

‘98 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

금속파편신호 중 배경잡음 제거/감소를 위한 기법 연구  
(A study on the Method for cancelling the background noise of the impact signal)

김 정수, 함 창식, 박 진호  
한국원자력연구소

요 약

본 논문은 금속파편 감시계통(LMPS: Loose Part Monitoring System)에서 금속파편신호 발생시 순수 금속파편신호와 시스템에서 발생하는 배경잡음이 혼재되어 나타나는데, 이 배경잡음 신호를 제거하기 위해서 시간영역 (adaptive signal processing)에서의 제거방법과 주파수 (spectral subtraction) 영역에서의 제거방법을 비교/분석하였다. 일반적으로 발전소 내에서는 모터등에 의한 잡음, 제어봉 구동잡음, 노내 핵 계측계통 구동잡음, 계통 밸브의 갑작스러운 작동에 의한 잡음 등 많은 배경잡음(background noise)이 존재한다. 이러한 신호들은 충격 신호 발생시에 순수 충격신호와 혼재되어 금속파편 충격시스템에 입력된다. 이러한 신호 중 시스템의 배경잡음신호를 제거하고 순수 충격신호만 추출해야만, 금속파편의 위치 및 그 물질의 에너지 등을 정확히 예측할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 두 가지 방법을 이용하여 비교 분석하였다. 첫 번째, 시간영역에서는 noise canceller 기법을 이용하여 배경잡음을 제거하고, 신호 대 잡음 비를 평가하였다. 두 번째, 주파수영역에서는 스펙트럼 감산법을 이용하여 배경잡음을 제거하고, 신호 대 잡음 비를 평가하였다. 실험은 평판구조물을 이용하여 입력신호를 취득, 분석 및 평가하고, 각 기법간의 신호 대 잡음 비를 비교/분석하였다. 비교 분석결과 noise canceller(시간영역) 보다는 스펙트럼 감산법(주파수영역)이 금속 충격신호에 대해 신호 대 잡음비가 훨씬 우수함을 보였다.

Abstract

In this paper, we compared the noise canceller (time domain analysis method) to the spectral subtraction (frequency domain analysis method) for cancelling background noise when the Loose Part Monitoring System's accelerometers combined the noise signal with the impact signal if the impact signal exists. In the operation of a nuclear power plant monitoring, alarm triggering occurs due to a peak signal in the background noise, an amplitude increase by component operation such as control rod movement or abrupt pump operation. This operation causes the background noise in LPMS. Thus this noise inputs to LPMS together with the impact signal. In case that this noise amplitude is very large comparing to that of the impact signal, we may not analyze the impact position and mass estimation. We analyzed two methods for cancelling background noise. First, we evaluate the signal to noise ratio utilizing the noise canceller. Second, we evaluate the signal to noise ratio utilizing the spectral subtraction. The evaluation resulted superior the noise canceller to the spectral subtraction on the signal to noise ratio.

## 1. 서론

LPMS는 원자력발전소 냉각재 계통내의 금속파편에 의한 계통 내 구조물들의 취약 또는 파손으로부터 안전성을 확보하기 위한 시스템이다. 이들 금속파편 들은 계통 내 유체유동, 응력부식, 피로, 구조요소 간 비정상적 마찰 등의 원인에 의해 구조물로부터 분리되면서 생성되거나, 원전 건설기간 또는 핵연료 재장전, 기타 보수활동 시 외부로부터 계통 내로 유입될 수 있다. 현재까지 외국에서 개발되어 운용되고 있는 LPMS는 원자로 냉각재계통 주요 기기의 압력경계 외부표면에 충격에 민감한 센서(Accelerometer, A.E. Sensor 등)들을 부착하여 압력경계 내부구조물에 금속파편이 부딪칠 때, 내부구조물을 따라 전파되는 충격파를 감지함으로써 미리 설정된 경보준위를 초과하는 충격신호의 발생을 주제어실에 알려주는 비안전성 계측 계통이다.[1,2]

