

능동 샤시 진동 제어가 실내 엔진 부밍 소음에 미치는 영향

The Effect of Active Chassis Vibration Control on the Engine Booming Noise

정병보*·박만복†·이용욱††·박영진**·이종원**·강구태††·채창국††

Byungbo Jung, Man-Bok Park, Yong-Wook Lee, Youngjin Park, Chong-Won Lee, Koo-Tae Kang, Chang-Kook Chae

Key Words : engine booming noise(엔진 부밍 소음), engine vibration(엔진 진동), hybrid control(혼합 제어)

ABSTRACT

차량 실내에서 발생하는 엔진 부밍 소음은 엔진의 진동이 샤시로 전달되어 구조 진동의 형태로 발생하는 구조 소음이다. 본 연구에서는 이러한 엔진 부밍 소음과 그 원인이 되는 엔진 진동 사이의 관계를 알아보고자 엔진 마운트 중 한 위치에서 차체로 전달되는 엔진 진동을 줄일 경우 실내 엔진 부밍 소음의 변화를 고찰하였다. 이를 위하여 제어용 구동기를 제작하고 feed-forward 와 feed-back 제어를 혼합한 hybrid 제어를 적용하여 실차 실험을 수행하였다.

The engine booming noise heard inside a vehicle's cabin is due to the engine vibration that's transferred to the chassis in the form of structural vibration and it often causes discomfort to the passenger. In an effort to seek out the possible relation between the engine booming noise and the engine vibration of a vehicle, a position on the engine mount was selected and the vibration transmission through the position was attenuated to observe the corresponding change in the noise level inside the cabin. A system consisting of an actuator and a hybrid controller that has both the feed-forward and feed-back capabilities was developed in order to carry out the experiment.

1. 서론

차량의 소유가 늘어나고 자동차 산업 기술이 발전함에 따라 자동차는 이동수단이라는 기본적인 기능 이상으로 레저 등 일상 생활과 밀접한 관련을 가진 새로운 도구로 자리매김하고 있다. 따라서 근래의 자동차 기술 또한 주행, 안전, 제동 등 기본적인 성능 이외에도 편의성, 승차감 등에 부가적인 관련 기술에 대해 많이 연구하고 있는 추세이다. 이러한 추가적인 요구 중의 하나인 승차감을 결정짓는 중요한 요소로 실내 소음과 진동을 꼽을 수 있으며 이 둘은 매우 밀접한 상호 관계를 가지고 있다.

차량의 진동 및 소음의 원인은 노면, 엔진, 풍절 등 여러 가지가 존재하며 이 중 엔진은 주행 및 정차 시 실내의 소음과 진동의 주요 원인이 된다. 차량 엔진은 연료의 폭발로 진동이 발생하고 이 진동은 엔진 마운트 등의 수동 절연장치를 통과하여 샤시(chassis)로 전달되어 차체의 진동을 유발하고 동시에 실내에 구조 진동 소음(structural-borne noise)의 형태로 200-400Hz 의 협대역 소음인

엔진 부밍 소음(engine booming noise)을 발생하게 된다.⁽³⁾ 그러므로 엔진 부밍 소음의 원인이 되는 차체로 전달되는 엔진 진동의 양을 줄일 경우 실내의 엔진 부밍 소음도 함께 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 가정을 검증하기 위하여 실내 엔진 부밍 소음의 원인이 되는 엔진에서 샤시로 전달되는 진동을 감소시킴으로써 실내 엔진 부밍 소음에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 이를 위하여 엔진 진동을 제어할 수 있는 성능을 가진 제어용 구동기를 제작하고 적합한 제어 알고리즘을 제안하여 실차 실험을 통해 이를 검증하고자 한다.

2. 엔진 부밍 소음과 엔진 진동

2.1 엔진 부밍 소음과 엔진 진동

제어용 구동기와 알고리즘 제안에 선행하여 실험에 사용할 차량의 엔진 진동과 실내 엔진 부밍 소음을 획득하여 그 특성을 분석하였다.

Fig.1 은 실험자가 실험 차량에 탑승 후 기어를 N 단에 놓은 상태에서 고정된 타코미터(tachometer) 신호가 나오도록 가속 페달을 조정하면서 받은 각각의 신호들이며 x 축은 주파수 값을 엔진 주파수 값으로 나누어 표시하였다.

Fig.1 에서 두 신호 모두 엔진 주파수의 0.5 배에 해당하는 주파수에서 큰 값을 보이고 있으며 서로

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : mrbig@bomun.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3076, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

† ㈜만도기계

†† ㈜현대자동차

상관관계가 매우 높음을 알 수 있다.

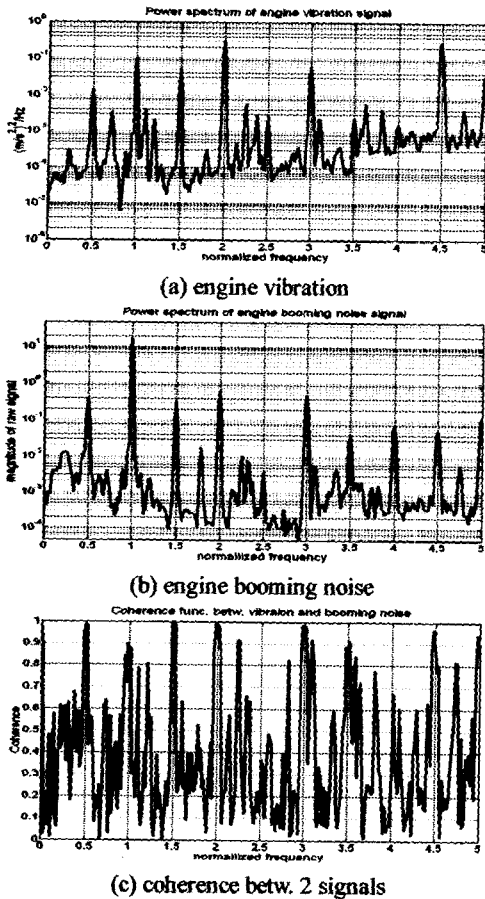


Fig. 1 Engine booming noise and engine vibration (fundamental frequency is 56Hz.)

