

잡음 속에 묻힌 충격 소음원 위치 추정

Impact Noise Source Localization in Noise

최영철*·김양한**

Young-Chul Choi · Yang-Hann Kim

Key Words : Impact Noise Source(충격 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 impact 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 noise; spatially distributed noise. This has been achieved by a 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.

기호설명

- P_{beam} : 빔형성 파워
 \mathbf{R} : 상관 행렬(correlation matrix)
 \mathbf{W} : 스캔 벡터(scan vector)
 H : 허미션(Hermitian)
 E : 기대값(Expected value)
 $p(t)$: 시간 영역에서의 음압신호
 $h(t)$: 시스템의 임펄스 응답함수
 $\delta(t)$: Dirac 델타 함수
 τ : 시간 지연
 $n(t)$: 노이즈
 $P(\omega)$: $p(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 $H(\omega)$: $h(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 $N(\omega)$: $n(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 T : 충격신호 사이의 시간지연
 θ_s : 1차원에서 소음원의 위치
 F_{MV} : 최소분산 켄스트럼
 P : 밴드 리프터의 차수
 d : 마이크로폰 사이의 간격
 M : 충격 신호의 개수
 c : 음속 (wave speed)
 λ : 파장 (wave length)
 ξ^2 : 노이즈의 분산

- A : 음압신호의 크기
 T : 임펄스 주기

1. 서론

회전기계로부터 발생하는 신호는 여러 가지 형태로 존재하는데, 이 중에서 주기적인 충격 신호는 기계의 결함을 판단할 수 있는 중요한 정보들을 포함하고 있다. 예를 들어 베어링이나 기어에 결함이 존재할 경우, 이러한 충격 신호로부터 결함 유무를 판단하고, 또한 결함 주기로부터 베어링의 구성 요소 중 어디에 결함이 존재하는지 유추할 수 있다[1].

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

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

충격 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 소음원

* KAIST

E-mail : youngcc@kaist.ac.kr
 Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** KAIST

E-mail : yanghannkim@kaist.ac.kr
 Tel : (042) 869-3025, Fax : (042) 869-8220

을 규명할 수 있는 방법으로 빔형성 방법[2]이 있다. 이 방법은 선형 어레이를 사용하기 때문에 인텐시티 방법[3], 음향 홀로그래피 방법[4] 등에 비해 시간과 노력이 적게 드는 장점이 있다. 본 연구에서는 선형 어레이를 이용한 가장 대표적인 방법인 빔형성 방법을 사용하여 충격 소음원 규명에 적용하고자 한다.

2. 기본 이론

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

2.1 잡음이 없는 경우의 충격 소음원의 위치 추정

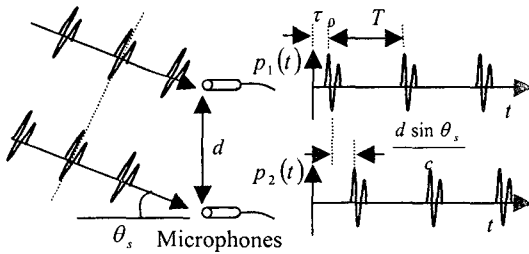


Fig 1. Impact noise source localization for 1 D case. Where d is microphone spacing, c is wave speed, and θ_s is the direction of noise sources.

Fig.1 은 1 차원 경우에 충격 소음원의 위치를 추정하는 방법에 대해 설명하고 있다. 소음원의 방향에 따라 두 마이크로폰에서 받은 충격 신호는 시간지연차이가 발생하고, 이러한 시간 지연 차이를 정확히 찾을 수 있다면 충격 소음원의 위치를 찾을 수 있게 된다. 우선 잡음이 없는 경우에 대해 살펴 보자.

