

하나로 표준형 계장 캡슐의 열적성능 평가

주기남, 박종만, 맹완영, 강영환
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 재료 조사시험용 표준형 계장캡슐 개발의 일환으로 캡슐 mock-up (96M-01K) 을 제작하여 노외에서 승온 성능실험을 수행함으로써, 실제 하나로내 장입시의 거동 및 안전성을 평가하고자 하였다. 본 실험을 통하여 표준형 계장캡슐의 설계/제작기술, 열적조절 성능, 그리고 열설계용 컴퓨터 code (GENGTC) 등을 평가할 수 있었다. 캡슐의 진공 및 micro-heater system은 만족할만한 성능을 보였으며, 캡슐의 공기중 승온거동은 계산치와 약간의 차이는 있으나, 이는 가공/조립상의 내부 gap 변화, 캡슐표면에서의 온도측정상의 오류, 그리고 상하부로의 열손실 등에 기인하는 것으로 추정된다. 본 실험을 통하여 표준형 계장캡슐의 하나로내 건전성을 추정할 수 있었으며, 향후 하나로 장입시의 승온 및 하강 절차 등을 설정할 수 있었다. 현재 본 실험 결과들을 토대로 하나로 조사시험공의 (CT, IR1, IR2) 핵적특성 평가용 표준형 계장캡슐을 (97M-01K) 설계·제작중이다.

1. 서 론

한국원자력연구소내 다목적연구로인 하나로는 현재 24MW에서 시험 가동중에 있으며, 1998년경 full power 인 30MW에 도달할 예정이다. 하나로를 이용한 주요 재료 조사시험 시설의 하나인 계장캡슐 분야는, 하나로내 장입을 위한 사전 건전성 평가작업의 일환으로 mock-up 캡슐을 제작하여 노외 건전성을 평가 중에 있다 [1,2].

노외 시험에서 그 건전성이 확보되는 경우, 1 차적으로 하나로 조사시험공의 핵적특성 평가용 캡슐이 제작되어 하나로에 장입될 것이다. 향후 표준형 계장캡슐은 원자로 구조용강, 원자로 안전성 및 액체금속로, 핵융합로용 재료연구, 노심재료 연구, 그리고 기타 첨단 및 기초연구 분야에 활용될 예정이며, 또한 본 캡슐 기술을 바탕으로 핵연료 조사시험용 캡슐과 특수목적 시험용 캡슐 등도 개발 예정이다.

캡슐을 하나로 시험공에 장입하기 위해서는 먼저 노내·외에서 일련의 안전성 평가 시험을 통해 그 건전성을 입증한 뒤 과기처의 인허가를 득하여야 한다. 이를 위하여 이미 본 캡슐의 기본설계를 바탕으로 하나로 설치시의 내진 및 진동해석, 조사조건에서의 기계적/열적 건전성 평가 작업이 성공리에 수행된 바 있다 [1,2]. 본 실험에서는 위의 일부 검증된 기본설계를 바탕으로 캡슐 상세설계가 이루어졌고, 하나로내 최종 건전성을 확인하는 단계로서 상세설계에 따라 제작된 캡슐 내부 구성 기자재의 건전성 및 성능평가, 그리고 공기중에서의 캡슐의 승온거동을 평가하여 이론 계산치와 비교 분석하고자 하였다 [3]. 본 실험결과는 향후 실제 하나로 냉각 system을 모사한 water loop 시험시설을 이용한 캡슐 승온실험 결과와 함께, 캡슐의 하나로내 운전절차 등의 도출 및 인허가 작업에 활용될 것이며, 또한 하나로 조사시험공의 핵적특성을 측정하기 위한 표준형 캡슐의 (97M-01K) 설계/제작에도 활용하고자 하였다 [4].

