지하처분연구시설(KURT) 내 암반의 온도 분포에 관한 연구 : 시추공히터시험 결과의 검증

윤찬훈*, 최영철, 권상기, 최희주

A Study on the Temperature Distribution of Rock Mass at KAERI Underground Research Tunnel: Verification on the Result of Borehole Heater Test

Chan-Hoon Yoon*, Young-Chul, Choi, Sang-Ki Kwon, Heui-Joo, Choi

Abstract In this study, the thermal analysis is carried out for a result of borehole heater test using ABAQUS ver 6.10 based on finite element analysis code. Thermal-mechanical rock properties as determined by laboratory tests before the in situ test and characteristics of the atmosphere at the test section are used as the initial condition. When comparing the results of the in situ test and thermal analysis, the temperature of C3 observation hole that is 0.9 m away from the heater showed very similar patterns and figures (about 1.3°C difference). But the results of the A and B observation hole showed a significant difference around 15°C ~ 20°C. To find the reason for these results, the over-coring is carried out for the A1 and B1 observation holes. As a result of checking the excavated rock core with the naked eye, there is no problem on the number and position of the sensor as the test plan. However the state of cement injection in the observation hole is poor.

Key words KURT, BHT, Thermal analysis, Over-Coring, Rock mass temperature

초 록 본 연구에서는 시추공히터시험의 실측 결과를 FEM 해석코드인 ABAQUS ver 6.10을 이용하여 열 해석을 수행하였다. 현장시험 전 암석 코아에 대한 실내 실험을 통해 결정된 열, 역학적 암반물성과 실험구간 내 대기특성을 해석 초기조건으로 입력하였다. 현장시험과 열 해석의 결과를 비교했을 때, 히터로부터 0.9 m 이격된 C3 관측공의 온도는 상당히 유사한 패턴과 수치(약 1.3°C 차이)를 보였으나, A와 B 관측공의 현장시험 결과와는 최대 15°C ~ 20°C 가량의 큰 차이를 나타냈다. 이러한 결과의 이유를 찾고자 A1과 B1 관측공을 대상으로 over-coring을 실시하였다. 육안으로 시추된 코어를 확인한 결과, 센서의 위치, 개수는 문제가 없었지만, 관측공 내 시멘트의 주입 상태가 불량하였다.

핵심어 지하처분연구시설, 시추공히터시험, 열 해석, 오버코어링, 암반온도

1. 서 론

현재 세계 각국은 방사성 붕괴열이 발생하는 고준위 폐기물을 안전하게 관리하고 처리하기 위해 지하 심부

암반에 처분하는 것을 가장 타당한 방안으로 고려하고 있다. 심지층 처분을 위해서는 심부 암반에 작용하는 높은 응력과 지하수압 그리고 폐기물에서 발생하는 높은 붕괴열로 인한 처분장 주변 환경의 변화에 대해 장기적으로 열-역학적 거동을 분석하고 예측하여 처분시스템에 적용하여야 한다. 이러한 이유로 대부분의 국가에서는 지하연구시설을 건설하고 암반과 완충재의 열-수리-역학적 거동에 대한 현장 실증시험을 실시하고 있으며, 실증시험 결과를 토대로 다양한 모델링 검증을 수행하고 있다.

국외의 경우, 스웨덴의 Hard Rock Lab.에서는 벤토

Received: Jul. 23, 2013

Revised: Aug. 20, 2013

Accepted: Aug. 20, 2013

*Corresponding Author: Chan-Hoon Yoon

Tel) +82428688773, Fax) +82428688850

E-Mail) yoon0940@hanmail.net

KAERI, Daedeok-daero 989-111, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

