

산업부산물을 이용한 저시멘트계 지반개량재의 강도 특성

Strength Characteristics of Low Cement Ratio Soil Stabilizer Using Industrial By-products

조진우¹ Cho, Jin-Woo

이용수² Lee, Yong-Soo

유준³ Yu, Jun

김세호⁴ Kim, Sei-Ho

Abstract

An experimental investigation was carried out to evaluate the strength characteristics of low cement ratio soil stabilizer. The low cement ratio soil stabilizer has been developed by the replacement of certain part of cement with by-product pozzolanic materials such as blast furnace slag, fly ash, waste gypsum and by using activator. A series of unconfined compressive strength tests were performed to investigate and obtain high-strength composite soil stabilizer with large amounts of blast furnace slag and fly ash. Test results show that there were better properties when blast furnace slag, fly ash, waste gypsum, and activator were added in proper ratio. The replacement of certain part of cement with by-product pozzolanic materials improved the strength and pore structure properties.

요지

본 연구에서는 산업부산물을 이용한 저시멘트계 지반개량재의 강도특성을 고찰하였다. 저시멘트계 지반개량재는 시멘트의 일정부분을 대표적인 포졸란 물질인 고로슬래그, 플라이애쉬, 석고 등의 산업부산물과 활성제를 이용하여 대체함으로써 제조하였다. 일축압축강도 실험을 통하여 포졸란 물질의 반응성을 고찰하였으며 최적의 강도를 나타내는 구성조합을 도출하였다. 실험결과 시멘트의 사용량을 감소시키고 적절한 량의 산업부산물과 활성제를 첨가한 결과 강도가 증가하고 시료구조가 밀실화 되는 것을 확인할 수 있었다.

Keywords : Activator, By-product, Cement, Pozzolanic materials, Soil stabilizer, Unconfined compressive strength

1. 서론

산업부산물은 산업활동에 의하여 부수적으로 발생하는 폐기물로서 산업의 급속한 발전과 더불어 그 발생량이 증가하고 있다. 우리나라의 경우 좁은 국토면적, 잦은 민원발생, 환경오염 등의 악화되는 환경여건으로 인하여 산업부산물의 처리에 관한 인식이 전환되고 있

며 정부의 시책도 산업부산물의 재활용을 적극적으로 장려하고 있는 실정이다(Kamon & Jang 1999; 신현국 1995).

미국, 일본 등의 선진외국은 지반개량재로서 기존의 재료보다 내구성, 내화학성이 강한 재료개발에 심혈을 기울이고 있다. 특히, 자원의 재활용 측면에서 산업부산물을 이용한 신재료개발에 많은 관심을 보이고 있다.

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT, jincho@kict.re.kr)

2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT)

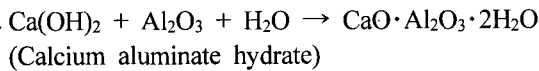
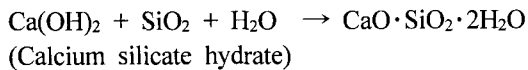
3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT)

4 플러스환경건설(주) 대표이사 (CEO, PLUS Environment Construction Co., LTD)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이러한 지반의 내구성 성능향상을 위한 방안으로 칼슘계(CaO) 산업부산물을 이용한 지반의 강도개선 효과를 기대할 수 있다. 칼슘화합물에 의한 지반개량효과는 포졸란 반응 등과 같은 재료입자들의 결합력으로 강도증진, 투수계수 감소 등의 효과를 가지고 있고 내구성도 뛰어난 것으로 알려져 있다(Li et al. 2000; Xinghua et al. 2000; 한국건설기술연구원 1992). 칼슘계 지반개량재를 개발하는 방안으로 기존의 사업장 일반폐기물중 대표적인 포졸란 물질인 플라이애쉬, 슬래그, 폐석고 등을 이용한다면 산업부산물의 재활용 촉진, 공사비용의 절감 등 사회·경제적 파급효과가 클 것으로 판단된다.

포졸란 물질이란 활성이 큰 비결정의 실리카(silica)와 알루미늄(alumina)을 가지고 있는 물질을 말하며 그 자체로는 결합성이 없으나, 수분 존재하에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 C-S-H($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), C-A-H($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)를 형성할 수 있는 물질을 말한다(Malhotra & Dave 1999; Caijun & Robert 2001).



이와 같은 반응을 통해서 규산칼슘수화물(CSH, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 계 화합물), 알루미늄산 칼슘수화물(CAH, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 계 화합물), 알루미늄산 칼슘(CA, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 계 화합물)등의 새로운 포졸란 반응생성물이 형성된다. 이러한 반응은 비교적 장기간에 걸쳐 다양한 접착성 물질을 생성하며 이에 따라 토립자의 간극이 채워짐으로써 더 조밀한 구조로 되는 것이다.

