

# 석탄회를 사용한 저강도 고유동화재의 경화 특성 분석

## Curing Characteristics of Controlled Low Strength Material Made with Coal Ashes

김 주 형<sup>1)</sup> · 조 삼 덕<sup>†</sup> · 공 진 영<sup>2)</sup> · 정 혁 상<sup>2)</sup> · 천 병 식<sup>3)</sup>

Kim, Juhyong · Cho, Samdeok · Kong, Jinyoung · Jung, Hyuksang · Chun, Byungsik

**ABSTRACT** : Unconfined compressive strength tests were performed to evaluate curing characteristics of controlled low strength material (CLSM) made with coal ashes. It is found that unconfined compressive strength normalized by curing times, increases as decreasing the water contents of CLSM particularly during first three days. Dynamic cone penetrometer tests were also carried out to evaluate cost-effective CLSM lump strength characteristics with time. It takes around 10 days to reach target strength, 500kPa (penetration rate, 20mm/blow). Curing rate significantly decreases after 10 days elapsed regardless of CLSM formulation.

**Keywords** : Controlled low strength material (CLSM), Coal ashes, Unconfined compressive strength, Curing time

**요 지** : 석탄회를 주재료로 하는 저강도 고유동화재의 특성을 분석하기 위해 일축압축강도시험을 수행하였으며, 경화 시간을 분석하였다. 동일한 배합비 상태에서 함수비가 낮을수록 일축압축강도 증가율이 큰 것으로 나타났으며, 초기 3일 동안에는 이와 같은 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인하였다. 또한, 가장 경제적인 시멘트 첨가비로 소형 모형지반을 조성하여 동적콘관입시험을 통해 배합비에 따른 저강도 고유동화재의 특성을 분석한 결과, 목표 일축압축강도인 500kPa(콘관입률 20mm/blow) 도달시간은 약 10일 정도 소요되는 것으로 나타났으며, 10일이 경과한 후에는 배합비와 상관없이 경화속도가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

**주요어** : 유동화 재료, 석탄회, 일축압축강도, 경화시간

## 1. 개 요

미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 오래전부터 화력발전소에서 배출되는 석탄회를 재활용하여 다양한 용도로 사용하고 있으나, 국내에서 석탄회는 여전히 폐기물이라는 인식을 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 최근 국내에서도 시멘트의 혼화재료, 비료, 성토 및 복토재료, 경량성 골재 등의 매우 제한적인 용도로 개발하여 재활용하고 있으나, 석탄회 재활용 비율은 석탄회 발생 증가량에 미치지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 석탄회를 대규모로 사용할 수 있는 건설용 재료로서의 다양한 재료 개발이 절실한 실정이다. 본 연구에서는 석탄회를 주요성분으로 하고 시멘트와 물을 첨가하여 혼합 초기에는 유동성이 높아 슬러리 상태로 타설할 수 있고, 점차 경화되어 일정시간 경과 후에는 다짐이 필요 없는 강도까지 도달하게 되어 관거와 같이 지중 구조물 주변에 다짐이 어려운 경우에 사용할 수 있으며, 추후 재굴착이 필요한 경우, 인력이나 장비로 재굴착이 가능한 저강도 고유동화재(CLSM, Controlled Low Strength Materials)

의 배합비에 따른 경화 특성을 분석하였다.

## 2. 매립 석탄회의 특징

국내 화력발전소에서 생산되는 석탄회는 석탄 연소 시 보일러 하부로 낙하되는 저회(bottom ash)와 입경이 저회보다 작아 집진기에서 포집되는 미분말회인 잔사회 또는 비회(fly ash)로 크게 구분한다. 국내에서 발생하는 석탄회는 연간 약 600만 톤이며, 이 중 58%는 재활용하고 있으나 나머지 42%는 매립처리를 하고 있는 실정이다. 석탄회 발생량 중 비회는 전체의 약 75%~80%를 차지하며, 화학적/물리적 특성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자형태로 포졸란성을 지니고 있어 콘크리트의 혼화재료나 비료재료 등으로 상당수 재활용되고 있다. 저회는 석탄회 발생량 중 약 10% 정도를 차지하고 있으며, 일부 벽돌이나 경량성 골재 등으로 사용하고 있으나 대부분을 회매립장에 매립하고 있는 실정이다.

표 1은 ○○발전소의 석탄회 매립장에서 채취한 저회와

1) 비회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원

† 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구위원(E-mail : sdcho@kict.re.kr)

2) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

3) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

표 1. 저회와 비회의 대표 화학성분

종류	비중	화학성분(%)							
		SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O
저회	1.84	50.6	11.5	1.75	0.85	24.7	5.91	1.72	0.37
비회	2.23	52.8	9.28	2.33	1.17	22.7	7.43	1.55	0.57

표 2. 유해성분 검출(mg/kg)

구분	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Cu	Cd	Hg	As	Pb
시험 결과	불검출	66.4	25.0	0.9	0.042	0.9	4.0
폐기물의 해양배출처리기준	370	410	270	10	1.2	70	220

