

# 무부하 압축기에 의한 냉장고 기계실 소음의 능동제어

## Active Control of Noise Transmitted through Ventilation Openings of the Machinery Room of Refrigerator

구 정 모\* · 정 의 봉\*\* · 김 태 훈\*\*\* · 홍 진 숙†

Jung Mo Koo, Weui Bong Jeong, Tae Hoon Kim and Chinsuk Hong

(Received June 9, 2016 ; Revised July 14, 2016 ; Accepted July 14, 2016)

**Key Words** : Noise Reduce(소음 저감), Active Noise Control(능동 소음 제어), Feedforward Control(피드포워드 제어), Refrigerator(냉장고), Compressor(압축기)

### ABSTRACT

The active control of noise generated by the compressor and transmitted out of the machine room through the windows is implemented based on the FIR filter. The machine room contains most of noise sources of electric home appliances, air-conditioners and refrigerators, for example. To actively reduce the noise from the machinery room. In this paper, the transfer function of the controller for minimization of the acoustic power transmitted through the windows is mathematically formulated. The transfer functions required for implementation of the active controller are the measured. The measurements are conducted in this initial stage under the operation of the compressor with no load. For improvement of the reliability of the transfer function of the compressor to the acoustic power, additional operational measurements are performed. The real time controller is implemented based on the FIR filter using the measured transfer functions and the performance of the active controller is estimated. Control performance is measured about 3 dB ~ 10 dB in reduction of the sound power at the peaks of the compressor noise.

### 1. 서 론

가정 생활에서 노출되는 소음을 저감하여 생활의 질을 높이고자 하는 노력들이 계속 진행되고 있다. 특히 여러 가전제품 중에 냉장고에서 발생하는 소음을 줄이기 위한 연구가 계속 되고 있다. Heo et al<sup>(1)</sup>는 냉장고 원심팬의 BPF 소음을 복합방법을 이용해 예측하고 설계를 변경하여 소음을 저감하였다.

Kim et al<sup>(2)</sup>은 냉장고에 사용되는 왕복동식 압축기 셀의 강성과 질량을 변경하여 방사되는 소음을 저감하였다. Kim et al<sup>(3)</sup>은 냉장고 배관의 구조 변경을 통하여 냉매에 의해 발생하는 소음을 저감하였다. Seo et al<sup>(4)</sup>는 쉬라우드 형상 개선과 기계실 내부 팬과 압축기의 배치 구조 변경을 통해 냉장고에서 발생하는 소음을 저감하였다. Lee et al<sup>(5)</sup>는 선형 압축기에서 토출 case의 접합 부분의 형상을 수정하여 소음을 저감하였다.

† Corresponding Author; Member, School of Mechanical Engineering, Ulsan College  
E-mail : cshong@uc.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

\*\* Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

\*\*\* LG Electronics Inc.

# A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2016 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

냉장고에서 발생하는 소음 중 주로 듣기 싫은 소리로 압축기 소음이 선정된다. 냉장고 기계실에서 압축기에 의해 발생하는 소음은 내부 공기 순환을 위한 환기구를 통해 투과되어 외부로 전파된다. 이러한 소음을 줄이기 위해서 환기구의 형상이나 크기, 위치를 변경하는 방법이 있지만, 해당 방법은 내부 공기의 유동을 방해하여 냉장고의 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

이 연구에서는 압축기 형상이나 내부 형상을 변경하지 않고 냉장고 기계실의 환기구를 투과하는 음향 파워를 최소화하는 제어기를 설계하기 위해 피드포워드 방식의 능동제어기법을 사용하였으며, 제어기 설계를 위한 압축기 전달함수 측정 방법과 스피커의 재생 성능이 제한되어 있을 때 제어기의 설계 방법 및 FIR 필터의 시간 지연에 따라 주파수에서의 위상 변화를 검토하였다.

