



능동 소리 디자인 및 음질 제어

이 상 권*
(인하대학교)

1. 머리말

국내의 산업의 발전에 따라서 소음에 대한 저감 보다 산업제품으로 부터 발생하는 소리를 소비자의 감성에 적합한 소리로 발생하게 하는 기술이 점점 더 흥미로운 연구과제로 제시되고 있다. 이러한 감성소리에 대한 연구를 일반적으로 음질이라 한다. 음질에 대한 연구는 악기를 개발하는 기술에서 발전되어 산업제품으로 점차 이동되어 최근에는 자동차, 가전제품, 철도, 핸드폰, 사무용품 등 인간이 사용하는 모든 산업제품으로 이동되어 고품격의 사운드를 설계함으로 제품의 부가가치를 증대 시키고 있다. 특별히 자동차의 경우 차량의 속도 및 동력 성능과 비례하여 부드럽고 힘 있는 소리를 재현함으로 자동차가 안전하게 굴러가고 운전자의 의도대로 움직이고 있다고 판단한다. 또한 정적인 상태의 음질을 다루는 것 보다 동적인 음질을 다루고 있음으로 차량의 속도 및 동력성능에 맞는 사운드를 발생해야함으로 능동적인 음질설계 및 음질제어 기술이 필요하다. 능동소리제어에 대한 국내 연구도 오래전부터 연구되었지만 실시간제어에 대한 여러 가지 문제로 최근에는야 실제적용이 가능하게 되었다.

2. 능동소리제어 기술 분야 현황

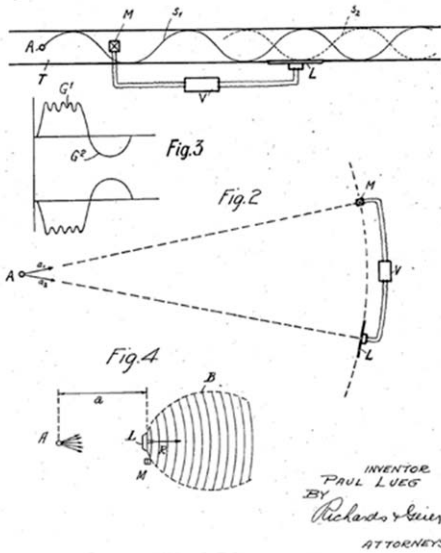
능동소리제어 기술은 1936년 Paul Lueg에 의해서 제안되었다. 당시 제안된 기술은 그림 1에서 보여주는 바와 같이 덕트내에 음원 A에서 발생하는 소리를 제어하여 덕트 출구에서 소리가 발생하지 않도록 하는 기술이다. 제어방법으로는 음원 A에서 발생하는 정현파의 위상과 반대되는 위상을 갖는 2차 음원(주로 스피커)을 사용하여 소리가 서로 상쇄 하도록 하는 기술이다.

이후 능동소리제어 기술은 활발하게 응용되지 못하였다. 1970년도에 스텐포드대 교수인 Widrow 박사가 실시간으로 아이를 임신한 산모의 맥동과 뱃속 아기의 맥동을 분리하는 능동필터(adaptive filter)를 소개함으로 실시간으로 소리를 제어하는 기술이 가능하게 되었다. 이때 소개된 능동필터가 적용된 능동알고리즘이 LMS(least mean square) 알고리즘이다⁽¹⁾.

그림 2는 LMS 알고리즘을 이용한 덕트의 능동소리제어 기술에 대한 설명도이다. 이 기술에 사용되는 LMS 알고리즘의 수식적 표현은 아래와 같다.

$$w_{k+1} = w_k + 2\mu xe \tag{1}$$

* E-mail : sangkwon@inha.ac.kr



Patented June 9, 1936

2,043,416

UNITED STATES PATENT OFFICE

2,043,416
PROCESS OF SILENCING SOUND
OSCILLATIONS
Paul Lueg, Kirchstrasse, Germany
Application March 8, 1934, Serial No. 714,582
In Germany January 27, 1933
4 Claims. (Cl. 179-1)

