

## 현장시험성토를 통한 석탄회 및 페타이어의 성토재료 활용성 검토

### A Study on Application as fill materials of Bottom Ash and Tire Shred by Field Test Embankment

이성진<sup>1)</sup>, Sung-Jin Lee, 김윤기<sup>2)</sup>, Yun-ki Kim, 이태윤<sup>3)</sup>, Tae-yoon Lee, 신민호<sup>4)</sup>, Min-ho Shin, 황선근<sup>5)</sup>, Seon-Keun Hwang

<sup>1)</sup> 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원, Senior Researcher, KRRI

<sup>2)</sup> 한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후 연구원, Post Doc. KRRI

<sup>3)</sup> 부경대학교 환경시스템공학부, 조교수, Assistant Professor, PKNU

<sup>4)</sup> 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원, Pricipal Researcher, KRRI

<sup>5)</sup> 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 책임연구원, Chief Researcher, KRRI

**SYNOPSIS :** Based on the proven feasibility of bottom ash and tire shred-soil mixtures as lightweight fill materials, tire shred-bottom ash mixtures were suggested as a new lightweight fill material to replace the conventional construction material with bottom ash. Therefore, we carried out the laboratory test, field compaction test and performance test of large scale embankment in order to evaluate their suitability for the use of lightweight fill materials in the before studies. We could verified that the ash, tire-shred and the mixture are able to be the useful materials as light fill materials. In this study, we built real scale embankment with RBA(Reclamated Bottom Ash), TRBA(Tire shred-Reclamated Bottom Ash mixture), WS(Weathered Soil), BA(Bottom Ash screened by 5mm sieve) for monitoring the behavior such as settlement, lateral displacement and water content change. Furthermore, we are examining the ground water quality in the surrounding area of the test embankment.

**Keywords :** bottom ash, tire-shred, light fill materials, water quality, test embankment

## 1. 서 론

현재 천연골재 채취로 인한 자연훼손방지, 토취장확보문제 해결, 천연골재의 수급난 해결 등을 위해 자원순환형 지반재료 활용의 필요성이 대두되고 있다. 특히 페타이어와 석탄회는 그 발생량의 급증에 따라 야적장 및 회사장 확보에 어려움을 겪고 있어 이들의 활용을 통해 천연골재의 대체 효과와 산업부산물의 재활용 효과를 기대할 수 있을 것이다.

석탄회의 경우, 국내에서 2005년 말 현재 약 600만톤이 발생되고 있다. 이 중 재활용량은 약 350만톤으로 재활용율이 약 58%정도에 머무르고 있으며, 대부분 플라이애쉬의 재활용으로써 석탄회발생량 중 약 15-25%를 차지하는 저회(Bottom Ash)는 대부분 매립되고 있다. 그러나 이러한 석탄회를 매립하기 위한 회처리장의 용량이 절대 부족한 상황으로 대부분의 화력발전소는 새로운 회처리장 건설과 관리에 많은 비용을 지불하고 있으며, 자연환경 훼손에 따른 환경민원이 발생되고 있다. 또한 당진, 태안, 보령, 하동, 영흥 등에 추진 중인 석탄화력발전소의 건설로 인해 2010년에는 약 800만톤의 석탄회가 발생할 것으로 예상되고 있으나 제철설비 증가에 따라 시멘트를 50%까지 대체할 수 있는 Slag Powder가 증가되고 건설경기 침체로 수요가 감소하는 등 석탄회의 수요는 지속적으로 감소 추세에 있다. 이러한 현상은 경제

성장과 비례하여 미국, 일본, 영국, 독일 등 선진국에서도 확인되고 있는 현상이며, 이들 나라에서도 석탄회의 재활용을 위해 다양한 노력이 이루어지고 있다.

