

제주도 외도천유역의 유출특성

하규철^{1*} · 문덕철² · 고기원² · 박기화¹

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²제주특별자치도 환경자원연구원

Runoff Characteristics of the Oedocheon Watershed in Jeju Island

Kyoochul Ha^{1*} · Deokcheol Moon² · Ki-Won Koh² · Ki-Hwa Park¹

¹Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Research Institute of Public Health & Environment, Jeju Special Self-Governing Province

ABSTRACT

Runoff characteristics of the Oedocheon in Jeju island were investigated using the long-term stream stage monitoring data. At the Cheonah valley in the upstream area and Oedocheon downstream, annual runoff occurred 21 and 12 times, respectively, and their average runoff periods were 21 days and 12 days, respectively. Stream stage response time to rainfall was 4 hours, and storm-water transfer from the upstream, Cheonah valley, to the Oedocheon downstream took about 2 hours. The stream discharge measurements had been carried out from Feb. 2004 to Jul. 2005, and showed that normal discharge of the Oedocheon was 0.39 m³/sec in average. Stage-discharge curves were developed to estimate base flow (normal discharge) and (direct) surface runoff. The base flow separations by a numerical filtering technique illustrated that annual surface runoff and base flow accounted respectively for 31.8~36.5%, 63.5~68.2% of the total stream discharge.

Key words : Jeju island, Oedocheon, Runoff characteristics, Runoff frequency, Base flow separation

요 약 문

제주도의 물관리나 지하수 함양량 산정에 있어서 직접유출량 평가는 유용하게 사용되어 진다. 외도천 유역의 상류지역인 천아계곡과 하류지점에서의 장기 수위관측자료를 이용하여 유출빈도를 분석한 결과, 연간 발생하는 유출 발생빈도는 천아계곡에서는 약 21회, 외도천 하류에서 약 12회였다. 유출지속시간을 고려하면 연간 유출을 관측할 수 있는 기간이 천아계곡에서는 21일, 외도천 하류에서는 12일 정도인 것으로 나타났다. 교차상관분석에 의하여 강우에 대한 수위반응은 약 4시간인 것으로 분석되었으며, 유출이 발생했을 때 천아계곡으로부터 외도천 하류지점까지 수위 전파 시간은 약 2시간이었다. 외도천 하류지점에서 유량측정결과, 상시 유출량은 평균 0.39 m³/sec였으며, 기저유출과(직접) 유출량을 평가하기 위해 수위-유량곡선을 개발하였고, 개발된 수위-유량곡선을 이용하여 수위를 시간에 따른 총유출량으로 산정하였다. 수치필터링기법에 의한 총유출량을 기저유출량과 직접유출량으로 분리 낸 결과, 연간 총 하천유량 중 31.8~36.5% 정도를 직접유출이 기여하고 있으며 63.5~68.2% 정도는 기저 유출이 기여하는 것을 확인하였다.

주제어 : 제주도, 외도천, 유출빈도, 유출특성, 기저유출분리

1. 서 론

유출(runoff)이란 지상으로 떨어진 강우의 일부분이 지

표(surface runoff) 또는 지하수 유출(subsurface discharge)을 통해서 하천으로 흐르는 과정을 말하는 것으로서 유출의 결과인 하천의 유량은 물이 수자원으로 이용되는 가장

*Corresponding author : hasife@kigam.re.kr

원고접수일 : 2008. 6. 17 심사일 : 2008. 6. 27 게재승인일 : 2008. 9. 23

질의 및 토의 : 2008. 12. 31 까지

* 본 논문은 2008년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

중요한 공급처이기도 하면서 또한 인간 생활에 가장 큰 피해를 주는 요소이기도 하다(선우중호, 1996). 제주도의 하천의 하상 매질은 투수성이 높아서 웬만한 강우가 아니면 지표 유출이 발생하지 않는다고 알려져 있지만, 제주도에서 유출발생과 관련한 연구는 그동안 관측의 어려움 때문에 거의 이루어지지 못했다. 1990년대 후반에 와서야 제주특별자치도 수자원관리본부에서 제주도 주요하천에 대하여 수위관측 및 유량측정을 실시하면서 하천과 관련한 연구가 활발해지기 시작하였다(문덕철, 2004; 제주도, 한국수자원공사, 2003; 한국지질자원연구원, 제주도, 2005; 하규철 외, 2008).

제주도에는 총연장 826.57 km에 이르는 약 60여개의 지방2급 하천과 83개의 소하천이 흐르고 있다(제주도, 2004). 제주도의 하천 형성은 지형, 지질 등과 밀접한 관계를 갖고 있어, 지형경사가 급하고 조면암류 또는 조면암질현무암류가 넓게 분포되어 있는 남·북부지역은 하천 발달이 상대적으로 양호하다. 반면, 평탄한 용암대지로 이루어져 지형이 비교적 완만한 동부의 성산·구좌지역과 서부의 대정·한경지역에는 하천이 거의 형성되어 있지 않다. 남·북 사면에는 조면암류로 구성된 V자형의 침식계곡을 따라 소규모로 지표하천이 발달되어 있으나, 현무암질 용암으로 구성되어 있는 동·서 사면에는 하천의 발달이 극히 미약하다. 즉 제주도의 하천은 제주와 서귀포를 중심으로 한 남·북부지역에 집중적으로 분포하고 있다(Fig. 1).

남쪽으로 흐르는 하천은 하류구간에서 깊이 30~40 m의

하곡을 형성하는 경우가 많은데 비하여, 북쪽으로 흐르는 하천은 20~30 m의 하곡을 보임에도 불구하고 깊이는 3~5 m에 불과하여 지역간 하천 형태에 차이를 보이고 있다. 전반적으로 하곡은 V자형을 이루고 해안지대에 이르기까지 하각작용이 매우 활발하여 유년기 하곡지형의 특색을 잘 보여주고 있다(김미령, 2003).

본 연구에서는 제주도의 하천의 유출특성을 파악하기 위하여 제주도의 대표적인 상시 유출하천인 외도천에서의 장기간의 수위자료와 유량 측정 자료를 분석하였다. 유출 발생과 관련하여 유출빈도, 강우와의 상관성, 직접유출과 기저유출에 대한 기여율 등에 대한 정량적인 분석결과를 제시하고자 한다.

2. 유역 개요 및 연구 방법

2.1. 유역 개요

외도천은 한라산 Y계곡에서 무수천을 거쳐 바다에 이르는 하천으로 조공천, 도근천, 수정천 등 다양한 이름으로 불리고 있으며, 1968년 수원개발이 시작된 이래로 취수가 되기 시작하면서, 1973년부터는 월산정수장을 거쳐 제주시로 물을 공급하는 상수원으로 사용되고 있는 하천이다(<http://www.jejuwater.go.kr>). 제주도에 있는 대부분의 상시유출 하천과 마찬가지로 외도천은 해안변 부근에서 지하로 함양된 지하수가 지표로 용출되어 나타나는 일종의 대규모 용천으로 생각할 수 있다(한국지질자원연구원, 제주도, 2005; 하규철 외, 2008).

