

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

발전소 시운전데이터를 이용한 금속파편 질량추정 알고리즘 개발

**Development of mass estimation algorithm using impact test data
of Nuclear Power Plant**

김태완, 김정수, 황인구, 함창식

한국원자력연구소

황두성, 박욱기

한국전력공사

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. 본 논문은 Hertz 이론을 바탕으로 원자력 발전소의 증기발생기에 발생하는 금속파편의 질량을 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이 질량추정 알고리즘을 영광 3호기 시운전 금속파편 충격데이터에 적용하여 실제값과 질량 추정값을 비교 분석하였다. 분석한 결과 질량 추정 평균 오차가 약28% 이내로 상당히 유용한 결과를 보임을 알 수 있었다.

Abstract

It is known that loose parts in the reactor coolant systems (RCS) cause serious damage into the systems. We developed the mass estimation algorithm based on Hertz theory in order to estimate the mass of loose parts and applied the algorithm to the impact test data of YG3. The mass estimation values were compared with real values in order to verify the algorithm. The result showed that the average error of mass estimation value in less than 28%.

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

1. 서 론

원자력 발전소 냉각재 계통내의 금속파편은 유체유동, 응력 부식, 구조요소간 비정상적 마찰 등에 의해 구조물로부터 분리되거나 원전 건설기간 핵연료 재장전, 기타 보수활동시 외부로부터 금속 이물질이 계통내로 유입됨으로써 발생된다. 금속파편은 계통내 구조물들을 취약하게 하거나 파손을 일으키므로 이러한 금속파편에 대한 분석 알고리즘은 원자로의 운전성 및 안전성과 직결된다. 그러므로 원자력 발전소에는 이들 금속파편을 감시하기 위한 금속파편 감시 시스템(LPMS, Loose Parts Monitoring System)이 설치되어 운용되고 있다. 그러나, 국내 원전에 설치되어있는 금속파편 감시 계통은 금속파편이 발생된 위치나 금속파편의 질량에 대한 정보는 제공하지 않고 단지 경보 발생 및 기록을 수행하는 단계에 머무르고 있다[1]. 본 논문에서는 원자력 발전소 내에 발생하는 금속파편의 질량을 추정할 수 있는 방법을 개발하였다.

금속 파편 충격 신호를 분석하여 질량을 판별하는 기존의 방법은 전력스펙트럼 밀도(PSD)를 이용한 질량 평가법[2], 중심 주파수를 이용하는 질량 평가법[3] 및 Hertz의 충격이론[4, 5, 6, 7, 8]등이 있다. 그러나, 전력스펙트럼 밀도(PSD)를 이용한 질량 평가법과 중심 주파수를 이용하는 질량 평가법은 센서의 공진 및 배경잡음으로 인해 정확한 질량판별을 추정하기가 어렵다. 본 논문에서는 Hertz 충격이론을 기본으로 질량 추정 알고리즘을 개발하였고, 영광 3호기 시운전데이터를 이용하여 유용성을 판별하였다. 본 논문의 2장에서 Hertz에 대한 충격이론을 바탕으로 본 논문의 개발 알고리즘을 flow chart별로 설명하였고, 3장에서 실제 영광 3호기 시운전 데이터를 이용한 실험결과를 설명하였으며, 마지막으로 4장에는 결론 및 추후 연구 방향에 대해 제시하였다.

2 Hertz이론을 이용한 충격 질량 추정 알고리즘

2.1 Hertz 의 충격이론

무한히 넓은 금속평판(Steel Plate)에 강구(Solid sphere)를 아래 그림과 같이 충돌 시킬 때, 평판의 응답함수가 충격접촉시간의 반주기(Half Period)로 하는 굽힘파(Banding Wave)로 나타난다고 가정하면, Hertz의 이론으로 다음과 같이 금속구에 대한 접촉시간동안의 최대변위 D_{max} 및 접촉시간 T_d 를 각각 얻을 수 있다.

$$D_{max} = K_b(mV_0^2)^{0.4}R^{-0.2} \quad (1)$$

$$K_b = \left[\frac{15}{16} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.4}$$

$$T_d = 2.94D_{max} / V_0 \quad (2)$$

여기서, m 은 강구의 질량, V_0 는 강구의 충돌속도 (m/sec), ν_1 과 ν_2 는 plate와 강구의 poisson 비, E_1 과 E_2 는 plate와 강구의 Young을 (N/m²), R 은 강구의 반경 (m), K_H 는 Hertz의 충돌계수 (m^{0.75}N^{-0.4})를 말한다.