나이트 완충재의 열-수리-역학적 거동을 평가하고 (Temperature Buffer Test, TBT), CODE-BRIGHT와 ABAQUS 코드를 이용하여 THM 모델링을 수행하였다(Mattias Akesson, 2012). 이와 더불어 Long term test of buffer material(LOT) project를 실시하여 TOUGHREACT 코드로 THG 모델링을 수행하였다(Clara Sena 외, 2010). 또한, 스위스의 Grimsel test site에서 수행된 현장 THM 시험인 FEBEX 국제공동연구(Alonso 외, 2008)를 대상으로 FEM 코드인 ROCMAS와 CODE-BRIGHT를 이용하여 THM 해석이 수행되었다(J. Rutqvist and C.-F. Tsang, 2003). 그리고 스위스의 Mont Terri Clay URL에서는 Opalinus clay 암반의 열적 거동과 절리에 의한 영향을 평가하기 위한 실증시험(Y. Wileveau and T. Rothfuchs, 2006)이 수행되었고, 본 시험은 DECOVALEX-2015 국제공동연구의 test case로서 해외 여러 나라에서 FLAC 3D, TOUGH2 코드 등을 이용하여 모델링을 수행하고 있다.

국내의 경우, 한국원자력연구원에서 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)을 건설하여(Cho 외, 2004) 지하 처분에 대한 다양한 연구를 수행하고 있다. 암반에서의 열전달과 관련된 열-역학적 거동 평가를 위한 시추공히터시험(Borehole Heater Test, BHT)이 수행되었고(Kwon 외, 2011), FLAC 3D 코드를 이용하여 THM 거동을 평가하였다(Kwon 외, 2012). 그리고 현재는 공학적 방벽인 벤토나이트 완충재의 THM 거동 평가에 대한 KURT 현장 실증시험 및 모델링 연구를 준비하고 있으며, 일부 수행 중에 있다. 이와 더불어 공학적 규모의 실증시험인 KENTEX 장치를 제작하여 벤토나이트 완충재의 THM 거동을 평가하였고(Lee & Cho, 2007), 그 연구결과를 토대로 TOUGH2 코드를 이용하여 모델링 연구를 수행한 바 있다(Jae Owan Lee 외, 2008). 그리고 처분 터널의 형상에 따른 고준위폐기물 주변의 열적 거동을 파악하기 위해 ORIGIN-ARP 프로그램을 이용하여 열 선원향을 결정하고 ABAQUS 프로그램으로 열 해석을 수행하기도 하였다(Choi 외, 2013).

이에 본 연구에서는 KURT 내 우측 연구 모듈에서 수행된 시추공히터시험을 ABAQUS 6.10을 이용하여 히터로부터 발생하는 열로 인한 암반의 열적 거동 파악을 위해 열 해석을 수행하였다. 추가적으로 시추공히터 시험 결과의 검증과 추후 수행 될 모델링 연구를 위해 2개(A1, B1)의 관측공을 대상으로 2012년 11월에 over-coring 작업을 실시하였고, 그라우팅 상태와 삽입된 센서의 개수, 위치를 확인하였다.

2. 시추공히터시험

2.1 시험개요

시추공히터시험은 Fig. 1과 같이 한국원자력연구원 내에 위치한 지하처분연구시설(KURT) 우측 연구모듈

Fig. 1. Borehole heater test

Fig. 2. Placement of heater & observation holes

Fig. 3. Form of heater in tunnel wall

벽면에 히터와 100여개의 온도 및 압력센서를 암반 내부에 삽입하여 암반의 열-역학적 장기 거동 모니터링을 목적으로 한 현장시험이다. 관측공들은 Fig. 2와 같이 히터를 중심으로 약 30 cm 간격, 38 mm 직경, 5 m 깊이로 천공하였다. 온도와 압력 센서들은 각각의 관측공에 삽입한 후 시멘트로 그라우팅 처리를 하여 암반과 센서를 밀착시켰다. 본 연구 주제가 열 해석인 만큼 RS 공의 압력측정에 대한 세부사항 및 결과는 제외하였다.

그리고 2 m 길이의 히터는 Fig. 3과 같이 터널 벽면으로부터 약 1.2 m 깊이에 설치되었다. 2007년 12월부터 2008년 6월까지 히터온도를 20℃부터 5℃ 단위로 평균 90℃까지 증가시켰으며, 2010년 9월 까지 90℃로 유지시켰다(Fig. 4). 그 이후 히터의 온도를 120℃까지 상승시켰고 2011년 8월에 히터의 작동을 정지시켰다. A1~A4, B1~B4, C3 관측공 내부에는 -30℃~80℃의 측정 범위를 가지고 방수, 방습, 내구성을 지닌 진동현

식 온도센서를 삽입하였다. A 관측공의 경우 12개, B 관측공에는 9개, 그리고 C 관측공의 경우 8개의 온도 센서를 정해진 간격으로 Fig. 5와 같이 설치하여 실시간으로 암반의 온도를 측정하였다.

