

경수로용 신형소결체의 하나로 조사시험용 무계장캡슐 노외 검증시험

Out-pile Test of Non-instrumented Capsule for the Advanced PWR Fuel Pellets in HANARO Irradiation Test

김대호, 이찬복, 오동석, 방제건, 김영민, 양용식
정연호, 전형길, 류정수

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 신형소결체의 하나로 노내 조사시험을 위한 무계장 캡슐을 설계·제작하여 노외시험을 수행하였다. 200 kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 약 7.45 kg/s로 측정되었고, 진동실험 결과 진동주파수 영역은 약 13.0 - 32.3 Hz 범위였으며 측정된 RMS 변위는 11.6 μm 이하이고, 무계장캡슐의 최대 진동변위는 30.5 μm 이하의 매우 낮은 범위로 관찰되었다. 내구성 실험은 200 kPa 발생유량의 110%인 8.19 kg/s의 유량조건에서 103일 17시간 동안 수행되었다. 노외실험결과 하나로 조사시험용 경수로용 신형소결체 무계장캡슐은 압력강하, 냉각수 유량, 고유진동 및 마모에서 하나로 노내조사시험을 위한 시험요건을 모두 만족하였다.

Abstract

Non-instrumented capsule were designed and fabricated to irradiate the advanced pellet developed for the high burn-up LWR fuel in the HANARO in-pile capsule. This capsule was out-pile tested at Cold Test Loop-I in KAERI. From the pressure drop test results, it is noted that the flow velocity across the non-instrumented capsule of advanced PWR fuel pellet corresponding to the pressure drop of 200 kPa is measured to be about 7.45 kg/sec. Vibration frequency for the capsule ranges from 13.0 to 32.3 Hz. RMS displacement for non-instrumented capsule of advanced PWR fuel pellet is less than 11.6 μm , and the maximum displacement is less than 30.5 μm . The flow rate for endurance test were 8.19 kg/s, which was 110% of 7.45 kg/s. And the endurance test was carried out for 100 days and 17 hours. The test results found not to the wear and satisfied to the limits of pressure drop, flow rate, vibration and wear in the non-instrumented capsule.

1. 서 론

핵연료의 안전성과 고연소도화를 추구하기 위해 개발된 큰결정립 UO_2 소결체의 노내 연소시험을 위해 하나로 노내조사시험을 계획하고 있다. 이를 위해 시험봉의 핵적특성 및 예비 성능시험이 수행되었으며 이를 근거로 한 기계적 구조건전성 및 열수력적 안전성이 확보될 수 있는 시험봉 제조 및 하나로 조사시험용 무계장캡슐을 그림 1과 같이 설계 제작하였다.[1,2,3,4] 현재 가동되고 있는 하나로에 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐을 장전하여 조사실험을 수행하기 위해서는 정상운전 중 캡슐의 구조적 강도가 충분하여야 하고 또한 원자로 일차냉각계통의 설계기준이 되는 열수력학적 요구조건이 만족되어야 한다. 이러한 측면에서 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐 시제품은 원자로 운전조건에서의 노외 실증실험을 통하여 핵연료 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 진동에 의한 구조적 건전성 및 열수력학적 특성 등을 평가함으로써 원자로의 안전성을 확보하여야 한다.

이를 위한 노외 실증실험의 항목으로는 압력강하 실험, 진동실험 및 내구성실험 등이 있다. 대부분의 노외 실증실험은 원자로 실제 운전조건과 동일한 온도, 압력 및 유량조건에서 실시된다. 압력강하 실험을 통하여 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐이 하나의 제한조건인 200 kPa 이상, 12.7kg/s이하를 만족하는 설계요건을 검증하고 원자로 노심과의 수력학적 양립성을 입증한다. 그리고 진동실험 및 내구성실험을 통하여 핵연료집합체가 장시간동안 장전되어 운전되었을 때, 유체 유발 진동에 의해 마모(Wear)가 발생하는지 여부를 실험적으로 규명하여 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐 및 유동관(Flow Tube)의 건전성을 확인해야 한다.

큰결정립 신형 UO_2 소결체의 하나로 조사시험을 위하여 제작된 무계장캡슐은 5 년여의 장기간 조사에 따른 캡슐의 내구성이 확보되어야 하나, 단계적으로 대략 2.5년 정도의 내구성을 확보하고 노내 조사기간 중의 시험 핵연료봉의 냉각과 우회류 및 회전류에 의한 진동등을 최소화하고 캡슐의 마모 최소화를 동시에 만족시키도록 캡슐의 설계 최적화를 시도하였다. 본 논문에서는 열수력 유동시험장치인 Cold Test Loop-I을 이용하여 압력강하, 진동 및 내구성 실험[5,6,7]을 통하여 캡슐의 구조적 건전성과 열수력적 특성을 확인하여 그 결과를 정리하였다.

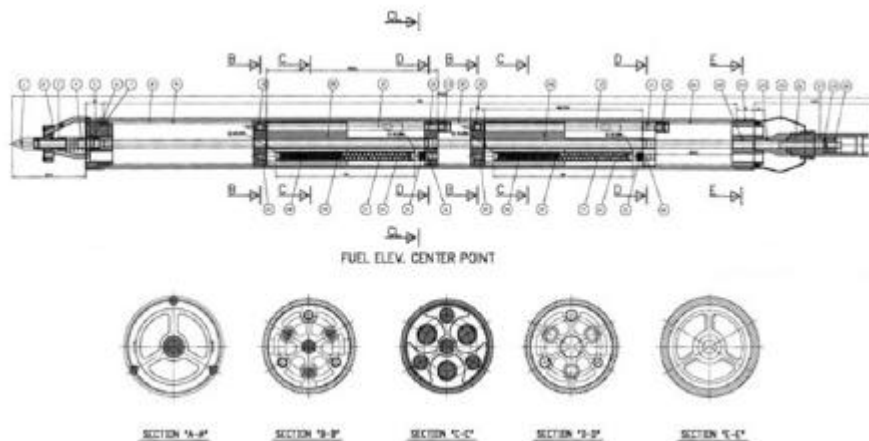


그림 1. 신형 UO_2 소결체 노내시험용 캡슐 개략도[8]

