

# 노이즈 캔슬링 헤드폰에 적합한 잔여 음악 제거기 기반의 2차 경로 추정 알고리즘

## Secondary Path Estimation Algorithm Based on Residual Music Canceller for Noise Cancelling Headphone

지유나, 이근상, 박영철<sup>†</sup>

(Youna Ji, Keunsang Lee, and Youngcheol Park<sup>†</sup>)

연세대학교 컴퓨터정보통신공학부

(Received June 25, 2015; accepted August 18, 2015)

**초 록:** 본 논문은 노이즈 캔슬링 헤드폰을 위한 능동 소음 제어 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 피드백 구조의 filtered-x least mean square algorithm(FxLMS) 기반 능동 소음 제어 기술을 이용하여 외부에서 헤드폰 내부로 유입되는 소음을 제어한다. 이때 가변적인 2차 경로에 강인하게 대처하기 위해 지속적으로 2차 경로를 추정하는 잔여 음악 제거기 기반의 온라인 2차 경로 추정 알고리즘을 이용한다. 실험을 통해 2차 경로가 변화하는 환경에서 제안 능동 소음 제어 알고리즘은 기존 알고리즘들에 비해 음악 신호의 왜곡 없이 안정적으로 일관성 있는 소음 제어 성능을 보임을 확인하였다.

**핵심용어:** 능동 소음 제어, 온라인 2차 경로 추정, 잔여 음악 제거기

**ABSTRACT:** An active noise control (ANC) algorithm for noise canceling headphone is proposed. In this study, the feedback ANC operated with the filtered-x least mean square algorithm (FxLMS) algorithm is used to attenuate the undesired noise. Also an adaptive residual music canceller (RMC) is proposed for enhancing the accuracy of the reference signal of the feedback ANC. Simulation results show that a high quality of music sound can be consistently achieved in a time-varying secondary path situation.

**Keywords:** Active Noise Control (ANC), On-line secondary path estimation, Residual Music Canceller (RMC)

**PACS numbers:** 43.50.Ki, 43.60.Mn

### 1. 서 론

모바일 디바이스가 발전함에 따라 이어폰 혹은 헤드폰의 사용도가 높아져 다양한 환경에서 음악을 청취하는 사람들이 많아지고 있다. 특히 비행기, 버스 그리고 거리 등에서 음악을 청취하게 되면 높은 배경 잡음으로 인해 안정적인 음악 청취가 힘들다. 따라서 배경 잡음을 제거하여 청취력을 향상시키기 위한 목적으로 능동 소음 제어를 이용한 노이즈 캔슬링 헤드폰이 개발 되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

능동 소음 제어 시스템은 소리의 특성인 중첩의 원리를 이용하여 잡음과 반대 위상을 갖는 소음 제어 신호를 생성해 헤드폰의 이어패드 안쪽으로 유입되는 외부 잡음을 상쇄시킨다. 능동 소음 제어는 그 구조에 따라 크게 피드포워드 시스템과 피드백 시스템으로 나눌 수 있다.

피드포워드 구조는 헤드폰 외부에 위치한 참조 마이크로로부터 측정된 소음신호를 기반으로 헤드폰 내부의 에러 마이크 위치에서의 소음 신호가 최소가 되도록 제어 신호를 생성하며 음악 신호의 왜곡 없이 넓은 대역의 잡음을 감소시킬 수 있다.<sup>[3]</sup> 하지만 헤드폰으로 유입되는 외부 잡음과 Analog to Digital Converter(ADC), Digital to Analog Converter(DAC) 및

<sup>†</sup>Corresponding author: Youngcheol Park (young00@yonsei.ac.kr)  
Division of Computer and Telecommunication Engineering,  
Chanjo, Room 269, Yonsei University, 1 Yonseidaegil, Wonju  
26493, Republic of Korea  
(Tel: 82-33-760-2756, Fax: 82-33-763-4323)

