

‘98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 원자로 압력용기 감시시험용 충격시험시스템 구축

주용선, 박대규, 안상복, 홍권표, 이기순

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

원자로 압력용기 재료로 사용되고 있는 ASTM SA508 및 SA533 계열의 재료는 결정구조가 체심입방격자(bcc)로서 시험온도별 최대흡수에너지(USE)에 대한 선도를 그리면 고온에서는 연성이 크고, 저온에서는 취성이 큰 전형적인 "S"자 형태의 Cv-천이온도곡선으로 나타난다. 그리고 조사전과 조사후의 연성-취성천이온도곡선을 흡수에너지값이 30ft-lb 또는 50ft-lb인 지점에서 비교해보면 재료의 조사취화(radiation embrittlement)현상으로 온도가 높은 쪽으로 이동됨을 알 수 있으며, 이러한 온도의 이동값은 원자로의 운전수명과 밀접한 관련이 있다. 따라서 조사전후의 흡수에너지값에 따른 온도변화량을 정확하게 산출하기 위해서는 시편의 온도를 조절하는 장치 및 시편을 아주 짧은 시간내에 충격시험기의 엔빌까지 장전하는 장치 등의 충격시험시스템 구축은 매우 중요하다. 이에 조사개시시험시설(IMEF)에서는 원자로 압력용기 감시시험에 대한 충격시험시스템을 구축하였고, 이의 내용은 감시시험 수행에 기준이 되는 ASTM E185-82 및 과학기술처 고시 제 92-20호의 세부내용을 충분히 만족시키는 것으로 확인되었으며, 이렇게 확인된 내용들은 현재 국내에서 수행되고 있는 감시시험에 적극적으로 활용되고 있다.

### 1. 서 론

각국의 규제기관에서는 원자로 압력용기의 중성자 조사에 따른 기계적 성질의 변화를 원자로 압력용기의 수명말기까지 정기적으로 감시 및 평가하는 감시시험(surveillance test)을 수행토록 관련된 규정을 제정하였다<sup>[1,2,5,6]</sup>. 이는 약  $1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ 의 속중성자( $E > 1.0 \text{ MeV}$ )조사로 인한 재료의 조사취화현상을 수시로 감시함으로써 원자로의 수명연장 뿐만 아니라 원자력계통에 사용되는 재료의 안전성을 확보하기 위함이다. 국내의 경우 원자로 압력용기의 감시시험은 ASTM E185-82 및

과학기술처 고시 제 92-20호에 의해 수행되며, 시험항목은 원자로 운전 온도 측정, 중성자량 측정, 충격, 인장 및 화학 조성 분석 시험으로 구분된다.

충격 시험은 감시 시험 중에서 가장 핵심적인 시험으로 용기 재료 및 용접재의 조사 전후에 대한 연성-취성 전이 온도 곡선으로부터 중성자 조사에 의한 용기의 기계적 성질의 변화량을 확인함과 동시에 인장 시험의 시험 온도를 설정한다. 특히 원자로 압력 용기 제작에 사용된 재료는 고온에서는 연성이 크고, 저온에서는 취성이 큰 전형적인 "S"자 형태를 나타내고 있어 단열된 형태의 용기를 사용하여 시험의 시험 온도를 조절하고 일정 시간 동안  $\pm 1^\circ\text{C}$  범위 내에서 유지할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다.

속중성자에 조사된 충격 시험편은 높은 방사능을 갖고 있기 때문에 이의 취급 및 시험은 반드시 방사선 차폐가 된 핫셀에서 시험이 행해져야 함<sup>[78]</sup>은 물론 ASTM E23-94 규정에서 정의하는 시험편의 파단 시간은 시험편이 시험 온도 조절 장치로부터 충격 시험기의 엔빌에 장전된 후 타격할 때까지 5초 내에 이루어져야 하는 조건을 만족시켜야 한다<sup>[34]</sup>. 따라서 시험 온도 조절 장치인 냉각/가열 겸용 로와 시험이송 장치 등을 개발하여 핫셀 내에서 감시 시험의 충격 시험이 가능하도록 충격 시험 시스템을 구축하였다.

## 2. 본 론

충격 시험은 중성자 조사로 인한 재료의 물성치 중 각각의 시험편에 대한 최대 흡수 에너지를 획득한 후 이를 조합하여 전형적인 형태의 연성-취성 전이 온도 곡선을 획득하는데 그 목적이 있다. 최대 흡수 에너지, 횡팽창량, 파면을 및 파면 사진 등의 시험 자료를 획득하기 위해 충격 시험기, 자료 처리 시스템, 시험 온도 조절 장치, 시험이송 장치, 횡팽창량 측정 장치 및 파단면 촬영 장치 등으로 충격 시험 시스템을 구성하여 그림 1과 같이 설치하였고, 각 구성품의 개조된 세부 내용은 다음과 같다.

