

고해상도 센서어레이 신호처리법을 이용한 원자력발전소 핵증기 공급계통의 새로운 금속파편 진단기법

A New Loose Parts Monitoring Technique for Nuclear Steam Supply System based on High Resolution Sensor Array Signal Processing

이 일 근*, 최 재 원*
(Ill-Keun Rhee*, Jae-Won Choi*)

요 약

원전내 금속파편들을 조기에 탐지하기 위한 금속파편 감시계통(LPMS: Loose Parts Monitoring System)은 원전의 안전성 및 신뢰도 확보를 위하여 중요한 부분으로서, 대부분의 국내 원전들에서 설치 운영중이거나 운영예정이다. 하지만 이들 LPMS들은 외국에서 개발된 것들로서 고가이며 기술이전이 이루어지지 않아 기술종속의 우려와 함께 효과적인 금속파편 진단에 많은 어려움을 지닌다.

따라서 본 논문의 주된 목적은 고해상도를 가지며 분석방법이 간단한 효율적인 금속파편 위치평가를 위한 알고리즘을 제안, 실현함으로써, 비전문적인 운전자도 컴퓨터를 사용한 간단한 조작을 통하여 정확하고 신속한 금속파편 진단을 수행할 수 있도록 하는 것이다.

본 논문에서 제안한 수정된 원교차법을 이용하여 작성된 금속파편 위치평가 프로그램을 이용하여 실제 원전상황을 고려한 모의실험을 실시한 결과, 제안된 평가기법이 약 3.4% 정도 오차를 가지는 우수한 위치평가를 수행함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Loose parts monitoring system(LPMS), which is used to detect metallic loose parts in the nuclear power plant, plays an important role in safe and reliable operation of the plant. To prevent from the damage due to the loose parts, most domestic nuclear power plants are using, or planning to use LPMS. However, these LPMS's, which are all invented from overseas and thereby depend on the oversea technologies, are very expensive, and are known to be inefficient to diagnose loose parts due to the lack of fundamental know-how of LPMS.

Therefore, the main purpose of this paper is to propose and to realize a new loose parts localization algorithm which is simple and efficient enough even for the inexperienced operators to diagnose loose parts accurately and promptly.

Considering practical nuclear power plant circumstances, some simulations for estimating the loose parts location have been done. The results show that the proposed method, called a modified circle intersection method, performs high resolved loose parts localization with 3.4% of error.

I. 서 론

계통내 유체유동, 응력부식, 피로, 구조요소간 비정상적 마찰등의 원인에 의해 구조물로부터 분리되면서 생성되거나, 원전 건설기간 또는 핵연료재장전, 기타 보수활동시 외부로부터 금속이물질이 계통내로 유입됨으로써 발생될 수 있는 원자력발전소 냉각재계통내의 금속파편(Metallic Loose Parts)은 계통내 구조물들의 취약 또는 파손을 야기시키므로써 안전성을 저해시킬 수 있다. 따

라서 이러한 원전내 금속파편으로 부터의 안전성 확보를 위하여 운용되고 있는 계측계통을 가르켜 금속파편 감시계통(LPMS: Loose Parts Monitoring System)이라고 한다. 현재까지 국내외에서 운용되고 있는 LPMS들은 모두 외국에서 개발된 것으로서 그 원리는 다음과 같다. 즉, 압력경계 내부구조물에 금속파편이 부딪힐 때 발생하는 충격파가 내부구조물을 따라 전파되어, 원자로 냉각재계통 주요기기의 압력경계 외부표면에 부착된 충격에 민감한 가속도계(Accelerometer)등의 센서들에 감지된다. 이러한 충격파 감지용 센서들은 제어봉 구동장치 설치지역인 원자로 압력용기 상부헤드와 금속파편이 비교적 정제하기 쉬운 지역인 증기발생기의 Hot Chamber 등 1차계통 압력

*한남대학교 공과대학 전자공학과
접수일자: 1997년 5월 10일

경계 외부표면에 설치되어진다(그림 1 참조)[1].

현재 사용중인 LPMS의 경우 충격신호를 레코더에 저장하고 전문가를 통해 데이터 베이스화된 기준신호와 비교분석하는 방법을 사용해 왔다. 그러나 이러한 방법은 분석사 많은 소요시간을 가지며, 실제 원전이 운영요원들은 전문적 지식을 가지고 있지 않아, 손상 잠재성이 큰 경우 즉각적인 대처를 할 수 없는 단점을 가진다.

외국에서는 원전의 경제성 및 안전성 확보를 위하여 LPMS에 대한 꾸준한 연구가 진행되고 있으나[2, 3], 국내에서는 이러한 기술에 관한 인식 및 연구 부족으로 인하여 선진외국 기술에 의존함으로써 기술종속의 우려와 함께 많은 외화를 낭비하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 분석방법이 간단하고 효율적인 금속파면 위치평가를 위한 알고리즘을 제안하고 입체적 모형구조물을 이용한 모의실험을 통하여 그 효용성을 입증함으로써, LPMS의 국산화를 위한 국내 기반기술을 축적하는데 본 논문의 목적과 의의가 있다.

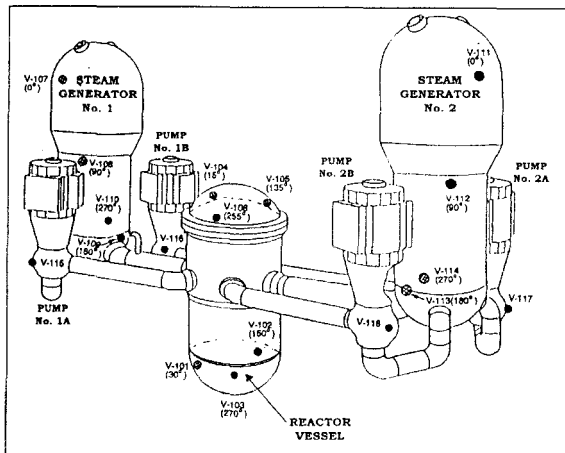


그림 1. 센서가 부착된 원자로 및 스팀발생기의 예.

