

# 주행 중 철도 차량의 결함 위치 추정 방법

## Fault localization method of a train in cruise

전종훈\*

Jeon, Jong-Hoon

김양한\*\*

Kim, Yang-Hann

### ABSTRACT

Faults of rotating parts of a train normally generate unexpected frequency band or impulsive sound[1] which has a period when it moves with a constant speed. The former can be detected by the moving frame acoustic holography method, which visualizes sound field that is generated by a moving and emitting pure tone or band limited noise source. We have attempted to apply the method to the latter case: the periodic impulsive sound which generate different signal compared with what can be measured by the band limited noise. The signal to noise ratio which determines the success of early fault detection must also be studied with the impulsive and moving signal. This research shows how the problems related with these issues can be resolved. The main idea is that periodic impulsive signal can be expressed by infinite set of discrete pure tones. This enables us to obtain lots of holograms that visualize periodic impulsive sound field including noise by using the moving frame acoustic holography method. Therefore holograms can be averaged to improve the signal to noise ratio until having reliable information that exhibits where the impulsive sources are. Theory and experiment by using the miniature vehicle are described [Work supported by BK21 & KRRI].

### 1. 서 론

철도 차량의 하부에 있는 구동계(차축, 베어링 등)는 지면에 개방되어 있기 때문에 운전 중에 외부로부터 충격에 의한 결함이 발생하기 쉽다. 결함은 발생 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 파악해야 할 뿐만 아니라, 결함이 어디에서 발생하였는지 초기에 알아낼 필요가 있다.

결함의 위치를 찾기 위해 결함이 발생했을 때 나타나는 증상을 파악하고, 이를 이용하여 결함의 위치를 발견해야 한다. 그러나 차량의 결함은 정지해 있는 상태에서는 증상을 발견하기 힘들다. 따라서 운전 중인 차량에서 발생하는 특징을 이용하여 결함의 위치를 찾아내는 방법이 필요하다. 운전중인 차량에서 결함이 발생하면 결함 발생 부위와 접촉면 사이의 충격으로 인한 소음이 발생한다. 이를 이용하면, 주행중인 차량에서 발생하는 소리가 갖는 정보를 이용하여 결함의 위치를 파악할 수 있다.

소리가 갖는 공간 정보를 이용하여 소음원의 위치를 찾는 연구로 음향홀로그래피 방법[2-6]과 빔형성 방법[7-8]을 들 수 있다. 이 중 음향 홀로그래피는 측정면의 음압 분포를 이용하여 측정면 이외의 면에서의 음압 분포, 입자 속도, 인텐시티 등을 예측하는 방법이다. 초기의 연구는 정지해 있는 소음원에 대

\* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동 제어 연구 센터, 비회원

E-mail : echovel@kaist.ac.kr

TEL : (042) 869-3064 FAX : (042) 869-8220

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동 제어 연구 센터, 비회원

해서만 적용이 가능했으나, 이러한 제한점을 극복하여 이동하는 소음원을 가시화하기 위해 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법[9-12]이 개발되었다. 최근에는 이동하는 주기적인 충격 소음을 가시화하는 방법이 개발되어 차량 결함 탐지의 가능성을 보여줬다[13]. 그러나 철도 차량 하부의 경우 결함 신호 이외의 잡음이 존재하는데, 이로 인해 소음원 위치를 찾기 어렵게 된다. 범형성 방법의 경우 최근 연구에 의하면 최소 분산 방법을 적용하여 잡음에 묻힌 경우 충격 소음원의 위치를 찾을 수 있으나, 이는 정지해 있는 소음원에만 적용할 수 있다[1]. 따라서 이동하는 충격 소음원이 잡음에 묻혀 있을 경우 잡음의 영향을 제거하여 음원의 위치를 찾아낼 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해서는 잡음에 묻힌 이동하는 충격 소음이 어떤 특성을 가지는지 우선 파악할 필요가 있다.

## 2. 문제 정의

### 2.1 결함 신호의 수학적 표현

운전 중인 철도 차량의 하부에서 발생하는 결함의 한 특징으로, 결함 부위가 주변 부위에 부딪힐 때 충격이 발생하고, 이로 인해 충격 소음이 방사된다는 점을 들 수 있다. 만약 차량이 정속으로 운행할 경우 충격 소음 역시 주기를 갖게 된다.

이러한 현상을 바탕으로 결함 신호를 수학적으로 표현하기 위해 우선 필요한 변수들을 정의할 필요가 있다. 결함에 의한 충격이  $t = t_1$ 의 시간에 발생하고, 이러한 충격이  $\Delta T$ 의 주기를 가지고 반복된다고 하면, 결함이 발생시키는 충격력은

$$F(t) = F_0 \sum_{t=-\infty}^{\infty} \delta(t - (t_1 + i\Delta T)) \quad (1)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $\delta(\cdot)$ 은 디락 델타(Dirac Delta) 함수를 뜻하며, 여기서  $F_0$ 은 충격량을 뜻한다. 식 (1)에 표현된 충격력에 의해 결함 부위는 차량과 함께 정속으로 이동하면서 충격음을 발생시킬 것이고, 이를  $(x_m, y_m, z_m)$ 의 위치에 있는 마이크로폰으로 측정한다고 생각하자.  $t = t_1 + i\Delta T$ 의 시간에 충격음이 발생하는 순간 결함과 마이크로폰 사이의 거리를  $r_{mi}$ 라고 하고, 결함에서 발생한 충격음은 단극 음원의 형태로 방사한다고 가정하면 마이크로폰에서 측정한 음압  $p(x_m, y_m, z_m; t)$ 는

