

# 지반 및 지반환경 공학 분야에서의 지열 이용

박준범, 권기범\*, 최성대\*, 김재진\*, 박준우\*, 김세종\*\*

서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, \*서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, \*\*서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

## 1. 서론

지반 및 지반환경 공학 분야에서 다루는 흙은 열에 의해 물성치가 변하고 이는 접촉 인자에 물리적, 화학적 변화를 준다. 특히, 동결 및 해빙 과정을 통해 수반되는 팽창 및 수축은 건물이나 도로, 교량 및 철도 등의 사회 기반 시설에 영향을 줄 수 있기 때문에 열의 전달은 한랭지역 기술자들에 의해 지대한 관심을 받아 왔다. 뿐만 아니라, 절연성 조건을 필요로 하는 천연 액화 가스 저장소나, 열을 쉽게 전달하고 소산시켜야 하는 지중 매설 고압 송전 선로를 시공할 때에도 열의 전달 성질이 고려된다 (Mitchell, 2003).

이처럼 구조물에 영향을 미치는 지반 내부의 열은 외부로부터 자연적, 인위적으로 공급되어 전달될 수 있으며 지구 내부에서 발생하는 지열로부터도 직접 취할 수 있다. 19세기 초 지열이 에너지원으로 활용되기 시작한 이래 세계적으로 많은 지열 발전소가 건설되어 지열 에너지의 활용이 활발하고, 지금 이 순간에도 화석연료의 대체 에너지로 주목을 받고 있다. 그러나 지반 및 지반환경 공학 분야에서의 지열 연구 성과는 현재까지는 극히 미미한 실정이다. 이러한 시점에서 지반 및 지반환경 공학 분야의 지열 연구 활동을 정리하고 활용 방향을 제시하는 것이 필요하다고 판단된다.

이에 흙의 열전도에 관한 이론적 배경을 소개한

후 지반 및 지반환경 공학 분야에서의 지열 이용에 대하여 알아보겠다.

## 2. 흙에서의 열전도 및 특성

투수성이 좋은 사질토나 자갈층에 물이나 공기의 흐름이 있는 경우는 대류(Conduction)에 의해 열이 전달되기도 하고, 표토의 경우에는 복사(Radiation)를 고려할 수 있으나 흙의 내부 열의 흐름은 복사나 대류보다는 주로 전도(Conduction)에 의존하고 있다.

정상상태(Steady-state)의 균질한 토질에서 일어나는 열전도는 푸리에(Fourier) 공식을 따른다 (Mitchell, 1993).

$$Q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} A \quad \text{or} \quad q_x = \frac{Q_x}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

$Q_x$  = x방향으로의 열의 흐름 (W)

$q_x$  = 단위면적당 열의 흐름 ( $\frac{W}{m^2}$ )

$\lambda$  = 열전도도 ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )

$T$  = 온도 (K)

$x$  = 거리 (m)

$A$  = 면적 ( $m^2$ )

흙과 관련된 대표적 물질에 따른 열전도도는 표 1과 같다.

표 1을 통해 볼 때, 흙의 열전도도는 다른 물질의 값들과 달리 변화가 있음을 알 수 있다. 이러한 값

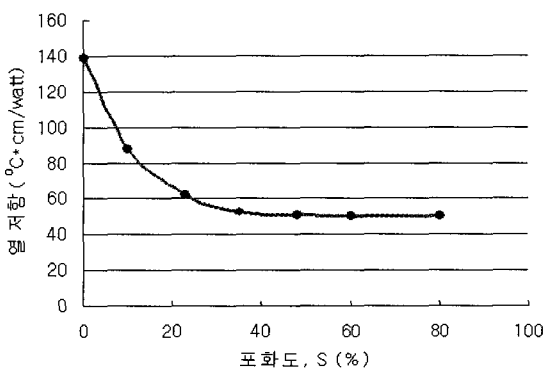
의 변화는 흙의 다양한 구성성분이나 건조단위 중량 및 포화도 등의 변화에 따른다. 공기나 물의 열전도도보다 고체의 열전도도가 크기 때문에 다져진 흙의 열전도도가 느슨한 경우의 값보다 크게 나타난다. 또한 물이 공기보다 큰 열전도도를 갖기 때문에 포화도가 클수록 큰 전도도를 갖는다.

