

## 준설토를 이용한 단섬유 보강 Bottom Ash 혼합 경량토의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on Mechanical Properties of Monofilament-reinforced Bottom Ash Mixture for Recycling Dredged Soil

김 윤 태<sup>1</sup> Kim, Yun-Tae

한 우 종<sup>2</sup> Han, Woo-Jong

#### Abstract

This paper investigates the mechanical characteristics of monofilament-reinforced bottom ash mixtures for recycling dredged soil. Reinforced bottom ash mixture is a lightweight soil added with monofilament in order to increase its shear strength. Test specimens were fabricated by various mixing conditions including monofilament content, its length and its diameter. Then several series of unconfined compression tests and direct shear tests were performed to investigate mechanical characteristics of reinforced lightweight soil. The experimental results indicated that stress-strain behaviors of reinforced lightweight soil were strongly influenced by mixing conditions of monofilament content, its length and diameter. The compressive strength of reinforced lightweight soil generally increased by adding monofilament. In this test, the maximum increase in compressive strength was obtained at 0.5% content and 4cm length of monofilament. These results were similar to those of direct shear tests. The unconfined compressive strength of reinforced lightweight soil with monofilament of 0.25mm in diameter was greater than that of reinforced lightweight soil with monofilament of 0.5mm in diameter.

#### 요 지

본 연구에서는 준설토 재활용을 위한 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 역학적 특성을 고찰하였다. Bottom ash 혼합경량토는 경량토로서 자체 전단강도증가를 위하여 단섬유를 혼합하였다. 공시체는 단섬유의 함유량, 길이, 직경을 각각 변화시켜 다양한 배합비로 제작하였으며 역학적 거동 특성을 조사하기 위하여 일축압축시험과 직접전단 시험이 수행되어졌다. 실험결과 응력-변형 관계는 단섬유의 함유량, 길이, 직경과 같은 배합조건에 크게 의존하는 것으로 나타났고, 단섬유 혼합에 의해 압축강도 및 전단강도가 일반적으로 증가되었음을 알 수 있었다. 단섬유 함유율 0.5%와 길이 4cm에서 최대압축강도가 나타났으며 이러한 결과는 직접전단시험에서도 비슷하게 나타났다. 직경에 따른 압축강도는 단섬유 직경 0.5mm보다 0.25mm에서 더 큰 보강효과가 나타났다.

**Keywords :** Bottom ash, Direct shear test, Dredged soil, Monofilament, Recycling, Unconfined compression test

1 정회원, 부경대학교 해양공학과 조교수 (Member, Assistant professor, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ., yuntkim@pknu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 부경대학교 해양공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

항만 건설 및 항만 리모델링 등의 대규모 산업시설이 확충 및 재정비됨에 따라 매년 대량의 준설토가 발생하고 있고 앞으로도 지속적인 항로유지 준설과 오염해역 준설로 인하여 준설량이 꾸준히 증가할 것으로 전망되고 있다. 현재 준설토 처리는 일반적으로 단순 외해투기 및 육상매립에 의존하고 있는 실정이며, 이로 인해 주변 환경의 오염, 매립을 하기 위한 투기장 건설비용 증대, 부지확보 어려움 등과 같은 문제점들이 발생할 수 있다. 따라서 꾸준히 발생하는 준설토를 효율적으로 이용하고 재활용할 수 있는 기술이 필요하다.

선진국에서는 준설토를 단순 매립하기 보다는 해양 환경복원 및 인공 서식지 조성, 친환경적인 친수공간 개발 등에 적극적으로 재활용하고 있다. 준설토 재활용에 관한 기존 연구를 살펴보면 Tsuchida 등(1996)은 성토재료로서 사용되는 경량혼합토(lightweight treated soil)에 대한 연구와 수중에서 타설된 경량혼합토의 거동을 연구하였고, Otani 등(2002)은 X-ray CT scanner를 통하여 SGM(Super Geo-Material)에 대한 특성을 연구한 바 있다. 한편 국내에서는 2000년도 초반부터 건설재료로서 준설토가 재활용될 수 있도록 경량혼합토에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내에서 수행된 경량혼합토에 대한 연구를 살펴보면 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구(김주철 등, 2002), 준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강경량토의 압축거동 특성 비교에 관한 연구(김윤태 등, 2005), 지오그리드 혼합 보강경량토의 압축거동특성 연구(김윤태 등, 2006a), 폐어망을 이용한 보강 경량토의 압축거동 특성 연구(김윤태 등, 2006b) 등이 수행된 바 있다.

지금까지 준설토 재활용을 위하여 고화재, 기포제 등을 이용한 경량혼합토에 대한 국내 연구결과가 많이 발표되었지만 사용된 재료나 시험결과가 일본의 선행연구와 유사한 경향을 나타내고 있기 때문에 보다 다양한 방법을 통한 연구가 수행될 필요가 있다.

한편, 전력사용량이 크게 증가하면서 화력발전소에서 부산물로 발생하는 석탄회량도 급증하여 한국전력에 따르면 2010년경에는 발생량이 약 600만톤에 이를 것으로 예상되고 있다. Bottom ash는 석탄회 발생량의 15~20%를 차지함으로써 Fly ash보다 상대적으로 적게 발생된다. 그러나 시멘트 원료 및 콘크리트 혼화제로 많은 양이 재활용되는 Fly ash와 달리 수십년 동안 Ash

pond에 매장되어오고 있는 실정이라서 전체 Bottom ash 양은 전국적으로 수백만 톤에 이른다. 또한 앞으로 에너지 수요 증가와 화석연료의 사용으로 석탄회 발생량은 계속 늘어날 전망이다. 따라서 준설토와 마찬가지로 Bottom ash도 재활용할 수 있는 기술이 시급히 마련되어야 한다.

