

# 화강암 및 편마암 산지 소유역의 강우유출 특성\*

田中幸哉\*\* · 金泰鎬\*\*\* · 松倉公憲\*\*\*\*

## Runoff Characteristics in Small Mountainous Basins with Granite and Gneiss Bedrocks\*

Yukiya Tanaka\*\* · Taeho Kim\*\*\* · Yukinori Matsukura\*\*\*\*

**요약** : 한반도 중부지방의 사면형성과정을 검토하기 위하여 이 지역에 광범위하게 분포하는 쥐라기의 화강암과 선캄브리아기의 편마암으로 구성된 산지 소유역에서 수문관측을 실시하였다. 화강암유역의 면적은 0.0546km<sup>2</sup>이며, 기복비는 0.35이다. 편마암유역은 다소 넓어 면적은 0.0754km<sup>2</sup>이나 기복비는 0.36으로 거의 같다. 두 유역의 사면은 모두 삼림으로 피복되어 있다. 관입시험 결과에 의하면 화강암유역 토층의 층후는 20cm 이하로 얇고 도처에 기반암이 노출된다. 반면에 편마암유역의 층후는 50cm 이상으로 상대적으로 두껍게 나타난다. 관측은 1999년 5월부터 시작하였으며 현재도 계속되고 있다. 강우에 대한 유출반응은 편마암유역이 화강암유역에 비하여 신속하게 나타난다. 첨두유량과 기저유량 모두 화강암유역보다는 편마암유역에서 전반적으로 높게 관측되어 편마암유역 사면에서의 지류량이 큰 것으로 생각된다. 또한 편마암사면에서 우수의 긴 체류시간을 반영하여 전기전도도는 편마암유역이 화강암유역보다 2배 정도 높게 관측된다.

주요어 : 화강암, 편마암, 사면프로세스, 유출특성

**Abstract** : The hydrological field experiments are carried out in two mountainous catchments underlain by Jurassic granite and Precambrian gneiss in order to examine the hillslope processes in Korea. The granite and gneiss are typical rocks in Korean Peninsular. The areas of granite basin(Gr-basin) and gneiss basin(Gn-basin) are 0.0546km<sup>2</sup> and 0.0754km<sup>2</sup>, respectively. The relief ratios of Gr- and Gn-basins are 0.35 and 0.36, respectively. Both of basins are covered with forests. The soil layer of Gn-basin is thicker than that of Gr-basin. The hydrological measurements started from May 1, 1999 and are continuing. The runoff response of Gn-basin is quicker than that of Gr-basin. The peak and baseflow discharges of Gn-basin are generally higher than those of Gr-basin, implying that Gn-basin has larger water storage capacity than Gr-basin. The electric conductivity of river water of Gn-basin shows about 2 times as high as that of Gr-basin. It suggests that residence time in soil layer of Gn-basin is longer than that of Gr-basin.

Key Words : granite, gneiss, slope process, runoff characteristics

### 1. 머리말

1998년과 1999년의 여름철에 발생한 집중호우는 한반도 전역에 걸쳐 큰 피해를 일으켰다. 특히 기상관측 개시 이래 최대강도의 강우가 발생한 경기도 북부 일원에서는 저지대의 많은 하천이 범람하여 주변 일대에 광범위한 침수피해를 가져왔다. 뿐만 아니라 산지에서는 사면붕괴와 토석류가 도처에서 발생하여 양주군 장흥면의 송추계곡과 돌

고개 일대에서는 다수의 사상자를 낳는 등 토사 재해에 대한 일반인의 관심을 불러 일으켰다(대한토목학회, 1999; 양주군, 1999).

집중호우로 인하여 일어나기 쉬운 이러한 사면붕괴와 토석류 등의 매스 무브먼트(mass movement)는 토사재해로서 뿐만 아니라 급격한 지형변화의 요인으로서도 주목의 대상이 된다. 일반적으로 사면붕괴와 토석류는 사면상의 토양이나 풍화층에 침투한 우수가 공극을 포화시킴으로

\* 본 연구의 일부는 福武學術文化振興財團의 연구조성금으로 진행되었음.

