

공기조절식 산화장치의 열전달 특성

신현규 · 강권호* · 김길정* · 김 철†

아주대학교 에너지학과

*한국원자력연구소

(1997년 1월 28일 접수, 1997년 9월 12일 채택)

Heat Transfer Characteristics of Air-Controlled Oxidizer

Hyun Kyoo Shin, Kweon Ho Kang*, Kil Jeong Kim* and Chul Kim†

Department of Energy, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

*Korea Atomic Energy Research Institute, Yusong, Taejeon 305-600, Korea

(Received 28 January 1997; accepted 12 September 1997)

요 약

우라늄 핵연료의 성형가공시 발생하는 감손우라늄칩 폐기물의 안정화 처리에 사용되는 공기조절식 산화장치에서의 열전달 특성에 관한 연구는 산화장치의 안전한 조업을 위하여 필요하다. 본 연구에서는 감손우라늄칩이 방사성 폐기물이므로 매우 위험하기 때문에 감손우라늄칩의 산화시 발생열을 모사할 수 있는 정도의 전기히터를 원통형 산화장치 내부에 설치하여 자연대류 열전달 특성 규명 실험을 수행하였다. 히터의 발생열량을 달리하면서 용기 내외벽의 온도 분포, Nusselt수와 Rayleigh수를 구하고, Nusselt수와 수정된 Rayleigh수의 관계를 구하여 시간에 따른 열전달 특성을 파악하였다.

Abstract—A study on the heat transfer characteristics of an Air-Controlled Oxidizer(ACO) was carried out to provide information for the safe operation of an ACO treating Depleted Uranium chip wastes(DU chips) produced in the process of nuclear fuel fabrication. Experiments have been conducted on the natural convection heat transfer in a cylindrical oxidizer with variable internal heat sources supplied by an electric heater. The rates of heat input from the heat sources were properly adjusted in accordance with the rate of heat generation estimated in the analysis of oxidation process, and the temperature profiles of the inside and outside walls, Nusselt and Rayleigh numbers were obtained. Also, the relation between Nusselt and modified Rayleigh numbers was derived.

Key words: Air-Controlled Oxidizer, DU Chips, Natural Convection Heat Transfer

1. 서 론

공기조절식 산화장치는 감손우라늄 폐기물칩을 산화처리하여 안정화하기 위한 장치로서 주입되는 공기의 양을 조절하여 산화시 발생열량을 제어할 수 있도록 설계되었다[1,2]. 감손우라늄은 천연우라늄으로부터 U^{235} 를 추출하는 과정에서 얻어지는 부산물로서 U^{235} 의 농도는 0.2-0.3%이다. 이렇게 생성된 감손우라늄은 미사일의 투과체, 비행기의 무게중심제 등 비원자력 이용분야에 사용될 뿐만 아니라 핵연료 우라늄은 방사성 물질이므로 위험하기 때문에, 연구용 원자로 및 차세대 원자로의 신행핵연료를 개발과정의 모의 핵연료로서 감손우라늄이 이용되고 있다. 감손우라늄을 원자력 분야에 이용하거나 비원자력 분야에 이용하기 위한 제조과정에서 칩과 스크랩 형태의 감손우라늄 폐기물이 발생하게 된다. 칩 형태의 감손우라늄은 반응면적이 넓어 열적으로 매우 불안정하여 자연발화하는 성질이 있으므로 개방형 드럼을 이용하여 물속에 저장하고 있다. 미국의 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)[3] 및 Rockwell Flat Plant(RFP)[4]에서는 이들 감손우라늄 폐기물을 가장 안전한 우라늄 화합물인

U_3O_8 으로 전환하기 위하여 산화처리하는 방법을 택하고 있다. ORNL에서는 pilot규모의 우라늄 칩 산화처리 시설을 설치하여 수차례 실험을 수행하였으며, RFP에서는 소각로를 설치하여 시험운영하고 있다. 이들은 감손우라늄의 산화처리시 발생하는 높은 산화열의 적절한 냉각을 문제점으로 제시하였다.

