

## 내부열원을 갖는 Top-vented 원통형 밀폐공간에서의 자연대류 연구

강권호, 신현규\*, 신치범\*, 유재석\*, 김 철\*, 박영무\*

한국원자력연구소, \*아주대학교

### 요약

본 연구에서는 감손우라늄 폐기물칩의 처리 장치인 공기조절식 산화장치의 열전달 특성을 실험적으로 해석하였다. 감손우라늄칩의 산화처리시 발생하는 산화열에 의한 장치 내부의 온도상승 및 외부로의 열전달을 해석하기 위해 산화장치 내부에 히터를 설치하여 실험을 수행하였으며, 히터의 발생열량을 달리하면서 시간에 따른 열전달 특성을 알아보기 위하여 Nusselt수, Grashof수와 Rayleigh수를 구하고, Nusselt수와 Rayleigh수의 관계를 구하였다.

### 1. 서론

내부발열체에 의한 밀폐용기 내의 자연대류 열전달 현상은 원자로의 설계 및 반응기내의 온도분포 등 공학적으로 매우 중요한 연구대상이 되고 있으며, 이에 대한 관심이 고조되면서 이에대한 연구 역시 많은 분야에서 이루어 지고 있다. 강[1,2] 등이 개발한 공기조절식 산화장치는 우라늄칩에 직접 점화하여 산화 처리하는 방식을 취하지 않고 산화장치 내부에 우라늄칩이 산화될 수 있는 분위기를 별도의 열원에 의해 만들어 줌으로써 산화속도를 조절하여 발생하는 산화열의 냉각을 적절히 하기 위한 장치이다. 이재현[3]은 유한차분법을 이용하여 고립된 발열물체를 가지는 정사각형 밀폐공간 내에 발열체의 위치변화에 따른 자연대류 열전달 현상 및 유동 특성을 수치적으로 해석하였다. Prasad[4]등은 내부열원을 갖는 원통형 porous 밀폐공간에서 자연대류 현상을 종횡비가 1에서 20까지의 범위에서 Rayleigh수가  $10^4$  이하에서 연구를 수행하여 최대 공간온도와 총 Nusselt수의 관계식을 구하였다. Myrum[5]은 top-vented 밀폐공간에서 열원으로부터의 자연대류를 실험적으로 연구하였다.

본 연구에서는 공기조절식 산화장치를 실험 대상으로 하여 감손우라늄칩을 처리하기 전의 시험단계로서 감손우라늄칩의 산화처리시 발생하는 산화열에 의한 장치 내부의 온도상승 및 외부로의 열전달을 해석하기 위해 산화장치 내부에 히터를 설치하여 실험을 수행하였다. 히터의 발생열량을 달리하면서 시간에 따른 열전달 특성을 알아보기 위하여 열유속, Nusselt수, Grashof수와 Rayleigh수를 구하고, Nusselt수와 Rayleigh수의 관계를 구하였다.

## 2. 실험

그림 1에 실험에서 사용된 공기조절식 산화장치의 일부분인 용기와 측정계통의 개략도이다. 용기는 직경 450mm, 높이 670mm, 두께 5mm의 원통형 용기로서 스텐레스 스틸 316으로 제작되었다. 감손우라늄의 산화시 발생하는 산화열을 모사하기 위해 2kW(220V×24.6Ω)의 전기히터를 장치내부의 밑면에서 30mm 높이에 설치하였으며, 장치내부의 온도측정을 위하여 중심에서 반경방향과 밑면에서 높이방향으로 60mm×470mm, 110mm×270mm, 160mm×70mm의 위치에 열전대를 각각 설치하였다. 또한 장치벽면에서 외부로의 열전달을 측정하기 위하여 장치의 밑면으로부터 95mm, 295mm, 495mm 위치의 내외면에 각각 열전대를 설치하였다. 열전대는 0.25mm의 T-type을 이용하였으며, 시간에 따른 위치별 온도변화를 동시에 측정하기 위해 data acquisition system으로 DA2500E(Yokogawa)을 사용하였다. 여기서 측정된 data를 computer를 이용하여 2분간격으로 자동 기록하였다.

실험은 공기중(Pr = 0.7)에서 수행되었으며, 용기내부의 Rayleigh수가  $4.54 \times 10^{11} \leq Ra^* \leq 6.96 \times 10^{12}$ 의 범위에서 히터에 공급되는 전압을 조절하여 발생열을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 용기 및 내외부의 초기온도가 주위온도와 같은 상온의 조건에서 실험을 시작하여 약 300분 동안 계속되었으며 기준열전대를 DA2500E에 설치하여 시간에 따른 주위의 온도로 활용하였다.