\*\* 福井大學 地理學科 副教授(Associate Professor, Department of Geography, Fukui University)

\*\*\* 濟州大學校 地理教育專攻 助教授(Assistant Professor, Department of Geography Education, Cheju National University)

\*\*\*\* 筑波大學 地球科學系 教授(Professor, Institute of Geoscience, University of Tsukuba)

써 전단강도(shearing strength)가 저하되어 발생한다(Sidle and Swanston, 1982). 이러한 공극수의 포화도는 사면에서의 물의 동태와 밀접하게 관련된 현상으로서 산지 유역에서의 유출특성을 잘 반영하고 있다. 최근의 수문지형학적 연구는 이와 같이 산지 소유역에서의 물의 거동이나 유출특성에 의한 매스 무브먼트의 발생기구에 관하여 많은 사실을 밝히고 있다(Kirkby, 1978; Anderson and Burt, 1990; Selby, 1993; Hirose et al., 1994; Onda, 1994; 恩田 等, 1996; Tanaka and Agata, 1997). 그러나 한국에서 소유역의 수문특성에 관한 연구로는 지화학적 물질수지(박수진, 1992)와 유출모델(강인석 등, 1993; Park et al., 1999)을 다룬 사례가 일부 있을 뿐이며, 산지에서 빈발하는 사면 붕괴와 토석류에 관한 수문지형학적 검토는 거의

이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 수문지형학적 관점에서 한반도 중부지방의 사면형성과정을 규명하기 위한 첫 단계로서 이 지역에 가장 넓게 분포하는 화강암과 편마암으로 구성된 산지 소유역에서 수문관측을 통하여 강우유출특성을 비교·검토하였다.

## 2. 관측유역

서울특별시의 근교에 소재하는 산지 소유역을 연구대상 유역으로 선정하였다(Figure 1, 2). 화강암유역(Gr)은 경기도 양주군 장흥면의 사패산 북서쪽에 위치하며, 주라기의 대보관입암류에 속하는 서울화강암으로 구성되어 있다(한국자원연구

