'00 춘계 학술발표회 논문집
한국 원자력학회

금속파편 자동 진단 기법 개발

Development of Automatic Diagnosis for Loose Parts Monitoring System

김태완, 김정수, 박주현, 함창식
한국 원자력 연구소

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. 본 논문에서는 질량 및 위치 추정 알고리즘에 필요한 충격 신호의 시작점과 반주기를 자동 판별하는 알고리즘을 개발하고, 이를 영광 3호기 시운전 데이터를 이용하여 알고리즘의 유용성을 분석하였다. 제안된 알고리즘을 적용하여 위치 판별한 결과와 실제 위치와의 오차는 평균 약 7.5% 이하의 오차를 보였다. 또한 반주기 자동화 알고리즘을 적용하여 질량 추정한 평균 오차가 약 21.7%이내로 상당히 유용한 결과를 보임을 알 수 있었다.

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, we developed the automatic diagnosis estimation algorithm of impact starting point and initial half period. We applied the automatic algorithm to the impact test data of YGN3. The result of the estimated impact starting point applying to the proposed algorithm has below about 7.5% average error rate. Also, the result showed that average error mass estimation applied this algorithm has within 21.7%.

이 연구는 과학기술부 원자력 성과이전 과제의 지원을 받아 수행하였음

1. 서론

원자력 발전소 냉각재 계통내의 금속파편은 구조물의 진동, 비정상적인 마찰 등으로 인하여 구조물의 일부가 떨어져 나오거나 원전 건설시공 중 혹은 핵연료 재장전시, 기타 보수활동 중에 외부로부터 금속물질이 계통내로 유입됨으로써 발생된다. 냉각재 계통 내부의 금속파편은 냉각수를 따라 계통내부를 고속으로 이동하여, 계통 내벽과의 충돌에 의하여 구조물에 치명적인 손상을 일으키며, 더 나아가 1차측 냉각재 및 방사능 등을 외부로 유출시킬 위험이 있으므로 이러한 금속파편에 대한 분석 알고리즘은 원자로의 운전성 및 안전성과 직결된다. 이러한 이유로 원자력 발전소에는 이를 감시 및 진단하기 위해 금속파편 감시시스템(LPMS; Loose Parts Monitoring System)이 설치되어 운용되고 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 제공하므로 써, 안전사고를 미연에 방지하는 역할을 한다[1, 2, 3].

영광 3호기에 설치된 금속파편 감시시스템은 충격시 발생되는 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 위한 방법으로, 영광 3호기 냉각재 계통 중 증기발생기 내부에서 발생하는 금속파편의 충격신호를 센서로부터 입력받아 분석컴퓨터에 입력하여 충격위치 및 충격 질량을 바로 분석할 수 있도록, 위치 및 질량 판별에 가장 중요한 입력값인 충격신호의 시작점 및 반주기를 자동으로 판별하는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 알고리즘을 영광 3호기 시운전 데이터를 이용하여 유용성을 판별하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 충격신호의 시작점 및 반주기를 판별하는 알고리즘을 설명하였고, 3장은 위치 판별을 위한 기본 알고리즘인 삼각법에 대해 언급하였으며, 4장에서는 질량 추정 알고리즘에 필요한 Hertz의 충격이론[5, 6, 7, 8]을 설명하였고, 4장은 영광 3호기 시운전 데이터에 본 연구에서 개발된 자동판별 알고리즘을 적용하여 분석한 결과에 대해 기술하였고, 마지막으로 5장에서는 결론 및 추후 연구방향에 대하여 제시하였다.

2. 시작점 및 반주기 자동화 알고리즘

2.1 배경잡음 감소 알고리즘

원자력 발전소 내에는 모터 등의 많은 기기들의 가동음에 기인한 소음이 많이 발생한다. 이러한 소음이외에도 원자로 각 부위에 설치되어 있는 충격센서에는 금속파편에 의한 정보로 오인하기 쉬운 제어봉 구동잡음, 노내 핵계측계통 구동잡음, 계통 밸브의 급작스런 작동에 의한 잡음, 비충격성 기계적 잡음과 전기적 잡음 등 많은 배경잡음(Background Noise)이 감지되게 된다. 금속파편이 구조물에 충돌할 경우 발생된 충격신호는 구조물을 통하여 전달되며, 이때 충격신호를 센서에서 정확하게 인식하는 것은 정확한 충격신호 위치와 질량판별에 매우 중요한 관건이 된다. 따라서, 배경잡음이 나타나는 상황에서 충격신호의 발생을 검출하고 분석하는데 있어 잡음을 줄이는 것은 매우 중요한 일이다.