이를 위하여 제 2장에서는 충격신호의 검출로부터 충격위치 평가를 위한 관련이론들에 대하여 기술하고, 제 3장에서는 이들 이론들을 바탕으로 실제 원전상황을 모사한 실험환경에서의 금속파면위치 평가과정 및 그 결과를 고찰한 후, 제 4장에서 결론을 맺는다.

II. 충격위치 평가를 위한 관련이론

본 장에서는 원전경험상 금속파면 발생가능성이 높은 원자로(RPV: Reactor Pressure Vessel)의 상하부 헤드와 스팀발생기(S/G: Steam Generator)의 측면부에서 발생(그림 1의 실제 원전(울진 3, 4호기)에서의 센서위치 참조) 되는 금속파면에 의한 충격위치를 평가하기 위한 이론을 포함한 과정들을 기술하고 실험을 통하여 그 효용성을 살펴보도록 한다. 제안된 LPMS의 수행과정은 그림 2에

서 나타낸 것과 같이, 센서어레이로 부터의 충격신호 검출 및 전처리, 충격신호 분석, 충격신호위치 평가 및 디스플레이의 순으로 단계적으로 이루어지게 된다. 이들을 각 부분별로 자세히 설명하면 다음과 같다.

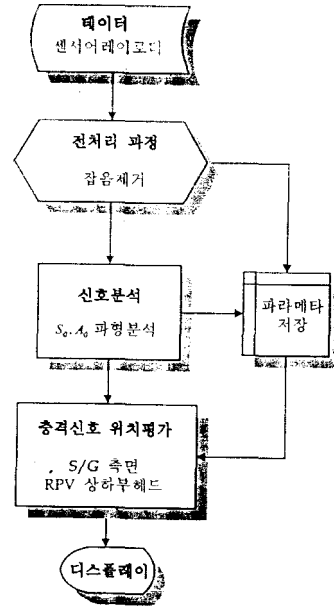


그림 2. 본 연구에서 제안된 LPMS 블록도.

2.1 충격신호 검출 및 전처리 과정

원자력발전소 내에는 모터동에 의한 잡음, 제어봉 구동 잡음, 노내 핵계측계통 구동잡음, 계통 밸브의 급작스런 작동에 의한 잡음등 비충격성 기계적 잡음과 전기적 잡음 등 많은 배경잡음(Background Noise)이 존재한다. 이들은 금속파면에 의한 충격신호와 함께 금속파면 위치 평가를 위하여 설치된 센서에 감지되게 된다. 본 연구에서는 스펙트럼 감산(Spectral Subtraction)법[4]을 응용하여 이들 배경잡음으로부터 충격신호를 분리한 후 원교차법과 수정된 원교차법을 사용하여 RPV나 S/G 등의 입체구조물상에서의 충격위치를 예측하는 기법을 제안하였다.

일반적으로 충격신호는 잡음과 비교할 때 상대적으로 반응시간이 짧은 임펄스신호의 형태를 가지며 충격신호 간 간격이 길다[5]. 반면에 센서들에 충격신호와 함께 감지되는 부가잡음은 앞에서 설명한바와 같이 여러 형태의 잡음이 섞인 형태가 되므로 Central Limit Theorem[6]을 이용하여 가우시안분포를 가진다고 가정할 수 있다. 또한 잡음의 스펙트럼은 매우 천천히 변화하므로써 광의의 정재성(Widesense Stationary)을 가지며 충격신호와 잡음은 서로 독립적이라고 가정한다[5]. 스펙트럼 감산법은 그림 3의 순서도에서 보이는 바와 같이 충격신호에 잡음이 부가된 센서수신신호를 이산푸리에변환(DFT: Discrete Fourier Transform)하여 얻은 진폭스펙트럼으로부터, DFT의 평균을 취하여 예측된 잡음 진폭스펙트럼을

때냄으로써 원래 충격신호를 추출하는 기법이다. 위선용 경향상 충격신호는 0~20kHz의 주파수대역을 가지므로 저역통과필터(LPF: Low Pass Filter)를 이용하여 충격신호 주파수대역으로 한정하였다. 이렇게 예측된 충격신호의 진폭스펙트럼을 쌍의의 정제성을 가지는 잡음이 부가된 센서수신신호의 위상스펙트럼과 합친 후, 이를 이산푸리에 역변환(IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform)을 하게 되면 시간영역에서의 충격신호가 얻어진다.

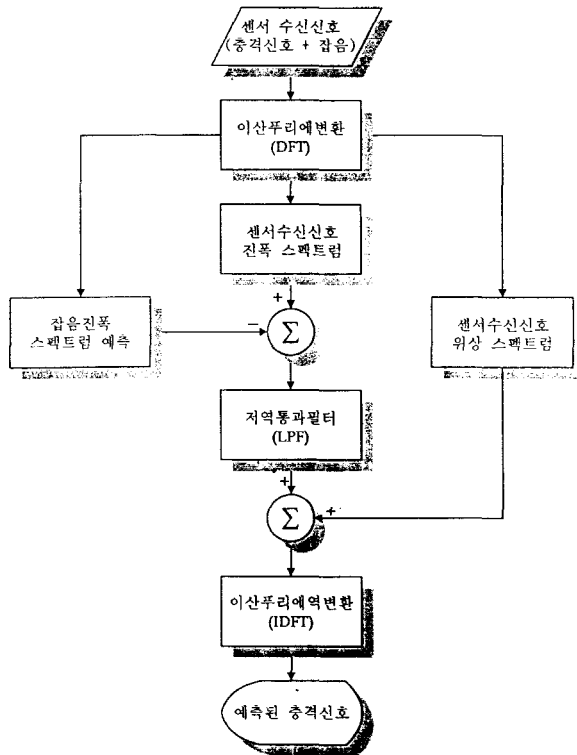


그림 3. 스펙트럼 감산법을 이용한 잡음제거과정.

