

자동차의 엔진소음 감쇠를 위한 효율적인 적응제어기에 대한 연구

권오상*

Study on Efficient Adaptive Controller for Attenuation of Engine Noises in a Car

Oh-Sang Kwon*

요약

본 논문에서는 자동차의 무게 감소, 탑승자의 안락함과 정숙함, 그리고 연비의 향상 등을 위해 소음을 저감하는데 있어 흡음재와 차음재를 사용하는 기존의 수동적인 방법을 사용하지 않고 능동적으로 감소시키는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기존의 능동소음 제어기를 향상시킨 것으로서 양방향 제어 알고리즘을 사용하는 새로운 제어기이다. 제안한 알고리즘은 계산량의 증가가 거의 없고, 구현이 간단하고 안정적이며, 수학적으로도 해석이 용이한 장점이 있다.

자동차 엔진소음에 대한 모의실험을 통해 양방향 제어기의 소음감쇠 성능을 순방향제어기와 역방향제어기의 성능에 대해 비교한 결과 시간영역과 주파수영역에서 양방향제어기의 소음감쇠 성능이 우수함을 확인하였으며, 임펄스성의 간섭이 유입되거나 2차 경로의 응답이 변화하는 경우에도 가장 좋은 성능을 보여주었다.

ABSTRACT

In this paper, a new active noise control method was proposed to decrease a weight of car, and to increase a fuel efficiency and to provide passengers' comfort and calmness, instead of a passive noise control method such as sound absorbing and insulating materials. The proposed method is an enhanced active noise controller operating by a bidirectional control algorithm. The algorithm is simple to implement and available to analyze mathematically with nearly equivalent complexity of computation. Through simulations for engine noises of a car, the proposed controller was verified that its performances of time and frequency domain were superior to those of both feedforward and feedback controllers, and it had better capability of controlling the noises when the impulsive disturbance was flow in and the response of secondary path was varied.

키워드

Active Noise Controller, Bidirectional Algorithm, Performance, Complexity of Computation
능동소음제어기, 양방향 알고리즘, 성능, 계산량

1. 서론

현재 전 세계적으로 자동차에 대한 수요가 급증하고 있으며, 자동차는 단순한 교통수단의 기능을 넘어 탑승

했을 때의 정숙성 및 편안한 승차감을 요구받고 있다. 또한, 경제적인 측면에서 자동차의 무게를 경량화 하는 연구가 많이 이루어졌다. 최근 10년 동안 아이들링 시 자동차 소음은 5~6 [dB], 가속 소음은 5~10 [dB]의

* 교신저자(corresponding author) : 고려사이버대학교 전기전자공학과(narcis@cuk.edu)
접수일자 : 2014. 07. 04

심사(수정)일자 : 2014. 08. 21

게재확정일자 : 2014. 09. 19

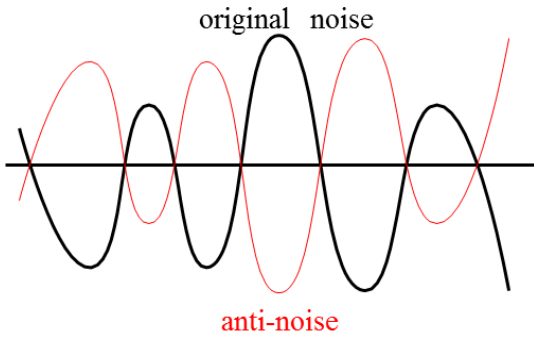


그림 1. 능동소음제어의 원리
Fig. 1 Principle of active noise control

저감이 이루어졌는데, 이는 저소음/저진동 파워트레인의 개발과 새시 부품의 최적화 및 고강성 차체, 그리고 흡음재와 차음재의 최적화를 통해 구현된 것이다 [1]. 또한, 최근 고유가 및 친환경 정책으로 인해 차량 개발에 있어서 연비 향상 문제가 크게 대두되고 있다. 이는 주로 자동차의 무게 및 소음 진동과 관련 있는 문제로서 무게를 경량화 시키거나 흡음재나 차음재의 최적화를 통해 연비를 향상시키는 노력이 대부분이다. 그러나, 이러한 흡음재나 차음재는 상당한 무게를 가중시키므로 자동차의 무게를 감소시키는데 한계가 있으며, 연비를 향상시키는 효과도 그리 크지 않다.