적용 필터를 거쳐 시간지연이 생긴 제어 신호 사이의 인과성 문제로 인해 실제 환경에서는 제한적으로 사용되고 있다.<sup>[4]</sup>

반면 피드백 구조는 헤드폰 내부의 오차 마이크로부터 합성된 참조 신호를 이용하여 소음을 제어하는 구조를 가지며 저주파 대역에서 높은 잡음 제거율을 보인다. 하지만 피드백 구조에서는 추정된 2차 경로를 이용하여 참조 신호를 재생성하기 때문에 음악 청취 환경에서 추정된 2차 경로와 실제 2차 경로 사이의 차이가 발생하게 되면 참조 신호의 왜곡으로 인해 잡음을 제거 하는 대신 음악 신호의 왜곡을 발생시키게 된다.<sup>[5]</sup> 따라서 피드백 능동 소음 제어 기반의 노이즈 캔슬링 헤드폰에서는 안정적인 음악 청취 환경과 잡음 제거 성능 향상을 위해 정확한 2차 경로 추정이 필요하다. 헤드폰 환경에서 백색 잡음 또는 음악 신호를 사용하여 2차 경로를 온라인으로 추정하는 알고리즘은 가장 널리 알려진 방법<sup>[6,7]</sup>이다. 이러한 기술은 2차 경로의 정확도를 높여 알고리즘의 성능을 향상시킬 수 있지만 시스템의 안정성을 보장 할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 피드백 능동소음 제어 알고리즘의 시스템 안정성 문제를 해결하기 위해 잔여 음악 제거 필터를 이용하여 실제와 추정된 2차 경로간의 차이를 지속적으로 모니터링 함으로써 2차 경로의 시간에 따른 변화에 강인한 온라인 추정 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 II장에서 노이즈 캔슬링 헤드폰을 위한 피드백 능동 소음 제어와 온라인 2차 경로 추정 알고리즘을 설명하고, III장에서 제안하는 잔여 음악 제거기를 이용한 강인한 가변 2차 경로 추정 알고리즘을 보인다. IV장에서 실험을 통해 제안 알고리즘의 성능을 평가하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존연구

### 2.1 피드백 능동 소음 제어

Fig. 1은 헤드폰에서 사용되는 피드백 능동 소음 제어 시스템<sup>[3,8]</sup>을 보이고 있다. 피드백 능동 소음 제어 시스템은 오차 마이크로부터 합성된 참조 신호를 이용하여 소음을 제어하며 이때 오차 마이크로에서 얻

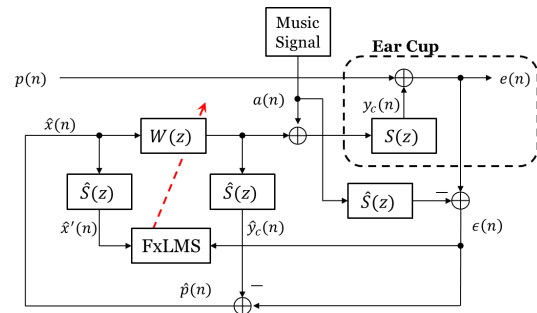


Fig. 1. Feedback ANC system.

어지는 능동 소음 제어의 잔여 소음은  $z$ -도메인에서 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$E(z) = P(z) + \hat{X}(z)W(z)S(z) + A(z)S(z), \quad (1)$$

여기서  $P(z)$ ,  $A(z)$  그리고  $S(z)$ 는 각각 헤드폰으로 유입되는 주 소음 신호  $p(n)$ , 음악 신호  $a(n)$  그리고 2차 경로  $s(n)$ 의 전달함수를 각각  $z$ -도메인으로 표현한 것이다. 이때 능동 소음 제어 시스템은 오차 마이크로에서 측정되는 에러 신호의 평균 제곱 비용 함수  $\xi(n) = E[e^2(n)]$ 을 최소화 하도록 조정되며 이를 위해 FxLMS(Filtered-x Least Mean Square) 알고리즘이 이용된다. FxLMS 알고리즘의 계수 갱신 식은 다음과 같다.<sup>[3]</sup>

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu_w \hat{\mathbf{x}}'(n)\epsilon(n), \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{L_w-1}(n)]^T$ 와  $\hat{\mathbf{x}}'(n) = [\hat{x}'(n), \hat{x}'(n-1), \dots, \hat{x}'(n-L_w+1)]^T$ 로  $L_w$ 차 필터 계수 벡터와 입력 벡터를 나타내며,  $\mu_w$ 는 적응 필터의 수렴속도를 조절하는 수렴 상수를 뜻한다. FxLMS 알고리즘의 입력 신호는,  $\hat{x}'(n) = \hat{\mathbf{s}}^T(n)\hat{\mathbf{x}}(n)$ 로 오차 마이크로부터 합성된 참조 신호  $\hat{x}(n)$ 에 2차 경로를 보상하여 얻을 수 있다.  $\hat{\mathbf{s}}(n) = [s_0(n), s_1(n), \dots, s_{L_s-1}(n)]^T$ 는  $L_s$ 차수의 2차 경로 필터 계수 벡터를 뜻한다.

