

웨이브렛 패킷을 이용한 능동 소음제어 및 비교실험

Active Noise Control by Using Wavelet Packet
and Comparison Experiments

장재동, 김영중, 임묘택*

(Jae-Dong Jang, Young-Joong Kim, and Myo-Taeg Lim)

Abstract : This thesis presents a kind of active noise control(ANC) algorithm for reducing noise due to engine inside a car. The proposed control algorithm is, by using WP(Wavelet Packet), a one improving the instability due to delay of noise transmission and the lack of response ability for the rapid change of noise, which are defects of the existing FXLMS(Filtered-X Least Mean Square) algorithm. The chief character of this system is a thing that faster operation than the FXLMS is implemented by inserting WP in the secondary path. In other words, WP implements parallel operation. Then, the weights of filter in the adaptive algorithm will be updated faster. In addition, because WP have so excellent a resolution, they can process very minute noise. The efficiency of this control algorithm will be demonstrated in the matlab simulation and in the actual experiments by using a Labview program and a car.

Keywords : Active Noise Control(ANC), Wavelet Packet(WP), Filtered-X Least Mean Square(FXLMS)

I. 서론

원하지 않는 진동이나 소음은 전기적, 기계적 시스템에 있어서 작업자의 능률이나 작업환경에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다[1]. 이러한 소음이나 진동을 방지하는 소음 및 진동제어에 대한 연구는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 먼저 소음원으로부터 소음을 적게 방출시키는 방법, 두 번째로 흡음, 차음 등의 부가적인 방법으로 소음을 줄이는 수동적인 방법, 마지막으로 소음을 줄이기 위해서 부가적인 소음원을 사용하는 능동소음제어 방법이 있다. 이 중에서 수동적인 방법은 구조물의 재질, 형상 등에 대한 정확한 파악이 필요하고 고주파 소음에 대하여는 좋은 성능을 보이거나 대부분의 전기적 기계적 소음인 500Hz 이하의 저주파 소음에 대해서는 구조물의 크기가 커야 하므로 많은 제약이 따른다[2]. 따라서 이런 수동 소음제어의 단점을 극복하기 위해서 저주파 소음에 대해서 탁월한 효과를 보이는 능동소음제어가 최근 많이 연구되고 있다. 1936년 Lueg에 의해서 처음 창안된 능동소음제어는 신호 처리기술과 하드웨어의 발달과 더불어 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 초기 능동소음제어는 시스템을 수학적으로 모델링 한 후 이에 대한 매개변수들을 실험을 통해 비실시간으로 얻고 이 결과를 이용해서 소음제어를 하였다. 그러나 시변 시스템인 경우 이와 같은 방법은 실제 적용에 어려움이 있기 때문에 신호 처리기법을 이용하여 소음과 동일 진폭, 반대위상을 갖는 부가적인 소음원을 이용한 실시간 소음제어 방법이 각광받게 되었다. 이러한 능동소음제어 시스템은 하드웨어적으로 경량화가 가능하므로 최근 항공기의 소음제어나 에어컨, 해

드셋과 같은 전자장치의 소음제어에 많이 적용되고 있다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 능동소음제어 방법으로 Filterd-X LMS(FXLMS)알고리즘이 있다. 그런데 이 알고리즘은 적응필터를 통과한 신호가 2차 경로를 통과하면서 변형되므로 이에 대한 정확한 모델링이 필요하다[4]. 그런데 적응필터와 오차 채널에 대한 선형조건이 가정되어야 하므로 실제 모델링 과정 중에 제약이 따른다.

이러한 제약 조건으로 인해, 소음의 전달 지연으로 인한 시스템의 심각한 불안정성과 소음 전달과정에서 소음의 빠른 변화에 대한 응답능력부족 등과 같은 문제점이 발생하게 되었다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 시스템의 2차경로에 웨이브렛 패킷을 삽입한 알고리즘을 제안하였다. 웨이브렛 패킷은 병렬연산을 수행하기 때문에 신호처리 및 전달의 속도가 엄청나게 빠르며, 우수한 분해능을 가지고 있기 때문에 신호의 빠른 변화에도 신속하게 응답할 수 있는 좋은 장점이 있다. 본 논문에서는 제안된 웨이브렛 패킷 알고리즘 이론에 대한 실제 실험을 통해서 그 우수성을 제시하였다. 자동차의 엔진 소음을 소음원으로 가정하고 여러 개의 스피커와 마이크, 그리고 컴퓨터를 이용하여 시스템을 구성한 다음 랩뷰(Labview) 프로그램과 매트랩(Matlab)을 이용하여 FXLMS 알고리즘과 웨이브렛 패킷 알고리즘을 이용한 결과를 그래프를 통해 비교분석함으로써 연구의 타당성을 입증하였다. 시간 영역과 주파수 영역을 각각 분석함으로써 실제로 소음이 진행되는 시간동안의 감쇄정도와 저주파 영역에서의 감쇄정도를 전체적으로 확인할 수 있도록 실험을 계획하고 실시하였다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 25., 채택확정 : 2007. 2. 17.

