

'98 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

DUPIC 핵연료 조사시험 예비평가

박희성, 이철용, 정인하, 배기광, 김학노,

이기홍, 박종만, 강영환, 양명승

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료 개발에서는 소결체의 물성연구와 노내거동부터 연구를 시작하여 신 개념의 핵연료의 개발에 부합되는 조사시험 계획이 수립되어야 하기 때문에 DUPIC소결체의 물성 및 노내거동 연구를 캡슐을 이용하여 조사시험을 수행할 계획이다. 본 논문에서는 노외 시험 및 예비 특성화(Pre-Characterization)와 노내시험인 DUPIC 핵연료 소결체 시험 그리고 연료봉 조사시험에 필요한 항목들에 대하여 분석하였으며 DUPIC 소결체가 하나로 노심의 CT, IR2, IP9등에서 무게장 캡슐을 이용하여 조사될 경우의 출력을 평가하였다. 또한 모든 핵연료와 DUPIC 핵연료 소결체의 조사시험을 위해 무게장 캡슐(Capsule)에 대하여 연구 하였다.

1. 서 론

DUPIC 핵연료 개발은 중수로 핵연료용 천연우라늄을 절감할 수 있고 경수로 및 중수로 사용후핵연료 발생량을 감소시키므로 경제.산업적 측면에서 국제 경쟁력을 강화할 수 있는 중요한 기술이다. 연구 초기 단계에서는 제조에 관련된 기술개발과 노심 해석분야의 업무가 주로 수행되었고 연구가 진척됨에 따라 실험적 검증을 위한 조사시험의 필요성이 대두되었다. 이에 따라서 DUPIC 핵연료 개발에서는 소결체의 물성연구와 노내거동부터 연구를 시작하여 신 개념의 핵연료의 개발에 부합되는 조사시험 계획이 수립되어야 하기 때문에 DUPIC소결체의 물성 및 노내거동 연구를 캡슐을 이용하여 조사시험을 수행할 계획이다.

2. DUPIC 핵연료 조사시험[1]

DUPIC 핵연료 소결체는 천연우라늄 소결체에 비하여 다성분(핵분열생성물)을 함유하며 기계적인 혼합으로 인하여 균질성이 기존의 핵연료에 비하여 좋지 않은 특성이 있다. 또한 CANDU 원자로를 고려하면 천연우라늄 소결체보다 연소도 및 노내 연소 시간이 약 2배 이상 큰 특징이 있다.

2.1. 노외 시험 및 예비 특성화(Pre-Characterization)

현재 DUPIC 핵연료 소결체의 최적 제조 방법, 재원 및 specification 등이 최종적으로 완료되지 않은 상태이므로 조사시에 제조되는 핵연료는 엄밀하게 측정하여 핵연료 설계시에 반영되도록 해야한다. 대부분의 정보는 핵연료의 제조시에 생산되는 제조이력 및 특성검사서에서 얻을수 있으나 기본적인 물성은 정확히 측정될 필요가 있다. 이 시험의 목적은 DUPIC 핵연료 소결체의 노외 성능자료 생산과 DUPIC 핵연료 소결체의 노내 시험계획 수립 및 노내 시험 결과 평가를 위한 특성자료 생산에 있으며 소결체의 제조와 관련된 항목으로는 밀도, 제원, dish, 표면조도, 재소결밀도, 결정립크기 및 분포, 가스, 기공의 크기 및 분포, 기공도, 개기공도, 화학조성, 수분함량, O/M비 등이 있으며 기본 물성에 속하는 용융점, 열전도도, 강도, 경도, 크립 특성, 화학조성, 편석 및 형태, gap conductance등도 측정해야 한다.

