

충격 신호의 포락선을 이용한 충격 위치 추정기법

The Estimation Method of the Impact Position Using the Envelope of Impact Signal

이 위 혁, 이재 국*, 우 경 행, 최 원 호

(Wee-Hyuk Lee, Jae-Kook Lee, Kyoung-Hang Woo, and Won-Ho Choi)

Abstract : The LPMS (Loose Part Monitoring Systems) are used widely for detecting the impact position in the nuclear reactor. There are some major methods to detect impact position in LPMS such as the triangular method, the rectangular method, the circular intersection method and so on. The time difference of these methods are calculated using S0-mode and A0-mode waves of each sensor. In this paper, we propose a method to detect impact position using the enveloped waves of acquired signals. The result of this paper show that the position detecting accuracy and reducing the processing time are proposed method is improved than traditional methods.

Keywords : LPMS (Loose Part Monitoring System), impact signal, envelope, impact position

I. 서론

원자력 발전소의 가동 년 수가 증가함에 따라 원자로의 노후에서 오는 원자로 내부 구조물 간의 체결력 저하 또는 상실, 기기 내부 구조물 부품 파손으로 인한 금속 이물질로 타 기기 손상 또는 노심유로 차단으로 인한 국부비등 또는 제어봉 구동장애, 냉각재 펌프 축 균열 또는 파열, 구조물 비정상 진동, 입력경계 균열 또는 누설 등의 결함이 발생할 수 있다. 이러한 결함은 원자로의 안정적인 동작을 위협할 수 있으며 원전의 불시 정지등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 원자력 발전의 건전성을 유지하고 결함의 발생을 감시하며 이상발생시 원인을 진단하는 감시 진단 시스템의 설치가 필수적이다[1-3,7].

원자력 발전소의 건전성 감시 계통(NIMS: NSSS integrity monitoring system)이란 원자로 및 원자로 주변 계통 내부를 떠돌아다니는 금속성 물질을 검출하는 금속파편 감시계통(LPMS: Loose Part Monitoring System)과 원자로 냉각재 계통 압력 경계의 구조물 결함에 따른 냉각재 누설을 감시하는 음향누설 감시 계통(ALMS: Acoustic Leak Monitoring System), 원자로 내부 용기의 진동 상태를 감시하는 내부진동 감시 계통(IVMS: Internals Vibration Monitoring System), 원자로냉각재펌프의 축 정렬 로터 평행유지 및 축 균열탐지를 하기 위해 원자로냉각재펌프 진동감시계통(RCPVMS: RCP Vibration Monitoring System)등 4개의 서브시스템(sub-system)으로 구성된 설비이다[5,9].

원자로 내부 및 원자로 계통시설에 금속 파편이 발생하였을 때 그 금속파편은 유체의 흐름에 따라 이동하여 핵연

료 손상, 제어봉 구동장애, 증기 발생기 세관 누설 등을 유발하는 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

금속 파편 감지 시스템인 LPMS는 구조물을 따라 전파되는 충격파를 감지하여 1차 계통 압력 경계 내부를 떠돌아다니는 금속 파편의 존재유무, 위치 및 질량 등을 검출하여 이상 상태 발생시 운전원에게 관련 정보를 제공해주는 시스템이다. 그러나 원자력 발전의 특성상 운전 중 접근의 어려움으로 인해 정확한 데이터 수집이 불가하며, 현재의 기술 수준으로는 충격 신호 발생시 그 신호만을 운전자 혹은 관련 기술자에게 알려주는 정도의 수준에 있기 때문에 담당 운전자의 오판으로 인한 원전의 정지 혹은 무리한 기동으로 안전사고 초래 및 경제적인 손실을 야기할 위험이 있다[4].

본 논문에서는 이러한 LPMS 시스템과 관련하여 충격 발생시 생성되는 충격신호를 가속도 센서를 이용하여 취득하고 포락선 변환을 이용하여 충격신호 도달 시간차를 계산하여 충격 위치를 추정하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 충격 및 진동 신호의 특성과 LPMS 관련 내용에 대해 설명하고 III장에서는 본 논문에서 제안한 충격신호의 포락선 변환을 이용한 충격위치 추정 알고리즘을 서술하였으며 IV장에서는 모의 충격 실험 장치를 통한 충격 실험 및 결과를 서술하였다. 마지막으로 V장에서는 결론 및 향후 연구 과제에 대해 기술하였다.

II. 진동 및 충격 신호의 특성과 LPMS

1. 진동 및 충격 신호의 특성

진동은 어떤 물체가 기준 좌표계나 평형위치에 대해서 물체가 반복적으로 운동하는 현상이다. 일반적으로 회전이나 왕복운동을 하는 물체에서 발생하는 힘과, 기계 부품들 사이에서 발생하는 마찰, 회전 접촉, 제작상의 공차 및 여유에 의한 동역학적 영향으로 진동이 발생된다.

진동은 압축 방향의 변형에 대해서는 종파인 소리와 마

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 11. 11., 채택확정 : 2006. 3. 21.

이위혁, 이재국, 우경행, 최원호 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(cyber21hyuk@naver.com/alf037@hanmail.net/whk2000@hanafos.com/whchoi@mail.ulsan.ac.kr)

※ 본 논문은 2003년 울산대학교의 연구비와 한국과학재단 지정 울산 대학교 네트워크 기반 자동화연구센터의 지원에 의한 것임.