INVENTOR
PAUL LUEG
BY
Richardson
ATTORNEYS

그림 1 Paul Lueg에 의해 제안된 능동소리제어 기술의 원천 기술과 특허

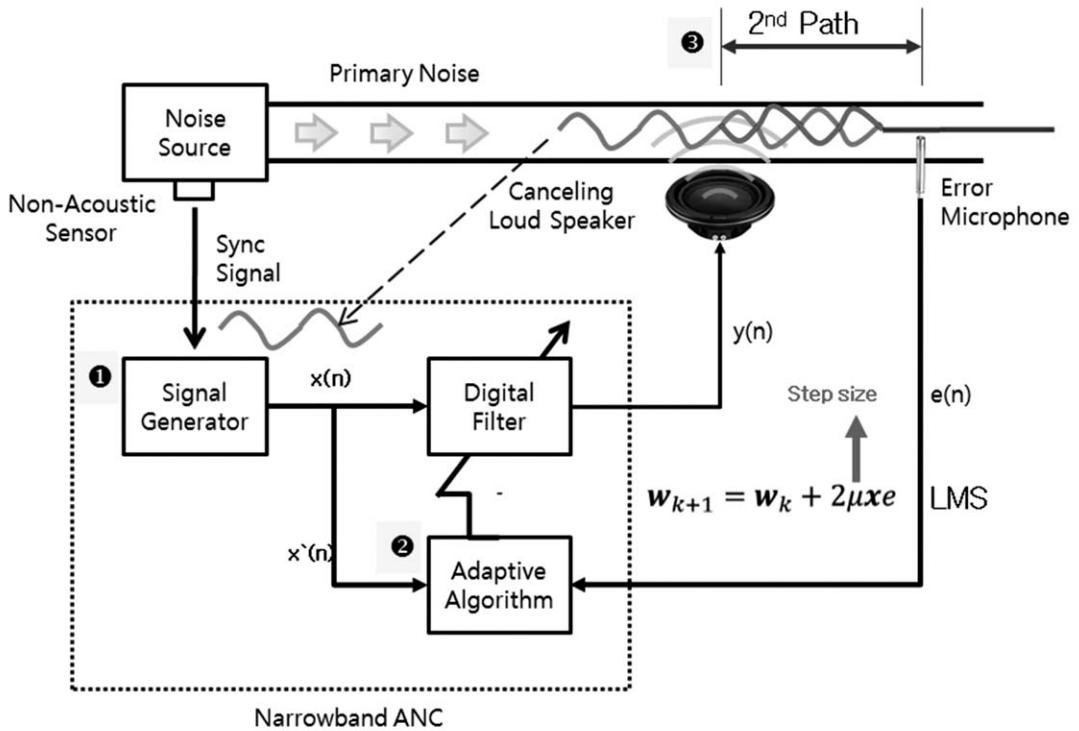


그림 2 LMS 필터를 이용한 능동소리제어 기술 설명도

여기서 w_k 는 능동필터의 계수 벡터이며, x 는 필터 입력 신호 벡터이며, e 는 음원과 2차음원의 차이의 오차이다. 일반적으로 x 신호를 reference 신호라 불리며 오차를 에러 신호로 불린다. 이 기

술을 성공적으로 실시간으로 적용하기 위해서는 3가지 주요기술이 필요하다. 첫 번째가 필터 입력신호이다. 입력신호는 2차 LMS 필터를 거쳐 2차음원의 파형을 형성하는 주요임무를 담당

