

# 고속철도 실내소음저감을 위한 다중 채널 능동소음제어

## Multi-channel Active Noise Control for Reducing Interior Noise of KTX

김새한\* · 박성원\*\* · 이태오\* · 이권순† · 신은우\*\*\*

Sae Han Kim, Sung Won Park, Tae O Lee, Kwon Soon Lee and Eun Woo Shin

### 1. 서 론

국내에 고속철도 KTX가 운행됨에 따라 편리함과 신속함을 추구하던 고객들이 이제는 편안함과 안정감 등 질적인 서비스를 추구한다. 그래서, 고속철도 KTX가 운행 중에 발생하는 소음을 저감하는 문제가 중요한 요소로 대두되고 있다.

현재 소음을 저감하는 방법으로는 차음재, 흡음재, 소음기 등을 이용한 수동소음제어 방법을 사용하고 있다. 수동소음제어 방법은 500Hz 이상의 고주파 영역에서만 효과가 좋으며, 500Hz 이하의 저주파 영역에서는 저감효과가 미미하다. 또한, 주변의 환경적인 요소 변화에 의한 소음은 능동적으로 저감을 하지 못하는 단점이 있다<sup>(1)~(3)</sup>.

본 논문에서는 고속철도(KTX)가 운행하면서 발생하는 소음을 측정하고, 다중채널(Multi-channel) 능동소음제어 방법을 이용하여 소음이 어느 정도 저감되는지 시뮬레이션을 하였다.

### 2. ANC 시스템

#### 2.1 FXLMS ANC 시스템

그림 1에서와 같은 능동소음제어 시스템에서 오차신호  $e(n)$ 과 제어신호  $y(n)$  사이에 존재하는 부가경로 전달함수  $S(z)$ 로 인하여 소음신호  $x(n)$ 과 제어신호  $y(n)$ 의 위상이 맞지 않아 시스템이 불안정하게 된다.

따라서, FIR 필터에 의해  $\hat{S}(z)$ 으로 2차 경로를

† 이권순; 정회원, 동아대학교 전기공학과  
E-mail : kslee@dau.ac.kr  
Tel : 051-200-7739 , Fax : 051-200-7743

\* 동아대학교 전기공학과

\*\* (주)보강하이텍

\*\*\* (주)SQ엔지니어링

추정한 후 적응필터의 가중치를 갱신하여 불안정해지는 문제점을 해결할 수 있는데, 이러한 방법을 FXLMS ANC 시스템이라고 한다<sup>(4)</sup>.

FXLMS ANC 시스템에 대한 구조는 그림 2와 같다.

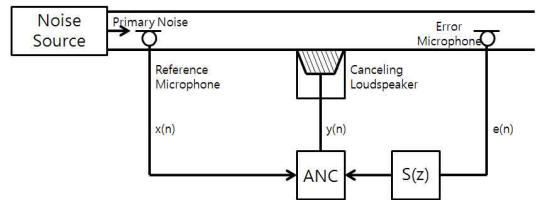


Figure 1 ANC system in Duct

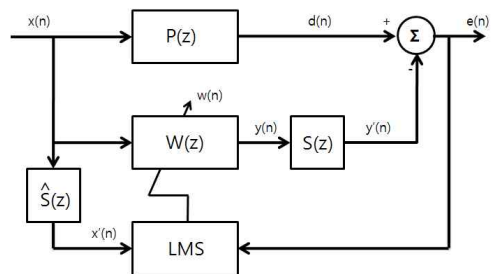


Figure 2 Block diagram of the FXLMS ANC system

그림 2에서 시간  $n$ 에서의 오차신호  $e(n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y'(n) \\ &= d(n) - s(n) * y(n) \\ &= d(n) - s(n) * [w^T(n)x(n)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$e(n)$  : 잔류소음       $d(n)$  : 주소음원

$y'(n)$  : 2차 경로 전달함수 출력

$y(n)$  : 적응필터 출력       $w(n)$  : 적응 가중치

$x(n)$  : 기준소음

시간  $n$ 에서, 적응필터  $W(n)$ 의 계수벡터  $w(n)$ 과 기준소음  $x(n)$ 은 다음과 같다.

$$w(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ w_2(n) \ \cdots \ w_{L-1}(n)]^T \quad (2)$$

$$x(n) = [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ \cdots \ x(n-L+1)]^T \quad (3)$$

