

하나로 조사시험용 캡슐 Mock-up의 건전성 평가

주기남, 박종만, 강영환
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로를 이용한 재료조사시험용 계장캡슐 개발에 앞서 캡슐 mock-up (96M-01K) 을 제작하였으며, 이 캡슐 mock-up의 실제 하나로 조사시험용 장입시를 가정하여 강도 및 열적 건전성 평가를 수행하였다. 평가 결과 하나로 정상출력시 (30MW) 캡슐 mock-up 내 조사시료의 온도는 진공 및 heating system을 사용하여 279~473°C 범위로 조절될 수 있었으며, 목표 조사기간 동안 캡슐 mock-up은 강도적으로 허용기준을 충분히 만족함으로써 안전한 것으로 판명되었다. 향후 본 캡슐 mock-up을 이용한 노의 simulation 실험 등을 통하여 기존 캡슐 mock-up의 건전성을 확인한 후 이를 기준으로 하여 표준형 하나로 캡슐을 설계·제작하고자 한다.

1. 서 론

한국원자력연구소에 위치한 다목적연구로인 하나로로는 현재 22MW에서 시험 가동 중에 있으며, 하나로를 이용한 재료 조사시험용 계장 캡슐은 순수 국내 기술력으로 개발 중에 있다 [1,2]. 하나로에는 여러 조사시험 시설들이 설치되어 있으나, 일반적으로 캡슐 system은 사용자의 다양한 조사조건 요구에 적용될 수 있는 점으로 인해 가장 유용한 조사 system으로 평가되고 있다 [3]. 이들 조사시험용 캡슐은 원자로 핵심재의 노내거동 예측을 통한 원자로 건전성 평가 및 수명예측, 신소재 및 핵연료의 개발 등을 포함한 여러 목적으로 사용될 수 있다.

현재 순수 국내기술에 의해 개발중인 조사시험용 계장캡슐의 설계·제작에 필요한 기술 국산화를 위하여 기존에 확보된 기술을 바탕으로 하여 예비적인 캡슐 mock-up을 설계·제작하여 기술적인 평가작업을 수행 중에 있다. 또한 국산 캡슐에 대한 보다 객관적인 안전성 확보를 위하여 현재 일본의 대표적 조사시험로인 JMTR (Japan Material Test Reactor) 에서 적용되고 있는 캡슐안전성 평가기준을 [4] 토대로 검토하였다. 캡슐 mock-up의 하나로 최대출력인 30MW 가동시의 조사시료를 포함한 캡슐 각 부위의 온도 계산은 GENGTC code를 [5] 이용하여 수행하였으며, 캡슐이 가장 취약할 것으로 사료되는 최대 온도 도달시의 기계적 건전성을 평가하여 요구기준과 비교하였다 [4].

본 연구를 통하여 수정·보완된 캡슐 설계·제작기술과 열적·기계적 건전성 평가작업을 기본으로 하여, 향후 수행예정인 노의 성능평가 및 온도 simulation 실험 등을 통하여 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐을 설계·제작하고자 한다.

2. 조사시험용 캡슐 Mock-up 설계·제작

본 연구에서 설계·제작된 계장 캡슐 mock-up은 하나로 핵연료 장입전 하나로 실제 가동 상황에서 수행된 캡슐 전체 구조물의 진동 및 내진 해석 시험을 위해 사용하였던 캡슐 mock-up을 기본으로 하고 있다 [2]. 따라서 캡슐 mock-up은 기본적인 외형은 기존의 것과 별다른 차이는 없으나, 그림 1에서 알 수 있듯이 실제 하나로 장입용과 동일하게 캡슐내부를 5단으로 나누어 각단에 별도의 micro-heater와 열전대를 장입하여 캡슐내부의 온도를 어느 정도 조절할 수 있게 하였다. 사용된 heater는 stainless steel 피복된 특수 heater로 상하 양단의 heater는 외경 2mm, 중심부 heater 3개는 외경 1.5mm이고, 장입된 열전대는 모두 12개로서 K-type 열전대이다. 또한 각단 중심부에 캡슐의 안전성을 감안하여 최소 직경의 stainless steel 304 시편을 장입하였다.

캡슐 mock-up의 제작은 (주) 대우정밀에서 수행되었다.

3. 캡슐 Mock-up의 온도 평가

향후 하나로에서의 조사시험시에 조사시편을 포함한 캡슐 각 부위의 정확한 온도 조절은 매우 중요하다. 본 연구에서는 설계·제작된 캡슐 mock-up을 하나로 중심에 (CT hole) 실제 장입하는 경우를 가정하여 하나로 정상가동시의 온도평가를 (30MW 가동) GENGTC code를 이용하여 수행하였다. GENGTC code는 1차원 열계산 전산 프로그램으로 일본 조사시험로에서는 본 연구와 같은 비교적 symmetrical 형태의 캡슐의 경우에 이를 이용하여 열계산을 수행한다. 반면 비교적 복잡한 구조의 캡슐인 경우 먼저 GENGTC code로 예비계산을 한후 추가적으로 2-dimensional 열계산 computer code를 이용하여 열계산하여 큰 온도가 나오는 값을 기준으로 하여 기계적 건전성 평가를 수행한다.

