

마이크로폰 어레이를 이용하여 차량 하부에서 발생한 결함의 위치를 찾아내는 방법

A method to find the position of fault in a moving vehicle using microphone arrays

전중훈* 김양한**

Jong-Hoon Jeon, Yang-Hann Kim,

ABSTRACT

Sound generated from a moving vehicle often carries information on the condition of vehicle, for example, whether it has faults or not, where the fault exists. The latter is possible especially by MFAH(moving frame acoustic holography) and beamforming method. MFAH is applicable to the sound source of pure tone or narrow band noise. For the beamforming method, we have to know what kind of wave the sound source radiates, for example, plane wave or spherical wave. That is, whether the above methods are applicable depends on the characteristics of sound source. To apply these methods to the fault detection, we have to know the characteristics of wave from faults. In this research, a machine diagnosis technique based on the above holographic approaches is introduced to find the position of faults. The signal due to faults is modeled based on the fact that the faults radiate impulsive noise, and analyzed in time and frequency domain. The way how MFAH and beamforming method can be used is introduced to find the position of source.

1. 서론

운전 중인 철도 차량의 하부에 있는 구동계(차축, 베어링 등)는 지면에 개방되어 있기 때문에 외부로부터 충격에 의한 결함이 발생하기 쉽다. 결함은 초기에는 잘 발견되지 않지만, 지속적으로 운전을 하게 되면 마모로 인해 파손으로 이어질 수 있다. 부품 파손은 탈선과 같은 사고를 유발할 수 있으므로 결함을 조기에 발견하여 부품 교체 등의 조치를 취해야 한다. 이를 위해서는 차량 하부의 결함 존재 유무를 파악하는 것뿐만 아니라, 결함이 어디에서 발생하였는지에 대한 정보 또한 필요하다. 따라서 운전 중인 차량 하부를 모니터링할 수 있는 시스템이 필요하다.

결함의 위치를 판별하기 위한 방법으로 결함이 발생하였을 때 생기는 증상을 파악하고, 이를 이용하여 위치를 추정하는 방법을 생각할 수 있다. 결함이 발생했을 때 나타나는 증상 중 하나는, 결함 발생 부위와 접촉면 사이의 충격으로 인한 소음이다. 이를 이용하면 결함에서 발생한 소리를 측정하여 소리가 발생한 위치를 추정하는 기술을 적용할 수 있다.

음압 정보를 이용하여 소음원의 위치를 찾는 연구 중 대표적인 것으로 음향홀로그래피 방법[1-3]과 빔형성 방법[4-5]을 들 수 있다. 음향 홀로그래피는 경계면의 음압을 측정하여 소음원이 존재하는 면에서 음장분포를 예측하는 방법으로, 소음원의 위치뿐만 아니라 음장 분포, 입자 속도, 인텐시티 등 다양한 음향학적 물리량을 제공한다는 장점이 있다. 특히 철도 차량과 같이 이동하는 소음원에 대하여 적용 가능한 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법[6-7]이 개발되었으나, 이는 순음 성분(pure tone) 또는 협대역 소음에 대해서만 적용이 가능하다는 단점이 있다. 빔형성 방법은 소음원

* 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : echovel@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3065 FAX : (042)869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

의 형태를 평면과 또는 구면파로 가정하여 다수의 마이크로폰을 이용하여 소음원의 위치를 추정하는 방법이다. 빔형성 방법은 간단한 원리를 이용해 소음원의 위치를 찾아낼 수 있다는 장점이 있으나, 소음원에서 발생하는 소음의 방사 형태에 대해 알고 있어야 한다. 따라서, 이러한 방법들을 철도 하부 결합 위치 파악에 적용하기 위해서는 우선 철도 하부의 결합에서 발생하는 소음에 대해 구체적으로 관찰할 필요가 있다.

2. 문제 정의

2.1 관심 대상의 구체화

철도 차량 하부에서 발생하는 결합에는 차량 바퀴의 외륜 즉, 선로(rail)와 접촉하는 부분 사이의 마모에 의한 균열, 베어링의 마모로 발생한 결합, 혹은 체결 부위 볼트의 파손 등이 있다. 이 중 베어링의 마모로 인한 결합 발생률이 가장 높다[8]. 이러한 결합이 발생시키는 충격 소음의 주기는 차량의 바퀴가 회전하는 주기에 의해 결정되며, 차량이 정속으로 운행할 경우 충격 소음 역시 주기를 가진다. 즉, 차량의 이동 속도를 일정하게 유지할 수 있다면 위의 결합 신호는 주기적으로 발생하게 된다. 본 연구에서는 관심 대상을 주기적인 충격 신호를 발생시키는 차량 하부 기기의 결합으로 정한다. 그리고 이러한 결합에 의해 주기적으로 발생하는 충격 신호를 결합 신호라고 정의한다.

