

# 저주파 대역의 소음 평가 지수 개선을 위한 창문형 능동 소음 제어기

## An active noise control window system to reduce noise rating in low frequency band

오원근<sup>†</sup>

(Wongyeun Oh<sup>1†</sup>)

<sup>1</sup>순천대학교 멀티미디어공학전공

(Received July 24, 2018; accepted September 17, 2018)

**초 록:** 본 논문에서는 창문형 능동소음제어(Active Noise Control, ANC)의 잔류 소음의 평가 기준으로 실내소음 평가에서 사용하는 NR(Noise Rating)을 적용하고 이 값의 최소화를 위한 능동소음제어기에 대해서 연구하였다. 이를 위해 Filtered-E LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용하여 사용자가 설정한 유효 동작 주파수 대역 내에서 NR 값을 줄이는 노이즈 셰이핑(noise shaping) 필터의 형상을 제안하였다. 제안한 필터의 유용성은 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 기존의 심리음향 ANC에서 사용된 필터들과 비교했을 때 잔류 소음의 NR 값이 더 낮아지는 것을 보였다.  
**핵심용어:** 능동소음제어(Active Noise Control, ANC), 창문형능동소음제어기, 실내소음평가지수, 실내음향

**ABSTRACT:** In this paper, we apply the NR (Noise Rating) to the evaluation of the residual noise of the window type ANC (Active Noise Control) and study the active noise controller for minimizing the NR value in rooms. We proposed a shape of a noise shaping filter of the Filtered-E LMS (Least Mean Square) algorithm that reduces the NR value within the effective operating frequency band of the ANC. The usefulness of the proposed scheme is verified by simulation and showed that the NR value of the residual noise is lower than the filters used in the conventional psychoacoustic ANC.

**Keywords:** ANC (Active Noise Control), ANC windows, NR (Noise Rating), Room acoustics

**PACS numbers:** 43.50.Ki, 43.55.Hy, 43.66.Lj

### 1. 서 론

능동소음제어(Active Noise Control, ANC)는 원 소음과 180° 위상을 갖는 제어 소음을 인공적으로 발생시켜 원 소음과 공간에서 합성함으로써 소음을 줄이는 기술이다.<sup>[1]</sup> 이론적으로 ANC는 완벽한 역 위상 신호를 만들어서 합성한다면 소음이 완전하게 제거되어야 하나, 실제로는 불가피하게 어느 정도 잔류 소음(residual noise)이 남는다. 일반적인 ANC에서는 잔류 소음의 에너지를 최소화하는 FXLMS (Filtered-X Least Mean Square)와 같은 알고리즘을 주로 사용한

다. 그러나 이 알고리즘은 인간의 청각 특성을 고려하지 않은 것이기 때문에 소음의 에너지가 작아지더라도 사람의 청감으로는 변화량을 크게 느끼지 못할 수 있다. 그 이유는 사람 청각의 특성은 주파수 대역에 따라 다른 민감도를 갖기 때문이며, 동일한 음압 레벨의 소음이라도 청감적으로는 달리 지각될 수 있기 때문이다.<sup>[2]</sup> 따라서 ANC에서도 청각의 심리음향 특성을 고려해서 주파수 대역에 따라 소음제어의 가중치를 달리하는 것이 효율적이다. 이렇게 ANC에 청각 특성을 반영한 기존의 연구에는 References [3]~[5]가 있다.

Kuo와 Tsai<sup>[3]</sup>는 FXLMS에서 잔류 소음의 스펙트럼 형상을 조절할 수 있도록 노이즈 셰이핑(noise shaping)

<sup>†</sup>Corresponding author: Wongyeun Oh (owg@senu.ac.kr)  
Department of Multimedia Engineering, Suncheon National University,  
255 Jungang-ro, Suncheon-si, Jeonnam 57922, Republic of Korea  
(Tel: 82-61-750-3832, Fax: 82-61-750-3830)

필터를 추가한 Filtered-E LMS(FELMS)를 제안하였다. Sommerfeldt와 Samuels<sup>[4]</sup>는 잔류 소음의 Loudness를 줄이는 필터의 형상을 설계하였으며, Bao와 Panahi<sup>[5]</sup>는 A-weight와 ITU-R 486 필터를 사용하여 Zwicker 심리음향 파라미터를 개선하는 PANC(Psychoacoustic ANC)를 제안하였다. 이들 연구에서는 특정 필터를 사용했을 때 잔류 소음의 심리음향 파라미터 값이 향상됨을 보였으나, 이들 연구에서는 심리음향 파라미터를 원하는 방향으로 조절하기 위한 필터 형상에 대해서는 명확하게 제시되지 않았다.

