

# 지하 동굴 유출지하수의 지구화학특성에 따른 미생물군의 분포 특성

권장순\*, 류지훈, 고용권

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*jskwon@kaeri.re.kr

## 1. 서론

그동안 국내 부존 암반지하수 및 유출지하수에 관한 연구는 주로 수량 확보 측면에서 이루어져 왔다. 특히, 수리지구화학적 특성과 오염에 관한 연구는 제한적으로 수행되었으며, 대부분 주요 용존 이온의 분포 및 거동 특성 해석과 물-암석반응 규명을 목적으로 연구가 진행되었다[1,2]. 하지만 근래 국가 지중 시설의 건설에 있어 지중 환경 변화의 관측과 향후 예측은 공공의 관심을 받고 있으며, 이에 따른 과학적인 접근과 해석이 요구되고 있다. 본 연구에서는 지중 시설 건설활동에 따른 유출지하수의 지구화학특성 및 그에 따른 생지구화학적 환경특성을 규명하기 위하여 부유/침전물 내 미생물 동정 및 분석을 실시하였다.

## 2. 본론

### 2.1 시료채취 및 전처리

지하수의 용존이온 분석 및 기타 지구화학적 측정/분석에 해당하는 내용은 그 내용의 보편성으로 본 지면에서는 생략하기로 하였다. 미생물분석에 있어 활용되는 부유/침전물 시료는 우선 완전 건조되지 않게 현장 상태로 원심분리용 튜브에 채취하여 분석전까지 냉동상태로 보관하였다. 이후 실험실 내 전처리에 있어서도 사용된 모든 기구들은 무균 제품 또는 멸균을 통하여 사용하였으며, 피펫 등 실험도구들은 클린 벤치에서 15 분 간 자외선 조사 후 사용을 실시하였다.

추출 및 원심분리를 통하여 DNA 추출을 실시하였으며, DNA 농도 및 염기서열 분석을 각각 Qubit fluorometer 및 3730xl DNA analyzer (Macrogen), ABI3730XL(Applied Biosystems)를 활용하여 실시하였다.

### 2.2 차세대 염기서열 분석법

2004년에 도입된 차세대 염기서열 분석법(Next-generation sequencing, NGS)은 대용량 염기서열 정보를 분석함에 있어 시료별 유전자 데이

터 획득량 및 장비별 처리 가능량에서 기존 기술 대비 우월성을 가지는 분석 방식으로 평가되고 있다. 특히 Sanger sequencing과 비교하면 시료별 획득 데이터량 측면에서 매우 유리하다. 본 실험에서 이용된 MiSeq은 v4 hyper variable의 모든 부분을 분석할 수 있고, 수 일의 짧은 시간 내에 분석이 가능하며, 기존의 pyrosequencing에 비하여 더 많은 서열을 동시에 분석할 수 있었다.

### 2.3 미생물 결과해석 유의사항

토양 또는 지하수에서 DNA 상태로 존재하는 미생물이 반드시 대사적으로 활발한 상태임을 의미하는 것은 아니며, DNA를 기반으로 분석된 미생물 다양성이 반드시 실제로 활동 중인 미생물의 다양성과 일치하지 않을 수도 있다. 또한 시료 내 특정 미생물 종, 즉 특정 종과 유사한 DNA 시퀀스가 발견되었다는 것은 해당 미생물의 존재와 활동 가능성을 의미하는 것으로서 주변 지하수화학에 미치는 미생물의 직접적인 영향을 평가하기에 한계가 다르므로 반드시 지하수화학 결과와 함께 해석이 이루어져야 한다. 따라서 지하수 내 미생물 군집의 변화를 비교분석하기 위해서는 해당 지하수에 대한 지속적인 지구화학적 조사와 함께 미생물 군집 모니터링이 필수적으로 수행되어야 한다.