간략하게 정리한 시추공히터시험의 개요 즉, 히터와 관측공의 배치도, 히터 설치상황, 히터 발열이력, 관측공에 따른 온도센서들의 개수 및 위치는 ABAQUS 열 해석의 초기조건 및 경계조건으로 사용하였다.

2.2 시험결과

시추공히터시험이 이루어진 KURT 내 연구모듈 I 은 그 심도가 약 90 m이며, 적외선 온도측정기기(Raytak, ST20-pro)를 통해 암반표면의 온도를 계절에 따라 측정 한 결과, 암반의 초기온도를 약 14℃~15℃ 내외로 추정할 수 있었다(Kwon 외, 2009). 이는 A, B, C 관측공에서 얻어진 암반 내부의 초기 측정온도가 13℃~15℃ 범위에서 형성되는 것을 통해서도 확인할 수 있었다. 시험 결과는 히터의 발열을 시작한 2007년 12월부터 히터의 온도가 안정적으로 90℃를 유지하고 있는 구간인 2009년 11월까지를 범위로 정하여 7일간 측정된 온도를 평균하여 대표적으로 A1, B1, C3 관측공을 대상으로 센서 위치별로 Fig. 6에 정리하였다(Yoon 외, 2012).

Fig. 6의 (a)에서 도시한 것은 히터로부터 0.3m 이격된 A1 관측공의 측정결과로서, 터널 벽면으로부터 2.7 m 지점에서 주로 높은 온도가 형성되었으나 최고온도 (39.67℃)는 4 m 지점에서 나타났다. (b)의 그래프는 0.6 m 이격된 B1 관측공의 측정결과로서, A1과 마찬가지로 4 m에 위치한 지점에서 가장 높은 온도인 33.21℃를 나타냈다. 하지만 최저 온도의 경우는 A1은 1.2 m, B1은 3 m 지점에서 형성되었다. (c)의 그래프는 히

Fig. 4. History of heater temperature

Fig. 5. Location of the sensors in the observation holes

Fig. 6. Temperature variation of observation holes

터로부터 0.9 m 이격된 C3 관측공의 측정결과인데 A1, B1과는 달리 2.1 m 지점에서 최고온도(27.98°C)가 형성되었다. 이러한 불규칙적인 결과는 암반 내부에 존재하는 수많은 절리들과 지하수층의 영향인 것으로 사료된다.

3. 암반 열해석

시추공 히터 현장시험 결과를 토대로 예측이 어려운 암반 내 열전달 현상을 해석하고자 유한요소 해석 코드인 ABAQUS 6.10을 이용하여 열 해석을 수행하였다. 단, 모델링에서는 모델 특성상 상하좌우 대칭될 것으로 판단하여 A1, B1, C3 관측공에 대한 해석결과만을 실측결과와 비교 및 분석하였다.

3.1 ABAQUS 열 해석 알고리즘

유한요소법을 사용하며 3차원 해석이 가능한 ABAQUS 코드는 각종 해석에 적용할 수 있는 알고리즘이 포함되어 있어 사용자가 사용 목적에 따라서 적당한 기하학적 모델과 재료 모델 그리고 경계 및 초기조건을 선택하여 사용하여야 한다. 따라서 사용자에게 따라 준비하는 입력 자료가 달라질 수도 있으며 경계조건 또한 다르게 입력할 수 있다.