## 2. 제어 시스템의 구성

Fig. 1은 냉장고 기계실의 능동 소음 제어를 위한 개략적인 구성도를 보이고 있다. 기계실에는 주 소음원인 압축기가 있고 좌우 2개의 통풍구가 있다. 제어 시스템은 참조 신호 센서, 에러 센서, 제어 스피커 및 제어기로 구성되어 있다. 참조 신호 센서는 가속도계를 선정하여 사용하고 에러 센서는 마이크로폰을 선정하여 사용할 것이다. 제어 스피커는 대역폭을 측정하여 선정하였다.

참조 신호 센서는 기계실 내 압축기 shell 표면에 가속도계를 Fig. 2에서 보인 바와 같이 부착하여 사용하였으며, 가속도계의 종류는 교정 자료를 참고하여 관심 주파수 대역에서 신뢰할 수 있는 것으로 선정하였다. 부착 위치는 에러 센서와의 coherence를 측정하여 관심 주파수 대역에서 높은 값을 갖는 곳으로 선정하였다. Fig. 3은 참조 신호와 제어 센서 신호 사이의 coherence function을 보이고 있다. 제어기가 작동되는 주파수와 조화 주파수에서는 높은 coherence를 보이고 있음을 알 수 있다.

제어 스피커는 주파수 전달함수를 Fig. 4(a)와 같이 측정하여 제어 가능 주파수 대역을 미리 파악하였다. 이 연구에서는 200 Hz 이상의 주파수에서 제어가 가능하도록 스피커를 선정하였다. Fig. 4(b)는 제어 스피커의 백색 소음에 대한 재생 성능을 보이

고 있다. 저주파 대역에서는 소리 발생 성능이 좋지

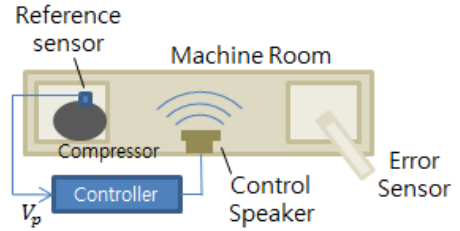


Fig. 1 Schematic diagram of active control system for a machinery room of refrigerators



Fig. 2 Reference sensor on the shell of the compressor and the control speaker next to it

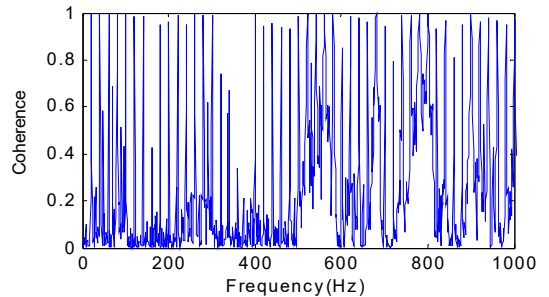


Fig. 3 Coherence function between reference signal and microphone signal

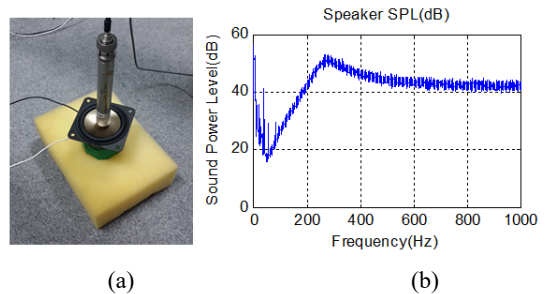


Fig. 4 Measurement of the performance of the con-

ontrol peaker

않으나 약 200 Hz 부근에서 그 성능이 회복되어 이 연구에서 관심 대상인 200 Hz 이상의 주파수 대역에서 능동 제어하기 위한 제어 스피커를 확인 하였다.

에러 센서는 환기구를 통해 전파되는 음향 파워를 추정하기 위한 센서로서 마이크로폰을 양측 중앙에 설치하였다.

### 3. FIR 필터 설계

#### 3.1 이론적 배경

냉장고 기계실의 주 소음원인 압축기에 의한 소음의 능동제어를 위한 블록 다이어그램을 Fig. 5에서 보이고 있다. 여기서 참조 신호는  $V_p(j\omega)$ 로서 압축기의 소음 특성을 대표할 수 있는 한 점에서 계측한 가속도계의 전압 신호이고  $P_p(j\omega)$ 는 이 때 압축기에서 발생하는 음압 신호이다. 두 신호 사이의 전달함수를  $H_p(j\omega)$ 라고 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$P_p(j\omega) = V_p(j\omega)H_p(j\omega) \tag{1}$$

여기서  $j\omega$ 는 각 주파수를 나타낸다.

