



# 하나로 중성자 조사 시험용 재료 캡슐 시험 장치 개발 및 이용

주기남, 조만순, 강영환, 김봉구, 이기홍, 김영기  
한국원자력연구원 원자력기초과학연구본부

## 서론

하나로 조사 시험용 재료 캡슐(Material Capsule) 시험 장치는 재료의 중성자 조사 성능 평가를 위한 설비로서 단시간 내에 원자로의 주요 구조 재료 및 핵연료 집합체 부품들에 대한 수명 말기까지의 중성자 조사 조건을 구현할 수 있는 시험 설비이다.

연구로를 활용한 캡슐 조사 시험은 다양한 운전 조건을 구현할 수 있으며 조사 시험 변수를 조절할 수 있고 하나로의 중성자속이 높아 시험 기간을 크게 단축할 수 있는 장점이 있다.

고리 1호기를 포함한 경수로 원자로 압력 용기(Reactor Pressure Vessel, RPV) 재질의 경우 30MW 열출력의 하나로 중심 CT 조사 시험공에서 약 2일만에 시편의 중성자 조사량이 상용 원자로 압력 용기의 30년 수명 말기 조사량인  $6.4 \times 10^{19} (n/cm^2)$  ( $E > 1.0 \text{MeV}$ )

에 도달하게 된다.

하나로를 이용한 조사 시험용 재료 캡슐 시험 장치 및 관련 기술은 순수 국내 기술로 개발되었으며, 시험 장치는 크게 본체부, 연결부, 그리고 제어장치부로 구성되어 있다.

조사 시편을 포함하는 본체부는 원자로 노심부에 장입되는 부분으로 시편의 조사 온도를 제어/측정할 수 있는 열전대 및 히터가 설치되어 있다.

제어장치부는 조사 기간 동안 원자로 출력에 따른 핵적 특성에 의해 가열된 시편부의 온도를 열전대로 측정하여 본체부 내의 He gas 압력이나 장착된 마이크로 히터 출력을 조절하여 최종적으로 이용자 요구 온도에 도달하도록 제어한다.

연결부는 본체부와 제어장치부간의 계장선 연결/보호 기능 및 원자로 내 시험 장치의 고정 역할을 담당하여 시험장치 전체의 구

조 건전성을 확보케 하는 역할을 한다.

현재 하나로 조사 시험용 표준형 계장 캡슐은 원자력 재료들에 대한 산·학·연의 하나로 중성자 조사 시험 연구에 활발히 활용되고 있다.

그동안 압력용기강 재료의 경우 연구로에서 캡슐을 이용한 조사 시험이 여러 번 수행되어 [1, 2], 최근 고리 1호기 원전의 수명 연장 운전 결정을 위한 조사 취화 시험 평가 데이터 및 안전성 평가 기술 확보에 매우 중요한 역할을 하였으며, 향후 2012경으로 예정된 고리 1호기의 차기 안전성 평가 및 추가 연장 운전 계획의 수립에 결정적인 데이터를 제공할 예정이다.

재료 계장 캡슐은 영광 3호기 이후 국내 모든 경수형 원자로에 사용되고 있는 국산 원자로 압력 용기의 조사 특성 평가에도 활용되어 원자로 산업계의 원자로 부

품 국산화 사업에도 기여한 바 있다[1].

또한 한전원자력연료(주)에서 제작된 경수로 핵연료 집합체의 각종 부품재 및 제어봉 물질의 노내 성능 평가를 수행함으로써 핵연료 국산화 사업에도 기여하고 있다.

한편 국제적으로도 미국 DOE (Department of Energy) 주관 I-NERI (International Nuclear Energy Research Initiative) Project인 VHTR용 고온 재료 조사 특성 평가 및 Westinghouse 제작 제어봉 물질 조사 특성 평가에도 참여하여 하나로로 국제적인 위상 제고에도 크게 기여하고 있다.

### 조사 시험용 재료 캡슐 시험 장치 개발

#### 1. 하나로 조사 시험용 장치 개발

하나로에서는 재료의 중성자

조사 시험을 위하여 래빗 조사 장치 (small non-instrumented capsule), 핵연료 노내 조사 시험 설비(Fuel Test Loop, FTL), 그리고 캡슐 조사 시험 장치 등이 개발되어 왔다[3].

