

## 산림소유역에서 주요 유출성분 분석을 위한 천연추적자의 탐색

유재운 · 김경하 · 전재홍 · 최형태 · 정용호

국립산림과학원 산림환경부 임지보전과

## Searching the Natural Tracers for Separation of Runoff Components in a Small Forested Catchment

Yoo, Jaeyun · Kim, Kyongha · Jun, Jaehong · Choi, Hyungtae and Jeong Yongho

Div. Forest Conservation, Korea Forest Research Institute.

### ABSTRACT

This study was conducted to find end-members and tracers which are effective to be applied in the End Member Mixing Analysis (EMMA) model for runoff separation at the Gwangneung coniferous forest catchment (13.6ha), Gyeonggi-do, Korea. We monitored three successive rainfall events during two weeks from June 26, 2005 to July 10, 2005, and analysed chemical properties of rainfall, throughfall, stemflow, groundwater and soil water considered as main components of storm runoff. The followings are the results of analyses of each component and tracer. Groundwater, soil water and rainfall (or throughfall) were dominant runoff components. Rainfall and groundwater were selected as main components for the two components-one tracer mixing model, and groundwater, soilwater and throughfall were selected as main components for the three components-two tracers mixing model. Tracers were selected from anion ( $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ ), cation ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{Ca}^{2+}$ ) and Acid Neutralizing Capacity (ANC) in event 1, 2, and 3.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and ANC were selected in the two components-one tracer mixing model and  $\text{SO}_4^{2-}\text{-K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{-ANC}$ , and  $\text{Ca}^{2+}\text{-ANC}$  were selected in the three components-two tracers mixing model. Selected main runoff components and tracers can provide basic information to determine the contribution rate of each runoff component and identify the runoff process in a forest watershed.

Key Words : *Runoff separation, EMMA model, Tracer, Coniferous forest catchment.*

---

**Corresponding author** : Yoo, Jaeyun, Div. of Forest Soil Conservation, Dept. of Forest Environment, Korea Forest Research Institute 207 Cheongnyangni 2-Dong, Dongdaemoongu, Seoul Republic of Korea, 130-712,  
Tel : +82-2-9612-644, E-mail : jaeyun74@hotmail.com

**Received** : 2 July, 2006. **Accepted** : 6 August, 2006.

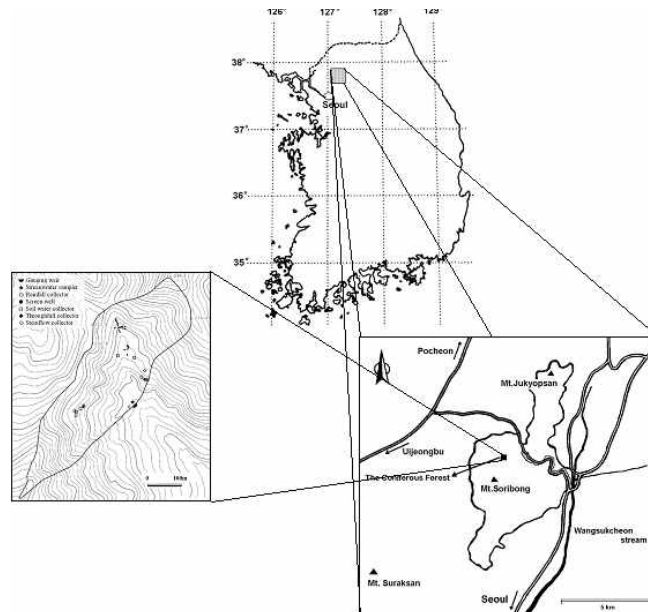
## I. 서론

최근 대기오염물질의 증가, 오존층의 파괴, 지구온난화와 같은 환경문제는 지구규모의 기상이변뿐만 아니라 국지적인 규모의 예측이 불가능한 기상현상을 야기하고 있으며, 산림에서 발생하는 수자원의 양적·질적 변화에도 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 환경적인 문제와 수문환경의 변화를 구명하고자 소유역 단위의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 산림유역 내에서의 물의 양적 분포 뿐만 아니라 질적인 분포에 관한 관심도 증가하고 있다 (Hooper 등, 1990; Likens와 Bormann, 1995; McGlynn과 McDonnell, 2003).