국외의 경우 슬래그 및 플라이애쉬를 이용한 시멘트 제조 및 반응특성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Xinghua(2000) 등은 슬래그와 플라이애쉬를 혼합한 시멘트의 강도특성을 고찰하여 적정 혼합비율을 제시하였고, Li(2000) 등은 플라이애쉬와 비교해 가격이 고가인 슬래그를 플라이애쉬로 대체하기 위하여 플라이애쉬와 슬래그의 혼합비율에 따른 특성을 분석하기도 하였다. Malhotra와 Dave(1999)는 플라이애쉬, 활성화시킨 점토물질, 일반 점토물질을 이용한 시험을 수행하여 포졸란물질의 활성도가 클수록 시료의 강도가 증가하는 것을 확인하였다.

시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물 포졸란 재료를 혼합하는 일련의 연구들은 포졸란 물질의 활성도를

증가시키기 위하여 여러 가지 방법을 사용하고 있는데, Caijun과 Robert(2001)는 포졸란 물질의 활성도를 증가시키기 위하여 기계적 방법, 열적 방법, 화학적 방법을 사용한 결과 기계적방법이나 열적방법은 큰 효과를 보지 못하였고, 화학적방법이 가장 좋은 효과를 나타내었다. 또, 부대시설이나 에너지를 필요로 하는 기계적방법이나 열적방법보다 적용이 간단한 화학적방법이 가장 합리적인 포졸란 활성화 방법임을 보여주고 있다.

국내의 경우, 슬래그 및 플라이애쉬를 이용한 시멘트 및 지반개량재가 많이 개발되어 사용되고 있으나 이에 대한 체계적인 연구결과가 나오지 못하고 있는 실정이다. 이는 중소기업들에 의한 단발성 연구가 지속되는 것이 원인으로 판단되며, 따라서 지속적이고 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 산업부산물을 이용한 저시멘트계 지반개량재를 개발하기 위하여 슬래그, 플라이애쉬, 폐석고 등의 포졸란 반응특성을 분석하였고, 이들 포졸란물질의 배합비에 따른 강도특성을 고찰하였다. 이러한 과정을 통하여 개발된 지반개량재를 일반포틀랜드시멘트 및 국내 지반개량재와 성능을 비교해 보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 지반개량재 구성물질

지반개량재 구성물질로서 일반포틀랜드시멘트, 고로슬래그, 플라이애쉬, 폐석고를 사용하였으며, 산업부산물의 포졸란 반응성을 증가시키기 위하여 나트륨계, 칼슘계, 실리카계의 활성화제를 사용하였다. 또한 국내 산업부산물의 포졸란 반응성을 고찰하기 위하여 소석회를 사용하였다. 마지막으로, 개발된 저시멘트계 지반개량재와 기존의 개량재의 특성을 비교하기 위하여 일반포틀랜드시멘트 및 국내 지반개량재와 비교실험을 수행하였다. 국내 지반개량재는 시멘트, 포졸란재료, 석회, 석고 및 무기염류 등의 첨가제로 구성된 지반개량재로서 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 지반개량재이다.

표 1은 산업부산물의 화학조성을 나타내고 있다. 시멘트와 고로슬래그의 CaO 함유량은 각각 63%, 41.1%로서 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, SiO_2 와 Al_2O_3 가 다음으로 많은 비율을 나타내고 있다. 플라이애쉬는 시멘트와 고로슬래그와 비교해 CaO의 비율이 떨어지나

표 1. 산업부산물의 화학구성 성분(%)

대상물질	시멘트	고로슬래그	플라이애쉬	폐석고
SiO ₂	22	34.2	50.2	4.15
Al ₂ O ₃	6	13.5	21.6	0.94
Fe ₂ O ₃	3	0.83	7.84	19.19
TiO ₃	-	1.05	0.71	2.36
CaO	63	41.1	10.09	21.1
MgO	2.5	5.8	2.43	0.94
Na ₂ O	-	0.29	1.52	0.02
K ₂ O	-	0.20	1.33	0.06
SO ₃	2	0.73	-	28.9
lg-loss	1.5	2.3	4.0	22.2

표 2. 산업부산물의 유해물질 용출량(mg/L)

대상물질	시멘트	플라이애쉬	고로슬래그	폐석고
Cu	검출안됨	0.08	검출안됨	검출안됨
Pb	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
Cd	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
Cr ⁺⁶	검출안됨	0.03	검출안됨	검출안됨
As	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
Hg	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
CN	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
TCE	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
PCE	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨
Organic phosphorus	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨

SiO₂와 Al₂O₃의 비율이 매우 높음을 알 수 있다. 폐석고는 SO₃의 비율이 가장 높으며 이는 내유기성 성질을 나타내는데 필수적인 요소이다. 전반적으로 CaO 성분을 많이 포함하고 있는 것으로 나타나 칼슘계 지반개량제 혼합재료로서의 가능성을 보여주고 있다.

