

전동식 동흡진기와 Filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 차량의 능동진동제어 실험

Active Vibration Control of Vehicle by Active Linear Actuator and Filtered-x LMS Algorithm

이한동*·곽문규†·김정훈**·송윤철***·박운환***

Han-Dong Lee, Moon K. Kwak, Jeong-Hoon Kim, Yoon-Chul Song and Woon-Han Park

Key Words : Active Linear Actuator(능동선형구동기), Active Vibration Control(능동진동제어), Vehicle Vibration(차량진동), Filtered-x LMS

ABSTRACT

This paper deals with the Filtered-x Least Mean Square algorithm for a active vibration control in vehicle vibration reduction. Before applying the proposed FxLMS algorithm to automobile, the performance of the FxLMS algorithm is simulated using sensor data of a vehicle. The FxLMS algorithm requires that reference signal be a representation of disturbance signal and the plant model be incorporated into the computation path. To this end, The system identification is carried out to obtain the plant model based on the measurement results. A tachometer signal is used as reference signal. The FxLMS control algorithm is first tested using simulation and applied to a vehicle. Experimental results show that the proposed control algorithm can reduce vibration level in a short period of time.

1. 서 론

자동차의 안락함 개선을 위해 새로운 진동 제어 방법을 요구하고 있다. 특히 기존의 엔진 마운트로서 더 이상의 효과를 기대하기 어렵게 됨에 따라 새로운 개념의 능동 엔진마운트가 도입되게 되었다. 기존의 엔진마운트 설계방식은 엔진의 진동을 자동차 메인 프레임으로부터 격리하는 방식으로 설계되었으며 이를 위해 고무 또는 하이드로 마운트가 사용되고 있다. 그러나 기존의 고무로 제작된 엔진마운트가 고주파수 대역에서 효과적이기 때문에 엔진에 의하여 발생된 낮은 주파수 대역의 진동을 억제하는 데는 한계가 있다.¹⁾ 이를 해결하기 위해 새로운 능동형 엔진마운트에 대한 연구^{1)~4)}가 진행되고 있다. Konrad Kowalczyk³⁾는 자동차 프레임에 Voice-coil 형태의 액츄에이터를 부착하고 Adaptive Controller 를 이용하여 엔진에서 전달되는 신호의 180 도 위상으로 제어력을 가해지도록 만들어 능동진동제어를 수행하였다. 본 연구에서는 Active Linear Actuator(ALA)¹⁰⁾로 불리는 전동식 액츄에이터를 이용하여 능동진동제어

를 수행하고자 한다.

능동진동제어 이론은 크게 피이드백 제어와 피이드포워드 제어로 나뉜다. 피이드백 제어 이론으로는 Proportional-integral-derivative(PID), lead-lag compensation, Linear Quadratic Gaussian(LQG), H₂, H_∞ 등을 예로 들 수 있다. 이들 이론을 사용하는 경우 구조물의 감쇠가 증가하는 효과를 가져오게 된다. 따라서 공진시의 진폭을 감소할 수 있는 효과가 있다. 피이드포워드 제어는 제어 대상 외부 교란에 대한 정확한 정보를 담고 있는 참조신호를 필요로 한다. 따라서 주 진동원인을 알 수 없거나 많은 수의 참조신호를 사용해야 할 경우에는 피이드포워드 제어보다는 피이드백 제어시스템이 효과적이다. 그러나 엔진에서 발생하여 프레임에 전달되는 외부 기진력은 엔진 회전 신호, 즉 타코미터 신호와 관련이 있다. 이 신호를 참조신호로 사용할 수 있기 때문에 피이드포워드 제어알고리즘 중 가장 널리 알려진 Filtered-X LMS 알고리즘을 사용하여 차량의 능동진동제어 실험을 수행하고 그 타당성을 분석하였다.

2. Filtered-x LMS 이론적 배경

Least Mean Square 알고리즘은 선형 최적 디지털 필터로 알려진 Wiener 필터를 기반으로 하고 있다¹¹⁾. Wiener 필터는 주어진 비용함수를 최소화하여 얻어진다. 필터 디자인 최적화로 주로 사용되는 방법은 mean-square error(MSE)가 있다. 그림 1은 최적필터문

† 교신저자; 동국대 기계로봇에너지공학과
E-mail : kwakm@dongguk.edu
Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9379
* 동국대학교 기계로봇에너지공학과
** 현대기아자동차 연구개발총괄본부
*** (주) 파브코

제의 대표적인 블록 다이어그램이다.

