

## **수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤택움재의 물리적 특성 연구** **Study on physical characteristics of grouts for backfilling ground heat exchanger**

이철호<sup>1)</sup>, Chulho Lee, 김후정<sup>2)</sup>, Hujeong Gil, 최항석<sup>3)</sup>, Hangseok Choi, 최효범<sup>4)</sup>, Hyopum Choi, 우상백<sup>5)</sup>, Sang-Baik Woo

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea Univ.

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea Univ.

<sup>3)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea Univ.

<sup>4)</sup> (주)건화 기술연구소 상무, Managing Director, Research & Development Institute, Kunhwa Co., Ltd.

<sup>5)</sup> 대원토질(주) 이사, Director, Daewon Soil Co., Ltd.

**개요(SYNOPSIS)** : To obtain the physical properties of grout materials, that is the thermal conductivity and viscosity, which are used for backfilling ground heat exchangers, nine bentonite grouts and cement grouts being adapted in the United State have been considered in this study. The bentonite grouts show that the thermal conductivity and viscosity increase with the content of bentonite or filler (silica sand). The saturated cement grouts appear to possess much higher thermal conductivity than the saturated bentonite grouts, and the reduction of thermal conductivity in the cement grouts after drying specimens is less than the case of the bentonite grouts. To investigate the performance of cement grouts, fifteen samples were prepared by varying the water/cement ratio and the amount of sand and bentonite added into the cement mortar. Maintaining the moisture content of grouts is a crucial factor in enhancing the efficiency of ground heat exchangers.

**주요어(Key words)** : Ground heat exchanger, Grout, Thermal conductivity, Viscosity

### **1. 서 론**

우리나라는 에너지 자원 보유량이 부족하여 화석연료의 97%를 수입에 의존하고 있으며 고유가 시대를 대비하기 위한 대체 에너지 개발의 필요성이 증대되고 있다. 교토 의정서(1997) 및 발리 로드맵(2007)에 의한 온실가스 배출량 제한과 신에너지 및 재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법 제 11조를 통해 대체에너지의 사용이 의무화 되어가고 있는 실정이다. 대체에너지 중 지열원을 이용하는 지열 냉난방 시스템은 친환경적이며 비고갈성으로 알려져 있다. 국내에도 2000년대에 들어서면서 지열 냉난방 시스템의 보급이 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 지열 냉난방 시스템의 열교환은 지중의 열교환기에서 발생하며 천공구간에 수리적인 불투수성 구간을 만들고 HDPE로 제작된 수직 U-bend 내의 순환유체의 열을 전달시키기 위해 보어홀은 뒤택움재로 채워진다(한정상 외, 2004). 지중 열교환기의 효율은

딧채움재의 열전달 특성에 크게 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 국내 현장에서 사용 중인 9종의 벤토나이트계 그라우트와 미국에서 개발된 시멘트계 그라우트의 열전도와 점도특성을 분석하고 시멘트 배합비에 따른 특성 변화를 시험하였다. 벤토나이트의 경우 벤토나이트 함유량에 따른 열전도도 관계와 첨가제로 인한 특성변화에 대한 시험을 실시하였으며, 시멘트계 그라우트재는 BNL(Brookhaven National Lab)에서 추천한 시멘트-모래 배합비로 시료를 조성한 후 열전도도를 측정하고 물과 시멘트 비, 천연규사 함유량, 벤토나이트 함유량을 변화시킨 후 열전도도와 유동성을 고찰하였다.

## 2. 시험 시료 및 방법

### 2.1 시험 시료

벤토나이트 시료는 현재 국내에서 사용 중인 표 1의 벤토나이트 9종을 사용하였으며, 첨가제로는 천연규사(7호)를 사용하였다. 벤토나이트 시료 1~7은 토목 공사용으로 생산된 재료이며 벤토나이트 8은 지중열교환기용으로 쓰이며, 특히 벤토나이트 9는 지중열교환기용 벤토나이트로 제작되어 일정 함량의 천연규사가 제품에 미리 함유되어 현장에서 물과 혼합하여 바로 사용할 수 있는 특성을 가지고 있다. 벤토나이트 시료의 팽윤도 (swelling index)는 ASTM D5890 방법으로 측정하였으며 범위는 10~30ml/2g로 나타났다. 시료 1번과 3, 10, 11은 팽윤도가 10~15ml/2g로 낮은 편이고 시료 2, 4, 5, 7번은 23~30ml/2g으로 팽윤도가 좋은 재료에 속한다.

표 1. 벤토나이트 시료의 물리적 특성

| 종 류     | 제조사 | 공기중<br>함수비<br>(%) | pH   | 팽윤도<br>(ml/2g) | Marsh Viscosity<br>(교반 1시간후)<br>(sec) | 투수계수<br>(cm/sec)    | 200번체<br>잔류량<br>(%) |
|---------|-----|-------------------|------|----------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 벤토나이트 1 | D   | 10.0              | 9-11 | 12-15          | •                                     | •                   | •                   |
| 벤토나이트 2 | D   | 10.0              | 9-11 | 24-30          | •                                     | •                   | •                   |
| 벤토나이트 3 | S   | 8.9               | 10.0 | 15.0           | 33.9                                  | •                   | •                   |
| 벤토나이트 4 | S   | 9.5               | 10.1 | 23.0           | 40.9                                  | •                   | •                   |
| 벤토나이트 5 | S   | 9.5               | 10.0 | 24.5           | 41.6                                  | •                   | •                   |
| 벤토나이트 6 | C   | 12.0              | 6-12 | 18.0           | •                                     | 10 <sup>-7</sup> 이하 | 2.2                 |
| 벤토나이트 7 | C   | 12.0              | 6-12 | 29.0           | •                                     | 10 <sup>-7</sup> 이하 | 2.2                 |
| 벤토나이트 8 | C   | 12.0              | 6-12 | 10.0           | •                                     | 10 <sup>-7</sup> 이하 | 2.2                 |
| 벤토나이트 9 | C   | 12.0              | 6-12 | 11.0           | •                                     | 10 <sup>-7</sup> 이하 | 2.2                 |

시멘트계 그라우트는 기존 문헌(Allan와 Philippacopoulos, 1999)에서 제시한 배합비로 일반 포트랜드 시멘트로 배합하였으며 첨가한 천연규사는 벤토나이트 첨가제와 동일한 재료를 사용하였다. 이중 'Mix-111'은 BNL연구소에서 지중열교환기용으로 개발한 딧채움 재료로써 벤토나이트나 순수 시멘트의 열전도도보다 3배가량 높은 열전도도를 나타내며 습윤상태의 열전도도는 평균 2.42W/m°C, 건조상태일 때 평균 2.16W/m°C의 값을 보인다(Allan와 Philippacopoulos, 1999). 본 연구에서는 물/시멘트 비, 천연규사 함유량, 벤토나이트 함유량에 따른 열전도도와 유동성 변화에 대해 분석하였다.

