

지열에너지 이용을 위한 지반공학

나. 삼. 민 / GS건설기술연구소
 김. 재. 형 / 한국건설기술연구원

최근 국내에서 지열에너지(Geothermal Energy)의 활용에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 대한 연구개발 및 지열 냉난방 보급사업 등이 활발하게 진행되고 있다. 본고에서는 지열에너지를 보다 효율적이고 경제적으로 이용하기 위해 필요한 지반공학 관련 기술들과 필요성에 대하여 설명하고자 한다.

일반적으로 지열에너지는 지구 내부로부터 전달되는 열에너지와 방사성 물질의 붕괴에 의해 생성되는 열에너지, 그리고 태양으로부터 복사되는 열에너지를 주요 구성요소로 하고 있다.

천부 지열에너지는 태양 복사열의 영향을 많이 받고, 심부 지열에너지의 경우는 지구내부의 열에너지와 방사성 물질의 붕괴에 의해 생성되는 열에너지의 영향을 많이 받는다. 지열에너지 이용은 이러한 지구의 열을 직접(direct) 또는 간접(indirect)으로 활용하는 것으로서(그림 1에서 나타난 것과 같이 다양한 형태의 열원이 존재하고 있다. 지열에너지의 활용 분야에 따라서 지열을 이용한 냉난방 활용 분야와 지열을 이용한 발전(發電) 분야로 나눌 수 있다.

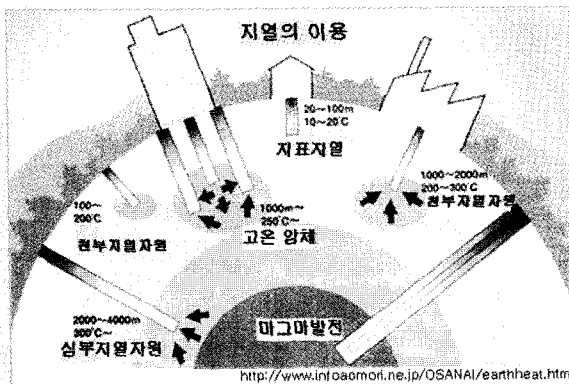
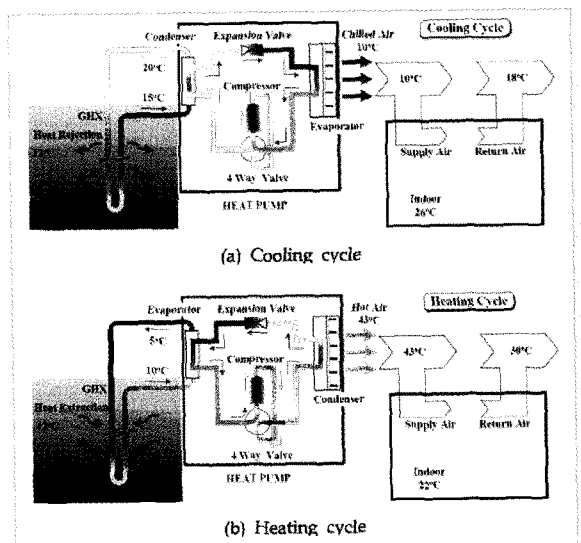


그림 1 지열에너지의 활용의 종류



지열이용 냉난방 시스템

● 기 획 시 리 즈

1-1. 지열이용 냉난방

지열이용 냉난방시스템은 일반적으로 [그림 2]와 같이 지중열교환기, 열펌프, 공조시스템 등으로 구성되어 있다. 이중 지중열교환기는 지열을 이용하기 위하여 지중에 설치하는 것으로 대상물에서 배출된 열을 지중의 암반 또는 지하수와 교환하는 역할을 하게 된다. 열펌프는 [그림 2]에서 나타낸 것과 같이 사용자의 목적에 맞게 냉방과 난방을 담당하는 메인시스템이며, 지중열교환기를 이용하여 추가적인 열을 공급하거나, 열을 빼앗은 구조로 되어있다.

