

## 원자로 용기 하부 냉각 실험에서의 용융물과 용기면의 간극 측정 기법 개발

강경호, 김종환, 함영수, 김상백

한국원자력연구소

### 요약

노심용융물의 노내 자연 냉각 현상은 TMI-2 사고 이래로 실험과 해석 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있으나, 아직까지는 이에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않은 상태이다. 원자로 용기 냉각 Mechanism 중에서 노심용융물이 원자로 용기 하부 반구내로 재배치되어 하부 반구 내벽과 접촉할 때 용융물과 하부 반구 내벽 사이에 생길 수 있는 작은 간극으로 냉각수가 침투되어 노심용융물의 냉각이 이루어질 수 있다는 가정이 유력하게 제기되고 있다. 본 논문에서는 노심용융물과 원자로 용기 하부 반구 사이의 간극을 통한 노심용융물의 냉각 특성을 규명하는 SONATA-IV 실험 연구와 연계하여 이상 유동이 존재하는 고온 표면에서의 미세한 간극을 측정할 수 있는 방법의 검토 및 시편을 이용한 실험을 통하여 가장 적합한 간극 측정 기법을 도출하였다. 간극 측정 기법으로는 중성자 라디오그래피, X 선 후방산란 단층 기법 그리고 초음파 펄스 반사 탐상법을 검토하였으며, 시편 측정 실험 결과 실시간 간극 측정 방법으로는 초음파 펄스 반사 탐상법이 가장 적합한 것으로 나타났다.

### 1. 개요

TMI-2 사고에서는 약 19 톤의 노심용융물이 원자로 용기 하부 1구립뿔[재배치되었으나 원자로 용기의 파손이 발생하지 않고 노심용융물의 냉각이 이루어짐으로써 원자로 용기 하부 반구 내에서의 노심용융물 냉각 현상에 대한 많은 관심이 모아졌다. 이에 대한 실험, 해석적인 연구가 최근에 활발하게 이루어지고 있으나 아직까지는 명확한 냉각 현상 규명이 이루어지지 않은 실정이다.<sup>[1]</sup> 제기되고 있는 가능한 용융물의 냉각기구로 노심용융물이 냉각수가 존재하는 원자로 용기 하부 반구내로 재배치되어 하부 반구 내벽과 접촉할 때 용융물과 하부 반구 내벽 사이에 생길 수 있는 작은 간극으로 냉각수가 침투되어 노심용융물의 냉각이 이루어진다고 보고있다. 이를 규명하기 위한 대형 실험이 일본의 ALPHA 실험에서 이루어졌으며 한국 원자력 연구소에서는 SONATA-IV 연구를 통하여 간극의 형성 및 냉각 실험이 준비중이다. 이러한 간극을 통한 냉각 현상을 규명하기 위해서는 실증실험을 통해 용융물과 하부 반구 사이의 미세한 간극 형성 과정과 간극의 크기를 측정할

수 있어야 한다. 그러나, 고온의 용융물이 냉각수가 존재하는 하부 반구와 접촉하여 생길 수 있는 간극의 측정은 간극 내부에서 냉각수와 수증기가 불규칙하게 공존하는 이상 유동 현상의 복잡성과 하부 반구 표면의 고온 그리고 평면 형태가 아닌 반구 형태의 기하학적인 구조로 인하여 측정에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 간극 내에 이상유동이 존재하고, 고온의 반구 형태의 구조면에서의 간극 측정을 기대할 수 있는 여러가지 간극 측정 기법의 타당성 검토 및 이를 위하여 시편을 이용하여 측정을 수행한 결과를 기술하였다. 간극 측정 기법으로는 중성자 래디오그래피 방법 (Neutron Radiography Method), 초음파 펄스 반사 탐상법 (Pulse Echo Testing Method) 그리고 X선 후방산란 단층기법 (X-ray Backscatter Tomography) 을 고려하여, 각 기법의 타당성 검토를 하였다. 또한, 단상 및 이상 유동을 생성할 수 있는 시편을 제작하여 위의 방법을 이용하여 간극을 측정하였고, 측정 결과를 토대로 용융물과 냉각수가 존재하는 하부 반구 사이의 간극을 측정하는데 가장 적합한 간극 측정 기법을 도출하였다.