2. 노외시험에 따른 구조별 특성

그림 1의 큰결정립 신형 UO_2 소결체의 하나로시험용 캡슐은 70,000 MWd/MTU까지 연소시키기 위해서는 5년여의 장기간 조사가 필요하며 이를 위해서는 캡슐의 내구성이 확보가 필수적이다. 따라서, 단계적으로 대략 2.5년 정도의 내구성을 확보하고 노내 조사기간 중의 시험 핵연료봉의 냉각과 우회류 및 회전류에 의한 진동 등을 최소화하여 캡슐의 마모 최소화를 동시에 만족시키도록 캡슐의 설계 최적화를 시도하였다. 장기간의 연소되기 때문에 시험 핵연료봉 및 캡슐의 건정성 유지 및 하나로 OR 홀의 안전성 확보에 최우선적인 관심을 두고 설계하였다. 캡슐의 압력강하, 진동 및 내구성실험을 통하여 캡슐 및 하나로의 안전성 관점에서 조사공과 직간접적으로 접촉이 우려되는 부위의 특성을 확인할 필요가 있다.

2.1 상단고정체 스프링

상단고정체 스프링은 캡슐이 하나로의 OR벽에 유일하게 접촉하는 부위로 캡슐의 진동흡수 및 상단부의 고정역할을 수행하며 재질은 Inconel-x750이다. 3 개의 스프링이 장착된 하나로 18봉 또는 36봉 핵연료의 상단고정체 스프링력은 20N/mm이며 이를 3년의 중성자 조사기간을 거치면 대략 11%의 스프링력이 감소되어 18N/mm 정도인 것으로 분석[9]되었다. 또한, 3개의 스프링이 약 30도 가량 누워있는 형상을 하고 있어 설계유량 12.7 kg/s에서 비대칭 진동현상이 관측되었으며, 고유진동수와 진폭을 분석한 결과 x 및 y 방향으로의 방향성을 가지고 있어 각기 고유진동수와 진폭이 일치하지 않는다. 이는 상부 스프링의 비대칭으로 인해 방향에 따른 강성이 다르고 하단연료부의 질량분포도 엄밀하게는 x 및 y 좌표를 기준으로 대칭이 되지 않을 것으로 판단되어, 이로 인해 발생하는 진동에 의한 마모를 최소화하기 위해 스프링의 개수 및 방향성을 고려하여 설계변경을 시도하였다.

그림 2에서 보는 것과 같이 기존 18봉의 상단고정체 스프링은 3개로 약 30° 가량 한 방향으로 누워 있다. 이를 6개의 스프링을 등간격으로 배열하고, OR홀 벽에서 수직으로 배치하여 그림에서 보는 것과 같이 변경하였다. 이때의 스프링력을 40N/mm이며, 3년간의 중성자 조사에 의해 35N/mm 정도로 감소할 것으로 예상된다.

구조상으로는 기존의 스프링의 경우 상단고정체에 용접되어 있는 반면에 변경된 스프링은 상하의 유격만큼의 이동이 가능하고 좌우 회전이 가능토록 하여 캡슐 장착시 OR홀 벽에 간섭을 최소화하였다. 스프링과 캡슐몸체와의 간섭 및 스프링과 유동관 사이의 진동에 의한 마모를 확인하였다.

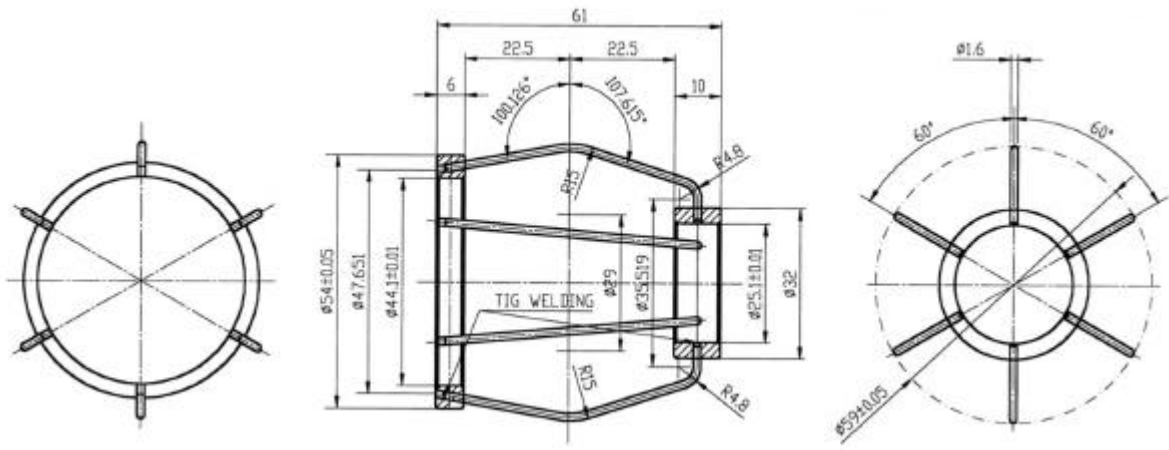


그림 2. 상단고정체 스프링 구조도

2.2 상.하단고정체(Top & Bottom End Plate)

상.하단고정체는 캡슐의 중심 유지와 OR홀 벽에 가장 근접하는 부품으로 진동 및 기타 캡슐의 상하 구조적 건전성 확보에 중요한 부품이다. 상단고정체(Top End Plate)는 상단스프링의 하단부 고정틀 역할을 수행하면서 동시에 내통(Inner Tube)을 누름으로서 내부 구조물의 흔들림이 없도록 눌림 고정체 역할을 하게 된다. 그림 3에서와 같이 상단고정체는 이종 재료의 2개 부품으로 구성되어 있다. Stainless Steel 재료의 주 몸체에 알루미늄 재질의 덮개가 씌어져 하나로 OR홀 벽에 손상이 가지 않도록 연한 재질을 이용하였다. 내부의 몸체는 내통을 누르고, 덮개는 외통(Outer Tube)을 고정하게 된다. 몸체의 중앙부는 적당한 챔퍼를 주어 유체의 흐름을 원활하게 하여 캡슐에 간섭이 일어나지 않도록 하였으며 추후 계장선의 설치에 따른 공간확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

