터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제21권 제3호, 2011년 6월, pp. 225~234

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 21, No. 3, 2011, pp. 225-234
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

지하처분연구시설(KURT)에서의 시추공 히터 시험

권상기[1)]*, 이창수[2)], 윤찬훈[3)], 전석원[2)], 조원진[1)]

Borehole Heater Test at KAERI Underground Research Tunnel

S. Kwon, C. Lee, C.H. Yoon, S.W. Jeon, W.J. Cho

Abstract In this study, an in situ heater test for investigating the thermo-mechanical behavior related to heat flow was carried out. It was the first in situ heater test in Korea. For the test, an adequate design of heater, observation sensors, and data logging system was developed and installed with a consideration of the site condition and the test purposes. It was possible to observe that steep joints are overwhelmingly developed in the test area from a joint survey. The major rock and rock mass properties at the test site could be determined from the thermal and mechanical laboratory tests using the rock cores from the site. From the measured rock temperature distribution, it was possible to observe the influence of the rock joints and the heat flow through tunnel wall. When the heater temperature was maintained as 90℃, the rock temperature at 0.3 m from the heater hole was increased up to 40℃.

Key words borehole heater test, KURT, in situ test, rock temperature, high-level radioactive waste disposal

초 록 본 연구에서는 암반에서의 열 전달과 관련된 열-역학적 거동을 평가하기 위한 현장 히터시험을 국내 최초로 실시하였다. 현장시험을 위해 현장조건과 시험 목적에 부합하는 시추공 히터시험을 설계하고 히터장치, 관측용 센서, 데이터로깅 시스템의 설치가 이루어졌다. 시험 구간에서의 노출면 조사를 통해 고경사 절리가 우세하게 분포함을 알 수 있었으며 암석코아에 대한 실험실 실험을 통해 히터시험구간에서의 주요 열, 역학적 암반 물성을 결정하였다. 암반의 온도분포 변화를 통해 암반 내에 존재하는 절리의 영향과 터널 벽면으로의 열손실을 파악할 수 있었으며 히터온도가 90℃로 유지되는 경우, 히터공에서 0.3 m 떨어진 암반의 온도는 최대 40℃까지 상승함을 알 수 있었다.

핵심어 시추공히터시험, 지하처분연구시설, 현장 실증시험, 암반온도, 고준위폐기물 처분

1. 서 론

2011년 현재 21기의 원자로가 가동 중인 국내에서 사용후핵연료의 관리 및 처분 기술 개발은 원자력 산업의 지속적인 발전 및 안전하고 신뢰도 높은 후행핵연료 주기의 완성을 위해 시급한 과제이다. 일본 후쿠지마 원전 사고 당시, 발전소 내에 보관되어 있던 사용후핵연료 임시저장시설에서 발생한 문제점들은 사용후핵연료의 안전한 관리 및 영구 처분의 필요성을 다시 한번 각인시켜주었다. 그동안의 국내 원전 운영을 통해 발생된 10,000 톤 이상의 사용후핵연료는 원전 부지에 임시 저장되어 있으며 2016년 중간저장시설의 운영을 통해 장기 관리할 계획이다. 고준위방사성폐기물의 특성 중 하나인 방사성 붕괴열에 의한 처분장 안전성과 안정성에 미치는 영향은 처분장 설계 및 안전성 평가에서 중요한 인자이다. 즉, 붕괴열에 의한 온도 변화는 처분장 주변에서의 수리적, 역학적, 화학적 거동에 변화를 줌으로써 장, 단기 처분장 안전성에 영향을 미치기 때문에 처분장 부지선정, 설계, 운영을 위해서는 방사성 붕괴열에 의한 처분장 거동 변화에 대한 이해가 반드시 필요하다.

지금까지 국내에서는 한국형 처분시스템의 도출을 위해 방사성 붕괴열을 고려한 다양한 모델링이 시도된 바 있다. 초기 단계에서는 해외의 문헌자료를 이용한 모델링을 통한 처분장의 거동 해석이 이루어졌으며 이후 실

[1)] 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
[2)] 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부
[3)] 인하대학교 환경공학과
* 교신저자 : kwonsk@kaeri.re.kr
접수일 : 2011년 6월 10일
심사 완료일 : 2011년 6월 24일
게재 확정일 : 2011년 6월 24일

험실 실험을 통해 얻어진 암석 물성과 한국 고유의 지질학적 특성을 고려한 모델링이 실시되었다(권상기 외, 2004). 이러한 연구결과들은 결정질 암반의 지하 500 m에 조절 발파기법으로 굴착되는 한국형기준처분시스템 도출에 활용되었다(최희주 외, 2008). 제시된 한국형기준시스템의 실증을 위해 한국원자력연구원에서는 3년 동안에 걸친 부지조사, 설계, 굴착 작업을 통해 2006년 11월 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT) 건설을 완료하였다. 총 길이 255 m에 달하는 지하처분연구시설은 처분장 후보 암종인 화강암반에 위치하며 최대 심도 90 m를 확보할 수 있도록 설계되었다. 총길이 255 m, 6 m × 6 m 크기의 마제형 터널은 암반 손상을 최소화하기 위해 조절발파기법을 적용하여 굴착되었다(조원진 외, 2004). 건설 후 2007년부터 KURT 에서는 시추공 히터시험을 비롯한 다양한 현장시험이 실시되고 있다. Fig. 1은 KURT 의 터널과 현장시험이 실시되는 위치를 보여주고 있다.