2.2 충격신호 분석

충격신호가 예측되면 이 충격신호의 발생위치를 평가하기 위한 신호의 분석이 이루어져야 한다. 얻어진 신호를 통하여 알아낼 사항으로는 우선 신호의 시작점이야. 정확한 충격위치를 측정하기 위해서는 정확한 신호의 시작점을 찾아내는 것이 중요하다. 즉, 충격위치로부터 발생된 충격파가 원자로 구조물 표면을 따라 전파되면서 일정거리 떨어져 있는 충격센서에 도달되어 충격신호가 나타나게되는 정확한 시점을 측정하는 것이다. 충격신호가 발생된 점에서는 진폭이 급격히 증가(즉, 충격파의 상승시간(Rise Time)이 짧음)하므로 신호의 시작점을 쉽게 찾아낼 수 있게 된다. 하지만 충격위치로부터 거리가 멀어짐에 따라 충격파의 포락선 형태는 상승시간이 점점 길어지고 감쇄되는 속도 또한 길어지게 된다[7]. 신호의 상승시간이 길어짐으로 인해 신호의 앞부분 즉, 진폭이 낮은 부분은 원자로 가동중에 존재하는 배경잡음에 섞이

면 구별을 해낼 수 없게 된다. 따라서 신호의 정확한 시작점을 찾아내는데 어려움이 따르게 된다.

신호분석에 있어서 또 다른 중요한 고려사항은 충격에 의한 표면파의 전파모드, 즉 S₀모드파와 A₀모드파의 구분이다. 두 모드파는 속도차이를 가지고 있어서 S₀파가 A₀파 보다 먼저 센서에 도착하게 된다. S₀모드파의 진폭이 작아 대부분 배경잡음에 묻혀 버리는 수가 많다. 따라서 잡음과 S₀파의 구분이 하나의 문제이고, S₀파와 A₀파의 정확한 구분이 또 하나의 문제이다. 실제로 잡음이 없는 실험에서도, 시간영역에서 진폭과 주기를 가지고 S₀파와 A₀파를 정확히 구분해내기는 힘든 일이다. 따라서 필터를 통한 주파수영역에서의 해석과 기준신호에 의한 경험이 필요하다.

본 논문에서는 영교차법과 진폭크기의 변화를 이용하여 S₀파와 A₀파의 시작점 판단 및 두파의 구분을 해내는 연구에 대해서는 이미 수행된 결과를 이용하며[8, 9], 여기서는 충격신호의 위치를 평가하는데 주안점을 둔다.

2.3 충격신호 위치 평가

계통기기들의 손상 잠재성을 평가하기 위한 금속파편의 질량등의 특성평가를 위한 전단계로서 금속파편 신호의 발생위치 평가는 중요한 의미를 지니며, 이는 또 금속파편 제거작업에 따른 보수작업자 피로량 감소와 직결된다. 여기서는, 본 연구에서 직접적으로 사용되는 S/G의 측면부에서 발생하는 금속파편 평가를 위한 원교차법(Circle Intersection Method)과 RPV의 상하부헤드 부분에서 발생하는 금속파편 평가를 위하여 본 논문에서 제안된 수정된 원교차법(Modified Circle Intersection Method)에 대하여 설명한다.

2.3.1 원교차법

강구가 강판에 충돌하여 여기된 충격파를 이용하여 충격위치를 평가하는 대표적인 방법에는 삼각법(Triangulation Method)과 원교차법이 있다. 삼각법은 식 (1)과 같이 충격신호의 도달지연시간과 충격파의 전파속도를 이용하는 방법이다. 구조물에서의 전파속도 V_g가 알려져 있을 때 3개 이상의 가속도 시간이력 정보들간의 신호도달지연 Δt_{i,j} (i, j는 센서번호)를 계산함으로써 평가가 가능하다.

$$r_i - r_j = V_g \cdot \Delta t_{i,j} \tag{1}$$

이 방법은 3개 이상의 센서를 사용하므로 현재 운용중인 원전의 LPMS에는 적용이 불가능하다. 또한 복합구조물에서의 알고리즘 구현이 어렵다는 단점을 가진다.

한편 Olma와 Castinie는 1개의 센서에 감시된 서로 다른 2개의 모드파인 S₀와 A₀의 도달 시간차와 각 모드파의 충격속도를 이용하여 충격위치를 평가 할 수 있는 원교차법을 개발하였다. 이 모드파를 이용하는 방법은 기

본 모드 즉 S_0 와 A_0 모드의 전파속도차에 의한 신호도달 지연시간 $\Delta t_{A_0, S_0}$ 를 이용하는 방법으로서 그림 4와 식(2)에서 보여진다. 이 방법에서 얻어지는 충격위치 r 은 센서 설치위치를 중심으로 하는 반지름이므로, 3개 이상의 센서 신호로부터 r_1, r_2 를 구하여 그 둘 반지름으로 하는 3개 원의 교차점을 충격위치로 평가하는데 금속파편 충격 신호로부터 S_0 와 A_0 파의 신호 시작점 구분이 쉽지 않다는 단점은 있으나 각 센서에서 충격점까지의 거리가 직접 계산되어 나온다는 장점을 가지고 있다.

