

산업폐기물인 제지회의 활용방안에 관한 연구

A Study on Utilization Method of Paper Ash in Industrial Waste

허 열* · 이처근** · 이명원** · 안광국***

Y. Heo · C.K. Lee · M.W. Lee · K.K. Ahn

(1999년 5월 11일 접수, 1999년 9월 18일 채택)

ABSTRACT

This study is an experimental study to investigate the possibility of the utilization of paper ash as the cover, liner in waste disposal landfill and other construction materials. The sample used in these tests was obtained from Daehan paper mill. A series of tests were performed to evaluate basic properties, compaction, permeability, compressive strength, consolidation, leaching, and CBR of paper ash. In order to investigate the soil engineering properties of paper ash, the test results were compared with those obtained of fly ash. The results of unconfined compression tests show that paper ash had a larger strength than the fly ash. Also, the maximum dry unit weight of paper ash was approximately 59~76.9% less than that of the fly ash. It was found from the results of leaching test that paper ash is classified as non-detrimental general wastes according to the waste management law.

1. 서 론

인구의 증가와 산업의 발달로 산업폐기물 발생량은 매년 증가하고 있다. 이들 폐기물 중 특히 본 연구에서 다루고자 하는 제지공장에서 발생하는 제지회도 종이 소비량 증가에 따라 해마

다 그 발생량이 증가하는 추세이며 향후 더 늘어날 것으로 예상된다. 또한 이러한 폐기물의 수집, 운반 그리고 처리를 위해 막대한 인력과 처리비용이 필요할 뿐만 아니라 처리방법도 매립, 투기 등으로 일관할 경우 좁고 한정된 국토를 가진 우리 나라로서는 심각한 문제가 아닐 수

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

*** Illinois Institute of Technology 토목공학과 박사과정

없다. 한국제지공업연합회 발행 “제지산업 폐기물 발생 및 처리현황보고서(1996)”에 의하면 제지공장 폐기물의 연간 발생량은 1,251천톤에 달하고 있으며, 이중 제지회는 전체 발생량의 약 11%인 137천톤에 달하고 있으며, 제지폐기물의 처리를 위해 매년 약 120억원, 그리고 제지회의 처리비용으로 이중 16.7%인 20억원이 소요되고 있다.

제지공장에서 제지회가 되기 이전의 단계인 슬러지의 공학적 특성 및 활용방안에 대해서는 비교적 많은 연구가 진행되어 왔고^{2~4)}, 또한 플라이애쉬의 토질공학적 특성 및 건설재료로서의 활용방안에 대해서는 많은 연구가 수행되었지만^{1,7,9,10)}, 제지회의 활용에 대한 연구는 국내는 물론 외국에서도 아직까지는 활발히 이루어지지 않는 실정에 있다. 현재 제지회의 처리는 매립하거나 부분적으로 시멘트, 비료원료로 재활용되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 제지공장에서 슬러지를 소각후 발생하는 제지회를 단순매립 등이 아닌 성토재, 폐기물 매립장의 복토재 및 차수재 등 토공재료로서 활용가능성을 규명하기 위하여 일련의 실험을 수행하고, 실험결과는 기존의 플라이애쉬에 대한 연구결과와 비교·검토하여 산업폐기물인 제지회의 활용방안에 참고자료를 제시하고자 한다.

2. 실험내용 및 방법

본 실험에 사용된 제지회는 충북 청원군 강외면에 위치한 대한제지 공장에서 채취하고, 산업폐기물인 제지회의 토질공학적 특성과 활용방안을 연구하기 위하여 기본물성시험인 비중, 아터버그 한계, 입도분석, pH 시험을 실시하고, 역학적 물성시험으로 다짐, 압밀, 투수, 일축압축, 노상토 지지력시험을 실시하고자 한다. 다짐시험은 A다짐 및 D다짐방법으로 실시하였으며, 투수시험은 직경 10cm, 높이 12.5cm인 몰드를 사용하여 변수위투수시험법으로 실시하고, 일축압축시험은 직경 5cm, 높이 12.5cm의 공시체를 제작하여 변형제어법으로 실시하고자 한다. 또한, 시료의 미시구조분석을 위한 SEM분석, 화

학성분을 분석하기 위한 EDS분석과 제지회의 유해물질 함유량을 파악하기 위하여 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험을 실시하고자 한다.