Bottom ash의 재활용에 관한 국외 연구 동향을 살펴보면 Bottom ash를 아스팔트 포장 충전재로 활용(Churchill 등, 1999)하거나, 콘크리트 잔골재로 활용(Ghafoori 등, 1996), 또는 건설공사 시 성토재료 이용(Kim 등, 2005) 등과 같이 Bottom ash를 단순 건설재료로 재활용하기 위한 연구들이 수행되었다. 국내에서는 Bottom ash를 잔골재로 이용한 고성능 시멘트 모르타에 대한 물성 연구(김동환 등, 2000)와 같이 Bottom ash를 콘크리트 대체 골재로 활용한 연구 및 특허가 주를 이루었다. 최근 Bottom ash를 이용한 그라우팅재 연구(도영곤 등, 2006) 등이 수행된 바 있으나 아직 실용화 단계에 이르지 못한 것으로 판단된다. 그러므로 화력발전소의 부산물로서 막대한 국가적 처리비용이 예상되는 Bottom ash를 재활용하는 연구는 폐자재의 자원화 및 환경보호 차원에서 매우 유용한 연구로 사료된다.

그리고 지반 보강과 안정성 도모를 위하여 지반보강재로 사용되는 섬유재는 지반구조물의 역학적 안정성을 증가시키기 위하여 오래전부터 사용되고 있다. 이용형태는 크게 두 가지로 나뉘는데 첫째는 섬유를 직조하여 제품화한 토목섬유라고 명명되는 평면적인 형태이며, 둘째는 섬유 자체를 흙과 랜덤하게 혼합하는 선형적인 형태이다. 이 중 섬유를 직접 혼합하는 방법은 흙과 혼합이 용이하고, 강도의 등방성과 지속성이 우수하다. 또한 섬유재의 단위중량은  $9.4\text{kN/m}^3 \sim 9.6\text{kN/m}^3$  정도 범위로서 경량화된 재료이기 때문에 경량성을 유지할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 준설토와 Bottom ash를 적극적으로 재활용할 뿐만 아니라 혼합토의 역학적 특성을 개선하기 위하여 단섬유를 직접 혼합한 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토를 제작하였다. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토는 단섬유의 길이별, 함량별 혼합율에 따라서 제작되어졌고, 압축강도 특성, 응력-변형특성 및 전단강도 정수 등을 일축압축강도시험, 직접전단시험 등과 같은 실내실험을 통해 분석하였다.

## 2. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토

경량토는 기포, 시멘트 및 함수비를 조절함으로써 사

용목적에 따라 단위중량과 압축강도를 조절할 수 있기 때문에 성토부의 침하와 인접지반의 변형을 억제할 뿐만 아니라 주변 구조물에 거의 영향을 주지 않으며, 교대의 뒷면이나 칼버트·박스 설치부의 침하를 줄여서 구조물과 성토부의 부등침하를 경감·방지한다. 하중이 작용하더라도 수평방향으로 거의 토압이 작용하지 않으므로 측방 유동을 경감시켜 구조물의 변위를 방지할 수 있다. 또한 경량토는 유동성이 있으므로 펌프 압송에 따른 시공이 가능하고, 저품질인 흙도 이용할 수 있어 준설토의 재활용과 같은 장점이 있다(태평양 Soil, 2004).

그림 1은 흙과 섬유와의 계면에서의 역학적인 거동을 나타낸 개념도이다. 흙과 섬유와의 계면에서 흙과 섬유의 부착력, 마찰력과 interlocking force이 작용하여 섬유의 sliding을 막고 섬유가 인장응력을 받아서 지반의 전단강도를 증가시키는 보강효과를 발휘하게 된다. 이러한 개념을 바탕으로 본 연구에서는 기존의 무보강 Bottom ash 혼합경량토에 단섬유를 혼합한 보강 경량토를 제작

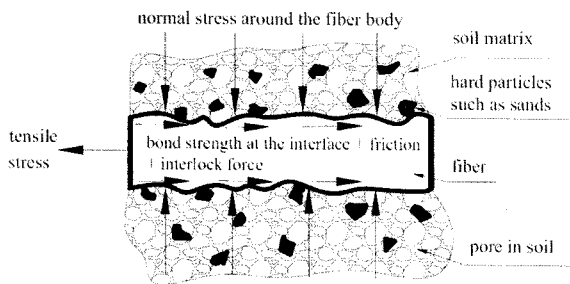


그림 1. 흙과 섬유사이의 계면에서 나타나는 역학적 거동(Tang 등, 2007)

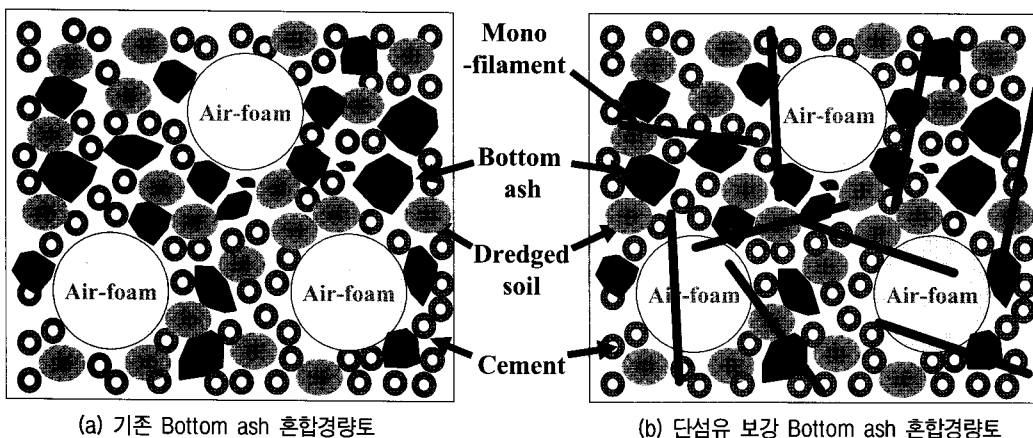


그림 2. 기존 Bottom ash 혼합경량토와 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 개념도

표 1. 준설토의 물성시험 결과

초기 함수비 (%)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	No.200체 통과율(%)	USCS
54.7	39.2	18.5	2.60	81.2	CL

하여 보강효과를 보고자 하였다.

