

초음파 공진 분석법을 이용한 건식공정 핵연료 소결체의 탄성계수 측정

류호진 · 강권호 · 문재선 · 송기찬 · 정현규 · 정용무

한국원자력연구소

Elastic Modulus Measurement of a Dry Process Fuel Pellet by Resonant Ultrasound Spectroscopy

Ho Jin Ryu, Kweon Ho Kang, Je Sun Moon, Kee Chan Song, Hyun Kyu Jung and Yong Moo Cheong

Korea Atomic Energy Research Institute 150, Deokjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, KOREA

(Received 15 June 2004 ; Accepted form 9 August 2004)

Abstract The elastic moduli of simulated dry process fuels with varying composition and density were measured in order to analyze the mechanical properties of a dry process fuel pellet. Resonant ultrasound spectroscopy(RUS) which can determine all elastic moduli with one set of measurements for a rectangular parallelepiped sample was used to measure the elastic moduli of UO_2 and simulated dry process fuel. The simulated dry process fuel showed a higher value of Young's modulus than UO_2 due to the presence of metallic precipitates and solid solution elements in the UO_2 matrix. The correlation between Young's modulus and porosity(P) of simulated dry process fuel was found to be $231.4 - 657.8 P$ (GPa) at room temperature. Dry process fuel with a higher burnup showed higher Young's modulus because total content of fission product element was increased.

1. 서 론

원자력 발전용 핵연료에는 주로 UO_2 와 같은 세라믹 소결체가 사용되며 소결체의 탄성계수는 핵연료의 열팽창, 스웰링, 핵연료봉 내압, 냉각수 압력 등에 의한 기계적 거동 해석 시 일차적으로 필요한 물성 데이터이다[1]. 핵연료 소결체와 같은 등방성(isotropic) 물체의 경우, 영률(Young's modulus), 프와송비(Poisson's ratio), 전단탄성계수(shear modulus), 체적탄성계수(bulk modulus) 4개의 계수 중 2개만이 독립변수이며, 전단탄성계수 G와 체적탄성계수 K는 영률 E와 프와송비 ν 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

탄성계수의 측정법으로는 인장시험, 압축시험, 굽

힘시험을 통해서 얻을 수 있는 응력과 변형률의 상관관계에서 정적 탄성계수를 구하는 방법과 재료 내의 음파 속도 및 공진 주파수를 구하여 동적 탄성계수를 측정하는 방법이 있다. 정적인 방법은 고전적인 방법이지만 정밀도가 떨어지는 결과를 얻게 되어 측정값의 오차가 보다 적은 것으로 알려져 있는 비파괴 시험(nondestructive test) 방식이 탄성계수의 표준 측정법으로 인정되고 있다[3]. 초음파 영역에서 공진(resonance)을 측정하는 방법은 1930년대부터 많이 시도되어 왔으며 매우 정확한 측정결과를 얻을 수 있고 펄스 에코(pulse echo)를 이용하여 음파 속도를 측정하는 방법은 1940년대 후반부터 시행되었다[4-8]. 그러나 이러한 방법들은 비교적 큰 크기의 시편이 필요하며, 탄성계수를 얻기 위해 결정 방향별로 여러번의 측정이 필요하다는 단점이 남아있다. 또한 극저온에서 압전 트랜스듀서와 시편의 접합이나, 고온에서 고온용 압전 재료의 부족은 극한 환경에서의 탄성계수 측정을 어렵게 하고 있다.

