Table IV-43]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 천미천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 114.7mm, 유효강우량은 286.6mm로 단시간에 높은 강우량을 나타냈으며, 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 43.5%, 연구단 CCTV는 36.8%로 두 관측장비가 유사한 유출률을 나타냈다.

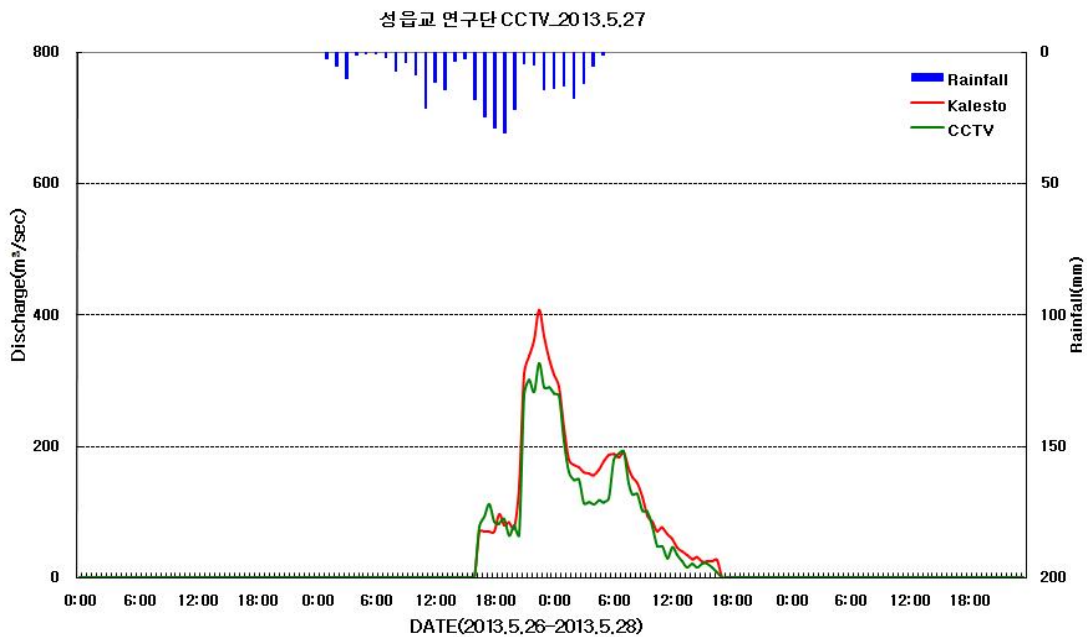


Fig. IV-47. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)

Table IV-43. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
114.7	307.8	102,423.36	31,523,864	12,757,468	10,796,297	40.5	34.2

⑤ 2014년 8월 1일 제12호 태풍 “나크리”

[Fig. IV-48]는 제12호 태풍 나크리(NAKRI)의 영향에 의한 유출발생 8월 2일시 9시 30분부터 8월 4일 3시 00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. Kalesto는 유속 자료가 결측되었으며, 침투유량은 14시00분에 연구단 CCTV가 $79.81m^3/sec$ 로 관측되었다. 5일 선행강우량이 160.9mm, 강우량은 239.9mm를 나타냈으며, 연구단 CCTV는 12.4%의 유출률을 보였다([Table IV-44]).

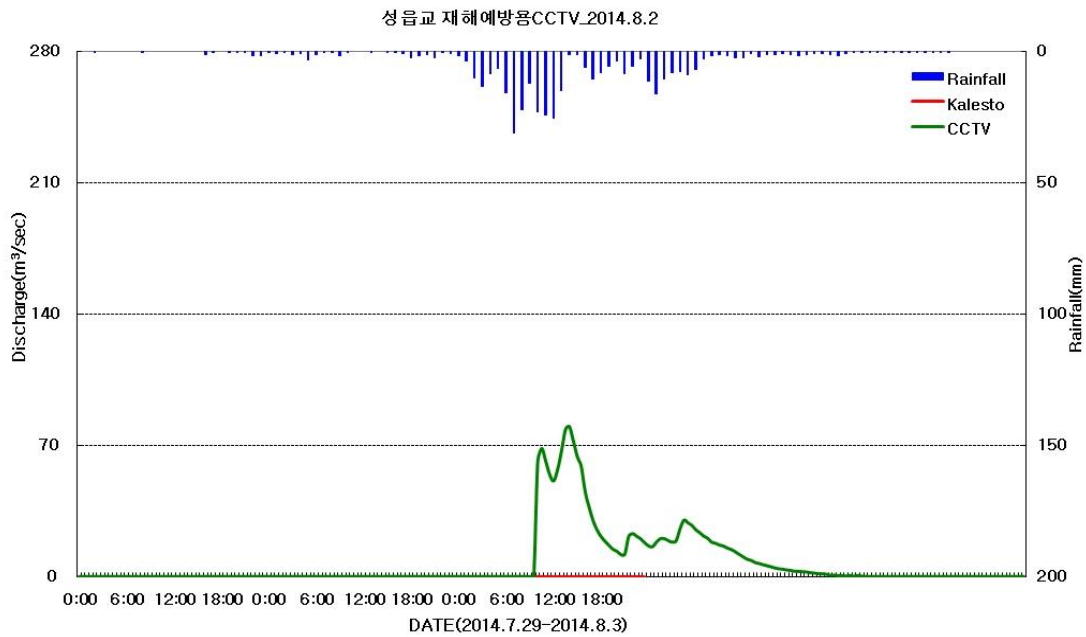


Fig. IV-48. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)

Table IV-44. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
160.9	239.9	102,423.36 9	24,566,246	-	3,050,128	-	12.4

⑥ 2014년 8월 20일 집중호우

[Fig. IV-49]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 8월 20일 12시 00분부터 8월 21일 1시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. Kalesto는 유속 자료가 결측되었으며, 침투유량은 13시00분에 연구단 CCTV가 $31.31m^3/sec$ 로 관측되었다. 5일 선행강우량이 201.9mm, 강우량은 58.8mm를 나타냈으며, 연구단 CCTV는 9.7%의 유출률을 보였다([Table IV-45]).

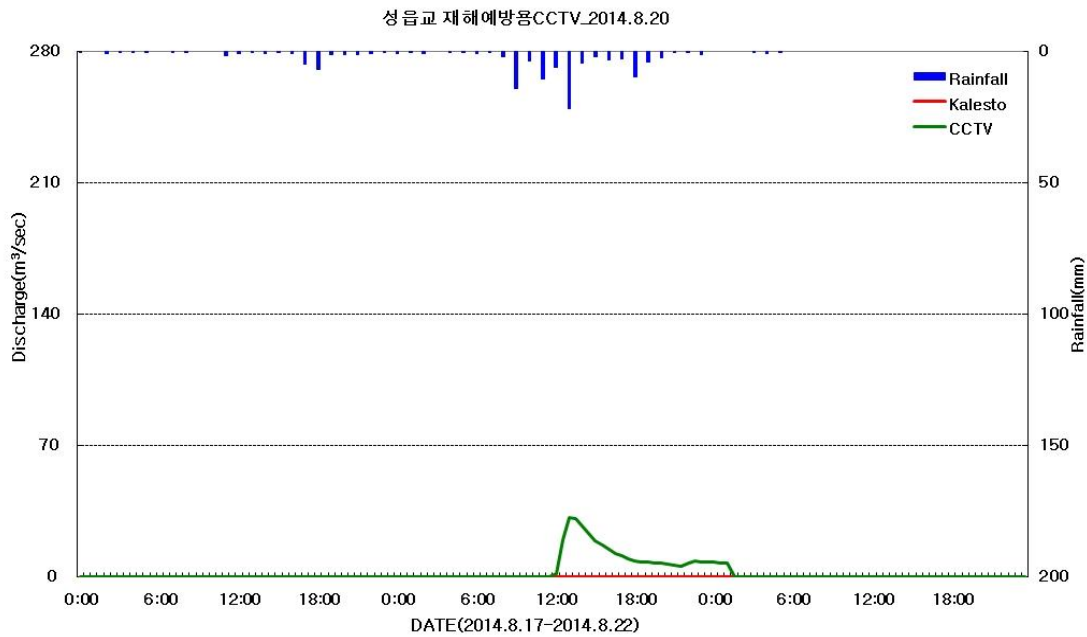


Fig. IV-49. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 20, 2014)

Table IV-45. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 20, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
201.9	58.8	102,423.36 9	6,020,446	-	585,032	-	9.7

⑦ 2014년 8월 24일 집중호우

[Fig. IV-50]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 8월 24일 11시 30분부터 8월 25일 4시 30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다.

Kalesto는 유속 자료가 결측되었으며, 첨두유량은 13시30분에 연구단 CCTV가 $40.88\text{m}^3/\text{sec}$ 로 관측되었다. 5일 선행강우량이 158.7mm, 강우량은 53.7mm를 나타냈으며, 연구단 CCTV는 10.2%의 유출률을 보였다([Table IV-46]).

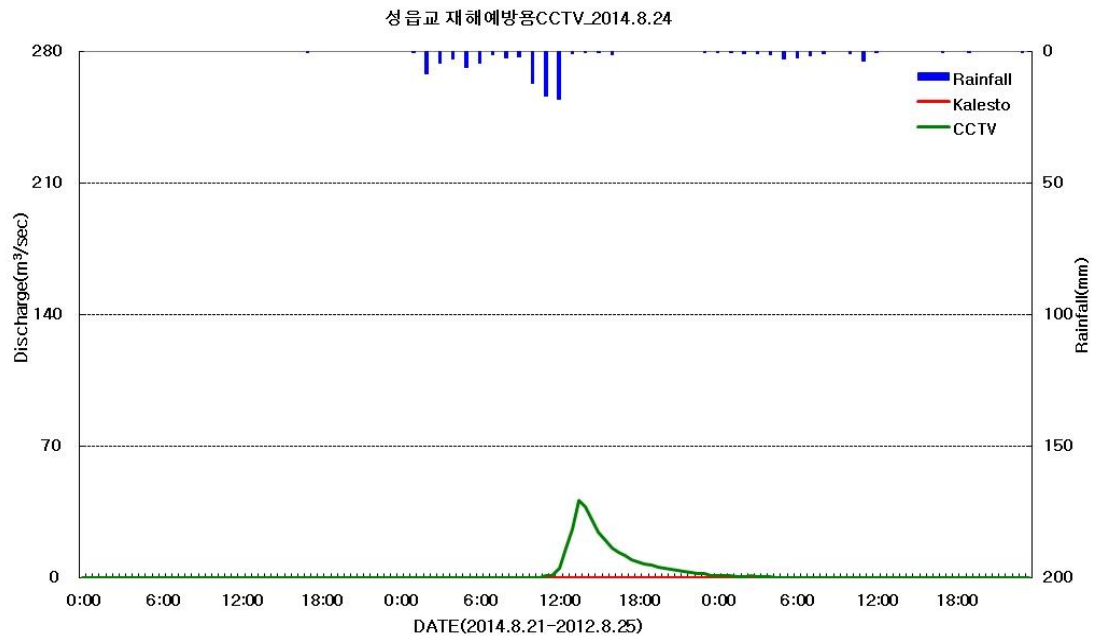


Fig. IV-50. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 24, 2014)

Table IV-46. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 24, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
158.7	53.7	102,423.36 9	5,501,159	-	562,226	-	10.2

⑧ 2014년 9월 23일 제16호 태풍 “풍잉”

[Fig. IV-51]는 제16호 태풍 풍잉(FUNG-WONG)의 영향에 의한 유출발생 9월 24일시 6시00분부터 9월 25일 2시 00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. Kalesto는 유속 자료가 결측되었으며, 침투유량은 9시00분에 연구단 CCTV가 $23.26m^3/sec$ 로 관측되었다. 5일 선행강우량이 168.2mm, 강우량은 61.0mm를 나타냈으며, 12.3%의 유출률을 보였다([Table IV-47]).

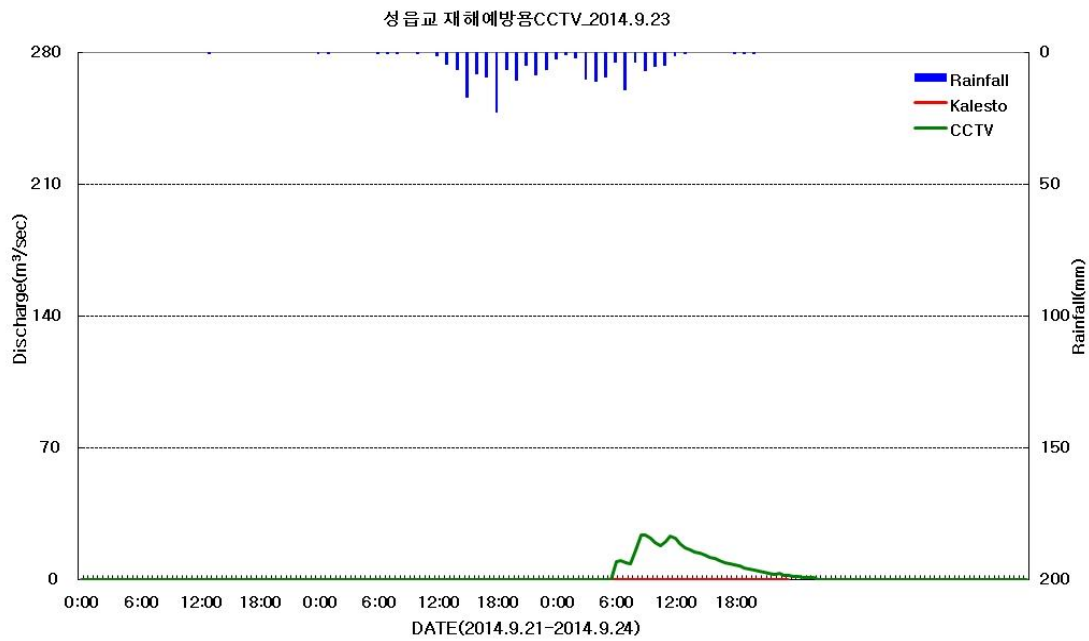


Fig. IV-51. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)

Table IV-47. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
168.2	61.0	102,423.36 9	6,245,777	-	765,352	-	12.3

(3) 한천(한북교)

① 2014년 7월 9일 제8호 태풍 “너구리”

[Fig. IV-52]는 제8호 태풍 너구리(NEOGRI)의 영향에 의한 유출발생 7월 9일시 8시 30분부터 7월 10일 11시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출 수문곡선이다. 첨두유량은 14시30분에 $29.37m^3/sec$, 총 유출량은 $6,636,857m^3$ 로 분석되었다. 5일 선행강우량이 271.1mm, 강우량은 180.9mm이며, 강우량 대비 유출률은 13.4%로 나타났다([Table IV-48]).

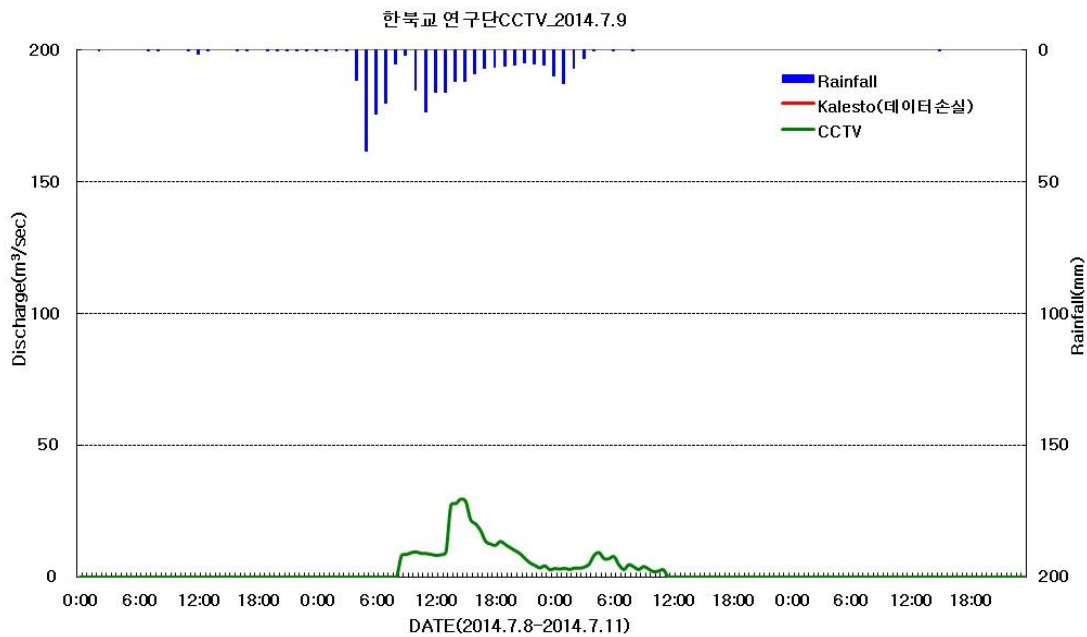


Fig. IV-52. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)

Table IV-48. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
271.1	180.9	36,681,907 9	6,636,857	-	876,357	-	13.4

② 2014년 8월 2일 제12호 태풍 “나크리”

[Fig. IV-53]는 제12호 태풍 나크리(NAKRI)의 영향에 의한 유출발생 8월 2일시 4시30분부터 8월 3일 17시 30분까지 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이 다. (Kalesto의 결측 값 제외). 첨두유량은 8시00분에 연구단 CCTV가 227.98 m^3/sec , Kalesto가 동시간에 346.97 m^3/sec 로 관측되었다. 5일 선행강우량이 213.6mm, 강우량은 802.1mm로 단시간에 높은 강우량을 나타냈으며, 강우량 대비 Kalesto는 12.2%, 연구단 CCTV는 19.1%로 나타났다([Table IV-49]).

