

음향 홀로그래피에 의한 실린더의 와류 유동 소음 가시화 및 기여량 분석 Visualization and contribution analysis of the vortex shedding noise due to a cylinder by acoustic holography

°남 경 옥 · 김 양 한*

Kyoung-Uk Nam and Yang-Hann Kim

Key Words : Acoustic holography(음향 홀로그래피), Multiple coherence function(다중 기여도 함수), Incoherence(완전 비상관), Contribution analysis(기여량 분석), Vortex shedding(와류 유동), Lift force(양력), Drag force(항력)

ABSTRACT

This paper exploits how vortex noise is generated around a cylinder. This is done by utilizing an acoustic holography. In this experiment, compressed air was injected to the cylinder through a hose. Therefore, major noise sources were at a hose end as well as around the cylinder: vortex shedding noise. The holography results show a resultant noise picture there it is not easy to clearly sort out the shedding noise and what is generated at the end of the tube. We attempted to separate those noise by the method we developed: contribution analysis scheme. The method, in fact, was found to be efficient and practical to separate the noise field into independent noise sources. The highlights of the results are, we believe, that lift and drag noise picture are now available. This procedure does not limit its application, therefore we may use this to visualize any noise field that we want to understand.

1. 서 론

근접장 음향 홀로그래피⁽¹⁾는 홀로그램면이라고 불리는 2차원 면에서 측정된 음압 정보만으로 임의의 위치에서 음압, 속도, 인텐시티 등의 모든 음향 물리량들의 예측을 가능하게 한다. 특히 소음원 근처에서의 음향 특성들도 알 수 있기 때문에 소음원의 특성을 파악하는데 유용한 방법이다.

본 논문은 이러한 홀로그래피 방법을 대표적인 공력 소음원인 실린더에 의한 와류 유동 소음⁽²⁾에 적용함으로써 공력 소음원에 대한 그 유용성을 확인하고자 한다. 또한 최근에 알려진 기여량 분석 방법⁽³⁾을 적용하여 양력과 항력에 의한 소음원들을 구별해 결과적으로 홀로그래피의 해상도를 높일 수 있을 확인한다. 본 연구에서 적용한 기여량 분석 방법은 기존 방법^(4~8)과 달리 기준 마이크로폰들을 각 소음원 가까이에 놓을 필요가 없어 홀로그래피를 적용하기 전에 각 소음원의 위치를 알 필요가 없다는 장점이 있다.

본 논문의 2장과 3장에서는 실험에서 사용한 단계적 측정 방법⁽⁹⁾과 기여량 분석 방법에 관련된 이론적인 내용들을 간단히 정리한다. 4장에서는 실험 결과들을 정리한다.

2. 기준 신호들을 이용한 홀로그램면의 단계적 측정 방법

2.1 단계적 측정 방법의 가정

음향 홀로그래피 방법은 신호가 주기 함수인가, 랜덤인가, 정상 신호인가 하는 것에 상관없이, 즉 신호의 특성에 상관없이 적용할 수 있는 방법이다. 하지만 홀로그램면의 임의의 두 점 사이의 위상 정보 또는 상호 스펙트럼을 필요로 한다. 어떤 종류의 신호에 대해서도 임의의 두 점 사이의 관계를 알기 위해서는 원칙적으로는 모든 점을 동시에 측정해야 한다. 하지만 모든 점을 동시에 측정하기 위해서는 고가의 측정 시스템을 마련해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정상 신호의 경우 기준 신호를 이용하여 동시에 측정하지 않고 단계적으로 측정하여 서로 다른 두 점 사이의 상호 스펙트럼을 구하는 방법이 개발되어 졌다⁽⁹⁾.