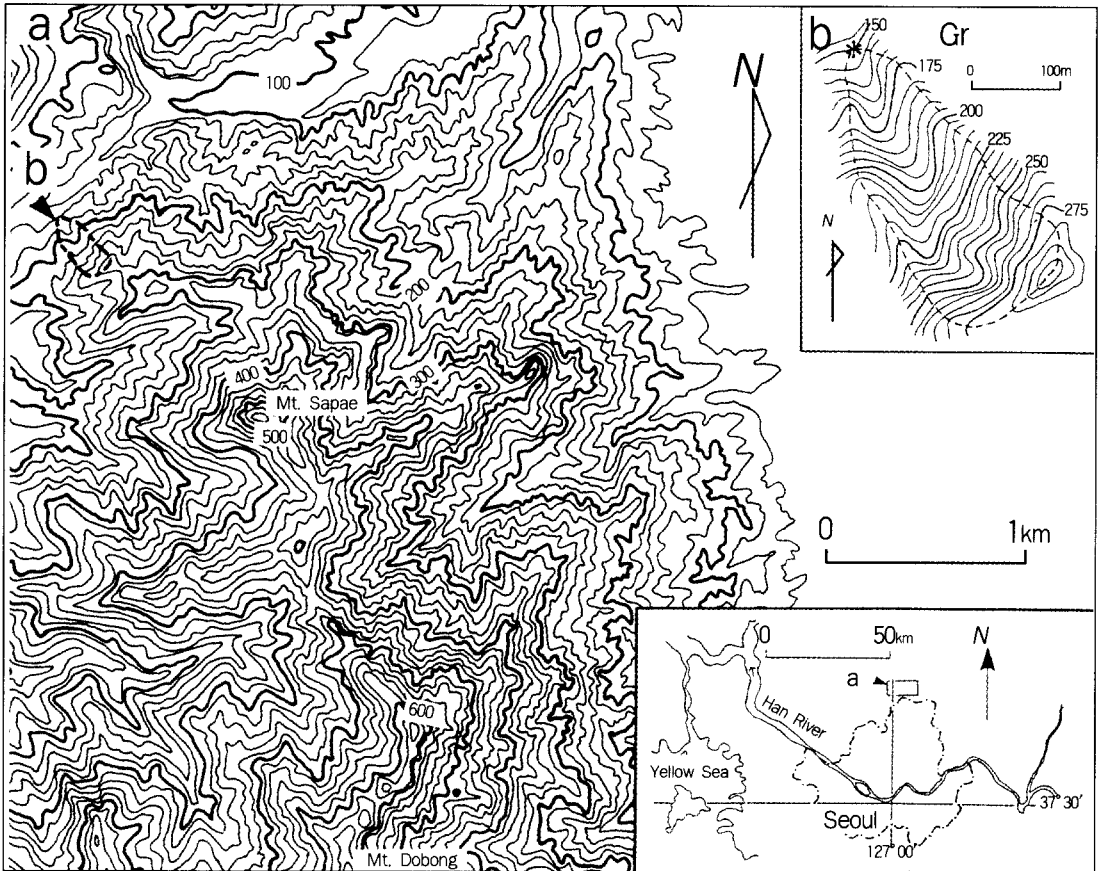


Figure 1. Study areas and experimental basins. Contour intervals are 20m and 5m, respectively. Asterisks indicate the locations of hydrological observation sites.

주: a, b는 granite임.

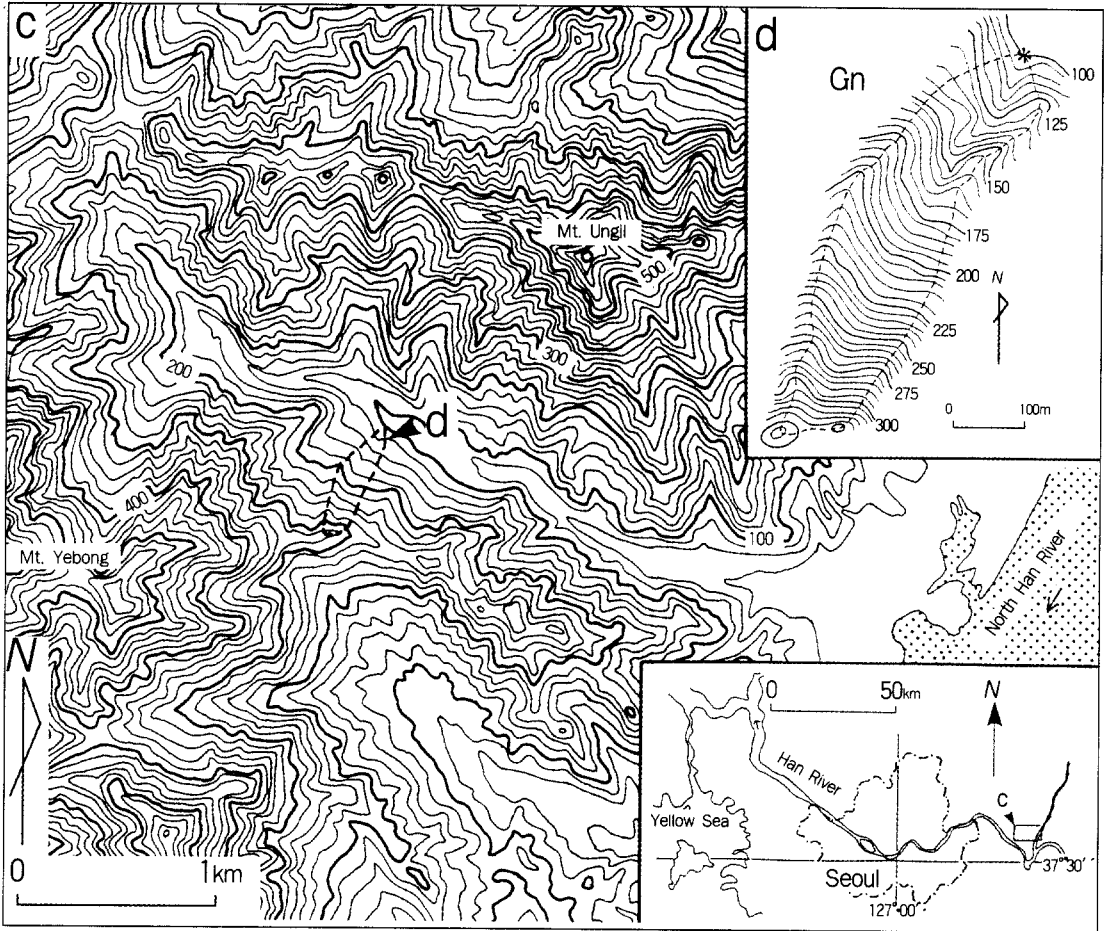


Figure 2. Study areas and experimental basins. Contour intervals are 20m and 5m, respectively. Asterisks indicate the locations of hydrological observation sites.

