



금속파편 충격신호의 주파수분석에 의한 질량추정 연구(1) A Study on the Mass Estimation by Frequency Analysis of Metallic Loose Parts Impact Signal(1)

이상국*†
Sang-Guk Lee*†

(Received 29 March 2018, Revision received 11 June 2018, Accepted 11 June 2018)

Abstract: The Loose Parts Monitoring System(LPMS) detects the presence of metallic impact(s) due to a loose part within the primary pressure boundary and the steam generators. LPMS alerts the operator to the suspected presence of a loose part. And it can provides diagnostic information related to the location and characteristics of the metallic impact(s), programmed analysis criteria for alarm discrimination to reduce false alarms, simultaneous transient data captured for various LPMS channels, and the function of capturing up to 4 minutes of loose parts data for further evaluation. Logs data of LPMS can be used in historical analysis, including frequency and time domain analysis. This paper is intended to introduce the mass estimation using the metal sphere signal map among the mass estimation methods for impact signals acquired from steam generator sensor channels using time-jointed frequency analysis method. And also, we are going to introduce mass estimation methods and analysis results of time signal, FFT spectrum and time delay of impact signals measured in nuclear power plant.

Key Words : Impact Signal, Mass Estimation, Reactor, Steam Generator, Loose Metallic Parts

1. 서 론

금속파편감시시스템(LPMS, Loose Parts Monitoring System)은 Hertz의 금속충격이론을 바탕으로, 충격 물체가 원자로 및 증기발생기 압력경계 내부면에 부딪칠 때 발생하는 충격파를 가속도 센서 (accelerometer)를 이용하여 탐지하는 설비이다. 원 자력발전소 원자로계통 내부에 금속파편 이물질 이 발생할 경우 내부구조물과의 충격으로 충격신 호가 발생하는데, 이러한 충격신호는 금속파편감 시시스템을 이용하여 감지하고 있다.¹⁻⁸⁾ 이러한 충격신호가 발생할 때 내부 금속파편 이물질의

질량을 추정하여 구조물에 가해질 때의 건전성을 평가하여 발전소 운전 계속여부를 결정해야 한다. 따라서 본 논문은 발생한 충격신호에 대해 주파 수분석 방법 중 시간주파수 분석방법을 이용하여 질량평가맵으로 금속파편의 질량을 추정하는 연 구결과를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시간파형 및 중심주파수 분석 결과

2.1.1 LPMS 센서 설치위치

*† 이상국(교신저자) : 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : Sangguklee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5514

*† Sang-Guk Lee(corresponding author) : Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.
E-mail : Sangguklee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5514

금속과편감시시스템은 원자로계통의 압력경계 내부에 금속성 이물질(loose parts)이 존재할 때 이를 조기에 감지하는 설비로서 금속성 이물질의 위치 및 중량을 결정하기 위한 정보를 제공해 준다. Fig. 1은 금속과편감시시스템의 센서 설치 위치의 개략도이다. 측정 데이터는 증기발생기 C에 설치된 A 센서 및 B 센서로부터 전송된 이벤트신호를 대상으로 하였다. A 센서는 튜브시트(tube sheet) 상부쪽, B 센서는 증기발생기 고온관 부근에 설치되어 있다.

