

NAH기법을 이용한 공조용 컴프레서 소음저감 응용

김희철¹, 이동연¹, 이화조¹, 심재술^{1*}
¹영남대학교 기계공학부

NAH method for reducing sound source generated in air-conditioning rotary compressor

Heui Cheol Kim¹, Dong-Yeon Lee¹, Hwa-cho Yi¹ and Jaesool Shim^{1*}

¹School of Mechanical Engineering
Yeungnam University, Kyeongsan, Kyongbuk, Korea, 712-749

요약 본 논문에서는 공조용 로타리 컴프레서에서 발생하는 소음을 줄이기 위하여 음향 홀로그래피를 이용하는 방법을 다룬다. 소음이 방사되는 것을 음향 홀로그래피를 이용하여 정상적인 컴프레서와 문제가 있는 컴프레서에 대하여 측정하였다. 음향 홀로그래피는 2가지 컴프레서의 다수의 격자점에서 측정 및 예측하였고, 컴프레서 표면 위로 재구성하였다. 2개의 마이크로폰을 사용하여 1344개의 측정 점에서 측정을 수행하였고, 그 중 1개의 마이크로폰은 스캐닝용이고 또 다른 하나의 마이크로폰은 레퍼런스용이다. 음향 홀로그래피는 소음원을 그래픽적으로 보여주기 위한 좋은 도구이다. 본 논문에서 컴프레서의 표면에서 소음 원 위치를 정확히 찾을 수 있었고, 그 소음원은 소음을 발생시키는 부품과 관계된 것이었다. 음향 홀로그래피는 가전제품에 대해 소음 저감 방법으로서 유용함을 알 수 있다.

Abstract The paper demonstrates how to deal with the Near-field Acoustic Holography method (NAH) for reducing noise source which is generated in air-conditioning compressor. Sound radiation was measured for both normal compressor and fault compressor. The acoustic noise holograms are predicted by measuring at discrete multiple points around the two compressors and are thereafter reconstructed on the surface of the compressors. 1344 measuring points are used by two microphones in which one is scanning microphone and the other is reference microphone. NAH is a good tool for the visualization of Sound so we can show the source of sound graphically. In this paper, the NAH method found the exact noise source position on the surface of the compressor and the noise-related sub part in the compressor. We found the NAH and is very useful as a noise reduction tool for home-appliance device.

Key Words : Near-Field Acoustic Holography (NAH), Rotary compressor, Visualization

1. 서론

소음을 발생시키는 물체 주변의 음장을 해석하려면, 일반적으로 특정 위치에서 측정된 소음의 주파수 분석을 통하여 소음원의 주요한 성분을 알아내는 방법을 통하여 소음원을 추정하는 방법이 일반적이다. 그러나 이와 같은 해석법은 관심이 있는 특정 소음원 주파수는 알아낼 수 있으나, 소음원의 위치를 찾아내기는 어렵다. 소음원의

위치를 알아내는 방법으로 일련의 마이크로폰을 사용하는 방법이 알려져 있는데, 선형 마이크로폰 어레이를 사용하여 음원의 위치와 그 크기를 알아내는 방법과 평면 마이크로폰 어레이를 사용하는 음향 홀로그래피 방법이 있다. 음향 홀로그래피는 홀로그래피 면이라 부르는 특정 거리의 면에서 직접 음압을 측정하여 관심있는 음장을 해석하는 것으로 음원으로부터 근거리의 측정면에서 음압 분포를 직접 측정 후 공간상의 푸리에 변환을 시도

본 논문은 교육과학기술부 재원, 한국연구재단 지원, 광역경제권 선도 산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

*교신저자 : 심재술(jshim@ynu.ac.kr)

접수일 11년 03월 04일

수정일 (1차 11년 03월 29일, 2차 11년 04월 24일)

게재확정일 11년 05월 12일

함으로서 전체 공간의 음압, 매질 입자의 속도 그리고 기타 필요한 음장 분포를 예측하고 결과적으로 원하는 음원의 위치와 소음원의 크기를 파악하는 방법으로 현재 널리 이용되고 있다[1-4]. 이러한 음향 홀로그래피는 홀로그래피를 이루는 면의 형상에 따라 평면 홀로그래피, 원통 홀로그래피, 구면 홀로그래피 등으로 나누어 생각할 수 있다. 최근에는 감쇠파를 고려함으로써 소음원 근처에서도 음장을 예측할 수 있는 근접음장 음향홀로그래피(Nearfield acoustic holography) 해석 방법이 실용화되고 있다[5,6].