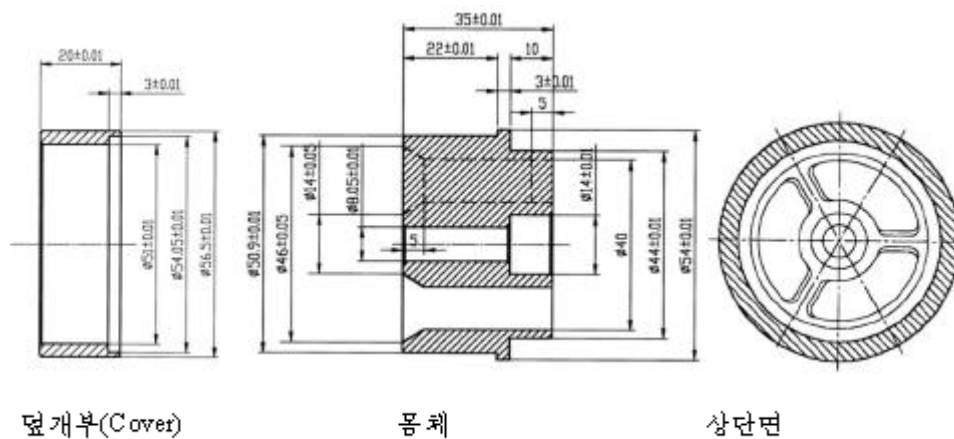


그림 3. 상단고정체(Top End Plate) 구조도

하단고정체(Bottom End Plate)는 그림 4와 같이 캡슐 몸통이 회전하지 않도록 잡아주는 3개의 Guide Arm을 고정하는 홈이 있고 상단고정체와 같은 이종 재료의 2개 부품으로 설계되었다.

덮개부분은 내통의 하단부를 받쳐주고 회전하지 않도록 4개의 홈이 있으며 외통의 하단부를 받쳐 주게 되어 있다. 몸체부분은 중심봉(Central Rod)을 고정하는 부싱과 접촉하게 되어 있고 몸통부를 받쳐주는 하단스프링과 접촉하게 되어 있어 Stainless Steel의 강한 재질이 적합하다. 특히 3개의 Guide Arm이 닿이는 홈은 알루미늄과 스테인레스가 함께 지지함으로서 회전 및 진동모드에 의한 마모를 최소화할 수 있다. 중앙의 유체 통과부위를 가능한 크게 하여 유체의 흐름에 따라 캡슐에 미치는 진동을 최소화하였다. 내구성실험을 통하여 하단고정체와 Guide Arm 사이의 마모와 진동을 확인하였다.

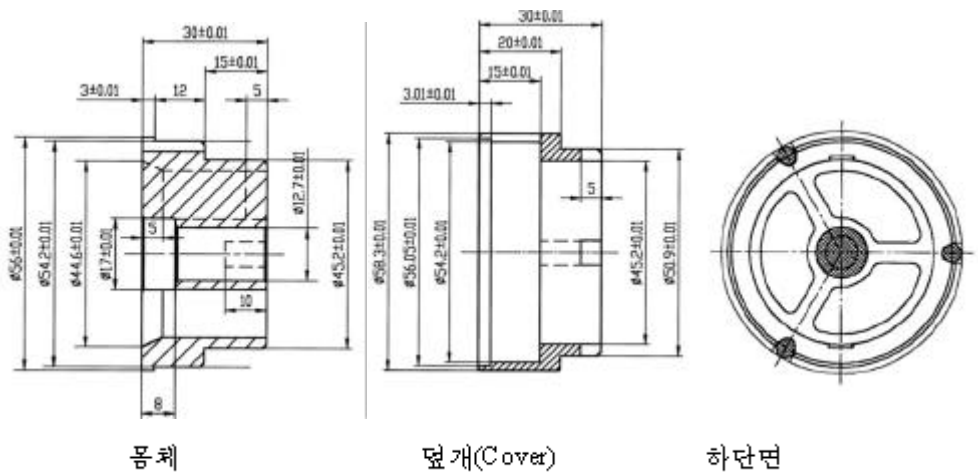


그림 4. 하단고정체(Top End Plate) 구조도

2.3 하단안내집합체(Bottom Guide Assembly)

하단안내집합체는 그림 5와 같이 Guide 몸체, 알루미늄 Seating Ring 및 삼발이(Guide Arm)으로 구성되어 있다. 재질은 Zircaloy-4 ASTM B351-85 Grade R60804이며 삼발이와 몸통부분은 EB 용접을 한다. 기존의 Guide와 큰차이는 없으나 삼발이(Guide Arm)의 끝단부분의 기존 반달형 적삭부분을 없애고 Arm의 직경 굵기를 그대로 끝단까지 이어지도록 설계하였으며, 하단고정체의 삼발이 삽입 홈에 중심으로부터 각각 60°의 각을 주어 삼발이가 회전 진동 모드에 의해 전도도록 설계되었다. 홈의 접촉되는 길이는 17 mm를 주어 장전시 간섭이 일어나지 않도록 설계되었으며 Guide 몸체의 Central Rod와 접촉하는 부분은 산화처리를 통해 마찰 및 진동에 의한 마모가 없도록 설계하였다. 빠른 유속에서 하단고정체와 삼발이 사이에 진동에 의한 마모를 확인하였다.

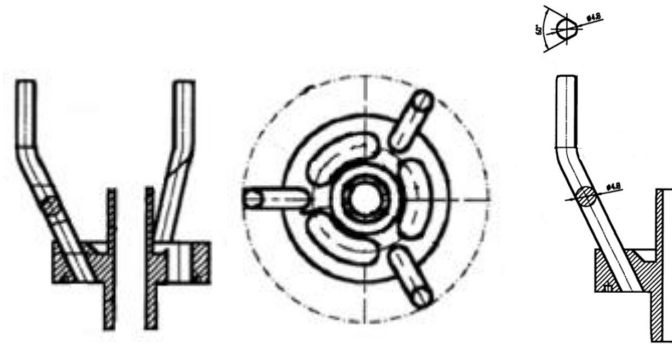


그림 5. 하단안내집합체(Bottom Guide Assembly) 부품도

3. 실험방법 및 절차

3.1 실험장치

본 실험은 상온·상압 실험장치인 Cold Test Loop I을 이용하여 수행되었다. Cold Test Loop I은 상온·상압 조건에서 다양한 유체유동 실험을 수행할 수 있으며 저장수조, 가변속도모터 펌프, Test Section, 모터제어장치, 온도제어장치 및 관련 배관 등으로 구성된다.