장재동 : 고려대학교 메카트로닉스학과(jade337@korea.ac.kr)

김영중, 임묘택 : 고려대학교 전기전자전파공학부

(kyjoong@korea.ac.kr/mlim@korea.ac.kr)

II. 본론

1. ANC(Active Noise Control)

ANC의 기본적인 블록 다이어그램은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

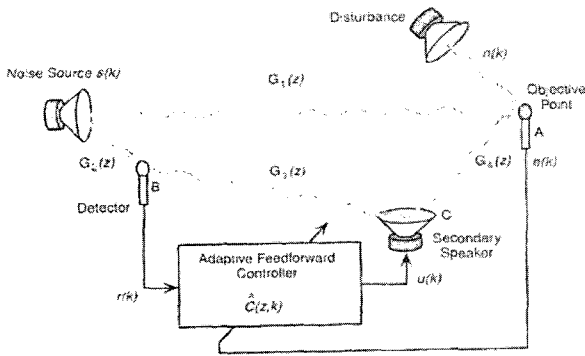


그림 1. 기본적인 ANC 시스템.
Fig. 1. Basic ANC system.

위의 그림에서 각각의 $G(z)$ 들은 각 단계의 전달함수를 나타낸다. 소음원에서 발생하는 음성신호 $s(k)$ 가 소음감지 마이크론 B에 의해 전기신호 $r(k)$ 로 변환되어 적응 제어기에 들어가면 제어기에서는 그 신호와 진폭이 같고 위상은 180도 반대인 신호 $u(k)$ 를 생성하여 2차 경로 스피커 C를 통해 방사하게 된다. 소음 감쇄정도 측정지점 A에서는 오차 마이크론이 설치되어 $s(k)$ 와 $u(k)$ 사이의 오차인 $e(k)$ 가 측정되어 다시 제어기 쪽으로 피드백하게 되고 제어기에서는 웨이트를 갱신하게 된다. 웨이트 갱신과정이 계속 반복되면서 오차 신호의 값은 점차 0에 가까워지게 된다[3].

2. FXLMS 알고리즘

2차 경로의 기준(reference) 신호가 웨이트 갱신이후의 전달함수와 동일한 필터를 통과하게 하는 방법이 FXLMS 알고리즘이다. FXLMS 알고리즘을 이용한 ANC시스템의 블록 다이어그램은 다음과 같다[4,9].

다음 그림을 수식적으로 해석하면 다음과 같다.

$$e(n) = d(n) - y'(n) = d(n) - s(n) * y(n) = d(n) - s(n) * [w^T(n) x(n)] \tag{1}$$

여기서 $s(n)$ 은 $S(z)$ 의 임펄스 응답이고, *는 선형 컨볼루션을 의미한다. $W(z)$ 의 계수 벡터

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

시간 n 에서의 신호 벡터

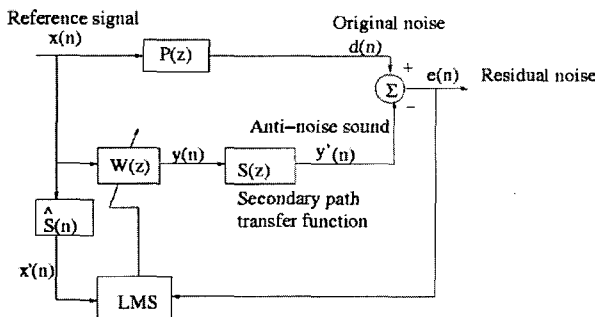


그림 2. FXLMS를 이용한 ANC 시스템.
Fig. 2. ANC system by using FXLMS.

$$x(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T \tag{3}$$

여기서 L 은 필터 $W(z)$ 의 차수이다.

(1)을 양변 미분하면,

$$\nabla e(n) = -s(n) * x(n) = -x'(n) \tag{4}$$

여기서

$$x'(n) = [x'(n) \ x'(n-1) \ \dots \ x'(n-L+1)]^T \tag{5}$$

이고

$$x'(n) = s(n) * x(n) \tag{6}$$

그러므로, 다음 식에서

$$\hat{\xi}(n) = e^2(n) \tag{7}$$

(7)의 양변을 미분하면,

$$\begin{aligned} \nabla \hat{\xi}(n) &= 2[\nabla e(n)]e(n) \\ &= 2[\nabla e(n)]e(n) \\ &= -2x'(n)e(n) \end{aligned} \tag{8}$$

다음의 웨이트 방정식에 (8)를 대입하면 FXLMS 알고리즘이 유도된다.

$$\begin{aligned} w(n+1) &= w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \\ &= w(n) + \mu x'(n)e(n) \end{aligned} \tag{9}$$

그런데, 실제 ANC 적용에 있어서는 $S(z)$ 는 알려지지 않고, 부가적인 필터인 $\hat{S}(z)$ 에 의해 추정된다. 그래서 그림 2에서 처럼, 다음과 같이 식이 수정된다.

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n) \tag{10}$$

여기서 $\hat{s}(n)$ 은 $\hat{S}(z)$ 의 추정된 임펄스 응답이다.

3. 본 논문에서 제안하는 웨이브렛 패킷 알고리즘

앞 장에서 제시되었던 FXLMS 알고리즘은 LMS 알고리즘의 단점을 극복하였지만 다음과 같은 문제점을 노출하였다[3].

