2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

건식재가공 핵연료 성능평가를 위한 INFRA 코드시스템의 적용
An Application of INFRA Code System for the Performance Evaluation of Dry Process Fuel

박창제, 박주환, 강권호, 류호진, 송기찬, 양용식, 이찬복
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

경수로 사용후핵연료를 원격 건식 공정으로 재가공하여 제조한 핵연료를 원자로에 장전 시 핵연료의 노내 거동을 분석할 수 있는 전산 코드 개발이 필요하다. 건식 재가공핵연료는 다양한 원자로에 사용될 수 있으므로, 모든 대상 원자로에 대한 건식 재가공 핵연료의 성능 평가 코드를 확보하는 것이 궁극적인 목표이다. 이와 같은 작업의 일환으로 경수로에 건식 재가공 핵연료를 장전하는 경우에 대한 핵연료 성능 평가를 위하여 한국원자력연구소에서 독자소유권을 가지고 개발한 핵연료 성능 평가 코드인 INFRA 코드의 열적, 기계적 성능 모형을 건식 재가공 소결체의 물성에 적합하도록 수정하여 노내 거동을 분석하였다. 추가된 건식재가공 소결체의 모형을 확장하여 동일한 원자로 조건에서 UO_2 핵연료와 성능을 비교 분석하였다. 본 연구는 건식 재가공 소결체의 열적, 기계적 성능 모형을 고려한 건식 재가공 핵연료 성능 분석 전산 코드 개발의 기초 작업으로서, 건식 재가공 핵연료를 Gen-IV 등 미래 원자력 시스템에 장전하였을 때 원자로 내에서의 핵연료 거동 및 건전성 분석 코드 체계 구축에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

In order to evaluate the performance of dry process fuel loaded into the pressurized water reactor (PWR), we have modified INFRA, an high burnup fuel performance code system developed independently by Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), with thermal and mechanical performance models of dry process fuel. Hence, the inpile behavior of dry process fuel will be estimated in the PWR with this code system. This paper deals with thermal characteristics of UO_2 and dry process fuels by the computational results obtained from the modified INFRA code with various thermal and mechanical models of the dry process fuel. The results will be utilized to provide basic data for the dry process fuel performance and to construct the dry process fuel performance code system with new thermal and mechanical models of dry process fuel for the future nuclear systems such as the generation IV reactor systems.

1. 서론

지속적인 인류의 발전과 원활한 미래 에너지 수요를 위하여 현재의 원자력시스템을 개선하여 제 4 세대 원자력시스템 (Generation IV reactor system, Gen-IV)을 개발하자는 논의가 개시되어 현재 활발히 연구계획을 구상하고 있으며 국제공동연구가 진행중에 있다. 이와 관련하여 새로운 개념의 원자력시스템이 선정되었으며 각 시스템별로 새로운 핵연료와 핵연료주기를 도입하여 Gen-IV의 목표인 지속성과 안정성, 경제성, 그리고 핵비확산성 등을 확보하기 위해 여러 방면에서 관련 작업이 진행중에 있다.[1]

이러한 핵비확산성 산화물 건식재가공 핵연료의 연구가 수행되고 있으며[2,3], 그 연구의 일환으로 하나로에 장전시 건식재가공 핵연료의 성능 분석을 위한 전산시스템 구축은 이미 수행한 바 있다.[4,5] 하나로는 상용원자로에 상응하는 조건으로 수행이 가능하나 상이한 핵연료 주변의 유동 조건으로 인해 핵연료봉의 노내 거동 및 건전성 시험에는 한계가 있어서 이를 극복하는 방법으로 핵연료 성능 분석용 전산코드에 의한 핵연료 성능을 해석하였다.

한편, 건식재가공 핵연료 성능 분석용 전산코드의 개발을 위해 기존의 가압경수로용 혹은 중수로용 전산코드를 이용하는 방법이 있을 수 있다. 그러나, 이들 코드들은 UO_2 소결체에 대해 적용이 가능하므로 전술한 바와 같은 건식재가공 핵연료 소결체는 물성 및 재료적인 측면에서 기존의 UO_2 소결체와 매우 다르므로 기존의 전산 코드를 활용하기 위해서는 건식재가공 핵연료 소결체에 대한 여러 가지 물성 값들을 먼저 알아야 할 뿐만아니라 핵연료 장전 대상 원자로도 먼저 선정해야만 한다.