상수도로부터 보충된 순환수는 저장수조에 적정량이 채워지고, 이 순환수는 주 순환계통의 주 흡입관에 유입되어 펌프에 의해 실험대에 공급된다. Test Section에 공급되는 유량은 모터제어 장치에 의한 펌프회전 속도에 의해 제어되며, 이 때 공급되는 유량은 Turbine 유량계에 의해 측정된다. 실험중 폐쇄회로를 흐르는 순환수 온도를 일정하게 유지하기 위하여 PID Controller, Control Valve, SCR Unit, Heater 및 RTD(Resistance Temperature Detector) 등으로 구성되는 온도제어장치를 이용한다. 즉 PID Controller에 원하는 온도를 입력시키면 SCR Unit에 의해 Heater가 작동하며 원하는 온도까지 순환수를 가열시키게 되며, 온도 Setting치가 RTD로부터 측정되어지는 PV(Position Value)치를 초과할 경우 Control Value가 열리면서 상수도에 연결된 보충수 배관을 타고 차가운 물이 저장수조 내로 유입되어 온도는 일정하게 유지된다. 저장수조내의 수위는 Over-flow Drain을 설치하여 일정하게 유지된다.

경수로용 신형소결체 무계장 캡슐이 장전되는 Test Section은 하나로용 원통형 유동관이 이용되었다. 본 실험에서는 Zircaloy 재질의 실제유동관(21C)을 이용한다. 유동관의 외부에는 Flow Housing이 장전되는데, Flow Housing의 재료는 SUS이나, 진동실험시 Laser Beam이 투과될 수 있도록 홈을 파서 제작하였다.

Spider Cup에 하나로용 18봉 핵연료집합체에 해당하는 Orifice가 삽입되고, Zircaloy 유동관은 90 N·m의 일정한 힘으로 Spider Cup에 체결된다. 본실험에 이용된 Spider Cup에는 Spider Pin이 없다.

실험중 Test Section으로 공급되는 유량은 OMEGA Turbine유량계로 측정한다. Turbine의 회전수와 유량간에는 다음의 일정한 관계가 성립된다.

$$\dot{Q} = A + B H \quad (1)$$

여기서, \dot{Q} : Flow Rate (GPM),
A, B : Constant (Given By OMEGA),
H : Frequency (Hz).

식 (1)에서 유량을 구하는데 이용되는 H는 Turbine의 회전수에 비례하며 Turbine 유량계 전장부(Electronic Part)를 통하여 출력되는 전기적 신호를 측정함으로써 구해지며 다음의 관계가 성립한다.

$$H = A_2 + B_2 V \quad (2)$$

여기서, A_2, B_2 : Calibration Constant

V : Voltage (Volt)

실험대로 유입되는 순환수의 온도는 RTD로 측정하며 이는 또한 온도제어용 PID Controller에 입력변수로서 이용된다. Test Section 입구압력 및 각 측정부위에서 발생하는 압력강하는 Rosemount사의 Smart Type 압력발신기와 차압발신기로 측정한다. 압력발신기와 차압발신기는 예비 실험을 통하여 최적의 측정범위로 교정되었다.

3.2 실험자료의 측정 및 처리

각 계측기에서 발생하는 전기적 신호는 Data Acquisition System(DAS)과 본 실험을 위해 작성된 구동 Program에 의해 수집되고 처리된다. DAS는 Personal Computer, DT-2821 A/D Converter 등으로 구성된다. 구동 Program은 Main Program 과 Sub-Program등으로 구성되며, Main Program은 실험자료의 처리에 필요한 핵연료집합체의 제원과 계측기의 교정식 등을 저장한다. Sub-Program은 처리된 실험자료의 출력과 주어진 온도, 압력 조건에서 순환수의 물성치를 계산할 수 있는 Steam 표 등으로 구성되었다.

3.3 실험방법

3.3.1 압력강하측정 실험

실험용 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐이 장전되면 1.0 kg/s 간격으로 유량을 변화시키면서 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐에서 발생하는 압력강하를 측정한다. 실험유량 범위는 4 - 9 kg/s이다. 각 유량에 대한 실험온도 조건은 하나로 노심 입/출구 온도인 35/45℃의 평균인 40 ℃로써 이는 전술한 바와 같이 저장수조의 하부에 위치한 RTD에 의해 측정되어 온도제어장치에 의해 유지된다. 압력강하 실험결과 다음의 하나로 제한조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} \text{압력강하} &> 200 \text{ kPa} \\ \text{유량} &< 12.7 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

3.3.2 진동측정 실험

경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 진동은 Laser Vibrometer (Polytec Model: FV3001)를 이

용하여 측정한다. Laser Interferometer로부터의 입사광은 진동물체로부터 반사되어 여러 Lens조합을 거쳐 Signal Processor에 전달되어 진동물체의 진동속도와 진동변위에 해당되는 전기신호로 변환된다. 이 전기적 신호는 Computer Memory에 일단 저장되고 FFT(fast Fourier transform)을 과정을 통하여 주파수 대 진폭의 함수를 얻고 이 결과로부터 Peak Amplitude, RMS Amplitude 및 진동 주파수 특성 등을 판별한다.

진동실험의 경우 각 핵연료집합체의 Grapple Head부분에 대하여 90° 간격을 두고 서로 다른 2 지점에서 측정되었고 실험조건은 표 1에 보여준다. 진동실험결과 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 진동변위가 하나로 핵연료집합체와 유동관간의 허용간격인 300 μm 이내의 범위이어야 한다.

3.3.3 내구성실험

내구성 실험의 경우 순환수 온도 40 °C조건에서 실시되었으며 실험조건은 표 1에 정리되어 있다.

내구성 실험중 매 24시간마다 진동변위 변화를 육안관찰하고, 실험중 초기 10일 후에 그리고 그후 매 30일마다 및 종료 후 실험부를 해체하여 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐에 대하여 육안검사를 실시한다. 마모가 발견되면 필요시 세척하고 마모 부위를 기록한다.