2.2. DUPIC 핵연료 소결체 시험(노내 시험)

현재 DUPIC 핵연료 소결체나 연료봉 및 집합체를 제조한 경험이 없어 최적 제조방법, 제원 및 specification 등이 최종적으로 완료되지 않은 상태이므로 초기의 조사시험은 주로 fresh UO_2 와의 성능비교에 주안점을 두며 이후에 DUPIC 핵연료 소결체, 연료봉 및 집합체로 구분하여 순차적으로 조사시험을 수행한다. DUPIC 핵연료 소결체 시험은 소결체의 제조조건 및 제조 후 특성에 따른 노내 성능 자료생산이 목적이며, 시험 및 조사항목으로는 핵분열기체 방출, 고밀화 및 팽윤, 기계적 성질 변화(열전도도, 경도, 강도, 크립 특성), 미세구조변화(결정립 및 기공크기 변화, 재구조화), hot spot, inhomogeneity 영향, 온도, 연소도 및 핵종분포, O/M비 변화, poison 물질의 특성변화 등이 있다.

2.3. DUPIC 핵연료 소결체 분석

DUPIC 소결체가 하나로 노심의 CT, IR2, IP9등에서 무게장 캡슐을 이용하여 조사될 경우의 출력을 평가 하였다. 비교평가를 위하여 UO_2 소결체가 조사될 경우도 병행하여 분석 하였다. DUPIC 핵연료의 조성은 표 1 과 같은 조성을 사용하였으며 UO_2 소

결체 핵연료의 농축도는 1.2, 2.5, 5.0 w/o 의 세가지를 모두 계산하였다. 계산은 MCNP[2]를 사용하였다. MCNP 계산에 적용한 가정사항과 초기조건은 다음과 같다.

- 노심에는 32개(36봉 다발 20개와 18봉 다발 12개)의 핵연료가 장전되어 있다.
- CT, IR1, IR2에 DUPIC 혹은 UO_2 소결체 조사시험 캡슐이 장전되어 있지 않을 경우에는 AI 모의 다발이 장전된다.
- 정지봉은 모두 완전 인출 상태이며, 제어봉은 절반이 삽입되어 있다.
- 노심의 핵분열물질에서 발생하는 총 출력을 27.5 MW로 가정 하였다.

2.4. DUPIC 핵연료 조사시험

하나로를 이용하여 DUPIC 핵연료 조사시험을 모의핵연료 소결체의 조사시험과 연료봉 및 연료다발의 조사시험을 계획하고 있다. 현재 모의 핵연료와 DUPIC 핵연료 소결체의 조사시험을 위해 무게장 캡슐(Capsule)개발과 조사시험과 관련된 원격조립, 계장기술 및 취급기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

가. 무게장 캡슐의 개발

그림 1은 3개의 연료봉을 동시에 장착할 수 있는 무게장 캡슐의 사진이다. 캡슐 외통은 직경 56mm, 두께 3mm인 알루미늄 재질의 tube를 사용하였으며 캡슐 상부와 하단 locking part는 하나로 재료시험용 계장캡슐로 개발된 부품을 그대로 인용하였다. 길이 250mm, 직경 13.15mm의 핵연료봉이 하나로의 core center에 위치하도록 설계하였으며 핵연료봉 상부 및 하부로는 핵연료봉의 위치를 고정하기위한 stopper와 반사체, 알루미나 단열재를 그리고 위로는 sleeve guide 부품, 그리고 내부 spring을 장착하였다. Element assembly는 3개의 mini-element로 구성되는데, 소결체 5개를 한 개의 mini-element로 상단에 핵분열가스를 포집하기 위한 plenum과 5개의 소결체와 스프링은 피복재(316L stainless-steel)에 삽입되고 양쪽끝은 봉단마개로 TIG(Tungstun Inert Gas)용접하여 밀봉한다. 총길이 960mm의 무게장캡슐은 하나로에 장전되는 핵연료의 크기와 동일하다. 앞으로 열유동시험을 거쳐서 최종적으로 설계를 확정하고 엄격한 QA/QC에 의해 새로이 제작된 무게장캡슐을 '98년 말에 하나로에 장전할 예정이다.

