

지열발전을 위한 지열정 시멘트용 G-class시멘트와 일반 포틀랜드시멘트와의 유동성 비교실험

전종욱[†], 원종묵*, 최항석*

이노지오테크놀로지 시스템개발부, *고려대학교 건축사회환경시스템공학과

An Experimental Comparison of the Fluidity of G-class cement with Portland cement

Jongug Jeon, Jongmuk Won*, Hangseok Choi*[†]

INNOGEO Technologies, System Development Division, Seoul 150-739, Korea

*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

Abstract

The G-class cement is usually used for geothermal well grouting to protect a steel casing which is equipped in a geothermal well to transfer geothermal water from deep subsurface to ground surface. In geothermal grouting process, obtaining appropriate fluidity is extremely important in order to fill cement grout flawlessly. In this paper, a series of the V-funnel and Slump Flow test was performed on both of the Portland cement and the G-class cement in order to compare fluidity and filling ability of those kind of cements. In the result of V-funnel test, the fluidity of G-class cement was evaluated much better than the Portland cement at the water/cement ratio of 0.8. In the case of Slump Flow test, the fluidity of G-class cement was estimated slightly better than the Portland cement at both the water/cement ratio of 0.55 and 0.8. Even though the initial fluidity and filling ability of G-class cement were relatively higher than the Portland cement, the results could be considerably changed with time. The results show that the fluidity and filling ability for geothermal well cementation can be properly controlled with water content and additives for adverse geothermal well environment.

Key words: Geothermal Well(지열정), V-funnel(브이형 퍼널), Slump cone(슬럼프콘)

기 호 설 명

R_m : Relative Funnel Speed, 식(1)

Γ_m : Relative Funnel Area, 식(2)

1. 서 론

지열발전은 지속적으로 공급 부족현상을 야기시킬 수 있는 화석연료 발전을 대체할 수 있는 신재생에너지원 발전 중 유일하게 기저부하를 대체할 수 있을 만큼 운전 가동율이 좋은 발전방식이다. 지열발전을 위한 기술개발은 국내에서도 뒤늦게나마 연구가 시작되어 국내최초의 지열발전소가 운전되는 시점을 점차 앞당기고 있는 추세이

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-70-8277-8754, Fax: +82-2-782-1661

E-mail: jongugjeon@gmail.com

접수일 : 2012년 4월 6일

심사일 : 2012년 4월 20일

채택일 : 2012년 5월 11일

다. 지열발전기술이 성공적으로 완성되기 위해서는 많은 분야의 연구가 동시에 수행되어야 하며, 그 중에 지열유체를 지중으로부터 끌어올리거나 지중으로 주입하기 위한 지열정의 공벽 안정화연구는 지열발전을 위한 핵심연구 분야이다.

현재 전 세계 지열발전소가 지어지기까지 발생한 많은 문제점들 중에 안정화되지 못한 공벽으로 인해 중단, 혹은 장기간 공사기간이 연장된 프로젝트들은 쉽게 찾아볼 수 있다. 대표적으로 호주의 Geodynamics사가 추진했던 Cooper Basin 지열개발계획은 고온고압의 지열 저류층을 확인하고 투수성 또한 확장이 가능한 것으로 알려졌지만 비화산지대에서의 지열발전산업을 이끌기에 충분한 조건이었음에도 불구하고 지열정의 붕괴로 프로젝트는 수년간 표류하고 있다.

지열정 시멘테이션(cementation)에 사용되는 재료는 역학적으로 금속 지열정 케이싱을 온전히 지지해 줄 수 있어야 할뿐 아니라 최대 320 °C 정도까지 올라가는 지열유체에 의한 초기 부식이나 침식에도 견딜 수 있어야 한다. 다시 말해 지열정에 사용되는 시멘테이션 재료들은 고온에서의 안정화도 만족하여야 하지만 40,000 ppm 이상의 이산화탄소나 pH 1.5 미만의 강한 산성조건에서도 본래의 기능을 다할 수 있어야 한다.^[1] 이것은 단순한 뒤채움재로 사용되는 통상적인 지중열교환용 그라우팅재료와 그 성격이 다르다.

