

유용미생물을 이용한 포러스콘크리트의 수질정화특성에 대한 현장평가

Site Assessment for the Water Purification Effect of Porous Concrete by using Effective Micro-organisms

김 봉 균¹⁾ 박 준 석²⁾ 서 대 석³⁾ 김 화 중⁴⁾ 김 윤 용^{5)*}
Bong-Kyun Kim Jun-Seok Park Dae-Seuk Seo Wha-Jung Kim Yun-Yung Kim

Abstract

In recent years, a rapid growth in the population and urbanization led to an increasing industrial growth. The inadequate treated-wasted water from industry and various non-point sources causes significant negative effects on the stream water. For past few decades, extensive researches have been performed on water purification process. The purpose of this study is to investigate mechanical performance and water purification properties of porous concrete by using effective microorganisms through the site assessment test. The mechanical performance evaluation results showed that the increase void ration caused an decrease in the strength. The optimal mix rate was found to be 15% void rate From the site assessment, it was evaluated that the porous concrete improved the quality of the water and the purification ratios are 34.1 for SS, 14.6% for BOD, 34.9% for COD, 11.4% for T-N, and 12.6% for T-P. The porous concrete and the related purification technique can reduce the non-point pollution sources flowing into the river.

Keywords : Effective micro-organisms, Porous concrete, Water purification, Site assessment test

1. 서 론

최근 수십년간의 산업발달, 인구증가 및 밀집화로 인한 수계환경으로의 오염물질 배출량이 증가하고 있으나, 신규 폐수 및 하수처리장을 설치하기 위한 시간 및 비용, 부지 등의 문제와 지구온난화로 인한 국지성 호우 등의 강우로 인해 발생하는 비점오염원에서의 오염물질 유입으로 도시내 하천 및 호소 등의 수질오염이 점차 심화되고 있는 실정이다. 또한 도로, 논, 밭, 산림으로부터 배출되는 오염원의 경우 수계로의 유입을 차단하기 어려운 특성으로 인하여 오염물질의 유입이 방지되고 있는 실정이다 (Bae, 2010).

한편, 선진외국에서는 수계의 부영양화 방지 및 오염물질 제거 등의 연구가 활발히 진행되어 왔고, 일본의 경우 자연형 하천공법 등을 도입하여 시범사업을 진행하여 왔다. 국내

의 경우에도 하천에 직접 적용가능한 자연형 하천수질 정화 기술의 개발 보급이 요구되어 1997년 자갈접촉 정화법을 시작으로 하여 실제 하천에 적용하기 위한 기술개발이 진행되어 왔다 (Lee, 2006; Szymanski and Patterson, 2003; Higa and Parr, 1994; Song et al., 2012; Nilsson et al., 2013; Zakaria et al., 2010).

최근에는 생물학적 처리와 다르게 미생물을 이용한 공법이 연구되고 있다 (Kim et al., 2004; Hae, 2012; Lee and Son, 2007; Park et al., 2001). 이러한 공법은 고부하의 폐수에서 유기물 및 질소, 인과 악취를 효과적으로 제거하는 B3 공법과 망상형 회분식 바실러스 접촉장치가 국내 식품폐수 처리장에서 적용되고 있다.

하지만 오염 호소나 하천을 대상으로 하는 직접정화기술 적용은 일부 기관에서 진행되고 있는 실정으로 일부 정화방

1) 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정
2) 정회원, 경북대학교 건설환경에너지공학부 박사과정
3) 정회원, 동산콘크리트산업(주) 동산BIO콘크리트 연구소 소장
4) 정회원, 경북대학교 건설환경에너지공학부 교수
5) 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : yunkim@cnu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2015년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

법을 제외하면 체계적인 연구가 거의 미미한 실정에 있다 (Choi et al., 1999; Kim et al., 2012; Kim et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 국내 수계환경에 적합하고, 하천 및 호소의 수질정화기능을 가지는 콘크리트의 개발을 위하여 오염물질의 제거성능이 뛰어난 바실러스계 유용미생물을 적용한 포러스콘크리트의 물성평가를 실시하여 최적 배합을 결정한 후 제조된 포러스콘크리트를 실제 도시내 하천 현장에 설치하여 수질정화성능을 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 구성

본 연구에서는 수질정화효과가 있는 바실러스계 미생물 배양액을 포러스콘크리트에 적용하여 장기간에 걸쳐 미생물의 생화학적 반응에 의하여 수질정화성능을 발휘하는 수질정화용 포러스콘크리트를 제조한 뒤 현장적용을 통한 수질정화성능을 검토하되, 실내시험 연구결과 (Park et al., 2014) 와 수질정화성능을 비교 평가하고자 한다.

2.1.1 미생물 특성

본 연구의 유용미생물은 절대호기성 및 통성혐기성 바실러스계 미생물로서 유기물을 먹이원으로 하여 세포물질을 생합성하는 화학유기영양세균이다. 바실러스계 미생물은 세포 바깥으로 다양한 생리활성물질을 생성하여 분비하며, 불리한 환경이 조성되는 내생포자라는 특수 휴면구조 (Dormant structure)를 형성하여 불리한 환경에서도 오랜기간 생존할 수 있으며, 반대로 환경이 유리하게 바뀌게 되면 다시 활동하는 특성을 가짐과 동시에 세포벽 외부로 점액층이 존재하여 표면에 접촉하기 쉬운 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다 (Kang, 2009; Son, 2007; Lee, 2006).

2.1.2 미생물 부착 방법

본 실험에서 장기간의 수질정화성능을 발휘하려면 바실러스계 미생물의 활동이 가장 중요하므로, 다공질의 화산석과 내부에 많은 공극을 가지는 포러스콘크리트를 사용하여 공시체를 제조함으로써 공시체 내부 및 외부에 미생물의 부착 및 생존가능성을 높이고자 하였다.

따라서 바실러스계 미생물의 외부 점액층으로 인하여 골재에 부착되기 쉬운 다공질 화산석과 다공성의 포러스콘크리트의 공극에서 성장 및 활동을 하게 된다. 이러한 매커니

즘은 Fig. 1과 같다. 또한 배합과정에서 미생물을 부착성을 높이기 위하여 3번의 미생물 부착 및 배합 처리를 하였으며 그 적용방법은 Fig. 2와 같다 (Park et al., 2014).