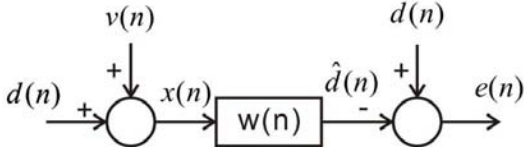


Fig. 1 Block Diagram in Optimum Filtering Problem

여기서 $d(n)$, $v(n)$, $\hat{d}(n)$, n 은 바라는 신호, 잡음 신호, 필터를 통과한 신호, 그리고 필터계수를 나타낸다. $w(n)$ 은 필터 계수이고 $x(n)$ 은 노이즈 성분이 포함된 신호이다. 이 신호가 필터에 입력이 되어 원 신호를 재구성하는 것이다. 또한 $e(n) = d(n) - \hat{d}(n)$ 은 두 신호간의 차이로서 오차를 나타낸다. 최적 필터링 문제의 기본적인 개념은 잡음 성분이 함유된 신호에서 원하는 신호, $d(n)$ 을 얻는 데에 있다. 따라서 오류신호, $e(n)$ 이 최소화 되어야 하며 비용함수(MSE 함수)는 다음 식과 같이 표현한다.

$$J = E\{(d(n) - \hat{d}(n))^2\} = E\{e^2(n)\} \quad (1)$$

$x(n)$ 과 $d(n)$ 의 신호 평균값이 0을 가지며 필터 계수 $w(n)$ 이 시간에 따라 변하지 않는다고 가정을 하면 필터 출력은 입력과 필터 계수의 Convolution이다. 따라서, 다음과 같은 $\hat{d}(n)$ 을 구할 수 있다.

$$\hat{d}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m x(n-m) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(n) \quad (2)$$

여기서 M 은 필터의 계수이다.

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{M-1}(n)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ \dots \ x(n-M+1)]^T \quad (4)$$

따라서 측정된 에러 값은

$$e(n) = d(n) - \mathbf{w}^T \mathbf{x}(n) \quad (5)$$

$e(n)$ 을 최소화 하기 위해 필터 계수를 계속적으로 업데이트하는 적응형 필터를 고려할 경우 Steepest-descent 방법을 이용한 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \nabla J(\mathbf{w}(n)) \quad (6)$$

$$\nabla J(\mathbf{w}(n)) = -2\mathbf{P}_{dx} + 2\mathbf{R}_x \mathbf{w}(n) \quad (7)$$

여기서 μ 는 수렴 상수, $\nabla J(\mathbf{w}(n))$ 는 필터계수에 대한 미분 함수를 나타낸다. \mathbf{P}_{dx} , \mathbf{R}_x 는 각각 Cross-correlation 그리고 Auto-Correlation 을 나타내며 다음과 같은 측정값으로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{R}_x \cong \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n), \mathbf{P}_{dx} \cong d(n)\mathbf{x}(n) \quad (8a,b)$$

식(8)을 식(7)에 대입하고 그 결과를 식(6)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e(n)\mathbf{x}(n) \quad (9)$$

식(9)는 적응형 LMS 알고리즘을 나타낸다.

Filtered-x LMS 알고리즘은 적응 역모델에서 발생하는 잡음을 효과적으로 제거하기 위해 제안된 알고리즘이다. 이 알고리즘의 구현은 다음 그림과 같다.

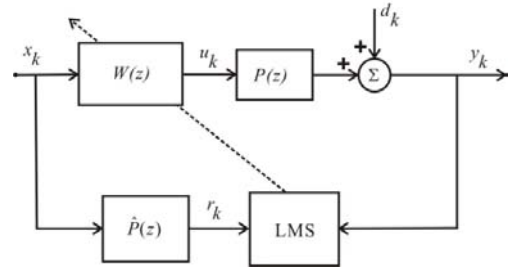


Fig. 2 Filtered-x Least Mean Square Algorithm.

위 그림에서 x_k 는 참조신호, u_k 는 필터 출력(제어입력), $\hat{P}(z)$ 은 2차 경로 전달함수를 나타낸다. 참조 신호, x_k 를 필터링함으로써 기존의 LMS 알고리즘에서 발생했던 수렴과 안정성 문제가 개선되었다. 기준신호가 플랜트 모델을 통과함으로써 오류 신호가 LMS 알고리즘에 유입되는 것을 방지하기 때문이다.

