

원자력발전소의 폴린부분품감시에서 포락선법에 의한 도착시간결정

리금산, 로광철, 오수일

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《원자력발전소는 과학기술적으로 잘 다산하여 안전성을 철저히 담보할수 있게 건설하여야 합니다.》

원자력발전소이상진단체계의 구성요소인 폴린부분품감시에서 충격파가 발생하여 수감부까지 도착하는데 걸리는 시간을 정확히 결정하는것은 중요한 문제로 나선다.

각이한 위치에 배치된 수감부들에 충격신호가 도착하는 시간을 결정하기 위한 여러가지 방법들이 제기되었지만 간섭잡음이 존재하는 경우에는 좋은 결과를 얻을수 없었고 오정보확률이 높은 등 일련의 결함들이 제기되었다.[3, 4]

본문에서는 간섭잡음을 효과적으로 제거하기 위한 한가지 방법과 포락선알고리즘에 기초한 충격신호의 도착시간결정방법에 대하여 서술하였다.

1. 웨블레트변환에 의한 잡음제거

폴린부분품감시체계에서 측정된 신호를 검사하는 과정에 흔히 자료언기와 변환과 같은 많은 종류의 잡음신호들의 영향으로 간섭잡음이 나타난다. 그러므로 실제응용에서는 측정자료를 해석하기 전에 반드시 잡음제거를 진행하여야 한다.

본문에서는 현재 널리 리용되고있는 웨블레트변환[1]에 기초한 잡음제거방법을 리용하여 원자력발전소의 1차회로계통에서 판로를 따라 이동하는 폴린부분품이 판로벽과 충돌할 때 발생하는 충격신호속에 섞여있는 잡음을 효과적으로 제거하기 위한 합리적인 웨블레트와 분해차수를 선택하였다.

폴린부분품에 의하여 발생하는 충격신호는 1~10kHz의 주파수대역에 놓여있으며 충격신호속에 섞여있는 잡음은 보통 백색가우스잡음이고 신호대잡음비는 10dB정도[2, 6]이므로 모의실험에서는 충격파모양에 백색가우스잡음을 첨부하여 잡음제거실험을 진행하였다.

LabVIEW환경에서 폴린부분품에 의하여 발생하는 충격파와 비슷한 모의신호를 발생시키고 여기에 백색가우스잡음을 추가하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험에 리용된 잡음제거프로그램의 원리도는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보여주는것처럼 주파수가 비슷한 2개의 시누스파의 선형결합으로 모의신호를 발생시켜 폴린부분품에 의한 충격신호와 비슷한 파형을 모형화하였다.

발생시킨 충격신호에 백색가우스잡음을 추가하여 잡음이 섞인 모의신호를 형성하였다. 선형결합한 시누스파의 주파수를 1~10kHz에서 변화시키면서 실험을 진행하여 이 범위에서 합리적인 웨블레트와 분해차수를 결정하였다. 그리고 주파수가 2kHz이고 신호대잡음비가 10dB인 경우 충격신호의 잡음제거를 모의하였다.(그림 2)

