

급결성 유동화처리토의 특성에 관한 실험적 연구

A experimented study on Rapid-Setting Flowable Material

이상일¹⁾, Sang-Il Lee, 조대호²⁾, Dae-Ho Cho, 한상재³⁾, Sang-Jae Han, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 한양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, samy231@empal.com

²⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chungang University

³⁾ 한양대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

⁴⁾ 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Controlled low-strength material(CLSM) which is easily excavated and also known as flowable material, is commonly used as a backfill in utility trenches and other applications. In this study, a rapid-setting flowable material a kind of CLSM made with a field soil were evaluated by an experimental study. The properties ordinarily desired from the mix are: (a) flow under gravity; (b) hardening for early workability(after 4 hours)and cover; and (c) ultimate strength low enough to allow ready excavation. Fluidity of fresh material is evaluated using a simple spread test. Hardening is measured by a mortar penetrometer, and these values are correlated with unconfined compressive strength. It is desirable to keep the ultimate strength to less than 5.6kg/cm^2 somewhat less target strength is selected for the 28-day value.

Key words : Rapid-setting, Controlled low-strength, Fluidity, W/C-Ratio

1. 서 론

전통적으로 관 매설 공사에 사용되어 온 되메우기 방법은 트렌치를 굴착한 후 저면에 모래를 포설하고 관을 설치하여 그 위에 모래 또는 현장 발생토를 이용하여 다짐하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 흙을 다짐하는데 시간과 노력이 많이 소요 될 뿐만 아니라 관 하부 및 작은 틈새를 되메우기 어렵다. 이러한 여러 가지 문제점을 해결할 수 있도록 유동성 뒤채움재를 활용하는 방안이 제안되었다. 기존 유동성 뒤채움재는 주로 모래, Fly Ash, 시멘트, 물을 적절히 혼합하여 충분한 유동성을 갖을 뿐만 아니라 시멘트 이상으로 강도를 발현시킬 수 있으나 가격이 저렴한 반면, 강도발현이 늦고 잔토처리비용 및 모래수급이 어려운 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하면서, 현장발생토와 고화재를 현장에서 혼합하는 것만으로 강도를 발현시킬 수 있는 고성능 유동화처리재(이하 G-Agent)가 개발되었다. 그러나 개발된 처리재의 최적배합비와 실제 현장발생토와 혼합했을 경우, 발생하는 여러 가지 인자들이 정량화되지 못한 실정이다. 본 연구에서는 급결성과 친환경성을 갖는 G-Agent와 현장에서 채취한 시료를 통일분류법을 기준으로 5가지(SW, SM, SC, ML, CL)로 분류하여 실내실험을 실시하였다. 이들 결과를 바탕으로 고화재배합과 강도의 상관관계를 규명하고자 하였으며 고성능 유동화 처리토의

적정 배합비를 도출하고자 하였다.

2. 시료 특성

본 연구에서는 실제 현장토에서의 유동화처리제의 적용성을 파악하기 위해 경기도 안산시 소재 한양 대학 부근 OO 현장에서 채취한 시료(SW, SM, ML)와 남해 광양만 부근 OO 해성점토(CL)를 채취하여 사용하였다. 또한 채취된 시료를 특성에 맞게 분류하기 위해 입도분석을 하였고, 액·소성한계시험을 실시하였다. 그러나 SC의 경우 실제 지반에서의 채취가 용이하지 않았으므로, 채취된 SW와 CL을 50:50으로 혼합하여 조성하였다. 표 1은 5가지 시료의 입도분석결과와 비중을 나타내었으며, 그림 1에는 입경가적곡선을 나타내었다.