3. 전달함수 계측 및 System Identification

FxLMS 구현을 위해서 참조신호를 필터링할 2차 전달경로에 해당되는 전달함수, 즉 플랜트 모델이 필요하다. 이를 위해 그림 3과 같이 투산 차량의 프레임에 ALA를 부착하였다. 그리고 모터드라이버, ALA, 프레임 등 제어 입력과 가속도계 출력 사이에 존재하는 모든 시스템의 전달함수를 HP 35670A 장비를 이용하여 계측하였다. 이 데이터를 Matlab System Identification Toolbox를 이용하여 계측된 값에 가장 근접한 시스템의 모델을 예측하였다. 10Khz 샘플링 속도에 대한 이산 전달함수는 식(10)와 같다.



Fig. 3 Experimental Setup for FxLMS Algorithm

$$\hat{P}(z) = \frac{-0.5168z^{10} + 4.779z^9 - 19.64z^8 + 47.07z^7 - 72.5z^6 + 74.45z^5 - 50.97z^4 + 22.43z^3 - 5.761z^2 + 0.6576z}{-41.24z^5 + 0.859z^4 + 18.46z^3 - 13.98z^2 + 4.666z - 0.6222} \quad (10)$$

그림 4 는 계측된 전달함수와 예측된 전달함수를 보여주고 있다. 계측한 전달함수와 System ID 로 예측된 모델이 거의 유사한 것을 볼 수가 있다.

그리고 FxLMS 구현을 위해서 외란과 상관 관계를 가지는 참조신호가 필요하다. 참조신호는 1 차 전달 경로에서 프레임에 가해지는 외란에 직접적으로 관련된 신호가 되어야 한다. 가속 페달에서 엔진을 거쳐 프레임에 전달되는 외부교란신호는 1 차 전달 경로이다. 자동차 엔진 RPM 이 변함에 따라 프레임에 전달되는 가진력이 변하게 되어 프레임에 가해지는 가진력은 지속적이며 가변적인 외란으로 간주할 수 있다. 1 차 전달경로를 통하여 프레임에 전달되는 외란을 가늠할 수 있는 신호로는 엔진 점화플러그 작동을 전기적으로 콘트롤하는 ECU(Engine Control Unit)신호와 엔진 RPM 과 직접적인 연관이 있는 타코미터 신호를 고려할 수 있다. 본 논문은 타코미터 신호를 선택하여 실험하였다. 타코미터 신호를 측정하기 위해 크랭크 축에 레이저 센서를 부착하여 일회전 시 신호를 계측할 수 있도록 하였다. 타코미터 신호는 그림 5 와 같다. Idle 상태에서의 신호를 나타낸 것으로 엔진 RPM 에 해당되는 약 12Hz 주기를

가진다.