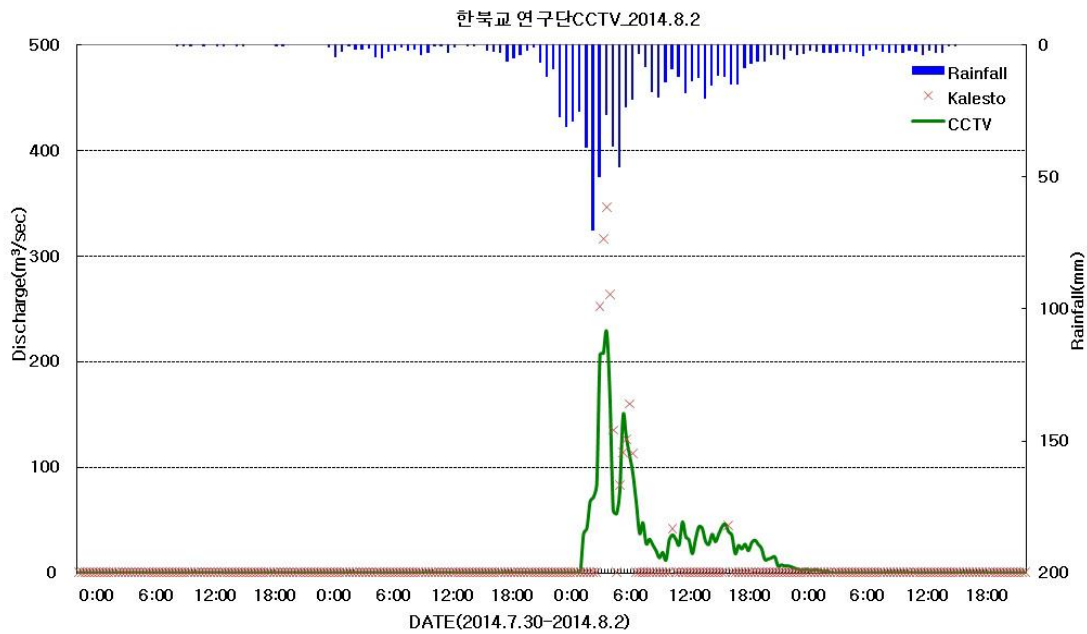


Fig. IV-53. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)

Table IV-49. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
213.6	802.1	36,681,907	29,421,824	3,596,856	765,352	12.2	19.1

③ 2014년 9월 23일 제16호 태풍 “풍왕”

[Fig. IV-54]는 제16호 태풍 풍왕(FUNG-WONG)의 영향에 의한 유출발생 9월 23일 21시 30분부터 9월 24일 17시 30분까지 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수 문곡선이다. Kalesto는 모든 관측 값이 결측되었으며, 연구단 CCTV의 첨두유량은 4시30분에 $13.65m^3/sec$, 총 유출량은 $393,232m^3$ 로 분석되었다. 5일 선행강우량이 117.03mm, 강우량은 229.4mm이며, 강우량 대비 재난감시용 CCTV의 유출률은 7.9%로 나타났다([Table IV-50]).

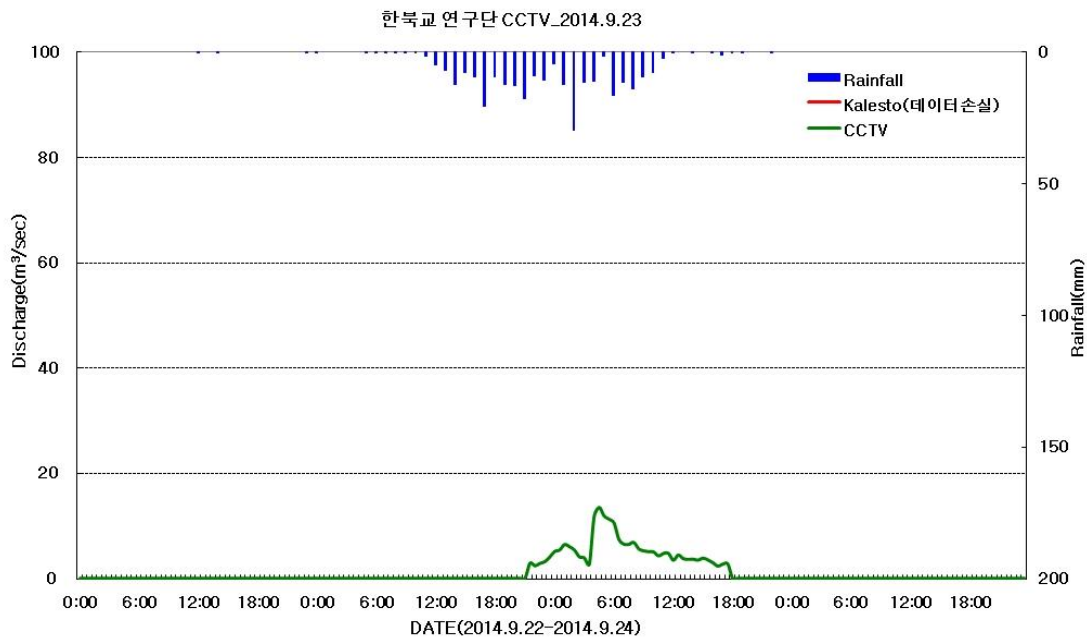


Fig. IV-54. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 23, 2014)

Table IV-50. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 23, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto	CCTV	Kalesto	CCTV
117.03	229.4	36,681,907	8,412,995	-	393,232	-	7.9

4.1.2 미세측유역의 강우-유출특성 분석

(1) 병문천(삼오교)

① 2012년 4월 21일 집중호우

[Fig. IV-55]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월21일 7시00분부터 23시30분까지 제2신성교 Kalesto와 삼오교의 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유출수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 15시00분에 35.01 m^3/sec , 동시간에 Kalesto는 23.96 m^3/sec 의 첨두유량을 나타냈다.

[Table IV-51]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 141.0mm, 유효강우량이 271.8mm로 나타났으며 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 13.6%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 21.9%로 나타났다.

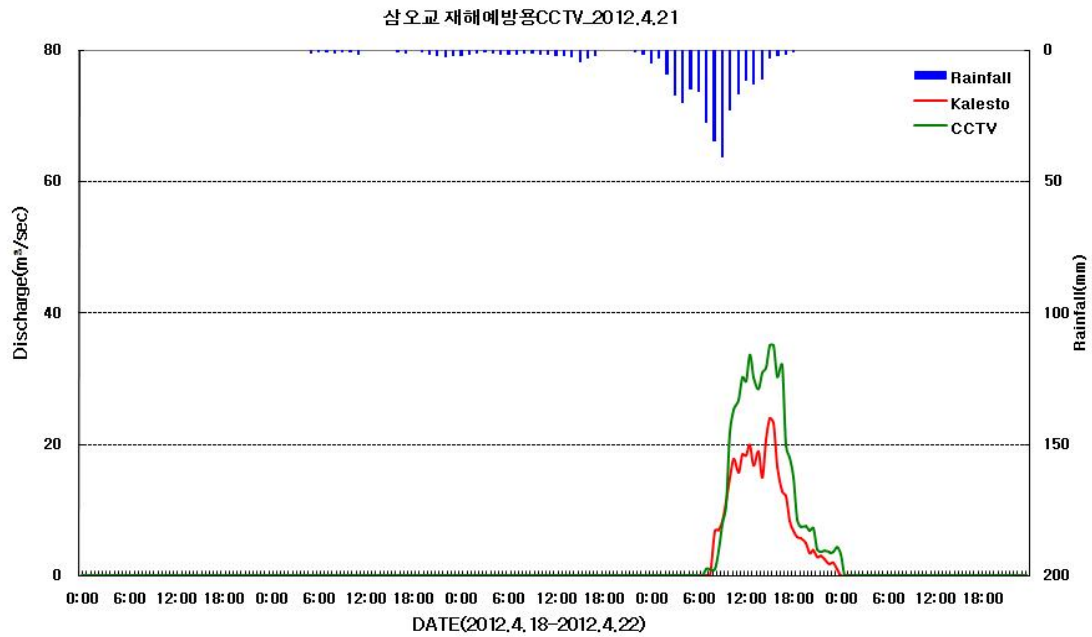


Fig. IV-55. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 21, 2012)

Table IV-51. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
141.0	271.8	16,982,086	4,616,071	628,109	1,010,276	13.6	21.9

② 2012년 4월 25일 집중호우

[Fig. IV-56]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월25일 8시30분부터 19시30분까지 제2신성교 Kalesto와 삼오교의 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 9시00분에 $12.68m^3/sec$, Kalesto는 8시30분에 $6.85m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다.

[Table IV-52]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 21일 유출사상의 영향으로 427.5mm로 산정되었으며 유효강우량은 130.4mm로 나타났다. 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 3.8%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 9.7%로 나타났다.

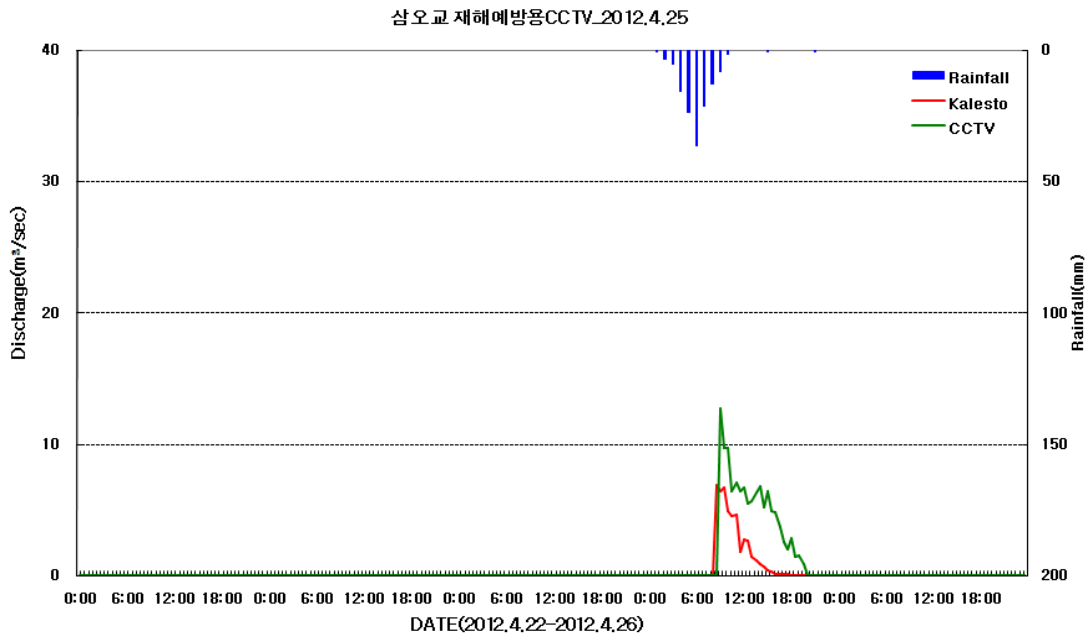


Fig. IV-56. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)

Table IV-52. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
427.5	130.4	16,982,086	2,213.785	83,146	213,920	3.8	9.7

③ 2012년 7월 18일 제7호 태풍 “카눈”

[Fig. IV-57]은 제7호 태풍 카눈(KHANUN)의 영향에 의한 유출발생 시 7월18일 15시00분부터 19일 6시30분까지 제2신성교 Kalesto와 삼오교의 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유출수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 1시00분에 $9.87m^3/sec$, Kalesto는 21시00분에 $7.44m^3/sec$ 의 첨두유량을 나타냈다.

[Table IV-53]은 태풍 카눈에 의한 유출발생 시 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 173.6mm로 산정되었으며 유효강우량은 193.6mm로 나타났다. 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 2.8%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 8.2%로 나타났다.

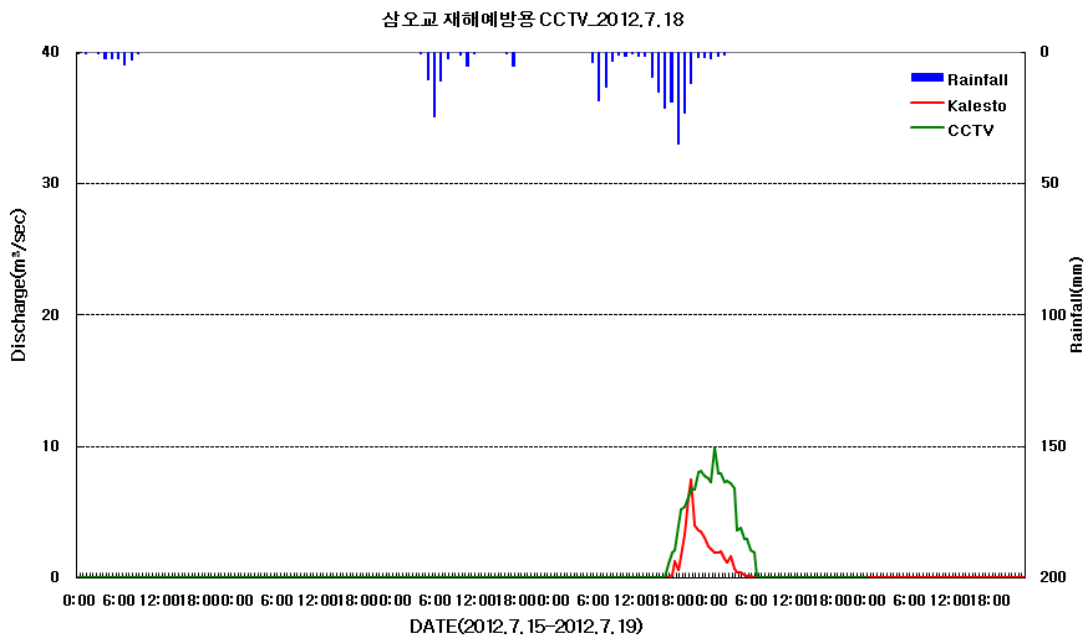


Fig. IV-57. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)

Table IV-53. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
173.6	193.2	16,982,086	3,280,430	91,726	268,524	2.8	8.2

④ 2012년 8월 23일 집중호우

[Fig. IV-58]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 8월23일 14시00분부터 24일 12시00분까지 제2신성교 Kalesto와 삼오교의 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다.다. 첨두유량은 제2신성교 Kalesto가 17시30분에 $20.90m^3/sec$ 를 나타냈으며 삼오교 CCTV는 18시00분에 $27.46m^3/sec$ 를 나타냈다. 이후 24일 1시00분부터 2시30분까지 48.08mm의 집중호우의 영향으로 제2신성교 Kalesto는 3시00분에 $13.01m^3/sec$, 삼오교 CCTV는 동시간에 23.56 cms로 두 번째 첨두유량을 나타냈다. 총 유출량은 삼오교 CCTV의 유출량이 $376.11m^3/sec$, 제2신성교 Kalesto의 총 유출량은 $170.90m^3/sec$ 로 $205.21m^3/sec$ 로 상당한 유출량 차이를 나타냈다.

