

고연소도 신형 UO_2 소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉 설계

Design of Test Fuel Rod for High Burn-up UO_2 Pellets in HANARO Irradiation Capsule

김대호, 이찬복, 오동석, 송근우, 방제건, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 큰결정립 UO_2 소결체의 하나로 캡슐 노내 조사시험을 위한 시험봉을 설계하였다. 시험용 UO_2 소결체는 연소도 70 MWD/kgU 이상까지 하나로에서 연소시킬 계획이다. 시험용 UO_2 소결체가 경수로 핵연료와 유사한 출력 및 온도 조건에서 연소될 수 있도록 시험봉의 충전 기체를 변화시키면서 시험봉의 거동을 분석하였다. 또한 하나로 캡슐 조사시험에 요구되는 ONB(Onset of Nucleate Boiling) 및 핵연료 용융 방지 등의 안전 요건을 만족시키고, 캡슐이 마모 손상 없이 장기간 동안 하나로에서 조사될 수 있도록, 캡슐의 냉각 유로 및 유량 설계를 최적화 하였다.

Abstract

Test fuel rod was designed to irradiate the large grain UO_2 pellet developed for the high burn-up LWR fuel in the HANARO in-pile capsule. UO_2 pellets will be irradiated up to the burn-up higher than 70 MWD/kgU. To irradiate the UO_2 pellets at the power and temperature conditions equivalent to LWR fuel, in-pile behavior of test rods was analyzed by varying the fuel rod filling gases. In addition, to satisfy the safety criteria of HANARO such as prevention of ONB(Onset of Nucleate Boiling), fuel melting and wear damage of the capsule during the long term irradiation, design of coolant flow channel and flow rate in the capsule was optimized.

1. 서 론

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 큰 결정립 신형 UO_2 소결체의 노내 성능 시험 및 검증을 위해 하나로에서의 캡슐 조사시험을 추진 중에 있다. 캡슐 조사시험은 경수로 핵연료의 출력 및 온도 조건과 유사하거나 보수적인 조건에서 수행될 예정이며, 조사후에는 핵분열기체방출, 소결체의 안정성 및 고연소도에서의 결정립 세분화 및 핵분열기체 기포 생성 등과 같은 Rim effects 검사 등이 수행될 예정이다.

신형 UO_2 소결체의 하나로시험용 캡슐은 그 동안 Dupic 핵연료의 조사 시험을 위해 개발된 무게장캡슐의 설계를[1] 기본으로 하여, 신형 소결체의 조사 요건에 따른 설계개선을 수행할 예정이다. 신형 소결체는 70 MWD/kgU 이상의 연소도까지 고온 및 고출력에서 장기간 연소되기 때문에 시험 핵연료봉 및 캡슐의 건정성 유지가 최우선적인 관심 사항이다. 또한 6 개의 시험봉을 일시에 조사하기 위해 그림 1과 같이 상하의 2 층 구조로 하여 각각 시험봉을 3 개씩 배치할 예정이다. 그리하여 연소도 35 MWD/kgU에 도달하면 하나의 시험봉 다발을 인출하여 중간 연소도에서의 신형 UO_2 소결체의 성능을 조사후 시험을 통해 검사할 예정이다. 다른 시험 핵연료봉 다발은 새로운 캡슐에 넣어서 하나로에 재장전되어 70 MWD/kgU 이상까지 조사할 계획이다.

본 논문에서는 신형 UO_2 소결체의 하나로 조사시험시 경수로 핵연료의 연소조건과 유사하도록 시험 연료봉을 예비적으로 설계하였다. 하나의 냉각수 온도가 40-50 °C로써, 경수로의 300 °C 보다 매우 낮기 때문에, UO_2 소결체의 온도를 경수로 핵연료와 동일하게 유지시키기 위해 시험봉의 충전기체의 종류 및 압력을 변화시키면서 핵연료의 온도를 분석하였다. 또한 장기간의 노내 조사기간 중의 핵연료의 냉각 및 캡슐의 마모 최소화화를 동시에 만족시키도록, 캡슐의 냉각 채널의 설계 최적화를 시도하였다. 즉, 캡슐로 흐르는 냉각수의 유량 및 유로 면적을 변화시키면서 핵연료의 중심 및 표면온도 변화를 분석하였다.