우리의 주거 환경 속에서 필수품으로 여겨지는 가정용 공조기(에어컨)는 쾌적하고 조용한 생활환경을 해칠 정도로 다소 소음을 발생시키는 가전기기 중의 하나이다. 또한 사회적 생활수준이 향상됨으로서 정온한 주거 환경에 대한 욕구가 증대하였고 그에 따라 저소음, 저진동 가전기기의 필요성도 함께 증대하였다.

공조용 압축기의 주요 소음원은 압력 맥동에 의한 냉매의 유체음, 컴프레서와 에어컨프레임과 연결된 배관 내의 유체 유동에 의한 배관 진동음, 컴프레서 내부의 빈 공간과의 공명에 의한 공명음, 컴프레서 내부의 모터 구동에 의한 모터 구동음 등 다양한 소음원이 존재한다. 이러한 소음원으로부터 발생한 소음이 컴프레서 내부에서 발생하여 쉘을 통하여 외부로 전달된다. 공조용 컴프레서는 쉘에 직접적으로 내부 구성물들이 용접되어 결합되어 있으므로 내부 음원별로 발생 위치나 그 전달 경로를 알기 어렵다[7-9].

본 논문에서는, 공조용 컴프레서의 이상 소음원을 파악하는데 원통형 음향 홀로그래피 해석방법이 사용될 수 있음을 보일 것이다. 우선, 전통적으로 수행되는 대표 소음 측정용, 하나의 마이크로폰으로 측정함으로써 문제가 되는 주된 주파수 성분을 밝히고, NAH 실험 / 해석 방법을 통해 문제의 주파수 성분이 발생하는 위치를 파악할 것이다.

2. 원통형 홀로그래피 이론[2,10-20]

2.1 일반 해

기본적인 파동 방정식(Wave Equation)은 다음과 같다.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 p : 음압, c : 음속, t : 시간 이다.

실린더 좌표계에서의 Laplace Operator 는 다음과 같다.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2)$$

여기서 r : 반경방향, ϕ : 회전방향, z : 수직축방향을 나타낸다.

또한, 실린더 좌표계에서의 Gradient Operator 는 다음과 같이 된다.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \hat{e}_\phi + \frac{\partial}{\partial z} \hat{e}_z \quad (3)$$

여기서, 파동방정식의 변수를 분리하면

$$p(r, \phi, z, t) = R(r)\Phi(\phi)Z(z)T(t) \quad (4)$$

와 같이 된다.

(4)식을 (1)식에 대입하면, 다음과 같이 된다.

$$\left(\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{rR} \frac{dR}{dr} + \frac{1}{r^2 \Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\phi^2}\right) + \left(\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2}\right) = \frac{1}{c^2 T} \frac{d^2 T}{dt^2} \quad (5)$$

그러므로 주파수 영역에서의 일반적인 해는

$$p(r, \phi, z, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\phi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A_n(k_z, \omega) e^{ik_z z} H_n^{(1)}(k_r, r) + B_n(k_z, \omega) e^{ik_z z} H_n^{(2)}(k_r, r)] dk_z \quad (6)$$

와 같이 된다. 여기서, $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ 이고,

$H_n^{(1)}(k_r, r)$ 는 1종 Hankel 함수이고,

$A_n(k_z, \omega)$ 는 1종 Hankel 함수의 계수이다.