2.2 실험 재료

2.2.1 시멘트

이 실험에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 밀도 3.15g/cm^3 , 분말도 $3,318\text{cm}^2/\text{g}$ 의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였다.

2.2.2 굵은골재

이 실험에서 사용한 굵은골재는 화강암질 부순돌과 경량부석을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.2.3 혼화제

혼화제로는 시멘트 분리작용과 미세공기 연행으로 단위수량저감, 워커빌리티 (Workability) 및 내동해성을 개선시키

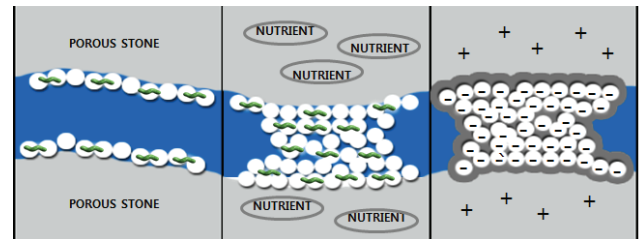


Fig. 1 Application mechanism of microorganisms

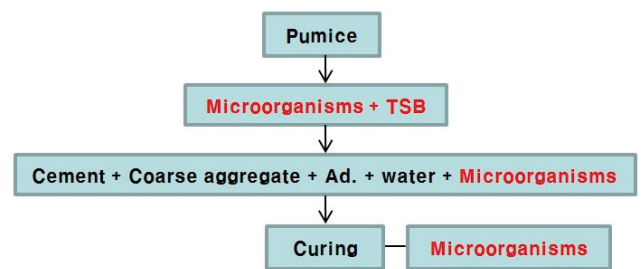


Fig. 2 Application method of microorganisms in mixing process

Table 1 Physical properties of coarse aggregate

Aggregate	Grading	Density (g/cm^3)	Water absorption ratio	Unit volume weight (t/m^3)
Coarse aggregate	5~20mm	2.80	0.8	1.720
	5~13mm	2.81	0.8	1.690
Fine aggregate	5mm	2.59	-	-
Pumice	5~8mm	1.04	16.1	0.392

Table 2 Properties of chemical admixture

Appearance	Density (g/cm ³)	pH value
Dark brown liquid	1.08±0.3	6±1

Table 3 TSA and TSB medium composition

Medium name	Medium composition
TSA medium	[Distilled water 1 L] - Tryptone (15.0 g) - Soytone (5.0 g) - Sodium Chloride (5.0 g) - Agar (15.0 g)
TSB medium	[Distilled water 1 L] - Pancreatic Digest of Casein (17.0 g) - Papaic Digest of Soybean (3.0 g) - Dextrose (2.5 g) - Sodium Chloride (5.0 g) - Dipotassium phosphate (2.5 g)

는 국내 S사 제품의 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 그 특성은 Table 2와 같다.

2.2.4 배지 및 균주

이 실험에 사용된 배지는 TSA (Tryptic Soy Agar)와 TSB (Tryptic Soy Broth)를 사용하였으며, 각 배지의 조성은 Table 3과 같다.

이 실험에서는 시중에 유통되고 있는 바실러스계 유용미생물 (Effective Microorganisms, EM)을 사용하였다. 미생물의 분리는 시료 30g을 멸균수 270 mL에 넣어서 교반한 후, 살균한 팁을 끼운 마이크로펄프로 TSA 배지에 10 mL 취한다. 여기에 살균한 콘라지봉 (bend glass)을 이용한 도말법으로 접종하였다. 또한 분리된 미생물에 대하여 pH 11이상의 강알칼리성시험을 실시하여 배합과정에서의 미생물 생존성을 확인하였다. 본 실험에서는 16S rDNA 염기서열 분석법에 의해 동정된 미생물을 이용하였으며, 동정된 미생물들은 Table 4와 같다 (Park et al., 2014).

2.3 시험체 제조 및 시공

2.3.1 시험체 구성

시험체는 일반콘크리트로 제작된 포카라블록과 유용미생물을 적용한 포러스콘크리트블록으로 나누어 제작하였으며, 각각의 포카라블록 내부에 포러스콘크리트블록을 7개씩 채우는 형태로 최종 시험체를 제작하였다. 평상시 및 갈수시 유입수 대비 포러스콘크리트블록의 총 접촉면적은 0.69m², 0.12m²이며, 총 접촉체적은 1.38m³, 0.24m³이다. 다음 Fig.

Table 4 List of EM used in this study

No.	Identification	Homology (%)
DS01	Bacillus flexus	99.2
DS02	Bacillus flexus	99.26
DS03	Bacillus flexus	99.6
DS04	Bacillus flexus	99.93
DS05	Bacillus firmus	99.86
DS06	Bacillus firmus	99.79
DS07	Brevibacillus agri	99.36
DS08	Bacillus circulans	99.31
DS09	Bacillus circulans	99.53
DS10	Lactobacillus farraginis	99.59

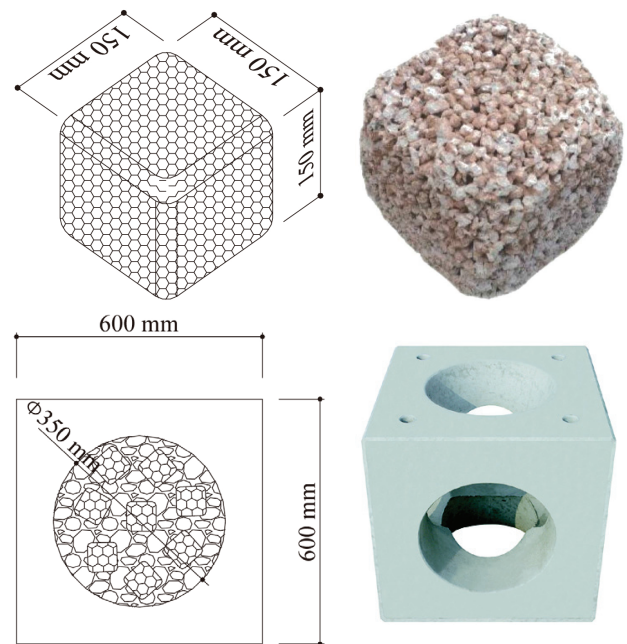


Fig. 3 Porous concrete and Pocara ordinary concrete

3에 각각의 시험체 규격 및 실물모형을 나타내었다.

