



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

악근천 유역의 기저유출량 산정

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

柳 和 辰

2012年 8月

악근천 유역의 기저유출량 산정

指導教授 楊 城 基

柳 和 辰

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 8月

柳和辰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 産業大學院

2012年 8月

Estimation of Baseflow Discharge through Acrgeun Stream Basin

Hwa-Jin Yoo

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2012. 8.

This thesis has been examined and approved.

Department of construction & Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차	i
표 목 차	ii
그 립 목 차	iii
사 진 목 차	iv
Summary	v
I. 서 론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 동향	2
3. 연구의 목적	3
II. 현장조사 및 방법	4
1. 현장조사 방법	4
1.1 유량 측정지점 선정	4
1.2 측선 배치	8
2. 현장조사	8
2.1 측선에서 유속 측정	8
2.2 하천 유량산정	9
III. 이론적 배경	11
1. 구조물에 의한 하천 유량측정법	11
1.1 사각위어	12
1.2 전폭위어	13
1.3 광정위어	14

2. 계측기에 의한 유속 및 유량측정법	17
2.1 유속 계측기	17
2.2 유량 계측기	19
3. 유속-면적법에 의한 유량산정법	22
3.1 중간 단면법	22
3.2 평균 단면법	23
IV. 연구대상 유역 기초현황	24
1. 연구대상 유역	24
2. 유역 및 지형 특성	26
2.1 하도의 평면형	27
2.2 유역 지질 및 토양	28
2.3 유역 토지이용 현황	31
3. 유역의 입체적 특성	32
3.1 유역 평균고도	33
3.2 유역 평균경사	34
4. 유역의 강우분석	36
4.1 연평균 강수량	38
4.2 연도별 강수량	40
4.3 강수규모 발생일수	41
4.4 무 강수일	44
V. 하천의 기저유출량 산정	45
1. 하천구조물에 의한 유출량 산정	45
2. 유량 계측기에 의한 유출량 산정	47
3. 기저유출량 산정결과 비교	59
VI. 결론	63

참고문헌	65
감사의 글	67

List of Tables

Table II-1. Standard of measurement line	8
Table II-2. Standard of water level	9
Table III-1. Correction factor of C_v	15
Table III-2. Correction factor of $C_D(F)$	16
Table III-3. Technical data of flow meter	21
Table IV-1. Present status of stream watershed	26
Table VI-2. General characteristics of basin	26
Table IV-3. Plane figure of basin	27
Table IV-4. Rate and dimension by soil series at the basis	30
Table IV-5. Ground coverage state at the basin	31
Table IV-6. Altitude analysis chart of the basins	32
Table IV-7. Status of meteorological post of the basins to be studied	37
Table IV-8. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin	39
Table IV-9. Rainfall data by year of rainfall observatory at the basin	41
Table IV-10. Number of raining days for each year and precipitation pattern	42~43
Table IV-11. Number of non-raining days for each year	44
Table V-1. Baseflow discharge using weir equation	46
Table V-2. Cross section view using flow meter	48~55
Table V-3. Baseflow discharge using flow meter	56
Table V-4. Comparison of stream baseflow discharge	60

List of Figures

Fig. II-1. Observational locations and topographic map	5
Fig. II-2. Flow chat of the study contents	7
Fig. II-3. Subject stream flow observation scene	10
Fig. III-1. Rectangular weir	12
Fig. III-2. Broad-crested weir	14
Fig. III-4. Site measurement using flowmate	18
Fig. III-5. Site measurement using ADC	19
Fig. III-6. Site measurement using ADCP	21
Fig. III-7. Flow calculation by mid-section method	22
Fig. IV-1. Basin for the study	25
Fig. IV-2. Observational locations and topographic map	25
Fig. IV-3. Soil map of basin to be studied	29
Fig. IV-4. Land-cover map of basin	31
Fig. IV-5. Altitude analysis map of the basins	33
Fig. IV-6. Slope analysis map of the basins	35
Fig. IV-7. Slope direction analysis map of the basins	35
Fig. IV-8. Location of weather observatory	38
Fig. IV-9. Precipitation by month and by precipitation observatory	39
Fig. IV-10. Precipitation by year and by precipitation observatory	40
Fig. V-1. Baseflow discharge using weir equation	47
Fig. V-2. Baseflow discharge using flow meter	57
Fig. V-3. Analysis on RMSE error of actual measurement value comparison of stream baseflow discharge	58
Fig. V-4. Comparison of stream baseflow discharge	61
Fig. V-5. Analysis on RMSE error of actual measurement value and Weir equation	62

Summary

Based on precise observation on Akgeun Stream in Jeju Province maintained by spring water with a two-week interval using up-to-date measuring device, baseflow discharge was calculated with Weir flow equation from water level measurement for comparative analysis. Daily average discharge of the subject stream observed by ADCP was $68,083\text{m}^3$, and observation by Flowmate and ADC was $56,765\text{m}^3$. Flow discharge was large at $0.748\sim 1.541$ during summer but was significantly reduced during winter to $0.226\sim 0.614$. Discharge during summer was about 3.37 times that during winter. Reason for smaller observation value by Flowmate and ADC compared to ADCP is probably because of error in average flow caused by observation distance, horizontal flow distribution, and perpendicular flow. Average daily discharge computed using broad-crested Weir equation was $94,797\text{m}^3$ with RMS error of 0.478. For a more precise calculation of stream baseflow discharge, long-term observation and theoretical study are necessary.

I. 서론

1. 연구의 배경

수자원은 인간생활의 영위 및 산업활동에 필수 불가결한 기본 요소로서 국내에서는 1960년대부터 국가산업의 발전과 고도 경제성장을 안정적으로 뒷받침하기 위한 수자원 개발과 용수공급의 노력이 활발하게 진행되어 왔다. 2009년 우리나라 수자원 이용현황에 따르면 연간 수자원 총량 중 증발 및 침투로 손실되는 양의 42%를 제외한 58%가 하천으로 유출되며, 그중에서 사용할 수 있는 실 이용량은 27% 정도지만, 이에 반해 제주도는 연평균 강우량이 약 2,000mm에 달하는 우리나라 최대의 다우지역이며 투수성이 좋은 다공질 화산암류 및 환산회토로 이루어져 있어 총 강우량의 48.5%에 이르는 빗물이 지하로 침투하여 대부분의 하천들이 건천을 이루고 있다(양, 2007). 이러한 지역적 특성에 의해 지표수의 지속적인 유출량이 적은 반면에 지하의 대수층에 부존된 지하수의 양은 풍부하며, 지하수는 제주도의 유일한 수자원으로서 안정적이고 원활한 수자원 공급을 보장하기 위해서는 지하수자원의 체계적인 보전 관리를 전제로 한 계획적이고 합리적인 지하수 개발과 이용이 가장 중요한 관건이다.

제주도 내에는 911개에 이르는 많은 용천수가 분포하고 있으며, 이들 중 92%에 달하는 841개소가 해안 가까운 지역에 위치하고 있다(제주도, 1999). 1960대 중반까지 제주도의 수자원이용은 이러한 해안 용천수를 이용하거나 봉천수에 의존하는 열악하고 미미한 수준에 머물러 있었다. 2000년 준공된 제주도 광역상수도 1단계 건설사업까지의 수자원개발을 지속적으로 추진한 결과 제주도의 상수도 보급률은 99.9%로 전국 최고 수준에 이르게 되었다. 그러나 제주도 개발 및 고도 성장에 따른 인구, 토지이용 등의 증가로 인한 수요가 급증하였고, 이를 해결하기 위하여 인구 밀집지역 및 농업지역 등 단지 수요에 편중된 개발로 장래 지하수 오염의 악영향을 초래하며, 고려하지 않는 무분별한 개발로 인한 질산성

질소 농도 증가와 같은 수질악화 현상이 확산되는 등 지하수 개발의 난맥상이 노출되기 시작하였다.

2. 연구의 동향

제주도 용천수의 용출량에 관한 조사는 1960년대부터 시작되었다. 당시 조사의 주된 목적은 용천수를 상수원이나 농업용수로 개발하여 제주도의 심각한 물 문제를 해결하는데 필요한 기초적인 자료를 얻기 위해서였다. 1993년 한국수자원공사는 기존에 조사된 용천수에 대한 자료를 수집·분석하고 용천수 383개소의 용출량을 $1,078,210\text{m}^3/\text{d}$ 으로 보고한 바 있다. 김경찬(1996)은 서귀포지역 일대의 16개 용천수에 대한 수질특성을 조사한 바 있으며, 고병련(1998)은 제주도 동부지역의 관정 32개소와 용천수 15개소에 대한 수질분석을 실시하고 수질조성 분포특성과 해수침입에 따른 이온성분의 상관관계에 대한 연구한 바 있다. 이대하 등(2000)은 제주도 지하수의 순환시스템해석을 위한 연구에서 용천수에 대한 동위원소 특성을 연구를 실시하였다. 연구결과, 제주도 지하수의 평균연령은 16년이고, 지하수 연령은 산악 및 중·산간 지역에서 해안지역으로 갈수록 대체로 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석하였다.

2000년도부터 제주도의 수문지질구조 및 지하수 순환시스템 조사과정에서 용천수에 대한 조사도 이루어졌으며, “제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 I”에서는 용출량이 많은 용천수 8개소를 선정하고 용출량 및 체류기간 조사를 실시하였다. 조사결과, 제주시 삼양1동에 위치한 삼양큰물 용천수의 용출량은 $6,212\text{m}^3/\text{d}$ 이고, 체류기간은 15년인 것으로 나타났다.(제주도,2001) 제주도 광역상수도 2단계 건설사업을 위한 기본 및 실시설계 용역에서는 유속계를 이용하여 옹포천·창고천·중문천·강정천의 유량을 조사하였다. 조사결과, 옹포천의 유량은 $10,195 \sim 40,435\text{m}^3/\text{d}$, 창고천은 $3,100 \sim 131,933\text{m}^3/\text{d}$, 중문천은 $1,337 \sim 18,403\text{m}^3/\text{d}$, 강정천은 $69,034 \sim 185,322\text{m}^3/\text{d}$ 인 것으로 나타났다.

제주도 지하수의 중·장기적인 종합관리 방안을 수립하기 위해 실시된 ‘제주도

수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ'에서는 제주도 해안지역에 위치한 122개소 용천수의 용출량을 월1회씩(2002. 7 ~ 2003. 8.)측정을 실시하였다. 측정결과는 도 전체적으로 일평균 용출량은 602,959m³/d이고, 개소 당 평균 용출량은 약 5,000m³/d인 것으로 조사되었다(농림부·2003) 이광식 등(2004)은 제주도 한라산 남·북측사면 용천수의 용출 이온 함량과 산소·수소 동위원소 특성에 대한 연구를 실시하였다.

문덕철(2004)은 제주도 남·북사면과 서부지역의 해안변 부근(외도천, 옹포천, 강정천, 연외천)을 대상으로 강우량에 따른 하천수위의 변동특성을 파악하고, 수위-유량 관계곡선을 유도하여 연간 기저유출량의 규모를 파악하였다. 옹포천의 경우는 39,647 ~ 116,607m³/d을 나타냈고, 연외천은 45,859 ~ 185,462m³/d을 나타냈으며 기저유출량 산정을 위해 수위-유량 관계식을 유도하면 옹포천 $Q=458824 h^{0.9694}$ (R=0.9485)의 식을 얻었으며, 연외천은 $Q=1368019 h^{8.5035}$ (R=0.9615)의 식을 산출한바 있다.

3. 연구의 목적

제주도 기저유출 하천에 대한 정밀한 조사와 유량산정은 수자원의 확보와 이용 및 관리적인 측면에서 매우 중요하다. 따라서 상시하천 기저유출량의 정확한 관측과 산정. 계절적 및 연 변화에 대한 특성을 규명하는 것은 매우필요한 과제이다. 그러나, 하천 유출량의 정확한 조사와 산정은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 대상유역인 약근천의 기저유출량을 2주마다 정기적으로 수리구조물과 ADCP, ADC 등에 의한 유속 및 유량의 현장 조사를 통해 기저유출량을 산정하고 이들 결과를 비교·검토하여 보다 정밀한 유출량을 산정하였다. 이 같은 연구는 제주도의 수자원이 전적으로 지하수에 의존하고 있는 실정에 있으나 지하수의 과도한 개발·이용으로 향후 지하수 함양량 감소 등에 의한 용수문제를 사전에 예방하고, 보다 능동적인 수자원 확보와 가뭄에 대비하기 위한 대책으로 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다.

II. 현장조사 및 방법

1. 현장조사 방법

1.1 유량 측정지점 선정

유량측정 지점의 위치선정은 정확하고 효율적인 유량측정을 위해 매우 중요하다. 유량측정 지점은 균일한 유속분포를 확보하기 위한 충분한 길이(약 100m 이상)와 직선하도의 확보가 가능한 횡단면상의 수심이 균일한 지점을 선택하며, 모든 유량 규모에서 하나의 하도로 형성되는 구간, 가능하면 하상이 안정되어 있고, 식생 성장이 없는 지점을 선택하였다.

유량측정시 안정적인 수위와 유량 등의 수리환경을 확보하기 위해 저유량인 경우에는 안정적인 여울을 형성하고, 홍수인 경우에는 협착부를 형성하거나 단락 혹은 낙차가 있는 지점을 선택하였다. 또한, 측정장비가 상시 접근할 수 있는 지점과 수위표 지점으로부터 1Km 이내(수위가 급변하는 경우 가능하면 수위관측소 주변)인 지점, 유속계나 부자가 어디에서나 유효하게 잠길 수 있을 정도의 충분한 수심이 확보되어야 한다. 교량 등 구조물 근처에서 측정할 경우 구조물 상류 지점을 선택, 대규모 하천을 제외하고 가능하면 도섭으로 측정 할 수 있는 지점을 선택한다.(ISO 748, 1997)

유량측정 지점은 수계 전체의 적정한 관측망을 고려하여 하천, 수자원 등의 계획 및 시공 관리상 중요한 지점에 배치하여야 하며, 적정한 관측망이란 상하류 측정 지점의 값을 알면 중간에 임의 지점의 유량을 실용적으로 이용할 수 있을 정도의 관측망을 확보한다. 하천계획, 관리 및 시공상 필요한 지점을 고려하되, 배치 계획을 검토할 경우에는 수계 전체의 관측망을 구상하면서 적정 배치 계획 시에는 하천의 종·횡단도, 지질도 등을 참고로 한다.

본 연구에서는 하천의 조사지점 선정을 위해 먼저 조사지점을 도상조사를 통해 예비적으로 선정하였다. 지형도, 항공사진, 위성사진을 활용하여 선정을 하며,

유량측정은 저수시나 홍수시를 막론하고 동일한 위치에서 측정할 수 있는 장소가 바람직하지만, 저수 유량과 홍수 유량의 차가 큰 곳에서는 각 유량의 크기에 적합한 방법을 사용해야 하므로 측정위치도 달라질 수가 있다. 중간 규모의 유출시에는 측정 횟수를 많이 하여 정확도 향상에 노력하여야 한다.

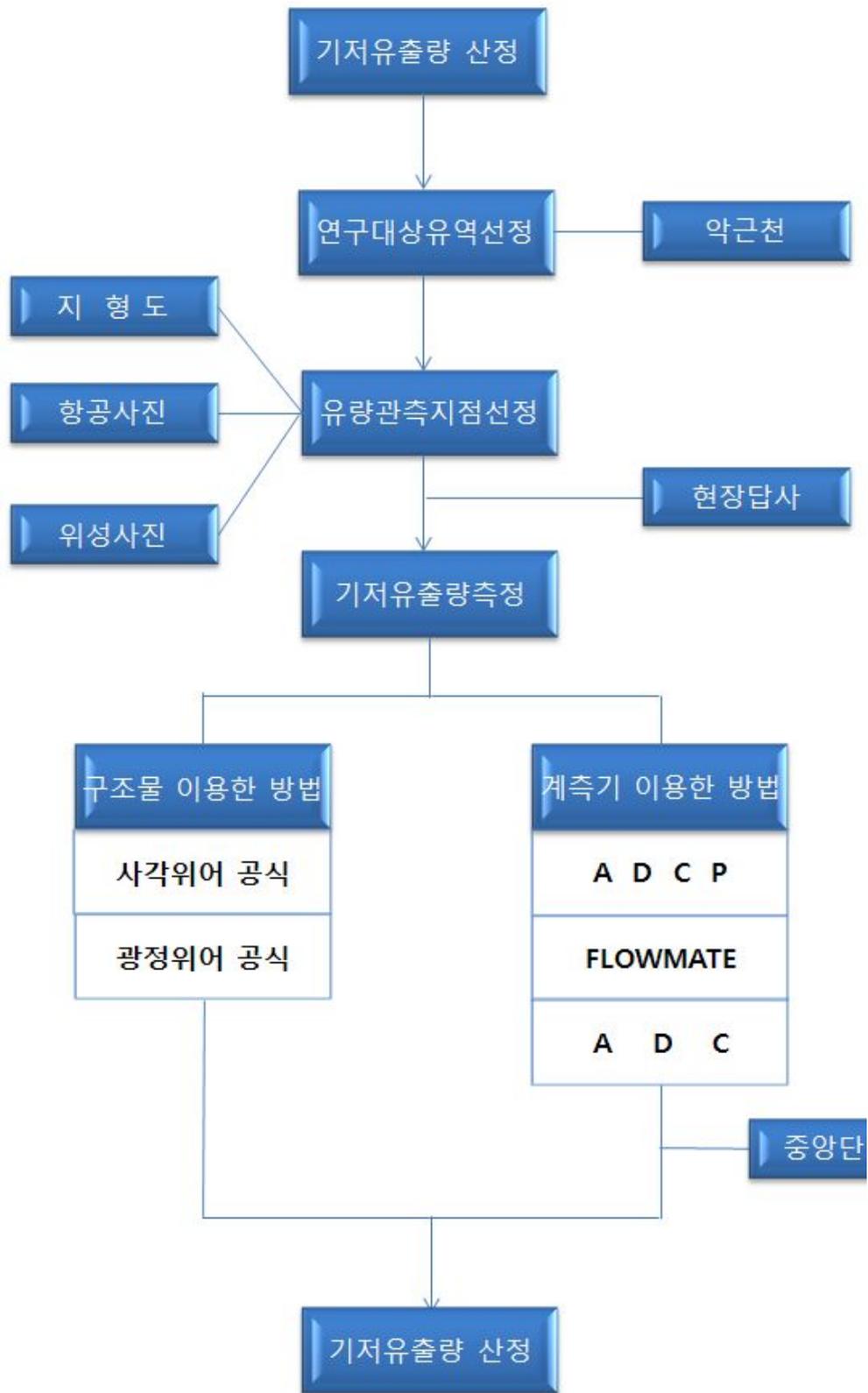


Fig. II-2. Flow chat of the study contents

1.2 측선 배치

유량측정은 하천 단면을 여러 개의 구간으로 나누고 유속과 수심을 측정하여 관측한다. 수심과 유속측정은 일반적으로 동일한 측선에서 이루어지는데, 하천의 유량이 5%를 넘지 않는 범위에서 시행하며, 구간 유량이 최대 10%를 초과하지 말아야 한다. 측선수에 따른 상대오차는 측선수가 20개를 초과하면 상대오차가 줄어들어 수렴하여 불확실도가 5% 이내로 측정이 가능(한국건설기술연구원, 2004)하다는 연구 결과가 발표되었다. 본 연구에서는 악근천 하폭이 41m 이므로 측선수를 평균 38개 측선수 배치하여 정밀한 유량을 실시하였다.

