

# 원전 금속이물질 감시계통 센서 플레이트의 진동 특성 개선 연구

## Improvement of Vibration Response of a Sensor Plate of Loose Parts Monitoring System in Nuclear Power Plants

서 정 석\* · 한 순 우† · 이 정 한\*\* · 강 토\* · 박 진 호\*

Jung-Seok Seo, Soon-Woo Han, Jeong-Han Lee, To Kang and Jin-Ho Park

(Received October 14, 2016 ; Revised February 1, 2017 ; Accepted February 1, 2017)

**Key Words :** Loose Part Monitoring System(금속이물질 감시계통), Sensor Plate(센서 플레이트), Resonance(공진), Modal Analysis(모드 해석)

### ABSTRACT

This paper discussed design for resonance avoidance of sensor plates of loose-parts monitoring systems (LPMS) in nuclear power plants (NPP). An LPMS monitors impact of loose parts in primary loop of NPP by using accelerometers, which is mounted on sensor plates. Resonance of the plates may cause false alarms at frequencies over 10 kHz, which can be misunderstood as impact signals of loose parts with small mass and cause unnecessary response of NPP operators. Modal analysis was carried out for the existing sensor plate and design parameters affecting natural frequencies were chosen. Frequency response functions of plates were analyzed by changing the parameters and the optimized plate design for avoiding resonance was determined. Experiments was carried out for the plate specimen with improved design and verified the proposed approach and design.

### 1. 서 론

국내 경수형 원전 1차계통의 원자로 및 증기발생기 등의 압력경계 구조물에는 금속이물질 감시계통(loose parts monitoring system : LPMS)이 설치되어 있다<sup>(1)</sup>. LPMS는 압력경계 구조물 내에 발생할 수 있는 금속이물질의 충격 신호를 감시하며 신호를 분석하여 이물질 충격이 구조물 건전성에 미치는 영향을 평가한다. LPMS에서는 압력경계 구조물 외부에 내방사화된 가속도계를 설치하여 이물질 충격에 의해 구조물에 전파하는 탄성파를 측정한다. 측정된 신호를 분석하여 충격 발생 위치 및 충격 이물질의

질량을 추정하게 된다. 충격 발생 위치는 구조물에 부착한 다수의 가속도계 신호를 삼각법 등에 의해 분석하여 추정할 수 있다. 이물질의 질량은 충격 신호의 크기 및 에너지의 중심 주파수로부터 분석한다<sup>(2,3)</sup>. NRC Reg. Guide 1.133<sup>(4)</sup>에서는 질량 110 g 이상의 이물질 충격은 구조물의 건전성에 악영향을 줄 수 있으므로 지속적인 감시 및 분석이 필요하다고 권고하고 있다. Mayo 등의 연구<sup>(5)</sup>에 의하면 실제의 압력경계 구조물에서 110 g의 이물질 충돌 에너지가 갖는 주된 중심 주파수는 대략 5 kHz ~ 9 kHz 범위에 존재한다. 이에 국내 원전에서는 10 kHz 이하에서 필터링된 LPMS 신호를 주로 감시해왔다. 그러나 최근 원전 운영 연수 증가에 따라 안전성에 대한

† Corresponding Author; Member, Korea Atomic Energy Research Institute

E-mail : swhan@kaeri.re.kr

\* Korea Atomic Energy Research Institute

\*\* ACT Co. Ltd.

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

사회적 관심이 증대되면서 수십 그램 이하의 이물질에 의한 충격 신호도 모니터링하는 경우가 늘고 있다. 50 g 이하의 작은 질량의 이물질 충격 신호의 중심 주파수는 대략 10 kHz 이상 대역에 주로 분포한다. 그러나 이 대역에는 LPMS 센서 마운트계의 고유진동수에 의한 공진 또는 부적절한 센서 부착으로 인한 진동 성분들이 존재하며, 이로 인해 실제 이물질 충격 신호가 아님에도 경보가 발생한 사례가 있다. LPMS 오경보의 잦은 발생은 발전소 불시 정지 등 현장의 불필요한 대응 조치를 불러오게 되므로, 센서 마운트계의 공진 회피 설계 등을 고려할 필요가 있다.