감손우라늄 폐기물칩을 처리하기 위한 산화장치와 같이 내부에 발열체가 있는 밀폐용기의 열전달 현상은 원자로의 설계 및 반응기 내의 온도분포 등 공학적으로 매우 중요한 연구대상이 되고 있다. Sefcik 등[5, 6]은 위, 아래가 모두 트인 수직으로 'vent'되는 밀폐공간에서의 한쪽 수직벽이 가열되고 반대쪽 수직벽은 단열인 경우, vent의 크기를 변화시키면서 자연대류 열전달 특성을 이론 및 실험적으로 해석하였다. 그들은 검사체적을 기초로 한 유한 차분법을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 이론적 연구에서는 밀폐공간내에서의 온도분포 등을 결과로 제시하였다. 실험에서는 가열된 벽의 위치에 따른 국소 열전달을 구하였으며 Grashof수가 증가할수록 Nusselt수도 증가하는 것을 보여주었으며, 유동 구조는 연기를 이용한 가시화 기법을 통하여 Mach-Zehnder 간섭계에 의해 결정하였다. Miyamo-

to 등[7]은 윗벽과 아랫벽 그리고 한쪽 수직벽이 고온의 등온이고 나머지 한쪽벽을 부분적으로 또는 전체적으로 열린 사각형 공간에서의 2차원 정상 층류 자연대류를 유한차분법을 이용하여 수치해석하였다. 그들은 각도를 변화시키면서 경사진 밀폐공간 내부의 온도 분포의 변화 등을 보고하였는데 Rayleigh수가 1부터 10^8 까지 증가하면서 변화될 때 Nusselt수의 증가되면서 변화하는 것을 결과로 제시하였다. Epstein[8]은 roof-vented 밀폐공간에서 vent를 통하여 주위로부터 밀폐공간으로 들어가는 공기의 속도에 의하여 타는 속도가 조절된다고 생각하여, 앞선 연구의 경험적인 관계들을 이용하여 최대 가능한 연소속도를 결정하였다고 보고하였다. Myrum[9]은 Prandtl수가 약 5인 물속에서 vent의 크기, 내부 밀폐공간의 높이, Rayleigh수 등을 변화시키면서 내부 열원으로부터 top-vented 밀폐공간에서의 자연대류에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 이 연구에서 확정된 평균 Nusselt수는 $Nu=0.303(Ra)^{0.279}$ 의 관계식으로부터 구한 값과 $\pm 8\%$ 의 오차를 나타낸다고 보고하였다.

감손우라늄을 산화처리할 때 산화장치의 안전한 조업을 위하여 용기에서의 열전달 특성을 파악해야 한다. 그러나 감손우라늄칩이 방사성 폐기물이므로 매우 위험하기 때문에, 본 연구에서는 감손우라늄칩의 산화시 발생열을 모사할 수 있는 용량의 전기히터를 용기 내부에 설치하여 열전달 특성 규명 실험을 수행하였다. 히터의 발생열량을 달리하면서 용기 내외벽의 온도상승 및 수정된 Rayleigh수에 따른 Rayleigh수와 Nusselt수를 구하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Fig. 1은 강 등[1]이 개발한 공기조절식 산화장치이다. 이 산화장치에서 oxidation chamber는 스테인레스 스틸 316을 이용하여 직경 450 mm, 높이 670 mm, 두께 5 mm의 원통형 용기로 제작되었다. Fig. 2는 공기조절식 산화장치의 일부분인 용기, 히터의 치수 및 측정계통의 개략도이다. 감손우라늄의 산화시 산화열을 모사할 수 있는 직경 150 mm, 높이 50 mm인 2 kW(220 V \times 24.6 Ω)용량의 전기히터를 장치 내부의 밀면에서 30 mm 높이에 설치하였으며, 장치 내외벽의 온도측정을 위하여 장치의 밀면으로부터 95 mm, 295 mm, 495 mm의