$H_n^{(2)}(k_r, r)$ 는 2종 Hankel 함수이고,

$B_n(k_z, \omega)$ 는 2종 Hankel 함수의 계수이다.

2.2 Exterior problem and Helical Wave Spectrum

Exterior 문제에 있어서는, 위(6)식에서 2번째 항이 0이 되는데 이것은 자유음장 조건이기 때문이다.

$$p(r, \phi, z, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\phi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_n(k_z, \omega) e^{ik_z z} H_n^{(1)}(k_r, r) dk_z \quad (7)$$

Helical wave spectrum은 ϕ 와 z 영역에서 2차원 공간 푸리에 변환을 통하여 다음을 얻을 수 있다.

$$P_n(r, k_z) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\infty}^{\infty} p(r, \phi, z) e^{-in\phi} e^{-ik_z z} dz = F_z F_\phi [p(r, \phi, z)] \quad (8)$$

여기서, F_z , F_ϕ 는 각각 z, ϕ 축에 관한 푸리에 변환이다.

2.3 Supersonic and Subsonic Wave

Supersonic (propagating) wave :

여기서 $k > k_z$ ($c < c_z$), 그리고 k_r 이 실수이면, 사운드는 원-음장(far-field) 로 전파된다.

Subsonic (evanescent) wave :

여기서 $k < k_z$ ($c > c_z$), 그리고 k_r 이 허수이면, 사운드는 원-음장(far-field) 로 전파되지 않는다. 비록, 방사 서클은 원형 실린더에서는 수학적으로 정의되지 않지만, 등가의 방사 서클은 존재한다. 원주 방향의 등가 감쇠 조건 (r 이 실린더 반경이라면)

$$k_\phi = \frac{n}{r} > k \quad (9)$$

으로 된다.

2.4 Inverse Problem

2.4.1 음압의 재구성(Pressure reconstruction)

a 를 소음원의 반경이라 하고, r_h 를 홀로그램 반경이라고 두자. ($a < r_h$)

< Supersonic case >

$$P_n(a, k_z) = \frac{H_n^{(1)}(k_r a)}{H_n^{(1)}(k_r r_h)} P_n(r_h, k_z) \\ \Rightarrow p(a, \phi, z) = F_z^{-1} F_\phi^{-1} \left\{ \frac{H_n^{(1)}(k_r a)}{H_n^{(1)}(k_r r_h)} F_z F_\phi [p(r_h, \phi, z)] \right\} \quad (10)$$

여기서, 여기서, F_z , F_ϕ 는 각각 z, ϕ 축에 관한 푸리에 변환이고, F_z^{-1} , F_ϕ^{-1} 는 각각 z, ϕ 축에 관한 푸리에 역변환이다.

그리고,

$$G_p \equiv \frac{H_n^{(1)}(k_r a)}{H_n^{(1)}(k_r r_h)} \quad (11)$$

는 Supersonic case의 pressure propagator이다.

< Subsonic case >

$$P_n(a, k_z) = \frac{K_n(k'_r a)}{K_n(k'_r r_h)} P_n(r_h, k_z) \\ \Rightarrow p(a, \phi, z) = F_z^{-1} F_\phi^{-1} \left\{ \frac{K_n(k'_r a)}{K_n(k'_r r_h)} F_z F_\phi [p(r_h, \phi, z)] \right\} \quad (12)$$

그리고

$$G_p \equiv \frac{K_n(k'_r a)}{K_n(k'_r r_h)} \quad (13)$$

는 Subsonic case의 pressure propagator이고,

K_n 함수는 Hankel 함수의 인수가 허수가 될 때 사용하는 수정 베셀함수이다.

또한, $k'_r = \sqrt{k_z^2 - k^2}$ 이다.

2.4.2 속도의 재구성

시간 영역에서의 오일러 방정식은 다음과 같다.

$$-\rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}(r, \phi, z, t) = \vec{\nabla} p(r, \phi, z, t) \quad (14)$$

그리고 주파수 영역에서의 오일러 방정식은 다음과 같다.

$$i\rho_0 c k \vec{V}(r, \phi, z, \omega) = \vec{\nabla} p(r, \phi, z, \omega) \quad (15)$$

여기서,

i : 허수, ρ_0 : 공기밀도, c : 음속, k : 파수이다.

