

FxLMS 알고리즘 기법을 이용한 식기 세척기의 펌프 소음 능동 제어

Active control of pump noise of dishwashers using FxLMS algorithm

탁언수,¹ 오한음,² 홍진숙,^{3†} 정의봉⁴

(Un-su Tark,¹ Han-Eum Oh,² Chinsuk Hong,^{3†} and Weui-Bong Jeong⁴)

¹부산대학교 기계공학부, ²(주)에코 에너지 기술 연구소, ³울산과학기술대학교, ⁴부산대학교
(Received December 9, 2020; revised December 24, 2020; accepted January 11, 2021)

초 록: 본 논문에서는 가정용 식기세척기의 저주파 대역 방사 소음 저감을 위하여 능동 소음 제어를 수행하였다. 먼저 식기세척기의 소음 환경 분석을 통해 펌프 소음이 저주파 대역 방사 소음에 가장 크게 기여하고 있음을 확인하였고 이를 고려하여 참조 신호를 선정하였다. 참조 신호는 음향피드백을 방지하기 위해 가속도계를 이용하여 펌프 몸체에 부착하여 획득하였다. 오차 신호 센서는 식기세척기 전방 1 m, 높이 0.5 m에 위치한 마이크로폰으로 선정하였다. 다음으로 제어기 설계를 위해 식기세척기의 작동 회전수 2,500 rpm, 2,600 rpm, 2,800 rpm에 대하여 오차 신호와 참조 신호를 측정하고, 2차 경로 전달함수를 측정하였다. 그리고 설계된 제어기를 Digital Signal Processor(DSP) 장비에 탑재 시켜 제어 성능을 시험으로 확인하였다. 시험 결과 펌프 작동 주파수의 7차 배수 성분에서는 회전수 별로 1.93 dB, 4.43 dB, 5.15 dB 만큼 줄었고 12차 배수 성분에서는 회전수 별로 6.67 dB, 2.34 dB, 4.28 dB 만큼 줄었다. 그리고 overall Sound Pressure Level(SPL)은 회전수 별로 0.84 dB, 2.58 dB, 1.48 dB 만큼 줄었다.

핵심어: 식기 세척기, 능동 소음 제어, 오차 신호, 참조 신호, Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) 알고리즘, Digital Signal Processor (DSP)

ABSTRACT: In this paper, active noise control was performed to reduce radiated noise in the low frequency band of dishwashers. First, through an analysis of the noise environment of the dishwasher, it was confirmed that the pump noise contributed the most to the radiated noise in the low frequency band, From the result of the noise environment analysis, the reference signal was selected to be the vibration signal of the pump body. The reference signal was obtained by using the accelerometer on the pump body, which can prevent acoustic feedback. The error signal sensor was selected as a microphone located at 1 m in front of the dishwasher and 0.5 m in height. And to design the controller, the error signal and the reference signal were measured at the operational rpms of the dishwasher at 2,500 rpm, 2,600 rpm and 2,800 rpm, and the secondary path transfer function was measured. The designed controller was mounted on Digital Signal Processor (DSP) equipment, and the control performance was verified experimentally. As a result of the measurement at the 3 operational rpms, the 7th multiple component of pump operating frequency decreased by 1.93 dB, 4.43 dB, 5.15 dB per rpm, and the 12th multiple component decreased by 6.67 dB, 2.34 dB, 4.28 dB per rpm. And overall Sound Pressure Level (SPL) decreased by 0.84 dB, 2.58 dB, 1.48 dB by rpm.

Keywords: Dishwasher, Active noise control, Error signal, Reference signal, Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) Algorithm, Digital Signal Processor (DSP)

PACS numbers: 43.40.At, 43.50.Ki

†Corresponding author: Chinsuk Hong (cshong@us.ac.kr)

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Republic of Korea

(Tel: 82-52-297-3134, Fax: 82-52-297-3137)



Copyright©2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

최근 삶의 질 향상과 기술이 발전함에 따라 소비자들의 가전제품에 대한 요구 사항이 까다로워지고 있다. 모터에 의해 가동되는 가전제품이 작동하면서 내는 소음은 주거 환경에서 발생하는 주된 소음의 원인으로 볼 수 있다. 이러한 소음은 인간에게 스트레스를 주고 휴식을 방해한다. 따라서 최근에는 가전제품의 기능적 성능뿐만 아니라 소음이나 진동을 고려하는 연구가 요구되고 있다.^[1,2] 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 가전제품 중에서 오랫동안 주거 환경에서 자리 잡아온 세탁기나 냉장고 같은 경우에는 제품의 소음 저감에 대한 연구가 지속적으로 이루어져왔다.^[3-9]