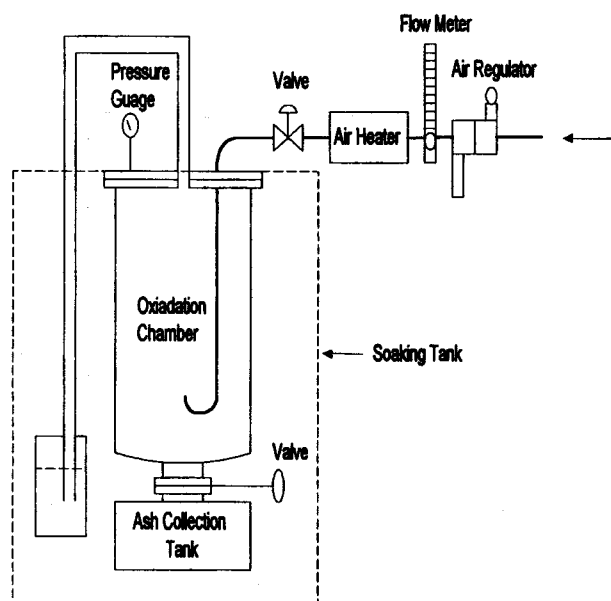


Fig. 1. Schematic diagram of air-controlled oxidizer.

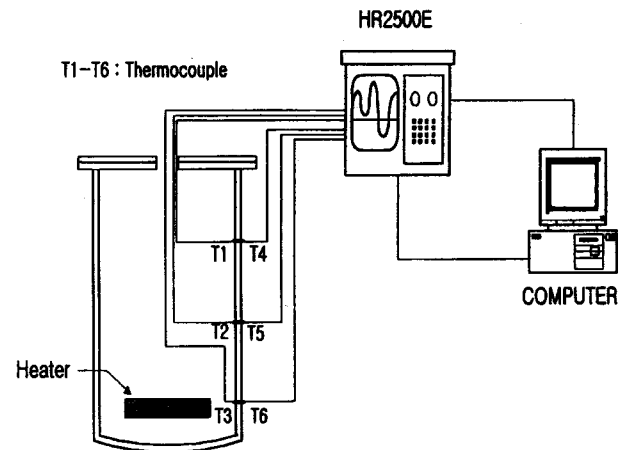


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

위치에 내외면에 각각 열전쌍을 설치하였다. 열전쌍은 0.25 mm의 copper-constantan(T-type)을 이용하였다. 각각의 열전쌍은 data acquisition system인 HR2500E(Yokogawa, Japan)과 RS-232-C를 이용하여 386 DX PC에 연결하였다. 이렇게 측정된 온도는 컴퓨터에 2분 간격으로 자동 기록되도록 하였다. Table 1은 하이브리드 레코더의 제원을 나타낸다.

2-2. 실험방법

실험은 공기 중($Pr=0.7$)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 식 (5)에 따른 용기내부의 수정된 Rayleigh수(Ra')가 $4.53 \times 10^{11} \leq Ra' \leq 6.97 \times 10^{12}$ 의 범위에서 수행되었다. 용기 및 내외부의 초기온도가 주위온도와 같은 상온의 조건에서 실험을 시작하여 약 300분 동안 계속되었으며, 열전쌍 1개를 용기에서 1 m 떨어진 HR2500E에 설치하여 시간에 따른 주위의 온도로 활용하였다. 밀면으로부터 거리가 x 만큼 떨어진 부분에서 장치외부의 용기의 전도 열전속 q_x 를 이용하여 각 위치의 국소 열전달계수 h_x 를 다음과 같이 계산하였다.

$$h_x = \frac{q_x}{T_{ow} - T_{\infty}} \quad (1)$$

여기서 T_{ow} 및 T_{∞} 은 외벽 및 주위의 온도이다. 본 연구에 사용된 주요 무차원수는 밑에 정의되어 있는 Nusselt수, Rayleigh수와 Prandtl 수, 용기 내부의 수정된 Rayleigh수, 평균 Nusselt수, 평균 Rayleigh수이며, 이를 이용하여 열전달 특성을 규명하였다.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2)$$