한다. 따라서 음원과 상관성이 존재하는 신호가 되어야 한다. 자동차의 배기음은 엔진 회전수와 연관이 있으므로 자동차 엔진과 연관된 소리는 자동차의 회전수에 해당하는 파형을 필터의 입력 신호로 사용 한다⁽²⁾. 두 번째 주요한 기술은 필터 알고리즘의 선택이며 실시간으로 시간의 지연 없이 2차음원에서 1차 음원에 반대위상을 갖는 파형을 발생하기 위해서는 연산시간이 빠른 알고리즘이 필요하다. 많은 알고리즘이 개발되어 논문으로 제출되지만 안정적이고 예측가능한 선형적인 위상이 나타내는 것은 LMS 알고리즘이 최적이다. 세 번째로 주요기술은 오차를 측정하는 마이크와 2차음원을 발생하는 스피크의 2차경로에 의한 제어 시간의 지연이다. 2차 경로는 실제 대부분 아날로그적인 방법으로 이루어 짐으로 디지털신호처리 기술의 발전과 무관하게 제어시간 지연의 주범이다. 이 문제를 해결하여 이러한 시간 지연을 LMS 알고리즘에 미리 반영하여 개조한 것이 Filterd_X LMS(FXLMS) 알고리즘이며 다음과 같이 표현된다.

$$w_{k+1} = w_k + 2\mu x'e \quad (2)$$

여기서 x' 를 2차 경로의 전달함수로 필터된 입력신호가 된다. 즉 2차 경로의 전달함수가 $s(z)$ 이면 x' 는 다음과 같이 표현된다.

$$x' = x * s \quad (3)$$

여기서 * 컨볼루션을 나타내며, s 는 $s(z)$ 의 impulse response이다. 2차 전달함수는 실험으로 측정한다⁽³⁾.

덕트의 능동소리제어 기술을 자동차의 실내 능동소리제어에 적용하는 기술은 1987년도 영국 사우스햄튼대학에서 공간음장을 제어하는 multiple error LMS 알고리즘⁽⁴⁾을 개발하면서 가능하게 되었다. 당시 이 기술은 항공기 내의 항공기 엔진 소리를 능동적으로 제어하는 기술에 적용되었고 실제차량에 적용은 1988년도 Lotus사와 공동연구로 개발 하였으나 양산차에 적용은 가격 문제와 외장 스피커의 설치문제로 적용하지

못했다. 양산차종의 적용은 1992년 Nissan Bluebird 모델에 처음 적용하였다. 이 차종은 외장 스피커와 외장 마이크설치 등 가격문제가 있었으나 음질 악화문제가 심각했다. 이러한 문제가 해결되지 않는 한 능동소리제어 기술은 자동차에 적용은 한계를 느끼고 있었다. 이 후 자동차 용역 회사와 양산차 회사에서는 이 문제를 해결하기 위해서 부단한 노력을 하였다. 2000년도에 하드웨어 및 소프트웨어 신호처리 기술이 발전하면서 외장 스피커 대신 내장 스피커를 2차 음원으로 사용하는 기술이 개발 되었고, 핸드폰 기술의 발전에 따라 MEMS 마이크로폰이 차량에 적용가능하게 되었다. 2003년에 Honda에서 가변 엔진의 엔진 마운트 장치에 대한 능동소리제어 장치를 가진 차량을 양산했으며, 2008년도에 도요타 Crown 모델에도 능동소리제어 장치가 적용되었다. 또한 2010년도에 GMC 시보렛 SUV 차량에 능동소리제어 기술이 적용되었다. 2013년도에는 Ford 회사는 Fusion Hybrid 저주파 부밍소음 저감에 능동소리제어 장치를 적용하였다. 최근에 적용되는 이러한 제품들은 소리제어가 필요한 영역에 맞춤형으로 소량(2~3개)의 마이크와 소량의 스피커(1~3개)를 이용하여 소리를 제어하는 기술을 적용하였다. 결국 차량의 기본 음질을 훼손하지 않는 범위내에서 맞춤형 능동소리제어 기술을 적용하였다. 고급브랜드차종을 개발하는 독일의 능동소리제어 기술은 기본적으로 자동차는 소리를 발생하는 장치이고 소리의 발생이 차량의 속도 및 동력 성능과 잘 조화를 이루어 운전자의 감성에 일치하는 소리를 발생하여 감성음질을 향상하는데 초점을 두고 능동소리제어 기술을 발전 시켰다.