추정된 참조 신호  $\hat{x}(n)$ 은 주 소음 신호인  $p(n)$ 과 같다고 가정하며 오차 마이크로에서 측정된 신호와 출력 제어 신호에 2차 경로를 보상한 신호, 그리고 음악

신호에 2차 경로를 보상한 신호를 이용하여 구할 수 있다. 참조 신호의 z-도메인 표현은 다음과 같다.

$$\hat{X}(z) \equiv P(z) = E(z) - \hat{S}(z)A(z) - \hat{S}(z)W(z)\hat{X}(z). \quad (3)$$

참조 신호  $\hat{x}(n)$ 은 FxLMS 알고리즘의 입력으로 사용되어 주 소음 신호를 제거 할 수 있는 제어 신호를 능동적으로 생성한다. 따라서 피드백 능동 소음 제어 시스템의 성능을 높이기 위해서는 참조 신호의 정확한 합성이 이루어져야 하고 그러기 위해선 정확한 2차 경로 추정이 요구된다. 실제 2차 경로와 추정된 2차 경로와의 차이는 참조 신호 왜곡을 발생시켜 소음 제거율과 음악 신호의 품질을 떨어뜨린다.

### 2.2 온라인 2차 경로 추정 알고리즘

피드백 능동 소음 제어 시스템의 성능을 향상시키기 위해 변화하는 2차 경로를 온라인으로 추정하는

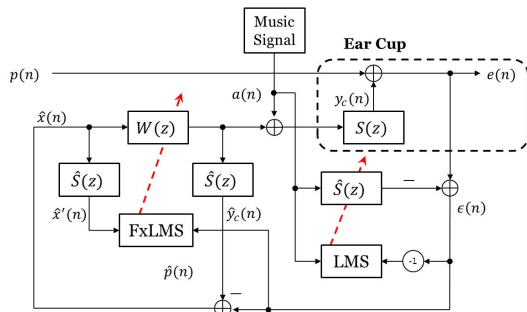


Fig. 2. Feedback ANC with on-line secondary path estimation.

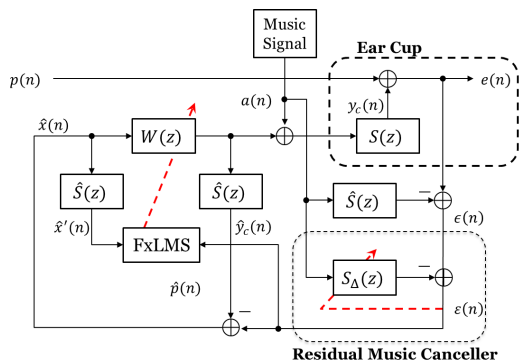


Fig. 3. Proposed feedback ANC with a residual music canceller.

알고리즘이 연구<sup>[6,7]</sup>되었다. Fig. 2는 피드백 능동 소음 제어에서 음악 신호를 이용하여 온라인 2차 경로 추정을 수행하는 구조를 보이고 있다.

2차 경로를 추정하기 위한 적응 필터는 음악 신호를 참조 신호로 하고 측정된 오차 마이크에서 기존에 추정된 2차 경로를 보상한 음악 신호를 뺀 신호  $\epsilon(n)$ 를 적응 필터의 에러 신호로 하여 다음 식과 같이 LMS 알고리즘을<sup>[9]</sup> 이용하여 적응적으로 갱신한다.

$$\hat{\mathbf{s}}(n+1) = \hat{\mathbf{s}}(n) + \mu \mathbf{a}(n)\epsilon(n). \quad (4)$$

$$\epsilon(n) = e(n) + \hat{\mathbf{s}}(n)\mathbf{a}(n). \quad (5)$$

## III. 잔여 음악 제거기 기반의 온라인 2차 경로 추정

### 3.1 잔여 음악 제거기 기반의 온라인 2차 경로 추정

기존의 온라인 2차 경로 추정 알고리즘을 헤드폰에 사용하게 되면 실제 2차 경로와 추정된 2차 경로의 차이에 의해 참조 신호에 바이어스가 발생하게 된다. 이때 바이어스가 발생한 참조 신호  $\hat{x}(n)$ 을 z-도메인에서 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{X}(z) = \frac{P(z) + A(z)S_{\Delta}(z)}{1 - W(z)S_{\Delta}(z)}, \quad (6)$$