표 1. 각 시료의 물성

최대입경	26.5mm	19.1mm	4.75mm	0.149mm	0.25mm
D60(통과백분율60%의 입경)	2.8mm	0.55mm	0.95mm	0.025mm	0.02mm
D30(통과백분율30%의 입경)	0.77mm	0.22mm	0.09mm	0.015mm	0.01mm
D10(통과백분율10%의 입경)	0.2mm	0.15mm	0.05mm	0.0095mm	0.0065mm
균등계수 $Cu=D_{60}/D_{10}$	14.0	3.7	19	2.6	3.1
곡률계수 $Cc=(D_{30})^2/(D_{60} \times D_{10})$	1.06	0.59	0.171	0.95	0.77
#200번 Sieve 통과율	1.53%	5.12%	27.7%	90.27%	99.22%
비중	2.71	2.71	2.71	2.68	2.69
액성한계				31%	49%
소성한계				23.2%	28%
통일분류법	SW	SM	SC	ML	CL

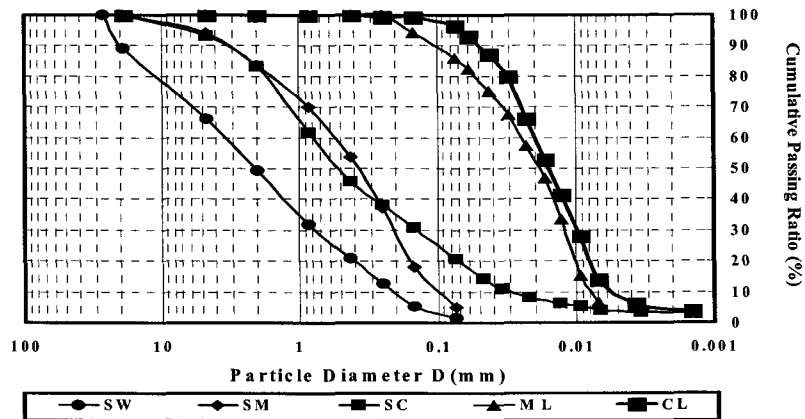


그림 1. 각 시료의 입경가적곡선

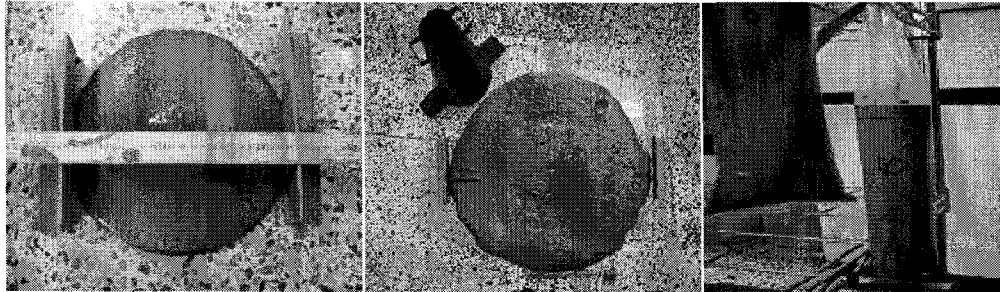
3. 실험

3.1 예비실험

본 연구에서는 채취된 시료를 4번체(4.76mm)로 거른 후 유동성, 블리딩, 일축압축 강도특성에 따른 예비시험을 실시하였다. 이를 바탕으로 본 시험의 배합비를 선정 하였다. 예비시험의 경우, 일본 도로공단 규격 실린더몰드(JHS A 313, $\phi 8\text{cm} \times H 8\text{cm}$)와 미국 표준시험협회(ASTM D 6133, $\phi 3\text{in} \times H 6\text{in}$) 규격 실린더몰드를 제작하여, 유동성 시험(ASTM: 6in 이하의 흐름값은 저유동, 6~8in는 중간, 8in 이상의 흐름값은 고유동으로 분류, 일본 동경전력: 18~30cm)을 실시하였다. 이 때 기준치를 18~30cm로

설정하고 기준치에 부합되는 배합비 범위에 만족하도록 하였다. 또한 $\phi 5\text{cm} \times \text{H}50\text{cm}$ 의 폴리에틸렌 실린더를 제작하여 블리딩 시험을 실시하였다(기준 : 블리딩률 1%이하). 모든 기준치에 만족하면, 각 배합비 별로 시료와 고화재를 4시간 공기양생 시키고, 일축압축 강도시험을 실시하였다. 그리고 기준치(기준 : $1.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상)에 부합되는 범위를 선택하여 본 실험의 배합비를 설정하였다.

그림 2에는 유동성 시험, 슬럼프콘 시험 그리고 블리딩 시험의 전경을 나타내었다.