고온 고압하의 심부 케이싱 시멘트 주입 시 일정시간이 지나면 케이싱과 공벽 사이의 환형공간을 채우던 시멘트가 경화되어 환형공간을 미처 채우지 못하여 공벽안정화를 저해하므로 시멘트 그라우트의 유동성을 높여 시멘트의 공급 속도를 향상 시키기 위해 지연제를 충분히 혼합한다. 그러나 지나치게 유동성을 향상시킬 경우 지열정 외벽에 발달한 수많은 균열로 시멘트 그라우트가 상당히 손실될 것이다. 따라서 지열정 시멘테이션은 시추지역의 지질학적 특성을 감안하여 최적의 유동성을 확보하게 혼합되어 주입된다.

본 연구는 지열발전 시 지열정 케이싱 외부 그라우팅용 재료로서 G-class 시멘트의 유동성 평가에 대한 연구이며, 국내에서는 연구가 진행된 적이 없는 특수시멘트인 점을 감안하면 앞으로

활발히 진행될 지열발전을 위한 지열정 시멘테이션 연구의 기초자료로 유용하게 활용 될 것이다.

2. 지열발전을 위한 지열정 시멘테이션

지열발전을 위한 지열정을 완성하는데 사용되는 특수 시멘트는 유정시멘트(oil-well cement) 중에서 API(American Petroleum Institute)에서 규정한 G-class이다. G-class 시멘트는 지열수를 이송시키기 위해 지열정에 삽입되는 강철 케이싱을 보호·보강하기 위해 사용되는 시멘트로써 심도가 매우 깊은 지열 저류층의 고온·고압 하에서도 충분한 내구성이 확보될 수 있도록 개발 되었다.^[2]

심부 고온에서 사용하는 시멘트로 국내에서는 생산되지 않는 시멘트로 화학적 성분은 Table 1 과 같고, 물리적 특성은 Table 2에 정리하였다.

시멘트 배합비는 미국 BNL의 Philippacopoulos 와 Berndt^[3]가 제안한 기본 배합비 중 40SF type 의 배합비를 기초로 물/시멘트비를 변화시키면서 실험을 수행하였다.(Table 3) G-class시멘트 배합에 따른 유동성 평가를 위해 일반 건설용 시멘트(보통 포틀랜드 시멘트)와 비교 실험하여 그 적정성을 확인해 보았다.

Table 1 Material composition of G-class cement

Material	Percentage
C_4AF	12%
C_3A	3%
C_2S	30%
C_3S	50%
etc.	5%

Table 2 Physical specification of G-class cement

Absolute volume	0.0382 gal/lb
Bulk density	94 lb/cu. ft
Slurry density	15.8 lb/gal
Slurry yield	1.14 cu. ft/sk
Specific gravity	3.14
Typical Wagner fineness	1600-1800 sq.cm/gm
Water requirement	4.96 gal/sk

Table 3 Mixture design of tested cements (by mass)

Mix type	Cement	Silica flour
40SF	1	0.4
Water	Bentonite	Dispersant
0.55	0.034	0.012

3. 실험장치 및 실험방법

고온고압 환경에서 내구성 유지가 필수적인 지열정 시멘테이션은 다양한 첨가제를 요구한다. 특히 고온에서 필요한 Silica Flour는 강도 감소 방지 및 고강도 시멘트 양생을 목적으로 사용하며 통상 심부지열 발전에 35~40%가 포함된다. Bentonite는 미세한 입자로 구성된 점토광물로 고밀도의 팽창기능을 하며 침투막을 형성하여 물의 침입 방지 및 공벽 붕괴 방지 역할을 한다. Dispersant는 방수효과 및 중성화 방지를 위한 방수제로 투수계수와의 연관성과 접착력, 침투성, 내수성, 접착강도, 내마모성, 탄력성 등 시멘트의 물리적 특성향상 역할을 담당한다.

