2003 추계학술발표회 논문집 한국원자력학회

감손라우라늄 산화용기의 열 안전성 연구

A Study on the Thermal Safety of Depleted Uranium Oxidation Vessel

이형권, 홍권표, 전용범, 민덕기, 박광준, 이은표, 황용화, 서항석, 김길수, 권형문.

한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

감손우라늄 산화용기의 열 안전성에 관한 실험과 수치해석을 수행하였다. 시간경과와 열량변화 에 따른 용기의 온도변화와 Nusselt number를 구하였으며, 실험결과를 토대로 온도변화와 Nusselt number를 예측할 수 있는 관계식을 도출하였다. 또한 실험의 유효성을 확인하기 위하여 유한체적법(FVM)에 의한 수치해석값과 실험값을 비교하였으며, 오차가 약 11.1%로 잘 일치하였 다. 이러한 결과는 감손우라늄 산화용기 설계에 이용될 것이다.

Abstract

A experiment and numerical analysis on the thermal safety of the depleted uranium vessel were performed. The temperature gradient and Nusselt number in the vessel were experimentally determined according to the variation of time and heat input. The relevant equations were derived from the result of the experiments, which are able to predict the temperature gradient and Nusselt number. Also, the validation of experiments was confirmed by comparing the experimental values with the numerical analysis of using the finite volume method, and they appeared to be a good agreement within 11.1 % error range. The results obtained from this experiment can be used for the depleted uranium oxidation vessel design.

1. 서론

핵연료제조에 이용되는 우라늄(UO2)은 핵분열 동위원소인 U²³⁵의 농도가 약 0.71 %인 천연우 라늄을 농축하여 사용하고 있다. 우라늄을 1 kg을 3%로 농축하기 위해서는 U²³⁵의 농축도가 0. 2~0.3%인 감손우라늄이 약 5~6 kg로 비교적 많은 양이 발생한다. 감손우라늄은 밀도가 19 g/ 때로 납의 두배 정도로 금과 텅스텐과 비슷할 뿐만 아니라 가공성이 텅스텐보다 우수하고 금과 백금같은 금속보다 경제적이기 때문에 산업적으로 널리 이용되고 있다.^[1] 또한 감손우라늄의 원자 력 분야에서 응용으로는 국내에서는 연구용 원자료 및 고식증식로에 장전될 핵연료의 제조기술을 확립하고, 제조상의 문제을 파악하기 위해서 차세대 원자력 발전 연료 개발에 필요한 접근 방법 을 정립하기 위한 모의핵연료로서 감손우라늄이 사용된다. 감손우라늄은 천연우라늄, 토륨과 함께 저준위 방사능물질로 규정되어 있으나 원자번호가 납보다 높은 중금속이므로 인체에 많은 양이 흡입되었을 때 치명적일 수 있는 유독성이 있으며, 가공과정에서 아주 작은 입자들이 공기 중에 떠다닐 수 있으므로 인체에 흡입될 수 도 있다. 그리고 우라늄은 공기 중에서 가열하면 급속히 산화하고, 자연발화성이 있으므로 가공과정에서 칩이나 스크랩형태로 미세하게 분쇄되었을 때는 감손우라늄은 자연발화할 수 있는 표면적이 커지므로 물 속이나 기름 속에 저장하여야 한다. 처 분장으로 운반되는 우라늄 칩이나 작은 조각은 모래 등과 같은 발화 억제 물질과 혼합하고 발화 반응을 방지하기 위하여 콘트리크와 혼합한다. 그러므로 감손우라늄칩을 처분하거나 장기간 저장 할 때는 화학적으로 가장 안정된 형태인 U₃O₈형태로 산화처리를 하여야 한다. 이러한 산화처리는 산화과정에서 생성되는 방사성 비산재의 공기중 확산을 방지하기 위하여 밀폐형 반응기 내에서 이 루어져야 한다. 또한 감손우라늄 조각은 반응용기 내에서 산화 중 높은 반응열을 발생시키기 때문 에 열 손상에 대한 안전성을 고려하여야한다. 따라서 본 연구는 산화장치을 이용하여 산화처리하 기 이전에 모의실험을 수행하여 산화용기내부의 열흐름, 온도분포, 및 열전달 특성을 규명하여 산 화용기의 열 안전성에 대한 기본 자료를 생산하고자 한다.