2.2 결합 신호의 특성

결합에서 발생한 주기적인 충격 소음은 매질을 통해 수신 지점 즉, 마이크로폰에 측정된다. 그렇다면 결합이 발생한 지점에서의 소음과 마이크로폰으로 수신된 신호 사이의 관계를 파악하기 위해 이들을 수학적으로 표현해 보자. $t=t_0$ 라는 시간에 결합에 의한 충격음이 발생하고, 이는 ΔT 의 주기를 가지고 반복적으로 발생한다고 하자. 이 경우 충격 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$p_s(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - (t_0 + i\Delta T)). \quad (1)$$

여기서 $\delta(t)$ 는 디랙 델타(Dirac delta)를 의미한다. 한편, 마이크로폰을 통해 수신된 음압을 $p_M(t)$ 이라고 하면,

$$p_M(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{r_i} \delta(t - (t_0 + i\Delta T + \frac{r_i}{c})) \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 r_i 는 i 번째 충격음이 발생할 때 소음원과 마이크로폰 사이의 거리를 나타낸다. 만약 소음원과 측정점 사이의 상대 운동이 발생하지 않는다면 r_i 는 i 에 관계없이 일정한 값을 지닌다. 이는 소음원과 마이크로폰이 둘 다 정지해 있거나 둘 다 같은 속도로 움직이는 경우에 해당한다. 이 경우 i 번째 충격음과 $i+1$ 번째 충격음이 마이크로폰에 측정될 때의 시간차는

$$t_0 + (i+1)\Delta T + \frac{r_{i+1}}{c} - (t_0 + i\Delta T + \frac{r_i}{c}) = \Delta T \quad (3)$$

이다. 즉, 충격 주기와 동일한 시간 지연을 가지고 측정된다. 하지만 둘 사이에 상대 운동이 존재하는 경우 측정 신호의 시간차는

$$t_0 + (i+1)\Delta T + \frac{r_{i+1}}{c} - (t_0 + i\Delta T + \frac{r_i}{c}) = \Delta T + \frac{r_{i+1} - r_i}{c} \quad (4)$$

가 되어 매 경우 다른 값을 가진다. 그림 1(a)는 등속도로 이동하는 주기적인 충격 소음원을 지면에 고정된 마이크로폰으로 측정하는 모습을 도식화한 것이며, 그림 1(b)는 마이크로폰을 통해 측정된 신호를 도식적으로 나타낸다. 측정된 신호를 관찰하면 충격 신호의 시간 간격이 ΔT 즉, 등간격이 아니라는 사실을 관찰할 수 있다.

(a)

(b)

그림 1. (a) 등속으로 이동하는 충격 음원과 마이크론의 도식화, (b) 마이크론으로 측정된 충격 신호

그렇다면 이동하는 차량에서 발생하는 주기적인 충격 신호는 주파수 영역에서 어떤 형태로 측정되는지에 대해 살펴 보자. 우선 정지해 있는 소음원이 주기적으로 충격 신호를 발생시키는 경우, 주파수 영역에서 관찰한 결과는 그림 2.(a)와 같다. 다시 말해서, 충격 주기 ΔT 의 역수에 해당하는 간격을 갖는 이산화된 스펙트럼의 형태로 나타난다. 반면, 이동하는 주기적인 충격 소음의 경우 그림 2(b)와 같이 특정 주파수 폭을 갖는 연속 스펙트럼 형태로 나타난다. 따라서 이동하는 주기적인 충격 소음의 측정 신호는 시간 영역, 주파수 영역에서 측정점과 음원의 상대적인 운동으로 인한 도플러 효과가 발생하여 충격 신호의 주기 등 소음원이 갖고 있는 결합의 정보가 왜곡되어 측정된다. 따라서 도플러 효과를 제거하여 음상을 가시화하는 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용하거나, 도플러 효과를 포함한 충격 신호를 모델링하고, 이를 이용해 소음원 위치를 추정하는 빔형성 방법을 적용하는 방법을 생각할 수 있다.