이중에서 지중열 교환기는 지열공 순환수와 지반(지하수 포함)과의 열교환을 담당하는 부분으로 지반공학의 지식이 많이 활용되는 분야이다. 수평형 및 수직형의 경우 보어홀에 시공되는 그라우팅 물질의 열교환 능력과 더불어 지반이 가지고 있는 열교환 특성이 전체시스템의 설계 및 성능 확보에 많은 영향을 미치게 된다. 지하수 이용시스템의 경우에는 지하수의 유동속도, 암반의 열전도도, 열구배 등이 지반관련 중요 설계변수가 된다.

1-2. 지열이용 발전

지열발전(地熱發電, geothermal power generation)이란 시추공을 통하여 지하에 저류되어 있는 지열유체를 분출시키거나 물을 주입시켜 고온의 물이나 수증기를 뽑아내어, 그 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 발전방식이다.

지열발전을 열원의 이용형태와 굴착심도로 분류하면 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다. 굴착심도로만 지열발전을 분류하는 것은 무리가 있으나, 지열발전에 이용하는 열원별 분포 심도가 대체적으로 일정하며, 깊이에 따라서 굴착비용이 증가하는 경향을 보이기 때문에 발전소의 건설비용 및 발전소의 규모를 굴착심도로 판단하는 것이 어느 정도 가능한 일이다.

일반적으로 심도 2000m까지의 굴착은 온천개발과 같은 분야에서도 이용되고 있어 지열발전을 위한 기술이라고 말하기 어렵지만, 2000m 이상의 굴착은 지열발전을 위한 굴착시스템이 도입 또는 개발되어야 한다.

지열발전을 위해서는 지열정을 굴착하여 지열을 추출하는 시스템을 건설하여야 한다. 지열발전에 사용되는 지열정은 <표 2>에서 나타낸 것과 같이 크게 4가지

표 1 지열발전의 형태

이용형태	지열원	추출온도(°C)	굴착심도(m)
천층수 직접이용	천층수, 지표수	30~100	~ 200
열수직접이용	열수, 온천수	60~100	~ 2000
Enhanced Geothermal System (EGS)	고온암체	70~300	2000 ~

표 2 지열발전을 위한 지열정의 종류

분류	지열정		일반적 직경 (선단부)
	조사정	소형 대형	
조사단계		소형	100mm 정도
		대형	220mm 정도
생산단계	생산정		220mm 정도
	환원정		220mm 정도
	관측정		

로 분류할 수 있다.

지열발전을 위한 심부 천공은 고정밀 천공, 고속 천공, 방향성 천공(directional drilling) 등의 기술이 필요하다. 또한 심부 암반의 초기응력 상태(In-situ stress state), 암반의 열적 특성, 수리적 특성, 화학적 특성 분석기술, 심부암반에 균열망을 생성 및 유지관리하는 기술, 미소지진파(micro-seismic wave) event 및 심부암반 상태변화 등을 모니터링하는 기술, 등이 지반관련 중요 지열발전 기술이다.

II. 지열에너지 관련 지반공학기술

지열 에너지를 활용하는 시설로서 일반인의 육안으로 확인할 수 있는 부분은 상부의 플랜트 시설이지만, 지열 에너지 시설의 건설 및 지중설비 관련 부분은 지반공학의 지식과 기술을 필요로 한다.

2-1. 지반의 열물성

지중열교환기의 설치 및 지열발전소의 입지를 선정함에 있어서 지반의 열물성 및 지중의 열전도도를 평가하는 것이 매우 중요하다. 특히, 냉난방시스템의 설계에 있어서, 이러한 특성들은 지중열교환기의 효율에 절대적인 영향을 주게 되며, 지열이용 냉난방 시스템의 경제성을 확보하는데 중요한 인자가 된다.