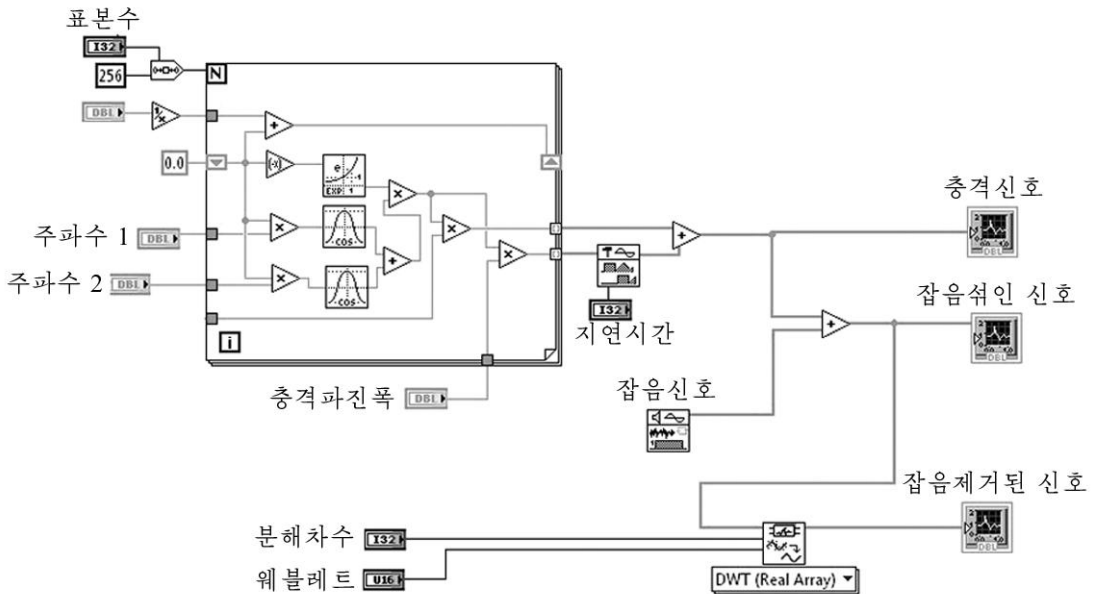


그림 1. 잡음제거프로그램의 원리도

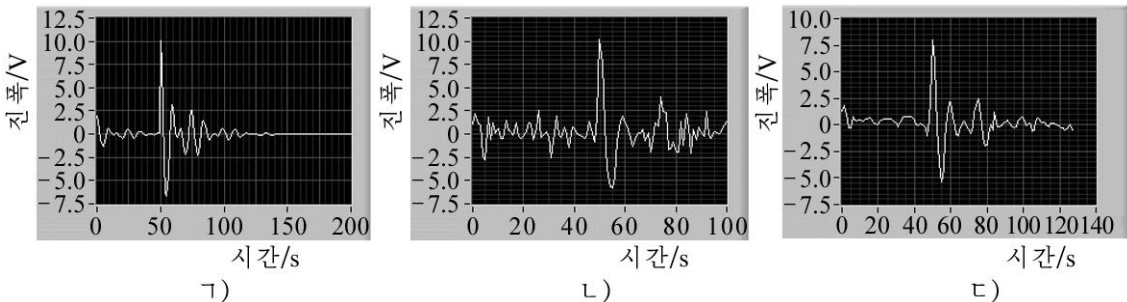


그림 2. 충격신호에 대한 잡음제거모의결과
 가) 원신호, 나) 잡음섞인 신호, 다) 잡음제거된 신호

모의실험을 통하여 이러한 형태의 신호로부터 웨블레트변환에 기초하여 잡음을 제거하고 웨블레트를 DB04로 선택하며 분해차수를 12로 설정하였을 때 충격신호의 잡음제거 효과가 가장 좋다는것을 알수 있다. 이러한 설정값을 리용하여 원자력발전소의 플린부분품감시에서 플린부분품에 의한 충격신호의 잡음제거에 적용할수 있다.

2. 충격신호의 도착시간결정방법

충격에 의한 진동시작점을 밝히고 충격신호가 수감부들에 도착하는 시간차를 신속정확히 결정하기 위한 많은 연구들이 진행되었으나 잡음이 존재하는 경우에는 좋은 결과를 얻을수 없었으며 계산량이 방대한것과 같은 부족점들을 가지고있었다. 세계적으로 충격위치결정에서 각이한 수감부들에서 신호의 도착시간차를 리용하여 충격시작점을 얻는 방법이 많이 리용되고있는데 여기에는 시간령역루적법, 두제곱평균법, 신호상관법 등이 있다.[6]

시간령역루적법과 두제곱평균법은 일정한 시간동안의 신호의 루적합을 부단히 계산하여 신호가 도달했는가를 판단하는 방법으로서 계산량이 방대하고 특히는 잡음이 심하거나 신호대잡음비가 낮은 경우에는 리상적인 결과를 얻을수 없다. 신호상관법도 역시 신호들의 호상상관함수를 구하고 그에 기초하여 시간차를 구하는 방법으로서 지금까지 널리 리용되어왔지만 잡음이 있는 경우에는 만족한 결과를 얻을수 없었다.

현재 포락선법은 표본화주파수를 높이 설정하여야 하는 결함은 있지만 다른 방법들에 비해 계산량이 적고 정확도가 높은것으로 하여 연구[2, 5, 6]가 심화되고있지만 구체적인 알고리즘은 소개된것이 없다.

이로부터 논문에서는 보다 간단한 방법으로 도착시간을 결정할수 있는 한가지 방법을 제안하였다.