이 연구에서는 오경보 사례가 발생했던 국내 원전 LPMS 센서 마운트계, 그 중에서도 센서를 압력 경계 구조물에 부착하기 위해 필수적으로 사용하는 마운트 플레이트의 공진 회피 설계 가능성을 연구하였다. 현재 플레이트의 고유진동수를 실험과 해석에 의해 파악한 후, 플레이트의 각 설계 변수가 고유진동수의 변화에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 공진 발생을 최소화할 수 있는 개선안을 제시하고 실제로 제작하여 개선 전후 플레이트의 고유진동수를 실험적으로 비교하여 개선안의 타당성을 검증하였다.

## 2. 현 LPMS 센서 플레이트의 고유진동수 파악

### 2.1 LPMS 센서계 구조

Fig. 1은 이 연구에서 다루고자 하는 국내 원전의 LPMS 센서계를 나타낸다. 우선 두 개의 센서 플레이트가 구조물에 볼트로 체결되어 있다. 상부 플레이트(센서 플레이트 2)에는 센서 디스크가 3점 용접

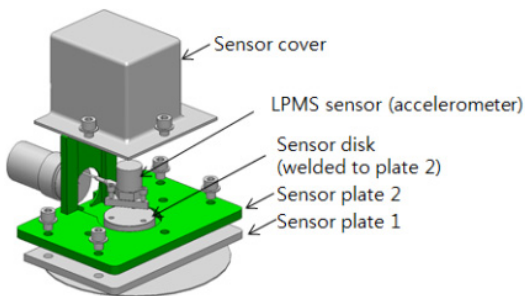


Fig. 1 Assembly drawing of LPMS sensor system

되어 있으며 LPMS 센서(가속도계)는 이 센서 디스크에 볼트로 고정된다. 외부 충격 및 보온재의 간섭으로부터 센서를 보호하기 위해 센서계 위에는 별도의 센서 커버를 장착한다.

### 2.2 LPMS 센서 플레이트 고유진동수 측정

우선 실제 제원 및 재질에 따라 제작한 센서 플레이트 시험편의 고유진동수를 실험적으로 측정하였다. 플레이트는 질량이 매우 큰 중량물에 볼트로 체결하였으며, LPMS 센서 부착 위치에 소형 가속도계(B&K 4374)를 부착하여 플레이트의 주파수 응답 특성을 측정하였다. 가진은 임팩트해머(B&K 8203)를 이용하였고, 데이터 측정 장비 Agilent E8408A 플랫폼과 Ideas-TDAS<sup>(6)</sup>를 이용하여 신호를 측정 및 분석하였다. 샘플링 주파수는 51.2 kHz, 분해능은 1.56 Hz이다.