반면에 최근 빌트인 가전제품 시장의 규모가 커짐에 따라 사용량이 증가한 가정용 식기세척기의 경우에는 소음 저감에 관한 연구가 아직 미흡한 실정이다. 가정용 식기세척기의 소음에는 펌프 회전에 의한 소음과 노즐에서 물이 분사되면서 내부 구조물에 부딪히는 소음이 있다. 이러한 소음을 저감하기 위한 방법으로 흡, 차음재를 이용하는 수동적 소음제어를 이용해 왔다. 하지만 흡, 차음재를 이용하는 방법은 500 Hz 미만의 저주파 영역의 소음에 대해서는 소음 저감 효과가 비교적 적은 편이다. 한편 최근 Digital Signal Processor(DSP) 장비의 발달로 실시간으로 신호를 처리해 소음을 제어하는 능동 소음 제어에 대한 연구가 많은 분야에서 활발히 이루어지고 있다.^[10-12] 능동 소음 제어는 수동 소음 제어와 달리 저주파 소음 저감에 효과가 있고 제품의 내부 구조에 대한 제약이 적은 장점이 있다. 식기세척기에서도 능동 소음 제어에 관한 연구^[13]가 진행되었지만 컴퓨터 시뮬레이션으로 제어 성능을 확인하고 실제 시험을 통해 제어 성능을 검증한 연구는 아직 진행되지 않았다.

본 논문에서는 가정용 식기세척기에 발생하는 소음을 능동 제어하여 소음을 저감시키는데 목적을 두고 있다. 능동 소음 제어를 하기 위하여 먼저 식기세척기 소음 환경 분석을 수행하였다. 소음 환경 분석을 통해 제어 대상 소음을 선정하였다. 해당 소음을 제어하는데 가장 적절한 참조 신호와 스피커 위치를

선정하여 제어 시스템을 구성한다. 그리고 Filtered-x Least Mean Square(FxLMS) 알고리즘 기법을 이용하여 제어기를 설계하고 전산해석으로 소음 저감을 예측하였다. 설계한 제어기를 DSP 장비에 탑재하여 제어 성능 시험을 진행하여 제어 전후 소음 수준을 비교하였다.

II. 능동 소음 제어 알고리즘

본 연구에서는 능동소음제어기 설계를 위해 두 가지 알고리즘을 사용하였다. 첫째는 능동 제어기 운용에서 요구되는 2차 경로(제어 스피커에서 측정점까지의 경로)의 모델링을 위해 LMS 알고리즘^[14]을 사용하였다. 그리고 둘째는 2차경로가 존재하는 모델의 능동제어기 운용을 위해 FxLMS 알고리즘^[15]을 사용하였다.

LMS 알고리즘의 블록선도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 참조 신호 $x(n)$ 이 필터 차수가 I 차의 제어기인 \mathbf{W} 를 통과한 후의 신호 $y(n)$ 과 외란신호 $d(n)$ 사이의 오차 신호 파워를 최소화시키는 제어기를 설계하는 기법이다. 오차신호 $e(n)$ 은 다음의 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y(n) \\ &= d(n) - \mathbf{W}^T x(n), \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{W} = [W_0 \quad W_1 \quad \dots \quad W_{I-1}]^T. \quad (2)$$

$$x = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-I+1)]^T. \quad (3)$$

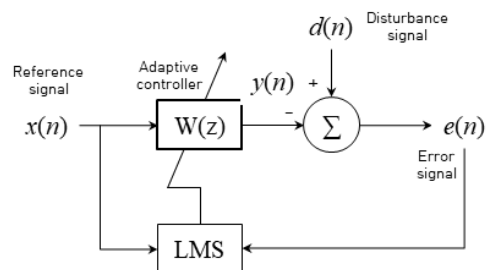


Fig. 1. Block diagram of LMS algorithm.

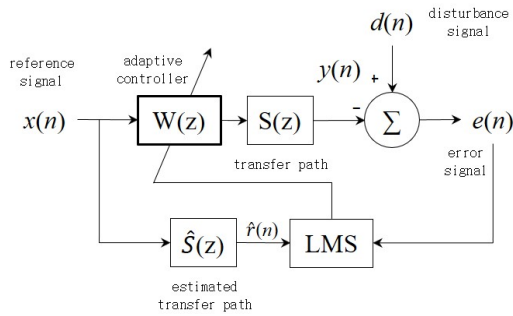


Fig. 2. Block diagram of FxLMS algorithm.