측정에서 얻어진 시계렬자료의 포락선은 Teager의 알고리즘으로부터 다음식으로 표시된다.

$$E(n) = x(n)^2 - x(n-1)x(n+1) \quad (1)$$

여기서 $E(n)$ 은 신호의 포락선이나 에네르기곡선을 나타내며 x 는 신호표본, n 은 리산시간을 의미한다.

원자력발전소의 1차회로계통에서 발생하여 관로를 따라 전파되는 충격신호는 매우 짧은 시간동안에 발생한 여러개의 시누스파들의 합성으로 볼수 있다.

논문에서는 각주파수가 각각 ω_1, ω_2 이고 $\omega_1 \approx \omega_2$ 인 2개의 시누스파의 합성파형

$$\eta(x, n) = \eta_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x) + \eta_2 \sin(\omega_2 t - k_2 x) \quad (2)$$

를 전파되는 충격신호로 모형화하였다. 여기서 η_1 과 η_2 는 매개의 전달파형요소의 상수 진폭, ω 는 각주파수(rad/s), k 는 파수, t 는 파동이 전파되는 시간(s), x 는 파동이 전파된 거리(m)이다. 식 (2)에서 t 를 리산시간으로 변환하면 다음식을 얻는다.

$$\eta(x, n) = \eta_1 \sin(\Omega_1 n - k_1 x) + \eta_2 \sin(\Omega_2 n - k_2 x) \quad (3)$$

여기서 n 은 신호표본지표이며 $\Omega = 2\pi(F/F_s)$, F 는 신호주파수(Hz), F_s 는 표본화주파수이다.

식 (3)으로부터 합성신호의 포락선은 다음식으로 표시할수 있다.

$$E(x, n) = \eta^2(x, n) - \eta(x, n-1)\eta(x, n+1) \quad (4)$$

변수변환

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2}, \Delta k = \frac{k_1 - k_2}{2}, \Omega_p = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{2}, k_p = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

를 진행하면 식 (4)는 다음과 같이 표시된다.

$$E(x, n) = \eta_1^2 \sin^2 \Omega_1 + \eta_2^2 \sin^2 \Omega_2 + 2\eta_1 \eta_2 \sin^2 \Omega_p \cos 2(\Delta\Omega n - \Delta k x) - 2\eta_2 \sin^2 \Delta\Omega \cos 2(\Omega_p n - k_p x) \quad (5)$$

$\Omega_1 \approx \Omega_2$ 이면

$$E(x, n) = \eta_1^2 \sin^2 \Omega_1 + \eta_2^2 \sin^2 \Omega_2 + 2\eta_1 \eta_2 \sin^2 \Omega_p \cos 2(\Delta\Omega n - \Delta k x) \quad (6)$$

이다. 식 (6)으로부터 포락선모양이 최대인 점에서의 시계렬번호 n 이

$$n = \frac{\Delta k}{\Delta\Omega} x = \frac{x}{\Delta\Omega / \Delta k}$$

라는것을 알수 있다. $C_g = \Delta\Omega / \Delta k$ 라고 하면 n 은 다음과 같이 표시된다.

$$n = \frac{x}{C_g} \quad (7)$$

이로부터 충격신호의 포락선최대봉우리가 특정한 기본주파수에서의 식 (7)로 표시되는 군속도로 전파된다고 볼수 있다.

따라서 측정에서 얻어진 충격시간신호의 시계열자료로부터 식 (6)을 리용하여 포락선을 그린 다음 최대봉우리를 검출하고 봉우리점에 대응하는 표본값을 표본화주파수로 나누어 도착시간을 결정할 수 있다.

포락선법에 의한 도착시간결정알고리즘은 그림 3과 같다.

도착시간결정을 위한 프로그램은 LabVIEW를 리용하여 작성하였다. 대표적인 기능함수들은 Hilbert Transform.vi와 Peak Detector.vi이다. Hilbert Transform.vi는 시계열자료에 힐베르트변환을 적용하여 신호포락선을 얻는 기능함수이며 Peak Detector.vi는 최대봉우리검출을 위한 기능함수이다.

프로그램의 정확성검증을 위하여 입구신호파형을 그림 1에서 보여준 프로그램을 리용하여 발생시켰다. 출현위치를 나타내는 충격신호의 발생시간값을 50으로 설정하고 실험을 진행하였다. 그림 4에 포락선법에 의한 최대봉우리검출결과를 보여주었다.

