

## KURT 내 열전달계수 결정에 관한 실험적 연구

윤찬훈<sup>1)\*</sup>, 권상기<sup>2)</sup>, 김진<sup>3)</sup>

### Experimental Study on the Determination of Heat Transfer Coefficient for the KURT

Chan-Hoon Yoon, Sang-Ki Kwon, Jin Kim

**Abstract** In cases of high-level radioactive waste repositories, heat load is apparent by radioactive waste decay. The safety of a waste repository would be influenced by changing circumstances caused by heat transfer through rock. Thus, a ventilation system is necessary to secure the waste repository. The first priority for building an appropriate ventilation system is completing a computer simulation research with thermal rock properties and a heat transfer coefficient. In this study, the heat transfer coefficient in KURT was calculated using the measurement of inner circumstance factors that include dry bulb and wet bulb temperature, rock surface temperature, and barometric pressure. The heater that is 2 m in length and 5 kw in capacity heats the inside of rock in the research module by 90°C. As a result of determining the heat transfer coefficient in the heating section, the changes of heat transfer coefficient were found to be a maximum of 7.9%. The average heat transfer coefficient is approximately  $4.533 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$ .

**Key words** High-level Radioactive Waste, Heat Transfer Coefficient, KURT, Rock Surface Temperature, Natural Convection

**초 록** 고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 폐기물의 방사성 붕괴에 의해 발열 현상이 나타나게 되며, 암반을 통한 열전달에 의해 처분장 주변 환경이 변화됨으로써 처분장의 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 처분장의 안전성 확보를 위해선 적절한 처분장 내 환기장치가 필요하다. 적절한 환기시스템의 구축을 위해서는 암반 열물성치와 처분장 내 열전달계수의 산정을 통한 컴퓨터 시뮬레이션 연구가 핵심이라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 KAERI Underground Research Tunnel(이하 KURT) 내부 환경 인자(건습구온도, 암반표면온도, 대기압)들의 측정을 통해 열전달계수를 산정하는 것에 초점을 맞추었다. KURT 내부 우측 연구모듈의 막장 벽면에 길이 2 m, 용량 5 kw의 히터가 90°C로 암반 내부를 가열하고 있는 히터구간의 열전달계수 산정 결과, 태양의 위치에 따른 처분장 외부 대기의 온도변화에 의해 열전달계수의 수치 변화가 최대 7.9% 발생하였으며, 평균 열전달계수  $h$ 는 약  $4.533 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 의 수치를 나타내었다.

**핵심어** 고준위 방사성 폐기물, 열전달계수, KURT, 암반표면온도, 자연대류

## 1. 서론

고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 처분 동굴 하부에 밀봉되는 처분용기는 밀봉 후 고준위 폐기물의 방사성 붕괴에 의해 상당기간 동안 발열을 하게 되며(완충

재 사용 유무에 따라 100°C~150°C), 암반을 통한 열전달, 암반 표면으로부터의 대류, 지하수 유입에 의한 열전달 등에 의해 처분 동굴의 대기온도 상승에 큰 역할을 하게 된다. 이러한 대기온도의 상승은 처분장 내 작업 환경 및 처분된 고준위 폐기물의 안전성에 악영향을 미치게 되므로 처분장의 절대적인 안전을 위해 적절한 환기시스템이 반드시 필요하다. 적절한 환기시스템에 의한 열 제거는 주위의 완충재를 포함하는 암반에서 발생하는 열전도, 열대류, 열복사 등과 같은 인자들을 수치 모델링을 통해 분석함으로써 결정될 수 있을 것이다(김진 등, 2005). 이들 인자 중 암반 내 처분장의 환경

<sup>1)</sup> 인하대학교 환경공학과 박사과정

<sup>2)</sup> 한국원자력연구원 고준위폐기물처분 연구부

<sup>3)</sup> 인하대학교 사회기반시스템공학부 부교수

\* 교신저자 : yoon0940@hanmail.net

접수일 : 2009년 11월 11일

심사 완료일 : 2009년 11월 24일

게재 확정일 : 2009년 12월 9일

은 주로 암반과 공간의 열전달에 의해 좌우되는데, 이는 암반의 열물성, 처분 공간의 형태, 지하수 용출여부, 계절 등에 크게 영향을 받게 된다.

본 연구의 궁극적인 목표는 방사성 폐기물 처분장 즉, 지하 암반으로 둘러싸인 공간의 온도분포를 예측하고 조절하는 것이며, 과거 이와 유사한 연구들이 진행되어 왔다. 외국의 경우, YUCCA MOUNTAIN 내 저장고에서의 열전달 대류계수에 관한 연구(Roald Akberov et al, 2003) 에서 강제대류 시 방사열에 의한 열전달은 매우 미미하여 무시하여도 무방하다는 결과를 보였다. 그리고 국내의 경우는 군수물자 저장창고를 대상으로 지하 공간 내 온도-습도의 예측 시뮬레이션 모델을 개발하기 위한 암반의 열물성에 관한 실험(이창우, 1996) 이 실행되었으며, 지하 암반 냉동 저장고 주변의 온도분포 예측을 위한 암반 열물성에 관한 수치해석(이규상 등, 2004) 이 수행되었다. 그리고 암석의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 수치해석(안형준 등, 1997) 및 환기에 따른 콘크리트의 열전달 대류계수에 관한 실험(Yun Lee et al, 2009) 등이 연구되었다.