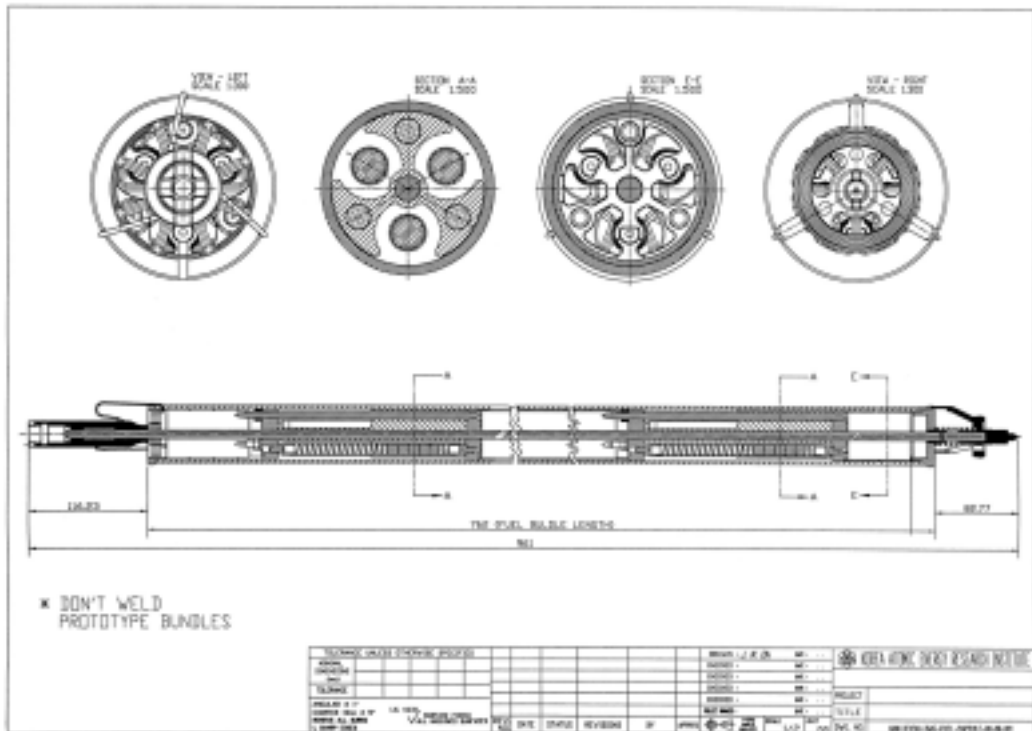


그림 1. 신형 UO_2 소결체 노내시험용 캡슐 개략도[2]

2. 시험봉 설계

하나로 노내 캡슐에 장전될 시험봉의 UO_2 소결체는 고연소도용으로 1300°C 에서 4시간 공기분 위기에 열처리된 U_3O_8 단결정을 소결체 제조공정에 4 ~ 6% 첨가하여 제조한 큰결정립 소결체이다. 이때 성장되는 결정립의 크기는 12 ~ 20 μm (기존 소결체 결정립 크기는 6 ~ 8 μm)이다. 이 기술은 현재 한전 원자력연료주식회사에서 양산공정 실증시험 중에 있다.

2.1 냉각조건 분석

2.1.1 최소유량 결정

핵연료 조사 캡슐내로 흐르는 냉각수의 최소유량을 구하기 위해서는 시험봉의 최대 가능 선출력에서 하나로의 안전 제한조건인 Onset of Nucleate Boiling(ONB) 온도(125°C 이하)를 만족시키는 냉각수 유량을 구해야한다. 신행 소결체의 최대 가능 선출력은 DUPIC 핵연료 분석시 사용한 정상 및 과도상태의 선출력비율[3]을 사용하여 정상상태 최대출력 500W/cm 기준으로 33% 증가시켜 과도상태의 최대 가능 선출력을 667.3 W/cm 로 가정하였으며, 열속은 최대 가능 선출력을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q''_{\text{lim}} = \frac{LHGR_{\text{lim}}}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

여기서, $LHGR_{\text{lim}}$: 봉 최대 선출력(W/cm)

D : 봉 직경 (m)

열전달 계수는 식 (2)의 Newton의 냉각법칙을 시험봉에 적용함으로써 계산되며, 최소유량은 Prandtl number와 Reynolds 수의 함수로 표현되는 식 (3)의 Dittus-Boelter 상관식으로부터 역산되었다.

$$q''_{\text{lim}} = h \cdot (T_{\text{clad}}^{\text{lim}} - T_{\text{coolant}}) \quad (2)$$

여기서, q''_{lim} : 열속 (W/cm^2)

h : 열전달 계수 ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)

$T_{\text{clad}}^{\text{lim}}$: 피복관 표면온도, ONB 온도 ($^\circ\text{C}$)

T_{coolant} : 냉각수 온도 ($^\circ\text{C}$)

$$Nu(= h \cdot D_h/k) = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3)$$

여기서, Nu : Nusselt 수

h : 열전달 계수 ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)

k : 열 전도도 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

D_h : 수력직경 (m)

$$Re : \text{Reynolds 수} \left(\frac{m \cdot D_h}{\mu \cdot A} \right)$$

$$Pr : \text{Prandtl 수} \left(\frac{C_p \cdot \mu}{k} \right)$$

하나로 노심에서 신형소결체 캡슐의 최소 냉각조건에서 계산된 열수력 인자는 표 1과 같다. 표 1에서 신형 소결체 캡슐에서 시험봉이 최대 667.3 W/cm 이하에서 연소될 때 하나로의 ONB 온도 기준을 만족시키는 최소 냉각수유량은 5.188 kg/s 인 것으로 계산되었으며, 이는 DUPIC 캡슐의 유량 9.632 kg/s에 비해 46% 작다.