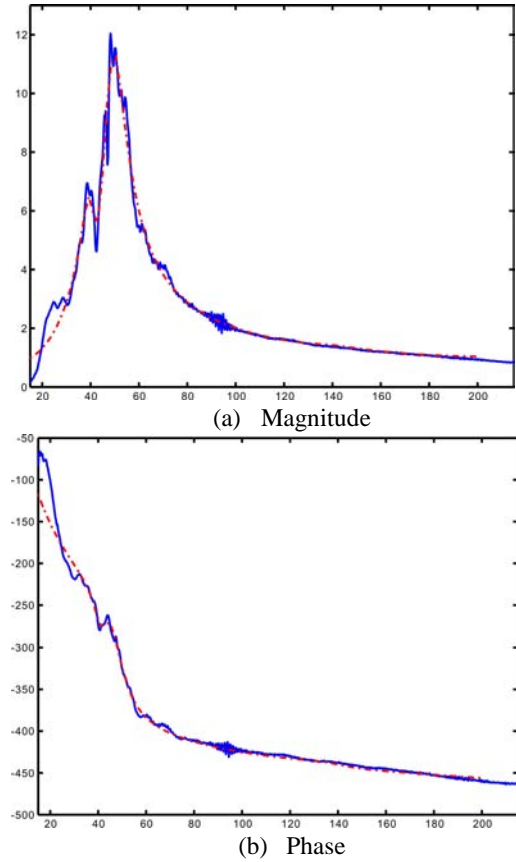


Fig. 4 Measured (solid) and Identified(dashed) Transfer Function for Tucson

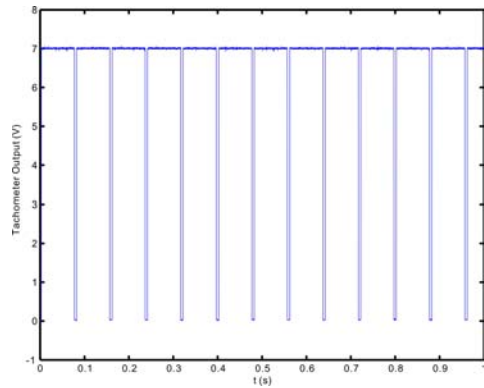


Fig. 5 Tachometer Signal at Idle

4. 수치 시뮬레이션

투산 차량을 대상으로 능동진동제어 실험 전에 FxLMS 알고리즘에 대하여 시뮬레이션을 해보았다. 이를 통해 능동제어실험 결과를 예측해 볼 수 있으며 실험 결과를 시뮬레이션결과와 비교하여 그 신빙성을 입증할 수 있다. 시뮬레이션을 하기 위해서 Matlab Simulink 를 이용하였으며 그림 6 은 작성된 알고리즘이다.

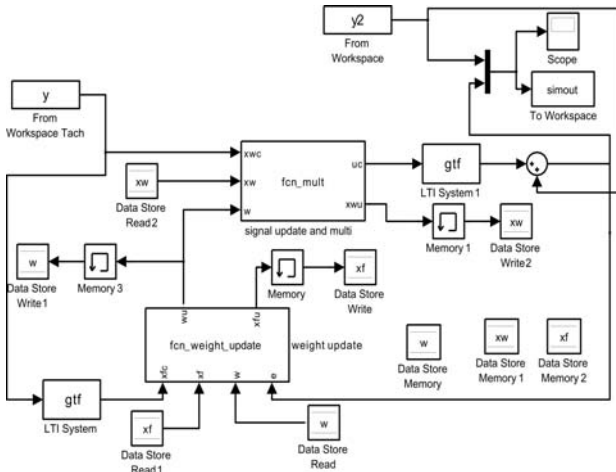
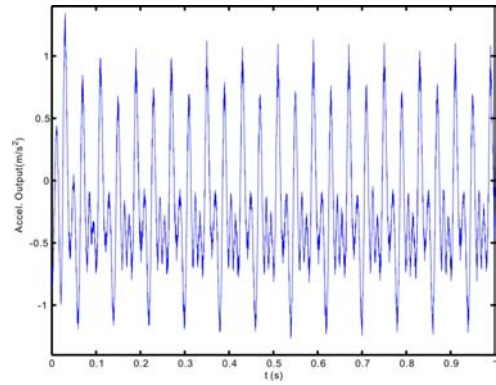


Fig. 6 Simulink Block Diagram of FxLMS for Simulation

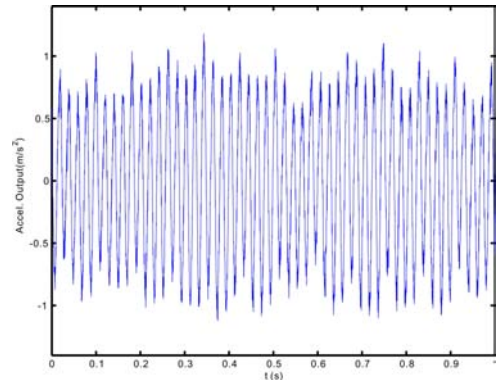
시뮬레이션을 수행하기 위해 앞에서 System ID를 통해 구한 전달함수를 플랜트 모델과 필터링 2 차 전달 경로함수로 사용하였다. 여기서 우측에 위치한 gtf 블록은 투산 능동마운트 시스템을 대변하는 플랜트 모델이고 좌측에 위치한 gtf 블록은 예측된 플랜트 모델이다. 좌측의 gtf 블록은 참조신호를 필터링하기 위한 것이다. y2 블록은 프레임에 부착된 가속도계의 신호를 계측한 데이터이며 y 블록은 가속도 신호와 동시에 계측된 타코미터 신호이다. fcn_weight_update 블록에서 참조신호와 에러신호를 이용하여 필터 계수의 파라미터 값을 구한다. 참조신호는 동시에 fcn_mult 블록에 입력되어 필터 계수와 컨볼루션(Convolution)을 통하여 제어입력이 된다.

Idle(720RPM), 1500RPM 그리고 2000RPM 에 해당되는 실제 가속도 계측 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7(a), 8(a), 9(a)는 각 RPM 상태의 프레임의 가속도계 신호이고 그림 7(b), 8(b), 9(b)는 시뮬레이션을 통해 제어상태의 프레임 가속도 값을 예측한 결과이다.