2.3.2 시험체 제작 및 배합

시험용 공시체 중 포러스콘크리트는 트윈샤프트믹서를 이용하여 분할혼합방식으로 총 4분간 혼합하였으며, 일반콘크리트인 포카라블록은 원통형 강제식 믹서를 이용하여 분할혼합방식으로 총 4분간 혼합하여 제작하였다. 제작된 포러스콘크리트는 공시체는 24시간의 기건양생 후 28일간 20±3°C에서 수중양생하였으며, 일반콘크리트는 8시간의 증기양생을 거친 후 28일간의 기건양생을 실시하였다. 각각의 배합표는 Table 5와 Table 6에 나타낸 바와 같다.

Table 5 Mixing design of porous concrete

Porosity (%)	W/C (%)	Unit volume weight (kg/m ³)					
		C ¹⁾	W ²⁾	M ³⁾	Coarse aggregate		Ad. ⁶⁾
					CS ⁴⁾	P ⁵⁾	
5	25	611.8	138.1	15.4	1521.0	62.5	2.44
10	25	526.1	118.3	13.2	1521.0	62.5	2.11
15	25	438.0	98.5	11.0	1521.0	62.5	1.75
20	25	349.9	78.7	8.7	1521.0	62.5	1.40

*1) C : Cement, 2) W : Water, 3) CS : Crushed Stone, 4) M : Microorganisms, 5) P : Pumice, 6) Ad. : Admixture

Table 6 Mixing design of ordinary concrete

W/C (%)	S/a (%)	Unit volume weight (kg/m ³)				
		C ¹⁾	W ²⁾	Aggregate		Ad. ⁵⁾
				CA ³⁾	S ⁴⁾	
40.0	39.5	437.5	175.0	1078.1	682.8	5.25

*1) C : Cement, 2) W : Water, 3) CA : Coarse aggregate, 4) S : Fine aggregate, 5) Ad. : Admixture

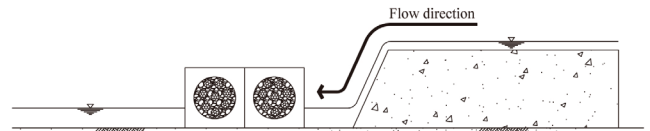


Fig. 4 Site test construction

2.3.3 시험체 시공 및 부지

현장 적용을 위한 부지는 경기도 용인시내 경안천의 지류인 동진 소하천 하류구간에 시공하였다. 대상 하천의 폭은 약 6.50m, 구배는 약 2.33%이며, 수심은 평상시 약 20cm, 갈수기 약 8cm이다. 대상 하천 및 설치 전경과 대상하천 수질특성을 Fig. 4와 Table 7에 나타내었다.

2.4 실험 방법

2.4.1 공극률 시험 방법

공극률시험은 일본콘크리트공학협회의 에코콘크리트연구위원회가 포러스콘크리트의 공극률 시험방법으로 제안한 용적법에 의하여 측정하였다 (JCI, 1995). 공극률은 식 (1)에 의하여 계산하였다.

$$A(\%) = 1 - (W_2 - W_1) / V \times 100 \quad (1)$$

- A : Porosity of concrete
- W₁ : Submerged weight of concrete
- W₂ : Air-dried weight of concrete
- V : Volume of concrete

Table 7 Characteristics of test river

Item	Test value	Item	Test value
Velocity (m/s)	0.28	Temperature (°C)	9.8
pH	7.8	EC (μs/cm)	245.0
BOD (mg/L)	2.30	COD (mg/L)	5.50
T-N (mg/L)	5.95	T-P (mg/L)	0.08

2.4.2 압축강도 시험 방법

압축강도 시험은 Φ100x200mm 공시체를 제작하여 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하여 1,000kN 유압식 강도시험기를 사용하여 측정하였다.

2.4.3 수질특성평가

대상부지에 블록을 설치한 뒤 약 10일간의 안정화기간을 가진 후 98일간 7일 간격으로 유입부와 유출부로 나누어 각각 총 14회 측정하되, 1회 측정시 해당 지점의 중간 수위에서 총 3개의 시료채취하여 평균값을 최종값으로 하였다. 또한 기존에 연구된 실내 수질시험의 동일기간에 따른 연구결과와 비교평가하였다. 또한 유용미생물의 생육특성과 관련된 수온, pH, DO특성과 부유물질 또는 영양물질의 제거특성을 파악하기 위하여 EC, SS, BOD, COD, T-N, T-P를 측정하였다. 수질 분석 항목과 방법은 Table 8과 같다.

Table 8 Chemical analysis items and methods

Analysys items	Methods	Note
Water temperature	pH meter(pH 330, WTW, Germany)	direct measurement
pH	pH meter(pH 330, WTW, Germany)	direct measurement
EC($\mu\text{m}/\text{cm}$)	EC meter(HI 933100, Hanna, Portugal)	direct measurement
DO(mg/L)	Winkler {(sodium azide modification} method	-
SS(mg/L)	Vacuum Filtration	Glass fiber filter method
BOD(mg/L)	DO meter(YSI 58, USA)	5 day BOD
COD(mg/L)	Potassium permanganate method	oxidizing agent - KMnO_4
T-N(mg/L)	Ultraviolet absorption spectrometry	-
T-P(mg/L)	Ascorbic acid reduction method	-

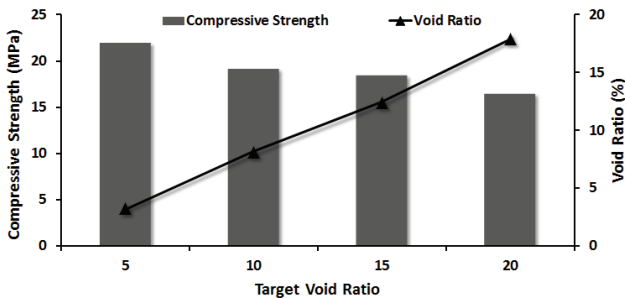


Fig. 5 Compressive strength and void ratio of porous concrete by using EM

3. 시험결과 및 분석

3.1 공극률 및 압축강도 평가

유용미생물을 이용한 포러스콘크리트의 설계공극률에 따른 압축강도와 실측공극률의 시험 결과는 다음 Fig. 5와 같다.

