

원추형 하단부 구조를 갖는 캡슐의 하나로와의 양립성시험

최명환[†] · 조만순* · 주기남* · 박승재* · 김봉구* · 강영환*

Compatibility Test of the Capsule with Cone Shape Bottom Guide Structures to the HANARO Reactor

M.H. Choi, M.S. Cho, K.N. Choo, S.J. Park, B.G. Kim and Y.H. Kang

Key Words: Instrumented Capsule(계장캡슐), HANARO(하나로), Bottom Guide Structure(하단부구조물), Cone Shape(원추형), Pressure Drop(압력강하), Endurance(내구성)

Abstract

The design modification of bottom guide structures of the instrumented capsule, which is used for the irradiation test in the HANARO reactor, was required because of the trouble of the bottom guide arm's pin during irradiation. The previous structure with 3-pin arms was changed into the cone shape of one body. The specimens of the bottom end cap ring with three different sizes ($\phi 68/70/72\text{mm}$) were designed and manufactured. The out-pile tests for the capsule with previous and new three bottom guide structures were performed in the one-channel flow test facilities. In order to evaluate the compatibility with HANARO and the structural integrity of the capsule, a loading/unloading, a pressure drop, a thermal performance, a vibration, and an endurance test were conducted. From out-pile test results, the capsule with the cone shape bottom guide structures was found to be more stable than the previous structure and the optimized size of the bottom guide structure selected was 70mm in diameter. It is expected that the new bottom guide structures will be applicable to all material and special capsules which will be designed and manufactured for the irradiation tests in the future.

1. 서 론

계장캡슐(instrumented capsule)은 국내 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용하여 재료 및 핵연료 등의 조사시험(irradiation test)에 사용된다. 캡슐을 이용한 조사시험은 한정된 조사목적에 맞게 설계/제작되어 수행되며, 캡슐 내부는 주로 시편의 배치에 따라 복잡한 형상을 갖게 된다. 계장캡슐은 외형 면에서 원형 실린더의 형상을 가지며, 하나로 조사공의 하부 리셉터클(receptacle)

에 고정되는 하단부구조물(bottom guide structure), 시편이 위치하는 본체(main body), 제어나 계측을 위한 계장선 보호를 위한 보호관(protection tube)으로 구성된다. 이들 구조는 그동안 많은 연구와 경험을 통하여 조사시험을 수행하는데 구조적으로 안정화되어 있다⁽¹⁾.

그동안 계장캡슐 하단부는 1998년 guide arm이 손상되어 두 차례의 설계변경이 있었으며, 건전성 확보를 위한 구조해석 및 시험 등의 연구가 수행된 바 있다⁽²⁾. Fig. 1은 3개의 핀 형태의 암(arm)과 원형 링(ring)을 갖는 기존 계장캡슐에 사용되었던 캡슐 하단부 구조물을 나타내었다. 최근 조사시험이 수행된 캡슐(02M-05U)의 경우, 1차 14일간의 조사시험에서 캡슐 하단부의 링이 암에서 분리되었고, 암 하나가 절단되어 손실되었음이 확인되었다. 이에 따라 수차례의 원인분

[†] 한국원자력연구소

E-mail : cmh2002@orgio.net

TEL : (042)868-8531 FAX : (042)863-6521

* 한국원자력연구소

석 및 전문가 회의, 원자로안전심의위원회 심의 등을 거쳐 캡슐 하단부의 유사한 손상을 방지하기 위한 근본적인 설계변경이 이루어졌다^(3~5).

본 연구에서는 원자로안전심의위원회 심의에서 제시된 바를 근거로 하여 새로운 캡슐 하단부를 일체형으로 설계/제작하였다. 또한 하나로에서의 안전한 조사시험을 위해서는 설계 변경되어 제작된 하단부를 장착한 캡슐의 특성과 및 하나로와의 양립성을 평가해야 한다. 이들 평가는 하나로 노심에 캡슐을 장착하고 수행하는 것이 가장 바람직하나 현실적인 어려움으로 인하여 하나로 조건을 유사하게 구현한 단일채널 유동시험 시설(one-channel flow test facility)⁽⁶⁾을 이용한 노외시험(out-pile test)으로 수행하였다. 시험은 기존의 하단부 및 설계 개선된 하단부 구조물을 장착한 캡슐에 대하여 장·탈착, 압력강하, 열적성능, 진동변위측정, 내구성 시험 등을 수행하였다. 또한 시험 결과의 종합/평가를 토대로 하나로의 여러 요구조건을 만족하는 하단부 엔드캡 링(bottom end cap ring)의 직경을 결정하였다⁽⁷⁾.