페타이어의 경우는 전 세계적으로 매년 수십억 개에 달하는 양이 발생되고 있으며, 미국의 경우 매년 5천만개가 발생한다고 보고되고 있다(Garga & O'Shaughnessy, 2000). 국내에도 2007 환경통계연감(환경부, 2007)의 폐기물 재활용현황에 따르면 지속적인 증가추세에 있으며 2006년 현재 23,689,000개에 이르고, 이러한 증가 추세는 계속될 전망이다. 페타이어의 회수비율은 약 40-80%이며 전량 수거되고 있지 못한 상황이다. 페타이어는 야외 적치 등으로 미관을 해칠 뿐 아니라 각종 병원체의 전달 매개체인 동물의 서식지 역할을 하게 되어 여러 가지로 사회적 문제를 야기하고 있다(윤여원, 2004).

최근에는 페타이어의 발생량과 함께 재활용량의 증가도 계속되고 있다. 그러나 현재 재활용의 약 70%가 시멘트 킬른에서 소각원료로 활용되면서 석탄이나 갈탄을 연료로 활용한 시멘트에 비해 납, 아연, 카드뮴 등의 중금속이 수백 배 포함되어 건설 후 심각한 2차 환경문제의 야기가 지적되고 있다. 따라서 보다 환경오염을 줄일 수 있고 대량으로 활용할 수 있는 분야의 개발과 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

석탄회와 페타이어는 그 경량의 특성을 이용하여 연약지반의 경량성토재료로 활용하는 것이 제안되고 있다. 따라서 앞선 연구를 통해 경량 폐기물의 성토재료로서의 활용과 합리적인 설계 및 시공을 위해서 이들 재료의 입도분포, 비중, 상대다짐밀도, 투수시험 등 기본물성 및 대형삼축압축시험 등 실내 실험을 통해 지반공학적 물성과 환경적 유해성 평가를 위한 실험으로 성토재료로서의 적합성을 검증한 바 있다(고태훈 등, 2007; 이성진 등, 2007, 2008). 또한 실제 현장에서의 혼합 및 다짐 특성과 지지력 특성 등을 평가하였고 실내 대형 토조에서 실대형 모형 성토체를 조성하여 성토구조물로서의 거동을 기존 성토재료와 비교하여 기존 성토체를 대체할 수 있는 재료적 특성을 확보하고 있는 것을 확인할 수 있었다(이성진 등 2008, 2009). 그리고 페타이어와 석탄회 및 풍화토를 재료로 하여 장기적인 재료적 압축침하특성 검토와 온도변화에 따른 침하특성을 비교하여 성토재료로서의 활용성을 검토하였다(이성진 등 2009). 이어서 본 연구에서는 페타이어, 매립저회, 5mm 이하로 스크린된 저회, 일반 풍화토 등 4가지 단면으로 시험 성토체를 조성하고, 각 단면의 층별침하, 수평변위, 토압, 깊이별 온도변화, 간극수압 및 함수비 변화 등을 측정하고 성토체하부와 주변 지하수의 수질변화를 평가하여 재생혼합재료의 성토재료로의 활용가능성을 평가하고자 한다.

