

지반보강 및 차수 그라우팅재로서의 Bottom Ash 활용에 관한 연구 A Study on Application of Bottom Ash with Grouting Improvement and Waterproof Grouting

권혁두¹⁾, Hyuk-Doo Kwon, 이범준²⁾, Bum-Jun Lee, 도영곤³⁾, Young-Gon Doh, 이 송⁴⁾, Song Lee

1) (주)건화 엔지니어링 부사장, Vice President, Kunhwa Engineering

2) 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

3) (주)선진 엔지니어링 토질부, Dept. of Geotechnical Engineering, Sunjin Engineering

4) 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

SYNOPSIS : Recently, coal ashes which are increasing annually are buried in ash ponds as industrial wastes. However, buried coal ashes can pollute ground water and ground due to leachate from coal ashes, which are serious environmental problem. Even though a lot of researches on recycling of coal ashes have been conducted, only 15% of coal ashes are recycled up to now. And those recycled coal ashes are not bottom ashes but fly ashes. So in this study, it was proved that Bottom Ash can be used as an alternative material to O.P.C(Ordinary Portland Cement) according to laboratory test results and test field construction. Also bottom ash is more economical and environmentally friendly than O.P.C.

Key words : Bottom ash, Grouting material, O.P.C

1. 서 론

국내 에너지 발전설비용량 중 최대 비중을 차지하는 화력발전은 화석연료들의 연소과정에서 필연적으로 발생하는 석탄회에 대한 처리문제와 같은 환경적인 문제점을 수반하게 되며 국내 발전에너지에서 차지하는 화력발전의 높은 비중만큼 환경에 미치는 부정적인 영향 또한 급격히 증대되고 있다.

국내 화력발전에 따른 석탄회 발생량은 1990년 180만톤에서 2006년에는 550만톤으로 증가하였으며 2010년경에는 600만톤에 이를 것으로 전망된다. 이렇게 해마다 증가하고 있는 석탄회는 대부분 일반 산업폐기물로 간주되어 슬러리화하여 회사장(Ash Pond) 등에 매립되고 있으나 폐기 매립된 석탄회는 인근 지역으로 비산되어 주변 환경을 오염시키거나 매립에 따른 알칼리성과 중금속 등의 용출성분들에 의하여 인근 토양 및 수질을 오염시키는 등 심각한 환경적 문제점을 야기할 수 있다. 또한 막대한 처리비용 및 처리를 위한 매립장 부지 부족 등의 심각한 사회적 문제도 발생한다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 석탄회의 재활용에 대한 연구노력이 사회 전반에 걸쳐 계속 진행되고 있으나 지속적인 연구에도 불구하고 석탄회 발생량에 비해 국내에서의 석탄회 재활용 실적은 15%에 불과하고, 이마저도 석탄회 중 Fly Ash에 관한 연구가 대부분이고 Bottom Ash에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Bottom Ash의 공학적 활용에 대한 연구를 수행 하고자 하였다. 먼저 초미세분말로 만들어진 Bottom Ash를 이용하여 시멘트 및 황토, 풍화토, Bentonite 등과의 최적 배합비, 압축강도

및 투수계수 등의 비교를 통하여 Bottom Ash의 토목 재료로서의 적합성에 관한 연구를 실시하였으며 현장 시험 시공 후의 시료에 대한 추가 실험을 실시하여 현장에서의 적용성을 파악하였다.

2. 석탄회 이론

2.1 석탄회의 생성

화력발전소에서 석탄을 연소하여 사용한 후, 남은 부산물을 석탄회라 부른다. 석탄회는 무연탄의 경우 30~50%, 유연탄은 10~15% 정도의 회분을 함유하고 있으며, 석탄 연소온도의 변화에 영향을 미치는 연소로의 구조, CaO함량의 변화에 영향을 미치는 탄의 종류, 분쇄도, 체류기간, 집진기의 형태에 따라 여러 가지 물리, 화학적인 성질이 변하게 된다. 이 때, 미세한 분말상태인 미분탄은 연소되어 배연가스와 함께 보일러 내에서 배출되는 데 모이는 장소에 따라 Bottom Ash, Cinder Ash, Fly Ash로 구분된다.

