

빔형성기 출력의 파고율을 이용한 충격음의 방향 추정

Impulsive sound localization using crest factor of the time-domain beamformer output

서대훈† · 최정우* · 김양한**

Dae-Hoon Seo, Jung-Woo Choi and Yang-Hann Kim

Key Words : Array signal processing, Source localization, Beamforming, Delay-and-sum, Impulsive sound

ABSTRACT

This paper presents a beamforming technique for locating impulsive sound source. The conventional frequency-domain beamformer is advantageous for localizing noise sources for a certain frequency band of concern, but the existence of many frequency components in the wide-band spectrum of impulsive noise makes the beamforming image less clear. In contrast to a frequency-domain beamformer, it has been reported that a time-domain beamformer can be better suited for transient signals. Although both frequency- and time-domain beamformers produce the same result for the beamforming power, which is defined as the RMS value of its output, we can use alternative directional estimators such as the peak value and crest factor to enhance the performance of a time-domain beamformer. In this study, the performance of three different directional estimators, the peak, crest factor and RMS output values, are investigated and compared with the incoherent interfering noise embedded in multiple microphone signals. The proposed formula is verified via experiments in an anechoic chamber using a uniformly spaced linear array. The results show that the peak estimation of beamformer output determines the location with better spatial resolution and a lower side lobe level than crest factor and RMS estimation in noise free condition, but it is possible to accurately estimate the direction of the impulsive sound source using crest factor estimation in noisy environment with stationary interfering noise.

1. 서 론

충격음의 방향 추정은 소음 저감이나 군사 분야의 소음원 규명에 이용될 수 있다. 예를 들면 무기류나 총기류에서 발생하는 충격음을 이용하여 음원의 발생 위치 탐지가 가능하다. 그러나 충격음은 지속 시간이 짧을 뿐만 아니라 센서의 측정 신호에는 간섭 잡음과 배경 잡음이 더해지기 때문에 충격 음원의 위치 추정과 분류에 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 간섭 잡음이 지배적인 상황에서 충격 음원의 방향을 추정하는 것이며, 여기서의

충격음은 폭발에 의한 임펄스 음원으로 제한하며 관측 시간 동안에 한 방향에서 한번 발생하는 단일 충격음을 지칭한다. 또한 잡음은 방향 추정과 분류를 목표로 하는 충격 음원 이외의 신호로 정의한다. 따라서 잡음은 센서에 유입되는 측정 잡음(measurement noise)이외에도 탐지 하고자 하는 충격 음원과 다른 방향에서 발생하는 간섭 잡음원(interfering noise source)이 더해진다.

충격음의 방향 추정을 위해서는 정확한 음원의 방향을 추정할 수 있으며, 동시에 높은 분해능을 갖는 방향 추정 방법이 필요하며 분류 성능을 높이기 위해서 충격 음원과 다른 방향에서 입사하는 간섭 잡음 및 측정 잡음의 영향을 최소화 시켜야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 충격 음원의 방향 추정을 위해 시간 영역 빔형성기 출력으로부터 방향 추정자를 정의하여 간섭잡음이 지배적인 상황에서도 충격 음원의 방향을 추정할 수 있는 방향 추정자를 제안한다.

† 교신저자: 한국과학기술원 소음 및 진동 제어 연구 센터

E-mail : huny@kaist.ac.kr

Tel : (042) 350-3065, Fax : (042) 350-8220

* 한국과학기술원 소음 및 진동 제어 연구 센터

** 한국과학기술원 소음 및 진동 제어 연구 센터

2. 문제 정의

2.1 문제 정의

충격 음원의 방향을 추정하기 위해 측정 문제, 예측 문제, 해석 문제를 정의한다. 측정 문제는 마이크로폰 어레이의 형상 및 센서의 개수 선정과 관련된 문제이며, 본 연구에서는 이론적인 해석을 위하여 등 간격 선형 어레이를 사용한다.