Fig. 3에는 임팩트해머의 가진에 의한 플레이트의

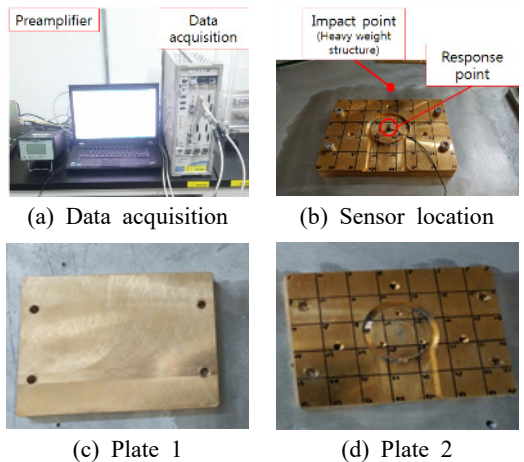


Fig. 2 Schematic of modal testing

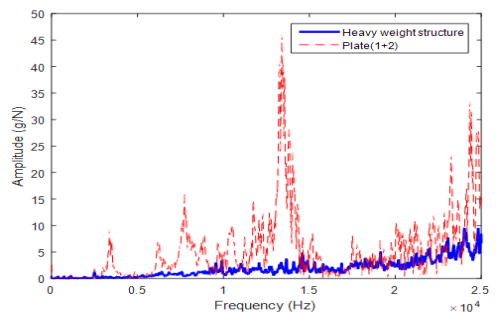


Fig. 3 Acceleration responses of sensor plates

진동 신호와 함께 플레이트가 부착된 중량물 자체의 진동 응답 신호를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 중량물 자체는 20 kHz 이내에서 특정한 고유진동수가 없으므로 중량물의 진동 특성이 플레이트의 진동 응답에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 붉은색으로 나타낸 그래프는 센서 플레이트 1과 센서플레이트 2를 중량물에 볼트로 결합한 상태에서의 진동 응답특성을 나타내며 13 kHz와 25 kHz 부근에서 크

게 나타남을 볼 수 있다. 이중 13 kHz 대역의 성분은 앞서 언급한 바와 같이 작은 질량의 이물질 충격 신호의 중심 주파수 대역과 겹쳐 오경보를 발생시킬 수 있다. 이에 이 연구에서는 이 대역에서의 플레이트의 진동 응답 크기를 감소시킬 수 있는 설계안을 제시하고자 하였다. 이하에서는 위의 진동 응답 측정 결과를 바탕으로 하여, 플레이트의 각 형상 변수가 진동 응답 특성에 미치는 영향을 우선 해석적으로 살펴보았다.

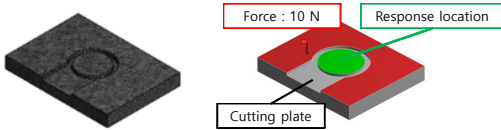


Fig. 4 FE model and boundary condition of harmonic response analysis

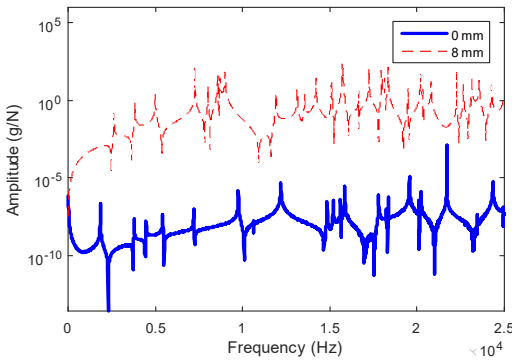


Fig. 5 Comparison of frequency response functions between a plate model without cut surface (blue line) and a model with cut surface by 8 mm

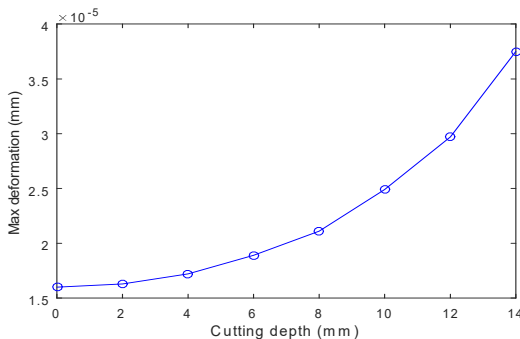


Fig. 6 The FE analysis result for displacement of sensor disk according to surface cut depth

### 3. LPMS 센서 플레이트 진동 응답 특성 해석

#### 3.1 해석 모델 및 조건

플레이트 1은 단순한 사각 형태이므로, 형상 변수가 많은 플레이트 2의 주파수 응답 특성을 중점적으로 해석하였다. 플레이트의 크기는 140 mm × 100 mm × 16 mm로, 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 총 127193개의 SOLID45 요소로 메쉬를 구성하고(Fig. 4) 해석을 수행하였다. 이때 플레이트의 아래 네 모서리를 고정시킨 경계 조건을 부여하였다.