산림유역에서 강우기간 동안 계류수의 형성에 영향을 미치는 주요 성분으로는 강우, 지상류(overland flow), 지하수, 지중유출수(subsurface stormflow) 등이 있으며(Fritz 등, 1976), 계류수의 화학적인 변화를 분석하는 것은 유출수의 근원과 유출경로를 추정할 수 있는 유용한 도구이다(Muraoka와 Hirata, 1988). 이것은 유역의 고유 특성에 따라 복잡한 양상을 나타내기도 한다

(Burns 등, 1998). 혼합모델(mixing model)은 이들 주요 성분의 기여도를 추정하기 위한 방법으로, 계류수가 각 유출성분의 혼합으로 형성되는데 근원을 두고 있다. 이 모델은 EMMA 모델(End Member Mixing Analysis model, EMMA model)이라고도 하며, 계류수 발생에 기여하는 둘 이상의 주요 유출성분과 하나 이상의 추적자를 질량수지방정식에 적용하여 해를 구함으로써 기여도를 추정하는 방법이다(Christophersen 등, 1990; Buttle, 1994; Carrera 등, 2004).

산림유역에서 수집된 물 시료의 용존이온 또는 동위원소 분석 자료를 기초로 유출근원을 밝히는 연구에 있어서 적합한 유출성분과 추적자의 적용은 무엇보다도 중요하다 할 수 있다. 하지만 이와 관련한 국내에서의 연구는 극히 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문은 경기도 광릉에 위치한 침엽수 인공림유역에서 관측된 세 차례의 강우사상을 분석하여 계류 유출수량에 영향을 미치는 주요 유출성분을 선정하고 유출분리에 적용성이 높은 추적자를 찾는데 그 목적이 있다.



**Figure 1.** Location and topography of the experimental catchment and spatial distribution of measuring instrumentations and sampling points.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상지

본 연구는 경기도 포천시 소흘읍 직동리 국립수목원 내에 위치한 침엽수림 시험유역(N 37°45', E 127°09')에서 수행하였다(Figure 1). 침엽수림 유역은 1976년에 조림사업이 실시된 인공림으로 1996년과 2004년 두 차례 간벌 및 가지치기를 실시하였다. 전체 유역면적은 13.6ha로서 잣나무와 전나무로 구성되어 있으며, 표고 160~290m, 경사 13~35°이다. 또한 유역의 모양은 편마암이며 토성은 사양토이다.

### 2. EMMA 모델(End Member Mixing Analysis model)

EMMA 모델은 해당 시험유역의 주된 유출성분과 유역출구에서 채취한 계류수 내 추적자의 농도를 질량수지식에 적용하여 유출성분별 기여도를 산정하는데 이용된다. 이들 성분이 계류로 유입되어 혼합된다고 가정할 때, 유출성분별 추적자의 농도는 계류수에서 분석된 추적자 농도보다 극단의 농도를 나타내는 뚜렷한 특성을 보여야 한다. 한편, 혼합모델에 적용할 수 있는 추적자는 환경동위원소와 생물지화학적 인자 등이 있다. 이 중 환경동위원소에는 oxygen-18( $\delta^{18}\text{O}$ ), deuterium ( $\delta^2\text{H}$ ) 등의 안정 동위원소와 tritium( $\delta^3\text{H}$ ) 같은 방사성 동위원소가 있으며, 생물지화학적 인자로는  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  등이 있다(Hooper

등, 1990; Bazemore 등, 1994; Buttle, 1994; Hooper, 2001).