열전달 현상을 미분형으로 표현하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \cdot \underline{q} + \gamma = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, g : 물체의 표면을 통과하는 단위 면적당 열 유속 벡터

γ : 물체 내부의 단위 부피 당 생성되는 열량

ρ : 물체의 밀도

c : 물체의 비열

T : 온도

t : 시간

그리고 식 (1)은 물체의 표면을 통하여 유입되는 열 증가율에 물체 내에서 생성되는 열 생성율의 합이 물체 내부에너지의 증가율로 표현되는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\int_S \underline{q} dS + \int_V r dV = \int_V \rho \dot{U} dV \quad (2)$$

여기서, q : 물체의 표면 S 를 통과하여 단위 면적당 유입되는 heat flux

r : 물체 내 단위 부피당 생산되는 heat flux

ρ : 물체의 밀도

$\dot{U}$: 온도의 함수로 단위 질량당 내부 에너지

식 (2)를 divergence theorem, chain rule 등을 이용하

여 유한요소법의 요소부피에 대한 평균을 취하면 식 (3)로 표현되며,

$$\begin{aligned} & \int_V \delta \rho \dot{U} dV - \int_V \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot q dV \\ & = \int_S \delta \theta q dS + \int_V \delta \theta r dV \end{aligned} \quad (3)$$

열유속 q 에 Fourier의 법칙을 이용하고, Galerkin 방법을 사용하여 시행함수를 적용시켜 유한요소법으로 변환하면 식 (4)과 같이 finite element approximation으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \int_V N^N \rho \dot{U} dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} dV \bar{\theta}^M \\ & = \int_V N^N r dV + \int_S N^N q dS \end{aligned} \quad (4)$$

심지층 처분장의 열원이 시간에 따라 그 강도가 변함을 고려할 때 본 연구에서 다룰 열전달 문제는 비정상상태 해석(transient analysis)을 통하여 풀게 된다. ABAQUS에서 사용되는 time integration operator는 backward difference algorithm 즉, $U_{t+\Delta t} = \frac{(U_{t+\Delta t} - U_t)}{\Delta t}$ 이고 이를 열평형공식인 식 (4)에 대입하면

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \int_V \rho (U_{t+\Delta t} - U_t) dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot \\ & k \Big|_{t+\Delta t} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} dV \bar{\theta}^M_{t+\Delta t} - \\ & \int_V N^N r \Big|_{t+\Delta t} - \int_S q_{t+\Delta t} dS = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

최종적인 열 해석 방정식인 식 (5)로 변형되어 유한요소 코드인 ABAQUS의 열 해석 핵심 알고리즘으로 사용된다(Park 외, 2000).

3.2 해석 조건

시추공히터시험 결과의 ABAQUS 열 해석을 위해 암반과 히터 그리고 대기의 물성을 Table 1과 같이 입력하였다. 시험구간에서 회수된 코어를 이용한 실내 암석 시험(Cho 외, 2009) 결과를 통해 암석의 열전도도, 열용량, 밀도를 암반의 물성으로 해석에 입력하였다. 그리고 KURT 건설로 인한 시험 구간 내 굴착손상영역(EDZ)의 열전도도는 암반 열전도도 보다 약 20% 감소

된 수치를 적용하였다(Lee, 2012). 히터의 온도는 Fig. 4의 데이터를 이용하였으며, 암반온도에 큰 영향을 끼치는 대기 열전달 특성은 KURT 내에서 수행된 열전달 계수 결정 현장실험 결과를 적용하였다(Yoon 외, 2009).

열 해석 모델의 크기는 Fig. 7의 (a)에서 나타낸 바와 같이 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 이며 75,924개의 격자로 구성하였다. EDZ 부분은 2 m로 간주하여 암반 영역과 구분하였다. 관측공이 삽입된 깊이인 5 m까지는 조밀한 격자를 적용하여 해석의 정확도를 높였고, 2007년 12월부터 2009년 11월까지 비정상상태로 해석하였다. Fig. 7의 (b)는 모델의 단면이며 터널 벽면에서 1.2 m 이격된 위치로부터 삽입된 히터와 히터를 중심으로 열이 분포하는 모습을 보여주고 있다.

