

친환경 하상차수공법 현장 적용성에 관한 연구

A Study for Field Application of Environmental-friendly Waterproof Method for Riverbed

박민철¹⁾ · 김성구²⁾ · 광노경³⁾ · 신효희⁴⁾ · 이송[†]

Park, Minchul · Kim, Seonggoo · Kwak, Nokyoung · Shin, Hyohee · Lee, Song

ABSTRACT : In period of rapid economic development, as doing river conservation work by using harmful materials environmental pollution has adversely effected humans, animals and plants frequently. For recovery of environmental pollution it needs a lot of time and cost. Therefore, in this study, in order to take an environment-friendly method which is also economical and durable both results of the laboratory model test and field test were compared and analyzed. According to the results of the laboratory model test, those methods such as concrete paving, asphalt paving, bentonite mat, stabilized soil method and mixed soil method have small amount of seepage, but on the other hand compaction soil, grassland and permeable materials have considerable amount of seepage. The results of field test show a similar tendency with laboratory test and have been satisfied to assess standard of domestic water permeability below 1.0×10^{-7} cm/sec and unconfined compressive strength is also than 1.0MPa so it has been satisfied about standard. In conclusion, as compaction rate increased, as unconfined compression strength increased and coefficient of permeability decreased.

Keywords : River bed waterproof method, Bentonite mat method, Mixed soil method, Stabilized soil method

요지 : 급속한 경제발전시기에는 하천공사 시 유해한 재료를 사용함으로써 환경오염으로 인한 인간 및 동식물에 악영향을 끼치는 사례가 많이 발생하였다. 이를 복구하는 시간 및 비용이 많이 소요되는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하천공사 중의 차수공사 시 환경오염 문제점을 극복할 수 있는 친환경적이면서 경제적으로 저렴하고, 장기적으로 사용할 시 내구성에 문제없는 공법을 적용하고자 실내모형실험결과와 현장실험결과를 비교·분석하였다. 실내실험결과 콘크리트 포장재, 아스팔트 포장재, 벤토나이트 매트, 고화토공법, 혼합토공법은 적은 침투량을 나타내었고, 이와 반대로 다짐흙, 초지, 투수성 포장재는 많은 양의 침투량이 발생되었다. 현장투수실험결과는 실내실험투수결과와 비슷한 경향을 나타냈으며, 국내차수시설 투수기준인 1.0×10^{-7} cm/sec 이하에 모두 만족하였다. 또한, 일축압축강도는 1.0MPa 이상 결과값을 얻어 기준에 만족하였고, 다짐도가 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 투수계수는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

주요어 : 하상차수공법, 벤토나이트매트공법, 혼합토공법, 고화토공법

1. 서론

산업 발달과 생활 편의성으로 인하여 환경오염이 늘어나고 있는 실정이다. 건설공사 시 이에 따른 대책으로 환경오염을 최소화하는 공법과 친환경 공법이 많이 이루어지고 있는 추세이다. 기존 소하천하상 시공 시 손실수가 발생하지 않도록 하기 위하여 차수성이 뛰어나고 세굴현상에 대한 저항성이 뛰어난 콘크리트차수재로 시공을 하여 물 흐름을 유도 하였다. 하지만 콘크리트 구성 재료인 시멘트와 혼화제는 유해한 성분을 포함하고 있어 환경오염에 대한 심각한 부작용으로 동·식물이 살기에 어려운 실정이다.

이러한 환경문제를 해결하기 위한 방법으로 최근에는 친

환경적인 하상차수성에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다 (김명균, 1998). 이에 따른 연구는 폐기물 매립지에서부터 시작되었다. 매립지에서 제일 많이 사용된 재료는 점토 차수재로서 차수성이 우수하며, 시공이 간단하여 많이 사용되었다(Auvinet 등, 1980).

그러나 동결 및 용해, 건조 등(이송 등, 2000)에 의해 손상이 많이 이루어지고 자체적으로 복원이 어렵고, 소하천의 경우 장시간 물 흐름이 발생할 때 유실에 따른 손상이 증대되어 세굴현상을 일으키는 원인이며, 최근에는 재료수급 부족으로 어려움을 겪고 있는 실정이다.

따라서 흙과 벤토나이트를 혼합하여 만든 혼합토공법(이광열 등, 2001; 주재우 등, 2006; Lundgren, 1981; Chapuis,

1) 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

2) 비희원, SK건설 파주운정지구 물순환시스템 조성공사 현장소장

3) 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

4) 정희원, 대림대학 토목환경과 전임강사

† 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수(E-mail : scugeo@uos.ac.kr)

1990), 토목섬유와 벤토나이트를 결합한 벤토나이트매트공법(석재덕, 2005), 고화재와 흙을 혼합하여 만든 고화토공법(신은철 등, 1998) 등은 매우 낮은 투수성으로 차수재 역할 뿐만 아니라 세굴에 대한 안정성도 뛰어나다. 또한 친환경적이면서 환경오염을 최소화할 수 있고, 유속이 있는 소하천에서 영구적으로 사용할 수 있으며, 현장에서 발생하는 흙을 사용함으로써 재료수급에 대한 불균형 해소와 경제적으로 이익을 주는 등 많은 장점을 가지고 있다.

이에 본 연구는 기존공법들과 친환경 공법의 신뢰성 및 현장 적용성을 판단하기 위하여 실내모형시험기(2.0×2.0×1.0m)를 제작하여 표면재료에 따른 강우강도별로 실험한 결과값과 현장에서 직접 채취한 불교란 시료를 이용하여 다짐도, 투수계수, 일축압축강도 등을 실시하여 실내실험과 비교·분석하였다.

2. 실내모형시험

2.1 실험개요

본 연구에서 실내실험의 목적인 현장적용성을 평가하기 위해 친환경 하상차수공법인 벤토나이트매트공법, 혼합토공법, 고화토공법 3공법과 기존에 사용한 아스팔트차수재, 콘크리트차수재, 다짐흙, 초지 등의 재료를 사용하였다. 실내모형시험기는 아크릴로 2m×2m×1m 크기로 제작하였고, 실제 강우조건을 모사하기 위하여 별도로 인공강우 시스템을 제작하였다. 인공강우 강우강도를 고려한 노즐 분사식으로 재현인공강우자동시스템을 설치하여 표면재료에 따른 차수 및 침투실험을 실시하였다.