위 식 (14), (15) 로부터,

$$\vec{V} = \frac{1}{\rho_0 c} \left(\frac{-i}{k} \frac{\partial}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{n}{kr} \hat{e}_\phi + \frac{k_z}{k} \hat{e}_z \right) P_n(r, k_z) \quad (16)$$

로 된다.

2.4.3 속도의 반경방향 성분

< Supersonic case >

$$\begin{aligned} \dot{W}_n(a, k_z) &= \frac{-ik_r H_n^{(1)}(k_r a)}{\rho_0 c k H_n^{(1)}(k_r r_h)} P_n(r_h, k_z) \\ \Rightarrow \dot{w}(a, \phi, z) &= F_z^{-1} F_\phi^{-1} \left\{ \frac{-ik_r H_n^{(1)}(k_r a)}{\rho_0 c k H_n^{(1)}(k_r r_h)} F_z F_\phi [p(r_h, \phi, z)] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

그리고

$$G_v = \frac{-ik_r H_n^{(1)}(k_r a)}{\rho_0 c k H_n^{(1)}(k_r r_h)} \quad (18)$$

는 Supersonic case의 velocity propagator 이다. 또한, $H_n^{(1)}$ 는 Hankel 함수의 인수에 대한 미분이다.

< Subsonic case >

$$\begin{aligned} \dot{W}_n(a, k_z) &= \frac{-ik'_r K'_n(k_r a)}{\rho_0 c k K_n(k_r r_h)} P_n(r_h, k_z) \\ \Rightarrow \dot{w}(a, \phi, z) &= F_z^{-1} F_\phi^{-1} \left\{ \frac{-ik'_r K'_n(k_r a)}{\rho_0 c k K_n(k_r r_h)} F_z F_\phi [p(r_h, \phi, z)] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, $K'_n(k_r a)$ 는 Hankel 함수의 인수에 대한 미분이다. (H_n, K_n 는 각각 그 인수가 실수, 허수일 때 사용되는 Hankel 함수이다.) 그리고,

$$G_v = \frac{-ik'_r K'_n(k_r a)}{\rho_0 c k K_n(k_r r_h)} \quad (20)$$

는 Subsonic case의 velocity propagator 이다.

2.4.4 사운드 인텐시티의 재구성(Sound Intensity reconstruction)

보통의 사운드 인텐시티, $I(a, \phi, z, \omega)$ 는 다음과 같이 된다.

$$I(a, \phi, z, \omega) = \frac{1}{2} \text{Re} [p(a, \phi, z, \omega) \dot{w}(a, \phi, z, \omega)^*] \quad (21)$$

여기서, Supersonic 사운드 인텐시티는 입자 속도와 음압의 Supersonic 성분으로부터 재구성될 수 있다. Supersonic 사운드 인텐시티는 사운드 소스의 위치를 찾는 데 강력한 틀이 될 수 있고, 원-음장(far-field)의 예측에 사용되어질 수 있다. Supersonic 사운드 인텐시티,

$I^{(s)}(a, \phi, z, \omega)$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$I^{(s)}(a, \phi, z, \omega) = \frac{1}{2} \text{Re} [p^{(s)}(a, \phi, z, \omega) \dot{w}^{(s)}(a, \phi, z, \omega)^*] \quad (22)$$

위 첨자 (s)는 Supersonic을 나타낸다.

3. 기본적인 가정

2절의 원통형 홀로그래피의 원리가 적용되려면, 기본적으로 다음과 같은 가정이 성립해야한다.

