

조사재시험시설 핫셀에서의 원자로 감시시편 시험기술개발

안상복, 이기순, 박대규, 주용선, 김병철

한국원자력연구소

요 약

원자로 압력용기는 운전기간 동안 중성자 조사에 따른 재료의 기계적 성질이 변화되므로, 용기의 건전성 유지여부를 평가하기 위하여 조사시편을 이용한 주기적인 감시시험이 요구된다. 그러나 감시시편은 방사성 물질로서 일반 환경조건에서 시험이 불가능하다. 따라서 국내의 자력기술로 완공된 조사재시험시설의 핫셀 내에서 감시시험의 주요항목인 온도감시자, 충격, 인장, 파괴인성, 그리고 성분분석 등에 대한 시험을 수행하기 위하여 관련된 규정에 적합하도록 장비 및 시험 평가기술을 개발하였다.

1. 서 론

원자로 압력용기 노심대재료(beltline materials)는 가동 중에 높은 에너지를 갖는 속중성자($E > 1.0\text{MeV}$)와의 충돌로 격자원자가 이동하여 원자공공, 격자간 원자, 불순물 원자 등이 생성되어 조사 취화 및 경화 현상이 발생된다.¹⁾ 따라서 발전소의 수명 말기까지 압력용기의 기계적 건전성을 평가하기 위하여 감시용 시편을 용기의 내부에 설치한 후, 가동년수에 따라 적절한 시기에 시편을 인출하여 일련의 감시시험을 실시하도록 규정하고 있다. 미국의 경우 USNRC 10CFR50, Sec. 50.55a, App. G 및 H등의 법률에 따라 ASME code Sec. III & XI, Reg. Guide 1.99 Rev.2, Standard Review Plan 5.3.2등의 평가지침과 ASTM E185-82의 시험 표준 등을 적용하여 감시시험을 수행한다. 국내에서는 원자력법 시행령 제 70조에 따라 여러 관련 시험규정을 기초하여 과학기술처 고시 제 92-20호인 원자력 압력용기 감시시험 기준에 따라 시험을 수행토록 규정하고 있다.

원자로 노심 외곽의 중성자 차폐벽에 부착된 감시시편은 원자로의 운전 시에 발생된 각종 방사선의 조사로 인하여 방사화 되므로, 각종 시험을 위하여 적절한 방사선차폐가 가능한 핫셀 등의 공간이 요구된다. 따라서 핫셀 내에서 감시시험을 수행하기 위하여 감시캡슐의 이송 및 해체, 인장 및 충격시험, 성분분석, 그리고 온도감시자 검사 시험을 위한 일련

의 핫셀용 장비 및 시험기술을 개발하여 국내의 원자력 발전소에서 인출되는 압력용기의 감시시험에 적용하였다.

2. 감시시험 기술 개발

감시시험 캡슐은 발전소의 저장조에서 수송용기에 장입하여 조사재시험시설의 수조 내로 운반한다. 캡슐은 수조에서 수송용기로부터 인출하고 핫셀 내로 이송하여 해체한 후, 시편을 분류한다. 이중 온도감시자는 고 배율의 하이스코프 시스템을 이용하여 검사되며, 중성자 선량 감시자는 별도의 화학분석을 실시한다. 기계적 특성을 파악하기 위한 충격/인장/파괴인성 시편은 핫셀 내에 설치된 충격 및 인장시험기를, 그리고 성분분석은 차폐형 극미세 성분분석기(shielded EPMA)를 이용하여 시험을 실시한다. 상기의 과정에 따라 수조 및 핫셀 내에서 시편의 이송과 핫셀 내에서 시험순서의 모식도는 그림 1과 같다.

가. 캡슐의 수송 및 핫셀 내 인입

감시시편 캡슐은 다량의 방사선을 방출하므로 차폐납 두께 80~106mm의 A-type의 수송용기를 제작하여 발전소의 저장풀에서 조사재시험시설의 수조로 캡슐을 운반하는데 이용하였다. 수송용기는 제작 시에 관련 규정에 의거하여 방사선 누설시험, 살수시험, 자유낙하시험, 수압시험을 실시하여 성능을 입증하였다. 캡슐을 장입하기 위한 내부는 직경 147.4mm, 높이 1626.5mm의 원통형 공간으로 설계되었으며, 내부 공간 내에 캡슐을 고정하기 위하여 상 하단에 그리드 및 스프링을 설치하였다. 수조 내에서 작업 중 내부공간으로 인입된 물을 외부로 방출하기 위한 배출구를 하단부위에 별도로 설치하였다. 시험시설의 수조 내에서 수송용기의 상단부위에 설치된 고정볼트를 해체한 후, 캡슐을 인출하여 수조와 핫셀의 연결통로인 사진 1의 bucket elevator 시스템을 이용하여 핫셀 내로 인입하였다.