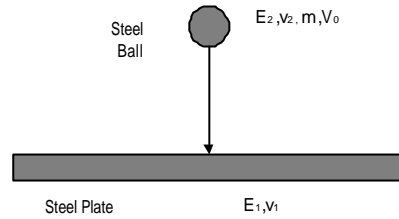


그림 1. 강구와 금속평판과의 충돌실험.

Hertz의 충격이론에 의하여, 강구가 금속파면에 충돌하였을 때의 최대변위와 충격 접촉시간을 알 수 있다. 그러나 Hertz 이론으로부터 충격 신호의 질량을 추정하기 위한 속도, 가속도 및 변위와 접촉시간과의 관계를 얻을 수 없다. 그러므로 다음절에서와 같이 충격신호를 정현파 형태로 가정한다.

2.2 정현파 가정

강구가 금속판에 충돌하는 모양을 Hertz의 충격이론에 근거하여 정현파의 모양으로 가정하면 아래 그림과 같다.

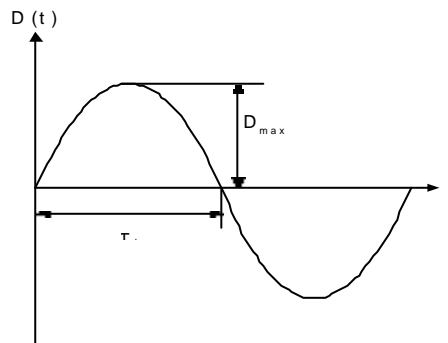


그림 2. 강구에 의한 금속판의 변형모양의 정현파 가정.

위 그림에서 강구가 금속판에 충돌시 변형되는 변위 $D(t)$ 는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_{max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (3)$$

여기서 식(3)을 미분하면, 충격속도 $V(t)$ 와 충격가속도 $A(t)$ 를 계산할 수 있다.

$$D(t)' = V(t) = \frac{\pi}{T_d} D_{max} \cos\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (4)$$

$$D(t)'' = A(t) = -\left(\frac{\pi}{T_d}\right)^2 D_{max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (5)$$

금속판에 가해지는 힘 $F(t)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$F(t) = mA(t) \quad (6)$$

여기서 t 의 범위는 $0 < t < T_d$ 이므로, 위의 식들은 강구가 금속판에 접촉하고 있는 동안에만 의미를 갖는다. 그리고, 최대 충격속도는 $V(t)$ 의 cosine함수부분이 "1"일때이며, 다음과 같이 표현된다

$$V_{max} = V(0) = V_0 = \frac{\pi}{T_d} D_{max} \quad (7)$$

충격접촉시간은 위의 식을 이용하면 최대변위와 최대 충격속도로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_d = \pi \frac{D_{max}}{V_0} \quad (8)$$

이렇게 구한 접촉시간은 Hertz의 충격이론에 의한 식(2)의 접촉시간과 거의 같은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 단지 약 7%정도의 오차를 보이고 있어 충격거동에 대한 앞의 가정을 사용하여도 큰 오차를 내지 않는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 가정을 이용하여 금속판의 충격파는 정현파로 가정하여 계산할 수 있다.

2.3 반주기 조정

충격질량을 추정하기 위한 본 논문의 추정 알고리즘에 대한 흐름도는 그림 3에 있다. 여기에서 입력변수는 충격파의 진폭(m/s^2), 반주기(sec), 거리(m), 충격속도(m/s), 평판두께(m)등이다. 강구의 충격 접촉시간인 반주기(T_d)는 식(8)을 그대로 사용할 경우, 실제 계산된 출력값이 많은 차이를 보인다

다. 따라서 모의실험을 분석하여 반주기의 주기에 따라 입력값을 수정하였다. 표1은 반주기의 조정 범위와 조정값을 나타낸다.

