

99 추계 학술발표회 논문집

한국 원자력학회

## 삼각법을 이용한 증기발생기의 금속파편 위치판별 기법 개발

### Development of Technique for Localizing Loose Parts within a Steam Generator using Triangular Method

김택환, 김정수, 정철환, 함창식

한국 원자력 연구소

서덕민, 이방진

한국 전력 공사

성주현

(주) 우진

#### 요 약

금속파편은 원전의 건설시 혹은 보수공사시 외부에서 유입되거나 원전 자체의 진동에 의해 원전 내부에서 발생하며 주요 구조물에 치명적인 손상을 입힘으로서, 원전의 안전성에 많은 영향을 끼친다. 이러한 금속파편이 발생시, 파편의 정확한 위치를 판별하기 위해서 본 논문에서는 원전 증기발생기 내부에서 발생한 금속파편의 충격위치를 판별하는 알고리즘을 제안하고, 이를 영광 3호기 시운전 데이터를 이용하여 알고리즘의 유용성을 분석하였다. 영광 3호기에 적용하기 위해, 증기발생기를 원통으로 모델링 하였고, 모델링된 원통 상에서 삼각법을 이용하여 충격위치를 판별하는 알고리즘을 개발하였다. 제안된 알고리즘을 이용하여 영광 3호기 충격시험 데이터에 적용한 결과, 실제 충격시험 위치와 추정위치는 0.05% 이하의 오차 범위 내로 분석되어 정확하게 위치를 판별할 수 있음을 알 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 개발된 알고리즘을 기존 원전에 적용하면, 원전의 안전성 제고에 크게 기여할 것으로 예상된다.

---

이 연구는 과학기술부 원자력 성과이전 과제인 "NSSS 디지털 건전성 감시계통 국산화"의 지원을 받았음

## Abstract

It is known that loose parts in the reactor coolant systems (RCS) bring serious damage into the system components and impede the normal function of the system. In this paper the localization algorithm of loose parts in S/G is developed and applied to the impact test data of the YG 3 S/G in Korea. The S/G is modeled as a cylinder shape and the triangular method is used to find out the impact point of a loose part on the model. The result of the estimated impact point applying to the proposed algorithm has below 0.05% average error rate. If this algorithm will be installed into the NPP, the safety and operability of NPP will be improved.

## 1. 서론

원전의 냉각재 계통 내부에서 발생하는 금속파편은 구조물의 진동, 비정상적인 마찰 등으로 인하여 구조물의 일부가 떨어져 나오거나 원전 건설시공 중 혹은 핵연료 재장전시, 보수공사 중에 외부로부터 유입된다. 냉각재 계통 내부의 금속파편은 냉각수를 따라 계통내부를 고속으로 이동하여, 계통 내벽과의 충돌에 의해 구조물에 치명적인 손상을 야기하며, 심한 경우 1차측 냉각재 및 방사능 등을 외부로 유출시킬 위험이 있다. 이러한 이유로 원자력 발전소에는 이를 감시 및 진단하기 위해 금속파편 감시시스템(LPMS: Loose Parts Monitoring System)을 설치하고 있다. 이 시스템은 원자로 냉각재 계통 주요 기기의 압력경계 외부표면에 충격에 민감한 가속도계 센서(Accelerometer)를 설치하여 금속파편이 냉각재 계통 내부에 발생하였을 때, 충격음을 탐지하고 충격 위치를 판별하여, 운전원에게 필요한 정보를 제공하므로써, 안전사고를 미연에 방지하는 역할을 한다[1, 2, 3].

영광 3호기에 설치된 금속파편 감시시스템은 충격시 발생하는 신호를 저장하여 전문가가 이 신호를 데이터베이스화된 기준신호와 비교 분석하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 운전원이 쉽게 접근할 수 있는 분석 알고리즘이 내재되어 있지 않고, 실제 충격시 충격신호의 분석 과정에 많은 시간이 소요된다. 그러므로 치명적인 손상이 발생할 경우, 즉각적으로 대처를 할 수 없으며 운전원의 경험에만 의존하므로 오판 가능성이 크고 정확한 충격위치를 판별할 수 없는 단점이 있다[4].