2.1.1 Fly Ash

미분탄연소 보일러의 연소가스가 집진장치를 통과할 때 채취된 석탄회로, 총 석탄회 발생량의 75~90% 정도를 차지하며 대부분 0.1mm이하의 입경을 갖는다. Fly Ash의 입도분포는 1~100 μ m의 범위에 있고, 그 평균입경은 20~30 μ m로 거의 시멘트 입경과 비슷하다. 전기 집진기 내에서 호퍼의 위치에 따라 입자크기는 차이가 나며 분말도가 7000cm³/g 이상의 값에는 보통 수 μ m정도로 나타난다.

Fly Ash의 분말도는 SiO₂의 함유량과 함께 포졸란 활성을 지배하는 주요인자이며 콘크리트의 워커빌리티에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 분말도가 커지면콘크리트의 배합 시 단위수량의 증가를 초래하지만, 입자가 미세함으로 콘크리트 내에서 골재사이의 공극을 충전시켜 줌으로써 수밀성을 증대시킬 수 있다. Fly Ash가 콘크리트혼화재로 사용되어 콘크리트의 특성을 개선시킬 수 있는 것은 포졸란 반응에 의한 부가적인 수화생성물을 만들기 때문이다. Fly Ash 입자는 시멘트 수화조직체 내부에 존재하는 Ca(OH)₂와 반응하여 시멘트 수화물을 증가시켜주기 때문에 장기강도를 증가시켜 주는 효과가 있다. 즉, Fly Ash 입자의 유리질 SiO₂와 수화 부산물인 Ca(OH)₂가 반응하여 C-S-H수화물을 만드는 포졸란 반응에 의해서 장기강도가 증진한다.

2.1.2 Cinder Ash

미분탄연소 보일러의 연소가스가 공기에열기와 절탄기 등을 통과할 때 낙하하여 채취된 석탄회로, 총 석탄회 발생량의 5% 정도가 발생된다. 대부분 0.1~10mm 정도의 입경범위를 갖고 있고, 규산질이 60% 이상 함유된 다공질로 형성되어 건조밀도는 약 720kgf/m³ 정도로 경량이며 보습, 보비효과가 뛰어나며 탄력성이 우수한 자재로 운동 경기장 또는 골프장의 표층 및 중층에 널리 사용되는 경량 골재이다.

2.1.3 Bottom Ash

미분탄연소 보일러의 저부에 낙하한 용융상태의 석탄회가 급랭, 고화 되어 암괴형태로 존재하는 것을 분쇄기를 사용하여 분쇄시킨 회로서, 총 석탄회 발생량의 10~15% 정도가 발생한다. 대부분 1~10mm 정도의 입경범위를 갖으며 입도분포 또한 상당히 양호하여 입경 0.1~1mm의 입자가 50%, 1mm 이상의 입자가 50% 정도를 차지한다. 건조밀도는 약 590kgf/m³ 정도이다. 입자는 모래

형상으로서 다공질이기 때문에 비중이 1.9~2.3 정도의 범위로 일반 토사에 비해 가볍다. Bottom Ash 주된 화학성분은 SiO_2 , Al_2O_3 등이고 전체의 80%이상을 차지한다. 이러한 성분은 포졸란 반응을 일으키는 물질로 시멘트와 혼합할 경우 시멘트의 수화에 의해 발생하는 Ca(OH)_2 의 Ca^{2+} 와 SiO_2 , Al_2O_3 가 반응하여 C-S-H나 C-A-H를 생성하고 장기간에 고화되어 강도를 발현한다.

3. 실내시험

3.1 기본물성시험

본 연구에서 이용된 당진 화력발전소에서 발생한 Bottom Ash와 보통포틀랜드시멘트, 황토, 풍화토 그리고 Bentonite의 기본물성시험을 수행하였다. 수행한 기본물성시험의 항목은 함수량 시험, 비중 시험, 액성한계 시험, 소성한계 시험, 체분석 시험, 그리고 이러한 기본물성 시험 결과를 통하여 통일분류법에 의한 토질분류를 하였다.