따라서, 이러한 흡음재나 차음재를 사용하는 수동적인 방법보다는 소음을 능동적으로 감소시키는 방법이 효과적이며, 경제적인 측면에서도 이득이다. 능동소음제어는 그림 1과 같이 제어가 가능한 부음원(secondary source)을 사용하여 소음에 대해 동일 크기와 반대 위상의 인공 음을 발생하여 원래의 주소음원(primary noise source)에 의해 발생된 소음 영역을 인공 음과 중첩시킴으로써 정음 하는 원리이다. 정음하는 효과는 주소음원과 부음원의 기하학적인 배치와 특성 및 환경, 그리고 주소음원에 의해 생성되는 영역의 주파수 스펙트럼 등에 의해 좌우된다. 이때, 주소음원에서 제어할 영역까지의 음향학적인 경로가 시간에 따라 변화하므로 제어하는 시스템은 이러한 변화에 적응할 수 있어야 한다.

자동차에 대한 능동소음제어 기술의 적용은 1990년대 닛산 블루버드 모델부터 양산화가 시작되었다.

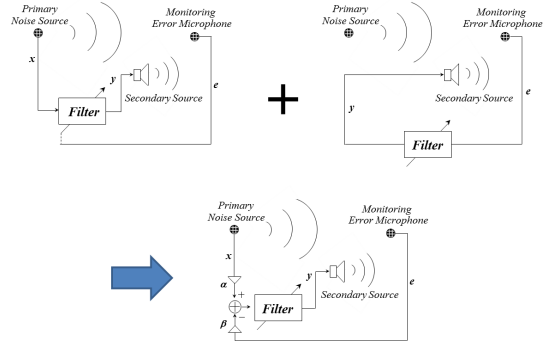


그림 2. 양방향 Filtered-x LMS 알고리즘의 원리
Fig. 2 Principle of bidirectional filtered-x LMS algorithm

2000년대 이후로 혼다, 도요타, 닛산, GM사 등 여러 회사에서 양산 적용중이다. 자동차의 여러 소음 중 주로 300Hz 이하의 엔진 부밍 대역의 소음 저감을 목표로 하며, 이는 연비를 향상시키는 효과를 낸다. BMW사에서는 능동제어기술을 활용하여 역동적인 가속음을 구현하였다고 발표하였는데, 가솔린 엔진에 비교하여 부족한 디젤 엔진의 주행음을 크게 증폭시키는 역할도 한다.

능동 소음 제어 기술을 자동차의 소음을 저감시키는데 적용하기 위해서는 적응 제어기의 성능이 중요하며 이러한 적응 제어기를 구동하는 적응 제어 알고리즘을 사용하는 것이 일반적이다. 가장 대표적인 알고리즘으로는 최소 평균 제곱 알고리즘(Least Mean Square, LMS)을 들 수 있는데, 구현이 간단하고 안정적이며, 수학적으로도 해석이 용이하다. 하지만 적응 제어기 뒷단에 존재하는 2차 경로 또는 오차 경로 때문에 그 성능이 떨어지게 된다. 즉, 전반적으로 수렴속도를 감소시키며, 잔여 에너지가 증가하여 제어기가 불안정하게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 많이 사용된 알고리즘이 LMS 알고리즘을 발전시킨 Filtered-x LMS 알고리즘이다[2]. 그러나 이 알고리즘도 수렴속도가 느리고, 특히, 2차 경로의 변화에 대처하는 능력이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 많은 논문이 발표되었는데, 이들 논문에서 제시한 방법은 계산 양이 많고, 음성신호에 대해 제한적으로 사용되었으며, 신호에 대해서 미리 측정해야 하는 등의 단점을 가지고 있어 소음제어 분야에서

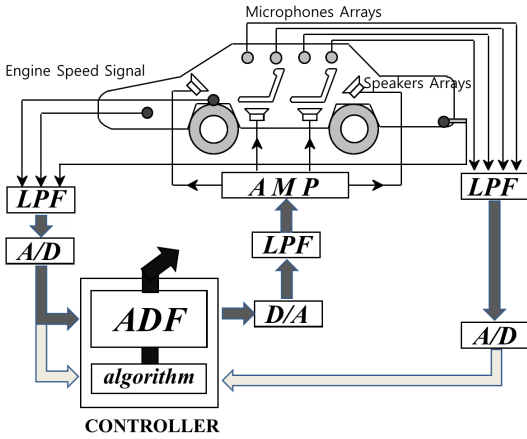


그림 3. 자동차 소음을 저감시키는 능동소음제어기의 전체적인 구조
 Fig. 3 Overall structure of active noise controller attenuating noises in a car

효율적으로 사용되지 못하였다[3-8].