3. 결 론

DUPIC소결체의 계산결과를 선출력으로 환산하여 표 2에 정리 하였다[4]. 피복관

이 있는 5개의 소결체를 조사시킬 경우 최대 선출력은 CT에서 130.40 kW/m, IR2에서 118.79kW/m, IP9에서 55.43kW/m로서 IR2와 IP9은 CT최대 선출력의 91%, 43%로 각각 계산되었다. 조사조건은 40kW/m로 설정한데 비해 IP9에서의 선출력은 약 50kW/m이나 CT와 IR2에서는 90kW/m이상의 매우 높은 선출력을 보이고 있다. 그러므로 조사조건을 만족시키기 위해서는 원자로 출력을 낮추어 운전하든가, 캡슐내의 출력을 낮추는 방안이 강구되어야 한다. 그림 2은 피복관이 없는 경우의 선출력을, 그림 3은 피복관이 있는 경우의 선출력을 각 조사위치에서 소결체의 갯수에 따라 비교 하였다. 제어봉이 절반 삽입되어 있으므로 CT와 IR2에서의 선출력은 위쪽에서 아래쪽으로 증가하는 경향을 보이나, IP9에서의 선출력은 제어봉 위치에 영향을 받지 않고 균등한 축방향 출력 분포를 보이고 있다. 위치 0cm에서 소결체 1,3,5개일 때의 선출력을 비교하면 소결체 갯수가 많을수록 선출력이 감소한다. 그러나 이러한 효과보다는 제어봉에 의한 중성자속 분포 변화 효과가 더 커서 가장 낮은 위치에 있는 5개 소결체 조사시의 최하단 소결체의 선출력이 가장 크다. 표 2에서 피복관이 있는 5개 DUPIC소결체의 선출력은 1.2w/o와 2.5w/o UO₂ 소결체 선출력값 사이에 있으므로 DUPIC소결체의 농축도도 그에 해당함을 알 수 있다. 농축도가 증가함에 따라 선출력도 증가하는데 1.2w/o에서 2.5w/o로 증가할 때는 선출력이 1.8배 정도 증가하였으나 2.5 w/o에서 5.0w/o로 증가할 때는 선출력이 1.6배 정도 증가하므로 농축도에 따른 선출력의 증가율은 점차 감소함을 알 수 있다. CT, IR2의 경우는 선출력이 높아 소결체의 온도가 너무 높아질 우려가 있으며 IP9의 경우 선출력은 DUPIC 핵연료의 조사시험에 적당하나 자연대류로 냉각시키는 특성 때문에 표면에서 비등이 일어나 사용하기가 힘들다. 따라서 현재는 OR 조사공에 대한 분석이 수행중에 있으며 IP와 IP의 중간의 특성을 감안하면 OR조사공이 DUPIC 핵연료의 조사시험에 적합할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. KAERI/TR-919/97, "DUPIC 핵연료 조사시험 계획 기술 분석"
2. J.F Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", LA-12625-M, Nov. 1993.
3. T. Ishii, " Themocouple re-instrument technique for irradiated fuel rod", JAERI-M 93-016, pp 197-208, Feb, 1993.
4. 이병철, " DUPIC Pellet을 CT, IR2 및 IP9에서 조사시 출력 및 발열량 분포", HAN-RR-CR-97-059, 1997. 6. 20