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여, 영광 3호기 냉각재 계통 중 증기발생기 내부에서 발생하는 금속파편의 충격신호를 센서로부터 입력받아 분석컴퓨터에 입력하여 즉각적으로 충격위치를 분석할 수 있는 위치판별 분석 알고리즘을 제안한다. 즉, 증기발생기 내에서 발생한 금속파편의 위치판별을 위한 증기발생기의 모델링 및 위치판별 알고리즘을 제안하였고, 이 알고리

즘을 이용하여 센서에 유입된 신호의 충격 시작시간을 운전원이 입력하면, 즉시 충격위치 판별이 가능하도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 영광 3호기의 시운전 데이터를 적용하기 위해 증기발생기의 모델링에 대하여 설명하였고, 3장에서는 위치 판별을 위한 기본 알고리즘인 삼각법에 대해 언급하였으며, 4장은 영광 3호기 시운전 데이터를 개발 알고리즘에 적용하여 분석하였고, 마지막으로 5장에서는 결론 및 추후 연구방향에 대하여 언급하였다.

## 2 영광 3호기 증기발생기의 모델링

영광 3호기에 설치된 증기발생기의 센서위치 및 제원은 그림 1과 같다. 금속파편 감시시스템에 적용하기 위해 그림 1의 증기발생기의 일부를 그림 2와 같이 원통형으로 모델링 하였다. 그리고 이 원통을 다시 평면으로 모델링 하여 3차원인 증기발생기를 2차원인 평면으로 해석하였다. 평면으로 모델링된 증기발생기의 센서 위치 및 제원은 그림 3과 같다.

