

능동 머플러를 위한 퍼지논리 적응필터의 설계

안 동 준^{*1)} · 박 기 홍²⁾ · 김 선 희²⁾ · 남 현 도³⁾

아주자동차대학 자동차계열¹⁾ · 국민대학교 자동차공학과²⁾ · 단국대학교 전자전기공학부³⁾

Design of Fuzzy Logic Adaptive Filters for Active Mufflers

DongJun Ahn^{*1)} · Kihong Park²⁾ · Sunhee Kim²⁾ · HyunDo Nam³⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Ajou Motor College, Chungnam 355-769, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

³⁾Department of Electronics & Electrical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 448-701, Korea

(Received 27 August 2010 / Accepted 9 February 2011)

Abstract : In active noise control filter, LMS algorithms which used for control filter, assure the convergence property, and computational burden of these algorithms are proportionate to the filter taps. The convergence speed of LMS algorithms is mainly determined by value of the convergence coefficient, so optimal selection of the value of convergence coefficient is very important. In this paper, We proposed novel adaptive fuzzy logic LMS algorithms with FIR filter structure which has better convergence speed and less computational burden than conventional LMS algorithms, for single channel active noise control with ill conditioned signal case. Computer simulations were performed to show the effectiveness of a proposed algorithms.

Key words : Active noise control(능동소음제어), Adaptive filter(적응필터), Active muffler(능동 머플러), Fuzzy logic LMS algorithm(퍼지논리 LMS 알고리즘)

Subscripts

$W(z)$: transfer function of control filter
 $X(n)$: vector of input signal
 $e(n)$: error signal
 $m_{ue}(UE)$: membership function of error signal

1. 서 론

차량 내부에서 발생하는 소음은 탑승자의 쾌적한 운전조건을 방해하는 대표적인 요인으로 지목받고 있으며, 특히 디젤엔진이 탑재된 SUV의 증가에 따라 소음저감요구는 점차 증대되고 있다. 수동적인 소음 저감기술의 발달로 인해 근래의 출시되는 차

량내부의 소음은 많이 감소되었지만 타이어 및 도로소음, 고속운행시의 소음증가는 여전히 상존하고 있다.

기존의 수동형 머플러는 내연기관의 배기 소음을 저감하기 위하여 배기가스가 챔버 내의 차폐경로를 통과하면서 소음이 감쇄, 흡수되는 방식을 적용하고 있다. 이 방식은 배기가스의 원활한 방출을 방해하는 작용을 하므로 엔진의 출력감소, 연비저하 등 부정적인 영향을 준다.

능동형 머플러(active muffler)¹⁻⁴⁾는 수동형 머플러의 단점을 해결하기 위하여 배기 파이프를 직관화함으로써 앞에서 언급한 문제점을 해결하려는 것으로(Fig. 1 참조), 배기소음의 저감은 능동소음제어 기법으로 대응하는 방식이다.

*Corresponding author, E-mail: ahndj@motor.ac.kr

능동소음제어 기법으로 주로 사용되고 있는 적응필터 알고리즘은 최소평균자승(LMS: Least Mean Square)기법을 이용하며, 수렴성이 보장되고 계산량이 제어필터의 차수에 비례하기 때문에 신호처리 분야에 널리 쓰이고 있다. 그러나 느린 수렴 특성으로 인한 시스템 성능 저하 등의 문제로 인해 수렴특성 개선을 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

본 논문에서는 LMS 알고리즘의 수렴특성을 결정하는 수렴계수를 퍼지논리를 이용하여 추출하여 능동소음 제어계의 수렴특성 향상 및 계산량을 저감시킨 퍼지논리 적응필터가 포함된 새로운 능동소음제어계를 제안하고자 한다.

2. 능동 머플러 모델링

2.1 1차원음장 능동소음제어

능동소음제어는 음파간섭의 원리를 이용한 것으로 P. Lueg⁵⁾에 의해 기본적인 원리가 처음으로 발표되었다. Fig. 1에서 보인 바와 같이 능동소음제어의 기본 원리는 1차원 음장인 경우에 제어용 음원을 사용하여 소음원에서 발생된 소음을 상쇄시키는 방식이다.

