

잡음 속에 묻힌 임펄스 소음원 위치 추정[#]

Impulsive Source Localization in Noise

최 영 철[†] · 김 양 한^{*}

Young-Chul Choi and Yang-Hann Kim

(2004년 6월 16일 접수 : 2004년 8월 7일 심사완료)

Key Words : Impulsive Source(임펄스 소음원), Source Localization(음원 위치 추정), Beamforming Method(빔형성 방법), Cepstrum Analysis(켄스트럼 분석)

ABSTRACT

This paper addresses the way in which we can find where impulsive noise sources are. Specifically, we have an interest in the case that the signal is embedded in noise. We propose a signal processing method that can identify impulsive sources' location. The method is robust with respect to spatially distributed noise. This has been achieved by the modified beamforming method with regard to cepstrum domain is used. It is noteworthy that the cepstrum has the ability to detect periodic pulse signal in noise. Numerical simulation and experiments are performed to verify the method. Results show that the proposed technique is quite powerful for localizing the faults in noisy environments. The method also required less microphones than conventional beamforming method.

기 호 설 명

c : 음속 (wave speed)
 d : 마이크로폰 사이의 간격
 $\delta(t)$: Dirac 델타 함수
 E : 기대값(expected value)
 F_{mv} : 최소분산 켄스트럼
 H : 허미션(hermitian)
 $h(t)$: 시스템의 임펄스 응답함수
 $H(\omega)$: $h(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 M : 임펄스 신호의 개수
 $N(\omega)$: $n(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 $n(t)$: 노이즈
 p : 밴드 리프트의 차수

P_{beam} : 빔형성 파워
 $p(t)$: 시간 영역에서의 음압신호
 $P(\omega)$: $p(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 R : 상관 행렬(correlation matrix)
 r_i : 기준 마이크로폰과 i 번째 마이크로폰 사이의 거리
 T : 임펄스 주기
 W : 스캔 벡터(scan vector)
 τ_i : i 번째 마이크로폰에서의 시간 지연
 θ_s : 1차원에서 소음원의 위치
 λ : 파장 (wave length)
 ξ^2 : 노이즈의 분산

[†] 책임저자 : 정회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : youngcc@kaist.ac.kr
 Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

^{*} 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

[#] 이 논문은 2004 춘계학술대회에서 우수발표논문으로 추천되었음.

1. 서 론

회전기계로부터 발생하는 신호는 여러 가지 형태로 존재하는데, 이 중에서 주기적인 임펄스 신호는 기계의 결함을 판단할 수 있는 중요한 정보들을 포함하고

있다. 예를 들어 베어링이나 기어에 결함이 존재할 경우, 이러한 임펄스 신호로부터 결함 유무를 판단하고, 또한 결함 주기로부터 베어링의 구성 요소 중 어디에 결함이 존재하는지 유추할 수 있다.⁽¹⁾

결함 유무뿐만 아니라 이러한 임펄스 신호가 어디에서 발생하는지 그 위치를 추정하는 것은 기계 진단 측면에서 매우 의미 있는 일이라 할 수 있다. 특히 이러한 주기적인 임펄스 신호가 매우 작아 잡음 속에 완전히 묻혀 있는 경우 임펄스 소음원의 위치를 추정하는 것은 곧 초기에 결함을 진단하는 것이기 때문에 매우 중요한 일이다.

임펄스 소음원을 규명하기 위해서는 신호를 측정하기 위한 센서 어레이와 임펄스 신호의 특성을 잘 이용한 신호처리 방법이 필요하다.

임펄스 신호가 예를 들어 한번 발생할 경우에는 언제, 어디서 발생할지 모르기 때문에 모든 센서가 동시에 측정되어야 된다. 많은 센서를 동시에 사용하면 시스템이 복잡해 지고, 비용이 많이 들기 때문에 센서의 개수에 대한 제한을 받게 된다. 따라서 적은 수의 마이크로폰을 사용하여 소음원의 위치 및 세기를 구할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 이러한 요구조건을 만족하면서 소음원을 규명할 수 있는 방법으로 빔형성 방법⁽²⁾이 있다. 이 방법은 선형 어레이를 사용하기 때문에 인텐시티 방법,⁽³⁾ 음향 홀로그래피 방법⁽⁴⁾ 등에 비해 적은 수의 센서를 사용하기 때문에 시간과 노력이 적게 드는 장점이 있다. 본 연구에서는 선형 어레이를 이용한 가장 대표적인 방법인 빔형성 방법을 사용하여 임펄스 소음원 규명에 적용하고자 한다.