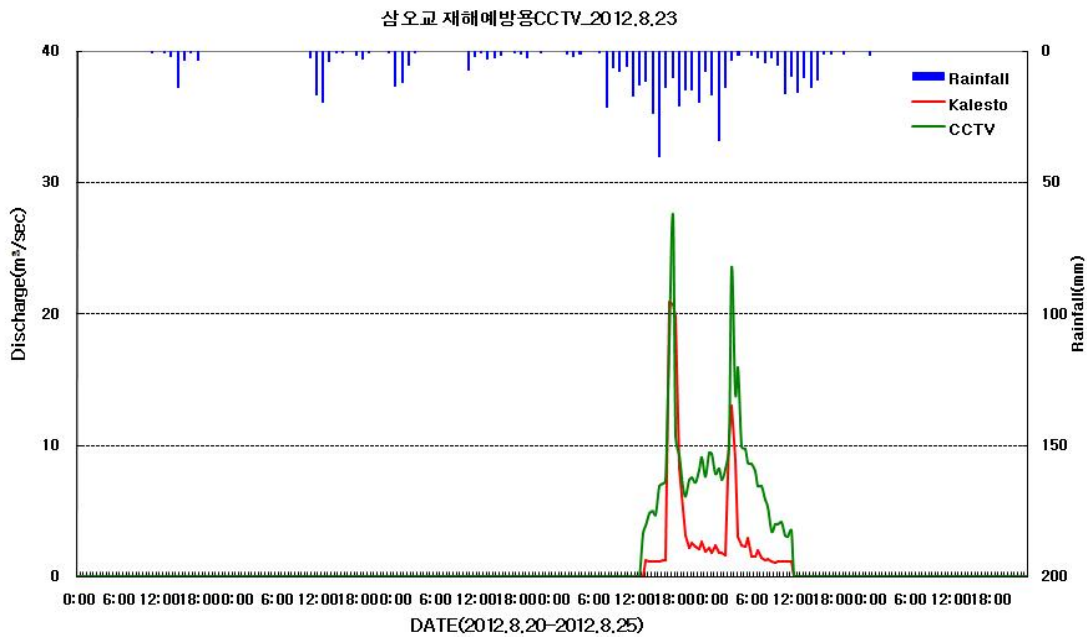


Fig. IV-58. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)

Table IV-54. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
209.7	419.6	16,982,086	1,540,785	307,619	671,134	4.3	9.4

⑤ 2012년 8월 28일 제15호 태풍 “볼라벤”

제15호 태풍 “볼라벤”발생 시 재난감시용 CCTV는 27일 23시30분부터 30일 18시 30분까지 CCTV의 접속문제로 인해 [Fig. IV-60]과 같이 유출영상을 확보하지 못하였다.

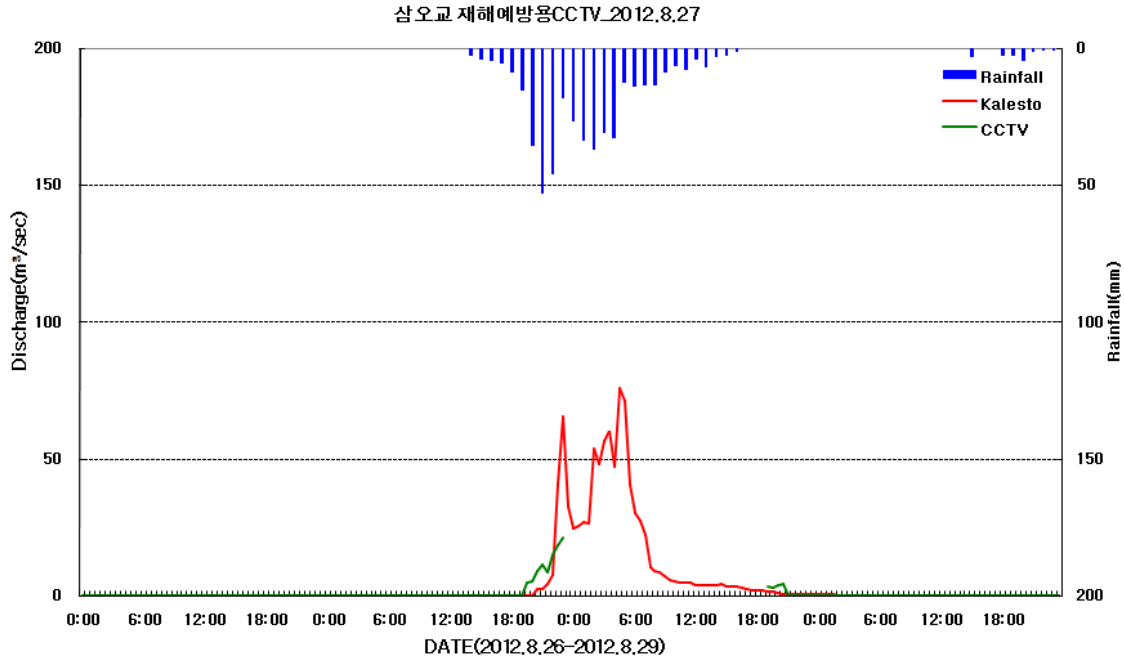


Fig. IV-59. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)

Table IV-55. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
465.8	448.2	16,982,086	7,611,880	1,626,089.2	-	21.4	-



Fig. IV-60. Low-quality video of Disaster Monitoring CCTV system

⑥ 2012년 8월 30일 제14호 태풍 “덴빈”

[Fig. IV-61]은 제14호 태풍 덴빈(TEMBIN)의 영향에 의한 유출발생 시 8월30일 3시30분부터 18시00분까지 제2신성교 Kalesto와 삼오교의 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유출수문곡선이다. 삼오교 CCTV의 첨두유출량은 6시00분에 $13.65m^3/sec$, 제2신성교 Kalesto의 첨두유출량은 동시간에 $5.14m^3/sec$ 를 나타냈다. 총 유출량은 삼오교 CCTV가 $92.55m^3/sec$, Kalesto가 $46.32m^3/sec$ 로 두 관측장비의 관측값이 $46.23m^3/sec$ 의 차이를 나타냈다. 5일 선행강우량이 $504.3mm$ 로 산정되었으며 유효강우량은 $78.0mm$ 로 나타났다. 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 6.3%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 15.9%로 나타났다.

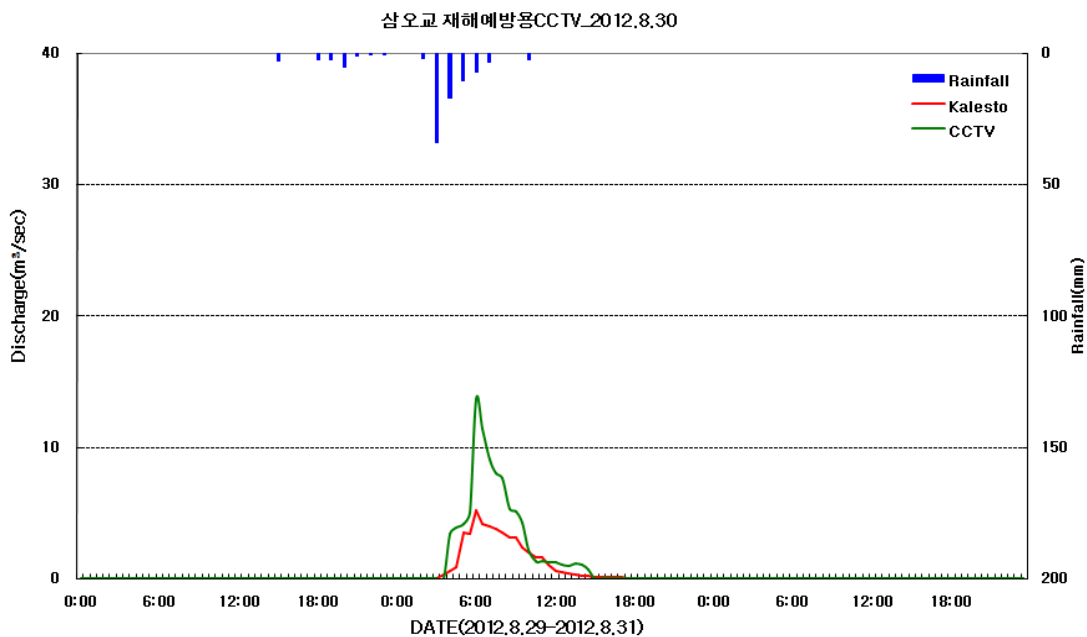


Fig. IV-61. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 30, 2012)

Table IV-56. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 30, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
504.3	78.0	16,982,086	1,324,603	83,383	210,771	6.3	15.9

⑦ 2012년 9월 16일 제16호 태풍 “산바”

[Fig. IV-62]는 제16호 태풍 산바(SANBA)의 영향에 의한 유출발생 시 9월16일 14시30분부터 18일 14시30분까지 제2신성교 Kalesto와 삼오교의 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 제2신성교 Kalesto의 관측 자료는 17일 7시30분 9시30분까지의 수위·유속자료가 결측되었으며, 3시30분 7시00분까지 최대 $68.07m^3/sec$ 에서 최소 $31.18m^3/sec$ 의 유출값이 30분 간격으로 변동하는 결과를 나타냈다. 삼오교 CCTV의 침투유출량은 9시30분에 발생하였다. 5일 선행강우량이 504.3mm로 산정되었으며 유효강우량은 78.0mm로 나타났다. 강우량 대비 Kalesto는 유출률이 14.7%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 28.3%로 나타났다.

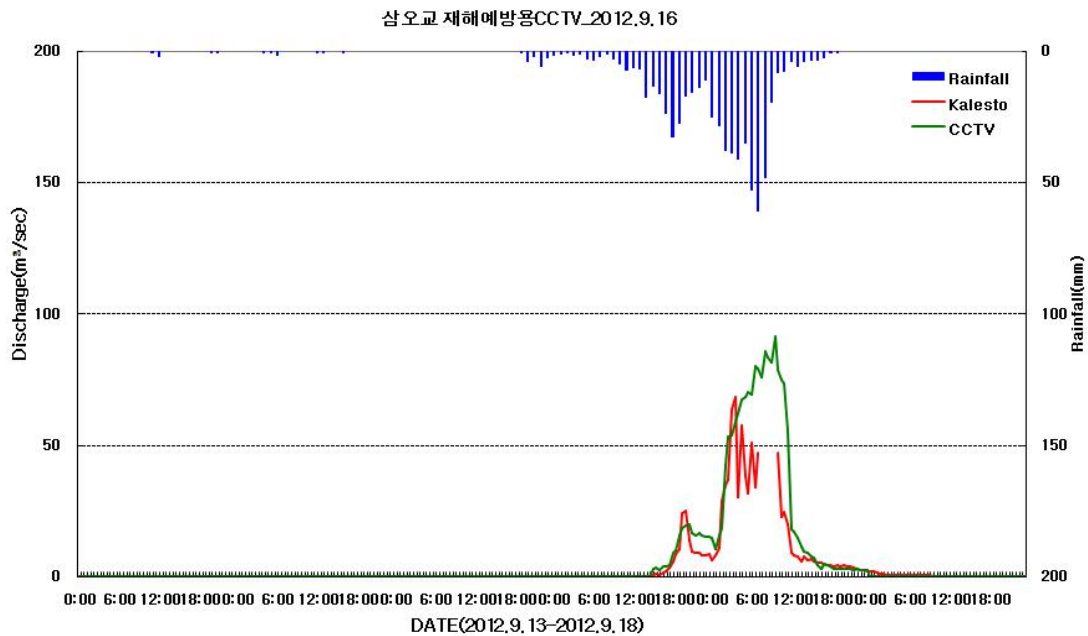


Fig. IV-62. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)

Table IV-57. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2신성교)	CCTV	Kalesto (제2신성교)	CCTV
670.7	547.8	16,982,086	9,303,466	1,690,059	3,259,091	14.7	28.3

⑧ 2013년 5월 27일 집중호우

[Fig. IV-63]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 5월27일 13시30분부터 28일 11시30분까지 제2신성교 Kalesto, 삼오교의 Kalesto와 재난감시용 CCTV 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용하한 유출수문곡선이다. 삼오교의 Kalesto 자료는 제주시청 재난관리과에서 2013년 2월에 설치·운영되었으며, 이후 5월27일에 발생한 유출사상에 대한 관측 자료를 수집하여 동일 지점을 관측하는 CCTV의 유출자료와 비교·분석하였다. 삼오교 지점의 CCTV와 kalesto의 유출량 변동이 비슷한 경향을 나타내지만 약 476m상류부의 제2신성교 Kalesto는 유출량 변동이 유사하게 나타나지만 산정된 값에서 약 $10m^3/sec$ 의 적은 유출량을 나타냈다.

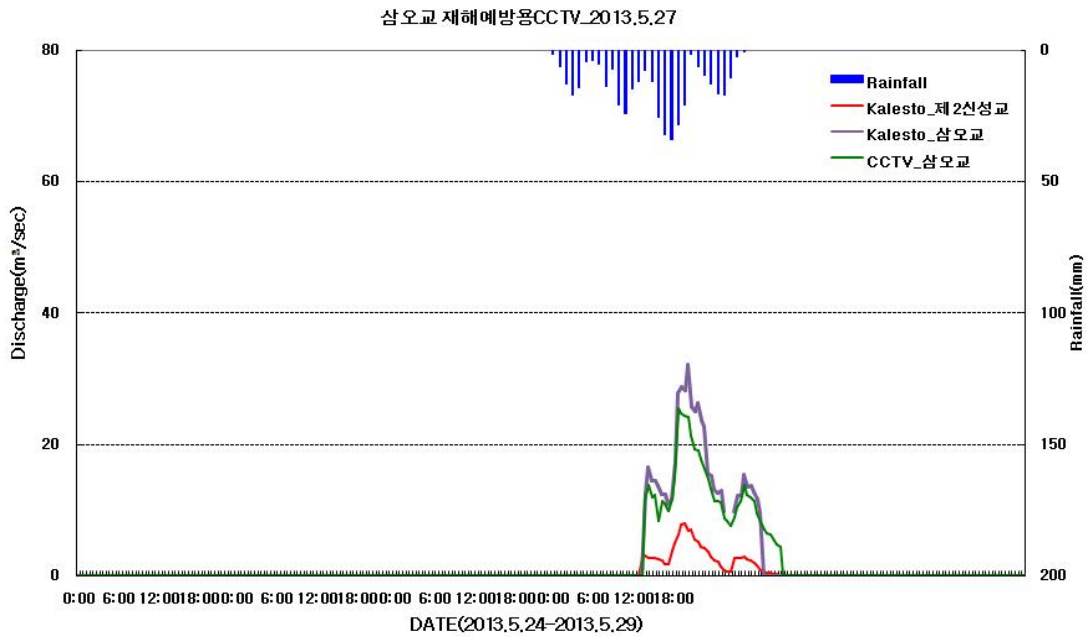


Fig. IV-63. Hydrograph and comparison of flow discharges(May 27, 2013)

Table IV-58. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(May 27, 2013)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (삼오교)	CCTV	Kalesto (삼오교)	CCTV
159.5	400.1	16,982,086	6,795,042	1,016,994	944,920	15.0	13.9

⑨ 2014년 7월 9일 제8호 태풍 “너구리”

[Fig. IV-64]는 제8호 태풍 너구리(NEOGRI)의 영향에 의한 유출발생 7월 9일시 10시 30분부터 7월10일 24시00분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 15시00분에 17.5 m^3/sec , Kalesto는 14시30분에 25.0 m^3/sec 의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 170.4mm, 강우량이 207.6mm이며, 강우량 대비 Kalesto는 10.9%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 9.3%로 나타났다([Table IV-59]).