본 연구에서는 암반에서의 열 전달과 관련된 열-역학적 거동을 평가하고 기 사용된 모델링 기법의 검증에 활용할 자료를 획득하기 위해 시추공 히터시험을 설계하고 설치하였다. 열-역학적 거동에 대한 면밀한 평가와 분석을 위해서는 수리적 거동의 영향을 최소화 시킬 수 있는 구간이 시험 장소로 적합하기 때문에 암질 변화가 비교적 복잡하지 않으며 지하수 유입이 적은 KURT 내 우측 연구모듈 구간을 시험 구간으로 선정하였으며 지하수의 유동이 예상되는 터널 바닥을 피해 터널 벽면에서 시험 장치를 설치하였다. 또한 히터 시험 구간 주변에서의 불연속면의 분포 및 특성에 대한 조사와 함께 암반의 열-역학적 물성을 평가하기 위한 다양한 실험실 실험이 실시되었다. 시추공 히터시험은 2007년 12월 본격 가동되었으며 단계적인 온도상승을 통해 히터온도를 90°C 로 유지시키면서 암반 내 열적 변화에 대한 관찰 및 분석을 실시하였다. 2010-2011년에는 비정상 과열 상태에서의 암반 거동 관찰을 위해 히터온도를 100°C 이상으로 가열하고 있으며 이와 함께 환기시스템이 암반 온도 변화에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하고 있다. 이러한 연구는 고준위처분장 및 장기저장시설에서의 암반손상구간에서의 열적 물성, 환기시스템에 의한 열손실, 암반 내 존재하는 불연속면과 이방성의 영향 평가에 활용할 계획이다.

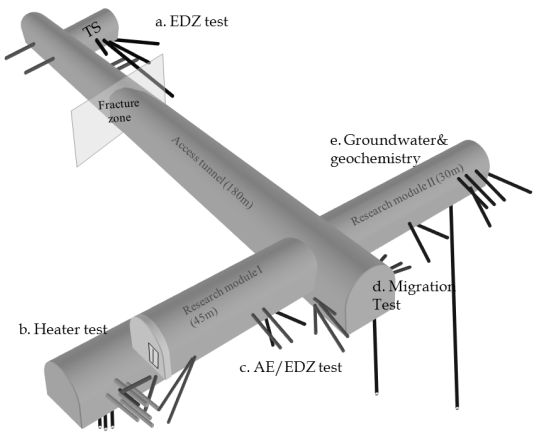

Fig. 1. In situ tests at KURT

2. 해외 유사 연구 현황

고준위폐기물 처분 연구를 수행하는 대부분의 국가에서는 지하연구시설(Underground Research Laboratory)을 건설하고 암반과 공학적방벽재의 열-수리-역학(THM) 거동에 대한 현장 실증실험을 실시하고 있다. 미국은 Yucca Mountain에서 single hole heater test에서 drift 규모의 실험까지 단계별 현장시험을 실시하였으며(Lin, 1998) 일본에서도 Kamaish 광산에서 대규모 열-수리-역학(THM) 현장시험을 실시하였다. 스위스 Grimsel에서는 완충재를 고려한 현장 THM 시험인 FEBEX가 국제공동연구로 수행되었으며(Alonsol 외, 2008) 캐나다 URL에서는 Canister/Buffer 시험 후 나타난 결과를 보강하는 측면에서 시추공에서의 열-수리거동 현장시험(TH Experiment)이 420 m level에서 수행된 바 있다(Berchenko 외, 2004). 스웨덴에서는 처분장 인근 지하암반에서의 열-역학적 파괴거동을 예측하기 위해 에스페 Hard Rock Lab.에서 대규모 pillar stability 현장시험(APSE)을 실시하였다(Andersson 외, 2006). APSE는 심도 450 m에 굴착된 폭 5 m, 높이 7.5 m 타원형 터널에서 실시되었으며 암반에서의 역학적 변화를 효과적으로 관찰할 수 있도록 시험 설계가 이루어졌다. 즉 응력집중이 최대가 되는 방향으로 터널을 굴착하고 처분공 사이의 pillar 두께를 1 m만 남겨둠으로써 굴착에 따른 균열 발생을 효과적으로 관찰할 수 있도록 하였다. 그 밖에도 공학적 규모의 THM 시험이 세계 각국에서 실시되었는데 여기에는 캐나다의 Thermal Performance Test, 일본의 BIG-BEN과 COUPLE, 스페인의 Mock-up test, 한국의 KENTEX 등을 들 수 있다. 이러한 현장 및 실험실 연구결과들은 DECOVALEX 국제공동연구의 주요 test case 대상으로 선정되어 세계 각국의 전문가들에 의한 THM 모델링 기법 개발에 활용되고 있다.

3. KURT 히터시험 구간 지질 조사

3.1 시험구간의 지질 및 절리

KURT 주변 지역의 지질은 복운모 화강암과 이를 관입한 안산암질 암맥 그리고 풍화잔류토층으로 구성되어 있으며 복운모 화강암은 흑운모화강암이나 편상화강암 등과 접촉하고 있다(권상기 외, 2009). 히터시험구간에는 복운모 화강암체 사이에 안산암질 암맥이 관입상으로 일부 분포하고 있다. 히터시험 구간에 노출된 3개 벽면에 대한 절리조사를 통해 얻어진 114개의 절리자료 분석 결과 경사방향 235°, 경사 77°를 갖는 절리군과 경사방향 284°, 경사 85°를 갖는 절리군이 지배적이며 70° 이상의 고경사 절리가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

3.2 암석의 역학적 물성

암석의 물성 측정을 위해 시험구간에서 회수된 암석코아를 이용한 실험실 실험이 실시되었다. 일축압축시험은 히터공 상부공과 하부공으로 나누어 각 10회씩 수행하였다. 일축압축 시험을 통해 비중, 공극률, 탄성파속도, 압축강도, 탄성계수, 포아송비 등을 측정하였다. 시추공 히터시험 구간에서 회수한 암석코아의 평균 비중은 2.65로 나타났다(표 1). 시험 구간의 평균 공극률은 0.778%, 최대 공극률은 1.87%, 최소 공극률은 0.07%로 측정되었다. 탄성파속도 측정 결과 P파의 속도는 4673 m/sec 로 S파의 평균속도인 2444 m/sec에 비해 약 2배 정도 빠른 것으로 나타났다.

