

한강 수계 분지내 하천수의 산소, 수소 안정동위원소 조성

김규한* · 이세희

이화여자대학교 과학교육과

Oxygen and Hydrogen Isotopic Compositions of Stream Waters in the Han River Basin

Kim-Kyu Han*, Lee-Sae Hee

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750 Korea

Oxygen and hydrogen isotopic compositions of stream water in the Han river basin are expressed by the equation of $\delta D = 6.6\delta^{18}O - 7.4$, which is not satisfy the meteoric water line ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$). It might be depended on the local climatic condition and the evaporation effect in the Han river basin. The $\delta^{18}O$ and δD values of stream water in the Han river basin range from -8.2 to -10% (avg. -9.1%) and -60 to -96% (avg. -69%), respectively. The stream water from the South Han river ($\delta^{18}O = -8.9$ ~ -10% , avg. -9.3% , $\delta D = -66$ ~ -96% , avg. -69%) is slightly more depleted in ^{18}O and D than those of North Han river ($\delta^{18}O = -8.4$ ~ -9.7% , avg. -9.2% , $\delta D = -64$ ~ -95% , avg. -69%). It reflects more altitude effect than the effect of latitude and inflow of the ^{18}O enriched SO_4^{2-} and HCO_3^- from the carbonate rock and sulfide minerals in the Taebagsan and Hwanggangri mineralized zone. The Main stream water of the Han river having $\delta D = -60$ ~ -76% (avg. -68%) and $\delta^{18}O = -8.2$ ~ -10% (avg. -9.0%) is enriched in ^{18}O compared to the South and North Han river waters, which is caused by the evaporation effect. Binary simple mixing ratio of the Main Han river water between South and North Han river waters was obtained to be 6 : 4 by the isotopic data, suggesting a strong influence of South Han river water to the Main Han river water.

Key words : oxygen and hydrogen isotopic compositions, stream water, Han river basin, altitude effect, evaporation effect.

한강 수계분지내의 하천수의 산소 및 수소 동위원소 조성은 $\delta D = 6.6\delta^{18}O - 7.4$ 로 순환수선($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)과 차이를 나타내고 있다. 이는 한강수계 분지내의 지역적 기상조건과 증발 영향 때문으로 해석된다. 한강 하천수의 $\delta^{18}O$ 과 δD 값은 각각 -8.2 ~ -10% (평균 -9.1%)과 -60 ~ -96% (평균 -69%)이다. 그리고 남한강 하천수의 평균 $\delta^{18}O$ 와 δD 값은 -9.3% 과 -69% 로 북한강 하천수의 -9.2% 와 -69% 값보다 무거운 산소와 수소 동위원소비가 결핍되어 있다. 이는 남한강 하천수에 탄산염 기원과 황화광물 기원의 황산염의 무거운 산소의 유입과 위도 효과를 받고 있음에도 불구하고 집수지의 고도 효과의 영향을 더 많이 받기 때문으로 해석된다. 동위원소 자료에서 계산된 한강분류에서의 남한강과 북한강 하천수의 혼합비율은 약 6 : 4로 남한강 하천수의 영향이 한강 본류 하천수에 크게 영향을 주고 있다.

주요어 : 산소와 수소 동위원소조성, 하천수, 한강수계분지, 고도효과, 증발효과

1. 서 언

한강의 수질 및 생태계에 대한 연구가 국내의 연구자들에 의해 단속적으로 이루어져 왔으나 하천수중의 용존 이온종의 기원, 하천수의 혼합, 하천수의 수계분

지내의 지질의 특성에 따른 영향 등의 연구에 중요한 수단인 환경 동위원소(C, H, O, N, S 등) 연구는 극히 제한적으로만 수행되었다. 남한의 일부 지역에 대한 지하수와 강수에 대한 동위원소 연구는 일부 연구자들에 의해 수행된 바 있다(水谷義彦 등, 1980; 中井信之 등, 1982; 김규한과 中井信之, 1988; 이광식과 장병욱, 1994; 이광식과 정재일, 1997; 이광식 등, 1997; 이광

*Corresponding author: kyuhan@mm.ewha.ac.kr

식과 이창복, 1999).

김규한과 中井信之(1988)은 남한의 지하수와 강수의 산소, 수소 동위원소 조성 연구에서 Craig(1961)의 순환수선($\delta D=8\delta^{18}O+10$)에 근접함($\delta D=7.7\delta^{18}O+4$)을 보고하였다. 산소, 수소 동위원소 조성은 온도 효과와 함께 내륙, 위도 및 고도의 영향을 받으며 위도 효과보다 지형에 따른 고도 효과의 지배를 더 크게 받고 있다(김규한과 中井信之, 1988).

또한 강수의 1년간 동위원소 조성 연구 결과에서 계절적 영향보다 수증기단의 특성에 크게 지배 받아 6월을 전후하여 동위원소 값의 큰 변화가 있으며 강수의 d 값은 온도, 증발량, 강수량 등에 영향을 받고 있음을 보고하였다(김규한과 中井信之, 1988). 이광식과 정재일(1997)은 우리나라 포항에서 1961~1976년에 얻어진 강수 동위원소 자료의 회귀분석에서 포항지역 강수의 산소와 수소 동위원소 조성($\delta D=8.05\delta^{18}O+12.7$)이 온도효과 보다 우량효과에 영향을 더 크게 받고 있음을 지적하였다.

한강 하천수의 화학적 특성 및 동위원소비(δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$, $\delta^{13}C$) 연구는 中井信之 등(1982)에 의해 처음 이루어졌다. 수소 및 산소 동위원소비는 한강의 상류에서 하류로 내려 갈수록 ^{18}O 가 부화되는 고도효과가 남한강에서 잘 반영되고 있으며 단양-양수리간의 남한강 하천수에서 물의 산소 동위원소값은 석회암과 금속 광상 분포와 같은 수계 유역의 지질을 잘 반영해 주고 있다(中井信之 등, 1982).