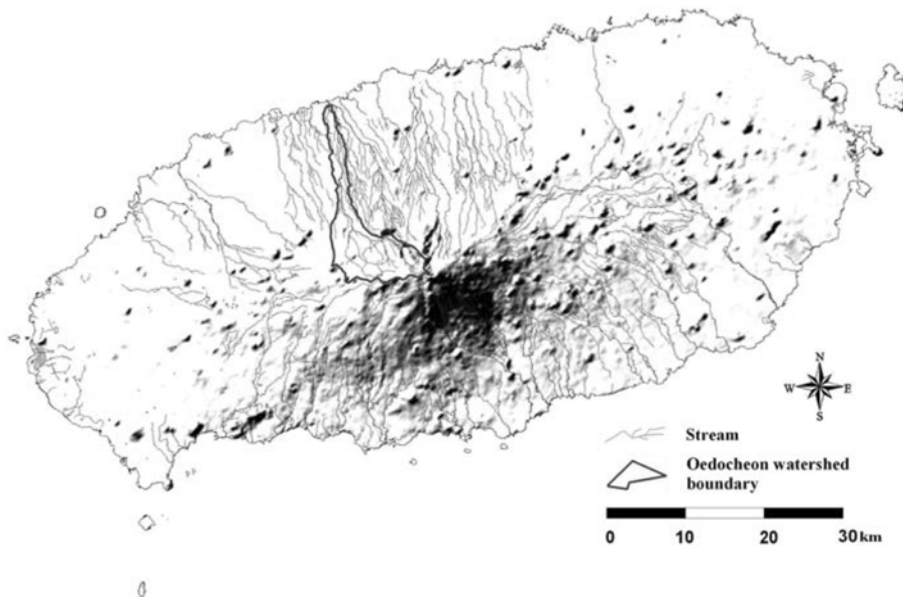


Fig. 1. Streams in Jeju island and the Oedocheon watershed.

외도천 유역의 기하학적(geometric) 특성치들은 WMS (Watershed Modeling System) 프로그램을 이용하여 계산하였다(http://www.emrl.byu.edu/wms.html). 1:5,000수치지형도에서 수치표고모형을 만들고, 흐름 방향(flow direction), 흐름 수렴영역(flow accumulation)을 추출함으로써 하계망을 구성하였으며, 구하여진 하계망은 실제 하천의 분포와 거의 일치시켰다.

외도천유역의 기하학적 특성을 살펴보면 유역면적 41.25 km², 유역길이 16.85 km, 최대유하거리 22.87 km, 유역경사는 0.2598, 최대하도경사는 0.0764, 최대하도길이는 21.76 km이다. 사행계수(sinuosity factor)는 1.29로 구불구불한 정도가 그리 크지 않은 것을 알 수 있고, 형상계수(shape factor)는 6.88로 폭에 비하여 길이가 매우 긴 형태를 하고 있다(Fig. 2). 외도천유역의 중요한 지형으로는 해발 고도 1950 m의 백록담과 1740 m의 윗세 오름, 만세동산과 으렁 오름, 망체 오름, 붉은 오름 등 크고 작은 오름이 약 8~10여개 정도 분포하고, 어승생과 붉은 오름으로부터 물이 V자형으로 모여드는 천아 계곡이 있다.

2.2. 연구 방법

제주특별자치도 수자원관리본부에서는 외도천 하류지점(외도정수장과 천아 계곡에 수압 환산방식의 지동수위센서를 설치하여 1997년부터 하천 수위를 관측하고 있다. 외도천은 제주도에 있는 다른 하천과 마찬가지로 비가 많이 발생할 때를 제외하고는 지표유출이 발생하지 않기 때문에, 평상시와 유출이 발생할 때를 하천 수위 상승에 의하여 구분이 가능하다. 즉, 수위상승 기록을 통해서 유출빈도를 확인할 수 있다. 그런데, 연속된 강우에 의하여 다중 수위상승(multi-peak)이 발생한 경우에는 빈도를 파악하려면 일정한 기준이 필요하다. 이번 연구에서는 여러 번의 수위상승(multi-peak)이 1일 이내에 발생하였다면 하나의 유출로 간주하였다. 또한 유출이 발생한 것으로 간주된 최소 수위상승분은 센서의 해상도를 고려하여, 5 cm로 하였다. 유출빈도는 1998년부터 2007년까지의 기간동안 관측된 수위자료를 이용하여 분석하였다.

유출특성과 유출량 분석은 다운년으로 대표되는 2004년, 과우년으로 대표되는 2005년을 대상으로 수행하였다. 강우량은 제주특별자치도 소방방재본부에서 운영하고 있는 1100고지, 노형, 향파두리, 어승생 관측소의 시강우량 자료를 획득하여 분석에 사용하였다(http://www.jeju119.go.kr). 대부분의 유출은 1일 전후로 소멸하기 때문에 강우량과의 상관성을 파악하기 위해서는 하루단위의 강우량 자료보다는 시 강우량 자료가 보다 더 유출특성을 파악하

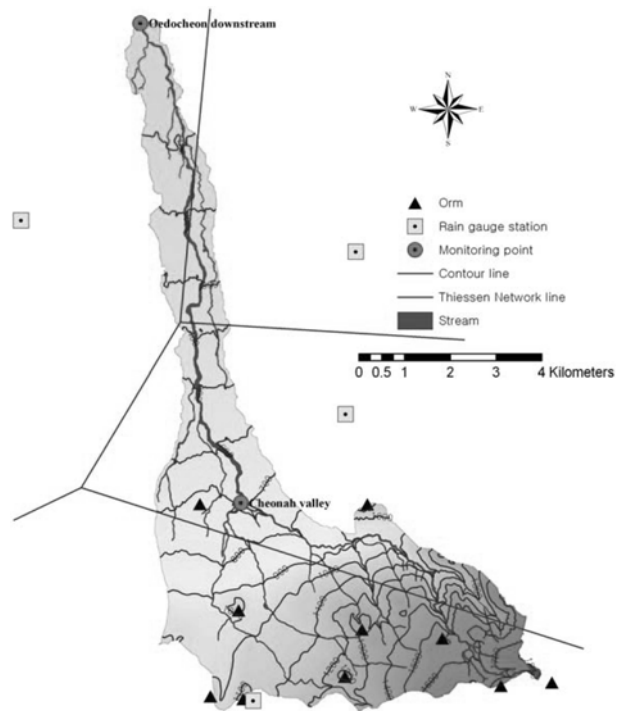


Fig. 2. Topography and the monitoring points for the Oedocheon watershed.

기에 유리하다고 할 수 있기 때문에, 비교적 강우량 자료의 누락이 거의 없었던 시기인 2004년과 2005년도를 분석 대상기간으로 선정 하였다. 유역에 내린 평균 강우량은 티센법(Thiessen method)에 의해 산정하였다(Fetter, 1988; 선우중호, 1996; 윤태훈, 1998). Fig. 2에 강우량 관측소와 티센망(Thiessen network)을 함께 나타내었다.

본 논문에서는 특별한 언급이 없는 한 유출은 직접 지표유출(direct surface runoff)을 의미하고, 기저유출은 직접유출이 아닌 지하로 침투한 물이 지표로 흘러 나와 흐르는 지하수 유출과 중간유출을 포함하는 개념으로 간주하였다. 하천의 상시유출량은 주로 기저유출로 이루어져 있다. 일정한 기간 동안 하천유량이 결정되게 되면, 하천 유출량으로부터 기저유출과 직접유출을 분리할 수 있다. 하천 유량기록이 어떤 특정한 시간간격으로 주어져 있는 경우, 기저유출량과 직접유출량도 또한 같은 시간간격으로 추정해 낼 수 있다. 대부분의 경우, 그러한 방법은 1년이나 또는 그이상의 기간동안의 값을 분석하여야만 오류를 줄일 수가 있다. 하천 유출수문곡선으로부터 지하수 하천유출량을 추정해내는 많은 방법들은 적용에 있어서 약간씩의 주관적인 판단이 개입되어 있지만, Nathan과 McMahon(1990)이래로 수치필터링 기법이 도입되면서 이러한 주관성을 배제하고, 지하수 유출량추정의 일관성을 유지시킬 수 있었다. 이러한 방법들은 하천유량분할방법