시험구간 암석의 일축압축강도의 평균값은 일반적인 화강암 강도보다 낮은 94 MPa로 나타났으며 히터공 상부 암석의 강도가 하부 암석에 비해 10% 정도 높게 평가되었다. 탄성계수의 경우, 평균값은 52 GPa, 최대 98 GPa의 탄성계수를 가지는 것으로 나타났으며 포아송비는 평균 0.2로 측정되었다. 간접인장시험을 통해 측정된 암석의 평균 인장강도는 9.8 MPa로서 일축압축강도의 약 1/10 정도로 나타났다. 삼축압축시험은 총 4회를 수행하였으며, 내부마찰각의 경우 53°~57°, 점착력은 13.7~17.7 MPa로 나타났다.

3.3 암석의 열적 물성

열팽창계수 측정시험은 히터공 상부 15회 그리고 하부 15회를 수행하여 총 30회를 수행하였으며 열팽창계수를 20℃~50℃, 50℃~100℃, 100℃~150℃, 150℃~200℃에 대해 각각 결정하였다. 상온에서는 7.5e-6/^{o}K, 50-100^{o}C에서는 9e-6/^{o}K로 온도 증가에 따라 열팽창계수는 증가함을 알 수 있다(표 1). 따라서 히터온도가 90^{o}C까지 가열되는 히터시험의 해석을 위해서는 7e-6/^{o}K~9e-6/^{o}K 사이의 열팽창계수를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

암석의 열전도도는 처분 환경에서의 THM 거동 해석에서 가장 중요한 입력변수 중 하나이다. KURT 암반의 열전도도를 평가하기 위해, 다양한 심도에서 회수된 시추 코아를 이용한 실험실 실험을 실시하였다(조원진 외, 2009). 실험에서는 암석의 공극률과 밀도를 측정한 후, 포화도에 따른 열전도도 변화를 측정하였다. 건조암의 경우 열전도도는 평균 2.9 W/m^{o}K이며 포화된 상태에서는 7% 증가한 3.1 W/m^{o}K으로 측정되었다. 심도의 증가에 따라 열전도도는 증가하는 경향을 보였다. 지표면 부근에서는 심도에 따라 열전도도가 높아지지만 일정 심도 이상에서는 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다. KURT 심도(0~100 m) 구간의 경우, 열전도도는 2.5~3 W/m^{o}K 사이에 분포할 것으로 예상되며 지표면 부근의 경우 심도에 따른 열전도도 변화가 크게 나타나지만 50 m 이상의 심도에서는 변화의 폭이 적어 일정한 값을 사용해도 무방할 것으로 판단되었다(Kwon 외, 2010). 이러한 경향은 지표면 부근에서 관찰되는 암반풍화 및 지하수위에 의한 것으로 보여진다.

3.4 시험 구간의 열전달 특성

지하암반 내 열전달은 주로 암반과 공기를 통한 열전달에 의해 좌우되며, 이는 암반과 대기의 열 물성, 처분공간의 형태, 지하수 용출여부, 계절 등에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 히터 시험구간에서 대류열전달계수 결정을 위해 여름과 겨울 두 차례에 걸쳐 현장 실험을 수행하였다. 현장실험에서는 환기 팬 가동 유무로서 대류 조건을 구분하였으며 대기의 건-습구 온도, 암반표면온도 및 고도를 이용하여 대류조건에 따른 계절별 열전달계수를 산정하였다. 자연대류조건에서 대류열전달계수의 크기는 주로 암반표면과 대기의 온도 차이에 의해 결정되었으며, 강제대류조건에서는 유입공기의 풍속에 따른 레이놀즈수의 크기에 의해 결정되었다. 열전달계수 산정 결과, 자연대류 조건에서 평균 4.73 W/m^{2}K, 강제대류 조건에서는 평균 7.46 W/m^{2}K로 측정되었다(윤찬훈, 2011).

3.5 히터 시험 구간의 터널 형상

히터시험 구간을 포함한 KURT 전 구간은 지보가 설치된 후의 터널 크기가 6 m × 6 m가 되도록 설계되었다. 대부분의 터널 구간은 록볼트와 숏크리트 또는 30 cm 두께의 콘크리트 라이닝으로 보강되어 설계에서 고려한 터널 크기로 마무리되었다. 하지만 히터 시험 구

간의 경우, 연구를 위한 암반 노출을 필요로 하였기 때문에 벽면 부의 암반에는 숏크리트를 설치하지 않았으며 낙반 방지를 위한 천장부 숏크리트만 설치하였다. 히터시험이 실시되고 있는 우측 연구모듈의 터널 폭은 6.5 m 이고 터널 높이는 6.3 m, 터널 면적은 35.85 m^2 이며 굴곡을 고려한 주변장의 길이는 25.15 m로 조사되었다.

4. 시추공 히터 현장 시험

4.1 히터공 및 관측공

시추공 히터시험을 위해 우측 연구모듈 막장 왼편의 벽면을 선정하여 시추작업을 실시하였다 히터공의 위치는 터널 바닥에서 약 1.5 m 위치에 있는 비교적 양호한 암반을 선택하였다. 히터가 설치되는 히터공의 직경은 11 cm 이며 길이는 3.2 m 이다. 관측공 천공에 따른 암반의 열-역학적 거동 변화를 최소화하기 위해 관측공의 크기는 일반적으로 사용되는 76 mm 시추공의 절반 크기인 38 mm 직경으로 천공하였다. 관측공과 히터공에서 암석코아를 회수하여 암석물성 측정 및 절리분포 분석에 활용하고자 하였다. Fig. 2는 시험구간에 천공된 시험공을 보여준다.

38 mm 관측공의 수는 15개로 각 관측공의 길이, 방향 및 설치된 센서는 표 2와 같다. 관측공의 길이는 5 m 내외로 히터가 설치된 구간의 2 m 외부까지 측정이 가능하도록 하였다. 온도센서는 수직과 수평 양방향으로 0.3 m, 0.6 m, 0.9 m 떨어진 지점에 수평으로 천공된 관측공과 경사 관측공에 설치하였다. 응력센서가 설치된 4개의 수평 관측공은 히터공에서 약 50cm 떨어져 있다. Fig. 3은 각 시험공 배치 및 히터공까지의 거리를 보여준다. 대부분의 관측공은 히터공에서 1 m 내외에 위치하고 있으며 경사공(C1, C2)은 히터시험 구간에서 5 m 까지 온도변화를 관측할 수 있다. 경사공의 수평경사는 Fig. 4에서와 같이 경사각을 26°로 하여 히터 중심의 상, 하부를 지날 수 있도록 하였다.