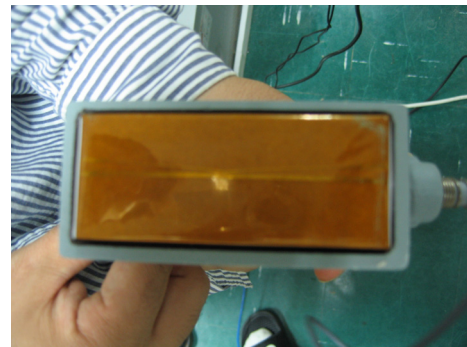
## 2.2 시험 방법

### 2.2.1 열전도도 측정 시험

본 연구에서는 그라우트 재료의 열전도도를 측정하기 위하여 그림 1(a)의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 프로브는 그림 1(b)의 PD-13 모델을 사용하였고, 크기는 95mm×40mm이며 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브 표면은 유리섬유로 구성되어 있다. 열전도도를 측정하는 방식은 매질 내의 열선에 일정 열량을 공급하고, 시간의 따른 열선의 온도 상승관계를 구하여 매질의 열전도도를 구하는 비정상 열선법(transient hot wire method)을 적용한다. 시험에 사용한 프로브는 시료의 특별한 가공 없이 열전도도를 측정할 수 있다. 벤토나이트의 경우 Gel-type의 재료이므로 일정한 시료의 형태를 유지하기 어려워 그림 2(a)와 같은 60mm×1100mm 크기의 시료 성형틀을 제작하고 시료 주변에 일정 온도의 물이 흐를 수 있는 jacket을 넣고 항온수조(그림 2(b))를 이용하여 일정한 온도를 유지하면서 열전도도를 측정하였다. 온도는 시료가 충분히 팽윤을 하게 되는 시간(6시간)동안 일정하게 20℃로 유지하도록 하였다. 시멘트계 그라우트의 경우 직사각형 몰드에 시료를 성형하여 수중양생 후 14일에 습윤상태의 열전도도와 공기 건조 후 열전도도를 측정하였다.

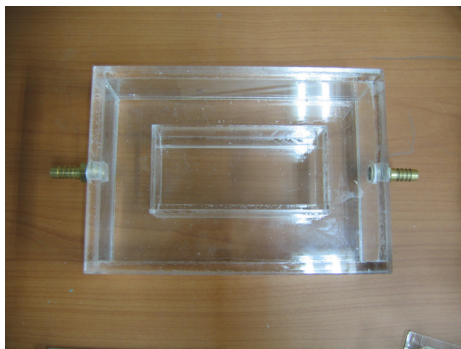


(a) 열전도도 측정기

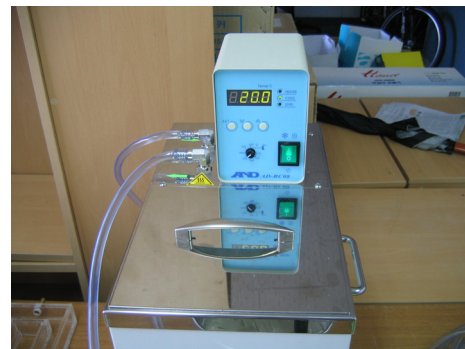


(b) 프로브(PD-13)

그림 1. 열전도도 측정기(QTM-500)와 프로브



(a) 열전도 측정용 시료 성형틀



(b) 항온수조

그림 2. 시료 성형틀과 항온수조

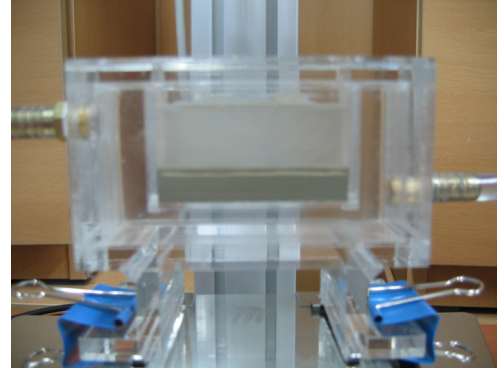
### 2.2.2 벤토나이트 그라우트의 점도 측정 시험

그라우트재의 열전도도 측정과 더불어 교반 후 시간에 따른 그라우트재의 점도 변화를 분석하였다. 점도측정은 그림 3(a)와 같은 진동방식의 점도계를 이용하여 수행하였다. 진동식 점도 측정기는 측정부

의 판(plate)이 진동(30Hz)하면서 유체나 Gel의 점도를 측정하는 방법으로써 시간에 따른 점도의 변화를 자동으로 측정할 수 있으며 점도 측정 범위는 0.003~120P(poise)이다. 점도는 교반 완료 즉시 점도계용 틀에 넣고 시간에 따른 점도를 측정하였다. 점도계용 틀에도 일정한 온도를 유지하기 위해 그림 3(b)와 같이 water jacket을 가진 틀을 제작하였으며 온도유지는 열전도도 측정 시와 마찬가지로 항온수조를 사용하였다.



