

## Bottom Ash를 이용한 그라우팅재의 환경적 연구

### A Study of the Bottom Ash as Environmentally Grouting Materials

도 영 곤<sup>1</sup> Doh, Young-Gon  
권 혁 두<sup>2</sup> Kwon, Hyuk-Doo  
이 송<sup>3</sup> Lee, Song

#### Abstract

The purpose of this study was to examine the proper mixing ratio of ordinary portland cement and Bottom Ash to recycle the Bottom Ash, which is an industrial waste. After the evaluation, the compressive strength and durability were assessed using the mixture of completely weathered soil (Hwangto), weathered granite soil, and Bentonite. Then environmental friendliness of this mixed material was examined through heavy metal leaching method. It was found out that proper mixing ratio is 6:4, and that the 6% mixture quantity of completely weathered soil (Hwangto), weathered granite soil, and Bentonite is the most effective for compressive strength and durability. It was also found out through heavy metal leaching method that the Bottom Ash could be below the standard of the Clean Water Law.

#### 요 지

본 연구는 산업폐기물인 Bottom Ash의 재활용을 위한 목적으로 보통포틀랜드 시멘트와 Bottom Ash의 적정 혼합비를 산정한 후 황토, 풍화토, Bentonite를 일정량 혼합하여 강도와 내구성에 대해 평가했고, 중금속 용출시험을 통해 환경적 영향을 검토했다. 그 결과 시멘트:Bottom Ash의 적정혼합비는 6:4이고, 황토, 풍화토, Bentonite는 6% 혼합하였을 경우 강도와 내구성에 가장 효과적 이었다. 또한 중금속 용출시험결과 지정 폐기물 기준에 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Bentonite, Bottom ash, Compressive strength, Durability, Industrial waste

#### 1. 서 론

국내산업이 발전함에 따라서 산업부산물인 Bottom Ash가 기하급수적으로 늘어가고 있으며, 대부분의 Bottom Ash는 매립되고 있어 환경보호와 자원재활용 차원에서 큰 문제로 대두되고 있다. 산업부산물중 화력발전소에서 미분탄을 연소시킴으로써 발생하는 석탄회는 Fly Ash와 Bottom Ash로 나누어지고 그 양이 매년 증가하

고 있어 2010년에는 600만톤 이상으로 급증할 것으로 예상 된다(김성수, 2000). 따라서 막대한 처리비용과 함께 매립장의 부족 등 여러 가지 문제를 야기 시키고 있어 Bottom Ash로 인한 환경적 문제를 해결하기 위한 일환으로 본 연구를 실시하였다.

본 연구에서는 석탄회중 대부분 폐기 처리되는 Bottom Ash를 10 $\mu$ m의 초미세분말로 분쇄하고 보통포틀랜드 시멘트(=Ordinary Portland Cement 이하 O.P.C), 황토,

1 정희원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (Member, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul)

2 정희원, 서울시 시설관리공단 기술본부장 (Member, Seoul Metropolitan Facilities Management Corporation)

3 정희원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사 (Member, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul, scugeo@uos.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

풍화토, Bentonite를 혼합하여 물성시험과 화학분석시험을 실시하였다. 기본적인 특성을 파악한 후 각 시료에 대해 배합 비율을 달리하여 다짐시험을 실시하여 공시체를 제작하고 일정기간 양생시켜 압축강도시험과 동결융해시험을 통하여 강도특성을 파악함으로써 지반공학적인 특성이 어떻게 향상되었는지 연구하였고, 그라우팅재 등으로 활용 시 강우나 지하수 등의 접촉에 의해 배출되는 침출수의 환경오염 가능성에 대한 무해성을 검증하기 위하여 중금속 용출시험을 실시하였다(김학삼, 1995). 또한 분말도에 따른 주입재의 침투 범위를 평가하였다.