### 가. 충격 시험기 및 자료 처리 시스템

시험 용량 300ft-lb, 햄머 중량 60lb인 Tinius-Olsen사의 Model 84를 핫셀용으로 사용할 수 있도록 일부분을 개조하였다. 시험 기기가 안치되는 바닥 부분에는 재질이 탄소강이며 두께가 150mm인 철판을 사용하였다. 시험 기기의 햄머를 원격으로 자유 낙하시키기 위해서 수동 낙하 손잡이에 햄머 낙하 제어기를 설치하여 작업 구역에서 원격으로 조작할 수 있도록 하였고, 낙하된 햄머를 강제로 빠른 시간 내에 멈출 수 있도록 한 햄머 멈춤 장치와 다시 햄머를 걸쇠에 장착하기 위한 전기 구동 모터를 사용하였다. 시험 전 기기의 교정(calibration) 및 시험편 파단 후의 충격 흡수 에너지 값을 작업 구역에서 작업자가 용이하게 획득 및 확인할 수 있도록 디지털 표시기와 시간별 하중의 변화 값을 획득하기 위한 측정 최대 용량이 10,000lb인 응력 변형 게이지를 텅(tup)에 설치하였다.

텅 및 햄머에 장착되어 있는 변형 게이지 및 플래그(flag)로부터 햄머의 낙하 속도 및 시간별 하

중의 변화값을 획득 및 처리하는 dynatup GRC 730 Data Acquisition System을 사용하였다.

#### 나. 시편온도 조절장치

원자로 압력용기 재질은 시험온도에 따라 최대흡수에너지가 현격하게 변화하는 재질이기에 때문에 조사전후의 연성-취성전이온도곡선을 정확하게 구하기 위해서는 시편온도를 시험온도에 맞도록 조절 및 유지할 수 있는 장치가 필수적이다. 일반실험실에서는 조(bath)를 사용하여 시편의 온도를 맞추어 사용하고 있으나, 폐쇄된 공간인 핫셀내에서 원격조작기로 사용하기에는 많은 문제점이 도출된다. 그래서 형상이 200mmW x 200mmH x 300mmL이고, 시험온도 범위가 -150℃~+300℃이며, 외부로부터 공기유입을 억제하고 내부온도를 유지하도록 세라믹계통의 단열재를 외부에 설치한 별도의 냉각/가열 겸용로를 제작하였다. 장치 내부에는 시편의 인입을 위한 인입안내관을 설치하고, 인입안내관 하단에 시편의 고온 가열을 위한 100~300W인 가열코일을 설치하였으며, 인입관 상단에는 시편의 저온 냉각을 위해 스테인레스강으로 제작된 냉각코일을 설치하였다. 로내의 온도측정을 위해 Pt 100-φ3.2 열전대를 설치하였고, ASTM E23-94에서 요구하는 온도 변화값을 ±1℃가 되도록 온도를 정밀하게 조절하는 저온온도조절기 및 상온온도조절기를 각각 사용하여 작업구역에서 조작할 수 있도록 하였다. 그리고 다음과 같이 시편온도 조절장치의 성능을 시험하였다.

##### (1) 온도조절용 냉각/가열 겸용로의 냉각/가열능력

핫셀내 설치후 로의 냉각 및 가열능력을 시험하였고, 그 결과들 그림 2에 각각 나타내었다. 시험결과 상온에서 -150℃까지 도달하는 시간은 약 30분, 상온에서 +300℃까지는 가열히터의 위치를 중간정도에 위치시켜 놓고 시험한 결과 약 60분 소요됨을 알 수 있었다.

##### (2) 특정온도에서의 안전성

로내 시험편의 온도가 특정온도하에서 시간의 경과함에 따라 특정온도의 지속성 여부를 측정한 결과 ±1℃범위내에서 변동하고 있음을 확인하였다.

##### (3) 특정온도에서의 시편의 로외 방출시 시편의 온도변화

ASTM E23-94에서는 냉각 또는 가열된 시험편이 엔빌에서 파단될 때까지 약 5초 이내에 수행되어야 한다고 규정하고 있어 열전대를 시험편의 중앙부 및 표면에 설치하고 시편을 노외로 방출시킨 후 약 30초간의 시험편의 온도변화를 확인하였다.

##### (가) 상온 이하의 경우

시험편의 시험온도를 로내에서 -50℃로 냉각시킨 후 시험하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편 표면에서 온도상승 기울기에 조금씩 차이가 있으나, 시험편 내부는 약 10초 이후부터 온도가 상승됨을 알 수 있다. 따라서 본 시험의 경우 작업구역에서 시편이송장치로 시험편을 충격시험기의 엔빌까지 이송시키는데 약 3초 정도 소요됨을 감

안할 때 시험결과는 매우 양호하다고 추정할 수 있었다.