표 1. 원지반시료의 기본물성실험 결과

구 분	G _s	Wn(%)	LL	PI	#200(%)	γ _{dmax} (g/cm ³)	O.M.C(%)	k(cm/sec)	USCS
벤토나이트매트공법	2.650	25.9	N.P	N.P	35.7	1.792	17.7	3.60×10 ⁻⁶	SM
혼합토공법	2.642	16.6	N.P	N.P	24.6	1.821	13.9	2.60×10 ⁻⁵	SM
고화토공법	2.645	15.4	N.P	N.P	9.8	1.830	15.4	6.20×10 ⁻⁵	SM

표 2. 벤토나이트매트 실험결과(한국화학시험연구원, 2009)

구 분	실험결과	실험기준	실험방법
중 량	5386.2	4840g/m ² 이상	ASTM D 5993
인장강도	길이	771.5	95N이상
	폭	1010.9	95N이상
낙구충격시험	이상없음	이상없을것	ASTM M 3736
파열강도	727.8	100N이상	ASTM D 4833
경도	이상없음	이상없을것	ASTM D 1790
팽윤도	36.0	≥ 20mL이상	ASTM D 5890
투수시험	1×10 ⁻¹⁰ cm/sec	1×10 ⁻⁹ cm/sec이하	ASTM D 5084
몬모릴로나이트 함유량	81%	70%이상	-

2.2 토질특성

본 연구에 사용된 시료는 현장에서 적용되는 3가지 공법에 적용될 장소에서 채취하였다. 시험재료의 특성을 파악하기 위하여 기본물성시험인 비중, 액·소성시험, 제가름시험, #200체 통과율, 입도분석, A-다짐, 투수계수실험 등을 실시한 결과 모든 시료에서 소성지수가 N.P가 나왔으며, 통일분류법상 실트질모래로 판정되었다.

투수계수 실험결과 각 재료의 투수계수 k는 2.2×10⁻⁵cm/sec ~ 3.6×10⁻⁶cm/sec으로 국내하상차수시설 기준인 1.0×10⁻⁷cm/sec 이하에 적합하지 않음을 확인할 수 있었다. 표 1은 현장에서 발생하는 채취한 시료의 기본물성시험 결과이다.

2.3 침투량 실험대상재료에 대한 최적배합비 선정

표 1에서 나타났듯이 원지반의 투수계수 결과값은 기준에 적합하지 않으므로 벤토나이트매트 공법, 혼합토공법, 고화토공법을 적용하기 위해서는 원지반을 각각의 공법에 겸용하거나 혼합하여 사용해야 한다. 따라서 현장 발생토와 혼합재료의 최적 배합비를 찾기 위해서는 현장발생토에 벤토나이트 또는 고화재를 일정한 비율로 증가시키면서 실험을 하였다. 각각 시료에 대하여 A다짐을 실시한 후 γ_{dmax}와 O.M.C를 구한 다음 이 결과값을 이용하여 Ø70×140mm 공시체를 제작하여 7일간 양생한 뒤, 삼축투수계수실험 및 일축압축강도실험을 실시하여 최적 배합비를 구했고, 이를 본 연구에서의 표면재료에 따른 강우강도별 실내실험과 현장 적용성 평가를 위해 사용하였다.

2.3.1 벤토나이트매트공법

벤토나이트매트공법은 매트 자체로 시공하기 때문에 현

장의 발생토를 혼합하지 않고 사용한다. 따라서 매트와 각종 품질은 품질시험전문기간을 통해 확인하였고, 그 결과 국내차수기준에 적합한 제품으로 판정되었다. 표 2는 벤토 나이트매트의 품질시험결과를 나타내고 있다(한국화학시험 연구원, 2009).

2.3.2 혼합토공법

시험결과 벤토나이트과우더량을 증가시킬수록 투수계수는 감소하고, 압축강도는 증가하는 결과를 나타내었다. 혼합토공법의 벤토나이트과우더 최적의 혼입률은 차수성 및 내구성을 고려하여 6%로 정했다. 이는 국내차수시설의 기준인 투수계수 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 만족한다. 표 3은 벤토나이트과우더 배합비율에 따른 시험결과를 나타내고 있다.

2.3.3 고화토공법

고화재 특성은 시멘트 주성분에 고로슬래그, 석고, fly-ash, 실리카흄 등 혼화재료를 혼합해서 만든 재료로서 압축강도는 1종 포틀랜드 시멘트 기준강도보다 낮으나 환경오염에 대해 무해한 성질을 가지고 있다. 이 시험결과도 마찬가지로 고화재량이 증가할수록 투수계수는 감소하고, 압축강도는 비례적으로 증가하는 경향을 보였고, 혼합토공법보다 강도 및 차수성이 우수한 결과를 나타냈다. 고화재혼입량 90kg/m^3 일 때 투수계수 $8.61 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$, 압축강도 1.66MPa의 결과값은 국내하상차수시설 기준에 만족하나, 장기적인 안정성을 유지하기 위해서 고화재량을 120kg/m^3 로 결정하였으며 이를 표면재료에 따른 침투량시험과 현장시공에 적용하였다. 표 4는 고화재 배합비율에 따른 시험결과를 나타내고 있다.

표 3. 벤토나이트 혼합비율에 따른 시험결과

구분	벤토나이트 함량 (%)	γ_{dmax} (g/cm^3)	O.M.C (%)	투수 계수 (cm/sec)	일축압축 강도 (MPa)	비고
혼합토 공법	6.0	1.804	14.5	8.00×10^{-8}	1.65	현장 적용
	7.0	1.792	15.8	7.10×10^{-8}	1.78	
	8.0	1.779	16.1	6.30×10^{-8}	1.89	
	10.0	1.742	17.3	5.00×10^{-8}	1.99	

