

산업폐기물 매립지의 건설부지의 활용성

Utilization Potential of Industrial waste Landfills as Construction Sites.

장연수(YEON-SOO JANG)\*1, 조삼덕(SAM-DEOK CHO)\*1, 김학삼(HAK-SAM KIM)\*2, 김영진(YONG-JIN KIM)\*1, 홍성완(SUNG-WAN HONG)\*3

- \*1. 한국건설기술연구원, 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, K.I.C.T., Seoul.
- \*2. 한국건설기술연구원, 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Division, K.I.C.T., Seoul.
- \*3. 한국건설기술연구원, 지반연구실장, Head, Geotechnical Engineering Division, K.I.C.T., Seoul.

SYNOPSIS

The characteristics of the landfill of coal ash and ironwork wastes are investigated by performing the basic geotechnical experiments and groundwater quality analyses in the landfills. The results show that the waste materials themselves have good characteristics that can be used as reclamation materials. However, landfills need either some ground improvement or costly foundation and excavation methods to be used as construction sites, because of the careless management during the period of waste disposal.

1. 서 론

우리나라는 최근 도시의 인구집중과 산업화가 가속됨에 따라 주택 또는 산업용 부지의 부족이 심화되고 있다. 또한 산업폐기물의 발생량도 경제규모의 확대와 산업구조의 고도화에 따라 1985년 이후 5년동안 연간 약 14.7%의 증가를 가져왔고 1989년 대비 1일 산업폐기물의 발생량은 5만 8천 톤에 이른다(1). 이러한 문제들의 적합한 해결 방안으로서 비교적 일반토사와 비슷한 특성을 갖춘 폐기물, 예를 들어 석탄회, 제철 폐기물, 광산 버려 등의 매립지를 건설부지로서 활용하는 방안이 고안되고 있다.

본 논문에서는 산업폐기물중 국내에서 다량 발생하고 있으며 적절한 설계 및 시공을 거치면 건설부지의 매립재로도 활용가능한 석탄회 및 제철폐기물 매립지의 특성을 기매립 부지를 선택하여 기본 토성 실험과 발생 침출수의 화학성분 분석을 통하여 고찰해 보았다.

대상 매립지반으로서 석탄회의 경우 서천 및 삼천포 화력 발전소의 회처리장과 제철 폐기물의 경우 포항 제철소 폐기물 매립지를 선택하였다. 회처리장의 경우에는 실트질 입경을 갖고 있는 비교적 연약한 석탄회를 매립재로서 활용시 해결해야 할 과제와 조립토나 암석재와 비슷한 재료 특성을 보이는 제철 매립재 특히 슬래그 지반에서의 말뚝 기초의 시공 가능성이 조사대상이 되었다. 또한 이러한 폐기물용 매립재로 활용시 흙과는 달리 재료내에 함유되어 있는 화학성분이 주변환경에 미치는 영향성 평가와 함께 필요시 청정한 주변환경을 유지할 수 있는 대비책울 강구할 필요가 있어 매립재의 활용시 지반환경적 측면에서 고려되어야 할 사항에 대하여도 알아 보았다.

2. 석탄회 매립부지의 활용

2.1 석탄회 발생 및 처리 시스템

석탄회는 석탄을 보일러에서 연소시킴으로써 발생하는 회를 의미하며, 대부분의 석탄회는 무연탄이나, 역청탄, 아역청탄(亞歷靑炭), 갈탄, 아탄(亞炭)등의 유연탄을 미분탄기(微粉炭機) 내에서 건조, 분쇄

시킨 후 보일러에서 연소시켜 발생되는데, 이때 채취되는 석탄회는 전체 미분탄의 15~45% 정도로 주로 집진설비 내에서 포집되거나 보일러 저부에서 채취된다(그림 1). 전체 석탄회중 집진설비에 포집되는 비회(fly ash)의 양은 약 60~80% 정도이고 나머지 20~40% 정도가 보일러 저부에서 채취되는 저회(bottom ash)이다.

비회와 저회를 적절하게 처리하기 위한 회처리 시스템은 각 발전소 별로 회처리 능력, 수종방법, 입지조건, 운송조건 등 여러가지 제반 환경에 따라 구성기 및 설비에 차이가 있다. 국내 화력발전소의 석탄회 처리 시스템은 대부분 비회와 저회를 함께 물과 혼합한 상태로 회수중간을 통해 회처리장으로 운반하여 회처리장내의 수면위에서 자유 침강시키는 형태인 습식매립을 실시하고 있으며, 비회 저장 사일로가 설치되어 있는 곳에서는 건조상태의 비회를 사일로에 저장하는 시스템이 추가로 설치되어 있다(그림 1). 국내 화력발전소는 대부분이

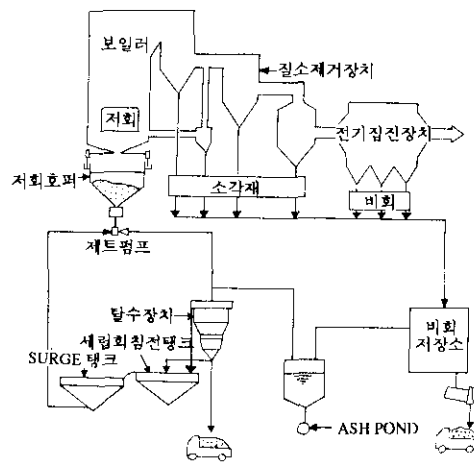


그림 1. 화력발전소의 석탄회 처리 시스템 개략도

해안에 인접하여 있기 때문에 내륙에 위치한 영월 화력발전소를 제외한 7개 화력발전소 모두가 해수를 사용한 습식매립 시스템을 사용하고 있으며, 회처리장의 규모도 매우 방대하다. 또한 회처리장의 상등수는 침전지나 침전탱크에서 중화, 침전한 후 재사용하는 재순환 시스템(closed system)이 많이 사용되고 있다.

