

## 지반개량재로서 제지회의 활용에 관한 연구

### A Study on the Application of Paper Fly Ash as Stabilization/Hardening Agent

이용안\* · 이홍주\*\* · 김유성\*\*\*  
Lee, Yong-An · Lee, Hong-Ju · Kim, You-Seong

#### Abstract

Examined a practical use possibility of paper fly ash that is industrial by-product as a stabilization/hardening agent. Performed unconfined compression test, scanning electron microscopy and pH analysis etc. for 100% paper fly ash-soil mixtures and each paper fly ash-soil mixtures that add cement as the second addition and sulfate component of small quantity for strength promotion and so on. In all cases, strength of admixtures increased according as curing time and mixing ratio increases but almost strength is revealed at mixing early and expressed maximum strength increase efficiency at mixing ratio 9% with raw soil. Compare with the case that use paper fly ash only, in case of cement amount 10~30% was included in paper fly ash, strength of admixtures increases two times and 40% was included, that increases from five to eight times.

**Keywords** : Paper fly ash, Stabilization/Hardening agent, Admixture, Cement

#### 요 지

산업부산물인 제지회의 연약지반 표층고화처리 등을 목적으로 하는 지반개량재로서의 활용가능성을 모색하였다. 100% 제지회와 강도증진 등을 위한 2차 첨가재로써 시멘트 및 소량의 황산염(sulfate)성분을 첨가한 각각의 제지회 혼합토에 대하여 일축압축강도, 전자주사현미경관찰, pH분석 등을 수행하였다. 모든 경우에 있어서 양생이 진행됨에 따라서, 혼합비의 증가에 따라서, 혼합토의 강도는 증가하나 혼합초기에 거의 대부분의 강도가 발견되며 강도증가 효율면에서는 흙과의 혼합비가 9% 내외에서 최대 효율을 나타낸다. 제지회만을 사용하는 경우에 비하여 제지회에 함유된 시멘트량이 10~30%까지는 약 2배의 강도가 증가하며 시멘트 함유량이 40%일 경우에는 5~8배 정도 강도가 증가한다. 포졸란 반응 및 수화물의 생성에 유리한 환경을 나타내는 조건은 시멘트 함유량이 20%이상의 제지회를 7%이상 흙과 혼합했을 경우이다. 제지회만을 사용하는 경우에는 수화반응 또는 포졸란 반응이 활발하지 못하며, 흙과의 혼합비가 10% 이상에서 활발하게 유산석회수화물이 생성된다.

**주요어** : 제지회, 지반개량재, 혼합토, 시멘트

\* 정회원 · 전북대학교 토목공학과 박사과정  
\*\* 전북대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*\* 정회원 · 전북대학교 토목환경공학부 부교수

## 1. 서론

산업부산물인 소각재의 활용방안에 대한 지반공학 측면에서의 연구는 주로 전력산업에서 발생하는 석탄회에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 최근 들어 펄프산업이 발전하면서 발생량이 증가하고 있는 제지회의 활용방안에 대한 연구도 조금씩 이루어지고 있다. 그 예로서, 제지회 자체를 성토재료로서의 사용, 벤토나이트와 혼합하여 차수재료로서의 사용에 관한 연구 등이 있다. 본 연구에서는 제지회를 대량 재활용하기 위하여, 연약지반의 표층고화처리 등을 목적으로 하는 지반개량재로서 제지회의 활용 가능성을 검토하고자 하였다. 지반개량재는 대상지반 내에서 수화반응, 포졸란반응 등의 작용으로 대상지반의 역학적 성능을 개선하게 된다. 이러한 작용은 주로 지반개량재의 화학적 성분에 의한 것으로, 기존의 지반개량재는 시멘트, 생석회 등이 주를 이루고 있다. 그러나 이 두가지 제품은 모두 2차 제품이므로 발전설비나 생산설비에서 발생하는 산업부산물인 석탄회나 제지회를 지반개량재로 이용할 수 있다면, 일단은 경제적인 측면에서 비교우위를 차지할 수 있을 것이다. 그러나 석탄회 뿐만 아니라 제지회는 시멘트 및 석회계 지반개량재에 비하여 경제성 및 양호한 포졸란 반응성 등의 장점을 가지고 있음에도 불구하고 그 자체만으로 화학적 성분의 구성상 지반개량재로서의 강도발현 등이 부족한 경우가 많다. 한편, 석탄회나 제지회는 화학적 구성성분의 비율이 약간 다를 뿐 성분의 구성은 동일하다고 할 수 있으나 석탄회의 경우도 원탄 및 소각공정에 따라 지반재료 및 혼합재로서 반응성에 차이가 발생하므로 제지회에 대한 별도의 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 제지회 및 혼합토의 고결화 효과를 증대시키기 위하여 제지회를 주재료로 하고 2차 첨가재로써 시멘트와 소량의 황산염 등을 첨가하고 흙과 혼합하여 일축압축강도, pH분석, SEM(전자주사현미경)관찰 등

을 통해 제지회 혼합토의 개량효과 및 그 반응특성에 미치는 영향을 비교 분석하고 제지회를 지반개량재로서 이용할 수 있는가의 여부를 확인하고자 하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1 제지회의 화학적 성분 및 특성