2. 기본 이론

가장 간단한 경우인 1차원에 대해 임펄스 소음원의 위치를 추정하는 방법부터 살펴 본 후 잡음 속에 이러한 임펄스 신호가 완전히 묻혀 있을 때 임펄스 소음원을 어떻게 찾는지 알아 본다.

2.1 잡음이 없는 경우의 임펄스 소음원의 위치 추정

Fig. 1은 1차원 경우에 임펄스 소음원의 위치를 추정하는 방법에 대해 설명하고 있다. 소음원의 방향에 따라 두 마이크로폰에서 받은 임펄스 신호는 시간지

연차이가 발생하고, 이러한 시간 지연 차이를 정확히 찾을 수 있다면 임펄스 소음원의 위치를 찾을 수 있게 된다. 우선 잡음이 없는 경우에 대해 살펴 보자.

Fig. 1처럼 1차원에서 임펄스 소음원이 의 방향에 존재할 때 마이크로폰에서 받게 되는 음압 신호는 같이 표현할 수 있다.

$$p_1(t) = h(t) * \sum_{m=1}^M \delta(t - \tau_1 - mT) \quad (1)$$

식 (1)을 푸리에 변환(Fourier transform)하여 주파수 영역에서 관찰하여 보면

$$P_1(\omega) = H(\omega) \cdot e^{j\omega\tau_1} \cdot \frac{1 - e^{j\omega MT}}{1 - e^{j\omega T}} \quad (2)$$

와 같이 된다. 식 (2)에서 가장 중요한 항은 임펄스 소음원의 위치와 직접적으로 관계되어있는 τ_1 이다. 따라서 거리 d 만큼 떨어진 두 마이크로폰 사이의 전달함수를 구하면

$$\frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)} = e^{j\omega(\tau_2 - \tau_1)} = e^{j\omega \frac{d \sin \theta_s}{c}} \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (3)에서 마이크로폰 간격 d 와 음속 c 는 알고 있는 값이기 때문에 푸리에 역변환을 취한다면 소음원의 방향인 θ_s 을 쉽게 찾을 수 있다.

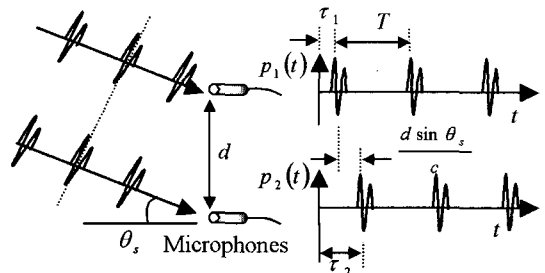


Fig. 1 Impulsive source localization for 1 D case. Where d is microphone spacing, c is wave speed, and θ_s is the direction of noise sources

이 방법은 식 (3)에서 볼 수 있듯이 두 마이크로폰 사이의 전달 함수를 구하는 것에 그 특징이 있다. 이것은 시스템의 임펄스 응답함수와 임펄스 트레인으로 디컨볼루션(deconvolution)시키며 또한 두 마이크로폰 사이의 시간 지연 차이를 찾게 해 주기 때문에 임펄스 소음원의 위치를 추정할 수 있게 해 주는 것이다.