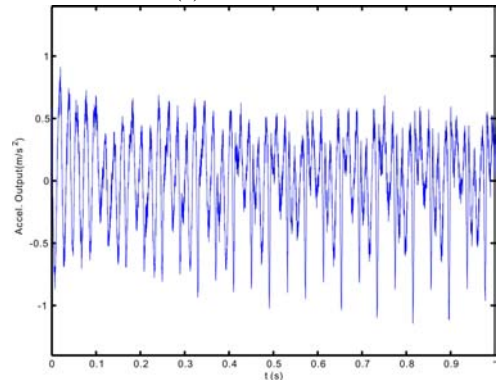


(b) Controlled

Fig. 7 Time Response at Idle(720RPM)

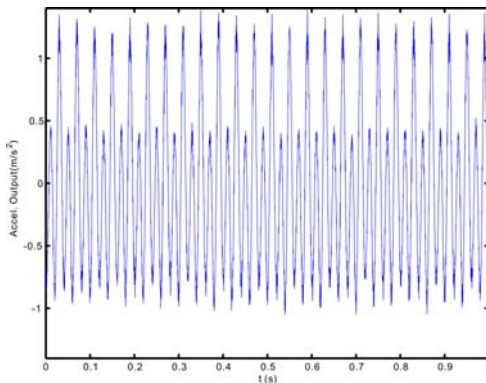


(a) Uncontrolled

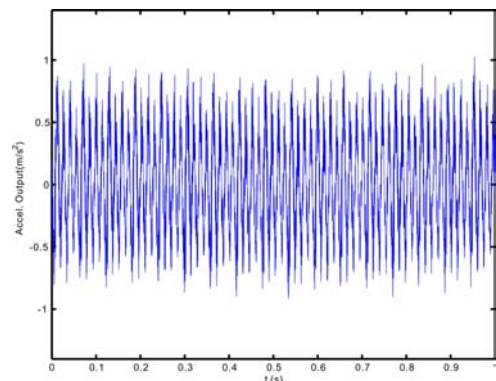


(b) Controlled

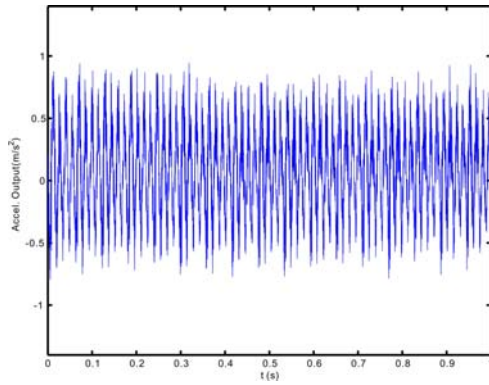
Fig. 8 Time Response at 1500RPM



(a) Uncontrolled

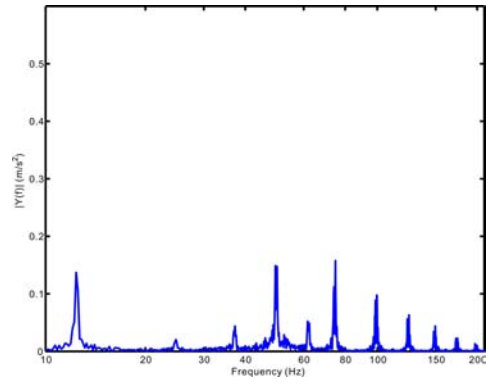


(a) Uncontrolled



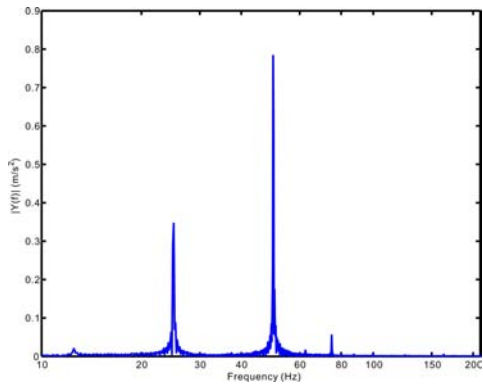
(b) Controlled

Fig. 9 Time Response at 2000RPM

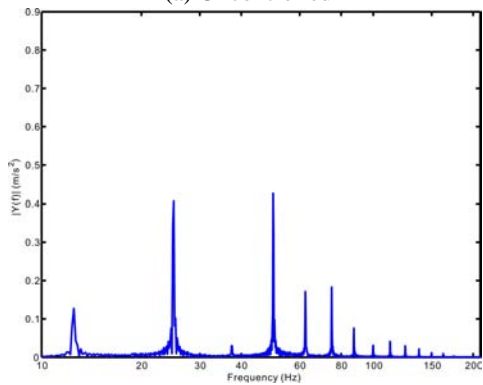


(b) Controlled

Fig. 11 Spectral Analysis at 1500RPM

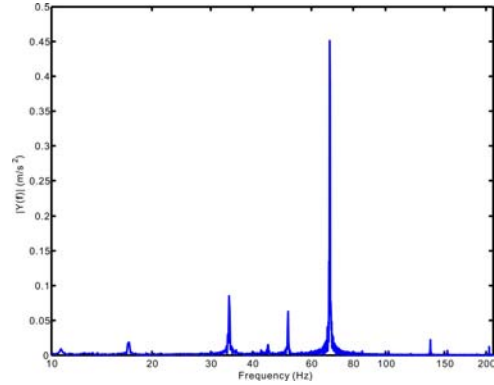


(a) Uncontrolled

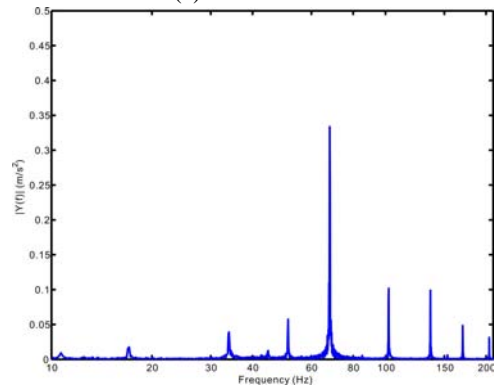


(b) Controlled

Fig. 10 Spectral Analysis at Idle(720RPM)

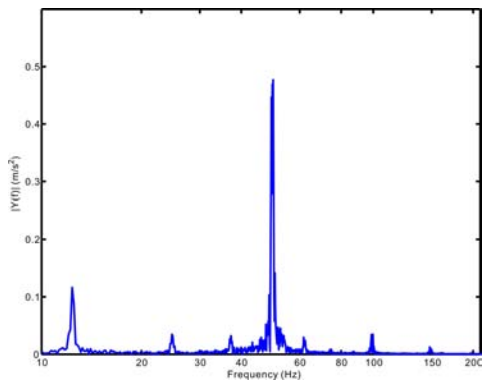


