

## 플라이 애시-생석회-하수처리 슬러지 혼합물의 지반공학적 특성 연구

### Research for geotechnical properties of Fly ash-Lime-Sludge mixture

구 정 민\* · 권 무 남\*\* · 이 상 호\*\*\*

Goo, Jung Min · Kwon, Moo Nam · Lee, Sang Ho

#### Abstract

Although fly ash possesses viable engineering properties, an overwhelming majority of fly ash from coal combustion is still placed in storage or disposal sites. Similarly, sludges generated from various water treatment operations are predominantly subjected to the fate of land disposal. To prepare sludges for land disposal typically requires time consuming dewatering schemes, which can become extremely difficult to execute depending upon the composition of the sludge and its affinity for water. This study was undertaken to reuse fly ash and sludge as construction materials. This paper includes geotechnical properties of fly ash and fly ash-lime-sludge mixture and results of compaction test, UU-test, falling head test, leaching test and CBR test. The effect on mixing fly ash with sludge and lime and the effect of curing period and the results are obtained from this test.

*Keywords : Fly ash, Sludge, Lime, Geotechnical property*

#### I. 서 론

플라이 애시는 석탄을 연료로 쓰는 화력발전소에  
서 연소시 석탄 중의 회분이 1500°C 정도의 고온

에서 연소되어 전기 집진장치에 의해 모아진 직경  
2~50  $\mu\text{m}$ 의 미세 입자이다. 국내에서 발생하는 플  
라이 애시는 주로 역청탄 또는 점착질 석탄의 연소  
후 부산물로서, 대부분 F-type이다. F-type의 플  
라이 애시는 유기물 성분의 침출을 감소시키고 수  
분과 반응시 포졸란 특성을 보이며 이에 장기적인  
강도증가를 기대할 수 있다. 우리 나라에서는 그  
발생량이 연간 약 500만톤 이상으로 알려져 있  
으며, 우수한 공학적 특성을 가짐에도 불구하고, 그  
중 약 20%만이 건설재료의 첨가제 등으로 이용되

\* 경북대학교 농토목공학과 대학원

\*\* 경북대학교 농토목공학과

\*\*\* 경북대학교 농토목공학과

\* Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5730

fax: +82-53-950-6752

E-mail address: raxmann@daum.net

고 나머지는 폐기물 매립장에 그대로 투기되고 있어 대기 및 지반의 이차적인 환경오염을 야기시키고 있는 실정이다.

하수처리장에서 발생하는 폐기물인 하수처리 슬러지는 폐수나 고체/액체상태인 슬러지로서 주로 하수처리 공정에서 발생되고, 이런 하수처리 슬러지의 처리는 모든 하수처리장에서 일상적인 문제로 되고 있다. 하수처리 과정에서 발생하는 슬러지는 대부분이 인근 하천에 직접 방류시키거나 지반매립 및 해양투기 시켜왔으나, 하수처리시설의 대형화와 하천유량의 감소로 하천은 이런 방류를 더 이상 감당하기 어렵게 되었다. 또 환경에 대한 규제가 강화되면서 지표수에 슬러지를 직접 배출하거나 지반에 매립하는 것은 이미 금지되고 있는 실정이다. 국내에서는 대부분 탈수슬러지 케이크 상태로 만들어 폐기물 매립장 또는 쓰레기 매립장에 매립하고 있으나, 이것도 환경적 잠재 위험요소로서 문제가 제기되고 있으며, 이러한 처리에 대하여 경제적 손실 또는 관리문제에도 많은 노력과 인력을 소비하고 있는 실정이다. '98년말 현재 하수처리시설의 슬러지 처리량은 총 1,413천톤으로서 이중 매립처분된 양이 793천톤으로 전체의 56.1%를 차지하고 있으며, 해양투기 552천톤(39.1%), 농업이용 34천톤(2.4%), 그 외 소각 등의 방법으로 처리하고 있다(환경부 홈페이지, 2000).<sup>16)</sup>

하수처리 슬러지 처리시설의 건설비와 처리비용은 하수처리장의 시설운영비를 증가시키는 요인이 되고 있으나 슬러지 관리분야에서 대부분의 하수처리장은 극히 소극적인 계획을 세우고 있을 뿐이고, 아직도 처리시설의 설치와 운영기술의 확보단계에 머물고 있다. 또한 '97년 7월에 개정된 폐기물관리법에 의하면 2001년 1월 1일 이후에는 배출업소의 유기성 오니를 직접 매립할 수 없도록 규정하고 있으므로, 하수처리 슬러지를 매립지에 바로 매립하기 어려워질 경우를 고려하여 실용가능한 재활용 방안에 대한 연구가 시급한 것으로 판단된다.

본 연구는 낮은 함수비 상태의 플라이 애시에 높

은 함수비 상태의 하수처리 슬러지를 혼합하고, 여기에 강도증가 및 살균 등의 목적으로 생석회를 투입한 플라이 애시-하수처리 슬러지-생석회 혼합물의 지반공학적인 특성과 환경유해성을 검토함으로써 새로운 폐기물 처리 방법으로서의 타당성과 혼합물의 노상토, 성토재 및 복토재 등 새로운 토목재료로서의 이용 가능성 여부에 대한 실험을 실시하였다. 이를 위해 본 연구에서는 지반공학적인 측면에서 플라이 애시에 혼합되는 하수처리 슬러지의 최적량과 생석회 혼입량을 배합비와 양생 기간 등을 변화시켜 실험을 수행하며, 다짐특성, 강도특성, 팽창 및 지지력 특성 및 환경유해성에 대하여 가장 유리한 배합비를 결정하는데 그 목적이 있다.

## II. 실험재료 및 실험방법

### 1. 실험재료

#### 가. 플라이 애시

본 연구에 사용된 플라이 애시는 삼천포 화력발전소에서 채집한 것으로서, XRD(X-Ray single crystal Diffractometer)로 분석한 화학적 성분과 ASTM C618-94의 규정에 따라 측정된 물리적 성질은 Table 1과 같다. ASTM C 618 규정에 따르면, 플라이 애시 내에  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량이 70% 이상일 때는 F-type, 그리고 그 이하일 때는 C-type으로 규정하고 있으며, 본 실험에 사용된 플라이 애시는 이들의 함량이 85.73%로서 F-type 플라이 애시로 판단된다. 또한  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 와 같은 알칼리 성분은 규소와 반응하여 팽창을 일으키는 성질을 가지고 있고 플라이 애시를 건축재료로 사용할 때 KS F 규정에서 두 성분의 함량을 5% 이하로 제한하고 있으며 각각 0.63%, 1.26%로 이 규정에 적합하다. 플라이 애시의 비중은 2.47로 일반 흙에 비하여 비중은 다소 작은 값을 보였다.

