

碩士學位論文

濟州道 主要河川의 基底流出量
算定에 관한 研究

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

文 德 鐵

2004年 06月

濟州道 主要河川의 基底流出量 算定에 관한 研究

指導教授 楊 城 基

文 德 鐵

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2004年 06月

文德鐵의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2004年 06月

A Study on Estimation of Baseflow Discharge
through Several Streams in Jeju Island, Korea

Duk-Chul Moon

(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

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

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
List of Figures	iii
List of Table	v
Summary	vii
제1장 서론	1
1-1 연구의 배경	1
1-2 연구의 동향	2
1-3 연구의 목적	5
제2장 연구조사 및 방법	6
2-1 연구대상 하천의 선정	6
2-2 기상 및 자료의 분석	7
2-2-1 강우량 자료 분석	7
2-2-2 하천의 유역특성 분석	8
2-3 하천에 대한 현장조사	9
2-3-1 외도천	10
2-3-2 옹포천	10
2-3-3 강정천	13
2-3-4 연외천	13
2-4 이론적 고찰	16
2-4-1 강우와 유출	16
2-4-2 하천유량 수문곡선	18

2-4-3 수문곡선의 분리	20
2-4-4 유출량 산정방법	21
제3장 하천유역의 개요	25
3-1 유역의 지질분포	25
3-2 하천 형상 및 지형특성	27
3-2-1 외도천	28
3-2-2 옹포천	30
3-2-3 강정천	32
3-2-4 연외천	34
3-3 용천수의 분포	36
3-4 연구대상 하천유역의 물수지분석	45
제4장 하천수위의 변동특성	48
4-1 하천의 수위변동	48
4-2 강우량과 하천수위와의 관계	56
제5장 하천의 유출량 산정과 수위-유량 관계곡선	59
5-1 하천수위에 의한 유출량 산정	59
5-2 수위-유량 관계곡선에 의한 유출량 산정	62
제6장 결론	71
참고문헌	73
부 록	76

List of Figures

Fig. 1. The Location of gauging stations and watershed area of each stream.	7
Fig. 2. The observation sites of rainfall gage.	8
Fig. 3. Watershed area of the Woedo stream and observation location of stream discharge.	11
Fig. 4. Watershed area of the Ongpo stream and observation location of stream discharge.	12
Fig. 5. Watershed area of the Gangjung stream and observation location of stream discharge.	14
Fig. 6. Watershed area of the Yeonwoe stream and observation location of stream discharge.	15
Fig. 7. Hydrologic cycle.	17
Fig. 8. Hydrograph.	19
Fig. 9. The recession graph of stream water level.	20
Fig. 10. The cross section of the square weir.	24
Fig. 11. The map showing stream distributions in Jeju Island.	26
Fig. 12. Analysis of altitude with elevations in the Woedo stream.	29
Fig. 13. Analysis of slope in the Weodo stream.	29
Fig. 14. Analysis of altitude with elevations in the Ongpo stream.	31
Fig. 15. Analysis of slope in the Ongpo stream.	31
Fig. 16. Analysis of altitude with elevations in the Gangjung stream.	33
Fig. 17. Analysis of slope in the Gangjung stream.	33
Fig. 18. Analysis of altitude with elevations in the Yeonwoe stream.	35
Fig. 19. Analysis of slope in the Yeonwoe stream.	35
Fig. 20. Geology and springs in the Woedo stream watershed area.	39
Fig. 21. Geology and springs in the Ongpo stream watershed area.	41

Fig. 22. Geology and springs in the Gangjung and Yeonwoe stream watershed area.	44
Fig. 23. Hydrograph of the Woedo stream.	48
Fig. 24. Hydrograph of the Ongpo stream.	49
Fig. 25. Hydrograph of the Gangjung stream.	50
Fig. 26. Hydrograph of the Yeonwoe stream.	51
Fig. 27. Runoff hydrograph of the Woedo stream.	53
Fig. 28. Runoff hydrograph of the Ongpo stream.	53
Fig. 29. Runoff hydrograph of the Gangjung stream.	54
Fig. 30. Runoff hydrograph of the Yeonwoe stream.	54
Fig. 31. The decline trend of stream water level.	56
Fig. 32. Stage-discharge rating curve of the Ongpo stream.	66
Fig. 33. Stage-discharge rating curve of the Yeonwoe stream.	66
Fig. 34. Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Ongpo stream.	68
Fig. 35. Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Yeonwoe stream.	68

List of Table

Table 1. The classification of gradient grades.	9
Table 2. Form of the stream.	27
Table 3. Results of analysis of altitude with elevations in the Woedo stream.	28
Table 4. Results of analysis of slope in the Woedo stream.	28
Table 5. Results of analysis of altitude with elevations in the Ongpo stream.	30
Table 6. Results of analysis of slope in the Ongpo stream.	30
Table 7. Results of analysis of altitude with elevations in the Gangjung stream.	32
Table 8. Results of analysis of slope in the Gangjung stream.	32
Table 9. Results of analysis of altitude with elevations in the Yeonwoe stream.	34
Table 10. Results of analysis of slope in the Yeonwoe stream.	34
Table 11. Springs in the Woedo stream watershed area.	38
Table 12. Springs in the Ongpo stream watershed area.	40
Table 13. Springs in the Gangjung stream watershed area.	42
Table 14. Springs in the Yeonwoe stream watershed area.	43
Table 15. The results of water budget analysis of the western Jeju watershed area.	46
Table 16. The results of water budget analysis of the Hanrim watershed area.	47
Table 17. The results of water budget analysis of the middle Seogwi watershed area.	47
Table 18. The analysis of runoff hydrograph.	55
Table 19. The analysis of decline trend of stream water level.	57

Table 20.	The hydraulic characteristics of aquifer in regional groups.	58
Table 21.	Estimation of baseflow discharge in the Woedo and Gangjung stream.	59
Table 22.	Estimation of baseflow discharge in the Gangjung stream.	60
Table 23.	Compared with baseflow discharge in the Woedo and Gangjung stream.	61
Table 24.	Estimation of baseflow discharge through measured the speed of a current in the Ongpo stream.	63
Table 25.	Estimation of baseflow discharge through measured the speed of a current in the Yeonwoe stream.	64
Table 26.	Compared with baseflow discharge in the Ongpo and Yeonwoe stream.	65
Table 27.	Relations expression through stage-discharge rating curve of stream.	67
Table 28.	Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Ongpo stream.	69
Table 29.	Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Yeonwoe stream.	70

Summary

In Jeju Island, the groundwater is discharged into the form of spring water at several stream. To set a fixed quantity of baseflow discharge from groundwater in the viewpoint of hydrology, 4 downstreams (Woedo stream, Gangjung stream, Yeonwoe stream and Ongpo stream) were selected to estimate the characteristic of baseflow and the discharge of baseflow based on current gauging data.

The results analyzing the data on the water level of selected streams, there were 11 to 14 times level peak caused by runoff, mostly occurred during monsoon season, and duration of runoff was 8 to 46 hours. These represent the hydrogeological characteristics of Jeju Island, Which include the steep slope and the short stream length.

In case of Gangjung , Yeonwoe and Ongpo stream, the variation of stream water level by baseflow rose during summer, which was closely linked to the distribution of seasonal precipitation. From autumn to spring, the water level fell down while that of Woedo stream was maintained almost constantly all a year round. This difference in water level can be explained by different hydrogeographical factors such as the surface or underground geographical status in the selected stream, the hydraulic characteristics of aquifer, the travel time of groundwater water(circulation speed of groundwater), and the precipitation in watershed.

Data on the water level observed in Woedo and Gangjung stream

in every single minutes were applied to the weir formula(equation of Oki and Govinda Rao) to estimate baseflow discharge. It was found that the baseflow discharge of Woedo stream was $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ during 6 month period(July~December, 2003) and that of Gangjung stream was $60 \times 10^5 \text{ m}^3$ for 1 year in 2003. By comparing the baseflow discharge on the two stream using the data on current meter, it was more 3 to 10% higher than the value estimated by the weir formula.

Also, using the data on current and water level estimated in Ongpo and Yeonwoe stream, the water level-water flow rating was applied to assess baseflow discharge. $Q=458824h^{0.9694}$ ($R=0.9485$) formula was produced for Ongpo stream while $Q=1368019h^{8.5035}$ ($R=0.9615$) formula was suggested in Yeonwoe stream. By applying these relations expression, the annual baseflow discharge from Ongpo and Yeonwoe stream were $23 \times 10^5 \text{ m}^3$ and $38 \times 10^5 \text{ m}^3$, respectively.

제1장 서론

1-1 연구의 배경

제주도 내에는 911개에 이르는 많은 용천수가 분포하고 있으며, 이들 중 92%에 달하는 841개소가 해안 가까운 지역에 위치하고 있다(제주도, 1999). 용천수는 대수층으로 함양된 지하수가 지질경계부나 침식 절개지 또는 급경사면 등 지층의 열린 틈을 통해 지상으로 배출되는 물이기 때문에 지하수의 함양, 배출, 순환연구에 중요한 대상이 되고 있다. 특히, 해안 저지대에 위치한 용천수의 용출량은 지하수 배출 성분 중 기저유출에 해당하는 성분이므로 이에 대한 수문학적 및 수문지질학적 연구는 유역 내 전체적인 지하수 함양량 규모는 물론 지하수의 수리지구화학적 진화과정을 밝히는데 좋은 정보를 얻을 수 있다. 아울러, 용천수를 통해 배출되는 기저유출량에 대한 연구는 용천수의 이용 및 보전관리계획을 수립하는 데에도 중요한 기초자료의 역할을 한다.

제주도는 우리나라 최대의 다우지역임에도 불구하고 투수성이 좋은 다공질 화산암류 및 화산회토로 이루어져 있어 총 강우량의 48.5%에 이르는 빗물이 지하로 침투함으로써 대부분의 하천들이 건천을 이루고 있다(제주도·한국수자원공사, 2003). 또한 한라산 백록담을 중심으로 남·북사면에 발달해 있는 하천들은 경사가 급할 뿐만 아니라, 20km 미만의 짧은 연장으로 인하여 강우에 의한 홍수유출 지속시간이 2~3일에 불과하고(제주도·한국수자원공사, 2003), 강우 후에는 건천의 상태를 이룬다.

그러나, 제주도 북부지역에 위치한 외도천을 비롯하여 서부지역의 용포천, 남부지역의 창고천·중문천·강정천·연외천·동홍천 등 일부 하천의 경우, 해안에 가까운 지점의 하상과 측벽에서 용천수가 유

출됨으로써 하천수의 흐름이 유지되고 있다. 이들 하천을 통해 바다로 유출되는 용천수는 지하수의 기저유출 성분이기 때문에 가물에도 수량변화가 크지 않을 뿐만 아니라, 수질도 양호하여 1970년대부터 상수원으로 개발해 이용하고 있다. 유출량 규모면에서 볼 때, 이들 하천을 통한 기저유출량은 전체 용천수의 유출량에서 차지하는 비율이 높을 뿐만 아니라, 개소당 유출량도 많기 때문에 제주도 지하수의 기저유출 특성을 연구하는데 좋은 대상이라 할 수 있다.

제주도의 지하수에 관한 조사·연구는 1960년대 초반부터 여러 연구기관과 개인 연구자들에 의해 진행되기 시작하였으며, 이러한 연구들로부터 지하수에 관한 기초적인 사항들이 밝혀짐으로써 제주도의 지하수 특성을 이해하는데 큰 도움이 되고 있다. 그렇지만, 이전에 실시된 조사·연구의 대부분은 수문지질, 수질, 지하수위, 지하수 산출특성 등의 분야에 집중된 반면, 용천수를 통한 기저유출에 관한 연구는 지극히 부족한 실정이다.

따라서, 제주도 지하수의 함양과 배출규모, 지하수 순환시스템, 기상변화에 따른 기저유출량의 변동 등을 밝히기 위해서는 유출 규모가 큰 용천수를 대상으로 기초적인 연구부터 꾸준히 수행되어야 할 것으로 지적되고 있다.

1-2 연구의 동향

제주도 용천수의 유출량에 관한 조사는 1960년대부터 시작되었다. 당시 조사의 주된 목적은 용천수를 상수원이나 농업용수로 개발하여 제주도의 심각한 물 문제를 해결하는데 필요한 기초적인 자료를 얻기 위해서였다. 1965년 건설부에서는 강정천을 상수원으로 개발하기 위하여 총 21회(1965. 7~10월)에 걸쳐 유량을 측정할 바 있는데, 이때 조사된 결과를 보면 최소유량은 $34,102\text{m}^3/\text{d}$, 최대 $36,789\text{m}^3/\text{d}$, 평균 $35,280\text{m}^3/\text{d}$ 이었다.

또한, 1973. 7~1979. 11까지 강정천에 대한 유량조사가 실시되었다. 이 당시 유량측정 방법은 하천에 가수위표를 설치하여 수위를 관측하고, 웨어공식($Q = CBH^{3/2}$, 단 C는 유량계수로 2.17를 사용)을 적용하여 용출량을 산정하였는데, 최소 13,000m³/d, 최대 27,000m³/d, 평균 20,400m³/d이었다(제주도, 1979).

1981년 산업기지개발공사(현 한국수자원공사)는 제주도의 주요 용천수 30개소에 대한 용출량을 조사하고, 총용출량을 746,000m³/d으로 보고하였다.

1993년 한국수자원공사는 기존에 조사된 용천수에 대한 자료를 수집·분석하고 용천수 383개소의 용출량을 1,078,210m³/d으로 보고한 바 있다. 박상운(1996)은 도 일원 15개소의 용천수에 대한 용출량 측정과 더불어 55개소의 용천수에 대한 수질성분 조사를 실시한 바 있으며, 김경찬(1996)은 서귀포지역 일대의 16개 용천수에 대한 수질특성을 조사한 바 있다. 고병련(1998)은 제주도 동부지역의 관정 32개소와 용천수 15개소에 대한 수질분석을 실시하고 수질조성 분포 특성과 해수침입에 따른 이온성분의 상관관계에 대해 연구한 바 있다. 또한, 제주도에서는 1998년부터 2년간 도 일원에 분포하는 용천수에 대한 전수조사를 실시하여 911개소에 대한 기초적인 자료를 집대성하고, 조사결과를 “제주의 물·용천수”라는 책자로 발간하였다. 이 보고서에 따르면, 용출량 측정이 가능한 701개소의 평균 용출량은 1,083,363m³/d이고 최대용출량은 1,608,342m³/d이다(제주도, 1999).

2000년도에 접어들어서는 제주도의 수문지질구조 및 지하수 순환시스템 조사과정에서 용천수에 대한 조사도 이루어졌다. “제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 I (제주도, 2001)”에서는 용출량이 많은 용천수 8개소를 선정하고 용출량 및 체류기간 조사를 실시하였다. 조사결과, 제주시 삼양1동에 위치한 삼양큰물 용천수의 용출량은 6,212m³/d이고, 체류기간은 15년인 것으로 나타났다.

제주도 광역상수도 2단계 건설사업을 위한 기본 및 실시설계 용역 과정(건설교통부·제주도, 2001)에서는 유속계를 이용하여 옹포천·창고천·중문천·강정천의 유량을 조사하였다. 조사결과, 옹포천의 유량은 10,195~40,435m³/d, 창고천은 3,100~131,933m³/d, 중문천은 1,037~18,403m³/d, 강정천은 69,034~185,322m³/d인 것으로 나타났다. 동부지역의 수문지질과 지하수자원의 부존특성을 파악하기 위해 제주도에 실시한 “제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅱ(제주도, 2002)”에서는 동부지역에 위치한 30개소 용천수에 대해 월1회씩(2001. 11~2002. 10) 주기적인 용출량 측정이 이루어졌는데, 평균 164,762m³/d, 최대 327,568m³/d으로 조사되었다.

제주도 지하수의 중·장기적인 종합관리 방안을 수립하기 위해 실시된 “제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ(제주도·한국수자원공사)”에서는 제주도 해안지역에 위치한 122개소 용천수의 용출량을 월1회씩(2002. 7~2003. 8) 측정하였다. 측정결과, 도 전체적으로 일평균 용출량은 602,959m³/d이고, 개소 당 평균 용출량은 약 5,000m³/d인 것으로 분석되었다. 또한, 옹포지구 농촌용수 개발사업 기본계획수립 과정에서 실시된 옹포천의 유출량은 21,600m³/d인 것으로 조사되었다(농림부·농업기반공사, 2003).

한편, 이대하 등(2000)은 제주도 지하수의 순환시스템해석을 위한 연구에서 용천수에 대한 동위원소 특성 연구를 실시하였다. 연구결과, 제주도 지하수의 평균연령은 16년이고, 지하수 연령은 산악 및 중산간 지역에서 해안지역으로 갈수록 대체로 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석하였다. 지역별 지하수 평균 연령분포는 북부지역이 20년, 서부지역 27년, 남부지역 10년, 동부지역 18년으로 남부지역이 가장 낮은 연령을 보이고, 동부지역, 북부지역, 서부지역 순으로 연령이 높아지는 것으로 해석하였다. 이광식 등(2004)은 제주도 한라산 남·북측 사면 용천수의 용존 이온 함량과 산소·수소 동위원소 특성에 대한

연구를 실시하였는데, 북측사면의 용천수들은 여름철에 함양된 강수로부터 유래하고 있는 것으로 나타나 용천수의 함양과 배출간에 큰 시간적 차이가 없이 매우 빠르게 순환하는 것으로 해석되었다.

1-3 연구의 목적

이 연구는 제주도 남·북사면과 서부지역의 해안변 부근에서 기저유출을 통해 연중 하천수의 흐름이 유지되고 있는 4개 하천(외도천, 옹포천, 강정천, 연외천)을 대상으로 강우량에 따른 하천수위의 변동 특성을 파악하고, 수위-유량 관계곡선을 유도하여 연간 기저유출량의 규모를 파악하는데 중점을 두었다.

이 연구를 통해 얻어진 연구대상 하천별 기저유출량에 관한 자료는 제주도 지하수의 기저유출 특성을 파악함과 아울러 향후 지하수자원의 보전·관리, 용수개발, 하천생태계 보전, 재해방지대책 등에 중요한 기초정보로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

제2장 연구조사 및 방법

2-1 연구대상 하천의 선정

제주도에는 지방2급 하천과 소하천을 포함해 총 143개의 하천이 분포하고 있으나, 일부하천(외도천·옹포천·창고천·중문천·강정천·연외천·동홍천)을 제외하면 모두 건천을 이루고 있기 때문에 지하수로부터 배출되는 기저유출 성분 조사가 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 용천수의 형태로 기저유출이 발생하고 있는 하천 중 용출량 규모, 조사·관측의 용이성, 연구결과의 상호비교, 용천수 이용상황 등을 고려하여 외도천·옹포천·강정천·연외천을 연구대상 하천으로 선정하였다(Fig. 1).

연구대상 하천중에서 외도천·강정천·옹포천은 1970년대부터 상수원으로 개발돼 이용하고 있으며, 외도천과 강정천은 각각 북사면과 남사면에 위치하고 있어 연구결과의 상호비교가 가능하다. 또한, 강정천과 외도천에는 은어가 서식하고 있으며, 취수보가 시설되어 있어 조사·관측도 비교적 용이한 편이다.

이 연구를 위하여 전술한 4개 하천(외도천·옹포천·강정천·연외천)을 대상으로 18개월간(2002. 7~2003. 12) 월1회 이상 정기적으로 유속을 측정하였고, 제주도광역수자원관리본부에서 설치·운영중인 실시간 자동수위관측 자료를 수집·분석하여 홍수유출 횟수 및 지속시간 뿐만 아니라, 하천수위와 강우량과의 관계에 대해서도 분석하였다.

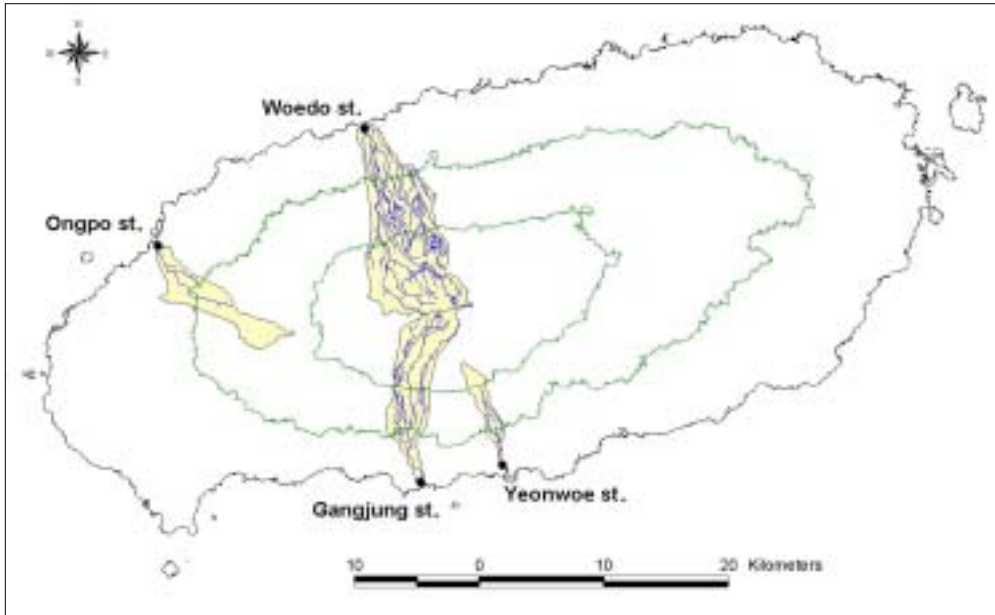


Fig. 1. The Location of gauging stations and watershed area of each stream.

2-2 기상 및 자료의 분석

2-2-1 강우량 자료 분석

연구대상 하천의 홍수유출 발생횟수와 유출 지속시간 등을 파악하기 위해 제주도소방방재본부 강우관측소(29개소)와 제주지방기상청 관할 강우자료(4개소)를 수집·분석하였다. 수집된 강우자료는 연구대상 하천의 유역을 고려하여 Fig. 2와 같이 각 하천 유역내에 위치한 강우관측소의 자료를 선정·이용하였다. 즉, 외도천은 제주기상대·항파두리·관음사·어승생의 강우자료를 이용하였고, 옹포천은 한림읍사무소·저청초등학교·어음분교의 강우자료를, 강정천과 연외천은 대천동사무소·서귀포기상대·돈내코·서귀포시청에서 관측된 강우량 자료를 산술평균하여 적용하였다.