2.2 잡음이 존재하는 경우

식 (3)에서 보여 주듯이 주파수 영역에서 조화함수의 주기를 찾으면 소음원의 위치에 대한 정보 θ_s 를 얻을 수 있다. 하지만 신호대 잡음비가 낮아 조화함수 $e^{j\omega \frac{d}{c} \sin \theta_s}$ 가 잡음 속에 완전히 묻혀 있을 경우 아래 식과 같이 표현할 수 있으며

$$\frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)} = e^{j\omega \frac{d}{c} \sin \theta_s} + N(\omega) \quad (4)$$

이런 경우 소음원의 위치를 추정하기 어렵게 된다. 따라서 잡음 속에 묻힌 조화함수를 검출할 수 있는 최소분산 방법^(5,6)을 적용한다면 조화함수의 주기, 즉 소음원의 위치를 추정할 수 있게 된다. 이 방법은 조화함수는 선 스펙트럼(line spectrum)을 가지고, 잡음은 연속 스펙트럼을 가진다는 성질을 이용한 방법이다. 잡음 속에 조화함수가 묻혀 있는 신호를 밴드 패스 필터의 대역 폭을 줄여 가면서 스펙트럼을 예측하여 보면, 조화함수의 신호 파워는 변하지 않지만, 잡음일 경우 필터의 대역 폭이 줄어들어 따라 통과되는 잡음의 파워가 점점 줄어들어 조화함수를 검출할 수 있게 된다.

식 (4)를 최소 분산 캡스트럼식에 대입하면 캡스트럼 영역에서 다음 식과 같이 유도 된다.⁽¹⁾

$$F_{mv}(\tau_2 - \tau_1) = \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + 1}{1 + \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - \left| \sum_{k=0}^p e^{jk \left(\tau - \frac{d}{c} \sin \theta_s \right)} \right|^2 \right\}} \quad (5)$$

여기서 $\sum_{k=0}^p e^{jk \left(\tau - \frac{d}{c} \sin \theta_s \right)}$ 은 이산 푸리에 변화(dis-

crete Fourier transform)과 같은 형태이기 때문에 $\tau = \frac{d}{c} \sin \theta_s$ 와 $\tau \neq \frac{d}{c} \sin \theta_s$ 로 나뉘 보면 다음 식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$F_{mv}(\tau) \equiv \begin{cases} \frac{\xi^2}{1+p} + 1 & \text{for } \tau = \frac{d}{c} \sin \theta_s \\ \frac{\xi^2}{1+p} & \text{for } \tau \neq \frac{d}{c} \sin \theta_s \end{cases} \quad (6)$$

따라서, P 가 커짐에 따라 $\tau = \frac{d}{c} \sin \theta_s$ 에서만 1로 접근하고 나머지 구간에서는 점점 감소하므로 여 조화함수의 주기, 즉 임펄스 소음원의 위치를 추정할 수 있게 된다.

3. 빔형성 방법의 적용

앞절에서는 1차원이고 단지 2개의 마이크로폰을 사용하기 때문에 식 (4)와 식 (6)에서 볼 수 있듯이 두 마이크로폰 사이의 시간지연 차이만으로도 소음원의 방향을 쉽게 찾을 수 있다. 그러나, 3차원처럼 다수의 마이크로폰을 사용한다면 마이크로폰 사이의 시간 지연차이 모두를 이용하여야 하기 때문에 소음원의 위치를 직접적으로 찾는 것이 어려워진다. 따라서 소음원을 모델링하여 그 위치를 찾는 빔형성 방법을 적용하기로 한다.

각 마이크로폰에서 측정되는 신호에 음원의 모델에 따라 위상보정을 하여 얻은 신호 파워로부터 음원의 입사각 또는 위치를 찾는 방법을 빔형성 방법이라 하고, 다음 식과 같이 정의 된다.⁽²⁾

$$\begin{aligned} P_{beam} &= \mathbf{W}^H \mathbf{E} [\mathbf{P} \mathbf{P}^H] \mathbf{W} \\ &= \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 R 즉 마이크로폰 어레이에 측정된 신호의 공간상 특성과 가장 잘 일치하는 W 를 찾아내는, 즉 빔형성 파워가 최대가 되는 W 를 찾는 것이 소음원 혹은 음원의 위치를 찾는 것임을 이야기하고 있다. 결국은 선택하는 W 가 얼마나 실제 음압 신호의 공간상 특성(R)과 유사한가가 탐지의 성공여부를 좌우한다. 따라서 빔형성 방법은 음원의 위치를 규명하

는데 있어 스캔 벡터가 그 성능을 좌우함을 쉽게 알 수 있다.