P. Lueg의 특허에 따르면, Fig. 1에서, 소음원에서 발생된 음향 소음 S_N 은 머플러의 배기 통로를 따라서 전파되어 마이크로폰 M 에 감지된다. 이 감지된 음향 소음이 전기 신호로 변환된 후 제어 시스템을 통하여 위상이 변화되고 증폭된 후 출력 스피커를 통하여 방출된다. 이때 소음원에 대한 제어음원 S_c

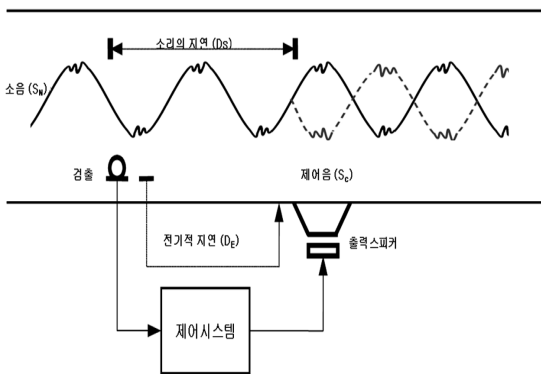


Fig. 1 One dimensional active noise cancelling concept

의 180° 위상 전환은 제어 시스템에서 적절한 시간 지연을 줌으로써 얻을 수 있다. 음파의 전달 속도가 전기적 신호의 전달 속도에 비해 느리기 때문에 소리의 지연 D_s 가 전기적 지연 D_E 보다 작다. 따라서 소음감쇄는 제어 시스템에서 적절한 시간 지연을 조절함으로써 가능하다.

이러한 능동소음제어 시스템은 온도 등 주변의 환경이 변하거나 소음원 및 소음시스템의 특성이 미지일 경우에는 2차 음원을 이용하여 소음을 제어하기가 어렵기 때문에 적응 신호처리 기법을 도입하여 적응 필터를 사용하는 것이 일반적인 추세이다.

Fig. 2는 자동차 머플러에 대한 능동 소음 제어 시스템⁶⁾을 나타낸 것으로, 1차 음원은 머플러의 엔진 측 배기단에서 l_0 만큼 떨어진 거리에 위치한다고 가정하며 1차 음원에 의해 발생하는 음을 검출하는 마이크로폰은 1차 음원으로부터 l_1 거리에 위치하고, 2차 음원은 마이크로폰으로부터 l_2 거리에 위치함을 보이고 있다.

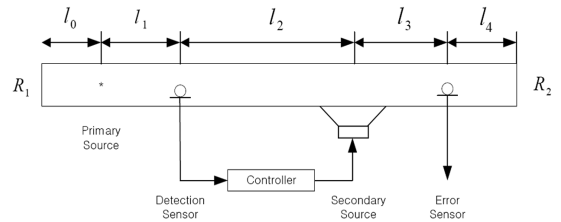


Fig. 2 Active noise canceling systems for mufflers

오차 신호를 측정하는 데에 사용되는 마이크로폰은 2차 음원으로부터 l_3 , 머플러의 종단으로부터 l_4 의 거리에 위치하며 R_1, R_2 는 머플러 양단의 음파 반사 계수이다.

Fig. 2의 주요 전기음향 전달함수들이 선형이라고 가정하면 Fig. 3과 같은 중첩 모델로 표현할 수 있다.

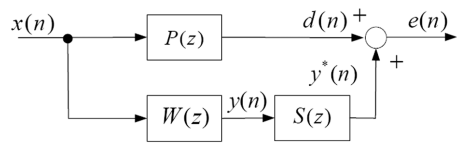


Fig. 3 Superposition models for active mufflers

Fig. 3에서, $P(z)$ 는 1차 경로, $W(z)$ 는 제어필터, $S(z)$ 는 2차경로 전달함수로서, 기존에 존재하는 배경 소음의 반대위상을 인위적으로 만들어 내는 2차 음원을 생성함으로써, 상쇄 간섭을 일으켜 오차를 최소화하는 제어 필터를 생성하는 것이다.

3. 퍼지 논리 적응필터의 설계

본 절에서는 능동소음제어에서 주로 적용하고 있는 LMS 알고리즘과 이를 개선시킨 퍼지논리 LMS 알고리즘을 제안하고자 한다.

3.1 LMS 알고리즘

Fig. 4에 보인 적응필터 알고리즘은 미지의 시스템 계수를 추정하여 제어 목적을 달성하는데 주목적이 있다.