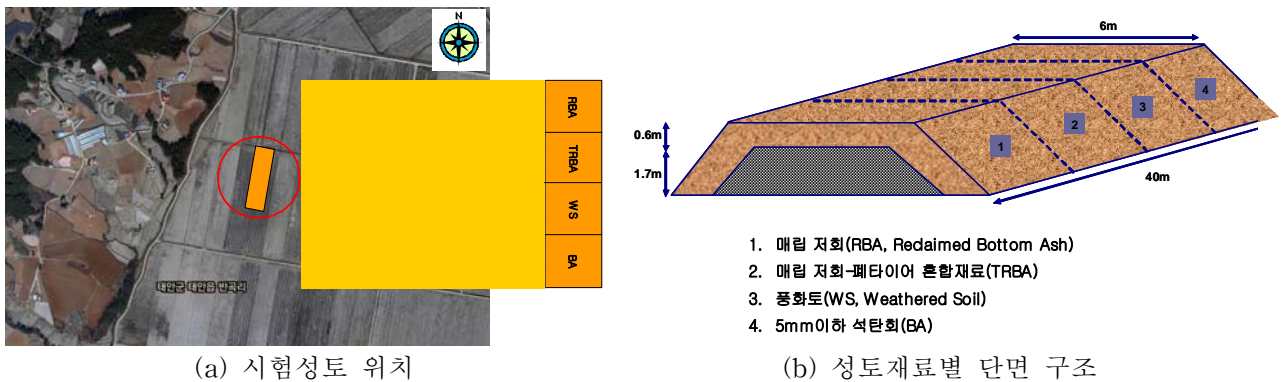


그림 1 현장 시험 성토 위치 및 단면 구조

## 2. 실험 개요

본 연구는 폐기물을 활용하여 성토재료로 활용하는 것이므로 이때 발생될 수 있는 침하 및 변형 등의 경향을 확인하는 것이 요구된다. 이를 위해 지난 연구를 통해 TBA층과 WS층을 포함하는 실대형의 성토구조물을 조성하여 정적 동적 하중에 대해 발생하는 침하정도를 비교하여 약 1m의 복토 조건 하에서 그 차이가 매우 미미한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 성토구조물의 경우 장기간 활용되어야 하고, 특

히 석탄회를 포함한 재생혼합재료의 경우 동결 등의 환경 변화에 물리적, 환경적 영향을 받을 수 있기 때문에 온도, 함수비 등의 변화 조건을 포함하여 장기적인 거동변화 경향을 확인하고 이에 대비하는 것이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 페타이어, 석탄회를 연약지반에 성토한 후, 성토체 거동 및 수질환경 영향을 평가하고 일반성토재료와의 비교를 통하여 실제 성토재료로 활용하기 위한 정보를 확보하기 위해 충남 태안군의 매립지 현장에 설치하였다.

성토는 3가지 재생혼합재료-매립저회(RBA), 페타이어-매립저회 혼합재료(TRBA), 5mm 이하로 스크린된 저회(BA)재료를 다음 그림과 같이 30cm 층씩 다짐하여 1.7m 높이로 성토한 후 대표적인 일반성토재료인 풍화토(WS)로 상부와 측면에 두께 60cm로 복토를 하였다. 그리고 한 단면은 전체 높이에 풍화토만으로 성토하여 다른 재생혼합토가 포함된 단면들의 거동과 수질환경에 대한 특성을 비교하였다.

## 2.1 시험 성토체 재료 특성

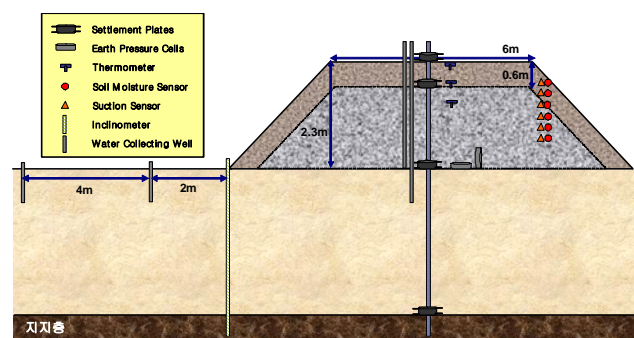
석탄회는 태안화력발전소에 매립되어 있는 매립저회를 활용하였으며, 두 종류로 저회를 구분하여 비교하였다. 먼저 매립저회(RBA)는 매립되어 있는 저회를 스크린작업 없이 이용한 재료이고, BA(<5mm)는 5mm 이하로 정제한 저회이다. 페타이어는 페타이어 가공 업체에서 300mm 이하로 분쇄된 타이어 슈레드를 사용하였으며, 일반성토재료로서 풍화토를 비교 단면과 복토재료로 활용하였다. 매립저회는 매립된 위치와 시기에 따라서 세립분을 많이 포함하기도 하고 보다 큰 입자들이 많이 섞여 있었다. 성토 후 측정된 건조단위중량은 다음 표 1과 같다.