비열(Specific Heat)은 어떤 물질의 온도를 1만큼 올리는데 필요한 열량으로서 비열이 높은 물질은 열의 전달에도 불구하고 온도변화가 잘 일어나지 않는 특성을 가진다. 비열을 알면 단위 중량당 열용량과 단위체적당 열용량을 계산할 수 있고, 계산된 값들은 정상상태(Steady-state)가 아닌 과도상태(Transient-state)에서 열의 흐름을 고려할 때 유용하다.

잠열(Latent Heat)은 승화열(Heat of Fusion) 및 기화열(Heat of Vaporization)로 구분되며, 이들은 각각 물질의 상태변화에 필요한 일정량의 열을 의미한다. 승화열은 지반의 동결 및 융해 과정에서, 기화열은 지반 내 액체 및 기체상태의 전

<표 1> 물질에 따른 열의 전도도 (Mitchell, 1993)

물질 종류	전도도(W/m/K)	물질 종류	전도도(W/m/K)
공기	0.024	얼음	2.250
물	0.600	콘크리트	1.800
비	100kg/m <sup>3</sup>	구리	389.0
	500kg/m <sup>3</sup>	흙	0.25~2.5(≈1.7)



[그림 1] 열저항과 포화도의 일반적인 관계 (Mitchell, 1993)

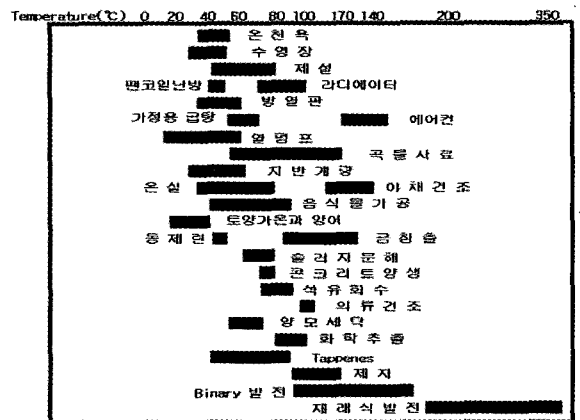
환과정에서 고려된다.

물질에 따른 열 저항은 개념상 열전도도의 역으로 생각할 수 있으며 이 특성은 공사 자재 선별에 이미 적용되어 왔다. 그림 1은 부서진 석회석의 열 저항과 포화도간의 관계를 보여주고 있으며 포화도에 따라 약 3배 크기의 절연성의 차이가 있음을 알 수 있다.

### 3. 지반 및 지반환경 공학 분야에서 지열 이용

지열의 활용은 곧 지열 에너지의 활용으로 이해될 수 있을 정도로 타 분야에서의 활용성은 제한된 실정이나, Lindal(1973)은 이미 오래전에 온도에 따른 지열의 활용 범위를 그림과 같이 다양하게 제시하였으며, 이후에도 여러 과학자들에 의해 지열의 다양한 활용 방안이 개발되었다.

그림 2를 통해 알 수 있듯이 지열은 지반 및 지반환경 공학 분야를 포함한 여러 분야에서 활용될 수 있을 것이다. 특히, 지반 및 지반환경 공학 분야에 해당되는 사항은 제설 및 제빙, 지반 개량, 토양 가온(Soil Warming), 콘크리트 양생 및 슬러지 분해 등을 들 수 있다. 실제 일부 과학자 및 기술자들에 의해 이러한 분야에 대한 연구가 일부 진행되었으며 특히, 토목기술이 발달하고 지열의 활용도가 높은 일본 등에서 다양한 연구가 진



[그림 2] 지열유체의 이용방법을 나타내는 도표 (Lindal, 1973)

행되고 있다.

또한 국제 지열 협회(International Geothermal Association)는 지열의 활용 분야를 크게 1)지열 발전, 2)지열의 직접 이용 및 3)지열 히트 펌프 등 3가지로 구분하고 있다. 지열의 직접 이용 방법에서 인도가온(Sidewalk Warming) 및 지역난방(District Heating) 등은 주로 지열이 히트 펌프를 경유하여 토목공사 및 지반공학 분야에 접목되는 방식으로 이루어진다. 그림 3은 지열을 이용한 인도가온 설치공사의 예를 보여준다.