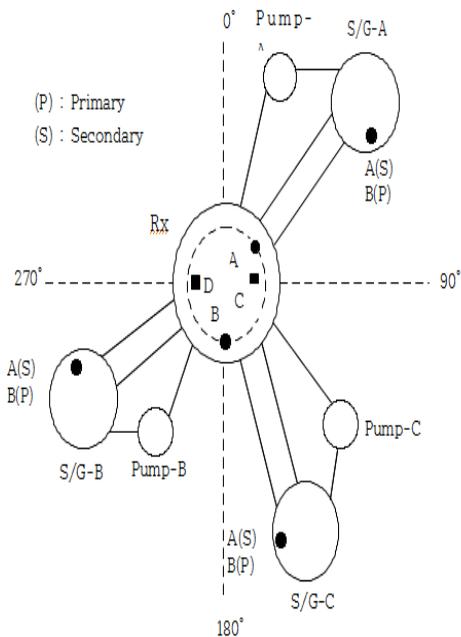
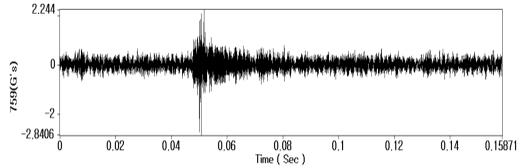
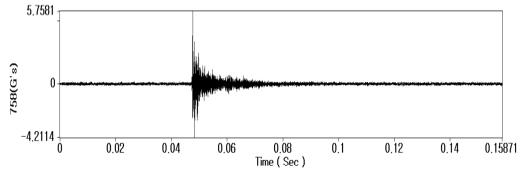


Fig. 1 Location of LPMS sensors

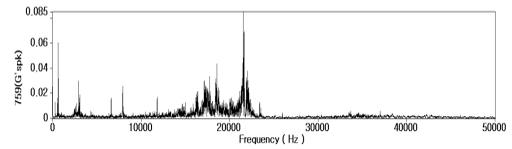
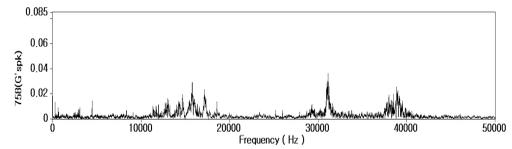
2.1.2 충격신호의 시간파형 분석

현재까지 신호분석 방법은 시간파형과 주파수 스펙트럼 파형 분석을 통하여 이물질 존재여부 및 질량추정을 수행해 왔으나, 단순한 주파수분석(Fourier Transform) 기법은 주파수성분에 따른 시간정보를 알 수 없으며, 시간에 따른 주파수분포 및 에너지분포를 알 수 없어 정확한 이물질 충격 여부 및 질량추정 등이 곤란하였다.

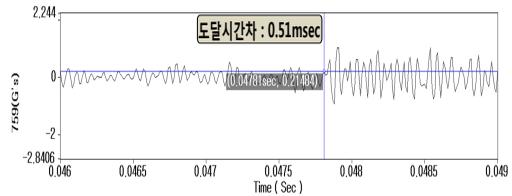
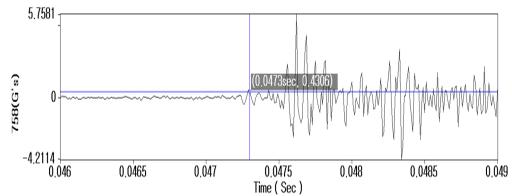
그러나 시간-주파수 영역으로 분석하게 되면 시간축과 주파수축으로 형성되는 2차원 공간에



(a) Event time signal



(b) FFT spectrum

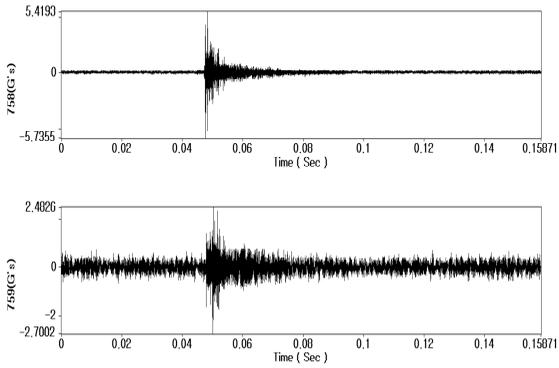


(c) Time delay

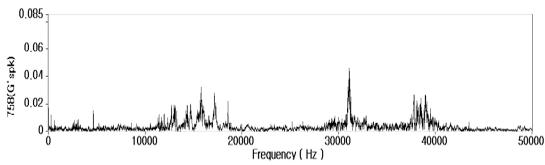
Fig. 2 Event time signal, FFT spectrum and time delay of impact signal #1