일반적으로 지중열교환기가 설치되는 지반은 토사층 또는 암반층이 될 수 있으며, 토사층의 경우 토사층의 공극률, 함수비, 구성광물 등의 영향이 크다. 암반의 경

표 3 암종에 따른 열물성 (박정민 등, 2007)

암종	밀도 (g/cm ³)	공극률 (%)	열확산률 (mm ² /sec)	비열 (J/gK)	열전도도 (W/m-K)
화성암	2.65	1.23	1.422	0.917	3.56
변성암	2.72	1.09	1.66	0.902	4.16
퇴적암	2.73	1.23	1.753	0.921	4.53
화산암	2.6	3.14	1.431	0.907	3.64

우리나라 일부지역의 시료를 사용하여 열물성을 측정 한 결과이다.

지열 냉난방 분야에서 이용되고 있는 지중열전도도의 개념은 실제 지중열교환기가 설치되는 지반과 지열공의 전체적인 열전달특성을 평가한 것으로 지하수 및 균열의 영향, 그라우팅 물질의 특성 등을 포함하는 현장 실험으로 결정하게 된다. 이러한 개념은 지반공학 분야에서 사용하고 있는 지반의 지중열전도도 개념과는 약간의 차이가 있음을 인지해야 한다. 지중열전도도의 경우 지하수 및 강우 등 다양한 인자가 영향을 미치게 되므로, 정밀한 측정에 많은 시간과 노력이 소요되며, 결과 또한 지역별, 시기별로 많은 편차를 보이기도 한다.

지열발전소의 입지선정에는 해당지역의 지온경사가 중요한 변수가 된다. 지온경사가 높을수록 원하는 온도를 얻을 수 있는 천공 깊이가 줄어들어 지열발전의 경제성이 향상된다. 지온경사는 지구내부에너지의 열전달 정도 및 암반의 방사성 동위원소의 함량 등에 따라 지역별 편차를 가지고 있다. [그림 3]은 한국지질자원연구원 에서 심도별 지온경사를 조사하여 우리나라 전체에 대한 지온분포를 추정한 결과 중 일부를 나타내고 있으며, 지역별, 지반별 온도 분포를 대략적으로 추정할 수 있다. 그림에서 검은 점으로 표시된 부분은 심부지반의 온도를 관측한 관측지점의 위치를 나타낸다.

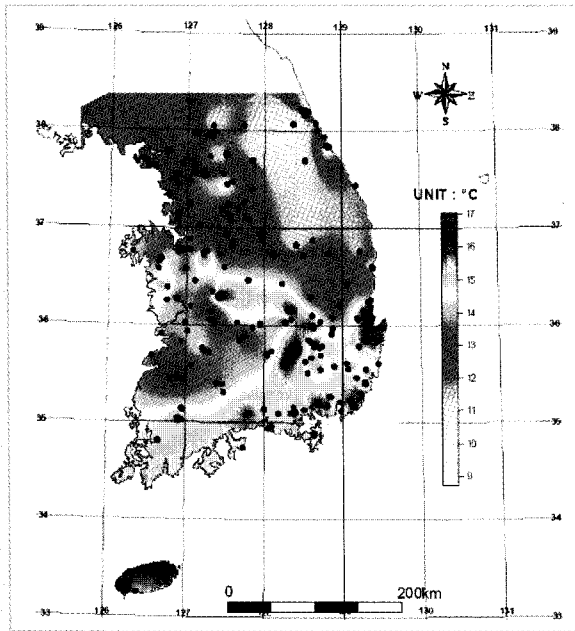


그림 3 지표부의 지온분포 추정 (한국지질자원연구원, 2004)