이러한 경향에 따라 한국원자력연구원에서는 고준위 폐기물 처분시스템의 다양한 현장 실증연구를 위해 연구소 내 지하처분연구시설인 KURT를 건설하였다. 결정질 화강암반에 위치하고 있는 KURT는 터널크기 6 m × 6 m로서 하향구배 10%의 180 m의 진입터널과 75 m의 연구모듈 터널로 구성되어 있다(조원진 등, 2007). 연구모듈 터널은 각각 좌우로 나뉘어 30 m, 45 m로 굴착되어 열, 수리, 역학적, 화학적, 미생물 거동과 관련된 다양한 현장 실험이 실시되고 있다. 본 연구에서 시험을 실시한 연구모듈 터널은 시추공 히터시험(Borehole heater test, BHT) 구간으로써, KURT 우측 연구모듈 막장 벽면에 길이 2 m, 용량 5 kw의 히터가 90°C로 암반 내부를 가열하고 있고, 주변으로 15개의 관측공이 천공되어 있다. 터널 환기에 의한 열손실을 차단하기 위해 히터 시험구간에는 차단벽이 설치되어 있으며, 히터온도, 암반온도, 실험공간온도 및 습도 등을 자동 또는 수동으로 기록하고 있다.

고준위 방사성 폐기물 처분장과 같은 지하 암반으로 둘러싸인 환경에서의 대기온도를 예측하는 것은 향후 건설 될 또 다른 처분장들의 안전성 확보 차원에서 매우 중요하다. 대기온도의 예측을 위해서는 지하암반의 열전도도, 열확산도, 열구배, 점성계수 등과 같은 열물성치를 각종 실험 및 계측을 통하여 산출하고, 지하 암반에서 대기로 전달되는 열, 즉 열속(Heat flux) 결정 후 컴퓨터 시뮬레이션 연구가 진행되어야 한다. 이 때, 열속은 열전달계수 및 암반표면온도와 대기온도의 온도차에 대한 함수이므로, 열전달계수의 산출은 지하 공

간 온도 예측 시뮬레이션 연구의 핵심이라고 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 KURT 내 히터구간 모듈에서의 열전달 계수 결정을 위해 실험공간의 건-습구 온도, 대기압, 암반표면온도를 2009년 8월 25일부터 8월 26일까지 2일에 걸쳐 측정하였다.

## 2. 열전달이론

지하 공간 환경인자들의 실측을 통해 KURT 내 히터구간에서의 열전달계수를 산출하는 것이 본 연구의 목표이다. 히터구간은 현재 차단벽이 설치되어 있어 외부로부터의 공기유입은 없는 상황이므로 현재 히터구간은 자연대류(Natural convection)상태임을 알 수 있다. 전체 열전달계수는 식 (1)과 같이 대류열전달계수( $h_c$ )와 복사열전달계수( $h_r$ )로 구성되어 있는데 복사열전달계수에 수분에 의해 제거되는 열을 나타내는 흡수분율  $a_b$  (Absorption fraction)을 곱한 수치와 대류열전달계수와 의 합으로 나타난다.

$$h = h_c + a_b h_r \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (1)$$

$a_b$  에 대한 자세한 설명은 2.2의 복사열전달계수에서 다루어 질 것이다.

### 2.1 대류열전달계수

#### (Convection Heat Transfer Coefficient, $h_c$ )

대류열전달계수는 암반표면의 온도와 대기온도 사이의 차이에 비례하는 형태로 나타나며, 이는 기체의 물성 값이 아니라 기체의 유동형태에 의존된다. 본 연구가 진행된 KURT 내 히터구간에서는 기체의 운동이 극단적으로 느려지게 되는 자연대류의 상태이므로 열전달의 많은 부분은 복사열전달에 의해 일어날 것이다. 그리고 대류열전달의 영향 역시 무시 할 수 없을 것으로 예상된다. 식 (2)에서 대류열전달계수는 누셀트 수(Nusselt number)와 공기의 열전도도를 터널 대표직경으로 나눈 수치이며, 본 연구에서 실측된 실험공간온도(약 20°C)를 통한 산출된  $k_a$ 는 약 0.0257 [ $W/m \cdot K$ ]로서 시간에 관계없이 거의 일정한 값을 나타냈다.

$$h_c = \frac{N_u k_a}{d} \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (2)$$

$k_a$  = Thermal conductivity of air  
( $2.2348 \cdot 10^{-4} T^{0.8353}$  [ $W/m \cdot K$ ])

$d$  = Hydraulic mean diameter[m]

