

<논 문>

# 음향 홀로그래피를 이용한 다수의 완전 비상관 소음원들의 가시화

Visualization of Multiple Incoherent Sources Using Nearfield Acoustic Holography

남 경 옥\* · 김 양 한\*\*

Kyoung-Uk Nam and Yang-Hann Kim

(1999년 3월 19일 접수 ; 1999년 9월 11일 심사완료)

**Key Words** : Acoustic Holography(음향 홀로그래피), Incoherence(완전 비상관), Vector Notation (벡터 표기), Partial Field(부분 음장)

## ABSTRACT

The objective of this paper is to obtain the contribution of each source to the spectrum of pressure, when there are multiple incoherent sources in near-field acoustic holography. For this objective, we have to obtain signals very coherent to the input signals of the sources. To obtain the very coherent signals, many people have measured pressure signals in the vicinity of the sources. However, it is sometimes difficult to locate microphones near to the sources so that the signals are very coherent to the input signals. This paper proposed a method to obtain the very coherent signals by near-field acoustic holography. Therefore, the proposed method does not require the measurement of pressure near to each source. Simulation results for two incoherent monopole sources showed the possibility of the proposed method.

## 1. 서 론

같은 주파수 영역에 다수의 완전 비상관(incoherent) 소음원들이 존재하는 경우, 음향 홀로그래피<sup>(1)</sup>는 크게 두 가지 목적을 위하여 사용된다. 하나는 원하는 위치에서 음압이나 속도의 스펙트럼(spectrum)을 구하는 것이다. 다른 하나는 그 스펙트럼에서 각 소음원의 기여량을 구하는 것이다. 각 소음원의 기여량은 어느 소음원을 먼저 제어할 것인지를 결정하는데 유용한 정보가 된다. 그러나, 각 소음원의 기여량을 구하기 위해서는 세가지 문제가 해결 되어야 한다.

첫번째는 소음원 수의 결정이다. 다중 기여도 함수(multiple coherence function)<sup>(2)</sup>나 측정 신호의 스펙트럼들로 구성된 행렬의 특이치(singular value)<sup>(3)</sup>는 이 문제 해결을 위해 사용될 수 있다.

두번째 문제는 소음원의 입력 신호와 상관 관계가 아주 큰 신호를 얻는 것이다. 이 논문이 다루는 내용이 이것에 해당된다.

세 번째 문제는 두 번째 문제에서 얻은 신호들이 입력들과 달리 완전 비상관이 아닐 때, 완전 비상관 신호로 만드는 것이다. 이를 위해 부분 기여도 함수 방법(partial coherence method)<sup>(2,4,5)</sup>이나, 가상 기여도 함수 방법(virtual coherence method)<sup>(5-7)</sup>을 사용할 수 있다.

이 논문에서 다루는 두 번째 문제를 해결하는 가장 좋은 방법은 각 소음원의 입력 신호를 직접 측정

\* 정회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

하는 것이다. 그러나, 많은 경우에 입력 신호를 직접 측정하는 것은 현실적인 제약이 많다. 따라서 소음원 가까이서 음압 신호를 측정하여 입력 신호와 상관 관계가 매우 높은 신호를 측정하려는 시도가 보편적이었다. 음향 홀로그래피의 경우 단계적 측정을 위해 사용하는 기준 마이크로폰들을 소음원 가까이서 측정하는 이유가 여기에 있다<sup>(4,5,7)</sup>. 그러나, 각 입력 신호와 매우 상관 있는 신호를 얻을 만큼, 마이크로폰을 소음원 가까이 위치 시키는 것 또한 용이한 것은 아니다.

이 논문은 신호 처리에 의해 각 입력 신호와 매우 상관 있는 신호를 얻는 방법을 제안한다. 신호처리에 의해 얻기 때문에 제안하는 방법은 기준 마이크로폰을 소음원 가까이에 둘 필요가 없는 장점이 있다.