표 2는 산업부산물의 유해물질 용출실험 결과를 나타내고 있다. 플라이애쉬에서 소량의 구리와 크롬이 용출되었으나 모두 기준치 이내로 본 연구에서 사용된 산업부산물은 환경적으로 영향이 적은 물질임을 알 수 있다.

2.1.2 개량 대상물질

개량 대상물질로서는 자체 반응성이 없는 주문진표 준사를 사용하였다. 또한 개발된 저시멘트계 지반개량제와 기존 개량제의 특성을 비교하기 위하여 모래 이외에 화강토, 점토를 사용하였다. 비교대상 재료로 점토와 화강토를 선정한 이유는 점토는 농경지, 해안연약지반의 대표적인 구성 흙이고, 화강토는 임로, 산로의 대표

표 3. 대상시료의 기본 특성

특성	비중	200번체 통과량(%)	액성한계 (%)	소성지수	통일분류
화강토	2.64	47.67	27.20	N.P	SM
점토	2.50	98.63	38.3	10.5	CL
모래	2.62	0	N.P	N.P	SP

적인 구성 흙이기 때문이다. 점토는 경남 하동의 카울린 나이트, 화강토는 경기도의 고양시의 산토를 사용하였다. 경남 하동산 카울린나이트와 주문진표준사는 시료 자체가 균질하기 때문에 그대로 사용하였으나, 화강토는 자갈 크기의 입자부터 점토 크기의 입자까지 그 크기가 다양하여 20번체 통과시료를 사용하였다. 표 3은 모래, 화강토, 점토의 기본특성을 나타내고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 포졸란 반응성 실험

산업부산물을 활용하여 지반개량제를 개발하기 위해

서는 산업부산물의 포졸란 반응성이 매우 중요하다. 그러나, 국내에는 포졸란물질의 반응성을 측정할 수 있는 구체적인 방법이 규정되어 있지 않다. “KS L 5507 포졸란 혼합용 석회”와 “KS L 5508 석회 혼합용 플라이애쉬 및 포졸란”에서 석회, 플라이애쉬 및 포졸란 재료의 품질기준만을 제시하고 있으며 현재 국제규격(ISO)에 따른 포졸란 반응성 시험방법에 대한 개정을 추진 중이다.

따라서, 본 실험에서는 Indian Standard의 “포졸란물질의 활성도 결정방법(Lime Reactivity test)”에 의하여 산업부산물의 포졸란 반응성을 측정하였다. Indian Standard에 의한 포졸란 반응성 실험을 간단히 설명하면 다음과 같다. 일정량의 소석회, 포졸란 물질, 모래를 혼합 후 70±5% flow의 물을 혼합한다. 혼합된 시료는 50mm의 정육면체에 채워지며 48시간 양생된다. 시료를 탈착한 후 50±2℃의 온도, 90~100%의 습도에서 8일간 양생한다. 양생된 시료에 대하여 일축압축강도 시험을 실시하며 이때의 일축압축강도를 포졸란 반응성(Pozzolan Reactivity)이라고 한다. 본 실험에서는 시료의 크기를 직경 5cm, 높이 10cm, 다짐함수비 10%로 제작하여 실험을 수행하였다.

2.2.2 일축압축강도 실험

KS F 2320에 의한 일축압축강도 실험을 실시하였다. 최대하중 3000kg의 기기를 사용하여 하중재하속도 1mm/min을 유지하는 변형률 제어방식으로 실험을 수행하였다. 시료의 성형은 KS F 2329 실험실에서 휴시멘트의 압축 및 휨강도 실험용 공시체 제작 및 양생방법에 의하여 성형하였다. 지반개량재 배합비는 충분한 반응을 위하여 건조된 흙을 기준으로 25%로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 산업부산물의 포졸란 반응특성

표 4와 그림 1은 국내 산업부산물의 종류에 따른 포졸란 반응성 평가를 위한 실험 조건 및 결과를 나타내고 있다. 제강슬래그, 폐석고, 플라이애쉬는 28일 강도가 각각 0kgf/cm², 2.6kgf/cm², 2.6kgf/cm²으로 비교적 낮은 강도를 나타내고 있어 포졸란 반응성이 크지 않은 것으로 나타났다. 고로슬래그의 경우 28일 강도가 86.7kgf/cm²으로 매우 높은 값을 나타내고 있다. 실제로 고로슬래그는 OH⁻이온이나 SO₄²⁻이온의 존재하에서 포틀랜드시멘트와 동일한 수경성을 발휘하는 것으로 알려져 있다(七ノト協會 2003). 제강슬래그와 플라이애쉬의 혼합량에 따른 강도변화를 살펴보면 제강슬래그의 혼합량이 감소하고 플라이애쉬의 혼합량이 증가할수록 강도가 증가하였으며, 고로슬래그와 플라이애쉬의 혼합량에 따른 강도변화를 살펴보면 플라이애쉬의 혼합량이 감소하고 고로슬래그의 혼합량이 증가할수록 강도가 증가하였다.