## 2. 간극 측정 기법

노심용융물과 냉각수가 존재하는 원자로 용기 하부 반구 사이의 미세한 간극은 특정 두께의 Carbon Steel 로 이루어진 하부 반구와 고온의 용융물 사이에 생성되므로 비파괴 검사를 위한 측정 기법 중에서 적용 가능한 방법을 검토하였다. 아래는 대표적인 비파괴 검사 방법인 중성자 래디오그래피 방법과 초음파 펄스 반사 탐상법 그리고 X 선 후방산란 단층 기법에 대하여 간극 측정 가능성 측면에서 수행한 주요 실험 결과를 기술하였다.

### 중성자 래디오그래피 ( Neutron Radiography )<sup>[3]</sup>

중성자는 투과율이 우수하고, 물질에 따라 투과율의 차이가 크므로 이를 이용한 비파괴 영상 촬영이 다방면에서 이루어지고 있다. 본 논문에서는 간극 주위에서의 중성자 투과율 변화가 간극을 관측할 수 있을 정도로 충분히 큰치를 관찰하기 위해 시편을 제작하여 중성자 래디오그래피를 수행하였다. 실제 원자로 물질과 여기서 사용한 시편의 중성자 소멸계수 (Linear Attenuation Coefficient) 가 유사하도록 시편의 재질을 선택하였다. 노심용융물에 해당하는 물질로 주석을, 압력용기의 물질로 스테인레스 스틸을 사용하였다. 그림 1 은 중성자 래디오그래피 시험의 시편과 배치도를 나타낸 것이다.

시험 결과 얻은 중성자 래디오그래피 화상은 물이 없는 경우 비교적 우수하게 간극의 유무를 보여주고 있으나, 물이 있는 경우는 물의 중성자 소멸계수가 상대적으로 커 간극의 유무를 보여주지 못하였다. 앞으로 중성자 조사 시간에 따라 간극 크기에 대한 분해능을 더 검증해 볼 필요가 있다. 또한 이 방법은 중성자원이 원자로라는 단점으로 인해 시간에 따른 간극의 변형을 측정하기에는 실험장치의 설치에 따른 문제점이 있어 주로 실험후 측정에 활용할 예정이다.

