

2001 춘계 학술발표회 논문집

한국 원자력학회

울진 및 고리 금속파편 시운전데이터에 자동화 알고리즘 적용연구

A Study on Automation Algorithm using impact test data
at UCN and KNU

김정수, 황인구

한국 원자력 연구소

김태완*, 성주현**, 김인기^o, 공승주^{oo}

(주) 우진^{***}, 한국전력공사^{o,oo}

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 원자력 연구소에서 개발한 자동화 알고리즘을 울진 및 고리 시운전 데이터에 적용하여, 알고리즘의 유용성 및 각 발전소의 센서별 특징등을 비교 분석하였다. 울진 3호기의 경우, 개발한 위치 추정 알고리즘을 적용한 결과 평균 오차는 약 30% 내외였으며, 울진 4호기의 경우, 17.57 %의 오차를 보였다. 또한 고리 4호기에 질량 추정 자동화 알고리즘을 적용한 결과 추정된 평균 오차가 약 71.91%(100 gram의 경우) 및 47.107 %(200 gram)이내의 유용한 결과를 보여 주었다.

Abstract

It is known that any loose part in the reactor coolant system (RCS) brings serious damage into the system components and impede the normal function of the system. In this paper, we applied the automatic diagnosis estimation algorithm to the impact test data of Kori-4 and UCN 3 & 4. The impact point estimated by the developed algorithm has about 30% average error rate at UCN 3 and about 17.47 % at UCN 4. Also, the result showed that average mass estimation error of this algorithm has within 71.9%(100 gram) and 47.107 %(200 gram) at Kori-4.

이 연구는 과학기술부 원자력 성과이전 과제에 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 즉각적인 대응은 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 외 부표면에 충격에 민감한 가속도계 센서(Accelerometer)를 설치하여 금속파편이 냉각재 계통 내부에 발생하였을 때, 충격음을 탐지하고 충격 위치를 판별하여, 운전원에게 필요한 정보를 제공함으로써, 안전사고를 미연에 방지하는 역할을 한다[1].

울진 3 & 4호기에 설치된 금속파편 감시시스템은 충격시 발생하는 신호를 저장하여 전문가가 데이터베이스화된 기준신호와 비교 분석하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 운전원이 쉽게 접근할 수 있는 분석 알고리즘이 내재되어 있지 않고, 실제 충격시 충격신호의 분석과정에 많은 시간이 소요된다[2,3].

또한 고리 4 호기의 경우, 충격신호가 발생하면 Frequency Ratio(FR : 중심주파수대 배경잡음 주파수비)기법을 이용하여 질량지표에 의해 질량을 추정하지만, 이 기법 역시 정량적인 질량 판별이 어렵고 질량추정의 범위만을 제시해주고 있다. 또한, 센서의 응답 특성이 발전소의 수명에 따라 달라짐으로 해서 센서의 주파수 특성에 따른 Peak 값을 선정하는데 어려움이 있다[4].

본 논문에서는 이러한 단점을 보완한 방법으로, 원자력연구소에서 자동화 알고리즘[5]을 개발하였다. 이 알고리즘을 이용하여 금속파편 감시시스템이 설치된 울진 3 & 4호기 및 고리 4호기의 시운전 데이터를 적용하여 위치 및 질량추정을 비교 분석하였다. 이러한 비교/분석을 통하여, 제안한 알고리즘의 유용성을 판별하고, 각 발전소별 센서의 특징등도 함께 분석할 수 있었다. 그리고 실제 충격신호 발생시, 기준 데이터로 사용될 시운전 충격신호의 데이터 베이스도 함께 구축할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 충격신호의 시작점 및 반주기를 판별하는 알고리즘을 간략하게 설명하고, 3장은 자동화 알고리즘에 대해 언급하고, 울진 3 & 4호기에 적용한 결과에 대한 비교 분석한 결과에 대해 기술하였고, 4장은 고리 4호기 시운전 데이터를 자동화 알고리즘중 질량추정 알고리즘에 적용하여 분석한 결과에 대해 기술하였고, 마지막으로 5장에서는 결론 및 추후 연구방향에 대하여 제시하였다.

2. 시작점 및 반주기 자동화 알고리즘

2.1 배경잡음 감소 알고리즘의 도입배경[6]

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 발생한 충격신호는 구조물을 통하여 전달되며, 이때 충격신호를

센서에서 정확하게 인식하는 것은 정확한 충격신호 위치와 질량판별에 매우 중요한 관건이 된다.