## 2.2 회처리장 지반조사 시험

국내 회처리장의 매립상태를 파악하여 향후 건설부지로서의 활용성을 검토하기 위해 국내의 대표적인 회처리장 2개소를 선정하여 표준관입시험(SPT)과 관관입시험(CPT) 등의 현장 지반조사를 실시하였다. 조사대상 회처리장은 서천 화력발전소의 제 1회처리장과 삼천포 화력발전소의 제 1회처리장으로 회처리장의 규모와 상태는 표 1과 같다.

표 1. 조사대상 회처리장의 규모와 상태

항 목	서천 제 1회처리장	삼천포 제 1회처리장
면적	346,700 m <sup>2</sup>	643,216 m <sup>2</sup>
용적	2,600,000 m <sup>3</sup>	2,650,600 m <sup>3</sup>
매립방식	습식매립 (자유침강)	습식매립 (자유침강)
매립상태	비회와 저회(약 50% 정도)가 불규칙하게 혼합매립	비회와 저회(약 15% 정도)가 불규칙하게 혼합매립
매립개시일	1983. 9	1983. 9
매립완료일	1992. 1	1992. 1

서천 제 1회처리장과 삼천포 제 1회처리장 내에 매립되어 있는 매립회(비회+저회)와 전기집진기내에서 채취한 비회를 대상으로 수행한 기본적인 특성실험 결과는 표 2와 같다. 이 표에서 보듯이 비회는 모

표 2. 서천과 삼천포 석탄회의 물리적, 역학적 특성(2)

특 성	석탄회 종류	삼 천 포		서 천		
		비 회	매 립 회	비 회	매 립 회	
비회(%)	유효입경, D <sub>10</sub> (mm)	0.011	0.013(0.012~0.014)	0.010	0.013(0.008~0.030)	
	균등계수, C <sub>u</sub>	1.7	2.7(1.5~3.8)	2.0	24.0(6.5~25.0)	
	곡률계수, C <sub>g</sub>	0.7	0.8(0.5~1.0)	0.9	0.4(0.3~1.1)	
포스양	역성한계, LL(%)	-	-	-	-	
	소성지수, PI(%)	NP	NP	NP	NP	
유입분류	유입분류	ML	ML(ML)	ML	ML(ML~SM)	
	AASHTO 분류	A-4	A-4(A-4)	A-4	A-4(A-4~A-2-4)	
비 중	비 중	2.12	2.17(2.12~2.25)	2.30	2.24(2.02~2.30)	
	A1 다짐	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.20	1.18	1.46	1.49
다 리	O.M.C(%)	26.0	28.0	17.0	16.0	
	D2 다짐	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.24	1.25	1.50	1.55
O.M.C(%)	O.M.C(%)	23.7	23.0	14.5	12.3	
	포스양	일축압축강도	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	1.09	0.93	0.82
최소점토강도		$\phi$ (°)	32.0	36.9	32.2	39.5
최대점토강도		C <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	1.50	0.98	0.88	0.82
CBR	CBR 값(k)	1.1	5.7	1.0	21.3	
	평정률(k)	10회 다짐	3.06	2.21	0.63	0.15
		25회 다짐	2.97	2.12	0.47	0.13
		55회 다짐	2.65	1.97	0.13	0.13
투 수	투수계수, k(cm/sec)	1.360 × 10 <sup>-5</sup>	2.192 × 10 <sup>-5</sup>	1.490 × 10 <sup>-5</sup>	2.192 × 10 <sup>-5</sup>	
	압축지수, C <sub>c</sub>	0.13 ~ 0.14	0.06 ~ 0.11	0.08 ~ 0.10	0.06 ~ 0.07	
밀 도	선형압밀함수, P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.52 ~ 0.65	0.64 ~ 1.00	0.34 ~ 0.52	0.90 ~ 1.50	

주) 매립회에 대한 ( ) 내의 값들은 회처리장에서 채취한 3개 시료에 대한 실험값의 범위를 나타내고 있음

두 균등계수(C<sub>u</sub>)가 1.7~2.0, 유효입경(D<sub>10</sub>)이 0.01~0.012 mm의 실트질 흙(ML)으로 분류된 반면에 매립회는 C<sub>u</sub>가 1.4~25.0, D<sub>10</sub>이 0.008~0.03 mm의 압축성이 적은 실트질 흙 (ML) 또는 실트질 모래(SM)로

분류되었는데, 이는 매립회의 경우 비회와 저회가 혼합되어 있으며, 회처리장내 매립위치에 따라 저회의 혼합율이 상이하기 때문이다. 또한, 매립회의 비중은 비회와 큰 차이없이 2.17~2.24 정도로 일반 토사에 비해 매우 작은 값을 보여주며, 액소성시험 결과는 모두 비소성(Non-Plastic)으로 나타났다.

석탄회의 다짐특성은 일반 토사에 비해 최대 건조밀도는 낮은 반면 최적함수비가 높게 나타나며, 서천 석탄회가 삼천포 석탄회에 비해 최대 건조밀도가 높고 최적함수비가 낮게 나타났다. 전단강도와 투수계수, CBR, 압밀특성지수는 다짐된 시료에 대하여 구하였다. 다짐시료에 대한 석탄회의 강도특성은 확장공화도와 비교해 볼때 손색이 없을 정도의 높은 강도를 보여주고 있음을 알 수 있다. CBR 시험과정 중 물의 흡수에 의한 시료팽창율은 삼천포회가 서천회보다 매우 큰 값을 보여주고 있어 석탄회 발생지역 및 분단의 종류에 따른 흙의 특성이 다소 변화함을 알 수 있다.