충격이 감지된 센서를 통해 레코더에 저장된 잡음 섞인 충격신호를 필터링 하는 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 연속하여 입력되는 이산 충격 신호값을 미리 정해진 수개(n개)씩 메모리에 읽어온다. 그 다음 n 개의 신호값의 평균값을 취하여 현재값에서 이 평균값을 빼 차이를 구한다. 이렇게 하면 신호에 섞여 있는 저주파 성분을 제거할 수 있다. 본 연구에서는 n 의 값을 5로 정하였는데, 그 이유는 그림 1에서 보이는 바와 같이 실제 충격신호를 분석한 결과 신호의 한 주기가 대략 5개의 신호들로 이루어져 있기 때문이다. 이를 적용하여 실제 신호 $y(t_i)$에서 배경잡음을 감소시킨 신호 $\hat{x}(t_i)$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{x}(t_i) = y(t_i) - \frac{1}{5}\sum_{j=1}^{5} y(t_{i-j}) \tag{1}$$

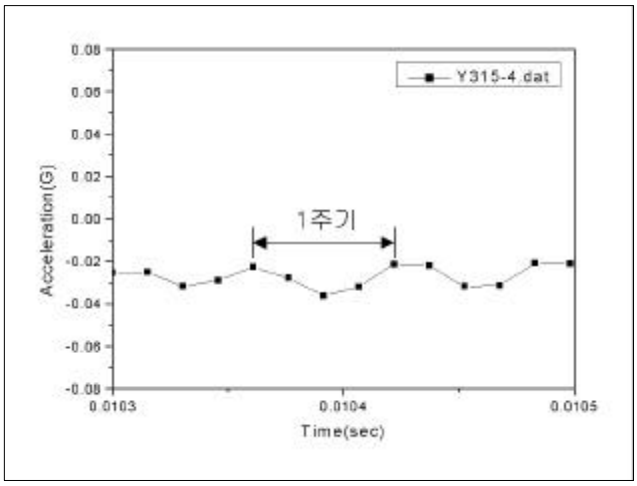


그림 1. 충격신호의 배경잡음 주기

2.2 시작점 판별 알고리즘

충격파가 시작되는 시작점은 충격위치를 판단하는 중요한 정보로 사용된다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 배경잡음을 소거한 신호를 이용하여 신호의 초기값인 배경잡음의 평균값을 먼저 구한 후, 이 값들을 기준으로 하여 전체 신호의 표준편차를 구한다. 잡음의 평균과 비교해 충격신호의 파형은 잡음의 평균에서 벗어난, 즉 편차가 큰 값을 갖게 되므로 단기적으로 표준편차값이 증가하는 지점이 충격신호의 시작점이 된다. 금속파편의 충격에 의한 신호가 배경잡음의 신호 보다 매우 크기 때문에 본 연구에서는 초기 배경잡음에서 계산된 표준편차값의 평균의 두 배 이상 넘는 지점을 시작점으로 선택하였다. 시작점을 T_s를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T_s = t_i(SD_i > 2 \times SD_{\text{배경잡음}}) \tag{2}$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{x}_i - m)^2}$$

여기서 $SD_{\text{배경잡음}}$은 충격 신호가 발생하기 전 배경잡음을 신호의 표준 편차를 나타내고 SD_k는 충격신호의 각 구간에서의 표준 편차를 나타낸다. 그리고 m은 충격신호가 들어오기전 배경잡음의 평균값을 나타낸다.

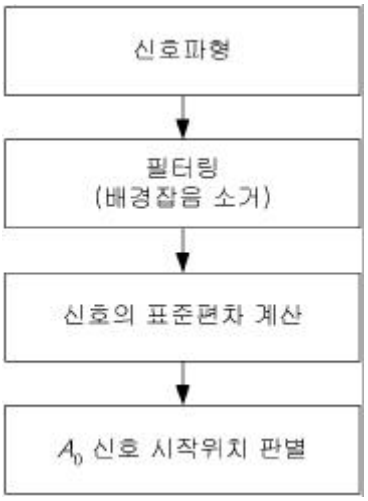


그림 2. 신호의 배경잡음 소거 및 충격신호의 시작점 판별의 순서도

2.3 반주기 판별 알고리즘

충격파의 최대변위 및 그의 반주기 값은 충격을 가한 강구의 질량을 판별하는 중요한 정보로 사용된다. 충격신호의 최대변위를 구하는 순서는, 부호에 관계없이 충격신호의 처음부터 끝까지 탐색하여 그 중 신호의 최대변위 정보를 위치 및 시간과 함께 저장한다. 반주기를 찾는 과정은, 저장된 신호의 최대변위를 기준으로 하여 반주기의 시작과 끝의 시간을 각각 구하여 두 점 사이 시간값의 차이를 계산한다. 최대변위 및 반주기를 판별하는 순서도는 그림3에 나타냈다.

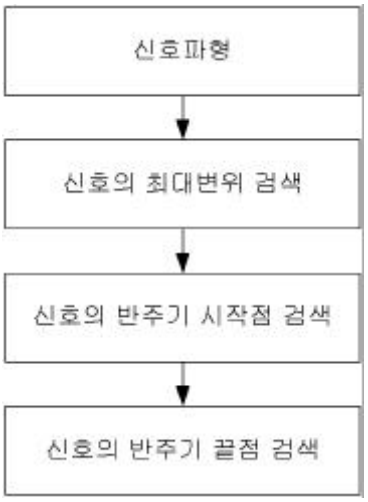


그림 3. 충격신호의 최대변위 및 반주기 시작점 판별의 순서도

3. 충격위치 평가 알고리즘과 질량 추정 알고리즘

3.1 삼각법(Triangular Method)에 의한 충격위치 평가 알고리즘

충격에 의한 표면파의 전파모드는 크게 S_0 모드파, A_0 모드파의 두 가지로 나뉜다[9]. 본 논문에서는 진폭이 크고, 매질에 따른 전파 속도가 일정한 A_0 모드파를 이용하여 삼각법을 적용, 충격 위치를 판별하였다. 삼각법을 이용하여 충격위치를 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.