따라서, 본 논문에서는 계산 양의 증가가 거의 없고, 신호에 대해 미리 추정해야 하는 등의 단점을 없앤 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 그림 2와 같이 역방향 (feed-back) 제어 알고리즘의 참조신호와 결합한 이른바 “양방향 (Bi-directional)” 형식의 알고리즘으로 구성된다. 역방향 제어 알고리즘은 순방향 제어 알고리즘의 단점인 느린 수렴속도를 향상시키거나 상관도가 있는 참조신호를 얻을 수 없을 때 사용한다. 하지만 역방향 제어 알고리즘은 주어진 대역폭에서 제한적인 이득을 얻을 수 있는 이득-대역폭 제한의 단점과 제어가 불안정하다는 단점이 있다. 이 문제는 전체적인 구조를 순방향 제어 알고리즘의 형식을 따르게 하여 안정적인 알고리즘으로 해결할 수 있다. 또한, 계산 량 측면에서 기존의 알고리즘에 비해 덧셈과 곱셈이 한번 필요할 뿐 많은 계산 량의 증가가 없다는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 양방향 제어 알고리즘에 대하여 논하고, III장에서는 제안한 양방향 제어 알고리즘의 성능을 모의실험을 통해 증명하였으며, IV장에서 결론을 맺었다.

II. 양방향 적응 제어기

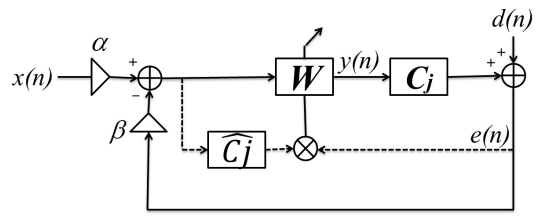


그림 4. 양방향 Filtered-x LMS 알고리즘의 구조
 Fig. 4 Structure of bidirectional filtered-x LMS algorithm

자동차의 엔진소음을 저감시키는데 사용하는 적응 제어기의 전체적인 구조는 그림 3과 같다. 자동차에는 소음을 유발하는 많은 요인이 있는데, 엔진에서 유발되는 엔진소음, 차량 배기구를 통해 유발되는 배기계소음, 타이어 소음, 도로 소음 등이 있다. 이들 소음은 그 원인과 특성이 서로 상이하며, 특히, 차량의 실내에 존재하는 소음은 차량의 종류, 주행상태, 도로조건 등에 따라 매우 복잡한 특성을 나타낸다. 소음을 수동적으로 저감시키는 흡음재나 차음재마저도 소음의 특성에 영향을 준다. 따라서, 모든 소음들을 함께 해석하고 분석하기에는 아직 기술이 미흡하므로 본 논문에서는 엔진소음에 집중하여 소음을 저감시키는 제어기를 제안하였다. 제어기는 제안한 양방향 Filtered-x LMS 알고리즘을 사용하며 그 구조는 그림 4와 같다.

그림 4에서 제어가 FIR 필터로 구성되고, n 번째 표본에서 i 번째 계수가 $w_i(n)$ 이라고 한다면 제어기의 출력은 다음과 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$y(n) = \sum_{i=0}^{I-1} w_i(n) [\alpha x(n-i) - \beta e(n-i)] \quad (1)$$

여기서 I 는 적응 FIR 필터의 계수 개수이며, α 와 β 는 각각 원래의 참조신호와 오차신호의 가중 계수이다.

