

RPV 상하부에서 발생하는 금속파편의 충격위치 평가

최재원, 이일근, 송영중
한남대학교
대전광역시 대덕구 오정동 133

구인수, 박희윤
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

LPMS(Loose Part Monitoring System)는 원자로 및 냉각재계통내에서 발생하는 금속파편의 검출 및 분석을 위하여 사용되는 진단 장비이다. 본 논문에서는 RPV(Reactor Pressure Vessel)의 상부헤드(closure head)와 하부헤드(lower head)에서의 금속파편의 충격위치를 평가하는 LPMS를 위한 새로운 기법을 제안하고, Mock-up에서의 실험을 통하여 그 효용성을 검증하였다. 즉, 수정된 원고차법을 제안하고, 이를 반구(半球)로 모델링된 RPV의 상·하부헤드에 존재하는 금속파편의 위치평가에 적용함으로써 정확한 충격위치를 찾을 수 있음을 보였다. 이들 결과는 충격물질의 질량이나 에너지를 계산하는데 정확한 정보를 제공해 줄 수가 있다.

I. 서 론

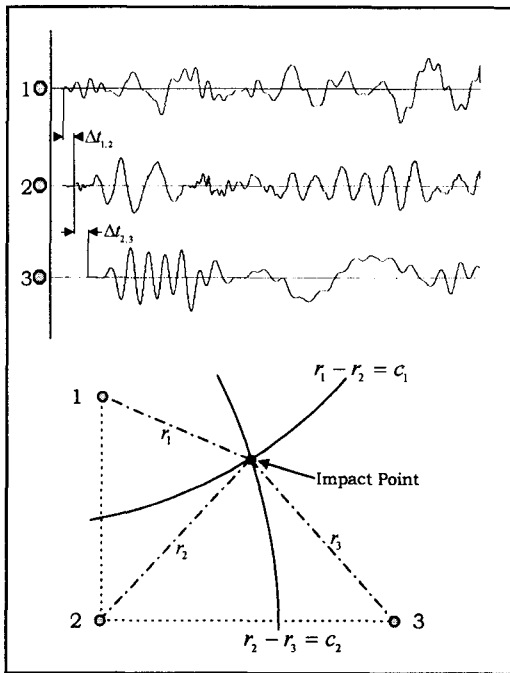
LPMS는 원전내 구조물에서의 금속파편 유무 및 특성을 판별하는 장비로서, 금속파편 충격에 의해 발생하는 과도 음향신호를 구조물 외벽에 부착된 적절한 수량의 가속도계 센서(accelerometer)를 이용하여 획득하고, 이 신호를 분석해 충격위치, 금속파편의 크기, 정체특성 평가 및 안전성영향을 결정하게 된다.

원자로 냉각재계통에 금속파편들이 존재할 경우 계통내 유동상태에 따라 이동하게 되면 1차 계통기기의 파손 또는 약화, 노심내부구조물 및 증기발생기 전열관을 손상시켜 방사성 물질 누출등 안전성에 지대한 영향을 가져올 수 있고 가동률 저하로 인하여 원전의 경제성에도 큰 손실을 가져올 수 있다. 금속파편 발생원인은 기계적 손상 및 부식에 의하여 구조물로부터 분리되면서 생성될 수 있으며, 원전 건설기간중 또는 핵연료 재장전, 기타 보수활동시 외부로부터 유입되기도 한다[1,2]. 그러므로 이러한 금속이물질의 탐지 및 손상잠재성 평가는 안전성 증대와 경제성 제고에 기여할 수 있다.

II. 본 론

2-1. 충격위치 평가방법의 기본이론[3]

금속간의 충격파를 이용하여 충격위치를 평가하는 대표적인 방법에는 삼각법(triangulation method)과 원교차법(circle intersection method)이 있다. 삼각법은 그림1에 서와 같이 3개이상의 센서로부터 탐지되는 금속파편 충격신호의 도달지연시간과 충격파의 전파속도를 이용하는 방법으로서 신호도달 지연시간(arrival time)에 의한 방법이 보편적이다.



$$r_1 - r_2 = V_g \cdot \Delta t_{1,2}$$

$$r_3 - r_2 = V_g \cdot \Delta t_{2,3}$$

여기서,

r_1, r_2, r_3 : 센서와 충격위치까지의 거리.

