

Existence and Characteristics of Microbial cells in the Bentonite to be used for a Buffer Material of High-Level Wastes

고준위폐기물 완충재로 사용되는 벤토나이트의 미생물의 존재 및 특성

Ji Young Lee, Seung Yeop Lee* , Min Hoon Baik and Jong Tae Jeong

Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

이지영, 이승엽*, 백민훈, 정종태

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received April 2, 2013 / Revised May 31, 2013 / Approved June 13, 2013)

There was a study for biological characteristics, except for physico-chemical and mineralogical properties, on the natural bentonite that is considered as a buffer material for the high-level radioactive waste disposal site. A bentonite slurry that was prepared from a local 'Gyeongju bentonite' in Korea was incubated in a serum bottle with nutrient media over 1 week and its stepwise change was observed with time. From the activated bentonite in the nutrient media, we can find a certain change of both solid and liquid phases. Some dark and fine sulfides began to be generated from dissolved sulfate solution, and 4 species of sulfate-reducing bacteria (SRB) were identified as living cells in samples that were periodically taken and incubated. These results show that sulfate-reducing (or metal-reducing) bacteria are adhering and existing in the powder of bentonite, suggesting that there may be a potential occurrence of long-term biogeochemical effects in and around the bentonite buffer in underground anoxic environmental conditions.

Key words: Bentonite, Sulfides, Sulfate-reducing bacteria, Biogeochemical effects

고준위방사성폐기물 처분장의 완충재로 고려되고 있는 자연산 벤토나이트에 대해서 기존의 물리·화학적 및 광물학적 성질 외에 생물학적 특성을 살펴보았다. 국내산 '경주벤토나이트'를 대상으로 만든 현탁액을 영양배지 세럼병에서 일주일 이상 숙성시키며 시간에 따른 벤토나이트의 변화를 관찰하였다. 영양배지에서 활성화된 벤토나이트는 고체 시료뿐만 아니라 용액도 함께 변화였다. 용존황산염 수용액으로부터 검은색의 미립자 황화물이 생성되기 시작하였으며, 시료를 채취하여 배양한 결과 4 종류의 황산염환원박테리아(SRB)가 자체 생존하고 있음이 확인되었다. 이러한 결과는 벤토나이트 분말시료 내에 황산염환원(혹은 금속환원)박테리아가 고착 및 서식하고 있음을 말해주는 것으로, 이는 지하의 환원환경 조건하에서 완충재 내외부에 장기적으로 생지화학적 영향이 발현될 가능성이 있음을 의미한다.

중심단어 : 벤토나이트, 황화물, 황산염환원박테리아, 생지화학적 영향

*Corresponding Author. E-mail: seungylee@kaeri.re.kr, Tel: +82.42.868.4735

1. 서론

우리나라 에너지 공급의 30% 이상을 담당하고 있는 원자력 발전은 에너지 생산 과정에서 필연적으로 방사성 폐기물이 발생되는데, 환경 보전과 폐기물 장기관리 측면에서 방사성을 가진 폐기물을 보다 안전하게 처분해야 하는 숙제를 안고 있다. 현재 고준위방사성폐기물은 처리하는 방법에 있어서 결정된 바는 없으나, 처리 과정의 최종 산물은 일정한 두께를 가진 금속용기 안에 넣어 지하심부에 처분하는 것으로 계획되어 있다 [1]. 방사성폐기물을 보다 안전하게 처분하기 위해서 다중방벽(multi-layers)으로 방어하고 있으며, 벤토나이트가 이러한 방벽 중의 하나를 구성하고 있다. 처분장의 완충재(자연산 벤토나이트)는 지진과 같은 강한 충격을 흡수하고 폐기물과 지하수의 접촉을 최대한 억제하는 역할을 한다 [2,3]. 또한, 폐기물로부터 용출되어 나올 수 있는 방사성 핵종들이 생태계로 확산되는 것을 일정기간 저지하는 목적으로도 사용된다 [3,4]. 이와 같이 고준위폐기물처분장에 사용되는 벤토나이트는 다양한 용도와 활용을 가지는 매우 중요한 물질 중의 하나이다. 현재까지 이러한 벤토나이트에 대해 국내 외적으로 많은 연구가 수행되어 왔으며, 특히 물리적인 완충 능력, 특성 및 방사성 핵종과의 물리·화학적 반응 등에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다 [2-6]. 이 외에도, 최근 새롭게 밝혀진 연구결과에 의하면 벤토나이트 입자 공간 사이에 다양한 종류의 미생물들이 생존하고 있다는 사실이 보고되고 있다 [7,8]. 이러한 최근의 발표는 향후 벤토나이트에 대한 생물학적 특성 조사 및 검토가 반드시 필요함을 말해주고 있다.