(a) Uncontrolled



(b) Controlled

Fig. 12 Spectral Analysis at 2000RPM



(a) Uncontrolled

그림 10(a), 11(a), 12(a)는 프레임에서 계측한 가속도계의 신호에 대한 주파수 분석결과를 보여주고 있다. 그리고 그림 10(b), 11(b), 12(b)는 시뮬레이션을 통해 제어상태의 프레임 가속도 값에 대한 주파수 분석결과이다. 주성분 주파수만을 볼 경우 Idle에서는 0.8m/s^2 에서 0.4m/s^2 로 절반 가까이 진동억제가 되었고 1500RPM에서는 0.45m/s^2 에서 0.15m/s^2 로 약 1/3 수준으로 진동억제가 되었으며 2000RPM에서는 0.45m/s^2 에서 0.35m/s^2 로 약 1/4 수준으로 진동억제가 되었다. 이 정도의 진동 억제를 실제 차량의 능동진동제어에서 기대할 수 있을 것으로 예상하고 실차 실험을 수행하였다.

5. 차량 능동진동제어 실험

앞서 시뮬레이션을 통하여 능동진동제어가 가능함을 이론적으로 알 수 있었지만 실제 타당성 검증을 위해 투산 차량을 대상으로 능동진동제어 실험을 수행하였다. Simulink 를 이용해 FxLMS 알고리즘을 다음과 같이 구현하였다.

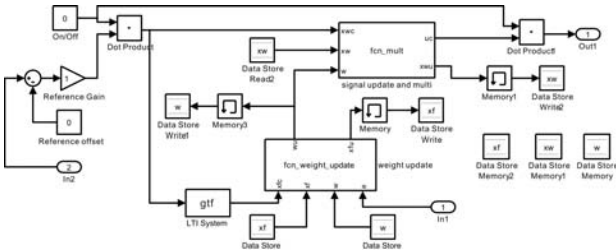


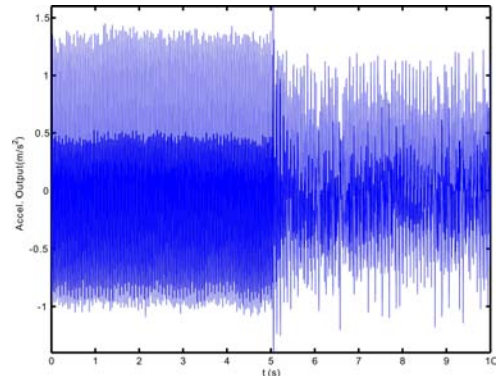
Fig. 13 Filtered-x LMS algorithm for Tucson