여기서 I 는 필터 차수를 뜻한다. 이 때 Eq. (1)을 이용하여, 오차 신호의 파워를 나타내면 다음과 같다.

$$J = e^2(n) = \{d(n) - \mathbf{W}^T \mathbf{x}(n)\}^2, \quad (4)$$

여기서 J 는 목적함수를 뜻한다. Eq. (4)의 목적함수를 최소화하는 필터 계수를 구하기 위해, 경사 하강 법을 이용하였으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) - \mu \frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}(n)} \\ \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) + 2\mu \mathbf{x}(n)e(n), \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 μ 는 수렴계수이다. 수렴 계수가 커짐에 따라 필터의 수렴 속도가 빨라지는 반면 수렴 계수가 너무 크면 필터는 발산하게 된다. 그러므로 적절한 수렴 계수의 선택이 중요하다. 수렴 계수의 범위는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$0 < \mu < \frac{1}{I\kappa^2}. \quad (6)$$

FxLMS 알고리즘의 블록 선도를 Fig. 2에 나타 내었다. FxLMS 알고리즘은 LMS 알고리즘에서 참조신호가 전달경로를 통과한 신호가 입력으로 들어가게 된다. $\hat{S}(z)$ 은 실제 전달 경로 $S(z)$ 를 2.1절에서 설명한 LMS 알고리즘 방식을 통해 Finite Impulse Response(FIR) 필터 형식으로 추정된 전달 경로를 의미한다. 여기서 오차 신호 $e(n)$ 은 다음과 같이 나타낼

수 있다.

이 때 Eq. (7)을 이용하여, 오차 신호의 파워를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y(n) \\ &= d(n) - \mathbf{S}^T \mathbf{W}^T \mathbf{x}(n). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} J &= e^2(n) \\ &= \{d(n) - \mathbf{S}^T \mathbf{W}^T \mathbf{x}(n)\}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Eq. (8)의 목적함수를 최소화하는 필터 계수를 구하기 위해, 경사 하강 법을 이용하였으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) - 2\mu \hat{\mathbf{r}}(n)\mathbf{e}(n) \\ \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) - \mu \frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}(n)}. \end{aligned} \quad (9)$$

또한 수렴 계수의 범위는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$0 < \mu < \frac{2}{\|s\|^2 \sigma_x^2 (I + 2D_{eq})}, \quad (10)$$

여기서 $\|s\|^2$ 은 전달 경로의 충격응답에 의해 생겨진 벡터의 놈을 의미하고, σ_x^2 은 참조 신호의 파워를 의미하고 D_{eq} 는 전달 경로의 시간 지연 요소를 의미한다.

III. 식기 세척기 소음 환경 분석

능동 소음 제어를 하기 앞서 식기 세척기의 소음 환경 분석을 실시하였다. Fig. 3은 식기 세척기 능동 소음 제어를 하기 위한 장치구성도를 나타낸다. 시험 대상은 가정용 식기 세척기로 상단부에는 물이 분사되면서 식기가 세척되는 공간이 있고, 하단부에는 펌프를 가동하기 위한 기계실이 구성되어 있다. 시험은 반무향실에서 진행하였으며, 소음을 측정하기 위한 마이크로폰(B&K Type 4190)의 위치는 식기

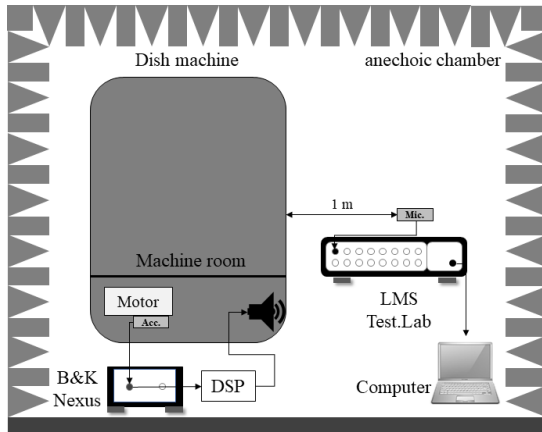


Fig. 3. Experiment setup of the active noise control of a dishwasher.

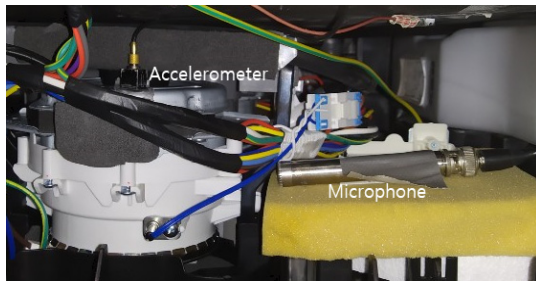


Fig. 4. (Color available online) Location of reference sensors.

세척기 전방 1 m, 높이는 식기 세척기 높이 절반인 0.5 m에 두었다. 그리고 신호를 계측 하는 장비로 LMS. Test lab을 사용하였다.

소음 신호와 상관성 높은 참조 신호를 찾기 위해, 주 소음원으로 추정되는 펌프에 가속도계(B&K type 4501)를 부착하였고 펌프 근처에 마이크로폰(B&K type 4190)을 설치하였다. 가속도계 부착 위치와 마이크로폰 위치를 Fig. 4에 나타내었다. 펌프에 직접 부착한 가속도계는 펌프회전과 관련된 진동 신호를 얻을 수 있고 펌프 근처 마이크로폰은 펌프 회전과 관련된 음압 신호를 얻을 수 있다. 선택한 참조신호가 소음원과 얼마나 상관성이 있는지를 평가하기 위하여 참조 신호와 오차 신호사이의 상호 상관 함수를 계산하였다. 상호 상관 함수는 제어 성능과 직결되는 지표이다¹⁶⁾.

