

# 지열 발전정 시멘팅을 위한 G-class 시멘트 특성 평가에 관한 연구

## Evaluation of Characteristics of G-class Cement for Geothermal Well Cementing

원 종 목<sup>1</sup> Won, Jongmuk  
박 상 우<sup>3</sup> Park, Sangwoo

전 종 옥<sup>2</sup> Jeon, Jongug  
최 항 석<sup>4</sup> Choi, Hangseok

### Abstract

The G-class cement is commonly used in practice for geothermal well cementing in order to protect a steel casing that is designed to transport hot water/steam from deep subsurface to ground surface during operating a geothermal power plant. In order to maintain optimal performance of geothermal wells, physical properties of the cementing material should be satisfactory. In this paper, relevant factors (i.e., groutability, uniaxial compression strength, thermal conductivity and free fluid content) of the G-class cement were experimentally examined with consideration of various water-cement (w/c) ratios. Important findings through the experiments herein are as follows. (1) Groutability of the G-class cement increases by adding a small dose of retarder. (2) There would be a structural defect caused when the w/c ratio is kept higher in order to secure groutability. (3) Thermal conductivity of the G-class cement is small enough to prevent heat loss from hot steam or water to the outer ground formation during generating electricity. (4) The G-class cement does not form free water channel in cementing a geothermal well. (5) The Phenolphthalein indicator is applicable to the distinction of the G-class cement from the drilling mud.

### 요 지

G-class 시멘트는 지열발전소 가동 시에 지열정에서 고온의 지열수나 증기를 심부에서 지표면까지 이동시키는 케이싱을 보호하는 시멘팅 재료로서 이용된다. 지열정을 통한 원활한 지열발전을 위해서는 시멘팅 재료의 물리적 특성들이 만족되어야 한다. 본 연구에서는 G-class 시멘트를 지열정 시멘팅 재료로서의 중요한 물리적 특성인 유동성, 일축압축강도, 열전도도, free fluid 함유율(Free fluid content) 등을 평가하기 위해, 다양한 물/시멘트 비 조건에서 실내실험을 수행하였다. G-class 시멘트에 대한 물리적 특성 평가를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다. (1) G-class 시멘트의 유동성은 소량의 응고지연제(retarder)를 첨가하여 증가시킬 수 있다. (2) 유동성 확보를 위해 물/시멘트 비를 높일 경우, 일축압축강도가 감소하여 지열정의 구조적 문제를 야기할 수 있다. (3) G-class 시멘트의 열전도도는 지열정 가동 시에 지열정에서 외부 지반으로의 열손실이 거의 없을 정도로 낮게 평가되었다. (4) G-class 시멘트를 시멘팅 재료로 이용할 경우, 블리딩(bleeding) 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다. (5) 페놀프탈레인 지시약은 지열정 시공시 지표면에서 시추용 이수와 G-class 시멘트를 구분하기 위해 적합할 것으로 판단된다.

**Keywords :** G-class cement, Groutability, Compressive strength, Thermal conductivity, Free fluid

1 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 비회원, 한국냉동공조인증센터 수석연구원 (Chief Engineer, Korea Refrigeration & Air-conditioning Assessment Center)

3 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3326, Fax: +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

최근 세계적으로 부존된 화석연료의 고갈로 인한 에너지 위기를 극복하고, 온실가스에 의한 기후변화 문제를 해결하기 위해 다양한 방안들을 모색하고 있으며, 아울러 Post-교토체제의 시행에 따라 선진국을 중심으로 온실가스 감축을 통한 저탄소형 산업구조 전환이 최대 현안 과제로 부각되고 있다. 저탄소형 사회 구현과 녹색 성장이라는 두 가지 국가 정책을 실현하기 위해 국내에서도 태양광, 풍력, 지열 등과 같은 신재생에너지(new and renewable energy)에 대한 관심이 고조되고 있으며 신재생에너지 보급이 확대되고 있는 추세이다(Park, 2011).

신재생에너지 중 지열에너지는 지중(토양, 지하수, 지표수 등)이 태양 복사에너지나 지구 내부의 마그마 열에 의해 보유하고 있는 에너지를 의미한다. 태양 복사열은 지구에 도달하는 전체 복사에너지 중 약 47%를 차지하며, 대체로 특정 깊이의 지중 열은 연중 일정한 온도를 유지하고 있다. 이러한 지열에너지는 지표면으로부터 깊이에 따라 천부지열(shallow geothermal)과 심부지열(deep geothermal)로 구분된다. 천부지열의 온도는 지형과 지역에 따라 다소 차이가 있지만 대략 10~20°C 정도이며, 심부지열은 40~150°C 이상의 온도를 유지한다. 또한 지열에너지는 활용 측면에서 직접이용(direct use)과 간접이용(indirect use) 기술로 분류할 수 있다. 지열에너지의 직접이용은 앞서 언급한 천부지열을 이용하는 기술로서 지중의 중·저온 에너지(10~20°C)를 열 펌프(heat pump)나 냉동기와 같은 에너지 변환기기의 열 원으로 공급하여 건물 냉난방, 각종 건조 산업, 도로 융설, 온천 등에 활용하는 기술을 의미한다. 반면, 간접이용 기술은 심부지열 중 대략 80°C 이상의 고온수나 증기를 끌어올려 전기를 생산하기 위한 지열발전(geothermal power plant)에 활용하는 기술을 일컫는다(Korea geothermal research society, 2008).

지열발전이란 시추공을 통하여 지하에 저류되어 있는 지열 유체를 분출시키거나 주입정에 인공적으로 물을 주입시켜 고온의 물이나 수증기를 추출한 후, 고온의 물이나 수증기가 발전기 터빈을 작동하는 발전방식이다. 향후 지열발전은 종래의 투수성이 양호한 지열 저류층에서 생산되는 열수를 직접 이용하여 전기를 생산했던 재래식 방법에서 탈피하여 고온 건조암체(Hot Dry Rock) 내에 부존된 지열을 개발 이용하는 공학적 지열시스템(Enhanced Geothermal System, EGS)과 2차 작동유체와

열 교환방식을 이용하는 2차 지열발전(binary cycle power plant)방법을 병용하는 기법이 주를 이룰 것으로 예상된다(Han et al., 2010). Fig. 1은 EGS의 일반적인 모식도이다.

