

## 내부열원을 갖는 Top-vented 원통형 밀폐공간에서의 자연대류에 관한 실험적 연구

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

한국원자력연구소, \*아주대학교

## An Experimental Study on the Natural Convection Heat Transfer with a Heat Source in a Top-Vented Cylindrical Enclosure

Kweon Ho Kang, Hyun Kyo Shin\*, Chee Burm Shin\*, Jaisuk Yoo\*,  
Chul Kim\* and Young Moo Park\*

Korea Atomic Energy Research Institute (NEMAC), \*Ajou University

### 요 약

본 연구에서는 감손우라늄칩을 처리하기 전의 시험단계로서 감손우라늄칩의 산화처리시 발생하는 산화열에 의한 산화장치 내부의 온도상승 및 외부로의 열전달을 해석하기 위해 산화장치 내부에 히터를 설치하여 실험을 수행하였다. 히터의 발생열량을 달리하면서 시간에 따른 열전달 특성을 알아보기 위하여 열유속, Nusselt 수, Grashof 수와 Rayleigh 수를 구하고, Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계를 구하였다.

**Abstract**— An experimental study was conducted on the natural convection heat transfer with a heat source (heater) in a top-vented cylindrical enclosure. Using an Air Controlled Oxidizer (ACO) for treatment of depleted uranium chips, the heat transfer characteristics of the ACO was studied with various heat generation. Heat flux, Nusselt number, Grashof number and Rayleigh number were obtained and the relation between Nusselt number and Rayleigh number was derived.

### 1. 서 론

우라늄은 핵분열성 물질로서 원자력산업 등에 널리 사용되고 있다. 공학적인 관점에서 우라늄의 가장 큰 특징은 밀도가 납의 거의 2배이며, 금이나 텅스텐과는 비슷하다는 것이다. 또한 우라늄은 텅스텐과 레늄같은 금속보다 가공하기가 훨씬 쉽고, 금이나 플라티늄 같은 무거운 금속보다 경제적이므로, 큰 밀도를 요구하는 여러 분야의 산업에 응용될 수 있는 금속이다. 감손우라늄은 천연우라늄에서 핵분열 물질인  $U^{235}$ 를 농축하는 과정에서 발생하며, 이때  $U^{235}$ 의 농도가 0.2~0.3%로서 낮기 때문에 천연우라늄에 비하여 비방사능이 70% 이상이나 낮다. 또한, 감손우라늄은 밀도가 높기 때문에 외국의 경우 방사선차폐, 비행기나 헬리콥터의 무게중심제, 플라이 휠 등에도 사용된다. 그러나, 최근 들어 방사능이 있는 감손우라늄의 수요가 감소하여 방사성 폐기물의

처리처분 문제가 대두되게 되었다. 우리나라에서는 연구용 원자로 및 차세대 원자로 등에 사용할 핵연료의 개발시 모의 핵연료제조에 감손우라늄을 사용하고 있으며 이 과정에서 칩과 스크랩의 형태로 방사성 폐기물이 발생된다. 이는 열적으로 매우 불안정하여 자연발화하는 성질이 있어 현재까지 이들을 물속에 저장하고 있으며 물과 반응하여 수소가스를 발생할 수 있기 때문에 개방형 용기에 보관하고 있다. 장기간 보관으로 저장용기의 부식과 미량이나마 방사성 물질 누출 등 문제가 될 수 있는데, 이러한 저장상의 문제점을 해결하고 보다 안정한 물질로 만들어 고화하기 위하여 감손우라늄을 우라늄 산화물인  $U_3O_8$ 으로 산화 처리하는 방법을 택하고 있다. 미국의 Oak Ridge National Laboratory에서는 금속우라늄칩을 산화우라늄으로 처리하기 위하여 Y-12 Plant에 pilot 규모의 우라늄칩 산화시설을 설치하여 수 차례 실험을 수행하였다<sup>1)</sup>. 이들은 금속우라늄칩에 직접