한편 ANC의 응용 분야 중의 하나인 창문형 ANC는 개방되어있는 창문으로 들어오는 소음을 ANC로 상쇄시켜 소음을 줄이는 구조물이다.<sup>[6-10]</sup> 창문형 ANC에서는 주로 FXLMS 알고리즘을 사용하여 창문을 통과하는 외부 소음의 에너지를 줄이는 방식을 사용하고 있다. 그러나 소음의 전체 에너지는 감소하였지만 실내에서 인간이 지각하는 소음의 청감은 달라질 수 있으며, 아직 여기에 대한 연구는 본격적으로 이루어지지 않았다. 이러한 배경하에 본 논문에서는 창문형 ANC를 실내 공간에 적용했을 때 잔류소음의 주파수 특성을 조절하는 방안을 제시하였다. 이를 위해 주파수 웨이핑 필터가 내장된 FELMS 구조를 사용하여 1 kHz이하 대역의 잔류 소음의 스펙트럼을 NR(Noise Rating)을 최소화하도록 하는 웨이핑 필터의 형상을 구했다. 1 kHz로 대역을 제한한 이유는 그 이상의 대역은 ANC로는 제어가 힘든 영역으로써 공간상에서 역위상 합성 시 오히려 위상 불일치로 인한 역효과가 날 수도 있기 때문이다. NR은 실내음향에서 소음도를 표시하기 위해 국제 표준화 기구(International Organization for Standardization, ISO)에 의해 개발된 지표이며, 주로 유럽에서 많이 사용되고 있다.

제안한 FELMS의 필터의 유용성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제안한 필터, A-weighting 필터, 저역통과필터와 같은 3종의 필터를 이용하여 pink noise와 도로 소음에 대해 각 필터의 효과를 실험하였다. 그 결과 1 kHz 이하 대역에서는 제안한 형상의 필터가 기존에 사용되었던 A-weighting 필터보다 더 낮은 잔류 소음의 NR값을 나타냄을 보였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 ANC와 PANC에 대한

설명, 3장은 심리음향 필터, 4장은 시뮬레이션 및 결과 분석, 그리고 5장은 결론으로 이루어져 있다.

## II. 능동소음제어기

### 2.1 FXLMS 알고리즘

ANC는 입력 소음과 위상이 반대인 소음을 생성하고, 이를 합성함으로써 소음을 저감시키는 원리로 동작한다. ANC 제어 알고리즘으로 가장 많이 사용되는 것은 FXLMS 알고리즘이다.<sup>[1]</sup> Fig. 1은 FXLMS의 블록 선도를 나타낸 것이다.

여기에서  $x(n)$ 은 마이크로 입력된 원 소음 신호,  $d(n)$ 은 소음이 제거될 위치에서의 소음 신호이며  $P(z)$ 는 소음이 지나가는 경로의 전달함수이다.  $S(z)$ 는 이차경로(secondary path)이며 앰프, 스피커 등과 같은 전기음향기기의 전달함수를 의미한다.  $\hat{S}(z)$ 는  $S(z)$ 의 모델 전달함수이며, 이차 경로의 영향을 상쇄하기 위한 것이다.  $y(n)$ 은 제어 스피커를 통해서 나오는 역위상 신호이며 공간에서  $d(n)$ 을 상쇄하는 역할을 한다. 이때 상쇄되지 않고 남은 잔류 소음  $e(n)$ 은 LMS 알고리즘의 입력으로 들어가 제어기  $W(z)$ 를 업데이트 하는데 사용된다.  $W(z)$ 는 FIR 구조의 적응 필터이며, 제어기의 계수 업데이트 식은 다음과 같다.<sup>[1]</sup>

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(n) [\mathbf{x}(n) * \hat{s}(n)], \quad (1)$$

여기에서  $\mu$ 는 필터의 step size이고,  $\hat{s}(n)$ 은  $\hat{S}(z)$ 의 임펄스 응답이다.