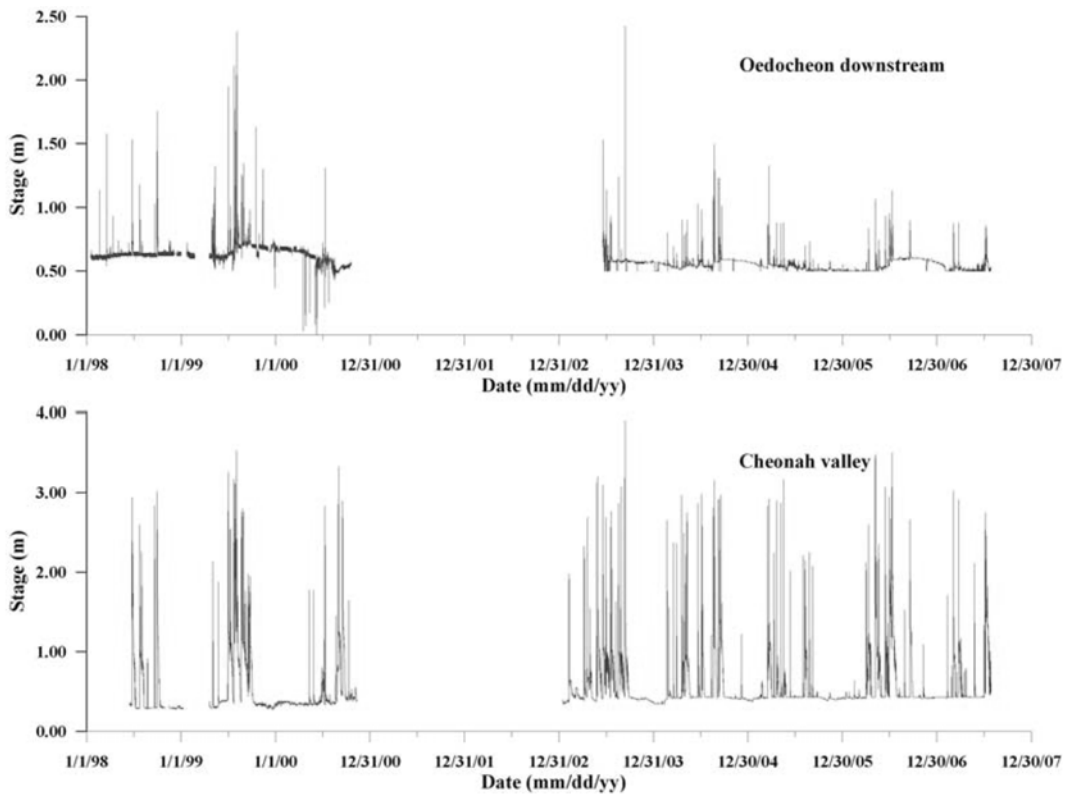


Fig. 3. Stream stage variations at the Cheonah valley and the Oedocheon downstream.

(streamflow partitioning)으로 통칭된다(하규철 외, 2007).

이번 연구에서는 Rutledge(1998)가 개발한 PART프로그램을 이용하여 기저유출량을 추정하였다. PART프로그램은 일종의 하천유량분할방법을 이용한 프로그램으로, 자동으로 하천 유량곡선으로부터 지하수 하천유출량인 기저유출량을 분리해 낼 수 있다. 이 프로그램의 기본 입력자료는 일평균 유량이기 때문에, 1시간 단위의 외도천 유량자료를 일별로 평균을 구하여 입력 자료를 재구성하였다.

3. 외도천 유역의 유출특성

3.1. 유출빈도

Fig. 3은 1998년부터 2007년까지 외도천 하류지점과 천아계곡에서 매시 정각 1시간 간격으로 하천수위변화를 나타낸 그림이다. 2001년도와 2002년도의 자료는 누락되었는데, 직접유출이 발생시 유수의 힘에 의하여 센서의 이동 또는 파손이 발생하였기 때문이다.

외도천 하류 관측지점은 외도취수장에 위치한 곳으로서 취수 펌프가 자주 가동되기 때문에 자연적인 수위변화뿐만 아니라 양수에 의한 인위적인 수위변동도 같이 반영되어 있다. 이때에는 일정했던 수위가 급격하게 하강하기 때

문에 그래프 상에서 구분할 수 있다. 그리고, 센서의 보수 또는 교환에 의하여 센서의 위치가 변경되었기 때문에 외도천 하류관측지점에서는 2003년 6월 18일, 천아계곡에서는 2003년 1월 15일을 기점으로 전체적인 수위 하강 또는 상승이 발생하였는데, 이전 수위 자료와의 일관성을 유지하기 위하여 인위적으로 수위자료를 상승 또는 하강시켜 보정하였다.

1998년부터 2007년까지의 관측자료를 분석해보면, 외도천 하류 관측지점의 수위는 인위적인 양수의 영향을 제외한 나머지 수위자료로부터 0.40~2.42 m 범위에서 평균 0.58 m, 최빈값으로 0.50 m의 수위를 나타내고 있었다. 천아계곡의 수위는 0.28~3.90 m 범위에서 평균 0.55 m, 최빈값으로 0.43 m의 수위를 보이고 있었다. 유출발생에 의한 시간당 최대 변화폭은 외도천 하류 관측지점에서 2003년 9월 12일 14시에 1.58 m, 천아계곡에서는 1998년 9월 20일 18시에 2.53 m를 나타내었다.

외도천 유역에서의 월별 유출 발생빈도와 월별 평균 유출 발생빈도를 Table 1에 나타내었다. 1998년부터 2007년 7월까지 관측된 총 유출발생은 외도천 하류에서 78회, 천아계곡에서 140회였다. 연간 유출발생회수를 보면 1년 동안 자료의 누락이 없이 지속적으로 관측된 기간동안만

Table 1. Runoff occurrences on the Oedocheon watershed

(a) Cheonah valley													
Year	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Sum.
1998	-	-	-	-	-	-	1	2	2	0	0	0	5
1999	-	-	-	-	2	0	4	6	4	0	0	0	16
2000	0	0	0	0	2	1	2	2	2	1	0	0	10
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	0	1	1	5	3	1	4	4	1	0	0	0	20
2004	0	2	3	3	4	2	2	3	3	0	1	1	24
2005	0	1	2	3	4	1	1	4	2	0	1	0	19
2006	2	1	1	3	4	7	3	2	1	0	2	0	26
2007	0	2	5	5	1	0	6	-	-	-	-	-	19
Ave.	0.3	1.2	2	3.2	2.9	1.7	2.9	3.3	2.1	0.1	0.6	0.1	20.5

(b) Oedocheon downstream													
Year	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Sum.
1998	0	1	1	2	1	3	1	1	2	1	0	0	13
1999	-	-	-	-	4	0	4	6	3	0	1	0	18
2000	0	0	0	0	0	0	2	0	0	-	-	-	2
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	-	-	-	-	-	1	3	1	1	0	0	0	6
2004	0	1	2	1	3	1	2	4	3	0	0	0	17
2005	0	0	2	2	2	0	0	2	0	0	0	0	8
2006	-	-	-	-	3	3	2	0	1	0	0	0	9
2007	0	0	2	0	0	0	3	-	-	-	-	-	5
Ave.	0	0.4	1.4	1.0	1.9	1	2.1	2.0	1.7	0.2	0.2	0	11.7

- : No data

으로 계산해 보면, 외도천 하류와 천아계곡에서 각각 8~17회, 10~26회 유출이 발생했음을 알 수 있다. 월별 평균 유출빈도의 합계로 계산하여 보면, 외도천 하류에서 약 12회, 천아계곡에서는 약 21회가 되는 것을 알 수 있다. 월별 유출발생 회수가 가장 많은 달은 외도천 하류의 경우 7월에 평균 2.1회이고, 천아계곡의 경우에는 8월과 4월에 각각 3.3회, 3.2회로 가장 많은 유출이 발생하였다 (Fig. 4).