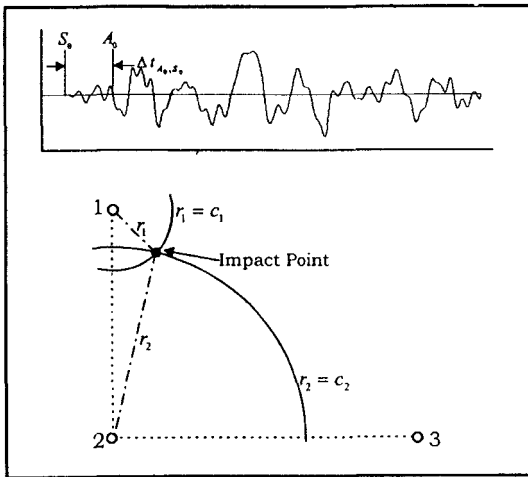


그림 4. 원교차법을 이용한 충격위치 평가방법.

$$r = \frac{V_{A_0} \cdot V_{S_0} \cdot \Delta t_{A_0, S_0}}{(V_{S_0} - V_{A_0})} \quad (2)$$

실제 원자로 및 냉각재 계통기에서 충격위치를 평가하기 위해서는 복잡한 구조물로 이루어진 각 계통기기에 대한 모든 상황을 고려하여야 한다. 그러나 모든 상황을 고려할 경우 너무 많은 요소들에 의해 충격신호가 영향을 받으므로 일일이 이 모든 것을 고려하기란 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 먼저 금속파편이 자주 검출되는 지역인 S/G와 축면부에서의 금속파편 위치평가를 원교차법을 이용하여 수행하였다.

2.3.2 원통구조물에서의 충격위치 평가

금속파편에 의한 충격파가 원통구조물의 표면을 따라 전파되면 그 표면의 특정 위치에 설치되어 있는 가속도계 센서에 의해 충격파가 감지된다. 위에서 설명한 원교차법을 원통구조물에 적용하기 위하여 좌표계를 설정하였다. 원통면을 해석하기에 용이한 원통좌표계(Cylindrical Coordinate)를 도입하고 직각좌표계와의 상호변환을 이용하여 원통면에서의 충격위치를 표시하였다. 원통좌표계는 그림 5와 같이 (ρ, ϕ, z) =(원통의 반지름, 방위각(Azimuth Angle), 높이)로 표시된다.

충격파는 원통의 표면을 따라 전파되므로 모든 해석은

원통의 표면에서만 이루어진다. 이를 해석하는 하나의 방법으로서 임의의 원통면을 절단하여 직사각형의 형태로 펼쳐 해석할 수 있다. 펼쳐진 구조물에서 충격위치를 평가한 후, 이를 다시 원통으로의 변환에 의하여 원래의 원통구조물에서의 충격위치로 대응시킬 수 있다.

원통구조물에서의 각 좌표값의 위치와 그 펼친 직사각형에서의 각 좌표값의 위치의 상호 변환 방법을 설명하면 다음과 같다. 원통 구조물에서의 좌표값들은 앞에서 언급한 바와 같이 원통좌표계를 사용하여 나타내었다. 원통의 반지름 ρ 는 원통의 표면을 직사각형의 형태로 변환하는 것이므로 항상 일정하며, 직사각형의 가로 x 값은 ϕ 의 함수로, 또한 직사각형의 세로 y 값은 z 의 함수로서 나타내어진다.

즉,

$$\begin{aligned} x &= \rho \times \phi \\ y &= z \end{aligned} \quad (3)$$

또한 역으로 평면 직사각형 구조물에서 원통형 구조물로의 변환은 다음과 같이 이루어진다.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho \\ \phi &= \frac{x}{\rho} \text{ [rad]} \\ z &= y \end{aligned} \quad (4)$$

예로서, 그림 5에서 보이는 바와 같이 원통 표면상의 한 점 P를 평면상의 점 P'로 대응시킬 때, 원통면 상의 점 P의 좌표값이 $P(\rho=10, \phi=\pi/6, z=10)$ 이면 평면상의 점 P'의 좌표값은 $P'(x=5.236, y=10)$ 로 얻어진다.

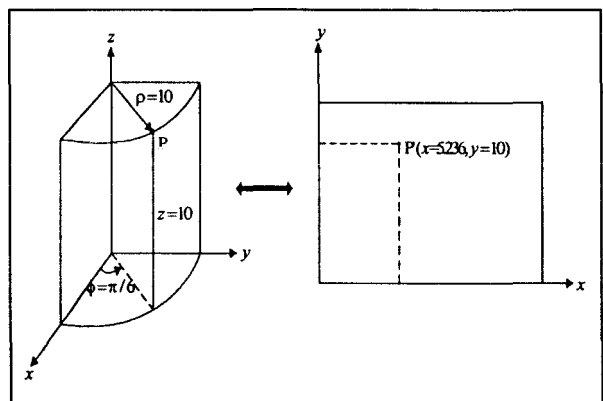


그림 5. 원통 구조물과 평면 구조물사이의 좌표값 대응 예.

2.3.3 수정된 원교차법 및 반구구조물에서의 충격위치 평가

반구(半球)형의 모양을 갖는 RPV의 상부와 하부헤드

부분을, 원사료의 몸체부분인 원통형 구조물에서 충격위치평가를 위해 도입한 평면부사방식을 이용하여 해석할 경우에는 구의 특성상 큰 오차를 가질 수 있다. 따라서 이 경우에는 구좌표계(Spherical Coordinate)를 도입하여 충격위치를 평가하였다.

구좌표계에서 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 좌표의 변환은 그림 6에 나타내었다.

