



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#) 

碩士學位論文

표면영상유속계(SIV)를 이용한
한천의 홍수유출량 산정

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金湧錫

2013年 2月

표면영상유속계(SIV)를 이용한
한천의 홍수유출량 측정

指導教授 楊 城 基

金 湧 錫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013年 2月

金湧錫의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2013年 2月

Flood runoff measurements using Surface Image Velocimetry(SIV) in Han stream

Yong-Seok Kim

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2013. 2.

This thesis has been examined and approved by

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Won-Bae Park, Doc. of Jeju Development Institute

Thesis director, Sung-Kee Yang, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차	i
표 목 차	iii
그 립 목 차	iv
영 문 요 약	vi
I. 서 론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구의 내용 및 범위	2
3. 국내 외 연구동향 분석	3
II. 표면영상유속계(SIV) 시스템	5
1. PIV(Particle Image Velocimetry)의 기본원리	5
2. 표면영상유속계(Surface Image Velocimetry, SIV)를 이용한 유속측정	6
2.1 SIV의 기본 원리	6
2.2 SIV의 분석 과정	8
2.2.1 영상 획득	8
2.2.2 영상의 좌표 변환	9
2.2.3 속도벡터의 계산	14
2.2.4 후처리	16
III. 자료 및 방법	17
1. 연구대상 하천	17
2. 현장관측	18
2.1 기상 상태	18
2.1.1 제15호 태풍 볼라벤(BOLAVEN)	18

2.1.2 한천 지역의 강우현황	20
2.2 유량산정을 위한 관측자료의 획득	21
2.2.1 계측기기별 관측 위치	21
2.2.2 적용단면	23
IV. 현장 적용 및 결과	28
1. 표면영상유속계(SIV)의 현장적용	28
1.1 MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry)	28
1.1.1 MSIV의 현장적용방법과 특이사항	28
1.1.2 MSIV를 적용한 유속 및 유량 산정결과	36
1.2 STIV (Spatio Temporal Image Velocimetry)	45
1.2.1 STIV의 현장적용방법과 특이사항	45
1.2.2 STIV를 적용한 유속 및 유량 산정결과	45
2. 전자파 표면유속계(Electromagnetic surface current meter)	51
2.1 이동식 전자파표면유속계의 유속 및 유량 산정결과	52
2.2 고정식 전자파표면유속계의 유속 및 유량 산정결과	56
3. 유량 계측 방식에 따른 유속 및 유량의 비교·분석	57
V. 결론 및 제언	63
VI. 참고문헌	65
VII. 감사의 글	67

List of Table

Table II-1. Difference of SIV and PIV	8
Table III-1. To the impact of typhoon, VORAVEN	19
Table III-2. AWS(Atomatic Weather System) using the watershed rainfall Survey	20
Table IV-1. MSIV applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results	37
Table IV-2. STIV applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results	47
Table IV-3. Electromagnetic surface current meter applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results	52
Table IV-4. Kalesto applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results	56
Table IV-5. Measured velocities and calculated flow discharges with various methods	57

List of Figures

Fig. II-1. Image acquisition process of PIV (Raffel et al, 1998).....	6
Fig. II-2. Analysis procedure of Surface Image Velocimetry (김, 2008).....	7
Fig. II-3. Surface image acquisition for SIV(노, 2005).....	9
Fig. II-4. Examples of distorted image(노, 2005).....	10
Fig. II-5. Image distortion caused by camera position(노, 2005).....	10
Fig. II-6. The relationship between Physical-coordinate and Image-coordinate (Fujita 등, 1998).....	12
Fig. II-7. Reference points for image transformation (Fujita et al, 1998).....	13
Fig. II-8. Calibration images(노, 2005).....	14
Fig. III-1. Location of the study area.....	17
Fig. III-2. The Han Stream in Jeju island	18
Fig. III-3. Path of VOLAVEN.(the 15th typhoon of 2012).....	19
Fig. III-4. Applied to the precipitation observation system.....	20
Fig. III-5. Various velocity measurement systems in the study site.....	21
Fig. III-6. The shooting location for the analysis of the "MSIV"(a) and the acquired images(b).....	22
Fig. III-7. The shooting location for the analysis of the "STIV"(a) and the acquired images(b).....	22
Fig. III-8. Electromagnetic surface current meter(a), Kalesto(b).....	23
Fig. III-9. The river-bed survey of Observation section.....	23
Fig. III-10. Cross-sectional area of the difference due to the change of river-bed.....	24
Fig. III-11. (a) Applying cross-sectional of MSIV and STIV. (b) Applying cross-sectional of MSIV and STIV.....	26
Fig. III-12. The middle cross-section law enforcement methods.....	27
Fig. III-13. Distance measurement for Selected reference point.....	27
Fig. IV-1. Start screen of MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry).....	30
Fig. IV-2. Image analysis setup screen.....	31
Fig. IV-3. Physical coordinates and the image coordinates of a reference point placed.....	31
Fig. IV-4. Create a grid for analyzing the velocity distribution.....	32

Fig. IV-5. Image selections and settings for analysis	35
Fig. IV-6. Analysis range setting process	34
Fig. IV-7. Examples for analysis range settings	34
Fig. IV-8. Options for the velocity distribution in the vector	35
Fig. IV-9. The filtering process for analysis result	35
Fig. IV-10. Apply the cross-section of the discharge for calculating MSIV	36
Fig. IV-11. The analysis process of STIV. (Exemple. 17:30 image, 1p~5p)	46
Fig. IV-12. Apply the cross-section of the discharge for calculating STIV	46
Fig. IV-13. Comparison of surface velocities	58
Fig. IV-14. One-to-one relationships of velocity measurements between the electromagnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry	60
Fig. 15. Comparison of flow discharges	61
Fig. 16. One-to-one relationships of discharge measurements between the electromagnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry	62

Summary

Surface Image Velocimetry(SIV) is an instrument to measure water surface velocity by using image processing techniques. Since SIV is non-contact type measurement method, it is very effective and useful to measure water surface velocity for steep mountainous streams, such as streams in Jeju island. In the present study, an surface imaging velocimetry system was used to calculate the flow rate for flood event due to a typhoon. At the same time, two type of electromagnetic surface velocimetries (electromagnetic surface current meter and Kalesto) were used to observe flow velocities and compare the accuracies of each instruments. The comparison showed that for velocity distributions root mean square error(RMSE) was 0.15 and R-squared was 0.79. For discharge measurements, RMSE reached 4.59 and R-squared did 0.95. It means that surface image velocimetry could be used as an alternative method for electromagnetic surface velocimetries in measuring flood discharge.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 전 세계적인 기상이변이나 집중호우로 인해 과거와 다른 강수현상과 기록적인 호우가 자주 발생하고 있다. 엘니뇨(El Nino) 및 라니냐(La Nina)와 같은 기상이변 현상은 북반구 지역의 기록적인 집중호우와 홍수를 유발시키면서 많은 수해피해와 재산피해를 입혔으며, 우리나라도 유례없는 이상기후현상이 다양하게 발생하여 많은 인명 및 재산상의 피해를 입었다.

과거와 비교 시 홍수로 인한 인명 및 재산 피해가 크게 발생하는 이유는 1차적인 영향으로 전 세계적인 이상기후의 영향을 지목할 수 있다. 또한 국지적으로는 도시의 발전 방향이 친환경 도시개발을 목적으로 한 하천 주변의 개발을 지목할 수 있다(김 등, 2008). 이에 따라 하천 홍수 재해에 대비하기 위한 예방 차원의 연구들이 많이 이루어지고 있으며, 특히 수자원 관련 계획의 기초자료인 하천 유량측정에 많은 관심이 집중되고 있다.

하천범람 피해와 도시침수 피해를 막고, 수자원 확보 및 효율적인 관리를 위해서는 수자원에 대한 정밀한 관측 및 연구가 수행되어야 하며, 특히 지속적이고 신뢰성 있는 하천의 유량 조사가 매우 중요하다.

기존의 유량측정기법에는 유속계를 이용하여 평수기 때의 유속을 측정하는 유속-면적법과 홍수 시 봉부자를 이용한 유속측정기법이 이용되었다. 그러나 이와 같은 접촉식 유속측정방법은 많은 시간과 인력이 요구되며, 측정시간에 따라 오차가 발생하는 문제점이 있다(김 등, 2011). 최근에는 접촉식 유속측정방법의 단점을 보완하여 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)와 전자파 표면유속계(Electromagnetic surface current meter 또는 Doppler radar)와 같은 비접촉식으로 표면의 흐름속도를 계산하는 방식이 많은 각광을 받고 있다(양 등, 2011). 이와 같은 비접촉식 유속측정방법은 제주도 하천의 흐름 특성상 기존 유

속측정방법에 비해 안전하고 효과적이며 정확한 유속을 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

SIV기법이 적용되는 제주도 하천의 특징은 섬의 중앙부에 1,950m 높이의 순상 화산체인 한라산을 중심으로 원추형 화산의 특징인 방사상 수계를 이루고 있다.

육지부와 다른 지질학적 특성으로 인해 전체 143개의 하천 중 6개 하천을 제외한 하천이 평상시에는 물이 흐르지 않는 건천을 이루고 있다. 또한, 제주도의 강우량은 연평균 약 2,000mm로서 우리나라 최다우지역이며, 집중호우의 영향으로 인해 유출 발생 시 평균 3~4 m/sec의 돌발성 홍수유출이 발생하고 불과 1일 미만의 단시간에 유출이 끝나는 특이한 유출현상을 보이고 있다. 연간 하천 유출은 주로 집중호우와 태풍 등의 영향으로 5~10회 정도 발생하고 있다(양, 2007).

본 연구에서는 제주도 하천의 유출특성을 고려하여 제주도 북부 중앙부에 위치한 한천의 하류부인 제2동산교에서 홍수발생시 유량관측을 위해 비접촉 유속 측정 방식인 표면영상유속계(SIV)를 이용하여 유량을 산정하였다. 동시에 전자과 표면유속계로 관측한 유량과 비교·분석하여 표면영상유속계의 정확도와 활용성을 모색하였다.

2. 연구의 내용 및 범위

본 연구는 국내외에서 활발한 연구가 이루어지고 있는 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)를 제주도 하천인 한천에 적용하여 유출 발생 시 정밀한 유속을 산정하고, 하천의 단면자료를 이용하여 유량을 산정하였다. 산정된 유량은 이동식 및 고정식 전자과표면유속계(Electromagnetic surface current meter 또는 Doppler radar)의 관측 값과 비교·분석을 실시하고, 제주도 하천의 유출 발생 시 정밀하고 신속한 유속 및 유량 산정에 대한 방향을 제시하였으며, 향후 표면영상유속계의 개선 방안을 제시하였다.

본 연구에서 수행한 내용을 각 장별로 정리하면 다음과 같다.

먼저 제1장의 서론은 연구의 배경을 제시하고, 제주도의 하천유출 특성을 고려

한 연구 목적을 명확히 하였으며, 기존의 국내외 연구동향을 수록하여 본 논문의 연구 위치를 살펴보았다.

제2장에서는 표면영상유속계(SIV) 시스템의 이론적 배경과 기본원리에 대한 내용을 수록하였다.

제3장에서는 표면영상유속계(SIV)의 현장 적용을 위해 연구대상 하천의 소개와 유출 발생 시의 기상상태 및 유량 산정에 필요한 자료를 검토하였다.

제4장에서는 이미지 해석 기법의 적용성과 효용성을 판단하기 위해 표면영상유속계(SIV)를 이용하여 현장의 적용 방법과 분석된 결과를 제시하였다. 관측 구간에 따라 전체 흐름장의 분석을 위한 MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry) 기법과 수직영상을 분석한 STIV(Spatio Temporal Image Velocimetry) 기법을 적용하여 유속을 분석하고 유량을 산정하였다. 동시에 이동식 전자파표면유속계와 제2동산교에 설치된 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)로 산정된 유속을 제시하였으며, 산정된 결과를 토대로 종합적인 비교·분석을 수행하였다.

제5장에서는 종합적인 결과에 대한 결론과 향후 연구과제에 대해 고찰하였다.

3. 국내외 연구동향

영상기법을 적용한 연구는 기존의 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry)에서 시작되며, 유체를 다루는 모든 분야에서 다양한 연구가 진행되고 있다.

Leese(1971)에 의해 영상기법을 적용한 유동장의 해석이 시도되었으며, Adrian(1991)에 의해 영상처리 기술이 도입되었다. Kinoshita(1984), Fujita(1992) 등은 영상처리 기술을 이용하여 실제하천에 적용하여 유속측정을 시도하였고, 이후 Fujita(1994) 등, Aya(1995) 등은 촬영 각도에 따른 왜곡을 보정하는 기법을 개발하여 유동장 분석에 사용하였으며, 하천의 2차원 유속분포와 이미지의 해상도에 따른 유량차이를 보였다. Ettema(1997) 등은 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)를 이용해 대규모 영역의 여러 가지 형태에 적용하여 성공적으로 접근하였으며, Fujita, Muste(1998) 등은 LSPIV의 적용 결과에 대해 대규모 대상영역을 동시에

분석하고, 매개변수를 적절히 조절하면 소규모의 영역의 흐름과 난류구조의 적용이 가능함을 밝혔다. Musta(2002) 등은 LSPIV에서 추적입자의 크기와 입자 분포의 영향에 대한 연구를 수행하였다(김, 2003). 또한 Fujita(2005) 등은 시공간 영상(space-time image)을 이용하여 1차원적인 유속을 구하는 STIV(Spatio Temporal Image Velocimetry)을 개발하였다(김, 2008).

국내의 PIV에 대한 연구는 김미영(1999) 등이 해류표면과 같은 표면류의 속도를 측정하기 위해 PIV의 응용인 SF-PIV기법을 사용하였다. 윤병만(2001) 등은 PIV의 수리학분야에의 적용성을 살펴보았으며, 이후 LSPIV기법을 이용하여 곤지암천의 유속장을 성공적으로 추출하였다. 노영신(2002) 등은 영상내의 왜곡을 수정하기 위한 방법을 개발하고 개수로 실험 장치를 이용하여 표면유속을 측정하여 LSPIV기법을 검증하였다. 이후 측정된 표면유속에 대해 평균유속으로 환산할 수 있는 방법을 개발하고, 현장적용을 통해 검증하였다. 류권규(2006) 등은 PTV(Particle Tracking Velocimetry)의 입자 추적 알고리즘과 LSIV(Large Scale Image Velocimetry)의 좌표 변환 알고리즘, 유속 산정 알고리즘을 조합하여 흔들리는 영상에서 표면 유속을 측정하는 알고리즘을 개발하였다. 김영성(2007) 등은 현장에서 LSPIV의 적용 시 촬영각도의 범위에 따른 상관도의 변화양상을 파악하여 오차범위를 줄이는 연구를 수행하였다. 또한 류권규(2006) 등은 흔들리는 영상에 대한 보정 알고리즘을 개발하였고, 김서준(2007) 등은 고정식 표면영상유속계(FSIV) 시스템을 교량에 설치하여 실시간으로 연속적인 유량 측정을 실시하고 SIV에 관련된 많은 연구를 수행하였다.

II. 표면영상유속계(SIV) 시스템

획득된 영상자료를 이용한 해안 유동 및 하천 흐름 등에 대한 유속측정방법은 분할된 이미지에 분포된 추적입자의 이동거리 및 이동시간을 통해 유속을 계산하는 방식이다. 본 연구에서 제시된 SIV(Surface Image Velocimetry)의 기본 원리는 최초의 영상기법을 이용한 PIV(Particle Image Velocimetry)와 적용되는 대상과 적용방법에서 차이가 있으나, 획득된 영상의 유속을 분석하는 기본원리는 동일하다.

실제 3차원 공간의 하천 흐름을 영상기기를 통한 기록 및 저장 시 화면상의 2차원으로 저장된다. 영상처리를 통해 얻어지는 디지털 영상정보는 화면상 2차원의 입자 위치 및 각 화소의 명암 등급 값으로 기록되며, 영상 내의 흐름 특성이나 입자들의 이동은 시간변화에 따라 연속된 이미지의 화소에 대한 명암 등급 값이 변화한다는 것을 의미한다. 영상 해석을 이용한 유속 측정은 연속된 이미지 사이의 시간에 따른 각 화소의 명암 등급 값의 변화를 분석하여 영상 내에서 어떤 지점의 화소로 이동하였는지를 판별하고 분석하는 방식이다(노, 2005).

1. PIV(Particle Image Velocimetry)의 기본원리

영상분석을 이용한 PIV의 기본원리는 유동가시화(Flow visualization)기술과 관련이 있다. 유동가시화란 속도, 압력, 밀도 및 온도와 같이 우리 눈에 직접 보이지 않는 유동 정보의 공간분포를 어떤 범위의 기간과 공간에서 눈에 보이도록 하는 실험 방법이다(김, 2010).

PIV를 적용한 유동장의 해석방법은 Fig. II-1과 같다. 흐름영상에서 물 입자의 유동궤적을 추적하기 위해 비중이 1.0에 가까운 추적 입자(tracer particle)를 투입(seeding)하고, 레이저와 같은 광원을 이용하여 추적 입자를 비추는 과정이 필요하다. 빛에 반사된 추적 입자의 운동을 영상기기를 이용 정밀 촬영하고, 획득

된 2차원의 영상자료를 일정한 시간간격의 정지화상으로 추출한다.

영상처리 과정을 거친 후 영상내의 추적 입자 이동거리를 정지화상의 시간간격으로 나누어 최종적으로 유속장의 속도분포를 계산하는 유속측정기법이다(윤, 2001, 김, 2003).

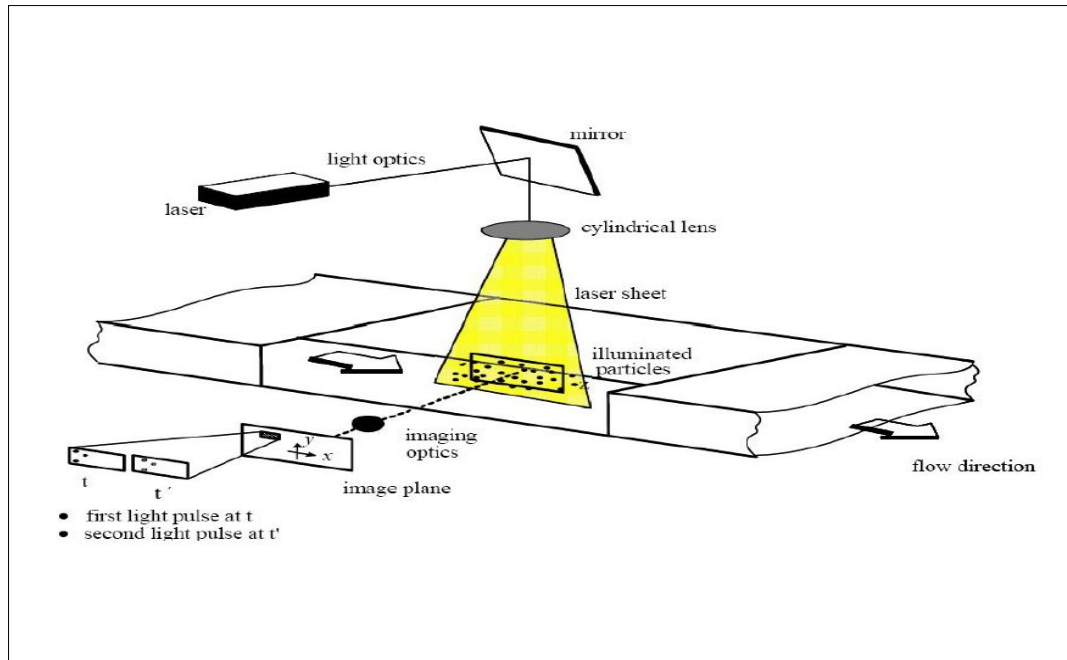


Fig. II-1. Image acquisition process of PIV (Raffel et al, 1998)

그러나 PIV기법은 본 연구의 SIV기법과 달리 특수 입자의 투입과 레이저광에 의한 조명장치가 필요하고, 흐름의 상태를 90° 각도로 촬영된 영상이 이용하며, 제약된 실험 공간 내에서만 사용되는 조건이 있다.

