

미생물 균체의 주입을 통한 토양의 투수계수 감소

Permeability Reduction of Soils by Biomass Injection

송 영 우*¹
Song, Young-Woo

김 건 하*²
Kim, Geon-Ha

구 동 영*³
Ku, Dong-Young

Abstract

When microorganism is injected into porous medium such as soils, biomass is retained in the pore. Soil pore size and shape are varied from the initial condition as a result of biofilm formation which makes hydraulic conductivity reduced and friction rate between soil aggregates increased. In this research, hydraulic conductivity reduction was measured after microorganism are inoculated and cultured with synthetic substrate and nutrient. In addition, this research evaluated the applicability of biomass-soil mixture to the field condition as an alternative cover material in landfill by measuring hydraulic conductivity change after repetitive freeze-thaw cycles.

Hydraulic conductivity of silty soil decreased by approximately 1/50 after biomass inoculation and cultivation. Biofilm attached on soil aggregates is resistant to acidic or basic condition. After repetitive freeze-thaw cycles, however, hydraulic conductivity increase implies that biomass clogging can be impaired.

요 지

박테리아를 토양과 같은 다공성 매질에 주입시키고 적절한 기질과 영양분을 공급시키면 박테리아는 매질의 표면에 부착하여 성장하며 그 결과 공극의 크기가 감소하여 매질의 투수계수가 감소되고 입자간 마찰계수가 증가한다. 본 연구는 투수계수가 비교적 큰 모래와 화강풍화토에 박테리아를 접종, 배양한 후 투수계수의 변화를 측정하였으며, 배양된 바이오필름의 내화학적 및 온도변화에 대한 내구성 실험을 통해 대응 차수재로의 가능성을 평가하였다. 화강풍화토에 박테리아를 접종, 배양한 후 투수계수는 초기치와 비교하

*1 정희원, 한남대학교 공과대학 토목·환경공학과 교수

*2 한남대학교 공과대학 토목·환경공학과 조교수

*3 한남대학교 대학원 토목·환경공학과 석사과정

여 약 1/50 정도의 감소를 나타냈고, 산성 또는 염기성용액의 침투 이후에도 투수계수의 급격한 증가는 나타나지 않았다. 그러나 반복적인 동결-융해후 투수계수가 증가해 바이오필름으로 인한 공극의 폐색이 손상될 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Hydraulic conductivity, Biofilm, Landfill, Alternative cover material.

1. 서론

산업의 발달과 인구 증가에 따라 발생하는 많은 산업 및 도시 폐기물의 효과적인 처리를 위해 매년 막대한 예산이 소요되고 있다. 이러한 폐기물의 최종 처리는 대부분 매립에 의존하게 되므로 매립 후 침출수로 인해 2차적인 환경오염이 발생되지 않도록 처리되어야 한다. 일반적으로 폐기물 위생매립장에는 매립 폐기물로부터 흘러나온 침출수가 주변 지반 및 지하수층으로 이동하는 것을 방지하기 위하여 차수재를 설치하게 된다. 따라서 매립지내 침출수의 유출과 지하수의 오염을 방지할 수 있는 위생적인 매립지 건설을 위해서는 효과적이며 경제성이 우수한 차수재를 선택해야 한다. 국내에서 주로 사용되고 있는 차수재는 지오멤브레인, 점토 차수재 및 혼합 차수재 등 몇 종에 국한되어 있다. 그러나 지오멤브레인은 불완전하게 포설되었을 경우 자체 복원력이 없기 때문에 침출수의 누수를 방지할 수 없고, 폐기물중 유기물 분해 및 수분량의 변화 등으로 발생하는 부등침하로 인한 손상을 반드시 고려해야 하는 단점이 있다. 점토 차수재의 경우 균열 등에 의한 차폐성이 문제가 될 수 있고, 혼합 차수재의 경우는 혼합재료의 함량결정과 환경적 안정성에 문제가 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 기존 차수재의 단점 보완과 외국에서 개발된 다양한 차수재의 보급 및 국내 지반 여건을 고려한 경제적인 대용 차수재의 개발이 필요한 실정이다.

현재 국내에서 개발중인 차수재로는 기존 지오멤브레인의 물성 및 접합성을 개선시킨 고성능 고분자 매립재료, 플라이애쉬, 제철 폐기물, 하수 슬러지 등의 산업폐기물을 재활용한 복토재, 차수재 등이 있다. 최근 외국에서는 폐기물 매립장에 사용 가능한 대용 차수재로서 바이오필름의 사용 가능성에 대한 연구들이 진행 중에 있다. Dennis와 Turner(1998)는 전체 중량의 17%에 해당하는 kaolinite를 섞어 투수계수를 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/s로 감소시킨 후 박테리아를 접종·배양하여 투수계수를 본래 값보다 1/1000 정도 감소시켰고, 바이오필름을 형성한 시료에 염류용액, 산성용액, 염기성 용액을 침투시켜 흡과 화학용액과의 화학반응으로 인해 발생할 수 있는 투수계수의 증가가 없음을 관찰하였다. 그리고 습윤·건조 시험 후 바이오필름 집합체가 손상되어 투수성이 증가했으나 영양분의 재공급을 통해 안정된 투수계수 값을 회복할 수 있음을 증명하여, 바이오필름으로 처리한 토양이 폐기물 바닥 차수재로 사용할 수 있음을 제시하였다.