3.2. 유출특성

Table 2에는 유출사상에서 강우량, 강우지속시간, 침투 시간, 수위상승, 기저시간, 1일 선행강우량을 나타낸 것이다. 분석기간이 되고 있는 2004년도에 내린 강우량은 외도천 유역과 천아계곡 소유역에서 각각 2,473 mm, 2,720 mm이었고, 2005년에는 1,111 mm, 1,162 mm였다. 1993년부터 2002년까지의 10여 년간의 강우자료로 계산된 제주도 전체지역의 연평균 강우량은 1,975 mm이다(제주도,

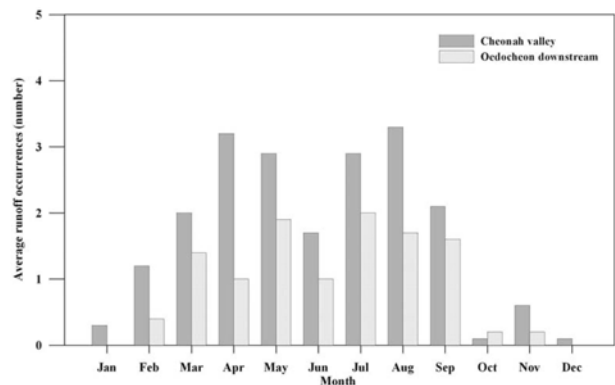


Fig. 4. Average monthly runoff occurrences on the Oedocheon watershed.

수자원공사, 2003). 제주도 연평균 강우량과 비교해 볼 때, 2004년은 비교적 강우량이 많은 다우년이었던 반면, 2005년은 강우량이 매우 적었던 과우년이었던 것을 알 수 있다. 2004년도에 발생한 유출회수는 천아계곡과 외도천 하류지점에서 각각 24회, 17회였고, 2005년도에는 19회, 8

Table 2. Runoff characteristics on the Oedocheon watershed

(a) Cheonah valley

No.	Date	Time	Rainfall Duration (hr)	Total Rainfall (mm)	Peak Time (hr)	Stage Rise (m)	Base Time (hr)	1-day Precedent Rainfall (mm)
1	2004-02-22	06:00	1	2.1	1	2.21	33	0.7
2	2004-02-28	23:00	8	43.3	2	1.1	18	0.0
3	2004-03-05	19:00	4	2.6	13	0.08	43	1.5
4	2004-03-17	13:00	9	47.5	4	1.92	26	0.0
5	2004-03-30	03:00	13	62.7	1	1.93	46	0.0
6	2004-04-18	21:00	16	162.8	2	2.5	43	0.0
7	2004-04-23	11:00	—	—	2	0.19	11	—
8	2004-04-26	20:00	14	100	2	1.69	17	0.7
9	2004-05-03	15:00	12	51.3	6	0.92	15	49.2
10	2004-05-04	02:00	9	45.7	3	0.96	20	63.7
11	2004-05-09	01:00	14	108.7	2	1.84	22	0.0
12	2004-05-15	14:00	5	7.3	2	0.2	5	0.0
13	2004-06-19	13:00	11	76.8	2	2.42	20	13.5
14	2004-06-25	14:00	—	—	2	0.29	9	—
15	2004-07-04	08:00	27	120.6	2	2.5	44	9.6
16	2004-07-07	10:00	14	90	2	1.68	20	0.0
17	2004-08-18	07:00	7	122.7	2	2.36	16	9.2
18	2004-08-19	05:00	7	54.9	3	0.46	18	233.9
19	2004-08-22	12:00	12	135.5	2	2.08	12	2.1
20	2004-09-07	11:00	6	88.4	3	2.47	38	24.6
21	2004-09-11	08:00	18	111.8	4	2.19	25	113.8
22	2004-09-12	12:00	5	18.5	3	0.58	5	47.0
23	2004-11-10	17:00	10	20.6	3	0.06	33	12.4
24	2004-12-05	03:00	16	50.5	1	0.76	19	0.0
25	2005-02-23	16:00	5	2	13	0.05	60	0.0
26	2005-03-17	03:00	—	—	2	2.33	34	—
27	2005-03-22	06:00	—	—	4	1.96	31	—
28	2005-04-10	07:00	7	47.8	2	1.74	28	4.0
29	2005-04-20	00:00	11	127.7	2	2.39	23	0.0
30	2005-04-22	21:00	—	—	3	0.23	6	—
31	2005-05-05	15:00	13	128.7	2	2.38	36	0.0
32	2005-05-11	07:00	—	—	2	0.08	7	—
33	2005-05-18	01:00	9	18.3	2	2.65	29	0.0
34	2005-05-22	07:00	—	—	—	0.29	—	—
35	2005-06-10	20:00	12	41.9	2	1.54	27	0.0
36	2005-07-31	01:00	8	15.7	2	1.77	25	0.3
37	2005-08-07	17:00	8	16.2	5	1.7	34	5.8
38	2005-08-09	05:00	17	8.6	6	0.43	21	12.6
39	2005-08-24	18:00	25	18.1	5	1.81	32	5.5
40	2005-08-31	17:00	—	—	2	0.17	18	—
41	2005-09-06	07:00	—	—	2	1.64	28	—
42	2005-09-23	21:00	—	—	2	0.08	13	—
43	2005-11-12	04:00	—	—	2	0.06	21	—

Table 2. continued

(b) Oedocheon downstream

No.	Date	Time	Rainfall Duration (hr)	Total Rainfall (mm)	Peak Time (hr)	Stage Rise (m)	Base Time (hr)	1-day Precedent Rainfall (mm)
1	2004-02-22	10:00	14	12.9	3	0.19	24	3.5
2	2004-03-17	18:00	15	41.7	9	0.16	26	0.0
3	2004-03-30	11:00	13	56.9	6	0.11	28	0.0
4	2004-04-18	22:00	15	130.7	1	0.38	26	0.0
5	2004-05-04	04:00	10	44	8	0.27	27	51.6
6	2004-05-09	03:00	16	85.7	2	0.36	30	0.0
7	2004-05-31	03:00	7	16.6	8	0.06	13	37.2
8	2004-06-19	15:00	12	63.8	1	0.49	26	12.6
9	2004-07-04	09:00	10	74.4	1	0.4	8	3.0
10	2004-07-07	12:00	15	72.3	2	0.22	29	0.0
11	2004-08-18	08:00	8	118.1	6	0.55	20	8.7
12	2004-08-19	00:00	6	46.5	2	0.32	6	217.2
13	2004-08-22	11:00	13	121.6	5	0.68	13	6.7
14	2004-08-23	02:00	5	20.9	1	0.2	5	184.6
15	2004-09-07	11:00	16	81.8	2	0.65	19	6.5
16	2004-09-11	08:00	18	122.5	5	0.65	17	5.3
17	2004-09-18	12:00	5	16.4	3	0.37	14	26.3
18	2005-03-17	05:00	-	-	2	0.33	24	-
19	2004-03-22	07:00	-	-	2	0.78	12	-
20	2004-04-10	14:00	9	42.5	2	0.13	31	2.8
21	2004-04-20	02:00	11	95.4	4	0.35	31	0.0
22	2005-05-05	17:00	9	71	2	0.33	24	25.9
23	2005-05-18	04:00	9	27	4	0.34	13	0.0
24	2005-08-07	00:00	8	26.8	7	0.08	15	9.5
25	2005-08-24	22:00	26	27.4	2	0.21	11	8.6

- : No data.

회로 강우량의 감소에 의해 유출회수도 줄어든 것을 알 수 있다(Table 1). 특히 고도가 낮은 지역인 하류지점에서 상류 천아 계곡보다 유출회수가 현저하게 줄어들었다.

상류인 천아 계곡에서 유출이 더 많이 발생하는 것은 상류지역에 강우량이 더 많이 분포하고, 하천의 경사도 또한 하류보다 더 커서 유출이 발생할 수 있는 조건이 보다 더 양호하게 형성되어 있기 때문이다. 상류에서 발생했던 유출이 모두 하류까지 전달되지 못하는 것은 유출발생시 상류에서 하류로 물이 흘러 내려가면서 지하로 침투되거나 증발산에 의하여 손실되기 때문이다. 즉, 손실량보다 강우량이 초과할 때에만 하류까지 물이 흘러 내려갈 수 있기 때문에, 상류에서 46 cm 이상의 수위상승을 일으키는 유출규모가 아니면 상류와 하류에서 동시에 유출현상을 관측할 수가 없다(Table 2).

