

Compression Strength Behavior of Mixed Soil Recycling Bottom Ash for Surface Layer Hardening

매립석탄회를 재활용한 표층연약지반 개량용 혼합토의 압축강도 특성 연구

Gi-dae Oh^{1†}, Kyoung Yul Kim¹
오기대^{1†}, 김경열¹

Abstract

Domestic thermal power plant fly ash is at a situation which emissions are increasing every year. Comparing to Fly Ash, Bottom Ash is only 15 %, but it's recycling rate is low, so most of them is being buried in the ground. However, landfill site of every power plant is full, and the construction of a new landfill is difficult. To solve this problem, the best solution is to use Bottom Ash as a landfill of large-scale civil engineering projects. The purpose of this study was to investigate the compression strength behavior characteristics of weak clay and uniaxial compression test to examine the applicability of surface soil solidification method of mixed soils mixed with industrial waste coal ash and weak clay which is buried in bulk. As a result of the test, the fluidity of the Mixed soil with clay + bottom ash + cement was improved to 200 mm at the water content of 91-92 %. The uniaxial compressive strength was also good for the mixed soils (clay + bottom ash + cement) meeting the required strength of 159 kN/m² at 28 days. However, the other samples did not meet the required strength. In this study, the prediction equations for the compression strength behavior by cement and curing period were presented.

국내 화력발전소의 석탄회 발생량은 매년 증가하고 있는 상황이다. 특히 Fly Ash보다 상대적으로 생산량이 15 % 정도로 적은 저회의 경우 적은 생산량에도 불구하고 재활용률이 낮아 발전소에 단순 매립되어 있는 실정이다. 하지만, 발전소 마다 매립장이 포화상태에 있고, 새로운 매립장 건설이 어려운 상황이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 매립석탄회를 토목 공사에서의 대규모 적용을 촉진하는 방안이 가장 합리적인 방안이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산업폐기물인 석탄재와 항만 준설을 하면서 대량으로 매립되고 있는 준설토를 혼합한 혼합토의 표층고화처리공법에 대한 적용성을 검토하기 위해서 유동성 및 일축압축시험을 통한 역학적 거동 특성을 연구하였다. 시험결과, 유동성은 준설토와 석탄회 혼합토의 경우 함수비 91-92%에서 유동성 200 mm를 확보하여 우수했고, 준설토 100 %와 모래와 석탄회의 혼합토는 상대적으로 낮은 유동성을 나타냈다. 일축압축강도 역시 준설토와 석탄회의 혼합토는 28일 강도에서 요구 강도 159 kN/m²을 만족하면서 우수한 결과를 나타냈으나, 그 외 시료들은 요구 강도를 만족하지 못하는 결과를 나타냈다. 본 연구에서는 시멘트와 양생 기간에 따른 압축강도 거동 예측식을 제시하였다.

Keywords: Bottom Ash, Compression Strength, Flowability, Backfill, Surface Layer Hardening

Manuscript Received October 14, 2019, Accepted November 8, 2019

¹ KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea
† ogd@kepcoco.kr

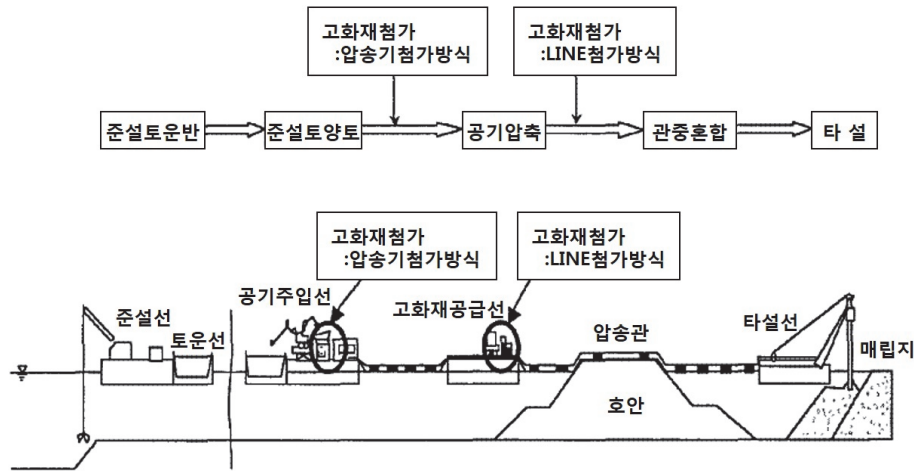


Fig. 1. 준설토를 이용한 관중혼합처리공법 개념도 (해양연구원, 2003).