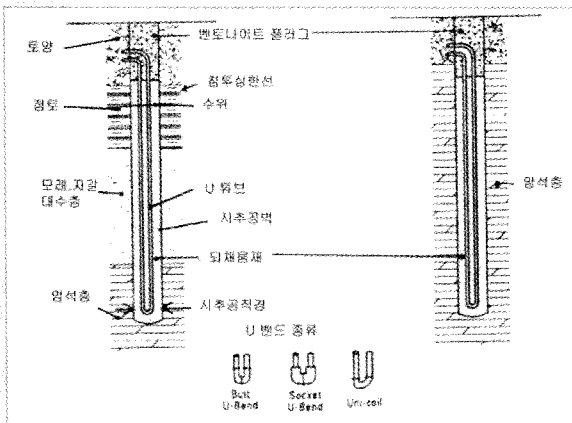


그림 4 U자형 지중열교환기의 구조

우, 암반내에 존재하는 균열(절리, 단층, 파쇄대) 등도 암반의 열물성에 크게 영향을 주게 되어, 실험실에서 수행한 암석 코어에 대한 열물성을 현장에서 그대로 적용하기에는 무리가 있다. <표 3>은 암석코어를 대상으로

2-2. 지중 설비의 설치

지열에너지를 이용하기 위해서는 굴착작업을 필연적으로 수행하여야 하고, 지중설비를 설치하여야 한다. 이때 지중 암반에 대한 특성 파악이 시공의 안정성 확보 및 문제발생을 근본적으로 방지하는 핵심적인 요소가 된다.

냉난방 분야에서는 지중열교환기를 설치하여야 하며, 지중열교환기는 열전달을 쉽게 할 수 있도록 설계함과 동시에 인접지반에 영향을 주지 않도록 시공하여야 한다. [그림 4]는 수직밀폐형 방식의 U자형 지중열교환기의 구조를 보여주고 있으며, 지중열교환기와 시추공벽은 충전물로 채워져 있다.

또한 지하수 이용형에 있어서는 토사층의 지열공 공벽 붕괴방지를 위한 casing 설치, 지표의 오염물질이 지열공 내부로 유입되는 것을 방지하기 위한 지열공 주위

● 기 획 시 리 즈

그라우팅 처리, 지하수 함양능력 측정 등이 중요한 지반공학 기술이 된다. [그림 5]는 지하수 이용방식중 하나인 SCW (Standing Column Well) 방식의 지열냉난방 시스템에서 지중열교환기 부분에 대한 일반적 개략도를 보여주고 있다. SCW 공법의 경우 지하수와 암반과의 열교환 능력에 의하여 전체 냉난방 시스템의 성능이 좌우되므로 지하수-암반 연계 열유동 해석 및 암반내 지하수 흐름에 의한 열전달 분석 등의 해석기술이 지반공학적으로 중요하다. 또한 다수의 SCW 지열공을 설치하려면 SCW 지열공간의 열적 영향범위를 분석하여 최적 지열공 간격을 결정하여야 한다.

지열발전을 위한 지열정은 심도 수백 m에서 수 km에 도달하여야 하므로, 굴착정의 공벽붕괴를 방지하고, 천부 지중수 및 기타 유체들의 유입을 막고, 생산정과 환원정을 통과하는 지열유체의 열손실을 막기 위하여 공벽보호관을 설치하게 된다.

공벽보호관은 지열공 굴착설계에 있어서 핵심적인 사항으로 지역적인 지반의 특성에 좌우되며, 굴착비용의 상당부분을 차지하게 된다. 굴착심도가 깊어지게 되면 지표에서 대구경의 굴착이 이루어져야 되며 많은 수의 보호관이 필요하게 되어 총 굴착비용의 20%를 차지하는 경우도 있다. <표 4>는 공벽보호관의 유형을 정리해서 나타내고 있다.

[그림 6]은 유럽의 Soultz 지역에서 진행중인 EGS 지열발전 프로젝트에서 수행한 GPK2 지열공의 천공도를 보여주고 있다. 약 5km까지 천공이 수행되었으며 그림에서 볼 수 있는바와 같이

천부에서는 대구경으로 천공을 시작하여 심부로 갈수록 천공경이 작아지는 형태를 취하고 있으며 지열공 보호 및 지열수의 열손실을 방지하기 위하여 다수의 casing을 이용하고 있다.

