

## FLAC3D를 이용한 지하처분연구시설 시추공 히터시험 열해석

권상기, 김진수, 박승훈, 최희주\*

인하대학교, 인천시 남구 용현동

\*한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

[kwonsk@inha.ac.kr](mailto:kwonsk@inha.ac.kr)

### 1. 서론

고준위방사성폐기물 심지층 처분장에서 발생하는 열에 의한 처분장 주변에서의 열적 거동을 예측하기 위해서는 처분환경과 유사한 조건에서의 실증을 위한 현장 시험이 매우 중요하다. 한국원자력연구원에 건설된 지하처분연구시설(KURT)에서는 암반에서의 열-역학적 복합거동 평가를 위한 시추공히터시험이 실시되었다. 시험구간에서의 열-역학적-수리적 물성은 실험실 또는 현장시험을 통해 측정되어 보고된 바 있다(Cho and Kwon, 2010;Kwon et al.,2011). 본 연구에서는 시추공히터시험을 통해 얻어진 암반 내 온도 변화를 분석하였으며 시험 구간에서 측정된 암반의 물성과 FLAC3D 를 이용한 3차원 모델링을 실시하였다.

### 2. 시추공 히터시험

KURT 가 준공된 2006년 11월 이후 KURT 내 연구도물에서는 시추공 히터시험을 위한 장비설치, 히터 가열 전 암반 및 대기의 온도 변화, 암석 코아를 이용한 암석의 열적, 역학적 물성 측정을 위한 실험실 실험이 실시되었다. 터널 벽면에 11cm 직경의 히터공을 천공하고 알루미늄 재질의 5kw 히터를 터널 벽면에서 1m~3m 구간에 설치하였으며 온도와 응력 변화를 측정하기 위한 15개의 관측공을 천공하였다. 이중 11개의 관측공에는 약 100개의 온도센서를 설치하였으며 20개의 응력센서는 히터공에서 0.5m 떨어진 4개의 관측공에 각각 5개씩 설치하였다. 2007년 9월 히터와 센서, 데이터로거, 전력공급장치 등의 성능 시험을 위한 예비시험을 마치고 2007년 12월 본 시험을 위한 전력공급이 시작되었다. 히터의 온도는 단계적으로 상승시킨 후 2010년 9월까지 90°C를 유지하였다. 비정상 가열 조건에서의 암반 거동을 평가하기 위해 히터의 온도를 최대 120°C 까지 상승시키면서 암반 내외의 온도, 응

력, 습도 변화를 자동 또는 수동으로 측정하였다. 기존 세계 각국에서 실시된 히터시험과 본 현장 시험은 다음 측면에서 차별성을 가진다.

- 절리가 존재하는 결정질 암반
- 터널 굴착으로 손상된 구간에서의 시험
- 환기시스템의 영향을 고려

시험구간에는 다수의 절리가 존재하며 이들 절리의 존재는 암반 내 온도 분포에 영향을 미칠 수 있다. 각 시추공에서 회수된 암석코아에 기록된 절리의 수를 0.5m 간격으로 측정하여 구간별 절리의 평균간격을 계산하여 Fig.1과 같이 2차원 분포로 나타내었다. 그림에서 보듯이 시험기간 동안 각 온도센서에서 측정된 최대온도와 암반 내 절리의 간격은 밀접한 연관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 터널 벽면 부근에서는 벽면으로의 열 손실에 따라 상대적으로 낮은 온도 분포가 나타나며 3m 구간에서 나타나는 낮은 온도는 그 구간에 많이 분포하는 절리 때문으로 판단된다.

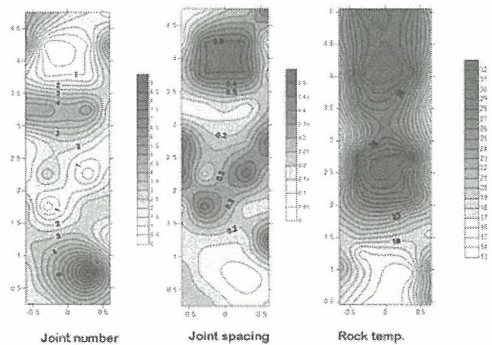


Fig. 1. Distribution of joint and peak rock temperature in rock.