바이오필름이란 박테리아가 다공성 매질에 흡착되어 성장하는 동안 주요 성분이 다당류로 구성된 점착성 물질(slime)인 EPS(Extracellular Polymeric Substances)를 생성해 다른 무기 미립자들과 함께 퇴적되어 형성한 집합체를 말하며, 낮은 투수성, 큰 비표면적, 강한 친수성 등의 특징을 나타낸다(Taylor, 1990). 바이오필름의 물리적·화학적·생물학적 특성은 주요 성분인 미생물

과 EPS 그리고 바이오 필름이 완성되었을 때의 환경에 의존하는데, 특히 바이오필름의 물리적 특성은 바이오필름 중 유기탄소(organic carbon)의 50~90%를 차지하는 EPS에 의해 크게 좌우된다. 이런 EPS는 바이오필름에 중요한 역할을 하는데, 바이오필름을 구성하는 박테리아와 기층간의 상호작용에 영향을 주며, 바이오필름을 보호하는 역할을 한다(Characklis와 Marshall, 1990). 바이오필름은 이런 EPS성분으로 인해 유체 전단력과 같은 힘에 의해 변형되었을 때 빠르게 회복하는 점·탄성체의 표면으로 되어있어 유체의 마찰저항을 증가시키고, 시료의 투수계수를 감소시킨다.

본 연구에서는 화강풍화토의 투수계수를 감소시키기 위해 벤토나이트 또는 시멘트 등과 같은 혼합재를 사용한 기존 차수재와는 달리, 박테리아를 화강풍화토와 혼합하여 배양한 뒤 토양의 투수계수 변화를 관찰하고 이를 통하여 바이오필름으로 처리된 토양의 차수재 사용 가능성에 대하여 알아보았다.

2. 연구 배경

미생물은 수중 환경에서 대부분 기층 표면에 견고하게 부착하여 생장과 증식을 반복한다. 바이오필름이란 표면에 부착된 박테리아와 그들의 신진 대사 분비물인 EPS 그리고 또 다른 무기 미립자들의 퇴적에 의해 형성된 Fig. 1과 같은 집합체를 말하며, 토양 표면에서의 퇴적과정은 다음과 같다. 즉 박테리아는 액상(liquid phase)에서 토양 표면까지 이동하는 동안 토양 표면에 흡착하거나 이탈하며 필름을 형성한다. 흡착된 세포들은 영양분을 이용하여 성장하며 세포 개체 수를 증가시키고, EPS를 생성하여 퇴적을 증가시켜 바이오필름을 형성하게 된다. 이런 박테리아의 성장에 따른 간극의 폐쇄, 그리고 투수성의 감소에 대한 연구 결과는 다수 보고된 바가 있는데, Shaw 등

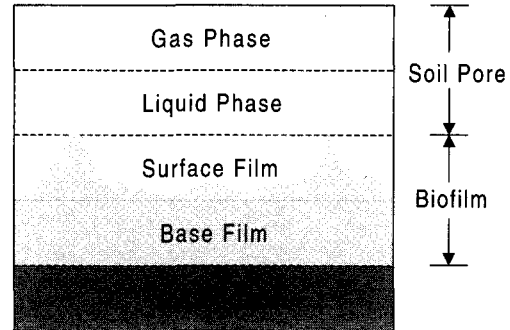


Fig. 1 Biofilm System
(modified from Characklis and Marshall, 1990)

(1985)은 직경 90 μm 인 유리구슬을 직경 1cm, 길이 5cm인 유리관에 균일하게 채운 후 투수시험을 실시하였다. 활성화된 박테리아를 주입했을 경우 시료의 투수계수는 1/100 정도의 감소를 나타냈고, 바이오필름이 형성된 시료에 살균제를 침투시켜 바이오필름 속에 있는 세포들을 소멸시켰으나 시료의 투수계수는 변하지 않았다. Stoodley 등 (1994)은 직경 500 μm 인 유리구슬을 3mm 유리관에 채운 후, 바이오필름을 형성시켰을 때의 유속과 전단강도를 측정하였다. 실험 결과 유속은 유리관 중간 부분에서 가장 빨랐으며 전단강도는 약 5배 정도 증가했음을 관찰하였는데, 이것을 통하여 바이오필름의 퇴적이 유속과 전단강도에 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있었다.

이전의 연구들은 모래나 유리구슬 등을 이용하여 바이오필름이 공극을 폐색시킴에 따라 일어나는 투수계수의 감소와 전단강도 또는 마찰계수의 증가에 초점을 두어 왔기 때문에, 이를 현장도에 적용하여 차수막을 만들기 위해 토양을 개량시키는 방법으로써 바이오필름을 사용한 구체적인 시도는 없었다. 따라서 본 연구는 위생매립장 주변 토사를 이용하여 바이오필름을 생성시킨 후 차수재료 또는 복토재료의 사용 가능성을 조사하였으며, 차수재나 복토재로 장기간 사용 시 발생할 수 있는 환경의 변화 즉, 오염물질의 유입, 동결·

Table. 1 Basic Property of Poorly Graded Sand Used for the Test

Basic Property	Test Method	Test Result
D ₅₀ Grain Size	KS F2309	0.63 (mm)
Liquid Limit	KS F2303	30.0 (%)
Plastic Limit	KS F2303	24.3 (%)
Plasticity Index	KS F2303	5.8 (%)
Specific Gravity	KS F2308	2.67
Optimum Moisture Content	KS F2312	15.75 (%)
Maximum Dry Unit Weight	KS F2312	1.68 (t/m ³)

용해 과정 등에 의한 투수성의 변화를 관찰함으로써 바이오필름으로 처리한 토사의 차수재료 사용에 대해 평가하고자 하였다.