3. 결과분석 및 고찰

3.1 기본물성 특성

제지회에 대한 입도분석결과 Fig. 1에 나타난 바와 같이 제지회의 No.200(0.074mm)체 통과율은 55.8% 정도이고, 입도분포가 양호하며, 유효경은 0.0028mm로 플라이애쉬의 유효경(D₁₀)은 0.01~0.012mm에 비해 작게 나타났다. 정적액성한계 시험결과 제지회의 액성한계는 105.4%, 소성지수는 15.3%인 반면 플라이애쉬는 비소성용

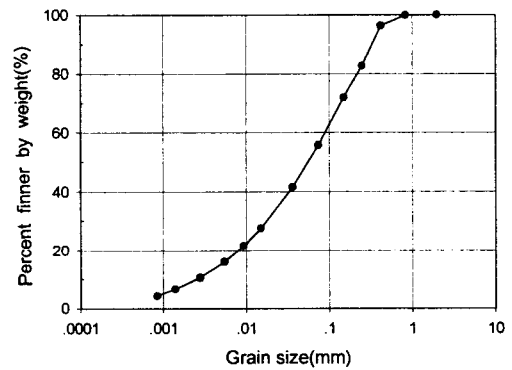


Fig. 1 Grain-size distribution curve of paper ash

Table 1 Physical properties of paper and fly ash

Physical properties	Paper ash	Fly ash
Specific gravity	2.52	2.05~2.30
Uniformity coefficient	31.79	1.7~2.0
Curvature coefficient	1.30	0.7~1.3
Effective size (mm)	0.0028	0.01~0.012
Percent passing through the No.200 sieve(%)	55.8	58~82
Liquid limit (%)	105.4	-
Plasticity index (%)	15.3	NP
pH	10.6	7.52~8.47
USCS (unified soil classification system)	MH	ML
AASHTO classification	A-7-5	A-4

나타낸다. 한편 제지회의 pH 값은 10.6의 강알칼리성으로 플라이애쉬의 pH값 7.52~8.47에 비해 약간 크게 나타났다. 통상적으로 pH값이 5.5 이하인 경우에는 인집 구조물이나 강재의 부식, 내구성 등에 직접적인 영향을 미치나 6.5 이상부터는 별다른 영향이 없는 것으로 알려져 있다. Table 1은 제지회와 플라이애쉬의 기본물성을 정리하여 나타낸 것이다.

3.2 다짐특성

제지회에 대한 다짐곡선을 Fig. 2에 나타내었으며, Table 2는 제지회와 플라이애쉬의 최적함수비와 최대건조단위중량을 나타낸 것이다. 이로부터 제지회의 최대건조단위중량은 A다짐과 D다짐에서 각각 0.861과 0.915g/cm³로 플라이애쉬에 비해 각각 59~76.9%와 61~73.8%로 작게 나타났다. 이와 같이 다짐한 제지회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 침하와 관련하여 볼 때 그리고 구조물의 뒷채움재로 사용할 경우 토압면에서 볼 때 플라이애쉬나 일반 토공재에 비해 우수한 공학적 특성을 갖는다고 할 수 있어 경량성토재로 활용가능성이 있다고 판단된다. 한편, A, D다짐에서 제지회의 최적함수비는 각각 63%와 57.5%로 비교적 높게 나타났으며, 플라이애쉬보다 1.8~3.9배정도 큰 값을 나타내었다.