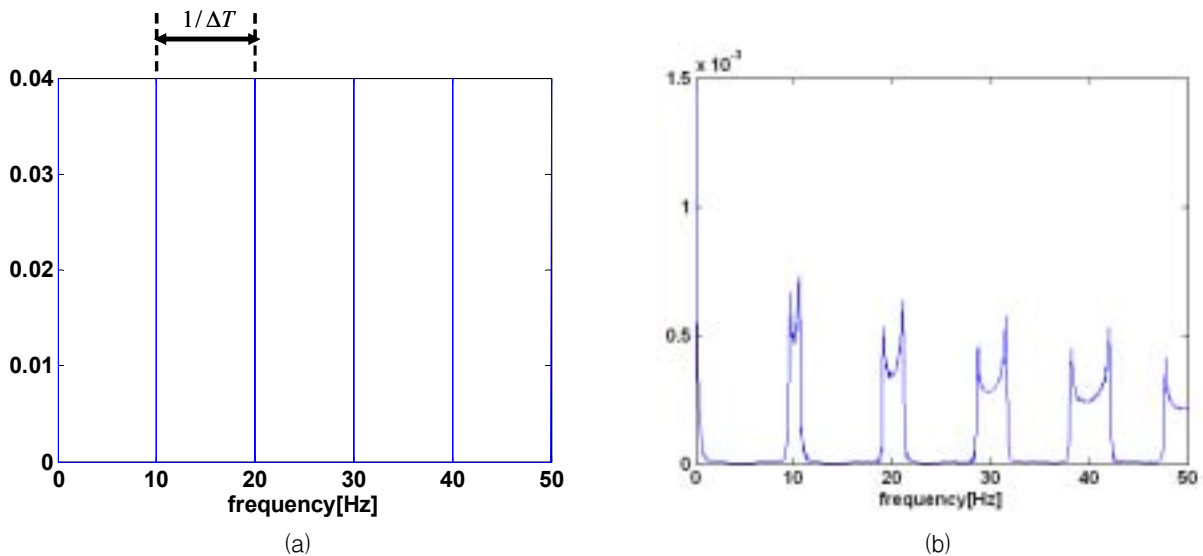


그림 2. 주기적인 충격 신호를 주파수 영역에서 관찰한 결과: (a) 소음원이 이동하지 않는 경우, (b) 소음원이 등속으로 이동하는 경우

3. 결합 위치 추정 방법

3.1 빔형성 방법

3.1.1 기본 원리

이상적인 충격 신호의 경우 측정된 신호는 식 (2)와 같이 델타 함수의 조합으로 표현된다. 이는 델타 함수의 특성에 의해 특정 시간에 대해서만 값을 가지고 나머지 시간의 경우 측정 신호는 0이 된다. 따라서, 서로 다른 음원의 위치 및 초기 충격 시간에 의해 측정된 두 신호 $p_M(t)$ 와 $p'_M(t)$ 를 곱하면, 충격 신호가 측정된 시간이 서로 다르다면 두 충격 신호는 모두 사라져 0이 된다. 반대로 두 충격 신호가 측정된 시간이 같다면 두 함수의 곱은 0이 아닌 값을 가

진다. 이러한 측정 신호의 성질을 이용하면, 적절한 스캔 함수를 선택하여 측정 신호와 곱함으로써 충격 신호들 중 일부를 없애거나 남겨두는 것이 가능하다.

3.2.2. 스캔 함수의 제안 및 빔형성 파워

본 장의 경우 충격 음원의 위치와 초기 충격 시간을 찾는 방법을 다루므로 스캔 함수는 당연히 위의 두 변수에 대한 항을 담고 있어야 한다. 따라서 스캔 함수를 다음과 같이 정의하자:

$$s_M(t_{0s}, \Delta x_s; t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta_u(t - (t_{0s} + i\Delta T + \frac{r_{si}}{c})). \quad (5)$$

여기서 $\delta_u(t)$ 는 다음을 만족한다:

$$\delta_u(t) = \begin{cases} 1 & \text{when } t=0. \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 r_{si} 는 $t_{0s}, \Delta x_s$ 에 관한 항을 담고 있으며

$$r_{si} = \sqrt{(x_M - (x_0 + \Delta x_s + u(t_{0s} + i\Delta T)))^2 + h^2} \quad (7)$$