I. INTRODUCTION

산업이 고도화 되면서 산업폐기물들이 급증하고 있으며, 이렇게 발생한 폐기물들은 대부분 소각되거나 매립됨에 따라서 지반오염등의 문제가 우려되고 있다. 또한, 상당수의 폐기물들은 재활용이 가능함에도 불구하고 그냥 버려지고 있어 자원 재활용 측면에서도 큰 문제로 대두되고 있다. 따라서 이러한 폐기물들을 대량으로 재활용하기 위한 지반공학적인 노력이 절실한 상황이다.

국내 화력발전소의 석탄회 발생량은 매년 약 940만 톤으로 예전에 비해서는 감소하였으나, 여전히 많은 양이 발생하고 있다. 특히 비회(Fly Ash)보다 상대적으로 생산량이 15% 정도로 적은 저회(Bottom Ash)이 경우 적은 생산량에도 불구하고 재활용률이 낮아 발전소에 단순 매립되어 있는 실정이다. 하지만, 발전소 마다 매립장이 포화상태에 있어 추가적인 신규 매립장건설이 필요하지만, 환경단체들의 반발에 따라 새로운 매립장 건설이 어려운 상황이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 매립석탄회를 토목공사에의 대규모 적용을 촉진하는 방안이 가장 합리적인 방안이라고 할 수 있다. 토목공사에의 대규모 활용 방안의 일환으로 성토재료의 활용이 가장 가능성이 높으나 성토재료로 활용할 경우 토목공사 종류에 따른 역학적 검토가 필요한데, 매립석탄회는 일반 토사와 달리 비중이 가벼운 경량재료라 성토재료로서는 유리하나, 하중재하 시 압축 특성이 높고, 모관 상승과 흡수율이 높아 큰 함수비에서 다짐 특성이 좋지 않은 단점을 가지고 있다.

따라서 국내외의 많은 연구자들이 이를 극복하기 위한 다양한 연구들을 수행하였는데, 1980년대부터 비회와 저회를 적정 비율 혼합해서 도로성토재료로 활용하고자 하는 연구 [1][2] 를 비롯하여 건설재료로서의 토질공학적 특성에 대한 연구 [3], 페타이어 입경에 따른 페타이어-저회 혼합토의 전

단특성 연구 [4], 석탄회를 활용한 저강도 고유동화재의 일축압축강도 및 플로우 특성 [5], 저회의 포졸란 반응에 대한 연구 [6] 등 다양한 연구가 수행되었다.

일반 성토재료로 활용 시 매립 석탄회의 단점을 극복하기 위한 고화재의 혼입이 필요하므로 일반 토사에 비해 시공성이 떨어지므로 연약지반 표층부에 석회석이나 시멘트계를 혼합하여 흙 속의 물과 수화 반응 및 점토광물과 반응을 유도하여 표층을 고화시켜 장비의 통행성(Trafficability)를 확보하는 표층고화처리공법에 적용하는 것이 합리적으로 판단된다.

항만 개발이나 운영 중에는 항로의 수심 유지를 위해서 필연적으로 준설 공사가 수행되고, 이 준설토를 매립함에 따라서 막대한 조성 비용과 시간이 소요되고 있다. 한편 유지 준설 등을 위한 준설토는 지속적으로 발생되어 매립지 확보가 어려운 상황이다. 따라서, 준설토를 고화 처리용 건설재료로 활용 시 큰 경제적 이익이 있을 것으로 판단된다. 준설토 역시, 준설토의 Sand mat 재료 적합성평가를 위한 시험시공 사례연구 [7], 준설토를 활용한 경량 혼합토의 역학적 특성연구 [8], 초연약지반의 표층개량에 관한 연구 [9] 등 다양한 연구가 수행되었다.