접촉하여 산화하는 방식을 택하였으며, 실험결과로 우라늄칩의 높은 산화열과 산화율에 인한 산화장치의 국부적인 과열 등을 문제점으로 제시하였다. Rockwell Flat Plate에서는 산화열을 제어하기 위해 산화장치로 유입되는 공기를 산화후 발생하는 배기가스와 혼합하므로써 산화장치내의 산소분압을 낮추었다<sup>2)</sup>. 그러나 이 방법을 따르면 산화장치내에서의 유량이 많기 때문에 배기가스의 배출시 산화우라늄 가루가 비산되어 외부로 유출될 가능성이 높은 것이 문제로 제시되었다. 강<sup>3,4)</sup> 등이 개발한 공기조절식 산화장치는 우라늄칩에 직접 접촉하여 처리하는 방식을 취하지 않고 산화장치 내부에 우라늄칩이 산화될 수 있는 분위기를 별도의 열원에 의해 만들어 줌으로써 산화속도를 초월하여 발생하는 산화열의 냉각을 적절히 하기 위한 장치이다. 본 연구에서는 공기조절식 산화장치를 이용하여 방사성 폐기물인 감손우라늄칩을 산화 처리할 때 산화열에 의한 장치내부의 온도상승과 외부로의 열전달 현상을 규명하고자 한다.

자연대류에 의한 열전달은 각종 전자장치의 냉각, 송배전선, 온천 및 지열에너지의 응용 등에서 많이 일어나는 현상이다. 내부발열체에 의한 밀폐용기 내의 자연대류 열전달 현상은 원자로의 설계 및 반응기내의 온도분포 등 공학적으로 매우 중요한 연구대상이 되고 있으며 이에 대한 관심이 고조되면서 이에 대한 연구 역시 많은 분야에서 이루어 지고 있다. 이재현<sup>5)</sup>은 유한차분법을 이용하여 고립된 발열물체를 가지는 정사각형 밀폐공간 내에 발열체의 위치변화에 따른 자연대류 열전달 현상 및 유동특성을 수치적으로 해석하였다. Prasad<sup>6)</sup> 등은 내부열원을 갖는 원통형 porous 밀폐공간에서 자연대류 현상을 종횡비가 1에서 20까지의 범위에서 Rayleigh 수가  $10^4$  이하에서 연구를 수행하여 최대 공간온도와 총 Nusselt 수의 관계식을 구하였다. Myrum<sup>7)</sup>은 top-vented 밀폐공간에서 열원으로부터의 자연대류를 실험적으로 연구하였다. 실험은 Prandtl 수가 약 5인 물속에서, vent의 크기, 내부 밀폐공간의 높이, Rayleigh 수 등을 변화시키면서 수행되었다. 이 연구에서 확정된 평균 Nusselt 수는  $Nu=0.303(Ra)^{0.279}$ 의 관계식으로부터 구한값과  $\pm 8\%$ 의 오차를 나타내었으며 가시화 실험을 병행하였다.

본 연구에서는 감손우라늄칩을 처리하기 전의 시험단계로서 감손우라늄칩의 산화처리시 발생하는 산화열에 의한 산화장치 내부의 온도상승 및 외부로의 열전달을 해석하기 위해 산화장치 내부에 히터를 설치하여 실험을 수행하였다. 히터의 발생열량을 달리하면서 시간에 따른 열전달 특성을 알아보기 위하여 열유속, Nusselt 수, Grashof 수와 Rayleigh 수를 구하고, Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계를 구하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치

Fig. 1과 2에 실험에서 사용된 공기조절식 산화장치의 일부분인 용기와 측정 계통의 개략도 및 용기의 치수를 나타내었다. 용기는 직경 450 mm, 높이 670 mm, 두께 5 mm의 원통형 용기로서 스텐레스 스틸 316으로 제작되었다. 감손우라늄의 산화시 발생하는 산화열을 모사하기 위해 2 kW(220 V  $\times$  24.6  $\Omega$ )의 전기히터를 장치내부의 밑면에서 30 mm 높이에 설치하였으며, 장치내부의 온도측정을 위하여 중심에서 반경방향과 밑면에서 높이방향으로 60 mm  $\times$  470 mm, 110 mm  $\times$  270 mm, 160 mm  $\times$  70 mm의 위치에 각각 열전대를 설치하였다. 또한 장치벽면의 온도를 측정하기 위하여 장치의 밑면으로부터 95 mm, 295 mm, 495 mm의 위치에 내외면에