래빗은 주로 동위원소 생산용으로 사용되고 있으나, 소형 규격의 재료 및 핵연료 시편의 조사 시험에도 활용되고 있다.

래빗 장치는 비교적 낮은 온도 (200℃ 이하) 및 중성자 조사 조건에서 소형 시편의 다양한 조사 시험에 매우 유용한 장치이다.

주로 원자로 가동 조건과 유사한 고온·고압의 냉각수 조건에서 핵연료봉의 조사 시험용으로 설계 제작된 핵연료 노내 조사 시험 설비의 경우 2009년 현재 시험 가동중에 있으며, 향후 핵연료의 성능 검증 및 안전성 연구에 활용될 것이다.

하나로를 이용하여 원자력발전소의 수명 평가 및 새로운 재료 및 핵연료의 개발을 위하여 계장

및 무게장 캡슐 시험 장치가 개발되었다.

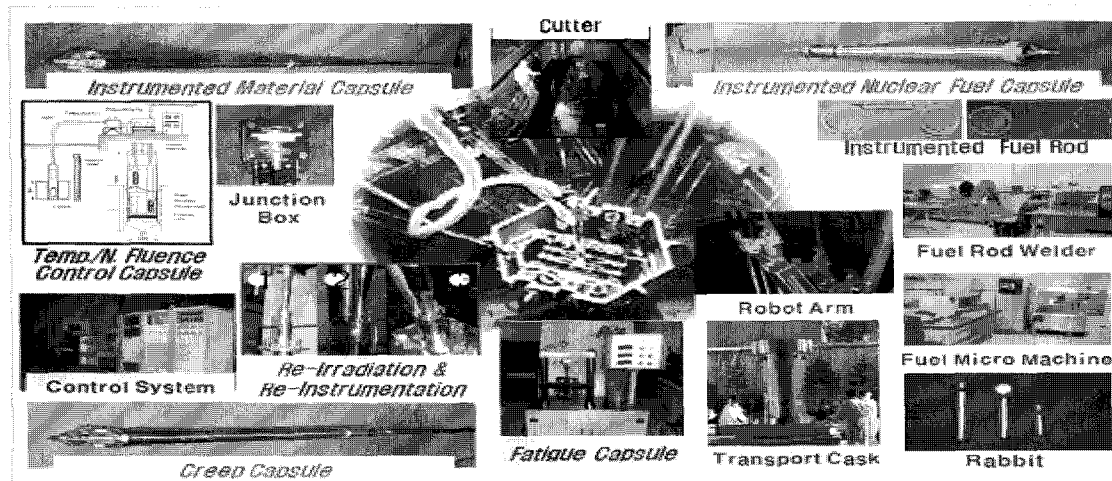
또한 계장 캡슐 시험 장치와 연계하여 캡슐 고정 장치, 연결 장치, 제어 장치, 절단 장치, 이송 장치 등 일련의 관련 장치들이 <그림 1>과 같이 개발되었다.

원자로 노심에서 조사 시험된 캡슐 장치는 조사 후 절단 장치를 이용해 본체 부분을 절단하여 이송용 캐스크에 담아 조사후 시험 시설인 IMEF (Irradiated Materials Examination Facility)으로 보내 진다.

IMEF hot cell에서 해체된 시편들은 이용자들의 요구에 따라 재료의 조사 특성평가를 위한 다양한 조사후 시험이 수행된다.