표 1 DUPIC 소결체 조성

원소	원자 밀도 (atoms/barn.cm)	원소	원자 밀도 (atoms/barn.cm)	원소	원자 밀도 (atoms/barn.cm)
O16	4.5949E-02	Kr83	4.2887E-08	Mo95	3.4295E-05
Rh103	1.7588E-05	Pd105	1.5695E-05	Pd108	6.3075E-06
Ag109	3.1783E-06	Cd113	7.6964E-09	In115	9.5677E-08
1127	3.6977E-08	Xe131	2.8766E-07	Cs133	7.3190E-07
Cs134	1.2573E-09	Cs135	1.9023E-07	La139	3.7515E-05
Nd143	2.3985E-05	Nd145	1.9928E-05	Nd144	3.8207E-05
Nd146	1.9929E-05	Pm147	3.3503E-07	Sm147	5.8561E-06
Nd148	1.0729E-05	Sm148	4.6790E-06	Sm149	1.2491E-07
Nd150	5.0814E-06	Sm150	9.0988E-06	Sm151	4.1476E-07
Sm152	3.8399E-06	Eu151	3.3012E-08	Eu153	3.3558E-06
Eu154	4.0637E-07	Eu155	8.6338E-08	Gd155	2.6500E-07
Gd157	3.0125E-09	Th232	9.5901E-06	U233	3.4402E-07
U234	2.2150E-07	U235	2.0941E-04	U236	7.0787E-05
U238	2.2056E-02	Np237	7.9202E-06	Pu238	2.7118E-06
Pu239	1.0753E-04	Pu240	4.2281E-05	Pu241	1.5051E-05
Pu242	8.1974E-06				

표 2 DUPIC 소결체 선출력 (kW/m)

소결체 개수	위치 (cm)	피복관 없을 때			피복관 있을 때		
		CT	IR2	IP9	CT	IR2	IP9
1	0	125.19	109.75	52.83	126.07	101.68	54.81
3	-3	120.46	109.34	49.73	125.24	107.92	56.09
	0	120.69	99.69	51.36	119.82	99.27	58.11
	3	108.97	96.61	55.46	112.43	90.67	49.13
5	-6	136.59	109.37	54.76	130.40	118.79	51.30
	-3	129.14	100.45	50.58	112.21	100.41	48.39
	0	119.01	94.68	52.99	117.63	93.68	55.43
	3	108.07	91.87	47.52	108.91	85.43	53.29
	6	105.00	96.15	46.77	96.57	80.13	48.49

표 3 UO₂ 소결체 선출력 (kW/m)

height (cm)	CT			IR2			IP9		
	1.2 w/o	2.5 w/o	5.0 w/o	1.2 w/o	2.5 w/o	5.0 w/o	1.2 w/o	2.5 w/o	5.0 w/o
-6	87.84	170.29	269.15	76.59	148.65	218.83	36.92	84.93	134.61
-3	82.16	147.77	254.05	71.91	139.49	221.49	39.74	74.17	123.42
0	91.95	144.92	256.85	72.62	130.82	213.02	39.47	72.33	124.09
3	79.63	154.26	240.27	64.06	112.08	194.81	37.88	77.61	129.15
6	73.80	140.85	242.24	63.35	111.29	197.56	38.41	83.37	125.29

그림 1 무계장 캡슐

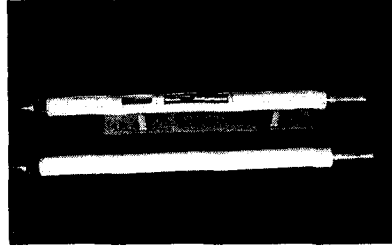


그림 2 피복관이 없는 경우의 선출력 분포도

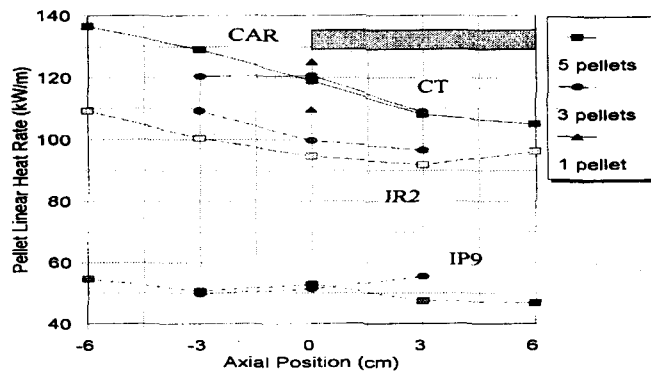


그림 3 피복관이 있는 경우의 선출력 분포도

