

# 미생물 배설물을 이용한 휴 처리 기술



**장 일 한**  
 한국건설기술연구원 수석연구원  
 ilhanchang@kict.re.kr

## 1. 머리말

토양은 인류 문명의 토대로써 그 위에서 태초

의 인류가 태동하였으며, 수렵과 농경의 선사 문명을 꽃피우고 지속적인 발전을 통해 오늘의 현대 사회에 이르게 되었다. 대부분의 사관(史觀)은 인류 문명의 시작을 물을 다스리는 치수(治水)에서 비롯되었다고 보고 있다. 물 없이 생존이 불가능한 인간의 특성상, 대부분의 인류 문명은 해안 또는 하천주변을 중심으로 발달하였고, 오늘날에도 대부분의 세계 주요 도시들은 “Waterfront City”의 성격을 띠고 있다.

하천 및 해안 주변 지반은 퇴적토층인 경우가



그림 1. 고대 및 현대 문명

## 학술/기술기사

많으며, 물과 지하수가 인접한 지질학적 특성상 연약한 지반 층인 경우가 많다. 따라서 인류의 문명은 이러한 “쓸모없는 땅”을 유용하게 만들기 위한 도전의 연속이었으며, 고대나 현대에서 지반공학의 가장 큰 과제는 ‘가장 경제적이면서도 효율적으로 지반의 특성(특히 강도)을 개량’ 시키는 것이다.

일반적으로 흙(지반)의 강도를 개량시키는 방법은 크게 두 가지로 분류된다. 물리적 처리를 통해 흙의 밀도(다짐도)를 증진시키거나, 흙 속의 물을 제거(배수) 시키는 방법이 있고, 화학적 방법으로는 첨가제를 주입 또는 혼합함으로써 고결 작용을 통해 흙의 강도를 직접적으로 증진시킬 수 있다. 지반 개량을 위한 화학적 처리 방법으로써 토목 및 건설 분야에서 가장 널리 사용되어 온 건설 재료가 시멘트(ordinary cement)이다. 시멘트는 흙 속의 물과 반응하여 수화(hydrate) 되면서 C-S-H gel 또는 C-H crystal을 형성하여 흙 입자간 결합력을 효과적으로 증진시키는 재료이다.

하지만 최근 여러 환경 문제(특히 이산화탄소 배출)들로 인해 시멘트의 이용과 활용 제한에 대한 필요성이 대두되고 있음. 시멘트 자체는 생산 과정에서 전 세계 이산화탄소 배출량의 5%를 배출하고 있으며(British Petroleum 2008), 지반 주입 시 고염기(pH 12 이상)성으로 인해 지하수

오염 및 생태계를 교란시키는 부작용을 갖고 있다. 따라서 수자원 및 수생태계 보호를 위해 수변 및 친수 공간 개발을 위한 지반 개량 및 차수벽 시공 시 향후 시멘트의 이용이 규제될 것으로 예상되고 있다(서울시 2007, ‘하천생태복원 기본지침’).

## 2. 친환경 흙 처리 기술 개발 현황

### 2.1 국외 현황

해외에서는 1990년대 후반부터 바이오폴리머(biopolymer)를 이용한 흙 처리에 대한 연구를 시작하였다. Martin 등 (1996)은 팽창성이 좋은 바이오폴리머인 잔탄검을 이용하여 지중연속벽 굴착 시의 벤토나이트 슬러리를 대체할 수 있는 공법을 제시하였으며, Orts 등 (2007)은 바이오폴리머를 이용한 표층 안정화 기술의 대략적 개념과 적용 가능한 분야를 제시하였다. 흙의 내구성 증진을 위한 기술은 현재 textile이나 geosynthetic를 이용하는 물리적인 방법에 크게 의존하고 있는 실정이다. 이는 흙의 구조에 변화는 주지 못하고 외부적으로 흙을 유실시킬 수 있는 바람과 물의 접근을 차단하는 목적으로, 흙의 경관을 해칠 뿐만 아니라, 표층 식생환경에

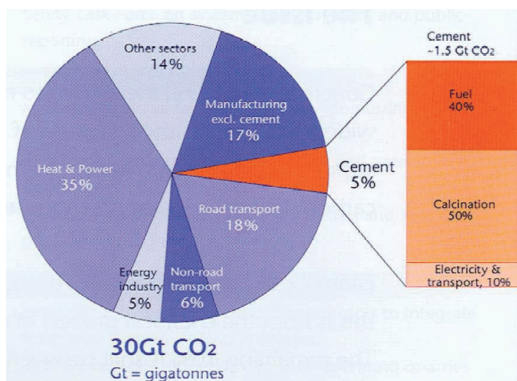


그림 2. 시멘트 관련 이산화탄소 배출과 어독성 실험에 의한 어류 폐사

도 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

전반적으로 국외의 바이오폴리머를 이용한 흙 처리 관련 연구들은 전체적으로 도입기 수준에 머무르고 있으며, 흙의 침식 및 내구성 증진 방안에 관련된 연구 분야에서도 획기적인 대안이 제시되고 있지 않은 상황이다.

