

평면 음향 홀로그래피를 이용한 음장의 가시화 및 음원탐지

권휴상, 서재갑, 정완섭
한국표준과학연구원 음향진동그룹

Sound visualization and source identification by using planar acoustic holography

Hyu-Sang Kwon, Jae-Gap Suh, and Wan-Sup Chung
KRISS

(E-mail : hyusang@kriss.re.kr)

요약문

다수의 마이크로폰 어레이를 사용하여 소음원에서 방사하는 음장을 예측, 가시화하고 소음원의 시, 공간적 특성을 파악하기 위하여 음향 홀로그래피 방법에 대한 연구를 수행하였다. 음향 홀로그래피 방법은 실험적으로 소음원의 특성을 규명할 수 있기 때문에 많은 연구가 활발히 진행되고 있지만, 많은 개수의 마이크로폰과 신호수집장치 등이 필요하기 때문에 그 사용에 많은 제약이 있어 왔다. 음향 홀로그래피 방법중에서 대표적인 평면 음향 홀로그래피 방법을 중심으로 마이크로폰의 개수, 간격등과 같은 측정조건과 함께 마이크로폰을 스캐닝하는 방법등에 대한 해석을 통하여 장, 단점 및 제한성을 논하였다. 또한 이러한 측정방법에서 나타나는 오차요인을 해석하고 이를 보정하는 방법에 대한 설명과 함께 실험을 통하여 이를 확인해 보았다.

1. 서론

생활수준이 향상되고 산업이 발달함에 따라 소음문제의 해결에 대한 요구는 날로 증대되고 있다. 이러한 소음문제 해결의 첫 단계로는 소음원의 위치와 세기 등은 물론이고 이로부터 발생한 소음이 전파되어 나가는 시공간적 경로와 방사특성등을 정확히 파악하는 것이라 하겠다. 이를 위하여 종래에 사용되어진 방법으로는 진동측정 및 해석을 통한 소음원 유추나 한 두개의 마이크로폰 혹은 음향 인텐시티 탐측자등을 이용하여 부분적인 음장을 측정하여 유추, 해석하는 방법등을 들 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 공간적으로 소음원이나 방사음장등을 정확하게 제공할 수 없다는 단점을 가지고 있

으며 이에 공간적인 음장정보를 전체적으로 측정, 해석하고자 하는 연구가 계속되어 왔다. 이러한 노력의 결과로 1980년대 중반 이후부터 본격적인 연구가 진행되어 오고 있는 음향 홀로그래피 방법은 관심있는 대상체의 방사음장을 전 공간영역에서 해석할 수 있다는 장점으로 인하여 주목을 받고 있으며, 근래에 들어서 센서기술 및 하드웨어의 발달로 인하여 응용이 더욱 활발해지고 있다^[1].

음향 홀로그래피 방법은 그 형태에 따라 다양한 방법론이 있지만 그 기본은 평면 어레이를 사용하는 평면 음향 홀로그래피라 할 수 있다. 평면 음향 홀로그래피 방법에서는 이차원 격자형으로 마이크로폰을 배열하여 평면상의 음압을 측정하여야 하는데, 대부분의 음향 홀로그래피 시스템의 경우 그 사용 마이크로폰의 개수에 제한이 있기 때문에 모든 측정점의 음압을 동시에 측정하기에는 어렵고 대신에 선형 마이크로폰 어레이를 이용하는 스캐닝 방법이 많이 이용되고 있다. 이 방법에서는 음원이 방사하는 음장이 시간에 따라 변하지 않는 정상상태라 가정하고 수개 혹은 수십개의 마이크로폰을 순차적으로 옮겨가며 홀로그래피를 측정하는 방법이다. 이때 순차적으로 측정하는 측정점의 음압사이의 신호관계를 측정하기 위하여 수개의 마이크로폰을 고정된 위치에 두고 그 음압신호를 측정하게 된다. 이러한 기준 마이크로폰은 상관관계가 없는 음원의 개수보다 많아야 하며 그 위치를 선택하는 문제가 있다^[2]. 본 연구에서는 이러한 기준 마이크로폰의 개수와 위치 선택등에 대한 연구와 더불어 이 기준 마이크로폰을 이용하여 홀로그래피를 계산하는 방법과 이때 나타나는 음원신호의 변화를 보정하는 방법등에 대해 간략히 설명하고자 한다. 또한 무향실내에서 두 개의 스피커와 마이크로폰 어레이를

이용한 실험을 통하여 제안하는 방법들의 타당성을 검증하고 이를 이용한 음장예측의 가능성을 확인하고자 한다.