초음파 공진 분석법(RUS, Resonant Ultrasound Spectroscopy)은 이러한 문제를 해결할 수 있는 새로운 탄성 계수 측정법으로서 Fig. 1과 같이 직육면체로 가공된 시편을 drive transducer와 receive transducer 사이에 장착하고 drive transducer를 이용하여 0에서 8,000 kHz 범위 내에서 주파수를 변화시키며 시편을 진동시키는 방식을 가지고 있다[9]. 시편이 탄성계수와 크기 및 밀도에 의해 결정되는 내부 공진 주파수에 의해 진동될 때는 진동 폭이 급격히 증가하여 receive transducer에 전달되므로 시편의 공진주파수를 측정할 수 있다. 크기와 밀도를 아는 시편의 공진 주파수를 전산 프로그램에 의해 해석하면 탄성계수의 값을 계산해 낼 수 있다[10,11]. 주로 금속과 세라믹이 그 측정 대상이 되며 현재까지는 결정대칭성이 isotropic, cubic, hexagonal, tetragonal, orthorhombic인 경우 탄성계수의 계산이 가능하다. RUS는 탄성계수를 측정하는 방법 중 가장 정밀한 방법 중 하나이며 통상적으로 0.1% 이하의 오차범위 내의 값을 얻을 수 있다. 또한 최근 들어 박막이나 준결정, 초전도체와 같이 큰 시편을 얻기 힘든 신소재의 탄성계수를 측정하는 데 유용하게 사용되고 있다. 최근의 측정결과에 의하면 RUS와 음파속도법에 의해 측정된 c_{ii} (diagonal)는 1-2% 오차 이내의 거의 같은 값을 나타내며 $c_{ij}(i \neq j)$ 값은 RUS에 의한 결과가 음파속도법에 의한 측정결과 보다 정확한 것으로 보고되었다[12]. 또한 한 번의 측정으로 모든 결정 방향의 탄성계수를 동시에 얻을 수 있어 결정 방향별로 반복 측정이 필요 없다는 장점이 있다. 매우 정밀한 치수의 직육면체의 시편의 가공이 필요하지만 한번 가공하면 조건의 변화에 따라 동일한 시편을 이

용하여 계속해서 탄성계수를 측정할 수 있는 장점도 있다.

습식 추출 공정을 사용하지 않는 건식 공정 핵연료인 DUPIC(Direct Use of Spent PWR Fuel In CANDU Reactors) 핵연료는 가압경수로(Pressurized Light Water Reactor)에서 방출된 사용후 핵연료 내의 핵분열성 물질(U^{235} , Pu^{239})을 CANDU형 중수로(Heavy Water Reactor)에서 재활용하기 위해 개발된 미래형 핵비확산성 핵연료이다[13]. DUPIC 핵연료는 핵연료 자원을 절약함과 동시에 누적되는 사용후 핵연료량을 감소시킬 수 있다는 장점이 있는 핵연료 기술이다. DUPIC 핵연료의 원자로 내 성능을 해석하기 위해서는 열물성 및 기계적 물성 등의 평가를 통하여 성능 해석 전산 코드에 사용될 수 있는 물성 데이터베이스를 구축하는 것이 필수적이며 탄성계수의 측정도 그 일환으로 수행되고 있다. 본 연구에서는 초음파 공진 분석법을 사용하여 UO_2 핵연료 및 모의 DUPIC 핵연료의 탄성계수를 측정하여 그 결과를 비교 분석하고 조성 및 기공도에 따른 DUPIC 핵연료의 탄성계수 변화를 모형화하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 제조된 모의 DUPIC 핵연료의 조성은 연소도(burnup)별로 사용후핵연료 내의 동위원소 조성을 계산하는 ORIGEN-2 전산 코드를 이용하여 계산되었으며 이때 기준이 된 DUPIC 핵연료의 원료는 고리1호기에서 약 27,300 MWd/tU의 연소도까지 연소된 후 방출되어 10년동안 저장된 사용후핵연료였다. 핵연료의 연소도는 단위무게의 우리눔이 핵분열 반응에 의하여 생성하는 열량의 척도로서 연소도가 증가함에 따라 핵분열 생성물이 비례하여 증가하는 경향이 있다. Table 1과 같이 DUPIC 핵연료의 주요 구성 원소를 포함하는 산화물 분말을 천연 UO_2 에 첨가하여 초기 조성, 10,000 MWd/t 연소도, 20,000 MWd/tU 연소도에 해당되도록 혼합하였다. 여러 종류로 첨가된 산화물 원소들의 균질한 혼합을 위해 attritor에서 메탄올을 용매로 한 습식 밀링을 200 rpm, ball-to-powder 무게비는 4 : 1의 조건으로 2 시간 동안 수행하고, 40°C로 유지된 오븐에서 약 5 일간 건조시켰다. 건조된 모의 DUPIC 핵연료 분말을 35번 체(sieve)를 통과시킨 후 turbular mixer에서