서로 다른 두 점에서 측정된 신호를 $Y_1(f)$, $Y_2(f)$ 라고

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : kunam@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

하고 N 개의 기준 신호들을 $R_1(f), \dots, R_N(f)$ 라고 하자. 만약 $Y_1(f), Y_2(f)$ 가

$$Y_1(f) = H_{R_1 Y_1}(f)R_1(f) + \dots + H_{R_N Y_1}(f)R_N(f) \quad (1)$$

$$Y_2(f) = H_{R_1 Y_2}(f)R_1(f) + \dots + H_{R_N Y_2}(f)R_N(f) \quad (2)$$

와 같이 기준 신호들의 선형 조합으로 표현된다고 가정하자. 이 경우 식 (1)에서 계수들 $H_{R_1 Y_1}(f), \dots, H_{R_N Y_1}(f)$ 은 $Y_1(f)$ 와 기준 신호들을 동시에 측정하면,

$$\begin{bmatrix} H_{R_1 Y_1}(f) \\ \square \\ H_{R_N Y_1}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{R_1 R_1}(f) & \square & S_{R_1 R_N}(f) \\ \square & \square & \square \\ S_{R_N R_1}(f) & \square & S_{R_N R_N}(f) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{R_1 Y_1}(f) \\ \square \\ S_{R_N Y_1}(f) \end{bmatrix} \quad (3)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 $S_{R_i R_j}(f)$ 는 i 번째 기준 신호와 j 번째 기준 신호의 상호 스펙트럼을, $S_{R_i Y_1}(f)$ 은 i 번째 기준 신호와 $Y_1(f)$ 의 상호 스펙트럼을 나타낸다. 식 (2)의 계수들도 유사하게 구할 수 있다. 따라서 $Y_1(f), Y_2(f)$ 의 상호 스펙트럼은 동시에 측정하지 않고도 식 (1)과 (2)를 이용하여

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = \begin{bmatrix} H_{R_1 Y_1}(f) \\ \square \\ H_{R_N Y_1}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{R_1 R_1}(f) & \square & S_{R_1 R_N}(f) \\ \square & \square & \square \\ S_{R_N R_1}(f) & \square & S_{R_N R_N}(f) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{R_2 Y_1}(f) \\ \square \\ H_{R_2 Y_2}(f) \end{bmatrix} \quad (4)$$

와 같이 구할 수 있다. 따라서 기준 마이크로폰들을 이용하여 단계적 측정을 하는 경우 식 (1), (2)가 성립하는가를 확인해야 한다. 이를 위한 척도가 기여도 함수(coherence function) 또는 다중 기여도 함수⁽¹⁰⁾(multiple coherence function)라고 할 수 있다.

2.2 다중 기여도 함수

일반적으로 한 출력 신호 $Y_1(f)$ 와 N 개의 기준 신호 $R_1(f), \dots, R_N(f)$ 사이에는

$$Y_1(f) = H_{R_1 Y_1}(f)R_1(f) + \dots + H_{R_N Y_1}(f)R_N(f) + N_1(f) \quad (4)$$

의 관계가 존재한다. 여기서 $N_1(f)$ 는 잡음을 표현하는 것으로 $R_1(f), \dots, R_N(f)$ 들과 완전 비상관(incoherent), 즉 기준 신호들과의 상호 스펙트럼이 0이다. 식 (4)가 식 (1)이 되

기 위해서는 $N_1(f)$ 가 0이 되어야 한다. 즉 $N_1(f)$ 의 자기 스펙트럼 $S_{N_1 N_1}(f)$ 가 0이어야 한다.

출력 신호에 대한 이 잡음 성분의 상대적인 크기를 나타내는 척도로써 다중 기여도 함수가 존재한다. 그 정의⁽¹⁰⁾는

$$\gamma_{Y_1 : R}^2(f) = 1 - \frac{S_{N_1 N_1}(f)}{S_{Y_1 Y_1}(f)} \quad (5)$$

이다. 즉 이 다중 기여도 함수가 1에 근접할수록 식 (4)는 식 (1)에 근접하게 된다. 결국 기준 신호들을 이용해 단계적으로 측정한 것이 동시에 측정한 것과 같은 효과를 가지지를 판단하려면, 이 다중 기여도 함수가 1에 근접하는 지를 살펴보아야 한다.