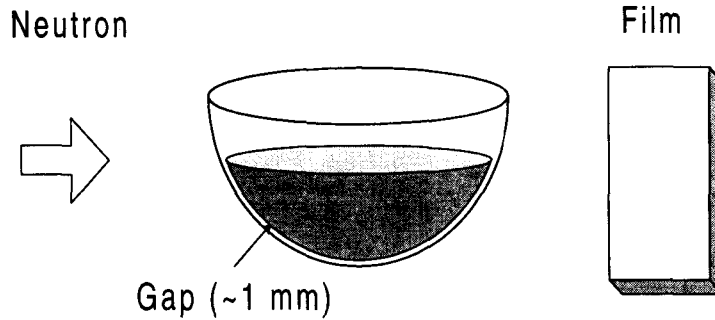


그림 1. 중성자 라디오그래피를 이용한 간극 측정 실험 개념도

### X 선 후방산란 단층기법 ( X-Ray Backscatter Tomography )<sup>[3]</sup>

X-선이 물체와 작용하여 일어나는 여러가지 현상 중에서 Compton 산란은 광자가 원자내의 전자와 충돌하여 광자의 에너지 일부가 전자에 주어지고 이 에너지에 의하여 전자가 외부로 방출되는 현상이다. 이러한 Compton 산란 중에서도 특히 광자 입사의 반대방향으로 산란한 광자를 사용하여 비파괴검사의 한 방법으로 물질의 특성을 발견하는 X 선 후방산란 단층 기법에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 특히 피검체의 용량이 크고 피검체를 이루는 물질이 동일하지 않을때 (Inhomogeneous), 비파괴 검사에 전형적으로 사용되는 초음파나 X-Ray Radiography 로서는 원하는 결과를 얻기가 매우 어렵기 때문에 X 선 후방산란 단층 기법이 많이 사용된다. 대부분의 X 선 후방산란 단층 시스템은 X-선 발생기, 입사 Beam 과 반사 Beam 의 크기를 조정할수있는 시준기(Collimator), 검출기와 Beam 의 움직임을 제어하는 Computer Controlled Mechanism 등으로 구성되어있다. 그러한 시스템중 가장 간단한 시스템은 아주 가늘게 시준된 Pencil-beam 과 Area Detector 를 사용하는 것이다. 컴퓨터 제어를 통하여 피검체를 고정시켜 놓은 상태에서 Beam 으로 조사한, 혹은 Beam 을 고정시켜놓은 상태에서 피검체를 조사한 계측값을 화상(Image) 형태로 나타내면 특정 깊이에서 피검체의 구조나 조성을 파악할 수 있다. 그러나 이렇게 구해낸 화상은 Beam 이 피검체를 통과하는 동안의 Beam 의 소멸(Attenuation)이 포함된 상태이다. 따라서 피검체의 구조나 조성이 복잡한 경우에는 별도의 프로그램을 통한 해석이 필요하다. X 선 후방산란 단층 기법은 냉각수와 수증기가 복합적으로 혼합되어 있는 용융물과 하부 반구 사이의 간극

측정을 위해서는 적합한 방법이지만, 측정 시스템이 고가이고, 별도의 해석 프로그램의 마련 및 입사광과 산란광의 계측을 위한 충분한 계측 공간이 필요하다는 단점이 있다.

#### 초음파 펄스 반사 탐상법 ( Pulse Echo Testing Method )<sup>[2]</sup>

아래 그림 2 는 본 논문에서 수행한 간극 측정 실험을 이용하여 초음파 펄스 반사 탐상법의 원리를 나타낸 것이다. 초음파 탐촉자에 주어지는 전압펄스의 여기기간은  $10^{-5}$  초 미만이며 짧은 전압펄스는 일련의 주파수대로 되어 있다. 본 논문에서는 탐촉자 하나로서 송신과 수신을 겸하는 일탐법에 대하여 기술하였다. 탐촉자로부터 나온 한개의 펄스 초음파가 매질이 다른 경계면에 도달하게 되면 일부는 투과되고 또다른 일부분은 반사한다. 즉, 한개의 펄스가 매질로 향하여 직사되었을 때 일부는 첫번째 매질경계 (경계면 A) 에서 반사되고 그 반사파는 탐촉자에 의해서 탐지된다.

일부 투과된 초음파는 다시 두번째 매질경계 (경계면B) 에서 일부는 반사되고 역시 일부는 투과된다. 그중 반사파는 또다시 경계면 A 에서 일부가 투과되어 탐촉자에 감지되게된다. 비슷한 형식으로 경계면 B 에서 반사되고 다시 경계면 A 에서 반사된 초음파는 경계면 B 로 다시 진행하게된다. 이와같이 보면 초음파의 일부는 경계면 AB 사이를