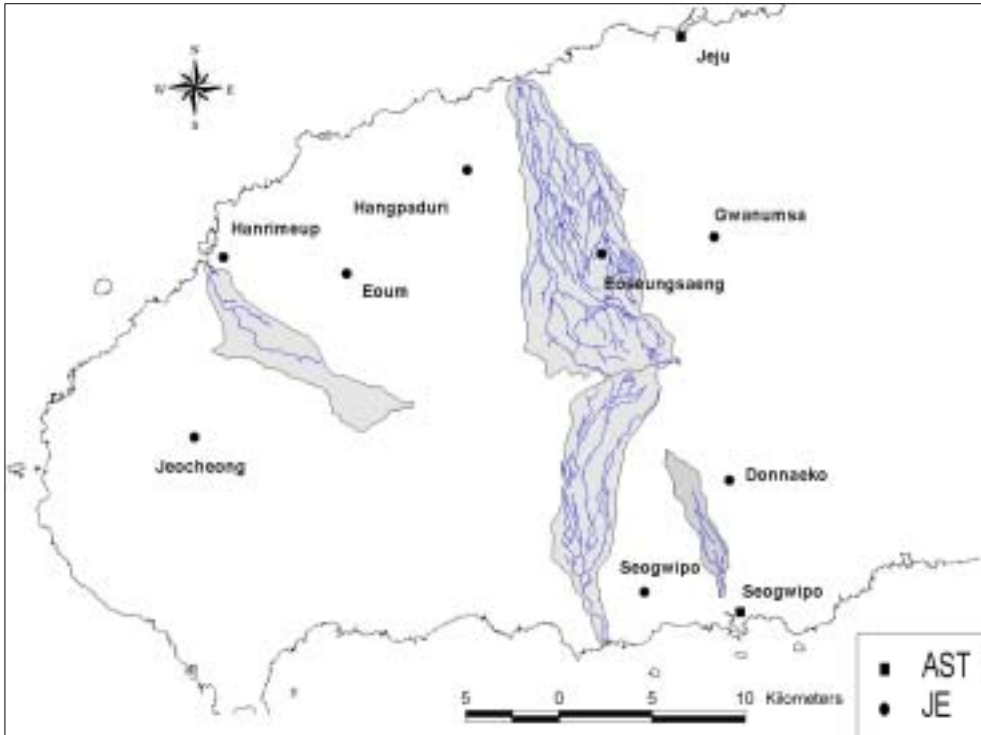


Fig. 2. The observation sites of rainfall gage(AST:Astronomical Office Rainfall Gage, JE:Jeju Province Rainfall Gage).

2-2-2 하천의 유역특성 분석

연구대상 하천의 유역특성을 파악하기 위해 축척 1/5,000 제주도 수치지형도(국립지리원, 1995)를 이용하여 유역면적, 유로연장, 유역평균폭, 형상계수 등을 분석하였다. 또한, 하천유역의 표고 및 경사에 대한 분석은 축척 1/5,000 제주도 수치기본도의 등고데이터와 GIS 3차원 분석기법을 이용하여 실시하였다. 특히, 경사분석에 있어서는 Table 1과 같이 Hudson(1936)과 이금삼 등(2000)이 제안한 5등급체계를 적용하여 분석하였다.

Table 1. The classification of gradient grades.

Grades	Slope range	Classification
1	< 5°	Flat slope
2	5~10°	Slightly slope
3	10~15°	Moderate slope
4	15~20°	Steep slope
5	20° <	Very steep slope

또한, 연구대상 하천유역 내에 위치한 용천수의 분포특성을 파악하기 위해 축척 1/50,000 제주도 지질도를 이용하였다. 즉, 용천수의 위치를 지질도상의 지질경계와 비교·분석함으로써 용출지점과 지질과의 관련성 해석을 시도하였다.

2-3 하천에 대한 현장조사

연구대상 4개 하천의 기저유출량을 산정함과 아울러 변화양상을 파악하기 위하여 2002. 7~2003. 12월까지 18개월 동안 매월 1회 이상 현장조사를 실시하였다. 우선, 유속측정의 일관성을 유지함과 아울러 유량산정을 위해 각 연구대상 하천에 대한 수준측량을 실시하였다. 수준측량시에는 유속측정 지점과 상·하류 각각에 대해 횡단면도 측량하였다. 유속측정은 Marsh-McBirney사의 FLO-MATE 모델 2000을 이용하여 매월 1회 이상 동일지점의 대표유속을 측정·기록하였다. 또한 유속측정시에는 자동수위측정기에 의한 수위값과의 비교를 위해 외도천과 강정천에 설치된 가수위표의 수위도 병행해 측정하였다. 아울러, 연구대상 하천의 홍수유출 발생횟수와 지속기간 및 기저유출량과 강우량과의 관계분석 등을 위해 제주도광역수자원관리본부에서 설치·운영하고 있는 하천수위 자동관측 자료를 수집·분석하였

다. 한편, 연구대상 4개 하천의 조사지점 주변현황과 본 연구를 위해 설정한 단면 등에 대해 하천별로 살펴보면 다음과 같다.

2-3-1 외도천

Fig. 3은 외도천 조사지점 주변의 상황과 유출량 산정을 위해 설정한 3개의 단면을 나타낸 것이다. 3개의 단면 중 C-C'단면은 취수보가 설치돼 있을 뿐만 아니라, 자동수위관측기가 설치·운영되고 있는 지점이다. 이 단면은 실시간으로 관측되고 있는 수위자료를 이용하여 Govinda Rao(1963)와 Oki(1929)의 실험식을 적용해 기저유출량을 산정하기 위하여 설정된 단면이다. 또한, A-A' 및 B-B'단면은 유속계에 의한 유속측정 자료를 통하여 기저유출량을 산정하고자 설정한 단면으로서, 전술한 웨어공식에 의한 결과와 상호 비교·검토를 위해 설정하였다.

2-3-2 용포천

Fig. 4는 용포천의 유출량을 선정하기 위해 한림읍 동명리와 용포리를 연결하는 우회도로에 있는 월계교를 중심(하천의 상류방향으로 35m~하류방향으로 40m)으로 설정한 3개의 단면을 설정하여 나타낸 것이다. 3개의 단면 중 B-B'단면은 자동수위관측기가 설치·운영되고 있는 지점으로서, 이 단면은 실시간으로 관측되고 있는 수위자료와 유속측정 자료를 이용하여 수위-유량 관계곡선을 유도하기 위해 설정된 단면이다. 또한, A-A' 및 C-C'단면은 유속측정 자료를 이용하여 기저유출량을 산정하기 위해 설정된 단면이다.

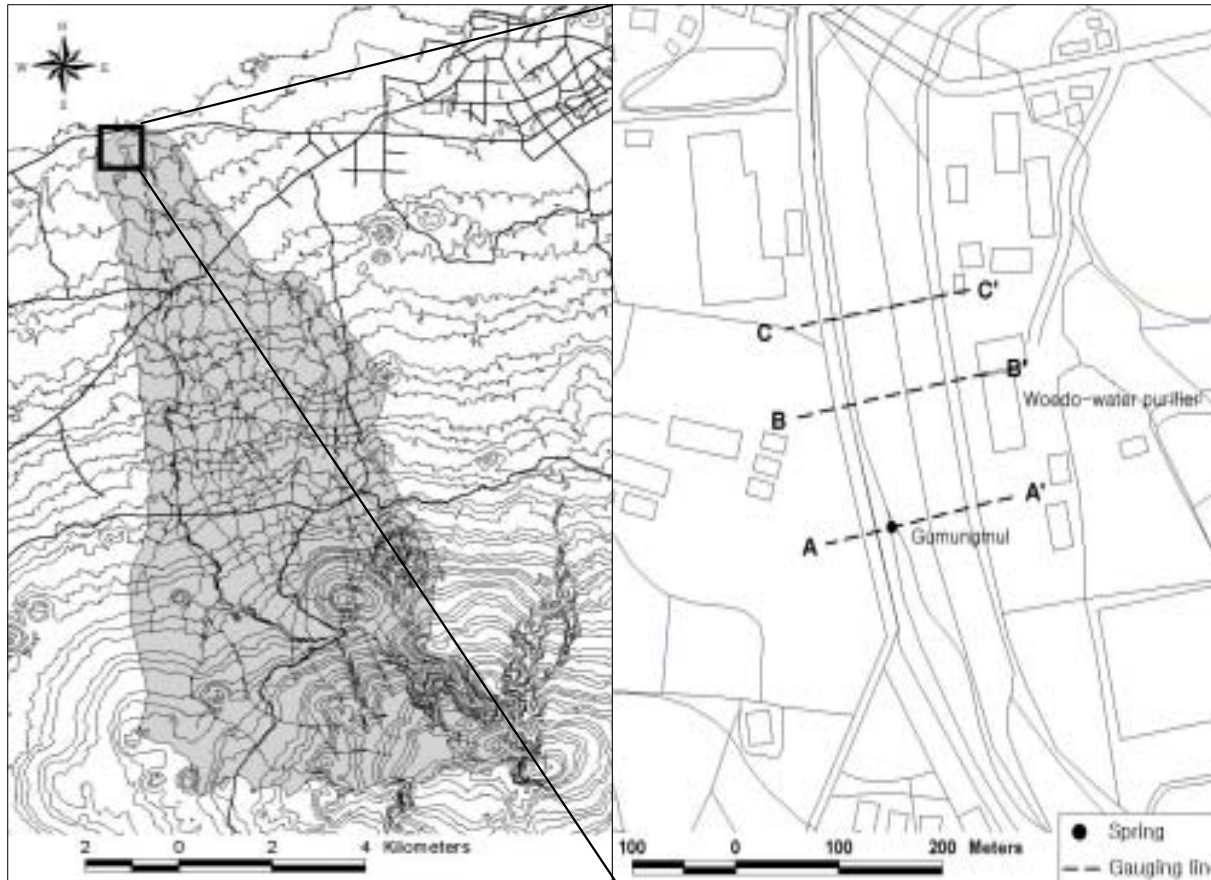


Fig. 3. Watershed area of the Woedo stream and observation location of stream discharge.

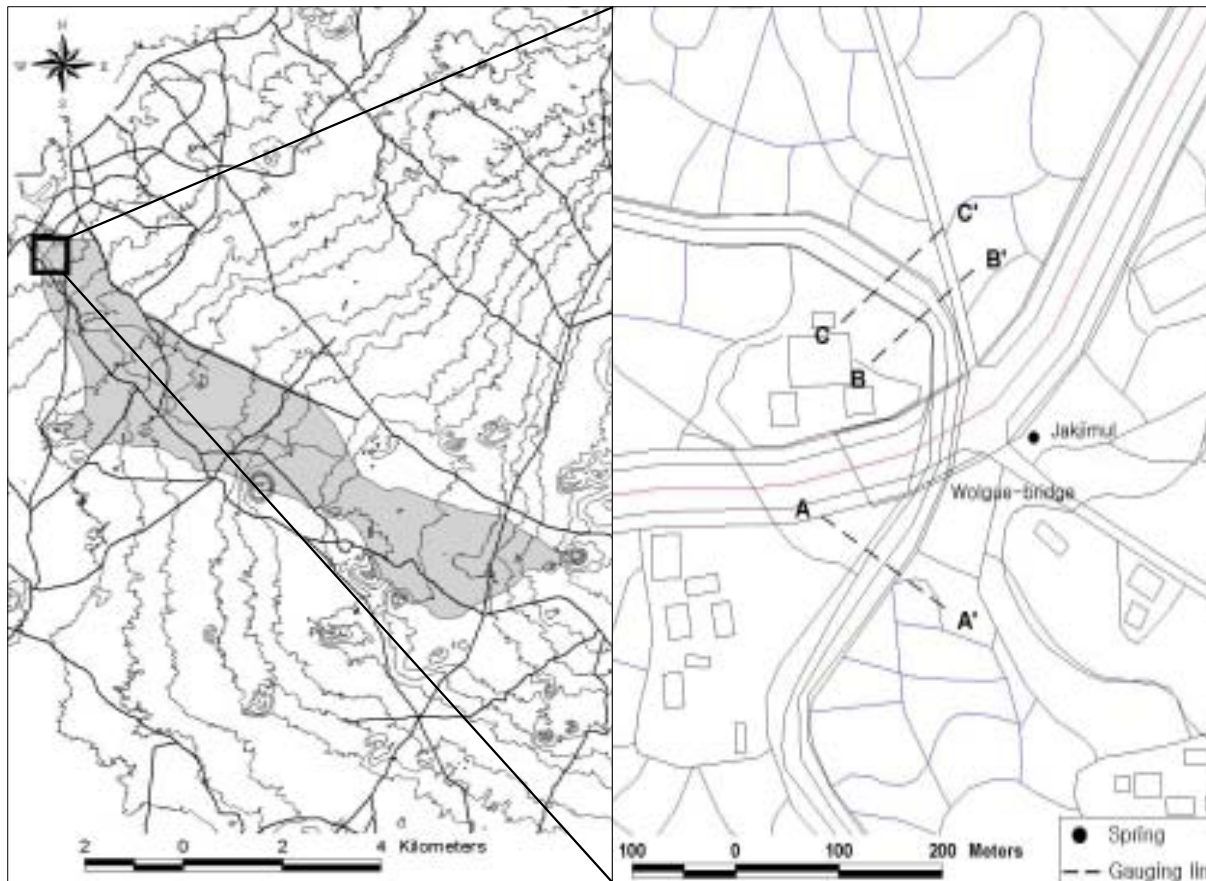


Fig. 4. Watershed area of the Ongpo stream and observation location of stream discharge.

2-3-3 강정천

Fig. 5는 강정천의 A-A'단면(강정수원지의 취수보 부근)과 B-B'단면(강정교 부근)을 설정하여 나타낸 것이다. 2개의 단면 중 A-A'단면은 외도천의 C-C'단면과 같이 취수보가 설치되어 있고, 자동수위관측기가 설치·운영되고 있는 지점이다. 이 단면은 실시간 수위관측 자료를 이용하여 웨어공식에 의해 기저유출량을 산정하기 위하여 설정된 단면이다. 또한, B-B'단면은 유속계에 의한 유속 측정자료를 통하여 기저유출량을 산정하고자 설정한 단면으로서, A-A'단면에서 산정된 결과와 비교·검토를 위해 설정하였다.

한편, 2개의 단면 사이에는 “큰넷물2”와 “가시물”이라는 용천수가 위치해 있는데, 용출량은 각각 $600\text{m}^3/\text{d}$, $8,982\text{m}^3/\text{d}$ 으로 조사된 바 있다(제주도, 1999).

2-3-4 연외천

Fig. 6은 연외천의 기저유출량을 산정하기 위해 설정한 3개의 단면을 나타낸 것이다. B-B'단면에는 다른 하천에서와 같이 자동수위관측소가 설치·운영중이며, 이 단면은 실시간 수위관측 자료와 유속측정 자료를 이용하여 수위-유량 관계곡선을 유도하기 위해 설정된 단면이다. 또한, A-A' 및 C-C'단면은 유속측정 자료를 통하여 기저유출량을 산정하여, 3개의 단면에서의 결과를 비교하기 위해 설정된 단면이다.

한편, B-B'와 C-C'단면 사이에는 2개(굴렁지샘, 샘동네물)의 용천수가 분포하고 있고, 각각의 용출량은 $300\text{m}^3/\text{d}$ 과 $80\text{m}^3/\text{d}$ 인 것으로 조사된 바 있다(제주도, 1999).

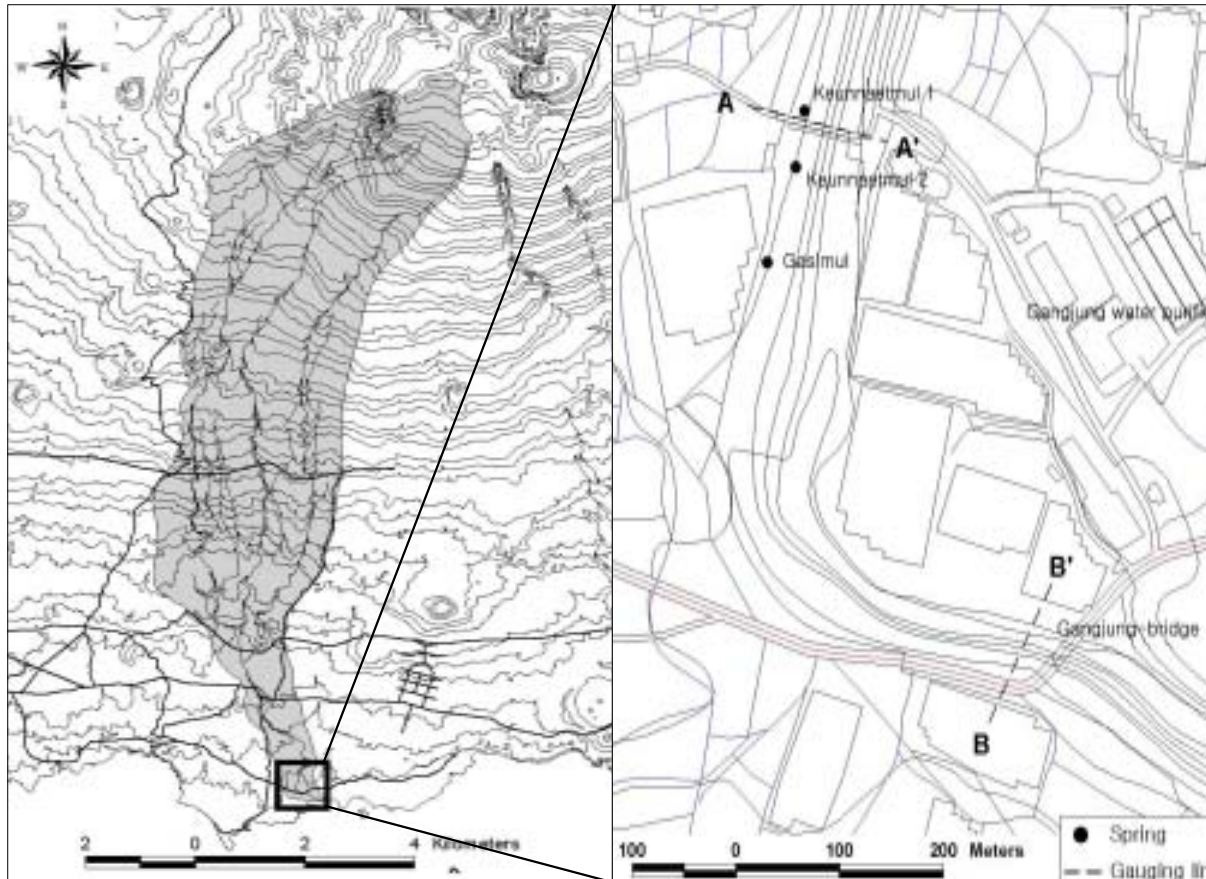


Fig. 5. Watershed area of the Gangjung stream and observation location of stream discharge.

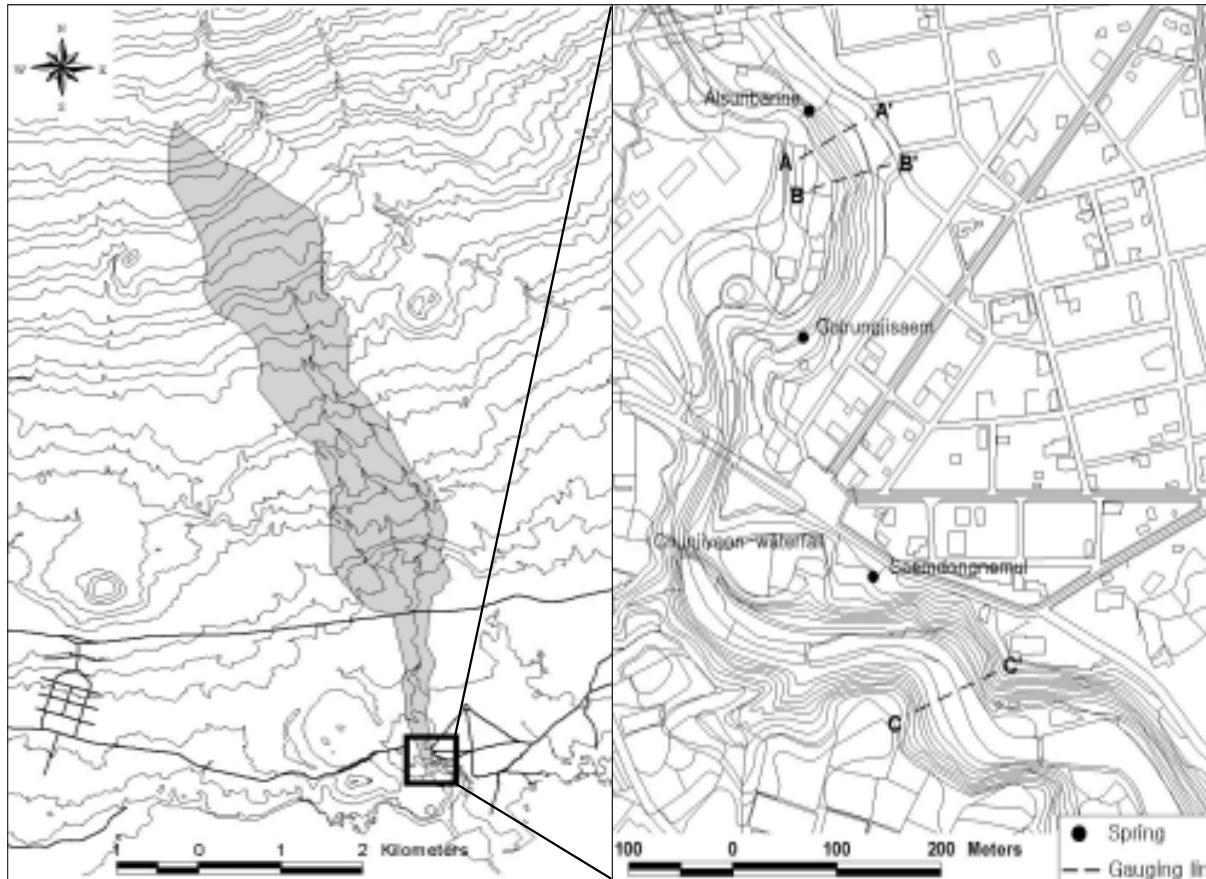


Fig. 6. Watershed area of the Yeonwoe stream and observation location of stream discharge.

2-4 이론적 고찰

2-4-1 강우와 유출

지표면이나 바다로부터 증발된 수분은 대기중에서 상승, 이동하다가 응집되어 다시 지표면 또는 바다로 강하한다. 강하된 물은 식물 등에 의해 차단되거나 지표면에 도달하여 하천에 유입된다. 그 일부는 지하로 침투하여 지하수를 형성하기도 한다. 이러한 물의 순환과정을 수문순환이라고 한다. 수문순환은 중단없이 계속적으로 반복되는데 증발, 강우, 차단, 증산, 침투, 침투(percolation), 저류, 유출 등의 여러 가지 복잡한 과정을 거치게 된다(Fig 7).