표 1 진동, 압력강하 및 내구성 실험조건표

	진동 및 압력강하실험		내구성실험
온도	40 °C	온도	40 °C
		유량	8.19 kg/s
유량범위	4 - 9.1 kg/s	실험기간	103일 17시간

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압력강하측정 실험

경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 압력강하 실험은 내구성실험 전후 각 2회씩 4회에 걸쳐 실시하였으며, 유량을 변화시키면서 무계장 캡슐 전체 압력강하량을 측정하였다. 실험결과는 표 2에 요약하여 정리하였으며, 실험결과 200 kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 약 7.45 kg/s로 측정되었으며, 이는 하나로 제한조건인 12.7 kg/s 이하를 만족하였다.

표 2. 무계장캡슐 압력강하 요약표

Hz of Pump	FRBET1	DPBET1	FRBET2	DPBET2	FRAET1	DPAET1	FRAET2	DPAET2
10.0	4.13	64.88	4.14	65.13	4.07	64.01	4.06	63.58
12.0	5.03	92.84	4.99	92.42	4.94	92.81	4.89	92.61
14.5	6.00	131.69	6.00	132.51	5.94	131.94	5.93	131.54
17.0	7.00	177.74	7.01	179.22	6.94	178.31	6.93	177.69
18.1	7.45	199.68	7.42	199.72	7.34	198.79	7.32	198.11
19.5	8.04	229.96	8.03	232.42	7.90	229.05	7.93	230.21
22.0	9.04	290.38	8.98	289.95	8.86	287.66	8.91	289.27
22.0	8.98	289.41	9.02	289.91	8.88	286.79	8.86	289.07
19.5	8.04	231.79	8.01	230.84	7.93	230.04	7.90	229.38
18.1	7.46	201.66	7.49	201.21	7.31	198.06	7.35	198.59
17.0	7.00	177.56	7.05	179.58	6.91	176.58	6.96	177.46
14.5	6.02	132.68	6.00	133.04	5.92	131.05	5.91	131.53
12.0	5.05	92.84	4.98	93.12	4.95	91.44	4.93	92.63
10.0	4.14	64.91	4.10	64.37	4.06	64.14	4.04	63.29

FR : Flow Rate (kg/sec),

DP : Pressure Drop (kPa),

1 : Location 1

BET : Before Endurance Test,

AET : After Endurance Test,

2 : Location 2

4.2 진동측정 실험

경수로용 신형소결체 무계장 캡슐에 대한 진동실험은 유량을 1 kg/s 간격으로 증가시키면서 Grapple Head에 대하여 90° 간격을 두고 서로 다른 두 지점에서 실시되었다. 실험은 각각의 방향에서, 내구성 실험전후 각각 측정하였다. View Port 1에서의 변위와 View Port 2에서의 변위는 큰 차이를 보이지 않았으나, 내구성실험 전후에 따른 차이는 내구성 실험 전에는 비교적 최대 변위가 12.3 - 24.0 μm 로 좁은 쪽을 보였으나, 내구성 실험후의 최대변위는 6.5 - 30.5 μm 로 넓은 범위에 나타나고 있다. 이 결과로부터 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 최대 진동변위는 약 30.5 μm 이하의 범위임을 알 수 있었다. 표 3에서처럼 국산 하나로용 18봉 핵연료집합체의 최대진동변위는 약 80 μm 이하의 범위이며[6], 또한 1999년도에 제작된 DUPIC Irradiation Test Rig-002에 대한 결과는 최대진동변위 54 μm 이하의 범위이다. 그리고 2000년도에 수행된 DUPIC Irradiation Test Rig-003에 대한 결과는 최대진동변위 70 μm 이하의 범위이다. 위의 실험결과로부터 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 진동변위는 하나로 제한조건인 최대허용간격 300 μm 이하의 범위를 만족하였다.

표 3. 하나로용 18봉핵연료 및 기타캡슐과의 진동실험결과 비교

	경수로용 신형소결체 무계장캡슐	DUPIC-003	DUPIC-002	DUPIC-001	하나로 18봉 핵연료
Frequency	13~32.3 Hz	5~32 Hz	10~20 Hz	14~18.5 Hz	11~14 Hz
RMS Displacement	11.6 μm 이하	12.7 μm 이하	10 μm 이하	14 μm 이하	15 μm 이하
Max. Displacement	30.5 μm 이하	40.0 μm 이하	70 μm 이하	54 μm 이하	80 μm 이하

4.3 내구성실험

경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 내구성 실험은 순환수 온도 40 °C, 200 kPa 압력강하 유 발유량의 (7.45 kg/s) 110%인 8.19 kg/s 조건에서 103일 17시간 실시되었다[7]. 내구성실험에 앞서 부품의 무게측정 및 3차원 측정을 통하여 기록을 유지하고 실험후 동일방법으로 동일 측정기를 사용하여 무게 및 3차원 측정을 시행하였으며 제조업체를 이용하여 측정된 시험 전후의 Inspection Report를 작성하였다. 내구성 실험에 사용된 유동관은 하나로운영팀의 지원을 받아 Serial Number #KM-312-N-013-RX021C를 사용하였으며 이때 Inlet Orifice 및 Lock Ring함께 지원을 받아 사용하였다.