지열발전 시설을 성공적으로 건설하기 위해서는 지열발전소 부지선정, 지열정 설계, 시추장비 사양 선정, 지열정 케이싱(casing) 설계, 공벽안정용 시멘팅(cementing) 설계, 지열 저류층 평가, 시추 성능 주요인자 분석, 비용 예측 평가 등 많은 분야의 연구가 동시에 수행되어야 한다(Edwards et al., 1982). 이 중 지열정 시멘팅에 사용되는 재료는 역학적으로 강재 지열정 케이싱을 충분히 지지해 줄 수 있어야 할 뿐 아니라 최대 320°C 정도까지 상승하는 지열유체에 의한 초기 부식이나 침식에도 견딜 수 있어야 한다(Toshifumi, 2007). 즉, 지열정에 사용되는 시멘팅 재료는 고온에서의 안정성도 만족하여야 하지만 40,000ppm 이상의 이산화탄소나 pH 1.5 미만의 강한 산성조건에서도 본래의 기능을 유지해야 한다. 이것은 단순히 뒤채움재로 사용되는 통상적인 지중열교환용 그라우팅재료와 그 성격이 다르다 볼 수 있다(Jeon et al., 2012).

지열 발전을 위한 지열정 시멘팅에 적용되는 특수 시멘트는 유정시멘트(oil-well cement)중에서 API(American Petroleum Institute)에서 규정한 G-class 시멘트이다. G-class 시멘트는 지열수를 이송시키고 지열정에 삽입되는 강재 케이싱을 보호·보장하기 위해 사용되는 시멘트로서 규산2석회(2CaO·SiO<sub>2</sub>), 규산3석회(3CaO·SiO<sub>2</sub>), 알루미늄산 3석회(3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 알루미늄산철 4석회(4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등의 4가지 주요성분으로 이루어져 있다. 또한 심도가 매우 깊은 지열 저류층의 고온·고압하에서도 충분한 내구성이 확보될 수 있도록 개발되었다.

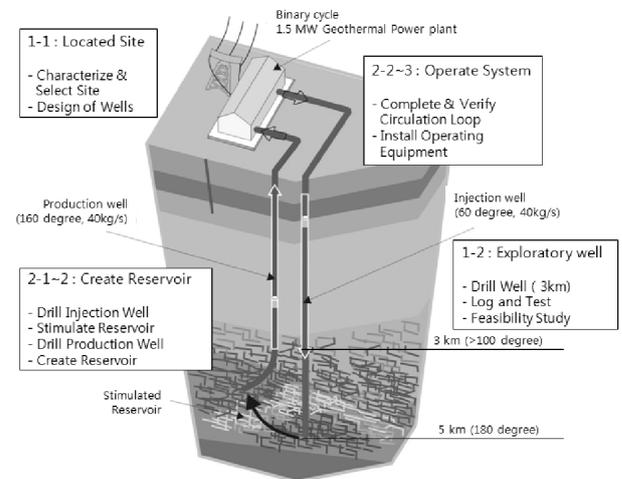


Fig. 1. Schematics of EGS (Yoon et al., 2011)

하지만 아직 국내에서는 G-class 시멘트와 같은 지열정 시멘팅에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 G-class 시멘트가 지열정 공벽 시멘팅 재료로서의 적합한 기능 유지에 필수적인 중요한 물리적 특성인 유동성, 일축압축강도, 열전도도 및 free fluid 함유율을 다양한 물/시멘트 비에서 실내실험을 통해 평가하고 각각의 물리적 특성에 대한 지열정 시멘팅 재료로서의 적합성을 판단하고자 한다.

본 연구에서 수행한 실내실험에서 G-class 시멘트 배합비는 미국 BNL(Brookhaven National Laboratory)의 Philippacopoulos and Berndt(2000)가 제안한 지열정 시멘트 시멘팅 재료의 기본 배합비 중 40SF type(Table 1)의 배합비를 기초로 물/시멘트 비를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

## 2. 유동성 평가

### 2.1 실험 개요

고온 고압하의 심부 케이싱에 시멘팅시 시멘트 모르타르의 유동성이 부족할 경우 시멘트가 주입 초기에 경화되어 케이싱과 공벽사이의 공간을 폐색시켜 지속적인 시멘트 모르타르 공급을 방해할 수 있다. 따라서, 시멘팅 재료의 유동성을 증가시켜 시멘트의 주입 효과를 향상시키면 시멘트 주입 시 시멘트 모르타르의 막힘 방

지가 가능하다. 하지만, 유동성을 향상시키기 위해 시멘트 모르타르의 점도를 지나치게 낮출 경우, 지열정 외벽에 발달한 수많은 균열로 많은 양의 시멘트 모르타르가 유실되므로 구조적 안정성에 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 시추지역이나 시추심도 등을 종합적으로 고려하여 시멘팅을 위한 최적의 유동성을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 G-class 시멘트의 유동성을 평가하기 위해 EFNARC(The European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)와 JSCE (Japan Society of Civil Engineers)에서 추천하는 시멘트 모르타르에 대한 유동성 평가실험인 V-funnel Test와 Slump Flow Test의 두 가지 방법을 적용하였다. G-class 시멘트의 유동성에 대한 기초연구는 Jeon et al(2012)에 의해 수행되었고, 본 연구에서는 이를 바탕으로 좀 더 다양한 물/시멘트 비에 대한 영향을 검토하였다. 또한, 추가적으로 유동성 확보를 위해 응고를 지연시키거나 배합시점으로부터 원하는 시간에 응고를 유발하기 위해 시멘트 첨가제 중 한 종류인 응고지연제(Retarder, Halliburton Energy Services)를 기존 40SF 배합비에 첨가하여 응고지연제/시멘트 비를 0.005에서 0.025까지 증가시키면서 유동성 실험을 반복 수행하였다.

