

박테리아 흡착 팽창질석 기반 친생태 잔디블록의 개발

Development of Eco-Block for Grass Growth based on Expanded Vermiculite Absorbing Bacteria

윤현섭¹ · 정승배^{1*} · 양근혁² · 이상섭³ · 이재영⁴

Hyun-Sub Yoon¹ · Seung-Bae Jung^{1*} · Keun-Hyeok Yang² · Sang-Seob Lee³ · Jae-Yeung Lee⁴

(Received September 5, 2016 / Revised September 21, 2016 / Accepted September 21, 2016)

This study developed an eco-block for grass growth using the expanded vermiculites that absorb bacteria selected considering for the high pH and dry environments and plant growth. For the developed eco-block, a fundamental properties including compressive strength gain and water absorption and ecology characteristics were tested. The selected bacteria was *Bacillus alcalophilus* and *Rhodoblastus acidophilus* and had high concentration of 10^9 cell/mL. The expanded vermiculite that was used for shelter of bacteria was added by 7.5% and 10% replacement of the natural aggregates by volume. The developed eco-block achieved the minimum requirements specified in SPS provision and significantly effective in reducing chemical Chemical Oxygen Demand(COD) concentration and enhancing the growth of fish and plant.

키워드 : 박테리아, 성장처, 흡착, 친생태 잔디블록, 생태특성

Keywords : Bacteria, Shelter, Absorption, Eco-block, Ecology characteristics

1. 서론

콘크리트 제방 또는 콘크리트 2차제품의 사용에 의한 하천 정비 및 보강은 하천의 자정기능 감소, 생물의 서식지 감소 및 수질오염 등의 부정적 환경 영향을 초래하기도 한다(Lee et al. 2011). 이러한 부정적 환경영향의 최소화를 위하여 식물생육 또는 수역환경의 수질 복원 기능을 갖는 박테리아를 활용한 콘크리트 2차 제품 개발 및 실용화 연구가 시도되고 있다(Park et al. 2013). 기존 박테리아 활용 콘크리트 2차 제품은 배합 시 박테리아를 단독으로 투입하거나, 양생 시 배양액에 침지하여 콘크리트 표면 및 내부로의 박테리아 흡착을 유도 하고 있다. 그러나 콘크리트는 시멘트 수화과정에서 발생하는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 및 내부 수분의 감소로 강알칼리성(pH 11 이상) 및 극건조 환경으로 변화되어 박테리아가 지속적으로 성장하기 위한 중성수준의 pH(6~9) 및 영양분(수분 및 유기

물)의 확보에 어려움이 따를 수 있다(Shin et al. 2014). 또한 초기 강도 발현의 촉진을 목적으로서 비교적 고온의 환경($40^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ 이상)에서 증기 양생을 실시하는 콘크리트 2차 제품의 특성상 상온의 환경($20\sim 30^\circ\text{C}$)에서 최적의 성장효율을 갖는 박테리아는 생장에 저해를 받을 수 있다.

이러한 문제점을 극복하고자 Jung et al.(2015)은 강알칼리성 환경에서의 박테리아 성장처(shelter) 조성 및 고온의 환경(40°C 이상)에서도 지속적인 생장이 가능한 박테리아 적용 연구를 수행 하였다. 박테리아 성장처(shelter) 조성의 가능성을 평가하기 위하여 높은 흡수율 및 다공성 구조를 갖는 고 흡수성 수지를 활용하였다. 이 연구의 사전 연구로서 진행된 Yoon et al.(2016)의 연구에서는 친생태 콘크리트 2차 제품 개발의 기초자료로서 박테리아의 지속적인 성장 환경을 조성할 수 있는 흡착기술을 제시하였는데, 제안된 연구에서는 뛰어난 보습성 및 이온교환능력($120\sim 150\text{meq}/100\text{g}$)

* Corresponding author E-mail: jungsb2306@naver.com

¹경기대학교 일반대학원 건축공학과 (Depart. Architectural Engineering, Graduate School Kyonggi University, Kyonggi-do, 16227, Korea)

²경기대학교 플랜트·건축공학과 (Depart. Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 16227, Korea)