Table II-1. Standard of measurement line

수면 폭(m)	측선수
$0 < \text{수면 폭} \leq 0.5$	3~4
$0.5 < \text{수면 폭} \leq 1$	4~5
$1 < \text{수면 폭} \leq 3$	5~8
$3 < \text{수면 폭} \leq 5$	8~10
$5 < \text{수면 폭} \leq 10$	10~20
$10 < \text{수면 폭}$	20 이상

2. 현장조사

2.1 측선에서 유속 측정

유속계는 한 점에서의 유속을 측정하는데 이용된다. 한 단면에서 유량측정을 위해서 각 측선의 평균유속을 측정해야 하는데, 측선의 평균유속은 각 측선의 여러 지점에서 유속을 이용하며, 한 측선에서 측정 수의 선택은 현장 여건에 요구

되는 유량측정 정밀도에 따라 결정이 된다.

악근천의 기저유출량 조사시 1점법을 이용하였다. 1점법이란 수면 아래 0.6d 수심에서 측정된 유속을 측선의 평균유속으로 이용을 한다. 실제측정과 수학적 이론에서 1점법이 신뢰할 만한 결과를 나타내는 것으로도 알려지고 있지만, 0.75m 이상인 경우에는 2점법을 사용해야 하는 기준이 있었으나, 0.8d 수심의 측정시 유속이 나오질 않아 현장 여건을 고려하여 1점법을 이용하여 측선에서의 평균유속을 측정하였다.

Table II-2. Standard of water level

수 심(m)	측정 방법
0.75 이상	2점법(0.2d, 0.8d)
0.75 미만	1점법(0.6d)

2.2 하천 유량산정

연구대상 악근천의 기저유출량을 산정함과 그리고 변화양상을 파악하기 위하여 2011. 07. 08 ~ 2012. 03. 31일까지 10개월동안 2주마다 현장조사를 실시하였으며, 총20회의 실측값을 얻어냈다. 유속측정은 ADCP(SonTek), Flowmate(APM 코리아), ADC(OTT)을 이용하여 동일지점의 대표유속을 측정 및 기록하였으며, 2012. 02. 16일부터 Flowmate 유속계의 고장으로 인하여 ADC 유속계로 교체를 하여 유속을 측정하였다.

유속 측정시 측정자가 흐름에 영향을 주지 않도록 유속계로부터 충분히 떨어져서 측정하였다. 유속 측정시에는 측정자가 유속계를 중심으로 하류방향으로 최소한 10cm 이상 떨어지며, 옆 방향으로는 적어도 45cm 이상 떨어져 측정을 실시하였다.

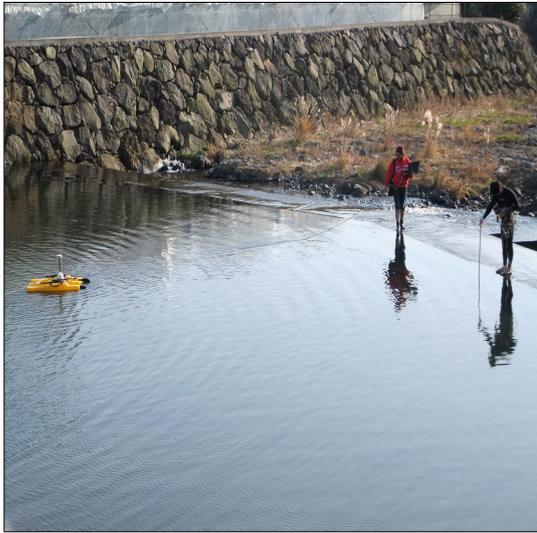


Fig. II-1. Subject stream flow observation scene

Ⅲ. 이론적 배경

1. 구조물에 의한 유량측정 방법

하천의 흐름을 막아 물을 구조물 위로 넘어 흘리게 하는 방법이며, 유량을 측정할 수 있는 구조물을 위어라고 한다. 위어는 흐름에 지배단면을 발생시켜 하류수위의 영향을 받지 않는 조건을 만들고 위어를 넘어 흐르는 수심과 유량의 관계로부터 유량을 계산한다. 위어를 월류하는 흐름은 위어 정상에서 하나의 지배단면을 통과하며, 이때 상류의 흐름은 하류 수심의 영향을 받지 않으므로 월류하는 수심과 유량의 관계는 단일식으로 나타내고, 이 원리를 이용하는 것이 위어를 이용한 유량측정 방법의 특징이다. 유량은 위어공식을 이용하여 월류하는 수심으로부터 산출된다.

하류 수위가 높아져 위어가 잠기는 상황이 되면 단순한 관계가 성립이 되지 않고, 위어가 잠기는 경우는 하류 수위가 높아진다는 하류 수위의 영향을 받아 위어의 마루에서 지배단면을 유지할 수 없게 되는 상태이다. 따라서 유량은 상류 수위만의 함수가 아니라 하류 수위에도 의존하므로 상류 및 하류에서 수위를 동시에 측정해야 한다.

1.1 사각위어

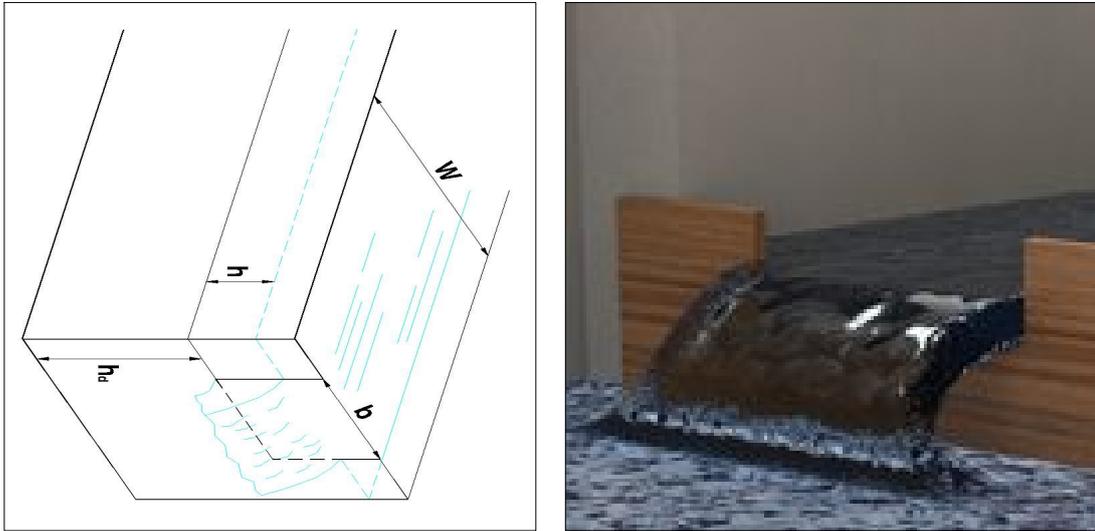


Fig. III-1. Rectangular weir

1) 板谷·手島の 공식(1951)

이 공식은 1951년 板谷·手島가 Rehbock의 전폭위어에 대한 식을 수정한 것이데, 측면수축의 영향을 가미하고 많은 학자들의 실험값을 써서 만든 것이다.

$$Q = K_2 B H^{3/2}$$

$$K_2 = 1.785 \frac{0.00295}{h} + 0.237 \frac{h}{h_e} - 0.428 \sqrt{\frac{(W-B)}{h_d W}} + 0.034 \sqrt{\frac{W}{h_d}}$$

이 식의 적용범위는 $W = 0.5 \sim 6.3\text{m}$, $B = 0.15 \sim 5.0\text{m}$, $h_d/W \geq 0.06$, $h = 0.03 \sim 0.45\sqrt{B}(\text{m})$ 이다.

2) OKi의 식(1929)

이 공식은 물의 점성, 측면수축 및 접근유속을 고려하여 만든 것이며 실험결과

와 잘 일치한다.

$$Q = K_3 B h^{3/2}$$

$$K_3 = 1.839 \left[1 + \frac{0.0012}{n} \right] \left[1 - \frac{\sqrt{h/B}}{10} \left(1 - \frac{h/B}{10 h_d} \right) \right] \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Bh}{W(h + h_d)} \right) \right]^2$$

이 식의 적용범위는 $h \geq 0.02\text{m}$, $B > 0.15\text{m}$, $h/B \leq 1$, $h_d \geq 0.3\text{m}$, $W - B > 3h$ 이다.

1.2 전폭위어

1) 수정 Rehbock의 공식(1951)

이 공식은 예전부터 써온 Rehbock의 공식을 1951년 석원·정전이 보정한 것인데, 공식에 $(1+\varepsilon)$ 의 보정을 한 공식이다.

$$Q = K_1 B h^{3/2}$$

$$K_1 = \left(1.785 \frac{0.00295}{h} + 0.237 \frac{h}{h_d} \right) (1 + \varepsilon)$$

ε 는 h_d 가 1이하일 때는 $\varepsilon=0.1$ 이상일 때는 $\varepsilon=0.55(h_d-1)$ 이 식의 적용범위는 $B \geq 0.5\text{m}$, $h_d=0.3 \sim 0.25\text{m}$, $h=0.03 \sim h_d$, 여기서, h 는 0.8m 이하이며, $h \leq B/4$ 이다.

2) Bazin의 공식(1865)

이 공식은 수로측면의 영향으로 인한 흐름 단면의 수축이 없는 위어일 경우 사용한다.

$$Q = \frac{2}{3} CL \sqrt{2g} H^{3/2} = C' LH^{3/2}$$

$$C' = \left(1.794 + \frac{0.013}{H} \right) \left[1 + 0.55 \left(\frac{H}{H + P_w} \right)^2 \right]$$

여기서, P_w 는 위어 상류 하상으로부터 위어 정점부까지의 높이를 나타내며, $0.09\text{m} < H < 0.52\text{m}$, $0.24 < P_w < 1.13\text{m}$, $0.5\text{m} < L < 2.0\text{m}$ 이다.

1.3 광정위어

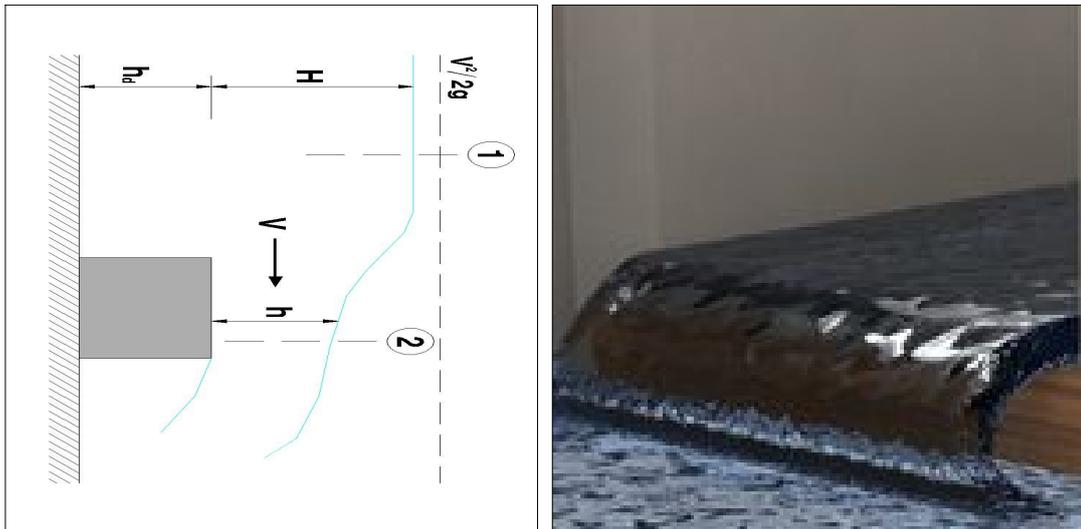


Fig. III-2. Broad-crested weir

1) 광정위어 식

이 공식은 하천 유량측정 지침에 제시한 공식이며 흐름 방향으로 상당한 길이를 가지는 배수 구조물로서 위어 상에서 한계 수심이 발생하도록 함으로 유량을 측정 할 수 있다.

$$Q = C_D \sqrt{(g)} b H^{3/2}$$

또는

$$Q = C_V C_D (2/3)^{3/2} \sqrt{g} b h^{3/2}$$

여기서, H는 총수두이며, h은 측정수두, C_v는 다음과 같은 표에서 구할 수 있다.

Table III-1. Correction factor of C_v

C _D bh/A	C _v
0.1	1.003
0.2	1.010
0.3	1.020
0.4	1.039
0.5	1.057
0.6	1.098
0.7	1.146
0.8	1.217

C_D값은 다음 조건에 따라 정하며, $0.08 \leq h/L \leq 0.33$ 이고, $0.18 \leq h/h+P \leq 0.36$ 이면 C_D=0.848이다. 그 외 조건은 다음 표를 보는 바와 같이 유량계수 C_D에 보정값 F를 곱하여 유량 계수를 결정한다.

Table III-2. Correction factor of $C_D(F)$

h/L	h/h + h _d			
	0.600	0.500	0.400	0.350
0.35	1.509	1.032	1.011	1.001
0.40	1.602	1.035	1.014	1.002
0.45	1.066	1.040	1.018	1.007
0.50	1.074	1.047	1.025	1.014
0.60	1.094	1.068	1.044	1.034
0.70	1.120	1.092	1.070	1.058
0.80	1.144	1.115	1.093	1.080
0.95	1.152	1.123	1.101	1.089

2) Govinda Rao의 식(1963)

이 공식은 1963년 Govinda Rao · Muralidhar가 $0 < h/L \leq 2$, $0 < h/h_d < 1$ 범위에서 직사각형단면의 위어에 관한 유량측정 자료를 통하여 유량계수 K에 관한 식을 제시하였다.

$$Q = K_{4 \sim 7} B h^{3/2}$$

$$0 < h/L \leq 0.1 = K_4 = 1.642(h/L)^{0.022}$$

$$0.1 \leq h/L \leq 0.4 = K_5 = 1.552 + 0.083(h/L)$$

$$0.4 \leq h/L \leq (1.5 \sim 1.9) = K_6 = 1.444 + 0.352(h/L)$$

$$(1.5 \sim 1.9) \leq h/L = K_7 = 1.785 + 0.237(h/W) \text{이다.}$$

일반적인 하천의 유량측정방법은 하천 횡단면의 유속측정에 의한 방법으로 하지만 하상의 위어를 설치하여 월류수심을 측정하고 위어공식에 적용하여 구하는 방법도 있다. 위어의 종류는 직각, 3각위어, 4각위어, 전폭위어 등이 있으며, 하천 횡단면의 유속측정에 의한 방법은 유수단면에서 정해진 간격으로 배치된 측정점에서의 유속을 측정하고 유수단면적을 곱하여 유량을 구한다. 유속측정 측정기 종류는 접촉식 유속계의 종류는 회전식 유속계, 전자기식 유속계, 또한, 비접촉식 유속계는 전자파 표면 유속계, 영상 표면 유속계 등을 사용하거나, 홍수시 부자를 띄어 그 속도를 측정하여 구한다.

2. 계측기에 의한 유속 및 유량측정법

2.1 유속 계측기

1) Flowmate

Flowmate(Flow Meter)는 1974년에 소개된 실증된 전자기 센서이며, 유속을 순간적으로 읽어낸다. 전도체가 자기장을 가로질러서 움직이면, 전도체의 이동속도에 비례하여 전압이 발생한다는 Faraday의 전자기 유도법칙을 이용한 것으로서 전자기 유속계 센서의 전면으로부터 흐름이 센서에 접근할 때 자기장, 흐름의 방향, 그리고 전압은 상호 수직하게 된다. 센서는 자기장을 만드는 전자기 코일을 가진 기구로 카본 전극 부분은 운동자의 속도에 의해 만들어진 전압을 측정하며, 여기에서 운동자의 속도라고 하는 것은 흐르는 유체를 말한다. 전자기 유속계는 기존의 회전식 유속계와 비교해서 가동 부분이 없고, 관측치는 직접 디지털 값으로서 읽어 낼 수가 있다.

또한, 전자기식 유속계는 휴대가 간편하고 측정이 용이하다는 장점을 지니고 있으며, 조정가능모드는 일정 시간이나 또는 설정된 기간 평균값을 조정이 가능하며, 자료저장, 재생기능이 있다. 재생기능은 현장작업시 19개 자료 기록재생이 가능하다. 평균값 자가점검 기능과 바 그래프로 화면을 표시도 가능하다. 그러나

전자기 유속계는 검출기의 위치에 따라서 자기장 분포가 변형되어 오차를 만들기 때문에 실제 현장 사용에 있어서는 주의가 필요로 하며, 이와 같은 자기장 분포의 변형에 의한 오차를 막기 위해서는 유속계 아랫부분의 하상으로부터 15cm 이상 떨어져야 하고 수면에서 최소 5cm 이상 잠기도록 해야 한다. 그러므로 실제 측정에서는 1점법의 경우 50cm 이상의 수심의 필요하고 2점법에서는 1m 정도의 수심이 필요하게 된다. 하천에서 사용할 경우 검출기를 정확하게 흐름 방향과 일치시키는 것이 어렵게 때문에 어느 정도 각도의 어긋남은 피하기 어렵다. 이 때문에 검출기와 흐름이 이루는 각에 의해 오차가 발생하며, 이에 따라 수 %의 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 측정 유속이 실제 유속값과 일치하는지를 정기적으로 검정을 하여야 하고 이들 관계가 적정하다는 것을 확인하고 사용해야 한다.

그리고 유속 측정시 초기에 이상치가 발생한 가능성이 크므로 유속 값이 안정된 후 측정해야 한다는 것이다.



Fig. III-4. Site measurement using flowmate

2) ADC

ADC의 도섭봉은 가능한 흐름에 대한 저항이 적고, 취급이 용이한 원형 단면의 봉이 이용된다. 이 도섭봉의 바닥판을 하상에 놓고 눈금이 새겨진 주지지봉의 보조지지봉을 상·하로 이동하면서 ADC의 디스플레이 스크린에 수심을 보면서

0.6d에 위치하게 하여 유속을 읽어 낼 수가 있다. 또한 ADC의 기능 중 횡단면을 미리 입력을 시켜 유속을 관측하면 총 유량으로 계산하는 프로그램이 있으며, PC에 USB 연결 케이블로 연결하여 File를 전송이 가능하다. ADC의 유속 측정 범위는 $-0.2 \sim 2.4\text{m/s}$ 이며, 수심은 $0 \sim 5.0\text{m}$ 로 Flowmate 보다 3배 이상의 수심에서 측정이 가능하며, 정확도는 $\pm 1\%$ 로 정확한 유속을 측정이 가능한 유속계이다.