본 연구에 사용한 제지회는 국내의 ○○제지공장에서 발생하는 것으로 종이를 생산하는 공정에서 발생하는 제지슬러지(sludge)의 수분 제거과정을 거치고 소각로에서 소각된 후에 전기집진기에 의하여 포집되어진 비회(fly ash)이다. 이것은 소위 인공 포졸란재료로써 성분의 구성비율은 표 1에 나타낸 바와 같이  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ 가 전체의 76.6% 정도로 대부분을 차지하고 있으며 그 외에  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  등의 성분들로 구성되어 있다. 이러한 성분들은 흙 속의 간극수와 반응하여 칼슘실리케이트 수화물(CSH) 및 칼슘알루미늄에이트 수화물(CAH) 등의 새로운 수화물 및 포졸란물질을 장기적으로 서서히 생성하게 되어 대상지반의 강도를 증가시키게 된다.  $\text{CaO}$ 는 간극수의 소화와 함께 포틀랜드아이트( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )를 생성하게 되고 자경효과에 의한 초기 강도를 결정짓게 되며 포틀랜드아이트에서 방출되는  $\text{Ca}^{2+}$ 이온은 흙속에 포함되어 있는 규산염( $\text{SiO}_2$ )이나 알루미늄산염( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )과 반응하여 역시 칼슘실리케이트 수화물(CSH) 및 칼슘알루미늄에이트 수화물(CAH) 등을 생성하게 된다. 이러한 반응메카니즘은 시멘트와 본질적으로 동일하다. 그러나 그림 1에서 나타낸 바와 같이 시멘트 및 생석회와 제지회의 구성성분을 비교해 보면  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등은 제지회에 다량 함유하고 있어 장기적인 포졸란 반응성은 유리할 것으로 판단되나,  $\text{CaO}$ 의 양은 비교적 적어 혼합 초기의 강도발현 효과는 불리할 것으로 판단된다.

표 1. 제지회의 화학적 구성 성분

구분	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	Ig-Loss
case1 (제지회)	30.0	13.2	1.44	33.4	6.48	5.59	0.98	0.39	0.57	7.6

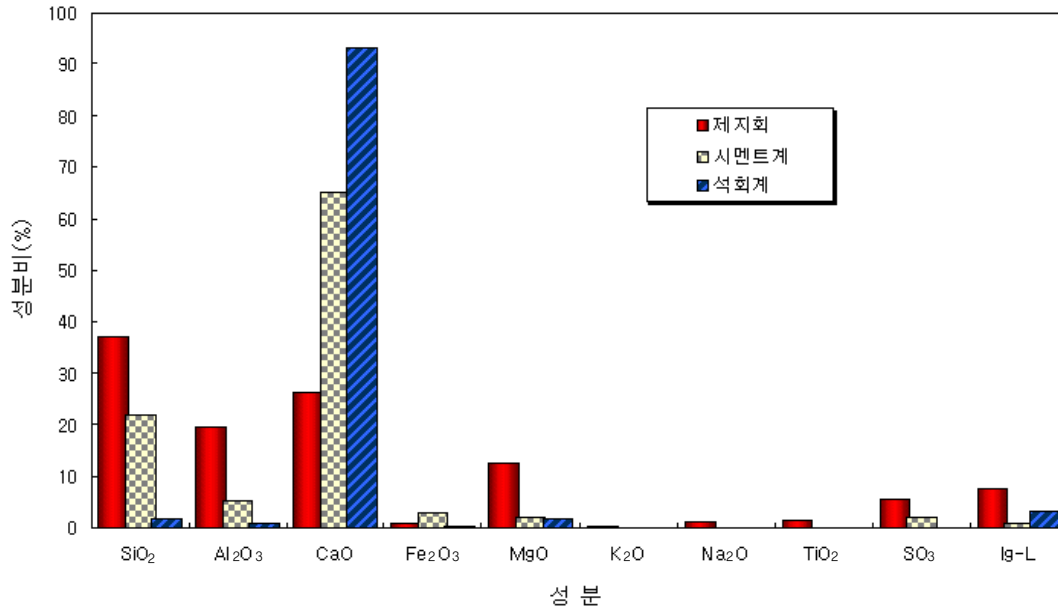


그림 1. 각 고화재의 화학적 성분 비교

따라서, 제지회에 2차 첨가제로서 시멘트와 소량의 황산염을 첨가하여 양호한 포졸란 반응성과 함께 높은 강도발현과 내구성의 증대를 모색하였다. 표 2는 고화재로서 이용가능성 및 공학적 특성을 검토하기 위하여 제지회에 포함된 첨가제의 양을 달리하여 나타낸 것이다. 여기에서 시멘트는 위에서 언급한 바와 같이 주로 강도발현을 목적으로 하여 중량비율 10~40%까지 변화시켜 첨가하였고, 황산염성분은 각각 무수석고(CaSO<sub>4</sub>)와 유산알루미늄(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)으로서 주로 CaO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 SO<sub>3</sub>로 구성되어 있어 흡과의 반응특성이 우수하며, 각각의 경우에 모두 전체 중량의 5%씩 첨가하였다. 이 성분은 에트린자이트(ettringite)라고 하는 수화물을 생성하는데 도움이 되는 것으로 유기질을 함유한 토질에서도 반응특성이 우수하고 침상결정으로서 혼합토의 간극을 보충하도록 결정화가 이루어진다. 제지회 성분에 포함되어 있는 SO<sub>3</sub>와 인위적으로 첨가한 두 가지의 황산염성분은 모두 에트린자이트 수화물의 생성에 관여하는 성분들이다.