미연소 탄소량을 나타내는 강열감량은 1.7%로 플라이 애시가 건축재료로 사용될 경우 KS F 규정

Table 1 Chemical components and physical properties of fly ash

Chemical component	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	Others
Content (%)	49.81	26.41	9.51	7.04	1.35	1.26	0.88	0.63	3.11
Physical properties	Specific gravity		Loss of ignition (%)		Water content (%)		#200 passing (%)		pH
	2.47		1.7		0.21		99.04		13.08

치인 6% 이하를 만족시키고 있으며, 함수비는 0.21%로 매우 건조한 상태이다. #200체 통과백분율은 99.04%로 매우 미세한 입자임을 알 수가 있으며, 수소이온농도는 13.08로 강알칼리성 물질이다. 따라서 산성화된 토양을 중성화시키는 물질로도 이용 가능할 것으로 보인다.

나. 하수처리 슬러지

대구 신천 하수처리장에서 발생된 것을 본 실험에 사용하였으며, 검은 색을 띄고 있으며 pH는 7.4로 중성에 가까운 성질을 보였다. 조금의 약취를 가지고 있으며 고형물 함량이 2.54%로 주로 수분으로 구성되어 있다. XRD로 주요 성분을 분석한 결과, 일반 토양에서 쉽게 발견할 수 있는 Al, Fe, Zn 그리고 Si로 구성되어 있으며, 하수처리 슬러지가 발생되는 시기에 따라 그 정량이 변화할 수 있기 때문에 정량분석은 의미가 없는 것으로 판단하여 측정하지 않았다.

Table 2는 환경에 유해한 12가지의 화학성분에 대하여 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)로 분석한 결과이다. 기준 농도는 일반/특수 폐기물을 구별하는 농도값을 적용하였으며, 모든 유해요소에 대하여 매우 낮은 상태이거나 검출한계 이하의 값을 나타내었으며, 환경적 유해 정도는 낮은 것으로 평가되었다.

다. 생석회

본 실험에 사용된 생석회는 충북 단양군 지역에서 생산되어 가공된 P사의 제품으로 주요 성분의

Table 2 The pollution constituent concentration of sludge

Element	Tolerance limit (ppm)	Concentration (ppm)
Pb	3	0.087
Cu	3	2.03
Cr	2	1.280
Mn	10	2.372
Zn	5	0.3225
Fe	10	3.877
Cd	0.1	D.L. >
Ni	-	0.423
Ba	-	1.07
Be	-	D.L. >
Ag	-	0.062
Hg	0.005	D.L. >

D.L. > (Under Detection Limit)

Table 3 Chemical components and grain size of lime

Chemical components (%)				pH	#100 passing (%)
CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	The others	12.6	94
83.51	1.42	4.21	10.86		

분석 결과는 Table 3. 과 같이 나타났으며, CaO, MgO 및 SiO<sub>2</sub>의 함유량이 전체의 약 90% 이상을 차지하고 있으며 강알칼리성 물질로 분석되었다.

2. 실험방법

혼합물 제조방법은 먼저 플라이 애시의 건조중량

Table 4 Mix characteristics

Material	Lime additive (%)	Symbol
Fly ash	0	F000
Fly ash + Sludge	0	FS00
Fly ash + Sludge	2	FSL2
Fly ash + Sludge	6	FSL6
Fly ash + Sludge	10	FSL10
Fly ash + Sludge	14	FSL14

에 생석회를 0, 2, 6, 10, 14%로 변화시키며 혼합한 후, 하수처리 슬러지의 혼입량을 조절하며 다짐 시험을 실시한 후, 최적함수비에 해당하는 하수처리 슬러지양을 공시체 제작에 적용하였다. 총 6종류의 배합비를 적용하여 각종 시험에 사용될 공시체를 제작하였고 시료명을 간단화하기 위하여 Table 4에 따라 표기하도록 한다.

각 혼합물에 생석회를 투입한 주된 이유는 하수처리 슬러지 내의 E. Coli, Salmonella typhosa 등과 같은 여러 병원균의 활동을 중지시키고 악취 제거 등에 효과가 있다는 연구결과(Riehl et al., 1994)<sup>13)</sup>에 따른 것이며, 또한 강도발현에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 가장 적합한 배합비를 구하기 위한 것이다.

기본 물성치 파악을 위하여 각 혼합물에 대하여 입도분포, 아터버그 한계 및 통일분류법에 의한 분류 등을 KS F 규정에 준하여 실시하였다.

본 실험에서 사용되는 플라이 애시, 하수처리 슬러지, 생석회 그리고 혼합물에 대한 미세구조를 파악하기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscopy)촬영을 실시하였다.

각 혼합물에 대하여 다짐시험을 실시하였으며, 이 결과에 따라 플라이 애시와 생석회 혼합물에 하수처리 슬러지를 최적함수비에 따라 투입하여 공시체를 제작하였다.

시료의 액성지수가 10 이하인 경우, 정확한 강도를 구하기 위해 일축압축시험보다는 축압과 하중이

정확하게 제어되는 삼축압축시험을 권장하고 있기 때문에 각 혼합물의 생석회 함유량 변화와 양생기간에 따른 강도 및 축변형률을 관찰하고자 삼축압축시험을 실시하였다. 총 6종류의 배합비에 대하여 1일, 7일, 14일, 21일, 28일, 35일, 49일, 56일, 120일 및 150일 동안 패키한 상태로 23±3℃의 온도를 유지하였으며, 각 양생일에 대한 시험 공시체는 3개 이상 제작하였고 총 180개 이상의 공시체를 제작하였다. 변형률 제어법과 비압밀 비배수 조건(UU-test)을 적용하였으며, 축압은 50~100 kPa(0.51~1.02 kgf/cm<sup>2</sup>)을 적용하였다. 실험결과는 혼합비 및 양생기간에 따라 최대축차응력-변형률의 관계와 증가비율에 대하여 분석하였다.

각 혼합물의 노상토 및 보조기층재로 적합성 여부를 검토하기 위하여 실내 CBR시험(California Bearing Ratio test)을 실시하였고, 실험결과는 배합비의 변화에 따른 수정 CBR값과 팽창정도에 따라 분석하였다.

각 혼합물에 대하여 양생기간과 혼합비의 변화에 따른 투수특성을 분석하고자 변수위 투수시험(Falling head method)을 실시하였다. 다짐시험 결과치에 따라 각 혼합비에 대하여 공시체를 최적함수비보다 2% 습윤측에서 제작하였다. 이것은 이론적으로 투수계수는 최적함수비일 때 최소가 되지만, 실측에 의하면 최적함수비의 습윤상태로 2~4%인 상태에서 투수계수가 최소가 된다는 연구결과(Lamb, 1958 ; Olsen, 1962)<sup>5)</sup>에 따른 것이다. 각 혼합비로 제작된 공시체에 대하여 14일간의 양생기간에 따라 1일 간격으로 투수계수를 측정하였다.