기존발전소에서 사용되는 방법으로는 BandPass filtering 기법을 사용하는데 영광 3&4호기의 경우, 12차 FIR(Finite Impulse Response) 필터링 기법을 사용하고 있다. 또한, EPRI-NP-5743 보고서에는 신호의 SNR(Signal to Noise Ratio)을 향상시키기 위해서 HPF(High Pass Filter) 및 BPF(Band Pass Filter)를 사용해야 한다고 권고하고 있다. 이 보고서에서 권고하고 있는 HPF의 범위는 500~1000Hz로써, 교류 전압선의 주파수 신호를 감소하기 위해서 또는 주파수의 유량 및 진동에 의한 잡음 그리고 냉각재와 관련된 음향 잡음 등을 줄이기 위함이다. 그리고 BPF의 경우, 10~20KHz의 범위로 권고하고 있다. 이는 주파수 성분의 음향 또는 센서의 고유진동 주파수를 제거하고 충격신호 발생시에 잡음이 효과적으로 제거된 신호를 얻을 수 있다고 알려져 있다. 하지만, 대부분의 발전소에서 충격시 시운전 충격 데이터 및 정상상태의 각 센서별 배경 잡음을 분석한 결과, 배경잡음 성분들이 0~500Hz 범위에도 포함되어 있는 것으로 분석되었다[7]. 이러한 배경잡음을 효율적으로 줄이기 위해, 본 논문에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 시간영역에서의 접근법(Moving average filter 및 least-square approach)등을 이용하여 기존 시스템에 설치되어 있는 필터와 시간영역에서의 필터에 대한 신호 대 잡음비를 비교하였고, 그중 신호 대 가장 좋은 필터를 이용하여 자동화 알고리즘에 적용하였다.

2.1.1 Moving Averaging 필터[8]

충격신호가 연속적으로 입력되는 이산 충격 신호값을 미리 정해진 수개(윈도우 크기 : n)씩 메모리에 읽어온다. 그리고 n개의 신호값의 평균값을 취하여 현재값에서 이 평균값을 빼 차이를 구한다. (1)식은 Moving Average 필터를 수식적으로 표현하였다. 이렇게 하면, Moving Average 필터의 특성에 의해 저주파 성분을 제거할 수 있다. 울진 3호기의 경우, n의 값을 4로 정하였는데, 그 이유는 실제 충격신호를 분석한 결과, 신호의 한 주기가 대략 4 point의 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.

$$\hat{x}(t_i) = y(t_i) - \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 y(t_{i-j}) \quad (1)$$

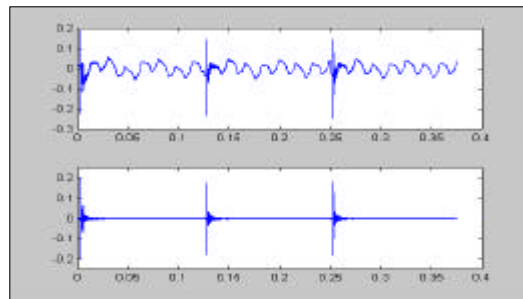


그림 1. Averaging Filter 실제 신호의 적용(단위: Volts)

그림 1의 위쪽 그림은 필터가 되지 않은 원 충격신호를 나타내고 있으며, 아래쪽 그림은 Moving

Average 필터를 적용한 결과를 보여주고 있다.

2.1.2 Curve Fitting Method[9]

일반적으로 Curve Fitting 기법에는 이산데이터를 이용하여 수학적 모델을 얻는데 사용된다. 예를들면, 측정치 데이터가 $1 < k < n$ 로 구성되어 있으면, x_k 는 k 번째 값이고, y_k 는 이에 대응되는 측정데이터이면, (2)식과 같이 표현될 수 있다.

$$f(x_k) = y_k, 1 < k < n \quad (2)$$

이때, f 함수가 결정되면, 구간내의 모든 y 값을 추정할 수 있다. 이러한 f 함수를 구하기 위해, (3)식과 같이 오차요인을 최소화하는 방향으로 접근하는 방법이 최소자승 curve fitting 방법이다.

$$E = \sum_{k=1}^n [f(x_k) - y_k]^2 \quad (3)$$

여기서 사용한 방법은 Piecewise-Linear Interpolation 방법을 사용하였다. 이 방법은 Interpolation 하는 방법 중에 가장 간단한 방법이다. 즉, Window 크기를 정하여, 정해진 구간내의 충격의 원 신호를 읽고 이를 이용하여 직선에 방정식을 추정한 후, 이를 원신호에 결합하면, 필터된 신호를 추출할 수 있다. (4)식은 Piecewise-Linear Interpolation을 나타내고 있다. 본 논문에서 사용한 윈도우 크기는 20 및 50 point 로 하였다.

$$f_k = y_k + \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} (y_{k+1} - y_k), 1 < k < n \quad (4)$$

2.1.3 기존 필터와의 비교 및 분석

실제 신호를 적용시켜본 결과가 표 1에 나타나 있다. 자동화 알고리즘 및 신호처리 방법들은 주로 시간영역에서의 접근방법을 이용하였다. 왜냐하면 주파수 영역에서의 접근 방법은 센서의 공진주파수등 분석시 여러 제약 조건이 발생하게 된다. 또한 신호의 Real-Time 분석에 계산량 증가로 인해, 여러 제약 조건이 발생하게 된다. 그러므로 자동화 알고리즘 및 신호처리 기법등을 시간영역에서 접근하기 위해 시간영역의 필터기법들을 사용하였다. 표 1은 기존 발전소에서 사용 중인 12차 FIR 필터를 구성하여 시운전 충격신호를 기존 필터에 필터링한 신호 대 잡음비를 나타내고 있다. 또한 Moving Average 필터등을 이용하여 얻은 신호 대 잡음비를 비교한 표이다. 표 1에서 기존 필터와 Moving Average 필터는 약 10배이상의 필터성능을 보이고 있다. 그러므로 자동화 알고리즘의 전처리 필터링 기법에는 Moving average 필터를 적용하였다. 그리고 NUREG-CR-2344[10]의 보고서에 의하면 신호 대 약 10 dB 이상인 경우에는 위치오차가 약 2 ~ 3cm 정도 내외로 알려져 있다.