그리고  $V_s(j\omega)$ 는 제어 스피커에 인가되는 전압 신호이며  $P_s(j\omega)$ 는 이 전압 신호에 의해 스피커에서 발생하는 음압 신호이다. 이들 두 신호 사이의 전달함수를  $H_s(j\omega)$ 라고 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$P_s(j\omega) = V_s(j\omega)H_s(j\omega) \tag{2}$$

또한  $C(j\omega)$ 는 참조 신호  $V_p(j\omega)$ 와 스피커에 인가되는 제어 신호  $V_s(j\omega)$ 간의 전달함수이고 다음과

같은 관계가 성립한다.

$$V_s(j\omega) = C(j\omega) V_p(j\omega) \tag{3}$$

압축기에 의한 소음을 능동적으로 제어하고 있을 때 창밖으로 방사되는 음압은

$$P(j\omega) = P_p(j\omega) + P_s(j\omega) \tag{4}$$

으로 나타낸다.

이 때, 창밖으로 방사되는 음향 파워는 창에서의 음압의 제곱에 비례하므로 비용함수를 식 (5)와 같이 정할 수 있다.

$$\begin{aligned} J(j\omega) &= P^H(j\omega)P(j\omega) \\ &= (P_p + P_s)^H(P_p + P_s) \\ &= (P_p + H_s V_s)^H(P_p + H_s V_s) \\ &= P_p^H P_p + P_p^H H_s V_s \\ &\quad + V_s^H H_s^H P_p + V_s^H H_s^H H_s V_s \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)는 표준 Hermitian 2차 함수의 형태를 보이고 있으며 이로부터 비용함수인 음향파워가 최소화 되는 제어 신호를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial J(j\omega)}{\partial Re(V_s)} = 0, \quad \frac{\partial J(j\omega)}{\partial Im(V_s)} = 0 \tag{6}$$

식 (6)으로부터

$$V_s = -(H_s^H H_s)^{-1} (H_s^H H_p) V_p \tag{7}$$

식 (3)과 식 (7)로부터 제어기의 전달함수  $C(j\omega)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$C(j\omega) = -(H_s^H H_s)^{-1} (H_s^H H_p) \tag{8}$$

실제 제어 실험 시 실시간 데이터 처리를 위해 주파수 영역 제어기를 FIR 필터로 설계하였다. FIR 필터의 계수를 구하기 위해 식 (8)로 주어진 주파수 전달함수를 역 푸리에 변환하여 구하였다. 역 푸리에 변환을 통해 구한 FIR 필터 계수는 causality를 고려하여 재배치되어야 하며, 이로 인하여 filter length의 반( $T_{filter}/2$ )만큼의 시간적 지연이 발생하였다<sup>(7)</sup>. 이 시간지연으로 인하여 제어기는 식 (9)와 같은 위상 변화를 발생시킨다.

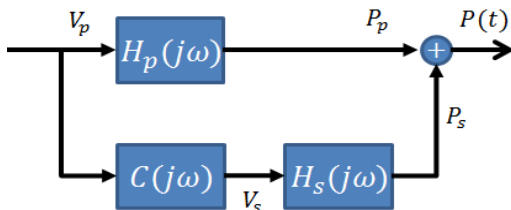


Fig. 5 Block Diagram of the feedforward control system for active control of a machinery room of refrigerators

$$x_{delayed}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi f(t - \frac{T_{filter}}{2})} d\omega \quad (9)$$

$$= x(\omega)e^{-j\pi f T_{filter}}$$

여기서  $x(t)$ 는 시간 지연이 없는 FIR 필터 계수이고,  $f$ 는 각 주파수,  $T_{filter}$ 는 Filter Length,  $e^{-j\pi f T}$ 는 주파수에 따른 위상 변화,  $x_{delay}(j\omega)$ 는 시간적 지연이 발생한 FIR 필터의 주파수 영역 응답을 나타낸다.