표 1. 기본물성시험 결과

시 료	w (%)	G_s	LL (%)	PI (%)	#200통과율 (%)	USCS
Bottom Ash (일반)	10.5	2.32	N.P	N.P	2.1	SW
Bottom Ash (분말)	10.5	2.32	N.P	N.P	100	SW
황 토	16.9	2.63	N.P	N.P	82.1	SW
풍 화 토	15.7	2.62	N.P	N.P	75.4	SW
Bentonite	5.7	2.30	295	221	89.2	CH

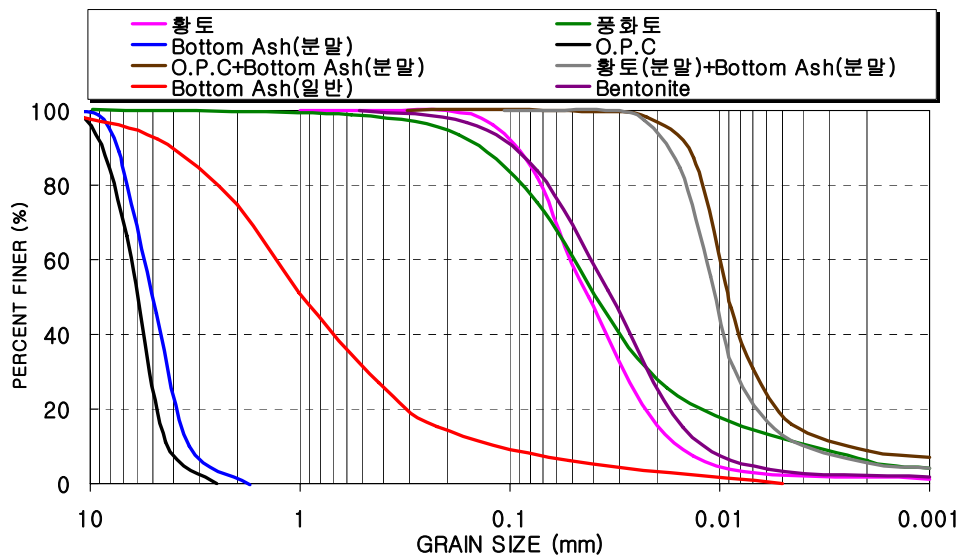


그림 1. 입도분포 곡선

3.2 화학분석 및 중금속 용출시험

Bottom Ash의 화학적 특성과 환경오염 가능성 검증을 위하여 화학성분분석 및 광물분석 시험을 수행하였다. 화학성분분석 시험은 준비된 Bottom Ash 시료를 분쇄 후 No. 200체를 통과한 시료 중 정량 분석용 시료 0.5g을 채취하여 실시하였다. 또한, Bottom Ash를 그라우트재료로 이용할 경우 지중에서

의 토양환경오염 가능성에 대한 여부를 검증하기 위하여 중금속 용출실험을 수행하였다. 다음 표 2는 화학분석시험 결과를 나타낸 것이고, 표 3과 4는 중금속 용출시험결과를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 Bottom Ash를 이용한 혼합시료 전부가 지정폐기물 기준에 적합한 것으로 판명되었고, “수질환경보전법”에 의한 오염물질 배출허용 기준치를 훨씬 못 미치는 것으로 나타나고 있어 Bottom Ash의 그라우트재로서의 이용에 환경적 문제는 없을 것으로 판단되었다.

표 2. 화학분석시험 결과

성분(%)	종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO
O.P.C		22.00	5.53	65.00	1.42	1.01	1.53
Bottom Ash		55.90	24.17	1.01	1.34	7.77	0.22
Hwangto		50.29	24.08	3.05	1.28	3.81	0.04
Weathered Soil		49.82	30.27	4.09	2.02	2.98	0.17
Bentonite		63.70	19.82	0.92	1.09	2.65	1.09

표 3. 원시료의 중금속 용출시험 결과

Heavy Metal	CN	Cu	Cd	Pb	As	Hg	pH
Standard(mg/l)	1	3	0.3	3	1.5	0.005	5.8~8.6
Sample							
Bottom Ash	ND	ND	ND	0.045	ND	ND	10.1
Hwangto	ND	ND	ND	ND	ND	ND	9.11
Weathered Soil	ND	ND	ND	ND	ND	ND	9.37
Bentonite	ND	ND	0.1	0.1	ND	ND	7.52

표 4. 혼합시료의 중금속 용출시험 결과

Heavy Metal	CN	Cu	Cd	Pb	As	Hg	pH
Standard(mg/l)	1	3	0.3	3	1.5	0.005	5.8~8.6
Sample							
Bottom Ash + O.P.C + Hwangto	ND	ND	ND	ND	ND	ND	11.1
Bottom Ash + O.P.C + Weathered Soil	ND	ND	ND	0.07	ND	ND	11.4
Bottom Ash + O.P.C + Bentonite	ND	ND	ND	0.08	ND	ND	10.3