2. 표면영상유속계(Surface Image Velocimetry, SIV)를 이용한 유속측정

2.1 SIV의 기본 원리

SIV기법은 PIV기법의 제약조건을 개선하여 개수로 흐름의 표면영상에 대해

분석과정을 거쳐 유속을 측정하는 기법이나 유체의 유동에 대한 유속벡터의 분석과정이 PIV기법과 유사하다.

표면영상분석을 위한 분석 과정은 Fig. II-2와 같다.

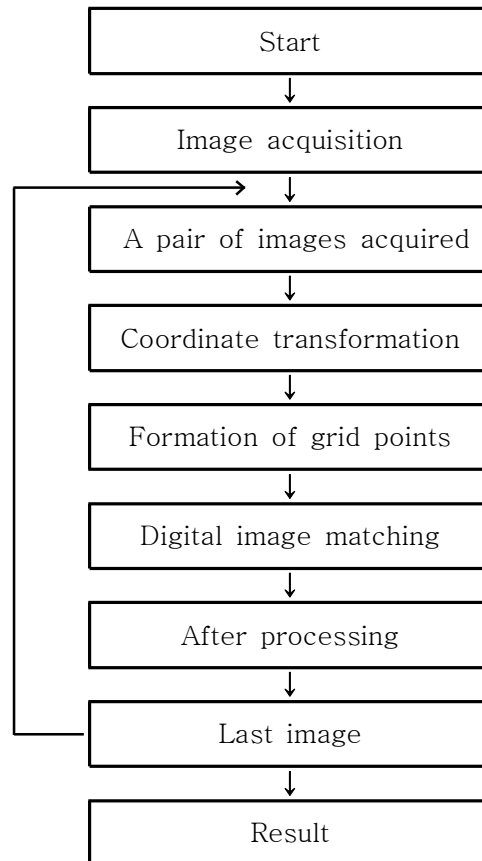


Fig. II-2. Analysis procedure of Surface Image Velocimetry (김, 2008).

주로 실내실험에서 이용되고 레이저와 같은 인위적인 광원을 필요로 하는 PIV와 달리 SIV는 주로 넓은 영역을 대상으로 하기 때문에 영상획득 및 영상처리 과정은 대상지역의 규모 및 촬영방법에 따라 차이가 있다. SIV기법의 기본 원리 및 적용방법을 이해하기 위해서는 이러한 두 기법간의 적용상 차이점을 파악하는 것이 필요하다.

Table II-1는 PIV와 SIV간의 차이점을 비교한 것이다. 두 기법간 적용상의 차이점은 광원의 종류, 분석대상 영역의 규모, 왜곡 발생 여부, 측정되는 흐름장의 종류 및 추적 입자의 투하여부 등을 들 수 있다(노, 2005).

Table II-1. Difference of SIV and PIV

	PIV기법	SIV기법
광원	레이저광	자연광 및 일반조명
대상영역	소규모의 실내유동실험	4m ² ~45,000m ² 범위의 실제하천
영상왜곡발생	소규모 영역이므로 왜곡 발생하지 않음	촬영위치에 따른 왜곡 보정 필요
시스템구성	레이저, AOM, 촬영 및 저장장치, 반사경, cylindrical lens, PC	일반 캠코더 및 PC
분석과정	영상디지털화, image grab, 영상처리 유속산정	영상디지털화, image grab, 영상왜곡보정, 표면유속산정

2.2 SIV의 분석 과정

2.2.1 영상 획득

표면영상 유속계를 이용하여 수로의 표면유속을 측정하기 위해서는 우선 대상 영역의 유동장에 대한 영상을 획득해야 한다. 영상획득은 Fig.Ⅱ-3에서 보는 바와 같이 촬영이 용이한 위치에 촬영 장치를 설치하여 유동장에 대한 영상을 촬영하고 이를 기록한다. 촬영지점은 대상영역과 기준점이 촬영영역 범위 내에 포함되도록 대상영역에 비해 높이가 높은 제방 또는 교량 등의 적절한 위치를 선정하고, 선정된 위치에 촬영 장치를 설치하여 기록을 수행한다.

표면영상유속계(SIV)는 유동장을 촬영하고 이를 분석하여 유속을 측정하는 기법이기 때문에 촬영 장치는 가장 기본적인 장비라 할 수 있다. PIV 일반적으로 CCD(charge-coupled device camera) 카메라를 이용하여 촬영하고 프레임그래버(frame-grabber)를 통해 별도의 저장장치에 촬영된 영상을 기록한다. CCD 카메라는 빛의 신호를 자기장의 전자로 바꾼 다음 이를 전압으로 전환하여 전기신호로 변환해 주는 역할을 하며, 프레임그래버는 이러한 전기적 신호를 디지털 신호로 변환하는 역할을 한다. 그러나 촬영과 기록이 동시에 가능한 일반 캠코더를 이용하거나 촬영영상 자체를 디지털로 기록하면 별도의 디지털 전환 장치를 필요로 하지 않는다.

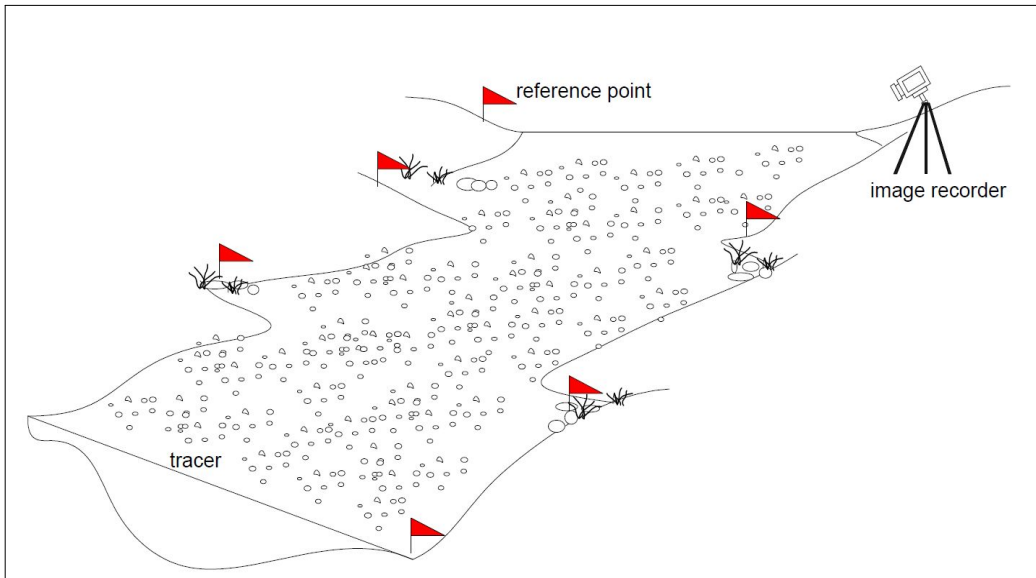


Fig. II-3. Surface image acquisition for SIV(노, 2005).

2.2.2 영상의 좌표 변환

일반적으로 영상왜곡은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 실제 사물은 3차원 공간상에 존재하므로 이를 영상으로 전환할 경우, 2차원 평면 형태로 저장되기 때문에 발생하는 왜곡이고, 둘째는 카메라의 촬영 각도에 따른 사물의 원근에 의해 발생하는 왜곡이다.

표면영상유속계(SIV)는 영상 획득 시 비스듬한 각도로 수표면의 영상을 기록하므로 이에 대한 왜곡은 카메라의 촬영 각도에 의한 원근상의 왜곡이다. 이것은 실제로는 동일한 거리라 할지라도 촬영영상 내에서는 촬영 각도 및 촬영 위치에 따라 달라지는 현상이다. Fig. II-4에서 보는 바와 같이 수로바닥에 표시된 흰색의 선은 원거리의 지점은 짧게, 근거리의 지점은 더 길게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. II-5에서 보는 바와 같이 하천과 같은 넓은 영역의 유속을 측정하는 경우, 실제좌표계(physical coordinate), 영상좌표계(image coordinate)간의 관계를 이용하여 영상에 대한 왜곡을 수정해주어야 한다. 실제 좌표계는 대상영역의 각 지점들의 물리적인 좌표계를 의미하며, 이에 대응되는 영상내의 좌표를 영상 좌표계라고 한다.



Fig. II-4. Examples of distorted image(노, 2005).

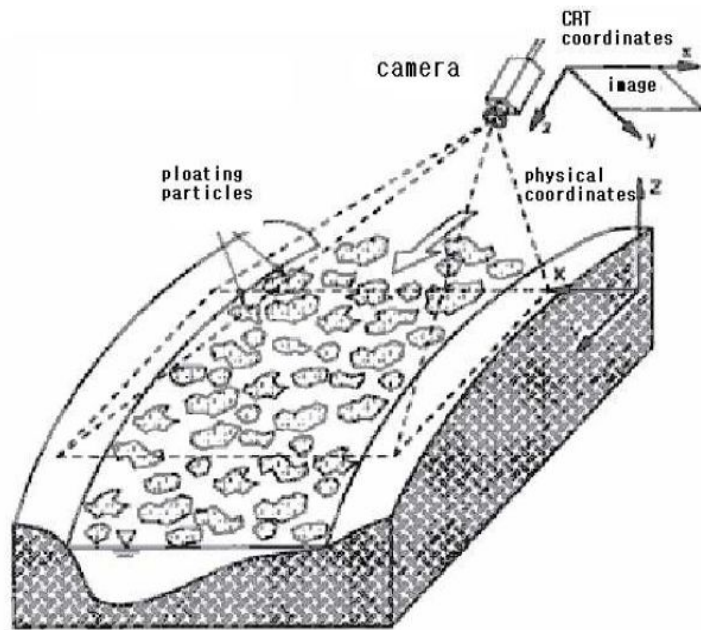


Fig. II-5. Image distortion caused by camera position(노, 2005).

2차원 투영좌표 변환법은 좌표점을 다른 평행하지 않은 좌표로부터 평면에 투영한 후의 (x, y) 좌표를 분석적으로 계산할 수 있다. 2차원 투영좌표 변환법은

경사진 사진에서의 특정 좌표(x,y)를 일정한 보정비율로 평면상의 물리 좌표 (x, y)로 계산하는데 가장 많이 사용된다.

2차원 투영좌표 변환법에 의한 물리좌표계(X,Y)와 각 영상의 영상좌표계(x, y) 간의 관계식은 다음 식(2.1)과 식(2.2)와 같다. 식(2.1)과 식(2.2) Fujita 등(1997)에 의해 유도되었다.

$$x = \frac{b_1X + b_2Y + b_3}{b_7X + b_8Y + 1} \quad (2.1)$$

$$y = \frac{b_4X + b_5Y + b_6}{b_7X + b_8Y + 1} \quad (2.2)$$

여기서 $b_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 는 회전보정, 병진이동 보정, (x,y)좌표에 대한 직각보정과 평행하지 않은 두 좌표계간의 좌표보정을 위한 8개의 변환계수(또는 맵핑 계수)이다.

식(2.1)과 식(2.2)로부터 왜곡된 영상의 (x,y)좌표로부터 보정된 실제좌표계의 (X,Y)좌표를 계산할 수 있다. (X,Y)좌표는 보정을 위한 지표면상의 기준점이 되고, (x,y)는 이에 해당하는 왜곡된 사진 상의 좌표가 된다. 식 (2.1)과 식(2.2)는 기준점 각각에 대해 성립하며 8개의 미지수를 갖기 때문에 최소 4개의 기준점이 필요로 하나, 해석을 위해 4개 이상의 기준점을 두는 것이 좋다. 그러면, 이들 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CB = Z \quad (2.3)$$

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_8]^T, Z = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (2.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_1 & -x_nY_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & -y_nX_n & -y_nY_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

여기서, B는 변환 계수 벡터(8×1)이며, Z는 물리 좌표 벡터(2n×1), C는 변환 행렬(2n×8)이다. 2차원 투영좌표 변환법은 8-매개변수 변환(8-parameter transform)이라고도 하는데, 이는 변환을 위한 변환 계수가 모두 8개가 사용되기 때문이다.

변환 계수는 이미 알고 있는 실제 좌표계의 n 개의 기준점 $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ 과 영상좌표계의 n 개의 대응점 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 를 이용하여 최소자승법에 의해 결정된다. 이러한 변환 계수는 위의 식 (2.3)~(2.5)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = (C^T C)^{-1} C^T Z \quad (2.6)$$

여기서, C^T 는 행렬 C 의 전치 행렬이다.

실제 좌표계와 영상 좌표계간의 관계는 Fig. II-6과 같다. 기준점은 Fig. II-7과 같이 보통 하천 양안에서 몇 개의 점을 선정하여 정하게 된다. 기준점은 측량을 통해 얻게 되며, 기준점으로부터 8개의 변환 계수가 결정되면 이로부터 식 (2.1)과 식(2.2)를 반복 계산하여 나머지 좌표에 대한 변환을 수행하게 된다. 그러면 영상 좌표는 다음과 같이 물리 좌표로 역변환 된다.

$$X = \frac{(b_5 - b_6 b_8)x + (b_3 b_8 - b_2)y + (b_2 b_6 - b_3 b_5)}{(b_4 b_8 - b_5 b_7)x + (b_2 b_7 - b_1 b_8) + (b_1 b_5 - b_2 b_4)} \quad (2.7-a)$$

$$Y = \frac{(b_6 b_7 - b_4)x + (b_1 - b_3 b_7)y + (b_3 b_4 - b_1 b_6)}{(b_4 b_8 - b_5 b_7)x + (b_2 b_7 - b_1 b_8)y + (b_1 b_5 - b_2 b_4)} \quad (2.7-b)$$

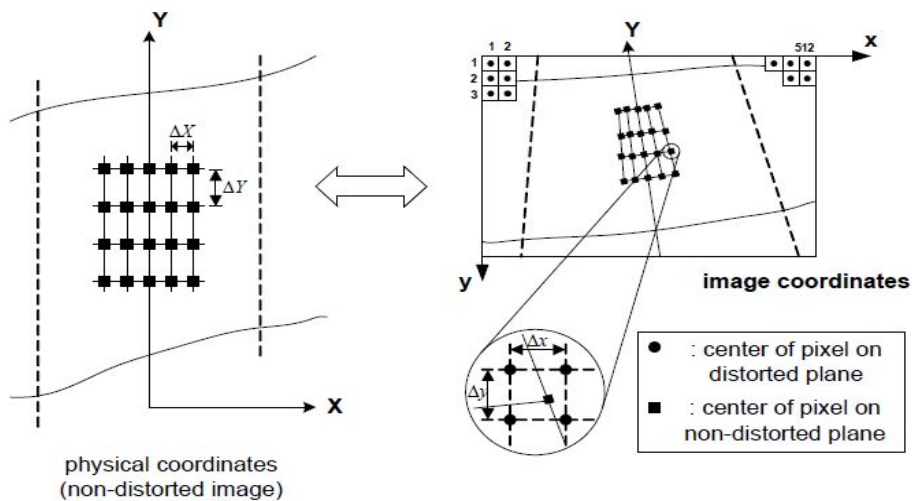


Fig. II-6. The relationship between Physical-coordinate and Image-coordinate(Fujita 등, 1998).

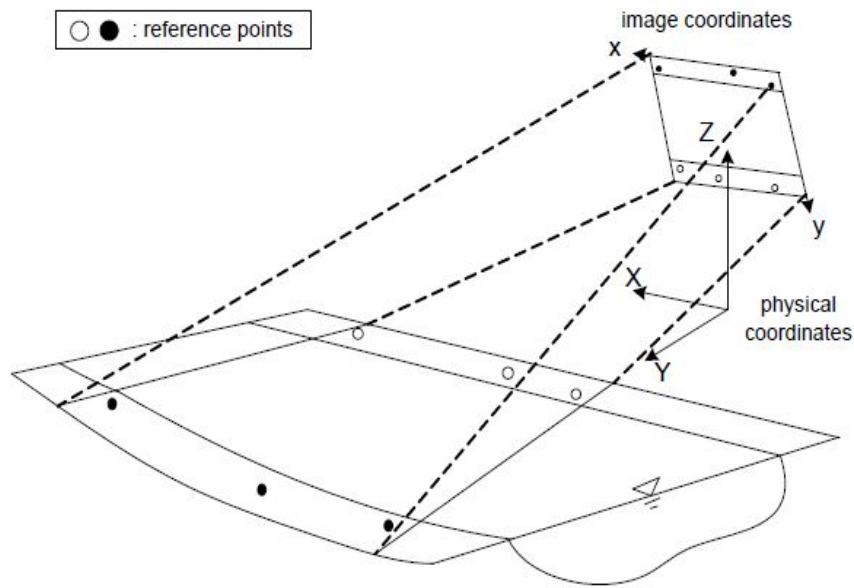


Fig. II-7. Reference points for image transformation (Fujita et al, 1998).

한편, 식(2.7)을 이용하여 계산한 것은 실제 물리 좌표의 값이므로, 이를 영상으로 다시 나타내기 위해서는 크기를 변화시켜야 한다. 즉, 원점에 대한 이동과 확대 및 축소를 하여야 적절한 크기의 영상으로 나타낼 수 있다. 이것은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$x' = X_{min} + XS \quad (2.8-a)$$

$$y' = Y_{min} - YS \quad (2.8-b)$$

여기서, (x', y') 은 변환된 영상의 좌표이며, (X_{min}, Y_{max}) 는 물리적 좌표의 좌측 상단이고 영상 좌표에서는 좌측 하단에 해당한다. 또한, S는 영상 좌표와 물리 좌표 사이의 축척이다.

이러한 영상 좌표계와 실제 좌표계의 관계를 이용하여 Fig. II-4의 왜곡된 영상을 보정한 결과는 Fig. II-8과 같다. 흰 줄로 나타난 격자망이 정사각형을 이루고 있음을 알 수 있다.

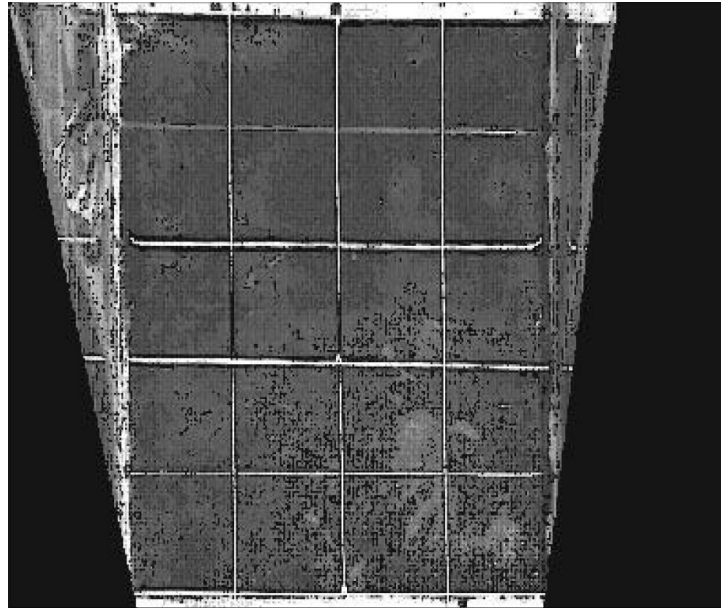


Fig. II-8. Calibration images(노, 2005).

2.2.3 속도벡터의 계산

SIV는 획득된 동영상의 디지털화 및 정지화상추출, 영상의 왜곡보정과 영상처리 과정을 거친 후 PIV기법과 동일한 방법으로 속도벡터를 계산하게 된다. SIV는 연속되는 두 영상 내의 입자군 이동으로부터 유속벡터를 산정하게 되는데, 여기서 입자군의 크기를 상관영역(interrogation area)이라 하고, 두 번째 영상 내에서 동일 입자군을 찾기 위한 영역을 검색영역(searching area)이라고 한다. SIV 분석에서는 연속되는 두 영상의 검색영역 내에서 각 입자군간 도심의 이동거리를 두 영상의 시간간격으로 나누어 유속벡터를 계산한다.