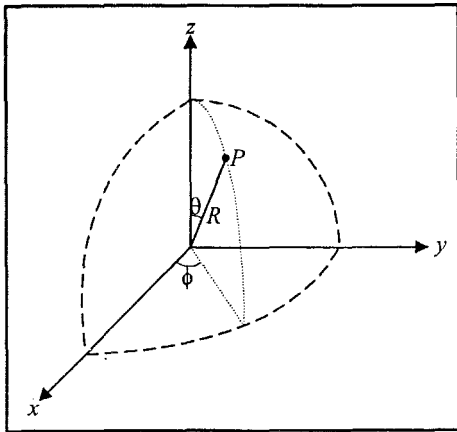


그림 6. 구좌표계와 직각좌표계 사이의 변환

주어진 RPV 상부와 하부헤드를 해석하기 위해서는 구 전체를 고려하지 않아도 되고, 또한 충격파는 반구의 표면을 통해서만 전달되기 때문에 구의 표면만을 대상으로 하면 된다. 이러한 특성을 염두에 두고 원자료를 반지름이 R인 구라고 가정하면, 반구의 좌표식은 다음과 같이 얻어진다.

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \tag{5}$$

여기서, R은 원자료의 상 하부헤드의 반지름이며, 원자료의 중심부를 직각좌표계의 중심(0, 0, 0)으로 하여 좌표축을 설정한다. 또한 식(5) 위에 놓여있는 각각의 센서좌표를 S#1(x_1, y_1, z_1), S#2(x_2, y_2, z_2), 그리고 S#3(x_3, y_3, z_3)라 하면, 센서에서 충격점까지의 거리계산식은 식(6)과 같게 된다.

$$\begin{aligned} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 &= r_1'^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 &= r_2'^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 &= r_3'^2 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 r_1', r_2', r_3' 는 각센서와 충격점까지의 최단거리 값을 나타낸다.

r_1, r_2, r_3 을 센서와 충격점과의 반구표면을 따른 거리라 할 때 원교차법을 적용하기 위해서는 3차원 공간상에

있는 반구표면에 반지름 r_1, r_2, r_3 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_1', r_2', r_3' 가 된다. r_1', r_2', r_3' 와 r_1, r_2, r_3 의 관계식은 그림 7에서 볼 수 있다. 식(5)와 식(6)을 결합하면 다음과 같은 식(7)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} x_1x + y_1y + z_1z &= \frac{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - r_1'^2 + R^2}{2} \\ x_2x + y_2y + z_2z &= \frac{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - r_2'^2 + R^2}{2} \\ x_3x + y_3y + z_3z &= \frac{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - r_3'^2 + R^2}{2} \end{aligned} \tag{7}$$

식(7)은 원래의 원교차법을 수정한 형태를 가지며, 센서에서 충격점까지의 최단거리를 포함하는 평면의 방정식이므로, 식(7)의 세 개의 식을 연립하여 풀면 충격점의 좌표를 구할 수 있다.

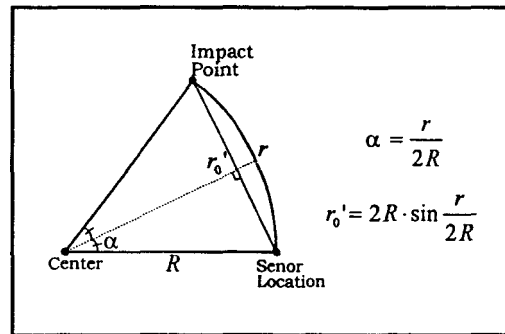


그림 7. 센서와 충격점까지의 직선거리와 표면의 거리.

III. 실험 및 고찰

본 장에서는 앞장에서 설명한 이론들을 바탕으로 잠음 제거, S₀, A₀파의 시작점 구분과정등의 신호분석 및 충격위치평가를 위해 작성된 프로그램을 이용하여 RPV와 S/G등의 입체구조물에서 발생하는 금속파면의 발생위치를 검출하는 실험 및 분석과정에 대하여 다룬다.

3.1 실험 설비

충격위치 평가실험을 위하여 본 연구에서는 실제 원전에서의 상황을 반영하여 환경을 조성하였다. 금속파면에 의한 충격신호를 취득하여 이를 분석하고 평가하기 위한 연구 실험설비는 그림 8에서 보이는 기기들과 모형 구조물(Mock-up), 충격가진설비, 분석 소프트웨어로 구성되어 있다. 충격특성 평가를 위한 충격시편으로는 강구(Steel Ball)를 사용하였으며, 분석 소프트웨어는 Borland C++ V3.0 Compiler를 이용하여 제작하였다.

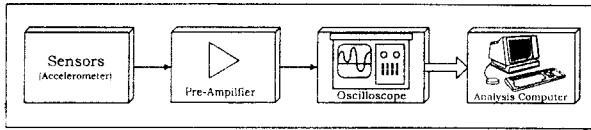


그림 8. 충격신호의 취득과 분석 과정.

모형구조물 외벽에 설치되어 충격신호를 감지하는 가속도계 센서는 금속파편 충격신호의 진동주파수의 범위를 고려하여 B&K사의 모델 4395S를 사용하였다. 이 센서의 사양은 0.3Hz~18kHz의 응답주파수, 7500m/초²의 최대측정범위, 1.0±2% mV/ms^{-2} 의 감도를 가지며, 설치공진주파수는 37kHz이다. DeltaTron형 가속도계로서 전치증폭기(Preamplifier)가 내장되어 있으며 별도의 정전류 전원공급기가 필요하고 전압원 센서로 작동된다.

모형구조물에 충격을 가하여 금속파편의 충돌에 의한 충격을 모사하는 장치인 충격가진기는 PCB사의 충격해머키트(Impact Hammer Kit)를 사용하였다. 해머의 무게는 약 0.24kg이며, 8kHz 이내의 충격신호 주파수를 발생시킬 수 있다. 또한 이 충격가진기에는 가속도계 센서와 전치증폭기가 내장되어 있어 충격인가시간과 충격력등을 측정할 수 있다. 충격측정감도는 2.3mV/N (10mV/lbf)이다. 또한 충격특성 평가를 위해서 스테인레스강 강구를 각 질량별로 제작하여 이를 사용하였다.

