'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

조사된 UO_2 소결체의 열전도도 모델 개발

Development of Irradiated UO_2 Thermal Conductivity Model

이찬복, 방제건, 김대호, 정연호

한국원자력연구소
대전시 유성구 사서함 105 호, 305-600

요 약

조사된 UO_2 핵연료 소결체에 대해 주기적으로 온도를 변화시키면서 측정한 열확산도 자료에 기초하여 UO_2 소결체의 열전도도 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 고체성 핵분열 생성물, 기체성 핵분열생성물, 방사선 조사손상 및 기공도 등의 인자들의 곱으로부터 UO_2의 열전도도를 구한다. 주기적인 온도 변화에 따른 열확산도 측정자료와 기존의 UO_2 열전도도 모델들과의 비교를 통해 개발된 모델을 검증하였다. 개발된 모델은 기존의 열전도도 모델들과는 달리 핵분열기체의 영향을 별도의 인자로써 고려할 수 있기 때문에, 고연소도 UO_2 소결체의 Rim 영역과 같이 핵분열기체가 기지로부터 기포로 석출되는 영역에서의 열전도도 변화를 예측할 수 있다.

Abstract

Thermal conductivity model of the irradiated UO_2 pellet was developed, based upon the thermal diffusivity data of the irradiated UO_2 pellet measured during the thermal cycling. The model predicts the thermal conductivity by multiplying such separate factors as solid fission products, gaseous fission products, radiation damage and porosity. The developed model was verified by comparison with the variation of the measured thermal diffusivity data during the thermal cycling and prediction of other UO_2 thermal conductivity models. Since the developed model considers the effect of gaseous fission products as a separate factor, it can predict the variation of thermal conductivity in the rim region of high burnup UO_2 pellet where the fission gases in the matrix are precipitated into bubbles.

1. 개 요

UO_2 소결체의 열전도도는 밀도, 기공도, Stoichiometry, 온도 및 불순물의 농도 등의 영향을 받는다. 또한 노내의 방사선 조사조건 하에서는 방사선조사량 및 핵분열생성물의 영향을 받는다. 세라믹인 UO_2 소결체의 열전도도는 1500 ℃ 이하에서는 주로 Phonon 열전달에 의해 일어나며, 1500 ℃ 이상의 고온에서는 자유 전자에 의한 열전달이 추가된다. 세라믹 구조인 UO_2 소결체에서 자유전자의 이동성은 온도가 증가함에 따라 가속적으로 증가하기 때문에 전자에 의한 열전달은 온도 증가와 함께 증가한다. Phonon 열전달 기구는 온도차가 있는 고체의 구성 격자에서 열적 진동에 의해 가상적인 양자 입자가 이동하여 열전달을 하는 것과 같으며, Phonon은 주기와 길이를 지닌 파동의 특성도 지닌다. 격자내 구성입자의 자체 진동은 온도에 따라 증가하기 때문에, 열전달 Phonon 파동과의 간섭으로 인해 온도가 증가함에 따라 열전달의 저항이 커지게 된다. 따라서 Phonon에 의한 열전달은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 또한 격자 내의 점결함, 선결함 및 불순물 등은 자체적 혹은 이로 인한 격자의 변형 등에 의해 Phonon 파동의 이동을 간섭을 통해 방해하기 때문에 열전도도를 감소시킨다. Phonon 파동을 산란 시키는 정도는 점결함, 선결함 및 기포 혹은 핵분열생성물화합물 등의 큰 이물질 장애물 등의 순서로 감소한다[1].

2. UO_2 소결체의 열전도도 모델 분석

2.1 열전도도에 영향을 주는 인자

<u>기공도</u>

기공도가 UO_2의 열전달에 주는 영향은 기공의 모양 및 분포 상태에 따라 다르다. 기공도는 UO_2 소결체 제조 시에 생성되는 기공과 노내 연소 중에 핵분열기체가 모여 생성된 기포 등에 의해 결정된다. UO_2 소결체 내의 결정립 경계면에 생성되는 기포는 결정립 경계면의 영향에 의해 볼록렌즈 모양을 가지며, 결정립 내부 및 고연소도 소결체의 Rim 영역에 생성되는 기포는 구 모양이다. UO_2 소결체의 제조시에 생성된 기공은 기포와는 달리 표면이 불규칙한 모양을 가진다. UO_2 소결체의 열전도도에서 기공도(p)의 영향을 고려하는 기공도인자(f_p)보정식은 다음과 같은 것들이 있다[2]. 여기서 기공의 기체성 구성 물질의 열전도도는 기지의 열전도도와 비교하여 아주 작다고 가정하였다.