일반적으로 지하 심부의 암반은 신선한(fresh) 상태의 암반으로 지열발전에 충분한 자연 균열망을 보유하고 있지 못하다. 따라서 EGS지열발전을 위해서는 생산정과 환원정 사이를 지열유체가 순환할 수 있도록 인공적인 균열망을 생성해주는 기술이 매우 중요하다. 이러한 인공 균열망 생성기술은 현지 기반암의 초기응력상태, 기반암이 가지고 있는 자연균열 상태, 암반의 열적, 화학적, 물리적 특성에 대한 이해를 필수적으로 요구한다.

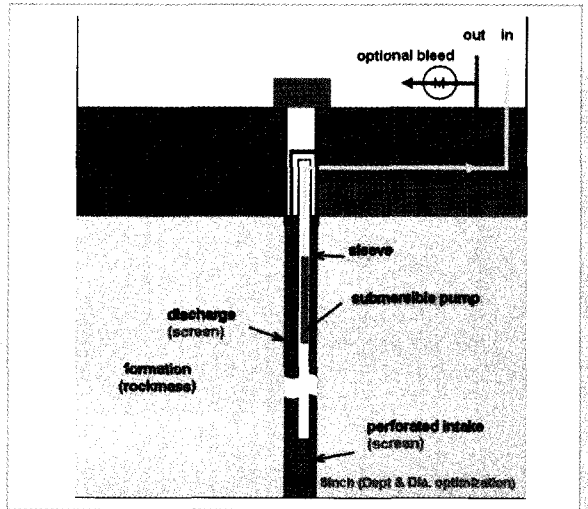


그림 5 SCW 지중열교환기 개략도

표 4 공벽보호관의 유형 (강주명, 1994)

유형	설치심도	목적
전도보호관	수십m 이내	굴착장비의 기초 보강 및 지표미고결층 보호
지표보호관	수백m 이내	고결 연결암반의 붕괴방지 및 시추공의 마찰 손상 방지
중개보호관		과지입층 또는 팽창성 암반의 처리에 사용
생산정보호관	수km 이내	목표심도에서 생산정을 보호, 라이너를 동시 사용하는 것이 일반적
라이너		공벽보호관을 지표까지 연장하지 않고 중간에서 처리하는 보호관