LPMS를 원전의 금속 파편 탐지 도구로써 최적으로 활용하기 위해서는 금속과 금속간의 충격 특성, 냉각재 계통 구조물을 통한 금속 충격파의 전파 특성, 충격에 의한 응답 신호로부터의 금속 파편의 크기, 정체 특성 평가 및 안전성 영향 결정 등 고도의 진단기술이 확립되어 있어야 한다. 하지만 국내의 경우 고리 3 호기에 LPMS가 최초로 설치되는 등 비교적 짧은 LPMS 도입 역사를 가지고 있으며 또한 운전 경험 및 신호 진단 기술 결핍 등으로 인하여 운전 중 발생하는 LPMS의 금속 충격 경보에 대한 조치를 포함한 전반적인 운영 상태가 미흡한 실정이다[3,4,5]. 이 LPMS 계통이 기존 발전소에 운영되고 있는 실태를 간단히 살펴보면, 금속 파편에 의한 이상 신호가 발생하게 되면 경보가 울리고 자기 기록 테이프가 동작하여 이상 신호의 이력을 기록한 뒤, 이 기록된 신호를 바탕으로 운전원이 경험적으로 그 위치와 특성을 평가/조치한다. 그러나 현재와 같은 수행 방식으로는 빠른 대응을 요하는 큰 결함이 발생하였을 때나 운전원의 경험 부족으로 인한 오판을 하게 되는 경우에 심각한 문제를 야기한다. 따라서 충격에 의한 경보 신호가 발생한 즉시 컴퓨터에 그 신호가 기억되고 그와 동시에 바로 충격 신호가 분석되어 발생한 금속 파편의 위치 및 특성을 파악할 수 있는 자동 파형분석 알고리즘이 절실히 요구된다.

한편, 원자력 발전소는 충격센서(가속도계)를 사용하여 충격위치를 평가할 때, 펌프의 동작, 제어봉 구동, 노내 핵 계측 계통 구동, 그리고 계통 밸브의 갑작스러운 작동등과 같은 비충격성 기계적 잡음과 전기적 잡음 등 많은 배경잡음(Background Noise)이 존재한다. 따라서 원자로 각 부위에 설치되어 있는 센서에서는 많은 잡음신호가 감지되게 된다. 그러므로 센서에 입력된 신호를 전처리 과정 없이 바로 충격신호를 분석하기에는 여러 어려움이 존재할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 충격신호를 분석하여 금속 파편의 위치 및 특성을 정확히 파악하기 위해, 정상 운전중에 들어오는 배경잡음신호를 제거하기 위해 시간 영역 신호 분석에서 널리 알려진 noise canceller를 순환형 자승기법(RLS: Recursive Least Square)을 이용하여 배경잡음을 제거하고 신호 대 잡음비를 평가하였고, 주파수 영역에서는 스펙트럼 감산법(Spectral Subtraction) 법을 이용하여 배경잡음을 제거하고 신호 대 잡음비 향상을 평가하여 시간 영역과 주파수 영역에서의 신호 대 잡음비를 비교 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1. 시간영역에서의 잡음제거기법[6,7,8,9]

Time series analysis에서의 잡음제거 기법은 Widrow가 제시한 adaptive noise canceller[8]를 가장 많이 사용한다. 그림 1은 noise canceller의 block diagram이다. 이 필터를 사용하는 목적은 내부 또는 외부의 잡음에 왜곡된 신호를 adaptive filter를 사용하여 배경잡음을 제거하고, 본래의 신호를 복원하는데 있다. 이를 위해 그림 1에서  $s$ 를 최소자승(least squares)기법으로 추출한다. 즉, filter의 weight 값을 조정하여 전체 시스템의 출력 값을 최소화한다. 이를 위해 각 신호들 ( $s$ ,  $n_0$ ,  $n$ )이 확률적으로 정재성(stationary)하다고 가정한다. 그리고  $s$ 가  $n_0$ 와  $n$ 에 확률적으로 상호 독립적이며,  $n_0$ 와  $n$ 은 서로 확률적으로 상호 종속적으로 가정한다. 그림 1에서, 출력은 다음과 같다.