본 실험에서 사용되는 플라이 애시와 하수처리 슬러지는 폐기물이며, 폐기물 내에 함유되어 있는 유해물질은 지반에 매립할 경우, 지하수 또는 우수의 침투로 인하여 폐기물로부터 침출되어 지하수와 토양 등을 오염시킬 수 있다. 따라서 침출시험(leaching test)을 수행함으로써 환경유해성 여부에 대한 검정이 필요하며, 본 연구에서는 회분식을 이용하였으며, 미국의 TCLP(Toxicity Charac-

teristic Leaching Procedure) 시험법에 따라 실시하였다.

침출액은 증류수에 염산을 넣어서 pH를 5.8~6.3으로 조절한 후, 플라이 애시 또는 혼합물과 용매의 중량:부피 비를 1:10으로 하여 혼합하며, 그 혼합액이 500 ml 이상 되도록 한다. 이 혼합액을 상온, 상압하에서 200rpm으로 6시간 이상 교반한 후, 진탕액을 적절히 여과하여 여과액의 일부를 ICP-MS 및 AAS기기(Atomic Absorption Spectrophotometer)를 이용하여 일반/특수 폐기물 구분기준의 유해성분과 pH를 측정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 플라이 애시, 슬러지, 및 생석회 혼합물의 물리적 특성

플라이 애시, 하수처리 슬러지 및 생석회를 혼합한 재료에 대하여 액성한계, 소성한계, 소성지수를 측정한 결과 Table 5와 같다.

플라이 애시의 액성한계는 36.70%, 소성한계는 34.47%, 플라이 애시-하수처리 슬러지 혼합물의 액성한계와 소성한계는 각각 38.60%, 35.91%로 후자가 다소 증가한 값으로 측정되었으며 이 현상은 하수처리 슬러지에 함유된 유기물질로 인해 점성이 다소 높고 세립분 함량이 다소 많기 때문인 것으로 추정된다.

플라이 애시에 대한 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같이 나타났으며 매우 미세한 입자들로 구성되어 있음을 확인할 수 있다.

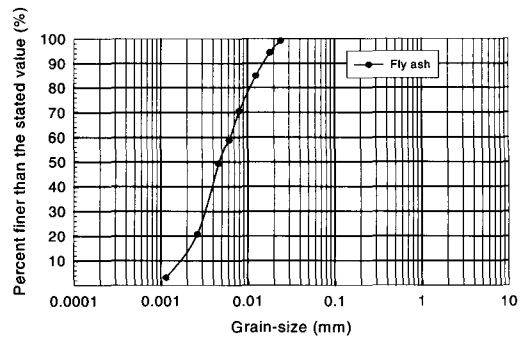


Fig. 1 Grain-size distribution curve of fly ash

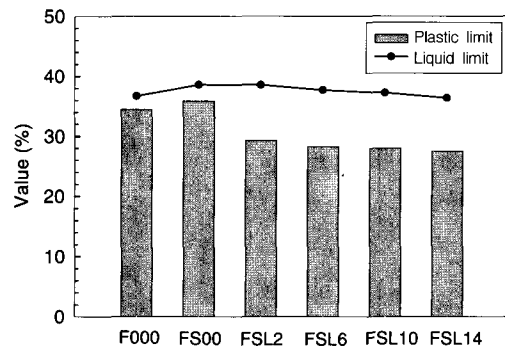


Fig. 2 LL and PL of each mixture

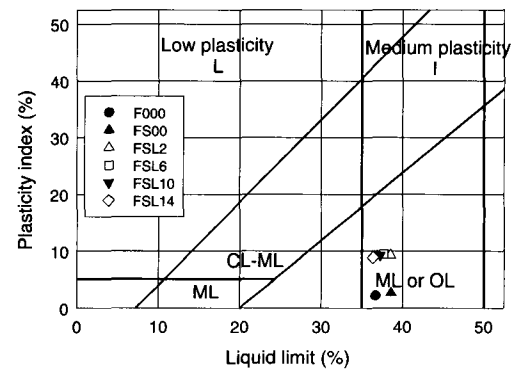


Fig. 3 Casagrande's Index chart

Table 5 Physical properties of each mixture

Mixture Item	F000	FS00	FSL2	FSL6	FSL10	FSL14
LL (%)	36.70	38.60	38.53	37.70	37.25	36.40
PL (%)	34.47	35.91	29.27	28.23	27.99	27.50
I <sub>p</sub>	2.23	2.69	9.26	9.47	9.26	8.90
USCS	ML-CL	ML-CL	ML	ML	ML	ML

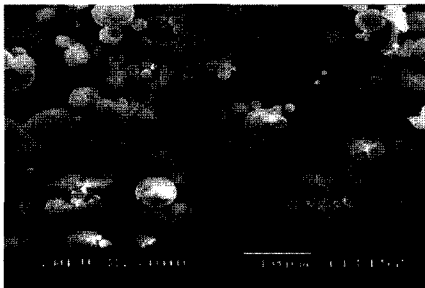
플라이 애시-하수처리 슬러지-생석회 혼합물에서는 생석회 함량이 증가할수록 액성한계와 소성한계의 값이 미소하게 감소하는 경향을 보이는 것으로 측정되었으며 이것은 석회성분의 발열 반응과 팽성성에 기인한 현상으로 판단된다.

일반적으로 액성한계가 증가하면 그 압축성은 커지며, 소성지수가 증가함에 따라 건조강도도 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 순수 플라이 애시에 하수처리 슬러지를 혼입함으로써 압축성과 건조강도를 증가시킬 수 있는 것으로 판단된다. 여기에 생석회를 혼입함에 따라 그 압축성은 감소할 것으로 예상되며, 이는 혼합물의 강도발현에 영향을 미칠 것으로 판단이 된다.