예측 문제는 다수의 센서에 측정된 신호를 입력으로 하여 지향 하고자 하는 방향으로의 출력을 얻기 위한 빔형성기의 종류를 결정하는 문제이다. 여기서 충격 음원 및 간섭 잡음은 어레이부터 원거리에 위치하여 평면파 형태로 전파하며, 반사파가 존재하지 않는 자유 음장 조건으로 가정한다.

마지막으로 해석 문제는 예측 문제에서 구한 빔형성기 출력을 이용하여 충격 음원의 방향을 판단하는 문제이다. 이때 방향 추정자는 높은 분해능을 가져야하며, 간섭 잡음의 방향이 아닌 충격음의 방향을 정확하게 추정해야한다.

먼저 Fig. 1과 같이 측정 잡음 및 간섭 잡음이 존재하지 않는 자유 음장에서, 등간격 선형 어레이로부터 원거리에 위치한 하나의 음원 $s(t)$ 로부터 i 번째 센서의 측정 신호는

$$p_i(t) = s(t - (i-1)\tau_s) \quad \text{where } \tau_s = \frac{d \cos \theta_s}{c} \quad (1)$$

와 같다. 여기서 τ_s 는 두 센서 사이의 시간 지연 (time delay) 그리고 c 는 음파의 전파 속도를 의미한다. 임의의 지향 방향(θ)에 대한 지연-합 빔형성기 출력 (beamformer output)은⁽¹⁾

$$b(\theta, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i(t + (i-1)\tau) \quad \text{where } \tau = \frac{d \cos \theta}{c} \quad (2)$$

로 정의된다.

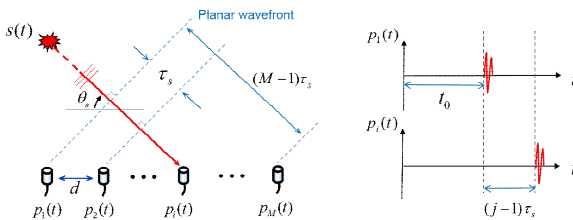


Fig. 1 (a) Incident planar waves on a uniform linear array

and (b) signals measured at two different microphones in the time-domain (θ_s : incident angle of a plane wave, d : microphone spacing, τ_s : time delay between two adjacent microphones, p_i : sound pressure at the i -th microphone ($i=1, \dots, M$), and α : time delay between the source s and the first microphone p_1).

충격음은 정의⁽²⁻⁵⁾에서 알 수 있듯이 짧은 시간 동안 음압의 크기가 증가하여 짧은 지속 시간을 가진다. 따라서 시간 영역에서의 빔형성 기법을 적용하면 신호대 잡음비가 높은 구간을 선택하여 빔형성기 출력을 구할 수 있기 때문에 높은 방향 추정 성능을 기대할 수 있다. 따라서 Fig. 2과 같이 시간 영역 빔형성기 출력을 이용한 방향 추정자를 정의하고 그에 따른 성능을 비교하고자 한다.

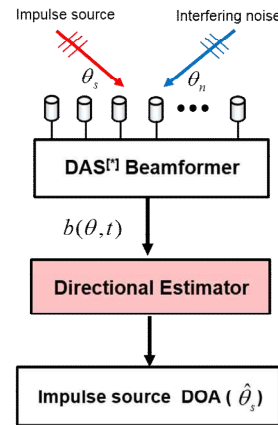


Fig. 2 Flow chart for localization of impulsive sound source (θ_s : incident angle of a impulse source, θ_n : incident angle of a interfering noise source, $b(\theta, t)$: delay-and-sum beamformer output with respect to the steering angle(θ) and $\hat{\theta}_s$: estimated direction of a impulse source)

3. 충격 음원의 방향 추정

시간 영역에서 빔형성기 출력은 지향 방향이 충격 음원의 방향과 일치할 때($\theta = \theta_s$), 빔형성기 출력의 파워 및 피크 값은 최대가 된다. 따라서 지향 방향에 따른 빔형성 파워 또는 피크 값을 이용하여 충격 음원의 방향을 추정할 수 있다⁽⁶⁾. 이 절에서는

시간 영역 빔 출력을 이용하여 충격 음원의 방향을 추정을 위한 새로운 방향 추정자를 제시한다.