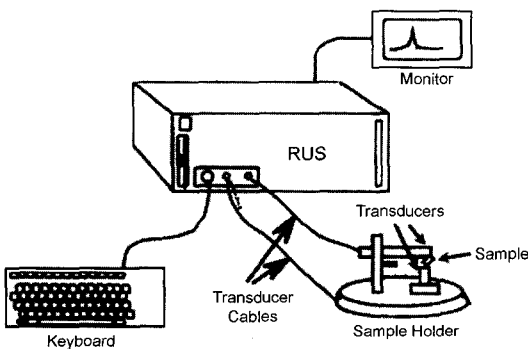


Fig. 1. Equipment of resonant ultrasound spectroscopy(RUS).

Table 1. Composition of additives for simulated DUPIC fuel with the reference composition.

elements	weight percentage (wt.%)			surrogates
	reference DUPIC	10,000 MWd/tU	20,000 MWd/tU	
Rb	0.000	0.009	0.017	Rb ₂ O
Sr	0.053	0.079	0.096	SrO
Y	0.035	0.048	0.057	Y ₂ O ₃
Zr	0.284	0.384	0.472	ZrO ₂
Mo	0.253	0.341	0.441	MoO ₃
Tc	0.059	0.079	0.096	RuO ₂
Ru	0.166	0.251	0.339	RuO ₂
Rh	0.032	0.034	0.036	Rh ₂ O ₃
Pd	0.109	0.159	0.235	PdO
Te	0.000	0.015	0.030	TeO ₂
Ba	0.146	0.187	0.226	BaCO ₃
La	0.094	0.128	0.159	La ₂ O ₃
Ce	0.183	0.278	0.354	CeO ₂
Pr	0.086	0.112	0.140	Nd ₂ O ₃
Nd	0.310	0.407	0.521	Nd ₂ O ₃
Sm	0.068	0.080	0.095	Nd ₂ O ₃
Th	0.039	0.038	0.037	-
U	97.255	96.566	95.780	UO ₂
Np	0.035	0.044	0.046	-
Pu	0.722	0.723	0.796	CeO ₂
Am	0.071	0.035	0.027	La ₂ O ₃
total	100.000	100.000	100.000	

4시간 동안 혼합시켰으며, 0.2 wt%의 Zn stearate를 첨가시킨 후 다시 30분간 혼합하였다. 이와 같이 처리된 분말은 100-400 MPa의 압력으로 직경 10 mm의 압분체로 성형하여 1,700°C에서 4시간동안 수소 분위기로 소결되었다. 소결된 UO₂ 및 모의 사용후핵연료는 수침법을 이용하여 밀도가 측정되었고 초음파 공진 분석법을 이용한 탄성계수 측정을 위해 세 변의 길이가 각각 다른 직육면체로 연마되었다. 이때 한 변의 길이는 대략 2.5 - 5 mm의 범위였다. 연마 시 시편의 직각도와 평행도를 최대한 확보하기 위해 특별히 고안된 치구를 제작하여 사용하였다.

UO₂ 및 모의 DUPIC 핵연료의 초음파 공진 분석법에 의한 탄성계수 측정은 Quatrosomics, Inc.사의 공진 초음파 분석기를 이용하였다. 공진 주파수의 측정을 위해 drive transducer와 receive transducer 사이에 시편을 채대각 방향으로 놓고 주파수를 100 kHz에서 1000 kHz까지 증가시키며 RUSPEC 이라는 소프트웨어를 통해 공진 주파수를 측정하였다. 탄

성계수를 계산하는 RPR 코드에 측정된 공진 주파수 데이터를 20개 이상 입력하여 8차 함수로 계산한 후 얻어진 값이 RMS error 0.2% 이하, chi square 1.0 이하의 조건이 만족될 때까지 반복 계산하였다. RPR 코드는 A. Migliori 등에 의해 개발된 FORTRAN 코드로서 측정된 공진 주파수를 입력하면 탄성계수를 계산하게 된다[14]. 본 연구에서는 핵연료 소결체가 분말의 소결로 제조된 다결정체이므로 등방성 재료로 가정하고 2개의 탄성계수, 즉 영률과 프외송비를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

초음파 공진 분석법을 이용한 탄성계수 측정은 UO₂와 모의 DUPIC 핵연료를 비교하는 핵연료별 비교시험, 모의 DUPIC 핵연료의 밀도 변화에 따른 밀도별 비교시험, 모의 DUPIC 핵연료의 연소도 변화에 따른 연소도별 비교시험으로 나뉘어 수행되었다.