- 1) LMS 알고리즘에 비해 개선되기는 했지만 여전히 남아 있는, 소음 전달의 지연으로 인한 시스템의 불안정성
- 2) 소음의 전달 경로에서 소음의 빠르고 급작스러운 변화에 대한 응답능력 부족

위와 같은 문제점들은 웨이브렛 패킷 알고리즘의 장점으로 해결할 수 있다. 웨이브렛 패킷은 병렬연산을 수행하기 때문에 연산속도가 아주 빠르며, 뛰어난 분해능으로 인해 신호의 빠른 변화에 대한 응답 능력이 탁월하기 때문이다.

본 논문에서는 ANC 시스템의 2차 경로에 웨이브렛 패킷 필터뱅크를 삽입한 알고리즘을 제안한다. 그 블록 다이어그램은 다음과 같다.

그림 3을 수식적으로 해석하면 다음과 같다[5-7,10,11].

$R_{hi}(z)$ 와 $R_{li}(z)$ 를 각각의 웨이브렛 패킷 필터 전달함수라고 하면, 2차 경로의 스피커 바로 이전의 전달함수

$$\begin{aligned} p_T(n) &= \sum_{i=1}^N (w_{hi}(n)R_{hi}(z) + w_{li}(n)R_{li}(z))p_D(n) \\ &= w^T(n)p_R(n) \end{aligned} \tag{11}$$

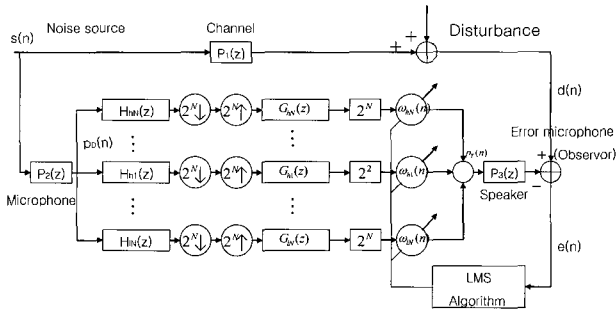


그림 3. 웨이브렛 패킷 알고리즘을 이용한 블록 다이어그램.

Fig. 3. Block diagram by using WP algorithm.

여기에서,

$$p_D(n) = s(n)P_2(z)$$

$$p_R(n) = [R_{h,N}(z)p_D(n) \cdots I_N(z)p_D(n)]^T$$

이다. 따라서

$$e(n) = d(n) - P_3(z)p_T(n)$$

$$= P_1(z)s(n) - P_3(z)p_T(n)$$

$$= P_1(z)s(n) - P_3(z)w^T(n)p_R(n)$$

또한 여기에서, 블록 다이어그램 속의 disturbance의 영향은 무시한다고 가정한다.

(12)를 $w^T(n)$ 에 관하여 양변 미분하면,

$$\nabla e(n) = -P_3(z)p_R(n)$$

$\xi(n) = e^2(n)$ 이므로 이 식을 $e(n)$ 에 관하여 양변 미분하면,

$$\nabla \xi(n) = 2[\nabla e(n)]e(n)$$

$$= -2P_3(z)p_R(n)e(n)$$

따라서 다음과 같은 새로운 웨이트 방정식, 즉 웨이브렛 패킷 알고리즘이 탄생하게 된다.

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

$$= w(n) + \mu P_3(z)p_R(n)e(n)$$

여기에서 사용된 웨이브렛의 종류는 Daubechies이며 $m=4$ 를 사용했다. m 은 스케일링 함수의 미분가능 횟수를 의미한다.

III. 실험실 수행

1. 실험실 장비 배치

실험에 사용된 장비들의 개략적인 배치도는 다음과 같다.

그림 4에서 DM(S_1 오른쪽에 있는 마이크로폰)은 스피커 S_1 에서 나오는 소음 신호를 측정하는 마이크로폰이고 EM2 (S_2 오른쪽에 있는 마이크로폰), EM3(S_3 오른쪽에 있는 마이크로폰)은 스피커 S_1 과 S_2 , S_3 에서 나오는 신호가 상쇄를 이룬 후 남은 오차 신호를 측정하는 오차 마이크로폰이다. PC1은 소음원의 소음파형을 스피커로 출력시키는 역할을 하고, PC2는 DM으로 받은 전기신호를 측정하여 웨이브렛

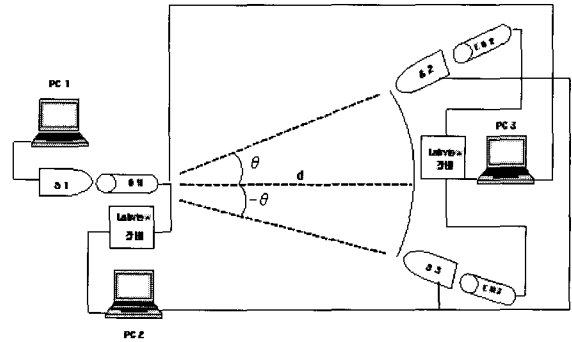


그림 4. 실험 장비들의 개략적인 배치도.

Fig. 4. Rough arrangement of experiment equipments.

표 1. 실험에 사용된 장비들과 그 수량.

Table 1. Equipments used in experiment and their quantity.