Fig. 1 처럼 1 차원에서 충격 소음원이 θ_s 의 방향에 존재할 때 d 만큼 떨어진 두 마이크로폰에서 얻는 음압 신호와 같이 표현할 수 있다.

$$p_1(t) = h(t) * \sum_{m=1}^M \delta(t - \tau_0 - mT) \quad (1)$$

$$p_2(t) = h(t) * \sum_{m=1}^M \delta\left(t - \tau_0 - \frac{d \sin \theta_s}{c} - mT\right)$$

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

$$P_1(\omega) = H(\omega) \cdot e^{j\omega\tau_0} \cdot \frac{1 - e^{j\omega MT}}{1 - e^{j\omega T}} \quad (2)$$

$$P_2(\omega) = H(\omega) \cdot e^{j\omega\tau_0} \cdot e^{j\omega \frac{d \sin \theta_s}{c}} \cdot \frac{1 - e^{j\omega MT}}{1 - e^{j\omega T}}$$

와 같이 된다. 식 (2)에서 가장 중요한 항은 충격 소음원의 위치와 직접적으로 관계되어 있는 $e^{j\omega \frac{d \sin \theta_s}{c}}$ 항이다. 따라서 $e^{j\omega \frac{d \sin \theta_s}{c}}$ 항만을 구하기 위해 두 마이크로폰 사이의 전달함수를 구하면

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

와 같이 쓸 수 있다. 즉 두 마이크로폰의 전달함수는 주파수 영역에서 주기가 $\frac{d \sin \theta_s}{c}$ 인 조화함수로 나타난다.

식 (3)에서 푸리에 역 변환을 취하면 다음 식과 같이 델타 함수로 나타나게 되고

$$F^{-1}\left(\frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)}\right) = \delta\left(\tau - \frac{d \sin \theta_s}{c}\right) \quad (4)$$

이 식에서 마이크로폰 간격 d 와 음속 c 는 알고 있는 값이기 때문에 소음원의 방향인 θ_s 을 찾을 수 있다.

제안된 방법은 충격 신호와 임펄스 트레인으로 컨볼루션된 식 (1)을 디컨볼루션(deconvolution)시켜서 임펄스를 분리한 뒤, 이 임펄스로부터 마이크로폰 사이의 시간 지연 차이를 이용하여 충격 소음원의 위치를 추정하는 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 잡음비

가 낮아 조화함수 $e^{j\omega \frac{d}{c} \sin \theta_s}$ 가 잡음 속에 완전히 묻혀 있을 경우 아래 식과 같이 표현할 수 있으며

$$\frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)} = e^{j\omega \frac{d \sin \theta_s}{c}} + N(\omega) \quad (5)$$

이런 경우 소음원의 위치를 추정하기 어렵게 된다. 식 (5)를 자세히 관찰하여 보면 주파수 영역에서 잡음 속에 조화함수가 묻혀 있는 형태이다. 따라서 잡음 속에 묻힌 조화함수를 검출할 수 있는 최소분산 켈스트럼방법[1,6]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 대역폭을 줄여 가면서 스펙트럼을 예측하여 보면, 조화함수의 신호 파워는 변하지 않지만, 잡음일 경우 필터의 대역폭이 줄어들어 따라 통과되는 잡음의 파워가 점점 줄어들어 조화함수를 검출할 수 있게 된다.

식 (5)를 최소 분산 켈스트럼식에 대입하면 켈스트럼 영역에서 다음 식과 같이 유도 된다. (유도 과정은 참고문헌 1 참조)

$$F_{MV}(\tau) = \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + 1}{1 + \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - \left| \sum_{k=0}^p e^{jk\left(\tau - \frac{d}{c} \sin \theta_s\right)} \right|^2 \right\}} \quad (6)$$

여기서 $\sum_{k=0}^p e^{jk\left(\tau - \frac{d}{c} \sin \theta_s\right)}$ 은 이산 푸리에 변화(discrete Fourier transform)과 같은 형태이기 때문에 $\tau = \frac{d}{c} \sin \theta_s$ 와 $\tau \neq \frac{d}{c} \sin \theta_s$ 로 나눠 보면 다음 식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$F_{MV}(\tau) \cong \begin{cases} \frac{\xi^2}{1+p} + 1 & \tau = \frac{d}{c} \sin \theta_s \\ \frac{\xi^2}{1+p} & \tau \neq \frac{d}{c} \sin \theta_s \end{cases} \quad (7)$$

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

3. 빔형성 방법의 적용

앞 절에서는 1 차원이고 단지 2 개의 마이크로폰을 사용하기 때문에 식 (4)와 식 (7)에서 볼 수 있듯이 두 마이크로폰 사이의 시간지연 차이만으로도 소음원의 방향을 쉽게 찾을 수 있다. 그러나, 3 차원처럼 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].