표 1. 각 필터의 신호 대 잡음 비교

	12차 FIR	Averaging	Least square(20)	Least square(50)
S/N 비(dB)	3	16.6	13.58	12.81

2.2 시작점 판별 알고리즘

충격파가 시작되는 시작점은 충격위치를 판단하는 중요한 정보로 사용된다. 그림 1에서 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 표준편차 값이 증가하는 지점이 충격신호의 시작점이 된다. 금속파편의 충격에 의한 신호가 배경잡음의 신호 보다 매우 크기 때문에 본 논문에서는 초기 배경잡음에서 계산된 표준편차 값의 평균의 10 배 이상 넘는 지점을 시작점으로 선택하였다. 시작점을 T_s 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T_s = t_i (SD_i > 10 \times SD_{\text{배경잡음}}) \quad (5)$$

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

여기서 $SD_{\text{배경잡음}}$ 은 충격 신호가 발생하기 전 배경잡음을 신호의 표준 편차를 나타내고, SD_k 는 충격신호의 각 구간에서의 표준 편차를 나타낸다. 그리고 m 은 충격신호가 들어오기전 배경잡음의 평균값을 나타낸다. 물론 배경잡음 및 충격신호 시작점을 찾기위한 표준편차의 배수(예,10배)는 배경잡음 준위에 따라 달라질 수 있다.

3. 충격위치 평가 알고리즘과 질량 추정 알고리즘

3.1 삼각법(Triangular Method)

충격에 의한 표면파의 전파모드는 크게 S_0 모드파, A_0 모드파의 두 가지로 나뉜다[11]. 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. 울진 3 & 4호기의 증기발생기에는 4개의 센서가 설치되어 있는데, 3개는 증기발생기 하부에, 1개는 증기발생기 상부에 설치되어 있다. 충격위치 판별 알고리즘에는 증기발생기 하부에 설치된 3개의 센서가 이용된다.

$$r_2 - r_1 = V_g \cdot \Delta t_{1,2} \quad (6)$$

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

삼각법에 의한 충격위치 평가는 센서에 유입된 충격신호의 도달지연시간과 충격파의 전파속도를 이용한다. 그림 2는 삼각법을 이용한 충격위치 평가방법을 나타내고 있다[12].

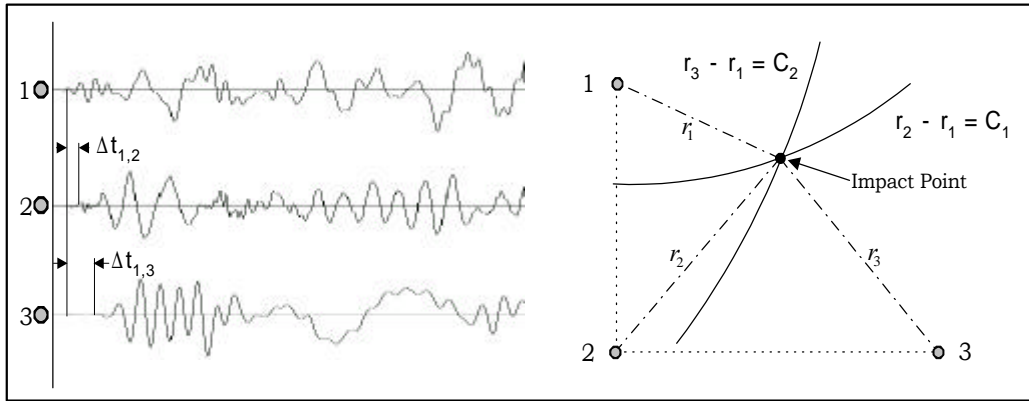


그림 2. 삼각법을 이용한 충격위치 평가방법

3.2 질량 추정 자동화 알고리즘

3.2.1 최대변위와 반주기 판별 알고리즘[13]

충격파의 최대변위 및 반주기 값은 충격을 가한 강구의 질량을 판별하는 중요한 정보로 사용된다. 충격신호의 최대변위를 구하는 순서는 부호에 관계없이 충격신호의 처음부터 끝까지 탐색하여, 그 중 신호의 최대변위 정보가 메모리에 저장된다. 반주기를 찾는 과정은 저장된 신호의 최대변위를 기준으로 하여 반주기의 시작과 끝의 시간을 각각 구하여 두 점 사이 시간값의 차이를 계산한다. 최대 변위를 구하기 위해, 신호의 최대값까지 신호파일을 읽어나간다. 여기서 신호의 최대값 앞쪽의 일정 갯수의 신호를 메모리에 저장해 둔다. 신호의 최대값, 즉 배열에 저장된 제일 끝 값으로부터 배열을 거꾸로 거슬러 올라가며 신호의 부호가 최대값과 다르게 바뀌는 위치를 찾는다. 그림 3은 이러한 과정을 나타냈다.