표 1 실험 대상 재료 설명 및 단위중량

	Material	건조단위중량( $kN/m^3$ )
RBA	매립저회	11.14
TRBA	300mm이하의 페타이어와 매립저회 혼합재료	-
WS	풍화토	15.54
BA(<5mm)	5mm이하의 저회	10.98



(a) 시험성토 위치



(b) 시험성토체 대표 단면 구조

그림 2 현장 시험 성토체 전경 및 계측기 현황

## 2.2 계측기 설치 현황

성토체의 장기 거동을 단면별로 비교하기 위해 성토체 층별침하, 토압, 지하수 관측공, 경사계 등은 4개의 단면에 모두 설치되어 계측되고 있으며, 온도, 함수비, 부간극수압 등은 대표적인 단면에 설치하여 계측되고 있다. 계측기 설치 평면도와 설치 현황은 다음 그림 3과 표 2 ~ 표 5와 같다. 추가적으로 현장에는 강우량계를 설치하여 현장 강우정보와 성토체 내부의 함수비 변화 경향을 파악하는 데 활용하였다.

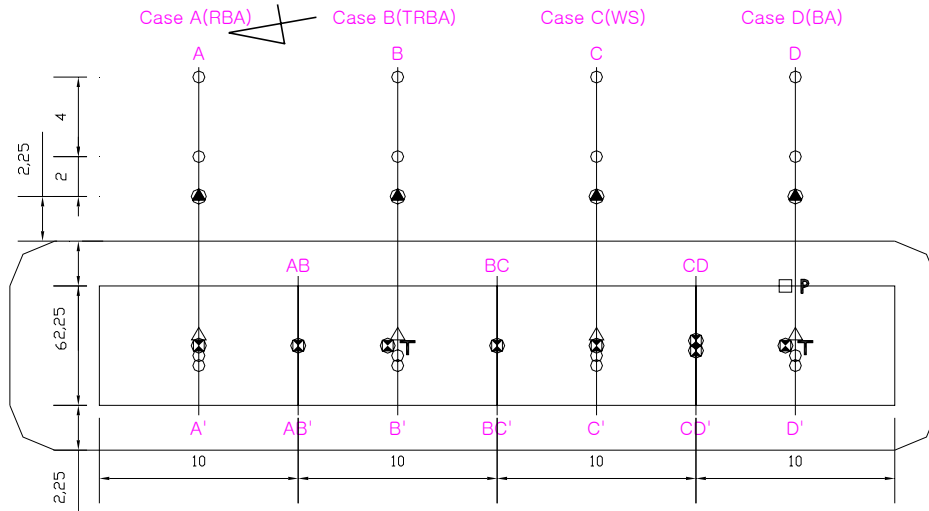


그림 3 계측기 설치 평면도

표 2. RBA단면 계측기 현황

센서종류	수량	센서번호	센서위치	비고
지하수위계	4	W-A1	RBA 중심	
		W-A2	RBA 중심으로부터 동쪽측면 10m	
		W-A3	RBA 중심으로부터 동쪽측면 14m	
		W-A4	RBA 중심	
층별침하계	4	S-A1	RBA 중심 하부지반	
		S-A2	RBA 중심 원지표	
		S-A3	RBA 중심 원재료 지표	
		S-A4	RBA 중심 성토체 지표	
토압계	2	EP-A-V	RBA 중심 원지표	
		EP-A-H	RBA와 TRBA 경계 원지표	
경사계	1	RBA-A RBA-B	RBA 중심으로부터 동쪽측면 8m	

표 3. TRBA단면 계측기 현황

센서종류	수량	센서번호	센서위치	비고
지하수위계	4	W-B1	TRBA 중심	
		W-B2	TRBA 중심으로부터 동쪽측면 10m	
		W-B3	TRBA 중심으로부터 동쪽측면 14m	
		W-B4	TRBA 중심	
층별침하계	4	S-B1	TRBA 중심 하부지반	