4.2 히터 및 온도센서

시추공 히터시험에 사용된 히터는 알루미늄 재질로 제작되었으며 무게는 28 kg 이다. 히터의 길이는 2 m 로서 벽면에서 1.2 m에서 3.2 m 사이에서 히터가 위치하게 되며 최대 공급가능한 전력은 5 kw 이다. Fig. 5는 히터 설치 모습을 보여준다. 히터의 설계 시 히터의 설치 위치를 변경할 수 있도록 하였으며 기계식 장치를 사용하여 암반과 히터가 밀착될 수 있도록 함으로써 히터에서 발생하는 열이 암반으로 원활히 전달 될 수 있도록 하였다.

히터시험을 위해 100여개의 진동현식 온도센서가 암

Fig. 2. Boreholes for in situ heater test and joints around the test area

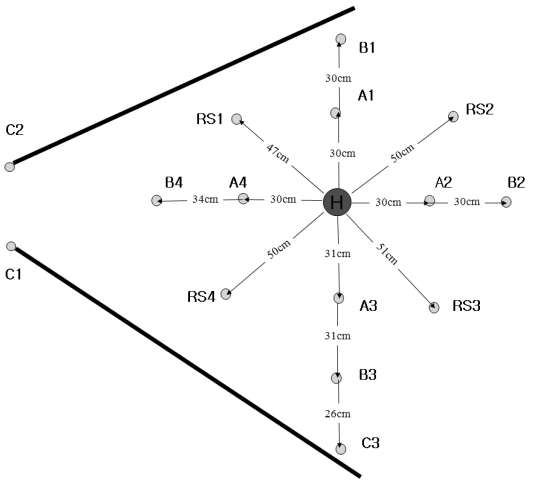

Fig. 3. Distance between the heater hole and observation holes

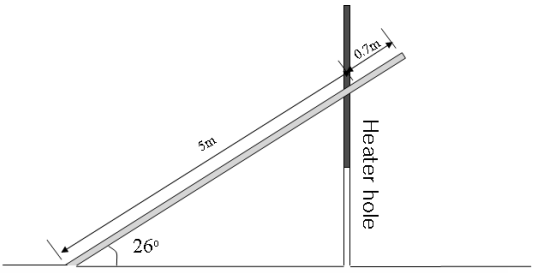

Fig. 4. Drilling direction of C1 and C2 holes

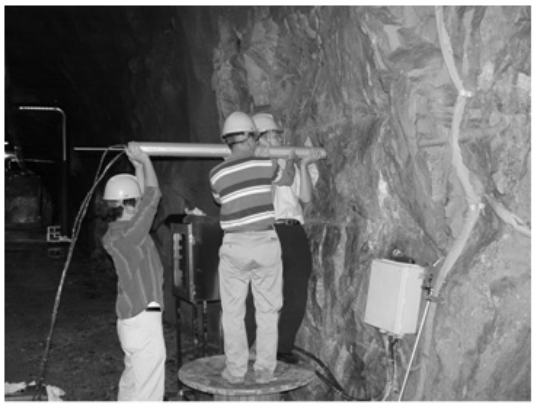

Fig. 5. Installation of the 2 m long heater

반 내에 설치되었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 히터에 비교적 먼 관측공들인 A1, A2, A3, A4 공에는 각각 9개의 온도센서를 설치하였으며 약 30 cm 거리에 있는 B1, B2, B3, B4 공에는 각각 12개의 온도센서를 설치하였다. 하향 경사공인 C1 에는 12개, 상향 경사공인 C2 에는 3개, 최하단 수평공인 C3 에 8개를 설치하였다. 설치 지점은 히터에 가까운 관측공 중앙부에는 센서를 밀집시켰으며 먼 곳에는 설치 간격을 비교적 넓게 하였다. 각 관측공에서 계획된 위치에 온도센서를 설치한 후, 관측공은 시멘트액을 주입하여 밀봉함으로써 암반과 센서간의 온도 전달이 원활하게 하였다.

4.3 히터시험 추진 현황

본격적인 히터시험이 실시되기 전, 센서와 데이터 기록 시스템의 작동을 확인하기 위해 2007년 8월~9월에 걸쳐 약 2주간 히터 온도를 70°C까지 상승시키는 예비시험이 실시되었다. 예비시험을 통해 측정 장치를 보완한 다음, 암반 온도가 초기 상태로 돌아가기에 충분한 시간이 경과한 시점에서 본 시험을 위한 히터 가동이 시작되었다. 응력센서는 2007년 5월23~5월30일 사이