### 2.2 V-Funnel Test

V-funnel Test는 12L의 시멘트 모르타르를 Fig. 2a의

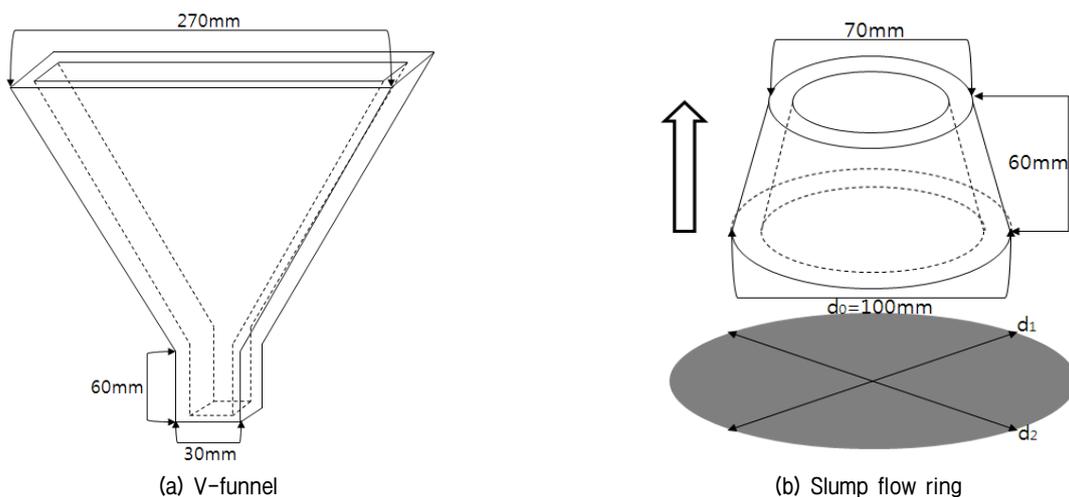


Fig. 2. Schematics of V-funnel and Slump flow ring

Table 1. Mixture design of 40SF by mass

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

V-Funnel에 채우고 시료 상부를 평편하게 유지하고 출구에서 시료가 유출되지 않도록 출구를 닫은 상태에서 10초간 기다린 후, 출구를 개방하고 중력에 의해서만 시멘트 모르타르가 하부로 유출되도록 하여 모르타르가 모두 빠져나가는 시간을 기록하고 시험을 종료하는 과정으로 진행된다. 시험에 사용된 시료는 타설 또는 배합 직후의 시멘트 모르타르부터 타설 이후 10분 간격으로 모두 6회 실험을 실시하였다. V-funnel 아크릴 통과 시멘트 모르타르의 마찰을 최소화하기 위해 시험 시작 전에 아크릴 통에 소량의 물을 도포하고, 아크릴 통의 수평, 수직도를 맞추고 출구를 개방하였다. V-funnel Test에 의한 유동성 평가는 식 (1)의  $R_m$  (Relative Funnel Speed of Mortar)값을 통해 판단한다.

$$R_m = 10/t, \quad t(\text{sec}) : \text{funnel을 흘러내린 속도} \quad (1)$$

### 2.3 Slump Flow Test

Slump Flow Test는 V-funnel Test와 달리 시멘트 모르타르의 횡방향 유동성을 평가하기 위한 시험방법이다. Slump Flow Test는 Fig. 2b의 100mm 직경의 황동링을 사용하며, 평편한 아크릴판 위에 타설 직후의 모르타르를 채운 링을 올려놓고 10분 간격으로 타설 직후부터 50분이 경과할 때까지 10분 간격으로 링을 수직으로 들어 올려 시멘트 모르타르가 아크릴 바닥에 원형 또는 타원형으로 퍼져나간 최대 직경과 최소 직경을 시간에 따라 기록한다. Slump Flow Test에 의한 유동성 평가는 식 (2)의  $\Gamma_c$  (Relative Flow Area of Mortar)값을 통해 판단한다.

$$\Gamma_c = (d_1 d_2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (2)$$

여기서,  $d_1, d_2$ 는 시멘트 모르타르가 흘러내린 후 측정 직경(m)이고,  $d_0$ 는 황동링의 직경(m)이다.

### 2.4 실험 결과

#### 2.4.1 물/시멘트 비 조건에서의 유동성 평가

40SF 배합비에서 물/시멘트 비 0.55, 0.6, 0.7, 0.8에 대한 G-class 시멘트 모르타르의 V-Funnel Test 측정값 ( $R_m$  값)을 y축에 Slump Flow Test 측정값( $\Gamma_c$  값)을 x축에 도식하였다(Fig. 3).