³경기대학교 생명과학과 (Depart. Biological Sciences, Kyonggi University, Kyonggi-do, 16227, Korea)

⁴(주)그랜드코단 (Grand Kodan Industry Co., LTD, Seoul, 06309, Korea)

을 갖는 팽창질석을 활용하였으며, 정량적인 박테리아 흡착성능 평가 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 Yoon et al.(2016)의 연구에서 제시된 박테리아 성장처(shelter) 조성 기술 및 이를 활용한 친생태 콘크리트 배합기술의 활용성을 콘크리트 잔디블록 제조로 확장하였다. 공장 배합을 통해 제작된 잔디블록에서 기본 요구성능인 압축강도와 흡수율을 평가하였으며, 박테리아의 효과를 평가하기 위하여 잔디 성장성 및 어류 급성 독성시험을 포함한 수질정화능력을 실험하였다.

2. 박테리아 흡착재 활용 잔디블록 배합실험

2.1 사용 재료

본 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)의 규정에 준하여 생산되는 국내 A사의 1종(보통 포틀랜드 시멘트)을 사용하였다. 굵은골재는 최대 치수 19mm 이하 및 13mm 이하의 쇄석을 혼합하여 사용하였으며, 잔골재로서 비중 2.58의 석분을 사용하였다. 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타났다.

2.2 박테리아 선별 및 성장환경 조성

사전연구(Yoon et al. 2016)에서 제시한 잔디블록에 특성화된 *Bacillus alcalophilus* 및 *Rhodoblastus acidophilus* 박테리아를 선별하였다. 두 균주 모두 고온의 양생환경 및 강알칼리성(pH 11 이상)의 잔디블록 제작 환경에서 생장이 가능한 특징을 가지고 있다. 박테리아 최적 성장 조건 확립을 위한 배양액은 Nutreint Broth 및 KCTC 967 medium을 사용하였으며 주요 구성요소로는 1L의 증류수를 기준으로 Beef extract, Yeast extract, Sodium Chloride 및 KH_2PO_4 등이 사용되었다. 박테리아 배양 농도의 경우 사전연구 결과 식물생장성 및 수질정화 효과가 가장 높게 나타난 10^9 cell/mL

Table 1. The physical properties of coarse aggregates

G _{max} (mm)	Gravity	Water absorption(%)	FM	Unit weight (kg/m ²)
19	2.68	1.03	6.4	1,536
13	2.68	1.03	7.05	1,525

Table 2. The physical properties of fine aggregates

G _{max} (mm)	Gravity	Water absorption(%)	FM	Unit weight (kg/m ²)
2.5	2.58	3.0	3.12	1,889

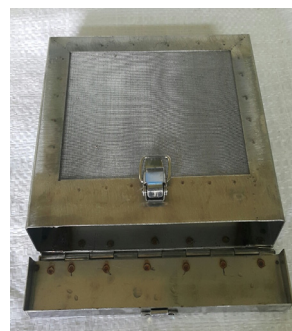
로 하였다.

극 건조, 고온 및 강알칼리성(pH 11 이상) 환경에서의 박테리아의 최적 성장 환경을 조성하고자 다공성 구조 및 뛰어난 양이온 교환용량(120~150meq/100g) 특성을 가진 팽창질석을 박테리아의 성장처(shelter)로서 활용하였다(Table 3). 성장처로서 선정된 팽창질석의 경우 비중이 0.5 미만으로 박테리아 배양액에 단순 침지 시 부유 할 수 있으며, 재료의 응집으로 인해 균질한 박테리아 흡착 성능을 나타내는데 어려움이 따를 수 있다. 이를 방지 하고자 본 연구에서는 박테리아 흡착 패드 및 멸균용기를 개발하여 성장처(shelter)로의 흡착을 유도하였다(Fig. 1). 개폐형 클립을 이용하여 패드 내부로의 팽창질석을 투입 배출 할 수 있도록 하였으며, 다수의 패드를 일정간격으로 배양액 용기에 고정하여 재료가 응집되지 않고 고르게 분산 될 수 있도록 하였다. 또한 배양액 용기 내에서 박테리아 배양액의 지속적인 순환을 위하여 120rpm의 속도로 회전하는 팬을 이용하였다.