#### 2. 하나로 조사 시험용 재료캡슐 설계 및 제작

재료 캡슐 시험 장치는 주로 하나로 노심 중심인 CT/IR 시험공, 노심 주변인 OR 시험공, 그리고



<그림 1> 하나로 조사 시험용 캡슐 및 관련 장치

〈표 1〉 하나로 재료 조사 시험용 시험공 특성

Location	Hole		Inside Dia. (cm)	Neutron Flux (n/cm <sup>2</sup> · sec)		Remarks
	Name	No.		Fast Neutron (>0.82 Mev)	Thermal Neutron (<0.625 ev)	
Core	CT	1	7.44	1.95 × 10 <sup>14</sup>	4.30 × 10 <sup>14</sup>	Fuel/material test
	IR	2	7.44	1.80 × 10 <sup>14</sup>	3.83 × 10 <sup>14</sup>	Radioisotope production
	OR	4	6.00	2.01 × 10 <sup>13</sup>	3.30 × 10 <sup>14</sup>	
Reflector	LH	1	15.0	7.35 × 10 <sup>11</sup>	9.72 × 10 <sup>13</sup>	Fuel/material and others test
	HTS	1	10.0	1.72 × 10 <sup>11</sup>	8.82 × 10 <sup>13</sup>	Radioisotope production
	IP	17	6.0	1.43 × 10 <sup>9</sup> - 2.17 × 10 <sup>12</sup>	2.16 × 10 <sup>13</sup> - 1.81 × 10 <sup>14</sup>	

노심 외곽인 IP 시험공에 장입되어 조사 시험을 수행하게 된다.

이들 시험공의 핵적 특성은 <표 1>과 같으며, 조사 시험공의 노심 내 위치에 따라 다양한 고속 및 열중성자속 조건, 그리고 시편 허용 규격 등이 달라지므로 이용자의 목적에 따라 조사시험 조건을 선택할 필요가 있다.

<그림 2>는 하나로 노심 중심인 CT/IR 시험공과 노심 외곽인 OR 시험공에서 조사 시험하기 위해 개발된 조사 시험용 재료 캡슐 시험 장치 및 시험 시편의 온도 및 조사 분위기를 조절할 수 있는 캡슐 제어 장치를 보여주고 있다.

캡슐 시험 장치는 크게 본체부, 보호관부(5m), 그리고 안내관부(9.5m) 세부분으로 구성되어 있다.

조사 시편과 계장품들을 포함하는 본체부는 직경 60mm(혹은 56mm), 길이 약 1m의 원통으로 조사 시편을 중심으로 시편 온도 조절용 미세 정밀 히터가 장착된 5단 구조로 되어 있으며, 조사 시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 기본적으로 12개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe-Ag-Nb-Co 중성자 모니터가 설치되

어 있다.

하나로 재료 캡슐은 먼저 캡슐 이용자와의 협의를 통하여 캡슐의 주요 구조, 장입 시편 치수 및 임시 배치 위치, 조사 조건 등을 결정하는 기본 설계가 수행되고, 이를 토대로 하나로 시험공에서의 감마 발열량(gamma heating rate) 분포 및 중성자 조사량 등 핵적 특성이 계산된 후, 계산된 값을 사용하여 열 매체와 캡슐 외통 간의 간격(gap) 설계, 시편의 최종 배치 및 열전대(T/C)와 중성자모니터(F/M)의 배치 위치 결정 등의 설계 절차를 거쳐 <그림 2>와 같이 최종 제작된다.

### 3. 하나로 조사시험 및 조사후 처리

이용자 요구에 따라 설계/제작된 캡슐 및 관련 시설을 하나로에서 안전하게 사용하기 위해서는 이들 에 대한 구조 건전성 및 안전성이 객관적으로 입증되어야 한다.

이에 따라 캡슐 기본 설계에 준하여 캡슐의 조사 안전성 및 온도/강도 건전성을 평가하게 된다.

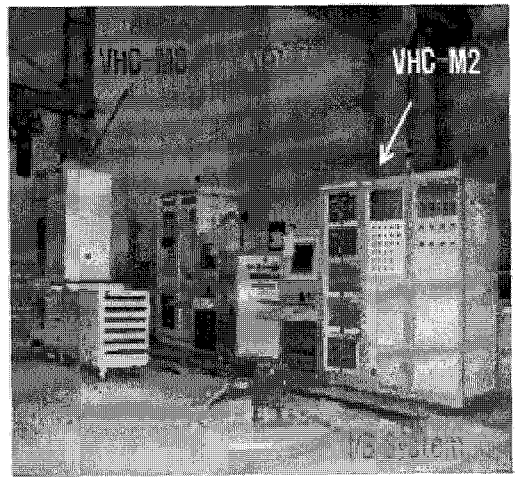
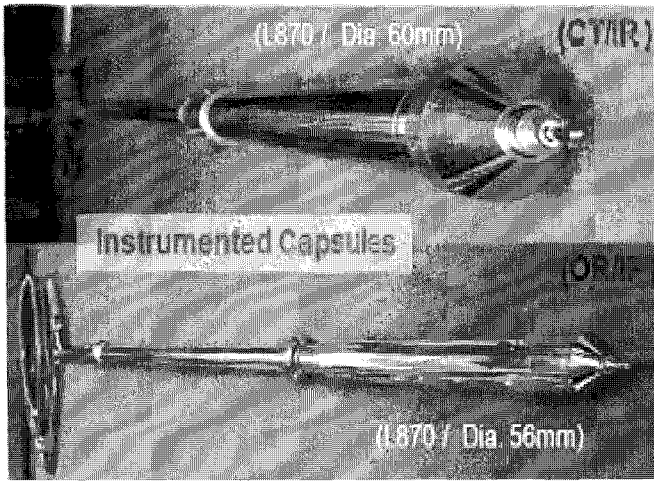
이를 만족하는 경우 하나로 T-class 기준에 의거하여 상세