그림 13의 제어알고리즘은 Autobox 장비의 DSP 보드로 다운로드 되어 실시간 제어 알고리즘으로 구동하게 된다. 그림 6과 비교하면 차량의 플랜트 모델이 필요하지 않으며 그림 6의 y2 블록은 In1 블록으로 대체되어 프레임 가속도계 센서 신호를 A/D 입력 받는다. 그리고 그림 6의 y 블록은 In2 블록으로 대체되어 타코미터 신호를 입력 받는다. Out1 블록은 FxLMS 알고리즘의 제어입력이 된다.

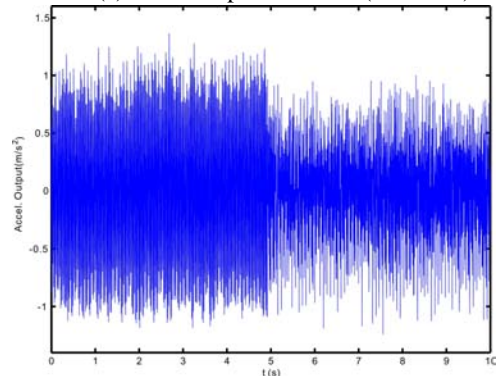
FxLMS 알고리즘에 있어 수렴계수 μ 의 값을 결정하는 것이 중요하다. 수렴계수의 결정을 위해 여러 차례의 실험을 통해 적합한 값을 선정하였다. 선정된 $\mu = 0.025$ 이다.

자동차엔진에 의해서 발생될 수 있는 주파수 중에서 목표 주파수는 30Hz 부터 300Hz 까지 이다. 실험 여건 상 Idle(720RPM)과 1500RPM 그리고 2000RPM에서 3번의 실험을 하였으며 약 5초 후 제어기를 작동하였다. 그림 14은 차례대로 Idle(720RPM), 1500RPM, 2000RPM에서의 능동진동제어 결과이다. 보이는 바와 같이 능동진동제어가 이루어짐을 확인할 수가 있다.

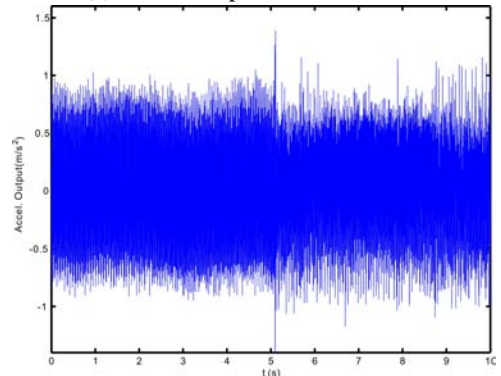
제어 후 각각의 RPM에 대한 프레임 가속도계 신호를 주파수 분석을 한 결과는 그림 15과 같다. 제어 전 주파수 성분과 그 크기는 그림 10(a), 11(a), 12(a)에서 이미 나타내었다.



(a) Time Response at Idle (720RPM)

