

'98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

조사시험용 DUPIC 핵연료의 온도분석

정인하, 박희성, 이기홍, 배기광, 양명승

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료 소결체의 하나로 조사시험과 관련하여 이중 피복관으로 구성된 소결체 설계를 수행하였으며 각각의 설계변수가 핵연료의 온도에 미치는 영향하였다. 하나로에서 조사할 DUPIC 핵연료의 설계해석 결과, DUPIC 핵연료의 조사시험시 열전도도, 출력, 반경 틸새 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미쳤으며, 피복재 두께, gamma열, 열전달 계수 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치지 않았다. Transient 온도분석의 경우 약 160초 이상의 시간에서 평형 온도에 도달할 것으로 분석되었다.

1. 서론

DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel in CANDU reactors) 핵연료 개발은 캐나다 및 미국과 국제공동연구로 수행하고 있으며, 핵연료 가공 및 성능의 실험적 검증연구도 수행 중에 있으며, DUPIC 핵연료의 성능분석을 위하여 하나로에서 capsule을 이용한 조사시험을 준비 중에 있다. Capsule을 이용한 DUPIC 소결체의 노내조사시험 예비단계로서 조사시험용 소결체 설계에 따른 온도분석을 수행하였으며, 이 결과는 실제 소결체의 조사시험에서 예측되는 설계 및 가공변수의 영향을 간접적으로 평가할 수 있어 소결체의 설계에 반영할 예정이다.

2. 방법

2.1. 핵연료 설계

소결체 5개를 한 개의 mini-element로 구성하고 상단에 핵분열 가스의 포집을 위하여 plenum을 구성하였다. plenum에는 스프링을 삽입하여 이동이나 운전 중에 소결체가 이동하는 것을 최소화하도록 하였다. 5개의 소결체와 스프링은 피복재에 삽입하고 양쪽 끝을 봉단마개 용접으로 밀봉하였다. 봉단마개의 상세설계는 mini-element의 장착과 관계되므로 캡슐에 삽입되는 부위의 상세설계와 더불어 완성될 예정이며 예비설계 단계에서는 단순화하였다.

2.2 설계 분석의 기본사항

하나로 장전시의 출력과 부자재의 감마열 등의 값은 하나로에서 예비분석한 자료를 토대로 하였으며 선출력 450W/cm일 경우에서의 온도분포를 분석하였다. 따라서 조사공의 위치나 핵연료의 종류에 무관하게 계산하였으므로 이 계산 값은 추후에 하나로에서의 조사위치가 결정되면 출력의 백분을 비로 표시될 수 있도록 하였다. DUPIC 핵연료

assembly설계의 기본적인 사양을 표 1에 요약하였다. 분석 코드는 주로 HEATING 7.2f를 이용하였으며 cylindrical coordinate로서 대칭성을 고려하여 r(반경)에 따른 온도 분포를 구하였다. Heating에서는 열팽창을 고려하지 않으므로 열팽창은 GENGTC을 이용하여 고려하였다. 분석에서는 조사핵연료 assembly가 3개의 mini-element로 구성되어 있으나 각각의 mini-element 주위로 냉각수가 흐르므로 1개의 mini-element에 대해서만 분석을 수행하였다.

2.3 열전도도

설계시 고려된 물질로서, 열전달에 관여하는 재료로는 핵연료, zircaloy, He, 스텐레스강 등이 있는데, DUPIC 핵연료의 열전도도 $k(W/cm^{\circ}C)$ 는

$K_{Fuel} = 0.04154 - 3.32 \times 10^{-5}T + 2.21 \times 10^{-8}T^2 - 8.90 \times 10^{-12}T^3 + 1.75 \times 10^{-15}T^4$ 를 이용하였다.(여기서, T는 섭씨 온도이다.)

상기 식은 일반적인 값을 나타내므로 DUPIC 핵연료의 열전도도와 가장 근접하다고 판단되는 값으로 향후에 계속 보완을 해야 하며 조사로 인한 변화는 무시하였다.

2.4 연료봉 표면에서의 강제 열전달 계수

경계조건으로서 forced convection에 의한 열전달계수는 $27,000w/m^2^{\circ}C$ 를 사용하였으며 냉각수의 온도는 $50^{\circ}C$ 로 하였다.

2.5 Zircaloy와 스텐레스강에서의 발열량

발열량으로 두 재료 모두 $60w/cm^3$ 를 사용하였다. zircaloy의 밀도는 $6.5g/cm^3$ 이며 스텐레스강의 밀도는 $7.8g/cm^3$ 으로 계산하였다.