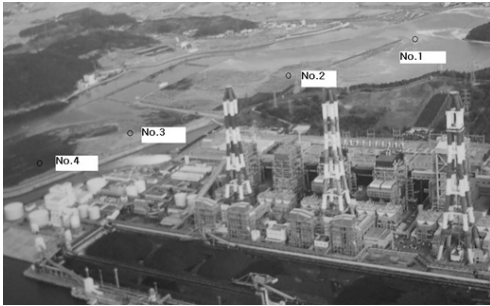


그림 1. 조사 위치

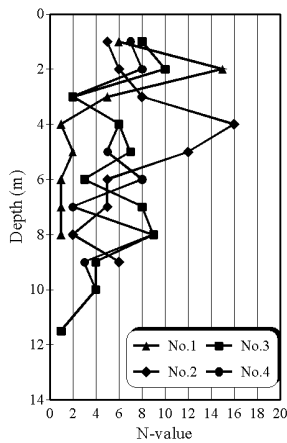


그림 2. 표준관입시험 결과

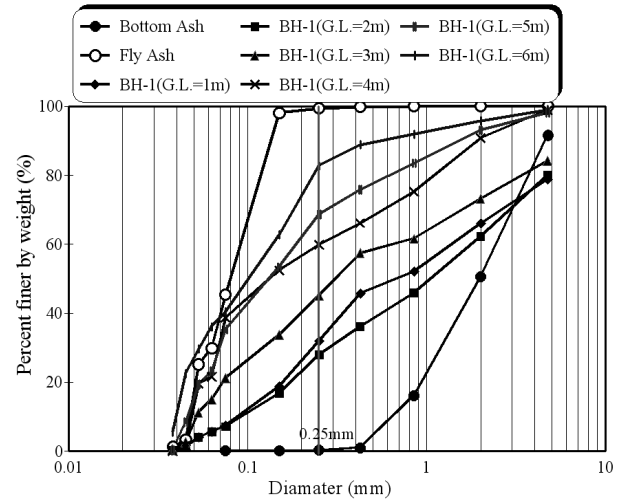


그림 3. 채취 시료의 입도 분포 (No.1)

표 3. 위치별 저회/비회 비율(%)

심도(m)	No.1	No.2	No.3	No.4
1	68/32	27/73	15/85	49/51
2	72/28	43/56	17/83	14/86
3	55/45	28/72	9/91	24/76
4	40/60	40/60	12/88	13/87
5	31/69	31/69	12/88	3/97
6	17/83	17/83	11/89	10/90
7	-	25/75	16/84	2/98
8	-	6/94	16/84	1/99
9	-	68/32	4/96	5/95
10	-	0/100	5/95	0/100
11.5	-	-	7/93	-

비회의 비중과 화학성분을 나타낸 것이다. 우선 입도크기가 상대적으로 큰 저회의 비중이 입도 크기가 상대적으로 작은 비회의 비중보다 작은 것으로 나타났으며, SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 석탄회의 75% 이상의 화학성분으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 또한, 표 2는 해양환경관리법시행규칙(국토해양부, 2010)에 의거하여 채취한 석탄회에 대한 중금속에 대한 유해성분을 검출한 것이다. 표 2에 나타난 것과 같이 유해 중금속 성분은 해양배출 처리 기준치를 모두 만족하고 있어 해양매립재로서 사용이 가능할 것으로 평가되었다.

석탄회의 대규모 재활용을 위해서는 회매립장에 매립되어 있는 매립회를 그대로 사용하는 것이 가장 바람직하지만, 발전에 사용하는 석탄의 종류에 따라 그리고 석탄회 매

립시기에 따라 매립된 석탄회의 물리적/화학적 특성이 상이한 것으로 알려져 있다. 그림 1과 그림 2는 ○○발전소의 석탄회 매립장에서 표준관입시험을 수행한 위치와 시험 결과를 나타낸 것이며, 그림 3은 이 지역에서 채취한 시료의 입도 분포 결과를 나타낸 것이다.

그림 2에서 보면 석탄회 매립장의 표준관입시험의 결과인 N값이 대부분 10이하로 매우 느슨한 상태인 것을 알 수 있다. 입경을 기준으로 비회와 저회를 분류하기가 어렵지

만, 그림 3에 나타난 것과 같이 석탄회 발생 단계에서 저회와 비회를 따로 채취하여 두 재료의 입도를 분석한 결과 두 재료의 입도 경계는 0.25mm 정도인 것으로 판단되었으며, 표 2에는 이를 근거로 저회와 비회를 분류한 결과를 나타내었다. 표 3에서 보면 저회와 비회의 혼합비율이 매립위치 및 매립 층에 따라 달라지는데, 가장 최근에 매립하고 있는 No.1 지역의 상부층은 저회의 비율이 우세한 반면 No.2, No.3, No.4 위치에서는 저회보다는 비회의 비율이 더 높게 나타났다. 또한, 하부 매립 지반에서 채취한 샘플에서 저회보다는 비회의 혼합 비율이 더 높게 나타났는데, 이는 최근 비회의 재활용 비율이 높아진 결과로 판단된다. 이와 같이 매립되어 있는 석탄회는 비회와 저회의 매립비율이 위치와 심도마다 다르기 때문에 일정한 품질의 석탄회를 사용하는 것은 매우 어려운 것으로 나타났다.