V_g : 충격파의 전파속도.

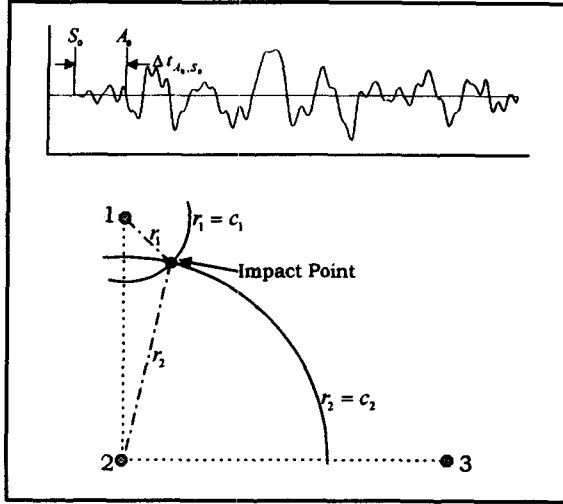
$\Delta t_{1,2}, \Delta t_{2,3}$: 센서사이의 충격파 도달시간차.

그림 1. 삼각법을 이용한 충격위치 평가방법.

원교차법은 구조물에서의 국부적인 힘(충격력등)으로부터 2차원파가 전파되어 가는 현상인 Lamb Wave[4] 전파특성을 이용하는 것으로서, 하나의 센서에서 서로 다른 2개의 특정 모드(S_0 와 A_0)를 이용하는 방법이다. 이 방법에서 얻어지는 충격위치 r 은 센서 설치위치를 중심으로 하는 반지름이므로, 2개 이상의 센서 신호로부터 r_1, r_2 를 구하여 그를 반지름으로 하는 2개 원의 교차점을 충격위치로 평가한다. 금속파편 충격신호로부터 A_0, S_0 파의 구별이 쉽지 않다는 단점은 있으나 2개의 가속도계 신호만으로도 충격점을 찾을 수 있고, 각 센서에서 충격점까지의 거리가 직접 계산되어 나온다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 RPV 상하부에 발생하는 금속파편의 충격위치를 평가하는 수정된 원교차법을 제안하고, Mock-up에서 얻어진 데이터를 제안된 방법을 적용하여 해석하므로써

그 효율성을 밝혔다.



$$r = \frac{V_{A_0} \cdot V_{S_0} \cdot \Delta t_{A_0, S_0}}{(V_{S_0} - V_{A_0})}$$

그림 2. 원교차법을 이용한 충격위치 평가방법.

2-2. 원통구조물에서의 충격위치 평가를 위한 수학적 모델링

반구(半球)형의 입체 구조물로 모델링한 RPV의 상부와 하부헤드부분을, RPV의 몸체부분인 원통형 구조물에서 충격위치평가를 위해 도입한 평면투사방식[5]을 이용하여 해석할 경우에는 구의 특성상 큰 오차를 가질 수 있다. 따라서 이 경우에는 구좌표계(spherical coordinate)를 도입하고, 구좌표계와 직교좌표계의 연관성을 고려해야 한다.

구 좌표계에서 좌표값은 (r, θ, ϕ) 로 나타내어지며 여기서 r 은 구의 반지름, θ 는 앙각(elevation angle), ϕ 는 방위각(azimuth angle)을 가리킨다. 구좌표계와 직교좌표계 사이의 좌표변수의 변환은 그림 3과 식(1)에 나타내었다.

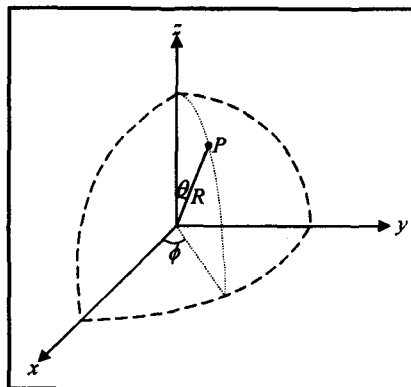


그림 3. 구좌표계와 직각좌표계 사이의 변환.

$$\begin{aligned}
 x &= r \sin \theta \cos \phi & r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (r \geq 0) \\
 y &= r \cos \theta \sin \phi & \theta &= \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \\
 z &= r \cos \theta & \phi &= \tan^{-1} \frac{y}{x}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

주어진 RPV 상부와 하부헤드를 해석하기 위해서는 구 전체를 고려하지 않아도 되고, 또한 충격과는 반구의 표면을 통해서만 전달되기 때문에 구의 표면만을 대상으로 하면 된다. 이러한 특성을 염두에 두고 RPV를 반지름이 R 인 구라고 가정하면, 위의 식(1)로부터 반구의 좌표식은 다음과 같이 얻어진다.