내구성실험은 매 24시간마다 진동수준의 변화를 육안 관찰하였고 실험종료 후 시험부(그림 11 참조)를 해체하여 경수로용 신형소결체 무계장 캡슐의 마모 발생 여부를 확인하였다. 실험중 육안검사를 초기 10일, 이후 매 30일마다 4회에 걸쳐 실시하였다. 초기 10일 육안 관찰의 결과 부품에서는 전혀 마모의 흔적이 발견되지 않았고, 매 30일 마다 육안검사시 마모의 흔적은 발견할 수 없었으며 장탈착에 의한 약간의 스크래치 정도를 발견할 수 있었다. 노외시험 작업일지 및 부품별 매 육안검사에 따른 실험일지가 기록 유지되었다. 103일 17시간의 내구성실험후 그림 6 & 7 과 같이 캡슐의 해체를 통한 마모 확인결과 Guide Arm #2의 우측에 마모흔적이 육안으로 발견되었으나 극히 미세한 흔적으로 마모량 계산이 불가능한 정도임을 그림 8과 같이 50배율의 전자광학현미경으로 관찰결과 확인할 수 있었다. 또한 이와 접촉한 Bottom End Plate #2 Slot에서도 육안 검사시 마모의 흔적이 있는 것으로 관찰되었으나 정량적인 측정이 곤란한 극히 미세한 양의 마모로 판단된다. 실제 그림 9에서처럼 50배율 전자광학현미경에 의한 관찰결과 마모의 양을 확인하기 곤란하였다. Guide Arm #2와 Bottom End Plate #2 Slot의 마모는 진동에 의한 마모라기 보다는 장탈착에 의한 마모로 의심된다. 상단스프링은 특성상 장착후 진동이나 충격에 의해 몸통자체가 함께 움직이므로서 마모를 최소화 할 수 있도록 설계변경된 것으로 그림 10에서 보는 것과 같이 Guide Tube와 접촉된 스프링면에서 육안검사시 마모의 흔적을 발견하였으나 50배율의 전자광학현미경의 미세 관찰결과 마모량 계산이 곤란한 오차범위내에 있어 정량적인 확인이 곤란한 미세량으로 확인되었다. 특성상 Guide Tube의 장탈착에 의한 표면에 광택으로 의심된다. 검사결과는 표 4에 부품별 내구성 실험 전후 무게측정과 마모요약표를 기록하였다.

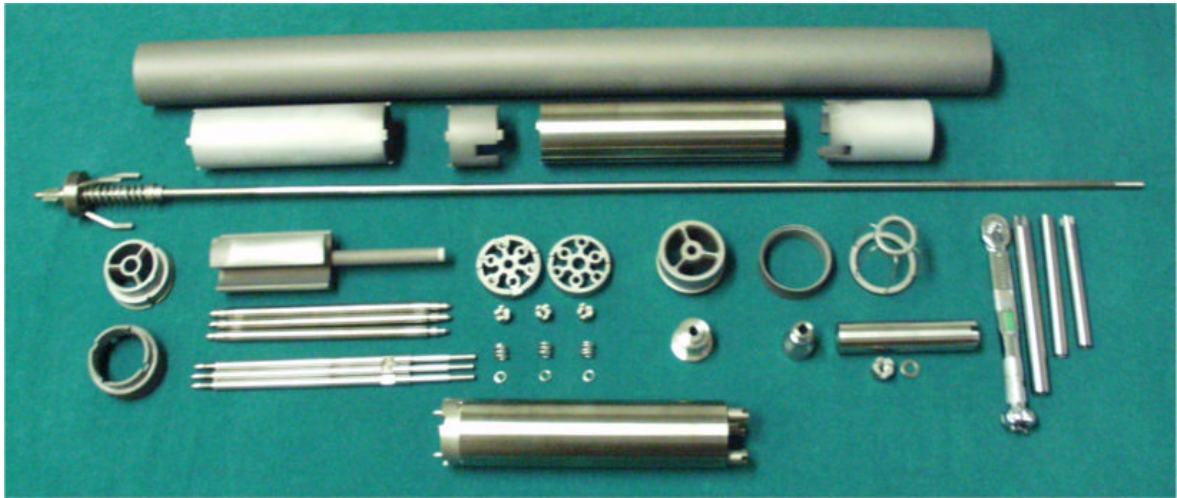


그림 6. 경수로용 신형소결체 무계장캡슐 해체부품(시험후)

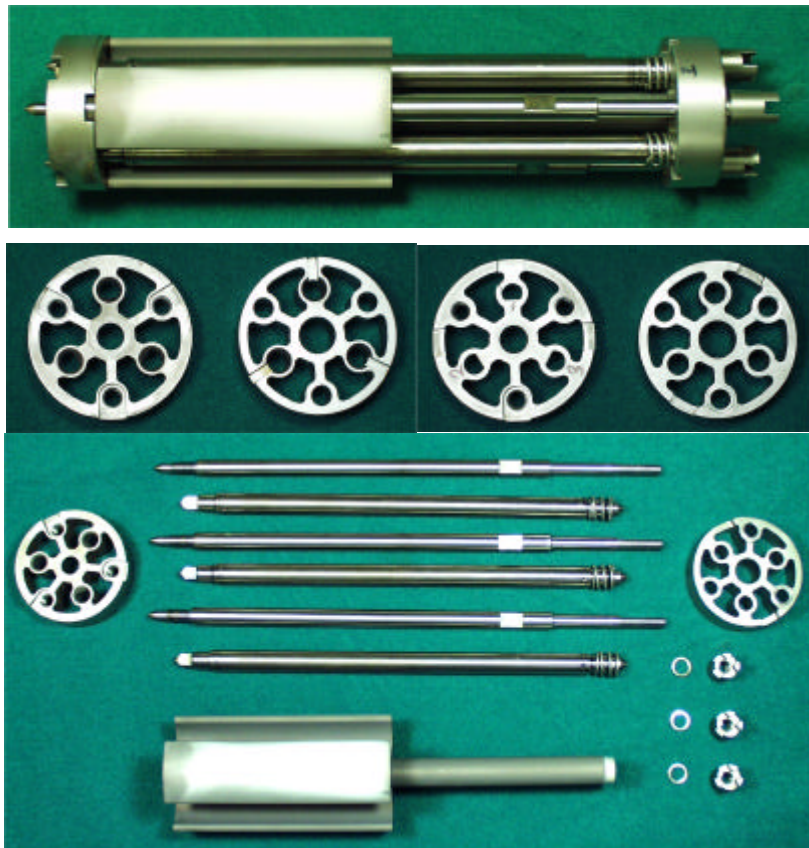
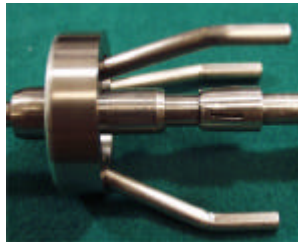
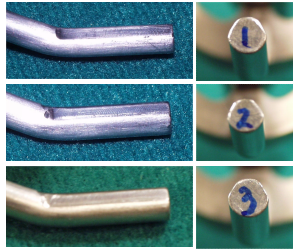


그림 7. 시험봉 집합체 해체부품(시험후)



←상단

하단→



(시험전)



(시험후)