		S-B2	TRBA 중심 원지표	
		S-B3	TRBA 중심 원재료 지표	
		S-B4	TRBA 중심 성토체 지표	
토압계	2	EP-B-V	TRBA 중심 원지표	
		EP-B-H	TRBA와 WS 경계 원지표	
경사계	1	TRBA-A TRBA-B	TRBA 중심으로부터 동쪽측면 8m	
온도계	3	T1	TRBA 중심 성토체 지표로부터 20cm 깊이	
		T2	TRBA 중심 성토체 지표로부터 70cm 깊이	
		T3	TRBA 중심 성토체 지표로부터 120cm 깊이	

표 4. WS단면 계측기 현황

센서종류	수량	센서번호	센서위치	비고
지하수위계	4	W-B1	TRBA 중심	
		W-B2	TRBA 중심으로부터 동쪽측면 10m	
		W-B3	TRBA 중심으로부터 동쪽측면 14m	
		W-B4	TRBA 중심	
층별침하계	4	S-B1	TRBA 중심 하부지반	
		S-B2	TRBA 중심 원지표	
		S-B3	TRBA 중심 원재료 지표	
		S-B4	TRBA 중심 성토체 지표	
토압계	2	EP-B-V	TRBA 중심 원지표	
		EP-B-H	TRBA와 WS 경계 원지표	
경사계	1	TRBA-A TRBA-B	TRBA 중심으로부터 동쪽측면 8m	
온도계	3	T1	TRBA 중심 성토체 지표로부터 20cm 깊이	
		T2	TRBA 중심 성토체 지표로부터 70cm 깊이	
		T3	TRBA 중심 성토체 지표로부터 120cm 깊이	