### 3. 실내시험

#### 3.1 저장도 고유동화재 기준

현장 조사 결과 매립되어 있는 석탄회를 토목재료용 매립재 또는 채움재로 사용하는 경우, 석탄회 배출 시기에 따라 또는 매립된 위치에 따라 석탄회의 입도분포가 다르게

나타나고 있다. 또한, 그림 2의 표준관입시험 결과에서 나타난 것과 같이 배출되는 석탄회를 그대로 매립하는 경우, 지반이 매우 느슨하게 되어 상부 구조물 건설 시에는 지반을 보강하거나 깊은 기초를 사용해야 하는 문제점이 있다. 따라서 석탄회를 이용하여 매립재 또는 채움재를 개발하기 위해서는 매립되어 있는 석탄회의 정확한 플로우(ASTM D 6103) 및 강도 특성(ASTM D 4832)을 파악할 필요성이 있다. 기존 저장도 고유동화재는 모래를 주성분으로 사용하며 시멘트 첨가량을 조절하여 필요한 일축압축강도를 얻고 있다. 저장도 고유동화재는 추후 보수공사 등을 고려해 인력 또는 기계로 재굴착이 가능한 정도의 일축압축강도를 가져야 하는데, 이에 대해 각 기관마다 다른 기준을 제시하고 있다. 예를 들면, ACI Committee 229(1994)에서는 2,068kPa(300psi) 이하의 일축강도를 가지는 재료를 저장도 고유동화재라고 정의하고 있으며, ASTM(2002)에서는 인력굴착 시 345kPa(50psi), 기계굴착 시 1,380kPa(200psi)를 TRB(2008)에서는 350~1,000kPa(51~145psi)을 저장도 고유동화재의 일축압축강도 범위로 제안하고 있다. 또한 저장도 고유동화재의 자기수평성 및 원활한 유동성을 확보하기 위해 ACI Committee 229(1994)와 TRB(2008) 등지에서는 플로우 값을 최소 20cm(≈8in) 이상이라고 규정하고 있다.

#### 3.2 플로우시험 결과

본 연구에서 사용한 석탄회는 매립되어 있는 매립회(Pond Ash)와 비회(Fly Ash)를 사용하였으며 그림 4에는 매립회의 입도분포를 나타내었다. 그림 4에서 보면 사용한 매립회는 순수 저회에 가까운 입도분포를 나타내고 있는데, 그림 4에 나타난 입도분포를 갖는 매립회와 비회를 배합하여 우선 ACI Committee 229(1994)와 TRB(2008)에서 규정하고 있는 플로우 값의 만족 여부를 판단하였다.

플로우시험은 배합된 고유동성 재료가 골고루 퍼져 나간 후에 물과 같이 자기수평성을 충분히 확보할 수 있는 척도가 되는 시험이다. 그림 5는 매립회와 비회를 7:3으로 배합한 상

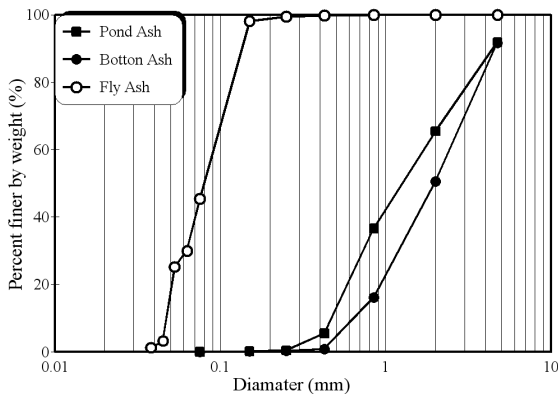


그림 4. 매립회의 입도분포



(a) 함수비 26%



(b) 함수비 28%



(c) 함수비 29%

그림 5. 예비 플로우시험

태에서 함수비를 변화시키며 플로우시험 수행 결과를 나타낸 것이다. 저장도 고유동화재의 플로우 값은 함수비가 높을수록 커질 것으로 판단되지만, 함수비가 증가할수록 첨가되는 고화재의 양도 증가해야 할 것으로 판단되어 플로우 값을 만족하는 가장 낮은 함수비 상태가 최적의 함수비라 할 수 있다. 그림에서 보면 매립회는 함수비에 매우 민감하게 반응해 함수비 1~2%의 차이에 매우 큰 플로우 값의 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있었으며, 함수비 29% 이상이 되어야 배합한 석탄회가 완전히 슬러리 상태가 되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 예비 플로우시험 결과를 바탕으로 석탄회 배합비를 다양하게 조절하여 플로우시험을 수행하였다.

예비시험 결과를 바탕으로 함수비는 31%, 32.5%, 34%의 세가지 조건으로 플로우시험을 수행하였으며, 매립회와 비회 회 배합비는 0~100%까지 조절하여 공시체를 제작하였다.

표 4는 시멘트 첨가비에 따른 석탄회 배합비별 플로우시험 결과를 나타낸 것으로, 비회를 100% 사용하는 경우, 함수비 31% 상태에서는 대부분 저장도 고유동화재의 플로우 값이 20cm에 미치지 못하였으며, 함수비를 증가시켜야 20cm 이상의 플로우 값을 얻을 수 있었다. 또한, 매립회를 100% 사용하는 경우에는 함수비 31%~34% 조건 전반에 걸쳐 만족할만한 플로우 값을 얻지 못해 시험에 적용한 함수비 상태에서는 자기수평성을 만족하는 저장도 고유동화재를 얻을 수 없을 것으로 판단되었다. 저장도 고유동화재의 플로우 값과 시멘트 첨가비와의 특별한 상관관계는 없는 것으로 나타났다.