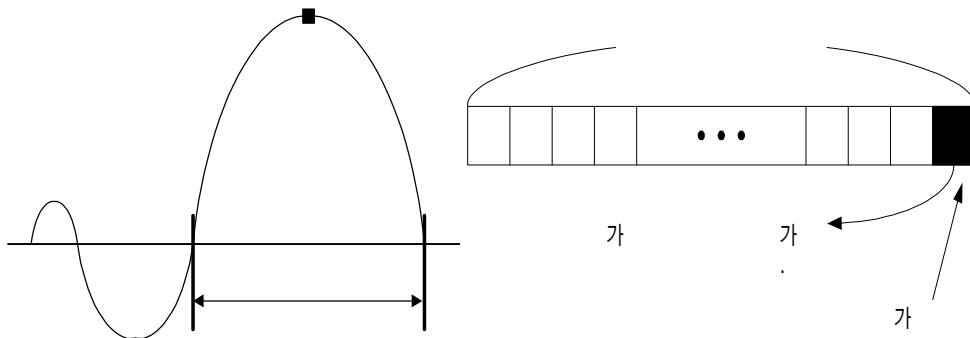


그림 3. 충격신호의 최대값 및 반주기를 찾는 과정

부호가 바뀌는 지점을 찾았으면 다음의 세 가지 경우를 고려할 수 있다. 첫 번째는 부호가 바뀐 지점에서 바로 뒤의 값이 “0” 이면, 그 점이 반주기의 시작점이 된다. 둘째로는 부호가 바뀐 지점의 값이 “0” 이면 그 점이 반주기의 시작점이 된다. 세 번째로는 부호가 바뀐 지점의 값이 “0”이 아니고 부호만 바뀐 경우, 바로 앞, 뒤의 두 점을 연결하는 직선의 방정식을 고려하여 y값

이 0이 되는 x 값을 구한다. 이에 대한 그림 및 직선의 방정식을 그림 4에 나타냈다.

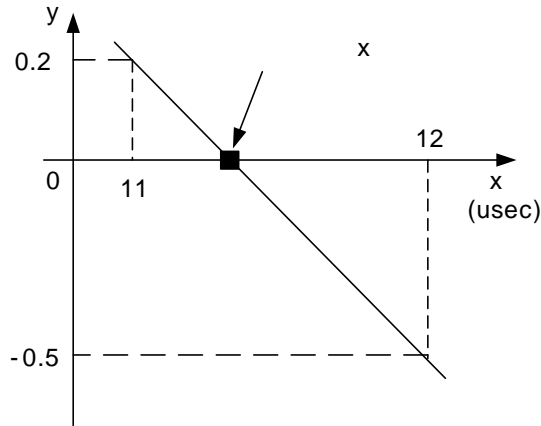


그림 4. 직선의 방정식을 이용하여 시간값을 찾는 과정

$$y = ax + b \quad (7)$$

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (8)$$

$$b = y_1 - ax_1 \quad (9)$$

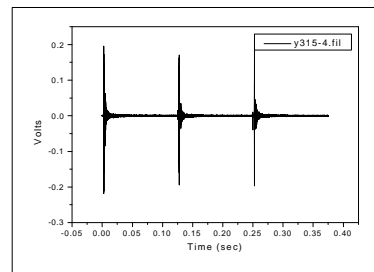
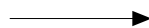
여기서 구하는 x 는 y 가 0일 때이므로,

$$x = x_1 - \frac{b}{a} \quad (10)$$

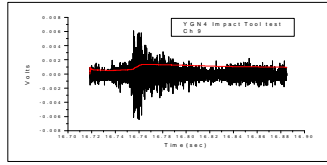
반주기의 시작점이 구하고 난 뒤 끝점을 구한다. 반주기의 끝점은 시작점을 구할 때의 방법을 반대로 이용하면 된다. 그림 5는 자동화된 위치 및 질량추정 알고리즘의 흐름도를 보여주고 있다.



(a) 충격신호입력



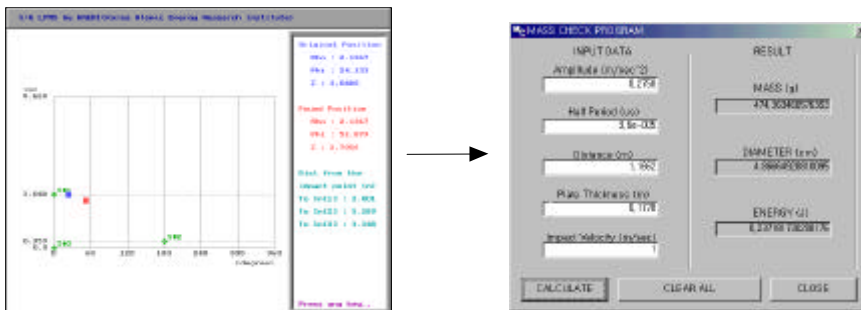
(b) 필터링



(c) 시작점 판별

Input file name ? : y301-2.dat
 Filtering file Y4IT01~1.TIM... : Done! // 충격신호의 Prefiltering
 Source file name : Y4IT01~1.fil // *.fil 에 필터된 신호 저장
 Analysing file : Y4IT01~1.fil
 Starting time of the signal at Sensor #1 : 1676.0501 (μ sec) // 시작점 시간값, 시작점 자동 판별
 Starting time of the signal at Sensor #2 : 1556.0501 (μ sec) // 시작점 시간값,
 Starting time of the signal at Sensor #3 : 1476.0501 (μ sec) // 시작점 시간값
 Impact Point : Rho : 2.1367, Phi : 42.591, Z : .03452 // 위치 표시
 Max value checking...
 Total lines : 24576
 Max value : -0.2758 // 충격신호의 최대변위
 Rising time of the signal at #1 : -0.000416 (sec) // Rising Time
 Half period checking... // 최대변위의 반주기 계산
 Half period of the signal : 36.9562501471 (μ sec)
 Impact Signal Save : Y4IT01~1.imp // *.imp에 충격신호저장
 Done!

