다중채널 능동소음제어기법을 이용한 KTX 실내소음의 구간별 저감성능 비교

논 문
61-1-30

KTX Interior Noise Reduction Performance Comparison Using Multichannel Active Noise Control for Each Section

장 현 석* · 김 영 민* · 이 태 오** · 이 권 순*
(Hyeon-Seok Jang · Young-Ming Kim · Tae-Oh Lee · Kwon Soon Lee)

Abstract - Since the eco-era is getting closer, the importance of noise reducing in the passenger cars of high-speed train is very important. The active noise control is best choice to reduce low frequency noise because the passive one is too heavy for high speed trains where weight is so critical. Also ANC is able to reduce the ambient noise when the environmental-factor changes. To reduce a three-dimensional closed-space sound field like a car of a high-speed rail is hard to do using single channel ANC control system. We used multi-channel FXLMS algorithm which calculation speed is fast and the secondary path estimation is possible in order to take into account the physical delay in electro acoustic hardware control loudspeaker and power amplifier. Firstly, we have measured interior noise of KTX and estimated noise path in KTX test-bed. However there was some problem related to algorithm divergence and increasing the filter order. We have made a simulation of interior environment of KTX car by using three frequency bands of 120Hz, 280Hz, 360Hz as the most important for KTX ANC system. During this research the interior noise reduction of KTX car was made by using the multi-channel FXLMS algorithm. Reduction performance was evaluated and compared each other for open space section and tunnel section. in-situ experiment for the KTX noise reduction by proposed ANC was performed based on data obtained in simulation and they were compared for open space section and tunnel section as well.

Key Words : Active noise control, Noise cancelling, FXLMS, High-speed rail, Noise reduction

1. 서 론

국내에서도 시속 300Km가 넘는 고속철도 KTX 시대가 일반화되었다. 고속철도 이용객이 늘어남에 따라 편리함과 신속성을 추구하던 패러다임이 편의성과 안락함을 추구하는 방향으로 전환되고 있다. 이에 따라 고속철도 실내소음을 저감하는 역할이 중요한 문제로 대두되고 있다. 하지만 고속철도 실내소음의 해결을 수동소음제어에만 의존하는 것은 열차 구조적인 한계를 가지고, 저주파 소음을 많이 차단할 수 없다는 문제점을 가진다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 소음을 소음으로 제거하는 방법이 능동소음제어(Active Noise Control : ANC)기술이다.

능동소음제어기술은 적용대상이 두 가지로 구분된다. 먼 저 덕트와 같은 1차원 음장과, 고속철도차량 실내와 같은 3차원 폐공간 음장으로 구분된다. KTX와 같은 3차원 폐공간 음장은 소음원이 명확하지 않고, 제어대상인 소음의 동특성을 명확하게 규명하지 못한다. 그 원인으로는 기차와 지하철을 포함한 철도차량의 소음과 진동현상은 공력소음, 동력

장치와 주변기기에 의한 소음, 차륜과 레일(궤도)의 상호작용(접촉)에 의한 진동 등 복합적으로 발생하기 때문이다. 특히, 고속철도에서는 빠른 속도에 의해 공기와의 마찰로 인한 공력소음, 터널 통과시에 생기는 압력에 의한 소음, 팬터그래프의 진동에 의한 소음 등의 다양한 원인이 기여한다. 그러므로 고속철도 차량의 실내소음을 제어하기 위해서는, 이러한 다양한 요소들이 다른 기여도로 만들어내는 비정상적인 환경잡음을 실시간으로 계수 값들을 추정할 수 있는 적응형 알고리즘이 개발되거나, 많은 수의 제어스피커와 에러마이크를 이용하여 제어 영역을 확장해야 한다.

최근 이러한 소음의 비선형적인 특성을 제어하기 위하여 신경망, 퍼지신경망 알고리즘과 같은 인공지능 기법들이 DSP기술의 발달로 인해 ANC 시스템에 적용되는 단계에 이르렀다. 하지만 아직까지 연구가 활성화 단계가 아니며 1차원 공간인 덕트에서의 시뮬레이션 단계에 머물러 있다. 따라서 KTX 실내와 같은 3차원 폐공간에서의 ANC 적용해법은 실시간 계산 문제와 2차 경로 문제를 동시에 해결할 수 있는 전통적인 FXLMS 알고리즘을 이용하여 제어스피커와 에러마이크 개수를 늘려 제어가능영역을 확장하는 방법에서 찾아볼 수 있다.