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

$$Nu_x = \frac{h_x \times x}{k} \quad (4)$$

$$Ra' = \frac{g\beta Q D^4}{\nu \alpha k} \quad (5)$$

Table 1. Specification of the hybrid recorder

Model	Yokogawa, HR2500E
Data scan time	300 points/2 s
Scan frequency	2 s - 60 s
Accuracy	$\pm (0.03 \% \text{ of readings} + 2 \text{ digits})$

$$Nu = \frac{1}{H} \sum \int_0^H Nu_x dx = \frac{\sum (Nu_x \times \Delta x_i)}{\sum \Delta x_i} \quad (6)$$

$$Ra = \frac{1}{H} \sum \int_0^H Ra_x dx = \frac{\sum (Ra_x \times \Delta x_i)}{\sum \Delta x_i} \quad (7)$$

여기서 ν , α , g , β , k , Q , h , D 및 H 는 각각 동점성계수, 열확산계수, 중력가속도, 열팽창계수, 열전도도, 히터의 발생열량, 국소열전달계수, 용기의 지름 및 용기의 높이를 나타내며, i 는 국소 Nusselt수 및 국소 Rayleigh수가 대표할 수 있는 영역의 거리를 나타내는 첨자로 1, 2, 3이다. 계산에 사용된 공기의 물성치는 다음과 같은 경막온도를 이용하여 구하였다.

$$T_f = \left(\frac{T_{ow} + T_{\infty}}{2} \right) \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

본 실험에서는 시간에 따른 장치 내외벽의 온도상승 및 외부로의 자연대류 열전달 특성을 파악하였다.

3-1. 온도분포

Fig. 3의 (a)와 (b)는 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 4.53×10^{11} , 2.20×10^{12} 및 6.97×10^{12} 일 때의 시간에 따른 용기 내벽과 외벽의 온도(T)와 주위 온도(T_{amb})와의 차이(ΔT)에 대한

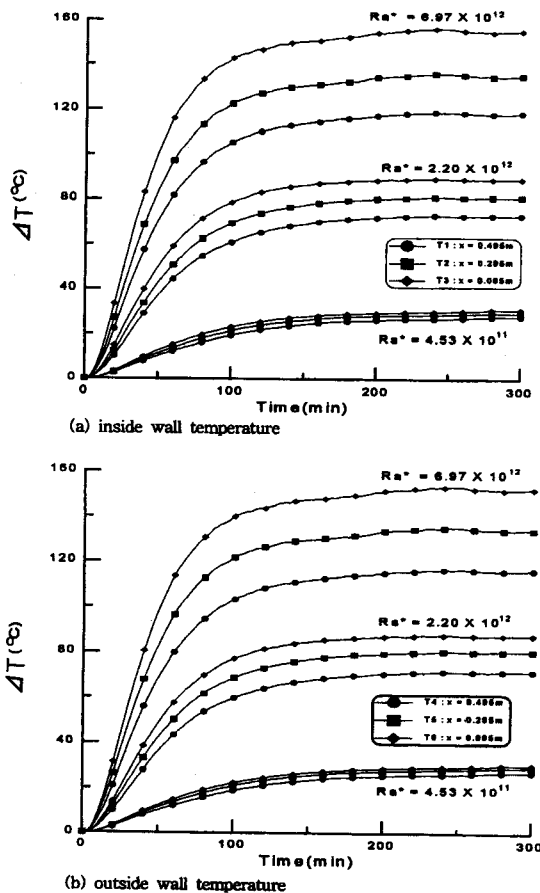
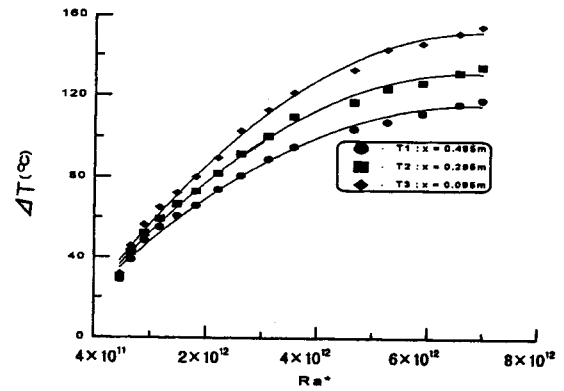
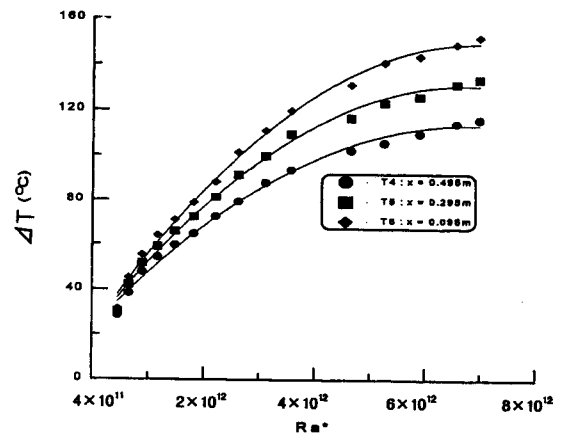