(d) 시작점/위치판별 및 반주기를 자동으로 판별하는 과정



(e) 충격위치 표시

(f) 충격 질량 및 에너지 표시

그림 5. 자동화된 위치 및 질량추정 알고리즘의 흐름도

4. 실험 및 분석 결과

그림 6은 울진 3&4호기 증기발생기의 외벽의 두께 및 U-Tube의 두께, 그리고 센서의 위치를 나타내고 있다. 울진 3&4호기의 제원은 영광 3호기의 제원과 동일하다. 이 그림에서 나타난 센서의 위치 및 증기 발생기의 외벽의 두께 등은 금속파편의 위치 및 질량 추정을 하기 위해 필요한 변수이다. 울진 3&4호기 증기발생기 외벽의 재질은 SA-508 Class 3 이다. 외벽에 부착 된 가속도계(Accelerometer) 센서의 감도는 10pC(pico Coulomb)/g(gram) ~ 50pC/g(Coupled Sensitivity Preamp : 100mV/g, Range : 0.01g - 100g Peak)이며, 측정감도는 Mass가 0.23 lbs ~ 30 lbs (104.32616g - 13.60776kg)이다. 운동에너지(Kinetic Energy)는 0.5 ft-lb(3 inch이내)이상 이다. RCS 유속은 Hot Leg일 경우 40 ft/s (12.192m/s)이며, Cold Leg는 37.4 ft/s (11.39952m/s) 이다.

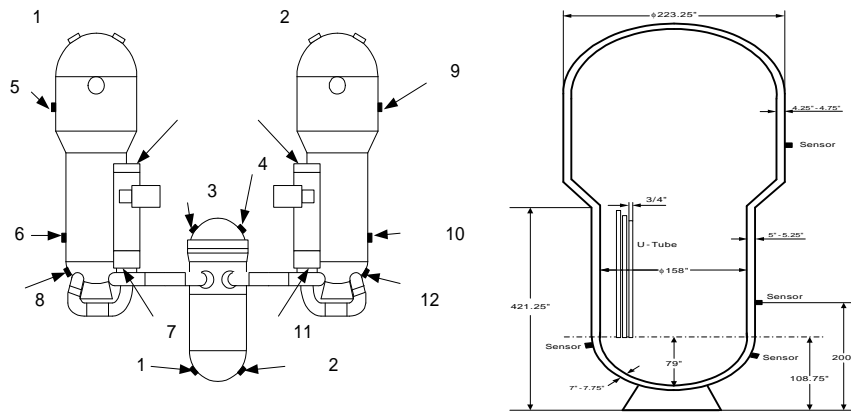


그림 6. 울진 3 & 4호기 원자로 및 증기발생기상에 설치된 센서의 위치

4.1 울진 3호기 위치 판별 적용

울진 3호기 증기 발생기 시운전시의 충격시험은 2000년 6월 28일 부터 29일까지 시행하였다. 이 충격시험시 증기발생기의 1차측 유속은 1 m/s 내외였다. 정상 상태와 동일한 조건으로 만들기 위해 1차 계통의 냉각재 펌프를 구동하여 증기발생기의 온도를 상온상태(100℃)로 만들어 시험하였다. 그리고 충격도구는 증기발생기에 Impact Tool(충격질량 : 0.5lbs)로 충격을 발생시켰다. 여기에서는 충격도구를 단지 Impact tool만을 사용하였으므로, 충격위치 알고리즘만 적용하였다. 센서를 통하여 유입된 신호를 레코더(TEAC RD-200T; 샘플링 주파수 : 24 kHz($\Delta t=4.1666 \times 10^{-5}$), 대역폭 : 10KHz, 4채널(채널당 16bit), S/N비 : 70dB, 입력전압 $\pm 5V$)에 저장하였다.

4.1.1 위치 판별 결과

자동화 알고리즘의 시작시간 판별을 신호의 표준편차에서 초기 배경잡음 크기의 20배를 넘는 지점을 시작점으로 판별하여 실험한 결과는 표 2에 나타냈다. 표준편차의 크기를 20배로 한 이유는 각 센서별 배경준위가 영광 3호기에 비해 2배 이상 큰 값으로 나타나 앞의 경우보다 더 높게 설정하여 실험하였다.