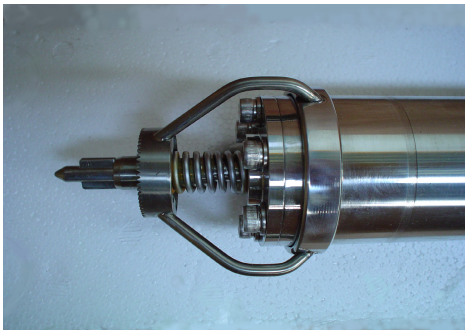


Fig. 1. Bottom guide structure with 3-pin arms (previous capsule)

2. 설계 개선

Fig. 1과 같은 기존 캡슐 하단부의 설계 개선은 손상 가능성이 있는 부위인 3개의 암과 상부 링을 없애고 원추(cone) 모양의 일체형으로 하여 시제품을 제작하였다. Fig. 2는 원추형 하단부 구조를 나타낸 것으로 rod tip과 하단부 엔드캡이 같은 STS304 재질로 만들어진 일체형이다. 열수력 측면에서의 평가를 위하여 직경이 다른 세 종류($\Phi 68/70/72\text{mm}$)의 하단부 엔드캡 링을 제작하였으며, 세부적인 설계변경은 다음과 같다⁽⁵⁾.

1) Rod tip: Zircaloy-4 재질을 스테인레스강

(14% cold worked STS304)으로 변경하여 약 160%의 강도를 증가시켰으며, 이중 금속간의 용접부위를 없앴다.

2) Spring: 재질을 STS304 스프링 강에서 Inconel 재료로 변경하였고, 캡슐 장전 툴(tool)의 재질 변경에 따른 중량 변화를 고려하여 스프링 상수를 변경하였다.

3) Bottom guide cap: 최외각 부를 직경 68/70/72mm인 알루미늄 재질의 링 형태로 설계하여 변경 설치 가능케 하였으며, 시험을 통하여 최외각 부 링의 크기를 결정하였다.



Fig. 2. New bottom guide structure of the cone shape

3. 노외시험

시험 모델로는 크게 네 경우를 고려하였는데, 첫째 Fig. 1과 같은 기존 캡슐 하단부 구조물이고, 다른 세 경우는 Fig. 2에서 보인 바와 같이 일체형으로 제작된 신형 하단부 구조물의 엔드캡 링의 크기가 각각 $\Phi 68\text{mm}$, $\Phi 70\text{mm}$, $\Phi 72\text{mm}$ 인 경우의 모델이다. 이들 링의 크기에 따라 캡슐 주변의 유동조건이 달라지고, 이는 캡슐의 특성 변화를 가져온다. 따라서 하나로와 캡슐에서 요구되는 구조적, 열수력적 특성을 만족하는 크기를 선정하기 위해 세 가지 엔드캡 링을 교대로 장착한 후 특성시험을 수행하였다.

본 시험에 사용된 장치는 Fig. 3과 같은 단일채널 유동시험 장치로서, 노심과의 수력학적 양립성을 검증하기 위해 하나로의 정상운전 조건과 동일한 온도, 압력 조건에서 시험이 수행될 수 있다. 이 장치는 캡슐을 하나로에 장전하기 전에 노외에서 장전시험을 하고, 압력강하, 내구성 및 진동시험 등을 수행하여 캡슐제원의 적합성 검토와 하나로에서 요구되는 요건을 만족하는 가를

검증하는데 사용된다⁽⁶⁾. 실험시 유동조건은 정상 유량의 10%~120%로 형성되며 유량을 조절하기 위해 펌프의 속도를 조절할 수 있는 인버터를 설치하여 펌프의 회전 속도를 연속적으로 제어할 수 있게 하였다. 유량은 용량식 전자유량계를 사용하여 측정한다.