3. 능동음질설계 제어 기술 분야 현황

능동음질설계 분야는 능동소리제어의 응용분야로서 두 가지 분야로 연구를 진행하고 있다. 한 분야는 심리음질요소를 제어하여 음질을 개선하는 분야와 다른 한 분야는 원하는 소리를 설계

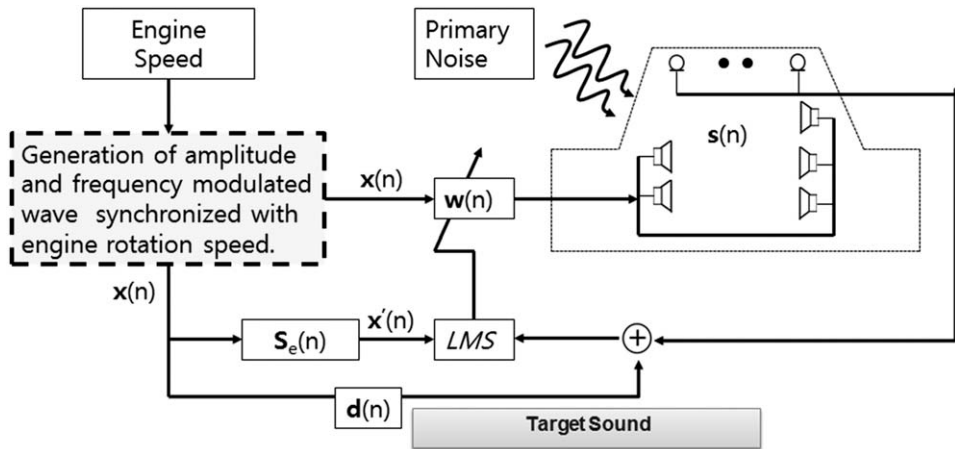


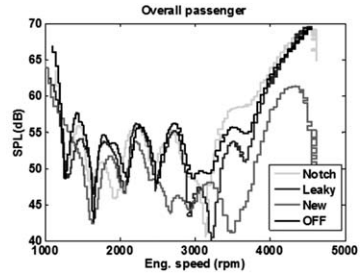
그림 3 LMS 필터를 이용한 능동소리제어 기술 설명도



(a) 실험 차량



(b) 마이크로폰



(c) 능동제어 알고리즘 비교

그림 4 능동음질제어 실험 장치와 알고리즘 성능 비교

하여 실내에서 발생하도록 하는 사운드 능동 사운드 설계 분야이다. 실제 응용은 자동차 사운드를 설계하여 능동적으로 발생하게 하는 분야이다. 이 분야의 연구는 2004년도 제안된 active sound profile⁽⁵⁾에서 출발한다. 제안된 연구는 차량 내부에서 원하는 소리를 목적음(target sound)를 발생하기 위해서 그림 2에서 오차를 “0”으로 하지 않고 목적음을 삽입하는 방법이다. 이 방법을 다시 정리하면 그림 3과 같이 되며 이것을 commend FX LMS 알고리즘이라 불린다.

차량의 실내에서 발생하는 목적음은 운전자가 원하는 소리를 만들어서 입력하면 된다. 목적음은 소비자가 선호하는 음질을 사전에 음질 연구를 통하여 사운드를 설계하여 입력한다. 목적음 제작 기술은 새로운 연구 분야임으로 이 글에서는 자세히 논하지 않는다. 실제 자동차의 응용을 위해서는 reference signal x 를 이용해서 target

sound를 제작해야하므로 엔진 회전수와 관련이 있는 컴퓨터에 저장된 sine 파형을 사용하는데 이때 많이 사용하는 방법이 commend notch FXLMS이다. 이 경우 가감속 시 자동차의 속도가 급격히 변하는 경우 저장된 sine 파형을 불러서 제어하는데 제어시간의 지연에 대한 문제가 존재하여 가감속 시 제어에 한계가 존재한다. 이곳을 보상하기 위해서 commend leaky FXLMS⁽²⁾을 사용하면 제어 성능이 감소한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 commend AOF FXLMS⁽⁶⁾를 개발하여 사용한다.