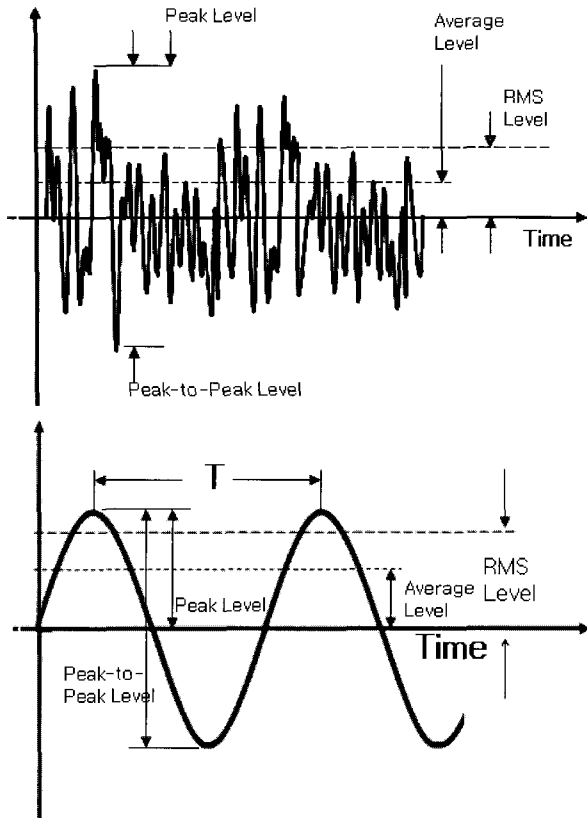


그림 1. 진동 크기의 정규화.
Fig. 1. Normalization of vibration magnitude.

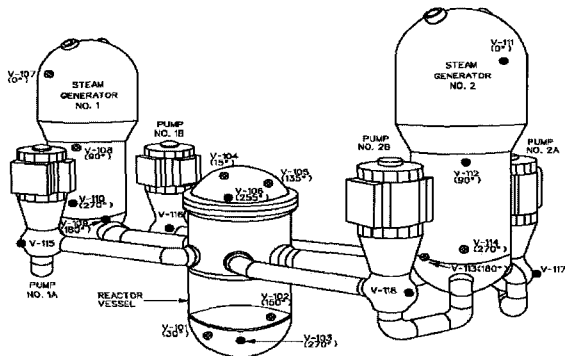


그림 2. LPMS의 가속도 센서 부착 위치.
Fig. 2. The attached accelerometer position of LPMS.

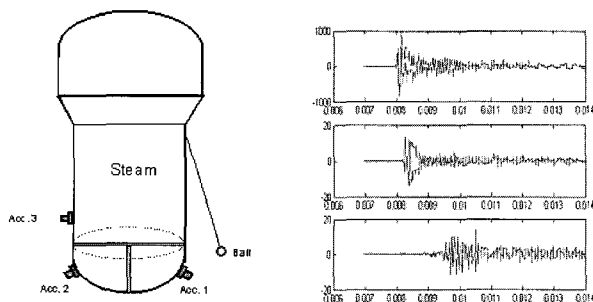


그림 3. 원자로 냉각재에 부착된 가속도 센서 및 충격 신호.
Fig. 3. Accelerometer and impact signal.

찬가지이나, 전단 변형(shear strain)에 의해서도 진동을 전파하며 진동량은 벡터량으로 크기와 동시에 방향을 고려해야 한다.

진동의 정도를 나타내는 진폭은 여러 방법으로 정량화될 수 있다. 그림 1과 같이 정현파의 진동 진폭을 나타내는 방법으로는 피크-피크(peak-to-peak), 최대값(peak), 평균값(average), 실효값(root-mean-square) 등이 있다.

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형되거나 파괴가 일어나게 되면 재료 내부에 축적되어 있던 변형에너지는 파면 형성 에너지, 열에너지, 격자변형에너지와 같은 여러 형태의 에너지로 변환되면서 탄성파를 발생시킨다. 충격파란 이 탄성파의 대표적인 형태이다[6].

충격파는 종파(longitudinal wave)와 횡파(shear wave), 표면파(rayleigh surface wave)로 구분되며 종파는 입자의 진행 방향과 파의 방향이 평행하고 전파속도가 빠른 특성을 가지며, 횡파는 입자의 진행방향과 파의 방향이 수직이고 종파 속도의 약 50%인 특성을 가진다. 표면파는 자유 경계면에서의 입자의 진동이 면에 수직인 횡파성분과 면에 평행한 종파 성분이 타원형으로 진동하면서 재료의 표면층으로 전파하는 파의 특성을 가진다.

2. LPMS(Loose Part Monitoring System)

금속 파편 감지 시스템인 LPMS는 구조물을 따라 전파되는 충격파를 이용하여 원자로 관련 계통에 부유하는 금속 파편의 존재유무, 위치 및 질량 등을 검출하여 이상 상태 발생시 운전원에게 관련 정보를 제공해준다. 그러나 원자력 발전이라는 특성상 접근의 어려움으로 정확한 데이터 수집이 불가하며, 현재의 기술 수준으로는 충격 신호 발생시 그 신호만을 운전자 혹은 관련 기술자에게 알려주는 정도의 수준에 있기 때문에 담당 운전자의 오판으로 인한 원전의 정지 혹은 무리한 가동으로 안전사고 초래 및 경제적 손실 야기의 위험도가 있다.