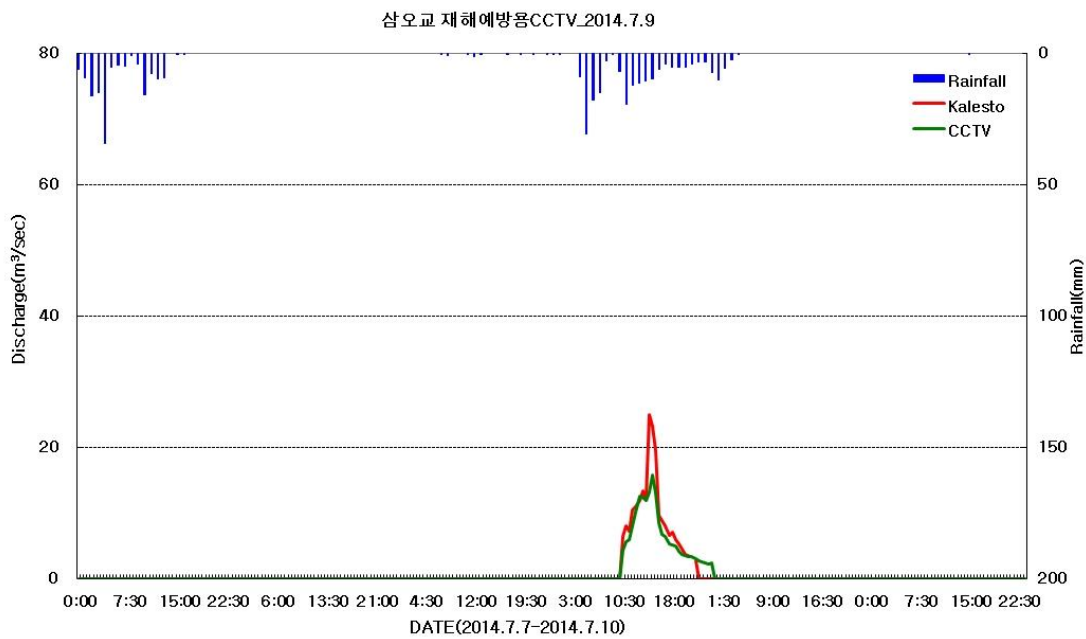


Fig. IV-64. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 9, 2014)

Table IV-59. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 9, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (삼오교)	CCTV	Kalesto (삼오교)	CCTV
170.4	207.6	16,982,086	3,524,632	386,808	328,530	10.9	9.3

⑩ 2014년 8월 2일 집중호우

[Fig. IV-65]은 제12호 태풍 나크리(NAKRI)의 영향에 의한 유출발생 8월 2일시 5시 30분부터 8월 2일 23시 30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출 수문곡선이다. 재난감시용 CCTV는 8시30분에 30.83m³/sec, Kalesto는 8시00분에 69.88m³/sec의 첨두유량을 나타냈다. 5일 선행강우량은 174.7mm, 강우량이 477.7mm이며, 강우량 대비 Kalesto는 22.0%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 11.2%로 나타났다([Table IV-60]).

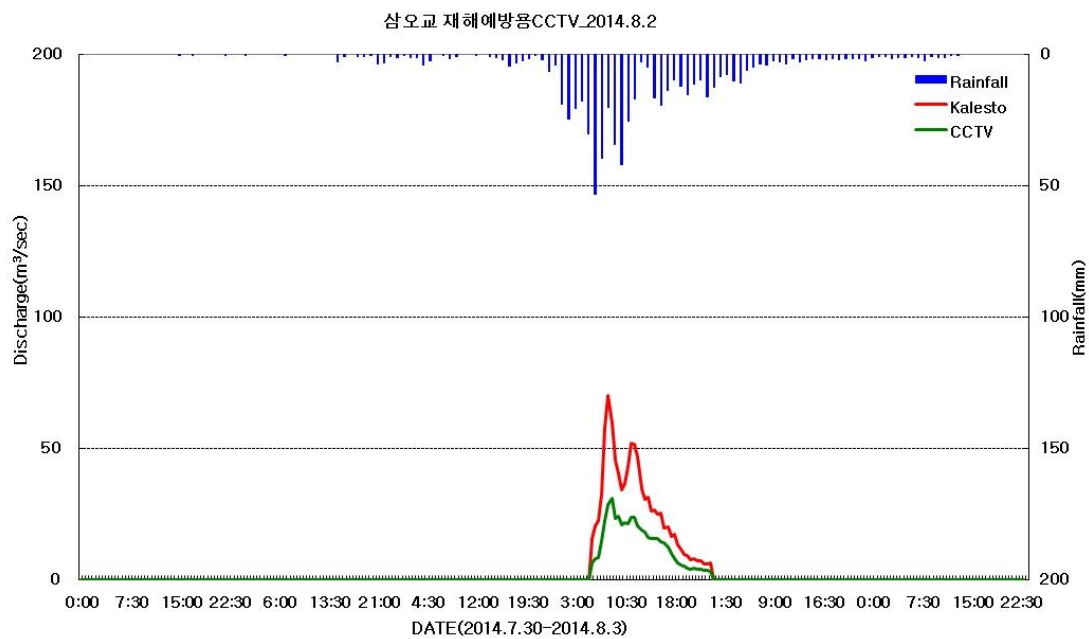


Fig. IV-65. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)

Table IV-60. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto (삼오교)	CCTV	Kalesto (삼오교)	CCTV
174.7	477.7	16,982,086	8,111,833	1,784,485	909,907	22.0	11.2

(3) 병문천(오봉교)

① 2012년 4월 21일 집중호우

[Fig. IV-66]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월21일 7시30분부터 22시00분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 총 유출량은 $565.71m^3/sec$, 첨두유출량은 10시30분에 $33.01m^3/sec$ 를 나타냈다.

[Table IV-61]는 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량이 141.0mm로 산정되었으며 유효강우량은 271.8mm로 나타났다. 강우량 대비 재난감시용 CCTV의 유출률은 22.1%로 나타났다.

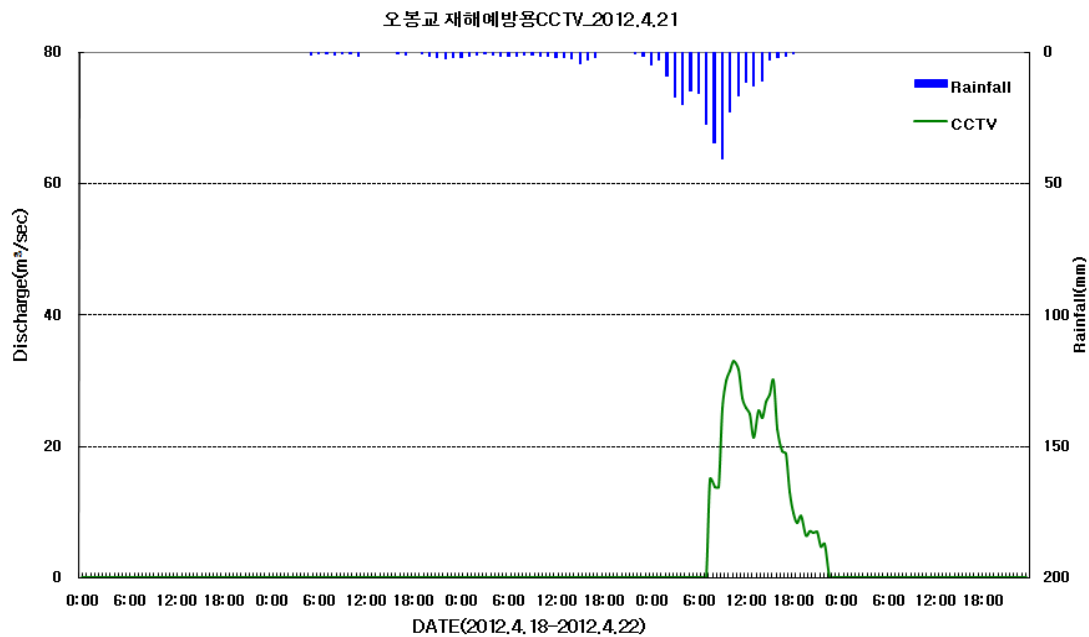


Fig. IV-66. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 21, 2012)

Table IV-61. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
141.0	271.8	16,982,086	4,616,071	1,018,281	22.1

② 2012년 4월 25일 집중호우

[Fig. IV-67]는 집집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월25일 8시30분부터 16시 30분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출량 산정 결과이다. 총 유출량은 $85.62m^3/sec$, 첨두유출량은 9시30분 $14.14 m^3/sec$ 를 나타냈다.

[Table IV-62]은 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량은 21일의 유출사상의 영향으로 $427.5mm$ 로 많은 강우량이 산정되었으며 유효강우량은 $130.4mm$ 로 나타났다. 강우량 대비 재난감시용 CCTV의 유출률은 22.1%로 나타났다.

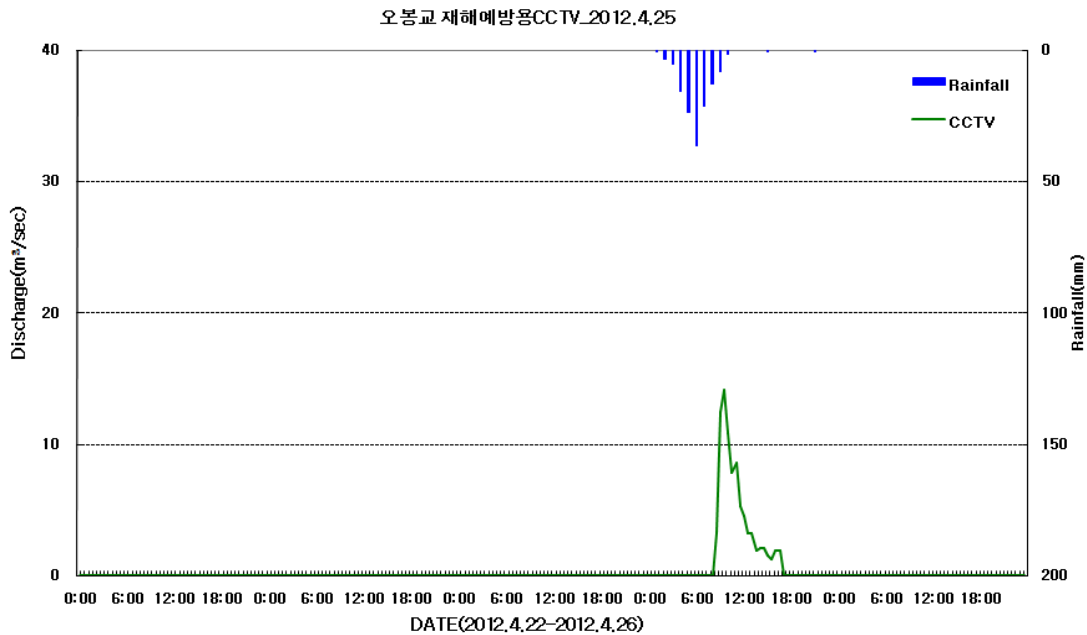


Fig. IV-67. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)

Table IV-62. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
427.5	130.4	16,982,086	2,213,785	154,111	7.0

③ 2012년 7월 18일 제7호 태풍 “카눈”

[Fig. IV-68]은 제7호 태풍 카눈(KHANUN)의 영향에 의한 유출발생 시 7월18일 15시00분부터 19일 3시30분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상 유속계(SIV)를 적용한 유출량 산정 결과이다. 총 유출량은 $70.61m^3/sec$, 침투유출량은 17시00분 $9.88m^3/sec$ 를 나타냈다.

[Table IV-63]은 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량은 173.6mm로 산정되었으며 유효강우량은 193.2mm로 나타났다. 강우량 대비 재난감시용 CCTV의 유출률은 3.9%로 나타났다.

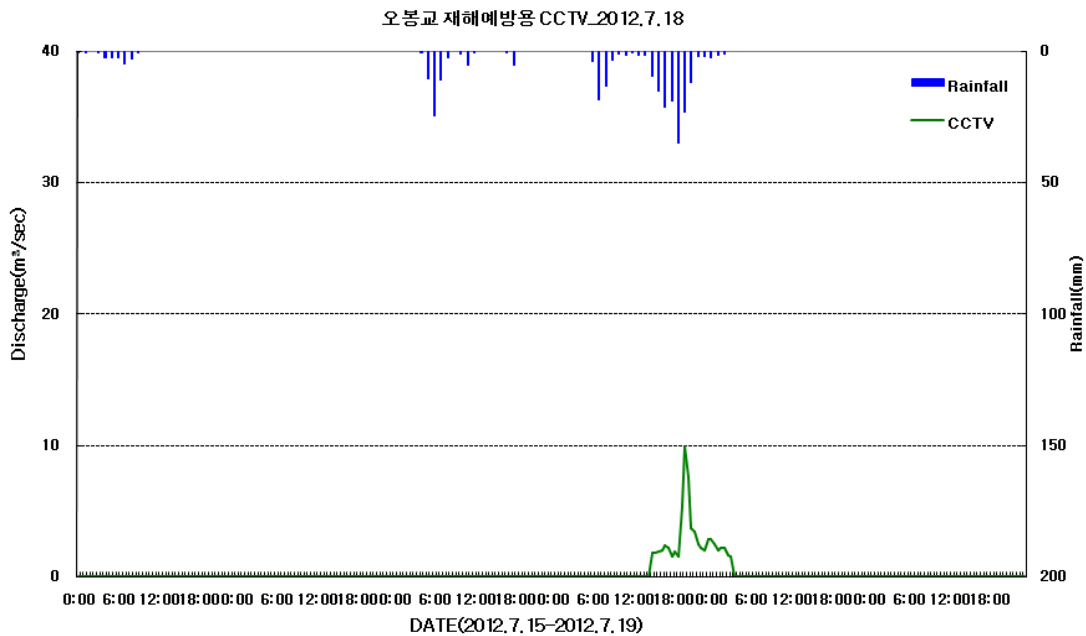


Fig. IV-68. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)

Table IV-63. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
173.6	193.2	16,982,086	3,280,430	127,094	3.9

④ 2012년 8월 23일 집중호우

[Fig. IV-69]은 집중호우에 의한 유출발생 시 8월23일 17시00분부터 24일 10시00분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 첨두유량은 18시00분에 $12.72m^3/sec$, 총 유출량은 $218,023m^3$ 으로 관측되었다.

[Table IV-64]는 집중호우 의한 유출발생 시 강우량에 따른 병문천 유역의 유출특성을 나타내는 결과이다. 5일 선행강우량은 209.7mm로 산정되었으며 유효강우량은 419.6mm로 나타났다. 강우량 대비 재난감시용 CCTV의 유출률은 3.1%로 나타났다.

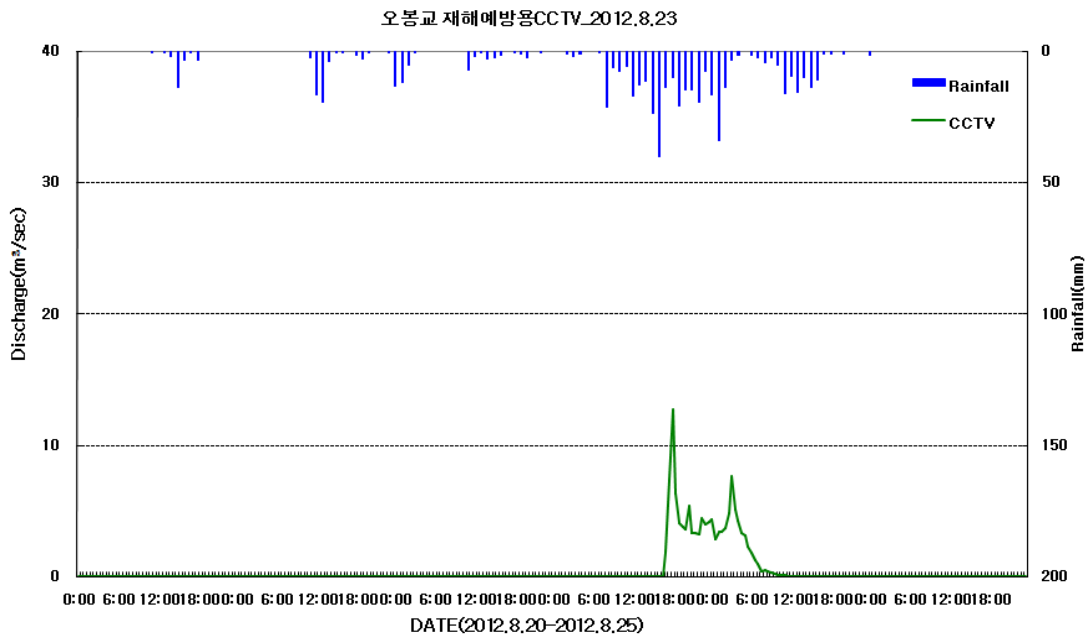


Fig. IV-69. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 23, 2012)

Table IV-64. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 23, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
209.7	419.6	16,982,086	7,126,023	307,619.7	218,204.5

⑤ 2012년 8월 28일 제15호 태풍 “볼라벤”

[Fig. IV-70]은 제15호 태풍 볼라벤(BOLAVEN)의 영향에 의한 유출발생 시 8월27일 23시00분부터 28일 20시30분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면 영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 침투유량은 23시30분에 $45.74m^3/sec$, 총 유출량은 $1,417,041m^3$ 으로 관측되었다. 5일 선행강우량은 465.8mm, 강우량은 448.2mm이며, 재난감시용 CCTV의 유출률은 18.6%로 나타났다([Table IV-65]).