3.1 충격 음원의 방향 추정을 위한 3가지 방향 추정자

(1) 실효값을 이용한 방향 추정자

빔형성기 출력은 지향 방향과 음원의 방향이 일치할 경우 빔형성기 출력의 파위는 최대가 된다. 이러한 특성을 이용하여 첫 번째 방향 추정자로서 빔형성기 출력의 실효값을 정의한다. 충격음이 유한한 구간 $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta T$ 내에서 발생한 경우 지향 방향에 따른 빔형성기 출력의 실효 값은

$$b_{rms}(\Delta T, \theta) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} [b(\theta, t)]^2 dt} \quad (3)$$

이며, 실효값을 이용한 방향 추정자는

$$\hat{\theta}_{rms} = \arg \max_{\theta \in [0, \pi]} [b_{rms}(\Delta T, \theta)] \quad (4)$$

로 정의 된다.

(2) 피크값을 이용한 방향 추정자

지향 방향과 음원이 방향이 일치하는 경우 빔형성기의 출력은 보강 간섭으로 인해서 음원의 파형과 유사해지며, 일치하지 않는 경우 출력은 상쇄 간섭으로 인해서 음원의 파형과 달라지게 된다. 따라서 음원이 충격음이 경우에 음원 방향으로의 빔형성기 출력 $b(\theta = \theta_s, t)$ 은 음원의 방향에서 최대값을 가진다. 지향 방향에 따른 빔형성기 출력의 피크값은

$$b_{peak}(\theta) = \max_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} [b(\theta, t)] \quad (5)$$

로 표현되며, 피크값을 이용한 방향 추정자로 식 (6)을 정의한다.

$$\hat{\theta}_{peak} = \arg \max_{\theta \in [0, \pi]} [b_{peak}(\theta)] \quad (6)$$

(3) 피크값을 이용한 방향 추정자

파고율은 대상 신호의 피크 진폭을 실효값으로 나눈 값으로 정의되며 무차원의 값이다. 정현파의 경

우 파고율은 진폭에 상관없이 2 dB로 항상 일정하며 대부분의 환경 소음의 경우 10 dB 내외다. 그러나 충격음의 경우 종류 및 측정 환경에 따라서 달라지지만 통상 총소리의 경우 20dB 이상 값을 가진다⁽⁷⁾. 따라서 정상 신호와 충격 신호의 파고율이 서로 다른 성질을 이용하여 충격 음원의 방향 추정하는 방법을 제안한다. 식 (3)과 식 (5)로부터 빔형성기 출력의 파고율은

$$b_{ef}(\Delta T, \theta) = \frac{b_{peak}(\theta)}{b_{rms}(\Delta T, \theta)} \quad (7)$$

$$= \frac{\max_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} [b(\theta, t)]}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} [b(\theta, t)]^2 dt}}$$

로 정의되며, 식 (7)을 데시벨 단위로 표시하면

$$b_{ef}(\Delta T, \theta) = 10 \log_{10}(b_{peak}(\theta)) - 10 \log_{10}(b_{rms}(\Delta T, \theta)) \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

와 같다. 식 (8)과 같이 파고율은 데시벨 단위에서 빔형성기 출력의 피크 값과 실효값의 차와 같고 이로부터 파고율을 이용한 방향 추정자는

$$\hat{\theta}_{ef} = \arg \max_{\theta \in [0, \pi]} [b_{ef}(\theta)] \quad (9)$$

로 정의한다.

3.2 충격 음원의 방향 추정 실험

(1) 실험 목적 및 환경

본 연구에서 제안한 간섭 잡음 환경에서의 충격 음원의 방향 추정 방법의 적용 가능성을 입증하기 위한 실험을 수행한다. 실험의 목적은 시간 영역 빔형성기의 출력을 이용한 3가지 방향 추정자의 성능을 확인하고, 방향 추정 결과로부터 충격음 분류 가능성을 검증하는 것이다. 모든 실험은 자유 음장 조건을 만족 시키는 무향실(차단 주파수= 100 Hz)에서 진행되었다. Figure 3은 충격음 및 간섭 잡음 발생위치와 측정 장치를 요약한 그림이다. 충격음을 발생하기 위해서 어레이 마이크로폰으로부터 수직 방향이며 어레이 중심으로부터 4.7m 떨어진 곳에 화약 총성을 발생시키고(Fig. 4(a)), 간섭 잡음원로는 실제 장갑차량에 발생된 작동 소음을 사전에