Fig. III-5. Site measurement using ADC

2.2 유량 계측기

기저유출의 측정규정이 정해지지 않아 지표유출 유량관측 기준으로 하여 유량 관측을 실시하였다. 지표유출의 기준은 유량자료를 획득하기 위해서는 원칙적으로 해당 관측소에서 홍수, 평수, 저수시에 수위를 정확하게 유량으로 계산할 수 있는 최적의 수위-유량 관계를 작성하여야 한다. 따라서 가능하면 모든 수위에 걸쳐 유량을 측정함으로써 가장 정확한 유량을 생산할 수 있도록 해야 한다. 우리나라 하천 설계 기준은 “저수 유량 측정과 같이 정기적인 측정은 연간 36회 이상을 측정하되 계절이나 순별로 하여야 한다.”라고 제시되어 있다.

또한 우기에는 수시로 현지에 나가 가능한 한 매시 측정을 시행해야 하며, 큰

홍수 유출시 뿐만 아니라 중간 규모 홍수의 유출시에도 실시하여야 하고 홍수의 증수기 뿐 아니라 감수기에도 실토록 해야 한다”고 규정되어 있다.(한국수자원 학회, 2002) 외국의 일본인 경우는 연간 33회 측정을 하고 있으며, 미국과 ISO의 경우에는 연간 횡수를 규정하고 있는 우리나라와 일본의 사례와 달리 하상의 수리 특성을 고려하여 주기적인 유량관측을 시행할 것을 규정하고 있다.

즉, 주기적인 유량측정에 의하여 통제의 전이를 검증하도록 규정하고 있다.(한국건설기술연구원, 2004).

1) ADCP

ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용한 유량 측정 방법은 1980년 말부터 하천 유량 측정에 도입된 계측기 이며, ADCP는 비접촉식으로 3차원 유속과 수시자료를 매우 효율적이고 빠르게 측정하며 그 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 속도측정방법과 비교하면 매우 세밀하다. ADCP를 활용한 유량관측은 현존하는 유량 관측 기법 중 매우 정확한 기법으로 알려져 있으며 미국의 경우 지리조사국(USGS)에서의 약 57%의 유량관측소에서 수위-유량 곡선 구성을 선박, 케이블, 교량 등에서 실시한 ADCP 관측을 통해 이루어지고 있으며 그 비중은 계속 높아지고 있다.(Muste 등, 2007)

기계식의 프로펠러미터가 하천의 한 지점에서의 유속을 제한적으로 측정하는 반면에 ADCP는 선박에 장착해 횡단 운항함으로써 하천 단면의 수천 혹은 수만 지점에서 3차원 유속을 매우 신속하게 측정하여 제공한다. ADCP는 20~30° 정도의 기울어진 3~4개 빔을 기하학적으로 위치시키고 약 200KHz ~ 3MHz 분포의 초음파를 발생시켜 하천의 부유물질에 반사된 음파의 도플러 편차를 이용하여 주어진 깊이(2~100cm) 단위로 빔 진행방향의 유속을 측정하고 각각의 빔에서의 유속을 수학적으로 전환하여 3차원 유속을 측정한다.(RDI, 1996; SonTek, 2000). 또한, 각각의 빔에서 부가적으로 수심 정보도 제공하며, 본 연구에서는 ADCP 중 SonTek 사의 RiverSurveyor M9이 사용되었다.

RiverSurveyor M9은 다양한 ADCP 기기들 중 저수심과 고수심 모두에 사용하도록 설계되었고 수심측정기를 별도로 장착한 9개의 빔으로 구성되어있다. ADCP의 유속 측정 가능 수심은 40m이고 유속은 최고 20m/s까지 깊이방향으로

최소 2cm부터 최대 4m 마다 3차원 유속을 측정이 가능하다.(SonTek, 2010). ADCP는 일반적으로 소형 선박에 탑재되어 교량 등을 활용하여 하천을 횡단하여 단면의 상세 유속 및 수심을 측정한 후 소프트웨어를 이용하여 유량을 계산한다.



Fig. III-6. Site measurement using ADCP

Table 1. Technical data of flow meter

기기명(모델명)	측정항목	제조사	측정범위	정확도
Flowmate (Model 2000)	유속	Marsh-McBirney(1990)	-0.15 ~ 6m/s	±2%
ADC	유속	OTT	-0.2 ~ 2.4m/s	±1%
ADCP (Riversurveyor M9)	유속 유량	SonTek(2011)	±20m/s	±0.5%

3. 유속-면적법에 의한 유량산정법

유속-면적법에서 유량은 하천단면 소구간의 면적과 각 소구간의 유속을 곱한 구간 유량의 합으로 구해진다. 유량 계산 방법은 크게 산술계산법, 등유속선법, 수심-유속 적분법으로 나눌 수 있으며, 산술계산방법으로는 중간 단면법과 평균 단면법이 있다.

세계적으로 가장 많이 사용되는 유량 계산방법은 중간단면법이며, 이 방법이 평균단면법보다 정확한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에는 중간단면법을 사용하여 기저유출량을 산정하였다.

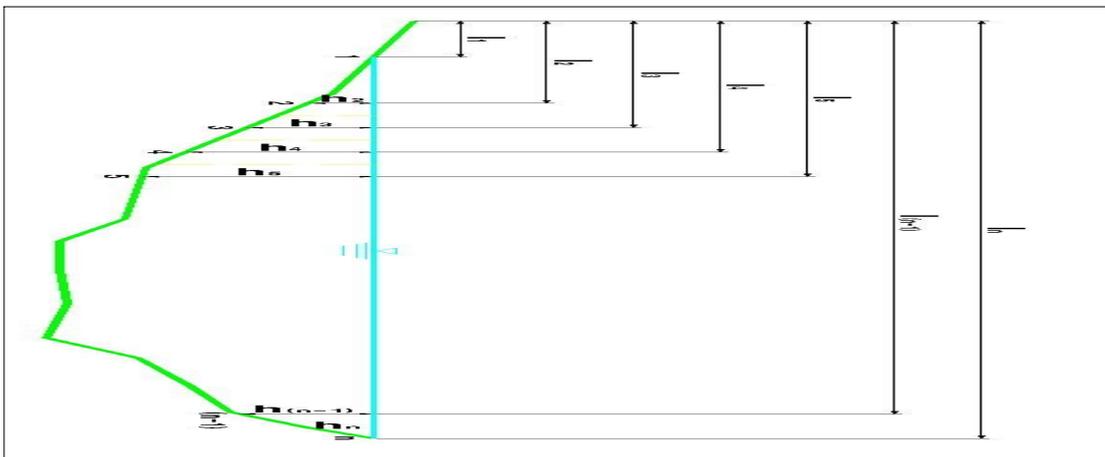


Fig. III-7. Flow calculation by mid-section method

3.1 중간단면법

중간단면법은 유속과 수심의 변화가 직선이라는 가정아래 각 소단면에서 유량은 수표면을 따라 측정된 소단면의 수면 폭을 유속과 수심을 곱하여 계산하는 방법으로써 이 수면 폭은 인접한 측선에서 계산되는 측선까지의 폭의 반과 다음 측선까지 폭을 반을 더한 합으로 계산한다. 따라서 처음과 마지막에 측정된 측선은 중간단면법이 계산에 활용될 경우 가능한 하안과 가깝게 측선을 배치해야 한다.

변형 중간단면법은 중간 단면법의 한 형태로서 유속 및 수심 측선의 중간에 수심을 추가하여 측정하는 방법이다. 서로 인접하는 2개의 수심 측선 간은 사다리꼴로 면적을 구한다. 1개의 유속 측선이 담당하는 단면적은 이것과 서로 인접한 양측의 유속 측선과의 각각의 중앙까지로 하며, 이 방법은 수심이 보다 정확하게 측정되면 유량측정 결과보다 정확할 것이라는 가정에서 기인한 것이다.

$$Q = \sum q_i \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \quad \text{또는} \quad Q = \sum \bar{V}_i d_i \frac{b_i + b_{i+1}}{2}$$

3.2 평균단면법

단면은 각각 두 개의 인접한 측선으로 경계를 이루고 있는 여러 개의 소단면들로 부터 구성되어 있는 것으로 간주한다. 각 소단면에 대해 반복 계산되며 전체 유량은 각 소단면의 유량을 더 해서 구할 수 있다. 위의 식에서 제방과 측선 간 소단면에서의 추가 유량은 제방에서의 유속과 수심이 0이라는 가정 하에서 유량을 계산할 수가 있다. 하지만 이 유량이 전체 유량에 대해 중요한 비율을 차지하고 있다면 다음 식에 제시된 방정식을 제방 영역에서의 평균유속을 계산하는데 사용이 가능하다.

$$V_x = V_a \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{1}{m}}$$

IV. 연구대상 유역 기초현황

1. 연구대상 유역

자연발생적인 하천의 형상은 수많은 세월을 거치면서 형성된 것으로서 일반적으로 하도의 평면형은 자연하천의 사행특성을 다루는 수리 기하학적 평면을 나타내고 있으며, 오랜 기간동안 세굴과 퇴적을 통해 형성되는 하도는 하천사행 특성과 저수로, 하안침식 등을 나타내며 하천사행의 변화는 단기간에 형성되는 사항은 아니며 다년간 걸친 홍수로 인해 만곡 외측으로 세굴이 진행되어 하도의 굴곡을 형성되었다.

제주도의 하천은 한라산 정상부를 중심으로 발산하고 있으며, 악근천은 한라산 서쪽능선에서 발원하여 남류하다가 1115번 도로를 지나 우안으로 지방하천인 영남천, 세초천을 합류한 후 강정동 해안으로 유입되는 지방하천으로 동경 126° 29' ~ 126° 32', 북위 33° 13' ~ 33° 20' 사이에 위치한다.

하상경사는 비교적 급경사를 이루며, 상류는 유로 전체에 표면수가 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출 등으로 인하여 유수를 형성하고 있으며 하도 내에 공작물 등이 설치되어 하천이 옛 모습을 상실하고 있는 실정이며, 하천이 제방축조 후 제방의 안전을 위해 사면 하단부에 세굴방지 시설을 설치하여 인위적인 유로변경 외에는 자연적인 변화가 점차 감소하고 저수로의 유심부만이 변화하고 있다.

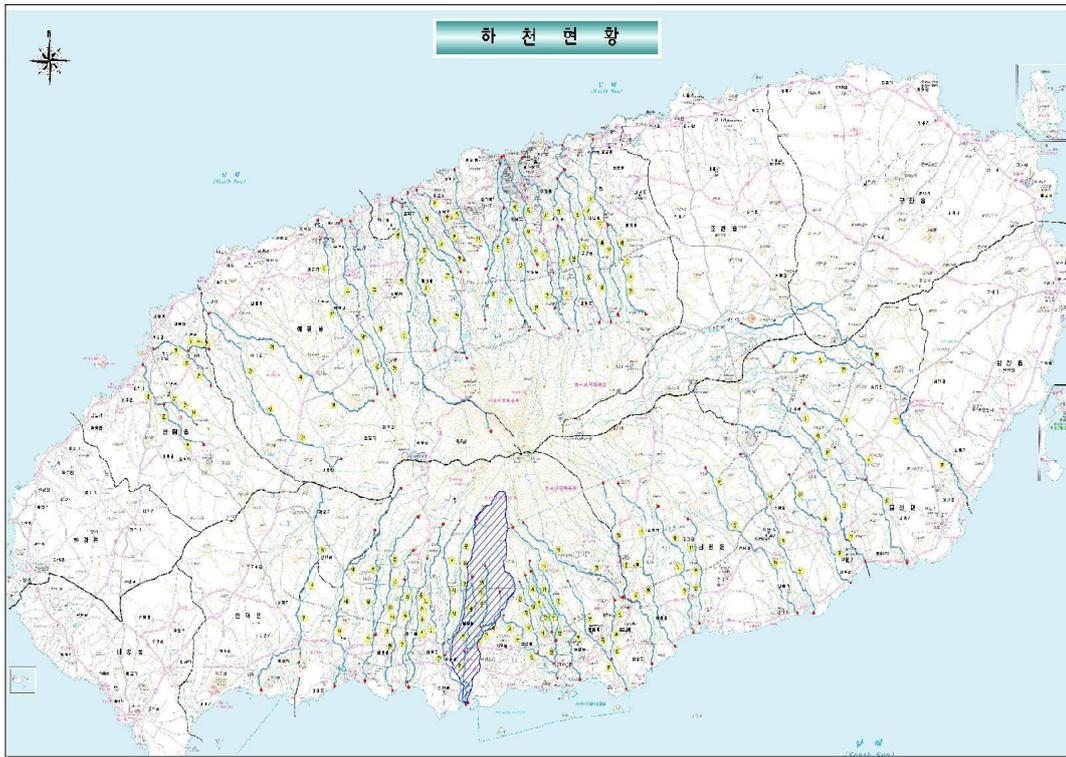


Fig. IV-1. Basin for the study

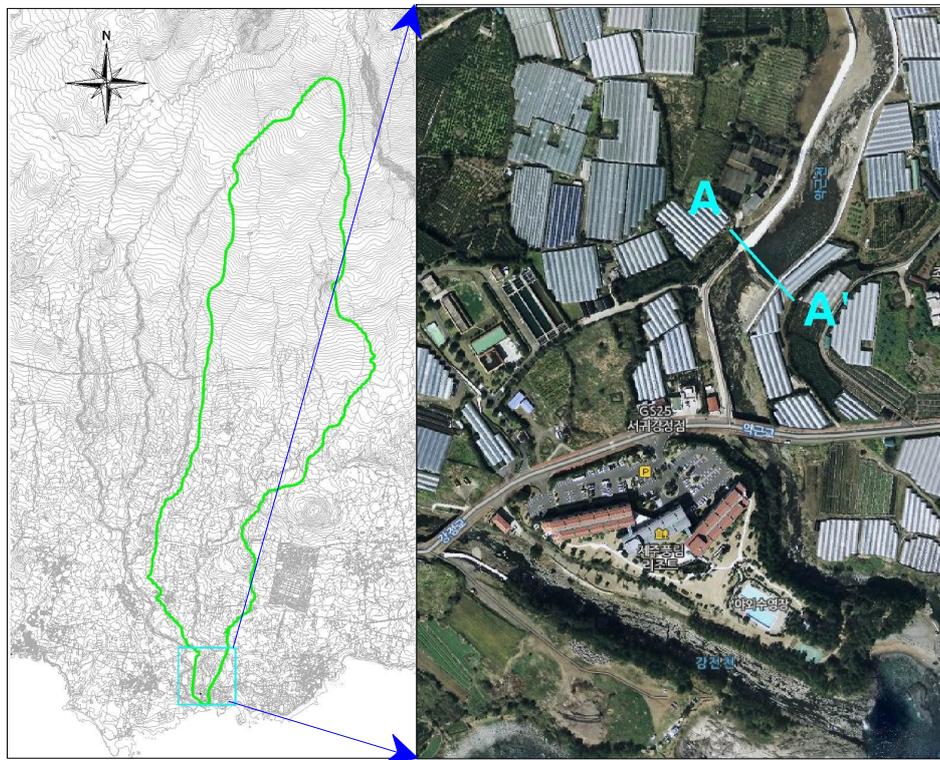


Fig. IV-2. Observational locations and topographic map

Table IV-1. Present status of Stream watershed

하천명	수 계		하천의 구간		하천 연장 (km)
	본 류	하천등급	기점	종점	
악근천	악근천	지방하천	서귀포시 강정동 52번지선	서귀포시 강정동 1541번지선 해안	9.00

2. 유역 및 지형 특성

유역의 평면특성은 하천의 유출특성이며, 유출규모를 파악하는데 중요한 인자로써 유역면적, 유로연장, 유역 평균 폭 및 형상계수 등이 하천을 이해하고 유역의 수문사항을 분석하는데 있어 매우 중요한 요소이다.

유역의 형상계수는 유역의 형태를 나타내는 무차원 수치로서 형상계수가 1.0에 가까울수록 유역의 형상은 정방형에 근접하며, 형상계수가 클수록 유출의 집중성향이 매우 크므로 침투홍수량이 크게 발생한다. 하지만 형상계수가 작으면 유출의 집중성향도 약해져서 침투홍수량이 비교적 적게 나타날 것으로 예측 할 수 있다.

하천밀도는 본류와 지류를 포함한 전체 하천의 총 길이를 유역면적으로 나눈 값이며 유역내의 지류가 많고 적음을 정량적으로 나타낸다. 연구지역 내의 하류 부하천의 대한 유역면적, 유로연장, 유역평균 폭, 형상계수를 구하였다.

Table VI-2. General characteristics of basin

하 천	유역면적 A(km ²)	유로연장 L(km)	유역평균 폭 A/L	형상계수 A/L ²
악 근 천	23.51	12.11	1.95	0.16

2.1 하도의 평면형

하천은 평면 형태에 따라 직류하천, 사행(곡류)하천, 다지(망상)하천으로 구분된다. 직류하천은 상당한 길이의 하천구간에 걸쳐 곡선하도가 없고 직선하도가 계속되는 하천을 말하며, 사행(곡류)하천은 상당한 길이의 하천구간에 걸쳐 하도가 곡선을 이루는 하천이고, 다지(망상)하천은 하천경사가 급하고 하천수심은 얇은 여러 줄기로 구성된 하도망을 말한다. 이러한 관점으로 볼 때 연구대상의 하천은 사행(곡류)하천의 형태를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

유수의 흐름에 의해 발생하는 유수력은 상대적으로 낮고 연약한 부분을 따라 흐르게 되며, 이로 인해 자연스럽게 하천평면형이 형성되고 이는 시간이 경과함에 따라 사행현상을 유발하면서 흐르게 된다. 따라서 하도의 사행현상은 하도의 평면형을 결정짓게 되고 만곡현상이 진행되어 불필요한 치수상의 문제점을 발생시키는 원인이 되기도 한다. 이러한 사행을 나타내는 특성분석은 사행과장, 하천만곡도, 하천형상계수, 사행경사 등이 있으며, 하천만곡도를 분석하였다.

하천만곡도(Tortuosity)는 어떤 하천 전체 하천연장 중에서 얼마만큼의 만곡부를 포함하고 있는지를 표시하는 척도로서 다음과 같은 식으로 산출한다.

$$T = \frac{L_m}{L}$$

여기서, T는 하천만곡도, L_m 은 만곡부의 하천연장, L은 전체 하천연장이다.

Table IV-3. Plane figure of basin

하 천	하천연장 (m)	만곡부 하천연장 (m)	만 곡 도	비 고
악 근 천	9,000	2,134	0.257	

2.2 유역 지질 및 토양

제주도는 순상화산에서 볼 수 있는 Aspite 화산으로 지질은 1,950m의 섬 중앙에 위치한 한라산과 기생화산에서 용출된 화산용출암으로 현무암류, 조면암류, 조면암질안산암류, 기생화산용출물 및 화성쇄소퇴적암류와 사구로 구성되어 있으며, 현무암류는 감람석, 휘석, 현무암을 기저로 하여 침상장석 감람석현무암 반상휘석 현무암, 비현정질현무암등이며 이들이 제주도 전체 면적의 95%이상의 분포를 보이고 있다. 본 연구의 유역의 지질은 대부분 장석현무암과 반상휘석 현무암 및 조면암으로 구성되며, 신다콘, 조면안산암, 테러스, 신양동층등이 산재해 있다.