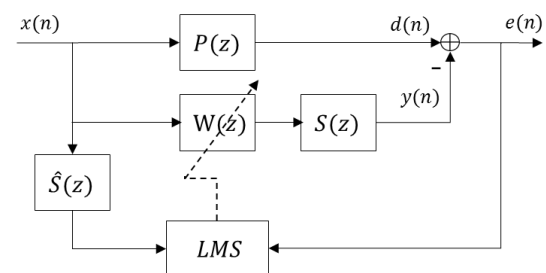


Fig. 1. Schematic diagram of the FXLMS algorithm.

### 2.2 FELMS와 Noise rating

FELMS 알고리즘은 FXLMS에 잔류 소음의 스펙트럼 형상 제어를 위한 노이즈 웨이핑 필터가 추가된 구조이다.<sup>[3]</sup> Fig. 2는 FELMS 알고리즘의 블록선도를 나타낸 것이다. 여기에서  $F(z)$ 가 노이즈 웨이핑 필터이며, 이 필터의 전달함수 특성에 따라 잔류 소음  $e(n)$ 의 스펙트럼 형상을 조절할 수 있다.

FELMS 알고리즘에서 제어기  $W(z)$ 의 계수 업데이트 식은 다음과 같다.<sup>[3]</sup>

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e_f(n)[x(n) * \hat{s}(n) * f(n)], \quad (2)$$

여기에서  $f(n)$ 은 노이즈 웨이핑 필터  $F(z)$ 의 임펄스 응답이며,  $e_f(n)$ 은 필터  $F(z)$ 를 통과한 잔류 소음이다.

이 구조에서 가장 핵심적인 것은 필터  $F(z)$ 를 어떤 형상으로 설계하는가 하는 것이다. 기존의 응용에서는 A-weighting, ITU-R 468 필터 등을 사용하여 잔류 소음의 스펙트럼을 조정하고, 그 결과 심리음향 파라미터가 개선됨을 보였으나 특정한 파라미터를 줄이기 위해 어떤 형상의 필터를 사용해야 하는가에 대해서는 명확하게 제시되지 않았다.<sup>[5]</sup> 또한 기존의 연구에서는 노이즈 웨이핑의 효과를 Zwicker 심리음향 파라미터인 Loudness, Sharpness, Roughness, Tonality 등으로 분석하였다. 그러나 이러한 파라미터는 계산이 복잡하며 간단한 계측기로 측정하기 힘들기 때문에 실내음향에서는 일반적으로 사용되지 않는다.

본 논문에서는 창문형 ANC에 FELMS 알고리즘을 적용하였을 때, 실내음향에서 청감적 소음의 척도로 일반적으로 사용되고 있는 NR값을 줄일 수 있는 노

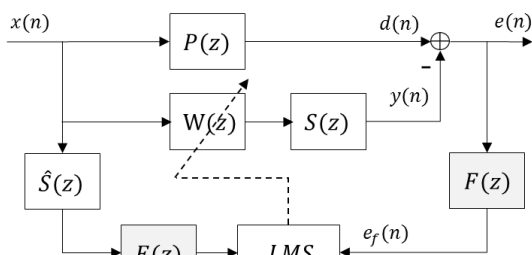


Fig. 2. Schematic diagram of the Filtered-E LMS algorithm.

이즈 웨이핑 필터의 형상을 제안하였다. NR은 ISO에 의해 개발된 소음평가 지표이다. 이는 건물이나 실내에서 소음을 청력보존, 회화, 거슬림의 3가지 관점에서 평가하여 허용 가능한 소음 수준을 하나의 숫자로 표시하기 위해 사용된다.<sup>[11]</sup>

이러한 NR값을 잔류소음의 기준으로 했을 때, 기존의 심리음향 PANC에서 사용했던 A-weight 또는 ITU-R 486과 같은 노이즈 웨이핑 필터는 적합하지 않다. 이 필터의 진폭 응답은 최대 피크값이 6300 Hz (ITU-R 468)와 2500 Hz (A-weighting)이며, 이들을 노이즈 웨이핑 필터로 사용했을 때, 해당 주파수에서 잔류 소음의 레벨을 최대한으로 감소하도록 FELMS 알고리즘이 동작한다. 그러나 ANC는 실제로는 최대 500 Hz ~ 1000 Hz 이하의 저주파 대역에서 유효하게 작동하며, 그 이상의 주파수 대역에서는  $d(n)$ 과  $e(n)$ 의 위상을 정확하게 맞추기 힘들기 때문에 효과적인 제어가 힘들다. 따라서 최대 피크가 ANC의 유효 대역에서 벗어난 필터는 실내음향에 적용하기 적합하지 않으며, ANC의 최대 유효 주파수 이하에서 피크가 존재해야 한다.

