

소음원 규명 방법론(특성과 응용을 중심으로)

김양한*

Methods of Noise Source Identification(Their Characteristics and Applications)

Yang-Hann Kim

Keywords: Source Identification (음원 규명), Beamforming Method(방위각 추정 방법), Intensity Method(인텐시티 방법), Holography Method(홀로그래피 방법)

1. 서론

소음원의 특성 즉 사람이 듣기에 좋지 않은 소리의 발생 위치 및 크기, 위상의 특성을 정확히 혹은 공학적으로 사용하기에 충분한 정도로 파악하는 것은 효과적인 소음 제어를 위하여 대단히 중요하다.

소음원을 정확히 파악하려는 노력은 군사적인 목적에서 상당히 오래 전부터 이루어져 왔음은 널리 알려진 사실이다. 이러한 군사적 목적의 소음 탐지에 관련된 보편적인 요구 사항은 보다 먼 거리에서 보다 빨리 소음원을 찾아내는 것이었다. 먼 거리에서 측정되는 음파의 형태는 평면파에 근사함을 쉽게 이해할 수 있고, 따라서 각종 레이더와 관련된 이론에서 많은 부분 충분히 검증되어 왔던 평면파 전파 이론에 근간을 둔 탐지 방법들이 광범위하게 사용되었다.[1,2] 즉 소음원의 구체적인 크기나 상세한 근거리에서의 음장 형태등에 대한 관심 보다는 소음원의 위치에 대한 신속 정확한 파악이 주된 관심사이었기 때문에 측정된 음

파의 전파각도 추정기(bearing angle estimator)가 그 주된 연구 및 개발의 대상이었다.

소음에 대한 관심이 군사적인 목적 이외의 일반 산업 분야에서도 증가하면서 자연스럽게 소음원 파악에 대한 관심 또한 증가 하였으며 이러한 관심은 기계공학 분야의 경우 각종 수송기계의 방사 소음 특성은 물론 수송기계 내부 음장을 형성하는 소음원의 위치 파악 등으로 확대, 적용되게 되었다. 결국은 수중이나 대기중에서 군사적 상황과는 달리, 음원의 정확 신속한 위치 파악 보다는 음원의 크기, 위상, 구체적인 형태 및 전파 모델 등 보다 다양하고 구체적인 정보를 필요로 하게 되었다. 음향학적인 면으로 이러한 소음원 파악 혹은 규명에 대한 요구 조건을 다시 검토하여보면, 종전의 탐지 방법이 평면파 모델로 충분하였다면, 이제는 음파 전파 모델이 구면파 형태로 변화되어야 함을 의미하며 결국은 전파 각도 추정기가 이제는 음원 위치 추정기(noise source position estimator)로 변화함을 의미한다 볼 수 있다. 상당히 많은 경우 이러한 방법을 이용하여 운송 기계

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

의 소음원을 간접적으로 규명하고 있는 것 또한 사실이다.

그러나 이러한 방법은 엄밀한 의미에서 소음원의 구체적인 음압의 시,공간적 특성을 나타내고 있지 못하다. 결국은 등가 단극음원의 크기를 유추하여 그 크기들의 분포를 일종의 등가적 위치에 그리는 것이 대부분의 응용 예라 할 수 있다. 이러한 방법에 비하여 음향 홀로그래프 방법이나 인텐시티 방법은, 홀로그래프 방법의 경우 홀로그램 평면에서 측정된 음압 정보를 기반으로 하여 측정되지 않은 면의 음압을 추정함으로써 음원의 구체적인 시,공간적 형태를 알 수 있다는 면에서 전자의 방법과 엄격히 구별된다. 전자의 방법에 비하여 고가의 측정 비용이 단점이나 제공되는 정보의 양에서 볼때 비교의 대상이 될 수 없다. 음향 인텐시티 방법 또한 인텐시티라는 물리량이 음향 파우어의 흐름을 표현하고 결국은 파우어의 흐름의 방향을 알게 되면 음원의 위치 및 형태에 대한 추론 또한 가능하기 때문에 소음원 규명을 위하여 사용될 수 있는 방법 중의 하나라 볼 수 있다. 이러한 소음원 규명 방법론 들은 각각 이론의 근간이 다르고 또한 특성 또한 구별되어지므로 응용분야 또한 다를 것임을 쉽게 상상할 수 있다.