표 1. 최소 냉각조건에서의 열수력 인자

Parameter	신형소결체 캡슐	DUPIC 캡슐
최대선출력 (W/cm)	667.3	661.2
열전달 계수 (W/cm ² °C)	26304	42630
냉각수 유량 (kg/s)	5.188	9.632
냉각재 온도 (°C)	40	40
피복관 표면온도 (°C)	125	125
피복관 외경 (mm)	9.5	12.12

2.1.2 최적 냉각조건

신형소결체 캡슐 내부의 냉각채널을 그림 2와 같이 예비적으로 설계하였다. 그림 2는 열전달계수 계산을 위해 사용된 개략도이며, S_R 은 시험봉 하나의 유로 채널이고 S_{Ass} 는 캡슐 전체의 유로채널이다. DUPIC 핵연료 캡슐의 압력손실 시험결과 및 개발된 캡슐 내부의 압력손실예측모델[4]로부터 계산된 캡슐의 전체 압력손실 크기와, 하나로 노심의 열수력 특성자료[5]를 사용하여, 표 2와 같이 신형소결체 캡슐의 열수력 인자를 구하였다. 표 2에서 정상상태 최적유량은 7.333 kg/s 이며 이 때 냉각수의 열전달계수는 34.690 W/m²K 인 것으로 나타났다.

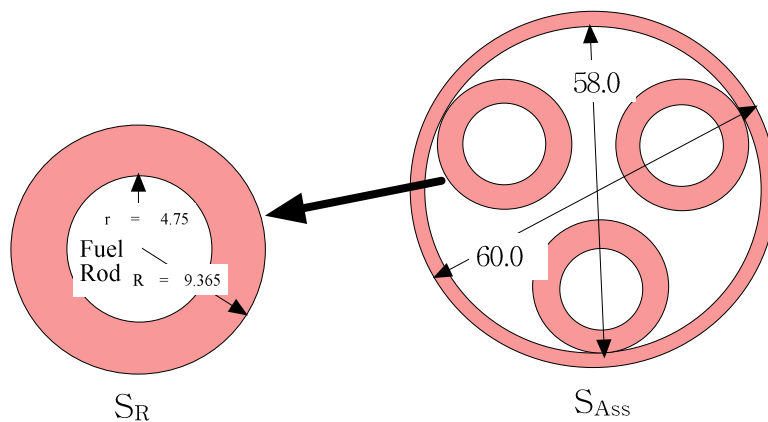


그림 2. 열전달계수 계산을 위한 개략도

표 2. 정상 상태에서의 열수력 인자

Parameter	Value
열전도도 [W/m.K]	0.6288
밀도 [kg/m ³]	992.4
비열 [J/kg.K]	4177.9
점성계수 [kg/m.sec]	0.00065
봉별 유로 단면적 [m ²]	0.0002046
봉별 수접길이 [mm]	88.687
봉별 수력직경 [mm]	9.23
Reynolds 수	129600
Prandtl 수	4.34
유량 [kg/s]	7.333
열전달 계수 [W/cm ² °C]	34.690

2.2 시험봉 성능분석

2.2.1 과도상태에서의 시험봉 거동분석

신형 UO₂ 소결체의 캡슐 조사시험에서 소결체의 표면온도가 경수로 핵연료의 연소조건과 유사하게 적용되어야 개발된 소결체의 성능검증이 용이하다. 따라서 캡슐의 냉각수유량과 압력강하량을 최적화할 필요가 있다. 아울러, 하나로의 안전요건인 ONB 온도의 초과여부를 확인하였다.

캡슐조사 시험중 최대선출력에서 소결체의 안전성을 확인하기 위해 핵연료 출력이 가장 큰 조사초기에서의 중심온도 및 표면온도를 확인하였다. 이때의 조건에서 핵연료봉 성능분석 코드를 이용하여 정상상태에서 분석하였다. 참조 연료봉으로는 한국표준원전용 개량핵연료를 사용하였으며, 주요입력으로는 피복관 외경과 내경은 각각 9.5 mm, 8.36 mm이고 소결체 길이 및 외경은 각각 10 mm, 8.19 mm이다. 주요 입력자료는 표 3과 같다.

