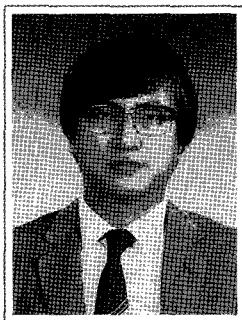


실시간 재료의 변형 특성 시험용 캡슐

강 영 환

한국원자력연구소

조사시험용캡슐 개발 및 활용 과제책임자



우리 나라에는 산업 발전과 더불어 필요한 에너지원으로 원자력의 중요성을 인식하여 일찍이 1978년 고리 1호기의 상용 운전이 시작되었으며, 현재에는 가압 중수로 4기 및 가압 경수로 12기가 가동중에 있다. 원자력 발전이 차지하는 비중이 1997년 34%에서 현재는 43%에 달하고 있어 원자력 에너지가 주요 에너지원으로 자리를 차지해 오고 있다.

이들 발전소에 사용되고 있는 재료는 발전소 가동 연수가 증가함에

따라 발전소의 가혹한 가동 조건(온도 330°C, 압력 150기압 이상, 중성자 조사량 $5 \times 10^{19} n/cm^2$ ($E > 1 MeV$) 이상)에 노출되어 필연적으로 조사 취화, 부식(corrosion), 조사 크립(irradiation creep) 등에 의하여 고유 특성이 지속적으로 저하되고 열화(degradation)를 유발시키므로 안전 운전의 여유도를 낮추게 되고 발전소의 안전성 확보에 우려가 된다. 그러므로 발전소의 안전성 및 경제성을 높이기 위한 노력이 어느 때보다 필요하게 된다.

또한 차세대 원자로를 비롯한 각종 개량 원자로의 개발은 핵연료를 포함한 다양한 재료 문제를 내포하고 있으며, 원자력 선진국들이 당면한 가장 큰 문제는 방사선 조사와 관련된 제반 현상의 규명과 조사로 인한 노화(aging)에 견딜 수 있는 첨단 재료를 만들어 내는 일이다.

이들 발전소에 사용될 재료도 설계 수명이 현재보다 2배 정도 길어질 전망이지만 가동 연수가 증가함

에 따라 중성자에 노출되어 필연적으로 조사 취화 현상 등이 예상되며, 원전에 사용하는 재료의 전전성 평가와 노내 설계 자료의 확보는 차세대 원전의 개발에 매우 중요한 분야가 된다.

이러한 세계적인 추세와 함께 국내에서도 국가 원자력 중장기 과제인 「원자력 신소재 개발」, 「신형 핵연료 개발」, 「핵비확산성 건식 공정 산화물 핵연료 개발」, 「SMART 원자로 개발」, 「액체 금속로 개발」 등이 진행되고 있으며 이에 필요한 다양한 재료의 조사 시험 평가가 요구되고 있다.

이외에도 국내 산업체에서 현재 개발중이거나 개발한 원전 재료도 적용 코드에서 필요로 하는 노내 설계 자료의 확보가 요구되고 있다.

이를 위해 하나로를 이용한 원자로 재료 및 핵연료의 노내 조사 특성 및 조사 거동 자료 생산을 위해서는 조사 시험에 필요한 기술과 설비의 확보가 가장 먼저 이루어져야 한다.

본고는 우리나라 조사 시험 기술의 현황을 기술하여 산·학·연 이용자들이 추후 연구로를 이용한 조사 시험시 참고할 수 있고, 원전용 소재의 방사선 효과를 실시간으로 측정할 수 있는 캡슐 개발 경위와 내용 및 향후 전망에 대하여 논술하고자 한다.

조사 시험과 하나로 이용

조사 시험 기술은 새로운 핵연료나 재료 개발을 위하여 필수적으로 수행하여야 하는 시험으로 기초 연구부터 공정 개발 및 인허가 획득까지 필요한 자료를 확보하는 데 그 중요성이 있다.

조사 시험은 크게 상용로를 이용하는 방법과 연구로를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.

그러나 연구로를 이용하는 방법이 상용로와는 달리 다양한 운전 조건을 구현할 수 있어 조사 시험 변수를 다양화할 수 있고 중성자 속이 높아 조사 기간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

더욱이 국내에는 원자력연구소 내에 열출력 30MW 연구용 원자로인 「하나로」(HANARO)가 1995년 첫 임계에 도달한 이래 현재 정상 가동 중이다.