따라서 본 연구에서는 산업폐기물인 석탄재와 준설토를 혼합한 혼합토의 표층고화처리공법에 대한 적용성을 검토하기 위해서 유동성 및 일축압축시험을 통한 역학적 거동 특성을 연구하였다.

II. 연약지반 표층고결 공법

표층고결공법은 시멘트, 석회 등을 써서 표층부의 연약지반을 화학적으로 고정하여 흙의 성질을 개선하는 공법으

Table 1
표층고화처리공법 비교

구분	혼합방법	특징
관중혼합방식	공기압송 Plug류를 이용한 관중혼합	- 고탍수비 점성토적용
		- 대규모 매립지반적용성 우수
		- 급속시공 가능
플랜트혼합방식	혼합 플랜트에 의한 기계식 혼합	- 저합수비 적성토 적용 가능
		- 중소규모 시공 적합

Table 2
실험 재료의 물리적 특성

시료	비중	합수비 (%)	D10 (mm)	Cu	소성한계 (%)
모래	2.676	3	0.28	1.7	-
준설토	2.66	97	-	-	60
매립 석탄회	2.12-2.17	30	0.008-0.03	1.4-25	-

로 준설토, 매립지나 산업폐기물 처리장에 있어서 건설기계의 표층개량(Trafficability 확보), 토압 저감, 수증 뒷채움(Backfill)을 위한 표층 처리로 이용되고 있다.

그리고 본 공법은 연약지반(준설토)과 고화재의 교반 혼합 방식에 따라 플랜트 혼합 방식과 관중 혼합 방식으로 구분되는데, 비교적 합수비가 높은 점성토에 고화재를 첨가하여 혼합하는 방식으로 대규모 공사에 급속 시공이 가능한 관중 혼합 방식이 합수비가 높고 석탄회 및 준설토의 대규모 활용이 필요한 국내 실정을 감안할 때 관중 혼합 공법 적합한 방법이다 (Fig. 1, Table 1).

본 공법은 Grab 준설토를 공기압송선으로 이동 시 고화재를 첨가하여 압송관내에서 발생하는 난류 효과를 이용하여 준설토와 고화재를 교반한다. 따라서 고화재 첨가로 인하여 입의 목표 강도의 재료를 단기간에 공급 가능하고, 기존의 대형 공기압송선을 활용할 수 있어 대량 급속 시공이 가능할 뿐만 아니라 준설토를 재활용함으로써 자원 재활용이 가능하다. 이에 본 연구에서는 추가로 석탄회를 준설토와 혼합하여 적용함으로써 역학적 특성 개선 및 산업 폐기물 재활용에 대한 검토를 수행하였다.

III. 시험방법

A. 시험재료

본 시험에서는 삼천포 화력발전소에서 부산된 석탄회를 사용하였으며, 저회회 경우는 대부분 매립장에 매립되어 있어 매립되어 있는 상태의 회를 이용하였고 준설토는 인근 해안에서 채취한 해안준설토를 사용하였다. 그리고 조립질의 저회회와의 성능비교를 위해서 천연 골재인 모래를 사용하였다. 연구에 사용된 천연 모래, 석탄회, 준설토의 물리적 특

Table 3
시험조건 및 시료제작

대상시료	배합 중량 (kN)				
	시멘트	준설토	매립석탄회	모래	중량배합비
준설토 + 매립석탄회 + 시멘트	0.49	11.53	11.53	-	1:23:23
	0.98	11.35	11.35	-	1:11:11
	1.47	11.16	11.16	-	1:7:7
준설토 + 시멘트	0.49	25.66	-	-	1:52
	0.98	25.24	-	-	1:25
	1.47	24.83	-	-	1:16
모래 + 매립석탄회 + 시멘트	0.29	-	11.58	11.58	1:39:39
	0.64	-	11.46	11.46	1:17:17
	0.98	-	11.33	11.33	1:11:11

성은 Table 2에 나타냈다.