표 2. 2차 첨가제가 함유된 제지회의 성분

구분	제지회 (%)	시멘트 (%)	CaSO <sub>4</sub> (%)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (%)
case1	100	0	0	0
case2	80	10	5	5
case3	70	20	5	5
case4	60	30	5	5
case5	50	40	5	5

## 2.2 대상토의 물리적 성질

일반적으로 연약지반이라 함은 함수비가 액성한계 이상이고 일축압축강도가 0.25kgf/cm<sup>2</sup>이하인 점성토, 실트질 흙이다. 표층안정처리에 적용하는 고화재는 이러한 흙을 대상으로 한다. 따라서 본 연구에서는 강으로 유입되는 소하천에서 채취한 생활폐수 및 각종 유기물이 포함된 점성토를 대상으로 하였다. 물리적 특성은 표 3에 나타내었으며 입도분포는 그림 2에 나타내었다. 대상 점성토는 일축압축강도가 거의 0에 가까운 상태로써 #200체 통과량이 98%로 세립질이며 공학적 분류로는 압축성이 작은 점성토(CL)로 분류된다.

표 3. 대상 점성토의 물리적 특성

$\omega_n$ (%)	$G_s$	$\omega_L$ (%)	$\omega_P$ (%)	$I_p$	USCS
56	2.674	39.44	21.53	17.94	CL

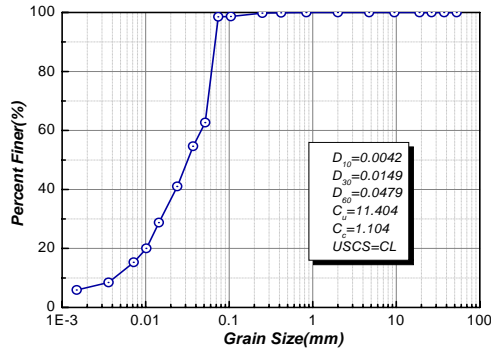


그림 2. 대상 점성토의 입도분포

### 2.3 실험방법

건조된 대상토를 액성한계에 달하는 함수비 상태에서 제지회 및 2차 첨가재가 함유된 제지회와 중량비율로 3%, 7%, 10%, 15%의 혼합비로 혼합하고 6×12cm 황동몰드에 습윤단위중량 1.8tf/m<sup>3</sup>으로 일정하게 다짐하여 분리

한 후 외부 대기에 의한 함수비 변화를 차단하기 위하여 비닐 랩(wrap)으로 싸고 평균온도 23°C의 항온수조에서 0일, 3일, 7일, 14일, 27일 양생하여 혼합비와 양생일에 따른 일축압축강도, pH, 전자주사현미경(SEM)관찰을 실시하였다. 여기서 중량비율은 대상토와 각각의 제지회(case1~case5)를 혼합한 중량에 대한 각 제지회의 중량비를 나타낸다.

### 3. 혼합토의 일축압축강도

#### 3.1 양생에 따른 일축압축강도특성

일반적으로 지반개량재에 의한 대상지반의 소요강도를 파악하기 위한 방법으로는 대상지반의 흙을 채취하여 일정 비율로 혼합하고 양생하여 일축압축시험을 수행한다. 따라서 본 연구에서도 표 2에 나타난 각각의 case에 해당하는 제지회 혼합토의 혼합비별, 양생일별 일축압축강도를 측정하여 그 변화양상을 관찰하였다. 각각의 경우에 대하여 3회의 일축압축강도를 측정하였고 표 4에 그 평균값을 정리하여 나타내었다. 그림 3~그림 5는 양생이 진행됨에 따라 각각의 case별 혼합토의 강도증가 경향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 혼합비가 클수록 양생에 따른 일축압축강도의 변화는 크고, 상대적으로 혼합비가 작을수록 양생에 따른 강도의 변화는 미미하게 나타나고 있다.

표 4. 제지회 및 2차 첨가재를 함유한 제지회 혼합토의 일축압축강도

구분	혼합비	일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
		0일 재령	3일 재령	7일 재령	14일 재령	28일 재령
case1 (cement 0%)	3 %	0.168	0.171	0.247	0.217	0.217
	7 %	0.544	0.575	0.655	0.655	0.588
	10%	0.892	1.128	0.873	0.884	0.954
	15%	2.061	2.352	2.155	2.513	3.078
case2 (cement 10%)	3 %	0.310	0.371	0.387	0.426	0.491
	7 %	0.931	1.090	1.140	1.164	1.247
	10%	1.186	1.824	2.259	1.995	2.099
case3 (cement 20%)	3 %	0.350	0.448	0.595	0.416	0.512
	7 %	0.934	1.228	1.416	1.398	1.433
	10%	1.261	1.874	2.399	2.499	2.516
case4 (cement 30%)	3 %	0.403	0.453	0.477	0.494	0.572
	7 %	1.067	1.319	1.382	1.419	1.444
	10%	1.397	2.362	2.760	2.946	2.962
	15%	2.725	6.638	6.943	6.999	8.062
case5 (cement 40%)	3 %	0.410	0.461	0.503	0.504	0.536
	7 %	0.803	2.678	3.075	3.343	3.377
	10%	1.633	6.811	6.991	7.484	7.768
	15%	2.841	14.135	15.086	16.896	18.313

또한 혼합 직후, 즉 양생 0일에서 3일 사이에 거의 대부분 강도가 발현되며 양생 3일 이후로는 강도증가가 미미하게 나타나고 있다. 이것은 각각의 양생일에 대하여 28일 양생 강도에 대한 비로써 정규화하여 나타낸 그림 6~그림 8로 잘 설명되어진다. 각각의 그림에서와 같이 각 case의 경우에 모두 28일 양생 시편의 강도를 기준으로 3일 양생 기간동안 75~90% 이상의 강도가 나타나며, 그 이후로는 매우 서서히 강도증가가 일어나고 있어 혼합초기에 혼합토의 강도가 거의 결정되어짐을 알 수 있다. 또한 흙과의 혼합비가 클수록, 제지회에 함유된 시멘트량이 많을수록, 3일까지의 강도발현 속도가 상대적으로 빠르게 나타나고 있다. 이와 같이 혼합초기에 강도증가가 거의 이루어지는 것은 제지회 및 2차 첨가제를 함유한 제지회를 혼합함에 따라 함수비가 감소하게 되며 이것은 생석회 성분에 의한 자경효과에 의한 것이고 이후, 양생이 진행되면서 여타의 포졸란 물질의 생성과 함께 서서히 강도의 증가가 이루어지는 것으로 판단된다.