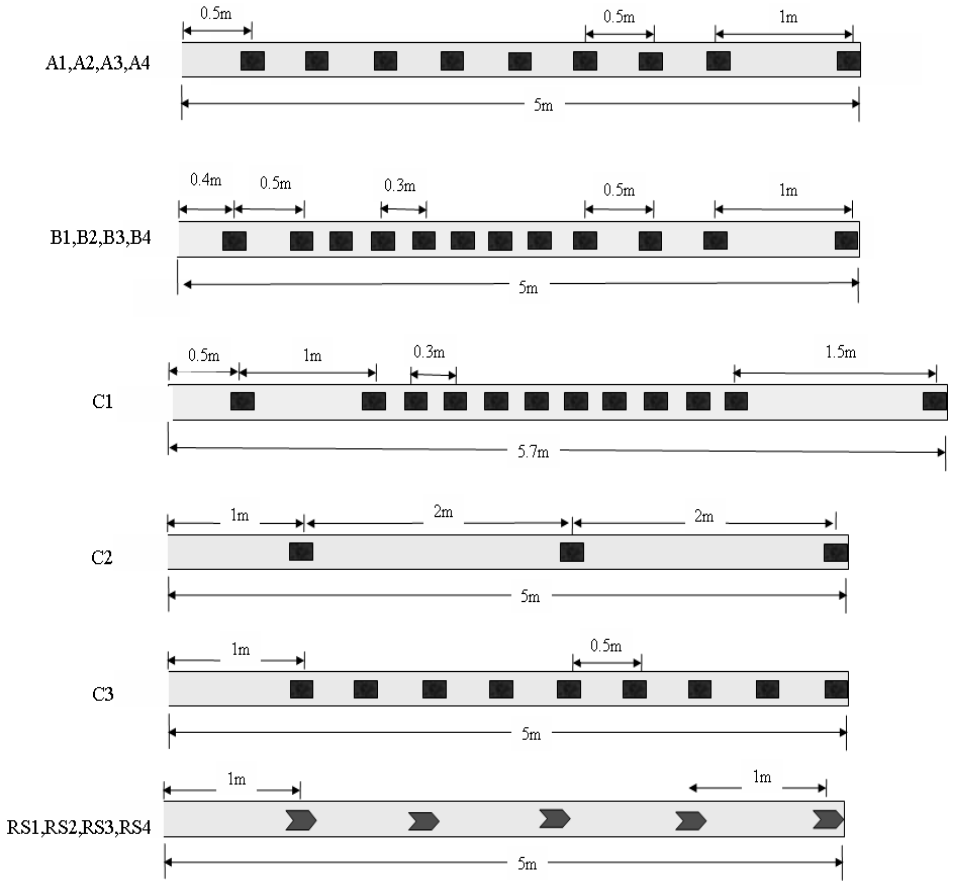

Fig. 6. Location of the sensors in the observation holes

에 설치되었으며 5월 23일 C3 공에 온도센서가 설치되었다. 2007년 7월에는 환기시스템으로부터 히터시험 구간을 격리시키기 위한 차단벽이 설치되었다. 2008년 1월에는 시험공간의 습도를 적정 수준으로 유지시키기 위해 제습기를 설치하였다.

2007년 12월 히터가열이 개시되었으며 단계적인 온도 상승을 통해 2008년 6월 90°C 에 도달하였다. 이후 히터온도를 유지하면서 암반의 열-역학적 거동 변화를 관찰하였다. 터널 내 대기 온도와 습도, 벽면 온도는 초기조건 파악을 위해 시험 전부터 측정하였으며 시험 개시 후 암반온도, 응력 및 소요 전력량과 히터 온도의 변화도 자동 및 수동 방식으로 기록하고 있다.

5. 현장 측정 결과

5.1 터널 내 온도 변화

Fig. 7은 시간에 따른 터널 벽면 온도와 대기 온도 및 습도 변화를 보여주고 있다. 대기 및 벽면온도에 대한 측정은 히터에 대한 가열이 시작되기 전부터 측정하여 초기 조건을 파악할 수 있도록 하였다. 일반적으로 일정 심도 이상에서의 암반 온도는 계절적 변화없이 유지되는 것으로 알려져 있으나 환기시스템이나 자연대류에 의한 대기 순환이 있는 경우, 터널 주변 암반의 온도는 대기 온도 변화에 영향을 받게 된다. 비접촉식 온도 측정기(Raytak 사 ST20-pro)를 사용하여 측정한 암반 벽면의 온도는 상대적으로 변화폭이 큰 공기 온도에 비해 낮거나 높게 나타났다. 2007년 5월부터 측정된 암반 벽면온도는 2007년 9월까지 서서히 증가하다가 시험이 착수되기 직전에 낮은 값을 보인다. 암반 벽면 온도도 터널 내 대기 온도의 변화 추세와 유사한 경향으로 변화할 것으로 보아 9월-10월 사이에 최대 온도에 도달했던 것으로 여겨진다.

Fig. 8은 히터공 주변에서의 히터 가열에 따른 히터공 좌우 수평방향으로 암반 벽면에서 측정한 온도 변화를 보여준다. 측정 기간 동안 히터온도는 90°C로 일정하게 유지하였다. 측정점 사이의 간격은 약 0.6 m 이며 히터에서 멀어질수록 온도도 대칭적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 2009년 7월 히터공에서 가장 가까운 지점에서의 온도는 23°C로 히터 시험 끝 구간에서 20°C로 히터 가열에 의한 온도 차이가 3°C 정도로 나타난다. 2008년 11월 이후, 시간 경과에 따른 온도 변화는 일정하지 않으며 대기온도 변화에 따른 암반 온도의 계절적 변화에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 KURT 내 진입터널에서 측정된 터널 벽면에서의 온도변화를 보여준다. 벽면 온도는 휴대용 적외선 온도계를 사용하여 10 m 간격으로 측정하였다. 계절에 따라 유입되는 공기 온도의 차이가 남으로써 터널 벽면에서의 온도도 계절에 따라 차이를 보이는데 대기의 영향이 큰 터널 입구부에서 변동 폭이 크고 터널 막장에 가까울수록 변동 폭이 적어짐을 알 수 있다. 터널

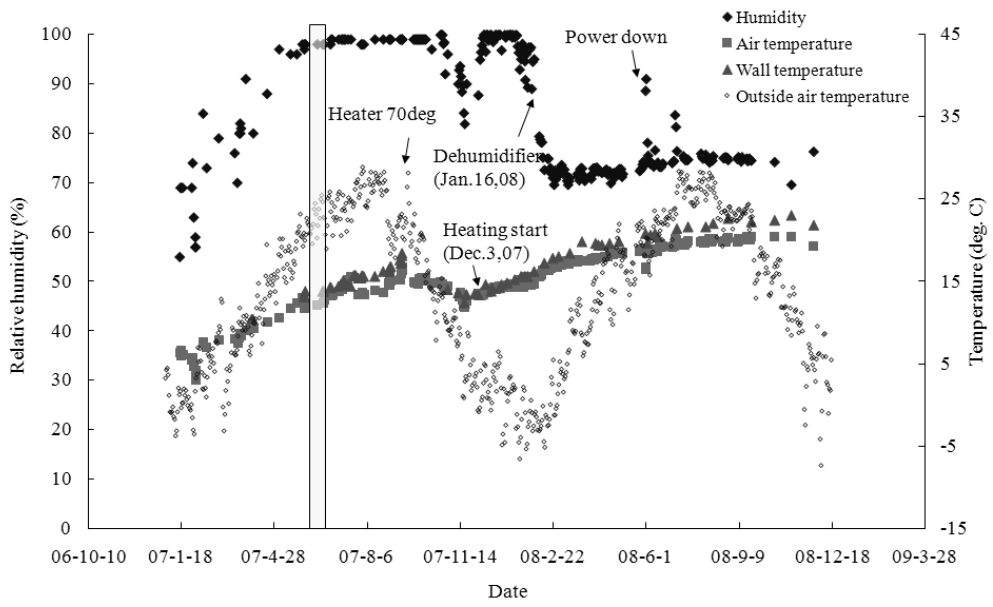

Fig. 7. Variation of humidity and air and wall temperatures measured for the heater test