이오필름이 형성된 시료의 물리·화학적 특성을 실험하는데 사용하였다. 화강풍화토의 기본 물성값은 Table.1에 나타나 있다.

3. 실험 방법

3.1 토양

본 연구에서는 모래와 화강풍화토를 사용해 시험하였다. 모래는 박테리아 접종 후의 투수계수 변화와 바이오필름의 생성 및 형태 관찰 실험에 이용했으며, 입경이 40번 체를 통과하고 60번 체에 남은 250~420 μ m인 것을 사용하였다. 체분석 시험 KS F2309에 따라 실험한 모래와 화강풍화토의 입도분포곡선은 Fig. 2로, 이때 모래의 균등계수는 1.58, 곡률계수는 1.03, D₅₀은 0.47mm이었다. 화강풍화토는 D 위생매립장에 반입된 토사로 바이오필름 형성에 따른 투수계수 변화와 바

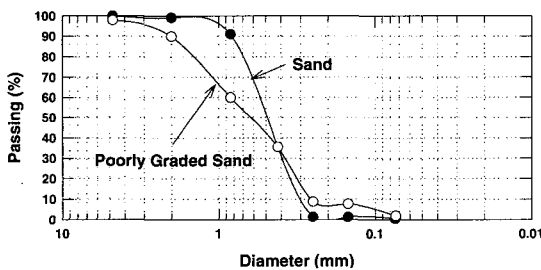


Fig. 2 Grain-Size Distribution Curve of Soils

3.2 박테리아

시험에 사용된 박테리아는 Azotobacter chroococcum(KCTC 2700)이다. 이 박테리아는 호기성 질소 고정 세균으로, 생장에 필요한 pH 범위는 5.5~8.5로 최적 pH는 7.6이다(Stainer 외, 1986). Fig. 3은 박테리아의 최적 성장온도를 예측하기 위해 배양온도를 각각 10 $^{\circ}$ C, 20 $^{\circ}$ C, 30 $^{\circ}$ C로 유지하여 일정 시간마다 측정된 증식곡선이다. 세균 세포가 성장하면 탁도를 변화시키므로, 분광광도계를 사용하여 600nm 부근의 투광도를 측정하여 증식곡선을 작성하였다. 실험 결과 박테리아는

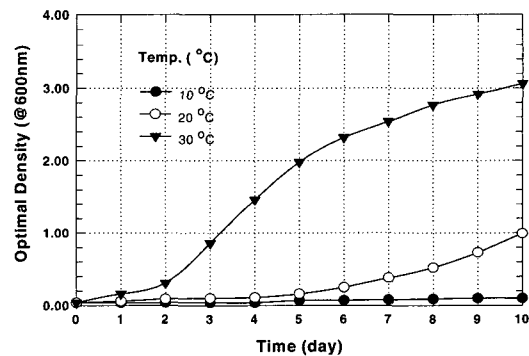


Fig. 3 Temperature Effect on Bacterial Growth vs. Time

30°C에서는 생장이 활발하였으나, 20°C에서는 생장이 느리게 진행되었다. 따라서 토양에 접종한 후의 배양 실험은 25°C 이상에서 수행하였다.

3.3 배양

배지의 성분은 KH_2PO_4 200mg, K_2HPO_4 800mg, MgSO_4 200mg, CaSO_4 100mg, 미소량의 FeSO_4 와 Na_2MoO_4 , Yeast extract 500mg, Mannitol 20g 등을 증류수 1 l 에 혼합하여 제조하였다. 배지 분말은 증류수와 잘 섞이도록 저어주고 heater를 사용하여 완전히 녹였으며, 완전히 녹은 배지의 pH는 pH Meter를 이용하여 산성인 경우 1N NaOH로, 염기성인 경우 1N HCl을 섞어 7.6으로 조정하였다. 영양분 용액에 존재하는 모든 미생물을 완전히 사멸시키거나 제거하기 위해 배양액을 고압멸균기(autoclave)에 넣고, 121°C의 온도에서 1.5kgf/cm²의 압력으로 15분 동안 가압하여 멸균하였다. 이렇게 만든 액체배지에 박테리아를 접종하여 30°C 배양기에서 3일 동안 성장시켜 다짐시험에 사용하였다. Fig. 4는 박테리아 배양 과정을 나타낸다. 배양이 끝난 박테리아 혼합액은 시료에 배합하기 전에 평판 계수법을 이용하여 다음과 같은 방법으로 박테리아 수를 측정하였다(Atlas와 Bartha, 1992). 박테리아를 영양분 용액에 접종하여 성장시킨 후 시료에 배합하기 전

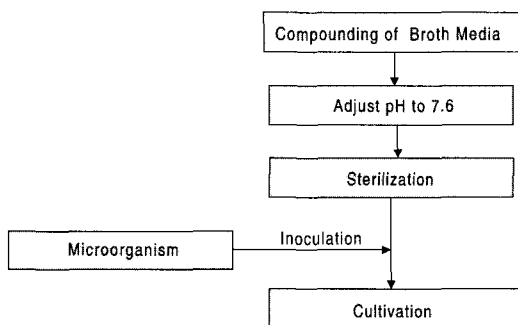


Fig. 4 Procedure for Bacterial Culture

의 용액을 취해 10배로 희석시켜 삼각 유리봉을 이용하여 고체배지에 도말하고, 30°C의 배양기에서 3일 정도 배양해 고체배지 상에 나타난 집락(colony)을 측정하였다. 실험 결과 모래와 화강풍화토의 투수시험에 이용된 박테리아의 농도는 각각 3×10^7 cell/ml과 $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7$ cell/ml이었다.

