

능동소음제어기법을 이용한 고속철도 터널소음제어

남현도*, 안동준**, 최영훈*
 단국대학교*, 아주자동차대학**

Reduction of Interior Noise for KTX in Tunnels Using Active Noise Control Techniques

Hyun Do Nam*, Dong Jun Ahn**, Young Hoon Choi*
 Dankook University*, Ajou Motor College**

Abstract - 한국철도공사의 조사에 의하면 KTX 이용 시 승객들이 느끼는 가장 불편한 점 중에 하나로 소음문제를 지적하고 있다. 특히 한국은 프랑스 등 유럽 국가와 달리 터널 구간이 차지하는 비중이 높아 터널 구간에서의 소음이 심각한 문제가 되고 있다.

본 연구에서는 KTX 터널 구간 운행 시 발생하는 소음을 능동소음제어 기법으로 제어하는 가능성을 알아보기 위하여 안정도가 강화된 IIR LMS 알고리즘을 이용하여 KTX 소음을 저감하는 능동소음제어시스템을 제안하고, 이를 이용하여 직접 측정된 KTX 소음을 제어하는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 서 론

2004년 한국형 고속철도 KTX가 성공적으로 개통되면서 서울-부산 간을 3시간 이내로 연결하게 되어 KTX를 이용하는 승객이 점차 증가하게 되었으나, 한국철도공사에서 2004년 KTX 이용객에 대한 종합적 여론 및 만족도 조사에 의하면 KTX 이용시 가장 나쁜 점은 좌석배치, 좌석의 안락감, 차내소음, 차내진동 등으로 나타나 소음에 대한 불만이 매우 높은 것으로 나타났다.

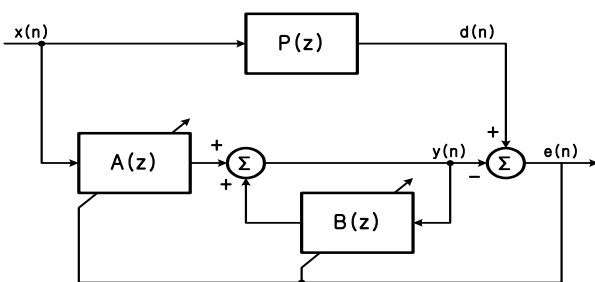
특히 우리나라는 프랑스 등과 달리 터널 구간이 많아 터널 통과시의 소음이 매우 커서 고속철도 승객의 불편을 주고 있어 능동 소음제어 기법을 이용한 고속철도의 터널구간 통과소음의 저감은 승객 서비스 향상은 물론 고속철도 기술의 해외 진출에도 기여할 수 있다.

능동소음제어 기법은 소음원에 의해 발생된 주음원의 음장과 파괴간섭을 일으키는 부가적인 음원을 활용하는 방법으로 비교적 낮은 주파수의 소음 제어에 효과적인 방법이다. 능동 소음제어시스템은 제어용 필터와 적응제어 알고리즘 두 부분으로 이루어져 있는데, 필터의 계수추정 알고리즘이 간단하고 안정성을 감안하여 FIR 구조가 많이 사용되고 있으며, 계수 추정 알고리즘으로는 FXLMS 알고리즘이 사용되어왔다[1].

FIR 필터는 IIR 필터에 비해 비슷한 성능을 얻기 위해 필터의 차수가 커져야 하므로 계산량이 많아지는 단점이 있어 IIR 필터를 사용하는 능동소음 제어 시스템이 제안되고 있다[2]. 그러나 시스템의 작동 초기에 IIR 필터의 극점이 z평면에서 단위 원 밖으로 나가는 경우 시스템 자체가 불안정해질 수 있다.