유동성을 평가하기 위한 실험방법으로는 EFNARC^[4](The European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)와 JSCE(Japan Society of Civil Engineers)에서 추천하는 유동성에 관한 실험으로 진행되었다.

3.1 V-funnel 실험

V-funnel 실험은 시멘트 모르타르의 유동성을 평가하는 실험으로 우선 12ℓ의 시멘트 모르타르를 Fig 1(a)에 제시된 V-funnel에 시료 상부 표층 평편도를 유지하여 채운다. 모르타르를 채울 때에는 중력이외에 추가다짐이 가해지지 않도록 주의하고 출구에서 시료가 새어 나가지 않도록 유지한 채 10초간 기다린 후, 출구를 개방하고 중력에 의해서만 시멘트 모르타르가 흘러내리도록 하여 모르타르가 모두 빠져나가는 시간을 기록하고 실험을 종료하게 된다. 12ℓ의 시멘트 그라우트가 아크릴 Funnel을 통과 할 때 마찰을 최소화하기 위해 실험 시작 전에 아크릴 벽면에 소량의 물을 도포하고, 아크릴 통의 수평, 수직도를 맞춘 후 출

구를 개방한다.

실험은 V-funnel 상부에서 출구의 빛이 보이는 시점에 종료하고 최대 5분까지만 수행하며, 시간은 출구를 개방함과 동시에 측정을 시작하고 시료가 모두 통과하는 순간에 측정을 완료한다.

모르타르의 점도가 높을수록 시료의 통과 시간이 길어지게 되며 점도가 낮아 유동성이 높을 경우, 모르타르는 단시간에 출구를 통해 통과하게 되는 실험으로 지열발전을 위한 시추현장에서 Mud Fluid의 유동성을 확인하기 위해 사용되는 시험방법이다.

3.2 Slump flow 실험

Slump Flow 실험은 V-funnel 실험과 유사한 시멘트 그라우트의 유동성을 평가하기 위한 실험 중의 하나로 Fig. 1(b)의 100mm 직경의 링(ring)을 사용하며, 수평 아크릴판 위에 모르타르를 채운 링을 올려놓고 링을 수직으로 들어 올려 Fig. 2에서 보이듯 모르타르가 아크릴 바닥에 원형 또는 타원형으로 퍼져나간 최대 직경과 최소 직경을 산정하는 실험이다.

유동성이 낮은 모르타르 일수록 퍼져나간 범위는 작아질 것이므로 V-funnel 실험과 함께 지열정 시멘트 그라우트의 유동성 및 채움 능력을 판단할 수 있는 근거로 활용할 수 있다.

3.3 시멘트 모르타르의 유동성 평가

시멘트 모르타르의 유동성 평가를 위한 V-funnel 실험과 Slump Flow 실험의 모식도 및 실험결과 해석방법을 그림 3에 나타냈다.



(a). V-funnel

(b). Slump Flow

Fig. 1 Test equipment for fluidity



Fig. 2 Spreaded cement mortar

V-funnel 실험에서 얻어지는 유동성 평가기준은 $R_m (=10/\text{velocity})$ 으로 Relative Funnel Speed of Mortar를 의미한다. 또한, Slump Flow 실험에서 유동성 평가기준은 Γ_c (또는 Γ_m)로 Relative Flow Area of Mortar를 의미한다. 각 평가기준에 대한 계산식은 다음식 (1)과 (2)에 각각 정리하였다.

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1)$$

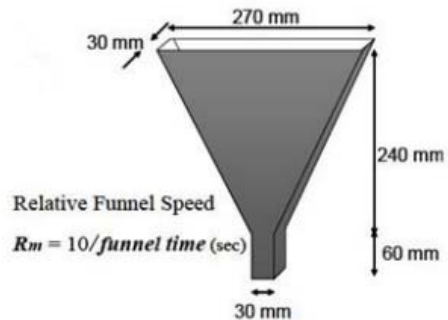
여기서 t는 모르타르가 V-funnel을 모두 비우는데 소요되는 시간(sec).

$$\Gamma_c = \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2} \quad (2)$$

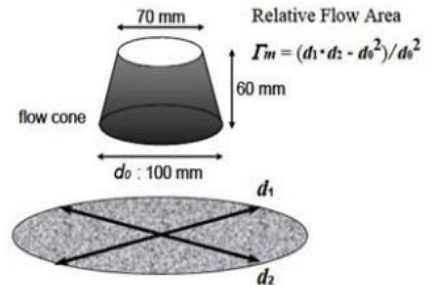
여기서 d_1 과 d_2 는 각각 흘러내린 모르타르의 장방향과 단방향 직경, 그리고 d_0 는 슬럼프 콘의 직경을 의미한다.