$$r_2 - r_1 = V_g \cdot \Delta t_{1,2} \tag{3}$$

$$r_3 - r_1 = V_g \cdot \Delta t_{1,3} \tag{4}$$

삼각법에 의한 충격위치 평가는 센서에 유입된 충격신호의 도달지연시간과 충격파의 전파속도를 이용하여 그림 4를 이용하여 식 (3)과 (4)에 의해 충격위치를 구할 수 있다[10].

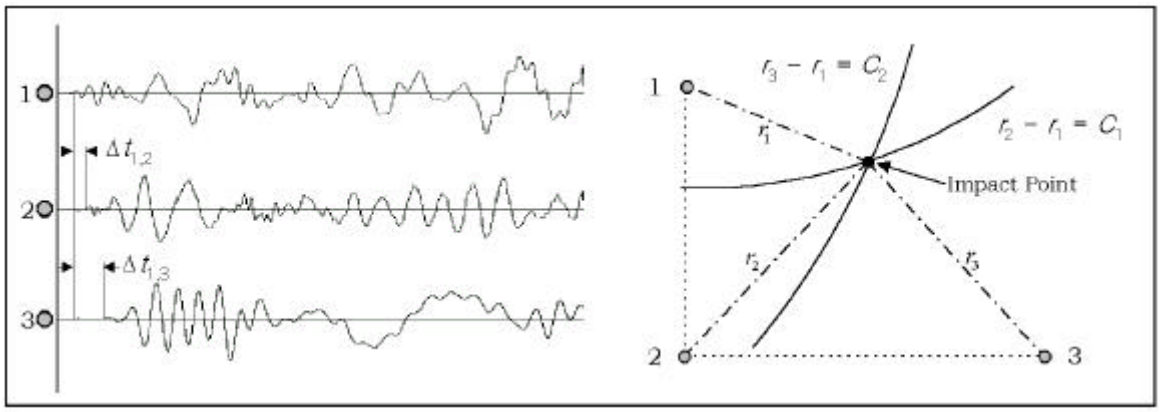


그림 4. 삼각법을 이용한 충격위치 평가방법

3.2 Hertz의 충격이론과 정현파 가정에 의한 질량추정 알고리즘

3.2.1 Hertz의 충격이론

그림 5에서 보이는 것과 같이 무한히 넓은 금속평판(Steel Plate)에 강구(Solid sphere)를 충돌시킬 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.

$$D_{\max} = K_h (m V_0^2)^{0.4} R^{-0.2} \tag{5}$$

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

$$T_d = 2.94 D_{max} / V_0 \quad (6)$$

여기서, m은 강구의 질량, V_0는 강구의 충돌속도 (m/sec), v_1과 v_2는 plate와 강구의 poisson 비, E_1과 E_2는 plate와 강구의 Young율 (N/m^2), R 은 강구의 반경 (m), K_h 는 Hertz의 충돌계수(m$^{0.8}$N$^{-0.4}$)를 말한다.

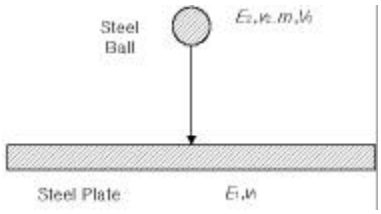


그림 5. 강구와 금속평판과의 충돌실험.

3.2.2 정현파 가정

강구가 금속판에 충돌하는 모양을 Hertz의 충격이론에 근거하여 정현파의 모양으로 가정하면 그림 6과 같이 나타난다.

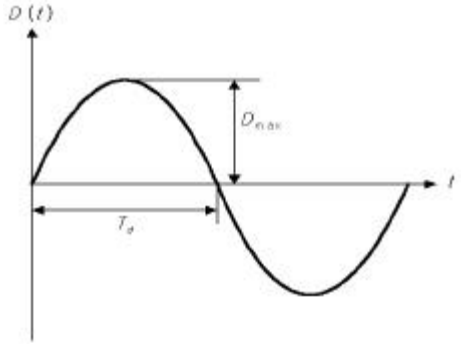


그림 6. 강구에 의한 금속판의 변형모양의 정현파 가정.