오차 센서의 출력 $e(n)$ 은 주신호 $d(n)$ 과 부음원 출력의 합과 같다. 여기서 부음원 입력부터 오차 센서 출력까지의 전달함수를 J 차수의 FIR 필터로 모델링한다면, j 번째 계수는 C_j 이며, 오차신호는 다음의 식 (2)에서 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

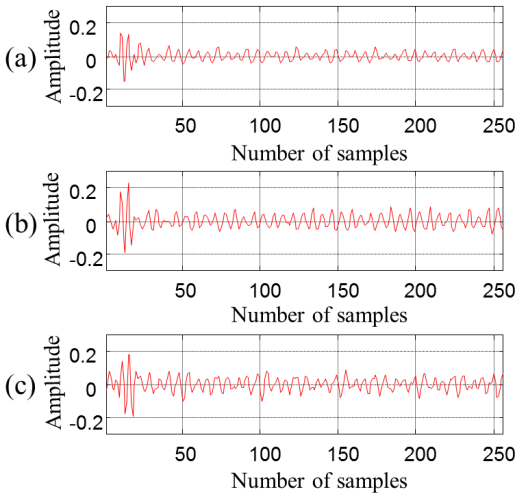


그림 5. 주경로의 응답(a)과 2차경로의 응답(b),(c)
 Fig. 5 Response of primary path(a) and responses of secondary path(b),(c)

$$e(n) = d(n) + \sum_{j=0}^{J-1} C_j y(n-j) \quad (2)$$

$$= d(n) + \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} C_j w_i(n-j)$$

$$\cdot [\alpha x(n-i-j) - \beta e(n-i-j)] \quad (3)$$

$$= d(n) + \sum_{i=0}^{I-1} w_i \sum_{j=0}^{J-1} C_j$$

$$\cdot [\alpha x(n-i-j) - \beta e(n-i-j)] \quad (4)$$

$$= d(n) + \sum_{i=0}^{I-1} w_i \sum_{j=0}^{J-1} C_j \cdot x_w(n) \quad (5)$$

전체 오차는 다음의 식 (6)과 같이 정의한다.

$$J = E[e^2(n)] \cong e^2(n) \quad (6)$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 평균값이다. 가중된 참조신호 $x_w(n)$ 가 적어도 주신호 $d(n)$ 과 상관성이 있다면 J 의 값을 감소시키는 것이 가능하다. 전체 오차는 필터 계수에 대해 2차 함수 (quadratic function)이고, J 를 최소화시키는 데 필요한 최적의 계수 값은 반복

적으로 기울기 하강 방법 (gradient descent method)에 의해 계산될 수 있다.

기울기 벡터 (gradient vector)는 다음의 식 (7)에서 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\nabla_i(n) = \frac{\partial J}{\partial w_i} = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w_i} \quad (7)$$

여기서

$$\frac{\partial e(n)}{\partial w_i} = r_w(n-i) \quad (8)$$

$$= \sum_{j=0}^{J-1} C_j [\alpha x(n-i-j) - e(n-i-j)] \quad (9)$$

$r_w(n-i)$ 는 “가중된 필터링 참조 신호 (weighted filtered reference signal)”라 불리며, 가중된 참조 신호와 가중된 오차 신호가 i 표본만큼 지연되어 부음원에 인가되었을 때 센서에서 측정되는 신호를 의미한다. 필터 계수가 매 표본마다 기울기의 순간적인 음수 값에 비례하여 변화 또는 적응된다면 다음과 같이 필터 계수 값을 계산할 수 있는 식을 얻을 수 있다.

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu(-\nabla_i(n)) \quad (10)$$

$$= w_i(n) - 2\mu e(n) r_w(n-i) \quad (11)$$

$$= w_i(n) - \alpha' e(n) s(n-i) + \beta' e(n) t(n-i) \quad (12)$$

여기서 μ 는 적응 속도와 안정성을 결정하는 파라미터이며, $\alpha' = 2\mu\alpha$ 와 $\beta' = 2\mu\beta$ 는 각각 원래의 참조 신호와 오차신호의 가중치를 결정하는 파라미터이다. 또한, $s(n-i)$ 와 $t(n-i)$ 는 각각 순방향 속성의 필터링된 신호와 역방향 속성의 필터링된 신호를 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$s(n-i) = \sum_{j=0}^{J-1} C_j x(n-i-j) \quad (13)$$

$$t(n-i) = \sum_{j=0}^{J-1} C_j e(n-i-j) \quad (14)$$

원래의 참조신호에 대해 가중치 파라미터를 0으로 주면 (6)식은 Filtered-error LMS 알고리즘과 동일하며, 오차신호에 대해 가중치 파라미터를 0으로 주면 (6)식은 Filtered-x LMS 알고리즘과 동일하다[2]. 제안한 하나의 알고리즘을 가중치 파라미터에 따라 두 가지 알고리즘의 특성을 살리도록 조절할 수 있다.