표 4. 고화재 혼합비율에 따른 시험결과

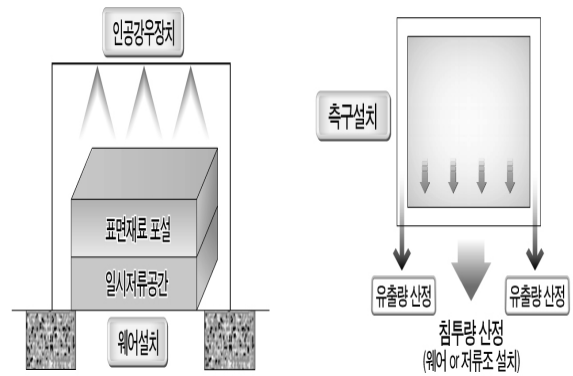
구분	고화재 함량 (kg/m^3)	γ_{dmax} (g/cm^3)	O.M.C (%)	투수 계수 (cm/sec)	일축압축 강도 (MPa)	비고
고화토 공법	90	1.842	14.7	9.10×10^{-7}	1.66	현장 적용
	100	1.850	14.0	8.01×10^{-7}	1.92	
	110	1.879	13.3	5.54×10^{-8}	2.12	
	120	1.889	12.1	4.24×10^{-8}	2.32	

2.4 실험장치 및 구성

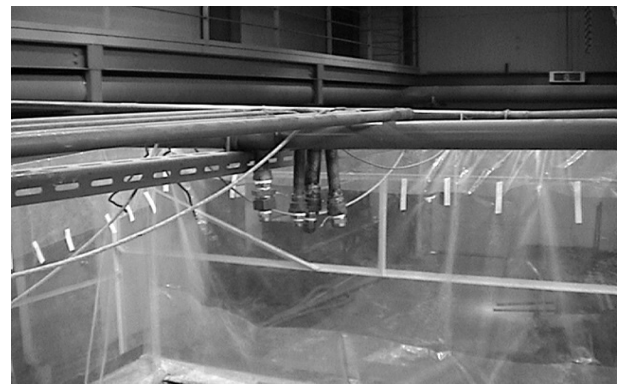
본 연구에 사용한 실험 장치는 표 5와 그림 1에 나타냈듯

표 5. 실험장비제원

크기	경사	측점	디지탈 유량계범위	월류 웨어	저수조	측구
2m×2m (4m ²)	횡방향 2% 종방향 2%	NO.1	15L/hr ~ 500L/hr	삼각 웨어	1×2×0.6m (1,200ℓ)	0.3×0.15m
		NO.2	500L/hr ~ 5,000L/hr			
		NO.3	2,000L/hr ~ 20,000L/hr			



(a) 실험장치 모식도



(b) 인공강우장치



(c) 차수 및 침투시험

그림 1. 실험장비 모식도 및 사진

이, 2m×2m×1m 실내모형시험기를 제작하였다. 하부 침수조의 웨어부를 통과한 물은 침투량 및 직접유출량을 측정할 수 있게 제작하였으며, 측정시간은 30초와 1분은 웨어 월류 높이로 측정하고 2분부터 1분 간격으로 5분까지 측정하고 5분부터는 5분 간격으로 90분까지 측정될 수 있도록 하였다.

측정방법은 정한 시간에 따라 메스실린더를 이용하여 눈금을 측정한 후 체적으로 환산하여 침투량 및 유출량을 산출하였다.

인공강우는 강우강도를 고려한 노즐 분사식으로 재현인공강우자동시스템을 제작하여 강우조건에 맞게 제작하였고, 재료표면에는 종방향 2%, 횡방향 2% 경사를 주었다. 표면재료에 따른 강우강도별 침투량 실험을 실시하여 각 재료별 차수성을 파악하였다.

2.5 실험방법

실험과정은 차수성 효과를 저하시키는 원인을 제거하기 위하여 NO. 19.0mm체를 통과한 골재를 시료로 사용하였다.

벤토나이트 매트공법의 차수실험은 현장과 유사한 조건으로 모사하기 위하여 원지반을 조성하고 두께 6mm 벤토나이트매트를 설치한 후 양호한 사질토를 두께 300mm로 포설하고 다진 후 유속에 따른 차수재 손실 방지를 위해서 상부 피복제 자갈을 두께 250mm(D20mm~70mm)로 포설하였다.

혼합토 차수실험의 경우 벤토나이트 파우더와 현장발생토 배합비율을 표 3에서 정한 6% 비율로 했으며 두께는

표 6. 표면재료의 조건

구분	토지 이용
콘크리트 포장	· 도로 및 주택시설
아스팔트 포장	· 도로 및 주택시설
다짐흙	· 운동장 시설
초지	· 공원시설
투수성 포장	· 공원 및 도로시설
벤토나이트매트	· 도로 및 호수시설
혼합토	· 도로 및 호수시설
고화토	· 도로 및 호수시설

표 7. 표면재료에 따른 강우강도별 침투량 분석

구분	다짐흙 (L/sec)	초지 (L/sec)	아스팔트 포장재 (L/sec)	콘크리트 포장재 (L/sec)	투수성 포장재 (L/sec)	고화토 (L/sec)	혼합토 (L/sec)	벤토나이트매트 (L/sec)
20mm/hr	0.0780	0.0149	0.0020	0.0000	0.0220	0.0003	0.0032	0.0021
30mm/hr	0.0151	0.0202	0.0031	0.0010	0.0321	0.0018	0.0051	0.0035
50mm/hr	0.0173	0.0260	0.0043	0.0021	0.0592	0.0036	0.0071	0.0042
80mm/hr	0.0192	0.0282	0.0052	0.0032	0.0901	0.0056	0.0075	0.0053
100mm/hr	0.0221	0.0295	0.0060	0.0042	0.1113	0.0061	0.0081	0.0062
200mm/hr	0.0296	0.0300	0.0071	0.0058	0.2078	0.0073	0.0085	0.0069

300mm로 포설하였다. 고화토공법 차수실험은 혼합토 공법과 마찬가지로 고화재와 현장발생토를 실내시험에서 구한 비율로 일정하게 혼합 후 두께 500mm로 포설한 다음 실험을 실시하였으며, 모든 시료의 다짐은 실내다짐결과에서 얻은 γ_{dmax} 와 O.M.C값을 이용하여 수행하였다.