$$S_{\Delta}(z) = S(z) - \hat{S}(z), \quad (7)$$

여기서  $S_{\Delta}(z)$ 는 2차 경로 추정 오차  $\mathbf{s}_{\Delta}(n) = \mathbf{s}(n) - \hat{\mathbf{s}}(n)z$ 의 z-도메인 표현이다. 2차 경로 추정의 오차  $S_{\Delta}(z)$ 는 능동 제어 시스템을 불안정하게 만들뿐 아니라 음악 신호의 왜곡을 발생시키는 주된 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 잔여 음악 제거기를 이용하여 실제 2차 경로와 추정된 2차 경로 사이의 차이를 지속적으로 관찰하여 2차 경로의 변화에 강인하게 대처하는 알고리즘을 제안한다.

Fig 3은 본 논문에서 제안하는 잔여 음악 제거기 기반의 온라인 2차 경로 추정 기법을 적용한 피드백

능동 소음 제거 시스템의 블록선도를 보이고 있다.

Eq.(7)을 Eq.(3)에 대입하여 정리하면 2차 경로 추정 오차로 인해 바이어스가 생긴 참조 신호를 다음과 같은 수식으로 표현 할 수 있다.

$$\hat{X}(z) = \hat{P}(z) + R_M(z), \quad (8)$$

이때  $R_M(z) = S_\Delta(z)A(z)$ 이며 2차 경로 추정 오차에 의해 발생한 값으로 추정된 참조 신호 내의 잔여 음악 신호를 나타낸다. 본 논문에서는 적응 필터를 이용하여 참조 신호의 왜곡을 발생시키는 잔여 음악 신호를 제거해 소음 제어의 성능을 향상시킨다. 또한, 잔여 음악 제거의 계수 벡터는 2차 경로의 바이어스를 추정하므로 기존에 추정된 2차 경로와 결합하여 정확도를 높일 수 있다.

$$S(z) \approx \hat{S}(z) + S_\Delta(z). \quad (9)$$

잔여 음악 제거기는 음악 신호를 참조 신호로 Normalized LMS(NLMS)를 사용하여 제거 될 수 있으며 그 계수는 다음 식과 같이 적응적으로 갱신한다.<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{s}_\Delta(n+1) = \mathbf{s}_\Delta(n) - \mu_R \frac{\mathbf{a}(n)}{\|\mathbf{a}(n)\|_2 + \delta} \varepsilon(n), \quad (10)$$

여기서  $\|\cdot\|_2$ 은 놈(norm) 연산자이고,  $\mu_R$ 는 잔여 음악 제거기의 수렴 속도를 조절하는 수렴 상수이며,  $\delta$ 는 작은 상수이다. 최종적으로 2차 경로 추정 수식은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{s}}(k) = \begin{cases} \hat{\mathbf{s}}(k-1) + \mathbf{s}_\Delta(k), & \text{when } k = lM \\ \hat{\mathbf{s}}(k-1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서  $l, M$ 은 각각 갱신 주기를 결정하는 상수와 샘플링 주파수이다.

### 3.2 잔여 음악 제거기를 위한 가변 수렴 상수 기술

앞 절에서 잔여 음악 제거기를 이용한 2차 경로 추정 알고리즘에 대해 소개하였다. 실제 헤드폰 사용

환경에서는 시스템의 안정성을 보장하기 위해 변화하는 2차 경로를 빠르게 추정할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 가변 수렴 상수 기술을 사용하여 잔여 음악 제거기의 수렴 성능을 향상시키고자 한다. 최적 수렴 상수는 잔여 음악 제거기의 사후에러(a posteriori error)의 파워와 잔여 소음 신호의 파워가 같아지도록 결정 되는 것이다.

$$E[\varepsilon_a^2(n)] = (1 - \mu_R(n))^2 E[\varepsilon^2(n)] = E[p_r^2(n)]. \quad (12)$$

위의 수식에서  $p_r(n) = p(n) - y_c(n)$ 로 잔여 소음 신호를 나타낸다. 결과적으로 잔여 음악 제거기의 가변 수렴 상수는 다음과 같이 정리 된다.

$$\mu_R(n) = \mu_{R,\max} \beta_R(n), \quad (13)$$

$$\beta_R(n) = 1 - \sqrt{\frac{E[\varepsilon^2(n)] - E[y_{a_r}^2(n)]}{E[\varepsilon^2(n)]}}, \quad (14)$$

여기서  $\mu_{R,\max}$ 는 잔여 음악 제거기를 위한 수렴 상수의 최대값이고,  $y_{a_r}^2(n) = a^T(n)s_\Delta(n)$ 는 추정된 잔여 음악 신호이며  $\beta_R(n)$ 은 0과 1사이를 갖는다.