### 3.3 일축압축시험 결과

석탄회를 주성분으로 하는 저장도 고유동화재의 일축압축시험은 ASTM D 4832에서 제시한 방법을 사용하였으며,

표 4. 플로우시험 결과(cm)

water content cement ratio (%) P.A:F.A (%)	31.0%					32.5%					34.0%				
	1.4	3.2	4.9	6.6	8.2	1.4	3.1	4.8	6.4	8.0	1.3	3.0	4.7	6.3	7.9
0 : 100	17	13	21	16	18	18	13	29	23	23	27	24	30	29	27
30 : 70	32	28	27	25	21	33	32	29	27	20	37	35	36	30	25
50 : 50	29	26	24	26	23	37	33	30	30	30	38	37	32	32	32
70 : 30	26	27	22	25	24	33	31	26	27	29	37	32	35	29	28
100 : 0	17	17	18	24	20	17	17	18	18	16	18	17	16	14	11

표 5. 일축압축시험 결과(kPa)

water content(%) P.A:F.A (%)	Age (day)	31.0					32.5				34.0			
		cement ratio( %)												
		3.2	4.9	6.6	8.2	3.1	4.8	6.4	8.0	3.0	4.7	6.3	7.9	
0:100	3	-	391.93	602.55	822.71		316.77	458.60	598.72		214.86	318.16	375.80	
	7	-	630.36	1030.08	1476.65		580.89	707.00	1055.84		367.12	599.70	707.92	
	14	-	749.62	1234.62	1717.39		639.59	1043.63	1555.26		452.21	745.69	951.75	
	28	-	814.24	1346.88	1939.36		686.91	1093.08	1621.47		466.64	785.16	1102.63	
30:70	3	-	516.13	569.64	764.75	101.26	253.29	328.02	622.93	114.01	344.37	478.98	737.58	
	7	-	960.66	991.22	1340.98	152.43	545.86	661.15	1321.44	126.74	646.71	820.60	1442.26	
	14	-	1301.25	1327.99	1830.60	188.53	771.16	1014.77	1802.27	149.46	742.30	1016.89	1576.27	
	28	-	1497.33	1555.05	2206.31	217.81	819.97	1115.36	1983.94	176.74	819.75	1314.30	1642.16	
50:50	3	204.67	521.87	646.92	1143.52	138.00	394.70	473.65	725.96	125.47	430.78	423.78	619.22	
	7	280.88	933.54	1187.69	1720.38	236.93	660.17	769.67	1128.51	149.21	619.01	769.67	1102.41	
	14	332.05	1113.16	1718.68	2571.76	252.22	878.96	1054.50	1998.03	170.35	848.61	1128.30	1800.79	
	28	345.62	1382.31	2129.71	2767.60	276.85	1133.61	1382.10	2242.18	210.61	951.75	1258.60	2477.09	
70:30	3	193.62	444.57	615.19	779.86	128.65	340.59	426.96	686.91	130.78	224.73	414.44	527.76	
	7	313.16	687.76	947.29	1194.30	193.84	657.63	982.30	1263.69	195.29	340.17	700.28	890.63	
	14	367.51	1078.22	1575.42	1800.36	206.68	825.70	1342.63	1875.48	212.78	626.01	1215.94	1507.94	
	28	553.92	1250.32	2126.52	2520.59	215.79	898.91	1745.19	2524.41	274.52	873.02	1812.67	2184.46	
100:0	3	-	29.71	35.70	40.11		25.68	90.82	101.43		44.88	115.65	223.45	
	7	-	39.68	43.77	59.84		28.44	91.25	157.67		58.14	161.28	289.24	
	14	-	48.60	53.95	64.51		45.41	125.84	210.72		75.12	249.13	394.70	
	28	-	64.94	74.96	84.46		65.78	156.40	277.57		108.86	329.34	471.10	

플로우시험에 사용한 동일한 배합비로 공시체를 제작하였다. 배합조건 중 시멘트 첨가비가 1.4%인 경우는 모든 매립회와 비회의 혼합비율과 상관없이 수중 양생 시 공시체가 제모습을 유지하지 못해 시멘트 첨가비는 최소 1.4%를 초과하여야 할 것으로 판단되었다(공진영 등, 2010). 또한 시멘트 첨가비가 3.0~3.2%이더라도 비회와 매립회 100% 조건, 그리고 매립회와 비회 혼합비율 30:70 조건에서 역시 공시체 수중양생 시 공시체가 흐트러져 일축압축강도 시험이 불가하였다. 표 5는 공진영 등(2010)이 일축압축시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 표 5에서 보면 매립회를 100% 사용한 경우에는 비회를 혼합한 다른 배합비의 일축압축강도에 비해 매우 낮은 일축압축강도를 가지는 것으로 나타났다. 표 4와 표 5의 시험 결과에서 알 수 있듯이 매립회 100%를 사용하는 경우에는 자기수평성을 나타내는 플로우 값은 만족하지 않을 뿐만 아니라 일축압축강도 자체도 매우 낮은 일정량의 비회를 혼합해서 사용해야 함을 알 수 있다.