Fig. 3. One-channel flow test facilities

4. 결과 및 고찰

4.1 장·탈착 시험

설계 개선되어 제작된 하단부 구조물에 3가지 크기의 하단부 엔드캡 링을 설치한 캡슐을 이용하여 장·탈착 시험을 수행하였다. 상부 고정팔을 이용하여 캡슐 보호관을 guide한 후 캡슐을 하강시킨 결과, 모든 경우 육각 유동관(hexagonal flow tube; 내면 근접거리=74.4mm) 상부 턱에 걸리지 않고 유동관 속으로 장입되었다. 캡슐을 계속 하강시킨 결과, 조사공 하단부의 리셉터클에 장착되는 과정에서 캡슐에 약간의 기울어짐이 있거나 방향이 조금이라도 일치하지 않으면 모든 경우에 2,3번의 걸림이 발생하였다.

이러한 장전시 걸림은 rod tip의 끝부분과 날개(wing) 부위가 스파이더 상부와 홀컵의 테두리(턱)에 걸리기 때문에 발생된다. 첫번째 걸림은 rod tip 꼭지와 스파이더 상부 턱과의 접촉에서 발생할 수 있다. 두번째 걸림은 rod tip의 날개가 스파이더 상부 턱과의 접촉에서 발생되며, 세번째 걸림은 rod tip의 날개가 스파이더 홀컵의 턱에 얽혀지는 경우에 발생된다. 두번째와 세번째의 걸림현상은 rod tip의 날개와 스파이더의 방향

및 캡슐의 수직성이 확보되지 않는다면 구조상 세 가지 경우에 모두 발생하게 된다.

따라서 캡슐 장·탈착 관점에서는 하단부 엔드캡 링의 직경이 클수록 바람직하나 장전시 걸림면에서는 직경 70mm와 72mm 간에 큰 차이가 없어 이들 모두 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 새로운 하단부 구조물은 기존 설계와는 달리 장·탈착 과정에서 하단부의 손상발생 가능성은 없는 것으로 판단된다.

4.2 압력강하 시험

하단부 설계변경에 따른 노심에서의 유량 변화는 주변 유동관에 설치된 핵연료(fuel)의 냉각에 영향을 미치기 때문에 양립성 평가를 위한 중요한 인자 중 하나이다. 하나로의 육각형 유동관에 설치되는 핵연료 집합체에 대한 설계요건은 온도 40℃에서 유량 19.6kg/s일 때 압력강하가 200kPa±5%의 범위에 있어야 한다. 따라서 육각 유동관에 장전되는 캡슐은 다음의 하나로 요구조건을 만족해야 한다.

- 유체온도 : 35~40℃
- 압력강하 : 209kPa
- 유량 : 19.6kg/s 이하

노외시험에 이용된 캡슐은 하나로에 장전되는 재료시험용 계장캡슐과 동일한 캡슐로 노외시험을 위해 제작되었다. 이 캡슐에 기존의 하단부가 장전되어 있는 경우와 설계 변경된 3가지 직경을 갖는(ϕ 68/70/72mm) 하단부 엔드캡 링을 사용한 경우에 대하여 압력강하를 측정하였으며, 하나로의 dummy fuel에 대한 압력강하를 측정하여 기준 데이터로 사용하였다.

하나로의 노심채널 유량은 23개의 유동관 위치에 따라 일정하지 않다. 유동관 별 유량은 최저 19.013kg/s, 최대 21.005kg/s이 흐르고 있음을 보여 준다⁽⁸⁾. 본 장치에 dummy fuel을 장전한 상태에서 유동-압력강하 실험을 한 결과에 따르면 200kPa의 차압 조건에서 16.62kg/s의 유량이 흐른다. 이 값은 하나로에서 요구되는 유량(19.6kg/s)보다 17%정도 적은 양이다. 그 원인은 유동관 하부 리셉터클의 제작 과정에서 인입구가 좁게 만들어진 것으로 판단된다. 본 유동 실험에서는 유량계에서 측정된 유량에서 dummy fuel에 대한 표준 유량으로 환산하기 위해 factor로서 1.1793을 사용하여 유량을 보정하였다⁽⁷⁾.

기존 캡슐과 신형 하단부를 장착한 캡슐에 대한 압력강하 측정 결과는 Table 1과 Fig. 4에 나타내었다. 설계 변경된 하단부를 장착한 경우에 대한 유량은 dummy fuel과 기존 캡슐에서의 유량에 비해 적다. 즉 200kPa(정압제외)에서 각각의 경우에 대한 측정된 유량 값을 통해 기존 캡슐 및 신형 하단부를 장착한 캡슐은 모두 하나로의 유량 요건을 만족함을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of the flow rate at pressure drop, 200kPa

Condition	Dummy fuel	Previous capsule	Cap ring dia.(mm)		
			φ 68	φ 70	φ 72
Flow Rate (kg/s)	19.6	18.81	17.04	16.61	14.56