본 논문에서는 우선적으로 고연소도 핵연료 성능 분석을 위해 개발된 INFRA (INtegrated Fuel Rod Analysis) 코드[6]를 이용하여 건식재가공 소결체용 열적 기계적 모델을 수정하여 가압경수로에 장전시 건식재가공 핵연료의 성능분석을 수행하고 있다. 이러한 작업은 향후 경수로외의 다양한 미래 원자력시스템에 건식재가공 핵연료를 장전시 성능평가 코드시스템 구축에 기본적인 과정으로 활용할 수 있을 것이다. 또한 다양한 원자력시스템에 따른 보다 새로운 건식재가공 핵연료의 열적·기계적 모델을 고려한 성능평가 코드시스템을 구축해야할 것이다.

2. INFRA 코드의 소개

INFRA 코드는 1997년에 한국원자력연구소에서 개발하기 시작하였으며 독자 소유권을 확보하고 있으며 기능성으로는 세계 최신을 목표로 하고 있다. 대상 핵연료의 연소도는 70000MWd/MtU 이상 이며 U-235 농축도 5 w/o 이상까지 적용 가능하게 개발되었다. 적용 핵연료는 UO_2, UO_2/Gd_2O_3, 그리고 ThO_2-UO_2 등 이다. 프로그램은 총 16,115 라인으로 140개의 서브루틴으로 구성되어 있으며 PC에서 작동되는 FORTRAN 언어로 되어있다. 코드 검증을 위하여 Halden Reactor Project에의 핵연료 노내 시험자료를 이용하여 핵연료의 거동을 비교하였으며 OECD/NEA의 International Fuel Performance Database도 이용하고 있다. 또한 IAEA/CRP주관 FUMEX-II 프로그램에 참가하여 benchmark 평가를 수행하고 있다.[6] Table 1에는 INFRA에서 다루고 있는 핵연료봉 주요 성능 모델을 나타내고 있다. INFRA 코드에서는 입력 및 출력의 각 변수 단위를 SI 단위를 기본으로 하여 통일하고 있으며 입력의 정보를 서로 연관성이 있는 5 그룹으로 분리하여 입력의 편의성을 향상시키고 있다. 또한 출력을 5 그룹으로 분리하여 사용자가 편리하게 분석할 수 있도록 개선하였다.

Table 1. 핵연료봉 주요 성능 모델 분석

구분	성능인자	고연소도용 모델 개선필요여부	INFRA 독자 모델 개발	비고
소결체	Power and Burnup 분포	O	O	
	Fission Gas Release	O	O	
	Swelling	O	O	Bubble Swelling
	Densification	X	O	저고밀화 소결체
	Thermal Conductivity	O	O	
	Creep	X	X	
	Restructuring	X	X	
	Relocation	X	O	
	Rim Effects	O	O	HBS 생성 연소도, 열전도도
피복관	Stress	O	O	FEM
	Strain	O	O	FEM
	Creep	O	O	Creep-out 모델
	Growth	X	X	
	Corrosion	O	O	
	Hydriding	O	X	

3. 건식재가공 소결체 물성 모형

본 연구에서 고려된 건식재가공 소결체 열적 모형으로는 열전도도 모형과 열팽창계수 모형이다. 건식재가공 성능평가를 위한 기본적인 입력모형은 참고문헌 [7]에 상세히 기술되어 있다. 본 논문에서는 모의 건식재가공 핵연료 소결체로 구한 열전도도, 열팽창계수, Young 실험식에 대해 INFRA 전산코드에 첨가된 모형을 제시하고 있다.