(a) 유동성 시험

(b) 슬럼프콘시험

(c) 블리딩시험

그림 2. 유동성시험, 슬럼프콘 시험, 블리딩시험

3.2 본실험

본 시험에서는 예비시험과 동일하게 먼저 유동성, 블리딩 시험을 실시하였다. 또한 슬럼프 콘을 이용하여 슬럼프 플로우값을 구하였다. 유동성, 블리딩 시험 후 선정된 배합비에 따라 공시체를 제작하고, 4시간, 1일, 7일, 28일의 양생기간을 설정하였다. 4시간 양생 후, 예비시험과 동일하게 몰드 내에서 공기양생을 하였고, 그 외의 경우에는 진공포장을 하여, 항온 항습기에 넣고 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도로 진공 양생시켰다. 양생이 완료되면, 일축압축 강도시험과 투수시험을 실시하였다. 또한 유동화 처리토의 응결시간에 따른 관입 저항치를 측정하기 위하여 응결시간 시험을 실시하였다.

4. 실험 결과

4.1 예비시험 결과

SW 시료를 이용한 경우, 현장시료를 전체 혼합물의 약 $53 \pm 2\%$ 로 비율을 일정하게 고정시키고 물과 고화재와의 중량비(이하 W/C로 표기)를 변화시키면서 유동성 시험을 실시했다. 그 결과 SW의 시료의 경우에는 기준치를 만족시키는 배합비는 약 160~180%로 나타났다.

SM 역시 현장토 $59 \pm 1\%$ 를 기준으로 W/C를 변화시키는 방법으로 시험을 실시하였으며, 기준치를 만족시키는 배합비 약 146~192%를 기준으로 오차를 감안하여 본 시험의 배합비를 설정하였다.

SC 시료의 경우에는 기준치를 만족시키는 배합비 215%를 기준 현장토의 비율을 예비시험 보다 낮추고(43.5%) 최대/최소치의 오차를 감안하여 본 시험의 배합비를 설정하였다.

ML 시료는 현장토비를 36~42% 범위로 변화 시키며 기준치에 부합되는 W/C 배합비를 찾고자 하였으며 이를 바탕으로 기준치를 만족시키는 W/C비 164~230%를 기준으로 배합비를 설정하였다.

CL은 유동성을 만족시키기 위해 현장토의 비를 35%~40%의 범위에서 W/C비를 변화시키면서 시험을 실시하였다. 하지만 이 범위에서는 강도기준에 미치는 값을 찾지 못하였기 때문에 기준에 부합되는 W/C 비를 찾기 위해 현장토비(26~40%)를 바꾸면서 제시험을 실시하였다. 그 결과 W/C 187%이하에서 기준 강도치에 부합되는 결과가 나타났다. 그러나 187% 이하에서는 유동성에 부합되지 못하였으므로 W/C비의 범위를 찾을 수가 없었다. 따라서 CL의 경우에는 유동성과 일축강도 기준치에 부합되는 W/C비를 설정하기 위해 촉진제를 고화재 1kg당 6g을 첨가하였다. 그 결과 강도($1.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)와 유동성

(18~30cm)을 기준치를 만족하는 W/C가 187와 238%에서 나타났다. 이상의 결과로부터 촉진제를 고화재 1kg 당 6g씩 혼합하고, W/C 187~238%를 기준으로 최대/최소치의 오차를 감안하여 본 시험의 배합비를 설정하였다. 표 2에는 예비시험 결과를 바탕으로 설정된 본 시험의 배합비를 나타내었다.

표 2. 본 시험의 배합비

시료	배합 No.	현장토(%)	고화재(%)	W/C(%)
SW	SW-1	53.3	14.0	212
	SW-2	53.3	16.0	186
	SW-3	53.3	18.0	165
	SW-4	53.3	20.0	149
SM	SM-1	60.0	13.0	207
	SM-2	60.0	13.9	192
	SM-3	60.0	15.5	168
	SM-4	60.0	17.1	150
SC	SC-1	43.5	17.0	231
	SC-2	43.5	18.4	207
	SC-3	43.5	19.2	195
	SC-4	43.5	20.0	182
ML	ML-1	38.8	16.9	263
	ML-2	38.8	17.4	241
	ML-3	38.8	19.9	208
	ML-4	38.8	21.0	191
CL	CL-1	32.4	19.3	251
	CL-2	32.4	20.0	238
	CL-3	32.4	20.8	225
	CL-4	32.4	21.6	212