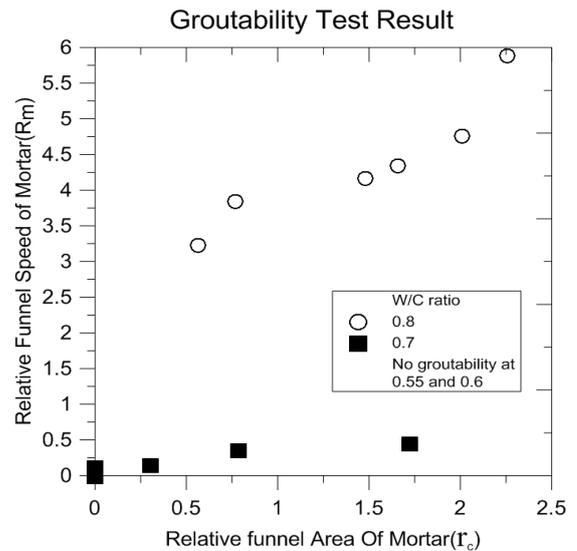


Fig. 3. Groutability of cement slurry with various w/c ratios

유동성 실험 결과, 물/시멘트 비가 증가할수록  $\Gamma_c$  값과  $R_m$  값이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 응고지연제를 첨가하지 않은 상태에서 G-class 시멘트 모르타르의 유동성은 전반적으로 매우 낮게 평가되었다. 물/시멘트 비가 0.55와 0.6인 경우에는  $\Gamma_c$  값과  $R_m$  값이 거의 0에 가깝고 물/시멘트 비가 0.7인 경우에는  $R_m$  이 측정되지만 매우 작은 값을 보이며 시멘트 모르타르 배합 후 30분부터는 모르타르의 유동성이 급격히 감소하여 G-class 시멘트의 시간에 따른 경화정도가 매우 빠르게 진행되었다. 물/시멘트 비가 0.8인 경우에는 지열정 시멘팅에 적용하기 적합한 유동성을 보이나 높은 물/시멘트 비 때문에 충분한 강도를 발휘하지 못할 것으로 예상할 수 있다. 부족한 G-class 시멘트의 유동성 향상을 위해 응고지연제를 첨가한 상태에서 유동성 실험을 다시 수행하였다.

#### 2.4.2 응고지연제(retarder)/시멘트 비에 대한 유동성 평가

40SF 배합비에서 물/시멘트 비를 0.55로 고정시키고 응고지연제/시멘트 비 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025에 대한 G-class 시멘트 모르타르의 V-Funnel Test 측정값 ( $R_m$  값)을 y축에 Slump Flow Test 측정값( $\Gamma_c$  값)을 x축에 도식하였다(Fig. 4).

응고지연제를 첨가한 후, G-class 시멘트 모르타르의 유동성이 크게 향상되어 소량의 응고지연제 첨가만으로도 응고지연제 첨가 전과 비교할 때 동일한 물/시멘트 비에서  $\Gamma_c$  값과  $R_m$  이 상당히 증가한 것을 확인할 수 있

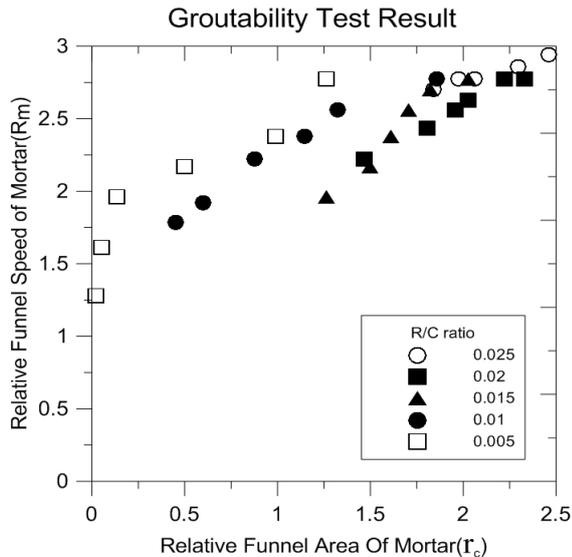


Fig. 4. Groutability of cement slurry with various retarder/cement ratios

다. 또한 응고지연제/시멘트 비가 증가할수록 유동성이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 응고지연제/시멘트 비 0.01~0.015구간에서 가장 큰 폭의 유동성 상승을 보였다. 또한 응고지연제/시멘트 비가 0.015이상 이 되면 G-class 시멘트 모르타르 배합 후 50분이 경과하여도 충분한 유동성을 보였다. 즉, 응고지연제의 첨가는 G-class 시멘트 모르타르의 경화속도를 효과적으로 감소시켜 시간에 따른 유동성 감소 정도를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 결론적으로 유동성 확보 측면에서 지열정 시멘팅 재료로서 G-class 시멘트에 응고지연제의 첨가는 매우 효과적이라 할 수 있다.

### 3. 일축압축강도 평가

#### 3.1 실험 개요 및 방법

G-class 시멘트 공시체의 일축압축강도 실험은 지열정 가동 시 케이싱을 통해 전달되는 열에 의해 시멘팅 부분에 발생하는 열응력과 높은 상재하중에 견딜 수 있는지 여부를 판단하기 위해 수행하였다. 고온의 깊은 심도에서의 시멘트의 양생을 모사하기 위해 실험장비의 최고온도 조건(100°C)에서의 건조상태 양생과 지하수 조건에서 시멘트 양생 모사를 위해 상온(21°C)에서의 수중양생을 하여 시편을 준비고 일축압축강도 실험을 수행하였다. 고온 건조양생과 상온 수중양생 모두 시멘트 모르타르 배합 후 28일간 양생 후 일축압축강도 실험을 수행하였다.



Fig. 5. Fractured specimen during uniaxial compression test

일축압축강도 실험용 공시체는 직경 100mm이고 높이가 200mm의 표준공시체(KSF2403) 규격을 적용하였고, 공시체에 스트레인게이지를 종방향으로 2개, 횡방향으로 1개를 부착하여 일축압축강도와 탄성계수를 측정하였다. 평균 강도를 산정하기 위해 고온 건조양생과 상온 수중양생 조건에 대해 각각 4개의 공시체를 양생하여 강도평가를 수행하였다. 일축압축 하중을 재하 하여 공시체에 발생하는 응력-변형률 선도를 작성하고 탄성구간의 기울기로부터 탄성계수를 결정하였다. 일축압축강도 실험은 유동성 실험과 동일하게 Table 1의 40SF type의 배합비를 기초로 물/시멘트 비를 변화시켜가며 수행하였다. 일축압축강도는 공시체가 파괴된 시점(Fig. 5)에서 측정된 압축강도로 산정하였고, 탄성계수는 파괴 시 압축강도의 40%에 해당하는 지점과 변형률  $5.0 \times 10^{-5}$ 에 해당하는 지점 사이의 기울기를 이용하여 탄성계수를 산정하는 ASTM(American Society for Testing Material)에서 제시하는 방법을 적용하였다.

#### 3.2 실험 결과

40SF 배합비에서 물/시멘트 비 0.55, 0.6, 0.7, 0.8에 대한 4개의 G-class 시멘트 공시체들의 탄성계수와 일축압축강도 평균값을 Table 2에 정리하였다.