본 논문에서는 다중채널 FXLMS 능동소음제어 시스템을 이용하여 KTX 소음을 저감하고, KTX 소음을 터널구간과 개활지 구간으로 분류하여 구간별 저감 성능을 비교해 본다.

† 교신저자, 시니어회원 : 동아대 공대 전기공학과 교수·공박
E-mail : kslee@dau.ac.kr

* 준 회 원 : 동아대 공대 전기공학과 석사과정

** 정 회 원 : 동아대 공대 전기공학과 BK21 연구교수·공박

접수일자 : 2011년 11월 11일

최종완료 : 2011년 12월 6일

2. 다중채널 FXLMS ANC 시스템

FXLMS 알고리즘이 능동소음제어에 전통적으로 많이 사용될 수 있었던 것은 2차 경로에 대한 추정값 오차에 대해 상당히 강인하기 때문이다. 하지만 KTX 실내와 같은 3차원 폐공간에서 2차 경로 성분은 소음의 경로 추정이 어렵고, 반사음이 발생하여 비선형적인 특성이 더욱 커짐에 따라 ANC 성능을 떨어지게 만든다. 이를 보완하기 위한 시스템이 오차센서, 제어음원을 추가한 다중채널 FXLMS ANC 시스템이다.

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 $y(n)$ 이 맞지 않아 시스템이 불안정하게 된다. 이러한 문제점은 FIR필터에 의해 $\hat{S}(z)$ 으로 2차 경로를 추정한 후 적응필터의 가중치를 갱신하여 불안정해지는 문제점을 해결할 수 있는데, 이러한 방법을 FXLMS ANC 시스템이라고 한다. FXLMS ANC 시스템에 대한 구조는 그림 2와 같다.

그림 1 덕트구조에서 ANC 시스템

Fig. 1 ANC system in duct

그림 2 FXLMS ANC 시스템의 블록도

Fig. 2 Block diagram of the FXLMS ANC system

2.2 다중채널 FXLMS ANC 시스템

KTX 실내에서 측정되는 소음은 특정한 위치에 분포하는 것이 아니라, 다양한 위치에서 분포하기 때문에 제어를 위해서는 많은 제어스피커와 오차마이크가 필요하게 된다.

그림 3 다중채널 FXLMS ANC 시스템

Fig. 3 The structure of multi-channel ANC system

덕트에서와는 달리 KTX는 소음원이 다양하게 분포하기 때문에 기존의 단일채널 ANC 시스템 보다는 다중채널의 ANC 시스템이 적용 되어야 한다. 그림 3은 다중채널 ANC 시스템의 구조를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 $1 \times 2 \times 2$ (소음원 스피커 1개, 제어용 스피커 2개, 에러마이크 2개)의 다중채널 ANC 시스템을 사용하였으며, 2개의 1차 경로 전달함수와 4개의 2차 경로 전달함수, 4개의 2차 경로 추정 전달함수를 가지고 있다.

3. KTX 실내소음 측정

고속철도 KTX의 실내에서 소음측정을 시행하였다. 측정지점은 그림 4와 같이 선정하였으며, 출입문과 동반석의 창가와 통로방향, 30cm와 130cm의 높이에서 탑승한 승객이 없는 조건에서 순수 KTX의 실내소음만 측정하였다. 측정방법은 80km/h 저속에서 280km/h의 고속까지 터널, 개활지 12개의 구간을 지날 때마다 실내소음을 측정하였다.

그림 4 KTX 실내소음 측정

Fig. 4 KTX interior noise measurements

4. 시뮬레이션

우리는 KTX와 유사한 테스트베드를 구축하고, 그곳에서 소음의 경로를 추정하였다. 다만, KTX의 소음으로 전달함수를 추정하는 것은 발산과 안정성 문제 등이 발생하여 ANC의 저감대역인 500Hz이하에서 소음의 경로를 모델링하고 다중채널 능동소음제어를 이용하여 KTX소음을 저감하는 시뮬레이션을 해보았다.