- Loeb 보정식 : $f_p = 1- \alpha p$
- Maxwell 보정식 : $f_p = (1-p)^{1.5}$
- Maxwell-Eucken 보정식 : $f_p = (1-p)/(1+ \beta p)$
- Schulz 보정식: $f_p = (1-1.5p)$
- Bakker 보정식 : $fp = (1-p)^{1.7 \pm 0.7}$

Loeb 및 Maxwell-Eucken 보정식에서 α 및 β 인자는 모든 기공이 구형이고 균일하게 분포되었을 경우에는 이론적으로는 각각 1 및 0.5 이다. 그러나 비조사된 UO_2 소결체의 실제 측정된 열전도도 자료를 Fitting한 결과, α 값은 2.5 ± 1.5 로써, 기공으로 인한 열전도도 감소효과가 구형일때보다 증가하였다. 이는 기공이 구형이 아니고 불규칙하게 분포되었기 때문이다. Schulz 보정식은 기공들이 구형으로써 균일하게 분포된 경우에 대해 이론적으로 유도된 것이다. Bakker 보정식은 25 MWD/kgU 연소도까지 조사된 UO_2 소결체 내의 기공의 모양 및 분포에 대해 유한요소법으로 해석한 결과로부터 유도된 것이다[3]. 그림 1은 각 기공도

보정식의 예측치를 기공도에 따라 비교한 것이다. 기공의 모양이 비 구형이고, 분포가 불균일 할수록 기공 보정인자가 작음을 알 수 있다.

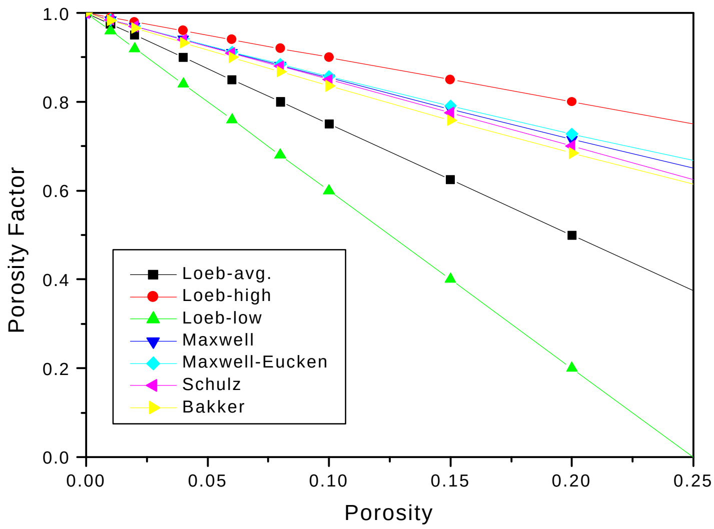


그림 1. 기공 보정식 비교

<u>핵분열생성물</u>

핵분열생성물은 UO_2 소결체 내에서 다음과 같이 4종류의 형태로 존재한다[4].

- 기지에 용해된 산화물 : Sr, Zr, Nb, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm
- 금속석출물 : : Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sb, Te
- 산화된 석출물: Ba, Zr, Nb, Mo, (Rb, Cs, Te)
- 기체 및 휘발성 원소 : Kr, Xe, Br, I, (Rb, Cs, Te)

핵분열 생성물이 UO_2 소결체의 열전도도에 주는 영향을 분석하기 위해 위의 핵분열 생성물의 농도 및 존재 상태를 비방사성의 원소들로 모사한 SIMFUEL을 제조하여 열전도도를 측정하는 연구가 많이 수행되었다[5]. SIMFUEL의 시험 결과, 용해된 핵분열생성물은 열전도도를 감소시키는 반면에 금속석출물(0.05 ~ 1 μm)은 오히려 열전도도를 증가시키는 것으로 나타났다[6]. 이는 금속석출물의 열전도도가 UO_2 기지 보다 크기 때문이다.