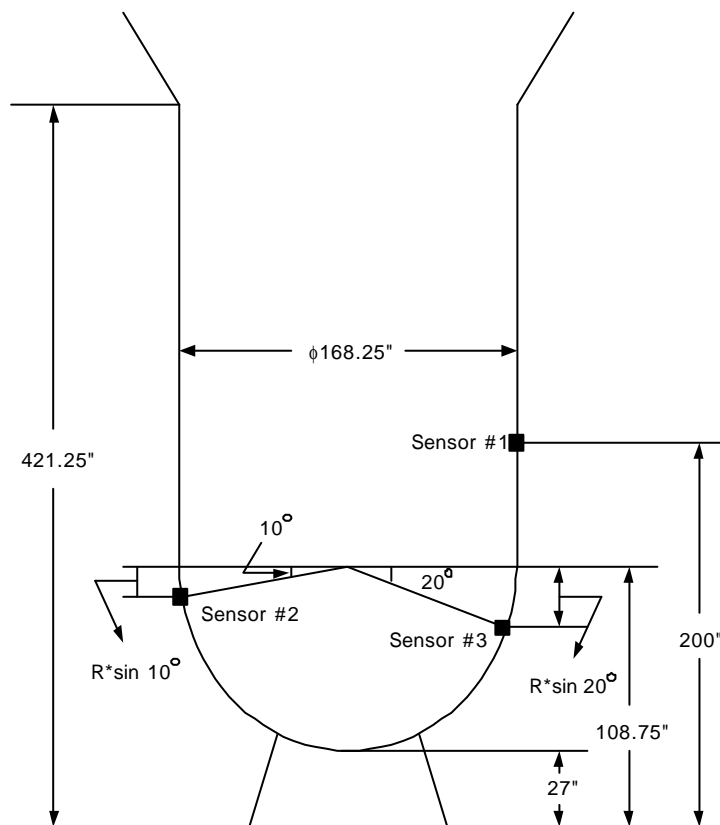


그림 1. 영광 3호기 증기발생기의 제원 및 센서의 위치

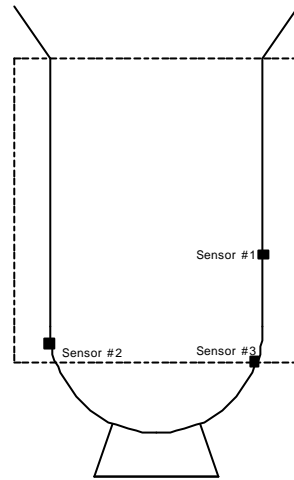


그림 2. 평판으로 모델링하기 위한 증기발생기의 일부분

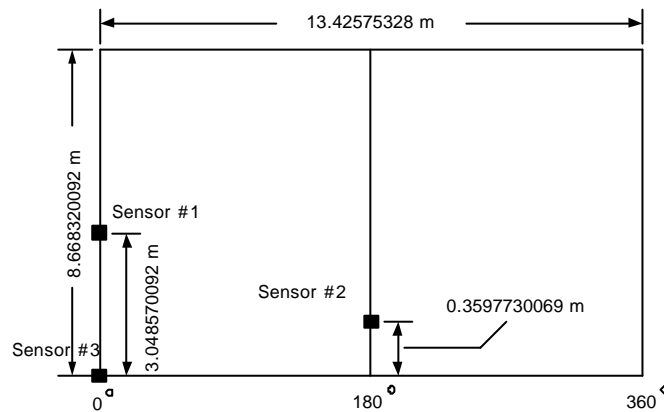


그림 3. 평판으로 모델링된 증기발생기의 일부

그림 3에서 평면의 너비는 증기발생기 원통부분의 둘레 길이이며, 평면의 높이는 원통으로 모델링된 증기발생기의 일부에서 가장 아래에 위치한 센서(그림 3의 3번 센서)의 위치를 기준으로 한 것이다. 각 센서의 위치는 증기발생기의 원통 상에서의 위치를 평면상에서의 위치로 재해석하여 미터(m) 단위로 나타낸 것이다. 센서 번호는 실제 증기발생기 상에 설치된 센서 번호와 일치하지 않으며 설치 순서에 따라 재 지정된 번호이다.

### 3. 삼각법(Triangular Method)에 의한 충격위치 평가 알고리즘

충격에 의한 표면파의 전파모드는 크게  $S_0$  모드파,  $A_0$  모드파의 두 가지로 나뉜다[5].  $A_0$  모드파는 의사세로파라고도 불리며 파의 진행 방향과 매질의 운동 방향이 수직인 파형이다. 이 의

사제로파의 전파 속도는 어떠한 매질에서도 변하지 않는다. 또한 운동 방향과 진행 방향이 수직이므로 전파속도가 느리고 진폭이 크다. S<sub>0</sub> 모드파는 굽힘파라고도 불리며 파의 진행 방향과 매질의 운동 방향이 같다. 따라서 전파 속도는 빠르나 진폭이 작아 실제 신호에서는 잡음에 묻혀 구분이 힘들다. 또한 전파되는 매질의 성질이나 두께 등에 의해 전파되는 속도도 달라진다. 본 논문에서는 진폭이 크고, 매질에 따른 전파 속도가 일정한 A<sub>0</sub> 모드파를 이용하여 삼각법을 적용, 충격 위치를 판별하였다.

원자력 발전소 내부에 발생하는 금속파편의 충격 위치를 삼각법을 이용하여 추정하는 방법은 적용 가능성이 높다는 이점 때문에 많은 연구가 수행되고 있다[6, 7]. 삼각법을 이용하여 충격 위치를 평가하기 위해서는 적어도 3개 이상의 센서로부터의 충격신호 정보가 필요하다. 영광 3호기 증기발생기에는 4개의 센서가 설치되어 있는데, 3개는 증기발생기 하부에, 1개는 증기발생기 상부에 설치되어 있다. 본 논문에서 제안한 충격위치 판별 알고리즘에는 증기발생기 하부에 설치된 3개의 센서가 이용된다.