우선 플레이트의 주파수응답함수를 구하기 위해 조화응답해석(harmonic response analysis)<sup>(7,8)</sup>을 수행하였다. 가진력은 플레이트의 상하 방향으로 10 N을 가했으며, LPMS 센서가 부착되는 센서 디스크 중심의 응답을 해석하였다. 이때의 주파수 범위는 실험 결과와의 비교를 위해 0 kHz ~ 25 kHz로 설정하였다.

#### 3.2 형상 변수 영향 해석 결과

이 해석에서 고려한 형상 변수로는 센서 부착면의 절삭부 깊이, 플레이트의 중형비 및 센서 디스크 용접부이다. 절삭부 깊이와 플레이트 중형비는 값을 여러 가지로 바꾸어 가면서 진동 응답 특성의 변화를 살펴보았는데, 이를 종합적으로 평가하기 위해 응답스펙트럼 해석(response spectrum analysis)를 통해 플레이트에 가해지는 외력에 의한 센서 디스크부의 변위를 계산하였다<sup>(9)</sup>. 이 해석에서는 고유 모드별 응답 크기를 기초로, 플레이트의 상하 방향으로 0 kHz ~ 25 kHz 대역에서 동일한 10 m/s<sup>2</sup>의 외력을 가한 후 센서 디스크의 응답을 변위로 나타낸다. 이때 모드별 응답은 식 (1)의 SRSS(square root of

sum of square)에 의해 계산하였다.

$$R = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_k^2} \quad (1)$$

여기에서  $R_k$ 는  $k$ 번째 모드의 응답을,  $N$ 은 주파수 범위 내의 모드 번호를 의미한다<sup>(10)</sup>.

(1) 절삭 면의 영향

Fig. 5는 플레이트 2에 절삭면이 없을 때와 절삭면 깊이가 8 mm인 경우의 주파수응답함수 해석 결과를 비교하고 있다. 이 그림에서와 같이 플레이트 상부에 절삭면이 존재하고 그 깊이가 증가할수록 고유 모드가 추가적으로 발생하고, 전 주파수 대역에서의 진동 응답 크기도 증가함을 확인하였다. Fig. 6은 절삭면의 깊이 증가에 따른 센서 디스크 중앙

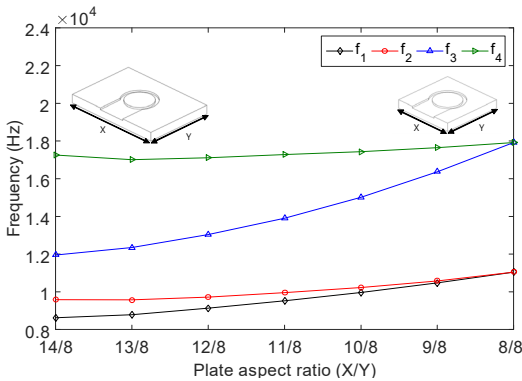


Fig. 7 Natural frequencies of a sensor plate according to aspect ratio

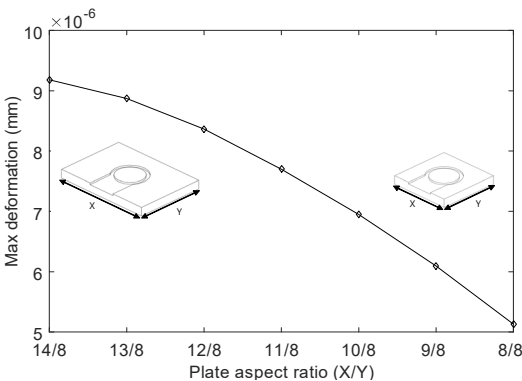


Fig. 8 The FE analysis result for displacement of sensor disk according to plate aspect ratio

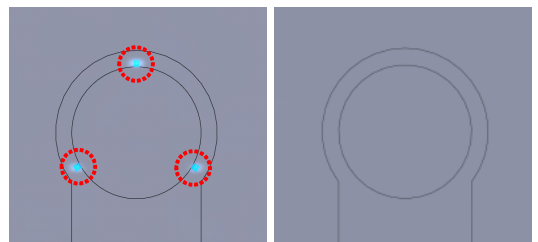
부의 변위 응답 해석 결과를 보여준다. 절삭 깊이가 8 mm 이상이 되면 절삭 면이 없는 경우에 비해 변위가 최소 30 % 증가함을 알 수 있다. 따라서 플레이트 2의 절삭면을 없애는 것이 진동특성 개선 측면에서 유리하나, 센서 케이블 등을 설치하기 위한 절삭면이 필요한 것으로 판단하여, 이 연구에서는 깊이 2 mm의 절삭면을 설정하였다.