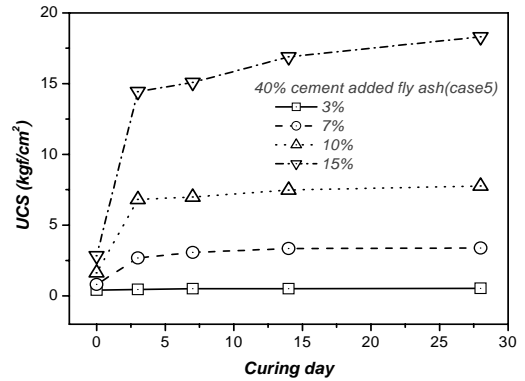


그림 5. 양생에 따른 강도변화(case5)

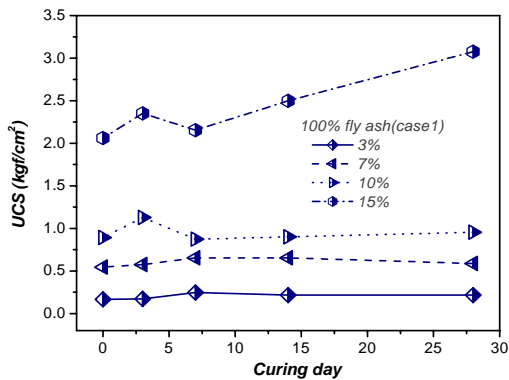


그림 3. 양생에 따른 강도변화(case1)

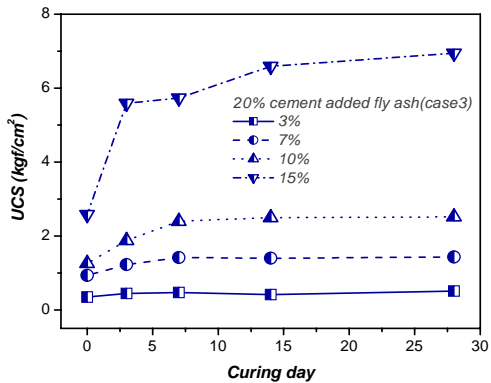


그림 4. 양생에 따른 강도변화(case3)

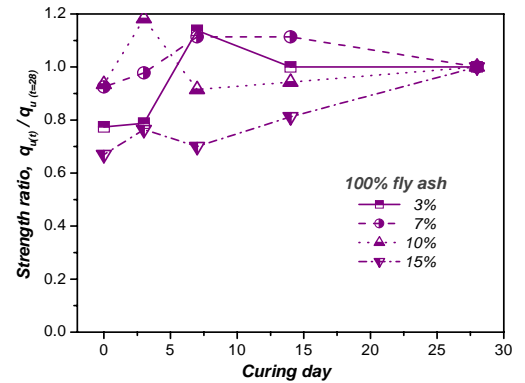


그림 6. 양생에 따른 강도발현속도(case1)

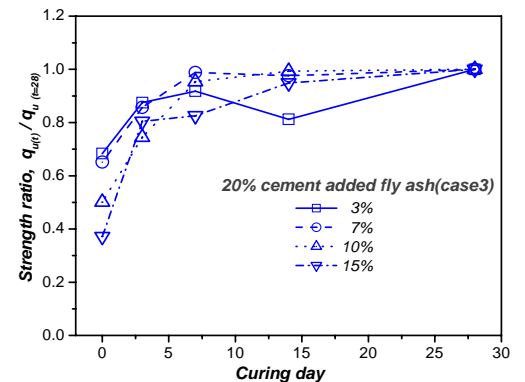


그림 7. 양생에 따른 강도발현속도(case3)

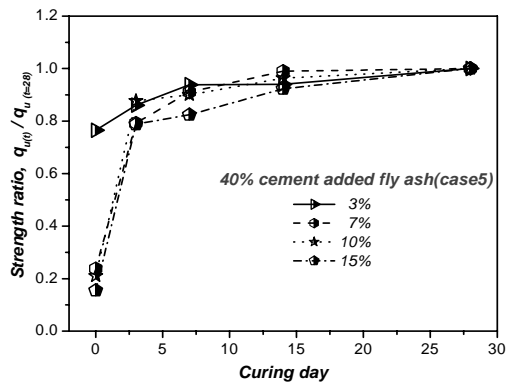


그림 8. 양생에 따른 강도발현속도(case5)

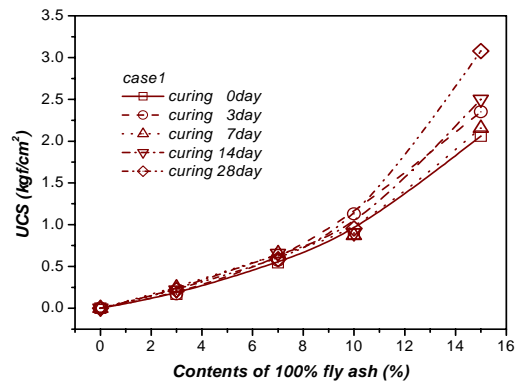


그림 9. 혼합비에 따른 강도변화(case1)