이러한 수문순환의 과정 중 유출은 지표면에 도달한 강우가 하천에 이르는 경로에 따라 다시 지표면 유출, 지표하 유출 또는 중간유출, 지하수 유출로 구분된다.

지표면 유출은 지표면 및 지상의 각종 수로를 통해 흘러 유역의 출구에 도달하는 유출을 말한다. 수로에 도달하기까지 지표면 위를 흐르는 지표면 유출을 지표류라 하며, 이와 구별하기 위하여 하천을 흐르는 유출을 하천유출이라 한다. 지표면 유출은 침투유량에 기여하는 주요성분이 되고, 또한 수로에 제일 먼저 도달하여 수문곡선의 침투를 형성한다.

지표하 유출 또는 중간유출은 강우가 지표속으로 침투하여 표토층을 따라 하천에 이르기까지 횡적으로 흐르는 것으로, 지표면과 지하수위 사이에서 흐른다. 지표하 유출의 일부는 곧 하천으로 흘러 들어갈 수도 있는 반면 상당한 기간이 지난 후 하천수와 합류하는 경우도 있다.

지하수 유출은 표토층을 통해 침투한 물이 더 깊이 침투하여 지하수를 형성하는 유출부분으로 비교적 장기간 지하수로 존재한다. 이러한 지하수도 중력에 의해 낮은 곳으로 흐르고, 결국에는 바다로

흘러 들어가게 된다.

실용적인 유출해석을 하기 위해서는 하천수로를 통한 총 유출을 통상 직접유출과 기저유출로 분류한다. 직접유출은 강수 후 비교적 단시간 내에 하천으로 흘러 들어가는 지표면 유출과 지표하 유출 및 하천 또는 수로에 직접 떨어지는 수로상 강우로 구성된다. 기저유출은 지하수 유출과 시간적으로 지연된 지표하 유출에 의해 형성된다.

유출현상을 일으키는 호우기간의 총 강수량을 초과강수량과 손실량으로 구성된다. 초과강수량은 지표면 유출의 형성에 직접적으로 기여하는 부분을 말하며 손실량은 지표면 유출이 되지 않는 잔여부분을 뜻한다. 이러한 강수량의 손실은 차단, 증발, 증산, 지면저류, 침투 등에 의해 생기게 되는 것이며 수문순환과정에서 볼 때에는 물의 손실이 아니지만 이수면에서는 손실이라고 볼 수도 있다.

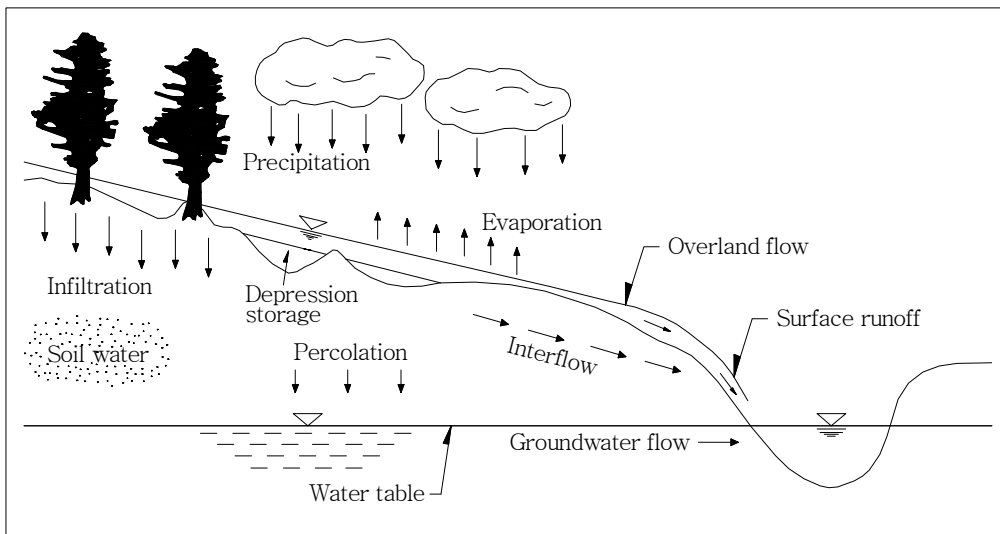


Fig. 7. Hydrologic cycle.

2-4-2 하천유량 수문곡선

수문곡선은 수위나 유량 또는 유속 등의 특성을 경과시간별로 도시한 그림이다. 일반적으로 수문곡선은 유량수문곡선을 뜻하는데, 수문곡선은 강우에 대한 유역의 반응을 종합적으로 나타내 주는 곡선으로서 강우의 형태나 진행방향 등 기후특성과 유역의 경사, 흙의 피복상태, 지질상태, 유역의 지형학적 특성을 전부 포함한 결과를 대표한다.

Fig. 8는 강우에 대한 수문곡선을 모식적으로 나타낸 그림이다. A~B는 수문곡선의 접근구간, B~D는 상승구간, D~G는 하강구간이라 한다. 2개의 변곡점 C~E를 첨두구간이라고 하며, 점 B는 수문곡선의 시작점, 점 D는 첨두점이라고 한다. F~G구간은 지하수에 의하여 보충되는 유량을 나타내는 구간으로서, 이를 지하수감수곡선이라고 한다. 또한 강우의 유효우량의 질량중심으로부터 첨두유량 발생시간까지의 시간을 지체시간이라고 한다.

상승곡선구간의 C점과 하강곡선구간의 E점은 곡선의 변곡점이며, B~C구간은 유역의 저류증가(수로의 저류, 지표면저류 등)로 인한 유량의 증가를 나타내 주는 구간이며, 이 구간에서는 유역의 지형학적 요소(유역의 경사, 지표면상태, 유역의 형태 등) 및 기상학적 요소(강우강도, 시간적 분포, 공간적 분포 등)에 의하여 영향을 받는다. 첨두점 D는 유량이 가장 집중적으로 나타난 점으로서 유역면적 중에서 유출에 기여하는 면적이 가장 클 대에 일어난다. 유역면적이 비교적 작은 경우에는 출구에서부터 가장 먼 지점으로부터의 유량이 가장 가까운 지점의 유량과 동시에 나타날 때를 말한다.

하강곡선 중의 변곡점 E점은 지표면 유출이 중지된 시간이다. 즉 강우가 끝나면 하천은 지표면에 저류지에서 물을 공급받아 지표면

유출이 계속되나 강우로부터의 공급이 없으므로 지표면유출량은 시간에 따라 감소한다. 따라서 E점에 이르러서는 지표면유출에 의한 공급은 중단되고, E점 이후부터는 저류지에서 물이 방류되어 나타난 것이다. F점에 이르러서는 수로로부터 방류도 중지되고, 이점 이후부터 F~G 구간에서는 순수한 인근 지하수공급에 의하여 유출이 유지된다.

지하수감수곡선인 F~G구간은 침투 또는 수로의 수위상승으로 인하여 지하수층에 저류된 물의 양이 하도로 다시 유입되는 것으로서, 이는 유역의 대수층의 특성에 좌우된다.

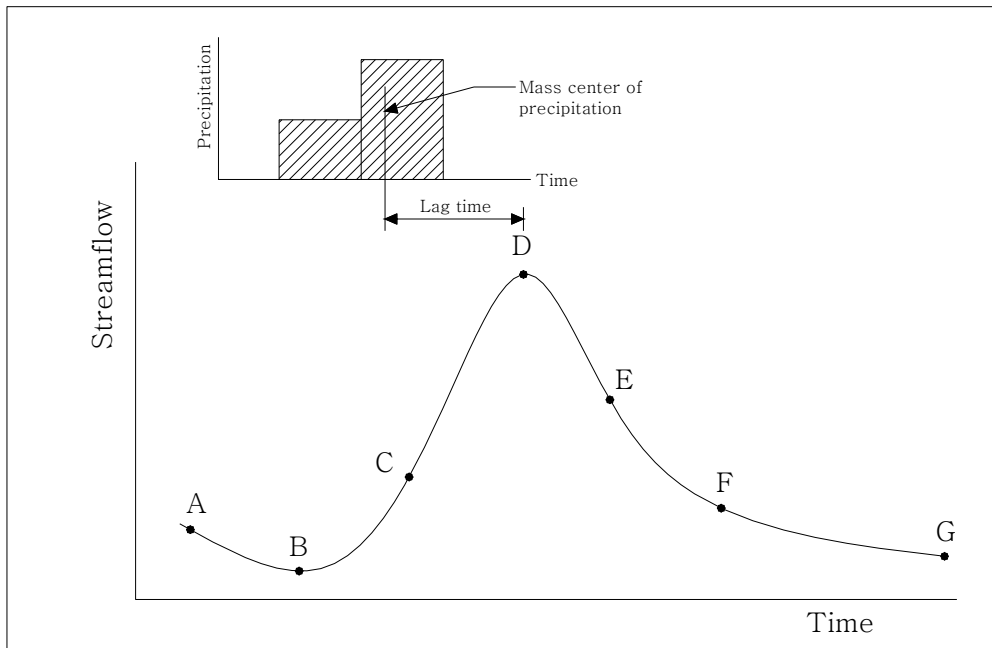


Fig. 8. Hydrograph.

2-4-3 수문곡선의 분리

하천에 증수(增水) 형식은 지표면유출과 중간유출, 지하수유출로 크게 나누어지나 단위도법에서는 주로 지표면유출과 중간유출을 포함한 직접유출과 기저유출로 대별하여 생각한다. 그러나 주어진 수문곡선에서 직접유출과 기저유출을 엄밀히 분리하는 것은 매우 곤란하다.

수문곡선의 유량은 지표면유출, 중간유출, 지하수유출 및 수로상 강수를 합한 것이다. 즉, 직접유출과 기저유출을 합한 것이므로 호우로 인한 유출해석을 위한 직접유출과 기저유출을 분리시켜야 하며 다음과 같은 분리 방법이 있다.

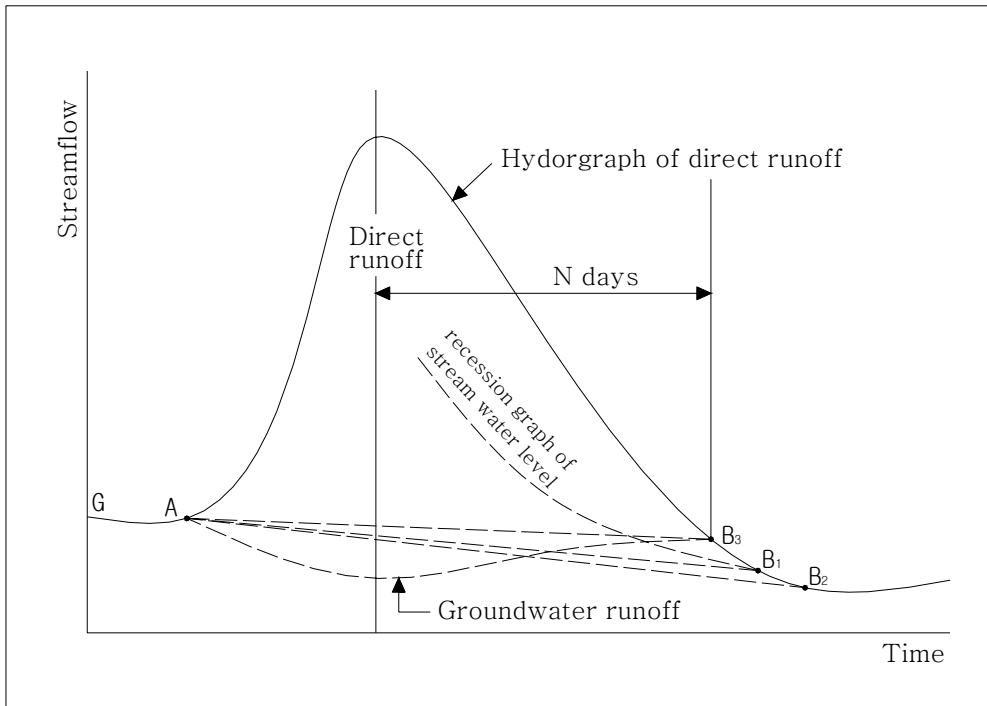


Fig. 9. The recession graph of stream water level.

(1) 지하수 감수곡선법

과거의 수문곡선으로부터 지하수 감수곡선을 그려 실제 관측된 수문곡선의 지하수 감수곡선에 겹쳐 분리하는 방법이다.

(2) 수평직선 분리법

상승부 기점에서 수평선을 그려 분리하는 방법.

(3) N-day법

침투유량이 발생한 시간으로부터 N일 후에 유출이 끝난다고 생각함.

$$N = A_1^{0.2} = 0.8267A^{0.2} (A_1 = \text{mile}^2, A = \text{km}^2)$$

만약 유역면적이 500km^2 이라면 $N = 0.8267(500)^{0.2} = 2.86$ 일로, 침투유량이 발생하고 2.86일 후에는 유효유량에 의한 유출이 끝난다고 본다.

(4) 수정 N-day법

변곡점에서 침투유량까지 직선을 그리고 침투유량점에서 N일까지 직선으로 그려 분리하는 방법이다.

2-4-4 유출량 산정방법

일반적으로 하천의 유량측정방법은 하천횡단면의 유속측정에 의한 방법과 웨어를 설치하여 월류수심을 측정하고 웨어공식에 적용하여 구하는 방법 등이 있다.

하천횡단면의 유속측정에 의한 방법은 유수단면에서 정해진 간격으로 배치된 측정에서의 유속을 측정하고 유수단면적을 곱하여 유량을 구한다. 유속측정에는 회전식 유속계, 전자기식 유속계, 전자파 표면 유속계 등을 사용하거나, 홍수시 부자를 띄워 그 속도를 측정하여 구하기도 한다.

웨어를 설치하여 수위를 측정하고, 유출량을 산정하는 방법에는 웨어의 종류에 따라 다양한 실험공식이 제시된 바 있다.

(1) 전폭웨어

1) 수정 Rehbock의 공식(1951)

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

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

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

ϵ : h_d 가 1이하일 때는 $\epsilon=0$, 1이상일 때는 $\epsilon=0.55(h_d-1)$

이 식의 적용범위는 $B \geq 0.5m$, $h_d = 0.3 \sim 2.5m$, $h = 0.03 \sim h_d$, 여기서 h 는 0.8m이하이며, $h \leq B/4$ 이다.

(2) 사각웨어

1) 板谷·手島の 공식(1951)

이 공식은 1951년 판곡·수도가 Rehbock의 전폭웨어에 대한 식을 수정한 것인데, 측면수축의 영향을 가미하고 많은 학자들의 실험값을 써서 만든 것이다.

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

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

이 식의 적용범위는 $W = 0.5 \sim 6.3m$, $B = 0.15 \sim 5.0m$,

$h_d / W^2 \geq 0.06$, $h = 0.03 \sim 0.45 \sqrt{B}(m)$ 이다.

2) Oki의 식(1929)

이 공식은 물의 점성, 측면수축 및 접근유속을 고려하여 만든 것이며 실험결과와 잘 일치한다.

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

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

이 식의 적용범위는 $h \geq 0.02m, B > 0.15m, h/B \leq 1, h_d \geq 0.3m,$

$W - B > 3h$ 이다. 이 식은 외도천과 강정천에서 유량산정시 이용되었다.

(3) 광정웨어

1) Govinda Rao의 식(1963)

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

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

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

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

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

$$(1.5 \sim 1.9) \leq h/L ; K_7 = 1.785 + 0.237(h/W)$$

이 식은 Oki의 식과 함께 외도천과 강정천에서 유량산정시 이용되었다.

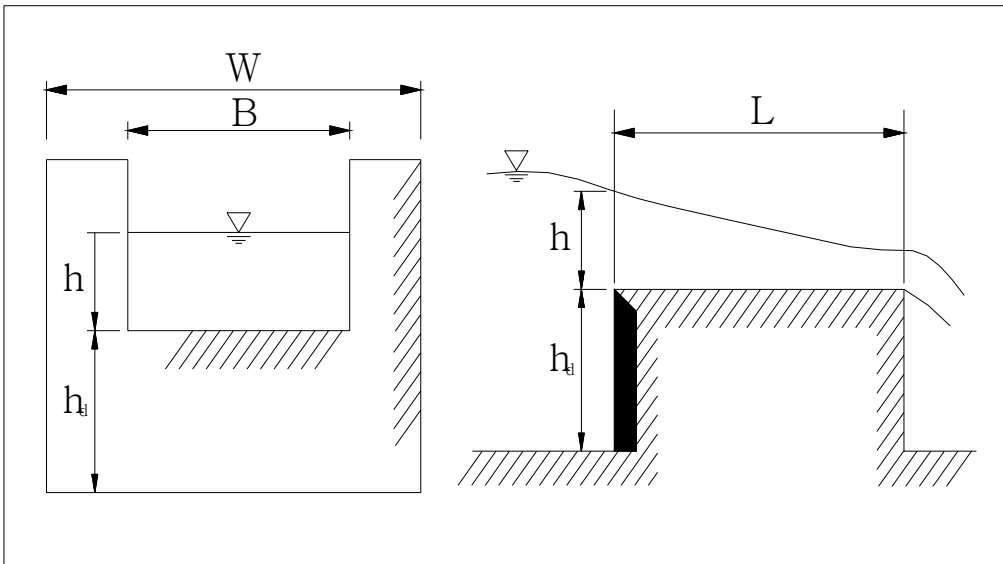


Fig. 10. The cross section of the square weir.

제3장 하천유역의 개요

3-1 유역의 지질분포

제주도의 하천은 한라산 정상부를 중심으로 방사상 형태를 보이거나 대부분 지형경사가 급한 남·북사면에 집중되어 있다(Fig. 11). 이러한 하천들은 투수성이 좋은 제주도의 지질적 특성으로 인하여 대부분 건천의 상태를 유지하고 있다. 그러나 북부지역의 외도천, 서부지역의 용포천, 남부지역의 강정천과, 연외천 등은 해안변 부근에서 솟아나는 용천수에 의해 유출이 지속적으로 유지되고 있다.

제주도를 구성하는 암석은 크게 화산암류와 퇴적암류로 나눌 수 있다. 화산암류는 화학적 조성에 있어서 조면암류에서부터 현무암류에 이르기까지 비교적 다양하게 산출되며, 퇴적암류는 수성화산활동으로부터 형성된 응회퇴적층을 비롯하여 해양성퇴적층, 용암류 사이에 협제된 퇴적층, 현생퇴적층, 사구층 등이 있다.

축척 1/50,000 제주·애월도폭(제주도, 1998), 서귀포·하효리도폭(제주도, 2000), 모슬포·한림도폭(한국자원연구소, 2000)에 기재된 연구대상 하천 주변지역의 지질특성을 살펴보면 다음과 같다.

외도천 유역에서 조면암류는 도평동 부근과 어승생저수지 서쪽 산록도로 주변에 국한되어 분포하고 있으나, 상류지역에는 비교적 넓게 분포하고 있다. 또한, 강정천 유역은 법정악에서 강정동 해안에 이르는 거의 대부분의 지역이 조면암류로 이루어져 있고, 연외천 유역 또한 상류인 금성목장 부근과 고근산 동쪽지역을 제외하면 모두 조면암류로 이루어져 있다. 조면암류 분포지역을 통과하는 하천의 특징을 보면, 용암류의 점성이 비교적 높기 때문에 현무암류 용암으로 이루어진 지역보다 험준한 지형을 이루고, 각수바위·천왕사·영실지역 등과 같은 큰 지형적 변화를 일으키는 요인이 되고 있다. 또한, 암질은 치밀하고

견고한 편이나 용암이 냉각되는 과정에서 생겨난 절리구조와 균열이 발달하여 경계부나 산정부에서 물리적 풍화가 진전되는 경우가 많으며, 조면암류에 속하는 용암은 거의 대부분이 아아(aa)용암으로서 용암류의 상·하부에는 암괴나 자갈 크기의 클린커로 이루어진 층이 발달하는 것이 특징이다.

옹포천 유역에는 조면암류가 분포하고 있지 않으며, 모두 현무암류로 이루어져 있다. 그리고 용암류 경계면을 따라 발달하는 유로도 없고, 넓은 규모의 퇴적암 분포지역도 없다. 일반적으로 현무암류는 점성이 낮아 대지상의 평탄한 지형을 이루는 것이 보편적인 특징이고, 암질은 다공질로서 대체로 치밀·견고하지 못할 뿐만 아니라, 표면은 밋밋한 형태를 이루며, 용암의 냉각과정에서 생겨나는 절리구조 및 균열이 발달하는 것이 특징이다. 따라서 현무암류가 분포하는 지역에서는 협곡을 이루는 하천을 찾아보기가 어렵고, 하천의 곡심이 얇은 것이 특징이다.

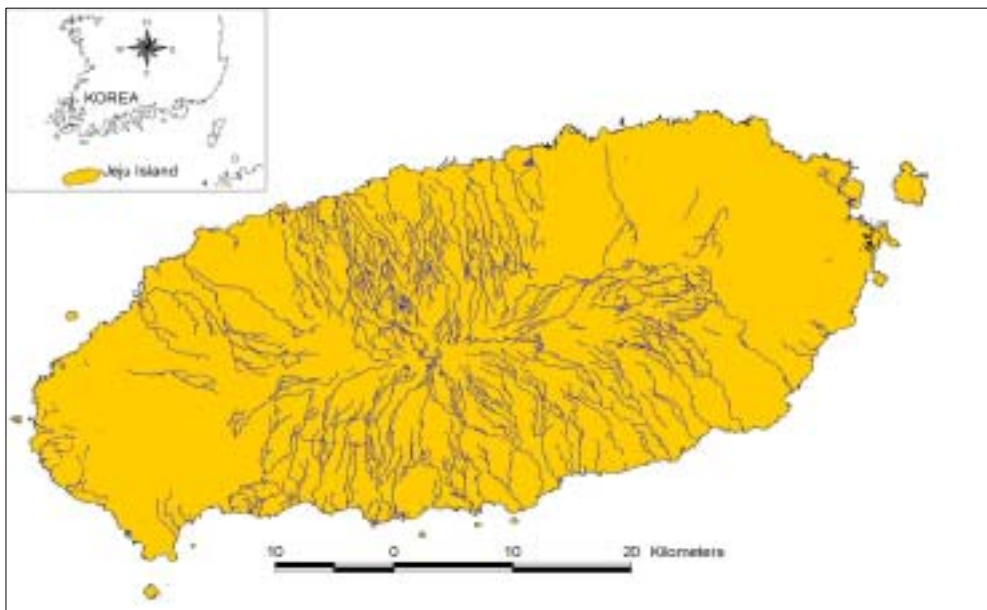


Fig. 11. The map showing stream distributions in Jeju Island.

