

조사시험 결과 평가를 위한 02M-02K 재료 캡슐의 열해석

최명환, 주기남, 강영환, 조만순, 손재민, 박승재, 신윤택, 서철교, 김봉구
대전시 유성구 덕진동 150 한국원자력연구소
cmh2002@orgio.net

1. 서론

캡슐은 중성자를 이용한 재료 및 핵연료의 조사시험에 사용되는 장치중의 하나이다. 02M-02K 캡슐은 원자로 압력용기 재료인 SA508 저합금강 및 Fe-base 합금의 조사특성을 평가하고자 설계, 제작되었다[1]. 또한 2003년 8월 24 MW 출력의 하나로(HANARO) CT 조사공에서 290 ± 10 °C의 조사온도로 약 6일간 최대 0.64×10^{20} n/cm² ($E > 1.0$ MeV) 중성자 조사량까지 조사되었다[2]. 조사시험 결과 분석의 한 부분으로 측정 온도에 대한 해석결과와의 비교, 분석은 해석모델의 신뢰성 평가 및 설계데이터의 검증에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 조사시험 후 조사시 측정 온도에 대한 비교, 평가 및 해석모델의 검증을 위하여 02M-02K 캡슐의 유한요소해석 프로그램인 ANSYS[3]를 이용한 열해석을 수행하였다. 조사시험 중 열전대를 이용하여 측정한 하나로 출력에 따른 온도분포의 경향을 분석하고, 열매체와 외통 사이 갭의 설계값과 실측값에 대한 영향에 대하여 기술하였다.

2. 캡슐모델 및 열해석

시편을 포함하는 캡슐본체는 하나로 노심 조사공에 위치하며, 시편은 캡슐본체의 축방향 5개의 단에 위치한 열매체 내부에 삽입된다. Fig. 1은 열전대(thermocouple; TC)의 위치를 나타낸 것으로서 캡슐 본체의 상부를 1 단으로 하여 1, 3단에는 각각 3개, 2, 4, 5단에는 각각 2개의 열전대가 설치되었다. 각 단의 열전대는 시편홀 #3, #4의 시편 중앙에 상부(top)와 하부(bottom) 가장자리에서 깊이 7 mm되는 지점에 설치되어 온도를 측정하였다. 시편의 온도에 큰 영향을 미치는 갭의 크기는 시편과 열매체 사이가 0.1 mm, 열매체와 외통 사이가 0.105~0.33 mm로서 축방향으로 각 단이 다르게 설계되었으며, Table 1에 나타내었다. 또한 이들 갭의 측정값은 설계값과 1/1000 mm 이내의 미소한 차이를 보였다.

열해석을 위한 모델은 Fig. 2와 같이 캡슐 단면의 원주방향 대칭성을 고려하여 단면에 대한 1/4의 2차원 모델을 생성하였다. 경계조건으로서 캡슐외통 표면에서의 열전달 계수는 30.3×10^3 W/m² °C, 외통 주변 냉각수의 온도는 36 °C를 사용하였다. 또한 하중조건으로서 노심 gamma flux의 분포에 따른 재료의 발열량을 Table 1에 나타내었는데, 이 값은 CT, 24MW, 제어봉 위치 430 mm에서의 발열량이며[4], 해석에서는 재료의 밀도를 곱해

열전대 위치에서의 열발생 밀도로 환산하여 사용하였다.

Table 1. Gap size and gamma heating rate for the 2D analysis of 02M-02K capsule.

Stage	Thermo-couple	Y-Coord. (cm)	Gap size (mm)	Gamma heating rate (W/g)		
				Specimen	Holder	Tube
1	TC1 (top)	27.45	0.33	1.9	1.76	1.91
	TC2 (bot)	17.45	0.19	2.9	2.64	3.04
2	TC4 (top)	15.05	0.175	3.16	2.85	3.23
	TC5 (bot)	5.05	0.115	4.19	3.78	4.25
3	TC6 (top)	2.65	0.12	4.42	3.96	4.47
	TC7 (bot)	-7.35	0.11	4.80	4.29	4.86
4	TC9 (top)	-9.75	0.105	4.78	4.32	4.90
	TC10(bot)	-19.75	0.125	4.29	3.88	3.37
5	TC11(top)	-22.15	0.13	4.11	3.70	4.15
	TC12(bot)	-32.15	0.23	2.70	2.50	2.72