제안하는 방법의 체계적이고, 정확한 설명을 위해서는 우선 다입력 문제에 대한 정확한 이해가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 새로이 벡터 표기를 사용하여 각 소음원의 기여량을 구하는 문제를 설명한다.

본 논문은 설명의 편의를 위해 두 개의 소음원이 존재하는 경우만을 다룬다. 일반적인 경우는 이 결과의 단순한 확장으로 볼 수 있다.

## 2. 벡터 표기와 문제의 정식화

### 2.1 벡터 표기

두 개의 신호  $u_1(t)$  와  $u_2(t)$  를 생각하자. 이 신호들은 Fig. 1과 같이 0초부터 T초까지 동시에 측정된 N개의 시간 기록들을 갖는다. 각 시간 기록의 유한한 푸리에 변환(finite Fourier transform)<sup>(2)</sup>을  $u_1^{(1)}(f), \dots, u_1^{(N)}(f)$  와  $u_2^{(1)}(f), \dots, u_2^{(N)}(f)$  이라고 표시하자.

만약 T와 N이 충분히 크다면, 특정 주파수에서 두 신호의 스펙트럼들은

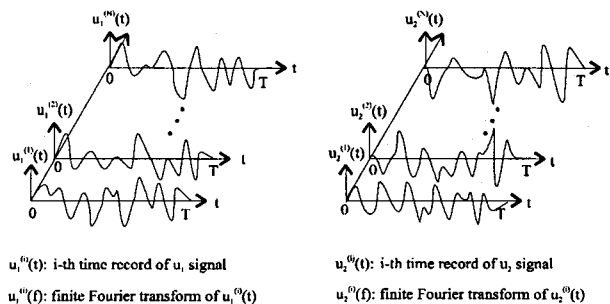


Fig. 1 Time records of  $u_1(t)$  and  $u_2(t)$

$$s_{u_1 u_1} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N u_1^{(i)*} u_1^{(i)}, \quad s_{u_2 u_2} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N u_2^{(i)*} u_2^{(i)},$$

$$s_{u_1 u_2} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N u_1^{(i)*} u_2^{(i)} \quad (1)$$

와 같이 구할 수 있다<sup>(2)</sup>. 위 첨자 \*는 공액 복소수 (complex conjugate)를 나타낸다. 위 식에서 주파수를 나타내는  $f$ 는 생략되었다.

이제  $u_1^{(i)}$ 들과  $u_2^{(i)}$ 들로 구성된

$$\vec{u}_1 = \frac{1}{\sqrt{NT}} [u_1^{(1)} \dots u_1^{(N)}]^T$$

$$\vec{u}_2 = \frac{1}{\sqrt{NT}} [u_2^{(1)} \dots u_2^{(N)}]^T \quad (2)$$

와 같은 행벡터(column vector)들을 정의하자. 위 첨자 T는 전치 연산(transpose)을 나타낸다.

이 벡터 표기를 사용하면, 식 (1)의 스펙트럼들은

$$s_{u_1 u_1} = \vec{u}_1^H \vec{u}_1, \quad s_{u_2 u_2} = \vec{u}_2^H \vec{u}_2, \quad s_{u_1 u_2} = \vec{u}_1^H \vec{u}_2 \quad (3)$$

와 같이 각 벡터간의 내적(dot product)으로 구할 수 있다. 위 첨자 H는 공액 전치 연산(conjugate transpose)을 나타낸다.

두 신호의 상관 정도를 나타내는 기여도 함수(coherence)는

$$\gamma_{u_1 u_2}^2 = \frac{|s_{u_1 u_2}|^2}{s_{u_1 u_1} s_{u_2 u_2}} = \frac{|\vec{u}_1^H \vec{u}_2|^2}{(\vec{u}_1^H \vec{u}_1)(\vec{u}_2^H \vec{u}_2)} \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 각 벡터의 모든 항이 실수이고, 두 벡터가 이루는 각이  $\theta$  라면, 위의 기여도 함수는  $\cos^2 \theta$ 가 된다. 따라서, 기여도 함수는 한 벡터의 방향이 다른 벡터의 방향에 얼마나 근접하는가에 대한 척도라고 할 수 있다. 기여도 함수가 1이면, 두 벡터는 선형 종속 관계에 있고, 0이면 서로 직교한다.