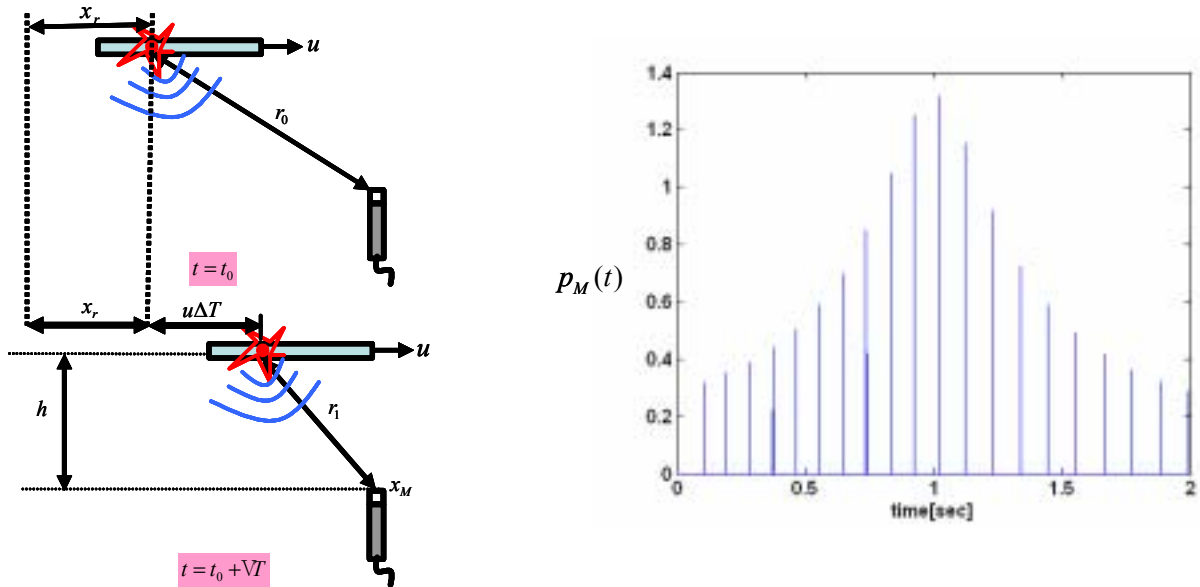


그림 3. 2차원 음장의 경우 변수의 정의 및 측정된 신호

과 같이 표현된다. 제안된 스캔 함수의 크기는 1이기 때문에 측정된 신호와 곱했을 때 측정된 충격 신호의 시간이 같을 경우 그대로 통과시키고, 그렇지 않을 경우 통과시키지 않는 창문 함수의 역할을 한다. 만약 스캔 함수가 측정된 신호가 같다면 즉, $t_{0s}, \Delta x_s$ 가 각각 $t_0, \Delta x$ 와 같을 경우

$$s_M(t_{0s}, \Delta x_s; t) \times p_M(t) = p_M(t) \quad \text{when } t_{0s} = t_0, \Delta x_s = \Delta x \quad (8)$$

와 같이 된다. 이와는 반대로, 스캔 함수와 측정 신호가 모두 다른 시간에 충격 신호가 발생할 경우 식 (8)은 모든 시간에 대해 0의 값을 가진다. 따라서 스캔 함수와 곱한 측정 신호는 스캔 함수의 $t_{0s}, \Delta x_s$ 와 측정 신호의 $t_0, \Delta x$ 와 같을 때 가장 많은 충격 소음 성분을 가진다. 이를 이용하면, 스캔 함수와 곱한 측정 신호의 크기를 시간 영역에서 적분하였을 때, 제일 큰 값을 가질 때 $t_{0s}, \Delta x_s$ 를 실제 음원 위치 및 초기 시간 지연이라고 추정하여 충격 소음원의 위치를 찾을 수 있다.

3.2 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법

이동 프레임 음향 홀로그래피 방법[6-7]은 이동하는 음원에서 방사한 음압을 정지해 있는 마이크로폰 어레이로 측정한 후, 공간상의 파수 성분과의 관계를 이용하여 도플러 효과를 제거한 후 음장을 가시화하는 방법이다. 본 연구의 핵심은 주기적인 충격 소음에의 적용 가능성에 대한 것이므로 이 부분에 대해서만 언급하고, 도플러 효과 제거 과정 및 음장 예측 과정은 참고문헌 1,2,3,6,7로 대치한다. 이동 프레임 음향 홀로그래피는 음원이 발생하는 소음이 단일 주파수인 경우에 적용이 가능하다. 만약 이동하는 음원이 두 개의 순음 성분: f_{h1}, f_{h2} 를 가지게 된다면 이를 측정된 신호는 그림 4와 같이 두 개의 좁은 폭을 가진 스펙트럼 형태로 나타나게 된다. 여기서 밴드의 폭은 순음 성분의 주파수와 음원의 이동 속도에 의해 결정된다. 이는 그림 4.3의 오른쪽 그림과 같이 순음 성분에 의해 측정된 신호의 중첩으로 표현할 수 있다. 만약 두 밴드가 주파수 영역에서 겹치지 않고 충분히 이격되어 있다면, 각각의 밴드만을 통과시키는 대역 통과 필터를 이용하여 각 단일 주파수에 의해 발생한 음장을 예측할 수 있다.