### (1) 지반조사 시험개요

서천 제 1회처리장과 삼천포 제 1회처리장에 대하여 회처리장 내의 위치 및 깊이별 지지력 평가를 목적으로 SPT 및 CPT 시험을 수행하였다. 각 회처리장별 시험위치는 그림 2, 그림 3과 같으며, 회처리장의 매립상태를 고려하여 시험이 가능한 면적내에서 서천 제 1회처리장은 SPT 9개소, CPT 10개소, 삼천포 제 1회처리장은 SPT 5개소, CPT 10개소의 시험위치를 선정하였다. 또한 SPT 시험 후에는 석탄회 침출수의 성분분석을 목적으로 침출수 채취공을 설치하였다.

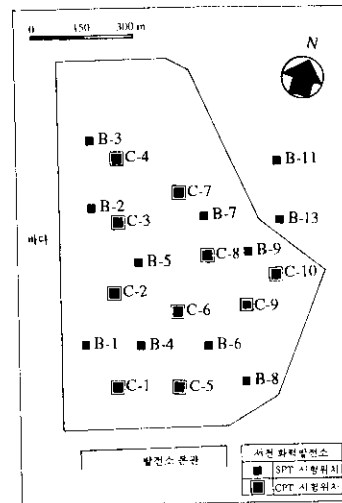


그림 2. 서천 제 1회처리장내 SPT 및 CPT 시험위치

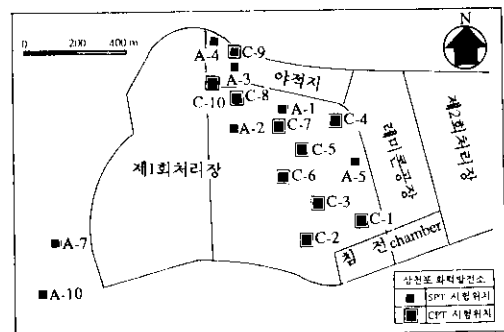


그림 3. 삼천포 제 1회처리장내 SPT 및 CPT 시험위치

(2) 회처리장내 석탄회층의 깊이 추정 및 지지력 평가

SPT 시험에서 얻은 회처리장내 지반깊이별 SPT 채취시료를 분석하여 개략적인 지층단면을 추정하여 보면 서천과 삼천포 회처리장은 5~13 m 정도의 순수한 석탄회층 아래 매우 연약한 실트질 점토층과 석탄회가 섞인 벨층이 2~6 m 정도의 깊이로 존재하며 그 하부에 단단한 퇴적층이 존재하고 있는 것으로 평가되었다. (그림 4)

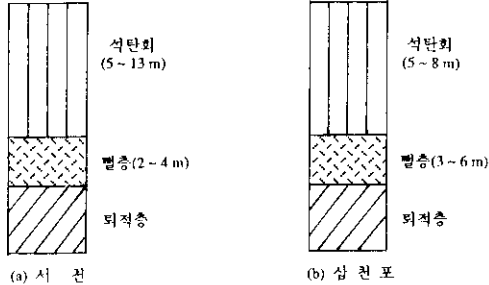


그림 4. SPT 시험으로부터 구한 회처리장내의 개략적인 지층단면

그림 5.와 그림 6.에서는 서천과 삼천포 회처리장내 석탄회층에 대한 SPT 및 CPT 시험결과를 보여준다. 이 그림에서 보듯이 석탄회층의 N값과 qc값은 위치 및 깊이에 따라 다양한 값을 보여주나, 전체적으로 서천 회처리장에서는 N값이 2~10 정도, qc값이 0~100 kg/cm<sup>2</sup> 범위, 삼천포 회처리장에서는 N값이 2~6정도, qc값이 0~50 kg/cm<sup>2</sup> 범위를 나타내어 비교적 연약한 층이 형성되어 있음을 알 수 있다.

특히 매립완료된 석탄회층위에 40cm 정도의 복토가 되어 있는 서천 회처리장의 경우, 지표로부터 3m 깊이 이내의 석탄회층은 약간 건조한 상태로 존재하고 복토로 인한 다짐효과가 발생되어 대체적으로 N값과 qc값이 크게 나타났으며, 또한 서천 회처리장의 B-5공, C-6공 및 삼천포 회처리장의 A-4공, C-4공 등은 다른 시험공보다 큰 N값과 qc값을 보여주는데 이는 이 시험공들 주위에 굵은 입경의 저회들이 많이 분포되어 있기 때문으로 사료된다.

이와 같이 회처리장내 수면위로부터 석탄회를 자유침강시키는 습식 방식으로 매립된 국내 회처리장내의 석탄회 지반은 상당히 연약한 상태로 존재하고 있으므로 이러한 회처리장을 각종 구조물의 기초지반으로 활용하기 위해서는 지반을 개량하여야 할 것이다.