다짐이 완료되면 인공강우 자동시스템을 설치하여 시작 후 30초와 1분의 직접유출량 및 침투량을 웨어 월류 높이로 측정하고 2분부터 1분 간격으로 5분까지 측정하고 5분부터는 5분 간격으로 90분까지 측정하였다. 실제 현장 조건을 모사하기 위해서 강우강도 20mm/hr, 30mm/hr, 50mm/hr, 80mm/hr, 100mm/hr, 200mm/hr 6가지 조건으로 90분간 실험을 실시한 후 유출량과 침투량을 측정하여 표면재료에 따른 강우강도별 침투량을 비교·분석하였다. 본 시험에서 사용된 시료의 종류는 표 6에 제시되어 있는 바와 같다.

3. 실내실험결과 분석

3.1 표면재료에 대한 강우강도에 따른 침투량 분석

표 7과 그림 3의 결과에 나타났듯이 표면재료에 따른 강우강도별 침투량 분석결과 콘크리트 포장재가 침투수량이 가장 적었고, 아스팔트 포장재, 고화토, 벤토나이트 매트, 혼합토, 다짐흙, 초지, 투수성포장재 순으로 침투량이 적은 순으로 나타났다. 이 중에서도 투수성 포장재는 가장 높은 침투수량을 보였으며, 시간에 따라 침투수량은 거의 변화가 없었고, 강우강도별로 비교했을 경우 침투량이 증가하는 것을 확인하였다. 다짐흙, 초지는 측정시간 대략 15분까지는 침투변화수량이 뚜렷하게 나타났지만, 그 이후 시간에는 강우강도별로 따른 침투수량의 변화가 거의 없었다.

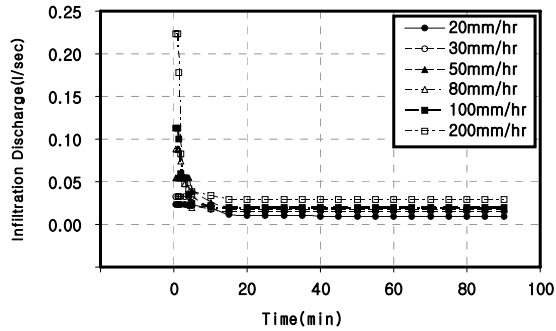
아스팔트, 콘크리트, 고화토, 혼합토, 벤토나이트매트 공법은 측정시간 초기 2분 동안에만 침투수량의 변화를 확인할 수 있었지만, 그 이후 시간에는 강우강도별로 따른 침투 변화량은 미세한 차이를 나타냈다.

또한 침투발생시간은 모든 시료에서 강우강도 증가에 따라 단축되는 경향을 나타내었고, 다짐흙, 초지, 투수성포장

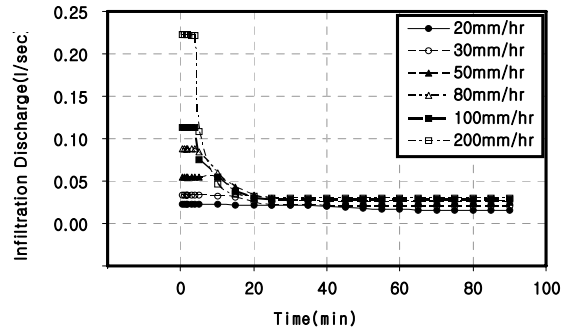
재에서는 강우강도가 증가할수록 침투량도 비례하여 증가하는 경향을 얻을 수 있었다. 이는 차수시설에 적합하다고 할 수 없고 이와 반대로 아스팔트 포장재, 콘크리트 포장재, 고화토 차수재, 혼합토 차수재, 벤트나이트매트 차수재는 강우강도가 증가하여도 침투량에는 영향을 미치지 않는다

는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 불투수성에 가깝고 차수시설에 적용해도 무방하다고 사료된다.

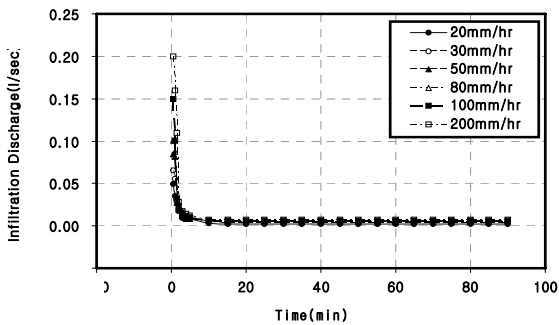
그림 3은 대표적인 200mm/hr 강우강도를 90분 동안 측정된 결과로서 투수성포장재가 가장 많은 침투수량을 나타냈으며, 본 연구에서 적용한 친환경공법인 혼합토, 벤토나



