

음향 홀로그래피를 이용한 자동차 바람소리 성능 개발

김무상* · 남경욱**

AEROACOUSTIC NOISE REDUCTION OF AN AUTOMOBILE USING ACOUSTIC HOLOGRAPHY

Moosang Kim*, Kyoung-Uk Nam**

Keywords : Wind Noise(바람소리), Acoustic Holography(음향 홀로그래피)

Abstract

This paper introduces the process of reducing the automobile wind noise by using acoustic holography. First, a microphone array scans a side or plane under an automobile step-by-step. Second, a pressure on a source plane is calculated. Third process is to analyze how much individual sources contribute to interior noise. Fourth process is to control important noise sources determined by the contribution analysis. This paper deals with the entire process, theoretical and experimental problems.

1. 서론

자동차 바람 소리는 100km/h 이상에서 중요 소음이다. 소음원의 발생 위치 및 특성에 따라 상부 풍절음, 하부 풍절음, 흡출음 등으로 구분할 수 있다. 이중 하부 풍절음은 전체 바람 소리의 50% 정도 기여량을 갖는다[1]. 따라서 하부 풍절음 개선 없이는 획기적인 소음 저감을 기대할 수 없다.

하부 풍절음의 개선 대책을 세우려면, 우선적으로 그 원인이 되는 소음원의 위치 및 실내음에 대한 기여량 등 소음원의 특성을 파악해야 한다. 하지만 하부라는 구조적인 특성과 측정 시 많은 잡음을 유발시키는 바람 소리의 특성 상 귀로 듣거나 하나의 마이크로폰을 이용한 단순 측정을 통해서도 소음원 파악이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 음향 홀로그래피[2]를 생각할 수 있다.

음향 홀로그래피는 경계면의 음압 측정(2차원 측정)을 통해 3차원 음장을 구하는 방법이다. 그 특성 상 소음원 위치의 음압도 직접 측정하지 않고 구할 수 있으므로 소음원의 위치 파악 등에 유용하다. 최근에는 개별 소음원들이 자동차의 외부 음장 및 실내음에 얼마나 기여하는 지도 구할 수 있을 정도로 발전되었다[3,4].

본 논문은 자동차 바람소리 개발을 위해 사용되는 음향 홀로그래피 방법에 대해 소개한다. 특히 하부에 적용된 음향 홀로그래피 방법과 이를 이용한 개별 소음원의 외부 음장 및 실내음에 대한 기여량을 구하는 방법을 설명한다. 또한 하부 소음원을 알고 있는 실차에 적용하여 방법을 검증하고자 한다.

2. 자동차 하부 음향 홀로그래피

2.1 음향 홀로그래피

가장 단순한 경우로 Fig.1처럼 자유 음장에서 평면형 홀로그래피를 생각하자. 소음원들과 경계를 이루는 음원면(source plane)의 음압 $P(x_s, y_s, z_s; f)$ 을 측정하면, 소리가 전파해 나가는 방향의 음압 $P(x, y, z; f)$ 은 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식에 의해

$$P(x, y, z; f) = \int_{S_h} P(x_s, y_s, z_s; f) \times K_{pp}(x - x_s, y - y_s, z - z_s; f) dS_h \quad (1)$$

$$K_{pp}(x, y, z; f) = \frac{1}{2\pi} \frac{z}{r^3} (1 - jkr) \exp(jkr)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

로 구할 수 있다. 이를 역으로 계산하면, 임의의 2차원 평면(홀로그램면)의 음압 측정으로 음원면의 음압도 구할 수 있다. 음원면을 소음원 가까운 위치로 선정하면, 소음원과 가까이에서 음압을 측정한 것과 같은 효과를 갖는다. 따라서 음향 홀로그래피는 소음원의 위치 파악 등에 유용하다.