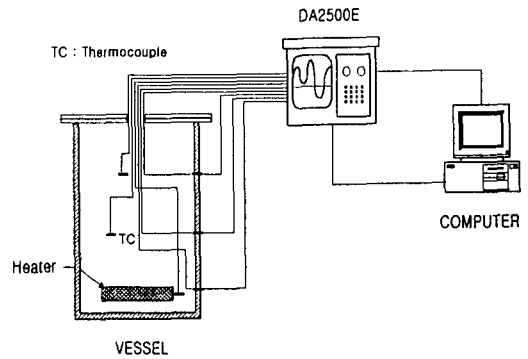


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

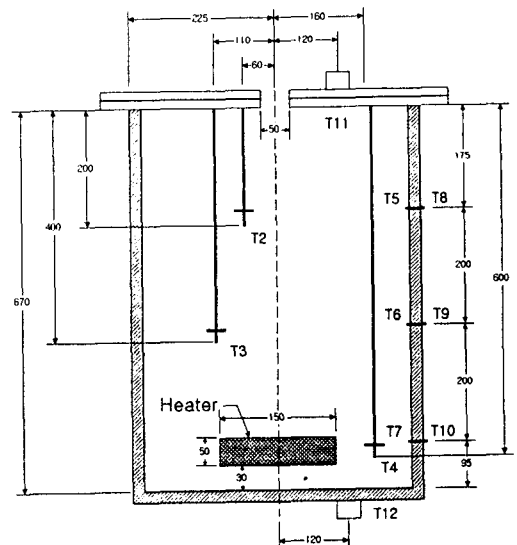


Fig. 2. Dimensions of the vessel.

각각 설치하였다. 열전대는 0.25 mm의 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.

2-2. 실험방법

실험은 공기중(Pr=0.7)에서 수행되었으며 히터에 공급되는 전압을 50 V(101.6 W)에서 196 V(1561.6 W)의 범위에서 10 V 간격으로 조절하여 발생열을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 본 실험은 용기내부의 Rayleigh 수가  $4.54 \times 10^{11} \leq Ra^* \leq 6.96 \times 10^{12}$ 의 범위에서 수행되었다. 용기 및 내외부의 초기온도가 주위온도와 같은 상온의 조건에서 실험을 시작하여 약 300분 동안 계속되었으며 기준열전대를 DA2500E에 설치하여 시간에 따른 주위의 온도로 활용하였다. 장치외부로의 열전달  $q_c$ 를 이용하여 각 위치의 국소 열전달계수  $h_z$ 를 다음과 같이 계산하였다.

$$h_z = \frac{q_z}{T_{ow} - T_{\infty}} \tag{1}$$

여기서  $T_{ow}$  및  $T_{\infty}$ 은 외벽 및 주위의 온도이다. 또한 외부로의 자연대류 열전달 현상을 파악하기 위해 히터의 발생열량에 따른 Nusselt 수, Grashof 수, Rayleigh 수와 Prandtl 수를 실험장치 밀면에서의 높이를  $z$ 로 하여, 각각의 무차원수를 다음과 같이 정의하였다. 또한 용기 내부의 Rayleigh 수는 수정된 Rayleigh 수를 사용하였다.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \tag{2}$$

$$Gr_z = \frac{g \beta \Delta T z^3}{\nu^2} \tag{3}$$

$$Ra_z = \frac{g \beta \Delta T z^3}{\alpha \nu} \tag{4}$$

$$Nu_z = \frac{h_z \times z}{k} \tag{5}$$

$$Ra^* = \frac{g \beta Q D^4}{\nu \alpha k} \tag{6}$$

여기서  $\nu$ ,  $\alpha$ ,  $g$ ,  $\beta$ ,  $k$ ,  $Q$ ,  $h_z$ ,  $D$ 는 각각 동점성계수, 열확산계수, 중력가속도, 열팽창계수, 열전도도, 히터의 발생열량, 국소열전달계수, 용기의 지름을 나타낸다. 계산에 사용된 공기의 물성치는 다음과 같은 막온도를 이용하여 구하였다.