(2) 플레이트 중횡비의 영향

플레이트의 가로와 세로 방향의 길이 비, 즉 중횡비 또한 고유모드 수, 고유진동수 및 변위 응답에 영향을 준다. Fig. 7은 중횡비에 따른 플레이트의 고유진동수 변화를 나타내는데, 정사각형에 가까울수록 고유진동수 개수가 줄어들어 공진점이 감소함을 알 수 있다. Fig. 8은 중횡비에 따른 디스크 부의 변위 크기 변화를 의미하며, 정사각형에 가까울수록 변위응답이 감소함을 보여준다. 결론적으로 정사각형에 가까운 플레이트의 진동 응답 특성이 이 연구의 목적에 부합한다고 판단된다. 센서 커버의 설치를 고려한다고 해도 실제 LPMS 센서 플레이트를 정사각형으로 바꾸기는 어렵지 않을 것으로 판단되어, 이 연구에서는 정사각형 형태의 센서 플레이트를 개선안으로 제안하였다.

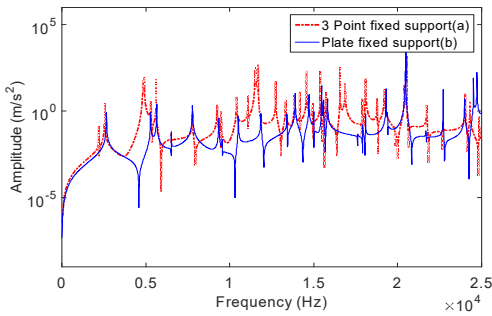
(3) 센서 디스크 용접부 영향

LPMS 센서가 장착되는 부분인 센서 디스크는 3점 용접을 통해 플레이트 2에 고정되어 있다. 디스크와 플레이트가 일체인 경우와는 진동 특성에 차이가 있을 것으로 예상되어 3점 용접 상태 모델과 디스크와 플레이트의 일체형 모델 양자의 주파수응답함수를 해석하였다. 우선 Fig. 9는 디스크와 플레이트

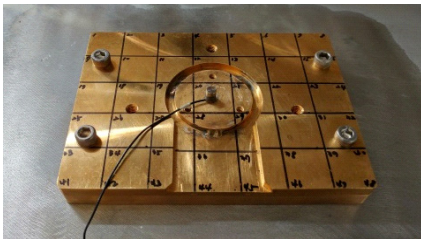


(a) A plate with welded sensor disk (b) Machined sensor disk

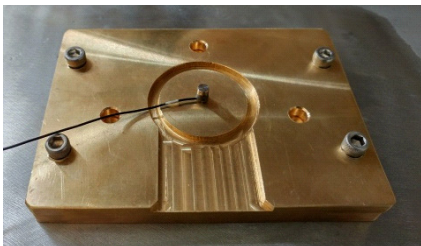
Fig. 9 Analysis model



**Fig. 10** The analysis results for frequency response function of the plate with a welded disk (red line) and the plate with a machined disk (blue line)