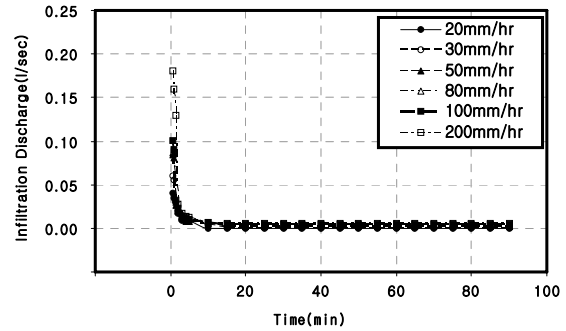
(a) 다짐흙



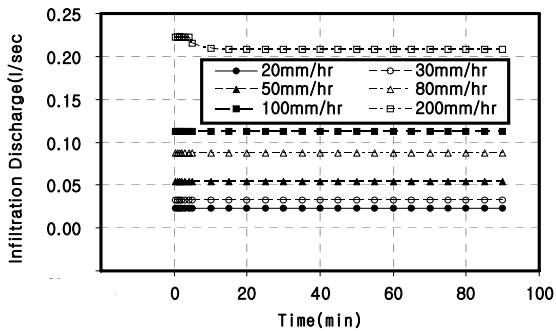
(b) 초지



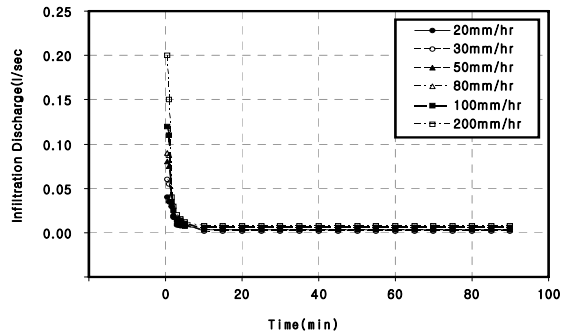
(c) 아스팔트 포장



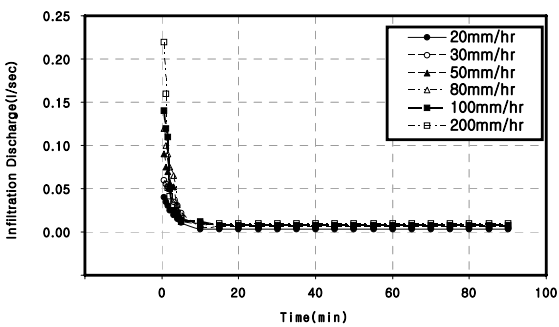
(d) 콘크리트 포장



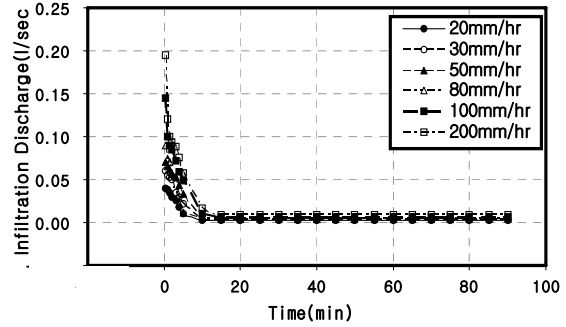
(e) 투수성 포장



(f) 고화토



(g) 혼합토



(h) 벤트나이트매트

그림 2. 표면재료에 따른 강우강도별 침투량 분석

3.2 표면재료에 대한 강우강도에 따른 침투율 분석

표 8과 그림 4의 결과에 나타났듯이 표면재료에 따른 강우강도별 침투율 분석결과 콘크리트 포장재는 가장 적은 침투율을 나타냈으며, 투수성 포장재는 가장 높은 침투율을 확인할 수 있었다. 두 재료를 비교했을 때 최고 100배 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

다짐흙, 초지, 아스팔트 포장재, 콘크리트 포장재, 고화토 차수재, 혼합토 차수재, 벤토나이트매트 차수재는 강우강도에 따라 침투율이 많은 편차를 확인할 수 있었고, 투수성 포장재는 거의 대부분 침투되는 것으로 확인되었다.

그림 5는 대표적인 200mm/hr 강우강도 조건일 때 90분 동안 측정한 후 표면재료에 따른 침투율 분석을 나타내고 있다. 투수성포장은 100% 침투율로 침투수량에서와 마찬가지로 가장 높은 침투율을 나타냈으며, 콘크리트 포장의 경

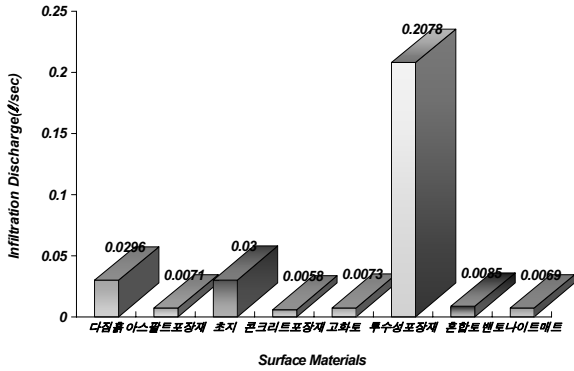


그림 3. 강우강도 200mm/hr 표면재료에 따른 침투량

이트매트, 고화토공법은 기존 차수재인 아스팔트나 콘크리트에 비해 거의 차이가 발생하지 않았고, 표면유실도 거의 없는 것으로 확인되었다.

표 8. 표면재료에 대한 강우강도별 침투율 분석

구 분	다짐흙 (%)	초지 (%)	아스팔트 포장재 (%)	콘크리트 포장재 (%)	투수성 포장재 (%)	고화토 (%)	혼합토 (%)	벤토나이트매트 (%)
20mm/hr	35.02	67.60	13.58	10.65	100.00	14.17	15.22	13.60
30mm/hr	34.80	58.01	10.12	9.85	99.65	13.02	13.51	11.61
50mm/hr	26.12	47.60	5.83	9.65	99.35	10.09	11.40	9.26
80mm/hr	17.82	31.82	3.25	1.29	98.99	5.11	5.63	4.57
100mm/hr	16.10	27.81	2.89	0.98	98.69	0.15	0.19	0.11
200mm/hr	13.32	13.62	0.10	0.00	93.50	0.10	0.13	0.04