장비	수량
스피커 harman/kardon	3
마이크로폰 MS-23	3
Labview DNC2120	1
Labview DAQ card	2
Notebook PC	3

분석을 한 다음, 그 파형을 텍스트 파일로 저장하는 역할을 한다. PC3은 EM1과 EM2를 통해 받은 오차 전기신호를 측정하여 그 파형을 텍스트 파일로 저장하는 역할을 한다. 실험에 사용된 장비들을 정리하면 위의 표와 같다.

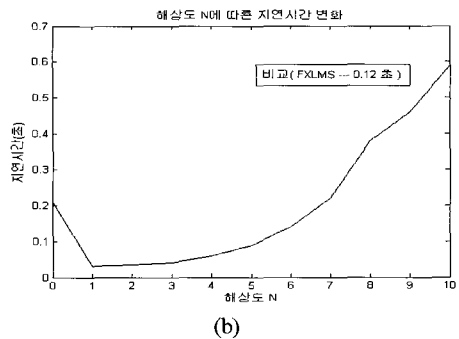
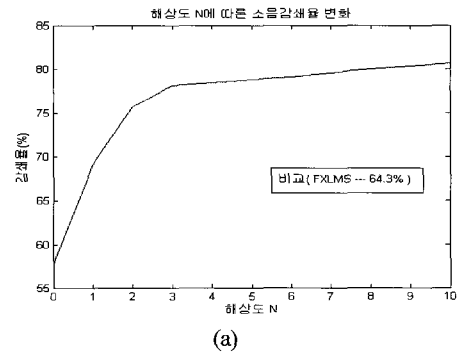


그림 5. (a) N의 변화에 따른 소음감쇄율의 변화, (b) N의 변화에 따른 지연시간의 변화.

Fig. 5. (a) The change of noise reduction ratio for the change of N, (b) The change of delay time for the change of N.

본 실험에서는 웨이브렛 패킷을 구성하기 위해 Daubechies 스케일링 함수를 사용하였으며, 웨이브렛의 해상도 $N=3$, 스텝 간격 $\mu=0.01$ 이 사용되었다. 스텝 간격은 ANC에서 흔히 사용되는 값이며, $N=3$ 이 최적인 이유는 앞의 그림 5(a), (b) 그래프를 분석해보면 알 수 있다.

그림 5(a),(b) 그래프에서처럼 N 이 0부터 10까지 변할 때의 소음감쇄율과 지연시간의 변화를 살펴보면, N 이 증가할 수록 소음의 감쇄가 증가하기는 하지만 $N=3$ 을 지나면서부터 소음 감쇄율의 증가량이 급작스럽게 둔화되고 지연 시간이 급격하게 증가하게 되므로 $N=3$ 이 최적이라는 결론을 내게 되었다.

2. 스피커 간의 최적거리 분석

본 논문에서 비교하는 알고리즘은 FXLMS 알고리즘과 웨이브렛 패킷 알고리즘이다. 소음원으로 사용된 파형은 약 17초간 지속되는 자동차의 엔진 가속 소음이다.

먼저 스피커 간의 최적거리를 알기 위해, 앞의 그림 4에서 θ 가 0도이고 S_3 과 EM3이 없으며 S_1 과 S_2 가 수평으로 위치해 있는 경우를 생각해보자. S_1 과 S_2 사이의 거리 d 가 어느 정도 되었을 때 소음의 감쇄가 가장 많이 일어나는지 먼저 알아보았다. d 는 S_1 에서 0으로 기준을 잡고 S_1 을 고정시킨 채로 S_1 과 붙어있던 S_2 를 5cm간격으로 오른쪽으로 움직인 거리이며, d 를 늘려가면서 소음감쇄율을 최대로 하는 최적 거리를 찾기 위해 실험하였다. 그리고 가장 소음감쇄율이 높게 나오는 d 부근에서 좀더 분해능을 높여서 재 측정하였다. 그 실험결과는 다음의 두 표와 같았다(표에 나타난 수치들은 소수 첫째 자리에서 반올림한 값들이다).

표 2. d 의 변화에 따른 감쇄율의 변화.

Table2. The change of noise reduction ratio for the change of d .

$d(cm)$	소음감쇄율(%)	$d(cm)$	소음감쇄율(%)
0	-121	55	25
5	-115	60	50
10	-102	65	60
15	-99	70	73
20	-94	75	53
25	-90	80	39
30	-81	85	21
35	-72	90	12
40	-40	95	-12
45	-10	100	-37
50	12	105	-49

표 3. d 의 미세간격 변화에 따른 소음 감쇄율의 변화.

Table3. The change of noise reduction ratio for the minute change of d .

$d(cm)$	소음감쇄율(%)	$d(cm)$	소음감쇄율(%)
66	62	71	74
67	67	72	75
68	69	73	71
69	71	74	65
70	73	75	

표 4. θ 의 변화에 따른 소음감쇄율의 변화.

Table4. The change of noise reduction ratio for the change of θ .