Table 2, 3, 4에 표시된 것과 같이 모의 핵연료 소결체의 밀도는 압분 압력에 따라 92.8%에서 95.7%의 범위에서 변화되었으며, 직육면체 시편의 크기는 2.5 mm에서 5.0 mm 사이의 범위에서 세변의 길이가 각각 다르도록 변화되었다.

10.395 g/cm³의 소결밀도를 가지는 UO₂에 대한 RUS 실험 결과, Table 5에 기록된 바와 같이 194.1 GPa의 영률을 얻을 수 있었으며 이는 UO₂에 대한 물성 데이터베이스인 MATPRO-11에서 제시된 식에 의해 동일 밀도에 대해 계산한 결과인 193.8 GPa와 거의 유사한 값(오차 : 0.17%)으로 초음파 공진 분석법에 의한 탄성계수 측정이 매우 신뢰도가 높음을 알 수 있었다[15].

UO₂를 비롯한 산화물 핵연료의 영률은 온도와 밀도에 따라 변화되며 화학당량(stoichiometry)에 따른 산소 대 우라늄의 비율(O/U)과 연소도에 따라서도 변화된다. UO₂의 영률은 bending 시험과 공진 주파수법에 의해 측정되어 왔다[16,17]. 그러나 bending 시험에 의한 결과는 공진 주파수법에 의한 것에 비해 정밀하지 못하기 때문에 핵연료 성능 해석 계산

에 이용되지 않고 있다. Fig. 2는 온도와 밀도의 변화에 따른 UO₂의 영률 변화를 보여주고 있다[18-20]. 영률은 온도가 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하고, 밀도가 감소함에 따라 감소한다. 중성자 조사(irradiation)에 따른 노내 영률의 측정결과 중성자 조사에 의해 영률이 2%정도 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 중성자 조사에 의한 고밀화에 의한 것으로 설명되며 그 효과가 적기 때문에 핵분열 생성물의 축적과 결정격자의 손상을 고려하는 연소도 관련 모델은 아직까지는 사용되고 있지 않다[21].

상온 영률에 미치는 밀도의 영향을 분석하기 위해 90%에서 100%범위의 밀도를 가지는 UO₂에 대하여 수많은 데이터들이 얻어지고 분석되었다[22]. Fig. 3과 같이 최소자승법에 의해 기공도(P)와 영률(E)의 관계를 얻은 결과,

$$E = 233.4 - 563 \cdot P \quad (\text{GPa}) \quad (3)$$

로 표현되었다. 따라서 온도에 의한 변화와 기공도에 의한 변화를 동시에 고려한 결과,

Table 2. The sintered density and x-y-z dimensions of RUS specimen for compositional comparison.

fuel	density (g/cm ³)	theoretical density (g/cm ³)	relative density (%)	x(mm)	y(mm)	z(mm)
UO ₂	10.395	10.96	94.8	3.296	2.950	2.417
DUPIC fuel	10.287	10.789	95.3	3.572	2.987	2.235

Table 3. The sintered density and x-y-z dimensions of RUS specimen for compositional comparison.

fuel	density (g/cm ³)	theoretical density (g/cm ³)	relative density (%)	x(mm)	y(mm)	z(mm)
DUPIC fuel	9.987	10.789	92.6	3.454	4.189	4.781
	10.149		94.1	2.790	3.008	4.018
	10.300		95.5	2.925	3.223	4.590

Table 4. The sintered density and x-y-z dimensions of RUS specimen for compositional comparison.