### 3.2 혼합비에 따른 일축압축강도특성

그림 9~그림 11은 혼합비의 증가에 따른 일축압축강도 증가 경향을 나타낸 것으로써 그림에서 보는 바와 같이 자립할 수 없을 정도로 연약한 원시료(혼합비 0%)에 제지회 및 2차 첨가제가 함유된 제지회의 혼합비가 증가할수록 강도는 지속적으로 증가하며 그 증가경향은 더욱 커지고 있음을 알 수 있다. 양생에 따른 강도의 차이는 혼합직후(0일 양생)를 제외하고는 그다지 크지 않으며, 다만 혼합비가 클수록(15%) 양생에 의한 강도차이가 비교적 크게 나타나고 있다. 한편, 각각의 혼합비에서의 일축압축강도를 3% 혼합비에서의 일축압축강도의 비로 정규화하여 로그 함수로 나타내어 보면 그림 12~그림 14와 같다. 이와 같이 정규화 하면 양생에 의한 강도비의 차이는 혼합직후를 제외하고는 더욱 차이가 나지 않으므로 혼합비에 따른 강도비율은 2차 포물선의 형태로 회귀분석되어진다. 이것은 혼합비가 증가할수록 실질적인 강도는 지속적으로 증가하게 되나 강도증가 효과면에서는 이와 같이 임의의 혼합비 이상에서는 둔화되는 경향을 나타내는 것이다. 따라서 혼합비 3%와 15% 범위 내에서 접선을 설정하게 되면 강도 증가비가 변곡점을 나타내는 혼합비를 설정할 수 있게 된다. 각각의 case별로 이와 같이 설정하게 되면 최대의 강도증가 효율을 나타내는 혼합비는 모두 9% 내외에서 결정되게 된다.

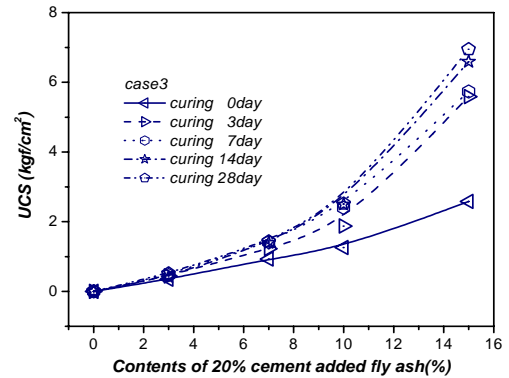


그림 10. 혼합비에 따른 강도변화(case3)

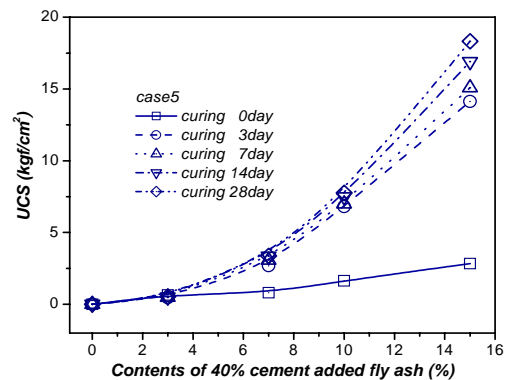


그림 11. 혼합비에 따른 강도변화(case5)

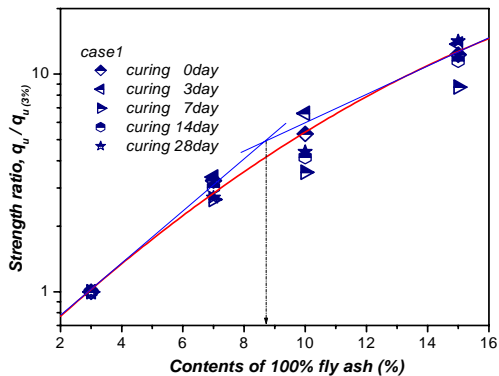


그림 12. 혼합비에 따른 강도증가율(case1)

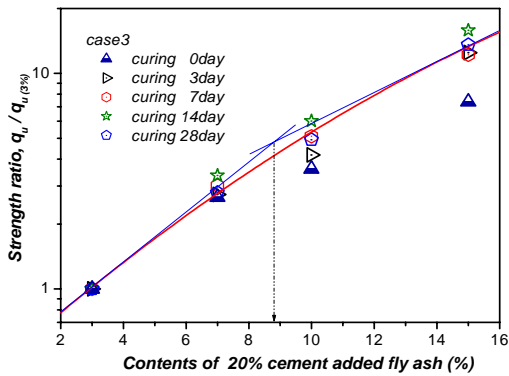


그림 13. 혼합비에 따른 강도증가율(case3)

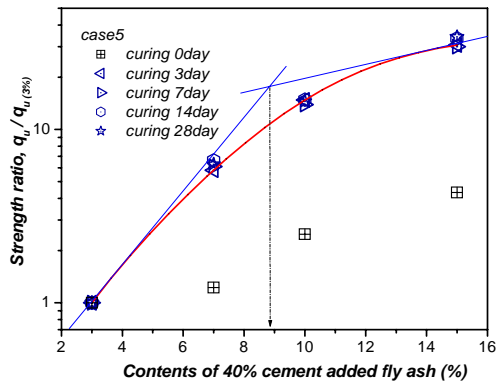


그림 14. 혼합비에 따른 강도증가율(case5)