그림 6에서 강구가 금속판에 충돌시 변형되는 변위 $D(t)$는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_{max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (7)$$

여기서 식(7)을 미분하면, 충격속도 $V(t)$를 얻을 수 있고 또 이를 다시 미분하면 충격가속도 $A(t)$를 계산할 수 있다.

$$V(t) = D(t)' = \frac{\pi}{T_d} D_{max} \cos\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (8)$$

$$A(t) = D(t)'' = -\left(\frac{\pi}{T_d}\right)^2 D_{max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (9)$$

또한, 금속판에 가해지는 힘 $F(t)$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F(t) = mA(t) \quad (10)$$

여기서 t 의 범위는 $0 < t < T_d$ 이므로, 위의 식들은 강구가 금속판에 접촉하고 있는 동안에만 의미를 갖는다. 그리고, 최대 충격속도 V_{max}는 $V(t)$의 cosine함수부분이 "1"일때이며, 다음과 같이

표현된다

$$V_{\max} = V(0) = V_0 = \frac{\pi}{T_d} D_{\max} \tag{11}$$

충격파를 정현파로 가정하였을 때의 충격접촉시간은 윗식을 이용하면 최대변위와 최대 충격속도의 함수로 유도되는데 다음과 같다.

$$T_d = \pi \frac{D_{\max}}{V_0} \tag{12}$$

식(12)에서 유도된 접촉시간 T_d는 Hertz의 충격이론에 의한 식 (6)의 접촉시간 T_d와 약 7%정도의 적은 오차를 나타낸다. 그러므로 금속파편의 충격파를 정현파로 가정하여, 반주기의 조정[11] 파형의 속도 정의[12], 거리 및 damping에 의한 감소요인[13]을 보상하여 계산하면 충격파에 의하여 강구의 질량을 추정 할 수 있다.

4. 실험 및 분석 결과

본 논문에서 개발된 금속파편의 충격충격신호의 시작점 및 반주기 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/sec 이며, 증기발생기상에 설치된 가속도계 센서의 측정감도는 10pC/g 50pC/g이다. 이때 센서를 통하여 유입된 신호를 레코더(TEAC RD-135T; 샘플링 주파수 : 51 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. 영광 3호기에 설치된 센서의 위치는 그림 7에 나타나 있다.

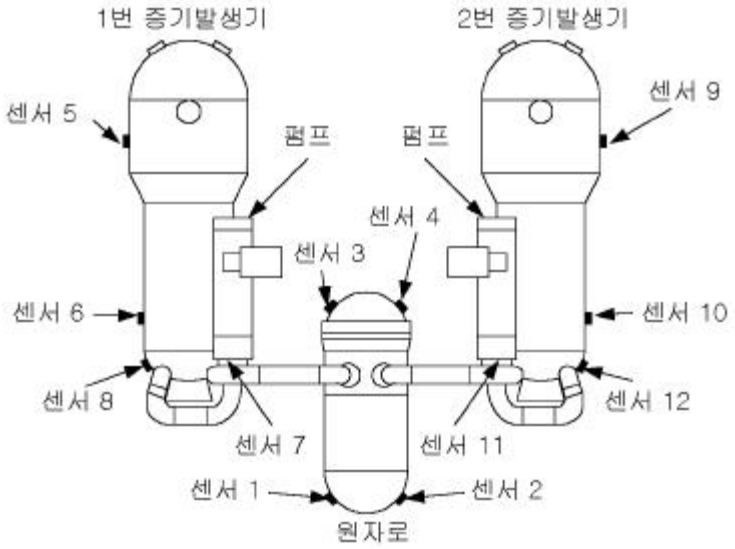
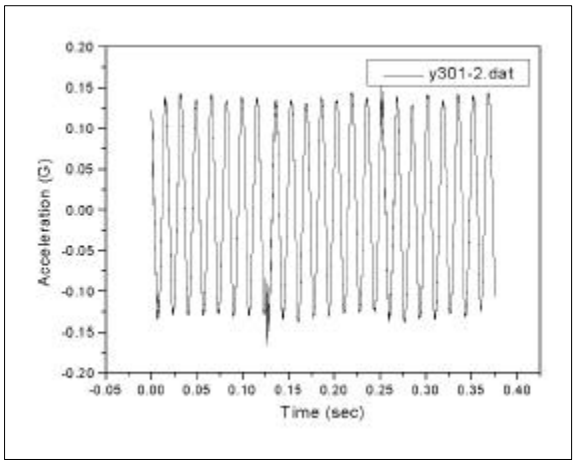


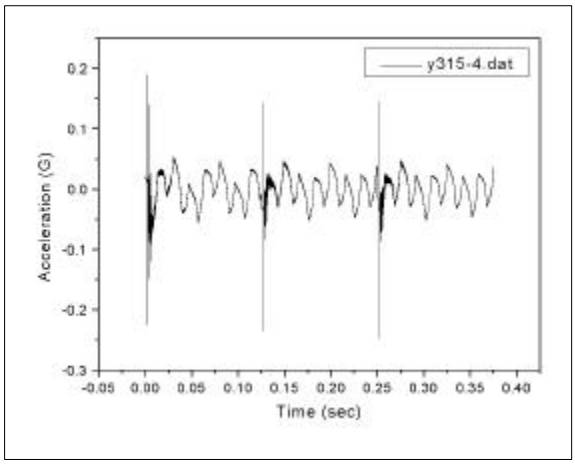
그림 7. 영광 3호기 원자로 및 증기발생기상에 설치된 센서의 위치

```
Input file name ? : y301-2.dat
Filtering file y301-2.dat... : Done!
Starting time of the signal : 1281.739 (usec)
Source file name  : y301-2.fil
Analysing file : y301-2.fil
File type checking... : OK
Max value checking...
        Total lines : 24576
        Max value : -0.0308618
        (t) of max value : 0.1267091 (sec)
        (#) of max value : 8305
Half period checking...
        Half period of the signal : 40.9249934233 (usec)
```