자유 음장 조건

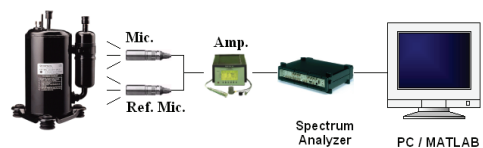
모든 소음원은 홀로그래피의 한 쪽 면에 존재하여야한다. 측정점 사이의 위상 관계는 시간불변량이어야 한다. 만약 측정이 동시가 아니고 한 세트씩 이루어진다면, 고정된 레퍼런스 마이크로폰이 사용되어야하고 홀로그래피 면에 존재하는 측정점 사이의 위상 관계는 일정해야 한다.

4. 실험



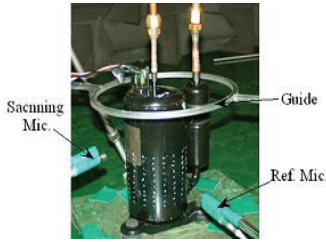
[그림 1] 가정용 에어컨에 장착된 컴프레서

그림 1은 실험의 대상이 되는 공조용 컴프레서로서, 일반 가정에서 흔히 볼 수 있는 가정용 에어컨에 장착되는 컴프레서이다. 이러한 컴프레서를 소음 양품 1대, 소음 불량품 1대를 NAH 소음 시험하여 소음 방사 특성을 비교 분석할 것이다.



[그림 2] NAH 측정 / 해석 과정

그림 2는 일반적인 NAH 측정 및 해석을 수행하는 과정을 나타낸다. 측정 대상물 주위에 일정 거리에서 홀로그래프 면을 따라 스캐닝 마이크로폰으로 측정을 수행하고 레퍼런스 마이크로폰으로는 매 측정 시 마다 레퍼런스 음압을 측정한다. 이때, 측정된 음압정보는 앰프를 통해 스펙트럼 분석기로 전달되어 주파수 분석이 진행되고 최종적으로 컴퓨터에서 NAH 해석을 수행한다.



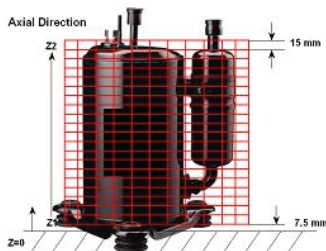
[그림 3] 공조용 컴프레서의 NAH 실험 장치

그림 3는 공조용 컴프레서의 NAH 실험장치를 나타낸다. NAH 측정 홀로그래프 표면으로부터 일정 거리에 레퍼런스 마이크로폰을 위치시키고, 스캐닝 마이크로폰으로 설정된 홀로그래프 표면을 가이드를 따라 측정한다.

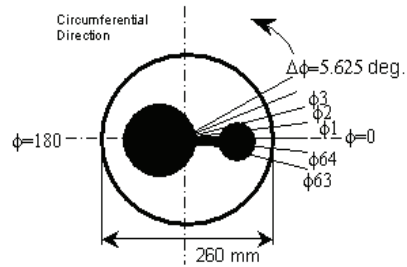
측정 제한 사항은 다음과 같다.

- 측정 Frequency Span : 0~8191 Hz
- 측정 Frequency resolution : 1 Hz
- 측정점의 수 : 21(axial) X 64(Circumferential)
- 레퍼런스 마이크로폰 수 : 1
- 홀로그래프 표면의 측정 반경 : 130mm
- 측정점의 축방향 변위 증가량 (z) : 15 mm
- 측정점의 원주방향 변위 증가량(f) : 5.625 deg.

그림 4 와 그림 5는 NAH측정을 위한 축 방향과 원주 방향의 측정 기하학적 형상을 나타낸다.