## IV. 실험 및 결과

실험을 위해 헤드폰 외부와 내부의 전달 함수인 주 음향 경로와 2차 경로를 오프라인으로 각각 측정하였다. 이때, 음악 청취 환경을 가정하여 샘플링 주파수는 48 kHz로 하였으며, 다음과 같은 전달 함수를 보인다.

Fig. 4(a)는 주 음향 경로의 주파수 응답이다. 헤드폰 내부로 유입되는 대부분의 고주파 성분은 헤드폰의 물리적 특성으로 인해 차폐되기 때문에 대략 저역 통과 필터와 같은 특성을 보인다.<sup>[10]</sup> 반면 Fig. 4(b)는 2차 경로의 주파수 응답으로 스피커의 특성과 헤드폰 사용자 외이의 특성을 반영하고 있다.

제안 알고리즘의 실효성을 검증하기 위한 비교 알고리즘으로 고정된 2차 경로(Fixed SP), 정확한 2차 경로(Correct SP) 그리고 온라인 2차 경로 추정(Adaptive

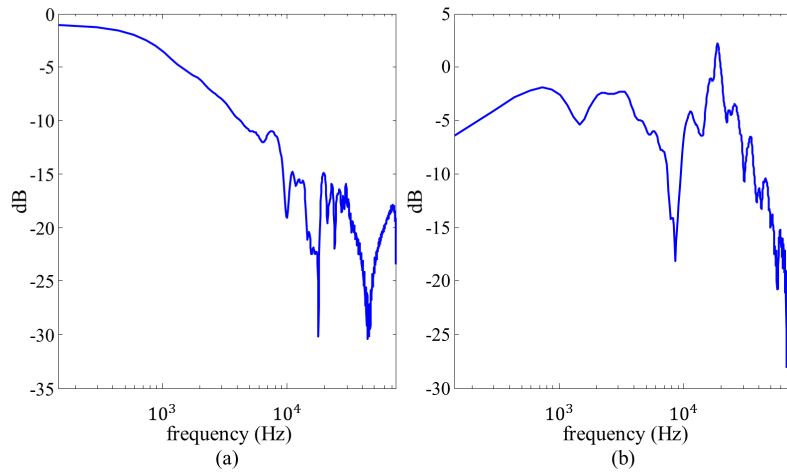


Fig. 4. Frequency response of (a) primary path, and (b) secondary path.

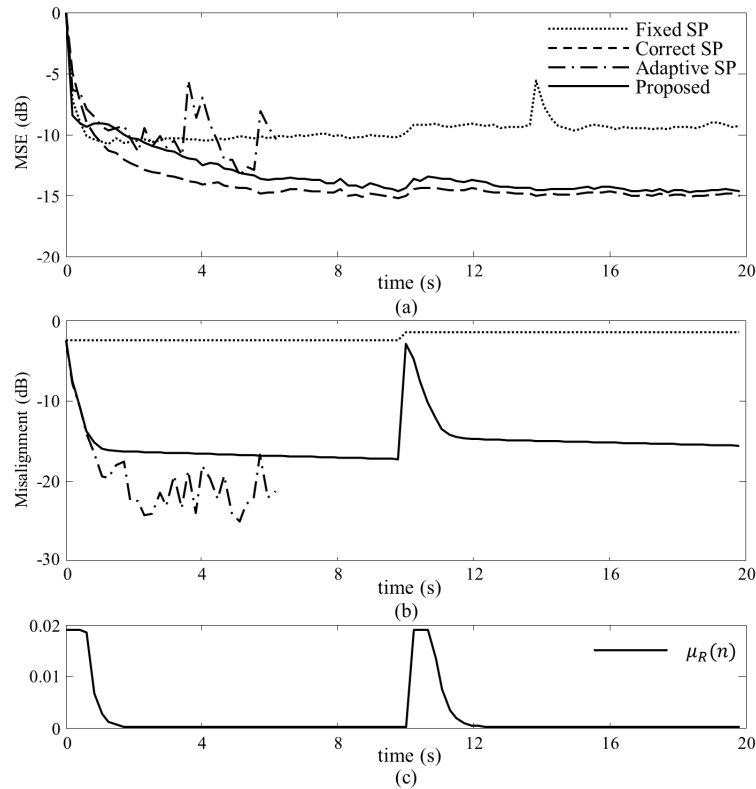


Fig. 5. (a) MSE, (b) misalignment, and (c) variable step-size for RMC  $\mu_R(n)$ .