정보를 표시함으로써 시간에 따라 변화하는 충격 신호 등과 같은 과도신호(transient signal)의 분석에 유용하며, 시간에 따른 주파수분포, 주파수 성분별 에너지 분포 및 분산특성을 파악할 수 있는

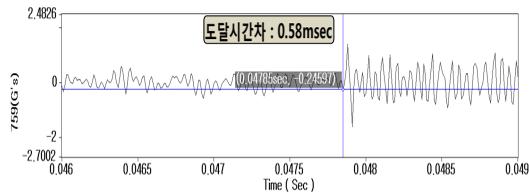
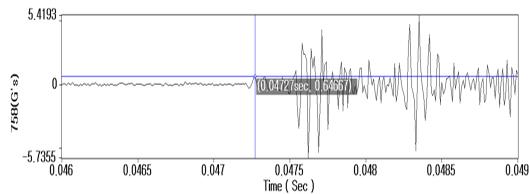
금속파면 충격신호의 주파수분석에 의한 질량추정 연구(1)



(a) Event time signal



(b) FFT spectrum

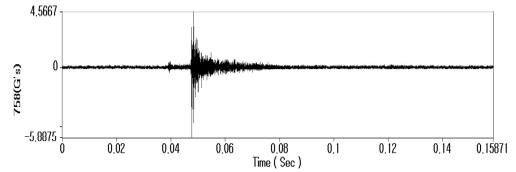


(c) Time delay

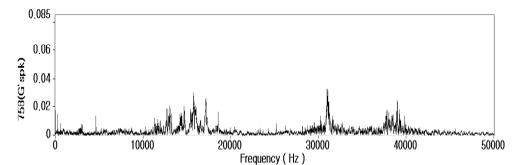
Fig. 3 Event time signal, FFT spectrum and time delay of impact signal #2

므로 이물질 충격발생 여부를 보다 정밀하게 판별할 수 있다.⁵⁾

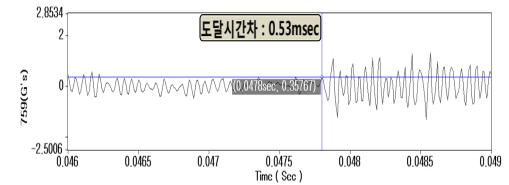
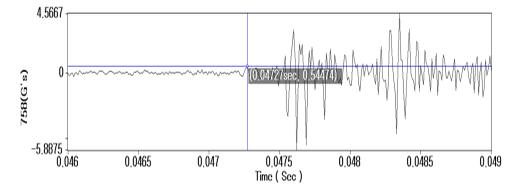
시간-주파수 신호분석 방법에는 위그너빌분포 (Wigner-Ville Distribution), 단시간 푸리에 변환



(a) Event time signal



(b) FFT spectrum



(c) Time delay

Fig. 4 Event time signal, FFT spectrum and time delay of impact signal #3

(Short Time Fourier Transform) 및 웨이블릿 변환 (Wavelet Transform) 방법이 있으며, 이 중 가장 정확도가 높은 위그너빌 분포 방법으로 분석하였다. 신호분석 데이터는 일정기간중 발생한 충격신호

중에서 가속도값이 큰 3개의 충격신호를 표본으로 추출하였다.

Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4는 충격신호 #1, 2, 3에 대한 시간파형, 주파수분포 특성 및 시간지연 패턴을 분석한 결과를 나타내었다. 센서에 근접한 위치(3 m 이내)에서 충격 신호가 발생한 경우에는 신호의 크기가 일순간 커졌다가 시간에 따라 감소하는(즉 ▷ 형태) 파형이 나타나는 것으로 알려져 있으며, Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 A 센서에서 계측된 신호의 경우 ▷ 형태의 파형임을 관찰할 수 있다. 또한 충격 신호가 B 센서 보다 A 센서에 약 0.5 ms 정도 먼저 도달하며 진동진폭도 B에 비하여 상대적으로 크므로, 충격 위치는 A에 가까운 위치임을 확인할 수 있었다.