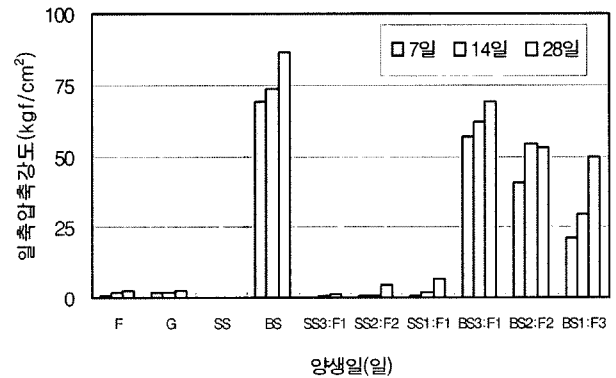


그림 1. 산업부산물의 포졸란 반응특성

표 4. 산업부산물의 포졸란 반응특성 실험조건 및 결과

시료번호	구성비(%)					일축압축강도(kgf/cm ²)		
	제강슬래그	고로슬래그	플라이애쉬	폐석고	소석회	7일	14일	28일
플라이애쉬(F)			80		20	0.5	1.9	2.6
폐석고(G)				80	20	2.1	1.8	2.6
제강슬래그(SS)	80				20	0	0	0
고로슬래그(BS)		80			20	69.1	73.4	86.7
SS 3 : F 1	60		20		20	0.2	0.6	1.3
SS 2 : F 2	40		40		20	0.3	0.8	4.3
SS 1 : F 3	20		60		20	0.5	1.7	6.6
BS 3 : F 1		60	20		20	56.5	62.0	69.2
BS 2 : F 2		40	40		20	40.6	54.0	53.2
BS 1 : F 3		20	60		20	21.2	29.5	49.6

실험결과 고로슬래그의 경우 자체적으로 매우 높은 포졸란 반응성을 나타내고 있으며 플라이애쉬는 자체적인 반응성은 없으나 슬래그와 혼합시 소정의 강도를 발휘하는 것으로 나타났다.

3.2 산업부산물 혼합비에 따른 강도특성

3.2.1 플라이애쉬의 영향

표 5와 그림 2는 플라이애쉬의 혼합비가 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위한 시료제조 조건 및 일축압축강도 실험 결과를 나타내고 있다. A1~A3에서 알 수 있듯이 플라이애쉬의 혼합량이 증가할수록 일축압축강도는 현격하게 감소하는 양상을 나타내고 있다. 플라이애쉬를 40% 혼합했을 경우 플라이애쉬를 혼합하지 않은 경우와 비교하여 양생일에 따라 30~40% 강도가 감소하

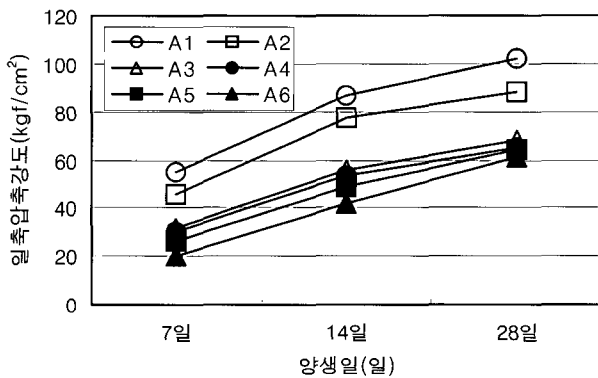


그림 2. 플라이애쉬와 폐석고의 혼합비에 따른 일축압축강도

였다. A3~A6에 나타난 바와 같이 플라이애쉬의 혼합비를 고정시키고 폐석고의 혼합비를 증가시킨 경우 강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 플라이애쉬와 폐석고의 혼합비를 증가시키면서 강도를 증가시키는 어려움을 확인 할 수 있었다.