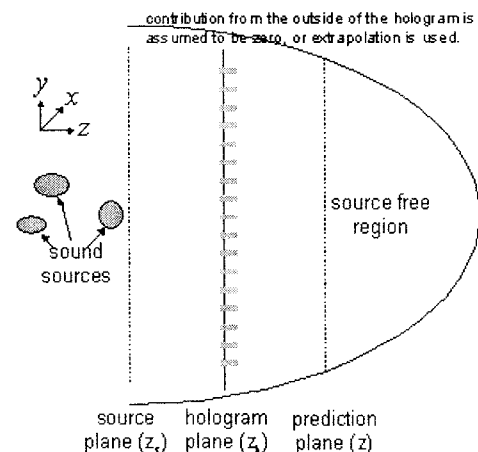


Fig.1 Acoustic holography Illustration

* 현대자동차, mooskim@hyundai-motor.com

** 현대자동차, kunam@hyundai-motor.com

2.2 하부 플랫폼

자동차 하부에 홀로그래피를 적용하기 위해서는 하부에서 임의의 2차원 면의 음압을 측정해야 한다. 이를 위해 Fig.2처럼 자동차를 올려 놓고, 그 아래에서 마이크로폰을 이동시키며 측정할 수 있는 하부 플랫폼을 제작하였다. 자동차 하부 플랫폼에서는 Fig.1과 달리 바닥에서 반사파가 존재한다. 반사파를 신호처리로 제거하기 위해 Fig.2와 같이 두 개의 면을 측정할 수 있도록 마이크로폰 어레이를 설계하였다[5]. 이는 덕트와 같은 1차원 음장에서 두 개의 마이크로폰을 이용해 입사파와 반사파를 제거하는 방법이 3차원으로 확장된 것이다[6].

플랫폼 head의 형상은 여러 가능한 형상들 중에서 유동장이 플랫폼이 없는 경우와 유사하다고 판단된 원형으로 하였다(Fig.3). 또한 edge 부위는 와류 유동을 감소시키기 위해 round 처리하였다(Fig.4)