2.1.3 충격신호의 중심주파수 분석

미국 규제요건인 Reg. Guide 1.133에 의하면 LPMS에서 검출하여야 하는 금속파편의 질량은 0.25 lb(0.114 kg)부터 30 lb(13.6 kg) 범위이며, 미국전력연구원(EPRI)의 시험결과를 보면, 이 범위에 해당하는 질량에 의해 발생하는 충격파는 주로 1 kHz ~ 11 kHz의 중심주파수를 갖는 것으로 분석되어 있다. 현재까지 20 kHz 이내의 충격신호 주파

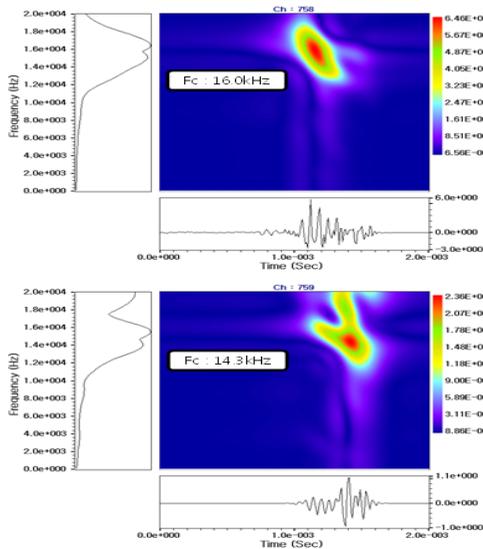


Fig. 5 Time-frequency energy distribution for impact signal #1

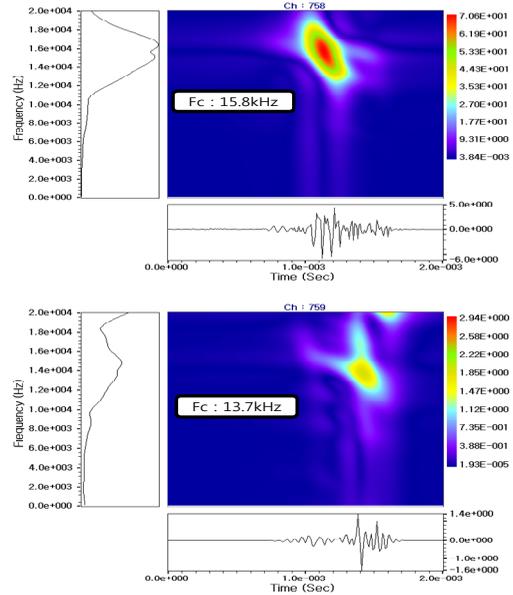


Fig. 6 Time-frequency energy distribution for impact signal #2

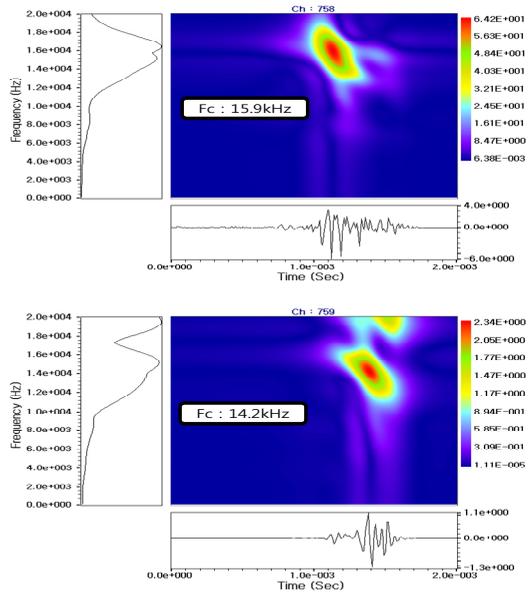


Fig. 7 Time-frequency energy distribution for impact signal #3

수 분석결과(Fig. 2~Fig. 4의 FFT 결과)를 관찰해 보면, 약 14 ~ 16 kHz 부근에서 센서 배경잡음의 스펙트럼에서는 나타나지 않는 주요 중심주파수