3.1 열전도도

일반적으로 핵연료 소결체의 열전도도는 소결체의 온도상승에 영향을 미치기 때문에 가장 중요한 열물성 중 하나이다. 고체 내에서 열전도도에 관여하는 기구로는 격자진동 (K_{latt}, phonon), 복사 (K_{Rad}, radiation) 및 자유전자 (K_{el}, electron)의 운동 등이다. 건식재가공 핵연료 소결체의 열전도도 특성을 분석하기 위하여 Laser Flash 장치를 이용하여 열확산도 측정하였다.[8] 시험 온도는 상온 ~ 1,623 K, 실험 분위기는 1.3×10^{-4} Pa 이하의 고진공 조건이었다. 시험 재료는 기준 조성의 모의 건식재가공 소결체로서, 밀도는 10.16 g/cm^3, 결정립 크기는 4.5 ㎛이다. 실험 결과에 따르면, 건식재가공 소결체의 열확산도는 온도 상승에 따라 감소하며, UO_2의 열확산도보다 작게 나타났으며, 열전도도 역시 건식재가공 소결체가 UO_2보다 작아지는 결과를 보였다. 실험 결과에 따른 건식재가공 소결체의 열저항도(thermal resistivity)는 다음과 같다.

$$R=\frac{1}{K}=0.1081+2.0\times10^{-4}T. \quad (1)$$

모의 건식재가공 핵연료 소결체를 이용하여 생산된 건식재가공 핵연료 소결체 열확산도 자료를 이용하여 상온 ~ 3000 K까지 적용할 수 있는 건식재가공 핵연료 소결체 열전도

모델을 개발하였으며, 기본 참조 모델로는 UO_2 고체 밀도에 대해 Harding과 Martin이 제시한 실험식을 기초로 하였으며 열전도도 모델 식은 다음과 같다.

$$K_D = K_{DO} \times f_{dis} \times f_{pre} \times f_{por} \times f_{rad}, \quad (2)$$

여기서, 각 계수들의 자세한 값들은 참고문헌 [7]에 자세히 나타나 있다.

이와 같은 UO_2의 열전도도 모델을 기초로 하여 실험을 통해 구한 모의 건식재가공 핵연료 소결체의 온도에 따른 열전도도 모델은 K'_{DO}의 계수만 바뀐 형태로 다음과 같이 표시된다.

$$K_D = K'_{DO} \times f_{dis} \times f_{pre} \times f_{por} \times f_{rad}, \quad (3)$$

여기서

$$K'_{DO} = \frac{CR}{A' + B' \cdot T + Bd \cdot GAD} + \frac{C}{T^2} \mathrm{EXP}\left(-\frac{D}{T}\right),$$

$$A' = 0.0944,$$

$$B' = 2.027 \times 10^{-4}.$$

본 모형은 소결체의 온도, 2000 K까지의 실험 결과로부터 구해졌으며, 이에 대한 상세한 실험 내용은 참고문헌[8]에 기술되어 있다. 따라서, INFRA에 의해 건식재가공 핵연료 소결체의 열전도도를 계산하는 경우 우라늄산화물의 기본 열전도도인 K_{DO}의 계수만 수정하면 된다.

3.2 열팽창

모의 핵연료의 온도에 따른 열팽창 측정을 위하여 push rod type의 dilatometer (DIL 402C, Netzsch)를 이용하여 298 ~ 1900 K의 온도 범위에서 축 방향 미소 변위를 측정하였다. 표준 물질인 Al_2O_3에 대한 본 실험 기기의 최대 오차는 2% 이내였다. 실험은 분당 5 K의 승온률로 불활성 분위기에서 수행되었다.[9]

선 열팽창은 온도에 따른 초기시편의 길이에 대한 길이 변화를 나타내는 것으로 다음의 식으로 구할 수 있다. 즉,

$$\text{Expansion}, \frac{\Delta L}{L_0}, \ \% \ = \ \frac{L_T - L_{298}}{L_{298}} \times 100 \ , \quad (4)$$

여기서 L_T and L_{298}은 온도 T와 298 K에서의 시편 길이를 나타낸다.

구해진 모의 건식재가공 핵연료의 열팽창률은 UO_2의 것보다 크게 나타났으며, 그 차이는 온도 증가에 따라 커지는 것으로 나타났다. 그러나 모의 건식재가공 핵연료와 모의 사용후핵연료의 열팽창률간의 차이는 거의 나타나지 않았다. 이는 두 모의 핵연료의 밀도, 결정립 크기, 조성 및 농도가 거의 동일하기 때문으로 보이며, 실험으로부터 구한 건식재가공 핵연료의 열팽창계수는 다음의 식으로 나타난다.

$$\Delta L/L_0 = -0.3854 + 1.13 \times 10^{-3} T + 1.095 \times 10^{-7} T^2 \ , \quad (5)$$

이 식은 선형 열팽창계수의 백분율이며, T는 온도로 Kelvin 온도이다.