2. 실험

가. 실험장치

실험장치는 상부에 배출구가 있는 원통형용기, 전기히터, 열전대, 데이터 수집장치(data aquisition system) 및 전압조정기로 구성되어 있다. 용기 내부에는 감손우라늄 칩을 산화시킬 때 발생하는 산화열을 모사할 수 있도록 전기히터(200V, 24.62)를 바닥면에서 30 mm 높이의 중 앙에 설치하였다.

용기 내부의 온도변화를 측정하기 위한 열전대는 원통중심에서 반경방향과 밑면에서 높이 방향 으로 60 mm/470 mm, 110 mm/270, 160 mm /70 mm인 위치에 열전대(T-type)를 설치하였다. 용기의 내벽 및 외벽 온도를 측정하기 위한 열전대는 용기의 밑면에서 95mm, 295mm 및 495mm 높이에 고정하였다. 그리고 기준 온도로 사용하기 위한 실험실의 온도는 용기의 외부로부터 1 m 떨어진 곳에 1개의 열전대를 설치하였다. 데이터수집장치(DAS)는 컴퓨터와 열전대 스캐너로 구 성되어 있다. 열전대 스캐너는 ACRO사의 ACRO 931 series(T형 열전대 정밀도 :±0.24℃)로서 5개의 입력 모듈로 구성되어 있으며, 총 40개소의 온도 측정이 가능하다. 그리고 용기내부의 열 유량을 조정하기 위한 장치는 전압조정기 (220V, 3 KVA)를 사용하였다.

나. 실험방법

산화용기에 감손우라늄칩을 직접 산화시키는 실험은 매우 위험하기 때문에 산화열을 모사할 수 있는 전기히터를 내부에 설치하고, 전기히터의 열유량을 변화시키면서 수행한다. 실험은 공기 (Pr=0.69)중에서 내부 열유량 변화 및 시간경과에 따른 용기의 온도분포를 파악하는 것이다.

Fig.1은 실험장치의 개략도이며, 본 실험을 수행하기 앞서 실험조건을 수립하기 위하여 예비 실험이 수행되었다.



Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus. 예비실험은 용기내부 온도가 주위온도와 같은 상온에서 실험을 시작하여 내부 열유량이 최대로

되는 정상상태까지 수행하였다. 이러한 예비실험에서 정상상태의 도달시간이 약 210분으로 확인 되었기 때문에 본 실험에서는 300분 동안 수행하였으며, 온도측정 주기는 2분 간격으로 하였다. 내부 열유량 변화에 따른 실험은 전압조정기를 사용하여 전기히터의 열유량을 260W에서 1,467W 까지 변화시키면서 수행하였다.

3 실험결과

가. 온도분포

온도분포는 시간경과에 따른 용기의 내부, 내벽 및 외벽의 온도와 정상상태에서 내부 발열 체의 열유량 증가에 따른 온도 변화를 나타내었다.

Fig. 2는 내부 발열체의 열유량이 260W, 585W 및 1,467W일 때 용기내부의 각 위치에서 시간 경과에 따른 온도변화를 나타내었다. 내부온도 변화는 실험초기에서 약 90분까지는 급격히 증가 하다가, 이후부터는 증가속도가 둔화되어 완만히 증가하였으며, 약 210분 정도에서 정상상태에 도 달하였다. 각 위치별 온도분포를 보면 용기의 중심축에서 가장 가깝고, 밑면에서 가장 멀리 떨어 져 있는 열전대 T₂의 온도가 가장 높게 나타났으며, 반면에 중심축에서 가장 멀리 떨어지고, 발 열체와 가장 가까운 열전대 T₄의 온도가 가장 낮게 나타났다. 이것은 전기히터에 의해서 가열된 열전대 T₂ 위치에서 공기의 밀도가 작아져 up-stream 현상이 발생하여 용기의 상부 배출구로 배출되고, 배출된 공기의 양만큼 차갑고 밀도가 높은 외부의 공기가 유입되어 벽을 타고 밑으로 내려오는 down-stream 현상이 발생하였기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.



Fig. 2. Variation of inside temperature with time.