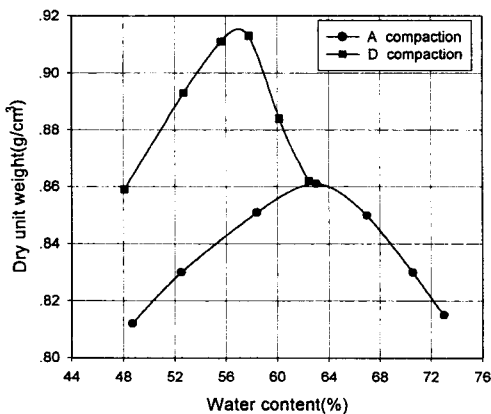


Fig. 2 Results of compaction test of paper ash

Table 2 Compaction test results of paper & fly ash

Compaction method		Paper ash	Fly ash
A method	W _{opt} (%)	63.0	17.0~34.7
	γ_{dmax} (g/cm ³)	0.861	1.12~1.46
D method	W _{opt} (%)	57.5	14.5~28.4
	γ_{dmax} (g/cm ³)	0.915	1.24~1.50

3.3 압밀특성

제지회의 압밀특성을 구하기 위하여 표준다짐시험결과 다짐곡선에서 0.95 γ_{dmax} 에 대응하는 건조축 및 습윤축 함수비인 50, 72.5%와 최적다짐상태의 3가지 경우에 대해 표준압밀시험을 실시하였으며, e-log P 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 재하단계 동안의 간극비 변화량은 시료의 함수비가 50, 63, 72.5%인 경우 각각 0.171, 0.224, 0.234로 함수비가 증가할수록 증가하였으며, 초기간극비에 대한 간극비의 변화비는 8.29~11.60%로 작은 값을 나타내고 있다. Table 3은 제지회와 플라이애쉬의 압축지수, 팽창지수와 선행압밀용력을 나타낸 것

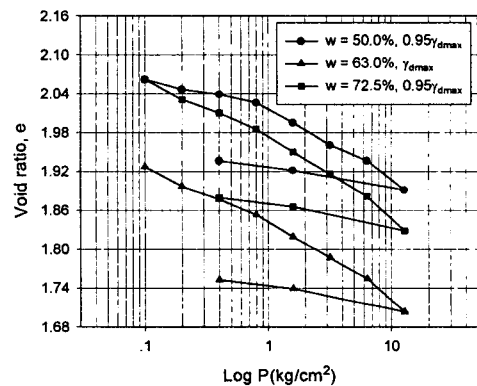


Fig. 3 e-log P curve of paper ash

Table 3 Results of consolidation test

Materials		Compression index	Swelling index
Paper ash	w=50.0%, 0.95 γ_{dmax}	0.120	0.041
	w=63.0%, γ_{dmax}	0.132	0.045
	w=72.5%, 0.95 γ_{dmax}	0.138	0.047
Fly ash		0.06~0.14	-

이다. 제지회의 압축지수와 팽창지수는 함수비 증가에 따라 선형적으로 증가하며, 이로부터 제지회의 압축지수는 0.120~0.138로 플라이애쉬의 압축지수 0.06~0.14에 비해 0.94~2.2배정도 크게 나타났으나, 군산, 장항지역 연약점토의 평균 압축지수⁸⁾인 0.51에 비해서는 상당히 작은 값을 나타내고 있어 제지회의 압축성은 적다고 할 수 있다. 한편, 제지회의 팽창지수는 0.041~0.047로 압축지수의 34.1% 정도를 나타내고 있다.

3.4 투수특성

제지회를 토질공학적으로 이용시 중요한 요소중의 하나는 투수성을 들 수 있으며, 이는 지반내에서 오염물질과 지하수이동 등에 있어 적절한 투수계수의 확보가 필요하다. 미국 환경보호청의 기준에 의하면 차수재로 적용 가능한 투수계수는 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하를 기준으로 하고 있으며⁵⁾, 국내에서도 이것을 기준으로 적용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 매립장의 차수재로서 제지회의 이용가능성을 파악하기 위하여 함수비를 50, 58, 63, 68, 72.5%로 변화시켜 가면서 변수위투수시험을 실시하였다. 투수계수는 시간경과에 따라 감소하기 때문에 본 연구에서는 시간경과에 따른 투수계수의 변화를 측정하여 일정한 값으로 수렴할 때의 값으로 하였다. Fig. 4는 제지회에 대한 투수시험결과와 경과시간에 따른 투수계수의 변화를 나타낸 것으로 투수계수는 시간경과에 따라 감소하였으며, 5일 이후부터 일정한 값으로 수렴하였다.