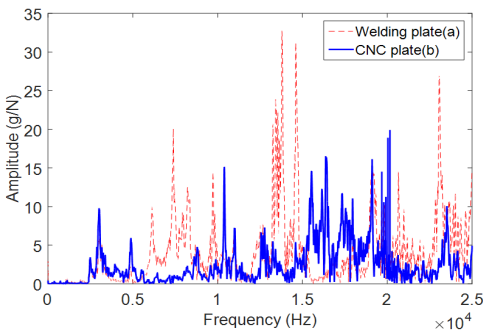


(a) A welded disk



(b) A machined disk

**Fig. 11** The test specimens of LPMS sensor plate



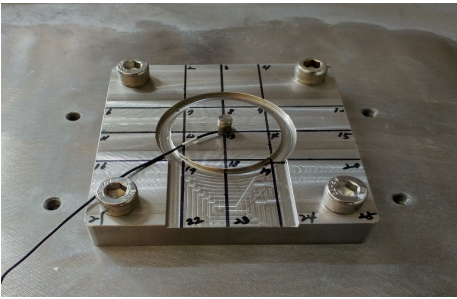
**Fig. 12** The experimental result for vibration response of the plate with a welded disk (dot line) and the plate with a machined disk (blue line)

트 간 3점 용접 모델과 일체형 모델을 나타낸다. 용접부의 지점을 solid 요소로 모델링하여 3점 용접 위치에 bonded 결합조건으로 구속하였다. Fig. 10은 디스크가 용접된 모델로 10 kHz 이상 대역에서 고유 모드가 상대적으로 많이 발생하고 진동 응답 크기 또한 증가한다. 따라서 디스크가 용접된 경우 공진으로 인한 LPMS의 오경보 발생 가능성이 커질 것을 예상할 수 있다. 이에 개선 모델에서는 플레이트 2에 기계 가공을 통해 디스크 부를 제작하여 용접의 영향을 배제하였다.

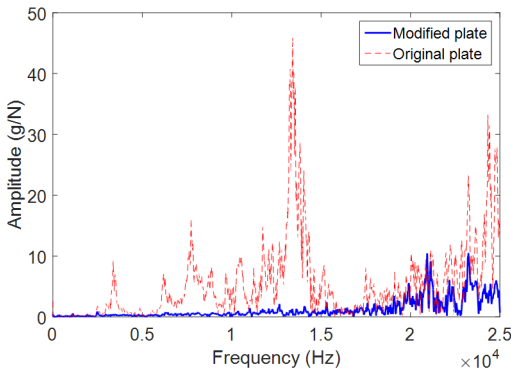
디스크 용접부가 플레이트 진동 응답 특성에 미치는 영향은 실험적으로도 검증하였다. 현재의 센서 플레이트 2(Fig. 11(a)) 시편과 절삭면 깊이 및 플레이트 중횡비는 현재와 같이 유지하면서 플레이트 상부를 기계 가공해서 디스크를 일체형으로 형성한 시편(Fig. 11(b))을 제작하였다. Fig. 12는 디스크 용접 시편과 기계 가공된 시편의 주파수 응답함수를 실험적으로 비교한 것으로, 임팩트해머를 이용하여 플레이트를 가진하고, 디스크 중앙의 가속도 응답을 측정하였다. 그 결과 현재 플레이트(붉은선)에서 크게 나타났던 13 kHz 대역의 응답이 디스크 일체형 플레이트 시편에서는 15 kHz 이상으로 이동하면서 크기가 감소한 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 진동 응답 특성 개선 플레이트 제작 및 성능 평가

해석을 통해 파악한 LPMS 센서 플레이트의 진동 응답 특성 개선 방안을 정리하자면 i) 플레이트 상부 절삭면 깊이를 줄이고 ii) 플레이트의 중횡비를 1에 가깝게 유지하며, iii) 센서 디스크와 플레이트를 일체화하는 것이다. 이를 반영하여 Fig. 13과 같은 진동 응답 특성 개선형 센서 플레이트 시편을 제작하였다. 현재 LPMS 센서계에서는 두장의 플레이트로 나뉘어져 있으나, 개선 플레이트에서는 이를 하나로 합하여 제작하였다. Fig. 14는 현재 플레이트(Fig. 1과 같이 플레이트 1과 플레이트 2가 결합된 플레이트)와 개선 플레이트의 주파수 응답 특성을 디스크 중앙부에서 측정하여 비교한 결과이다. 개선 후 모델의 주공진점은 20 kHz 이상의 대역에서만 나타나며, 그 이하에서는 뚜렷한 공진점이 없고 응답의 크기 자체가 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 20 kHz 이상의 주