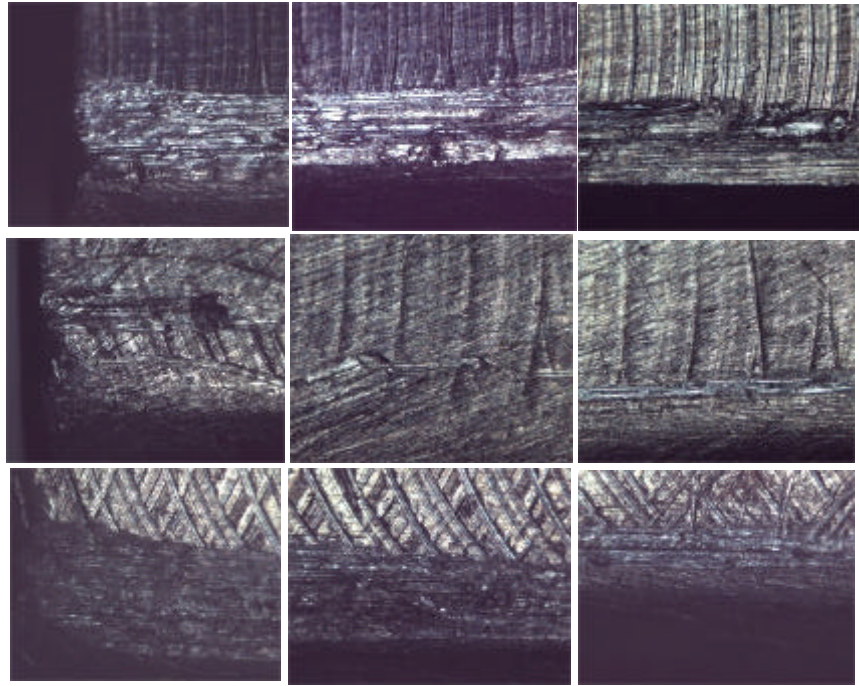
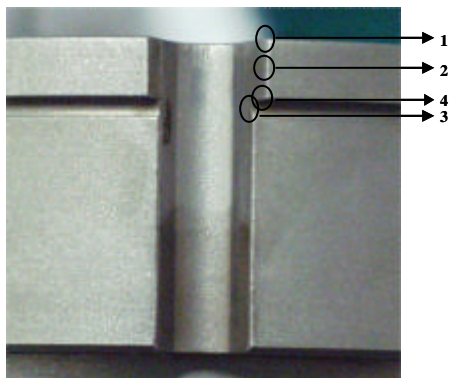
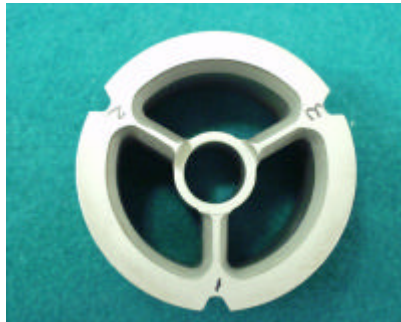


