

플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물의 지반공학특성

Geotechnical properties of Fly ash - Water treatment sludge mixture

권 무 남 · 구 정 민* · 이 상 윤 (경 북 대) · 채 교 익 (상 주 대)

Kwon, Moo Nam · Goo, Jung Min · Lee, Sang Yun · Chae, Kyo Ik

Abstract

Although Fly ash possess viable engineering properties, an overwhelming majority of the fly ash from coal combustion is still placed in storage or disposal sites. Similarly, sludges generated from various water treatment operations are predominantly subject 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 dependent upon the composition of the sludge and its affinity for water.

This test was undertaken to reuse of fly ash and sludge with mix. In this paper includes of geotechnical properties of fly ash and fly ash-sludge mixture and results of compaction test, unconfined test, falling head test and CBR test and it was analyzed the effect on mixing fly ash with sludge.

I. 서 론

석탄을 연료로 사용하는 화력발전소에서 연소 후 남는 플라이애쉬는 우리 나라에서 연간 약 500만톤 이상이 발생되는 것으로 알려져 있으며, 그 중 약 20%는 건설재료의 첨가제로 이용되고 나머지는 폐기물 매립장에 그대로 투기되고 있어 대기 및 지반의 이차적인 환경오염 문제를 야기 시키고 있는 실정이다. 또한 슬러지는 하수종말처리장, 제지공장 또는 화학공장 등에서 나오는 폐기물로서, 우리 나라에서 많은 양이 발생되고 있으나, 주로 탈수 케이크 상태로 만들어져 폐기물 매립장에 매립 또는 해양에 투기되고 있어 지반 및 수질 환경보전에 악영향을 미치는 것으로 여겨진다.

우리 나라에서 발생하는 플라이애쉬는 대부분 Class F로 분류되며, 수분과의 반응을 통해 자경성을 발현하며, 그 포조란 성질이 슬러지를 안정화시키는데 큰 역할을 하는 것으로 보고되었고(Maher et al. 1993), 이 혼합물의 지반공학특성을 파악하여 건설공사용 재료로 이용할 수 있다면 폐기물 매립장의 공간 확보와 폐기물의 재활용 차원에서 환경문제 해결에 다소 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

슬러지의 물리적·화학적 성질은 잘 알려져 있지 않고 있으며, 하수종말처리장에서 발생된 슬러지는 화학적 응고제인 석회를 첨가하여 탈수 케이크 형태로 만들고 있다. 이 과정에서 다량

의 석회 및 슬러지 안정화에 많은 시간이 요구되며, 이에 따른 공정이 길어 비경제적인 것으로 지적되고 있다. 그러나 슬러지를 석탄의 연소 후 남는 2차 오염물질인 플라이애쉬와 혼합하면 탈수가 촉진되고 강도가 증가되며 안정화가 이루어지는 것으로 알려져 있다.

이에 석회와 플라이애쉬의 특성을 이용하여 하수처리장에서 나오는 슬러지에 혼합하면, 플라이애쉬와 슬러지를 공학적 재료로 재활용할 수 있을 것으로 예상되며, 적절한 배합과 양생에 따라 플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물은 강도와 지지력이 크고, 투수성이 낮아지는 것으로 알려져 있어 이것을 매립지 차수재 및 덮개용 재료 또는 토목 공사용 재료로 재활용이 가능할 것으로 예상된다.

최근 선진국에서는 플라이애쉬, 폐기물 소각장의 Bottom ash, 제철공장의 슬래그, 하수종말처리장 및 제지공장의 슬러지 등에 관한 재활용 연구가 매우 활발하며 분야에 따라서는 이미 실용화하고 것으로 알려져 있으나, 우리나라에서는 이들에 관한 연구가 아직 미흡한 실정에 있는 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 플라이애쉬와 슬러지의 재활용 가능성 여부를 조사하기 위하여 플라이애쉬와 하수처리슬러지를 혼합·제조하여 그들에 관한 물리적, 지반공학적 성질을 연구, 분석하여 환경 보전적 차원에서 건설용 재료로서의 활용 가능성을 평가하기 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