탄성계수와 일축압축강도는 모두 고온 건조양생한 공시체가 상온 수중양생한 공시체에 비해 낮게 평가되었다. 이 결과를 토대로 고온에서 G-class시멘트가 양생되는 경우 파괴나 변형에 매우 취약할 것임을 유추해 볼 수 있다. 하지만 실제 심부 지열정의 환경은 양생조건이 본 연구의 실험조건(100°C)보다 더 고온일 수 있는 동시에 지하수도 존재할 수 있으므로 본 연구를 통해

Table 2. Uniaxial compressive strength and Young's modulus of cement

w/c ratio	0.55		0.6		0.7		0.8	
Curing method	dry <sup>*1</sup>	water <sup>*2</sup>	dry	water	dry	water	dry	water
E (Mpa)	6224	26216	6379	15183	6087	15387	5056	10280
q <sub>u</sub> (Mpa)	23.04	28.97	19.50	26.23	16.92	21.47	14.56	20.10

\*1: Cured at 100°C in dry condition for 28 days

\*2: Cured at 210°C in water for 28 days

실제 G-class시멘트가 지열정 시멘팅에 적용될 때 실제 양생조건에서의 탄성계수를 정확하게 예측하기는 어렵다. 본 연구에서 탄성계수가 물/시멘트 비가 높아질수록 다소 낮아지는 경향을 보이나 물/시멘트 비 0.55와 0.6 간의 경향성이 다소 불확실하게 나타났다. 고온 건조양생의 경우 물/시멘트 비 0.55의 탄성계수보다 0.6의 탄성계수 값이 오히려 약간 크게 나타나는 경향을 보였다. 하지만 물/시멘트 비 0.7의 탄성계수와 물/시멘트 비 0.55, 0.6의 탄성계수와 차이가 크지 않기 때문에 변형에 매우 민감한 스트레인게이지의 실험오차로 판단된다. 일축압축강도의 경우, 기존 문헌(Philippacopoulos and Berndt, 2000)에서 제시한 40SF배합비에 대한 일축압축강도 38.9±4.2Mpa 보다 비교적 작게 측정되었는데 이는 상이한 실험조건에서 기인하는 것으로 판단된다. Philippacopoulos and Berndt(2000)는 52°C에서 28일동안 수중양생 시킨 후 200°C 조건에서 일축압축실험을 수행하여 본 논문의 양생 온도 및 일축압축실험 온도조건과 다르다. 또한 공시체의 규격이 다르기 때문에 이 두 실험결과를 직접적으로 비교하기 어렵다. 통상적인 지열정 시멘팅 재료로서 시멘트 공시체의 일축압축강도는 최소 6.9MPa 이상이 요구된다(Aristodimos et al., 2002). 따라서, 본 논문에서 수행한 G-class 시멘트 배합시 물/시멘트 비 0.55~0.8 구간에서는 낮은 일축압축강도로 인한 구조적 문제가 발생할 소지가 없다고 판단된다. 하지만 지열정의 주변 온도나 지질, 수리학적 분포에 따라서 0.7 이상의 높은 물/시멘트 비에서는 구조적 문제가 발생할 소지가 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 열전도도 측정 시험

##### 4.1 실험 개요 및 방법

지열정에서 적용하는 케이싱 재료나 시멘팅 재료는 열전도도가 충분히 낮아 지열정에서 추출되는 물이나 수증기가 보유한 에너지가 추출과정에서 외부(지반)로 열손실

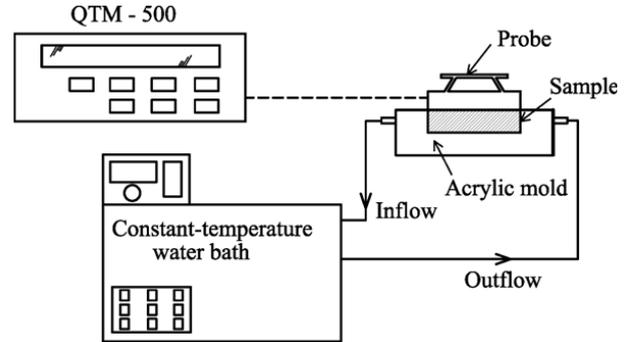


Fig. 6. Thermal conductivity measurement system (Lee, 2012)

이 발생하는 것을 최소화해야 한다. 즉, 시멘팅 재료의 열전도도가 상대적으로 클 경우, 고온의 지열수가 지표로 추출되는 과정에서 지열정 외부로 열이 다량 손실되어 발전효율이 저하될 수 있다. 그러므로 시멘트 재료의 열전도도는 지열정에 사용될 때 고려해야할 중요한 인자이다.

본 연구에서는 Kyoto Electronics에서 제조한 QTM-500장비를 이용해 G-class 시멘트 시편의 열전도도를 측정하였다. 열전도도 측정용 시료는 성형틀 안에 50mm×100mm×50mm 규격으로 제작하였고, 전체적인 열전도도 측정모식도는 Fig. 6과 같다. QTM-500 측정기는 비정상 열선법(Transient Hot Wire Method)를 적용하고 측정 프로브에 가해지는 전류(I)와 열선의 온도(T)를 측정한 후, 필요한 센서 프로브의 보정 값을 이용하여 식 (3)을 통해 시편의 열전도도를 산정한다(Takegoshi et al., 1982).

$$k_1 = K \frac{Rl^2 \ln(t_2/t_1)}{T_2 - T_1} - H \quad (3)$$

식 (3)에서 K와 H는 센서 프로브의 보정값으로 열전도도 측정기 내부에 입력된 값이고, 또한 R과 l은 각각 열선의 단위 길이당 전기저항(Ωcm)과 열선에 흐르는 전류(A), t<sub>1</sub>과 t<sub>2</sub>는 열선에 전류가 흐른 후 부터 시간(초)이며 T<sub>1</sub>과 T<sub>2</sub>는 이때의 열선의 온도(°C)가 된다. 시료성형틀에 시멘트 시편을 양생시킨 후 열전도도 측정시, Lee(2012)가 제안한 방법을 적용하여 시편 온도는 항온

수조와 연결된 시료성형 틀 외부에 목표 온도의 물을 순환시켜 시편을 일정한 온도로 유지한 상태에서 열전도도를 측정하였다(Fig. 5). 본 연구에서는 시편 온도에 따른 열전도도 차이를 비교하기 위해 시편의 온도가 각각 20°C와 50°C로 유지되도록 한 후 물/시멘트 비(0.55, 0.6, 0.7, 0.8)에 대해 열전도도 측정을 수행하였다. 각 조건에서 열전도도를 3회 측정하고 이를 평균하여 대표 열전도도 값으로 제시하였다.