SIV 또는 PIV를 이용해 유속장을 측정하기 위해서는 화상 내에서 추적 입자들의 이동거리를 구해야 한다. 이를 위해 두 개의 연속되는 사진 내의 미소한 영역에 대해 동일한 특성 즉 영상의 짜임새나 형태 등을 인지하여 동일한 입자군을 판별할 수 있어야 한다.

이러한 영상내의 특성을 컴퓨터를 이용하여 소프트웨어적으로 분석하고 이로부터 두 영상간의 상호관계를 분석하는 것을 디지털 영상판별(digital image matching)기법이라고 한다. 영상 판별에는 상호 상관계수를 계산하여, 연속되는 두 영상내의 상관영역에 대한 명암 등급값을 비교하여 검색 영역 내에서 상관계

수가 가장 큰 입자군을 동일 입자군으로 판별한다. 상관영역은 상관계수 계산을 위한 입자군의 크기를 의미하며, 이 크기를 기준으로 상관계수를 계산한다. 검색 영역은 두 번째 영상 내에서 동일 입자군의 판별을 위한 검색 범위로, 이 영역 내에서 상관계수를 계산한다. 만약 검색영역의 크기가 (x,y) 각각 10×10 개의 화소로 이루어졌다면, 검색영역에서 상관영역은 100개가 존재하게 되며, 모두 100개의 상관계수를 계산하게 된다. 계산의 효율을 위해서는 예측되는 입자군의 이동을 고려하여 적절한 크기의 검색영역을 설정하는 것이 좋다.

각 상관영역의 상관계수 R_{ab} 의 계산은 연속되는 두 번째 영상의 검색 영역 내에서 상관영역을 화소단위로 이동하면서 모든 상관영역에 대해 수행된다. 두 입자군 즉 상관영역간의 상관계수 R_{ab} 는 연속되는 두 영상의 상관영역 내 명암 등급값 a_{ij} 와 b_{ij} 로부터 계산되며, 검색 영역 내에서 가장 큰 R_{ab} 값을 갖는 입자군을 동일한 입자군으로 판단, 두 입자군간의 이동거리를 산정하는 방식이다. 상호상관 기법에서의 상관계수 R_{ab} 는 식 (2.9)와 같이 정의 할 수 있다.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \overline{a_{ij}})(b_{ij} - \overline{b_{ij}})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \overline{a_{ij}})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \overline{b_{ij}})^2 \right]^{1/2}} \quad (2.9)$$

여기서 MX와 MY는 상관영역의 크기를 나타내며, a_{ij} 와 b_{ij} 는 각각 연속되는 두 영상 내 상관영역의 픽셀에 대한 i 열과 j 행에 대한 명암 등급 값을 나타낸다. $\overline{a_{ij}}$ 와 $\overline{b_{ij}}$ 는 상관영역내의 모든 명암 등급 값의 평균이다.

상관계수가 +1을 갖는 경우는 영상 촬영 시 잡음 성분이나 화면의 떨림으로 인해 완전하게 동일한 입자군이 두 영상사이에 존재하게 되는데 이는 입자의 이동으로 간주될 수 없고 잡음성분으로 간주된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 식 (2.9)를 보완한 식 (2.10)을 이용하였다.(Yu, 2004)

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \times \frac{\min(\bar{a}_{ij}, \bar{b}_{ij})}{\max(\bar{a}_{ij}, \bar{b}_{ij})} \quad (2.10)$$

일반적으로 상관계수의 최소 기준값은 0.7이 사용되며, 상관계수가 이 값을 초과하면 연속되는 두 상관영역은 서로 동일한 입자군으로 판단한다. 이와 같은 방법으로 입자들간의 이동거리가 구해지고 이를 두 영상간의 시간차로 나누면 속도분포가 구해지게 된다.

2.2.4 후처리

연속되는 두 영상간의 분석을 통해 순간 유속장이 결정되고, 이를 전체 영상에 대해 반복적인 계산을 거치면 분석영상의 수만큼의 순간 유속장을 얻을 수 있다.

이런 순간 유속장은 크건 작건 오류 벡터를 포함할 수 있으므로, 오류 벡터의 보정이 필요하게 된다. 또한, 수정된 순간 유속장의 자료에서 평균 유속장이나 난류 성분, 와도 등 다양한 계산을 수행할 수 있다.

최종적인 유속장은 이러한 순간 유속장의 변화를 시간 평균하여 구해지게 된다. 오류벡터의 제거는 이러한 시간평균과정에서 유속벡터 계산 시 입자의 분포가 조밀하지 못하거나 잡음성분으로 인해 발생하는 오류벡터를 제거하는 방법을 사용하였다. 즉, 이러한 오류벡터는 상관계수가 0.7 이하의 작은 값을 갖게 되는데, 시간 평균과정에서 상관계수의 기준범위를 0.70~0.99로 설정하여 이 범위를 벗어나는 유속벡터에 대해서는 시간평균에 포함되지 않도록 하였다. 또한 x 방향과 y 방향의 유속 범위를 지정하여 필터링을 하도록 하였다(윤 등 2007).

Ⅲ. 자료 및 방법

1. 연구대상 하천

한천유역은 제주도 북부 중앙부에 위치하며, 한라산 정상부근에서 발원하여 남북 방향으로 흘러 제주시 오라동과 용담동을 거쳐 바다로 유입되고 있다(Fig. Ⅲ-1).



Fig. Ⅲ-1. Location of the study area.

한천의 총연장은 19.9km, 유역면적은 34.57km², 유역의 평균 폭은 3.25m이며, 하상경사는 약 0.0265로 상대적으로 급한 경사를 형성하고 있다. 또한 하상은 대부분 현무암질의 거석 및 입도가 큰 자갈로 구성되어 전형적인 산지하천의 형태를 보여주고 있다(양 등, 2011).

한천의 짧은 유로 연장과 급한 경사, 투수성의 매우 높은 현무암질의 영향으로 평상시에는 건천을 형성하고 있으나, 집중호우 시와 태풍 통과 시, 선행강수와 밀접한 관련을 가지면서 유출이 발생하고 있다(Fig. Ⅲ-2).

관측 지점은 한천 하류부에 위치한 제2동산교이며 홍수유출 시 현장조사를 실시하고 유량을 산정하였다.



(a) dry season

(b) flood season

Fig. III-2. The Han Stream in Jeju island

2. 현장관측

2.1 기상 상태

2.1.1 제15호 태풍 블라벤(BOLAVEN)의 영향

제15호 태풍 블라벤(BOLAVEN)은 2012년 8월 20일 오후 3시 미국의 괌 서쪽 해상에서 발생하여 2012년 8월 27일 새벽 제주도과 남부 지방에 영향을 주고, 2012년 8월 29일 오전 6시 북한 강계 육상에서 온대저기압으로 변질하였다. 강력한 강풍을 동반한 태풍 블라벤의 영향으로 전체 88명이 사망하였으며, 대한민국에서는 19명이 사망하였다. 또한 수많은 전신주와 가로등, 건물이 파손되었으며, 190만명에 달하는 주민이 정전피해를 겪었다.

태풍 블라벤은 최대중심기압이 986 hPa로 2007년의 태풍 나리(NARI) 이후 가장 강력한 대형급 태풍으로 최대풍속이 65m/sec의 강한 풍속을 동반하였고, 제주지역에는 기간 강수량이 305.9mm, 산간지역(한라산 윗세오름)에는 740.5mm 강수량을 기록하였다(Table III-1).

Table III-1. To the impact of typhoon, VORAVEN

발생일	2012년 8월 20일
소멸일	2012년 8월 29일
최저 기압	910hPa
최대풍속(10분 평균)	KMA : 53m/sec
	JMA : 50m/sec
최대풍속(1분 평균)	65m/sec
최대크기	KMA : 550km(반경)
	JMA : 1300km(직경)
인명피해	88명 사망
	56명 실종
기간 강수량(8월 27 ~ 28일)	제주 : 305.9mm

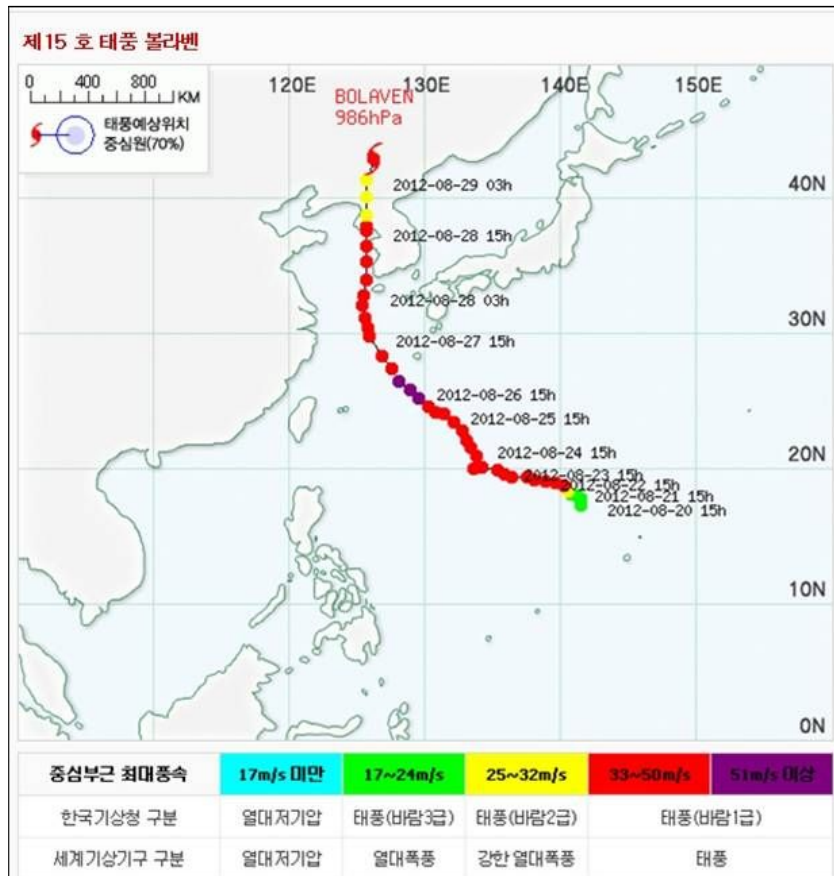


Fig. III-3. Path of VOLAVEN.(the 15th typhoon of 2012)

2.1.2 한천유역의 강우현황

태풍 볼라벤(BOLAVEN)의 내습으로 인한 강우 시, 한천의 유출에 대한 영향성을 조사하기 위해 기상청의 AWS(Atomatic Weather System)자료를 이용하여 해당 유역에 대한 강우량 자료를 수집하고 강우현황을 조사하였다.

제주도의 기상관측소 현황은 전체 4개소의 기상대가 운영 중이며 24개소의 AWS와 48개소의 강우량계가 설치 운영되고 있다. 한천유역의 유출에 대한 강우현황을 판단하기 위해 산간지역의 어리목(Eriomok), 윗세오름(Witseohreum), 진달래밭(Jindalreabat), 아라(Ara)에 총 4개소의 AWS자료를 이용하였다(Fig. III-4).



Fig. III-4. Applied to the precipitation observation system.

Table III-2. AWS(Atomatic Weather System) using the watershed rainfall Survey

지점	지속시간 (hour)	시간당강우량 (mm/hr)	총강우량 (mm)
Ara	25	17.4	434.5
Eorimok	26	22.3	580.5
Jindalreabat	27	19.9	538.5
Witseohreum	26	28.8	784.0

산간지역의 강우현황을 조사한 결과 아라(Ara)지점의 총 강우량은 434.5mm, 어리목(Eorimok) 580.5mm, 진달래밭(Jindalreabat)은 538.5mm으로 나타났으며, 윗세오름(Witseohreum)이 784.0mm로 가장 많은 강우량을 보였다.

2.2 유량 산정을 위한 관측자료 획득

2.2.1 계측기기별 관측위치

태풍의 영향에 의한 제주도 한천의 유출 발생 시 비접촉식 유속계를 적용한 유속 산정에는 제주시 오라동의 제2동산교에서 Fig. III-5와 같은 관측구간을 선정하여 유속을 관측하였다.

표면영상유속계(SIV)를 이용한 유속 관측에는 하천의 흐름에 대한 전체적인 유동장을 해석하고 유속을 산출하는 MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry)와 하천 단면의 구간별 수직영상을 해석한 STIV(Spatio Temporal Image Velocimetry)를 적용하였다.

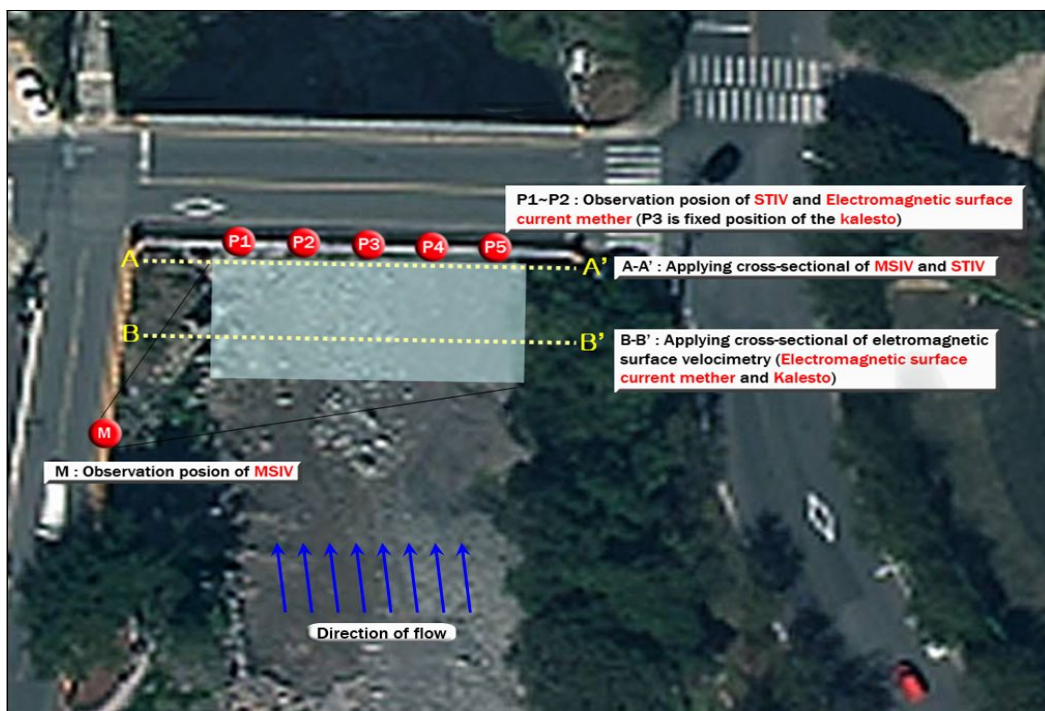


Fig. III-5. Various velocity measurement systems in the study site.

Fig. III-5의 M-point는 MSIV의 관측위치로써 Fig. III-6(a)과 같은 각도의 영상을 30분 간격으로 촬영한 자료를 이용하여 분석하였다. 30분 간격으로 촬영 시 Fig. III-6(b)과 같이 참조점의 포함 영역을 고려하여 유출상태를 촬영하였으며, 최대한 흔들림 없는 영상자료의 획득이 가장 중요하다.



Fig. III-6. The shooting location for the analysis of the "MSIV"(a) and the acquired images(b).

Fig. III-5의 P1~P5는 전체 34.2m의 하천 단면에 대해 획득되는 촬영 이미지와 유출상태의 분포를 고려하여 5m 간격으로 선정된 관측 포인트이다. 선정된 5개의 포인트는 III-7(a)과 같이 STIV기법의 적용을 위한 관측구간이며, 동시에 이동식 전자파표면유속계(Electromagnetic surface current meter)의 관측 위치와 동일하다(Fig. III-8(a)). 이 중 P3은 하천 단면의 중앙부근이며, Fig. III-8(b)과 같이 고정식 전자파표면유속계인 Kalesto가 설치되어 유속을 관측하고 있다.



Fig. III-7. The shooting location for the analysis of the "STIV"(a) and the acquired images(b).



(a)

(b)

Fig. III-8. Electromagnetic surface current meter(a), Kalesto(b).

2.2.2 적용 단면

1) 현장 측량작업

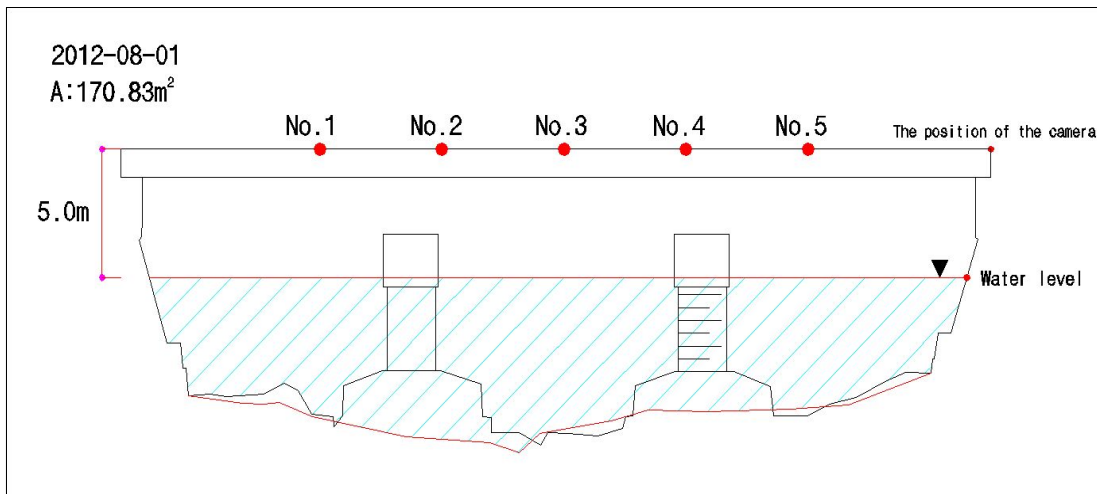
관측 시간에 따른 표면영상유속계(SIV)와 전자파 표면유속계로 산출된 유속은 계측기기별 관측 단면을 적용하여 유량을 산정하므로 관측구간에 대해 정밀한 측량작업이 필요하다(Fig. III-9).



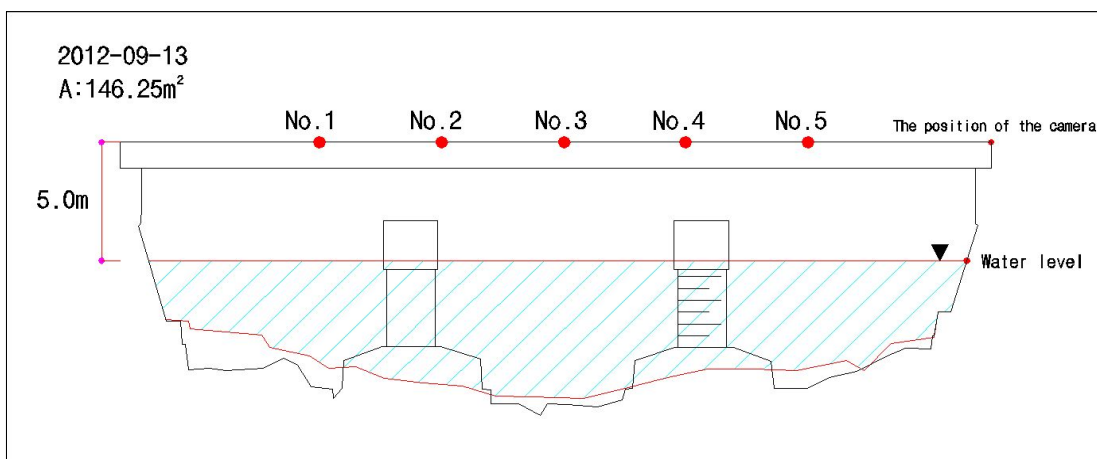
Fig. III-9. The river-bed survey of Observation section.

유출발생 전의 하천단면은 2012년 8월 1일 측량을 실시하였으며, 유출발생 후 단면 자료는 2012년 8월 28일 태풍 블라벤의 내습 이후, 8월 30일 제14호 태풍 덴빈(TEMBIN)의 제주도 영향으로 인해 2012년 9월 13일에 하천 단면측량을 실시하고 유량계산에 적용하였다.