Fig. 5는 강우량과 하천수위 상승과의 관계를 나타낸

그래프이다. 2월과 3월의 유출은 강설부분이 강우량에 반영되지 않은 관계로, 그래프 상에서 제외하였다. 천아 계곡이나 하류지점에서 관측한 유출발생시 수위상승고와 강우량사이에는 약한 양의 상관관계를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 선형회귀식의 기울기로부터, 강우량에 대한 수위 상승율은 상류인 천아 계곡이 더 높은 것을 알 수 있다.

유출이 발생했을 때, 강우량과 하천수위 상승사이에는 상관성이 약한데, 이는 유출에 관여하는 요소가 강우량 이외에도 강우강도, 강우지속시간 등과도 관련되어 있기 때문이다. 같은 강우량이지만 강우지속시간이 길어지면, 지하수로의 침투, 또는 증발산 등에 의하여 강우의 손실량이 커지기 때문이다. 반면, 강우량은 적더라도 일정한 시간동안 강우가 집중적으로 내린다면 유출이 발생할 수 있다. 또한 지표면 상태가 매우 축축한 상태에 있다면 유출

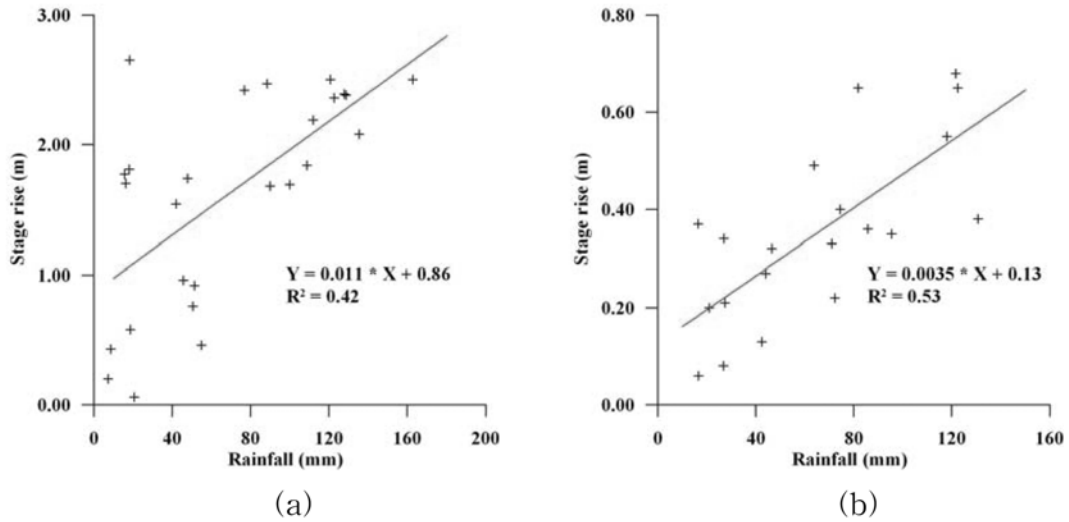


Fig. 5. Relationship between rainfall and stream stage rise, (a) at the Cheonah valley, and (b) at the Oedocheon downstream.

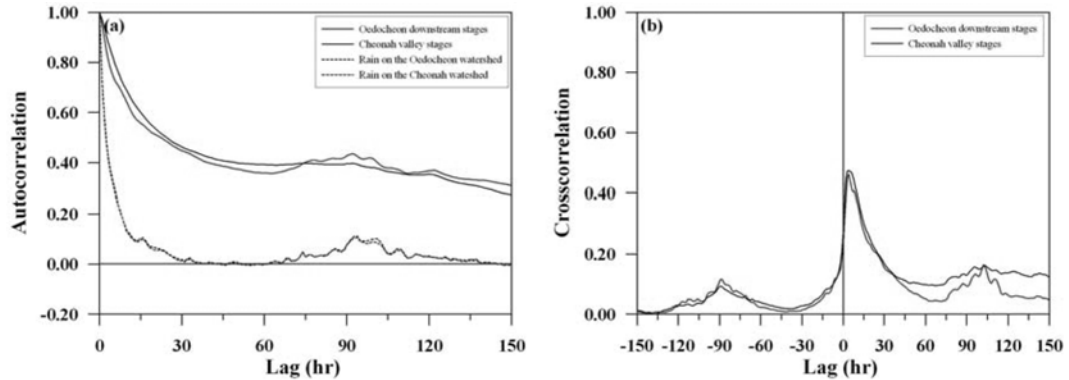


Fig. 6. Correlation analyses of the stream stages and rainfall data, (a) auto-correlation coefficients, (b) cross-correlation coefficients.

이 일어날 수 있는 조건이 양호할 것이기 때문에, 선행강우량의 유무도 유출발생과 관련이 있다고 할 수 있다. 제주도에서는 침투성이 매우 좋은 화산암으로 이루어져 있어서 유출지속시간이 2~3일 이내로 짧기 때문에, 각 유출 발생시 1일 선행강우량을 검토하였다. 검토 결과, 1일 선행강우량과 하천 수위상승사이에 그리 강한 상관성을 보여주지는 못했는데, 투수성이 큰 제주도의 지질특성에 때문으로 판단된다(Table 2).

2004년에서 2005년까지의 기간동안, 천아 계곡에서는 총강우량이 2월과 3월을 제외하고 2.0~162.8 mm, 강우지속시간은 5~27시간에서 수위상승이 5 cm~2.65 m 정도 있었다. 하나의 유출이 시작부터 종료될 때까지의 시간인 기저시간은 5~60시간으로, 평균 24.5시간 이었다. 외도천 하류지점에서는 12.9~130.7 mm의 총강우량에, 강우지속시간은 5~26시간, 수위상승은 6~78 cm이었다. 기저시간은 5~31시간으로, 따라서 유출지속시간은 평균 24시간이었다.

천아 계곡에서는 연간 평균 21회, 외도천 하류에서는

평균 12회인 점과 두지점에서의 유출지속시간이 약 24시간인 것을 고려하면, 연간 유출을 관측할 수 있는 기간은 천아계곡에서는 약 21일, 외도천 하류에서는 약 12일에 불과하다는 것을 알 수 있다.

외도천 하류지점과 천아 계곡으로부터 1998년부터 2007년 7월까지의 기간 중에 7월과 9월 사이에는 짧은 시간 동안 비가 집중적으로 내려 유출이 발생하기도 하지만, 2~3일 이상의 긴 시간동안 유출이 연속되어 발생하기도 한다. 따라서, 하루 이내에 발생한 여러 번의 유출에 대해서 단일 유출로 간주하였기 때문에 유출발생빈도는 다소 차이가 날 수 있다. 여름철의 유출발생이 많은 것은 강우량이 집중되는 우리나라의 강우특성 때문이며, 상류인 천아 계곡에서 비가 적은 시기임에도 4월에 유출이 많이 발생하는 것은 겨우내 얼어 있던 산간지역의 눈과 토양이 녹으면서 유출이 발생하기 쉬운 조건이 형성되었기 때문으로 해석된다.

강우량에 대한 유출발생의 반응시간을 알아보기 위하여

교차상관분석을 실시하였다. Fig. 6은 하천의 수위와 대상 유역에 내린 강우 시계열 자료에 대한 자기상관계수와 하천 수위가 강우량에 대한 반응성을 보여주는 교차상관계수를 나타낸 그래프이다. 하천의 수위 수문곡선이 상당한 기간동안 자기상관계수가 0으로 수렴하지 않는 이전 자료에 대한 의존성, 기억효과를 가지고 있는데 반하여, 강우량 자료는 40~50시간 이내로 자기상관계수가 수렴하는 무작위적 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 무작위적 특성을 갖는 강우량자료를 입력 자료로, 하천수위자료를 출력 자료로 하여 교차상관계수를 구하게 되면 시스템의 입력에 대한 출력의 반응시간을 알 수가 있다(Larocque et al., 1998). 외도천 하류와 천아 계곡 수위관측지점에서 강우량과의 교차상관계수는 지체시간 4시간에서 각각 0.462, 0.474로 가장 높은 값을 나타내었다. 따라서, 각 수위관측점에서의 강우량에 대한 수위변동은 4시간의 지체시간을 갖고 반응하고 있는 것으로 보여 진다.