Fig. 3. Variation of inside and outside walls temperature difference with time.



(a) inside wall temperature



(b) outside wall temperature

Fig. 4. Inside and outside wall temperature differences versus modified Rayleigh number at steady state.

변화를 나타내었다. (a)와 (b) 모두 약 100분 후에 정상상태에 도달하였으며, 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 각 지점별 온도차이도 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4의 (a)와 (b)는 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수에 따른 용기 내벽과 외벽의 정상상태 온도와 주위 온도와의

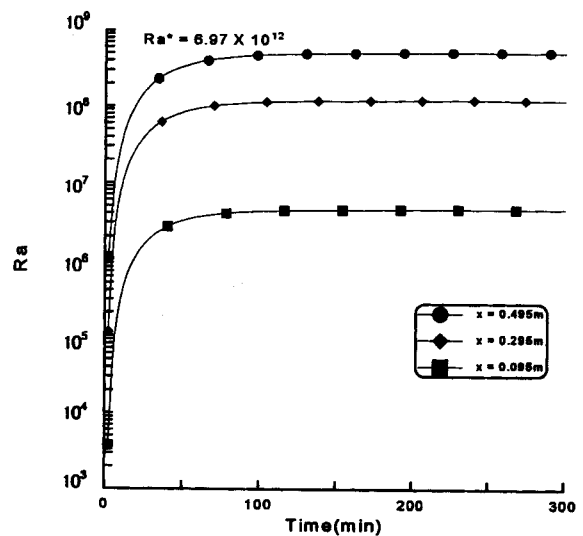


Fig. 5. Variation of Rayleigh number with time ($Ra^* = 6.97 \times 10^{12}$).

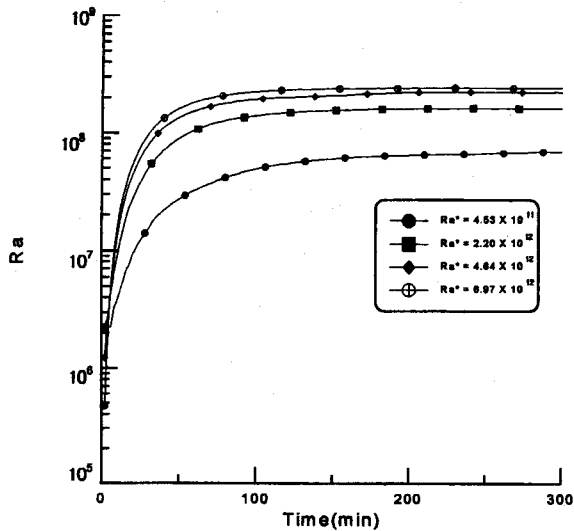


Fig. 6. Variation of average Rayleigh number with time.

차이를 나타내었으며, 밑면에서 가까운 지점에서의 온도와 주위 온도와의 차이가 높게 나타났고 가장 먼 지점에서의 온도차이는 낮게 나타났다. 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 Fig. 3의 경우와 같이 차이도 증가하였으며 온도분포는 포물선의 형태를 나타내며 증가하였다.