식기세척기를 구동시키는 펌프의 회전수를 2,500 rpm, 2,600 rpm, 2,800 rpm으로 바뀌가면서 소음을 측정하였다. 샘플링 주파수는 2,048 Hz로 하였으며, 이

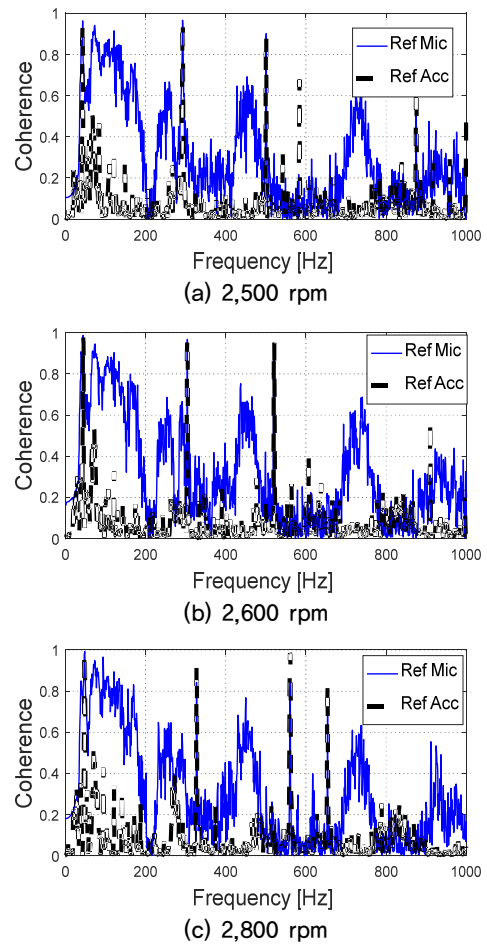


Fig. 5. (Color available online) Coherence functions between the error signal and the reference signals of the microphone (solid line) and accelerometer (dashed line).

때 주파수 간격은 1 Hz로 하였다. 그리고 90 % 중첩하여 100회 평균하였다. Fig. 5는 펌프 rpm회전수에 따른 상호 상관 함수를 나타낸 것이다. Fig. 5를 보면 참조 신호 센서가 가속도계 일 때 전방 1m 소음과 펌프 가속도 사이의 상호 상관 함수 값이 높게 계산되었다. 반면 참조 신호 센서가 마이크로폰 일 때는 7차, 12차 성분에서 뿐만 아니라 200 Hz 대역에서 높은 상호 상관 함수 값을 가지고 400 Hz~500 Hz 대역과 700 Hz~800 Hz 대역에서 0.5 이상의 상호 상관 함수 값을 가진다. 상호 상관 함수 값을 고려했을 때는 참조 신호 센서가 마이크로폰 일 때 제어 성능이 더 잘나올 것이라고 예상 할 수 있다. 하지만 마이크로폰으로 제어를 하게 되면 식기 세척기의 소음뿐만 아니라 제어 스피커에서 나오는 소음도 측정되기 때

문에 제어 전압이 발산하는 음향 피드백 현상이 발생하여 제어 시스템을 구현하기에 어려움이 많다. 따라서 제어 스피커에서 나오는 소음의 영향을 받지 않는 가속도계 신호를 참조 신호로 선정하였다.

IV. 능동 소음 제어 시스템 구성

장치 구성도를 나타낸 Fig. 3을 보면 오차 신호 센서인 마이크로폰은 식기 세척기의 전방 1 m, 높이 0.5 m 지점에 위치시켜 음압을 계측하였다. 참조 신호 센서인 가속도계는 주된 소음원이라 추정되는 펌프의 진동을 측정하기 위해 펌프의 외부에 부착하였다. 가속도 계에서 측정된 신호는 B&K 사의 Nexus 장비를 거쳐 전압 신호로 바뀐다. 그리고 이 전압 신호는 DSP 장비를 거쳐 스피커에 전달된다. 액츄에이터인 스피커는 펌프 회전 소음이 오차 신호 센서로 전달되는 중간에 위치시켰다. 스피커의 전달함수를 측정하기 위하여 스피커에 1V 백색잡음 전압을 인가하고 외란신호를 측정하였다. 그리고 전압 대비 음압의 전달함수와 상호 상관 함수를 Fig. 6에 나타내었다. 전달함수와 상호 상관 함수에 근거 하여 스피커가 본 연구에서의 관심 주파수인 펌프 작동 주파수의 7차, 12차 배수 성분 주파수에서 제어 신호를