성분이 나타남을 볼 수 있다. 충격신호 #1, 2, 3에 대한 금속이물질에 의한 충격 에너지의 중심주파수 성분을 상세히 관찰하기 위하여 시간-주파수 2차원 동시분석 방법을 수행하였으며, 중심주파수 측정 결과를 Fig. 5~Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 5~ Fig. 7에서 보는 바와 같이 13.7 kHz~16 kHz 사이에서 충격에너지가 집중되어 있음을 확인할 수 있었다.

2.2 금속파편 질량 추정 방법 및 추정결과

2.2.1 금속파편 질량추정 방법

금속파편 질량추정을 위해 현재까지 적용되는 주요 방법으로는 특정주파수 성분을 이용한 질량 추정(frequency ratio method), 질량지표를 이용한 질량추정(mass index method) 및 질량평가맵(Metal Sphere Signal Map, MSSM)을 이용한 질량추정법이 있다.

특정주파수 성분을 이용한 질량추정 방법은 충격물질의 질량이 클수록 전파되는 충격파의 주파수 성분 중 저주파 성분이 잘 여기되는 특성을 지닌다는 사실이 알려져 있다. 이러한 이론에 의거하여 T.Tsunoda는 다음과 같은 FR(Frequency Ratio)을 질량을 추정하는 한 가지 지표로서 제시하였으며, 아래의 식 (1)로 표시된다.⁹⁾

$$FR = \frac{\int_{1kHz}^{6kHz} (APSD)df}{\int_{10kHz}^{15kHz} (APSD)df} \quad (1)$$

여기서, APSD : Auto Power Spectral Density

즉 FR은 고주파 성분의 크기에 대한 저주파 성분의 크기의 비로서 주어진 주파수 대역은 실험적으로 얻을 수 있다.

질량지표를 이용한 질량추정 방법은 주파수 대역별 충격신호와 배경 잡음의 Power Spectra 비를 구하여 구성 주파수의 상대적 증가를 알 수 있는 것으로 식 (2)와 같이 산출된다. 산출된 Power Spectra 비함수의 면적 중심 f_c 가 아래와 같은 식으로 주어지며, 이것이 질량지표로서 활용된다.

$$R_{f_i} = \frac{I_{f_i}}{B_{f_i}}, f_c = \frac{\sum R_{f_i} \cdot f_{c_i}}{\sum R_{f_i}} \text{ (kHz)} \quad (2)$$

여기서, I_{f_i} : 충격 신호 주파수대역 (i-1)~(i) kHz의 Power Spectra값

B_{f_i} : 배경 잡음 주파수대역 (i-1)~(i) kHz의 Power Spectra값

R_{f_i} : (i-1)~(i) kHz 주파수대역에서 충격신호와 배경 잡음의 Power Spectra비

f_{c_i} : (i-1)~(i) kHz 주파수대역의 중심 주파수 ($= \frac{(f_{i-1} + f_i)}{2}$)

f_c : 전체 R_{f_i} 에 대한 중심 주파수

질량평가맵((Metal Sphere Signal Map, MSSM)을 이용한 질량추정법은 Fig. 8과 같이, 충격신호의 가속도 크기와 중심 충격주파수 정보를 통해 충격체의 질량과 충격속도를 추정하는 방법으로 다음의 절차로 분석이 진행된다.^{1, 10)} 본 논문에서는 질량평가맵을 이용한 질량추정법을 적용하였다.