설계/제작된 계장 캡슐은 조사 시험 전 노외에서 충분한 성능 검증 시험을 거치게 된다.

이러한 설계/제작/검사 과정을 거쳐 완성된 조사 시험용 캡슐은 정해진 하나로 노심에 설치되게 되는데, 원자로 냉각수의 고속 상향 흐름으로 인한 캡슐 자체의 내진 안전성을 만족시키기 위하여 조사 시험시 본체 하단부, 본체 상부, 침니 상부, 고정팔 고정부 등 최대 4곳에서 지지 또는 고정 된다.

하나로 조사 시험공 내에 설치된 조사 시편들은 원자로 출력 상승에 따른 gamma heating에 의하여 온도가 1차 상승하게 되며, 이에 캡슐 내 He 진공도를 조절하여 목표 온도에 근접시키고, 최종적으로 각 단별로 설치된 micro-heater를 이용하여 시편의 조사 온도를 목표 조사 시험 온도로 조절하게 된다.

현재 하나로 운전은 대략 24일 운전 - 10일 점검 운영 체제로 운영되고 있으며, 시험 기간 동안 각단 시편의 온도는 캡슐 내 설치된 열전대, 히터, 가스관 등이 연결된 캡슐 제어 장치를 통해 일정



(그림 2) 하나로 조사 시험용 재료 계장 캡슐 및 제어 장치

하게 제어된다.

〈그림 3〉은 하나로 노심 배치 및 CT 시험공에 설치되어 조사 시험중인 재료 계장 캡슐의 모습이다.

조사 시험이 완료된 캡슐은 작업자의 방사능 피폭 안전성 측면에서 하나로내 작업 수조에 약 1개월 가량 보관되어 방사능 냉각 처리된 후, 정해진 절차에 따라 원자로 작업 수조에서 절단되어 이송용 캐스크에 넣어진 다음 조사 후 시험 시설인 IMEF로 이송된다.

IMEF의 hot cell 시설로 이송된 캡슐은 정해진 절차에 따라 해체되어 조사시편 및 F/M을 인출하고 나머지 부분들은 폐기 처분된다.

IMEF 시설에서 해체 분리된 조사 시편은 관련 이용자들의 요구에 따라 다양한 조사 후 물성 평가 시험이 수행되며, 분리된 F/M을 이용하여 중성자 조사량 평가 작업이 수행된다.

#### 4. 조사 시험 평가 기술 개발

하나로에서 조사 시험을 통해

이용자가 요구하는 시편의 조사 특성을 얻기 위해서는 다음과 같은 평가 기술이 필요하다.

먼저 캡슐의 기본 설계를 바탕으로 하여 원자로 시험공에서의 핵적 특성 계산이 필요하다.

하나로에서는 MCNP 코드를 [4] 이용하여 핵적 반응도 효과, 중성자속 분포, 중성자 스펙트럼, 발열량 등을 계산한다.

계산된 임계도의 불확도는 0.2mk 이하이고, 중성자속의 불확도는 열중성자속 1.5%, 1 MeV 이상 고속중성자속은 2.5% 정도이다 [5].