SP)을 사용하는 피드백 능동 소음 제어 알고리즘들을 사용하였다. 먼저, 다음과 같이 기본 주파수의 하모닉 성분을 갖도록 소음 신호를 모델링하여 실험을 실시하였다.

$$p(n) = \sum_{i=1}^P A_i \sin(2\pi i f + \theta_i) + v(n), \quad (15)$$

여기서  $P$ 는 하모닉의 개수이며,  $f$ 는 기본 주파수이고,  $A_i$ 와  $\theta_i$ 는 각각  $i$ th 하모닉의 크기와 위상이다. 그리고  $v(n)$ 은 백색 배경 잡음이다. 이때 소음 신호

$p(n)$ 은  $P=4$ 과 기본 주파수 150 Hz로 하였으며 위상은 랜덤하게 발생하고, 배경 잡음 5 dB SNR을 갖도록 생성하였다. 20차의 AR 프로세서를 이용하여 모델링된 신호를 음악 신호로 가정하였다. 이때 제어 필터와 2차 경로 추정 필터의 차수는 각각 128로 하였으며,  $\mu_W, \mu_S$  그리고  $\mu_{R,max}$ 는 각각 0.001, 0.02 그리고 0.02로 하였다. 제안 알고리즘에서 2차 경로 갱신 주기를 결정하는 상수  $l$ 은 1을 사용하였으며, 10s 뒤에 2차 경로를 변경하여 실험을 하였다. 각 알고리즘들의 소음 제어와 2차 경로 추정 성능을 평가하기 위한 방법으로 MSE(Mean Square Error)와 misalignment를 사용하였다. Fig. 5는 각 알고리즘에 대한 MSE와 misalignment 곡선을 보이고 있다.

Fig. 5의 결과로부터 제안 알고리즘은 변화하는 2차 경로를 빠르게 추정함으로써 Correct FANC와 유사한 소음 제어 성능을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 반면, 고정 2차 경로를 사용하는 Fixed SP는 바이어스로 인해 높은 MSE 값을 가지고, Adaptive FANC는

큰 수렴 상수를 사용하여 발산하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 15s부터 20s까지의 헤드폰 내부 노이즈와 각 알고리즘의 에러 신호를 스펙트럼으로 보이고 있다.

Fig. 6으로부터 제안 알고리즘은 Correct SP와 유사

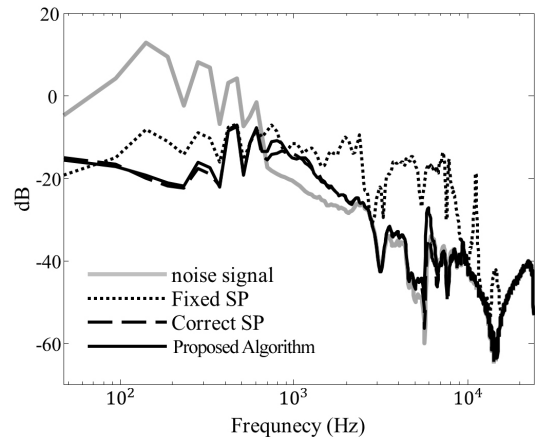


Fig. 6. Spectrums of noise signal and error signals such as fixed SP, correct SP and proposed algorithm.