3-2 하천 형상 및 지형특성

연구대상 유역특성을 파악하기 위해 축척 1/5,000 제주도 수치지형도를 이용하여 유역면적, 유로연장, 유역평균폭, 형상계수, 표고·경사별 면적 등을 GIS분석하였다. 유역의 형상계수는 유역의 형태를 나타내는 무차원 단위의 수치로서 형상계수가 1.0에 가까울수록 유역의 형상은 정방향에 근접함을 의미하며, 형상계수가 클수록 유출의 집중성향이 높아지므로 침투홍수량이 증가하게 된다. 따라서 Table 2에서 제시된 바와 같이, 제주도 북사면에 위치한 외도천과 옹포천의 형상계수가 남사면의 강정천과 연외천에 비해 매우 크게 나타나고 있다. 한편, 연구대상 하천유역의 표고 및 경사별 면적에 대한 분석결과를 살펴보면 다음과 같다.

Table 2. Form of the stream.

Stream	Location	Watershed Area (km ²)	Stream Length (km)	Average width (A/L)	Form factor (A/L ²)
Woedo stream	Woedo-dong, Juje city	76.7	18.4	4.2	0.2
Ongpo stream	Ongpo-ri, hanrim-eup	24.5	10.5	2.3	0.2
Gangjung stream	Gangjung-dong, Seogwipo city	37.5	16.0	2.3	0.1
Yeonwoe stream	Seogwi-dong, Seogwipo city	8.1	9.0	0.9	0.1

3-2-1 외도천

표고별 유역면적에 대한 분석을 실시한 결과, 해발 200m이하 지역은 11.2km²로 유역전체의 14.6%를 차지하고 있고, 해발 200~600m 지역은 31.5%(24.2km²), 해발 600m이상 지역은 53.9%(41.4km²)로서 총 유역면적은 76.74km²로 분석되었다(Table 3).

또한 경사 분석 결과를 보면, 5이하의 평탄지역은 전체면적의 25.9%인 19.9km²이고, 5~10인 완경사지는 65.9%인 30.6km²로 분석되었는데, 결과적으로 토지의 활용도가 높은 경사 20이하 지역이 전체의 88.8%인 68.1km²로 분석되어 외도천 유역은 전반적으로 평탄한 유역을 이루고 있는 것으로 나타났다(Table 4).

Table 3. Results of analysis of altitude with elevations in the Woedo stream.

Altitude (m)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 100	5.8	7.6	5.8	7.6
100~200	5.4	7.1	11.2	14.6
200~300	6.8	8.8	18.0	23.5
300~400	6.0	7.8	24.0	31.3
400~500	4.9	6.4	29.0	37.7
500~600	6.4	8.4	35.4	46.1
600~900	16.1	21.0	51.5	67.1
900~1,200	15.1	19.6	66.6	86.7
1,200~1,500	6.5	8.4	73.0	95.2
1,500 <	3.7	4.8	76.7	100.0

Table 4. Results of analysis of slope in the Woedo stream.

Slope (°)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 05	19.9	25.9	19.9	25.9
05~10	30.6	39.9	50.6	65.9
10~15	11.6	15.2	62.2	81.0
15~20	6.0	7.8	68.1	88.8
20 <	8.6	11.2	76.7	100.0

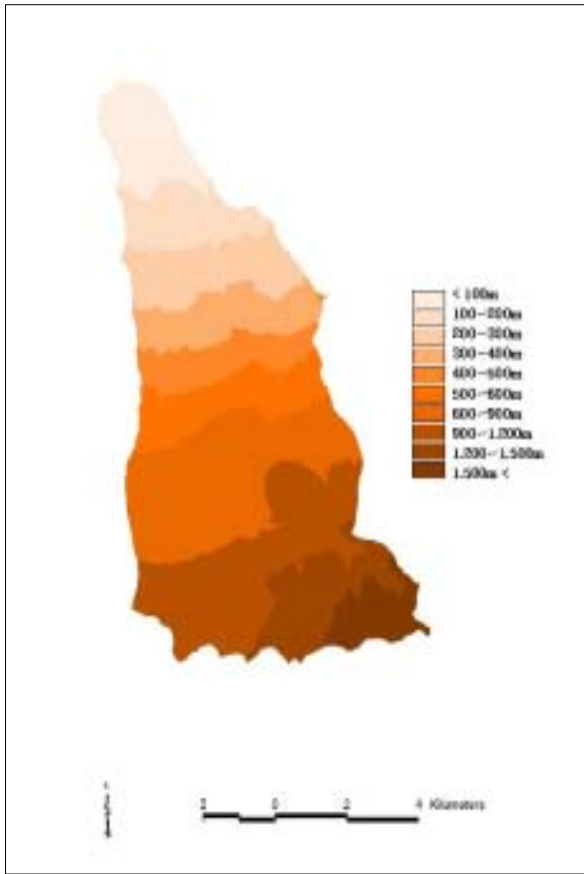


Fig. 12. Analysis of altitude with elevations in the Woedo stream.

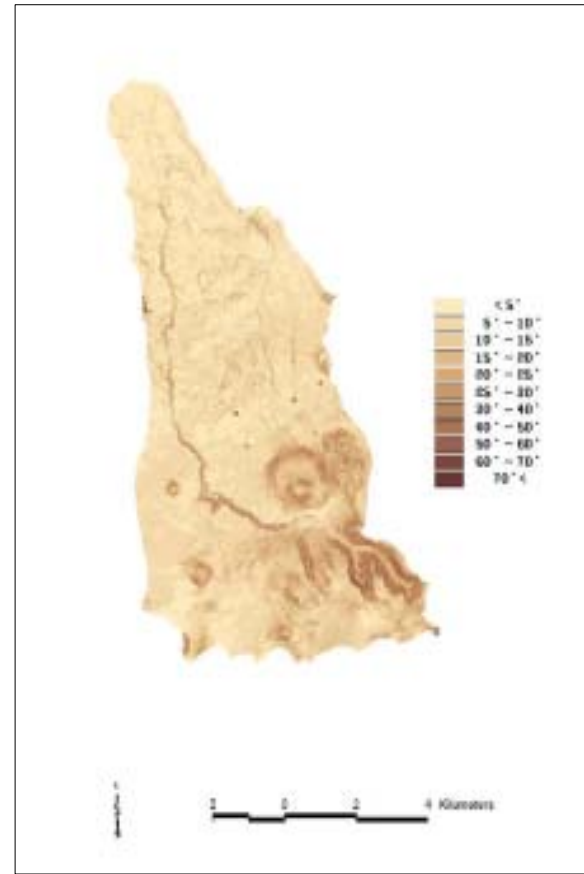


Fig. 13. Analysis of slope in the Woedo stream.

3-2-2 옹포천

Table 5에서 보는 바와 같이 표고별 유역면적에 대한 분석을 실시한 결과, 해발 200m이하 지역은 9.88km²로 유역전체의 40.29%이고, 해발 200~600m 지역은 59.70%(14.64km²)를 차지하는 반면, 해발 600m이상 지역은 0.01%(0.0013km²)에 불과해 옹포천 유역의 대부분은 해발 600m이하 지역에 분포하는 것으로 분석되었으며, 총 유역면적은 24.52km²였다.

또한 경사 분석 결과를 보면, 5이하의 평탄지역은 전체면적의 76.32%인 18.71km²이고, 5~10인 완경사지는 17.9%인 4.4km²로 분석되었는데, 결론적으로 토지의 활용도가 높은 경사 20이하 지역이 전체의 97.81%인 23.98km²로 분석되어 옹포천 유역 역시 전반적으로 평탄한 유역을 이루고 있는 것으로 나타났다(Table 6).

Table 5. Results of analysis of altitude with elevations in the Ongpo stream.

Altitude (m)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 50	1.6	6.5	1.6	6.5
50~100	2.2	8.8	3.8	15.3
100~200	6.1	25.0	9.9	40.3
200~300	5.2	21.0	15.0	61.3
300~400	6.0	24.6	21.1	85.9
400~500	3.1	12.7	24.2	98.6
500~600	0.3	1.4	24.5	100.0
600 <	0.0	0.0	24.5	100.0

Table 6. Results of analysis of slope in the Ongpo stream.

Slope (°)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 05	18.7	76.3	18.7	76.3
05~10	4.4	17.9	23.1	94.3
10~15	0.6	2.3	23.7	96.6
15~20	0.3	1.3	24.0	97.8
20 <	0.5	2.1	24.5	100.0

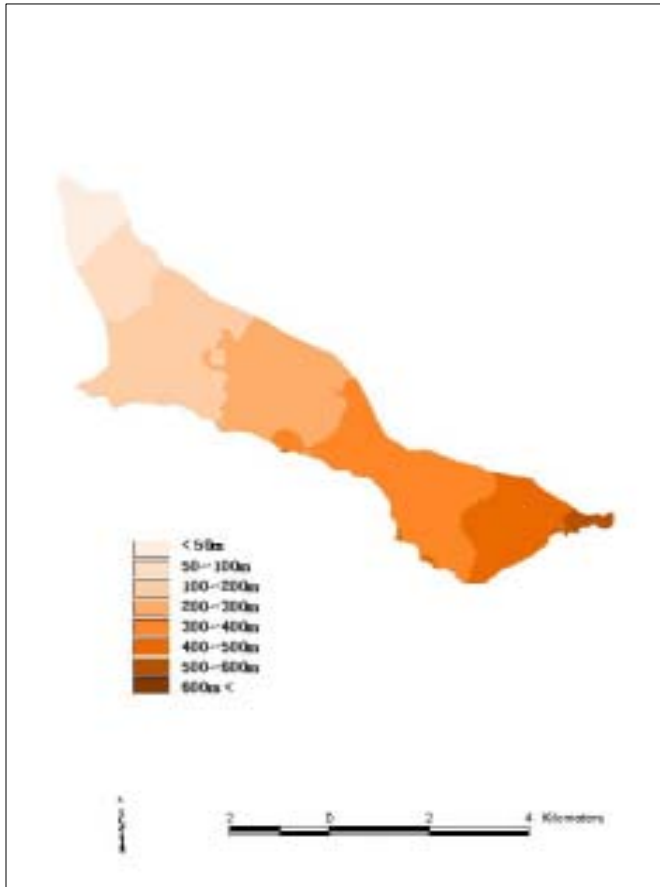


Fig. 14. Analysis of altitude with elevations in the Ongpo stream.

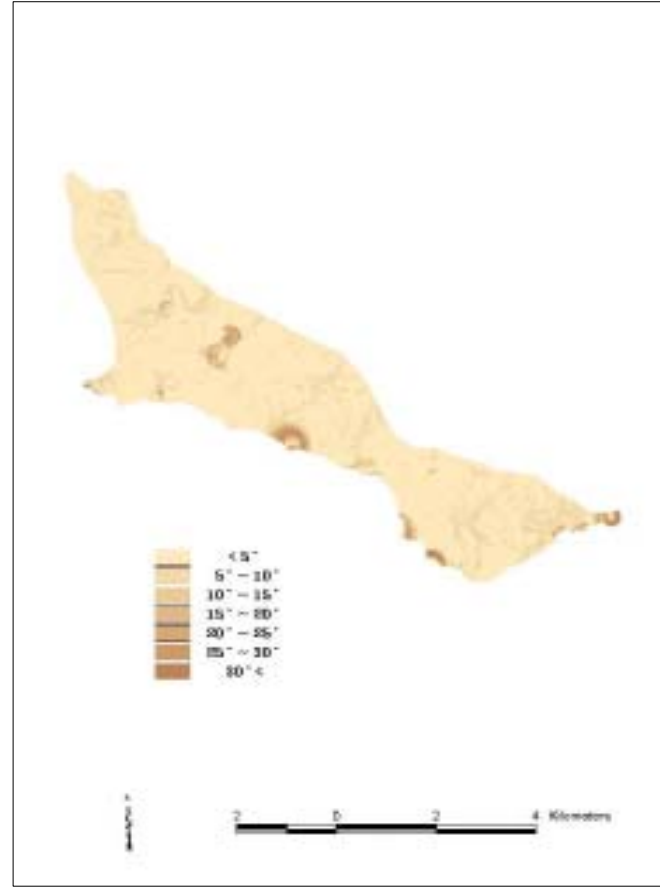


Fig. 15. Analysis of slope in the Ongpo stream.

3-2-3 강정천

표고별 유역면적에 대한 분석을 실시한 결과, 해발 200m이하 지역은 5.3km²로 유역전체의 14.1%를 차지하고 있고, 해발 200~600m 지역은 28.8%(10.8km²)를 차지하고, 600m이상 지역은 57.2%(21.5km²)로서 앞서 언급한 두개의 하천과는 달리 강정천 유역의 대부분은 표고 600m이상 지역에 분포하는 것으로 분석되었다. 그리고 총 유역면적은 37.6km²로 분석되었다(Table 7).

또한 경사 분석 결과를 보면, 5이하의 평탄지역은 전체면적의 17.0%인 6.4km²이고, 5~10인 완경사지는 46.5%인 17.4km²로 분석되었다. 따라서 토지의 활용도가 높은 경사 20이하 지역은 94.9%인 35.6km²로 분석되어 강정천 유역 역시 전반적으로 평탄한 유역을 이루고 있는 것으로 나타났다(Table 8).

Table 7. Results of analysis of altitude with elevations in the Gangjung stream.

Altitude (m)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 50	0.9	2.3	0.9	2.3
50~100	1.5	3.9	2.3	6.2
100~200	3.0	7.9	5.3	14.1
200~300	3.5	9.3	8.8	23.4
300~400	2.5	6.5	11.3	30.0
400~500	2.5	6.6	13.7	36.6
500~600	2.4	6.3	16.1	42.8
600~799	5.0	13.4	21.1	56.2
800~1,000	5.1	13.7	26.2	69.9
1,000~1,200	5.6	14.9	31.8	84.7
1,200~1,400	3.0	8.1	34.9	92.8
1,400~1,600	1.9	5.0	36.7	97.8
1,600 <	0.8	2.2	37.6	100.0

Table 8. Results of analysis of slope in the Gangjung stream.

Slope (°)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 05	6.4	17.0	6.4	17.0
05~10	17.4	46.5	23.8	63.4
10~15	9.2	24.4	33.0	87.8
15~20	2.7	7.1	35.6	94.9
20 <	1.9	5.1	37.5	100.0

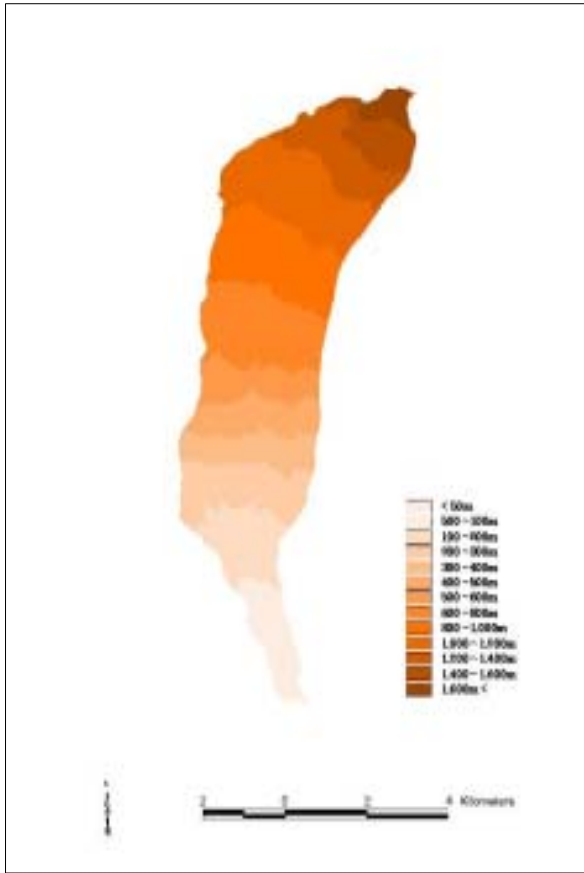


Fig. 16. Analysis of altitude with elevations in the Gangjung stream.

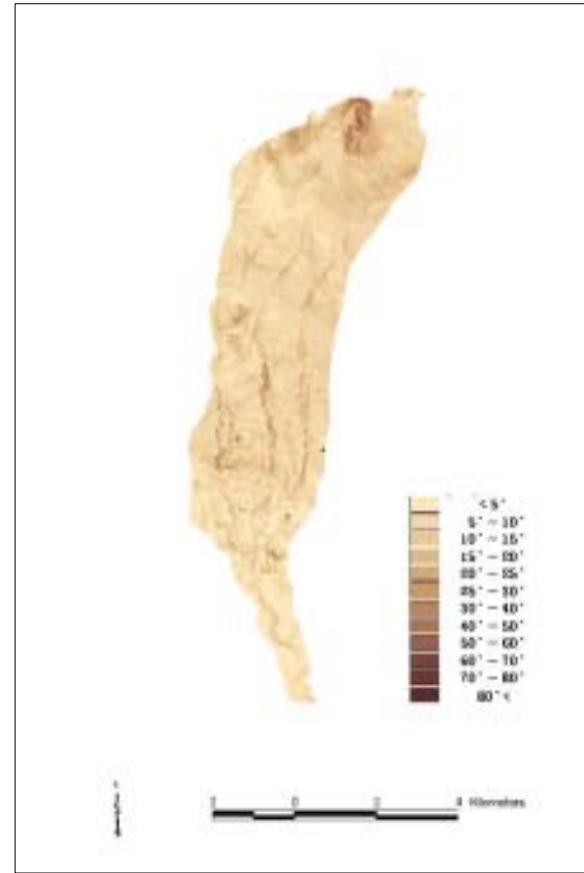


Fig. 17. Analysis of slope in the Gangjung stream.

3-2-4 연외천

표고별 유역면적에 대한 분석을 실시한 결과, 해발 200m이하 지역은 1.6km²로 유역전체의 19.7%를 차지하고 있고, 해발 200~600m 지역은 53.7%(4.4km²), 해발 600m이상 지역은 26.7%(2.2km²)로서 유역의 대부분 해발 200~600m이상 지역에 분포하는 것으로 분석되었다. 그리고 총 유역면적은 8.1km²로 분석되었다(Table 9).

또한 경사 분석 결과를 보면, 5이하의 평탄지역은 전체면적의 21.4%인 1.7km²이고, 5~10인 완경사지는 46.7%인 3.8km²로 분석되었다. 따라서 토지의 활용도가 높은 경사 20이하 지역은 97.8%인 7.9km²로 분석되어 연외천 유역 역시 전반적으로 평탄한 유역을 이루고 있는 것으로 나타났다(Table 10).

Table 9. Results of analysis of altitude with elevations in the Yeonwoe stream.

Altitude (m)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 100	0.6	6.7	0.6	6.7
100~200	1.1	13.0	1.6	19.7
200~300	1.2	15.2	2.8	34.9
300~400	1.1	14.0	4.0	49.0
400~500	1.1	13.9	5.1	62.9
500~600	0.9	10.5	6.0	73.4
600~700	1.1	14.1	7.1	87.4
700~800	0.5	6.6	7.6	94.0
800~900	0.4	4.9	8.0	98.9
900 <	0.1	1.1	8.1	100.0

Table 10. Results of analysis of slope in the Yeonwoe stream.

Slope (°)	Watershed area(km ²)	Percentage (%)	Accumulation of watershed area(km ²)	Accumulation of percentage(%)
< 05	1.7	21.4	1.7	21.4
05~10	3.8	46.7	5.5	68.1
10~15	1.9	23.0	7.4	91.1
15~20	0.6	6.7	7.9	97.8
20 <	0.2	2.2	8.1	100.0

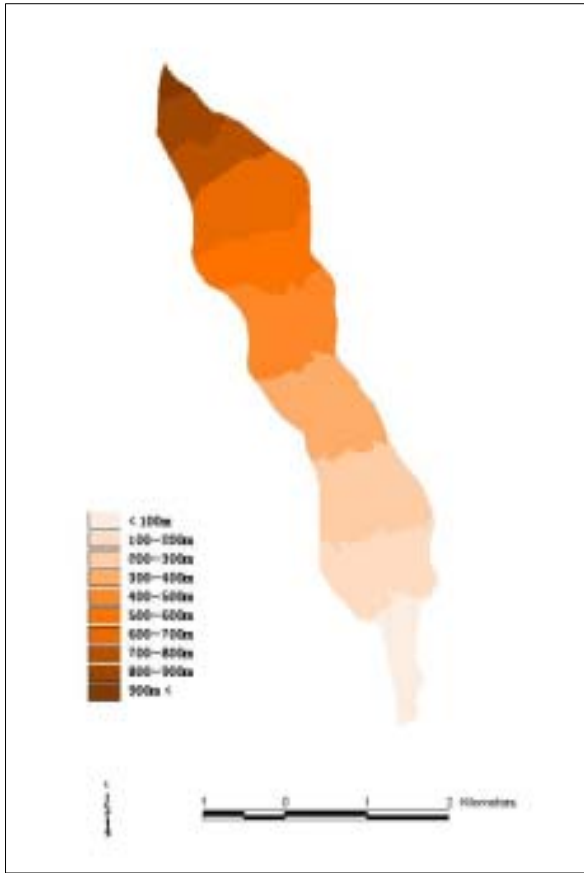


Fig. 18. Analysis of altitude with elevations in the Yeonwoe stream.

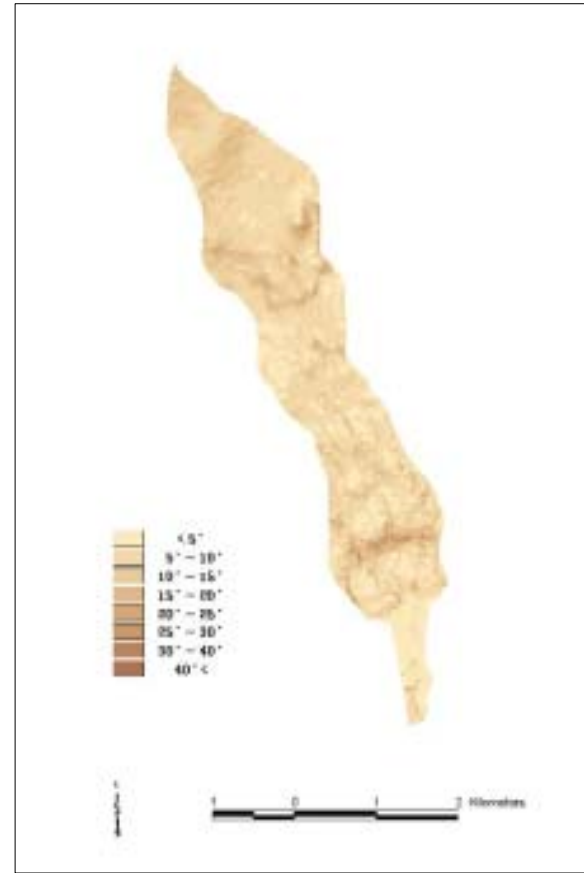


Fig. 19. Analysis of slope in the Yeonwoe stream.