## 2.2 국내 현황

시멘트 및 기타 화학제품의 사용을 대체할 수 있는 친환경 지반개량 재료 및 공법 개발의 일환으로 Chang and Cho (2012) 등은 미생물의 부산물인 친환경 바이오폴리머를 이용한 흙 처리 및 강도증진 방법을 제안하였다. 하지만 섬유(fiber) 계열의 고친수성 바이오폴리머인 베타글루칸은 물과 만났을 때 흡습으로 인해 팽창된 fiber들이 흙 속에서 인장 균열을 발생시켜 전체적으로 흙 입자 간 결합을 약화시켜 결국 혼합토의 구조를 상실하게 된다.

전반적으로 흙의 물에 대한 내구성 증진을 위한 국내 기술 현황은 전체적으로 해외와 큰 차이가 없는 실정이다. 주로 토목섬유 또는 콘크리트 구조물을 이용하여 외부의 위험요소를 차단하거나, 흙 상부의 응력 조건을 증가시킴으로써 물리적 안정화 시키는 방법을 주로 채택하고 있다.

## 3. 미생물 배설물을 이용한 흙 처리

### 3.1 미생물 배설물 - 바이오폴리머

바이오폴리머(biopolymer)란 쉽게 설명하여 미생물 등의 유기체들이 합성하는 고분자 탄화수소 중합체이다. 가령 예를 들어, *Saccharomyces cerevisiae*는 포도당(glucose)을 섭취하여 포도당 분자들 간 beta- 결합을 형성하여 고분자 사슬인 글루칸(glucan)을 생성한다. 사슬(chain) 계열의 고친수성 바이오폴리머는 물과 만났을 때 흡습으로 인해 팽창된 fiber들이 흙 속에서 인장 균열을 발생시켜 전체적으로 흙 입자 간 결합을 약화시켜 결국 혼합토의 구조를 상실하게 된다.

이와 다르게, 고분자 사슬을 형성하지 않고, 단량체(monomer)들이 서로 이온(ionic-) 또는 수소결합(hydrogen bonding)에 의해 젤(gel)을 형성하는 바이오폴리머 종이 있다. 젤화 바이오폴리머들의 응집 원리는 재료 마다 다르나 크게 1) 매개 이온을 통한 전기화학적 결합, 2) 용해 후 탈수로 인한 재배열, 3) 온도 차이로 인한 열적젤화(thermo-gelation) 등으로 구분될 수 있다. 일반적으로 열적젤화 바이오폴리머는 고온 상태에서는 물에 용해되는 저점성의 특징을 갖고 있으나 낮은 온도, 특히 40도 이하에서는 급격한 젤화를 통해 고점성의 젤을 형성하게 된다. 특히

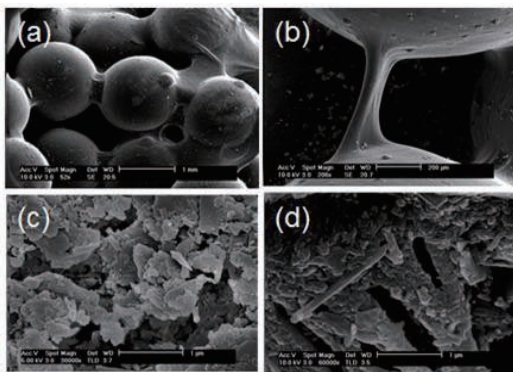
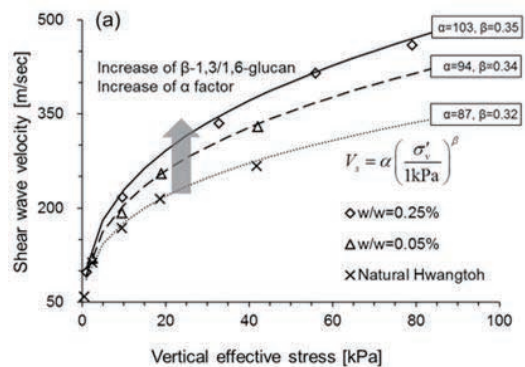