$$p(x_m, y_m, z_m; t) = F_0 h(t) * \sum_{t=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_{mi}} \delta(t - (t_1 + i\Delta T + \frac{1}{c} r_{mi})) \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $c$ 는 소리의 전파 속도를 뜻한다.  $h(t)$ 는 결함 부위의 충격 응답 함수이며, 단위 충격력이 가해졌을 때 단극 음원의 응답을 나타낸다. 간단한 경우로 결함 시스템이  $f_r$ 의 공진 주파수와 시상수  $\tau$ 를 가질 때 충격 응답 함수는

$$h(t) = \begin{cases} \frac{H_0}{\tau} e^{-j(\frac{1}{\tau} + j2\pi f_r)t} & t \geq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

과 같이 모델링할 수 있다. 여기서  $H_0$ 는 단위 충격량에 의해 발생하는 소음원을 단극음원으로 가정하였을 때의 음원의 크기를 나타낸다. 차량 하부와 같이 강체로 된 시스템의 충격 응답 함수는 빠른 속도로 감쇠하며[14-15], 따라서 본 연구에서는 시상수  $\tau$ 가 매우 작다고 가정한다. 즉, 다음에 의해 정의되는  $h_0(t)$ 를 충격 응답 함수로 사용한다:

$$h_0(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} h(t). \quad (4)$$

이러한 가정에 의하면 충격 응답 함수는 디락 델타 함수와 같게 된다[15].

그림 1(a)는  $x$  방향으로 이동하는 주기적인 충격 음원 및  $(x_m, y_m, z_m)$ 에 위치한 마이크로폰을 나타내며,  $u$ 는 충격 음원의 이동 속도이다. 그림 1(b)는 이동하는 주기적인 충격 음원에 의해 방사된

신호를 정지해 있는 마이크로폰을 통해 측정한 신호의 한 예를 나타낸다. 충격 주기 및 이동 속도는 후에 설명할 주파수 영역에서 도플러 효과를 잘 관찰할 수 있는 한 예제로 각각 0.1sec 및 17.15m/sec로 설정하였다.

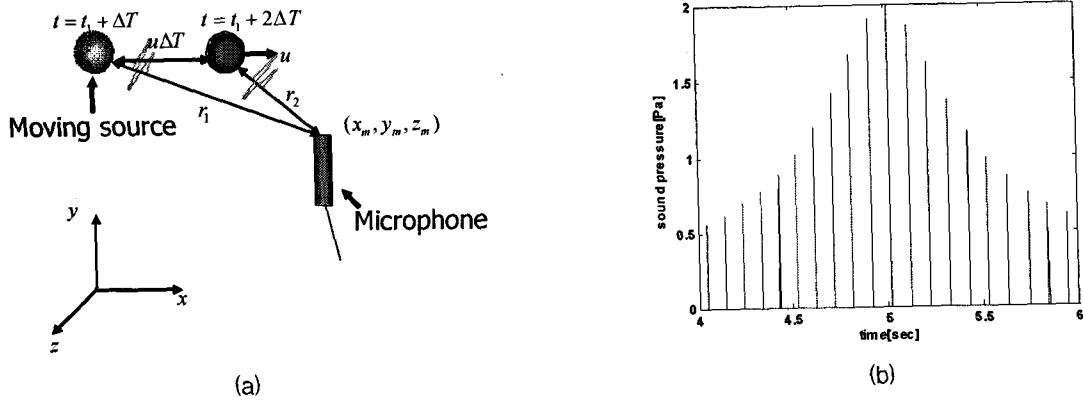


그림 1. (a)  $u$ 의 속도로 이동하는 충격 음원과 정지해 있는 마이크로폰, (b) 마이크로폰으로 측정한 주기적인 충격 신호.  $\Delta T$ 는 충격 주기를 뜻하며, 여기서는 0.1sec이다.

## 2.2 주행 중 발생하는 결합 신호의 특징

만약 음원이 정지해 있는 경우, 음원과 마이크로폰 사이의 상대 운동이 없기 때문에  $r_{mi}$ 는 항상 일정한 값을 갖게 된다. 따라서 측정되는 충격 신호 역시  $\Delta T$ 의 주기를 갖게 된다. 이 경우 충격 주기가 잡음에 묻히게 되더라도 최소 분산 방법을 이용한 범형성 방법[1]을 이용하여 결합의 위치를 찾을 수 있다. 그러나 본 연구의 경우 음원이 이동하는 경우이고, 이 때 마이크로폰으로 측정한 충격 신호의 간격은

$$t_1 + i\Delta T + \frac{r_{mi}}{c} - (t_1 + (i-1)\Delta T + \frac{r_{mi-1}}{c}) = \Delta T + \frac{r_{mi} - r_{mi-1}}{c} \quad (5)$$

이 되므로 음원의 위치에 따라 음원과 마이크로폰 사이의 거리가 매번 달라지게 되고, 따라서 측정된 충격신호는 매번 다른 간격을 가지게 된다. 따라서 이 경우 위에서 언급한 방법을 적용할 수 없다.