$$\xi = s + n_0 - y \quad (1)$$

여기서,  $s$ 는 순수충격신호,  $n_0$ 는 배경잡음신호,  $y$ 는 filter의 출력 신호이다. (1)식에서 양변을 제곱하면,

$$\xi^2 = s^2 + (n_0 - y)^2 + 2s(n_0 - y) \quad (2)$$

(2)식에다 양변에 기대치를 취하면,  $s$ 와  $n_0, y$ 는 통계적으로 상관관계가 없으므로,

$$\begin{aligned} E[\xi^2] &= E[s^2] + E[(n_0 - y)^2] + 2E[s(n_0 - y)] \\ &= E[s^2] + E[(n_0 - y)^2] \end{aligned} \quad (3)$$

(3)식에서, 신호 출력  $E[s^2]$ 는 필터가  $E[\xi^2]$  값을 최소화 시키는데 영향을 받지않는다. 즉, 최소 출력은 다음과 같다.

$$E_{\min}[\xi^2] = E[s^2] + E_{\min}[(n_0 - y)^2] \quad (4)$$

여기서,  $E[\xi^2]$ 의 최소화는  $E_{\min}[(n_0 - y)^2]$ 을 최소화할 의미하므로, 전체 출력을 최소화 할 수 있다. (3)식에서 가장 작은 출력은  $E_{\min}[\xi^2] = E[s^2]$ 을 알 수 있다. 즉,  $E[(n_0 - y)] = 0$ 가 됨을 의미한다. 수식적으로  $y = n_0$  및  $\xi = s$ 를 말한다. 이때, 출력은 배경잡음에 완전히 제거되며, 순수 충격신호만 얻을 수 있다. 본 논문에서 적용한 adaptive filter는 순환 자승 최소법(Recursive Least Square)을 사용하여 filter를 설계하였고, filter의 차수는 10차로, training은 5000번 하였다.

## 2.2 주파수 영역에서의 스펙트럼 감산법[10,11]

스펙트럼 감산법은 충격신호에 잡음이 부가된 센서 신호의 스펙트럼으로부터, 충격신호가 관찰되기 전까지 얻은 잡음신호에 평균을 취하여 예측된 잡음의 스펙트럼을 빼냄으로써 원래 충격신호의 스펙트럼을 회복시키는 방법이다. 이때 잡음은 정재성을 갖거나 또는 그의 스펙트럼이 매우 천천히 변화해야 하며, 충격신호와 잡음은 상호 독립적이어야 하는 조건을 만족해야 한다. 즉, 감산법은 잡음을 제거한 후 얻어진 충격신호의 진폭(Magnitude) 스펙트럼과 잡음이 부가된 신호의 위상(Phase)스펙트럼을 합친 후, 이를 이산시간 푸리에 역변환(IDFT ; Inverse Discrete Fourier Transform)을 하게 되면 시간영역에서의 충격신호가 얻어진다. 센서의 출력은

$$y(m) = x(m) + n(m) \quad (5)$$

여기서,  $y(m)$ : 배경잡음과 충격신호가 혼합,  $x(m)$ : 순수 충격신호,  $n(m)$ : 배경 잡음 신호.