EFNARC(The European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)2002와 JSCE(Japan Society of Civil Engineers)에서 제시한 최적 유동성을 평가하는 방법으로 Fig. 4와 같이 y축은 V-funnel 실험 결과를 나타내는 R_m , x축은 Slump Flow 실험 결과를 나타내는 Γ_c 을 도식하여 골재분리가 일어나지 않으면서 유동성이 우수한 모르타르의 기준으로 $4.9 \leq \Gamma_c \leq 5.1$, $0.9 \leq R_m \leq 1.1$ 의 범위를 권장하고 있다. 하지만, 이 범위는 일반적인 건설용 시멘트 모르타르의 기준으로 본 연구에서 제시하는 심부 지열용 발전 시멘트 유동성 평가기준으로 직접 사용할 수 없으나 참고자료로 활용은 가능하다.

지열정에 사용되는 시멘테이션의 유동성은 시추현장의 지반조건 및 온도, 화학성분에 따라 다르게 적용되어야 하므로 본 실험에서는 기존 미국 BNL의 Philippacopoulos와 Berndt^[3]가 제안한 기본 배합비 중 40SF Type의 배합비를 사용 (Table 3)하여 유동성 실험을 수행하였으며 기본 배합비에 추가하여 Hemant^[5] 등의 연구에서 고려한 6개의 지열정 현장조건 중 물/시멘트비가 최대가 되는 0.8을 적용하여 물/시멘트 비에 따른 유동성 비교평가를 수행하였다.



(a). V-funnel



(b). Slump Flow

Fig. 3 Test equipments for V-funnel test and Slump Flow test

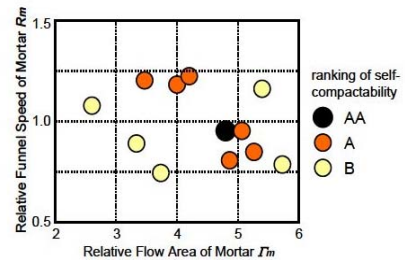


Fig. 4 Example of fluidity evaluation

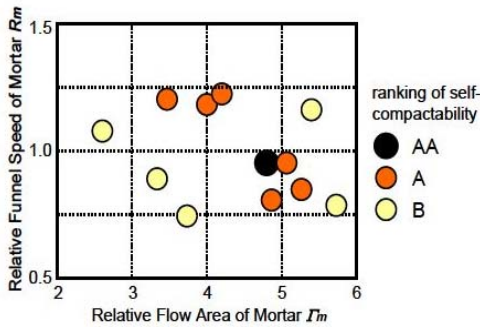


Fig. 4 Example of fluidity evaluation

4. 결과 및 고찰

4.1 V-funnel 실험결과

4.1.1 물/시멘트비 0.55

지열정 시멘테이션용 시멘트 모르타르의 유동성을 평가하기 위해 수행한 기본 배합비인 물/시멘트비 0.55에 대한 V-funnel 실험 결과에서는 점도가 높아 일반 포틀랜드시멘트와 G-class 시멘트모두에서 유동이 발생하지 않았다. 이는 Philippacopoulos 와 Berndt^[3]의 실험을 위한 배합비는 지열정 시멘트의 양생 후 응력변화에 초점을 맞춘 실험 배합비이기 때문에 유동성이 발현되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 다음 절에 물/시멘트비율인 0.8에 대한 V-funnel 실험을 추가로 실시하였다.