**Fig. 13** The LPMS sensor plate proposed in the work



**Fig. 14** Comparison of vibration responses of a original LPMS sensor plate (blue line) and the plate suggested in the work (dot line)

과수 성분은 센서 부착 상태에 의해서도 영향을 받으며, 이물질 충격 신호라면 구조물 건전성에 영향이 없어 현장에서도 의미를 두지 않는 10 g 이하 미소 질량 충격 신호의 중심 주파수 대역이다. 따라서 이 연구의 설계안을 적용하면 10 kHz 이상에서의 LPMS 센서 플레이트의 공진에 의한 오경보 발생 가능성을 줄일 수 있을 것으로 판단한다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 원전의 금속이물질 감시계통에서 센서계의 기계적 공진에 의한 오경보 발생 가능성을 감소시킬 수 있는 센서 플레이트의 진동 특성 개선 설계안을 제시하였다. 현재 센서 플레이트의 진동 응답 특성에 대한 실험과 해석을 통해 플레이트의 기계적 공진 특성을 분석하였다. 플레이트의 진동 응답 특성에 주된 영향을 미치는 3가지 형상 인자를 선정하여 조화응답해석과 응답스펙트럼해석을 통

해 형상 인자별 플레이트의 고유진동수 및 외력에 대한 변위 응답 특성을 분석하여 진동 응답 특성을 개선할 수 있는 설계안을 제시하였다. 이를 바탕으로 개선 플레이트를 제작하여 진동 특성에 대한 실험을 수행하였고, 현재의 플레이트에 대비해 공진 발생 가능성을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다. 이 연구의 개선안을 적용할 경우 10 kHz 이상의 주파수 대역에서 원전 금속이물질 감시계통 센서계의 기계적 공진에 의한 오경보 발생 가능성을 낮출 수 있어 현장의 불필요한 대응 및 경제적 손실을 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 한국원자력연구원의 2016년도 주요사업으로 수행되었음.

## References

- (1) Park, J. H. and Kim, Y. H., 2006, Impact Source Localization on an Elastic Plate in a Noisy Environment, Measurement and Science Technology, Vol. 17, No. 10, pp. 2757~2766.
- (2) Park, J. H. and Kim, Y. H., 2006, An Impact Source Localization on a Spherical Shell by using Smoothed Wigner-Ville Distributions, Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 1274~1279.
- (3) Park, J. H., Choi, Y. C. and Lee, J. H., 2005, Source Localization of an Impact on a Plate using Time-frequency Analysis, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 107~111.
- (4) Regulatory Guide 1.133, 1981, Loose-Part Detection Program for He Primary System of Light-Water-Cooled Reactors, U.S., Nuclear Regulatory Commission.
- (5) Mayo, C. W. and Shugars, G., 1988, Loose Part Monitoring System Improvements, Progress in Nuclear Energy, Vol. 21, pp. 505~513.
- (6) TDAS Wet User's Manual, 2008.
- (7) ANSYS Mechanical Users Guide, 2013, ANSYS, Inc.
- (8) Park, C. W. and Hong, C. H., 2008, Theory and Application with ANSYS Workbench, INTER VISION.

(9) Lee, J. M., 1996, Theory and Application of Modal Analysis, Seoul National University.

(10) Hwang, S. H. and Chai, J. S., 2003, Finite Element Analysis of Thru-flow Type TWS, Proceedings of the KNS Annual Autumn Conference.



**Jungseok Seo** received his B.S. and M.S. degree in Mechanical Engineering from Chungnam National University. He is currently a researcher in KAERI, His research interested encompass vibration and rotor-dynamics, condition monitoring & diagnostics.



**Soon-Woo Han** is a principal researcher at Korea Atomic Energy Research Institute. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Seoul National University. He is interested in structural health monitoring of pressure boundary structures of nuclear power plants.