그림 2는 무보강 Bottom ash 혼합경량토와 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 개념도를 나타낸 것이다. 무보강 Bottom ash 혼합경량토는 그림 2(a)와 같이 준설토, Bottom ash, 기포, 물, 시멘트로 구성되어진다. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토는 그림 2(b)와 같이 무보강 Bottom ash 혼합경량토의 강도 증대 및 역학적 특성 개선을 할 뿐만 아니라 인장 및 전단에 대한 취약점을 개선시키기 위하여 단섬유를 랜덤하게 혼합한 형태이다. 첨가된 단섬유로 인하여 충격 및 균열에 대한 저항성 증대, 파괴 또는 균열의 조절·제어 등과 같은 장기 안정성에도 효과적이라 판단되며 준설토와 Bottom ash를 보다 적극적으로 이용 가능하게 될 것으로 기대된다.

### 3. 실내시험 방법

#### 3.1 공시체 제작

본 연구에서 사용된 준설토 시료는 부산신항 배후부지에서 채취된 시료로서 준설토의 기본적인 물리적 특성은 실내 물성시험을 통하여 파악되었다. 그 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 액성한계는 39.2%, 준설토의 현상함수비 54.7%, 비중은 2.60, 소성지수는 18.5%로서 준설토를 통일분류법(USCS)으로 분류하면 CL로 나타났다.

재료의 경량성 확보를 위해 사용된 기포제는 공기압,

온도, 유기물 함량, 발포 후 경과시간에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Watabe 등, 2004). 기포제는 형상에 관계없이 시멘트가 응결하고 경화될 때까지 기포를 안정하게 유지되어야 한다. 본 연구에서 사용된 기포제는 합성계면활성제계 기포제로서 고급 Alcohol 유황 에스테르계 화합물이다. 기포 생성을 위하여 기포제와 물을 1:20의 비율로 혼합한 후 공기압을 가해 사전에 발포시키는 방식을 사용하였다.

고화재로 사용된 시멘트는 물과 반응하여 수화물이 되기 때문에 강도발현을 한다. 일반적으로 점성토 등에는 강도발현이 좋은 보통 포틀랜드 시멘트 또는 고로 시멘트 B종을 사용하며, 유기질토 등에는 시멘트계 고화재를 사용한다. 본 실험에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하였다.

Bottom ash는 화력발전소에서 발생된 석탄회 중 바닥에 남은 재로서 입도분포는 일반적으로 자갈에서 모래까지 분포하며 실트와 점토크기의 입자는 매우 드물다. Bottom ash의 특성은 연소되는 석탄의 종류와 연소조건 등에 의존되며 같은 발전소에서 발생한 Bottom ash라도 발생한 시간이 다르면 성분이 다른 특징이 있다(Kumar 등, 2003). 본 연구에서 사용한 Bottom ash는 삼천포 화력발전소에서 발생한 것으로서 공시체 제작을 위해 #4번 체에 통과시켜 자갈크기의 입자를 배제시켰다. 본 연구에서는 XRF(X-ray Fluorescence)분석을 통하여 Bottom

ash의 화학성분을 조사하였다. 표 2는 XRF 분석결과로부터 구한 Bottom ash의 화학적인 구성성분을 나타낸 것이다.

본 실험에서 보강재로 사용된 섬유재는 합성섬유 제품인 S사의 모노필라멘트이다. 모노필라멘트의 재질은 High Density Polyethylene이 주원료로서 인장강도가 크고 비중이 1보다 작아 경량성을 가지고 있다. 직경이 0.25mm 및 0.5mm 단섬유의 주요 특성은 표 3과 같다.

본 논문에서 공시체 제작방법은 다음과 같다.

- ① 각 배합조건에 따라 준설토, 시멘트, Bottom ash 및 물의 순서로 첨가한 후 균질하게 혼합한다.
- ② 단섬유를 배합 및 시험조건에 맞게 혼합하고, 단섬유의 엉킴을 방지하고 균질하게 혼합될 수 있도록 세심한 주의를 기울인다.
- ③ 균질하게 혼합된 조정토에 미리 발포된 기포를 중량비에 맞게 첨가하여 혼합한다. 이때 혼합 과정 시 기포의 소포를 최소화하기 위하여 발포기기로 발포시킨 기포를 평균 5분 이내에 배합한다.
- ④ trimming 실시후, 항온상태(20±2℃)에서 습윤양생의 과정을 거쳐 공시체 샘플이 완성된다.

단섬유 혼합에 따른 압축거동 특성과 보강효과를 파

표 2. Bottom ash의 화학성분

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
49.8	18.2	10.4	13.9	3.52	0.69	0.55	1.17	0.96

표 3. 단섬유의 특성

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	항복응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	표면경도	열변형점 (℃)	연화점 (℃)	직경(mm)
0.96~0.98	39.2	50	75	125	0.25, 0.5

표 4. 배합 및 시험조건

시험조건	일축압축시험 / 직접전단시험
시멘트 함유량, Ci(%)	20
준설토 초기 함수비, Wi(%)	120
기포 함유량, Ai(%)	2
Bottom ash 함유량, BAi(%)	100
단섬유 함유량, MFi(%)	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0
단섬유 길이 (cm)	2, 3, 4, 5
단섬유 직경 (mm)	0.25, 0.5
양생일(day)	28
양생방법	습윤양생

악하기 위하여 표 4와 같이 배합 및 시험조건을 달리 적용하였으며, 이때 재료별 함량은 건조된 준설토의 중량비로서 결정되었다. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 기준 배합비는 앞서 수행된 예비실험 결과를 바탕으로 단위중량 및 유동특성을 고려하여 결정된 배합 조건으로 시멘트 함량 20%, 초기 함수비 120%, 기포 함량 2%, Bottom ash 100%로 정하였다. 경량성 확보를 위하여 사용되는 기포제는 시간이 지남에 따라 소포가 되기 때문에 공시체 제작과정에서 기포의 혼합은 5분 이내로 실시하였으며 시멘트 경화에 대한 영향을 고려하여 전체 공시체 제작 시간은 10분 이내로 조절하였다. 공시체 제작시 발생하는 실험오차를 줄이기 위하여 같은 배합비의 공시체를 3수준으로 제작하여 실험을 수행하였다.

### 3.2 일축압축시험

다양한 배합조건에 따라 제작된 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 거동특성을 파악하기 위하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 일축압축시험의 공시체 크기는 직경 72mm, 높이 148mm로 제작하였으며 일축압축강도 시험은 변형률 제어가 가능한 D사의 일축압축시험기를 사용하였다. 이때 축변형률은 1.0%/min으로 제어하였다.