시험결과 제지회의 투수계수는 함수비 68%까지는 함수비 증가에 따라 투수계수가 감소하였으며, 그 이상의 함수비에서는 다시 투수계수가 증가한다는 것을 알 수 있다. 제지회의 함수비 58%에서 투수계수는 $1.28 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 플라이애쉬의 투수계수($1.092 \sim 1.49 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$)와 유사하고, 최적상태에서 제지회의 투수계수는 $4.04 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 플라이애쉬의 투수계수에 비해 0.27~0.37배정도 작게 나타났으며, 이것은 제지회와 플라이애쉬의 유효경의 비 0.23~0.28과 유사함을 알 수 있다. 한편, 가장 작은 투수계수는 시료의 함수비 68%에서 $1.89 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며, 이는 차수재 기준을 만족하지는 않

으나 제지회에 약간의 첨가제(벤토나이트 등)를 혼합한다면 차수재로 충분히 사용가능성이 있다고 판단된다.

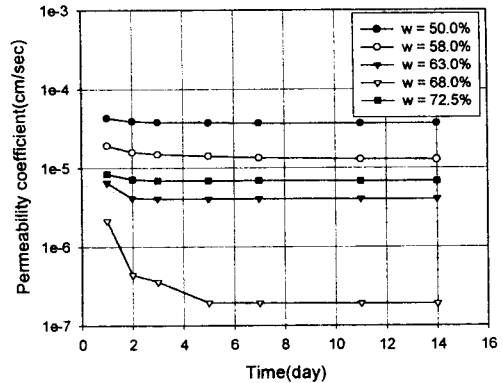


Fig. 4 Relationship between permeability coefficient with time

3.5 강도특성

본 연구에서 강도특성은 일축압축시험을 통하여 규명하였으며, 표준다짐결과 최적다짐상태의 공시체를 제작한 직후에 시험하였으며, 그 결과 응력-변형률 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 공시체 제작 직후에 측정된 제지회의 평균 일축 압축강도는 2.45kg/cm^2 로 플라이애쉬의 일축 압축강도($0.82 \sim 1.21 \text{kg/cm}^2$)에 비해 2~3배정도 크게 나타났으며, 또한 군산, 장항지역 연약점토의

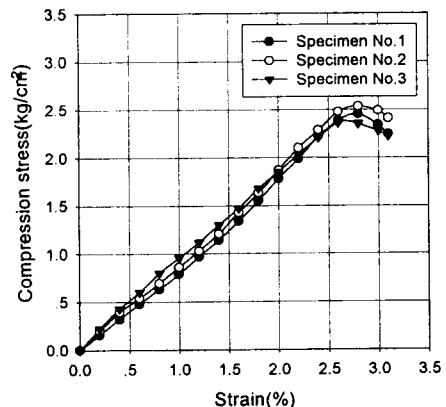


Fig. 5 Stress-strain curve for paper ash

평균 일축압축강도⁸⁾인 0.38kg/cm²에 비해서는 6.5배 정도의 큰 강도를 나타내었다. 이와 같이 비교적 단위중량이 작고, 높은 함수비 상태임에도 불구하고 높은 강도를 나타내는 것은 제지회에 포함되어 있는 석회성분이 물과 반응하여 응결 경화하는 잠재수경성이 있기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 제지회의 파괴시 변형률은 0.026~0.028 정도로 나타났다.

3.6 노상토 지지력특성

Fig. 6은 제지회에 대한 노상토 지지력 시험 결과와 CBR값과 건조단위중량의 관계를 나타낸 것으로 0.9 γ_{dmax} 와 0.95 γ_{dmax} 에 대응하는 제지회의 수정 CBR값은 각각 32.3%와 34.5%로 토공용 재료의 품질기준(하부노상 5이상, 상부노상 10이상⁶⁾)을 만족하는 높은 CBR 값을 갖고 있기 때문에 도로의 성토에 사용 가능할 것으로 여겨진다. 이러한 분석은 수정 CBR 값만을 기준으로 살펴본 것이므로 실제 시공가능성을 위해서는 내구성, 동결융해 저항성에 관한 검토가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