상부 배출구에서 유체가 대류현상에 의해서 배출되고 유입되는 연구는 앞선 연구자들에 의해서 도 보고되었으며, 본 연구의 실험용기와 비슷한 구조를 갖는 용기에서의 연구동향을 알아보면 다음과 같다. Epstein은 가연성화학 물질 또는 폐기물를 저장하는 roof-vent된 공간에 화재가 발 생했을 때 최대 가능연소량을 결정하기 위해 수치해석을 수행하였는데 연소량은 vent 주위로부터 유입되는 공기량에 의해서 결정된다고 제시하였다.^[2] Myrum은 vent에서의 유동을 파악하기 위 하여 top-vent된 밀폐용기에서 vent의 크기와 Rayleigh 수를 변화시키면서 가시화실험을 수행하 였다. 그 결과 유동형태는 vent의 중앙부분은 배출되고 가장자리 부분은 유입되는 형태(mode 1), 전체적으로 배출되는 형태(mode 2), 중앙 부분과 한쪽 가장자리는 배출되고 한쪽 가장자리에 서만 유입되는 형태(mode 3), 그리고 mode 1과 반대현상으로 중앙부분은 유입되고 가장자리 부 분은 배출되는 형태(mode 4)가 나타났다고 보고하였다.^[3]

Fig. 3은 정상상태에서 내부 발열체의 열유량 변화에 따른 용기 내부의 온도분포를 나타냈으며, 열유량이 증가함에 따라 온도변화는 포물선형태로 증가하는 경향을 나타냈다.

실험결과로부터 용기내부의 온도를 예측할 수 있도록 관계식을 도출하였으며, 다음과 같은 식 으로 표현할 수 있다.

x = 0.47 m, r= 0.06m 위치에서

 $T = -4.70 \ x \ 10^{-5} Q^2 + 0.165 Q + 79.5 -----(1)$ x = 0.27 m, r=0.11 위치에서 $T = -4.63 \ x \ 10^{-5} Q^2 + 0.162 Q + 75.3 -----(2)$ x = 0.07 m, r=0.16m 위치에서

T = −4.61 x 10⁻⁵Q² + 0.163Q + 71.4 ------(3) 관계식 1, 2, 3은 정상상태에서 내부 열유량만 주어진다면 각 위치에 대한 용기내부의 온도를 예 측할 수 있으며, 오차범위는 ±2.4%, ±2.5% 및 ±2.9%이다.



Fig. 3. Variation of inside temperature with heat generation at steady state

Fig. 4는 내부 발열체의 열유량이 260W, 585W 및 1,467W일 때의 시간경과에 따른 내벽의 온 도변화를 보여주고 있다. 내벽의 온도변화는 내부의 온도변화와 마찬가지로 약 90분까지는 급격 히 증가하다가 약 210분 후에 정상상태에 도달하였다. 각 위치에 대한 벽면의 온도차는 내부 열 유량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 내부 발열체와 가까운 위치일수록 온도분포는 높게 나타났다. 이것은 내부 발열체와 거리가 가까울수록 복사 열전달 영향을 많이 받기 때문에 나타난 현상이라고 판단된다.



Fig. 4. Variation of inside wall temperature with time.

Fig. 5는 정상상태에서 내부 발열체의 열유량 변화에 따른 내벽의 온도 분포를 나타내고 있다. 온도변화는 내부 발열체의 열유량이 증가함에 따라서 포물선형태로 증가하고, 각 위치에 대한 온도차도 증가하는 것으로 나타났다.

실험결과로부터 내부 발열체의 열유량 증가에 따른 내벽의 온도 변화를 예측할 수 있도록 관계 식을 도출하였으며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다. *T* = −4.49 *x* 10⁻⁵*Q*² + 0.15*Q* + 50 -----(6) 관계식 4, 5, 6은 정상상태에서 열유량만 주어진다면 내벽의 온도를 예측할 수 있으며, 오차범 위는 실험치를 기준으로 각각 ±4.6%, ±2.3%, ±2.6%이다.

--(4)

--(5)



Fig. 5. Variation of inside wall temperature with heat generation at steady state.

Fig. 6은 내부 발열체의 열유량이 260W, 585W 및 1,467W일 때 외벽의 온도변화를 나타내었 다. 외벽에 대한 온도변화는 내벽의 온도변화와 마찬가지로 실험초기에서 약 90분까지는 급격히 증가하다가 이후부터는 증가속도가 둔화되어 약 210분 후에 정상상태에 도달하였다. 각 위치에 대한 온도차는 시간이 경과됨에 따라 증가하였으며, 내부 발열체와 가까운 위치일수록 온도는 높 게 나타났다. 이것은 내벽에서 나타난 현상과 마찬가지로 내부 발열체와 거리가 가까울수록 복 사 열전달 영향을 많이 받기 때문에 나타난 현상이라고 판단된다.