지하 환경에서 생존 가능한 미생물들은 그 종류가 다양하며 각기 특성에 따라 지하수의 산화/환원 변화, 방사성 핵종 수차 및 화학적 거동 변화, 용기 부식 및 생광물화 작용 등 다양한 생지화학적 반응을 일으키고 있다 [8-12]. 따라서, 지하수 및 암반에 생존하는 미생물 뿐만 아니라 벤토나이트 자체 미생물 생존 여부도 처분 관점에서 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 이러한 미생물 중에서 특히 관심의 대상이 되는 반응미생물로는 철(Fe^{3+})을 환원시키는 철환원박테리아(IRB; iron-reducing bacteria)와 황산염(SO_4^{2-})을 환원시키는 황산염환원박테리아(SRB; sulfate reducing bacteria)가 있다. 이들 박테리아들은 지하 심부 환경에서 핵종 산화/환원 변환 및 금속용기 부식 등에 깊이 관여되어 있는 미생물들이다 [8-12].

본 연구에서는 국내 처분장 완충재로 고려되고 있는 국내산 벤토나이트에 대해서 생물학적 활성 및 변질 특성

등을 조사하고, 그에 따른 환경적 의미를 고찰하였다. 이를 통해 얻은 국내 벤토나이트 완충재에 대한 생물학적 연구 자료는 향후 방사성폐기물 지하처분 설계 및 안전성평가 등에 있어서 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 시료 준비

실험에 사용된 벤토나이트는 경주시 양남면 벤토나이트 광산에서 채취한 것으로써, 과거 본 연구원에서 다양한 압축벤토나이트 제조, 물성 측정 및 핵종 확산 실험 등을 수행했던 것과 동일한 벤토나이트이다 [3,6,13]. 본 논문에서 우리는 이 벤토나이트를 이후 “경주벤토나이트”라 칭한다. 경주벤토나이트는 Ca-type 벤토나이트로써 주 화학 조성은 SiO_2 56.8%, Al_2O_3 20.0%, F_2O_3 6.0% 및 소량의 기타 성분 등으로 구성되어 있다 [6]. 층상구조(layer structure)를 갖는 점토질 광물로 구성된 벤토나이트는 층간(interlayer) 사이에 Ca^{2+} 양이온 및 소량의 Na^+ 양이온들이 자리잡고 있으며, 본 시료의 경우 양이온교환능(cation exchange capacity, CEC)이 57.6 meq/100 g이다 [3,6]. 경주벤토나이트의 분말 형태를 확대한 주사전자현미경 이미지는 Fig. 1과 같다. 판상구조(platy structure)의 몬토릴로나이트(montmorillonite)가 주 구성 광물이며 입자 크기는 수 μm 이하로써, 종이처럼 구겨진 입자 형태를 보여주는 것이 특징이다.

시료 준비는 벤토나이트 분말과 멸균된 3차 증류수를 고액비(solid/solution ratio)를 달리하여 섞어 하루정도 교

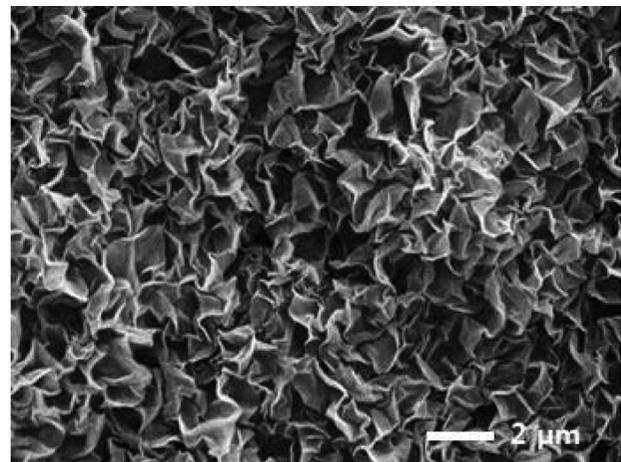


Fig. 1. A SEM image of powder surfaces of Gyeongju bentonite.