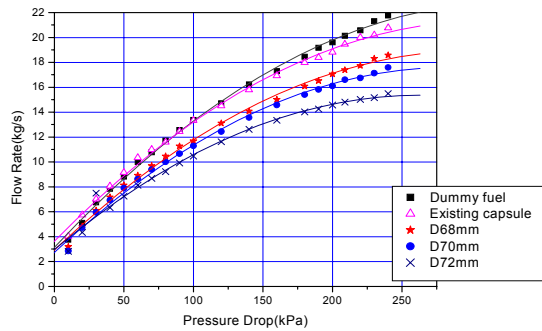


Fig. 4. Measured flow rate with the pressure drop

4.3 열적 성능시험

노외시험에서 사용된 설계 개선된 하단부를 장착할 경우, 캡슐 주위로 흐르는 유량은 Table 1에 나타난 바와 같이 기존 캡슐에 흐르는 유량의 77~90%가 흐른다. 이 경우 캡슐에서의 열적 성능의 변화를 측정하는 것이 필요하다. 캡슐의 열적 성능의 측정은 조사시험을 위해 대기 중인 크립 캡슐(02S-08K)을 사용하였다. 크립캡슐에서는 중앙 시편부를 기준으로 반경방향 5개의 열전대(thermocouple)가 배치되었으며, 편의상 T/C1~T/C5로 나타내었다. 또한 중앙 시편을 감싸주는 홀더(holder) 주위에는 2.5kW 용량의 히터가 감겨 있어 조사시험중 온도제어에 사용된다.

본 열적 성능시험은 200kPa의 차압조건에서 온도제어용 히터 출력을 1.0kW로 하였을 때의 온도변화를 살펴보았다. Table 2는 5개의 열전대에서 측정된 유량변화에 따른 온도변화를 나타내

었다. 엔드캡 링이 커져 유량이 적게 흐르면 캡슐 내부 온도는 약 1~3℃ 상승하였다. 이는 매우 작은 양으로서 캡슐은 주위의 유량이 변하더라도 캡슐내부의 온도는 거의 변화가 없는 것으로 평가할 수 있다.

Table 2. Measured temperatures(°C) at heater power, 1.0kW (water temp. 35°C)

Thermocouple	Previous capsule	End cap ring dia.(mm)		
		φ 68	φ 70	φ 72
T/C 1	360	361	362	363
T/C 2	365	366	366	368
T/C 3	356	358	358	360
T/C 4	234	234	234	235
T/C 5	175	177	177	178

4.4 진동변위 측정

캡슐 주위의 유동변화로 인한 캡슐의 진동변위가 어떻게 달라지는가를 비교/평가하기 위하여 진동변위를 200kPa의 차압조건에서 측정하였다. Fig. 5은 캡슐이 장착된 상태 및 변위측정 위치를 나타낸 것으로서, 측정위치는 캡슐의 본체와 보호관이 연결되는 길이 120mm의 파이프 중간에서 측정하였다. 결과의 정리를 위해 편의상 측정 방향의 좌표계를 도입하여 나타내었으며, 캡슐 보호관을 잡는 로봇 팔(robot arm)과 평행한 방향을 y좌표(서쪽), 로봇 팔에 수직한 방향을 x좌표(북쪽)로 하였으며, 두 방향의 변위를 각각 측정하였다. 또한 대각방향(D)으로의 변위 성분은 다음 식을 이용하여 계산한 값이다.

$$D = \sqrt{(X^2 + Y^2)} \tag{1}$$

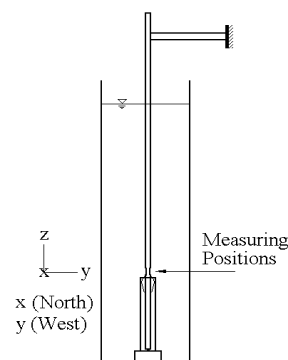


Fig. 5. Measuring position of the displacement

단일채널 유동시험 장치는 아크릴로 이루어져 외부에서의 관측이 용이하게 되어 있으며, 물과 아크릴의 수조를 통과하여 캡슐의 변위를 측정할 수 있는 레이저 변위계(laser doppler vibrometer)를 이용하였다. 그 밖에 사용된 장비로는 데이터 레코더, 오실로스코프, I-DEAS TDAS s/w, HP VXI front end, HP x2000 w/s 등이 있다.