식 (5)는 식 (3)과 (4)로부터 다시

$$\begin{aligned} \gamma_{Y_1 : R}^2(f) &= \begin{bmatrix} S_{R_1 Y_1}(f) \\ \square \\ S_{R_N Y_1}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{R_1 R_1}(f) & \square & S_{R_1 R_N}(f) \\ \square & \square & \square \\ S_{R_N R_1}(f) & \square & S_{R_N R_N}(f) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{R_1 Y_1}(f) \\ \square \\ S_{R_N Y_1}(f) \end{bmatrix} \\ & \quad (6) \end{aligned}$$

과 같이 표현된다⁽¹¹⁾. 따라서 $Y_1(f)$ 와 기준 신호들을 동시에 측정하면 구할 수 있는 값이다.

3. 기여량 분석 방법

같은 주파수 내에 다른 원인에 의해 발생하는 독립적인 소음원들이 존재하는 경우에 홀로그래피를 수행하면, 그 결과는 분명 이들 소음원들에 의한 음장이 합쳐진 형태로 나타날 것이다. 이 경우 각각의 소음원에 의한 음장을 구별하는 것은 각각의 소음원들의 특성을 파악하는데 유용한 정보가 될 수 있다. 이 과정을 본 논문에서는 기여량 분석이라고 하고, 본 장에서는 그 이론적 배경에 대해서 살펴본다.

3.1 문제 정의

Fig. 1과 같은 단일 입력/단일 출력 계를 생각하자. 측정 출력 $\hat{Y}(f)$ 는 입력 $X(f)$ 에 완전비상관(incoherent)인 잡음 $N(f)$ 에 의해 왜곡된 신호이다. 이 경우 입력이나 입력과 완전 상관(coherent)인 신호 $R(f)$ 를 측정할 수 있다면, 출력의 참값 $Y(f)$ 의 자기 스펙트럼은

$$S_{Y Y}(f) = \frac{|S_{X \hat{Y}}(f)|^2}{S_{X X}(f)} \quad \text{or} \quad \frac{|S_{R \hat{Y}}(f)|^2}{S_{R R}(f)} \quad (7)$$

과 같이 구할 수 있다.

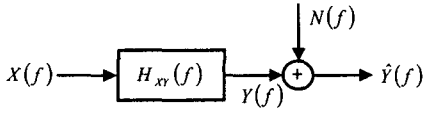


Fig. 1. Single-input and single output system.

이제 Fig. 2와 같은 2 입력/단일 출력 계를 생각하자. 두 입력 $X_1(f)$ 와 $X_2(f)$ 는 서로 다른 원인에 의해 발생하여 완전 비상관이라고 가정하자. 이 경우 첫 번째 입력 $X_1(f)$ 의 입장에서는 출력에 대한 $X_2(f)$ 의 기여량 $Y_2(f)$ 는 잡음이라고 생각할 수 있다. 따라서 입력 $X_1(f)$ 를 직접 측정하거나 이와 완전 상관인 신호 $R_1(f)$ 를 측정한다면, 출력 신호 $Y(f)$ 의 자기 스펙트럼에 대한 $X_1(f)$ 의 기여량은 식 (7)과 유사하게

$$S_{Y_1 Y_1}(f) = \frac{|S_{X_1 Y}(f)|^2}{S_{X_1 X_1}(f)} \quad \text{or} \quad \frac{|S_{R_1 Y}(f)|^2}{S_{R_1 R_1}(f)} \quad (8)$$

과 같이 구할 수 있다.

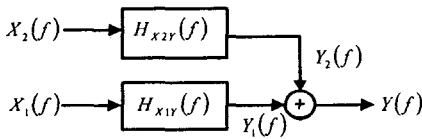


Fig. 2. Two-input and single-output system.

기본적으로 음향 홀로그래피에서 독립적인 소음원의 기여량 분석 방법 역시 2 입력/단일 출력 계의 기여량 분석 방법과 동일하다고 할 수 있다. 관건은 각각의 소음원에 완전 상관인 신호를 어떻게 구할 것이냐 하는 것이다. 기존 방법들⁽⁴⁻⁸⁾에서는 각 소음원에 완전 상관인 신호를 직접 측정해서 구하려고 하였다. 이러한 이유로 단계적 측정을 위해 사용하는 기준 마이크로폰들을 소음원 가까이에 위치시켰다. 하지만 이 방법은 홀로그래피를 수행하기 전에 소음원의 위치를 알아야 하므로, 소음원의 위치 파악이라는 홀로그래피의 중요한 목적과 상충되는 모순이 발생한다.