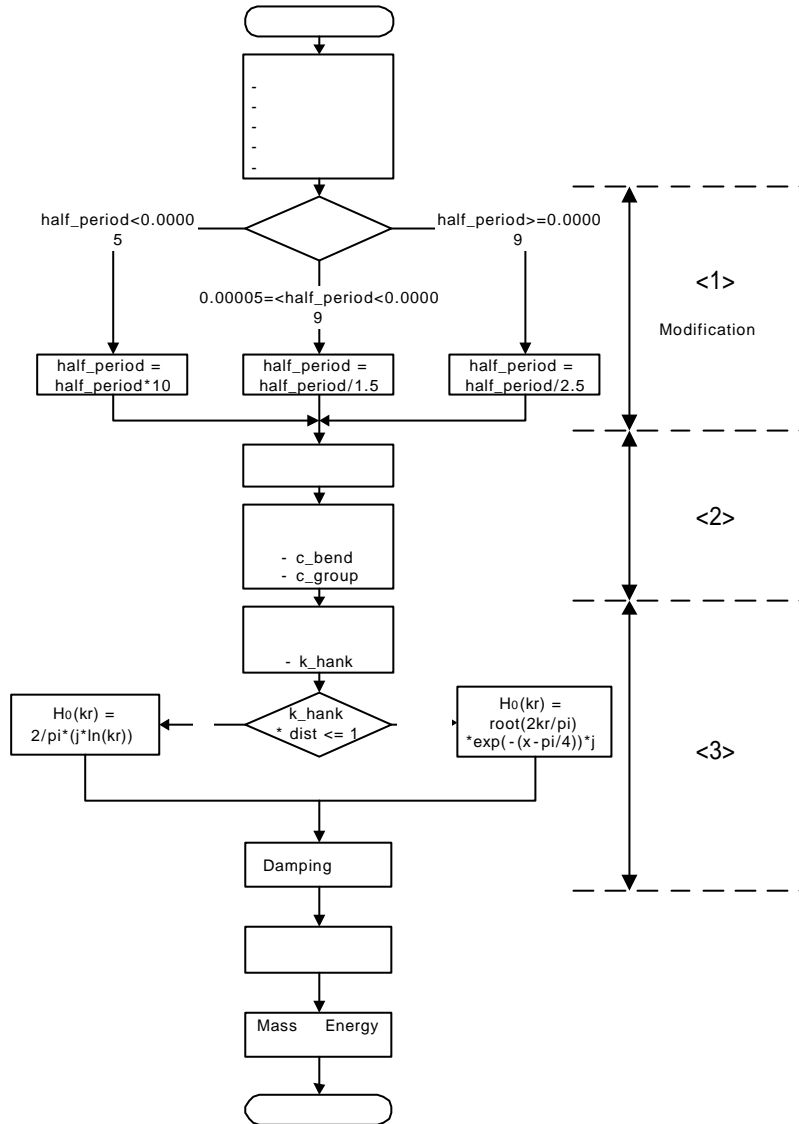


그림 3. 질량 추정 알고리즘의 흐름도

표 1. 수정된 반주기 조정범위 및 조정값

반주기 범위	조정값
반주기가 0.00005sec 미만일 경우	반주기(T_d) $\times 10$
반주기가 0.00009sec 이상일 경우	반주기(T_d) $\div 2.5$
반주기가 0.00005sec 이상, 0.00009 미만일 경우	반주기(T_d) $\div 1.5$

24 충격파의 파형속도 정의

정확한 금속질량의 유효 질량을 계산하기 위해 사용되는 충격파에는 의사세로파(Quasi - Longitudinal Wave)와 굽힘파(Bending Wave)가 사용된다. 그림 3의 두 번째 부분은 파형속도를 계산하는 절차에 대해 나타내고 있다. 의사 세로파는 진행 방향과 운동 방향이 수직이며 전파속도가 느리고 진폭이 크며, 매질에 상관없이 일정한 속도(5,270m/s)를 유지한다. 굽힘파는 진행 방향과 운동 방향이 같아 전파 속도가 빠르지만 진폭이 작아 실제 신호에서는 배경잡음에 묻혀 알아보기 힘들고, 전파되는 매질의 성질이나 두께등에 의해 전파되는 속도가 달라진다. 실제 충격파는 임펄스파(Impulse Wave)와 비슷하며 여러 가지 주파수를 포함하고 있다. 그러므로 좀더 정확한 계산을 위해서는 각 파의 속도를 이용한 군속도(Group Velocity)라는 포괄적인 개념의 속도를 이용해야 한다. 충격파 군속도(Impact Wave Group Velocity), C_g 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_g = \frac{3.6C_L^2kf}{C_g(C_L+9kf)} \quad (9)$$

여기서 C_L 는 의사세로파, C_g 는 굽힘파, k 는 평판의 두께, 그리고 f 는 주파수(Hz)를 말한다.