3.2.2 고로슬래그의 영향

표 6과 그림 3은 고로슬래그의 혼합비가 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위한 시료 제조 조건과 일축압축강도 실험 결과를 나타내고 있다. 고로슬래그 30%와 플라이애쉬 10%인 B2와 플라이애쉬만 40%인 A3~A6의 결과에서 알 수 있듯이 모두 40%의 플라이애쉬, 고로슬래그 혼합물의 구성비를 나타내지만 일축압축강도는 B2가 월등히 높음을 알 수 있다. 시멘트 혼합량이 A3~A6보다 적은 B3~B5의 경우에도 A3~A6보다 높은 강도

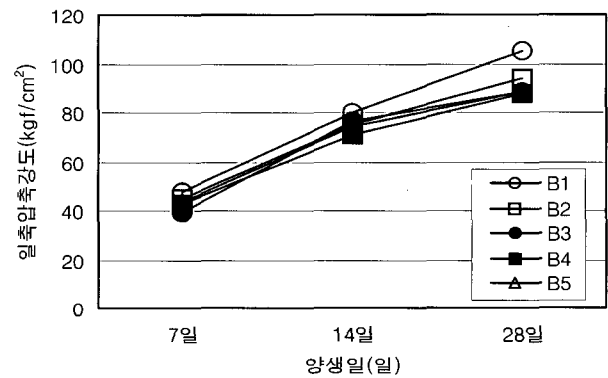


그림 3. 고로슬래그의 혼합비에 따른 일축압축강도

표 5. 플라이애쉬와 폐석고의 혼합비에 따른 강도특성 실험조건 및 결과

시료번호	구성비(%)			일축압축강도(kgf/cm ²)		
	시멘트	플라이애쉬	폐석고	7일	14일	28일
A1	95	0	5	55.2	86.5	101.9
A2	75	20	5	45.6	77.4	88.2
A3	55	40	5	31.5	55.7	68.4
A4	53	40	7	30.2	53.2	65.3
A5	51	40	9	26.4	48.6	64.6
A6	49	40	11	20.2	42.1	61.2

표 6. 고로슬래그의 혼합비에 따른 강도특성 실험조건 및 결과

시료번호	구성비(%)				일축압축강도(kgf/cm ²)		
	시멘트	고로슬래그	플라이애쉬	폐석고	7일	14일	28일
B1	65	30	0	5	47.5	80.2	105.2
B2	55	30	10	5	44.6	75.4	94.3
B3	45	30	20	5	39.5	76.3	88.4
B4	45	40	10	5	42.9	70.8	87.6
B5	35	50	10	5	43.6	74.7	88.4

를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 고로슬래그가 개량재의 강도를 증가시키고 있음을 나타내고 있다. 또한 B2, B4, B5에서 알 수 있는 바와 같이 시멘트의 혼합량이 감소하고 고로슬래그의 혼합량이 증가함에 따라 큰 강도의 감소가 나타나지 않음을 확인 할 수 있다.

3.2.3 활성화제의 영향

표 7과 그림 4는 활성화제가 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위한 시료제조 조건과 일축압축강도 실험 결과

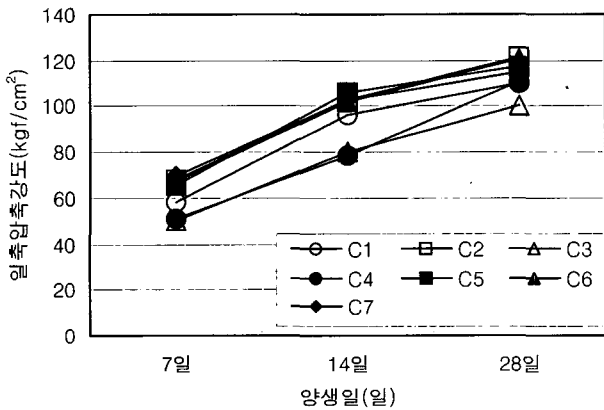


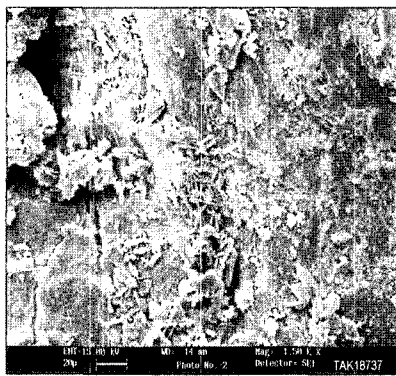
그림 4. 활성화제의 종류에 따른 일축압축강도

를 나타내고 있다. 일반적으로 알카리계나 알루미늄계는 시멘트 물질의 활성을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Roy & Silsbee 1992; Wang et al. 1979). C1~C6와 A, B 실험결과들을 비교할 때 C의 강도가 현격하게 증가된 것을 알 수 있다. 따라서 알카리계, 알루미늄계의 활성화제의 효과를 확인 할 수 있었다. C2, C3, C4의 결과에서 알 수 있듯이 활성화제 중 나트륨계의 효과가 가장 큰 것으로 나타났으며 이러한 차이는 양생 초기에 더욱 두드러지게 나타났다. 또한 나트륨계 활성화제를 사용한 C2의 경우 시멘트만 100% 사용한 C7보다 높은 강도를 나타내어 고로슬래그, 플라이애쉬, 활성화제를 사용한 고강도 지반개량재 개발 가능성을 보여주고 있다.