## III. 모의실험

### 3.1 시뮬레이션 프로그램

제안한 필터와 다른 필터의 성능을 시뮬레이션으로 비교하였다. 프로그램은 Labview로 작성하였으며, Fig. 3은 사용자 인터페이스 화면이다. 프로그램은 크게 필터 선택부, 스펙트럼 표시부, 그리고 결과 출력의 3부분으로 구성되었다. 필터 선택부는 사용자 임의로 진폭 응답 특성을 설정할 수 있는 사용자

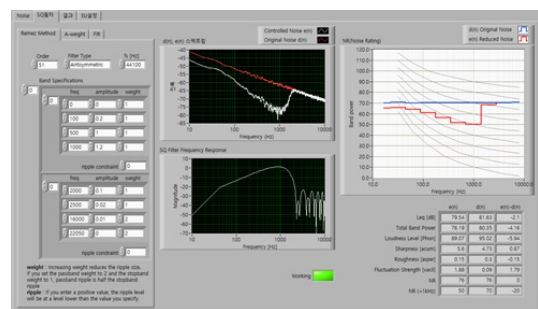


Fig. 3. The GUI of the FELMS simulation program.

정의 필터, 차단주파수의 설정이 가능한 저역통과필터, 그리고 A-weighting 필터와 같이 총 3종의 필터를 선택할 수 있도록 구성되어 있다.

화면의 중앙부는 스펙트럼 표시부로 원 소음  $d(n)$  과 제어된 소음  $e(n)$  의 스펙트럼 그래프, 그리고 사용한 필터의 스펙트럼 그래프가 표시된다. 화면 우측의 결과 출력부에서는 원 소음과 제어된 소음의 NR 그래프와 함께 등가소음레벨  $Leq$ , 파워, 라우드니스 레벨, Zwicker 심리음향 파라미터, 그리고 최종 계산된 NR값과 1 kHz 이하 대역에서만 계산한 NR값이 표시된다.

### 3.2 노이즈 셰이핑 필터

창문형 ANC를 이용할 때 유효한 최대주파수  $f_M$  을 기준으로, 그 이하의 대역에서는 창문형 ANC를 이용하고 그 이상의 대역에서는 기존의 흡음재나 흡음 구조를 사용하는 것이 효과적이다. 그러므로 FELMS의 필터  $F(z)$  는 전체 주파수 대역이 아니라 ANC의 유효 주파수 대역 내에서만 NR을 최소화하도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는  $f_M$  이하의 대역에서는 소음의 옥타브 스펙트럼이 원하는 NR 곡선 아래에 위치하도록  $F(z)$  의 형상을 만들어야 한다. 즉, 소음의 스펙트럼 레벨이 높은 곳에서는 필터의 이득치를 크게하고 그렇지 않은 곳에서는 작게 설정한다. 이를 만족하는 필터의 진폭 특성은 소음 스펙트럼의 상하 대칭 형상을 하한선으로 하고 그 이상으로 진폭응답을 갖는 것이다. 이때 최고 주파수  $f_M$  에서 필터의 진폭 응답은 0 dB 이상으로 설정하여 가장 소음 제어가 크게 일어나도록 해야 한다. Fig. 4에  $f_M = 1$  kHz에서 NR-60을 얻기 위한 필터 형상의 예를 들었다. 그림에서 음영으로 표시된 부분이 소음 스펙트럼의 역을 하한선으로 하는 필터 형상의 영역이다.

### 3.3 모의실험

필터  $F(z)$  로 다음과 같이 3종류의 필터를 사용하여 소음제어 효과를 비교하였다. 이들 필터의 진폭 스펙트럼은 Fig. 5에 나타내었다.