그림 3. 바이오폴리머-흙 혼합토 SEM images와 전단파속도 거동



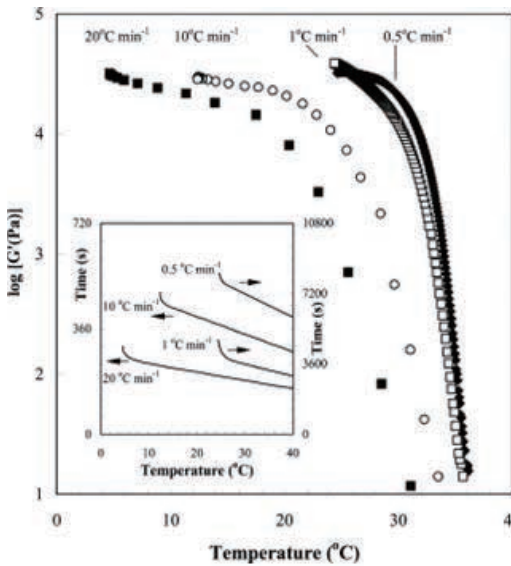


그림 4. 온도에 따른 열적 젤화 바이오폴리머의 점성률(전단강도) 변화(Labropoulos et al 2002)

는 낮은 온도에서는 물에 녹지 않는 특징이 있다 (Labropoulos et al 2002). 열적 바이오폴리머의 가장 큰 특징은 젤화가 될 때 그림 5와 같이 촘촘한 matrix를 형성한다는 점이다. 그물(mesh/net) 타입의 매트릭스는 매우 단단한 구조를 이루고 있고, 그 사이에 입자(particulate material)가 위치하면 매우 견고한 구조를 이룰 수 있다.

### 3.2 열적 젤화 바이오폴리머를 이용한 흙 처리

Agar gum은 Red Algae에서 생산되는 바이오폴리머로써 일반적으로 두 가지의 성분으로 이루어져 있다. 하나는 Agarose라 불리는 젤을 형성하는 다당류이며, 다른 하나는 Agaropectin이라 불리는 젤화를 촉진시키는 폴리머로 구성된다. 이 둘은 서로 상호 작용을 통해 젤을 형성하게 되는데 85도 이상에서 Agarose와 Agaropectin은 서로 해

한 점은, 이런 열적 젤화 바이오

폴리

머

는

낮은 온도에서는 물에 녹지 않는 특징이 있다 (Labropoulos et al 2002). 열적 바이오폴리머의 가장 큰 특징은 젤화가 될 때 그림 5와 같이 촘촘한 matrix를 형성한다는 점이다. 그물(mesh/net) 타입의 매트릭스는 매우 단단한 구조를 이루고 있고, 그 사이에 입자(particulate material)가 위치하면 매우 견고한 구조를 이룰 수 있다.

수 있다.

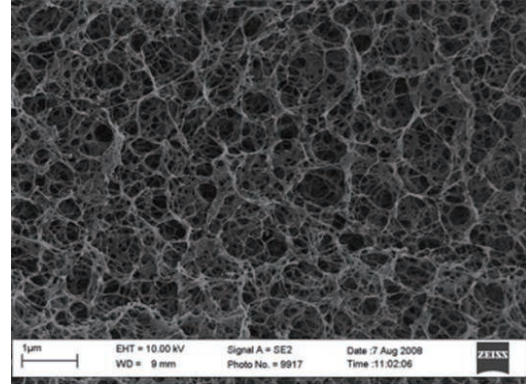


그림 5. 열적 젤화 바이오폴리머의 젤 형상 (SEM image)

Agaropectin이 응결핵 역할을 하며 Agarose를 응결시켜 전체적으로 젤 매트릭스를 형성하게 된다.

Gellan gum(젤란검)은 미생물의 부산물로 생성되는 다당류이다. Gellan gum은 단위 고분자끼리 서로 축합반응을 통해 젤 매트릭스를 형성한다는 점이다. Gellam은 표면이 음전하를 띠고 있어 일반적으로 알칼리금속 또는 알칼리토금속과 같은 양이온들을 첨가해주면 더욱 견고한 젤 매트릭스를 형성하는 특징이 있다.