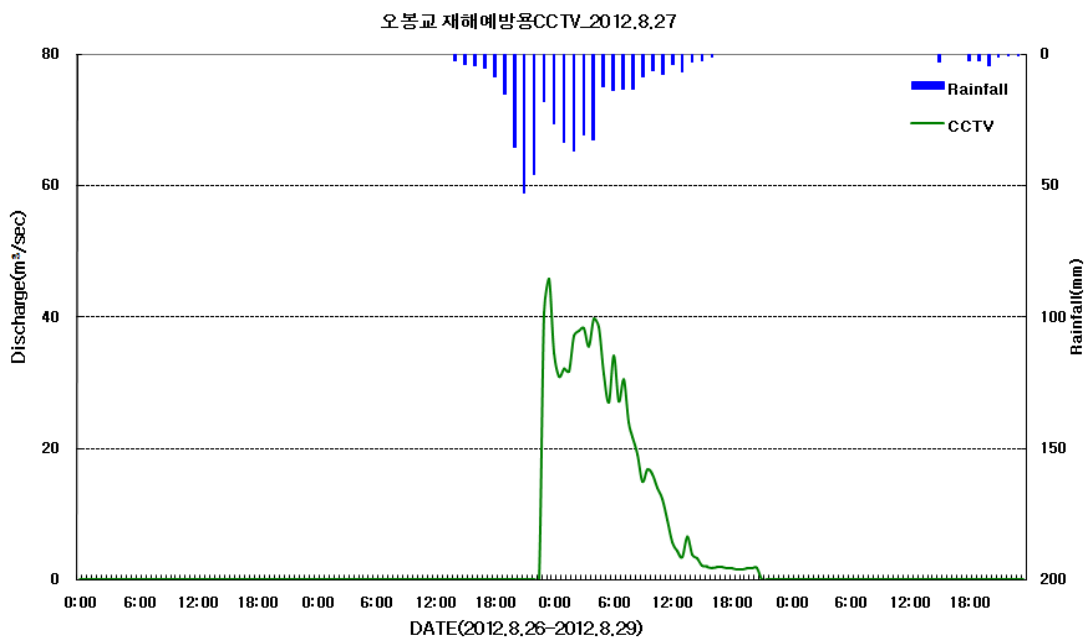


Fig. IV-70. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)

Table IV-65. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
465.8	448.2	16,982,086	7,611,880	1,417,041	18.6

⑥ 2012년 8월 30일 제14호 태풍 “덴빈”

[Fig. IV-71]는 제14호 태풍 덴빈(TEMBIN)의 영향에 의한 유출발생 시 8월30일 4시00분부터 14시30분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 첨두유량은 6시00분에 $18.48\text{m}^3/\text{sec}$, 총 유출량은 $210,771.82\text{m}^3$ 으로 관측되었다. 5일 선행강우량은 504.3mm , 강우량은 78.0mm 이며, 재난감시용 CCTV의 유출률은 15.9%로 나타났다([Table IV-66]).

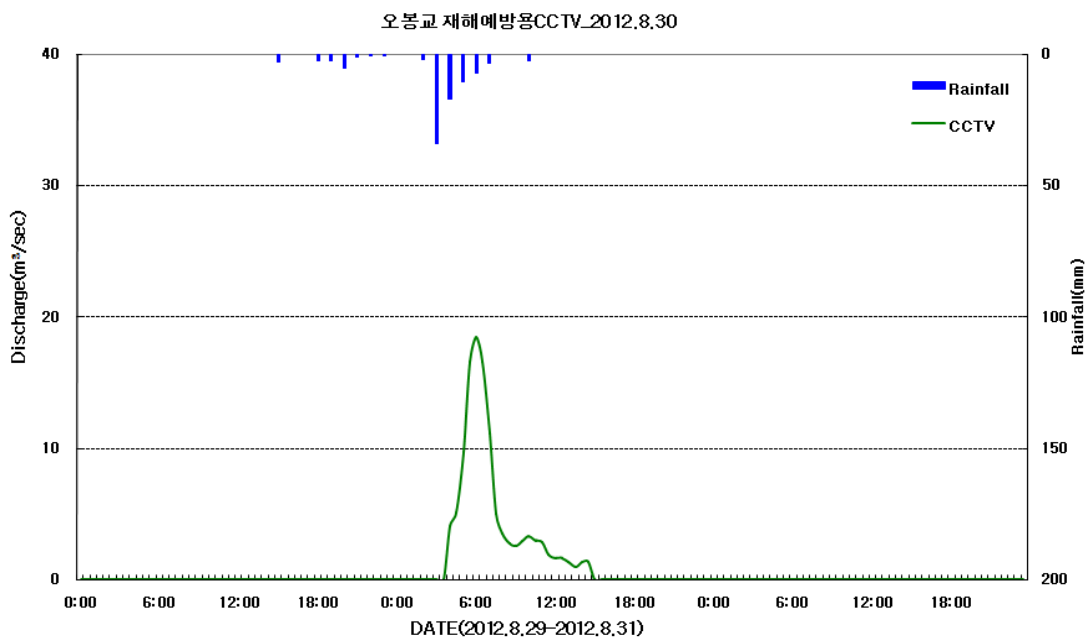


Fig. IV-71. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)

Table IV-66. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
504.3	78.0	16,982,086	1,324,603	210,771	15.9

⑦ 2012년 9월 16일 제16호 태풍 “산바”

[Fig. IV-72]은 제16호 태풍 산바(SANBA)의 영향에 의한 유출발생 시 9월16일 15시00분부터 23시30분까지 오봉교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 첨두유량은 8시00분에 $56.74m^3/sec$, 총 유출량은 $2,172,926m^3$ 으로 관측되었다. 5일 선행강우량은 90.7mm, 강우량은 678.0mm이며, 재난감시용 CCTV의 유출률은 18.9%로 나타났다([Table IV-67]).

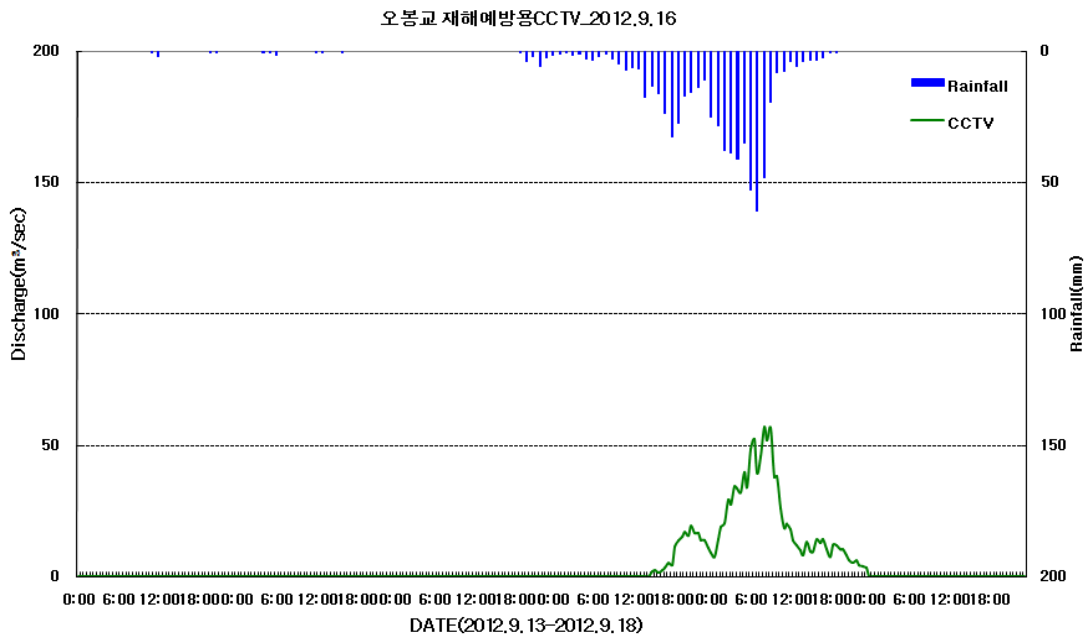


Fig. IV-72. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)

Table IV-67. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(September 16, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
90.2	678.5	16,982,086	11,522,515	2,172,926	18.9

⑧ 2014년 7월 6일 집중호우

[Fig. IV-73]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 7월 6일 4시 00분부터 21시 30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 첨두유량은 9시00분에 $45.23m^3/sec$, 총 유출량은 $2,645,639m^3$ 으로 관측되었다. 5일 선행강우량은 126.8mm, 강우량은 155.8mm이며, 재난감시용 CCTV의 유출률은 27.1%로 나타났다 ([Table IV-68]).

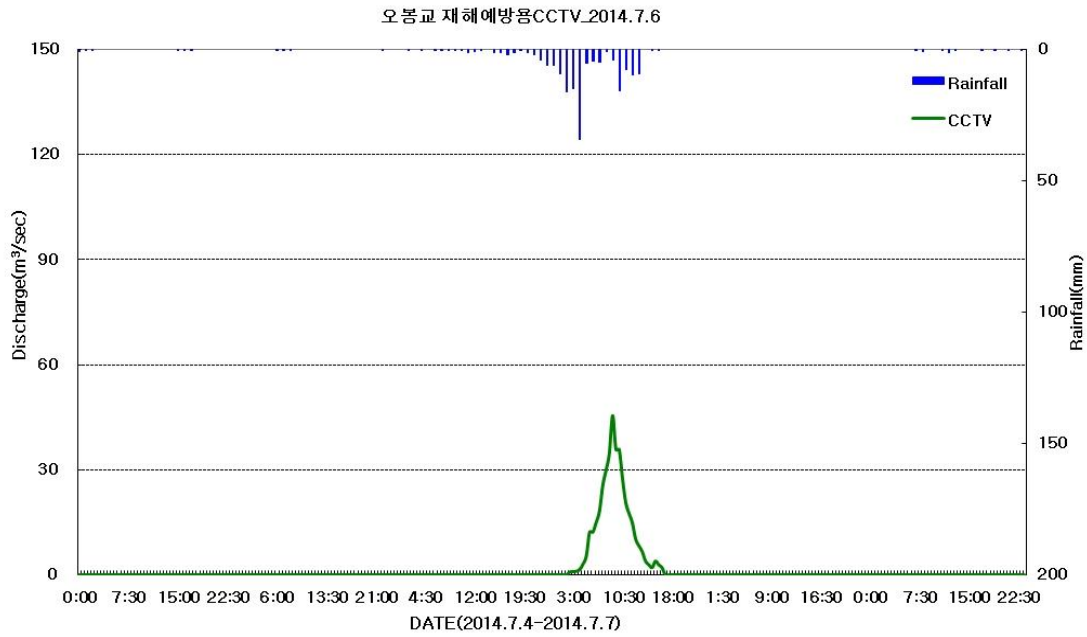


Fig. IV-73. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 6, 2014)

Table IV-68. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 6, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
126.8	155.8	16,982,086	2,645,639	716,142	27.1

⑨ 2014년 8월 2일 제12호 태풍 “나크리”

[Fig. IV-74]은 제12호 태풍 나크리(NAKRI)의 영향에 의한 유출발생 8월 2일시 5시 30분부터 8월 3일 23시30분까지 Kalesto와 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출 수문곡선이다. 첨두유량은 11시30분에 $52.81m^3/sec$, 총 유출량은 $8,111,833m^3$ 으로 관측되었다. 5일 선행강우량은 174.7mm, 강우량은 477.7.0mm이며, 재난감시용 CCTV의 유출률은 18.8%로 나타났다([Table IV-69]).

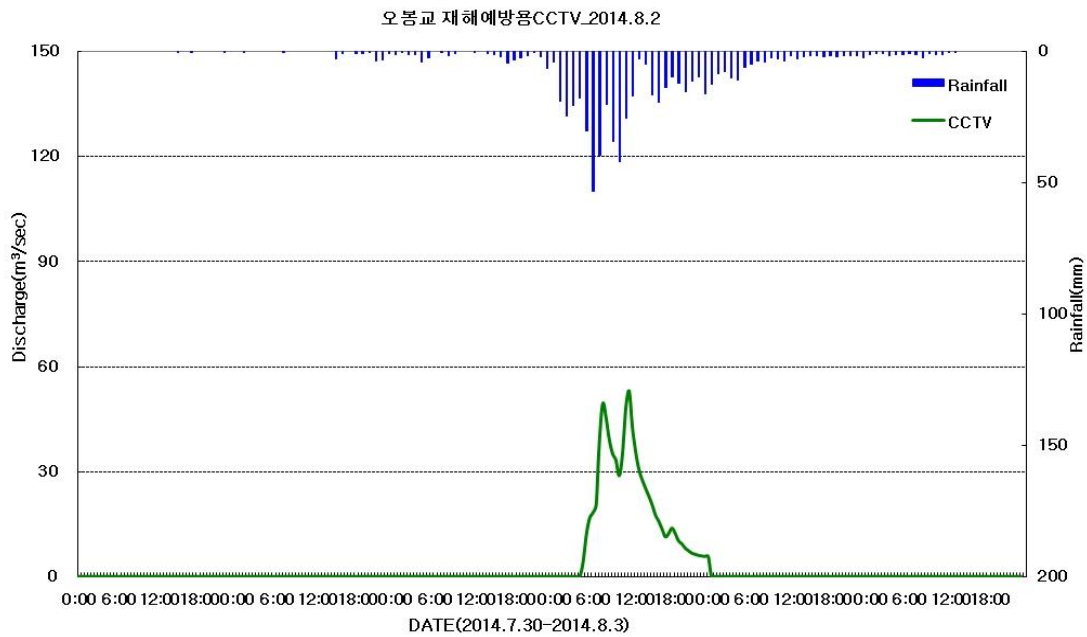


Fig. IV-74. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 2, 2014)

Table IV-69. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 2, 2014)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)	유출률 (%)
174.7	477.7	16,982,086	8,111,833	1,524,747	18.8

(4) 화북천(별도교)

① 2012년 4월 21일 집중호우

[Fig. IV-75]는 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월21일 8시00분부터 23시30분까지 제2별도교의 Kalesto 유출량과 별도교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비의 유출량 변동이 비슷한 경향을 나타내지만 상류부의 별도교 CCTV 총 유출량은 $2,754.24 \text{ m}^3/\text{sec}$, 제2별도교 Kalesto가 $1,996.35 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 $577.89 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유출량 차이를 나타냈다. 첨두유출량은 CCTV가 10시30분에 $229.63 \text{ m}^3/\text{sec}$, Kalesto가 11시30분 $186.69 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 나타냈다. 5일 선행강우량은 152.7 mm , 강우량은 297.6 mm 이며, 강우량 대비 Kalesto는 24.3%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 31.4%로 나타났다([Table IV-70]).