반시키고 125 ml 세럼병(serum bottle)에 옮겨 담은 후, 준비된 벤토나이트 현탁액(bentonite slurry)의 용존산소를 제거할 목적으로 순수 질소가스(N_2 gas, >99.9%)로 40분 이상 purging하였다(Fig. 2). 그리고, 다른 미생물에 의한 오염을 막기 위해 무균실험대(clean bench)에서 모든 작업을 수행하였다.

2.2 실험 방법

벤토나이트 시료가 생물학적 활성을 가지고 있는지 알아보기 위해 미생물 영양배지(nutrient media)를 만들어 준비된 벤토나이트 현탁액과 반응시켰다. 영양배지는 두 가지 종류(SRB 및 IRB)로 만들었는데, 구체적인 조성은 오종민 외(2010)의 논문에서 기술되어 있다 [14]. 본 연구에서는 벤토나이트의 생물학적 활성도를 높이기 위해 기본 영양배지 성분 외에 SRB의 경우 5% Fe(II) ammonium sulfate 6 ml를 추가로 넣어주었다. IRB의 경우에는 기본 영양배지에 Fe(III)-citrate 15 mM과 sodium lactate 25 mM을 추가하였다.

벤토나이트 자생미생물(indigenous bacteria) 활성화 실험을 위해 IRB 혹은 SRB 영양배지가 담긴 100 ml 세럼병에 준비된 벤토나이트 현탁액을 10 ml씩 넣고 항온기에서 30℃ 조건으로 숙성시켰다. 일정 시간(대략 일주일)이 경과한 후, 벤토나이트로부터 1차 배양된 현탁액을 주사기를 이용하여 일정량 추출하고 다시 새롭게 농화(enrichment) 배양하는 과정을 계속적으로 5번 이상 반복하였다. 모든 실험은 무균실험대에서 수행하였고 실험에 사용된 세럼병은 사전에 압멸균기(JISICO)로 121℃, 15분 멸균 처리하였으며, 각종 시약 주입시 0.2 μ m 필터를 사용함으로써 외부미생물에 의한 오염 가능성을 차단하였다.

2.3 분석 방법

경주벤토나이트의 자생박테리아 동정을 위해 배양된 미생물의 DNA를 추출하여 16S rRNA 분석을 실시하였다. DNA 추출을 위해 각 영양배지 배양액으로부터 10 ml의 용액 시료를 채취 및 원심분리 후, MoBio사의 Soil genomic DNA extraction kit를 이용하여 DNA를 추출하