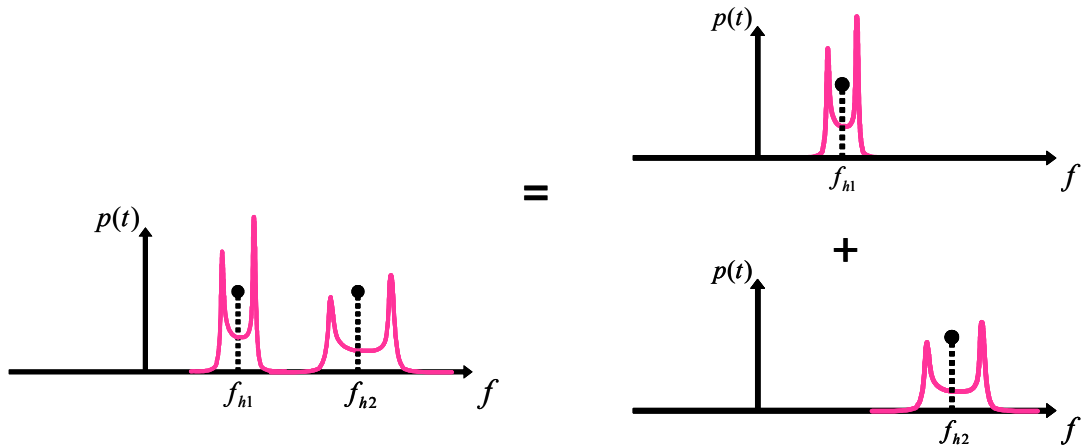


그림 4 이동하는 두 개의 순음 성분을 고정된 좌표계에서 측정된 결과의 도식화

한편, 이동하는 주기적인 충격 소음을 주파수 영역에서 관찰하면 그림 2(b)와 같이 좁은 밴드폭을 갖는 스펙트럼이 반복하여 나타난다. 밴드폭은 주파수가 높아질수록 점점 더 넓어지며, 각 밴드의 중심 주파수 사이의 간격은 $1/\Delta T$ 로 일정하기 때문에, 높은 주파수 영역에서는 밴드 사이의 겹침 현상이 발생하여 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용할 수 없다(그림 5 참조).

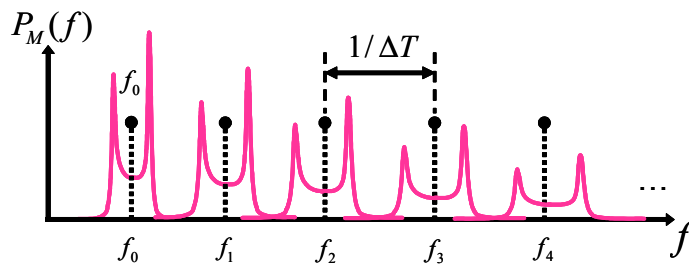


그림 5. 도플러 효과가 반영된 단일 주파수 성분의 스펙트럼: 고주파수 영역에서 주파수 겹침 현상이 발생하게 됨을 도식적으로 보여주고 있다.

각 중심주파수 별 밴드폭은 $\Delta f = \frac{2M}{1-M^2} f_i$ 와 같이 수학적으로 표현 가능하다. 또한 각 밴드의 중심 주파수 또한 수학적인 표현이 가능하므로 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용할 수 있는 주파수 상한선은

$$f_i < \frac{1-M}{2M} \frac{1}{\Delta T} \tag{9}$$

와 같이 표현할 수 있다. 따라서 주어진 조건을 만족하는 주파수 영역에서 이동하는 주기적인 충격 소

음을 가시화할 수 있다.

4. 모의 실험 및 결과

4.1 빔형성 방법

3장에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 그림 6(a)은 모의실험에 사용한 변수들을 나타낸다. 마이크로폰 어레이가 x 방향으로 등간격으로 설치되어 있고, 간격은 $0.2m$ 이다. 충격 소음원의 위치는 이동하는 차량의 후미 및 측면에서 각각 $0.3m, 0.3m$ 씩 떨어져 있는 경우이며, $t=0.04sec$ 일 때 처음으로 충격 소음이 발생하며 이후 $0.1sec$ 의 주기를 갖고 소음을 발생시킨다. 음원의 이동 속도는 $34m/sec$ 즉, 0.1의 마하 수(Mach number)를 가지고 y 방향으로 이동한다. 그리고 잡음에 대한 강건함을 검증하기 위해 그림 6(b)와 같이 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)가 0dB인 백색 잡음을 추가하였다.