충격가진기로부터 발생된 신호를 취득하기 위하여 사용한 디지털 오실로스코프는 LeCroy사의 200MHz No. 9304를 사용하였다. 이는 4개의 입력채널과, 컴퓨터와의 자료호환을 위한 GPIB 포트와 RS-232 포트를 가지고 있다. 또한 DOS 포맷의 3.5인치 드라이브를 가지고 있어 신호를 저장하거나 저장된 신호를 읽어 낼 수도 있다.

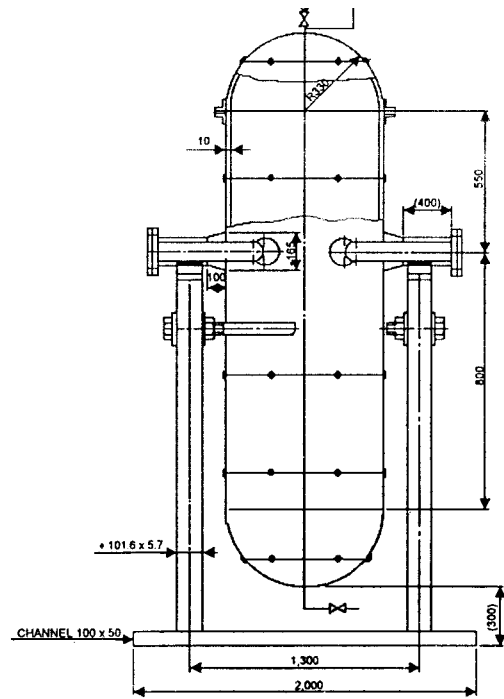
범용컴퓨터내에는 디지털 오실로스코프에 저장된 충격신호를 분석하여 충격위치를 평가하기 위한 목적으로 작성된 분석 소프트웨어를 갖추고 있다. 이 분석 소프트웨어는 앞장에서 설명한 이론을 이용하여 C와 C++언어를 이용하여 제작되었다.

원자로 모형구조물은 그림 9와 같은 형태를 가지며, 구조물 지지대, 급수 및 배수장치, 수위측정장치, 배기 및 압력제한장치, 가속도계 설치패드 등으로 구성되어 있다. 원자로모형 구조물은 한국표준형 원자로 크기의 약 1/7로 축소된 것이며, 10mm 두께의 스테인레스강으로 제작되었다. 가속도계 설치패드는 60° 간격으로 측면에 18개, 하부헤드에 14개, 상부헤드에 14개가 설치되어 있다.

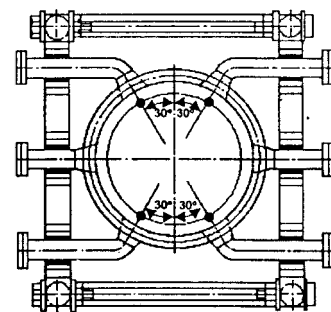
그림 10은 지금까지 설명한 실험설비를 전체적으로 보여주고 있다.

3.2 실험결과 및 분석

먼저 충격가진기를 이용하여 원자로 모형구조물에 충격을 가하여 센서로부터 얻은 충격신호에, 앞장에서 설명한 바와 같은 광의의 정재성(Widesense Stationary)을



(a)



(b)

그림 9. 원자로모형 구조물의 도면 (a)측면도와 (b)윗면도

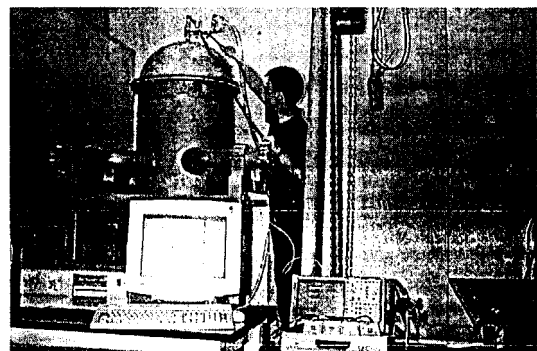


그림 10. 충격위치 평가 실험을 위한 설비.

구형(White Gaussian Noise)을 부가하였다. 또한 신호대잡음비(S/N:Signal to Noise Ratio)는 실제원전의 경우를 고려하여 약 4[dB]로 설정하였다[5]. 그림 11은 충격신호에 잡음이 첨가된 신호의 파형을 나타내고 있다. 여기에서 보듯이 충격신호의 시작점을 찾기가 불가능하므로 이를 스펙트럼 감산법을 이용하여 잡음을 제거하였다. 잡음이 제거되어진 복원된 충격신호의 파형을 그림 12에 나타내었다. 스펙트럼 감산법에 의하여 잡음이 제거된 충격신호는 약 14[dB]의 신호대 잡음비를 가지게 되어 약 10[dB]이상의 신호대 잡음비가 개선되었다.

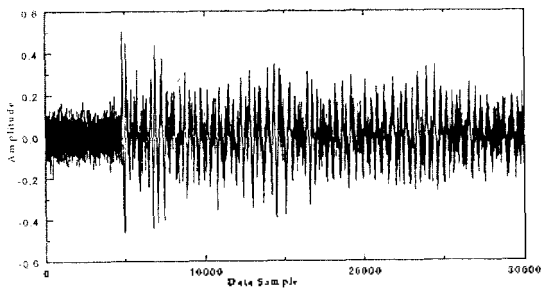


그림 11. 잡음이 첨가된 충격신호 파형(S/N=4[dB]).

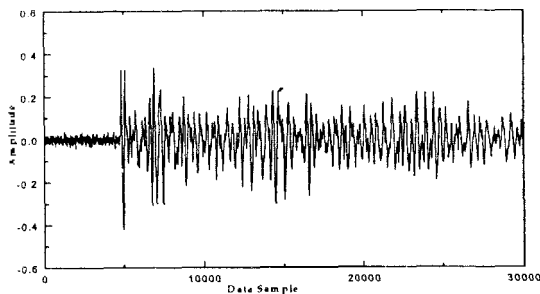


그림 12. 잡음이 제거된 충격신호 파형(S/N=14[dB]).