(나) 상온 이상인 경우

시험편의 시험온도를 로내에서 +300℃로 가열시킨 후 시험하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시험온도가 +300℃일 경우 시험편의 온도하강이 방출 후 약 3초 이후 급격하게 이루어짐을 알 수 있었다. 이 역시 위의 조건을 충분히 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

(4) 온도조절용 제어반과 겸용로내에서의 시편의 온도 상관관계

온도조절용 제어반과 겸용로내에서의 시편의 내외부온도 상관관계를 측정하여 시험결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 저온냉각시에는 시편 내부와 외부의 온도차가  $\pm 2^\circ\text{C}$ 이고, 상온가열시에는  $\pm 3\sim 4^\circ\text{C}$  차이가 있음을 확인하였다. 이러한 시험결과는 충격시험을 수행하는데 커다란 문제점이 될 수 없을 것으로 판단되었다.

다. 시편이송장치

시편인입구(specimen loading place)에 놓여진 시험편을 온도조절장치용 로의 중앙부(약 150 mm)까지 1차 이송시키고, 설정된 시험온도와 시험편의 온도가 평형상태를 유지할 때까지 대기후 충격시험기의 엔빌까지 2차 이송시키기 위한 장치로서 핫셀의 작업구역에 설치하였다. 시편인입구는 시편을 쉽게 놓을 수 있도록 개구방향이 윗쪽으로 되어 있으며, 그 크기는 11 x 11 x 90 mm이다. 시편인입구에 놓여진 시험편을 시험기기의 엔빌까지 이송할 때 시편의 놓이는 위치가 항상 일정하도록 하기 위해서 별도의 치구를 제작/설치하였다.

라. 횡팽창량 측정장치

햄머로 타격된 시험편은 파단 후 재료의 연성으로 인하여 노치부(notch)에 변형이 발생하는데, 이의 측정을 위해서 일반 횡팽창량 측정기기를 원격조작기로 작업이 용이하도록 개조하였다.

마. 파단면 촬영장치

ASTM E185-82에서는 파단된 시편 조각들을 시편번호별로 묶어서 파단면을 촬영토록 되어 있다. 핫셀내부에 있는 시험편의 형상을 촬영하는데 일반적으로 잠망경(periscope), 하이스코프(high-scope) 등의 장치들을 사용하고 있으나, 충격시험편의 경우 단면이 10 mm x 10 mm 정도로 파단면을 촬영하는 것은 거의 불가능하여 근접촬영 및 확대기능이 가능한 일반용 폐쇄감시회로 카메라를 개조하여 핫셀내에 설치하였고, 또한 자료를 영구토록 보존할 수 있도록 녹화기에 녹화를 할 수 있도록 하였다.

바. 성능시험

“가”발전소 “B”호기 4차 감시시험의 충격시험을 수행하였다. 시험한 시편의 종류는 모재종방향, 모재횡방향, 용접재, 열영향부(HAZ)로 각각 15개씩이었으며, 냉각/가열 겸용로와 시편이송장치

의 성능을 시험한 결과 매우 양호하였다. 특히 시험편을 냉각/가열 겸용로내에 넣은 후 시험온도까지 가열 및 냉각하는데 약 30분, 시험편의 온도유지시간에 약 30분 소요되었으며, 시험결과를 그림 6에 나타내었다.

### 3. 결 론

감시시험의 충격시험시스템을 구성하는 충격시험기, 시험온도조절장치, 시험이송장치, 횡팽창량 측정장치 및 파단면 촬영장치를 조합 후 성능을 시험하였다. 시험편의 온도를 조절 및 유지하기 위한 냉각/가열 겸용로를 핫셀내에 설치후 특정온도 도달시간 및 로의 안전성, 시험편을 노외로 추출하였을 때의 온도변화 및 시간 등을 시험하였고, 노내에서 시험편의 온도분포상태가  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  이내로 60분 이상 균일하게 유지할 수 있음을 확인하였다. 그리고 냉각/가열 겸용로에서 충격시험기의 앤빌까지 도달한 후 햄머로 타격할 때까지 소요된 시간을 측정한 결과 약 3초 소요됨을 확인하였다. 위의 결과는 모두 ASTM E23-94 및 E185-82 규정에서 요구하는 조건-노내 시험편 유지시간이 가스를 사용하는 경우 30분 이상 및 타격시간 5초 이내<sup>[84]</sup>-를 모두 만족함을 확인하였다.