이러한 이유로 원자력 분야의 산업체·학계 및 연구소에서 요구하는 기술을 사전에 면밀히 검토 분석하

여 원자력 중장기 과제로서 필요한 기술을 개발하고 이를 이용한 다양한 조사 시험을 수행하고 있다.

하나로에는 조사 시험 목적으로 노심에 7개의 수직 조사공이 있으며 노심 내부의 3개 조사공(CT, IR1 &IR2)이 캡슐을 이용한 조사 시험에 활용되고 있으며 반사체 영역에 있는 4개의 조사공(OR3~OR6)도 조사 시험에 활용되고 있다.

조사 시험 구분 및 이용 시설

연구로를 이용한 핵연료를 포함한 원자력 재료의 조사 시험은 조사 목적과 대상 연구로의 설비에 따라 매우 다양한 형태로 나눌 수 있다.

크게 요약하면 소규모지만 핵연료 또는 재료의 개발 초기 단계에서 수행하는 열전도도, 열확산 계수 및 원자재의 구조 안정성을 시험하는 기초 특성 시험, 후보 선정 재료의 부식 및 치수 안정도 등을 시험하는 재료 선정 시험, 시제품의 팽윤(swelling), 파손 저항성(failure resistance) 등을 시험하는 시제품 개발 시험, 최종 제품의 수명 및 전반적인 성능을 시험 평가하는 시제품의 종합 성능 검증 시험으로 나눈다.

이용 시설 또한 소규모로 다양한 조사 시험을 깊이 있게 할 수 있는 캡슐(capsule)과 리그(rig), 대규모로 개발 완료 전 단계에서 노내 실증

시험을 종합적으로 수행할 수 있는 루프(loop)로 나눌 수 있다.

이 중에서 캡슐은 조사 대상에 따라 재료 조사용과 핵연료 조사용으로 나눌 수 있으며, 조사중 조사 조건 또는 조사 시료의 특성들을 측정할 수 있는 여부에 따라 무제장과 계장 캡슐로 구분된다.

그리고 조사 목적에 따라 제약 조건이 있기는 하지만 조사 특성을 파악하기 위한 계장을 함으로써 재료 및 핵연료의 조사 특성 자료를 파악할 수 있다.

캡슐이나 리그에 설치 활용되고 있는 계장 기술로는 주로 단위 시험(separate test)에 걸맞는 시편의 온도 측정용 열전대, 시편의 최종 조사량 평가용 중성자 도시메타, 핵연료 핵분열 가스 압력 변화 측정용 LVDT, 중성자 속 분포 측정용 SPND, 시편의 변위 측정용 LVDT 등이 활용되고 있다.

그리고 루프는 종합 성능 시험(integral test) 능력을 갖고 있어 캡슐이나 리그보다는 대규모 시설로서 크게 핵연료 조사중 요구되는 상용로 가동 조건인 수화학 조건, 온도 및 압력 등을 종합적으로 제어하는 노외 공정 계통과 핵연료가 장입되어 연구로에서 조사되는 노내 시험부로 구분된다. 노내 시험부에도 다양한 계장 기술이 접목되어 활용될 수 있다.

국내외 조사 시험 현황 및 이용 기술

원자력 선진국에서는 연구로를 이용한 핵연료 및 원자로 구조재의시험은 주로 고중성자 환경하에서 일차 압력 경계 재료의 건전성 평가와 원전 핵연료의 신뢰성 및 안전성 입증을 위한 시험이 주로 수행되어지고 있다.

특히 일본·프랑스·미국·캐나다·노르웨이 등 여러 원자력 선진국에서 수행되는 시험은 다양한 형태의 시험 설비를 이용하며, 1960년대 이후부터 주요 조사 시험 기술 개발이 진행되어 소규모의 캡슐을 이용한 시험부터 종합 성능, 부하 추종 및 출력 급증 시험을 위한 루프 시험에 이르기까지 여러 종류의 시험 기술이 개발되어 활용되고 있다.