4.1 Test-bed의 3차원 음장 모델링

그림 5와 같이 Test-bed 내부의 소음 전달 경로를 파악하기 위해 적응필터 방식으로 $P_1(z) \sim S_{22}(z)$ 의 모델링을 실시하였다. 그림 6의 Sp에서 Pure-tone 또는 KTX 실내 소음을 출력하고, Data 취득 장비와 연결된 M0, M1, M2의 마이크로 그 소음을 측정하여 입출력 관계 Data를 취득하였다. 마찬가지로 S1과 S2에서도 소음을 출력하여 M0, M1, M2에서 입출력 관계 데이터를 취득하였다.

그림 5 Test-bed 모델링을 위한 전달함수 경로
Fig. 5 Transfer function path for test-bed modeling

그림 6 KTX Modeling 단면도
Fig. 6 Section view of the KTX test-bed for modeling

4.2 Pure tone 모델링

Test-bed 환경에서 시뮬레이션을 하기 위하여, 120Hz, 280Hz, 360Hz에 대한 모델링을 실시하였고, 각각의 주파수에 대한 Pure tone으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 대표적으로 120Hz에 대한 Pure tone을 FIR 필터 구조로 P1 ~ P2, S11 ~ S12, S21 ~ S22, 까지 모델링한 결과를 보였다. 사용된 필터차수는 32차수이며, 추정 오차가 충분히 작아졌을 때를 각 경로의 모델링 전달함수로 사용하였다.

그림 7 Test-bed에서의 120Hz의 경로 모델링
Fig. 7 Path modeling of 120Hz

그림 8은 FIR 필터 구조로 Test-bed의 2차 경로 전달함수 추정 결과를 보인 것으로, 필터 차수는 32차수이며, 추정 오차가 충분히 작아졌을 때를 전달함수로 사용하였다.

그림 8 Test-bed의 2차 경로 추정 결과(S11~S22)
Fig. 8 Test bed path estimation results(S11~S22)

4.3 KTX 실내소음을 이용한 시뮬레이션

우리는 3가지 모델링(120Hz, 280Hz, 360Hz)에서 개활지와 터널 구간의 소음저감성능을 비교하였다. 데이터가 많은 관계로 그림 9와 같은 개활지구역의 창측 소음을 120Hz, 280Hz, 360Hz 모델링에서 제어한 결과를 error mic1번의 소음신호와 그 신호의 FFT분석으로써 보여준다.

그림 9 개활지 구간 KTX 실내 소음(창측)
Fig. 9 Interior noise of KTX in the open space section

4.3.1 120Hz 모델링 결과

다음 그림은 120Hz 모델링 ANC 시뮬레이션 결과이다 .

(a) Err mic1

(b) mic1 FFT analysis

그림 10 개활지 구간 120Hz 모델링 시뮬레이션 결과
Fig. 10 120Hz modeling simulation results at the open space section

4.3.2 280Hz 모델링 결과

다음 그림은 280Hz 모델링 ANC 시뮬레이션 결과이다 .

(a) Err mic1

(b) mic1 FFT analysis

그림 11 개활지 구간 280Hz 모델링 시뮬레이션 결과
Fig. 11 280Hz modeling simulation results at the open space section

4.3.3 360Hz 모델링 결과

다음 그림은 360Hz 모델링 ANC 시뮬레이션 결과이다 .

(a) Err mic1

(b) mic1 FFT analysis

그림 12 개활지 구간 360Hz 모델링 시뮬레이션 결과

Fig. 12 360Hz modeling simulation results at the open space section

4.4 종합

그래프에서 확인할 수 있듯이, 전반적으로 120Hz 모델링에서 가장 많은 저감률을 보였다. 반면, 360Hz 모델링에서는 ANC가 실행되어도 mic1의 소음신호가 잘 줄어들지 못한다는 것을 확인할 수 있다.

표 1 모델링에 따른 KTX 실내소음의 감소율

Table 1 Average noise reduction index of KTX in each modeling

주파수	측정 구간	측정 지점	평균감소량 [dB]		전체 평균 감소량 [dB]
			Err1	Err2	
120Hz	Open space	Window	36.8	49.9	43.3
		Aisle	34.4	32.3	33.4
	Tunnel	Window	20.3	23.4	21.8
		Aisle	27.0	21.6	24.3
280Hz	Open space	Window	23.4	21.3	22.4
		Aisle	24.2	22.4	23.3
	Tunnel	Window	23.5	17.8	20.6
		Aisle	26.6	17.2	21.9
360Hz	Open space	Window	21.7	4.3	13.0
		Aisle	17.7	2.8	10.2
	Tunnel	Window	7.4	12.1	9.7
		Aisle	3.7	6.6	5.2

개활지구간의 평균감소량은 24.3[dB]이고, 터널구간의 평균감소량은 17.3[dB]를 나타내었다. 전반적으로 개활지의 [dB]감소량이 터널구간의 [dB]감소량보다 좋은 결과를 보였다.