Burnup	density (g/cm ³)	theorecal density (g/cm ³)	relative density (%)	x(mm)	y(mm)	z(mm)
10,000 MWd/tU	10.079	10.746	93.8	2.715	3.602	3.959
20,000 MWd/tU	9.977	10.692	93.3	2.933	3.826	4.753

Table 5. Elastic constants of UO₂ and simulated DUPIC fuel obtained from RUS.

fuel	c ₁₁ (GPa)	c ₁₂ (GPa)	c ₄₄ (GPa)	E (GPa)	v
UO ₂	269.97	121.96	74.00	194.1	0.311
DUPIC fuel	309.05	161.37	73.84	198.3	0.343

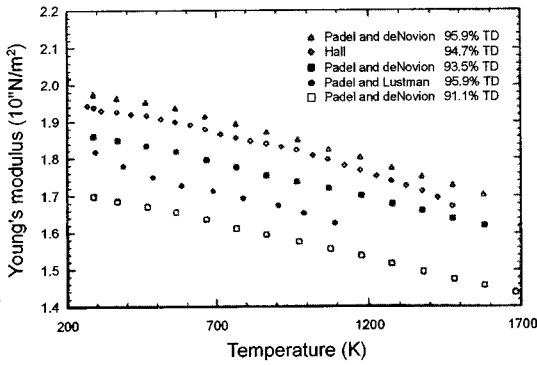


Fig. 2. Young's modulus for stoichiometric UO₂ fuel at several temperature and fractions of theoretical density[15].

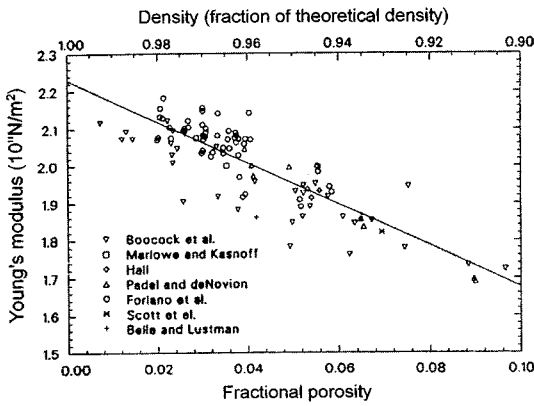


Fig. 3. Young's modulus data and least-squares linear fit for stoichiometric UO₂ fuel at room temperature and several different densities[15].

$$E = 233.4(1 - 1.0915 \times 10^{-4}T)(1 - 2.752P) \text{ (GPa)} \quad (4)$$

의 관계식을 얻을 수 있었다.

Wachtman 등은 상온에서 단결정 UO₂의 평균 영률이 230 GPa, 평균 전단탄성계수(shear modulus)가 87.4GPa라고 보고하였다[23]. 따라서 프와송 비는 $\mu = E/2G - 1$ 이므로 UO₂의 프와송 비는 0.316으로 계산된다. Padel과 de Novoin은 각각 0.314와 0.306의 값을 보고하여 Wachtman의 결과와 거의 일치함을 보였다[18]. 또한 프와송 비는 온도나 기공도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타난다.

RUS로 탄성계수를 측정한 UO₂ 소결체와 유사한 밀도를 가지는 모의 DUPIC 핵연료의 영률을 측정할 결과 Table 5와 같이 198.3 GPa의 값을 보여 모의 DUPIC 핵연료의 영률이 UO₂보다 높음을 알 수 있

었다.

모의 DUPIC 핵연료의 밀도에 따른 영률의 관계식을 얻기 위하여 밀도 변화에 따른 영률을 일차식으로 근사한 결과 Fig. 4와 같이 UO₂ 보다 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 기공도가 증가함에 따라 영률이 감소하는 경향을 나타내었다. UO₂와 모의 DUPIC 핵연료의 기공도(P)에 따른 상온 영률의 관계식은 아래와 같다.

$$E_{UO_2} = 225.8 - 621.4P \text{ (GPa)} \quad (5)$$

$$E_{DUPIC} = 231.4 - 657.8P \text{ (GPa)} \quad (6)$$

모의 DUPIC 핵연료의 연소도에 따른 이론밀도를 구하기 위하여 Lucuta 등의 모의 핵연료 실험결과를 바탕으로 모의 DUPIC 핵연료의 연소도를 첨가원소량을 기준으로 계산하였고 그에 따른 이론밀도를 계산하였다[24]. Fig. 5와 같이 Lucuta의 모의 핵연료(3at%, 8at%)에 대한 첨가원소량을 일차식으로 근사하여 연소도의 함수로 나타내었고 또한 Lucuta등이 제시한 이론 밀도 데이터를 일차식으로 근사하여 이론밀도 역시 연소도의 함수로 나타내었다. 이 때 at% 연소도는 1 at% 당 9,375 MWd/tU으로 환산하였다. 그결과 핵분열생성물 함량(F.P.)과 이론밀도(T.D.)에 대해 아래와 같이 연소도(BU, MWd/tU)의 함수로 표현되는 환산식을 얻을 수 있었다.