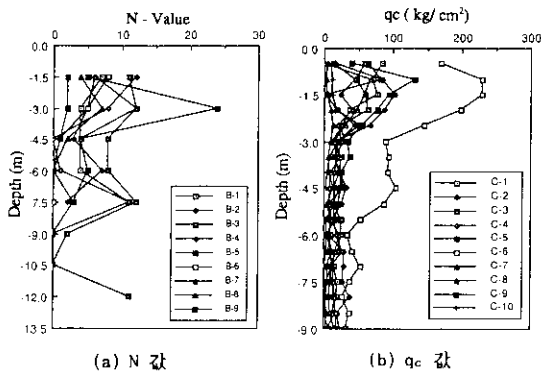


그림 5. 시험위치별 깊이에 따른 N값과 qc값 관계(서천)

2.3 침출수 분석을 통한 주변환경에의 영향 평가

회처리장내의 석탄회 침출수가 주위지역의 주변환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 표 3.과 같이 서천과 삼천포 회처리장 내외에 각 5개소의 침출수 채취공을 설치하여 각종 중금속을 포함한 총 21개 항목에 대한 화학분석을 실시하고 그 결과를 표 4와 표 5에 보였다. 회처

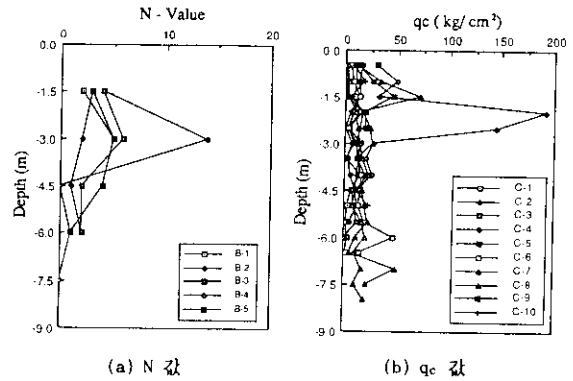


그림 6. 시험위치별 깊이에 따른 N값과 qc값 관계(삼천포)

리장내의 깊이에 따른 화학적 특성은 큰 차이없이 거의 유사하게 나타나며, 회처리장 제방을 경계로 pH와 이온전도도 및 중금속 성분농도 등이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 회처리장내의 석탄회 침출수가 회처리장 제방이나 토층을 통과하는 과정에서 침출수에 있는 화학 성분들이 대부분 회석, 흡착, 침전 등의 작용으로 인해 감소되기 때문으로 사료된다.

회처리장내의 석탄회 침출수가 회처리장 밖으로 유출되었을 경우의 주위 지하수계나, 해역의 수질오염 정도를 평가해 보기 위해 표 6.과 같이 회처리장내 침출수의 성분농도들을 국내의 폐수배출 허용기준 및 방류수 수질기준과 비교해 보았다. 표 6에서 보듯이 서천과 삼천포 회처리장내의 수질은 각종 중금속류를 포함한 대부분의 성분농도가 환경처에서 규정한 폐수배출 허용기준과 방류수 수질기준을 만족할 정도로서, 석탄회 침출수에 의한 주위 지하수 오염은 매우 미미할 것으로 사료된다. 한편 폐수배출 허용기준과 방류수 수질기준에는 표 6.에서 분석대상으로한 성분외에 대장균수, 폐놀, 시안, 광유류, 유지류 등과 같은 유기질 성분에 대한 수질기준이 제시되어 있으나, 보일러에서 고온으로 연소되어 발생하는 석탄회에서는 상기의 유기질 성분들이 거의 침출되지 않을 것으로 판단하여 표 6.의 분석항목에서 제외하였다.

표 3. 침출수 채취공의 위치 및 채취깊이

조사 위치	삼천포 회처리장		서천 회처리장	
	회처리장내 (깊이)	회처리장외 (거리, 깊이)	회처리장내 (깊이)	회처리장외 (거리, 깊이)
A-3	8 m		B-2	10 m
A-4	15 m		B-7	15 m
A-5	10 m		B-9	5 m
A-7		5m, 5m	B-11	
A-10		50m, 20m	B-13	
				50m, 20m
				5m, 5m

주) 조사위치는 <그림 2>, <그림 3> 참조

표 4. 서천 회처리장 내외의 침출수의 화학성분 분석 결과

성분	단위	회처리장내				회처리장외					
		B2		B7		B9		B11		B13	
		'90.11	'91.11	'90.11	'91.11	'90.11	'91.11	'90.11	'91.11	'90.11	'91.11
pH		8.5	8.1	7.10	7.9	7.50	8.1	5.80	6.6	5.5	6.6
Cond.	μ mhos/cm	28,000	42,000	29,500	34,000	34,000	34,000	239.0	230	186.0	260.0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	ppm		8.6		8.2	2.8	8.0		Tr.		0.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		2,276	1,775	1700	1,287	2,155	1,689		9.5	6.7	14.6
Cl <sup>-</sup>		14,420	11,776	12,410	10,960	12,550	11,171		18.7	48.7	32.3
Ca		410.0	540.0	450.0	690.0	410.0	860.0		1.7	2.8	0.8
Mg		930.0	720.0	870.0	680.0	780.0	500.0		5.2	2.5	4.8
Si		2.3	20.4	11.0	7.6	4.6	24.3		4.8	5.5	5.7
B		1.7	2.6	1.3	1.4	2.1	2.8		0.8	ND	0.2
Fe	ppb	93.0	154.6	83.0	149.1	71	123.7		44.0	900.0	41.0
Mn		242.0	83.5	250.0	34.3	510	74.0		92.0	40.6	86.0
Cr <sup>6+</sup>		6.0	ND	5.0	ND	3.0	ND		2.0	ND	Tr.
Cu		8.0	27.2	3.0	Tr.	5.0	46.2		2.0	9.0	2.0
Zn		31.0	83.5	31.0	33.4	57.0	73.0		14.0	37.5	15.0
Pb		Tr.	12.0	2.0	13.0	Tr.	13.0		4.0	12.0	6.0
Cd		12.2	5.0	10.4	4.0	9.8	4.0		2.0	Tr.	1.0
Ni		114.0	89.9	490.0	37.0	224.0	18.3		5.0	Tr.	11.0
Al		1494.0	2.6	957.0	2.4	524.0	16.7		528	0.5	841.0
As		1.0	ND	2.0	ND	7.0	ND		Tr.	ND	Tr.
Hg		Tr.	ND	Tr.	ND	Tr.	ND		Tr.	ND	Tr.