(a) 점도 측정기



(b) 점도 측정용 용기(water jacket)

그림 3. 점도 측정기

### 2.2.3 벤토나이트 그라우트의 팽윤도(Free Swell Test) 측정

Free Swell Test(ASTM D5890)은 U.S. Pharmacopoeia Convention(USPC)에서 의약품 조제나 복용량을 조사하는 법에서 착안하여 고안되었다. ASTM의 방법이 적용되기 전에는 벤토나이트의 팽윤도를 측정하는 방법으로 GRI(Geosynthetic Research Institute) 시험법인 GCL-1(Free Swell of the Clay Component of Geosynthetic Clay Liners)을 사용하였다. GRI의 GCL-1 시험법은 100g의 시료를 게이지(gauge)가 부착된 직경 150mm 직경의 실린더(cylinder)에 넣고 24시간 후의 팽윤된 값을 읽는 것이다. 그러나 Lin과 Benson(2000)은 GCL-1 시험의 경우 24시간까지 벤토나이트의 팽윤은 끝나지 않고, 400시간 이후에도 팽윤은 지속된다고 보고하였다. ASTM법은 GRI의 GCL-1 시험법보다 간단한 시험기구를 가지고 진행된다. 시험은 노건조 후 볼-밀드(ball-milled)된 2g의 고운 시료를 100ml 메스실린더에 0.1g씩 넣고 충분히 수화하고 침강할 수 있도록 최소 10분 간격으로 시험을 진행한다. 벤토나이트가 뭉쳐서 덩어리 형태로 침강할 경우 낮은 투수특성으로 인해 뭉친 벤토나이트 슬러리 때문에 물이 안쪽까지 스며드는 시간이 매우 오래 걸리므로 시료를 넣는 과정에서 주의를 요한다. 모든 시료를 넣은 후(ASTM에서는 16시간)에 팽윤된 점도와 물 사이의 경계를 ml단위로 읽고 결과를 ml/2g단위로 기록한다. 본 연구에서는 총 9종의 시료에 대해 100ml 메스실린더로 Free Swell Test를 수행하였다. 특히, 과립형 시료의 경우 막자 사발로 분쇄 후 100번체 통과 시료로 시험을 진행하였다.

### 2.2.4 시멘트 그라우트의 유동성 시험

#### (1) V-lot Funnel 시험

시멘트의 유동성을 살펴보고자 시멘트 몰타르(mortar)의 유동성을 판별할 수 있는 V-Funnel 시험을 수행하였다. 12ℓ의 시멘트 몰타르를 바닥에 고정된 그림 4의 V-Funnel에 채운 후 상부를 매끄럽게 다듬는다. 몰타르를 채울 때에는 다짐이 가해지지 않도록 주의하고 출구에서 물 또는 시료가 새어나가지 않게 유지한채 10초간 기다린 후 출구를 개방하고 중력에 의해서만 몰타르가 흘러내리도록 하여 몰타르가 모두 빠져나가는 시간을 기록하고 시험을 종료한다. 이 시험은 상부에서 출구에 빛이 보일 때 종

료하고 최대 5분까지만 수행한다.



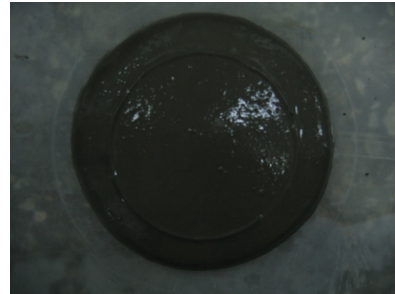
그림 4. V-Funnel 시험장치

## (2) Slump Flow 시험

Slump Flow 시험은 그림 5(a)의 몰타르용 100mm 직경을 사용하였다. 수평으로 조절된 판 위에 몰타르를 채운 링(ring)을 놓고 수직으로 들어올려 그림 5(b)처럼 몰타르가 퍼져나간 타원형의 최소, 최대 직경을 측정하여 기록한다. 유동성이 낮은 몰타르 일수록 퍼져나간 범위는 작아질 것이므로 V-Funnel 시험과 함께 시멘트 그라우트의 유동성을 판단할 수 있는 자료로 활용 할 수 있다.



(a) Slump Flow 링



(b) Slump Flow 시험 모습

그림 5. Slump Flow 링과 시험 모습

## 3. 시험 결과

### 3.1 벤토나이트 그라우트의 물리적 특성

#### 3.1.1 순수 벤토나이트 그라우트의 열전도도

일반 토목 시추용 벤토나이트 슬러리를 혼합할 때 전체 슬러리 무게에 대하여 보통 8~10%의 벤토나이트를 사용하지만 지중 열교환기의 그라우트 재료로 사용할 경우 현장에서는 일반적으로 15%~25%의 벤토나이트 분말을 물과 혼합하여 사용하고 있다(조정식, 2006). 따라서 본 시험에서는 벤토나이트 무게비 20%와 30%를 기준으로 순수 벤토나이트의 열전도도를 측정하였다. 무게비 20% 순수 벤토나이트 9종에 대한 열전도도 시험결과, 그림 6에서 보듯이 평균적으로 0.74~0.81 W/m<sup>2</sup>°C의 열전도도가 측정되었고, 무게비 30% 순수 벤토나이트인 경우에는 0.76~0.95W/m<sup>2</sup>°C의 열전도도를 갖는 것으로 측정 되었다. 대체적으로 벤토나이트의 함량을 20%에서 30%로 증가시킬 때 벤토나이트 종류에 따라 작게는 2.7%에서 크게는 25%까지 열전도도가 증가하였다. 측정결과에서 보듯이 20%와 30% 순수 벤토나이트의 열전도도에서는 제조회사별로 큰 차이를 보이지 않았다.