여기서,  $L$  : 적응필터  $W(n)$ 의 차수

따라서,

$$w(n+1) = w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \quad (4)$$

여기서,

$$\nabla \hat{\xi}(n) = \nabla e^2(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \quad (5)$$

식 (1)에 의하여.

$$\nabla e(n) = -s(n) * x(n) = -x'(n) \quad (6)$$

따라서,

$$\nabla \hat{\xi}(n) = -2x'(n)e(n) \quad (7)$$

식 (7)을 식 (4)에 대입하면, FXLMS 알고리즘을 구할 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n) \quad (8)$$

실제로 능동소음제어를 할 때에는  $S(z)$ 는 알 수 없기 때문에 2차 경로  $\hat{S}(z)$ 에 의해 추정되며, 2차 경로 추정을 통하여 필터링 된 입력벡터  $x'(n)$ 는

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (9)$$

$\hat{s}(n)$ 는  $\hat{S}(z)$ 의 계수벡터이다.

## 2.2 다중채널(Multi-Channel) ANC 시스템

KTX 실내 소음은 특정한 위치에 분포하는 것이 아닌 다양한 위치에 분포하기 때문에 실내 소음을 제어하기 위해서는 많은 제어스피커와 오차마이크가 필요하게 된다.

본 논문에서는 2개의 제어스피커와 2개의 오차마이크를 가지고 있는 다중채널 ANC 시스템 구조를 사용하였으며 그림 3에 나타내었다<sup>(4)</sup>.

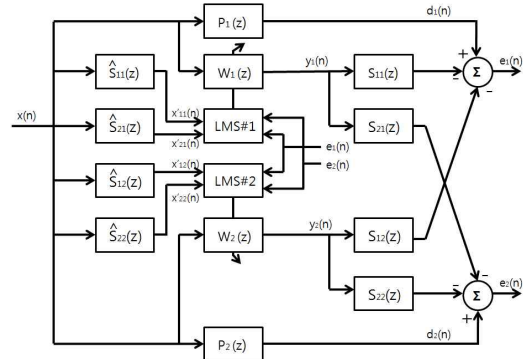


Figure 3 Multi-Channel ANC System

그림 3에서 시간  $n$ 에서 입력신호가 적응필터를 통해 나오는 출력은 다음과 같다.

$$y_1(n) = W_1^T(n)X(n) \quad (10)$$

$$y_2(n) = W_2^T(n)X(n) \quad (11)$$

여기서,

$$W_1(n) \equiv [w_{1,0}(n) \ w_{1,1}(n) \ \cdots \ w_{1,L-1}(n)]^T \quad (12)$$

$$W_2(n) \equiv [w_{2,0}(n) \ w_{2,1}(n) \ \cdots \ w_{2,L-1}(n)]^T \quad (13)$$

$$X(n) \equiv [x(n) \ x(n-1) \ \cdots \ x(n-L+1)]^T \quad (14)$$

2차 경로 추정을 통하여 추정된 입력신호  $x'(n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X'_{km}(n) &\equiv \hat{s}_{mk}(n) * X(n) \\ &= \sum_{i=0}^{I-1} \hat{s}_{mk,i}(n)X(n-i) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $I$  : FIR 필터  $\hat{S}_{mk}(z)$ 의 차수 ( $m, k = 1, 2$ )

적용 필터에 새로운 소음신호가 계속 입력되기 때문에 다음과 같이 필터의 가중치 벡터를 갱신시켜

실시간으로 소음제어가 가능하도록 한다.

$$\begin{aligned}
 W_1(n) &= W_1(n) + \mu[X'_{11}(n)e_{11}(n) + X'_{12}(n)e_{12}(n)] \\
 &= W_1(n) + \mu\{\hat{s}_{11}(n) * X(n)\}_{e_{21}} \\
 &\quad + \mu\{\hat{s}_{12}(n) * X(n)\}_{e_{12}}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 W_2(n) &= W_2(n) + \mu[X'_{21}(n)e_{21}(n) + X'_{22}(n)e_{22}(n)] \\
 &= W_2(n) + \mu\{\hat{s}_{12}(n) * X(n)\}_{e_{21}} \\
 &\quad + \mu\{\hat{s}_{22}(n) * X(n)\}_{e_{22}}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

### 3. KTX 실내소음 측정

고속철도 KTX의 실내에서 소음측정을 수행하였다. 측정 장소는 그림 4와 같으며, 출입문과 동반석의 창가와 통로방향 30cm와 130cm의 높이에서 탑승한 승객이 없는 조건에 순수 KTX의 실내소음만 측정하였다.