대표적인 프랑스 및 일본의 예를 들면 프랑스는 OSIRIS 연구로와 현재는 가동 중지되었지만 SILOE 연구로를 주로 이용하여 리그 등을 활용한 미래의 핵융합로 및 고속로 재료를 포함한 가압경수로용 핵재료의 검증 시험이 활발히 진행중이거나 진행되었다.

특히 고속 중성자 환경하에서 각종 계측 장비를 장착하여 원전 구조재의 신뢰성 및 안전성 향상 관련 시험을 수행하고 있다.

이와 관련된 주요 연구는 조사중 시편의 조사 성장·팽윤·크립 등 기계적 특성 등을 구명하는 연구이

〈표 1〉 캡슐 관련 시설/장비 기술 개발 내역

| 1994. 7. | | 재료 시험용 캡슐 개발 착수 |
|---------------|--|--------------------------------|
| 1994. 12. | | 재료 캡슐 모캡을 이용한 하나로 내 진동 시험 수행 |
| 1995. 7. | | 캡슐 고정 장치 개발 및 하나로 설치 |
| 1996. 1. | | 재료 캡슐 및 관련 장치 핵적·열적·기계적 해석 원료 |
| 1996. 7. | | 캡슐 조사 후 절단기 및 재료 시험용 무계장 캡슐 개발 |
| 1997. 7.~9. | | 재료 시험용 캡슐 제어 장치 개발 |
| 1997. 10.~11. | | 재료 캡슐 및 관련 시설 안전성 분석 |
| 1998. 3. | | 재료 시험용 계장 캡슐 하나로 내 설계 검증 시험 |
| 1999. 5. | | 핵연료 시험용 무계장 캡슐 개발 |
| 1999. 11. | | 하나로 이용 활성화 사업 착수(MOST) |
| 2000. 3. | | 핵연료 시험용 계장 캡슐 개발 착수 |
| 2001. 12. | | 실시간 시험용 크립 캡슐 개발 |

다. 이미 1960년대 중반부터 관련 기술 개발이 진행된 이래로 현재는 발전소의 가동 조건과 거의 흡사한 조건에서 완벽하게 수행할 수 있는 단계에 와 있다.

일본의 경우는 1965년에 재료시험로(JMTR) 건설에 착수하여 1970년 정상 가동되었고, 확보한 조사공을 이용하여 고속 증식로 재료, 개량로 재료 및 기존 발전소의 압력 용기 강재(pressure vessel)의 조사 시험, 노내 크립(in-pile creep) 시험, 흑연(graphite) 특성 시험 등의 조사 시험 수행에 필요한 각종 계측 기술들을 단계적으로 개발하여 사용하고 있다. 현재 60여개의 캡슐을 동시에 이용할 수 있으며, 대략 20여 개는 특수 계장을 하여 사용중이다.

국내의 조사 시험 기술 개발은 원자력구소의 표준형 계장 캡슐 기반 기술 개발을 시작으로 하고 있다고 보면 1994년 7월부터 착수하여 현

재는 소내에서 필요한 원자력 재료 및 핵연료의 조사 시험뿐 아니라 산업체나 학계에서 요청하는 조사 시험도 수행하고 있다. 현재까지 개발된 캡슐과 관련 시설/장비의 기술 개발 내역은 다음과 같다.

조사 시험 설비의 하나인 캡슐이란 연구로(예, '하나로')를 이용하여 원자력발전소의 안전성 확보에 가장 중요한 핵연료, 압력 용기 재료나 노심 재료들의 방사능 효과를 평가하여 물성 변화 등을 정확히 파악하는데 사용되는 것으로서, 발전소에서 사용중인 재료의 사용 환경을 부분적으로 재현해 줄 수 있는 장치이다.

이 장치는 '하나로'와 같은 연구로를 이용한 시험에 많이 이용되는 장치이며 그 주요 특성은 다음과 같다.

1. 재료 시험용 캡슐

하나로용 표준형 캡슐은 계장 및 무계장 캡슐이 개발되어 활용중이

다. 계장 캡슐의 총길이는 약 6m이며 캡슐 본체는 다단 온도 제어형으로 직경은 60mm이고 길이는 1m 정도이며, 캡슐 내부는 He 가스 분위기로 조절된다.

캡슐 본체 내부의 주요 계장으로는 14개 열전대, 4개 중성자 조사량 평가용 도시메타(fluence monitor), 5개 미니 히터(micro-heater) 및 1개의 가스관 등이 있다.