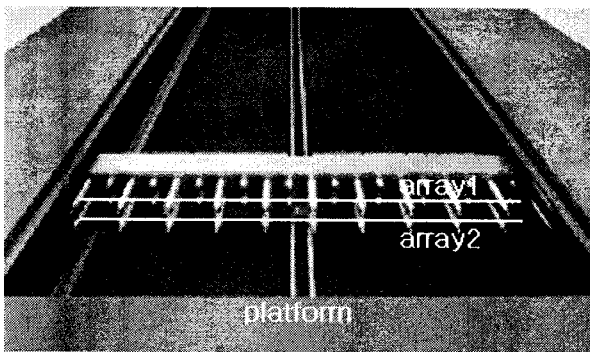


Fig.2 Underbody platform

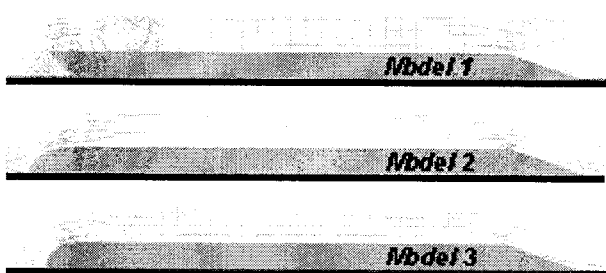


Fig.3 Streamlines of underbody platforms with different heads

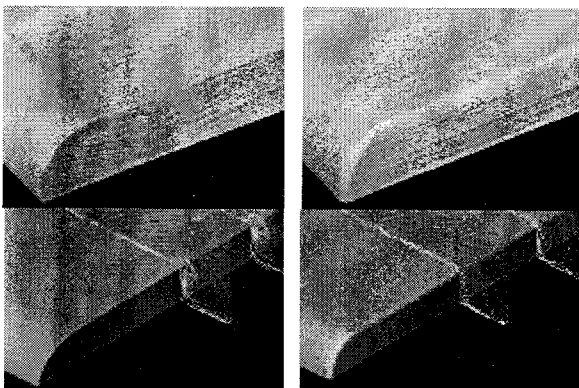


Fig.4 Vortex reduction of rounded edge

2.3 순차적 측정

홀로그램면의 음압은 크기 뿐만 아니라 임의의 두 점 사이의 위상 정보도 요구한다. 모든 점 사이의 위상 정보를 알기 위한 가장 확실한 방법은 모든 점을 동시에 측정하는 것이다. 그러나 자동차 하부에서는 자동차의 크기, 관심 주파수 등을 고려할 때, 최소 $15 \times 20 \times 2$ 의 많은 측정점을 필요로 한다. 충

분한 샘플링 주파수로 이만한 수를 동시에 측정할 수 있는 상용화된 장비는 존재하지 않고, 또한 계산 시간도 오래 걸린다. 따라서 대안으로 마이크로폰을 순차적으로 이동시키며 측정하는 방법[7]을 채택하였다.

순차적 측정에서는 동시에 측정하지 않은 두 점 사이의 위상차를 알기 위해 홀로그램면을 순차적으로 측정하는 동안 기준이 되는 마이크로폰을 공간 상에 고정시킨다. 이를 기준 마이크로폰, 그 신호를 기준 신호라고 한다. 하부 홀로그래피에서는 기준 마이크로폰을 차 내부에 두었다.

기준 마이크로폰을 사용하는 이유는 두 점 사이의 거리를 측정하는 것에 비유하여 설명할 수 있다. 두 점을 동시에 관찰하면, 그 거리는 자를 이용하여 직접 측정할 수 있다. 하지만 동시에 관찰하지 못하는 경우에는 Fig.5처럼 축을 정하여 각각의 점을 투영한 후 자를 이용하여 측정해야 한다. 순차적 측정에서 기준 마이크로폰은 이처럼 축의 역할을 한다.

기준 마이크로폰의 개수도 중요하다. 거리 측정에서 두 점이 2차원 평면에 놓이면, 두 개의 축이 필요하다. 신호에서도 차원의 개념이 존재하며, 기준 마이크로폰의 수는 차원과 같아야 한다. 홀로그래피에서 신호의 차원은 소음원의 수이다. 하지만 바람 소리처럼 소음원이 많으면, 홀로그래피 시험 전에 그 수를 알기 어렵다. 따라서 하부 홀로그래피에서는 16개라는 가능한 많은 수의 기준 마이크로폰을 사용하였다. 충분하지 확인하기 위해 기준 마이크로폰의 개수의 변화에 따른 결과의 수렴 특성을 확인하였다[8]. 이는 기준 마이크로폰의 수가 증가할수록 그 결과는 참값에 수렴하기 때문이다[9].

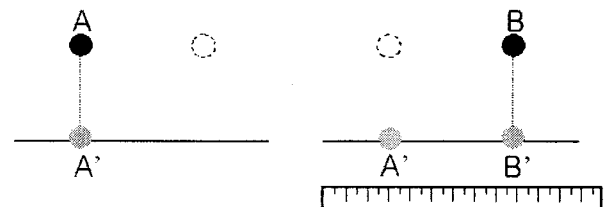


Fig.5 Indirect distance measurement

2.4 마이크로폰 자체 잡음의 감소

유동장에서 마이크로폰으로 음장을 측정하는 경우 음압 뿐만 아니라 유동장 자체의 교란에 의해 상당히 큰 잡음이 발생함은 잘 알려져 있다. 하부의 홀로그램면 측정에서도 같은 문제가 발생한다. 하지만 순차적 측정에서 홀로그램면의 음압은 기준 신호와의 상호 스펙트럼(cross-spectrum) 형태로만 이용된다[7]. 상호 스펙트럼에서는 계산 시 평균 횟수가 많아질수록 잡음의 영향은 사라진다[10]. 평균 횟수를 변화시켜가며 관찰한 결과로는 현재의 관심주파수 내에서는 160번이면 충분하다고 판단되었다[8].