$$T_f = \left( \frac{T_w + T_{\infty}}{2} \right) \tag{7}$$

3. 결과 및 고찰

본실험에서는 주로 시간에 따른 장치내부의 온도상승 및 외부로의 자연대류 열전달 특성을 파악하였다. Fig. 3 및 4는 내부발열체의 발생열량이 101.6 W, 491.9 W, 1040.7 W 및 1561.6 W 일때의 시간에 따른 용기내부의 온도변화를 나타내었다. 실험 초기에서 부터 약 100분까지는 빠르게 증가하다가 증가속도가 둔화되어 약 200분 후에 정상상태에 도달하였으며 내부발열체의 발생열량이 커질수록 T2와 T3와의 차이가 크게 나타났다. Fig. 5는  $z=0.495$  m,  $z=0.295$  m 및  $z=0.095$  m 위치의 용기벽면에서 외부로의 대류열전달과 전도열전달의 비율을 나타내는 Nusselt 수의 변화를 시간에 따라 나타내었다.

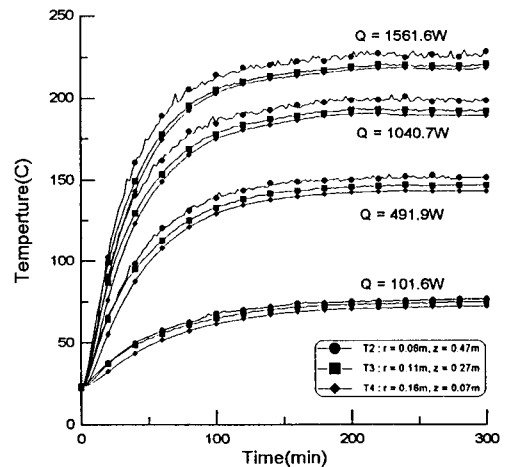


Fig. 3. Variation of inside temperatures with time.

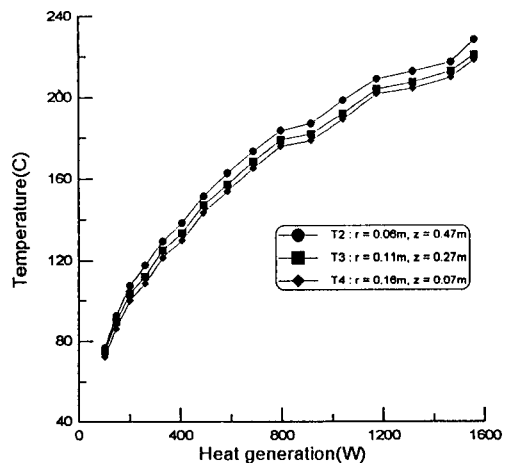


Fig. 4. Inside temperatures versus heat generation at steady state.

Figure에서 실험의 초기에 Nusselt 수가 급격히 증가한 후 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  $(T_{ow}-T_w)$ 항의 값이 적어  $h_2$ 가 상대적으로 커지므로 초기의  $Nu_2$ 가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. Nusselt 수가 급격히 증가되나 벽면의 온도가 올라가고 난 후인 40~50분 후에는 발생열량과, 위치에 따라서 일정한 값을 나타냄을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 발생열량에 따른 Rayleigh 수의 변화를 시간에 따라 나타냈다. Rayleigh 수는 시간에 따라 초기에는 급격히 증가하다가 발생열량에 따라 다소 차이가 있지만 100분이 경과하면 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났으며, 발생열량의 변화에 따른 그래프의 형태는 비슷하나 Rayleigh 수의 영역은 발생열량과 위치 및 시간