본 논문에서는 시스템의 작동 초기에는 IIR 필터의 극점을 원점 방향으로 끌어당겨 안정도를 개선하고 정상상태에는 원위치로 보내 필터성능에는 영향을 미치지 않는 안정도가 강화된 적응 IIR 필터 알고리즘을 제안하고 이를 이용하여 터널 통과시 KTX 실내 소음을 제어하는 능동소음 제어 시스템을 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

2. IIR LMS 알고리즘



<그림 1> IIR LMS 알고리즘 블록 다이어그램

IIR 필터구조를 이용한 적응 필터는 1976년 Feintuch 에 의해서 소개되었으나[3] 능동소음제어를 위한 IIR LMS 알고리즘은 1985년 Eriksson에 의해 제안 되었다[2]. IIR LMS 알고리즘을 위한 간단한 블록 다이어그램은 아래의 그림1과 같이 나타낼 수 있다[1]. 여기서 $x(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 기준 입력값과 제어필터의 출력값이고, $d(n)$ 과 $e(n)$ 은 각각 제어를 하지않을때의 소음신호와 제어시의 오차값을 의미한다.

$x(n)$ 과 $y(n)$ 을 입력과 출력으로 하는 전달함수 $H(z)$ 은

$$H(z) = \frac{A(z)}{1-B(z)} \tag{1}$$

이 되며, L,M차의 $A(z)$ 과 $B(z)$ 이라 하면 IIR 필터의 계수 벡터 $A(n)$ 과 $B(n)$ 를

$$A(n) \equiv [a_0(n) a_1(n) \dots a_{L-1}(n)]^T \tag{3}$$

$$B(n) \equiv [b_1(n) b_2(n) \dots b_M(n)]^T \tag{4}$$

라고 한다면, 실제 시스템의 출력값은 다음과 같다.

$$y(n) = W^T(n)U(n) \tag{5}$$

$$W(n) \equiv \begin{bmatrix} A(n) \\ B(n) \end{bmatrix}, U(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n-1) \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$X(n) = [x(n) x(n-1) x(n-2) \dots x(n-L+1)] \tag{7}$$

$$Y(n-1) \equiv [y(n-1) y(n-2) \dots y(n-M)]^T \tag{8}$$

를 의미한다. 따라서 시스템의 출력값 $y(n)$ 은 $A(n)$ 과 $B(n)$ 의 함수라고 할 수 있다.

최소경사법을 이용하여 계수들의 업데이트식을 구하면

$$W(n+1) = W(n) + \mu U(n)e(n) \tag{9}$$

라고 쓸 수 있다. 또한 위 식은 다시 $A(n)$ 과 $B(n)$ 각각의 업데이트 식으로 나누어 쓸 수 있다.

$$A(n+1) = A(n) + \mu_a X(n)e(n) \tag{10}$$

$$B(n+1) = B(n) + \mu_b Y(n-1)e(n) \tag{11}$$

위의 식(11)과 식(12)을 이용하면 μ_a 와 μ_b 의 값을 각기 달리 줌으로써 분모항과 분자항을 각각 따로 제어가 가능하다.

IIR LMS는 앞에서 전개한 것과같이 항상 극점이 존재하므로 안정성에 제한이 있다. 따라서 이 알고리즘을 안정되게 수행하기 위해서는 항상 극점이 단위 원 안쪽에 있도록 극점의 위치를 확인하여 조정해야한다. 극점의 위치를 추적하는 방법으로 Kharitonov의 이론이 주로 사용되고 있으나[4] 이의 방법으로 극점의 위치를 추적하는데 많은 계산량을 필요로 하므로 실시간으로 소음제어를 하는데에는 부적격하다. 따라서 본 논문에서는 실시간으로 소음제어를 위해서 극점의 위치를 추적하지 않고 안정하게 할 수 있는 간단한 방법을 제안한다[5].