3.3 다짐시험

다짐시험은 KS F 2312 규정에 적합한 수정 D 다짐 방법에 따라 수행하였으며, Bottom Ash와 O.P.C 사이의 최적 배합비를 산정하기 위하여 Bottom Ash : O.P.C의 배합비를 각각 4:6, 3:7, 2:8 로 하여 수행하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 얻었다. 또한, 강도 및 단위중량의 증진을 위한 첨가제로서 황토, 풍화토, Bentonite를 이용하였으며, 3%, 6%, 9%, 12%의 중량비로 혼합하였다. 그 결과, 2:8의 혼합비에서 최대건조밀도가 가장 높게 나타나 최적 혼합비가 2:8임을 알 수 있었으며 황토, 풍화토의 혼합 첨가율이 6%였을 때, Bentonite의 경우는 3%였을 때 최대건조밀도가 가장 높게 나타났다.

3.4 일축압축강도 시험

일축압축강도 시험용 공시체는 D다짐 시험으로부터 얻은 시료의 단위중량과 일축압축시험 공시체의 단위중량이 같아지도록 지름 5cm, 높이 10cm의 공시체 체적에 투입될 적정 총시료량을 계산하고 각각의 시료를 소정의 중량비로 혼합하여 제작하였으며, 항온항습기를 이용하여 상대습도 95%이상, 온도 21℃로 습윤 양생시켰다. 제작 후 1일, 7일, 28일, 55일, 90일, 190일 간 양생시켰으며, 양생 후 공시체의 상·하부를 평면도 0.05mm이내가 되도록 연마하였다. 그 후 일축압축강도를 측정하여 혼합물에 따른 강도 특성을 검토하였다.

다짐시험에서와 마찬가지로 황토, 풍화토, Bentonite를 각각 3%, 6%, 9%, 12%씩 첨가 혼합하여 일축압축강도의 변화를 비교해 보았다. 그림 2는 O.P.C만으로 양생시킨 공시체와 6:4에서 2:8까지 다양한 배합비로 Bottom Ash와 O.P.C를 배합한 공시체의 일축압축강도를 비교한 결과이다. 양생일 7일을 넘어 90일 정도의 초기강도는 O.P.C의 강도가 높았으나 양생기간이 증가할수록 Bottom Ash를 혼합한 공시체의 강도가 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 장기강도에서는 Bottom Ash를 혼합한 공시체의 강도가 더 유리할 것으로 판단된다.