국내 연구자에 의한 한강 하천수의 환경동위원소 연구는 이광식과 이창복(1999)에 의해 수행되었으며 광나루와 중지도에서 10여차례에 걸쳐 채수된 한강 시료와 금강, 섬진강 시료에 대해 검토되었다. 결과적으로 위도가 높은 섬진강, 금강, 한강 순으로 하천수의 동위원소 조성이 부화되는 위도효과가 반영되었다. 또한 금강과 섬진강의 시료는 동위원소 조성 변화가 크고 한강 하천수는 상대적으로 작으므로 수계분지 특성의 영향을 받고 있다(이광식과 이창복, 1999). 우리나라 하천수는 강수량의 약 70%가 집중되는 여름 강수에 크게 영향을 받고 있으며 여름 강수가 댐에 저장되었다가 가을~봄에 방류됨에도 그 원인이 있다(이광식과 이창복, 1999).

그러나 한강 하천수의 동위원소 연구는 부분적으로 보고된바 있으나 하천수의 발원지에서 하류까지 체계적으로 채취된 시료에 대하여 동위원소분석 연구와 동위원소를 이용한 용존이온의 기원 연구 등은 최근에 수행된바 없다.

따라서 본 연구에서는 남한강, 북한강, 한강 본류 하천수의 동위원소 특성 규명과 한강 본류 하천수의 혼합비율을 정량화하였다. 또한 환경동위원소 자료를 이용하여 한강 하천수에 용존하고 있는 용존 이온종들의 기원, 하천수와 주변 지질과의 관계 등을 밝히고자 하였다.

2. 한강 수계의 지질

동에서 서로 흐르는 한강은 북한강과 남한강의 양대 지류와 본류로 나누어진다. 북한강 수계분지 지역은 선캄브리아기의 변성암류와 쥐라기의 화강암류의 암석이 분포하며 지형은 구조선의 NNE-SSW 방향과 일치하게 발달하는 직선의 유로를 나타내고 있다(김규한과 김완숙, 1994). 또한 강원도 춘천 서쪽에는 주로 선캄브리아기 편마암류가 분포하며 춘천-가평-양수리까지 선캄브리아기의 편마암류 및 운모편암, 석영장석질편암, 규암, 석회암 등이 분포하고 있다.

남한강 상류인 영월 북서부 지역과 평창강 일대 지역에는 석회암, 역암, 사암, 셰일 등 고생대의 퇴적암층이 주류를 이룬다. 이 지역은 탄질 셰일, 무연탄 등이 넓게 분포하고 있으며 태백산 및 황간리 광화대에는 금속 광산이 산재한다. 충북 단양 지역에는 천매암, 슬레이트, 합력천매암, 석회암과 선캄브리아기 편마암류, 쥐라기의 화강암 등이 분포하고 있다. 북한강과 남한강이 합류하여 본류를 이루는 양수리에서 김포까지 한강 본류 지역은 선캄브리아기의 편마암류와 이들을 관입한 쥐라기의 화성암류가 분포하고 있으며 상위는 부정합의 형태로 제 4기의 충적층이 피복하였다(홍승호 등, 1982).

3. 시료채취 및 분석방법

시료 채수는 1999년 5월에 실시하였으며 남한강 13지점, 북한강 11지점, 한강 본류 20지점에서 총 44개의 시료를 채취하였다(Fig. 1). 이 중에는 북한강으로 합류되는 소양강 시료와 남한강으로 합류되는 평창강, 영월 동강의 시료도 포함되어 있다.

하천수 시료의 동위원소 성분은 계절적 변화에 따라 영향을 받으므로 시료채취를 건기에 실시하여 강수로 인한 희석 효과를 줄이고, 하천 주변 기반암의 종류에 의한 지질적 영향을 조사하였다. 산소, 수소 동위원소비($^{18}O/^{16}O$, D/H)는 고려대학교 전략광물자원연구센터 동위원소 분석실에 있는 FINIGAN MAT 252를 이용