3.1 스캔 벡터

임펄스 소음원일 경우 마이크로폰 어레이에서는 임펄스신호가 지나가는 속도를 느끼게 되고 또한 식 (4)와 식 (6)에서 알 수 있듯이 임펄스 소음원일 경우 임펄스 형태로 나타나기 때문에 스캔 벡터를 시간 지연 차이를 나타내는 임펄스로 모델링 할 수 있다.

1차원일 경우 N 개의 다수 마이크로폰을 사용한다면 다음 식과 같이 스캔 벡터로 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{W} = \left\{ \delta(\tau - \Gamma), \delta\left(\tau - \Gamma - \frac{d \sin \theta}{c}\right), \dots, \delta\left(\tau - \Gamma - \frac{(N-1)d \sin \theta}{c}\right) \right\}^T \quad (8)$$

3차원 일 경우에는 아래 식과 같이 스캔 벡터를 표현할 수 있다.

$$\mathbf{W} = \left\{ \delta\left(\tau - \Gamma - \frac{r_1}{c}\right), \delta\left(\tau - \Gamma - \frac{r_2}{c}\right), \dots, \delta\left(\tau - \Gamma - \frac{r_N}{c}\right) \right\}^T \quad (9)$$

여기서 Γ 는 공간 엘리에이싱(spatial aliasing)이 생기지 않기 위한 향으로 차원은 시간이며, 가장 멀리 있는 소음원과 마이크로폰까지의 거리를 음파가 이동하는 시간보다 크면 된다.

3.2 상관행렬(Correlation Matrix)

상관 행렬은 식 (5)을 이용하여 다음과 같이 시간 영역에서 구성할 수 있다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} F_{mv}(\Gamma) & F_{mv}(\Gamma + \tau_1 - \tau_2) & \dots & F_{mv}(\Gamma + \tau_1 - \tau_{N-1}) \\ F_{mv}(\Gamma + \tau_2 - \tau_1) & F_{mv}(\Gamma) & \dots & F_{mv}(\Gamma + \tau_2 - \tau_{N-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{mv}(\Gamma + \tau_{N-1} - \tau_1) & F_{mv}(\Gamma + \tau_{N-1} - \tau_2) & \dots & F_{mv}(\Gamma) \end{bmatrix} \quad (10)$$

즉 주파수 영역에서 최소 분산 방법을 적용하여 잡음 속에 묻혀있는 임펄스 신호를 검출하게 된다. 이러한 임펄스 신호는 마이크로폰 사이의 시간 지연차이를 의미하므로 스캔함수를 이용하여 임펄스 소음원

의 위치를 추정할 수 있게 해 준다.

3.3 빔형성 파워

이산 영역에서 빔형성 파워는 (7)식과 같이 표현할 수 있다. 변형된 빔형성 방법을 사용하여 임펄스 소음원의 위치를 추정할 수 있는지 이론적으로 살펴 보자.

가장 간단한 경우인 Fig. 1에 보인 바와 같이 1차원에 대한 빔형성 파워를 유도함으로써 적용 가능성에 대해 살펴 보기로 한다. 식 (5)와 스캔 벡터인 식 (8)을 곱하여 τ 에 대해 적분을 수행하면 다음 식과 같이 빔형성 파워를 계산할 수 있다.

$$P_{beam} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} F_{MV}(\tau) \mathbf{W}^*(\tau) d\tau \right|^2 = \left| \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + 1}{1 + \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - \left| \sum_{k=0}^p e^{jk \frac{d}{c} (\sin \theta_s - \sin \theta)} \right|^2 \right\}} \right|^2 \quad (11)$$

위 식은 식 (6)처럼 $\sum_{k=0}^p e^{jk \frac{d}{c} (\sin \theta_s - \sin \theta)}$ 이 이산 푸리에 변화(discrete Fourier transform)과 같은 형태이기 때문에 $\theta = \theta_s$ 일 때와 아닐 때로 나누어 보면 다음 식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$P_{beam}(\theta) \cong \begin{cases} \frac{\xi^2}{1+p} + 1 & ; \theta = \theta_s \\ \frac{\xi^2}{1+p} & ; \theta \neq \theta_s \end{cases} \quad (12)$$