(5)식을 Fast Fourier Transform(FFT) 처리하여 주파수영역으로 표현하면,

$$Y(f) = X(f) + N(f) \quad (6)$$

여기서 FFT 처리 시 신호의 window 는 Hamming 이나 Hanning 창함수를 이용하였고, 이산 푸리에 변환을 통하여 주파수 영역으로 변환하는 기법을 사용하였다. 그림 2 는 스펙트럼 감산법에 의한 잡음 제거과정을 보여준다. 즉, 잡음이 부가된 신호의 진폭스펙트럼을 구한 후 잡음의 진폭스펙트럼을 빼주면,

$$|\hat{X}(f)| = |Y(f)| - \alpha |\bar{N}(f)| \quad (7)$$

여기서, 절대값은 진폭 스펙트럼을 나타내며,  $|\hat{X}(f)|$  는 충격신호 진폭스펙트럼  $|X(f)|$ 의 추정치,  $|\bar{N}(f)|$  는 잡음의 평균 진폭스펙트럼,  $\alpha$ 는 조정변수(  $\alpha=1$ , 전체잡음이 제거된 상태)를 나타낸다. 잡음신호에 대한 평균 진폭 스펙트럼 추정은 잡음신호만 존재할 경우, (8)식과

$$|\bar{N}(f)| = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |N_i(f)| \quad (8)$$

같이 나타낼 수 있다. (8)식에서  $|N_i(f)|$  는 잡음신호만이 존재하는 K 개의 잡음신호 window 에서 i 번째 잡음신호의 스펙트럼이다. 또 다른 방법으로, 평균잡음의 진폭 스펙트럼은 저역 통과 필터(Low Pass Filter:LPF)의 출력으로 얻을 수 있다.

$$|\bar{N}_i(f)| = \rho |\bar{N}_{i-1}(f)| + (1 - \rho) |N_i(f)| \quad (9)$$

여기서,  $\rho$  는 저역 통과 필터의 계수 이며, 전형적으로 0.8 - 0.95 의 값을 가진다. 충격신호 진폭스펙트럼의 추정치  $|\hat{X}(f)|$  를 센서 신호의 위상스펙트럼과 결합 후, 이를 이산 푸리에 역변환을 이용하여 시간영역에서의 잡음이 감소된 충격신호를 얻을 수 있다. 즉,

$$\hat{x}(m) = \sum_{k=1}^N |\hat{X}(k)| \exp(j\theta_Y(k)) \exp(-\frac{j2\pi}{N} km) \quad (10)$$

또한, (7)식에서  $\alpha=1$  이라고 가정하면, 진폭스펙트럼 추정치의 기대값은 다음과 같다.

$$E [ |\hat{X}(f)| ] = E [ |Y(f)| ] - E [ |\bar{N}(f)| ] = E [ |X(f)| + |N(f)| ] - E [ |\bar{N}(f)| ] \approx E [ |X(f)| ] \quad (11)$$

### 3. 실험

금속과편에 의한 충격신호를 다양한 형태의 배경잡음신호와 구분하기 위해서는 발전소의 운전조건, 충격과편의 포락선 형태 및 충격과편에 대한 진폭크기와 배경잡음의 준위를 고려하여 각 채널마다 일정한 기준값 (Threshold value)을 설정한다. 센서에서 기준치를 넘는 신호가 입력되면 일반적으로 금속과편에 의한 충격신호인지를 판별한 후 충격위치를 평가하고 그 특성을 알아낸다. 본 논문에서는 금속과편에 의한 충격신호인지를 판별한 후 이러한 충격신호를 분석하여 금속과편의 위치 및 특성을 정확히 파악하기 위해, 정상 운전중에 들어오는 배경잡음신호를 제거하기위한 방법을 제시하고 비교/분석하였다. 그림 3 은 충격과편의 전형적인 형태를 나타내고 있다. 충격과편의 특성을 살펴보면, 초기부분에는 큰 진

폭이 야기되고 이후에는 지수적(Exponential)으로 감소한다. 충격파가 센서로부터 입력되면 충격파에 실려있는 배경잡음을 제거하기위해 2 절에서 제시한 방법을 이용하였다. 그림 4 는 평면구조물에서 취득한 충격파형이다. 그리고 충격신호의 신호 대 잡음비를 계산하기 아래와 같은 식을 이용하였다.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P}{\sigma^2} [dB] \quad (12)$$