$h_c$  는 강제대류의 경우 경계층의 두께에 의해 결정되며, 또한 공기의 유속과 벽면의 마찰에 의해 발생하는 난류의 흐름에 의해 결정되므로, 마찰계수와 레이놀즈의 함수가 된다. 그러나 자연대류의 상태에서는 식 (3)와 같이 기체의 밀도차에 의한 부력을 나타내는 그라스프 수(Grashof number)와 자연대류 시( $\frac{G_r}{R_e^2} \gg 1$ ) 열전달

특성을 나타내는 레일리 수(Rayleigh number), 그리고 운동량 확산과 열확산의 비를 나타내는 프란틀 수(Prandtl number)의 함수로서 누셀트 수( $N_u$ )를 표현하게 된다. 즉, 강제대류(Forced convection)에서 레이놀즈수가 난류로의 천이를 판정하는 역할을 하는 것처럼 자연대류에서는 그라스프 수( $G_r$ )가 그 역할을 대신하게 된다. 본 식에서  $N_{uo}$  값은 0.36 $\pi$ (Churchill, S.W, 1983)로서 터널과 같은 수평 실린더 형상일 때 누셀트 수를 결정하는 인자를 나타낸다.

$$N_u = [N_{uo}^2 + R_a^{\frac{1}{6}} \left( \frac{1 + \left( \frac{0.5}{P_r} \right)^{\frac{9}{16}}}{300} \right)^{\frac{-16}{9}}]^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

누셀트 수는 전도열전달에 대한 대류열전달의 비율로 정의되며, 무차원 온도구배를 나타내는 무차원 수이다. 식 (4)의 레일리 수는 그라스프 수와 프란틀 수의 곱으로 나타나게 되며, 식 (5)의 5가지 인자들을 통해 그라스프 수가 결정 된다.

$$R_a = G_r \times P_r \quad (4)$$

$$G_r = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (5)$$

$\beta$  = Volume expansivity [ $K^{-1}$ ]

$\Delta T$  = Temperature difference between  
the hot surface & the bulk fluid [K]

$L$  = Characteristic length [ $\pi D/2$ , m]

$\nu$  = Kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]

그리고 프란틀 수는 암반표면 위를 지나가는 공기에서 발달하는 속도 및 온도경계층과 이의 상대적인 크기를 나타내는 무차원수이며, 보통 공기나 다른 기체의 경우 0.7에서 0.8 사이의 값을 가지게 된다. 이에 본 연구에서는 KURT 내 히터구간에서 측정된 건구온도를 기준으로 300K에서 0.707의 값을 적용하였다.

## 2.2 복사열전달계수

### (Radiation Heat Transfer Coefficient, hr)

복사열이란 방사성에 의한 열전달, 원자의 진동에 의해 발생하는 열을 말한다. 일반적으로 수증기, 이산화탄소가 이 열을 흡수하여 온도가 증가하는데, 산소, 질소는 이러한 작용이 없다.

$$h_r = 4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times T_{av}^3 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (6)$$

식 (6)은 복사열전달계수 산출을 위한 수식으로서,  $T_{av}$ 는 어떤 두 지점에서의 평균온도를 의미하는데, 보통 대기의 건구온도를 나타낸다. 그리고 식 (1)에서 전술한 바와 같이 열전달계수는 대류열전달계수와 복사열전달계수의 합으로 이루어져 있으며, 흡수분율(Absorption fraction,  $a_b$ ) 이라는 상수가 포함되어 있다. 흡수분율은 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$a_b = 0.104 \ln(147XL) \quad (7)$$

여기서,  $L$ 은 방열거리(Mean radiation path length)로서 보통 3D로 정해진다. 그리고  $X$ 는 공기 중에 수분입자들이 얼마나 포함되어 있는가를 나타내는 Moisture content로서 식 (8)에 정리 되어있다.

$$X = 0.622 \times \frac{e}{P-e} \left[ \frac{kg}{kg \text{ dry air}} \right] \quad (8)$$

$P$  = Barometric Pressure [kPa]

$e$  = Actual Vapor Pressure [kPa]

기압  $P$ 는 시간에 따른 고도를 측정하여 KURT 내 대기압으로 적용하였다. 그리고  $e$ 는 실제 수증기압으로 식 (9)과 같이 습윤 수증기압(Saturation vapor pressure)을 이용하여 산정된다.

$$e = e_{sw} - AP\Delta T \quad (9)$$

$A$  = Psychrometric 'constant' [kPa/°C]

$P$  = Barometric Pressure [kPa]

$\Delta T$  =  $t_d - t_w$  [°C]

$$e_{sw} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 \times t_w}{237.7 + t_w}\right)$$

식 (9)의  $A$ 는 Psychrometric constant로서 보통 0.000644의 값을 가지며,  $\Delta T$ 는 건구온도와 습구온도의 차이를 나타낸다.

### 3. 연구방법

고준위 방사성 폐기물 처분장 내의 온도 예측을 위한 환경인자인 건구온도, 습구온도, 암반표면온도 및 대기 압을 측정하였으며, 이들에 걸쳐 오전 10시부터 오후 5시까지 실측이 이루어졌다. 그리고 자연대류상태에서의 열전달계수 산정을 위해 별도의 환기시설은 가동하지 않았다.

