

청감적 소음 감소를 위한 능동소음제어기 설계

김종호* · 오원근**

A Design Method of The Active Noise Controllers for The Perceived Noise Reduction

Jong-Ho Kim* · Wong-Eun Oh**

요약

본 논문에서는 능동 소음 제어기(Active Noise Controller)의 잔류 소음을 청감적으로 감소시키는 설계법을 제안하였다. 이를 위한 구조로는 FELMS(Filtered-E Least Mean Squares) 알고리즘과 소음 평가 지수인 NC(noise criteria)를 사용하였으며, 능동 소음 제어기의 유효 동작 주파수 대역 내에서 NC 지수를 최소화하는 FELMS에 내장된 노이즈 셰이핑 필터의 스펙트럼 조건식을 도출하였다. 제안한 조건을 만족하는 필터가 기존에 사용되었던 심리음향 기반의 필터보다 더 향상된 NC값을 나타내는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a design method of Active Noise Control (ANC) that reduces perceived level of the residual noise. A FELMS (Filtered-E Least Mean Squares) algorithm is used for the ANC system and the NC (noise criteria) is applied as an evaluation criterion of the residual noise. With this structure, we present the allowable spectral shape of the noise shaping filter that minimizes the NC index within the effective operating frequency band of the ANC, and showed that the filter satisfying in the criterion has a lower NC value than the psychoacoustic-based filter used in the previous studies.

키워드

Active Noise Control, Filtered-E LMS, Noise shaping filter, Noise Criteria curve
능동 소음 제어, FELMS 알고리즘, 노이즈 셰이핑 필터, NC 곡선

1. 서론

소음은 쾌적한 생활을 방해하고 음성이나 음향 신호를 통한 정보 전달력을 떨어뜨리는 주요 원인 중 하나이다. 일상에서도 차량, 공장, 건설 현장과 같은 실외의 소음뿐만 아니라 실내의 가전제품의 모터, 수도 등의 소리로 인해 TV나 기기의 동작음이 마스킹(masking)되는 현상을 흔히 경험할 수 있으며, 이러

한 소음의 영향을 줄이기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다[1][2].

능동소음제어(ANC; Active Noise Control)는 원소음과 역 위상인 제어 소음을 합성하여 서로 상쇄하는 원리로 소음을 저감하는 기술로서 최근 다양한 분야에 응용되고 있다[3-5]. 그러나 ANC를 적용하더라도 완전히 소음이 제거되기는 힘들며 약간의 잔류 소음(residual noise)이 남는다. 이러한 잔류 소음에 대

* 순천대학교 멀티미디어공학과 (jhkim@snu.ac.kr) • Received : Dec. 23, 2018, Revised : Jan. 19, 2019, Accepted : Feb. 15, 2019

** 교신저자 : 순천대학교 멀티미디어공학과

• Corresponding Author : Won-Geun Oh

• 접수일 : 2018. 12. 23

Dept. of Multimedia Engineering, Suncheon National University,

• 수정완료일 : 2019. 01. 19

Email : owg@snu.ac.kr

• 게재확정일 : 2019. 02. 15

한 영향은 심리음향의 관점에서 평가되는 것이 바람직하다. 그 이유는 인간의 청각 특성이 주파수 대역에 따라 민감도가 달라서 낮은 음압 레벨의 소음이라도 청감적인 크기는 달리 지각할 수 있기 때문이다[6]. 따라서 ANC 알고리즘은 이러한 청각의 심리음향 특성을 고려하여 주파수 대역별로 소음제어의 가중치를 달리하는 것이 효과적이라 할 수 있다.

그러나 ANC에서 가장 일반적으로 사용되는 FXLMS(Filtered-X Least Mean Squares) 알고리즘은 잔류 소음의 스펙트럼 제어가 불가능한 구조로 되어 있다. 반면 FELMS(Filtered-E LMS)는 FXLMS에 잔류 소음의 스펙트럼 형상을 조절할 수 있는 노이즈 셰이핑(noise shaping) 필터가 내장된 구조이다. FELMS는 여러 연구자에 의해 잔류 소음의 개선을 위한 연구에 적용되어 청감적인 개선이 가능함을 입증하였다. 그러나 이들 연구에서는 단순히 기존에 사용하던 필터만 사용하였을 뿐이고, 특정한 지표에 최적적인 필터를 설계하는 절차에 대해서는 명확하게 제시되지 않아서 실제 응용이 힘들었다[7-9].