따라서 위의 시간 지연에 의한 위상 변화를 보정해 주려면 인위적인 시간 지연을 넣어 주어야 하고, 보정에 필요한 시간 지연 값은 제어하려는 주파수에 따라 식 (10)과 같이 달라지게 된다.

$$\tau = \frac{n}{f_{fund}} - \frac{T_{filter}}{2} \quad (10)$$

여기서  $f_{fund}$ 는 제어하고자 하는 고조파 주파수 중 첫 번째 성분이고,  $T_{filter}$ 는 필터를 제작할 때의 시간 길이이다. 그리고  $n$ 은  $n = 1, 2, \dots$ 로  $\tau$ 가 양수가 되는 첫 번째 자연수를 선정하여 시간 지연 값이 항상 양수가 되게 하고 시간 지연을 최소화 하였다.

$T_{filter}$ 가 필터의 주파수 간격  $\Delta f$ 의 역수이므로,  $f_{fund}$ 가  $\Delta f$ 의  $2n$ 배이면 식 (10)에 의해 시간 지연  $\tau$ 가 0이 되어 인위적인 시간 지연이 필요하지 않다. 하지만 그렇지 않은 주파수에 대해서는  $\tau$ 값이 존재하여 제어 실험을 수행할 때 simulink 블록선도에  $\tau/dt$ 의 정수 값만큼의 딜레이 블록을 추가해 주어야 한다. Fig.6은 실제 제어 실험 시에 제어기의 FIR 필터 출력부분에 위상 지연을 위한 딜레이 블록을 추가한 블록 선도를 나타내었다.

### 3.2 전달함수 측정

식 (8)에서 보인 바와 같이 제어기를 설계하기 위

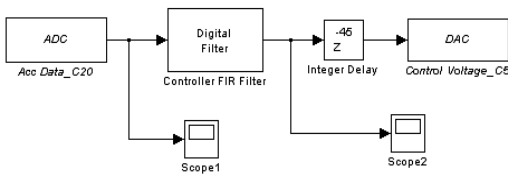


Fig. 6 Block diagram for 51.1 Hz operation control with artificial delay

해 압축기 가속도 신호와 에러 센서의 음압 신호 사이의 전달함수인  $H_p$ (향후 압축기 전달함수라 칭함)와 제어 스피커 입력신호와 에러 센서의 음압 신호 사이의 전달함수  $H_s$ (향후 스피커 전달함수라 칭함)를 측정하였다. 압축기 가속도계와 제어스피커의 위치는 Fig. 2에서 보이고 있고, 에러 센서인 마이크론의 위치는 Fig. 7에서 보이고 있다. 측정 시 주파수 해상도는 0.1 Hz, 샘플링 주파수는 5120 Hz로 하고 99 % overlap하여 100회 평균하였다.



Fig. 7 Location of the microphone for the error sensor

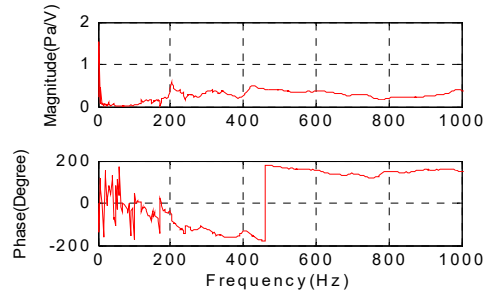


Fig. 8 Transfer function of the control peaker to the acoustic pressure at the center of the window

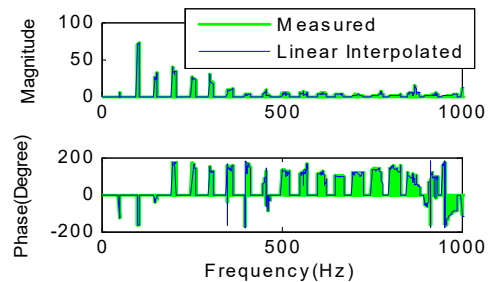


Fig. 9 Transfer function of the compressor to acoustic pressure at the center of the window