## 2. 시험재료 및 방법

### 2.1 시험 재료

#### 2.1.1 토질 공학적 성질

본 시험에 사용된 재료는 O.P.C, 당진화력발전소의 Bottom Ash, 국내산 황토, 풍화토 Bentonite를 이용하였고, 시료들의 물리적 특성을 파악하기 위하여 함수량시험, 비중시험, 비중계시험, 입도 분석시험, 액성한계, 소성한계시험을 실시하였다.

#### 2.1.2 화학성분

본 시험은 화학적 특성을 분석하기 위해 시료들을 분쇄하여 #200체를 통과시킨 시료 중 정량분석용 시료토 0.5g을 채취하여 원자흡광분석기를 이용하여 화학성분을 분석하였다.

### 2.2. 시험방법

#### 2.2.1 다짐시험

KS F 2312 규정에 적합한 수정 D 다짐 방법에 따라 Bottom Ash:O.P.C (4:6, 3:7, 2:8)혼합비에 황토, 풍화토, Bentonite를 3%, 6%, 9%, 12%의 중량비로 혼합한 상태의 시료로 다짐곡선, 최대건조밀도, 최적함수비를 결정하여 최적의 배합비를 산정하였다.

#### 2.2.2 압축강도시험

압축강도 평가를 위한 목적으로 KS F 2405에 따라 직경 5cm 높이 10cm인 공시체를 제작하고, 일축압축강도시험을 이용하여 강도를 평가 하였다. 공시체 제작 과정

은 3층 25회 다지고 상대습도 95%이상, 온도21℃로 습윤 양생하였다. 공시체 제작 후 1, 3, 7, 28, 55, 90, 190일간 양생하여 강도를 평가하였다. 또한 그라우팅재로 사용 시를 고려하여 W/(C+Bottom Ash)를 40%, 50%, 60%까지 변화시켜 가며 실험을 실시하였고, 급결제를 3%, 4%, 5%로 변화시켜가며 압축강도를 시험을 실시하였다.

### 2.2.3 동결 융해 시험

동결융해의 반복 작용이 강도저하에 큰 요인으로 작용하기 때문에 동결융해에 대한 저항성 시험을 실시하였다. 또한 보다 현장성에 부합되는 동결조건을 갖추기 위해 KS F 2456에 적합한 대형 Lysimeter 실험을 실시하였다. 따라서 7일 28일 90일 190일 양생시킨 공시체를 24시간 기준으로 동결 시 -24℃, 융해 시 2℃를 5, 10, 20회 반복한 뒤 압축강도시험을 실시하였다.

### 2.2.4 중금속 용출 시험

Bottom Ash를 그라우팅재나 뒷채움재로 사용 시 침출수에 의한 환경오염 가능성에 대한 문제를 검증하기 위하여 중금속 용출실험을 위한 분석 장비로 유도결합플라즈마 발광분석기를 사용하였다.

### 2.2.5 Bottom Ash 분말도에 따른 주입성 평가

본 연구에서 주입재와 표준 시료토를 대상으로 분말도에 따른 침투주입의 한계를 평가해 보기위해 품질 특성을 조사했다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 토질공학적 성질

물성시험 결과는 표 1과 같다. Bottom Ash와 황토 풍화토를 분쇄하여 #200체 통과량을 알아본 결과 75%이상이고 액성한계와 소성지수는 모두 N.P였다. Bottom Ash는 SW로 분류되고 비중은 보통 흙보다 작게 나타났다. 하지만 Bentonite는 물과 반응하면 원래 체적보다 8~15배가 팽창하는 Montmorillonite 계통의 점토여서 일반적인 토사에 비해 높은 액성한계와 소성지수를 보이고, CH로 분류된다(홍상희, 1999). 이상과 같은 시험 결과에서 알 수 있는 Bottom Ash의 가장 큰 특징은 그 자체의 경량성이라 할 수 있으며 이와 같은 성질은 그라

표 1. 입도분석결과

시료	Wn	G <sub>s</sub>	LL	PI	#200 통과량	USCS
BottomAsh(일반)	10.5	2.32	N.P	N.P	2.1	SW
황토	16.9	2.63	N.P	N.P	82.1	SM
풍화토	15.7	2.62	N.P	N.P	75.4	SM
Bentonite	5.7	2.30	295	221	89.2	CH

우팅재나 뒷채움재 등으로 이용될 경우 상재하중을 저하시키는 역할을 할 수 있다.