그러면 이러한 도플러 효과가 주파수 영역에서는 어떤 형태로 발생하는지 살펴보자. 우선 정지해 있는 소음원이 주기적으로 충격 신호를 발생시키는 경우, 주파수 영역에서 관찰한 결과는 그림 2(a)와 같다. 다시 말해서, 충격 주기  $\Delta T$ 의 역수에 해당하는 간격을 갖는 이산화된 스펙트럼의 형태로 나타난다[16]. 반면, 이동하는 주기적인 충격 소음의 경우 그림 2(b)와 같이 특정 주파수 폭을 갖는 연속 스펙트럼 형태로 나타나며, 이는 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$P(x_m, y_m, z_m; f) = F_0 H_0 \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_{mi}} e^{j2\pi f \left( t_1 + i\Delta T + \frac{r_{mi}}{c} \right)}. \quad (6)$$

여기서  $H_0(f)$ 은 푸리에 변환(Fourier transform)을 나타내며 주파수에 상관없이 일정한 값을 갖는다. 즉, 정지해 있는 주기적인 충격 신호는  $1/\Delta T$ 의 배수에 해당하는 주파수를 갖는 순음 성분들의 조합으로 표현된다. 이를 통해 이동하는 주기적인 충격 신호는 이동하는 순음 성분들의 조합으로 표현될 것임을 유추할 수 있다. 그림 3은 이러한 현상을 도식적으로 설명해 준다. 이를 이용하면 이동하는 주기적인 충격 신호를 각각의 이동하는 순음 성분으로 분리시킨 후 이동 프레임 음향 흘로그래프 방법을 적용하여 가시화할 수 있다. 이에 대한 내용을 3장에서 다루자.

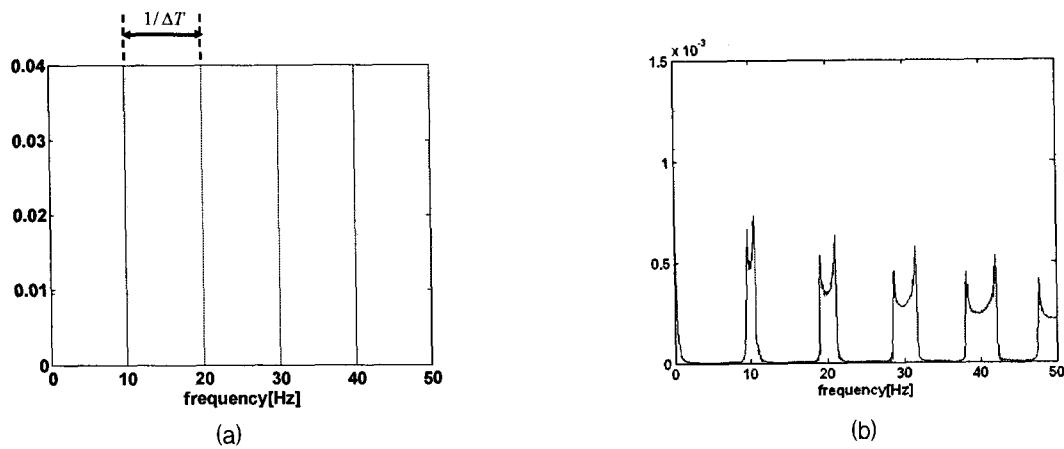


그림 2. 주기적인 충격 신호를 주파수 영역에서 관찰한 결과: (a) 소음원이 이동하지 않는 경우, (b) 소음원이 등속으로 이동하는 경우

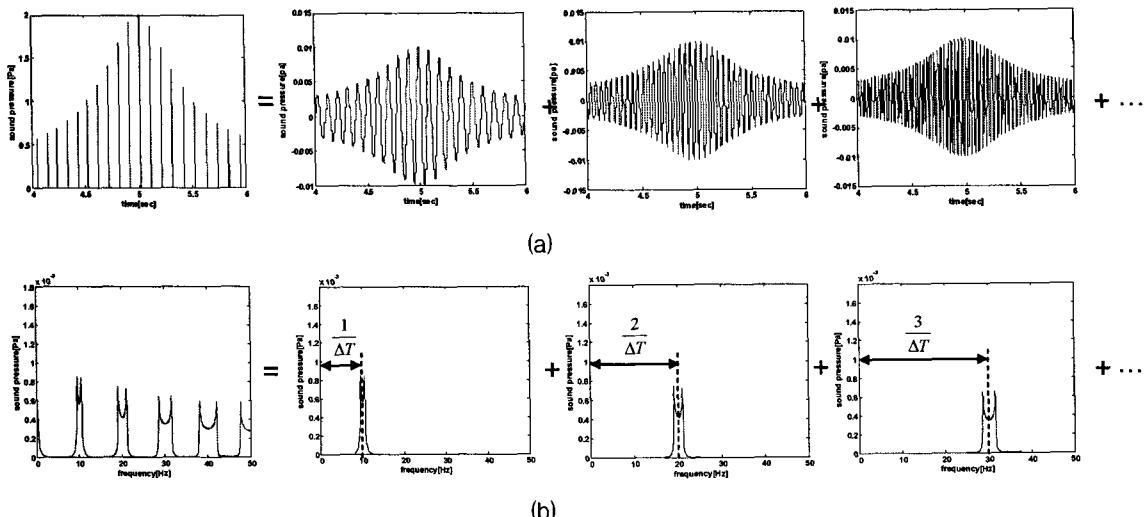


그림 3. 이동하는 순음 성분의 조합으로 표현한 이동하는 주기적인 충격 신호: (a) 시간 영역에서 관찰한 결과, (b) 주파수 영역에서 관찰한 결과