여기서 P 는 충격신호의 평균전력(분산)을 의미하고,  $\sigma, \sigma^2$  은 잡음의 표준편차(standard Deviation)와 분산(Variance)을 의미한다. 그림 5 는 잡음이 부가된 충격신호의 그림이다. 이 그림은 그림 3 에 충격신호에 광의의 정재성(wide stationary)을 가진 백색 가우시안 잡음(White Gaussian Noise)를 신호 대 잡음비가 3 dB 되게 부가하였다. 이 그림을 그림 3 과 비교해볼 때, 진폭이 큰 부분은 충격파형의 형태를 추적할 수 있지만 정확한 충격신호의 시작점을 구분하기는 어렵다. 잡음 감소 성능을 비교하기위해 잡음이 부가된 충격신호를 각각 noise canceller 기법과 스펙트럼 감산법을 이용하여 잡음을 감소시켜 보았다. 그림 6 은 noise canceller 기법을 이용하여 잡음을 감소시킨 충격파형을 나타낸 것이고, 그림 7 은 스펙트럼 감산법을 이용하여 잡음을 감소시킨 충격파형을 나타내고 있다. 그림 6 과 7 을 비교해보면, 그림상으로는 거의 구분이 불가능하지만 (12)식을 이용하여 계산해보면 스펙트럼 감산법이 잡음감소 처리에 있어서 더 우수함을 나타내고 있다. 즉, 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)에서, 잡음이 3dB 인 경우 스펙트럼 감산법의 경우 8.8 dB 향상되었지만, noise canceller 기법을 이용한 결과 약 3 dB 정도 향상됨을 알 수 있었다. 표 1 은 여러 가지 충격신호의 SNR 을 이용하여 위의 두 가지 방법으로 잡음을 감소 시킨 후 SNR 변화를 나타내고 있다. 이상의 실험에서 스펙트럼 감산법이 noise canceller 방법보다 SNR 이 약 4 dB 이상 증가함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 LPMS 시스템에서 충격위치 분석 및 그 물질 특성 분석 시 가장 문제가 되는 배경잡음을 제거하기위해 시간영역에서의 adaptive signal processing 인 noise canceller 기법을 이용하여 제거하였고, 주파수영역의 경우 가장 널리 사용되는 스펙트럼 감산법을 이용하여 배경잡음을 제거하여 각 기법들을 비교 분석하였다. Noise canceller 기법은 시간축 상에서 배경잡음을 제거하기 때문에 계산상의 부하는 줄어들지만 잡음 향상이 스펙트럼기법보다 떨어지며, 스펙트럼 감산법은 noise canceller 기법보다 잡음 향상비는 우수하지만 계산상에 상당한 부하가 걸림을 알 수 있다. 즉, 스펙트럼 기법은 충격신호를 on-line 으로 데이터를 받아 분석할 경우 여러 문제가 야기될 수 있다. 왜냐하면 다량의 충격정보를 시간영역에서 주파수 영역으로 바꾸어 주어야 하기 때문이다. 하지만 이러한 계산상의 부하는 컴퓨터 기술 특히 신호처리기술의 발전으로 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 본 논문에서 제시한 기법 및 비교분석 데이터는 LPMS 시스템에 대한 자동화 구축 시 상당히 유용하게 이용될 수 있으며 특히, 충격신호의 위치 추정 및 물질의 특성 분석을 위해 배경잡음신호를 제외한 순수 충격신호를 이용하여 좀더 정확한 위치추정 및 물질특성 등의 정보를 운전원에게 알려줌으로써 운전원의 판단에 상당히 도움을 줄 것으로 예상된다. 이러한 기법들을 기존 발전소 또는 향후 건설될 발전소에 적용될 경우 발전소의 안전성 향상에 도움을 줄 것으로

예상된다. 향후 연구방향은 실제 발전소에서 일어난 충격신호를 취득하여 위와 같은 기법을 이용하여 비교/분석하면 발전소에 사용될 기법들을 선정하는데 상당한 도움을 줄 것으로 예상된다.