#### 3.1 측정장소

KURT는 한국원자력연구소 부지 후면 산지에 건설된 연구시설로서 심부 암반에 건설된 고준위폐기물처분장의 환경을 모사할 수 있고, 방사성 물질을 전혀 사용하지 않는 비방사성 시설이다. 터널크기는 6 m × 6 m로서 하향구배 10%의 180 m의 진입터널과 75 m의 연구모듈 터널로 구성되어 있다. KURT 내부를 지탱하고

있는 암반은 결정질 화강암반이며, 본 연구에서 실측이 이루어진 히터구간은 90°C로 발열되고 있는 히터로 인해 건조한 암반표면인 상태를 보이고 있다. Fig. 1은 KURT의 입구를 나타낸 것으로 외부인의 무분별한 출입을 막기 위하여 철문이 설치되어 있으며, 작업자 및 방문자들을 위한 급기 및 배기 시설이 마련되어 있다. Fig. 2는 입구로부터 연구모듈까지 연결된 하향구배 10%의 진입터널로서 원활한 장비 및 작업자의 진출입을 위해 바닥 콘크리트가 타설되어 있다.

진입터널을 지나 연구모듈 우측에 약 45 m 깊이로 굴착되어 있는 히터시험구간은 터널 환기에 의한 열손실을 차단하기 위해 히터 시험구간에는 Fig. 3과 같이 차단벽이 설치되어 있으며, Fig. 4와 같이 막장 벽면에 길이 2 m, 용량 5 kw의 히터가 90°C로 암반 내부를 가열하고 있고, 주변으로 15개의 관측공이 천공되어 있다.

벽면의 히터 및 습도 조절장치로 인하여 암반표면은



Fig. 1. KURT 진입터널 입구



Fig. 2. 진입터널 내부



Fig. 3. 히터구간 입구 차단벽



Fig. 4. 암반벽면의 히터 설치 현황

Fig. 5와 같이 건조한 상태로 나타내고 있기 때문에 본 연구에서는 열전달계수 산정 시 고려해야 할 습윤한 암반 조건을 제외하였다.

### 3.2 측정방법

히터구간 모듈에서의 열전달 계수 결정을 위해 실험 공간의 건-습구 온도, 대기압, 암반표면온도를 오전 10시부터 오후 5시까지 30분 간격으로 계측을 실시하였다. 열전달 산정에 필요한 건구온도 및 습구온도는 Fig. 6과 7의 기기를 동시에 사용하여 보정하였다. Fig. 6은 온도 및 습도를 디지털 화면으로 보여주는 장비로서 독일의 Lufft사의 E200 모델이며 -20°C에서 50°C의 온도범위에서  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 의 정밀도를 가진다. Fig. 7의 Sling Psychrometer는 영국의 ERTCO사의 PS100F 모델로서 건구 및 습구온도의 측정이 가능하며 상대습도 결정도 가능하다. 온도는  $30^\circ\text{F} \sim 100^\circ\text{F}$ 의 범위를 가진다.

암반의 표면온도는 히터가 삽입된 위치를 중심으로 전방위 30 cm 거리의 온도를 평균하여 사용하였는데,

Fig. 8의  $-32^\circ\text{C} \sim 535^\circ\text{C}$ 까지 측정 가능하며 대기온도  $-18^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$ 에서는  $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 정밀도를 나타내는 미국의 Raytak사 제품 ST20-Pro를 사용하였다.

그리고 측정범위 0.2 m~200 m를 가지며  $\pm 3$  mm의 정밀도를 나타내는 오스트리아의 Leica사 제품 DISTO™ lite를 사용하여 히터구간의 대표직경 및 형상들을 측정하였다(Fig. 9). 열전달계수 산정 시 필요한 히터구간의 대기압은 Fig. 10의 미국 American Paulin System사의 Model T-5 altimeter를 사용하여 시간에 따른 고도 측정 후 대기압으로 환산하였다.

## 4. 연구결과

고준위 폐기물 처분장의 경우 방사성 동위원소의 붕괴 현상으로 인한 발열과정으로 처분장 내 대기온도가 오랜 시간에 걸쳐 상승될 것이며, 이는 처분장을 이용하는 작업자 및 방문자들에게 치명적인 영향을 끼치게 될 것이다. 처분장 암반 내부에서 발열하는 열원에 의