국내 최초의 조사 시험용 계장 캡슐인 97M-01K 캡슐이 1997년에 국내 기술로 설계/제작되어, 1998년에 하나로 중심의 CT 및 IR2 조사 공에서 성공적으로 조사 성능 시험이 수행되었다.

이를 바탕으로 한국중공업(주)에서 제작한 한국형 표준 원자로에 사용하는 압력 용기 재료의 조사 성능을 평가하기 위한 98M-02K 캡슐을 설계/제작하여 조사 시험이 수행되었다.

현재는 이 캡슐을 이용하여 가압 경수로용 압력 용기 재료인 SA508(용접재(weld material) 포함), SA533 재료, 가압 중수로인 CANDU 압력관 재료인 Zr-2,5Nb 및 상용로 구조 재료인 STS304, STS316, STS321, Cr-Mo Alloy 등의 조사 시험과 반도체, 자성재료, 특수 합금 재료(Zr-1Nb-1Sn-X 합금, Zircaloy-4, STS350, STS304, STS309)에 대한 조사 시험과 새로운 중성자 도시메타 개발

시험 등 대학의 기초 연구에 활용되고 있다.

2. 핵연료 시험용 캡슐

핵연료 무계장 캡슐은 현재 개발되어 이용자들에게 공개하고 있으나 계장 캡슐은 현재 개발중에 있다.

핵연료 캡슐은 연구로용 핵연료 집합체와 유사한 구조를 갖고 있다. 계장 및 무계장 캡슐의 차수는 다소 차이가 나지만 대략적으로 외경 56mm, 길이 960mm이며, 주요 구성은 조사 시험중 구조 진전성을 확보하기 위한 최외각의 Basket, 조사 시험용 핵연료 시료를 포함한 캡슐, 캡슐과バス켓(basket)과의 연결부, 또한 캡슐 제어 계통과의 연결부로 되어 있다.

현재 고려하는バス켓에는 적계는 3개의 핵연료 시험봉을 수용할 수 있고, 많게는 2단으로 6개까지 핵연료 시험봉을 장전하여 조사 시험할 수 있다.

국내 최초의 조사 시험용 캡슐은 1997년에 국내 기술로 개발되어, 1998년에 하나로 중심의 OR 조사 공에서 성공적으로 「핵 비화산성 건식 공정 산화물」 모의 핵연료 소결체 조사시험이 수행되었고 신형 핵연료 소결체에 대한 조사 시험에도 활용되고 있다. 현재 이를 바탕으로 계장 캡슐이 개발중이고 2003년도 경에 개발 완료를 목표로 하고 있다.

그 주요 내역은 핵연료 소결체 중

심 및 표면 온도 측정을 위한 기술(drilling/grooving), 조사 시험중 핵연료봉 내에 핵분열로 생성된 기체 압력 측정 기술, 조사 성장(irradiation growth)으로 인한 연신량 등을 실시간으로 측정하는 기술 등이 개발중이다.

주요 활용 분야로는 신형 경수로용 핵연료, 핵 비화산성 건식 공정 산화물 핵연료, 핵연료 첨가 재료 ($Gd_2O_3-TiO_2$, $Dy_2O_3-TiO_2$, U-Zr 합금 등)이다.

3. 특수 목적 시험용 캡슐

일반적으로 새로운 재료 및 핵연료의 개발에 따라 요구되는 시험, 즉 특수 목적 시험용 캡슐이다. 예로서, 조사중에 새로운 핵연료의 핵분열 생성물 방출 거동을 연구할 수 있는 캡슐(gas sweep capsule), 개량 재료의 조사 성장을 측정할 수 있는 캡슐, 새로운 재료의 변형 특성 시험용 크립 캡슐, 개량 핵연료의 출력 급상승(power ramp) 시험용 캡슐 등 다양한 목적을 구현할 수 있는 캡슐이다.

이번에 개발된 재료의 크립 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 캡슐도 이에 포함되며 이에 대한 상세 내역은 실시간 변형 특성 시험 기술 개발 내역에 기술한다.