3-2. Rayleigh수의 변화

Fig. 5는 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 6.97×10^{12} 인 경우의 위치에 따른 Rayleigh수의 변화를 보여 준다. Rayleigh수는 수정된 Rayleigh수에 따라 실험 초기에는 급격히 증가하다가 증가속도가 둔화되어 약 100분이 지나면 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 위치별로 수정된 Rayleigh수에 따른 Rayleigh수의 범위는 위치가 0.095 m에서는 $2.6 \times 10^4 \leq Ra_s \leq 4.5 \times 10^6$, 0.295 m에서는 $7.8 \times 10^4 \leq Ra_s \leq 1.2 \times 10^8$ 이며 0.495 m에서는 $4.7 \times 10^6 \leq Ra_s \leq 5.1 \times 10^8$ 을 나타낸다.

Fig. 6은 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 4.53×10^{11} , 2.20×10^{12} , 4.64×10^{12} 및 6.97×10^{12} 일 때의 시간에 따른 평균 Rayleigh수의 변화를 나타낸다. 시간에 따른 국소 Rayleigh수의

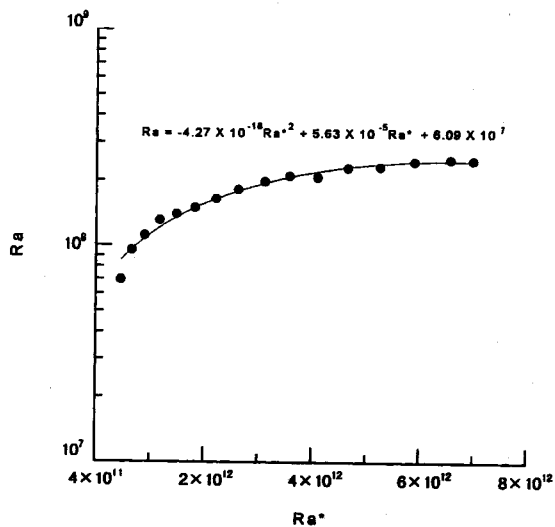


Fig. 7. Variation of average Rayleigh Number with modified Rayleigh number at steady state.

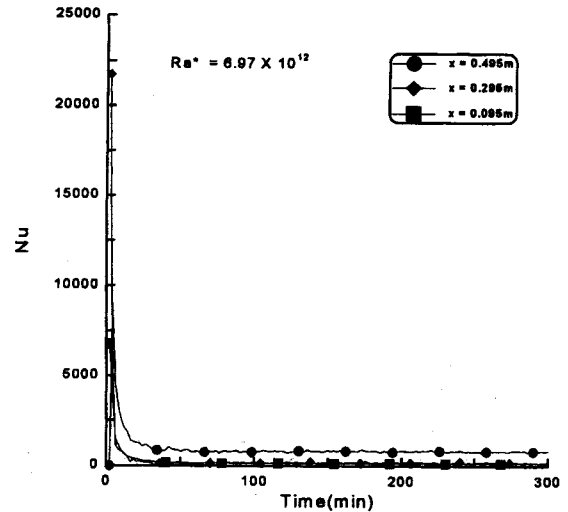


Fig. 8. Variation of Nusselt number with time ($Ra^* = 6.97 \times 10^{12}$).

변화에서와 마찬가지로 초기상태에는 빠르게 증가하다가 서서히 증가하였으며, 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 Rayleigh수 역시 증가하였으며, 정상상태에도 빠르게 도달하였다. 이는 내부발열체의 발생열량의 증가가 Rayleigh수의 정상상태 도달하는 시간에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

Fig. 7은 정상상태에서 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수의 증가에 따른 평균 Rayleigh수의 변화를 나타낸 것이다. 평균 Rayleigh수는 7.0×10^7 에서 2.5×10^8 의 범위에서 변화하며, 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 다음과 같이 포물선 형태를 나타내며 증가하였다.

$$Ra = -4.27 \times 10^{-18} Ra^{*2} + 5.63 \times 10^{-5} Ra^* + 6.09 \times 10^7 \quad (9)$$

윗 식에서 정상상태에서의 평균 Rayleigh수를 용기 내부의 수정된 Rayleigh수에 관하여 표현되었으며, 용기 내부의 수정된 Rayleigh수만 주어진다면 평균 Nusselt수를 예측할 수 있으며, 예측치는 실측치와 $\pm 3.5\%$ 이내의 오차를 나타낸다.