## 4.2 실험 결과

40SF 배합비에서 물/시멘트 비 0.55, 0.6, 0.7, 0.8에

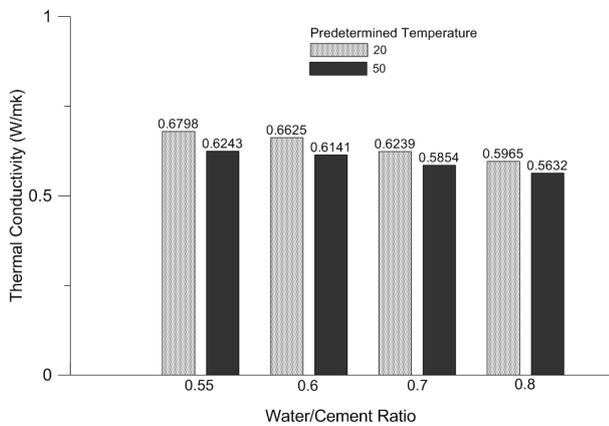
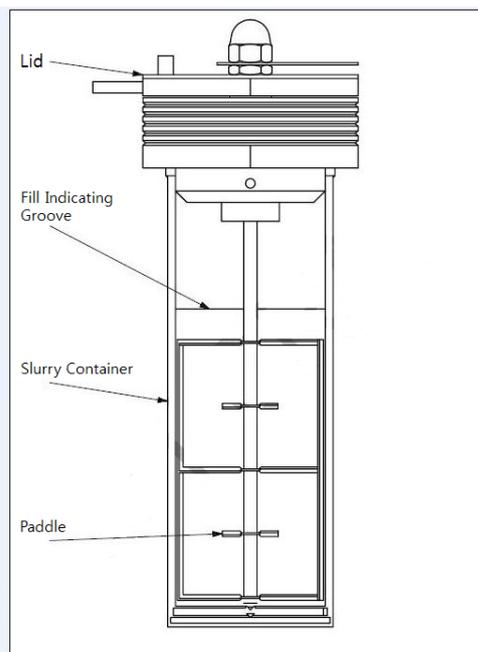


Fig. 7. Thermal conductivity of cured cement specimen



(a) Inside structure of consistometer

대한 G-class 시멘트 시편의 열전도도를 시편 온도조건에 따라 Fig. 7에 나타냈다.

열전도도 실험 결과, 시편 온도 20°C와 50°C 모두 물/시멘트 비가 높아질수록 열전도도는 낮아지는 경향을 보였다. 또한 Santoyo et al.(2001)이 제안한 G-class 시멘트의 열전도도 값인 0.5~0.7W/m·K과 유사한 범위를 보였다. 일반적으로 물/시멘트 비가 작은 경우는 시료내 고형물질이 다량 함유된 것을 의미하므로 열전도도가 증가하게 된다. 또한 열전도도 측정온도가 높아질수록 열전도도는 낮게 평가되는데(Hans-Dieter and Rudiger, 2003; Vosteen and Schellschmidt, 2003) 본 연구의 G-class 시멘트도 동일한 경향을 보였다. 보통 심부 지반의 열전도도가 1~2.5W/m·K정도임을 감안할 때(IGSHPA, 2000), G-class시멘트는 심부 지반의 열전도도에 비해 낮은 열전도도를 갖는 것으로 판단된다. 이것은 전술한 바와 같이 깊은 심도에서 고온 유체나 증기를 지표로 추출할 때 열손실을 방지할 수 있어, 지열정용 단열재로서 G-class 시멘트의 적합성을 의미한다.

## 5. Free fluid 실험

### 5.1 실험 개요 및 방법

지열정에 시멘트 모르타르를 주입한 후에 free fluid



(b) Overview of consistometer

Fig. 8. Schematics of consistometer

가 과다하여 시멘트에 블리딩(bleeding)이 발생하면 경화과정에서 주입한 모르타르가 균일하게 양생되지 않는다. 특히, 시멘팅이 밀실하게 형성되지 않은 빈 공간에서는 고온에 의한 증기 팽창으로 시멘팅에 국부파괴를 야기할 수 있어 지열정의 생산성이 매우 감소하게 된다(Roni et al., 2004). 따라서 free fluid 함유율은 공벽 안정성 측면에 있어서 매우 중요한 평가 항목이다. 유동성만 고려하면 전술했듯이 물/시멘트 비가 클수록 지열정 시멘트의 주입이 용이하나, 물/시멘트 비가 클수록 free fluid가 많이 함유될 수 있으므로 시멘트 배합 시에 적절한 물/시멘트 비를 적용해야 한다.

본 연구에서는 API(American Petroleum Institute) specification 10A에서 제안한 실험방법으로 free fluid 실험을 진행하였다(API, 2009). 시멘트 배합 후 1분 안에 시료를 플라스크에 담아서 교반기를 이용해 20분간 교반한 후 수분이 증발하지 않게 플라스크 입구를 막고 2시간 후에 시멘트 위에 형성된 free fluid의 양을 측정하는 방법으로 G-class 시멘트의 free fluid 실험을 진행하였다. 교반기는 Fig. 8와 같이 제작하였으며 free fluid 함유율은 식 (4)를 통해 산정된다.

$$\phi(\text{Free fluid content, \%}) = \frac{\rho V_{FF}}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 G-class 시멘트의 비중인 1.91이고,  $V_{FF}$ 는 플라스크에서 추출된 free fluid 부피, 그리고  $m_s$ 는 초기 슬러리의 무게이다.