<u>불순물 혹은 첨가물</u>

UO_2 소결체 내의 첨가물 혹은 불순물이 UO_2의 열전도도에 주는 영향은 핵분열생성물과 같이 열전도도를 감소시킨다. UO_2 소결체에 Gd_2O_3를 첨가하여 제조되는 가돌리니아 가연성 독봉은 Gd_2O_3의 농도에 따라 UO_2/Gd_2O_3 소결체의 열전도도는 감소한다. Gd_2O_3는 BCC 격자 구조로써 FCC 구조의 UO_2 격자에 변형을 일으키고 결함의 생성을 촉진시켜서 열전도도를 저하시킨다. 또한 Gd_2O_3와 같은 첨가물은 UO_2와 질량이 다르기 때문에 Phonon-Phonon 산란

특성을 변화시킨다.

Stoichiometry

비조사된 $UO_{2\pm x}$ 소결체에 대해 산화 정도인 Stoichiometry를 변화시키면서 열전도도를 측정한 결과, x가 양일 경우(Hyper-stoichiometry) 열전도도는 감소하였고, 음일 경우(Hypo-stoichiometry) 열전도도는 약간 증가한다. 그러나 조사된 UO_2 소결체의 열전도도의 평가에서는 Stoichiometry 뿐만 아니라 핵분열생성물 및 연소도의 영향을 함께 고려하여야 한다. 따라서 Halden[7] 및 NFI 경험식[8] 등과 같은 조사된 UO_2 소결체의 열전도도 경험식들은 Stoichiometry의 영향을 별도의 변수로 고려하고 있지 않고 있다.

방사선 조사 손상

방사선 조사에 의해 UO_2 소결체에는 점 및 선결함, Dislocation 및 Loop 등의 조사 손상이 생성된다. 이들은 Phonon 파동의 진행을 간섭을 통해 방해하기 때문에 UO_2 소결체의 열전도도를 감소시킨다. 이들 방사선 조사 손상은 또한 온도가 증가함에 따라 재결합에 의해 결함들이 소멸되기 때문에 손상의 정도가 감소한다. 실험 결과 1000 K 이하에서 선 및 점결함은 재결합에 의해 소멸되는 것으로 나타났다[9]. 또한 방사선 조사손상은 낮은 연소도에서 일찍 포화상태에 도달하기 때문에 연소도에 비례하여 지속적으로 증가하지 않는다.

2.2 기존의 UO_2 열전도도 모델

Lucuta 모델[6]

1996 년에 발표한 조사된 UO_2 소결체에 대한 Lucuta 모델식은 다음과 같다.

$$l = K_{1d} K_{1p} K_{2p} K_{3x} K_{4r}\, l_0$$

$$l_0 = \frac{1}{(0.0375 + 2.165\times10^{-4}\cdot T)} + \frac{4.715\times10^9}{T^2}\exp(-\frac{16361}{T})$$

여기서,

λ = thermal conductivity of irradiated UO_2

λ_0 = thermal conductivity of unirradiated 100 % dense UO_2

K_{1d} = factor for fission products

K_{1p} = factor for precipitated metal fission products

K_{2p} = factor for porosity

K_{3x} = factor for stoichiometry

K_{4r} = factor for radiation damage

핵분열생성물의 영향은 SIMFUEL의 시험 결과에 기초하였으며, 방사선 조사손상의 영향은 Daniel 및 Cohen의 자료를[10] 사용하였다. 기공도는 Maxwell-Eucken 보정식을 사용하였

으며, 100 % 밀도 UO_2 의 열전도도는 Harding 및 Martin의 자료를[11] 사용하였다.

Halden 모델[7]

Halden 모델식은 Halden 연구로에서의 핵연료 온도 측정 시험 자료가 새로이 생산될 때마다 지속적으로 개선되어 왔다. 그러나 모델식의 구조상의 변화는 없었다. 1997 년에 Wiesnack에 의해 발표된 Halden 의 모델식은 다음과 같다.

$$l_{95} = \frac{1}{0.1148 + 0.0035BU + 2.475 \times 10^{-4}(1 - 0.00333BU)T} + 0.0132\exp(0.00188T)$$

위에서 λ_{95}는 95 % 이론밀도에서의 UO_2의 열전도도(w/m.K), BU는 연소도(MWD/kgU)이며, T는 온도(℃) 이다. Halden의 모델식은 노내에 연소중인 핵연료에서 직접 측정된 온도 및 출력 자료로부터 유도된 모델식이다. 따라서 노내에서의 UO_2 소결체의 열전도도를 잘 대변할 수 있다. 그러나 핵연료 갭에서의 열전달 계수의 불확실성 및 적용 가능한 온도의 범위는 실제 노내 측정시의 온도 범위에 국한되며, 노내에서 소결체 내의 온도 변화를 각각 고려하지 못하고 소결체의 평균온도만을 고려하는 등의 제한 요소가 있다.