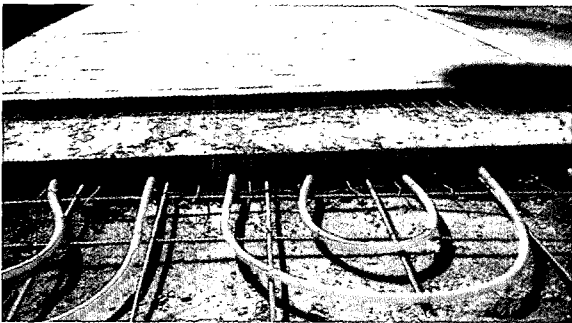
지반 및 지반환경 공학 분야에서의 지열 이용 방안에 대한 연구는 학문적 연구 및 활용분야로 나누어 볼 수 있다. 학문적 연구 분야에서는 지열이 암반 및 토질의 물리적, 역학적 성질에 미치는 영향이 주로 연구되었고 활용분야에서는 지반 및 지반환경 분야에 대한 지열이용의 적용성 여부가 검토되었다.

#### 4. 학문적 연구

##### 4.1 고온의 지하수가 암석의 강도와 변형 특성에 미치는 영향

稻田善紀 外 (1986)는 암석의 강도나 변형특성이 열에 얼마나 영향을 받는지 정성적(定性的) 결과를 얻고자 진행한 연구를 통해, 미시적 관점에서 많은 문제가 있을 수도 있다고 언급하면서도 다음과 같은 연구 결과를 발표하였다.

1. 실온(室溫)에서는 화강암, 안산암의 압축 및



[그림 3] 지열을 이용한 인도가온(Sidewalk Warming) 설치공사

인장강도 모두 건조 상태 보다 습윤 상태에서 더욱 저하된다.

2. 고온(100℃) 건조 상태에서 화강암, 안산암의 압축강도는 대부분 실온에 비해 변화가 없으나, 인장강도는 약간 저하된다. 반면, 고온 습윤 상태에서는 압축강도, 인장강도 모두 현저하게 저하된다.
3. 실온에서 화강암, 안산암의 접선 탄성 계수는 습윤 상태 쪽이 건조 상태 쪽보다 작아진다. 고온(100℃) 건조 상태에서의 접선 탄성 계수는 실온에 비해 큰 변화가 없으나 고온 습윤 상태에서는 상승된다.
4. 안산암의 포아송비는 건조 상태보다 습윤 상태가 더 크다.
5. 화강암, 안산암의 변형치는 온도를 높이면 증가하며, 화강암의 변형이 상당히 크다. 또한, 화강암은 건조 상태보다 습윤 상태의 변형치가 크며, 온도이력을 준 경우에도 실온에서 건조 상태의 잔류변형보다 습윤 상태의 변형치가 크다. 특히, 화강암의 습윤 상태의 변형수치는 안산암보다 몇 배 이상 크다. 두 암석 모두 온도이력을 여러 번 주면, 잔류변형은 일정한 값으로 수렴한다.
6. 화강암, 안산암의 접선 선팽창계수, 할선(割線) 선팽창계수 모두 온도를 높이면 상승된다. 특히, 화강암에서 두드러지며, 건조 상태보다 습윤 상태의 변형치가 더 크다.
7. 고온에서 현미경 관찰결과와 X-ray를 이용한 암석의 조직변화 해석 결과를 통해, 고온에서 잠재적 미세균열(Micro Crack)이 확대되고, 석영, 흑운모 또는 정장석과의 경계에서 미세균열(Micro Crack)이 발생된다. (稻田善紀 外, 1986)

##### 4.2 지열 열수 환원시의 지층의 투수성 저하에 관한 실험적 고찰

지열발전소에서 사용되는 고온의 지하수는 사용 후에 다시 환원 우물을 통해 지반 내부로 유입된다. 이 때, 열수 중에 다량으로 포함되어 있는 실

리카가 부착되면서, 환원 우물 주변 지층의 투수 능력이 서서히 감소한다.

실리카의 부착과정을 조사하기 위해 큐슈전력(주) 대약지(大岳地) 열 발전소로부터 배출되는 지하수를 이용해 실내 실험을 실시하였다(系井龍一, 1986). 이 연구에서 변질되지 않은 암쇄(岩碎)를 사용하였으며, 실험과 수치계산으로 얻은 결과를 근거로, 충전재(充填材)가 달라지면 부착과정 또한 상이함을 보였다. 이후로도 추가 실험을 통해, 암쇄에 대한 실리카의 부착정도를 해명하여 실제 지층에 적용할 것을 목표로 하고 있다.