3.2 제안하는 방법

본 논문에서 사용한 기여량 분석 방법⁽³⁾은 각 소음원들과 완전 상관 신호를 직접 측정하지 않는다. 대신 홀로그래피에 의해 예측된 음압 신호를 이용한다. Fig. 3은 그 과정을 보여준다.

먼저 음원면(소음원들이 놓인 2차원 면)의 음압을 홀로그래피를 통해 측정한다. 두 번째로 최대값 위치에서의 음압을 새로운 기준 신호로 선정한다. 이 새로운 기준 신호는 소음원 위치에서의 음압이므로 직접 측정된 것과 마찬가지로 그 해당 소음원에 완전 상관 또는 완전 상관에 근접한 신호라고 할 수 있다. 세 번째 과정은 이 새로운 기준 신호를 이용하여 식 (8)과 유사한 과정을 거쳐서 그 해당되는 소음원의 기여량을 구한다. 네 번째는 음원면의 전체 음압에서 첫 번째로 구한 소음원의 기여량을 빼서 나머지 음장을 구한다. 그리고 이 나머지 음장에 대해서 앞의 과정을 반복한다. 그러면 순차적으로 모든 소음원의 기여량을 구할 수 있게 된다.

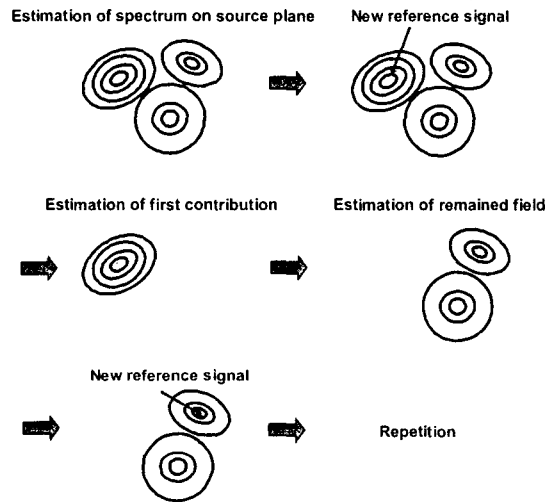


Fig. 3. Procedure of contribution analysis.

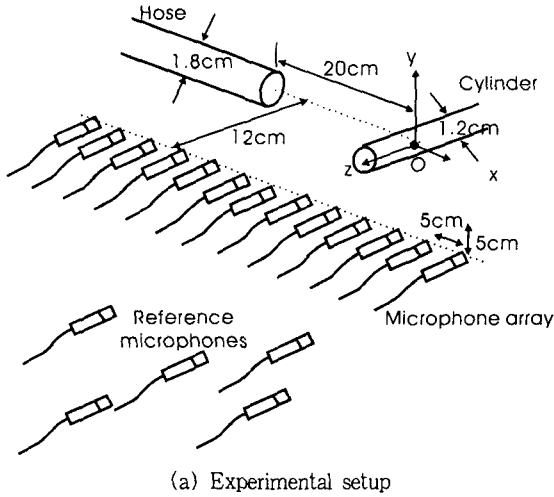
4. 실린더의 와류 유동 소음에 대한 실험 결과

4.1 소음원의 구성 및 측정 사양

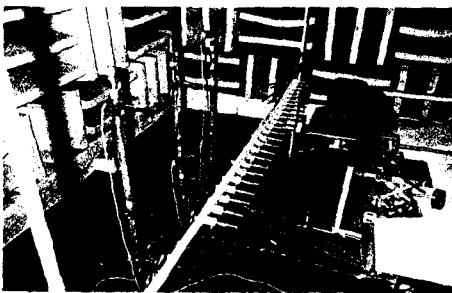
실린더에 의한 공력 소음의 발생을 위해 Fig. 4와 같은 실험 장치를 구성하였다.