2. 조사시험용 캡슐 Mock-up 설계·제작

96M-01K 캡슐은 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐의 노외 시험용 mock-up 으로 캡슐 제작 요소기술의 확보 및 내부 구성부의 성능 평가를 위해 제작되었다. 본 캡슐은 그림 1과 같이 5단으로 구성되어 있고, 각단에는 각기 독립제어형의 stainless steel 피복의 외경 2mm micro-heater가 장착되어 있다. 캡슐의 온도는 진공조절 장치와 각단의 micro-heater를 사용하여 각 단별로 조절될 수 있다. 캡슐 각부의 온도는 그림 1에 표시된 바와 같이 12개의 K-type 열전대에 의해 측정된다. 본 캡슐은 대우정밀(주)에서 제작된 후 내부품질 검사절차에 따라 치수검사, 내압검사, 액체침투검사 및 X-선 회절검사 등이 수행되어, 제조 결함없이 설계대로 제작되었음이 확인되었다.

3. 캡슐의 진공 및 가압성능 평가

본 캡슐은 하나로 조사시험시 약 11m 깊이의 water pool 속에 잠기게 되며, micro-heater 및 열전대 등 각종 계장 line 들은 보호관 및 안내관을 통하여 캡슐 control system에 연결되게 된다. 따라서 하나로 조사조건에서 캡슐의 온도조절에 매우 중요한 캡슐내부 진공도 또한 길이 11m 이상의 내경 4mm 세관을 통해 하나로 밖에서 조절되어야 한다. 본 실험에서는 그림 2와 같이 실제 캡슐 system을 모사하여 가압 및 진공실험을 수행하였다. 캡슐본체와 rotary pump 사이는 실제 하나로 시험을 모사하기 위하여 15m 길이의 1/4 inch Cu tube를 연결하였으며, 캡슐 본체 하단부 및 pump 부에 진공 및 압력 gauge를 연결하여 캡슐 system의 진공 및 가압특성을 평가하였다. 이때 사용한 gas는 고순도의 (99.99%) He gas로, 중성자 조사 안전성 및 열전도율이 비교적 우수함으로 일반적으로 캡슐의 제어장치 등에 널리 사용된다.

조사캡슐의 경우 장기간 조사환경에 놓이게 되므로, 캡슐내 구성부재 사이의 gap에 공기 등이 존재하는 경우 radio-active하게 되므로 시험로 장입전 충분히 진공처리 또는 안정한 He, Ar 등의 gas로 치환되어야 한다. 또한 캡슐의 gas 조절 system은 다음 2가지의 주요 역할을 하게 된다. 먼저 gap의 진공도를 조절하여 열전도율을 조정함으로써 캡슐내부의 온도를 조절할 수 있게 하고, 또한 캡슐 온도 급상승시 He gas를 dump시킴으로써 온도를 떨어뜨려 캡슐 자체의 안전성을 유지시킬 수 있게 한다.

캡슐의 온도 급상승에 따른 캡슐 내부압력증가에 대한 안전성을 평가하기 위하여 일본 조사시험로의 시험규정에 따라 37.7 psi (2.65 kg/cm²) 의 He gas에서 30분간 유지시켰으나, 압력변화가 없었다. 온도 급상승시 이를 억제하기 위한 He gas dumping 시험에서 15m 길이의 1/4 inch gas pipe를 통해 진공상태에서 37.7psi 까지의 승압에 필요한 시간은 2~3sec에 불과함으로써 캡슐의 온도 급상승시 충분히 제어할 수 있는 속도를 보이고 있다. 한편 rotary pump를 사용한 진공으로의 pumping 속도는, -1 atm 까지는 약 2~3 sec, 5x10⁻²mbar 까지는 약 3min 정도의 시간이 소요되었다. 따라서 본 캡슐의 진공 및 가압, 그리고 내압성능 등을 종합해볼 때 하나로내 조사시험시 발생할 수 있는 온도 급상승 현상시에도 본 캡슐은 적절히 대응할 수 있는 충분한 안전성을 지니고 있다고 판단된다.