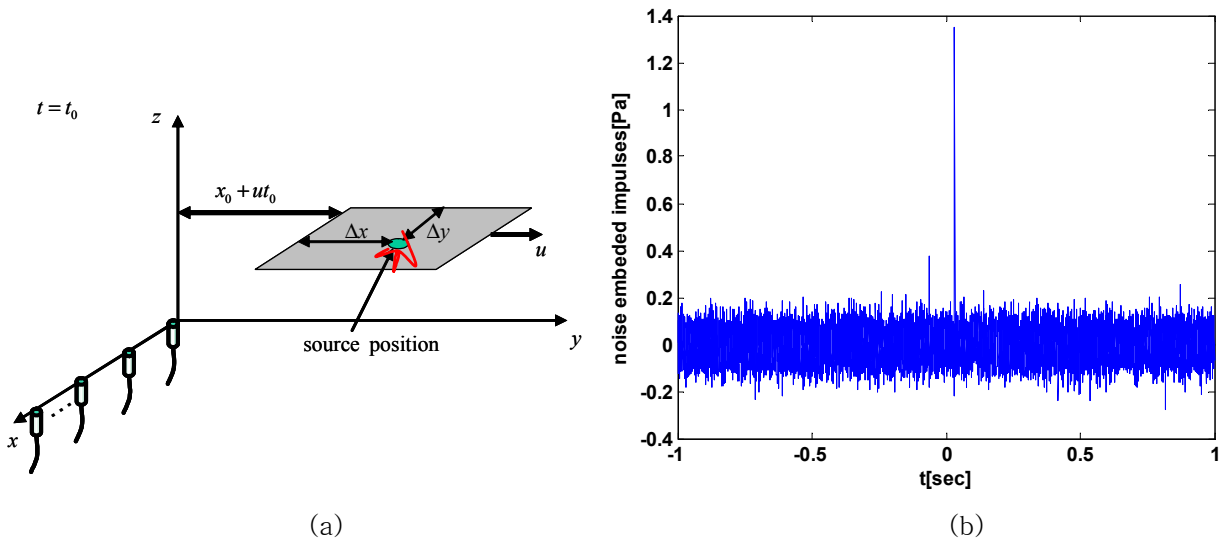


그림 6. 빔형성 방법: 모의실험($t_0 = 0.04, sec, \Delta T = 0.1sec, \Delta x = 0.3m, \Delta y = 0.3m, u = 34m/sec$)
 그림 7은 모의실험 결과를 보여준다. 그림 7(a)는 t_{0s} 즉, 초기 충격 발생 시간을 변화시켜가며 빔형성 방법을 적용한 결과를 보여준다. 실제 충격 발생 시간인 $0.04sec$ 에 빔형성 파워가 최대인 것을 확인할 수 있으며, 이를 따로 관찰하면, 실제 음원의 위치인 $\Delta x = 0.3m, \Delta y = 0.3m$ 에서 빔형성 파워가 최대가 됨을 확인할 수 있다. 따라서 빔형성 방법의 경우 신호 대 잡음비 $0dB$ 수준의 잡음에 강건하게 소음원의 위치를 찾을 수 있음을 알 수 있다.

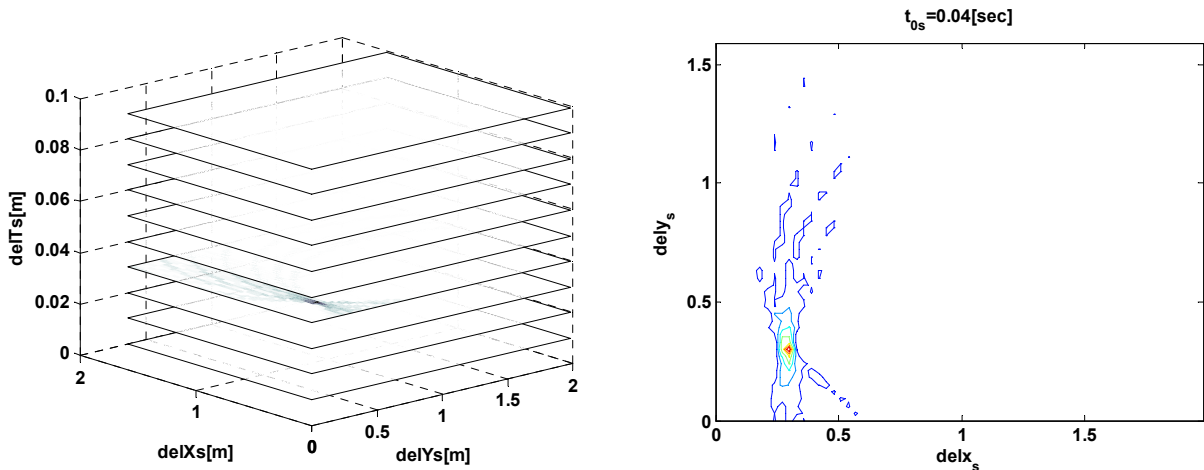


그림 7. 모의실험 결과: (a) t_{0s} 를 변화시켜가며 관찰한 결과, (b) $t_{0s} = 0.04sec$ 일때의 결과

4.2 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법

이동 프레임 음향 홀로그래피의 경우 $\Delta x=5m, \Delta y=7.5m, u=3.4m/sec, \Delta T=0.1sec$ 인 경우에 대해 모의실험을 수행하였다. 이 경우 식 (9)에 의하면 이동 프레임 음향 홀로그래피가 가능한 상한 주파수는 $495Hz$ 이다. 즉, $495Hz$ 이하의 주파수에 대해서 음장 가시화 적용이 가능하다. 그림 8은 중심 주파수가 $495Hz$ 이상 또는 이하인 경우에 대해 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용한 결과이다.