(a) Model mesh

(b) Analysis section

Fig. 7. Thermal analysis model using ABAQUS

Table 1. Input parameter for thermal analysis

Constant \ Material	Rock Mass		Heater	Atmosphere
	Intact rock	EDZ		
Thermal conductivity [W/m·K]	3.03	2.43	15	0.0263
Heat capacity [J/kg·°C]	792.7	792.7	504	1.1614
Density [kg/m ³]	2650	2650	4000	1007
Initial temperature [°C]	14.5	14.5	20~90	15
Heat transfer coefficient [W/m ² ·K]	.	.	.	4.73

3.3 해석 결과

현장시험과 모델해석의 결과 비교는 동일한 시점을 기준(2009년 11월 3일)으로 관측공에 따른 각각의 온도센서 실측 결과를 이용하였는데, A 관측공의 경우 12개, B 관측공은 9개, C3 관측공은 8개의 센서에서 획득된 데이터를 통해 해석 결과와 비교하였다.

Fig. 8의 (a)는 히터로부터 0.3 m 이격된 관측공(A hole)의 결과로서, A4 에서 최대온도 41.29°C, 최저온도는 A3 에서 16.06°C를 나타냈다. 터널 벽면으로부터 약 0.8 m~1.2 m 부분에서 A1, A4 관측공과 A2, A3 관측공이 상반된 온도변화 패턴을 나타냈다. 그리고 약 3 m~3.5 m 지점에서 모든 관측공에서 급격히 온도가 감소하는 경향을 보였다. 또한 4m~5m 지점에서는 히터가 삽입된 부분의 온도 보다 오히려 상승하였다. 예측컨대, 온도의 갑작스런 패턴 변화는 파쇄대와 같은 큰 절리 혹은 지하수층 그리고 히터에 공급되는 전력량 등이 큰 요인이 될 것으로 판단된다. 열 해석 결과는 Fig. 8의 (b)에서와 같이 예상대로 A1 관측공 기준으로 히터가 삽입된 1.2 m~3.2 m 구간에서 최대 약 50°C를 보였고 그 이후의 구간에서는 약 20°C까지 감소하였다. 즉, 시험 결과와 비교하였을 때 최소 3°C, 최대 20°C 가량 차이를 나타냈다.

B 관측공의 경우, Fig. 9의 (a)에서와 같이 시험 결과에서 일정한 규칙을 찾아보기 어려웠다. 대략 20°C 에서 30°C 내외의 범위 안에서 불규칙하게 분포하는 것을 볼 수 있었다. 이는 히터로부터 이격거리가 0.3 m~0.6 m 부근의 암반 내부에 불규칙적인 절리가 무수히 포함되어 있기 때문에 암반으로의 열전달이 제대로 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 하지만 A 관측공과 유사한 결과로서, 터널 벽면으로부터 1.2 m 부근의 온도 감소 그리고 3 m 부근에서 급격하게 온도가 하강한다는 점에서 분명히 암반 내부에 불연속면이 존재한다는 것을 추정할 수 있었다. B1에 대한 열 해석 결과를 Fig. 9의 (b)에 도시하였고, 해석 최대온도가 약 36.72°C로서 시

(a) Result of In situ test

(b) Comparison result of A1 hole

Fig. 8. Comparison of Temperature distribution (A hole)

험 결과와 최대 약 14°C, 최소 약 1°C 차이를 나타냈다. A1 관측공에서 보다 다소 차이가 감소하였으나, 역시 암반 내부의 불연속면과 관측공 내부의 상황을 고려하지 못하였기에 시험결과와 모델 해석결과의 차이를 줄이지 못하였다고 사료된다.

Fig. 10은 히터에서 아래 방향으로 약 0.9 m 이격된

C3 관측공의 시험결과와 해석결과를 비교한 그래프이다. A1과 B1의 결과와는 달리 온도 변화 패턴이 상당

(a) Result of In situ test

(b) Comparison result of B1 hole

Fig. 9. Comparison of Temperature distribution (B hole)

Fig. 10. Comparison of Temperature distribution (C3 hole)

히 유사하였고, 수치 또한 거의 흡사하게 나타났다. 해석 결과 최고 29.22℃로서 히터시험 현장의 최고 온도인 27.91℃와 약 1.3℃의 매우 적은 차이를 보였다. 이러한 이유는 히터 하부의 암반에는 상부(A1, B1)와는 달리 상대적으로 불연속면이 발달하지 않은 것으로 추정된다. 또한 히터로부터 이격거리가 증가함에 따라 암반온도의 변화폭이 감소되고, 암반의 위치에 따른 특성이 평균화되었기 때문인 것으로 판단된다(Kwon 외, 2012).