금속 파편 충격 신호는 발전소의 정상상태 운전에 의한 것이 아니며 순간적이면서 비 주기적으로 발생하는 전형적인 비 정상상태 신호로 분류된다. 최근에 널리 알려진 기법으로서 STFT(Short Time Fourier Transform), WT(Wavelet Transform) 및 WD(Wigner Distribution) 등의 3가지가 있다. 국내에서는 원자력 분야의 노이즈 분석을 위하여 이러한 기법들의 실제 현장 적용 사례는 아직 없는 실정이다.

그림 2는 LPMS의 원자로 및 증기발생기의 상·하부에 부착된 가속도 센서를 나타내며 그림 3은 원자로 냉각재의 모의 강구 충격 실험을 나타낸다.

가속도 센서의 위치는 발전소에 따라 차이가 있으나, 주로 원자로 압력용기의 둘레에 동일 평면상으로 약 90도 간격으로 설치되어 있으며, 노심의 상부와 하부 또는 상부, 중심부, 하부에 각각 4개씩 설치되어 있다.

그림 3에서처럼 원자로 냉각재에 가속도 센서를 부착하고 금속파편에 대한 충격파를 만들기 위해서 ball을 이용하여 가격하면, 각 가속도 센서로부터 충격 가속도 신호가 나온다. 실제 가동 중에는 이들 신호에는 많은 잡음이 발생하여 이러한 충격파를 탐지하기가 어렵다. 따라서 우선은 정지 상태에서 배경 잡음이 없는 경우에 충격파의 발생 시점

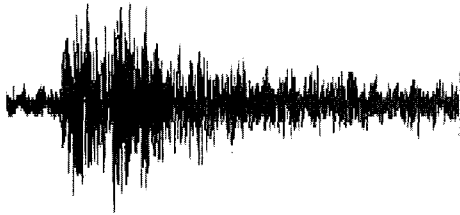


그림 4. LPMS의 충격신호 1.
Fig. 4. The example of impact signal 1.

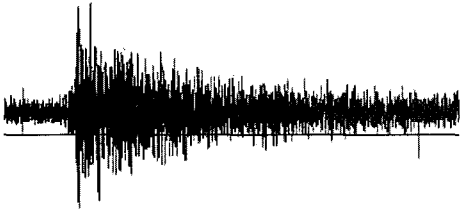


그림 5. LPMS의 충격 신호 2.
Fig. 5. The example of impact signal 2.

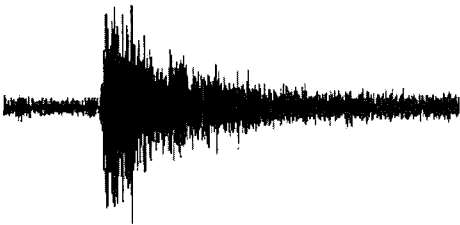


그림 6. 원자로 가동시 발생하는 열충격 잡음.
Fig. 6. The occurred thermal impact noise.

을 정확히 찾는 것이 중요하다. 이것을 위해서 일반적으로 시간 데이터를 이용하여 진폭 변화, 주파수 변화 등을 이용하여 충격과의 발생 시간을 예측하여 왔다. 이 방법은 시간 축의 데이터만을 이용하여 진폭 및 주파수 변화를 예측함으로써 부정확하며 어려움이 많다.

그림 4, 5, 6은 모의 충격 실험에 의한 충격 신호 및 원자로 가동시에 발생하는 열충격 잡음 신호의 예를 나타낸 것이다.

충격 물질의 위치를 추정하기 위하여 위치 표정과 위치 평가 기법이 사용된다. 일반적으로 충격 위치 표정 알고리즘은 도달 시간차법, 감쇠법, 지역위치 표정법, 벡터법 등이 있으며, 충격 위치를 평가하는 방법으로는 원교차법과 삼각법등이 있다.

2.1 위치표정기법

위치 표정 기법은 1차원 위치 표정과 2차원 위치 표정기법으로 구분되며 2차원 위치 표정기법에는 2개의 센서, 3개의 센서, 4개의 센서를 사용하는 방법으로 구분된다.

• 1차원 위치표정

- 배관과 같은 1차원 구조물에 3개의 센서가 일정한 간격을 두고 부착되어 있는 경우

- 도달시간차 (arrival time difference) : $\Delta T = \frac{L}{C}$

L : sensor distance, C : sound velocity, ΔT : time difference

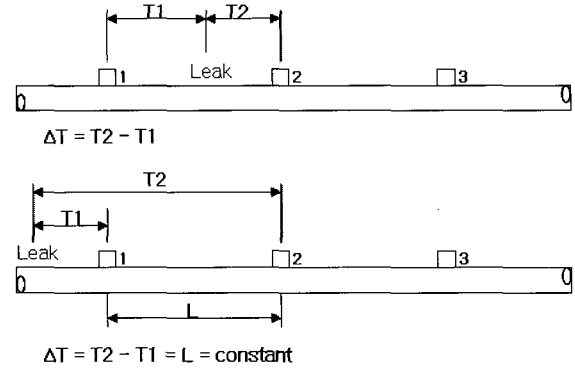


그림 7. 1차원 위치표정.
Fig. 7. Position estimation of 1-dimension.