25 진폭감소 특성에 대한 보상

그림 3의 세 번째 부분은 거리감쇄 보상 및 Damping 보상방법을 나타내고 있다. 여기서, 거리 감쇄 및 Damping 보상을 하는 이유는 다음과 같다. 충격 신호의 데이터는 일반적으로 충격지점에서 어느 정도 떨어져 있는 센서로부터 얻은 정보를 분석하게 되므로, 충격지점에서부터 센서까지 충격파가 전파되는 동안 매질의 종류와 매질 내부의 물질등 여러 가지 감쇠 영향에 의해 충격파의 진폭이 감소하여 여러 가지 정보를 잃어버리게 된다. 따라서 정확한 충격 질량을 측정하기 위해서는 위의 감쇠 요인을 보상하여 질량을 측정해야 한다.

거리에 의한 진폭감쇠란 충격점과 센서사이의 거리에 의해 충격파가 전파되는 동안 진폭이 감소하는 현상이며, 헨켈함수(Hankel Function)를 이용하여 (10)식처럼 표현된다.

$$D(r) = D_0[H_0(kr) - H_0(-jkr)] \quad (10)$$

$$H_0(kr) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} j \ln(kr), & |kr| \ll 1 \\ \left(\frac{2}{\pi} kr\right)^{0.5} e^{-(x-\frac{\pi}{4})j}, & |kr| \gg 1 \end{cases}$$

여기서, D_0 는 충격위치에서의 진폭, $D(r)$ 은 충격위치로부터 거리 r 위치에서의 진폭, k 는 $2\pi f / C_b$, H_0 는 Hankel Function of 2nd kind을 말한다.

Damping에 의한 진폭감쇠원인은 매질 및 매질 주변물체인 냉각재이며, 이는 주변유체 밀도, 주파수, 금속판의 두께, 밀도 등 몇가지 변수에 의해 보상된다. Damping에 의한 진폭감쇠를 보상하면 충격 위치로부터 거리 r 만큼 떨어진 위치에서의 진폭은 다음과 이 표현될 수 있다.

$$D(r) = D_0 e^{-\left(\frac{\eta r}{C_b}\right)} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi f \rho_s k} \cdot \frac{M_f}{\sqrt{M_f^2 - 1}}$$

여기서, ρ_0 는 주변유체 밀도, c_0 는 주변유체에서의 음속, f 는 전파 주파수, ρ_s 는 금속판의 밀도, k 는 금속판의 두께, M_f 는 C_b / c_0 이며, η 는 감소계수를 말한다.

26 직경, 질량, 에너지 계산

앞의 절에서 기술한식들을 이용하면, 충격위치에서의 신호의 최대 변위와 충격접촉시간을 계산할 수 있다. 이를 다시 금속판의 정보로 바꾸어 강구로 가정한 금속파편의 반경을 계산하면 직경과 질량 및 에너지를 계산할 수 있다.

3. 실험 및 분석

본 논문에서 개발된 금속파편의 충격위치 판별 알고리즘을 영광 3호기 증기발생기 시운전시에 실시된 충격 시험 데이터에 적용하여 분석하였다. 충격 시험은 정상상태와 동일한 조건으로 만들기 위해 RCP를 구동하여 상온상태(100℃)로 만들어 시험하였다. 그리고 증기발생기 하부에 설치된 센서를 기준으로 하여 좌측으로 1m, 위로 80cm 또는 60cm 근처를 질량 530g의 강구로 충격을 발생시켰으며, 총 6번 수행되었다. 이 때 증기발생기 내부의 유속은 1.0844 m/sec, 증기발생기의 하부의 두께는 7inch(17.78cm), 그리고 증기발생기상에 설치된 가속도계 센서의 측정감도는 10pC/g ~ 50pC/g이다. 센서를 통하여 유입된 신호를 레코더(TEAC RD-135T; 샘플링 주파수 : 51.2 kHz(1/Δt=1.9539×10⁻⁵), 대역폭 : 20kHz, 4채널, 채널당 14bit, S/N비 : 72dB)에 저장

하여 본 논문에서 개발한 알고리즘을 이용하여 분석하였다.