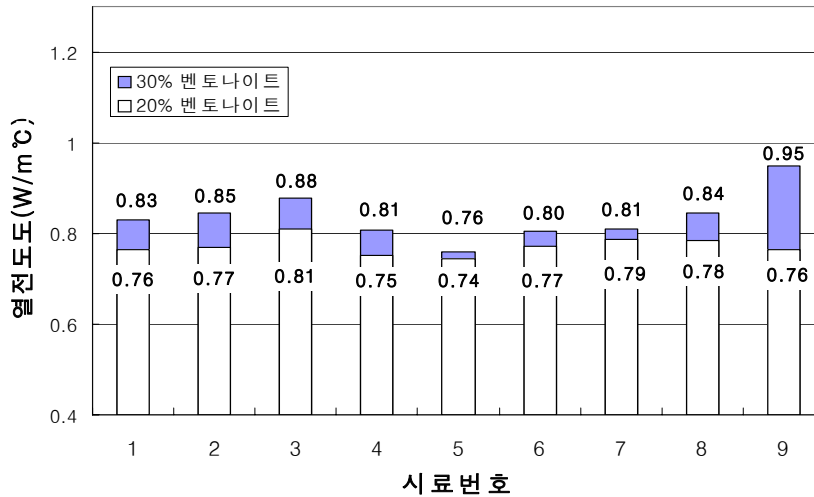
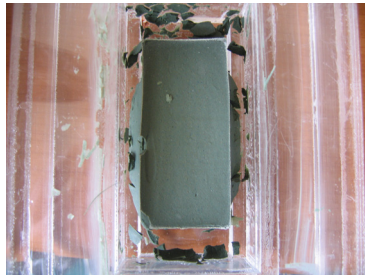


그림 6. 무게비 20%, 30% 순수 벤토나이트의 열전도도

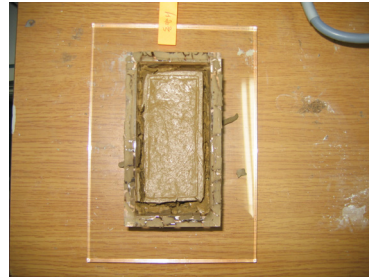
건조 시 열전도도 측정은 벤토나이트 시험체가 그림 7에서 보는 것처럼 심하게 갈라지고 수축하여 변형이 심하므로 어느 정도 열전도도의 감소 경향을 확인할 수 있으나 전반적으로 정확한 값을 측정하기가 어렵다. 실제로 10일간 공기 중에 방치하였을 경우 50%정도의 부피변화가 발생하였고, 건조 시 측정 가능한 형태를 유지한 시료의 열전도도 측정 결과 함수비를 유지시킨 시료에 비해 20%정도의 열전도도 성능밖에 발현되지 못하였다. 이는 지중 열교환기 시공 시에 고려되어야 할 사항이며 뒤채움 그라우트 시공 시와 시공 후 함수비 유지가 지중 열교환 시스템의 효율성에 큰 관건임을 보여주는 결과이다. 건조 시 시료의 상태가 열전도도 측정이 가능한 벤토나이트 시료(1, 2)에 대해 열전도도를 측정하고 이때의 함수비를 측정하였다. 측정된 건조 시 벤토나이트의 열전도도는 습윤시와 비교하여 그림 8에 나타났다. 이때의 벤토나이트 1의 함수비는 38.7%, 벤토나이트 2의 함수비는 272.6%로 나타났다. 시료의 바깥 부분보다 시료 안쪽이 수분증발이 어려워 시료의 안쪽부분의 함수비가 조금 높게 나타나므로 시료의 바깥쪽과 안쪽의 평균함수비를 기록하였다. 시료를 건조시켰을 때 대부분의 경우 심하게 갈라져 crack이 발생하거나 수축이 심하여 열전도도 측정이 용이하지 않지만, 그림 8처럼 함수비 유지의 중요성을 단적으로 보여주는 결과를 얻게 되었다.

### 3.1.2 천연규사를 첨가한 벤토나이트 그라우트의 열전도도

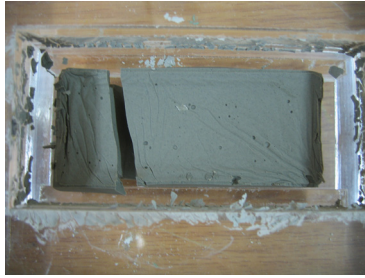
우리나라의 경우 현장에서는 순수 벤토나이트와 비교했을 때 상대적으로 열전도도가 높은 천연규사를 넣음으로써 그라우트의 열전도도를 높여 사용하고 있다(조정식, 2006). 그림 9(a)에서 보듯이, 무게비 20% 벤토나이트의 경우에, 15%씩 천연규사의 양을 증가시키면 따라 열전도도 값은 약 0.08~0.12W/m°C씩 증가하였다. 무게비 30% 벤토나이트의 경우 0.04~0.18W/m°C씩 증가하였다(그림 9(b)). 두 가지 경우(20%, 30%)에서 천연규사를 15%씩 무게비를 증가시키면 평균적으로 0.09W/m°C의 열전도도 향상으로 나타났다.