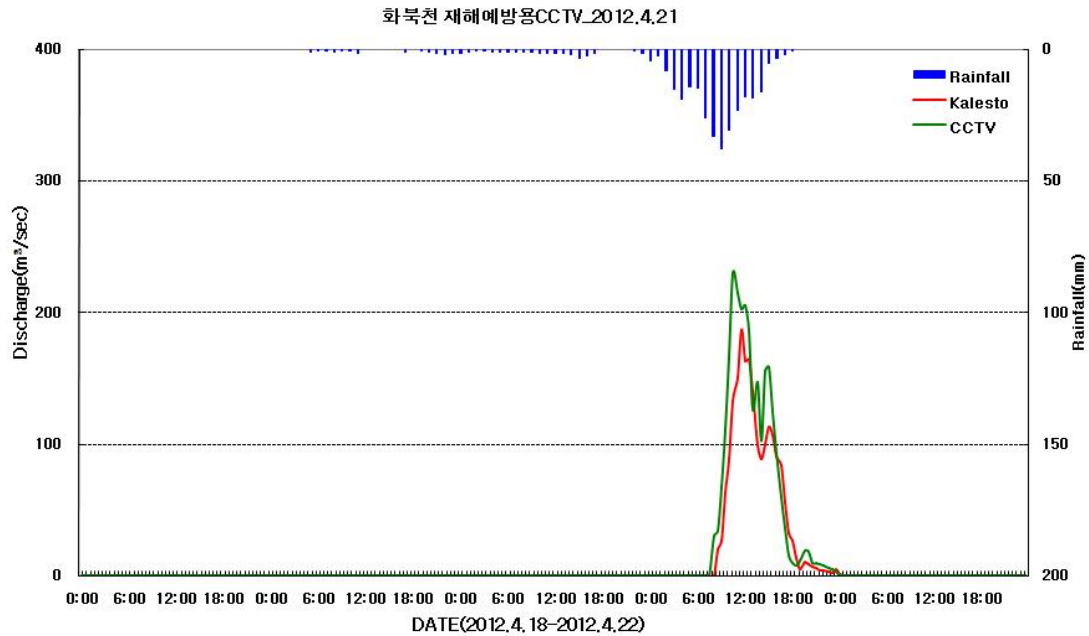


Fig. IV-75. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 21, 2012)

Table IV-70. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 21, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2별도교)	CCTV	Kalesto (제2별도교)	CCTV
152.7	297.6	49,594,981	14,759,962	3,593,423	4,633,633	24.3	31.4

② 2012년 4월 25일 집중호우

[Fig. IV-76]은 집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 4월25일 8시00분부터 15시30분까지 제2별도교의 Kalesto 유출량과 별도교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비의 침투유량은 25일 2시00분부터 8시00분까지 108.18mm의 집중호우의 영향으로 8시30분에 Kalesto가 101.79m³/sec, CCTV가 116.76m³/sec를 나타냈다. 5일 선행강우량은 436.2mm, 강우량은 117.3mm이며, 강우량 대비 제2별도교 Kalesto는 13.2%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 10.2%로 나타났다([Table IV-71]).

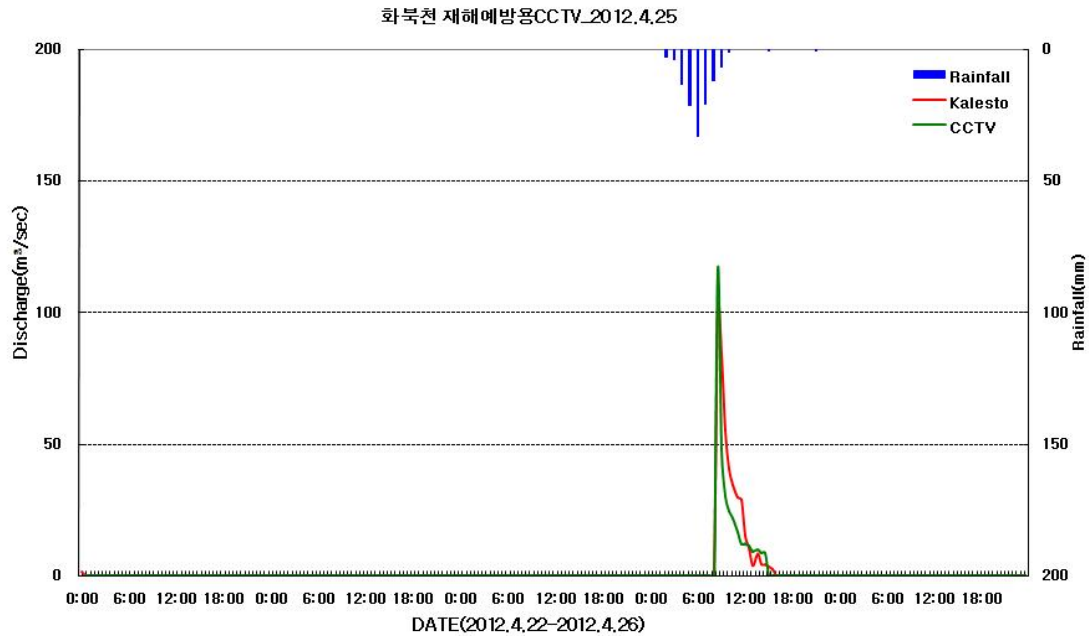


Fig. IV-76. Hydrograph and comparison of flow discharges(April 25, 2012)

Table IV-71. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(April 25, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m ²)	수문총량 (m ³)	유출량 (m ³)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2별도교)	CCTV	Kalesto (제2별도교)	CCTV
436.2	117.3	49,594,981	5,817,491	765,087	592,138	13.2	10.2

③ 2012년 7월 18일 제7호 태풍 “카눈”

[Fig. IV-77]은 제7호 태풍 카눈(KHANUN)의 영향에 의한 유출발생 시 7월18일 20시30분부터 19일 3시30분까지 제2별도교의 Kalesto 유출량과 별도교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출수문곡선이다. 두 관측장비의 총 유출량은 별도교 CCTV가 $478.95m^3/sec$, 제2별도교 Kalesto가 $434.82m^3/sec$ 로 $44.13m^3/sec$ 의 유출량 차이를 나타냈다. 첨두유출량은 CCTV가 10시30분에 $229.63m^3/sec$, Kalesto가 11시30분 $186.69m^3/sec$ 를 나타냈다. 5일 선행강우량은 268.4, 강우량은 137.3mm이며, 강우량 대비 제2별도교 Kalesto는 11.5%, 재난감시용 CCTV의 유출률은 12.7%로 나타났다([Table IV-72]).

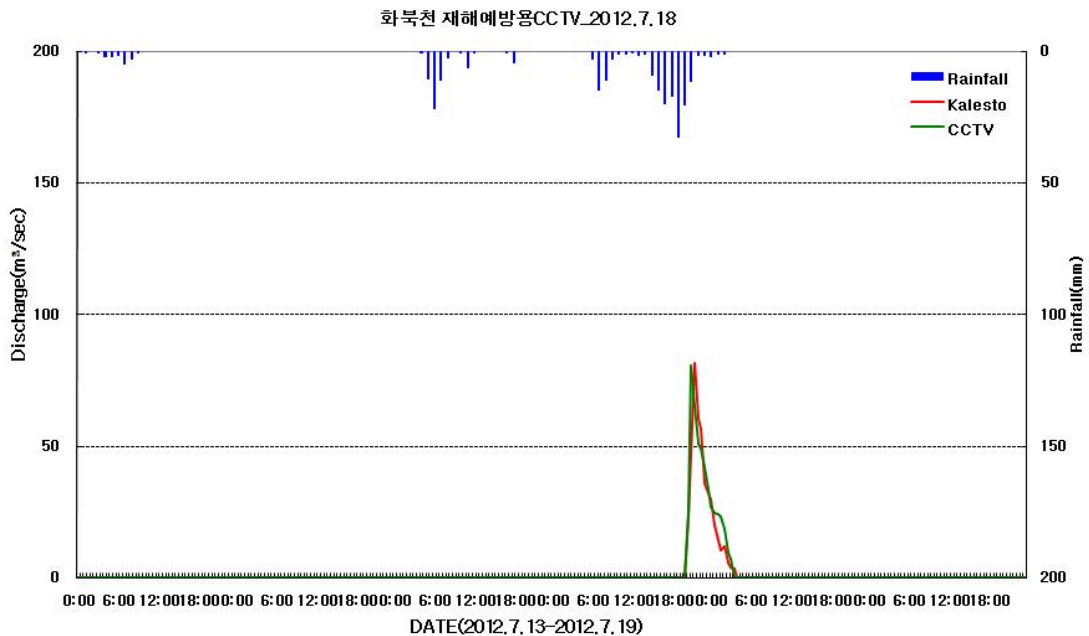


Fig. IV-77. Hydrograph and comparison of flow discharges(July 18, 2012)

Table IV-72. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(July 18, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2별도교)	CCTV	Kalesto (제2별도교)	CCTV
268.4	137.3	49,594,981	6,806,911	782,668	862,112	11.5	12.7

④ 2012년 8월 30일 제14호 태풍 “덴빈”

[Fig. IV-78]는 제14호 태풍 덴빈(TEMBIN)의 영향에 의한 유출발생 시 8월 30일 6시30분부터 13시00분까지 제2별도교의 Kalesto 유출량과 별도교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출량 산정 결과이다. 두 관측장비의 총 유출량은 별도교 CCTV가 $131.47m^3/sec$, 제2별도교 Kalesto가 $91.10m^3/sec$ 로 $40.37 m^3/sec$ 의 유출량 차이를 나타냈다. 첨두유출량은 CCTV가 7시00분에 $15.57 m^3/sec$, Kalesto가 $12.54 m^3/sec$ 를 나타냈다.

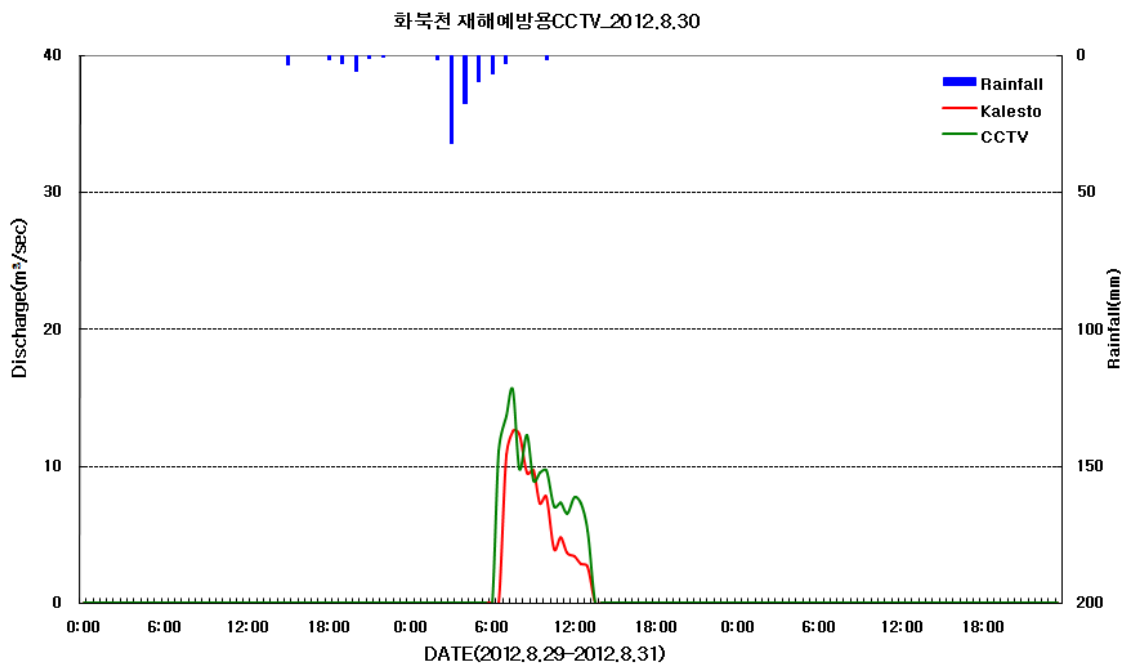


Fig. IV-78. Hydrograph and comparison of flow discharges(August 28, 2012)

Table IV-73. Rainfall-Runoff Characteristics and Runoff Rate(August 28, 2012)

5일 선행강우량 (mm)	강우량 (mm)	유역면적 (m^2)	수문총량 (m^3)	유출량 (m^3)		유출률 (%)	
				Kalesto (제2별도교)	CCTV	Kalesto (제2별도교)	CCTV
516.1	73.5	49,594,981	3,645,727	163,972.4	236,643.0	4.5	6.5

⑤ 2012년 9월 16일 제16호 태풍 “산바”

집중호우의 영향에 의한 유출발생 시 9월16일 17시00분부터 17일 23시00분까지 제2별도교의 Kalesto 유출량과 별도교 재난감시용 CCTV의 유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용한 유출량 산정 결과이다. 별도교 CCTV는 접속불량문제로 17일 3시00분부터 16시30분까지 유출영상을 기록하지 못하였다[Fig. IV-80]. 제2별도교의 Kalesto는 전체 유출시간에서 총 6회분의 수위·유속자료가 손실되었다.

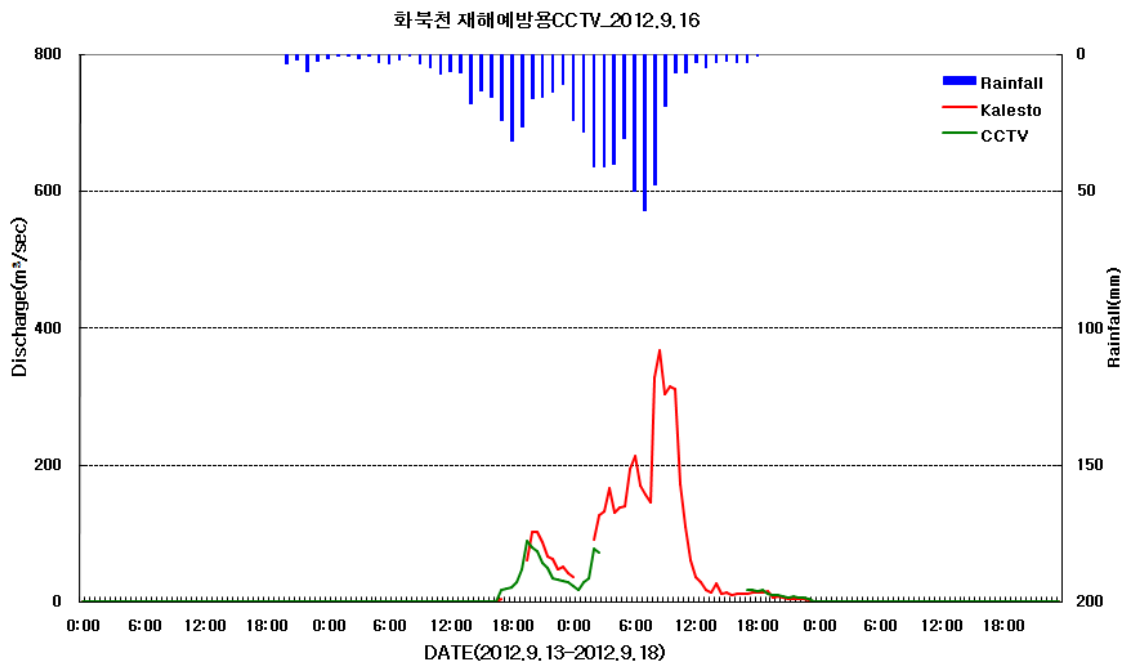


Fig. IV-79. Hydrograph and comparison of flow discharges(September 16, 2012)



Fig. IV-80. Low-quality video of Disaster Monitoring CCTV system

5. 홍수유출 특성을 고려한 유량출측정 고도화 연구

제주도 간헐천을 대상으로 기존 유량관측방법의 단점을 보완하고 유출특성을 고려한 유량관측 시스템을 개발하여 관측 유량의 정확도 향상을 목적으로 한다. 적용되는 방법은 표면영상유속계(SIV; Surface Image Velocimeter)를 활용하여 제주도 간헐천의 관측지점 측면부에 유출영상기록장치(CCTV)를 설치하여 집중호우 및 태풍의 내습 시 홍수유출영상을 기록하고, 영상분석에 적합한 야간유출영상을 수집하기 위해 교량하부에 조명장치를 설치함으로써 정확한 돌발성 홍수 유출량을 관측하는 간헐천의 유량관측 시스템 개발에 관한 것이다.

5.1 간헐천의 홍수유출량 현장관측 방법의 개선

제주도의 하천은 투수성이 우수한 지질특성으로 인해 평상시 건천의 형태를 나타낸다. 집중호우 및 태풍 내습시 하천유량이 점진적으로 증가하는 국내 내륙지역 하천과 상이한 제주도 하천은 표층이 포화 된 후 갑작스럽게 유출이 발생하며, 특정 강우에 의해서만 발생하는 유출 횟수도 연간 5~10회 밖에 되지 않아 지속적인 하천 유량관측이 매우 힘든 지역이다.