### 3. 결합 위치 추정 방법

#### 3.1. 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법의 기본 개념[9]

이동 프레임 음향 홀로그래피 방법은 이동하는 순음 또는 협대역 음원에서 방사한 음압을 정지해 있는 마이크로폰 어레이로 측정한 후, 도플러 효과를 제거하여 음장을 가시화하는 방법이다. 본 방법에 의하면 그림 4의 지면에 고정된 마이크로폰 어레이를 이용하여 양의  $x$  방향으로  $u$ 의 속도로 이동하는 음원면(source plane) 상에서의 음압을 가시화할 수 있다. 이를 위하여 본 방법은 2개의 좌표계를 설정한

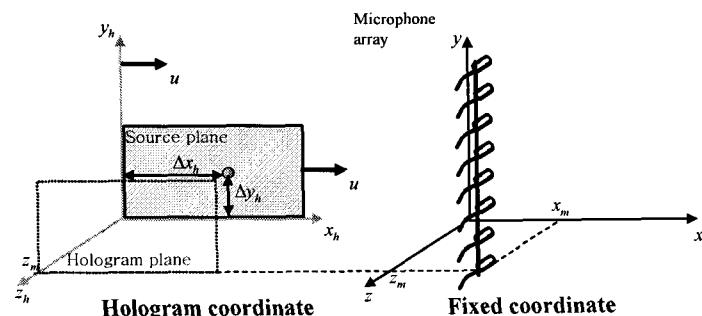


그림 4. 고정 좌표계, 홀로그램 좌표계, 음원면 및 홀로그램면에 대한 도식적인 표현

다: 하나는 마이크로폰과 함께 자면에 고정된 고정 좌표계(fixed coordinate)이며, 두 번째 좌표계는 음원면과 함께 이동하는 홀로그램 좌표계(hologram coordinate)이다(그림 4 참조). 우선  $P_{f_{h0}}(x_m, y_m, z_m; f)$ 를 순음 성분  $f_{h0}$ 를 갖는 이동하는 소음원으로부터 방사된 소리를  $(x_m, y_m, z_m)$ 의 위치에서 측정한 신호라고 하자. 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법에 의하면 고정 좌표계 상의 음압  $P_{f_{h0}}(x_m, y_m, z_m; f)$ 는 홀로그램 좌표계 상에서 관찰한 음압과 다음의 관계를 가진다:

$$P_{f_{h0}}(x_m, y_m, z_m; f) = \frac{\Delta f}{u} \hat{P}_h(k_x, y_m, z_m; f_{h0}). \quad (7)$$

여기서  $\Delta f$ 는 측정된 신호의 주파수 분해능(frequency resolution)을 뜻하며,  $\hat{P}_h(k_x, y_m, z_m; f_{h0})$ 는 홀로그램면에서 관찰한 음압의  $x$  방향 공간 푸리에 변환( $x$  directional spatial Fourier transform)을 뜻한다.  $k_x$ 는  $x$  방향 파수 성분( $x$  directional wave number)을 뜻하며, 주파수와 다음의 관계를 갖는다:

$$k_x = \frac{2\pi(f - f_{h0})}{u}. \quad (8)$$

따라서, 식 (7)을 공간 푸리에 역변환하면 홀로그램 좌표 상에서의 음장  $P_h(x_h, y, z_s; f_{h0})$ 를 예측할 수가 있다:

$$P_h(x_h, y_m, z_m; f_{h0}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}_h(k_x, y_m, z_m; f_{h0}) e^{jk_x x_h} dk_x. \quad (9)$$

식 (9)을 통해서 홀로그램을 얻으면, 음원면에서의 음장  $P_h(x_h, y_m, 0; f_{h0})$ 을 예측할 수 있고, 음원이 있는 위치에서 음압이 가장 크기 때문에 음원의 위치를 알아낼 수 있다.

### 3.2. 결합 신호의 홀로그램 취득 방법

그러면 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 결합 신호를 가시화하는 방법을 구체적으로 살펴 보자. 앞서 언급했듯이 이동하는 주기적인 충격 신호는 이동하는 순음 성분의 조합으로 표현할 수 있기 때문에  $P(x_m, y_m, z_m; f)$ 는 다음과 같이 순음 성분을 갖는 이동하는 음원에 의해 방사된 음장의 조합으로 쓸 수 있다:

$$P(x_m, y_m, z_m; f) = \sum_{i=1}^{\infty} P_{f_{hi}}(x_m, y_m, z_m; f). \quad (10)$$

식 (10)에서 각각의 순음 성분에 의한 음장  $P_{f_{hi}}(x_m, y_m, z_m; f)$ 을 분리해내는 대역 통과 여파기(Band pass filter)를 이용하면 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법을 통해 각 순음 성분에 대해 음장을 가시화 할 수 있다.