본 논문에서는 심리음향 기반의 소음 평가 파라미터인 NC(Noise Criterion) 곡선을 이용하여 FELMS의 노이즈 셰이핑 필터의 형상을 구하는 방법을 제시하였다. NC 곡선은 ANSI/ASA(American National Standards Institute/Acoustical Society of America) 표준으로 사용하는 소음 기준이다. 유사한 파라미터로는 NR(Noise Rating)이 있으며, 국제 표준화 기구 ISO에 의해 개발되어 주로 유럽에서 사용되고 있다. NC와 NR은 계산이 단순하고 소음의 영향에 대해 직관적인 이해가 가능한 장점이 있어 각국에서 소음 기준으로 널리 사용되고 있다[10].

NR을 ANC에 적용한 연구에는 창문형 ANC에 NR을 적용한 연구가 있다[11]. 이 연구에서도 NR 값 최소화를 위한 노이즈 셰이핑 필터의 형상을 제안하였으나, 필터의 조건이 명확하게 수식으로 제시하지 않아서 필터의 형상을 도출하는데 시행착오를 거쳐야 한다. 본 논문에서는 [11]에서 사용한 NR대신 NC를 평가 기준으로 사용하여, 잔류 소음이 특정 NC 값 이하가 되는 노이즈 셰이핑 필터를 설계하는 방법을 제시하였다. NC는 동일한 소음이라도 NR과는 다른 수치를 출력하기 때문에 이에 적합한 ANC 설계법을 제시하고, 또한 기존의 연구 [12]에서 대략적으로 제

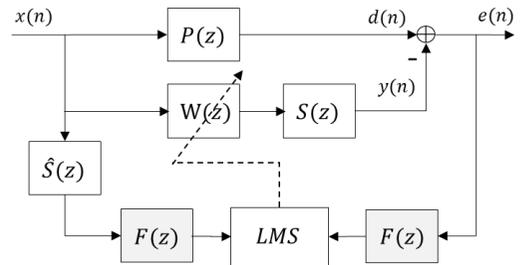


그림 1. FELMS 알고리즘을 사용한 ANC시스템
Fig. 1 ANC system using the FELMS algorithm

시되었던 NC 기준의 필터 설계 알고리즘을 명확하게 수식으로 도출하였다. 제안한 방법의 유용성은 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 교통 소음을 사용하여 성능을 분석한 결과 제안한 형상의 노이즈 셰이핑 필터가 ANC의 유효 대역 내에서 NC 값을 감소하는데 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 보였다.

본 논문의 구성은 2장은 FELMS 알고리즘과 노이즈 셰이핑 필터 설계, 3장은 시뮬레이션 및 분석, 그리고 4장은 결론으로 이루어져 있다.

II. FELMS 알고리즘

2.1 FELMS 알고리즘

ANC 제어에 가장 많이 사용되는 FXLMS 알고리즘은 전체 주파수 대역에서 동일한 가중치로 잔류 소음의 에너지를 줄이는 방식으로 동작한다. FELMS는 FXLMS에 잔류 소음의 스펙트럼 형상을 조절할 수 있도록 노이즈 셰이핑 필터가 추가된 구조로 되어 있으며, 이 필터의 스펙트럼 형상을 설정하여 주파수 대역별로 소음의 감쇠량을 조절할 수 있다.

그림 1은 FELMS 알고리즘을 사용한 ANC의 블록 선도를 나타낸 것이다. 여기에서 $x(n)$ 은 원 소음 신호, $d(n)$ 은 소음 제거 위치에서의 소음 신호, 그리고 $P(z)$ 는 소음이 지나가는 경로의 전달함수이다. $S(z)$ 는 이차 경로(secondary path)로서 앰프, 스피커와 같은 음향기기의 전달함수이며, $\hat{S}(z)$ 는 이를 모델링한 전달함수이다. $y(n)$ 은 제어 스피커로 출력되는 역위상 소음 신호로서 제어 위치에서 소음 $d(n)$ 을 상쇄하는 역할을 한다. 이때 잔류 소음 $e(n) = d(n) - y(n)$ 은 노이즈 셰이핑 필터 $F(z)$ 를

통과하여 LMS 알고리즘의 입력으로 들어가며, 제어기 $W(z)$ 의 계수 갱신에 사용된다. 제어기는 일반적으로 FIR 구조를 갖는 적응 필터로 구성되며, 계수의 업데이트 식은 다음과 같다[7].