다음은 핵연료봉 성능분석 코드를 이용한 과도상태에서 최대선출력 667.3 W/cm에 대해 표 4와 같이 4가지의 Case별로 소결체 중심온도, 소결체 표면온도, 피복관 표면온도 및 냉각수 온도를 분석 계산하였다. Case I과 Case II는 최소유량 5.188 kg/sec 및 열전달계수 26,304 W/m².K를 기준으로 시험봉 내의 충전가스를 각각 100% Argon 2기압과 100% Helium 1기압의 조건으로 분석하였으며, Case III와 Case IV는 최적유량 7.333 kg/sec 및 열전달계수 34,690 W/m².K를 기준으로 시험봉 내의 충전가스를 각각 100% Argon 2기압과 100% Helium 1기압의 조건으로 분석하였다.

최소유량과 최적유량에서 최대 선출력을 입력으로 4가지의 경우에 대한 소결체의 중심온도를 분석하였다. 소결체의 중심온도가 가장 크게 변화하는 조사초기를 가정하여 분석한 결과를 표 5에 정리하였다. 분석결과 소결체의 중심온도가 Case I의 경우 2798°C, Caes II의 경우 2,372°C, Case III의 경우 2,785°C 및 Case IV의 경우 2,346로 각 경우의 UO₂ 소결체 용융온도 2,837°C 이하임을 확인하였다. 또한, 시험용 피복관의 온도는 125°C 이하로써 하나로의 ONB 기준을 만족하였다.

표 3. 캡슐 및 시험봉의 예비분석용 Data Summary

구 분	단 위	신형소결체 캡슐	DUPIC 캡슐
Core & Thermal Specific Data			
봉내압 (상온)	bar (100% He)		1
한계 선출력	W/cm	667.3	661.2
최대 선출력	W/cm	500	495.4
냉각수 입구온도	℃	40	40
냉각수 유량	kg/s	7.333	9.632
열전달계수	W/m ² K	34690	42630
속 중성자속 (E > 0.821 MeV)	n/cm ² -sec	2.54 x 10 ¹⁵	2.54 x 10 ¹⁵
Teat Fuel Rod Specific Data			
Pellet Diameter	mm	8.19	10.55
Pellet Length	mm	10.00	10.00
Fuel Gap Thickness	mm	0.085	0.125
Cladding O.D.	mm	9.50	12.12
Cladding I.D.	mm	8.36	10.80
Capsule Specific Data			
Cooling Block Dia.	mm	18.73	21.35
Lower End Cap OD	mm	58	59.3
외통 OD	mm	56	56
연료봉 길이	mm	200(100 x 2)*	100
프레넘 길이	mm	100(50 x 2)	50
Active Length	mm	100(50 x 2)	50

* 상단/하단 2층 배열(그림 1. 참조)

표 4. 각 Case별 시험조건

구 분	유 량	열전달계수	Fill Gas in Rod	Fill Gas 압력
Case I	5.188 kg/s	26304 W/m ² .K	Ar 100%	2 bar
Case II	5.188 kg/s	26304 W/m ² .K	He 100%	1 bar
Case III	7.333 kg/s	34690 W/m ² .K	Ar 100%	2 bar
Case IV	7.333 kg/s	34690 W/m ² .K	He 100%	1 bar

표 5. 최대 예상선출력 667.3 W/cm 에서의 각 Case별 온도분석 결과

(단위 : ℃)

구 분	소결체 중심온도	소결체 표면온도	피복관 표면온도	냉각수 온도
Case I	2798	793	125	40
Case II	2372	474	125	40
Case III	2785	781	104.5	40
Case IV	2346	459	104.5	40

2.2.2 정상상태에서의 시험봉 거동분석

정상상태에서 선출력 변화에 따른 시험봉의 거동을 각 Case 별로 분석하였다. 정상상태에서의 시험봉의 출력은 최대 600 W/cm에서 300 W/cm까지 변화할 것으로 예상하여, 600, 500, 400 및 300 W/cm에서 핵연료 온도와 봉내압을 100 MWd/kgU 연소도까지 분석하였다.

표 6, 7, 8 및 9은 각 Case에 대한 선출력별 온도분석결과이며, 그림 3, 4, 5 및 6는 연소도에 따른 온도변화의 결과이다. 소결체의 표면온도는 Case II와 CaseIV가 상용조건과 비교적 유사했으며, Case I과 Case III의 소결체 표면온도는 상용조건에 비해 비교적 높은 편이었다.