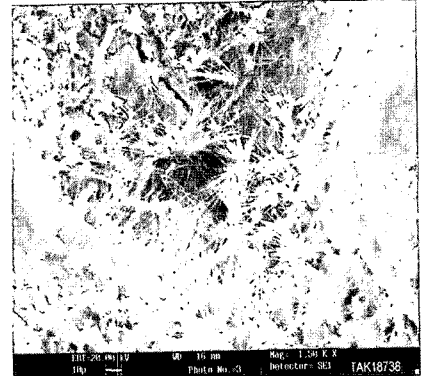
그림 5는 모래 및 개량된 지반의 입자구조를 나타내고 있다. 그림 5의 (a)는 원시료인 모래의 입자구조를 나타내고 있으며 (b)는 시멘트로만 개량된 C7의 28일 입자구조, (c)는 나트륨계 활성화제를 사용한 C2의 28일 입자구조를 나타내고 있다. C7의 SEM 사진을 살펴보면 반응생성물을 찾아볼 수 있으나 주로 입자표면에 소량으로 분포하고 있고, 입자사이의 공극을 찾아볼 수 있으며 입자구조가 치밀하지 않음을 확인 할 수 있다. C2의 경우에는 침상모양의 반응생성물이 발달하고 있는 것을 확인 할



(a) 모래(원시료)



(a) 모래(원시료)



(c) C2

그림 5. 모래 및 개량토의 SEM 사진

표 7. 활성화제 종류에 따른 강도특성 실험조건 및 결과

시료번호	구성비(%)				활성제(%)			일축압축강도(kgf/cm ²)		
	시멘트	슬래그	플라이애쉬	페석고	나트륨계	칼슘계	규소계	7일	14일	28일
C1	30	40	20	5	5			58.6	96.4	109.8
C2	40	30	20	5	5			67.9	102.4	121.7
C3	40	30	20	5		5		50.2	80.4	100.6
C4	40	30	20	5			5	51.2	78.5	110.8
C5	50	20	20	5	5			65.4	105.7	117.6
C6	50	30	10	5	5			67.5	101.6	120.8
C7	100							69.2	102.9	115.2

수 있으며 이러한 침상모양의 반응생성물은 서로 연결되어 있어 입자구조를 밀실화하는 역할을 하고 있다.

이상의 실험결과로부터 시멘트 35~45%, 고로슬래그 30~50%, 플라이애쉬 10~20%, 폐석고 5~10%, 활성제 3~5%와 같은 산업부산물을 이용한 저시멘트계 지반개량재의 구성비를 도출할 수 있다.

3.3 저시멘트계 지반개량재와 기존 지반개량재의 비교

일반포틀랜드시멘트 및 기존의 국내 시멘트계 지반개량재와 비교하기 위하여 시멘트 40%, 고로슬래그 35%, 플라이애쉬 15%, 폐석고 10%, 나트륨계 활성제 5%의 저시멘트계 지반개량재를 제조하였다. 시료의 제작은 KS F 2329 실험실에서 휴시멘트의 압축 및 휨강도 실험용 공시체 제작 및 양생방법에 의하여 성형하였다. 지반개량재 배합비는 고화반응을 일으키기 위한 충분한 배합비로 판단되는 25%로 결정하였으며, 다짐 함수비는 다짐실험의 결과로부터 최적함수비로 다짐을 실시하였다(모래 10%, 화강토 20%, 점토 25%). 표 8은 산업부산물을 이용한 저시멘트계 지반개량재의 성능비교를 위한 배합조건을 나타내고 있다.

그림 6은 본 연구에서 개발한 저시멘트계 지반개량재(K)와 일반포틀랜드시멘트(C), 기존의 국내 시멘트계 지반개량재(A)의 일축압축강도 실험결과를 나타내고 있다. 모래지반(S)의 경우 SK와 SC가 오차범위(10%) 내의 비슷한 값을 나타내고 있으나, SA의 경우 상당히 낮은 강도를 나타내고 있다. 모래지반에 대하여 시멘트로 개량된 SC의 강도를 100으로 했을 때, SK는 96.6~106.0으로 거의 동등한 강도를 나타내나 SA는 29.9~

35.4로 30% 수준의 강도를 나타내어 모래지반에서는 개량효과가 현저히 감소함을 알 수 있다. 기존의 국내 시멘트계 지반개량재가 모래지반에서는 개량효과가 현저하게 떨어지게 나타났는데 이는 시멘트의 수화에 필요한 수분이 에트린자이트의 생성에 소비되어 버려 시멘트의 수화에 필요한 수분이 부족하여 경화현상이 충분히 발생되지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 일반적으로 고유기질토에 적용되는 시멘트계 지반개량재를 모래지반에 사용할 때에는 이러한 강도저하현상에 유의하여야 할 것이다.