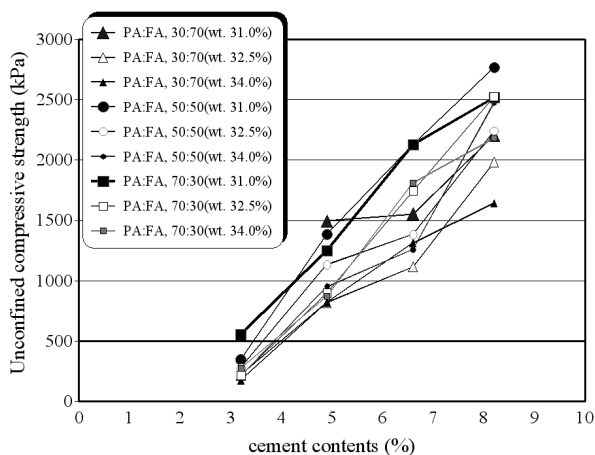
그림 6은 공진영 등(2010)이 시험한 다양한 조건의 석탄회 혼합비에 따라 제작한 저강도 고유동화재 공시체의 28일 일축압축강도 결과를 시멘트 첨가량과 함수비에 따라 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서 보면 시멘트 첨가량이 증가할수록 28일 일축압축강도는 거의 정비례하여 증가하는 양상을 나타내고 있으며, 그림 6(b)에 보면 함수비에 일축압축강도는 매우 민감하게 반응하며 함수비가 증가할수록 일축압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 석탄회를 사용한 저강도 유동화재의 최적 배합비는 자기수평성을 나타내는 최소 플로우 값을 만족하고 최소 시멘트 첨가량으로 원하는 강도를 얻을 수 있는 배합비를 선택해야 한다. 그림 6의 결과에서 보면 함수비가 증가하면 자기수평성을 나타내는 플로우 값은 증가하지만 동일한 일축압축강도를 나타내기 위해서는 더 많은 시멘트가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 28일

경과 후에 필요한 일축압축강도 기준을 500kPa로 한다면, 매립회와 비회의 배합비는 70:30이며, 31%의 함수비 그리고 시멘트가 3.2% 첨가되는 경우가 가장 경제적인 배합비로 나타났다.

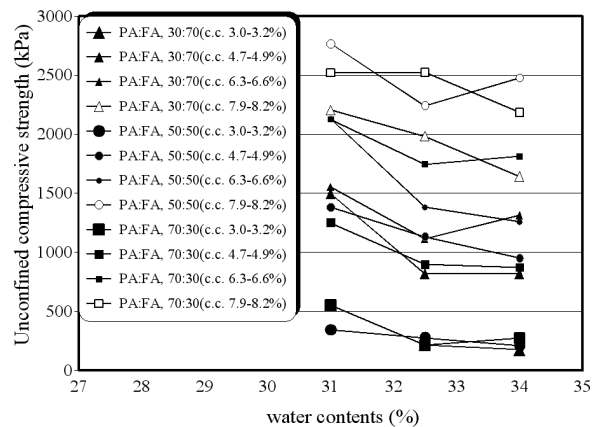
### 3.4 시간 경과에 따른 강도 증가율

저강도 고유동화재는 자기수평성 및 목표강도 발휘 뿐만 아니라 시간 경과에 따른 강도증가율도 매우 중요하다. 그림 7은 시간 경과에 따른 각 배합비의 공시체의 28일 일축압축강도로 정규화한 저강도 고유동화재의 일축압축강도 증가율을 나타낸 것이다. 우선 함수비가 31%인 경우 3일 후 측정된 일축압축강도는 28일 강도를 기준으로 약 28~60%를 나타내고 있으며, 7일 후 측정된 일축압축강도는 44~81%의 일축압축강도를 나타내어 대략 1주일 정도면 28일 후 측정된 강도의 50% 정도는 발휘되는 것으로 나타났다. 함수비가 32.5%인 고유동화재의 경우에는 3일 후 측정된 일축압축강도는 28일 강도를 기준으로 26%~60%로 나타났으며, 7일 후 측정된 일축압축강도는 50~85%의 일축압축강도를 나타내고 있다. 함수비가 34%인 경우에도 3일 후에 측정된 일축압축강도는 28일 강도 기준으로 23~65%로 나타났으며, 7일 후 측정된 일축압축강도도 39~87%로 나타내고 있다. 다소 배합비 별로 차이는 있으나 특이한 것은 시멘트 함량이 낮을수록 28일 강도 대비 3일 일축압축강도와 7일 일축압축강도의 비가 가장 크게 나타나고 있다는 것이다. 이는 시멘트 양이 상대적으로 적은 경우에는 경화 현상이 초기에 크게 발휘되지만 시멘트 양이 상대적으로 많은 경우에는 경화 현상이 시간이 경과함에 따라 지속적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8~10은 표 5에서 나타낸 여러 가지 배합비에 대한 일축압축강도를 경화 소요일수로 정규화하여 일별 일축압