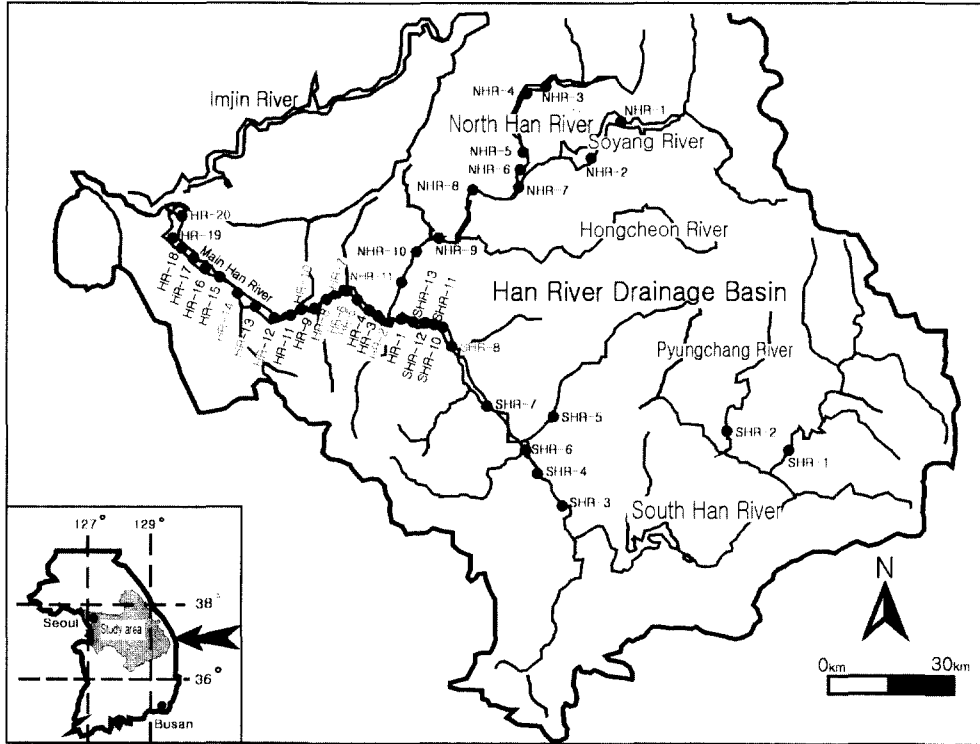


Fig. 1. Sample location map of stream waters in the Han river basin, Korea.

하였고 산소 및 수소 동위원소 분석 결과는 비엔나 표준시료(V-SMOW)와 비교된 천분율(‰)로 표현하였다. 분석의 오차 범위는 수소 동위원소비가 ±1‰, 산소동위원소가 ±0.1‰이다.

4. 결과 및 토의

4.1. 산소 및 수소 동위원소비

1999년 5월에 채취한 44개의 한강 하천수 시료의 산소 및 수소 동위원소비는 $\delta D = 6.6\delta^{18}O - 7.4$ ($n=41$, $r=0.9$)로서 이는 순환수선(global meteoric water line: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$) (Craig, 1961)보다 다소 하향 이동하여 도시되며 북한강과 한강 본류 하천수에서 현저하게 나타난다(Table 1, Fig. 2). 이는 中井信之 등(1982)의 연구에서 1980년 11월과 1981년 5월에 채취된 시료 43개에 대한 관계식 $\delta D = 6.5\delta^{18}O - 5.7$ ($n=43$)와 이광식과 이창복(1999)의 $\delta D = 6.3\delta^{18}O - 5.1$ ($n=29$)과도 유사한 경향을 나타내고 있다. 이처럼 순환수선에 비해 기울기가 작은 이유는 기단 특성의 변화와 증발효과의 반영 때문으로 해석된다. 이광식과 이창복(1999)은 한강의 7개의 크고 작은 범이 하천수의 흐름을 정체시켜

표면 증발을 촉진시키는 역할을 하는 것으로 분석한 바 있다.

한강 하천수의 안정 동위원소비의 범위는 $\delta D = -60 \sim -96\%$ (평균, -69%), $\delta^{18}O = -8.2 \sim -10\%$ (평균, -9.1%)의 범위로 남한 순환수(김규환과 中井信之, 1988)의 $\delta D = -40 \sim -73\%$, $\delta^{18}O = -5.2 \sim -10\%$ 의 범위와 유사하다. 북한강은 $\delta D = -64 \sim -95\%$ (평균, -69%), $\delta^{18}O = -8.4 \sim -9.7\%$ (평균, -9.2%)이며 남한강은 $\delta D = -66 \sim -96\%$ (평균, -69%), $\delta^{18}O = -8.9 \sim -10\%$ (평균, -9.3%)이다. 그리고 한강본류의 하천수는 $\delta D = -60 \sim -76\%$ (평균, -68%), $\delta^{18}O = -8.2 \sim -10\%$ (평균, -9.0%)이다(Table 1).

1981년 한강 하천수의 평균 산소와 수소 동위원소비는 북한강 -8.8% , 64% , 남한강 -9.1% , -65% , 한강 본류 -8.0% , 58% 이다(中井信之 등, 1982)

1981년 한강 하천수에 비해 1999년 한강 하천수의 평균 동위원소값이 비교적 균일한 특징을 나타내며 한강 본류에서 산소 동위원소비는 1‰ 정도의 큰 차이를 보이고 있다. 이같은 현상은 한강 본류 수계의 환경변화를 반영하고 있다. 즉, ^{18}O 부화 기원의 물이 한강 본류에 유입량 감소를 의미하고 있다.

Table 1. Oxygen and hydrogen isotopic compositions of stream waters from the Han river basin.