- 충격 거리, 특성주파수 및 구조물 두께 정보 확인
- 거리에 따른 특성 충격주파수 감쇠율 계산
- 3 feet 위치에서의 충격가속도 크기 계산

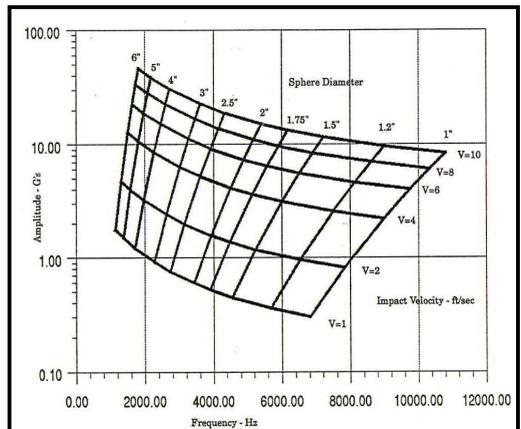


Fig. 8 Metal sphere signal map at 3ft from sensor

- MSSM에서 주파수, 가속도크기와 Match되는 강구 및 속도 확인
- 강구 크기를 고려한 질량 계산

2.2.2 금속파편 질량추정 결과

충격에너지 분포에 대한 시간-주파수 동시 분석 결과, 중심 주파수의 범위가 최소 14 kHz에서 최대 16 kHz 정도로 나타났으며, 시간영역 최대가속도와 더불어 질량지표 방법을 이용하여 분석한 결과, 금속성 이물질의 질량은 약 12~14 g으로 분석되었다.

충격신호 #1, 2, 3에 대한 질량을 추정한 결과를 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타내었다. 충격신호 #1에 대한 금속성 이물질의 질량은 12 g으로 평가되었으며, 충격신호 #2 및 충격신호 #3에 대해서는 각각 14 g 및 12 g으로 평가되었다.

본 분석에서는 금속성 이물질을 완전한 강구로 가정한 추정기법 자체의 불확실성, 충격속도의 변화를 기준으로 한 질량평가맵을 이용한 점 등으로 인하여 질량추정에 있어 다소의 오차가 있을 수 있다.

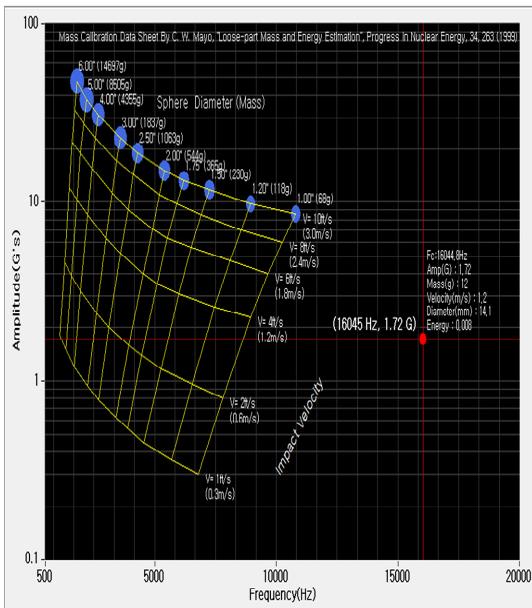


Fig. 9 Result of mass estimation for impact signal#1 using metal sphere signal map

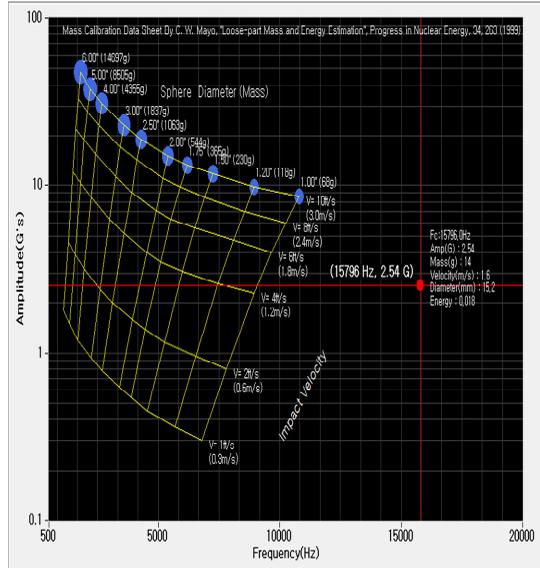


Fig. 10 Result of mass estimation for impact signal #2 using metal sphere signal map