III. 모의 실험

3.1 모의실험 환경

자동차의 엔진소음을 저감시키는 모의실험을 위해 그림 3과 같은 환경을 구축하였다. 자동차 실내의 엔진소음을 제거하기 위한 정음화 영역으로 운전자 좌석을 선택해 오차센서를 위치시켰으며, 참조신호를 전자제어장치(ECU)에서 픽업할 수 있도록 구성하였다. 즉, 엔진점화 신호를 적응 제어기의 입력으로 사용할 수 있도록 하였으며, 자동차 실내의 오차 센서의 출력 신호를 주신호로 사용하였다. 참조신호와 주신호는 모두 300 [Hz]의 차단주파수를 가진 저역통과필터를 통과시켰으며, 1000 [Hz]의 샘플링주파수로 4초정도의

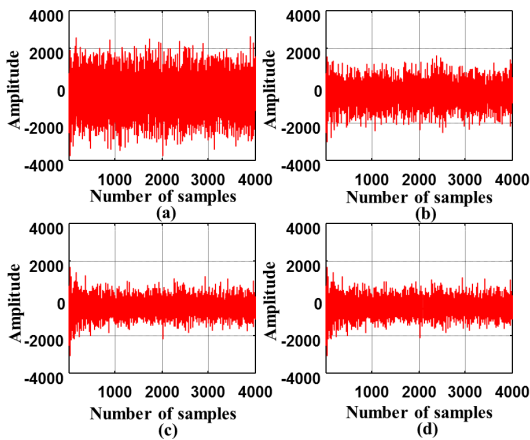


그림 6. 시간 영역에서의 엔진소음 감쇠성능 비교
 (a) 소음제어 전의 주신호 (b) 순방향 제어기의 성능
 (c) 역방향 제어기의 성능 (d) 양방향 제어기의 성능
 Fig. 6 Comparison of engine noises in time domain
 (a) Primary signal before control
 (b) Performance of feedforward controller
 (c) Performance of feedback controller
 (d) Performance of bidirectional controller

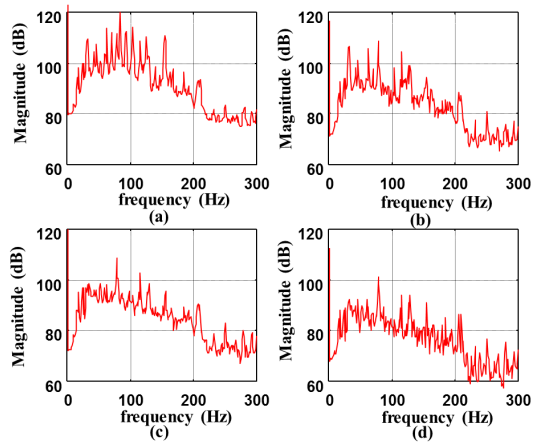


그림 7. 주파수 영역에서의 엔진소음 감쇠성능 비교
 (a) 소음제어 전의 주신호 (b) 순방향 제어기의 성능
 (c) 역방향 제어기의 성능 (d) 양방향 제어기의 성능
 Fig. 7 Comparison of engine noises in frequency domain
 (a) Primary signal before control
 (b) Performance of feedforward controller
 (c) Performance of feedback controller
 (d) Performance of bidirectional controller