NFI 모델[8]

NFI 모델은 39.3 MWD/kgU까지 연소된 UO_2 핵연료의 열확산계수를 노외에서 Laser Flash Method에 의해 측정한 자료에 근거하여 개발되었다. 열전도도는 열확산계수, 밀도 및 비열의 상관관계로부터 구한다. NFI 모델식은 다음과 같다.

$$l_{95} = \frac{1}{4.52 \times 10^{-2} + 2.46 \times 10^{-4}T + 1.87 \times 10^{-3}BU + 0.038BU^{0.28} \cdot h(T)} - 5.47 \times 10^{-9}T^2 + 2.29 \times 10^{-14}T^4$$

$$h(T) = \frac{1}{1 + 396\exp(-6380/T)}$$

위식에서 λ_{95}는 95 % 이론밀도에서의 UO_2의 열전도도(w/m.K), BU는 연소도(MWD/kgU)이며, T는 온도(K), h(T)는 방사선조사손상의 영향을 온도의 함수로 나타낸 것이다.

3. UO_2 열전도도 모델식 개발

미국 EPRI가 주관하는 국제공동연구 프로그램인 NFIR(Nuclear Fuel Industry Research)에서는 조사된 UO_2 핵연료에 대해 온도를 변화시키면서 UO_2 의 열확산 계수를 Laser Flash Method에 의해 측정하였다[12,13]. 조사된 UO_2 핵연료의 시편은 24.9 MWD/kgU(U2), 36.23

MWD/kgU(U4) 및 59.93 MWD/kgU(U6) 연소도의 3 종류였다. 표1은 열확산계수를 측정한 온도 변화 이력을 보여준다.

표 1. 조사된 UO_2 시편의 온도 변화 이력

Cycle	Temperature(℃)			Duration of Cycle of Specimen(min)		
	Initial	Peak	Final	U2	U4	U6
1	300	800	300	269	330	332
2	300	1100	500	240	375	485
3	500	1500	300	422	412	485
4	300	1600	300	469	542	611

열확산계수는 300 ℃에서 1600 ℃까지 온도가 100 ℃ 변할 때 마다 측정되었다. Cycle 1에서의 측정자료는 노내 연소 및 노외 냉각기간 중에 생성된 모든 영향이 포함된 상태에서의 UO_2 의 열확산계수를 나타낸다. 최대 800 ℃까지 도달한 Cycle 1 이후에는 핵연료시편의 노외 냉각기간 중에 생성된 방사선조사 손상이 소멸되었다고 볼 수 있다. 따라서 Cycle 2의 측정자료는 실제 원자로 내에서의 핵분열생성물 및 노내 방사선 조사손상 등의 노내 연소중의 영향들이 포함된 UO_2의 열확산계수라고 할 수 있다. 최대 온도가 1100 ℃ 인 Cycle 2 이후에는 노내에서의 연소 중에 생성될 수 있는 모든 방사선 조사 손상들이 회복 혹은 소멸되었다고 볼 수 있다. 따라서 Cycle 3에서 측정된 열확산계수는 노내에서 생성되는 방사선 조사손상의 영향이 배제된 핵분열생성물의 영향만이 포함된 UO_2 시편의 열확산계수라고 할 수 있다. Cycle 3 은 최대 1500 ℃ 까지 온도를 증가시켰기 때문에 Cycle 3 중에 핵연료시편에 있는 핵분열기체는 기지 내에서 기포로 방출되거나 외부로 방출되어 기지 내에는 핵분열기체가 존재하지 않는 다고 가정할 수 있다. 따라서 Cycle 4에서 측정된 열확산계수는 핵분열생성물 중에서 핵분열기체의 영향이 배제된 고체성 핵분열생성물의 영향만이 고려되었다고 가정할 수 있다. 온도를 주기적으로 변화시키면서 Cycle 1-4까지 열확산계수를 측정한 후의 핵연료시편을 분석한 결과, U4 시편에서는 결정립 경계면에 micron 크기의 기포가 새로이 형성되었으며, 고연소도인 U6 시편에서는 결정립 내에서도 micron 크기의 기포가 생성되었으며, 기포의 크기는 소결체의 가장자리로 갈수록 커졌는데, 이는 국부 연소도가 소결체 가장자리로 갈수록 증가하기 때문이다.