그리고 충격시험으로 획득한 시험결과는 속중성자( $E > 1.0\text{MeV}$ )조사로 인해 발생하는 재료의 조사취화(radiation embrittlement)현상을 감시함으로써 원자로의 수명 연장 뿐만 아니라 원자력계통에 사용되는 재료의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

### 4. 참 고 문 헌

- 1) ASTM E185-82, "Standard Recommended Practice for Surveillance Tests for Nuclear Reactor Vessels", E706(IF), ASTM(1982).
- 2) ASTM E185-94, "Standard Recommended Practice for Surveillance Tests for Nuclear Reactor Vessels", E706(IF), ASTM(1994).
- 3) ASTM E23-93a, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", ASTM(1993).
- 4) ASTM A370-88, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", ASTM(1988).
- 5) 10CFR Part50, App. G(IV), H(II), U.S.NRC, Oct. 30, 1992.
- 6) 과학기술처 고시 제 92-20호, "원자로 압력용기 감시시험 기준", 12, 1992.
- 7) 박대규외 4인, "핫셀설계기술", KAERI/AR-468/97, 한국원자력연구소, 1997.
- 8) 노성기외 5인, "장기저장 조사재료 특성시험연구", KAERI-NEMAC/RR -107-93, 과학기술처, 1993.

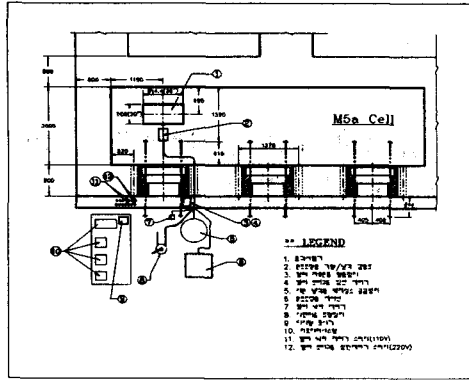


그림 1. 충격시험시스템 배치도.

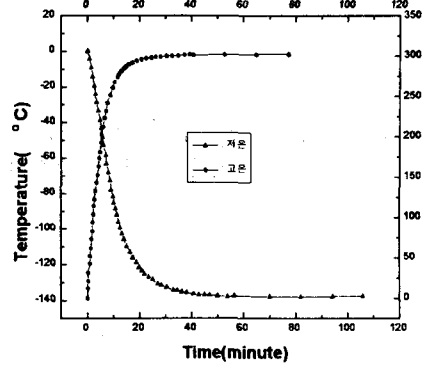


그림 2. 냉각/가열 겸용로 -150°C에서 +300°C까지의 냉각/가열특성곡선

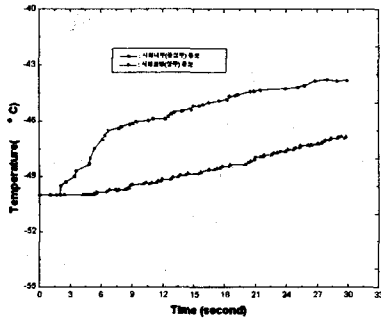


그림 3. 가열/냉각겸용로 내부온도 -50°C일 경우 시편의 로외 방출시 시편의 온도변화 곡선.

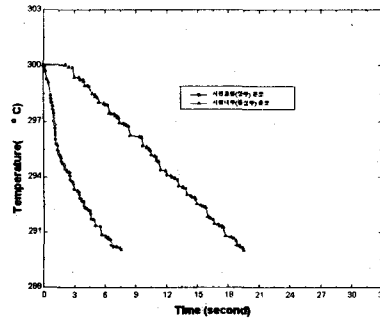


그림 4. 가열/냉각겸용로 내부온도 +300°C일 경우 시편의 로외 방출시 시편의 온도변화 곡선.

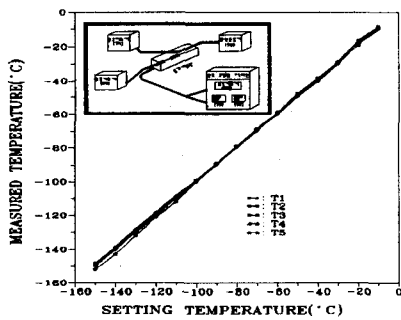


그림 5. 상온이하 온도조절용 제어반(T1, T2)과 노내의 시편 중앙(T3) 및 표면온도(T4, T5) 측정결과

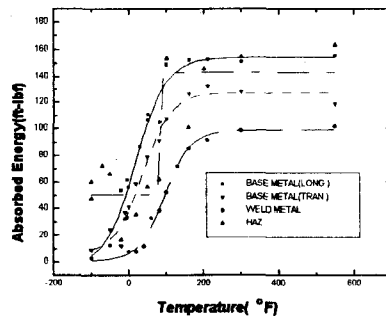


그림 6. “가”발전소 “B”호기 4차 감시시험 시편 종류별-모재회방향, 모재중 방향, 용접재, 열영향부- 충격 시험 결과.