표 2. 위치 판별 결과

Name/ Start Time(μ s)	Hit Point(cm)	Found Position	Original Position	Deviation
u302-2 (1250,2217,1646)	near ch 6 (→0.9, ↑0)	52.879(dgr) 2.7056(m)	24.132(dgr) 3.0485(m)	7.98% 3.95%
u302-3 (1583,2792,2187)	near ch 6 (→0.9, ↑0)	45.766(dgr) 3.3882(m)	24.132(dgr) 3.0485(m)	6.56% 3.92%
u302-4 (1229,2500,1771)	near ch 6 (→0.9, ↑0)	40.483(dgr) 2.9944(m)	24.132(dgr) 3.0485(m)	4.54% 0.62%
u302-5 (1208,1562,1708)	near ch 6 (→0.9, ↑0)	94.595(dgr) 4.0420(m)	24.132(dgr) 3.0485(m)	19.57% 11.46%
u303-2 (5208,5021,5250)	near ch 7 (→0.9, ↑0)	99.273(dgr) 1.7120(m)	155.86(dgr) 0.35977(m)	15.72% 15.60%
u303-5 (2167,2062,2125)	near ch 7 (→0.9, ↑0)	91.363(dgr) 1.3492(m)	155.86(dgr) 0.35977(m)	17.91% 11.41%
u303-6 (7833,6917,7708)	near ch 7 (→0.9, ↑0)	125.80(dgr) 0.83042(m)	155.86(dgr) 0.35977(m)	8.35% 5.43%
u304-1 (3646,3646,3312)	near ch 8 (→0.9, ↑0)	74.611(dgr) 0.27136(m)	24.133(dgr) 0(m)	14.02% 3.13%
u304-2 (8646,9083,8208)	near ch 8 (→0.9, ↑0)	49.920(dgr) 0.24338(m)	24.133(dgr) 0(m)	7.16% 2.81%
u304-4 (4187,4417,3875)	near ch 8 (→0.9, ↑0)	64.673(dgr) 0.48374(m)	24.133(dgr) 0(m)	11.26% 5.58%
u304-5 (10229,10417,9917)	near ch 8 (→0.9, ↑0)	66.658(dgr) 0.46002(m)	24.133(dgr) 0(m)	11.81% 5.31%

실제 위치 판별 알고리즘을 적용시킨 사용자 접속 확인 부분을 그림 7에 나타냈다.

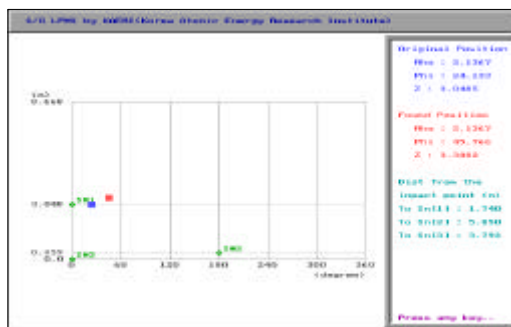


그림 7. 충격신호의 위치판별

4.2 울진 4호기 위치 판별 적용

울진 4호기 증기 발생기 시운전시의 충격시험은 2000년 4월 29일 데이터를 취득하였다. 이 충격시험시 증기발생기의 1차측 유속은 1m/s 내외이다. 정상 상태와 동일한 조건으로 만들기 위해 1차 계통의 냉각재 펌프를 구동하여 증기발생기의 온도를 상온상태(100℃)로 만들어 시험하

였다. 그리고 충격 도구는 Impact Tool(충격질량 : 0.5lbs)로 충격을 발생시켰다. 센서를 통하여 유입된 신호를 레코더(TEAC RD-200T; 샘플링 주파수 : 24 KHz($\Delta t=4.1666 \times 10^{-5}$), 대역폭 : 10KHz, 4채널(채널당 16bit), S/N비 : 70dB, 입력전압 $\pm 5V$)에 저장하였다.

4.2.1 위치 판별 결과

자동화 알고리즘의 시작시간 판별을 신호의 표준편차에서 초기 배경잡음 크기의 20배를 넘는 지점을 시작점으로 판별하여 실험한 결과를 표 3에 나타냈다.

표 3. 위치 판별 결과

Name/ Start Time(μs)	Hit Point(cm)	Found Position	Original Position	Deviation
u401 (18625,20042,19500)	near ch 5 ($\rightarrow 0.65, \uparrow 0.65$)	27.320(dgr) 6.3144(m)	24.166(dgr) 8(m)	0.88% 19.44%
u402 (4500,5792,5417)	near ch 6 ($\rightarrow 0.65, \uparrow 0.65$)	70.898(dgr) 2.4567(m)	17.429(dgr) 3.6980(m)	14.85% 14.32%
u405 (7208,6667,7125)	near ch 7 ($\rightarrow 0.65, \uparrow 0.65$)	110.33(dgr) 1.1165(m)	162.57(dgr) 1.0097(m)	14.51% 1.23%
u406 (11375,12292,10917)	near ch 8 ($\rightarrow 0.65, \uparrow 0.65$)	25.273(dgr) 0.56521(m)	17.429(dgr) 0.65(m)	2.18% 0.98%
u411 (3417,4125,3125)	near ch 11 ($\rightarrow 0.80, \uparrow 0.20$)	112.32(dgr) 0.68616(m)	21.451(dgr) 0.55977(m)	25.24% 1.46%
u412 (3417,4125,3125)	near ch 12 ($\rightarrow 0.65, \uparrow 0.50$)	42.145(dgr) 0.78977(m)	17.429(dgr) 0.5(m)	6.86% 3.34%