영광 3호기 실험데이터에서 질량을 계산하는데 필요한 최대 진폭 및 반주기의 입력값을 구하기 위해서 분석용 소프트웨어(Origin6.0)를 사용하였다. 금속파편의 충격신호는 그림 4와 같이 나타난다. 이 신호에서 최대 진폭은 Origin6.0에서 제공하는 tool을 이용하여 구한다. 신호의 반주기와 최대 변위를 구하기 위해서 이 신호를 그림 5와 같이 확대한다. 이 그림에서 나타난 것과 같이 반주기는 충격신호의 최대 변위값을 기준으로 하여 좌우측 가속도 값이 "0"인 부분 사이의 시간으로부터 구할 수 있다. 그림 4에는 영광 3호기 첫 번째 강구의 충격신호를 분석한 것이며 이 결과 최대값은 0.2758m/s^2 이고 반주기는 $36\mu\text{sec}$ 임을 알 수 있다.

위의 입력값들과 제원을 질량 판별 프로그램에 입력하여 계산한 결과 충격신호를 발생시킨 강구의 질량은 474.37g 이며, 직경은 4.8667cm 로 판별되었다.

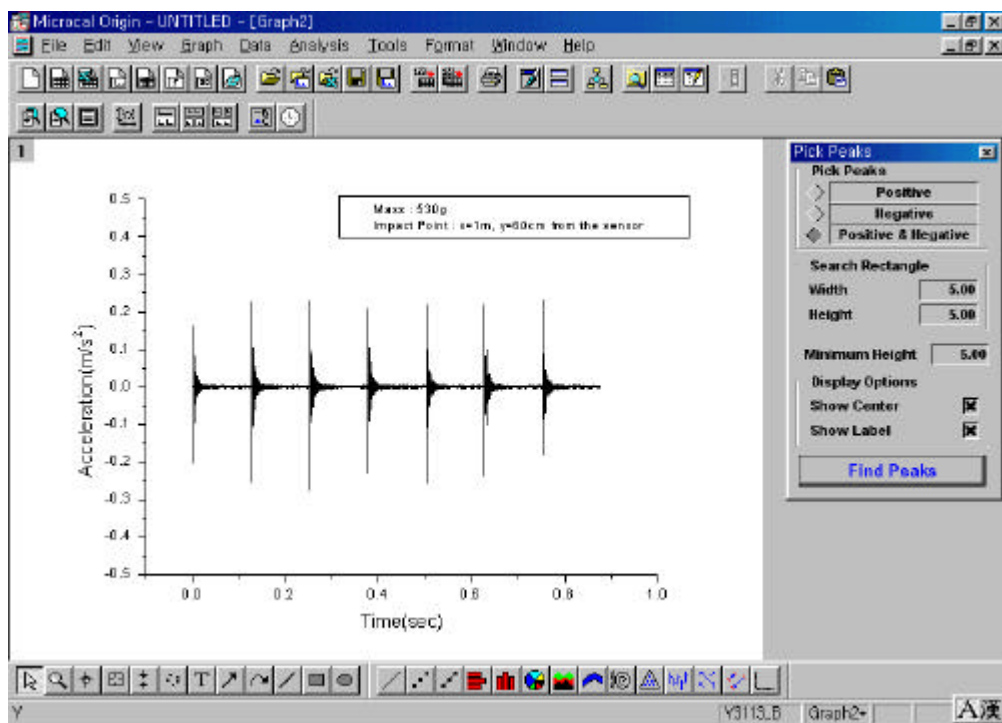