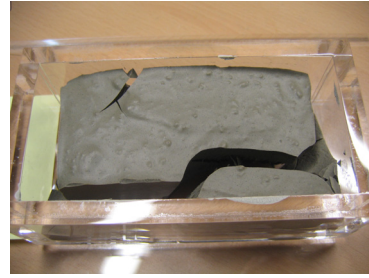
(a) 벤토나이트 1



(b) 벤토나이트 2

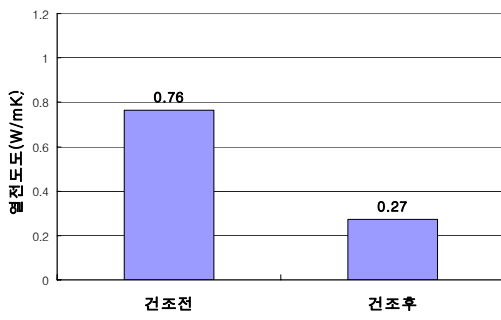


(c) 벤토나이트 8

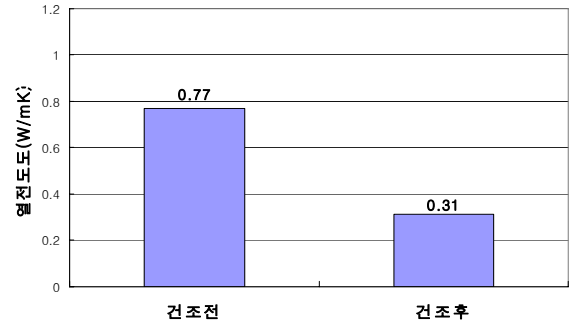


(d) 벤토나이트 9

그림 7. 건조상태 일때 벤토나이트의 수축과 크랙 발생

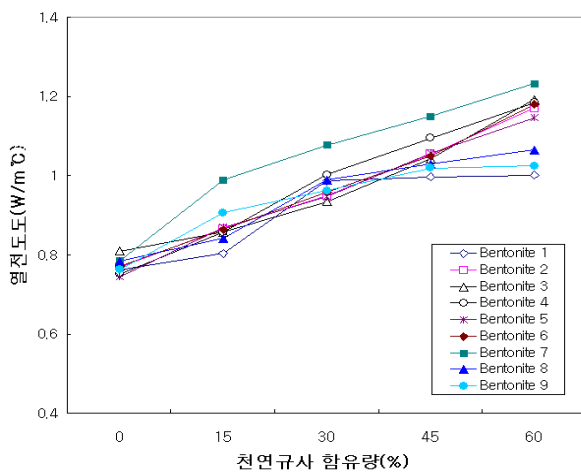


(a) 벤토나이트 1

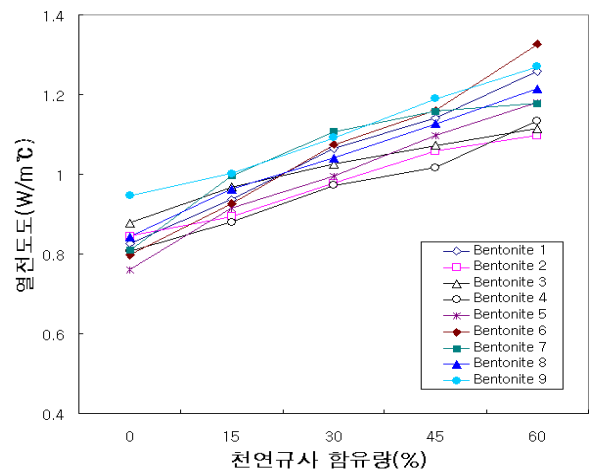


(b) 벤토나이트 2

그림 8. 건조상태 시 벤토나이트의 열전도도 변화 양상



(a) 20% 벤토나이트

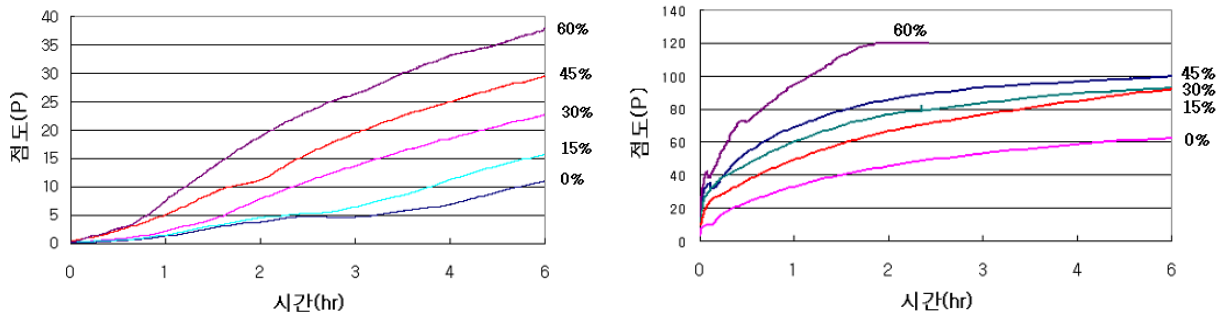


(b) 30% 벤토나이트

그림 9. 천연규사 함유량에 따른 벤토나이트 그라우트의 열전도도

### 3.1.3 벤토나이트 그라우트의 점도 측정 시험

벤토나이트의 함량 20%의 경우에 천연규사 함유량에 따른 벤토나이트 1과 벤토나이트 3의 점도변화를 측정하여 그림 10에 비교하였다. 다른 벤토나이트의 경우 교반 중 빠르게 팽윤하여 점도계의 측정범위를 초과하여 비교할 수 없었다. 현장 시공 시 팽윤도가 좋은 재료는 반드시 유동화제를 섞어 압송성(pumpability)을 높여 시공해야 할 것으로 판단된다.



(a) 20% 벤토나이트 1

(b) 20% 벤토나이트 3

그림 10. 천연규사를 함유한 벤토나이트의 시간에 따른 점도 변화

벤토나이트 1의 경우 앞서 열전도도 시험 결과에서 재료분리 현상으로 인해 천연규사의 침전이 발생하였지만 상대적으로 입경이 작은 천연규사는 침전되지 않고 여전히 남아있을 것이므로 천연규사 함유량 증가에 따라 점도는 증가하는 경향을 보였다. 이는 열전도도를 측정하는 과정에서 천연규사 함유량 30% 이상에서 측정값이 약간 증가하는 경향과 일치한다. 벤토나이트 3의 경우도 벤토나이트 1과 마찬가지로 천연규사의 함유량이 증가 할수록 점도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 그라우트제의 열전도성을 높이기 위해 현장에서 순수 벤토나이트와 천연규사를 혼합할 때, 열전도도의 증가와 함께 점도도 증가한다는 사실을 반드시 고려하여 그라우트 주입 시 천연규사 함량 및 주입시간 결정에 반영해야 한다. 또한, 점도가 낮은 벤토나이트의 경우, 천연규사의 재료분리로 인한 열전도 증가효율 감소를 고려해야 한다.