Fig. 6. Variation of outside wall temperature with time at each position.

Fig. 7은 정상상태에서 내부 발열체의 열량 증가에 따른 외벽의 온도변화를 나타내었다. 온도 변화형태는 포물선형이고 열유량이 증가할수록 각 위치에 대한 온도차는 증가하였다. 용기외벽 의 온도 변화도 내벽과 마찬가지로 내부 발열체의 열유량과 관련하여 실험결과로부터 다음과 같 T = −4.42 x 10⁻⁵Q² + 0.15Q + 49.7------(9)
관계식 7, 8, 9는 정상상태에서 내부 열유량 변화에 따른 용기의 외벽온도를 예측할 수 있는 관
계식이며, 오차범위는 실험치를 기준으로 각각 ±3.3%, ±2.4% 및 ±2.8%이다.



Fig. 7. Variation of outside wall temperature with heat generation at steady state.

나. Nusselt 수

Fig. 8은 정상상태에서 내부 발열체의 열유량 증가에 따른 각 위치의 국소 Nusselt 수 변화 를 나타냈으며, 용기의 밑면에서 높은 위치일수록 Nusselt 수가 크게 나타났다. 이러한 현상은 벽 면온도와 대기의 온도차가 상대적으로 작은 위치의 대류 열전달계수가 크기 때문이라고 생각된 다. Nusselt 수의 변화형태는 열유량이 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하는 형태를 나타 냈으며, 실험결과로부터 도출한 국소 Nusselt 수의 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다. x = 0.495m 위치에서

Nu_x = 0.089Q + 17.8 ------(10) x = 0.295m 위치에서 Nu_x = 0.041Q + 7.8 ------(11) x= 0.095m 위치에서

 $Nu_x = 0.01Q + 1.7$ -----(12)

Fig. 9는 정상상태에서 내부 발열체의 열유량 증가에 따른 평균Nusselt 수의 변화를 나타내었다. 평균 Nusselt 수의 변화형태는 국소 Nusselt수와 같은 형태로 열유량이 증가함에 따라 거의 직 선적으로 증가하는 형태를 나타냈으며, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

실험값으로부터 도출한 관계식 10, 11, 13 및 13은 내부 열유량이 주어진다면 용기외벽에 대한 국소 및 평균 Nusselt 수를 예측할 수 있으며, 오차범위는 실험치를 기준으로 각각 ±6%, ± 6.1%, ±7.6% 및 ±7.9% 이내이다.



Fig. 8. Variation of local Nusselt number with heat generation at steady state.



Fig. 9. Variation of average Nusselt number with heat generation at steady state.

4. 수치해석

가. 수치해석 모델링

열유동 해석을 위한 수치해석 모델은 용기 내부에서의 공기 유동을 난류유동 및 비압축성 유동을 고려하여 정상상태에 대한 해석을 수행하였다. 또한 유동장 내부에서의 자연대류 및 복 사열전달을 고려하였다.

열해석 모델은 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 용기 내부의 유동장은 난류영역으로 확대되 며, 수치해석 모델은 난류 해석모델에서 가장 대표적인 표준 k- 또모델을 사용하였다. 유체가 가 열되면 분자 운동이 커져 밀도가 낮아지게 되며, 이 밀도의 차이는 중력가속도로 인해 유동을 발 생하게된다. 자연대류 해석에서는 Boussinesq 모델을 사용하였으며, Boussinesq 모델에서는 밀도 가 균일하다고 가정하여, 아래의 식과 같이 밀도 차이를 체적팽창계수와 온도차로서 보상해 준다.

 $(\rho - \rho_o)g = -\rho_o\beta(T - T_o)g$ (14) $\rho = \rho_o(1 - \beta\Delta T)$ (15)

Boussineque 모델에서는 운동량방정식의 부력 효과를 제외한 모든 방정식에서 밀도를 일정한 것으로 취급함으로 온도함수로서의 밀도값을 사용하는 것보다 수렴이 빠른 이점이 있으며, 온도 및 밀도 변화가 비교적 적을 경우에 적용된다.

수치해석하기 위한 조건은 용기 주변온도는 21℃, 열전달계수는 실험값(1.60~8.86 W/m²℃), 복 사의 표면 방사율은 일반적으로 스테인레스강에서 0.3을 적용하여 용기 외부에서도 대류 및 복 사열전달이 일어나는 것으로 모델링 하였다. 용기내부의 열유량은 실험조건과 같은 열량인 260W, 585 W, 1,041W 및 1,467 W로 하였다.