3.2.1 S/G 측면부에서의 충격위치 평가

위에서 설명한 관련이론을 바탕으로 측면부분에 대한 충격위치 평가 프로그램을 작성하였다. 또한 이의 검증을 위하여 모형구조물에서 충격가진기(Impact Hammer)와 3개의 가속도계 센서를 이용하여 실험하였다.

모형구조물의 측면부는 60°마다 상·중·하의 높이로 센서를 부착할 수 있도록 되어 있다. 세 개의 센서를 각각 S#1(ρ , 0°, 상단), S#2(ρ , 120°, 하단), S#1(ρ , 240°, 하단)의 지점에 설치한 후 임의의 충격을 가한 다음 S_0 , A_0 파가 각 센서에 도달되는 도달시간을 측정하였다. 모드파의 속도는 구조물의 두께와 관련되므로 반복된 실험을 통하여 S_0 가 2300[m/s], A_0 가 1800[m/s]을 사용하였다. 충격위치 평가의 예로 (ρ , 30°, 중단)지점에 충격을 가하였을 때 각 센서에서 취득된 신호파형을 그림 13에 나타내었다.

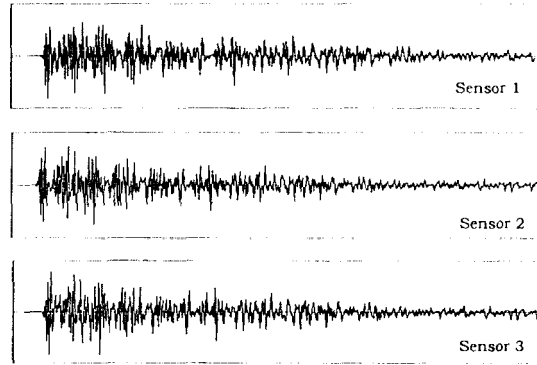


그림 13. 각 센서에서 취득된 신호파형.

충격위치 평가 프로그램은 그림 14와 같이 0°지점을 기준으로 펼쳐 나타내었다. 임의의 절단으로 생기는 문제점을 해결하고자 0°와 360°지점을 동시에 표현하였다.

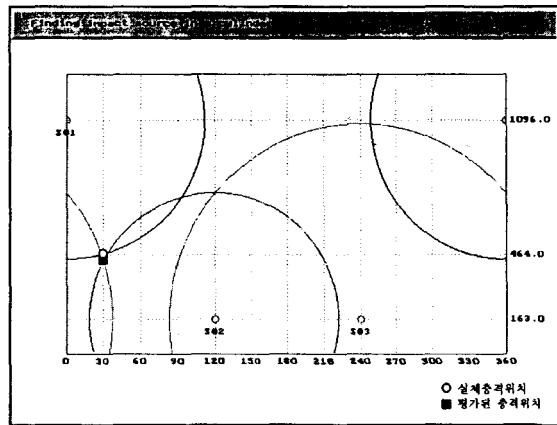


그림 14. (ρ , 30°, 중단)지점에 발생한 충격위치 평가 결과.

그림 14에서 세 원이 교차하는 지점이 평가된 충격위치 지점으로서 실제 충격위치와 근사한 지점을 평가하고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 RPV 상하부헤드에서의 충격위치 평가

수정된 원교차법의 형태로 충격위치 평가 프로그램을 작성하였다. 충격위치 평가 실험을 위해 실제 원전에서 센서위치를 참조하여 세 개의 센서를 같은 원주상에 120° 간격으로 배열하였다. 평가된 충격위치를 원자로모형 구조물의 상·하부의 모양을 정사영한 모습으로 컴퓨터 화면상에 나타내었으며, 여기서 충격위치의 지점은 세 개의 직선이 만나는 점으로 평가되어진다. 그 이유는 위에서 언급한 바와같이, 각 센서에서 하나의 평면의 방정식이 유도되는데 이를 각각 연결하게 되면 직선의 방정식의 형태로 표현될 수 있기 때문이다.

원자로모형 구조물의 상부헤드의 반지름 R 은 33cm이며, 세 개의 센서를 각각 (R , 60°, 0°), (R , 60°, 120°), (R ,

60°, 240°)의 지점에 설치하였고, (R, 50°, 40°)지점에 충격을 가하여 충격신호 제형을 획득하여 각 모드파의 도달시간을 측정하였다. 그 결과 그림이 그림 15에 나타나 있다.

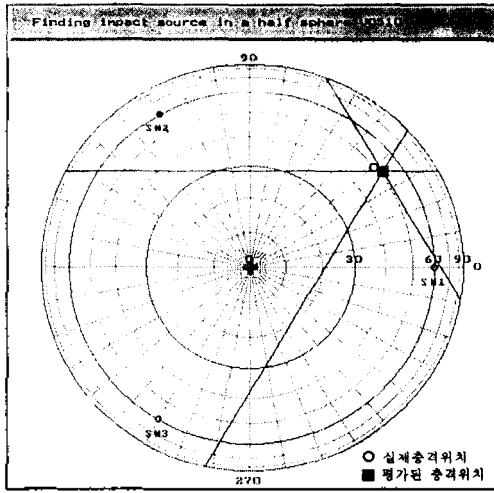


그림 15. (R, 50°, 40°)지점의 충격위치 평가 결과.