2. 기본이론

음원의 존재하지 않는 임의의 공간내의 음장은 이 공간을 둘러싸는 경계면의 음압 및 입자속도를 적분하는 Kirchhoff-Helmholtz 식으로부터 계산할 수 있다. 이 관계식은 수치해석적인 경계요소법이나 실험적인 음향 홀로그래피 방법등과 같이 공간상의 음장을 예측하기 위한 기본식으로 널리 알려져 있다. 이때 경계면을 무한평면과 무한반구로써 설정함으로써 Sommerfeld 경계조건에 의해서 무한반구상의 경계적분을 제거하고 Dirichlet 경계조건을 만족하는 Green 함수를 적절히 선택함으로써 평면상의 음압분포의 측정으로써 음장을 예측할 수 있는 평면 음향 홀로그래피의 기본식을 유도할 수 있다⁽¹⁾.

이러한 평면 음향 홀로그래피의 음장예측식은 공간상의 Fourier 변환을 이용하여 간략하게 표현할 수 있으며 이는 홀로그램 평면의 음압분포를 마이크로폰 어레이를 이용하여 측정한 뒤 공간상의 Fourier 변환을 이용하여 평면과 성분들로 나누어 원하는 공간상에 전파하고 이를 중첩하여 음장을 예측하는 과정이라 표현할 수 있다⁽¹⁾.

이러한 음장예측을 수행할 때 유한한 개수의 측정점의 음압을 이용하여 예측을 행하므로 필연적으로 예측음장에 오차가 포함되어진다. 그러므로 이를 줄이기 위한 연구가 계속되어 왔는데 유한한 크기의 측정구경에 의한 창문함수 영향을 줄이기 위한 최소오차 창문함수와 공간상의 엘리어싱을 제거하기 위한 공간필터의 사용등은 그 대표적인 예이다^(1,2).

3. 스캐닝 방법과 예측음장 보정

앞 절에서 홀로그램 평면의 음압을 측정하여 음장예측을 수행하는 기본 이론과 오차 개선방법등을 소개하였다. 이러한 기본방법론에서는 홀로그램면의 측정음압 즉 홀로그램의 신호가 상관되어 있어야 한다. 이를 위해서는 모든 측정점의 음압을 동시에 측정해야 한다. 하지만 대부분의 경우 사용가능한 마이크로폰의 개수가 측정점에 비해 적기 때문에 홀로그램을 동시에 측정하기는 어렵고 대신 몇 개의 고정된 위치의 기준 마이크로폰과 순차적으로 홀로그램을 측정하는 스캐닝 마이크로폰 어레이로써 홀로그램을 측정한다. 이러한 경우 음원으로부터 방사하는 음장과 홀로그램은 시간에 따라 그 특성이 변하지 않는 즉 정상상태라 가정한다. 이러한 순차적인 홀로그램 측정방법에서는 순차적으로 측정된 음압으로부터 정확한 홀로그램을 계산하는 과정이 필요하다.

먼저 N 개의 상관관계가 없는 음원신호를 벡터 s 로 표현하고, M 개의 기준측정점의 음압을 벡터 r 로 표현하면 이 사이의 관계식은 다음과 같으며 그

관계는 그림 1에 표현되어 있다.

$$r = Gs + n = q + n \quad (1)$$

여기서 n 은 각 측정음압에 포함된 잡음을 표현한다. G 는 음원신호와 기준음압 신호사이의 관계를 표현하는 행렬이며 q 는 잡음이 제거된 기준음압을 나타내고 있다.