5. Test-bed 실험

KTX와 유사한 실내환경을 만들기 위해 테스트베드를 구축하였다. 테스트 베드내에 소음원스피커, 제어스피커, 에러 마이크를 배치하여 실험환경을 만들었고, 우리가 측정한 KTX 소음을 실제로 능동소음 제어하여 보았다.

5.1 테스트베드 구축

다중채널 능동 소음제어시스템의 Test-bed는 그림 13과 같으며 실제 KTX 객차(일반실) 제원(길이 1870cm, 넓이 290cm, 높이 246cm)에 비하여 길이만 1/3로 줄어들었으며 넓이와 높이는 거의 유사한(길이 572cm, 넓이 290cm, 높이 246cm)크기로 제작하였다.

그림 13 테스트베드 설계도

Fig. 13 Specification of Test-bed

그림 14는 ANC시스템의 장비들이다. 그림 14(a) ANC hardware platform은 FPGA를 이용하여 A/D, D/A 변환을 수행하며, 16bit/8ch의 A/D, D/A 채널 중에 Microphone은 A/D 채널에, 그림 5의 AMP는 D/A 채널에 연결하였다. 컴퓨터에서 재생되는 KTX소음을 원소음으로 사용하며, Test-bed 내부에 1×2×2의 다중채널 시스템을 구축하여 실험환경을 완성하였다.

그림 14 (a) ANC 하드웨어 플랫폼과 (b) 스피커/마이크 AMP

Fig. 14 (a) ANC hardware platform and (b) Speaker/Microphone AMP

5.2 KTX 소음을 이용한 실험

KTX 실내 소음 실험은 ①번 위치에서 실험하였으며, 앞서 시뮬레이션 하였던 터널 구간과 개활지 구간의 소음을 사용하여 ANC 알고리즘의 성능을 평가하였다. 각각의 터널 구간과 개활지 구간의 소음은 2가지(창 측 위치와 통로 측 위치)경우로 나누어 실험하였다.

그림 15 제어스피커 및 에러마이크 배치 단면도
Fig. 15 Placement profile of control speakers and error mikes

그림 16은 개활지의 창측 소음의 실험 결과로써 ANC전/후의 테스트베드 내 KTX 소음파형이다. 가장 위의 소음이 소음원에서 나오는 Primary noise이며, 두 번째, 세 번째 파형이 각각 error mic 1, error mic2를 나타낸다.

(a) ANC 적용전

(b) ANC 적용후

그림 16 개활지 구간의 ANC 전/후 소음파형
Fig. 16 Noise signal of before/after ANC of open space section

표 2 개활지 구간의 dB 감소량

Table 2 Reduction index of open space section

KTX 소음 정보		구간 : 개활지, 속도 : 200~250km 마이크 높이 : 30cm, 위치 : 출입문, 창 측	
MIC1	99.8~103.1[dB]	94.8~97.2[dB]	5.5[dB]
MIC2	99.3~102.9[dB]	93.5~95.9[dB]	6.5[dB]
평균			6.0[dB]

(a) ANC 적용전

(b) ANC 적용후

그림 17 터널 구간의 ANC 전/후 소음파형
Fig. 17 Noise signal of before/after ANC of tunnel section

표 3 터널 구간의 dB 감소량

Table 3 Reduction index of tunnel section

KTX 소음 정보		구간 : 터널, 속도 : 130~170km 마이크 높이 : 30cm, 위치 : 동반석, 창 측	
MIC1	101.7~103.3[dB]	96.8~99.4[dB]	4.4[dB]
MIC2	99.7~103.5[dB]	95.7~97.7[dB]	4.9[dB]
평균			4.7[dB]

개활지 창 측의 경우 평균 6[dB], 통로 측의 경우 평균 5.8[dB]의 감쇄 효과를 보였으며, 터널 창 측의 경우 평균 4.7[dB], 통로 측의 경우 평균 4.8[dB]의 감쇄 효과를 보였다. 터널 소음의 경우 개활지보다 소음 감쇄가 적은 결과를 나타내었다.