#### 알 릫

본 연구는 과학기술부의 원자력 국제공동연구 사업으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. EPRI NP-5734, Loose -Parts Monitoring System Improvements, March, 1988.
2. ReG. Guide 1.133, Loose-Parts Detection Program for the Primary System of Light Water Reactors, U.S.NRC, May, 1981.
3. Technical Manual, Digital Metal Impact Monitoring System(DMIMS) for Korea Nuclear Unit 5 & 6.
4. 이일근외 4 명, “고압구조물의 이상신호 발생위치 검출 기술개발”, KAERI/CM-146/96.
5. 구인수외 11 명, “디지털 감시기술 개발”, KAERI/RR-1705/96.
6. Bernard Widrow, “Adaptive Signal Processing”, Prentice-Hall, Inc.,1985.
7. D. I. Kim, etc,” Reconstruction Process Algorithm of the corrupted Metal Impact Signal based on the Adaptive Filtering in Nuclear Power Plant”, ANS Meeting, Penn. Univ., Vol.2, pp. 901-904, 1996.
8. B. Widrow and J. Glover,” Adaptive noise cancelling : Principles and Applications”, Proceeding of the IEEE, Vol. 63, No. 12, pp. 1692-1717, Dec. 1975.
9. Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, 1996.
10. O. Vacheron, L. Cai, J.C. Benas, “ Transient Characterization by means of Non-Linear Optimization for Loose Part Monitoring Improvement of the Signal to Noise Ratio by Noise Spectrum Subtraction,” Proceeding in SMORN VII, Vol. 2, Session 10.3, 1995.
11. S.V.Vaseghi, Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction, John Wiley & Sons, 1996.