### 2.2 부분 음장

Fig. 2와 같이 두 개의 소음원이 존재하는 경우, 평면 음향 홀로그래피를 생각하자.  $q_1$  과  $q_2$  는 특정 주파수에서 두 소음원의 입력 신호를 나타낸다.  $p_H(x, y)$  와  $p_Z(x', y')$  은 홀로그램면과 예측면의 음압을 나타낸다.  $p_H(x, y)$  와  $q_i$  사이의 특성 함수를 각각  $h_{q_i p_H}(x, y)$  라고 하면,  $p_H(x, y)$  와  $p_Z(x', y')$  는

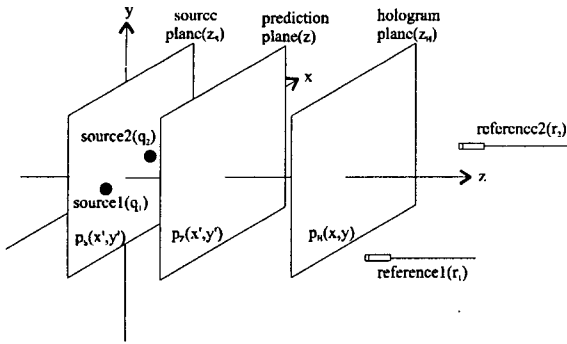


Fig. 2 Planar acoustic holography

$$p_H(x, y) = h_{q_1 p_H}(x, y)q_1 + h_{q_2 p_H}(x, y)q_2, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p_z(x', y') &= L_{p_H \rightarrow p_z}[p_H(x, y)] \\ &= h_{q_1 p_z}(x', y')q_1 + h_{q_2 p_z}(x', y')q_2. \end{aligned} \quad (6)$$

where  $h_{q_i p_z}(x', y') = L_{p_H \rightarrow p_z}[h_{q_i p_H}(x, y)]$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $L_{p_H \rightarrow p_z}$ 는 홀로그램면의 음압을 예측면으로 전파 시키는  $(x, y)$ 에 대한 선형 변환을 나타내고, 홀로그래피의 이론<sup>(1)</sup>에 의해 구할 수 있다.

$q_1, q_2, p_H(x, y), p_z(x', y')$ 가 정상(stationary) 신호라면, 앞절의  $\vec{u}_1, \vec{u}_2$ 처럼  $\vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{p}_H(x, y), \vec{p}_z(x', y')$  벡터들을 정의할 수 있다.

측정 시간  $T$ 가 충분히 길다면, 식 (5)와 (6)은 정의된 벡터의 모든 항에 대해서 성립하므로 벡터에 대해서도

$$\vec{p}_H(x, y) = h_{q_1 p_H}(x, y)\vec{q}_1 + h_{q_2 p_H}(x, y)\vec{q}_2, \quad (7)$$

$$\vec{p}_z(x', y') = h_{q_1 p_z}(x', y')\vec{q}_1 + h_{q_2 p_z}(x', y')\vec{q}_2 \quad (8)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (7)과 (8)은 홀로그램면과 예측면의 모든 음압 벡터들은  $\vec{q}_1$ 과  $\vec{q}_2$ 의 선형 조합으로 표현되어짐을 보여준다.

이제 두 개의 소음원이 서로 다른 원인에 의해 구동되어  $q_1$ 과  $q_2$ 가 완전 비상관인 경우를 생각하자. 즉,  $\vec{q}_1$ 과  $\vec{q}_2$ 가 서로 직교한다고 가정한다. 이 경우 홀로그램면과 예측면의 음압의 자기 스펙트럼은 식 (7)과 (8)의 내적에 의하여

$$s_{p_H(x, y)p_H(x, y)} = |h_{q_1 p_H}(x, y)|^2 s_{q_1 q_1} + |h_{q_2 p_H}(x, y)|^2 s_{q_2 q_2} \quad (9)$$