캡슐의 원자로 내 장입에 따른 임계도값을 계산하여 반응도 효과를 산출하는데, 하나로 운영 기술 지침서의 제한 조건인 +12.5mk보다 작아야 조사시험이 가능한 것으로 판단된다.

일반적으로 0.1 MeV 이상 및 1.0 MeV 이상의 고속중성자속이 계산되는데, 원자로 제어봉의 삽입 깊이, 캡슐 구성부의 재질 및 형태, 그리고 원자로 내위치(조사공 및 축 방향 위치)에 따라 결정되며, 이를 기준으로 하여 시편의 조사 기간이 결정된다.

또한 중성자속과 함께 계산되는 시편, 캡슐 내부 부품, 캡슐 외통에 대한 발열량(gamma heating) 값은 조사 조건에서 시편의 조사 온도 및 캡슐 자체의 열적 구조 건전성 평가에 활용된다.

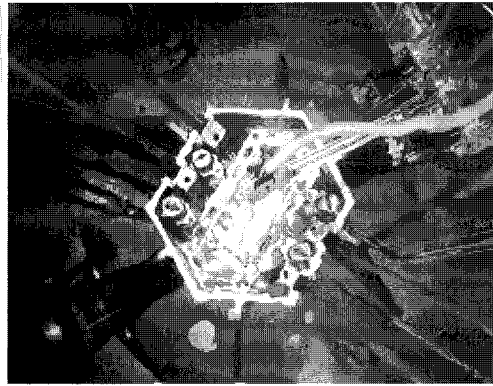
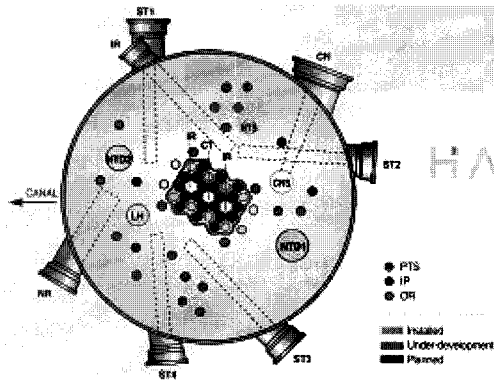
발열량은 중성자 및 즉발 감마, 지발 감마에 의한 발열을 모두 고려하고 있는데, 중성자에 의한 발열은 1% 정도에 불과하다.

한편 캡슐 내에 장입하였던 F/M을 이용하여 조사 시편이 받은 최종 중성자 조사량 평가 작업이 수행된다.

조사 시험 후 F/M은 IMEF hot cell에서 해체되며, dosimetry wire의 무게 변화 및 gamma ray spectrum을 측정하고 이를 SANDII code을 [6] 이용하여 중성자 조사량을 계산하게 된다.

이와 같이 하나로에서 얻어진 fast neutron ( $E > 1.0 \text{ MeV}$ ) 측정치는 앞서 MCNP code로 얻은 계산치와 약 20% 오차 범위 내에 있는 것으로 평가된다.

캡슐 각 부위의 발열량 및 원자로 냉각수 흐름에 따른 캡슐 각 부위의 조사온도는 열계산 코드인 GENGTC [7], ANSYS [8] 등



〈그림 3〉 하나로 노심 배치도 및 CT 시험공 계장 캡슐 조사 시험 모습

의 전산 프로그램들을 이용하여 계산되는데, 하나로에서의 기본적인 캡슐 본체부 설계는 주로 1차원 코드인 GENGTC code 계산값을 이용하여 수행하며, 필요할 경우 ANSYS 코드를 이용하여 세부적인 온도 평가 및 그에 따른 강도 건전성 평가 등을 수행한다.

일반적으로 조사 시편의 중성자 조사 손상 정도를 나타내기 위하여 고속중성자 조사량 단위와 dpa (displacement per atom) 단위를 사용한다.

하나로에서도 MCNP 코드를 이용한 중성자 조사량 평가와 더불어 재료의 조사 손상 현상에 대한 핵심적인 연구에 매우 중요한 의미를 지니는 dpa 평가를 SPECTOR 코드[9] 이용하여 수행하고 있다.

한편 조사된 시편의 방사화 정도는 ORIGEN2 code를[10] 이용하여 계산되는데, 조사 시편에 대한 방사화 자료는 시편의 조사 후 처리에 필요한 기본 정보를 제공하여 준다.