$\theta(^{\circ})$	소음감쇄율(%)	$\theta(^{\circ})$	소음감쇄율(%)
0	75	100	-58
10	-5	110	-54
20	-17	120	-49
30	-22	130	-40
40	-30	140	-59
50	-39	150	-68
60	-48	160	-88
70	-55	170	-97
80	-60	180	-120
90	-71		

여기에서 소음 감쇄율은 다음과 같은 식을 이용해서 구했다.

$$\text{소음감쇄율}(\%) = \frac{I_s - I_c}{I_s} \times 100 \quad (16)$$

여기서 I_s 는 소음원 스피커에서 소음 측정 마이크로폰으로 측정된 소음의 웨이브 파형의 절대값을 소음이 지속되는 시간동안 적분한 값이고, I_c 는 오차 마이크로폰에서 측정된 오차 소음의 웨이브 파형의 절대값을 소음이 지속되는 시간동안 적분한 값이다. 실험결과를 분석해본 결과 $d=70cm$ 일 때 최대의 소음감쇄가 이루어짐을 알 수 있었다.

3. 스피커 간의 최적각도 분석

앞에서 스피커 간의 최적거리를 알아보기는 하였지만 스피커 간의 각도에 있어서 일직선일 때($\theta=0^{\circ}$) 최적의 소음감쇄가 일어난다고 단정 지을 수는 없었다. 그래서 일직선일 때의 각도를 0도로 기준을 잡고 $d=72cm$ 는 고정된 채로, 10도씩 S_2 를 움직여가면서 실험하였다. 실험 결과는 위의 표 4와 같았다.(소수 첫째 자리에서 반올림한 값들)

이상하게도, 소음은 줄어들기보다 오히려 더 강해졌다. 스피커의 대칭성이 결여된 것이 문제의 원인으로 판단하고, θ 가 음수값이 되는 지점에 일직선상을 기준으로 S_2 와 대칭인 위치에 스피커(S_3)를 한 개 더 설치하였다. 여기에서는 S_2 와 S_3 바로 뒤에 위치한 두 개의 오차 마이크로폰에서 측정된 소음의 합을 적분한 값을 I_c 로 나타내었다.

표 5. θ 의 양방향 변화에 따른 소음 감쇄율의 변화.

Table5. The change of noise reduction ratio for the two direction change of θ .

$\theta(^{\circ})$	소음감쇄율(%)	$\theta(^{\circ})$	소음감쇄율(%)
± 0	75	± 100	12
± 10	75	± 110	30
± 20	76	± 120	45
± 30	77	± 130	1
± 40	77	± 140	-25
± 50	60	± 150	-45
± 60	41	± 160	-70
± 70	20	± 170	-99
± 80	13	± 180	-122
± 90	5		

표 6. θ 의 양방향 미세변화에 따른 소음 감쇄율의 변화.

Table 6. The change of noise reduction ratio for the two minute direction change of θ .

$\theta(^{\circ})$	소음감쇄율(%)	$\theta(^{\circ})$	소음감쇄율(%)
± 31	77.1	± 36	78.1
± 32	77.3	± 37	77.9
± 33	77.3	± 38	77.5
± 34	77.4	± 39	77.3
± 35	77.8		

그리고 가장 소음감쇄율이 높게 나오는 θ 부근에서 좀더 분해능을 높여서 재측정 하였다. 실험결과 표 5와 6과 같은 결과가 나왔다(표 5는 소수 첫째 자리에서 반올림한 값들이고, 표 6은 소수 둘째 자리에서 반올림한 값들).

실험결과를 분석해본 결과 $\theta = \pm 36^{\circ}$ 일 때 최대의 소음감쇄가 이루어짐을 알 수 있었다.

4. 시간 영역 분석

앞에서 수행한 실험에서 얻은 최적 거리($d=72\text{cm}$)와 최적 각도($\theta = \pm 36^{\circ}$)를 사용하여 FXLMS 알고리즘과 웨이브렛 패킷 알고리즘의 소음감쇄 정도를 시간 영역에서 파형으로 비교하였다. 알고리즘은 앞에서 설명한 수식과 일치하도록 램뷰 프로그램에서 코딩하였으며, 램뷰 실험장비로 측정된 값들을 텍스트 파일로 저장한 다음 매트랩(Matlab)에서 그 파일들을 불러와서 그래프로 만들었다. 그 그래프 파형은 그림 6과 같다.

시간 영역의 분석결과, 그림 6의 그래프처럼 FXLMS 알고리즘에 비해 웨이브렛 패킷 알고리즘이 원래의 소음 파형을 감쇄시키는데 더 좋은 성능을 보이는 것으로 나타났다. 소음 감쇄정도 이외에 알 수 있는 또 하나의 사실은 지연시간에 관한 것이었다. 그 사실을 그림 7, 8과 같이 그래프로 두 파형씩 비교해 보았다.

그림 7에서는 웨이브렛 패킷 알고리즘으로 제어된 파형과 FXLMS 알고리즘으로 제어된 파형이 따로 비교되고 있는데, 웨이브렛 패킷 알고리즘으로 제어된 파형이 FXLMS 알고리즘으로 제어된 파형보다 시간 지연이 덜하다는 점을 알 수 있다. 다음으로 그림 8에서 원래의 소음원의 파형과 웨이브렛 패킷 알고리즘으로 제어된 파형간의 시간 지연 차이를 보면, 웨이브렛 패킷 알고리즘으로 제어된 파형도

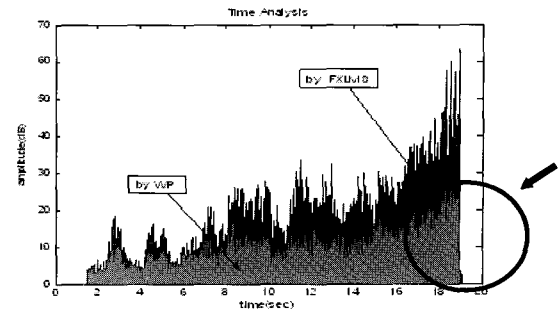


그림 7. FXLMS로 제어된 파형과 웨이브렛 패킷으로 제어된 파형의 시간 지연 비교.