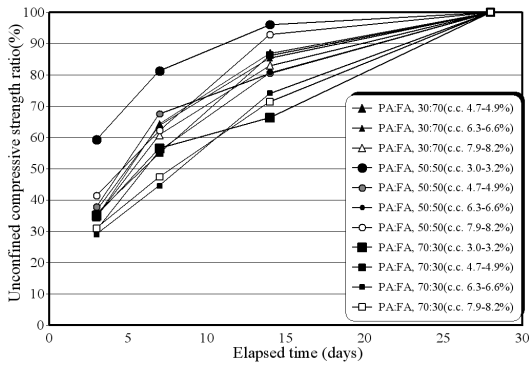


(a) 시멘트 첨가비에 따른 변화

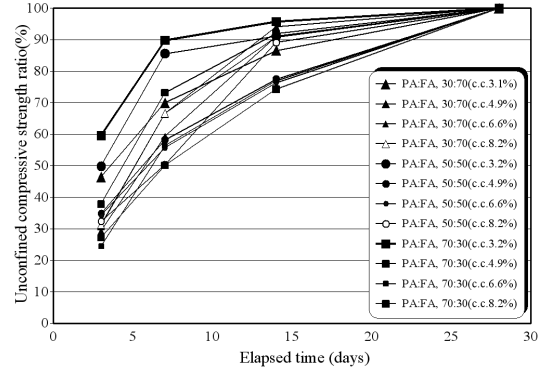


(b) 함수비 증가에 따른 변화

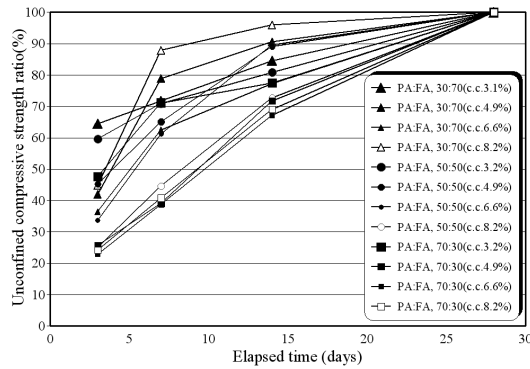
그림 6. 일축압축강도 변화(28일 강도)



(a) 함수비 31%

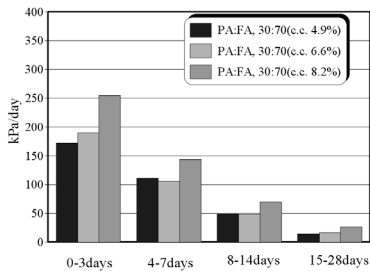


(b) 함수비 32.5%

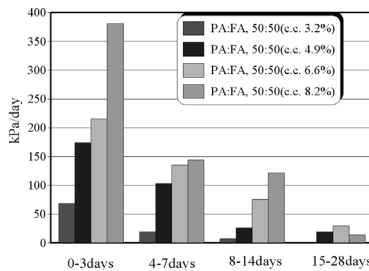


(c) 함수비 34%

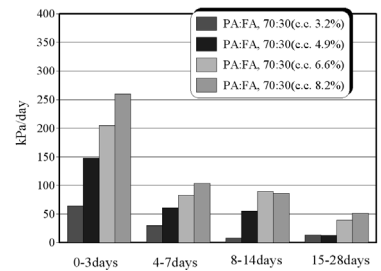
그림 7. 시간 경과에 따른 일축압축강도 증가율



(a) 함수비 31%

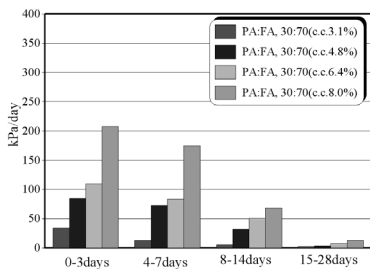


(b) 함수비 32.5%

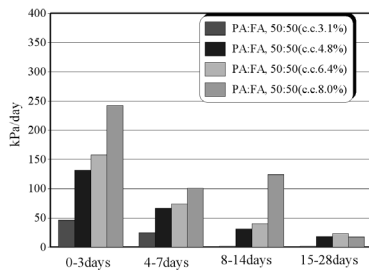


(c) 함수비 34%

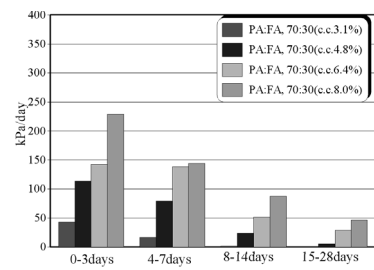
그림 8. 일축압축강도 증가율(PA:FA, 30:70)



(a) 함수비 31%



(b) 함수비 32.5%

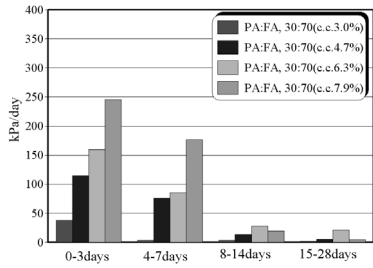


(c) 함수비 34%

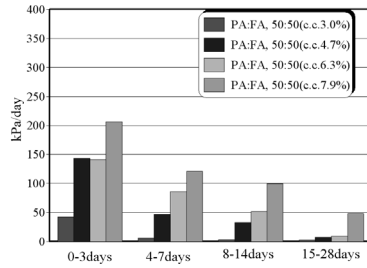
그림 9. 일축압축강도 증가율(PA:FA, 50:50)

축강도 증가율(kPa/day)을 나타낸 것이다. 여기에서 보면 그림 7에서도 나타난 것과 같이 초기 3일에 발생하는 일별 일축압축강도 증가율이 가장 크게 나타났으며, 시간이 경과할

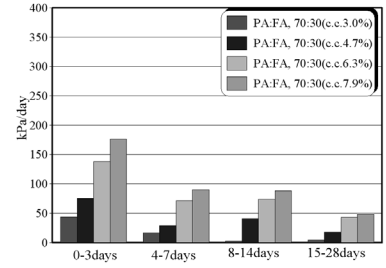
수록 일축압축강도 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 매립회와 비회 그리고 시멘트 배합비 상태에서는 함수비가 낮을수록 일축압축강도 증가율이 증가하고 있



(a) 합수비 31%



(b) 합수비 32.5%



(c) 합수비 34%

그림 10. 일축압축강도 증가율(PA:FA, 70:30)

는 양상을 나타내고 있으며, 특히 초기 3일 동안에는 이와 같은 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 동일한 합수비 상태에서는 매립회와 비회의 배합비에 따라 일축압축강도 증가율의 변화의 뚜렷한 경향을 나타내고 있지는 않지만, 본 시험에서 가장 경제적인 혼합비라고 판단한 시멘트 첨가비 3.1%인 경우에는 매립회:비회의 혼합비가 50:50 그리고 70:30인 경우 모두 비슷한 일축압축강도 증가율을 나타내고 있다.