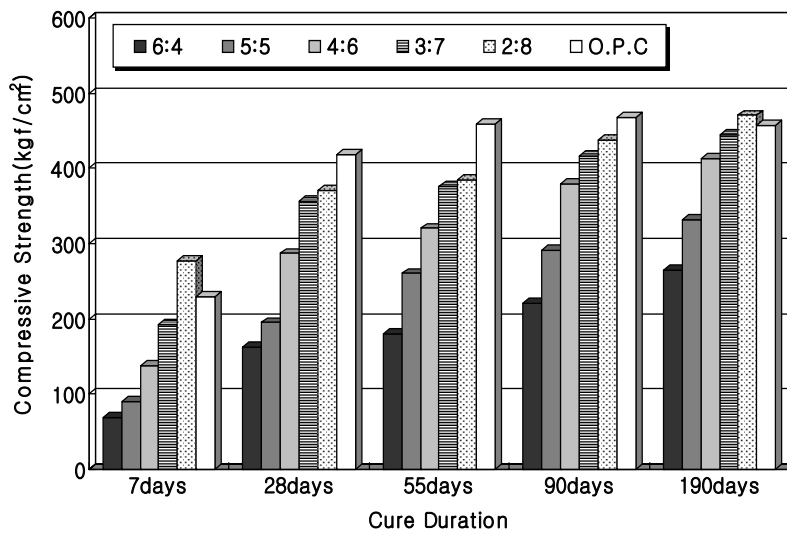


그림 2. Bottom Ash와 O.P.C의 혼합비율과 양생기간에 따른 일축압축강도

또한, Bottom Ash와 O.P.C의 최적 배합비인 2:8에 혼합 첨가재로 황토, 풍화토, Bentonite를 각각 3%, 6%, 9%, 12%의 중량비로 혼합하여 제작된 시료의 1일, 7일, 28일, 55일, 90일, 190일 양생 후의 압축강도를 비교한 결과, 황토, 풍화토, Bentonite를 혼합 첨가하였을 경우 양생기간이 증가할수록 일축압축강도가 증가하였고, 혼합 첨가함유량이 증가 할수록 압축강도의 감소하였다. 모든 첨가재의 혼합 첨가함유량이 3%에서 가장 큰 압축강도를 보였지만, 첨가율 6%일 때의 강도에 비교하면 그리 큰 차이가 나지는 않았다. 따라서 최대건조밀도와 압축강도를 고려한 최적의 배합비는 황토와 풍화토는 6%, Bentonite는 3%로 혼합 시 경제성을 고려하면 가장 적절하다고 판단된다.

3.5 동결·융해 시험

그라우팅재의 강도를 저하시키는 요인 중 동결·융해의 반복 작용이 가장 큰 요인이 된다. 따라서, Bottom Ash의 그라우트재로서의 이용 시 동결·융해로 인한 강도저하에 따른 피해를 최소화 할 수 있는지의 여부를 검증하기 위하여 본 연구에서는 동결·융해 저항성을 시험하였다. 24시간을 기준으로 -24℃에서의 동결과 4℃에서의 융해를 각각 5회, 10회, 15회, 20회씩 반복하였으며, 동결·융해를 마친 공시체에 대하여 일축압축강도시험을 수행하여 동결·융해에 의한 재료의 강도저하 특성을 파악하였다.

시험결과, O.P.C만 사용했을 경우보다 Bottom Ash를 첨가 하였을 경우 동결·융해의 반복 횟수가 증가할 수록 감소되는 압축강도의 폭이 작았다. 즉, Bottom Ash 첨가 시 동결·융해에 대한 저항성이 더 크다는 것을 보여준다. 전 절에서 선술 하였던 일축압축강도 시험 결과와 종합해 보면, 시공 직후의 강도는 Bottom Ash를 첨가했을 경우보다 O.P.C만을 사용했을 경우 더 강하지만, 동결·융해에 대한 저항성이 Bottom Ash를 첨가했을 경우 현저하게 높아지므로 장기적인 목적에 있어 Bottom Ash를 혼합하는 것이 더 효과적일 것으로 기대된다.