4. 공기중 승온성능 평가 및 캡슐내 온도분포 해석

하나로 표준형 계장캡슐에서의 조사시편 온도는 캡슐설계 구조 및 조사 위치에서의 γ flux, 캡슐내 진공도, micro-heater의 용량 등에 의하여 결정된다. 먼저 캡슐의

온도는 하나로 장입시 γ flux에 의해 1단계 상승하게 되고, 그후 캡슐내부의 진공도를 조절함으로써 목표치 부근까지 상승하게 되고, 최종적으로 micro-heater에 의해 목표 조사온도에 도달하게 된다.

실제 캡슐의 경우, 수심 11m 깊이에 존재하며 그 주위의 냉각수는 7.2m/sec의 속도로 흐르게 되나, 실험 한계상 본 연구에서는 예비적으로 공기중에서 승온시험을 수행함으로써 진공 및 micro-heating system의 성능을 평가하고 그 결과를 열설계 프로그램인 GENGTC code를 이용하여 비교 분석하였다. 승온시험은 그림 2의 실험장치를 사용하여 1atm 및 진공 (0.0338atm) 에서 수행하였으며, 전원은 slidax를 사용하여 각 단별로 가하였다. 그림 3은 캡슐 중심부인 3단에 설치된 micro-heater에 가해진 전압 및 전류치에 따른 시편중심부의 온도변화를 실험시간의 함수로 나타내고 있다. 캡슐의 승온속도는 JMTR의 유사 재료캡슐의 승온속도인 5.5~13°C/min에 비해 비교적 낮은 속도인 약 3.0°C/min로 승온되었다. 한편 고온에서 1기압의 He gas를 dump 시켰을 때 온도하강속도는 약 3.5m/sec로 측정되었으나, 실제 시험로에 장입되었을 경우 냉각수 흐름에 의해 보다 빠른 속도를 보일 것으로 추정된다. 참고로 JMTR 캡슐에서의 냉각속도는 약 32°C/sec로 보고되고 있다 [5].

공기중 캡슐 표면에서의 열전달계수는 Newton's Cooling Law에 따른 열이동량, q 로부터 구할수 있다 [6].

$$q = h \cdot A \cdot (T_w - T_{\infty})$$

여기서, 열이동량은 Heater 출력이고 (W), h 는 표면에서의 열전달 계수 ($W/cm^2 \cdot ^\circ C$), A 는 표면적, 226.2 cm^2 , T_w 는 캡슐 외통 표면온도($^\circ C$), T_{∞} 는 공기온도($^\circ C$) 이다.

표 1 및 그림 4에는 He 1기압 및 진공 (0.0338atm) 에서의 승온시험시 열전대로 측정된 실제치와 GENGTC code로 계산한 온도값을 나타내었다. 두 값 모두에서 캡슐내 온도구배가 거의 없는 경향은 유사하나, 약 30~40°C의 차이를 보이고 있다.

이의 원인으로는 1) 캡슐 내부 gap 오류, 2) 캡슐표면에서 온도 측정시의 오류, 3) 캡슐표면의 상하부로의 열손실 발생 등이 추정될 수 있다. 이들 오류중 1)은 제작/조립 과정에서 충분히 발생가능하리라 판단되며, 오류 2) 또한 $\varnothing 2\text{mm}$ 의 봉상 열전대를 이용하여 단순 기계적 점 접촉만으로 캡슐 표면온도를 측정하는 과정에서 실제보다 낮은 값을 측정함으로써 발생하리라 판단된다. 오류 3)의 경우, GENGTC code의 경우 상하부로의 열손실이 없다는 조건을 사용하는 반면 실제로는 어느 정도 열손실이 발생함에 기인하는 것이다. 먼저 시편 제작상의 실제 gap 효과를 추적하기 위하여 gap에 대한 영향이 비교적 작은 진공시험의 경우를 기준으로, GENGTC code로 계산하면 gap은 0.1734mm로 된다. 따라서 gap을 0.1734mm로 하고 시편 중심온도는 측정상 오류 발생 가능성이 매우 적으므로 이를 중심으로 GENGTC code 계산을 수행하면 캡슐표면 열전달계수는 $6.74 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ C$ 로 되며, 계산치는 실측치와 거의 일치하게 된다. 또한 실제 하나로 조사시험시에는 5단의 micro-heater 모두가 가동될 것이므로 상·하 방향으로의 열손실이 감소하게 되어 오차가 더욱 줄어들게 될 것이다. 향후 이러한 오류에 대해서는 cold water loop 실험 등을 통한 보다 체계적인 분석이 수행될 예정이다.