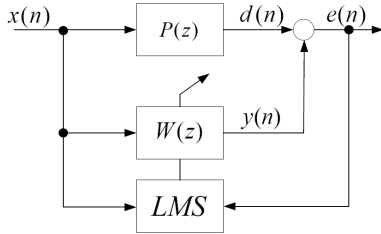


Fig. 4 Adaptive filter algorithm

Fig. 4에서, $x(n)$ 은 1차 음원 신호, $d(n)$ 은 머물러 음향 출력, $y(n)$ 은 제어 출력, $e(n)$ 은 시스템 출력과 제어 출력의 오차신호이며 LMS 알고리즘은 식 (1)과 같다. 식 (1)에서, 제어필터 벡터 $W(n)$ 을 결정하기 위한 수렴계수 $\mu(n)$ 의 적절한 선택이 시스템의 성능을 좌우하게 된다. 최적의 수렴계수를 결정하는 많은 연구가 있어 왔으며, 수렴속도의 향상을 위하여 식 (2)와 같이 입력 신호 벡터의 norm을 취하여 수렴계수에 반영하는 NLMS(Normalize LMS) 알고리즘이 주로 적용되었다. NLMS 알고리즘은 수렴계수가 가변되는 구조이기 때문에 이의 적절한 선택이 시스템의 성능을 좌우한다.⁶⁾

$$W(n+1) = W(n) + \mu(n) e(n) X(n) \quad (1)$$

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{X^T(n)X(n)} \quad (2)$$

여기서, $W(n)$ 은 LMS 제어필터 벡터, $X(n)$ 은 입력 신호 벡터, α 는 임의의 상수이다.

Fig. 4에서 제어 출력은 물리적으로 제어 스피커에서 발생한 2차음원을 통하여 출력되고, 1차음원과 상쇄되는 과정을 거치게 되는데 이를 2차경로라고 한다. 1차 경로와 2차 경로 전달함수는 미지이거나 시변인 경우가 많으므로 이를 적응필터로 실시간 추정하면서 최적의 $W(z)$ 를 구해야 하는데, 제어필터 $W(z)$ 의 해를 고려할 때 2차경로 전달함수의 존재를 고려하면 Fig. 4는 Fig. 5와 같이 변형될 수 있으며 이를 Filterd_x LMS 알고리즘⁷⁾이라고 한다 (Fig. 5에서 $y^*(n)$ 은 2차 경로 출력이다).

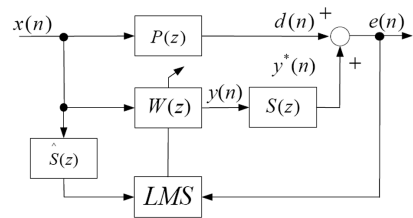


Fig. 5 Filtered_x LMS algorithms

3.2 퍼지논리 LMS 알고리즘

본 논문에서 제안한 퍼지논리 LMS 알고리즘⁸⁾은 LMS 알고리즘의 수렴 계수를 퍼지 논리로 갱신하는 NLMS 알고리즘 구조로서, 퍼지 추론 규칙에 의해 추정오차와 추정오차의 변화율을 고려하여 LMS 알고리즘의 양호한 수렴 특성을 얻기 위하여 수렴 계수 μ 를 가변시킬 경우, 논리적인 관점에서 볼 때 알고리즘의 안정도가 보장되는 범위 내에서 다음의 규칙을 고려할 수 있다.

- 1) IF adaptation speed is LOW, THEN μ must be increased
- 2) IF adaptation speed is HIGH, THEN μ must be decreased

따라서 다음과 같이 퍼지 논리를 이용하여 시스템 출력의 오적응도에 따라 스텝크기를 적절히 가변시키는 퍼지 LMS 알고리즘은

$$W(n+1) = W(n) + \mu(n) e(n) X(n) \quad (3)$$

$$\mu(n) = \frac{v(n)}{(L+1)} \quad (4)$$

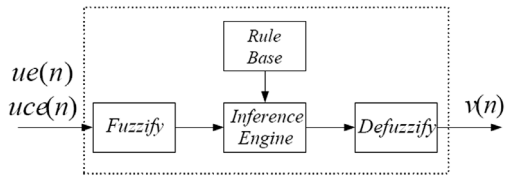


Fig. 6 Block diagram of fuzzy logic algorithms for convergence coefficients

여기서, $v(n)$ 는 퍼지 추론 알고리즘에 의하여 계산된 퍼지 출력, L 은 제어필터차수이다.