4.2 유동성 및 블리딩 실험결과

1) SW와 고화재 혼합시험 결과

시험결과, 유동성 시험과 블리딩 시험의 경우, 기준치에 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 슬럼프 콘을 이용한 유동성 시험에서는 W/C 165%이하에서는 기준치(60±10cm)에 부합되지 못하는 결과가 나타났다. 표 3에는 SW 시료에서 배합비에 따른 유동성, 슬럼프, 블리딩 시험의 결과를 나타내었다.

표 3. 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(SW)

배합 번호	W/C(%)	고화재비(%)	현장토비(%)	유동성시험		슬럼프 플로우(cm)	블리딩률 (%)
				JHS(cm)	ASTM(cm)		
SW-1	212	14.0	53.3	22.8	32.1	67.0	0.00
SW-2	186	16.0	53.3	19.7	27.7	64.5	0.00
SW-3	165	18.0	53.3	18.8	27.6	42.7	0.00
SW-4	149	20.0	53.3	18.1	26.7	45.0	0.00

2) SM과 고화재 혼합시험 결과

SM 시료의 경우 W/C 207%를 제외하고는 모두 기준치에 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 슬럼프 콘을 이용한 유동성 시험에서는 W/C 150%, 192%에서는 기준치(60±10cm)에 부합되지 못하는 결과가 나타났다. 블리딩 시험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다. 표 4에는 SM 시료에서 배합비에 따른 유동성, 슬럼프, 블리딩 시험의 결과를 나타내었다.

표 4. 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(SM)

배합 번호	W/C(%)	고화재비(%)	현장토비(%)	유동성 시험		슬럼프 플로우(cm)	블리딩률 (%)
				JHS(cm)	ASTM(cm)		
SM-1	207	13.5	60.6	22.1	35.7	70.8	0.028
SM-2	192	14.3	60.0	21.3	29.2	80.0	0.035
SM-3	168	16.0	58.8	21.5	28.8	52.3	0.025
SM-4	150	17.7	58.1	17.5	25.5	48.3	0.011

3) SC와 고화재 혼합시험 결과

유동성 시험의 경우, W/C 231%를 제외하고 182~207% 범위에서 모두 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 슬럼프 콘을 이용한 유동성 시험에서는 W/C 207%만이 기준치(60±10cm)에 적합한 결과가 나타났다. 블리딩 시험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다(표 5)

표 5. 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(SC)

배합 번호	W/C(%)	고화재비(%)	현장토비(%)	유동성 시험		슬럼프 플로우(cm)	블리딩률 (%)
				JHS(cm)	ASTM(cm)		
SC-1	231	17.0	43.5	22.1	36.5	79.0	0.00
SC-2	207	18.4	43.5	21.0	28.5	68.2	0.00
SC-3	195	19.2	43.5	18.1	24.4	70.3	0.00
SC-4	182	20.0	43.5	14.8	21.8	48.1	0.00

4) ML과 고화재 혼합시험 결과

ML 시료의 경우, 약간의 오차를 감안할 때, 전 범위에서 모두 기준치에 부합되는 결과가 나타났다. 그러나 슬럼프 콘을 이용한 유동성 시험에서는 전 범위에서 기준치(60±10cm)에 부합되지 못하는 결과가 나타났다. 블리딩 시험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다(표 6).

표 6. 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(ML)

배합 번호	W/C (%)	고화재비 (%)	현장토비 (%)	유동성시험		슬럼프 플로우(cm)	블리딩률 (%)
				JHS(cm)	ASTM(cm)		
ML-1	263	16.9	38.8	23.8	33.6	85.3	0.000
ML-2	241	18.0	38.8	21.1	31.9	79.0	0.000
ML-3	208	19.9	38.8	15.8	22.4	49.3	0.000
ML-4	191	21.0	38.8	15.3	19.9	44.3	0.000

5) CL과 고화재 혼합시험 결과

CL 시료의 시험 결과, 본 시험에서는 강도를 증진시키기 위해서 축진제를 각 배합비의 고화재량에 따라 14~16g 을 첨가하였다. 시험 결과 유동성과 슬럼프 플로우, 블리딩 시험에서 약간의 오차를 감안할 때, 전 범위에서 기준치에 모두 만족하는 것으로 나타났다(표 7).