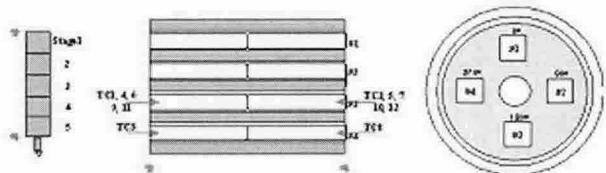


Figure 1. Schematic view of specimen arrangement and thermo-couple position.

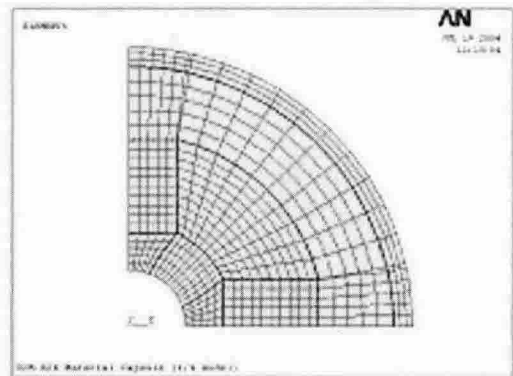


Figure 2. Finite element model of 02M-02K capsule.

3. 결과 및 고찰

Table 2는 하나로 출력 24MW에서의 조사시험 중 측정된 온도와 열매체의 외면과 외통의 내면 사이 갭에 따른 해석결과를 나타내었다. 조사시험 결과는 각 단에 따라 약간 다르지만 최소 233 °C에서 최대 256 °C의 범위에 존재하였다. 각 단에서 시편의 상하 온도는 5단에서 12 °C의 차를 보였으나 타 단에서는 거의 동일하였다. 또한 1단의 TC #1과 #3, 3단의 TC #7과 #8은 축방향 같은 높이에 설치되었으나 시편이 서로 90° 위치에 배치된 상태로서, 측정 온도차는 1단에서 10 °C, 3

단에서 11°C를 보였다. 이들 측정 온도로부터 02M-02K 캡슐의 시편은 열매체 외부의 온도조절 용 히터를 작동시키기 전에 각 단이 거의 일정한 온도분위기에 있었음을 확인할 수 있다. 해석결과와는 측정값에 비해 1단에서의 시편 온도가 다소 낮고, 타 단에서는 높은 온도를 보였으나, 두 결과의 차는 9%이내에 있었다. 또한 갭의 실제값과 설계값 사이 차이는 1/1000 mm이내로 거의 동일하여 온도 변화도 설계치를 적용한 경우와 큰 차이가 없이 3 °C 이내 존재하였다.

Table 2. Temperature (°C) of the specimen with the gap size.

Stage	Thermo-Couple	Test (24MW)	ANSYS (설계값)	Error ¹⁾	ANSYS (측정값)	Error
1	TC1 (top)	246	229.7	6.6	231.7	5.8
	TC2 (bot)	241	232.9	3.4	232.4	3.6
	TC3 (top)	236	(229.7)	2.7	(231.7)	1.8
2	TC4 (top)	233	237.6	-2.0	238.1	-2.2
	TC5 (bot)	234	243.3	-4.0	243.4	-4.0
3	TC6 (top)	255	257.1	-0.8	259.0	-1.6
	TC7 (bot)	256	263.9	-3.0	265.0	-3.5
	TC8 (bot)	245	(263.9)	-7.6	(265.0)	-8.2
4	TC9 (top)	238	259.2	-8.9	261.2	-9.7
	TC10(bot)	238	256.6	-7.8	255.8	-7.5
5	TC11(top)	250	252.3	-0.9	255.7	-2.3
	TC12(bot)	238	244.7	-2.8	245.7	-3.2

1) Error = (Test-Analysis)/Test×100(%)