스피커 전달함수는 백색 소음의 전압을 입력신호로 하고 이 때 발생된 왼쪽 창에서의 음압을 출력신호로 하여 전달함수를 측정하였다. 압축기 전달함수는 입력 신호를 압축기 전면 상단의 가속도를 측정하여 B&K Nexus를 통과시켜 출력되는 전압으로 선정했으며 왼쪽 창에서의 음압을 출력 신호로 전달함수를 측정하였다. 또한 압축기 내부에 냉매가 흐르지 않게 하고, 기계실의 팬을 끈 상태로 전달함수를 측정해 다른 요인의 영향을 줄였다.

Fig. 8은 측정된 스피커 전달함수를 보이고 있다. 스피커 전달함수는 200 Hz 이하의 대역에서 낮은 성능을 보이다가 200 Hz 이상에서 성능이 회복되는 것을 확인할 수 있다. 또한 200 Hz 이하의 대역에서 상관도가 낮아 위상 값이 정확하지 않게 측정 되었다.

압축기 전달함수는 전 주파수에 대해 가진하여 전달함수를 측정할 수 없고 압축기의 작동 주파수와 조화 주파수에서만 전달함수의 신뢰성이 확보된다. 압축기는 여러 가지 환경변화에 작동회전수가 변할 수 있으므로 압축기에 50 Hz에서 52 Hz 사이의 작동 주파수를 0.1 Hz 간격으로 입력한 뒤 측정된 전달함수들 중에 coherence가 높은 전달함수만 모아서 압축기 전달함수를 구성하였다.

앞서 측정된 전달함수를 이용해 주파수 간격이 2.5 Hz인 제어기를 설계하기 위해 전달함수를 선형 보간하였다. Fig. 9의 굵은 선 그래프는 앞서 측정된 신뢰성이 있는 전달함수 값들을 모아 놓은 그래프이고, 얇은 선 그래프는 전달함수의 값이 존재하지 않는 부분들에 대해 0.1 Hz 간격으로 선형 보간하여 나타낸 그래프이다.

측정한 전 주파수에서 coherence가 높아 연속으로 나타나는 스피커 전달함수와 달리, 압축기의 전달함수는 작동 주파수인 50 Hz에서 52 Hz의 고조파 성분들 이외에는 신뢰성이 낮기 때문에 전달함수의 크기를 모두 0으로 처리하였다.

### 3.3 제어기 설계

식 (8)과 선형 보간한 압축기 전달함수, 스피커 전달함수를 이용해 창밖으로 투과되는 음향 파워를 최소화하는 제어기를 설계하였다. 제어기는 2.5 Hz 간격으로 설계하였으며 50 Hz에서 52 Hz 고조파 성분들에서만 전달함수의 coherence가 높아 신뢰성이 있

어 해당 주파수 이외에서 전달함수의 크기를 모두 0으로 설정했기 때문에, 그 주파수에서 제어기의 게인이 모두 0이 되었다. 설계한 제어기 게인의 크기와 위상은 Fig. 10에 나타내었다.

200 Hz 이하에서 스피커의 재생 성능이 낮아 저주파에서 높은 전압을 인가하면 고조파 왜곡현상으로 인해 인가된 주파수의 고조파 성분에서 제어 성능이 하락하기 때문에, 200 Hz 이하인 제어기의 게인을 모두 0으로 처리하였다. 스피커의 전달함수가 비교적 낮고 압축기 전달함수의 크기가 큰 300 Hz 부근에서 가장 큰 제어 게인이 필요하며 고주파로 갈수록 압축기 전달함수의 크기가 낮아지고 스피커 전달함수의 크기가 커져서 제어 게인 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

앞서 설계한 제어기를 DSP 장비에 탑재하여 실시간 제어에 사용하기 위해 Fig. 10에서 보인 제어기의 전달함수를 역 푸리에 변환하고 causality에 맞게 재조정하여 FIR 필터로 구현 하였다. FIR 필터의 record length는 0.4초, 필터의 개수는 2048개로 설계하였다. 설계한 FIR 필터 계수는 Fig. 11에 나타내었다.