주) ND : Not Detected, Tr. : Trace

표 5. 삼천포 회처리장 내의 침출수의 화학성분 분석 결과.

성분	단위	회처리장내						회처리장외			
		A3		A4		A5		A7		A10	
		'90.11	'91.11	'90.11	'91.11	'90.11	'91.11	'90.11	'91.11	'90.11	'91.11
pH	-	7.8	7.5	7.8	7.7		6.3	6.8	5.5		
Cond.	μ mhos/cm	51,000	18,300	16,000	19,200		273.0	110.0	139.0		
COD	ppm	8.3		7.0	3.4			1.3			
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	~	2,141	1,000	2,029	1,124		6.8	ND	3.7		
Cl <sup>-</sup>	~	15,010	7,130	12,599	15,670		14.4	ND	10.4		
Ca	~	1,580	260.0	310.0	250		8.2	6.0	4.5		
Mg	~	830.0	570.0	300.0	1,400		8.7	3.7	5.2		
Si	~	68.8	3.5	8.2	8.1		13.9	8.4	6.6		
B	~	4.8	1.0	ND	1.4		0.6	28.6	Tr.		
Fe	ppb	20.3	180.0	45.8	98.0		96.0	80.0	81.0		
Mn	~	39.1	1,008	88.4	235.0		92.0	229.2	87.0		
Cr <sup>+6</sup>	~	ND	125.0	ND	6.0		2.0	ND	1.0		
Cu	~	6.0	13.0	Tr.	16.0		17.0	11.0	18.0		
Zn	~	38.9	31.0	86.7	36.0		24.0	15.0	22.0		
Pb	~	15.0	5.0	12.0	45.0		66.0	78.0	59.0		
Cd	~	11.0	132.0	4.0	101.0		4.0	Tr.	2.0		
Ni	~	22.9	210.0	12.0	777.0		5.0	Tr.	4.0		
As	~	181.0	2,087	4.5	493.0		5,467	4.5	28.7		
Hg	~	ND	Tr.	ND	Tr.		Tr.	ND	Tr.		

주) ND : Not Detected, Tr. : Trace

표 6. 회처리장내 침출수 특성 비교 평가

성분	단위	폐수배출 허용기준 (청정지역)	방류수기준	회처리장내	삼천포 회처리장내
pH	-	5.8~8.6	5~9	7.1~8.5	7.5~7.8
COD	ppm	50	50	Tr.~8.6	1.3~8.3
SS	ppm	50	70	50	28.3
Fe	ppb	2,000	10,000	71~154	20.3~165
Mn	ppb	2,000	10,000	34.2~250	39.1~1,008
Cr <sup>+6</sup>	ppb	100	500	ND~6	ND~12.5
Cu	ppb	500	3,000	Tr.~46.2	Tr.~16
Zn	ppb	1,000	5,000	31~83.5	31~86.7
Pb	ppb	200	1,000	Tr.~13	5~45.1
Cd	ppb	20	100	4~12.2	4~13.2
As	ppb	100	500	ND~Tr.	ND~7
Hg	ppb	ND	5	ND~Tr.	ND~Tr.

주) ND : Not Detected, Tr. : Trace

## 2.4 국내 석탄회 매립처리장의 문제점 및 개선방안

표 2에서 고찰한 바와 같이 석탄회는 다짐하여 시공하였을시 화강 풍화토에 비교할 만한 높은 강도를 보여 줌을 알 수 있다. 그러나 대부분의 국내 회처리장에 석탄회를 매립하는 방식은 회수송관을 통해 비회와 저회를 해수와 혼합한 슬러리 상태로 회처리장에 자유침강시키는 습식매립 시스템으로 매립종료후 건설부지로 활용하고자 할 경우 다음과 같은 문제점이 발생할 가능성이 있다.

- 자유침강으로 인한 석탄회의 밀도가 낮아 회처리장의 사용년수가 줄어들고, 형성된 매립부지는 지지력이 약하여 구조물 기초 건설 부지로 활용할 경우 별도의 지반 개량이 필요하게 된다.
- 회처리장내 비회와 저회의 불균질한 혼합에 따라 회처리장내 지지력 차이 및 부동침하 발생을 초래할 수 있다.
- 자유침강에 의한 매립시 비교적 높은 pH와 탄도가 발생하여 환경적인 문제가 발생할 수 있다.

따라서 이러한 문제점들을 개선하여 보다 효율적인 회처리장의 부지활용 및 성토재료의 매립회 활용 등을 유도하기 위한 방안으로 다음의 몇가지를 고려하여 매립하는 것이 바람직하다.

- 비회와 저회를 분리 매립하는 시스템으로의 전환
- 비회 매립시, 매립완료 후의 석탄회 지반이 보다 조밀하고 견고해질 수 있는 매립기법 - 고밀도 석탄회 슬러리공법, 석고 혼합 슬러리공법, 습식 매립후 건조시켜 육상 매립하는 방법 등을 개발하여 적용.