100 MWd/kgU까지 유효연소기간은 선출력 600 W/cm에서 800일이며, 500 W/cm에서 950일, 400 W/cm에서 1150일, 300W/cm에서는 1550일로 나타났다. Case I 및 II의 냉각수 유속이 6.54m/sec, Case III 및 IV는 9.244 m/sec로 상당히 빠르고 유량이 크기 때문에 냉각수 온도는 축방향으로 변하지 않았다. 시험봉의 내압은, 방출되는 핵분열 기체를 위해 시험봉 설계시 충분한 플레넘 공간이 있도록 하였기 때문에 연소도 70 MWd/kgU까지 각각의 압력 4 bar이하를 유지하고 있으며, 연소도 증가에 따라 자연적으로 선출력이 감소하는 실제의 시험봉 출력이력을 고려하면 연소도 100 MWd/kgU까지도 시험봉의 내압은 냉각수 압력보다는 작을 것으로 판단된다. 시험봉의 부식은 피복관의 표면온도가 125℃ 이하를 유지하기 때문에 연소도 100 MWd/kgU까지도 아주 작은 것으로 나타나, 핵연료 피복관 부식기준인 100 μm를 충분히 만족한다.

따라서, 시험봉은 하나로 안전 기준인 ONB 및 핵연료 용융방지 요건이 만족되었으며, 조사 전기간 동안 시험봉의 건전성이 유지될 것으로 판단된다.

표 6. 선출력 600 W/cm 일 때 온도 및 봉내압 분석결과

Time Step (Days)	Burn-up (MWd/kgU)	Case I				Case II				Case III				Case IV			
		T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP
0	0	2566	740	116.43	2.22	2146	467	116.43	1.11	2555	731	97.95	2.22	2122	454	97.95	1.11
100	10	2469	807	116.43	2.32	2064	520	116.43	1.14	2459	799	97.95	2.31	2041	506	97.95	1.14
150	20	2424	798	116.43	2.42	2036	529	116.43	1.19	2414	790	97.95	2.42	2014	516	97.95	1.19
300	40	2363	797	116.43	2.72	1930	511	116.43	1.38	2349	786	97.95	2.71	1909	498	97.95	1.37
450	60	2393	845	116.43	3.25	1853	490	116.43	1.71	2380	834	97.95	3.24	1820	472	97.95	1.63
550	70	2421	877	116.43	3.74	1885	513	116.43	1.99	2408	867	97.95	3.72	1854	496	97.95	1.96
600	80	2436	892	116.43	4.03	1904	525	116.43	2.26	2424	882	97.95	4.00	1974	508	97.95	2.22
800	100	2486	945	116.43	5.18	1994	581	116.43	2.89	2475	935	97.95	5.15	1965	564	97.95	2.83

(참조) T-cL : 중심온도, T-fS : 소결체 표면온도, T-cS : 피복관 표면온도, RIP : 봉내압(bar)

표 7. 선출력 500 W/cm 일 때 온도 및 봉내압 분석결과

Time Step (Days)	Burn-up (MWd/kgU)	Case I				Case II				Case III				Case IV			
		T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP
0	0	2299	759	103.69	2.22	1770	449	103.69	1.10	2289	752	88.29	2.22	1749	438	88.29	1.10
100	10	2251	831	103.69	2.32	1714	481	103.69	1.11	2243	824	88.29	2.31	1694	471	88.29	1.11
200	20	2181	820	103.69	2.41	1678	495	103.69	1.14	2172	813	88.29	2.41	1656	484	88.29	1.14
350	40	2025	744	103.69	2.70	1612	488	103.69	1.28	2016	738	88.29	2.69	1589	476	88.29	1.27
550	60	1996	746	103.69	3.25	1484	440	103.69	1.57	1982	737	88.29	3.23	1460	427	88.29	1.55
650	70	2021	769	103.69	3.62	1447	426	103.69	1.74	2008	760	88.29	3.60	1419	411	88.29	1.70
750	80	2050	791	103.69	4.07	1471	441	103.69	1.94	2037	782	88.29	4.04	1442	425	88.29	1.89
950	100	2098	831	103.69	5.00	1531	475	103.69	2.39	2086	822	88.29	4.96	1501	460	88.29	2.33

표 8. 선출력 400 W/cm 일 때 온도 및 봉내압 분석결과

Time Step (Days)	Burn-up (MWd/kgU)	Case I				Case II				Case III				Case IV			
		T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP
0	0	2013	788	90.95	2.21	1363	413	90.95	1.10	2006	783	78.64	2.21	1346	404	78.64	1.10
100	10	1996	845	90.95	2.30	1324	433	90.95	1.09	1989	840	78.64	2.30	1307	424	78.64	1.09
250	20	1933	845	90.95	2.40	1276	439	90.95	1.10	1926	840	78.64	2.39	1259	430	78.64	1.10
450	40	1760	756	90.95	2.72	1201	418	90.95	1.17	1753	751	78.64	2.71	1182	407	78.64	1.16
700	60	1548	639	90.95	3.20	1086	368	90.95	1.29	1537	632	78.64	3.19	1064	356	78.64	1.28
800	70	1560	650	90.95	3.43	1040	346	90.95	1.34	1548	642	78.64	3.41	1018	333	78.64	1.33
900	80	1578	663	90.95	3.76	1009	330	90.95	1.42	1565	655	78.64	3.74	987	318	78.64	1.40
1150	100	1625	696	90.95	4.52	1029	344	90.95	1.60	1612	688	78.64	4.48	1006	331	78.64	1.57