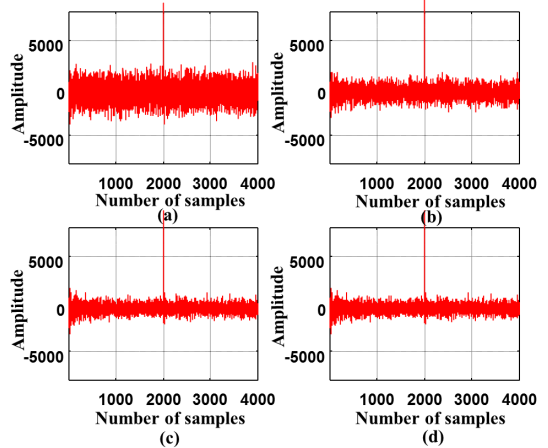


그림 8. 시간 영역에서의 엔진소음 감쇠성능 비교
 (a) 소음제어 전의 주신호 (b) 순방향 제어기의 성능
 (c) 역방향 제어기의 성능 (d) 양방향 제어기의 성능
 Fig. 8 Comparison of engine noises in time domain
 (a) Primary signal before control
 (b) Performance of feedforward controller
 (c) Performance of feedback controller
 (d) Performance of bidirectional controller

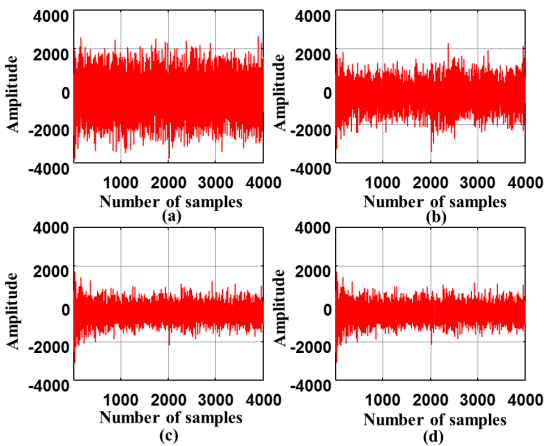


그림 9. 시간영역에서의 엔진소음 감쇠성능 비교
 (a) 소음제어전의 주신호 (b) 순방향 제어기의 성능
 (c) 역방향 제어기의 성능 (d) 양방향 제어기의 성능
 Fig. 9 Comparison of engine noises in time domain
 (a) Primary signal before control
 (b) Performance of feedforward controller
 (c) Performance of feedback controller
 (d) Performance of bidirectional controller

샘플을 표시하였다. 또한, 부음원에서 오차 센서까지의 응답을 측정하기 위해 상관도를 이용한 Hadamada 변환 방법을 사용하였다[9]. 이 변환 방법을 이용하여 추정된 자동차 실내에서의 2차 경로 응답은 그림 5와 같다. 제어기로서는 FIR 필터를 사용하였으며, 사용한 필터 계수의 개수는 64개이며, 2차 경로의 계수 개수도 64개이다. 또한, 수렴계수와 필터계수의 개수 등 순방향 제어 알고리즘과 역방향 제어 알고리즘, 그리고 제안한 양방향 제어 알고리즘을 동일한 환경 하에서 서로 비교하였다.

3.2 엔진소음의 감쇠성능 비교

다양한 자동차 엔진소음에 대해 실험하기 위해 엔진 회전수(Rotations per Minutes, RPM)를 변화시켰는데, 엔진소음은 RPM의 변화에 많은 영향을 받는다. 본 실험에서는 3000 [RPM]에서 5000 [RPM]까지의 변화를 주어 소음제어 실험을 수행하였다. 그림 6은 자동차 엔진소음의 감쇠성능을 시간영역에서 나타낸 것으로서 순방향 제어 알고리즘과 역방향 제어 알고리즘, 그리고 제안한 양방향 제어 알고리즘을 동일한 환경 하에서 서로 비교한 결과이다. 양방향 제어기를