주: c, d는 gneiss임.

소, 1999). 유역면적은  $0.0546\text{km}^2$ 이며, 기복비(relief ratio)는 0.35이다. 반면에 편마암유역(Gn)은 경기도 남양주시 조안면의 예봉산 북동쪽에 위치하며, 선캄브리아기의 경기변성암복합체에 속하는 호상편마암으로 구성되어 있다(한국자원연구소, 1999). 유역면적은  $0.0754\text{km}^2$ 로 화강암유역보다 다소 넓다. 그러나 기복비는 0.36으로 화강암유역과 거의 같으므로 유출에 영향을 미치는 stream power의 차이는 무시할 수 있다. 축척 1/25,000 지형도에서 계측한 하계밀도를 비교하면 화강암산지의 2차수 및 3차수 유역의 하계밀도가  $12.6\text{km}/\text{km}^2$ ,  $13.1\text{km}/\text{km}^2$ 인데 비하여 편마암산지의 경우는  $9.1\text{km}/\text{km}^2$ ,  $8.1\text{km}/\text{km}^2$ 로서 화강암산지보다 수계의 발달이 미약하다. 또한 관입시험과 노두단면의

관찰결과에 의하면 화강암유역에서는 토양 및 풍화층의 층후가 20cm 이하이며, 도처에 기반암이 노출되기도 한다. 그러나 편마암유역에서의 층후는 50cm 이상으로 상대적으로 두껍게 나타난다. 두 유역의 사면은 대부분 낙엽활엽수의 삼림으로 피복되어 있다.

### 3. 관측방법

조사유역의 출구에 50cm 길이의 수위계(Unidata U6521J depth probe)를 부착한 수로(6 inch Parshall flume)를 설치하였다(Figure 3). 유역으로부터 흘러나오는 모든 지표수가 수로

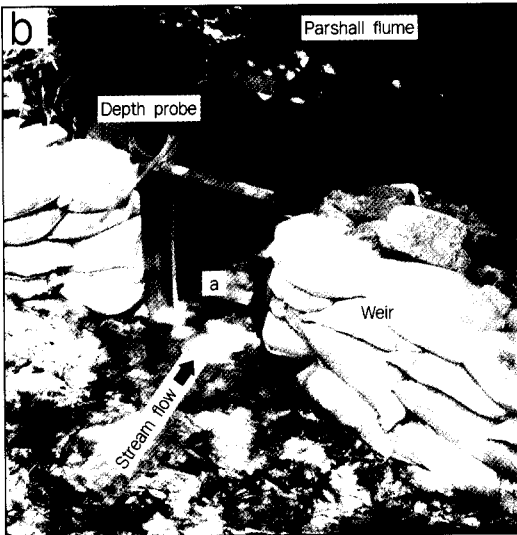
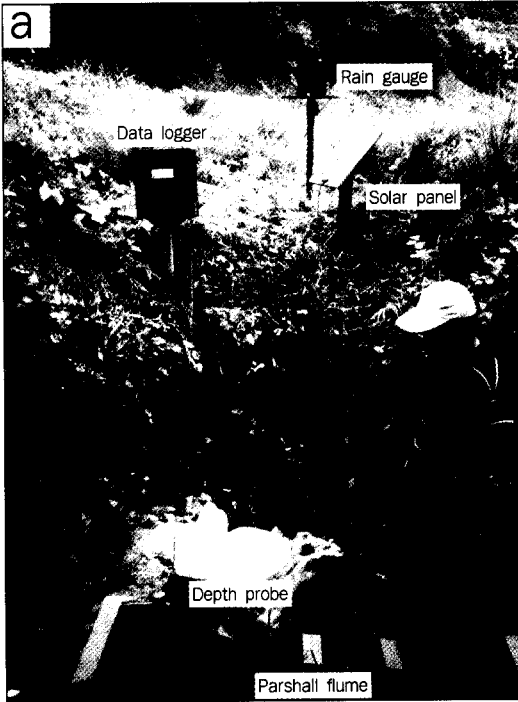


Figure 3. (a) General view of hydrological observation equipments, and (b) Parshall flume and weir, at gneiss basin.