Figure 2는 유출성분 및 추적자를 선정하는데 사용하는 혼합다이어그램이며, 'component' 또는 'end member'를 '요소' 또는 '유출성분'으로, 'tracer'를 추적자로 명명하여 사용하였다. Figure 2(a)는 2요소 혼합모델에 적용하기 위한 다이어그램으로서, 적절한 추적자를 이용하는 경우 계류수에서의 용존이온 A와 B의 농도는 유출성분 1과 2의 용존이온농도 범위 내에 위치한다. 또한 Figure 2(b)는 3요소 혼합모델을 이용하기 위한 것으로, 유출성분 1, 2, 3은 추적자 1과 2의 농도에 따라 삼각형을 형성하고, 계류수에서의 추적자 농도는 이들이 형성하는 삼각형 내에 위치한다. 본 연구에서의 혼합다이어그램 만족도(%)는 강우사상별 계류수 시료의 추적자 농도가 유출성분의 농도범위 내에 위치하는 비율을 의미한다.

일반적으로 혼합모델은 질량수지방정식에 기초하므로 각 유출성분과 계류수에서의 추적자 농도는 이 식을 만족시켜야 한다. 아래의 식 (1)과 (2)는 2요소 1추적자 혼합모델에 적용하는 질량수지방정식이다(Buttle, 1994).

$$f_a + f_b = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_a f_a + C_b f_b = C_{st} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $f$ 는 유출성분별 기여도,  $C$ 는 추적자의 농도를 의미하며 a와 b는 유출성분, st는 계류수

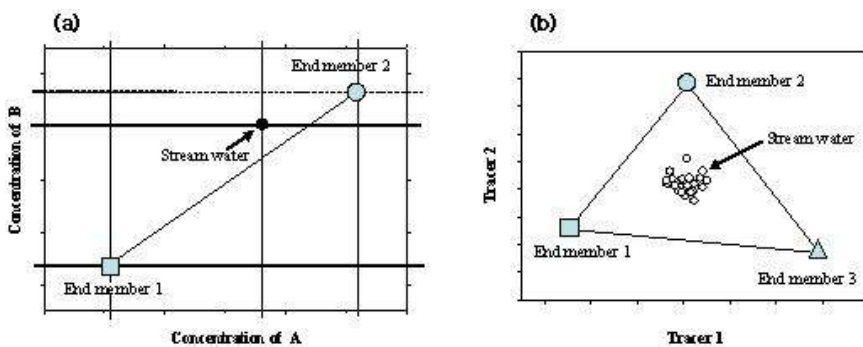


Figure 2. Examples of mixing diagrams to determine the contribution rate of each runoff component.

**Table 1.** Rainfall-runoff characteristics of three storm events.

	Event 1	Event 2	Event 3
Observed period	June 26~28, 2005	July 1~2, 2005	July 9~10, 2005
Precipitation(mm)	147.2	105.6	40.6
Antecedent Precipitation Index, API <sub>10</sub> (mm)	1.3	161.9	154.3
Maximum rainfall intensity(mm/10min)	11.1	17.7	2.5
Peak flow(mm/10min)	0.2	1.3	0.05

를 나타낸다. 단, 선정된 추적자들은 유출경로를 따라 어떤 화학적 반응에도 관여하지 않고 보존적으로 행동한다고 가정한다.

었다. 모든 통계분석에 SAS 프로그램을 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3. 분석방법

유출량은 부자-엔코더 수위계(OTT, Thalimedes)를 이용하여 10분 간격으로 수위를 측정하였으며, 강우량은 중량측정형 강우계(OTT, PLUVIO)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였다. 2005년 6월 26일부터 7월 10일까지 관측된 세 차례의 강우-유출 특성은 Table 1과 같다.