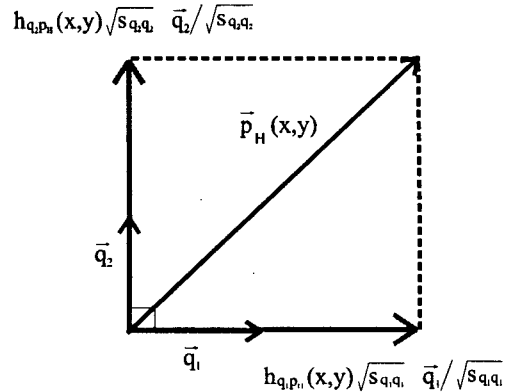


Fig. 3 Expression of pressure on a hologram plane by incoherent inputs in vector space

$$\begin{aligned} s_{p_z(x', y')p_z(x', y')} &= |h_{q_1 p_z}(x', y')|^2 s_{q_1 q_1} + |h_{q_2 p_z}(x', y')|^2 s_{q_2 q_2} \\ &= |L_{p_H \rightarrow p_z}[h_{q_1 p_H}(x, y)\sqrt{s_{q_1 q_1}}]|^2 + |L_{p_H \rightarrow p_z}[h_{q_2 p_H}(x, y)\sqrt{s_{q_2 q_2}}]|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위 식들에서 첫번째 항은 첫번째 소음원의 기여량을, 두 번째 항은 두 번째 소음원의 기여량을 나타낸다.

위 두식에서 각 소음원의 기여량은 부분 음장(partial field)이라고 불리는  $h_{q_1 p_H}(x, y)\sqrt{s_{q_1 q_1}}$ 과  $h_{q_2 p_H}(x, y)\sqrt{s_{q_2 q_2}}$ 에 의해 결정됨을 볼 수 있다. 이 부분 음장들은  $\vec{q}_1$ 과  $\vec{q}_2$  방향으로의 단위 벡터인  $\vec{q}_1/\sqrt{s_{q_1 q_1}}, \vec{q}_2/\sqrt{s_{q_2 q_2}}$ 에 대한  $\vec{p}_H(x, y)$ 의 사영(projection)을 나타낸다(Fig. 3).

만약 홀로그램면의 음압과 두 입력을 동시에 측정한다면,  $h_{q_i p_H}(x, y), \sqrt{s_{q_i q_i}}$ 를 구할 수 있어<sup>(2)</sup> 부분 음장을 구할 수 있고, 스펙트럼에서 각 소음원의 기여량도 구할 수 있다. 그러나, 많은 경우 출력만을 측정할 수 있기 때문에, 보통은 기준 신호를 대신 사용하게 된다.

### 2.3 문제의 정식화

두 개의 기준 신호  $r_1, r_2$ 를 측정하는 경우, 2.1절과 마찬가지로  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  벡터들을 정의할 수 있다. 이 경우 홀로그램면에서의 음압 벡터  $\vec{p}_H(x, y)$ 와  $\vec{p}_z(x', y')$ 는

$$\vec{p}_H(x, y) = h_{r_1 p_H}(x, y)\vec{r}_1 + h_{r_2 p_H}(x, y)\vec{r}_2, \quad (11)$$

$$\vec{p}_z(x', y') = h_{r_1 p_z}(x', y')\vec{r}_1 + h_{r_2 p_z}(x', y')\vec{r}_2, \quad (12)$$

where  $h_{r_{p_z}}(x', y') = L_{p_H \rightarrow p_z}[h_{r_{p_H}}(x, y)]$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서,  $h_{r_{p_H}}(x, y)$ 는 측정에 의하여 구할 수 있다<sup>(2)</sup>. 식 (11)과 (12)는 음압 벡터들을  $\vec{q}_1, \vec{q}_2$  대신에  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ 를 기저(basis)로 하여 표현한 것이라고 할 수 있다(Fig. 4).