Fig. III-10는 유출 발생 전, 후의 하상변화에 따른 유량의 차이를 보이고 있다. 하상 변화에 따른 단면 차이는 관측위치에서 5.0m의 수위를 가정하였을 때, 유출 발생 전에는 170.83m²의 단면이 유출 발생 후에는 146.25m²로 24.58m²의 단면 차이를 확인할 수 있다. 이와 같은 단면의 차이는 산정된 유속을 적용하고 유량을 산정하는 과정에서 과다산정의 요소가 된다. 따라서 유출 발생 시 평균 3~4m/sec의 매우 빠른 유속과 함께 전석, 자갈 및 모래 등이 하류부로 퇴적되는 점을 고려하여 유출 발생 후의 변화된 하천단면에 대해 정밀한 측량 작업이 중요하다.



a)



b)

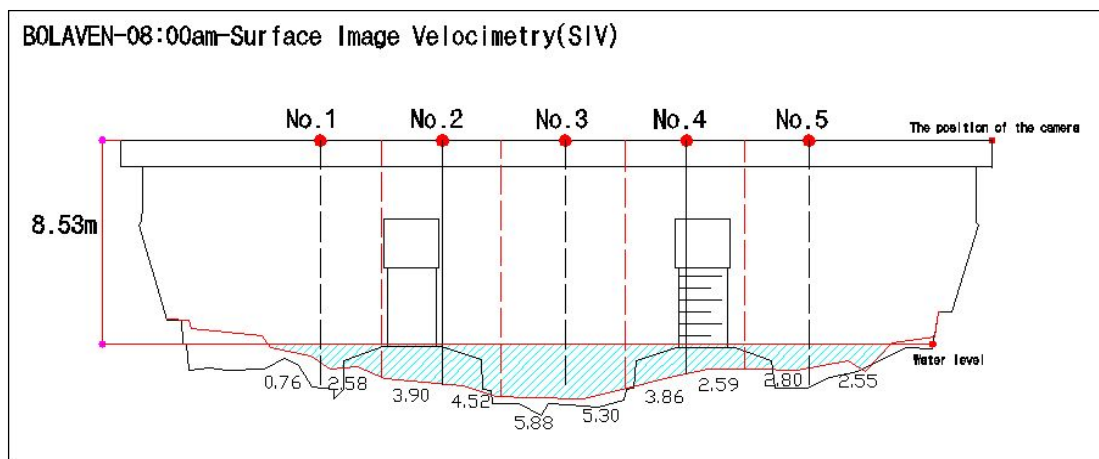
Fig. III-10. Cross-sectional area of the difference due to the change of riverbed.

2) 유량 산정을 위한 계측기기별 단면적용

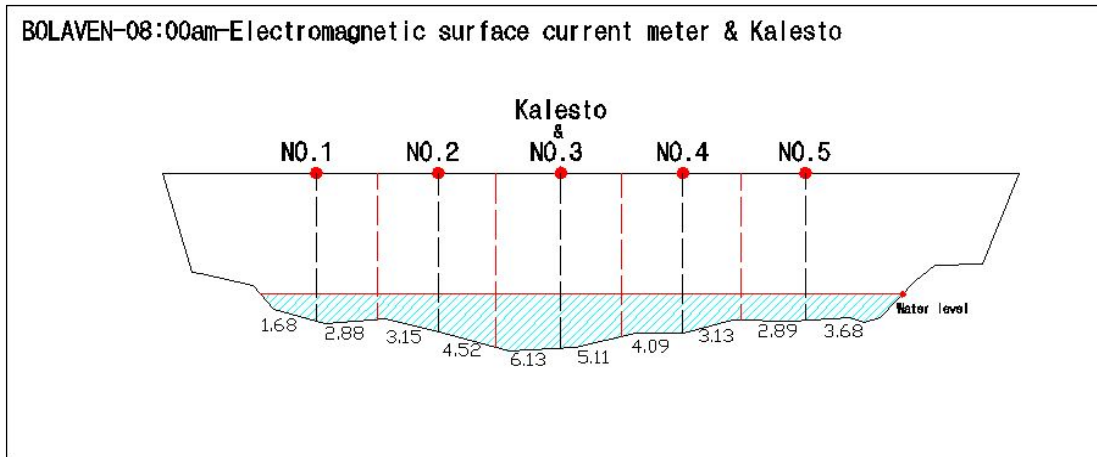
표면영상유속계(SIV)와 전자과표면유속계를 이용한 유량 산정은 관측시간에 대한 수위를 고려한 하천 단면자료를 이용한다. 계측기기의 하천 단면의 적용성을 고려하여 관측구간에 따라 제2동산교의 Fig. III-5처럼 관측구간에 따라 A-A', B-B'의 단면자료를 이용한다.

MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry)를 이용한 유량 산정에는 유속계산 시 제2동산교를 기준으로 유속장 분포를 고려한 A-A'단면을 적용하였다. 그리고 교량의 수직하부를 촬영하여 분석한 STIV(Spatio Temporal Image Velocimetry)의 적용단면도 MSIV의 적용단면과 동일한 A-A'단면을 적용하여 유량을 산정하였다.

이동식 전자과표면유속계(Electromagnetic surface current meter)는 STIV분석을 위한 촬영위치와 동일한 위치에서 관측을 실시하지만, Fig. III-7(a),(b)와 같이 관측되는 각도를 고려한 단면적용이 필요하다. 적용되는 단면은 A-A'을 기준으로 상류방향으로 약 6m지점인 B-B'의 단면을 이용하여 유량을 산정하였다. 마찬가지로 고정식 전자과표면유속계(Kaleesto)도 B-B'단면을 적용하였다.



(a)



(b)

Fig. III-11. (a) Applying cross-sectional of MSIV and STIV. (b) Applying cross-sectional of MSIV and STIV.

정밀 측량된 하천 단면에 대해 수위에 따른 면적을 계산하고 유량을 계산하는 방법은 중간단면법을 적용하였다. 유량 계산 방법으로는 대표적으로 산술계산법, 등유속선법, 수심-유속 적분법으로 나눌 수 있다. 이 중 세계적으로 가장 많이 사용되는 유량 계산방법인 중간단면법을 적용하여 유량을 계산하였으며, 이 방법이 평균단면법보다 정확한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다.

중간단면법은 유속(v)와 수심(d)의 변화가 직선이라는 가정아래 각 소단면에서의 유량은 수표면을 따라 측정된 소단면의 수면 폭을 $v \cdot d$ 와 곱하여 계산하는 방식이다. 이 수면 폭은 인접한 측선에서 $v \cdot d$ 가 계산되는 측선까지의 폭의 반과 다음 측선까지 폭의 반을 더한 합으로 간주된다. 양안의 두 개의 절반-하폭에서 $v \cdot d$ 에 대한 값은 0으로 간주된다. 따라서 처음과 마지막에 측정된 측선은 중간단면법이 계산에 활용될 경우 가능한 하안과 가깝게 측선을 배치해야 한다.

유량 계산은 각 측선에 대해 식(3.1)을 이용하여 계산한다. 여기에서 첫 번째 측선과 마지막 특선의 구간 유량은 식(3.2)을 이용하여 산출한다. 여기에서 1,2,...,n 은 측선번호이며, b_i 는 수면 폭, d_i 는 수심, v_i 는 각 측선에서 평균유속이다.

$$Q = \sum q_i \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \quad \text{또는} \quad Q = \sum v_i d_i \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \quad (3.1)$$

$$q_1 = v_1 \left[\frac{b_2 - b_1}{2} \right] d_1, \quad q_n = v_n \left[\frac{b_n - b_{n-1}}{2} \right] d_n \quad (3.2)$$

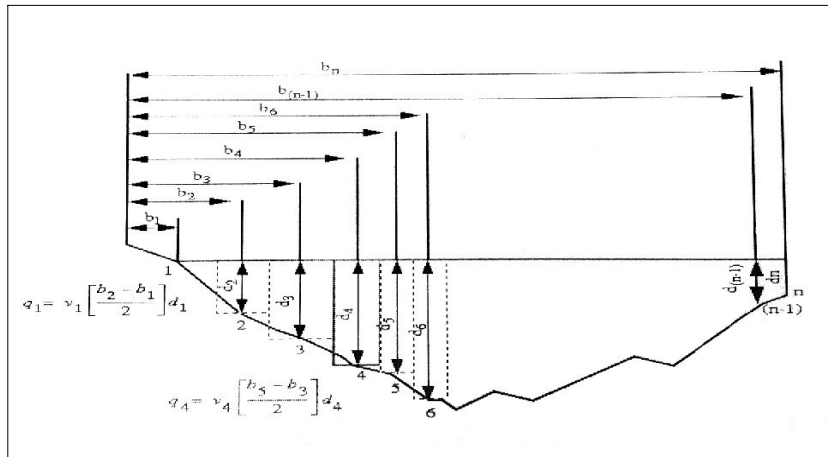


Fig. III-12. The middle cross-section law enforcement methods.

3) 참조점 선정을 위한 거리 측정

MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry)를 적용하여 유속을 분석하기 위해서는 분할된 이미지 상의 영상 좌표를 물리 좌표로 변환할 참조점들이 입력되어야 한다. 참조점은 영상내의 실제좌표의 기준을 잡아 거리를 측량하고, 실제좌표의 값을 입력하여 물리좌표계로 변환한다. 이와 같은 과정은 실제 3차원공간의 영상을 2차원으로 저장된 영상에 대해 관측거리에 따라 영상이 왜곡되는 부분을 보정하기 위함이다. 따라서 획득되는 영상내의 영상보정을 위한 정밀한 참조점 거리 측량이 필요하다.

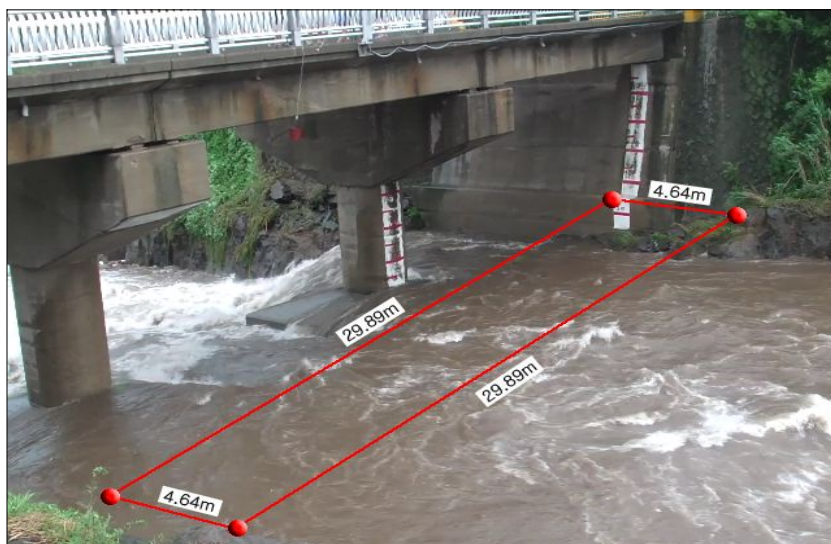


Fig. III-13. Distance measurement for Selected reference point.

IV. 현장 적용 및 결과

제15호 태풍 블라벤의 특이사항은 제주도에 내습한 다른 태풍과 비슷한 강수의 영향을 미쳤으나, 강력한 바람에 의한 피해 및 영향성을 고려해야한다. 특히 바람에 의한 영향성은 이미지해석 기법인 표면영상유속계(SIV)의 적용 시, 분석 자료의 획득과정과 분석된 표면유속의 결과를 적용하는 과정에서 많은 변수로 작용하였다.

표면영상유속계(SIV)와 이동식 전자파표면유속계의 측정시간은 2012년 8월 28일 8시00분부터 18시00분 까지 30분 간격으로 조사를 실시하였으나, 관측을 실시하는 과정에서 강한 비바람의 영향으로 관측의 위험성을 감안해 오전 시간에는 현장의 상황에 맞춰서 조사를 실시하였다. 이 후 태풍의 영향권이 제주도를 벗어나고 현장의 안전성이 보장되면서, 오후 시간에는 30분 간격으로 표면영상유속계와 이동식 전자파표면유속계를 이용한 관측을 실시하였다. 그러나 강한 풍속은 오후 내내 관측에 영향을 주었으며 영상촬영 과정에서 최대한 움직임 없이 고정된 자료를 획득하는 어려움이 있었다. 이와 같은 흔들림에 대한 영향은 획득된 영상 이미지분할 과정에서 분할된 각각 이미지 자료의 연관성을 최대한 고려하여 흔들림 영향을 가장 적게 받은 영상 파일만 추출하여 표면영상분석을 실시하였다.

1. 표면영상유속계(SIV)를 이용한 유량산정

1.1 MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry)

1.1.1 MSIV의 적용방법 및 특이사항

(1) 이미지 취득

MSIV를 이용하여 흐름에 대한 표면유속을 측정하기 위해서는 우선 대상 영역의 유동장에 대한 영상을 획득하여야 한다. 이 때 사용되는 장비는 CCD카메라(charge-coupled device camera)를 이용한다. 특히 현장상황을 고려하여 최대한 움직임이 없는 영상 획득이 가장 중요하다.

(2) 이미지 변환

획득된 영상을 이지로 변환시키는 작업을 실시한다. 획득된 영상은 frame captuer 프로그램을 이용하거나 동영상 상용 프로그램을 이용하여 이미지 파일로 변환 작업을 실시한다. 변환하는 과정에서 획득되는 이미지는 BMP(bitmap) 또는 JPEG(joint photographic coding experts group)파일이다. 그러나 JPEG의 파일 형식은 영상내의 연속되는 이미지 사이에서 중복되는 색이나 일부분을 같은 코트로 만들어 용량을 줄이는 방식으로 BMP 파일에 비해 화질이 떨어진다. 따라서 획득된 영상을 프레임별로 이미지 분할하는 과정에서 BMP파일로 변환을 실시한다. 현재 일반적인 디지털 캠코더의 경우 BMP영상을 이용하는 것으로 되어 있다.

분석하는 영상의 크기는 NTSC(National Television System Committee) 표준인 640×480 픽셀에서 2배 이내 정도가 적합한 것으로 보인다. 분할된 이미지의 픽셀의 크기를 크게 분할하여 분석할 경우 분석 시간이 오래 걸리는 문제와 정확한 영상 매칭이 어려운 단점이 있다. 반대로 영상의 픽셀이 지나치게 작은 경우는 해상도가 낮아서 원하는 정밀도의 영상 분석이 곤란하게 된다.

(3) 분석 작업

1) MSIV의 시작화면

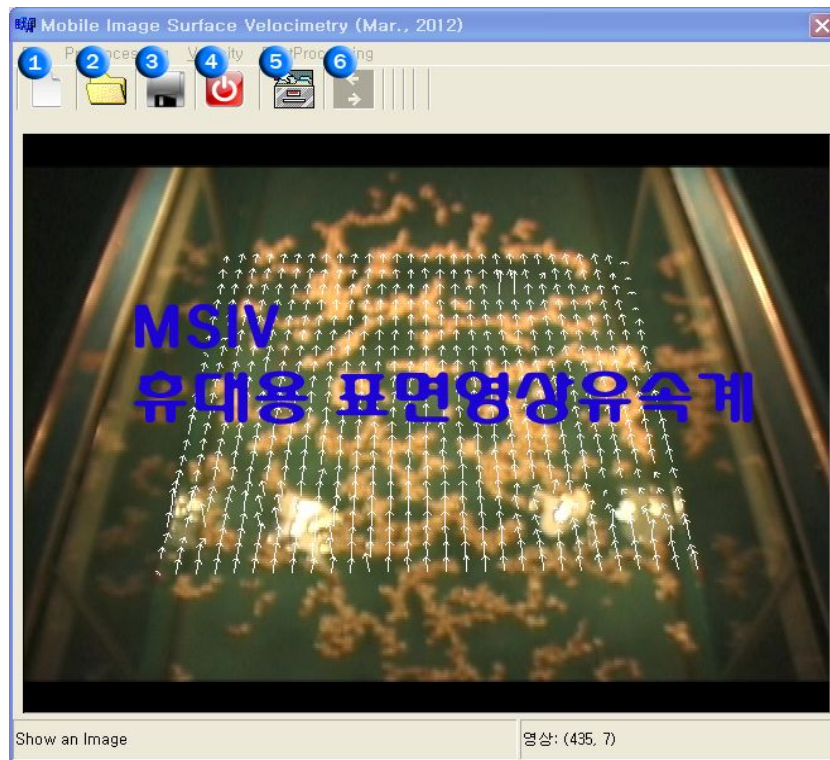


Fig. IV-1. Start screen of MSIV(Mobile Surface Image Velocimetry).

휴대용 표면영상유속계의 시작 화면은 Fig. IV-1과 같으며, ①~⑥의 주요기능을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① New Project : 새로운 파일을 만든다.
- ② Open Project : 기존의 작업 파일(파일명.PRJ : 전체 분석과정 저장)을 오픈한다.
- ③ Save Project : 프로젝트 파일을 저장한다.
- ④ Exit : 작업을 종료한다.
- ⑤ Assign Folder : 분석을 실시할 파일 위치를 설정한다.
- ⑥ Next : 다음 단계로 넘어간다.

2) 영상 자료의 선택 및 저장

영상 자료의 선택 및 저장은 획득된 이미지 폴더를 설정하고, 분석결과를 저장하는 폴더를 구분하여 설정한다. 결과를 산정하기 위한 입력 값 및 참조점의 위치가 결과폴더 안에 저장되므로 정확한 구분이 필요하다.

Fig. IV-1의 ⑤ Assign Folder을 클릭하면 다음과 같은 화면이 나타난다.



Fig. IV-2. Image analysis setup screen.

여기서 ① Image files에서 분할 된 이미지 폴더를 지정해 주면 ②처럼 분할된 이미지 파일들이 지정된다. 분할된 이미지 파일을 선택하면 메인화면에 분석영역이 나타난다. 다음 ③처럼 분석결과가 지정될 폴더를 지정해 준다.

3) 좌표 변환을 위한 참조점 입력

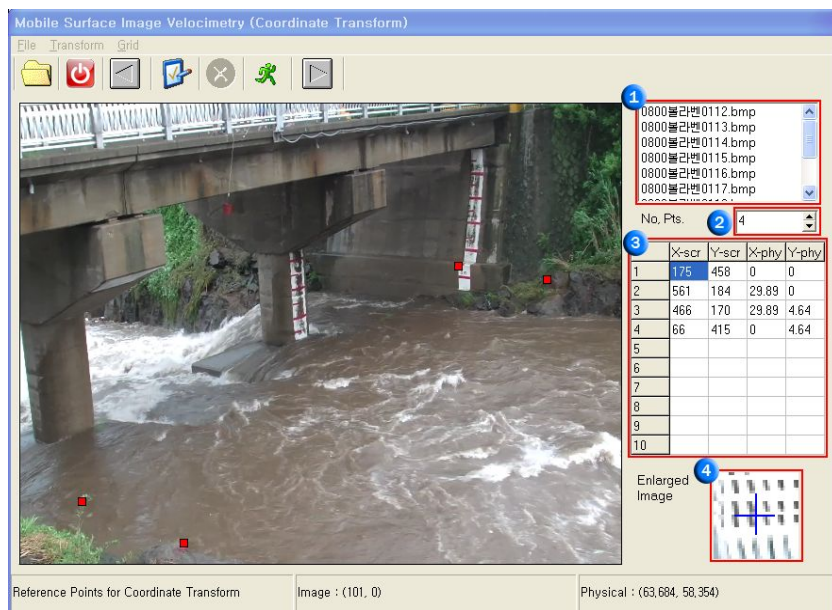


Fig. IV-3. Physical coordinates and the image coordinates of a reference point placed.

3차원의 공간영상을 2차원의 평면 상태로 저장되는 과정에서 발생하는 왜곡과 촬영 각도에 의한 사물의 원근에 의해 발생하는 왜곡에 대한 보정을 위해 Fig. IV-3과 같이 참조점을 입력한다.