에 따라서 다른 값을 나타낸다. Rayleigh 수는 내부히터의 발생열량이 101.6 W인 경우, 위치가 0.095 m에서는  $2.6 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 1.0 \times 10^6$ , 0.295 m에서는  $7.8 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 3.28 \times 10^7$ 이며 0.495 m에서는  $4.7 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 1.45 \times 10^8$ 을 나타내며 120분이 경과하면 일정한 값을 갖는 것으로 나타난다. 발생열량이 491.9 W인 경우, 위치가 0.095 m에서는  $2.6 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 2.9 \times 10^6$ , 0.295 m에서는  $7.8 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 7.7 \times 10^7$ 이며 0.495 m에서는  $4.8 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 3.7 \times 10^8$ 을 나타내며 100분이 경과하면 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 발생열량이 1040.7 W인 경우, 위치가 0.095 m에서는  $2.6 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 4.1 \times 10^6$ , 0.295 m에서는  $7.8 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 1.1 \times 10^8$ 이며 0.495 m에서는  $4.7 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 4.7 \times 10^8$ 을 나타내며 90분이 경과하면 일정한 값을 갖는 것으로 나타난다. 발생열량이 1561.6 W인 경우, 위치가 0.095 m에서는  $2.6 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 4.5 \times 10^6$ , 0.295 m에서는  $7.8 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 1.2 \times 10^8$ 이며 0.495 m에서는  $4.7 \times 10^4 \leq Ra_z \leq 5.1 \times 10^8$ 을 나타내며 80분이 경과하면 일정한 값을 갖는 것으로 나타나

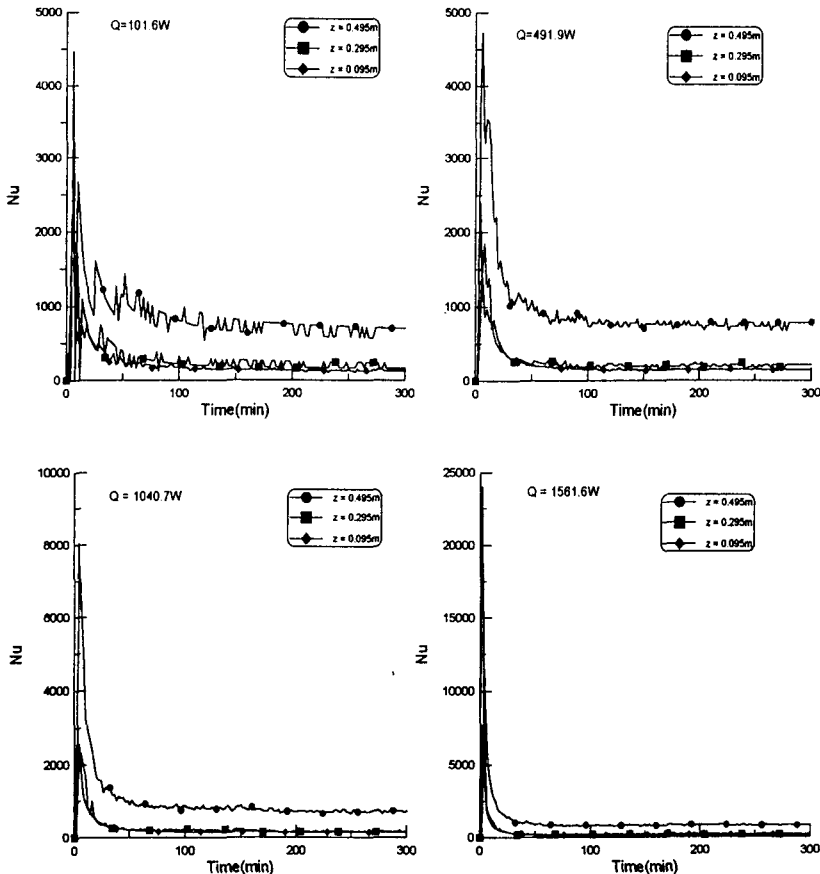


Fig. 5. Variation of Nu with time.