그림 4. 분석용 소프트웨어를 이용한 영광 3호기 시운전데이터 충격파 신호

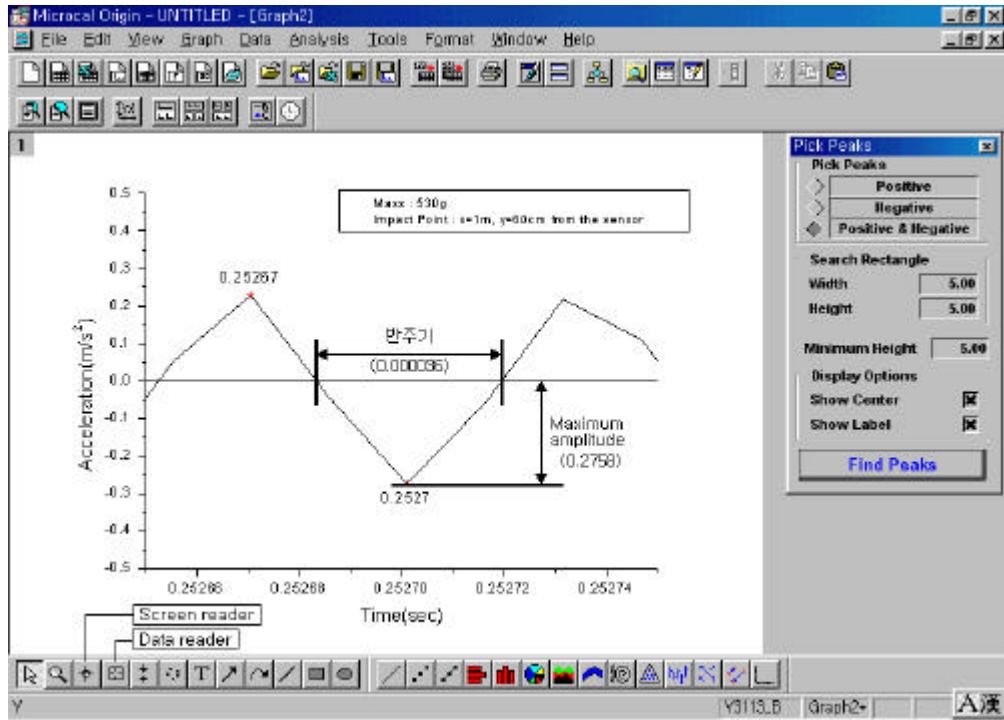


그림 5. 최대 진폭을 확대한 신호

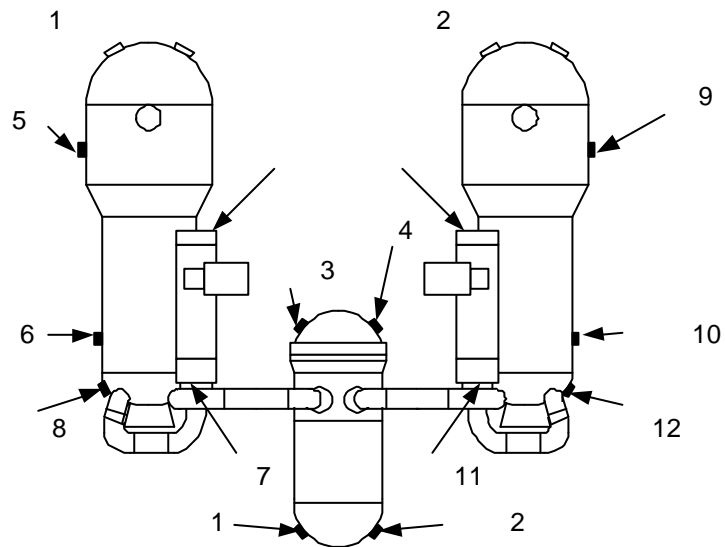


그림 6. 영광 3호기 원자로 및 증기발생기상에 설치된 센서의 위치

영광 3호기에 설치된 각 센서의 위치 및 번호는 그림 6과 같다. 원자로를 중심으로 양쪽에 두 개의 증기발생기가 설치되어 있다. 각각 1번 증기발생기, 2번 증기발생기로 구성되어 있다. 원자로에는 하부 헤드(반구부분)에 두 개, 상부 헤드에 두 개의 센서가 설치되어 있으며, 증기발생기에는 상부에 한 개, 하부에 세 개의 센서가 설치되어 있다. 그림 6의 센서들 중, 충격 시험시 기준이 된 센서들은 6번, 7번, 8번 센서이며, 충격위치 판별에 이용된 센서들은 1번 증기발생기의 6 ~ 8번 센서, 2번 증기발생기의 10 ~ 12번 센서이다.