먼저 ①번의 분석 이미지의 선택을 확인한다. ②번은 프로그램의 메인 화면에 보이는 것처럼 거리가 측량된 네 개의 참조점의 개수를 입력한다. ③번의 입력 탭인 (X-scr, Y-scr)은 이미지 상의 좌표 입력 탭으로 직접 이미지 상의 참조점 위치를 클릭하면 영상좌표가 입력된다. (X-phy, Y-phy)은 측량된 실제 거리를 입력하여 왜곡에 의한 수정을 실시한다. ④번은 마우스 커서의 위치에 따라 이미지의 확대 영상을 확인 할 수 있다.

4) 분석 영역을 설정하기 위한 격자망 생성

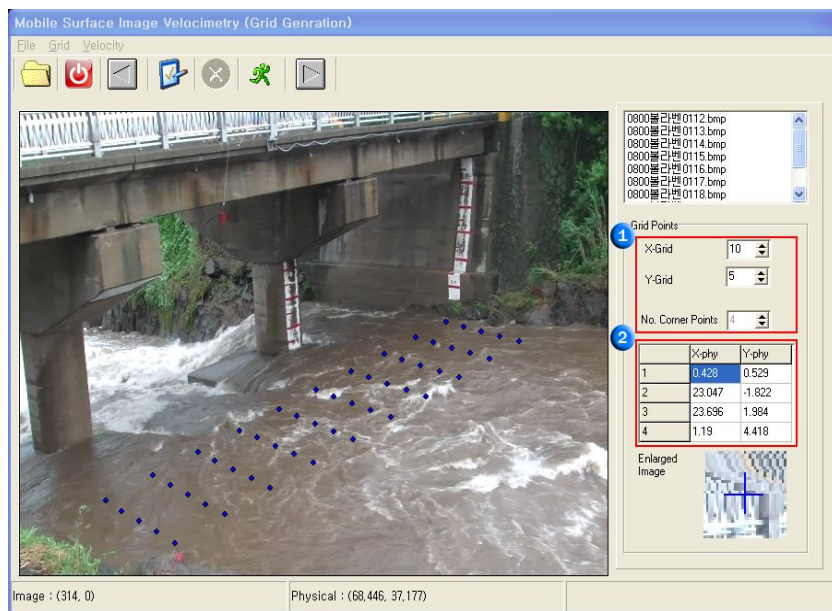


Fig. IV-4. Create a grid for analyzing the velocity distribution.

격자망을 생성하는 단계는 Fig. IV-4의 화면과 같다. 먼저 ①번의 X-Grid와 Y-Grid의 격자 개수를 입력한다. 격자망에서는 반드시 4개의 좌표점의 수를 입력한다. 그림??에서는 X-Grid의 10개의 격자망과 Y-Grid는 5개의 격자망 설치하여 유속을 분석하였고, 유속장을 확인하였다. 분석 영역 선택을 위한 격자망 설정 시 X방향 격자망은 63개로 제한되며, Y방향은 47개로 제한된다(윤, 2007).

5) 설정 사항

- Select Image

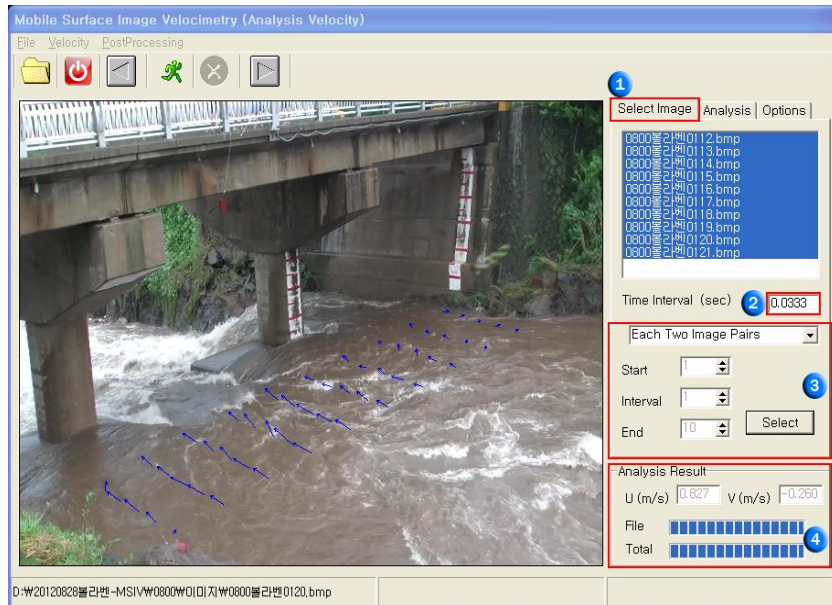


Fig. IV-5. Image selections and settings for analysis.

다음 단계는 분석 단계로 정밀 분석을 위해 설정하는 탭과 분석에 필요한 옵션을 설정하는 단계가 있다.

①번의 Select Image 탭은 설정된 각각의 이미지에 대한 선택사항을 조정한다.
② Time Interval은 영상의 획득 시 영상장비가 1/30로 영상을 획득하는데, 이는 초당 30프레임의 영상이 입력됨을 의미한다. 따라서 분석 시 1/30인 0.0333을 입력한다.

다음 ③의 Each Two Image Pairs로 설정하는 이유는 단일 이미지가 아닌 전체 이미지에 대하여 연속되는 두 개의 이미지를 한 쌍으로 반복해서 분석함을 의미한다. 다음 start는 첫 번째 이미지를 의미하고 end는 마지막 이미지 파일의 순번을 의미한다. 그 중간의 interval은 분석된 각각의 이미지의 간격을 설정한다. 다음 ④의 Analysis Result의 X방향, Y방향의 유속을 확인할 수 있다.

-Analysis

그림 ①의 Analysis는 분석되는 픽셀의 범위를 입력하는 탭이다.



Fig. IV-6. Analysis range setting process.

Analysis의 내용은 예제 Fig. IV-7을 참조하면, 파란색의 기준선을 중심으로 상, 하, 좌, 우의 흐름방향에 따른 탐색범위를 지정하게 된다. 빨간색 선을 영상
의 흐름 방향으로 보고, 획득된 이미지의 픽셀에 따라 분석되는 범위를 적절하게
조절해 주어야 유속이 과측정, 또는 저측정 되는 현상을 방지할 수 있다.

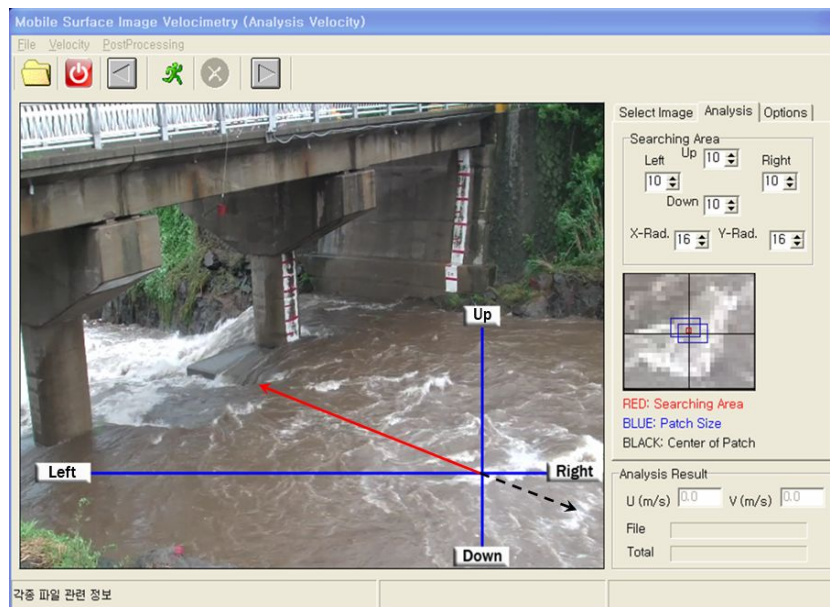


Fig. IV-7. Examples for analysis range settings.

- Option

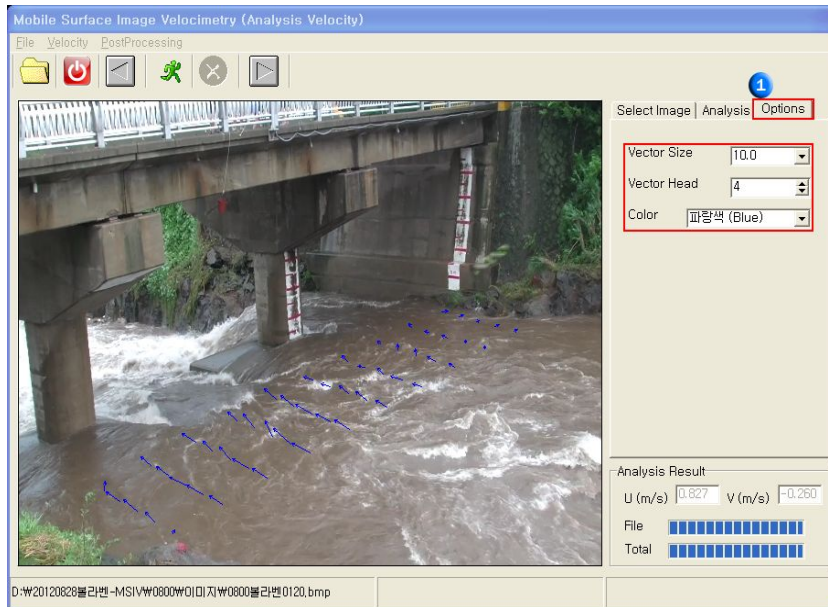


Fig. IV-8. Options for the velocity distribution in the vector.

Option 탭은 분석된 유속 벡터에 대한 설정 탭으로 벡터의 크기와 헤드, 색을 조정하는 탭이다.

6) 후처리

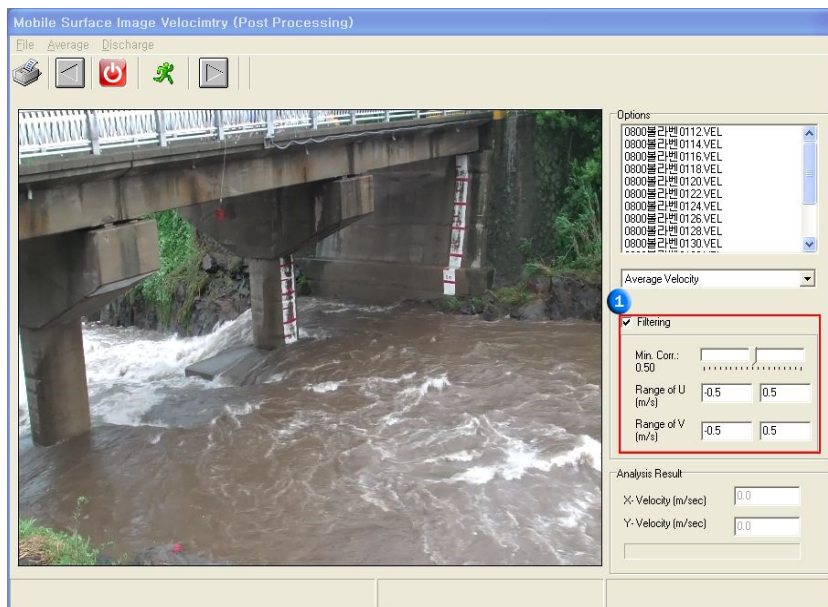


Fig. IV-9. The filtering process for analysis result.

다음 Filtering 탭의 Min.Corr는 분석되는 두 장의 이미지 중 첫 번째의 설정된 분석범위의 픽셀이 두 번째 이미지에서의 탐색되는 범위를 조절하는 것이며, U와V는 각각 X, Y축의 분석된 결과를 획득된 이미지에 따라 제거하는 범위를 조정하는 탭이다. 이는 기본 적으로 0.5의 수치를 입력하게 되며, 분석자의 분석방법에 따라 정밀조정 할 수 있다.

1.1.2 MSIV를 적용한 유속 및 유량 산정결과

MSIV로 산정된 유속 다른 관측 기법과 비교·분석하기 위해 전체 흐름에 대한 평균유속만 단면에 적용시키지 않고, 10개의 격자망(0p~9p)을 고려하여 구간별로 유속을 적용하여 유량을 산정하였다(Fig. IV-10). 지정된 결과 폴더의 확장자가 AVG파일을 이용하여 격자망 별 유속을 산정하였으며, 산정된 값은 Excel을 이용하여 30분 단위로 10개의 격자 포인트에 따른 유속을 입력하고 단면적을 적용하여, 유량을 산정하였다(Table IV-1).

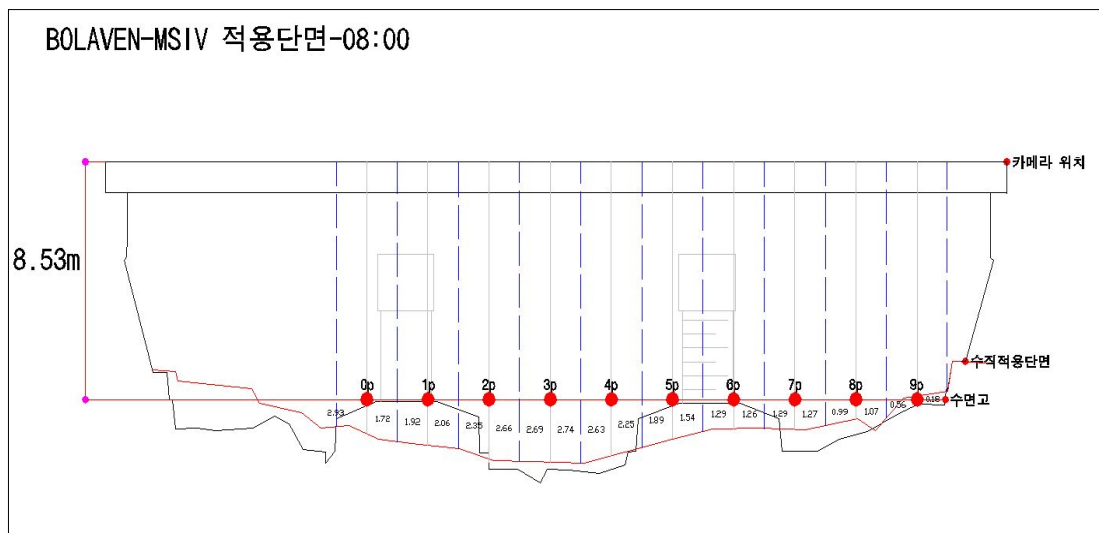


Fig. IV-10. Apply the cross-section of the discharge for calculating MSIV

Table IV-1. MSIV applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
08:00	0P	1.06	0.90	2.93	2.65	1.44	57.91
				1.72	1.56		
	1P	1.93	1.64	1.92	3.15		
				2.06	3.38		
	2P	2.37	2.02	2.35	4.74		
				2.66	5.36		
	3P	2.68	2.28	2.69	6.13		
				2.74	6.25		
	4P	2.70	2.29	2.63	6.03		
				2.25	5.16		
	5P	1.84	1.56	1.89	2.95		
				1.54	2.40		
	6P	1.56	1.33	1.29	1.72		
				1.26	1.68		
	7P	1.32	1.12	1.29	1.45		
				1.27	1.43		
	8P	0.88	0.75	0.99	0.74		
				1.07	0.80		
9P	0.54	0.46	0.56	0.26			
			0.18	0.08			
09:00	0P	0.59	0.50	2.84	1.43	1.48	54.91
				1.69	0.85		
	1P	1.44	1.22	1.90	2.33		
				2.04	2.50		
	2P	1.94	1.65	2.32	3.84		
				2.63	4.35		
	3P	2.36	2.00	2.67	5.35		
				2.72	5.45		
	4P	2.77	2.36	2.60	6.13		
				2.22	5.23		
	5P	2.41	2.05	1.86	3.81		
				1.52	3.11		
	6P	2.02	1.72	1.26	2.17		
				1.23	2.12		
	7P	1.75	1.49	1.26	1.88		
				1.24	1.85		
	8P	1.07	0.91	0.96	0.88		
				1.05	0.96		
9P	1.00	0.85	0.53	0.45			
			0.16	0.14			

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
11:00	0P	0.51	0.44	1.60	0.70	0.96	30.90
				1.31	0.57		
	1P	0.96	0.82	1.52	1.25		
				1.66	1.36		
	2P	1.31	1.11	1.94	2.16		
				2.25	2.51		
	3P	1.99	1.69	2.29	3.87		
				2.34	3.95		
	4P	2.12	1.80	2.22	4.00		
				1.84	3.32		
	5P	1.67	1.42	1.48	2.10		
				1.14	1.61		
	6P	1.07	0.91	0.88	0.80		
				0.85	0.77		
	7P	0.83	0.70	0.88	0.62		
				0.86	0.61		
	8P	0.66	0.56	0.58	0.33		
				0.64	0.36		
9P	0.12	0.10	0.18	0.02			
			0.00	0.00			
11:30	0P	0.71	0.60	1.18	0.71	0.91	26.24
				1.14	0.69		
	1P	1.19	1.01	1.34	1.36		
				1.48	1.50		
	2P	1.51	1.28	1.77	2.27		
				2.08	2.67		
	3P	1.69	1.43	2.11	3.02		
				2.16	3.09		
	4P	1.89	1.60	2.05	3.29		
				1.67	2.68		
	5P	1.39	1.18	1.31	1.54		
				0.96	1.13		
	6P	1.04	0.88	0.71	0.63		
				0.68	0.60		
	7P	0.69	0.59	0.69	0.41		
				0.41	0.24		
	8P	0.40	0.34	0.47	0.16		
				0.39	0.13		
9P	0.19	0.16	0.33	0.05			
			0.42	0.07			

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
12:00	0P	0.51	0.44	0.80	0.35	0.90	23.00
				0.96	0.42		
	1P	1.05	0.90	1.16	1.04		
				1.30	1.16		
	2P	1.37	1.17	1.59	1.85		
				1.89	2.20		
	3P	1.80	1.53	1.93	2.95		
				1.98	3.03		
	4P	1.99	1.69	1.86	3.15		
				1.49	2.52		
	5P	1.52	1.29	1.12	1.45		
				0.78	1.01		
	6P	1.11	0.94	0.53	0.50		
				0.50	0.47		
	7P	0.81	0.69	0.53	0.36		
				0.51	0.35		
	8P	0.26	0.22	0.23	0.05		
				0.28	0.06		
9P	0.17	0.14	0.39	0.06			
			0.00	0.00			
13:00	0P	0.32	0.27	0.69	0.19	0.85	20.45
				0.90	0.24		
	1P	0.91	0.77	1.10	0.85		
				1.24	0.96		
	2P	1.33	1.13	1.53	1.73		
				1.83	2.07		
	3P	1.51	1.28	1.87	2.39		
				1.92	2.46		
	4P	2.07	1.76	1.80	3.16		
				1.43	2.51		
	5P	1.44	1.23	1.06	1.30		
				0.72	0.88		
	6P	1.17	1.00	0.47	0.47		
				0.44	0.44		
	7P	0.80	0.68	0.47	0.32		
				0.45	0.31		
	8P	0.31	0.26	0.17	0.04		
				0.22	0.06		
9P	0.12	0.10	0.38	0.04			
			0.00	0.00			

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
13:30	0P	0.80	0.68	1.13	0.77	1.14	32.18
				1.12	0.76		
	1P	1.45	1.23	1.32	1.63		
				1.46	1.80		
	2P	1.77	1.51	1.75	2.64		
				2.05	3.09		
	3P	2.15	1.83	2.09	3.81		
				2.14	3.91		
	4P	2.37	2.01	2.02	4.06		
				1.65	3.32		
	5P	1.73	1.47	1.28	1.88		
				0.94	1.38		
	6P	1.23	1.04	0.69	0.72		
				0.66	0.69		
	7P	1.03	0.88	0.69	0.61		
				0.66	0.58		
	8P	0.67	0.57	0.39	0.22		
				0.44	0.25		
9P	0.22	0.19	0.39	0.07			
			0.00	0.00			
14:00	0P	0.47	0.40	0.92	0.37	0.92	22.93
				1.01	0.40		
	1P	1.05	0.89	1.22	1.09		
				1.36	1.22		
	2P	0.96	0.81	1.64	1.33		
				1.95	1.59		
	3P	1.87	1.59	1.99	3.16		
				2.04	3.24		
	4P	2.13	1.81	1.92	3.47		
				1.54	2.78		
	5P	1.44	1.23	1.18	1.45		
				0.84	1.03		
	6P	1.18	1.00	0.58	0.58		
				0.56	0.56		
	7P	0.52	0.44	0.58	0.26		
				0.56	0.25		
	8P	0.25	0.21	0.28	0.06		
				0.37	0.08		
9P	0.06	0.05	0.39	0.02			
			0.00	0.00			