온도계산은 5단 각각에 대하여 수행하였으며, 계산에 필요한 냉각수 온도는 45℃로 하였으며, 각단에서의 γ 값은 하나로 조사시험공에 대한 축방향으로의 변화치를 고려하여 결정하였다 [1]. 따라서 중심단(3단)을 10 W/g을 기준으로 하여 2단,4단은 9.0 W/g, 1단(최상부)은 7.8 W/g, 5단(최하단부)은 7.8 W/g으로 추정하였다. 그 밖의 캡슐 dimension은 설계도에 준하여 사용하였다. 캡슐내 분위기는 Helium gas로 하였으며, 0.4기압과 1기압으로 조절하였다. Heater 출력의 경우, $\phi 1.6\text{mm}$ 의 경우 hot part의 저항은 specification 상 4.65 Ω 이고 제한 전류는 15A이므로 최대 선출력은 87W/cm으로 계산되고, $\phi 2.0\text{mm}$ 의 경우 hot part의 저항은 11.2 Ω 이고 제한 전류는 20A이므로 최대 선출력은 373W/cm로 계산된다.

이들 실험변수들에 따라 캡슐 mock-up에 대해 GENGTC code를 이용해 계산한 조사시료 온도는 표 1에 나타내었고, 그 온도 범위를 그림 2에 나타내었다.

하나로 조사시험공에 캡슐이 장입되는 경우, 캡슐내 각단에서의 조사시료 온도는 기본적으로 279~333℃ 로 상승한다. 이에 Helium gas 압력을 1기압에서 0.4기압으로 낮출 경우 조사시료는 107~114℃ 정도 상승하게 된다. 최종적으로 각단별 설치된 micro-heater를 이용하여 각 단별 온도의 미세조절을 하게 되는데, 2,3,4단의 $\phi 1.6\text{mm}$ heater의 경우 6~9℃ 정도, 1,5단의 $\phi 2.0\text{mm}$ heater의 경우 25~33℃ 정도의 온도를 상승시킬 수 있다. 따라서 캡슐 각단에서의 최저온도는 He gas 1기압에서 heater 출력이 없을 때, 최대온도는 He gas 0.4 기압과 heater 최대출력시에 얻어진다.

4. 캡슐 Mock-up의 강도 건전성 평가

하나로 조사시험공에 장입된 캡슐은 원자로 가동동안 캡슐 각 부위에 작용하는 모든 가능한 응력으로부터 안전해야 한다. 그러므로, 캡슐 외통과 같은 압력 경계부는 강도 안전성 관점에서 분석되어야 한다. 원자로 가동중 캡슐 외통에 발생하는 응력으로는 외통 두께에 따른 온도구배에 기인한 열응력(thermal stress), 내부 gas 압력, 그리고 외부 냉각수 압력이다. 그러므로 캡슐 외통의 이들 응력들에 대한 안전성이 증명되어야 한다. 본 연구에서는 캡슐 mock-up이 하나로 최대출력인 30MW 가동시를 가정하여 캡슐이 가장 취약할 것으로 사료되는 최대 온도 도달시의 강도 건전성을 JMTR 평가절차에 따라 수행하여 요구기준과 [4] 비교하였다.

캡슐외통에 발생하는 응력은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 내부 He gas, (P_{He})에 의해 캡슐 외통에 작용하는 내부 압력은

$$P_{He} = \frac{273 + TG}{273} \times \frac{P_1}{100} \quad (1)$$

$$= 0.028 \text{ kg/mm}^2$$

윗식에서 TG는 He gas의 최고온도로 앞의 온도계산결과 473°C (373 W/cm heater 출력시) 이고 P_1 은 초기 압력 1기압(1.03323 kgf/mm²) 이다. 이러한 내부 gas 압력은 외통에 원주방향 응력(σ_i) 을 유발시킨다.