측정방법은 80km/h 저속에서 280km/h의 고속까지 터널, 개활지 12개의 구간을 지날 때마다 실내소음을 측정하였다.

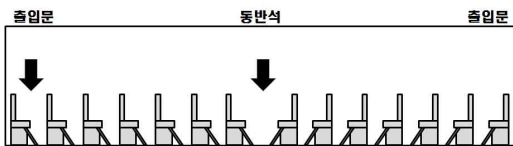
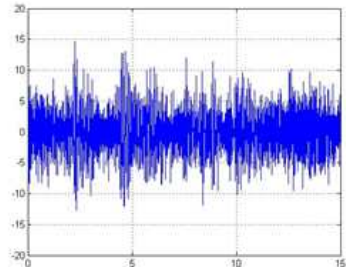


Figure 4 KTX interior noise measurements

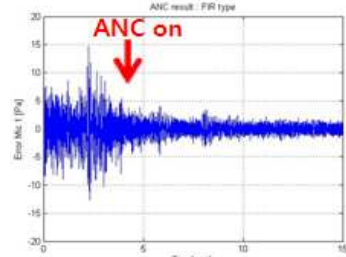
### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 12가지를 모두 수행하였지만 본 논문에서는 소음이 통로보다 큰 창가에 대한 시뮬레이션 결과만 나타내었다.

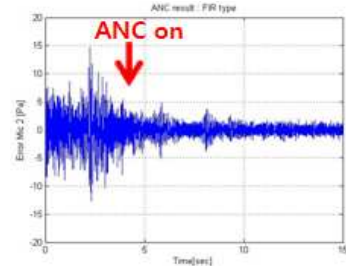
그림 5(a)는 터널구간, 130km/h속도, 동반석, 높이 130cm, 창가에서 측정한 소음이다. 이 소음을 본 논문에서 제시한 다중채널 능동소음제어 방식으로 소음저감 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 그림 5(b), (c)에서와 같이 소음이 저감되었으며, 그림 5(d), (e)에 측정한 소음을 FFT 하여 주파수 영역에서 분석하였다. 분석 결과 평균 10.17dB의 저감효과를 볼 수 있었다.



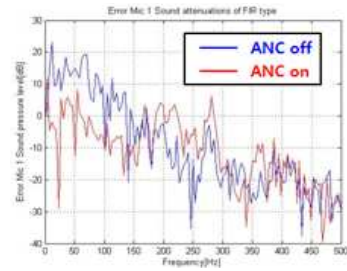
(a) Tunnel section KTX interior noise



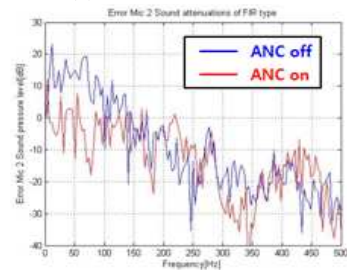
(b) Error MIC 1



(c) Error MIC 2



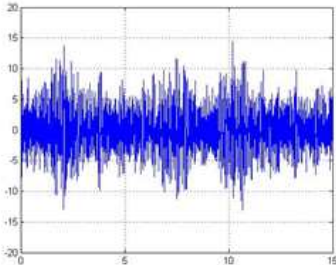
(d) Error MIC 1 FFT



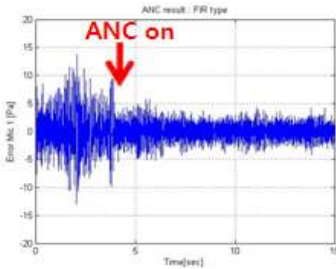
(e) Error MIC 2 FFT

Figure 5 Tunnel section KTX interior noise Simulation Result

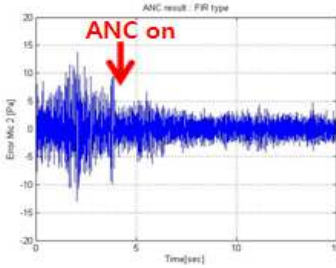
그림 6(a)는 개활지구간, 260~280km/h속도, 출입문, 높이 30cm, 창가에서 측정한 소음이다. 이 소음 역시 그림 5에서와 같은 다중채널 능동소음제어 방식으로 소음저감 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 결과 평균 8.24dB의 소음저감효과를 볼 수 있었다.