상류부의 표고 약 400m이상은 주로 장석현무암으로, 중·하류부는 반상휘석현무암으로, 하류부는 장석현무암 및 조면암으로 분포도를 보이고 있으며 각 하천 유역 내에 여러군데의 신다콘이 형성되어 있다. 또한, 유역의 토양특성은 강우로 인한 유출과정에 직접적인 영향을 미치고 토양의 성질에 따라 침투능이 상이하므로 총 강수량중 직접유출로 유하하는 유효수량의 크기에도 영향을 주는 중요한 인자이다. 본 연구는 현 토양에 맞는 토양 특성치를 정확하게 산정하기 위하여 농촌진흥원청 토양물리과에서 제작한 정밀토양도(1/25,000)를 이용하여 토양의 종류를 고려하였다.

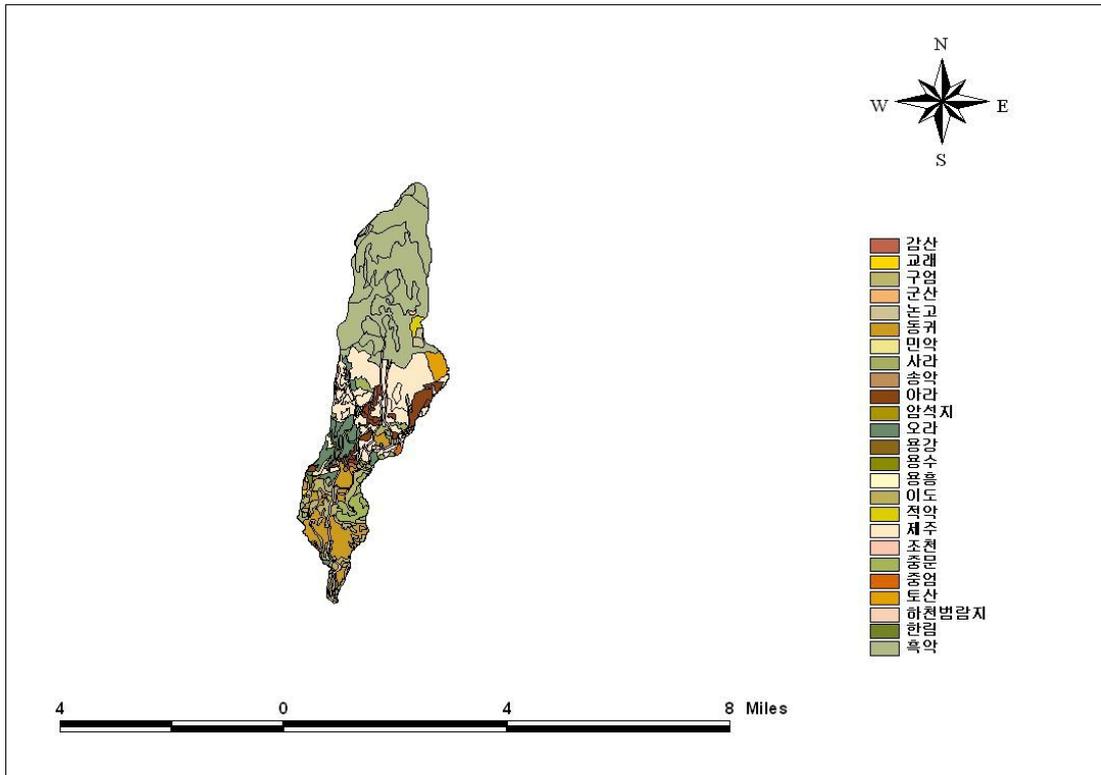


Fig. IV-3. Soil map of basin to be studied

Table IV-4. Rate and dimension by soil series at the basis

토양통	면적(km ²)	비율(%)
감산	0.104	0.44
교래	0.043	0.18
구업	1.491	6.34
군산	0.024	0.10
논고	0.136	0.58
동귀	2.073	8.82
민악	0.060	0.26
사라	0.177	0.75
송악	0.036	0.15
아라	1.038	4.41
암석지	0.021	0.09
오라	1.325	5.64
용강	0.125	0.53
용수	0.015	0.07
용흥	0.051	0.22
이도	0.128	0.54
적악	0.141	0.60
제주	4.450	18.93
조천	0.014	0.06
중문	1.083	4.61
중업	0.048	0.20
토산	0.367	1.56
하천범람지	0.906	3.85
한림	0.042	0.18
흑악	9.613	40.89
합계	23.51	100.00

악근천의 토양의 종류를 분류하였다. 흑악의 토양이 9.619km²으로 면적의 40.6%를 차지하여 악근천 유역의 토양 중 가장 많이 차지하는 것으로 조사 되었 으며, 제주는 4.456km²으로 전체의 18.8%를 차지하는 것으로 조사되었다.

2.3 유역 토지이용 현황

약근천의 토지이용은 현황은 다음 <표 IV-6>와 같으며 산림지가 15.60km²으로 면적의 66.36%를 차지하며 초지 1.13km²으로 전체의 4.80%를 차지하는 것으로 조사되었다.

Table IV-5. Ground coverage state at the basin

구 분	총면적	과수원	산림지	시설용지	주거지	초지	밭	기타
약근천	23.51	5.38	15.60	0.15	0.03	1.13	0.41	0.40

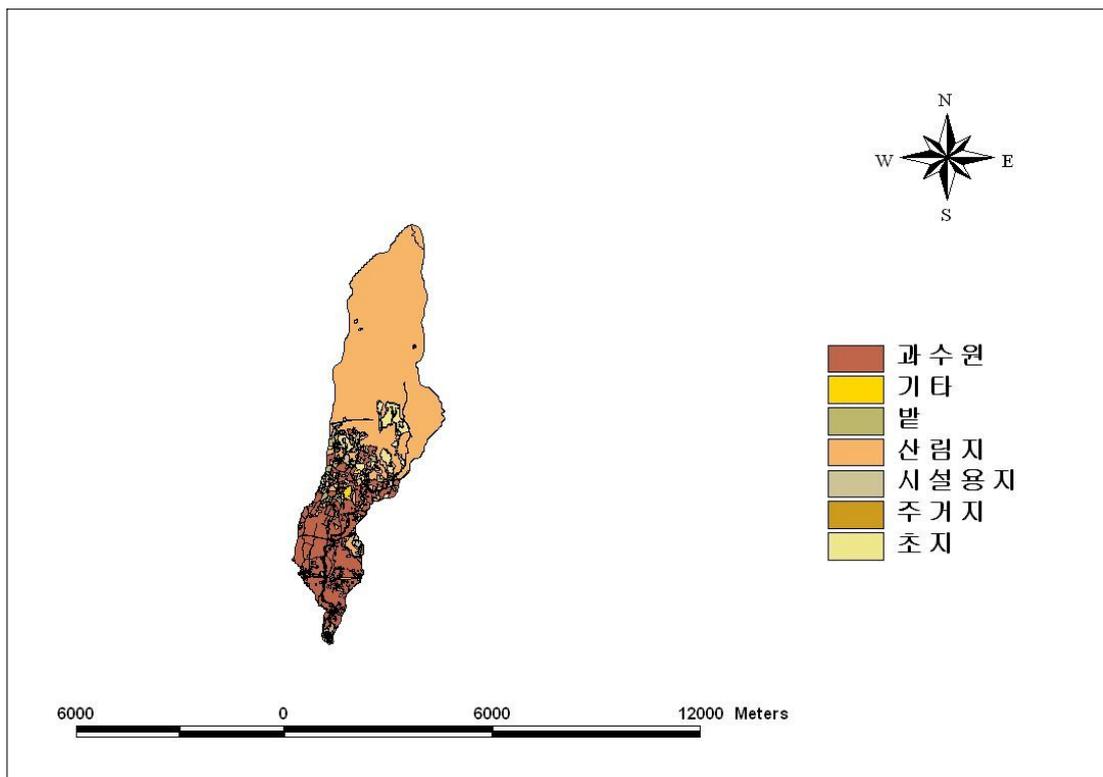


Fig. IV-4. Land-cover map of basin

3. 유역의 입체적 특성

유역의 입체적 특성 결정 인자로는 하천경사, 유역경사, 표고별 면적분포 등으로 유출특성, 특히 홍수의 도달시간을 결정하는 주요인자로 NGIS 수치지도를 이용한 Arcview 모형의 수치표고(DEM) 분석으로 산정한 하천의 입체적 특성은 다음과 같다.

표고별 면적분포는 고도에 따라 변하는 강우, 증발, 식생, 수문사항 등에 영향을 미치는 인자이다. 따라서, 표고별 면적분포를 구하였다.

Table IV-6. Altitude analysis chart of the basins

표 고	면적(km ²)	비율(%)
<200m	5.46	23.15
<400m	5.86	24.84
<600m	3.57	15.17
<800m	3.29	13.98
<1000m	2.72	11.58
<1200m	1.64	7.01
<1400m	0.73	3.17
<1600m	0.24	1.10
<1800m	0.00	0.00
<2000m	0.00	0.00
합계	23.51	100.00

3.1 유역 평균고도

유역의 평균고도는 교점법에 의거하여 구하며 교점법은 유역의 지형도를 촘촘한 눈금의 그래프용지를 덮고 눈금과 일정한 간격으로 교차되는 점의 등고선에 대한 고도의 누계를 구한다음 그 교점의 수로 나누면 유역의 평균고도가 된다.

$$h_m = \frac{\sum h}{\sum N}$$

여기서, h_m 은 유역의 평균고도, h 는 그래프선과 교차되는 등고선의 고도, N 은 그래프선과 등고선의 교차점이다. 악근천의 평균고도는 629.308m이다.

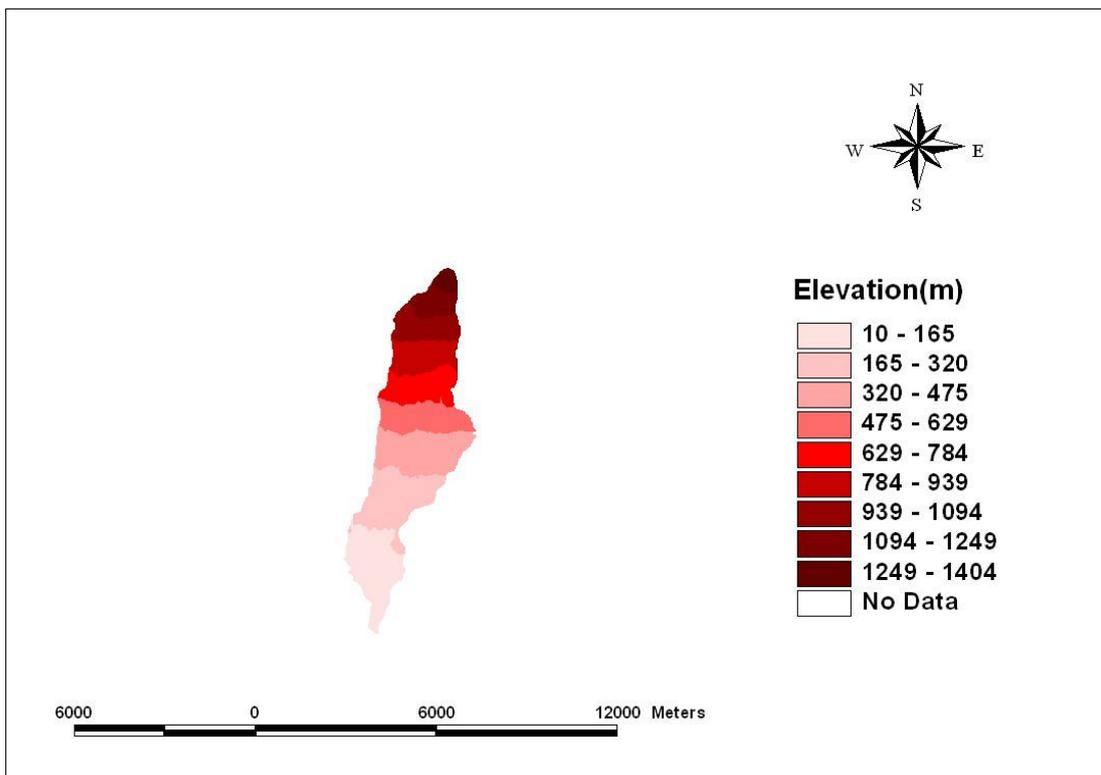


Fig. IV-5. Altitude analysis map of the basins

3.2 유역 평균경사

유역의 평균경사는 유출, 토사의 침식등과 관계가 깊은 인자로서 연구 대상 지역에서는 Horton의 방법으로 유역의 평균경사를 구하였으며, Horton의 방법은 해당 지역의 지형평면도를 매우 촘촘한 눈금의 그래프용지로 덮고 고도차 Δh 인 등고선을 기입하고 등고선과 그래프 선과의 교점을 표시한 후 그 교점의 총수를 N 이라하면, 서로 인접한 등고선사이에 끼는 그래프선의 선분 수는 N 개가 된다. 또한 이들 선분의 길이를 l 이라 하고 이 선분과 등고선 사이의 각을 a 라 하면 등고선 간격은 $l \sin a$ 이다. 그러므로 등고선의 수평거리 $d = \frac{1}{N} \sum l \sin a$ 가 된다. Horton은 N 을 충분히 많이 취하면 a 는 0° 에서 90° 까지의 균일하게 분포되어 있는 것으로 가정하고 $\sin a$ 을 평균하여

$$d = \frac{\sum l}{M} \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin a da = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sum l}{N} \text{ 을 얻는다.}$$

그러므로, 유역의 표면경사는 다음과 같이 표시된다.

$$J = \frac{\Delta H}{d} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta H \cdot N}{\sum l}$$

여기서, J 는 유역의 평균경사, l 는 등고선사이에 낀 선분의 길이, ΔH 는 등고선의 간격이며 약근천 유역의 평균 경사는 9.268%이다.

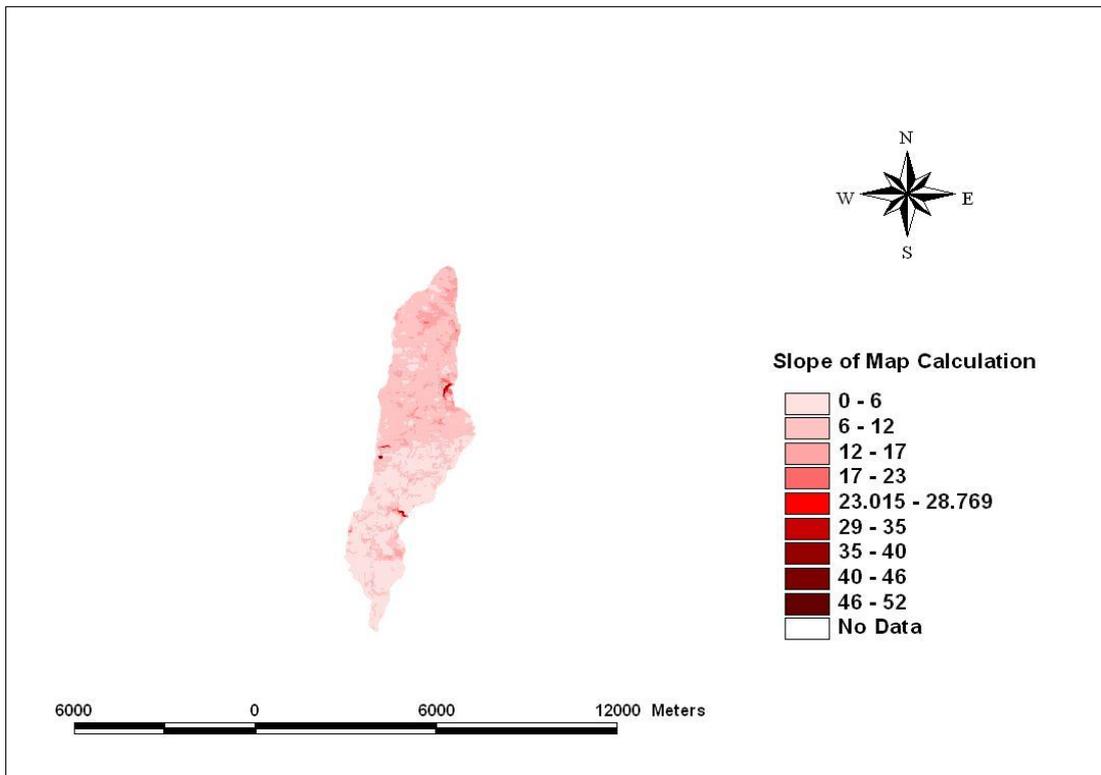


Fig. IV-6. Slope analysis map of the basins

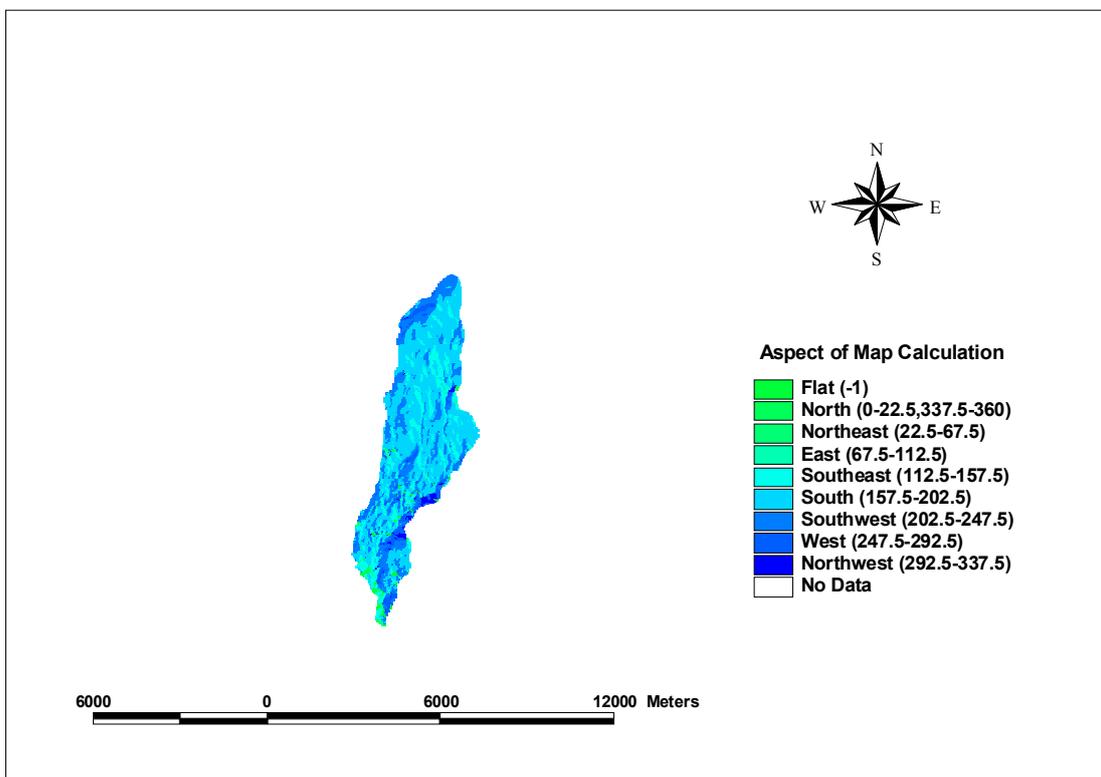


Fig. IV-7. Slope direction analysis map of the basins

4. 유역의 강우분석

제주특별자치도는 일반적으로 기후분류상 아열대기후대에서 온대기후대로의 전이지대에 위치하고 있다. 태양고도가 연중 높아 태양의 순복사량이 에너지 수지상 과잉이 시작되는 위도대이며 여름에는 태양의 북상으로 열대기단의 영향권에 들기도 한다.