그러면 대역 통과 여파기를 어떻게 설계할 지 생각해 보자. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 이동하는 주기적인 충격 신호는 주파수 영역에서 중심 주파수  $f_{hi} = \frac{i}{\Delta T}$ 를 갖는 협대역 신호들의 조합으로 표현된다. 각각의 협대역 신호는 순음 성분  $f_{hi} = \frac{i}{\Delta T}$ 를 갖는 신호가 도플러 효과에 의해 변조된 결과를 나타내며, 이 스펙트럼은 각각  $(1 - 2M)f_{hi}$ 와  $(1 + 2M)f_{hi}$  사이의 값을 갖는다[9]. 여기서  $M$ 은 마하 수를 나타낸다. 이를 이용하면 각 밴드를 통과시키는 대역 통과 여파기를 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$B_i(f) = \begin{cases} 1 & (1 - 2M)\frac{i}{\Delta T} < f < (1 + 2M)\frac{i}{\Delta T} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

이를 이용하면, 부대역 겹침 현상[9]이 발생하지 않는 다음의 주파수 범위 내에서 결합에 의한 음장을 오차 없이 가시화할 수 있다:

$$f_i < \frac{1 - 2M}{4M} \frac{1}{\Delta T} \quad (12)$$

식 (11)을 식 (10)에 적용하면

$$B_i(f)P(x_m, y_m, z_m; f) = P_{f_{hi}}(x_m, y_m, z_m; f). \quad (13)$$

의 결과를 얻을 수 있고, 따라서 중심주파수  $f_{hi}$ 에 대한 홀로그램은 식 (7), (9)를 통해

$$P_h(x_h, y_m, z_m; f_{hi}) = \frac{u}{\Delta f} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_i(f)P(x_m, y_m, z_m; f)e^{jk_x x_h} dk_x \quad (14)$$

와 같이 쓸 수 있다. 일단 홀로그램을 얻으면, 후방 예측을 통해 음원면에서 음장을 가시화할 수 있고, 따라서 결합의 위치를 찾을 수 있다.

### 3.3. 홀로그램 평균을 통한 잡음의 영향 제거 방법

3.2절에서 이동하는 주기적인 충격 신호를 대역 통과 여파기를 이용하여 가시화하는 방법에 대해 다루었다. 그러나 식 (14)까지의 과정은 잡음의 영향을 고려하지 않았다. 실제로 잡음은 항상 존재하며, 신호 대 잡음비가 낮을 경우 잡음에 의해 결합의 위치를 찾지 못할 위험이 있다. 따라서 잡음이 있는 경우 음원의 위치를 추정하는 방법이 필요하다.

우선 잡음이 섞인 주기적인 충격 신호는 시간 영역에서

$$p_n(x_m, y_m, z_m; t) = F_0 h_0(t)^* \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_{mi}} \delta(t - (t_1 + i\Delta T + \frac{1}{c} r_{mi})) + n(x_m, y_m, z_m; t), \quad (15)$$

주파수 영역에서

$$P_n(x_m, y_m, z_m; f) = F_0 H_0 \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_{mi}} e^{j2\pi f \left( t_1 + i\Delta T + \frac{r_{mi}}{c} \right)} + N(x_m, y_m, z_m; f) \quad (16)$$

과 같이 표현된다. 여기서  $n(x_m, y_m, z_m; t)$ 은  $(x_m, y_m, z_m)$ 의 위치에서 시간  $t$ 에 측정된 잡음을 뜻하며,  $N(x_m, y_m, z_m; f)$ 은  $n(x_m, y_m, z_m; t)$ 의 푸리에 변환을 뜻한다. 식 (16)을 3.2절의 절차에 따라 유도하면

$$\frac{u}{\Delta f} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_i(f)P(x_m, y_m, z_m; f)e^{jk_x x_h} dk_x = P_h(x_h, y_m, z_m; f_{hi}) + N(x_h, y_m, z_m; f_{hi}) \quad (17)$$

과 같이 쓸 수 있다.  $N(x_h, y_m, z_m; f_{hi})$ 는 다음과 같이 정의된다:

$$N(x_h, y_m, z_m; f_{hi}) = \frac{u}{\Delta f} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_i(f)N(x_m, y_m, z_m; f)e^{jk_x x_h} dk_x. \quad (18)$$

식 (17)의 우변의 첫 번째 항은 결합 신호의 홀로그램을 뜻하며, 두 번째 항이 잡음으로 인한 오차를 뜻한다. 이러한 오차를 줄이기 위해 결합 신호와 잡음의 신호 특성에 대해 생각해 보자. 결합 신호는 중심 주파수에 상관없이 결합 위치에서 최대값을 가지는 반면, 잡음 신호는 공간상에 랜덤하게 분포하기 때문에 평균을 취해서 줄일 수 있다. 따라서 식 (17)을 음원면까지 후방 예측한 후,  $N_a$ 개의 주파수에 대해 평균을 취한 결과를  $P_{N_a}(x_h, y_m, 0)$ 이라고 정의하면

$$P_{N_a}(x_h, y_m, 0) = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} [P_h(x_h, y_m, 0; f_{hi}) + N(x_h, y_m, 0; f_{hi})] \quad (19)$$