$$P_{beam} = \mathbf{W}^H E [\mathbf{P}\mathbf{P}^H] \mathbf{W} \\ = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \quad (8)$$

식(8)은 \mathbf{R} 즉 마이크로폰 어레이에 측정된 신호의 공간상 특성과 가장 잘 일치하는 \mathbf{W} 를 찾아내는, 즉 빔형성 파워가 최대가 되는 \mathbf{W} 를 찾는 것이 소음원 혹은 음원의 위치를 찾는 것임을 이야기하고 있다. 결국은 선택하는 \mathbf{W} 가 얼마나 실제 음압 신호의 공간상 특성(\mathbf{R})과 유사한가 탐지의 성공여부를 좌우한다

따라서 빔형성 방법은 음원의 위치를 규명하는데 있어 스캔 벡터가 그 성능을 좌우함을 쉽게 알 수 있다.

3.1 스캔 벡터

충격 소음원일 경우 마이크로폰 어레이에서는 충격신호가 지나가는 속도를 느끼게 되고 또한 식 (4)와 식 (7)에서 알 수 있듯이 충격 소음원일 경우 임펄스 형태로 나타나기 때문에 스캔 벡터를 시간 지연 차이를 나타내는 임펄스로 모델링할 수 있다.

예를 들어 앞장에 나왔듯이 1 차원일 경우는

$$\mathbf{W}(\tau) = \delta\left(\tau - \frac{d}{c} \sin \theta\right) \quad (9)$$

와 같이 표현할 수 있으며, N 개의 다수 마이크로폰을 사용한다면 다음 식과 같이 벡터로 표현

할 수 있다.

$$\mathbf{W}(\tau) = \left\{ 1, \delta\left(\tau - \frac{d}{c} \sin\theta\right), \dots, \left(\tau - \frac{(N-1)d}{c} \sin\theta\right) \right\}^T \quad (10)$$

3 차원 일 경우에는 아래 식과 같이 스캔 벡터를 표현할 수 있다.

$$\mathbf{W}(\tau) = \left\{ \delta\left(\tau - \frac{r_1}{c}\right), \delta\left(\tau - \frac{r_2}{c}\right), \dots, \left(\tau - \frac{r_N}{c}\right) \right\}^T \quad (11)$$

여기서 r_i 는 기준 마이크로폰과 i 번째 마이크로폰 사이의 거리를 나타낸다.

3.2 빔형성 파워

가장 간단한 경우인 1 차원에 대한 빔형성 파워를 유도함으로써 적용 가능성에 대해 살펴 보기로 한다. 식 (6)과 스캔함수인 식(9)을 곱하여 τ 에 대해 적분을 수행하면 다음 식과 같이 빔형성 파워를 계산할 수 있다.

$$P_{beam} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} F_{MV}(\tau) \mathbf{W}^*(\tau) d\tau \right|^2 = \left| \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + 1}{1 + \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - \sum_{k=0}^p e^{jk \frac{d}{c} (\sin\theta_s - \sin\theta)} \right\}^2} \right|^2 \quad (12)$$

위 식은 $\theta = \theta_s$ 일 때와 아닐 때로 나누어 보면 다음 식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$P_{beam}(\theta) \cong \begin{cases} \frac{\xi^2}{1+p} + 1 & ; \theta = \theta_s \\ \frac{\xi^2}{1+p} & ; \theta \neq \theta_s \end{cases} \quad (13)$$

밴드 패스 리프터 차수인 p 가 커짐에 따라 소음원의 위치인 $\theta = \theta_s$ 에서는 1 로 수렴하지만, 다른 곳에서는 감소하게 되어 충격 소음원의 위치를 추정할 수 있게 된다. 따라서 충격 신호가 잡음 속에 묻혀 있더라도 리프터 차수 p 를 크게 하면 밴드 패스 리프터의 대역폭이 줄어들고, 따라서 리프터를 통과하는 잡음의 파워가 줄어들기 때문에 소음원의 위치를 찾을 수 있게 된다.