4. Over-coring

4.1 Over-coring 개요

ABAQUS 6.10을 이용한 열 해석 결과, A와 B 관측공에서의 시험 결과와 상당한 차이를 나타냈다. 해석 결과에 대한 분석을 좀 더 세밀하게 해보았으나 더 이상 열 해석상의 문제점을 발견할 수 없어 암반 내부와 센서들의 상태를 확인코자 A1과 B1 관측공을 대상으로 over-coring 작업을 결정하게 되었다. 작업은 2012

Fig. 11. Over-coring operation at the heater test zone

Fig. 12. Result of over-coring operation

Fig. 13. Recovered A1 & B1 core after over-coring

년 11월 21일 부터 23일 까지 약 3일에 걸쳐 Fig. 11과 같이 실시하였다.

직경 38 mm인 A1, B1 관측공을 중심축으로 하여 직경 150 mm 크기로 1 m 단위로 끊어가며 굴착하였고, 작업 결과는 Fig. 12에 나타냈다. B1 관측공을 1.6 m 선 굴착하여 암반 내부 및 센서의 상태를 육안으로 확인한 이후 A1 관측공을 5 m 굴착하였다. 직경 110 mm의 히터공은 별도의 작업없이 히터만 제거하였다.

4.2 Over-coring 결과

당초의 작업 계획은 A1과 B1 관측공 모두 깊이 5 m 굴착이었으나, B1의 경우 약 1.6 m 깊이의 코어를 회수하는 도중 관측공에 삽입된 모든 센서들이 공 밖으로 뽑히는 상황이 발생하였고, 이에 관측공 내 그라우팅에 문제가 있다고 판단하여 B1 관측공에 대한 굴착을 중지하였다. 그 후 A1 관측공에 대한 굴착을 계획대로 5 m까지 실시하였다. Fig. 13은 작업 후 회수된 A1과 B1

Fig. 14. Situation of A1 observation hole

코어로서 ①로 표시된 3.3 m 코어와 빨간 점선으로 되어있는 ②, ③ 부분은 서로 연결되며, 이는 A1 코어의 길이가 길어서 나누어 나타냈다.

그런데 A1 관측공에 대한 over-coring 작업 중 특이한 점을 발견하였다. Fig. 14의 회수된 코어를 살펴본 결과, 관측공의 형상이 코어의 2.96 m 지점까지만 발견이 되었고, 그 이후부터는 볼 수 없었다. 즉, 코어 입구로부터 우측 방향으로 약 1.5° 틀어져 있어 2.96 m 이후

로는 관측공이 발견될 수 없었던 것이다. 이러한 이유는 아마도 관측공 혹은 코어의 수평 굴착에 문제가 있었던 것으로 추정된다.

앞서 기술한 바와 같이 B1 관측공을 1.6 m 까지 코어를 회수하여 살펴본 결과, 대략 0.6 m 까지만 그라우팅이 완료되어 0.6 m 이후로는 센서와 암반이 밀착되지 않고 관측공 내 대기와 접촉하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 시멘트를 관측공 입구에서부터 암반 내부 방향으로 주입하였으며, 게다가 온도 센서의 직경이 19.5 mm로서 관측공 내경(38 mm)의 50% 이상을 차지하고 있었기 때문에 그라우팅 상태가 불량했을 것으로 판단된다. 하지만 센서들의 위치 및 개수는 문제없이 시험 계획과 일치하고 있었다.