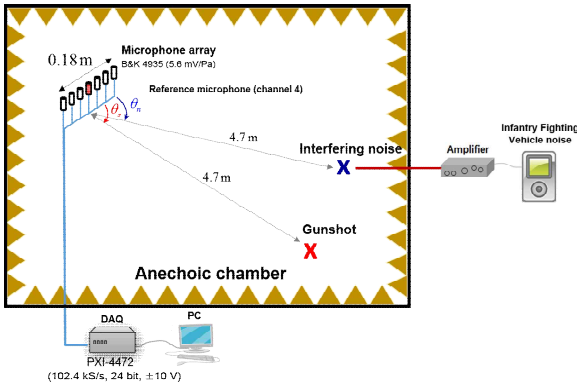


Fig. 3 Experimental setup for identifying an impulsive sound source. A gunshot sound is generated at a distance of 4.7m in a propagation direction at an angle $\theta_s = 90^\circ$ with respect to the ULA comprising seven microphones spaced 0.03m apart with an aperture size of 0.18m. The processing unit consists of a data acquisition device (PXI-4472) and laptop PC.

레코딩하여, 앰프(Anam AA-977)와 하나의 스피커(JBL 1Xtrme)를 사용하여 재생하였다. Figure 4(b)와 같이 측정 마이크로폰 어레이는 7개의 센서 ($M = 7$)로 구성되어 있으며 등간격($d = 0.03\text{ m}$)으로 배치된다. 모든 센서(B&K array microphone ICP type-4935, 1/4" free-field microphone)는 5.6 mV/Pa의 민감도(sensitivity)를 가진다. 음압의 측정은 102.4 kHz의 샘플링 주파수로 기록되며, 데이터수집장치는 내쇼날인스트루먼트 사의 PXI-4472 신호분석기를 이용하였다.



Fig. 4 Photographs of (a) generation of an impulsive sound using a gunshot and (b) a ULA with seven microphone elements (B&K ICP type-4935, reference microphone is channel 4).

(2) 실험 결과 및 고찰
Figure 5는 충격 음원과, 간섭 잡음이 공존하는 경

우 3가지 방향 추정자를 적용한 결과이다. $\theta_s = 90^\circ$ 의 방향에서 화약충이 발생되며, $\theta_n = 75^\circ$ 은 정상 형태의 간섭 잡음의 방향을 의미한다. Figure 5(a)는 기준 마이크로폰에 측정된 간섭 잡음이 섞인 충격 음원의 파형을 나타내며, 이 경우 신호대 간섭 잡음비가 낮기 때문에 충격음의 최대 음압이 간섭 잡음에 묻힌 경우이다. Figure 5(b)에서 알 수 있듯이 피크 추정자를 이용한 방향 추정 결과 간섭 잡음의 방향에서 최대가 발생하므로 충격음의 방향 추정에 실패하게 되며, 또한 실효치 추정자를 사용한 경우 마찬가지로 간섭 잡음의 방향에서의 빔형성기 출력의 파워가 최대가 되므로 간섭음원의 방향을 추정하게 된다. 그러나 파고율 이용한 방향 추정의 경우 앞의 두 방향 추정 결과와는 달리 충격음의 방향을 정확하게 추정할 수 있다.