유동장은 호스를 통해 분출되는 압축 공기에 의해 형성되었고, 호스의 지름은 약 1.8cm였다. 실린더는 지름이 1.2cm였으며, 호스로부터는 20cm 떨어진 지점에 위치시켰다. 유속은 실린더에서 호스와 수직인 지점인 O점에서 실린더가 없는 경우에 측정했을 때, 약 33.8m/sec였다. 이 경우 와류 유동 소음의 중심 주파수⁽²⁾(shedding frequency)는 약 562Hz이다. 이 실험 장치에서 공력 소음이 발생한다는 것은 분명히 알 수 있었으나, 실린더가 없는 경우의 소음도 상당히 컸다. 즉 호스에서 직접 방사되는 소음도 중요한 소음원으로 생각되었다. 그리하여 실험은 실린더에 의한 공력 소음

과 호스에서 방사되는 소음도 함께 가시화하고, 이후 기여량 분석에 의해 이 둘을 분리해 내는 방향으로 진행하였다.



(b) Front view



(c) Side view

Fig. 4 Experimental setup and photos

홀로그래면에서의 음압 측정을 위해 24개의 마이크로폰을 사용하였으며, 이를 x 방향으로 어레이를 구성해 y 방향으로 단계적으로 이동시켜가며 24개의 위치에서 음압을 측정하였다. 따라서 모두 24×24 개의 위치에서 음압을 측

정하였다. x 와 y 방향으로의 측정 간격은 5cm 였다. 홀로그래면은 호스 축과 12cm 떨어져서 측정하였다. 기준 마이크로폰은 5개를 사용하였으며, 그 위치는 Fig. 4에서 보듯이 소음원에서 홀로그래면보다 더 먼 위치에 놓았다.

홀로그래피 실험은 기여량 분석 결과를 비교하기 위하여 실린더가 있는 경우와 없는 경우 두 가지 경우에 대하여 실험하였다.

4.2 측정 스펙트럼과 다중 기여도 함수

Fig. 5는 홀로그래면의 한 측정 위치 ($x=0\text{cm}$, $y=15\text{cm}$)에서 측정한 음압의 자기 스펙트럼을 보여준다. 실린더가 없는 경우에도 스펙트럼 값이 상당히 큼을 볼 수 있다. 실린더가 존재하는 경우에는 와류 유동 소음의 중심 주파수 부근에서 스펙트럼이 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 6은 같은 점에서 측정한 음압과 기준 신호들 사이의 다중 기여도 함수를 보여준다. 200Hz 이상에서는 1에 근접함을 볼 수 있다. 이는 200Hz 이상에서는 단계적 측정 결과를 신뢰할 수 있다는 것을 의미한다.

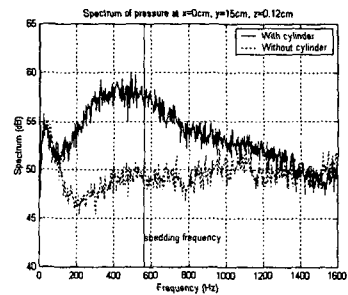


Fig. 5. Auto-spectrum of pressure at $x=0\text{cm}$, $y=15\text{cm}$ on the hologram plane.

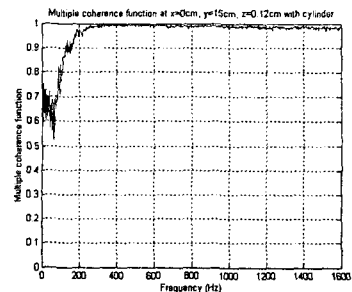


Fig. 6. Multiple coherence function of pressure at $x=0\text{cm}$, $y=15\text{cm}$ on the hologram plane with respect to reference signals.

4.3 홀로그래피 및 기여량 분석 결과

Fig. 7은 500Hz, 1000Hz, 1500Hz에서 구한 음원면의 음압 스펙트럼의 공간 분포를 보여준다. 대체로 호스에서 직접 발생되는 소음과 양력에 의한 쌍극 음원이 나타남을 볼 수 있다. 하지만 그 구분이 명확히 이루어지지는 않는다.