B1 관측공의 1.6 m 굴착 후, A1 관측공을 5 m까지 굴착하여 코어의 상태를 확인하였다. B1 관측공과 마찬가지로 그라우팅 상태가 불량하였다. 시멘트가 입구로부터 약 1.2 m 지점까지만 주입되어 있어서 1.2 m 이후로는 온도 센서들이 대기와 접촉하고 있었다. 하지만 A1 역시 센서들의 위치 및 개수는 시험 계획과 동일하

게 설치된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 15의 (a)와 (b)는 A1과 B1 관측공의 입구부를 나타낸 것으로 각각 12 가닥, 9 가닥의 온도센서 연결선이 온전히 보존되어 있는 모습을 보여주고 있다. 향후 암반 내부의 온도 분포에 대한 좀 더 세밀하고 정확한 분석을 위해 관측공의 그라우팅 상태와 절리의 영향을 고려한 열 해석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

한국원자력연구원 내에 고준위 방사성폐기물 처분 연구를 위한 지하처분연구시설(KURT)이 건설되어 실증 중심의 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 그 중에서도 본 연구에서는 고준위 핵폐기물의 영향으로 인한 암반의 열·역학적 거동 분석을 위해 수행된 시추공히터시험의 결과를 이용하여 FEM 열 해석을 수행하였다. 그리고 A1과 B1 관측공에 대한 over-coring을 실시하여 암반 내부를 육안으로 관찰하고자 하였다.

ABAQUS를 이용한 열 해석 결과를 살펴보면, 히터로부터 0.3 m 이격된 지점에서는 실제의 경우와 최소 3℃, 최대 20℃, 0.6 m 이격된 지점에서는 최소 1℃, 최대 14℃의 상당한 격차를 보였다. 이는 히터와 센서 사이에 존재하는 암반 내부의 불연속면에 의한 것으로 판단되며, 특히 현장시험에서 급격한 온도변화를 나타내는 지점에서는 상당한 크기의 대수층으로 인하여 온도가 감소하는 것으로 추정된다. 이러한 결과와는 달리 0.9 m 이격된 관측공의 경우, 시험결과와 최대 1.3℃의 차이를 보이며 해석 결과와 매우 유사한 패턴을 나타냈다. 이는 히터와 A1, B1 관측공 사이의 암반과는 달리 불연속면이 적게 발달하였기 때문이라고 판단된다. 또한 히터로부터 이격거리가 증가함에 따라 암반온도의 변화폭이 감소되고, 암반의 위치에 따른 특성이 평균화되었기 때문인 것으로 사료된다. 시추공히터시험과 열 해석간의 격차에 대한 원인을 파악하고자 A1과 B1 관측공을 대상으로 over-coring 작업을 3일에 걸쳐 실시하였다. 직경 38 mm인 관측공에 중심을 맞추어 직경 150 mm로 시추하여 코어를 살펴 본 결과, 그라우팅 상태가 불량하여 삽입된 센서들이 암반과 밀착되지 않고 관측공 내 대기와 접촉하고 있었다. 그리고 A1 관측공의 경우 온도 센서의 삽입을 위한 수평굴착 작업이 우향으로 약 1.5° 가량 틀어져 있었다. 또한 코어의 일부분이 지하수와 접촉하고 있었던 사실을 확인할 수 있었다.

향후 본 연구의 내용을 토대로 시추된 코어를 면밀히 분석하여 관측공 주변의 지하수 유입 상태, 암질, 절리 분포와 같은 정보를 수집해야 할 것이다. 이를 통해 본