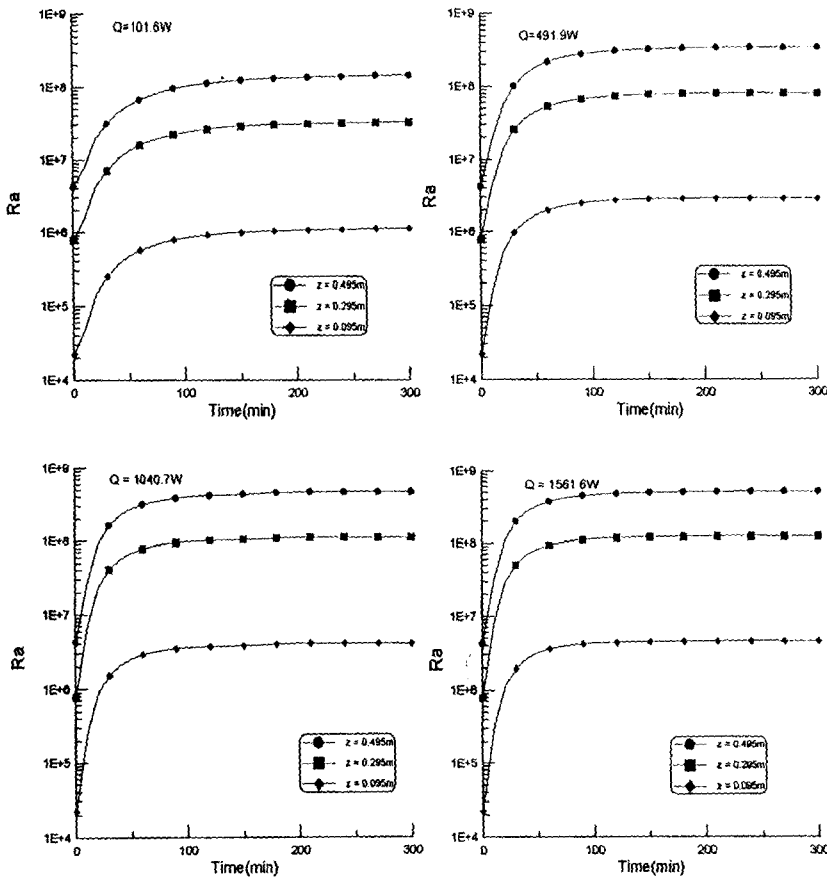


Fig. 6. Variation of Ra with time.

발생열량의 증가가 정상상태의 도달 시간에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 정상상태에서 내부 히터의 발생열량 증가에 따른 Rayleigh 수의 변화를 나타낸 것이다. 내부히터의 발생열량이 적은 범위(약 300W 이하)에서는 Rayleigh 수가 급격히 증가하나 300W 이상에서는 서서히 증가하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 8은 정상상태에 도달된 후의 Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계를 나타냈다. 자연대류 열전달에서는 Nusselt 수는 Rayleigh 수의 멱승의 함수로 표현될 수 있는 것으로 널리 알려져 있다. 앞에서 살펴본 것처럼 Myrum<sup>7)</sup> 등은 Top-vented되는 용기내에 열원이 있는 경우, 물속에서 자연대류 열전달 실험을 통해 Nusselt 수와 Rayleigh 수와의 관계를  $Nu=0.303 Ra^{0.279}$  ( $1.2 \times 10^6 \leq Ra \leq 3.6 \times 10^6$ )로 제시하였으며, Arya<sup>8)</sup> 등은 사용후핵연료 수송용기의 대류열전달에 대한 수치해석을 통해  $Nu_0=0.3097 Ra_0^{0.261}$  ( $4.26 \times 10^6 \leq Ra_0 \leq 4.50 \times 10^9$ )를 구했으며, 이는 실험치와 약 3% 미만의 오차를 나타낸다고 보고하였다. Keyhani<sup>9)</sup> 등은 용기벽에서 여러개의 열원

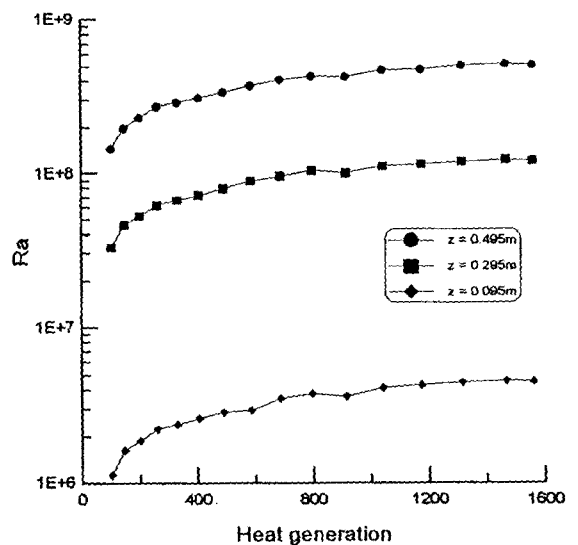


Fig. 7. Variation of Ra with heat generation at steady state.