3. 기여량 분석

음향 홀로그래피는 모든 소음원을 동시에 다 보여준다. 하지만 자동차 바람 소리에서 중요한 소음원인지 아닌지를 판단하기 위해서는 개별 소음원들이 실내용에 얼마나 기여하는지를 판단해야 한다. 본 장에서는 음향 홀로그래피를 이용하여 이러한 기여량을 구하는 방법을 간단한 계로부터 설명한다.

3.1 단일입력/단일출력 계에서 잡음 제거

Fig.6처럼 단일입력/단일출력 계에서 측정 잡음을 갖는 경우를 생각하자. 여기서 잡음은 신호와 상관 관계가 없다. 이

경우 출력 스펙트럼의 잡값 $S_{YY}(f)$ 는

$$S_{YY}(f) = \hat{\gamma}_{XY}^2(f) \hat{S}_{YY}(f) \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있다[10]. 여기서 $\hat{S}_{YY}(f)$ 는 잡음에 의해 왜곡된 측정 출력의 스펙트럼이고, $\hat{\gamma}_{XY}^2(f)$ 는 입력과 측정 출력 사이의 기여도 함수(coherence function)이다. 이 기여도 함수는 두 신호를 측정하기만 하면, 계산 가능한 양이다. 따라서 식 (2)는 전달 함수, 즉 경로나 잡음에 대한 다른 정보 없이도 출력의 측정 잡음을 제거할 수 있음을 보여준다.

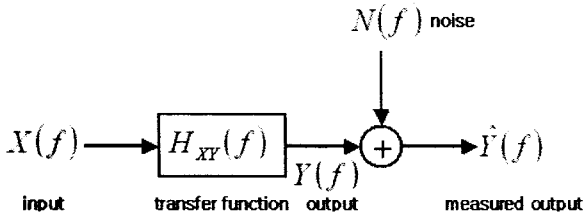


Fig.6 Block diagram of a single-input/single-output system

3.2 2-입력/단일출력 계에서 기여량 분석

Fig.7처럼 2-입력/단일출력 계를 생각하자. 두 입력이 그 발생 원인이 달라서 상관 관계가 없다면, 첫 번째 입력의 관점에서 두 번째 입력의 영향은 잡음일 뿐이다. 따라서 식 (2)와 유사하게 출력 스펙트럼 $S_{YY}(f)$ 에 대한 첫 번째 입력의 기여량 $S_{Y_{I1}}(f)$ 는

$$S_{Y_{I1}}(f) = \gamma_{X_{I1}Y}^2(f) S_{YY}(f) \quad (3)$$

처럼 구할 수 있다. 또한

$$R_1(f) = C_1(f)X_1(f) + C_2(f)X_2(f) \quad (4)$$

처럼 첫 번째 입력의 영향만을 받는 신호를 구하면, 첫 번째 입력의 기여량은 식 (3)과 유사하게

$$S_{Y_{I1}}(f) = \gamma_{R1Y}^2(f) S_{YY}(f) \quad (5)$$

으로 구할 수 있다.

식 (5)는 특정 입력의 영향만 나타나는 신호를 구할 수 있다면, 경로에 대한 정보 없이도 그 입력의 기여량을 구할 수 있음을 보여준다. 따라서 기여량 분석에서 관건은 특정 입력 또는 특정 소음원의 영향만 나타나는 신호를 어떻게 구하느냐 하는 것이라고 할 수 있다.