## 3. 제철소 폐기물 매립부지의 활용

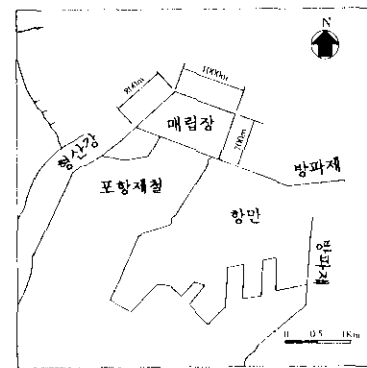
제철소 폐기물은 철 생산의 부산물로서 발생하는 물질로서 슬래그, 슬러지, dust 등이 있으며 많은 양이 재활용되고 있다. 재활용되고 남은 폐기물은 해안에 매립하고 있으며 이미 매립된 부지의 활용계획

이 추진되고 있다. 제철소 폐기물 매립부지 경우에는 건설잔토, 콘 크리트조각, 슬래그 등이 일반흙과 혼합 매립되어 있어, 굴착 및 기초 형태의 선택과 함께 이러한 폐기물로부터 흘러 나온 침출수로부터 발생할 수 있는 해양오염을 방지할 차수시설 설치가 해결하여야 할 과제이다. 따라서 본절에서는 부지활용을 위한 기본 현장조사와 함께 말뚝시험타 결과 및 침출수의 화학적 특성분석 결과를 기술한다.

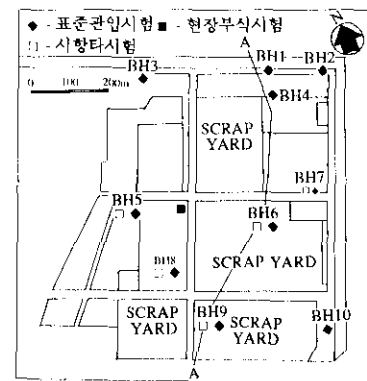
### 3.1 매립부지의 현황

조사대상 매립장은 포항의 제 3 부기장으로 포항제철로부터 북동쪽에 위치하고 있다(그림 7a). 제철폐기물 및 현장토질의 분포를 알아보기 위하여 표준관입시험 10개공을 실시하였으며 5개의 시추공 주변에서는 시험항타를 실시하였다(그림 7b). 표준관입시험시 채취된 교란시료로부터 파악된 그림 7b의 A-A 라인을 통한 제철폐기물과 현장토질의 분포는 그림 8과 같으며, 슬래그층이 10~15 m 길이로 매립되어 있으며 현장 토질은 20 m 길이까지의 사질토, 그 이하는 점토층으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

표준관입시험을 통하여 채취한 흙의 물리적 특성을 보면(표 7), 매립재와 원지반 흙의 비중과 세립토(<0.072 mm) 성분의 양은 큰 차이가 없으나 매립토내의 사질토는 원지반보다 훨씬 균등하며 점토질 성분은



(a) 매립장 위치



(b) 시추공의 위치 및 현장계측

그림 7. 제철소 폐기물 매립장의 위치 및 현장조사 계획

반대의 경향을 보인다. 채움 점토의 역성한계 및 소성한계는 원지반 흙의 값보다 적은 값을 보이며 소성지수는 원지반 흙이 크고 함수비는 매립재나 원지반 흙이 비슷한 값을 보인다.

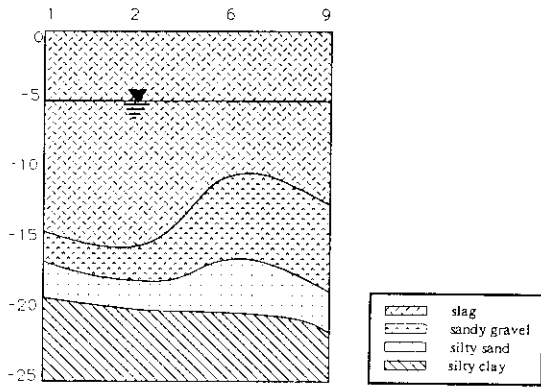


그림 8. A-A 단면의 보잉 로그로 부터 구한 토질조성도

표 7. 현장매립 부지내의 흙의 물리적 특성

특 성	매 입 층		원 지 반 층	
	모 래	점 토	모 래	점 토
비중	2.64	2.68	2.65	2.70
#200세 통과량(%)	33.0	80.0	31.0	89.0
균등계수(Cu)	94.4	3.7	15.6	10.1
역성한계(W <sub>L</sub> , %)	N.A*	42.7	N.A	64.7
소성한계(W <sub>p</sub> , %)		18.9		25.2
소성지수(I <sub>p</sub> , %)		23.8		39.5
수축한계(I <sub>c</sub> , %)		0.35		0.64
함수비(W)	17.6	35.8	25.9	37.8

\* Not Available

표준관입시험결과와 구하여진 N 값을 보면(표 8) 매립층에서의 N값은 매우 변화가 심한 것을 알 수 있으며, 샘플러가 관입할 수 없는 층(N ≥ 100) 도 찾아볼 수 있었다.

표 8. 토질의 종류별 N 값의 분포범위

구 분	분포범위	평균	비고
매 입 층	슬래그	3~100 <	
	자갈	10~49	26
원 지 반	자갈	8~25	15
	모래	11~33	22
	점토	8~11	9

### 3.2 현장 시험타 실시 및 결과 분석

표준관입시험 결과 및 타입말뚝의 시공성을 확인하기 위하여 5개의 타입말뚝을 표준관입시험이 시행된 위치에서 2~3 m 떨어진 곳에서 실시하였다.

시험말뚝은 직경이 406 mm이고 길이는 14m인 원형강관 말뚝을 사용하였으며 타입을 위한 향타기는 함마 및 램의 증량함이 2.5 톤인 IDM-25 모델을 사용하였다. 말뚝을 관입하기 위한 타격수를 말뚝 10 cm 관입시마다 측정하고 이를 20 cm 관입시의 타격회수로 환산하여 깊이 에 따라 그림 9에 도시하였다. 측정된 타격수는 주로 5~25회의 분포를 나타내며 BH 6과 BH 9에서는 각각 3 m 및 6 m에서 현저히 증가하여 총 14 m를 다 관입시키지 못하는 현상이 나타나고 있다. 이는 기존매립장에 매립된 폐기물의 입도가 불량하여 콘크리트 조각이나 폐철 조각 등이 함께 매립되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 관입되지 않은 지점을 비롯한 5개 지점에서의 시험타 말뚝의 거동을 표 9에 요약 하였다.