표 5. BA단면 계측기 현황

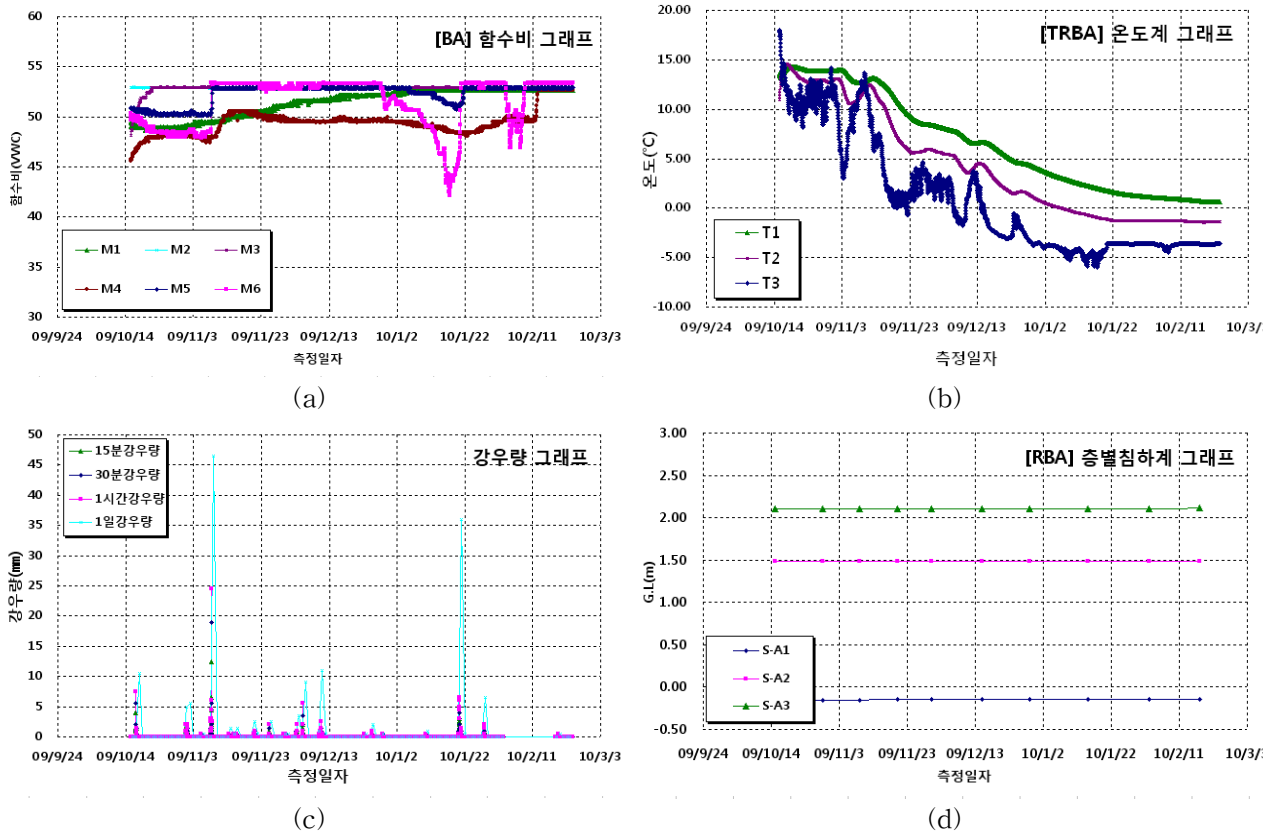
센서종류	수량	센서번호	센서위치	비고
지하수위계	4	W-D1	BA 중심	
		W-D2	BA 중심으로부터 동쪽측면 10m	
		W-D3	BA 중심으로부터 동쪽측면 14m	
		W-D4	BA 중심	
층별침하계	4	S-D1	BA 중심 하부지반	
		S-D2	BA 중심 원지표	
		S-D3	BA 중심 원재료 지표	
		S-D4	BA 중심 성토체 지표	
토압계	2	EP-D-V	BA 중심 원지표	
		EP-D-H	WS와 BA 경계 원지표	
경사계	1	BA-A BA-B	BA 중심으로부터 동쪽측면 8m	
온도계	3	T4	BA 중심 성토체 지표로부터 20cm 깊이	
		T5	BA 중심 성토체 지표로부터 70cm 깊이	
		T6	BA 중심 성토체 지표로부터 120cm 깊이	

토양수분계	5	M1	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 30cm깊이	
		M2	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 60cm깊이	
		M3	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 90cm깊이	
		M4	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 120cm깊이	
		M5	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 150cm깊이	
		M6	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 180cm깊이	
부압력계	5	P1	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 30cm깊이	
		P2	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 60cm깊이	
		P3	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 90cm깊이	
		P4	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 120cm깊이	
		P5	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 150cm깊이	
		P6	BA 성토체 동쪽 길어깨 지표로부터 180cm깊이	