나. 캡슐의 해체 및 시편의 분류

핫셀 내로 인입된 캡슐은 M2 핫셀 내에 설치된 캡슐절단기를 이용하여 해체하였다. 캡슐 절단기는 엔드밀 형태로 제작하여 캡슐면의 중앙에 위치한 용접부위를 절삭하는 방법으로 해체하였다. 절삭 시에 엔드밀은 600rpm의 회전수로 이송속도는 10mm/min 내외로 조정하여 운전하였다. 해체 후에 캡슐내의 배열된 각종 시편은 방사선 선량분석시편 및 온도감시자시편을 먼저 인출한 후, 인장, 충격, 파괴인성 시편은 핫셀 내에 설치된 감시카메라를 이용하여 시편에 표기된 시편의 고유번호를 확인하면서 분류하여 인출하였다.

다. 온도감시자 검사

온도감시자(thermal monitoring materials)는 2 종류로서 Pyrex관속에 밀봉되어 캡슐의

spacer 속에 내장되어 있다. 하나는 Ag-Pb-Sn 공정합금으로 용점이 304℃내외이며 다른 하나는 용점이 310℃로서 원자로의 최대 운전온도를 평가하기 위한 기능을 갖는다. 온도감시자의 검사는 핫셀 내에 설치된 하이스코프 시스템으로, 최대 600배율로 관찰하여 감시자의 용융 여부를 검사하여 원자로 운전 시에 규제된 최대온도의 도달여부를 판별하였다.

라. 충격시험

충격시험은 미국 10CFR50, Appendix G 및 H 와 ASTM E185-82 및 과학기술처 고시 제 92-20호에 의거하여 각 시험편의 채취 위치별로 완전한 충격곡선(full Cv-Curve)을 얻을 수 있도록 핫셀 내에서의 시험절차서를 개발하여 실시하였다. 장비는 Tinus Olsen Model 84(41.5kgf·m, 5.47m/sec)의 충격시험기를 핫셀용으로 개조하여 사용하였으며 설치 형상은 사진 3과 같다. 시험기의 striker tup에 계장화 장치를 부착하여 시간에 따른 흡수에너지(E_D)와 하중이 자동으로 컴퓨터에 입력되어, 총체적인 항복하중(P_{GY}) 및 시간(t_{GY}), 그리고 최대하중(P_M)과 최대하중에 이르는 시간(t_M)등을 결정할 수 있다. 시험 시에 온도 조절된 시험편을 원격으로 최단시간에 anvil에 장착하기 위하여 특수 고안된 bath를 이용하였다. 충격시험 후 ASTM A370-92에 따라 전단파단율(percent shear)은 파단면 사진에서 벽개 파단 부위의 폭과 높이로부터 결정하였으며, 횡팽창량은 다이얼 게이지를 이용하여 압축부위의 시험편 폭의 증가량을 측정하여 구하였다. 시험온도의 변화에 따른 흡수에너지, 횡팽창량, 전단파단율의 변화곡선은 hyperbolic tangent curve fitting 용 프로그램인 CVGRAPH Ver. 4.1을 이용하여 구하였다..

마. 인장시험

인장시험은 과학기술처 고시 제 92-20호 및 ASTM E185-82, E8-93 및 E21-92에 근거하여 만들어진 시험절차서를 개발하여 수행하였다. 시험장비는 핫셀 용으로 특수 제작된 Instron Model 8502를 이용하였으며 장비의 설치모습은 사진 2와 같다. 시험 중에 변형량(extension)의 측정은 핫셀 내에서 원격조종기를 이용하여 시험편에 탈·부착이 용이하도록 개발한 수냉식 변위게이지를 이용하였다. 시험편의 온도조절은 K-Type 열전대를 부착된 온도범위 -150~350℃의 강제 순환식 챔버를 이용하였으며, 시험 시에는 규정온도에서 최소 30분 이상의 holding time을 유지하였다. 시험온도는 ASTM E185-82, 9.1.2.2항에 의거하여 288℃의 운전온도, 충격시험으로부터 얻어진 천이곡선의 중간온도와 상온 또는 천이곡선의 하단부의 온도에서 각각 실시하였다. 시험속도는 0.006"/min의 변위 제어로 수행하였으며, 시험기 제어 및 시험 결과의 평가는 전용 프로그램인 Series-IX을 이용하였다. 아울러 시험 시에 Yokogawa 3023/F의 X-Y 레코더를 이용하여 별도의 아날로그 신호를 기록하였다.