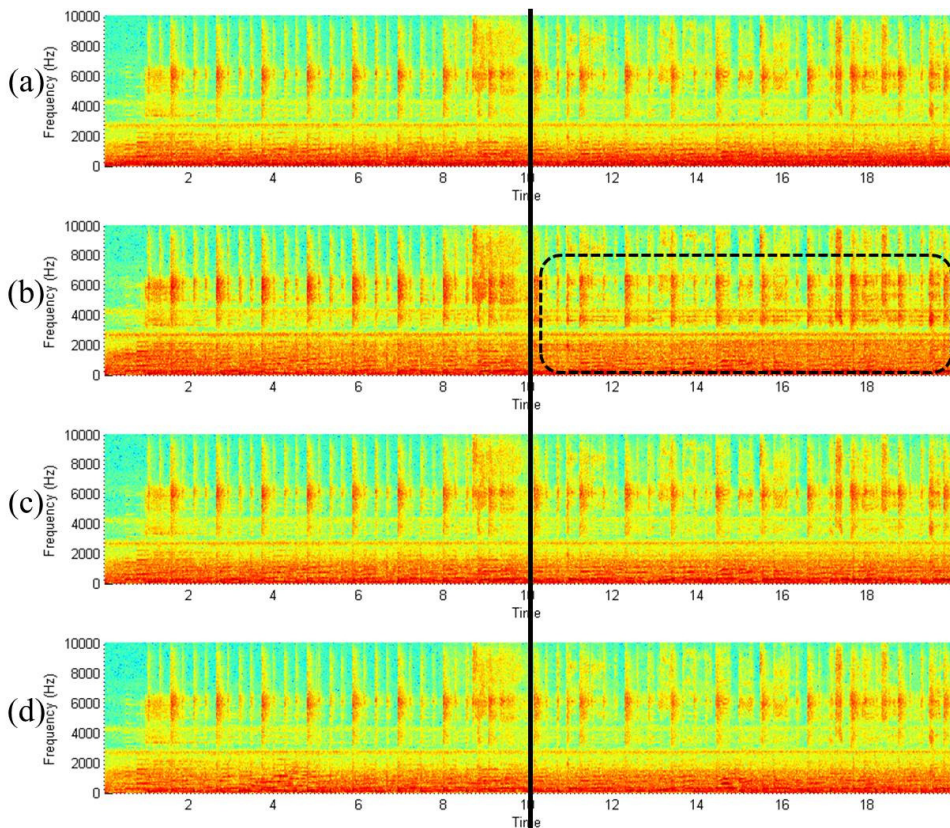


Fig. 7. Spectrogram error microphone signals: (a) without ANC (b) with fixed SP, (c) correct SP, and (d) proposed algorithm.

한 소음 제어 성능을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 반면 Fixed SP는 바이어스로 인하여 1 kHz 이하 대역에서 소음 제어 성능이 떨어지는 것뿐만 아니라 높은 주파수 대역에서 왜곡이 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

다음으로 외부 소음 신호로 NoiseX-92 데이터베이스의 F16과 한국 음악 신호를 사용하여 실험을 실시하였다. NoiseX-92는 다양한 환경에서 녹음된 소음 신호 데이터베이스로 소음 제어뿐만 아니라 음질 개선, 음성인식 등의 다양한 분야에서 알고리즘 성능 검증을 위해 널리 이용되고 있다. 또한 실제 오디오 환경에서 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 한국 음악 신호를 이용한 실험도 추가하였다. 이때 샘플링 주파수는 48 kHz로 설정하였고, Adaptive SP는 안정성의 문제가 발생하므로 실험에서 제외 하였다. 각 알고리즘의 파라미터들은 Fig. 5와 동일하게 사용하였으며, 10s 뒤에 2차 경로를 변경하였다. Fig. 7은 오차 마이크 신호의 스펙트로그램을 나타내고 있다.

Fig. 7에서 검은색 실선은 2차 경로가 변화한 위치를 나타내고 있다. 앞서 보인 것처럼 낮은 주파수 대역에서 Fixed FANC는 소음 신호뿐만 아니라 음악 신호도 함께 제거하는 것을 관찰할 수 있으며, 흰색 점선 박스를 살펴보면 음악 신호의 왜곡이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 헤드폰 사용자의 음악 청취 품질을 떨어뜨리는 요소로 작용한다. 반면 제안 알고리즘은 Correct FANC와 유사한 성능을 보이는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 8은 헤드폰 내부에 유입되는 소음과 각 알고리즘의 오차 마이크 신호에서 2차

경로를 보상한 음악 신호를 제거한 신호[i.e.,  $e(n) - \mathbf{a}^T(n)\mathbf{s}(n)$ ]의 스펙트럼을 15s에서 20s 구간에 대해서 보이고 있다.

Fig. 8의 결과로부터 제안 알고리즘은 지속적으로 2차 경로를 추정함으로써 음악 신호의 왜곡 없이 외부에서 유입되는 소음 신호를 효과적으로 제거하는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 5 ~ 8의 결과들로부터 제안 알고리즘은 2차 경로가 변화하는 환경에서 기존 알고리즘들에 비해 안정적으로 2차 경로를 추정함을 알 수 있다. 따라서 높은 소음 제어 성능과 일관성 있는 음악 품질을 제공할 수 있으므로 노이즈 캔슬링 헤드폰 환경에 적합하다고 할 수 있다.