위의 실험 결과들을 종합해볼 때, 향후 하나로 장입 표준형 계장캡슐의 온도는 γ flux / 진공도 조절 / micro-heater 가열의 3단계로 목표조사 온도에 도달하도록 하며, 최종 micro-heater에 의한 시편의 승온속도는 5~10°C/min로 조절하고, 조사시험 완료후엔 micro-heater의 전원을 off 시킨 다음, 1기압의 He gas를 dump 시키는 절차를 따르는 것이 바람직해 보인다.

5. 결론

1. 하나로 재료 조사시험용 표준형계장캡슐에 대한 안전성 평가의 일환으로 노의 성능 시험을 위한 캡슐 mock-up (96M-01K) 을 성공적으로 제작하여 공기중 성능시험을 수행하였다.
2. 표준형 캡슐은 mock-up 을 이용한 진공 및 가압, 그리고 내압 성능 시험 등을 통하여 하나로내 조사시험시 발생할 수 있는 온도 급상승 현상시에도 적절히 대응할 수 있는 충분한 안전성을 지니고 있는 것으로 판단된다.
3. 캡슐 mock-up의 He 1기압 및 진공 (0.0338atm) 에서의 승온시험시 열전대로 측정 한 실체치와 GENGTC code로 계산한 온도값은 캡슐내 온도구배가 거의 없는 경향은 유사하나, 약 30~40℃의 차이를 보이고 있다. 이의 원인으로는 캡슐 내부 gap 오류, 캡슐 표면에서의 온도측정 오류, 캡슐 상하부로의 열손실 발생 등으로 추정된다. 이러한 오류는 향후 water loop 실험 및 노내실험을 통하여 보다 체계적으로 분석될 예정이다.
4. 하나로 표준형 계장캡슐의 온도는 γ flux / 진공도 조절 / micro-heater 가열의 3단계로 목표조사 온도에 도달시키는데, 최종 micro-heater에 의한 시편의 승온 속도는 5~10℃/min로 조절하며, 조사시험 완료 후엔 micro-heater의 전원을 off 시키고, 1기압의 He gas를 dump 시키는 절차를 따르는 것으로 한다.

참고문헌

1. 강영환외, "계장캡슐 활용기술 개발", KAERI/RR-1398/93 (1994).
2. 강영환외, "계장캡슐 활용기술 개발", KAERI/RR-1510/94 (1995).
3. H. Someya et al, GENGTC-JB, JAERI-M 87-148, september 1987.
4. KAERI, Technical Specification for Instrumented Capsule, HAN-IC-DD-SP-97-001, 1997.
5. H. Someya et al, JAERI Report, JAERI M90-214, 1990
6. J.P. Hoffman, "Heat Transfer" sixth edition, p.17

Table 1. Capsule (96M-01K) temperatures calculated by GENGTC code.

Capsule Stage	GENGTC 계산값		실측 온도 (℃)	열전대 위치 (중심간거리, mm)
	위치	온도(℃)		
3 (1 atm)	0	262.56		
	1	262.6	296	A (0.4)
	2	262.5	297	B (0.61)
	3	261.4	290	C (2.87)
	4	257.1		
	5	255.0	256	D (3.0)
3 (0.0338 atm)	0	236.07		
	1	236.1	283	A (0.4)
	2	236.0	283	B (0.61)
	3	235.4	285	C (2.87)
	4	190.7		
	5	189.6	190	D (3.0)

* Micro-heater 선출력은 He 1atm 인 경우 34.43W/cm, He 0.0338atm의 경우 17.57W/cm임.