이를 고찰하여 보면 설계공극률이 5%에서 20%까지 증가할수록 압축강도가 22.0MPa에서 16.5MPa로 감소하는 경향을 보였으며, 실측공극률 또한 3.2%에서 17.9%까지 증가하여 설계공극률과 실측공극률과의 차이가 최대 2.1% 정도로 나타났다. 따라서 현 하천공사설계실무요령에 따르면 무근콘크리트일 경우 최소 18MPa를 만족하여야 하는 것을 고려해 보면 이를 만족하면서 공극을 확보할 수 있는 배합으로서 설계공극률 15%를 최적 배합으로 설정하였다.

3.2 수온, pH, 전기전도도 (EC), 중금속 용출 특성 평가

유용 미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시험 결

Table 9 Range and average of water temperature

Item	Influent ($^{\circ}\text{C}$)		Effluent ($^{\circ}\text{C}$)	
	min~max	average	min~max	average
In site test	14.6~22.6	22.4	15.0~26.0	22.5
In lab test	10.2~14.3	13.0	11.3~14.8	13.5

Table 10 Range and average of pH

Item	Influent		Effluent	
	min~max	average	min~max	average
In site test	7.3~9.1	8.0	7.6~8.8	8.1
In lab test	7.2~7.8	7.4	7.5~8.4	7.9

Table 11 Range and average of EC

Item	Influent ($\mu\text{m}/\text{cm}$)		Effluent ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	
	min~max	average	min~max	average
In site test	155.0~375.0	287.3	160.0~368.0	281.9
In lab test	341.2~362.1	352.2	378.2~402.5	410.2

Table 12 Concentrations of heavy metal elution

	Zn	Pb	Cu	Cr
minimum	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
max	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
average	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.

*N. D. : Non-Detection

과 경과일수에 따른 수온 및 pH, EC를 Table 9 ~ Table 11에 도시하였고, 중금속 용출 농도 측정결과를 Table 12에 나타내었다.

수온의 경우 현장시험의 경우 유입수 평균값은 22.4 $^{\circ}\text{C}$ 를 보였고, 최대 22.6 $^{\circ}\text{C}$, 최소 14.6 $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 또한 유출수의 평균값은 22.5 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고, 최대 26.0 $^{\circ}\text{C}$, 최소 15.0 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 유입수 대비 유출수 수온의 변화는 약 0.6%로서 작은 변화폭을 보였다. 또한 기존 실내시험에서의 결과와 비슷한 변화율을 보였다. 따라서 대상하천의 폭과 유량에 따른 현장조건을 고려해보면 유용미생물에 의한 수온의 변화는 미미한 것으로 판단된다.

pH 측정 결과는 현장시험의 경우 유입수 평균값은 8.0을 보였고, 최대 9.1, 최소 7.3으로 측정되었다. 또한 유출수의 평균값은 8.1로 나타났고, 최대 8.8, 최소 7.6로 나타났다. 유입수 대비 유출수 pH의 변화는 약 1.0%의 작은 변화폭을 보여 최적의 미생물 생육조건인 pH 6~8을 만족하는 것으로 나타났다. 28일간의 양생기간 동안 콘크리트가 중성화 되어 알칼리 용출은 없는 것으로 판단된다.

EC 측정결과는 현장시험의 경우 유입수의 평균값은 287.3 $\mu\text{m/cm}$ 을 보였고, 변화폭은 155.0 $\mu\text{m/cm}$ ~375.0 $\mu\text{m/cm}$ 으로 측정되었다. 또한 유출수의 평균값은 281.9 $\mu\text{m/cm}$ 로 나타났고, 변화폭은 160.0 $\mu\text{m/cm}$ ~368.0 $\mu\text{m/cm}$ 으로 나타났다. 유입수 대비 유출수의 변화는 평균 약 0.4%로 나타나 미생물에 의한 EC변화율은 거의 없는 것으로 나타났다.

유입 및 유출수에 대한 중금속 용출 농도 측정결과는 실내 시험과 동일하게 현장시험에서도 분석항목 전체에서 검출 이내의 값을 보임으로써 유용미생물에 의한 중금속의 용출과 중금속에 의한 수질에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

3.3 용존산소량 (DO) 특성 평가

유용 미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시험 결과 경과일수에 따른 DO의 변화는 다음 Fig. 6 및 Table 13과 같다.

현장시험결과 유입수의 DO농도 평균값은 11.0mg/L를 보였고, 최대 15.5mg/L, 최소 7.7mg/L의 농도가 측정되었다. 또한 유출수의 DO농도 평균값은 10.4mg/L로 나타났고, 최대 14.7mg/L, 최소 7.8mg/L의 농도를 나타내었다. 유입수 대비 유출수의 DO농도 변화율은 평균 4.0%로서 최대증가 3.8.0%, 최대감소 -19.6%로 나타났다.

경과일수에 따른 유입 및 유출수 각각의 DO농도 변화를 고찰하여 보면 전체적으로 DO농도 변화는 미미하였으나, 일부 측정시기에서는 높은 증감율이 나타났다. 이는 도시하천의 특성상 주변지역의 강우로 인한 유속증가로 자연적 폭기

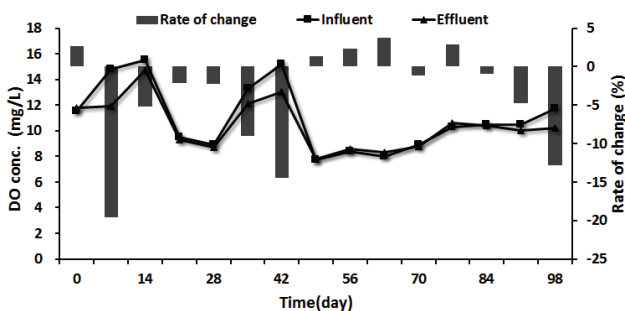


Fig. 6 Change of DO concentration with the passage of time

Table 13 Concentration and removal efficiencies of DO

Item	Influent (mg/L)		Effluent (mg/L)	
	min~max	min~max	min~max	average
In site test	7.7~15.5	7.8~14.7	-19.6~+3.8	-4.0
In lab test	8.5~9.1	7.3~8.9	-14.1~-2.2	-8.1

에 의한 용존산소의 증가와 초기유출수에 의한 과도한 오염물질의 유입으로 인한 일시적인 용존산소의 소모에 의한 것으로 판단된다.