표 7. 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(CL)

배합 번호	W/C(%)	고화재비(%)	현장토비(%)	축진제(g)	유동성시험		슬럼프 플로우(cm)	블리딩률 (%)
					JHS(cm)	ASTM(cm)		
CL-1	251	19.3	32.4	13.78	17.8	26.3	63.3	0.00
CL-2	238	20.0	32.4	14.30	16.8	25.3	60.5	0.00
CL-3	225	20.8	32.4	14.86	17.8	24.3	57.0	0.00
CL-4	212	21.6	32.4	15.47	18.2	26.5	65.5	0.00

4.3 일축압축시험 결과

일본 동경전력에서 제시한 급결성 유동화 처리토의 일축압축강도 기준치에 의하면 타설 1시간 뒤에 사람이 서있을 수 있는 정도의 강도가 발휘되어야 한다고 제시하고 있다. 또한 굴착 후 굴착 지면에서 발생하는 히빙(heaving) 등의 영향을 고려한 강도가 0.3kgf/cm²이상, 4시간 뒤에는 1.3kgf/cm²이상, 28일 강도는 인력굴착이 가능한 강도인 3.5~5.6kgf/cm²으로 제시되어 있다. 이는 3.5~5.6 kgf/cm²의 강도가 허용지지력의 개념에서 토질의 하중 지지력을 측정하는 표준이며, 이때의 값이 잘 다져진 흙의 강도와 동일하기 때문이다. 또한 미국 플로리다에서는 인력굴착이 가능한 최대 강도를 7kgf/cm², 백호(back hoe)와 같은 장비를 이용하여 굴착할 수 있는 강도를 7~21 kgf/cm², 굴착이 어려운 강도를 21kgf/cm² 이상으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 일축압축강도를 기준으로 하여 4시간 뒤에는 1.3kgf/cm²이상, 28일 후에는 5.6kgf/cm²이하로 설정하고 시험결과가 기준치에 부합되는지를 파악하였다.

그림 3은 양생기간과 W/C에 따른 시간별 압축강도의 변화를 나타내었다.