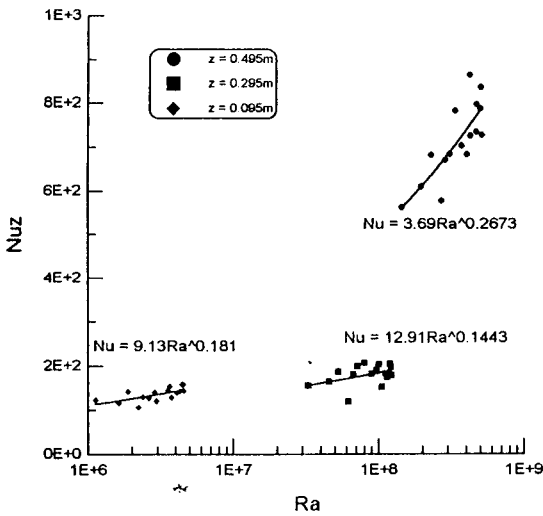


Fig. 8. Relation of  $Nu$  versus  $Ra$  at steady state.

을 갖는 밀폐용기에서 자연대류에 관한 실험을 통해 Nusselt 수와 Rayleigh 수와의 관계를  $Nu_z = 0.296 Ra_z^{0.223}$  ( $1.0 \times 10^5 \leq Ra_z \leq 1.0 \times 10^{11}$ )로 제시하였다. 본 실험에서 위치에 따른 Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계는 다음과 같이 나타났다.

•  $z=0.495$  m일 경우;

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

•  $z=0.295$  m일 경우;

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

•  $z=0.095$  m일 경우;

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

#### 4. 결 론

내부 발열체를 갖는 Top-vented 원통형 밀폐공간에서의 열전달 특성을 알아보기 위하여 발생열량을 50 V부터 196 V까지 10 V씩 변화시키면서 시간에 따른 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용기 내부의 온도분포는 시간에 따라 증가하다가 약 200분 후에는 거의 모든 실험에서 정상상태에 도달하며, Nusselt 수도 실험초기에는 급작스럽게 증가하지

만 실험시작 40~50분 후에 정상상태에 도달한다.

2) Rayleigh 수도 위치에 따라 다소 증가의 차이는 있지만 시간에 따라 초기에는 빠르게 증가하다가 약 100분 후에는 정상상태에 도달하며, 발생열량의 증가에 따라 서서히 증가된다.

3) 본 실험으로 정상상태에서의 Nusselt 수와 Rayleigh 수에 관한 다음과 같은 관계식을 얻었다.

•  $z=0.495$  m일 경우;

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

•  $z=0.295$  m일 경우;

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

•  $z=0.095$  m일 경우;

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

#### References

1. Y.C. Childs: The Proceedings of the Oak Ridge Model Conference, Oak Ridge, Tennessee, USA, Feb. 3-5, (1983).
2. Gordon L. Hickle: Waste systems progress Report, Jan. 1982-Feb. 1983, RFP-3533, Oct. 24, (1983).
3. 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).
4. 강권호, 김길정, 박영무: '96 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 5월 31일-6월 1일, 제주대학교, 한국, (1996).
5. 이재현: "고립된 발열물체를 가지는 정사각형 밀폐공간 내에서의 자연대류 열전달 및 유동 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 8(4), 360-367 (1984).
6. V. Prasad and A. Chui: Transactions of the ASME, 111, 916-925 (1989).
7. T.A. Myrum: Transactions of the ASME, 112, 632-639 (1990).
8. M. Satishchandra Arya and M. Keyhani: ASME Proceedings of the 1988 National Heat Transfer Conference, 3(7), 187-196 (1988).
9. M. Keyhani, L. Chen and D.R. Pitts: Journal of Heat Transfer, 113, 883-891 (1991).