한편, INFRA 코드에서 사용되고 있는 UO_2 소결체에 대한 열팽창계수는 MATPRO-version 11의 모델을 이용하고 있다. INFRA에 의해 건식재가공 핵연료 소결체의 열팽창계수를 계산하는 경우 기존 UO_2 소결체에 대한 열팽창계수 함수의 모양을 조정하여 전산화하였다.

3.3 Young's 계수

탄성계수는 탄성체가 탄성 한계내에서 가지는 응력과 변형의 비로서 비례한계 내에서는 물체에 가한 힘과 그것에 의한 변형량은 비례 관계에 있다는 Hook's law에 의해서 표현된다. 핵연료의 성능해석을 위해 기계적 거동을 분석할 경우 핵연료의 열팽창, 팽윤, 기체 내압, 냉각수 압력 등으로 인하여 변형 또는 응력이 발생할 경우 핵연료 소결체의 탄성계수는 응력과 변형률의 상호작용을 해석하는데 일차적으로 필요한 데이터이다. INFRA에서는 핵연료 물성 데이터베이스인 MATPRO-11에서와 같은 실험식을 아래와 같이 사용하고 있다.

$$E_{UO_2} = 233.4(1-2.752P)(1-1.0915\times10^{-4}T), \quad GPa \tag{6}$$

여기서 P는 기공도, T는 핵연료의 온도를 나타낸다.

건식재가공 핵연료의 탄성계수 측정을 위하여 공진주파수법의 원리를 기초를 하여 직육면체 시편의 1회 측정으로 모든 결정 방향의 탄성계수를 구할 수 있는 공진초음파 분광법 (Resonant Ultrasound Spectroscopy)을 사용하여 UO_2 핵연료와 결과를 비교 분석하였다. 실험 결과 건식재가공 핵연료의 Young's modulus은 금속석출물, 산화물 석출물, 고용체의 존재로 UO_2 보다 높게 측정되었다. 건식재가공 핵연료의 경우 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있었다.[3]

$$E_{DRY} = 239.2(1-2.843P)(1-1.0915\times10^{-4}T), \quad GPa \tag{7}$$

INFRA에서는 FUELYOUNGMODUL라는 함수에서 Yound's modulus를 계산하며, 여기에 건식재가공 핵연료의 경우를 추가하였다.

Table 2에는 INFRA 코드에서 변경된 모형들에 대해 요약하고 있다.

Table 2. 건식재가공 핵연료 성능평가를 위한 INFRA 주요 모델 변경 사항

물성 인자	모델식 및 변수명	INFRA 서버루틴 이름
Thermal Conductivity	Eq. (3)	FUTHCONLUC
Thermal Expansion	Eq. (5)	FUTHEXPANDCOEFF
Young's Modulus	Eq. (7)	FUELYOUNGMODUL
Density	FPDEN=10.784	INFRA, INITIALCONDITION, GASMOLECOMPO
Melting Point	FTMELT=2941	FUMATPROPERTY

4. 계산방법 및 결과

4.1 계산방법

INFRA 코드를 이용하여 건식재가공 핵연료 소결체의 열적/기계적 모형에 의한 소결체의 거동을 분석하기 위해 선정된 건식재가공 핵연료 설계자료는 기존 하나로 3차 및 4차 조사시험용 mini element의 핵연료봉 제원을 이용하였다. 하나로 3차 조사시험은 2001년 6월부터 2002년 2월까지 수행되었으며 평균 연소도는 3,400 MWd/t 이다. 3차 조사시험의 특징은 건식재가공 핵연료 조사시험중에서 최초로 SPND 계장조사 시험을 수행한데 있다. 4차 조사시험은 2002년 6월부터 2002년 10월까지 수행하였으며 무계장이며 하나의 핵연료봉은 3차 조사핵연료봉을 그대로 재

장전하여 조사하였다. 평균연소도는 3,300 MWd/t 이며, 3차와 4차 연속으로 조사한 핵연료봉의 경우 연소도가 6,700 MWd/t에 이른다.[3] 하나로의 연소이력은 Fig 1에 나타나 있으며 사용된 하나로의 노심자료는 Table 3에 나타나 있다.