4.1.2 물/시멘트비 0.8(Table 4, Table 5)

실험 결과, 일반 포틀랜드시멘트 보다 G-class 시멘트의 경우 V-funnel을 통과 속도가 매우 빠른 것으로 나타났다. 즉, G-class 시멘트가 일반 건설용 포틀랜드시멘트 보다 동일한 배합조건에서 점도가 낮아 유동성이 더 큰 것으로 판단된다. 일반 포틀랜드시멘트와 G-class 시멘트의 평균 유동성(R_m)은 각각 0.872와 4.013으로 나타났다. 상대적으로 평균유동성이 큰 G-class시멘트는 시간 경과에 따라 유동성 저하가 크게 나타나지만 50분 경과 후에도 일반포틀랜드 시멘트보다 약 4.6배 큰 유동성이 유지되고 있음을 확인하였다.

Table 4 V-funnel test result for Portland cement (Water/Cement ratio 0.8)

Time(min)	Evacuating time after delay time(s)	R_m
0	6.3	1.588
10	7.2	1.389
20	9.0	1.111
30	17.7	0.565
40	24.2	0.413
50	60.4	0.166

Table 5 V-funnel test result for G-class cement (Water/Cement ratio 0.8)

Time(min)	Evacuating time after delay time (s)	R_m
0	2.1	4.739
10	2.3	4.310
20	2.4	4.149
30	2.6	3.876
40	2.9	3.436
50	2.8	3.569

4.2 Slump-flow실험

4.2.1 물/시멘트 비 0.55(Table 6, Table 7)

V-funnel 실험이 시멘트 그라우트의 전반적인 유동성(bulk fluidity)을 평가하는 실험이라면 Slump-flow 실험은 시멘트 그라우트의 공간 채움 능력을 나타낸다고 할 수 있다. 지열정 공벽안정화의 실패요인 중 공간 채움의 미비로 발생하는 경우가 종종 있다. 지열정의 운전일정에 따라 지열정내의 온도는 크게 변화하게 된다. 이 때 시멘트 그라우트가 완전하게 채워지지 못한 부위에 가스 등이 존재할 경우 높은 온도변화에 열수축/팽창하여 시멘테이션을 파괴하는 결과를 야기한다. 이 같은 문제는 지열발전 프로젝트에 적지 않은 경제적 영향을 미친다.

G-class시멘트의 경우 초기에는 Γ_0 값이 일반 포틀랜드시멘트보다 0.045정도 높게 나타나나 시간경과 후 일반 포틀랜드시멘트는 경향성을 찾아보기 어려울 정도로 채움 능력의 변화가 적은 반면 G-class시멘트는 시간경과에 따라 채움 능력

이 현격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기에 시추공 내의 많은 균열들로 빠르게 퍼져 들어간 후 일정시간 이후에는 더 이상 균열구간으로 유출현상이 지속되지 못하게 만든다는 점에서 지열정 시멘테이션 과정의 중요한 물리적 의미를 가진다. 하지만 R_m 값의 경우 일반 포틀랜드 시멘트와 G-class 시멘트의 두 경우 모두 0의 값을 보인다. 즉, V-funnel에 의한 유동성이 없는 것으로 나타난 것이며 이것은 비교적 낮은 물/시멘트 비에서 기인한 것으로 보인다.

Table 6 Slump flow test result for Portland cement (Water/Cement ratio 0.55)

Time(min)	d1(cm)	d2(cm)	Γ_c
0	11.2	11.3	0.266
10	10.5	10.8	0.134
20	10.8	11.0	0.188
30	10.7	10.9	0.166
40	10.8	11.2	0.210
50	11.0	11.2	0.232

Table 7 Slump flow test result for G-class cement (Water/Cement ratio 0.55)

Time(min)	d1(cm)	d2(cm)	Γ_c
0	11.5	11.4	0.311
10	11.2	11.1	0.243
20	10.9	10.9	0.188
30	10.7	10.6	0.134
40	10.4	10.2	0.061
50	10.1	9.9	-0.001

4.2.2 물/시멘트 비 0.8(Table 8, Table 9)

실험 결과, 일반 건설용 포틀랜드시멘트 보다 G-class 시멘트의 Γ_c 값이 약 2배 정도 크고 50분이 경과한 후에도 약 15%이상 크게 유지되었다. 이는 초기유동성이 확보된 지열시멘트가 일정시간 동안 높은 채움 능력을 보인 후 빠르게 채움 능력이 낮아진다고 볼 수 있다. 물/시멘트 비 0.55 결과와 비교해서 채움 능력의 저하는 물/시멘트 비를 이용하여 조절될 수 있음을 알 수 있다.