Sample No.	Location	D‰ (V-SMOW)	¹⁸ O‰ (V-SMOW)	d-parameter	Ca ⁺² (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Ca+Mg ⁺² (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Altitude (m)
South Han river									
SHR-1	Yongwol(Dong River)	-67.5	-9.1	5.3	30.2	54.7	34.8	17.9	200
SHR-2	Pyungchang River	-66.4	-9.1	6.4	17.1	86.9	19.9	3.4	140
SHR-3	Sunchang	-69.1	-9.4	6.1	26.4	80.5	31.3	3.3	60-80
SHR-4	Jungsan	-66.9	-9.1	5.9	24.0	78.6	28.4	16.0	60-80
SHR-5	Moonmak	-66.0	-9.0	6.0	21.3	73.2	25.3	14.0	60-80
SHR-6	Hungho	-69.4	-9.4	5.8	26.2	84.0	31.1	5.3	60-80
SHR-7	Yuju	-70.8	-9.5	5.2	26.8	88.4	32.0	15.4	40
SHR-8	Gaegun	-70.6	-9.5	5.4	25.7	82.0	30.6	15.2	40
SHR-9	Yangpyoung	-72.7	-10.0	7.3	26.0	85.9	31.1	16.3	0-20
SHR-10	Shinwonri	-69.5	-9.3	4.9	24.8	67.6	29.7	15.9	0-20
SHR-11	Yangsuri 2	-95.6	-9.7	-18.0	8.9	33.1	10.8	6.2	0-20
SHR-12	Sinwonyok	-71.0	-9.3	3.4	21.5	83.5	25.9	14.8	40
SHR-13	Yangsuri 1	-69.6	-8.9	1.6	22.8	71.5	27.6	16.6	40
average		-69.1	-9.3	5.3	23.1	75.3	27.6	12.6	
North Han river									
NHR-1	Chugok	-68.7	-9.2	4.9	5.2	17.1	6.1	3.8	200
NHR-2	Soyang	-71.1	-9.4	4.1	4.9	18.3	5.8	3.6	180
NHR-3	Hwacheon 2	-91.8	-9.1	-19.0	12.2	50.5	15.4	5.9	120
NHR-4	Hwacheon 1	-70.9	-8.9	0.3	10.9	42.5	13.4	5.4	0-20
NHR-5	Chuncheon	-70.1	-9.3	4.3	10.6	41.5	13.1	5.2	60
NHR-6	Yiam	-69.7	-9.3	4.7	1.0	37.3	1.0	5.0	40
NHR-7	Gangchon	-68.6	-9.2	5.0	8.6	32.0	10.5	4.7	20
NHR-8	Gapyoung	-64.4	-8.4	2.8	-0.2	33.0	-0.4	4.9	0-20
NHR-9	Chongpyoung	-69.7	-9.3	4.7	8.7	37.3	10.5	4.9	60
NHR-10	Daesungri	-70.9	-9.4	4.3	8.7	33.2	10.6	4.9	0-20
NHR-11	Sambongri	-95.4	-9.7	-17.8	9.2	34.4	11.1	5.4	0-20
average		-69.3	-9.2	4.4	6.6	35.5	8.1	5.0	
HR-1	Paldang(Dasan)1	-66.5	-9.1	6.3	19.3	68.8	23.3	13.1	0-20
HR-2	Paldang 2	-75.7	-10.4	7.5	19.0	65.4	22.9	12.3	0-20
HR-3	Paldang 3	-70.0	-9.2	3.6	17.4	57.6	21.0	11.2	0-20
HR-4	Duckso 1	-62.5	-8.4	4.7	17.3	60.5	20.8	11.4	0-20
HR-5	Duckso 2	-65.0	-8.7	4.6	18.3	59.8	22.0	11.9	0-20
HR-6	Guri 1	-68.4	-9.3	6.0	22.2	72.3	27.1	23.2	0-20
HR-7	Guri 2	-68.1	-9.2	5.5	19.4	62.0	23.6	15.0	0-20
HR-8	Chonho bridge	-68.3	-9.3	6.1	17.0	59.6	20.7	10.8	0-20
HR-9	Jamshil bridge	-70.2	-8.9	1.0	16.4	56.1	19.7	10.3	0-20
HR-10	Yondong bridge	-69.7	-9.3	4.7	19.6	75.2	23.6	13.9	0-20
HR-11	Hannam bridge	-68.7	-9.0	3.3	17.3	61.0	20.7	11.2	0-20
HR-12	Dongjak bridge	-69.7	-9.1	3.1	17.5	66.4	21.1	12.3	0-20
HR-13	Yanghwa bridge	-71.7	-8.9	-0.5	16.7	68.8	20.4	13.0	0-20
HR-14	Sungsan bridge	-69.2	-9.0	2.8	18.8	64.0	22.8	13.5	0-20
HR-15	Sinhangju bridge	-71.5	-9.0	0.5	19.1	75.2	23.0	15.5	0-20
HR-16	Gochon	-60.4	-8.2	5.2	18.2	77.1	21.3	16.9	0-20
HR-17	Punggok	-70.3	-9.0	1.7	19.2	68.9	23.6	17.4	0-20
HR-18	Gamamri	-61.3	-8.3	5.1	29.0	74.2	92.6	173.2	0-20
HR-19	Nusanri	-69.4	-8.2	-3.8	35.3	73.7	118.8	225.7	0-20
HR-20	Hasungmyon	-72.7	-9.0	-0.7	37.4	68.9	112.6	208.2	0-20
average		-68.5	-9.0	4.7	21.1	67.3	37.3	47.3	

Data of the ion concentrations from Kim and Shim(2001)

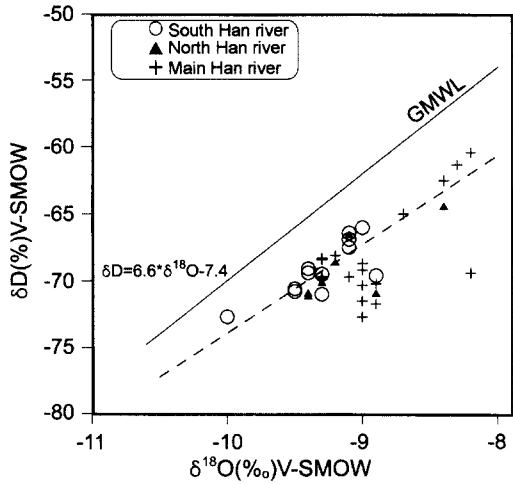


Fig. 2. Plot of δD versus $\delta^{18}O$ values of the stream waters in the Han river basin. GMWL means the global meteoric water line by Craig (1961). Dotted line, $\delta D=6.6\delta^{18}O-7.4$, shows the result of this study.

이론적으로 한강 본류 하천수의 동위원소비는 남한강과 북한강 하천수의 동위원소 값의 산술평균 값이 언어져야 함에도 불구하고 ^{18}O , D가 다소 부화된 동위원소비의 특징을 나타내고 있다. 이유는 (1)남한강, 북한강의 고도(200 m이하)가 높은 반면 한강 본류의 고도는 해발 0-20 m로 상대적으로 낮아 ^{18}O 가 부화된 지표수 기원의 물의 유입과 (2) 도심을 흐르는 한강 본류에 인간활동에 의한 ^{18}O 부화 기원의 물의 유입 (3) 증발 효과의 증대 등 복합적인 원인 때문으로 해석할 수 있다.