가. 실험재료

1) 플라이애쉬

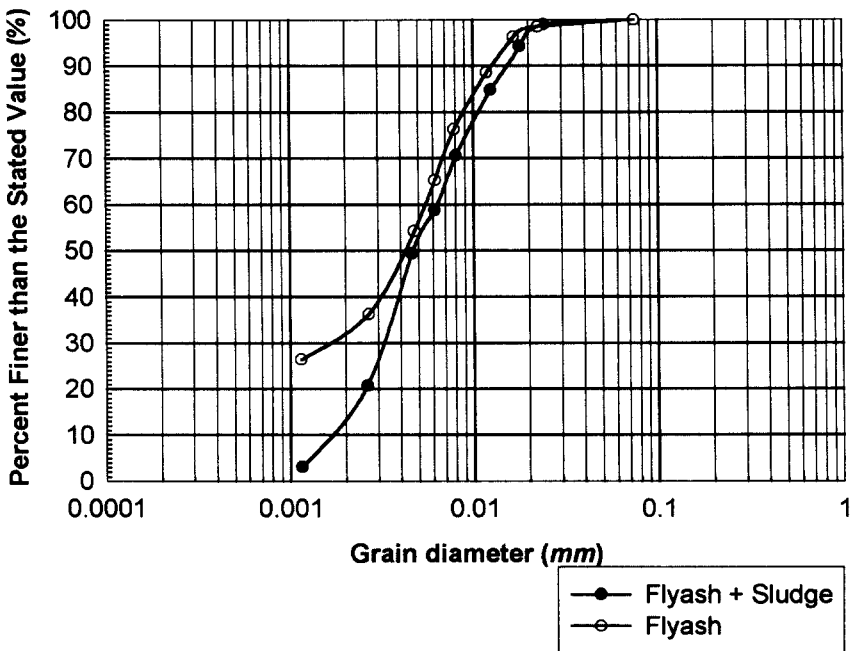


Fig. 1. Grain-size distribution curve

Table 1. Chemical composition of Flyash

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	P_2O_5	Na_2O	The others
Content (%)	49.81	26.41	9.51	7.04	1.35	1.26	0.88	0.63	3.11

표 1은 삼천포발전소에서 발생된 플라이애쉬의 화학적조성을 XRF 분석 결과를 나타내며, 그림 1은 플라이애쉬 및 플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물의 입도분포를 나타낸다.

이 실험에 사용된 플라이애쉬는 SiO_2 , Al_2O_3 그리고 Fe_2O_3 성분이 전체에 대하여 85%이상을 차지하며, ASTM의 규정에 따라 전형적인 Class F type으로 분류된다. 또한 규소와 반응하여 팽창을 일으키는 Na_2O 와 K_2O 는 각각 0.63%, 1.26%정도 포함되어 있고, 강열감량은 1.7%로 한국공업규정인 6%이하를 만족시킨다.

입도분포는 비교적 입자가 고르게 분포된 것으로 나타났으며, 하수처리슬러지와 혼합한 경우 플라이애쉬와 비교해 볼 때 좀더 미세한 입자를 가지는 것으로 나타났다.

2) 하수처리슬러지

가정에서 발생된 생활하수를 대구신천하수처리장에서 슬러지상태로 만든 것으로 검은 색을 띄고 있으며, pH 는 7~9로 비교적 안정된 상태이며, 조금의 악취를 가지고 있다. 하수처리슬러지의 농도 및 성분은 시기에 따라 항상 변화하므로 정성분석이 공학적으로는 의미가 없으며, Ca , Zn , Fe , Si 및 Al 성분으로 주로 구성이 되며, 수분함량이 97.46%로 묽은 액체상태인 것을 플라이애쉬에 혼합하였다.

나. 실험 방법

플라이애쉬와 플라이애쉬-슬러지 혼합물에 대하여 입도 분석, 비중, 액성한계, 소성한계 및 소성지수를 구하고 이를 바탕으로 통일분류법에 의하여 토성을 분류한다.

또한 플라이애쉬 및 플라이애쉬-슬러지 혼합물의 공학적 성질은 우선 각 시료에 대하여 다짐실험을 실시한 후, 다짐특성과 최적함수비를 구한 후 공시체를 제작하여 강도적 특성, 지지력 분석 및 투수 특성에 대하여 분석한다.

1) 다짐시험

플라이애쉬의 다짐특성 및 최적함수비와 플라이애쉬에 대한 하수처리슬러지의 최적배합비를 결정하기 위하여 KSF 2312의 기준에 따라 다짐시험을 실시하였다.

2) 강도적 특성

다짐시험 결과에 따라 플라이애쉬 및 플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물을 최적함수비 상태에서 공시체를 제작하여 강도를 측정하기 위하여 KSF 2314의 방법으로 실시하였다.

3) 지지력 분석

플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물의 노상토 재료로 사용할 경우, 적합한 지지력 및 포화시

팽창정도를 알아보기 위하여 KSF 2320의 방법으로 실시하였다.