표 9. 선출력 300 W/cm 일 때 온도 및 봉내압 분석결과

Time Step (Days)	Burn-up (MWd/kgU)	Case I				Case II				Case III				Case IV			
		T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP	T-cL	T-fS	T-cS	RIP
0	0	1670	788	78.21	2.21	965	357	78.21	1.10	1664	784	68.98	2.21	954	350	68.98	1.10
100	10	1674	838	78.21	2.24	939	371	78.21	1.09	1668	834	68.98	2.30	927	364	68.98	1.09
300	20	1641	841	78.21	2.33	909	370	78.21	1.08	1635	837	68.98	2.39	898	363	68.98	1.08
600	40	1482	757	78.21	2.62	839	344	78.21	1.12	1476	753	68.98	2.71	828	337	68.98	1.12
900	60	1259	619	78.21	3.00	771	308	78.21	1.22	1251	614	68.98	3.19	761	301	68.98	1.22
1100	70	1124	536	78.21	3.12	726	283	78.21	1.28	1114	530	68.98	3.41	713	275	68.98	1.28
1250	80	1103	524	78.21	3.23	696	266	78.21	1.37	1093	517	68.98	3.74	684	258	68.98	1.37
1550	100	1118	536	78.21	3.51	707	274	78.21	1.58	1108	529	68.98	4.48	694	266	68.98	1.58

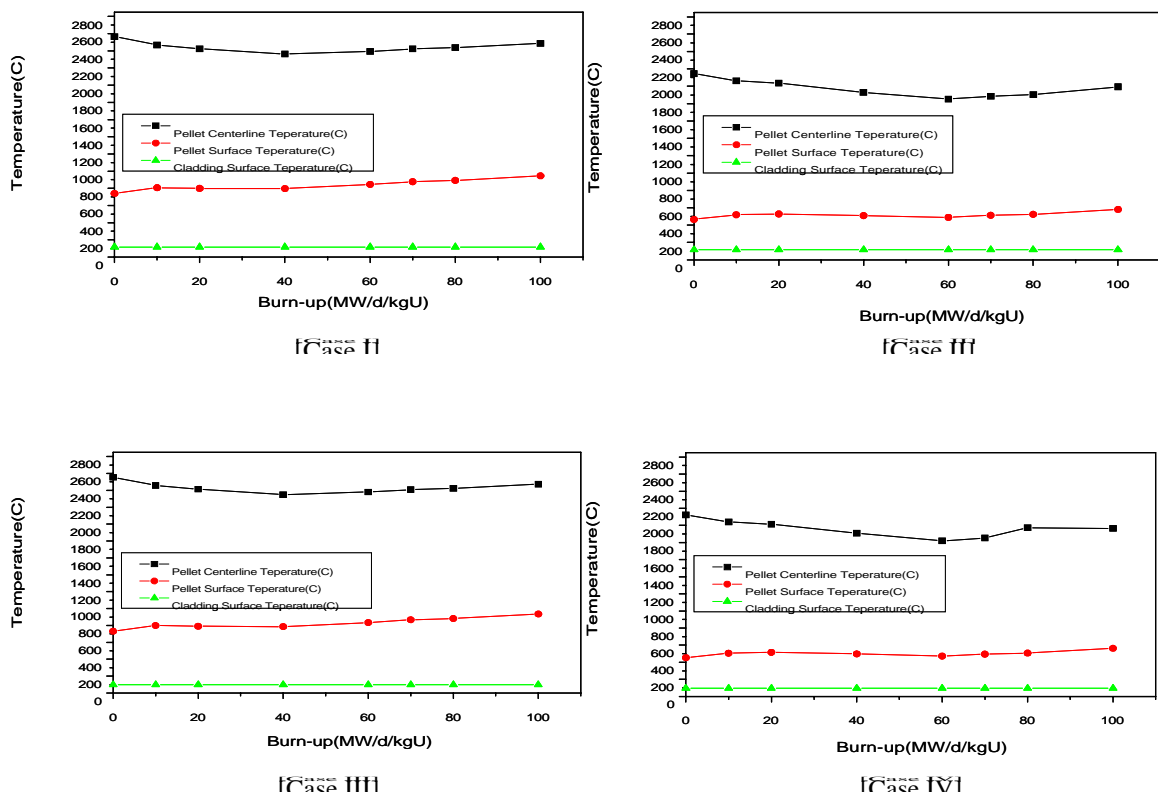
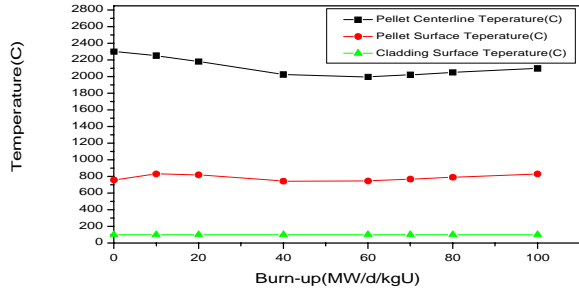
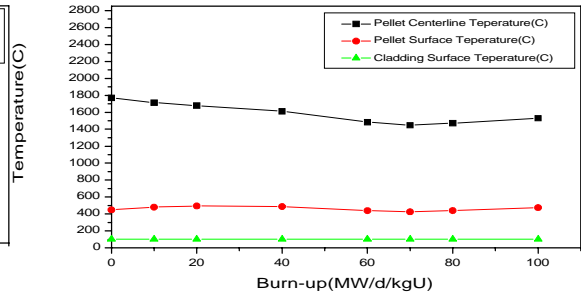