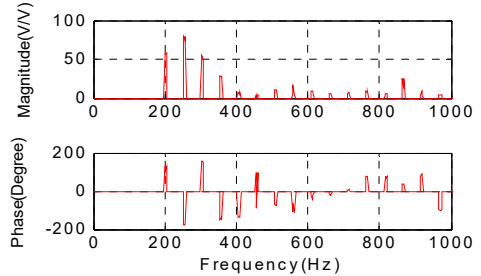


Fig. 10 Transfer function of the active controller to minimize the acoustic power through the window

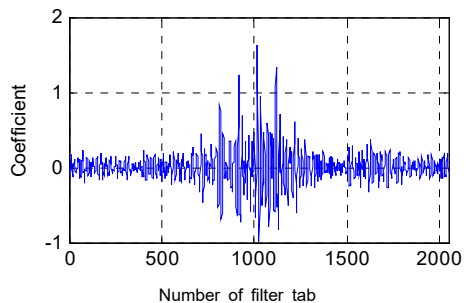


Fig. 11 FIR filter coefficient of the controller

#### 4. 제어 실험 결과

앞서 설계한 제어기의 제어 성능을 실험하기 위해 실제 제어 실험을 수행하였다. 참조 신호 계측 및 제어 신호 계산을 위한 DSP(digital signal processor) 장비로는 D-Space RTI 1103을 사용하였고, 전달함수 측정 및 제어기를 설계할 때와 동일한 가속도 측정을 위해 가속도계를 B&K Nexus에 연결하여 출력되는 전압 신호를 계측하였다. 또한 제어 전/후의 음압 변화 성능 측정을 위해서 PCB Electronics Microphone을 기계실 왼쪽 창 출구에 설치하였으며, 음압 신호의 스펙트럼 분석을 위하여 LMS SCADAS를 사용하였다.

제어 성능 측정 실험 시 전달함수를 측정한 상황과 동일하게 압축기 내부에 냉매가 존재하지 않으며, 압축기 흡입관과 토출관은 연결되지 않고 열려

있는 상태이다. 그리고 기계실 내부에 존재하는 팬이 작동하지 않는 상태에서 측정하였다.

제어 대상 주파수로는 주파수에 따른 시간 지연의 보상 효과를 확인하기 위해 시간 지연이 필요 없는 50 Hz와 실제 압축기 작동 주파수인 51.1 Hz를 선정하였고, 저주파수로 갈수록 스피커 재생 성능이 낮아져 고조파 왜곡 현상이 심해질 수 있어 이 때의 성능 차이를 보기 위해 소음을 200 Hz까지 제어했을 때와 300 Hz까지 제어했을 때 각각의 제어기를 설계하여 제어 전/후의 음압을 측정하였다.

Fig. 12는 압축기가 50 Hz로 작동하고, 제어기는 200 Hz 이상을 제어할 때의 실험 결과를 나타내었다. 음압의 크기는 dBA ref. 20  $\mu$ Pa로 나타내었으며, 제어 전 음압은 작동 주파수인 50 Hz의 고조파 성분들로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 제어 전 음압은 200 Hz에서 가장 크게 나타나며 50 Hz와 100 Hz에서도 40 dBA 이상의 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 200 Hz 이하에서는 제어기 계인의 크기를 0으로 처리하여 제어하지 않았기 때문에 제어 성능이 나타나지 않으며, 이외의 주파수들에 대해서는 600 Hz를 제외하고 peak별로 10 dB 이상 음압이 감소한 것을 확인할 수 있다. 재생 성능이 좋은 스피커를 사용하면 주 소음 성분인 50 Hz에서 200 Hz의 저주파 성분들도 제어할 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 13은 압축기가 50 Hz로 작동하고, 제어기는 300 Hz 이상을 제어할 때의 실험 결과를 나타내었다. 원래 200 Hz까지 제어할 때 제어 성능이 낮던 600 Hz의 peak가 고조파 왜곡 현상의 영향을 작게 받아 제어 성능이 조금 높게 나타나는 것을 확인할