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
14:30	0P	0.50	0.42	0.99	0.42	0.86	24.51
				1.05	0.44		
	1P	1.13	0.96	1.25	1.20		
				1.39	1.34		
	2P	1.18	1.00	1.68	1.68		
				1.98	1.98		
	3P	2.06	1.75	2.02	3.54		
				2.07	3.62		
	4P	2.17	1.85	1.95	3.60		
				1.58	2.92		
	5P	1.09	0.92	1.21	1.12		
				0.87	0.80		
	6P	0.84	0.72	0.62	0.44		
				0.59	0.42		
7P	0.69	0.59	0.62	0.36			
			0.59	0.35			
8P	0.36	0.31	0.32	0.10			
			0.40	0.12			
9P	0.12	0.10	0.39	0.04			
			0.00	0.00			
15:00	0P	0.37	0.31	0.92	0.29	0.87	23.94
				1.01	0.32		
	1P	0.97	0.82	1.22	1.00		
				1.36	1.12		
	2P	1.24	1.05	1.65	1.74		
				1.95	2.05		
	3P	2.12	1.80	1.99	3.59		
				2.04	3.68		
	4P	1.94	1.65	1.92	3.17		
				1.54	2.54		
	5P	1.42	1.21	1.18	1.42		
				0.84	1.01		
	6P	0.99	0.84	0.59	0.49		
				0.56	0.47		
7P	0.88	0.75	0.59	0.44			
			0.56	0.42			
8P	0.25	0.21	0.28	0.06			
			0.37	0.08			
9P	0.10	0.08	0.39	0.03			
			0.00	0.00			

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
15:30	0P	0.67	0.57	0.85	0.48	1.04	24.82
				0.98	0.55		
	1P	0.69	0.59	1.18	0.70		
				1.32	0.78		
	2P	1.04	0.89	1.61	1.43		
				1.92	1.70		
	3P	2.22	1.89	1.95	3.69		
				2.00	3.78		
	4P	2.12	1.80	1.89	3.40		
				1.51	2.72		
	5P	1.70	1.44	1.14	1.64		
				0.80	1.15		
	6P	1.43	1.22	0.55	0.67		
				0.52	0.63		
	7P	1.01	0.86	0.55	0.47		
				0.53	0.45		
	8P	0.80	0.68	0.25	0.17		
				0.33	0.22		
9P	0.55	0.47	0.37	0.17			
			0.00	0.00			
16:00	0P	0.32	0.27	0.95	0.26	0.90	24.77
				1.03	0.28		
	1P	0.91	0.77	1.23	0.95		
				1.37	1.06		
	2P	1.21	1.03	1.66	1.70		
				1.96	2.01		
	3P	2.16	1.84	2.00	3.68		
				2.05	3.77		
	4P	2.19	1.86	1.93	3.60		
				1.56	2.91		
	5P	1.47	1.25	1.19	1.48		
				0.85	1.06		
	6P	1.06	0.90	0.60	0.54		
				0.57	0.51		
	7P	0.62	0.53	0.60	0.32		
				0.58	0.31		
	8P	0.48	0.41	0.30	0.12		
				0.38	0.15		
9P	0.16	0.13	0.39	0.05			
			0.00	0.00			

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
16:30	0P	0.54	0.46	0.71	0.33	1.02	24.19
				0.91	0.42		
	1P	1.04	0.88	1.11	0.98		
				1.25	1.10		
	2P	1.23	1.05	1.54	1.61		
				1.85	1.94		
	3P	2.16	1.83	1.88	3.44		
				1.93	3.54		
	4P	2.27	1.93	1.81	3.49		
				1.44	2.78		
	5P	1.53	1.30	1.07	1.39		
				0.73	0.95		
	6P	1.22	1.04	0.48	0.50		
				0.45	0.47		
7P	1.22	1.04	0.48	0.50			
			0.46	0.48			
8P	0.49	0.42	0.18	0.08			
			0.26	0.11			
9P	0.29	0.25	0.39	0.10			
			0.00	0.00			
17:00	0P	0.36	0.31	0.48	0.15	0.73	16.32
				0.78	0.24		
	1P	0.73	0.62	0.99	0.62		
				1.13	0.71		
	2P	1.17	0.99	1.41	1.40		
				1.72	1.71		
	3P	1.61	1.37	1.76	2.41		
				1.81	2.47		
	4P	1.66	1.41	1.69	2.39		
				1.31	1.85		
	5P	1.11	0.95	0.95	0.90		
				0.61	0.58		
	6P	0.70	0.60	0.35	0.21		
				0.33	0.20		
7P	0.62	0.52	0.35	0.18			
			0.33	0.17			
8P	0.48	0.41	0.07	0.03			
			0.16	0.07			
9P	0.15	0.13	0.39	0.05			
			0.00	0.00			

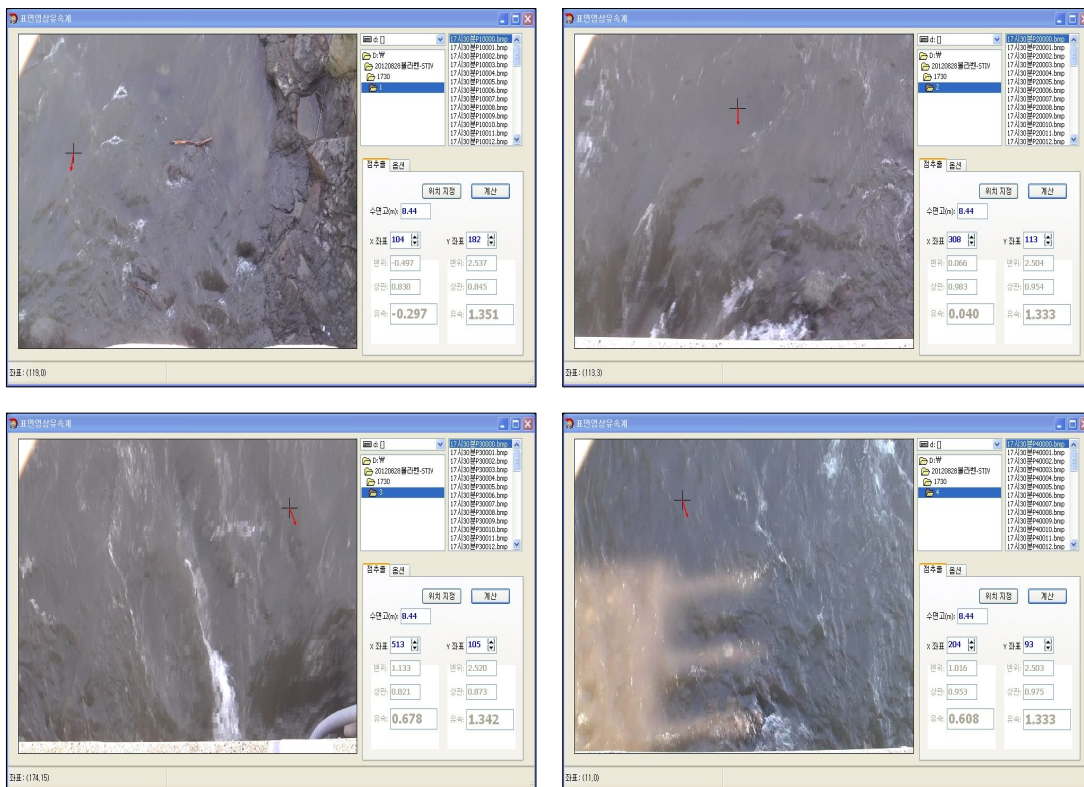
Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Cross sectional (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
17:30	0P	0.31	0.27	0.52	0.14	0.74	16.48
				0.80	0.21		
	1P	0.67	0.57	1.00	0.57		
				1.15	0.66		
	2P	0.92	0.78	1.43	1.12		
				1.74	1.36		
	3P	1.59	1.35	1.77	2.39		
				1.82	2.45		
	4P	1.86	1.58	1.71	2.70		
				1.33	2.10		
	5P	1.43	1.21	0.97	1.18		
				0.63	0.76		
	6P	0.78	0.66	0.37	0.24		
				0.34	0.22		
	7P	0.45	0.38	0.37	0.14		
				0.35	0.13		
	8P	0.38	0.32	0.08	0.03		
				0.16	0.05		
9P	0.09	0.08	0.40	0.03			
			0.00	0.00			
18:00	0P	0.31	0.27	0.42	0.11	0.74	17.09
				0.75	0.20		
	1P	0.64	0.54	0.95	0.52		
				1.09	0.59		
	2P	1.20	1.02	1.38	1.41		
				1.68	1.72		
	3P	1.92	1.63	1.72	2.80		
				1.77	2.89		
	4P	1.81	1.54	1.65	2.54		
				1.28	1.97		
	5P	1.33	1.13	0.91	1.02		
				0.57	0.64		
	6P	0.57	0.48	0.32	0.15		
				0.29	0.14		
	7P	0.59	0.50	0.32	0.16		
				0.30	0.15		
	8P	0.24	0.21	0.05	0.01		
				0.16	0.03		
9P	0.09	0.07	0.40	0.03			
			0.00	0.00			

1.2 STIV (Spatio Temporal Image Velocimetry)

1.2.1 STIV의 적용방법 및 특이사항

연구대상 하천의 횡단면을 따라 5개의 관측 포인트를 지정하고, 30분 단위로 구간 별 분석 자료를 획득하였으며, 유속변화를 평균하여 평균유속을 산정하였다. 표면영상유속계(SIV)의 STIV방식은 영상과 수표면까지의 수직거리만을 이용하므로 별도의 참조점 획득을 위한 측량 작업이 필요 없으며, 순간유속을 평균하여 고속 유동 시 발생하는 난류나 오차를 줄이는 장점이 있다(양 등,2012). STIV 기법을 이용한 유속산정법은 본 연구의 관측위치처럼 교량이 있을 경우 수직영상을 획득하고 분석하기에 효과적으로 사용할 수 있다.

1.2.2 STIV를 적용한 유속 및 유량 산정결과



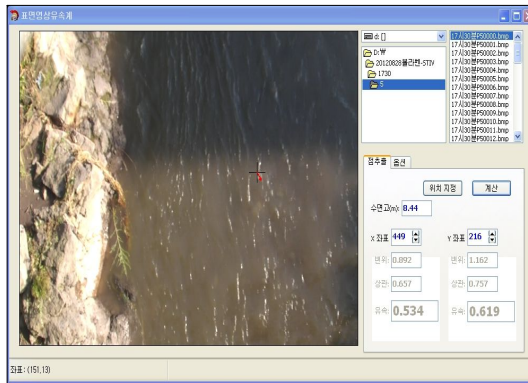


Fig. IV-11. The analysis process of STIV. (Exemple. 17:30 image, 1p~5p)

STIV를 적용한 유속산출 방법은 Fig. IV-11과 같다. 획득된 영상을 이미지로 분할하여 최대한 흔들림의 영향이 적은 이미지만을 추출하여 선택한다. 촬영위치에서 수위까지의 거리를 수면고에 입력하여 유속을 계산하면 지정된 지점에서 평균유속을 산정하여 X, Y 방향으로 평균유속이 측정된다.

측정된 표면유속은 표면유속과 평균유속의 보정계수인 0.85를 적용하여 평균유속을 간접 계산하였으며, Fig. IV-12과 같이 수위에 따른 단면적을 적용하여 최종적으로 유량을 산정하였다(Table IV-2).

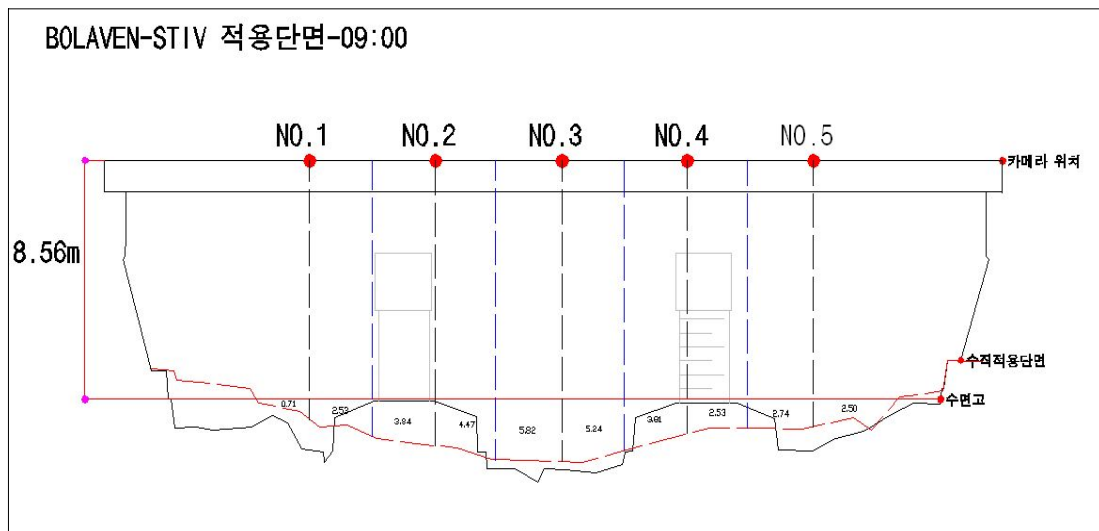


Fig. IV-12. Apply the cross-section of the discharge for calculating STIV.

Table IV-2. STIV applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results

Time	Point	Velocity (m/sec)		Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)	
08:00	1P	X	0.30	1.91	1.62	0.76	1.23	2.17	75.37
		Y	1.89			2.58	4.19		
	2P	X	1.64	2.51	2.41	3.90	8.33		
		Y	1.90			4.52	9.66		
	3P	X	2.21	2.92	2.48	5.88	14.59		
		Y	1.90			5.30	13.15		
	4P	X	2.13	2.86	2.43	3.86	9.38		
		Y	1.91			2.59	6.29		
	5P	X	-	-	-	-	-		
		Y	-			-	-		
09:00	1P	X	0.87	2.13	1.81	0.71	1.29	1.84	64.60
		Y	1.95			2.53	4.59		
	2P	X	0.58	1.82	1.55	3.84	5.94		
		Y	1.73			4.47	6.92		
	3P	X	1.88	2.69	2.29	5.82	13.32		
		Y	1.93			5.24	11.99		
	4P	X	1.15	2.21	1.88	3.81	7.17		
		Y	1.89			2.53	4.76		
	5P	X	0.22	1.93	1.64	2.74	4.50		
		Y	1.92			2.50	4.11		
11:00	1P	X	1.22	2.33	1.98	0.16	0.32	1.76	46.70
		Y	1.99			1.74	3.45		
	2P	X	0.44	2.01	1.71	3.05	5.22		
		Y	1.96			3.72	6.36		
	3P	X	1.09	2.28	1.94	4.99	9.66		
		Y	2.00			4.46	8.63		
	4P	X	0.01	1.84	1.57	3.02	4.73		
		Y	1.84			1.79	2.81		
	5P	X	0.25	1.90	1.61	1.92	3.10		
		Y	1.88			1.50	2.42		
11:30	1P	X	0.04	2.09	1.78	0.05	0.09	1.85	46.63
		Y	2.09			1.39	2.47		
	2P	X	1.72	2.65	2.26	2.70	6.09		
		Y	2.02			3.38	7.62		
	3P	X	1.97	2.84	2.41	4.61	11.13		
		Y	2.05			4.11	9.93		
	4P	X	0.10	1.56	1.32	2.67	3.53		
		Y	1.55			1.45	1.92		
	5P	X	0.20	1.73	1.47	1.54	2.27		
		Y	1.72			1.08	1.59		

Time	Point	Velocity (m/sec)		Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)	
		X	Y						
12:00	1P	X	0.24	2.09	1.78	0.01	0.02	1.68	33.57
		Y	2.08			1.01	1.79		
	2P	X	0.46	2.08	1.77	2.32	4.10		
		Y	2.03			3.02	5.33		
	3P	X	0.68	2.14	1.82	4.21	7.67		
		Y	2.03			3.73	6.80		
	4P	X	0.51	1.82	1.55	2.29	3.54		
		Y	1.75			1.09	1.69		
	5P	X	0.47	1.73	1.47	1.14	1.67		
		Y	1.66			0.65	0.95		
13:00	1P	X	1.08	2.15	1.83	0.00	0.00	1.59	33.35
		Y	1.86			0.88	1.61		
	2P	X	0.75	1.42	1.21	2.19	2.64		
		Y	1.20			2.91	3.51		
	3P	X	2.15	2.99	2.54	4.08	10.37		
		Y	2.07			3.61	9.17		
	4P	X	0.65	1.81	1.54	2.16	3.32		
		Y	1.69			0.97	1.49		
	5P	X	0.64	0.96	0.81	1.01	0.82		
		Y	0.71			0.51	0.41		
13:30	1P	X	0.54	1.72	1.46	0.05	0.07	1.60	36.79
		Y	1.63			1.33	1.94		
	2P	X	0.41	2.05	1.74	2.65	4.61		
		Y	2.01			3.33	5.80		
	3P	X	0.11	1.94	1.64	4.56	7.50		
		Y	1.93			4.06	6.68		
	4P	X	0.46	1.75	1.48	2.61	3.87		
		Y	1.68			1.40	2.08		
	5P	X	0.19	1.98	1.69	1.49	2.51		
		Y	1.98			1.02	1.72		
14:00	1P	X	0.12	1.22	1.04	0.02	0.02	1.52	33.05
		Y	1.21			1.12	1.16		
	2P	X	0.82	2.08	1.77	2.44	4.32		
		Y	1.91			3.13	5.54		
	3P	X	0.20	1.85	1.58	4.34	6.84		
		Y	1.84			3.85	6.07		
	4P	X	0.79	1.87	1.59	2.40	3.82		
		Y	1.70			1.20	1.91		
	5P	X	0.30	1.94	1.65	1.27	2.09		
		Y	1.92			0.78	1.29		

Time	Point	Velocity (m/sec)		Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
		X	Y					
14:30	1P	X	0.82	1.72	1.46	0.03	1.50	34.32
		Y	1.51			1.19		
	2P	X	0.99	2.03	1.72	2.50		
		Y	1.77			3.20		
	3P	X	0.19	2.04	1.73	4.41		
		Y	2.03			3.92		
	4P	X	0.39	1.96	1.67	2.47		
		Y	1.92			1.26		
	5P	X	0.03	1.10	0.93	1.34		
		Y	1.10			0.85		
15:00	1P	X	1.46	1.53	1.30	0.02	1.23	26.56
		Y	0.46			1.13		
	2P	X	1.45	1.68	1.42	2.44		
		Y	0.84			3.14		
	3P	X	1.50	1.60	1.36	4.34		
		Y	0.56			3.85		
	4P	X	0.11	1.31	1.11	2.41		
		Y	1.30			1.20		
	5P	X	0.01	1.13	0.96	1.27		
		Y	1.13			0.78		
15:30	1P	X	0.05	1.20	1.02	0.01	1.17	25.33
		Y	1.20			1.05		
	2P	X	1.36	1.91	1.62	2.36		
		Y	1.33			3.07		
	3P	X	0.23	1.35	1.14	4.26		
		Y	1.33			3.78		
	4P	X	1.16	1.78	1.52	2.33		
		Y	1.36			1.13		
	5P	X	0.02	0.63	0.53	1.19		
		Y	0.63			0.70		
16:00	1P	X	0.94	1.39	1.19	0.02	1.11	24.36
		Y	1.04			1.15		
	2P	X	1.13	1.54	1.31	2.46		
		Y	1.05			3.16		
	3P	X	0.18	1.41	1.20	4.37		
		Y	1.40			3.88		
	4P	X	0.04	1.36	1.16	2.43		
		Y	1.36			1.22		
	5P	X	0.44	0.83	0.70	1.29		
		Y	0.70			0.81		