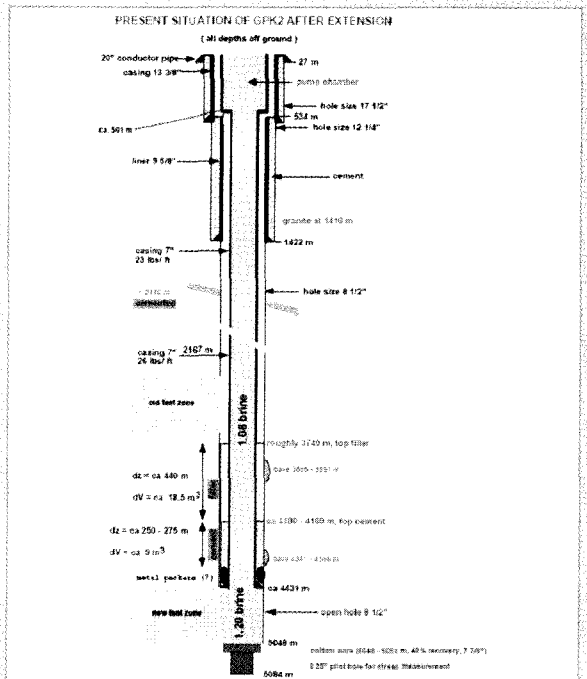


그림 6 Soultz 지역 GPK2 지열공 개략도

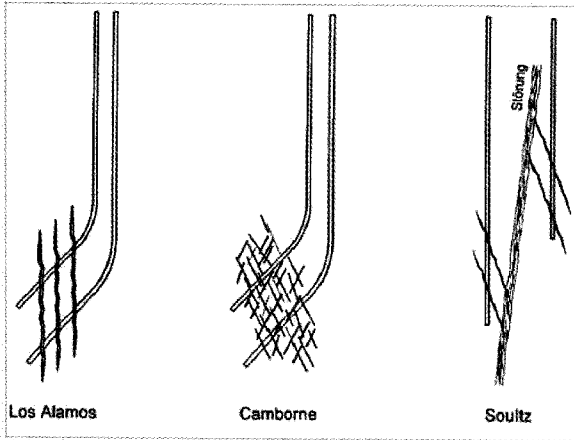


그림 7 균열망 구조에 따른 EGS 시스템분



그림 8 3차원 균열망 가시화 모델

인공 균열망은 지열발전 사이트의 특성에 맞게 생성되어야 하며 [그림 7은 다양한 EGS 지열발전 프로젝트에서 이용한 균열망 구조를 보여주고 있다.

또한 지하 심부에 생성되는 인공 균열망은 육안으로 직접 확인할 수 없기 때문에 생성된 인공 균열망 가시화 기술과, 생산정과 환원정 사이의 연결성을 파악하는 기술은 균열망 생성시 발생하는 미소지진과 탐지 및 분석 기술과 균열망내 유체순환 수치해석기술을 필요로 한다. [그림 8은 지열발전을 위해 생성시킨 균열망을 3차원적으로 가시화한 예이다.

EGS 지열발전에서 유체순환 수치해석기술은 단순한 수치해석의 차원을 넘어 열-수리-화학적-역학적 (Thermo-Hydro-Chemical-Mechanical) 연계해석 (coupled analysis)을 필요로 한다. 우리나라도 방사성 폐기물 처분장과 관련하여 심부 암반에서의 연계해석에 대한 연구가 상당부분 이루어져 있으나 이를 발전시켜 심부 지열에너지 활용분야에 적절히 접목하는 작업은 아직까지 미진한 상태이다. 따라서 그동안 연구개발이 부족했던 고온 고압하에서의 암반-지열수 상호작용에 대한 화학적 분석분야에 대한 수치모델 개발과 기존의 T-H-M 연구개발 성과의 접목을 통한 T-H-C-M coupled 모델개발을 이루어야 한다.

2-3. 지반환경 (지하수 등)

환경영향이란 인간의 활동에 의하여 주변환경에 미치는 영향을 총칭하는 말로서, 지열에너지 이용 시스템이 지상 및 지중에 건설되므로써 환경에 영향을 줄 수도 있다.

우리나라는 환경영향평가제도를 운영하여 각종 사업에 대한 환경적 판단을 하고 있다. 환경영향평가시에는 평가항목을 사전에 정하여 평가하고 환경정책평가연구원이 의견을 제시하는 것이 일반적이며, 일정 규모 이상의 사업에 대하여 환경영향평가를 실시한다.

국내에서는 지열에너지를 활용하는데 있어서 환경문제에 대한 구체적 연구 등이 미미하였고, 대규모 지열에너지 관련사업이 없었기 때문에 지열에너지 이용에 따른 환경영향 평가지침 등이 정비되어 있지 않은 상태이다.

현재, 지열에너지를 이용한 냉난방 이용분야에 있어서는 지하수를 직접적으로 활용하는 방식에 대하여, 굴착행위신고 및 지하수이용 영향조사를 실시하게 되어 있다.