나. 수치해석 결과

Fluent 코드에 의한 수치해석은 내부 열유량이 260W, 585W, 1,041W 및 1,467W인 경우에 수행하였으며, Fig. 10은 각각의 내부 열유량에서 용기의 내부 및 벽면의 온도분포를 나타내고 있 다. 내부 열유량에 따른 내부의 온도분포는 각각 73~135℃(260W), 95~185℃(585W), 115~227 ℃(1,041W)와 127~255℃(1,467W)를 나타내고 있다.





다. 실험 및 수치해석결과 비교

수치해석은 내부 열유량이 260W, 585W, 1,041W 및 1,467W인 경우에 용기의 온도분포를 구하였다. Table.1에서는 용기에 열전대가 설치된 위치에서 실험결과와 수치해석 결과를 비교하 여 나타내었다. 그 결과를 보면 전체적으로 해석결과가 실험결과보다 약 10% 정도 온도가 더 낮 게 나타났다. 이 차이는 열전달물성치, 경계조건, 해석 및 실험오차 등의 요인으로 발생된 오차라 생각된다. 특히 실험값이 해석값보다 크게 나온 것은 실험용기의 상부배출구에서 전기히터와 열 전대의 인입선들에 의해 대류유동이 방해되었기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 결론적으로 실험값과 해석값의 비교는 만족스러울 만큼 잘 일치하여 실험의 정확성이 확인되었다.

위치 열량			용기 내부		용기 외벽			
		T ₂ (x=0.47m, r=0.06m)	T ₃ (x=0.27m, r=0.11m)	T ₄ (x=0.07m, r=0.16m)	T ₈ (x=0.495)	T ₉ (x=0.295)	T ₁₀ (x=0.095)	
260W	실험값	117	112	108	76	81	87	
	해석값	108	104	102	73	77	87	
	오차	-7.7%	-7.1%	-5.5%	-3.9%	-4.9%	0%	
585W	실험값	162	156	153	101	110	123	
	해석값	149	141	136	95	102	122	
	오차	-8.0%	-9.6%	-11.1%	-5.9%	-7.2%	-1%	
1041W	실험값	199	192	190	124	139	153	
	해석값	187	176	169	115	126	156	
	오차	-6.0%	-8.3%	-11.1%	-7.2%	-9.3%	+2%	
1467W	실험값	219	213	210	136	154	171	
	해석값	212	200	192	127	142	178	
	오차	-2.7%	-6.1%	-8.6%	-6.6%	-7.8%	+4.1%	

CD 11	-	a .	<i>c</i>	• • •	1	1 . 1	1
Table		Comportioon	ot	ovportmontol	and	opolytical	370 110 C
Lanc		VOLUDALISOL	0.1	EXDELIDENTAL			values
	_		~-		~~~~~		,
		1		1		2	

5. 결론

감손우라늄 산화용기의 열안전성에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 산화용 기의 시간경과에 따른 내부 온도분포는 용기 중심축에 가까울수록 높고, 또한 상부에 위치할수록 높았다. 그리고 벽면의 온도분포는 발열체와 가까울수록 높게 나타났다. 이러한 현상은 용기내부 인 경우 대류 열전달에 의해서, 그리고 벽면은 복사열전달에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 해 석할 수 있다. 국소 Nusselt 수는 실험 초기에 매우 높은 상태에서 급격히 감소하여 시간이 지 남에 따라 안정된 경향을 보였다. 또한 정상상태에서, 내부 발열체의 열유량 변화에 따른 국소 Nusselt 수와 평균 Nusselt 수는 직선적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 실험 및 수치해석 결 과 온도는 전체적으로 해석결과가 실험결과보다 약 10% 정도 낮게 나타났지만, 실험값과 해석값 이 잘 일치하여 실험의 정확성이 확인하였다.

참고문헌

[1] Paul Loewestein, "Metal hand book", American society for metals(1980)

- [2] M. Epstein, "Maximum air flow rate into a roof-vented enclosure fire", Journal of Heat Transfer(1992)
- [3] T. A. Myrum, "Natural convection from a heat source in a top vented enclosure", Transactions of the ASME(1996)
- 이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 기관고유사업의 일환으로 추진하였으며, 관계자 여러분

께 감사드립니다.