3-3 용천수의 분포

제주도 용천수의 용출 위치는 지형의 변화와 밀접한 관계가 있다. 지형의 변화는 용암류의 불연속적인 분포, 하천의 발달, 오름의 형성, 침식·퇴적작용, 화산 및 지진활동에 수반된 지질구조적인 운동 등 여러 가지 요인에 의해 생겨날 수 있다. 대부분의 용천수들은 하천의 절벽이나 벼랑, 요철지형의 오목지, 산기슭 등에 위치하고 있는데, 이는 중력의 지배를 받으며 유동하던 지하수가 지형변화로 인하여 지하수면이 지표로 노출됨으로서 생겨나는 현상이다. 또한, 용천수는 오름의 기슭이나 침식면에서 용출하기도 한다. 오름에 침투한 빗물이 지형경사를 따라 흐르다가 기슭이나 중앙부에 생겨난 침식면에서 용출되기도 하는데, 이러한 용천수들은 용출량이 수십 톤에 불과한 소규모의 것들이 대부분이며, 강우량에 따라 용출량의 변화도 심하게 일어난다(제주도, 1999).

일반적으로 화산암 분포지역에서 하천은 주로 용암류의 경계부분을 따라 발달하는 것으로 알려져 있다. 이는 용암류 경계부분이 풍화나 침식에 약한 클린커층으로 이루어져 있거나 균열·절리가 발달하여 유수의 작용에 의해 비교적 쉽게 침식되기 때문이다. 이러한 용암류 경계부분에 지속적인 침식이 진행되고 연약한 부분들이 떨어져 나감으로서 하천이 형성되는데 만일, 계곡의 양쪽 벽에 대수층이 존재하는 경우에는 지하수가 하천으로 유출하게 된다.

특히, 이번 연구 대상 하천유역에서도 많은 용천수들이 분포하고 있으며, 함양된 지하수가 이들 용천수에서의 용출로 인해 하천에서 유출이 일어나고 있었다. 따라서 연구대상 하천 인근 주변에 있는 용천수에 대해 제주도가 실시한 자료(제주도, 1999) 및 현장조사를 실시하여 용출특성을 파악하였다. 각 하천유역별 용천수 현황을 Table 11~14에서 나타내었다.

외도천 유역 내 위치한 용천수는 해안지역의 구멍물(EL. 6.0m)에서 산악지역의 윗세물(EL. 1,667.9m)에 이르기 까지 32개소가 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이들 용천수 중 용출량이 가장 큰 용천수는 나라소(EL. 11.6m)이며, 평균용출량은 20,950m³/d였다.

이러한 용천수들의 용출은 대부분 용암류의 경계지점에 형성되고 있는데, Fig. 20에서 보는 바와 같이 제주도 지질도(축척 1:50,000)의 구성암석을 크게 현무암류, 조면암류, 퇴적암류 및 분석구로 간략화 한 후 용천수의 위치를 중첩시켜 놓은 것을 보면 알 수 있다. 즉, 용암류 경계면이나 말단부에서 용출하고 있으며, 특히 용암류의 가장자리인 해안선을 따라 용천수들이 집중적으로 위치하고 있어 지하수가 전반적으로 한라산쪽에서 해안방향으로 유동하고 있음을 보여준다.

Table 11. Springs in the Woedo stream watershed area.

Spring	Altitude (m)	Average yield of spring water(m ³ /d)	Location	Type
Gumungmul	6.0	300	Woedo-1dong, Jeju city	Lava flow contact type
Sujungbatmul	10	5,523		
Naraso	11.6	20,950		
Julmul	11.7	10		
Jinso	15.5	15,000		
Nabsemimul	19.8	2		
Dunduritmul	24.0	2		
Bilremul	16.5	2	Naedo-dong, Jeju city	
Julmul	152.0	50	Haean-dong, Jeju city	
Doksungmul	197.0	300		
Seogammul	217.1	50		
Guryongmul	231.2	2		
Bogeumul	231.4	10		
Jururetmul	264.4	500		
Sunmul	264.5	300		
Jorimul	408.6	50		
Noknamdammul	96.1	20		
Sunnyepokpo	748.5	2,835		
Eoseungsaengmul	1008.6	10		
Norisaengimul	454.2	10		
Gomanggwalwatmul	837.7	5,000	Nohyeong-dong, Jeju city	
Heukryongsamul	75.9	5	Dopyeong-dong, Jeju city	
Saemimoreulmul	89.1	5		
Beyeommotmul	90.5	-		
Haengjungimul	126.5	5		
Julmul	159.9	5		
Julgulmul	267.8	150		
Cheonagyegokmul(2)	650.0	5		
Cheonagyegokmul(1)	650.0	400		
Sajebimul	1399.7	500		
Witsemul	1667.9	50		
Oreumyaksu	1628.8	50		

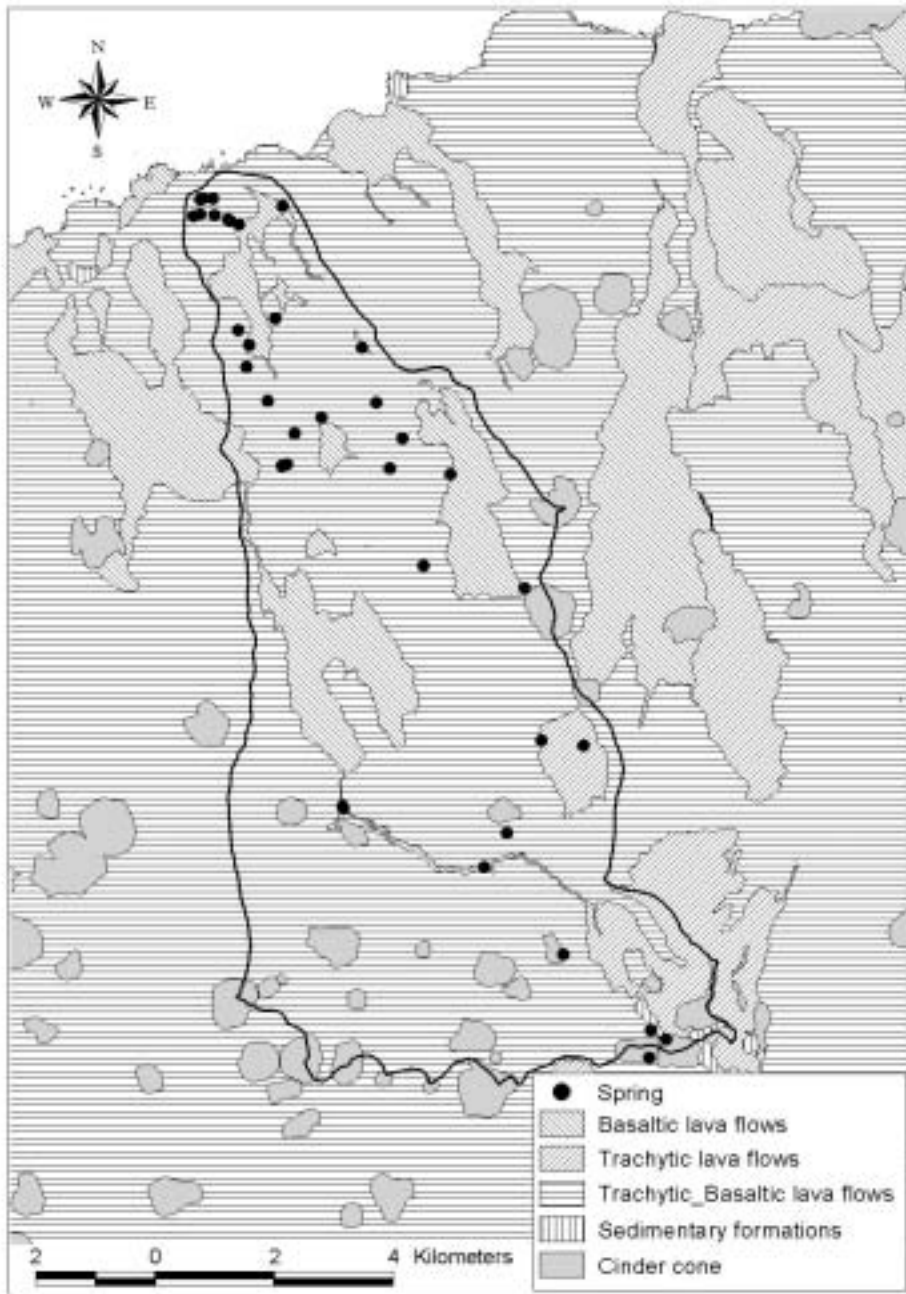


Fig. 20. Geology and springs in the Woedo stream watershed area.

옹포천 유역 내에 위치한 용천수는 해안지역의 구명물(EL. 0.0m)에서 정물(EL. 350.2m)에 이르기까지 12개소가 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 대부분의 용천수는 해발 10m이하에 대부분 분포하고 있으며, 이들 용천수중 조물2(EL. 5.2m)와 막근물(EL. 6.4m)에서 용출량이 가장 많은 것으로 나타났고, 평균용출량은 20,000m³/d였다.

이들 용천수들의 용출위치는 Fig. 21에서 보는 바와 같이 외도천 유역에서와 마찬가지로 용암류의 경계형으로, 용암류가 서로 접촉하는 경계면 또는 가장자리나 용암류의 말단부를 따라 용출하고 있다. 이러한 현상은 외도천에서와 같이 지질도와 용천수의 위치를 중첩시켜보면 더욱 확실하게 나타나고 있다.

Table 12. Springs in the Ongpo stream watershed area.

Spring	Altitude (m)	Average yield of spring water(m ³ /d)	Location	Type
Gumyeongmul	0.0	100	Dongmyeong-ri, Hanrim-eup	Lava flow contact type
Ojamul	5.0	150		
Jomul2	5.2	20,000		
Jakjimul	5.4	300		
Jomul1	5.4	3,377		
Gangsaengimul	6.1	1,000		
Makgeunmul	6.4	20,000		
mundumul	6.4	2,157		
Wolgyesumul	7.9	-		
Gaemyeongmul	8.7	18,932		
Munsumul	123.7	228	Myeongwol-ri, Hanrim-eup	
Jungmul	350.2	-	Geumak-ri, Hanrim-eup	

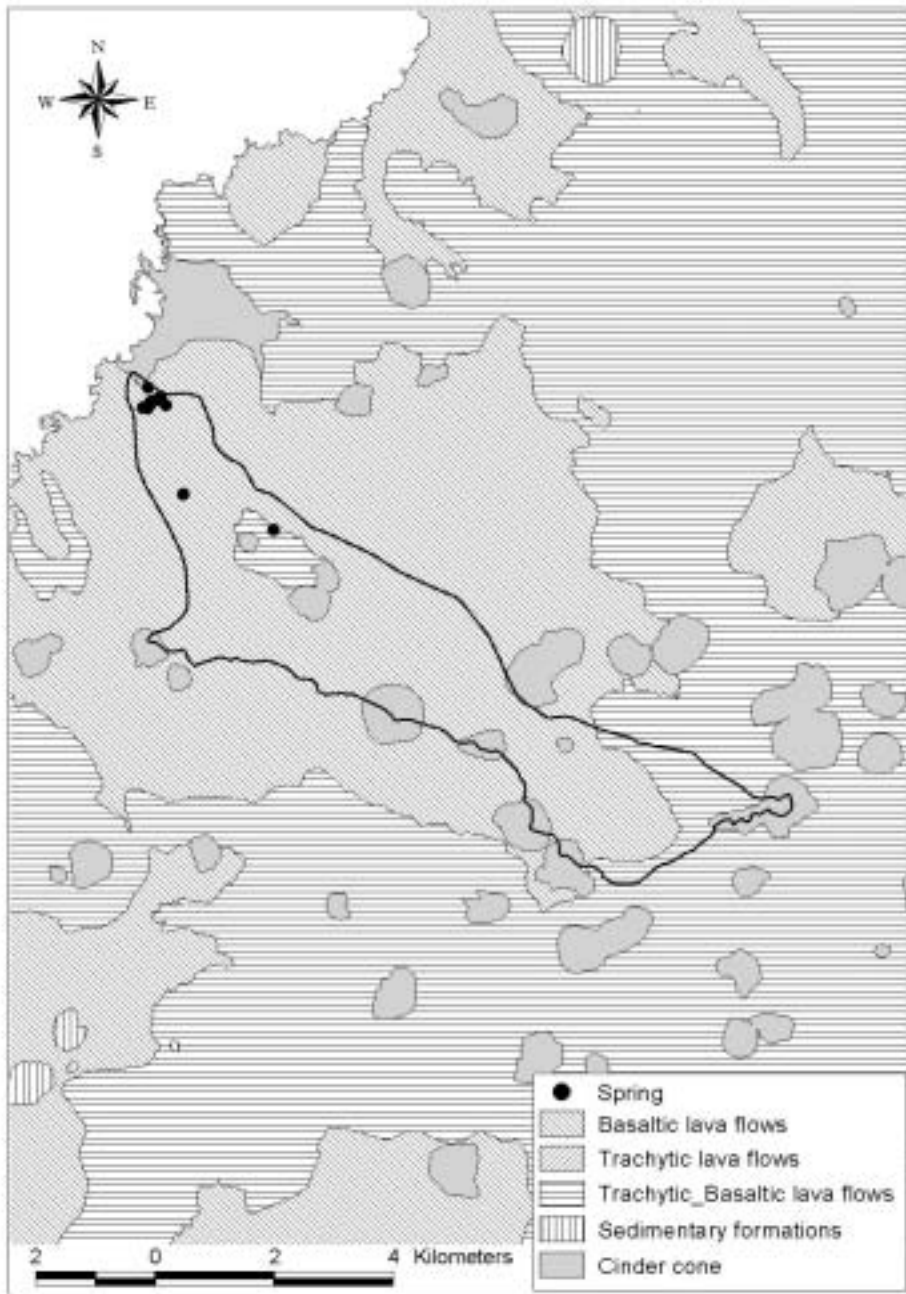


Fig. 21. Geology and springs in the Ongpo stream watershed area.

강정천 유역 내에서도 강정수원지 주변에 위치한 가시물(EL. 15.0m)에서 고지대에 위치한 노루샘(EL. 1,665.7m)에 이르기까지 12개소가 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 용천수 중 용출량이 가장 많은 용천수는 강정수원지 안에 있는 큰넷물1(EL. 19.5m)이며, 평균용출량이 30,000m³/d인 것으로 나타났다.

이들 용천수들의 용출은 외도천과 옹포천 유역에서와 마찬가지로 용암류의 경계지점이다(Fig. 22). 그러나, EL. 1665.7m에 위치한 노루샘인 경우, 다른 용천수와는 달리 사력층형의 용출형태를 보여준다. 이는 미고결 또는 준고결 사력층의 공극에 저류된 지하수가 지형변화 지점 또는 오목지를 따라 용출하는 것이다.

Table 13. Springs in the Gangjung stream watershed area.

Spring	Altitude (m)	Average yield of spring water(m ³ /d)	Location	Type
Gasimul	15.0	8,982	Gangjung-dong, Seogwipo city	Lava flows contact type
Keunnaetmul2	17.7	600		
Keunnaetmul1	19.5	30,000		
Netgiliso	26.4	2,000		
Dosuntongmul	68.8	20	Dosun-dong, Seogwipo city	
Saetongmul	73.5	30		
Saetnaetdomul	74.7	3		
Sanmulnaetdo	147.5	3		
Sanmulimaengi-dongsanmul	306.1	150	Hawon-dong, Seogwipo city	
Yeongsilgye-gokmul	1064.9	699		
Yeongsilmul	1555.0	2,000		
Norusaem	1665.7	30	Yeongnam-dong, Seogwipo city	Sedimentary type

연외천 유역 내에 위치한 용천수는 맥수물(EL. 0.0m)에서 운수천(EL. 166.0m)에 이르기까지 9개소가 분포하고 있다. 이들 용천수 중 용출량이 가장 많은 것은 생수(천지연)(EL. 30.1m)이며, 평균용출량은 2,890m³/d였다.

맥수물을 제외한 대부분의 용천수들은 앞에서 서술한 3개의 하천 유역과 동일하게 용암류의 경계지점에서 용출이 일어나고 있다(Fig. 22). 맥수물인 경우는 절리형의 용출형태를 보여주며, 이는 용암에 발달한 수직절리의 틈이나 과쇄대를 따라 용출하는 것이다.

Table 14. Springs in the Yeonwoe stream watershed area.

Spring	Altitude (m)	Average yield of spring water(m ³ /d)	Location	Type
Maksumul	0.0	-	Seohong-dong, Seogwipo city	Joint type
Hwangryongsamul	35.2	-	Seohong-dong, Seogwipo city	Lava flow contact type
Gonaengiso	56.3	5		
JiJangsaem	97.7	550		
Unchunsu	166.0	370		
Saengsu	30.1	2,890	Seogwi-dong, Seogwipo city	
Gulrungjisaem	42.0	300		
Saemdongnemul	46.1	80		
Alsunbanne	47.2	100		

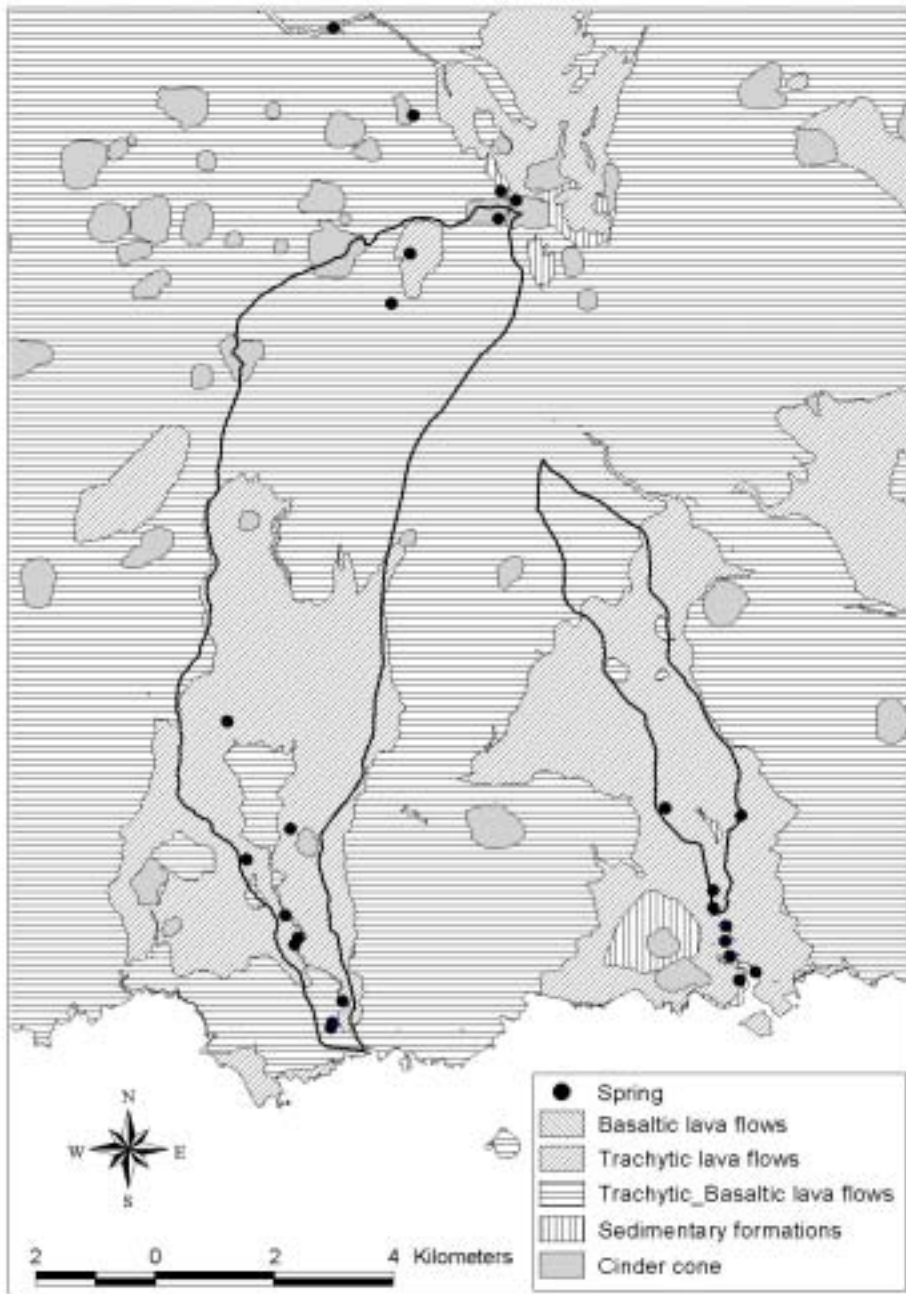


Fig. 22. Geology and springs in the Gangjung and Yeonwoe stream watershed area.

3-4 연구대상 하천유역의 물수지분석

2003년 제주도가 실시한 “제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ”에서는 제주도를 16개 수역으로 구분하고, 각 유역별로 강우총량, 직접유출량, 증발산량, 지하수 함양량에 대한 물수지 분석을 실시한 바 있다. 이중 외도천이 포함된 서제주수역, 옹포천이 포함된 한림수역, 강정천과 연외천이 포함된 중서귀수역에 대한 물수지 분석결과를 보면 다음과 같다.

Table 15~17에서와 같이 외도천을 포함하는 서제주수역의 10년간(1993~2002) 연평균 강우량은 2,153mm이지만, 연강우량은 최소 1,203mm(1996), 최대 2,964mm(1999)였다. 옹포천유역을 포함하는 한림수역의 10년간(1993~2002) 연평균 강우량은 1,375mm이지만, 연강우량은 최소 1,043mm(1996), 최대 1,955mm(1999)였다. 또한, 강정천과 연외천유역을 포함하는 중서귀수역의 10년간 연평균 강우량은 2,347mm이고, 연강우량은 최소 1,705mm(1996), 최대 3,136mm(1999)로 나타나 강우량의 변화가 큰 것으로 나타났다.