이상의 일반 포틀랜드시멘트와 G-class 시멘트에 대한 유동성 실험에서 Γ_c 와 R_m 의 상관관계를 Fig. 4와 같이 도시하여 물/시멘트비 0.55와 0.8에 대하여 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Table 8 Slump flow test result for Portland cement (Water/Cement ratio 0.8)

Time(min)	d1(cm)	d2(cm)	Γ_c
0	11.3	11.3	0.277
10	10.2	10.3	0.051
20	10.0	10.2	0.020
30	10.1	10.0	0.010
40	10.0	10.0	0.000
50	9.7	9.7	-0.059

Table 9 Slump flow test result for G-class cement (Water/Cement ratio 0.8)

Time(min)	d1(cm)	d2(cm)	Γ_c
0	12.1	12.3	0.488
10	11.2	11.8	0.372
20	11.6	11.6	0.346
30	11.4	11.2	0.277
40	11.0	10.9	0.199
50	10.9	10.9	0.155

5. 결 론

지열발전을 위한 고온 고압의 지열정의 공벽을 안정화시킬 수 있는 G-class 시멘트에 대한 유동성을 일반 포틀랜드 시멘트와 비교하여 평가하였다. G-class 시멘트가 지열발전용 시멘트 그라우트재로 일반 포틀랜드시멘트보다 지열정 환경을 고려할 때 유동성과 채움 능력에서 더 적합한 것으로 나타났다.

V-funnel 실험 결과, G-class시멘트가 일반 건설용 시멘트 보다 큰 유동성을 보여준다. 물/시멘트 비가 0.55일 경우, V-funnel에서 모르타르가 흘러내리지 않았으나 물/시멘트 비가 0.8일 경우, V-funnel의 통과 속도가 크게 증가하였고 시간경과에 따라 빠르게 속도가 줄어드는 것이 확인되었다. 또한 일반 포틀랜드시멘트에서는 50분이 지