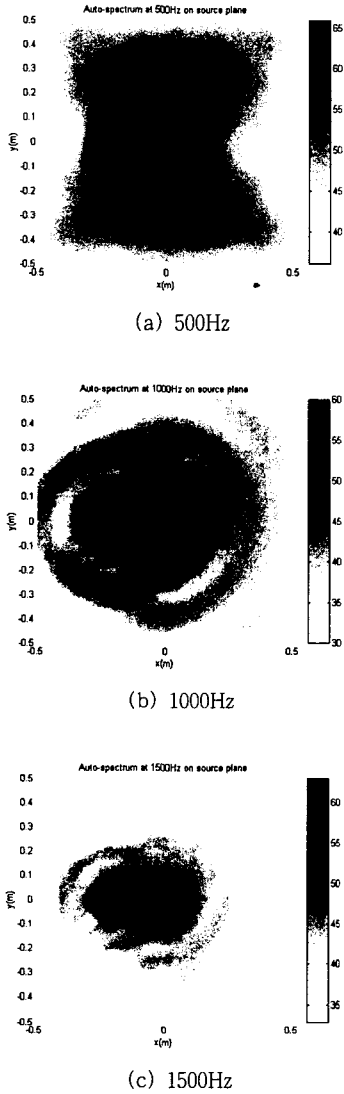


Fig. 7. Auto-spectrum of pressure on the source plane.

Fig. 8은 1000Hz에서 기여량 분석 결과를 보여 준다. Fig. 8(a)는 호스에서 직접 방사되는 소음을, (b)는 양력에 의한 쌍극 음원을, (c)는 항력에 의한 쌍극 음원을, (d)는 실린더가 없는 경우에 홀로그래피를 수행한 결과이다. 각각의 소음원을 잘 구분함을 볼 수 있다. 특히 전체 음압 분포에서

는 볼 수 없었던 항력에 의한 소음원도 기여량 분석을 통해 발견할 수 있었다. Fig. 8(a)와 (d)를 비교하면, 호스에 의해 방사되는 소음에 대한 기여량 분석은 정량적으로도 잘 맞음을 볼 수 있다.

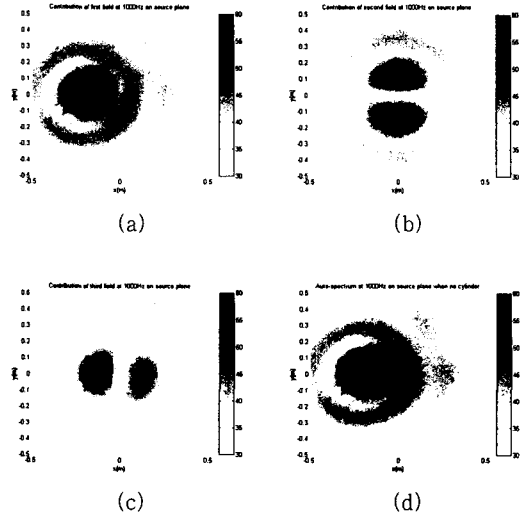


Fig 8. Contribution analysis at 1000Hz, (a) noise from the hose end, (b) noise due to lift force, (c) noise due to drag force, (d) pressure when no cylinder.

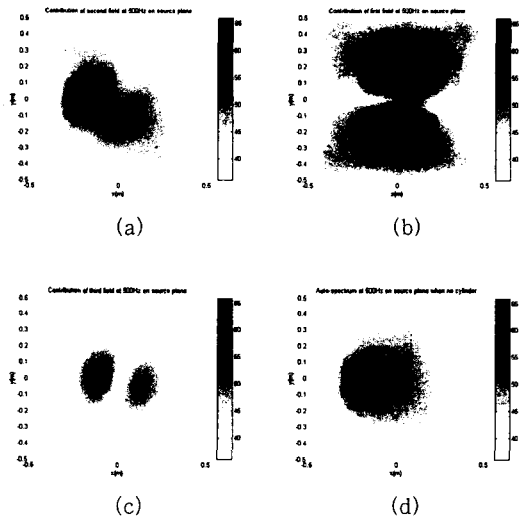


Fig 9. Contribution analysis at 500Hz, (a) noise from the hose end, (b) noise due to lift force, (c) noise due to drag force, (d) pressure when no cylinder.