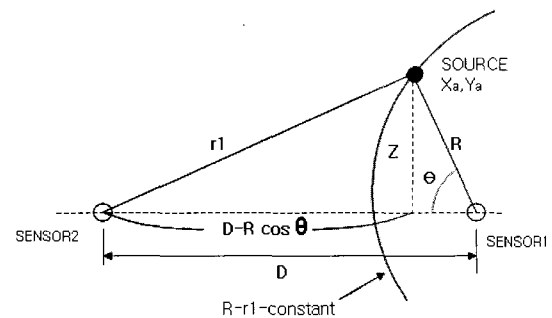


그림 8. 2차원 위치표정(2 sensor).
Fig. 8. Position estimation of 2-dimension(2 sensors).

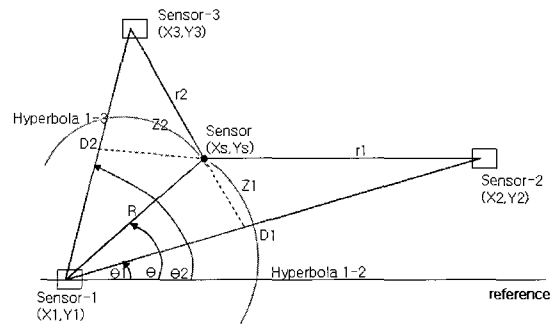


그림 9. 2차원 위치표정(3 sensor).
Fig. 9. 2-D location compensation with(3 sensors).

- Source Location

$$X_L = \frac{1}{2} (L - \Delta T \cdot C)$$

• 2차원 위치표정(2 sensor)

$$-\Delta t V = r_1 - R, Z = R \sin \theta$$

$$-Z^2 = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2, R^2 \sin^2 \theta = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2$$

$$-R^2 = r_1^2 - D^2 + 2DR \cos \theta, R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t V + D \cos \theta}$$

• 2차원 위치표정(3 sensor)

$$-\Delta t_1 V = r_1 - R, \Delta t_2 V = r_2 - R$$

$$-R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta - \theta_1)}, R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_2 - \theta)}$$

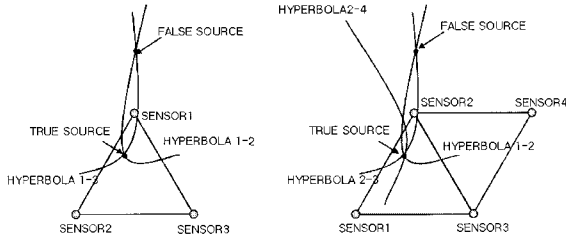


그림 10. 2차원 위치표정(4 sensor).
Fig. 10. Position estimation of 2-dimension(4 sensors).

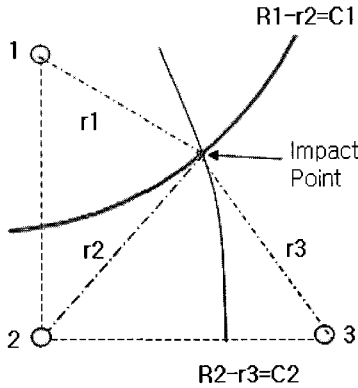


그림 11. 삼각기법.
Fig. 11. Triangulation method.

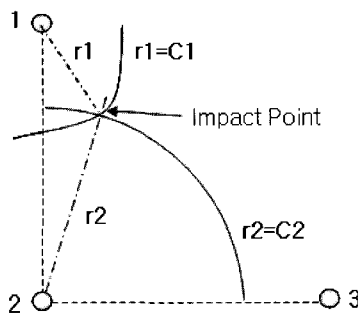


그림 12. 원교차법.
Fig. 12. Circle intersection method.

- r_1, r_2 : AE발생원에서 센서 2, 센서 3 사이의 위치 벡터
- D_1, D_2 : 센서 1에서 센서 2, 센서 3 사이의 위치 벡터
- R : AE 발생원에서 센서 1 사이의 위치 벡터
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3$: 기준점에서 센서 2, 발생원, 센서 3 사이의 각

● 2차원 위치표정(4 sensor)

2.2 위치평가기법

위치평가 기법으로는 삼각법(triangulation method)과 원교차법(circle intersection method)가 일반적으로 사용된다.

● 삼각법(triangulation method)

- 3개의 센서
- $r_1 - r_2 = V_g \cdot \Delta t_{1,2}, r_2 - r_3 = V_g \cdot \Delta t_{2,3}$
- r_1, r_2, r_3 : distance between sensors
- V_g : group velocity

- $\Delta t_{1,2}, \Delta t_{2,3}$: time delay between sensors

● 원교차법(Circle intersection method)

- 2개의 센서

$$r = \frac{V_g \cdot V_g \cdot \Delta t_{A,C}}{(V_g - V_A)}$$

III. 충격 신호의 포락선 변환을 이용한 충격 위치 추정 알고리즘

1. 제안한 알고리즘

충격파의 성질을 토대로 충격파를 이용하여 보다 정확한 충격 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였으며 전체 구성은 그림 13과 같이 구성하였다.