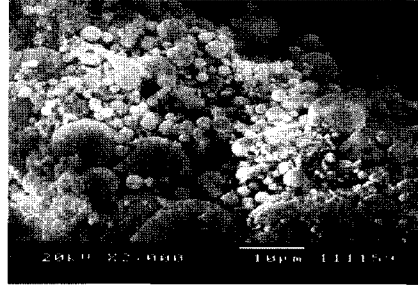
일반 흙의 많은 시험을 통해서 얻은 아터버그 한계값인 액성한계값과 소성한계값을 통계적으로 나타내는 Fig. 3의 Casagrande's Index table과 비교해 볼 때 사질토에 그 성질이 유사한 것으로 판단된다. 플라이 애시와 플라이 애시에 하수처리 슬러지를 혼입할 경우, 실트질 점토와 유사한 토성을 가지는 것으로 판단이 되며, 생석회를 혼입한 경우에는 실트와 유사한 토성을 가지는 것으로 분석되었다. 생석회 함유량이 많을수록 액성한계가 감소하여 압축성이 감소되며, 이는 강도 및 지지력 등에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 2. 혼합물의 미세입자 구조

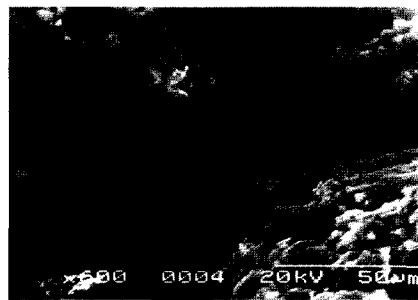
플라이 애시의 미세구조 및 다짐에 따른 결합상태를 관찰하고자 SEM촬영을 F000, FS00 및 FSL6 혼합물 등에 대하여 실시하였다. Photo 1.(c)의 확대배율은 600배로 하였고, 나머지는 2,000배로 확대촬영 하였다.



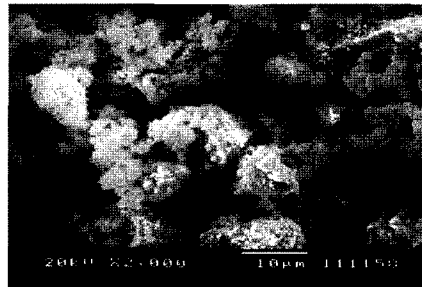
(a) Fly ash



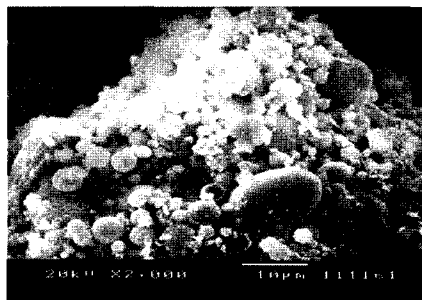
(b) Compacted Fly ash



(c) Sludge



(d) Lime



(e) Compacted FSL6

Photo. 1 SEM of each materials and mixture

Photo 1.(a)는 자연상태의 플라이 애시를 촬영한 결과이며, 1~10  $\mu\text{m}$  정도의 직경을 가지고 있으며, 그 형태는 유리입자와 같이 둥근 입자들이 수십 개씩 뭉쳐진 도메인(domain) 상태로 서로 분리되어 흩어진 모습을 보이고 있다. 고로에서의 급속한 냉각과정에 의해서 입자의 표면은 둥근 상태로 형성되고 도메인 사이에 수많은 공극이 형성된다. 또한 입자 표면에는 미세한 공극이 형성되며, 이는 투수성에 영향을 미친다고 알려져 있다(Krzysztof, 1980).<sup>7)</sup>

Photo 1.(b)는 증류수를 첨가한 후 최적함수비 상태로 다진 상태의 플라이 애시를 30일간 양생한 모습이며, 다져지지 않은 모습의 Photo 1.(a)와 비교해 볼 때, 직경이 수십  $\mu\text{m}$ 인 굵은 입자에 작은 입자들이 잘 다져진 상태로 경화되어 하나의 클러스터를 형성하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 입자들이 구형이므로 미세 입자 사이에 공극이 형성되어 있을 것으로 판단이 되며, 따라서 투수성은 크게 낮지 않을 것으로 판단이 된다.

Photo 1.(c)는 건조한 하수처리 슬러지를 촬영한 결과로써, 표면이 거친 상태로 비교적 큰 직경의 유기질 입자들로 구성되어 있는 것으로 나타났다.

Photo 1.(d)는 첨가제로 사용되는 생석회의 SEM 촬영 결과이며, 표면이 거친 상태인 굵은 입자들이 불규칙하게 입상구조로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 클러스터 사이에서 공극을 발견할 수 있다.

Photo 1.(e)는 FSL6 혼합물을 최적함수비 상태에서 다진 후, 30일 양생시킨 모습이다. 둥근 입자의 플라이애시와 불규칙한 생석회 입자들이 잘 다져진 상태로 하나의 클러스터를 형성하고 있으며, 입자들이 불규칙한 상태로 경화한 상태이므로 Photo 1.(c)와 비교해 볼 때, 다짐특성은 증가하였으며 이로 인한 결합상태가 개선되어 강도 증가가 예상된다.

### 3. 다짐특성

6가지의 혼합물에 대한 다짐시험 결과는 Table

6과 같으며, 그 다짐곡선은 Fig. 4와 같고, 혼합물에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화경향은 Fig. 5와 같다.

Table 6 Compaction test results of each mixture

Mixture	Maximum dry density ( $\gamma_{dmax}$ , gf/cm <sup>3</sup> )	Optimum moisture content (%)
F000	1.21	23
FS00	1.22	27.2
FSL2	1.24	26.8
FSL6	1.25	25.5
FSL10	1.27	24.2
FSL14	1.37	23

F000의 최적함수비는 증류수의 첨가량임. F000를 제외한 다른 혼합물의 최적함수비는 하수처리 슬러지의 첨가량임.

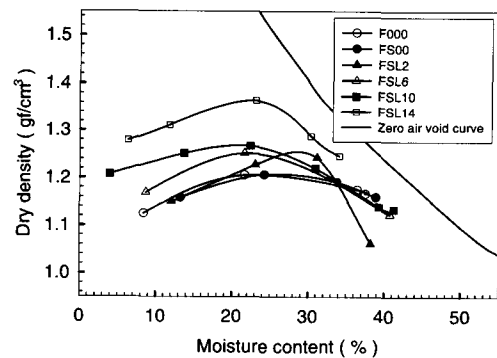


Fig. 4 Compaction test results of each mixture

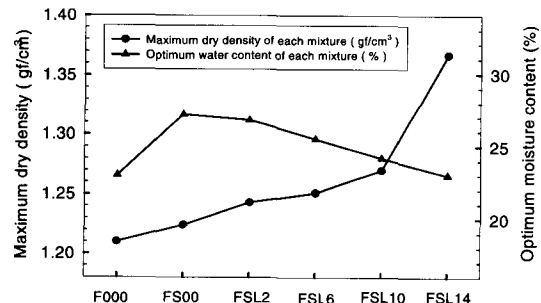


Fig. 5 Variations of MMD and OMC of each mixture

순수한 플라이 애시의 최대건조밀도는  $1.21 \text{ gf/cm}^3$ 로 나타났고, 여기에 하수처리 슬러지를 혼입함에 따라 최대건조밀도는  $0.014 \text{ gf/cm}^3$  증가하였고 생석회를 혼입함으로써 최대건조밀도는 계속 증가하는 경향을 보였다. 그 이유는 플라이 애시와 하수처리 슬러지의 공극을 비교적 미세한 생석회 입자가 채움으로써 건조밀도가 증가한 것으로 판단되며, 이는 SEM촬영 결과를 통해서도 확인할 수 있었다. 최적함수비는 하수처리 슬러지의 고형물 함량이 2.54%임을 감안한다면, F000와 FS00의 최적함수비는 거의 차이가 없는 것으로 판단되며, 생석회를 혼입함에 따라 함수비는 감소하는 경향을 보이고 있다.