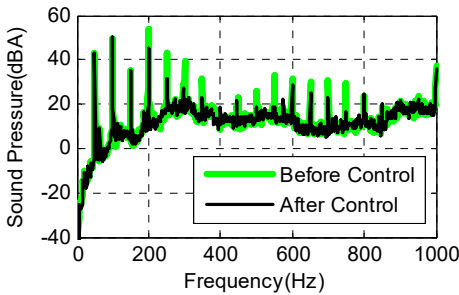


Fig. 12 Control performance of the active controller with zero gain up 200 Hz when the compressor operates at 50 Hz

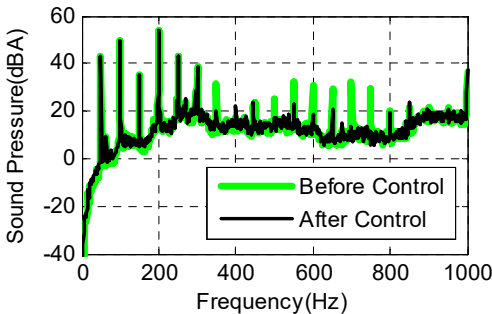


Fig. 13 Control performance of the active controller with zero gain up 300 Hz when the compressor operates at 50 Hz

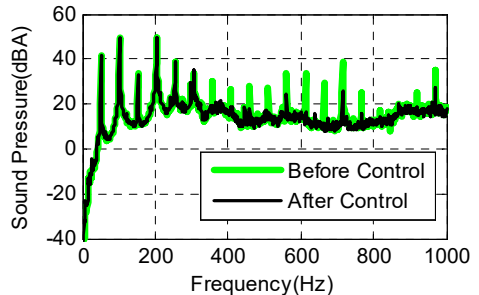


Fig. 14 Control performance of the active controller with zero gain up 300 Hz when the compressor operates at 51.1 Hz

수 있다. 이 외의 특성은 Fig. 12에 나타난 특성과 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 압축기가 51.1 Hz로 작동하고, 제어기는 300 Hz 이상을 제어할 때의 실험 결과를 나타내었다. 해당 주파수에서는 50 Hz 작동 시와 유사하게 소음이 발생하였으나 700 Hz 부근에서 40 dBA 이상의 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 시간 지연에 의한 제어기 위상 보정 효과를 보기 위하여 실험하였으며, 필요한 시간 지연 값은 식 (10)에 따라 0.0153 s를 주었다. 시간 지연을 적절하게 주면 작동주파수가 변하는 상황에 대해서도 제어 성능을 발휘할 수 있는 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 냉장고 압축기에 의해 발생하는 소음의 능동 제어에 관하여 연구하였다. 먼저 능동 제어 시스템의 구성을 위해 참조신호, 액추에이터 및 에러 신호를 선정하였다. 음향파워 전달을 최소화하기 위한 제어기는 주파수 영역에서 압축기와 스피커의 전달함수를 측정하여 설계하고 이를 FIR 필터로 구현 하고 성능확인을 위해 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

소음원의 전 주파수에 대한 전달함수를 확보할 수 없을 때 제어 주파수 부근에서 압축기 전달함수의 신뢰성을 확보하기 위해 0.1 Hz 간격의 전달함수를 측정하고 이를 선형 보간 하여 압축기 전달함수로 사용할 수 있음을 확인하였고, 필터 개수를 줄이기 위해 2.5 Hz 간격으로 제어기를 설계할 수 있음을 확인하였다. 냉장고 소음을 제어하기 위한 스피커는 실제 냉장고에 장착 할 수 있는 작은 크기로 선정하였으며, 이로 인해 스피커의 재생 성능이 200 Hz 이상으로 제한되었다. 이 때문에 제어기의 제어 영역을 200 Hz 이상으로 설계하였으며, 제어기의 일부 주파수에서의 게인을 0으로 만들어도 제어가 가능한 것을 실시간 제어를 통해 확인하였다.