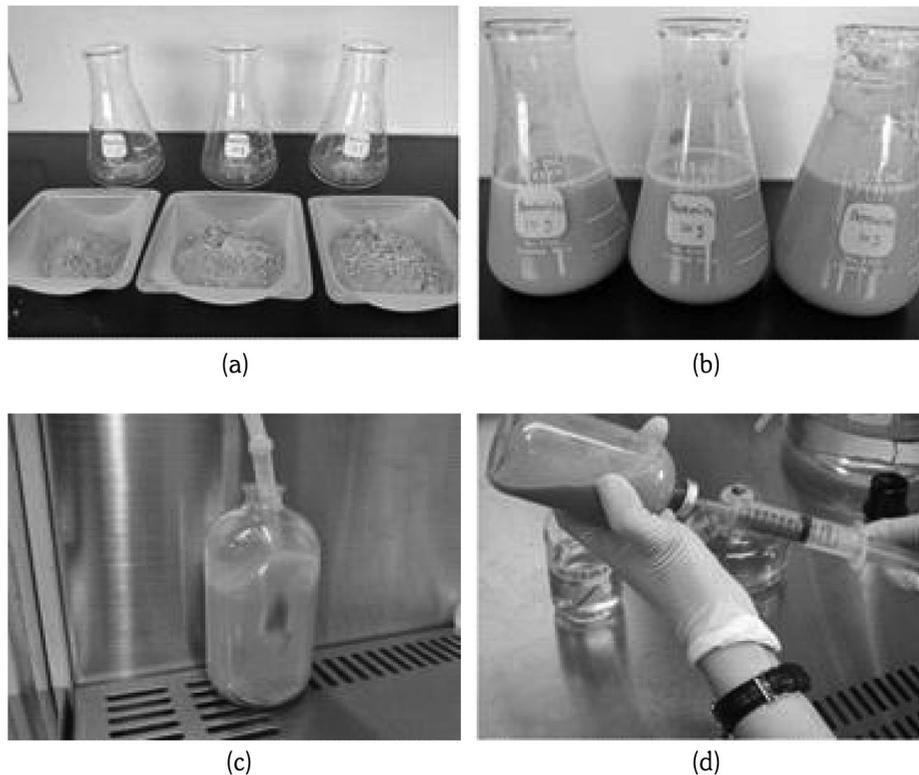


Fig. 2. Photographs showing a stepwise preparation procedure for the microbial cultivation from the raw Gyeongju bentonite. (a) Several containers with different amounts of bentonite powder, (b) bentonite slurries with different ratios of water to bentonite, (c) purging the bentonite slurry with pure N_2 gas, and (d) extracting some quantity of the bentonite slurry using a needle and syringe for a subsequent cultivation.

였다. 추출된 DNA는 0.8%(w/v) Agarose gel에서 전기영동을 실시하였고, 추출된 DNA양이 각 샘플 당 10 ng 미만이고 총 DNA양이 1 µg 미만인 것을 확인하였다.

미생물군집을 분석하기 위해 가스크래마토그래피(GC) clamp가 붙은 518F와 786R primer set을 사용하여 미생물의 16S rRNA gene을 증합효소연쇄반응(PCR; polymerase chain reaction)으로 증폭하여 변성 구배 젤 전기영동(DGGE; denaturing gradient gel electrophoresis)을 실시하였다. PCR은 95°C에서 5분간 초기 변성화시킨 후 95°C에서 30초간 denaturing, 55°C에서 30초간 annealing시킨 후 72°C에서 30초간 extension 과정을 35회 반복하였고, 72°C에서 5분간 최종 extension을 실시하였다.

DGGE를 분석하기 위하여 DGGE-PCR 산물 10 µl를 20V로 10분간 pre-running 후 250V로 8시간 전기영동을 실시하였다. 전기영동 후, SYBR green으로 염색하여 관찰하였다. 확인된 총 4개의 밴드를 잘라서 0.1X Tris-EDTA 버퍼에 담근 후 4°C에서 12시간 이상 DNA를 녹여냈다. 잘라낸 밴드로부터 sequence를 분석하기 위하여 DGGE-PCR 반응에 사용한 518F, 786R primer set을 사용하였다. 밴드에서 녹여낸 DNA의 16S rRNA를 PCR로 증폭하였다. PCR 증폭은 앞서 수행한 방법과 동일하게 수행하였다. PCR 반응 산물은 1.5%(w/v) Agarose gel에서 확인하였다.

미생물의 DNA 추출 및 분석과정은 충북대학교 미생물학과 환경미생물학 연구실의 장비를 이용하고 일반 분석 절차를 따라 수행하였다.

3. 실험결과 및 논의

3.1 벤토나이트 색상 변화

분말 상태의 경주벤토나이트를 물과 혼합하여 현탁액을 만든 후 영양배지에서 시간이 경과함에 따라 변화되는 벤토나이트의 특징을 관찰하였다. 초기 옅은 노란색을 띠던 용액이 점차 무색으로 변하였고, SRB 영양배지의 경우 약 7일 이후에는 완전히 검은색으로 변하였다(Fig. 3). Fig. 3(e)는 자생미생물의 활성화에 의한 검은색의 침전물을 보여주고 있다. 이러한 검은색 침전물은 벤토나이트를 피복하거나 혼합 형태로 공존하고 있으며, 아주 작은 입자들은 부유하여 용액의 색을 검게 만들었다. 초기 반응한 벤토나이트 색은 옅은 회색 빛깔을 나타내었으나 벤토나이트가

생물학적으로 숙성되면서 점점 짙은 회색 혹은 검은색으로 변질되었다. 영양배지의 종류(SRB 혹은 IRB 영양배지)에 따라 벤토나이트 색상 변화가 달랐는데, SRB 영양배지의 경우 벤토나이트 뿐만 아니라 포화용액도 검게 변하였다(Fig. 3). IRB 영양배지의 경우 벤토나이트 일부가 검은색 내지는 짙은 회색빛으로 변하였으나 용액의 색은 옅은 노란색에서 투명한 색으로 바뀌었다(Fig. 4). 이는 IRB 영양배지에 황산염(SO₄²⁻)이 존재하지 않아 황화물(sulfides) 형성이 불가능했기 때문인 것으로 사료된다.