각 혼합물에 대한 다짐결과치 중 얻어진 최적함수비를 각 시험에 사용될 공시체를 제작할 때 증류수 및 하수처리 슬러지의 혼입량으로 한다.

#### 4. 강도특성

##### 가. 축차응력과 변형률의 관계

F000, FS00, FSL2, FSL6, FSL10 및 FSL14 혼합물에 대하여 양생기간 1일, 7일, 14일, 21일, 28일, 35일, 42일, 49일, 56일, 120일 및 150일에 대하여 시험을 실시하였으며 각 양생일에 대하여 한 혼합비당 3개 이상의 공시체를 파괴하였다.

Fig. 6(a), Fig. 6(b), Fig. 6(c), Fig. 6(d), Fig. 6(e) 및 Fig. 6(f)에서는 격주간의 공시체 파괴결과를 그래프로 도시하였고, 양생기간에 따른 최대응력의 변화경향을 나타내는 Fig. 7에서는 모든 양생기간에 대해 나타내었다.

F000, FS00, FSL2 및 FSL6 공시체의 경우, 양생기간에 따라 강도발현이 우수하였으며, FSL10 및 FSL14 공시체는 불량하였다. 특히 생석회가 혼합된 FSL2 및 FSL6 공시체의 경우, 특정 양생기간이 지남에 따라 그 파괴곡선의 형태가 뚜렷하게 구분되는 형태를 보였으며, 이는 양생기간에 따른 생석회의 화학적 작용에 의한 것으로 판단된다. 또

한 120일과 150일에서 최대축변형률은 1% 내외에서 나타났고, 최대축차응력도 F000와 비교하여 비슷하거나 크게 감소하지 않았다.

F000의 경우, 양생기간에 따라 축차응력은 증가하는 반면 그 최대축변형률은 감소하는 일정한 경향을 보이며 파괴되었다. 1일 및 14일 공시체의 경우는 그 파괴경로가 완만한 곡선을 나타내면서 최대축변형률이 각각 1.5%, 1.07%에서 파괴되었으며, 이후 28일 이후 공시체들은 최대강도가 뚜렷하게 증가하는 반면, 그 축변형률들은 급격하게 감소하면서 파괴되었다.

FS00는 양생기간에 따라 공시체의 축차응력은 증가하였으나 최대축변형률은 일정한 경향을 나타내지 않으며 파괴되는 형태를 나타내었다.

FSL2는 1일양생 공시체의 최대축변형률은 3.0%을 나타내었으며, 이후 축변형률은 양생기간에 따라 크게 감소하면서 파괴되었고, 양생기간 28일 이후에는 그 최대축차응력이 급격하게 증가하여 파괴곡선의 형태가 1일, 14일 및 28일 공시체와는 뚜렷하게 구분되었다.

FSL6은 양생기간 56일을 기준으로 하여 파괴곡선의 형태가 양분되는 형태를 보였다. 양생기간 56일 이전에는 각 공시체의 축차응력이 미소하게 증가하고, 그 최대축변형률은 1.7~3.2% 범위 내에서 완만한 곡선형태를 나타내며 파괴되었다. 120일 및 150일간 양생시킨 공시체들은 최대축차응력은 급격히 증가하고 최대축변형률은 급격히 감소하는 형태를 나타내며 파괴되었다.

비교적 강도발현이 불량한 FSL10 및 FSL14공시체의 경우, 양생기간에 따라 최대축차응력은 미소하게 증가하고 최대축변형률은 미소하게 감소하면서 2~4% 범위에서 파괴되었다. 이는 하수처리 슬러지 내의 유기물과 적정범위를 초과하여 투입된 생석회가 반응하여 공시체 형태의 팽창과 변형을 일으켜 강도를 감소시키는 것으로 판단된다.