열적 젤화 바이오폴리머들은 일반적으로 70~80도 이상에서 해리가 되고 냉각되면서 40도 아래로 온도가 떨어질 때 젤을 형성하는 특징을 갖고 있다. 따라서 열적 젤화 바이오폴리머 - 흙 혼합물을 조성하기 위해서는 우선 100도 온도 조건에서 충분히 용해된 바이오폴리머 수용액

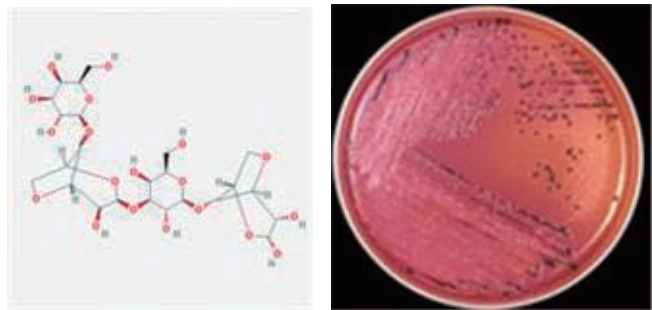


그림 6. Agaropectin의 분자구조와 Red Algae 배양

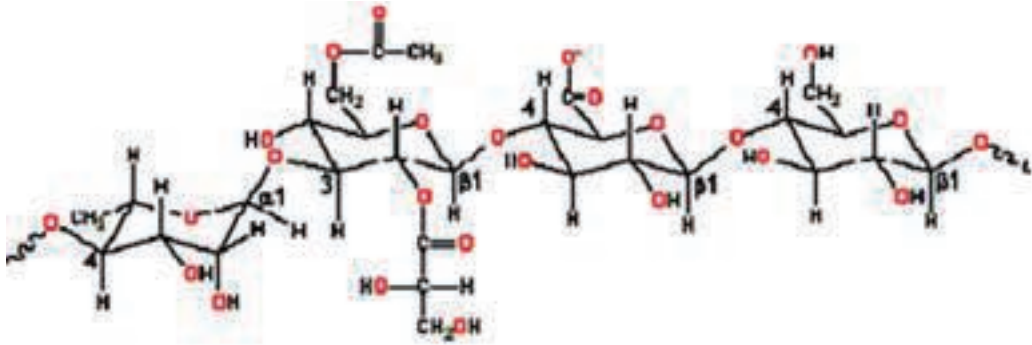


그림 7. Gellan gum의 기본 단위 분자구조

을 조성한 후, 흙과 혼합한 후 냉각을 시켜야 한다. 이 때 혼합으로 인한 급속한 온도 저하를 방지하기 위해, 흙도 미리 가열하여 충분한 작업성을 확보해야 한다.

열적 젤화 바이오폴리머의 특성상, 상온 상태에서는 아무리 물로 포화된 상태에서도 어느 정도의 강도가 발현되는 특성이 있다. 실제로 열적 젤화 바이오폴리머 두 종을 각각 일반흙(황토)과 모래(주문진 표준사)와 혼합하여 시편을 제작한 후 해당 시편을 28일 간 포화(침수) 시킨 후 불구

속 압축강도를 측정해보면 강도가 자연상태 흙보다 매우 높음을 알 수 있다. 특히, 모래의 경우 불구속압축강도가 거의 0 인 반면, 열적젤화 바이오폴리머로 처리한 모래는 압축강도가 최대 250 kPa까지 발현됨을 확인할 수 있다. 이는 바이오폴리머 처리가 흙의 내구성 및 강도 증진에 큰 효과가 있음을 확인할 수 있다. 흥미로운 사실은 공기건조와 달리 초기에 형성된 강도가 28일까지 거의 비슷하게 유지되고 있다는 사실이다. 이는 혼합토 시편 제작 후 바로 침수시킬 때