4. 핵연료 검증 시험 설비 루프

핵연료 실증 시험이 주된 목적인

루프 설비는 상용 핵연료의 운전 조건에서 핵연료의 조사 거동을 모의 할 수 있는 대규모 시설로서 2001년 말부터 사업이 시작되어 진행중에 있다. 그러므로 이의 이용은 2005년경부터 국내에서 개발되는 상용로 핵연료 등의 시험에 활용될 예정으로 있다.

실시간 시험 기술 특성

캡슐을 이용한 조사 시험 기간은 이용자의 요구 조건에 좌우되지만 통상적으로 수리부터 수십개월 정도 걸린다.

주요 절차는 일차로 이용자의 조사 시험 목적, 조사 시료 특성, 조사 조건 등에 적합하게 캡슐을 설계·제작하고 이를 하나로 내 조사공에 장전하여 요구되는 기간 동안 중성자를 쪐 후, 이를 하나로 수조에 옮겨 작업이 가능한 정도의 방사능 준위로 떨어지도록 상당 기간(일 개월에서 수 개월) 동안 냉각하고, 이를 적당한 크기로 잘라 이송용 캐스크(cask)에 넣어 조사재 시험 시설로 옮긴다.

이어서 핫셀(hot cell) 내에서 이송된 캡슐을 절단 분해하여 캡슐 내부에 있는 시편과 중성자 모니터 등을 꺼내 핫셀에서 필요한 핵연료 및 재료 시험을 수행한다.

그러나 이번에 개발한 실시간 변형 특성 시험용 크립 캡슐은 종전의

캡슐 시험과는 달리 조사재 시험 시설로 보내지 않고 하나로 노심에 직접 장전된 상태에서 원자력 재료의 물리적 특성 변화를 측정함으로써 냉각 등의 절차를 거치지 않고 단시간에 실시간으로 변형량을 측정할 수 있도록 함으로써 기존의 것보다 재료의 특성측정에 있어 정밀도 및 현장성을 강화하는 획기적인 신기술이다.

실시간 변형 특성 시험 기술 개발

원자로용 핵연료 피복관 등의 노심 재료는 사용중에 조사 크립(irradiation creep)에 의하여 열화(degradation)되는 문제점이 있기 때문에 조사 크립 기구(irradiation creep mechanism) 규명 및 크립 거동 시험 평가를 위한 연구가 일부 원자력 선진국에서는 일부 수행되어 왔다.

조사 크립 시험 장치는 하중을 가하는 방법과 변형량을 측정하는 방법에 따라서 크게 기체 계기법(gas gauging technique)과 선형 이동 측정법(linear-motion-probe technique)으로 분류된다.

1. 기체 계기법(gas gauging technique)에 의한 기술

작은 노즐이 달린 압력관에 설치된 시편이 크립 변형될 때 발생한 압력 차이를 측정함으로써 크립 변형

량을 측정하는 방법이다.

영국의 SGHWR(Steam Generating Heavy Water Reactor)용 Zircaloy-2 피복관 조사 크립 시험을 위하여 1966년 개발하여 Harwell의 DIDO와 PLUTO 시험 용 원자로에서 단일축 방향으로의 조사 크립 연구가 성공적으로 진행되었다.

판상의 시편에 대하여 10~10~5/hr. 범위에 있는 크립 속도를 측정하는 데 용이하며 측정 장비가 방사선 조사(irradiation flux)에 영향을 받지 않기 때문에 측정 장치를 시편에 근접하여 설치할 수 있으며 조사중인 시편에 대하여 오차가 5% 이내로 측정이 가능하다.

그러나 크립 변형량이 큰 경우에는 보조 고압 응력 장치가 필요하며 판상 인장 시편이나 원통형의 피복관의 크립 변형을 측정하기에 어려움이 있다.

2. 선형 이동 측정법(linear-motion-probe technique)에 의한 기술

하중을 조사되는 부위에 시편을 장입하고 조사되는 부위에서 비교적 먼 곳에서 전동 모터와 나사축을 사용하여 기계적인 방법으로 시편에 하중을 가하고 시편 표면에 부착된 브리치 형태의 변형률 측정기(strain gauge)를 사용하여 변형량을 측정하는 방법이다.

하중을 가하여 주는 방법에 따라 수로형(channel type)과 벨로우(bellow) 방법이 있다. 수로형 크립 시험 장치(in-channel type irradiation creep tester)는 하중 전달 방식이 길이/직경 비가 큰 축을 사용하여야 한다.