지하수를 직접 활용하는 형태의 경우, 지하수 수질오염 방지를 위한 천부 그라우팅이 중요하며 또한 이용되는 지하수가 공기에 노출되지 않게 하기 위하여 지열공에 대한 캡(cap)이 개발되어 있다. 지하수는 지중에서 효과적으로 열을 확산시키고 교환시킬 수 있는 능력이 있으며 국내의 경우 지하수위가 높게 분포하는 지역이 많아 이를 잘 활용할 경우 냉난방 시스템의 효율을 크게

향상시킬 수 있어 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

2-4. 인접구조물의 영향

우리나라의 경우 국토가 좁으며, 국민들의 환경에 대한 의식이 높기 때문에 미국과 같은 인구저밀도 국가들보다 작은 환경문제에도 사회적 이슈가 되기도 한다.

우리나라의 지질적 특성상 남부 일부지역(신생대 층)을 제외하고 상당히 단단한 표토층을 가지고 있어서 천층의 지열에너지를 활용하는 경우 지반침하 문제는 크게 발생되지 않을 것으로 판단되지만, 좁은 지역에 건물 이 밀집해 있는 이유로 이슈가 될 수도 있는 부분이다.

지열발전을 위하여 지하로부터 대량의 지열수를 꺼내 사용하게 되면, 지열수가 차지하고 있던 부피만큼의 지반침하가 발생하는 경우가 있다. 이 경우, 지반침하는 비교적 넓은 범위에서 천천히 진행되어, 지표에서 이러한 현상을 관측하기까지는 수년에서 수십 년이 걸리는 경우도 있다. 심각한 경우에는 지반침하량이 10cm에서 1m에 이르러, 지열 플랜트나 부근의 주택이 손상을 주는 경우도 있다. 이 때문에 대량의 열수를 꺼내는 경우에는 계획적으로 지반침하를 모니터링 할 필요가 있다.

하지만 근래 지열발전 플랜트의 경우 지열수의 재주입을 기본 방식으로 채택하고 있기 때문에 상기와 같은 경우는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 다만 지열수의 펌핑과 주입이 아무리 동시에 이루어진다 하더라도 암반의 수리전도도 특성 및 균열망 분포특성에 의하여 일부 공극이 발생할 여지가 있다는 점은 고려되어야 한다. 국내의 경우 지표가 다른 외국도시들에 비교할 때 단단한 지질구조를 가지고 있어 다수의 지반침하 피해는 발생하지 않을 것으로 판단되지만 연구가 필요한 부분이다.

지하철, 터널 등의 지중구조물 시공경험과 해석경험 등은 지중구조물에 의한 지반침하 분석의 발전에 상당

한 기여를 하였으며 많은 발전을 이룬 상태이나 지열공의 경우는 수직적으로 좁고 긴 관의 형태로 시공되므로 기존의 지하철, 터널 등에 의한 지반침하 영향과는 상이한 접근이 필요한 부분이다.

III. 결 론

지열에너지(Geothermal Energy)의 활용방식에 대한 종류를 지열냉난방과 지열발전으로 정리하고, 지열에너지를 이용함에 있어서 필요한 지반공학관련 기술을 정리하였다.

녹색성장과 신재생에너지 이용의 증가에 따라 지열에너지 이용에 대한 관심이 증대하고 있는 상황에서 지열에너지를 경제적이고 안전하게 이용하기 위한 지반공학 중요 기술에 대하여 개략적으로 소개하였다. 앞으로 국내 지열에너지 이용의 활성화를 위해서는 지상의 기계설비 뿐만 아니라 지중과 관련된 연구 및 개발 노력이 필요하다고 판단되었다.

참고문헌

1. 한국지질자원연구원, 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구 년차보고서 (2004)
2. 박정민, 김형찬, 이영민, 송무영, 경기도, 강원도, 충청도 일대의 암석 열물성 특성 연구, 대한자원환경지질학회 춘계지질과학기술 공동학술대회 (2007)
3. 강주명, 석유시추공학, 서울대학교 출판부, pp. 279-456 (1991)
4. Helmut Tenzer, Development of Hot Dry Rock Technology, International Summer School, pp. 213-226 (2003)