### 3.3 직접전단시험

무보강 및 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 전단강도 정수를 비교·분석하기 위하여 단섬유의 함유량 및 길이별 공시체를 제작한 후 직접전단시험을 수행하였다. 수직응력은 70kPa, 140kPa, 210kPa, 280kPa로 가한 후 디지털 전단시험기를 이용하여 전단시험을 진행하였다. 공시체의 크기는 가로 100mm, 세로 100mm, 높이 60mm의 직육면체 형태로 제작하였으며 전단변형률은 1%/min로 제어하였다.

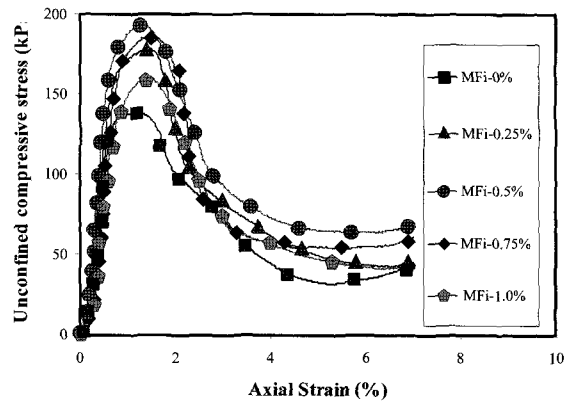
## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 응력-변형 거동 특성

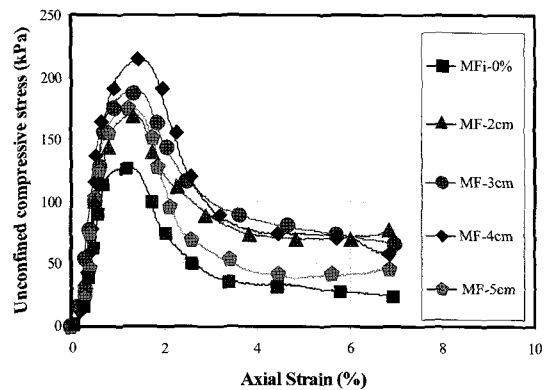
본 연구에서는 무보강 Bottom ash 혼합경량토와 단섬유를 보강한 혼합 경량토의 응력-변형 거동 특성을 비교

·분석하였다.

그림 3은 초기함수비 120%의 준설토에 시멘트 20%, 기포 2%, Bottom ash 100%로 혼합된 무보강 Bottom ash 혼합 경량토와 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 양생 28일에서의 응력-변형 곡선을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 단섬유의 함유량에 따른 응력-변형거동특성을 나타낸 것으로 단섬유의 길이는 3cm이고, 건조 준설토 무게에 대한 단섬유의 함유량은 각각 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%이다. 단섬유 함유량 0.5%까지 최대일축강도와 응력-변형곡선의 기울기가 증가하였다가 단섬유 함유량이 증가할수록 다시금 감소하는 경향을 나타내었다. 무보강 Bottom ash 혼합경량토에 비하여 단섬유 함유량 0.5% 혼합시 최대일축강도와 잔류 응력이 증가하는 것으로 나타나 단섬유 혼합이 역학적 특성개선에 효과가 있는 것으로 사료된다. 그림 3(b)는 단섬유의 함유량은 0.5%로 고정하고 단섬유의 길이를 2cm, 3cm, 4cm, 5cm로 변화시켜 혼합한 보강 혼합경량토의 양생 28일에서의 응력-변형 곡선을 나타낸 것이다. 응력-변형 곡선 결과는 단섬유의 길이가 4cm까지 최대일축강도와 응



(a) 단섬유 함유량에 따른 응력-변형거동



(b) 단섬유 길이에 따른 응력-변형거동

그림 3. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합 경량토의 응력-변형 거동

력-변형곡선의 기울기가 증가하였다가 이후 단섬유 길이가 증가할수록 다시금 감소하는 경향을 나타내었다.

Tang 등(2007)은 단섬유로 보강된 고화처리점토의 역학적 특성 연구에서 단섬유가 공시체 파괴시 발생하는 인장균열의 진행을 지연시키는 현상을 bridge effect로 명명하였다. 그림 4는 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 일축압축시험시 발생된 bridge effect를 나타낸 것으로 공시체의 인장균열 발생 부분에서 단섬유가 저항하면서 인장균열의 진행을 지연시키는 역할을 하고 있다.

#### 4.2 압축강도 특성

양생 28일이 경과한 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도는 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 단섬유의 함유량에 따른 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 최대압축강도와 잔류압축강도는 단섬유 함유량이 0.5%일 때 가장 크게 나타나고 이후 단섬유 함유량이 증가할수록 감소하는 경

향이 나타났다. 즉 적정 함유량인 0.5%까지는 단섬유 혼합에 의하여 Bottom ash 혼합토와 단섬유가 맞물림(interlocking)효과와 bridge effect에 의해 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도가 증가된 것으로 판단된다. 그러나 0.5%를 초과하는 경우에는 혼합되는 섬유재의 양이 과다해지면서 섬유재 자체의 영김에 의해서 맞물림 효과가 감소하게 되고, 섬유재와 섬유재 사이의 마찰력이 전체거동을 지배하여 상대적으로 마찰력과 저항력이 감소하게 된다. 이는 Nataraj 등(1996)의 연구에서 섬유혼합비를 0.2%, 0.3%, 0.5%의 비율로 혼합하여 실험한 결과 0.3%일 때 가장 큰 보강효과가 나타난 결과와 유사하다.