계류수 시료는 상기한 세 차례의 강우기간 동안 자동 물시료 채취기(ISCO, 6712FR)를 이용하여 2시간 간격으로 48시간 동안 채취하였다. 지하수 시료는 2005년 5월부터 9월까지 깊이 50~160cm의 관정에서 정기적으로 채수하였으며, 같은 기간에 강우, 수관통과우, 수간유하수, 토양수 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 이온크로마토그래피(음이온, Sykam, DE/S-135; 양이온, Dionex, DX-320 IC System)를 이용하여 음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)과 양이온(Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) 농도를 분석하였으며, 산중화능(Acid Neutralizing Capacity, ANC)은 아래의 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$ANC = [Na^+] + [NH_4^+] + [K^+] + 2[Mg^{2+}] + 2[Ca^{2+}] - [Cl^-] - [NO_3^-] - 2[SO_4^{2-}] \dots\dots\dots (3)$$

#### 1. 유출성분의 탐색

시험유역의 주요 유출성분을 탐색하기 위하여 강우, 수관통과우, 수간유하수, 토양수, 지하수를 예상 유출성분으로 선정하여 음이온과 양이온 농도, 산중화능(ANC)을 분석하였으며, 이상 극한치의 영향을 배제하기 위하여 각 분석결과에서 상위 5%와 하위 5%를 제외한 평균은 Table 2와 같다.

강우와 수관통과우의 평균이온농도의 차이는 K<sup>+</sup>을 제외하고 유의성이 없는 것으로 나타나(α>0.05) 이들의 화학적 특성이 유사한 것으로 생각되며, 토양수와 지하수에서는 Cl<sup>-</sup>과 Ca<sup>2+</sup> 농도의 차이가 거의 없었다(α>0.05). 반면 Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, ANC는 토양수, 지하수 그리고 이 외 유출성분 간의 차이가 뚜렷하였으며(α<0.01), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>도 유사한 경향이었다.

유출성분별 평균 이온농도는 전체적으로 수간유하수, 토양수, 지하수에서 높은 농도를, 강우와 수관통과우에서 낮은 경향이었다. 이것은 각 성

#### 4. 통계분석

유출성분별 이온농도의 차이는 General Linear Model(GLM)을 사용하여 검정하였으며, 각 이온의 평균농도는 Duncan의 다중검정으로 비교하

분의 특징을 잘 나타내고 있는 것으로서 선행강우량과 빗물에 의한 수관에서의 이온세탁, 토양내에서의 물의 이동과정 중 이온의 흡착과 용탈로 인해 나타나는 변화인 것으로 생각된다(Likens

**Table 2.** Chemical properties of each runoff component.

Components	Sample No.	Anion ( $\mu\text{eq/l}$ )		Cation ( $\mu\text{eq/l}$ )				ANC ( $\mu\text{eq/l}$ )
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	
Rainfall	18	4.9c (0.7)	63.8c (6.0)	55.9c (7.8)	20.5c (3.8)	8.9c (1.3)	37.8b (4.2)	52.5c (9.6)
Throughfall	20	17.2c (5.0)	99.0c (14.4)	46.1c (6.3)	51.2b (8.7)	20.7c (4.6)	86.7b (16.2)	125.4c (20.0)
Stemflow	16	108.1a (32.9)	406.6a (95.7)	70.8c (12.8)	156.4a (36.0)	128.2a (37.7)	459.0a (131.7)	242.5c (65.0)
Soilwater	35	46.9b (4.5)	183.7b (17.1)	119.7b (7.6)	57.8b (6.2)	124.4a (12.1)	441.2a (53.9)	569.8b (77.9)
Groundwater	92	45.6b (0.7)	115.3cb (2.7)	258.0a (4.8)	11.8c (0.5)	89.2b (2.6)	368.1a (16.1)	828.8a (40.6)

Values with the same letter do not differ among components by Duncan's multiple comparison test at  $\alpha=0.05$ . Value in parentheses is one standard error of the mean.