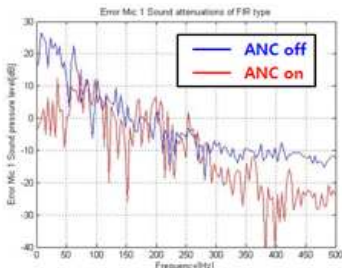
(a) Open Space section KTX interior noise



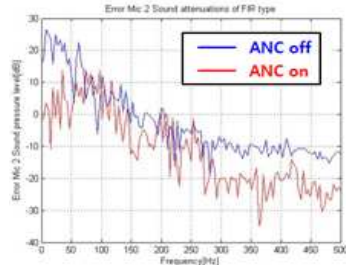
(b) Error MIC 1



(c) Error MIC 2



(d) Error MIC 1 FFT



(e) Error MIC 2 FFT

Figure 6 Open Space KTX interior noise Simulation Result

고속철도 KTX 실내에서 측정한 12개 구간에 대해 출입문과 동반석의 창가와 통로에서 소음을 측정하고 시뮬레이션을 수행한 결과 평균 소음저감 효과를 표 1에 나타내었다.

Table 1 All Cases Simulation Results

Section	Heigh(cm)	Position	Average Reduction(dB)
Tunnel	30	Window	6.95
		Aisle	6.22
	130	Window	5.08
		Aisle	2.79
Open Space	30	Window	9.16
		Aisle	8.32
	130	Window	3.8
		Aisle	3.1

표 1에서 터널 구간의 경우, 창가는 높이 30cm에서 측정한 소음이 130cm에서 측정한 소음보다 평균 1.87dB정도 저감효과가 좋았으며, 통로는 높이 30cm에서 측정한 소음이 높이 130cm에서 측정한 소음보다 평균 3.43dB정도 저감효과가 좋았다.

개활지 구간의 경우, 창가는 높이 30cm에서 측정한 소음이 높이 130cm에서 측정한 소음보다 평균 5.36dB정도 저감효과가 좋았으며, 통로는 높이 30cm에서 측정한 소음이 높이 130cm에서 측정한 소음보다 평균 5.22dB정도 저감효과가 좋았다.

시뮬레이션 분석 결과, 고속철도 KTX의 실내소음 제어는 터널보다는 개활지 구간에서 소음저감효과가 더 좋을 것을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문은 고속철도 KTX가 운행 중에 발생하는 소음을 실내에서 측정하고 다중채널 능동소음제어 방법을 통하여 소음저감 시뮬레이션을 수행하였다.

소음저감 시뮬레이션은 총 12개의 측정된 데이터로 하였으며, 시뮬레이션 결과를 FFT 분석으로 소음저감 정도를 계산한 결과는 다음과 같다.

첫째, 시뮬레이션 수행 결과 소음저감 효과는 터널 구간보다 개활지 구간에서 효과가 좋았으며, 둘째, 개활지 구간 높이 30cm 창가에서 측정된 소음이 평균 9.16dB 저감으로 소음저감효과가 가장 좋음을 알 수 있었다.

따라서, 고속철도 KTX의 실내소음저감은 개활지 구간이 터널 구간보다 더 좋음을 확인 할 수 있었다.

향후 시행되어야 할 연구는 KTX 실내에서 측정된 소음을 KTX 내부와 유사한 환경의 Test-Bed를 구축하고, 다중채널 소음저감 실험을 통하여 소음저감효과를 검증하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(과제번호 09기술혁신 E05)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 조현철, 이권순, 남현도, “신경회로망 다중 LMS 기법을 이용한 고속철도의 실내소음저감을 위한 ANC 시스템”, 대한전기학회논문지, 제 58P권, 제 4호, pp. 385-390, 2009
- [2] 한성익, 이태오, 여대연, 이권순, “순환형 신경망을 이용한 적응형 능동소음제어시스템의 성능향상에 대한 연구”, 한국해양정보통신학회논문지, 제 14권, 제 8호, pp. 1759~1766, 2010
- [3] 남현도 “일차원 음장에서의 능동소음제어”, 한국소음진동공학회지, 제 5권, 제 4호, pp. 461~567, 1995
- [4] S. M., Kuo and D. R., Morgan, Active noise