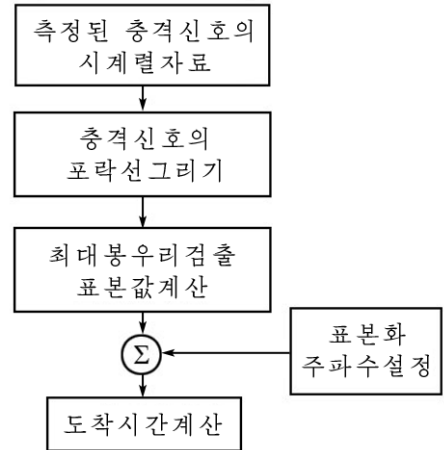


그림 3. 포락선법에 의한 도착시간 결정알고리즘

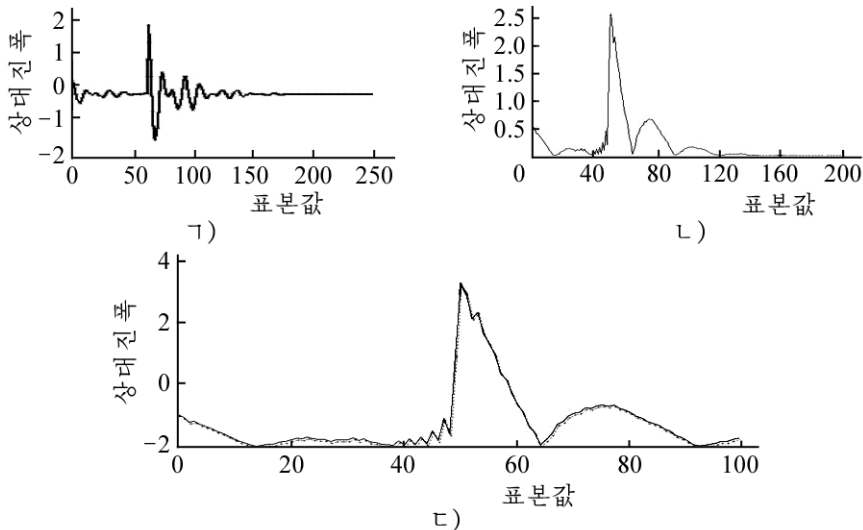


그림 4. 포락선법에 의한 최대봉우리검출결과
 가) 신호파형, 나) 신호파형의 포락선, 다) 최대봉우리검출

그림 4의 다)에서 보는것처럼 포락선법으로 얻은 최대봉우리값은 50.4이므로 이 점을 도착시간결정에 리용하여야 한다.

맺 는 말

웨블레트기술을 적용하여 풀린부분품충돌에 의해 발생하는 충격신호의 잡음을 효과적으로 제거할수 있는 합리적인 웨블레트와 분해차수범위를 확정하였다.

진동수감부에서 충격신호의 도착시간을 보다 신속정확히 결정할수 있는 한가지 알고리즘을 제기하고 LabVIEW환경에서 모의실험을 통해 제기한 알고리즘을 원자로의 풀린부분품감시체계에 적용할수 있다는것을 실험적으로 확증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 최철국; 웨블레트와 응용, 김일성종합대학출판사, 1~113, 주제106(2017).
- [2] G. Szappanos; Ann. Nucl. Energy, 24, 14, 1097, 1997.
- [3] B. J. Olma; Progress in Nuclear Energy, 43, 1, 225, 2003.
- [4] G. Por et al.; Progress in Nuclear Energy, 43, 14, 243, 2003.
- [5] G. Szappanos et al.; Progress in Nuclear Energy, 34, 3, 185, 1999.
- [6] 程实; 基于LabVIEW的核电站松物件定位分析系统, 浙江大学, 1~88, 2011.

주제109(2020)년 12월 5일 원고접수

Arrival Time Determination based on Envelope Method in LPMS of Nuclear Power Plant

Ri Kum San, Ro Kwang Chol and O Su Il

We determined the proper wavelet and the range of level that could effectively reduce noise of impact signal generated by loose parts, using wavelet transform.

We also suggested an effective algorithm that could determine the arrival time of impact signal in the vibration sensor. Through the simulation in LabVIEW, we demonstrated that the algorithm could apply on the loose parts monitoring system (LPMS) of nuclear power plant.

Keywords: loose parts monitoring system (LPMS), arrival time determination, envelope method