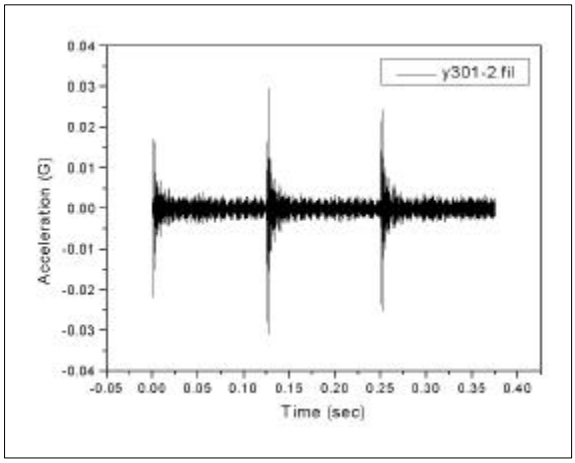
그림 8. **시작점 및 반주기를 자동으로 판별하는 프로그램의 실행 장면**



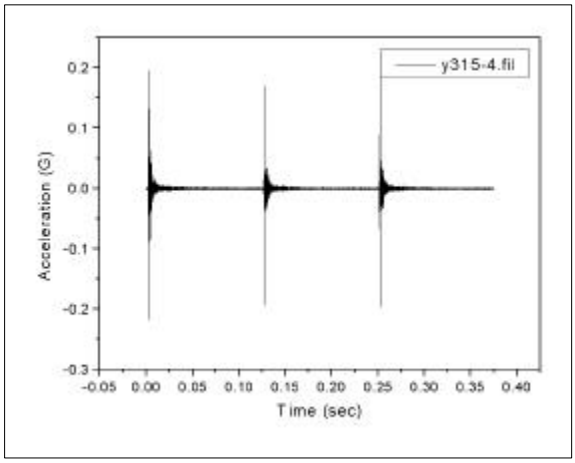
(a) 11**번 센서 (시험번호** 1)



(b) 8**번 센서 (시험번호** 3)



(c) **잡음 감소 신호 (시험번호** 1)



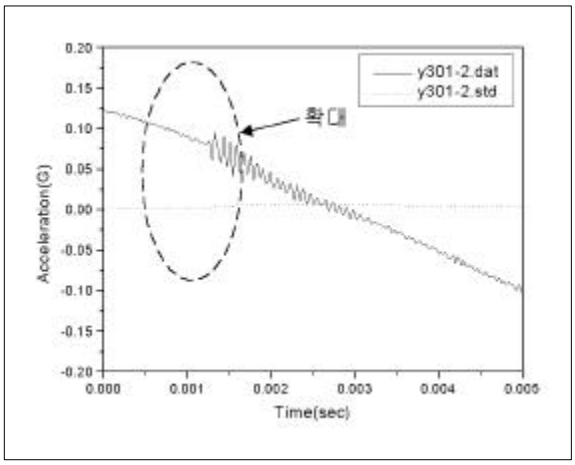
(d) **잡음 감소 신호 (시험번호** 3)

그림 9. **실제 신호와 잡음 감소 신호 비교**

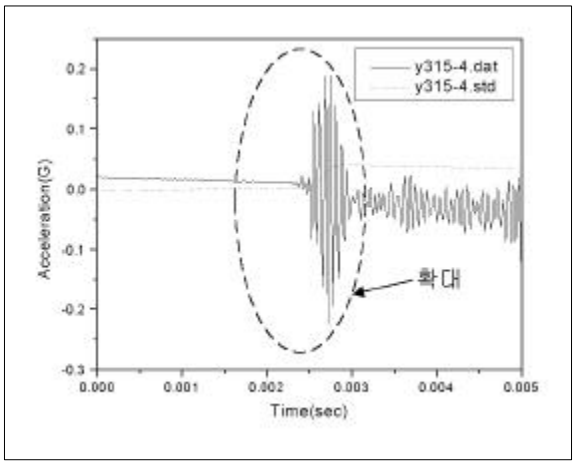
그림 8**은 시작점 및 반주기를 자동으로 판별하는 프로그램의 실행 장면을 보인 것이다. 강구**

시험 번호 1의 10번 센서에서 취득한 충격신호(y301-2.dat)를 입력하면 프로그램이 실행되어 배경 잡음을 소거한 파일(y301-2.fil)을 저장하고 표준편차를 계산한 값도 파일(y301-2.std)에 저장하게 된다. 그리고 이 저장된 파일들 속의 데이터를 이용하여 시작점과 최대값 및 반주기를 자동으로 판별하는데 그림에서 보이는 바와 같이 시작 시간은 1281.739μsec, 충격신호의 최대값은 -0.0308G, 그의 반주기는 40.92μsec로 판별함을 알 수 있다.