#### 4. 소규모 모형시험

소규모 모형시험은 그림 11에 나타난 것과 같은 1m<sup>3</sup> 규모의 혼합 및 펌핑 장치를 제작하여 수행하였다. 혼합장치는 리본타입의 믹서로 혼합속도를 자유자재로 제어할 수 있

으며, 많은 량의 비회와 저회 혼합물의 정확한 중량비를 측정하기 위해 믹서 하부에 로드셀을 장착하여 혼합 중량을 정확히 확인할 수 있도록 제작하였다. 또한, 비회와 저회를 쉽게 혼합하기 위해 호퍼와 스크류 타입의 공급장치를 이용해 해당시료들을 혼합하였으며, 혼합된 저장도 고유동화재는 그림 12에 나타난 것과 같은 높이 94cm×바닥직경 76cm×윗부분직경 100cm의 크기를 가지는 고무재질의 원통에 타설하여 모형지반을 조성하였다. 조성된 지반의 시간별 강도 증가 양상을 평가하기 위해서는 동적콘관입시험기(Dynamic cone penetrometer test)를 이용한 관입저항력으로 지반의 강성증가 양상을 분석하였다.

또한 소규모 모형시험에서 조성한 모형 지반에 대한 동적콘관입시험 결과를 일축압축강도로 간접적으로 평가하기 위해  $\Phi 400\text{mm} \times 500\text{mm}$ 의 소형공시체와  $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  크기의 공시체를 제작하여 소형공시체는 동적콘관입시험 결과를,  $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  크기의 공시체는 일축압축시험을 수행하였다. 그림 13은 일축압축강도와 콘관입률(mm/blow)과의 관계를 나타낸 것으로 두 시험 결과 간에는 그림에서 나타난 것과 같이 음의 지수값과 같은 일정한 관계가 있음을 알 수 있다. 특히, 두 시험간의 상관관계 분석에서 보면, 본 연구에서 목표로 할 뿐만 아니라 屈内澄夫(1996)가 경량성 토재로서 저장도 유동화토가 가져야 할 최소 일축압축강도

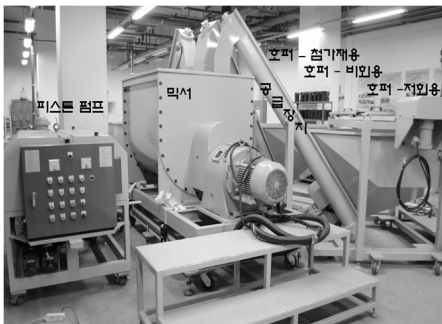


그림 11. 혼합장치

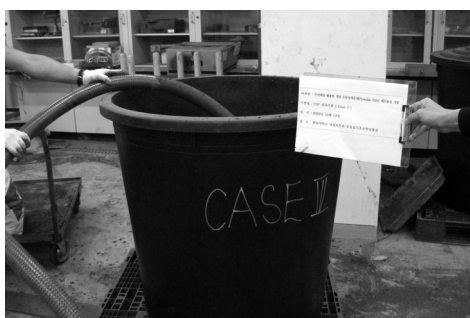


그림 12. 지반조성

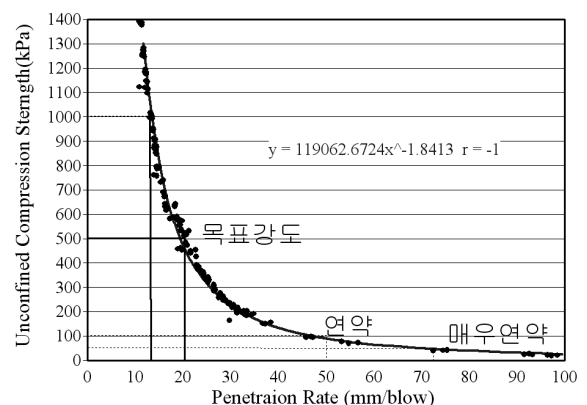


그림 13. 콘관입률과 일축압축강도 관계

로 제안한 500kPa는 약 20mm/blow 정도의 콘관입률로 환산할 수 있으며, 사질토의 연약층의 기준으로 판단되는 일축 압축강도 100kPa는 약 50mm/blow 정도의 콘관입률로 점성토의 연약층의 기준으로 판단되는 일축압축강도 50kPa는 약 73mm/blow로 환산할 수 있다.