3.3. 홍수위 전파속도

유출이 발생하게 되면 물이 하천을 따라 상류에서 하류로 흘러 내려가면서 수위와 유량의 전파가 발생한다. 수위 모니터링 지점인 천아 계곡과 외도천 하류사이의 거리는 하천을 따라서 11.8 km이다. 두지점이 각각 한 하천의 상류와 하류지점이기 때문에 수위 시계열 자료사이에는 상관성이 어느 정도 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7에 비교적 자료의 누락이 적은 시기인 2004년 1월부터 2005년 8월까지의 천아 계곡과 외도천 하류 수위간의 교차상관계수를 나타내었다. 유출이 발생하여 급격한 수위의 상승이 발생했던 때를 서로 비교해보면 어느 정도 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 최대교차상관계수는 2시간의 지체시간에서 0.61 값으로 산정이 된 것으로 보아 천아 계곡과 외도천 하류 사이의 홍수위 전달시간은 평균 2시간 정도 되며, 홍수위 전파속도는 약 5.9 km/hr 정도 될 것으로 판단된다.

3.4. 유출량 추정

3.4.1. 상시 유출량

천아 계곡에서는 현실적으로 신뢰성 있는 유량측정이 불가능하므로 외도천 하류에서만 유량측정이 이루어 졌다. 외도천 하류지점에서 상시 유량측정은 외도취수장에 설치된 자동수위측정 센서부로부터 상류 쪽으로 약 50 m 정도 떨어진 곳(A), 하천자동수위 센서부(B), 그리고 하천 수위 센서부 하류 약 100 m 지점의 해수침투 방지용 위어부(C) 3곳에서 이루어졌다. 상시 하천 유량은 일정한

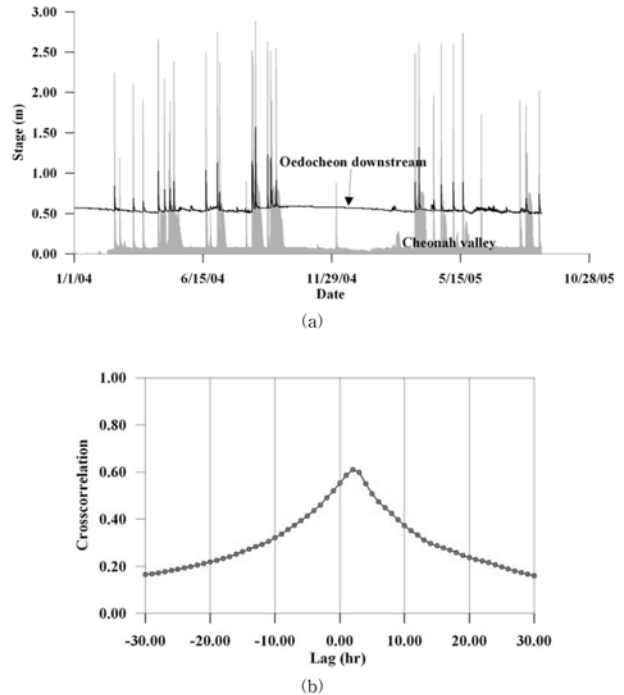


Fig. 7. The stream stage variations (a), and cross-correlation for the stream stages of the Oedocheon downstream and the Cheonah valley (b).

간격으로 유속을 재고, 측정된 유속과 단면적을 곱함으로써 유량을 측정하는 단면적법을 적용하여 산정하였다. 사용된 유속계로는 전자파를 이용한 유속계인 Marsh-McBirney사의 FLO-MATE Model 2000과 독일 OTT사의 NAUTILUS이다. 이들 유속계는 모두 한국건설기술연구원 의견의 검토를 마친 것들이다. 3곳에서 유량을 측정하는 이유는 상시 유출시의 하천유속이 매우 작아서 유량측정의 오차가 클 것으로 예상 되는 바 서로 다른 장소에서 유량을 비교하기 위해서이다. B단면과 C단면에서의 유량은 보 또는 위어의 영향, 그리고 C단면에서는 해수 조류의 영향을 직·간접적으로 받을 수 있기 때문에, A단면에서의 값을 외도천의 상시 유량 값으로 간주하였다.

Fig. 8은 2004년 2월부터 2005년 6월까지 외도천 하류 지점의 월별 상시 하천 유량 변동을 나타낸 것이다. 측정된 외도천 하류지점의 유량은 A단면을 기준으로 0.14~0.69 m³/sec의 범위에서 평균 0.39 m³/sec의 값을 보였고, B단면에서는 0.11~0.75 m³/sec의 범위에서 평균 0.41 m³/sec, C단면에서는 0.03~0.58 m³/sec의 범위에서 평균 0.18 m³/sec을 나타내었다. A단면과 B단면에서 측정된 유량은 B단면에서의 유량이 다소 높으면서 비슷했지만, C단면에서의 유량은 때에 따라서 2배 이상 유량이 작게 산정되었다.

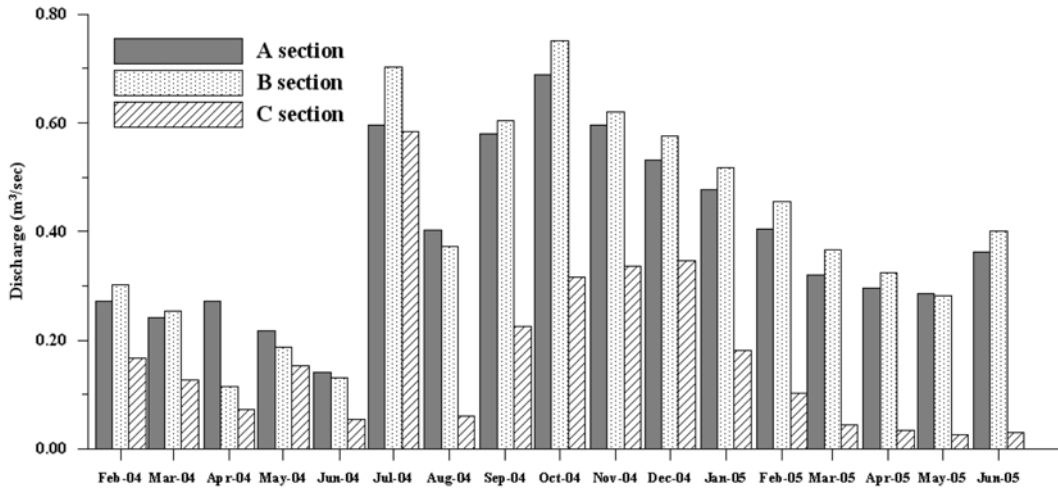


Fig. 8. The monthly normal discharges at the Oedocheon downstream.

3.4.2. 기저유출 분리

유출이 발생할 때의 유량은 2004년도 6월부터 8월까지의 4회에 걸쳐서, 한국수자원공사에서 개발한 도플러 효과를 이용한 전자파표면유속계(모델명 KST12V200202) 또는 봉부저(float)를 이용하여 유량을 산정하였다. 최대 1.49 m 수위에서 106.07 m³/sec의 유량이 흐르는 것이 관측이 되었다. 수위-유량곡선은 수위와 유량의 관계를 나타내는 곡선으로 수위에 대하여 측정된 유량을 도시하여 얻어진다. 수위-유량곡선의 주목적은 측정된 수위를 유량으로 환산하기 위함이다. 대개의 경우 간단히 수위와 유량의 도시로 충분하고 대표적인 곡선모양은 포물선이다(윤태훈, 1998). 외도천 하류지점에서 수위와 유량간의 관계식을 도출하기 위하여 수위를 x축으로 유량을 y축으로 놓고, 고수위에서는 2차 다항식으로 저수위에서는 일차식으로 회귀시켰다.

$$Q = \begin{cases} 101.07h^2 - 93.09h + 21.10, & R^2 = 0.93 (h \geq 0.54) \\ 4.56h - 2.14, & R^2 = 0.51 (h < 0.54) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 Q는 유량이고, h는 하천수위이다.