식 (11)과 (12)의 내적에 의하여 홀로그램면과 예측면에서 음압의 자기 스펙트럼을 구할 수 있다. 그러나, 그 표현에서 각 소음원의 기여량을 직접적으로 구할 수는 없다. 이는  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ 에  $\vec{q}_1, \vec{q}_2$ 의 영향이 다 나타나,  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  방향이  $\vec{q}_1, \vec{q}_2$ 의 방향과 다르기 때문이다.

이제 새로운 기저  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 를

$$\vec{v}_1 = h_{r_{v_1}}\vec{r}_1 + h_{r_{v_2}}\vec{r}_2, \quad \vec{v}_2 = h_{r_{v_1}}\vec{r}_1 + h_{r_{v_2}}\vec{r}_2 \quad (13)$$

와 같이 정의하자.  $\vec{p}_H(x, y)$ 는 이  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 들을 사용하여

$$\vec{p}_H(x, y) = h_{v_{1p_H}}(x, y)\vec{v}_1 + h_{v_{2p_H}}(x, y)\vec{v}_2, \quad (14)$$

where 
$$\begin{bmatrix} h_{v_{1p_H}}(x, y) \\ h_{v_{2p_H}}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{r_{v_1}} & h_{r_{v_2}} \\ h_{r_{v_1}} & h_{r_{v_2}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} h_{r_{p_H}}(x, y) \\ h_{r_{p_H}}(x, y) \end{bmatrix}$$

와 같이 쓸 수 있다. 만약  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 가 각각  $\vec{q}_1, \vec{q}_2$ 와 선형 종속 관계에 있다면, 앞서 정의한 부분 음장들은  $h_{v_{1p_H}}(x, y)\sqrt{s_{v_1v_1}}$ 과  $h_{v_{2p_H}}(x, y)\sqrt{s_{v_2v_2}}$ 에 대해 절대 위상에서만 차이를 보이게 된다. 이 절대 위상에서의 차이는 각 소음원의 기여량을 구하는데 영향을 미치지 않는다. 따라서, 각 소음원의 기여량을 구하기 위해서는  $\vec{q}_1, \vec{q}_2$ 와 선형 종속 관계인  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 를 구해야 한다. 다른 말로 입력 신호에 매우 상관 있는 신호를 구해야 한다.

지금까지의 연구들<sup>(4,5,7)</sup>은 기준 신호 벡터  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ 를 바로  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 로 사용하고, 그 신호들을 완전 비상관으로 만들기 위해서 부분 기여도 함수 방법이나 특이치 분리 방법을 사용하였다. 따라서, 기준 신호들이 각 소음원에 매우 상관 있기 위해서, 기준 신호가 소음원 가까이서 측정되어야만 했다.

다음 장은 입력 신호와 매우 상관 있는  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 를 구하기 위해 홀로그래피의 후방 예측 능력을 이용하는 방법을 제안하고 있다. 제안하는 방법은 기준 신호가 소음원 가까이서 측정될 필요가 없다는 장점이 있다.

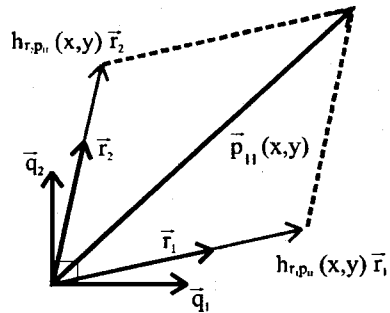


Fig. 4 Expression of pressure on a hologram plane by references in vector space

### 3. 제안하는 방법

2장에서 문제의 정식화는 완전 비상관인 두 개의 모든 소음원에 대해서 타당하다. 하지만 이 장에서 제안하는 방법은 소음원에 대한 몇 가지 제약 조건을 가진다. 첫째는 음원면에서 각 부분 음장이 하나의 산(peak)만을 가져야 한다. 두 번째는 각 부분 음장의 산의 위치가 서로 달라야 한다. 세 번째는 음원면의 자기 스펙트럼에서 각각의 산이 서로 구별되어야 한다.