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

여기에서 $\mathbf{w}(n)$ 은 제어기 $W(z)$ 의 필터 계수, $f(n)$ 은 노이즈 웨이핑 필터 $F(z)$ 의 임펄스 응답, 그리고 $e_f(n)$ 은 필터 $F(z)$ 를 통과한 잔류 소음이다.

2.2 노이즈 웨이핑 필터

FELMS 구조에서 가장 핵심은 노이즈 웨이핑 필터 $F(z)$ 의 스펙트럼 형상이다. 기존의 연구에서는 청감 곡선으로 널리 사용되고 있는 A-weighting 또는 ITU-R 468 필터 등을 사용하여 Zwicker 음질 평가 파라미터가 개선되는 것을 보였다[9]. 그러나 구체적인 필터의 설계법에 대해서는 명확하게 제시되지 않아서, 특정 음질 파라미터의 개선을 위한 필터 형상의 도출이 불가능했다.

본 논문에서는 FELMS 구조에서 ANC의 유효 대역을 설정하고, 그 이하 대역에서 잔류 소음의 NC 값을 줄이는 노이즈 웨이핑 필터의 형상을 설계하였다. 이렇게 유효 대역을 설정한 이유는 ANC가 갖는 동작의 한계 때문이다. ANC는 일반적으로 최고 500Hz ~ 1kHz 이하의 저주파 대역에서 효율적으로 작동하며, 주파수가 높아질수록 원 소음과 제어 소음의 위상을 일치시키는 것이 힘들어서 소음 감소 효과가 없거나 오히려 소음이 증가할 수도 있다. 유효 대역은 사용자와 응용 분야에 따라 달리 설정할 수 있으나 본 연구에서는 일반적인 상황을 가정하여 1kHz로 유효 대역을 설정하였다. 이처럼 유효 대역이 1kHz일 때, A-weight나 ITU-R 486 필터는 유효 대역 내에서 잔류 소음의 최대 감소를 달성하기 힘들다. FELMS에서 잔류 소음의 스펙트럼의 진폭은 노이즈 웨이핑 필터의 스펙트럼 진폭이 피크인 주파수에서 최저가 되는데, 이 필터들은 스펙트럼의 피크가 2500Hz와 6300Hz에서 형성되기 때문이다. 따라서 설계할 노이즈 웨이핑 필터는 피크가 ANC의 최대 유효 주파수 이하에 존재하는 형상을 가져야 한다. 이러한 형상의 노이즈 웨이핑 필터는 NR 기준의 ANC 연구에서 제

안되었으며, 이 필터 사용 시 유효 대역 내에서 최소의 NR 값을 갖도록 잔류 소음을 제어하는 것을 보였다[11]. 그러나 이 연구에서는 노이즈 웨이핑 필터의 조건이 수식으로 제시되지 않아 알고리즘을 이용한 자동화된 필터를 설계하기에는 어려움이 있었다.

2.3 필터의 스펙트럼 조건

유효 대역에서 잔류 소음의 NC 값을 최저로 하기 위해서는 잔류 소음의 옥타브 스펙트럼이 원하는 NC 곡선 아래에 위치하도록 $F(z)$ 의 스펙트럼 형상을 설정해야 한다. 잔류 소음의 NC 값을 m 이하로 하기 위해서는 잔류 소음의 스펙트럼이 식 (2)를 만족해야 한다.

$$P_r(k) < NC_m(k), \forall k \quad (2)$$

여기에서 $P_r(k)$ 과 $NC_m(k)$ 는 각각 k 번째 옥타브 밴드에서 잔류 소음의 파워와 NC- m 값을 나타낸다. (2)를 만족하는 노이즈 웨이핑 필터는 NC 곡선이 큰 값일 때는 작은 가중치를 갖고 작은 값일 때는 큰 가중치를 갖도록 설정해야 한다. 따라서 NC 곡선의 진폭 스펙트럼을 $g(f)$ 라 하면, $F(z)$ 의 진폭 스펙트럼은 유효 대역 내에서는 $1-g(f)$ 와 비례하고 그 이후는 진폭 값이 급격히 줄어드는 형태로 설정해야 한다. 즉, 유효 대역의 최고 주파수를 f_e 라 하면 노이즈 웨이핑 필터의 진폭 스펙트럼은 식 (3)을 만족해야 한다.