밴드 패스 리프터 차수인 P 가 커짐에 따라 소음원의 위치인 $\theta = \theta_s$ 에서 빔형성 파워가 최대가 되어 임펄스 소음원의 위치를 찾을 수 있음을 확인할 수 있다. 임펄스 소음일 경우에는 임펄스 신호의 시간지연에 의해 소음원의 위치를 추정하므로 일반적인 빔형성 방법에 비해 센서의 개수를 줄일 수 있다. 예를 들어 임펄스 소음이 한 개 발생할 경우, 이론적으로 1차원 일 경우에는 단지 2개의 마이크로폰이 필요하고, 3차원 일 경우는 마이크로폰 3개만 있으면 소음원의 위치를 추정할 수 있다.

4. 컴퓨터 모사 실험

앞의 이론적인 내용을 검증하기 위해 컴퓨터모사 실험을 수행하였다. Fig. 2(a)는 소음원에서 나오는 임펄스 트레인 신호를 보여 주고 있고, (b)는 (a) 신호에 인위적으로 가우시안 분포를 가진 백색 잡음을 포함시킨 신호이다. 컴퓨터 모사 실험에서는 이러한 베어링 결합 신호가 소음원에서 발생하고, 기준 마이크로폰을 포함한 총 4개의 마이크로폰으로 임펄스 소음원의 위치를 찾는 상황을 설정하였다. 마이크로폰에서 받는 신호는 공기 중에서 소음원과 마이크로폰까지의 전달 함수를 컨볼루션 시켜서 구하였다.

Fig. 3은 소음원이 마이크로폰의 중앙인와 한 쪽으로 치우쳐져 있는 에 위치해 있을 때의 모의 실험 결과를 보여 주고 있다. 이때 마이크로폰에서는 Fig. 2(b)처럼 가우시안 분포를 가진 백색잡음 속에 임펄스 신호가 완전히 묻혀 있는 신호를 받게 된다. 마이크로폰은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 소음면 위에 $(x_1, y_1, z_1) = (-0.2 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(x_2, y_2, z_2) = (1.2, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(x_3, y_3, z_3) = (0.5 \text{ m}, 1.2 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 에 위치해 있다. Fig. 3의 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 신호가 잡음에 완전히 묻혀 있고, 또한 4개의 마이크로폰만으로도 임펄스 소음원의 위치를 잘 추정할 수 있음을 관찰할 수 있었다.

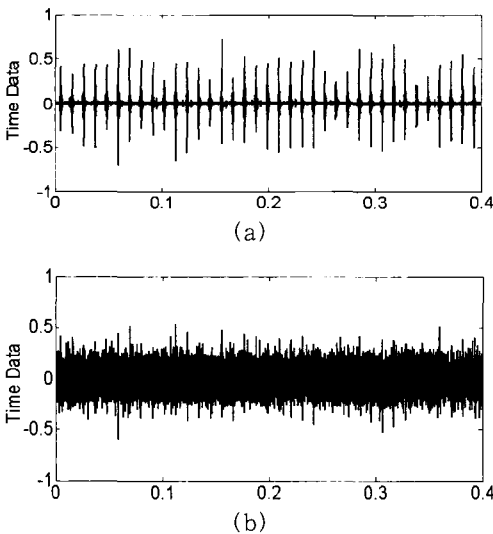


Fig. 2 Source signal which is bearing fault signal (a) without noise, (b) with noise which has Gaussian distribution

5. 자동차 엔진 실험

자동차 엔진에 의한 소음은 여러 가지 메커니즘 또는 소음원에 의해 발생한다. 구체적인 예로는 실린더의 폭발음, 밸브의 개폐 등을 들 수 있다. 특히 이러한 소음원들은 주기적으로 임펄스 소음을 발생시키는 임펄스 소음원이 되기도 한다. 이 절에서는 엔진에서 임펄스 소음원의 위치를 찾는 실험에 대해 살펴 본다.