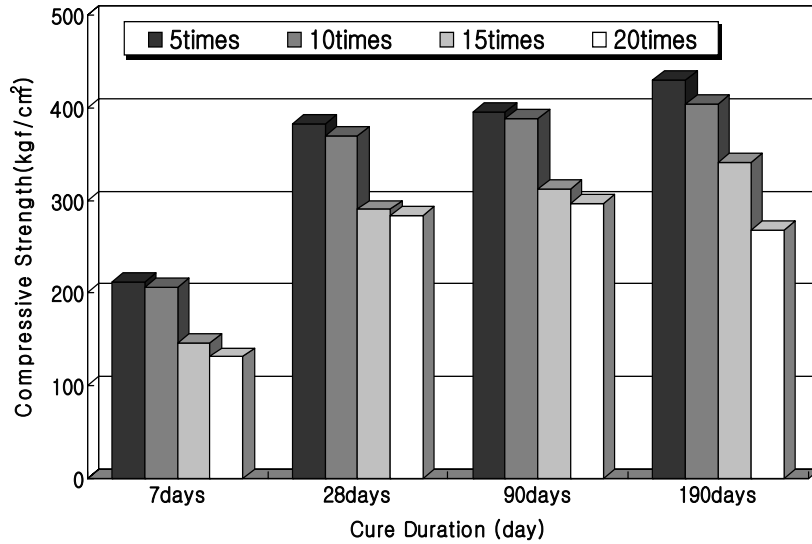


그림 3. O.P.C 공시체의 동결·융해에 따른 일축압축강도

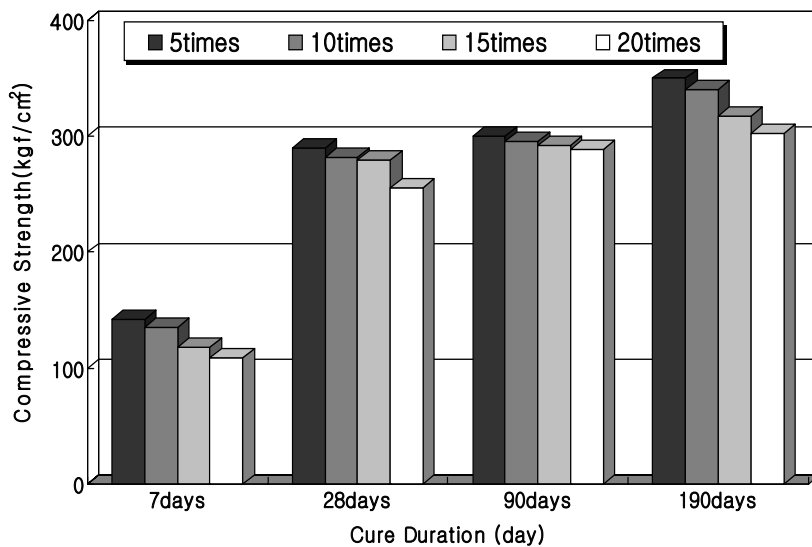


그림 4. Bottom Ash 첨가 공시체(2:8 배합비)의 동결·융해에 따른 일축압축강도

4. 현장시험시공

4.1 개요

실내시험결과들을 바탕으로 실제 현장에서 Bottom Ash의 그라우트재로서의 활용 여부를 평가하기

위하여 국내의 한 건설현장을 선정하여 현장시험시공을 실시하였다. 대상현장은 도로옹벽설치를 위한 도심지 가시설 토류벽 설계로서 실내시험을 통하여 산정된 Bottom Ash와 O.P.C의 최적 배합비인 2:8의 배합비로 배합한 Cement Paste를 이용하여 흙막이 벽체를 시공하였다. 또한, Bottom Ash가 혼합된 Cement Paste와의 강도 및 투수계수 비교를 위하여 보통 포틀랜드 시멘트만을 주입재료한 또 하나의 벽체를 시공하였다. 시공이 완료된 후 벽체에서 코어 공시체를 채취하여 강도시험과 투수시험을 수행하여 O.P.C만을 이용한 Cement Paste와 Bottom Ash가 함유된 Cement Paste의 강도증진 및 차수 효과에 대하여 비교분석 하였다.

표 5. 시험시공 현장 코어 공시체 채취 현황

Injected Materials	Ground Condition	
	Sand Ground	Clay Ground
O.P.C Cement Paste	3 Core Samples	2 Core Samples
Bottom Ash + O.P.C Cement Paste	3 Core Samples	3 Core Samples

4.2 일축압축강도 비교

채취한 코어 공시체에 대하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. Bottom Ash를 혼합한 Cement Paste로 흙막이 벽체를 시공했을 경우 O.P.C만을 Cement Paste 재료로 사용한 벽체에 비하여 60~75%정도 수준의 강도만을 발현했지만, 이와 같은 강도 역시 국내 설계기준 및 시방서 기준의 가시설 벽체에서 요구되는 강도를 초과하는 값으로 강도증진 측면에서는 Bottom Ash를 이용한 Cement Paste가 효과가 있었음을 검증할 수 있었다.

표 6. SCW 배합비 및 강도기준

Soil Type	Mixture			Compressive Stength (kgf/cm^2)
	O.P.C(kg)	Bentonite(kg)	Water(l)	
Clay	250~450	5~15	400~800	5~30
Sand	250~400	10~20	350~700	10~80
Sandy Gravel	250~350	10~30	350~ ~ 700	20~100

표 7. 현장시험시공 공시체에 대한 일축압축강도 시험결과

Sample	Clay Ground (kgf/cm^2)		Snad Ground (kgf/cm^2)	
	O.P.C	O.P.C+B.A	O.P.C	O.P.C+B.A
Sample 1	90.04	73.5	112.3	69.9
Sample 2	-	59.5	123.1	61.7

4.3 투수시험 비교

채취한 코어 공시체에 대하여 실내삼축투수시험을 수행하였다. 콘크리트 공시체에 대한 실내투수시험 방법은 국내규정이 없는 관계로 ASTM D 5084 : 2003을 따랐으며, 장비는 Flow Trac II를 이용하였다. 시험 결과, 사질토 지반에 시공한 경우, O.P.C만을 Cement Paste로 사용한 공시체는 $2.0 \times 10^{-7} cm/sec$ 의 평균투수계수를 보였으며 Bottom Ash와 O.P.C를 혼합한 Cement Paste를 사용한 공시체에서는 $3.6 \times 10^{-7} cm/sec$ 의 평균 투수계수를 보여 O.P.C 만을 사용한 공시체의 투수계수와 같은