2. 방위각 추정 방법론(Beamforming method)

2.1. 평면파 모델

그림 1과 같이 M개의 마이크로폰으로 구성되어 있는 어레이(array)에 단일주파수 f를 가진 K개의 평면파가 입사되고 있는 경우, m번째 마이크로폰에 수신되는 신호 $p_m(f,t)$ 는 다음식과 같이 주어진다.

$$p_m(f,t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j(2\pi f x_m \cos\theta_k / c + \phi_k^* + 2\pi f t)} + n_m(t) \quad (1)$$

여기서 A_k , ϕ_k^* , q_k 는 각각 k번째 평면파의 크기, 초

기 위상 및 입사각을 의미하며 x_m 은 m번째 마이크로폰의 위치 좌표를 나타낸다. $n_m(t)$ 은 잡음 신호를 의미하며 시공간에 대해서 가우시안(Gaussian) 분포를 가지고 분산이 σ^2 라고 가정하자. 음압벡터 P_k 를 k번째 음원에 의한 음압벡터라고 하면 마이크로폰에 수신되는 음압 벡터 P 는

$$P = [p_1 \quad \dots \quad p_M]^T = P_1 + P_2 + \dots + P_k \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이때 상관 행렬 R 은

$$R = E \{ P P^H \} \quad (3)$$

로 정의된다. 식 (3)은 각 마이크로폰 신호 사이의 위상 정보를 포함하고 있으며 음원들 상호간의 상관 정도에 따라 그 특성이 정해진다.

2.2. 구면파 모델[3,4]

음원이 단극(monopole) 음원인 경우 파형은 구면파 형태를 가지며 이때 마이크로폰 어레이에 입력되는 신호 $p_m(f,t)$ 는

$$p_m(f,t) = \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{r_{km}} e^{j(2\pi f r_{km} / c + \phi_k^* + 2\pi f t)} + n_m(t) \quad (4)$$

와 같다. 여기서 r_{km} 은 k번째 음원과 m번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미한다. 이때 음압 벡터와 상관 행렬의 정의 및 특성은 앞 절의 평면파 모델의 경우와 동일하며 가정한 음원 모델링의 차이에 의해서 음압벡터 및 상관행렬이 내포하고 있는 형태 및 의미만이 다를 뿐이다.

2.3 방위각 추적 방법론의 적용

각 마이크로폰에 수신되는 신호에 음원의 모델에 따른 위상 보정을 하여 얻은 신호의 합으로부터 음원의 입사각 또는 위치를 찾는 방법이다. 평면파의 경우 음압 벡터에 곱해지는 가중 벡터는

$$W(\theta) = [w_1(\theta) \quad \dots \quad w_M(\theta)]^T \quad (5)$$

$$w_m(\theta) = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j2\pi f x_m \cos\theta / c} \quad (6)$$

와 같이 가정되는 입사각 θ 의 함수이며 이때 빔형성 파워는

$$\text{Power}(\theta) = \mathbf{W}(\theta)^H \mathbf{R} \mathbf{W}(\theta) \quad (7)$$

로 정의된다. 만약에 실제 음원의 입사각 q_k 와 가정한 음원의 입사각 q 가 일치하는 경우 빔형성 파워는 상대적으로 큰 값을 가지므로 q 를 변화시키며 빔형성 파워를 계산하여 음원의 위치를 추정할 수 있다.

구면파 모델의 경우 음원 추적 방법은 평면파 모델링의 경우와 같으며 단지

$$w_m(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{e^{-j2\pi f r_m/c}}{r_m} \quad (8)$$

와 같은 가중 벡터의 차이만 존재한다. 여기서 r_m 은 가정되는 음원과 m 번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미하며 가중벡터는 x, y 의 함수로서 스캔영역이 평면파 모델의 경우와는 달리 2차원이 된다.