### 3.2 기존 시멘트 그라우트의 특성

Allan와 Philippacopoulos(1999)이 제시한 시멘트 배합비와 추가적으로 시멘트/모래 비를 변화시키고 천연규사의 양을 조절한 배합비(A, B)로 시료를 조성하였다. 측정은 보어홀 내에 지하수의 영향을 고려하기 위해 습윤 상태로 측정 후 건조 상태의 열전도도를 측정하여 그림 11에 비교하였다. Allan와 Philippacopoulos(1999)은 습윤상태의 열전도도는 평균 2.42W/m°C, 건조상태일때 평균 2.16W/m°C의 값을 갖는다고 보고하였으나, 본 시험에서는 습윤상태에서 2.21W/m°C, 건조상태에서 1.94W/m°C 정도로 약간 작게 측정되었다. 하지만, 건조상태의 열전도도가 습윤상태 일때와 비교하여 'Mix-111'의 열전도도가 0.27W/m°C 가량 감소하는 경향은 Allan와 Philippacopoulos(1999)의 결과와 일치한다. 측정된 시멘트계 그라우트의 열전도도가 대략 1.91 ~ 2.38W/m°C 범위로 벤토나이트계 열전도도보다 높으나 건조 시 크랙이 발생할 가능성이 있고 시간이 지남에 따라 파이프와의 접촉력이 떨어져 파이프와 그라우트 사이에 갭이 발생할 가능성이 있다고 문헌에 보고된 바 있다(Paul과 Remund, 1997). 크랙이 발생하는 위치에 따라 감소율은 다르지만 최대 66%까지 열전도도가 감소하는 것으로 보고하였다(Philippacopoulos와 Berndt, 2001). 그러나, 크랙이 발생하지 않는 경우, 시멘트계 그라우트는 건조 시 열전도도가 오직 5 ~ 25%만 감소하며, 그 감소폭은 벤토나이트계의 경우에 비해 상당히 작았다.



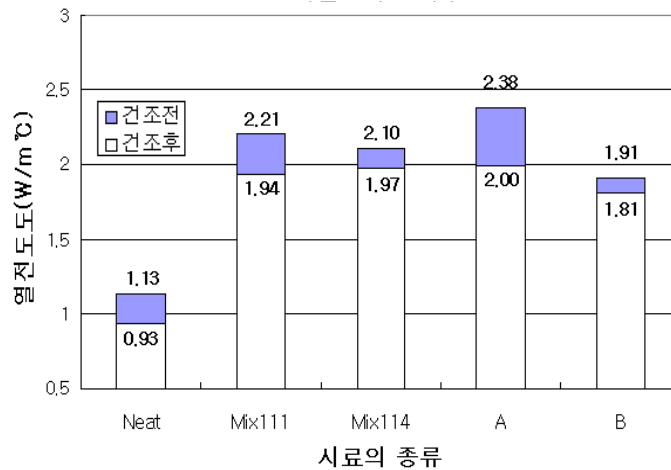


그림 11. 시멘트계 그라우트의 열전도도

### 3.3 시멘트 그라우트의 배합 조건에 따른 특성

순수 시멘트의 밀도를 감소시키고, 최종으로 혼합된 시멘트 슬러리의 체적을 증가시키기 위해 시멘트에 일반적으로 사용하는 첨가제는 모래와 벤토나이트이다(한정상 외, 2004). 따라서, 본 연구에서는 시멘트 그라우트의 배합비에 따른 특성을 알아보려고 물/시멘트 비, 천연규사 함유량, 벤토나이트 함유량을 변화시켜 배합하여 각 조건이 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 물/시멘트 비는 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8의 5가지, 물/시멘트는 0.6으로 고정하고 시멘트 무게의 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8배로 천연규사를 첨가한 조건 5가지, 물/시멘트 비는 0.6, 천연규사의 양은 시멘트 무게의 2.2배로 고정하고 시멘트 무게의 1%, 2%, 3%, 4%, 6%씩 벤토나이트를 첨가한 5가지로 총 15개의 배합으로 시료를 조성하였다.

#### 3.3.1 물/시멘트 비 영향

순수 시멘트 배합비로 물/시멘트 비만 조절하여 표 2와 같이 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8의 배합비에 대해 시료를 성형하고 열전도도와 유동성 시험을 수행하였다. 측정결과는 그림 12와 같이 물/시멘트 비가 증가 할수록 열전도도는 감소하는 것으로 나타났으며 Slump Flow는 증가하는 것으로 나타났다. 물/시멘트 비가 작은 것은 시료 내 고형물질이 다량 함유된 것을 의미하므로 열전도도가 커지고 유동성은 물의 양에 따라 증가한다. 그림 12에 나타난 Slump Flow 값은 최대/최소의 평균값을 나타낸 것이다. 열전도도는 물/시멘트 비가 0.1 증가할 때 대략 0.01~0.07W/m°C씩 감소한다.

열전도도 향상과 투수계수 저감 목적으로 시멘트 그라우트를 배합할 경우 Allan와 Philippacopoulos(1999)은 최소의 물/시멘트 비를 유지하는 것이 중요하다고 보고하였다. 하지만 물/시멘트 비를 감소 시키는 것은 유동성이 감소한다는 것을 의미하므로 배합비에 따른 적절한 물/시멘트 비를 고려해야 할 것이다. V-Funnel 시험의 경우 물/시멘트 비가 0.6 이상일 때는 출구를 열자마자 시료가 쏟아져 측정시간은 1초 이하로 표시하였다. 시료를 공기건조 시킨 후 측정한 결과 열전도도가 습윤 상태일 때 보다 대략 0.23~0.27W/m°C 만큼 소폭 감소하였다.

표 2. 물/시멘트 비에 따른 시멘트 배합비와 측정결과

| 시료번호           | Geo-1   | Geo-2   | Geo-3   | Geo-4   | Geo-5   |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 물/시멘트 비        | 0.40    | 0.50    | 0.60    | 0.70    | 0.80    |
| Slump Flow(mm) | 164-168 | 220-231 | 284-288 | 350-355 | 355-385 |
| V-Funnel(sec)  | 5.6     | 2.1     | 1이하     | 1이하     | 1이하     |