$$F.P.(wt\%) = -0.008 + 8.3378 \times 10^{-5} BU \quad (7)$$

$$T.D.(g/cm^3) = 10.9585 - 5.1918 \times 10^{-6} BU \quad (8)$$

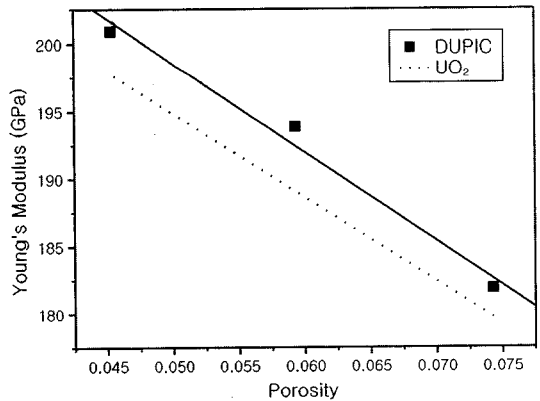


Fig. 4. Young's modulus of UO₂ and simulated DUPIC fuel with porosity.

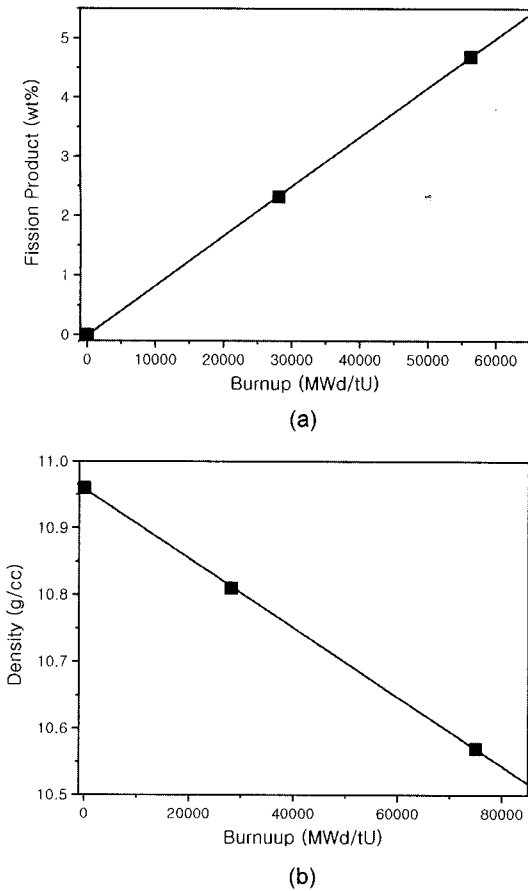


Fig. 5. The amount of fission product in (a) simulated spent fuel and (b) theoretical density of simulated spent fuel.

본 연구에서 첨가된 핵분열 생성물 원소의 함량을 연소도로 나타낸 결과 기준 조성의 경우 28,209 MWd/tU 이었으며, 또한 이에 해당되는 이론 밀도는 10.789 g/cm³이었으며, 10,000 MWd/tU와 20,000 MWd/tU에 해당되는 이론밀도는 각각 10.746 g/cm³과 10.692 g/cm³ 이었다. 연소도에 따른 모의

DUPIC 핵연료의 영률은 Table 6에 기록되었으며 식 (6)에 의해 동일한 기공도를 가지는 기준 조성의 모의 DUPIC 핵연료와 비교할 경우 고연소도의 모의 DUPIC 핵연료가 보다 높은 영률을 나타냄을 알 수 있었다.