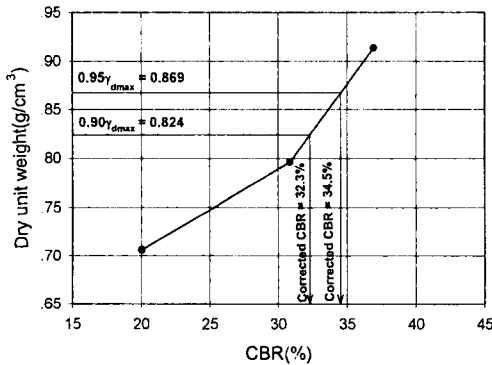


Fig. 6 Dry unit weight-CBR curve for paper ash

한편, 제지회의 단위중량이 일반 성토재에 비해 작고, 높은 함수비임에도 불구하고 높은 수정 CBR값을 나타내는 것은 제지회에 포함되어 있는 실리카(SiO₂)와 석회(Ca)성분의 포졸란 반응에 의한 수경성 때문이라고 판단된다. 제지회의 수정 CBR 값은 플라이애쉬의 수정 CBR 값 1.0~1.6%에 비해 21.6~34.5배정도 크게 나타나

CBR 측면에서는 제지회가 플라이애쉬에 비해 상당히 우수한 특성을 갖는 것으로 판단된다. 한편, 제지회의 팽창률은 0.05~0.07% 정도로 플라이애쉬의 팽창률(0.13~3.06)에 비해 상당히 작은 값을 나타내고 있어 제지회의 팽창성은 낮은 것으로 판단된다.

3.7 미시구조 및 화학성분 분석

제지회의 입자모양과 배열상태를 알아보기 위해 주사전자현미경을 이용하여 SEM(Scanning Electron Microscope)분석을 실시하였으며, Fig. 7은 제지회 입자를 3000배로 확대한 것으로 제지회는 입자들이 서로 불규칙하게 엉켜 있는 형태로 둥근 모양의 작은 입자에서부터 박판 모양의 비교적 큰 입자들이 불규칙한 분포를 하고 있으며, 입자사이에 많은 간극이 존재함을 알 수 있다.



Fig. 7 SEM for paper ash

Table 4는 EDS 분석결과 제지회와 플라이애쉬의 화학성분을 나타낸 것으로 제지회는 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 석회(CaO), 산화제2철(Fe₂O₃)이 전체의 88% 정도를 차지하는 주성분이고, 그 밖의 성분으로 고토(MgO) 등이 존재한다. 한편, 플라이애쉬는 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화제2철(Fe₂O₃)이 전체의 80~90%를 차지하는 주성분이고, 그밖에 칼륨(K₂O),

석회(CaO) 등이 존재한다. 특히, 제지회에는 석회의 구성비율이 18.49%로 높게 나타나 포졸란 반응에 의한 자경효과(self hardening effect)가 클 것으로 생각된다.

Table 4 Chemical constituent of paper and fly ash
(unit : weight %)

Element	Paper ash	Fly ash
SiO ₂	37.20	55.69~56.97
Al ₂ O ₃	26.05	21.36~24.86
CaO	18.49	0.95~2.04
Fe ₂ O ₃	6.20	4.83~4.87
MgO	2.98	0.56~1.39
SO ₃	0.59	-
K ₂ O	0.48	0.65~6.31
TiO ₂	-	0.79~0.84
P ₂ O ₃	-	0.22~0.36

3.8 용출특성

용출시험 결과 유해물질이 기준치이상 함유되어 있으면 지정폐기물로 취급되어 재활용이 불가능하게 되며, 제지회에 대한 용출시험 결과를 나타내면 Table 5와 같다. 이로부터 모든 평가 항목에서 유해물질 함유량이 거의 없거나 기준치 이하로 나타남으로서 일반폐기물로 분류할 수 있으며, 본 시료를 토공재 등으로 활용시 중

Table 5 Heavy metal leached concentration
(unit : mg/l)