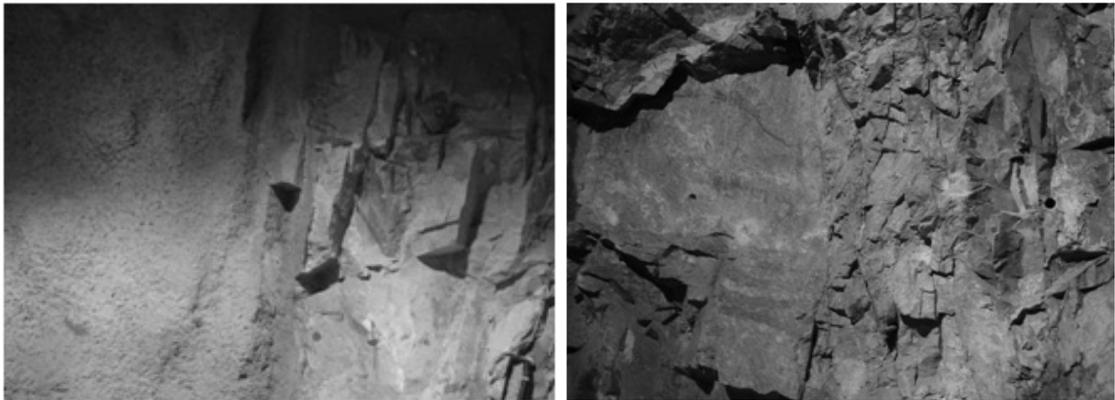


Fig. 5. 히터 구간 암반표면상태



Fig. 6. 온습도 기기 E200



Fig. 7. Sling Psychrometer PS100F



Fig. 8. 암반표면온도 측정 장비 ST20-Pro



Fig. 9. 거리 측정 장비 DISTO™ lite



Fig. 10. 고도 측정 장비 Model T-5 altimeter

Table 1. 대기 환경인자 실측치

시간	8월25일 1st. Measurement[°C]			8월26일 2nd. Measurement[°C]		
	암반표면온도	건구온도	습구온도	암반표면온도	건구온도	습구온도
10:00	21.4	20.22	17.67	21.6	20.28	17.44
10:30	21.5	20.33	17.56	21.5	20.28	17.11
11:00	21.5	20.39	17.94	21.6	20.39	17.67
11:30	21.7	20.44	17.44	21.8	20.28	17.39
12:00	21.7	20.39	17.33	21.9	20.33	17.94
12:30	21.8	20.39	17.67	21.7	20.39	18.06
13:00	21.8	20.44	17.78	21.9	20.39	17.67
13:30	21.8	20.44	17.61	21.8	20.39	18.06
14:00	22.0	20.44	17.94	21.8	20.39	17.33
14:30	22.1	20.39	17.50	21.9	20.39	17.78
15:00	22.2	20.39	17.33	22.1	20.28	17.61
15:30	21.6	20.39	17.67	21.8	20.22	17.89
16:00	21.5	20.56	17.33	21.7	20.44	18.06
16:30	21.6	20.44	17.72	21.8	20.28	17.94

해 상승하는 대기온도를 예측하기 위해서는 처분장 내 환경인자 분석과 열전달계수의 결정을 통한 시뮬레이션 연구가 필요 할 것이다. 이에 본 연구에서는 한국 원자력연구소 내부에 설치된 KURT 시설을 이용하여 히터구간 내부의 환경인자들을 측정하고 분석하여 열전달계수를 결정하였다.

히터구간 내부의 환경인자 측정 이전에 외부 대기를 측정한 결과 오전 10시 온도는 각각 약 22.11°C, 25.56°C 이었으며, 습도는 각각 약 70.5%, 69.6%를 나타내었다. 그리고 하루 중 가장 뜨거운 오후 2시에는 각각 약 29.44°C, 29.50°C이었고, 습도는 약 53.8%, 52.5%로 이들 모두 비슷한 양상을 나타내었다. Table 1은 양일

에 걸친 KURT 내부 환경인자의 측정 결과로서, 25일 오전 10시의 외부 대기 온도가 26일에 비해 약 3.45°C 가량 낮은 수치를 나타내었다.

#### 4.1 히터구간 형상

히터구간 내 대기의 환경인자 측정에 앞서 향후 시뮬레이션에 적용 될 형상을 DISTO™ lite 기기를 사용하여 측정하였다. KURT 설계 및 시공 시 결정된 보강 후 단면적은 6 m × 6 m이나 발파작업으로 인하여 Fig. 11과 12와 같이 실제 측정치와 약간의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 이러한 일정하지 못한 터널 벽면의 형상은 마찰계수에 큰 영향을 주게 되며, 환기시스템 가