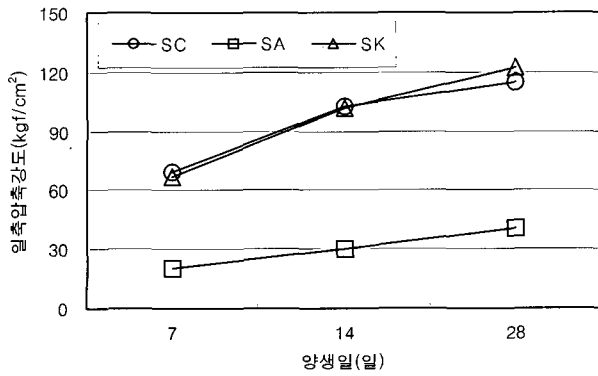
화강토지반(W)의 경우 WC, WK, WA가 비슷한 값을 나타내고 있으나, WA의 경우 WC보다 약간 작은 강도를, WK의 경우 약간 큰 강도를 나타내고 있다. 전반적으로 화강토 지반에서는 WC, WK, WA간의 큰 차이를 보이지 않았다.

점토지반(C)의 경우 CK와 CA가 오차범위(10%) 내의 비슷한 값을 나타내고 있으나, CC의 경우 상당히 낮은 강도를 나타내고 있다. 점토지반에 대하여 시멘트로 고화된 CC의 강도를 100으로 했을 때, CK는 147~153, SA는 123~153으로 50% 수준의 강도증가를 보여주고 있다. 이는 시멘트의 가장 큰 단점인 점토지반에서의 개량효과가 현저하게 떨어지기 때문으로 판단된다.

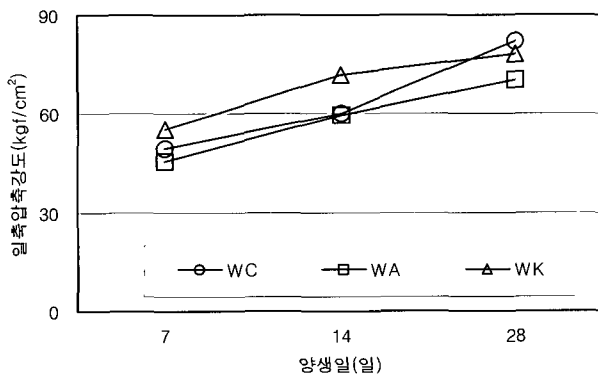
시간에 따른 강도증가현상을 살펴보기 위하여 7일 강도와 28일 강도를 비교해 보면 모래지반에서는 재령 28일 강도가 재령 7일 강도의 1.6~1.9배, 화강토 지반에서는 재령 28일 강도가 재령 7일 강도의 1.4~1.6배, 점토지반에서는 재령 28일 강도가 재령 7일 강도의 1.5~1.7배로 나타났다. 일반적으로 시멘트계 지반개량재의 재령 28일 강도는 재령 7일 강도의 1.2~1.7배 정도로

표 8. 개발된 지반개량재의 성능비교를 위한 배합조건

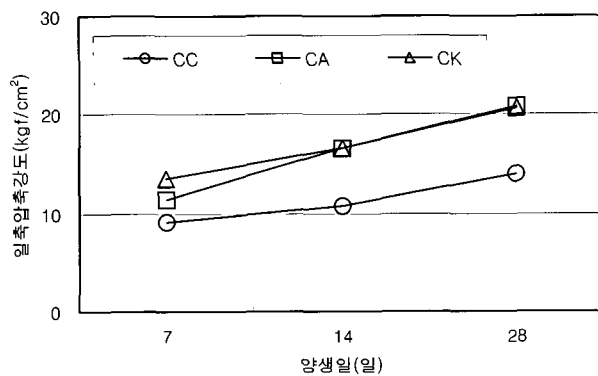
시료 번호	물(g)	시료(g)			지반개량재(g)					
		모래	화강토	점토	시멘트	기존의 국내 시멘트계 지반개량재	석탄회	고로 슬래그	폐석고	활성제
모래	SC	500	4000		1000					
	SA	500	4000			1000				
	SK	500	4000		400		150	350	100	50
화강토	WC	1000		4000	1000					
	WA	1000		4000		1000				
	WK	1000		4000	400		150	350	100	50
점토	CC	1250		4000	1000					
	CA	1250		4000		1000				
	CK	1250		4000	400		150	350	100	50



(a) 모래



(b) 화강토



(c) 점토

그림 6. 지반종류에 따른 지반개량재별 일축입축강도

알려져 있다(セメント協會 2003). 따라서 본 연구에서 개발한 지반개량재는 기존의 시멘트계 지반개량재와 비슷한 강도증가 양상을 보여주는 것으로 판단된다. 또한, 응력-변형 관계를 살펴보면 모래지반에서는 $E_{50}=90\sim 120q_u$, 화강토지반에서는 $E_{50}=150\sim 200q_u$, 점토지반에서는 $E_{50}=330\sim 480q_u$ 로 나타났으며, 지반개량재의 종류에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다.