4) 투수특성 분석

플라이애쉬에 하수처리슬러지를 혼입함에 따라서 재령에 따른 투수계수값의 변화를 관찰하고자 KS F 2322의 방법에 따라 변수위투수시험을 실시하였다. 투수시험용 시료의 다짐도는 다짐시험에서 얻어진 결과치로부터 최대건조밀도의 95%로 하였으며, 함수비는 최적함수비보다 2% 습윤측의 함수비로 하였다. 그 이유는 이론적으로 투수계수는 최적함수비일 때 최소가 되지만, 실측에 의하면 최적함수비의 2~4%인 상태에서 투수계수가 최소가 된다는 Lamb (1958) 과 Olsen (1962 등의 연구결과에 따른 것이다. 공시체는 두께 7cm를 목표로 제작하였으며 14일간 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

가. 지반공학적물성치

Table 2. Physical properties of material

Material	Gravity	LL(%)	PL(%)	I_p (%)	Classification by USCS
Flyash	2.47	36.70	34.47	2.23	ML-CL
Flyash+Sludge	2.39	38.60	35.91	2.69	ML-CL

하수처리슬러지를 플라이애쉬에 혼입하므로써, 비중은 감소하였으며 액성한계 및 소성한계는 증가하였으며 그 결과치는 표 2에 나타난다. 플라이애쉬 및 플라이애쉬-하수처리슬러지의 토질역학상의 분류는 그림 2와 통일분류법 (Unified Soil Classification System) 에 의하여 ML-CL로 분류되었다.

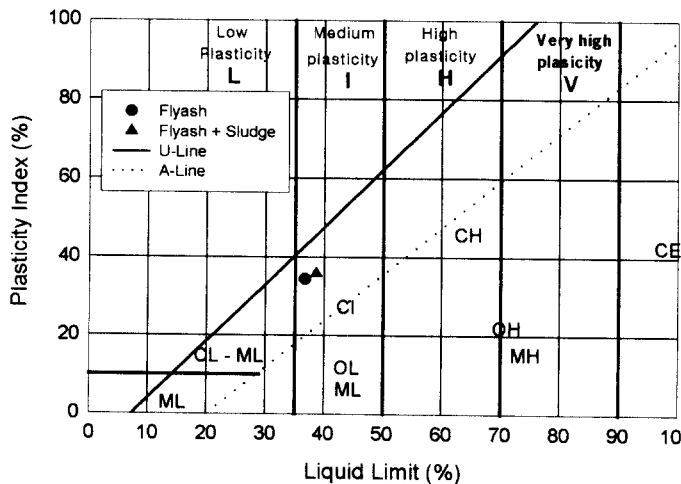


Fig. 2. Classification by Casagrade's index table

나. 다짐시험

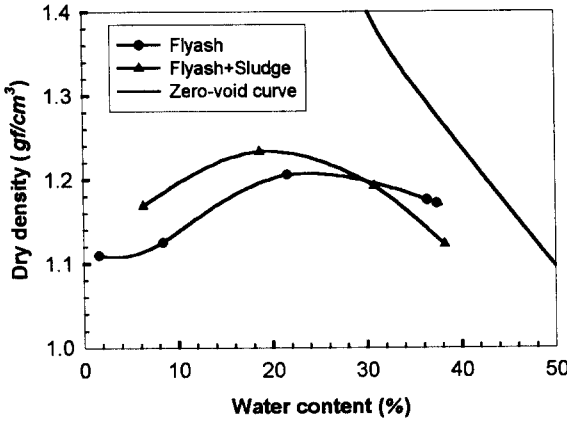


Table 3. Compaction test results of material

Material Item	Flyash	Flyash + Sludge
γ_{dmax} (kgf/cm ³)	1.21	1.32
ω_{opt} (%)	23	23.5

Fig. 3. Compaction curve of materials

플라이애쉬는 최적함수비를 조금 초과할 경우, 수분에 대하여 스펀지현상이 심하였고, 플라이애쉬의 최대건조단위중량은 1.21 gf/cm^3 , 최적함수비는 23%로 나타났다. 플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물은 최적슬러지 혼입량이 26.04%였고, 하수처리슬러지의 수분함량이 97%이상임을 감안한다면 최적함수비는 플라이애쉬에 비해 크게 변화되지 않았다. 최대건조단위중량의 경우, 하수처리슬러지를 혼입함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그림 3에서 보면, 곡선의 폭이 중형보다는 횡형의 모습과 완만한 곡선의 형태를 나타내고 있는데, 이는 전형적인 사질토의 다짐곡선의 특성과 일치한다.