위에서 설명한 제한 조건하에서 음원면의 자기 스펙트럼은 각각의 소음원 가까이에 있는  $(x'_1, y'_1)$ 과  $(x'_2, y'_2)$  위치에서 두 개의 산을 가질 것이다. 그 두 점에서의 음압 벡터  $\vec{p}_Z(x'_1, y'_1)$ 와  $\vec{p}_Z(x'_2, y'_2)$ 는

$$\vec{p}_Z(x'_1, y'_1) = h_{r_{p_z}}(x'_1, y'_1)\vec{r}_1 + h_{r_{p_z}}(x'_1, y'_1)\vec{r}_2 \quad (15)$$

$$\vec{p}_Z(x'_2, y'_2) = h_{r_{p_z}}(x'_2, y'_2)\vec{r}_1 + h_{r_{p_z}}(x'_2, y'_2)\vec{r}_2 \quad (16)$$

와 같이 쓸 수 있다. 이 두 음압 벡터는 각각의 소음원 근처의 음압이므로 다른 소음원의 영향이 상대적으로 작게 나타난다. 따라서, 이 두 음압 신호는 각각의 소음원에 매우 상관 있는 신호가 된다.

제안하는 방법은 바로  $\vec{p}_Z(x'_1, y'_1)$ 와  $\vec{p}_Z(x'_2, y'_2)$ 을 새로운 기저  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 로 사용하는 것이다. 즉, 위 식들에서  $h_{r_{p_z}}(x'_j, y'_j)$ 는 식 (13)에서  $h_{r_{v_i}}$ 에 대응된다. 그리고, 부분 음장은 식 (14)로부터 구하여진다. 소음원 근처의 음압 신호를 사용한다는 점에서 제안하는 방법은 개념적으로는 소음원 가까이서 기준 신호를 측정하는 것과 같다.

$\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 가 완전 비상관이 아닌 경우에는 기존 방

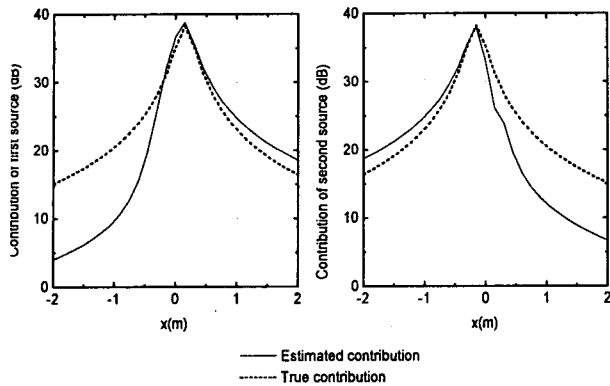


Fig. 5 Contributions at  $y=0$  line on hologram plane, which are calculated by applying partial coherence method to reference signals

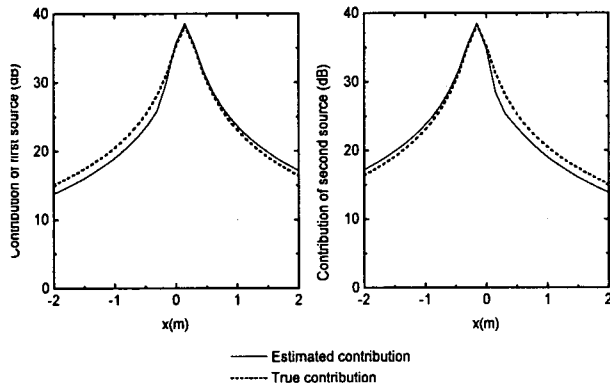


Fig. 6 Contributions at  $y=0$  line on hologram plane, which are estimated by applying partial coherence method to signals estimated by proposed method

법처럼  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 에 대해 부분 기여도 함수 방법이나 특이치 분리 방법을 사용할 수 있다. 부분 기여도 함수 방법은 부록에서 설명되어진다.