과 Bormann, 1995; Ohte 등, 1995). 또한 강우, 수 관통과우, 지하수, 그리고 토양수의 화학적 특성은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 그리고 ANC 등에서 서로 뚜렷한 극단의 농도 차이를 보임에 따라 강우시 이들 성분이 계류수의 유출수량에 영향을 미치는 주요 유출성분인 것으로 생각된다. 이러한 결과는 강우기간 동안 계류수에 기여하는 주요 유출 성분이 강우, 지상류, 지하수 및 지중유출수 등이라고 보고한 선행연구(Fritz 등, 1976; Hooper 등, 1990; McGlynn과 McDonnell, 2003)와 유사한 것이다. 한편 주요 유출성분의 선정에서 수간유

하수의 경우는 이온농도의 변이가 다른 성분에 비해 너무 크기 때문에 제외하였다.

## 2. 추적자의 탐색

세 차례의 강우기간 동안 계류수에서 분석된 예상 추적자의 농도는 강우사상별로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 3). 특히 계류수의 음이온의 농도는 계류수 2와 3에 비해 계류수 1에서 전체적으로 높은 경향이었으며, Na<sup>+</sup>을 제외한 양이온과 ANC의 경우도 계류수 1에서 높은 농도를 보였다. 이러한 결과는 강우사상 1이

**Table 3.** Chemical properties of stream water samples during the three storm events.

	Sample No.	Anion ( $\mu\text{eq/l}$ )		Cation ( $\mu\text{eq/l}$ )				ANC ( $\mu\text{eq/l}$ )
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	
Stream water 1 (June 26~28)	24	63.4a (1.6)	142.4a (2.3)	168.4a (5.9)	37.6a (2.4)	139.2a (1.9)	438.9a (15.4)	932.8a (45.6)
Stream water 2 (July 1~2)	24	59.6b (1.0)	135.6b (1.5)	192.0b (3.5)	22.8b (0.6)	101.6b (0.7)	296.8b (2.5)	505.0b (11.3)
Stream water 3 (July 9~10)	24	46.2c (0.6)	120.8c (1.0)	207.4cb (7.9)	16.9c (1.3)	83.4c (1.4)	266.2c (4.8)	522.3b (16.2)

Values with the same letter do not differ among components by Duncan's multiple comparison test at  $\alpha=0.05$ . Value in parentheses is one standard error of the mean.

강우량은 많지만 선행강우량(API<sub>10</sub>)이 1.3mm로 적어서 침투유출량이 작고, 강우사상 2는 선행강우량과 강우량이 많을 뿐만 아니라 최대강우강도가 17.7mm/10min로서 침투유출량이 매우 높기 때문인 것으로 판단된다(Table 1). 또한 계류수 2와 3의 이온 농도의 차이는 강우사상 2와 3의 강우량과 강우강도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

상기 결과로부터 지하수와 강우를 2요소 혼합모델의 유출성분으로 선정하여 예상 추적자별로 다이어그램 만족도를 Table 4에 나타내었다. 다이어그램 만족도는 Figure 2와 같이 강우기간동안 채취한 총 24개의 계류수 시료 중에서 유출성분의 농도범위 내에 위치하는 비율을 백분율(%)로 나타낸 것이다.

강우사상 1에서는 Na<sup>+</sup>과 ANC이 각각 29.2%, 45.8%의 만족도를 보이고 있으나 나머지 이온의 경우 대부분 유출성분의 농도범위를 벗어나 적합한 혼합다이어그램을 형성하지 않았다. 이것은 강우-유출 특성에 따라 침투유출량이 차이를 보이는 것과 마찬가지로 선행강우량과 강우강도의 차이 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 강우사상 2에서는 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, ANC이 모두 혼합다이어그램을 100% 만족시키는 것으로 나타나 추적자로서 적절한 것으로 판단되며, 강우사상 3에서는 음이온을 제외한 양이온 대부분이 만족도 80% 이상이었고, 특히 Ca<sup>2+</sup>과 ANC이 100%로서 높은 만족도를 나타내었다.

**Table 4.** Percentages of stream water samples, chemical properties of which are within the ranges defined by the two end members mixing model.

	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	ANC
Event 1	-	-	29.2	4.2	-	-	45.8
Event 2	-	-	100.0	12.5	-	100.0	100.0
Event 3	41.7	20.8	91.7	79.2	87.5	100.0	100.0

- : zero percent

**Table 5.** Percentages of stream water samples, chemical properties of which are within the ranges defined by the three end members mixing model.