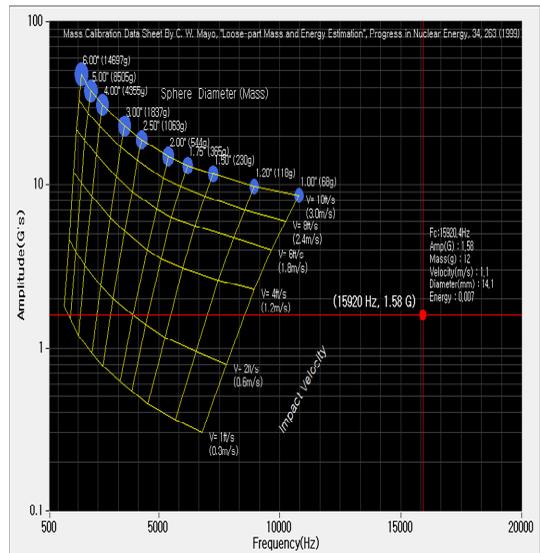


Fig. 11 Result of mass estimation for impact signal #3 using metal sphere signal map

3. 결론

원자력발전소 1차계통 내부 구조물에 충격신호가 발생할 때 구조물 내부에 존재하는 금속파편

이물질의 질량을 추정하여 구조물에 충격이 가해질 때의 건전성을 평가하기 위한 금속파편의 질량 추정평가 방법중 질량평가맵 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 금속이물질에 의한 충격 에너지의 중심주파수 성분을 정밀 관찰하기 위하여 시간-주파수 2차원 동시분석 방법을 이용할 수 있었다.

2) 시간-주파수 에너지분포 분석에 의한 중심주파수와 질량 지표 맵을 이용하여 충격신호에 대한 금속파편 이물질의 크기의 범위를 추정할 수 있다.

3) 충격신호에 대한 금속파편 이물질의 질량을 추정 평가할 수 있는 방법은 발전소 원자로 및 증기발생기 내부 구조물의 건전성 평가에 활용할 수 있다.

References

1. C. W. Mayo, D. P. Bozarth, G. N. Lagerberg, C. L. Mason, 1998, "Loose-Part Monitoring System Improvements", Research Project 2642-1, EPRI NP-5743.
2. S. G. Lee et al., 2014, "Development of Integral Database and Analysis Program for Structural Integrity Monitoring and Diagnosis of Nuclear Reactor system", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 293-294.
3. S. G. Lee, 2014, "A Study on the Signal Analysis of Loose Parts Monitoring System", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 204.
4. S. G. Lee, 2015, "A Study on the Signal Analysis of Loose Parts Monitoring System(2)", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 56-59.
5. S. G. Lee, 2015, "A Study on the Wigner Ville Time Jointed Frequency Signal Analysis for Impact Signal of LPMS", Proceedings of the KSPSE Annual Autumn Conference, pp. 101-103.
6. S. G. Lee, 2016, "A Study on the Propagation Characteristics Analysis of LPMS Impact Signal(1)", Proceedings of the KSPSE Annual Spring Conference, pp. 37-39.
7. S. G. Lee, 2017, "A Study on the Propagation Characteristics Analysis of LPMS Impact Signal(2)", Proceedings of the KSPSE Annual Spring Conference, pp. 127-129.
8. Reg. Guide 1.133, 1981, "Loose-Part Detection Program for the Primary System of Light-Water-Cooled Reactor", Rev.1
9. T. Tsunoda and et al., 1985, "Studies on the Loose Part Evaluation Technique", Progress in Nuclear Energy, Vol.15, pp. 569-576.
10. J. K. Lee et al., 2012, "Development of LPMS Sensor Auto-Impact Test Method", Final R/D Report of the KHNP, p. 86.