물수지 분석에 있어서 평년(1993~2002)을 기준으로 했을 경우, 강우총량은 서제주수역 192백만 m³, 한림수역 195백만 m³, 중서귀수역 249백만 m³ 이었고, 직접유출량은 각각의 수역에 대해 52백만 m³ (27.1%), 23백만 m³ (11.8%), 75백만 m³ (30.1%)이었다. 또한, 증발산량은 각각 65백만 m³ (33.8%), 88백만 m³ (45.1%), 75백만 m³ (30.1%)이었다. 따라서 지하수 함양량은 각각 75백만 m³ (39.1%), 84백만 m³ (43.1%), 99백만 m³ (39.8%)으로 나타났다.

과우년(1996)을 기준으로 했을 경우, 강우총량은 서제주수역 108백만 m³, 한림수역 147백만 m³, 중서귀수역 181백만 m³ 이었고, 직접유출량은 각각 16백만 m³ (14.8%), 13백만 m³ (8.8%), 40백만 m³ (22.1%)이었다. 또한, 증발산량은 각각 64백만 m³ (59.3%), 80백만 m³ (54.4%), 72(39.8%)

이었다. 따라서 지하수 함양량은 각각 28백만 m³(25.9%), 54백만 m³(36.7%), 69백만 m³(38.1%)으로 나타났다.

다우년(1999)을 기준으로 했을 경우, 강우총량은 서제주수역 257백만 m³, 한림수역 277백만 m³, 중서귀수역 333백만 m³이었고, 직접유출량은 각각 93백만 m³(36.2%), 47백만 m³(16.9%), 134백만 m³(40.2%)이었다. 또한 증발산량은 각각 66백만 m³(25.7%), 88백만 m³(31.8%), 80백만 m³(24.0%)이었다. 따라서 지하수 함양량은 각각 98백만 m³(38.1%), 142백만 m³(51.3%), 119백만 m³(35.7%)이었다.

결과적으로 강우총량은 강우량 변화에 따라 매우 큰 차이를 나타냈고, 직접유출량은 강우총량이 증가할수록 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으나, 증발산량은 강우량의 변화와 상관없이 거의 일정한 것으로 나타났다.

Table 15. The results of water budget analysis of the western Jeju watershed area.

Rainfall (mm)	Total rainfall (10 ⁶ m ³)	ET (10 ⁶ m ³)	Runoff (10 ⁶ m ³)	Recharge (10 ⁶ m ³)	Remarks
2,153 (Aver.)	192	65	52	75	1993~2002
2,860 (Max.)	257	66	93	98	1996
1,203 (Min.)	108	64	16	28	1993

※ ET : Evapotranspiration

Table 16. The results of water budget analysis of the Hanrim watershed area.

Rainfall (mm)	Total rainfall ($10^6 m^3$)	ET ($10^6 m^3$)	Runoff ($10^6 m^3$)	Recharge ($10^6 m^3$)	Remarks
1,375 (Aver.)	195	88	23	84	1993~2002
1,955 (Max.)	277	88	47	142	1996
1,043 (Min.)	147	80	13	54	1993

※ ET : Evapotranspiration

Table 17. The results of water budget analysis of the middle Seogwi watershed area.

Rainfall (mm)	Total rainfall ($10^6 m^3$)	ET ($10^6 m^3$)	Runoff ($10^6 m^3$)	Recharge ($10^6 m^3$)	Remarks
2,347 (Aver.)	249	75	75	99	1993~2002
3,136 (Max.)	333	80	134	119	1996
1,705 (Min.)	181	72	40	69	1993

※ ET : Evapotranspiration

제4장 하천수위의 변동특성

4-1 하천의 수위변동

연구대상 4개 하천에서 자동수위측정기에 의해 관측된 일별 수위자료를 강우량자료와 함께 Fig. 23~26에 제시하였다. 수위자료는 홍수유출로 인한 수위 peak와 발생횟수를 파악하기 위해 일최대 수위자료를 이용하였다.

외도천 유역의 강우량은 Fig. 23과 같이 6개월(2003. 7~12월)동안 1,279mm를 나타내었으며, 이중 82%가 하절기인 7~9월 사이에 집중되었다. 홍수유출로 인한 수위 peak는 총 5회 발생하였다. 특히 2003. 9. 12일에는 태풍 ‘매미’에 의한 집중강우(277mm)로 수위가 1.93m까지 상승하여 조사기간 중 최고치를 나타내었다.

한편, 홍수유출이 발생하지 않는 기간동안 기저유출에 의해 유지되는 하천수의 수위는 4~8cm 정도로 거의 일정한 것으로 조사되었다.

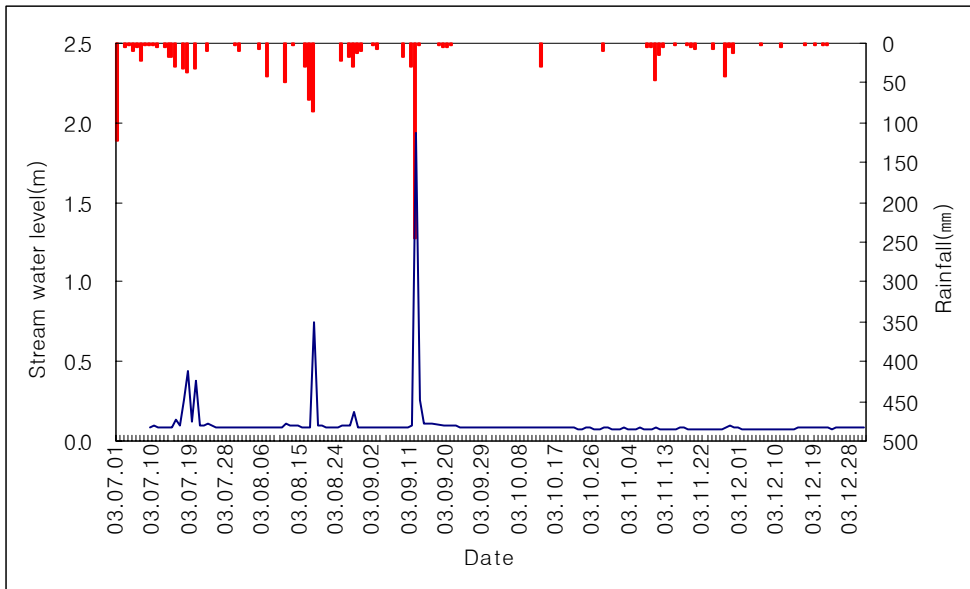


Fig. 23. Hydrograph of the Woedo stream.

옹포천 유역에 1년(2003. 1~12월)동안 내린 강우량은 1,574mm이며, 이 중 72%에 해당하는 1,127mm가 5~9월에 집중되어 하절기 강우편중 현상을 보였다. 홍수유출로 인한 수위 peak는 15개월(2002. 10~2003. 12월)동안 14회 발생하였는데, 대부분의 홍수유출은 하절기에 집중되었다(Fig. 24). 특히, 태풍 ‘매미’에 의한 집중강우(71mm)로 수위가 1.45m까지 상승하여 연구기간 동안 최고치를 나타내었다. 한편, 기저유출 성분에 의한 하천수위는 평균 13cm였고, 변동폭은 4~20cm로 나타났다. 계절적인 수위변동을 보면, 2002. 9~2003. 5월까지 점진적으로 낮아지는 경향을 보이다가 여름철 강우에 의하여 2003. 9월까지 상승하였으며, 이후에는 다시 하강하는 현상을 나타냈다.

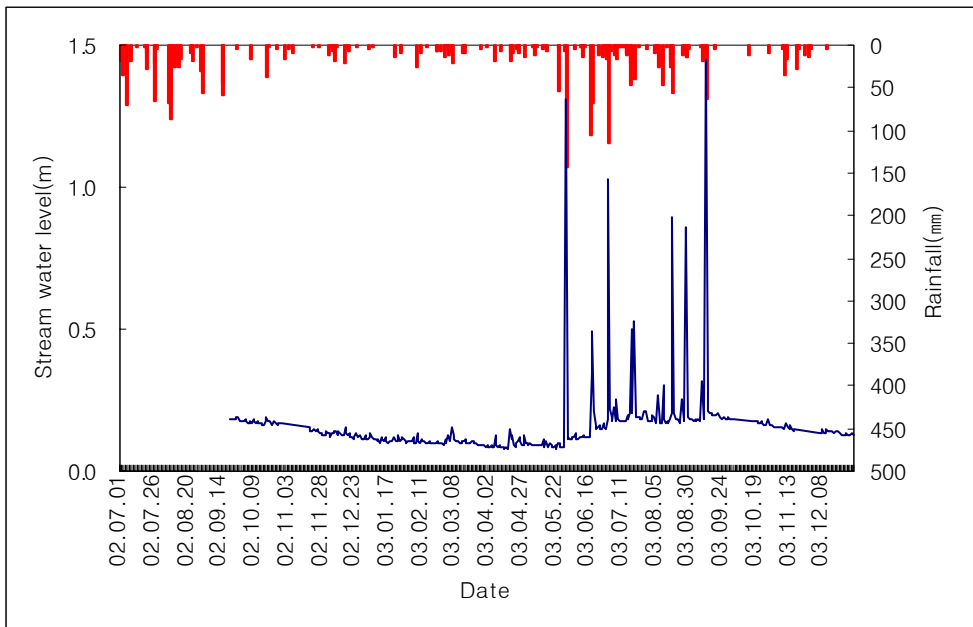


Fig. 24. Hydrograph of the Ongpo stream.

강정천과 연외천 유역의 연간(2003년) 강수량은 2,554mm이며, 이 중 73%에 해당하는 1,866mm의 강우가 하절기에 집중되는 강우편중 현상을 나타내었다. 홍수유출로 인한 수위 peak는 18개월(2002. 7~2003. 12월)동안 강정천은 17회, 연외천은 19회 발생하였다(Fig. 25~26). 특히, 태풍 ‘매미’의 영향으로 156mm의 집중강우를 보여 두 하천모두 수위가 최고치를 보여, 강정천은 2.32m, 연외천은 2.06m까지 상승하였다. 한편, 기저유출 성분에 해당하는 수위는 강정천에서 평균 0.08m, 연외천에서 0.73m였고, 변동폭은 각각 0.00~0.15m, 0.64~0.81m로 나타났다. 또한 계절적인 수위변동은 옹포천과 같이 강수량의 차이에 의해 하강과 상승을 반복하는 것으로 나타났다.

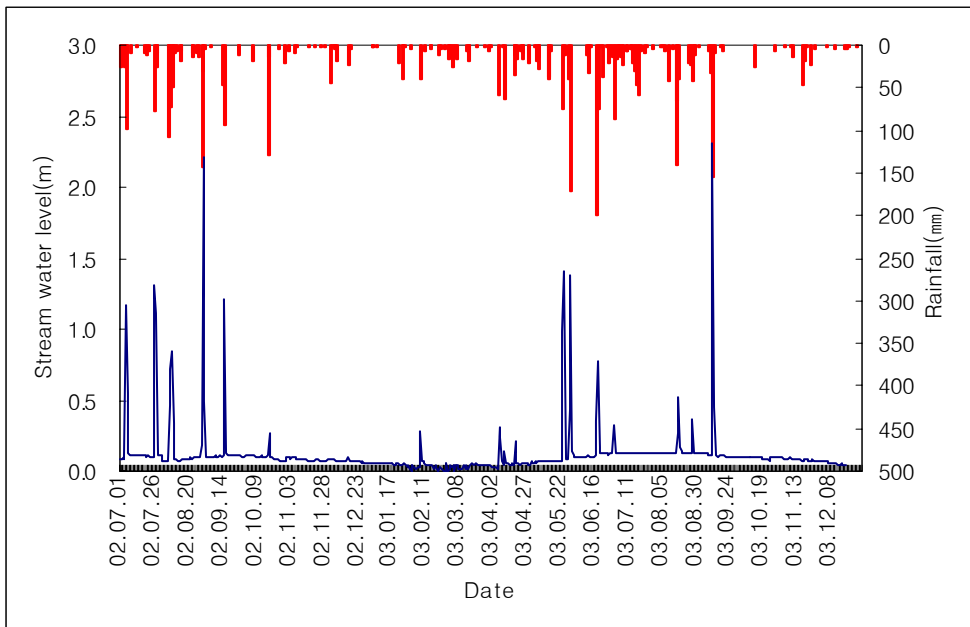


Fig. 25. Hydrograph of the Gangjung stream.

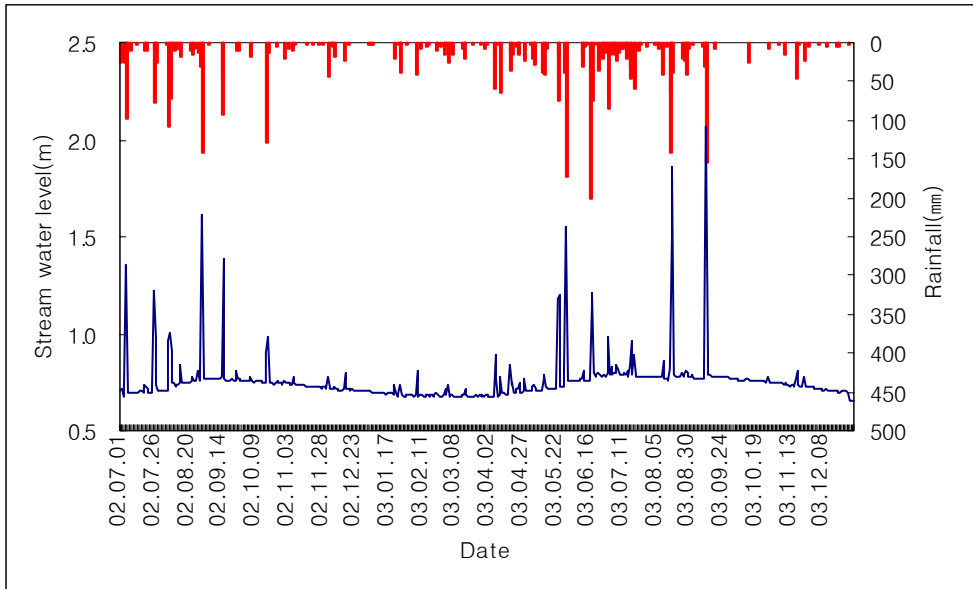


Fig. 26. Hydrograph of the Yeonwoe stream.

상기와 같이 옹포천·강정천·연외천의 계절적인 수위변동은 외도천과는 다른 양상을 나타냈는데, 이들 하천은 외도천에 비해 유역면적이 작고, 지하수 체류기간도 비교적 짧아 지하수의 순환이 빠르게 이루어지고 있기 때문인 것으로 해석된다.

한편, 연구대상 하천의 강우에 의한 홍수유출특성을 파악하기 위하여 즉 유효강우량, peak도달시간, 유출지속시간 등 시간별 수위 측정기록과 강우자료를 이용해 hydrograph방법에 의해 홍수유출특성분석을 실시하였다(Fig. 27~30 및 Table 18). 외도천은 연구기간 동안 관측된 수위자료 부족으로 2003. 07. 17~07. 19일에 발생한 홍수유출 사상에 대해 분석하였는데, 이때 유효강우량은 39mm이고, 수위가 peak점까지 도달하는데 걸린 시간은 9시간이었으며, 홍수유출 지속시간은 25시간으로 나타났다. 옹포천에 대해서는 3회의 홍수유출 사상에 대해서 분석을 실시하였는데, 유효강우량은 22~38 mm(평균 30mm)이었고, peak도달소요시간은 3~8시간(평균 6시간)이

었다. 또한 홍수유출이 지속된 시간은 16~21시간(평균 18시간)으로 분석되었다. 강정천인 경우, 2002~2003년 사이에 발생한 6회의 홍수유출 사상에 대해 분석하였는데, 유효강우량은 48~132mm(평균 83mm), peak도달소요시간은 2~20시간(평균 8시간), 홍수유출 지속시간은 9~46시간(평균 25시간)이었다. 또한, 연외천에 대해서는 2002~2003년 사이에 발생한 총 10회의 홍수유출에 대해 분석을 실시하였다. 분석결과, 유효강우량은 22~143mm(평균 54mm), peak도달소요시간은 3~11시간(평균 6시간), 홍수유출 지속시간은 8~20시간(평균 14시간)이었다.

이상의 분석결과를 종합해보면, 연구대상 하천의 강우에 의한 홍수유출 특성은 매우 다양한 것으로 사료된다. 즉, 유효강우량의 경우 최소 22mm에서 최대 143mm의 범위를 나타내고 있을 뿐만 아니라, 침투수위(peak)까지 도달하는데 걸리는 시간 또한 2~20시간의 범위를 나타냈으며, 홍수유출 지속시간도 8~46시간으로 편차가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 연구대상 하천의 홍수유출특성이 다양하게 나타나고 있는 것은 첫째, 선행강우량의 차이 둘째, 유역내 강우량의 분포 셋째, 시우량(강우강도) 넷째, 유역내 토지피복상태 등의 기상·수문학적 조건이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 제주지역 하천의 홍수유출특성에 대한 대표값을 구하기 위해서는 시간별 강우량과 하천수위측정이 장기간 지속적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

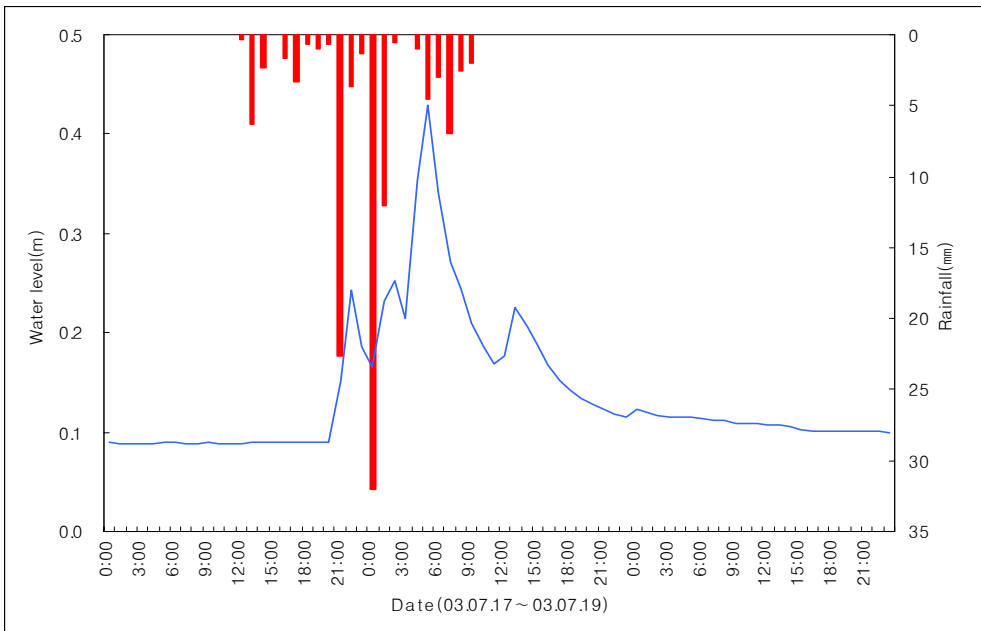


Fig. 27. Runoff hydrograph of the Woedo stream.

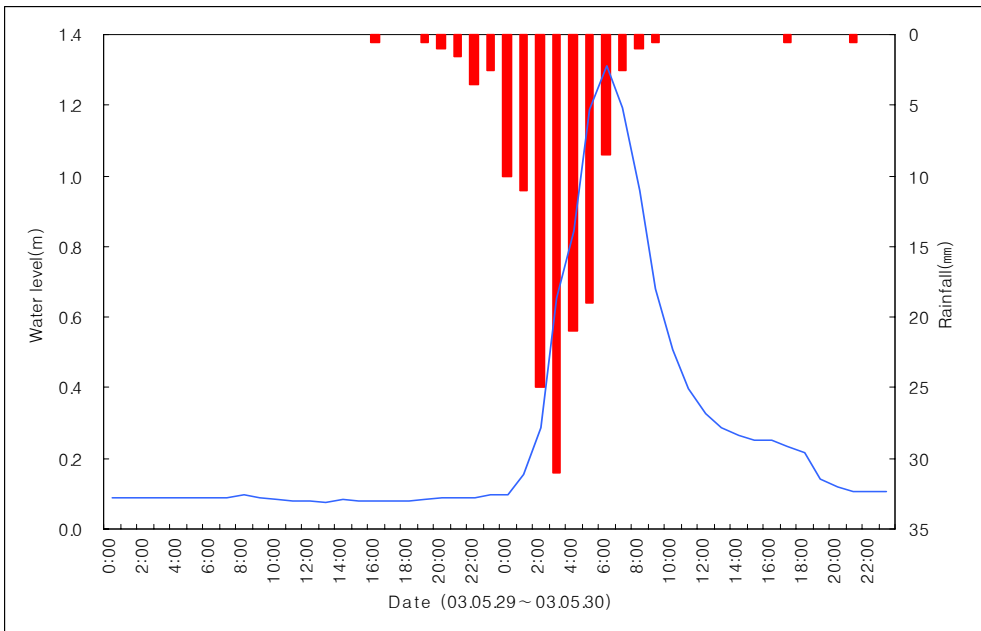


Fig. 28. Runoff hydrograph of the Ongpo stream.

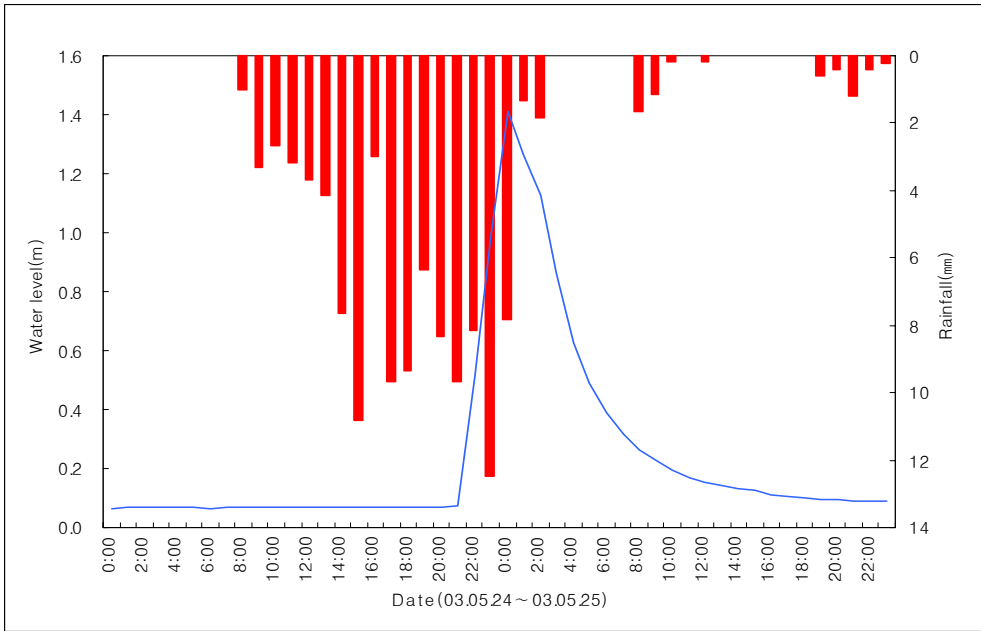


Fig. 29. Runoff hydrograph of the Gangjung stream.