### 4.3 결빙된 토양 및 광미의 지열에 의한 침전 모델링

겨울철 결빙점 이하의 온도에서 토양 및 광미(Tailing)를 운반하여 적재할 때 적재물이 동결되어 결빙층이 형성된다. 기후조건이 완화되는 여름에 대기온도 및 지반의 온도가 상승함에도 불구하고 결빙층 위에 추가 적재된 토양이나 광미로 인해 열의 전달이 제한되어 결빙층이 완전히 해빙되지 않는다.

그림 4는 캐나다 카메오 지역에서 관측된 지층의 단면구조로서 지난 수 년 동안 형성된 결빙층을 보여준다. 진하게 표현된 층이 아직 해빙되지

않은 결빙층을 의미하고, 연한 부분은 해빙되어 침하가 일어나고 있는 부분이다. 다수 존재하는 결빙층은 침하가 일어나지 않기 때문에 적재 지역의 침하를 예측하는데 제한적이다. 오랜 시간이 지나면 내부 깊숙이 존재하는 결빙층부터 지열에 의해 해빙되기 시작하고 침전이 발생할 것임을 예상할 수 있다. 이러한 과정을 예측하기 위해 Nixon과 Nick(1998)은 '지열 모델링'을 도입하여 소개하였고 두 곳의 우라늄 광산을 배경으로 실시된 모델링 결과치와 실제 관측치를 비교하였다.

1991년 Nixon에 의해 제시된 지열 모델링(THERM 1)은 광범위한 데이터를 반영한 1차원 유한요소 프로그램이며 지수함수식이 적용되었다. 이 모델은 지반 표층에서의 에너지 평형상태를 기본으로 시작하였다. 지반 내부로 전달되는 에너지는 태양에 의한 단파, 대기에 의한 반사파, 표층수의 기화 및 바람에 의한 열손실 등이 적용되어 계산된다.

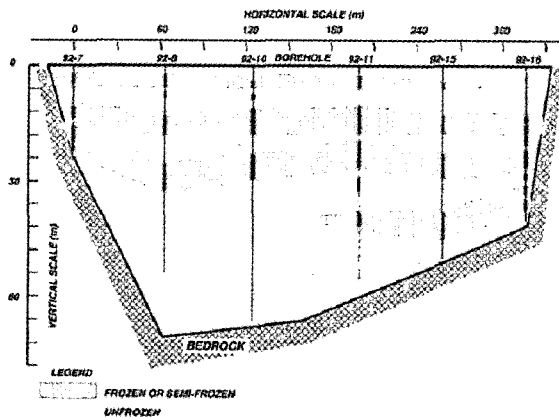
지열 모델링을 통해 Rabbit Lake에서 장기 예측 시뮬레이션을 한 결과 결빙층이 완전 해빙되고 침전되는데 약 100~200년이 소요될 것으로 예측하였다. 또한 Key Lake 지역의 초기 결빙 두께 16.5m가 완전 해빙되는데 70~120년이 소요될 것으로 예측하였다(Nixon and Nick, 1998).

## 5. 활용분야

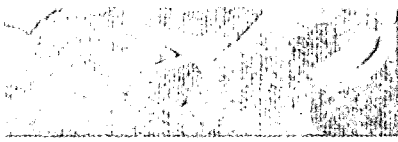
### 5.1 지중열을 이용한 교량, 도로 및 주차장 등의 노면 제설 및 예방시스템

겨울철에는 도로에 쌓인 눈과 노면의 동결에 따른 차량의 미끄럼 사고가 빈번하기 때문에 동결기 도로 노면 관리 방법으로서 기계 제설, 동결방지제 살포 및 동결억제 포장 등이 활용되고 있다.

최근에 도로 포장체 내부에 파이프를 매입하여 지하 100~150m의 지하수를 끌어올려 순환시키는 파이프식 도로히팅시스템(road heating system)에 대한 연구가 활발하다. 고온의 지하수로부터 전달되는 열을 통해, 동결된 노면이나 도



[그림 4] 결빙층 간격이 묘사된 카메오 지역의 지층 단면도 (Nixon and Nick, 1998)



로에 쌓인 눈이 용해되는 것이다.