### 3.3 2차 첨가재 함유량에 따른 일축압축강도특성

시멘트의 함유량은 혼합토의 강도발현에 직접적인 영향을 미치는 것으로 그림 15와 그림 16은 양생 7일과 28일

에서 각각의 case(제지회에 함유된 시멘트량)에 대한 강도 변화를 시멘트 함유량 0%, 즉 제지회 100% 조건에서의 강도비로 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 나타나듯이 제지회를 100% 사용하는 경우에 비하여 제지회에 시멘트를 첨가함으로써 혼합토의 강도증가를 도모할 수 있다. 제지회에 함유된 시멘트량이 10~30%까지는 시멘트 함유량의 증가에 따라서 강도증가 효과는 비교적 크게 차이가 나지 않으며 흙과의 혼합비에 따라 다소 차이는 있으나 약 2배 정도의 강도증가 효과가 있다. 시멘트 함유량이 40%에서는 5~8배 정도로 현저하게 강도가 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 강도증진을 목적으로 할 경우에 시멘트의 함유량이 30% 이상에서 높은 강도발현을 기대할 수 있음을 의미하나 시공목적에 따라서 시멘트의 함유량을 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

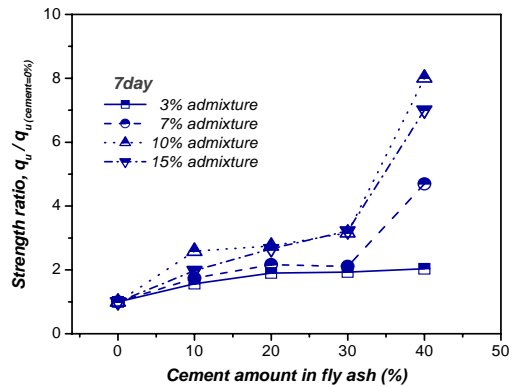


그림 15. 제지회에 함유된 시멘트량에 따른 강도증가율(7일 양생)

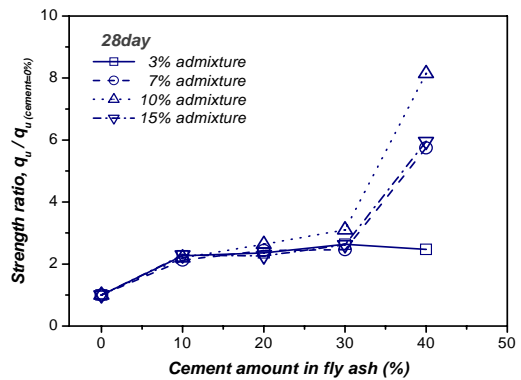


그림 16. 제지회에 함유된 시멘트량에 따른 강도증가율(28일 양생)

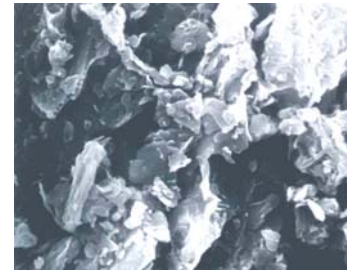
#### 4. 수화반응 및 포졸란반응 분석

위와 같은 혼합토의 강도증가 메카니즘은 제지회 및 2차 첨가재 혼합에 따른 수화반응과 포졸란반응에 의한 수화물의 생성 및 토립자의 구조변화 내지 면모화에 의한 것으로 요약할 수 있다. 따라서 혼합토에 생성되는 수화물 또는 포졸란 반응물질의 양과 종류는 고화효과를 판단할 수 있는 근거가 되는데, 이러한 수화물을 확인하는 방법으로는 x-선 회절분석(XRD) 및 전자주사현미경분석(SEM) 등이 주로 사용된다. 그러나 XRD 분석은 생성물질의 결정성이 낮은 경우 뚜렷한 반응생성 여부를 확인하기 어려우며, 비슷한 회절각도를 가지는 다른 일반광물에 가려 확인하기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서도 XRD 분석을 실시하였으나 규산석회수화물이나 에트린자이트 등 여타의 수화물의 생성을 나타내는 회절각도에서 점토광물의 회절피크(peak)로 인하여 그 생성여부를 확인하기가 불투명하므로 본 논문에서는 SEM 관찰에 의한 혼합토의 포졸란 반응특성을 분석결과를 제시하였다.

##### 4.1 전자주사현미경(SEM) 관찰

그림 17(a)와 (b)는 시멘트가 20% 함유된 제지회(case3) 혼합비 7%와 10% 혼합토의 28일 양생한 경우의 전자주사현미경 사진으로 점토와의 혼합비가 7%까지는 뚜렷한 수화물의 징후를 발견할 수 없었으나 10%이상에서는 침상 결정의 에트린자이트(ettringite)가 점토입자를 고루 덮고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 일정량 이상의 혼합비에서 수화반응 및 포졸란 반응이 보다 활발하게 발생하는 것이다. 또한, 에트린자이트를 제외한 규산석회수화물 등은 형태가 불규칙한 다각형 판상 구조를 이루고 있기 때문에 판상의 점토입자와의 구분이 어려운 것으로 판단된다. 그림 17(c)~(e)와 앞의 (b)에 나타낸 바와 같이 case1(제지회 100%)을 제외한 대부분의 경우에 정도의 차이는 있으나 이와 같이 흙과의 혼합비가 10% 이상에서 에트린자이트의 생성을 확인할 수 있다. 이와 같은 에트린자이트의 생성은 제지회에 인위적으로 양을 고정시켜 첨가한 황산염 등에 의한 것으로, 에트린자이트의 생성량의 많고 적음이 일정하지 않은 것은 시편의 극히 일부분을 관찰하기 때문으로 생각되며, 제지회에 첨가된 시멘트의 양에 의하여 에트린자이트가 생성 또는 그 양을 결정하는 것은 아니라고 판단된다. 한편, 흙과의 혼합비가 10% 미

만이거나 제지회 100%(case1)만을 사용하는 경우 에트린자이트 등 수화물의 생성은 확인할 수 없거나 불분명하지만, 그림 17(g) 및 (h)에 나타낸 바와 같이 그림 17(f)의 점토와 비교해 볼 때 입자구조가 단립화한 경향을 나타낸다. 이러한 입자의 구조변화 역시 강도증가의 원인이 되며 수화물이 덮여있는, 혼합비가 10% 이상의 경우에서도 이러한 입자구조의 변화는 병행되고 있다.