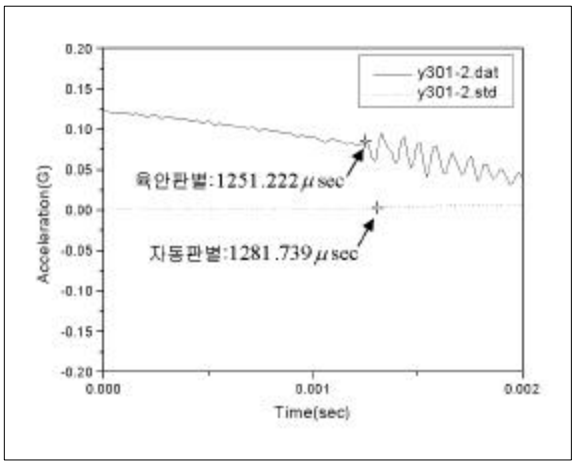
충격신호에서 배경잡음을 줄인 결과는 그림 9와 같이 된다. 그림 9의 (a)에서 보이는 것과 같이 실제 원자력 발전소의 금속파편 감시 센서에 입력되는 파형은 배경잡음의 저주파 성분 때문에 실제 신호를 육안으로 검출하기란 거의 불가능하다. 이 파형에 본 연구에서 제안한 알고리즘을 적용한 결과가 그림 9의 (c)와 같이 나타난다. 이 경우 저주파수의 배경잡음이 제거되어 육안으로도 충격파형을 구분할 수 있다. 또한 그림 9의 (b)에 보인 바이어스된 배경잡음이 존재하는 센서의 실제 파형도 육안으로 판별할 경우 매우 어렵게 되지만, 배경 잡음을 소거하면 그림 9의 (d)와 같이 나타나 파형을 분석하기가 용이해진다.



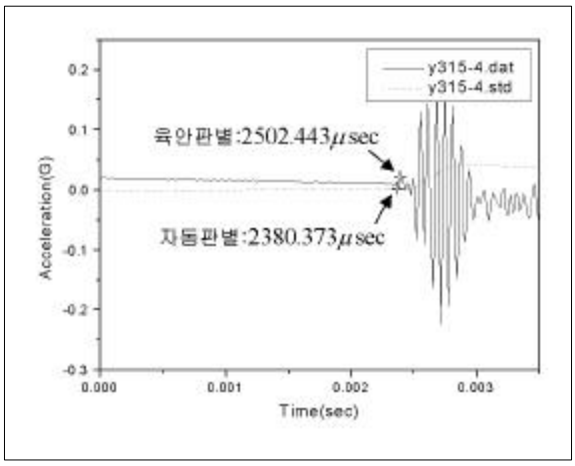
(a) 시험번호 1 시작점 부분



(b) 시험번호 3의 시작점 부분



(c) 시험번호 1의 시작점부분 확대

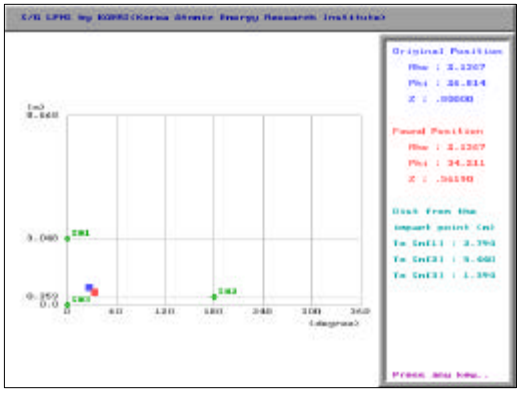


(d) 시험번호 3의 시작점 부분 확대

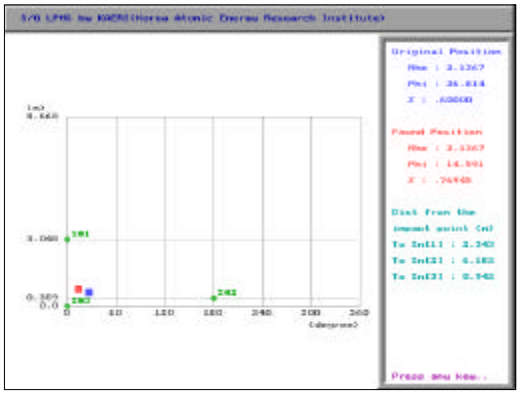
그림 10. 시작점의 육안 판별과 자동판별의 비교

잡음이 감소된 신호를 본 논문에서 제안한 자동 시작점 판별 알고리즘과, 잡음이 감소되지 않고 육안으로 판별한 값과의 차이를 그림 10에 보였다. 그림 10에서 두개의 신호가 보이는데, dat란 확장자를 가진 파일의 신호인, 가는 실선은 실제 충격신호를 보인 것이며 이를 신호분석 도구인 Origin을 이용하여 육안으로 시작점 판별을 한다. 신호를 육안으로 판별하는 방법으로는 영교차법, 주기별 고주파성분의 평균값 변동추이를 이용한 방법, 진폭크기의 변화를 이용하는 방법 및 저주파성분의 변동추이를 관찰하는 방법 등을 이용하여 시작점을 판별하였다.[14] 그리고 점선은 실선으로 보인 기존의 실제 충격신호에서 배경잡음을 감소시킨 후 이 신호들의 표준편차를 나타내는데 이 신호에 앞에서 언급한 알고리즘을 적용하여 시작점을 자동으로 판별한다.