현재 제주도는 홍수유출시 전자과를 이용하여 표면유속을 관측하는 Kalesto가 설치·운영되고 있으나 초기 유속이 과대하게 산정되는 문제와 저유속의 흐름일 때 정확도가 낮은 문제점이 있다. 또한 기존의 표면영상유속계(SIV)는 분석되는 기본 데이터가 유출영상을 이용하는 방식이므로 수집되는 유출영상의 화질에 따라 산정된 결과가 많은 오차변동을 나타내며 영상 분석에 적합한 양질의 야간유출영상을 수집하기 어려운 단점이 있다.

유량관측방법 개발의 핵심내용은 표면영상유속계(SIV)를 제주도 간헐천에 적용하고 분석하는 과정에서 관측 유출량의 정확도 향상을 위한 카메라의 관측각도를 제시하고, 분석에 적합한 야간유출영상의 수집을 위한 통합 기술을 의미한다.

다양한 유출영상의 분석경험과 현장경험에 의한 연구결과를 바탕으로 기존 제주도의 유량관측방법의 문제점 개선방안을 해결하고 표면영상유속계(SIV)의 활용성 증대 및 유량분석 결과의 정확도 향상을 위해 안출되었다. 특히 수자원 관리의 기본이 되는 유출량 자료의 정확도 향상과 지속적인 확보가 가능한 유량관측 시스템을

제공함에 있다.

이 논문에서 제안하는 유량관측 시스템은 표면영상유속계(SIV)를 활용하는 과정에서 오차율을 줄이기 위해 카메라의 설치 각도를 흐름방향의 직각으로 설치하는 제원을 제시한다. 또한 교량 하부에 자연광에 가까운 1000W의 조명장치를 설치함으로써 야간유출영상의 분석에 적합한 유출영상을 수집할 수 있다.

5.2 산지형 하천의 홍수유출량 측정시스템 제안

[Fig. IV-81]는 제주도 한천의 제2동산교를 대상으로 전체적인 개략도를 나타낸다. 분석에 적합한 야간유출영상을 수집하기 위해 1000W의 조명장치를 교량하부에 설치하는 방안은 자연광에 가까운 광원을 하상에 집중할 수 있는 장점과 운전자의 야간운행을 방해하지 않는다는 장점이 있다. 또한 [Fig. IV-81]의 영상저장장치는 기존의 연구 결과를 바탕으로 야간영상 기록에 적합한 최저조도카메라(0.00001 Lux)와 영상저장장치(HD-DVR)가 설치되며 인터넷 공유기를 연결하여 웹을 통한 실시간 감시가 가능하다.

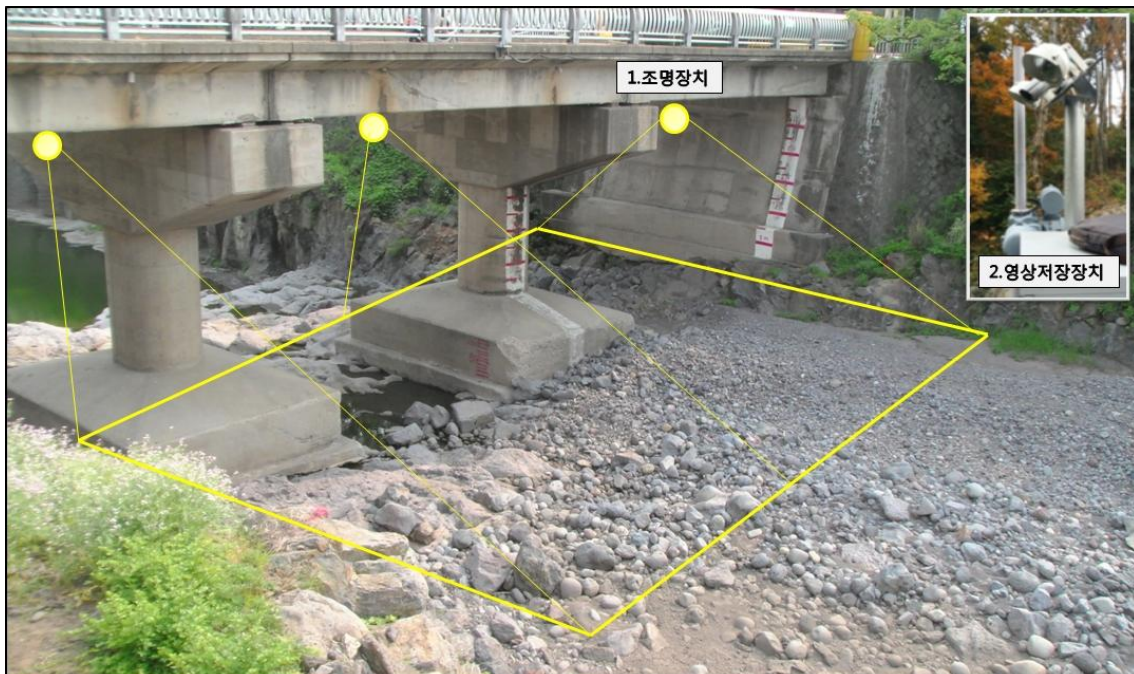


Fig. IV-81. Example of discharge observation system

[Fig. IV-82]은 ¹유출영상기록장치(CCTV)와 ²교량 하부의 조명장치 설치 예시를

나타낸다. ¹⁾유출영상기록장치(CCTV)의 설치 각도는 최대한 관측 현장을 고려하여 흐름방향과 직각이 되도록 설치하여 표면영상유속계(SIV)를 적용하고 분석하는 과정에서 영상왜곡에 의한 요차율을 줄일 수 있다. 또한 ²⁾1000W 조명장치는 야간에 매우 효과적으로 야간 유출현상을 관측 및 감시 할 수 있으나, ³⁾광원의 집중과 같이 광원을 하천 하상에 집중하기 위해 Fig. IV.교량하부의 설치 예시와 같이 설치하는 것이 효과적인 방안이다. 교량 하부의 조명장치는 자연광에 가까운 빛을 발산하도록 한 것으로서, 유출영상기록장치에 의해 촬영한 유출량의 야간영상의 분석시 정확도를 향상시킬 수 있도록 한 것이다. 또한 기록적인 집중호우 및 태풍의 내습시 야간의 현상상황을 효과적으로 감시할 수 있는 장점이 있으며 유사시 방재 대책으로 사용될 수 있다. 또한 현재 주요 하천의 교량부근에 설치된 조명장치와 같은 직립식 구조물 형식이 아니므로 자연경관에 방해되지 않는 장점이 있다.

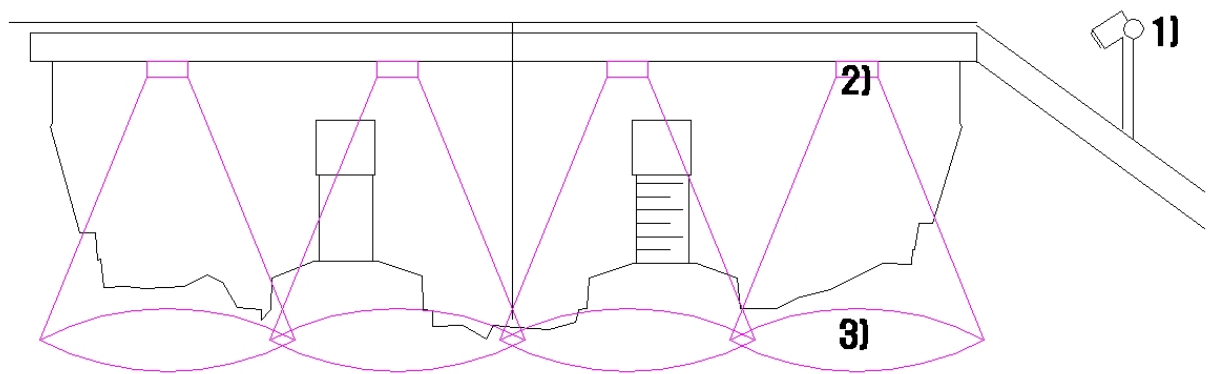


Fig. IV-82. Example of installation of discharge observation system at the site(front view)

[Fig. IV-83] 은 교량하부의 정면도로서 조명장치 설치 예시를 나타낸다. 외부로부터 전력을 공급하기 위해 전원공급선과 1000W의 조명장치, 그리고 방수캡을 설치하여 과도한 유량 발생 시 누전의 위험을 방지할 수 있도록 고안하였다.

※ 세부 제원 및 치수는 설치 장소에 다르므로 미표기함

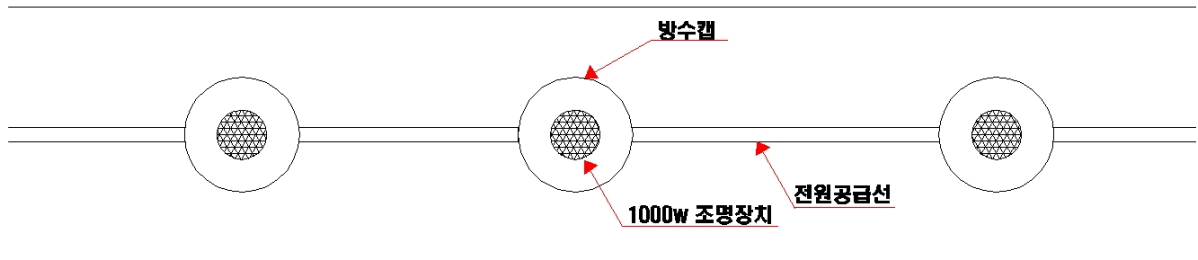


Fig. IV-83. Installation example of lighting equipment
(Bridge lower part-front view)

[Fig. IV-84]은 교량하부의 측면도로서 1)은 교량의 단면, 2)는 조명장치, 3)은 방수캡(조명호보장치)를 나타낸다. 교량단면을 중심으로 교량 하부 조명 장치는 방수캡의 길이 정도만 도출되도록 현장 상황에 맞추어 설계한다.

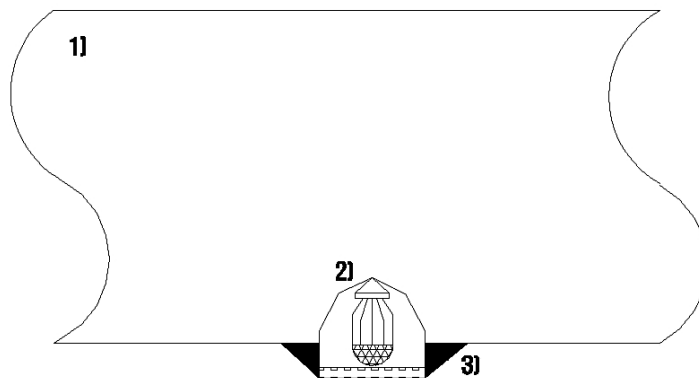


Fig. IV-84. Installation example of lighting equipment
(Bridge lower part-side view)

이 같은 간헐천의 유량관측 시스템은 제주도 간헐천의 특성에 맞추어 설치되는 조명장치(1)와 유출영상기록장치(CCTV)(2)를 통합하여 세트 개념의 장치로 만든 것이며, 이를 교량(3)의 하부에 설치하기만 하면 주야간을 불문하고 간헐천의 유량을 실시간으로 감시할 수 있어, 돌발성 홍수 등으로 인해 급격하게 변할 수 있는 간헐천의 유출량을 정확하게 관측할 수 있게 된다. 참고로 제주도 간헐천의 유량관측 시스템에 대해서 예시한 도면을 참조로 하여 설명하였으나 기술사상의 범위 내에서

당업자에 의해 다양한 변형이 이루어질 수 있다.

이 연구의 유량관측 시스템의 특징은 종래 유량관측 기법에 비해 설치비용 절감효과와 관측자의 안전보장, 소수인원으로 연속적인 유출량을 관측할 수 있는 효과가 있다. 또한 조명장치를 교량하부의 슬래브에 설치함으로써 야간 운행 차량의 시야를 방해하지 않게 되며, 주요 하천의 교량부근에 설치된 기존의 조명장치와 같은 직립식 구조물 형식이 아니므로 자연경관에 방해되지 않는 새로운 홍수유출량 관측 시스템이다. 이러한 시설은 교량 부근의 하천수위 및 유출상태를 실시간으로 감시가 가능하다. 따라서 극한 기상을 동반한 특이한 집중호우 및 태풍 내습시의 하천 유출현상에 대해 다목적 감시와 유량측정을 원활히 수행할 수 있는 신개념의 유량 측정 시스템이다.

V. 결 론

제주도 주요 간헐천(한천, 천미천, 병문천, 화북천)을 대상으로 계측구역(제주수자원연구원 CCTV)과 미계측구역(하천 재난감시용 CCTV)의 홍수유출영상(2012. 4~2014. 9)을 표면영상유속계(SIV)에 적용하여 다양한 유출사상과 오차율을 분석하였다. 산지형 간헐천 특유의 유출특성을 고려한 유량관측방법 적용 및 개선과 고도화의 연구결과는 다음과 같다.

(1) 야간 하천유출영상에 의한 표면유속성분의 정확도를 향상시키기 위해 현장관측지점에 자연광에 가까운 150 lux 이상의 1000 W 조명장치를 설치하고 유출영상을 수집하였다. 현장개선 후 수집된 야간 유출영상은 RGB 평균분포 값이 62.22에서 118.36으로 확장된 영상은 표면영상유속계(SIV) 분석에 적합한 양질의 야간 유출영상을 활용할 수 있었다. 또한 야간유출영상의 표면유속 분석결과와 Kalesto 관측 표면유속을 비교한 결과 결정계수 R^2 가 0.848, 주간유출영상은 R^2 가 0.891로 분석되었다. 야간유출영상의 단점을 보완하기 위해 하폭이 비교적 작은 작은 제주도 하천에 1000 W의 조명장치를 설치한 결과 야간유출영상을 분석하여 정확도를 높이는데 매우 효과적이었다.

(2) 표면영상유속계(SIV)의 참조점 설정과정에서 원거리 참조점의 입력오류에 의한 유속 변동률(16.77%~317.69%)과 근거리 참조점 입력오류에 의한 유속 변동률(1.10%~74.47%)에 의해 산정된 유출량은 0.82~338.63%로서 큰 변동폭을 보였다. 이러한 결과는 하폭이 큰 내륙부 하천에 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유량을 산정할 경우 참조점의 미세한 입력오류는 더 큰 유속오차를 발생할 수 있다. 따라서 참조점 설정과정에서 오차율을 줄이도록 방법을 개선하여야 한다.

(3) 표면영상유속계(SIV)로 분석된 연속 이미지의 상호상관계수를 해석하고 수집된 유출영상의 적정 필터링 값을 제시하였다. 주간유출영상은 상관계수가 0.9~1.0 범위의 유속이 전체 59개의 유속벡터 중 61.0%로 나타났다. 야간유출영상은 0.9~

1.0 범위의 상관계수는 17%로 낮게 분석되어 야간유출영상이 주간유출영상에 비해 영상분석에 적합한 유출영상의 질이 떨어지고 있음을 나타낸다. 따라서 표면영상유속계를 적용한 유량산정 과정에서 획득되는 유출영상에 따라 상관계수에 대한 합리적인 필터링 과정이 필요하다.

(4) 국내에서 처음으로 하천감시 목적의 하천 재난감시용 CCTV의 홍수유출영상을 표면영상유속계(SIV)에 적용하여 미계측구역의 강우-유출특성을 분석하였다. 또한 제주도 간혈천의 주요지점에 설치한 제주수자원연구단 CCTV와 Kalesto 관측 자료를 활용하여 강우-유출특성을 분석하고 유출량을 비교·분석한 정량적인 결과를 제시하여 표면영상유속계(SIV)의 활용성을 크게 향상시켰다. 특히 사용목적이 다른 하천 재난감시용 CCTV를 활용하는 기술개발로 고가의 유량관측장비(Kalesto)의 설치비용에 비해 경제적인 관측비용 절감과 다지점의 관측지점이 가능하였다.