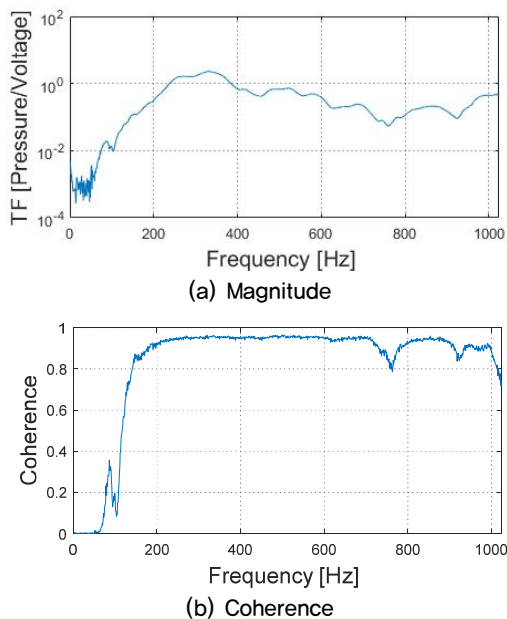


Fig. 6. (Color available online) Speaker transfer function.

발생 시키는데 적절한 사양을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

V. 전산해석을 통한 제어 성능 예측

제어 성능 시험을 수행하기 앞서 Mathwork사의 Simulink를 이용하여 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 이 모델을 구축하기 위해 먼저 스피커에 가해지는 백색 잡음 전압을 입력 신호로 하고 전방 1 m에서 측정되는 음압을 오차 신호로 하여 LMS 알고리즘을 적용하여 스피커 전달 경로를 구하였다. Fig. 7는 LMS 알고리즘을 적용 시킨 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)를 보면 필터를 통과함에 따라 오차 신호가 0에

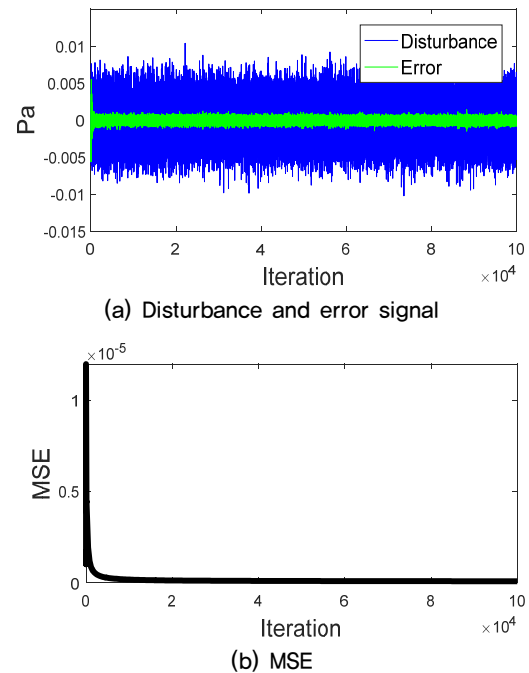


Fig. 7. (Color available online) LMS algorithm application result according to iteration.

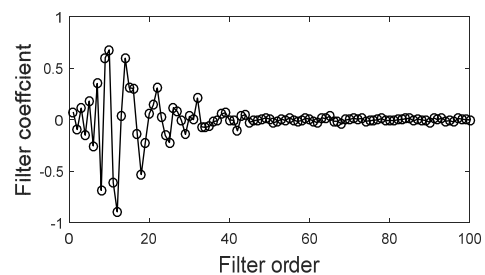


Fig. 8. Filter coefficient.

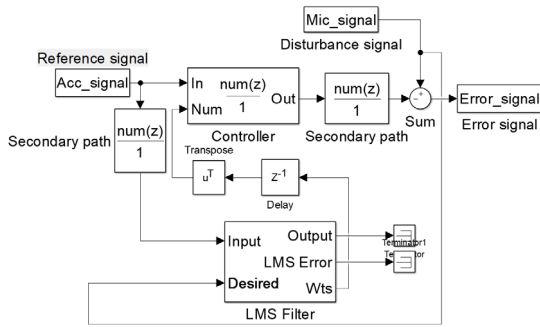
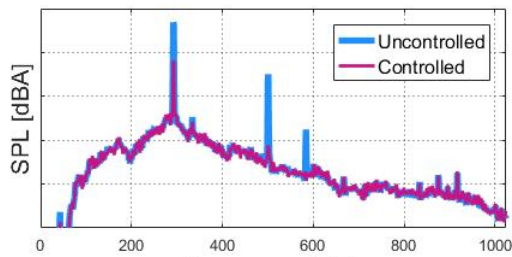
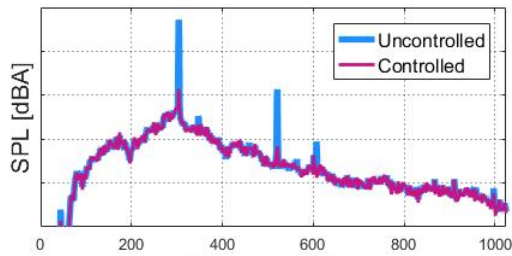