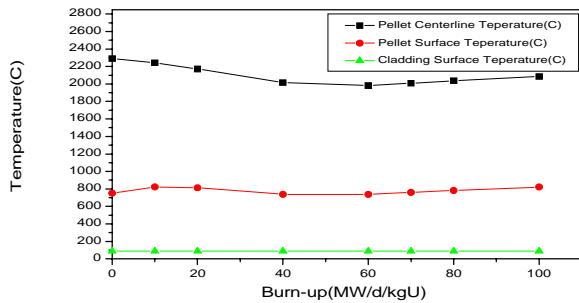
그림 3. 선출력 600W/cm일 때 온도분포



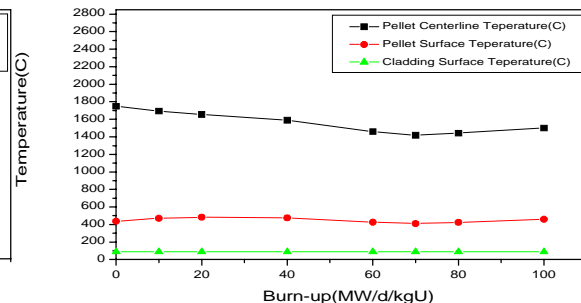
[Case I]



[Case II]

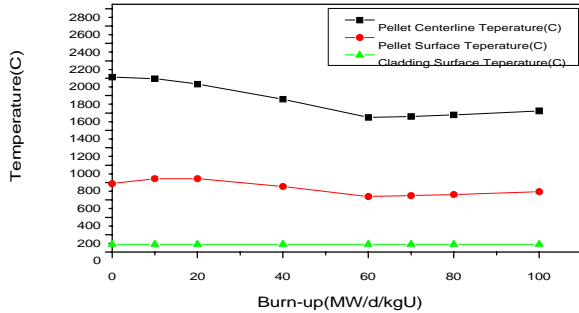


[Case III]

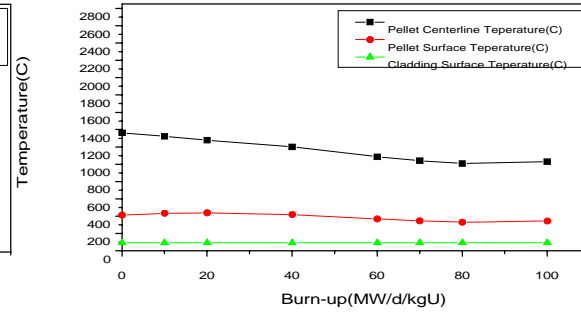


[Case IV]

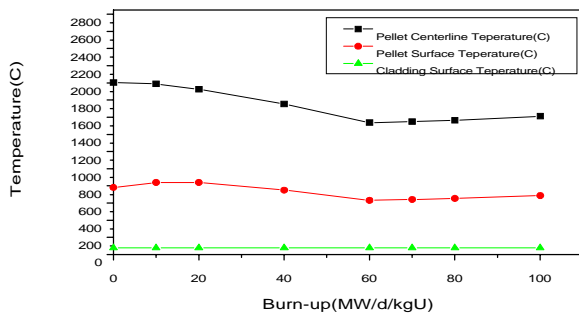
그림 4. 선출력 500W/cm일 때 온도분포



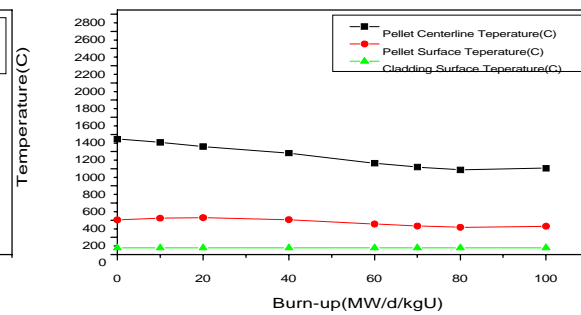
[Case I]