3.4 실험

박테리아를 접종한 각각의 시료에 대해 수행한 실험은 Table 2에 나타나 있다. Test 1에서는 박테리아를 접종한 모래의 투수계수 변화와 전자주사현미경을 이용하여 바이오필름이 형성된 시료의 단면을 관찰하였다. 모래의 투수시험은 정수위 투수시험으로 직경 10cm, 높이 12.4cm인 강성벽 원형 몰드를 사용하였다. 실험은 3×10^7 cell/ml 농도의 박테리아를 6 l의 영양분 용액에 접종하여 단위중량이 1.6kg/cm³인 모래에 침투시켰고, 시료를 통과한 혼합액은 펌프를 사용하여 다시 저수조로 흘러 보내 10일동안 재순환시켰다. Fig. 5는 실험에 사용된 모래의 투수시험 장치이다.

Test 2에서는 20일 동안 영양분을 공급했을 경우 박테리아 생장에 따른 시료의 투수계수 변화를 시간에 따라 측정하여 바이오필름이 시료의 투수계수에 미치는 영향을 관찰하였다. 박테리아로 배합한 시료의 다짐 시험은 직경 10cm, 높이 12.7cm

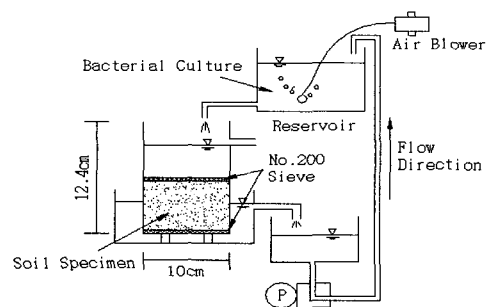


Fig. 5 Constant Head Permeability Test Apparatus

Table. 2 Test Program and Concentration of Bacteria Used for the Test

Test	Specimen	Test Program			
		Bacteria of Concentration (cell/ml)	Compaction Test	Hydraulic Conductivity Test	
1	Sand		3×10^7	-	permeated with nutrient solution followed by tap water (1 Specimen)
2	SP (Poorly Graded Sand)	Plate Count Method	$5 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7$	Standard Compaction Test	permeated with nutrient solution followed by tap water (4 Specimens)
3			2×10^6		permeated with nutrient solution followed by chemical solution (2 Specimens)
4			8×10^6		permeated with nutrient solution followed by three freeze-thaw cycles (4 Specimens)

의 몰드를 사용하여 KS F 2312 A방법으로 수행했으며, 이때의 다짐에너지는 5.64 kg/cm^2 로 표준다짐에너지 5.63 kg/cm^2 와 비슷하였다. 투수시험은 변수위 투수시험으로 홍진정밀 변수위 투수시험 장치를 사용하여 KS F 2322에 따라 수행하였다. Test 3은 바이오필름이 형성된 시료에 화학용액을 침투시켰을 경우 바이오필름의 손상에 따른 투수계수 변화를 알아보기 위해 실험하였다. 일반적으로 매립장 침출수의 pH는 4~8.5이나(Sharma와 Lewis, 1994), *Azotobacter chroococcum*의 적정 pH 농도가 5.5~8.5임을 감안하여 증류수에 HCl을 혼합한 pH 3인 산성용액과 NaOH를 혼합한 pH 11인 염기성용액으로 투수시험을 수행하였다.

Test 4는 바이오필름에 의하여 투수계수가 감소된 시료에 온도 변화를 주었을 경우 발생할 수 있는 투수계수 변화와 그에 따른 간극비를 측정함으로써 바이오필름의 손상 가능성을 조사하였다. 시험에 사용된 4개의 몰드는 같은 시간동안 영양분 용액을 공급한 후, 그중 한 개는 동결·융해 시험을 수행하면서 투수계수를 관찰하였고, 나머지 세 개는 동결·융해 시험에 따른 간극비 변화 관찰에 이용하였다. 간극비와 투수계수 측정에 사용된 시료를 달리한 것은, 함수비 측정을 위해 샘플을 채취하면 시료의 교란으로 인해 투수계수가 증

가할 수 있기 때문이다. 또한 4개 몰드의 간극비는 박테리아의 생장에 따라 서로 다르게 측정될 수 있으나, 배합 함수비와 다짐에너지를 같게 하였으므로 간극비가 동일한 것으로 가정하였다. 실제 다짐 후 바로 측정된 4개 몰드의 간극비는 0.63~0.65의 범위에 있었다. 시료는 토양내 수분이 동결하는 온도를 고려하여 -4°C 로 고정시켜 24시간 동안 완전히 동결시킨 후(Moo Young과 Zimmie, 1996), 48시간 동안 20°C 에서 융해시켜 수돗물을 침투시키며 투수계수와 간극비를 측정하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 다짐 특성