이와 같이 UO₂보다는 모의 DUPIC 핵연료가 높은 영률을 나타내는 것은 UO₂ 기지 내에 함유하고 있는 핵분열생성물 함량이 증가하기 때문인 것으로 분석되며, 핵분열 생성물로 첨가된 원소들 중 기지 내에 고용된 원소에 의한 고용강화 효과와 금속 석출물 및 산화물 석출물 형성 원소에 의한 입자강화 효과가 탄성계수를 증가시키는 것으로 판단된다. DUPIC 핵연료는 사용후 핵연료를 재가공하여 제조하기 때문에 사용후 핵연료 내에 핵분열로 인해 존재하는 핵분열 원소들을 대부분 함유하게 된다. 그중 Ru, Tc, Rh, Pd 등의 원소들은 UO₂ 내에 금속 석출물을 형성하는 것으로 알려져 있으며, Zr, Y, Ce, La 등은 고용원소로 존재하는 것으로 알려져 있다 [25]. Fig. 6은 모의 DUPIC 핵연료의 미세조직으로서 입계 주위에 금속 석출물 입자들이 존재하고 있음을 보여주고 있다.

연소도에 따른 세라믹 핵연료의 탄성계수에 대하여는 최근 들어 여러 방법을 통하여 측정이 이루어지고 있다. Yamanaka 등은 (U,Ce)O₂에 Nd 또는 Zr을 첨가하는 방식으로 모사한 고연소도 핵연료의 음파 속도를 초음파 펄스 에코법으로 측정하여 영률이 첨가원소 함량이 증가함에 따라 감소함을 보고하였다[26]. 또한 Laux 등도 연소도에 따라 초음파법에 의해 측정된 탄성계수가 감소함을 보고하였다[27]. 그러나 Pujol 등은 고압에서의 싱크로트론 회절에 의하여 체적탄성계수를 측정된 결과 연소도에 따라 탄성계수가 증가하는 결과를 보고하였다[28]. 또한 Spino 등은 연소도에 따라 고용강화와 석출강화로 인하여 Vickers 경도가 증가한다는 결과를 보고한 바 있다 [29]. 최근의 결과들을 종합하여 볼 때 연소도에 따른 탄성계수의 변화는 보다 정밀한 검증이 필요한 실

Table 6. Elastic constants of simulated DUPIC fuel with burnup obtained from RUS.

Burnup	c ₁₁ (GPa)	c ₁₂ (GPa)	c ₄₄ (GPa)	E (GPa)	ν	E of DUPIC fuel with the same porosity (GPa)
10,000 MWd/tU	276.29	130.34	72.97	192.7	0.323	190.6
20,000 MWd/tU	287.69	145.95	70.87	189.4	0.337	187.3

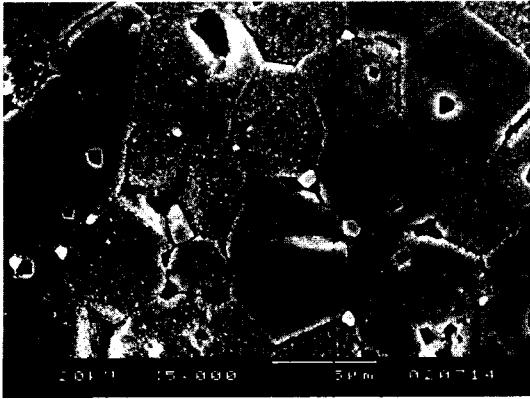


Fig. 6. Scanning electron micrographs of simulated DUPIC fuel after sintering.

정이다. 그러나 본 연구의 결과는 연소도에 따른 탄성계수의 증가를 분명히 보여주고 있으며 이는 Pujol 등의 결과와 일치하고 있다. 따라서 향후 RUS 기법에 의한 연소도별 탄성계수 측정 결과는 고연소도 핵연료의 탄성계수에 대한 논란을 해결할 수 있는 귀중한 자료를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 결과로 건식공정 핵연료의 기계적 거동 분석에 필요한 핵연료 소결체의 탄성계수를 RUS 기법으로 측정하여 구할 수 있었으며, 이로써 핵연료의 열팽창, 스웰링, 기체 내압, 냉각수 압력 등으로 인하여 변형 또는 응력이 발생할 경우 응력과 변형률의 상호작용 해석의 신뢰성을 향상시킬 수 있게 되었다. 또한 본 연구는 핵연료뿐만 아니라 다른 재료의 탄성계수 측정에도 적용될 수 있는 기술로서 새롭게 개발되고 있는 신소재들의 탄성계수 데이터를 확보하는데 기술적 도움을 주게 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

1. 작은 직육면체 시편의 1회 측정으로 모든 결정 방향의 탄성계수를 구할 수 있는 공진 초음파 분석법 (Resonant Ultrasound Spectroscopy)에 의해 세라믹 핵연료의 탄성계수를 측정하는 방법을 확립하고 문헌상의 값과 비교함으로써 측정의 신뢰성을 확보하였다.

