

## 입체구조물에서의 금속파편 충격위치 검출 방법 연구

최재원, 이일근, 박수영

한남대학교

전종신, 한상준

한국원자력연구소

### 요 약

본 연구는 원자로 RPV(Reactor Pressure Vessel)를 두 개의 이상적인 입체 구조물 즉, 원통면과 반구로 나누어, 원통면에서의 충격위치를 검출할 수 있는 알고리즘을 제안하고 그 효용성을 고찰하는데 있다. 현재 사용중인 원전내 금속파편 감시계통(LPMS : Loose Parts Monitoring System)의 경우 충격신호를 레코더에 저장하고 전문가를 통해 데이터베이스화된 기준신호와 비교 분석하는 Off-line 분석방법을 사용해 왔다. 그러나 이러한 방법은 많은 소요시간을 가지므로 손상잠재성이 큰 경우 즉각적인 대처를 할 수가 없다는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 방법을 지양하고 센서로부터 얻은 충격신호를 분석컴퓨터에 입력하여 즉각적으로 충격위치를 찾을 수 있는 On-line 분석방법을 제안함에 있어, 기초적 연구로서 원통면에서의 충격위치 검출방법을 제시하였다.

### I. 서 론

원자력발전소 냉각재계통내에 존재하는 금속이물질은 계통내 유체유동, 응력부식, 구조요소간 비정상적인 마찰등으로 구조물로부터 분리되면서 생성될 수 있으며, 원전 건설기간중 또는 핵연료 저장전 중에 외부로부터 유입될 수 있다[1-2]. 이러한 금속파편은 계통내 유동상태에 따라 이동하게되면 1차계통기기의 파손 또는 약화, 증기발생기의 세관손상, 노심유로차단에 기인한 핵연료 피복관 파손 잠

재성, 제어부 구동방해 잠재성, 손상기기 보수에 따른 방사선 피폭량 증대 등의 문제를 야기시킬 수 있다. 그러므로 이러한 금속이물질을 탐지하고 손상잠재성을 평가함은 안전성 증대와 경제성 제고에 기여할 수 있다[3].

LPMS(Loose Parts Monitoring System)는 금속파편 충격에 의해 발생하는 과도 음향신호를 압력경계 외벽에 부착된 적절한 수량의 가속도계 센서(Accelerometer)를 이용해 획득하고, 이 신호를 분석해 충격위치, 금속파편의 크기, 정체특성 평가 및 안전성영향을 결정하는 시스템이다.

## II. 본 론

### 2-1. 충격위치 평가방법의 기본이론[4]

금속간의 충격파를 이용하여 충격위치를 검출하는 대표적인 방법에는 삼각법이 있다. 이 방법은 3개 이상의 센서에 의하여 검출된 충격파 중 각각 2개의 센서사이의 충격신호 도달시간차와 전파속도를 이용하는 방법이다.

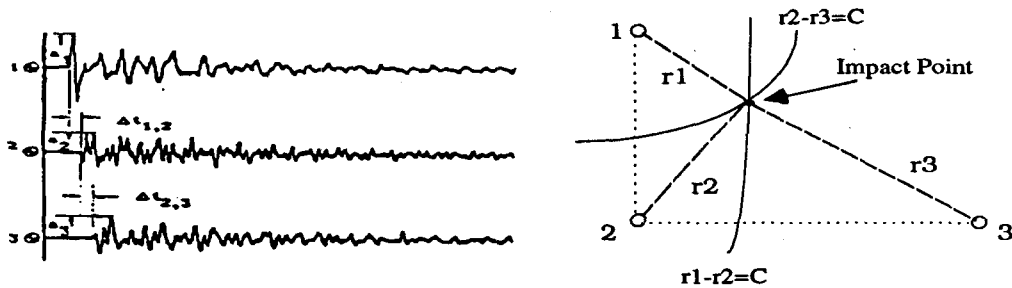


그림 2. 삼각법을 이용한 충격위치 예측방법.

$$\begin{aligned} r_1 - r_2 &= V_g \cdot \Delta t_{1,2} \\ r_3 - r_2 &= V_g \cdot \Delta t_{2,3} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $r_1, r_2, r_3$  : 각 센서에서의 충격위치까지의 거리.

$V_g$  : 충격파의 전파속도.

$\Delta t_{1,2}, \Delta t_{2,3}$  : 두 센서에서의 충격파 도달시간차.

그림 2와 식 (1)에서 보이듯이 충격파의 도달시간차와 전파속도를 알면 두 센서에서 충격위치까지의 일정한 거리의 차를 구할 수 있고, 그 두 센서의 위치를 초점으로 하는 거리의 차가 일정한 쌍곡선을 구할 수 있게 된다. 다른 센서 쌍에서도 위와 같이 하면 하나의 교점을 구할 수 있으며 이것이 충격위치로 결정되어 진다.

## 2-2. 원통구조물에서의 충격위치 예측을 위한 프로그램기법 도출

충격파는 표면을 따라 전파된다. 따라서 원통구조물에서는 모든 수학적 해석이 원통좌표계로 표시되어야 하며, 원통면에서의 충격파 전파를 해석하는 한 방법으로 원통의 펼친 그림을 이용하는 방법을 생각할 수 있다.