Fig. 3은 캡슐 3단 시편에서의 하나로 출력에 따른 측정 및 해석온도의 비교를 나타내었다. 해석결과는 전체적으로 출력증가에 비례하여 선형적인 온도 증가를 보였으나, 측정온도는 하나로 출력 약 18 MW를 기준으로 크기가 변하는 약간 포물선적인 변화를 보였다. 그 이유는 열매체와 외통 사이 갭의 크기 변화에 기인한 것으로 판단된다. 즉 출력이 증가함에 따라 캡슐 내부 재료의 온도가 증가하고, 이는 열매체의 팽창을 증가 시킴과 동시에 갭을 감소시켜 온도가 감소하는 것이다. 3단에서의 시험결과는 같은 시편홀의 시편(TC #6과 #7)에서는 거의 동일한 온도를 보였으나, 하부의 서로 90° 위치에 배치된 TC #7과 #8에서의 온도는 출력이 증가함에 따라 차가 커지는 경향을 보였다. 출력에 따른 온도는 1단의 시험결과가 전체적으로 높고, 나머지 2, 4, 5단의 온도 변화는 3단과 마찬가지로의 경향을 나타내었다. 또한 캡슐 하부 5단에서는 시편 상부(TC #11)와 하부(TC #12)의 온도차가 상대적으로 크게 발생하였는데, 이는 축방향 발열량의 구배가 다른 단에 비해 크기 때문으로 판단된다.

4. 결론

하나로 출력 24 MW시 시편의 측정온도는 233~ 256 °C 범위에 있었으며, 시편 상, 하부의 최대 온도 차는 5단에서 12 °C를 보였다. 또한 축방향 같은 높이에서 시편의 온도 차는 1단(TC #1과 #3)에서 10 °C, 3단(TC #7과 #8)에서 11 °C로서 각

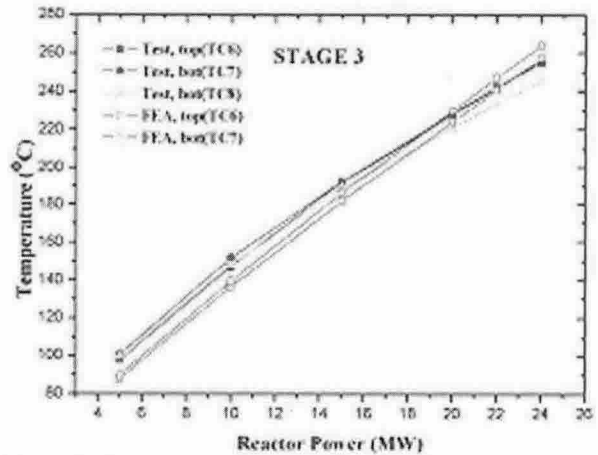


Figure 3. Comparison of measured and analyzed temperatures at Stage 3 with the reactor power.

단의 시편이 거의 일정한 온도 분위기에서 조사 시험 된 것으로 평가된다.

- (1) 24 MW 출력시 해석결과와는 시험결과에 비해 1 단을 제외한 타 단에서 약간 높은 온도를 보였다. 또한 하나로 출력에 따라 해석온도는 거의 선형적인 증가를 보였으나, 시험결과는 포물선 적인 온도증가를 보였다. 그러나 전체적으로 두 결과의 차이는 9% 이내 었으며, 이를 통하여 캡슐 열해석 모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- (2) 열매체와 외통 사이의 갭은 설계값과 측정값 사이의 차가 1/1000 mm 이내였으며, 이들 갭의 변화로 인한 온도변화는 3 °C 이내에 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] 대우정밀(주), "End of Manufacturing Report; 파괴특성 평가 시험용 재료 계장캡슐(02M-02K)", 대우정밀(주), 2003.
- [2] 주기남 외 8인, "원자로 압력용기 조사 파괴특성 평가용 계장캡슐 (02M-02K) 설계/제작/ 시험 보고서", KAERI/TR-2596/2003, 한국원자력연구소, 2003.
- [3] ANSYS IP Inc., "ANSYS User's manual", Ver. 7.0, ANSYS IP Inc., 2002.
- [4] 서철교, "계장캡슐 02M-02K의 온도측정 조건에서의 발열량", 내부통신문, HAN-RR-CR-920-04-033, 한국 원자력연구소, 2004.