충격 소음일 경우에는 충격 신호의 시간지연에 의해 소음원의 위치를 추정하므로 일반적인 빔형성 방법에 비해 센서의 개수를 줄일 수 있다. 예를 들어 충격 소음이 한 개 발생할 경우, 이론적으로 1 차원일 경우에는 단지 2 개의 마이크로폰이 필요하고, 3 차원일 경우는 마이크로폰 3 개만 있으면 소음원의 위치를 추정할 수 있다.

4. 컴퓨터 모사 실험

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

$$T(t) = \frac{1}{r} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (14)$$

와 같다.

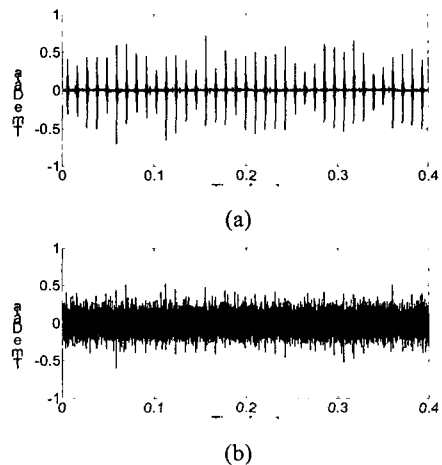


Fig.2 Source signal which is bearing fault signal (a) without noise, (b) with noise which has Gaussian distribution.

Fig.3 은 소음원이 마이크로폰의 중앙인 $(x, y, z) = (0.5m, 0.5m, 0m)$ 와 한 쪽으로 치우쳐져

는 $(x, y, z) = (0.2m, 0.2m, 0m)$ 에 위치해 있을 때의 모의 실험 결과를 보여 주고 있다. 이때 마이크로폰에서는 Fig.2(b)처럼 가우시안 분포를 가진 백색잡음 속에 충격 신호가 완전히 묻혀 있는 신호를 받게 된다. 기준 마이크로폰은 소음면에서 1m 떨어진 $(x, y, z) = (0.5m, 0.5m, 1m)$ 에 있고, 나머지 3개의 마이크로폰은 Fig.3에서 볼 수 있듯이 소음면 위에 $(x_1, y_1, z_1) = (-0.2m, 0m, 0m)$, $(x_2, y_2, z_2) = (1.2m, 0m, 0m)$, $(x_3, y_3, z_3) = (0.5m, 1.2m, 0m)$ 에 위치해 있다. Fig. 3의 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 신호가 잡음에 완전히 묻혀 있고, 또한 4개의 마이크로폰만으로도 충격 소음원의 위치를 잘 추정할 수 있음을 관찰할 수 있었다.

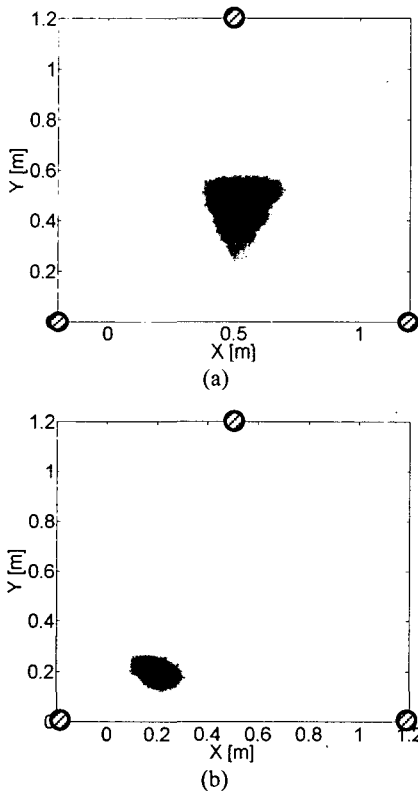


Fig. 3 Computer simulation for 1D case. (a) source location is $(x, y, z) = (0.5m, 0.5m, 0m)$, (b) source location is $(x, y, z) = (0.2m, 0.2m, 0m)$. Microphone positions are $(x_1, y_1, z_1) = (-0.2m, 0m, 0m)$, $(x_2, y_2, z_2) = (1.2m, 0m, 0m)$, $(x_3, y_3, z_3) = (0.5m, 1.2m, 0m)$

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 충격 소음을 발생시키는 충격 소음원이 되기도 한다. 이 절에서는 엔진에서 충격 소음원의 위치를 찾는 실험에 대해 살펴 본다.