### 3.2 화학성분 측정결과

O.P.C와 Bottom Ash, 황토, 풍화토, Bentonite의 화학성분 측정결과 표 2와 같은 측정결과가 나타났다. Bottom Ash의 주성분은 SiO<sub>2</sub> 56%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 24%, CaO 1%, MgO 1.3% 등으로 구성되어있다. 일반적으로 광물이 비결정질인 경우 물과 반응해서 응결 경화하는 성질을 잠재수경이라 하고, 이러한 반응을 포졸란 반응이라 한다. 즉, 포졸란 반응이란 실리카성분이 수산화칼슘과 반응하여 불용성 화합물을 생성하여 경화하는 성질을 말한다. Bottom Ash와 황토, 풍화토, Bentonite는 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 전체 성분의 70%이상 차지하며 포졸란 반응에 의한 자경성 때문에 강도가 장기적으로 증가한다. 이러한 잠재수경성 반응의 메커니즘을 그림 2에서 나타내었다(천병식, 1985).

### 3.3 다짐 시험

Bottom Ash와 O.P.C를 2:8, 3:7, 4:6 비로 혼합하여 실험한 결과 4:6의 비에서 최대건조밀도가 1.59g/cm<sup>3</sup>로 가장 높게 나타나 적정혼합비인 4:6의 배합비를 알아냈다. 한편, 4:6의 배합비에 황토, 풍화토, Bentonite를 3%, 6%, 9%, 12%로 혼합하여 다짐시험을 실시한 결과 6% 혼합했을 때의 황토, 풍화토, Bentonite의 최대건조밀도가 1.77g/cm<sup>3</sup>, 1.71g/cm<sup>3</sup>, 1.72g/cm<sup>3</sup>로 가장 높게 나타났다.

표 2. 화학성분 측정결과

종류 성분(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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
황토	50.29	24.08	3.05	1.28	3.81	0.04
풍화토	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

다. 따라서 Bottom Ash : O.P.C를 4:6의 비와 황토, 풍화토, Bentonite를 6%로 혼합 하였을 경우 최적의 배합비를 나타낸다. 하지만 Bentonite의 경우 혼합량이 증가함에 따라 최대건조단위중량이 감소하는데 이는 황토와 풍화토에 비해 비중이 상대적으로 작기 때문이다. 또한 혼합량이 커짐에 따라 최적함수비가 증가하는 것은 Bentonite의 비표면적이 증가되어 물과 친화력이 커지고 흡수성이 증가되기 때문인 것으로 생각된다. 그림 2는 Bottom Ash와 O.P.C를 혼합하였을 2:8, 3:7, 4:6 혼합하였을 경우 다짐곡선과 Bottom Ash와 O.P.C (4:6) 비율에 황토, 풍화토, Bentonite 3%, 6%, 9%, 12% 혼합시 다짐곡선의 결과이다.

### 3.4 압축강도 시험

그림 3에서 양생일이 증가 할수록 압축강도는 증가하는 것을 볼 수 있고, 일반 O.P.C 공시체와 Bottom Ash를 40% 혼합한 공시체와의 압축강도를 비교한 결과 초기 강도는 차이가 있으나 양생일이 증가할수록 Bottom Ash를 혼합한 공시체의 강도가 증가하는 것을 볼 수 있