를 통과하도록 수로의 양옆에는 50cm 높이로 모래주머니를 쌓아올려 소규모의 보(weir)를 만들었다(Figure 3b). 수로를 통과하는 유량은 Figure 3b에 표시한 a 지점의 수위를 이용하여

구할 수 있다. 즉 유량과 수위는 다음과 같은 관계식을 지닌다.

$$Q = 0.264H_a^{1.58}$$

여기에서  $Q$ 는 유량(l/sec),  $H_a$ 는 a 지점의 수위(cm)이다(日本土木學會, 1985). 유역의 강우량을 관측하기 위하여 수로 부근에 우량계(TBRG Davis 0.2mm tipping bucket rain gauge)를 설치하였다. 수위와 우량 데이터는 5분 간격으로 데이터 로거(EME System OWL2C logger 0498)를 이용하여 자동으로 기록하였다. 또한 태양열판(Solarex MSX-10L solar panel)을 설치하여 각 관측계기에 전력을 공급하였다(Figure 3a).

관측은 1999년 5월 1일부터 시작하였으며 현재도 계속하고 있다. 데이터로거의 메모리 용량 관계로 수위와 우량 관측치를 한달 간격으로 휴대용 컴퓨터로 회수하였다. 데이터 회수시에는 전기전도도계(EC meter, Horiba ES-12)를 사용하여 25°C의 수온으로 보정한 하천수의 전기전도도(electrical conductivity)를 측정하였다.

#### 4. 관측결과 및 고찰

Figure 4에 실험유역에서 관측된 1999년 9월 15일부터 10월 7일까지 23일간의 강우량과 수문곡선(hydrograph)을 나타냈다. 수문곡선의 유량으로는 단위면적당 유량을 의미하는 비유량(specific discharge)을 사용하였으며, 유량과 강우량 모두 5분 간격으로 표시하였다. 이 기간에 총강우량이 10mm를 넘는 강우이벤트는 4회 발생하였으며, 9월 22일을 제외한 9월 17일부터 24일까지는 1주일에 걸친 지속적인 강우로 화강암유역에서는 202mm, 편마암유역에서는 237mm의 많은 강우량을 기록하였다. 특히 화강암유역에서는 9월 19일 8시 45분부터 9월 21일 9시 45분까지 164mm의 강우량을 보이는 강우의 피크가 나타났다. 편마암유역에서도 9월 19일 7시 5분부터 9월 21일 12시 55분까지 198mm의 비가 내리며 강우의 피크를 기록하였다. 두 유역 모두 유량의 피크는 강우량의 피크에 대응하여 나타났다. 그러나 화강암유역의