적설시 산악도로의 터널 출입구에서 특히 미끄럼 사고가 많은 점을 고려하여, 터널 출입구의 동기노면관리에 관한 온수 파이프식 도로히팅시스템에 관한 연구가 실시되었다. 외부 기온의 영향을 적게 받는 터널 내부의 특성을 이용하여, 터널 내부의 지열 및 용수(用水)에 의해 확보된 고온의 지하수를 매설 파이프를 통해 통수시켜 터널 출입구의 노면을 관리하고자 한 것이다. 온도설계를 포함하여 경제성 및 실용성 분석을 위한 수치해석을 실시한 결과, 동절기에도 지열에 의한 용수는 비교적 높은 온도를 가지고 있으며, 항온(恒溫)탱크를 매설할 경우 매입된 파이프에 단시간에 일정한 열 공급을 할 수 있다고 판단했다(郡内 康榮, 1999).

또한 용해를 필요로 하는 소요면적에 비해 용수가 부족한 때를 대비해, 외부로부터 물을 유입시켜 유입된 물의 온도를 상승시켜 수원을 확보하는 과정에서 터널 내부 수온상승의 특성을 조사하였다. 조사결과, 1) 관내 수온 상승은 통수 거리에 비례하고 용수에서 유입수가 차지하는 비율에 영향을 받으며, 2) 용수온도가 외부 온도 변화에 영향을 받기는 하나 시간대에 무관하게 통수를 통해 온도 상승이 있으며, 3) 물과 암반 사이의 온도 차이가 클수록 열의 이동이 많아지며 암반의 열용량이 크기 때문에 암반 온도 변화는 거의 보이지 않음을 보여줬다(仁尾 彰一郎, 2001).

동절기 고가 교량 위에서의 미끄럼 사고 또한 치명적인 결과를 초래한다. 지하수를 이용하여 교량 상판의 눈을 녹이고 동결을 방지하기 위한 기초 자료를 얻기 위해 파이프형 도로히팅시스템에 대한 실내실험, 야외 현장실험 및 수치해석을 실시하였다(谷本 俊夫, 1998). 특히, 파이프의 간격, 온수 온도, 외부 기온 등에 의한 효과를 조사하였고, 평지와 산악지에서 지중 온도분포를 측정해 지하수 이용 여부를 검토하였다. 연구 결과, 평지의 지하수는 도로히팅시스템에서 효과적이었으나 산악지에서는 온수 확보를 위해 추가적인 에너지 공급이 필요하다고 판단하였다. 또한, 파이

프 간격이 일정할 때 외부기온의 변화는 해빙 효과에 큰 영향을 주며, 온수 온도를 고온으로 하는 것보다 파이프의 간격을 줄이는 게 더 효과적이라는 결과를 도출했다.

‘금속봉 매설법’이라고 불리는 노면 동결 방지법이 제안되었으며 이 방법은 높은 열 전도도의 특성을 지닌 알루미늄 같은 금속봉을 통해 지열 에너지를 지표까지 전달해 노면 동결을 억제하려는 방법이다(福原 輝幸, 1993). 금속봉 매설법에 의한 노면동결 억제 효과를 조사하기 위해 야외 실험을 실시한 결과, 일반적인 콘크리트 위에서는 몇 번 정도 동결이 일어났지만 금속봉 매설법에 의한 콘크리트 위에서의 동결은 관찰되지 않았다.

우리나라에서도 지중열을 이용하여 교량의 눈과 얼음을 제거하는 시스템이 국내 특허에 출원 및 등록되었다(안 형준, 2004). 이 시스템은 지중열 채열부, 히트펌프 및 열전달 수단으로 구성되어 있다. 지중열 채열부는 지중에 설치되어 지열을 흡수하는 열전달 유체를 갖는다. 히트펌프는 상기 지중열 채열부로부터 열이 축적된 열전달 유체를 저장하여 펌프 작동시 열전달 유체를 공급받아 전달 유체와 열 교환을 행하여 온수를 생산하는 시스템이다. 열전달 수단을 통하여 히트펌프에서 생산된 온수를 교량의 상판에 배치된 배관으로 공급하여 교량노면의 눈 또는 얼음을 녹인다. 위 시스템은 교량주변의 온도 및 기후조건에 따라 히트펌프 및 열전달수단을 제어하여 제설 및 제빙을 행하도록 하는 제어수단을 포함한다.