식 (4)의 $v(n)$ 는 Fig. 6과 같은 추론과정을 거쳐 수렴 계수를 결정하는 퍼지 추론 결과로, 식 (5), (6)과 같이 오적응도의 정량적 척도인 추정오차 $ue(n)$ 와 추정오차의 변화율 $uce(n)$ 에 의하여 결정된다.

식 (5)의 오적응도의 정량적 척도 $ue(n)$ 은 입력신호 벡터와 추정오차간의 상호상관의 norm을 취하고 smoothing 필터를 적용한 것이고, 식 (6)의 $uce(n)$ 은 $ue(n)$ 의 변화율의 절대 값의 smoothing 필터를 적용한 것이다.

$$ue(n) = \alpha_1 ue(n-1) + (1 - \alpha_1) \frac{\|e(n) X(n)\|}{(L+1)} \quad (5)$$

$$uce(n) = \alpha_1 uce(n-1) + (1 - \alpha_1) \|ue(n) - ue(n-1)\| \quad (6)$$

여기서 α_1 은 추정오차의 망각 인수이다.

입력 퍼지 변수 $ue(n)$, $uce(n)$ 의 소속 함수(membership function)와 출력 퍼지변수 $v^0(n)$ 의 소속 함수는 Fig. 7과 같다.

퍼지출력 $v^0(n)$ 를 계산하기 위한 언어적 규칙은

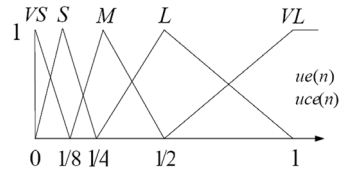
$$R_i: \text{IF } ue \text{ is } UC_i \text{ and } uce \text{ is } UCE_i, \text{ THEN } v \text{ is } V_i \quad (7)$$

이러한 언어적 규칙으로 퍼지 출력을 얻으려면 추론과정을 거쳐야 하므로 퍼지 출력 결정을 위한 합성 규칙은,

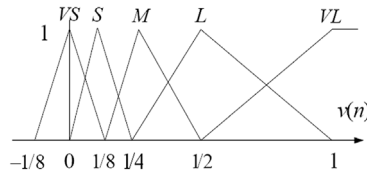
$$V = R \circ (UE \times UCE) \quad (8)$$

퍼지 출력을 결정하기 위한 언어적 제어 규칙은 Table 1과 같으며, 퍼지 출력 $v^0(n)$ 는 추론 규칙으로 주로 많이 쓰이는 max-min 합성연산자로 표현하면,

$$v^0(n) = m_R(UE_i, UCE_i, V_i) = \max \left[\sum_{i=1}^N \min [m_{UE_i}(ue_i), m_{UCE_i}(uce_i), m_{V_i}(v_i)] \right] \quad (9)$$



(a) m_{ue} (UE), m_{uce} (UCE) : membership function of $ue(n)$, $uce(n)$



(b) m_v (V) : membership function of $v^0(n)$

Fig. 7 Membership function of fuzzy input/output variables

Table 1 Linguistic Control Law for Convergence Coefficient Determination

ue \ uce	VS	S	M	L	VL
VS	VL	L	M	S	VS
S	VL	VL	L	M	S
M	VL	VL	VL	L	M
L	VL	VL	VL	VL	L
VL	VL	VL	VL	VL	VL

퍼지 추론과정을 거쳐 얻어진 출력 $v^0(n)$ 는 퍼지 변수이고 실제 출력은 crisp한 $v(n)$ 이 되어야 하므로 역퍼지화를 위해 이산화된 무게 중심법을 적용하면,

$$v(n) = \frac{\sum_{i=1}^N (v^0(n) m_V(v_i))}{\sum_{i=1}^N (m_V(v_i))} \quad (10)$$

Fig. 8은 본 논문에서 제안한 능동 머플러를 위한 퍼지논리 적응필터의 블록다이어그램이다.

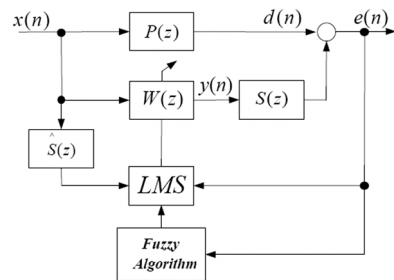


Fig. 8 Fuzzy logic adaptive filters for active mufflers

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 퍼지논리 적응필터 시스템의 유용성을 보이기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. Table 2는 머플러의 물리적인 제원을 나타낸 것이다.