그림 5(b)는 단섬유의 길이에 따른 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 최대 압축강도와 잔류압축강도는 단섬유의 길이가 4cm일 때 가장 크게 나타나고 이후 단섬유 길이가 증가할수록 감소한다. 본 연구에서 수행한 배합비에서는 단섬유의 적정길이는 4cm임을 알 수 있다. Prabaker 등(2002)은 섬유재가 랜덤하게 혼합된 흙의 강도에서 섬유재의 길이

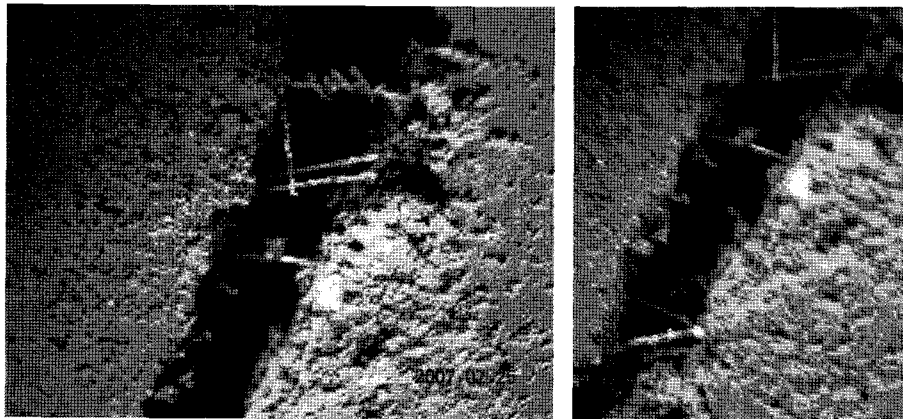
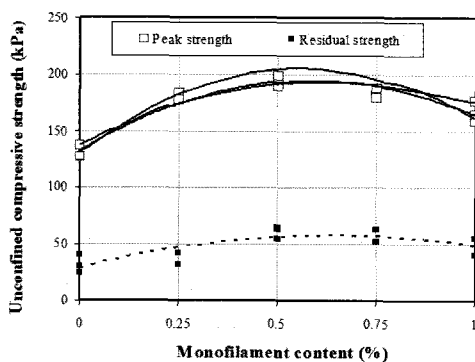
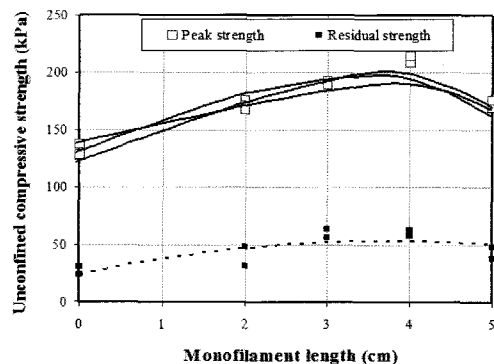


그림 4. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 Bridge effect



(a) 단섬유의 함유량에 따른 압축강도 변화



(b) 단섬유의 길이에 따른 압축강도 변화

그림 5. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도 변화

가 어느 적정 값을 넘어서게 되면 흙과 섬유재의 맞물림이 감소하게 됨을 밝혔다. 또한 조삼덕 등(1995)의 연구에 의하면 일정 길이 이상에서 강도 증가효과가 미미한 이유는 섬유의 길이가 증가할수록 섬유의 엉킴현상이 두드러지기 때문이다. 특히 혼합시 입경이 큰 입자들은 서로 엉켜있는 섬유사이에서 이탈하는 경향이 나타나 엉켜진 섬유 덩어리 형태가 존재한다. 본 연구에서도 단 섬유 길이가 5cm인 공시체에서 섬유의 엉킴현상이 나타났고 상대적으로 입경이 큰 Bottom ash가 엉켜진 단 섬유 사이에서 이탈하였다.

그림 6은 단섬유의 직경에 따른 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 보강 효과를 알아보기 위해 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도를 무보강 공시체의 압축강도로 정규화 하였다. 섬유 직경이 0.25mm인 경우가 0.5mm인 경우보다 보강효과가 컸으며, 섬유 직경이 0.5mm인 경우 보강효과는 거의 나타나지 않았다. 이는 섬유직경이 클수록 섬유의 유연성이 작아져서 보강경량토 사이에서

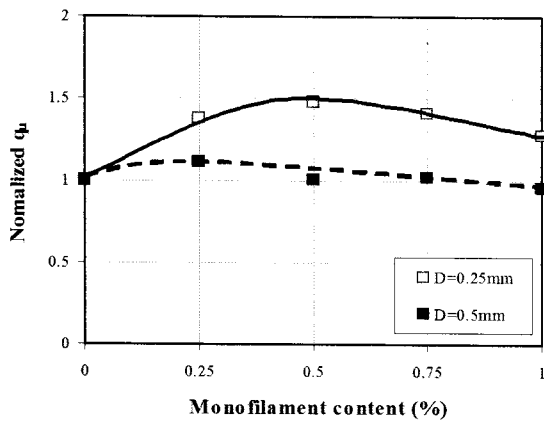


그림 6. 단섬유의 직경에 따른 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도 변화

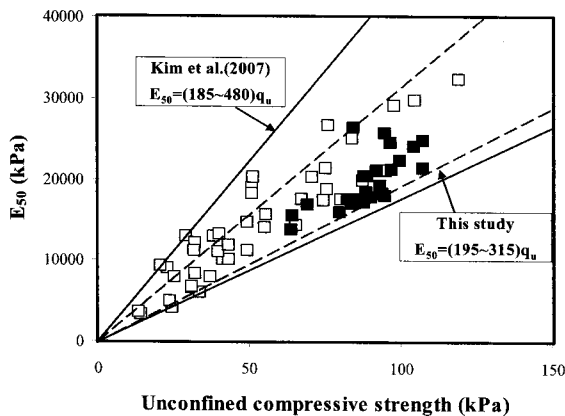


그림 7. 일축압축강도와 활선 탄성계수( $E_{50}$ )와의 관계

섬유의 맞물림 효과가 감소하기 때문으로 판단된다. 조삼덕 등(1995)의 연구에서도 직경이 0.46mm인 섬유재를 혼합한 경우가 직경 0.21mm인 섬유재를 혼합한 경우보다 전단강도가 작게 보고되었다.