B. 배합비 및 시험조건

환경부령 169호 폐기물관리법 시행규칙에는 “폐기물의 재활용 용도 및 방법(제46조 제3항과 관련)”에 대해서 명기하고 있는데, 폐기물의 재활용은 관계법령에 의하여 인허가된 건축 및 토목공사의 성토재, 보조기층재, 도로기층재 및 매립시설의 복토용 등으로 재활용 시에는 이물질 제거하고 자원의 절량과 재활용 촉진에 관한 법률 제25조의 규정에 의한 지침에 적합하게 사용하며, 일반 토사류 또는 건설 폐재류를 재활용한 토사류를 50 % 이상 혼합하여 사용하도록 하고 있다.

석탄회와 준설토는 현재 산업폐기물로, 환경기준에서 제시하는 유해물질 기준을 만족해야 한다. 따라서 본 연구에서는 준설토, 준설토+석탄회의 경우에 대해서 시험을 수행하되 준설토와 석탄회의 배합비는 자연합수비 상태에서 준설토의 액상한계 합수비(약 60%)를 기준으로 준설토와 석탄회의 혼합비를 50:50으로 고정시키고 합수비와 시멘트량만 변화시키면서 준설토 100 % (시멘트 함유량 = 2, 4, 6%), 석탄회 + 준설토 (시멘트 함유량 = 2, 5, 7%)으로 계획하여 시험을 수행하였다. 추가로 천연 모래와 매립 석탄회 (시멘트 함유량 = 2, 4, 6%)에 대해서도 비교를 위해서 수행하였다.

C. 시험방법

유동성 시험은 ASTM D 6103에 의거해 실시되었으며, 시료를 직경 50 mm, 높이 100 mm인 원형실린더에 채우고 높이 30 cm까지 2-4초 내에 실린더를 들어올려 퍼진 시료의 최대 반경과 이에 대한 수직반경을 측정하였고, 시험 기준은 ASTM D 6103에서 제시하는 고유동성 기준인 흐름치 200 mm로 하였다.

압축 시험은 ASTM D 4832에 준하여 실시되었다. 시료를 무다짐으로 직경 100 mm, 높이 200 mm인 공시체에서 양생 시켰으며, 양생은 시공 현장을 고려하여 습윤양생을



Fig. 2. 준설토+석탄회+시멘트의 유동성 시험.

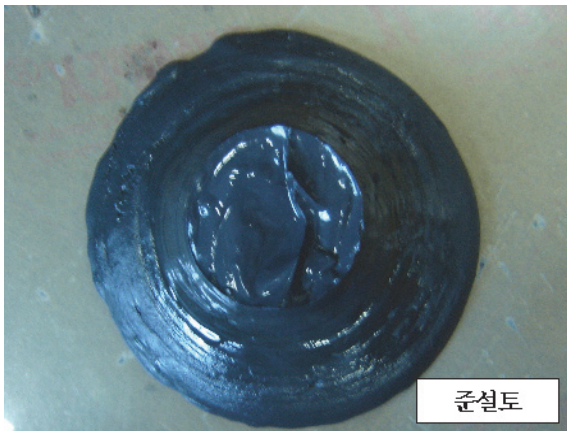


Fig. 3. 준설토+석탄회+시멘트의 유동성 시험.



Fig. 4. 모래+석탄회+시멘트의 유동성 시험.

시행하였다. 그리고 시험기는 1 mm/min의 속도로 재하하여 시험을 수행하였다. 그리고 본 연구에서는 점토의 컨시스턴트 시와 일축압축강도의 관계상 견고 지반으로 분류되는 일축 압축강도 98-196 kN/m²을 기준으로 검토하였다.