### 2.4 지하수 지구화학

연구지역 지중 유출지하수는 건설활동에 따라 지하수위 하강과 더불어 지하수압 감소로 해당 지역이 해안지역에 위치하는 특성으로 염수의 유입이 진행되고(CAVE14-1), 특정구간의 이온교환반응 등과 같은 지구화학반응, 그라우팅 등과 같은 인위적인 활동으로 인하여 수질의 특성이 결정(CAVE14-6)되었다. 염수 유입 특성과 더불어 특히 유출지하수 중 최고 38 mg/L의 용존 Fe의 농도가 분석되었으며(CAVE14-3), 이는 연구부지 내 널리 산재되어 있는 황철석(pyrite)의 용해반응 결과로 사료된다. 또한 동굴 내 관로 및 집수정을 따라 발생한 적갈색의 부유/침전물의 경우 전함량분석 및 지구화학 모델링 결과 Fe-(oxy)hydroxide임을 유추할 수 있

었다. 구간별로 염기성 유출지하수가 산출되는 지역에서는 탄산염광물의 부유/침전물의 형태도 관찰되었다.

### 2.5 미생물 분석결과

염수의 유입 영향으로 가장 높은 전기전도도(EC) 및 Na, Cl, SO<sub>4</sub> 농도를 보이는 CAVE14-1 구역에서는 비교적 우세한(>14.7%) 황산염환원 박테리아(*Desulfobacteraceae*, *Desulfuromonas* 등)의 풍부도를 보였다. 그라우팅 등의 영향으로 강알칼리성 환경을 보여주는 CAVE14-5 및 CAVE14-6 구역에서는 기존 문헌 내 알칼리성 동굴에서 관찰되는 *Variovorax*가 각각 50.8% 및 81%로 분석되었다. 비교적 낮은 pH(6.8)와 높은 용존 Fe의 함량으로 특징되었던 CAVE14-3 구역은 철산화 박테리아(*Gallionellaceae* 13.8%, *Nitrosomonadaceae* 6.4%) 및 호산성 박테리아(*Holophagaceae* 5.1%, *Coxiella* 1.6%), 그리고 특별히 *Magnetospirillum* 1.7%의 존재와 관계가 있는 것으로 평가된다. pH 10 정도의 산도를 갖는 CAVE14-4 및 CAVE14-5 구역에서는 *Silanimonas*(각 4.2% 및 5.8%), *Erysipelothrix*(각 3% 및 2.2%)와 같은 호알칼리성 박테리아가 관찰되었다. 하지만 연구지역 내 유출 지하수 중 가장 높은 pH를 보이는 강알칼리성의 CAVE14-6에서는 호알칼리성 박테리아가 관찰되지 않았으며, 이는 해당 박테리아가 생존할 수 없는 정도의 극심한 환경의 조성 때문인 것으로 사료된다.

### 3. 결론

유출지하수 내 침전물의 지구화학분석 결과는 미생물 분석 결과와도 현장 환경에 따라 분류되는 유사성을 보였으며, 강한 염기 환경 하에서는 미생물의 존재 역시 감소함을 확인하였다. 특히 염수의 영향을 받고 있는 구간에서는 15% 정도의 황산염환원 미생물이 우세하고, 호염성 박테리아가 관측되었다. 상대적으로 낮은 pH 환경 내 고농도의 용존 Fe 함량이 나타나는 구간에서는 철산화, 황산화 미생물이 동정되었다.

해당 연구지역 미생물 분석결과를 통하여 해당 지층 환경에서 매우 다양한 미생물 군집이 나타나고 있음을 확인하였고, 건설활동에 따른 주위 지구화학적인 환경의 변화(특히 pH 및 염도)에 따라 미생물 군집의 조성이 매우 극적으로 변화되고 있음을 확인하였다. 이에 인간의 인위적 건설활동에 따른 지층 환경의 변화 및 향후 변동예측을 위하여 지속적

인 생지구화학적 모니터링이 필요함을 제안하는 바이다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(핵연료주기사업)입니다.

### 5. 참고문헌

- [1] S.R. Kim, S.T. Yun and G.T. Chae, "Hydrogeochemical characteristics of groundwater from the Youngcheon diversion tunnel: preliminary results", Proc. of Symp. Korea Inst. Mineral and Energy Resour. Eng. April 1998, 38-43 (1998).
- [2] S.T. Yun, Y.K. Koh, C.S. Kim and C.S. So, "Geochemistry of geothermal waters in Korea: environmental isotope and hydrochemical characteristics I. Bugok area", Econ. Environ. Geol., 31, 185-199 (1998).