우리나라 지하수의 황산염(SO₄²⁻)의 농도는 지역, 깊이 별 혹은 지질 특성(geological characters)에 따라 차이가 있지만, 일반적인 평균 농도는 수 십 ppm(mg/L) 이상으로 지하수에 상당량 용존되어 있다 [15,16]. 그리고, 유흥온천이나 바닷가와 가까운 지역의 지하수는 황산염의 농도가 이보다 훨씬 높다.

벤토나이트 및 용액의 색이 변하는 일차적인 원인은 벤토나이트 내 자생미생물의 성장 및 증식 때문인 것으로 판단된다. 즉, 본 실험에서 관찰되는 벤토나이트 색 변화는 서식 미생물의 활성화에 따른 생지화학적 반응에 의해 환원성 무기생성물이 만들어지기 때문이다 [17]. 알루미늄 규산염(aluminosilicates)의 판상구조 형태를 갖는 벤토나이트는 미세공극을 많이 가지고 있고 이러한 입자간 공극 사이에 나노크기의 미생물들이 고착 및 서식할 수 있는 환경이 조성될 수 있다. 최근 연구결과에 의하면 유럽에서 방사성폐기물 완충재로 고려하고 있는 'MX-80 벤토나이트' 내에서 SRB 박테리아중의 하나인 *D. africanus*가 서식하고 있음이 확인 및 발표되었다 [7].

과거 연구결과에 의하면 환원조건에서 미생물에 의해 만들어지는 검은색의 생성물들은 주로 황화광물이며, 대표적으로 맥키나와이트(mackinawite, FeS)가 있다 [17,18]. 이 물질은 물 속의 황산염이 환원되면서 용존철과 결합하는 과정에서 다량 합성된다. 지하수에는 철 및 망간 등의 양이온성 금속이온뿐만 아니라 황산염과 같은 음이온성 이온들이 풍부하게 존재한다. 또한, 지표 토양 및 암석을 구성하는 광물로부터 금속이온 및 황산염 등이 계속해서 용해되어 나오기 때문에 일반 지하수에는 이러한 성분들이 풍부히 존재한다 [8]. 일반적으로, 심부 환원 환경에서 생존하는 박테리아들은 지하수 및 주변 광물로부터 금속이온 혹은 황산염 등을 활용하여 에너지를 얻고 성장한다.

본 실험에서 관찰한 시간에 따른 경주벤토나이트의 색상 변화는 자생미생물들의 활동에 의해 검은색의 무기 황

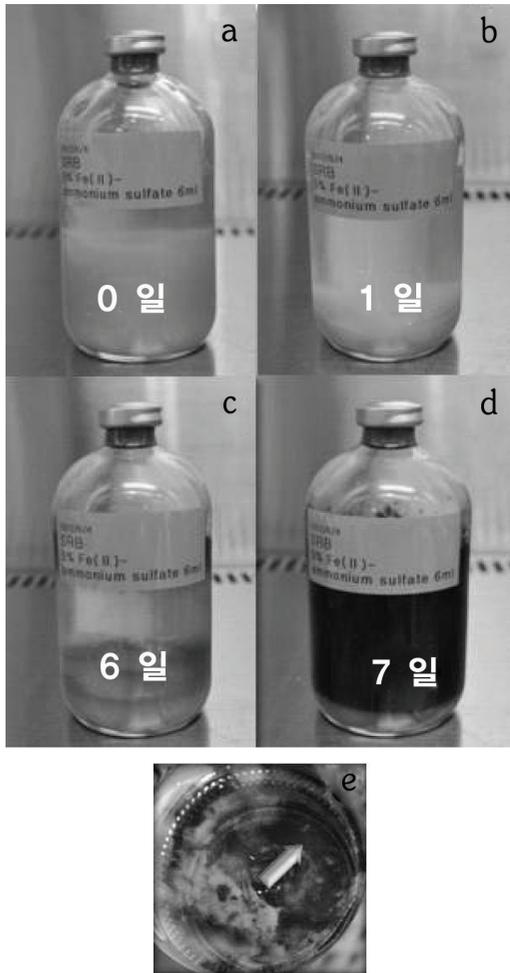


Fig. 3. A stepwise color change of a serum bottle that contained bentonite slurry and SRB growth nutrients. The periods of incubation for the bentonite slurry were (a) 0 day, (b) 1 day, (c) 6 days, and (d) 7 days, respectively. (e) A photograph of the bentonite slurry deposited at the bottom of the bottle having a newly-developed black sulfides. An arrow indicates the precipitated black sulfide solids.