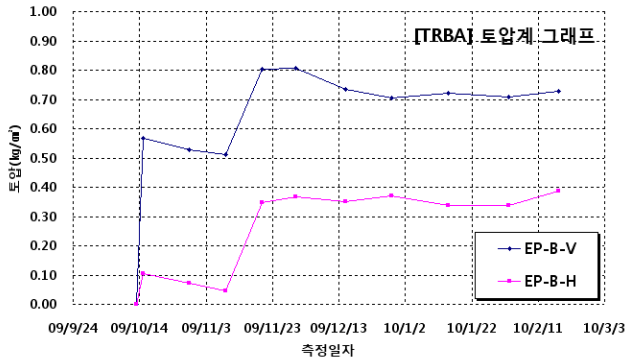
### 3. 결과

#### 3.1 계속 현황

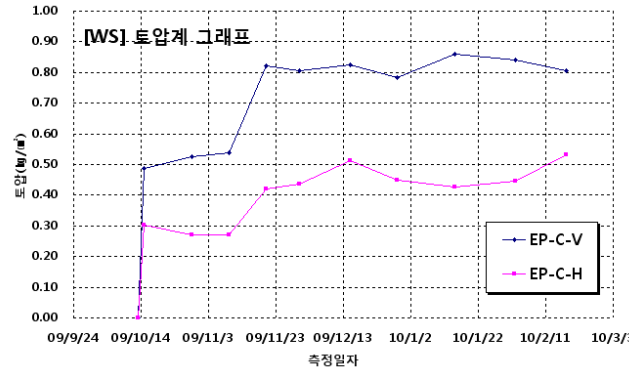
앞서도 언급된 바와 같이 석탄회는 동결 용해의 반복 과정에서 강도가 감소되는 것으로 밝혀진 연구결과가 있어 깊이별로 온도변화경향을 계속하였으나 동절기를 거치면서 대기온도가 영하 15도까지 하강해도 복토 60cm 이하에서는 영하의 온도로 떨어지지 않는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 앞선 논문에서 밝힌 바와 같이 90cm 이상의 복토가 이루어졌을 때 성토체재료로 사용된 석탄회 재료의 동결용해에 따른 강도 감소의 우려는 없을 것으로 판단된다. 또한 침하는 실내실험에서도 동결용해 시에 일반성토체재료 대비 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다(이성진 등, 2009).







(e)



(f)

그림 4 단면별 대표적 계측결과

층별침하계측결과 성토 후 현재까지 4개의 단면에서 성토부 표면과 내부 층별 침하 모두 어떤 변화도 관측되지 않았다. 상부 성토재의 무게차이에 비해 상대적으로 하부 연약지반의 두께가 깊지 않아서 전체적인 침하도 관측되지 않았으며, 성토재 자체 무게에 따른 사하중 이외에 추가적인 활하중이 재하되지 않은 상황에서 내부에 성토된 재생혼합층에 따른 층별침하의 변화가 없다고 단정지을 수는 없지만, 현재까지 성토체 축조 후 동절기를 지나는 약 5개월여동안에 재생혼합재료의 자체적인 추가침하는 없는 것으로 보인다. 향후에 추가적인 동적하중을 가하면서 층별침하거동을 관측할 필요는 있을 것으로 판단된다. 경사계에서도 4개의 단면에서 큰 차이를 보이지 않고 절대적으로 작은 변위만 관측되었다. 이는 앞선 층별침하결과와 마찬가지로 성토체 높이와 자체하중에 비해 연약지반 깊이가 깊지 않아서 상대적인 차이를 관측하기에 어려웠던 것으로 판단된다. 토압계의 경우 다짐밀도의 경향과 같이 일반성토재료인 풍화토(WS)에 비해 재생혼합재료 단면에서 경감되는 결과를 보였다. 함수비는 동절기의 강설 후에 녹으면서 상대적으로 침투되는 경향을 보였으나 복토층 두께 이상으로 침투되는 것으로 보이지는 않으며, 향후 하절기 집중 강우 시에 침투에 의한 안정성 평가와 침투수에 의한 재생혼합재료의 하부주변 지반 수질에 영향을 미칠 수 있는 가능성에 대해 판단이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

### 3.2 수질 분석 현황

지하수공을 통해 채취된 샘플에 대해 10개 중금속 성분(As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, Zn, Hg)을 분석하였다. As, Cd, Cr, Ni, Se은 전 시료에 대해 불검출되었으며, Cu, Mn, Pb, Zn의 경우 일부 검출이 되었으나 먹는물 수질기준 이하로 판명되었다. Hg의 경우도 먹는물 기준치인  $1\mu\text{g/L}$  보다 훨씬 작은 농도로 검출되어 중금속으로 인한 수질오염은 없는 것으로 판단된다.