Table 3. Core Data of HANARO for Calculation

Parameter	Value	Unit
Coolant temperature	313.15	K
Coolant pressure	0.4	MPa
Fast flux spectrum	1.41E13	$n/cm^2/s$
Gap size	0.125	mm
Coolant mass flux	1.225	$kg/cm^2/s$

4.2 입력자료

계산에 이용된 건식재가공 핵연료봉의 자료 및 소결체의 자료는 표 2와 3에 나타나 있다. 연소단계는 33 단계로 나누어 일정한 출력을 유지한다고 가정하고 계산을 수행하였다. 계산의 편의를 위해 축방향으로 10개의 등간격을 나누어 계산을 수행하였고 반경방향으로는 17개로 나누었다. 수정된 모델중 열전도도의 영향에 의한 효과가 가장 크며 이를 비교하기위하여 모델에 따른 결과를 기존의 UO_2 핵연료의 경우 Lucuta 모델 (INFRA-Lucuta)과 KAERI 모델 (INFRA-KAERI)을 고려하였으며, 그 결과를 건식재가공 핵연료의 모델(INFRA-DRY)을 이용하여 계산한 결과와 비교하였다. Table 4와 5에는 핵연료봉과 소결체에 대한 자료를 보여주고 있다.

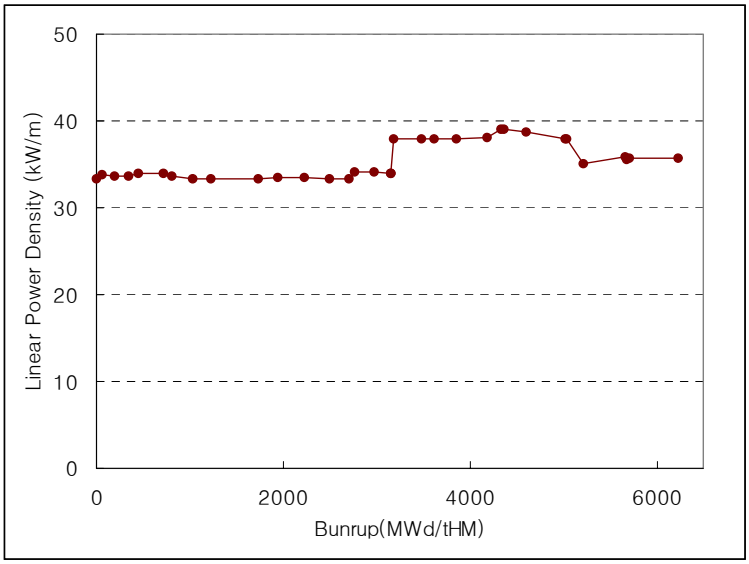

Fig. 1. Linear power density for 3rd and 4th HANARO irradiation test for dry process fuel rod

Table 4. Fuel Rod Data

Parameter	Value	Unit
Diametral gap	0.25	mm
Stack height	5.0	cm
Rod pitch	1.26	cm
Plenum Length	18.5	cm
Cladding Outside Diameter	1.212	cm
Cladding Inside Diameter	1.080	cm
Clad Thickness	0.660	mm
Initial Gas Pressure	0.1	MPa

Table 5. Fuel Pellet Data

Parameter	Value	Unit
True Density	95.0	% TD
Pellet Diameter	1.0550	cm
Pellet Length	1.1500	cm
Pellet Dish Radius	2.63	cm
Pellet Dish Length	0.42	mm
Effective Chamfer Width	0.59	mm
Fuel Enrichment	1.4	w/o
Grain size	5.0	μm

4.3 계산결과 및 검토

Figure 2는 선출력에 따른 건식재가공 핵연료와 UO_2 핵연료의 중심온도의 변화를 열전도도 모델에 따라 나타낸 것이다. Lucuta 모델을 사용한 건식재가공 핵연료의 경우를 제외하고 다른 모델들을 사용한 UO_2 핵연료의 중심온도는 거의 유사한 결과를 보여 주고 있다. Lucuta 모델을 사용한 경우 건식 재가공 핵연료의 열전도도 모형을 이용하는 경우 열전도도가 상대적으로 UO_2 소결체와 비교하여 감소하여 핵연료의 온도를 상승시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