화물이 합성 및 성장하면서 발생하는 변화로 관측된다. 미생물기원 무기 황화물은 나노크기의 입자를 가지기 때문에 성장하면서 침전물로 가라앉을 뿐만 아니라 용액상에 부유하기도 한다 [17].

3.2 미생물 유전자 분석

1 주일 이상 영양배지 내에서 활성화된 벤토나이트 현탁액으로부터 일부 용액을 추출하여 미생물의 존재 여부 및 종류를 파악하고자 하였다. 일차 추출된 용액을 다시 순

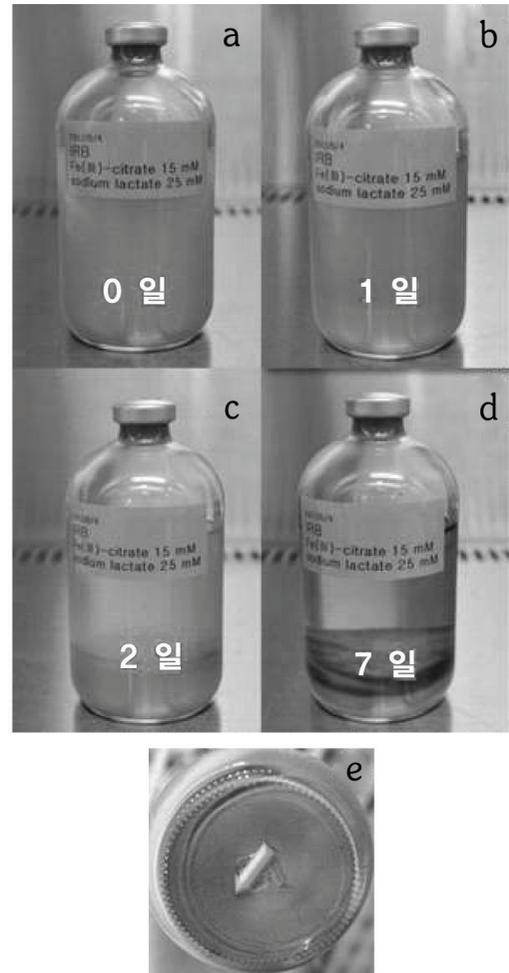


Fig. 4. A stepwise color change of a serum bottle that contained bentonite slurry and IRB growth nutrients. The periods of incubation for the bentonite slurry were (a) 0 day, (b) 1 day, (c) 2 days, and (d) 7 days, respectively. (e) A photograph of the bentonite slurry deposited at the bottom of the bottle having a newly-developed dark gray sediment. An arrow indicates the precipitated dark gray solids.

수하게 배양한 후 미생물의 유전자 분석을 실시하였고, 미생물의 DNA를 추출하여 PCR을 이용하여 16S rRNA 분석을 실시하였다. PCR-DGGE로부터 염기서열을 이용하여 SRB 영양염류 조건의 미생물 계통수를 분석한 결과 1, 2, 3, 4번이 우세한 것으로 나타났다(Fig. 5). 밴드 분석 결과 identity값이 거의 90% 이상의 근연관계를 보이는 4 종류의 미생물 균주들이 확인되었으며, 최종적으로 황산염환원미생물(SRB)로 밝혀졌다(Table 1). 하지만, IRB 영양염류 조건에서 추출한 미생물들은 철환원미생물(IRB)이 아닌 것으로 확인되었으며, 이는 전혀 다른 종류의 혐기성미

Table 1. Sequencing results for the microbe of Kyongju bentonite

| Band No. | Identified bacteria | GenBank No. | Similarity |
|----------|---|-------------|------------|
| 1 | Clostridium mayombeii DSM 6539(T) | FR733682 | 91.765 |
| 2 | Clostridium aminovalericum DSM 1283(T) | X73436 | 96.400 |
| 3 | Clostridium populeti ATCC 35295(T) | X71853 | 96.032 |
| 4 | Desulfosporosinus auripigmenti DSM 13351(T) | AJ493051 | 98.438 |