4.3 고리 4호기에 자동화 알고리즘적용

고리 4호기 증기 발생기 시운전시의 충격시험은 2000년 8월 30일 데이터를 취득하였다. 충격시험은 정상상태와 동일한 조건으로 만들기 위해 냉각재 펌프를 구동하여 상온상태(100℃) 이상으로 만들어 시험하였다. 그리고 증기발생기 하부에 설치된 센서를 기준으로 하여 우측으로 3 ft(=91.44cm)근처를 질량 15g, 50g, 100g, 200g의 강구로 충격을 발생시켰으며, 증기발생기의 각 센서당 5회 이상의 충격시험을 수행하였다. 증기발생기 내부의 유속은 1.2~2.4 m/s 으로, 질량 추정 프로그램에 입력시 평균유속(1.8m/s)을 적용하였고, 증기발생기 외벽의 하부 두께는 6~6.5 inch(=15.24~16.51cm)이다. 증기발생기상에 설치된 가속도계 센서의 측정감도는 30mV/g이다. 이때 센서를 통하여 유입된 신호를 Data Logging System[14](PC(AMD K6-2 400MHz, 4GB HDD, 128MB RAM), DSP Board(DAP 3000a/212(Microstar Lab), Ranges : $\pm 10V$, RAM : 2048 Kbytes, Dual 1024-byte FIFO), OS : Windows98, 샘플링 주파수 : 100 KHz($\Delta t=1 \times 10^{-5}$), 대역폭 : 50KHz, 1채널(채널당 12bit))에 저장하여 개발한 알고리즘을 이용하여 분석하였다.

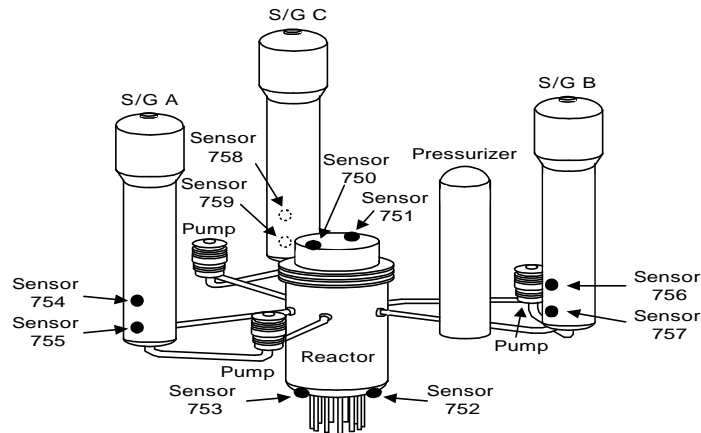


그림 8. 고리 4호기 원자로 및 증기발생기상에 설치된 센서의 위치

고리 4호기에 설치된 센서의 위치는 그림 8에 나타나 있다. Averaging Filter의 window 크기 (n)는 고리 4호기의 경우, “7”로 정하였는데, 그 이유는 한 주기가 대략 7 point의 신호들로 이루어져 있기 때문이다. 실제 데이터를 취득하였을 경우, 센서에서 전치증폭기를 통하여 나온 신호는 “32배” 증폭시킨 신호로서 단위는 전압이다. 따라서 질량판별 알고리즘에 필요한 인자인 단위가 가속도인 최대변위를 입력하려면 다음과 같은 과정을 거쳐 질량 추정 입력값으로 변환하였다.

$$(((\text{최대변위}[V]) \div 32) \div 0.03) \div 9.8 = \text{최대변위}[m/s^2] \quad (11)$$

고리 4호기 증기발생기에 설치된 756센서 및 원자로 하부 센서는 구조상 충격이 불가능하여 충격 시험을 하지 못하였다. 질량 추정 결과 강구 50g의 경우 오차는 평균 92.58%, 100g의 경우, 오차는 평균 71.91%, 200g의 경우, 오차가 47.107%로 결과를 보였다. 따라서 강구의 질량 추정은 강구의 무게가 크면 클수록 오차율이 줄어드는 결과를 보여주었다. 센서별 질량추정 결과를 표 4,5,6에 보였다.

표 4. 증기발생기-A의 상부센서(755)근처에서 충격을 가한 강구(50g)의 질량 판별 결과

최대변위(m/s ²)	반주기(μs)	추정 질량(gram)	오 차(%)
0.241345355	32.4548440069	134.66	169.32
0.16245397	38.0827366957	85.08	70.16
0.177209032	37.7769301814	92.48	84.96
0.191148487	38.6464228206	97.76	95.52
0.180249019	33.7040047089	100.46	100.92
0.215171803	37.5397736256	110.88	121.76
0.131090196	48.7564734133	60.94	21.88
0.219843004	34.7106231221	118.54	137.08
0.099948859	45.7638825977	50	0
0.141396495	37.153643067	76.2	52.4
0.165938834	41.1616666245	82.86	65.72
0.286945169	37.2887937932	145.64	191.28
			92.58