Figure 3은 핵분열생성기체의 방출율을 보여주는데 모든 경우가 낮은 연소도로 인해 유사한 경향을 보여주고 있으며 거의 연소도에 따라 선형적인 비례관계를 보여주고 있다. Figures 4는 핵연료의 전체 변형률을 각각 나타낸다. 핵연료의 변형률은 연소에 따라 초기 고밀화로 인해 차츰 감소하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

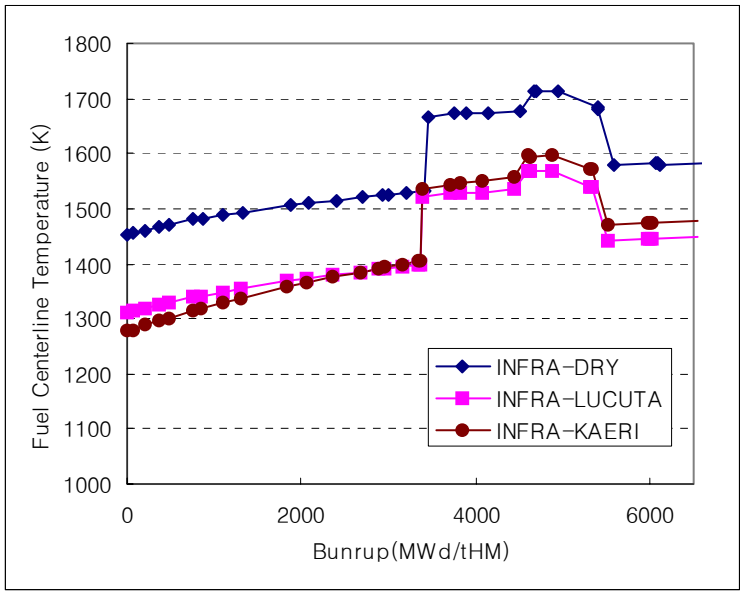

Figure 2. Fuel centerline temperature for various cases

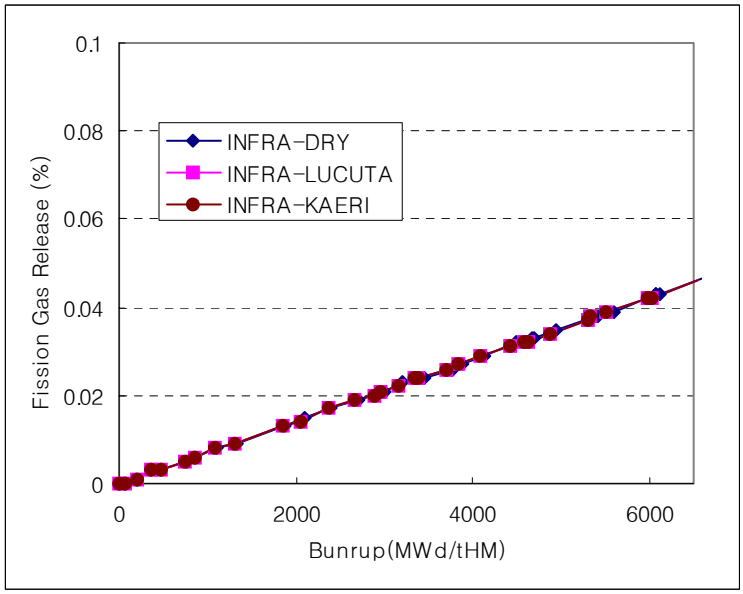

Figure 3. Fission gas release for various cases

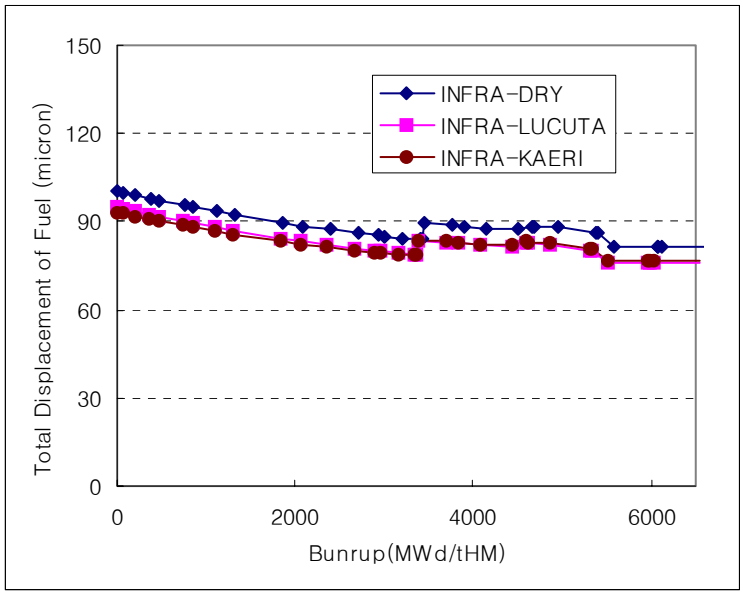

Figure 4. Total displacement of fuel for various cases

5. 요약 및 결론

건식재가공 핵연료의 열적/기계적 물성 모델을 고연소도 핵연료의 성능평가 코드시스템인 INFRA의 모듈을 약간 수정하여 핵연료 성능 분석을 수행하였다. 건식재가공 소결체의 물성은 simulated 핵연료를 이용하여 실험을 통하여 얻은 자료를 근사하여 구한 열전도도 모형과 열팽창계수 등의 열물성 모형과 Young's modulus 등의 기계적 물성 모델들이다. 또한 수정된 INFRA 코드시스템으로 계산을 수행함으로써 건식재가공 핵연료의 열전도도의 모델이 핵연료의 거동 및 성능에 많은 영향을 준다는 것을 확인하였다. 특히 핵연료의 중심온도, 피복재의 변형, 핵연료봉의 외경 등에 상당한 영향을 주게 된다. 반면, 핵분열생성 기체의 양이나 피복재의 온도에는 영향이 거의 없다는 것을 보였다.

건식재가공 핵연료의 열적/기계적 모델 중 중요한 변수인 열전도도와 열팽창계수 모델을 실제 핵연료 성능 코드시스템에 적용한 것을 바탕으로 보다 추가적인 건식재가공 핵연료의 열적·기계적 모델들이 고려되어야 것이다. 아울러 이러한 모델들은 실험을 바탕으로 구해지므로, 실험의 정확성과 신뢰성이 검증되어야 할 것이다. 