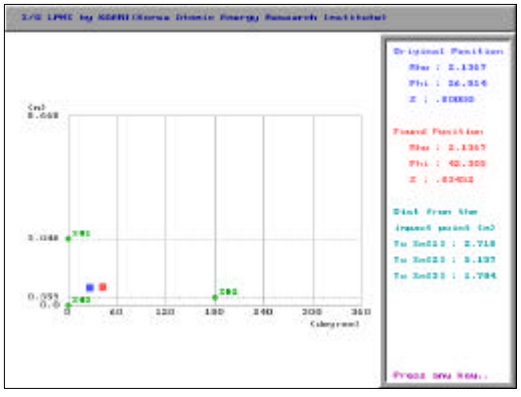
이렇게 구해진 각 센서에서의 충격파 시작 시간을 위치판별 프로그램에 입력하여 충격위치를 판별하였으며, 위치가 판별된 프로그램의 화면은 그림 11과 같이 나타난다.



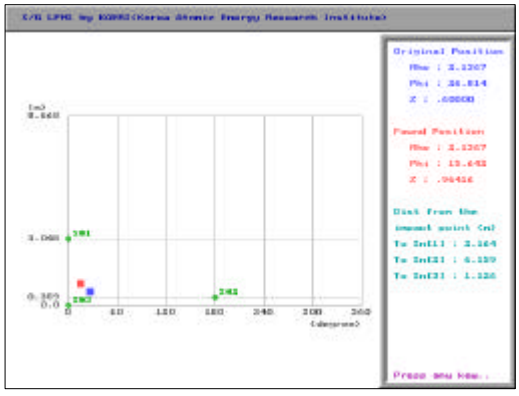
(a) 육안 판별(시험번호 1)



(b) 육안 판별(시험번호 3)



(c) 자동 판별(시험번호 1)



(d) 자동 판별(시험 번호 3)

그림 12. 시험번호 1과 3의 충격 위치 추정 결과

자동화 시작점 판별 결과와 육안으로 판별한 시작점 판별값을 비교한 것은 표1에 나타나 있

다. 실험 결과 판별오차가 약 174μsec로 일반적으로 육안으로 판별할 경우에 이정도의 오차는 적은 오차임을 알 수 있으며, 육안으로 판별할 때 시험번호 1,2번에서 시작점을 육안으로 판단을 하지 못할 경우도 있었으나 자동으로 판별할 경우에는 시작점 판별이 가능하였다.

표 1. 자동화와 육안으로 판단한 영광 3호기 시작점 시간 판별치 비교 (단위 : μsec)

시 험 번 호		1	2	3	4
1	자동화	15197	1281	1998	1007
	육안 판단	판별 불가	1251	2029	839
	판별 차이	-	30	31	168
2	자동화	6500	2975	3921	2532
	육안 판단	판별 불가	2929	3906	2471
	판별 차이	-	46	15	61
3	자동화	6988	2685	3860	2380
	육안 판단	6820	2914	4043	2502
	판별 차이	168	229	183	122
4	자동화	6942	2746	3967	2380
	육안 판단	6698	2960	4028	2502
	판별 차이	244	214	61	122
5	자동화	5813	2746	3936	2288
	육안 판단	6729	2883	4028	2487
	판별 차이	916	137	92	199
6	자동화	5615	2304	4364	3128
	육안 판단	6103	2441	4257	3189
	판별 차이	488	137	107	61

자동화한 위치 판별의 전체 결과 및 육안으로 판별한 위치 판별의 전체 결과는 표2에 나타나 있다.

표 2. 자동화와 육안으로 판단한 영광 3호기 위치판별 오차 비교(rho=2.1367)

시 험 번 호		원 래 위 치	육안 판별		자동화 판별	
			계산값	오차	계산값	오차
1	Phi	26.8 °	34.21 °	2.0%	42.3 °	4.3%
	Z	0.8m	0.56m	2.8%	0.83m	0.3%
2	Phi	26.8 °	21.98 °	1.3%	24.13 °	0.5%
	Z	0.8m	0.60m	2.3%	0.61m	2.2%
3	Phi	26.8 °	14.59 °	3.4%	15.64 °	3.1%
	Z	0.6m	0.77m	2.0%	0.96m	4.1%
4	Phi	26.8 °	16.7 °	2.8%	10.21 °	4.6%
	Z	0.6m	0.66m	0.7%	0.88m	3.2%
5	Phi	26.8 °	14.18 °	3.5%	8.77 °	5.0%
	Z	0.6m	0.80m	2.3%	0.72m	1.4%
6	Phi	26.8 °	14.71 °	3.3%	1.56 °	7.0%
	Z	2.248m	3.042m	9.1%	2.93m	7.8%

표2에 나타난 바와 같이 육안으로 판별한 오차는 육안의 경우 평균 약 5%이며, 자동으로 판

별한 경우 평균 약 7.5%이내로서 자동화판별을 할 경우에도 정확하게 실제 충격지점을 판별하였다. 따라서 본 논문에서 개발한 시작점 자동판별 및 충격위치 판별 알고리즘 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 소거되지 않은 잡음에 의해 발생한 오차로 분석되었다.

최대 진폭 및 반주기를 자동으로 판별하는 알고리즘과 기존의 육안으로 측정한 값과의 비교가 표 3에 나타나 있다.