$$|F(f)| = \begin{cases} A[1-g(f)], & f \leq f_e \\ 0, & f > f_e \end{cases} \quad (3)$$

여기에서 A 는 사용자가 설정하는 임의의 비례상수이다. 이를 만족하는 필터는 유효 대역의 최대 주파수 f_e 까지 단조 증가하는 스펙트럼을 갖게 된다. 이때 만약 f_e 보다 낮은 주파수 밴드에서 원 소음의 스펙트럼의 에너지가 커서 NC 값이 결정된다면, 다음과 같이 해당 주파수 대역의 노이즈 웨이핑 필터에 가중치를 더한다.

$$|F(f)| = A[1-g(f)] + \beta_k(f)$$

$$\text{if } P_r(k) > NC_m(k), k < k_{fc} \quad (4)$$

여기에서 $\beta_k(f)$ 는 가중치이고 k_{fc} 는 최대 유효 대역의 옥타브 밴드이다. 식 (4)를 만족하는 필터는 여러 모양이 가능할 수 있다. 본 논문에서는 실시간 필터 구현의 용이성을 고려하여 유효 대역 이내에서는 그림 2와 같이 NC 곡선과 상하 대칭 모양이고, 유효 대역인 1kHz 이후에는 30dB 감쇠하는 필터를 설계하여 시뮬레이션에 사용하였다.

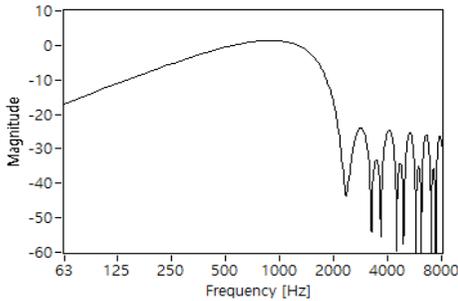
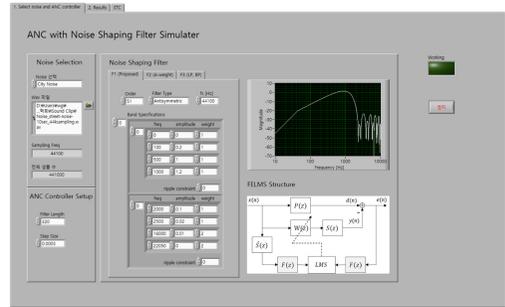


그림 2. 제안된 노이즈 셰이핑 필터 F(z)의 진폭 스펙트럼
Fig. 2 Proposed magnitude spectrum of the noise shaping filter F(z)

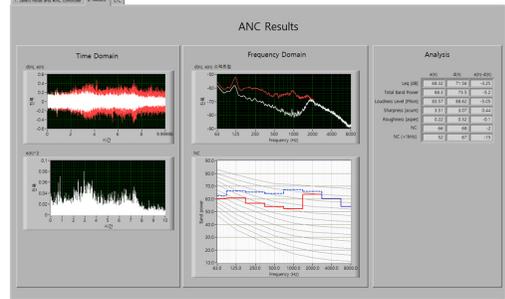
III. 모의실험 및 분석

3.1 시뮬레이션 프로그램

제안한 노이즈 셰이핑 필터를 사용한 ANC의 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 프로그램은 Labview로 작성하였으며 그림 3에 사용자 인터페이스 화면을 나타내었다. 프로그램은 대상 소음 및 필터 선택 창과 잔류 소음의 분석 결과를 출력하는 창으로 구성되어 있다. 필터 선택은 사용자 임의로 진폭 응답 특성을 설정할 수 있는 사용자 정의 필터, A-weighting 필터, 그리고 차단주파수 설정이 가능한 저역 통과 필터와 대역 통과 필터를 선택할 수 있도록 구성되어 있다. 결과 분석 창에서는 원 소음과 잔류 소음의 시간 파형, 잔류 소음의 에너지 파형, 그리고 주파수 스펙트럼과 NC 그래프가 출력된다. 분석 가능한 음향 파라미터로는 등가소음레벨 Leq, 라우드니스 레벨, 날카로움(sharpness), 거칠기(roughness),



(a)



(b)

그림 3. 시뮬레이션 프로그램의 사용자 화면 (a)소음 및 필터 선택 화면 (b)결과 화면
Fig. 3 User interface of the simulation program (a)noise and filter select window (b)results window

그리고 전 대역의 NC 값과 1 kHz 이하 대역에서의 NC값이 디스플레이 된다.