본 연구에서 수행한 건식재가공 핵연료의 가압경수로에 장전한 경우에 대한 열적 성능분석을 확장하여, 향후 다양한 미래 원자력시스템에 건식재가공 핵연료를 장전하였을 경우 열적·기계적 성능을 분석할 수 있는 건식재가공 핵연료용 성능 분석 코드시스템이 구축될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] *Generation 4 Roadmap - Report of the Fuel Cycle Crosscut Group*, DOE, FCCG Summary Rpt FR02-00, November 1, 2001.

[2] H.S. Park, et al., The DUPIC Fuel Cycle Alternatives: Status & Perspective, Proceedings of the 10th PBNC, 1996, Kobe, Japan.

[3] 송기찬 외, DUPIC 핵연료 조사시험 및 성능평가 기술개발, KAERI/RR-2236/2001, 과학기술부.

[4] 박주환 외, DUPIC 핵연료 성능평가를 위한 FEMAXI-V 입력 모형 개발, KAERI/TR-2246/2002 (2002)

[5] 박주환 외, 건식재가공 핵연료의 열적 모형을 이용한 핵연료 열적 성능 분석, KAERI/TR-2357/2003 (2003).

[6] 이찬복 외, "UO_2 핵연료봉 성능분석코드 INFRA 개발", 2001 추계발표대회, 한국원자력학회

[7] 박창제 외, 건식재가공 핵연료 성능평가를 위한 FRAPCON-3 코드의 열적 성능 분석, KAERI/TR-2523/2003 (2003).

[8] K.H. Kang, K.C. Song, and M. S. Yang, The Thermal Diffusivity of Simulated DUPIC Fuel for Irradiation Test, Metals and Materials International, Vol. 7, No.3, pp.285-290 (2001)

[9] K.H. Kang, et al., Thermal Expansion of UO2 and Simulated DUPIC Fuel, Journal of Nuclear Materials, Vol. 301, pp. 242-244 (2002)