## 5.2 free fluid 측정 실험 결과

40SF 배합비에서 물/시멘트 비 0.55, 0.6, 0.7, 0.8에 대한 free fluid 측정 실험결과를 Fig. 9에 나타냈다.

Free fluid 측정 실험을 수행한 결과 전체적으로 물/시멘트 비가 증가할수록 free fluid 함유율이 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 물/시멘트 비 0.55에서는 free fluid가 전혀 발생하지 않았다. 물/시멘트 비가 0.6에서부터 free fluid가 발생하기 시작하였으나, 일반적으로 지열정 시멘팅 재료로 사용되는 물/시멘트 비가 0.6을 넘지 않는 것을 감안할 때, G-class 시멘트를 지열정 시멘팅에 적용할 때 블리딩에 의한 문제는 없을 것으로 사료된다. 물/시멘트 비 0.55, 0.6, 0.7, 0.8의 시멘트 슬러리 모두 API specification 10A에서 제안한 free fluid 함유율 한

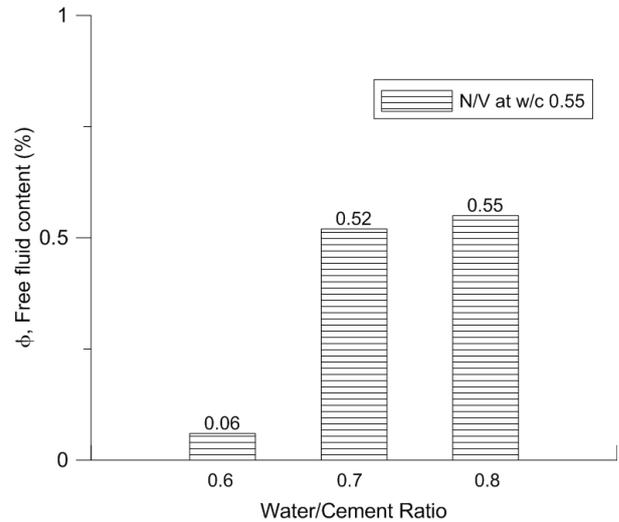


Fig. 9. Free fluid content with various w/c ratios

계값인 5%보다 훨씬 낮은 값을 보였다.

## 6. 페놀프탈레인 지시약 실험

### 6.1 실험 개요 및 방법

지열정 시추 시, 시추 중에 발생한 암석파편이나 토사를 지상으로 반출하기 위해 시추용 이수(mud)를 순환시키고, 최종 시추 후에 지열정에 시멘트 모르타르를 주입하는데 시멘트가 최하단부터 채워지면서 시추용 이수가 시추파편들과 함께 밀려서 지표면으로 반출된다. 시멘팅 최종단계에서 시추용 이수만 지상으로 반출되고 시멘트 모르타르는 지표로 유실되지 않도록 관리하는 것은 지열정 시멘팅에서 매우 중요하다. 일반적으로 산-염기 지시약을 이용해 지표면으로 시멘트가 유출되기 시작하는 시점을 판단한다. 산-염기 지시약이 시멘트의 염기성과 반응하여 색이 변하는 순간이 시멘트가 유출되기 시작하는 시점으로 시추용 이수의 반출이 완료되었다는 것을 의미한다. G-class 시멘트는 규산2석회( $2CaO \cdot SiO_2$ ), 규산3석회( $3CaO \cdot SiO_2$ ), 알루미늄산 3석회( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ), 알루미늄산철 4석회( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3Fe_2O_3$ ) 등의 4가지 주요성분으로 이루어져 있고 물에 G-class 시멘트를 혼합하면 석회성분( $Ca(OH)_2$ )이 발생되고 높은 pH값을 갖게 된다.

본 연구에서는 pH 8.2이상에서 붉게 변하는 페놀프탈레인 지시약을 이용하여 G-class 시멘트와 지열정 시공에 실제로 이용되는 시추머드를 5가지 종류의 중량비로 혼합하여 각각의 pH를 측정하고 페놀프탈레인 지시약

을 첨가하여 시료의 색상 변화를 평가하였다. 따라서 G-class 시멘트와 시추용 이수를 구분하기 위해서 이수는 반드시 pH 8.2이하의 값을 가져야 한다.

## 6.2 실험 결과

총 중량이 1일 때 시추용 이수의 중량비율을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0(나머지 중량은 G-class 시멘트)로 증가시키면서 페놀프탈레인 지시약 실험을 수행하여 시료의 pH와 색상 변화를 Fig. 10에 나타냈다.

G-class 시멘트와 시추용 이수 배합시료의 pH 측정결과 G-class 시멘트의 중량비가 늘어날수록 pH가 증가하는 경향을 보였다. 또한, G-class 시멘트 중량비 0.2(시추용 이수 중량비 0.8)에서도 시료의 색상이 붉게 변했다. 하지만 G-class 시멘트가 함유되지 않는 시료(시추용 이수의 중량비가 1일 때) 시료의 pH는 7.4으로 페놀프탈레인 지시약 색이 변하지 않았다. 이는 페놀프탈레인 지시약이 G-class 시멘트와 시추용 이수를 구분하기에 적합하다는 것을 의미한다.

## 7. 결론

본 연구에서는 실제 지열발전소 건설에 적용하기 위한 지열정 시멘팅 재료로서 G-class 시멘트의 중요한 물리적 특성을 실내실험을 통해 산정하고 적합성을 평가하였다. 또한 페놀프탈레인 지시약을 이용하여 G-class 시멘트와 시추용 이수를 구분하는 시험을 수행하였다.