3.2 시뮬레이션 결과

노이즈 셰이핑 필터로 그림 2의 필터(FP), A-weighting 필터(FA), 그리고 차단주파수가 1kHz인 저역 통과 필터(FL)을 사용하여 잔류 소음의 파라미터를 비교하였다. 이들 필터는 위상 왜곡을 피하려고 FIR 필터로 구현하였으며 FP는 71차, FL은 30차, 그리고 FA는 154차 필터가 사용되었다.

시뮬레이션을 위해 사용한 소음 $x(n)$ 은 [11]에서 사용되었던 것과 같은 5초간 녹음된 도로 소음을 사용하였다. 소음 전달 경로는 $P(z) = z^{-200}$ 와 같은 전달함수를 사용하였고, 이차 경로의 모델은 $\hat{S}(z) \cong S(z)$ 와 같이 오차를 무시할 수 있을 정도이며, 제어 스피커로 인한 피드백도 무시할 수 있다고 가정하였다.

표 1. 시뮬레이션 결과
Table 1. Simulation results

Parameters \ Results	d(n)	Proposed filter(FP)		A-weighting(FA)		Low pass filter(FL)	
		e(n)	e(n)-d(n)	e(n)	e(n)-d(n)	e(n)	e(n)-d(n)
Leq (dB)	74.9	71.5	-3.4	71.5	-3.4	71.5	-3.4
Loudness Level (phon)	92.0	86.4	-5.6	85.5	-6.5	86.2	-5.8
Sharpness (acum)	3.32	3.82	0.5	3.5	0.2	4.0	0.6
Roughness (asper)	0.33	0.28	-0.06	0.3	0.0	0.3	0.0
NC	71.0	69.0	-2.0	66.0	-5.0	71.0	0.0
NC(<1kHz)	70.0	54.0	-16.0	59.0	-11.0	61.0	-9.0

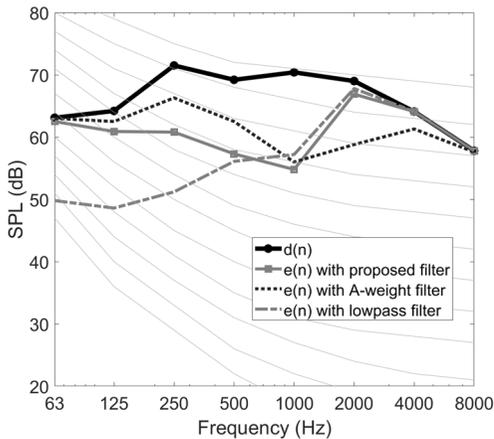


그림 4. 필터 3종의 제어 전후 NC곡선
Fig. 4 NC curve of d(n) and e(n) for the 3 noise shaping filters

이러한 설정으로 3종의 필터에 대해 시뮬레이션한 결과를 표 1과 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 각 필터를 사용했을 때 제어 전후의 NC 곡선을 나타낸 것이다. 전체 주파수 대역에서는 FA 필터를 사용했을 때가 NC 값이 가장 낮지만, 유효 대역인 1kHz 내에서는 제안한 필터 FP가 더 낮은 NC 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 표 1은 각 필터에 대해 ANC 적용 전후의 각종 음향 파라미터를 계산한 결과를 보인 것이다. 라우드니스 레벨과 NC 값은 A-weighting을 사용했을 때가 가장 좋게 나타났는데, 그 이유는 A-weighting의 피크가 1kHz 이상의 대역에 형성되어 가장 넓은 대역에서 잔류 소음을 억제하기 때문이다. 그러나 실제 ANC 응용에서 이러한 고역에서의 감쇠는 위상 불일치 문제가 생길 가능성이 커 실효를 나타내기 힘들다. NC 값의 경우 제안한 필터 FP는 전체 주파수 대역에서는 2가 감소하여 5만큼 감소한

FA보다 더 낮은 성능을 보였다. 그러나 ANC의 유효 대역으로 설정한 1kHz 이하만 고려한 NC(<1kHz) 값은 16이 감소하였으며, 이는 제안한 형태의 필터 사용 시 FA나 FL보다 더 많은 감쇠가 이루어질 수 있음을 나타낸다. Zwicker 음질 파라미터 roughness와 sharpness는 세 경우 모두 큰 변화가 없어 필터 사용에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