[Case III]



[Case III]



[Case IV]

그림 5. 선출력 400W/cm일 때 온도분포

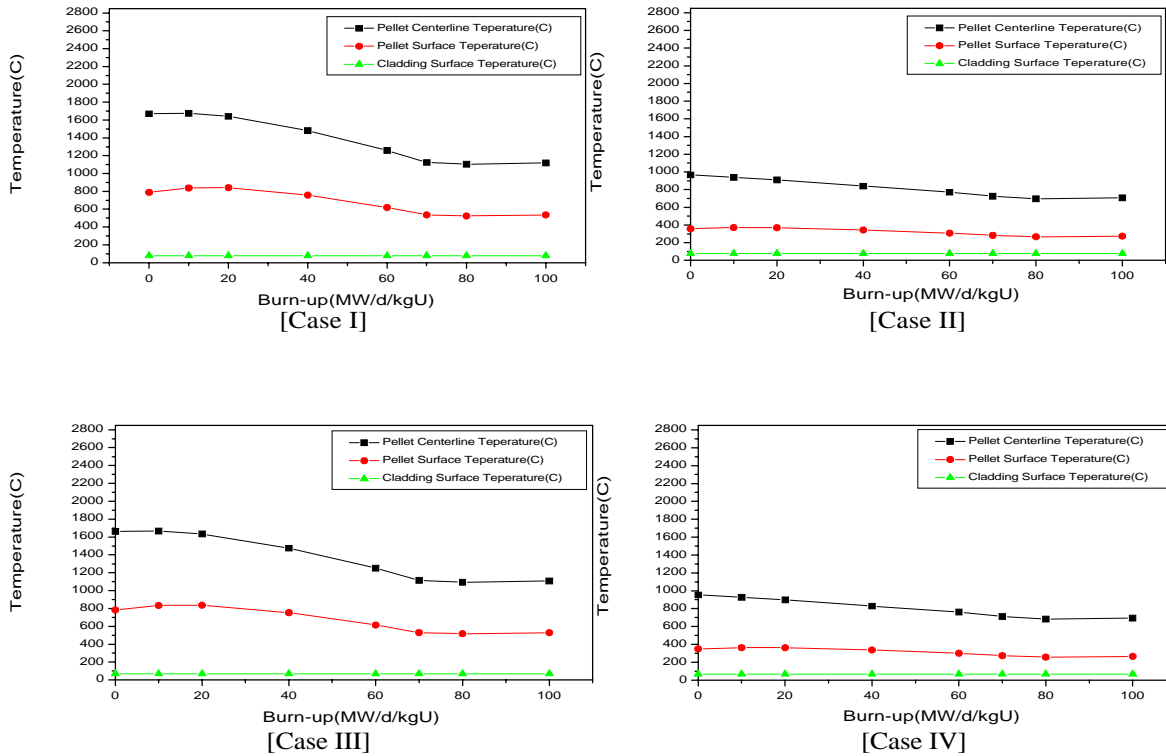


그림 6. 선출력 300W/cm일 때 온도분포

3. 결 론

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 큰결정립 UO_2 소결체의 하나로 캡슐 노내 조사시험을 위한 시험봉을 예비적으로 설계하였다. 시험봉의 충전가스의 종류 및 압력을 조절하여 시험봉의 온도 조건을 경수로 핵연료의 실제 연소 조건과 동일하도록 하였다. 장기간 조사될 캡슐의 마모를 최소화하기 위해, 캡슐의 마모가 냉각수 유량에 반비례하는 것을 고려하여, 시험봉의 최대 예상선출력 667.3 W/cm에서 핵연료 용융과 ONB 발생이 방지되는 최소 냉각수 유량을 도출하였다. Duplic 핵연료의 조사 캡슐을 기준으로 최대 46%까지 유량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 시험봉의 예비 설계결과, 시험봉의 제원은 경수로용 핵연료와 동일하게 하고, 충전 기체로는 100% Helium 1기압, 캡슐의 냉각수 유량 7.133 kg/sec 등의 조건이 최적인 것으로 판단된다.

4. 후기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행되었다. 본 연구를 도움을 주신 하나로이용기술개발팀, 하나로운영기술개발팀 및 DUPIC 핵연료개발팀에 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] 배기광 외 “DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서,” KAERI/TR-1157/98, 1998.10.
- [2] 김봉구 외 “신형소결체 하나로 조사캡슐 개략도“, HAN-IC-CR-00-021, 2000. 8.
- [3] 송기찬 외, “DUPIC 핵연료 조사 시험계획서,” KAERI/TR-1545/2000, 2000. 4.
- [4] “신형핵연료 조사시험용 캡슐의 압력손실 모델,” 2000 추계원자력학회, 2000. 10.
- [5] “하나로 안전성 분석보고서,” KAERI/TR-710/96, 1996.