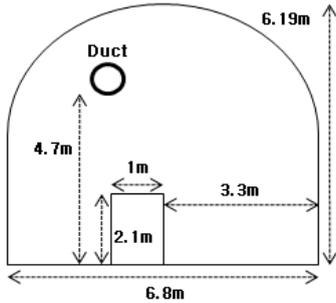


Fig. 11. 히터구간 단면 형상

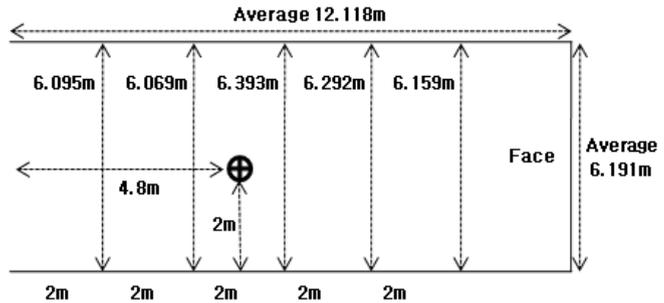


Fig. 12. 히터구간 측면 형상

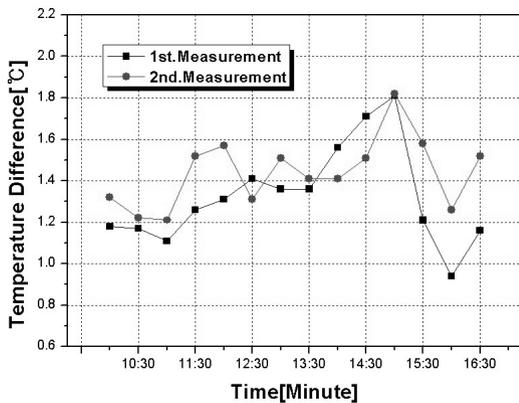


Fig. 13. 암반표면온도와 대기온도 차

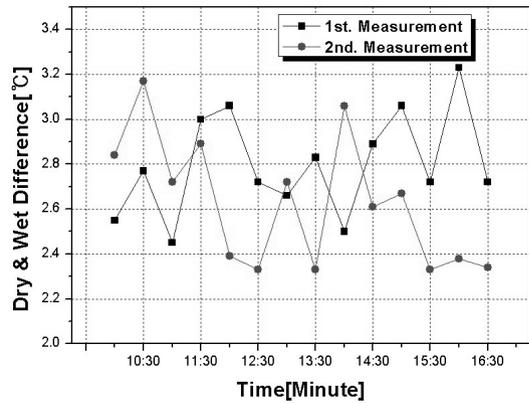


Fig. 14. 건습구 온도차

동 시 강제대류 현상으로 인해 공기 유동의 변화에 민감한 대류열전달계수 결과에 큰 변화를 가져올 것으로 예상된다.

단면을 기준으로 가로의 길이는 약 6.8 m로 측정되었으며, 측면은 2 m 간격으로 높이를 측정하여 평균을 낸 결과 약 6.19 m를 나타내었다. 히터구간 내 환기 덕트가 설치되어 있으나 자연대류상태의 열전달계수를 결정하기 위해 환기기 가동은 이루어지지 않았다.

#### 4.2 암반 표면온도 및 건습구온도 측정 결과

KURT 내부의 히터구간에서 90°C로 가열되는 Heater가 삽입된 암반벽면의 표면온도와 실험공간온도를 측정된 결과 두 온도의 차이는 Fig. 13에서 나타난 바와 같이 각각 0.94°C~1.81°C, 1.21°C~1.82°C로서 오전부터 서서히 증가하였고, 오후 2시 이후 최고치에 도달하였으며 그 이후 점차 감소하였다. 이는 KURT 외부 대기의 온도변화 추이와 흡사한 결과를 나타내고 있다. Fig. 14는 실제 수증기압(Actual vapor pressure) 결정 시 필요한 건습구 온도차로서 두 차례 측정에서

약 2.3°C~3.2°C의 차이를 나타내고 있다.

Fig. 13과 14 모두 측정상의 오차로 인하여 그래프 상에서는 수치들의 변화폭이 다소 큰 것으로 나타나지만 실제로는 최대 약 1°C가량 차이로써 열전달계수 산정에는 큰 차이가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

#### 4.3 열전달계수 산정 결과

히터구간은 자연대류 상태이므로 열전달계수를 결정하기 위해서는 레일리 수( $Ra$ ), 그라소프 수( $G$ ) 및 프란틀 수( $Pr$ )를 이용하여 누셀트 수( $Na$ )를 산정하여 결정된다. 이틀간 각각의 평균 대류열전달계수  $h_c$ 는 2.376  $W/m^2 \cdot K$ , 2.444  $W/m^2 \cdot K$ 이고, 복사열전달계수  $h_r$ 은 5.737  $W/m^2 \cdot K$ , 5.733  $W/m^2 \cdot K$ 의 결과를 나타내었다. 그리고 두 계수의 변화 추이는 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다.

$h_c$ 의 경우 Fig. 13의 암반표면과 실험공간의 온도 차이와 같은 추이를 보여주고 있으며  $h_r$ 은 암반표면과 실험공간온도 차이 대신 실험공간의 건구온도변화와 흡사한 패턴을 나타내었다. 이러한 결과는 식 (5)의 암반표