Table 4
유동성 시험 결과

대상시료	구분	중량비	함수비 (%)	흐름치 (mm)
시멘트 : 매립석탄회 : 준설토	A	1:23:23	91	200×195
	B	1:11:11	92	190×190
	C	1:7:7	92	195×197
시멘트 : 준설토	D	1:52	122	200×196
	E	1:25	122	190×195
	F	1:16	125	195×197

Table 5
양생 기간에 따른 일축압축강도 결과

대상시료	구분	배합비	일축압축강도 (kN/m ²)		
			7일	14일	28일
시멘트 : 매립석탄회:준설토	A	1:23:23	9.8	10.78	12.74
	B	1:11:11	75.46	83.3	106.82
	C	1:07:07	75.46	111.72	159.74
시멘트: 준설토	D	1:52			
	E	1:25			
	F	1:16	5.88	9.8	12.74

IV. 시험결과

A. 유동성 시험결과

준설토 100 %인 시료와 준설토+석탄회를 혼합한 시료 모두다 초기 함수비에서 추가적으로 물의 양을 증가시키면서 유동성 시험을 수행한 결과 준설토 100 % 시료의 경우 함수비 122-125 % (Fig 2), 준설토+석탄회 시료의 경우 함수비 91-92 % (Fig. 3)에서 유동성(200 mm)을 만족하는 것으로 나타났고, 모래+석탄회 시료의 경우는 Fig 4와 같이 재료 분리가 발생하여 유동성을 만족하지 못하였다.

준설토만 사용한 시료의 경우 준설토+석탄회시료에 비해서 약 36 %정도 높은 함수비에서 소요 유동성을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 준설토 만을 사용한 시료의 경우는 점성이 커서 유동성이 낮았지만, 석탄회를 섞은 시료의 경우에는 조립 재료인 석탄회를 혼합함으로써 교반 시 석탄회의 베어링 효과에 따라 유체 내에서의 혼합의 축진을 피하여 유동성이 개선되기 때문에 낮은 함수비에서도 기준 유동성을 만족하는 것이다.

그리고 혼합도에 첨가된 시멘트의 함유량은 동일한 시료에 대해서 3배가 증가함에도 함수비는 약 2-3 % 정도로 미미하게 증가하는 것으로 나타나 시멘트는 유동성에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 준설토 및 발전소 매립지에 해수와 함께 매립된 석탄회의 경우 시멘트와의 포졸란 반응이 약한 특성을 가지기 때문에 혼합 초기 유동성에서는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

B. 일축압축강도 시험결과

일축압축강도는 석탄회, 준설토, 시멘트 및 함수비와 같



Fig. 5. 준설토+시멘트 시료 자립 불가.

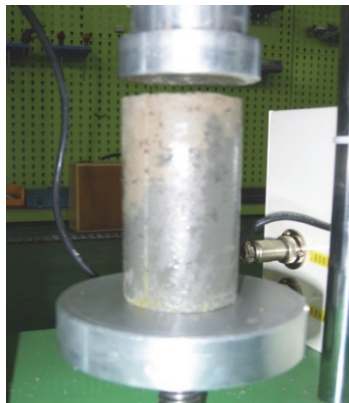


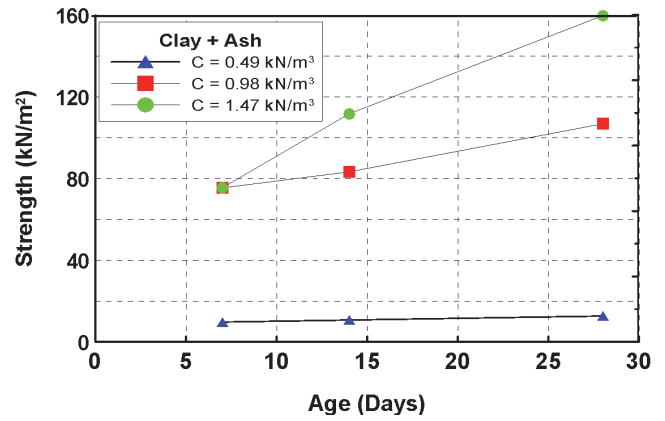
Fig. 6. 준설토+시멘트+석탄회 시료.

은 시험체 제작 시의 배합비뿐만 아니라 양생 방법 및 양생 일수와 같은 시공 조건에 따라서도 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 혼합 시 재료 분리로 인하여 유동성 확보가 어려운 모래+석탄회 혼합토를 제외 시료들에 대해서 현장시공조건과 부합하는 습식양생방법에 따라서 양생일수 7, 14, 28일에 따른 일축압축강도시험을 수행하였다.