Table 2 Muffler parameters

변수명	기호	값
반사 계수	R_1, R_2	0.2, 0
외형 길이	l_0	0.3[m]
	l_1	0.5[m]
	l_2	1.9[m]
	l_3	0.5[m]
	l_4	0.3[m]

Table 3은 시뮬레이션 공동 파라미터를 나타낸 것이다.

Table 3 Simulation parameters

변수	수치	
음속	340[m/s]	
샘플링 주파수	2[kHz]	
수행 스텝	20,000(10초)	
소음신호	가솔린 배기관(아반테 XD)	
	디젤 배기관(테라칸)	
2차경로 차수	Filtered_x인 경우	96
	Fuzzy Logic인 경우	64
제어필터 차수	Filtered_x인 경우	192
	Fuzzy Logic인 경우	96
수렴계수	Filtered_x인 경우	0.00005

식 (11)은 Table 2,3의 파라미터를 토대로 1차경로, 2차경로 전달함수를 이산형 전달함수 모형화⁶⁾ 기법을 통하여 구한 것이다.

$$P(z) = \frac{z^{-17} + 0.5z^{-21} + 0.06z^{-24}}{1 - 0.06z^{-21}} \quad (11)$$

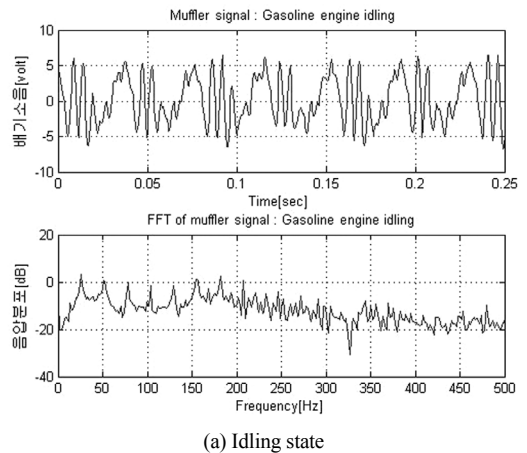
$$S(z) = \frac{z^{-3} + 0.2z^{-6} + 0.3z^{-35} + 0.06z^{-38}}{1 - 0.06z^{-21}}$$

식 (11)에서 알 수 있듯이 배기 파이프의 소음 신호가 오차 마이크론 사이의 전달 지연시간은 최소 17step정도이고, 배기 파이프의 특성상 한쪽 부분

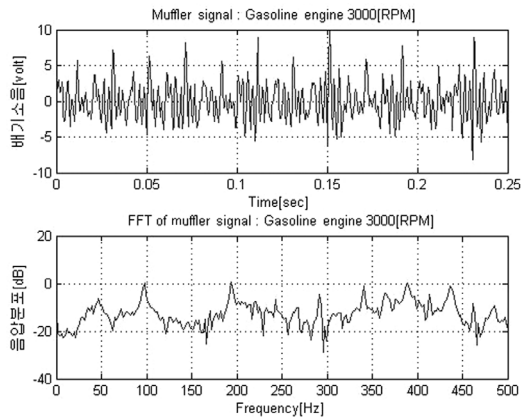
은 개방되어 있으므로 반사계수를 0으로 두었고, 엔진 측에서의 반사음은 20% 정도로 가정하였다. 음속은 배기 파이프의 온도에 따라 가변하지만 본 연구에서는 고정된 것으로 가정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 식 (11)의 제어 대상 시스템을 대상으로 가솔린과 디젤 엔진의 배기소음을 녹음하여 이를 입력신호로 사용하였다. 시뮬레이션 도구로서 기준 음원의 확보는 cool-edit 2.0을 사용하였으며, 시뮬레이션 도구는 Matlab 2009b버전을 사용하였다.