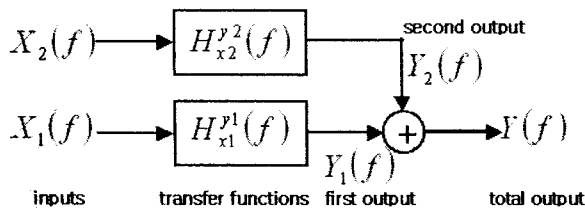


Fig.7 Block diagram of a 2-input/single-output system

3.3 음향 홀로그래피를 이용한 기여량 분석

음향 홀로그래피는 특정 소음원의 영향만 나타나는 신호를 구하는데도 유리하다. 음원면의 음장을 구할 수 있으므로 소

음원 위치의 음압을 알 수 있기 때문이다. Fig.8은 이러한 특성을 이용해 외부 음장에서 기여량을 구하는 과정을 보여준다.

첫 번째 단계는 홀로그램면의 음압을 측정하는 것이다. 두 번째로 음원면의 음압을 구한다. 세 번째에서는 음원면에서 최대 음압을 찾는다. 이 최대 음압은 특정 소음원 위치에서 발생하며, 그 소음원의 영향만 나타난다고 가정한다. 네 번째 단계에서는 앞의 가정과 식 (4)를 적용해 음원면 각각의 점에서 첫 번째 소음원의 기여량을 구한다. 다섯 번째 단계에서는 전체 음장에서 첫 번째 소음원의 기여량을 뺀 나머지 음장을 구한다. 그리고 나머지 음장에 대해 세 번째 단계부터 다섯 번째 단계까지를 반복적으로 적용해 다른 소음원의 기여량을 구한다.

실내음에 대한 기여량을 구하는 과정도 유사하다. 다만 실내음은 홀로그래피로 예측하지는 못하므로 원하는 위치에 마이크로폰을 설치하고 직접 측정해야 한다.

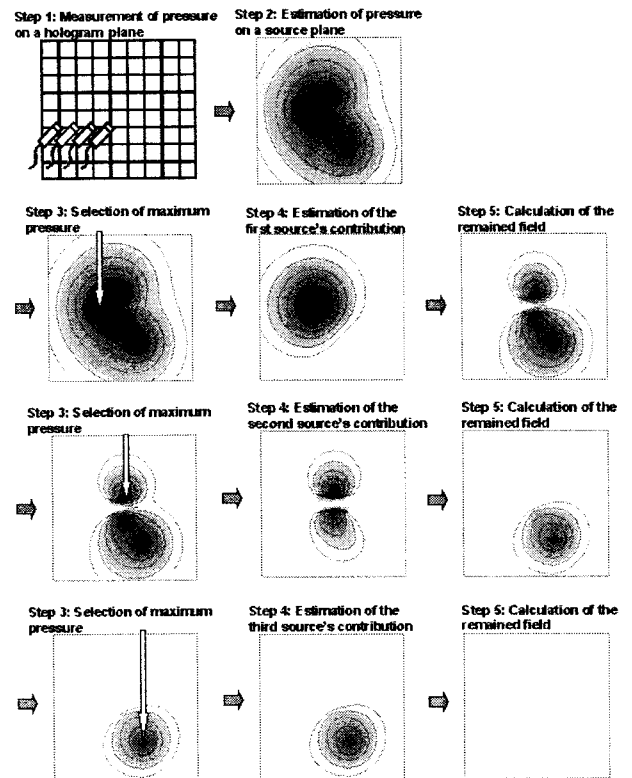


Fig.8 Contribution analysis procedure

4. 실차 검증

실차에서 음향 홀로그래피와 기여량 분석의 타당성을 확인하기 위해서 알고 있는 소음원이 존재하는 차량에 대해서 검증 실험을 수행하였다. 차량 하부 S/MBR에 HOLE이 있는 차량으로 HOLE 위치에서 400Hz의 공동 소음이 발생하는 경우였다. 비교를 위해 HOLE을 막지 않은 경우와 막아서 소음원 자체를 제거한 경우 두 가지를 모두 실험하였다.