(a) A1 core

(b) B1 core

Fig. 15. Extension leads of temperature sensors

연구에서 수행했던 열해석 작업을 보완하여 보다 명확한 현장시험 결과에 대한 검증이 필요할 것이다. 그리고 본 내용은 추후 심부 암반 내 저장 될 고준위폐기물에서 발생하는 열에 의한 벤토나이트 완충재와 암반의 열적 거동을 파악하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Akesson, M., 2012, Temperature buffer test final report, Clay Technology AB, TR-12-04.
2. Alonso, E. E., Springman, S. M. and Ng, C. W. W., 2008, Monitoring large-scale tests for nuclear waste disposal, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 26, pp. 817-826.
3. Cho, W. J., Kwon, S. and Choi, J. W., 2008, Thermal conductivity of granite from the KAERI underground research tunnel site, Tunnel and underground space, Vol. 18, No. 3, pp. 219-225.
4. Cho, W. J., Park, J. H., and Kwon, S., 2004, Basic design of the small scale underground research, KAERI/TR-2769.
5. Choi, H. J., Kim, I. Y., Lee, J. Y. and Kim, H. A., 2013, Thermal analysis of a horizontal disposal system for high-level radioactive waste, Tunnel and underground space, Vol. 23, No. 2, pp. 141-149.
6. Kwon, S. and Cho, W. J., 2009, 지하처분연구시설 주변 열, 수리, 역학적 초기조건, KAERI/TR-3796/2009.
7. Kwon, S., Kim, J. S. and Park, S. H., 2012, KURT 시추공 히터시험에 대한 열-역학적 복합거동 해석, KAERI/CM-1766/20121.
8. Kwon, S., Lee, C. S., Yoon, C. H., Jeon, S. W., and Cho, W. J., 2011, Borehole heater test at KAERI underground research tunnel, Tunnel and underground space, Vol. 21, No. 3, pp. 225-234.
9. Kwon, S., Lee, C. S., and Cho, W. J., 2012, Investigation of the thermal behavior of crystalline rock mass using an in situ borehole heater test, ARMS7 - 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, South Korea.
10. Lee, C. S., 2012, Characterization of thermal-mechanical behavior of rock mass in the excavation damaged zone at KURT, PhD thesis, Seoul National University.
11. Lee, J. W. and Cho, W. J., 2007, Thermal-hydro-mechanical behaviors in the engineered barrier of a HLW repository: engineering-scale validation test, Tunnel and underground space, Vol. 17, No. 6, pp. 464-474.
12. Lee, J. W., Cho, W. J. and Choi, J. W., 2008, The surface mock-up KENTEX: on the thermal-hydro-mechanical behaviors in the buffer of a Korean HLW repository, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geology Repository.
13. Park, J. H., Kuh, J. E., Kwon, S. and Kang, C. H., 2000, Thermal analysis of high level radioactive waste repository using a large model, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 32, No. 3, pp.244-253.
14. Rutqvist, J. and Tsang, C.-F., 2003, A fully coupled three-dimensional THM analysis of the FEBEX in situ test with the ROCMAS code: prediction of THM behavior in a bentonite barrier, 2003, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab), Earth Sciences Division, Berkeley, USA.
15. Sena, C., Salas, J. and Arcos, D., 2010, Thermo-hydro-geo-chemical modelling of the bentonite buffer LOT A2 experiment, TR-10-65.
16. Wileveau, Y. and Rothfuchs, T., 2007, THM behavior of host rock (HE-D) experiment: study of thermal effects on Opalinus clay, TR 2006-01.
17. Yoon, C. H., Kwon, S. and Kim, J., 2009, Experimental study on the determination of heat transfer coefficient for the KURT, Tunnel and underground space, Vol. 19, No. 6, pp. 507-516.
18. Yoon, C. H., Kim, J. S., Lee, C. S., Cho, W. J., Choi, H. J., Choi J. W., 2012, KURT 시추공 히터시험에 관한 열적거동 결과 분석, KAERI/TR-4694/2012.

윤 찬 훈

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

Tel: 042-868-8773

E-mail: yoon0940@hanmail.net

현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
 처분연구부 박사후연수생

최 영 철

1998년 부산대학교 정밀기계공학 공학사
 2000년 KAIST 기계공학 공학석사
 2005년 KAIST 기계공학 공학박사

Tel: 042-868-4870

E-mail: cyc@kaeri.re.kr

현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
 처분연구부 선임연구원

권 상 기

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

Tel: 042-860-7554

E-mail: kwonsk@inha.ac.kr

현재 인하대학교 에너지자원공학과 조
 교수

최 희 주

1983년 한양대학교 원자력공학과 공학사
 1985년 한국과학기술원 원자력공학과
 공학석사
 1996년 한국과학기술원 원자력공학과
 공학박사

Tel: 042-868-2274

E-mail: hjchoi@kaeri.re.kr

현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
 처분연구부 책임연구원