3. 실험결과 및 토의

분석한 결과를 요약하여 표 2에 나타내었으며 각각의 변수들의 영향은 다음과 같았다.

3.1 열전도도

핵연료의 열전도도는 온도에 직접적인 영향을 받는다. 또한 DUPIC 핵연료는 처음 시도되는 핵연료이므로 정확한 열전도도는 측정된 바가 없다. 본 연구에서 사용한 핵연료의 열전도도 값은 SIMFUEL 등에서 측정된 실험 값에서 가장 근사치로 추정되는 것을 사용하였으며 본 연구에서는 이 열전도도 값을 80, 100, 120%로 변화시켜 그 영향을 분석하였다. 이 결과를 그림 1에 나타내었는데 열전도도가 변화함에 따라서 핵연료의 중심 온도는 매우 큰 영향을 받았다. 그러나 핵연료 표면의 온도는 거의 변화하지 않았다. 열전도도가 약 20% 변화하는 경우 중심온도는 약 $300^{\circ}C$ 가 변화하므로 정확한 중심온도를 알기 위해서는 열전도도 값의 결정을 신중히 해야 한다.

3.2 핵연료와 zircaloy 피복관 사이의 간격

핵연료와 피복재인 zircaloy의 간격은 He으로 채워져 있지만 He의 열전도도가 낮기 때문에 이 부위에서 온도가 상승하게 된다. 간격에 따른 온도상승의 정도를 분석하기 위하여, 설계기준치인 $0.0445mm$ 에서 $0.03mm$ 씩 증가시켜 $0.1345mm$ 까지의 영향을 분석하였다. 이 결과를 그림 2에 나타내었다. 결과에 의하면 간격이 증가함에 따라 핵연료의 온

도는 일정한 폭으로 상승하였다. 즉, 핵연료의 표면 뿐 아니라 중심온도의 상승율도 거의 일정하였다. 또한 그림 3와 같이 피복재의 온도는 간격의 변화에 무관하였다. 즉, 피복재의 온도는 변화가 없으나 간격이 증가함에 따라 핵연료의 온도는 일정하게 증가하였다. 이 간격은 제조시의 공차와 관계되는데 작은 차이에 의해서도 핵연료의 온도변화폭을 예상할 수 있었다. 따라서 제조시의 공차는 엄격하게 통제되어야 할 것으로 예상되었다.

3.3 Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 사이의 간격

핵연료 assembly에 있는 zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 사이의 간격에 따라서도 온도 변화가 예상되므로 이에 대한 분석을 위하여 간격을 0.05, 0.075, 0.1, 0.15 및 0.2mm로 변화시켜 가며 각각의 경우에 대하여 온도 변화를 분석하였다. 분석결과를 그림 4과 5에 나타내었는데, 그림 4의 결과는 그림 3와 같이 간격이 증가함에 따라 핵연료의 온도가 일정하게 증가하며 그림 5에 나타난 것과 같이 간격이 증가함에 따라 내부 zircaloy 피복관의 온도를 일정하게 상승시켰다. 0.2mm 간격의 경우는 약 800℃의 온도상승을 나타내었다. 이 간격의 영향도 핵연료와 zircaloy 사이의 간격과 같이 중요하게 취급되어야 하며, 제조공차 역시 엄격하게 통제되어야 할 것으로 생각되었다.

3.4 radiation and natural convection

표2의 전달계수 항목에 radiation과 natural convection을 고려한 경우와 고려하지 않은 두 경우의 온도 분포를 나타내었는데, 표에서와 같이 두 경우의 차이는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서와 같은 설계조건에서는 radiation과 natural convection에 의한 열전달을 무시해도 전체 온도분포에는 영향이 없을 것으로 판단되었다.

3.5 Transient 분석

하나로에 장전하여 조사할 때 온도의 상승정도를 예측하기 위하여 transient 온도를 분석하였다. 입력으로는 열평창을 고려한 치수를 이용하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 초기에는 온도가 급격히 상승하나 시간이 지남에 따라서 서서히 평형 값에 도달하였다. 평형상태의 온도까지 도달하는데 걸리는 시간은 그림 6에서와 같이 약 160초이며 이 시간 후에 핵연료의 온도가 최대값에 도달하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

DUPIC 핵연료 assembly의 설계해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DUPIC 핵연료의 조사시험시 열전도도, 출력, 반경 틈새 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치며,
2. 피복재 두께, gamma 열, 열전달 계수 등은 핵연료의 온도에 크게 영향을 미치지 않는다.
3. Transient 온도 분석의 경우 약 160초 가 경과한 후 평형 온도에 도달한다.