본 논문에서는 실제 원자로의 모의 강구 충격 실험과 유사하게 진행하기 위해 강철 원통의 지정된 위치에 가속도 센서를 부착하고 강철원통의 지정된 위치에 충격 신호를 가하여 가속도 센서 4개를 통해 충격 신호를 취득하였다. 실험에 의한 충격신호의 주파수 특성을 고려하여 충격신호의 주파수영역이 15KHz이내의 주파수 특성을 가지는 것을 확인하여 여파기(low-pass-filter)의 경우 차단주파수를 20 KHz로 하여 3차 여파기로 만들었다. 취득된 신호는 프리앰프(preamp)를 이용하여 신호의 변위를 증폭하고, 여파기(low-pass-filter)를 통하여 신호에 포함된 잡음을 제거한다[8].

그러나 센서가 취득한 충격 신호의 시작점을 결정하는 데는 많은 어려움이 있다. 이 문제점을 해결하기 위해 센서로부터 취득된 충격신호의 포락선(envelope) 변환 시스템을 이용하여 보다 시작점 결정을 용이하도록 하였다. 포락선(envelope)이란 임의의 신호의 최대값들을 연결하여 구성된 신호이다. 개념적인 면에서 보면 그림 14와 같은 신호는 포괄신호와 어떤 다른 보다 빠른 주파수 성분을 가진 신호(carrier signal: 전송신호)의 곱으로 이루어진 것으로 볼 수

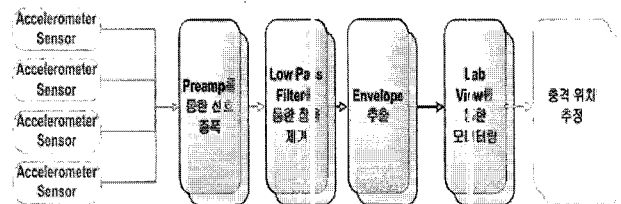


그림 13. 충격 신호 처리의 포락선 변환을 이용한 충격 위치 추정 알고리즘.

Fig. 13. The estimation algorithm of the impact position with envelope signal.

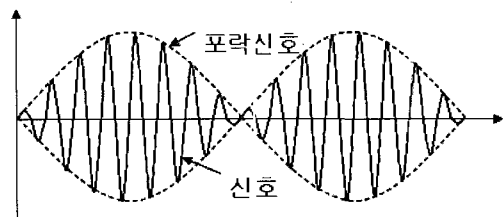


그림 14. 개념적인 면에서의 포락선.

Fig. 14. Brief envelope signal.

있다. 따라서 포락선의 변환은 이 반송신호의 제거 및 적합한 여과기를 사용하여야 하며 본 논문에서는 포락선이 일정이상의 값을 가졌을 때를 기준으로 충격신호 발생 시점을 결정하였다.

2. 충격신호의 신호처리 및 포락선 변환

그림 15와 그림 16에서 보듯 센서의 충격신호의 포락선 변환을 통하여 각 신호의 시작점을 정확한 기준으로 정하여 비교할 수 있으며 각 센서별로 도달하는 충격신호의 정확한 시간차를 구할 수 있다.

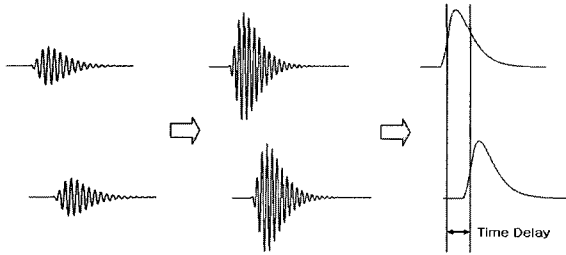


그림 15. 충격신호의 증폭 후 포락선 변환 및 도달 시간차.
Fig. 15. The difference time and transform of impact signal.

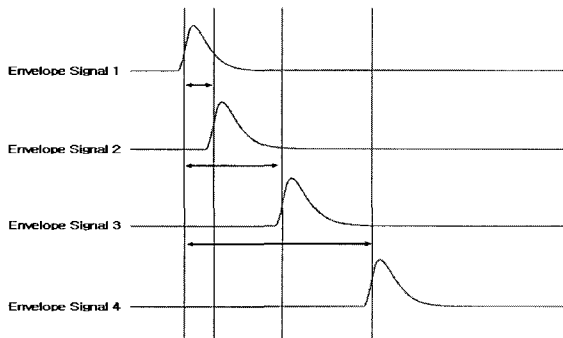


그림 16. 각 센서별로 도달하는 충격신호의 포락선 변환 및 시간차 표시.
Fig. 16. The difference time and transform of each accelerometer signal.