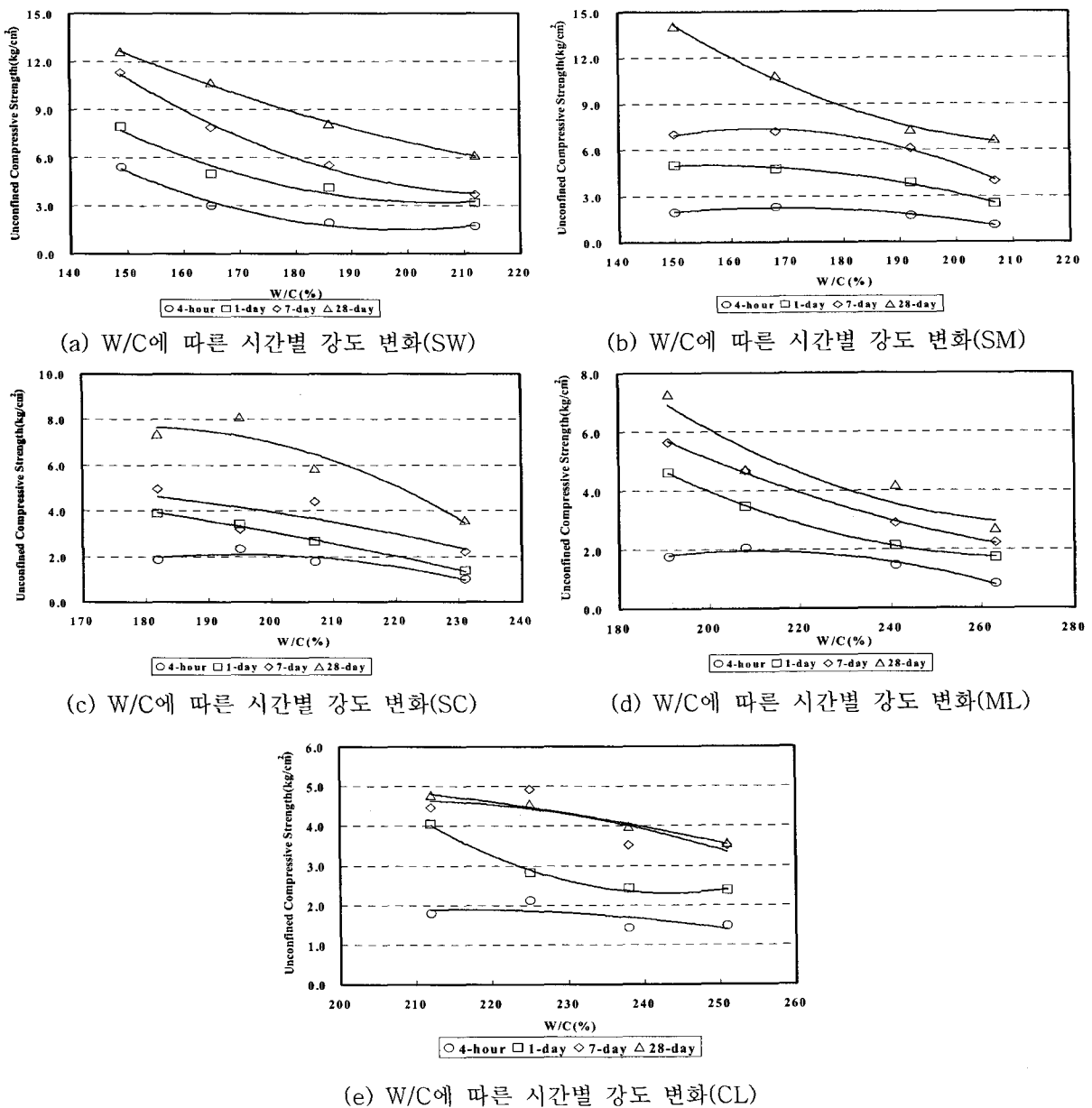


그림 3. W/C에 따른 시간별 일축압축강도

4.4 투수시험 결과

5가지 시료(SW, SM, SC, ML, CL)의 투수시험을 위해 배합비의 공시체를 일축압축시험과 동일한 조건으로 조성한 후, 4시간, 28일 양생하여 투수시험을 실시하였다. 시험결과, 투수계수는 $2.12 \times 10^{-6} \sim 8.49 \times 10^{-6}$ 의 범위를 나타내었으며 비교적 그 차이가 크지 않았다. 따라서 양생기간, 시료의 특성과 그다지 큰 차이는 보이지 않을 것으로 판단된다. 또한, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수인 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ 의 범위에도 부합되는 결과를 보였다.

표 8은 각 시료의 최적 배합비에 따른 투수시험 결과를 나타내었다.

표 8. 투수시험 결과

시험목록	SW-1	SM-2	SC-2	ML-2	CL-4
투수계수(cm/sec) - 4시간 양생	2.12×10^{-6}	2.02×10^{-6}	4.19×10^{-6}	3.78×10^{-6}	2.55×10^{-6}
투수계수(cm/sec) - 28일 양생	3.49×10^{-6}	5.02×10^{-6}	7.42×10^{-6}	6.47×10^{-6}	8.49×10^{-6}

4.5 관입 저항침에 의한 응결시간시험 결과

혼합물의 응결시간을 결정하는 시험으로써 관입저항치가 일정해 질 때를 안정된 상태로 판단하고 그 때를 종결시간으로 결정하였다. 일축압축시험을 통해 각 기준치(유동성, 블리딩, 일축압축강도)에 부합되는 각 시료 중 배합비 SW-1, SM-2, SC-2, ML-2, CL-4의 배합비에서 시험을 실시하였다.

본 시험에서 SW-1의 경우, 대략 20시간이 지나면 관입 저항치 28kgf/cm^2 정도에서 경화시간이 형성되었다(그림 4). 이는 이용수(2002)의 관입저항시험에서 제시한 기준치 결과인 28kgf/cm^2 에 부합되었다. SW를 제외한 다른 시료들은 미립분(실트, 점토)의 영향으로 SW보다 비교적 작은 값인 약 $8 \sim 10 \text{kgf/cm}^2$ 정도에서 일정한 값으로 수렴됨을 알 수 있었다.