REFERENCES

1. ORNL/TM-12262, Heating 7.2 User's manual
2. PC-GENGTC, 일본원자력연구소
3. KAERI/TR-919/97, DUPIC 핵연료조사시험계획 기술분석
4. HAN-RR-CR-97-088, Internal Memo

표 1 DUPIC 핵연료 assembly의 기본 설계 사양

치수(mm)	핵연료		Zircaloy-4	Stainless Steel	He
	내경	외경			
열전도도	식1	식2	식3	식4	-
밀도	10.6	6.47	7.8	0.000177	-
Specific heat	식5	233	식6	5130	-
열전달계수	0.388	0.6	0.6	-	-
열전달계수	-	-	27,000	-	-

* 단위 : l, kg, s, mm, °C

* 수식들의 항에 적당하게 코드를 수정했음.

식1. $0.04154 - 3.32 \times 10^{-4} T + 2.21 \times 10^{-8} T^2 - 8.9 \times 10^{-12} T^3 + 1.75 \times 10^{-6} T^4$

식2. $0.1 + 0.154 \times 10^{-3} T - 0.509 \times 10^{-6} T^2 + 0.156 \times 10^{-9} T^3 - 0.121 \times 10^{-11} T^4$

식3. $0.149 + 0.128 \times 10^{-3} T$

식4. $0.143 \times 10^{-3} + 325 \times 10^{-6} T - 0.768 \times 10^{-9} T^2$

식5.

온도	s. heat	온도	s. heat	온도	s. heat
-273	0.0	-100	0.043	400	0.0722
-260	0.003	0.0	0.056	1200	0.079
-247	0.0032	100	0.063	2000	0.082
-238	0.009	200	0.0675		

식6.

온도	s. heat	온도	s. heat
0	0.12	400	0.135

표 2 설계 분석에 의한 온도분포의 요약(단위:°C)

기준	핵연료		Zr	Zr	88	88	
	중심	표면	내표면	외표면	내표면	외표면	
열전도도	80%	2416	758	599	574	122	89
	100%	2738	758	599	574	122	89
	120%	2416	758	599	574	122	89
간격	0.0445	2416	758	599	574	122	89
	0.0745	2513	855	597	573	122	89
	0.1045	2595	947	595	570	122	89
(핵연료 Zr)	0.1345	2665	1035	593	569	121	89
	0.05	2220	591	408	377	123	89
	0.1	2416	758	599	574	122	89
(Zr, 88)	0.2	2683	1057	923	896	122	89
	0.3	4428	1253	1129	1167	120	88
	0.0	2407	749	589	565	119	87
Gamma 열	0.024	2410	753	593	569	120	88
	0.06	2416	758	599	574	122	89
	60%	2430	772	614	590	148	115
열전달계수	80%	2421	763	604	580	132	99
	100%	2416	758	599	575	122	89
	120%	2412	755	595	571	116	83
Transient (일계장 고려)	10초	1114	460	390	370	95	74
	60초	2272	643	545	519	122	89
	160초	2315	650	551	525	123	90
GENGTC	-	2280	639	541	515	122	88
	고려	2315	650	551	525	123	90
	무시	2416	758	599	575	122	89
계산방법	Nor	2416	758	599	574	122	89
	8OR	2416	758	599	574	122	89
	80%	1956	650	514	492	109	82
출력	100%	2416	758	599	575	122	89
	120%	2762	860	679	652	136	97
	0.419	2416	758	599	575	122	89
피복재 두께	0.619	2420	762	603	567	121	88
	0.819	2423	765	607	560	120	88
	1.019	2427	769	611	553	119	87