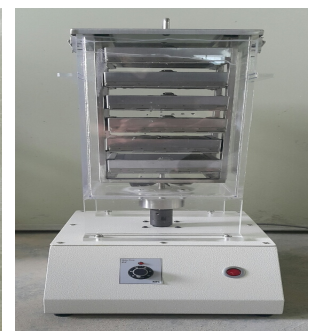
성장처(shelter)로의 박테리아 흡착은 72시간 동안 실시하였으며, 흡착 완료 후 시료를 채취하여 박테리아 흡착 성능을 평가하였다(Fig. 2). 채취 한 시료를 원심분리기 내에서 150rpm의 속도로 2시간 동안 원심 분리하여 흡착된 박테리아 균주를 탈착하였으며, 탈착된 균주의 개체수를 Hemocyto-meter를 이용하여 계수하였다. 평가 결과 박테리아 흡착 개체수는 *Bacillus alcalophilus*의 경우 6.65×10^8 cell/mL 이었으며, *Rhodoblastus acidophilus*의 경우 4.30×10^8 cell/mL로 나타났다.

Table 3. The physical properties of expanded vermiculite

Specific gravity	pH	CEC (meq/100g)	Absorption (%)	Particle Size (mm)
0.1~0.2	5.5~7.5	120~150	265~368	0.4~1.2



(a) Absorbent pads



(b) Sterilization containers

Fig. 1. Equipment devised for bacteria adsorption

2.3 잔디블록 제작

잔디블록 제작의 배합상세는 현재 제품 생산에 이용되는 것을 이용하였으며, 박테리아 흡착 팽창질석의 치환율을 골재의 부피 대비 0%, 7.5% 및 10%로 변화시켰다(Table 4). 따라서, Table 4의 시험체 명에서 V-7.5와 V-10은 각각 골재의 부피 대비 흡착재의 치환율과 같다. 잔디블록의 제작 과정은 Fig. 3에 나타낸바와 같이 계량된 결합재를 배합용기에 넣고 건비빔을 진행 하였으며, 배합 수 및 팽창질석을 혼입하여 습비빔을 실시하였다. 표층 및 기층의 순으로 몰드에 타설한 후 진동 및 압축기를 활용하여 다짐을 실시 하였으며, 탈형 후 증기양생(최고온도 40℃, 최고온도 유지시간 10hr)을 실시하였다. 제작된 잔디블록의 기본 역학적 특성 및 친생태 기능 평가를 위해 100 x 100 x 100mm의 정방형 실험체를 잔디 블록에서 채취하였다.

2.4 측정 및 방법

박테리아 흡착재 기반 친생태 잔디블록의 물리적 특성평가를 위해 SPS-KCIC0001-0703: 2015 방법에 따라 재령 28일 압축강도 및 흡수율을 측정하였다. 경화된 잔디블록에서 박테리아의 지

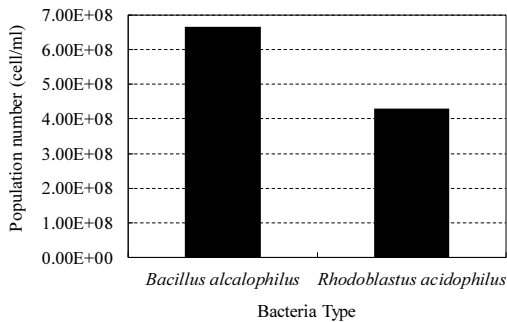


Fig. 2. Population concentration of bacteria absorbed into expanded vermiculite

Table 4. Mixture proportions of Eco-block using the expanded vermiculite absorbing bacteria

Specimens	Bacteria Type	Replacement of Expanded vermiculite (Sand × Vol%)	W/B (%)	S/B
Non-bacteria	None-bacteria	0	58	6.11
V-7.5	<i>Bacillus alcalophilus</i> +	7.5		
V-10	<i>Rhodoblastus acidophilus</i>	10		