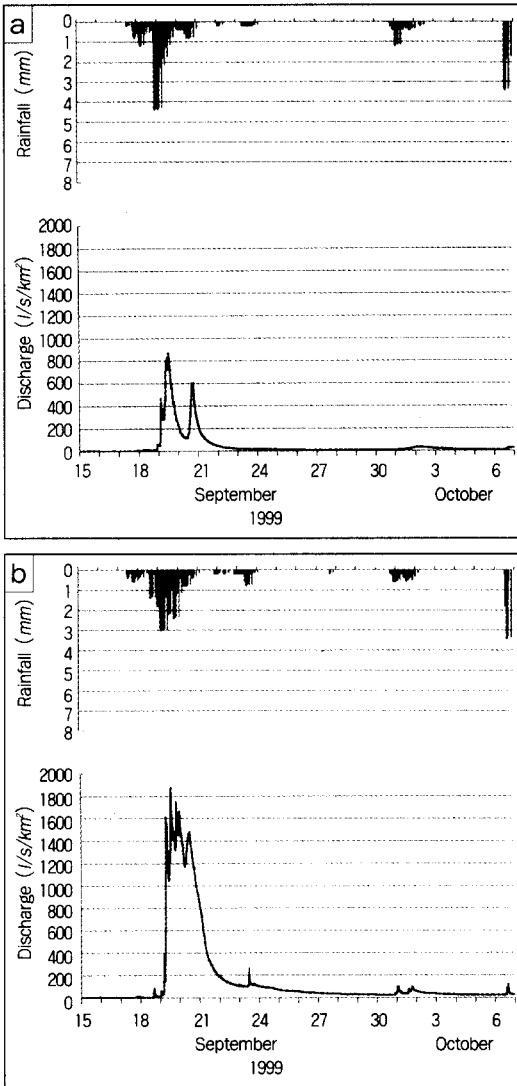


Figure 4. Rainfall(upper) and hydrograph(lower) of (a) granite and (b) gneiss basins from September 15 to October 7 in 1999.

최대유량이 900l/s/km<sup>2</sup>인데 비하여 편마암유역의 최대유량은 1,900l/s/km<sup>2</sup>로 2배를 상회하는 관측치를 보였다.

이러한 실험유역간에 보이는 첨두유량(peak discharge)의 차이는 1일 강우량이 100mm 이상인 경우를 제외하면 강우의 규모에 관계없이 전기간에 걸쳐 지속적으로 관측되는 현상이다. 예를 들면 10월 1일과 2일 양일간에 걸쳐 발생한 소규모의 강우로 인하여 화강암유역에서는 29mm, 편마



Figure 5. Joints on bedrocks in granite basin.

암유역에서는 28mm의 강우량이 관측되었다. 이 강우에 대응하는 유량의 피크를 비교하면 화강암유역이 40l/s/km<sup>2</sup>, 편마암유역이 70l/s/km<sup>2</sup>로서 30l/s/km<sup>2</sup>의 차이를 확인할 수 있다.

강우에 반응하여 초기유량으로부터 첨두유량에 이르는 상승곡선(rising limb)의 양상도 실험유역간에 차이를 보인다. 편마암유역에서는 대부분의 강우에 대하여 신속하게 반응하므로 급격한 상승곡선을 그리며 첨두유량에 도달한다. 반면에 화강암유역에서는 규모가 큰 강우에 대해서는 비교적 신속한 반응을 보이지만 소규모의 강우에 대해서는 완만한 상승곡선을 그리므로 피크의 형태가 명료하지 않다. 10월 1일과 2일 양일간의 연속강우에 대한 실험유역간의 유출반응의 차이가 이러한 경향을 잘 보여준다. 또한 10월 6일에 발생한 편마암유역의 12mm, 화강암유역의 19mm 강우에 대한 반응에서도 같은 현상을 확인할 수 있다.

화강암유역의 유출특성으로 빠른 유출(quickflow)에 의한 유량의 급격한 상승과 높은 첨두유량이 자주 지적되어 왔다(Hirose et al., 1994; Onda, 1994). 그러나 관측결과에 의하면 강우강도가 일정 수준에 도달하지 않는 경우에 화강암유역에서의 유출반응은 그다지 신속하지 않으며, 첨두유량도 편마암유역에 비하여 상대적으로 작고 유출율도 높지 않은 편이다. 본 화강암유역에서는 도처에 기반암이 노출되어 있는데 기반암에는 절리가 매우 조밀하게 발달되어 있다(Figure 5). 따라서 강우에 대한 완만한 유출반응, 비교적 높지 않은 첨두유량과 유출율은 우수가 이들 절리를 통하여 지하 깊숙이 침투한 결과로 생각된다. 그

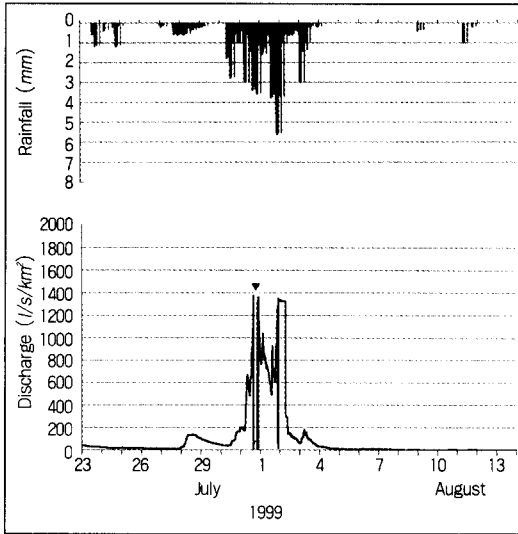


Figure 6. Rainfall(upper) and hydrograph(lower) of granite basin from July 23 to August 14 in 1999. The abrupt fall of discharge on July 31 indicates an abnormal measurement due to a unusual runoff event.