3-3. Nusselt수의 변화

Fig. 8은 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 6.97×10^{12} 인 경우의 위치에 따른 Nusselt수의 변화를 나타낸다. 실험의 초기에 Nusselt수가 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 $(T_w - T_\infty)$ 항의 값이 적어 h_2 가 상대적으로 커지므로 초기의 Nu_2 가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. Nusselt수가 급격히 증가되나 벽면의 온도가 올라가고 난 후인 40-50분 후에는 위치에 따라서 일정한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 위치별로는 장치 밑면으로부터 가장 먼 지점인 $x=0.495$ m에서 Nusselt수가 가장 높게 나타났으며, $x=0.295$ m 및 $x=0.095$ m에서는 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 4.53×10^{11} , 2.20×10^{12} , 4.64×10^{12} 및 6.97×10^{12} 일 때의 시간에 따른 평균 Nusselt수의 변화를 나타낸다. Fig. 8에 나타낸 시간에 따른 국소 Nusselt수의 변화에서와 마찬가지로 실험 초기에는 갑자기 증가하였다가 감소하여 약 40-50분 후에는 정상상태에 도달하였다. 정상상태

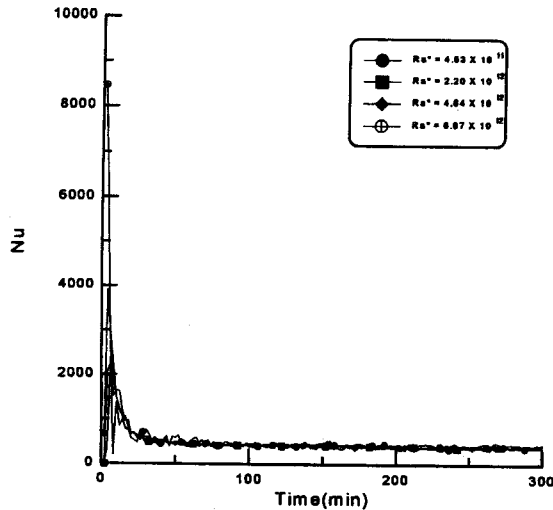


Fig. 9. Variation of average Nusselt number with time.

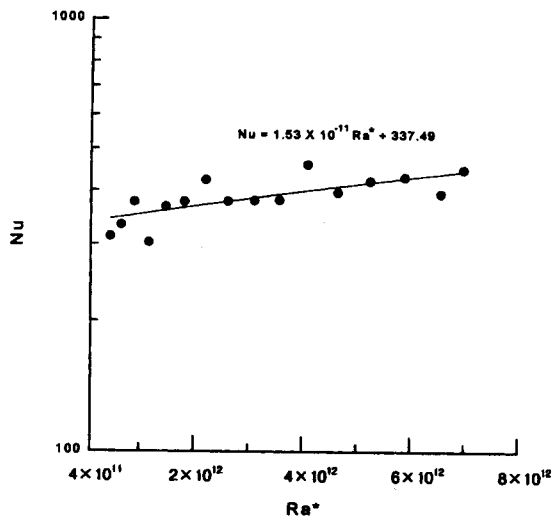


Fig. 10. Variation of average Nusselt number versus modified Rayleigh number at steady state.

에서의 Nusselt수는 수정된 Rayleigh수에 따라 약간의 차이는 있지만 거의 비슷한 값을 나타내었다.