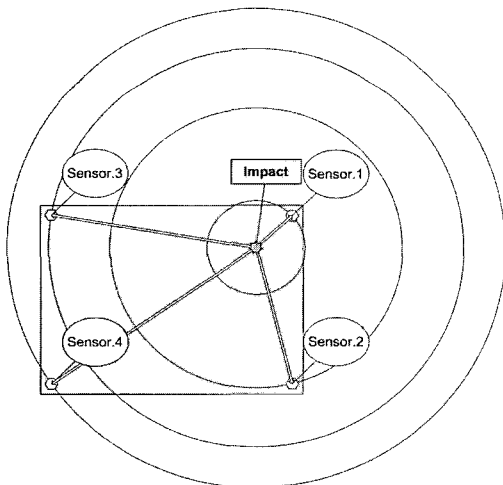


그림 17. 충격신호의 각 센서별 감지.
Fig. 17. Impact signal detection of each accelerometer.

그림 17의 형태로 충격파가 동심원의 형태로 퍼져나가 가속도 센서에 감지된다. 충격파의 진원과 충격파가 감지되는 곳, 즉 가속도 센서가 부착되어 있는 지점과의 거리는 일정하지 않으므로 각 센서가 충격파를 감지하는 시간을 기록한다. 기록한 시간을 이용하여 시간차를 분석하면 도달 시간차법을 이용하여 충격파의 진원을 찾아낼 수 있다. 도달 시간차법은 그림 과 같이 센서 1과 센서 2의 시간차를 통한 위치 추정 값과 센서 1과 센서 4와의 시간차를 통한 위치 추정값이 일치하는 곳을 계산한다.

IV. 실험 및 결과

1. 실험 장비의 구성

실험에서 쓰이는 주요 실험 부품들은 그림 18과 같이 강철 원통, 가속도 센서, 신호처리보드, DAQ(Data Acquisition) 보드, LABView로 구성되어 있다.

실험은 원자로 내의 금속 파편의 탐지 및 위치 추정을 목표로 하고 있지만, 원자로의 특성상 실제 대상을 실험하기가 어려울 뿐만 아니라, 원자로의 동작 중에는 접근하기가 불가하다. 따라서 실제 원자로를 대체할 가상 원자로를 강철원통으로 구성하였으며 가속도 센서 4개를 표면에 부착하여 실험을 수행하였다.

2. 실험의 수행 및 모니터링

그림 19와 같이 반지름 28cm, 높이 84cm의 강철 원통을 원주 방향으로 16등분(22.5도)하고 높이방향으로 6등분하여

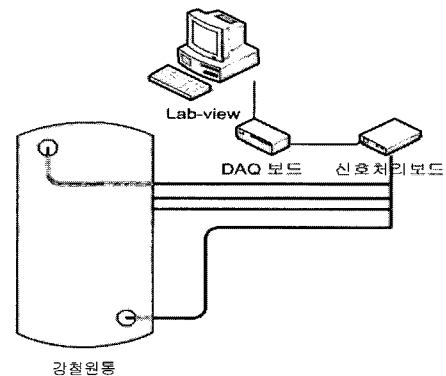


그림 18. 충격 실험 장비 구성.
Fig. 18. Structure of the test set.

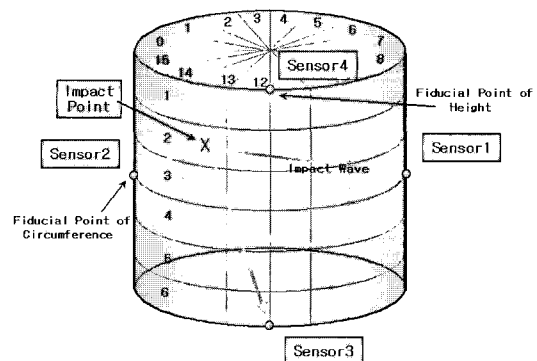


그림 19. 강철 원통의 셀 구분 및 부착된 센서의 위치 표시.
Fig. 19. A cubic plane o steel drum and attached sensor position.

정확한 충격위치의 판별을 위해 96개의 셀로 구분하였다. 96개의 고유영역을 가지는 각 셀에 200회의 임의의 충격을 가하여 그 충격 신호를 가속도 센서를 통하여 취득하였다.

센서를 통해 취득되는 충격신호를 처리하기 위한 보드를 제작하였다. 신호처리 보드는 포락선 변환을 위한 보드로 프리앰프(preamp), 여과기(low-pass-filter), 포락선 변환 회로를 포함한다. 그 각 회로의 회로도도 그림 20과 같다.

신호의 변위를 증폭하여 분별력을 높이기 위해 프리앰프를 사용하였으며 취득된 신호에 포함된 잡음을 제거하기 위해 여과기를 사용하였다. 위의 과정을 거쳐 변위가 증폭되고, 잡음이 제거된 충격 신호를 포락선 변환회로를 이용하여 변환한다.

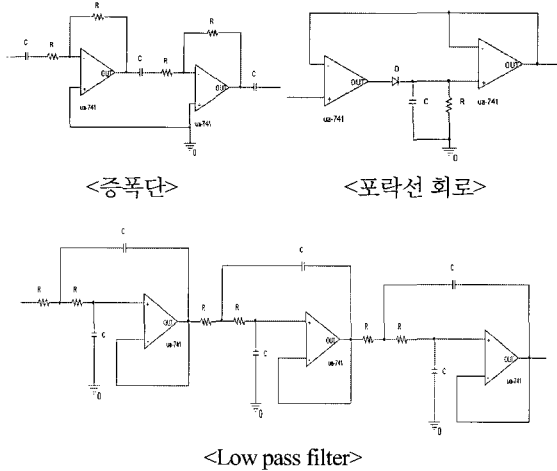


그림 20. 프리앰프, 여과기 및 포락선 변환 회로.
Fig. 20. The circuit of amplification, extraction envelope wave, and low pass filter.