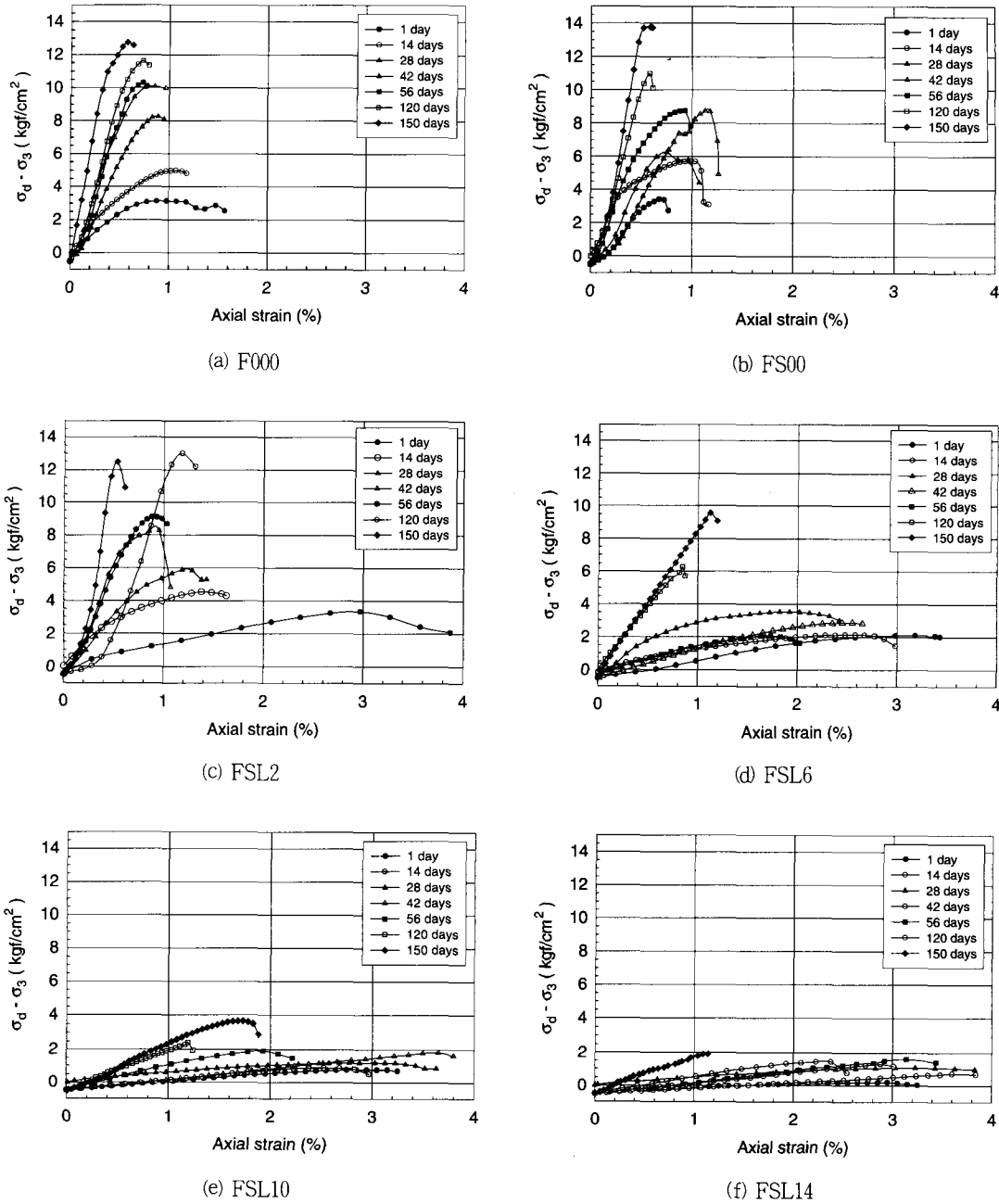


Fig. 6 Deviate stress-axial strain curves of each mixture

나. 플라이 애시-슬러지-생석회 혼합물의 양생기간별 강도(축치응력)변화  
Table 7과 Fig. 7은 플라이 애시-슬러지-생석

회 혼합물의 양생기간별 강도 변화를 나타내고 있다.  
대부분의 혼합물들이 플라이 애시 내의 SiO<sub>2</sub>성분과 Al성분이 수분과 반응하여 포졸란 반응을 일으

Table 7 Maximum deviate stresses of each mixture for curing periods

(Unit:kgf/cm<sup>2</sup>)

Curing days \ Material	F000	FS00	FSL2	FSL6	FSL10	FSL14
1	3.43	3.14	3.37	1.93	0.76	0.20
7	5.24	4.79	4.36	2.06	0.87	0.41
14	5.70	5.00	4.55	2.08	0.92	0.46
21	6.26	5.69	4.75	2.11	1.18	0.71
28	6.71	8.74	5.94	2.13	1.66	1.06
35	8.74	8.97	6.21	3.07	1.84	1.15
42	8.76	9.66	8.26	3.16	1.92	1.28
49	8.97	9.90	8.96	3.53	1.96	1.43
56	10.41	10.07	9.13	4.20	1.99	1.60
120	11.61	12.75	12.48	6.27	2.88	1.90
150	12.58	13.77	13.00	9.98	3.67	2.21
$\frac{\sigma_{150days} \text{ for each mixture}}{\sigma_{150days} \text{ for fly ash}}$	1	1.09	1.03	0.79	0.29	0.18

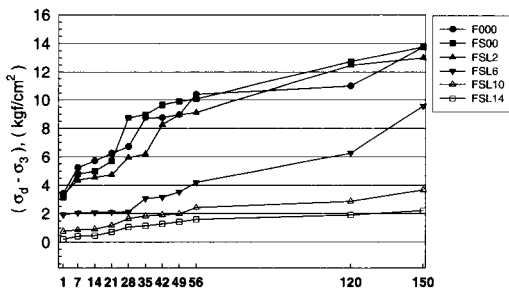


Fig. 7 Variations of maximum deviate stress of each mixture for curing periods

키면서, 양생기간이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 보여주고 있으며, F000과 FS00 및 생석회 함유량이 2%와 6%인 FSL2와 FSL6은 강도증가가 크게 일어났으며, 특히 F000, FS00 및 FSL2는 56일 이전에 강도증가가 크게 나타났다.

F000은 최대강도인 150일을 기준으로 비교해 볼 때, 86%에 해당하는 대부분의 강도증가가 발생하였고, FS00은 65%, 그리고 FSL2는 60%에 해당하는 강도증가가 일어났다.

FSL6은 강도 상태가 양호한 F000, FS00 및 FSL2에 비해 조금 낮은 강도를 나타냈으며, 56일까지는 28% 정도의 강도증가가 발생하였으며, 56

일 이후에는 강도증가의 폭이 더 큰 현상을 보였다. 이에 비하여, FSL10 및 FSL14는 강도가 매우 낮게 나타났으며, 양생에 따라 꾸준하게 강도증가가 일어나는 것으로 나타났다.

F000, FS00, FSL2 및 FSL6의 경우, 1일 강도는 1.9~4 kgf/cm<sup>2</sup>사이에 있었으며, 최대강도인 150일 강도는 9.5~14 kgf/cm<sup>2</sup> 범위의 값을 나타내었다. 이에 비해, FSL10과 FSL14는 1일 강도 및 150일 강도가 상대적으로 불량한 것으로 나타났다.

순수 플라이 애시의 강도증가에 대한 하수처리 슬러지와 생석회를 혼입함에 따른 강도증가의 정도를 파악하기 위하여, 150일 양생시킨 플라이 애시의 강도를 기준으로 하여 150일 양생시킨 각 혼합물의 강도를 비로 나타내었다.

FS00 및 FSL2는 각각 1.09, 1.03으로 나타났으며, FSL6은 0.79로 비교적 양호한 값을 나타내었다. FSL10 및 FSL14는 0.29, 0.18로 그 값은 매우 불량하였다. 따라서 플라이 애시와 하수처리 슬러지 혼합물에 적정량의 생석회를 투입하는 것은 살균의 목적과 미세하지만 강도를 증가시킬 수 있을 것으로 판단되며 그 적정량은 플라이 애시 건조

Table 8 CBR and modified CBR of each mixture

Mixture	Item	CBR	Modified CBR
F000		71	65.7
FS00		53.3	55.4
FSL2		7	6.5
FSL6		4	4.2
FSL10		4.4	4.2
FSL14		3.7	3.6

중량의 2%내외이며, 과다한 생석회의 혼입은 오히려 강도저하를 일으킬 것으로 예상된다.

### 5. 지지력 및 팽창특성

#### 가. 수정 CBR

각 혼합비에 대한 노상토 재료나 복토재료 이용 할 때 지지력과 팽창특성을 검토하고자 실내 CBR 시험을 수행하였으며, 그 결과들은 Table 8로 요약하였다.

F000와 FS00은 양호한 CBR 값을 보유하는 것으로 나타났고, 생석회를 혼입함으로써 CBR 값은 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 생석회가 물과 반응할 때 본래 체적의 1.5~1.7배 정도 팽창을 일으키는데 4일간의 수침과정에서 팽창이 크게 발생되고 건조밀도가 감소함에 따라 그 CBR 값이 급격히 감소하는 것으로 판단된다.