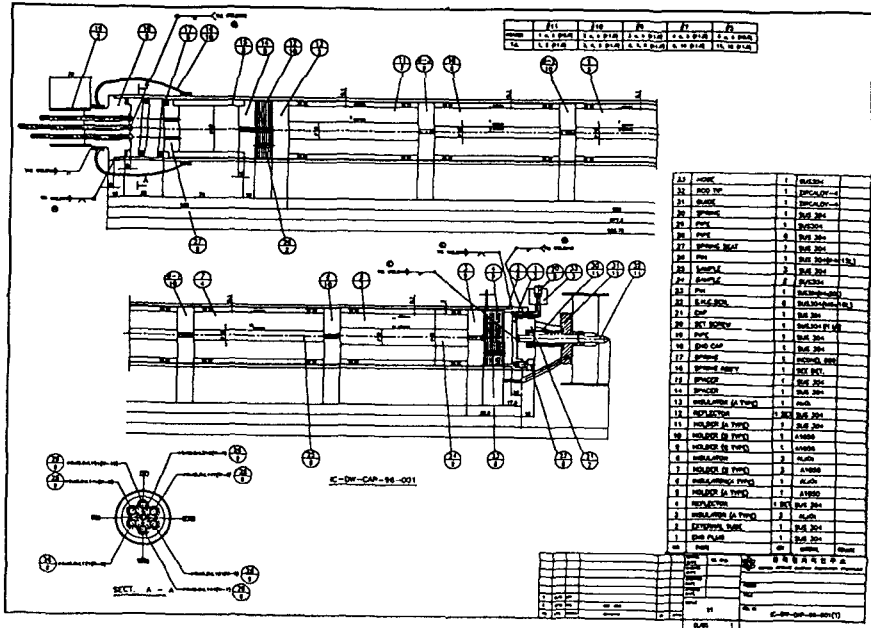


Fig 1 Drawing of Instrumented Capsule (96M-01K).

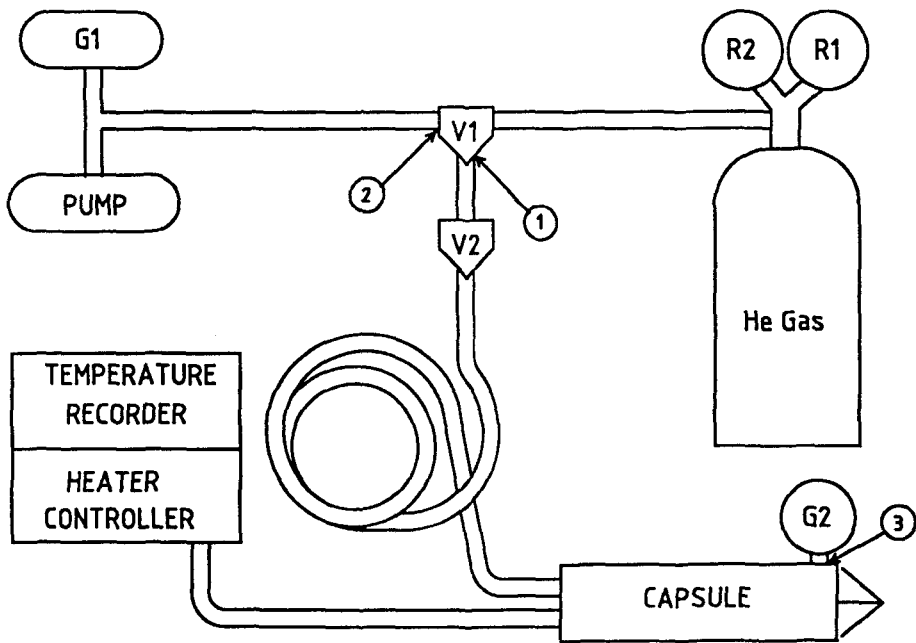


Fig 2. Schematic Diagram of He Gas Controlling System for 96M-01K Capsule.