Fig.9는 HOLE을 막지 않은 경우 400Hz의 1/3 옥타브 밴드에서 홀로그래피에 의해 예측된 음원면의 음장 분포를 보여준다. HOLE의 위치에서 소음이 발생함을 정확히 보여주고 있다. 따라서 음향 홀로그래피를 통해 소음원을 찾을 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig.10(a)는 HOLE을 막지 않은 상태에서 앞서 설명한 기여량 분석 방법을 통해 HOLE의 기여량을 구한 후, 전체 음장

에서 이를 빼준 나머지 음장을 보여준다. Fig.10(b)는 HOLE을 막아 소음원 자체를 제거한 후, 홀로그래피를 수행한 결과를 보여주고 있다. 두 경우의 차이가 거의 없으므로 제한한 기여량 분석 방법이 외부 음장에서 타당함을 볼 수 있다.

Fig.11은 실내음 결과를 보여주고 있다. Fig.10과 마찬가지로 HOLE을 막지 않은 상태에서 기여량 분석을 통해 HOLE에 의한 성분을 제거한 결과와 HOLE을 막은 결과를 비교하여 보여준다. 거의 일치함을 볼 수 있다. 이로부터 실내음에 대한 기여량 분석 방법도 타당함을 볼 수 있다.

5. 결론

자동차 하부 풍절음 개선을 위한 소음원 방법으로 음향 홀로그래피 방법을 개발하였다.

하부에서 2차원 음장을 측정하기 위한 플랫폼을 설계, 제작하였다. 바닥에서의 반사파를 제거하기 위해 두 개의 측정면을 갖도록 설계하였다. 기준 신호를 이용한 순차적 측정 방법을 사용하였고, 스펙트럼 계산 시 평균 횟수의 증가에 의해 잡음의 영향을 감소시켰다. 외부 음장에서 발견된 소음원이 실제 중요한 소음원인지 판단하기 위해 실내음에 대한 개별 소음원의 기여량을 분석할 수 있는 방법을 개발하였다. 하부에서 공동 소음이 발생하는 차량을 이용하여 이러한 방법들을 검증하였다.

이상의 과정을 통해 개발된 하부 음향 홀로그래피 방법은 하부 소음원의 위치 및 중요도를 파악하는데 효과적인 방법으로 판단되어 사용하고 있다. 실제로 바람소리를 발생시키는 각종 낙수 홀과 구조물을 음향 홀로그래피를 통해 발견하여 개선하고 있다.

참고문헌

- [1] 이강덕, "Wind noise 소음원 구분 방법에 대한 결과 보고," 현대자동차 기술보고서 THNC-WN-002 (2000).
- [2] E. G. Williams, J. D. Maynard, and E. Skudrzyk, "Sound source reconstruction using a microphone array," J. Acoust. Soc. Am. 68, 340-344 (1980).
- [3] K.-U. Nam and Y.-H. Kim, "Visualization of multiple incoherent sources by the backward prediction of near-field acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am. 109, 1808-1816 (2001).
- [4] K.-U. Nam and Y.-H. Kim, "A partial field decomposition algorithm and its examples for near-field acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am. 116, 172-185 (2004).
- [5] G. Weinreich and E. B. Arnold, "Method for measuring acoustic radiation fields," J. Acoust. Soc. Am. 68, 404-411 (1980).
- [6] A. F. Seybert and D. F. Ross, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique," J. Acoust. Soc. Am. 61, 1362-1370 (1977).
- [7] J. Hald, "STSF - a unique technique for scan-based near-field acoustic holography without restrictions on coherence," B&K Technical Review No. 1 (1989).
- [8] 김양한, 남경욱, 최영철, "음향 홀로그래피에 의한 완전비상관 소음원들의 기여량 분석," 현대자동차 프로젝트 보고서 (2002).
- [9] 남경욱, "낮은 상관 관계를 갖는 음장에서 음향 홀로그래피의 적용," 박사학위논문, 한국과학기술원 (2004).
- [10] J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd ed. (Wiley, New York, 1986), pp. 164-251.