와 같이 쓸 수 있다.  $N_a$ 의 값이 커질수록 잡음의 평균 결과는 0으로 수렴하여 식 (19)는

$$P_{N_a}(x_h, y_m, 0) \approx \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} P_h(x_h, y_m, 0; f_{hi}) \quad \text{for large } N_a \quad (20)$$

과 같이 쓸 수 있다. 결합 신호가 단극 음원의 형태를 띤다고 가정하였고, 식 (20)의 우변은 음원과 관측점 사이의 상대 운동이 없는 홀로그램 좌표계에서 관찰한 음압이며 음원의 형태는 단극음원으로 가정하였으므로

$$P_{N_a}(x_h, y_m, 0) \approx \frac{1}{N_a} \frac{A_0}{R} \sum_{i=1}^{N_a} e^{j2\pi f_{hi}(t_i + R/c)} \quad (21)$$

과 같이 쓸 수 있다. 여기서  $A_0$ 은 단극 음원의 크기,  $R$ 은 음원과 홀로그램 좌표의  $(x_h, y_m, 0)$  지점 사이의 거리를 나타낸다:

$$R = \sqrt{(x_h - \Delta x_h)^2 + (y_m - \Delta y_h)^2}. \quad (22)$$

여기서  $\Delta x_h, \Delta y_h$ 는 그림 4의 홀로그램 좌표계에서 음원의  $x, y$  방향 위치를 나타낸다. 식 (21)을 통해 홀로그램 평균 결과  $x_h = \Delta x_h, y_m = \Delta y_h$ 에서 최대가 된다는 사실을 알 수 있다.

#### 4. 축소모형 실험을 통한 제안한 방법의 검증

3장에서 제안한 방법을 검증하기 위해 축소 모형 실험을 수행하였다. 그림 5(a)는 축소모형 장치의 사진을 보여준다. 길이 3m, 폭 0.5m의 레일 위를 모터로 작동되는 모형 차량이 정속으로 이동하면서 스피커를 통해 충격 소음 및 잡음을 발생시킨다. 그림 5(b)는 실험에 사용한 모형 차량의 사진을 보여준다. 모형 차량에는 2개의 스피커가 설치되어 있으며, 각각 결합 신호 및 측정 잡음을 발생시킨다.

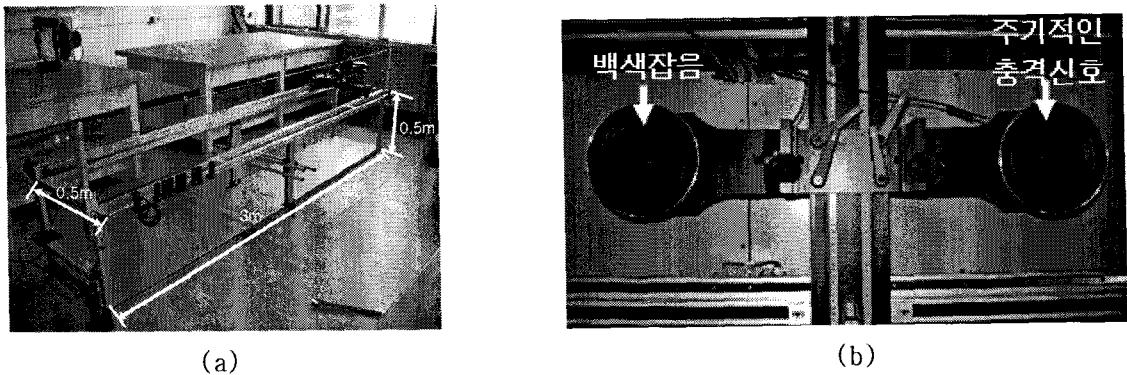


그림 5. 축소모형 사진, (a) 전체 사진, (b) 모형 차량의 상면 사진 및 스피커에 따른 발생 신호의 종류.

평균을 취할 수 있는 홀로그램의 개수는 이동 속도에 의해 결정된다. 본 연구에서는 70번의 평균 횟수면 충분하다고 생각하였으며, 70개의 홀로그램을 얻기 위해 차량의 이동 속도는 35cm/sec로 정하였다. 관심 하한 주파수는 파수 영역에서의 분해능을 확보할 수 있는 파장에 의해 결정되며, 본 연구의 경우 300Hz에 해당하는 파장이면 방사원(radiation circle) 안에 5개 이상의 데이터를 취득할 수 있으므로 충분하다고 생각하였다. 그리고 충격 신호의 주기는 0.1sec로 정하였으며, 이 경우 70개의 홀로그램을 얻기 위한 주파수 영역은 300Hz ~ 1000Hz이며, 이는 부대역 겹침 현상이 발생하지 않는 주파수 영역이다. 따라서 본 실험에서는 300Hz ~ 1000Hz 사이의 홀로그램을 평균하였다.

이동하는 충격소음을 측정하기 위한 마이크로폰 어레이 지그는 레일 하부 프레임에 설치하였다. 사용한 어레이 마이크로폰은 B&K type 4935 (5.5mV/Pa, upper limit 20kHz)이며, 총 18개를 사용하였다. 어레이 지그는 지면에 의한 반사파를 분리하기 위해 수직 방향으로 10cm의 간격을 두고 2개를 설치하였다. 그림 6은 두 번째 어레이의 4번째 마이크로폰에서 측정한 시간 신호를 보여 준다.