Time	Point	Velocity (m/sec)		Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
		X	Y					
16:30	1P	X	0.38	1.35	1.15	0.01	1.25	24.07
		Y	1.30			0.91		
	2P	X	0.20	1.46	1.24	2.22		
		Y	1.45			2.93		
	3P	X	0.56	1.57	1.33	4.11		
		Y	1.46			3.64		
	4P	X	0.95	1.68	1.43	2.19		
		Y	1.38			0.99		
	5P	X	0.06	1.31	1.11	1.04		
		Y	1.31			0.54		
17:00	1P	X	0.06	1.08	0.92	0.00	1.07	18.40
		Y	1.08			0.65		
	2P	X	0.83	1.39	1.18	1.96		
		Y	1.11			2.68		
	3P	X	0.20	1.34	1.14	3.84		
		Y	1.33			3.38		
	4P	X	0.09	1.36	1.15	1.93		
		Y	1.35			0.75		
	5P	X	0.16	1.11	0.94	0.77		
		Y	1.09			0.29		
17:30	1P	X	0.29	1.38	1.18	0.00	1.11	19.65
		Y	1.35			0.68		
	2P	X	0.04	1.33	1.13	2.00		
		Y	1.33			2.72		
	3P	X	0.68	1.50	1.28	3.87		
		Y	1.34			3.42		
	4P	X	0.61	1.47	1.25	1.96		
		Y	1.33			0.78		
	5P	X	0.53	0.82	0.69	0.80		
		Y	0.62			0.31		
18:00	1P	X	0.23	1.37	1.16	0.00	1.24	19.78
		Y	1.35			0.57		
	2P	X	1.09	1.52	1.29	1.88		
		Y	1.06			2.61		
	3P	X	0.79	1.58	1.35	3.76		
		Y	1.37			3.30		
	4P	X	0.08	1.36	1.16	1.85		
		Y	1.36			0.67		
	5P	X	0.26	1.14	0.97	0.68		
		Y	1.11			0.23		

2. 전자파표면유속계(Electromagnetic surface current meter)

표면영상유속계(SIV)를 적용시켜 산정한 유량의 비교를 위해 전자파표면영상 유속계를 이용하여 유속 및 유량을 산정하였다. 전자파표면유속계(Electromagnetic surface current meter)는 홍수기에 안전하고 정확한 유량 측정을 목적으로 한국 수자원공사에서 1993년도부터 연구를 시작하여, 1999년도에 홍수용 전자파표면유속계를 개발하였다. 2001년도에는 이동식 전자파표면유속계를 바탕으로 고정식 전자파표면유속계(고정식 실시간 홍수유량시스템)을 적용하여 운영중에 있다(김 등, 2011). 전자파표면유속계는 도플러 효과(Doppler effect)의 원리를 이용한 표면유속관측 장비로 약 10GHz의 극초단파 신호를 수표면에 전송하여 산란되어 반사 수신된 신호를 측정하여 흐름방향의 표면유속을 산출하는 방식이다(Lee와 Julien, 2006). 그리고 측정된 표면유속에 평균유속 보정계수 0.85를 적용하여 평균유속을 간접 계산하고, 미리 관측된 하천단면자료를 이용하여 유량을 산출한다. 연구에 사용된 이동식 전자파표면유속계는 흐름이 저속유동(약 0.3m/s 이하)인 경우 관측정확도가 저하됨을 보고한바 있으나(양 등, 2011), 표면유속이 2~4m/s의 고유속의 유동인 경우 관측오차가 약 2% 정도로 나타난다고 보고된 바 있다(이 등, 1997).

제2동산교에 설치된 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)는 유속과 수위를 동시에 관측할 수 있으나(뮤트로닉스, 2010), 관측구간이 하상단면의 중앙 1개 지점에서 표면유속을 계측하고 단면 전체에 적용하여 유량을 산정하므로 과대 산정의 오차를 포함할 수 있다(양, 2012).

2.1 이동식 전자파표면유속계의 유속 및 유량 산정결과

이동식 전자파표면유속계의 유량산정 시 적용단면은 Fig. III-11(b)을 적용하여 유량을 산정하였으며, 산정된 결과는 Table IV-3과 같다.

Table IV-3. Electromagnetic surface current meter applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
08:00	1P	0.89	0.75	1.68	1.49	2.01	79.99
				2.88	2.56		
	2P	3.01	2.56	3.15	9.47		
				4.52	13.59		
	3P	2.86	2.43	6.13	17.52		
				5.11	14.60		
	4P	2.56	2.17	4.09	10.46		
				3.13	8.01		
	5P	2.50	2.12	2.89	7.22		
				3.68	9.19		
09:00	1P	1.48	1.26	1.63	2.42	1.70	66.19
				2.82	4.18		
	2P	1.84	1.57	3.09	5.69		
				4.47	8.24		
	3P	2.78	2.36	6.07	16.87		
				5.06	14.07		
	4P	2.12	1.80	4.03	8.54		
				3.07	6.51		
	5P	1.77	1.50	2.83	5.00		
				3.59	6.34		
11:00	1P	0.86	0.73	0.97	0.83	1.29	39.57
				2.03	1.74		
	2P	1.86	1.58	2.31	4.29		
				3.72	6.92		
	3P	1.82	1.55	5.24	9.53		
				4.28	7.79		
	4P	1.65	1.40	3.25	5.37		
				2.33	3.85		
	5P	1.42	1.21	2.00	2.84		
				2.40	3.41		
11:30	1P	0.92	0.78	0.69	0.63	1.28	34.41
				1.68	1.54		
	2P	2.10	1.78	1.95	4.09		
				3.38	7.09		
	3P	1.81	1.54	4.86	8.82		
				3.93	7.13		
	4P	1.27	1.08	2.89	3.68		
				1.99	2.53		
	5P	1.42	1.20	1.63	2.31		
				1.88	2.66		

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
12:00	1P	0.71	0.61	0.42	0.30	1.24	28.43
				1.30	0.93		
	2P	1.63	1.39	1.57	2.56		
				3.02	4.93		
	3P	1.71	1.45	4.46	7.60		
				3.55	6.05		
	4P	1.73	1.47	2.51	4.35		
				1.63	2.83		
	5P	1.50	1.28	1.23	1.85		
				1.36	2.04		
13:00	1P	0.45	0.38	0.18	0.08	1.05	20.08
				0.86	0.39		
	2P	1.91	1.62	1.13	2.15		
				2.61	4.97		
	3P	1.42	1.21	4.00	5.70		
				3.12	4.44		
	4P	1.27	1.08	2.07	2.64		
				1.21	1.54		
	5P	1.10	0.94	0.77	0.85		
				0.78	0.86		
13:30	1P	1.16	0.98	0.65	0.75	1.25	31.86
				1.63	1.88		
	2P	1.85	1.57	1.90	3.51		
				3.33	6.15		
	3P	1.65	1.40	4.81	7.91		
				3.87	6.37		
	4P	1.32	1.12	2.84	3.75		
				1.94	2.56		
	5P	1.36	1.15	1.57	2.13		
				1.81	2.46		
14:00	1P	0.55	0.46	0.50	0.27	1.21	29.68
				1.41	0.77		
	2P	1.98	1.68	1.69	3.35		
				3.13	6.20		
	3P	1.66	1.41	4.59	7.61		
				3.67	6.08		
	4P	1.52	1.29	2.63	4.00		
				1.74	2.65		
	5P	1.39	1.18	1.35	1.87		
				1.52	2.11		

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
14:30	1P	0.54	0.46	0.55	0.30	1.08	26.88
				1.48	0.81		
	2P	1.42	1.21	1.75	2.49		
				3.20	4.55		
	3P	1.47	1.25	4.66	6.85		
				3.73	5.48		
	4P	1.63	1.38	2.70	4.39		
				1.80	2.93		
	5P	1.27	1.08	1.42	1.80		
				1.61	2.04		
15:00	1P	1.03	0.88	0.50	0.52	1.18	27.33
				1.42	1.47		
	2P	1.90	1.61	1.69	3.21		
				3.14	5.96		
	3P	1.38	1.17	4.59	6.34		
				3.67	5.07		
	4P	1.37	1.16	2.63	3.60		
				1.74	2.38		
	5P	1.25	1.06	1.36	1.70		
				1.52	1.90		
15:30	1P	0.51	0.43	0.45	0.23	1.07	25.23
				1.34	0.68		
	2P	1.54	1.30	1.62	2.49		
				3.07	4.71		
	3P	1.43	1.21	4.51	6.44		
				3.60	5.14		
	4P	1.57	1.33	2.56	4.01		
				1.67	2.61		
	5P	1.25	1.06	1.28	1.60		
				1.42	1.78		
16:00	1P	0.66	0.56	0.52	0.34	1.09	26.70
				1.44	0.95		
	2P	2.00	1.70	1.71	3.41		
				3.16	6.30		
	3P	1.38	1.17	4.62	6.38		
				3.69	5.09		
	4P	1.28	1.08	2.65	3.38		
				1.76	2.25		
	5P	1.13	0.96	1.38	1.56		
				1.55	1.75		

Time	Grid point	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Average Velocity (m/sec)	Total Discharge (m ³ /sec)
16:30	1P	0.30	0.25	0.36	0.11	1.03	23.62
				1.20	0.36		
	2P	1.91	1.63	1.47	2.81		
				2.93	5.61		
	3P	1.39	1.18	4.36	6.04		
				3.45	4.78		
	4P	1.42	1.21	2.41	3.42		
				1.53	2.17		
	5P	1.06	0.90	1.12	1.19		
				1.22	1.30		
17:00	1P	0.38	0.32	0.21	0.08	0.99	21.00
				0.94	0.36		
	2P	1.32	1.12	1.21	1.59		
				2.68	3.52		
	3P	1.74	1.48	4.09	7.10		
				3.20	5.56		
	4P	1.37	1.17	2.15	2.95		
				1.29	1.77		
	5P	1.03	0.87	0.85	0.87		
				0.88	0.90		
17:30	1P	0.42	0.36	0.23	0.10	0.82	16.12
				0.98	0.41		
	2P	1.55	1.32	1.25	1.94		
				2.72	4.21		
	3P	0.90	0.77	4.12	3.72		
				3.23	2.91		
	4P	1.26	1.07	2.19	2.76		
				1.32	1.66		
	5P	0.69	0.59	0.89	0.62		
				0.93	0.64		
18:00	1P	0.98	0.84	0.18	0.18	0.90	13.37
				0.86	0.85		
	2P	1.52	1.29	1.13	1.72		
				2.61	3.96		
	3P	0.87	0.74	4.01	3.49		
				3.12	2.72		
	4P	0.85	0.73	2.08	1.78		
				1.22	1.04		
	5P	-	-	-	-		
				-	-		

2.2 고정식 전자과표면유속계의 유속 및 유량 산정결과

제2동산교에 설치, 운영중인 고정식 전자과표면유속계(Kalesto)는 유출 시 10분 간격으로 유속과 수위를 동시 관측하고 있다. 유량산정 시 적용단면은 이동식 전자과표면유속계와 같은 Fig. III-11(b)를 적용하여 유량을 산정하였으며, 산정된 결과는 Table IV-4과 같다.

Table IV-4. Kalesto applying the surface velocity and the cross-sectional area, discharge results

Time	Velocity (m/sec)	Corr-Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Total Discharge (m ³ /sec)
08:00	2.23	1.90	37.26	70.63
09:00	2.45	2.08	36.66	76.34
11:00	1.95	1.66	28.53	47.29
11:30	1.86	1.58	24.88	39.34
12:00	1.7	1.45	21.05	30.42
13:00	1.4	1.19	16.73	19.91
13:30	1.88	1.60	24.35	38.91
14:00	1.85	1.57	22.23	34.96
14:30	1.49	1.27	22.90	29.00
15:00	1.47	1.25	22.26	27.81
15:30	1.4	1.19	21.52	25.61
16:00	1.49	1.27	22.48	28.47
16:30	1.35	1.15	20.05	23.01
17:00	-	-	-	-
17:30	-	-	-	-
18:00	-	-	-	-

3. 유량 계측 방식에 따른 전체 유속 및 유량의 비교·분석

본 연구에서는 2012년 8월 29일 제15호 태풍 불라벤의 영향으로 제주도 한천의 제2동산교의 유출발생 시, 비접촉식 유속관측방식인 표면영상유속계(SIV)를 이용하여 유속을 관측하고 유량을 산출하였다. 또한, 표면유속계의 정확도를 비교하기 위해 이동식 전자파유속계와 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)에 의한 유속과 유량의 자료를 각각 비교·검토하였다. 각 표면유속계측기기의 유속 값과 유량을 산정한 결과는 Table IV-5와 같다. Kalesto의 자료는 17:00pm 부터 유속 값이 결측되는 문제가 발생하여 표면영상유속계와 비교·분석 시 17:00pm~18:00pm의 자료는 제외하였다. 또한 유량 산정 시, 일반적으로 사용되는 표면유속-평균유속의 비인 0.85를 사용하였다.

Table IV-5. Measured velocities and calculated flow discharges with various methods

Time	MSIV		STIV		Electromagnetic surface current meter		Kalesto	
	Velocity (m/sec)	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Discharge (m ³ /sec)
08:00	1.69	68.13	2.17	75.37	2.01	79.99	1.90	70.63
09:00	1.74	64.47	1.84	64.60	1.70	66.19	2.08	76.34
11:00	1.12	36.35	1.76	46.70	1.29	39.57	1.66	47.29
11:30	1.07	30.88	1.45	35.01	1.28	34.41	1.58	39.34
12:00	1.06	27.05	1.40	26.67	1.24	28.43	1.45	30.42
13:00	1.00	24.06	1.44	27.11	1.05	20.08	1.19	19.91
13:30	1.34	37.86	1.60	36.79	1.25	31.86	1.60	38.91
14:00	0.99	26.98	1.52	33.05	1.21	29.68	1.57	34.96
14:30	1.01	28.84	1.50	34.32	1.08	26.88	1.27	29.00
15:00	1.03	28.16	1.23	26.56	1.18	27.33	1.25	27.81
15:30	1.22	29.20	1.17	25.33	1.07	25.23	1.19	25.61
16:00	1.06	29.14	1.11	24.36	1.09	26.70	1.27	28.47
16:30	1.20	28.46	1.25	24.07	1.03	23.62	1.15	23.01
17:00	0.86	19.20	1.07	18.40	0.99	21.00	-	-
17:30	0.85	19.39	1.11	19.65	0.82	16.12	-	-
18:00	0.87	20.11	1.09	17.44	0.90	13.37	-	-
Total		518.26		535.43		510.46		491.69

MSIV를 적용한 유량 산정 결과는 $518.26\text{m}^3/\text{sec}$, STIV는 $535.43\text{m}^3/\text{sec}$ 의 유량이 산정되었으며, 이동식 전자과표면유속계의 경우 $510.46\text{m}^3/\text{sec}$ 의 유량이 산정되었다. Kalesto는 결측된 구간을 감안하여 $491.69\text{m}^3/\text{sec}$ 로 산정되었다.

이동식 전자과표면유속계로 표면유속을 측정한 결과는 시간의 흐름에 따라 큰 변동 폭 없이 감소하는 경향을 보였으나, 고정식 전자과표면유속계(Kalesto)의 유속은 수위의 변동이 있는 구간에서 비교적 큰 폭으로 증가하거나 감소하는 경향을 보였다. MSIV의 유속 결과는 다른 유속계측기기에 비해 전체적으로 낮은 유속이 산정되었으며, 13시 30분의 경우 많은 유속이 산정되었음을 확인할 수 있다. STIV의 결과는 다른 관측기기와 같이 증가하고 감소하는 부분에서 같은 경향을 보이거나 다소 높은 유속이 산정되었다. 전체적으로 시간이 경과함에 따라 유속이 감소하는 경향을 보이며, 08시00분부터 14시30분 사이에는 태풍에 의한 강풍의 영향으로 각각의 계측기기의 변동차이를 보이다가 바람의 영향을 덜 받은 15시00분 이후에는 작은 변동을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 표면영상유속계(SIV)와 전자과 표면유속계의 관측 결과 중 어떤 값이 정확한 유속이라 판단할 수 없다. 하지만 시간에 따른 각 계측기기별 유속의 변동차이를 살펴보면 영상분석기법을 이용한 SIV기법이 바람에 의한 영향이 크다고 판단할 수 있다 (Fig. IV-13.).

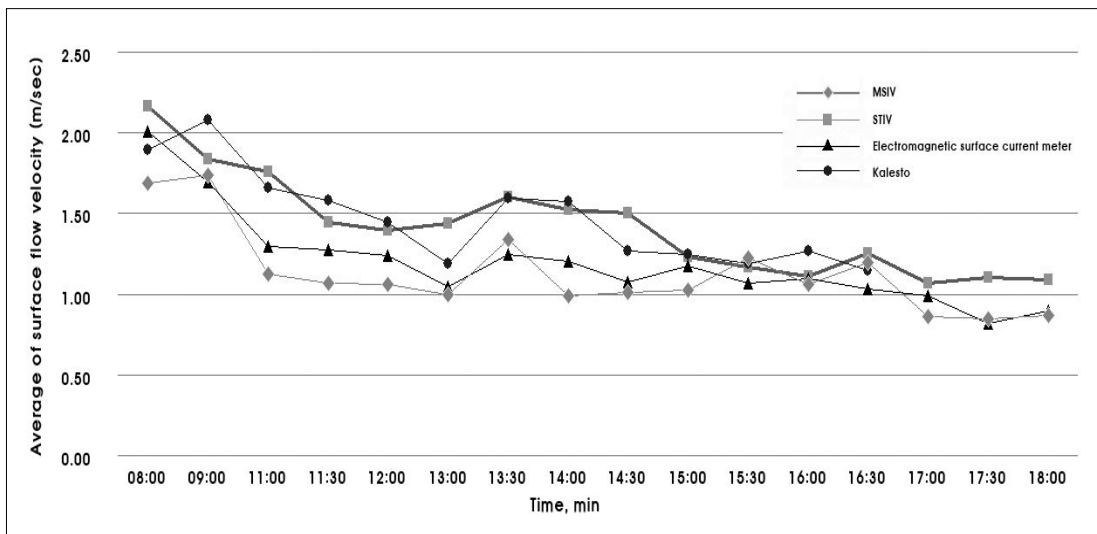


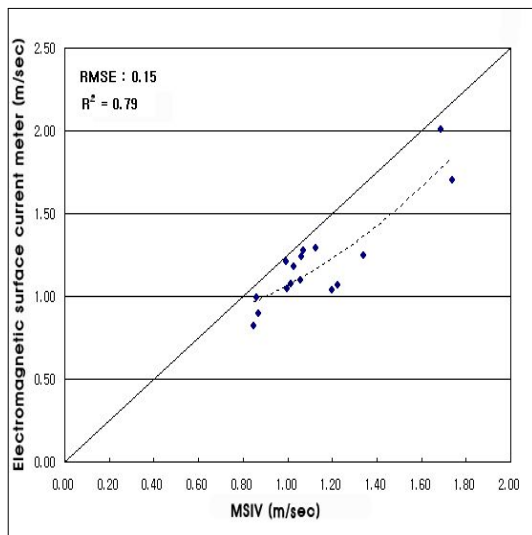
Fig. IV-13. Comparison of surface velocities.

각 계측기기의 유속결과에 의한 적합성을 판단하기 위해 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 결정계수(R-squared)를 나타냈다.