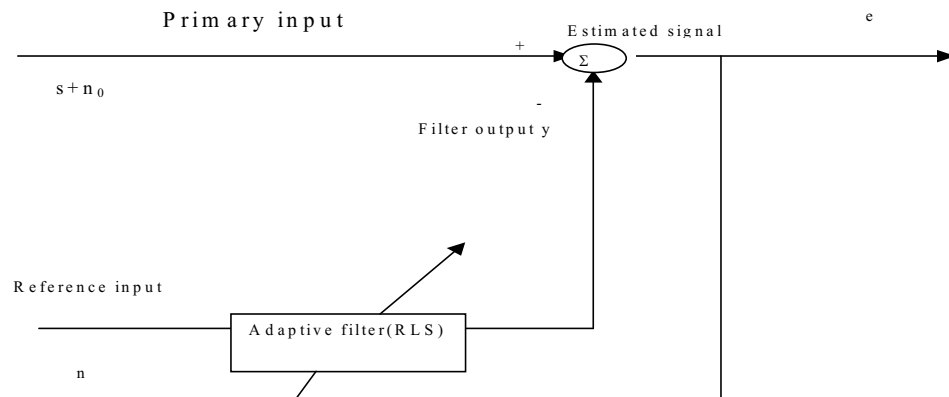


그림 1. Noise canceller 의 전체 구성도

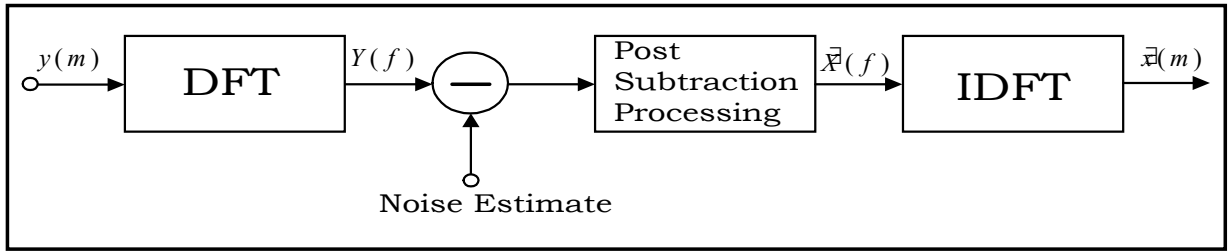


그림 2. 스펙트럼 감산법의 블록도

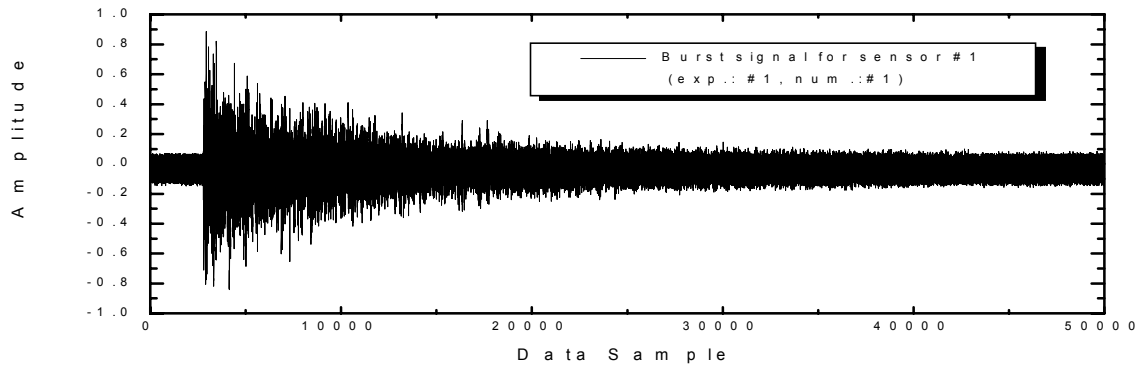


그림 3. 전형적인 충격파의 형태

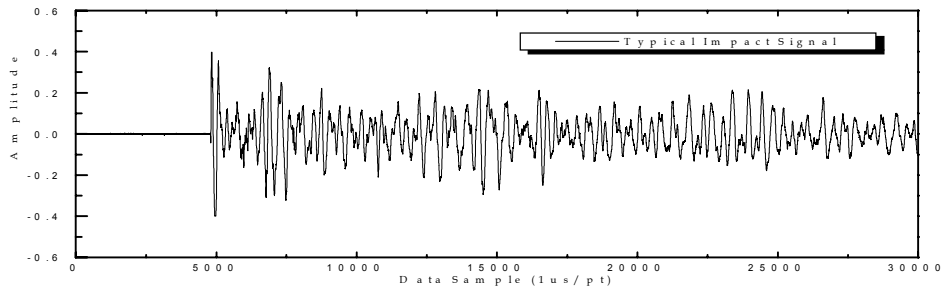


그림 4. 평면 모형구조물에서 취득한 충격파

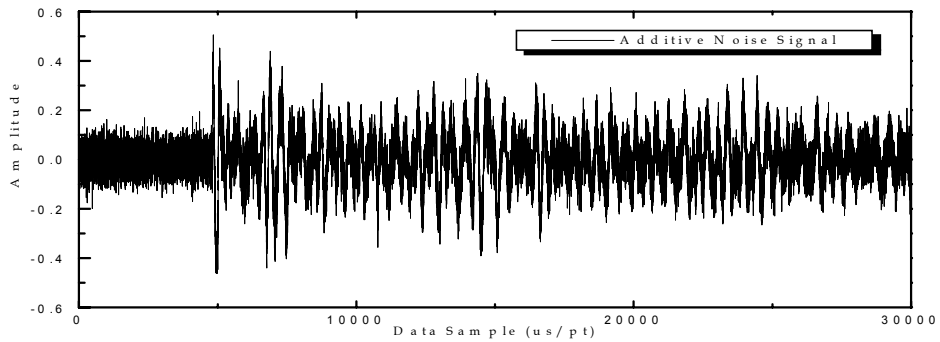


그림 5. 잡음이 첨가된 충격신호 파형 및 확대파형 (SNR=3[dB])