대표적인 ML계 흙의 경우 최적함수비 ω_{opt} 는 약 18%이며, 최대건조밀도 γ_{dmax} 는 1.67 kgf/cm^3 의 값을 나타내는 것에 비교해 볼 때, 플라이애쉬의 ω_{opt} 는 28% 증가한 상태로 γ_{dmax} 는 28% 감소한 상태인 것을 알 수 있다.

다. 일축압축강도

하수처리슬러지를 플라이애쉬에 혼입함에 따라 강도는 감소하였으나 최대강도를 나타내는 축변형율은 증가한 상태에서 공시체가 파괴되었다. 플라이애쉬와 비교해 볼 때 강도는 14%, 축변형율은 65% 증가한 상태를 보였다. 따라서 플라이애쉬에 슬러지를 혼입함에 따라 탄성적인 성질을 부여하는 것을 알 수가 있다.

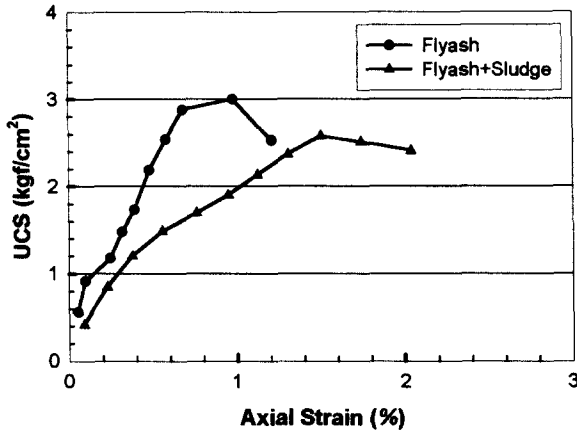


Fig. 4. Unconfined Compressive Strength curve

Table 4. Unconfined compressive strength results of material

Material	Flyash	Flyash + Sludge
Item		
q_u (kgf/cm ²)	3.00	2.57
ϵ (%)	0.98	1.50

라. 실내 CBR 시험

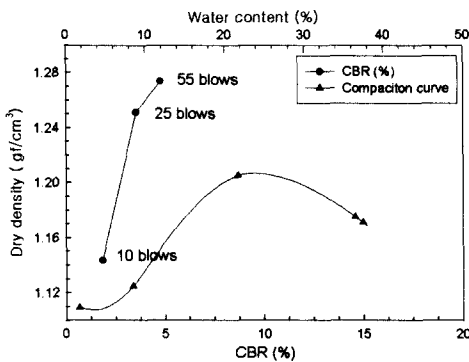


Fig. 5. CBR curve of Flyash

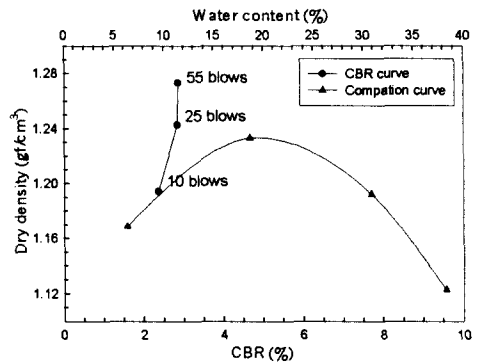


Fig. 6. CBR curve of flyash+Sludge

플라이애쉬 및 플라이애쉬-하수처리슬러지 혼합물의 CBR값은 최적함수비의 95%측에서 각각 2.3% 및 2.8%로 나타났으며, 슬러지를 혼입함으로써 그 값이 증가된 것으로 나타났다. 한편, 노반 재료로 이용되는 CBR값이 0~10을 감안한다면 플라이애쉬를 노반재료로 사용할 수 있을 것으로 여겨지나, 도로 노반 재료로 이용되기 위해서는 수행성을 높이는 다른 물질의 첨가가 필요한 것으로 나타났다.

마. 변수위 투수시험

플라이애쉬와 여기에 하수처리슬러지를 다짐시험 결과치에 따라 최적함수비의 상태로 공시체를 제작하였다. 그 결과치는 그림 7과 같이 나타났으며, 14일간의 재령에 따라 그 투수계수들은 크게 변화되지 않는 것으로 나타났다. 플라이애쉬는 3×10^{-3} cm/sec, 하수처리슬러지를 혼입한 공시체는 3.3×10^{-3} cm/sec 정도의 투수계수의 값을 각각 나타내었다. 하수처리슬러지를 혼입함에 따라서 투수계수의 값은 0.3×10^{-3} cm/sec 정도로 크게 증가하지 않는 것으로 나타났

다. 한편, 미국의 EPA에서는 폐기물 매립장 차수재의 투수계수값을 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하의 값을 요구하고 있으며, 투수계수 감소를 위하여 벤토나이트와 같은 저투수성 물질의 첨가가 필요할 것으로 보여진다.