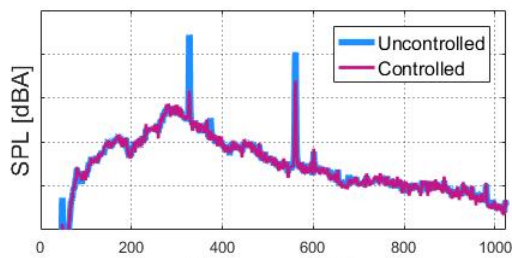
Fig. 9. Simulink model.



(a) 2500 rpm



(b) 2600 rpm



(c) 2800 rpm

Fig. 10. (Color available online) Simulated results of active noise control for the selected rpm.

가까이 수렴하는 것을 확인 할 수 있고, Fig. 7(b)를 보면 필터를 통과함에 따라 평균 제곱 오차가 0에 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 Fig 8을 보면 필터 차수가 40차 이상이 되면 필터 계수 값이 거의 일정

Table 1. Comparison of before and after control simulation at 7th and 12th harmonics of rpm and in overall SPL.

	rpm	Difference [dB]
7 th	2500	8.69
	2600	15.78
	2800	12.71
12 th	2500	16.20
	2600	13.02
	2800	6.48
overall SPL	2500	4.01
	2600	3.84
	2800	2.57

한 값이 나옴을 확인 할 수 있다. 그리고 회전수 별로 측정된 가속도계 신호를 참조 신호 x 라하고 구한 스피커 전달경로를 통과시켜 FxLMS 알고리즘을 적용하였다. Fig. 9은 식기세척기 능동제어 Simulink 모델을 보이고 있다. LMS의 입력으로는 가속도 신호가 앞서 구한 스피커 전달 경로를 통과한 신호가 들어가게 되고 Desired에는 마이크로폰 신호가 들어가게 된다. 그리고 Wts으로 FIR 필터 계수가 계산되어 제어기에 들어가게 된다. 마이크 신호에서 가속도 신호가 제어기와 전달경로를 거친 신호를 빼서 오차 신호를 계산한다. 여기서 계산된 오차 신호가 제어 후의 음압이 된다. Fig. 10은 회전수에 따른 제어 전후 음압 스펙트럼을 나타 낸 것이다. 앞서 계산한 상호 상관 함수의 값이 높은 주파수에서 제어 성능을 확인 할 수 있다. 제어 전후 펌프 작동주파수의 7차, 12차 배수 성분의 SPL값과 overall Sound Pressure Level(SPL) 값을 Table 1에 나타내었다. 펌프 작동주파수의 7차 배수 성분에서는 회전수 별로 8.69 dB, 15.78 dB, 12.71 dB 만큼 줄었고 12차 배수 성분에서는 회전수 별로 16.20 dB, 13.02 dB, 6.48dB 만큼 줄었다. 그리고 overall SPL은 회전수 별로 4.01 dB, 3.84 dB, 2.57 dB 만큼 줄었다.

VI. 제어 성능 시험

제어 시뮬레이션에서 제어 성능을 확인 한 제어기를 DSP 장비에 탑재하여 제어 성능 시험을 수행 하

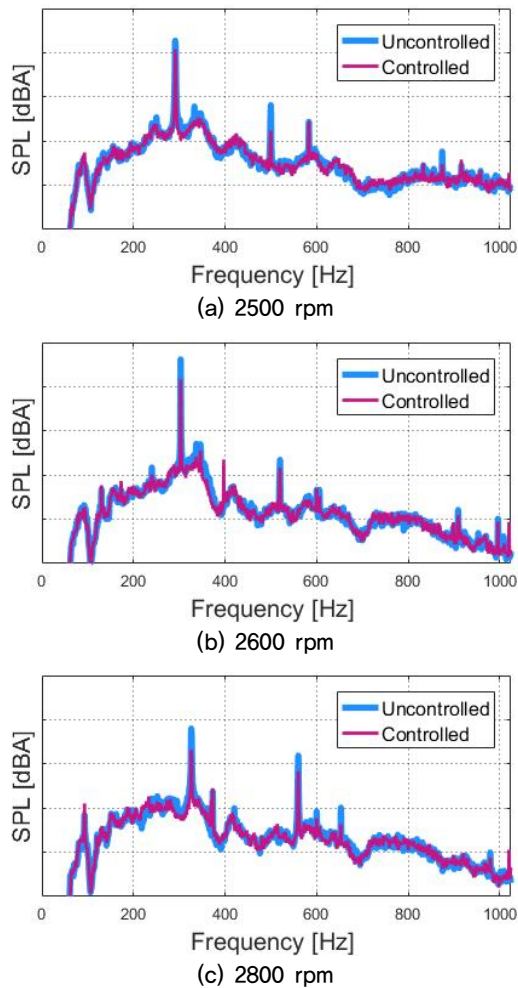


Fig. 11. (Color available online) Measured results of active noise control for the selected rpm.