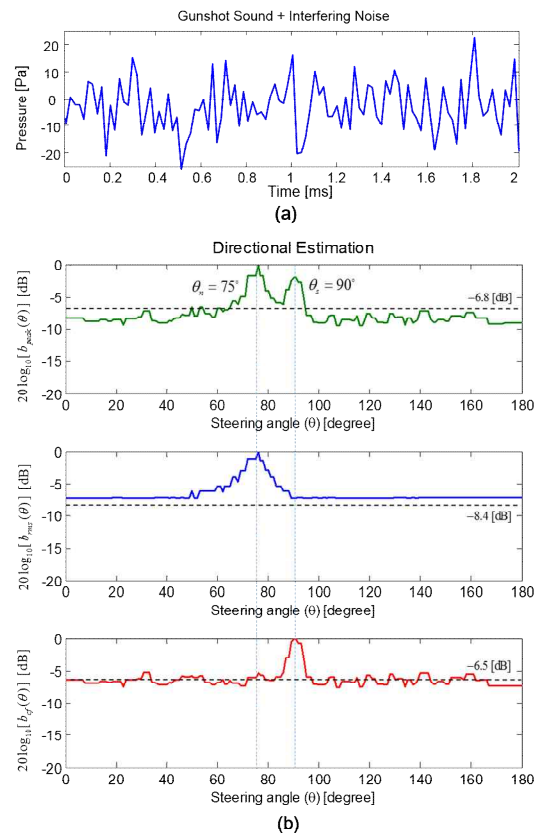


Fig. 5 Experimental results of directional estimation with interfering noise [Peak signal-to-interference ratio(PSIR) = 9.7 dB, $\Delta T = 0.15\text{ s}$]: (a) measured time signal at the reference microphone (channel 4) and (b) beam patterns of peak, RMS and crest factor estimation.

4. 결 론

충격음은 전형적인 과도 신호로 분류되며, 측정 시간에 따라 최대 음압은 일정한 반면 측정 시간에 비례하여 실효값이 감소한다. 그러나 정상 형태의 간섭 잡음은 최대 음압과 실효값이 측정 시간이 길어질수록 일정한 값에 수렴하게 된다. 따라서 본 연구에서는 간섭 잡음과 충격음이 공존하는 상황에서 과도 신호와 정상 신호의 특징에 착안하여 지향 방향에 따른 빔형성 출력의 피크값과 실효값을 정의하고, 두 값의 비로 정의되는 파고율을 방향 추정자로 정의 하여 3가지 방향 추정자의 성능을 비교하였다. 성능 비교 결과 충격음만 존재하는 경우에는 피크값을 이용한 추정자의 성능이 가장 우수하다. 그러나 간섭 잡음이 지배적인 상황에서는 실효값과 피크값을 이용한 방향 추정자 모두 간섭 잡음의 방향을 추정하게 되지만 파고율을 이용한 방향 추정자는 충격 음원의 방향을 정확하게 추정한다.

후 기

This work was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) grant funded by the Korea government (No. 10037244), and the BK21 (Brain Korea 21) project initiated by the Ministry of Education, and Unmanned Technology Research Center (UTRC) at Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), originally funded by DAPA, ADD.

참 고 문 헌

- (1) D.H. Johnson, D. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA (1993), pp. 113–119
- (2) Rosenblith, W.A. and Stevens, K.N Noise and Man, WADC TR52-204, pp.179-233. Handbook of Acoustic Noise Control, Vol.2, 1953
- (3) Kryter, K. D., *The Handbook of Hearing and the Effects of Noise – Physiology, Psychology, and Public Health*, Academic Press (1994).
- (4) ISO 10843: 1997, Acoustics -- Methods for the description and physical measurement of single

impulses or series of impulses, International Organization for Standardization.

- (5) ISO 13474:2009, Acoustics -- Framework for calculating a distribution of sound exposure levels for impulsive sound events for the purposes of environmental noise assessment Precision sound level meters additional characteristics for the measurement of impulsive sounds, International Organization for Standardization.

- (6) D.H. Seo, J.W. Choi, Y.H. Kim, “0Impulsive sound source localization using peak and RMS estimation of the time-domain beamformer output”. Mech. Syst. Signal Process. (MSSP) 2014, 49, pp. 95–105.

- (7) Veerella Komali, E. Adinarayana, “PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO OF SINGLE CARRIER FDMA SIGNALS”. International Journal of Engineering & Science Research (IJESR), Nov 2012, Vol. 2, 11, pp.1851-1856