주위의 해륙분포를 보면 지구에서 가장 넓은 태평양의 가장자리인 북서태평양 속에 있으면서 아시아 대륙에서 멀리 떨어져 있는 다습한 해양의 영향을 받고 있다. 일년내내 남서쪽에서 흘러드는 따뜻한 적도해류의 지류인 쿠로시아 난류의 영향을 받고 있으며 겨울에 북쪽에서 흘러오는 북한해류나 황해의 찬 연안류 같은 하류의 영향을 직접 받지 않는다고 볼 수 있다.

제주특별자치도 주변 해상의 해수면 온도는 위도권에서 거의 평행하여 남쪽으로는 갈수록 높아지는 경향이 있다.(국립수산진흥원, 1995) 지리적, 기후학적 원인으로 주로 난기단의 해양성 열대기단과 대륙성 열대기단의 영향을 받고 있으며 겨울철에도 북서쪽 대륙성기단의 직접적인 영향보다는 해양을 지나면서 약화되어 변질된 찬기단의 영향을 받고 있다. 봄과 가을에는 주기적으로 많으면서 남서몬순의 영향을 제일 먼저 받는 곳으로서 장마와 북상하는 태풍의 길목에 있기도 한다.

유역의 수문사항을 분석함에 있어 가장 기본적인 자료인 강우량을 측정하는데 관측소는 위치, 및 표고, 관측·자료년수 등을 종합으로 고려하여 선정하여야 한다. 또한, 최근에는 첨두홍수량이 최대가 되는 강우지속기간인 임계지속기간(critical duration)을 고려하여야 하며, 이를 위해서는 빈도해석에 충분한 시간강우량 자료의 확보가 필수적이다. 따라서, 강우 관측지점 중에서 본 연구를 수행하기 위한 강우량의 관측지점망은 제주도 유역에 가급적 균일한 공간 분포를 유지해야 한다.

통계적 자료 유의성 확보를 위해 2011 현재 10개년 이상의 자료를 보유한 지점, 단기간 분석 및 임의지속시간 강우분석을 위해 시계열(hourly time series) 자료가 획득 가능한 지점이며, 또한 유역 강우분석의 왜곡 가능성을 제거하기 위해

확률강우량 산정에 유의한 유역외 지점을 포함해야 한다. 위와 같은 기준으로 제주도유역의 강우관측지점을 검토한 결과 기성청관할 관측소 1개 지점(서귀포)과 AWS 관측소 2개지점(윗세오름, 하원)을 채택 자료로 선정하였다.

Table IV-7. Status of meteorological post of the basins to be studied

관측소	관측 종별	소재지	위 치		자료이용기간	표 고	관할청
			위도	경도			
서귀포	TM	서귀포시 서귀동 538	33° 30'	126° 31'	2000.1 ~ 2011.12	20.4	기상청
윗세오름	AWS	제주시 애월읍 광령리	33° 22'	126° 31'	2006.1 ~ 2011. 12	1,673.0	
하원	AWS	서귀포시 하원동	33° 17'	126° 27'	2002. 1 ~ 2011. 12	405.0	

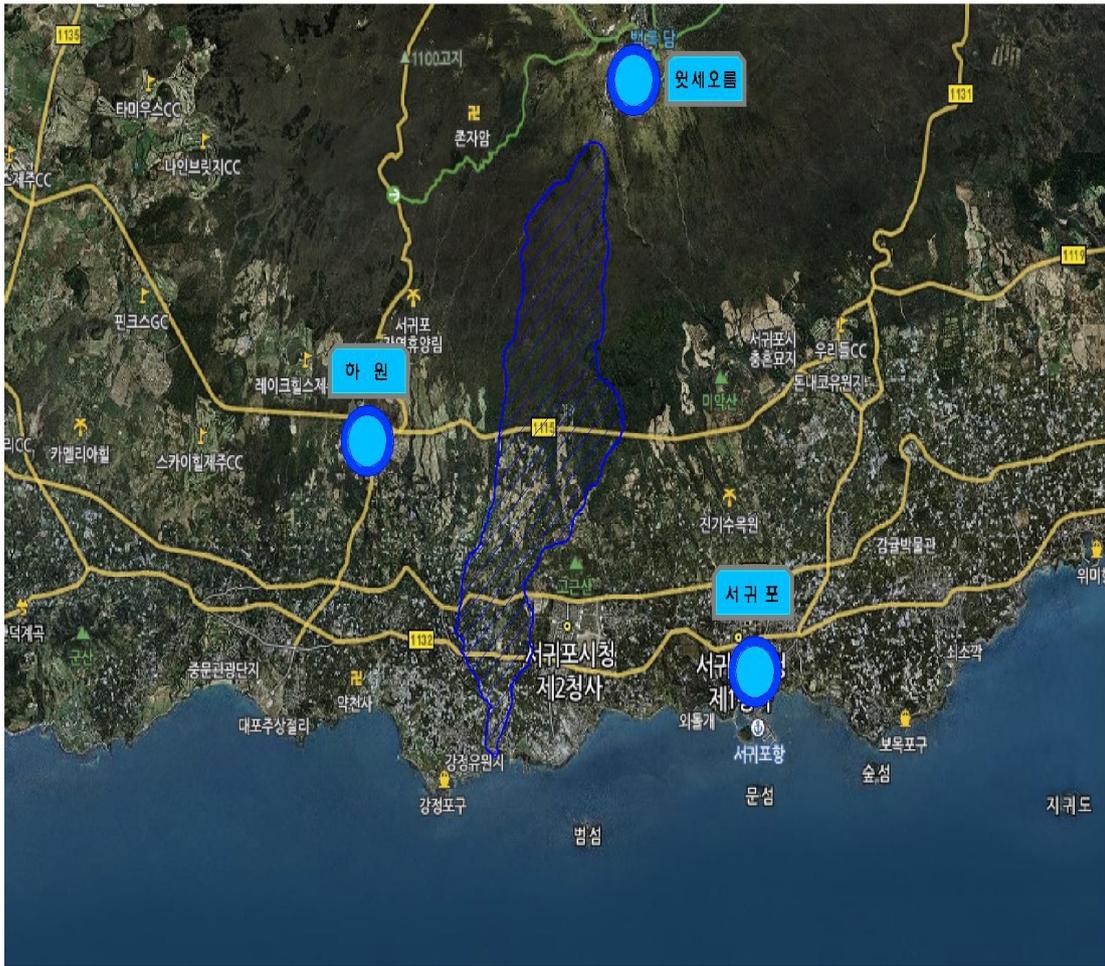


Fig. IV-8. Location of weather observatory

특히 기상청 AWS 관측소 2개소 중 10개년 이상 자료를 보유하지 않았으나 제주도 강우 특성상 한라산의 과업구간 종점부 유역에 미치는 영향이 커 한라산 정상부근의 AWS 관측소를 포함하였다.

4.1 연평균 강수량

연구유역 주변의 위치한 기상관측소의 강수량을 살펴보면 상류에 위치한 윗세오름 관측소는 2,581.6~7,562.0mm로써 하류지역인 서귀포, 하원 보다 2~3배 정도의 많은 강수량을 보이고 있고, 제주도는 연중 6월에서부터 8월 사이에 장마와

태풍 등의 영향으로 전체 연평균 강수량의 약 60%가 집중되는 현상을 보이고 있으며, 2000년부터 2011년까지의 월평균 강수량을 분석하였다.

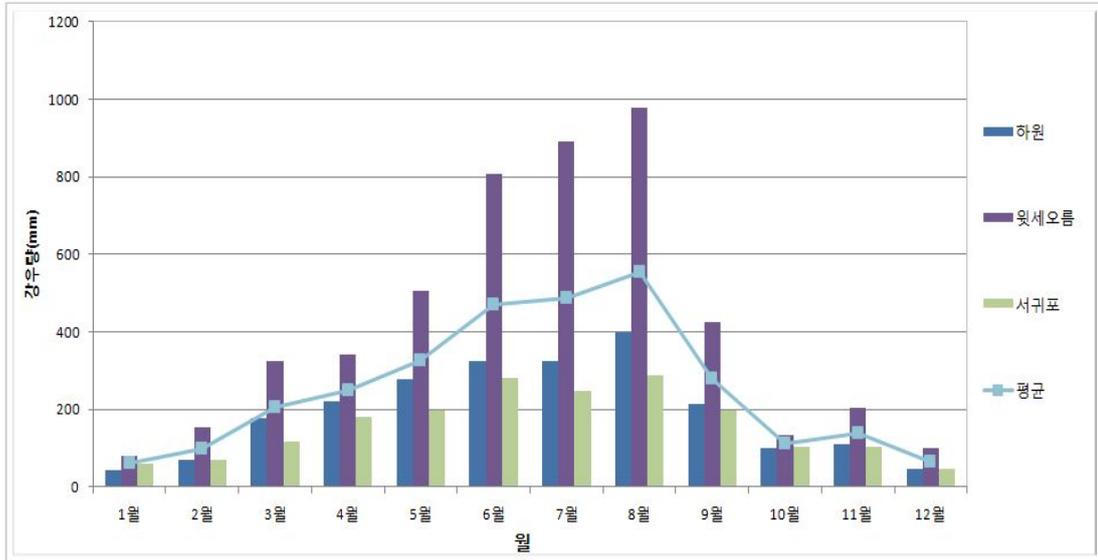


Fig. IV-9. Precipitation by month and by precipitation observatory

Table IV-8. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin

월평균	서귀포	윗세오름	하원	평균
1월	61.0	81.5	43.2	61.9
2월	69.1	153.3	71.1	97.8
3월	118.4	324.1	176.8	206.4
4월	179.8	342.8	221.4	248.0
5월	195.9	505.2	277.8	326.3
6월	280.7	806.8	324.9	470.8
7월	246.2	892.6	323.7	487.5
8월	289.0	977.7	397.2	554.6
9월	198.7	425.7	213.2	279.2
10월	102.1	134.3	98.6	111.7
11월	105.2	204.0	112.0	140.4
12월	46.7	99.2	47.1	64.3

4.2 연도별 강수량

최근 11년간 제주도 1개의 기상대와 2개의 AWS 관측소의 평균 강수량은 3,045.4mm 이다. 강수량이 많은 곳은 연구유역의 상류부에 위치한 윗세오름 관측소로 연평균 강수량이 4,947.1mm에 이른다. 하류부에 위치한 서귀포 기상대 연평균 강수량 1,882.4mm의 약 2배 이상의 강수량을 보인다. 상류부인 윗세오름 관측소는 과우년인 2008년도에 2,581.6mm, 다우년인 2010년도에 7,562mm로서 차이는 4,980.4(293%)로 매우 크게 나타나고 있다.

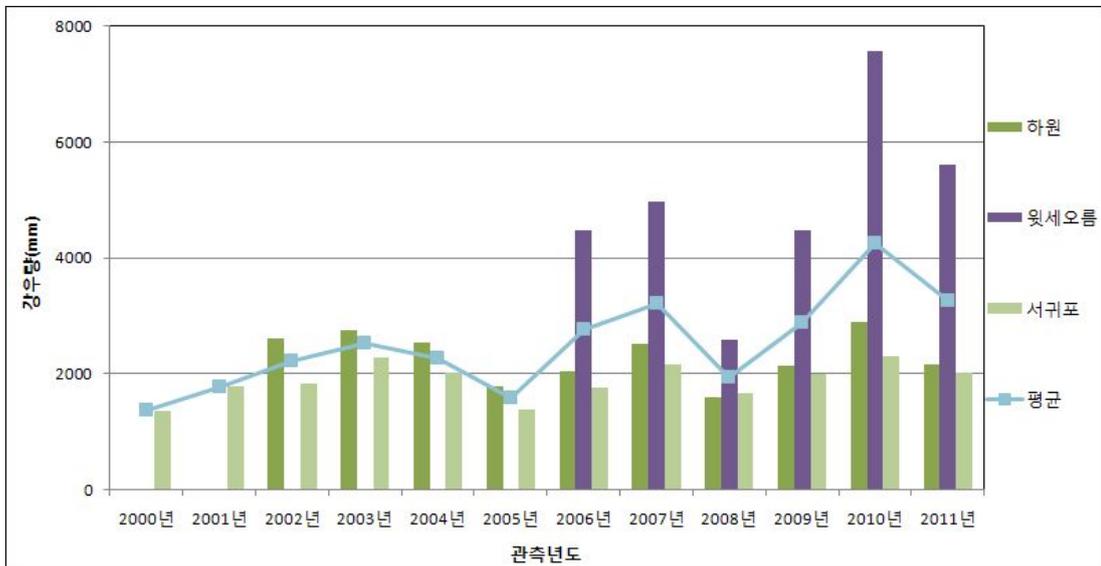


Fig. IV-10. Precipitation by year and by precipitation observatory

Table IV-9. Rainfall data by year of rainfall observatory at the basin

년 도	서귀포	하원	윗세오름
2000	1,368.5	-	-
2001	1,782.1	-	-
2002	1,833.6	2,617.5	-
2003	2,280.1	2,758.0	-
2004	2,018.0	2,535.0	-
2005	1,390.6	1,774.0	-
2006	1,757.6	2,039.5	4,472.5
2007	2,165.0	2,522.5	4,981.5
2008	1,661.4	1,605.5	2,581.6
2009	2,006.8	2,150.0	4,469.0
2010	2,314.4	2,903.5	7,562.0
2011	2,010.2	2,161.0	5,616.0
평균	1,882.4	2,306.7	4,947.1

4.3 강수규모 발생일수

강수 규모별 발생 빈도를 파악하기 위하여 강수 규모를 무강우일, 50mm 미만, 50~100mm, 100~200mm, 200mm 이상의 다섯 개의 범위로 분류하였다. 2000~2011년까지 평균을 살펴보면 분석에 이용된 관측소의 강수 발생 일수는 122~153일로서 상류에 위치한 윗세오름 관측소가 가장 많은 강우발생 일수를 보이고 있으며, 대부분의 강수는 100mm 미만으로 분석되었고, 50mm 미만의 강수일수가 전체 강수 발생일의 82~93%의 비율로 대부분을 차지하고 있다.

강수량의 11년간 평균을 보면 50mm 이상을 기록한 일수는 7일에서 최고 27일로서 상류부 고지대에 위치한 윗세오름이 27일 이상 강수발생 빈도를 보이고 있으며, 서귀포 9일, 하원 13일로서 고도에 따라서 강수 발생 빈도 및 강수량이 증가하는 것으로 나타났다.

Table IV-10. Number of raining days for each year and precipitation pattern(continue)

년 도	강수규모	서귀포	하원	윗세오름
2000년	0<P<50	114	-	-
	50≤P<100	4	-	-
	100≤P<200	1	-	-
	P≥200	0	-	-
2001년	0<P<50	130	-	-
	50≤P<100	7	-	-
	100≤P<200	1	-	-
	P≥200	0	-	-
2002년	0<P<50	137	125	-
	50≤P<100	5	9	-
	100≤P<200	4	3	-
	P≥200	0	1	-
2003년	0<P<50	133	118	-
	50≤P<100	6	9	-
	100≤P<200	4	4	-
	P≥200	0	1	-
2004년	0<P<50	122	90	-
	50≤P<100	7	8	-
	100≤P<200	3	5	-
	P≥200	1	1	-

Table IV-10. Number of raining days for each year and precipitation pattern

년 도	강수규모	서귀포	하원	윗세오름
2005년	0<P<50	118	103	-
	50≤P<100	7	12	-
	100≤P<200	0	1	-
	P≥200	0	0	-
2006년	0<P<50	130	117	134
	50≤P<100	7	6	13
	100≤P<200	1	5	4
	P≥200	0	0	3
2007년	0<P<50	120	94	114
	50≤P<100	8	10	18
	100≤P<200	2	3	8
	P≥200	1	1	4
2008년	0<P<50	127	110	123
	50≤P<100	7	5	6
	100≤P<200	1	3	4
	P≥200	0	0	1
2009년	0<P<50	125	99	110
	50≤P<100	8	10	14
	100≤P<200	1	4	14
	P≥200	0	0	2
2010년	0<P<50	114	127	142
	50≤P<100	7	11	16
	100≤P<200	2	8	11
	P≥200	0	0	11
2011년	0<P<50	102	99	132
	50≤P<100	14	14	14
	100≤P<200	2	4	12
	P≥200	0	0	5
평균	0<P<50	123	108	126
	50≤P<100	7	9	14
	100≤P<200	2	4	9
	P≥200	0	0	4
	합계	132	126	153

4.4 무 강수일

2000년 1월~2011년 12월 까지 11년의 연평균 무강수 일수는 윗세오름이 213일, 서귀포 233일로 나타났다. 상류부에 위치한 관측소가 다른 관측소에 비하여 상대적으로 적은 무강수 일수를 나타내었다. 해안 저지대의 경우 서부지역이 남부 지역에 비하여 많은 무강수 일수를 보이고 있다.

Table IV-11. Number of non-raining days for each year

년 도	서귀포	하원	윗세오름
2000	246	-	-
2001	222	-	-
2002	219	226	-
2003	222	232	-
2004	232	260	-
2005	240	248	-
2006	227	236	211
2007	234	256	221
2008	230	246	232
2009	231	251	225
2010	242	218	185
2011	247	247	201
평균	233	242	213

V. 하천의 기저유출량 산정

1. 하천구조물에 의한 유출량 산정

약근천의 기저유출량은 광정위어공식은 하천 유량측정 지침에 제시한 공식이며 흐름 방향으로 상당한 길이를 가지는 배수 구조물로서 위어 상에서 한계 수심이 발생하도록 함으로 유량을 측정 할 수 있다.

$$Q = C_V C_D (2/3)^{3/2} \sqrt{g} b h^{3/2}$$

식()을 사용하였으며, 위어 상류의 흐름은 하류 수심의 영향을 받지 않으므로 월류하는 수심과 유량의 관계는 단일식으로 이 원리를 이용하여 유출량을 산정하였다.