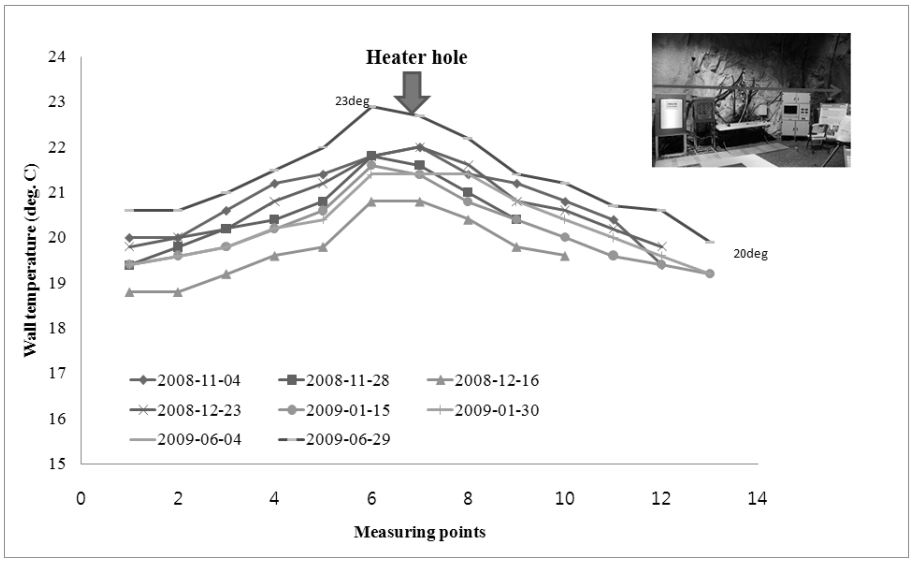

Fig. 8. Variation of wall temperatures with time along the horizontal measuring line passing the heater hole

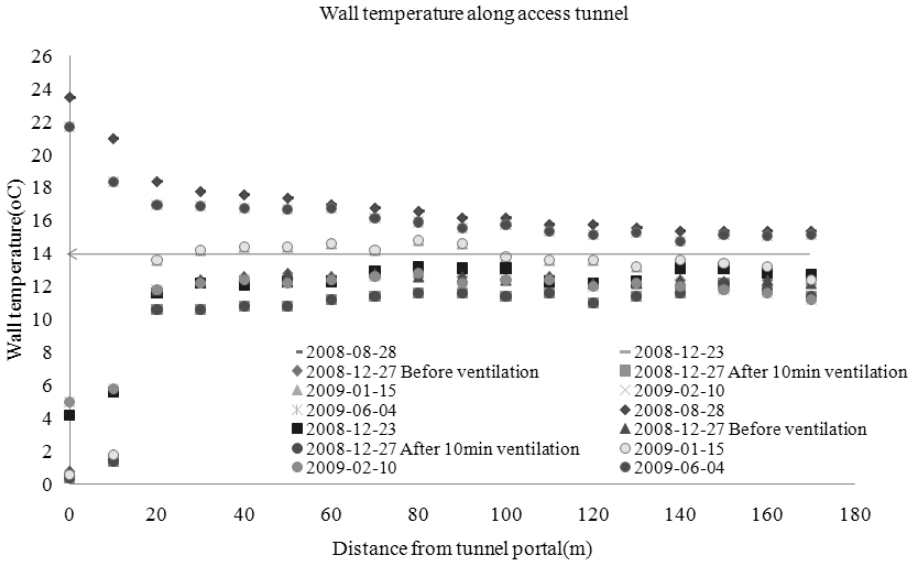

Fig. 9. Tunnel wall temperature change along the KURT access tunnel

막장 부에서는 터널벽면의 연간 평균온도가 14°C 내외에서 비교적 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이를 통해 KURT 심도(90 m) 에서의 초기 암반 온도는 14°C-15°C 내외일 것으로 추정할 수 있다.

5.2 암반 온도 변화

Fig. 10은 히터시험 초기단계에서 가열에 따른 암반의 온도 변화를 보여준다. 히터가열 후 18일 경과한 시점에서 암반의 최대온도는 약 30°C 까지 상승함을 알 수 있다. Fig. 11은 히터 가열 전후의 암반 내부 온도 변화를 보여준다. 가열 전 암반의 온도는 14°C-15°C 사이로 비교적 일정하게 분포하는 것으로 나타나며 히터를 90°C 까지 가열하였을 때 40°C까지 상승함을 알 수 있다. 히터가열 후 초기 온도의 분포와 상이한 온도 분포