(a) case3\_7%혼합\_28일



(b) case3\_10%혼합\_28일



(c) case2\_10%혼합\_28일

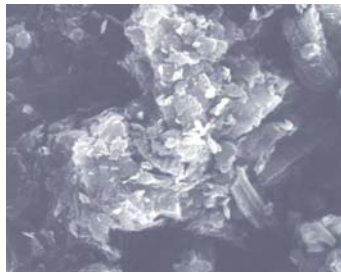


(d) case4\_10%혼합\_28일

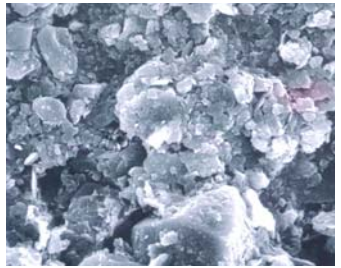




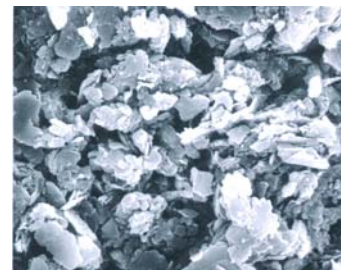
(e) case5\_10%혼합\_28일



(f) 대상점토



(g) case1\_10%혼합\_3일



(h) case4\_3%혼합\_3일

그림 17. case별 혼합토의 혼합비, 양생일별 SEM 사진

#### 4.2 pH 시험분석

pH는 혼합토에 포함되어 있는 규산염이나 알루미늄산염의 포졸란 반응성을 좌우하는 파라미터로서 강알칼리 환경에

서 규산염과 알루미늄산염의 용해도가 증가하고  $Ca^{2+}$  이온과의 양이온 교환반응 및 포졸란반응이 발생하게 된다. Davison et al.(1965)은 생석회를 이용한 연구에서 포졸란반응이 잘 발생하기 위한 최소값으로 10.5를 제시한 바 있다. 본 연구에 사용한 제지회 및 2차 첨가재를 함유한 제지회의 pH를 표 5에 나타내었는데, 제지회는 pH가 12.27로써 강알칼리성을 띤다. 이에 반하여 시멘트와 소량의 황산염성분을 첨가한 각각의 경우에는 제지회보다 pH가 다소 작으며 시멘트 함유량이 증가할수록 pH는 다시 서서히 증가하고 있다. 알칼리성의 시멘트가 증가함에도 불구하고, pH가 100% 제지회보다 작아지는 것은 제지회에 첨가한, 소량이지만 2가지의 강산성(pH=4) 황산염 등에 따른 것이다.

표 5. case별 pH

구 분	점토	case1	case2	case3	case4	case5
pH	7.10	12.27	10.27	10.51	10.62	11.40

이상과 같은 각각의 조건에서 점토와 혼합하였을 때 혼합토의 pH 변화를 그림 18~그림 20에 나타내었다. 시멘트 함유량이 높은 제지회를 사용할수록 pH는 증가하고 있으며 모든 경우에 있어서 흙과의 혼합비가 증가할수록 pH도 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 그 증가율은 점차 감소하여 28일 양생시 약 pH 11~11.5 정도로 수렴되고 있다. 한편 양생일의 증가에 따라서 pH는 감소하고 있지만 그 차이는 매우 적다. pH가 가장 높은 100% 제지회를 사용한 혼합토의 pH가 가장 작게 나타나고 있는데 이것은 시멘트를 함유한 경우와 달리 제지회 자체는 점토와 혼합되므로써 알칼리성을 유지하지 못하고 중화되기 때문인 것으로 판단된다.

Davison et al.(1965).이 제시한 최소 pH에 대하여 시멘트가 20% 함유된 제지회를 7% 이상 점토와 혼합했을 경우 그 이상을 유지하고 있으므로 장기적인 포졸란 반응이 활발할 것으로 판단되며, 이와 같이 pH 결과로 혼합효과를 간접적으로 확인할 수 있으며, 최소한의 혼합비 및 제지회에 포함되는 시멘트 함유량을 결정할 수 있을 것이다.