러나 강우강도가 일정 수준에 도달하여 침투율을 초과하는 경우에는 전형적인 화강암유역의 유출 양상이 나타난다.

Figure 6에 1999년 7월 23일부터 8월 14일까지 22일간 화강암유역의 강우량과 수문곡선을 나타냈다. 이 기간중 특히 7월 30일부터 8월 3일까지는 지속적인 호우로 총강우량이 587mm에 달했으며, 그 결과 급격하게 유량이 증가하여 7월 31일 1,400l/s/km<sup>2</sup>에 이르는 유출의 피크를 기록하였다. 그러나 유량의 증가로 하천수가 보(weir) 위로 흘러 넘치며 수로를 이동시킴으로써 이후의 관측에 이상을 일으켰다. 따라서 이 강우이벤트에 대한 정확한 유출반응을 전기간에 걸쳐 관측할 수는 없었지만 관측이상이 발생하기까지의 양상으로부터 침투율을 상회하는 강우가 발생하면 화강암유역 특유의 flush성 유출이 일어나는 것으로 보인다. 그러나 화강암유역의 유출반응이 조암광물(恩田, 1989)이나 유역의 규모(虫明의, 1981; Onda, 1994) 등에 따라 달라질 수도 있다는 사실을 고려하면, 화강암유역의 유출특성을 일반화하기 위해서는 보다 많은 관측사례가 필요하다.

한편, 실험유역간 유출특성의 또 다른 차이로 무강수기의 유량을 들 수 있다. 주로 기저유출

Table 1. Electrical conductivity( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) in experimental basins.

Date	Gr-basin	Gn-basin
99. 5. 1.	31.6	63.6
99. 6. 13.	35.9	64.1
99. 7. 23.	39.4	64.2
99. 9. 15.	28.7	56.9
99. 10. 17.	30.6	53.9
99. 12. 5.	30.8	57.7
00. 3. 16.	31.3	62.5
00. 5. 30.	33.7	65.0

(baseflow)에 의해 함양되는 무강수기의 유량을 비교하면 전기간에 걸쳐 편마암유역이 화강암유역보다 높게 관측된다. 이러한 결과는 편마암유역이 화강암유역에 비하여 유역사면에서의 저류량이 크다는 것을 단적으로 시사한다. 사면에서의 저류장소로는 암반의 절리 이외에 사면의 토양 및 풍화층을 들 수 있다(恩田, 1989; 海老塚 · 近藤, 1990). 유역간 토양 및 풍화층후를 비교하면 편마암유역이 화강암유역보다 2~3배 두꺼운 층후를 보이는 사실로부터 토양 및 풍화층이 저류층의 역할을 한다고 생각할 수 있다. 일반적으로 직접유출의 형성에는 translatory flow의 역할이 중요하다. translatory flow는 토양 속으로 침투한 우수가 강우 이전에 토층 내부에 저류되어 있던 토양수를 밀어냄으로써 발생하는 유출이다(田中, 1996). 따라서 편마암유역의 높은 침투유량에는 translatory flow가 크게 기여하는 것으로 생각된다.

하천수의 전기전도도를 비교하면 화강암유역에서는 28.7~39.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 인데 비하여 편마암유역에서는 53.9~65.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 2배 가까이 높게 관측된다(Table 1). 이 전기전도도는 대부분 평수기나 갈수기에 관측된 데이터이므로 기저유출에 의해 함양된 하천수의 전기전도도라고 볼 수 있다. 전기전도도는 하천수에 녹아 있는 불순물의 양에 따라 달라진다. 따라서 dilution effect로 강수 동안에는 하천수의 전기전도도가 낮아지거나 flushing effect로 유출 피크의 쇄감 직후에 전기전도도가 일시적으로 높아지는 등 전기전도도의 변화는 유출특성을 밝히는 자료로 사용할 수 있다(Pilgrim et al., 1979). 하천수의 높은 전기전도도는 유역을 구성하는 기반암의 용출 특성을 고려할 필요가 있기는 하지만 일반적으로 사면에서의 물의 긴 체류시간

을 시사한다(Hirose et al., 1994). 따라서 편마암유역 하천수의 높은 전기전도도 역시 저류량이 큰 편마암유역의 유출특성을 뒷받침하고 있다.