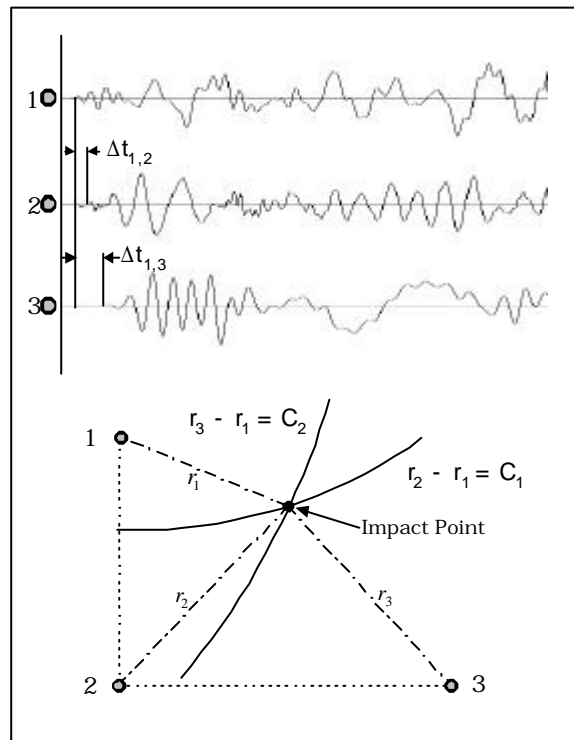


그림 4. 삼각법을 이용한 충격위치 평가방법

$$r_2 - r_1 = V_p \cdot \Delta t_{1,2} \quad (1)$$

$$r_3 - r_1 = V_p \cdot \Delta t_{1,3} \quad (2)$$

삼각법에 의한 충격위치 평가는 센서에 유입된 충격신호의 도달지연시간과 충격파의 전파속도를 이용하는 방법이다. 충격신호의 전파속도가 알려져 있을 때, 3개의 센서에 신호가 유입된 시간이력 정보를 얻고 센서 사이의 신호도달 지연시간을 이용하면 충격위치를 구할 수 있다.

그림 4는 삼각법에 의한 충격위치 평가방법을 보여주고 있다. 그림의 위쪽에는 센서 1, 2, 3에 들어오는 충격신호와 도달지연시간이 나타나있고, 아래쪽에는 이를 이용하여 충격위치를 구하는 방법이 나타나있다. 충격 신호가 발생시 센서 1과 센서 2, 그리고 센서 1과 센서 3 사이의 충격신호 도달 시간의 차,  $\Delta t_{1,2}$ ,  $\Delta t_{1,3}$ 를 구한 다음 이를 식 (1)과 (2)에 적용하면 충격 위치를 구할 수 있다.

여기서,  $r_1, r_2, r_3$ 는 센서와 충격위치까지의 거리를 나타내고,  $V_s$ 는 충격파의 전파속도, 그리고  $\Delta t_{1,2}$ ,  $\Delta t_{1,3}$ 는 센서 사이의 충격파 도달시간차를 나타낸다.