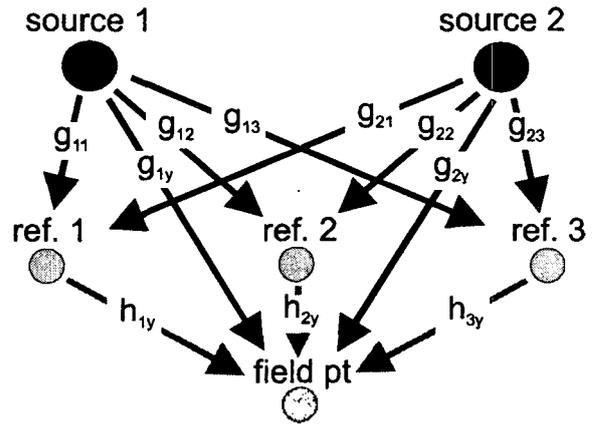


그림 1. 음원, 기준음압 및 홀로그램 신호사이의 상관관계

이 관계식으로부터 홀로그램을 계산하고 음장예측을 행하기 위하여 기준음압의 스펙트럴 행렬을 구해야 한다.

$$\begin{aligned} S_{rr} &= E\{rr^H\} \\ &= GE\{ss^H\}G^H + E\{nn^H\} \\ &= GS_{ss}G^H + \sigma_n^2 I \\ &= S_{qq} + \sigma_n^2 I \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 위 첨자 H는 Hermitian 을 나타내고 σ_n^2 은 잡음의 크기를 표현한다. 또한 홀로그램의 한점의 음압을 y 라 하면 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = h_y q + n_y \quad (3)$$

결국 홀로그램은 측정된 기준음압신호와 홀로그램면에서 측정된 음압신호의 관계 h_y 를 이용하여 구할 수 있다. 홀로그램의 스펙트럼은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} S_{yy} &= E\{yy^H\} \\ &= h_y S_{qq} h_y^H + \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 홀로그램에는 상관관계가 없는 음원신호들

이 중첩되어 있으므로 이를 상관관계 있는 부분음장으로 분리하여 해석하여야 한다. 이를 각 부분음장으로 분리하면 다음과 같다²⁾.

$$S_{yy} = \mathbf{a}\mathbf{a}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{a} 벡터는 각각의 독립적인 상관관계가 없는 신호로 이루어져 있다. 그러므로 이 분리된 음압신호 각각을 음향 홀로그래피 예측과정에 적용 계산하여 중첩함으로써 음장예측을 수행할 수 있다.

이러한 음장예측의 계산에 앞서 먼저 상관관계가 없는 음원의 개수를 계산하여야 한다. 이를 위하여 먼저 특이치 분리를 이용하여 상관관계가 없는 음원의 개수를 추정한다. 먼저 기준음압의 스펙트럼 행렬을 특이치 분리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{rr} &= \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \\ &= \mathbf{V}(\mathbf{\Lambda} + \sigma_n^2 \mathbf{I})\mathbf{V}^H \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 특이값을 비교하면 주변잡음에 비하여 큰 값들의 개수를 구할 수 있으며 이는 바로 상관관계가 없는 음원의 개수가 된다. 또한 이를 이용하여 식(5)와 같은 부분음장 분리를 행하는데 이러한 부분음장 분리 방법에는 STSF(Spatial Transformation of Sound Field)와 같이 특이치 분리 방법을 이용하는 방법과 Partial coherence 방법으로 나누어 볼 수 있다. 이러한 방법들에서 상관관계가 없는 음원의 개수를 추정하는 방법과 여러 위치의 기준음압 측정점에서 최적의 기준음압을 추정하는 방법등에 대한 연구가 있다³⁾.

이와 같이 구한 부분음장으로부터 음장예측을 수행하는데 이때 음원신호의 변화에 따른 영향에 대한 고찰이 필요하다. 즉 기존의 연구에서는 음원이 정상상태라는 가정에 의해서 홀로그램을 구하였다. 특이치 분리를 이용하여 계산한 기준음압신호의 분리는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{qq} &= \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H \\ &= (\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{\frac{1}{2}})(\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{\frac{1}{2}})^H \\ &= S_{qq}^{\frac{1}{2}} S_{qq}^{\frac{1}{2}H} \end{aligned} \quad (7)$$

결국 각각의 부분음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= S_{ry}^H S_{qq}^{-1} S_{qq}^{\frac{1}{2}} \\ &= S_{ry}^H \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{V}^H \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 기존의 연구에서는 음원이 정상상태라는 가정에 의해서 부분음장을 다음과 같이 간략화하여 사용하였다.