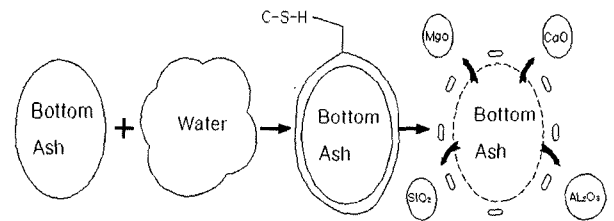
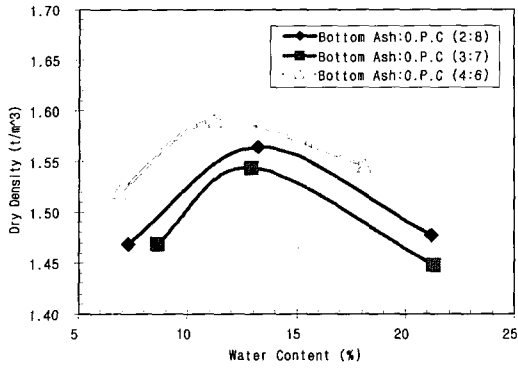
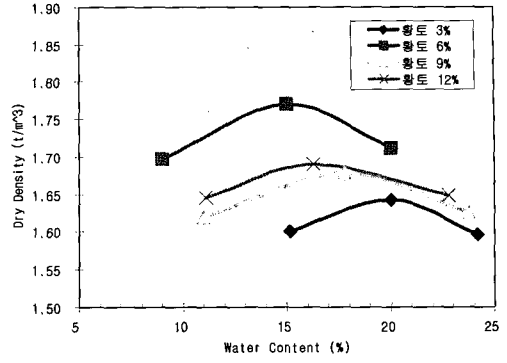


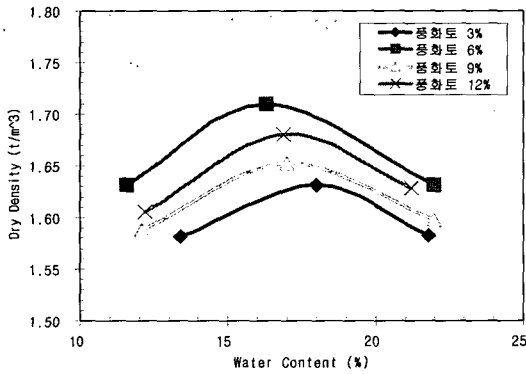
그림 1. Bottom Ash의 포졸란 반응의 메커니즘



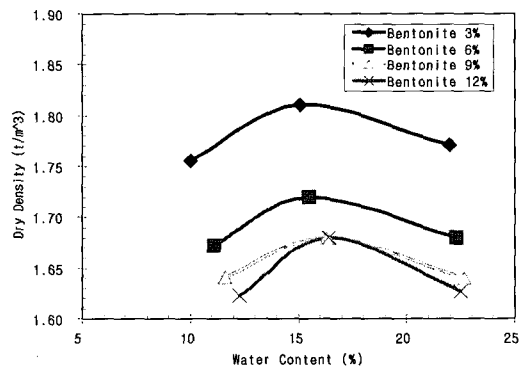
(a) Bottom Ash와 O.P.C.의 다짐곡선



(b) 황토 혼합 시 다짐곡선

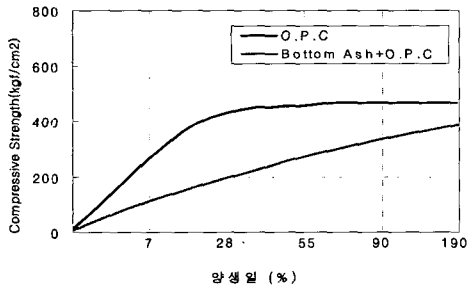


(c) 풍화토 혼합 시 다짐곡선

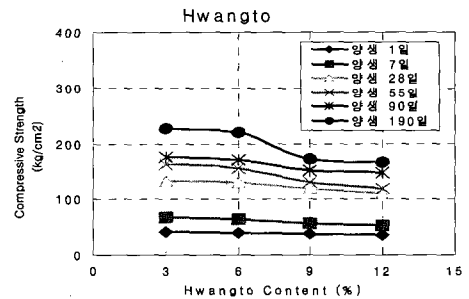


(d) Bentonite 혼합 시 다짐곡선

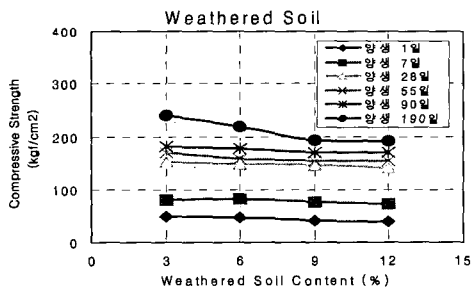
그림 2. Bottom Ash와 O.P.C. 각각의 비율로 혼합하였을 경우 다짐곡선과 Bottom Ash와 O.P.C. (4:6) 비율에 황토, 풍화토, Bentonite 3, 6, 9, 12% 혼합 시 다짐곡선