변위측정 결과는 약 2~5분간 레코더의 테이프에 저장하였으며, 최대변위가 발생하는 시간 전후의 약 2분간의 신호를 획득하였으며, Fig. 6은 레이저 변위계의 신호를 레코더에 저장하는 과정과 실험실에서의 데이터 획득 과정에 대한 개략도를 나타내었다. Table 3은 네 종류의 하단부를 장착한 캡슐의 측정된 변위결과로서, 약 2분간의 시간에 따른 변위이력 신호에서 최대, 최소, Peak-to-Peak(P-P), RMS, 대각방향의 변위로 나타내었다.

Table 3. Displacement of the capsule with previous and new bottom guide structures

Bottom Structure	Dir.	Displacement (μ m)					Remark
		Max. Peak	Min. Peak	P-P	Diagonal	RMS	
Previous capsule	X	89.6	-98.7	188.3	268.9	25.6	120s
	Y	96.0	-96.0	192.0		26.0	"
ϕ 68mm	X	53.6	-57.5	111.1	177.6	14.7	"
	Y	67.6	-71.0	138.6		17.6	"
ϕ 70mm	X	48.1	-50.1	98.2	152.5	12.9	"
	Y	57.3	-59.4	116.7		14.2	"
ϕ 72mm	X	47.0	-47.0	94.0	170.3	14.0	60s
	X	77.0	-65.0	142.0		17.0	30s
	X	906	-736	1642	2224.7	82.0	Res.
	Y	876	-625	1501		53.0	Res.

기존의 하단부 구조물을 캡슐에 장착하였을 때 X(북)와 Y(서) 방향으로의 P-P값은 각각 188.3 μ m와 192 μ m로서 로봇 팔의 방향인 Y방향의 변위가 약간 크게 발생하였다.

신형 하단부 구조물에 ϕ 68mm와 ϕ 70mm의 링을 장착하였을 때, 기존 캡슐과 비교할 때 두 경우 모두 변위가 감소하고, 대각변위는 각각 177.6 μ m와 152.5 μ m로 40.6%와 50% 감소하였다. Fig. 7은 ϕ 70mm인 엔드캡 링을 장착한 경우의 시간에 따른 변위이력을 나타내었다. 그러나 ϕ 72mm인 링을 장착한 경우에 순간적으로 큰 변

위가 2,3번 발생하여 P-P값 및 RMS값이 상당히 커지는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 유체의 유속 변화에 따른 공진으로 인하여 발생한 것으로 판단되며, 이러한 변위는 내부 침니 지지대가 캡슐의 중간부를 잡아 주는 하나로 조건에서는 크게 줄어들 것으로 사료된다. 이상의 진동변위 관점에서 설계 개선된 캡슐 하단부 구조물의 하단부 엔드캡 링의 크기는 ϕ 68mm와 ϕ 70mm 중 어느 것을 선정하여도 좋을 것으로 평가된다.

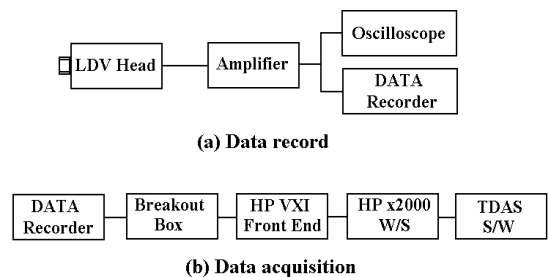


Fig. 6. Schematic view of the data acquisition

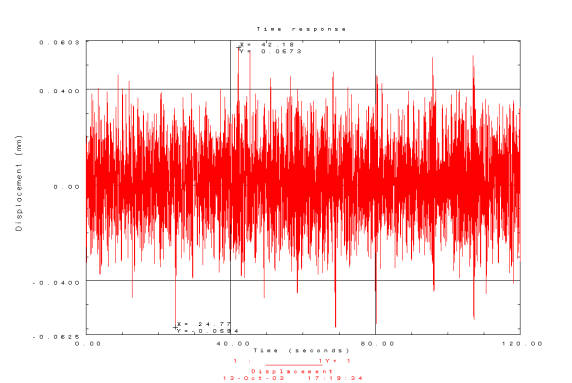


Fig. 7. Displacement of the capsule with ϕ 70mm ring in the west direction(y)