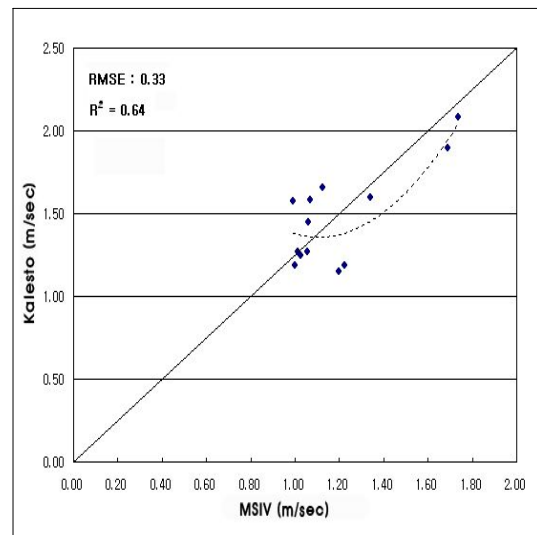
평균제곱근오차(RMSE)는 정밀도(precision)을 표현하는데 적합한 비교 방식으로 추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 차이를 다룰 때 사용하는 측도이다. 계산식은 (4.1)와 같으며, RMSE값은 산정된 계산 범위 내에서 작은 값이 계산될수록 정밀도가 높음을 판단한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_s(i) - V_t(i))^2} \quad (4.1)$$

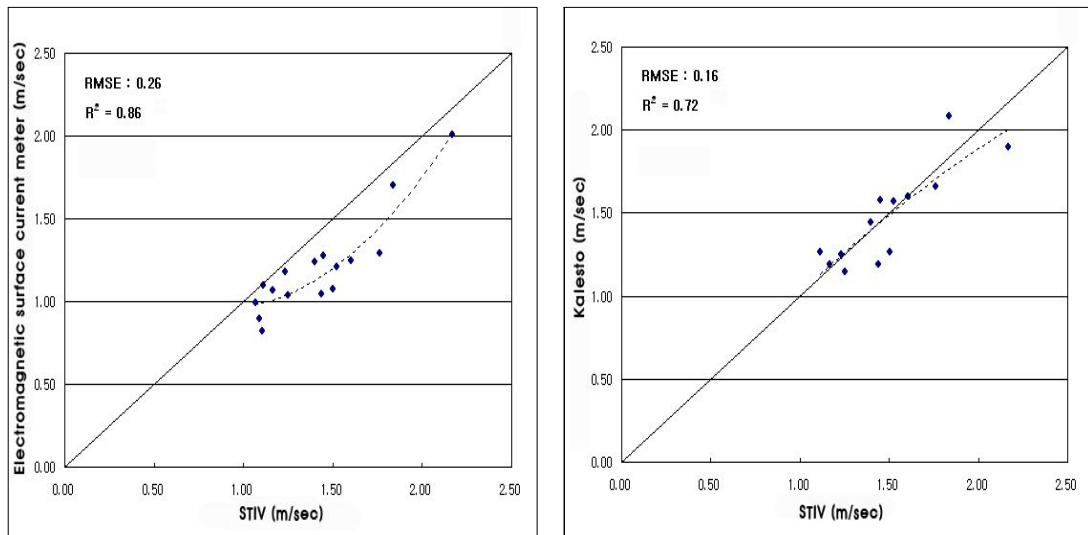
결정계수(R-squared)은 비교하는 두 값의 적합성을 판단하는 측정 계수로, 보통 0과 1의 사이 값을 갖는다. 비교결과 1에 가까운 결정계수의 값은 관측방식이 상이한 두 방식에 대하여 실제 유량에 가까운 결과를 산정하였다고 판단한다. 따라서 $R^2=1$ 일 경우 회귀선이 변수 사이의 관계를 완전히 설명해 주고 있음을 의미하며, 반대로 $R^2=0$ 일 경우는 비교하는 두 변수 사이의 관계를 전혀 설명해 주지 못함을 의미한다.



(a)



(b)



(c)

(d)

Fig. IV-14. One-to-one relationships of velocity measurements between the electromagnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry.

Fig. IV-14는 표면영상유속계(SIV)를 이용한 MSIV, STIV 유속을 기준으로 이동식, 고정식 전자파표면유속계와 비교한 그래프이다. MSIV와 이동식 전자파표면유속계의 유속 비교 결과는 RMSE 값이 0.15, R^2 값이 0.79로 나타났으며, 고정식 전자파표면유속계와 비교 시 RMSE 값이 0.33, R^2 값이 0.64로 나타났다. STIV와 이동식 전자파표면유속계의 RMSE는 0.26, R^2 값이 0.86, 고정식 전자파표면유속계와 비교 시 RMSE 0.16, R^2 값이 0.72로 나타났다.

각각 계측기기의 유속을 이용하여 유량산출 결과는 Fig. 15와 같다. 관측기기에 따라 관측구간에 적용되는 동일단면(Fig. III-11.(a),(b))을 적용한 결과, 유량의 변동 폭이 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 09시00분과 13시30분의 유량을 보면 Kalesto 유량 변동이 다른 계측기기에 비해 과측정 되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 Kalesto의 경우 다른 유속 계측기기와 달리, 단일 구간의 유속을 전체 유속으로 적용하여 유량을 산정하였으므로 과측정 되었다고 판단된다.

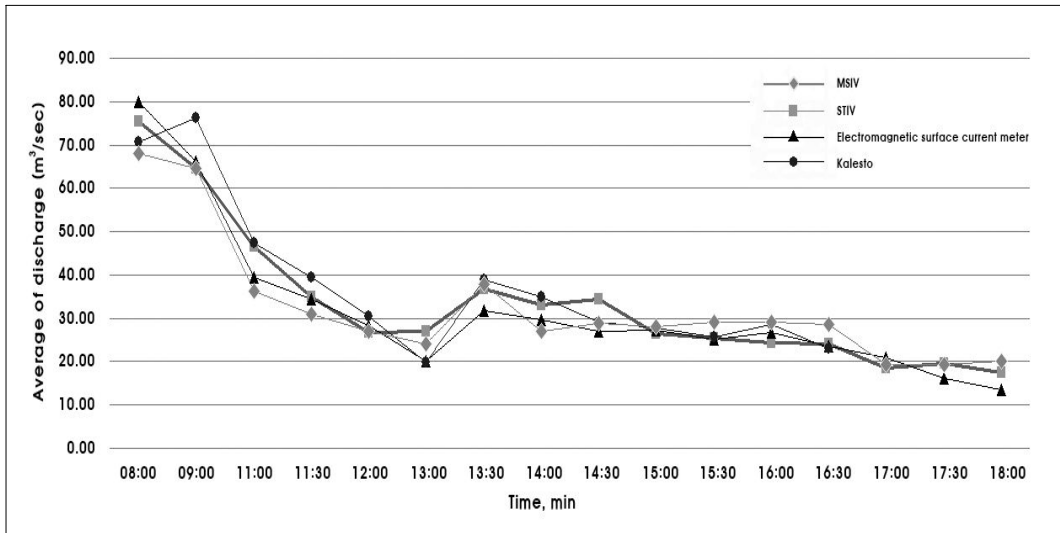
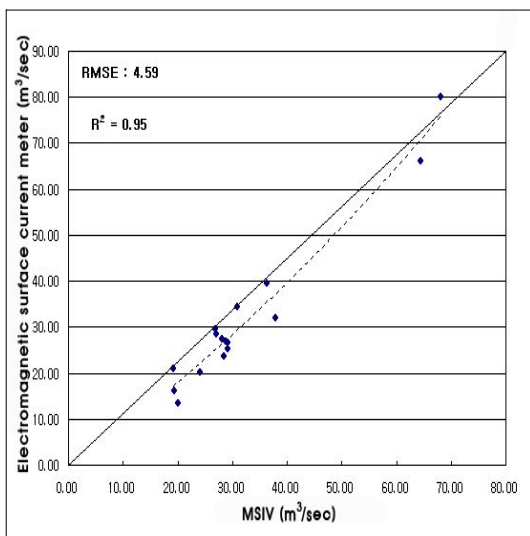
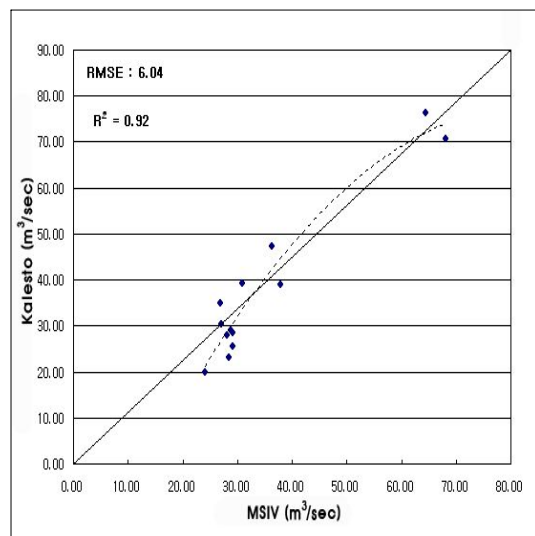


Fig. 15. Comparison of flow discharges.

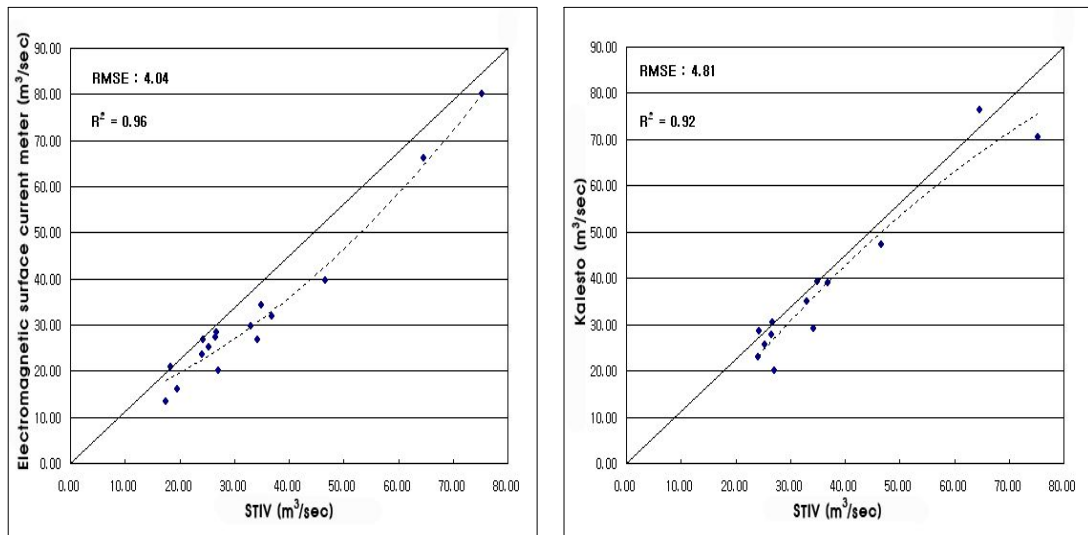
MSIV와 이동식 전자파표면유속계의 유량 비교 결과는 RMSE 값이 4.59, R^2 값이 0.95로 나타났으며, 고정식 전자파표면유속계와 비교 시 RMSE 값이 6.04, R^2 값이 0.92로 나타났다. STIV와 이동식 전자파표면유속계의 RMSE는 4.04, R^2 값이 0.96, 고정식 전자파표면유속계와 비교 시 RMSE 4.81, R^2 값이 0.92로 나타났다.



(a)



(b)



(c)

(d)

Fig. 16. One-to-one relationships of discharge measurements between the electromagnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry.

계측된 유속에 의해 산정된 유량의 전체적인 변동을 살펴보면 관측시간이 유출이 끝나는 시간임에도 불구하고 일부 구간에서 일정하게 감소하는 경향을 보이다가 상승하는 부분을 확인할 수 있다. 이런 관측 값은 산간지역의 순간적인 강우량의 영향이거나 계측기기의 오차 가능성이라 판단된다.

표면영상유속계(SIV)의 경우 전자파를 이용한 두 유속계측기기에 비해 변동이 큰 유속이 산정된 이유는 다음과 같은 두 가지로 판단된다.

첫째는 측정 위치가 표면영상유속계는 교량의 상류쪽 난간 직하류에 가깝지만, 전자파표면영상유속계는 그보다 약간 더 상류에서 측정하기 때문에, 그 영향을 받았을 수 있다. 제2동산교의 경우 교량 직하류가 상당한 낙차를 보이는 강하곡선을 이루기 때문에 교량에 가까울수록 유속이 크게 측정되었을 가능성이 있다.

둘째는, 표면영상유속계를 이용하여 유속을 산정하는 과정에서 분석 자료의 획득 시 강력한 바람을 동반한 태풍(최대 풍속 65m/s)의 영향으로 화면이 전체적으로 흔들리는 문제와 연관이 있을 수도 있다고 판단된다. 실제 하천의 흐름 상태는 일정하게 흐르고 있지만 영상을 촬영하고 획득하는 과정에서 2차원으로 저장된 화면이 상하로 흔들리는 경우, 입자군간 도심의 이동거리가 실제 흐름보다 과다하게 이동한 것으로 분석되기 때문이다.

V. 결론 및 제언

제주도 한천의 제2동산교에서 2012년 8월 29일 제 15호 태풍 블라벤의 내습에 의한 유출 발생 시, 표면영상유속계(SIV)에 의한 현장 관측을 실시하고 그 결과를 적용하여 유속 및 유량을 산정하였다. 이때 동시 관측한 이동식, 고정식 전자파표면유속계의 관측 값과 비교·분석하였으며, 연구를 통해 얻은 결과 및 결론은 다음과 같다.

1) 표면영상유속계(SIV)와 전자파 표면유속계로 산정한 유속을 RMSE와 결정계수 R^2 의 비교를 통해 정밀도와 상관관계를 분석하였다. MSIV와 이동식전자파 표면유속계의 평균유속에 대해 상관관계를 비교한 결과 R^2 (R -Squared)이 0.79, RMSE가 0.15로 나타났으며, 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)와 비교 결과 R^2 가 0.64, RMSE가 0.33으로 분석되었다. 같은 방식으로 STIV와 이동식 전자파표면유속계의 R^2 은 0.86, RMSE는 0.26, 고정식 전자파표면유속계와 비교 결과 R^2 가 0.72, RMSE가 0.16으로 분석되었다.

2) 관측 구간에 적용되는 하천단면을 이용하여, 유량을 산정한 결과는 다음과 같다. MSIV와 이동식전자파표면유속계로 산정된 유량을 비교한 결과 R^2 이 0.95, RMSE가 4.59로 나타났으며, 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)와 비교 결과 R^2 가 0.92, RMSE가 6.04으로 분석되었다. 같은 방식으로 STIV와 이동식 전자파표면유속계의 R^2 은 0.96, RMSE는 4.04, 고정식 전자파표면유속계와 비교 결과 R^2 가 0.92, RMSE가 4.81으로 분석되었다. RMSE값의 4.04~6.04범위 내에서 STIV와 이동식 전자파표면유속계의 유량결과가 높은 정밀도로 분석되었으며, 또한 각각의 유량결과를 비교한 결정계수 R^2 값이 0.92~0.96으로 매우 높은 상관관계를 나타냈다.

3) 본 연구에서 적용된 비접촉식 유속측정은 표면유속을 계측하므로, 표면유속과 평균유속간의 관계의 정립이 필요하다. 유량계산 시 표면유속-평균유속의 비

인 0.85를 사용하여 유량을 산정하였으나, 더 정밀한 유량산정을 위해 홍수 시 수직유속분포에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

유출발생 시 계측기기에 따라 측정된 유속 값의 정확한 참값을 판단할 수 없지만, 제주도와 같은 산지하천의 빠른 유속에서 기존 유량측정 방법의 적용이 어려울 경우 매우 효과적인 방식이라 판단된다.

향후 다양한 유출 사상에 대해 SIV기법을 적용하여 검증하고, 동시에 다양한 유량 관측기법과 비교, 검토한다면 제주도 하천유출의 유량 측정 기술을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

- 김남길, 2010, 표면영상유속계를 이용한 하천의 유속측정 기술 개발, 동의대학교 박사 학위 논문
- 김미영, 이영호, 서민식, 1999, 해류표면의 속도계측을 위한 SF-PIV의 개발, 한국해양 환경공학회논문집, 155-160
- 김서준, 류권규, 윤병만, 2011, 고정식 표면영상유속계(FSIV)를 이용한 실시간 하천 유량산정, 한국수자원학회논문집, vol. 44 no.5 통권, 제 226호, 377-388
- 김서준, 2008, 표면영상유속계를 이용한 유량측정기법의 정확도분석, 명지대학교 대학원 석사학위논문, 10-22
- 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
- 김영근, 2003, LSPIV를 이용한 표면유속 측정, 명지대학교 석사학위 논문
- 김영성, 양재린, 2007, LSPIV 적용시 물표면과 카메라 사이의 촬영각도에 따른 상관 계수의 변화양상 분석, 제33회 대한토목학회 정기 학술대회, 2556-2559
- 김영성, 이현석, 2011, 전자과표면유속계의 성능개선 및 실용화, 한국수자원학회 2011년도학술발표회
- 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, 제 38권, 제11호, 917-925
- 류권규, 김동수, 윤병만, 2005, 상호상관 PIV기법을 위한 빠르고 정확한 FFT 알고리즘의 개발, 한국수자원학회논문집, 제 38권, 제 10호, 851-859.
- 류권규, 윤병만, 김주황, 2006, LSIV를 위한 흔들리는 영상의 보정 알고리즘의 개발, 한국수자원학회 학술발표대회, 205
- 뮤트로닉스, 2010, 평갈수용 전자과표면유속계, 특허출원 10-2010-89895
- 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 하

천 유출 비교 분석, 한국환경과학회지, 20(6), 738-788

- 양성기, 2007, 제주도의 하천관리와 개선방안, 하천과 문화, 한국하천협회, 3(4), 104-115.
- 이상호, 김우구, 김영성, 1997, 전자과 표면유속계의 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, vol. 1 no.2, 13-16
- Aya, s., Fujita, I., and Yagyu, M., 1995, Field-observation of flood in a river by video image analysis, Annual J. of Hydraulic Engineering, JSCE, 39, 447
- 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. and Komira, 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 analys is 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 analys is by aerial photography, Proc. of JSCE, NO.345-II-1, 1-19
- Leese, L. 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.

감사의 글

대학원 석사과정 동안 많은 도움을 주신 분들께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 먼저 매사에 인격적 성숙과 제 자신을 발전시킬 수 있게 해주시고 이 논문을 쓸 수 있도록 연구 방향과 진행에 많은 지도와 격려를 해주신 양성기 교수님께 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 일정에도 심사를 맡아주신 김상진 교수님과 박원배 박사님께도 깊은 감사드립니다. 또한 대학원을 다니는 동안 지도해 주신 김남형 교수님, 박상렬 교수님과 이병걸 교수님께도 감사드리며, 특히 많은 가르침과 조언을 해주신 동의대학교 류권규 교수님께 깊은 감사드립니다.

대학원 생활에서 항상 긍정의 힘을 주시는 정우열 선배님과 정신적 지주이신 양원석 선배님, 항상 동생들 먼저 생각하시는 강명수 선배님, 동갑이지만 배울점이 많은 이준호를 비롯하여, 묵묵히 연구실생활에 잘 적응하는 강보성, 고성용, 그리고 김지영 선생님께 감사의 말씀드립니다. 또한 바쁜 대학원 생활 때문에 자주 만나지 못하더라도 만날 때 마다 한결같은 모습으로 힘을 주는 소중한 오랜 벗들에게 고맙다는 말을 전합니다.

마지막으로 사랑하고 존경하는 할아버지, 할머니께 감사의 마음을 전하며, 더욱 건강하시기를 바랍니다. 항상 막내 생각하시는 아버지, 든든한 큰누나와 매형 그리고 예쁜 조카 시연이가 더 건강하고 밝게 자라기 바라며, 막내 걱정만 하는 예쁜 작은누나께 사랑한다는 말과 고맙다는 말씀을 드립니다. 그리고 고통없는 하늘에서 편히 쉬고 계시는 사랑하는 어머니께 그리운 마음과 보고싶다는 말을 전합니다. 항상 어머니 생각하며 힘을 냅니다.

앞으로 더 발전하는 사람이 될 수 있도록 최선을 다하는 삶을 살겠습니다.

2013년 2월

김용석 배상