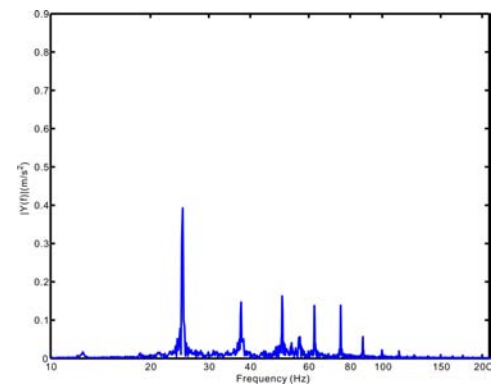


(a) Time Response at 1500RPM



(b) Time Response at 2000RPM

Fig. 14 Sensor Signal on the Frame



(a) Idle

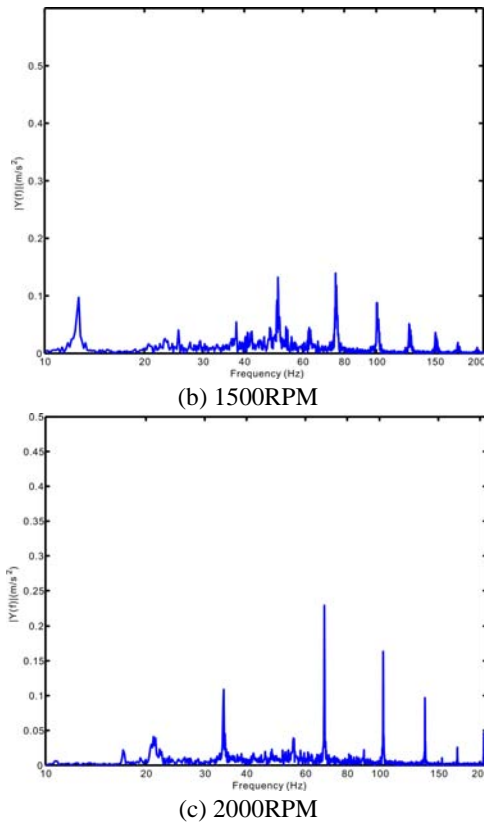


Fig. 15 Spectral Analysis of Controlled Signal

그림으로부터 전반적으로 각각의 주성분 주파수 성분내 대하여 진동억제가 가능함을 알 수 있다. Idle(720RPM)에서는 0.8m/s^2 에서 0.1m/s^2 로, 1500RPM 에서는 0.45m/s^2 에서 0.15m/s^2 로, 2000RPM 에서는 0.45m/s^2 에서 0.25m/s^2 로 진동억제가 되었다. 이를 시뮬레이션 결과와 비교해보면 주성분 주파수에 대해서 시뮬레이션의 결과보다 실제 차량 실험 결과가 좀 더 나은 것으로 관찰되었다. 전체적으로 시뮬레이션결과와 실제 차량 능동진동제어 실험 결과는 매우 흡사하다.

6. 결 론

본 연구에서는 능동엔진마운트 시스템 설계에 대한 선행 연구로써 투산 차량을 대상으로 FxLMS 제어 알고리즘의 효용성을 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다. 시뮬레이션을 통한 능동진동제어 예측결과와 실제 투산 차량에 적용한 능동진동제어 실험결과가 거의 동일 함을 알 수 있었다. 타코미터 신호를 참조신호로 이용, FxLMS 제어 알고리즘은 능동마운트를 이용한 차량의 능동진동제어에 효과적이라고 말할 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 차량의 진동 저감 효과를 미리 검증해 볼 수 있어 시뮬레이션 방법이 제어 알고리즘 개선에 효과적인 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 부품소재기술개발사업 “능동형 엔진 마운팅 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Persson, P., Johansson, S., Hakansson, L., Claesson, I. and Samuels, T., 2001, “ Feedback-LMS Control of Lateral Vibration in a Traincar ”, The 8th International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong.
- (2) Karimi, H. R. and Lohmann, B., 2007, “ Haar Wavelet Based Robust Optimal Control for Vibration Reduction of Vehicle Engine-Body System ”, Electrical Engineering, Vol. 89, pp. 469-478.
- (3) Kowalczyk, K., Karkosch, H. J., Marienfeld P. M., and Svaricek, F., 2006, “ Rapid Control Prototyping of Active Vibration Control System in Automotive Application ”, Proceedings of the IEEE, pp. 2677-2682.
- (4) Olsson, C., 2006, “ Active Automotive Engine Vibration Isolation using Feedback Control ”, Journal of Sound and Vibration, Vol.294, pp. 162-176.
- (5) Fowler, L. P., 1996, Application of Filtered-X LMS Algorithm for Disturbance Rejection in Time-periodic Systems, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (6) Olsson, C., 2006, “Active Automotive Engine Vibration Isolation Using Feedback Control”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 294, pp. 162-176.
- (7) Ang, K. H. and Chong, G., 2005, “PID Control System Analysis, Design and Technology”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 13, No 4.
- (8) Lee, K., Jung, S., and Kim, J., 2008, “Full Vehicle Modal Testing using Single-Run FRF Measurement and Mode Map Validation”, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 387-388.
- (9) Lee, H., and Lee, E., 2008, “An attenuation effect of noise according to the direction of secondary sound source in duct ANC system”, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp.497-502.
- (10) Lee, H., and Kwak, M., 2009, “Dynamic Characteristics of ALA and Active Vibration Control Experiment”, KSNVE, Vol. 19, No 8, pp. 781-787
- (11) Poularikas, A., and Ramadan, Z., 2006, Adaptive Filtering Primer with Matlab, Taylor & Francis, London