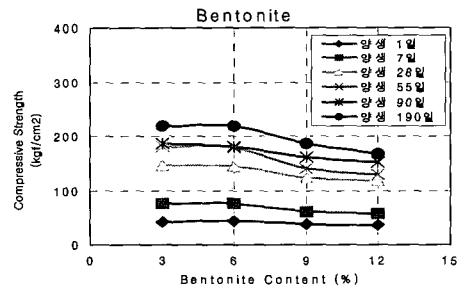
(a) Bottom Ash를 혼합한 공시체 압축강도



(b) 황토의 압축강도



(c) 풍화토의 압축강도



(d) Bentonite 압축강도

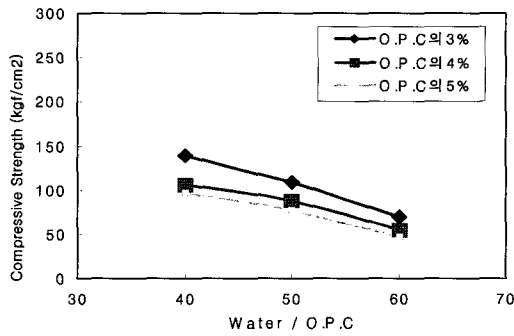
그림 3. Bottom Ash 40% 혼합한 공시체 압축강도와 Bottom Ash:O.P.C. (4:6)에 황토, 풍화토, Bentonite 3, 6, 9, 12% 혼합 시 압축강도

다. 또한 풍화토의 압축강도가 가장 크게 평가되었으며, 황토, 풍화토, Bentonite의 함유량이 증가 할수록 압축강도는 저하 되었고, 동일한 양생일에서 3%, 6%때의 초기 강도는 비슷하게 나타나지만 양생 28일후, 황토, 풍화토, Bentonite 혼합율 6% 이상일 때는 강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 경제적 환경적 측면을 고려 할 경우 6% 혼합이 가장 이상적이라 판단된다. 또한 그림 4에서 그라우팅재로서의 사용을 고려하여 W/O.P.C를 40%, 50%, 60%로 변화시켜 실험을 실시하였고 W/O.P.C와 급결제

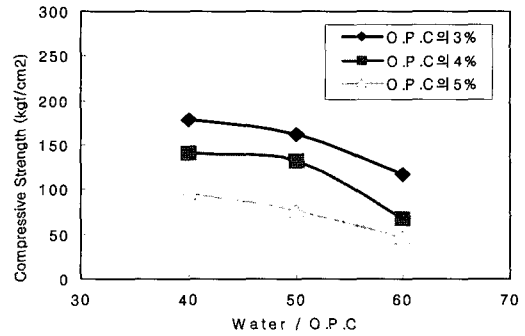
의 비가 커짐에 따라 강도가 감소하는 경향을 보인다.

### 3.5 동결융해 시험 후 압축강도

그림 5는 O.P.C공시체와 Bottom Ash 40%를 혼합한 공시체를 7, 28, 90, 190일 양생시킨 후 동결융해 5, 10, 15, 20회 반복 후 압축강도 변화이다. 일반적으로 동결융해 횟수가 증가할수록 압축강도는 감소하였으나, O.P.C 공시체와 Bottom Ash를 혼합한 공시체와의 압축강도