북한강과 남한강의 하천수는 지형에 의한 고도의 영향을 받고 있다. 또한 한강 본류 지역 하천수의 동위원소비는 분산도가 크다. 본류 지역 중 특별히 ^{18}O 이 부화된 곳은 고촌, 감암리, 덕소, 누산리 등의 지점이고 이는 증발 및 해수와의 혼합 또는 교환반응에 의한 영향으로 해석된다. 또한 풍곡, 신행주대교, 하성면 등지의 하천수는 ^{18}O , D의 결핍현상이 나타나는데 이는 $\delta^{18}O$, δD 가 결핍된 기원의 물이 본류에 유입되기 때문인 것으로 추정된다.

화천(NHR-3; $\delta D=-91.8\%$, $\delta^{18}O=-9.1\%$), 삼봉리(NHR-11; $\delta D=-95.4\%$, $\delta^{18}O=-9.7\%$)지역의 동위원소비가 현저하게 낮는데 이는 댐과 지형 고도가 높은 물의 혼합 영향이 나타난 것으로 보인다. 그러나 양수리(SHR-11; $\delta D=-96\%$, $\delta^{18}O=-9.7\%$)지역의 낮은 동위원소비는 양평, 양수리 지역의 동계에 빙수기원의 하천수가 댐과 지형의 특징으로 잔존하기 때문으로 보

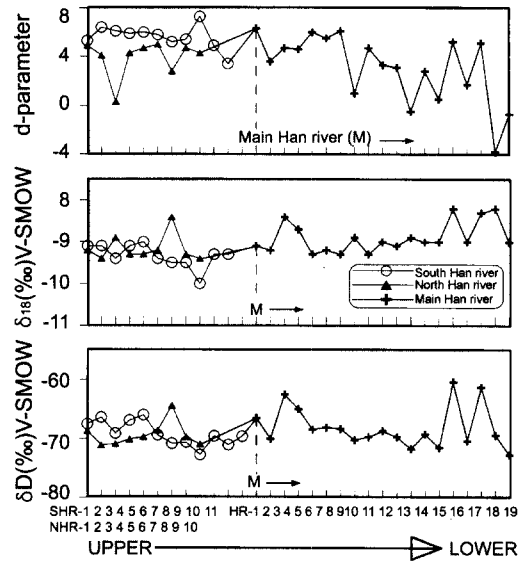


Fig. 3. Distribution of oxygen and hydrogen isotopic compositions of the stream waters from upper to lower Han river. (M : main Han river)

인다. 이광식과 이창복(1999)은 하천 중상류에 건설된 댐들에 의한 효과 때문에 하천수의 동위원소 조성 변화 범위가 현저히 좁아진다고 보고 한 바 있다.

Fig. 3에서 보면 한강 상류에서 하류에 이르는 하천수의 산소, 수소 동위원소비의 변동폭이 대단히 작고 산소와 수소 동위원소 변동 패턴은 대체적으로 유사하다. $\delta^{18}O$ 값은 하천의 하류와 상류에서의 고도효과가 나타나고 있으나 지역적인 특징이 우세하게 반영되고 있다. 中井信之 등(1982)은 남한강에서 동위원소비가 무거워지는 뚜렷한 고도효과를 보이는 반면 북한강은 고도효과를 반영하지 않는데 그 이유는 집수지역이 남한강 상류에는 300 m이상의 높은 지역이 많은 반면 북한강의 집수지역의 지형고도가 높지 않은 때문으로 설명하였다. 남한강 상류 집수 지역이 해발고도 100 m 이상 지역임에도 불구하고 ^{18}O 부화된 특징은 ^{18}O 부화된 탄산염암 기원의 산소의 혼합 때문으로 해석된다. 화천, 삼봉리지역 하천수의 ^{18}O 결핍이 심한 원인은 집수지역의 상부 높은 고도의 하천수의 다량 유입과 같은 지역적인 현상으로 추정된다.

5. 동위원소비와 용존 이온 농도와의 관계

하천수의 화학성분과 동위원소비는 하천유역에 분포하는 암석, 토지이용 형태, 식생, 인간활동등에 의해 달

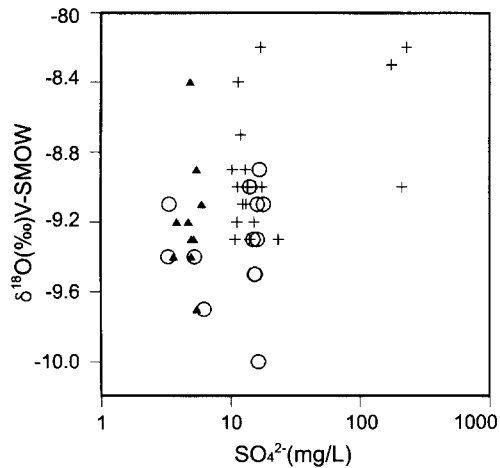


Fig. 4. Plot of SO_4^{2-} versus $\delta^{18}\text{O}$ values for the stream waters in the Han river basin. Symbols are the same as in Fig. 2.