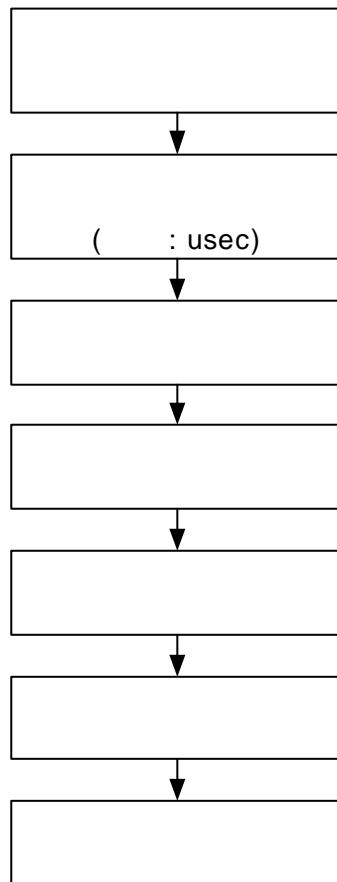


그림 5. 충격위치를 계산하기 위한 흐름도

그림 5는 본 논문에서 개발한 충격위치 판별 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다. 증기발생기 표면상에 충격 신호가 발생하면, 먼저 각 센서에 충격파( $A_0$  모드파)가 유입된 시간 정보를  $\mu\text{sec}$  단위로 입력받는다. 충격파가 각 센서에 도달한 순서는 입력받은 시간에 의해 자동으로 계산된다. 충격 신호가 충격이 발생한 지점에서 가장 가까운 센서에 도달할 때까지 걸린 시간을 알 수 없으므로 가장 먼저 신호가 도달한 센서의 시간을 다른 센서의 도달시간에서 뺀다. 이 과정을 거쳐 각 센서 사이의 충격신호 도달 시간차를 계산한다.

계산된 도달 시간차를 바탕으로 신호가 첫 번째로 도달한 센서에서 충격 지점까지 충격신호가 전파되는데 걸리는 시간을 계산한다. 이 값에 각 센서 사이의 충격신호 도달 시간차를 더해 각 센서에 충격신호가 도달하는데 걸린 시간을 구한다. 계산된 시간에 충격신호의 속도를 곱하면 각 센서로부터 충격지점까지의 거리가 계산되므로 이 값들을 이용하여 각 센서를 중심으로 하는 원을 그린다. 세 개의 원이 만나는 한 점이 추정된 충격위치이다.

그림 6은 본 알고리즘을 이용하여 개발된 프로그램으로 충격위치를 판별한 결과를 출력한 화면이다. 좌측 화면에는 평판으로 모델링된 증기발생기 상에서 발생한 충격위치를 표시하고 있으며, 우측 화면에는 충격발생 위치를 원통 좌표계로 나타내었다. 그리고, 계산된 충격위치와 각 센서 사이의 거리를 미터(m) 단위로 출력하였다. 이 화면에는 실제 충격 위치와 계산된 충격 위치 사이의 오차를 확인하기 위하여 실제 충격위치를 입력받아 비교하여 출력하도록 하였다.