Fig. 10은 정상상태에서 내부발열체에 의한 용기 내부의 Rayleigh수에 따른 평균 Nusselt수의 변화를 나타낸 것이다. 평균 Nusselt의 범위는 313.30에서 460.40까지 변화하였으며, 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 평균 Nusselt수도 비례하여 증가하는 것을 보여주며 다음 식과 같이 표현된다.

$$Nu = 1.53 \times 10^{-11} Ra^* + 337.49 \quad (10)$$

윗 식은 정상상태에서의 평균 Nusselt수를 용기 내부의 수정된 Rayleigh수에 관하여 표현되어 있으며, 수정된 Rayleigh수를 알면 평균 Nusselt수를 예측할 수 있으며, 윗 식에 의한 예측치는 실측치와 $\pm 6.6\%$ 의 오차를 나타낸다.

4. 결 론

공기조절식 산화장치에서의 열전달 특성을 알아보기 위하여 장치 내부에 전기히터의 발생열량을 50 V부터 196 V까지 10 V씩 변화시

키면서 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용기 내외벽의 온도분포는 시간에 따라 증가하다가 약 100분 후에는 정상상태에 도달하였으며, 수정된 Rayleigh수에 따른 정상상태에서의 온도 분포도 포물선의 형태를 나타내며 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 증가하였다.

(2) 평균 Rayleigh수도 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 시간에 따라 실험 초기에는 빠르게 증가하다가 약 100분 후에는 정상상태에 도달하였으며, 수정된 Rayleigh수가 증가할수록 정상상태에도 빨리 도달하였다.

(3) 평균 Nusselt수도 실험 초기에는 급작스럽게 증가되었다가 감소하여 약 40-50분 후에는 정상상태에 도달하며, 정상상태에서 내부발열체에 의한 용기 내부의 수정된 Rayleigh수에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었다.

(4) 정상상태에서의 Nusselt수는 수정된 Rayleigh수에 비례하여 약간 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

사용기호

D	: diameter of vessel [m]
ΔT	: temperature difference [$^{\circ}\text{C}$]
g	: gravity [m/s^2]
h_x	: local heat transfer coefficient [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]
H	: height of vessel [m]
k	: thermal conductivity [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]
Nu	: average Nusselt number
Nu_x	: local Nusselt number
Pr	: Prandtl number
q_x	: local heat flux [W/m^2]
Q	: heat generation by heater [W]
Ra	: average Rayleigh number
Ra_x	: local Rayleigh number
Ra^*	: modified Rayleigh number
T_f	: film temperature [K]
T_{ow}	: outer wall temperature [K]
T_{∞}	: ambient temperature [K]

그리스 문자

α	: thermal diffusivity [m^2/s]
β	: thermal expansion coefficient [$1/\text{K}$]
Δ	: differential
μ	: viscosity [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$]
ν	: kinematic viscosity [m^2/s]

참고문헌

1. 강권호, 김길정, 박영무: "96 춘계학술발표회 논문집", 한국원자력학회, 5월 31일-6월 1일, 제주대학교(1996).
2. Kang, K. H., Kim, K. J., Shin, H. K., Kim, C. and Park, Y. M.: *Nuclear Science and Engineering*(submitted)(1996).
3. Childs, Y. C.: "Oak Ridge Model Conference", Oak Ridge Associated Universities, Oak Ridge, Tennessee, USA, Feb. 3-5(1983).
4. Hickie, G. L.: "Waste System Progress Report", Rockwell International, RFP-3533, Oct. 24(1983).
5. Sefcik, D. M., Weeb, D. W. and Heaton, H. S.: *Int. J. Heat Mass*

- Transfer*, **34**(12), 3037(1991).
6. Sefcik, D.M., Weeb, D.W. and Heaton, H.S.: *Transactions of the ASME*, **113**, 912(1991).
7. Miyamoto, M., Keuhn, T.H., Goldstein, R.J. and Katoh, Y.: *Numerical Heat Transfer, Part A*, **15**, 411(1989).
8. Epstein, M.: *Journal of Heat Transfer*, **114**, 535(1992).
9. Myrum, T.A.: *Transactions of the ASME*, **112**, 632(1990).