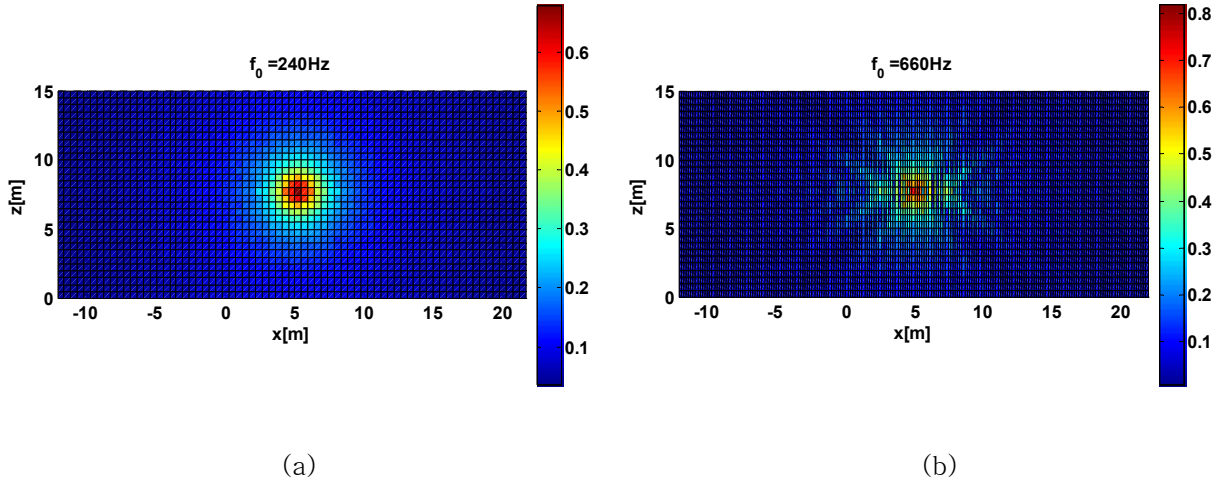


그림 8 잡음이 없는 경우 모의실험 결과: $f_0=(a) 160Hz, (b) 660Hz$

그림 8(a)에서 관찰할 수 있듯이 중심주파수가 $495Hz$ 이하인 $240Hz$ 인 경우에는 음원이 있는 위치에서 음압이 최대가 된다는 사실을 알 수 있다. 그러나 그림 8(b)와 같이 중심주파수가 $495Hz$ 이상인 $660Hz$ 인 경우에는 예측 음장에 오차가 있다는 사실을 알 수 있다. 이는 $495Hz$ 이상의 주파수에서는 주파수 밴드 겹침 현상이 발생하여 이들을 분리해낼 수 없기 때문이다. 한편, 이동 프레임 음향 홀로그래피의 경우 잡음이 섞일 경우 어떻게 되는지 살펴보자. 4.1과 마찬가지로 $f_0=220Hz$ 대 잡음비 $0dB$ 인 경우에 대해 음장을 예측한 결과는 그림 9와 같다.