### 3. 시추공히터시험 열해석

시추공히터시험에서 측정된 암반 내 온도 분포와 컴퓨터 해석 결과와 비교하기 위해 FLAC3D를 사용하였다. 본 해석에서는 히터에서 발생하는 열과 터널 벽면으로의 열손실과 암반 손상구

간의 영향을 함께 고려하기 위해 Fig.2와 같은 모델 격자망을 구성하였다. 격자망은 60x60x60m로서 6.5m 크기의 터널과 0.1m 직경의 히터공을 모사할 수 있도록 작성되었다. 터널벽면에서 1m 거리는 굴착시 발파작업으로 손상을 입은 암반손상 구간으로 이 구간의 열전도도는 원암(3W/m<sup>2</sup>K)에 비해 낮은 2W/m<sup>2</sup>K로 가정하였다. 현장시험과 같이 히터의 온도는 20°C에서 90°C까지 상승시킨 후 장기간 안정화될 때까지 유지시켰으며 이후 비정상 과열상태의 모사를 위해 120°C 까지 히터 온도를 증가시키면서 암반에서의 온도변화를 계산하였다. Fig.3 은 약 100개에 달하는 온도센서에서 측정된 최대온도값과 모델링에서 계산된 최대온도값을 비교하여 보여준다. 히터공에서 0.9m 떨어진 관측공의 온도 예측값은 실측값과 매우 유사한 변화 양상을 보이고 있다. 하지만 0.3m 떨어진 곳에서는 실측값과 상대적으로 많은 차이를 보이고 있다. 이는 암반 내에 존재하는 불연속면의 영향이 히터공 주변에서 보다 크게 나타난다는 것으로 볼 수 있다. 따라서 보다 정확한 모델링을 위해서는 불연속면을 고려한 해석을 실시해야 할 것으로 판단된다. 0.6m 관측공의 각 측정 지점에서의 온도값은 실측값과 예측값에 차이가 있으나 최대, 최저온도나 전반적인 변화양상은 비교적 유사하게 나타남을 알 수 있다.

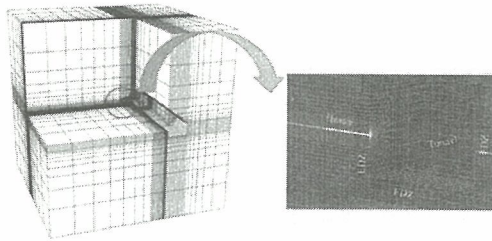


Fig. 2. Model mesh for BHT modeling.

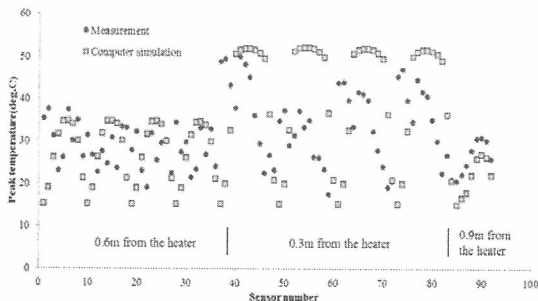


Fig. 3. Comparison of the peak temperatures from the measurement and modeling.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 상용코드인 FLAC3D를 이용하여 원자력연구원내 지하처분연구시설에서 수행된 현장 시추공히터 시험에 대한 모델링을 실시하였다. 모델링을 통해 전반적인 온도 변화 양상이나 최대,최소값은 실측값과 유사하게 예측할 수 있었다. 다만 암반 내 온도 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나는 암반 내 불연속면의 영향을 모델링으로 구현하기 위해서는 추가적인 해석이 필요한 것으로 나타났다.

#### 5. 감사의 글

이 논문은 한국원자력연구원(45519-01)과 인하대학교(INHA-44095)의 지원에 의하여 수행되었음.

#### 6. 참고문헌

- [1] Cho, W.J. & Kwon, S., 2010. Estimation of the thermal properties for partially saturated granite, *Engineering Geology*. 115,132-138.
- [2] Kwon, S. Choi, W.J. Choi, J.W., 2011. Initial Thermal Conditions around an Underground Research Tunnel at Shallow Depth. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci.* 48, 86-94.