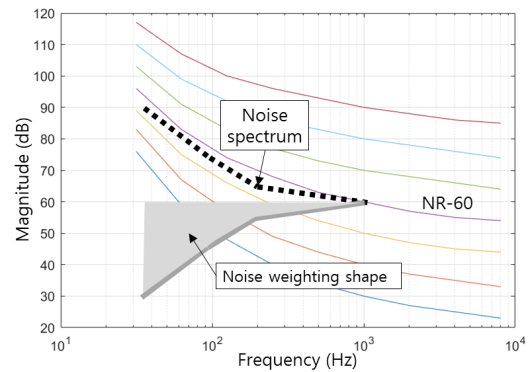


Fig. 4. The magnitude spectrum of the three noise shaping filters.

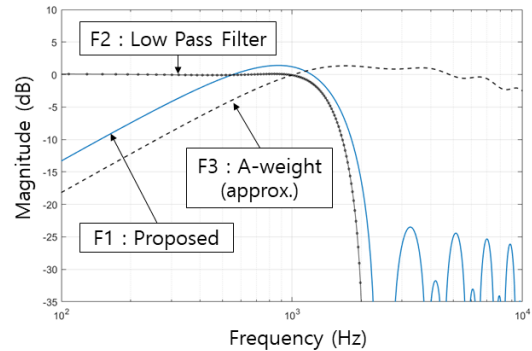


Fig. 5. The magnitude spectrum of the three noise shaping filters.

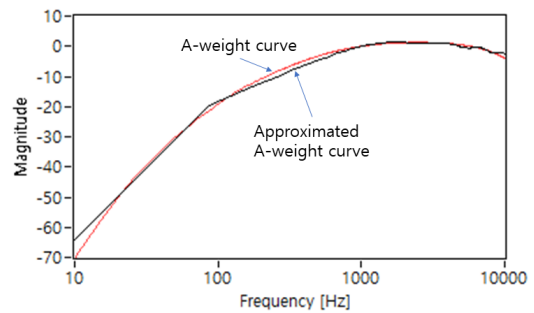


Fig. 6. The A-weighting curve and approximated FIR filter output curve.

- F1 : 최적 NR 필터
- F2 : 차단주파수가 1kHz인 저역통과필터
- F3 : A-weighting 필터

최적 NR 필터 F1은 앞 절에서 설명한 조건을 만족하도록 형상을 설정하고 이를 51차 FIR필터로 구현하였다. F2는 1 kHz 차단주파수와 35 dB의 정지대역

감쇄 값을 갖는 저역통과 필터이며, F3는 청감 특성 보정을 위해 소음계 등에서 일반적으로 사용되는 A 특성 가중치 필터이다. A-weighting 필터의 진폭 특성 식은 다음과 같다.<sup>[12]</sup>

$$R(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)(f^2 + 107.7^2)^{0.5}(f^2 + 737.9^2)^{0.5}}$$

$$A = 2 + 20 \log(R(f)). \tag{3}$$

시뮬레이션에서 Eq. (3)은 계산량과 ANC루프 내에서의 위상 오차를 줄이기 위해 30차 FIR 필터로 근사화하여 사용하였다. 원래의 A-weight 곡선과 근사 곡선의 주파수 특성을 비교한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다.

### 3.4 시뮬레이션 결과

모의실험은 2종류의 소음과 3종류의 필터에 대해 수행되었다. 사용한 소음은 음향 시스템에서 측정 및 튜닝용으로 사용되는 pink 잡음 그리고 실제 도로에서 녹음한 차량 소음이다. 시뮬레이션에서는 순수하게 필터  $F(z)$ 에 의한 ANC의 영향을 확인하기 위

해 이차 경로의 모델은  $\hat{S}(z) \cong S(z)$ 와 같이 오차를 무시할 수 있을 정도라고 가정하였으며, P(z)와 S(z)로 다음과 같이 간단한 전달함수를 사용하였다.

$$P(z) = z^{-200}. \tag{4}$$

$$S(z) = 0.02 + 0.01z^{-1}. \tag{5}$$

Figs. 7과 8에 pink noise와 도로 소음에 대한 제어 전후의 스펙트럼을 나타내었다. F1, F2와는 달리 A-weight 필터(F3)를 사용했을 때는 1000 Hz 이상에서도 소음이 감쇄되나, 이는 실제로 적용했을 때 공간상에서 제어가 쉽지 않기 때문에 F1, F2와 같이 유효 대역을 제한하고 그 이상은 수동 흡음을 하는 것이 더 안정적인 소음 감쇄가 가능하다. Figs. 9와 10은 소음 제어 전후의 NR곡선을 나타낸 것이다. pink noise와 도로 소음 모두 A-weight 필터가 가장 낮은 NR값을 보이지만 1000 이하에서는 F1이 가장 낮은 NR임을 볼 수 있다.