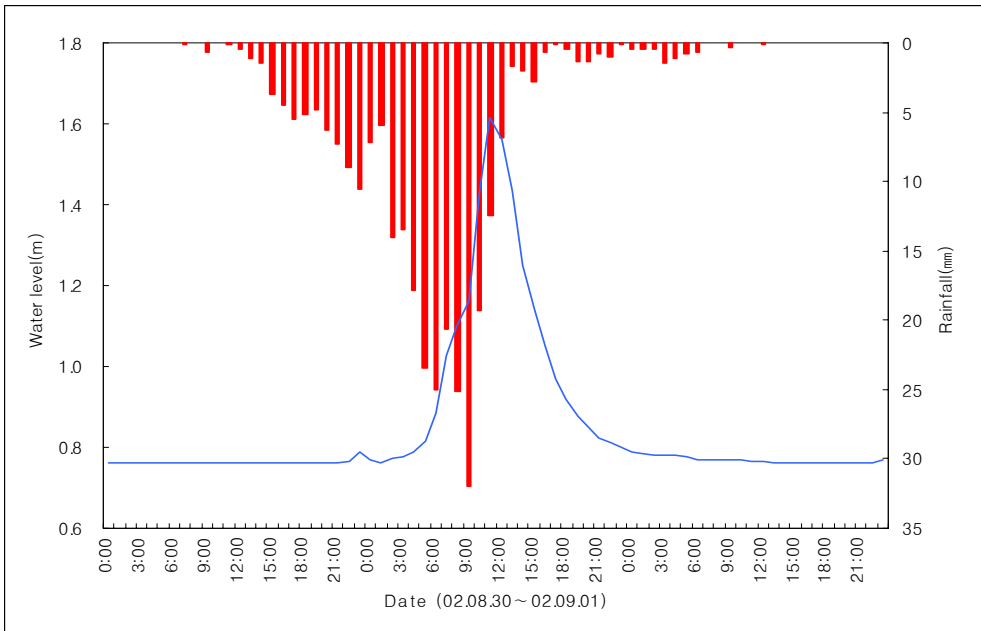


Fig. 30. Runoff hydrograph of the Yeonwoe stream.

Table 18. The analysis of runoff hydrograph.

Stream	Date	Total rainfall (mm)	Effective rainfall (mm)	Concentration time of peak level (hr)	Duration of runoff (hr)	Peak of water level (m)	Change of water level (m)
Woedo St.	03.07.17 ~ 03.07.19	108	39	9	25	0.43	0.34
Ongpo St.	03.05.29 ~ 03.05.30	140	31	6	21	1.31	1.21
	03.06.18 ~ 03.06.19	73	22	8	16	0.50	0.29
	03.07.17 ~ 03.07.18	66	38	3	17	0.50	0.31
Gangjung St.	02.08.06 ~ 02.08.09	93	71	4	20	0.38	0.32
		89	48	5	9	0.71	0.59
	02.08.30 ~ 02.09.01	303	61	13	46	2.21	2.13
	02.10.18 ~ 02.10.19	100	97	2	10	0.27	0.17
	03.05.24 ~ 03.05.25	118	91	3	22	1.41	1.34
	03.06.18 ~ 03.06.20	244	132	20	40	0.78	0.54
Yeonwoe St.	02.07.04 ~ 02.07.06	188	66	6	18	1.36	0.63
	02.08.06 ~ 02.08.08	87	61	4	10	0.96	0.25
		97	22	8	14	1.01	0.28
	02.08.30 ~ 02.08.31	303	143	7	20	1.62	0.83
	02.09.15 ~ 02.09.16	148	90	3	15	1.39	0.61
	02.10.18 ~ 02.10.19	99	42	8	8	0.98	0.20
	03.05.24 ~ 03.05.25	118	91	3	13	1.20	0.45
	03.05.29 ~ 03.05.30	196	40	6	19	1.55	0.81
	03.06.18 ~ 03.06.19	178	23	11	19	1.14	0.36
		81	24	5	19	1.21	0.32

4-2 강우량과 하천수위와의 관계

연구대상 하천에서 기저유출 성분에 의한 수위는 계절적으로 연중 거의 일정하거나, 상승과 하강을 반복하는 것으로 분석되었다. 특히, 옹포천·강정천·연외천인 경우, 갈수기 동안 하천수위가 점진적으로 하강하는 경향을 보였다(Fig. 31).

이들 하천에서는 약 4개월(2003. 9~12월)간 수위가 점진적으로 하강하여 옹포천은 8.8cm, 강정천은 7.2cm, 연외천은 13.6cm였지만, 외도천은 4cm내외의 변동폭으로 큰 변화 없이 일정한 것으로 나타났다. 이러한 수위 감수현상에 대한 추세식을 유도해 보면, 외도천을 제외한 3개의 하천에서는 추세식이 감수경향을 얼마나 잘 설명하는가를 평가하는 결정계수가 0.95이상으로 높게 나타난 반면, 외도천에서는 0.59로 낮게 나타났다.

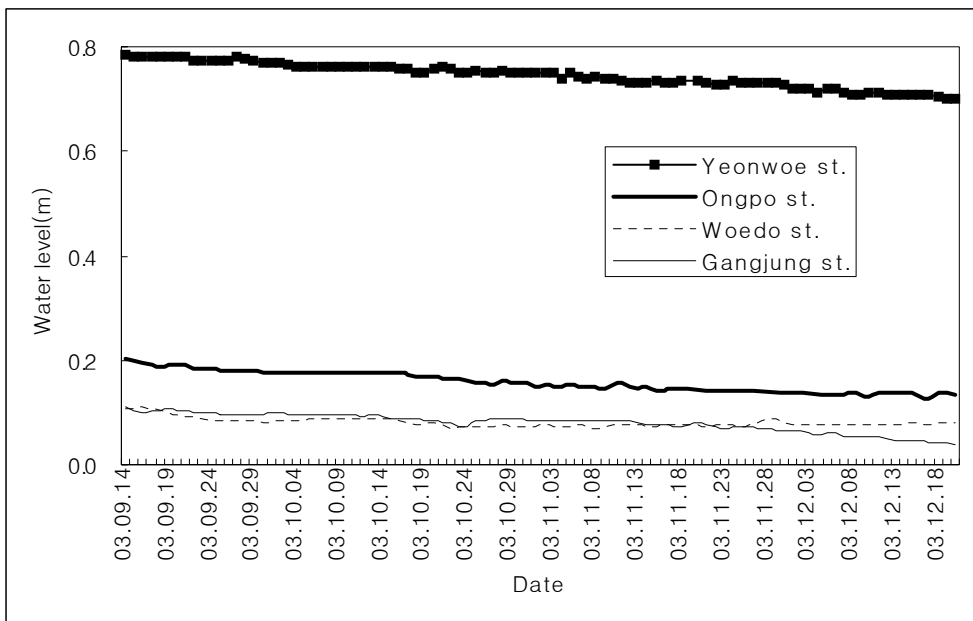


Fig. 31. The decline trend of stream water level.

Table 19. The analysis of decline trend of stream water level.

Gauging stream	Date	Days	Water level(m)		Change of water level(m)	Relations expression	R
			Max.	Min.			
Woedo stream	03.09.14 ~ 03.12.20	98	0.11	0.07	0.04	$h = -0.0002d + 0.0884$	0.59
Ongpo stream	02.09.21 ~ 03.03.31	192	0.18	0.07	0.11	$h = -0.0005d + 0.1682$	0.95
	03.09.14 ~ 03.12.20	98	0.20	0.12	0.09	$h = -0.0007d + 0.1905$	0.97
Gangjung stream	02.09.21 ~ 03.03.31	192	0.11	0.00	0.11	$h = -0.0005d + 0.1058$	0.95
	03.09.14 ~ 03.12.20	98	0.11	0.04	0.07	$h = -0.0006d + 0.1086$	0.95
Yeonwoe stream	02.09.21 ~ 03.03.31	192	0.77	0.68	0.09	$h = -0.0005d + 0.7603$	0.97
	03.09.14 ~ 03.12.20	98	0.79	0.65	0.14	$h = -0.0008d + 0.7842$	0.99

※ R : Coefficient of determination

이러한 수위변동 특성은 연구대상 하천유역의 지표 및 지하지질 상태, 대수층의 수리성, 지하수 체류기간(지하수 순환속도), 유역 내 강우량 등 수문지질학적 인자들이 동일하지 않음을 암시해 주고 있다.

조사대상 하천유역 대수층의 비양수량, 투수량계수, 수리전도도, 저류계수 등 수리성을 Table 20에 나타내었다. 수리전도도와 비양수량 및 투수량계수인 경우, 외도천이 포함된 북부지역은 서부지역과 남부지역에 비해 낮은 값을 보였고, 저류계수는 높은 값을 나타내었다(제주도·한국수자원공사, 2003). 따라서 외도천을 제외한 3개의 하천에서는 지하수의 순환이 원활하게 이루어지는 것으로 분석되어 갈수기에 하천수위가 점진적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 해석된다.

Table 20. The hydraulic characteristics of aquifer in regional groups.

Area	Specific Yield (m ³ /d)	Transmissivity (m ² /d)	Hydraulic Conductivity (m/d)	Storage Coefficient
Northern	4,660	10,608	262	0.13
Eastern	10,000	15,340	659	0.13
Southern	8,676	13,925	267	0.10
Western	11,111	11,137	175	0.11

제5장 하천의 유출량 산정과 수위-유량 관계곡선

5-1 하천수위에 의한 유출량 산정

외도천과 강정천의 기저유출량은 웨어에 설치된 자동수위관측소 자료를 이용하여 Oki(1929)와 Govinda Rao(1963)의 식에 적용해 산정하였다. 산정결과는 Table 21~22에 나타내었다.

Table 21. Estimation of baseflow discharge in the Woedo and Gangjung stream.

Month	Water level(m)	Oki ' s eq.(m ³)		Govinda Rao ' s eq.(m ³)	
		Daily	Monthly	Daily	Monthly
2003.07	0.084	32,164	997,076	28,830	893,724
2003.08	0.088	30,042	931,307	27,148	841,599
2003.09	0.086	33,638	1,009,14	30,078	902,336
2003.10	0.080	24,436	757,519	22,595	700,436
2003.11	0.076	20,783	623,488	19,613	588,378
2003.12	0.079	22,437	695,537	21,316	660,807
Maximum	0.109	33,638	1,009,140	30,078	902,336
Average	0.084	27,250	835,678	24,930	764,547
Minimum	0.070	20,783	623,488	19,613	588,378
Stream discharge (2003. 7~12)		5,014,068		4,587,280	

Table 22. Estimation of baseflow discharge in the Gangjung stream.

Month	Water level(m)	Oki ' s eq.(m ³)		Govinda Rao ' s eq.(m ³)	
		Daily	Monthly	Daily	Monthly
2002.07	0.096	230,883	7,157,379	202,725	6,284,462
2002.08	0.077	182,557	5,659,258	160,532	4,976,490
2002.09	0.102	245,481	7,364,427	215,478	6,464,341
2002.10	0.092	214,958	6,663,712	188,637	5,847,748
2002.11	0.077	179,754	5,392,622	157,828	4,734,852
2002.12	0.066	154,053	4,775,645	135,305	4,194,466
2003.01	0.044	106,488	3,301,128	94,039	2,915,214
2003.02	0.024	63,169	1,768,745	57,676	1,614,925
2003.03	0.02	61,550	1,908,058	55,832	1,730,789
2003.04	0.039	94,022	2,820,647	82,882	2,486,446
2003.05	0.069	156,434	4,849,440	136,894	4,243,702
2003.06	0.106	252,708	7,581,249	221,255	6,637,644
2003.07	0.121	290,854	9,016,460	255,037	7,906,138
2003.08	0.126	307,921	9,545,545	270,121	8,373,761
2003.09	0.107	257,379	7,721,356	225,619	6,768,583
2003.10	0.089	207,732	6,439,684	182,076	5,644,353
2003.11	0.078	180,218	5,406,525	158,034	4,741,009
2003.12	0.048	113,072	3,505,219	99,615	3,088,064
Maximum	0.150	307,921	9,545,545	270,121	8,373,761
Average	0.076	174,295	5,322,005	153,257	4,679,219
Minimum	0.000	61,550	1,768,745	55,832	1,614,925
Stream discharge (2003. 1 ~ 12)		63,864,056		56,150,628	

Oki의 식에 적용하여 산정된 외도천의 기저유출량은 하천수위가 7.0~10.9cm일 때 최소 20,783m³/d, 최대 33,638m³/d이었고, 6개월(2002. 7~12월)동안 총량은 5,014,068m³이었다. 강정천은 0.0~15cm일 때 최소 61,550m³/d, 최대 307,921m³/d이었고, 1년(2003. 1~12월)동안 총량은 63,864,056m³으로 계산되었다. 또한, Govinda Rao's 식에 적용하면 외도천의 기저유출량은 최소 19,613m³/d, 최대 30,078m³/d였고, 강정천은 최소 55,832m³/d, 최대 270,121m³/d이었다. 따라서 조사 기간 중 총 기저유출량을 계산하면 외도천은 6개월간(2002. 7~12월) 4,587,280m³, 강정천은 1년간(2003. 1~12월) 56,150,628m³이었다.

두 식에 의해 산정된 유출량은 9.3~13.7%의 차이를 나타내었는데, 이러한 차이는 유량계수 C값(Oki의 식 1.8~2.0, Govinda Rao 식 1.4~1.6)의 차이에 의해 비롯된 것으로 사료된다.

상기와 같은 웨어공식으로 산정된 기저유출량의 타당성을 검토하기 위해 외도천의 2개 지점(Fig. 3의 A-A'와 B-B'단면)과, 강정천의 1개 지점(Fig. 5의 B-B'단면)에서 평균유속을 측정하여 유출량을 산정하였다. Table 23은 웨어공식과 유속측정에 의해 산정된 유출량 값을 비교한 것이다.

Table 23. Compared with baseflow discharge in the Woedo and Gangjung stream.

Gauging stream	Date	Time	water level(m)	Stream discharge(m ³ /s)			
				OE	GE	A-A'	B-B'
Woedo st.	2003.12.26	10:55	0.085	0.34	0.31	0.35	0.33
Gangjung st.	2004.02.05	14:30	0.01	0.31	0.27	-	0.32

※ OE : Oki's equation

GE : Govinda Rao's equation

웨어공식과 유속측정법에 의해 산정된 유출량을 비교해 보면, Oki의 식에 적용하여 산정된 기저유출량은 외도천 0.34m³/s, 강정천 0.31m³/s으로 나타났으며, Govinda Rao의 식으로는 외도천 0.31m³/s, 강정천 0.27m³/s으로 산정되어 유속측정법에 의한 값이 3~10% 정도 많게 나타났다.

이러한 차이가 발생하는 요인을 보면, 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)에 의해 설정된 단면에서 산정된 유출량이 많게 나타난 것으로 해석된다. 특히 강정천에서 하천수위가 관측되는 A-A'단면과 유속측정을 실시한 B-B'단면 사이에는 큰넷물2·가시물 용천수가 있어 이들 용천수로부터 유입되는 양에 의해 B-B'단면에서 산정된 유출량이 A-A'단면에서 보다 많게 산정된 것으로 사료된다.

따라서 이러한 측정오차를 줄이기 위해서는 현장유속 측정이 지속적으로 이루어져야 할 뿐만 아니라, 하천변에 위치한 용천수의 유출변화를 지속적으로 파악함은 물론, 특히 홍수유출이 발생한 이후 하상이 변화에 대해서도 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5-2 수위-유량 관계곡선에 의한 유출량 산정

옹포천과 연외천의 기저유출량은 웨어가 설치된 지점에서 하천의 연직선상으로 단면측량을 실시하고, 유속계를 이용하여 18개월(2002. 7~2003. 12)동안 40회 이상 유속을 측정하여 산정하였다. 특히 옹포천인 경우 하천주변에 위치한 한림정수장에서의 취수량을 파악하여 산정된 유출량에 반영하였다. Table 24~25는 옹포천과 연외천에서 현장조사를 통해 산정된 유출량을 나타낸 것이다.

Table 24. Estimation of baseflow discharge through measured the speed of a current in the Ongpo stream.

Date	Time	water level(m)	discharge (m ³ /d)	Date	Time	water level(m)	discharge (m ³ /d)
2002.09.15	11:16	0.177	81,572	2003.04.14	12:35	0.078	42,196
2002.09.22	15:40	0.180	80,145	2003.04.28	13:35	0.078	42,613
2002.10.03	13:40	0.169	73,524	2003.05.03	11:10	0.079	40,692
2002.10.08	10:50	0.160	72,900	2003.05.16	13:45	0.072	40,375
2002.10.13	09:55	0.168	71,558	2003.05.27	14:20	0.071	40,277
2002.10.23	14:20	0.153	66,487	2003.06.03	09:50	0.111	54,654
2002.11.22	15:56	0.145	64,845	2003.06.16	10:00	0.111	52,801
2002.12.04	12:52	0.112	46,771	2003.06.26	14:00	0.145	75,118
2002.12.13	13:45	0.121	54,139	2003.07.02	13:25	0.188	116,607
2002.12.24	09:54	0.116	49,870	2003.07.14	14:30	0.161	80,332
2003.01.07	11:14	0.108	47,479	2003.07.24	13:00	0.183	104,801
2003.01.16	13:48	0.094	44,732	2003.08.01	07:40	0.172	93,318
2003.01.24	10:50	0.101	45,253	2003.10.22	14:30	0.161	87,523
2003.02.03	10:06	0.100	45,873	2003.10.22	14:40	0.161	85,227
2003.02.14	12:24	0.084	41,037	2003.10.22	15:00	0.161	88,435
2003.02.23	09:35	0.092	43,661	2003.10.22	15:20	0.161	86,351
2003.03.08	08:47	0.111	47,597	2003.10.22	15:40	0.161	83,247
2003.03.17	12:50	0.097	44,181	2003.10.22	16:00	0.161	85,358
2003.03.27	14:00	0.084	41,043	2003.12.26	13:00	0.135	59,579
2003.04.05	06:50	0.087	39,674	2003.12.26	13:20	0.129	57,713
Maximum	116,607m ³ /d						
Average	62,989m ³ /d						
Minmum	39,674m ³ /d						

Table 25. Estimation of baseflow discharge through measured the speed of a current in the Yeonwoe stream.

Date	Time	water level(m)	discharge (m ³ /d)	Date	Time	water level(m)	discharge (m ³ /d)
2002.07.14	14:00	0.700	71,333	2003.01.24	13:25	0.680	52,830
2002.07.21	15:50	0.700	78,749	2003.02.03	14:24	0.690	50,146
2002.07.27	14:50	0.720	103,367	2003.02.14	09:47	0.680	49,307
2002.07.28	14:25	0.710	107,657	2003.02.23	11:10	0.680	46,981
2002.08.04	09:10	0.710	88,953	2003.03.08	11:12	0.680	52,423
2002.08.18	14:15	0.750	129,617	2003.03.17	10:00	0.680	51,174
2002.08.25	13:05	0.750	130,545	2003.03.27	10:15	0.680	48,366
2002.09.03	14:05	0.770	152,070	2003.04.05	10:20	0.680	45,859
2002.09.15	14:55	0.770	148,145	2003.04.14	09:45	0.690	56,433
2002.09.22	12:15	0.770	146,001	2003.04.28	10:00	0.700	62,722
2002.10.03	09:40	0.750	134,378	2003.05.04	12:48	0.710	57,822
2002.10.08	15:00	0.750	129,111	2003.05.16	10:55	0.710	75,340
2002.10.13	13:00	0.760	124,438	2003.05.27	10:05	0.730	89,392
2002.10.23	10:54	0.740	124,476	2003.06.04	13:20	0.760	116,389
2002.11.02	09:20	0.750	115,581	2003.06.16	12:45	0.760	117,536
2002.11.11	13:55	0.740	106,120	2003.06.26	10:25	0.780	160,435
2002.11.22	13:01	0.730	97,057	2003.07.03	12:20	0.790	185,462
2002.12.04	09:46	0.720	90,842	2003.07.14	12:00	0.780	157,515
2002.12.13	16:15	0.710	80,051	2003.07.24	15:15	0.780	167,210
2002.12.24	12:10	0.710	72,442	2003.08.01	11:10	0.775	153,824
2003.01.07	15:30	0.700	61,843	2003.10.25	09:30	0.750	98,231
2003.01.16	10:52	0.690	53,239	2003.10.25	12:00	0.750	97,860
Maximum	185,462m ³ /d						
Average	98,620m ³ /d						
Minmum	45,859m ³ /d						

용포천의 기저유출량을 보면, 1일 39,674~116,607m³이고, 평균 유출량은 62,989m³/d으로 조사되었다. 기저유출량에 반영된 한림정수장에서 취수량은 23,702~28,548m³/d이었다. 연외천인 경우, 1일 기저유출량은 45,859~185,462m³/d이고, 평균 유출량은 98,620m³/d으로 조사되었다. 현장조사를 통해 산정된 기저유출량의 변동 특성은 4-2절에서 서술한 하천수위의 변동 특성과 같이 2002. 9~2003. 5까지 점진적으로 감소하고, 이후에는 계절적인 강우량의 영향으로 상승하는 경향을 보

이는 것으로 나타났다.

외도천과 강정천에서 실시한 것처럼, 유속측정 자료에 의해 산정된 유출량에 대한 타당성을 검토하기 위해 옹포천(Fig. 4의 A-A'와 C-C'단면)과 연외천(Fig. 6의 A-A'와 B-B'단면)에서도 2개의 단면을 설정하여 평균유속을 측정하여 유출량을 산정하였으며, 그 결과는 Table 26과 같다.

Table 26. Compared with baseflow discharge in the Ongpo and Yeonwoe stream.