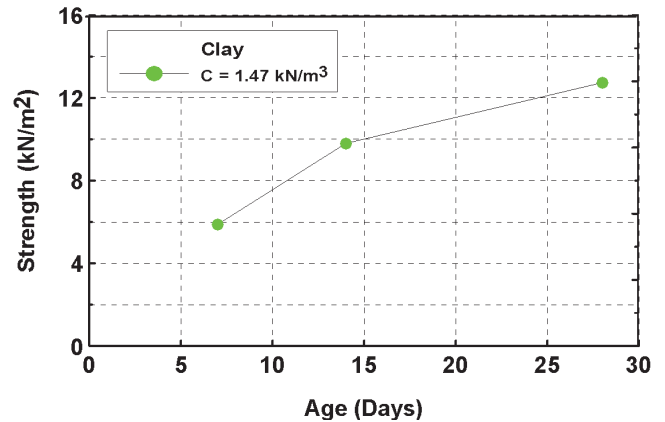
시멘트+준설토 혼합시료의 경우 F 시료를 제외한 모든 시료들은 양생기간에 관계없이 시험체를 몰드에서 탈형 시 Fig. 5와 같이 자립을 하지 못하였다.

반면, 시멘트+준설토+석탄회 혼합시료의 경우 양생 7일 경과시 A, B, C시료 모두 Fig. 6과 같이 일축압축강도시험을 수행할 수 있을 정도로 자립함을 확인할 수 있었다. 이는 준설토의 경우 유동성 확보를 위해 석탄회를 혼합한 시료에 비해 상대적으로 함수비가 높고, 준설토내에 다량 함유된 염분에 의한 포졸란 반응이 지연된 때문으로 판단된다.

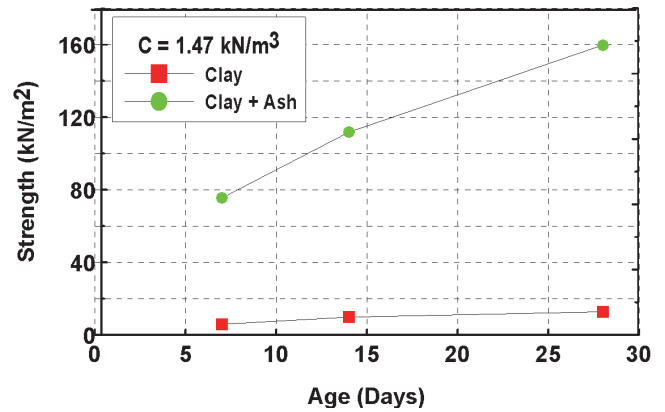
자립이 불가능한 시료를 제외한 석탄회+준설토 시료와 준설토 시료에 대해서 재령에 따른 일축압축 강도 시험을 수행한 결과, 석탄회+준설토+시멘트 시료의 경우 모든 배합 비에서 양생 기간에 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 시멘트의 함유량에 따라서 일축압축강도가 단계적으로 차이가 나타났는데, 점토 100 % 시료의 경우 역시 양생



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. 양생 기간에 따른 혼합토의 강도 변화. (a) 혼합토(준설토+석탄회). (b) 준설토. (c) 준설토, 혼합토 (시멘트 1.47 kN/m³).

기간에 따른 일축압축강도 증가는 혼합 시료와 유사하게 나타났다.

Fig. 7은 준설토 100 % 시료와 석탄회+준설토 혼합시료를 대상으로 동일한 시멘트 함량(시멘트 1.47 kN/m³)에 대해서 양생 기간에 따른 일축압축 거동을 분석한 결과로 양

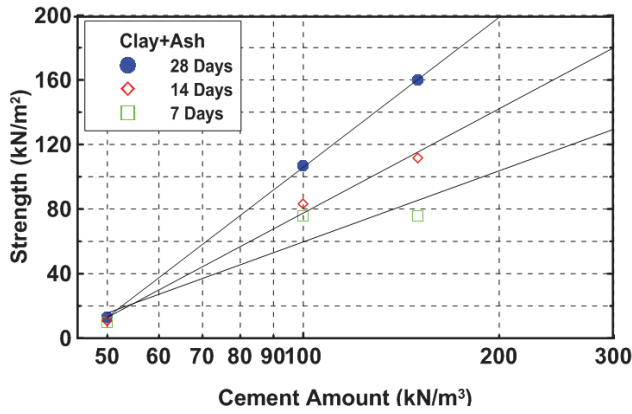


Fig. 8. 시멘트량-일축압축강도 상관 관계.