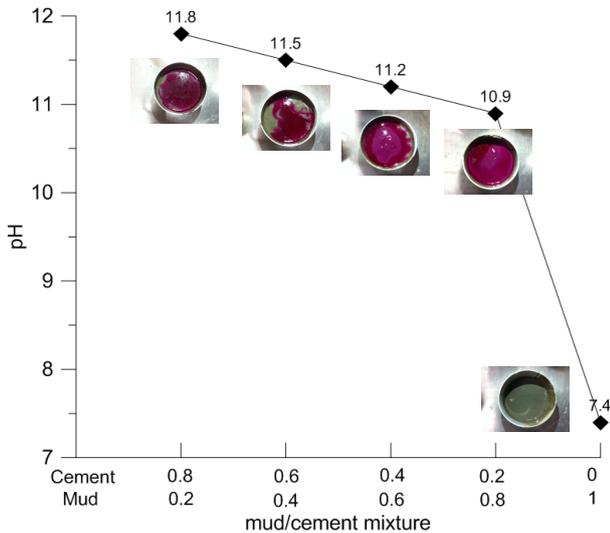


Fig. 10. Indicator test results with various mud/cement ratios

연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) G-class 시멘트의 유동성은 응고지연제 첨가에 의해 크게 향상되므로 심부에서 G-class 시멘트 경화속도를 감소시키기 위해 G-class 시멘트 배합시 응고지연제의 첨가는 유동성 측면에서 필수적이다. 또한 일정비율 이상의 응고지연제를 첨가할 시 G-class 시멘트 타설 후 상당한 시간동안 유동성 확보가 가능하다.
- (2) 물/시멘트 비 0.55~0.8 범위에서 기존문헌에서 제시한 G-class 시멘트의 일축압축강도 기준을 충족시킬 수 있다. 하지만 지열정의 주변지반의 온도나 지질, 수리학적 분포에 따라서 0.7이상의 높은 물/시멘트 비에서는 낮은 일축압축강도로 인한 구조적 문제가 발생할 소지가 있을 것으로 사료된다.
- (3) G-class 시멘트의 열전도도는 시편 내 설정온도 20°C와 50°C의 조건 모두 물/시멘트 비가 높아질수록 열전도도는 낮아지는 경향을 보였다. 또한, 본 논문에서 사용한 G-class 시멘트와 배합비는 비교적 낮은 열전도도를 보이므로 지열발전 효율성 측면에서 지열정 시멘팅 재료로서 적합한 것을 확인하였다.
- (4) G-class 시멘트의 산정된 free fluid 함유율은 API의 한계기준 보다 매우 낮은 값을 보였다. 이는 본 연구에서 G-class 시멘트 배합시 적용한 물/시멘트 비와 관계없이 free fluid에 의한 문제는 미미함을 알 수 있다.
- (5) 페놀프탈레인 지시약은 시추용 이수에 G-class 시멘트가 소량만 함유되어 있어도 붉게 변하므로 지열정 시공시에 지표면에서 시추용 이수만 지상으로 반출하기 위한 지시약으로써 적합할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생 에너지기술개발사업(No.2010T100200494)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. API specification 10A (2009), "Specification for Cements and Materials for Well Cementing", *American Petroleum Institute*, pp. 1-5.
2. Aristodimos, J., Philippopoulos, A.J., and Berndt, M.L. (2002),

- “Structural analysis of geothermal well cements”, *Geothermics*, Vol.31, pp.657-676.
3. Edwards, L.M., Chilingar, G.V., Rieke III, H.H., and Fertl, W.H. (1982), *Handbook of Geothermal Energy*, Gulf Publishing Company, USA.
  4. Hans-Dieter, V. and Rudiger, S. (2003), “Influence of Temperature on Thermal Conductivity, Thermal Capacity and Thermal Diffusivity for Different Types of Rock”, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.28, Issues 9-11, pp.499-509.
  5. Han, J., Han, H., and Han, C. (2010), *Geothermal Energy*, Hanrimwon.
  6. IGSHPA (2000), “Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems : Engineering Design and Field Procedures Manual”, *International Ground Source Heat Pump Association*, Still water.
  7. Jeon, J., Won, J., and Choi, H. (2012), “An Experimental Comparison of the Fluidity of G-class cement with Portland cement”, *Korea Society of Geothermal Energy*, Vol.8, No.2, pp.1-8.
  8. Korea geothermal research society (2008), *Renewable Energy R&D Strategy 2030 Series 8 : Geothermal Energy*, KEMCO(Korea Energy Management Corporation)/Renewable Energy Center.
  9. Lee, C. (2012), *Performance of Ground Heat Exchangers for Civil Infrastructures*, Ph.D. thesis, Korea University, Seoul, South Korea.
  10. Park, M. (2011), *Study on Thermal and Mechanical Characteristics of Cement-based Grout for Closed-loop Vertical Ground Heat Exchanger*, Master thesis, Korea University, Seoul, South Korea.
  11. Philippopoulos, 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.
  12. Roni, G., Cristiane, M., Kleber, T., Andre, L. M., and Alex, W. (2004), “On the Rheological Parameter Governing Oilwell Cement Slurry Stability”, *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Vol.12, pp.85-91.
  13. Santoyo, E., Garcia, A., Morales, J. M., Constreras, E., and Espinosa-paredes, G. (2001), “Effective thermal conductivity of Mexican geothermal cementing systems in the temperature range from 28°C to 200°C”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.21, pp.1799-1812.
  14. Takegoshi, E., Imura, S., Hirasawa, Y., and Takenaka, T. (1982), “A method of measuring the thermal conductivity of solid materials by transient hot wire method of comparison”, *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, JSME, Vol.25, pp.395-402.
  15. Toshifumi, S. (2007), “Advanced Cements for Geothermal Wells”, *Brookhaven National Laboratory*, Report 2007, USA.
  16. Vosteen, H. D. and Schellschmidt, R. (2003), “Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock”, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.28, pp.499-509.
  17. Yoon, W., Song, Y., Lee, T., Kim, K., Min, K., Cho, Y., and Jeon, J. (2011), “Research Background and Plan of Enhanced Geothermal System Project for MW Power Generation in Korea”, *Tunnel & Underground Space*, Vol.21, No.1, pp.11-19.

(접수일자 2013. 1. 22, 심사완료일 2013. 5. 10)