그림 14는 소형모형시험에서 수행한 지반에 대한 동적콘관입시험 결과를 시간에 따라 나타낸 것이다. 소형모형시험에서는 앞서 실내시험에서 평가한 다양한 석탄회, 시멘트, 물 배합비 중 가장 경제적인 것으로 판단되는 매립회:비회 혼합비 70:30, 시멘트 첨가비 3.1%를 중심으로 시멘트 첨가비와 함수비를 조절하여 조성지반의 강도를 평가하였다. 모든 조건의 지반 지반조성 후 초기 24시간 경과 시까지는 콘이 자중으로 관입되어 콘관입률을 측정할 수 없을 정도로 매우 낮은 강도를 갖지만 시간이 경과할수록 포졸란 반응이 발생하여 혼합체의 강도가 증가하고 있는 양상을 알 수 있다. 소형모형시험 결과에서도 실내시험의 결과에서와 같이 동일배합비의 경우 함수비가 감소할수록 콘관입률이 감소하여 지반이 더 단단해지는 양상을 확인할 수 있었으며, 동일함수비 조건에서는 시멘트 첨가비가 증가할수록 콘관입률이 감소하는 양상을 뚜렷이 확인할 수 있었다. 특히 시멘트함유율이 0%인 경우에는 60일이 경과한 시점에서도 1회 타격 시 콘관입률이 27.7cm/회에 달해 장시간을 방치해도 지반의 강도는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 특히, 실내시험에서 유동화토로 최적의 배합비로 결정된 시멘트 첨가비 3.2%, 함수비 31% 상태에서는 점성토에 대한 연약지반 기준인 50kPa(콘관입률 72mm/blow)에 도달시간은 약 4일 정도 소요되는 것으로 나타났으며, 목표 강도인 500kPa(콘관입률 20mm/blow)에 도달시간은 약 10일 정도 소요되는 것으로 나타났다. 소형모형시험 결과 10일이 경과한 후에는 경화 반응의 크기가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 앞서 수행한 실내시험에서 공시체 제작 시에 수중

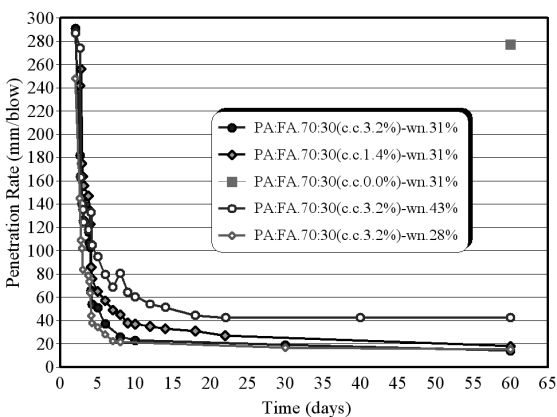


그림 14. 소형모형시험에서 수행한 동적콘관입시험 결과

양생 중 공시체가 흐트러져 일축압축강도 시험을 수행할 수 없었던 1.4% 시멘트 첨가비에 대한 모형지반의 동적콘관입 시험 결과를 보면, 목표 일축압축강도 500kPa에 도달하는 기간은 시멘트 첨가비 3.2% 지반에 비해 약 6배 긴 60일 정도 소요되는 것으로 나타나 시멘트량을 최소화하여도 매립지 조성공사와 같이 공사기간이 충분한 지역에는 시멘트 첨가비를 최소화하더라도 목표 일축압축강도를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 매립회를 주 재료로 하는 저강도 고유동화재의 개발을 위해 실내시험과 소형 모형시험을 통해 석탄회, 시멘트 그리고 물의 배합비에 따른 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저강도 고유동화재를 만족하는 플로우 값은 매립회 또는 비회만 사용하는 경우보다 매립회와 비회를 혼합한 경우 더 낮은 함수비에서 높은 플로우 값을 나타냄을 확인하였다.
- (2) 함수비가 증가하면 자기수평성을 나타내는 플로우 값은 증가하지만 동일한 일축압축강도를 나타내기 위해서는 더 많은 시멘트가 사용되어야 하므로, 가장 경제적인 배합비는 매립회와 비회의 혼합비가 70:30이며, 31%의 함수비 그리고 시멘트가 3.2% 첨가되는 경우이다.
- (3) 실내 일축압축시험 결과를 바탕으로 시멘트 첨가에 따른 저강도 고유동화재의 경화시간을 분석한 결과 동일한 배합비 상태에서는 함수비가 낮을수록 일별 일축압축강도가 증가하고 있는 양상을 나타내고 있으며, 특히 초기 3일 동안에는 이와 같은 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인하였다.
- (4) 소형 모형지반을 조성하여 동적콘관입시험을 통해 배합비에 따른 저강도 고유동화재의 특성을 분석한 결과, 매립회와 비회 혼합비 70:30, 시멘트 첨가비 3.2%, 함수비 31% 상태에서는 점성토에 대한 연약지반 기준인 50kPa(콘관입률 72mm/blow)에 도달시간은 약 4일 정도 소요되는 것으로 나타났으며, 목표 강도인 500kPa(콘관입률 20mm/blow)에 도달시간은 약 10일 정도 소요되는 것으로 나타났다. 또한, 소형모형시험 결과 10일이 경과한 후에는 배합비와 상관없이 경화 속도가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.



## 감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No. 20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재 (Flowable Fill)제조공정 개발).

## 참고 문헌

1. 공진영, 강형남, 천병식(2010), 석탄회를 활용한 저강도 고유동 화재의 일축압축강도와 플로우 특성, *한국지반공학회논문집*, Vol. 26, No. 1, pp. 75~83.

2. 국토해양부(2010), *해양환경관리법시행규칙*, <별표 8> 해양배출처리기준.
3. ACI Committee 229(1994), *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*, American Concrete Institute, 229R-2. pp. 1~12.
4. ASTM D 4832(2002), *Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders*, American Society for Testing Materials.
5. ASTM D 6103, *Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (CLSM)*, American Society for Testing Materials.
6. 届内澄夫(1996), *石炭灰の水域埋立てへの利用に關する研究*, 博士學位論文, 茨城大學, pp. 95.
7. TRB(2008), *Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low-Strength Material in Highway Construction*, NCHRP Report 597, U. S. Transportation Research Board, pp. 3~59.

(접수일: 2010. 9. 6 심사일: 2010. 9. 15 심사완료일: 2010. 10. 5)