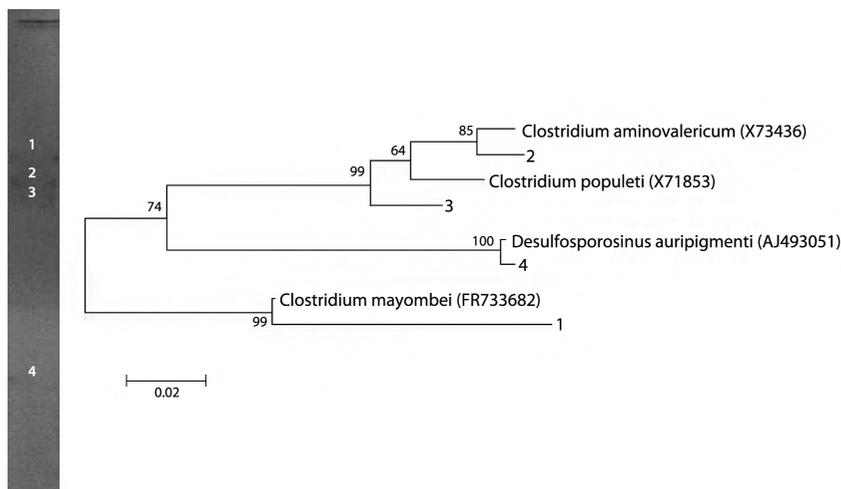


Fig. 5. phylogenetic tree and DGGE bands based on 16S rRNA gene analysis for the SRB bacteria enriched from the Gyeongju bentonite.

생물들이 SRB와 같이 벤토나이트 내에서 공존하고 있는 것으로 생각된다.

본 결과로부터 알 수 있는 사실은 국내 경주벤토나이트에는 많은 종류의 미생물들이 고착 및 서식하고 있으며, 특히 황산염환원박테리아가 4 종류 이상 존재한다는 사실을 알 수 있었다. 지금까지 국내 벤토나이트에 SRB 박테리아의 존재 여부를 구체적으로 연구하거나 밝힌 논문은 없었다. 벤토나이트 내 황산염환원(혹은 금속환원) 박테리아의 존재, 종류 및 특징 등은 반드시 검토해야 할 사항중의 하나이다. 그 이유로는 이러한 박테리아에 의해 지하수와 접촉하는 벤토나이트의 광물/화학적 특성이 변할 수 있고 더 나아가 이동하는 핵종들의 산화수 변화 및 접촉 금속용기의 부식 등과 깊은 관련성이 있기 때문이다 [8-12].

하지만, 고준위 방사성폐기물이 위치하게 될 지하심부 처분환경은 고온(<math><100^{\circ}\text{C}</math>), 고압(>1.6 g/cm³) 및 방사선(1

Gy/hr)이 있는 극한환경(severe environments)으로 미생물이 생존하기에 쉽지 않은 조건이다. 따라서, 추후 실험을 통해 경주벤토나이트 미생물이 지하처분장과 유사한 환경 조건에서도 생존 가능한지의 여부 및 기타 새로운 반응 특성 등을 구체적으로 밝히는 실험을 계획 중이다.

4. 결론

국내 방사성폐기물처분장의 완충재로 사용되는 벤토나이트에 대한 기존의 물성, 광물학적 및 화학적 특성 외에 별도로 생물학적 특성을 조사하였다. 본 연구에서는 국내 산출 경주벤토나이트를 대상으로 자생미생물이 생존하고 있는지의 여부 및 종류를 파악하는 기초실험을 수행하였다. 이를 위해 자연산 벤토나이트 분말을 현탁액으로 만들어 환원조건에서 오랫동안 숙성시킨 결과 벤토나이트

