

## 양양 양수발전소 터널 용출수의 바이모달 진화 특성: 예비 결과

Bimodal evolution of tunnel seepage water in the YangYang power plant construction site:  
Preliminary result

유인식 · 윤성택\*

(고려대학교 지구환경과학과, e-mail : styun@korea.ac.kr)

### 요 약 문

양양 양수발전소 건설 지역 터널 내에서 동일 암상 내에 부존하는 단열 암반 대수층 지하수를 수평/수직적 관점에서 체계적으로 채취하고 수리지구화학 및 환경동위원소 특성 연구를 수행하고 있다. 현재까지 모아진 특성 자료를 공간적 변화와 관련하여 예비 고찰한 결과, 연구 지역에는 두 가지 상이한 지하수 유동계를 이루고 있는 것으로 판단된다.

Key words : Tunnel seepage water, hydrogeochemistry, stable isotope, bimodalism

#### 1. 서론

심층 단열 암반 지하수는 다양한 변수들에 의한 수리 및 수질 특성 변화가 심하여 연구가 용이치 않다. 국내에서도 심부 단열 암반 지하수의 연구는 경제적, 기술적 어려움과 유동 특성 해석의 어려움으로 인하여 많은 연구가 진행되지 못하였다. 이에 비하여, 양양 양수발전소 건설지역 터널 내에서는 동일 암상 내에서 파쇄대를 따라 유출되는 단열 암반 대수층 지하수를 수평/수직적 관점에서 체계적으로 채취하여 연구를 수행할 수 있다. 특히, 발전소 건설에 따른 부지조사의 결과로 지하 지질 해석의 잇점이 있어 서로 다른 유동 특성을 가지는 천층 및 심층지하수의 공간적 연구가 가능한 지역이다.

본 연구에서는 터널 용출수 및 지표수의 지화학적, 동위원소적 특성을 바탕으로 단열 암반 지하수의 수리지구화학적 특성을 규명하고, 이를 이용하여 단열 암반 지하수의 유동 특성을 해석하고자 하였다.

#### 2. 연구지역 개관 및 연구 방법

연구 지역인 양양 양수발전소 건설 지역은 강원도 인제군과 양양군에 위치한다. 터널의 수직 심도는 지표로부터 최대 1100 m, 수평거리는 4800 m로서 동양 최대 규모이다 (그림 1). 항공사진 판독, 탄성과 탐사 및 시추조사 결과, 연구 지역의 지질은 대부분 균질한 편마암 암체로 구성되어 있으며, 단열 구조의 주 방향은 N5E/80-90SE 및 N75E/40-70SE로 파악되었다. 연구 지역의 오대산편마암 복합체는 주로 미그마타이트질 편마암과 반상변정질 편마암으로 구성되어 있으며, 소규모의 규암, 각섬암, 대리암 및 우백질 편마암이 렌즈상으로 협재되어 있다.

현장 조사 및 시료 채취는 갈수기(2000년 5월)와 장마 이후인 2000년 10월부터 12월까지 보름 간격으로 6회에 걸쳐 수행하였다. 각 시료채취 위치는 터널의 반경, 위치, 경사에 따라 크게 CT(cable tunnel), WA(work adit), TT(tailrace tunnel), PT(power tunnel)로 구분하여 명명하였다 (그림 2). 시료는 양이온과 음이온 분석용 시료 각 60ml[65개],  $\delta^{18}\text{O}$  및  $\delta\text{D}$  분석용 시료 60ml[76개],  $\delta^{13}\text{C}$  분석용 시료 1 l [15개]와 삼중수소 분석용 시료 1 l [11개],  $\delta$

$^{14}\text{C}$  분석용 시료 700 l [2개]를 채수하였다. 현장에서는 수온, pH, Eh, EC, 알칼리도, 유출량 (Q; discharge rate) 및 탁도를 측정하였다. 실내에서는 ICP-AES 및 IC를 이용하여 용존이온의 함량 분석을 수행하였고, XRD를 이용하여 침전물과 단열충진광물을 동정하였다.