Fig. 7. The time delay comparison of waveforms by FXLMS and waveform by WP.

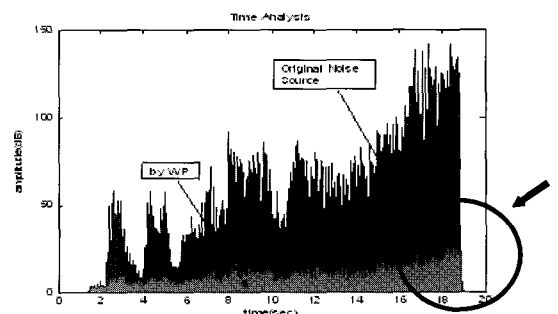


그림 8. 원래 소음원의 소음 파형과 웨이브렛 패킷으로 제어된 파형의 시간 지연 비교.

Fig. 8. The time delay comparison of original noise waveform and waveform by WP.

시간 지연이 있기는 하지만 FXLMS 알고리즘으로 제어된 파형에 비해서는 시간 지연이 덜하다는 것을 알 수 있다.

5. 주파수 영역 분석

이번에는 주파수 영역에서 소음의 감쇄정도를 분석하기 위한 실험을 실시하였다. 주파수 범위는 능동소음제어(ANC)에서 흔히 다루는 저주파 대역(0~500Hz)을 사용하였다. 그 그래프는 다음과 같다. 청색선(맨 위)은 원래의 소음 파형, 녹색선(가운데)은 FXLMS 알고리즘에 의해 감쇄된 후의 파형, 적색선(맨 아래)은 웨이브렛 패킷 알고리즘에 의해 감쇄된 후의 파형을 각각 나타낸다.

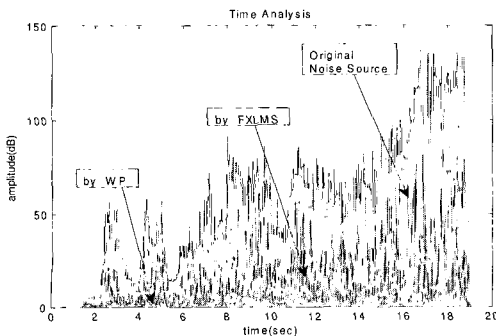


그림 6. 시간 영역에서의 소음감쇄 파형.

Fig. 6. Noise reduction waveforms in time domain.

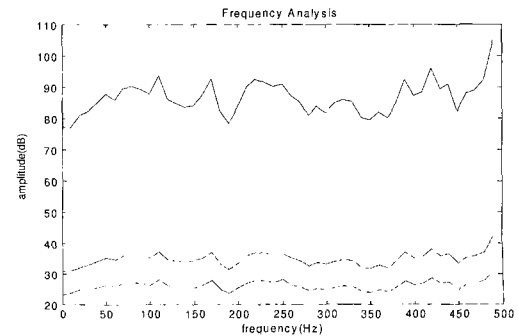


그림 9. 주파수 영역에서의 소음 감쇄 파형.

Fig. 9. Noise reduction waveforms in frequency domain.

주파수 영역의 분석 결과, 앞의 그래프에서 알 수 있는 것처럼 역시 FXLMS 알고리즘에 비해 웨이브렛 패킷 알고리즘이 원래의 소음 파형을 감쇄시키는데 더 좋은 성능을 보이는 것으로 나타났다. 두 알고리즘 모두 원래의 소음원 파형을 상당부분 감쇄시켰으나 그 감쇄량에 있어서 웨이브렛 패킷의 성능이 더 우수하다고 평가할 수 있다.

IV. 실제 자동차 실험

1. 자동차 실험장치도

자동차 실험장치도는 아래 그림 10과 같다[8]. 노트북을 비롯한 전선들의 위치는 공간상 생략하였다. 여기에서는 각 환기구를 소음원으로 가정하였다. 엔진의 가속소음은 3개의 환기구 모두를 통해서 실내로 전달된다고 가정하였다. 정팔각형 모양의 검은색 도형은 자동차 시트에 앉아있는 사람의 위치를 나타낸 것이고, 일록무늬 정사각형은 스피커의 위치를 나타내고 있으며, 정팔각형보다 작은 하늘색 원은 마이크를 나타내고 있다. 나와 있는 수치들은 환기구로부터 각 좌석까지의 실제 거리를 측정 한 것이다. 실제적인 엔진의 가속소음을 측정하는데 여러 가지 어려움이 있어, 앞에서 실험실 수행에서 사용되었던 엔진가속 소음파형을 각 환기구의 위치에서 인가하였다.