Tables 1과 2는 각 필터에 대해 소음 제어 전후의 파라미터를 계산한 결과를 나타내었다. 구한 값은 등가소음레벨  $Leq$ , 전대역파워(Total band power), 라우드니스 레벨(Loudness level), NR(전체대역), 그리고 1kHz이하 대역에서의 NR값인 NR(<1 kHz)이다.

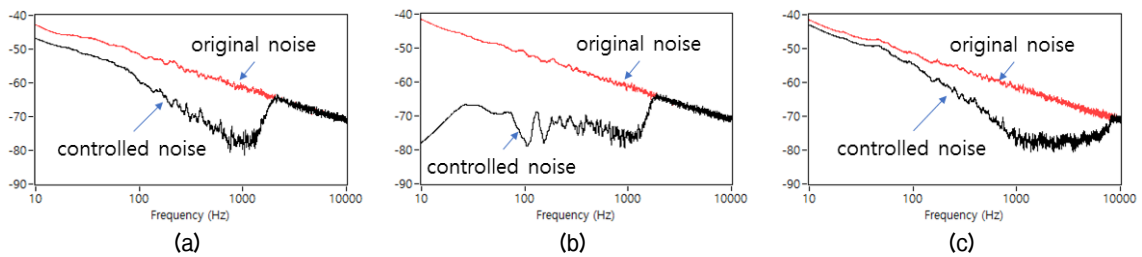


Fig. 7. Magnitude spectrum of the pink noise vs. controlled noise using the (a) proposed filter F1 (b) low pass filter F2 (c) A-weight filter F3.

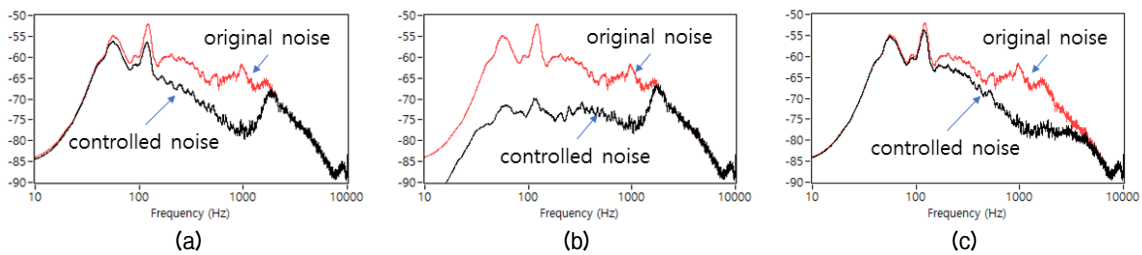


Fig. 8. Magnitude spectrum of the street noise vs. controlled noise using the (a) proposed filter F1 (b) low pass filter F2 (c) A-weight filter F3.

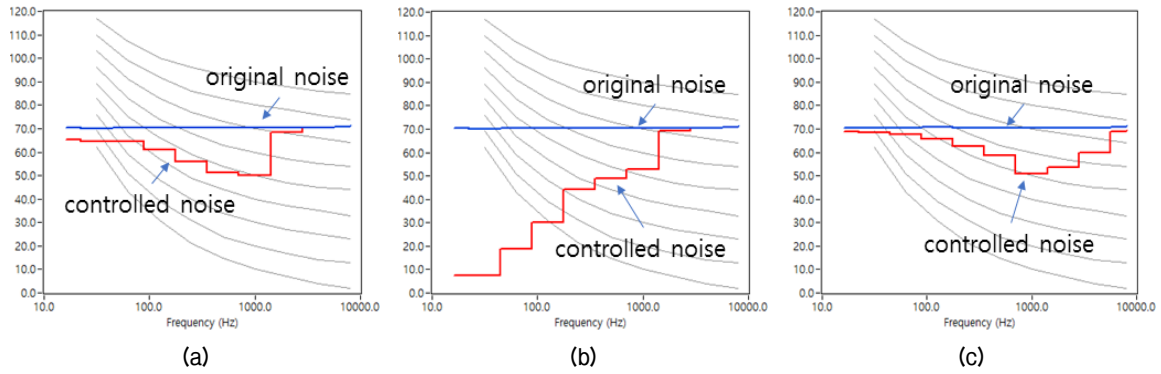


Fig. 9. NR curve of the pink noise vs. controlled noise using the (a) proposed filter F1 (b) low pass filter F2 (c) A-weight filter F3.