속생장성 평가를 위해 재령 28일 경화된 잔디블록의 표면 및 내부 시료를 채취하여 분말화 하였으며, 이를 *Bacillus alcalophilus* 및 *Rhodoblastus acidophilus*가 생장과 증식이 가능한 한천 배지에 접종하여 재 증식성을 확인하였다. 잔디블록의 식물 성장성 증대 평가를 위해 조경의 목적으로 사용되는 100 x 100mm 크기의 들잔디를 사용하였으며, 실험 시작 전 모든 실험군의 길이를 10cm로 일정하게 맞춘 후 재령별 잔디의 길이를 측정하여 식물성장성 증대 효과를 평가하였다. 친생태 잔디블록의 수질정화 특성 평가를 위해 COD, T-N 및 T-P를 각각 48ppm, 7ppm 및 0.8ppm의 농도로 조절한 오염수 시료를 사용하였다. 재령 28일 이후 경화된 친생태 잔디블록 시험체를 오염수 시료에 침지하였으며, 침지 재령 14일 이후 수질오염공정시험법에 따라 COD, T-N 및 T-P를 측정하였다. 또한, 잔디블록이 수중생물에게 미치는 영향을 확인하기 위하여 한국환경공단의 화학물질의 시험방법(지수식 어류 급성 독성 시험)에 따라 96시간 동안 어류 급성 독성 평가를 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 물리적 특성

박테리아 흡착재 기반 친생태 잔디블록의 물리적 특성 평가 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 박테리아 무혼입 시험체의 경우 압축

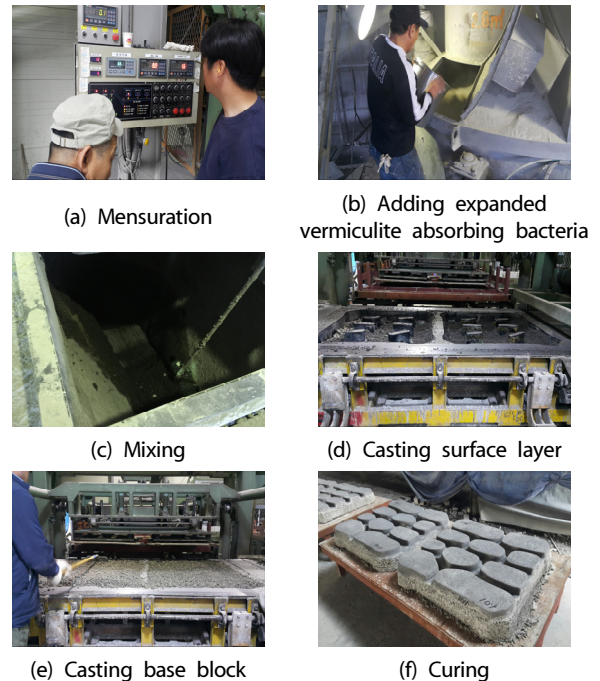


Fig. 3. Manufacture process of Eco-block

강도는 28.1MPa로 콘크리트 호안 및 옹벽블록 품질기준(SPS)인 재령 28일 압축강도 21MPa를 만족하였다. 박테리아 흡착 팽창질석의 치환율이 7.5%인 경우 압축강도는 32.1MPa로 박테리아 무혼입 시험체에 비해 약 14% 높게 나타났으며, 팽창질석의 치환율이 10%인 경우 압축강도는 29MPa로 박테리아 무혼입 시험체와 유사한 압축강도를 나타냈다. 친생태 잔디블록의 흡수율은 박테리아 흡착재 치환율에 관계없이 모든 시험체에서 4%로 나타났으며, 콘크리트 호안 및 옹벽블록의 흡수율 품질기준(7% 이하)을 만족하였다. 즉, 친생태 잔디블록의 물리적 특성 평가 결과 박테리아 흡착재 치환율에 관계없이 모든 시험체는 콘크리트 호안 및 옹벽블록의 KS 규격의 요구강도 및 요구흡수율을 만족하였다.