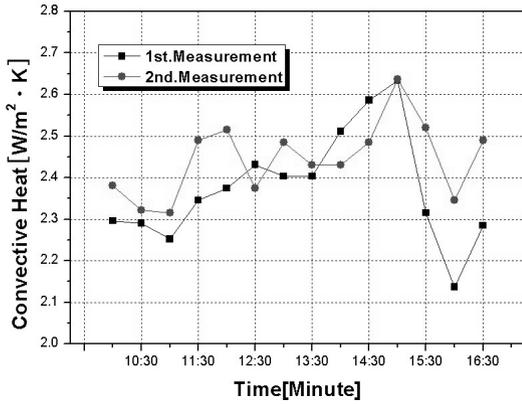


Fig. 15. 대류열전달계수 변화

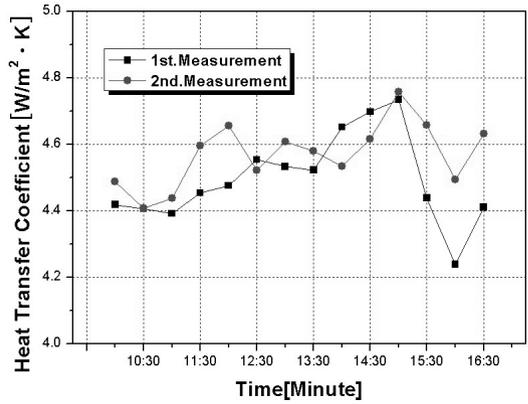


Fig. 17. 열전달계수 변화

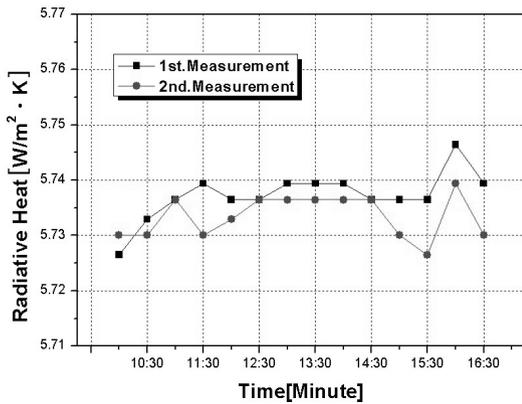


Fig. 16. 복사열전달계수 변화

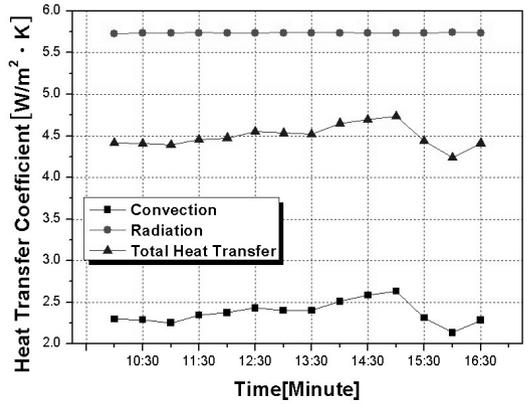


Fig. 18. 1st. 전체 열전달계수 변화(8.25)

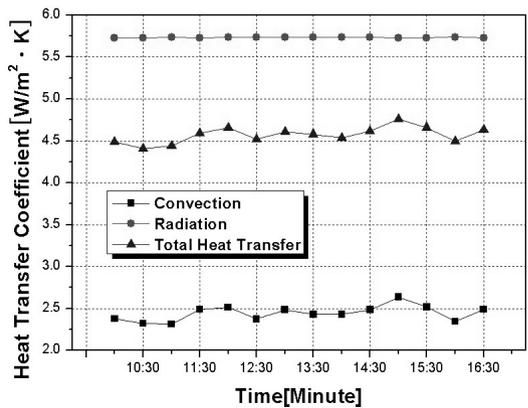


Fig. 19. 2nd. 전체 열전달계수 변화(8.26)

면온도와 대기온도차이로 결정되는 그라스프 수( $G_r$ )에 의해 대류열전달계수가 산정되게 되며, 식 (6)에서 대기의 온도변화에 의해 복사열전달계수가 결정되기 때문임을 확인할 수 있다.

Fig. 17은 열전달계수  $h$ 의 변화를 나타내고 있는데 태양의 위치에 따른 처분장 외부 대기의 온도변화에 의한 열전달계수의 수치 변화가 최대 7.9% 발생하였으며 두 차례 평균 수치는 약  $4.495 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,  $4.571 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 산정되었다. 그래프 상에서 볼 때 전체 열전달계수의 변화는 대류열전달계수와 거의 같은 추이를 보여주고 있는데, 이는 결국 열전달계수 변화 역시 압반표면과 실험공간의 온도 차이에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 18과 19 모두 두 차례에 걸친 대기 환경인자 측정으로 결정된 전체 열전달계수 변화를 보여주고 있는데, Fig. 16에서와는 달리 복사열전달계수의 변화가 다른 계수들에 비하여 미미한 것으로 나타나며, 전체 열전달계수의 변화는 대류열전달계수의 변화에 기인함을

알 수 있다. 자연대류의 상황이므로 대류열전달계수의 수치는 가장 작지만 복사열전달계수의 변화가 상대적으로 작아서 전체 열전달계수의 변화에 큰 영향을 주는

것으로 판단된다.