그림 3(a)에서 나타낸 원통에서 원통의 반지름  $r$ 이 원통을 이루고 있는 판의 두께  $d$ 에 비하여 훨씬 큰 값을 갖는다면(즉,  $r \gg d$ ) 이 원통 구조물을 가로의 길이가  $2\pi r$ 이고, 세로의 길이가  $h$ , 두께가  $d$ 인 평면형태의 구조물로서 해석할 수 있으며, 펼친 그림의 형태를 그림 3(b)에 나타내었다. 평면구조물에서 충격위치를

결정한 후 이를 다시 원통으로의 변환에 의해 원통구조물에서의 충격위치로 변환 할 수 있다.

원통구조물에서의 각 좌표값은 원통좌표계를 사용하였고 평면구조물에서의 좌표값은 직각좌표계를 사용하였다.  $(r, \phi, z)$  = (원통의 반지름, 기준으로부터의 각도, 원통의 높이)라 하면, 원통면에서 평면으로의 변환은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} x &= 2 \times \phi \times r \\ y &= z \end{aligned} \quad (2)$$

또한 역으로 평면구조물에서 원통구조물로의 변환은 다음과 같이 이루어 진다.

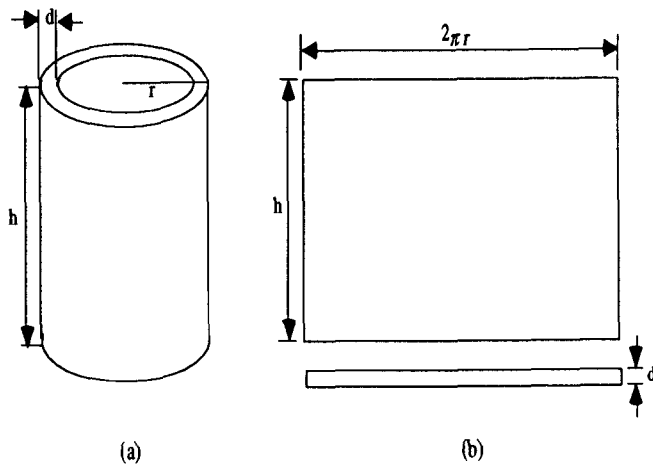


그림 3. 원통구조물과 그 펼친그림.

$$\begin{aligned}
 r &= r \\
 \phi &= \frac{x}{r} \text{ (rad)} \\
 z &= y
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

이러한 방법을 통하여 원통면상에서 설치된 충격센서를 대응하는 직사각형 평면 구조물상의 위치로 바꾸어 평면상에서의 충격위치를 구하다음 다시 원통면상의 위치로 환원하는 과정을 거쳐 충격위치를 표시한다.

### 2.3 충격위치 평가

위의 이론을 토대로하여 원통에서의 충격위치 평가를 컴퓨터 프로그램화 하였다. 이것은 제작된 RPV Mock-up에 적용하기 위해 그 형태를 Mock-up에 맞추었다. 세 개의 센서를 RPV Mock-up의 0° 상단, 120° 하단, 그리고 240° 하단에 각각 설치하고 임의의 충격이 있었을 때 충격파가 각 센서에 도달하는 도달시간차를 측정하고, 측정된 데이터를 변환된 평면구조물에 적용하여 충격위치를 구하였다. 프로그램상에서의 결과의 표현을 펼친그림상의 위치와 원통구조물에서의 위치를 동시에 표시하도록 하였다.

평면의 경우 실제 시각적으로 보이는 직선거리를 충격위치까지의 거리로 이용하기 때문에 그에따른 충격의 쌍곡선궤적을 표시하여 그 교점으로 충격위치를 찾아낼 수 있다. 그러나 원통의 경우에는 펼친그림이 모서리가 절단된 평면과 다르다. 그림4는 이러한 사실을 잘 나타내 주는 그림이다. 충격위치 a에서 발생한 충격파는 직선거리로서 가장 가까운 센서 1, 센서2 그리고 센서3에 의해 해석될 수 있다. 하지만, 충격위치 b에서 발생한 충격파는 이로부터 가장 가까운 센서 1, 센서 2'(이 붙은 센서는 펼친그림을 시각적으로 나타낸 좌측 180° 에서 우측 180° 까지의 평면밖의 연장된 평면상 센서, 즉, 2'=2), 센서 3에 의해 평가하여야 한다. 또한 충격위치 c에 의해 발생한 충격파는 센서 1', 센서 2, 센서 3에 의하여 평가하여야 한다.

즉, 원통상의 충격이 발생한 위치를 중심으로 펼쳐지는 평면을 달리하여 해석하여야 하는 것이다.