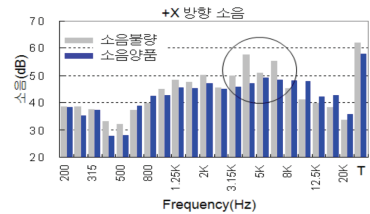


[그림 4] 축방향 홀로그래프 측정 Geography



[그림 5] 원주 방향 홀로그래프 측정 기하 형상

그림 4와 그림 5에 나타난 홀로그래프 면을 따라 스캐닝 마이크로폰을 이동시키며 측정을 수행한다. 소음 측정은 소음 양품 시료 #1대와 소음 불량품 시료 #1대를 각각 실험하여 비교 분석하는 방법으로 수행한다. NAH 소음 시험에 앞서 시료의 양, 부를 판정하기 위해 일반적으로 행해지는 주파수 분석을 마이크로폰 하나로 대표 소음을 측정한다. 대표 소음의 측정은 공조용 컴프레서의 어큐뮬레이터를 오른쪽 방향으로 향하게 한 후 컴프레서의 정면, 중앙에서 측정한다. 그 측정 결과를 그림 6에 정리하였다.



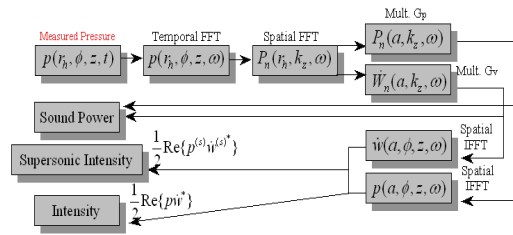
[그림 6] 양,부 판정용 컴프레서 소음측정 결과

그림 6에 나타난바와 같이 소음 불량품은 소음 양품에 비해 4kHz~6.3kHz 부분의 비교적 고주파수 영역의 소음이 높은 것으로 나타났다.

하지만, 소음이 높은 주파수 성분은 알 수 있으나, 그러한 소음을 발생시키는 소음원의 위치는 알기 어렵다.

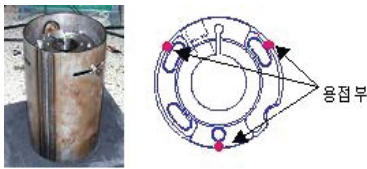
5. 해석

동일한 컴프레서를 그림3과 그림 4에 나타낸 바와 같이 원주방향으로 홀로그래프 면에서 NAH 소음 측정을 수행하고 NAH 해석을 수행한다. NAH 측정과 해석하는 과정을 간단히 정리하여 나타내면 그림 7과 같다.

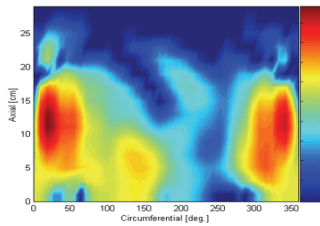


[그림 7] NAH 측정 및 해석 수행 과정

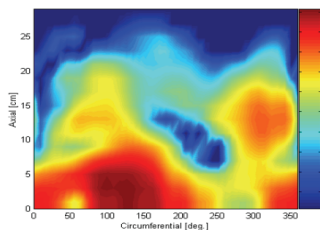
아래 그림 8은 공조용 컴프레서의 셸을 나타내는 그림인데, 이해를 돕기 위해 바닥 부분이 위 방향으로 향하게 하여 촬영한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 바닥 부분에 실제 냉매의 압축이 이루어지고 토출이 이루어지는 실린더가 셸 부분에 직접적으로 용접되어 있고 소음을 감소시키기 위해 머플러가 함께 부착되어있는 구조로 되어 있다.



[그림 8] 공조용 컴프레서 셸 (바닥 부분이 위로 향하게 하였음)



[그림 9] 양품 컴프레서 NAH 해석 결과(4kHz)

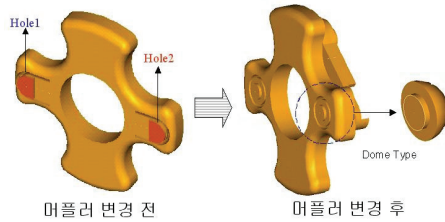


[그림 10] 불량품 컴프레서 NAH 해석결과(4kHz)

위의 그림 9와 그림 10에는 소음 양품과 소음 불량품 컴프레서의 NAH 소음 측정 결과를 (Supersonic Sound Intensity) 나타낸 그림이다. 위 두 그림은 그림6.에서 대

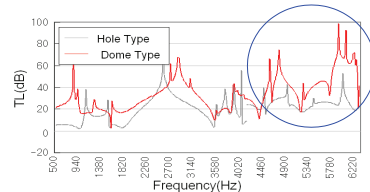
표 소음으로 확인된 4kHz 소음원이 컴프레서의 하단부 실린더가 셸에 용접된 부위에서 발생하고 소음 레벨도 높음을 명확히 보여준다.