제안한 방법을 검증하기 위해 두 개의 완전 비상관인 단극 음원들에 대해 모의 실험을 수행하였다. 홀로그램면과 음원면의 위치는 0.15 m와 0 m였다. 두 단극 음원의 위치는 (0.15 m, 0, 0)과 (-0.15 m, 0, 0)이었고, 기준 마이크로폰의 위치는 (0.5 m, 0, 0.5 m)와 (-0.5 m, 0, 0.5 m)였다. 홀로그램면의 측정 간격은 0.15 m였고, 전체 측정점의 수는  $32 \times 32$ 였다. 주파수는 300 Hz로 하였다. 각 소음원의 입력 신호는 단극 음원의 강도로 하였다. 두 소음원의 입력 신호의 자기 스펙트럼들은 서로 같게 하였고, 상호 스펙트럼은 가정대로 0으로 하였다.

부분 음장을 구하는 것은 두 가지 방법에 의해 수행되었다. 하나는 기존 방법처럼 단순히 기준 신호

에 대해 부분 기여도 함수를 사용하는 것이고, 다른 하나는 제안하는 방법에 의해 구한 새로운 기저에 대해 부분 기여도 함수 방법을 사용한 것이다. 두 번째 방법에서 후방 예측을 위해 전체 정보의 수가  $96 \times 96$ 이 되도록 제로 패딩(zero padding)을 하였고, MEW 창문 함수<sup>(8)</sup>를 사용하였다.

Fig. 5는 홀로그램면의  $y=0$  선상에서 첫번째 방법의 모의 실험 결과를 보여준다. 점선은 각 소음원의 기여량의 참값을 나타내고, 실선은 첫번째 방법에 의해 예측된 기여량을 보여준다. 이 그림에서 첫번째 방법은 상당히 왜곡된 부분 음장을 구함을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 대로 두 기준 마이크로폰의 위치가 소음원에서 멀리 떨어져 있기 때문이다. 즉, 기준 신호가 소음원의 입력 신호와 큰 상관 관계가 없기 때문이다.

Fig. 6은 두 번째 방법의 결과를 보여 준다. 첫번째 방법보다 훨씬 향상된 결과를 볼 수 있다. 하지만, 완벽하게 일치하지 않는다. 이는 한 소음원 근처의 음압에 다른 소음원의 영향이 미약하나마 남아 있기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 논문은 먼저 벡터 표기를 이용하여 다수의 완전 비상관 소음원들이 존재하는 경우, 스펙트럼에 대한 각 소음원의 기여량을 구하는 문제를 해석하였다. 이러한 해석을 바탕으로 각 소음원의 기여량을 구하기 위해서는 각 소음원의 입력 신호와 상관 관계가 큰 신호를 얻는 것이 중요함을 파악하였다. 또한, 본 논문은 상관 관계가 큰 신호를 얻기 위하여 음향 홀로그래피의 후방 예측 능력을 이용하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 결국 신호 처리에 의해 상관 관계가 큰 신호를 얻는 것이다. 따라서, 소음원 근처에서 직접 측정하여 소음원에 매우 상관 있는 신호를 얻으려 했던 기존 방식의 불편한 점을 해결할 수 있다. 두 개의 단극 음원에 대한 모의 실험을 통하여 제안하는 방법의 가능성을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Maynard, J. 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.
- (2) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, Random

Data : Analysis and Measurement Procedures, Second Edition, John Wiley & Sons Inc..

(3) Kompella, M. S., Davies, P., Bernhard, R. J. and Ufford, D. A., 1994, A Technique to Determine the Number of Incoherent Sources Contributing to the Response of a System, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 8(4), pp. 363~380.

(4) Hallman, D. and Bolton, J. S., 1992, Multi-Reference Nearfield Acoustical Holography, Proc. of Inter-Noise 92, pp. 1165~1170.

(5) Kwon, H. -S. and Bolton, J. S., 1998, Partial Field Decomposition in Nearfield Acoustical Holography by the use of Singular Value Decomposition and Partial Coherence Procedures, Proc. of Noise-Con 98, pp. 649~54.

(6) Price, S. M. and Bernhard, R. J., 1986, Virtual Coherence: A Digital Signal Processing Technique for Incoherent Source Identification, Proc. of 4th IMAC, pp. 1256~1262.