장치외부로의 열전달 $q_z$ 를 이용하여 각 위치의 국소 열전달계수 $h_z$ 를 다음과 같이 계산하였다. 또한 외부로의 자연대류 열전달 현상을 파악하기 위해 히터의 발생열량에 따른 Nusselt수와 Grashof수 및 Rayleigh수 등의 무차원수를 각각 실험장치 밑면에서의 높이를  $z$ 로 하여 다음과 같이 정의하였다. 용기 내부의 Rayleigh수는 수정된 Rayleigh수를 사용하였다.

$$h_z = \frac{q_z}{T_{ow} - T_\infty} \quad (1)$$

$$Nu_z = \frac{h_z \times z}{k} \quad (2)$$

$$Ra_z = \frac{g\beta\Delta T z^3}{\alpha\nu} \quad (3)$$

$$Ra^* = \frac{g\beta Q D^4}{\nu a k} \quad (4)$$

여기서,  $T_{ow}$ ,  $T_\infty$ ,  $\alpha$ ,  $g$ ,  $\beta$ ,  $k$ ,  $Q$ ,  $h_z$ ,  $D$ 는 각각 외벽과 주위의 온도, 동점성계수, 열확산계수, 중력가속도, 열팽창계수, 열전도도, 히터의 발생열량, 국소열전달계수, 용기의 지름을 나타낸다.

## 3. 결과 및 고찰

본실험에서는 주로 시간에 따른 장치내부의 온도상승 및 외부로의 자연대류 열전달 특성을 파악하였다. 그림 2는 내부발열체의 발생열량이 406.5W일때의 시간에 따

른  $z=0.495\text{m}$ ,  $z=0.295\text{m}$  및  $z=0.095\text{m}$  위치의 용기벽면에서 외부로의 대류열전달과 전도열전달의 비를 나타내는 Nusselt수의 변화를 나타내었다. 그림에서 실험의 초기에 Nusselt수가 급격히 증가한후 시간이 흐름에 따라 떨어져 정상상태에 도달한다. 실험 초기에는 내부발열체에 의해 용기벽으로 전달된 열이 용기의 열용량에 의해 외벽으로 열이 전달되지 않아 외벽의 온도상승에 영향을 미치지 않으므로 외벽의 온도와 주위의 온도차가 내벽과 외벽의 온도차에 비해 상대적으로 적게 나타난다. 따라서 식(1)에서  $(T_{ow} - T_{\infty})$ 항의 값이 적어  $h_z$ 가 상대적으로 커지므로 초기의  $Nu_z$ 가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. Nusselt수가 급격히 증가되나 벽면의 온도가 올라가고 난 후인 40~50분 후에는 발생열량과, 위치에 따라서 일정한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 그림 3은 발생열량이 406.5W에서 Rayleigh수의 변화를 시간에 따라 나타내었다. Rayleigh수는 시간에 따라 초기에는 급격히 증가하다가 약 100분이 경과하면 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 어느 정도의 시간이 경과되면 정상상태에 도달되며 온도차가 일정하게 나타남으로써 Rayleigh수도 정상상태에 도달하기 때문이다. 그림 4는 정상상태에 도달된 후의 Nusselt수와 Rayleigh수의 관계를 나타냈다. 자연대류 열전달에서는 Nusselt수는 Rayleigh수의 멱승의 함수로 표현될 수 있는 것으로 널리 알려져 있다. Myrum[3]등은 Top-vented되는 용기내에 열원이 있는 경우, 물속에서 자연대류 열전달 실험을 통해 Nusselt수와 Rayleigh수와의 관계를  $Nu = 0.303 Ra^{0.279} (1.2 \times 10^4 \leq Ra \leq 3.6 \times 10^5)$ 로 제시하였다.

다음의 관계식들은 위치에 따른 정상상태에서의 Nusselt수와 Rayleigh수의 관계를 실제의 데이터들을 fitting함으로써 얻은 식이다.

$z = 0.495\text{m}$ 일 경우;

$$Nu_z = 3.69 Ra_z^{0.2673} (1.45 \times 10^8 \leq Ra_z \leq 5.1 \times 10^8)$$

$z = 0.295\text{m}$ 일 경우;

$$Nu_z = 12.91 Ra_z^{0.1443} (3.28 \times 10^7 \leq Ra_z \leq 1.2 \times 10^8)$$

$z = 0.095\text{m}$ 일 경우;

$$Nu_z = 9.13 Ra_z^{0.181} (1.0 \times 10^6 \leq Ra_z \leq 4.5 \times 10^6)$$

#### 4. 결론

내부 발열체를 갖는 Top-vented 원통형 밀폐공간에서의 열전달 특성을 알아보기 위하여 발생열량을 변화시키면서 시간에 따른 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Nusselt수는 실험초기에는 급작스럽게 증가하지만 실험시작 40~50분 후에 정상상태에 도달한다.
- (2) Rayleigh수도 위치에 따라 다소 증가의 차이는 있지만 시간에 따라 초기에는 빠르게 증가하다가 약 100분 후에는 정상상태에 도달하며, 발생열량의 증가에 따라서도 서서히 증가된다.