## 5. 조사 시험 신기술 개발 현황

하나로에서는 점차 다양하고

고도화되어 가는 이용자들의 시험 조건을 만족시키기 위하여 그동안의 조사 시험을 통해 축적된 경험 및 데이터베이스에 기반하여 보다 정밀한 조사 조건 조절 및 중성자 조사 효과 해석을 위한 새로운 재료 캡슐 기술을 개발하고 있다.

새로운 캡슐 기술로 저중성자속 조사용 'OR/IP 조사 시험 캡슐' 기술, 원자로 가동과 무관하게 시편의 조사 온도 및 중성자 조사량을 비교적 자유롭게 조절할 수 있는 '조사 온도 정밀 제어 캡슐' 기술과 '중성자 조절 캡슐' 기술, 그리고 1000℃ 고온까지 조사 시험할 수 있는 '고온 조사 시험 캡슐' 기술 등이 현재 개발되고 있다.

먼저 표준형 조사 시험용 캡슐의 경우 중성자 강도가 가장 높은 원자로 노심 중심부인 CT 및 IR 조사공에서의 조사 시험을 위해 개발되었다.

따라서, 보다 다양한 중성자 조사 조건을 구현하기 위하여 상대적으로 중성자 flux가 낮은 영역인 OR 및 IP 시험공에서의 조사 시험을 위한 저중성자속 조사용 'OR/IP 조사시험 캡슐' 기술을 개발하여 현재 RPV 및 고온재료

시험 이용자들의 조사시험에 활발히 활용하고 있다.

조사 시편의 온도는 캡슐 자체의 gamma heating뿐만 아니라 캡슐 내부품 간 간격의 He 압력, 그리고 히터의 출력에 의해 결정된다.

따라서 원자로 가동 초기 및 종료시와 같은 출력 변화기에는 중성자 flux뿐만 아니라 시편 온도도 크게 변하게 된다.

이러한 조사 온도 변화는 재료의 조사 손상에 영향을 주어 조사 손상 mechanism 규명을 어렵게 하는 것으로 알려져 있다[11].

따라서 이러한 불필요한 천이 온도(transient temperature) 효과를 피하기 위하여 원자로 출력 상승 전부터 히터 및 진공만으로 시편의 온도를 최종 조사 온도로 만든 후 조사 기간 동안 일정하게 유지하는 '조사 온도 정밀 제어 캡슐' 기술이 개발되었다.

조사 기간 동안 시편의 중성자 조사량은 원자로 가동 시간에 의해 결정된다. 따라서 그동안 이용자가 원하는 특정한 조사량을 만족시키기 위하여 일정 시간 조사 시험 후에 원자로를 정지하고 캡슐을 인출하여 왔다.

그러나 현재 원자로로는 일반적

으로 24일 운전 - 10일 정비 주기로 운전되고 있으며, 점차 많은 이용자들이 원자로를 공용하고 있으므로 조사 시험 분야의 필요에 따라 원자로를 정지하는 것이 어렵게 되었다.

이에 조사 시험중 일부 시편이 원하는 조사량 조건에 도달하는 경우 캡슐 내에서 시편을 노심 밖 위치로 이동시켜 더 이상의 조사가 진행되지 않게 하는 '중성자 조절 캡슐' 기술이 개발되었다.