2. 환기구 세 개의 소음원을 모두 인가했을 때의 소음 감쇄율

환기구 세 개의 소음원을 모두 인가했을 때의 소음 감쇄율을 측정 한 결과는 다음 세 개의 그림과 같았다. 가로축의 각도는 세 개의 스피커 중 중간 스피커와 나머지 두 스피커들이 아래 위 대칭을 이루고 있는 각도를 의미한다. 그래프들이 연속적이지 않고 이산적인 모양을 띄는 이유는 각도가 정수인 경우의 10개 지점에서만 측정했기 때문이며, 감쇄율이 보다 크게 나오는 부분은 더 세분한 각도로 측정하였다.

여기에서는, 스피커와 소음원 사이의 거리가 72cm보다 짧기(50cm) 때문에 실험실 보다 감쇄가 덜 일어나므로 상쇄스피커를 중앙에 한 개 더 설치하였다. 또한 여기에서 좌석은 다섯 개인데도 그래프는 다섯 개가 아니고 세 개인 이유는 중앙 환기구와 왼쪽·오른쪽 환기구가 좌우 대칭을 이루고 있어서 소음 분포가 같은 좌우 좌석은 한 개씩 생략했기 때문이다. 여기에서 스피커 간 최적각도는 40도 근

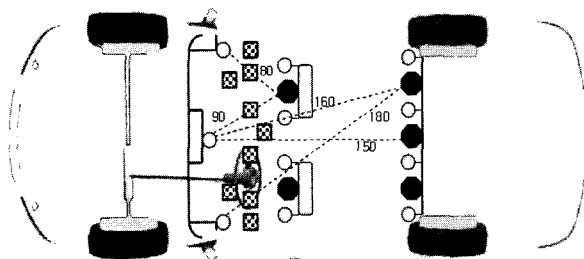


그림 10. 자동차(아반떼 XD)의 실내 실험장치도.
Fig. 10. The internal experiment equipment configuration of a car(avante XD).

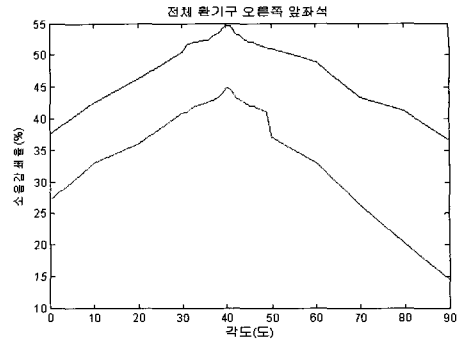


그림 11. 오른쪽 앞좌석의 소음 감쇄율 파형.
Fig. 11. Noise reduction ratio waveform in a right-front seat.

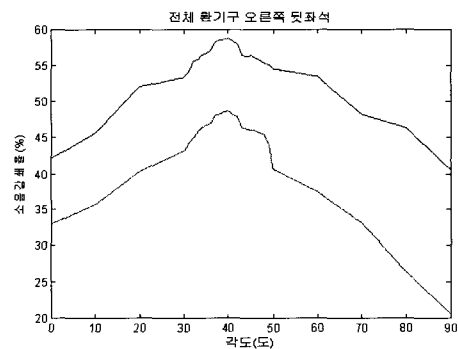


그림 12. 오른쪽 뒷좌석의 소음 감쇄율 파형.
Fig. 12. Noise reduction ratio waveform in a right-rear seat.

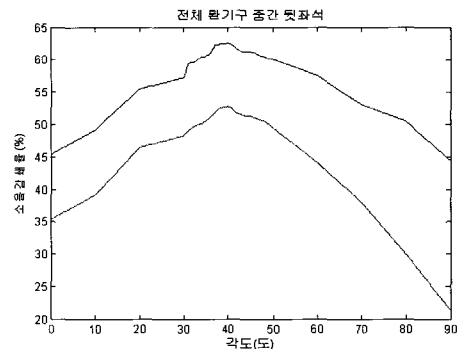


그림 13. 중간 뒷좌석의 소음 감쇄율 파형.
Fig. 13. Noise reduction ratio waveform in a central-rear seat.

다음의 그래프는 세 개의 소음원을 모두 인가했을 때 주파수 영역에서 분석해 본 결과이다. 청색파형(맨 위)은 원래 소음원의 파형이고 녹색파형(가운데)은 FXLMS 알고리즘에 의해 감쇄된 후의 파형이며 적색파형(맨 아래)은 웨이브렛 패킷 알고리즘에 의해 감쇄된 후의 파형이다.

결과 그래프에서 알 수 있는 것처럼 세 개의 소음원을 모두 인가했을 때, 그림 14부터 아래 그림으로 갈수록 소음 감쇄정도가 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 또한 소음 감쇄의 대칭민감성을 알 수 있게 해주는 모습이다. 그리고 역시 FXLMS 알고리즘에 비해서 웨이브렛 패킷 알고리즘의 감쇄율이 15~20%정도 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

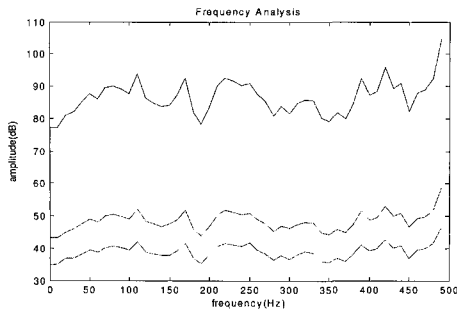


그림 14. 오른쪽 앞좌석 소음의 주파수 분석 파형.
 Fig. 14. Noise reduction frequency-analysis waveform in a right-front seat.