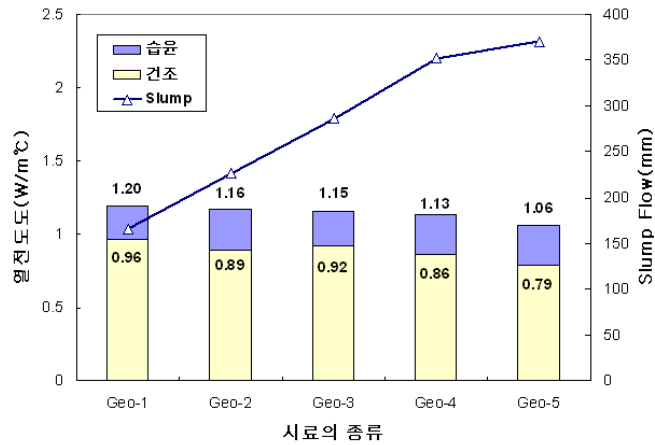


그림 12. 물/시멘트 비에 따른 그라우트의 열전도도 및 유동성

### 3.3.2 천연규사 함유량에 따른 특성

표 3과 같이 물/시멘트 비는 0.6으로 고정하고 천연규사의 양을 시멘트 무게의 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8배로 늘려가며 배합하였다. 유동화제는 시멘트 무게의 0.1%씩 첨가하였다. 시험결과 열전도도는 그림 13과 같이 천연규사의 양이 시멘트 무게에 대해 0.2배씩 늘어감에 따라 대략 0.01~0.09W/m°C씩 증가하였다. Slump Flow 시험에서는 Geo-9와 Geo-10의 경우 측정 최소값인 100mm로 나타났고 V-Funnel 결과도 Geo-9와 Geo-10의 두 경우 300초를 초과하여 측정을 종료하였다. Geo-9와 Geo-10의 배합비 같은 경우는 유동화제의 사용량을 늘려야만 압송성을 유지할 것으로 보인다. 시료를 건조 시킨 후에는 열전도도가 대략 0.20~0.42W/m°C 만큼 감소하였다. Slump Flow 결과는 Geo-9 부터 측정 최소값인 100mm로 나타났다. V-Funnel 결과도 Geo-9 부터는 300초를 초과하여 측정을 종료하였다.

표 3. 천연규사 첨가량에 따른 배합비와 측정결과

| 시료번호           | Geo-6   | Geo-7   | Geo-8   | Geo-9 | Geo-10 |
|----------------|---------|---------|---------|-------|--------|
| 물/시멘트 비        | 0.60    | 0.60    | 0.60    | 0.60  | 0.60   |
| 천연규사 /시멘트 비    | 2.00    | 2.20    | 2.40    | 2.60  | 2.80   |
| Slump Flow(mm) | 195-210 | 180-187 | 107-110 | 100   | 100    |
| V-Funnel(sec)  | 2.5     | 2.6     | 4.5     | 300   | 300    |

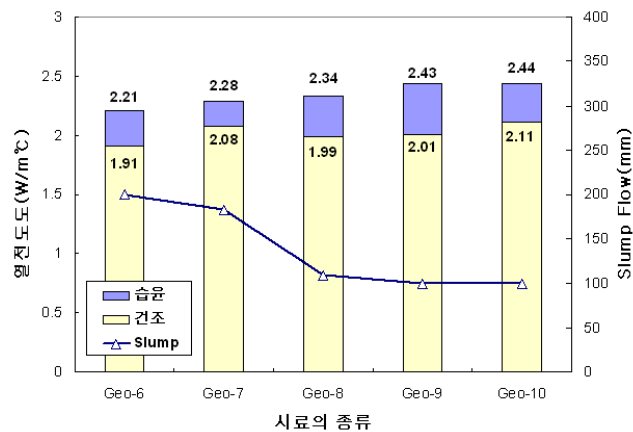


그림 13. 천연규사 첨가량에 따른 그라우트의 열전도도 및 유동성

Allan와 Philippacopoulos(1999)은 최소 물/시멘트 비를 유지한채 첨가제의 양을 늘리기 위해 단위체 적당(m³) 유동화제를 8.7~8.8ℓ씩 첨가하였다. 이때 물/시멘트 비가 0.55이고 시멘트 무게에 대한 유동화제의 무게가 약 1% 내외였던 점을 감안하면, Geo-9와 10번 시료와 비슷한 배합비에서 유동화제의 양에 따른 시멘트 몰타르의 유동성에 대한 검토가 필요할 것이다. 또한 일반적으로 유동화제는 제조 회사별로 성능이 조금씩 다른 것으로 알려져 있으므로 유동화제를 시멘트 무게에 대해 어느 정도 첨가는 것을 정량적으로 나타내는 것은 어렵다고 판단하며 시공자가 시험 배합에 사용한 유동화제의 성능을 고려하여 현장에서 이를 반영해야 할 것이다.

### 3.3.3 벤토나이트 함유량에 따른 특성

벤토나이트의 첨가에 따른 시멘트 그라우트의 변화를 알아보고자 표 4와 같이 물/시멘트 비는 0.6, 천연규사/시멘트 비는 2.4로 고정하고 벤토나이트의 양을 시멘트 무게의 1%, 2%, 3%, 4%, 6%로 늘려가면서 시료를 배합하였다. Allan와 Philippacopoulos(1999)은 벤토나이트를 시멘트 그라우트에 첨가하는 목적을 블리딩 현상 감소, 그라우트의 최종 체적 향상, 모래의 침전현상 방지 등이라고 밝혔다. Geo-6에서 Geo-10 시료의 경우와 마찬가지로 유동화제는 시멘트 무게의 0.1%씩 첨가하였다. 배합에 사용한 벤토나이트는 앞서 시험한 벤토나이트 그라우트 중 3번 시료를 사용하였다. 시료를 공기건조 시킨 후에는 열전도도가 0.34~0.44W/m°C 만큼 감소하였다.

표 4. 벤토나이트 첨가량에 따른 배합비와 측정결과

| 시료번호           | Geo-11  | Geo-12 | Geo-13 | Geo-14 | Geo-15 |
|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 물/시멘트 비        | 0.60    | 0.60   | 0.60   | 0.60   | 0.60   |
| 천연규사/시멘트 비     | 2.40    | 2.40   | 2.40   | 2.40   | 2.40   |
| 벤토나이트/시멘트 비    | 1 %     | 2 %    | 3 %    | 4 %    | 6 %    |
| Slump Flow(mm) | 105-107 | 100    | 100    | 100    | 100    |
| V-Funnel(sec)  | 4.5     | 300    | 300    | 300    | 300    |