박테리아의 배양액은 EPS를 비롯한 세균 세포들이 존재하고 있기 때문에 다소의 점성을 나타내므로, 같은 부피의 수돗물을 가했을 때보다 배합 함수비가 낮다(Dennis와 Turner, 1998). 따라서 수돗물로 배합했을 때와 박테리아 혼합액으로 배합했을 경우의 다짐특성 변화를 고려해야 한다. Fig. 6은 배합수에 따른 실트질 토양의 다짐곡선으로, 전자의 경우 시료의 OMC는 15.75%, γ_{dmax} 는 1.68 g/cm^3 , 후자의 경우 OMC는 16.85%,

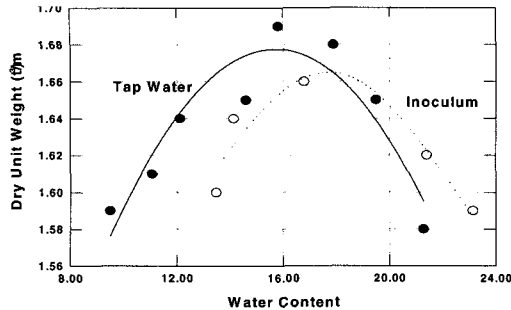


Fig. 6 Compaction Curves of Specimens Molded with Tap Water and Inoculum

γ_{dmax} 는 1.66g/cm^3 이었다. 일반적으로 다진 점토 차수재나 복토재의 경우 소요 강도와 전단강도 그리고 건조수축에 따른 균열 가능성 등을 고려한 최저투수계수는 OMC의 $\pm 2\%$, 최대건조단위중량의 96~98%의 범위에서 다짐을 해야 얻을 수다 (Sharma와 Lewis, 1994). 실험결과 배합수에 따라 OMC가 최대 2%정도 차이가 발생했지만, 함수비-최대건조단위중량과의 상관관계에서 γ_{dmax} 의 98%에 해당하는 함수비를 만족하기 때문에 현장 다짐시 수돗물로 측정된 최적함수비로 다짐을 해도 무관할 것으로 생각된다.

4.2 모래의 투수시험

모래의 투수계수는 박테리아를 혼합하기 전과 박테리아를 함유한 영양분 용액을 10일 동안 공급한 후 수돗물을 침투시켜 투수계수를 측정하였다. 10일 동안 영양분 용액을 침투시킨 후 수돗물을 통과시켜 측정된 모래의 투수계수 변화는 Fig. 7에 나타나 있다. 투수계수가 $4.3 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 인 모래 시료에 영양분 용액을 10일 동안 공급한 후 침투용액을 수돗물로 바꿔 투수시험을 한 결과 투수계수는 $3 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 까지 감소하였다. 그러나 투수계수는 잠시 증가한 후 다시 감소해 $2.6 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 값을 유지하였다. Fig. 7의 경우, 투수계수가 증가하는 이유는 수돗물을 침투시키면 모

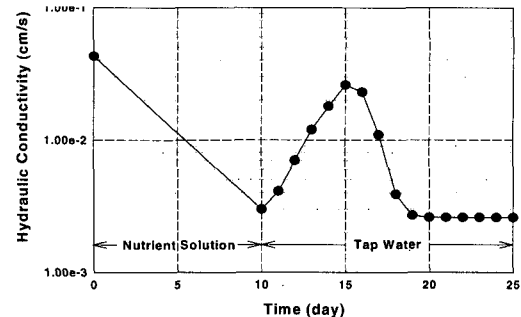


Fig. 7 Hydraulic Conductivity of Sand Treated by Biofilm

래에 남아있는 박테리아 혼합액의 점성이 감소하기 때문이며, 박테리아가 성장하면서 발생하는 가스(CO_2)에 의해 막혀 있던 간극이 감소해 포화도가 증가하기 때문이다. 그 후 시료의 투수계수는 수돗물의 침투 이후에도 간극 속에 그대로 퇴적되어 있는 바이오필름과 시료 속에 남아있는 박테리아와 수돗물 속에 존재하는 박테리아에 의해 바이오필름의 퇴적이 증가되어 다시 감소한 후 일정 값을 유지하게 된다 (Dennis와 Turner, 1998).

Fig. 8은 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy)을 이용해 박테리아 접종 전과 바이오필름이 형성된 후의 단면을 관찰한 것으로, Fig. 8.a는 박테리아를 함유한 영양분 용액을 침투시키기 전의 시료 단면이다. Fig. 8.b~8.d는 투수시험이 끝난 시료의 상단부분에서 샘플을 채취해 각각 150배, 700배, 1000배 확대한 것이다. Fig 8.b의 SEM 관찰 결과, 바이오필름이 모래 표면과 모래 입자간의 간극사이를 폐색 시켰음을 확인할 수 있었다. 또한 바이오필름은 Fig. 8.c와 8.d의 경우처럼 모래의 표면에서만 퇴적되어 간극을 막는 것이 아니라, 입자와 입자간을 서로 연결하는 mesh 형태의 바이오필름을 형성하여 간극을 보다 협소하게 만들었고, 형성된 mesh는 단일 층이 아닌 여러 층으로 이루어져 투수계수를 보다 효율적으로 감소시켰다.