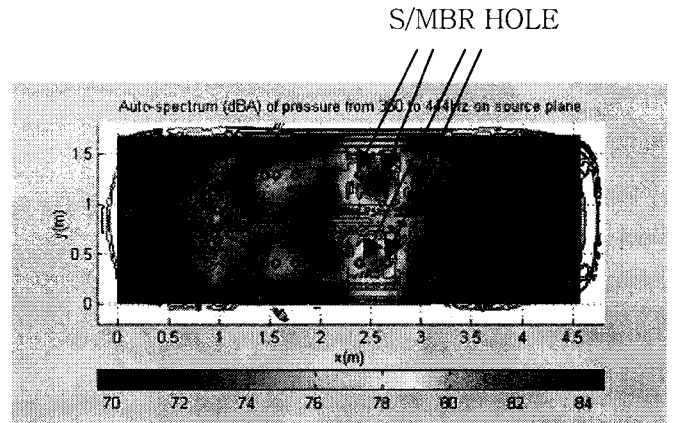
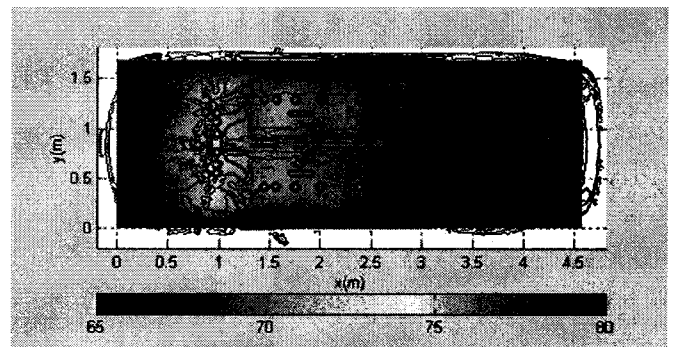
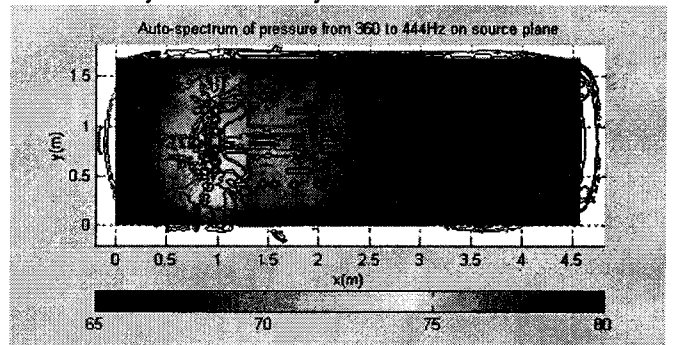


Fig.9 Sound pressure at a 1/3 octave band (400Hz) on a source plane when there are side member holes



(a) Remaining sound pressure when side member hole noise is removed by contribution analysis



(b) Sound pressure when side member holes are removed

Fig.10 Sound pressure at a 1/3 octave band (400Hz) when side member hole effects are removed

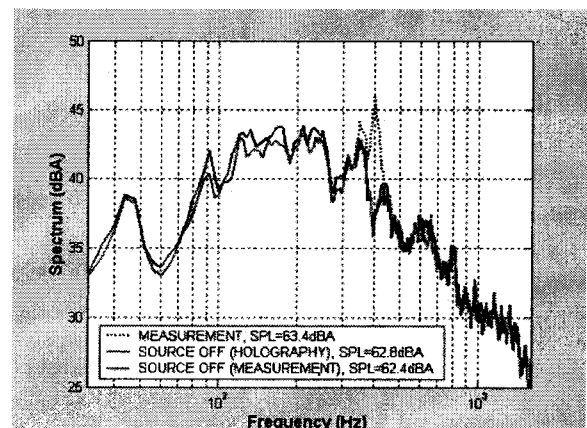


Fig.11 Interior Sound pressure when side member hole effects are removed