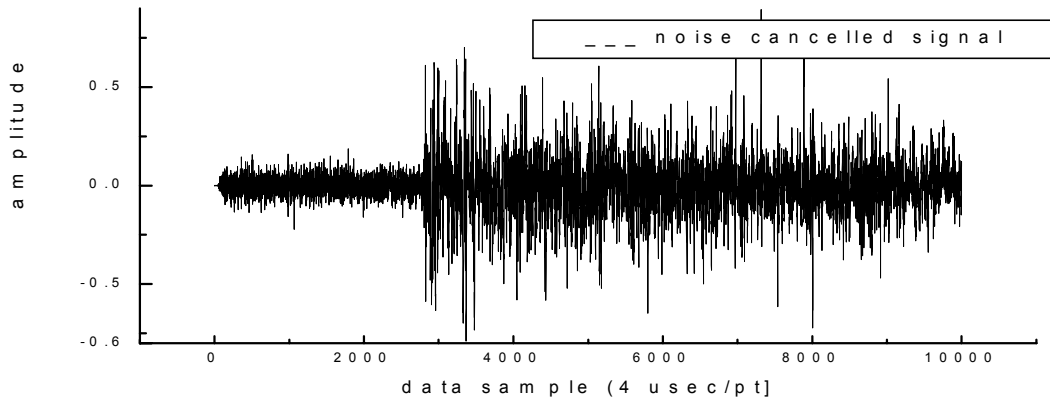


그림 6. Noise Canceller 를 이용하여, 잡음이 제거된 충격파형 및 확대파형

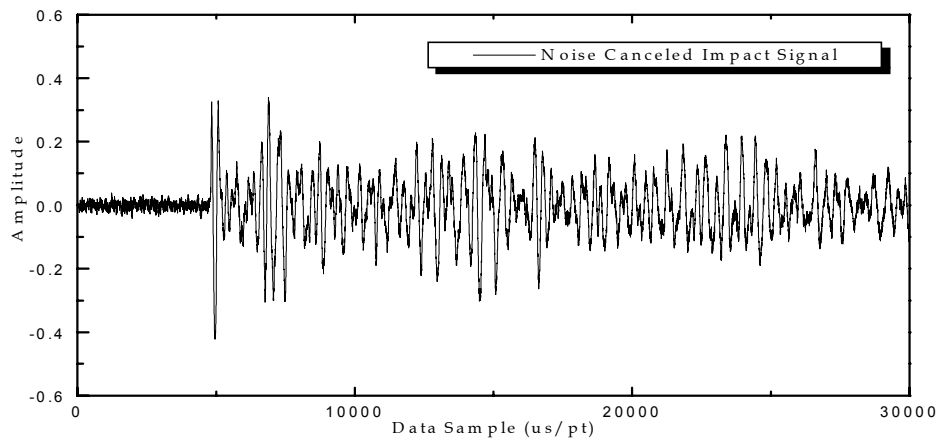


그림 7. 스펙트럼 감산법을 이용하여, 잡음이 제거된 충격파형 및 확대파형

표 1. 잡음 감소후의 SNR 향상성 비교

충격신호의 SNR	스펙트럼 감산 후 SNR	Noise Canceller 감산후 SNR
3 [dB]	8.83 [dB]	2.95 [dB]
4 [dB]	9.98 [dB]	4.21 [dB]
5 [dB]	10.74 [dB]	6.43 [dB]
6 [dB]	11.70 [dB]	7.86 [dB]