Gauging stream	Date	Time	water level(m)	Stream discharge(m ³ /s)		
				A-A'	B-B'	C-C'
Woedo stream	2003.12.26	13:20	0.129	0.76	0.67	0.77
Yeonwoe stream	2004.02.05	15:30	0.634	0.43	0.41	0.44
	2004.03.08	11:25	0.614	0.40	0.35	0.39

옹포천의 A-A'와 C-C'단면에서 측정된 유출량은 평균 0.765m³/s이고, 차이는 0.01m³/s에 불과했다. 그러나 두 단면사이에 웨어가 설치되어 있는 B-B'단면과는 0.10m³/s의 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 B-B'단면에서 수위가 너무 낮아 유속측정이 불가능한 부분은 제외되었고, A-A'~B-B' 단면에서 관개수로를 통해 옹천수 일부가 농업용수로 이용되고 있는데서 발생한 것으로 사료된다. 한편, 연외천의 각기 다른 단면에서 측정된 유출량은 5% 내외의 근사치를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 32~33은 각각 옹포천과 연외천의 현장측정을 통하여 산정된 기저유출량과 시간별 하천수위 관측자료를 이용하여 수위-유량 관계곡선을 나타낸 것이다.

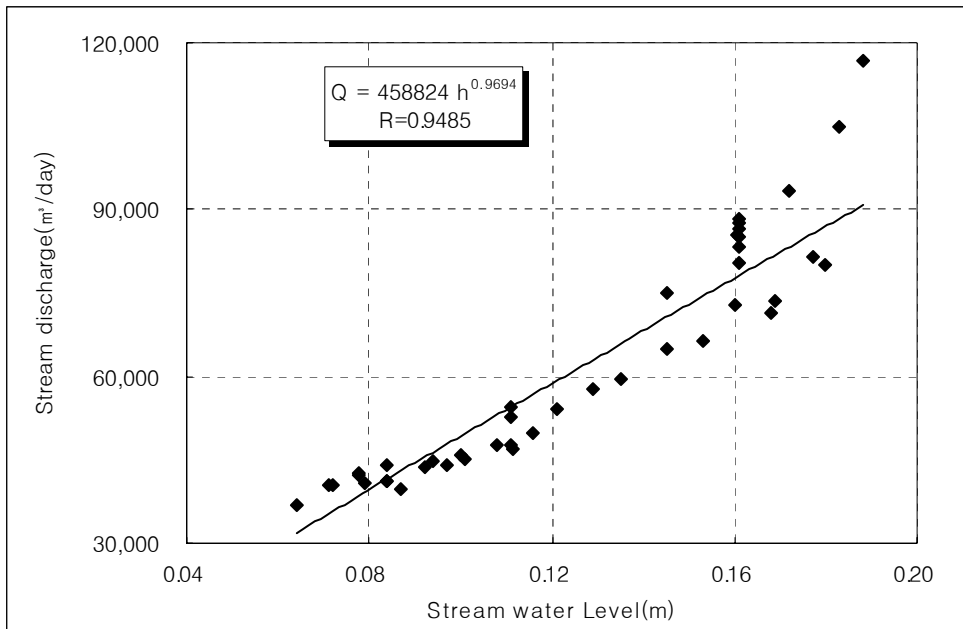


Fig. 32. Stage-discharge rating curve of the Ongpo stream.

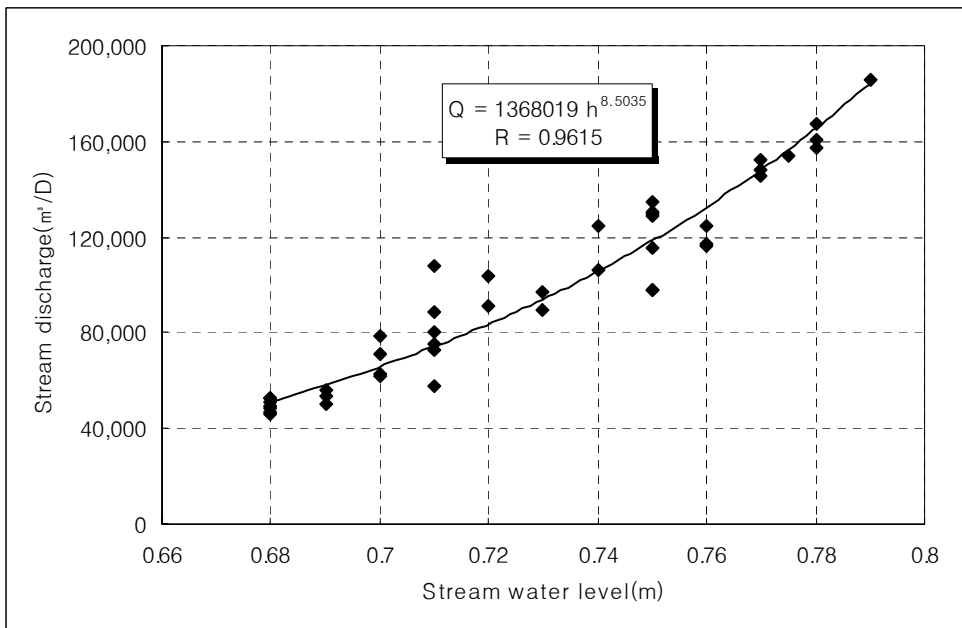


Fig. 33. Stage-discharge rating curve of the Yeonwoe stream.

Table 27과 같이 수위-유량 관계식을 유도한 결과, 옹포천의 하천 수위가 0.071~0.188m에서 수위와 유량간의 상관계수가 A식인 경우 0.9485이고, B식인 경우 0.9389로 나타났다. 연외천에서도 하천수위가 0.680~0.790m에서 상관계수가 C식인 경우 0.9615이고, D식인 경우 0.9610으로 나타나 두변수간의 상관성이 매우 높았다.

Table 27. Relations expression through stage-discharge rating curve of stream.

Gauging stream	Period	Range of stream water level	Relations expression	R
Ongpo stream	2002. 9. 15 ~2003. 12. 26	0.071m < h < 0.188m	A: $Q = 458824 h^{0.9694}$	0.9485
			B: $Q = 517877h - 3237.7$	0.9389
Yeonwoe stream	2002. 7. 14 ~2003. 10.25	0.680m < h < 0.790m	C: $Q = 1368019 h^{8.5035}$	0.9615
			D: $Q = 1093186h - 696797.3$	0.9610

※ R : Correlation coefficient

따라서 상관성이 높은 수위-유량 관계식을 통해 연속적인 수위자료를 적용하여 1년간 옹포천과 연외천을 통한 기저유출량을 계산하였다(Fig. 34~35과 Table 28~29). 계산 결과를 보면, 옹포천의 A와 B식, 연외천의 C와 D식 모두 서로 근사한 값을 보여 주고 있다. 옹포천의 A식인 경우 2003년 7월에 2,638천m³으로 최대치를 보였고, 2003년 4월에 1,246천m³으로 최소치를 나타냈으며, 월 평균유출량은 1,924천m³인 것으로 분석되었다. 연외천의 C식인 경우 2003년 7월에 최대 5,450천m³, 2003년 02월에 최소 1,504천m³을 나타냈으며, 월 평균유출량은 3,197천m³으로 분석되었다.

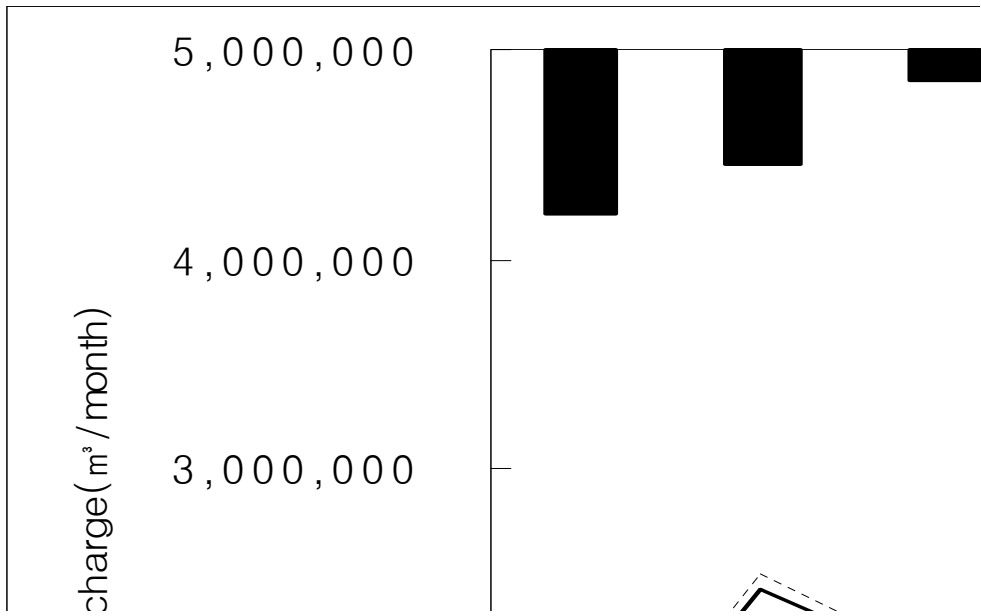


Fig. 34. Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Ongpo stream.

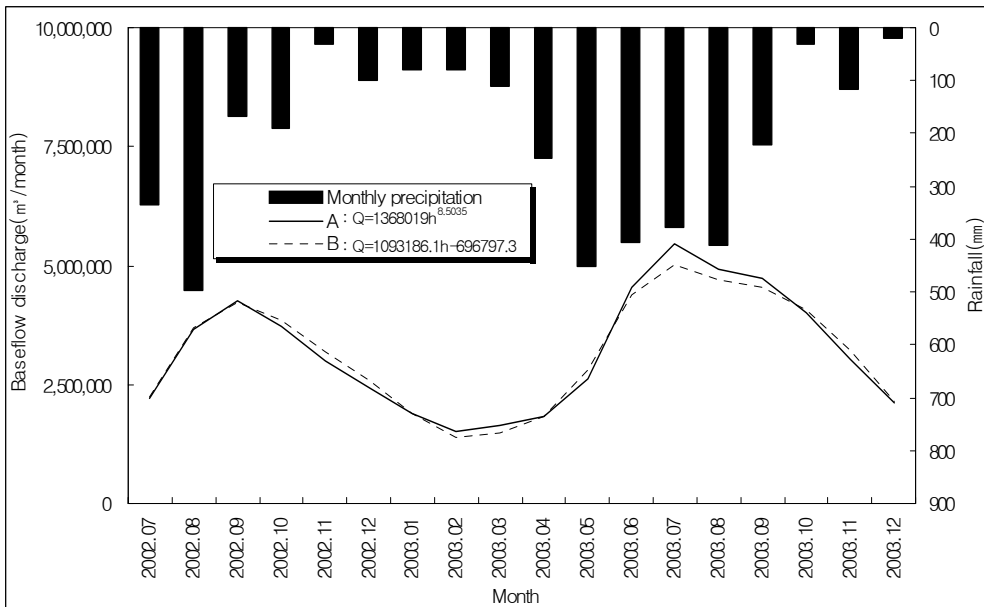


Fig. 35. Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Yeonwoe stream.

Table 28. Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Ongpo stream.

Month	Equation A(m ³ /month)	Equation B(m ³ /month)
2002. 09	1,380,235	1,426,052
2002. 10	2,433,294	2,497,320
2002. 11	2,034,465	2,064,847
2002. 12	1,795,035	1,797,693
2003. 01	1,568,764	1,551,449
2003. 02	1,314,954	1,290,615
2003. 03	1,463,149	1,437,016
2003. 04	1,245,818	1,206,627
2003. 05	1,284,880	1,244,082
2003. 06	1,811,853	1,821,628
2003. 07	2,637,707	2,722,748
2003. 08	2,574,510	2,652,955
2003. 09	2,648,022	2,740,288
2003. 10	2,540,115	2,615,029
2003. 11	2,093,356	2,129,362
2003. 12	1,953,223	1,970,765
Max.	2,648,022	2,740,288
Aver.	1,923,711	1,948,030
Min.	1,245,818	1,206,627
Stream discharge (2003. 01 ~ 12)	23,136,352	23,382,563

※Equation A : $Q = 458824 h^{0.9694}$, B : $Q = 517877h - 3237.7$

Table 29. Estimate of the monthly stream discharge through stage-discharge rating curve in the Yeonwoe stream.

Month	Equation C(m ³ /month)	Equation D(m ³ /month)
2002. 07	2,195,140	2,230,741
2002. 08	3,645,300	3,677,011
2002. 09	4,273,060	4,222,964
2002. 10	3,731,535	3,852,604
2002. 11	3,004,529	3,200,531
2002. 12	2,429,608	2,599,235
2003. 01	1,887,282	1,887,905
2003. 02	1,504,228	1,400,428
2003. 03	1,625,897	1,488,589
2003. 04	1,834,285	1,830,936
2003. 05	2,620,629	2,792,061
2003. 06	4,529,903	4,378,591
2003. 07	5,450,447	5,017,796
2003. 08	4,916,582	4,691,928
2003. 09	4,738,964	4,531,105
2003. 10	4,002,519	4,067,559
2003. 11	3,030,514	3,225,583
2003. 12	2,121,120	2,147,993
Maximum	5,450,447	5,017,796
Average	3,196,752	3,180,198
Minimum	1,504,228	1,400,428
Stream discharge (2003. 01 ~ 12)	38,262,370	37,460,473

※ Equation C : $Q = 1368019 h^{8.5035}$, D : $Q = 1093186h - 696797.3$

제6장 결론

제주도의 주요하천을 통해 용천수의 형태로 유출되고 있는 지하수의 기저유출 현상을 수문학적 관점에서 정량화하기 위해 남·북사면과 서부지역에 위치한 4개 하천(외도천, 강정천, 연외천, 옹포천)을 대상으로 연구를 실시한 결과는 다음과 같다.

1. 연구대상 하천에서 측정된 시간별 수위자료를 분석한 결과, 홍수유출은 강우가 집중되는 5~9월 사이의 하절기에 주로 발생하였으며, 2003년 1년간 발생한 홍수유출 횟수는 11회~14회 범위로 분석되었다. 또한, 홍수유출 지속시간은 평균적으로 8~46시간을 나타내어 제주도의 하천특성과 수문지질 특성을 잘 반영하였다.

2. 지하수의 기저유출에 의해 유지되는 하천수위 변화를 분석한 결과, 강정천·연외천·옹포천은 계절적인 변동을 나타내 강우량이 많은 하절기에 상승하고, 강우량이 적은 가을~봄철 사이 기간에는 하강하는 현상을 뚜렷하게 나타내었다. 그렇지만, 외도천의 경우는 하천수위가 연중 거의 일정하게 유지되는 현상을 보였다. 상기와 같은 수위변동의 차이는 연구대상 하천유역의 지표 및 지하지질 상태, 대수층의 수리성, 지하수 체류기간(지하수 순환속도), 유역 내 강우량 등 수문지질학적 인자들이 동일하지 않음을 암시해 주고 있다.

3. 외도천과 강정천에서 관측된 수위자료를 2가지 웨어공식(Oki와 Govinda Rao의 식)에 적용하여 기저유출량을 산정한 결과, 외도천

은 6개월(2003. 7~12월)동안 5백만 m^3 , 강정천은 연간(2003년) 60백만 m^3 으로 나타났다. 또한 상기 2개 하천에 대해 유속측정법으로 기저유출량을 산정한 결과, 웨어공식에 의한 값보다 3~10%정도 많게 나타났다.

4. 옹포천과 연외천을 대상으로 18개월(2002. 7~2003. 12월)동안 실시한 유속측정자료를 근거로 기저유출량을 산정한 결과, 옹포천의 경우 최소 39,647 m^3/d , 최대 116,607 m^3/d 을 나타냈고, 연외천은 45,859 m^3/d , 최대 185,462 m^3/d 을 나타냈다.

5. 옹포천과 연외천에서 실시된 유속측정 자료와 관측된 수위자료를 이용하여 기저유출량 산정을 위해 수위-유량 관계식을 유도한 결과, 옹포천은 $Q=458824 h^{0.9694}$ ($R=0.9485$)의 식을 얻었으며, 연외천은 $Q=1368019 h^{8.5035}$ ($R=0.9615$)의 식을 얻었다. 상기와 같은 관계식을 적용하여 옹포천과 연외천을 통해 유출되는 연간 기저유출량을 산정한 결과 각각 $23 \times 10^5 m^3$ 과 $38 \times 10^5 m^3$ 으로 나타났다.

참고문헌

- 이동률·윤용남, 1996, 우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석, 대한토목학회논문집, 제16권, 제2-4호, pp. 321~334.
- 심재현·고영찬, 1996, 강우에 의한 유출량 산정모형, 한국지방행정연구원, pp. 7~14.
- 강병남, 2000, 제주도 지하수의 고도별·지역별 수질 특성, 제주대학교 석사학위 논문, pp. 4~12.
- 이동률·윤용남·안재현, 2001, 월 유출량 예측 변수로서 지하수 함양량의 이용, 한국수자원학회논문집, 제34권, 제3호, pp. 275~285.
- 배상근, 2002, 지하수 함양량 산정방법에 대한 고찰, 한국수자원학회지, 제35권, 제3호, pp. 50~59.
- 이금삼·조화룡, 2000, DEM을 이용한 한반도 지형의 경사도 분석, 한국지리정보학회지, 3권, 1호, pp. 35~43.
- 이대하·고동찬·박원배, 2002, $^3H/ ^3He$ 및 CFC-12를 이용한 제주도 지하수 연령추정 및 활용, 제10회 세계 물의 날 기념 학술세미나, 제주도, pp. 37~72.
- 정진영, 2002, 유량 측정자료의 불확실도 분석에 관한 연구(섬진강 유역을 중심으로), 수원대학교 석사학위 논문, pp. 7~25.
- 김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 석사학위 논문, pp. 10~19.
- 정광옥, 2004, 제주지역 하천특성에 적합한 친환경적 하천정비 방안, 환경부 지정 제주지역환경기술개발센터, pp. 13~32.
- 이광식·박원배·현승규·김용제·문덕철·김구영, 2004, 제주도 한라산 남북측 사면 용천수의 수리지구화학 및 동위원소 조성, 지질학회지, 제40권, 제1호, pp. 41~52.

- 이광식 · 박원배 · 현승규 · 김용제 · 문덕철 · 김구영, 2004, 제주도 한라산 남북측 사면 용천수의 수리지구화학, 한국지하수토양환경학회 춘계학술 발표회, pp. 408~412.
- 한찬 · 한정상, 1999, 3차원 지하수모델과 응용, 박영사, pp. 799~867.
- 민병형 · 옥치울 · 손인식 · 김가현 · 민일규 · 서진호, 하천공학, 형설출판사, pp. 104~105.
- 김원만, 1996, 수리공식집, 건우사, pp. 254~275.
- 윤용남, 1998, 공업수문학, 청문각, pp. 245~247.
- 최영박, 2002, 현대수리학, 구미서관, pp. 128~162.
- 건설부, 1965, 제주도 산업지 기초조사보고서, pp. 53.
- 제주도, 1979, 강정천 용수개발 사업 기본계획보고서, pp. 89.
- 산업기지개발공사, 1981, 제주도수자원개발 종합조사보고서, pp. 195~201.
- 건설교통부 · 제주도 · 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원 종합 개발계획 수립보고서, pp. III-29.
- 건설교통부 · 한국수자원공사, 1995, 제주도광역상수도 I 단계 기본 및 실시계획 지질조사보고서, pp. 4~8.
- 제주도, 1997, 제주도 중산간지역 종합조사, pp. 82~83.
- 제주도, 1999, 제주의 물 용천수, pp. 19~42.
- 제주도, 2000, 제주도 전지역 GIS확대구축, pp. 17~35.
- 건설교통부 · 제주도, 2001, 제주도 광역상수도 2단계 건설사업 실시계획 보고서, pp. 46~49.
- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(I), pp. 174~222.
- 제주도, 2002, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(II), pp. 182~242.
- 제주도 · 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합 조사(III), pp. 11~83.
- Hudson G. D, 1936, Unit area method of land classification, Annals of A.A.G, pp. 99~112.

- Theis C. V, 1938, The significance and nature of cone of depression in ground-water bodies, *Economic Geology*, 38, pp 889~902.
- Gardner C. Bent, 1995, Streamflow, ground-water recharge and discharge, and characteristics of surficial deposits in buzzards bay basin, southeastern Massachusetts, USGS, pp. 18.
- A.T Rutledge, Considerations for Use of The RORA Program to Estimate Ground-Water Recharge From Streamflow Records, USGS, pp. 1~5.
- C. W. Fetter, *Applied Hydrogeology*, pp. 518~522.
- Thomas C. Winter · Judson W. Harvey · O. Lehn Franke · William M. Alley, 1998, Ground water and surface water a single resource, USGS, pp. 1~25.
- Stephen B. Gingerich, 1999, Ground-water Occurrence and contribution to streamflow , Northeast Maui, Hawaii, USGS, pp. 29.

부 록

조사지점 & 단면측량 사진



사진 1. 외도천 조사지점



사진 2. 옹포천 조사지점



사진 3. 강정천 조사지점



사진 4. 연외천 조사지점



사진 5. 단면측량

감사의 글

그동안 저의 학업과 연구에 많은 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다. 먼저 부족한 점이 많은 저에게 학문의 길로 인도하여 주시고, 끊임없는 격려와 조언을 주신 양성기교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고, 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡아 세심하게 검토하여 주신 박상렬교수님, 김성근교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 아울러, 학부에서부터 대학원에 이르는 기간동안 많은 가르침을 주신 김남형교수님, 남정만교수님, 이병걸교수님, 김상진교수님, 고호성교수님께도 고마운 말씀을 드립니다.

또한, 바쁜 업무에도 불구하고 현장조사는 물론 논문에 이르기까지 많은 관심과 격려, 조언을 아끼지 않으신 고기원박사님, 박원배박사님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고, 제주발전연구원의 김태운박사님, 제주도광역수자원관리본부 수자원연구실의 박윤석선생님, 강봉래선생님, 봉석형, 용식형, 기현형께도 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 항상 격려해 주었던 건형과 영웅형, 태혁에게 감사드리며, 대학원 생활을 같이 하면서 격려를 해주었던 창훈형, 태우형, 현수형, 지훈형, 순보, 성욱, 실험실 후배들에게도 감사드립니다. 그리고 조사현장에서 묵묵히 도움을 주고 힘이 되어준 사랑하는 은정, 사메人(태현, 동현, 원홍, 영진, 상호), 박이석선배님, 상규에게도 감사드립니다.

끝으로 제가 공부를 할 수 있도록 온갖 뒷바라지를 다하여 주시고 용기를 주셨던 아버지, 어머니를 비롯하여 누나, 매형, 덕신, 그리고 지원, 수연 등 사랑하는 가족에게 이 한편의 논문으로나마 고마운 마음을 전합니다.