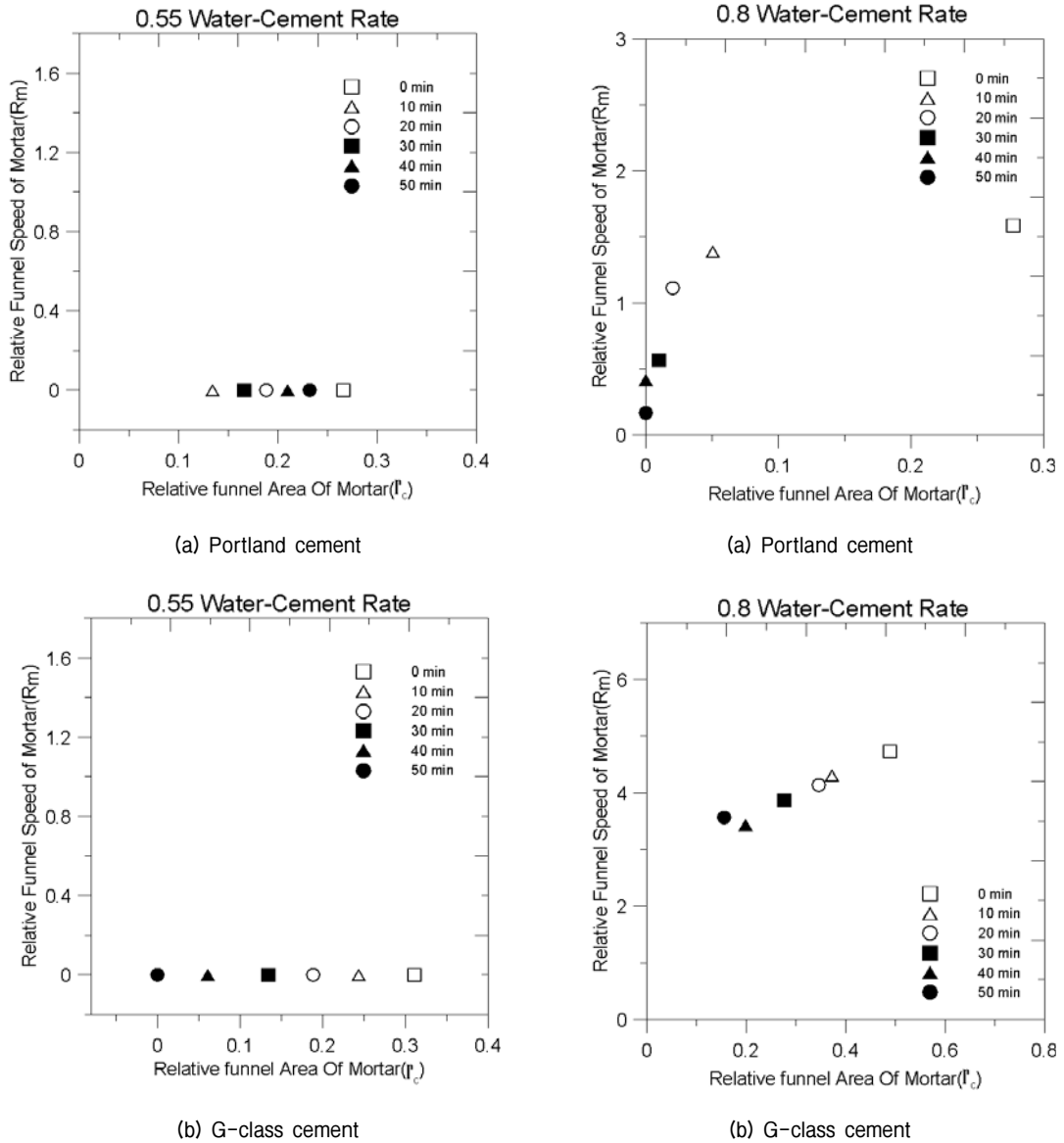


Fig. 5 Fluidity evaluation for Water /Cement ratio 0.55

난 후 모르타르가 거의 흘러내리지 않았으나 G-class 시멘트 경우는 50분 후에도 유동성을 유지하여 일반 시멘트에 비해 경화속도가 낮은 것을 확인할 수 있었다.

지열시추공 내의 많은 균열들을 채워야하는 G-class 시멘트의 채움 능력을 Slump Flow 실험을 통해 확인해 본 결과, 일반 포틀랜드시멘트에

비해 초기 채움 능력이 크고 시간경과에 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한 물/시멘트 비가 유동성에서 뿐만 아니라 채움 능력에도 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 추후 계면활성제 등의 첨가제 추가 및 배합비에 대한 추가 연구가 필요함을 확인하였다.

후 기

“본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지기술개발사업(No.2010T100200494)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.”

참고문헌

1. Toshifumi. S., Advanced Cements for Geothermal Wells, Brookhaven National Laboratory. Report 2007, USA.
2. Santoyo E., Garcia A., J.M.Morales., E.Constreras. and G.Espinosa-Paredes., 2001, Effective thermal conductivity of Mexican geothermal cementating systems in the temperature range from 28 °C to 200 °C. Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1799-1812.
3. Philippacopoulos A.J. and Berndt M.L., 2000, Characterization and modeling of cements for geothermal well casing remediation, Geothermal Resource Council Transaction, Vol.24, pp.81-86
4. The European Guidelines for Self- Compacting Concrete Specification, Production and Use, May 2005.
5. Hemant S., Khitoliya R. K. and Pathak S. S., 2009, Incorporating European Standards for Testing Self Compacting Concrete in Indian Conditions, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 1, No. 6 pp.41-45