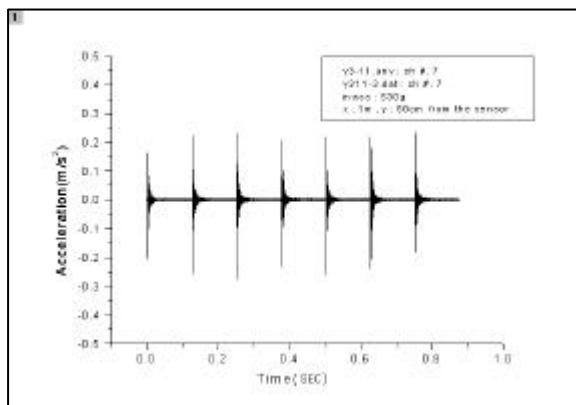


그림 7. 센서 7번 충격 데이터

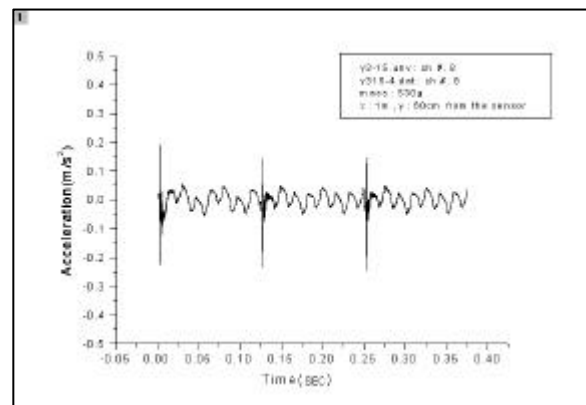


그림 8. 센서 8번 충격 데이터

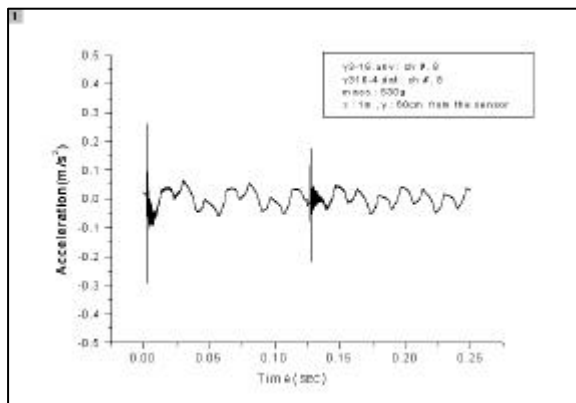


그림 9. 센서 8번 충격 데이터

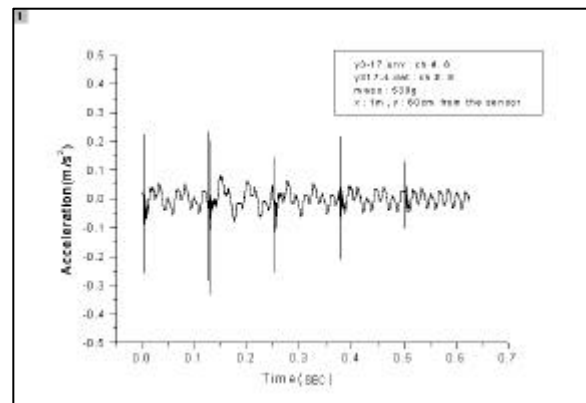


그림 10. 센서 8번 충격 데이터

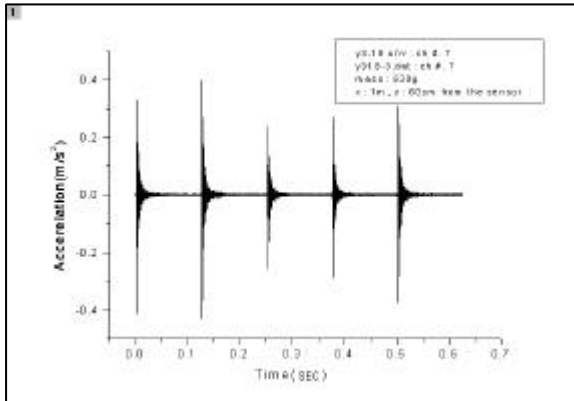


그림 11. 센서 7번 충격 데이터

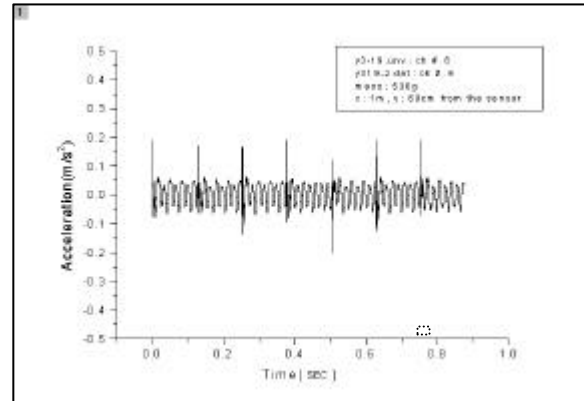


그림 12. 센서 6번 충격 데이터

영광 3호기 증기발생기 내의 금속파편 충격 질량을 추정하기 위해 총 6번의 시험을 수행하였다. 이들 데이터는 그림 7에서부터 그림 12까지 나타나 있다. 이 그림들 좌측 상부에 실제 충격 위치와 충격 질량이 나타나 있다. 이 신호 데이터들을 이용하여 충격질량을 추정한 결과가 표 2에 나타나 있다.

표 2. 영광 3호기 질량 판정 결과

시험번호	진 폭 (m/sec ²)	반 주 기 (μ sec)	판별된 직경 (cm)	판별된 질량 (g)	실제 질량 (g)	오 차
1	0,2758	36	4,8667	474,37	530	10,5%
2	0,2466	38	4,6323	409,09	530	22,8%
3	0,2594	30	4,9610	502,50	530	5,2%
4	0,3318	35	5,2129	583,00	530	10%
5	0,4291	35	5,6928	759,26	530	43,3%
6	0,1634	46	3,3605	156,18	530	70,5%
평균					530	27,05%

표 2에 나타난 것과 같이 분석된 충격 질량은 실제 질량과 약 27,05%의 오차를 보이고 있다. 실제 원자력 발전소에서 충격 질량을 추정할 때 사용되는 방법들과 상황을 고려해 보면 이 정도의 오차는 고려될 수 있으며 판별된 질량은 좋은 결과를 나타내고 있다. 이 표에 나타난 결과들이 서로 상이한 오차를 갖는 것은 각 센서와 구조물의 특성 및 위치 그리고 매질의 차이 때문으로 분석되었다.

5. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서 냉각재 계통기기 내부의 금속파편들에 대한 분석 알고리즘 중 질량추정 알고리즘이 개발되었다. 영광 3호기 시운전 데이터에 이용하여, 상당히 오차가 적은 결과를 보임으로서, LPMS 금속파편의 분석 알고리즘을 국산화 하였다는 점에서 상당한 의미를 가진다. 또한 발전소 시운전 데이터를 사용하였으므로, 기존 금속파편 시스템을 교체할 경우 본 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 충격 신호의 최대 변위 및 반주기에는 운전자의 개입이 필요한데, 앞으로 이를 자동으로 수행할 수 있는 시스템을 구축하고 또한 충격신호를 분석하는 데 있어서 배경잡음을 제거하는 알고리즘의 개발을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1]. 고압구조물의 이상신호 발생위치 검출기술 개발, KAERI/CM-102/94, 위탁과제 1차년도 연차보고서, 한국원자력연구소, 1995.
- [2]. K. Y. Sung, Acceleration Signal Characteristics of Steel Plate Impacted by Metallic Loose Parts, 63p, Department of Nuclear Engineering, 1992.
- [3]. I. K. Rhee, et. al., Development of Loose Part Signal Location Estimating Technique in High Pressured Structure, KAERI/CM-102/94.
- [4]. W. K. Shin, et. al., A Study on the Plant Diagnostic Techniques Using Reactor Noise, KAERI/NSC-454/89, 1989.
- [5]. Donald E. Hall, Basic Acoustics, John Wiley & Sons, 1987.
- [6]. EPRI, NP-5743, Loose Parts Monitoring Systems, Project No. 2642-1, Mar. 1988.
- [7]. Olma, "Experience with Digital Acoustic Monitoring Systems for PWR's and BWR's," Proceeding of technical committee meeting, Diagnostic Systems in NPP, IAEA-1ER-NPPCI-98/2, vol. 214, pp. 75 ~85, 1988.
- [8]. Thie, Power Reactor Noise, America Nuclear Society, 1981.