## 5. 맺음말

한반도의 대표적인 지질인 화강암과 편마암으로 구성된 두 산지 소유역에서 수문관측을 실시하였다. 관측결과에 의하면 강우에 대한 유출반응은 편마암유역이 화강암유역에 비하여 신속하게 나타난다. 또한 침투유량과 기저유량 모두 화강암유역보다는 편마암유역에서 전반적으로 높게 관측됨으로써 화강암유역보다 편마암유역 사면에서의 저류량이 크다는 것을 시사한다. 이러한 사실은 사면에서의 체류시간을 반영하는 전기전도도에 의해서도 뒷받침되고 있다. 금후 관측을 계속 진행하면서 이러한 유출특성의 차이가 암석의 풍화특성, 토층과 암반의 투수성 및 유역의 지형특성과 어떠한 관계를 가지고 있는지를 조사할 필요가 있다. 더불어 사면붕괴 발생기구의 관계를 검토함으로써 토사재해 대책에 유용한 제언이 가능하다고 생각한다.

## 文 獻

- 강인석 · 이봉재 · 강주복, 1994, "저류함수법에 의한 도시 소유역의 유출해석", 부산대학교 공대 논문집, 46, 91-100.
- 대한토목학회, 1999, 1998년 수해원인 분석 및 대책, 대한토목학회.
- 박수진, 1992, "화강암질 소규모 하천유역의 물질수지특성에 관한 연구", 지리학논총, 19, 11-27.
- 양주근, 1999, 수해백서, 양주군.
- 한국자원연구소, 1999, 서울-남천점 지질도폭 설명서, 과학기술부.
- 恩田裕一, 1989, "土層の水貯留機能の水文特性および崩壊發生に及ぼす影響," 地形, 10, 13-26.
- 恩田裕一 · 奥西一夫 · 飯田智之 · 辻村眞貴, 1996, 水文地形學, 古今書院, 東京.
- 日本土木學會, 1985, 水理公式集, 日本土木學會, 東京.
- 田中正, 1996, "降雨流出過程," 恩田 外(編), 水文地形學, 古今書院, 東京.
- 虫明功臣 · 高橋裕 · 安藤義久, 1981, "日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の 効果," 土木學會論文報告集, 309, 51-62.
- 海老塚正郎 · 近藤昭彦, 1990, "降雨流出過程における土層の効果", ハイドロロジ-, 20, 53-64.
- Anderson, M. G. and Burt, T. P.(eds.), 1990, *Process Studies in Hillslope Hydrology*, John Wiley, New York.
- Hirose, T., Onda, Y. and Matsukura, Y., 1994, Runoff and solute characteristics in four small catchments with different bedrocks in the Abukuma mountains, Japan, *Transactions Japanese Geomorphological Union*, 15A, 31-48.
- Kirkby, M. J., 1978, *Hillslope Hydrology*, John Wiley, New York.
- Onda, Y., 1994, Contrasting hydrological characteristics, slope processes and topography underlain by Paleozoic sedimentary rocks and granite, *Transactions Japanese Geomorphological Union*, 15A, 49-66.
- Park, J., Kang, I. S. and Singh, V. P., 1999, Comparison of simple runoff models used in Korea for small watersheds, *Hydrological Processes*, 13, 1527-1540.
- Pilgrim, D. H., Huff, D. D. and Steele, T. D., 1979, Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff, *Water Resources Research*, 15, 329-339.
- Selby, M. J., 1993, *Hillslope Materials and Processes*, Oxford University Press, New York.
- Sidle, R. C. and Swanston, D. N., 1982, Analysis of small debris slide in coastal Alaska, *Canadian Geotechnical Journal*, 19, 167-174.
- Tanaka, Y. and Agata, Y., 1997, Effects of runoff characteristics on the difference of drainage density in Soya hill, northern Japan, *Environmental Geology*, 24, 74-85.