시편의 재충전이 가능하며 원통형 시편의 조사 크립 시험 장치는 프랑스에서 1976년 개발되었다. 이들의 조사 크립 시험의 결과는 측정된 값이 시편 자체의 크립 변형량 외에도 그립(grip)이나 하중을 가하는 부위가 조사에 의한 변형이 발생하여 전체 측정치에 많은 오차를 주고 있다고 보고되어 있다.

그러므로 인장 하중을 압축 하중으로 변환시키는 특수한 그립(grip)을 설계 제작하여 인장 시험 장치를 활용한 압축 시험 장치를 사용하고 있다.

이번에 국내에서 개발된 크립 캡슐 설계에는 조사 크립 시험 장치가 시편의 크기·모양·하중을 가하는 방법 및 변형량 측정 방법에 따라 고유의 설계 및 제작을 수행할 필요가 있음을 확인하여 선형 이동 측정법을 적용하였으며, 원자력 선진국들의 캡슐 이용 기술에 대한 상세한 검토를 통하여 개발하였다.

조사 크립 시험 장치는 크게 하중을 유도하는 부품(load induced unit), 하중을 가하는 부품/loading unit), 시편을 지탱하는 부품

〈표 2〉 KAERI가 개발한 조사 크립 시험용 캡슐 주요 설계 사양

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| 장치 구성 | 시편지지부, 하중 전달부, 변형량 측정부, 제어부 |
| 사용 재료 | SUS 316, SUS 304, Al, silicon carbide |
| 본체 규격 | 직경 56mm, 길이 ~ 1m |
| 최대 변형량 측정 | ~20mm |
| 기동 온도 | ~500°C |
| 최대 부과 응력 | 250 MPa |

(specimen holding unit), 조사 크립 변형량 측정 부품(irradiation creep deformation measuring unit)으로 구분되도록 설계하였다. 특히 크립 시험 장치의 예비 설계에서는 원자력 선진국에서 수행한 조사 크립 시험 방법을 조사하고 조사 시험 장치의 설계 특성을 검토함으로써 하나로에 적합한 조사 시험 장치를 선정하였다. 또한 적용 기술에 대한 검증을 위하여 모의 조사 크립 시험장치를 제작하여 노외 성능 평가하여 설계 개선을 수 차례 하였다.

조사 크립 변형량의 측정이 용이 하며 다양한 시편에 적용할 수 있도록 부품을 설계 제작하고, 하중은 전기적 구동 장치에 의하여 기계적 방법으로 헬륨 가스압을 조절해 하여 선형으로 전달되며 시편은 중성자속이 가장 큰 부위에 장입되도록 하였고 크립 변형량은 브리지형(bridge type)으로 된 변형량 측정기로써 측정되도록 하였다.

우리가 개발한 조사 크립 시험용 캡슐의 주요 설계 사양은 다음과 같

다.

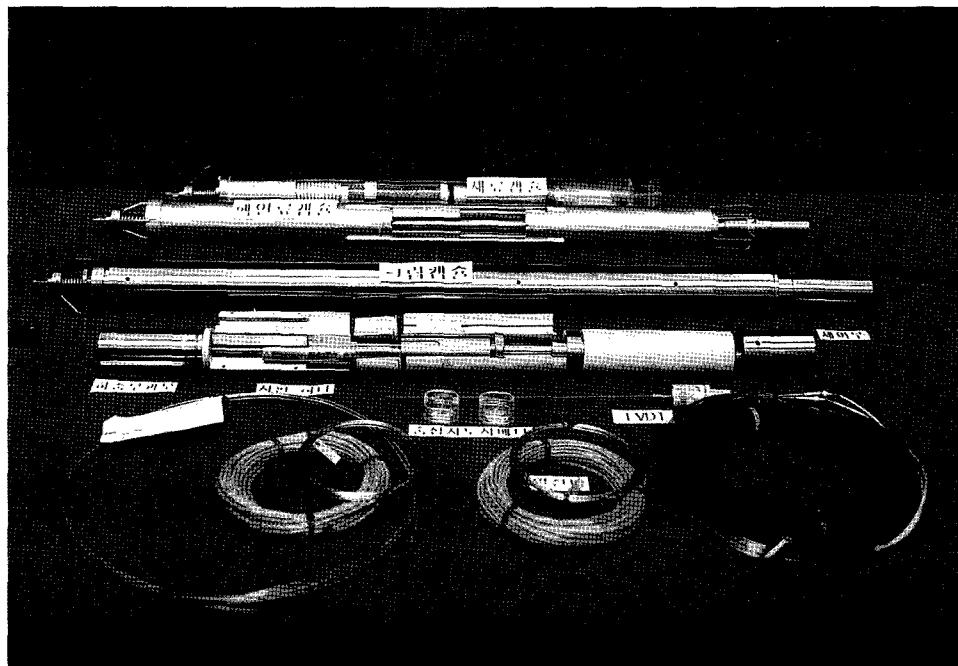
캡슐은 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 크게 압력 부과 용기, 본체 용기와 연결 용기로 구성되어 있다.