또한 유입수 대비 유출수의 DO농도 변화를 고찰하여 보면 대부분의 측정시기에서 DO농도가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 하천수가 포러스콘크리트 내부로 통과하면서 유기물의 생물학적 분해과정에서 산소가 소모되었기 때문으로 판단된다. 하지만 일부 강우 측정시기에서 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이를 고찰하여 보면 포러스콘크리트를 대상하천에 보의 형태로 설치하여 강우 등 다른요인에 의해 유량과 유속이 증가하면 유용미생물의 반응시간이 상대적으로 짧아지고, 하천수가 보를 월류하여 떨어지면서 자연적인 폭기현상으로 인하여 용존산소량이 증가한 것으로 판단된다.

실내시험결과와 현장시험결과를 비교해 보면 실내시험의 경우 평균 8.5%의 DO농도 감소를 보인것에 비해 현장시험의 경우는 평균 4.0%의 감소를 나타냈다. 이는 실내실험의 경우 현장의 경우와 달리 한정된 공간에서 미생물의 생존 활동으로 인하여 DO를 소비함으로써 DO가 더 소모되었기 때문으로 판단된다.

3.4 부유물질 (SS) 제거특성 평가

유용 미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시험 결과 경과일수에 따른 SS농도의 변화를 다음 Fig. 7과 Table 14에 나타내었다.

시험결과 유입수의 SS농도 평균값은 20.1mg/L를 보였고, 최대 56.2mg/L, 최소 6.5mg/L의 농도가 측정되었다. 또한 유출수의 SS농도 평균값은 11.9mg/L로 나타났고, 최대 30.8mg/L, 최소 4.2mg/L의 농도를 나타내었다. 유입수 대비 유출수의 SS 제거율은 평균 34.1%, 최대 59.0%, 최소 11.1%로 나타났다.

경과일수에 따른 유입 및 유출수 각각의 SS농도 변화를 고찰하여 보면 전체적으로 SS농도 변화는 일정하나 일부시기에 변화를 보였다. 이는 주변지역의 강우로 인해 비점오염물질인 교통오염물질, 도시지역의 먼지나 모래입자, 대기오염물질 등이 유출되고, 유속의 증가로 인해 하천바닥에 침전되어 있는 침전물이 유출수와 함께 하천으로 유입되었기 때문으로 판단된다. 또한 유출 초기에 급격하게 증가하였다가 직접유출이 끝나면서 급격하게 감소하는 경향이 나타났다.

유입수 대비 유출수의 SS 제거율을 고찰하여 보면 평균 34.1%의 제거율을 보였으며, 고농도일 때 제거율이 더 높게

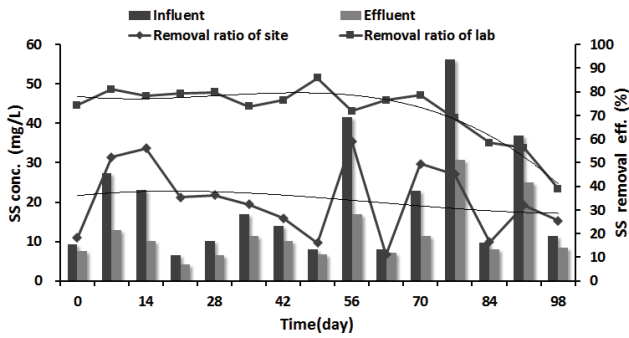


Fig. 7 Change of SS concentration with the passage of time

Table 14 Concentration and removal efficiencies of SS

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiencies (%)	
	min~max	min~max	min~max	average
In site test	6.5~56.2	4.2~30.8	11.1~59.0	34.1
In lab test	10.7~32.7	10.7~32.7	39.0~85.9	72.6

나타났다. 이는 포러스콘크리트가 비표면적이 크고 많은 내부공극을 가지고 있어 부유물질에 대한 여재 역할을 하였기 때문으로 판단된다. 하지만 실험 경과일이 약 30일 이후부터는 강우특성에 따른 변동은 제외하면 제거효율이 서서히 감소하는 현상을 보였고, 비정기적인 강우시 제거효율이 다소 회복되는 경향을 나타내었다. 이는 하천수 내 부유물질이 여재의 공극에 지속적으로 침전되어 쌓임으로서 공극이 막히는 현상을 초래하고 강우시 일부 침전물이 하천수와 함께 하류로 씻겨 내려갔기 때문으로 판단된다.

또한 실내시험시 제거율이 약 72.6%로 나타나 현장시험결과에 비하여 2배가량 높은 제거율을 보였다. 이는 실내시험의 경우 유입수의 유속이 일정하고 여재의 역할을 하는 포러스콘크리트에 대부분 접촉하여 통과하므로 현장시험에 비하여 유입수와 여재의 접촉면적이 훨씬 넓기 때문으로 판단된다.

3.5 생물학적 산소요구량 (BOD) 제거특성 평가

경과일수에 따른 BOD의 변화를 다음 Fig. 8과 Table 15에 나타내었다.

시험결과 유입수의 BOD농도 평균값은 3.4mg/L를 보였고, 최대 8.2mg/L, 최소 0.7mg/L의 농도가 측정되었다. 또한 유출수의 BOD농도 평균값은 2.7mg/L로 나타났고, 최대 5.7mg/L, 최소 0.7mg/L의 농도를 나타내었다. 유입수 대비 유출수의 BOD 제거율은 평균 14.6%, 최대 30.5%, 최소 2.6%로 나타났다.