3.2 박테리아의 지속 성장성 평가

재령 28일 이후 경화된 친생태 잔디블록에서 채취한 시료를 분말화하여 한천배지에 재점종한 결과 및 재증식 생균 개체수 평가 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 재점종결과 박테리아 흡착재 무혼입 시험체를 제외한 모든 시험체에서 박테리아의 군집 형성이 확인되었다. *Bacillus alcalophilus* 및 *Rhodoblastus acidophilus*는

각각 노란색과 붉은색의 군집(colony)을 재형성하였다. 재증식 생균 박테리아의 개체수 측정결과 박테리아 흡착 팽창질석의 치환율 7.5%인 경우 1.22×10^7 cell/mL로 나타났으며, 팽창질석의 치환율 10%인 경우 1.12×10^7 cell/mL로 비슷한 수준의 재 증식성을 나타내었다. 즉, 친생태 잔디블록 내에 혼입된 박테리아는 지속적으로 성장 및 증식할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 잔디성장 영향

증류수에 침지된 친생태 잔디블록 표면에 이식한 들잔디 모종의 생장사진 및 생장 길이를 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. 박테리아 무혼입 시험체에 이식된 잔디의 경우 재령 28일까지 초기 생장 길이에 비해 약 150% 이상 성장 하였으나, 이후 고사하였다. 반면, 박테리아 흡착 팽창질석 치환율이 7.5% 및 10%인 잔디블록 실험체는 재령 56일까지 들잔디 모종이 고사하지 않고 지속적으로 성장하였다. 들잔디 모종은 치환율 7.5%인 경우 초기 길이에 비해 약 190%의 길이 성장을 보였으며, 치환율 10%인 경우 약 220% 이상 성장 하였다.