인장시험의 결과로부터 항복강도(0.2% offset), 인장강도, 파단하중, 파단강도, 파단응력,

일정변위를, 최대변위를 및 단면감소율을 구하였다. 특히 단면 감소율의 측정은 하이스코프와 X-Y hair generator을 결합한 시스템을 이용하여 측정하였다.

바. 성분분석

재료의 조성성분이 조사취화에 미치는 영향을 분석하고자 Reg. Guide 1.99, Rev. 2, C1항에 따른 Cu와 Ni의 양에 의한 chemistry factor(CF)를 구하기 위한 성분분석을 실시하였다. 시편은 핫셀 내에서 충격시편의 일부를 미세 절단하여 마운팅을 실시하여 연마한 후, silver paint를 이용하여 시편과 마운트를 접지하는 방법으로 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 사진 4의 차폐형 EPMA로 이동하여 장착한 후, 시편 당 최소 30 부위에서 Cu와 Ni을 비롯한 각종 성분원소의 무게비율을 분석하였다.

사. 파괴인성시험

충격 및 인장시험의 결과의 규제조건으로 10CFR50, Sec.50.55a, App. G&H에서는 발전소의 수명 말기까지 최대흡수에너지(USE)가 50ft-lb이상일 경우에는 용기의 취성 파괴가 발생치 않는다고 판단한다. 이의 규제조건을 만족시키지 못하거나, 용기의 건전성을 보다 신빙성있게 평가해야 할 경우에 정량적인 파괴 인성시험을 수행하는데 사용하고자 현재 파괴인성시험은 유보되고 있다. 따라서 핫셀 내에서는 필요시 WOL이나 1/2" CT 시편을 대상으로 시험을 수행할 수 있도록 관련 기술을 확보 중에 있다.

아. 시험 후 시편의 보관

각종 시험 후에 파단된 시편 및 파괴인성 시편 그리고 일부 여분의 시편은 향후 소형 시편 및 재조립 충격시편 시험기술과 파단 면에 관한 연구 등을 위하여 한국원자력연구소내의 고 준위 폐기물저장소에 보관하고 있다.

3. "A" 발전소의 감시시험 결과

"A" 발전소를 대상으로 수행된 금번 4차 시험과 이전에 실시된 비 조사재 및 1, 2, 3차의 시험결과를 중성자 조사량에 따른 기계적 성질 및 화학성분의 변화를 검토하였다. "A" 발전소의 용기재료는 SA533-B-1으로 국내발전소에서 널리 사용되고 있다. 한편 중성자 조사량은 USNRC Reg. Guide DG-1053에 의한 새로운 해석기법으로 구한 값을 사용하였다.

인장시험과 충격시험으로부터 얻어지는 대표적인 시험결과는 그림 2, 3의 선도이다. 인장시험에서 항복강도와 인장강도는 그림 3에서와 같이 중성자의 조사량이 누적됨에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 압력용기강에서 나타나는 전형적인 조사강화 현상으로 고찰된다. 한편 그림 5에서 총 연신율은 조사량이 증가됨에 따라 감소하는 경향을

나타내었으나 그 변화량의 크기는 적었다. 이는 중성자 조사에 의하여 재료의 취성이 증가함에 따라 균일 및 총 연신율의 감소가 발생된 것으로 고찰된다. 한편 조사효과는 충격인성의 감소와 연성취성 천이온도(DBTT)의 상승으로 나타나는 취화 현상을 충격시험의 결과에서 관찰할 수 있다. 그림 6은 충격시험을 통하여 얻어진 결과 중에서 중성자의 조사에 따른 USE(Upper Shelf Energy)의 변화를 나타내었다. 일반적인 기대와는 달리 USE의 감소를 보여 주지는 않고 오히려 일부의 증가현상을 보여주기도 하였다. USE의 절대치의 크기는 열영향부위, 길이방향, 단면방향 및 용접부위의 순서로 나타났으며, 모두 규제치인 50 ft-lb 이상의 값을 나타내었다. 성분분석의 결과 중에서 Copper와 Nickel의 조성비(wt%)의 변화를 고찰한 그림 7에서 조사량의 누적에 따른 조성비의 큰 변화는 관찰되지 않았다.

4. 결 론

가. 국내 자력기술로 완공된 조사재시험시설의 핫셀 내에서 원자로 감시시험을 수행하기 위하여 관련된 시험캡슐의 취급 및 해체, 온도감시자 용융검사, 충격시험, 인장시험, 성분분석시험을 위한 관련장비 및 시험기술을 개발하였다.