실험결과, 본 연구에서 개발한 저시멘트계 지반개량재는 모래, 화강토, 점토 등 모든 지반 종류에서 좋은 개량효과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 산업부산물인 고로슬래그, 플라이애쉬, 폐석고 등을 이용한 저시멘트계 지반개량재를 개발하기 위하여 산업부산물의 포졸란 반응성 평가와 산업부산물의 혼합량에 따른 강도변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 국내 산업부산물인 고로슬래그, 플라이애쉬, 폐석고의 환경적 안정성 분석 결과, 폐기물관리법의 기준 이하로 나타나 환경적으로 안정하여, 재활용의 가치가 높게 나타났다.
- (2) 사용한 산업부산물의 CaO 성분이 10~40%의 범위로 나타났으며, 특히, 고로슬래그의 CaO 함량이 40% 이상으로, 포졸란 반응성이 높은 것으로 나타났다. 고로슬래그의 CaO 함량이 많다는 것은 기존의 지반개량재에 사용하는 시멘트 함량을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.
- (3) 소량의 알칼리계, 알루미늄계 활성제를 사용한 결과, 강도증진에 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히, 나트륨계 활성제는 시멘트만 사용한 시편보다 더 높은 강도를 나타냈으며, 사용한 활성제 중 나트륨계의 효과가 가장 크게 나타났다.
- (4) 일련의 실험결과, 적정의 산업부산물 혼합비율은 시멘트 35~45%, 고로슬래그 30~50%, 플라이애쉬 10~20%, 폐석고 5~10%, 활성제 3~5%와 같은 혼합비율로, 저시멘트계 지반개량재의 혼합 구성비를 도출하였다.
- (5) 저시멘트계 지반개량재와 포틀랜드시멘트 그리고 기존 국내 시멘트계 지반개량재를 비교한 결과, 포틀랜드시멘트와 기존 시멘트계 지반개량재는 지반종류에 따라 지반개량재의 개량효과가 서로 다르게 나타났으나, 저시멘트계 지반개량재는 지반종류에 관계없이 높은 개량효과를 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2003년도 건설기술핵심기술개발사업의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신현국 (1995), “폐기물 소각현황과 정책”, *한국대기보전학회지*, 제11권, 제2호, pp.101-106.
2. 한국건설기술연구원 (1992), *성토제로서의 석탄회 이용방안 연구*, 한국전력, pp.10-25.
3. 산업자원부 (1996), *포졸란 혼합용 석회*, KS L 5507.
4. 산업자원부 (2002), *석회 혼합용 플라이애쉬 및 포졸란*, KS L 5508.
5. 산업자원부 (1997), *실험실에서 흙 시멘트의 압축 및 휨강도 실험용 공시체 제작 및 양생방법*, KS F 2329.
6. セメント協會 (2003), *地盤改良マニュアル*, 第3版, pp.19-32.
7. Bureau of Indian Standards, *Method of test for pozzolanic materials*, IS 1727-1990.
8. Caijun Shi and Robert L. Day (2001), “Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans”, *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, Vol.31, pp.813-818.
9. Kamon, Masashi and Jang Yeon-Soo (1999), “Solution Scenarios of Geo-environmental Problems”, *Proc., 11th. ARC. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Vol.2, pp.207-226.
10. Li Dongxu, Shen Jinlin, Chen Yimin, Cheng Lin, and Xuequan (2000), “Study of properties on fly ash-slag complex cement”, *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, Vol.30, pp.1381-1387.
11. Malhotra, S. K. and Dave, N. G. (1999), “Investigation into the effect of addition of flyash and burnt clay pozzolana on certain engineering properties of cement composites”, *Cement & Concrete Composites*, Vol.21, pp.285-291.
12. Roy, D.M. and Silsbee, M.R. (1992), “Alkali activated cementitious materials, an overview”, *Mater Res Soc Symp Proc*, Mater Res Soc 245 153-164
13. Wang, Y., You, B., Zhang, G., and Deng, S. (1979), “The properties of alunite expanding cement, and its hydration and hardening”, *Chin Ceram Soc*, 7(2) 113-126.
14. Xinghua Fu, Wenping Hou, Chunxia Yang, Dongxue Li, and Xuequan wu (2000), “Study on high-strength slag and fly ash compound cement”, *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, Vol.30, pp.1239-1243.

(접수일자 2005. 11. 4, 심사완료일 2006. 3. 10)