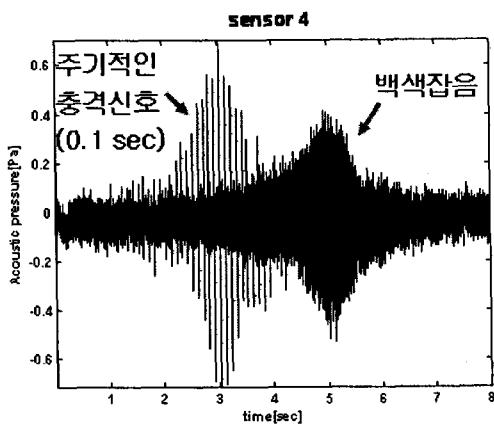


그림 6. 4번째 마이크로폰에서 측정한 신호

그림 6을 보면 전 시간 구간에 걸쳐 도플러 효과로 인해 포락이 형성됨을 알 수 있다. 모형 차량이 오른쪽으로 이동하고, 초기 상태에서 마이크로폰 어레이는 모형 차량의 오른쪽에 있기 때문에, 충격 신호가 먼저 측정되고, 그 다음으로 백색 잡음이 측정된다.

그림 7은 측정한 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)한 결과를 보여준다.

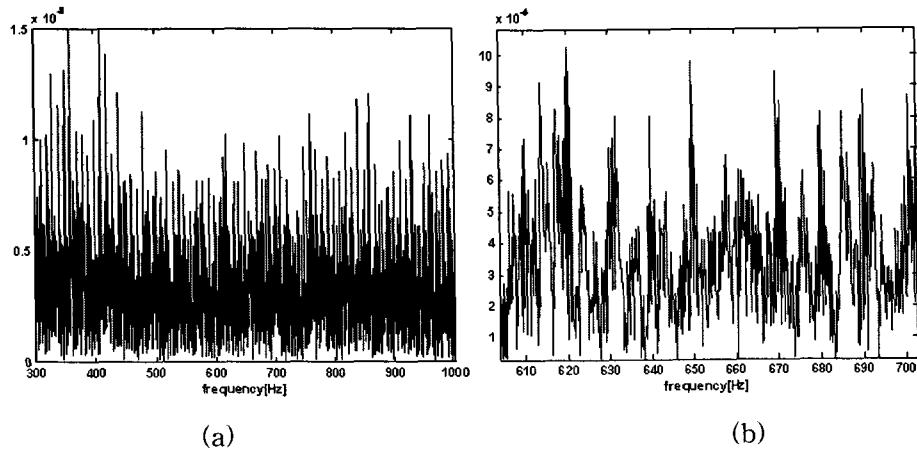


그림 7. 4번째 마이크로폰에서 측정한 신호의 푸리에 변환: (a)300–1000Hz, (b)400–500Hz.

충격 주기인 0.1sec의 역수 10Hz 간격으로 피크를 가지는 것을 알 수 있으나, 이를 확대해서 관찰하면 잡음의 영향을 많이 받는다는 사실을 알 수 있다. 그림 8은 몇 개의 주파수에 대해 음장을 가시화한 결과를 모형 차량 사진과 겹쳐서 보여준다.

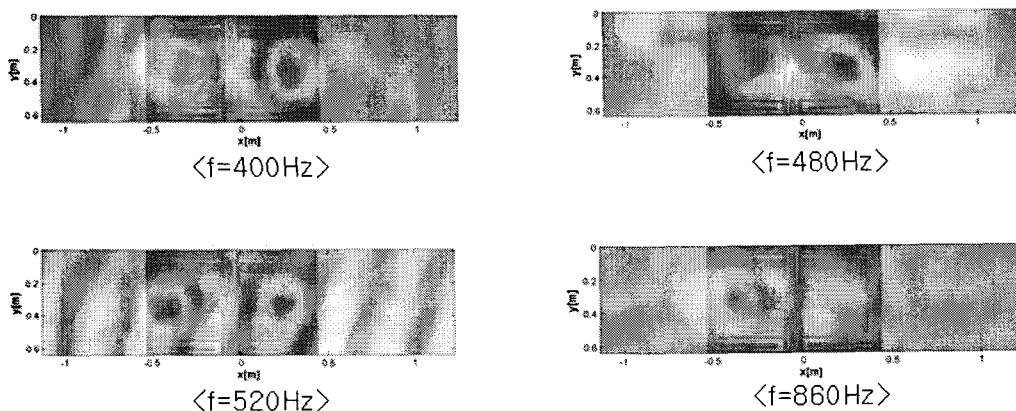


그림 8. 음장 예측 결과:  $f = 400\text{Hz}, 480\text{Hz}, 520\text{Hz}, 860\text{Hz}$

그림을 살펴보면 충격 소음원(오른쪽 스피커) 뿐만 아니라 백색 잡음(왼쪽 스피커)에 의한 신호 역시 가시화되었음을 볼 수 있다. 이러한 부분은 결합 신호의 위치를 찾는 데 오차로 작용하게 되고, 따라서 결합 탐지 성능을 저하시키는 요인이 된다. 그림 9는 300Hz - 1000Hz 사이의 홀로그램을 평균한 결과를 보여주고 있다.