## V. 결론

본 논문은 피드백 능동 소음 제거 기술을 위한 잔여 음악 제거기 기반의 온라인 2차 경로 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 적응 필터를 이용하여 참조 신호의 왜곡을 발생시키는 잔여 음악 신호를 제거해 소음 제어 성능을 향상시켰다. 제안된 기술은 변화하는 2차 경로에도 강건한 성능을 가지며 가변 수렴 상수를 기반으로 한 잔여 음악 제거기를 통해 빠르게 변화하는 2차 경로를 효과적으로 추정하고자 하였다. 실험을 통해 제안 알고리즘이 기존 기술에 비해 2차 경로가 변화하는 환경에서도 안정적으로 외부 소음을 제어하여 일관성 있는 음악 품질을 제공할 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부와 한국기술평가관리원의 지원을 받은 산업기술혁신사업의 연구 결과물입니다(No.10050527, 산업안전망 강화를 위한 범용 모듈, 센서, 시스템 개발사업).

## References

1. S. M. Kuo, S. Mitra, and W. S. Gan, "Active noise control system for headphone applications," *Cont. Sys. Tech.*

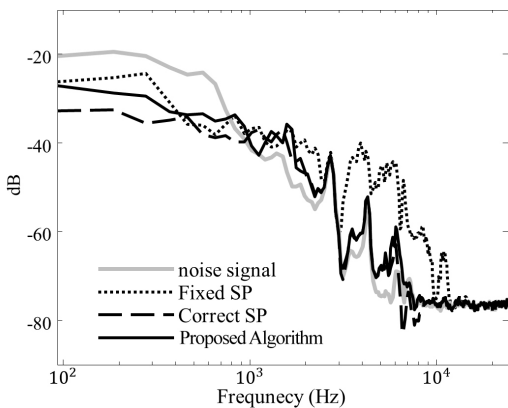


Fig. 8. Spectrums of noise signal and error signals such as fixed SP, correct SP and proposed algorithm during music.

- IEEE Trans. **14**, 331-335 (2006).
2. W. S. Gan and S. M. Kuo. "An integrated audio and active noise control headset," *Consumer Elec. IEEE Trans.* **48**, 242-247 (2002).
  3. S. M. Kuo and D. R. Morgan. "Active noise control: a tutorial review, in *Proc. of the IEEE.* **87**, 943-973 (1999).
  4. L. Zhang and X. Qiu. "Causality study on a feedforward active noise control headset with different noise coming directions in free field," *Appl. Acoust.* **80**, 36-44 (2014).
  5. C. Y. Chang and S. T. Li. "Active noise control in headsets by using a low-cost microcontroller," *Industrial Elec. IEEE Trans.* **58**, 1936-1942 (2011).
  6. B. Widrow and S. D. Stearns. *Adaptive signal processing* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985), pp.12-22.
  7. L. J. Eriksson and M. C. Allie, "Use of random noise for on-line transducer modeling in an adaptive active attenuation system," *J. Acoust. Soc. Am.* **85**, 797-802 (1989).
  8. T., Schumacher, H. Krüger, M. Jeub, P. Vary, and C. Beaugeant, "Active noise control in headsets: A new approach for broadband feedback ANC," in *Proc. of IEEE Int. Con. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 417-420 (2011).
  9. S. S. Haykin, *Adaptive filter theory* (Pearson Education, India, 2008), pp.231-237.
  10. M., Guldenschuh and R. Höldrich. "Prediction filter design for active noise cancellation headphones," *Signal Processing, IET.* **7**, 497-504 (2013).

## 저자 약력

### ▶ 지 유 나 (Youna Ji)



2011년: 연세대학교 컴퓨터정보통신  
공학부 학사  
2011년 ~ 현재: 연세대학교 전산학과  
석박통합 과정  
<관심분야> 디지털 신호처리, 음질 개선,  
음성 신호처리

### ▶ 이 근 상 (Keunsang Lee)



2006년: 연세대학교 정보기술학부 학사  
2010년: 연세대학교 전산학과 석사  
2015년: 연세대학교 전산학과 박사  
2015년 ~ 현재: LG 전자 미래융합IT 연구소  
연구원  
<관심분야> 디지털 신호처리, 적응 신호  
처리, 음성 신호처리

### ▶ 박 영 철 (Youngcheol Park)



1986년: 전기전자공학과 학사  
1988년: 전기전자공학과 석사  
1993년: 전기전자공학과 박사  
2002년 ~ 현재: 연세대학교 컴퓨터정보통신  
공학부 교수  
<관심분야> 디지털 신호처리, 오디오 신  
호처리, 음성 신호처리, 적응 신호처리