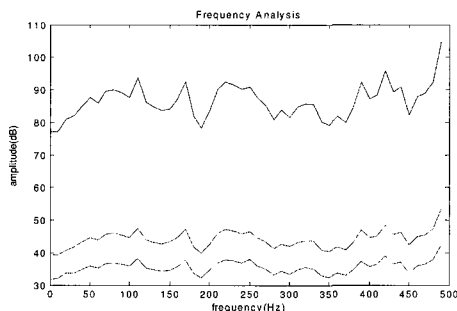


그림 15. 오른쪽 뒷좌석 소음의 주파수 분석 파형.
 Fig. 15. Noise reduction frequency-analysis waveform in a right-rear seat.

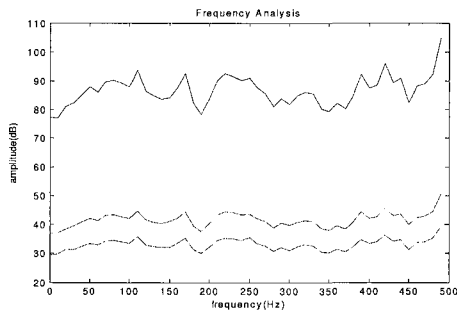


그림 16. 중간 뒷좌석 소음의 주파수 분석 파형.
 Fig. 16. Noise reduction frequency-analysis waveform in a central-rear seat.

V. 결론

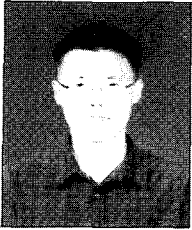
제안된 알고리즘에서의 웨이브렛 패킷은 병렬연산을 수행하기 때문에 연산속도가 아주 빠르며, 뛰어난 분해능으로 인해 신호의 빠른 변화에 대한 응답 능력이 탁월하다는 장점이 있어서 FXLMS 알고리즘의 단점을 극복할 수 있었다. 실험 결과에서 보여주듯이 웨이브렛 패킷 알고리즘을 이

용한 ANC 시스템이 FXLMS 알고리즘을 이용한 시스템보다 소음감쇄 부분에서 훨씬 많은 감쇄량을 보여주었고, 연산 시간 지연 부분에서도 FXLMS 알고리즘 보다 시간 지연이 덜하다는 것을 보여주었다. 시간 영역에서 보나 주파수 영역에서 보나 웨이브렛 패킷 알고리즘의 성능이 FXLMS 알고리즘의 성능을 압도하고 있음을 알 수 있다.

향후 소음원에서의 소음량을 좀 더 완벽하게 감쇄시키기 위해서는 본 연구가 제안한 방법에서, 좀더 좋은 성능의 스피커와 마이크로폰 센서의 확보 뿐 아니라 ANC 시스템에서 주변기기끼리의 여러 가지 반사파의 차단에 관한 더 세밀하고 심도 있는 연구가 계속되어야 할 것이다.

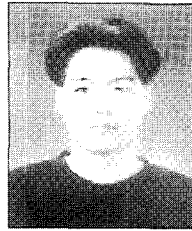
참고문헌

- [1] B. Widrow et al, "Adaptive noise cancelling,," *Proc. IEEE*, vol. 63. 1692-1716, Dec. 1975.
- [2] P. M. Joplin and P. A. Nelson, "Active control of Low-frequency Random Sound in Enclosures,," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, no. 6, June 1990.
- [3] S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Active noise control,," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 10, 1993, p. 12-35.
- [4] S. M. Kuo, *Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [5] I. Daubechies, Orthonormal bases of compactly supported wavelet, *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. XLI, pp. 909-996, 1988.
- [6] R. Coifman, Y. Meye and V. Wickerhauser, Wavelet Analysis and Signal Processing, in *Wavelets and Their Applications*, pp.153-178, Jones and Bartlett, Boston, 1992.
- [7] J. C. Goswami, A. K. Chan, *Fundamentals of Wavelets Theory, Algorithms and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [8] M. Tamamura, E. Shibata, "Application of active noise control for engine related cabin noise,," *JSAE Review 17*, pp. 37-43, July 1995.
- [9] B. Widrow and S. D. streams, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall Inc, 1985.
- [10] S. Hosur and A.H. Tewfik, "Wavelet transform domain LMS algorithm,," *IEEE Proc. ICASSP '93*, vol. 3, pp. 508-510, April 1993.
- [11] N. Erdöl and F. Basbu ğ, "Performance of wavelet transform based adaptive filtering,," *IEEE Proc. ICASSP '93*, vol. 3, pp. 500-503, April 1993.



장 재 동

2005년 고려대 제어계측공학과 졸업. 2005년~현재 고려대학교 메카트로닉스학과 석사과정. 관심분야는 능동 소음 제어.



김 영 중

1999년 고려대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 석사. 2006년 동 대학원 박사. 2006년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 연구원(Postdoctoral Fellow). 관심분야는 최적제어, 강인제어 및 이동 로봇의 영상제어.



임 모 택

1985년 고려대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 석사. 1990년 Rutgers University 석사. 1994년 Rutgers University 박사. 1996년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수. 관심분야는 강인제어, 다변수 시스템 이론, 컴퓨터

제어 시스템 설계.