F000와 FS00은 보조기층재료나 기층재료로써 매우 양호한 값을 가지는 것으로 나타났다. FSL2는 노상토로 사용가능하며, 보조기층재료로 사용가능한 값을 가지지만 사용하기에는 안정적이지 못한 것으로 여겨진다.

#### 나. 각 혼합비에 따른 팽창특성

실내 CBR시험 과정에서 10, 25 및 55회 다짐을 한 공시체들을 4일간 수침시키고, 이 과정에서 수분흡수가 되고 공시체의 팽창이 발생한다. 이를 팽창비(swelling ratio, %)라고 하며, 다음 식으로

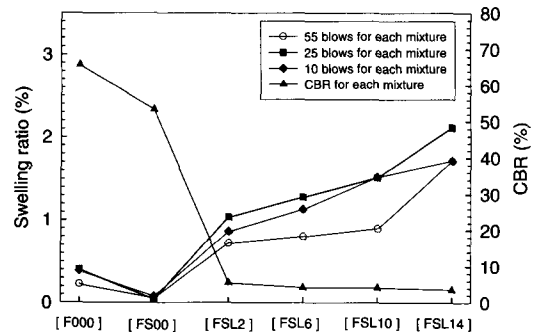


Fig. 8 Modified CBR and swelling ratio of each mixture

나타낸다.

$$\text{팽창비} = \frac{\text{팽창량 (변위계의 초기치와 최종치의 차이)}}{\text{공시체의 초기 높이}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots(1)$$

각 혼합물의 팽창비는 Fig. 10과 같이 나타났고, FS00가 F000보다는 팽창비가 작았으며, 생석회 혼입량이 증가할수록 그 값은 증가하였다. 또 각 혼합물의 다짐 횟수에서 비교해 보면, 55회 다짐 공시체가 팽창에 대해 제일 안정하고, 25회 다짐 공시체가 팽창에 불안정한 것으로 나타났다.

도로의 파손원인은 대형차량의 빈번한 통행, 연약지반의 부등침하, 동결융해로 인한 팽창(heaving) 등이다. 팽창비가 높을수록 도로의 기초지반에 침투되는 수분이 많으며, 지중온도(地中溫度)에 따라 동결융해작용이 발생되며, 이에 따라 현장 함수비의 증가 뿐만 아니라, 도로나 기타 포장층 표면에 치명적인 손상을 입힐 수 있다. 따라서 본 실험결과에서 볼 때, 순수 플라이 애시보다는 하수처리 슬러지를 혼입한 플라이 애시가 도로 보조기층재료 사용하기에 보다 안전할 것으로 판단된다.

### 6. 투수특성 및 환경유해성 여부

#### 가. 투수특성

Fig. 9는 양생기간에 따른 각 혼합물의 투수성

Table 9 Leaching test results of each mixture

Item Element	Detection Limit of each element (ppm)	Tolerance limit (ppm)	F000 (ppm)	FS00 (ppm)	FSL6 (ppm)
CN-	0.02	1	D.L.>	D.L.>	D.L.>
Cu	0.01	3	0.08	D.L.>	0.025
Cd	0.02	0.3	D.L.>	D.L.>	D.L.>
Hg	0.0025	0.005	D.L.>	D.L.>	D.L.>
As	0.01	1.5	D.L.>	D.L.>	D.L.>
Pb	0.02	3	D.L.>	D.L.>	D.L.>
Cr	0.01	1.5	0.02	0.04	D.L.>
Fe	0.02	-	D.L.>	D.L.>	D.L.>
Mn	0.02	-	D.L.>	D.L.>	D.L.>
Org. P	0.01	1	D.L.>	0.04	0.02
Hg	-	-	12.8	11.3	12.8

단, Hg의 검출한계단위는 ppb.

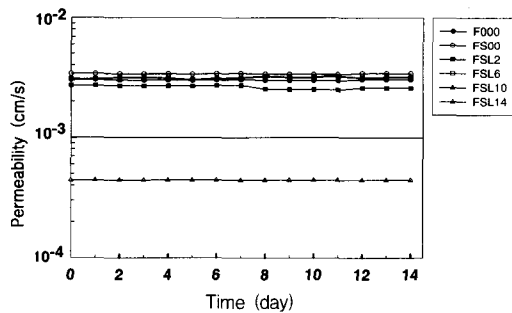


Fig. 9 Variations of hydraulic conductivity of each mixture by rigid wall permeability test according to elapsed time of each mixture

변화경향을 나타내고 있으며, 본 실험에서 측정된 플라이 애시의 투수계수는  $3.007 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 으로 Cabrear 등의 연구결과(1994)<sup>4)</sup>인  $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 와 유사하게 나타났다.

플라이 애시에 하수처리 슬러지와 생석회 혼입량이 2%, 6% 및 10%인 경우는 플라이 애시와 비슷한 수준으로 나타났으며, 생석회를 14% 혼입한 공시체는 14일 경과 투수계수가  $4.22 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 로 나타났으며, 투수성이 감소한 것으로 나타났다.

또한 모든 혼합물들은 양생기간에 따라 투수계수

의 증가 및 감소가 거의 일어나지 않고, 일정하게 유지되는 경향을 보였다.

플라이 애시에 벤토나이트나 시멘트 등을 건조 중량으로 10~15% 첨가함으로써 투수계수를 특정치 이상으로 개선시킬 수 있다는 연구결과(Bowder et al., 1987)<sup>3)</sup>에 따라 투수특성의 개선이 필요하다면 저투수성 물질을 혼합함으로써 가능할 것으로 판단된다.

#### 나. 환경유해성

플라이 애시와 하수처리 슬러지 및 생석회를 혼합함으로써 환경유해 여부에 대한 실험으로 침출시험을 실시하였으며, 그 분석결과는 다음 Table 10으로 나타났다.

유해성분 요소들과 기준검출치는 "폐기물 관리법" 시행령 제2조에 정하고 있는 폐기물 분류기준을 적용하였으며, 이 기준에 따라 일반폐기물과 특정폐기물로 구분하게 된다.<sup>16)</sup>

플라이 애시에 하수처리 슬러지를 혼합함으로써 Cu, Cr 등의 중금속들이 제거되거나 그 오염도가 감소하였으며, 유기인의 값은 0.04로 나타나 조금

증가하였으나 기준검출치인 1.00보다는 매우 낮았다. 따라서 하수처리 슬러지를 플라이 애시에 혼합함으로써 중금속 오염물질을 흡착하거나 그 농도를 낮추는데 효과가 있는 것으로 나타났다.