그림 15의 충격위치 평가 결과에서 보이듯이, 제안된 방법에 의하여 얻어진 충격위치는 실제의 충격위치와 유사한 지점을 나타내고 있어 제안된 이론 및 작성된 충격위치 평가 프로그램들이 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

본 논문에서 제안된 수정된 원교차법의 우수성을 정량적으로 입증하기 위하여 RPV 상하부 헤드부분에서의 금속파편에 의한 충격위치 평가를 위한 실험을 3개의 센서를 이용하여 충격위치별로 10번 독립적으로 수행하였다. 각 실험에 대하여 3개의 센서들로부터 평가된 충격위치와 각 센서사이의 거리, 그리고 실제 충격위치와 각 센서사이의 거리의 백분율오차를 각각 구한 결과가 표 1에 나타나 있다(즉 30번의 독립 시행효과를 가진). 표로부터 각 센서위치로부터 실제 충격위치와 평가된 충격위치사이의 평균 백분율오차는 3.33%가 되며 오차의 표준편차는 0.045가 되어, 제안된 방법이 실제 충격위치 근방에서 충격위치 평가를 수행함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 S/G 측면부 및 RPV 상하부등 입체 구조물내에서 발생하는 금속파편의 위치검출을 위하여 센서 어레이 신호처리 기법을 사용한 고해상도 금속파편 위치 평가 기법을 제안하였다. 이들을 바탕으로 LPMS를 위한 금속파편 위치평가 프로그램을 작성하였고 실제 원전 상황을 고려한 모의 실험을 통하여 제안된 기법이 평가 방법이 간단하며 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

본 연구결과들은 종합적인 LPMS계통 국산화를 위한 기반기술로 사용될 수 있으며, 따라서 원전의 신뢰도 및 안전성 확보와 함께 LPMS계통의 기술자립과 국제 경쟁력

상화, 그리고 의화질감에 크게 기여 할 것으로 기대된다.

표 1. 10번의 독립시행을 통한 RPV 상하부헤드에서 3개 센서의 평가된 충격위치 비교결과.

		단위: [cm]		
충격결과 센서위치 사이의 거리계산		실측값	평가값	오차(%)
실험 1	센서 1	30	28.6	4.67
	센서 2	30	30.7	2.33
	센서 3	30	30.7	2.33
실험 2	센서 1	14.5	14.8	2.07
	센서 2	34.1	33.9	0.59
	센서 3	46.0	46.8	1.74
실험 3	센서 1	34.1	34.0	0.29
	센서 2	14.5	14.6	0.69
	센서 3	46.0	46.4	0.87
실험 4	센서 1	47.6	46.6	2.10
	센서 2	24.7	23.1	6.48
	센서 3	24.7	26.3	6.48
실험 5	센서 1	13.4	12.0	10.45
	센서 2	36.7	37.1	1.09
	센서 3	50.2	49.1	2.19
실험 6	센서 1	36.7	38.1	3.81
	센서 2	50.2	50.3	0.20
	센서 3	13.4	12.3	8.20
실험 7	센서 1	34.1	34.9	2.35
	센서 2	46.0	45.7	0.65
	센서 3	14.5	13.5	6.90
실험 8	센서 1	17.5	18.3	5.46
	센서 2	31.8	30.9	2.83
	센서 3	48.4	48.0	0.83
실험 9	센서 1	49.1	48.2	2.07
	센서 2	25.0	25.5	2.00
	센서 3	25.0	24.1	3.60
실험 10	센서 1	13.4	11.6	13.43
	센서 2	36.7	37.6	2.45
	센서 3	50.2	49.2	1.99

참 고 문 헌

1. W. H. Jang, etc., "A Presentation in the Nuclear Steam Supply System Integrity Monitoring System (NIMS) for Yonggwang Nuclear Power Plant, Units 3&4".
2. T. Tsunoda, etc., "Studies on Loose Part Evaluation Technique," Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 569 to 576, Pergamon Press, 1985.

3. B. J. Olma, "Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of PWRs," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 15, pp. 583 to 594, Pergamon Press, 1985.
4. S. V. Vaseghi, *Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction*, John Wiley & Sons, England, 1996.
5. O. Vacheron, L. Cai, J. C. Benas, "Transient Characterization by means of Non Linear Optimization for Loose Part Monitoring. Improvement of the Signal to Noise Ratio by Noise Spectrum Subtraction," *Proceedings in SMORN VII*, Vol. 2, Session 10.3, 1995.
6. Peyton Z. Peebles, Jr., *Probability, Random Variables, and Random Signal Principles*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore, 1993.
7. W. K. Shin, etc, "A Study on the Signal Diagnosis Techniques for Loose Parts Monitoring System (LPMS)," KAERI/NSC-351/89.
8. 이일근 외, "On-line화된 원전내 금속과편 충격위치 검출 방법 연구," 제8회 신호처리 합동학술대회, Vol. 8, No. 1, pp. 645~648, 1995.
9. 이일근 외, "삼각법과 원교차법의 실험적 관점에서의 비교," 대한전자공학회 95년도 추계 종합학술대회, pp. 350~353, 1995.

▲이 일 근(III-Keun Rhee) 1959년 9월 27일생



1982년 2월: 경북대학교 전자공학과
(공학사)

1986년 6월: Oregon State University
전자공학과(공학석사)

1990년 2월: Oregon State University
전자공학과(공학박사)

1990년 3월~현재: 한남대학교 전자공
학과 부교수

1996년 3월~1997년 2월: Oregon State University 교환교수

※주관심분야: 디지털 신호처리 및 그 응용분야, 원전 LPMS
개발, 스펙트럼 분석, 이동 및 위성통신

▲최 재 원(Jae-Won Choi) 1971년 6월 28일생



1995년 2월: 한남대학교 전자공학과
(공학사)

1997년 8월: 한남대학교 전자공학과
(공학석사)

※주관심분야: 디지털 신호처리 및 그
응용분야, 원전 LPMS
개발, 스펙트럼 분석,
이동 및 위성통신