방위각 추정 방법론을 이용한 소음원 탐지는 각종 수송기계의 소음원 규명을 위하여 광범위하게 사용되어 오고 있다. 잘 알려진 고속전철 혹은 열차등과 같은 비교적 소음원이 길이 방향으로 광범위하게 분포하고 있는 경우에 적용되어 오고 있다.[5,6] 환경소음의 측면에서 이용이 가능하나 도플러효과의 효율적인 제거, 소음의 주파수폭과 상관관계등과 관련된 일련의 문제들이 정확히 이해되어야 적용에 오류를 피할 수 있다.[4]

3. 인텐시티(Intensity) 방법

임의의 평면에서 음향 인텐시티 분포를 아는 것은 사실 그 평면을 통과하는 음향 파워어를 아는 것과 동일하다. 따라서 인텐시티 벡터의 전체적인 모양 혹은 흐름을 통하여 소음원의 위치에 대한 추정이 가능하다 볼수 있다.(그림 2)

그러나 엄밀한 의미에서 추정된 음원의 신빙성 유무는 사실 정량적으로 표현될 수 없다. 즉 무한히 많은, 여러 종류의 다른 음원일지라도 동일한

인텐시티 분포를 결과적으로 만들 수 있다는 사실이다. 따라서 음원의 추정을 위하여는 따라서 부가적인 정보가 필요하게 되고 이러한 점에 착안하여 제안된 방법이 Supersonic intensity 방법이다.[7] 이 방법의 근본 원리는 비교적 간단하다. 즉 그림 3과 같이 방사원(radiation circle)을 경계로 하여 전파하는 성분과 감쇄하는 성분이 발생하게 되고, 따라서 파수 성분면에서 볼 때 전파하는 성분은 같은 주파수에서 음파의 전파속도보다 빠른 전파속도를 갖는다고 볼 수 있으므로, 즉 Supersonic한 성분의 인텐시티만을 보게 되면 소음원의 위치 및 소음원의 형태 등을 쉽게 알 수 있다는 원리이다. 그림 4는 수중에서의 원통형체의 방사문제에 대하여 supersonic 인텐시티의 적용 전후의 결과를 비교한 것이다. Super sonic 인텐시티의 경우 실제 가진 위치와 가장자리 부분에서 소음이 방사되고 있음을 정확히 나타내 주고 있다. 각종 기계부품 등의 효과적인 소음제어를 위하여 상당히 유용한 방법이라 볼 수 있다.

4. 홀로그래프 방법

음향 홀로그래프(그림 5)는 사실 Kirchhoff-Helmholtz 적분방정식의 이산화 형태의 또 다른 표현이라 할 수 있다. 따라서 임의의 측정 평면(홀로그래프)에서의 음압 분포(혹은 속도 분포)를 이용하여 임의의 지점에서 음압 혹은 속도 분포를 알 수 있게 된다. 이때 제약 조건은 그림 5에 그려져 있는 바와 같이 추정, 예측하려고 하는 지점이 음원을 감싸고 있는 단순히 연결된 평면(simply connected surface)이어야 한다는 조건 이외에는 없다. 따라서 홀로그래프 방법을 이용할 경우, 원하는 공간의 임의의 지점에서 모든 음향학적 물리량을 알아낼 수 있는 장점이 있다. 다만 이 경우 잘 알려진 바와 같이[8] 홀로그래프를 구성하는 구경(aperture)의 크기, 마이크로폰 사이의 거리 등이 추정된 물리량의 수준을 결정한다.[9,10] 결국 많은

수의 마이크로폰이 필요하게 되고 이것이 홀로그래프의 가장 큰 약점이라 할 수 있다.

이러한 현실적인 약점의 보완을 위하여 몇 가지 방법[11,12]이 제안되었으며 사실 현실적인 문제에 폭 넓게 응용되어온 바 있다. 그러나 이러한 방법들은 모두가 음원의 stationarity 즉 매 측정시의 음장 특성이 변하지 않는다는 가정에 그 뿌리를 두고 있는 제약성이 있다. 이러한 제약점의 제안을 위한 방법으로서 최근에 제안된 방법이 움직이는 마이크로폰 좌표계를 이용한 방법이다.[9]

4.1 움직이는 마이크로폰 좌표계를 이용한 홀로그래프 방법

그림 6은 홀로그램 좌표계와 마이크로폰 좌표계를 절대 좌표계에 비교하여 표현 하고 있다. 홀로그램 좌표계에 대한 마이크로 좌표계의 의 상대속도를 u 라 하면 측정음압신호와 이를 홀로그램 좌표계에서 표현한 음압은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$p_{mic}(0, y, z_H; t) = p_{hol}(ut, y, z_H; t) \quad (9)$$