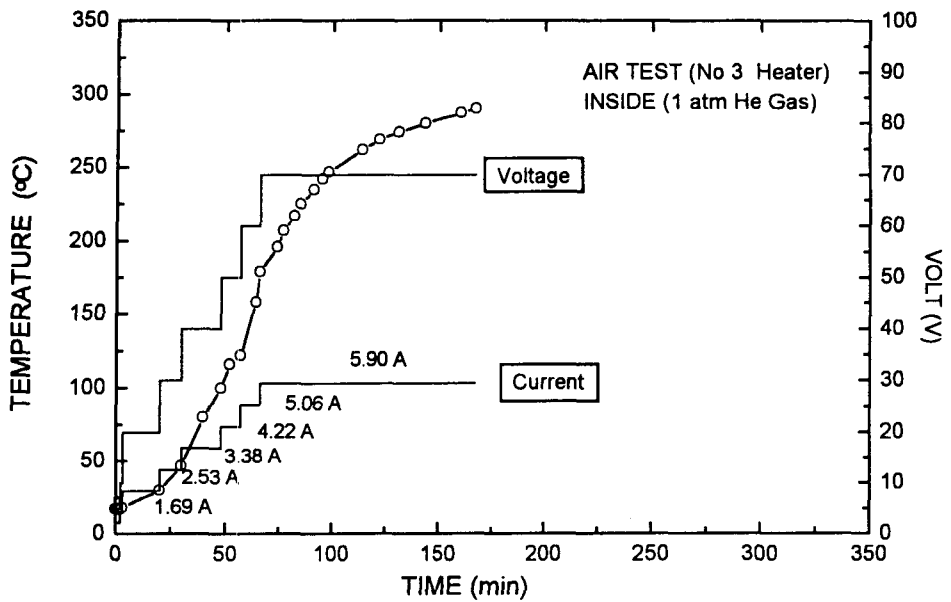


Fig. 3 Temperature changes of 96M-01K capsule in Air (No 3 Heater, 1atm He Internal Gas)

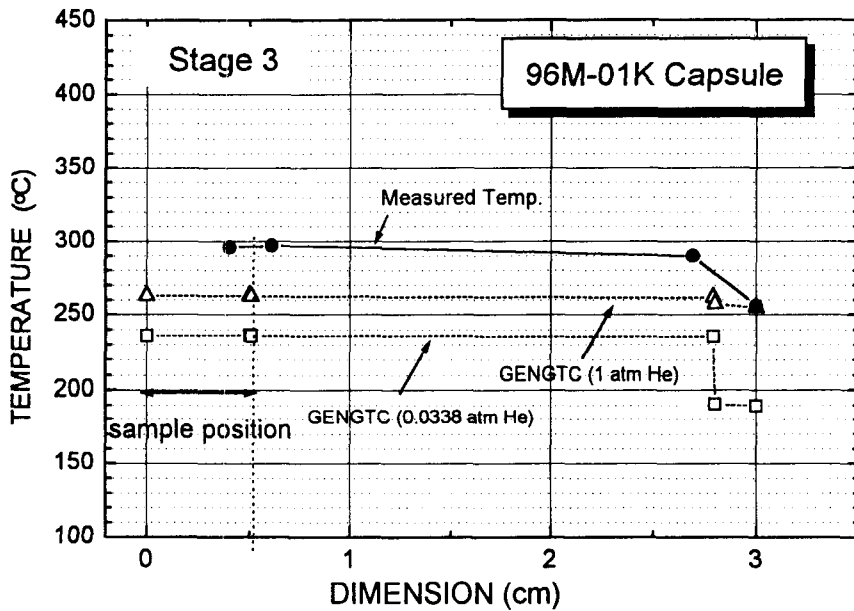


Fig. 4 Radial Distribution of Temp. at Stage 3 of 96M-01K Capsule.