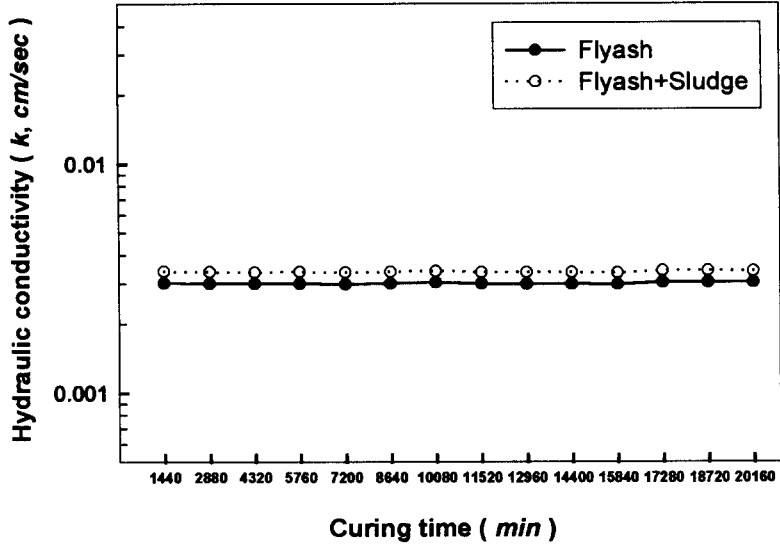


Fig. 7. Variations of hydraulic conductivity of each materials by rigid wall permeability test according to elapsed time

IV. 요약 및 결론

1. 전형적인 Class F type 플라이애쉬에 하수처리슬러지를 혼입한 결과, 비중은 감소하였으나, 액성한계 및 소성한계는 미소하게 증가하였으며 그 혼합물은 통일분류법에 의해 ML-CL로 분류되었다.
2. 다짐시험 결과, 플라이애쉬-하수처리슬러지와 플라이애쉬 간의 최적함수비는 크게 차이는 없었으며, 최대건조단위중량은 증가하였다.
3. 하수처리슬러지를 혼합함에 따라 일축압축강도는 14%정도 감소하였으나, 축변형율은 플라이애쉬 공시체에 비하여 65%정도 증가하였다.
4. 실내CBR시험 결과, 플라이애쉬와 플라이애쉬-하수처리슬러지 모두 CBR값이 3보다 작게 나타났으며, CL-ML로 분류되어 노반재료로 사용하기에 조건을 만족시켰다.
5. 변수위 투수시험 결과, 플라이애쉬와 플라이애쉬-하수처리슬러지의 투수계수의 값은 각각 $3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, $0.3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며, 하수처리슬러지를 혼입함에 따라 투수계수의 값이 조금 증가하였다. 또한 재령에 따른 투수계수의 변화가 없었으며 두 물질 모두 일정한 값을 유지하였다.

참 고 문 헌

1. Benoît, J., Eighmy, T.T., and Crannell, B.S.(1999) : Landfilling Ash/Sludge Mixtures, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 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, Vol. 14, No.3, pp. 247-256.
3. Bowders, John J., Usman, Mumtaz A., and Gidley, James S.(1987) : Stabilized Fly Ash for Use as Low-Permeability Barriers, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication, No.13, pp. 320-333.
4. 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, No.13, pp. 447-461.
5. Maher, M.H., Butziger, J.M., DiSalvo, D.L., and Oweis, I.S.(1993) : Lime Sludge Amended Fly Ash for Utilization as an Engineering Material, Proc. of sessions sponsored by Committees on Soil Improvement and Geosynthetics of Geotechnical Engineering Division of the ASCE, Geotechnical Special Publication, No.36, pp. 73-88.
6. McLaren, R. J., and Digiola, A.M.(1987) : The Typical Engineering Properties of Fly Ash, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication, No.13, pp. 683-697.
7. 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, pp. 805-816.
8. Pillia, M., Cossu, R., Carboni, L., and Malpei, F.(1995) : Use of Lime-Fly Ash Mixtures for Construction of Landfill Bottom, Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, pp.306-319.
9. 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, No.13, pp. 744-758.