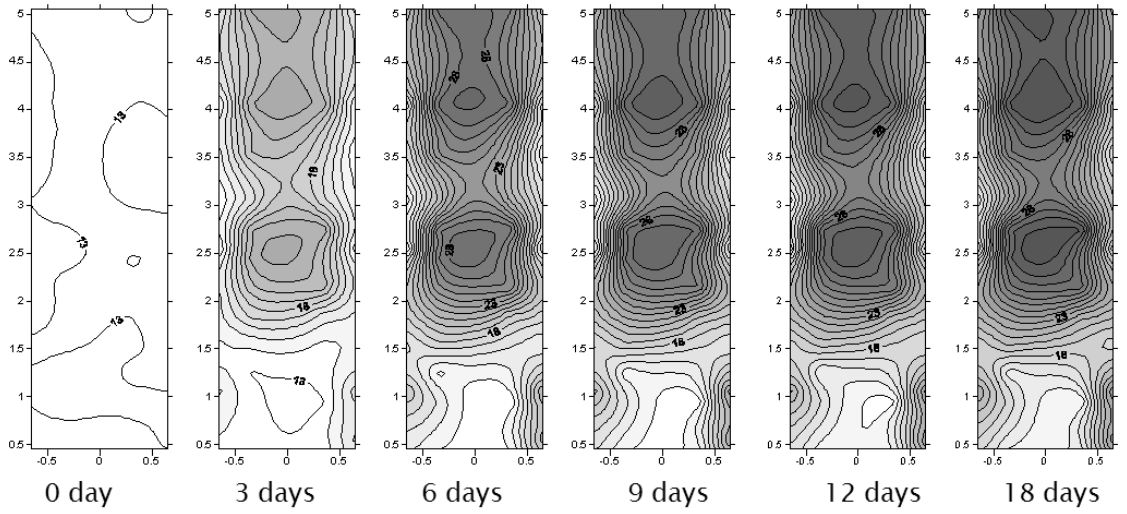

Fig. 10. Temperature distribution change with time in the test area after heating

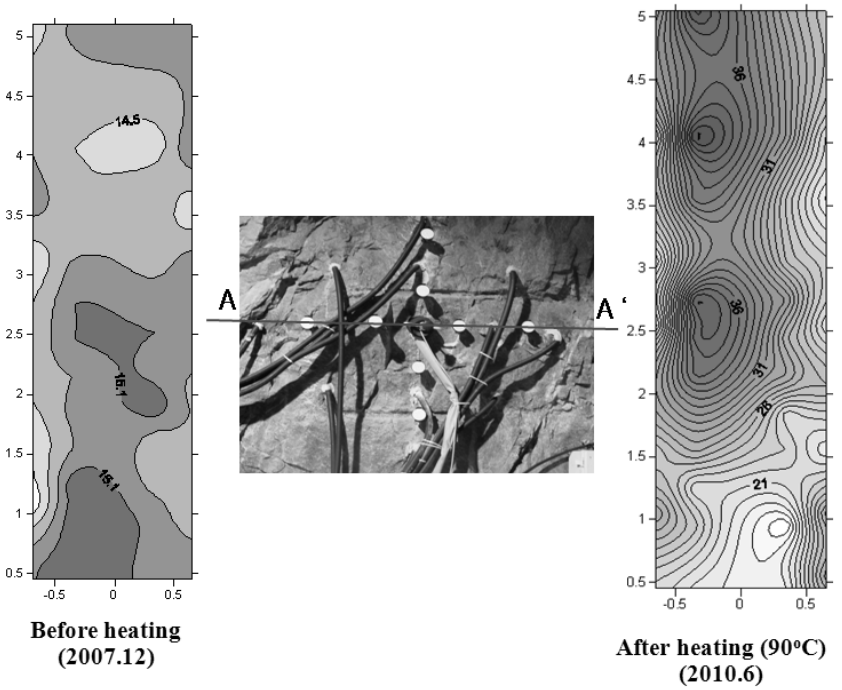

Fig. 11. Rock temperature distribution in the test area before and after heating

도를 보이는 까닭은 시험 구간 내에 위치하는 불연속면의 영향으로 보인다. 관측공 및 히터공 시추 시 관찰되었던 균열의 위치를 온도 분포도와 함께 그려보면 Fig. 12와 같다. 38 mm 관측공에서는 균열의 방향을 파악하는 것이 힘들지만 균열의 위치를 온도 분포도와 함께 표시함으로써 균열이 놓이는 방향을 추정할 수 있었다. 이러한 결과는 암반에서의 온도 분포에 미치는 불연속면의 영향이 상당히 크다는 것을 의미하며 향후 불연속면이 미치는 영향에 대한 보다 면밀한 분석이 필요한 것으로 판단된다. 이와 함께 터널 벽면으로의 열손실도

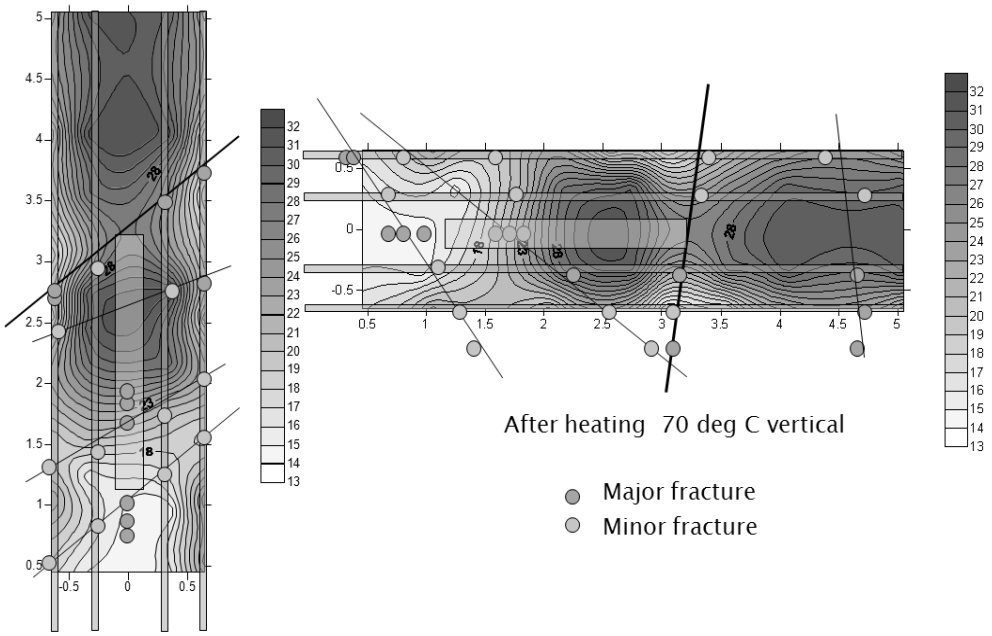

Fig. 12. Estimation of rock joints from the rock core observation and temperature distribution after heating

관찰되고 있다. 즉, 암반 내부의 온도 분포는 히터 중심에서 대칭적인 경향으로 나타나는 것이 아니라 터널에서 먼 쪽의 온도가 상대적으로 높게 나타나며 이는 터널 벽면으로의 열 손실 또는 벽면 주변에 위치하는 손상대의 영향으로 볼 수 있다. 향후 손상대의 열적 물성을 측정하여 이의 영향을 고려한 분석을 실시하여야 할 것으로 보인다.