홀로그램은 각 주파수별 공간상의 음압분포이므로 각 측정점의 측정음압신호를 시간에 대해 Fourier 변환함으로써 얻어진다. 하지만 마이크로폰이 움직이는 경우, 상대운동의 영향이 포함되어진 측정음압에는 공간변수 x 에 시간 t 에 대한 변수가 포함되어져 있으므로 단순히 시간에 대한 Fourier 변환만으로는 홀로그램을 바로 계산할 수 없으며, 대신에 다음과 같은 변환관계를 얻는다.

$$F_T \{p_{hol}(ut, y, z_H; t)\} = \frac{1}{u} \int_{-x}^{\infty} \hat{P}_{hol}\left(\frac{2\pi(f_h - f)}{u}, y, z_H; f_h\right) df_h \quad (10)$$

여기서 $\hat{P}_{hol}\left(\frac{2\pi(f_h - f)}{u}, y, z_H; f_h\right)$ 는 홀로그램을 공간상의 Fourier 변환함으로써 계산되는 파수 스펙트럼을 의미하며 실제 홀로그램과는 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$P_{hol}(x_h, y_h, z_H; f)$$

$$= F_x^{-1} \{\hat{P}_{hol}(k_x, y_h, z_H; f)\} \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}_{hol}(k_x, y_h, z_H; f) e^{jk_x x} dk_x \quad (11)$$

그러므로 측정음압신호의 Fourier 변환은 각 주파수 f_h 별 파수 스펙트럼이 f_h 를 중심으로 대역을 형성하며, 이들이 중첩되어 나타난다. 따라서 임의의 관심 주파수의 파수 스펙트럼을 분리하여 역 Fourier 변환하면 그 주파수의 홀로그램을 얻을 수 있으며, 이 개념이 움직이는 마이크로폰 좌표계를 이용한 홀로그래프 방법의 핵심적인 내용이다.

파수 스펙트럼을 분리하기 위해서는 스펙트럼들이 중첩되지 않아야 하므로 대역이 관심 주파수 사이의 간격보다 작아야 한다. 따라서 파수영역에서 잘 분리되어 있는 순음성분을 방사하는 음장에 대해 제한 하여 적용됨을 알 수 있다. i 개의 순음성분을 방사하는 음장에서 측정된 음압 신호를 Fourier 변환한 결과는

$$F_T \{p_{hol}(ut, y, z_H; t)\} \\ = \frac{1}{2u} \left\{ \sum_{i=1}^1 \hat{P}_{hol}\left(\frac{2\pi(f_i - f)}{u}, y, z_H; f_i\right) + \sum_{i=1}^1 \hat{P}_{hol}^*\left(\frac{2\pi(f_i + f)}{u}, y, z_H; f_i\right) \right\} \quad (17)$$

과 같이 표현할 수 있으며, 이는 각 주파수 f_i 의 파수 스펙트럼을 여파하여 복조(demodulation)한 후, 역 Fourier 변환함으로써 홀로그램을 얻을 수 있다. 이 과정은 그림 7에 개념적으로 설명되어져 있다.

그림 8은 움직이는 차량에 순음을 발생하는 스피커를 장착하고 실험하였을 경우, 움직이는 마이크로폰 좌표계를 이용한 홀로그래프 방법에 의한 결과를 나타낸다. 그림 8(a)는 예측 음압을 나타내며, 그림 9(b)는 인텐시티 분포를 나타낸다.

5. 결론

소음원의 특성을 규명하는 방법론들은 방위각 추정 방법론에 근간을 둔 소음원 위치 탐지 방법

과 같이 소음원의 등가 단극음원 크기 및 위치들을 추정하는 기본적인 방법들로 부터 보다 많은 계측기기 및 탐측자와 함께 상당히 정교한 데이터 처리를 수행하여야 하는 인텐시티를 이용한 음장 맵핑(Mapping) 홀로그래프를 이용한 관심음장 전체의 3차원 맵핑등 실로 다양하다 할 수 있다. 결국은 가장 많은 탐측자를 사용하는 측정 시스템이 보다 많은 음장의 정보를 제공하므로써 가장 탁월한 방법론이라 결정할 수 있다. 이것은 특히 탐측자 자체의 가격이 저렴해져 가는 추세인 점과 소형화하는 추세를 감안하여 봄과 동시에 공간상의 물리적인 의미 즉 파수영역에 대한 보다 폭 넓은 이해를 통한 시간, 공간, 주파수, 파수영역 즉 확대된 차원에서의 음장, 소음에 대한 이해를 갖을 수 있다는 면에서도 가치 있다고 할 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 및 대우자동차에 의하여 연구의 일부가 지원되었음을 밝히며 관계기관에 감사한다.