Table 6
시멘트량-일축압축강도의 상관식

단위 시멘트량 - 압축강도 상관식	R2
재령 28일: $Y=1.367 \times \ln(X)-5.216$	0.99
재령 14일: $Y=0.951 \times \ln(X)-3.59$	0.99
재령 7일: $Y=0.648 \times \ln(X)-2.376$	0.86

Table 7
양생 기간-일축압축강도의 상관식

양생기간 - 일축압축강도 상관식	R2
1.47 kN/m³: $\ln(Y)=0.54 \times \ln(X)-1.308$	0.99
0.98 kN/m³: $\ln(Y)=0.25 \times \ln(X)-0.774$	0.94
0.49 kN/m³: $\ln(Y)=0.189 \times \ln(X)-2.682$	0.97

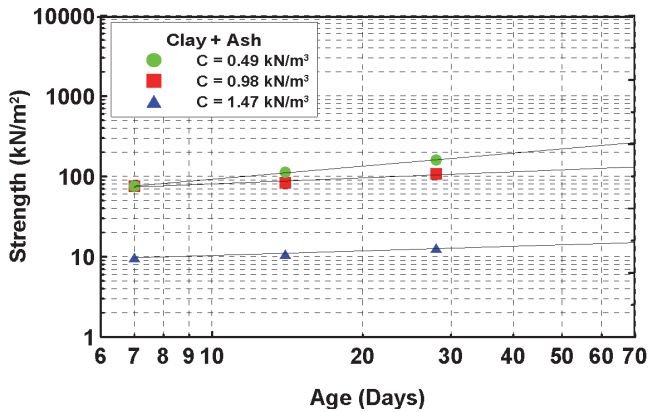


Fig. 9. 양생 기간-일축압축강도 상관 관계.

생 기간 7, 14, 28일에 따라서 혼합토 C 시료의 일축압축강도는 75.46, 111.72, 159.74 kN/m²로 양생 기간에 비례하여 크게 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 동일한 양의 시멘트를 첨가했을 때 혼합토 F시료는 양생 시간에 따른 일축압축강도가 거의 나타나지 않았다. 이는 점토질의 F시료가 조립재료인 C 시료에 비해서 유동성 확보를 위해서 약 30% 정도의 보다 많은 함수비를 가지게 되었고, 시료 성형 시와 같이 염분 함유량이 상대적으로 높은 준설토의 비율이 높은 F시료에서 시료성형때와 같이 포졸란 반응이 활발히 이루어 지지 못하여 이러한 강도 저하가 나타난 것으로 판단된다.

C. 혼합토의 시멘트량 및 양생 기간에 따른 일축압축강도 예측식 제안

시멘트량과 양생 기간에 따른 일축압축강도의 변화를 log-scale로 Fig. 8 및 9와 같이 나타낸 결과 선형적인 증가를 확인할 수 있었다. 그리고 이는 선형적인 상관식으로 나타냈을 때, 양생 기간 7일째의 시멘트량-일축압축강도의 상관계수 0.86을 제외하고는 모든 식들이 상관계수 0.94-0.99로 매우 높게 나타나 상관 관계가 있는 것으로 확인되었다.

양생 기간 14, 28일 강도를 기준으로 시멘트량 증가에 따라서 일축압축강도는 선형적인 관계를 나타냈지만, 7일 강도를 기준으로 시멘트량 증가에 따라서 상관성이 조금 낮게 나타났다. 그리고 양생 기간에 따른 일축압축강도 역시 모두 선형성을 나타내는 것으로 확인되었다.