라진다. 그리고 인공댐 등으로 인하여 변화하기도 한다. 한강 하천수의 화학성분은 하천 유역이 주로 화강암류와 편마암류로 구성된 북한강과 수계 주변에 광범위하게 분포하는 탄산염암과 태백산 및 황강리 광화대 내의 다수의 금속광상 분포로 특징지워지는 남한강의 수질은 주변지질에 크게 영향을 받고 있다(中井信之 등, 1982; 서혜영과 김규한, 1997). 그리고 남, 북한강이 합류하여 서울 도심으로 유입되는 한강본류의 하천수는 인간 활동에 의한 오염 영향이 크게 반영되고 있음이 보고되었다(서혜영과 김규한, 1997; 김규한과 심은숙, 2001). 中井信之 등(1982)은 남한강 하천수의 산소 동위원소비는 수계 유역의 탄산염암과 황화광물의 산화에 의한 황산염 이온의 영향을 받고 있음을 지적하였다. 탄산염암과 황산염 이온의 산소가 하천수의 산소 동위원소비에 미치는 영향을 검토하기 위해 Ca^{2+} , $(\text{Ca}+\text{Mg})^{2+}$, HCO_3^- , SO_4^{2-} 농도와 산소동위원소비와의 관련성을 검토하였다(Table 1, Fig. 4, 5, 6).

Fig. 4에서 북한강과 한강 본류는 하천수내의 SO_4^{2-} 농도변화가 적음에도 불구하고 SO_4^{2-} 의 $\delta^{18}\text{O}$ 값(中井信之 등, 1982)의 변화가 크다. 이는 상이한 기원의 황이 한강 본류 수계에 유입되고 있음을 의미하고 있다. 그러나 남한강의 경우 하천수의 SO_4^{2-} 농도변화와 함께 $\delta^{18}\text{O}$ 변화가 나타난다(Fig. 4). 이는 하천수의 산소 동위원소값에 SO_4^{2-} 의 기여가 있음을 의미한다.

남한강 하천수의 경우 HCO_3^- 농도와 $\delta^{18}\text{O}$ 값간에 관련성이 나타나지 않는다(Fig. 5). 이는 탄산염암의 농도변화에도 산소 동위원소비에 영향을 주지 못하고 있

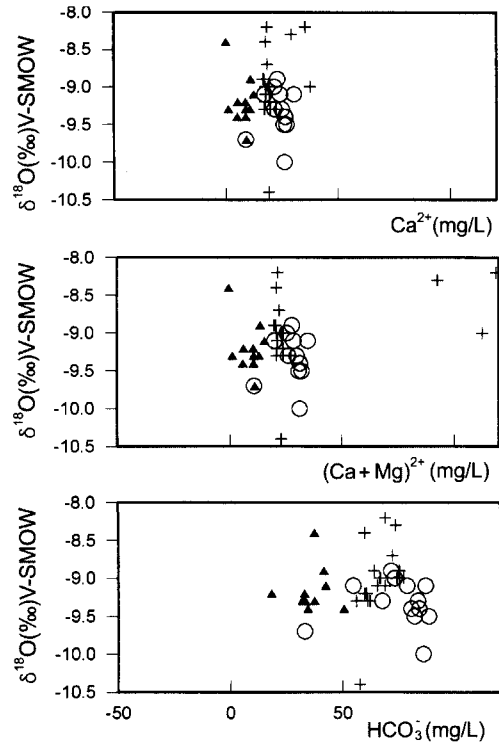


Fig. 5. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and chemical compositions of Ca^{2+} , HCO_3^- and $(\text{Ca}+\text{Mg})^{2+}$ for stream waters in the Han river basin. Symbols are the same as in Fig. 2.

다. 이같은 현상은 탄산염기원 산소에 비해 하천수의 수량이 현저히 많기 때문으로 해석된다. 그리고 용존 화학성분에서 농도 차이가 해수의 혼입을 현저히 나타내는 한강 하류의 하천수는 산소 동위원소값에서는 크게 반영되고 있지 않고 있다. 이는 하천수가 해수에 비해 양적으로 우세하기 때문으로 해석된다.

북한강, 남한강, 한강 본류의 상류에서 하류까지 연속적인 $\delta^{18}\text{O}$ 비, SO_4^{2-} 와 HCO_3^- 의 농도변동 곡선(Fig. 3, 6)에서 남한강과 북한강에서 SO_4^{2-} 와 HCO_3^- 농도차가 현저함에도 불구하고 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변동에는 잘 반영되고 있지 않고 있다. 이같은 사실은 하천수의 산소동위원소값이 SO_4^{2-} 나 HCO_3^- 의 산소보다도 하천수 기원지의 고도가 높은 남한강 상류의 집수지의 ^{18}O 가 결핍된 낮은 동위원소비를 가지는 물의 유입 영향이 더욱 크게 반영되고 있음을 의미하고 있다. 그러나 한강 본류의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 HCO_3^- 농도의 변동 패턴이 유사한 사실에서 SO_4^{2-} 보다 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 HCO_3^- 에 의해 더 많은 영향을 받고 있는 것으로 해석된다(Fig. 3, 6).

中井信之 등(1982)의 연구에서 용존 탄산염의 동위

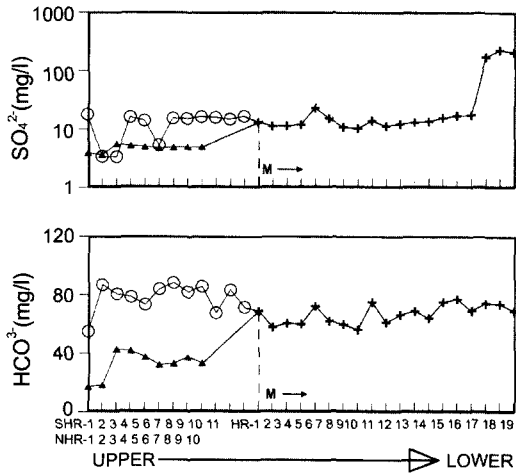


Fig. 6. Comparison of oxygen isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$), and concentration of SO_4^{2-} and HCO_3^- between upper and lower stream waters in the Han river basin. Symbols are the same as in Fig. 2.