표 5. 증기발생기-A의 상부센서(755)근처에서 충격을 가한 강구(100g)의 질량 판별 결과

최대변위(㎜)	반주기(μ s)	추정질량(gram)	오 차(%)
0.290652471	39.0755839408	143.25	43.25
0.226590293	41.0181913679	110.28	10.28
0.387783781	38.4908980946	190.23	90.23
0.3808882	42.9981575962	174.5	74.5
0.241122917	50.8590126516	241.3	141.3
			71.91

표 6. 증기발생기-A의 상부센서(755)근처에서 충격을 가한 강구(200g)의 질량 판별 결과

최대변위(㎜)	반주기(μ s)	추정질량(gram)	오 차(%)
0.278195936	59.9609264499	349.91	74.955
0.30881825	42.1612825696	144.76	27.62
0.3556044	43.1672242012	163.05	18.475
0.222289823	52.230269417	219.14	9.57
0.341442507	64.2150120722	409.83	104.915
			47.107

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 울진 3 & 4호기 및 고리 4호기의 증기발생기 내부에서 발생한 금속파편의 충격위치 및 질량을 판별하기 위하여 자동화 알고리즘에 시운전 데이터를 통하여 알고리즘의 유용성을 살펴보았다.

자동화 알고리즘을 이용하여, 울진 3 & 4호기에서 실시한 충격시험 데이터를 분석한 결과, 판별한 충격위치가 실제 충격위치와의 오차는 각각 약 30%, 17% 이하로 정확하게 위치를 판별함을 볼 수 있으며, 고리 4호기에서 실시한 충격시험 데이터를 이용하여 질량추정을 추정된 경우, 최대 변위와 반주기를 자동으로 판별하는 알고리즘을 질량 추정 알고리즘에 적용한 결과 실제 강구의 질량과 비교할 경우 평균오차가 약 91%(50 gram), 71%(100 gram), 47%(200 gram)로서 강구의 질량이 증가함에 따라 오차율이 현저히 감소함을 보이고 있다. 이러한 자동화 알고리즘을 원전에 적용하면, 위치 추정의 경우 약 20 % 내외의 추정오차를 보임으로써, 금속파편이 발생하였을 때 운전원이 간편하고 신속하게 충격위치에 대한 정보를 줄 수 있지만, 질량 판별의 경우, 오차율이 영광 3호기의 추정값 보다 높게 나타나 이를 개선하는 연구가 필요할 것으로 예상된다.

또한 향후 연구 과제로는 원전의 출력 증가시 자주 발생하는 오경보(false alarm)의 판별 등이다. 즉, 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 운전원이 금속파편의 충격신호와 구별이 어렵다. 이와 관련된 오경보를 구별하기 위한 알고리즘을 본 논문에서 개발한 알고리즘을 적절히 이용하고, 또한 유럽 등에서 널리 사용하고 있는 인공지능 기법 등과 결합하여 개발된다면 좀더 효과적인 위치 및 질량 추정에 관한 정보를 운전원에게 제시할 수 있을 것이며, 오경보 감소 등에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] EPRI. NP-5743, Loose Parts Monitoring Systems, Project No. 2642-1, Mar. 1988.
- [2] Combustion Engineering. Inc., "Instruction Manual; Operation - Maintenance Instructions for NSSS Integrity Monitoring System," Document No. 91691-ICE-15123.
- [3] 김태완외 7명, 울진 3, 4호기 원자력 발전소 NIMS 신호분석 및 진단, KOPEC/NED/TR/99-001, 한국전력기술주식회사, 1999년 2월.
- [4] 이용호외 3명, "원전 금속파편 감시설비 개발", '97 추계원자력 학술발표회 논문집, pp. 284-289, 1997.
- [5] 김정수외 6명, 금속파편 추정알고리즘개발 및 충격시험 데이터 분석, KAERI/AR-554/99, 한국원자력연구소, 1999.
- [6] 김태완외 3명, "금속파편자동진단 기법 개발", '00 원자력 학술대회 논문집, pp. 110, 고려한전연수원, May, 2000.
- [7] 김정수외 6명, 금속파편 추정알고리즘에 대한 데이터분석 사용지침서,KAERI/AR-558/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [8] Robert H. Shumway, Applied Statistical Time Series Analysis, Prentice-Hall, 1988.
- [9] Robert J. Schilling and Sandra L. Harris, Applied Numerical Methods for Engineers using MATLAB and C, Brooks/Cole, 1999.
- [10] R. C. Kryter and F. Sharoki, Summary of Studies on Methods for Detecting and characterizing Metallic Loose Parts in Nuclear Reactor Coolant Systems, NUREG/CR-2344, ORNL/TM-7969, Oak Ridge National Lab., Sept., 1981.
- [11] H. Lamb,"On Wave-Propagation in Two Dimensions", Proceedings of the London Mathematical Society, Vol.35, pp. 141-161, 1920.
- [12] 김태완외 5명, "삼각법을 이용한 증기발생기의 금속파편 위치판별 기법 개발", '99 한국원자력학술 발표회 논문집, pp 102, 서울대학교, 1999.10.
- [13] 김택환외 6명, "발전소 시운전데이터를 이용한 금속파편 질량추정 알고리즘 개발", '99 한국원자력학술 발표회 논문집, , 서울대학교, 1999. 10.
- [14] 김창희외 3명, 실시간 데이터 처리 및 저장시스템 개발, KAERI/RR-1931/98, 한국원자력 연구소, August 1999.