$$\mathbf{a} = S_{ry}^H \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

하지만 실제 음압측정의 경우 매 스캔마다 기준 마이크로폰에서 측정하는 음압의 크기는 차이가 있으며 이를 보정하여야 하는 필요성이 있다. 이를 보정하지 않는 경우 매 스캔의 신호에는 불규칙한 신호의 불균일이 발생하게 되며 이는 결국 예측음장에 오차가 된다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 오차를 감소시키기 위하여 각 부분음장을 식(9) 대신에 식(8)에서 오른쪽 항의 첫 번째 기준음압 스펙트럼 행렬은 매 스캔마다 측정된 음압신호로 계산하고 이를 평균하여 두번째 기준음압 스펙트럼 행렬로 사용하였다. 이러한 보정을 통하여 오차를 감소시키며 실제적으로 예측음장의 정확성을 높일 수 있었다.

4. 실험 및 결과고찰

실험은 무향실내에서 9 개의 스캐닝 마이크로폰과 5 개의 기준 마이크로폰을 사용하여 행하였다. 음원으로는 고주파 대역용 소형 스피커와 저주파용 우퍼를 사용하였다. 실험장치는 그림 2 와 같다.

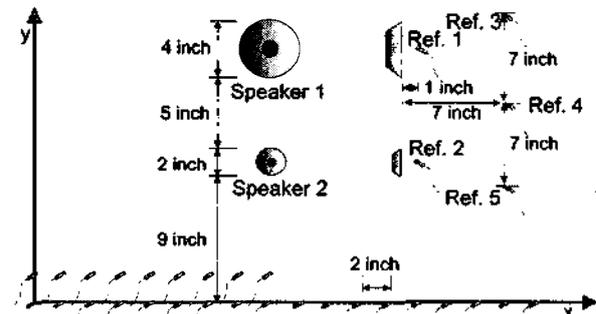


그림 2. 실험장치 및 측정조건

실험에서 32 번의 순차적인 측정동안 계속된 기준음압 1 과 2 의 스펙트럼은 그림 3 과 같다.

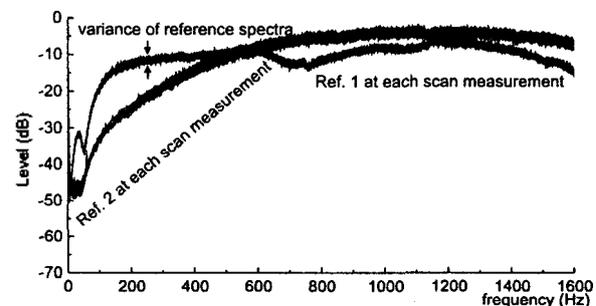


그림 3. 순차적인 측정동안의 기준음압신호의 스펙트럼 변화

또한 측정된 기준음압 신호의 스펙트럼 행렬의 특

이값은 그림 4 와 같이 구해진다.

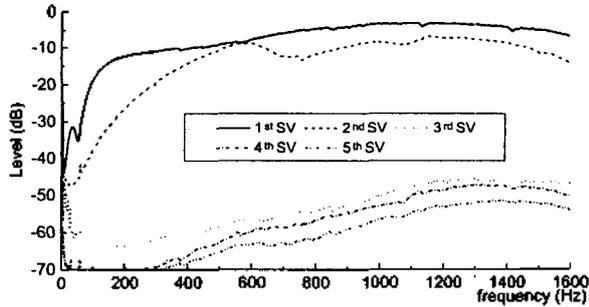


그림 4. 기준음압 스펙트럴 행렬의 특이값

그림 4에서 알 수 있듯이 두 개의 큰 특이값은 그림 3의 스펙트럼과 같이 음원이 발생하는 신호를 잘 표현하고 있으며 나머지 3개의 특이값은 작은 값의 주변잡음을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 이로부터 실험에서 사용된 독립음원은 두 개라는 사실을 유추할 수 있으며 두 개의 기준음압을 선정하여 음장예측을 수행할 수 있다.