	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	ANC
	Cl <sup>-</sup>	8.3	4.2	8.3	-	-
Event 1	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	83.3	-	4.2	-
	K <sup>+</sup>	-	-	-	25.0	-
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	95.8	37.5	41.7	95.8	100.0
Event 2	Na <sup>+</sup>	-	8.3	83.3	75.0	4.2
	K <sup>+</sup>	-	-	20.8	54.2	4.2
	Mg <sup>2+</sup>	-	-	-	-	79.2
	Ca <sup>2+</sup>	-	-	-	-	100.0
	Cl <sup>-</sup>	37.5	41.7	37.5	16.7	-
Event 3	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	91.7	54.2	83.3	100.0	100.0
	Na <sup>+</sup>	-	8.3	83.3	20.8	4.2
	K <sup>+</sup>	-	-	62.5	8.3	-
	Mg <sup>2+</sup>	-	-	-	4.2	95.8
	Ca <sup>2+</sup>	-	-	-	-	91.7

- : zero percent

또한 토양수, 지하수, 수관통과수를 유출성분으로 하여 3요소 혼합모델에 적용할 수 있는 추적자를 선정하기 위하여 각각의 다이어그램 만족도를 Table 5에 나타내었다.

강우사상 1에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 K<sup>+</sup>를 예상 추적자로 하였을 때 83.3%의 만족도를 보였으며 나머지는 대부분 10% 미만이었다. 이것은 상기한 것과 마찬가지로 강우-유출 특성의 차이 때문에 나타나는 것으로 보인다. 한편 강우사상 2와 3에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Na<sup>+</sup>(또는 -Ca<sup>2+</sup>, -ANC), Ca<sup>2+</sup>-ANC이 90% 이상의 만족도를 보였으며, 특히 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-ANC, Ca<sup>2+</sup>-ANC, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>의 경우는 100%의 높은 만족도를 나타내었다. Hooper 등(1990)과 Burns 등(2001)은 EMMA 모델을 이용한 유출성분별 기여도에 관한 연구에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Na<sup>+</sup>을 추적자로 선정하였는데 본 연구에서도 유사한 결과를 보이고 있다.

이상과 같이 EMMA 모델에 적용할 수 있는

추적자를 탐색한 결과, 강우사상 1은 강우사상 2, 3과는 다른 경향을 보이고 있는데 이것은 선행강우량(API<sub>10</sub>), 침투유출량, 그리고 강우강도의 차이와 같은 시간적 특성(Table 1)과 지형, 식생, 토양 등의 공간적 특성에 기인하는 것으로 판단된다 (Kirkby, 1978; Moldan과 Cerny, 1994).

결과적으로 2요소 1추적자 혼합모델에 적용할 수 있는 추적자로는 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, ANC으로 나타났으며, 3요소 2추적자 혼합모델에는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 K<sup>+</sup> (또는 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, ANC), Ca<sup>2+</sup>과 ANC의 조합이 적절한 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

본 연구는 경기도 포천시 소흘읍 직동리 국립수목원 내에 위치한 침엽수림 시험유역(N 37°45', E 127°09')에서 EMMA 모델(End Member Mixing Analysis model)에 적용할 수 있는 유출성분 및 추적자를 탐색하기 위하여 수행하였다. 이곳은 1976년에 조림사업이 실시되어 잣나무와 전나무로 구성되어 있는 침엽수 인공림으로서, 전체 유역면적은 13.6ha, 표고는 160~290m, 경사는 13~35°이다. 강우기간 동안 계류의 유출수량에 영향을 미치는 주요 유출성분과 EMMA 모델에 적용가능한 추적자를 선정한 결과는 다음과 같다.