그림 11은 소음 불량 컴프레서의 바닥 부분에 장착된 머플러의 구조를 홀(Hole) 타입에서 돔(Dome) 타입으로 변경, 개선한 것을 보여준다.



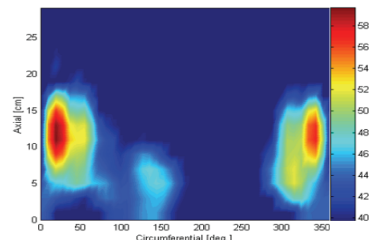
[그림 11] 머플러 개선

그림 12는 머플러 구조의 변경 전, 후의 TL을 나타낸다. 개선후의 TL이 전반적으로 우수하고, 특히 소음 불량 컴프레서의 소음 문제를 일으킨4kHz~6kHz 부분의 TL이 많이 개선되었음을 알 수 있다.



[그림 12] 개선 전, 후의 머플러 TL비교

위 그림 13은 그림 10에 나타난 소음 불량 컴프레서의 바닥 부분에 장착된 머플러를 그림 11과 같이 개선하여 다시 NAH 실험한 결과이다.



[그림 13] 불량품 컴프레서 Spec수정 후 NAH 해석 결과 (4kHz)

TL이 4~6kHz부분에서 개선되었음을 알 수 있다. 머플러 개선 후의 NAH 실험 결과를 나타내는 그림 13은, 그림10에 나타난 바닥 부위의 4kHz 소음원이 없어지고 그

림9와 같이 소음 양품 시료와 유사한 소음 방사 특성을 보임을 쉽게 알 수 있다.

6. 결론

공조용 컴프레서에 대해 원통형 좌표계의 음향 홀로그래피 과정을 수행하였다. 원통형 좌표계의 음향 홀로그래피를 수행함으로써 공조기용 컴프레서 주변의 음향 필드의 가시화를 구현할 수 있었다. 음장 가시화의 구현 결과, 단순한 소음 측정에 의한 대표 소음만으로 주파수 분석 결과로는 알 수 없었던 제품의 소음 발생위치를 쉽게 알 수 있었다. 현재의 NAH 실험 결과에 의하면, 주된 소음원은 컴프레서의 바닥 부분에서 발생함을 알 수 있다. 이것은 냉매의 토출 부분과 머플러 부분에서 소음이 발생함을 추정할 수 있다. 이러한 추론은 공조용 컴프레서의 구조를 상기해보면 상당히 타당한 추론임을 알 수 있고, 실제 머플러를 수정, 개선해 보면 문제가 되었던 위치의 소음원이 사라짐을 확인할 수 있어 NAH 실험 결과의 타당성을 입증할 수 있다.

참고문헌

[1] E. G. Williams, B. H. Houson, P. C. Herdic, S. T. Raveendra, and B. Gardner, "Interior near-field acoustical holography in flight," *J. Acoust. Soc. Am.* 108, pp.1451-1463 (2000).

[2] E. G. Williams, *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*, pp.115-182 (Academic, San Diego, California, 1999).

[3] E. G. Williams, "Regularization methods for near-field acoustical holography," *J. Acoust. Soc. Am.* 110, pp.1976-1988 (2001).

[4] E. G. Williams, "An overview of the inverse problem for sound reconstruction in interior spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 105, 968(A) (1999).

[5] E. G. Williams, H. D. Dardy and R. G. Fink "Nearfield acoustic holography using an underwater, automated scanner," *J. Acoust. Soc. Am.* 78(2), pp.789-798 (1985).