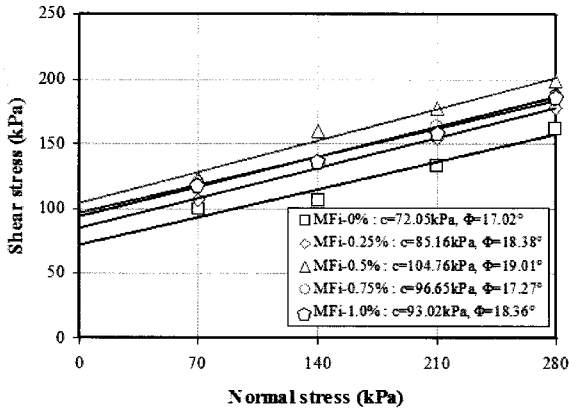
### 4.3 일축압축강도와 활선 탄성계수( $E_{50}$ )의 관계

단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 일축압축강도와 활선 탄성계수( $E_{50}$ )의 관계를 고찰하면 그림 7과 같다. 양생기간 28일에서 활선 탄성계수는 압축강도의 약 195~315배 정도의 범위를 가지는 것으로 나타났으며 각기 다른 단섬유 함량을 가짐에 따라 탄성계수 값은 다소 분산되게 나타났다. 이러한 결과는 기존의 연구결과의 범위인  $E_{50}=(185\sim480)q_u$ 에 포함됨을 알 수 있으며 향후 추가실험을 통하여 Bottom ash 혼합 경량토의 일반적인 일축압축강도와 활선 탄성계수( $E_{50}$ )의 관계를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

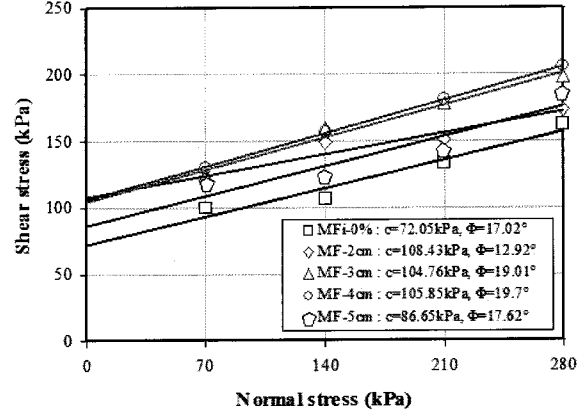
### 4.4 전단강도 특성

그림 8은 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 수직 응력에 대한 전단강도를 나타낸다. 모든 경우에서 수직 응력이 증가함에 따라 전단강도도 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 8(a)는 단섬유 함량에 따른 전단강도 특성을 나타내는 그림으로 내부 마찰각( $\phi$ )은 17~19° 내외의 값을 가지며 단섬유 함량 0.5%에서 가장 큰 점착력( $c$ )을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 단섬유 함량 0.5%에서 가장 큰 보강효과를 나타내는 일축압축시험의 결과와 유사하며, 섬유를 혼합할 시 적정 섬유혼합비가 존재한다는 것을 시사한다. 그림 8(b)는 단섬유 길이에 따른 전단강도를 나타내고 있다. 내부마찰각( $\phi$ )은 17~19° 내외의 값을 가지는 것으로 나타났으며 단섬유 길이 4cm에서 가장 큰 점착력( $c$ )가 나타났다. 이러한 결과는 일축압축시험결과와 유사하였으며 섬유길이에도 적절한 길이가 존재함을 알 수 있었다.

단섬유 함량과 길이에 대한 전단강도의 변화는 그림 9와 같다. 수직응력이 70~280kPa까지 증가함에 따라 전단강도가 모두 증가함을 볼 수 있다. 또한 단섬유 보강 공시체가 무보강 공시체 보다 상대적으로 큰 전단강도를 가진다. 그림 9(a)에 나타난 것과 같이 단섬유 함량별 전단강도는 0.5%에서 최대 전단강도를 가짐으로써 적정한 섬유비가 존재함을 확인하였다. 그림 9(b)는

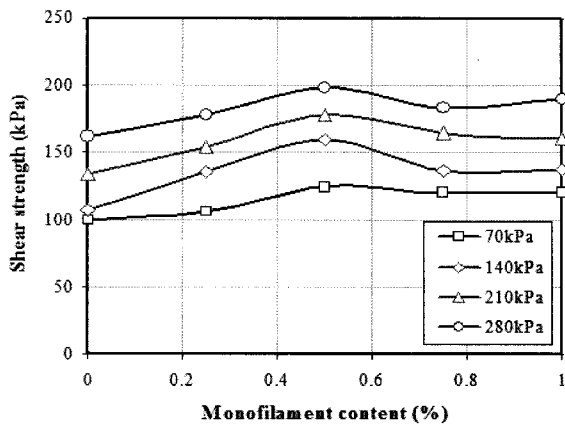


(a) 단섬유 함유량별 전단강도

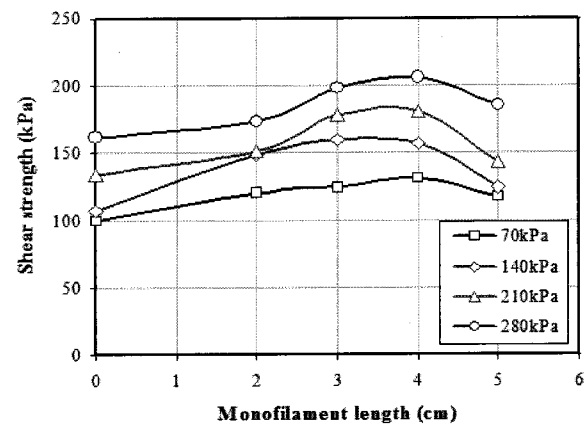


(b) 단섬유 길이별 전단강도

그림 8. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합 경량토의 수직응력에 대한 전단강도 특성