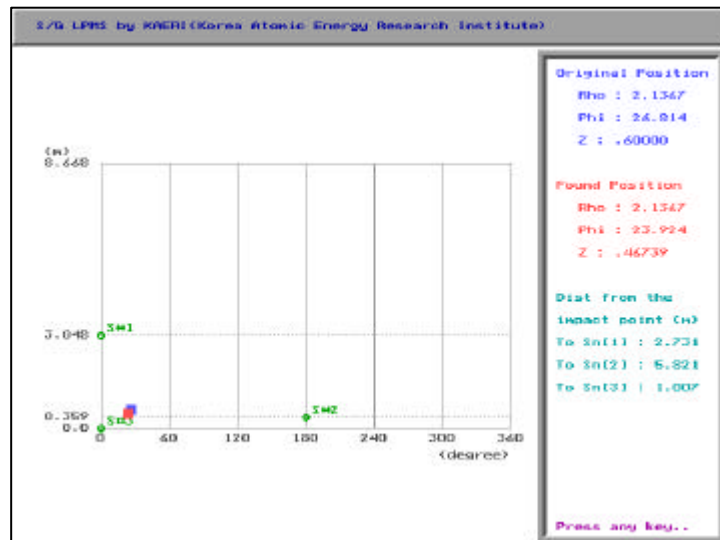


그림 6. 충격위치 계산결과를 그래픽으로 출력한 화면

#### 4 실험 및 분석결과

본 논문에서 개발된 금속파편의 충격위치 판별 알고리즘을 영광 3호기 증기발생기 시운전시에 실시된 충격시험 데이터에 적용하여 분석하였다. 충격시험은 정상상태와 동일한 조건으로 만들기 위해 RCP를 구동하여 상온상태(100℃)로 만들어 시험하였다. 그리고 증기발생기 하부에 설치된 센서를 기준으로 하여 좌측으로 1m, 위로 0.8m 또는 0.6m 근처를 질량 530g의 강구로 충격을 발생시켰으며 총 6번 수행되었다. 증기발생기 내부의 유속은 1,0844 m/sec이며, 증기발생기상에 설치된 가속도계 센서의 측정감도는 10pC/g ~ 50pC/g이다. 충격위치 판별에 이용된 충격파는 가장 두드러진 파인  $A_0$  모드파(Transverse Wave)를 이용하였는데 이 파는 매질에 상관없이 고유속도 3400 m/s 를 갖는다[5]. 이때 센서를 통하여 유입된 신호를 레코더(TEAC RD-135T; 샘플링 주파수 : 512 kHz( $1/\Delta t=1.9539 \times 10^{-5}$ ), 대역폭 : 20kHz, 4채널, 채널당 14bit, S/N비 : 72dB)에 저장하여 본 논문에서 개발한 알고리즘을 이용하여 분석하였다.

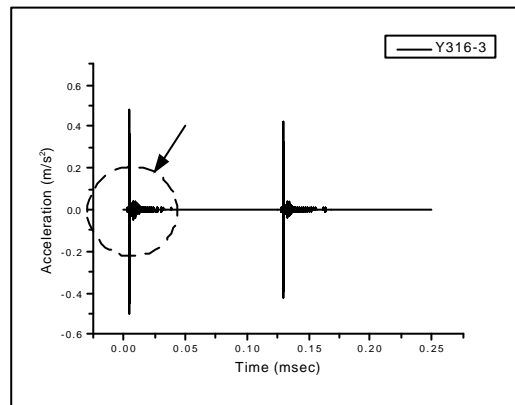


그림 7. 영광 3호기 증기발생기 충격 시험시 취득된 충격신호

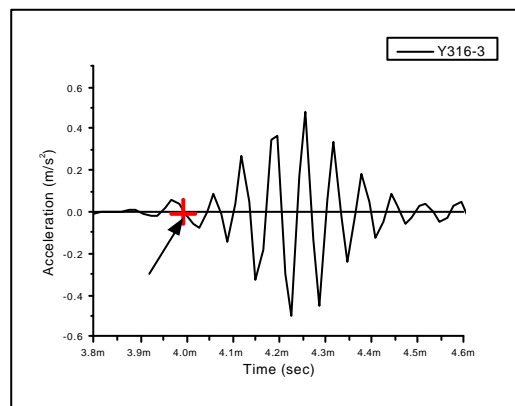


그림 8. 충격신호를 확대하여 충격파의 시작점을 판단한 화면



분석 과정은 다음과 같다. 먼저, 그림 7과 같이 취득된 각 센서의 충격 데이터를 화면에 출력하여 충격지점이 발생한 부분을 확대해서 분석한다. 그리고, 그림 8과 같이 충격신호가 발생한 시작점( $A_0$  모드파의 시작점)을 찾아 이 때의 시간을 기록한다. 실제 원전 내부에서 발생한 충격 신호는 잡음을 포함하고 있으므로  $A_0$  모드파의 시작점의 판별은 자동화하기 어렵다. 따라서 현재는 분석자의 경험에 의하여 영교차법, 주기별 고주파성분의 평균값 변동추이를 이용한 방법, 진폭 크기의 변화를 이용하는 방법 및 저주파성분의 변동추이를 관찰하는 방법 등을 이용하여 판별한다[8].

본 논문에서는 잡음이 존재하는 충격 신호를 잡음을 제거하지 않고 원 신호의 저주파성분 변동추이 관찰법을 이용하여  $A_0$  모드파의 시작점을 판별하였다. 이 방법은 신호의 고주파 성분은 제외하고, 외곽선 형태로 나타난 저주파 성분을 관찰하여 주기가 현저하게 늘어난 부분의 시작부분을 찾는다. 이렇게 구해진 각 센서에서의 충격과 시작 시간을 개발된 프로그램에 입력하여 충격위치를 판별하였다.