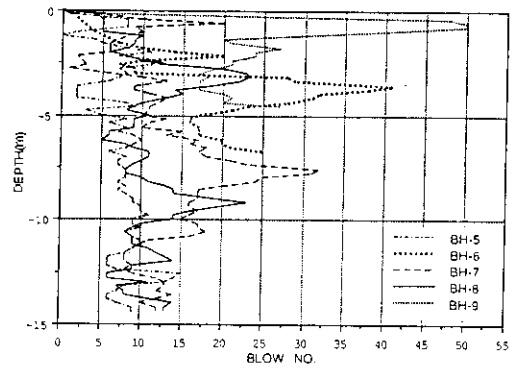


그림 9. 시험타 깊이에 따른 관입량 20 cm 당 소요향타수

표 9. 위치별 시험타 특성

시추공 번호	시험말뚝의 거동
BH-5, 7, 8 (14.4 m)	SPT와 비교하여 양호한 경향을 나타낸다.
BH-6 (6.8 m)	원지반이 추위지반에 비해 약 15cm 정도 침하되어 지름 40cm 정도의 공동 형성.
BH-9 (4.6 m)	0.5~1.0m 깊이에서 단단한 물체에 부딪혀 심한 진동이 발생하였고 4.6m에서 6" 정도 말뚝이 경사지게 관입하여 향타 중단

### 3.3 현장 침출수 샘플의 화학성분 분석

표 10에 표시된 시추공과 해당깊이로부터 물시료를 채취하여 화학성분을 실시하였다.

표 10. 물시료를 채취한 시추공과 해당깊이

시추공번호	깊이 (m)
BH-2 and 7	18.5
BH-5	22.5
BH-8	27.5
BH-9	32

각 시추공은 우수침투를 배제하기 위해 캡을 씌운 반경 1.5 인치의 P.V.C. 파이프를 사용하였고 5리터 정도의 샘플을 두차례에 걸쳐 채취한 후 성분분석을 실시하여 표 11의 결과를 얻었다.

침출수의 화학성분은 해수성분과 비슷한 경향을 보였으며 각각 다른 시기에 채취된 pH의 값도 BH 2와 BH 7을 제외하면 해수의 pH값(pH 8.3~8.6)과 비슷하여 매립장내의 침출수가 해수와 오랜 시간동안 접촉하여 희석 되어졌음을 알 수 있었다. 침출수내의 중금속의 양은 표 12에 보인 국내 환경보호법의 배출수의 기준을 만족시킴을 알 수 있었다.

표 11. 채취된 침출수의 화학성분 실험결과

일	시추공번호	Cd	Cr <sup>6+</sup>	Cu	Fe	Hg	Mn
'91 May	해수	0.0233	0.1814	0.0430	ND*	8.1676	0.0826
	BH2	0.0233	0.3626	0.0428	ND	8.1593	ND
	BH5	0.0259	0.1845	0.0440	ND	8.1277	0.2299
	BH7	0.0315	ND	0.0397	ND	8.1027	ND
	BH8	0.0233	0.1319	0.0357	ND	8.1311	0.3988
	BH9	ND	ND	0.0022	ND	7.0721	0.2554
'91 June	해수	0.0170	0.1206	0.0370	0.0595	4.4353	0.0300
	BH2	0.0171	0.1434	0.0610	0.0869	4.3975	0.0500
	BH5	0.0181	0.1614	0.0560	0.3667	4.3708	0.8739
	BH7	0.0168	0.1458	0.0580	0.0102	4.3298	0.0563
	BH8	0.0185	0.1149	0.0720	1.5213	4.3564	1.4276
	BH9	0.0072	0.0310	0.0440	2.5153	4.0425	0.7951

\* not detected

월	시추공번호	Pb	Zn	Cd	pH	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
'91 May	채수	0.1574	ND	0.0502	8.0000	20,968.5	2126.96
	BH2	0.3314	ND	ND	9.3000	20,368	2368.5
	BH5	0.2222	ND	ND	8.1000	21,967.5	2315.6
	BH7	0.1714	ND	ND	9.7000	19,693	1741.5
	BH8	0.1587	ND	ND	8.2000	13,258	1507.5
	BH9	0.0174	ND	ND	8.6000	524.9	95.8
	채수	0.1644	0.0116	ND	8.4000	18,719.2	2216.96
	BH2	0.2084	ND	ND	8.9000	19,469	2360.5
	BH5	0.2010	ND	0.0106	7.2000	20,469	2430.2
'91 June	BH7	0.1813	ND	0.0528	10.1000	19,119	2007.9
	BH8	0.2170	0.1854	0.0165	7.7000	17,069	2036.6
	BH9	0.0495	0.2712	ND	7.8000	449.9	101.98

표 12. 배출수에 대한 중금속 허용 기준

(단위: ppm)

성분	Cd	Cr	Fe	Zn	Cu	Cd	Pb	Cr <sup>6+</sup>
표준	1	2	10	5	3	0.1	1	0.5

### 3.4 재철폐기물 매립지의 건설부지 활용시 고려사항

재철폐기물 매립지의 건설부지로서의 활용시 다음과 같은 문제점이 있음을 알게 되었다.