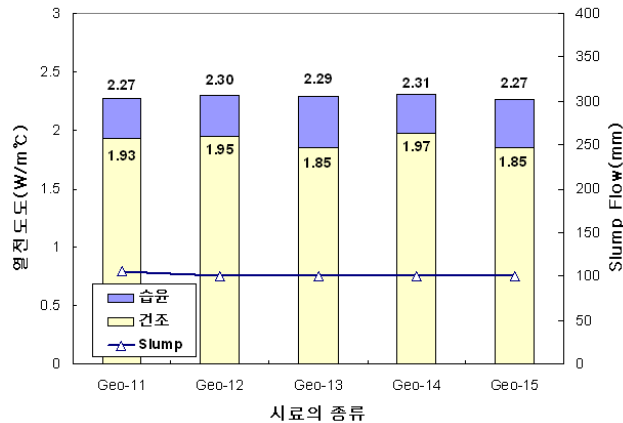


그림 14. 벤토나이트 첨가량에 따른 그라우트의 열전도도 및 유동성

시험결과 그림 14와 같이 벤토나이트가 시멘트 무게에 단지 1% 정도 첨가하여도 시멘트 몰타르의 유동성이 현저히 감소하였으며 벤토나이트 첨가량 2%에서 Slump Flow시험 최소값인 100mm를 기록하였다. 열전도도 측정 결과 1~6%의 벤토나이트 함량으로는 시멘트 그라우트의 열전도도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 시험에 사용한 벤토나이트의 Free Swell 시험 결과는 15ml/2g으로 상대적으로 팽윤하는 정도가 작은 편에 속하는 벤토나이트이지만, 소량으로도 시멘트 몰타르의 유동성에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서, 시멘트-모래 그라우트를 배합할 때 벤토나이트를 함께 배합할

경우 유동성이 떨어지므로 반드시 유동화제에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 국내에서 사용 중인 9종의 벤토나이트와 시멘트계 그라우트의 열전도도와 점도 특성에 대해 실험적으로 고찰하였으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 순수 벤토나이트 그라우트의 경우, 전체 무게에 대한 벤토나이트의 무게비가 20%일때 열전도도는 0.74~0.81W/m<sup>2</sup>C이고 30%일때 0.76~0.95W/m<sup>2</sup>C로 종류에 따라 벤토나이트 무게비가 20%에서 30%로 증가될 때, 2.7~25%까지 열전도도가 증가하였다.
- 벤토나이트 그라우트에 첨가제를 넣거나 벤토나이트 무게비를 늘릴 경우 점도가 증가하는 경향을 나타낸다. 점도 증가는 뒤채움 시 압송효율을 감소시키므로 배합 시 점도 영향을 고려해야 한다.
- 벤토나이트계 그라우트에 천연규사를 첨가할 경우 천연규사의 함유량이 증가함에 따라 열전도도는 증가하지만 벤토나이트의 점도가 낮을 경우 재료분리 현상으로 증가 폭이 크게 감소한다.
- 시멘트계 그라우트는 습윤 시 순수 시멘트일 경우 1.13W/m<sup>2</sup>C, 시멘트-모래의 경우 1.91~2.38W/m<sup>2</sup>C이고, 건조 시 순수 시멘트일 경우 0.93W/m<sup>2</sup>C, 시멘트-모래의 경우 1.81~2.00W/m<sup>2</sup>C로 측정되었다.
- 시멘트계 그라우트는 벤토나이트계 그라우트에 비해 2배~3배가량 높은 열전도도를 가지며 건조 시 열전도도 감소폭이 작아서 지중 열교환용 뒤채움 재료로서 시멘트계 그라우트제의 적용성을 연구할 필요가 있다.
- 시멘트 그라우트는 물/시멘트 비가 감소할수록, 천연규사의 첨가량이 증가할수록 열전도도는 증가하였다. 순수 시멘트의 물/시멘트 비가 0.4~0.8로 증가함에 따라 열전도도는 1.20W/m<sup>2</sup>C에서 1.06W/m<sup>2</sup>C로 감소하였다. 물/시멘트 비를 0.6으로 고정하고 천연규사의 양을 시멘트 무게의 2~2.8배까지 첨가한 결과 열전도도는 2.21W/m<sup>2</sup>C에서 2.44W/m<sup>2</sup>C로 증가하였다.
- 시멘트 그라우트는 물/시멘트 비가 감소할수록, 첨가제의 비율이 증가할수록, 그리고 벤토나이트의 비율이 증가할수록 유동성은 감소하는 것으로 나타났다. 물/시멘트 비가 0.4~0.8로 증가함에 따라 Slump Flow 결과는 166mm에서 370mm까지 증가하였다. 물/시멘트 비는 0.6으로 고정하고 천연규사의 양을 시멘트 무게의 2~2.8배까지 첨가한 결과 Slump Flow 결과는 200mm에서 100mm로 감소하였다.
- 시멘트 그라우트는 건조되었을 경우에도 벤토나이트 그라우트에 비해 열전도도가 높다. 시멘트 그라우트가 습윤 상태에서 건조되면 열전도도는 평균적으로 0.32W/m<sup>2</sup>C 정도 만큼 감소하며, 이는 벤토나이트 그라우트와 비교하여 건조 시 열전도도 감소율이 현저히 적음을 알 수 있다. 따라서 벤토나이트 그라우트의 경우 지중 열교환기 보어홀 내의 함수비 유지가 중요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심D04)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 조정식 (2006), “지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움제 조성에 관한 연구.”, 산업자원부, 최종보고서 2004-N-GE08-P-01
2. 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬(2004), **지열펌프 냉난방 시스템**, 한림원, 서울
3. Allan, M. L. and Philippacopoulos, A. (1999). "Properties and performance of cement-based grouts for geothermal heat pump application.", *U.S. Department of Energy*, Washington D.C..
4. Lin, L. C. and Benson, C. H.(2000). "Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs.", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.1, pp 40-49
5. Paul, N. D. and Remund, C. P. (1997). "Physical, thermal and hydraulic properties of bentonite-based grouts.", *Electric Power Research Institute*, Final Report No.TR109160, ERI Project RP38 81-1.
6. Philippacopoulos, A. and Berndt, M. L. (2001). "Influence of debonding in ground heat exchanger used with geothermal heat pumps.", *Geothermics*, vol30, pp. 527-545.