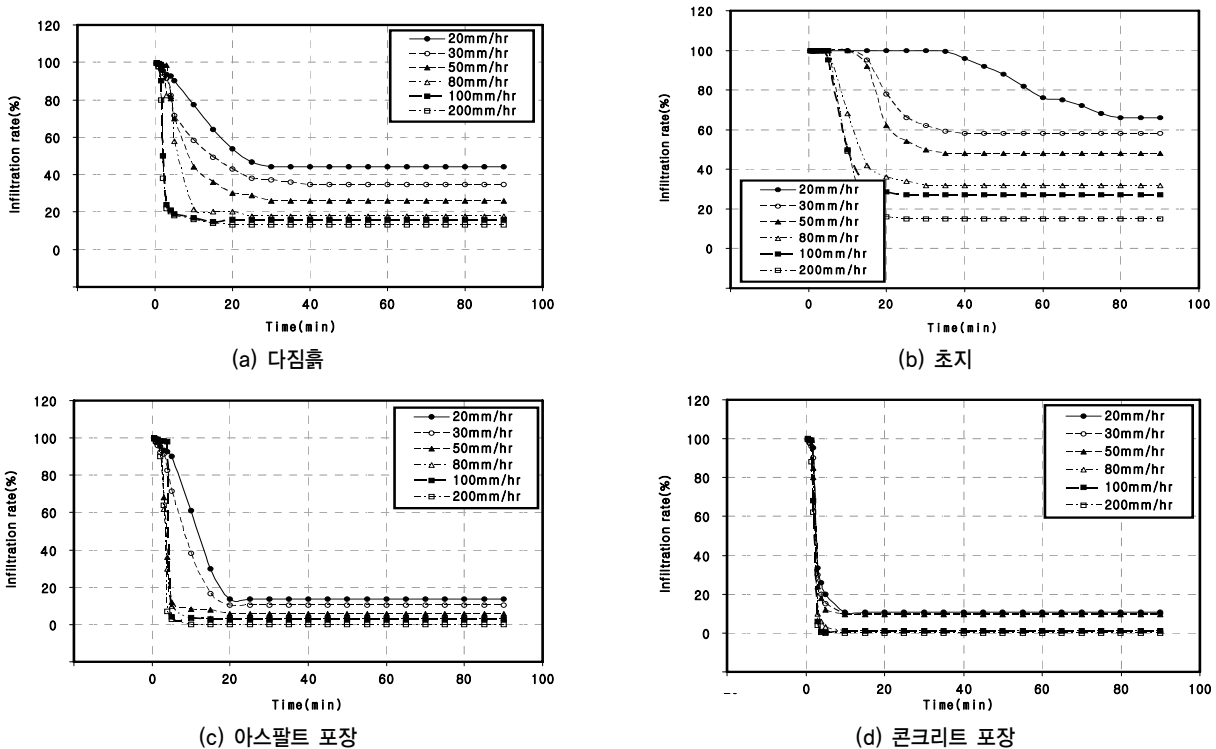
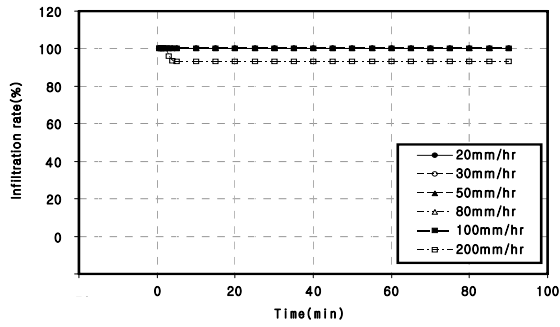
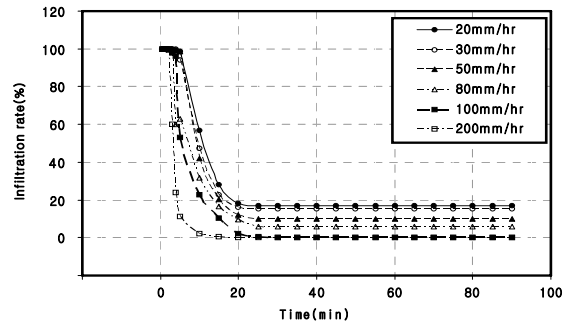


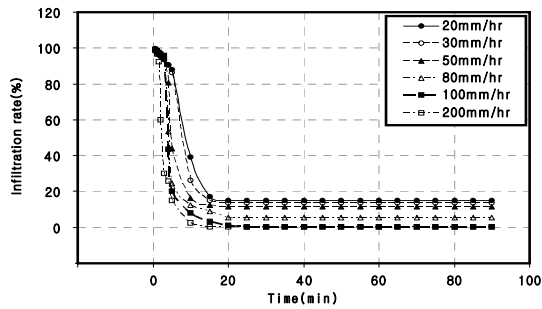
그림 4. 표면재료에 따른 강우강도별 침투율 분석(계속)



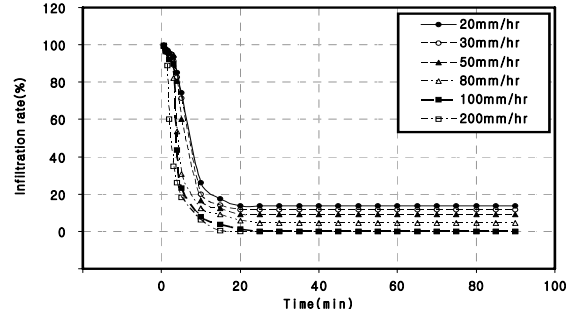
(e) 투수성 포장



(f) 고화토



(g) 혼합토



(h) 벤토나이트매트

그림 4. 표면재료에 따른 강우강도별 침투율 분석

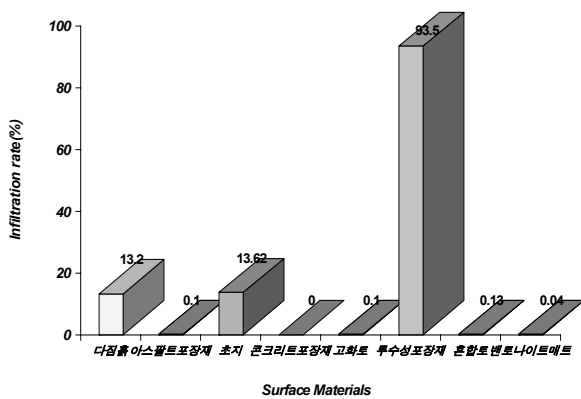


그림 5. 강우강도 200mm/hr 표면재료에 따른 침투율



그림 6. 현장다짐 및 시료샘플 채취

우는 0%로 가장 적은 침투율을 나타냈다. 친환경공법인 혼합토, 고화토, 벤토나이트매트 공법도 거의 0% 가까운 침투율을 결과를 나타냈으며, 표면유실에 따른 손실도 거의 발생하지 않아 기존공법인 콘크리트나 아스팔트와 비교했을 경우 차이가 거의 없는 것으로 확인되었다.

4. 현장실험결과 분석

4.1 개요

3장 실내실험결과 및 분석에 나타났듯이 벤토나이트공법, 혼합토공법, 고화토공법 3가지 공법은 국내하상차수시

설 기준인 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 만족하는 결과를 나타냈다.

실내실험 결과를 토대로 현장 적용성을 파악하기 위하여 실내 A다짐실험 결과값과 들밀도실험 결과값을 이용한 다짐도 결과값이 95% 이상 되었을 때 그림 6과 같이 미리 제작해 놓은 $\text{O}70\text{mm} \times 140\text{mm}$ 원통형 시료채취기를 이용하여 불교란 시료를 채취하였고, 이를 일축압축강도실험과 삼축투수실험을 통해 다짐도와 투수계수, 일축압축강도와 투수계수, 다짐도와 일축압축강도와의 관계를 비교·분석하였다.