• Specimen preparation and curing



• Uniaxial compressive test



그림 8. 열적젤화 바이오폴리머 혼합 시편 제작 및 불구속일축압축강도 측정 예시

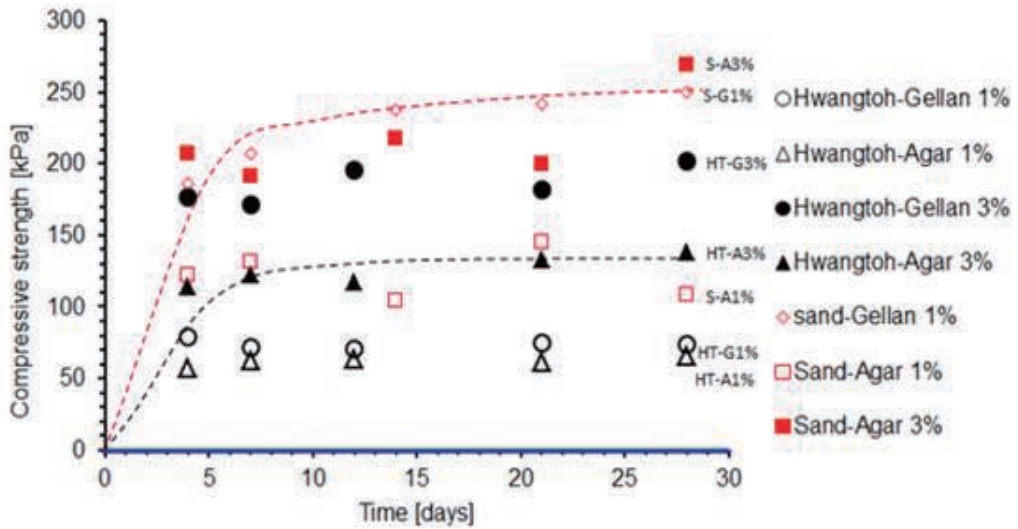


그림 9. Agar gum 및 Gellan gum 혼합토의 수중 보관 시 일축압축 강도

급속 냉각 효과로 인해 바로 젤 매트릭스(gel-matrix)를 형성하고, 수중 상태에서 유지되기 때문에 건조로 인한 단위중량 증가 효과가 없이 초기 상태를 유지하고 있음을 보여준다. 이는 항상성 유지 기능이 요구되는 지반 처리 분야에서 매우 높은 적용성을 가질 수 있음을 나타낸다.

#### 4. 맺음말

바이오폴리머를 이용한 흙 처리 분야는 국내는 물론 국외에서도 비교적 새로운 최신 연구 분야로서, 지반공학 외에 생명공학, 재료공학에 대한 이해와 학문 분야간 융합을 요구로 하고 있는 분야이다. 현재까지의 연구들이 주로 원천기술 및 기본 물성 파악, 바이오폴리머 재료 및 대상 미생물 발굴에 국한되고 있는 이유는 기존의 건설재료 및 공법에 비해 아직은 미생물 및 그 부산물들을 이용한 지반 처리 방법이 경제성이 낮기 때문이다. 하지만, 최근 급부상하고 있는 친

환경 건설의 패러다임에 발맞춰 다양한 응용 분야가 파생될 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 친환경성이 강조되는 하천 및 친수 공간에서의 적용은 근시일내에 바로 적용할 수 있는 분야로 판단된다. 그러므로 국내 하천 분야에 대한 적용을 위한 지반, 생명, 재료 공학 분야와 하천관련 전문가들 간의 융·복합 연구 및 상호교류 활성화가 시급하다고 판단된다. 특히 바이오폴리머의 공학적 응용 분야는 국내·외 간 기술 격차가 극히 작기 때문에 지금이야말로 국내의 기술력으로 세계를 선도할 수 있는 입지를 구축할 수 있는 최적기라 감히 제안하고 이 글을 마치고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수중 지반의 침식 저항 향상 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 🌊

## 참고문헌

1. 서울특별시, 2007, '하천생태복원 기본지침'
2. British Petroleum 2008, 'BP Review of Energt 2007'
3. Chang, I. and Cho, G.C., 2012, "Strengthening of Korean residual soil with beta-1,3/1,6-glucan biopolymer", *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 30, pp. 30-3.
4. Labropoulos, K.C., Niesz, D.E., Danforth, S.C., and Kevrekidis, P.G., 2002, "Dynamic rheology of agar gels: theory and experiments. Part II: gelation behavior of agar sols and fitting of a theoretical rheological model", *Carbohydrate Polymers*, Vol 50, No. 4, pp. 407-415.
5. Martin, G.R., Yen, T.F., and Karimi, S. 1996, "Application of biopolymer technology in silty soil matrices to form impervious barriers", *7<sup>th</sup> Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Geomechanics in a Changing World*, pp. 814-819.
6. Orts, W.J, Roa-Espinosa, A., Sojka, R.E., Glenn, G.M., Imam, S.H., Erlacher, K., and Pedersen, J.S., 2007, "Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agriculture, construction, and military applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 19, No. 1, pp. 59-66.
7. van de Berg, L., Rosenberg, Y., van Boekel, M.A.J.S., Rosenberg, M., and van de Velde, F., 2009, "Microstructural features of composite whey protein/polysaccharide gels characterized at different length scales", *Food Hydrocolloids*, Vol. 23, No. 5, pp. 1288-1298.
8. Wang, J., Wang, Z, Gao, J., Wang, L., Yang, Z., Kong, D., and Yang, Z., 2009, "Incorporation of supramolecular hydrogels into agarose hydrogels—a potential drug delivery carrier", *Journal of Materials Chemistry*, Vol 19, pp. 7892-7896.