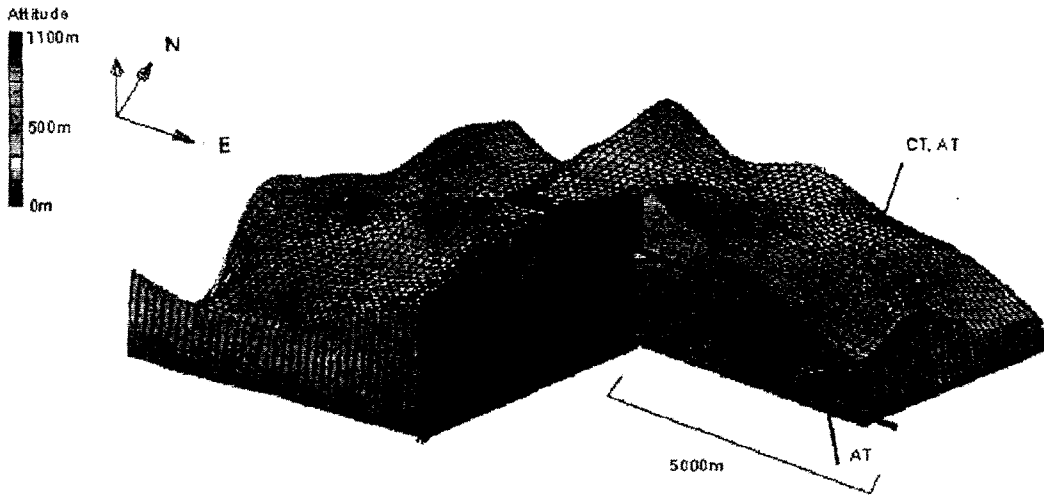


그림 1. 연구지역 지형 및 터널 현황도

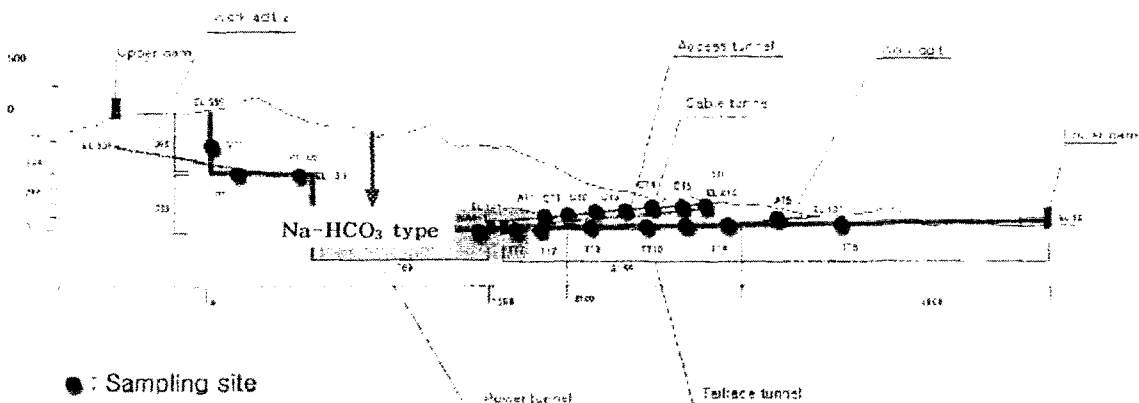
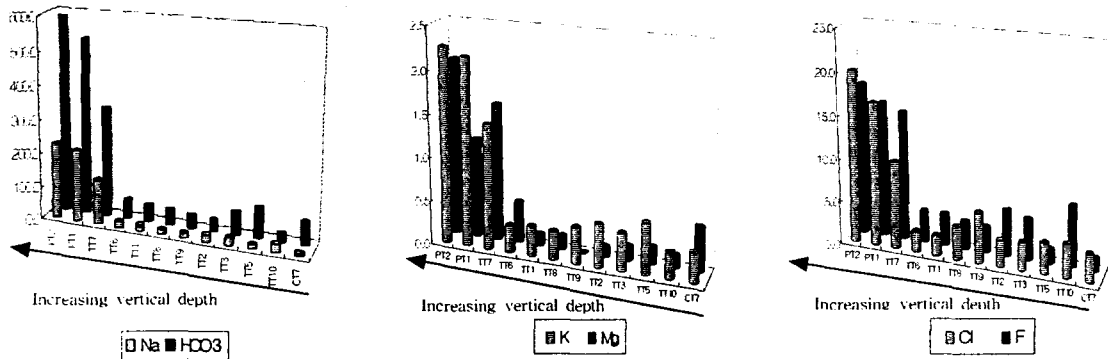


그림 2. 연구지역 수직단면도 및 시료채취 위치도

### 3. 지구화학적 해석 결과

연구 지역 터널 용출수의 수리지화학 특성은 인위적 오염 요인을 배제하고 지질 및 지형 특성만을 고려하여 해석할 수 있다.