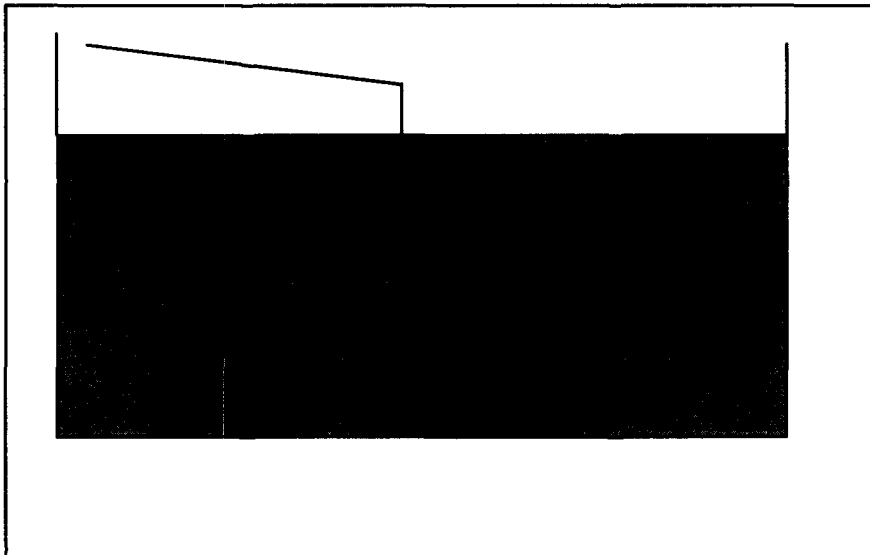


그림 2. 초음파 펄스 반사 탐상법에 의한 간극 측정 원리

주기적으로 계속 반복하면서 일부는 지속적으로 탐촉자에 의해서 감지되게 되는것이다. 물론 경계면 B 를 통과하여 아래로 향한 초음파는 같은 방법으로 경계면 C 에서 행동하게 된다. 한편 위에 기술된 바와 같이 탐지된 초음파들이 CRT 스크린을 통하여 시간의 함수관계로 표기되었을 때 초음파의 매질에서의 속도와 걸린 시간을 알면 매질의 두께 혹은 경계면 사이의 거리를 도출할수있다. 아래 그림 3 은 펄스가 매질로 입사되었을 때 탐지된 반사파를 CRT 스크린을 통하여 표시된 것이다. 시간이 약 5.12 ms후에 탐지된 반사파 (시그널 1)는 첫번째 매질경계, 즉 경계면 A에서 반사된 것이고 그후의 작은 세개의 반사파 (시그널 2, 3, 4)는 각각 두번째 경계면 (경계면B) 에서 반사된 것이다. 따라서 그간극의 두께 L은 다음의 식을 사용하여 계산될 수있다.

$$L = V \times T / 2 \quad (1)$$

여기서 V는 매질 B, 즉 물속에서의 음속 (~1500m/sec), T는초음파가 간극을 왕복하는데 소요된 시간, 즉 시그널 2 와 시그널 3, 혹은 시그널 3과 시그널 4의 간격 (1.3 μs)이다. 위의 계산식으로 간극의 크기를 계산하면 약 0.98 mm 로 실제 간극의 크기 1mm 와 오차를 2 % 로 비교적 간극의 크기를 제대로 측정한 것으로 보인다. 초음파 펄스 반사 탐상법은 실험에서 밝혀졌듯이 비교적 간단하게 미세한 간극의 크기를 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이 방법을 사용하기 위해서는 피검재의 표면 상태가 매끄러워야 하며, 본 연구소에서 수행중인 고온용융물을 이용한 노심용융물 노내 냉각 현상 실증 실험에서와 같이 탐상 표면의 온도가 800 K 이상의 고온으로 상승할 경우는 고온에서 견딜 수 있는 특수한 탐촉자를 제작해야하는 단점이 있다. 또한, 미세한 간극 사이에 냉각수와 수증기가 공존하는 이상유동의 조건시 적용 가능성에 대한 검토가 선행되어야 한다. 그럼에도 불구하고 이 방법이 용융물과 하부 반구 사이의 간극의 크기를 실시간으로 측정하는데 있어서 간편하게 적용할 수 있으므로 추후의 실험에서는 그림 4 와 같은 이상 유동 생성 시편을 제작하여 이상 유동이 존재하는 경우의 적용 가능성을 검토할 것이다.