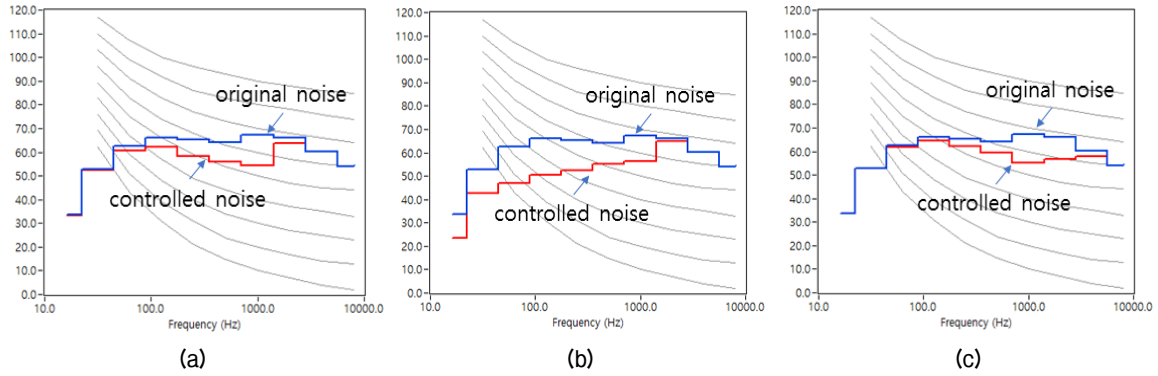


Fig. 10. NR curve of the street noise vs. controlled noise using the (a) proposed filter F1 (b) low pass filter F2 (c) A-weight filter F3.

Table 1. Simulation results of the pink noise.

Parameters	Filter	d (n)	e (n)	d(n)-e (n)	%
Leq (dB)	F1	81.6	79.2	2.4	2.9 %
	F2	80.7	76.6	<b>4.0</b>	<b>5.0 %</b>
	F3	81.8	80.2	1.7	2.1 %
Total band power	F1	80.4	76.2	4.2	5.2 %
	F2	80.4	75.0	<b>5.4</b>	<b>6.7 %</b>
	F3	80.6	75.7	4.9	6.1 %
Loudness level (Phon)	F1	95.0	89.0	6.0	6.3 %
	F2	95.0	88.0	7.0	7.4 %
	F3	95.0	84.4	<b>10.6</b>	<b>11.2 %</b>
NR	F1	76.0	76.0	0.0	0.0 %
	F2	76.0	76.0	0.0	0.0 %
	F3	76.0	74.0	<b>2.0</b>	<b>2.6 %</b>
NR (<1 kHz)	F1	71.0	50.0	<b>21.0</b>	<b>29.6 %</b>
	F2	70.0	53.0	17.0	24.3 %
	F3	70.0	55.0	15.0	21.4 %

Table 2. Simulation results of the traffic noise.

Parameters	Filter	d (n)	e (n)	d(n)-e (n)	%
Leq (dB)	F1	71.8	69.1	2.7	3.8 %
	F2	71.4	67.3	<b>4.0</b>	<b>5.6 %</b>
	F3	71.9	69.5	2.4	3.3 %
Total band power	F1	73.5	69.1	4.4	6.0 %
	F2	73.5	67.3	<b>6.2</b>	<b>8.4 %</b>
	F3	73.5	69.5	4.0	5.4 %
Loudness level (Phon)	F1	88.6	84.5	4.2	4.7 %
	F2	88.6	83.6	<b>5.1</b>	<b>5.8 %</b>
	F3	88.6	83.6	5.0	5.6 %
NR	F1	68.0	66.0	2.0	2.9 %
	F2	68.0	67.0	1.0	1.5 %
	F3	68.0	63.0	<b>5.0</b>	<b>7.4 %</b>
NR (<1 kHz)	F1	67.0	54.0	<b>13.0</b>	<b>19.4 %</b>
	F2	67.0	56.0	11.0	16.4 %
	F3	67.0	56.0	11.0	16.4 %