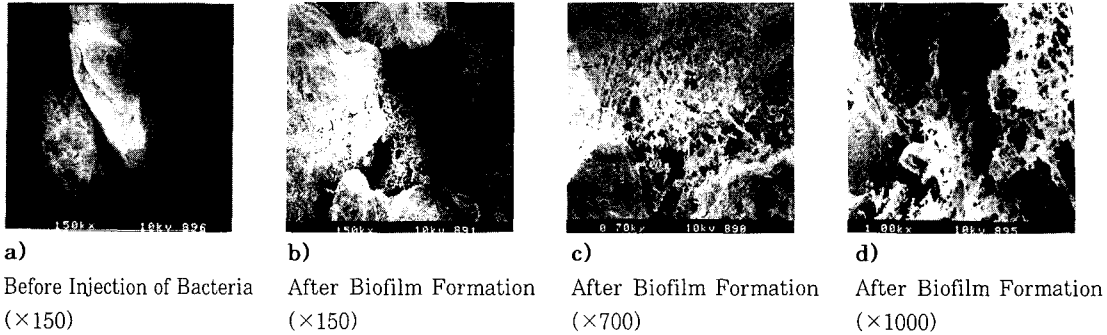


Fig. 8 Comparison of SEM Images of Pore Sand Before and After Biofilm Formation

4.3 실트질 토양의 투수시험

Fig. 9는 영양분 공급 시간에 따른 화학산화도의 투수계수 변화를 측정해 준 값이다. 투수계수가 $2.1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 인 시료는 영양분을 공급하지 않고 바로 수돗물을 침투시켜 투수계수를 측정했으나, 투수계수는 $1.1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 거의 감소하지 않았다. 이것은 박테리아가 성장하는데 있어 영양분 공급이 일정기간 필요함을 보여준다. 투수계수가 $1.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 시료에 영양분 용액을 10일 동안 공급한 후 25일 동안 수돗물을 침투시켜 측정해 준 투수계수는 $5.7 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 까지 감소한 후 일정 값을 유지하였다. 또한 투수계수가 $1.1 \times 10^{-4} \text{cm/s} \sim 1.05 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 시료에 각각 15일과 20일 동안 영양분 용액을 공급한 후 침투용액을 수돗물로 바꿔 침투시키면 시료의 투수계수는 $2.1 \times 10^{-6} \text{cm/s} \sim 1.7 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 감소하였다. Fig. 9의 경우에서, 투수계수가 증가하는 경향을 보이는 것은 앞서 언급한 것처럼 CO_2 의 감소에 따른 포화도의 증가와 영양분이 공급되지 않아 biomass의 체적이 감소했기 때문으로 볼 수 있다. 영양분용액을 각각 15일~20일 동안 공급한 후 수돗물로 바꾸면 투수계수는 $9.1 \times 10^{-7} \text{cm/s} \sim 7.8 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에서 $2.1 \times 10^{-6} \text{cm/s} \sim 1.7 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 43%, 46% 증가하였다. 투수시험 결과 시료는 1/10~1/100 정도의 투수계수 감소를

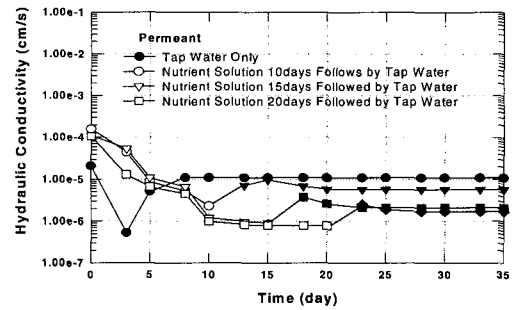


Fig. 9 Hydraulic Conductivity Change of Specimens Permeated with Nutrient Solution and Tap Water

나타냈는데, 특히 영양분 공급 15일 이후에 최저 투수계수 값을 보였다. 이것은 시료에 형성된 바이오필름이 간극의 형태를 보다 협소하게 만들었기 때문이다. 위 실험 결과 박테리아를 접종한 3개의 시료는 매립지 차수재 투수기준($1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하)을 만족하지 못했지만, 투수계수가 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 정도인 토양에 박테리아를 접종하면 시료의 투수계수를 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하로 감소시킬 수 있으므로 대용차수재 사용이 가능할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10은 15일 동안 영양분을 공급한 후에 화학용액을 침투시켜 투수계수 변화를 측정해 준 값이다. 투수계수가 각각 $9.5 \times 10^{-5} \text{cm/s} \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 시료에 영양분 용액을 공급한 후 침투용액을 산성용액(HCl)과 염기성용액(NaOH)

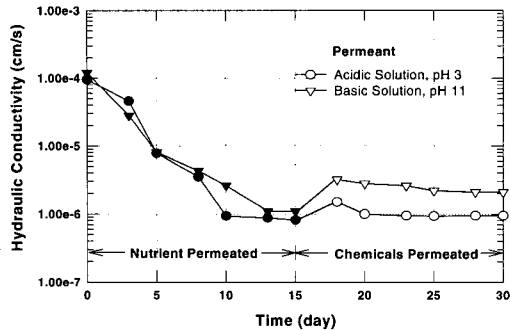


Fig. 10 Hydraulic Conductivity Change of Specimens Permeated with Nutrient Solution and Chemical Solution

으로 바꿔 침투시킨 결과 투수계수는 $9.5 \times 10^{-7} \text{cm/s} \sim 2.1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 의 감소를 나타냈다. 실험 결과, 화학용액을 침투시킨 이후에도 투수계수는 수돗물을 침투시켜 측정된 값과 비슷한 값을 유지했다. 이것은 바이오필름이 화학 용액에 잘 저항함을 보여주는 것이다.