4.5 내구성시험

캡슐에 대한 내구성 시험은 조사시험 동안 구조적인 손상 없이 운전할 수 있는가를 평가하기 위하여 수행하며, 주로 캡슐 및 하단부에서의 마모 상태를 육안으로 관찰하고, 육안 측정 결과 심한 손상이 발견된 경우에는 마모된 두께를 측정한다. 본 시험에서는 신형 하단부 구조물에 ϕ 70mm의 링을 장착한 캡슐을 이용하였으며, 하단부와 유동관 하부의 리셉터클과의 접촉부인 rod tip에서의 마모 상태를 중점적으로 조사하였다. 내구성 시험은 캡슐 정상운전 상태에서의 유량 조건의 110%인 220kPa 차압 조건에서 차기 시험

예정인 크립 캡슐의 조사시험 기간이 18일인 점을 감안하여 최대 시험기간의 10%인⁽⁹⁾ 2일간 수행하였다. 2일 간의 운전을 통한 내구성 시험후, 유동관 하부와 접촉되는 rod tip 부분, 하단부 엔드캡 링 부위에 대한 마모 상태를 관찰하였으며, 하단부 구조물과 캡슐 본체의 체결볼트, 측면 링의 체결 볼트에 대한 풀림 상태를 점검하였으나, 외부에서 마모의 흔적 및 나사의 풀림흔적은 거의 찾아 볼 수가 없었다.

5. 결 론

설계 개선된 신형 하단부 구조물을 장착한 캡슐의 특성 및 하나로와의 양립성 평가를 위하여 단일채널 유동시험 장치를 이용한 장·탈착, 압력강하, 열적 성능시험, 진동변위측정 시험, 내구성 시험 등을 수행하였다. 이들 결과를 종합적으로 평가할 때, 기존 형태의 구조 보다는 설계 개선된 일체형 원추 모양의 하단부 구조물을 장착한 캡슐이 구조적으로 더 안정하며 유체의 흐름 측면에서 우수한 것으로 평가되었다. 또한 개선된 하단부 구조에서 세 가지 크기의 하단부 엔드캡 링($\phi 68/70/72\text{mm}$)에 대하여, $\phi 68\text{mm}$ 링을 장착한 캡슐은 장·탈착시 유동관과의 간격이 커지게 되고, $\phi 72\text{mm}$ 는 진동변위 측면에서 공진이 우려되었다. 따라서 장·탈착, 진동, 압력강하 등의 모든 조건을 만족하는 $\phi 70\text{mm}$ 의 하단부 엔드캡 링을 사용하는 것이 세 개의 신형 하단부 중에서 최적의 사양으로 판단된다. 향후 원자로에서의 조사 시험을 목적으로 설계/제작되는 모든 재료 및 특수캡슐에는 70mm 직경을 갖는 원추형 하단부 구조를 적용할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업인 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Kang, Y.H. et al., 2003, "Capsule Development and Utilization for Material Irradiation Tests," KAERI, KAERI/RR-2360/03.

- (2) Kang, Y.H., Ryu, J.S., Kim, D.S., Oh, J.M., Lee, Y.S. and Koh, J.H., 2000, "Design Improvement of HANARO Capsule," *Proc. of the KNS '2000 Spring Annual Meeting*.
- (3) 주기남, 임인철, 2003, "02M-05U 캡슐 하단부 손상 원인분석 및 대책," 하나로 회의록, 한국원자력연구소, HAN-IC-MM-03-001.
- (4) 하나로 이용 연구단, 2003, "제 20차 원자로 안전 심의 위원회 회의록," 한국원자력연구소, 2003. 5. 27.
- (5) 주기남, 2003, "하나로 조사시험용 계장캡슐 하단부 설계변경(I/II)," 한국원자력연구소, HAN-IC-CR-03-011/013, 6.27/7.16
- (6) Cho, M.S. et al., 2003, "Utilization of the Capsule Out-pile Test Facilities(2000~2003)," KAERI, KAERI/TR-02406/2003.
- (7) Choi, M.H. et al., 2004, "Out-pile test of the Capsule with Cone Shape Bottom Structures," KAERI, KAERI/TR-2655/2004.
- (8) Kim, H.I. et al., 1996, "HANARO Core Channel Flow-Rate Measurement," KAERI, KAERI/TR-717/96.
- (9) Ryu, J.S. et al., 2000, "Technical Specification for Endurance Test of HANARO Irradiation Test Assembly," KAERI, KAERI/TR-1474/2000.