일본의 한 주차장에서 지중열을 이용하여 노면의 눈과 얼음을 녹이는 실험을 위한 시스템을 도입하여 충분한 효과가 있음을 보여줬다(川崎 和來, 1998). 더불어 하절기에는 대기보다 저온의 특성을 지닌 지중열이 순환수를 냉각시켜 태양 복사에 의해 따뜻해진 노면의 냉각 정도를 조사하고자 하였다.

## 5.2 하 폐수 처리 시스템

지중열 에너지의 하수처리 시스템 적용성 평가가 1989년 캐나다 프레리 지방(Prairie Provinces)

에서 시행되었다 (Vigrass et al., 1989). 전반적인 비용 대비 효과를 평가하고자, 지열 에너지를 하수처리 시스템에 적용하는데 소요되는 비용과 유입되는 하수의 온도를 지열로 증가시켰을 때 보여준 효과를 분석하였다. 활성 슬러지 방법에서 유입되는 하수의 온도를 연중 30℃로 일정하게 유지한 결과 BOD제거율이 10~15% 향상되었다. 그러나 폭기조에 장기간 폭기할 경우 하수 정화 효율이 감소하였다. 살수 여상 방법에서는 약 30%의 상당한 효율 증대를 보였다. 이러한 효과에도 불구하고 투자 대비 효율성은 매력적이지 못했다. 즉, 하수처리 시설에 지중열 적용시 판단되는 약 33~50%의 추가 비용은 예상 효과를 초과하기 때문에 시설비용 절감 및 효율 개선을 위한 추가 연구를 필요로 한다.

GeneSyst Int., Inc에서는 미국의 콜로라도 주에 “Deep Well Oxidation process”의 시범플랜트를 설치하였다. 이 공정은 농축슬러지를 습식화의 방법으로 처리하는 기술로서, 기존의 습식 산화와는 달리 지하 1,500m까지 수직관을 통하여 농축슬러지와 공기를 공급하는 방식이다. 공급된 농축 슬러지는 지열과 중력에 의해 자연적으로 기체와 액체를 구별할 수 없는 즉, 초임계상태에서 산화반응을 일으켜 COD는 80% 이상 감소하고, 휘발성 고형분의 90% 이상을 처리할 수 있는 것으로 보고되었다.

### 5.3 쓰레기 매립장을 활용한 지열 냉난방시스템

지열이 높은 쓰레기 매립장에 지열교환기를 설치하여 히트펌프를 이용하는 지열냉난방시스템에 관한 국내 특허가 출원되었다 (이상록, 2004). 이 시스템은 냉매를 이용해 고온의 열원을 저온으로 전달하거나 저온의 열원을 고온으로 전달하는 여러 개의 히트펌프, 지중열을 흡수 또는 지중으로 열을 방출하는 지열교환기, 파이프 내부에 존재하는 냉매를 원활하게 유통시키는 순환펌프, 그리고 히트펌프와 파이프로 연결되어 있는 냉난방부를 포함한다. 특히 이 시스템은 쓰레기 매립

장에 지열교환기를 설치함으로써, 지열교환기 설치시에 천공과정이 필요 없고 지열교환기를 지하 깊이 매설할 필요가 없어 초기 설치투자비를 획기적으로 감소시켜 경제적 효과가 크고, 쓰레기 매립장은 쓰레기의 분해과정에서 발생하는 열로 인해 지중열이 평균 25℃ 이상으로서 일반 지중의 평균온도인 15℃보다 월등히 높아 히트펌프의 효율을 획기적으로 높였다.

## 6. 결론

지열에너지의 활용은 전 세계적으로 특히, 환태평양 조산대에 걸쳐있는 국가들에서 활발하다. 필리핀의 경우 국가 전력량의 25%를 지열 발전에 의존하고 있다 (Dickson and Mario, 2004). 예상되는 화석 연료의 고갈로 인해 대체 에너지의 필요성이 증대되고 있으며, 지열은 대체 에너지의 중요한 부분을 차지한다. 또한, 환경 보존의 필요성은 지열 이용의 가치를 더욱 크게 하고 있다. 이러한 추세에 따라 지열이용을 소홀히 하던 우리나라도 심부에너지 이용을 위한 연구에 착수하였다 (한국지질연구원, 2004).

하지만, 지열의 에너지원으로서의 강점으로 인해 그 외적인 분야에서의 활용은 다소 제한적이었다고 할 수 있다. 1973년 Lindal은 지열 발전을 포함한 각 분야에서의 구체적인 활용 방안을 언급하였으나 아직 지반 및 지반환경 공학 분야에서의 지열 이용에 대한 연구 및 지열의 활용이 미흡한 실정이다. 특히, 1989년 Vigrass에 의한 지열의 하수처리 시설 적용 평가에서 보여준 비경제성으로 인해 추가 관련 연구가 거의 진행되지 않았음을 알 수 있다.