Table V-1. Baseflow discharge using Weir equation

관측일자	수 위(m)	유 량(m ³)			비 고
		Second	Daily	Monthly	
2011.07.08	0.88	0.303	26,221	812,865	
2011.07.22	0.94	1.577	136,251	4,223,772	
2011.08.06	0.94	1.577	136,251	4,223,772	
2011.08.19	0.97	2.428	209,772	6,502,922	
2011.09.02	0.96	2.131	184,104	5,707,234	
2011.09.16	0.95	1.847	159,579	4,946,940	
2011.09.30	0.95	1.847	159,579	4,946,940	
2011.10.14	0.93	1.322	114,185	3,539,742	
2011.10.28	0.93	1.322	114,185	3,539,742	
2011.11.11	0.93	1.322	114,185	3,539,742	
2011.11.25	0.93	1.322	114,185	3,539,742	
2011.12.09	0.93	1.322	114,185	3,539,742	
2011.12.23	0.92	1.082	9,459	2,897,235	
2012.01.06	0.91	0.753	5,091	2,017,812	
2012.01.20	0.89	0.467	40,371	1,251,488	
2012.02.03	0.89	0.467	40,371	1,251,488	
2012.02.16	0.89	0.467	40,371	1,251,488	
2012.03.02	0.82	0.165	14,273	442,468	
2012.03.16	0.81	0.058	5,046	156,436	
2012.03.31	0.82	0.165	14,273	442,468	
Minimum	0.81	0.058	5,046	156,436	
Average	0.91	1.097	94,797	2,938,702	
Maximum	0.97	2.428	209,772	6,502,922	

수위를 이용한 위어공식을 적용하여 산정된 악근천의 기저유출량은 0.058~2.428m³/s으로 산정하였다.

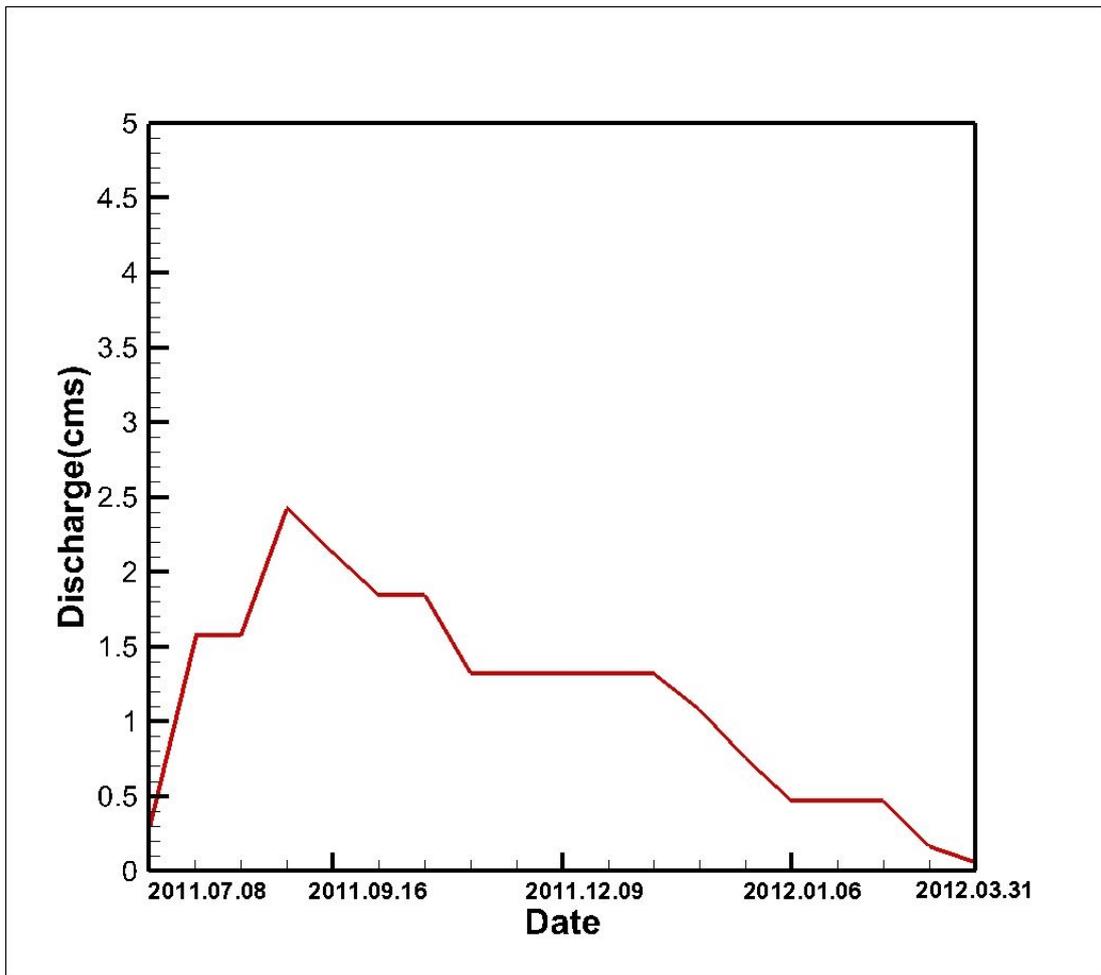


Fig. V-1. Baseflow discharge using weir equation

2. 유량 계측기에 의한 유출량 산정

위어공식으로 산정된 기저유출량의 타당성 및 검토를 하기 위하여 약근천의 A-A' 단면에서 평균유속을 유속 측정을 하였으며, 이 때 측정기는 ADCP, Flow Mate, ADC를 이용하여 기저유출량을 산정하였으며, Flow Mate 고장으로 인해 2012. 03. 16부터 ADC로 관측기기를 변경하여 관측하였다. 매 2주마다 현장 실측에 의한 횡단면도는 다음과 같다.

Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

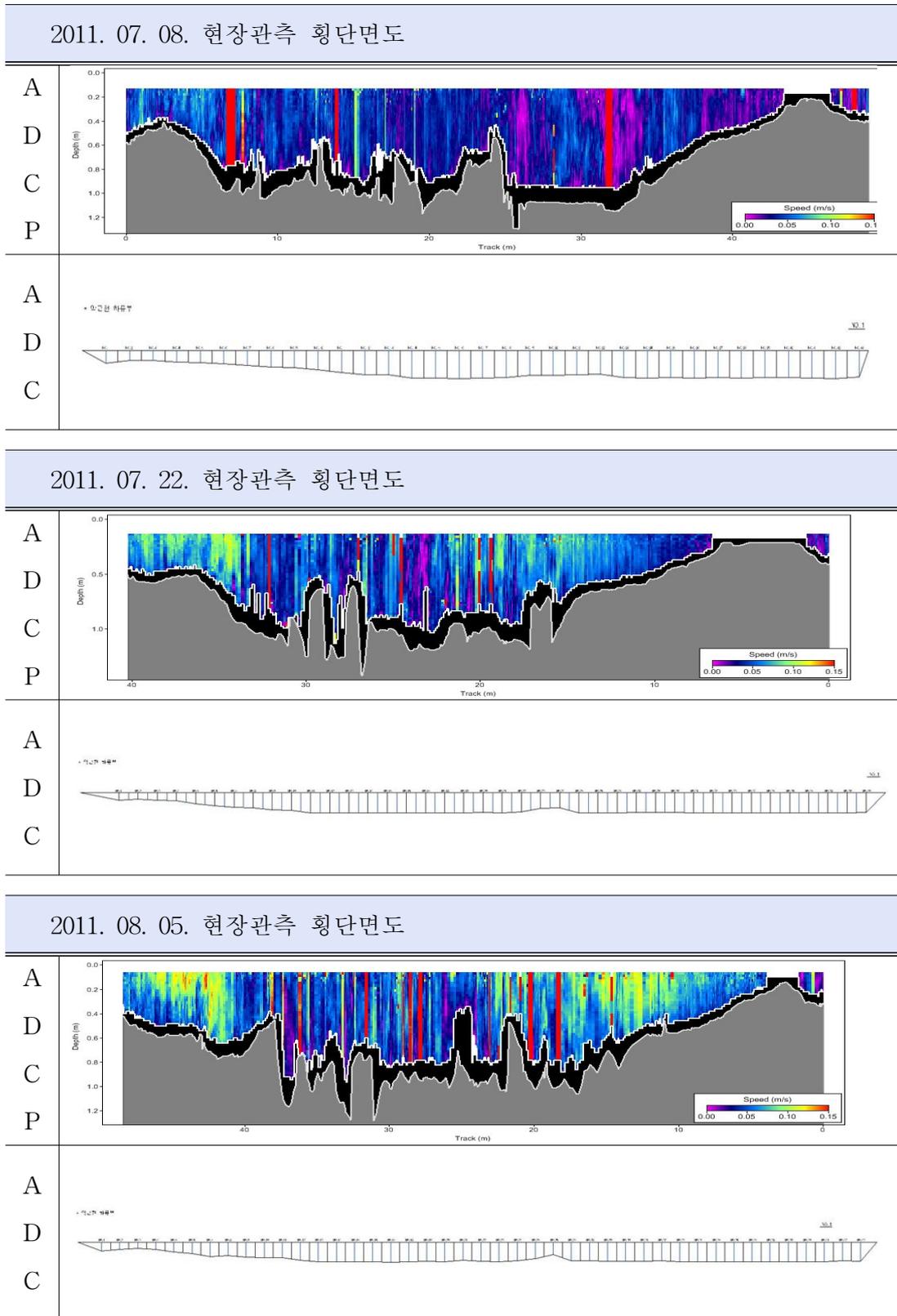


Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

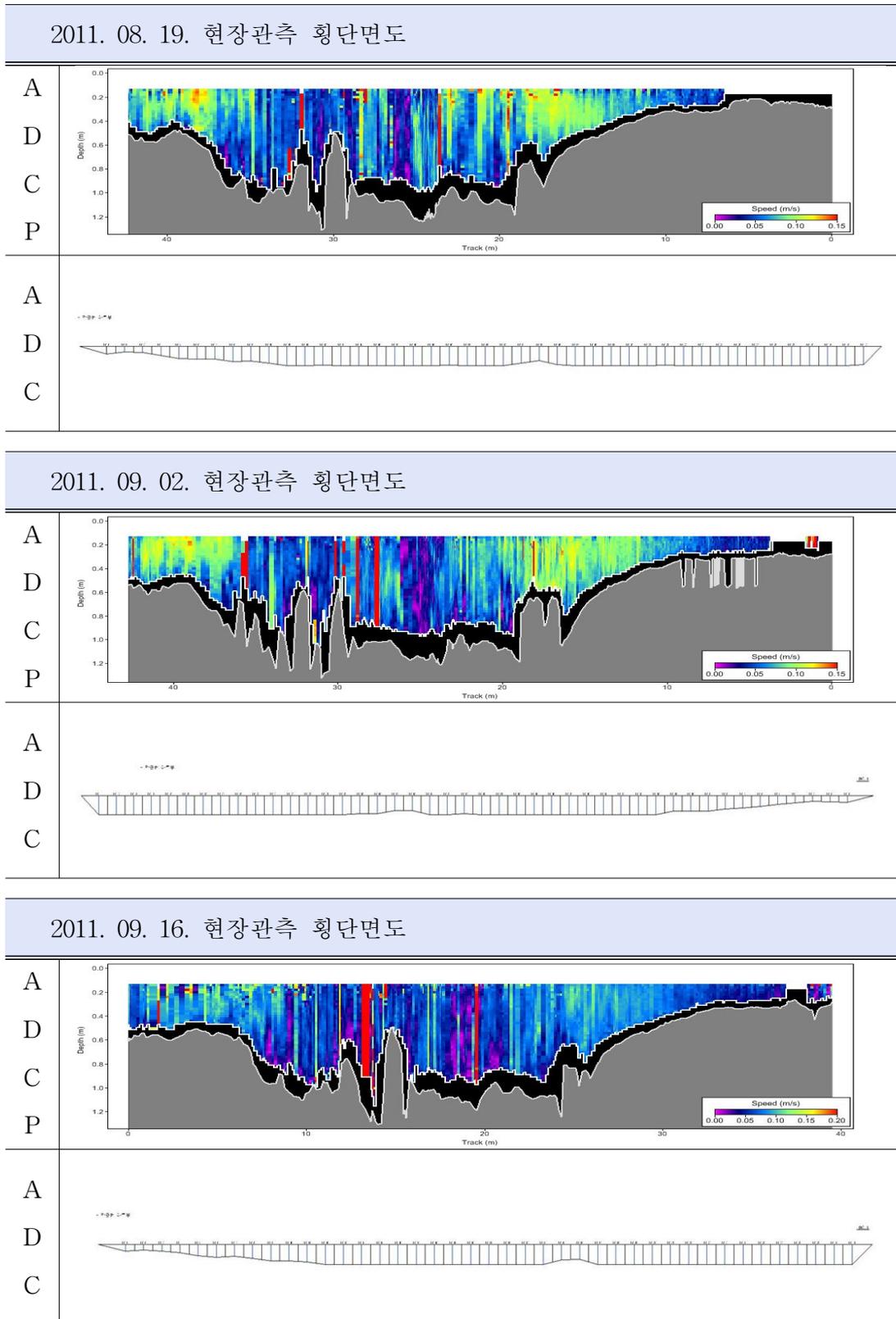


Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

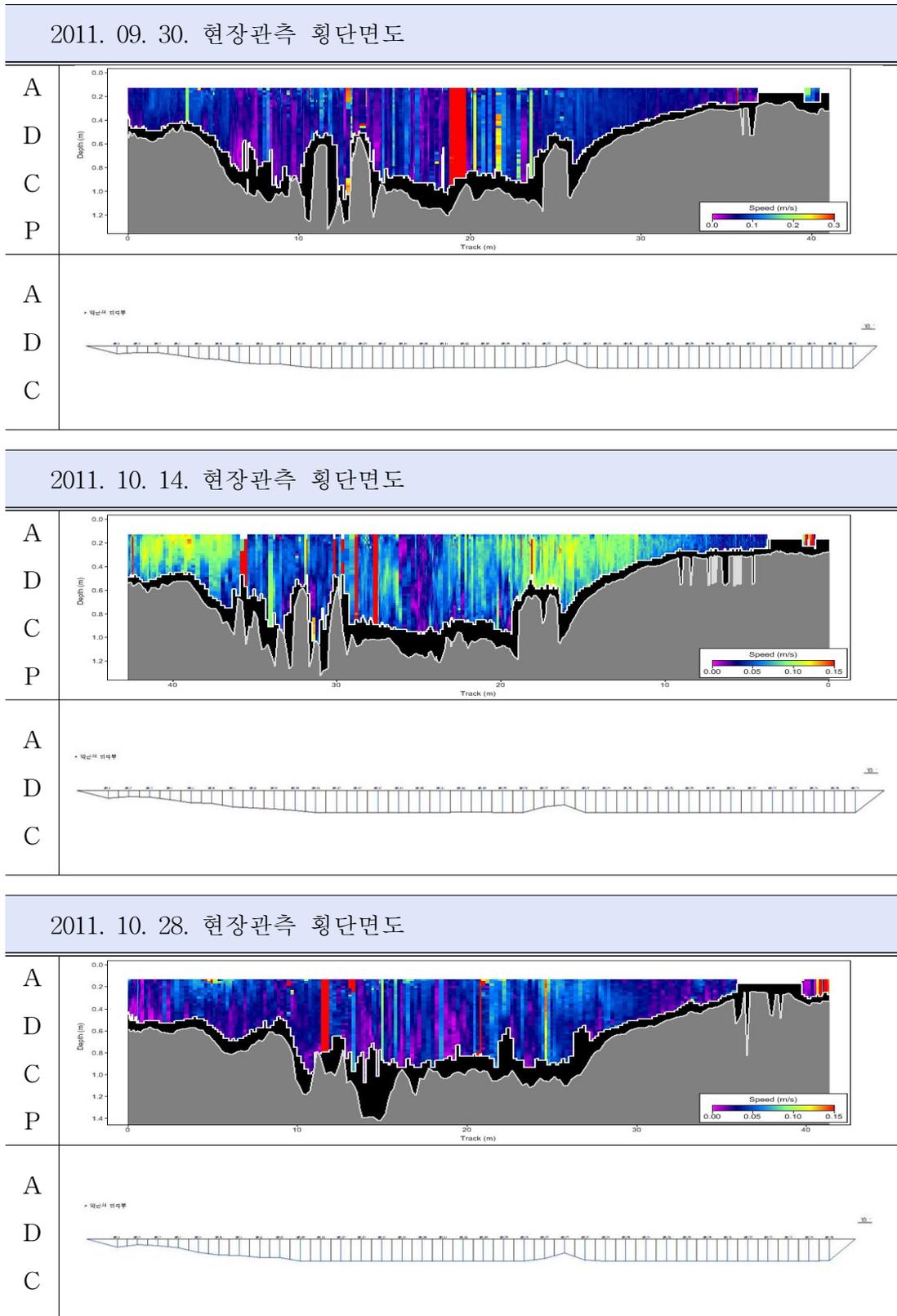


Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

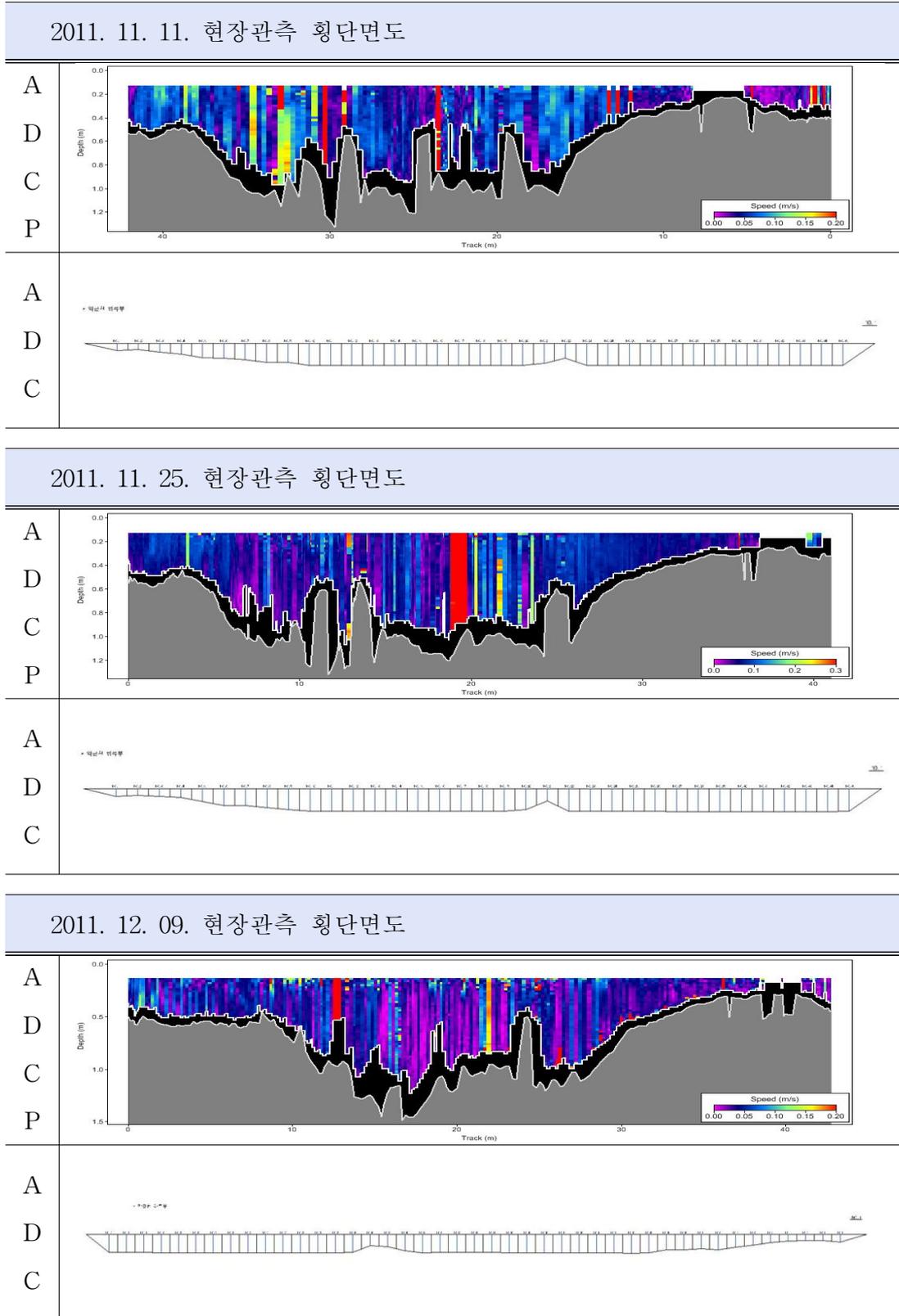


Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

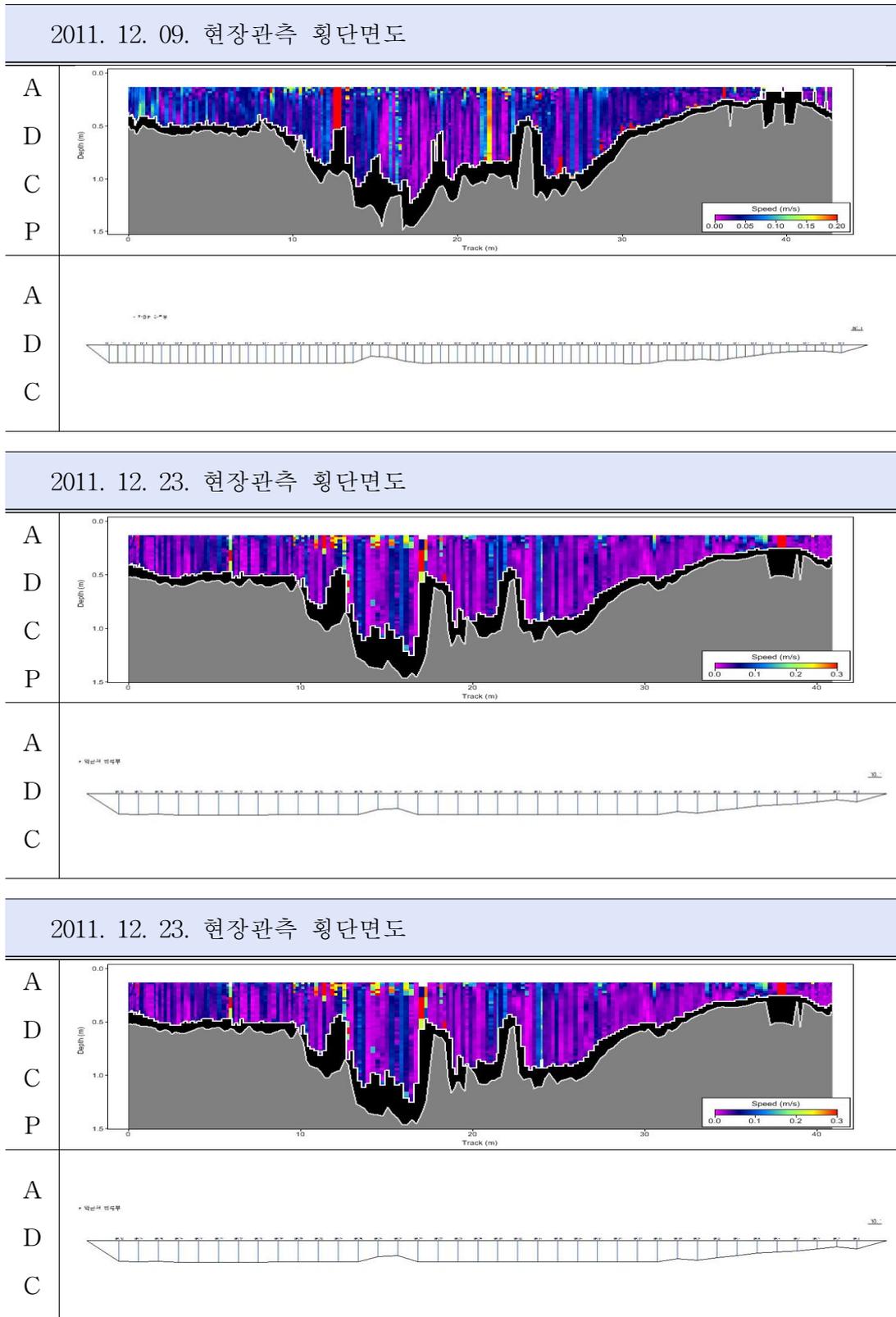


Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

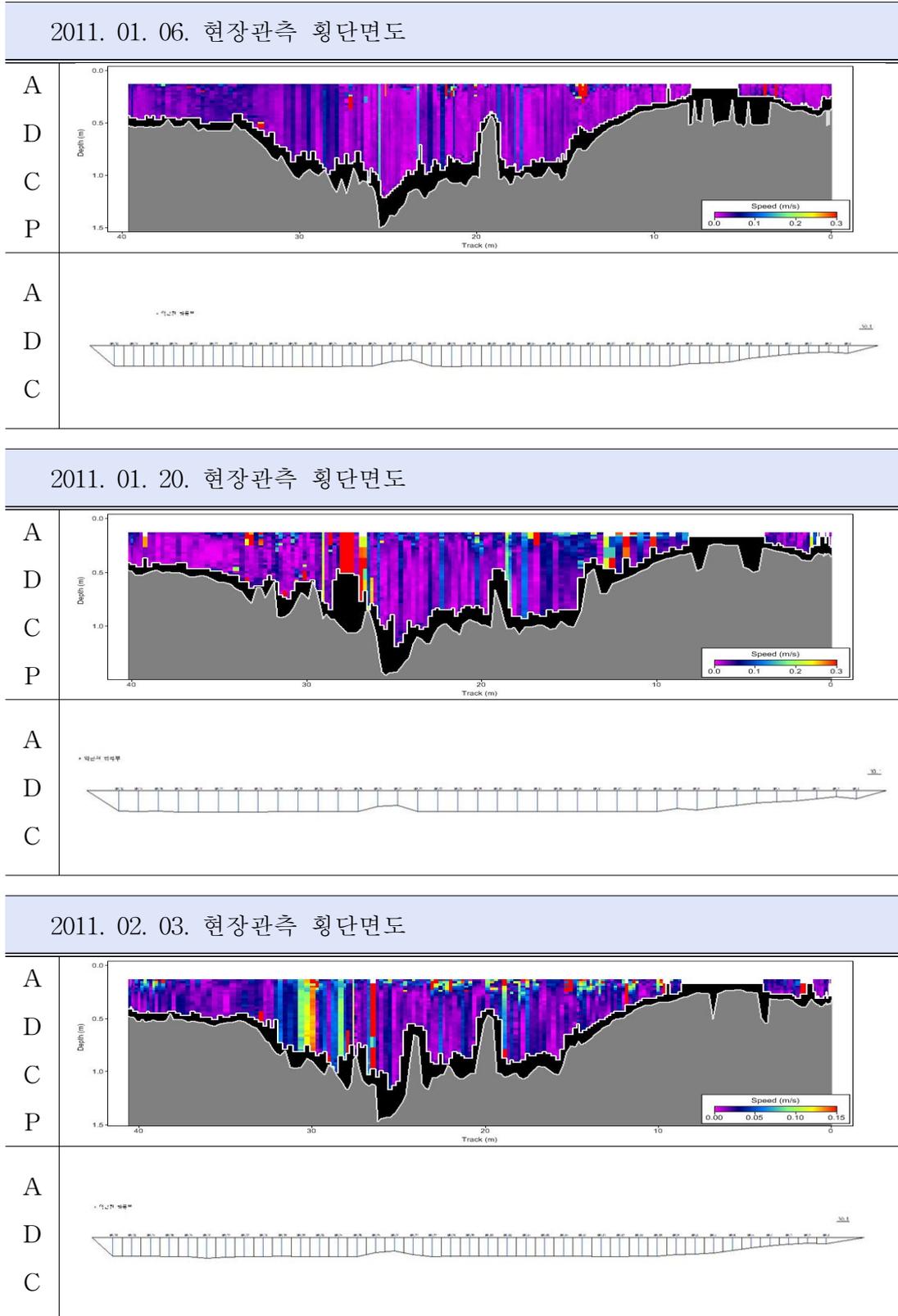


Table V-2. Cross section view using flow meter(continue)

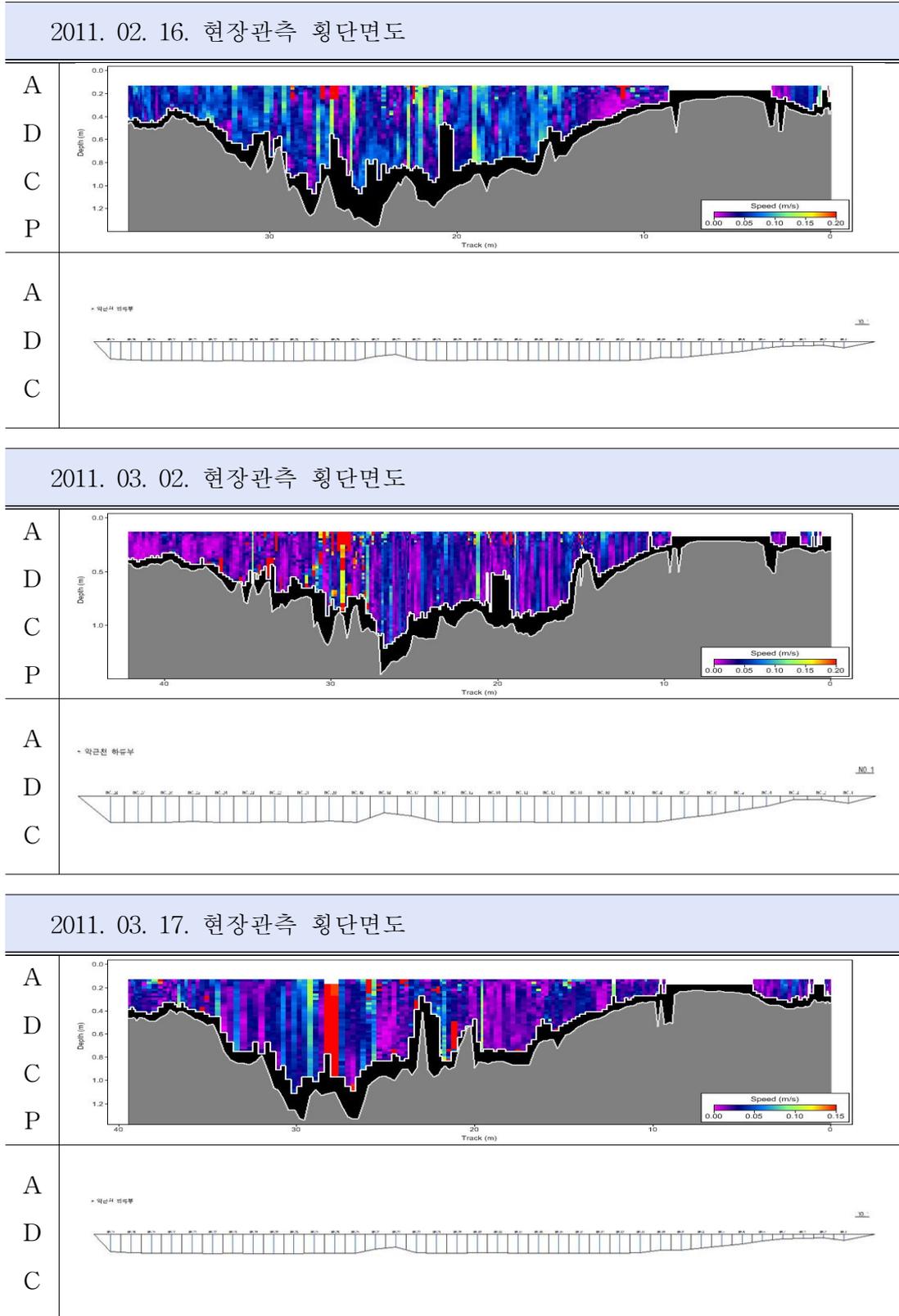


Table V-2. Cross section view using flow meter

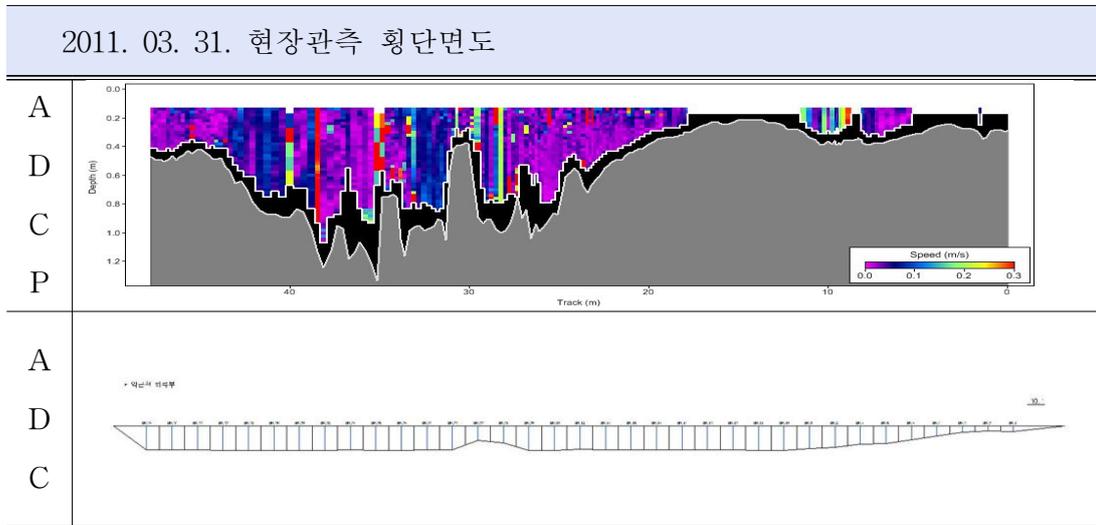


Table V-3. Baseflow discharge using flow meter

관측일자	유량(m ³ /sec)		비 고
	ADCP	Flowmate&ADC	
2011.07.08	0.748	0.832	ADC관측 시작일 2012.02.16
2011.07.22	1.245	0.990	
2011.08.06	1.310	1.300	
2011.08.19	1.479	1.219	
2011.09.02	1.541	1.115	
2011.09.16	1.360	1.173	
2011.09.30	1.169	0.777	
2011.10.14	0.955	0.870	
2011.10.28	0.740	0.449	
2011.11.11	0.733	0.545	
2011.11.25	0.717	0.557	
2011.12.09	0.701	0.381	
2011.12.23	0.698	0.410	
2012.01.06	0.614	0.362	
2012.01.20	0.383	0.344	
2012.02.03	0.324	0.325	
2012.02.16	0.105	0.382	
2012.03.02	0.226	0.439	
2012.03.16	0.334	0.323	
2012.03.31	0.385	0.348	
Minimum	0.105	0.323	
Average	0.788	0.657	
Maximum	1.541	1.300	

실측에 의한 악근천의 기저유출량은 ADCP로 관측한 기저유출량은 0.105~1.541m³/sec로 측정이 되었으며, Flowmate & ADC로 관측한 기저유출량은 0.323~1.300m³/sec로 측정이 되었다.

하루 총 기저유출량으로 환산하면 ADCP 관측값은 9,072~133,142m³/d이며, Flowmate & ADC 관측값은 27,907~112,320m³/d로 계산이 되었다.