4.1 엔진 배기소음 특성 분석

Fig. 9(a)의 첫 번째 그림은 가솔린 엔진의 배기소음 특성을 시간영역에서 보인 것으로 엔진의 RPM에 따라 주기성이 있음을 보인 것이고, 두 번째 그림은 FFT를 통한 주파수 분포를 보인 것이다. 두

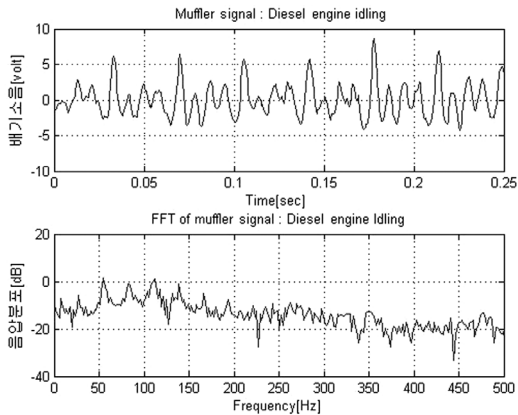


(a) Idling state

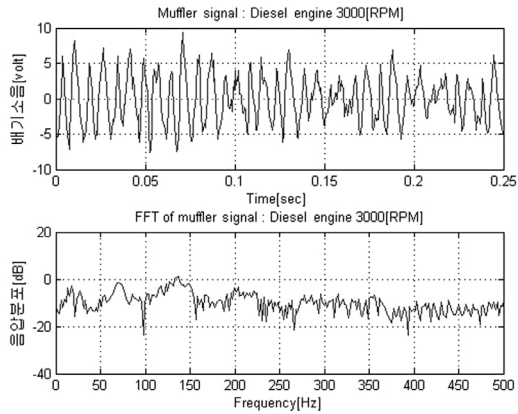


(b) Acceleration state (3000[RPM])

Fig. 9 Characteristics of gasoline engine noise signal



(a) Idling state

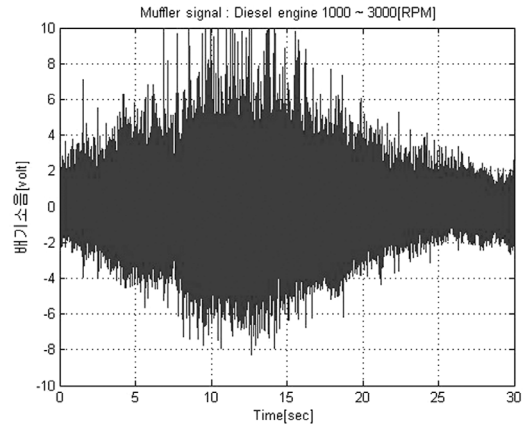


(b) Acceleration state (3000[RPM])

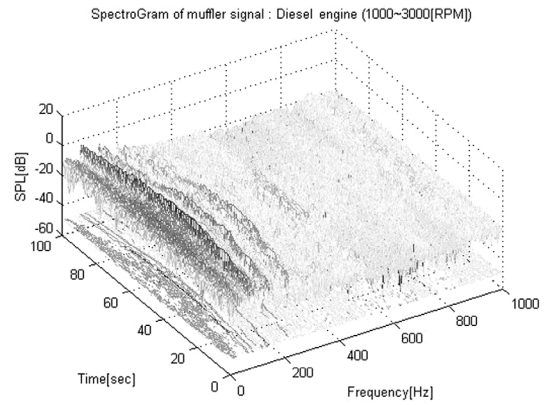
Fig. 10 Characteristics of diesel engine noise signal

번째 그림에서 엔진의 RPM이 증가함에 따라 배기 소음의 주파수 특성이 가변됨을 알 수 있다. Fig. 10은 디젤 엔진의 배기 소음 특성을 보인 것으로 가솔린 엔진의 경우보다 주파수 특성이 넓게 분포하는 광대역 특성을 가짐을 보인 것이다. 두 경우 모두 엔진의 RPM에 따른 소음의 주파수 특성이 가변하므로 이에 따라 능동적으로 적응하는 알고리즘이 필요하다.

Fig. 11(a)는 디젤 엔진을 1000~3000[RPM]으로 가변하였을 때의 배기 소음의 시간 추이 특성을 보인 것이고, Fig. 11(b)는 이를 spectrogram으로 나타낸 것으로, x축은 주파수, y축은 시간, z축은 음압 분포(SPL: Sound Pressure Level)의 3차원 입체 분포를 보인 것이다, 그림에서 주로 200, 300, 400[Hz] 부근의 주파수 특성이 시간에 따라 가변하고 있음을 알 수 있다.