그럼에도 불구하고, 일본을 중심으로 교량의 상판, 도로 및 주차장 등의 동결 노면을 융해하기 위한 지열이용 연구가 진행되었고, 이를 통해 지열 이용의 효율성 및 경제성이 제시되었으며 지열에 의한 흙의 물리적, 역학적 변화에 대한 연구도 일부 병행되었다.

우리나라는 극히 제한적인 지열이용으로 인해 시추 및 탐사기술이 낙후되었음을 감안할 때 현안 비용-효과만을 고집하기 보다는 미래 지향적인 마인드를 가지고 여러 분야에서 무한자원인 지열을 이용하기 위한 노력이 절실하다고 판단된다. 특히, 지반 및 지반환경 공학 분야에서는 지반 내에서 발생하는 지열자원을 외부로 경유하지 않고 곧바로 전달 응용할 수 있기 때문에 더 큰 장점이 있음을 감안하여 연구 및 활용을 위한 노력을 게을리 하지 말아야 하겠다.

### 참고문헌

- Dickson, M. H. and Mario, F., 2004, "What is Geothermal Energy?", International Geothermal Association
- LINDAL, B., 1973. "Industrial and other applications of geothermal energy", In Geothermal Energy, UNESCO, Paris, pp.135-148.
- Mitchell, 1993, "Fundamentals of Soil Behavior", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc, USA
- Nixon, J. F. and Nick, H., 1998, "Geothermal modeling of Soil or Mine Tailings with Concurrent Freezing and Deposition", Can. Geotech. J., Vol. 35, No. 2, pp. 234-250
- Vigrass, L. W., Viraraghavan, T. and F. A. Curtis, 1989, "Geothermal Energy Applications in Wastewater Treatment", Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 55-72
- 仁尾 彰一郎, 吉武 勇, 永井 泉治, 浜田 純夫, 2001年, "トンネル地熱および湧水を利用したパイプヒーティング導入水の加温実験", 土木學會年次學術講演會講演概要集第7部 56卷 242-243頁
- 兒玉潤, 足立格一郎, 田 亮, 鈴木繪理子, 山元茂弘, 2004年, "ベントナイト・珪砂混合試料の高温環境下での膨潤特性", 土木學會論文集 764卷 3-67 319-328頁
- 谷本 俊夫, 吉武 勇, 中村 秀明, 谷 直彦, 浜田 純夫, 1998年 6月, "温水パイプによる橋梁床版の融雪凍結防止システムに関する研究", 土木學會論文集 VI 595卷 VI-39 103-116頁
- 福原 輝幸, 1993年, "金屬棒埋設法による路面凍結緩和實驗", 土木學會年次學術講演會講演概要集 第4部 48卷 622-623頁
- 郡内 康榮, 浜田 純夫, 永井 泉治, 中村 秀明, 吉武 勇, 1999年, "恒溫地熱によるトンネル内融雪施設への利用に関する研究", 土木學會中國支部研究發表會發表概要集 51卷 627-628頁
- 川崎 和來, 山下 良男, 福原 輝幸, 1998年, "地中熱利用無散水融雪システムによる八井谷パーキング場の路面冷却 果", 土木學會年次學術講演會講演概要集 第7部 53卷 416-417頁
- 糸井 龍一, 前川 宏明, 横山 拓史, 神野 健二, 畑中 耕一郎, 池田 典男, 清水 農, 1986年, "地熱熱水還元時の地層の透水性低下に関する實驗的考察", 土木學會西部支部研究發表會講演概要集 180-181頁
- 稲田善紀, 横田公忠, 時川忠, 1986年 6月, "熱水が岩石の強度および形特性に及ぼす影響", 土木學會論文集 370/III-5 217-223頁
- 안형준, 2004, "지중열을 이용한 교량의 제설 및 제빙시스템", KR-A-10-2004-0060464
- 이상록, 2005, "쓰레기 매립장을 활용한 지열 냉난방시스템", KR-B-20-0382017-0000
- 한국지질자원 연구원, 2004, "심부 지열에너지 개발사업", 연구보고서, 일반 04-1