그리하여 Cycle 1-4에서 측정된 열확산계수의 변화를 추적하여 분석함으로써, 고체성 핵분열생성물, 기체성 핵분열생성물 및 방사선조사손상 등이 UO_2 핵연료의 열전도도에 주는 영향을 각각 분리하여 분석할 수가 있다. 다음은 위의 주기적인 온도 변화에 따른 열확산도 측정자료로부터 구한 고체성 핵분열생성물, 기체 핵분열생성물, 방사선조사손상 및 기공도 등의 영향을 각각 별도의 인자로 고려한 UO_2 소결체의 열전도도 모델식이다. 모델의 기본식은 Lucuta 모델식[6]과 유사한데, 핵분열생성물의 영향을 고체와 기체로 분리하여 고려하였다. 각 인자는 NFIR의 핵연료 시편의 열확산계수의 측정자료로부터 구하였다.

$$l = f_{sfp} f_{fg} f_{rd} f_p l_0$$

$$f_{sfp} = \frac{10.152 + 0.0762T}{10.152 - 4.8054BU^{0.5} + 1.563BU + (0.0762 + 4.724\times10^{-3}BU^{0.5} - 8.624\times10^{-4}BU)\cdot T}$$

$$f_{fg} = \frac{10.152 - 4.8054BU^{0.5} + 1.563BU + (0.0762 + 4.724\times10^{-3}BU^{0.5} - 8.624\times10^{-4}BU)\cdot T}{10.152 - 1.423BU^{0.5} + 1.6072BU + (0.0762 + 3.043\times10^{-3}BU^{0.5} - 8.066\times10^{-4}BU)\cdot T}$$

$$f_{rd} = \frac{1.19}{0.5608 + 0.5655\exp(179.38/T)}$$

$$l_0 = \frac{1}{(0.0375 + 2.165\times10^{-4}\cdot T)} + \frac{4.715\times10^9}{T^2}\exp(-\frac{16361}{T})$$

여기서,

λ = thermal conductivity of irradiated UO_2

λ_0 = thermal conductivity of unirradiated 100 % dense UO_2

f_{sfp} = factor for solid fission products

f_{fg} = factor for gaseous fission products

f_{rd} = factor for radiation damage

f_p = factor for porosity

위에서 T는 온도(K)이며, B는 연소도(MWD/kgU)를 나타낸다. 기공도 인자, f_p 는 기공 및 기포의 형태 및 분포에 따라 결정되어야 한다. 일반의 비조사된 혹은 낮은 연소도로 조사된 UO_2 소결체에 대해서는 Loeb 혹은 Bakker 보정식이 타당하고, 소결체 Rim 영역에서와 같이 구형의 기포가 발달되어 고르게 분포된 경우에는 이론적으로 유도된 Schulz의 보정식이 타당하다. 그림 2-5에는 고체 핵분열생성물인자(f_{sfp}), 기체성 핵분열생성물인자(f_{fg}), 방사선조사손상인자(f_{rd}) 및 이들 인자들의 곱인 연소도 인자($f_{tot}=f_{sfp}.f_{fg}.f_{rd}$)의 예측치와 NFIR의 온도 변화에 따른 열확산도 측정자료로부터 구한 값들이 비교되어 있다. 그림 3은 열확산도 측정자료로부터 구한 기체성 핵분열생성물인자의 산란성이 매우 큼을 보여주는데, 그림 2의 고체성 핵분열생성물인자와 비교하여 기체성 핵분열인자는 연소도 증가에 따른 변화가 크지 않는 것으로 나타났다. 방사선조사손상인자는 연소도 증가에 무관하게 일정한 것으로 나타났는데, 이는 방사선 조사손상이 낮은 연소도에서 일찍 포화되기 때문이다. 1100 ℃ 이상에서는 방사선조사손상이 모두 회복되고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 이들 인자들을 모두 곱한 연소도 변화에 따른 열전도도 변화를 보여주는데, 1300 ℃ 이상의 고온에서 측정자료의 산란성이 커지는 것을 제외하면 예측모델은 측정자료를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

그림 6-9는 위의 열전도도 모델식의 예측치와 Lucuta, Halden 및 NFI 등의 기존의 UO_2 열전도도모델의 예측치와 비교한 것이다. 개발된 모델은 NFI 모델의 예측치와 유사하였는데, NFI 모델도 조사된 핵연료의 열확산도도 측정자료로부터 개발된 것이다. Halden 모델은 800 ℃ 이하에서는 크게 예측하고 있는데, 이는 Halden 모델이 낮은 온도에서의 방사선조사손상에 의한 열전도도 저하를 충분하게 고려하지 못하기 때문인 것으로 추정된다[1]. Lucuta 모델은 금속석출물의 영향을 별도의 인자로 고려하는데, 500 – 800 ℃ 영역에서 온도 증가에

따른 열전도도의 감소율이 저하되고 있으며, 전반적으로 다른 모델 보다 열전도도를 크게 예측하고 있다.