원소비($\delta^{13}\text{C}$)가 한강분류의 지역은 $\delta^{13}\text{C} = -7 \sim -8\%$ 인데 반하여 한강 분류 지역은 $\delta^{13}\text{C} = -11\%$ 로 낮은 값을 가져 인간활동에 의한 동식물의 부패에 의한 탄산염의 혼입 영향이 나타나고 있는 것으로 해석하였다. 그러나 용존 SO_4^{2-} 의 황동위원소비($\delta^{34}\text{S}$)와 산소동위원소비($\delta^{18}\text{O}$)는 한강분류에서 $\delta^{34}\text{S} = 3 \sim 4\%$, $\delta^{18}\text{O} = 5 \sim 6\%$, 남한강의 상류 지역은 $\delta^{34}\text{S} = 3.9 \sim 11\%$, $\delta^{18}\text{O} = -2 \sim 5\%$, 중류지역은 $\delta^{34}\text{S} = 3 \sim 5\%$, $\delta^{18}\text{O} = 2\%$ 내외를 나타내고 있다. 그리고 북한강지역은 $\delta^{34}\text{S} = 5.1 \sim 7.2\%$ 이다(中井信之 등, 1982) (Fig. 7). 이같은 현상은 한강 상류에서는 $\delta^{34}\text{S}$ 값이 상이한 여러 광상 기원의 황의 유입으로 황동위원소비의 변화가 있으나 한강분류에서는 이들 황동위원소비를 가지는 하천수의 이상적인 혼합으로 동위원소비가 비교적 균일화 되었음을 의미한다. SO_4^{2-} 의 평균 농도 역시 남한강 12.3 mg/L, 북한강 4.9 mg/L로 남한강이 현저히 높다(김규한과 심은숙, 2001). 남한강 상류에는 태백산과 황강리 광화대의 금속광상과 무연탄층 내의 황철석등의 산화에서 유래된 SO_4^{2-} 가 유입되기 때문으로 해석된다. 반면 북한강은 광상 분포 빈도가 대단히 낮아 광상 기원의 황화광물의 유입이 대단히 적기 때문에 SO_4^{2-} 의 농도가 현저히 낮다.

북한강 하천수의 $\delta^{34}\text{S} = 5.1 \sim 7.2\%$ 로 대단히 균일하다. 태백산과 황강리 광화대의 여러 광상산 황화광물의 황동위원소비는 $\delta^{34}\text{S} = 2 \sim 5\%$ 이며 $\delta^{34}\text{S} = 4 \sim 5\%$ 에 높은 빈도를 나타내고 있다(김규한과 中井信之, 1981).

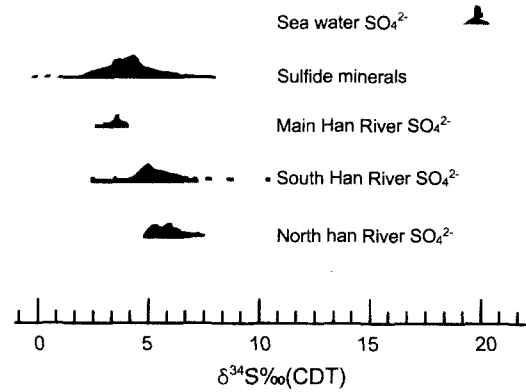


Fig. 7. Distribution of sulfur isotopic compositions of SO_4^{2-} in stream waters from the Han river basin. Sulfur isotopic data of sulfate ion and sulfide minerals are from Nakai *et al.* (1982) and Kim and Nakai (1981).

하천수의 SO_4^{2-} 의 황동위원소비와 황화광물의 황동위원소비가 비교적 유사한 값을 가지고 있다. 이는 한강 하천수의 황의기원이 광상의 황화광물의 산화에 의한 SO_4^{2-} 에서 유래되었음을 잘 보여주고 있다. 한강분류하천의 낮은 황동위원소비는 인간활동에 의해 발생한 황의 유입때문으로 추정된다(Fig. 7).

6. 한강 분류 하천수의 남한강과 북한강 하천수의 혼합비

한강 분류는 양수리에서 남한강과 북한강이 합류되어 서울 도심을 통과한 후 서해 바다로 유입된다. 한강 분류의 하천수의 동위원소비는 북한강과 남한강의 하천수의 동위원소비의 혼합 산물이다. 남한강, 북한강 하천수가 분류에 미치는 혼합의 영향을 검토하기 위해 남한강, 북한강, 분류의 $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$ 값의 평균치를 비교해 보면 분류의 값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 한강 분류 하천수의 산소와 수소 동위원소비는 집수지의 낮은 고도의 고도효과가 반영된 것으로 해석할 수 있다. 서혜영과 김규한(1997)의 CI 성분을 이용한 혼합비 계산에서 처럼 남한강, 북한강의 분류와 가까운 지점의 하천수의 산소 동위원소비 분석 자료를 이용하였다.