(7) Hald, J., 1988, STSF- A Unique Technique for Scan-Based Near-Field Acoustic Holography Without Restrictions on Coherence, B&K Technical Review No. 1, 1988.

(8) Kwon, H. S. and Kim, Y. H., 1995, Minimization of Bias Error due to Windows in Planar Acoustic Holography using a Minimum Error Window, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98, pp. 2104~2111.

(9) Strang, G., 1980, Linear Algebra and its Applications, Second Edition, Academic Press Inc., pp. 128~132.

부 록

부분 기여도 함수 방법

주어진  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 에 대해 부분 기여도 함수 방법<sup>(2)</sup>은

$$\vec{w}_1 = \vec{v}_1, \quad \vec{w}_2 = -\frac{s_{v_1 v_2}}{s_{v_1 v_1}} \vec{v}_1 + \vec{v}_2 = -\frac{\vec{v}_1^H \vec{v}_2}{\vec{v}_1^H \vec{v}_1} \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \quad (A.1)$$

와 같이 직교화를 수행한다.  $\vec{w}_1$ 은  $\vec{v}_1$ 이고,  $\vec{w}_2$ 는  $\vec{v}_1$ 에 수직인  $\vec{v}_2$ 의 성분이다. 결국  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 에 대한 그램-쉬미트 직교화 (Gram-Schmit orthogonalization)<sup>(9)</sup>를 수행한다. 홀로그래피면의 음압 벡터는  $\vec{w}_1, \vec{w}_2$ 를 사용하여

$$\vec{p}_H(x, y) = h_{w_1 p_H}(x, y) \vec{w}_1 + h_{w_2 p_H}(x, y) \vec{w}_2, \quad (A.2)$$

$$\text{where } \begin{bmatrix} h_{w_1 p_H}(x, y) \\ h_{w_2 p_H}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_{v_1 v_2} / s_{v_2 v_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{v_1 p_H}(x, y) \\ h_{v_2 p_H}(x, y) \end{bmatrix}$$

와 같이 표현할 수 있다.

$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{q}_1, \vec{q}_2$ 의 모든 항이 실수이고,  $\theta_1$ 은  $\vec{q}_1$ 과  $\vec{v}_1$ 사이의 각을,  $\theta_2$ 는  $\vec{q}_2$ 와  $\vec{v}_2$ 사이의 각을 나타낸다고 하자(Fig. A.1). 만약  $\theta_1$ 이  $\theta_2$ 보다 작다면, Fig. A.1(a)에서 보듯이  $\vec{w}_2$ 는  $\vec{v}_2$ 보다 더  $\vec{q}_2$ 에 선형적으로 종속되어진다. 그러나,  $\theta_1$ 이  $\theta_2$ 보다 크다면, Fig. A.1(b)에서 보듯이  $\vec{w}_2$ 는  $\vec{v}_2$ 보다 덜  $\vec{q}_2$ 에 선형적으로 종속되어진다. 따라서 이 경우에는  $\vec{v}_2$ 를 첫번째 기저로 삼고,  $\vec{v}_2$ 에 수직인  $\vec{v}_1$ 의 성분을 두번째 기저로 삼아야 한다.

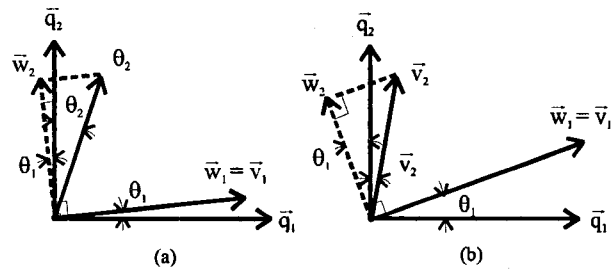


Fig. A.1 Orthogonalization of  $\vec{v}_1$  and  $\vec{v}_2$  by partial coherence method. (a) when  $\theta_1 < \theta_2$ . (b) when  $\theta_1 > \theta_2$