(5) 집중호우 및 태풍에 의한 산지형 간혈천의 관측유출량 정확도 향상을 위해 카메라의 관측각도와 1000W 조명장치의 효과적인 설치 방안을 제시하여 기존 표면영상유속계의 단점인 야간유출영상 분석의 정확도를 향상시켰다. 또한 제주도 간혈천은 국내 내륙지방 하천에 비해 하폭이 매우 작아 CCTV에 적용할 수 있는 장점이 있고, 홍수유출시 수표면에 형성되는 물거품은 표면유속분석에 적합한 추적 입자의 역할을 하고 있어 다양한 홍수유출영상에 표면영상유속계(SIV)를 적용하는 새로운 유출량관측시스템을 제안하였다.

현재 국내 하천의 수문조사는 유량조사사업단에 의해 지속적이고 정량적인 자료가 관측되고 있으나, 제주도는 수문·기상학적으로 특수지역이므로 지금까지 대부분의 하천은 유량관측이 수행되지 않은 산지형 미계측구역이다. 향후, 제주도 간혈천의 특이한 수문특성과 유출현상을 고려한 지속적인 수문성분조사와 최적 관측시스템 구축 및 연구·조사가 필요하다.

참고문헌

- Aya, s., Fujita, I., and Yagy, M., 1995, Field-observation of flood in a river by video image analysis, Annual J. of Hydraulic Engineering, JSCE, 39, 447
- Adrian, R. J., 1991, Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics, 23, 261-304
- Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A., 1997, Particle image velocimetry for whole-field measurement of ice velocities, Cold Regions Science and Technology Journal, 26(2). 97-112
- Fujita, I., Komura, S., Kanda, T., 1991, Accuracy of the correlation method and its application to aerial photographs of flood flow, Proc of Hydraulic Engineering, JSCE, 35, 293
- Fujita, I. and Komura, S. 1994, Application of Image Analysis for Measurement of River-Surface Flow, roc. of Hydraulic Engineering, JSCE, vol.38, 733-738
- Fujita, I. and Muste, M. and Kruger, A. 1998, Large-Scale Particle Image Velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, Journal of hydraulic Reserch, IAHR, vol.36, no.3
- Fujita, I., and Komura, S., 1994, Application of video image analysis for measurements of river surface flows, Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE, 38, 733-738
- Kinoshita, R., 1984, Present status and future prospects of river flow analysis by aerial photography, Proc. of JSCE, NO.345-II-1, 1-19
- Leese, J. A., Novak, C. S., and Clark, B. B., 1971, An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation, J. of Applied Meteorology, 10(2), 118-132
- Lee, J. S., and Julien, P. Y., 2006, Electromagnetic Wave Surface Velocimetry, Journal of Hydraulic Engineering, 132(2), 146-153
- Muste, M., Bradley, A. A., Kruger, A., and Meselhe, E., 2002, Flow

measurement in streams using video imagery, *Water Resources Research*, 38(12), 1315

- Muste, M., Gonzalez-Castro, J. A., Yu, K., Kim, D., 2007, Accuracy of ADCP discharge measurements for rating of flow-control structures, IIHR report, IIHR-Hydroscience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA
- Jeju development institute, 2009, The hydrologic and water quality characteristics analysis for the stream water application in Jeju island, 2009-11, p.98
- J. Le Coz., A. Hauet., G. Pierrefeu., G. Dramais., B. Camenen., 2010, Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers, *Journal of Hydrology*, 394, 42-52
- RDI, 1996, Acoustic Doppler Current Profilers-Principle of operation, a practical primer. San Diego, CA, Instruments
- SonTek, 2010, Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications, SonTek Newsletter, 6(1), SonTek, SanDiego, CA
- Steven, C., Coates, M., 1994, Application of a maximized cross-correlation technique for resolving velocity fields in laboratory experiments, *Journal of Hydraulic research*, 32(2), 118-132
- Sameh A. Kantoush., Anton J. Schleiss., Tetsuya Sumi., Mitsuhiro Murasaki., LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases, *Journal of Hydro-environment Research*. 5(4), 263-276
- Qi-han Ran., Wei Li., Qian Liao., 2016, Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements, *Hydrological processes*, 30(17), 3014-3029
- 김남길, 2010, 표면영상유속계를 이용한 하천의 유속측정 기술 개발, 동의대학교 박사학위 논문
- 김동수, 강부식, 2011, ADCP 자료의 공간평균을 이용한 평균유속장 산정에 대한 검증, *한국환경과학회지*, 20(1), 107-118
- 김동수, 양성기, 김수정, 이준호, 2015, 지표유속법 기반 제주 산지형 하천

Kalesto 유량 정확도 향상 기법, 한국환경과학회지, 24(4), 371-381

- 김동수, 양성기, 정우열, 2014, 산지하천의 전자파 표면유속 측정에 기반한 유량 및 유속 관측 오차 분석, 한국환경과학회, 23(4), pp. 543-552
- 김동수, 강부식, 2011, ADCP 자료의 공간평균을 이용한 평균유속장 산정에 대한 검증, 한국환경과학회지, 20(1), 107-118
- 김치영, 노영신, 차준호, 2016, 유량조사에서의 첨단기술 및 적용 현황, 대한토목학회지, 6(435), 29-33
- 김미영, 이영호, 서민식, 1999, 해류표면의 속도계측을 위한 SF-PIV의 개발, 한국해양환경공학회논문집, 155-160
- 김영근, 2002, LSPIV를 이용한 표면유속 측정, 명지대학교 대학원 토목환경공학과, 석사학위논문
- 김서준, 류권규, 윤병만, 2011, 고정식 표면영상유속계(FSIV)를 이용한 실시간 하천 유량산정, 한국수자원학회논문집, 44(5), 377-388
- 김서준, 2008, 표면영상유속계를 이용한 유량측정기법의 정확도분석, 명지대학교 대학원 토목환경공학과, 석사학위논문
- 김서준, 2013, 표면영상유속계 오차 분석을 통한 상관영역 크기 결정 기법 개발, 명지대학교 대학원 토목환경공학과, 박사학위논문
- 김서준, 류권규, 윤병만, 2010, 영상간의 시간간격에 따른 표면영상유속계의 정확도 분석, 한국수자원학회 정기학술대회, 1956-1960
- 김서준, 류권규, 윤병만, 2013, 상관영역 크기 변화에 따른 영상유속계의 오차분석, 한국수자원학회 논문집, 46(8), 821-831
- 김서준, 류권규, 윤병만, 2013, 적외선 카메라를 이용한 야간유속측정 방법 개발,
- 류권규, 김서준, 김동수, 2014, 상호상관법을 이용한 시공간 영상유속계의 2차원 유속분포 측정, 한국수자원학회 논문집, 47(6), 537-546
- 류권규, 추규찬, 2015, 스마트폰을 이용한 실시간 표면영상유속계, 대한토목학회 정기학술대회, 931-932
- 류권규, 김서준, 유병남, 배인혁, 2015, 주야간 겸용 표면영상유속계 개발을 위한 원적외선 카메라의 적용성 검토, 한국수자원학회논문집, 48(8), 659-672
- 김 원, 윤광석, 이을래, 김치영, 김동구, 차준호, 박은희, 2004, 하천 유량측정 지침, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, 20-24

- 김영근, 2003, LSPIV를 이용한 표면유속 측정, 명지대학교 석사학위 논문
- 김영성, 양재린, 2007, LSPIV 적용시 물표면과 카메라 사이의 촬영각도에 따른 상관계수의 변화양상 분석, 제33회 대한토목학회 정기 학술대회, 2556-2559
- 김영성, 이현석, 2011, 전자파표면유속계의 성능개선 및 실용화, 한국수자원학회 2011년도 학술발표회
- 김원, 김치영, 김동구, 이찬주, 황석환, 2005, 수치모형을 이용한 수위-유량관계 개발, 한국수자원학회, 2005(1), 319-323
- 김영성, 양재린, 추태호, 고익환, 2002, 표면유속을 이용한 하천유량 측정기법 개선, 한국수자원학회, 940-945
- 김영성, 양재린, 추태호, 고익환, 김우구, 2001, 엔트로피를 이용한 유량측정기법의 국내하천에의 적용, 대한토목학회, 1-4
- 김지성, 김원, 김동구, 김치영, 2009, 수치모형을 이용한 고리형 수위-유량 관계 분석, 대한토목학회, 29(1B), 1-9
- 김치영, 김원, 이을래, 2002, 유속면적법에 필요한 유속측정 시간 산정, 대한토목학회, 441-444
- 김치영, 윤광석, 김동구, 김원, 2004a, 초음파 유량측정 시스템에 의한 유량측정, 한국수자원학회, 1198-1202
- 김치영, 김원, 김동구, 2004b, 한 측선에서 제한된 측정수에 따른 불확실도, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, 3384-3389
- 김치영, 김원, 이찬주, 김동구, 2006, 유속지수법을 이용한 자동유량측정, 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, 242-246
- 김치영, 김원, 이찬주, 김동구, 2007a, 수위-유량관계법과 유속지수법에 의한 유량환산법 비교, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, 2609-2612
- 김치영, 김원, 이찬주, 황석환, 2007b, 실측자료를 이용한 고리형 수위-유량관계 특성 분석, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, 1301-1304
- 김치영, 노영신, 차준호, 2016, 유량조사에서의 첨단기술 및 적용 현황, 대한토목학회지, 64(6), 29-33
- 과학기술부, 2007, 지표수 조사 시스템 적용
- 노영신, 2004, 영상해석 기술을 이용한 하천 유량측정 기법 개발, 명지대학교 대학원 토목환경공학과, 박사학위논문

- 노영신, 윤병만, 김영근, 류권규, 2002, 개수로 실험장치를 이용한 LSPIV, 한국수자원학회 2002년도 학술발표회 논문집(Ⅱ), 982-988
- 노영신, 윤병만, 류권규, 2005, 표면유속을 이용한 평균유속 추정방법의 개발, 한국수자원학회논문집, 38(11), 917-925
- 류권규, 김동수, 윤병만, 2005, 상호상관 PIV기법을 위한 빠르고 정확한 FFT 알고리즘의 개발, 한국수자원학회논문집, 38(10), 851-859.
- 류권규, 윤병만, 정범석, 2008, 흔들리는 영상 분석을 위한 표면 영상 유속계 알고리즘, 한국수자원학회논문집, 41(8), 855-862
- 류권규, 김남길, 윤병만, 2009, 참조점이 필요없는 표면 영상 유속계를 위한 카메라 모형의 개발, 대한토목학회 정기학술대회, 2603-2606
- 뮤트로닉스, 2010, 평갈수용 전자과표면유속계, 특허출원 10-2010-89895
- 변창구, 1999, 제주도 수자원의 효율적인 이용방안 연구, 제주대학교 산업대학원 석사학위논문, 2-3
- 건설교통부수자원국, 2004, 수문관측매뉴얼
- 윤병만, 류권규, 2007, 휴대용 표면영상유속계 프로그램(매뉴얼)
- 양성기, 김동수, 류권규, 강명수, 정우열, 이준호, 김용석, 유호준, 2012, 전자과와 수표면 영상을 이용한 산지하천 홍수유량 및 유속 계측 비교연구, 한국환경과학회지, 21(6), 739-747
- 양성기, 김동수, 정우열, 류권규, 2011, 다양한 첨단 유량계측기기를 활용한 제주도 하천 유출 비교 분석, 한국환경과학회지, 20(6), 738-788
- 양성기, 2007, 제주도의 하천관리와 개선방안, 하천과 문화, 한국하천협회, 3(4), 104-115
- 양성기, 김동수, 2015, 제주형 하천유출 관측의 신시대
- 양성기, 2007, 제주도의 하천관리와 개선방안, 하천과 문화, 3(4), 105-115
- 양성기, 김동수, 정우열, 2014, 선행강우를 고려한 제주하천 유출특성 분석, 한국환경과학회, 23(4), 553-560
- 이상호, 김우구, 김영성, 1997, 전자과표면유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성, 한국수자원학회, 30(6), 671-678
- 윤병만, 류권규, 노영신, 2001, PIV의 수리학 분야에의 적용, 명지대 산업기술연구소 논문집, vol. 20, 761-766

- 윤병만, 2003, LSPIV 기법의 개요 및 응용 분야, 한국가시화정보학회지, 1(2), 13-16
- 박재영, 오병동, 전선미, 김재복, 2006, The Development of the Automatic Discharge Acquisition & Management System(ADAMS) using Ubiquitous Techmique, 한국수자원학회학술발표논문집, 한국수자원학회, 488-493
- 수문수자원학회, 2010, 하천유량관측의 신시대(하천유량관측고도화연구회 편)
- 오제승, 김병식, 김형수, 서병하, 2005, 홍수량 추정을 위한 유량 산정 기법에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 25(3B), 207-213
- 이민호, 김창완, 유동훈, 2009, 자동유량측정에 의한 한강대교 조석영향 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 42(7), 513-523
- 이을래, 김원, 2003, 수리학적 영향인자에 의한 수위-유량관계 곡선의 분석, 대한토목학회학술발표논문집, 대한토목학회, 175-178
- 이찬주, 김원, 김동구, 김치영, 2005, ADCP를 이용한 유속과 유량 측정, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 38(10), 811-824
- 이찬주, 김원, 김동구, 김치영, 2005, ADCP를 이용한 유속과 유량 측정, 한국수자원학회논문집, 38(10), 811-824
- 이찬주, 서일원, 김창완, 김원, 2007, Chiu가 제안한 2차원 유속분포식의 자연하천 적용성 분석, 한국수자원학회논문집, 40(12), 957-968
- 우효섭, 2001, 하천수리학. 청문각.
- 유지우, 2005, 중국 수문관측 현황 및 발전 방향, 한국수자원학회지, 38(5), 34-43
- 윤용남, 2007, 수문학, 청문각
- 이동훈, 2012, 유출분석을 위한 소유역 분할에 대한 연구, 아주대학교 대학원 공학석사학위 논문, 14-20.
- 원유승, 2007, 지표수와 지하수를 연계한 장기 강우-유출 모형의 개발, 아주대학교 일반대학원 박사학위 논문
- 정종호, 윤용남, 2007, 수자원설계실무, 구미서관

국내외 학술지 게재 논문

1. 전자파와 수표면 영상을 이용한 산지하천 홍수유량 및 유속 계측 비교 연구

- 저자명 : 양성기, 김동수, 류권규, 강명수, 정우열, 이준호, 김용석, 유호준
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.21 No.6 [2012])

2. 표면영상유속계(SIV)를 이용한 홍수유출량 측정

- 저자명 : 김용석, 양성기, 류권규, 김동수
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.22 No.5 [2013])

3. 하천 재난감시용 CCTV를 활용한 홍수유출량 산정

- 저자명 : 김용석, 양성기, 류권규, 김동수
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.23 No.4 [2014])

4. 영상장비를 활용한 하천의 홍수유출량 산정

- 저자명 : 강보성, 양성기, 정우열, 김용석
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.23 No.4 [2014])

5. 표면영상유속계(SIV)를 활용한 홍수유출량 산정 시 주,야간영상의 정확도 비교분석

- 저자명 : 김용석, 양성기, 류권규, 김동수
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.24 No.4 [2015])

6. 현장유출영상을 활용한 표면영상유속계(SIV)의 상관계수 분석

- 저자명 : 김용석, 양성기, 김동수, 김서준
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.24 No.4 [2015])

7. 표면영상유속계(SIV)를 활용한 홍수유출량 산정 시 참조점 설정에 따른 오차율 분석

- 저자명 : 김용석, 양성기
- 학술지명 : 한국환경과학회지(Vol.25 No.6 [2016])

학술발표대회 성과

1. 표면영상유속계(SIV)를 이용한 유량측정기법 적용 및 활용
- 학술대회명 : 한국수자원학회(2012)
2. 표면영상유속계(SIV)를 이용한 홍수유출량 측정
- 학술대회명 : 한국환경과학회(2012)
3. CCTV 영상을 이용한 표면영상유속계(SIV)의 적용 및 활용
- 학술대회명 : 한국수자원학회(2013)
4. 하천 재난감시용 CCTV를 활용한 홍수유출량 산정
- 학술대회명 : 한국수자원학회(2014)
5. 표면영상유속계(SIV)를 활용한 홍수유출량 산정 시 주,야간영상의 정확도 비교분석
- 학술대회명 : 한국환경과학회(2014)
6. 정확도 향상을 위한 표면영상유속계(SIV)
- 학술대회명 : 한국수자원학회(2015)

특허 성과

1. 건천의 유량관측 시스템
- 등록번호 : 10-2015-0049025