참고문헌

- Pillai, S., 1989, Array signal processing, Springer-Verlag, New York.
- Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, "Array signal processing: concepts and techniques," Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 1995, "Spherical beamforming and MUSIC methods for estimation of location and strength of spherical sound sources," Mech. Systems and Signal Proc., Vol. 9, No. 5, pp. 569-588.
- Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 1995, "Estimation of locations and strengths of broadband planar and spherical noise sources using coherent signal subspace," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 98, No. 4, pp. 2082-2093.
- Hamet, J.-F. Pallas, M.-A. and Schmitz, K. P., 1994, "DEUFRAKO-1 : Microphone array techniques used to locate acoustic sources on ICE, TGV-A and Transrapid 07," Proceedings of inter-noise94, Yokohama.
- Takano, T., Terada, K., Aizawa, E., Iida, A. and Fujita, H., 1992, "Development of a 2-dimensional microphone array measurement system for noise sources of fast moving vehicles," Proceedings of inter-noise92, Toronto.
- Williams, E. G., 1995, "Supersonic acoustic intensity," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, No 1, pp. 121-127.
- Maynard, 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.
- 김양한, 권휴상, 1992, "음향 홀로그래피를 이용한 방사음장의 전방예측에 관한 기본이론 및 신호처리 방법," 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 9, pp. 1654-1668.
- 김시문, 권휴상, 김양한, 1995, "원통면 음향 홀로그래피를 이용한 음장예측의 오차해석 및 적용 방법," 한국소음진동공학회지, 제5권, 제1호, pp. 37-48.
- Hald, J., 1989, "STSF-a unique technique for scan-based near-field acoustic holography without restrictions on coherence," Technical Review No. 1, B&K publication.
- Loyau, Pascal, J.-C. and Gaillard, P., 1988, "Broadband acoustic holography reconstruction from acoustic intensity measurement I: Principle of the method," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 84, No. 5, pp. 1744-1750.
- Kwon, H.-S. and Kim, Y.-H., 1996, "Moving frame technique for planar acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am, submitted.

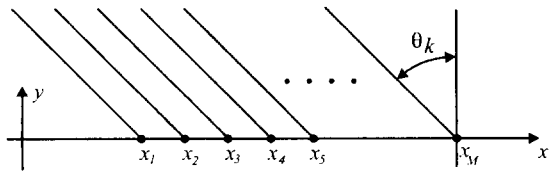


그림 1. 평면파 모델을 이용한 방위각 추정 방법 (Beamforming Method)의 개념도

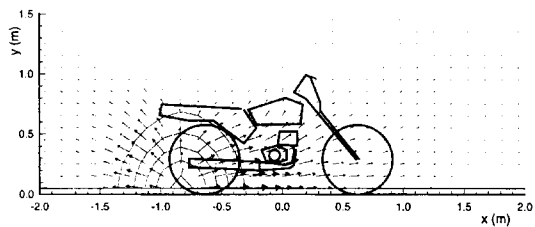


그림 2. 오토바이 소음에 대한 인텐시티 분포 (주파수 : 186 Hz)

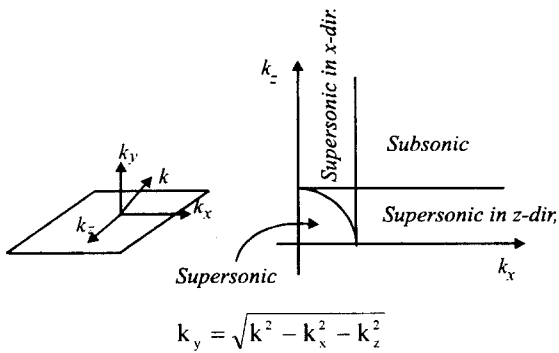


그림 3. Supersonic Intensity의 개념

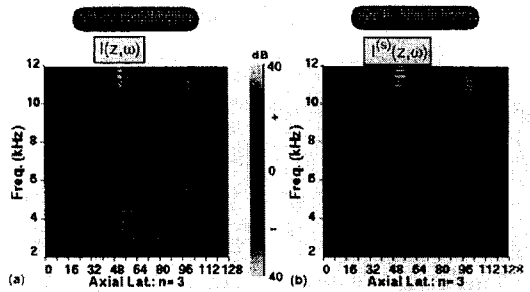


그림 4. Supersonic Intensity를 이용한 소음원 위치 측정 (원동형셀에 의해 수중에서 방사되는 소음[3])