압력 부과 용기는 고압의 헬륨(He) 기체가 압력 용기(pressure chamber) 내에 설치된 벨로우즈(bellows)를 축소시켜서 이음쇠(yoke)를 이동시키도록 고안되어 있다.

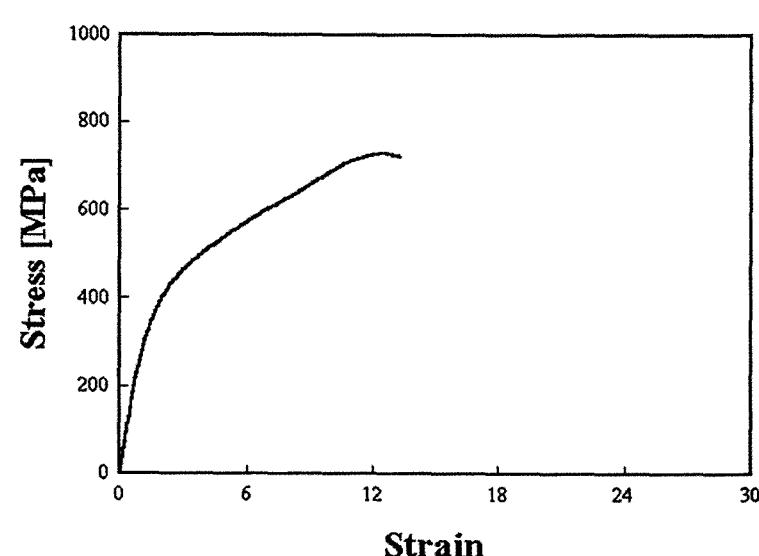
본체 용기는 시편이 장착되는 곳으로써 압력 용기로부터 전달된 하중이 전달축(pull rod)을 통하여 그립(grip)에 연결된 시편(specimen)에 하중을 전달하도록 설계되어 있다.

변형량 측정 부위는 시편이 크립 변형에 따라서 늘어난 변위를 상부 이음쇠(upper yoke) 상단에 연결된 전달축을 통하여 연결 용기에 장착된 선형 전위 차등 변압기(LVDT)에 전달되고 이것의 전기적 신호를 정량화하여 시편의 변위를 측정할 수 있도록 고안되었다.

연결 용기에는 선형 변위 차등 변환기가 장착되어 있으며, 시편의 파



〈그림 1〉 크립 캡슐



〈그림 2〉 핵연료 피복관 재료의 응력-변형량 곡선

손에 따른 충격을 완화하기 위하여 스토퍼(stopper)와 압력관·열전대·전선 등의 분리를 위한 분리기 가 장착되었다.

대부분의 소재는 중성자 조사 조건과 고온 내식성을 고려하여 스테인리스 강을 사용하여 제작하였으며 발열체는 탄화 규소를 사용하였다.

제작된 캡슐의 노화 성능 시험은 핵연료 피복관을 이용하여 300°C에서 가스압에 의하여 크립 변형시키고, 시험중에 측정된 온도 변화와 응력-변형률 곡선의 측정으로 수행되었다.

제작된 캡슐을 사용하여 수행한 시험 결과는 〈그림 2〉와 같다. 표준

인장 시험기를 사용하여 응력-변형 량 곡선을 시험하여 비교한 결과, 재료의 항복 강도와 최대 인장 강도는 변형 속도에 의존하는 현상을 고려 한다면 크립 캡슐에서 얻은 응력-변형률 값은 유사한 값으로 확인되었다.