(a) W/O.P.C 양생 7일 후 압축강도



(b) W/O.P.C 양생 28일 후 압축강도

그림 4. W/O.P.C 40%, 50%, 60% 에 급결제 3%, 4%, 5% 혼합한 공시체 압축강도

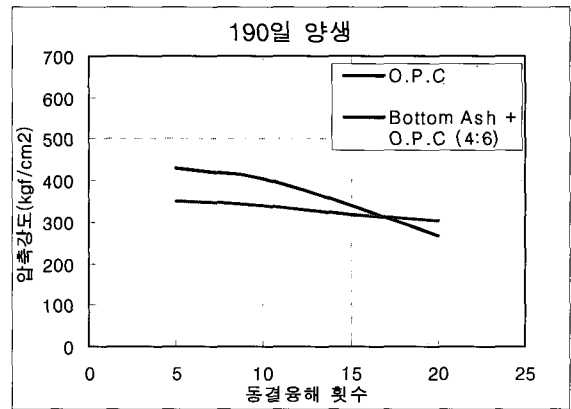
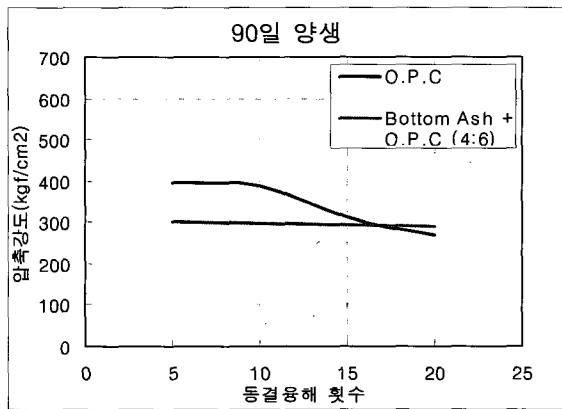
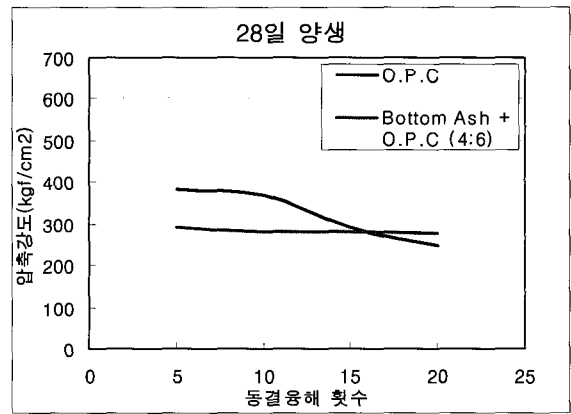
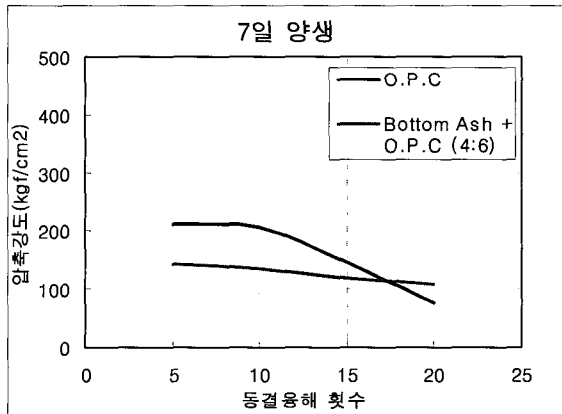


그림 5. 일반 O.P.C 공시체와 Bottom Ash 40% 혼합한 공시체의 7, 28, 90, 190일 양생 후 동결융해 5, 10, 15, 20회에 대한 압축강도 변화

표 3. 시료의 중금속 함유량

중금속 항목	CN	Cu	Cd	Pb	As	Hg	pH
기준(mg/l)	1	3	0.3	3	1.5	0.005	5.8~8.6
Bottom Ash	ND	ND	ND	0.045	ND	ND	10.1
황토	ND	ND	ND	ND	ND	ND	9.11
풍화토	ND	ND	ND	ND	ND	ND	9.37
Bentonite	ND	ND	0.1	0.1	ND	ND	7.52
BA+O.P.C	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10.3
B A+O.P.C+황토	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10.1
B A+O.P.C+풍화토	ND	ND	ND	0.07	ND	ND	10.4
B A+O.P.C+Bentonite	ND	ND	ND	0.08	ND	ND	19.3