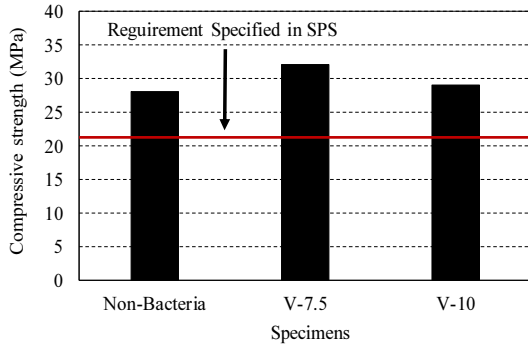


Fig. 4. Compressive strength of Eco-block

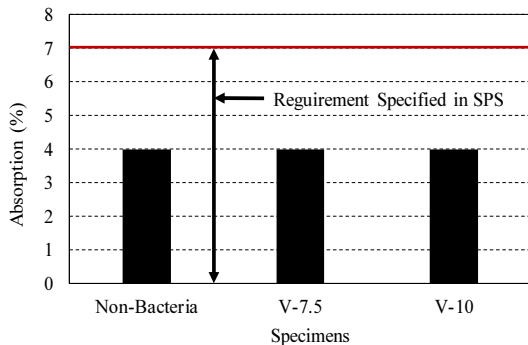


Fig. 5. Adsorption properties of Eco-block

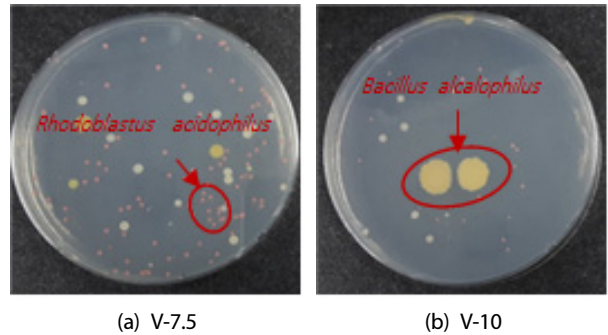


Fig. 6. Inoculation image of bacteria sampled from hardened Eco-block

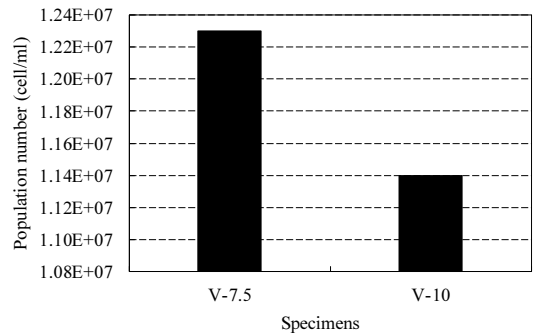


Fig. 7. Population concentration of bacteria sampled from hardened Eco-block

3.4 수질정화 능력

친생태 잔디블록 침지 재령 14일 이후의 수질변화를 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. COD 측정결과 박테리아 무혼입 시험체의 경우 초기 오염수 시료의 COD 농도에비해 약 17% 감소하였다. 반면, 박테리아 흡착 팽창질석 치환한 잔디블록 시험체의 경우 치환율이 7.5% 및 10%인 경우 초기 오염수의 COD 농도에 비해 각각 75% 및 78% 감소하여 비교적 높은 수준의 저감 효과를 나타내었다. T-N 및 T-P 농도 측정결과 박테리아 무혼입 시험체는 경우 재령 14일 이후 농도가 모두 감소하는 반면, 박테리아 흡착 팽창질석을 혼입한 시험체의 경우에는 농도가 약 12~38% 증가하는 경향을 나타내었지만, 그 절대적 양은 매우 적다. T-N 및 T-P의 경우 박테리아의 신진대사과정 중 배출되는 주요 성분인 질소(N)와 인(P)의 영향으로 농도가 증가한 것으로 판단된다. 박테리아의 신진대사과정에서 배출되는 N 및 P는 식물생장을 위해 반드시 필요한 영양성분으로 잔디의 생장에 따라 소모될 수 있는 수준으로서 수질에는 악영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

3.5 어류 급성 독성 평가

친생태 잔디블록의 어류 급성 독성 평가결과는 Table 6 및 Fig.

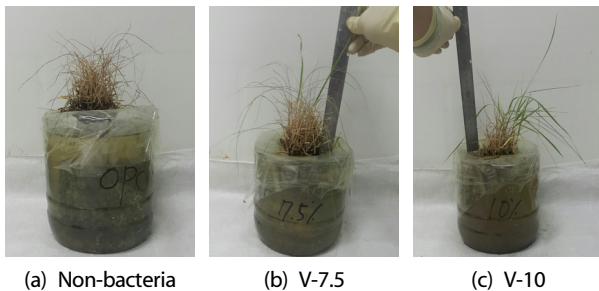


Fig. 8. Growth status of grass transplanted on Eco-block at an age of 56 days

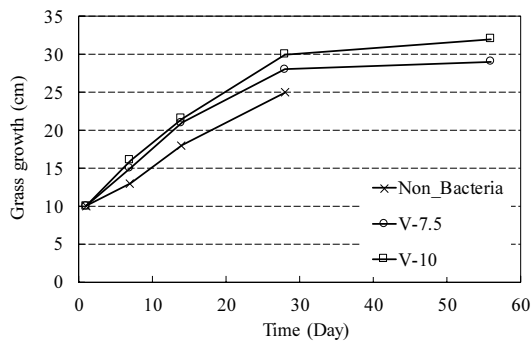


Fig. 9. Growth length of grass transplanted on Eco-block

10과 같다. 박테리아 무혼입 시험체의 경우 침지재령 24시간 이후 어류가 폐사하기 시작하였으며, 재령 96시간 이후에는 총 3마리가 폐사하여 70%의 어류 생존율을 나타냈다. 반면, 박테리아 흡착 팽창질석을 혼입한 시험체의 경우 치환율에 관계없이 모든 시험체에서 침지재령 96시간까지 어류가 폐사하지 않았다. 즉, 박테리아가 혼입된 잔디블록 시험체의 경우 어류 생장에 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 친생태 잔디블록 제품 개발의 연구로서 박테리아를 흡착한 팽창질석을 기반으로 제작한 친생태 잔디블록의 강도 발현과 흡수율 및 생태환경영향을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 잔디블록의 압축강도 발현 및 흡수율을 고려하면 박테리아를 흡착한 팽창질석의 적절한 치환율(모래 부피대비)은 7.5~10% 이하가 적합한 것으로 판단된다.
2. 재령 28일의 잔디블록 시험체에서 채취한 박테리아 균주들의 재