#### 4. 결론

원자로 내 용융물의 냉각 실험에서 간극 내에 이상유동이 존재할 때 용융물과 용기 내부의 간극 측정 기법의 개발은 실제 현상에서 간극의 형성 과정 및 유무를 결정하는 중요 인자로 작용한다. 간극 측정을 기대할 수 있는 여러가지 간극 측정 기법의 타당성 검토 및 이를 위하여 간극 측정 기법으로는 중성자 래디오그래피, 초음파 펄스 반사 탐상법 그리고 X선 후방산란 단층기법을 사용하였으며 시편을 이용하여 실제 간극을 측정하는 실험을 수행하여 각 기법의 타당성 검토를 하였다. 각각의 방법들이 일정하게 형성된 간극의 크기를 비교적 잘 측정하였으나 실제 노내 용융물 냉각 실험과 연계하여 실시간 간극 측정 기법으로는 계측기 설치 및작동, 결과 분석의 편리함 등에서 초음파 펄스 반사 탐상법이 가장

적합한 것으로 나타났다. 그러나, 미세한 간극 사이에 냉각수와 수증기가 공존하는 이상유동의 조건시 적용 가능성에 대한 검토가 선행되어야 하며, 이를 위하여 이상 유동 생성 시편을 위한 측정 실험을 준비중이다.

**참고 문헌**

1. J. Krautkramer, " Ultrasonic Testing of Materials ", Springer-Verlag Press. 1990.
2. J.L.Rempe, " TMI-2 Vessel Investigation Project ", TMI V(93)EG10, 1993
3. R.W.Nichols, " Nondestructive Examination in relation to Structural Integrity ", Appl. Sci Publ. 1980

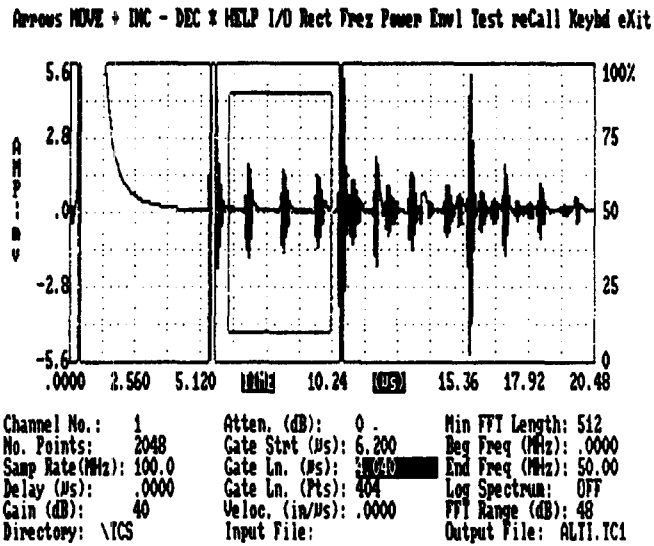


그림 3. 초음파 펄스 반사 탐상법을 사용한 1 mm 간극 측정시 파형 레코드

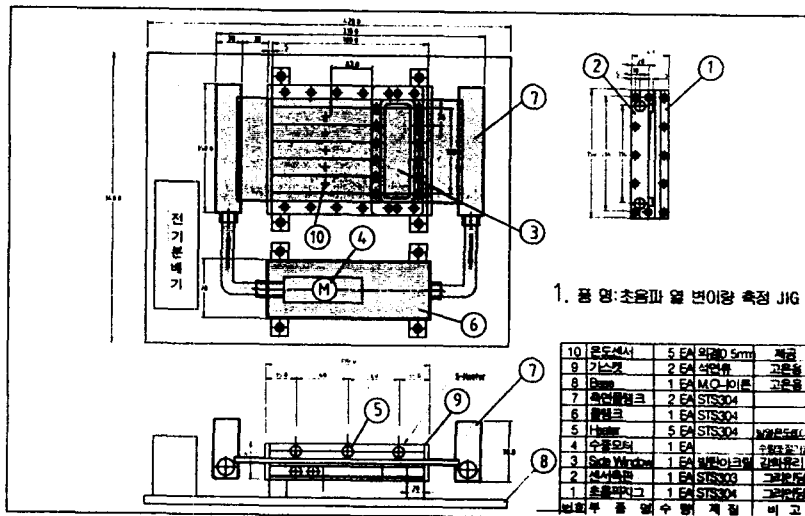


그림 4. 이상유동 생성 간극 측정용 시편