수준의 투수성을 발현했다. 또한, 점토 지반에 시공한 경우, O.P.C만을 Cement Paste로 사용한 공시체는 $6.8 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 평균 투수계수를 보였으며 Bottom Ash와 O.P.C를 혼합한 Cement Paste를 사용한 공시체에서는 $8.9 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 평균 투수계수를 보여 역시 O.P.C 만을 사용한 공시체와 같은 수준의 투수성을 발현했다. 따라서 차수를 목적으로 한 지반주입재로서 Bottom Ash를 첨가하면 O.P.C와 같은 수준의 차수효과를 볼 수 있다는 것이 검증되었다.

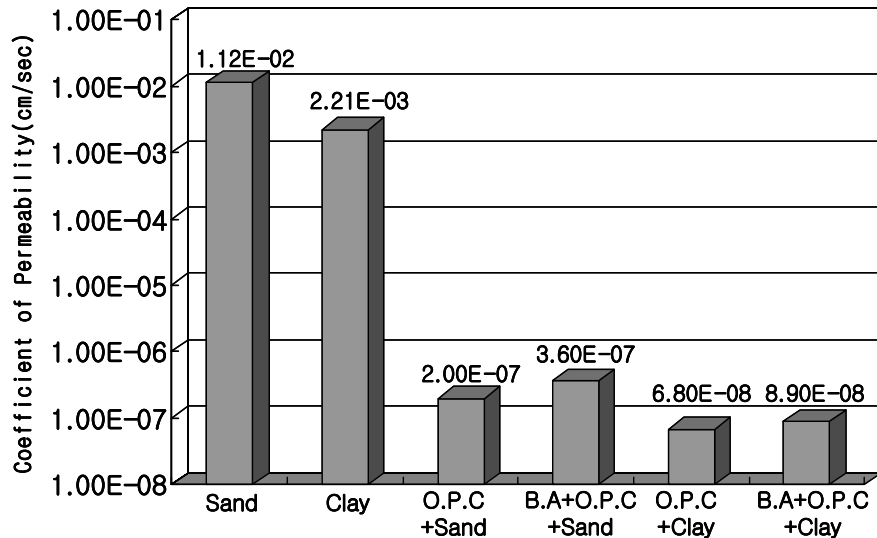


그림 5. 현장시험 공시체에 대한 실내투수시험 결과 비교

5. 결론

본 연구는 화력발전소에서 석탄 부산물로 생산되어 재활용되지 못하고 매립 처리되는 Bottom Ash를 그라우트재로 활용함으로써 폐자원인 Bottom Ash의 재활용률을 높이고, Bottom Ash의 성질을 파악하여 현장사용가능성에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과, Bottom Ash의 지반 주입재로서 이용 시 예상되는 토양환경오염 가능성에 대한 환경적 무해성을 검증하기 위하여 중금속용출 시험을 실시한 결과, 지정 폐기물 기준에 훨씬 못 미치는 것으로 나타났으며, 강도 및 차수성에 대한 검증 목적으로 수행한 실내시험 및 현장시험시공 결과를 종합적으로 고려할 때, Bottom Ash를 Cement를 대체할 그라우팅 및 Cement Paste 재료로 이용함이 경제적, 친환경적으로 매우 유리하게 분석되었다.

참고문헌

1. 김성수, 김동현, 김종필(2000), "Bottom Ash를 사용한 고유동충전재의 물리적 특성에 관한 실험적 연구", **첨단소재연구소 논문집 제3집**
2. 도영근, 권혁두, 이송(2006), "Bottom Ash를 이용한 그라우팅재의 환경적 연구", **한국지반공학회 논문집, 제22권 제11호, pp5-11**
3. 천병식, 고용일 외1인(1985), "석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", **한국지반공학회 논문집, 제11권 제2호**
4. 尾上篤篤生 外 4人(1983), "石炭灰の土木材料としての利用に關する研究", **第18回 土質工學研究發表會**
5. Donald H. Gray, and Yen-Kuang Lin(1972), "Engineering Properties of Compacted Fly Ash", **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, SM 4, April, pp. 361-380**