[6] R. C. Wei, A. L. Pate and M. R. Bai, "Power Estimation from Acoustical Holography," *ASME Winter Annual Meeting*, Nov. pp.25-30 (1990)

[7] K. Sano, K. Mitsui, "Analysis of Hermetic rolling piston type compressor noise and counter measurement," *International Compressor Engineering Conference*,

Perdue, 1986, pp.242-250

[8] H. Iwata, K. Sato, M. Hirabayashi, "Prediction of noise from a scroll compressor," *International Compressor Engineering Conference*, Perdue, 1988, pp.977-986

[9] K. Sano, Kawahara, Fujiwara, Ishii, "Experimental study for noise and vibration in Hermetic type compressor(1st report: Reduction of noise caused by resonance of each scroll compressor element)," *Trans. JSRAE*, Vol.14, No.2, 1997, pp.125-136

[10] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (John Wiley & Sons, 1982)

[11] V. Isakov, S. Wu, "On theory and application of the Helmholtz equation least squares method in inverse acoustics," *Inverse Problems*, 18 (2002), pp. 1147-1159.

[12] H.-E. de Bree, "The Microflown: An acoustic particle velocity sensor," *Acoustics Australia* 31, pp.91-94 2003.

[13] J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Near-field acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH," *Journal of the Acoustical Society of America* 78, pp.1395-1413, 1985.

[14] R. Raangs, W. F. Druyvesteyn and H.-E. de Bree, "A low-cost intensity probe," *Journal of the Audio Engineering Society* 51, 344-357, 2003.

[15] S. F. Wu, "On reconstruction of acoustic pressure fields using the Helmholtz equation least squares method," *J. Acoust. Soc. Am.* 107, pp.2511-2522 (2000).

[16] G.-T. Kim and B.-T. Lee, "3-D sound source reconstruction and field prediction using the Helmholtz integral equation," *J. Sound Vib.* 136, pp.245-261 (1990).

[17] S.-C. Kang and J.-G. Ih, "The use of partially measured source data in near-field acoustical holography based on the BEM," *J. Acoust. Soc. Am.* 107, pp.2472-2479

[18] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, "Near-field acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH," *J. Acoust. Soc. Am.* 78, pp.1395-1413 (1985)

[19] B.-K. Kim and J.-G. Ih, "On the reconstruction of vibro-acoustic field over the surface enclosing an interior space using the boundary element method," *J. Acoust. Soc. Am.* 100, pp.3003-3016 (1996)

[20] S. F. Wu, "On reconstruction of acoustic pressure fields by using HELS method," *J. Acoust. Soc. Am.* 107, pp.2511-2522 (2000)

김 희 철(Heui-Cheol Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 부산대학교 대학원 기계설계학과(기계공학석사)
- 1994년 3월 ~ 1995년 9월 : 현대중공업 상신계획부
- 1997년 4월 ~ 2002년 4월 : LG 전자 DA연구소 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 박사과정

<관심분야>

진동, 소음 실험 및 계측, IT, 컴퓨터 통신, 프로그래밍

심 재 술(Jae-sool Shim)

[정회원]



- 2007년 12월 : 워싱턴 주립대 기계공학과 (기계공학박사)
- 2008년 1월 ~ 2008년 9월 : Harvard-MIT 포닥
- 2008년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

물질전달, 나노/멤스 융복합, 전산 열유체, 바이오칩 설계

이 동 연(Dong-Yeon Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학부 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

Nano-mechatronics, Nano-design, Scanning-Probe Microscope

이 화 조(Hwa-Cho Yi)

[정회원]



- 1993년 7월 : 베르린 공대(독일) 기계공학과 (기계공학박사)
- 1987년 8월 ~ 1993년 8월 : 베르린공대 공작기계 및 가공기술 연구소(독일) 연구원
- 1993년 9월 ~ 1996년 2월 : 한국기계연구원 선임연구원
- 1996년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

계측 및 자동제어, 로봇 응용, 공장자동화