$$\sigma_i = \frac{P_{He} \times D_i}{2 \times t} \quad (2)$$

$$= 0.40 \text{ kg/mm}^2$$

윗식에서 D_i 는 외통 내경, 56mm이고, t 는 외통 두께, 2mm이다. 원자로 냉각수에 의해 캡슐 외통 외벽에 압력이 작용하는데, 냉각수 압력에 의한 캡슐 외벽에의 원주방향 응력은

$$\sigma_o = \frac{2 \times P \times (R_2)^2}{(R_2)^2 - (R_1)^2} \quad (3)$$

$$= -0.62 \text{ kg/mm}^2$$

여기서, P 은 냉각수 압력, 0.04 kg/mm² 이고, R_2 , R_1 은 각각 캡슐 외부반경과 내부반경으로 30mm, 28mm 이다. 캡슐 외통의 Limit Yield Stress (P_{cr})는

$$P_{cr} = \frac{E \times (t)^3}{4 \times \{1 - (\nu)^2\} \times (R_2)^3} \quad (4)$$

$$= 1.58 \text{ kg/mm}^2$$

여기서, E 는 Young's coefficient, 19800 kg/mm² 이고, ν 는 Poisson's ratio, 0.27 이다.

외통 두께에 따른 온도구배는 외통 내·외벽에 열응력을 유발하는데, 원주방향 최대열응력은

$$P_{tmax} = \frac{\alpha \times E \times (T_1 - T_2)}{2 \times (1 - \nu)} \quad (5)$$

$$= 15.16 \text{ kg/mm}^2$$

$$= 15.16 \text{ kg/mm}^2$$

여기서, α 는 선팅계수, $16.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이고 T1, T2 는 외통 내면, 외면의 온도로 각각 132.2°C , 64.46°C 이다. 이들 온도는 0.4 기압의 He gas, 373 W/cm 의 5단 heater 최고 출력시 얻어지는 외통 내·외 표면간 가장 큰 온도차이다. 이러한 P_{max} 는 캡슐 내표면에는 압축응력으로, 외표면에는 인장응력으로 작용한다.

캡슐의 end plug 는 원자로 가동중 충분한 강도를 가져야 한다. End plug 강도는

$$\frac{(t_p \times t_p)}{(t \times t)} > \frac{3}{8} \times \frac{D_i}{t} \quad (6)$$

$$56.2 > 10.5 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

여기서, t_p 는 end plug 의 두께로 15mm 이다.

위의 계산된 값들을 이용하여, 캡슐 외통에 대한 강도평가를 다음과 같이 행하였다.

- i) 내부 압력에 의한 circumferential 응력 조건 ($\sigma_i < \sigma_a$)
 $0.40 < 14.1$ ----- O.K.
- ii) 외부 압력에 의한 circumferential 응력 조건 ($|\sigma_o| < \sigma_a$)
 $0.62 < 14.1$ ----- O.K.
- iii) 외부 압력에 의한 limit yield stress 조건 ($P_{cr} > 3P$)
 $1.58 > 0.54$ ----- O.K.
- iv) 최대 기계적 및 열적 응력의 합 조건 ($|\sigma_o| + \sigma_{\text{tmax}} < 3\sigma_a$)
 $0.62 + 15.16 = 15.78 < 42.3$ ----- O.K.

여기서, σ_o 는 외부 압력에 의한 radial 응력이고, σ_a 는 허용응력으로 stainless steel 304인 경우 14.1 kg/mm^2 이고, σ_{tmax} 는 최대 열응력이다.

캡슐 mock-up 외통은 위의 모든 요구조건들을 만족한다. 따라서 본 캡슐은 하나로내 조사시험동안 충분한 강도를 가지고 있다.

따라서 본 연구를 통하여 수정·보완된 캡슐 설계·제작기술과 열적·기계적 건전성 평가작업을 기본으로 하여, 향후 수행예정인 노의 성능평가 및 온도 simulation 실험 등을 통하여 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐을 제작하고자 한다.

5. 결 론

1. 하나로내 재료 조사시험용 계장캡슐 기술개발을 위한 캡슐 mock-up이 국내 기술을 활용하여 성공적으로 설계·제작되었으며, 관련 성능 평가작업이 수행중이다.
2. 캡슐 mock-up 내 조사시험 시편의 하나로내 조사온도는, 진공/Helium gas 제어계통 및 micro-heater 제어계통으로 $279 \sim 473^\circ\text{C}$ 범위로 조절될 수 있다. 조사시편의 온도는 Helium gas를 1기압에서 0.4기압으로 조절함으로써 $107 \sim 114^\circ\text{C}$ 상승시킬 수 있으며, micro-heater를 이용 2,3,4단의 경우 $6 \sim 9^\circ\text{C}$ 정도, 1,5단의 경우 $25 \sim 33^\circ\text{C}$ 정도 온도의 미세조절이 가능하다.
3. 캡슐 mock-up의 하나로 장입시 압력 경계부위인 외통은 기계적 강도 안전성 관련 모든 요구조건들을 만족한다. 따라서 하나로내 조사시험동안 충분한 강도를 가진다.