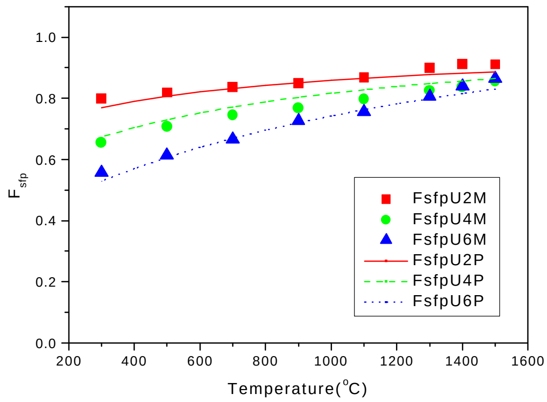


그림 2. 고체핵분열생성물인자 비교
(*M : 측정치, *P : 예측치)

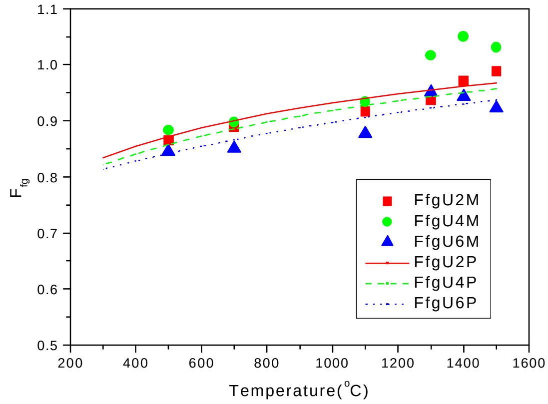


그림 3. 기체핵분열생성물인자 비교
(*M : 측정치, *P : 예측치)

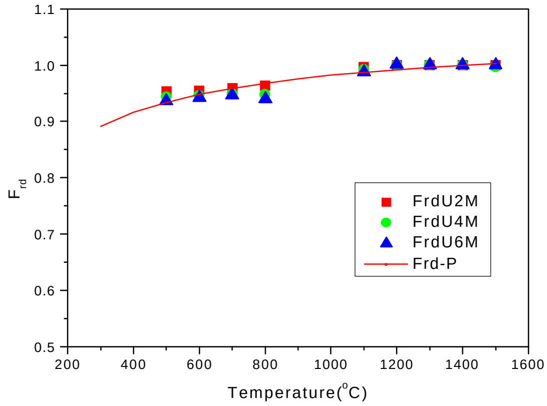


그림 4. 방사선조사손상인자 비교
(*M : 측정치, *P : 예측치)

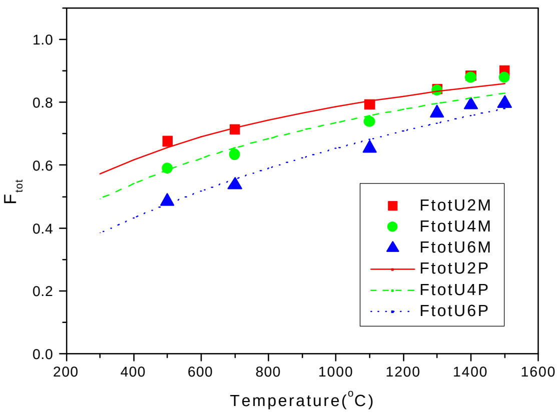
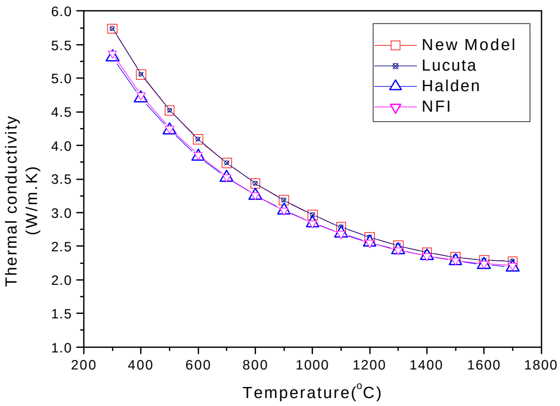