Examination item	Standard value	Paper ash	Fly ash
Cd	0.3	0.011	ND
Pb	3.0	0.032	ND
Cu	3.0	0.002	0.0007~0.004
Hg	0.005	ND ^{*1)}	ND
CN	1.0	ND	ND
Cr ⁶⁺	1.5	0.055	0.0707~0.216
As	1.5	0.001	0.025~0.055
Org.P	1.0	ND	-
Trichloroethylene	0.3	ND	-
Tetrachloroethylene	0.1	ND	-

*1) ND : not detected

금속에 의한 문제를 야기시키지 않을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 제지공장에서 발생하는 산업 폐기물인 제지회의 활용 가능성을 규명하기 위하여 일련의 실험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제지회의 최대건조단위중량은 플라이애쉬의 59~76.9% 정도로 침하와 토압면에서 제지회가 플라이애쉬나 일반 흙에 비해 우수한 공학적 특성을 갖고 있어 경량 성토재로 활용 가능성이 있다고 판단된다. 한편, 제지회의 압축지수는 플라이애쉬에 비해 0.94~2.2배정도 크게 나타났지만, 최종 재하후의 간극비의 변화율이 8.29~11.60%로 제지회의 압축성은 적다고 할 수 있다.
- 2) 제지회의 투수계수는 함수비 변화에 따라 큰 차이를 나타내었으며, 최적함수비 +5%에서 가장 작은 값인 1.89×10^{-7} cm/sec로 나타났으며, 이것은 차수재로 사용 가능한 투수계수의 기준에 근접하는 값으로 제지회에 약간의 첨가제를 혼합한다면 차수재로 사용가능성이 있다고 판단된다.
- 3) 제지회의 일축압축강도는 2.45kg/cm²로 플라이애쉬에 비해 2~3배 크게 나타났으며, 복토재의 일축 압축강도기준(0.5kg/cm² 이상)을 만족하고 있다. 또한, 수정 CBR값만을 기준으로 할 때 제지회는 토공재료의 품질기준을 만족하고 있으므로 도로성토재로 사용가능성이 있다고 판단된다. 그러나 실제 시공가능성을 위해서는 내구성과 동결융해 저항성에 관한 검토가 필요하다.
- 4) 제지회에는 석회(CaO)의 구성비율이 플라이애쉬에 비해 9배 이상 높게 나타나 포졸란 반응에 의한 자경효과가 클 것으로 판단된다. 용출시험 결과 제지회는 폐기물공정시험법에서 제시하는 유해성 중금속이 기준치 이하로 나타남으로서 토공재로 활용시 중금속 등에 의한 문제는 없을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Gray, D.H., and Lin, Y.K., "Engineering Properties of Compacted Fly Ash", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM4, pp. 361~380, 1972.
- 2) Horace, K. Moo-young & Thomas, F.Z., "Geotechnical Properties of Paper Mill Sludge for Use in Landfill Cover", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 9, pp. 768~775, 1996.
- 3) Kraus, J.F., Benson, C.H., and Wang, X., "Laboratory and Field Hydraulic Conductivity of Three Compacted Paper Mill Sludges", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol. 123, No. 7, pp. 654~662, 1997.
- 4) Krizek, R.J., and Atmatzidis, D.K., "Geotechnical Properties and Landfill Disposal of FGD sludge", Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, No. 13, pp. 625~639, 1987.
- 5) U.S. Environmental Protection Agency, "Construction Quality Assurance for Hazardous Waste Land Disposal Facilities, Technical Guidance Document", EPA/530-SW-86-031, US EPA. 1986.
- 6) 건설부, "도로공사 표준 시방서", pp. 74~79, 1986.
- 7) 고용일, "석탄회의 도로 성토재료로서의 활용에 관한 실험적 연구", 한양대학교대학원 박사학위논문, pp. 1~86, 1992.
- 8) 박성영, 오다영, "국내 연약지반의 지역별 공학적특성", 대한토목학회지, Vol. 46, No. 9, pp. 76~79, 1998.
- 9) 정문경, 서경원, 이용수, "플라이애쉬 혼합차수재의 투수특성과 미세구조 분석", 한국지반공학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 109~124, 1998.
- 10) 한국전력공사, "성토재료로서의 석탄회 이용방안 연구", 한국전력공사 기술연구원 연구보고서, pp. 1~417, 1992.