Leq나 전대역과워 값은 저역통과필터(F2)를 사용했을 때 가장 많이 감소하였다. 그러나 라우드니스 레벨은 A-weight 필터를 사용했을 때 가장 많이 감소하였는데, 이는 A-weight 필터가 등청감곡선(equal loudness contour)의 역 형태의 값을 가지고 있기 때문이다. 전체 주파수 대역에서 계산한 NR지수는 A-weight 필터 사용 시에 가장 많이 감소하였는데, 이는 1 kHz 이상에서도 진폭 특성이 높은 값을 유지하는 A-weight 필터의 특성 때문이다. 그러나 1 kHz 이하의 대역에서만 구한 NR값은 제안한 필터(F1)를 사용했을 때 가장 크게 감소한다. ANC는 높은 주파수 대역에서 적용하기 힘들기 때문에, 이와 같이 저역에서 NR을 많이 감쇄하는 제안한 형태의 필터 F1이 실제 적용 시 유용한 필터라고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 창문형 ANC를 사용하여 실내로 유입되는 소음을 제어할 때, 국제 표준으로 사용되는 NR지수를 기준으로 소음을 저감하는 방법에 대해서 연구하였다. 이를 위해 ANC루프 내부에 노이즈 스퀘이핑 필터가 내장된 FELMS 알고리즘을 사용하여, 창문형 ANC가 유효하게 동작하는 저주파 대역에서 NR지수를 최소화하는 필터의 형상을 제안하였다. 제안된 필터의 진폭 응답 특성은 ANC의 최대 유효 주파수 근처에서 피크를 갖고, 그 이하의 대역에서는 NR곡선의 역보다 큰 값을 갖는 형태를 하고 있다. 이 필터의 효과를 시뮬레이션을 통해 핑크 잡음과 도로 소음에 대해 비교한 결과, 기존의 심리음향 ANC에서 사용되었던 A-weighting 필터나 저역 통과 필터에 비해 제안한 필터를 사용했을 때 유효 대역 내에서 더 낮은 NR을 얻을 수 있음을 보였다.

향후 연구과제로는 NR이외의 다양한 건축음향 파라미터에 대한 최적의 필터 형상 도출 및 이를 해석적으로 구하는 방법, 그리고 실제 하드웨어로 구현한 실험을 통해 유용성을 검증하는 것 등이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2017년 순천대학교 학술연구비(과제번호 : 2017-0153) 공모과제로 연구되었음.

#### References

1. S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems* (John Wiley & Sons, New York, 1996), pp. 1-15.
2. E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and models* (Springer Science & Business Media, Berlin, 2013), pp. 203-237.
3. S. M. Kuo and J. Tsai, "Residual noise shaping technique for active noise control systems," *J. Acoust. Soc. Am.* **95**, 1665-1668 (1994).
4. S. D. Sommerfeldt and T. O. Samuels, "Incorporation of loudness measures in active noise control," *J. Acoust. Soc. Am.* **109**, 591-599 (2001).
5. H. Bao and I. M. S. Panahi, "A perceptually motivated active noise control design and its psychoacoustic analysis," *ETRI J.*, **35**, 859-868 (2013).
6. H. Huang, X. Qiu, and J. Kang, "Active noise attenuation in ventilation windows," *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 176-188 (2011).
7. B. Kwon and Y. Park, "Interior noise control with an active window system," *Appl. Acoust.*, **74**, 647-652 (2013).
8. T. Pàmies, J. Romeu, M. Genescà, and R. Arcos, "Active control of aircraft fly-over sound transmission through an open window," *Appl. Acoust.* **84**, 116-121 (2014).
9. B. Lam, and W.-S. Gan, "Active acoustic windows: towards a quieter home," *IEEE Potentials*, **35**, 11-18 (2016).
10. W. Oh, "A Single channel open-window Active Noise Control system," *Int. J. Appl. Eng. Res.* **12**, 872-876 (2017).
11. J. S. Kim, *Noise and Vibration Engineering - 4th edition* (Sejin Company, Seoul, 2013). pp. 162-170
12. ANSI, "American National Standard Specification for Sound Level Meters," ANSI S1.4-1983 (R2006), 2006.

#### 저자 약력

##### ▶ 오 원 근 (Wongyeun Oh)



1989년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 학사  
 1992년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 석사  
 1997년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 박사  
 1997년 3월 ~ 현재: 순천대학교 멀티미디어공학과 교수