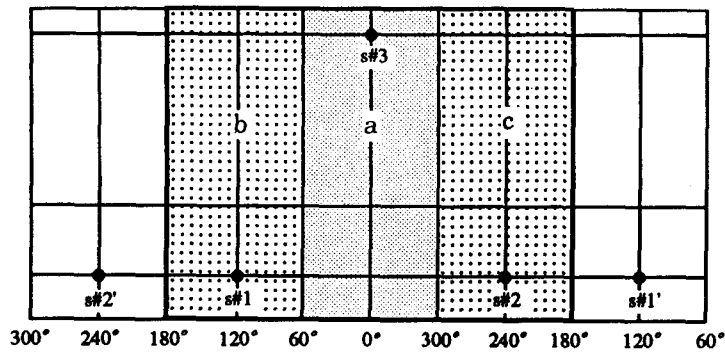


그림 4. 충격위치의 범위에 따른 해석.

이러한 세가지 경우에대한 해석은 각 센서에 입력된 충격신호를 통하여 충격 위치를 평가할 경우 가장 먼저 선택되어야 할 사항이다. 즉, 충격신호의 분석을 통하여 먼저 영역 a, 영역 b, 영역 c중 한 영역에서 충격이 발생하였음을 선택한 후 그 영역에 부합되는 평면을 선택하여 충격위치 평가가 이루어져야 한다. 이러한 사항을 컴퓨터를 통하여 자동으로 실행하는 것을 목표로 본 논문에서는 그 첫 단계로서 각 세 영역에서의 충격위치 평가를 다루었다.

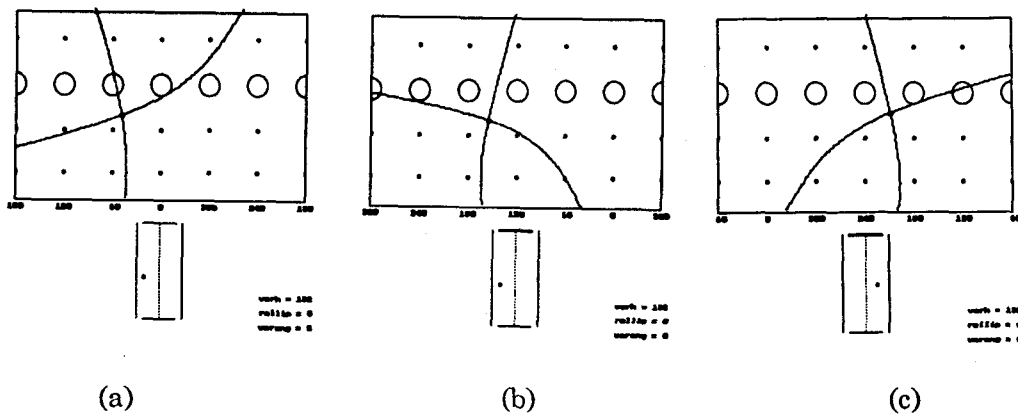


그림 5. 영역별 검출된 충격위치

그림 5의 (a), (b), (c)는 각각 영역 a, 영역 b, 영역 c에서 충격이 발생하였을 때의 경우를 시뮬레이션한 것이다. 그림의 상단 사각형은 펼친그림 상태에서의

삼각법을 사용한 충격위치 평가를 나타낸 것이다. 하단의 그림은 이를 다시 원통면의 위치로 환원하여 표시한 것이다. 이 하단의 그림은 방향키를 이용하여 상하로 회전할 수 있도록 함으로써 원통상 충격이 어느 지점에서 발생하였는지를 한 눈에 알 수 있도록 한 것이다.

### III. 결 론

Loose Parts를 검출하는 시스템에서 가장 중요하게 인식되는 것이 충격위치 평가이다. 정확한 충격위치를 평가해 냄으로써 Loose Parts의 특성을 정확하게 예측해낼 수 있게된다. 따라서 이러한 연구의 시작단계로 수행했던 평면에서의 충격위치 평가방법을 적용하여 원통에서의 충격위치 평가를 수행하였다. 수행 방법으로써 충격파는 원통의 표면을 따라 전파되므로 이를 좀더 쉽게 해석할 수 있게 원통을 펼친그림으로 평면화하였다. 각 두 센서(센서 1과 센서 2, 센서 2와 센서 3)의 시간차를 입력으로 하였고 그 결과는 정확한 위치를 예측하였다. 이 결과를 이용함으로써 현재 추진중인 충격파의 시간도달차를 입력파라메타로 하므로써 On-line처리가 가능하게 된다. 또한 RPV의 상부 및 하부의 반구구조물에서의 해석과의 접목을 통해 전체적인 RPV에서의 충격위치 검출 알고리즘의 기초자료로서 활용가능하다.

### 참 고 문 헌

- [1] W. K. Shin, etc, "A Study on the Signal Diagnosis Techniques for Loose Parts Monitoring System(LPMS)", KAERI/NSC-351/89.
- [2] EPRI, "Loose-Parts Monitoring System Improvements", EPRI NP-5743, March 1988.
- [3] Charles W. Mayo, "Metal Impact Signal Transmission Through Reactor Structures", SMORN VII, 1995.
- [4] 이일근 외 7명, "삼각법과 원교차법의 실험적 관점에서의 비교", 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집 제18권 제2호, 1995.