이상값을 보인 삼봉리(NHR-11; $\delta\text{D} = -95\%$, $\delta^{18}\text{O} = -9.7\%$)지점을 제외하고 남한강 하류인 양수리 지점(SHR-13)과 북한강 하류인 대성리 지점(NHR-10) 및 합류한 직후의 지역인 한강 분류 팔당(HR-1)지점의 시료를 이용하였다. 남한강에서 유입된 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값을

$\delta^{18}\text{O}_S$ 라 하고, 북한강에서 유입된 $\delta^{18}\text{O}$ 의 값을 $\delta^{18}\text{O}_N$ 라고 하면 다음과 같은 단순한 대수식이 성립된다 (Clark and Fritz, 1997).

$$\delta^{18}\text{O} = R\delta^{18}\text{O}_S + (1-R)\delta^{18}\text{O}_N$$

이 식에서 $R=0.6$ 이 얻어져 남한강이 60%, 북한강이 40%의 비율로 한강 본류에 $\delta^{18}\text{O}$ 를 공급하여 남한강 하천수가 우세하게 한강 본류에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 물론 남한강이 북한강 보다 큰 수량의 차이를 고려해야 한다. 유입량을 보면 하루에 남한강에서 팔당호로 흘러들어가는 유입량이 $1,632 \text{ m}^3$ 이고, 북한강에서 유입량은 $1,286 \text{ m}^3$ 이다(환경청, 1983). 즉 유입량도 남한강이 55%, 북한강이 43%정도이다.

이 혼합 비율은 시료 채수 시기와 북한강의 댐 방류량에 따라 달라질 수 있다. 서혜영과 김규한(1997), 김규한과 심은숙(2001)의 연구에서도 CI로 혼합비를 이용하여 계산한 결과, 남한강이 63%, 북한강이 37%의 비율로 한강 본류에 CI를 공급하여 남한강이 북한강보다 우세하게 CI공급의 영향을 주고 있는 것으로 보고하였다.

7. 결 론

1. 한강 하천수의 산소 동위원소비($\delta^{18}\text{O}$)는 $-8.2 \sim -10\%$ (평균, -9.1%)이고 수소 동위원소비(δD)는 $-60 \sim -96\%$ (평균, -69%)인 순환수로 $\delta\text{D}=6.6\delta^{18}\text{O}-7.4$ ($n=41$, $r=0.9$)의 관계를 나타낸다. 순환수 평균 조성과의 기울기와 절편 차이는 지역적인 기상 조건과 증발 영향 때문으로 해석된다.

2. 남한강의 δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 은 각각 $-66 \sim -96\%$ (평균, -69%), $-8.9 \sim -10.0\%$ (평균, -9.3%)로 북한강의 δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 비{ $\delta\text{D}=-64 \sim -95\%$ (평균, -69%), $\delta^{18}\text{O}=-8.4 \sim -9.7\%$ (평균, -9.2%)}로 남한강이 위도가 남쪽에 위치함에도 불구하고 북한강에 비해 ^{18}O 값이 결핍되어 있다. 이는 남한강 하천수의 동위원소 특성은 위도효과와 집수지역 주변에서 유입된 SO_4^{2-} 와 HCO_3^- 기원의 ^{18}O 부화된 산소의 혼입의 영향보다 집수지역의 고도효과가 크게 반영되고 있는 것으로 해석된다.

3. 한강 본류 하천수의 δD 는 $-60 \sim -76\%$ (평균, -68%), $\delta^{18}\text{O}$ 는 $-8.2 \sim -10\%$ (평균, -9.0%)으로 북한강과

남한강 하천수의 산소 평균적인 혼합의 값보다 다소 ^{18}O 가 부화되어 있다. 이는 한강 본류 주변 환경에서 ^{18}O 부화된 물질의 혼입 또는 증발 효과 때문으로 해석된다. 한강 본류의 하천수의 남한강과 북한강의 혼합 비율은 약 6:4로서 한강본류의 하천수는 남한강 하천수의 수질의 영향을 더 크게 받고 있다.

사 사

본 연구는 과학기술부 연구기반구축사업 연구비(과제번호 00-B-WB-01-A-04)에 의해 수행되었다. 시료채취와 원고정리에 협력해준 대학원생 심은숙, 이성은 양에게 감사한다.

참고문헌

- 김규한, 김완숙 (1994) 남한의 수계 발달과 지질구조와의 관계에 대한 연구, 지질학회지, 27권, p. 593-599.
- 김규한, 中井信之 (1981) 韓國의 溫泉水의 水素, 酸素及 硫黃同位體比. 地球化學, v. 15, p. 6-16.
- 김규한, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정 동위원소 조성, 지질학회지, 24권, p. 37-46.
- 김규한, 심은숙 (2001) 한강 하천수 중 용존이온의 지구화학적 특성과 기원. 자원환경지질, 34권, p. 539-553.
- 서혜영, 김규한 (1997) 한강 수계분지내 하천수의 지구화학적 특성 연구. 지하수환경, 4권, p. 130-143.
- 이광식, 이인성, 최만식, 박은주 (1997) 제주도 강수의 환경동위원소 연구. 지질학회지, 33권, p. 139-147.
- 이광식, 장병욱 (1994) 우리나라 대전과 서울 지역 강수의 안정동위원소 성분. 지질학회지, 30권, p. 475-481.
- 이광식, 정재일 (1997) 포항 강수의 안정 동위원소 조성 변화. 자원환경, 30권, p. 321-325.
- 이광식, 이창복 (1999) 남한 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성. 지질학회지, 35권, p. 73-84.
- 환경청 (1983) 한강유역 환경보전 수질 부문 보고서, 1권, p. 7-70.
- 홍승호, 이병주, 황상기 (1982) 한국지질도, 서울도폭, 한국동력자원연구소, 19p.
- 中井信之 外 10人 (1982) 漢江(韓國)及び 流域生態系における 環境動態に 關する基礎的調査. トヨタ財團研究助成研究報告要約.
- 水谷義彦, 中井信之, 洪思稟 (1980) 漢江の主要溶存化學成分の 地球化學的 研究 韓國における環境變遷史:文部省 海外學術調査中間報告 p. 105-108.
- Clark, I.D. and Fritz, P. (1997) Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Pub. New York, 328p.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. Science, v. 133, p. 1702-1703.

2001년 10월 25일 원고접수, 2002년 4월 26일 게재승인.