지표면으로부터의 수직 깊이에 따른 용출수의 온도 증가율은 평균  $1.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (평균 편차 0.15)로 나타났다. Piper diagram을 이용하여 수리지화학 특성의 변화를 고찰한 결과, 수직 심도가 낮은 구간의  $\text{Ca-HCO}_3$  유형(예: CT3, CT4, CT5, CT6, TT5)으로부터  $\text{Ca-Na-HCO}_3$  유형을 거쳐 심부 구간(지표면으로부터의 수직 심도 640 m 이상)에서는 특징적으로  $\text{Na-HCO}_3$  유형(예: PT1, PT2, AT1, TT7)으로 변화됨을 확인하였다. 한편, 연구 지역 지하수의 수리지화학 특성은 TT7 지역(발전소로부터 거리 50 m, 수직 심도 640 m)과 TT6 지역(발전소로부터의 거리 150 m, 수직 심도 600 m)을 경계로 뚜렷히 구분되어진다 (표 1; 그림 2). 즉, 수직 심도가 증가함에 따른 이화학적 특성 진화가 점진적이지 않고 특정 위치를 경계로 급변하는 양상을 보인다. 특히, Na, Cl, F, K에서 큰 변화를 보이는데, 이



반응성(이동도)이 큰 원소들로서 서로간에 정(+)의 상관 관계를 보인다. 이러한 수리지 화학 특성 구분은 유의성(LSD <0.001) 해석에 의해서도 검증되었다.

그림 3. 지표로부터의 수직 깊이에 따른 용존 이온 농도 (mg/l) 변화 (각 시료의 위치는 그림 2 참조)

한편, 연구 지역의 지질은 비교적 균질한 단일 암상을 이루고 있으며 지하수 유동도 수직에 가까운 단열계에 의해 주도됨을 감안하여 보면, 이러한 비점진적인 변화는 두 유형 (Na-HCO<sub>3</sub> 및 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형)의 지하수가 서로 다른 수리계를 형성하고 있음을 지시하는 것으로 해석된다.

한편, 지점별 이온종 농도는 유출량(Q)과 주목할만한 상관성을 보이지는 않았다.

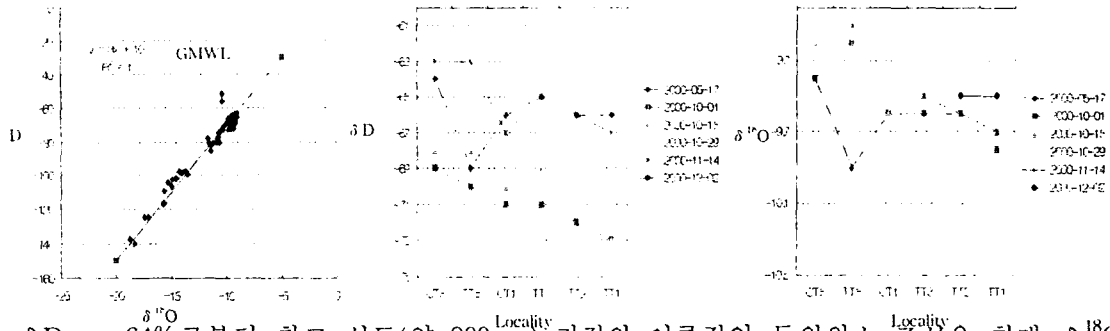
	Location	
	TT7의 심도(수직거리 640 m) 이상	TT6의 심도(수직거리 600 m) 이하
water type	Na-HCO <sub>3</sub>	Ca-Na-HCO <sub>3</sub>
Na	188.5 (131.2~223.3)	16.1 (7.9~24.3)
HCO <sub>3</sub>	477.0 (322.3~523.0)	50.7 (23.5~87.6)
K	2.0 (1.4~2.3)	0.4 (0.3~0.5)
Cl	15.6 (10.1~20.1)	3.5 (3.1~5.8)
F	16.3 (15.1~17.8)	3.8 (1.6~5.4)

표 1. 수직 심도에 의해 구분되는 두 유형 지하수의 용존 이온 평균 농도(mg/l)

#### 4. 동위원소 해석 결과

연구 지역 용출수의 산소 및 수소동위원소 자료에 의하면, 모두 순환수 기원으로 해석된다. 특히, 위에서 구분된 유형별 지하수는 동위원소 조성에 있어 뚜렷한 차이를 나타내었다. 산소 및 수소동위원소 조성의 평균값을 살펴보면, Na-HCO<sub>3</sub> 유형은 각각 -11.3‰(범위: -10.7~-11.7‰) 및 -78‰(범위: -74~-82‰)인 반면, Ca-Na-HCO<sub>3</sub> 유형은 -9.6‰(범위: -9.1~-9.8‰) 및 -66‰(범위: -63~-67‰) 이었다. 따라서, 동위원소 조성 역시 TT7 및 TT6 지역을 경계로 비점진적 변화를 보이면서 뚜렷이 구분된다.