나. "A"발전소의 감시시험결과를 검토한 결과 속중성자의 조사량이 누적됨에 따라 조사 강화 및 취화 현상에 의한 기계적 성질의 변화가 관찰되었으며, 재료의 화학성분의 조성비(wt%)는 큰 변화는 없었다.

참고자료

1. 이기순 "핵연료/재료 조사공학" 1997, 문경출판사
1. "A"발전소 원자로 압력용기재료 제1차 감시시험 결과보고서, 1984, 한국에너지연구소
2. "A"발전소 원자로 압력용기재료 제2차 감시시험 결과보고서, 1988, 한국에너지연구소
3. "A"발전소 원자로 압력용기재료 제3차 감시시험 결과보고서, 1993, 한국원자력연구소
4. "A"발전소 원자로 압력용기재료 제4차 감시시험 결과보고서, 1997, 한국원자력연구소
5. 조사재시험시설 운영보고서, 한국원자력연구소 KAERI/MR-300/97

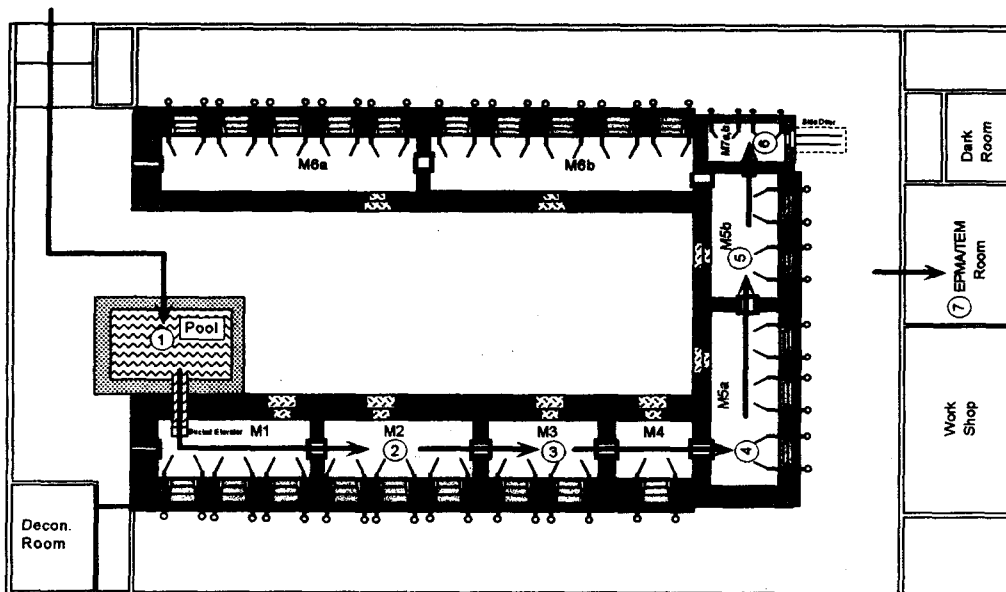


Fig. 1 The test flow layout of surveillance specimens in IMEF

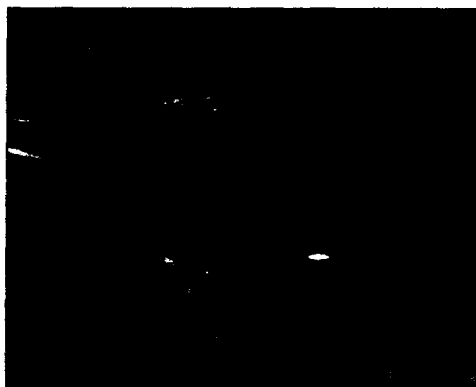


Photo 1 Bucket Elevator System in Pool

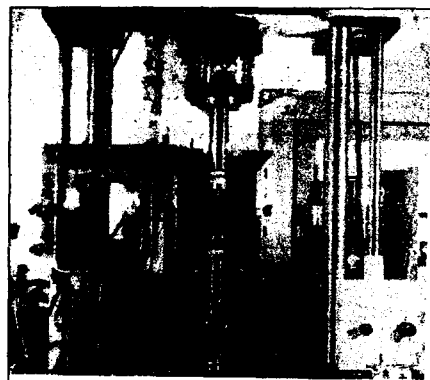


Photo 2 Tensile test machine in hot cell