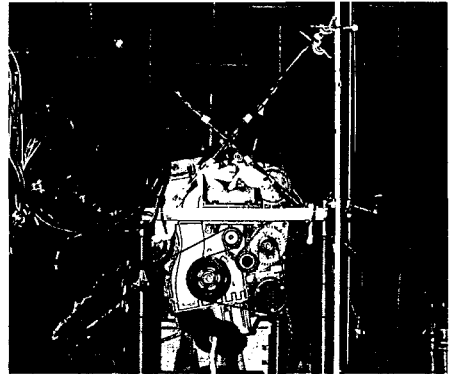


Fig.4 This picture shows the experimental setup for the engine to identify impact noise source. Sampling frequency is 16,384 Hz and total time length is 5.5sec.

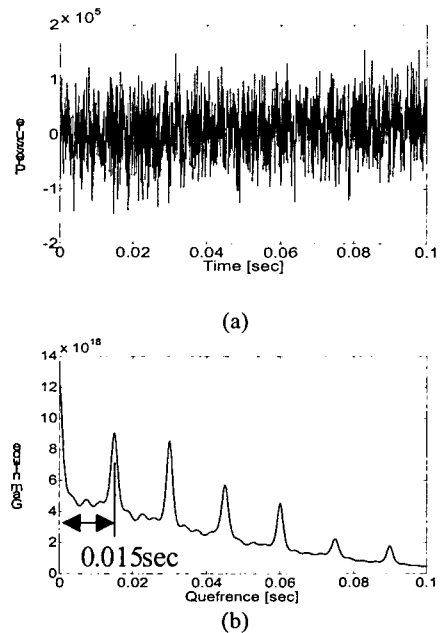


Fig. 5. (a) The Measured signal which cannot showed periodic impact signal (b) The result of the minimum variance cepstrum.

Fig.4 는 실험사진 및 실험 장치 구성을 보여 주고 있다. 어레이 형상은 X 자형이며 총 32 개의 마이크로폰을 사용하여 32.8kHz 로 샘플링하였다. 충격 소음원일 경우는 최소 3 개의 마이크로폰만으로도 소음원을 추정할 수 있지만, 공간 분해능 (Spatial resolution)을 고려하여 32 개의 마이크로폰 어레이를 사용하였다.

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

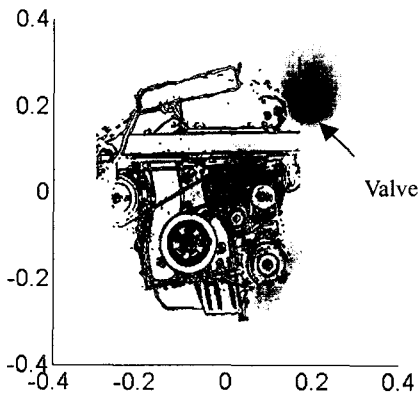


Fig. 6 Experimental result using proposed method. This figure shows that the location of impact noise source is around valve in the engine.

6. 결론

본 논문에서는 빔형성 방법을 통해 충격 소음원의 위치를 추정하는 방법에 대해 소개하였다.

충격 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 충격 소음원을 규명하기 위해 일반적인 빔형성 방법과는 달리 켈프스트럼 영역에서 상관 행렬과 스캔 벡터를 구성하여 빔형성 파워를 구함으로써 소음원을 규명하였다.

컴퓨터 모의 실험을 통해 충격 신호가 잡음 속에 묻혀 있어도 충격 소음원의 위치를 잘 찾을 수 있을 뿐만 아니라, 일반적인 빔형성 방법에 비해 적은 수의 마이크로폰으로도 음원의 위치를 추정할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

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

후 기

본 논문은 과학기술부의 국가지정연구실 사업 (NRL)과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Detection of impulse signal in noise using a minimum variance cepstrum-application on faults detection in a bearing system," Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10(6), pp.985-990, 2000
- (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) 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(4), pp. 2082~2093.
- (6) Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Detection of impulse signal in noise using a minimum variance cepstrum-theory," Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.10(3), pp.642-647, 2000