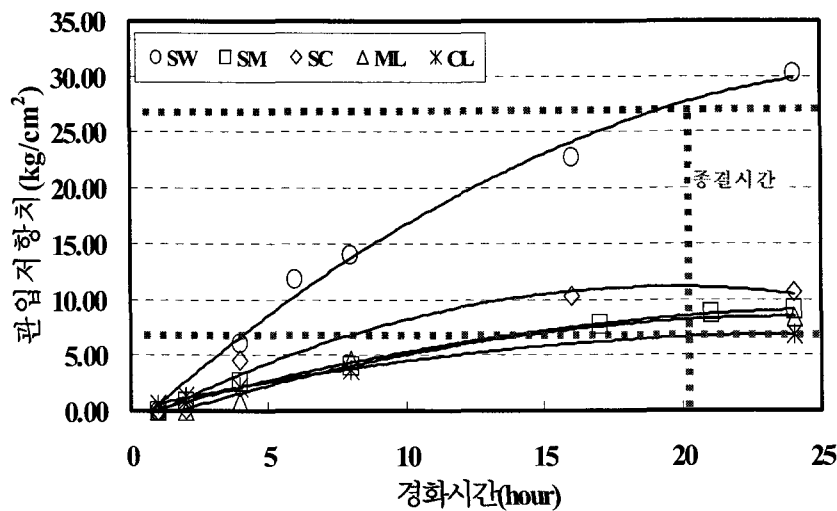


그림 4. 응결시간 시험결과

5. 결론

본 연구에서는 고성능유동화 처리토 공법의 적정 배합비를 도출하기 위해 실험을 실시하였다. 각 시험을 통해 발생토 결과를 나열해 보면 다음과 같다.

1. 유동성시험, 슬럼프 플로우, 블리딩률과 일축압축 강도시험의 결과를 바탕으로, 배합비 중 각 기준에 최대한 만족하는 배합비를 각 시료 별로 다음과 같이 선정하였다.

SW(W/C 212%, 현장토비 53.3%) SM(W/C 192%, 현장토비 6.00%)
SC(W/C 207%, 현장토비 43.5%) ML(W/C 241%, 현장토비 38.8%)
CL(W/C 212%, 현장토비 32.4%, 축진제 15.5g)

2. 투수시험 결과, 투수계수는 $2.12 \times 10^{-6} \sim 8.49 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 의 범위를 나타내어 불투수성 뒤채움재로 판단되며 양생기간, 시료의 특성에 따른 차이는 그다지 크게 나타나지 않았다. 또한 응결시간시험 결과, SW의 경우, 대략 20시간이 지나면 관입 저항치 28kgf/cm^2 정도에서 경화시간이 형성되었으며, SW를 제외한 다른 시료들은 대략 15시간이 경과되면, SW보다 비교적 작은 값인 약 $8 \sim 10 \text{kgf/cm}^2$ 정도에서 일정한 값으로 수렴되었다.
3. 응결시간시험 결과, SW의 경우, 대략 20시간이 지나면 관입 저항치 28kgf/cm^2 정도에서 경화시간이 형성되었으며, SW를 제외한 다른 시료들은 대략 15시간이 경과되면, SW보다 비교적 작은 값인 약 $8 \sim 10 \text{kgf/cm}^2$ 정도에서 일정한 값으로 수렴되었다.

참 고 문 헌

1. 문한영(1996), 토목재료학, 구미서관
2. 이용수(2002) "폐석회를 재활용한 저강도 고유동 충전재의 특성" 석사학위논문, 건국대학교
3. (주)지오시스(2003), "뒷채움 공사의 공기단축 및 비용절감을 위한 GEOTONE 5000", 특허 제 0378035호, 대한민국특허청
4. Head, KH(1992), *manual of soil laboratory testing*, ELE
5. STP 1459(2004), "Innovation Controlled Low-strength Materials" pp. 143~147
6. Tokyo Electric Power Company R&D Center, "Backfilling method using slurry material"