영광 3호기에 설치된 각 센서의 설치 위치 및 번호는 그림 9와 같다. 원자로를 중심으로 양쪽에 두 개의 증기발생기가 설치되어 있다. 원자로에는 하부 헤드(반구부분)에 두 개, 상부 헤드에 두 개의 센서가 각각 설치되어 있으며, 각 증기발생기에는 상부에 한 개, 하부에 세 개의 센서가 설치되어 있다. 증기발생기에 부착된 센서들 중 센서 5, 6, 8과 센서 9, 10, 12는 그림에서 보이는 것과 같이 일직선상에 설치되어 있고, 센서 7번과 11번은 이들 센서들의 반대쪽, 즉 180° 위상으로 설치되어 있는데 각 RCP 펌프에 가려 그림에는 나타나 있지 않다.

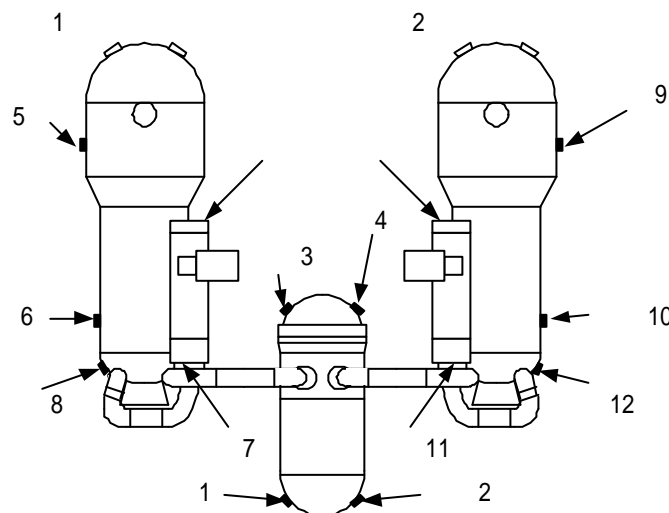


그림 9. 영광 3호기 원자로 및 증기발생기상에 설치된 센서의 위치

그림 9의 센서들 중, 충격위치 판별에 이용된 센서들은 1번 증기발생기의 6 ~ 8번 센서, 2번 증기발생기의 10 ~ 12번 센서들이며 이 센서들 중 주로 센서 6, 8, 12번 주위에서 충격신호를 발생시켰다.

영광 3호기에서 시행된 충격시험 데이터를 앞에서 설명한 분석과정을 이용하여 분석한 결과가 표 1에 나타나 있다. 이 표에서 '→' 기호는 센서를 기준으로 하여 좌측을 나타내고, '↑' 기호는 상부, '↓' 기호는 하부를 나타낸다. 이 실험에서 증기발생기 1은 센서 8이 좌표의 기준이 되고, 증기발생기 2는 센서 12가 좌표의 기준이 된다. 예를 들어, 표에서 실험 1은 12번 센서를 기준으로 하여 좌측으로 1m, 위쪽으로 0.8m 지점에 충격을 발생시켰을 때의 결과이며 이를 원통좌표계로 표시하면 26.8°, 0.8m가 된다. 각 센서에 유입된 충격신호를 분석한 결과 충격파( $A_0$  모드 파)가 센서에 유입된 시간은 각각 1251, 2330, 841  $\mu\text{sec}$ 이고, 이 시간들을 이용하여 계산한 결과 판별된 충격지점은 원통좌표계로 17.78°, 0.75m로 나타났다.

표 1에서 나타나 있듯이 총 6번의 충격시험 결과 계산된 충격지점은 약 0.05% 이하의 오차범위 내에 있어 정확하게 실제 충격지점을 판별하였다. 따라서 본 논문에서 개발한 증기발생기의 충격위치 판별 알고리즘과 프로그램을 원전에 적용하였을 때, 충격 추정위치를 오차 없이 쉽게 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 판별된 충격위치가 실제의 충격위치에서 적은 범위지만 오차를 갖는 이유는 충격신호의 발생 시각 판별시의 잡음에 의해 발생한 오차로 분석되었다.