감소정도는 상이하게 나타났다. 일반 O.P.C공시체는 동결융해 반복횟수가 10회 이상부터 압축강도가 급격히 감소하였다. 이에 반해, Bottom Ash를 혼합한 공시체는 동결융해 반복횟수가 증가함에 따라 압축강도가 거의 감소하지 않는 경향을 보였고, 동결융해 반복횟수가 20회 이상부터는 일반 O.P.C 공시체 보다 Bottom Ash를 혼합한 공시체가 더 높은 강도를 나타낸다. 따라서 Bottom Ash 40%를 혼합한 공시체가 결빙손상에 대한 저항성이 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3.6 중금속 용출 시험

O.P.C와 Bottom Ash, 황토, 풍화토, Bentonite를 혼합하여 그라우팅재와 뒷채움재 등으로의 활용 시 강우나 지하수 등의 접촉에 의해 배출되는 침출수의 환경오염 가능성에 대한 환경적 무해성을 검증하기 위하여 중금속 함유량을 정하는 중금속 기준항목인 CN, Cu, Cd, Pb, As, Hg에 대해서 용출 시험을 실시하였다. 표 3은 Bottom Ash, 황토, 풍화토, Bentonite의 각 중금속 함유량과 O.P.C에 Bottom Ash를 40% 혼합 후 황토, 풍화토, Bentonite를 6%씩 혼합한 결과 지정 폐기물 기준에 적합한 것으로 판정되고, “수질환경보전법”에 의한 오염물질 배출 허용 기준치에 못 미치는 것으로 나타났다.

### 3.7 Bottom Ash 분말도에 따른 주입성 평가

그라우팅 주입성은 재료 중에 함유된 입자의 크기에 크게 좌우한다. 따라서 J. C. King(1961)은 침투의 조건을 토립자의 크기와 주입재 입자의 크기로부터 구하는 식 (1)을 제시하여 다음 식을 만족시키지 못하면 현탁액의 침투 주입은 불가능하다.

표 4. 주입성 평가용 토질의 공극율 및 입경

시료토 종류	공극율(%) KS F 2506	입경크기(mm) KS F 2503	
		D <sub>10</sub>	D <sub>15</sub>
		사질층	40.5
굵은모래	39.7	0.21	0.27
중간모래	43.0	0.18	0.23
실트층	56.2	0.03	0.09

표 5. 주입재 토립자 입경

시료 직경	O.P.C	Bottom Ash+황토(분말)	Bottom Ash(분말)
G <sub>85</sub> (mm)	0.008	0.016	0.0071
G <sub>95</sub> (mm)	0.0098	0.022	0.0089

$$\frac{D_{15}}{G_{85}} \geq 15 \quad \frac{D_{10}}{G_{95}} \geq 8 \quad (1)$$

여기서, D<sub>10</sub>, D<sub>15</sub> : 지반의 토립자 중 입도분포곡선 10%, 15% 입경,  
G<sub>85</sub>, G<sub>95</sub> : 주입재의 입경 중 입도분포곡선 85%, 95% 입경

본 연구에서 주입재 대상 토질은 사질지반 3종류, 실트지반 1종류로 대전지역 금강에서 채취한 시료이다. 이들에 대한 공극율 및 입도 분석을 실시한 결과 표 4와 같고, 주입재의 직경은 표 5와 같다. J. C. King의 경험식으로부터 주입비를 평가한 결과는 표 6와 같다. 표 6으로부터 그라우팅재는 사질층에서 음영부분과 같이 침투주입이 가능한 것으로 평가되었다(King, 1961).