이상과 같이 ANC의 유효 주파수 이내에서 NC 값을 최소화하기 위해서는 제안한 형태의 필터가 가장 효과적임을 확인할 수 있으며, 이는 높은 주파수 대역에서 적용하기 힘든 ANC의 특성을 고려했을 때 기존의 A-weighting과 같은 필터보다 실제 적용 시 유용한 필터라고 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 ANC에 청감 요소를 도입하여, 유효 주파수 대역 내에서 잔류 소음의 NC 값을 줄이는 FELMS 알고리즘의 구체적인 노이즈 웨이핑 필터 설계법을 제안하였다. 이를 위한 최적의 필터는 진폭 스펙트럼이 NC 곡선 기울기의 역으로 증가하다가 유효 주파수 근처에서 가장 큰 값을 갖고, 그 이상의 대역에서는 급격하게 감쇠하는 형태를 갖는다. 이는 기존 연구에서 제시하였던 NR 기준의 필터와 유사한 형태를 보이며, 이러한 형태의 웨이핑 필터가 ANC 적용 시 청감적으로 우수한 성능을 보일 수 있음을 의미한다.

제안한 필터의 효과를 도로 소음에 대해 시뮬레이션으로 비교한 결과, 기존의 심리음향 ANC에서 사용되었던 A-weighting 필터보다는 5dB, 저역 통과 필터보다는 7dB 정도 유효 대역 이하에서 NC 값이 낮

아짐을 보였다. 향후 연구과제로는 NC 이외의 다른 음향 파라미터를 기준으로 최적 필터 형상을 도출하는 것을 들 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1B07050790)

References

[1] T. Kim, H. Jang, and W. Lee, "An Inter-floor Noise Prevention System using an Open-source Controller," *J. of the Korea institute of Electronic Communication Science*, vol. 12, no. 5, 2017, pp. 899-906.

[2] C. Lee, "The effects of a temporal masking on the sound laterlization," *J. of the Korea institute of Electronic Communication Science*, vol. 5, no. 4, 2010, pp. 352-356.

[3] S. Kuo and D. Rorgan, *Active Noise Control Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[4] W. Oh, "A single channel open-window active noise control system," *Int. J. of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 6, 2017, pp. 872-876.

[5] O. Kwon, "Study on Efficient Adaptive Controller for Attenuation of Engine Noises in a Car," *J. of the Korea institute of Electronic Communication Science*, vol. 9, no. 9, 2014, pp. 983-989.

[6] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and models*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.

[7] S. M. Kuo and J. Tsai, "Residual noise shaping technique for active noise control systems," *The J. of the Acoustical Society of America*, vol. 95, no. 3, 1994, pp. 1665-1668.

[8] S. Sommerfeldt and T. Oamuels, "Incorporation of loudness measures in active noise control," *The J. of the Acoustical Society of America*, vol. 109, no. 2, 2001, pp. 591-599.

[9] H. Bao and I. MShi, "A perceptually motivated active noise control design and its

psychoacoustic analysis," *Electronics and Telecommunications Research Institute J.*, vol. 35, no. 5, 2013, pp. 859-868.

[10] J. Kim, *Noise and Vibration Engineering - 4th edition*, Seoul: Sejin Company, 2013.

[11] W. Oh, "An active noise control window system to reduce noise rating in low frequency band," *J. of the Acoustic Society of Korea*, vol. 37, no. 5, 2018, pp. 331-337.

[12] W. Oh, "Active noise control system based on the noise evaluation parameters," In *Proc. Acoustical Society of Korea Conf.*, Gangneung, Korea, Nov. 2018, pp. 173.



김종호(Jong-Ho Kim)

1998년 한양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)

2000년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)

2008년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학박사)

2008년~2009년 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2009년~현재 순천대학교 멀티미디어공학과 교수

※ 관심분야 : 영상처리, 영상압축, 컴퓨터비전, 음향신호처리



오원근(Wong-Eun Oh)

1989년 한양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)

1992년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)

1997년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학박사)

1997년~현재 순천대학교 멀티미디어공학과 교수

※ 관심분야 : 음향신호처리, 소음제어, 전기음향, 인공지능, 영상처리