그림 7에 나타났듯이 현장 및 실내투수계수측정은 삼축투수계수 실험으로 측정하였으며, 실험 방법은 삼축압축시험방법과 같은 포화 압밀단계를 거쳐 마지막 단계에서 전단과정 대신 투수를 시켜 공시체의 투수계수를 측정하는 시험

표 9. 3가지 공법의 다짐도, 투수계수, 일축압축강도 실험결과

구 분	평균다짐도 (%)	평균투수계수 (현장 Sample) (cm/sec)	평균일축강도 (현장 Sample) (MPa)	평균투수계수 (실내 Sample) (cm/sec)	평균일축강도 (실내 Sample) (MPa)
벤토나이트매트공법	97.6	6.05×10^{-9}	-	1.0×10^{-10}	-
혼합토공법	97.4	4.58×10^{-8}	1.53	4.24×10^{-8}	1.65
고화토공법	97.7	4.98×10^{-8}	2.06	9.05×10^{-8}	2.32

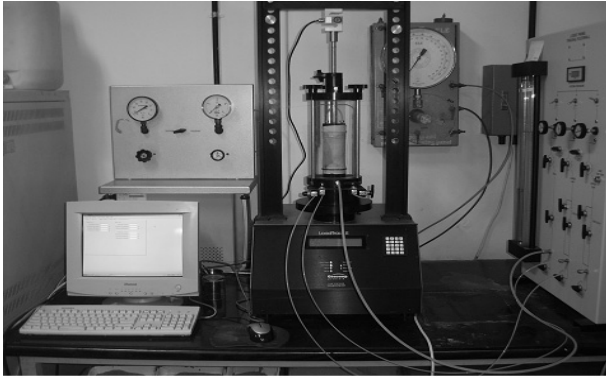


그림 7. 삼축투수계수 측정시험

이다. 투수단계에서는 공시체 상하부의 back pressure 차이를 두어 인위적으로 수두차를 형성시켜 통수시키는데 보통 흐름에 불리한 상방향의 흐름을 위해 시료 하부의 압력을 크게 하여 실시한다.

표 9는 3가지 공법에 대한 다짐도-일축압축강도-투수계수 실험에 대한 현장에서 채취한 시료를 가지고 실험한 결과값이다. 투수계수와 일축압축강도값은 국내 기준에 모두 적합하게 판정되었으며, 실내에서 실시한 값과 비교했을 경우 거의 비슷한 결과값을 나타냈다.

4.2 현장시험결과 및 분석

4.2.1 벤토나이트매트공법

벤토나이트매트공법은 현장에서 시료를 직접 채취할 수 없어 현장투수계수시험을 실시하였다. 그 결과 투수계수는 $1.63 \times 10^{-7} \text{cm/sec} \sim 2.50 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$, 평균 $6.05 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 로 측정되었으며, 실내투수시험과 비교했을 때 거의 비슷한 결과값을 얻었다.

또한 차수시설 기준인 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하 결과값을 얻었으므로 현장적용성의 문제가 없다고 판단되고, 다짐도는 95.8%~99.1%, 평균 97.6%로 측정되었으며, 다짐도가 높을수록 투수계수는 감소하는 경향을 나타냈다.

4.2.2 혼합토공법

시료를 채취하여 삼축투수시험을 실시한 결과 투수계수는

$8.20 \times 10^{-7} \text{cm/sec} \sim 9.05 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 이고 평균 $4.58 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며 이는 국내차수시설 기준에 적합한 것으로 확인할 수 있었다. 일축압축강도는 1.45MPa~1.63MPa 범위의 결과를 얻었으며 평균 1.53MPa로 측정되었다. 이는 현장일축압축강도 기준인 1.0MPa 이상보다 높은 결과값을 얻어 차수시설의 내구성에 문제가 없을 것으로 판단된다.

일축압축강도와 투수계수를 분석한 결과 압축강도가 증가하면, 투수계수는 감소하는 경향을 보였으며, 다짐도는 95.2%~99.2% 범위를 나타냈으며 평균 97.4%로 다짐도가 증가할수록 투수계수는 감소하고, 일축압축강도는 증가하였다.

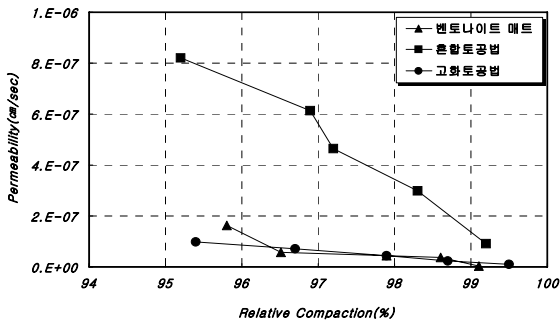
4.2.3 고화토공법

실험결과 투수계수는 $9.80 \times 10^{-8} \text{cm/sec} \sim 9.49 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 범위이며 평균 $4.98 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 국내 차수성 기준에 적합하고 다짐도가 높을수록 투수계수값은 낮게 평가되었으며 실내시험투수계수와 거의 일치하였다.

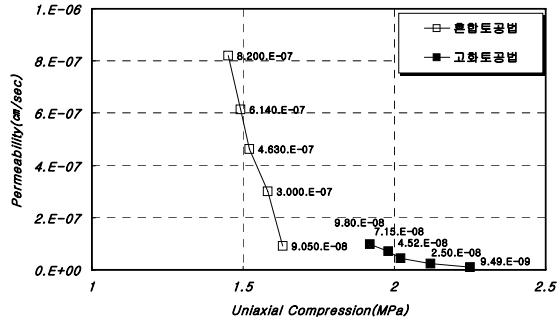
또한 일축압축강도값은 1.92MPa~2.25MPa로 국내기준인 1.0MPa 이상으로 내구성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 다짐도가 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 확인할 수 있었고, 일축압축강도는 혼합토공법보다 높게 평가되었다. 그림 8은 3가지 공법에 대한 일축압축강도-다짐도-투수계수를 비교·분석한 그래프이고, 그림 9는 현장시험과 실내시험의 압축강도 및 투수계수를 비교한 그래프이다. 두 결과값을 비교·분석해보면 거의 비슷한 결과를 나타내고 있어 친환경공법인 혼합토공법과 고화토공법의 현장 적용성에 문제가 없다고 판단된다.