계류의 유출수량에 기여하는 주요 유출성분으로는 성분별 뚜렷한 이온농도의 차이를 보이는 지하수, 토양수, 강우, 수관통과우를 선택하였다. 이 중에서 2요소 1추적자 혼합모델에는 강우와 지하수를, 3요소 2추적자 혼합모델(End Member Mixing Analysis model, EMMA 모델)에는 지하수, 토양수, 수관통과우를 유출성분으로 선정하였다. 강우사상 1, 2와 3에서 각 유출성분과 계류수 내의 음이온(Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)과 양이온(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) 농도, 산중화능(ANC)을 대상으로 적합한 추적자를 선별한 결과, 2요소 1추적자 혼합모델에는 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, ANC이, 3요소 2추적자 혼합모델에는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>,

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-ANC, 그리고 Ca<sup>2+</sup>-ANC이 적절한 조합인 것으로 나타났다. 이상과 같이 계류수에 영향을 미치는 주요 유출성분 및 추적자의 선정은 유출 성분별 기여도의 정량화 및 산림유역에서의 유출 발생 경로를 추적하기 위한 기초 자료로써 이용이 가능할 것으로 생각된다.

#### 인 용 문 헌

- Bazemore D. E., K. N. Eshleman and K. J. Hollenbeck. 1994. The role of soil water in storm flow generation in a forested headwater catchment : synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. *Journal of Hydrology* 162 : 47-75.
- Burns D. A., R. P. Hooper., J. J. McDonnell., J. Freer., C. Kendall and K. Beven. 1998. Base cation concentrations in subsurface flow from a forested hillslope-the role of flushing frequency. *Water Resources Research* 34 : 3535-3544.
- Burns, D. A., R. P. Hooper., J. J. McDonnell., N. E. Peters., J. E. Freer., C. Kendall and K. Beven. 2001. Quantifying contributions to storm runoff using end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed(Georgia, USA). *Hydrological Processes* 15 : 1903-1924.
- Buttle, J. M. 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography* 18(1) : 16-41.
- Carrera, J., E. Vázquez-Suñé, O. Castillo and X. Sánchez-Vila. 2004. A methodology to compute mixing ratios with uncertain end-members. *Water Resources Research* 40(12), W12101, DOI : 10.1029/2003WR002263.
- Christophersen, N., C. Neal., R. P. Hooper., R.

- D. Vogt and S. Andersen. 1990. Modeling streamwater chemistry as a mixture of soil water end-members-A step towards second generation acidification models. *Journal of Hydrology* 116 : 307-320.
- Fritz, P., J. A. Cherry., K. V. Weyer and M. G. Sklash. 1976. Runoff analysis using environmental isotope and major ions. In *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology*. IAEA, Vienna. pp.111-130.
- Hooper, R. P., N. Christophersen and N. E. Peters. 1990. Modeling streamwater chemistry as a mixture of soil water end-members-An application to the Panola Mountain catchment, Georgia, USA. *Journal of Hydrology* 116 : 321-343.
- Hooper, R. P. 2001. Applying the scientific method to small catchment studies : a review of the Panola Mountain experience. *Hydrological Processes* 15 : 2039-2050.
- Kirkby, M. J.(ed.) 1978. *Hillslope Hydrology*. John Wiley and Sons, 389pp.
- Likens, G. E., and F. H. Bormann. 1995. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*(2nd Ed.). Springer-Verlag, 160pp.
- McGlynn, B. L., and J. J. McDonnell. 2003. Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff and composition. *Water Resources Research* 39(11), 1310, DOI : 10.1029/2003WR002091.
- Moldan, B., and J. Cerny.(ed.) 1994. *SCOPE 51, Biogeochemistry of Small Catchments -A Tool for Environmental Research*. John Wiley and Sons, pp.207-223.
- Ohte N., N. Tokuchi and M. Suzuki. 1995. Biogeochemical influences on the determination of water chemistry in a temperate forest basin : factors determining the pH value. *Water Resources Research* 31 : 2823-2834.
- SAS Institute Inc. 1999. *SAS/STAT User's Guide, Version 8*, SAS Publishing, USA.