참고문헌

1. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1398/93 (1994).
2. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
3. JMTR Irradiation Handbook, JAERI, 1994.
4. Z. Masood, N. Tsuyuzaki, Y. Endo and Y. Ichihashi, Design of Hydraulic Rabbit capsule JAERI-memo 62-250, July 1987.
5. H. Someya, T. Kobayashi, M Niimi, T. Hoshiya and Y. Harayama, GENGTC-JB: A computer program, JAERI-M 87-148, september 1987.

Table 1. Calculated temperatures of irradiation specimens in the 96M-01K Capsule.

STAGE	γ Rate (W/g)	He Pressure (atm)	Heater Power (W/cm)	Temperature (°C)
5	8.0	1	0	333.28
			100	343.38
			200	352.53
			300	360.53
			373	366.41
		0.4	0	447.83
			100	455.51
			200	462.80
			300	469.21
			373	473.14
4, 2	9.0	1	0	279.27
			50	284.86
			87	288.53
		0.4	0	386.49
			50	390.36
			87	393.21
3	10.0	1	0	297.12
			50	301.99
			87	305.64
		0.4	0	408.06
			50	411.83
			87	414.66
1	7.8	1	0	328.26
			100	338.61
			200	347.51
			300	356.07
			373	361.69
		0.4	0	442.48
			100	450.00
			200	456.77
			300	463.46
			373	467.76

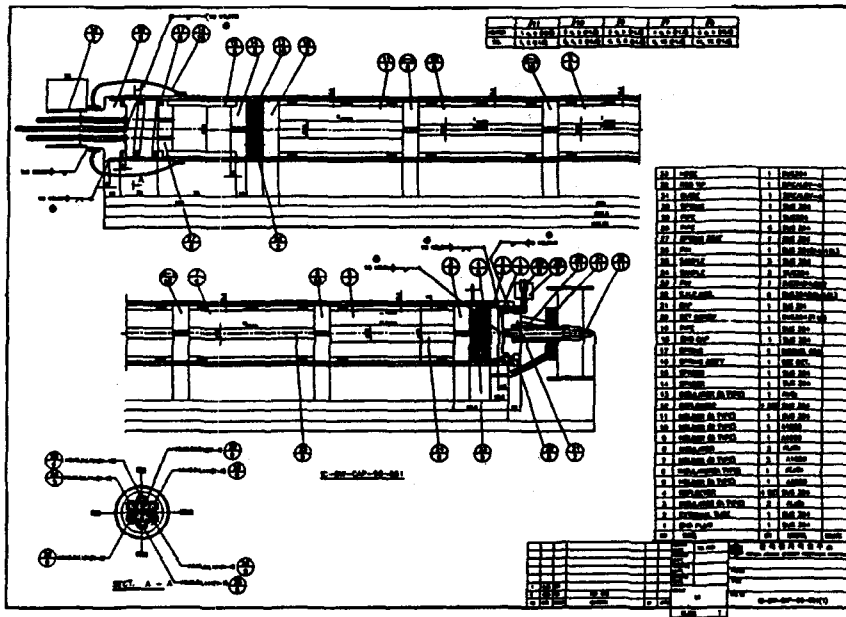


Fig.1 Drawing of Instrumented Capsule (96M-01K).

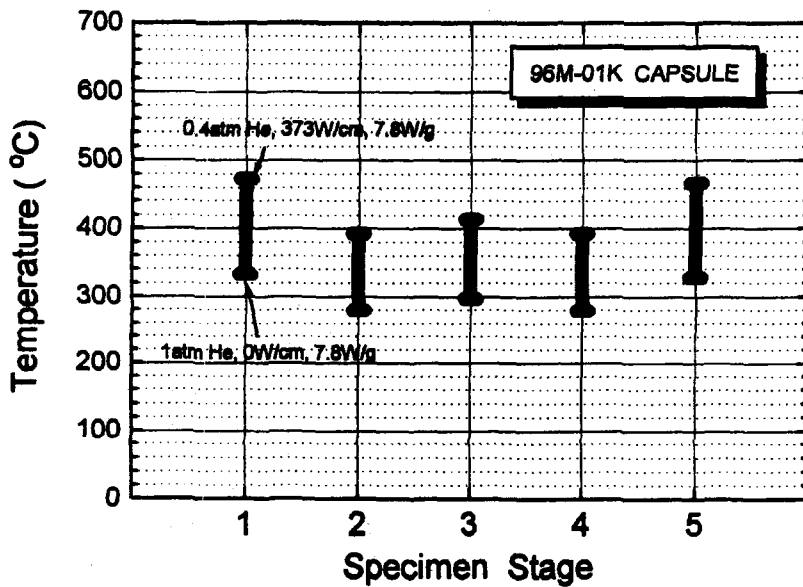


Fig.2 Temperatures of the Irradiation Specimens in the 96M-01K Capsule Supposed to be Loaded in 30MW HANARO Reactor.