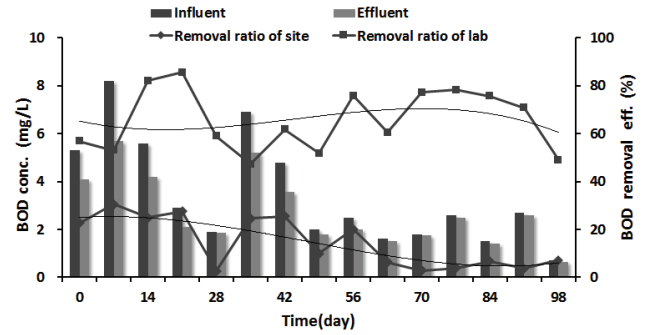


Fig. 8 Change of BOD concentration with the passage of time

Table 15 Concentration and removal efficiencies of BOD

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiencies (%)	
	min~max	min~max	min~max	average
In site test	0.7~8.2	0.7~5.7	2.6~30.5	14.6
In lab test	2.7~5.8	2.1~4.1	13.1~38.9	24.8

경과일수에 따른 유입 및 유출수 각각의 BOD농도 변화를 고찰하여 보면 SS농도의 변화와 마찬가지로 주변지역 강우시 비점오염물질이 초기유출에 의해 씻겨 내려감으로 인하여 농도가 유출초기에서는 증가하는 경향을 나타냈다.

유입수 대비 유출수의 BOD 제거율을 고찰하여 보면 평균 14.6%의 낮은 제거율을 보였다. 또한 저농도 보다 고농도일수록 제거효율이 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 유용미생물의 생물학적 활동 및 생물막으로 인하여 유기물의 제거되어 BOD농도가 저감된 것으로 판단된다.

또한 실내시험결과와 비교해 보면 실내시험의 경우 평균 24.8%의 제거율을 보여 현장시험에 비하여 약 2배 가량 높은 제거율을 보였다. 이는 유량에 비해 접촉면적이 작아 포러스콘크리트 공극의 유용미생물의 접촉이 작고, 주변 지역 강우시 미생물에 의한 유기물의 분해되는 속도에 비하여 유속이 증가하여 충분한 체류시간을 가지지 못해 제거율이 비교적 낮게 측정된 것으로 판단된다.

3.6 화학적 산소요구량 (COD) 제거특성 평가

유용 미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시험 결과 경과일수에 따른 COD의 변화를 다음 Fig. 9와 Table 16에 나타내었다.

시험결과 유입수의 COD농도 평균값은 6.6mg/L를 보였고, 최대 11.1mg/L, 최소 3.1mg/L의 농도가 측정되었다. 또한 유출수의 COD농도 평균값은 4.1mg/L로 나타났고, 최대 6.1mg/L,

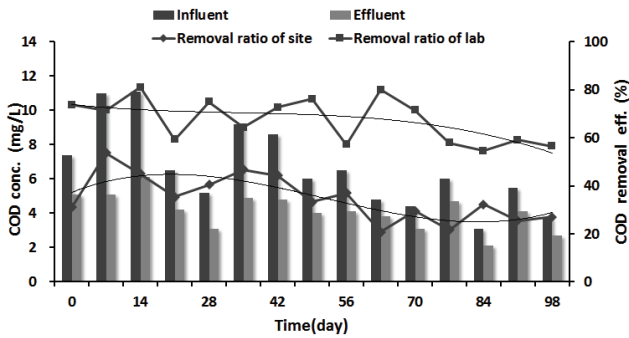


Fig. 9 Change of COD concentration with the passage of time

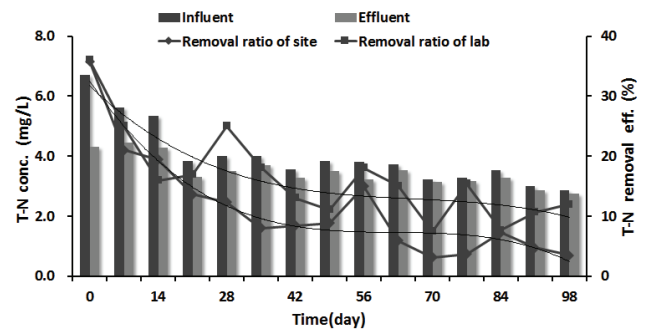


Fig. 10 Change of T-N concentration with the passage of time

Table 16 Concentration and removal efficiencies of COD

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiencies (%)	
	min~max	min~max	min~max	average
In site test	3.1~11.1	2.1~6.1	20.8~53.6	34.9
In lab test	18.0~32.0	4.8~15.3	13.5~75.1	58.0

최소 2.1mg/L의 농도를 나타내었다. 유입수 대비 유출수의 COD 제거율은 평균 34.9%, 최대 53.6%, 최소 20.8%로 나타났다.

경과일수에 따른 유입 및 유출수 각각의 COD농도 변화를 고찰하여 보면 BOD농도의 변화양상과 유사하게 주변 지역 강우에 의해 유출 초기에서는 농도의 증가가 나타나며, 유출이 감소되면서 농도가 감소하는 양상을 보이고 있으나, 변화 폭은 BOD에 비해 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

또한 유입수 대비 유출수의 COD 제거율을 고찰하여 보면 저농도 보다 고농도 일수록 제거효율이 다소 크게 나타나는 경향을 보이긴 하였으나, 전체적으로 약 34.9%의 제거율이 나타났다. 이는 유용미생물의 생물학적 산화/분해에 의한 것으로 판단되며, 포러스콘크리트와 골재로 사용된 경량부석 또한 미생물이 서식할 수 있는 서식처로서의 역할을 충분히 하였기 때문으로 판단된다.

실내시험결과와 비교해 보면 실내시험의 경우 평균 58.0%의 제거율을 보인것과 달리 현장시험에서는 약 34.9%의 다소 낮은 제거율을 보였다. 이는 BOD의 실험결과와 동일하게 실내시험의 경우보다 유속 및 유량이 크고 유입수가 포러스콘크리트와 접촉하여 미생물이 반응할 수 있는 시간과 접촉면적이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

Table 17 Concentration and removal efficiencies of T-N

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiencies (%)	
	min~max	min~max	min~max	average
In site test	2.9~6.7	2.8~4.4	3.1~35.8	11.4
In lab test	1.78~3.10	1.41~2.75	4.7~41.5	13.1

3.7 총질소 (T-N) 제거특성 평가

유용 미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시험 결과 경과일수에 따른 T-N의 변화를 다음 Fig. 10과 Table 17에 나타내었다.