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \tag{2}$$

또한 식(2) 위에 놓여있는 센서의 좌표를 (x_0, y_0, z_0) 라 하면, 센서에서 충격점까지의 거리계산식은 식(3)과 같게 된다.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r_0'^2 \tag{3}$$

여기서 r_0' 는 센서와 충격점까지의 최단거리 값이고, 위에서 언급한 r 은 센서와 충격점과의 표면을 통한 거리이다.

원교차법을 적용하기 위해서는 3차원 공간상에 있는 반구표면에 반지름 r 을 갖는 원을 그려 그의 교차점을 충격위치로 평가해야 하나 실제로 3차원공간상에 2차원인 원을 표현할 수는 없다. 따라서 그 원을 포함하는 구를 생각해야 하며 그 구의 반지름이 r_0' 가 된다. r_0' 와 r 의 관계식은 그림 4에서 볼 수 있다. 식(2)와 식(3)을 결합하면 다음과 같은 식(4)가 얻어진다.

$$x_0x + y_0y + z_0z = \frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r_0'^2}{2} \tag{4}$$

식(4)는 원래의 원교차법을 수정한 형태를 가지며, 센서에서 충격점까지의 최단거리를 포함하는 평면의 방정식으로서 이를 각각의 센서에 적용하여 연립하여 풀면 충격점의 좌표를 구할 수 있다.

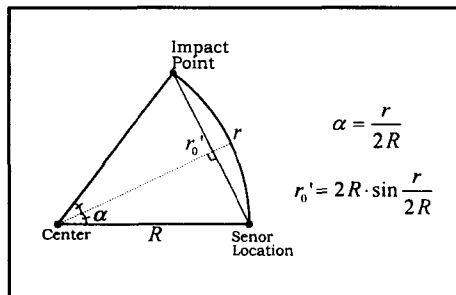


그림 4. 센서와 충격점까지의 직선거리와 표면의 거리.

2.3 충격위치 평가실험

위의 모델링을 통하여 충격위치평가 프로그램을 작성하였고, 이의 검증을 위하여 RPV Mock-up에서 Impact Hammer와 3개의 가속도계 센서를 사용하였다. RPV Mock-up의 상부헤드의 반지름 r 은 33cm이며, 세개의 센서를 각각 $(r, 60^\circ, 0^\circ)$, $(r, 60^\circ, 120^\circ)$, $(r, 60^\circ, 240^\circ)$ 의 지점에 설치하였고 임의의 충격이 있었을 때 모드파가 각 센서에 도달하는 도달시간차를 측정하고, 측정된 값을 수정된 원교차법을 이용해 작성된 프로그램에 적용하여 충격위치를 구하였다. 모드파의 속도는 반복된 실험을 통하여 S_0 가 3300m/s A_0 가 2460m/s임을 알아내었다.

충격위치 평가의 일례로 Impact Hammer를 이용하여 $(r, 0^\circ, 0^\circ)$ 지점에 충격을 가하였을 때 각 센서에서 나타난 충격파형을 그림 5에 도시하였다.

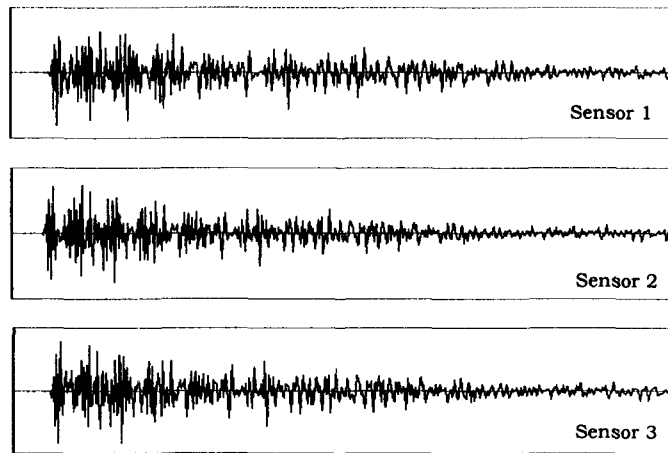


그림 5. 각 센서에서 측정된 충격파형.