그림 8. Bottom Guide Arm Assembly 마모비교 및 전자광학현미경(x 50) 미세사진



① ② ③ ④

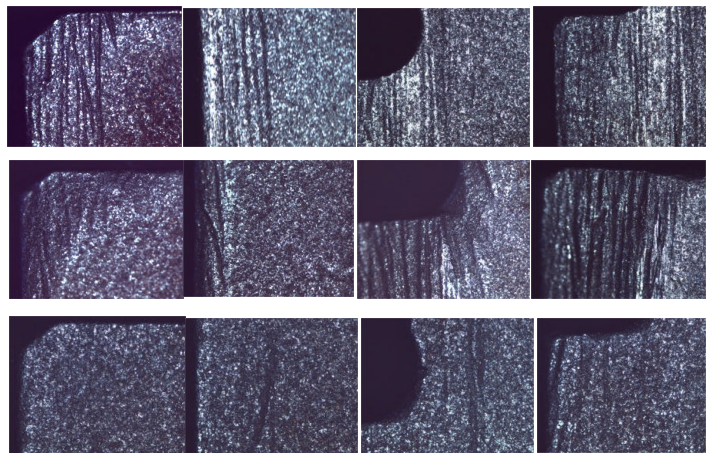


그림 9. 하단고정체 전자광학현미경(x 50) 미세사진

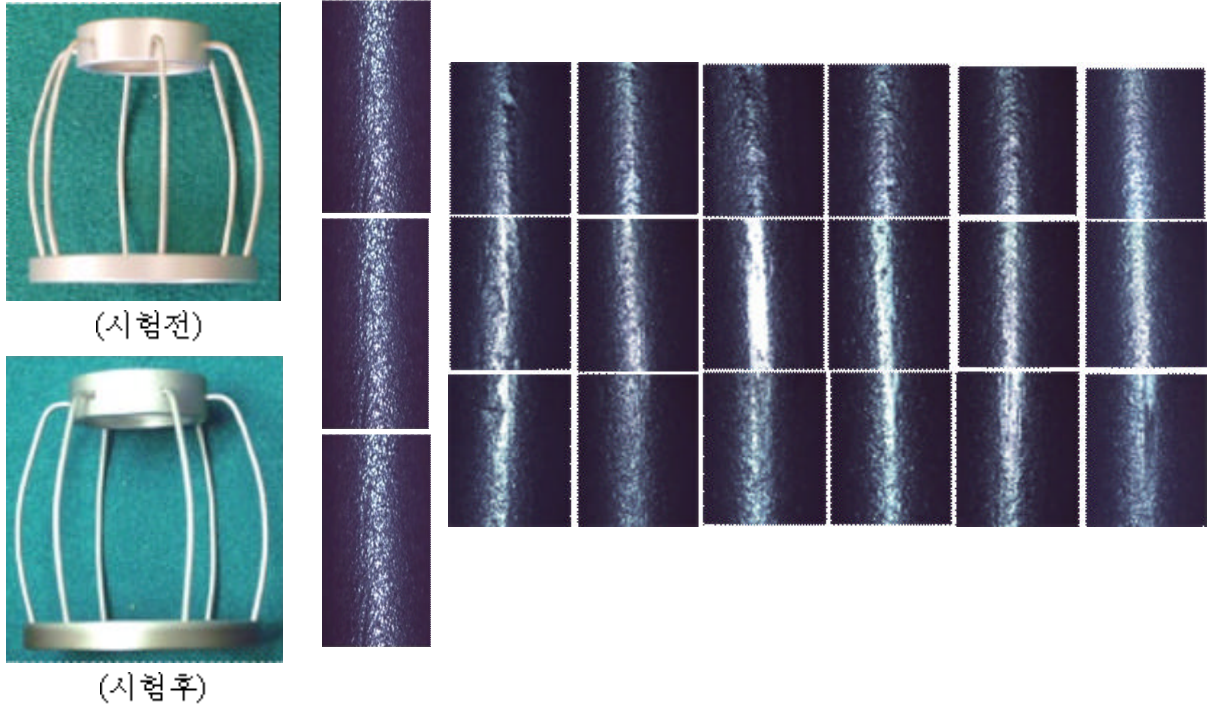


그림 10. 상단스프링 집합체 마모 비교 및 전자광학현미경($\times 50$) 미세사진



그림 11. Cold Test Loop-I에 장착된 시험부 및 부품

표 4. 부품별 내구성 실험 전후 무게측정 및 마모요약표

No	부 품 명	실험전 측정치(g)	실험후 측정치(g)	결 과	상 태	비 고
1	Rod tip & Central Rod & Bottom Guide Assembly & Collar	396.98	396.99	이 상 없 음	SS SW	
2	Bottom Guide Spring	17.23	17.23	"	NW	
3	Bushing	6.99	6.99	"	NW	
4	Lower End Plate	205.83	205.80	"	SW	
5	Lower End Plate Cover	39.67	39.65	"	SS	
6	Out Tube	806.93	806.93	"	NW	
7	Lower Support Tube	147.87	147.87	"	NW	
8	Test Fuel Rod Assembly					
	- Lower Housing	119.04 118.98	119.04 118.98	"	NW	
	- Upper Housing	105.48 105.61	105.48 105.61	"	NW	
	- Housing Support Rod	75.0	75.0	"	NW	
	- Housing Nut	6.5	6.5	"	NW	
	- Housing Nut Spring Washer	0.33	0.33	"	NW	
	- Fuel Rod Tube & Fuel Rod Bottom End Cap & Fuel Rod Top End Cap & Fuel Rod Plenum Spring & Fuel Pellet(Mock-up) & Fuel Pellet Spacer	63.88	63.88	"	NW	
	Fuel Rod Cooling Block	157.91 157.85	157.91 157.85	"	NW	
	Fuel Rod Hold-down Spring	1.55	1.55	"	NW	
	Hafnium Tube(Mock-up)	133.11 130.00	133.11 130.00	"	NW	
9	Upper Support Tube	74.78	74.78	"	NW	
10	Top End Plate	279.20	279.20	"	NW	
11	Top End Plate Cover	22.31	22.31	"	NW	
12	Top Guide	84.51	84.51	"	NW	
13	Top Guide Spring Assembly	63.84	63.84	"	SW	
14	Grapple Head Lock	109.71	109.71	"	NW	
15	Grapple Head	155.02	155.02	"	NW	
16	Grapple Head Clamping Nut	17.58	17.58	"	NW	
17	Grapple Head Clamping Spring Washer	1.80	1.80	"	NW	
18	Middle Support Tube	32.29	32.29	"	NW	

NW : No Wear, SS : Surface Scratches, SW : 표면접촉에 의한 Slight Wear Marks

HW : 눈에 보이는 Hard Wear

5. 결 론

경수로용 신형소결체 하나로 조사시험용 무계장캡슐의 압력강하 실험결과 약 200 kPa의 압력 강하를 유발하는 유량은 7.45kg/s 로 측정되었고, 하나로 제한 조건 12.7 kg/s 이하를 만족하였다. 진동실험 결과 진동주파수 영역은 약 5 - 32 Hz로 나타났으며, 실험범위에서의 RMS 진동변위는 약 12.7 μm 이하, 최대진동변위는 약 40.0 μm 이하로 측정되어 하나로 제한조건 300 μm 이하를 만족하였다. 순환수 온도 40 °C 에서, 압력강하 200 kPa 유발유량(7.45 kg/s)의 110 %인 약 8.19 kg/s 유량조건에서 103일17시간 동안 실시된 내구성 실험 중 육안관찰결과와 실험종료 후 무계장캡슐을 해체하여 확인한 결과, 경수로용 신형소결체 무계장캡슐의 부품에서는 마모의 흔적이 발견되었으나, 정량적인 측량이 곤란한 아주 극소량으로 확인되었다. 경수로용 신형소결체 하나로 조사시험용 무계장캡슐은 노외 검증시험을 통하여 하나로의 요구조건을 모두 만족하는 것으로 확인되었다.

6. 후기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행되었다. 본 연구를 도움을 주신 하나로이용기술개발팀, 하나로운영기술개발팀 및 DUPIC 핵연료개발팀에 감사드립니다.

7. 참고문헌

- [1] 김대호 외 "고연소도 신형 UO_2 소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉 설계," 2000 추계원자력학회, 2001. 4.
- [2] 이찬복 외 "경수로 핵연료용 큰결정립 UO_2 소결체 조사시험, HANARO Workshop 2000, 2000. 12.
- [3] 배기광 외 "DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서," KAERI/TR-1157/ 98, 1998.10.
- [4] 송기찬 외, "DUPIC 핵연료 조사 시험계획서," KAERI/TR-1545/2000, 2000. 4.
- [5] 전형길 외 "신형핵연료 무계장캡슐의 내구설시험절차서", KAERI/TR-1842/01, 2001. 6.
- [6] 전형길 외 "경수로용 신형소결체 무계장캡슐 수력시험", KAERI/TR-1962/01, 2001.11.
- [7] 김대호 외 "경수로용 신형소결체 무계장캡슐 내구성실험", KAERI/TR-2015/02, 2002. 1.
- [8] 김봉구 외 "신형소결체 하나로 조사캡슐 개략도", HAN-IC-CR-00-021, 2000. 8.
- [9] 강홍석, "진동 및 마모손상 저감 측면에서 제안하는 조사 시험봉 설계 개선 방안 ", AF-TM-FP-00002. Rev.1, KAERI, 2000.9.