그림 5. 연소도인자 비교
(*M : 측정치, *P : 예측치)



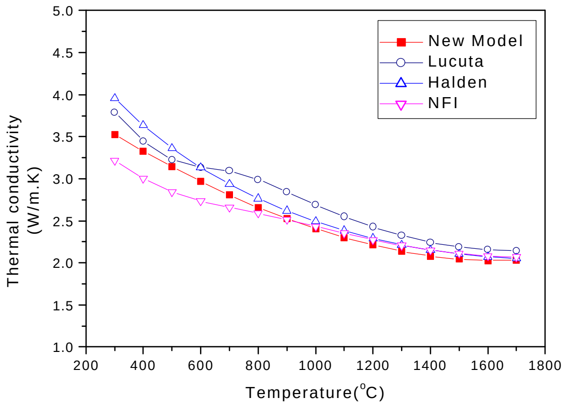


그림 6. 비조사된 UO_2(95 % TD)의 열전도도

그림 7. 20 MWD/kgU UO_2의 열전도도

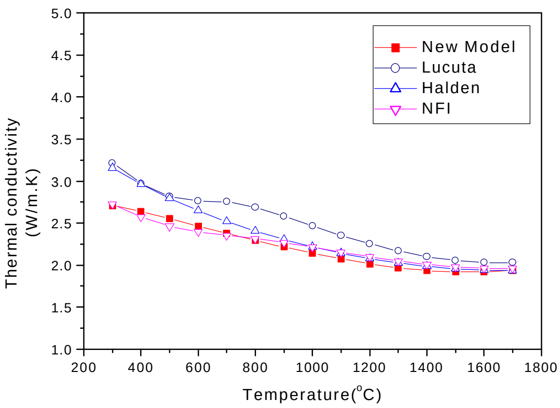


그림 8. 40 MWD/kgU UO_2의 열전도도

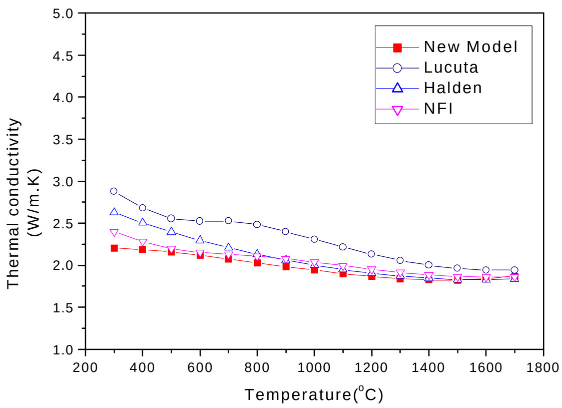


그림 9. 60 MWD/kgU UO_2의 열전도도

한편, 여기서 개발된 조사된 UO_2 소결체의 열전도도 모델은 고체성 핵분열생성물과 기체성 분열생성물의 영향을 구분하여 고려하기 때문에, 고연소도 UO_2 소결체의 Rim 영역에서와 같이 기지에 존재하던 핵분열기체가 기포로 석출되는 영역에서의 열전도도 변화를 예측할 수 있다. 소결체 Rim 영역에서의 핵분열기체로 구성된 기포의 기공도는 15 – 17 % 이며, 기포는 구형으로 고르게 분포되어 있다[14,15]. 따라서 소결체 Rim 영역에서의 열전도도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$l_{rim} = f_{sfp}^{rim} f_{rd} f_{p}^{rim} l_0$$