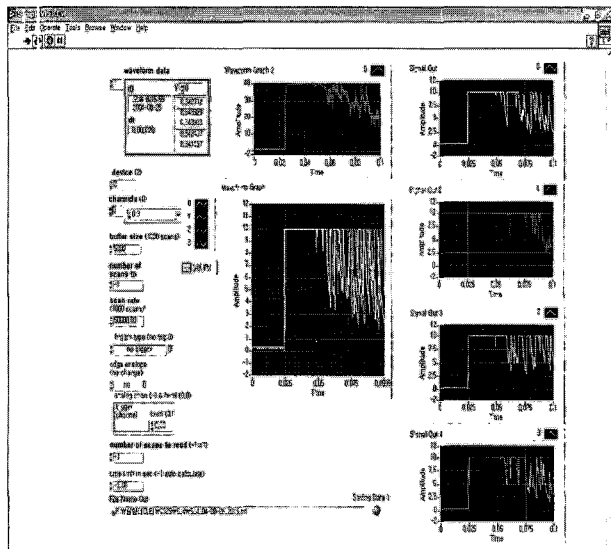


그림 21. LABView를 이용한 각 센서별 충격신호의 포락선 변환 모니터링 화면.
Fig. 21. A window of LABView that monitors the acquired envelope wave form.

신호처리 보드로부터 입력받은 신호를 NI(National Instrument)의 DAQ(Data Aquisition)보드에 연결하여 컴퓨터로 입력하였으며 전 처리된 신호를 display하고 DB(Data Base)구축을 위하여 LABView를 사용하였다.

LABView를 이용하여 충격신호의 포락선 변환 신호는 그림 21과 같다. 센서 1부터 센서 4까지 각 센서의 포락선 변환 신호를 나타내었으며 포락선 신호는 200000Hz 주기(각 센서별 50000Hz)로 샘플링 하였다.

3. 도달 시간차 계산 및 충격 위치 추정

96개의 각 셀로부터 취득한 충격신호의 포락선 변환을 이용하여 각 센서들의 충격위치에 대한 시간차를 구하고 이를 이용하여 기준점으로부터 충격위치까지의 거리를 계산하였다.

그림 22은 각 센서의 충격 신호의 도달 시간차를 계산하고 충격 위치 추정을 위해 각 셀로 구분하여 놓은 강철 원통의 전개도이다.

표 1과 표 2는 96개 각 셀의 충격 실험 결과 중 대표적인 8개의 셀에 대한 결과를 나타낸 것이다. 샘플개수 차이

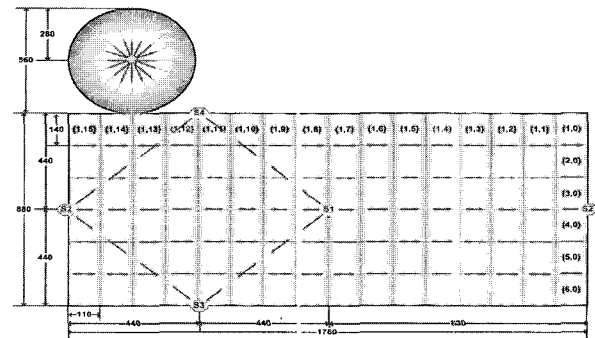


그림 22. 충격위치 추정을 위해 각 셀로 나타낸 강철원통의 전개도.
Fig. 22. A plane figure of steel drum for position estimation.

표 1. 위치추정 실험결과 1.

Table 1. A result of experiments 1.

셀 번호	(1,3)	(3,2)	(4,3)	(7,2)
원주방향 샘플 개수 차이	122.9	47.5	-37.9	-156.4
높이방향 샘플 개수 차이	42.5	54.4	53.95	79.3
원주방향 샘플 개수 차이의 표준편차	49.9	53.5	25.1	42.2
높이방향 샘플 개수 차이의 표준편차	41.6	37	32.8	31.5
기준점으로부터 원주방향으로의 거리(cm)	0.9	27.3	57.2	98.7
기준점으로부터 높이방향으로의 거리(cm)	26.06	22.9	23.1	14.2
실험 회수(회)	200	200	200	200
실제위치와 추정위치 일치하는 회수(회)	139	156	141	163
실제 위치와 추정위치가 다른 회수(회)	61	44	59	37
충격위치 검출율(%)	69.5	78	70.5	81.5

표 2. 위치추정 실험결과 2.

Table 2. A result of experiments 2.