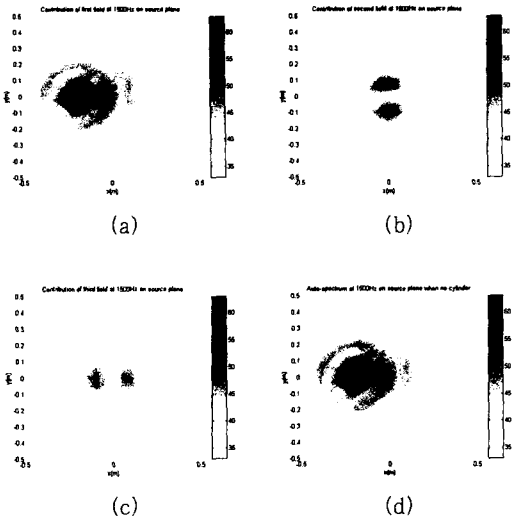


Fig 10. Contribution analysis at 1500Hz, (a) noise from the hose end, (b) noise due to lift force, (c) noise due to drag force, (d) pressure when no cylinder.

Fig. 9는 500Hz에서의 기여량 분석 결과를 보여준다. 1000Hz에서보다는 호스에서 방사되는 소음과 항력에 의한 쌍극 음원이 왜곡되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 7에서도 볼 수 있듯이 저주파수로 갈수록 소음원의 유효 면적이 더 커져 음장의 겹침 현상이 커지기 때문으로 생각된다. 즉 같은 소음원 위치에서의 음압이더라도 저주파수로 갈수록 다른 소음원의 영향이 커지기 때문으로 생각된다.

Fig. 10은 1500Hz에서의 기여량 분석 결과를 보여주는 데, 각각의 소음원이 명확히 구분됨을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문은 대표적인 공력 소음원인 실린더에 의한 와류 유동 소음에 홀로그래피를 적용한 실험 결과를 보여주었다. 다수의 기준 마이크로폰을 이용한 단계적 측정을 통해 홀로그래피를 수행하였다. 그 결과 공력 소음원 역시 홀로그래피에 의해 가시화 할 수 있음을 보였다. 또한 최근에 알려진 기여량 분석 결과를 적용하여 같은 주파수 성분을 갖는 독립적인 소음원들, 본 실험에서는 호스 끝에서 발생하는 소음원, 양력에 의한 쌍극 음원, 항력에 의한 쌍극 음원들을 분명하게 구별할 수 있음을 보였다. 하지만 저주파수에서는 기여량 분석 오차가 큼을 볼 수 있었다. 이는 저주파수에서는 고주파수에 비해 상대적으로 음장의 공간 겹침 현상이 커지기 때문으로 생각된다.

후기

본 논문은 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의해 지원 받았으며, 지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Williams, E. G., and Maynard, J. D., 1980, Holographic imaging without the wavelength resolution limit, *Phys. Rev. Lett.*, 45, pp. 554~557.
- (2) Blevins, R. D., 1990, *Flow-induced vibration*, pp. 349~383.
- (3) Nam, K.-U., and Kim, Y.-H., 2001, Visualization of multiple incoherent sources by the backward prediction of near-field acoustic holography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 109, pp. 1808~1816.
- (4) Ginn, K. B., and Hald, J., 1989, STSF-Practical instrumentation and applications, B&K Technical Review No. 2.
- (5) Hallman, D., and Bolton, J. S., 1992, Multi-reference near-field acoustical holography, *Proc. of Inter-Noise 92*, pp. 1165~1170.
- (6) 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. 649~654.
- (7) Ruhala, R. J., and C. B. Burroughs, 1998, Separation of leading edge, trailing edge, and sidewall noise sources from rolling tires, *Proc. of Noise-Con 98*, pp. 109~114.
- (8) Tomlinson, M. A., 1999, Partial source discrimination in near field acoustic holography, *Appl. Acoust.*, 57, pp. 243~261.
- (9) Hald, J., STSF- a unique technique for scan-based near-field acoustic holography without restrictions on coherence, B&K Technical Review No. 1.
- (10) Bendat, J. S., and Piersol, A. G., 1986, *Random data: Analysis and measurement procedures*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 164~251.
- (11) Newland, D. E., 1993, *An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis*, 3rd ed., Longman, England, pp. 206~211.