이와 같은 사실을 바탕으로 홀로그래프를 분리 해석하여 음장을 예측할 수 있다. 이때 앞 절에서 서술한 바와 같이 음원의 시간에 따른 변화에 의해서 홀로그래프와 예측음장에 오차가 포함되어 지는데 이를 보정하여 예측을 수행하였다. 음원신호의 변화는 그림 3에 잘 나타나 있다. 보정한 예측결과와 보정을 하지 않은 예측의 결과는 그림 5에서 비교할 수 있다. 그림 5는 200Hz에서 스피커 표면의 음압을 예측한 결과로써 각각의 분리 해석된 결과이다. 여기서 알 수 있듯이 기존의 방법론에 의한 결과(a,b)에 비하여 예측결과와 보정(c,d)이 필요함을 보여준다.

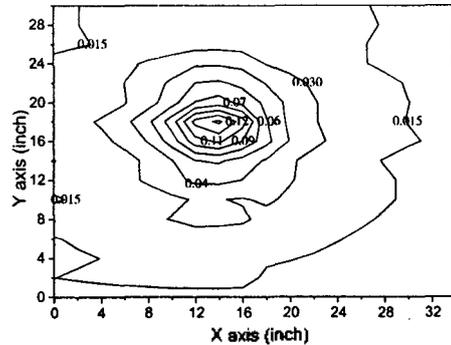
5. 결론

평면 음향 홀로그래피 방법론을 중심으로 측정 방법에 따른 예측음장의 신뢰도에 대한 고찰을 하였다. 측정조건으로는 마이크로폰의 개수나 간격등이 있으며 이로부터 발생하는 오차를 줄이기 위한 신호처리 방법을 연구하였다. 또한 적은 개수의 마이크로폰을 이용하여 홀로그래프를 측정하는 스캐닝 방법에 대한 고찰과 더불어 이때 나타나는 오차를 보정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 실험을 통하여 이들 방법론의 타당성을 검증하였다.

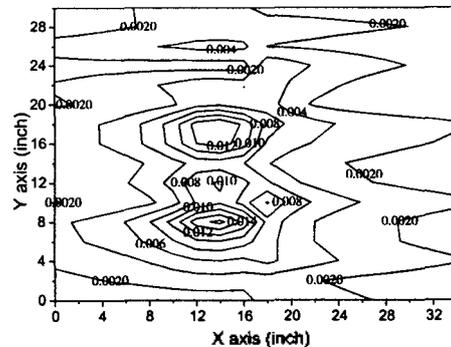
참고문헌

1. 권휴상, "개선된 평면 음향 홀로그래피 방법을 이용한 음장의 가시화," 박사학위논문, 1997
2. H.-S. Kwon, Y.-H. Kim, "Minimization of bias error due to windows in planar acoustic holography using a minimum error window," *J. Acoust. Soc. Am.*, 98(4), 2104-2111, 1995
3. H.-S. Kwon, J. S. Bolton, "Partial Field Decomposition

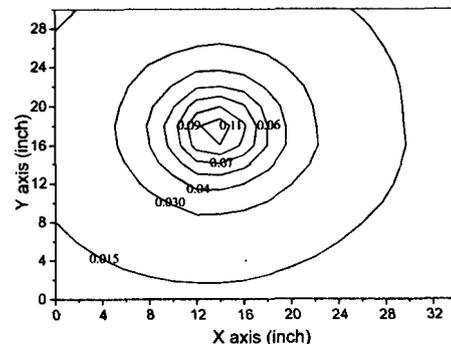
in Nearfield Acoustic Holography by the Use of Singular Value Decomposition and Partial Coherence Procedures," Noise-Con '98, USA, 1998



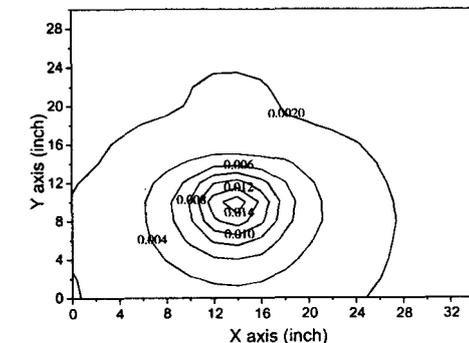
(a) 보정하지 않은 첫번째 부분음압 예측결과



(b) 보정하지 않은 두번째 부분음압 예측결과



(c) 보정한 첫번째 부분음압 예측결과



(d) 보정한 두번째 부분음압 예측결과

그림 5. 스피커면에서 예측한 200Hz의 음압분포