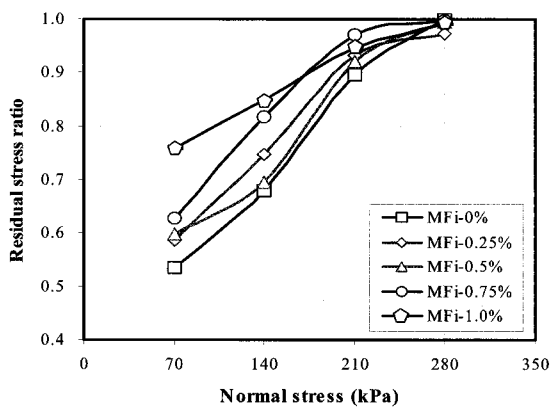


(a) 단섬유 함유량별 전단강도

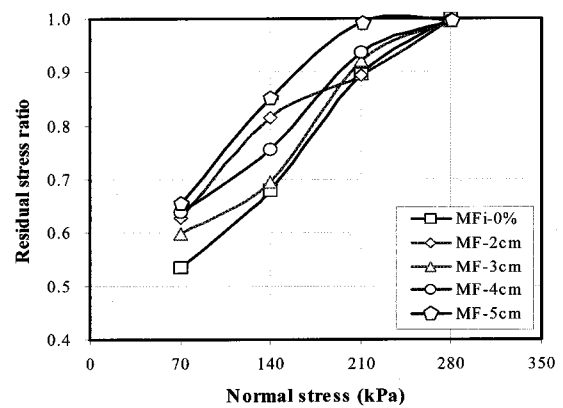


(b) 단섬유 길이별 전단강도

그림 9. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합 경량토의 전단강도 특성



(a) 단섬유 함유량별 잔류응력비



(b) 단섬유 길이별 잔류응력비

그림 10. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합 경량토의 수직응력에 따른 잔류응력비

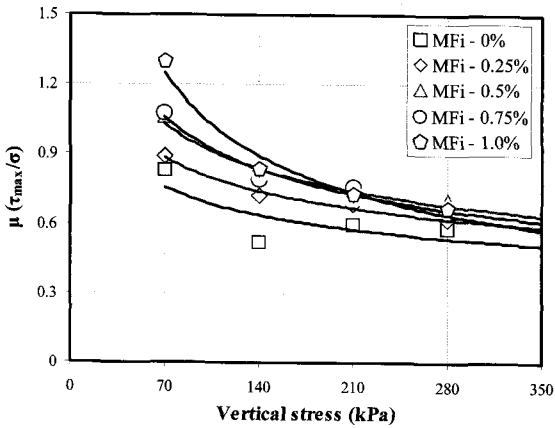
단섬유 길이별 전단강도는 4cm에서 최대 전단강도가 나타났으며 함유량과 마찬가지로 적정 섬유길이 존재함을 알 수 있었다.

전단응력-전단변형을 관계에서 최대점인 파괴점(peak point) 이후 계속되는 변형에 어느 정도 저항하다가 일

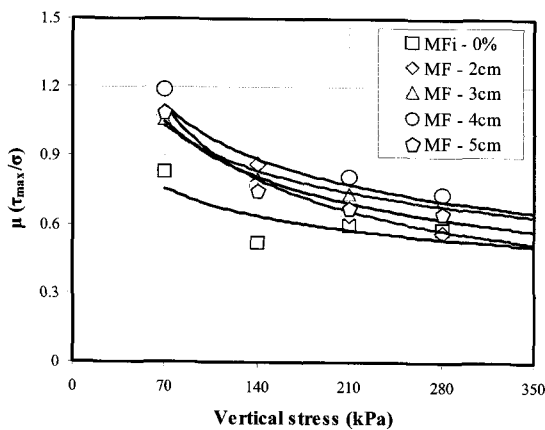
정한 수준으로 수렴하는 응력을 잔류응력이라고 한다. 잔류응력 특성은 전단응력-전단변형을 관계로부터 잔류응력비(residual stress ratio :  $\tau_{residual}/\tau_{max}$ )를 이용하여 표현하였다. 그림 10은 수직응력과 단섬유 함유량 및 길이에 대한 잔류응력비를 나타낸 것이다. 전체적으로 수



직응력이 증가할수록 잔류응력비는 증가하는 경향이 나타났다. 또한 잔류응력비는 단섬유의 함유량과 길이가 증가할수록 일반적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 파괴 후 거동은 잔류응력비가 증가함으로써 역학적 특성 개선에 효과가 있음을 보여준다.



(a) 단섬유 함유량별 마찰계수



(b) 단섬유 길이별 마찰계수

그림 11. 단섬유 보강 Bottom ash 혼합 경량토의 수직응력에 따른 마찰계수

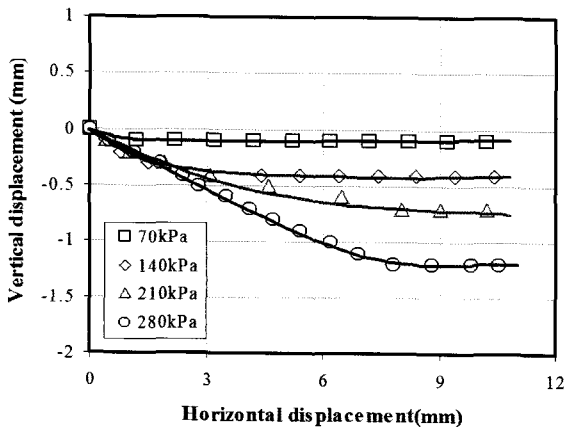


그림 12. 수평변위와 수직변위의 관계

Wood(1998)는 그의 저서에서 마찰계수는 응력비( $\tau/\sigma$ )와 다일러턴시( $dH/dD$ )의 향으로 표현할 수 있으며, 일정한 수직응력에서 더 이상 체적 변화가 없는 상태인 한계상태( $dH/dD=0$ )의 응력비( $\tau/\sigma$ )는 마찰계수( $\mu$ )와 같은 값을 갖는다고 제시하고 있다. 여기서  $dH$ 는 연직변위,  $dD$ 는 수평변위이다. 이를 근거로 그림 11과 같이 수직응력에 따른 마찰계수의 관계를 나타내었다. 전단시험으로부터 얻은 마찰계수는 수직응력이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 그림 10(a)와 (b) 두가지 경우에서 모두 무보강 공시체보다 단섬유 보강 공시체의 마찰계수가 좀 더 크게 나타남으로써 단섬유 혼합이 마찰계수를 증가시키는 것으로 사료된다.