매립되어진 폐기물 내에는 다량의 철조각과 콘크리트 잔토가 섞여 있어 향타를 통한 말뚝기초 시공에 어려움이 예상된다. 또한 시추공으로부터 채취된 침출수는 비록 국내 환경보호법의 배출수 기준을 만족시키기는 하지만 이 조사를 수행하는 동안 조사원이 피부 알러지를 경험한 경우도 있어 시공상의 주의가 요망된다. 특히 굴착된 매립토의 처분 방안과 시공중 발생하는 침출 지하수의 처리, 그리고 토목구조물 시공의 종사자에게 안전한 작업 환경을 조성해야하는 점이 해결하여야 할 과제이다.

불균질 매립층 문제의 해소 방안으로서 프리보어링 공법의 일종인 S.I.P.(Soil-Cement Injected Piling) 공법이 값도 저렴하고 Soil-Cement의 smearing 효과로 인하여 좋은 지지력을 갖고 있어 적용이 고려되었으나, S.I.P. 공법은 황하층에 약한 단점이 있어 본 재철소 부지와 같이 지진 및 기계 진동에 의한 황하층을 고려하여야 하는 경우의 기초로서 부적합하여 프리보어링 후 강관말뚝을 매설하도록 결정하였다. 강관말뚝은 압축 및 인장강도 모두에 강하고 재철소 생산제품 수요를 촉진시킨다는 점에서 장점이 있다.

시공시 침출수에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 공법으로는 굴착 시 지하수의 유입을 방지할 수 있고 콘크리트 잔토층이 섞여 있는 비균질한 흙을 효율적으로 굴착할 수 있는 슬러리 월(slurry wall)공법을 채택하였다. 또한 발생하는 굴착잔토중 특히 오염도가 강한 것으로 알려진 dust와 sludge 류에 대해서는 지오멤브레인(geomembrane) 등의 차폐시설 설치후 매립할 것을 제안 하였으며, 사용 후의 침출수와 혼합된 슬러지 오염물 제거를 위한 별도의 처리 설비를 갖추도록 하였다.

### 4. 요약 및 결론

본 논문에서는 석탄회 및 재철폐기물 매립재의 건설부지로서의 활용 가능성을 조사하기 위하여 기 매립된 부지에 대하여 기초지반으로서의 공학적 특성과 폐기물 매립지반으로서의 주변 지반환경에 대한 영향에 관하여 고찰해 보았다. 양 폐기물 모두 기초지반 재료로서는 일반 화강토 침도의 좋은 특성을 가지고 있으나 과거의 매립이 향후 활용가능성에 대한 고려가 없이 무작위로 매립이 시행되어 있으므로 지반개량이 추가로 필요하거나 지하연속벽, 매입말뚝 등 경제적이지만 않은 기초 또는 굴착공법이 사용되어야 함을 보여준다. 각 부분별로 유도되어진 결론은 다음과 같다.

- 석탄회 매립지반은 수면위로부터 석탄회를 자유침강시키는 습식방식으로 매립되었고 비회 및 저회의 혼합비율이 장소별로 달라 N 값이 위치 및 깊이에 따라 0에서 10까지의 다양한 범위를 보여 주며 대체로 연약한 지반을 형성하고 있다. 향후 기초지반으로 활용하기 위해서는 선행압밀, 여성토, 고결화법 등의 개량공법이 필요하다. 보다 효율적인 회처리장의 부지활용 및 매립재로의 활용을 유도하기 위해서는 비회와 저회를 분리 매립하는 시스템과 조밀하고 견고하게 매립할 수 있는 매립기법의 개발이 필요하다.
- 재철폐기물 매립지반은 자체로서의 강도가 탁월한 반면 무차별 매립으로 인한 콘크리트 및 철조각 등의 존재로 인하여 말뚝기초의 실시나 매립지 이하의 원지반을 개량하여야 할 경우 값이 저렴한 타입공법을 사용할 수 없는 결점이 발생하였다. 따라서 재철소 폐기물 매립장을 향후 건설부지로 사용할 경우를 고려해서 깊은 기초 설치에 장애가 되는 전석류의 폐기물과 주변환경 오염에 영향을 미칠 수 있는 dust, 슬러지류 등을 분리하여 매립하는 것이 필요하다. 매립장을 건설부지로 활용하기 위하여 원지반을 개량할 필요가 있을 경우, 사전에 이용 계획을 세워서 필요한 지역에 대한 원지반을 매립하기 전에 사전 개량하는 방안도 필요한 것으로 사료된다.
- 석탄회 및 재철소 매립지 모두 부지내에서 발생하는 침출수의 중금속의 양이 방류수 기준을 만족함을 보여주고 있다. 그러나 이러한 매립지반에 관한 환경적 규제는 점차로 강화되어 가는 것이 세계적인 추세인 점에 비추어 지속적인 관찰 및 연구가 필요하며 폐기물 중 중금속 함유물이 비교적 높은 재철 dust 및 슬러지류에 대해서는 차수벽을 설치한 후 매립하는 방안 등이 고려되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 기술연구원에서 발주한 "성토재로서의 석탄회 이용방안 연구"와 포항제철 Engineering에서 발주한 "재철소 산업폐기물 매립 기본계획"의 연구용역 사업의 일부이며 재정적인 지원을 해주신 두 기관에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. 신항식, "폐기물 관리 현황 및 방향", 대한토목학회지, Vol.39, No.5, 1991. 10.
2. 한국전력공사 기술연구원, "성토재로서의 석탄회 이용 방안연구", KRC-90H-J06, 1992. 6.
3. 포항종합제철 주식회사, "산업폐기물 매립기본계획 보고서", 1991. 11