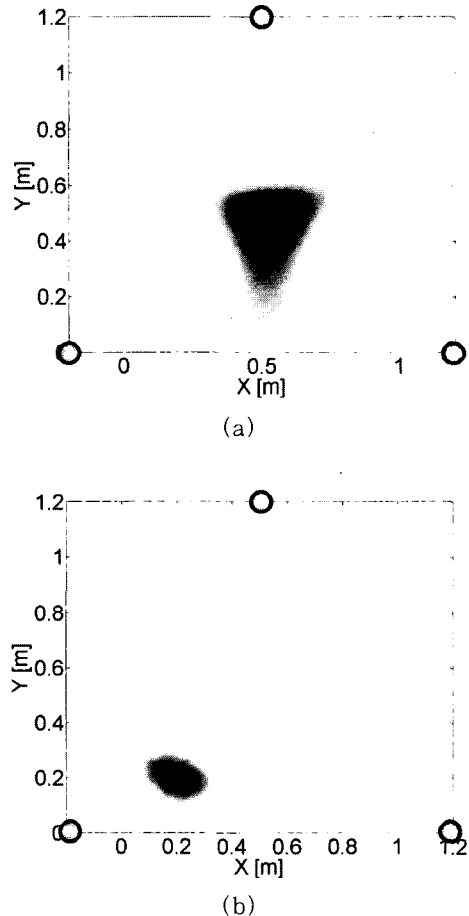


Fig. 3 Computer simulation for 1D case. (a) source location is $(x, y, z) = (0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, 0 \text{ m})$, (b) source location is $(x, y, z) = (0.2 \text{ m}, 0.2 \text{ m}, 0 \text{ m})$. Microphone positions are $(x_1, y_1, z_1) = (-0.2 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(x_2, y_2, z_2) = (1.2 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(x_3, y_3, z_3) = (0.5 \text{ m}, 1.2 \text{ m}, 0 \text{ m})$

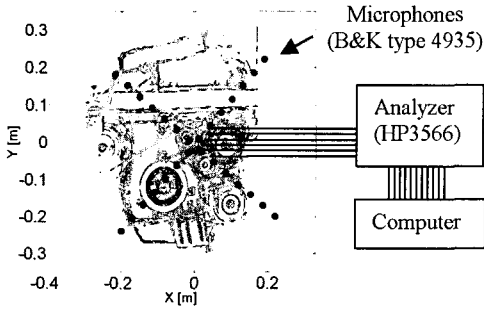


Fig. 4 This picture shows the microphone array and experimental setup for the engine to identify impact noise source. Sampling frequency is 32.8 kHz and total time length is 5.5 sec.

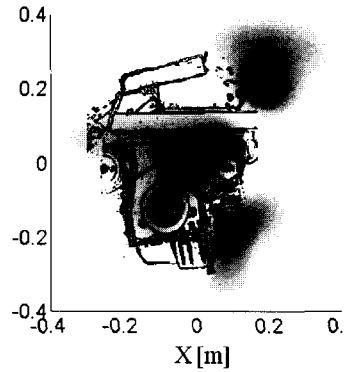
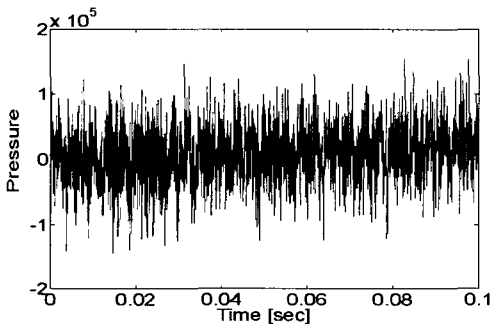
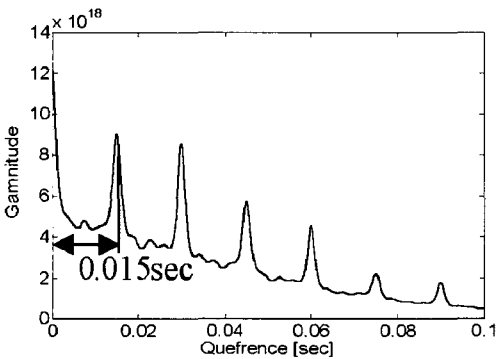


Fig. 6 Experimental result using proposed method. This figure shows that the location of impact noise source is around valve in the engine



(a)



(b)

Fig. 5 (a) The measured signal which cannot showed periodic impact signal (b) The result of the minimum variance cepstrum

Fig. 4는 어레이 형상 및 실험 장치 구성을 보여 주고 있다. 어레이 형상은 X자형이며 총 28개의 마이크로폰을 사용하여 32.8 kHz로 샘플링하였다.