Table. 2. Control performance of the active noise control system denoted by the reduction in SPL at 7th and 12th harmonics of rpm and in overall SPL.

	rpm	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Mean [dB]
		Difference [dB]				
7 th	2500	0.42	1.78	2.95	2.55	1.93
	2600	4.28	4.06	3.97	5.43	4.44
	2800	7.17	4.19	4.56	4.68	5.15
12 th	2500	8.88	6.89	6.05	4.86	6.67
	2600	2.38	1.15	1.64	4.19	2.34
	2800	3.30	3.54	4.94	5.32	4.27
Overall SPL	2500	0.45	0.74	1.01	1.15	0.84
	2600	2.59	2.43	2.35	2.94	2.58
	2800	2.12	1.40	1.48	0.91	1.48

였다. 제어 전후 시험 결과를 비교하기 위하여 설계한 제어기를 끈 상태에서 20 s를 측정하고 연달아 제어기를 켜 상태에서 20 s를 측정하였다. Fig. 11은 FxLMS 알고리즘을 이용하여 구한 제어기를 이용한 식기 세척기의 소음 저감 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 시험 결과는 제어 전 후 전방 1 m에서 측정 되는 음압을 비교하여 회전수 별로 나타내었다. 그리고 제어 시험을 4회 수행하여 제어 전후 펌프 작동주파수의 7차, 12차 배수 성분의 SPL값과 overall SPL 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 시험 4회에 대한 평균값을 보면 펌프 작동주파수의 7차 배수 성분에서는 회전수 별로 1.93 dB, 4.44 dB, 5.15 dB 만큼 줄었고 12차 배수 성분에서는 회전수 별로 6.67 dB, 2.34 dB, 4.27 dB 만큼 줄었다. 그리고 overall SPL은 회전수 별로 0.80 dB, 2.58 dB, 1.48 dB 만큼 줄었다.

시뮬레이션 결과와 제어 성능 시험 결과가 다소 차이를 보이는데 이는 스피커가 이상적인 스피커가 아니기 때문에 너무 낮은 전압이나 높은 전압이 인가되었을 때 스피커 출력이 앞에서 구한 스피커 전달함수의 비만큼 출력되지 않는다. 따라서 제어 전압이 스피커에 가해졌을 때 시뮬레이션에서 스피커가 내는 출력과 시험에서 스피커가 내는 출력이 다르기 때문이다.

VII. 결 론

본 연구는 FxLMS 알고리즘을 이용하여 식기세척기의 펌프에서 발생하는 소음을 능동제어 하였다. 능동 소음 제어를 구현하기 위하여 먼저 LMS 알고리즘을 적용하여 스피커 전달 경로를 추정하였다. 그리고 오차 센서는 식기 세척기 전방 1 m 마이크로폰으로 하였고, 참조 신호로는 주 소음원으로 추정되는 펌프에 부착한 가속도계로 선정하였다. 그리고 FxLMS를 적용하여 오차 신호를 최소화하는 제어기 필터 계수를 구하였다. 최종적으로 구한 제어기 필터 계수를 DSP 장비에 탑재하여 능동 소음 제어를 구현하여 제어 성능을 확인하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실제 시스템(본 연구에서는 식기 세척기)에 대해

FxLMS 알고리즘 기반의 능동 소음 제어 기법을 적용하였다. 소음 저감효과를 확인하기 위해 오차 센서의 선정 및 위치 설정, 그리고 오차 신호의 정보를 담고 있는 참조 신호의 선정과 관련된 소음 환경 분석이 요구되었다. 참조 신호 센서는 펌프에 부착한 가속도계와 펌프 근처 마이크로폰으로 하였다. 가속도계는 펌프 작동주파수의 7, 12차 성분에서 높은 상호 상관 함수 값을 가졌고, 마이크로폰은 펌프 작동주파수의 배수 성분뿐만 아니라 넓은 대역에서 높은 상관 함수 값을 가졌다. 하지만 마이크로폰은 음향 피드백 현상 때문에 제어 시스템을 구현하기 어렵기 때문에 참조 신호 센서로 가속도계를 선정하였다.