온도변화에 따른 바이오필름의 내구성을 평가하기 위해 동결·융해 시험을 하여 측정된 투수계수 변화는 Fig. 11에 나타나 있다. 투수계수가 $2.4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 시료에 영양분 공급하면 투수계수는 $7.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 까지 감소한다. 그러나 동결·융해 시험을 하기 이전에 침투용액을 수돗물로 바꾸면 시료의 투수계수는 Fig. 9의 경우처럼 증가한 후 일정 값을 유지하게 될 것이다. 따라서 biomass의 내생성장으로 인한 체적 감소에 따른 투수계수 증가와 동결·융해 시험으로 인한 투수계수의 증가를 구분해야 한다. 즉 내생성장으로 인한 투수계수의 증가를 Fig. 10의 경우와 같이 45%로 가정한다면 바이오필름 형성에 따른 시료의 투수계수는 $8 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 에서 $1.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 감소하게 될 것이다. 그런 다음 3회의 동결·융해 시험동안 시료의 투수계수는 Fig. 11과 같이 $7.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 까지 증가해 바이오필름 집합체가 손상될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이 값은 다진 점토로 동결·융해 시험을 했을 경우

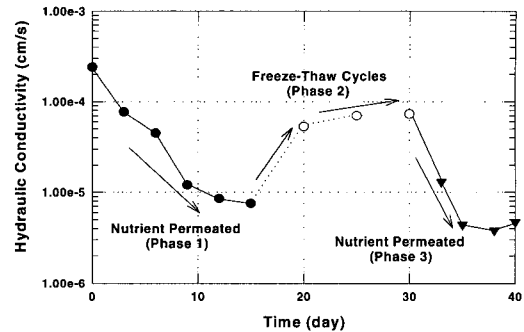


Fig. 11 Hydraulic Conductivity Changes with Freeze-Thaw Cycles

$10^{-1} \text{cm/s} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ 정도의 투수계수 증가보다는 크지 않았다(Othman 외, 1995). 이것은 흡입자 표면에 견고하게 부착하여 성장한 바이오필름의 표면이 EPS 성분으로 인해 빠르게 회복하는 점·탄성체로 되어있어, 동결·융해 시험 동안 큰 영향을 받지 않은 것으로 생각할 수 있다. 그러나 영양분을 다시 공급하면 biomass의 체적 증가로 인해 투수계수는 동결·융해 시험전의 $1.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 와 유사한 $2.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 의 안정된 값을 회복하였다.

Fig. 12는 투수계수 변화에 따른 간극비의 변화를 측정된 값으로 일반적인 흙의 투수계수와 간극비와의 상관 관계처럼 투수계수가 증가할수록 간극비도 커지는 경향을 보인다(Mitchell, 1993). Fig. 12의 간극비 측정 결과, 투수계수가 $2.4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 시료의 간극비는 0.63에서 영양분 공급 후 0.58으로 감소하였다. 그러나 3회의 동결·융해 시험 동안 바이오필름의 손상으로 인해 투수계수가 $7.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 일 때 간극비는 0.59로 증가하였다. 간극비의 증가 역시 앞서 언급한 것처럼, 바이오필름 집합체가 동결·융해 후에도 간극 속에 남아있기 때문에 큰 영향을 받지 않았다. 또한 동결·융해 시험이 끝난 후 영양분 용액을 재공급하면 간극비는 투수계수 감소와 함께 다시 감소하였다.

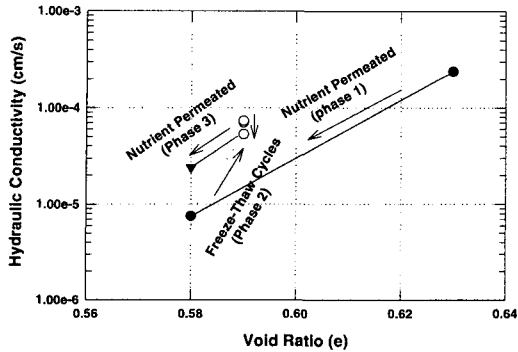


Fig. 12 Effects of Freeze-Thaw Cycles on Hydraulic Conductivity vs. Void Ratio Relationship

Table. 3은 모래와 화강풍화토에 박테리아를 접종하여 측정한 투수계수 변화를 요약한 것이다.

5. 결론

투수성이 높은 모래와 화강풍화토에 *Azotobacter chroococcum* 박테리아를 접종하고, 영양분 용액

을 공급하여 일정기간 동안 배양한 후 투수시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수돗물이나 박테리아 혼합액으로 다짐실험을 했을 경우 다짐 특성은 변하지 않았으며, 이것은 현장 다짐시 수돗물로 측정한 최적 함수비로 다짐을 해도 무관함을 보여주는 것이다.
- 2) SEM 관찰 결과, 입자 표면층 뿐만 아니라 입자와 입자 사이에 mesh 형태의 바이오필름이 형성되어 보다 효과적으로 간극을 폐색시키고 있음을 관찰할 수 있었다.
- 3) 투수계수가 $4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 인 모래와 $1.6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 화강풍화토에 박테리아를 접종·배양한 결과 투수계수는 각각 $2.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 와 $5.7 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 까지 1/10~1/100 정도 감소한 후 일정 값을 유지하였다. 특히 영양분 공급 15일 이후에 최저 투수계수 값을 보였는데, 이것은 바이오필름이 간극의 형태를 보다 협소하게 만들었기 때문이다.