본 상관식은 다양한 현장여건 및 재료들에 대해서 모두 적용할 수 있는 식은 아니지만, 매립준설토와 석탄회 혼합토의 경우 시멘트와 같은 고성능 고화재를 이용하여 표면개량을 수행할 경우 적용 가능성을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

V. CONCLUSION

본 연구는 산업폐기물인 석탄회와 해상 투기 등으로 환경오염을 야기하고 있는 준설토를 연약지반의 표층고화처리 공법에 적용성을 검토하고자 역학적 특성에 대한 시험을 수행하고 그 결과를 다음과 같이 기술하였다.

(1) 본 연구에서는 표층고화재로 석탄회와 준설토의 활용성을 검증하기 위해서 법률로 정한 준설토와 석탄회의 배합비 50:50은 고정시키고 시멘트와 함수비를 조정하면서 시공성을 확인하기 위한 유동성 시험과 양생 시간에 따른 강도 특성을 확인하기 위한 일축압축강도 시험을 수행하였다.

(2) 유동성 시험결과, 모래+석탄회를 혼합한 시료는 재료 분리로 유동성 확보가 불가능하였고, 준설토 100%와 준설토+석탄회 혼합토의 경우 각각 함수비 91-92%와 122-125%에서 유동성 200 mm를 만족하였고, 이는 조립 재료인 석탄회가 첨가된 혼합토의 경우 석탄회가 베어링 역할을 하여 낮은 함수비에서도 소요 유동성을 확보할 수 있는 것으로 나타나 석탄회가 유동성 확보에는 유리한 것으로 확인되었다.

(3) 일축압축시험 결과, 모든 시료들은 양생 시간과 시멘트 함유량에 따라서 단계적인 강도 증가를 나타냈

며, 이를 시멘트량을 log-scale로 변환했을 때, 14, 28일강도는 시멘트량에 대해서 상관계수 0.99이상의 상관성을 나타냈으며, 양생 기간을 log-scale로 변환했을 때 시멘트량에 따른 일축압축강도도 모든 경우에 대해서 상관계수 0.94-0.99로 높은 상관성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 본 연구에서는 상기 일축압축강도의 상관성을 관계식으로 제안하였다. 본 상관식은 다양한 현장 여건을 반영할 수는 없지만, 매립준설토와 석탄회의 혼합토가 연약 지반의 표면고화처리용으로 활용성 및 개략적인 적용성을 검증할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 해양준설토의 염화 특성에 따른 콘크리트 부식, 시멘트 최적 혼합량 제시, 타 지역 준설토에 대한 검토 등의 추후 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R04SK01.

REFERENCES

- [1] 천병식, 고용일, "석탄회의 도로성토재 및 노상재로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정 혼합비", 대한토목학회 논문집, 제12권, 1호, pp177-189, 1992.
- [2] 천병식 외, "석탄회의 건설재로서의 활용에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp 567-570, 1995.
- [3] 이영생, 강승구, "석탄회를 이용한 기성능 건설재료의 토질공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한토목공학회 논문집, 제20권, 제2C호, pp147-154, 2000.
- [4] 김윤태, 강효섭, "페타이어 저회가 혼합된 유동성 복합지반재료의 공학적 특성", 한국해양공학회지, 제14권, 제3호, pp52-58, 2010.
- [5] 김주형, 조삼덕, 공진영, "석탄회를 사용한 저강도 고유동화재의 경화 특성 분석", 한국지반환경공학회 논문집, 제11권, 제11호, pp77-85, 2010.
- [6] Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R. "Developemnt of Bottom Ash as Pozzolanlic Material," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, no.1, pp48-53, 2003.
- [7] 천병식, 여유현, "준설토의 Sand Mat 재료 적합성 평가를 위한 시험시공 사례연구", 지반공학회 가을학술대회, pp 373-380, 1998.
- [8] 윤길립 외, "굴폐각을 혼합한 모르타르 혼합토의 강도특성 연구", 한국지반공학회 논문집 제17권 5호, pp 51-60, 2002.
- [9] 방성택, 연용흠, "모형토조실험에 의한 초연약지반의 표층개량에 관한 연구", 한국지반환경공학회 논문집, 제20권, 제5호, pp39-46, 2019.