일반적으로 적응신호처리 시스템에서 필터계수가 완전히 수렴하기 전에 큰 오차가 발생한다. 이 경우 수렴계수의 크기에 따라서 극점이 크게 변동한다. 따라서 소음제어 초기에 극점이 z평면의 단위 원 밖으로 빠져 나가서 발산하는 경우가 많으므로 초기에 필터 계수의 분모항의 업데이트 식에서 극점의 위치를 단위 원쪽으로 조금 옮겨 주는 전처리 과정을 거침으로써 좀 더 안정된 IIR LMS를 적용할 수 있다. 이를 위해 IIR 적응필터의 전달함수중 분모 즉 $1-B(z)$ 대신에 다음식을 대입한다[6].

$$F(z) = 1 + kb_1(n)z^{-1} + k^2b_2(n)z^{-2} + \dots + k^M b_M(n)z^{-M}, 0 \leq k \leq 1 \quad (12)$$

IIR LMS의 분모항 $1 - B(z)$ 의 근을 z_1 이라 한다면

$$1 - B(z_1) = 1 + b_1(n)z_1^{-1} + b_2(n)z_1^{-2} + \dots + b_M(n)z_1^{-M} = 0 \quad (13)$$

을 만족시키는 $F(z)$ 의 근은 kz_1 이 된다. 즉,

$$F(kz_1) = 1 + kb_1(n)(kz_1)^{-1} + \dots + k^M b_M(n)(kz_1)^{-M} = 0 \quad (14)$$

이 된다. 따라서 $1 - B(z)$ 을 전처리 함으로써 극점을 k 배 만큼 원점 방향으로 조정이 가능하다. 능동 소음제어 시에는 초기에 오차가 커서 극점이 크게 변동될 때에는 k 를 0에 가까운 값으로 정해 원점으로 당겨주며, 정상상태 시에는 k 를 1로하여 원래의 극점값을 주어야한다. 즉,

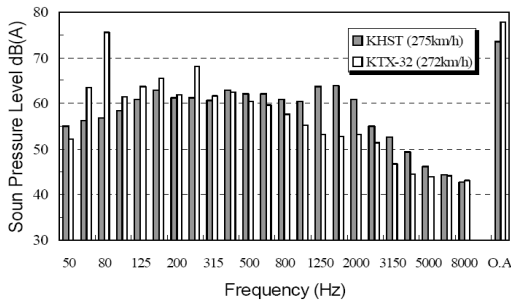
$$k(n+1) = \lambda k(n) + (1-\lambda), k(0) = 0, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (15)$$

따라서, k 값을 위와같이 가변 시켜 가면서 IIR 필터의 분모항 $1 - B(z)$ 의 업데이트식을 전처리 함으로써 안정된 소음제어가 가능하다.

3. KTX 터널 소음 분석 및 능동소음제어

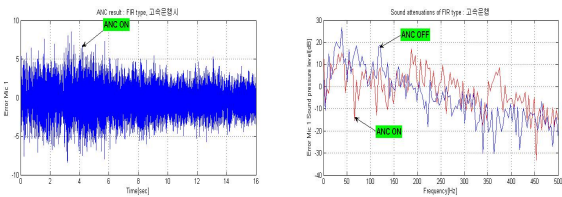
KTX차량의 실내 소음은 개활지보다는 터널 구간에서 더 높게 나타나며, 콘크리트케도 터널(황학터널, 화신5터널)과 자갈케도 터널에 대한 KTX차량의 실내소음을 비교한 결과 콘크리트케도 터널의 소음레벨이 대략 5~6dB(A)정도 높게 나타났으며, 주파수 분석결과 100Hz의 저주파수 성분에 대한 소음레벨이 높게 나타났다. 250km/h 이상의 속도로 터널 통과 시 KTX차량의 실내소음에서 가장 크게 나타나는 주파수는 60Hz-200Hz의 저주파 영역이며, 차체 측벽진동의 주파수영역과 유사하다[7].

그림 2는 한국철도 기술연구원에서 개발하여 시험운행중인 KHST 차량과 KTX 차량의 터널통과중의 실내소음 주파수 분석 결과이다.