제어 실험 결과로 압축기 50 Hz 작동, 200 Hz 이상을 제어할 때 가장 큰 peak인 200 Hz의 음압이 8 dB, 250 Hz 이상의 peak에서 3 dB에서 10 dB 가량 음압이 감소하였다. 그리고 고조파 왜곡현상에 의한 영향을 살펴보기 위해 같은 작동 주파수에서 300 Hz 이상을 제어할 때 600 Hz에서의 제어 성능이 개선되는

것을 확인할 수 있었다. 또한 필터의 시간 지연으로 인한 위상 지연을 추가적인 시간 지연으로 보상했을 때 제어 성능을 확인하기 위해 실제 압축기 작동 주파수인 51.1 Hz로 작동할 때 300 Hz 이상을 제어하는 경우 시간 지연을 주었을 때 각 peak의 음압이 10 dB 가량 감소하는 것을 확인하였다.

이 연구를 통해 냉장고 압축기 전달함수 측정 및 제어에 대한 방법을 확립하였고, 추후에 고조파 왜곡 현상에 의한 제어 성능 저하 및 제어 주파수별로 다른 시간 지연을 주어야 하는 불편을 극복할 수 있는 제어기 설계와 실제 냉장고에서 냉매가 존재하고 웬 소음이 작동할 때의 소음을 제어하는 연구를 진행할 예정이다.

## References

- (1) Heo, S., Cheong, C., Seo, M. Y. and Kim, S., 2009, Application of Hybrid Techniques for the Prediction of Internal BPF Noise of Centrifugal Fan in Refrigerators and Its Reduction, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 684~685.
- (2) Kim, Y. T., Lee, J. W. and Joo, J. M., 2005, Reduction of Radiated Noise in a Reciprocating Compressor, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 431~434.
- (3) Kim, M. S., Han, H. S., Kim, T. H. and Jeong, W. B., 2009, Reduction of Refrigerant-induced Noise of the Refrigerator by Modification of the Evaporator Inlet Pipe, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 10, pp. 1012~1020.
- (4) Seo, S. H., Kwak, T. H., Kim, C. J., Park, J. K., Cho, K. S., 2000, Noise and Vibration Reduction of A Household Refrigerator, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1133~1137.
- (5) Lee, J. H., Jeong, W. B. and Kim, D. J., 2009, Flow-induced Noise Analysis and Its Reduction Design of Discharge System in Linear Compressor, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 680~681.
- (6) Hong, C., 2005, Active Control of Resiliently-mounted Flexible Structures, Ph.D. Thesis. Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.

(7) Ji, S., Hong, C., Jeong, W. B. and Kim, T. H., 2015, Active Control of Noise Propagated through Ventilation Openings of Enclosures Using an FIR Filter, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 191~198.

(8) Stephen, E., 2000, Signal Processing for Active Control, Academic Press, pp. 53~55

(9) Nelson, P. A. and Elliott, S. J., 1990, The Active Control of Sound, Electronics and Communication Engineering Journal, Vol. 2, No. 4, pp. 127~136.

(10) Cunningham, E. P., 1992, Digital Filtering, Wiley.



**Jungmo Koo** received B.S. degrees from Pusan National University in 2015 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in active noise control.



**Weuibong Jeong** received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong is currently a pro-

fessor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element analy-

sis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.



**Taehoon Kim** received his B.S. degree from Changwon University in 2003 and M.S. degree from Pusan National University in 2005, respectively. He is currently a Pricipal Researcher at LG electronics Co., Changwon, Korea.



**Chinsuk Hong** received B.S. in mechanical engineering and an M.S. in dynamic and vibration from Youngnam University, Korea, in 1988 and 1991, respectively. He worked for the Naval System Development center in Agency

Defense Development (ADD), Korea, for 12 years from 1991. He then joined the Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton, UK, in 2003, to pursue his Ph.D. He received the Ph.D. in sound and vibration, in 2005. He was then with ISVR as a research fellow until 2006. After 3 years research work at Pusan National University, Korea, from 2006, he is now with Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan College from 2009. His research interests include active noise and vibration control, flow-induced noise and underwater shock response analysis.