임펄스 소음원일 경우는 최소 3개의 마이크로폰만으로도 소음원을 추정할 수 있지만, 제안된 방법은

마이크로폰의 개수가 많아 질수록 공간 분해능(spatial resolution)이 향상 되며, 또한 상하 좌우의 분해능을 고려하여 X자형으로 설계하였다.

Fig. 5(a)는 어레이에서 중앙에 위치한 마이크로폰에서 측정된 음압 신호를 나타내고 있다. 시간 영역에서는 임펄스 신호에 대한 정보를 알 수 없었지만, Fig. 5(b)의 최소 분산 켈스트럼 결과에서 볼 수 있듯이, 이 신호에는 주기가 0.015초인 임펄스 신호가 주기적으로 발생함을 쉽게 알 수 있다. 이 신호를 가지고 임펄스 소음원의 위치를 추정한 결과를 Fig.6에서 보여 주고 있다. 결과 그래프에 따르면 주기가 0.015초인 임펄스 신호는 엔진 위 부분의 밸브 부위에서 주로 발생함을 알 수 있었다.

6. 결론

이 논문에서는 빔형성 방법을 통해 임펄스 소음원의 위치를 추정하는 방법에 대해 소개하였다.

임펄스 신호는 시스템의 임펄스 응답함수와 임펄스의 컨볼루션으로 표현할 수 있으며 여기서 음파의 위상에 해당하는 임펄스의 시간 지연이 음원의 위치를 추정하는데 중요한 정보임을 알았다. 이러한 사실을 이용하여 임펄스 소음원을 규명하기 위해 일반적인 빔형성 방법과는 달리 켈스트럼 영역에서 상관 행렬과 스캔 벡터를 구성하여 빔형성 파워를 구함으로써 소음원을 규명하였다.

컴퓨터 모의 실험을 통해 임펄스 신호가 잡음 속에 묻혀 있어도 임펄스 소음원의 위치를 잘 찾을 수 있

을 뿐만 아니라, 일반적인 빔형성 방법에 비해 적은 수의 마이크로폰으로도 음원의 위치를 추정할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

제안된 방법을 임펄스 소음이 발생하는 엔진에 적용한 결과 음압 신호에서는 임펄스 신호를 관찰할 수 없었음에도 불구하고, 제안된 방법을 통해서도 임펄스 소음원의 위치를 추정할 수 있었다. 엔진에서 발생하는 임펄스 소음은 주로 밸브 부위에서 발생함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 과학기술부의 국가지정연구실 사업(NRL)과 교육인적자원부의 BK21사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Choi, Y.-C. and Kim, Y.-H., 2000, "Detection of Impulse Signal in Noise Using a Minimum Variance Cepstrum-application on Faults Detection in a Bearing System," Transaction of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 985~990.

(2) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, 1993,

Array Signal Processing, PTR Prentice Hall.

(3) F. J., Fahy, 1995, Sound intensity second edition, E&FN SPON

(4) Maynard, D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and Development of NAH.," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, pp. 1395~1413.

(5) Capon, J., 1969, "High-resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis," Proceedings of the IEEE, Vol. 57, No. 8, pp. 1408~1419.

(6) Peter, J. Sherman, 1991, "On the Family of the ML Spectral Estimates for Mixed Spectrum Identification," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 39, No. 3, pp. 644~665.

(7) Choi J.-W. and Kim Y.-H., 1995, "Estimation of Locations and Strengths of Broadband Planar and Spherical Noise Sources Using Coherent Signal Subspace," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 98, No. 4, pp. 2082~2093.

(8) Choi, Y.-C. and Kim, Y.-H., 2000, "Detection of Impulse Signal in Noise Using a Minimum Variance Cepstrum-theory," Transaction of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 642~647.