Fig. 9는 식(1)에 의한 수위-유량 관계 곡선식을 나타낸 것이다. 고수위의 수위-유량 관계 곡선식을 저수위에서도 적용하게 되면 유량값이 음의 값을 가지는 불합리한 결과가 나타날 수 있을 뿐만 아니라, 저수위 유량이 저평가될 수 있다. 따라서, 저수위에서의 수위-유량 곡선식이 필요하다. 저수위의 수위-유량 관계 곡선식은 직접유출이 발생하지 않았던 0.40~0.54 m 범위의 평상시 수위에서 측정된 유량자료를 이용하여 도출하였다.

저수위일 때가 고수위 일 때보다 상관계수가 낮은 것은

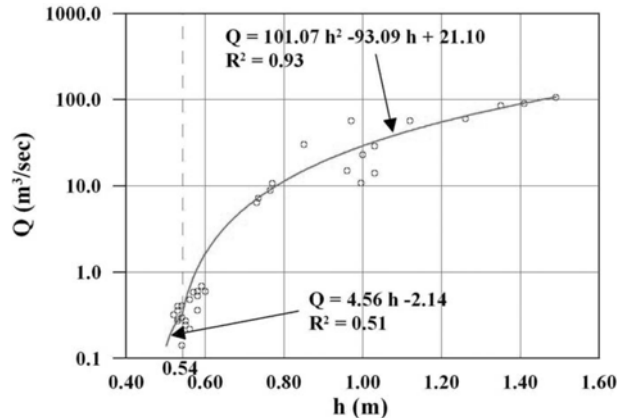


Fig. 9. Stage-discharge relation curve at the Oedocheon downstream.

유속이 적고 수심이 깊어서 유속 측정의 오차가 발생하기 쉬운 것에서 기인된다고 판단된다. 유량측정지점이 약 50 m 정도 떨어진 보의 영향을 받는 점, 하천의 흐름이 정상류가 아닌 비정상류이고 층류가 아닌 난류인 점도 또한 상관계수가 낮게 나타난 원인으로 꼽을 수 있다. 고수위일 때에는 직접 유출발생시 전자파 표면 유속계와 봉부저에 의한 유량측정의 한계에 의해 유량산출의 정확성이 떨어지게 된다. 위어를 설치하거나 다른 구조물을 설치하지 않고서는 좀 더 정확한 유량 측정치를 얻을 수 없는 한계가 있기 때문에, 이번 연구에서는 부득이하게 수위와 유량간의 관계식이 유효하다고 가정 하였다.

Fig. 10은 PART프로그램을 이용하여 기저유출을 분리한 그림이다. 유출이 발생하고 있지 않을 때에는, 하천유출의 대부분은 기저유출로 이루어져 있는 것을 알 수 있다. 5월부터 9월까지 유출이 빈번하게 발생하고 있는 기

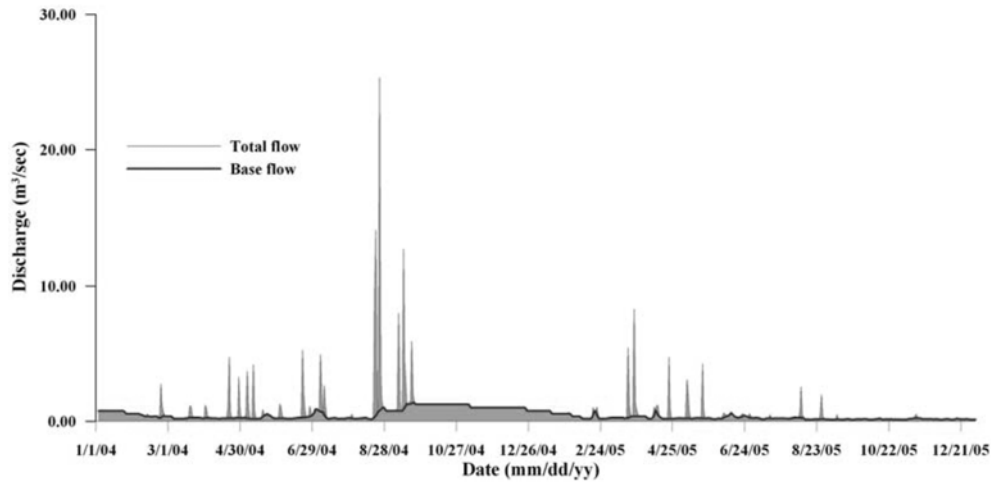


Fig. 10. The results of the base flow separation.

Table 3. The results of the base flow separation at the Oedocheon downstream

(a) In 2004

Month	Total flow (m ³)	Base flow (m ³)	Direct runoff (m ³)	Base flow ratio	Direct runoff ratio	Rainfall (mm)
Jan-04	1,929,051	1,929,051	—	100.0%	0.0%	75.1
Feb-04	1,366,192	1,011,512	354,680	74.0%	26.0%	66.0
Mar-04	982,129	673,762	308,366	68.6%	31.4%	128.5
Apr-04	1,445,804	628,305	817,499	43.5%	56.5%	222.3
May-04	1,721,092	766,243	954,849	44.5%	55.5%	369.2
Jun-04	1,665,898	816,471	849,426	49.0%	51.0%	198.1
Jul-04	1,672,895	928,524	744,371	55.5%	44.5%	222.0
Aug-04	5,723,176	1,242,224	4,480,952	21.7%	78.3%	554.8
Sep-04	5,475,558	2,830,296	2,645,262	51.7%	48.3%	401.4
Oct-04	3,373,754	3,372,775	979	100.0%	0.0%	60.6
Nov-04	2,720,592	2,716,971	3,621	99.9%	0.1%	77.5
Dec-04	2,518,847	2,515,226	3,621	99.9%	0.1%	97.9
Sum.	30,594,987	19,431,362	11,163,625	63.5%	36.5%	2473.4

(b) In 2005

2005	Total flow (m ³)	Base flow (m ³)	Direct runoff (m ³)	Base flow ratio	Direct runoff ratio	Rainfall (mm)
Jan-05	1,697,189	1,679,305	17,884	98.9%	1.1%	64.2
Feb-05	866,846	743,049	123,797	85.7%	14.3%	64.0
Mar-05	2,233,503	842,968	1,390,536	37.7%	62.3%	15.8
Apr-05	1,399,050	747,722	651,327	53.4%	46.6%	170.2
May-05	1,493,879	612,329	881,550	41.0%	59.0%	138.3
Jun-05	1,087,650	906,945	180,704	83.4%	16.6%	61.9
Jul-05	643,400	598,041	45,360	93.0%	7.0%	182.4
Aug-05	1,015,647	517,916	497,731	51.0%	49.0%	280.5
Sep-05	454,941	408,651	6,289	89.8%	10.2%	27.3
Oct-05	448,702	427,930	20,771	95.4%	4.6%	26.3
Nov-05	546,614	497,095	49,519	90.9%	9.1%	54.2
Dec-05	446,524	430,964	15,560	96.5%	3.5%	25.7
Sum.	12,333,945	8,412,916	3,921,028	68.2%	31.8%	1110.8

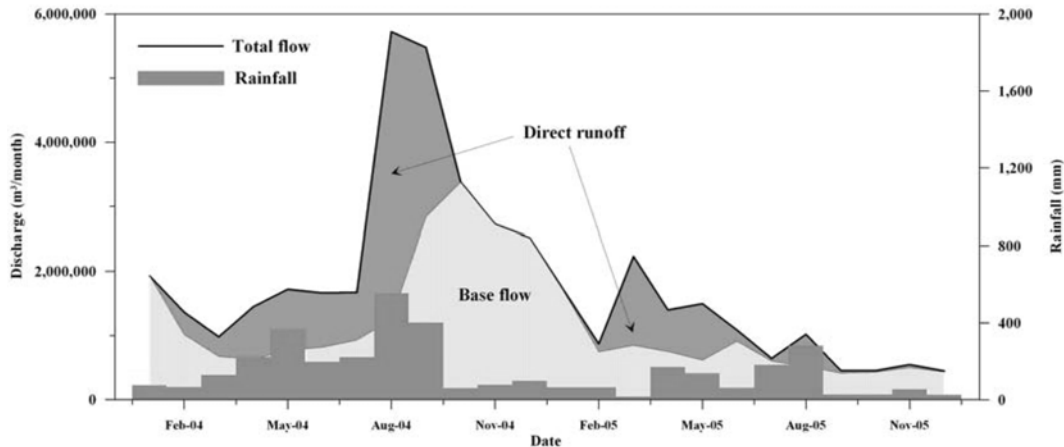


Fig. 11. The monthly variation of the base flow and direct runoff.