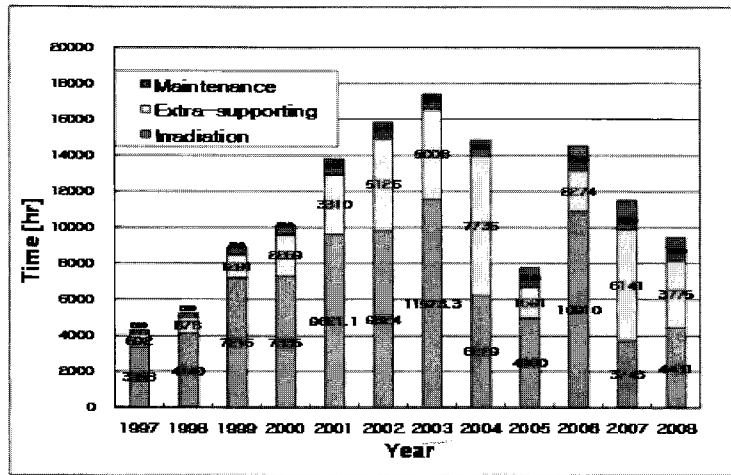
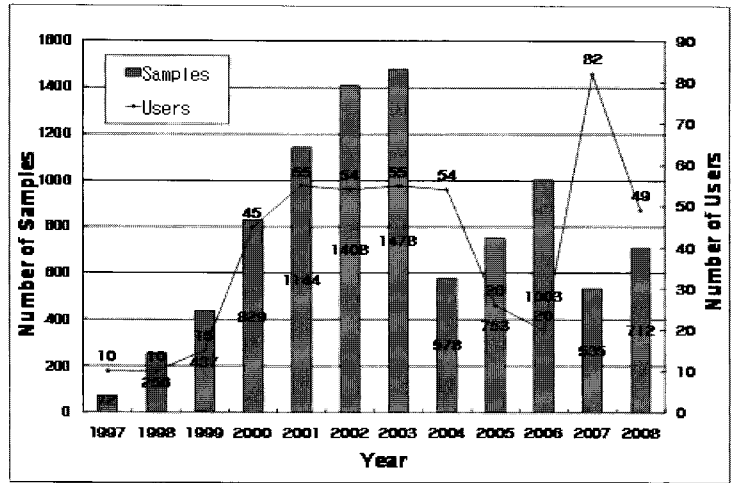
또한 현재 세계적으로 연구 개발이 활발히 진행되고 있는 고온 가동 조건의 차세대 원자로용 재료 조사 시험을 위한 '고온 조사 시험 캡슐' 기술이 개발되고 있다.

표준형 조사 시험용 캡슐이 주로 국내 가동중인 경수로(PWR 및 CANDU 형 원자로)의 가동 온도인 300℃에서의 조사 시험을 위하여 개발되었고, 이러한 표준형 캡슐은 현재 500℃까지의 조사 시험만이 가능한 것으로 평가되고 있다.

그러나 VHTR, SFR, Fusion 원자로 등 차세대 원자로들을 위한 후보 구조 재료의 사용 온도 조건이 700~1000℃ 범위의 고온인 것으로 알려져 있으므로 이에 적합한 고온 조사 시험 기술이 연구/개발되고 있다.

### 산·학·연 이용자 지원

원자로 및 핵연료주기 기술에 대한 국가 연구 개발 분야에서는 하나로를 이용한 수많은 노내 조사 특성 시험을 요구하여 왔다.



〈그림 4〉 하나로 조사 시험용 캡슐 이용 현황

이에 따라 조사 시험용 캡슐 기술 개발 분야에서는 노내 재료 및 핵연료 조사 특성 시험, 원자로 재료 및 부품들의 개발 및 안전성 연구, 그리고 원자로를 이용한 기초 기반 연구 등에 집중하여 왔다.

하나로에서 조사 시험이 시작된 1995년 이후 2009년 초 현재 원자력 연구계, 산업계 그리고 학계로부터 요청된 약 9,000여개의 시편들이 캡슐 및 래빗 조사 장치를 이용하여 8,700여 시간 동안 조사되었다.

조사 시험은 하나로 노심의 CT 및 IR 시험공뿐만 아니라 노심 주변부인 OR 시험공, 그리고 외곽

부인 IP 및 HTS 시험공을 이용하여 수행되었다.

조사 캡슐은 주로 연구계 및 산업계에서 요청된 RPV, 노심 재료, Zr 합금 등을 위해 제작되었으며, 일부 캡슐의 경우 국제 공동 연구 및 국내 대학의 하나로 이용 활성화 프로젝트 등을 위하여 제작되었다.

〈그림 4〉는 본격적으로 조사 시험이 수행된 1997년 이후의 하나로 이용자, 조사 시편 수, 그리고 조사 시간 등의 추이를 보이고 있는데, 2003년까지 꾸준한 증가세를 보인 이후, 최근에는 하나로 관련 시설(FTL, CNS) 건설 등으



로 인한 원자로 정지 기간의 증가로 인해 불규칙한 이용 현황을 보이고 있다.