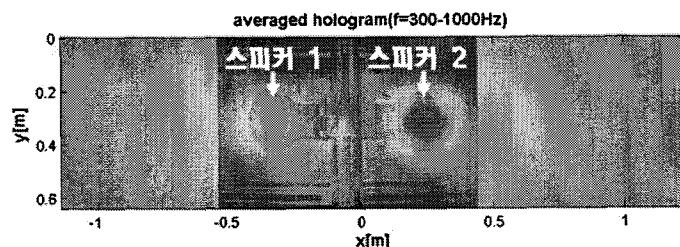


그림 9. 300Hz - 1000Hz 사이의 홀로그램을 평균한 결과

그림 9를 관찰해 보면 그림 8의 각 주파수별 홀로그램을 관찰한 것에 비해 충격 소음원의 위치(스피커 2)를 잘 알 수 있다. 스피커 1에서도 음원의 위치가 어느 정도 탐지되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 백색 잡음이 모든 주파수 성분을 가진 신호이기 때문이다. 따라서 충격 주기의 역수에 해당하는 주파수 성분이 가시화된 결과이다. 그러나 이러한 주파수 성분에 해당하는 신호는 백색 잡음이 가지는 신호에 대해 차지하는 비중이 작기 때문에 주기적인 충격 신호에 비해 작은 크기를 가지게 된다. 따라서 홀로그램 평균을 통하여 잡음의 영향을 제거하여 결합 위치 탐지 성능을 높일 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 차량 하부의 결합이 주기적인 충격 소음을 발생시킨다는 점에 감안하여 마이크로폰 어레이를 이용한 충격 위치를 추정하는 방법에 대해 다루었다. 차량이 이동하면서 소음을 발생하기 때문에 이동하는 소음원을 가시화하는 방법인 이동 프레임 음향 홀로그래피를 이용하여 적용 가능성을 검증하였다. 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용하기 위하여 주기적인 충격 소음을 여러 개의 이산화된 주파수 성분의 조합으로 표현하여 이동 프레임 음향 홀로그래피의 적용이 가능함을 보였다. 그리고 잡음의 영향을 제거하는 방법으로 여러 개의 주파수 성분에 대해 홀로그램을 구한 뒤, 이들을 평균하는 방법을 제안하였다. 이는 주기적인 충격 소음이 여러 개의 이산화된 주파수 성분을 가진다는 사실에 근거하였으며, 잡음을 평균을 취하면 0으로 수렴한다는 사실을 이용한 것이다. 이러한 과정을 수학적으로 확인하였으며, 축소 모형 실험을 통해 백색 잡음이 있는 경우 결합의 위치를 찾아낼 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원에서 주관하는 철도안전기술개발사업의 일환으로 진행되었으며, 한국철도기술연구원 및 교육인적자원부의 BK21 사업의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Y.-C.Chi and Y.-H.Kim, "Impulsive noise source localization in noisy environment using beamforming method," INTER-NOISE 2004, Prague, Czech Republic, August 22-25, 2004, 230, AN9.
2. T.S. Graham," Long-wavelength acoustic holography," 77<sup>th</sup> acoustical society of America, 46(1), 116, 1969.
3. E. G. Williams, J. D. Maynard, and E. Skudrzyk, "Sound source reconstructions using a microphone array," J. Acoust. Soc. Am. 68(1), 340-344, 1980.

4. Y.-H. Kim, "Can we hear the shape of a noise source?," ICA 2004, Kyoto International Conference Hall, Japan, 4-9 April, 2004, Fr1.X1.
5. Thomas D. Rossing (Ed.), Springer Handbook of Acoustics (Springer New York, 2007), chapter 26.
6. M. B. S. Magalhães, and R. A. Tenenbaum, "Sound sources reconstruction techniques: a review of their evolution and new trends," *Acta Acustica united with Acustica*, 90(2), 199-220, 2004.
7. S.U. Pillai, *Array Signal Processing* (Springer-Verlag, New York Inc., 1989), chapter 2.
8. Michael Brandstein and Darren Ward(Eds.), *Microphone arrays-Signal Processing Techniques and Applications* (Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001), chapter 1.
9. H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," *J. Acoust. Soc. Am.* 103(4), 1734-1741, 1998.
10. 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.
11. 김시문, 권휴상, 박순홍, 김양한, "선형 마이크로폰 어레이를 이용한 이동차량의 음장 가시화," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 291-297, 부산수산대학교, 1996.
12. 박순홍, 김양한, "지면에 고정된 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 pass-by 소음의 가시화," 한국소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 1479-1486, 2000.
13. 전종훈, 김양한, "마이크로폰 어레이를 이용하여 차량 하부에서 발생한 결함의 위치를 찾아내는 방법," 2006 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 한국해양대학교, 11월 9일~10일.
14. Y.-H. Kim, B. D. Lim, and W. S. Cheoung, "Fault detection in a ball bearing system using a moving window," *Mechanical Systems & Signal Processing*, 5(6), 461-473, 1991.
15. P. D. McFadden and M. M. Toozy, "Application of synchronous averaging to vibration monitoring of rolling element bearings," *Mechanical Systems & Signal Processing*, 14(6), 891-906, 2000.
16. A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, and J. R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed.(Prentice Hall, 1999).