셀 번호	(9,3)	(11,3)	(12,4)	(15,4)
원주방향 샘플 개수 차이	-113.6	-3.3	7.2	147.3
높이방향 샘플 개수 차이	63.2	46.7	-16.7	-9.0
원주방향 샘플 개수 차이의 표준편차	18.1	12.6	8.2	21.6
높이방향 샘플 개수 차이의 표준편차	30	20.2	17.1	56.1
기준점으로부터 원주 방향으로의 거리(cm)	83.7	45.1	41.4	-7.5
기준점으로부터 높이 방향으로의 거리(cm)	19.8	25.6	47.8	45.1
실험 회수(회)	200	200	200	200
실제위치와 추정위치 일치하는 회수(회)	147	155	141	143
실제 위치와 추정위치가 다른 회수(회)	53	45	59	57
충격위치 검출율(%)	73.5	77.5	70.5	71.5

에서 플러스(+값은 기준점에서 원주방향으로 센서 1을 거쳐 센서 2로 향하는 방향이며, 마이너스(-값은 기준점에서 원주방향으로 센서 2를 거쳐 센서 1로 향하는 방향이다. 1 샘플은 0.7cm의 거리값을 가지며 기준점으로부터 원주방향과 높이방향으로 각각 샘플개수 차이를 계산하고 그 값을 이용하여 기준점으로부터 원주방향으로의 거리와 높이방향으로의 거리를 각각 구하여 그 값이 포함되는 셀로 충격 위치를 추정하였다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 가속도 센서를 통해 충격 신호를 취득하고 충격 신호의 포락선변환을 통하여 충격 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다.

충격 실험 장치의 각 셀의 대한 모의 충격 신호를 4개의 가속도 센서를 통해 2000000Hz의 주기로 샘플링하여 취득하고 포락선 변환을 통해 각 센서별로 도달되는 충격 신호의 시간차(time difference)를 측정하였다. 이 시간차를 이용하여 기준위치로부터 원주방향과 높이방향으로 충격점의 거리를 계산하여 실제 충격위치와의 일치 여부를 반복적인 실험을 통해 검증하였다.

실험 결과에서 알 수 있듯이, 각 센서로부터 취득하는

충격 신호의 포락선 변환을 통하여 기존의 파동모드의 S0와 A0모드를 사용하는 방법보다 센서별 시간차 계산이 용이하며, 이 시간차를 이용하면 확한 충격 위치 탐지가 가능하다.

추후 연구과제로 원자력 발전소의 충격 실험 데이터 및 실제 충격 데이터를 적용하고 그 결과를 비교하는 연구가 필요하다. 또한, 충격 신호의 포락선 변환을 통한 충격 신호의 도달 시간차를 적용한 또 다른 충격 위치 추정 기법에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] J. H. Kim, S. J. Lee, and P. Seong, "Investigation on applicability of information theory to prediction of operator performance in diagnosis tasks at nuclear power plants," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 50, pp. 1238-1252, 2003.
- [2] Q. li and J. A. Bernard, "Design and evaluation of an observer for nuclear reactor fault detection," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 49, pp. 1304-1308, 2002.
- [3] Q. li and J. A. Bernard, "Design and evaluation of an observer for nuclear reactor fault detection," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 4, pp. 2493-2497, 2001.
- [4] R. Dorr, F. Kratz, J. Ragot, F. Loisy, and J.-L. Germain, "Detection, isolation, and identification of sensor faults in nuclear power plants" *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 5, pp. 42-60, 1997.
- [5] R. Sutton, M. J. Parkins, "Early detection of steam leaks in nuclear plant," *Control'91. International Conference*, vol. 1, pp. 75-80, 1991.
- [6] H.-W. Chang and C. J. Randall, "Finite-difference time-domain modeling of elastic wave propagation in the cylindrical coordinate system," *Ultrasonics Symposium*, vol. 1, pp. 397-402, 1988.
- [7] J. Louis Tylee, "On-line failure detection in nuclear power plant instrumentation," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-28, pp. 406-415, 1983.
- [8] T. L. Song, "Filtering theory," *Journal of Control, Automation, and System Engineering*, vol. 9, pp. 413-419 *Trans. Nuclear Science*, vol. 43, pp. 2096-2114, 1996.
- [9] J. S. Kim, C. S. Ham, J. Lyou, and J.-H. Lee, "Korea atomic energy research institute," Advanced I&C Team, Dept. of Electronics, Chungnam National University, Dept. of Electrical Eng., *Korea Advanced Institute Science Technology*, pp. 487-492, 1994.



이 위 혁

1977년 6월 24일생. 2003년 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 졸업. 2005년 동 대학원 석사. 2005년~현재 삼성 전자(주). 관심분야는 신경망, 시스템 고장 검출 및 진단 등.



이 재 국

1973년 11월 30일생. 1999년 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 졸업. 2003년 동 대학원 석사. 2005년 동 대학원 박사수료. 2005년~현재 ATM(주). 관심 분야는 신경망, 시스템 고장 검출 및 진단, 영상처리 등.



우 경 행

1970년 7월 22일생. 1993년 울산대학교 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 석사. 2005년 동 대학원 박사수료. 2005년~현재 E&I테크(주). 관심분야는 신경망, 시스템 고장 검출 및 진단 등.



최 원 호

1956년 2월 9일생. 1978년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1980년 동 대학원 석사. 1990년 동 대학원 박사. 1979년~1985년 제일 정밀 공업(주). 1985년~1986년 삼성 휴레 팩커드. 1986년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템 공학부 교수. 관심분야는 Image Processing, 고장 진단 등.