- (3) 본 실험으로 정상상태에서의 Nusselt수가 Rayleigh수의 멱승의 함수로 ;  
 $z = 0.495\text{m}$ 에서  $Nu_z = 3.69 Ra_z^{0.2673}$ ,  $z = 0.295\text{m}$ 에서  $Nu_z = 12.91 Ra_z^{0.1443}$ ,  
 $z = 0.095\text{m}$ 에서  $Nu_z = 9.13 Ra_z^{0.181}$ 을 얻었다.

### 참고문헌

1. K.H. Kang, K.J. Kim, H.K. Shin, C. Kim and Y.M. Park, "A Preliminary study for the Design of Air-Controlled Oxidizer for Treatment of Depleted Uranium Chip Waste", J. Nucl. Mater.(submitted)
2. 강권호, 김길정, 박영무 : 96 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 5월 31일 - 6월 1일, 제주대학교, 한국, (1996).
3. 이재현 : "고립된 발열물체를 가지는 정사각형 밀폐공간 내에서의 자연대류 열전달 및 유동 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 8(4), pp 360-367, (1984).
4. V. Prasad and A. Chui : Transactions of the ASME, 111, pp 916-925, (1989).
5. T. A. Myrum : Transactions of the ASME, 112, pp 632-639, (1990).

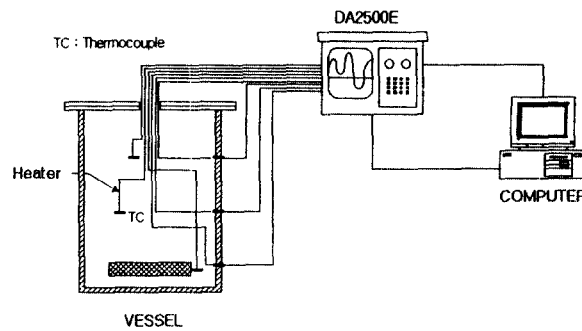


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

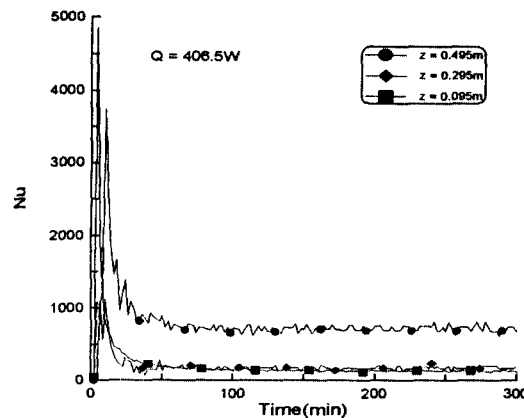


Fig. 2 Variation of Nu with time

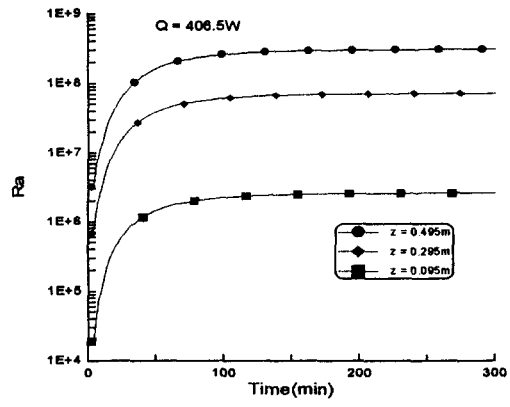


Fig. 3 Variation of Ra with time

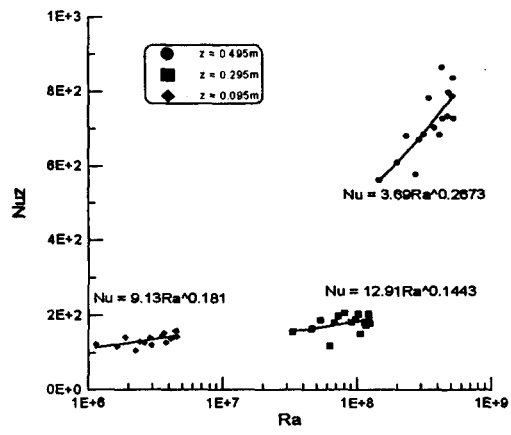


Fig. 4 Relation of Nu versus Ra at steady state