시험결과 유입수의 T-N농도 평균값은 4.0mg/L를 보였고, 최대 6.7mg/L, 최소 2.9mg/L의 농도가 측정되었다. 또한 유출수의 T-N 농도 평균값은 3.5mg/L로 나타났고, 최대 4.4mg/L, 최소 2.8mg/L의 농도를 나타내었다. 유입수 대비 유출수의 T-N 제거율은 평균 11.4%, 최대 35.8%, 최소 3.1%로 나타났다.

유입수 대비 유출수의 T-N 제거율을 고찰하여 보면 저농도 보다 고농도 일수록 제거효율이 크게 나타났다. 이는 유용미생물이 수중의 질소를 먹이원으로 하여 성장하고, 생물막을 형성함으로써 영양물질의 소모가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 또한 경과일수가 증가할수록 제거율이 서서히 감소하는 경향을 보였다.

실내시험결과와 비교하여 고찰하여 보면 실내시험의 경우 평균 13.1%의 제거율을 보여 현장시험결과와 평균 11.4%보다 제거율이 다소 크게 나온 것으로 나타났다. 이는 현장시험의 경우 초기 유입수의 농도가 실내시험보다 작고, 유입수의 농도가 2.9~6.7mg/L로 하천수의 수질환경기준으로 볼 때 ‘매우나쁨 (T-N 기준 1.5mg/L 초과)’을 넘어서 매우 오염되어 있어 주변 강우에 의한 하상의 오염물질 유출에 대한 영향이 적기 때문으로 판단된다.

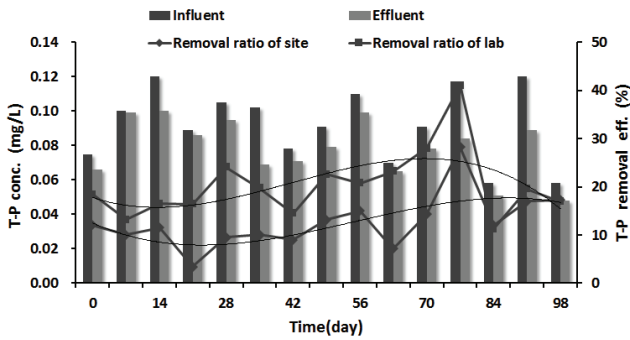


Fig. 11 Change of T-P concentration with the passage of time

Table 18 Concentration and removal efficiencies of T-P

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiencies (%)	
	min~max	min~max	min~max	average
In site test	0.058~0.120	0.048~0.100	3.4~28.2	12.6
In lab test	0.061~0.091	0.045~0.075	7.2~37.6	15.2

3.8 총인 (T-P) 제거특성 평가

유용 미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시험 결과 경과일수에 따른 T-P의 변화를 다음 Fig. 11과 Table 18에 나타내었다.

시험결과 유입수의 T-P농도 평균값은 0.092mg/L를 보였고, 최대 0.120mg/L, 최소 0.058mg/L의 농도가 측정되었다. 또한 유출수의 T-P 농도 평균값은 0.079mg/L로 나타났고, 최대 0.100mg/L, 최소 0.048mg/L의 농도를 나타내었다. 유입수 대비 유출수의 T-P 제거율은 평균 12.6%, 최대 28.2%, 최소 3.4%로 나타났다.

경과일수에 따른 유입 및 유출수 각각의 T-P농도 변화를 고찰하여보면 측정시기에 따라 다소 농도의 증감은 있으나 대부분 일정한 농도를 나타내었고, 다만 주변 강우에 따라 농도의 변화가 다소 나타난 것으로 판단된다.

유입수 대비 유출수의 T-P 제거율을 고찰하여 보면 T-N의 경우와는 다르게 측정기간에 따라 일정한 제거율을 보였으며, 저농도 보다 고농도 일수록 제거효율이 크게 나타났다. 이는 수중의 인이 포러스콘크리트의 미세공극과 유용미생물 막에 의해 흡착되고, 흡수되어 제거되었기 때문으로 판단된다.

실내시험결과와 비교하여 고찰하여 보면 현장시험의 경우 평균 12.6%의 제거율을 보여 실내시험결과의 평균 15.2% 보다 제거율이 다소 작게 나온 것으로 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 유용미생물을 이용한 포러스콘크리트의 공극률 및 압축강도와 현장적용 실험을 통한 수질정화 특성을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 공극률 및 압축강도 특성 평가 결과, 설계공극률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 보였으며, 적절한 소요강도를 고려해보면 설계공극률 15%의 배합이 적절한 것으로 판단되며, 설계공극률과 실측공극률의 차이는 최대 2.1%로 나타났다.
- (2) 용존산소, 수온 및 EC, pH와 중금속 용출 특성 평가 결과, 용존산소, 수온 및 EC는 유량 및 유용미생물에 의한 변화가 미미하였고, pH의 경우 평균 1.0%의 작은 변화폭을 보였다. 또한 중금속의 용출량은 측정되지 않아 수질 및 생물에 대한 독성은 없는 것으로 나타났다.
- (3) 부유물질 (SS)의 측정 결과 유입수 대비 유출수의 제거율은 평균 약 34.1%로 포러스콘크리트 내부의 많은 비표면적과 공극으로 인하여 부유물질에 대한 여재 역할을 하였기 때문으로 판단된다. 하지만 약 30일 이후부터는 여재의 공극막힘현상으로 인한 제거성능이 감소되어 이를 위하여 주기적인 역세 등의 유지관리가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- (4) 유용미생물을 적용한 포러스 콘크리트의 현장적용을 통한 수질정화특성 (BOD, COD 및 T-N, T-P)의 측정 결과, 각각의 평균 제거율은 약 14.6%, 34.9%, 11.4%, 12.6%로 나타나 기존의 실내시험에 비하여 낮았지만 하천환경의 개선효과를 나타내었다. 이는 유용미생물의 활동 및 성장에 따라 먹이원으로 유기물질을 소모하고 생물막 작용으로 인하여 수질이 개선된 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서의 유용미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시 하천 및 호소수 내의 오염물질을 제거할 수 있는 것으로 판단되며, 다만 장기간 설치시 포러스콘크리트의 공극막힘현상으로 인한 제거성능의 감소는 주기적인 역세 또는 침강지 설치로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 물관리연구사업인 자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술개발 연구단 (GREEN RIVER) (12기술혁신C02)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