지하수공을 통해 채취한 시료에 대해 5가지 음이온( $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )을 측정하였다.  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ 의 경우 검출되지 않았으며,  $\text{F}^-$ 의 경우 초기 시료(TRBA-1)에서 최대  $616\mu\text{g/L}$ 의 농도로 검출되었으나 이는 먹는물 기준치인  $2000\mu\text{g/L}$  보다 낮은 값이며 이후 지속적으로 감소하여 검출이 되지 않았다.  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 경우는 실제 현장실험에서도 다른 항목들에 비해 높은 농도로 유출이 되었다. 그러나 급속히 감소하여 먹는물 기준치 이하로 검출이 되었다. 이 항목에 대해서는 현장 지하수 수질, 사용 재료의 보관 및 이송과정, 유출 농도 변화 및 확산 경향 등을 종합적으로 고려하여 판단해야 할 것이다.

## 4 결론

본 연구에서는 재생혼합재료를 활용하여 현장 시험성토체를 구축하고, 이에 대한 거동과, 수질영향을 분석하고자 하였으며, 현재까지 계측 및 시험된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 깊이별로 온도변화경향을 계측하였으나 동절기를 거치면서 복토 60cm 이하에서는 영하의 온도로 떨

- 어지지 않는 경향을 확인할 수 있었다.
- (2) 층별침하 및 수평변위의 경우 성토체 자체 하중 하에서는 4단면에서 특징적인 변화가 발생되지 않았다.
  - (3) 함수비는 동절기에 강설의 영향으로 일부 침투되는 경향을 보였으나 복토층 두께 이상으로 침투되는 것으로 보이지는 않으며, 향후 하절기 집중 강우 시 계측결과를 활용하여 침투에 의한 안정성 평가가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.
  - (4) 10개 중금속 성분(As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, Zn, Hg)의 경우 먹는물 수질기준 이하로 판명되어 중금속으로 인한 수질오염은 없는 것으로 판단된다.
  - (5) 5가지 음이온( $F^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ )을 대상으로 분석한 결과  $SO_4^{2-}$ 를 제외한 다른 항목들은 문제없는 것으로 판단되며,  $SO_4^{2-}$ 의 경우 현장 지하수 수질, 사용 재료의 보관 및 이송과정, 유출 농도 변화 및 확산 경향 등을 종합적으로 고려하여 유해성 여부와 활용 방법에 대해 판단해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(차세대 시설물용 신재료 활용기술 연구단)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 고태훈, 이성진, 신민호, 황선근, 이수형(2007) “페타이어와 석탄회를 혼합한 경량성토재료의 지반공학 적 특성”. 2007 학술발표회논문집, 한국지반공학회, pp. 1320-1331
2. 윤여원(2004), “지반보강재로서 페타이어의 활용; 지반보강효과, 한국지반공학회논문집, 제20권, 3호 4월 pp.107-117.
3. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근, 이수형(2008), “석탄회-페타이어 혼합토의 성토재료 적용성에 관한 연구” 제34회 대한토목학회 정기학술대회 전문학회 및 국제 연구단세션-차세대 시설물용 신재료 활용 기술 연구단, pp.47-58
4. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근(2007) “대형삼축압축시험에 의한 페타이어-저회 혼합토의 응력-변형 특성에 관한 연구”. 2007학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2131-2135
5. 이성진, 신민호, 황선근, 고태훈, 이용식(2008) “저회-페타이어 재생혼합토의 실험형 성토구조물 성능 시험” 한국철도학회 봄학술발표회,
6. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근(2009), “저회(Bottom Ash)와 페타이어를 활용한 성토구조물 거동에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 29권 1C호, pp.21-31
7. 이성진, 신민호, 황선근, 이용식(2009), “석탄회 및 페타이어 재료의 장기압축 침하거동 특성”, 한국지반공학회 춘계학술대회 논문집
8. Garga V.K., and O'Shaughnessy, V.(2000), "Tire-reinforced earthfill. Part 1 : Construction of a test fill, performance and retaining wall design", Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.75-96.