간에 직접유출이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 2004년 8월에 직접유출량이 최대로 나타났다. Table 3에 시기별 기저유출량과 직접유출량을 나타내었으며, 각 성분이 총유출량에서 얼마만한 비율을 차지하고 있는 지도 나타내었다. 2004년도와 2005년도에 총유출량은 각각 $30.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, $12.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다. 총유출량이 2배 이상 낮아진 것은, 2004년도에 2,473 mm, 2005년도에 1,110 mm라는 2배 이상의 강우량 차이에 의해서 나타난 것으로 판단된다.

외도천은 강우가 지하로 침투되었다가 다시 지표로 흘러나오는 일종의 대용량 용천수로서 상시 유출이 발생하는 제주도에서는 몇몇 안 되는 하천중의 하나이다. 따라서 상시유출을 구성하고 있는 대부분은 기저유출이라고 볼 수 있다. 그러나, 침투율을 초과하는 강우가 발생할 경우 직접유출이 발생하고, 하도로 모아진 물이 상류에서 하류로 흘러 급격한 유량증가가 있게 된다.

Table 3과 Fig. 11에 총유출량에 대한 기저유출과 직접유출의 비율을 나타내었다. 기저유출량은 2004년도에 $19.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었던 것이 2005년도에 $8.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 약 57% 정도 감소했으며, 직접유출량은 2004년도에 $11.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 2005년도에 $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 약 65% 정도 감소하였다. 기저유출량과 직접유출량이 총유출에 기여하는 비율을 보면, 직접유출이 발생할 때와 발생하지 않을 때 극명하게 드러난다. 직접유출이 발생하지 않았던 2004년 1월과 2005년 10월부터 12월까지는 거의 대부분의 유출이 기저유출에 의해서만 나타난 것으로 분석이 된다.

월별 직접유출량을 보면 2004년 8월에 $4.48 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이므로 가장 많은 양을 기록하였고, 전체 유출량 대비 직접유출량 비율도 78.3%로 가장 높았다. 전체유출량에 대한

직접유출량의 비율은 1월과 2월, 그리고 10월에서 12월까지 직접유출량의 비율이 가장 낮은 경향을 보였다. 직접유출량과 강우량과 사이에는 양의 상관성을 갖지만, 강우강도와 강우빈도 등 다른 요인에 의해서도 영향을 받기 때문에 강한 선형관계를 나타내고 있지는 않은 것을 Table 3에서 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

이번 연구에서는 1998년에서 2007년까지의 외도천 하류지점(외도정수장)과 천아계곡에서의 수위관측자료를 이용하여 유출빈도를 분석하였으며, 특히, 다우년과 과우년으로 대표되는 2004년과 2005년도의 수위자료를 중심으로, 유출특성, 강수와와의 상관관계, 기저유출분리 등을 분석하였다. 다음은 이번 연구결과로부터 도출된 결과를 요약하여 나타낸 것이다.

- 1) 1998년도부터 2007년 7월까지의 외도천 하류와 천아계곡의 수위관측결과, 천아계곡에서는 0.28~3.90 m, 외도천 하류는 0.40~2.42 m에서 변동하였고, 유출발생에 의한 시간당 최대 변화폭은 외도천 하류지점에서 1.58 m, 천아계곡에서는 2.53 m를 나타내었다. 연간 발생하는 유출 발생빈도는 외도천 하류에서 약 12회, 천아계곡에서는 약 21회였다. 유출지속시간이 약 24시간인 것을 고려하면 연간 유출을 관측할 수 있는 기간은 천아계곡에서는 21일, 외도천 하류에서는 12일 정도이다.
- 2) 강우량에 대한 유출발생의 반응시간을 알아보기 위하여 교차상관분석을 실시한 결과, 외도천 하류와 천아계곡 수위관측지점에서 강우량에 대한 수위반응은 4시간인 것을 알 수 있었다.

3) 유출이 발생했을 때 천이계곡으로부터 외도천 하류까지 수위 전달은 약 2시간 정도 되는 것으로 분석되며, 이때의 홍수위 전파속도는 약 5.9 km/hr 정도이다.

4) 2004년 2월부터 2005년 7월까지 월별 상시 유량 측정결과, 외도천 하류지점에서 유출량은 평균 33,696 m³/day였다.

5) 외도천 하류지점에서 2004년과 2005년도의 총유출량으로부터 수치필터링기법에 의하여 기저유출과 직접유출을 분리해 내었을 때, 기저유출량은 2004년도에 19.4×10^6 m³이었던 것이 2005년도에 8.4×10^6 m³로 약 57% 정도 감소했으며, 직접유출량은 2004년도에 11.2×10^6 m³, 2005년도에 3.9×10^6 m³로 약 65% 정도 감소하였다. 외도천유역에서는 연간 총유출에서 약 63.5~68.2% 정도가 기저유출이며, 31.8~36.5% 정도는 직접유출이 기여하는 것으로 분석되었다.

외도천은 해안변 부근에서 지하로 함양된 지하수가 지표로 용출하여 상시 유출이 발생하는 일종의 대규모 용천으로 생각할 수 있다. 지하로 침투된 강우에 의해서 용천의 형태로 지속적으로 지표로 유출이 발생하면서도, 집중강우 시에 직접유출인 홍수 유출이 발생하는 전형적인 제주도 간헐 하천의 특징을 보여 주기도 한다. 유출빈도, 직접 유출량, 기저유출량의 추정은 제주도 물관리 및 물수지 분석, 지하수 함양량 산정에 있어서 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 기본사업인 '청정 대용량 지하수자원확보 기술개발(08-3211)' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 심사를 맡아서 유익한 조언과 비평을 주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 교육대학원 지리교육전공, 석사학위논문, p. 66.

문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 토목해양공학과, 석사학위논문, p. 79.

신우중호, 1996, 수문학, 동명사, 제4판, p. 396.

윤정수, 박상운, 1998, 제주도 용천수의 수리화학적 특성, 지하수 환경, 5(2), 66-79.

윤태훈, 1998, 응용수문학, 청문각, p. 924.

제주도, 2004, 2004 환경백서, p. 396.

제주도, 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수 자원 종합조사(III), p. 411.

하규철, 문덕철, 박기화, 2008, 제주도 하천의 유출특성 및 수질 변동 특성, 제주의 물·세계의 물 제주의 자산, 제7회제주지하수 학술세미나자료집, Part 3, 제주특별자치도, 한국지질자원연구원, p. 1-21.

하규철, 조성현, 김영식, 조민조, 2007, 산림지역에서의 지하수 하천유출량 평가, 2007년 춘계지질과학기술 공동학술대회, 대한지질학회지질학회, 대한지질공학회, 대한지질학회, 한국석유지질학회, 591-593.

한국지질자원연구원, 제주도, 2005, 제주도 지하수 부존 특성에 대한 지구과학적 해석, p. 231.

Nathan, R.J. and McMahon, T.A., 1990, Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis, *Water Resour Res.*, 26(7), 1465-1473.

Fetter, C.W., 1988, Applied Hydrogeology, 2nd Edition, Merrill, Columbus, OH, p. 592.

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., and Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *J. Hydrol.*, 205, 217-231.

Rutledge, A.T., 1998, Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data-update: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, p. 43.