각 시료 채취 지점의 지표면으로부터의 수직 심도 차이가 충전 고도의 차이를 반영한다고 가정하고 그 동안 알려진 동위원소 고도 효과(즉, -0.15~-0.25‰/100 m δ<sup>18</sup>O 및 -1~-4‰/100 m δD)를 적용하여 보면, 수직 심도가 가장 낮은(약 100 m) 지점의 δ<sup>18</sup>O = -9.4‰ 및



$\delta D = -64\%$ 로부터 최고 심도(약 900 m) 지점의 이론적인 동위원소 조성은 최대  $\delta^{18}O = -11.4\%$  및  $\delta D = -96\%$ 까지 낮아질 수 있다는 계산이 나온다. 그러나, 최고 심도 지점의 실제 동위원소 분석치는 그 보다 더 낮아  $\delta^{18}O = -12\%$  정도로 나타났다.

그림 4. 산소 및 수소 동위원소 분석 결과

따라서, 낮은 동위원소값을 갖는 Na-HCO<sub>3</sub> 유형의 지하수는 현재보다 더 높은 고도의 지역으로부터 충전되었거나 또는 그 기원이 상이한 것으로 생각된다.

동위원소 값의 계절적 변화를 살펴보면(그림 4), 7개월에 걸친 모니터링 기간 중 뚜렷한 계절적 변화를 보여주지 않았다. 이러한 불규칙적인 변화는 소위 'amount effect' 및 온도 효과 등이 중첩된 결과로 해석된다. 한편, 터널 용출수의 d 값(deuterium excess;  $\delta D - 8 \delta O$ )은 매우 다양하게 나타났다. 10월 1일과 15일에 채수한 시료의 경우에는 d 값은 10 미만(평균 5.7)으로서 다습한 공기의 느린 증발에 따른 구름 형성 과정을 시사한 반면, 다른 채수 시기의 d 값은 대체로 10 이상으로 나타나 건조한 공기로부터의 심한 비평형 조건에서의 빠른 증발과정을 지시하였다. 한편, 수질 유형별로 d 값의 유의한 차이는 나타나지 않았다. 그러나, d 값은 동일한 채수 시기 내에서는 거의 동일하지만 채수 시기가 달라짐에 따라 뚜렷이 변화됨을 유의할 필요가 있다. 따라서, 이 현상을 이용하면 지하수의 저류 시간에 관한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 용출수 내 용존 탄산염의  $\delta^{13}C$  값은 평균  $-10.32\%$ (범위:  $-7.29 \sim -11.84\%$ )이고 HCO<sub>3</sub> 함량 증가와 더불어 양(+)의 관계로 증가하는 양상을 보여주었다. 따라서, 연구 대상 지하수 내의 탄소의 기원은 대부분 토양 탄산염 또는 토양 이산화탄소로 해석된다.

## 5. 요약 및 결론

연구 지역 터널 용출수의 수리지구화학 특성은 Na-HCO<sub>3</sub> 유형과 Ca-Na-HCO<sub>3</sub> 유형으로 뚜렷히 구분된다. Ca-Na-HCO<sub>3</sub> 유형의 지하수는 수직 심도가 낮은 터널 구간에서 산출되며, 수직 절리 등의 구조선을 따라 비교적 짧은 시간 내에 짧은 유동경로를 따라 충전되어 지형(고도) 효과를 반영하고 있다. 반면, 수직 심도가 600-640 m 이상인 터널 구간에서 제한적으로 산출되는 Na-HCO<sub>3</sub> 유형의 지하수는 연구 지역 밖의 보다 높은 지역에서 충전되는 것으로 판단되며, 오랜 시간 심층 순환함으로써 높은 용존 이온 함량과 온도 및 낮은 산소 및 수소 동위원소 조성을 가지고 있다. 따라서, 연구 지역 터널 용출수는 수리적으로 상수, <sup>14</sup>C 동위원소 분석을 수행하고 있다.