(a) Variable state (1000~3000[RPM])



(b) Spectrogram of variable state

Fig. 11 Characteristics of diesel engine noise signal with variable state

Fig. 12는 Fig. 11의 가변 주파수 상황에서 본 논문에서 제안한 퍼지논리 적응필터와의 성능을 비교한 것으로, 제안한 알고리즘이 Table 3에 제시된 바와 같이 제어 알고리즘의 제어 필터, 2차경로 필터차수를 적게 했음에도 불구하고(계산량 감소) 수렴 특성 및 소음 감쇠 특성(Fig. 12(b)의 100~300[Hz]부근)이 기존의 방식에 비해 우수함을 보이고 있다.

5. 결론

능동머플러의 적응필터 알고리즘에서 적용되고 있는 LMS 알고리즘은 안정도와 수렴특성이 수렴계수와 밀접한 관계가 있어 수렴계수의 적절한 선정이 중요하다. 소음원의 주파수 특성이 시변인 non-stationary 프로세스인 경우 수렴계수의 적절한

후 기

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

References

- 1) S. J. Elliott and P. A. Nelson, "The Active Control of Sound," *Electronics and Communication, Eng. Jour.*, pp.127-136, 1990.
- 2) K. Kido, "Active Noise Cancellation," *Text for Singapore Acoustic Conference 85*, Singapore, 1985.
- 3) R. R. Leitch and M. O. Tokhi, "Active Noise Control Systems," *IEE Proc.*, Vol.134, Pt.A, No.6, pp.525-546, 1987.
- 4) H. S. Kim, D. G. Sohn and J. E. Oh, "Active Noise Control of Reverberant Sound Field Using the Multi-channel Adaptive Algorithm," *Transactions of KSAE*, Vol.3. No.6, pp.23-29, 1995.
- 5) P. Lueq, *Process of Silencing Sound Oscillations*, US Patent 2043 416 1934.
- 6) S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Models for Describing Active Noise Control in Ducts," *ISVR Technical Report No.127*, University of Southampton, U.K., 1984.
- 7) B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Eglewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, 1985.
- 8) D. J. Ahn, "Design of Adaptive Filters for Active Noise Control," *Ph. D. Dissertation*, Dankook Univ. Dept. of Elec., 1995.

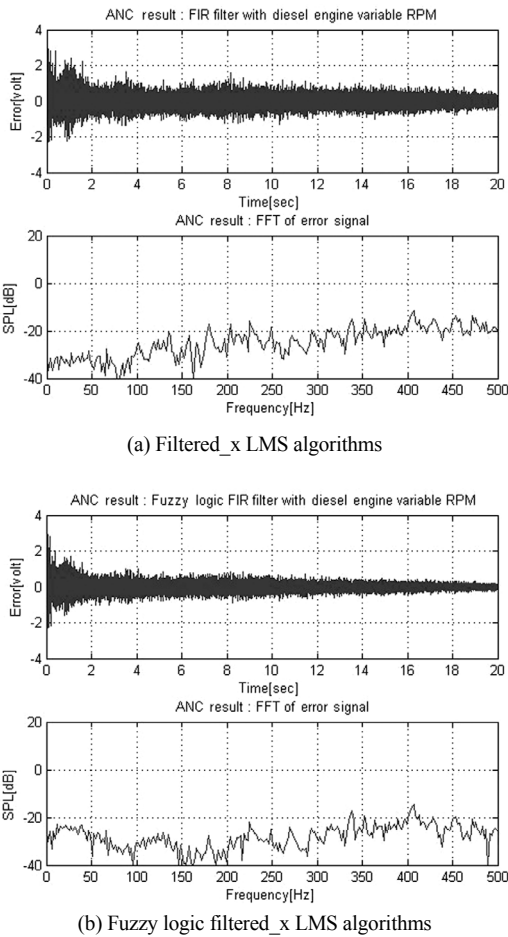


Fig. 12 Comparison of proposed algorithms VS. conventional algorithms

선정은 매우 어려우며, 고정된 수렴계수로는 만족스런 성능을 얻기가 어렵다. 본 논문에서는 자동차 배기소음의 주파수 특성을 분석하였으며, 퍼지논리에 의해 LMS 알고리즘의 오적응도에 따라 수렴 계수를 적절히 가변시키는 퍼지 LMS 알고리즘을 제안하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이의 유용성을 보였다.