References

1. Bae, J. W. (2010), Development on NBF Process for the Advanced Treatment of Domestic Sewage, Dept. of Environmental Engineering, Graduate School of Dong-A University, Busan, 1-10.
2. Choi, Y. H., Yoo, N. H., Choi, J. D., and Kim, G. S. (1999), Environmental Functions and Impacts on Blowing Beams in Small Rivers, *Journal of Agriculture and Life Sciences Research Institute*, Kangwon National University, 10, 38-46.
3. Hae, K. Y. (2012), The Study on Characteristic of Stream Water Treatment By Bio-Film Bowl, Department of Environmental Engineering, Graduate School of Mokpo National University, 1-10.
4. Higa, T., and Parr, J. F. (1994), Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Agriculture and Environment, *Japan International Nature Farming Research Center*.
5. Iain, M. M., Gillespie, J. C. P. (2013), Bioremediation an Environmental Remediation Technology for the Bioeconomy, *Trends in Biotechnology*, 31(6), 329-332.
6. JCI (1995), ECO Concrete Committee Report, *Japan Concrete Institute*, 56-58.
7. Kang, Y. H. (2009), A Study on Water Purification and Runoff Reduction by Rainwater Infiltration Facility using *Bacillus subtilis*, Dept. of Environment Engineering The Graduate School Kwangwoon University, 36-60.
8. Kim, E. H., Cho, Y. J., Park, S. J., Shin, K. S., Yim, S. B., Jung, J. K. (2004), Advanced Wastewater Treatment Process using Rotating *Bacillus* Contactor (RABC), *Journal of Korean Society on Water Quality*, Korean Society on Water Environment, 20(2), 190-195.
9. 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*, Korea Concrete Institute, 23(3), 331-338.
10. Kim, W. J., Do, H. W., Kim, W. S., Chun, W. Y. (2012), An Experimental Study on Water-Purification Properties and the Development of Green Building Materials in Moss Bricks Using Effective Micro-Organisms, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, 28(5), 103-110.
11. Lee, C. B. (2006), A Study on Advanced Treatment of Wastewater by Biofilm Filter Process, Department of Chemical Engineering Graduate School of Chosun University, 38-40.
12. Lee, C. B. (2006), A Study on Advanced Treatment of Wastewater by Biofilm Filter Process, Department of Chemical Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwangju, 4-5.
13. Lee, H. S., Son, H. H. (2007), Sedimentation and EPS Production by the Change of Dissolved Oxygen Concentration for the Aeration Tank to treat Wastewater with *Bacillus* sp., *Journal of Academia-industrial Technology*, Korea Academia-industrial Cooperation Society, 8(3), 624-631.
14. N, Szymanski, RA, Patterson (2003), Effective microorganisms (EM) and Wastewater system, in *future directions for on-site systems: Best management practice*. In: *Proceeding of on-site 03 Conference*, Held at University of New England, Armidale. Lanfax Laboratories Armidale, 347-354.
15. Nilsson, C., Lakshmanan, R., Renman, G., and Rajarao, G. K. (2013), Efficacy of Reactive Mineral-Based Sorbents for Phosphate, Bacteria, Nitrogen and TOC Removal-Golumn Experiment in Recirculation Batch Mode, *Water Research*, 47(14), 5165-5175.
16. Park, J. R., Lim, H. M., Woo, H. S. (2001), A Study on Operation Characteristics of the Upflow Contact Oxidation Process for River Purification, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Korean Society on Water Environment, 17(5), 567-564.
17. Park, J. S., Kim, B. K., Kim, W. S. Seo, D. S., Kim, W. J. (2014), Investigation on Water Purification Effect through Long-term Continuous Flow Test of Porous Concrete Using Effective Microorganisms, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26(2), 219-227.
18. Son, H. H. (2007), Removal Efficiency for Operation Condition in Advanced Treatment of Wastewater using *Bacillus* sp., Dept. of Civil and Environment Engineering The Graduate School Sangmyung University, 18-26.
19. Song, W. J., Fu, H. Y., and Wang, G. Y. (2012), Study on a Kind of Eco-concrete Retaining Wall's Block With Water Purification Function, *Procedia Engineering*, 28, 182-189.
20. Zakaria, Z., Gairola, S., and Shariff, N. M. (2010), Effective Microorganisms (EM) Technology for Water Quality Restoration and Potential for Sustainable Water Resources and Management, *2010 International Congress on Environmental Modelling and Software*, International Environmental Modelling and Software Society.

Received : 06/04/2014

Revised : 07/04/2014

Accepted : 07/11/2014

요 지

최근 수십년간의 산업발달 및 인구증가에 따라 산업폐수 및 각종 비점오염원의 유입으로 수질오염이 심각한 실정이다. 이에 대해 국내 및 국외에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 유기물질의 분해효과가 있는 유용미생물과 포러스콘크리트를 이용하여 하천 현장에 설치하여 구조적 성능평가와 장기간 수질정화능력을 평가하였다. 구조적 성능평가 결과, 시험체의 공극률은 15%가 적절하다고 판단되며, 또한 수질정화성능 검토 결과 각항목에 대한 제거율은 SS 34.1%, BOD 14.6%, COD 34.9%, T-N 11.4%, T-P 12.6%를 나타냈다. 따라서 유용미생물을 이용한 포러스콘크리트의 현장적용시 수질을 정화시키는데 효과적이라고 판단된다.

핵심 용어 : 유용미생물, 미생물 복합처리, 포러스 콘크리트, 현장적용 실험, 수질정화