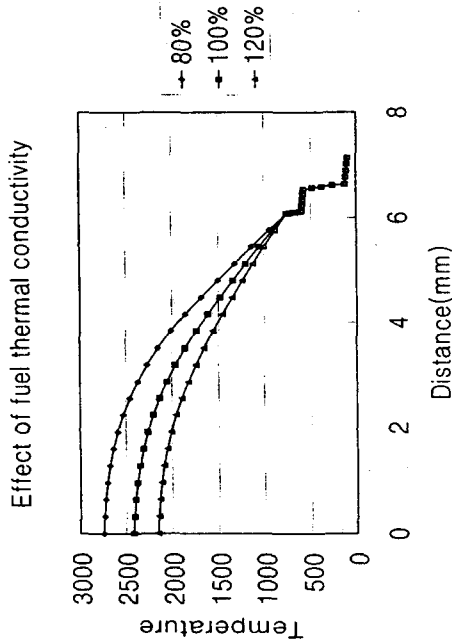


그림 1. 핵연료의 열전도도 영향

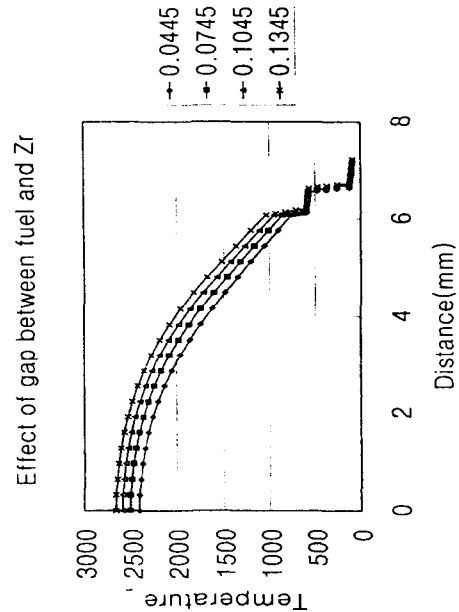


그림 2. 핵연료와 zircaloy 간격의 영향

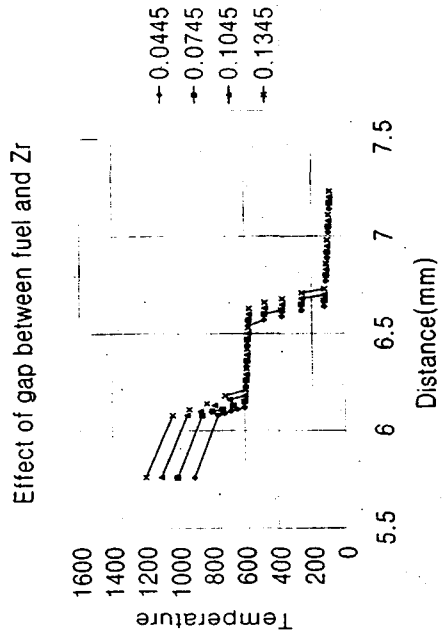


그림 3. 핵연료와 zircaloy 간격의 영향

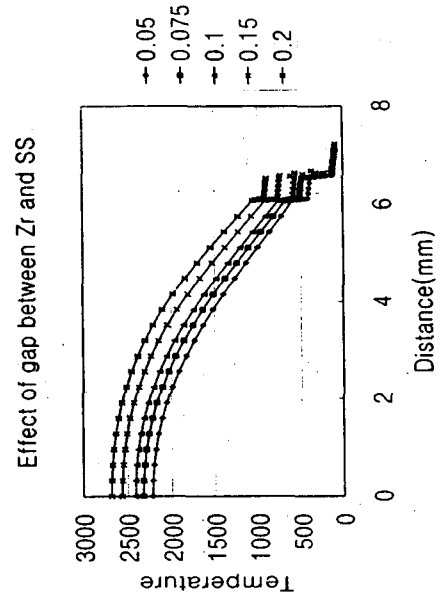


그림 4. Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 간격의 영향

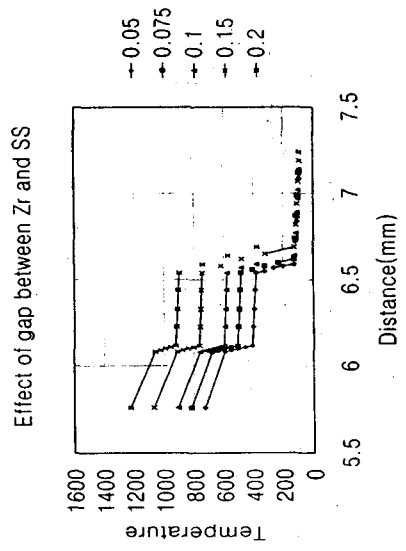


그림 5. Zircaloy 피복관과 스텐레스강 피복관 간격의 영향

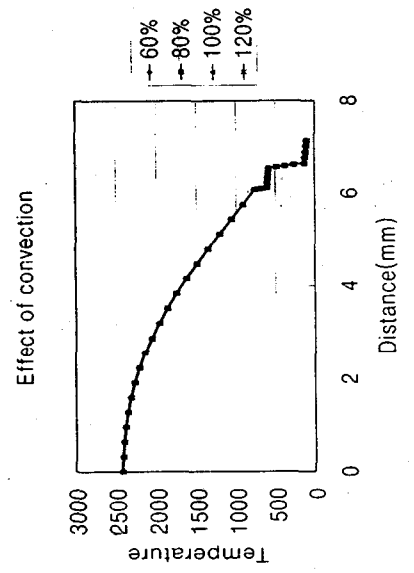


그림 6. 열전달 계수의 영향