Table. 3 Hydraulic Conductivity Changes of Specimens

Test	Specimen	Permeant	Water Content (%)	Hydraulic Conductivity (cm/s)	
				Initial	Final
1	Sand	nutrient solution for 10 days followed by tap water	-	4.3×10^{-2}	2.6×10^{-3} (6%)*1
2	SP (Poorly Graded Sand)	tap water only	18.7	2.1×10^{-5}	1.1×10^{-5} (52.4%)
		nutrient solution for 10 days followed by tap water	14.9	1.6×10^{-4}	5.7×10^{-6} (3.6%)
		nutrient solution for 15 days followed by tap water	15.4	1.1×10^{-4}	2.1×10^{-6} (1.9%)
		nutrient solution for 20 days followed by tap water	16.1	1×10^{-4}	1.7×10^{-6} (1.7%)
3	SP (Poorly Graded Sand)	nutrient solution for 15 days followed by acidic solution	16.4	9.5×10^{-5}	9.5×10^{-7} (1%)
		nutrient solution for 15 days followed by basic solution	15.4	1.2×10^{-4}	2.1×10^{-6} (1.8%)
4	SP (Poorly Graded Sand)	nutrient solution for 15 days followed by three freeze-thaw cycles	12.6	2.4×10^{-4}	2.4×10^{-5} (10%)

$$*1 = \frac{\text{Final } k}{\text{Initial } k} \times 100$$

- 4) 투수시험 결과 시료의 투수계수는 차수재 투수 기준을 만족하지 못했지만, 투수계수가 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 인 토양에 박테리아를 접종하면 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하로 감소시킬 수 있으므로 대응 차수 재 사용이 가능할 수 있을 것이다.
- 5) 산성용액(HCl) 또는 염기성용액(NaOH)을 침투시켜도 시료의 투수계수는 일정 값을 유지하였다. 이것은 바이오필름 집합체가 화학 용액의 침투에 잘 저항함을 보여주는 것이다.
- 6) 영양분 공급 후 $2.4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 에서 $1.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 까지 감소한 시료의 투수계수는 동결·융해 시 협동한 $7.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 감소했으며, 간극 비 또한 0.58에서 0.59으로 증가해 바이오필름 집합체가 손상되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 영양분의 재공급하면 투수계수와 간극비는 다시 회복되었다.
- 7) 본 연구를 현장에 적용할 경우 온도와 미생물 성장간의 상관관계에 대한 연구가 수행되어야 할 것을 생각된다.

감사의 글

본 논문은 한남대학교 교내 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 여러 조언을 주신 한남대학교 미생물학과 이인수 교수님, 미생물 관련 실험에 많은 도움을 준 한남대 미생물학과 대학원 박길순양과 김선원군에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Atlas, R.M., and Bartha, R.(1992). Microbial ecology:fundamentals and applications. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, Cal.
2. Characklis, W.G. and Marshall, K.C.(1990), Biofilm. John Wiley & Sons. Inc., New York, N. Y.
3. Dennis, M.L. and Turner, J.P.(1998), "Hydraulic conductivity of compacted soil treated with biofilm" J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg., Vol. 124, No. 2, Feb., pp.120~127.
4. Mitchell, J.K.(1993), Fundamentals of soil behavior. John Wiley & Sons. Inc., New York, N. Y.
5. Moo-Young H.K.(1996), "Effects of Freezing and thawing on the hydraulic conductivity of paper mill sludges used as landfill covers" , Can. Geotech. J., Vol. 33, pp.783~792.
6. Othman, M., Benson, C.H., Chamberlain, E.J., and Zimmie, T.F.(1995), "Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze-thaw State-of-the-Art" , Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils. ASTM. STP., 1142., Daniel, D.E., and Trautwein, S.J., eds., ASTM. Pa., pp.227~254.
7. Sharma, H.D., and Lewis, S.P.(1994), Waste containment systems, waste stabilization, and landfill : design and evaluation. John Wiley & Sons Inc., New York, N. Y.
8. Shaw, J.C., Wardlaw, N.C., Bramhill, B., and Costerton, J.W.(1985), "Bacterial fouling in a model core system" , Appl. and Environ. Microbiol., Vol. 49, No. 3, Mar., pp.693~701.
9. Stanier, R.Y., Ingraham, J.L., Painter, P.R., and Wheelis, M.L.(1986), The microbial World. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
10. Stoodley, Paul, Beer de Dirk, and Lewandowski, Zbigniew(1994), "Liquid flow in biofilm systems" , Appl. and Environ. Microbiol., Vol. 60, No. 8, Aug., pp.2711~2716.
11. Taylor, S.W., and Jaffe, P.R.(1990), "Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium. 3: Dispersivity and model verification" , Water Resour., Vol. 26, No. 9, Sep., pp.2171~2180.

(접수일자 1999. 9. 18)