표 3. 최대진폭과 반주기의 육안 및 자동 판별의 차이

시험번호	최 대 진 폭(G)			반 주 기(μsec)		
	육안판별	자동판별	차 이	육안판별	자동판별	차 이
1	0.2758	0.2795	0.0037	36	36	0
2	0.2466	0.2177	0.0289	38	32	6
3	0.2594	0.3264	0.067	30	36	6
4	0.3318	0.3043	0.0275	35	35	0
5	0.4291	0.4213	0.0078	35	34	1
6	0.1634	0.1640	0.0006	46	34	12

최대 진폭의 경우 차이가 평균 약 0.0225G로 매우 적은 차이를 보였으며, 또한 반주기의 경우 평균 약 4.16μsec의 차이를 보여 육안 판별과 자동판별이 거의 동일한 값을 나타냄을 볼 수 있었다.

표 4. 육안 및 자동 판별과의 질량 추정 차이

시 험 번 호	자동 판별값	육안 측정값	실제 질량	자동 판별 오차	육안 측정 오차
1	472.22	474.37	530	10.9%	10.5%
2	403.65	409.09	530	23.8%	22.8%
3	562.93	502.50	530	6.2%	5.2%
4	524.17	583.00	530	1.1%	10%
5	759.57	759.26	530	43.3%	43.3%
6	292.84	156.18	530	44.7%	70.5%
오차평균				21.7%	27.0%

자동화 오차와 측정값의 질량 판별 오차가 표 4에 나타나 있다. 각각의 시험의 오차는 육안으로 측정하여 질량을 판별한 경우 오차가 자동 판별 오차보다는 적은 경우도 있지만, 전체 평균의 경우 육안 측정값의 오차가 27.0%로 21.7%인 자동판별 오차보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 시험번호 4와 6의 경우 자동화 오차값 보다 육안 측정이 상대적으로 매우 큰 오차를 보이기 때문이다. 실제 원자력 발전소에서 충격 질량을 추정할 때 사용되는 방법들과 상황을 고려해 보면 이 정도의 오차는 고려될 수 있으며 판별된 질량은 좋은 결과라고 평가될 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 육안 측정보다 자동으로 최대 진폭 및 반주기를 측정할 경우 더 정확한 결과를 보여, 자동화된 알고리즘과 질량 추정 알고리즘 프로그램을 실제 원전에 적용하게 되면 충

격이 가해진 금속파편의 질량을 오차없이 신속하게 판별할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 영광 3호기 원전의 증기발생기 내부에서 발생한 금속파편의 충격위치 및 질량을 판별하기 위하여 시작점 및 반주기를 자동으로 판별하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 배경잡음을 제거하는 알고리즘과 신호의 표준편차를 구하여 시작점을 판별하는 알고리즘을 제안하였으며, 신호의 최대값 및 그의 반주기를 자동으로 판별하는 알고리즘을 개발하였다.

제안된 알고리즘을 이용하여 영광 3호기에서 실시한 충격시험 데이터를 분석한 결과, 위치 판별의 경우 시작점을 육안 및 자동으로 판별하는 알고리즘을 위치 추정 알고리즘에 적용하여 판별한 충격위치가 실제 충격위치와의 오차는 각각 약 5%, 7.5% 이하로 정확하게 위치를 판별함을 볼 수 있으며, 질량추정의 경우 최대 변위와 반주기를 육안 및 자동으로 판별하는 알고리즘을 질량추정 알고리즘에 적용한 결과 실제 강구의 질량과 비교할 경우 각각 약 27.0%, 21.7%로서 자동판별 알고리즘이 더 정확히 판별하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 이것을 원전에 적용하면 금속파편이 발생하였을 때 운전원이 간편하고 신속하게 충격위치 및 질량을 판별할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구 과제로는 원전의 출력 증가시 자주 발생하는 오경보(false alarm)의 판별, 각 알고리즘의 통합(시작점 및 반주기 판별 자동화 알고리즘, 위치추정 알고리즘, 질량 추정 알고리즘) 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 예정이며, 웨이블릿(Wavelet)을 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] 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.

[9] H. Lamb, "On Wave-Propagation in Two Dimensions," Proceedings of the London M-

athematical Society, Vol. 35, 1902, pp. 141-161

[10] **김태완외** 5**명**, "**삼각법을 이용한 증기발생기의 금속파편 위치판별 기법 개발**", '99 **한국원자력학술 발표회 논문집**, pp 102, **서울대학교**, 1999.10.

[11] **김택환외** 6**명**, "**발전소 시운전데이터를 이용한 금속파편 질량추정 알고리즘 개발**", '99 **한국원자력학술 발표회 논문집**, , **서울대학교**, 1999. 10.

[12] Charles W. Mayo, Loose Parts Signal Theory, Science Applications. International Corporation. OAK Ridge, TN. USA, Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 535-543, 1985

[13] L. Cremer et al., Structure-Borne Sound. ,Springer-Verlag, 1973.

[14] J. W. Allen and Lisa Oesterling, "Loose Part Sensor Validation, Impact Detection, and Characterization," Nuclear Plant Journal, May-June 1989.