## 4. 결론

본 연구는 Bottom Ash의 물리적 화학적 역학적 특성을 규명하고 이를 통하여 Bottom Ash의 활용을 목적으

표 6. 주입대상 토질별 주입비  $N_1$ ,  $N_2$

주입대상 시료토질		$N_1=D_{15}/G_{85} \geq 15$ , $N_2=D_{10}/G_{95} \geq 8$					
		O.P.C		Bottom Ash+황토(분말)		Bottom Ash(분말)	
		$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
사질층	굵은모래	47.5	30.6	23.7	13.6	47.5	33.7
	중간모래	33.7	21.4	16.8	9.54	33.7	23.5
	가는모래	28.7	15.3	14.3	6.81	28.7	16.8
실트층		11.2	3.06	5.62	1.36	11.2	3.37

로 수행되었으며 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 다공성인 Bottom Ash의 특징은 그 자체의 경량성이라 할 수 있다. 따라서 흙이나 콘크리트에 비하여 비중 및 단위중량이 작고, 이러한 성질은 그라우팅재나, 뒷채움재 등으로 이용될 경우 상재하중을 저하시키는 역할을 한다.
- (2) Bottom Ash를 미분으로 분쇄하여 황토, 풍화토, Bentonite를 혼합하였을 경우  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , CaO비가 높아져서 포졸란 반응에 의해 강도가 증가한다. 중금속 용출시험결과 지정 폐기물 기준에 못 미치는 것으로 나타났고, Bottom Ash를 혼합한 공시체의 pH가 10.4로 감소된 것을 알 수 있다.
- (3) 다짐시험을 실시한 결과 Bottom Ash와 O.P.C의 적정 혼합비는 4:6으로 평가 되었고, 황토, 풍화토, Bentonite를 6% 혼합 하였을 경우 최대건조밀도가 가장 높게 나타나 강도를 고려하였을 경우 Bottom Ash를 단독으로 이용하는 것보다 황토, 풍화토, Bentonite를 혼합하여 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.
- (4) 압축강도 시험 결과 양생일이 증가함에 따라 강도가 증가하였고, Bottom Ash를 혼합하였을 경우 일반 O.P.C 공시체에 비해 초기강도는 약하지만 양생일이 지속 될수록 강도가 증가함을 알 수 있다. 또한 황토, 풍화토, Bentonite 함유량이 높아짐에 따라 강도는 저

하 되지만, 6% 혼합하였을 경우 강도에 큰 영향이 없어 경제적으로도 유리하다. 또한 급결제를 혼합한 뒤 W/O.P.C를 달리하여 실험한 결과 W/O.P.C와 급결제비가 작을수록 강도에 큰 영향을 미치지 않지만 W/O.P.C가 50%이상 그리고 급결제 비가 6%이상 이면 강도저하가 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

- (5) 일반 O.P.C 공시체는 동결융해 반복횟수가 10회 이상 부터 강도감소 현상이 현저히 나타나지만 Bottom Ash를 혼합한 공시체는 강도감소 현상이 거의 나타나지 않는다.
- (6) Bottom Ash의 주입성 평가를 해본 결과 표 6의 음영 부분까지 주입이 가능함을 판단할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 김성수, 김동현, 김종필, *첨단소재연구소 논문집 제8집* (2000), "Bottom Ash를 사용한 고유동충전제의 물리적 특성에 관한 실험적 연구".
2. 원종필, 이용수 (2000), "Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전제의 내구특성에 관한 연구", *콘크리트 학회논문집*, 제12권 1호.
3. 김학삼, 홍성환, 조삼덕, 김종학 (1995), "성토재로서 석탄회 사용에 따른 수질 오염도 평가", *한국 지반공학회지*, 제 11권 제3호.
4. 천병식, 고용일 외 1인 (1985), "석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", *한국지반공학회*, 제11권, 제2호.
5. 홍상희 외 4인 (1999), "팽창제를 이용한 콘크리트의 양생환경에 따른 팽창특성", *한국콘크리트학회*.
6. King, J. C. (1961), "Grouting of granular materials" of *Mechanics and Foundation Engineering Div*, Vol.87.

(접수일자 2005. 11. 3, 심사완료일 2006. 11. 17)