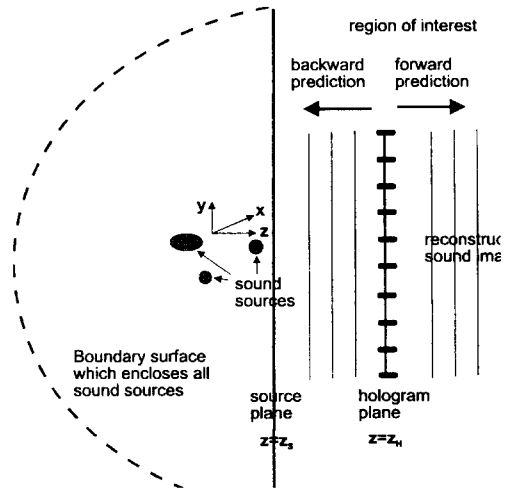


그림 5. 음향 홀로그래피 방법의 개념

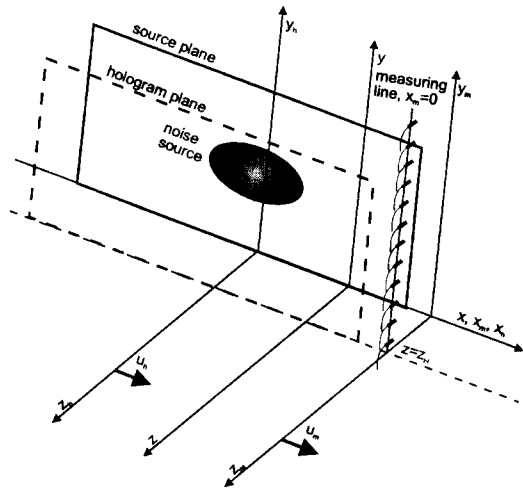


그림 6. 움직이는 좌표계를 이용한 음향 홀로그래피 방법의 좌표계 설정

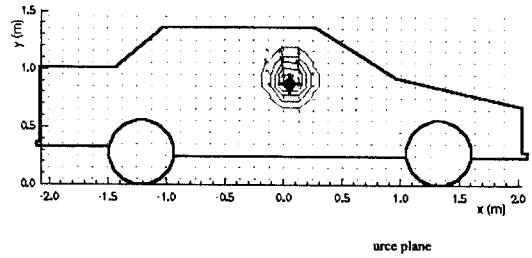
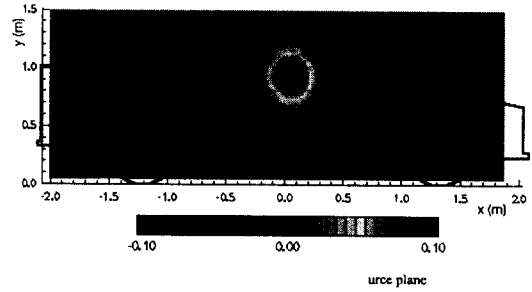


그림 8. 이동하는 차량에 부착된 스피커에 의한 방사음장 (주파수 : 700 Hz, 차량속도 : 30 km/h)

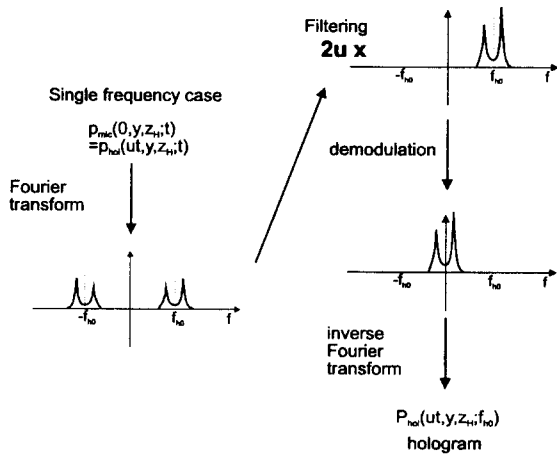


그림 7. 측정 스펙트럼으로부터 홀로그램을 얻는 과정의 개념도