6. 결 론

2006년 11월 원자력연구원 내에 고준위방사성폐기물 처분연구를 위한 지하처분연구터널(KURT)가 건설됨으로써 고준위처분연구는 기 개발된 기술, 시스템, 해석 기법의 실증 중심으로 수행되고 있다. 본 연구에서는 열-역학적 거동에 대한 면밀한 평가와 분석을 위해서 암질변화가 비교적 복잡하지 않으며 지하수 유입이 적은 KURT 내 우측 연구모듈 구간을 시험 구간으로 선정하고 터널 벽면에서 시추공 히터 시험을 실시하였다.

히터시험 구간에 대한 암석의 열, 역학적 물성과 불연속면의 분포 특성 분석 결과, 암석의 평균 단축압축강도는 94 MPa 로 일반적인 화강암 강도의 절반 정도로 나타났다. 인장강도는 압축강도의 약 1/10 정도인 9.8 MPa, 전단강도는 약 15 MPa 정도로 나타났다. 탄성계수는 52 GPa, 공극률은 약 0.8%로 측정되었다.

암석의 열적 물성에 대한 평가 결과 시험구간의 열전도도는 약 3 W/m^{o}K, 열팽창계수는 상온에서 약 7 microstrain/^{o}K 로 나타났다. 열전달계수 산정 결과, 자연대류 조건에서 평균 4.73 W/m^{2}K, 강제대류 조건에서는 평균 7.46 W/m^{2}K로 평가되었다. 암반의 온도분포 변화를 통해 암반 내에 존재하는 절리와 터널 벽면으로의 열손실을 파악할 수 있었으며 히터온도가 90^{o}C로 유지되는 경우, 히터공에서 0.3 m 떨어진 암반의 온도는 최대 40^{o}C 까지 상승함을 알 수 있었다.

향후 현장시험 결과 분석을 통해 암반 손상대의 열적 특성평가, 환기시스템의 영향, 암반 이방성 및 절리의 영향을 정량적으로 평가하고자 하고 있다. 현장시험 결과는 또한 암반의 THM 해석 모델의 검증에 활용될 것이며 추후 실시될 대규모 THM 현장 실증시험 설계의 기초자료로 활용될 것이다. 본 현장 히터시험은 국내 최초의 현장 열-역학적 거동 평가시험으로써, 향후 암반에서의 열-역학적 거동에 대한 이해가 필수적인 사용후핵연료 중간저장, 지열개발, 이산화탄소 지중격리, 유류지하비축과 같은 지하공간 개발을 위한 연구에도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 원자

력기술개발사업으로 지원받았습니다(연구과제 관리코드: M20703040004-08M0304-00410).

참고문헌

1. 권상기, 박정화, 조원진, 2004, 원자력연구소 내 지하처분연구시설 부지의 지반특성, KAERI/TR-2805.
2. 권상기, 조원진, 2009, 지하처분연구시설 주변의 열,수리, 역학적 초기조건, KAERI /TR-3796.
3. 윤찬훈, 고준위 방사성폐기물 처분장 내 온도 예측을 위한 열전달계수 결정 현장실험과 수치해석에 관한 연구, 2011, 인하대 환경공학과 박사학위논문.
4. 조원진, 권상기, 최종원, 2009, 지하처분연구시설 부지 화강암의 열전도도, 터널과 지하공간, Vol. 18, 219-225.
5. 조원진, 박정화, 권상기, 2004, 소규모 지하처분연구시설 기본설계, KAERI/TR -2769.
6. 최희주, 이종열, 조동건, 김성기, 김승수, 김건영, 정종태, 이민수, 최종원, 이재완, 전관식, 김풍오, 2008, 한국형 고준위폐기물 처분시스템, KAERI/TR-3563.
7. Alonsol, E.E., S.M. Springman and C.W.W. Ng, 2008, Monitoring Large-Scale Tests for Nuclear Waste Disposal, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 26, 817-826.
8. Andersson, J.C., B. Faith and O. Kristensson, 2006, Aspo pillar stability experiment– TM back calculation, GEOPROC 2006.
9. Berchenco, I., E. Detoumay, N. Chandler and J. Martino, 2004, An in-situ TH experiment in a saturated granite, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci. 41, 238.
10. Kwon, S., W.J. Cho and J.W. Choi, 2011, Initial Thermal Conditions around an Underground Research Tunnel at Shallow Depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 48, 86-94.
11. Lin, W., 1998, The status report of the signle heater test, LBNL report, UCRL-ID-129921.

권 상 기

1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1996년 University of Missouri-Rolla, Mining Eng. 공학박사

Tel: 042-868-8914
E-mail: kwonsk@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부 책임연구원

윤 찬 훈

2002년 인하대학교 자원공학과 공학사
2004년 인하대학교 자원공학과 공학석사
2011년 인하대학교 환경공학과 공학박사

Tel: 032-872-7551
E-mail: yoon0940@hanmail.net
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부 박사후 연구원

조 원 진

1979년 고려대학교 화학공학과 공학사
1984년 한국과학기술원 핵공학과 공학석사
1990년 한국과학기술원 핵공학과 공학박사

Tel: 042-868-8122
E-mail: wjcho@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부 책임연구원

이 창 수

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2007년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사수료

Tel: 02-880-9304
E-mail: cslee@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 석박사 통합과정

전 석 원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1991년 University of California at Berkeley 토목공학과 공학석사
1996년 University of Arizona 지질자원공학과 공학박사

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수