4.3 용출시험

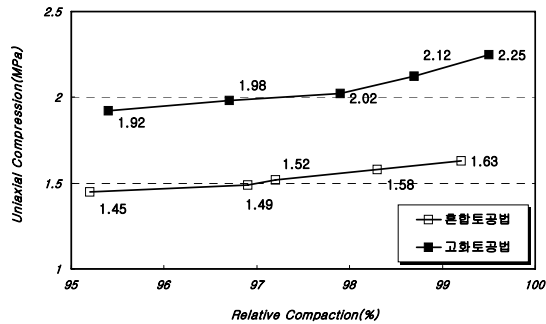
파주운정지구 물순환시스템에서 적용된 3가지 공법 중에서 벤토나이트공법과 혼합토공법의 주재료는 벤토나이트이기 때문에 재료의 특성상 환경의 무해한 성질을 가지고 있다. 하지만 고화토공법의 주재료는 시멘트계열이기 때문에 환경오염의 유해성을 판단할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 직접 채취하여 시료의 대한 용출시험을 실시하였다. 표 10의 실험결과값에 나타났듯이 Cr^{6+} 항목을



(a) 다짐도- 투수계수 관계



(b) 일축압축강도-투수계수 관계



(c) 다짐도-일축압축강도 관계

그림 8. 일축압축강도-다짐도-투수계수 관계

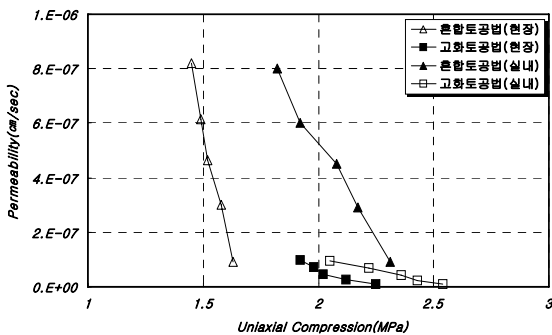


그림 9. 현장시험과 실내시험의 압축강도 및 투수계수 비교

제외하고는 금속이 검출되지 않았고, Cr⁶⁺에 있어서도 폐기물 규제기준인 1.5ppm보다 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다.

또한 기존연구 결과에 따르면 Cr⁶⁺ 함유량이 보통포틀랜드시멘트가 약 20ppm 이상, 고로슬래그시멘트와 일반적인

표 10. 고화토 응출실험결과

구분	결과	기준(ppm)
P _b	검출안됨	3.0이하
C _d	검출안됨	3.0이하
Cr ⁶⁺	0.23ppm	1.5이하
C _u	검출안됨	1.0이하
A _s	검출안됨	1.5이하
H _g	검출안됨	0.005이하
CN	검출안됨	검출무
유기인	검출안됨	검출무
트리클로로에틸렌	검출안됨	검출무
테트라클로로에틸렌	검출안됨	검출무

초미립자시멘트가 약 20ppm 이하 정도의 함유량을 갖고 있다고 하였다. 이와 비교하면 매우 낮은 값을 가지고 있어 친환경적으로 유용한 공법이라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 소규모 하천 친환경 하상차수공법인 벤토나이트매트공법, 혼합토공법, 고화토공법의 현장적용성을 분석하기 위해서 실내모형시험기(2.0m×2.0m×1.0m)를 제작한 후 표면재료에 따른 강우강도별 침투율 실내시험을 실시하였고, 현장에서는 다짐도 95% 이상이였을 때 시료를 채취하여 투수 및 일축압축강도를 실시하여 현장 적용성을 평가하였다.

- (1) 표면재료에 따른 강우강도별 침투분석 및 일축압축강도 실험결과 친환경공법인 고화토공법, 벤토나이트매트공법, 혼합토공법은 기존공법인 콘크리트나 아스팔트차수공법과 거의 비슷한 결과값을 나타내 현장적용성에 문제가 없을 것으로 판단된다.
- (2) 현장투수시험결과와 실내시험투수결과는 비슷한 경향을 나타냈으며, 국내차수시설 투수기준에 만족하였고, 일축압축강도값은 기준인 1.0MPa 보다 높게 나왔으므로 내구성에 문제가 없는 것으로 판단 되어진다.
- (3) 혼합토, 고화토공법의 현장시험결과 다짐도가 증가할수록 일축압축강도는 증가하였고, 투수계수는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.
- (4) 고화토공법의 환경유해성을 판단하기 위하여 응출시험결과 국내 환경기준에 모두 만족하였다. 이는 기존하상차수공법인 콘크리트나 아스팔트에서 나타내는 환경오염 문제점을 해결할 것이며, 친환경적으로 유용한 공법이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김명균(1998), 국내산 벤토나이트의 차수재로서의 공학적 특성, *한국자원공학회지*, Vol. 35, No. 4, pp. 800~806.
2. 석재덕(2005), *GCL을 이용한 하상의 안정성 연구*, 석사학위논문, 서울시립대학교, pp. 45~58.
3. 신은철, 김성환(1998), 폐석회의 점토차수재로서 활용에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 14, No. 5, pp. 29~38.
4. 이광열(2001), Soil-Bentonite 혼합토의 다짐 및 투수성연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 21, No. 6-C, pp. 689~696.
5. 이송, 이재영, 김홍석(2000), 폐기물 매립지 바닥층의 고화토 포설시 동결/융해 현상에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 16, No. 1, pp. 179~189.
6. 주재우, 서계원, 박종범(2006), 벤토나이트 혼합토의 혼합비에 따른 투수성 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 22, No. 1, pp. 45~52.
7. 한국화학시험연구원(2009), *벤토나이트 매트 시험*, H213-09-02820, pp. 1~2.
8. Auvinet, G. Y. and Hiriart, G. (1980), An Artificial Cooling Pond for the Rio Escondido Coal Fired Power Plant, *Proceedings of ASCE Symposium on Surface Water Impoundments*, Minneapolis, Vol. 2, pp. 1089~1098.
9. Chapuis, R.(1990), Sand-Bentonite liners: Predicting Permeability from Laboratory Tests, *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 27, No. 1, pp. 47~57.
10. Lundgren, T.(1981), Some Bentonite Sealants in Soil Mixed Blankets, *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 15-19 June, Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 349~354.

(접수일: 2010. 10. 15 심사일: 2010. 11. 8 심사완료일: 2010. 12. 14)