연구 개발 결과에 대해 국내 특허 출원을 마쳤으며, 미국 특허를 준비 중이고, 관련된 연구 논문은 국내외에 7편을 포함하여, 원자력 분야의 전문 학술 회의인 원자력기술구조역학 학술대회(SMiRT) 등에 발표하여 그 우수성을 확인받은 바 있다.

향후 전망

원자력발전소에서 사용중인 재료 중 중성자 조사에 의한 열화로 재료의 수명에 문제가 되는 것은 크게 경수로 압력 용기, 노내 구조물, 중수로 압력관 재료 등이다. 그러므로 발전소의 안전성 확보는 이들 재료의 정확한 전전성 평가에 달려 있으나 그간 우리 나라는 이들 시험 및 평가를 외국에 의존해 왔다.

그러나 하나로가 정상 가동됨과 이와 더불어 조사 후 시험 시설이 완료되어 있어, 앞으로 막대한 외화 절약과 함께 우리 문제를 국외에 의존하지 않고 우리 능력으로 평가할 수 있게 된다.

이번에 개발된 크립 캡슐을 이용하여 원자력발전소의 재료 특성을

보다 정확히 파악, 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라 향후 개발코자 하는 차세대 원자로 및 SMART 원자로 등의 원자력 재료의 특성 자료 확보에도 기여가 될 것으로 전망된다. 특히 이번 기술을 토대로 하여 재료의 균열 거동 등 보다 넓은 조사 시험을 수행할 수 있게 되리라 본다.

핵연료 계장 캡슐 기술은 현재 원자력 중장기 사업으로 진행되고 있으며, 필요한 핵연료의 조사 특성 및 성능 자료를 확보하기 위한 노력이 2003년도까지 진행될 예정이다.

또한 이미 개발된 무계장 캡슐 기술의 성능 향상과 시험봉에 접목되는 계장 기술 개발도 진행중이어서 명실공히 원자력 선진국 진입을 눈앞에 두고 있다.

이와 더불어 캡슐 개발에서 확보한 in-situ 측정 기술들을 이용하면 핵연료 소결체와 피복관 내 온도, 핵분열 기체 생성에 의한 압력, 소결체 및 피복관 변형 등을 실시간으로 측정 재료 및 핵연료 개발자들이 필요 한 자료를 적기에 확보할 수 있게 된다.

이외에도 핵연료 조사 시험용 루프 개발 계획이 수립되어 진행중이며 2005년경에 하나로에 설치되면 현재 개발중인 핵연료 인허가에 필요한 검증 자료는 물론 중요 노내 재료의 확보가 가능하다고 본다.

한편 연구로의 이용 활성화를 위하여 1999년도부터 산·학·연 외

부 이용자들 중심으로 「이용자협의회」가 구성되어 운영중에 있고 이산하에 6개의 「전문연구회」도 운영 중이다.

이 협의회를 통하여 국가 대형 기반 연구 시설인 하나로의 효율적 이용과 연구로 이용에 관한 이용자 상호간의 기술 교류 및 정보 교환을 통하여 관련 분야의 학술 발전과 기술 진흥 도모를 위한 제반 활동의 활성화를 이루게 된다.

더욱이 1999년도부터 국가 원자력 기반 확충 사업의 일환으로 「하나로 공동 이용 지원 사업」도 진행 중이며 산·학·연 외부 이용자들이 원하는 기초 연구 등을 할 수 있다(매년 4월경 공모되어 6월부터 연구 착수).

조사 시험 기술의 장래는 요즈음 각광을 받는 NT(나노테크놀로지 ; 머리카락 굽기의 10만분의 1 수준인 10억분의 1m라는 극미세를 제어하는 기술) 분야에도 활용될 수 있다.

예를 들어 중성자를 이용하여 재료의 미세 구조를 제어하여 기존의 화학 공정에 의하여 제작하던 반도체보다 양질의 반도체를 생산할 수 있다.

이외에도 산업체 등에서 필요한 전자 재료 화학 기계 의학 등 광범위한 분야에서 기술 혁신을 가져와, 새 천년 과학 기술의 주도권 확보에 기여할 수 있으리라 전망된다. ☈