및 수용액에서의 색상 변화를 관찰할 수 있었다. SRB 영양 배지 조건에서 검은색의 침전물 및 부유물이 생성되었으며 용존황산염이 황화물로 바뀌었다. 미생물의 존재 여부를 확인하기 위해 유전자 분석을 실시하였고, 벤토나이트 내에 4 종류 이상의 SRB가 생존하고 있음을 알 수 있었다. IRB 영양배지 조건에서도 미생물에 의한 벤토나이트의 시간적 변화를 관찰하였지만, 확인된 박테리아는 IRB 박테리아가 아닌 다른 종류의 일반 혐기성미생물로 분류되었다. 향후 과제로는 벤토나이트 자생미생물이 처분장의 극한환경 하에서 생존할 수 있는지의 여부 및 추후 발생 가능한 생지화학적 작용 등을 확인 및 검증하는 후속연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J.Y. Lee, D.K. Cho, H.J. Choi and J.W. Choi, "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels", J. Nucl. Sci. Technol., 44(12), pp. 1565-1573 (2007).
- [2] R. Pusch and T. Carlsson, "The physical state of Na-smectite used as barrier component", Eng. Geol. 21, pp. 257-265 (1985).
- [3] J.O. Lee, W.J. Cho and C.H. Kang, "Effect of Dry Density on Technetium Diffusion in Compacted Bentonite", Environ. Eng. Res., 7(4), pp. 219-225 (2002).
- [4] M.H. Baik, S.Y. Lee, J.K. Lee, S.S. Kim, C.K. Park and J.W. Choi, "Review and Complication of Data on Radionuclide Migration and Retardation for the Performance Assessment of a HLW Repository in Korea", Nucl. Eng. Technol., 40(7), pp. 593-606 (2008).
- [5] J.O. Lee, K.J. Lee and W.J. Cho, "Sorption and Diffusion of I-125 and Sr-90 in a Mixture of Bentonite and Crushed Granite Backfill of a Radioactive Waste Repository", Radiochim. Acta, 76, pp. 143-151 (1997).
- [6] J.O. Lee and W.J. Cho, "Determination of Water Content in Compacted Bentonite using a Hygrometer and Its Application", J. Korean Radioact. Waste Soc., 7(2), pp. 101-107 (2009).
- [7] P. Masurat, S. Eriksson and K. Pedersen, "Evidence of Indigenous Sulphate-Reducing Bacteria in Commercial Wyoming Bentonite MX-80", Appl. Clay Sci., 47, pp. 51-57 (2010).
- [8] P. Masurat, S. Eriksson and K. Pedersen, "Microbial Sulphide Production in Compacted Wyoming Bentonite MX-80 under In Situ Conditions Relevant to a Repository for High-Level Radioactive Waste", Appl. Clay Sci., 47, pp. 58-64 (2010).
- [9] S.Y. Lee, M.H. Baik and J.K. Song, "Removal Characteristics of Dissolved Uranium by *Shewanella p.* and Application to Radioactive Waste Disposal", Econ. Environ. Geol., 42(5), pp. 471-477 (2009).
- [10] S.Y. Lee, M.H. Baik, Y. Roh and J.M. Oh, "The effects of Fe-Bearing Minerals on the Interaction between Underground Dissimilatory Metal-Reducing Bacteria and Dissolved Uranium", J. Geol. Soc. Korea, 46(4), pp. 357-366 (2010).
- [11] S.Y. Lee, J.M. Oh and M.H. Baik, "Interaction between Selenium and Bacterium and Mineralogical Characteristics of Biotreated Selenium", J. Miner. Soc. Korea, 24(3), pp. 217-224 (2011).
- [12] S.Y. Lee, M.H. Baik and J.W. Choi, "Biogenic Formation and Growth of Uraninite (UO₂)", Environ. Sci. Technol., 44(22), pp. 8409-8414 (2010).
- [13] S.P. Yim, J.H. Lee, H.J. Choi, J.W. Choi and C.K. Lee, "An Investigation of Diffusion of Iodide Ion in Compacted Bentonite Containing Ag₂O", J. Korean Radioact. Waste Soc., 9(1), pp. 33-40 (2011).
- [14] J.M. Oh, S.Y. Lee, M.H. Baik and Y. Roh, "Characterization of Uranium Removal and Mineralization by Bacteria in Deep Underground, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)", J. Miner. Soc. Korea, 23(2), pp. 107-115 (2010).
- [15] C.H. Jeong, "Mineral-Water Interaction and Hydrogeochemistry in the Samkwang Mine Area, Korea", Geochem. J., 35, pp. 1-12 (2001).
- [16] C.H. Jeong, H.J. Kim and S.Y. Lee, "Hydrochem-

istry and Genesis of CO₂-Rich Springs from Mesozoic Granitoids and Their Adjacent Rocks in South Korea", *Geochem. J.*, 39, pp. 517-530 (2005).

- [17] S.Y. Lee, J.M. Oh, M.H. Baik and Y.J. Lee, "Change of Oxidation/Reduction Potential of Solution by Metal-Reducing Bacteria and Roles of Biosynthesized Mackinawite", *J. Miner. Soc. Korea*, 24(4), pp. 279-287 (2011).
- [18] S.Y. Lee, J.M. Oh and M.H. Baik, "Uranium Removal by *D. baculatum* and Effects of Trace Metals", *J. Miner. Soc. Korea*, 24(2), pp. 83-90 (2011).