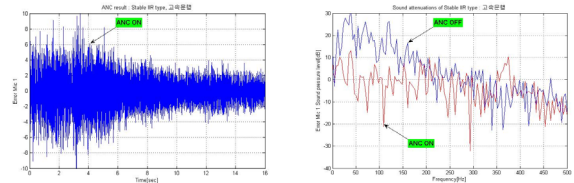


〈그림 2〉 터널의 KHST와 KTX의 실내소음 주파수 분석

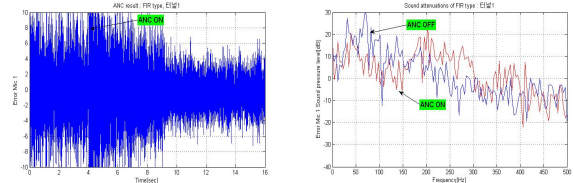
본 연구에서는 KTX 터널 소음제어를 위한 능동소음제어시스템의 가능성을 알아보기 위하여 기존의 FIR 필터와 제안한 안정한 IIR LMS 필터를 이용하여 KTX 실내에서 직접 측정된 소음에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.



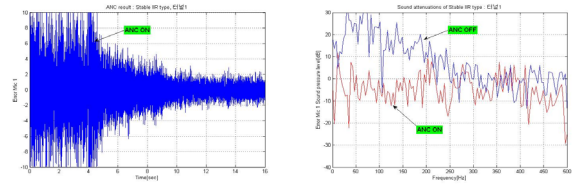
〈그림 3〉 FIR 알고리즘을 이용한 KTX 고속주행시



〈그림 4〉 IIR LMS 알고리즘을 이용한 KTX 고속주행시



〈그림 5〉 FIR 알고리즘을 이용한 KTX 터널주행시



〈그림 6〉 IIR LMS 알고리즘을 이용한 KTX 터널주행시

그림 3-6은 고속 주행시와 터널 주행시의 KTX 소음을 FIR 필터(256차)와 안정한 IIR LMS 필터(96차)를 이용한 능동소음제어 시스템을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4 및 그림 6에서 보듯이 안정한 IIR LMS 알고리즘을 이용한 경우가 더 적은 계산량에도 불구하고 더 좋은 결과를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 KTX 터널 구간 운행 시 발생하는 소음을 능동소음제어 기법으로 제어하는 가능성을 알아보기 위하여 안정도가 강화된 IIR LMS 알고리즘을 이용하여 KTX 소음을 저감하는 능동소음제어 시스템을 제안하고, 이를 이용하여 직접 측정된 KTX 소음을 제어하는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

고속 주행시와 터널 주행시의 KTX 소음을 FIR 필터와 안정한 IIR LMS 필터를 이용한 능동소음제어 시스템을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션한 결과, 안정한 IIR LMS 알고리즘을 이용한 경우가 더 적은 계산량에도 불구하고 더 좋은 결과를 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kuo S.M. and Morgan D., *Active Noise Control System*, John Wiley and Sons. Inc., New York, 1996.
- [2] L.J.Eriksson, "Active sound attenuation using adaptive digital signal processing techniques," 1985.
- [3] P.L Feintuch, "An adaptive recursive LMS filter," *Proc.IEEE*, vol.64, no.11, pp.1622-1624, 1976.
- [4] T.Brennan, "Bounding adaptive filter poles using Kharitonov's theorem," *Proc. 22nd Asilomar conf. Signals, Systems, Computers*, Pacific Grove, California, pp.658-662.
- [5] B.Friedlander, "A modified prefilter for some recursive parameter estimation algorithms," *IEEE Transactions on automatic control*, vol.AC -27, no.1, 1982.
- [6] Nam H.D. and Baek K.H., "Stabilized recursive LMS algorithms for active noise control," *Internoise 2003*, Jeju, pp.467-473, 2003.
- [7] 김 재철 외, "터널 주행 시 KTX 차량의 실내소음 저감방안 도출을 위한 기초 용역," 한국철도기술연구원, 2004.