지하공간에 있어서 열전달계수는 그 특성상 외부 공기의 온도, 지하 암반표면의 온도, 지하 대기의 온도에 의해 많은 변화가 예상된다. 즉, 계절에 따라 외부 대기의 온도 및 습도가 달라지므로 열전달계수에 큰 영향을 주게 될 것이다. 또한 지하암반의 수분함량 상태 역시 큰 변화 요인이 될 것이다. 그리고 환기기 가동 시 강제 대류 조건으로 인해 복사열전달계수의 수치에 비해 대류열전달계수의 수치는 많은 변화가 생길 것이며, 우천시 외부대기의 유입으로 인해 지하 저장소의 온도와 습도에 큰 변화가 생길 것으로 판단된다. 이렇듯 방사성 폐기물 처분장의 대기조건을 결정짓는 열전달계수는 일정한 수치가 아니므로 여러 가지 조건에 따라 계수를 결정하여 지하 대기 온도 예측 시뮬레이션에 다양하게 적용되어야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고준위 핵폐기물 처분 시 발생하는 열이 처분장 내부의 대기온도에 미치는 영향을 분석하고 예측하기 위하여 한국원자력연구소 내 고준위처분시스템의 실증을 위해 건설된 지하처분연구시설(KURT)에서의 열전달계수 결정에 관한 실험을 진행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) KURT 내부의 히터구간에서 90°C로 가열되는 히터가 삽입된 암반벽면의 표면온도와 실험공간온도를 이틀간 오전 10시부터 오후 5시까지 측정한 결과, 두 온도의 차이는 각각 0.94°C~1.81°C, 1.21°C~1.82°C로써 오전부터 서서히 증가하였고, 오후 2시 이후 최고치에 도달하였으며 그 이후 점차 감소하였다. 이는 KURT 외부 대기의 온도변화 추이와 흡사한 결과를 나타낸다.
- 2) 측정 시 히터구간은 별도의 환기가 없는 자연대류 상태이며, 이틀간 각각의 평균  $h_c$ 는 2.376 W/m<sup>2</sup>·K, 2.444 W/m<sup>2</sup>·K이고,  $h_r$ 은 5.737 W/m<sup>2</sup>·K, 5.733 W/m<sup>2</sup>·K의 결과를 나타내었다.  $h_c$ 의 경우 암반벽면 온도와 실험공간온도의 차이에 민감하였으며,  $h_r$ 은 대기의 건구온도변화와 흡사하였다. 그리고 태양의 위치에 따른 처분장 외부 대기의 온도변화에 의해 열전달계수의 수치 변화가 최대 7.9% 발생하였다.

- 3) KURT 내 히터구간의 전체 열전달계수는 각각 4.495 W/m<sup>2</sup>·K, 4.571 W/m<sup>2</sup>·K로 산정되었으며 분석결과 구간의 대기 흐름이 자연대류를 감안할 때 열전달계수의 경향에 큰 영향을 주는 인자는 복사열전달계수가 아닌 암반표면과 대기온도 차이로 인한 대류열전달계수의 변화인 것으로 판단된다.
- 4) 두 차례의 KURT 내 히터구간의 측정결과 평균  $h_c$ 는 약 2.41 W/m<sup>2</sup>·K,  $h_r$ 은 약 5.735 W/m<sup>2</sup>·K로써 평균 열전달계수는 약 4.533 W/m<sup>2</sup>·K라는 결과를 나타내었다. 결국, KURT 내 히터구간의 열전달계수  $h$ 는 환기기 가동이 없는 자연대류일 경우 약 4.533 W/m<sup>2</sup>·K이며, 이러한 결과를 이용하여 향후 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 대기온도 예측 시뮬레이션에 활용할 수 있으리라 판단된다.

## 참고문헌

1. 김진, 권상기, 2005, 한국형 방사성 폐기물 처분장을 위한 환기시스템 전략, Journal of the Korean Radioactive Waste Society, vol. 3(2), pp. 135-148.
2. Roald Akberov, Darrell W. Pepper, Yitung Chen, 2003, Modeling convective heat transfer around a waste cask stored in the YUCCA mountain repository, The 6th ASME-JSME Thermal engineering Joint Conference, Hawaii, U.S.A.
3. 이창우, 1996, 암반 열물성과 지하공간 환경분석 연구, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground space, vol. 6, pp. 335-341.
4. 이규상, 이정인, 2004, 지하암반 냉동저장고 주변의 온도 분포 예측을 위한 수치해석, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground space, vol. 14, No. 4, pp. 287-294.
5. 안형준, 이희근, 1997, 암석의 온도의존성을 고려한 열-수-라-역학적 상호작용의 수치해석적 연구, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground space, vol. 7, pp. 13-19.
6. Yun Lee, Myoung-Sung Choi, Seong-Tae Yi, Jin-Keun Kim, 2009, Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete, Cement & Concrete Composites, vol. 31, pp. 60-71.
7. 권상기, 조원진, 2007, 고준위폐기물 처분연구를 위한 지하처분연구시설에서의 암석역학 관련 연구, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground space, vol. 17, No. 1, pp. 43-55.
8. Churchill, S.W, 1983, Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere, Free convection around immersed bodies. Chapter 2.5.7.



### 윤 찬 훈

2002년 인하대학교 자원공학과 공학사  
2004년 인하대학교 자원공학과 공학석사

Tel: 032-872-7551  
E-mail: yoon0940@hanmail.net  
현재 인하대학교 환경공학과 박사과정 재  
학중



### 김 진

1987년 인하대학교 공학사  
1990년 미국 University of Kentucky 공학  
석사  
1995년 미국 University of Missouri-Rolla  
공학박사

TEL: 032-860-7558  
E-mail: jinkim@inha.ac.kr  
현재 인하대학교 사회기반시스템공학부  
부교수



### 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 고준위폐기물처  
분 연구부