각 센서에서의 신호파형을 증폭하여 모드파의 시작점을 구분[3]하고 이 값을 프로그램에 대입하여 충격위치를 평가하였다. 평가된 충격위치를 RPV의 상·하부의 모양을 정사영한 모습으로 컴퓨터 화면상에 나타내었다. 이때의 결과가 그림 6에 나타나 있으며, 여기서 충격위치 지점은 세 개의 직선이 만나는 점으로 평가되어 진다. 그 이유는 위에서 언급한 바와 같이, 각 센서에서 하나의 평면의 방정식이 유도되는데 이를 각각 연결하게 되면 직선의 방정식의 형태로 표현될 수 있기 때문이다.

그림 6의 충격위치 평가 결과에서 알 수 있듯이, 제안된 방법에 의하여 얻어진 충격위치는 실제의 충격위치와 거의 유사한 지점을 나타내고 있다. 각 센서에서의 정확한 모드파의 도달시간을 구함으로써 정확한 충격위치를 평가해낼 수 있었다.

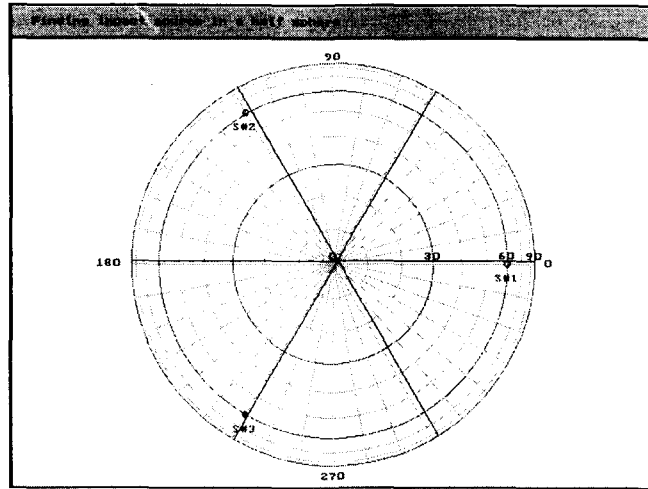


그림 6. $(r, 0^\circ, 0^\circ)$ 부분에서 충격발생시 평가된 충격위치.

III. 결 론

원전내 구조물들에서 발생하는 금속파편에 의한 정확한 충격위치 평가는, 금속파편의 특성 검출 등에 결정적 영향을 미치는 LPMS의 가장 중요한 부분중의 하나이다. 본 논문에서는 반구 형태를 가지는 RPV 상·하부 헤드부분에서 발생하는 금속파편의 충격 위치를 검출하기 위한 방법을 제안하였다. 이 방법은 반구형태를 지니는 RPV 상·하부에서 발생하는 금속파편 위치 검출에 사용되도록 원교차법을 수정한 형태를 가지며, 이를 적용한 Mock-up 실험 결과는 평가된 금속파편의 위치가 실제 위치와 잘 일치함을 보여 준다. 제안된 방법과 모드파의 도달시간을 찾는 프로그램과 연계하므로써 On-line처리가 가능하게 되며, 또한 RPV의 몸체부분의 해석법[5]을 접목하여 전체적인 RPV에서의 충격 위치 검출 알고리즘을 구성할 수 있게 된다.

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] 이일근 외, "삼각법과 원교차법의 실험적 관점에서의 비교", 대한전자공학회 추계종합 학술대회 논문집 제18권 제2호, 1995.
- [4] L.Cremer, M.Heckl, "Structure-Borne Sound", Springer-Verlag Berlin, 1988.
- [5] 최재원 외, "입체구조물에서의 금속파편 충격위치 검출 방법 연구", 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 1996.