2. 건식공정 핵연료 소결체의 영률은 금속석출물 및 고용원소의 존재로 UO_2 보다 높게 측정되며 기공도(P)에 따라 상온에서 231.4 - 657.8 P (GPa) 의

관계식을 가진다.

3. 건식공정 핵연료 소결체의 영률은 연소도가 증가함에 따라 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. D. R. Olander: Fundamental Aspect of Nuclear Reactor Fuel Elements, TID-26711-P1, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield (1976).
2. G. E. Dieter: Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Co., New York (1986).
3. E. Gruneisen: Ann. d Phys. **4** (1907) 801.
4. R. W. Boyle and D. O. Sproule: Can. J. Res. **2** (1930) 3.
5. D. L. Arenberg: J. Acoust. Soc. Am. **20** (1948) 1.
6. W. Roth: J. Appl. Phys. **19** (1948) 901.
7. H. L. Laquer: AECU-203 (1949).
8. H. J. McSkimin: J. Acoust. Soc. Am. **22** (1950) 413.
9. RU Spec User's Manual.
10. H. H. Demarest: Jr., J. Acoust. Soc. Am. **49** (1971) 768.
11. I. Ohno: J. Phys. Earth, **24** (1976) 355.
12. F. Chu, M. Lei, S.A. Maloy, J. J. Petrovic and T. E. Mitchell: Acta Mater. **44** (1996) 3035.
13. K. W. Song, Y. H. Kim, B. G. Kim, J. W. Lee, H. S. Kim, M. S. Yang, and H. S. Park: J. Kor. Nuc. Soc. **28** (1996) 366.
14. A. Migliori: Physica B, **183** (1993) 1.
15. MATPRO-Version11, D. L. Hargman and G. A. Reymann (Ed.), NUREG/CR-0497, TREE-1280, R3.EG&G Idaho, Inc., Idaho Falls, ID.
16. W. A. Lambertson and J.H. Handwerk: ANL-5053, Feb. (1956).
17. J.T.A. Roberts and Y. Ueda: J. Am. Ceram. Soc. **55** (1972) 117.
18. A. Padel and C. de Novion: J. Nucl. Mater., **33** (1969) 40.
19. J. Belle and B. Lustman: Fuel Elements Conference, Paris, France, November 18-23, 1957, TID-7546, Mar. (1958) 480.
20. A. R. Hall: J. Nucl. Mater. **37** (1970) 314.
21. V. M. Baranov et al.: Soviet Atomic Energy, **40** (1976) 37.
22. J. Boocock, A. S. Furzer and J. R. Matthews: AERE-M 2565, Sep. (1972).

23. J. B. Wachtmant, Jr., M. L. Wheat, H. J. Anderson, and J. L. Bates: J. Nucl. Mater. **16** (1965) 39.
24. P. G. Lucuta, R. A. Verrall, H. J. Matzke and B. J. Palmer: J. Nucl. Mater. **178** (191) 48.
25. K. H. Kang, H. J. Ryu, K. C. Song, M. S. Yang: J. of Nucl. Mater., **301** (2002) 242.
26. S. Yamanaka, S. Yoshida, K. Kurosaki, M. Uno, K. Yamanoto, T. Namekawa: J. Alloys and Compounds, **327** (2001) 281.
27. D. Laux, G. Despaux, D. Baron, J. Spino: 7th Inter. Conf. on CANDU Fuel, Kingston, Ont., Canada, 23-27 Sep. (2001).
28. M. C. Pujol, M. Idiri, L. Havela, S. Heathman: J. Spino, J. Nucl. Mater., **324** (2004) 189.
29. J. Spino, J. Cobos-Sabate, F. Rousseau: J. Nucl. Mater., **322** (2003) 204.