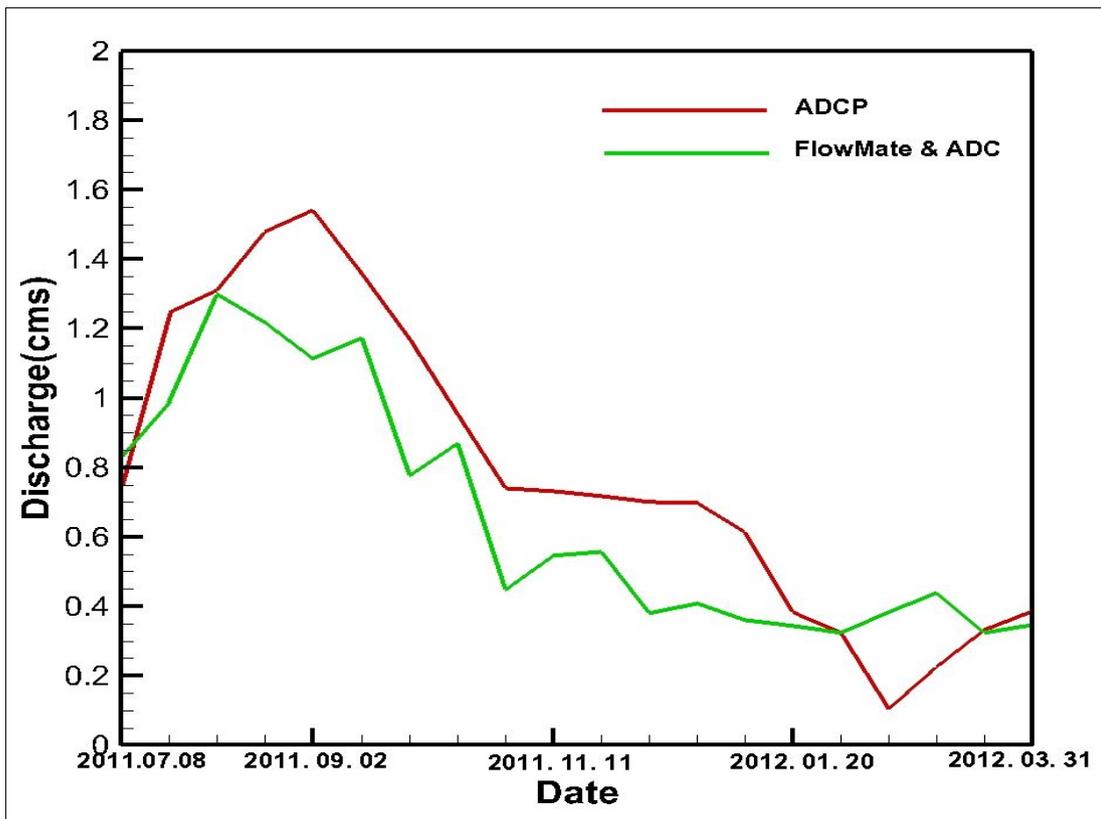


Fig. V-2. Baseflow discharge using flow meter

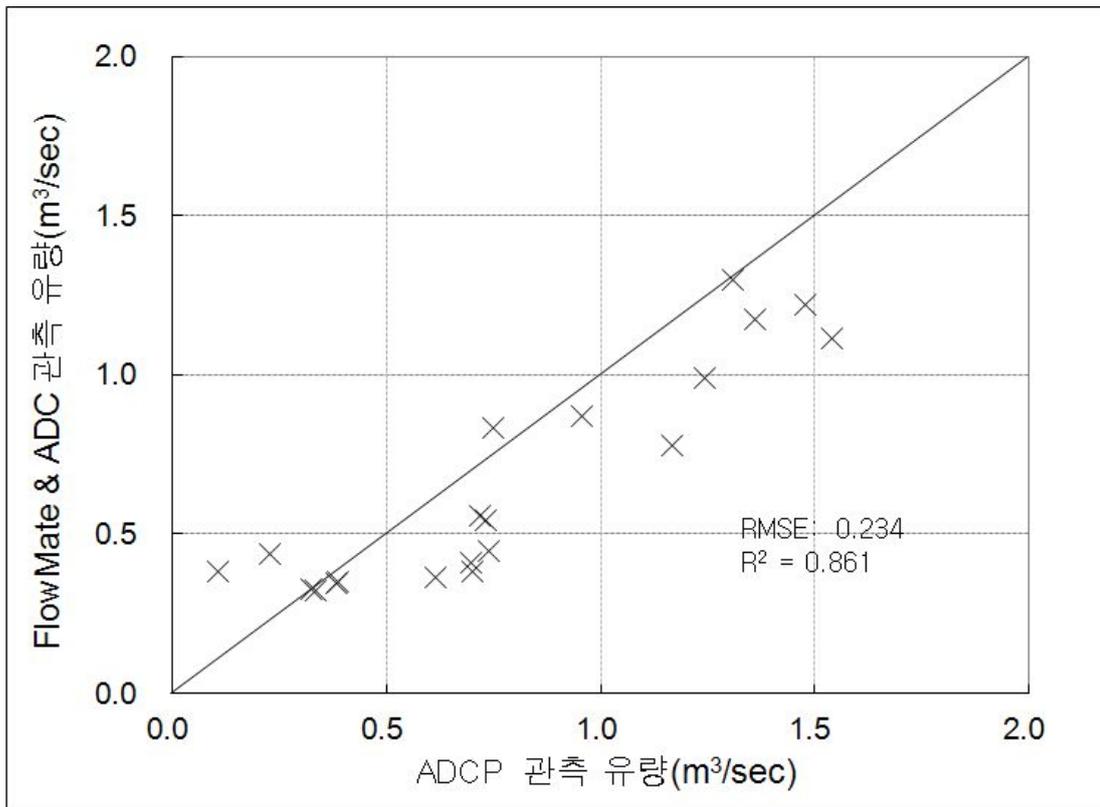


Fig. V-3. Analysis on RMSE error of actual measurement value comparison of stream baseflow discharge

관측기기 유량관측값이 차이가 발생하는 요인은 단면 측량 과정에서 줄자에 의한 하폭측정오차, 하상을 형성하는 토립자에 따른 수심측정오차, 평균유속 측정시 수직 및 수평유속분포 · 유속진동 · 비직각흐름 · 난류 등에 의한 평균유속 측정오차(정진영, 2002)이 있으며, Flowmate & ADC 관측시 관측자의 보폭에 의한 오차 등에 의해 설정된 단면에서 각 관측기계의 유출량의 상의하게 관측된 것이라 해석된다.

3. 기저유출량 산정결과 비교

약근천의 기저유출량은 광정위어공식을 이용하여 위어 상류의 흐름은 하류 수심의 영향을 받지 않으므로 하천 유량측정 지침에 제시한 공식을 이용하여 월류하는 수심과 유량의 관계는 단일식으로 이 원리를 이용한 유출량을 산정결과와 A-A' 단면에서 평균유속을 유속 측정을 ADCP, Flowmate, ADC를 이용하여 기저유출량을 산정을 비교하였으며, Flowmate와 ADC는 유속 및 수위를 구한 후 중앙단면적법으로 이용하여 기저유출량을 산정하였다. <표 V-4>는 구조물 위어의 광정위어로 구한 기저유출량과 관측한 ADCP, Flowmate, ADC의 기저유출량을 비교하였다.

Table V-4. Comparison of stream baseflow discharge

관측일자	유량(m ³ /sec)		
	광정위어 공식	ADCP	Flowmate&ADC
2011.07.08	0.303	0.748	0.832
2011.07.22	1.577	1.245	0.990
2011.08.06	1.577	1.310	1.300
2011.08.19	2.428	1.479	1.219
2011.09.02	2.131	1.541	1.115
2011.09.16	1.847	1.360	1.173
2011.09.30	1.847	1.169	0.777
2011.10.14	1.322	0.955	0.870
2011.10.28	1.322	0.740	0.449
2011.11.11	1.322	0.733	0.545
2011.11.25	1.322	0.717	0.557
2011.12.09	1.322	0.701	0.381
2011.12.23	1.082	0.698	0.410
2012.01.06	0.753	0.614	0.362
2012.01.20	0.467	0.383	0.344
2012.02.03	0.467	0.324	0.325
2012.02.16	0.467	0.105	0.382
2012.03.02	0.165	0.226	0.439
2012.03.16	0.058	0.334	0.323
2012.03.31	0.165	0.385	0.348
Minimum	0.058	0.105	0.323
Average	1.097	0.788	0.657
Maximum	2.428	1.541	1.300

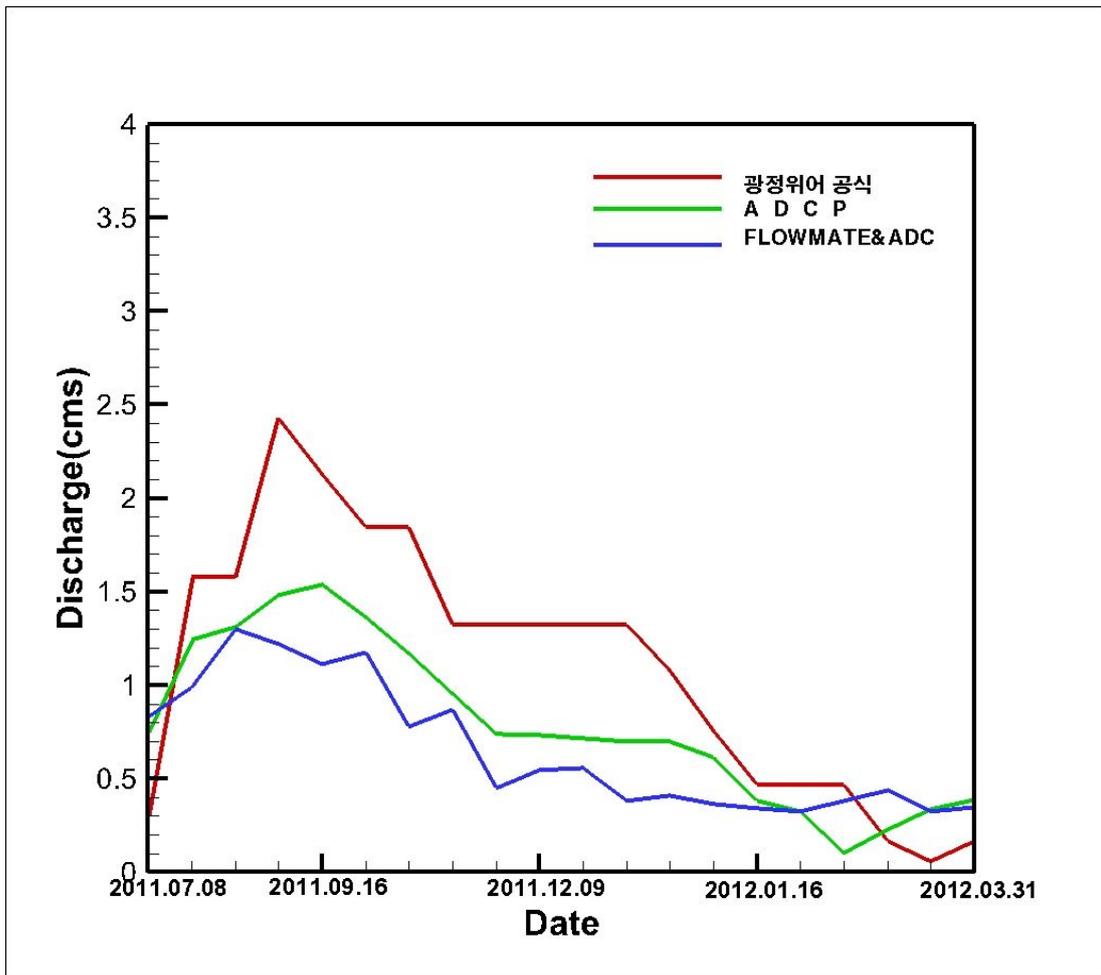


Fig. V-4. Comparison of stream baseflow discharge

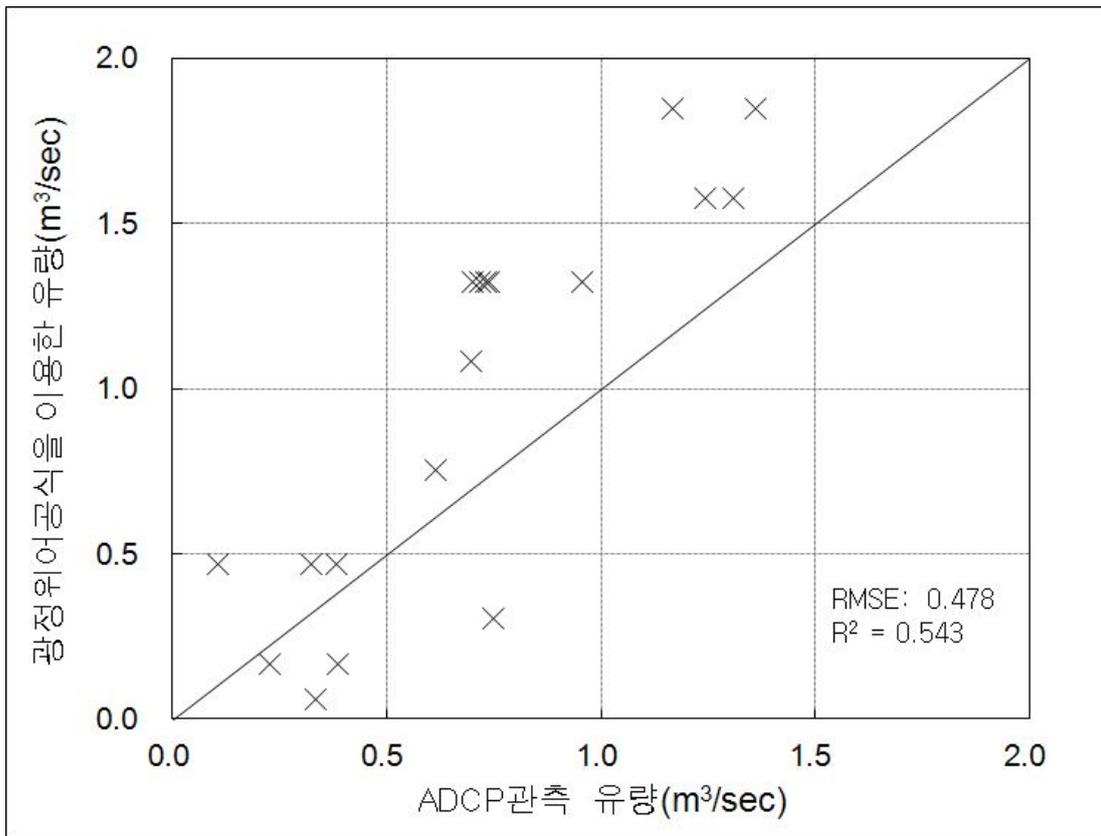


Fig. V-5. Analysis on RMSE error of actual measurement value and Weir equation

악근천의 기저유출 유량값을 비교·분석결과 측정된 수위자료를 이용한 광정 위어공식에 적용한 기저유출량 산정결과 실제하천의 반영을 제대로 하지 못하여 RMS 오차를 계산하여 본 결과, RMSE가 1.732로 크게 나왔다. ADCP로 관측한 기저유출량과 오차가 많이 나지만, 위어공식과 실측으로 관측결과 그래프를 보면 강우가 집중되는 7~9월 사이에는 유량값이 크게 나왔으며 겨울인 1~3월 사이에는 유량값이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 강우에 의한 지표면유출과 기저유출이 함께 계산된 것일 수도 있으나, 지하수 수위가 상승하여 기저유출량이 증가 할 수도 있다고 보며, 추가적으로 지속적인 기저유출량 관측을 하여 좀 더 정확한 기저유출량을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

VI. 결론

제주도의 악근천의 용천수의 형태로 유출되고 있는 지하수의 기저유출 현상을 수리학적으로 정기적으로 정밀 현장관측을 실시하였다. 본 연구에서는 기저유출량 조사를 10개월(2011. 07. 08~2012. 03. 31)간 2주일 간격으로 마다 현장에서 다양한 최신 정밀 계측기를 이용하여 실측을 하고 유출량을 산정하였다. 추가적으로 광정위어 유량공식을 이용하여 기저유출량을 분석하였으며 연구·조사한 결과는 다음과 같다.

1. 연구대상 하천에서 측정된 수위자료를 이용하여 광정위어공식에 적용하여 기저유출량을 산정한 결과는 일평균 $94,797\text{m}^3$, 월 평균 $2,938,702\text{m}^3$ 으로 나타났다.

2. 연구기간(2011. 07. 08~2012. 03. 31)동안 총 20회 유량을 실측하였고 유속계는 ADCP, Flowmate, ADC를 이용하여 기저유출량을 산정하였다. ADCP 관측한 일평균 기저유출량은 평균 $68,083\text{m}^3$ 이며, Flowmate와 ADC 관측값은 평균 $56,765\text{m}^3$ 이었다.

3. Flowmate와 ADC 관측값이 ADCP 관측값보다 작게 나온 이유는 관측자의 보폭에 의한 오차 및 평균유속 측정시 수직 및 수평유속분포·유속진동·비직각 흐름·난류 등에 의한 평균유속 오차가 있어 ADCP 관측값보다 작게 나온 것으로 보이며, RMS 오차를 계산한 결과 RMSE가 0.234로 나타났으며, 측정된 수위 자료를 이용한 광정위어공식에 적용한 기저유출량 산정결과 실제하천의 반영되지 않아 RMS 오차를 계산한 결과 RMSE가 0.478로 나타났다.

4. 위어공식과 실측관측한 결과 그래프를 보면 강우가 집중되는 7~9월 사이에는 유량값이 크게 나왔으며 겨울인 1~3월 사이에는 유량값이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 하계에는 유출량이 0.748~1.541로서 크게 나타났으나 동

계는 유출량이 현저히 줄어들어 0.226~0.614로서 하계에 비해 약 3.73배 적게 나타났다. 추가적으로 지속적인 기저유출량 관측을 실시하여 보다 정확한 기저유출량을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 강병남 (2000), 제주도 지하수의 고도별·지역별 수질 특성, 제주대학교 석사학위 논문
- 건설교통부·제주도·한국수자원공사 (1993), 제주도 수자원 종합 개발계획 수립보고서.
- 건설교통부 (1995), 유량관측개산방안 연구조사.
- 김원, 홍일표 (1999), 하천유량측정의 정확도 분석, 한국건설기술연구원.
- 건설교통부·한국수자원공사 (1995), 제주도광역상수도 I 단계 기본 및 실시설계 지질조사보고서.
- 건설교통부·제주도 (2001), 제주도 광역상수도 2단계 건설사업 실시설계 보고서.
- 건설부 (1965), 제주도 산업지 기초조사보고서. pp. 53.
- 김미령 (2003), 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 석사학위 논문.
- 김원만 (1996), 수리공식집, 건우사, pp. 254~275.
- 김원, 윤광석, 이을래 외 4 (2004). 하천 유량측정 지침, 수자원 지속적 확보 기술개발 사업단.
- 문덕철, (2004), 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 석사학위 논문.
- 변창구, 양성기 (1999), 제주도 수자원의 효율적인 이용방안 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문.
- 서귀포시 (2004), 지방2급 하천정비 기본계획 보고서(중문천, 도순천, 악근천, 원제천, 서흥천, 생수천, 연외천).
- 양성기 (2007), 지구의 수권과학, 구미서관 pp. 177~288.
- 양성기 (2011), 수리학, 제주물산업인재양성센터 pp. 275~308.
- 양성기, 정우열 (2011), 수자원모델링, 제주물산업인재양성센터 pp. 44~60.
- 양희경 (2001), 지형 및 인위적 변수에 의한 산지 하천의 분류, 서울대학교 박사학위논문.
- 이광식, 박원배, 현승규 외4 (2004), 제주도 한라산 남북측 사면 용천수의

수리지구화학, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, pp.408~412.

- 제주도 · 한국수자원공사 (2003), 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 pp. 11~83.
- 제주도 (1997), 제주도 중산간지역 종합조사, pp. 82~83.
- 제주도 (1999), 제주의 물 용천수, pp. 19~42.
- 제주특별자치도 (2009), 하천수계별 유역종합치수계획 수립 보고서.
- 정진영 (2002), 유량 측정자료의 불확실도 분석에 관한 연구(섬진강 유역을 중심으로), 수원대학교 석사학위 논문 pp. 7~25.

문덕철

- 배상근 (2002) 지하수 함양량 산정방법에 대한 고찰, 한국수자원학회지, 제 35권 제3호, pp. 50~59.
- A.T Rutledge, Considerations for Use of The RORA program to Estimate Ground-Water Recharge From Streamflow Records, USGS.
- C. W. Fetter, Applied Hydrogeology, pp. 518~522.
- Stephen B. Gingerich (1999), Ground-Water Occurrence and contribution to streamflow, Northeast Maui, Hawaii, USGS, pp. 29.
- Thomas C. Winter · Judson W. Harvey (1998) Ground Water and surface water a single resource, USGS.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 여러 차례 검토하고 세심한 지도와 격려를 아끼지 않으신 양성기 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문심사 과정에서 바쁘신 가운데도 세심하게 검토하여 주신 김남형 교수님, 박원배 박사님께도 고마운 말씀을 드립니다.

돌이켜 보면, 배움의 길을 걷기에 직장인이 시간적 한계를 극복하고 학업에 정진한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니었습니다. 또한 본 논문이 완성되기까지 많은 시간과 노력을 함께 해준 수리학 연구실 정우열연구원, 이준호연구원께도 감사드립니다.

그리고 대학원 과정을 보람있고 활기차게 보낼 수 있도록 항상 따뜻하게 배려해준 후배님들께도 진심으로 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 이 작은 결실이 맺어지기까지 힘과 용기를 주신 아내와 아이들 내색하지 않고 뒷바라지해 준 사랑하는 나의 아내 김영생여사, 사랑하는 아들 승환, 딸 정민, 현주에게 이 논문으로 보답하고자 합니다.

2012 년 6 월

유 화 진 배상