그림 4는 능동음질제어를 적용한 차량에 대한 실험 장치이며 기본적으로 Matlab Simulink와 dSpace를 사용한다. 마이크로폰은 그림 4(b)에서 보여주는 바와 같이 운전석 및 다른 좌석 위에 부착하고 5개의 스피커를 사용한다. 능동제어 알고리즘의 성능에 대한 비교는 그림 4(c)에서 보여

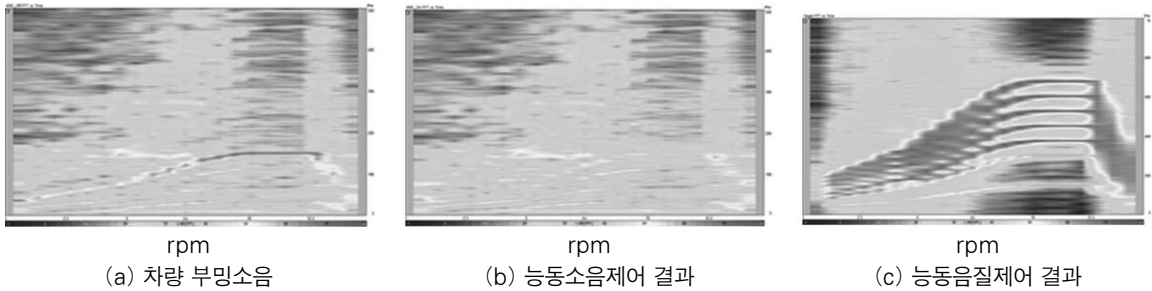


그림 5 능동음질제어 실험 장치와 알고리즘 성능 비교

준다.

그림 5는 commend AOF FXLMS 알고리즘을 이용한 능동음질제어에 대한 연구결과이다. 실험 차량은 실내에서 강한 부밍성 소음을 가진 차량이며 능동소음제어로 오차를 “0”으로 하여 부밍 소음을 제거한다. 이후에 스포티성 소음을 목적으로 입력하여 원하는 소리가 실내에서 주행 중에 발생하도록 하는 결과이다. 국내외 여러 차량에서는 2014년도 기준으로 대부분 차량에서 이 기술을 적용하고 있으며 앞으로 운전자의 뇌 과상태에 따라서 운전자가 필요한 자동차 소리를 보다 능동적으로 발생하도록 하는 기술의 발전이 요구된다.

4. 맺음말

능동제어기술을 이용한 능동소음제어 기술을 넘어 능동음질설계 기술까지 도달한 상태가 현재 기술이다. 이 기술은 기계공학과 전자공학 음향공학 기술이 융합으로 이루어지는 기술이며 자동차분야에 적용하기 위해서는 자동차 음질에 대한 기본적인 이해가 필요하다. 향후에는 소비자 선호음질과 자동차 브랜드 음이 원하는 차량의 내부에서 발생하는 기술이 발전될 것이다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Widrow, B. and Stearns, S. D., 1985, Daptive Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc.
- (2) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations, Wiley, New York; Chichester.
- (3) Kim, H., W., Park, H. S., Lee, S. K. and Shin, K. H. 2011, Modified-filtered-u LMS Algorithm for Active Noise Control and Its Application to a Short Acoustic Duct, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, pp. 475~484.
- (4) Elliott, S. J., Stothers, I. and Nelson, P. A., 1987, A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration, IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing, ASSP-35(10), pp. 1423~ 1434.
- (5) Reese, L., 2004, Active Sound-profiling for Automobiles, Doctoral Thesis, ISVR Southampton, UK.
- (6) Lee, S. K., Lee, S. M., Kang, I. D. and Shin, T., 2014, Active Sound Design for a Passenger Car Based on Adaptive Order Filter, Internoise 2014.