Table 5. Summary of water purification tests

Specimens	Concentration(ppm)		
	COD	T-N	T-P
Lake water	48	7	0.8
Non-Bacteria	40	5	0.2
V-7.5	12	8	0.9
V-10	11	8	1.1

Table 6. Summary of fish toxicity tests

Specimens	Survival of populations(total population) (hours)							
	0	3	6	12	24	48	72	96
Non-Bacteria	10	10	10	10	10	9	8	7
V-7.5	10	10	10	10	10	10	10	10
V-10	10	10	10	10	10	10	10	10



Fig. 10. Survival status of fish populations

접종한 결과 팽창질석 치환율이 7.5%인 경우 1.22×10^7 cell/mL로 나타났으며, 팽창질석의 치환율 10%인 경우 1.12×10^7 cell/mL로 박테리아의 생존성을 확인할 수 있었다.

3. 증류수에 침지된 잔디블록 표면에 이식한 들잔디 모종은 박테리아 무훈입의 경우 재령 28일 이후 모두 고사한 반면 박테리아 훈입의 경우에는 박테리아 무훈입 대비 190~220% 이상의 생장율을 보였다.
4. 친생태 잔디블록의 수질정화 평가결과 COD의 경우 초기 원수 시료에 비해 75~78% 낮은 값을 보였지만, T-N과 T-P의 경우 박테리아 대사과정에 따른 배출물로 인해 그 변화 값은 무의미한 것으로 판단된다.
5. 친생태 잔디블록의 어류독성 평가 결과 박테리아 무훈입 시험체의 경우 70%의 어류 생존율을 나타낸 반면, 박테리아가 훈입된 경우 모든 어류가 폐사하지 않아 어독성 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-B103706-02)에 의해 수행되었습니다. 또한, 연구 진행에 있어 도움을 주신 ㈜그랜드코단에 감사드립니다.

References

- Jeong, J.E., Yang, K.H., Yoon, H.S. (2015). Adsorption technology for bacteria-based concrete coating, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **3(2)**, 140-145 [in Korean].
- Kim, W.J., Choi, K.J., Park, J.S. (2011). An experimental study on water-purification properties in cement bricks using effective micro-organisms and zeolite, Journal of the Korea Concrete Institute, **23(3)**, 331-338 [in Korean].
- Lee, J.W. (2011). A Study on the stability Assessment Method of Block Revetments, Master's Thesis, University of Honam, Korea.
- Park, S.W., Ahn, T.J., Ahn, S.H., Kwon, S.H. (2013). Analysis on dimensional stability of porosity soil block for vegetation reinforcement, Journal of Wetlands Research, **15(1)**, 91-103 [in Korean].
- Shin, C.L. (2014). Natural Purification Treatment using Non-sintered Soil Brick with Effective Microorganisms, Master's Thesis, University of Seoul, Korea.
- Yoon, H.S., Jung, S.B., Yang, K.H., Lee, S.S., Lee, J.Y. (2016). Compressive strength and ecological characteristics of mortars using expanded vermiculite absorbing bacteria, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(2)**, 165-171 [in Korean].

박테리아를 흡착 팽창질석 기반의 친생태 잔디블록 개발

본 연구에서는 박테리아를 흡착한 팽창질석 기반의 친생태 잔디블록의 압축강도 발현과 흡수율 및 생태환경영향 평가를 실시하였다. 경화된 콘크리트의 극건조 환경 및 강알칼리성 환경에서 생장이 가능하며, 식물생장성 증대 효과를 갖는 *Bacillus alcalophilus*와 *Rhodoblastus acidophilus*를 10^9 cell/mL로 배양하여 혼합 사용하였다. 배양이 완료된 박테리아는 성장처 제공을 위한 재료로서 팽창질석에 흡착하였으며, 이를 잔디블록 제조 시 골재의 체적 대비 7.5%와 10% 훈입하였다. 개발된 친생태 잔디블록은 압축강도와 흡수율은 KS 규격을 만족하면서, 수질의 COD 저감, 어류생장 및 식물생장증대에 효과를 보였다.