사용한 결과가 수렴속도도 가장 빠르고 감쇠성능이 우수함을 알 수 있다. 그림 7은 자동차 엔진소음의 감쇠성능을 주파수영역에서 전력밀도스펙트럼(Power Density Spectrum, PDS)으로 나타낸 것으로서 역시 양방향 제어기를 사용한 결과가 감쇠성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 양방향 제어기의 성능이 순방향 제어기보다 특정 주파수에서 약 40 [dB], 그리고 전체적으로 약 20 [dB] 정도의 향상된 감쇠성능을 보여주었다. 그림 8은 소음제어기가 동작하는 도중에 임펄스성의 외부 간섭이 유입된 경우 수렴성능이 어떤 변화를 보이는지를 실험한 결과이다. 역시 양방향 제어기를 사용한 결과가 순방향 제어기보다 수렴속도도 빠르고 감쇠성능이 우수함을 알 수 있다. 그림 9는 소음제어기가 동작하는 도중에 2차 경로가 변화하는 경우에 성능의 변화를 실험한 결과이다. 2000번째 표본에서 그림 5의 (b)의 응답을 (c)의 응답으로 교체하였다. 그림에서 알 수 있듯이 순방향제어기는 2차 경로의 변화에 민감하여 수렴특성이 악화되는 반면에 양방향제어기는 그러한 변화에 영향을 덜 받으며 수렴함을 알 수 있다. 또한, 전체적으로 역방향제어기는 순방향제어기보다 좋은 성능을 보여주지만, 제어기가 불안정하여 오차신호가 발산하는 경우가 종종 발생하였다. 따라서, 양방향제어기가 순방향제어기와 역방향제어기보다 안정성을 유지하면서 좋은 성능을 내는 제어기임을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 자동차의 안락함과 연비의 향상 등을 위해 소음을 저감하는데 있어 흡음재와 차음재를 사용하지 않고 능동적으로 감소시키는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 제거하려는 소음(noise)에 대해 인공적으로 부음원에 의한 반소음(anti-noise)을 발생시켜 중첩시킴으로써 소음을 제거하는 기술이다. 반소음을 발생시키기 위해 새롭게 제안한 양방향 제어 알고리즘을 사용하였으며, 이는 기존의 능동소음제어 알고리즘을 향상시킨 것이다. 제안한 양방향 제어 알고리즘은 계산 양의 증가가 거의 없고, 구현이 간단하고 안정적이며, 수학적으로도 해석이 용이하다.

모의실험을 통해 자동차 엔진소음에 대한 양방향

제어기의 소음감쇠 성능을 순방향제어기와 역방향제어기의 성능과 비교하였다. 시간영역과 주파수영역에서 양방향제어기의 소음감쇠 성능이 가장 우수함을 확인하였으며, 임펄스성의 간섭이 유입되거나 2차 경로의 응답이 변화하는 경우에도 가장 좋은 성능을 보여주었다.

끝으로 제안한 양방향 알고리즘은 여러 적응제어 분야나 소음제어 분야에 널리 쓰일 수 있으며, 그 가능성이 많다 할 수 있다.

차후 양방향 제어기나 양방향 알고리즘에 대한 정밀한 수학적 해석을 통해 수렴 및 과도 특성, 그리고 여러 가지 특성을 연구할 계획이다.

References

- [1] D. Park, "Future Trend and Suggestion for Vehicle Noise and Vibration Development," *Auto J.*, vol. 33, no. 4, Apr. 2011, pp. 18-23.
- [2] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice-Hall Inc., 1991.
- [3] C. Lee and D. Kim, "Adaptive Noise Reduction of Speech Using Wavelet Transform," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 4, no. 3, 2009, pp. 190-196.
- [4] J. Choi, "Noise Reduction Algorithm in Speech by Wiener Filter," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 9, 2013, pp. 1293-1298.
- [5] J. Choi, "Speech and Noise Recognition System by Neural Network," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 4, 2010, pp. 357-362.
- [6] V. J. Mathews and Z. Xie, "A Stochastic Gradient Adaptive Filter with Gradient Adaptive Step Size," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 41, no. 6, 1993, pp. 2075-2087.
- [7] D. R. Morgan and S. G. Kratzer, "On a Class of Computationally Efficient, Rapidly Converging, Generalized NLMS Algorithms," *IEEE*

Signal Processing Letters, vol. 3, no. 8, 1996, pp. 245-247.

- [8] S. L. Gay and S. Tavathia, "The Fast Affine Projection Algorithm," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1995, pp. 3023-3026.
- [9] D. D. Rife, "Modulation Transfer Function Measurement with Maximum Length Sequences," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 40, no. 10, 1992, pp. 779-789.

저자 소개



권오상(Oh-Sang Kwon)

1992년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1994년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1999년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1999년~2003년 삼성전자 책임연구원

2005년~현재 고려사이버대학교 전기전자공학과 교수

※ 관심분야 : 통신, 멀티미디어, 신호처리