6. 결 론

본 연구에서는 다중채널 FXLMS 알고리즘을 이용하여 KTX의 구간별 소음을 저감하여 보는 시뮬레이션과 실험을 하였다.

하나, 우리는 승객이 탑승하지 않은 상태에서의 순수 KTX 소음만을 측정하였다. 둘, 이 순수한 KTX소음을 다중채널 FXLMS 알고리즘으로 시뮬레이션해본 결과, 개활지구간에서 평균 24.3[dB]의 감소량을 보이고, 터널 구간에서 17.3[dB]의 감소량을 보이며 터널구간이 개활지 구간보다 능동소음 제어가 어려움을 보였다. 120Hz 모델링 결과에서 가장 높은 저감율을 나타내었다. 셋, 앞서 시뮬레이션에서 사용한 소음을 실제 테스트베드에서 같은 소음 경로로 능동소음 제어 하여보았다. 그 결과로 개활지구간에서는 평균 6.0[dB]의 감소량, 터널구간에서는 4.7[dB]의 감소량을 각각 보았다.

종합적으로 시뮬레이션과 실험 결과 모두 개활지보다는 터널이 능동소음제어성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이것의 원인으로서는 FXLMS 알고리즘이 선형적인 특성 때문에 터널내에서의 소음이 개활지보다는 훨씬 비선형적이고 불규칙한 소음원으로, 그에 따라 소음원에 대처하는 능력이 떨어지게 되는 것으로 판단된다. 부가적으로, 시뮬레이션 결과에서 120Hz 환경에서 가장 좋은 성능을 내는 것으로 보아 200~300km/h로 운행되는 KTX 실내소음에는 100Hz 이하 또는 그것보다 더 낮은 주파수대의 소음들이 주로 존재한다는 것을 알 수 있었다.

향후 우리는 제어스피커와 에러마이크의 수를 증가시켜 실험해 볼 것이며, 운행중인 KTX에서 필드테스트하여 실 적용 가능성을 더욱 높일 것이다.

감사의 글

본 논문은 2011학년도 동아대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음

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, 2009.10
- [2] 한성익, 이태오, 여대연, 이권순, “순환형 신경망을 이용한 적응형 능동소음제어시스템의 성능 향상에 대한 연구”, 한국해양정보통신학회논문지, 제 14권, 제 8호, pp. 1759~1766, 2010.8
- [3] 남현도 “일차원 음장에서의 능동소음제어”, 한국소음진동공학회지, 제 5권, 제 4호, pp. 461~567, 1995
- [4] 안동준, “능동 소음제어를 위한 적응필터의 설계” 단국대학교 박사학위 논문, 1995
- [5] 여대연, “철도차량 실내소음저감을 위한 순환형 신경망 개발”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2004-2005, 2010
- [6] 서성대, “안정성이 강화된 적응필터를 이용한 능동소음 제어” 단국대학교 박사학위 논문, 2007
- [7] 정인석, 안규영, 남상원, “수정된 FXLMS 알고리즘을 이용한 능동소음제어 시스템 2차 경로 비선형 특성 적응 보상기법”, 2004년 정보 및 제어 심포지엄 논문집, pp.22-25, 2004.5
- [8] S. M., Kuo and D. R., Morgan, Active noise control system Algorithms and DSP implmentations, John Wiley & Sons, INC., 1996
- [9] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.

저 자 소 개

장 현 석 (長 炫 錫)

2011년 8월 동아대 전기공학과 졸업(학사).

2011년 9월~현재 동아대 전기공학과 제어 및 시스템 연구실 석사과정

김 영 민 (金 永 頤)

2011년 2월 동아대 전기공학과 졸업(학사).

2011년 3월~현재 동아대 전기공학과 제어 및 시스템 연구실 석사과정

이 태 오 (李 泰 吾)

1997년 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(학사). 1999년 동대학/동학과 졸업(석사). 2003년 동대학/동학과 졸업(박사). 2000년~2009년 2월 동명대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 2009년 6월~현재 동아대학교 전기공학과 BK21 연구교수

이 권 순 (李 權 純)

1973년 충남대학교 공업교육학과 졸업(학사). 1997년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 미국 오레곤 주립대학교 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(Ph.D.). 2003년~2008년 과학기술부지정 국가지정 연구실(NRL). 1982년~현재 동아대학교 전기공학과 교수

Tel : 051-200-7739

Fex : 051-200-7743

E-mail : kslee@dau.ac.kr