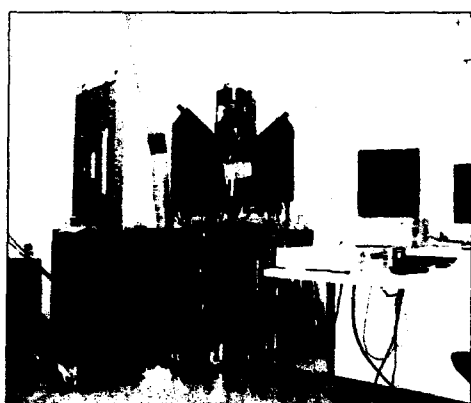


Photo 3 Shielded EPMA



Photo 4 Impact test machine in hot cell

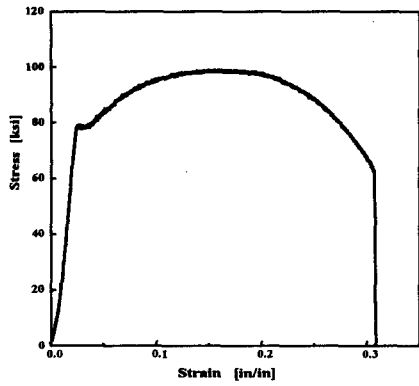


Fig. 2 Typical stress-strain curves from tensile test

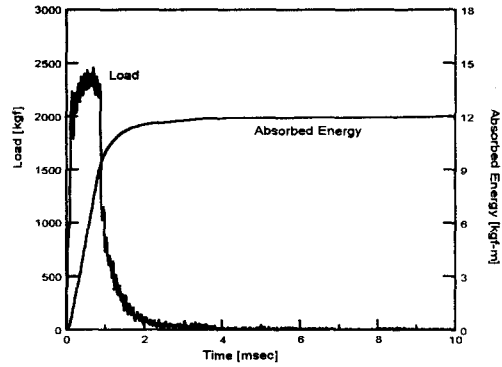


Fig. 3 Typical load-energy-time curves from impact test

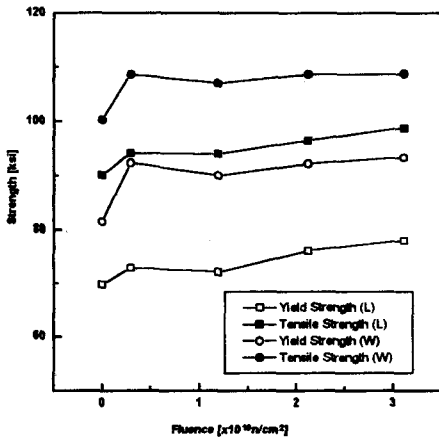


Fig. 4 The trend of strength changes with fluence

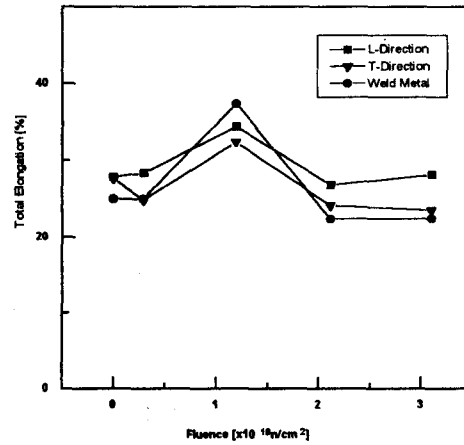


Fig. 5 The change of total elongation with fluence

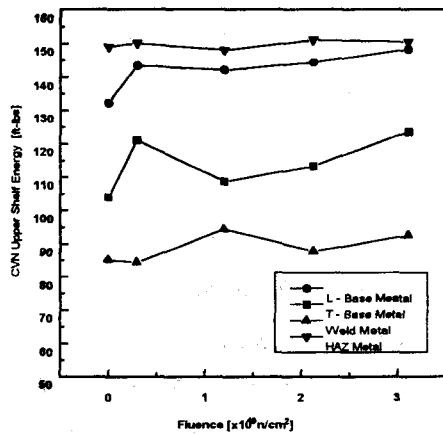


Fig. 6 The change of CVN USE with fluence percent

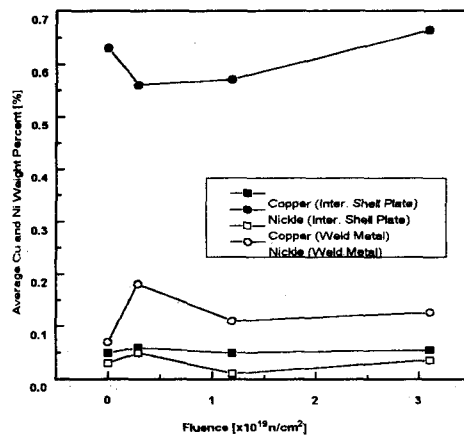


Fig. 7 The change of Ni and Cu weight with fluence