Rim 영역에서의 기포는 구형이고 균일하게 분포되어 있기 때문에 Schulz의 기공보정식을 사용할 수 있다. 한 예로써, 기포에 의한 기공도가 15 % 이고 국부 연소도가 80 MWD/kgU인 소결체 Rim 영역에서 600 ℃에서의 열전도도와 국부연소도가 80 MWD/kgU이고 핵분열기체가 기포로 석출되지 않은 정상적인 UO_2 소결체의 열전도도를 비교해 보면 다음과 같다. Rim 영역에서의 15 % 기포 기공도에 의해 열전도도가 23 % 감소하는 반면에, 기지로부터 핵분열기체가 없어짐에 따라 핵분열기체에 의한 열전도도 감소인자가 1 이 되어 18 % 증가한다. 따라서 Rim 영역에서 기지로부터의 핵분열기체 소멸과 기포 기공의 발생의 영향을 함께 고려하면, 국부연소도가 80 MWD/kgU 인 Rim 영역의 UO_2 소결체의 600 ℃에서의 열전도도는 정상적인 구조의 UO_2 소결체와 비교하여 약 9 % 만 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 고연소도 UO_2 소결체의 Rim 영역에서 기지로부터의 핵분열기체의 소멸 현상은 기포에 의한 열전도도 감소의 영향을 상당하게 보상하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

조사된 UO_2 핵연료 소결체에 대해 주기적으로 온도를 변화시키면서 측정한 열확산도 자료에 기초하여 UO_2 소결체의 열전도도 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 고체성 핵분열생성물, 기체성 핵분열생성물, 방사선 조사손상 및 기공도 등의 각 인자의 곱으로부터 열전도도를 구한다. 주기적인 온도 변화에 따른 열확산도 변화 측정자료와의 비교를 통해 각 인자의 신뢰성을 검증하였으며, 기존의 UO_2 열전도도 모델들과의 비교를 통해 개발된 모델의 신뢰성을 확인하였다. 개발된 모델은 기존의 열전도도 모델과는 달리 핵분열기체의 영향을 별도의 인자로써 고려할 수 있기 때문에, 핵분열기체가 기지로부터 기포로 석출되는 고연소도 UO_2 소결체의 Rim 영역에서의 열전도도 변화를 예측할 수 있다.

5. 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

6. 참고문헌

(1) C. Beyer and D. Lanning, “Review of fuel thermal conductivity data and model”, Seminar on Thermal

Performance of high burnup LWR Fuel, Cadarache, France, 2-6 March, 1998.
(2) D.G. Martin, "A Re-appraisal of the thermal conductivity of UO_2 and mixed (U,Pu) oxide fuel", J. Nucl. Mater. 110(1982)73.
(3) K. Bakker, et al., "Determination of a porosity correction factor for the thermal conductivity of irradiated UO_2 fuel by means of the finite element method", J. Nucl. Mater. 226(1995)128.
(4) H. Kleykamp, "The chemical state of the fission products in oxide fuels", J. Nucl. Mater. 131(1985)221.
(5) P.G. Lucuta, et al., "Modelling of UO_2-based SIMFUEL thermal conductivity : The effect of the burnup", J. Nucl. Mater. 217(1994)279.
(6) P.G. Lucuta, et al., "A pragmatic approach to modeling thermal conductivity of irradiated UO2 fuel : review and recommendations", J. Nucl. Mater. 232(1996)166.
(7) W. Wiesenack, "Assessment of UO_2 conductivity degradation based upon in-pile temperature data", Proc. of Int. Top. Mtg. on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, 1997.
(8) K. Ohira and N. Itaki, "Thermal conductivity measurements of high burnup UO_2 pellet and a benchmark calculation of fuel temperature", Proc. of Int. Top. Mtg. on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, 1997.
(9) M. Amaya and M. Hirai, "Recovery behavior of thermal conductivity in irradiated UO_2 pellets", J. Nucl. Mater. 247(1997)76.
(10) R.C. Daniel and I. Cohen, "In-pile effective thermal conductivity of oxide fuel elements to high burnup depletion", WAPD-246, 1964.
(11) J.H. Harding and D.G. Martin, "Recommendation for the thermal conductivity of UO_2", J. Nucl. Mater. 166(1989)166.
(12) S. Yagnik, "Thermal conductivity recovery phenomenon in irradiated UO_2 and $(U,Gd)O_2$", Proc. of Int. Top. Mtg. on LWR Fuel Performance, Parkcity, Utah, 2000.
(13) M. Lippens and L. Mertens, "High burnup UO_2 and $(U,Gd)O_2$ thermal diffusivity measurements and post-irradiation characterizations", EPRI Report TR-106501, 1996.
(14) J. Spino, et al., "Detailed characterization of the rim microstructure in PWR fuels in the burnup range 40-67 GWd/tM", J. Nucl. Mater. 231(1996)179.
(15) J. Spino, et al., "High burnup rim structure : evidences that xenon-depletion, pore formation and grain subdivision strat at different local burnups", J. Nucl. Mater. 256(1998)189.