그림 12는 단섬유 함유량 0.5%의 공시체에서 수직응력에 대한 수평변위와 수직변위의 관계를 나타낸 것이다. 실험 결과 수직응력이 증가할수록 연직변위는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 수평변위가 증가할수록 연직변위는 증가하였으며 이는 느슨한 모래의 직접전단 시험 결과와 유사하다. 이러한 결과는 재료의 경량성 확보를 위하여 첨가시킨 기포로 인하여 형성된 간극이 수직응력에 의해 압축되면서 나타난 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 준설토와 Bottom ash를 동시에 재활용하기 위하여 복합 지반재료인 Bottom ash 혼합경량토를 제작하였으며 일축압축강도시험 및 직접전단시험을 실시하여 응력-변형 거동, 압축강도 및 전단강도특성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 응력-변형 거동 특성은 단섬유의 함유량과 길이에 크게 의존한다. 단섬유는 Tang 등(2007)이 제시한 bridge effect와 맞물림 효과로 인해 강도 및 잔류응력의 증가에 효과가 있다고 사료된다.
- (2) 단섬유 함량에 따른 압축강도 특성은 단섬유 함량 0.5%와 길이 4cm에서 최대 보강효과가 나타나고 이후 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 적정 함유량 0.5%와 길이 4cm까지는 맞물림 효과와 bridge effect에 의해 압축강도가 증가하나, 이를 초과하는 경우에는 시료에 혼합되는 섬유 양과 길이가 과다해지면서 섬유재 자체의 엉킴에 의해서 맞물림 효과가 감소하고, 섬유재와 섬유재 사이의

마찰력이 전체적인 거동을 지배하면서 상대적으로 마찰력과 저항력이 감소되기 때문에 판단된다.

- (3) 단섬유의 섬유 직경이 0.5mm인 경우가 0.25mm 인 경우 보다 보강효과가 작게 나타났다. 이는 섬유직경이 클수록 동일 섬유 혼합비에서 배합되는 섬유의 유연성이 작아져서 보강경량토 사이에서 섬유와 흙과의 맞물림 효과가 감소하기 때문에 판단된다.
- (4) 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 할선 탄성계수는 압축강도의 약 195~315배 정도의 범위를 가지는 것으로 나타났으며 각기 다른 단섬유 함량에 따라서 탄성계수 값이 다르기 때문에 다소 분산되어 나타났다. 이러한 결과는 기존의 연구결과의 범위인  $E_{50}=(185\sim480)q_u$ 에 포함됨을 알 수 있었다.
- (5) 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 내부 마찰각 ( $\phi$ )은 17~19° 내외의 값을 가지며 단섬유 함유량 0.5%과 단섬유 길이 4cm에서 가장 큰 점착력을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 일축압축시험 결과와 유사하였으며 섬유의 함량과 길이에 적절한 값이 존재함을 알 수 있었다.
- (6) 단섬유 보강 Bottom ash 혼합경량토의 잔류응력비는 전체적으로 수직응력이 증가할수록, 단섬유의 함유량과 길이가 증가할수록 일반적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 마찰계수 역시 단섬유 보강 공시체에서 좀 더 크게 나타나서 단섬유 혼합이 역학적 특성 개선에 효과가 있음을 보여준다.

## 감사의 글

본 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며(KRF-2006-311-D00877), 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 김동환, 임종욱, 임남용 (2000), "화력발전소 Ash Pond에 매장되어 있는 Bottom Ash를 잔골재로 이용한 고성능 시멘트 모르타의 물성연구", *한국폐기물학회 춘계학술연구회 발표논문집*, vol.2000, No.0, pp.69-74.
2. 김윤태, 권용규, 김홍주 (2006a), "시오그리드 혼합 보강경량토의

- 압축강도 특성 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 제7호, pp. 37-44.
3. 김윤태, 김홍주 (2006b), "폐어망을 이용한 보강경량토의 압축거동 특성", *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 제11호, pp.25-34.
4. 김윤태, 권용규, 김홍주 (2005), "준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강경량토의 압축거동특성 비교", *한국해양공학회지*, 제19권, 제6호, pp.44-49.
5. 김주철, 이종규 (2002), "준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성연구", *한국지반공학회 논문집*, 제18권 제4호, pp.309-317.
6. 도영권, 권혁두, 이송 (2006), "Bottom Ash를 이용한 그라우팅재의 환경적 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제22권 제11호, pp.5-11.
7. 조삼덕, 김진만 (1995), "섬유혼합 보강토의 공학적 특성에 관한 실험연구", *한국지반공학회 논문집*, 제11권 제2호, pp.23-28.
8. 태평양 Soil(주) (2004), "발생토를 이용한 경량(기포) 혼합토 공법", 동서화학공업(주).
9. Churchill, E. V., Amirkhanian, S. N. (1999), "Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete Mixtures", *Journal of Energy Engineering*, Vol.11, No.4, pp.295-301.
10. Ghafouri, N. and Bucholc J. (1996), "Investigation of Lignite-Based Bottom Ash for Structural Concrete", *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol.8, No.3, pp.128-137.
11. Kim, B. J., Prezzi, M., Salgado, R. (2005), "Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.7, pp.914-924.
12. Kumar, S. and Stewart, J. (2003), "Evaluation of Illinois Pulverized Coal Combustion Dry Bottom Ash for Use in Geotechnical Engineering Applications", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 129, No.2, pp.42-55.
13. Nataraj, M. S., Addula, H. R. and Mcmanis, K. L. (1996), "Strength and Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soils", *Environmental Technology, Proceedings of 3rd International Symposium*, pp.826-831.
14. Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y. (2002), "Visualization for Engineering Property of In-situ Lightweight Soils with Air Foams", *Soil and Foundations*, Vol.4, No.3, pp.93-105.
15. Prabakar, J.R. and Sridhar, S. (2002) Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, Vol.16, pp.123-131.
16. Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai Y. (2007), "Strength and Mechanical Behavior of Short Polypropylene Fiber Reinforced and Cement Stabilized Clayey Soil", *Geotextiles and Geomembranes* 25, pp.194-202
17. Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T. and Kishida, T. (1996), "Development of Lightweight Fill from Dredgings", *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, pp.415-420.
18. Watabe, Y., Itou, Y., Kang, M. S. and Tsuchida, T. (2004), "One-Dimensional Compression of Air-Foam Treated Lightweight Geo-Material in Microscopic Point of View", *Soils and Foundations*, Vol.44, No.6, pp.53-67.
19. Wood, M. (1998), "Soil behaviour and critical state soil mechanics", pp.229-234.

(접수일자 2007. 10. 25, 심사완료일 2008. 1. 28)