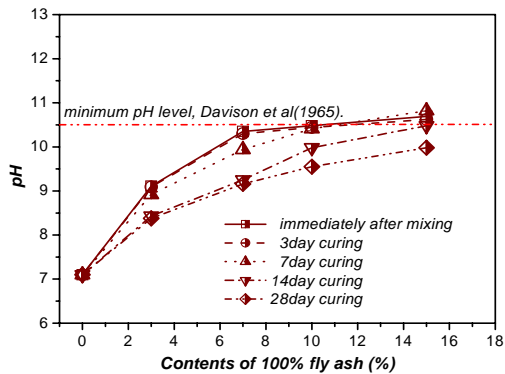


그림 18. 혼합비에 따른 pH의 변화(case1)

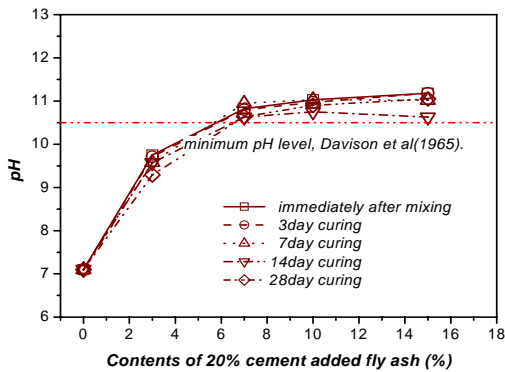


그림 19. 혼합비에 따른 pH의 변화(case3)

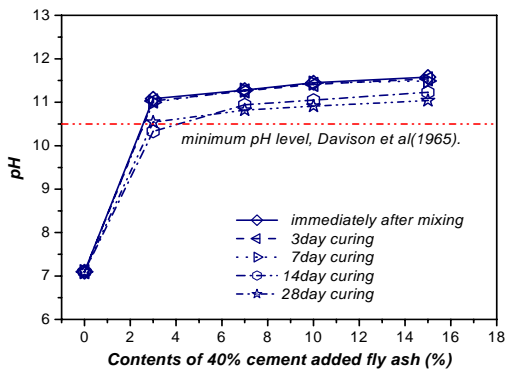


그림 20. 혼합비에 따른 pH의 변화(case5)

## 5. 결론

제지회를 고화재로서 활용하기 위하여, 점성토를 대상으로 일축압축강도특성 및 대상토와의 반응특성을 향상시키 고자 시멘트 및 소량의 황산염 등을 첨가하여 혼합토의 공학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 양생이 진행됨에 따라 모든 경우에 강도가 증가하고 있으나 28일 양생한 시편의 강도를 기준으로 혼합초기(3일 이내)에 이미 75~90% 이상의 강도가 발현되며 그 이후로의 강도증가는 매우 더디게 발생하여 혼합초기에 거의 대부분의 강도가 결정되어진다.
2. 혼합비의 증가에 따라 모든 경우에 강도는 지속적으로 증가하고 있으나 강도증가 효율면에서는 흙과의 혼합비 9% 내외에서 최대 효율을 나타낸다.
3. 제지회 100%를 사용하는 경우에 비하여 제지회에 시멘트 함유량이 증가할수록 강도는 증가한다. 그러나 일정하게 강도가 증가하는 것이 아니라 시멘트 함유량이 10~30%까지는 거의 비슷하게 평균 2배 가량 강도가 증가하며, 40% 함유할 경우 5~8배 정도 일축압축강도가 증가한다.
4. 제지회만을 혼합한 경우에는 뚜렷한 수화물의 생성을 파악하기 어려우나, 제지회에 10% 이상 시멘트가 함유된 경우, 정도의 차이는 있지만 수화물이 활발하게 생성된다. 주된 생성 수화물은 침상결정의 에트린자이트로써 이것은 주로 제지회에 포함된 소량의 두 가지 황산염성분에 의한 것으로 보여지며, 유기질토에 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 흙과의 혼합비가 작으면 수화물의 생성이 미흡하여, 일정량 이상(10%)의 혼합비에서 보다 활발한 수화물이 생성됨을 알 수 있다.
5. 포졸란반응 및 수화물의 생성에 유리한 환경을 조성하는 혼합토의 pH는 시멘트 함유량이 20% 이상의 제지회를 7%이상 흙과 혼합했을 경우에 pH의 최소치 이상을 나타내어 흙과의 반응특성에 유리하다.

(접수일자 : 2002. 1. 22)

## 참 고 문 헌

1. 이용안, 김유성(2001), PFA 지반안정재 혼합토의 공학적 특성, 2001 학술발표회 논문집(CD), 대한토목학회.
2. 이홍주, 이용안, 김유성(2001), PFA 지반안정재 혼합토의 물리·화학적 반응특성에 관한 기초적 연구, 2001 학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp. 173~178.
3. 정문경, 서경원 이용수 (1998), 플라이애쉬 혼합치수재의 투수특성과 미세구조분석, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, Vol.14, No.1, pp. 109~124.
4. A. H. Lav, M. A. Lav(2000) Microstructural Development of Stabilized Fly Ash as Pavement Base Material, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.12, No.2, pp. 157~163.
5. D. T. Bergado, L. R. Anderson, N. Miura, A. S. Balasubramaniam(1996), Soft Ground Improvement, ASCE, New York, pp. 234~253.
6. J. K. Mitchell(1993), Fundamentals of Soil Behavior, John Willy & Sons Inc., New York, pp. 84~99, pp. 111~114.
7. L. K. Davidson, T. Demirel, R. L. Handy(1965), Soil Pulverization and lime migration in soil lime stabilization, Highway Research Record No.92, Highway Research Board, Washington D. C., pp. 103~126.
8. M. S. Keshawaraz, U. Dutta(1993), Stabilization of South Texas Soils with Fly Ash, Fly Ash for soil improvement, Geotechnical Special Publication No.36, Kevan D. Sharp, ASCE, New York, pp. 30~42.
9. M. Kamon, T. Katsumi, Y. Sano(2000), MSW fly stabilized with coal ash for geotechnical application, Journal of Hazardous Materials, Elsevier Science, Vol.76, pp. 265~283.
10. P. V. Sivapullaiah, J. P. Prashanth, A. Sridharan, B. V. Narayana(1998), Reactive silica and strength of fly ashes, Geotechnical and Geological Engineering, Chapman & Hall, Vol.16, pp. 239~250.