플라이 애시-하수처리 슬러지 혼합물에 생석회를 플라이 애시의 건조중량에 6% 혼입한 경우, Cu가 검출되었으나 그 값은 기준농도치보다 훨씬 낮은 값인 0.025로 나타났고, Cr은 검출되지 않았고, 유기인 농도도 0.04에서 0.02로 감소하였다.

따라서 각 혼합물들의 유해물질 검출농도가 기준농도보다 매우 낮거나 검출한계 이하의 값을 가지므로 지반매립시 흙이나 지하수 등에 유해 물질이 침출되어 오염시키는 가능성은 낮은 것으로 판단이 된다.

본 실험결과, 플라이 애시, 플라이 애시-하수처리 슬러지 혼합물 그리고 생석회를 첨가한 혼합물들은 지반공학적으로 재이용시 환경유해성에 대한 위험은 낮은 것으로 평가된다.

#### IV. 결 론

산업폐기물인 플라이 애시와 생활폐기물인 하수처리 슬러지의 경제적/공학적으로 유리한 처리와 재이용을 목적으로 생석회를 첨가하여 기초적인 토질시험과 환경유해성에 대한 시험들을 실시하였고, 그 결과들을 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에 사용된 플라이 애시는 ASTM 규정에 의하여 F-type으로 분류되었고, 하수처리 슬러지는 고형물함량이 2.5% 정도로 묽은 액체상태였으며, 두 폐기물 모두 환경유해성분의 검출농도가 매우 낮은 것으로 나타나 지반공학적으로 재이용시 환경유해성에 대한 위험은 낮은 것으로 나타났다.

2. 통일분류법에 의하여 플라이 애시와 플라이 애시-하수처리 슬러지 혼합물은 ML-CL의 토성을 가지는 것으로 나타났으며, 여기에 생석회를 첨가함에 따라 ML로 그 성질이 변화되었다.

3. 플라이 애시에 하수처리 슬러지를 혼합함에 따

라 순수 플라이 애시의 최대건조밀도보다 증가하였다.

4. 플라이 애시, 플라이 애시-하수처리 슬러지, 그리고 여기에 생석회를 혼입한 공시체의 UU-test 결과, 150일 양생기간동안 포졸란 반응에 의한 지속적인 강도증가가 일어났다. 특히, 플라이 애시, 플라이 애시-하수처리 슬러지, 그리고 여기에 생석회를 2% 첨가한 혼합물들은 강도특성이 우수하였으며 전체 강도증가량의 60% 이상이 56일 이전에 발생하였다.

5. 플라이 애시-하수처리 슬러지 혼합물에 생석회를 투입하는 것은 강도증가의 효과보다는 하수처리 슬러지 내의 여러가지 병원균의 활동방지를 위한 살균목적이며, 강도저하를 일으키지 않는 생석회 혼입량은 플라이 애시 건조중량의 2% 내외인 것으로 나타났다.

6. 실내 CBR시험 결과, 플라이 애시, 플라이 애시-하수처리 슬러지 혼합물의 수정 CBR 값은 높은 값을 나타내었고, 노상 및 보조기층재 및 복토재로 이용될 때 우수한 공학적 성질을 가질 것으로 판단된다. 또한 생석회를 2% 혼합한 경우에는 노상 및 보조기층재로 이용가능하지만, 보조기층재로 사용할 경우 신중함을 기해야 할 것으로 나타났다.

7. 플라이 애시의 투수계수는  $3.007 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 나타났고, 플라이 애시에 하수처리 슬러지와 생석회를 혼합하는 것은 투수특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

8. 본 실험에서는 플라이 애시와 하수처리 슬러지의 지반공학 및 환경적으로 가장 유리한 배합비율이 생석회 : 하수처리 슬러지 : 플라이 애시 = 2 : 27 : 71 인 것으로 나타났다.

#### Reference

1. Benoit, J., Eighmy, T.T., and Crannell, B.S. 1999. Landfilling ash/sludge mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 125(10) : 877-888.

2. Borden, Roy H. and Baez, Juan I. 1991. Testing techniques for evaluating the shear strength of lime/fly ash slurry stabilized soil. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ 14(3) : 247-256.
3. Bowders, John J. Usmen, Mumtaz A. and Gidley, James S. 1987. Stabilized fly ash for use as low-permeability barriers. *Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication* (13) : 320-333.
4. Cabrear JG and Woolley GR. 1994. Fly ash utilization in civil engineering. *Environmental aspects of construction with waste materials* : 345-356.
5. Daniel, D. E. 1987. Geosynthetic clay liners. *Geotechnical practice for waste disposal* (7) : 139-163.
6. Edil, T.B., Berthouex, P.M., and Vesperman K.D. 1987. Fly ash as a potential waste liner. *Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication* (13) : 447-461.
7. Krzysztof parylak. 1980. Influence of particle structure on properties of fly ash and sand. *Grouting/Soil improvement and Geosynthetic* : 1031-1041.
8. Mahon M.H., Butziger, J.M., DiSalvo, D.L., and Oweis, I.S. 1993. Lime sludge amended fly ash for utilization as an engineering materia. *Proc. of sessions sponsored by Committees on Soil Improvement and Geosynthetics of Geotechnical Engineering Division of the ASCE, Geotechnical Special Publication* (36) : 73-88.
9. McLaren, R. J., and Digioia, A.M. 1987. The typical engineering properties of fly ash. *Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication* (13) : 683-697.
10. Nicholson, P.G., and Tsugawa P.G. 1996. Stabilization of diesel contaminated soil with lime and fly ash admixtures. *Environmental Geotechnology, Proceedings of the 3rd International Symposium* : 805-816.
11. Pillia, M., Cossu, R., Carboni, L., and Malpei, F. 1995. Use of lime-fly ash mixtures for construction of landfill bottom. *Fifth International Landfill Symposium* : 306-319. Proceedings Sardinia 95
12. Raghu Dorairaja, Hsieh Hsin-Neng, Neilan Thomas, and Yih Ching-Tzer, 1987. Water treatment plant sludge as landfill liner. *Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication* (13) : 744-758.
13. Riehl, M.L., Weiser, H.H., and Rheins, B.T. 1992. Effect of lime-treated water on survival of Bacteria. *Journal of AWWA* 44(5) : 56-67.
14. Shi-chih chu and Hsiang-sheng Kao. 1984. A study of engineering properties of clay modified by fly and slag. *Fly ash for soil improvement, Geotechnical special publication*. (36) : 89-99.
15. Kim., Yeong-Kwan and Heung-Jae, Cho. 1995. A feasibility study on the use of lime-stabilized sludge and fly ash mixture as a landfill cover. *Korean Solid Waste Engineering Society* 12(4) : 410-420.
16. The Ministry of Environment, Republic of Korea Homepage. <http://www.me.go.kr/book/index.html>. Accessed 8 May. 2000.