표 1. 영광 3호기 증기발생기 충격 시험 자료 분석결과

실험 번호	실제 충격지점	충격지점 (원통좌표계)	충격 신호 시작점 ( $\mu\text{sec}$ )	계산된 충격지점 (원통좌표계)	오차 (%)
1	12번 센서 기준 → 1m, ↑ 0.8m	26.8° 0.8m	1251, 2330, 841	17.78° 0.75m	0.025 0.006
2	12번 센서 기준 → 1m, ↑ 0.8m	26.8° 0.8m	2945, 3938, 2446	19.61° 0.54m	0.02 0.03
3	8번 센서 기준 → 1m, ↑ 0.6m	26.8° 0.6m	2879, 3968, 2498	18.22° 0.8m	0.024 0.023
4	8번 센서 기준 → 1m, ↑ 0.6m	26.8° 0.6m	2991, 3900, 2484	23.92° 0.47m	0.008 0.015
5	8번 센서 기준 → 1m, ↑ 0.6m	26.8° 0.6m	2858, 3920, 2460	19.23° 0.76m	0.021 0.018
6	6번 센서 기준 → 1m, ↓ 0.6m	26.8° 2.248m	2429, 4170, 3133	17.96° 2.99m	0.025 0.086

## 6. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 영광 3호기 원전의 증기발생기 내부에서 발생한 금속파편의 충격위치를 판별하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 증기발생기를 원통으로 모델링 하였으며, 모델링된 원통 상에서 삼각법을 이용하여 충격위치를 판별하는 알고리즘을 개발하였다.

제안된 알고리즘을 이용하여 영광 3호기에서 실시한 충격시험 데이터를 분석한 결과, 판별한 충격위치와 실제 충격위치와의 오차는 0.05% 이하로 정확하게 위치를 판별함을 볼 수 있다. 그러므로 이것을 원전에 적용하면 금속파편이 발생하였을 때 운전원이 간편하고 신속하게 충격위치를 판별할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구 과제로는 원전의 출력 증가시 자주 발생하는 오경보(false alarm)의 판별, 충격신호의 잡음 제거, 충격신호( $A_0$  모드파) 시작점의 자동판별 등이 있다. 원전의 출력 증가시 자주 발생하는 오경보는 원전의 출력이 증가함에 따라 구조물의 변형 등으로 발생하는 구조물 자체의 팽창 진동, 구조물간의 마찰에 의한 진동 등이 원인이다. 이러한 신호는 금속파편 신호음과 동일한 에너지를 가지고 있어 금속파편의 충격신호와 구별이 어렵다. 이와 관련된 오경보를 구별하기 위한 알고리즘을 본 논문에서 개발한 알고리즘을 적절히 이용하여 개발할 예정이다. 또한, 웨이블릿(Wavelet)과 AR 프로세스 모델링을 이용하여 실시간 잡음제거 및  $A_0$  모드파 시작점의 자동판별에 대한 연구를 수행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] EPRI, "Loose-Parts Monitoring System Improvements," EPRI NP-5743, March 1998.
- [2] W. K. Shin, et al, "A Study on the Signal Diagnosis Techniques for Loose Parts Monitoring System (LPMS)," KAERI/NSC-351/89.
- [3] W. K. Shin, et al, "A Study on the Plant Diagnostic Techniques Using Reactor Noise," KAERI/NSC-454/89.
- [4] Combustion Engineering, Inc., "Instruction Manual: Operation - Maintenance Instructions for NSSS Integrity Monitoring System," Document No. 91691-ICE-15123.
- [5] H. Lamb, "On Wave-Propagation in Two Dimensions," Proceedings of the London Mathematical Society, Vol. 35, 1902, pp. 141-161
- [6] B. J. Olma, "Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of PWRs," Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 583-594, Pergamon Press, 1985.
- [7] G. Castanie, et. al, "Recent Experiences in Loose Parts Monitoring of Light Water Reactors," SMORN V Meeting, Munich, FRG, Oct. 1987.
- [8] J. W. Allen and Lisa Oesterling, "Loose Part Sensor Validation, Impact Detection, and Characterization," Nuclear Plant Journal, May-June 1989.