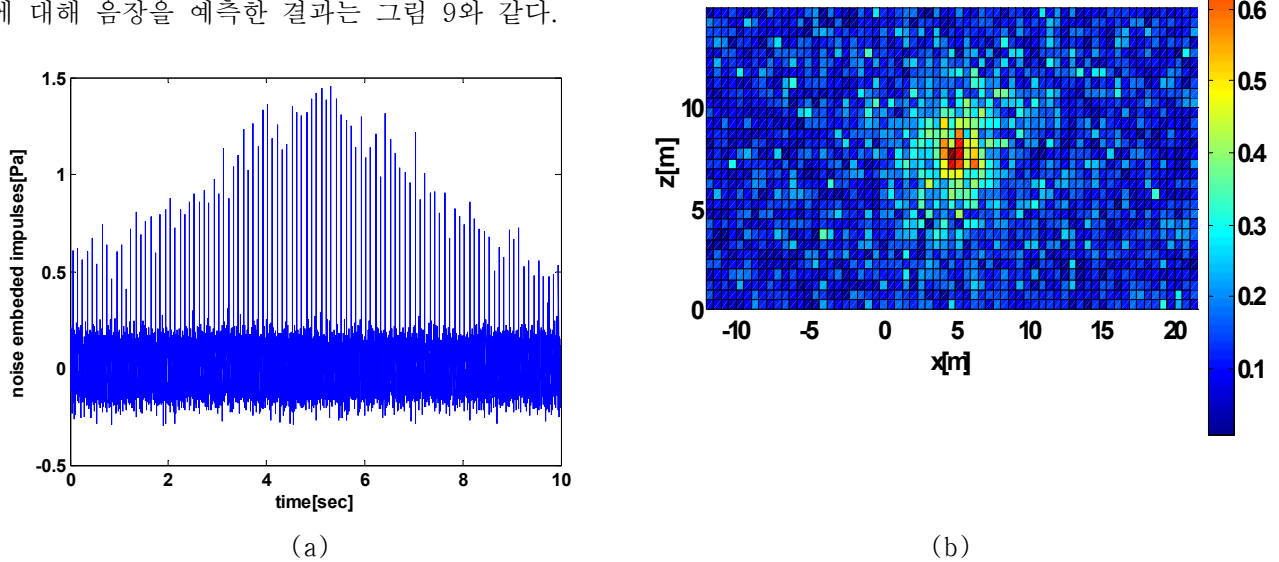


그림 9. S/N Ratio= $0dB$ 일 때 모의실험 결과: $f_0=(a)$ 시간 영역 신호 (b) $f=220Hz$ 에서 음장 가시화 결과
그림에서 알 수 있듯이 음원이 있는 곳에서 음압이 최대가 되지만 잡음의 영향에 의해 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 그리고 적용 가능한 주파수는 음원의 이동 속도가 빨라질수록 점점 낮아지므로 고속으로 이동하는 음원의 경우에 적용성에 한계를 지닌다. 그렇지만 저속으로 이동하고 잡음의 영향이 크지 않은 경우에 대해서는 이동 프레임 음향 홀로그래피를 이용하여 결함의 위치를 찾을 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 차량 하부의 결함이 충격 소음을 발생시킨다는 점에 감안하여 마이크로폰 어레이를 이용한 충격 위치를 추정하는 방법에 대해 다루었다. 차량이 이동하면서 소음을 발생하기 때문에 이동하는 소음원을 가시화하는 대표적인 방법인 이동 프레임 음향 홀로그래피와 빔형성 방법을 이용하여 적용 가능성을 검증하였다.

빔형성 방법의 경우 충격 신호가 발생한 시간과 그 시간에 차량의 위치를 알아야 하기 때문에 음원의 위치 및 시간 정보를 둘 다 추정할 필요가 있다. 이를 위해서 시간 영역에서 빔형성 방법을 적용하는 방법을 제안하였다. 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용하기 위하여 주기적인 충격 소음을 여러 개의 이산화된 주파수 성분의 조합으로 표현하여 이동 프레임 음향 홀로그래피의 적용이 가능함을 보였다. 마지막으로 컴퓨터 모의실험을 통해서 두 방법을 적용하여 이동하는 충격 소음원의 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다. 그러나 이동 프레임 음향 홀로그래피의 경우 빔형성 방법에 비해 잡음에 강건하지 못하며, 이동 속도가 높아짐에 따라 적용 가능한 주파수 영역이 제한을 받음을 확인할 수 있었다.

본 연구에 부가적으로 필요한 연구는 실제 철도 차량에서 발생할 수 있는 추가적인 제반사항을 고려하였을 때 적합한 방법을 개발하는 것이다. 결함의 조기 검출을 위해서는 미세한 결함에 의한 소음신호가 매우 작아 주위 잡음에 대한 신호 대 잡음비가 좋지 않은 경우 어느 정도 하한선 내에서 적용할 수 있는지 적용 가능 기준을 제시하거나, 혹은 잡음의 영향을 분리하는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

6. 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원에서 주관하는 철도안전기술개발사업의 일환으로 진행되었으며 한국철도기술연구원의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

7. 참고문헌

- [1] J.D. Maynard, E.G. Williams, and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography:I. Theory of generalized holography and the development of NAH," J.Acoust. Soc..Am., 78, 1395-1413, 1985.
- [2] W. A. Veronesi and J. D. Maynard, "Nearfield acoustic holography(NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation," J. Acoust. Soc. Am. 81, 1307-1322, 1987.
- [3] 권휴상, 개선된 평면 음향 홀로그래피 방법을 이용한 음장의 가시화(한국과학기술원 기계공학과, 박사학위 논문, 1997).
- [4] 최재웅, 근접장에서의 소음원 규명론(한국과학기술원 기계공학과, 박사학위 논문, 1994).
- [5] Jae-Woong Choi and Yang-Hann Kim, "Estimation of locations and strengths of broadband planar and spherical noise sources using coherent signal subspace," J. Acoust. Soc. Am. 98(4), 2082-2093, 1995.
- [6] H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am. 103(4), 1734-1741, 1998.
- [7] S.-H. Park and Y.-H. Kim, "An improved moving frame acoustic holography for coherent bandlimited noise," J. Acoust. Soc. Am., 104(6), 3179-3189, 1998.
- [8] 한국철도기술연구원 자체 조사 문서, "철도차량 고장, 결함의 원인," 1998.