하나로 조사 시험용 장치를 이용하여 얻어진 각 시편의 조사 특성 평가 자료는 이용자의 사용 목적에 따라 원자로의 안전성 평가 연구, 재료 및 핵연료 신소재 개발 연구, 차세대 원자로 개발 연구 등에 매우 귀중한 조사 시험 데이터베이스로 활용되어 왔다.

특히 하나로 조사 시험을 통해 얻어진 압력 용기재 및 핵연료 집합체 부품의 조사 취화 시험 평가 결과들은 고리 1호기를 포함하여 국내 가동중인 경수로 원자로의 안전성 평가 및 수명 연장 연구 및 핵연료 집합체 국산화 사업에 크게 기여하고 있는 것으로 평가되고 있다.

또한 하나로 세계 각국에서 경쟁적으로 연구하고 있는 차세대 원자로용 고온 재료 조사 특성 연구 분야인 I-NERI Project 국제 공동 연구 등에도 주도적으로 참여하고 있으며, SMART, Fusion, SFR, VHTR 등 국가 중장기 연구 개발 사업에서도 조사 시험 관련 분야에 대해 적극 협력하고 있다.

결론

하나로를 이용한 원자력 재료 및 핵연료 집합체 부품 소재의 중성자 조사 특성 평가를 위한 조사 시험용 재료 캡슐 시험 장치를 개발하기 위해 하나로 특성에 적합한 조사 시험용 캡슐의 설계 및

제작 기술, 그리고 제반 관련시설이 연구 개발되었다.

개발된 조사 시험용 재료 캡슐 시험 장치는 그동안 국내외 산·학·연 이용자들로부터 요청된 9,000여개 시편의 조사 특성 시험에 적용되어 원자로 안전성 연구 및 신소재 개발, 그리고 기초 연구 등에 유용하게 활용되었다.

한편 하나로에서는 이용자들의 보다 다양하고 정확한 조사 조건 요구를 만족시키기 위하여 그동안 축적되어온 경험 및 기술을 바탕으로 'OR/IP 조사시험 캡슐', '조사 온도 정밀 제어 캡슐', '중성자 조절 캡슐', '고온 조사 시험 캡슐' 등 새로운 조사 시험 기술이 개발되고 있으며, 향후 이러한 조사 시험 기술은 원자로 안전성 연구 및 신소재 개발뿐만 아니라, 차세대 원자로용 소재 개발에도 일익을 담당하게 되어 국내 원자력 기반 기술 확립에 크게 기여하게 될 것이다.

※ 본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술단의 방사선기술개발사업으로 지원받았음.

<참고 문헌>

1. 주기남 외, 한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 소재의 조사용 계장캡슐 (99M-01K?02H) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1646/2000 (2000).
2. 주기남 외, 압력용기강 모델합금 조사시험용 계장캡슐 (08M-01K)

설계·제작·시험 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-3746/2009 (2009.03).

3. K.N. Choo et. al., Material Irradiation at HANARO, Korea, Technical Meeting (TM-34779) on Research Reactor Application for materials under high fluence, Vienna, Austria, November, 2009.

4. J. Briesmeister, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transfer Code, Version 4C, LA-13709-M 2000.

5. 오수열, 08M-01K 캡슐의 핵적 특성 분석, HAN-NE-CR-920-08-18, 내부통신문, 2008.8.4

6. P.J. Griffin et al, User's Manual for SNL-SAND-II Code, SAND-93-3957 (April 1994).

7. H. Someya, T. Kobayashi, M Niimi, T. Hoshiya and Y. Harayama, GENGTC-JB: A computer program, JAERI-M 87-148 (1987).

8. ANSYS IP Inc., 2002, "ANSYS User's manual", Ver. 7.0, ANSYS IP Inc..

9. Lawrence R. Greenwood and Robert K. Smither, 'SPECTER: Neutron damage calculations for materials irradiations', ANL/FPP/TM-197.

10. A. G. Croff, A User's Manual for The Orgen-2 Computer Code, ORNL/TM-7175, July 1980

11. F.A. Garner, et al., "Influence of details of reactor history on microstructural development during neutron irradiation," J. Nuclear Materials, 205, 206(1993).