- (2) 본 연구에서는 식기 세척기의 회전수를 변화시켜가면서 전산 해석을 통해 제어기를 설계하였고 제어 성능을 예측하였다. 그리고 설계한 제어기를 DSP 장비에 탑재시켜 능동 소음 제어 시험을 4회 수행한 결과 3가지 회전수에 대해서 다음과 같은 소음 저감 효과가 있음을 확인 하였다. 2500 rpm에서는 펌프 작동 주파수의 7차, 12차 주파수에서 각각 평균 1.93 dB, 6.67 dB가 감소하는 효과가 있었고 overall SPL에서는 평균 0.84 dB가 감소하는 효과가 있었다. 그리고 2600 rpm에서는 펌프 작동 주파수의 7차, 12차 주파수에서 각각 평균 4.43 dB, 2.34 dB가 감소하는 효과가 있었고 overall SPL에서는 평균 2.58 dB가 감소하는 효과가 있었다. 그리고 2800 rpm에서는 펌프 작동 주파수의 7차, 12차 주파수에서 각각 평균 5.15 dB, 4.28 dB가 감소하는 효과가 있었고 overall SPL에서는 평균 1.48 dB가 감소하는 효과가 있었다.

References

1. H. K. Park, H. Kab, and H. S. Kim "Sensitivity analysis of environmental noise by measuring noise characteristic of air purifier" (in Korean), *AJMAHS*, **9**, 801-812 (2019).
2. M. Jung, C. Cheong, T. H. Kim, and J. Koo, "Numerical and experimental investigation on improvement of flow and noise performances of ice-fan flow piping system of household refrigerator" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **28**, 694-700 (2018).
3. J. M. Kim, B. K. Jeong, S. J. Heo, S. J. Ahn, and W. B. Jeong, "Analysis of sources and contribution for the radiated noise of drum-type washing machine" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **24**, 628-635 (2014).
4. H. J. Im and J. M. Lee, "An experimental study on the reduction of dehydration noise of a drum-type washing machine" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **28**, 451-459 (2018).
5. O. D. Lee and J. E. Oh, "Establishing procedure of contribution analysis on drum type washing machine using transfer path analysis" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **29**, 262-269 (2019).
6. K. S. Kong, W. B. Jung, T. H. Kim, D. S. Shin, and S. J. Ahn, "Pattern analysis of noise radiated from household refrigerator" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **26**, 121-129 (2016).
7. J. Y. Jang, T. H. Kim, U. S. Tark, W. B. Jeong, and S. J. Ahn, "Sound quality improvement of refrigerator using the analysis of high frequency noise radiated from compressor in the machine room" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **29**, 653-662 (2019).
8. T. H. Kim, K. S. Kong, W. B. Jung, and S. J. Ahn, "Sound quality analysis of refrigerators with the same sound pressure level" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **29**, 798-806 (2017).
9. J. H. Yun and W. J. Kim, "Method to reduce the noise of the machine room of a built-in refrigerator" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **28**, 561-566 (2018).
10. J. M. Koo, C. Hong, W. B. Jung, and T. H. Kim, "Active control of noise transmitted through ventilation openings of the machinery room" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **10**, 322-324 (2015).
11. J. M. Koo, W. B. Jeong, T. H. Kim, and C. Hong, "Active control of noise transmitted through ventilation openings of the machinery room of refrigerator" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **4**, 475-482 (2016).
12. K. Ryu, C. Hong, and W. B. Jeong, "Active control of noise from fan blowers in tower-type air conditioners" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **1**, 87-93 (2017).
13. N. Lee and Y. Park, "Active noise control for dishwasher noise," *J. Physics, Conf. Ser.* **744**, 2012-2018 (2016).
14. S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control System, Chap. 2* (John Wiley & Sons, New York, 1995), pp. 17-48.

15. S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control System, Chap. 3* (John Wiley & Sons, New York, 1995), pp. 53-98.
16. E. Stephen, *Signal Processing for Active Control, Chap. 5* (Academic Press, San Diego, 1995), pp. 233-265.

저자 약력

▶ 탁 언 수 (Un-su Tark)



2019년 2월: 부산대학교 기계공학부 학사
2020년 3월~현재: 부산대학교 기계공학부 석사

▶ 오 한 음 (Han-Eum Oh)



2013년 2월: 부산대학교 기계공학부 학사
2015년 2월: 부산대학교 기계공학부 석사
2020년 2월: 부산대학교 기계공학부 박사
2021년 1월 ~ 현재: 에코 에너지 기술 연구소 선임연구원

▶ 홍 진 숙 (Chinsuk Hong)



1988년 2월: 영남대학교 기계공학부 학사
1991년 2월: 영남대학교 기계공학부 석사
1991년 2월~2003년 2월: 국방과학연구소 선임연구원
2005년 11월: University of Southampton, ISVR 박사
2005년 12월 ~ 2006년 7월: University of Southampton, ISVR 연구원
2009년 2월 ~ 현재: 울산과학기술대학교 기계공학부 교수

▶ 정 의 봉 (WeuiBong Jeong)



1978년 2월: 서울대학교 학사
1980년 2월: 카이스트 석사
1981년 ~ 현재: 부산대학교 기계공학부 교수
1990년 2월: 도쿄 공업대학 박사