3. 제어 알고리즘의 제안 및 검증

3.1 제어 알고리즘

앞서 언급했듯이 제어의 대상이 되고 있는 엔진의 진동은 차량의 타코미터 신호와 연동되어있다. 따라서 샤시로 전달되는 진동을 제어하기 위해서 타코미터 신호를 기준 신호(reference)로 이용하는 feed-forward 제어 기법의 적용이 가능하며 Fig.2 에서 보듯 차량의 샤시에는 엔진의 진동뿐 아니라 노면에서부터 들어오는 잡음(whit noise) 형태의 외란이 존재하므로 이와 같은 형태의 외란을 줄이기 위해서 feedback 제어 기법이 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 feed-forward 제어 기법과 feedback 제어 기법을 동시에 이용하는 혼합(hybrid) 제어 기법을 이용하였다.⁽²⁾

Feed-forward 제어 방법으로는 타코미터를 기준 신호로 filtered-X LMS 제어 기법을⁽⁴⁾ 사용하며

feedback 제어 기법으로는 비례제어를 적용하였다.

제안된 혼합제어의 블록선도는 Fig.3 와 같다.

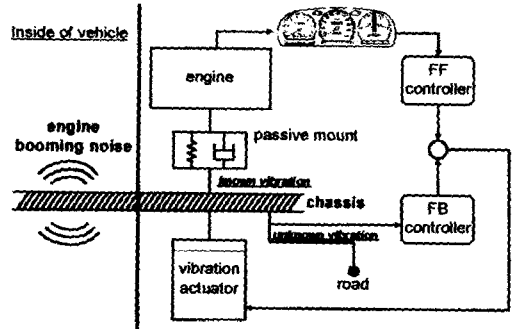


Fig. 2 Control structure for engine vibration

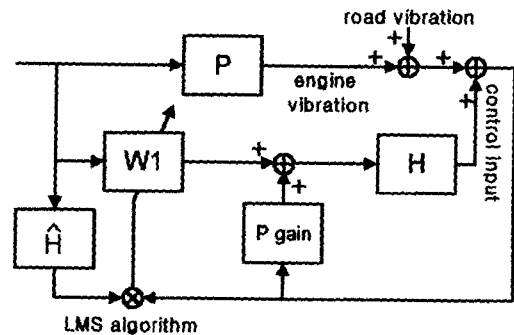


Fig. 3 Block diagram of the hybrid algorithm

여기서 H는 오차계, P는 대상계, \hat{H} 은 온라인 상에서 구한 오차계의 모델이다.

3.2 모의 실험

제안된 제어 알고리즘과 제어용 구동기의 성능을 검증하기 위하여 외팔보를 이용한 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험을 위한 실험 장치는 Fig.4 와 같다.

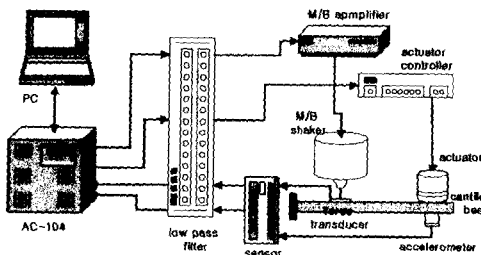


Fig. 4 Experiment setting of simulation

여기서 가진기(shaker)는 sine 형태의 외란과 잡음형태의 외란을 혼합하여 외팔보에 진동을 유발하는 진동원이 되며 sine 형태의 외란에 사용된 주파수 정보는 제어 시 feed-forward 제어기의 기준

신호로 사용되어 해당 성분의 진동을 감소시킨다. 구동기 아래에 설치된 가속도 센서를 이용하여 외팔보의 진동을 측정하고 이를 성능 지표(cost function)로 사용하였다. 실시간 제어를 위하여 제어기로는 AC-104 를 사용하였으며 샘플링은 2000Hz 로 수행하였다.

모의 실험은 가진기에서 150Hz 의 sine 형태의 외란과 잡음 형태의 외란으로 외팔보를 가진하고 이를 3.1 절에서 제안한 혼합 제어기를 이용하여 제어하였다.

Fig.5 의 결과에서 혼합 제어 기법에 의해서 feed-forward 제어 방법과 feedback 제어 방법을 각각 사용한 경우보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

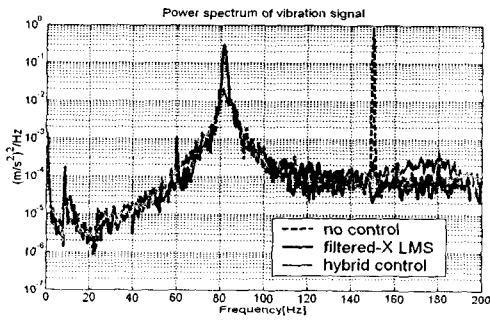


Fig. 5 Simulation results

4. 실차 실험 및 결과

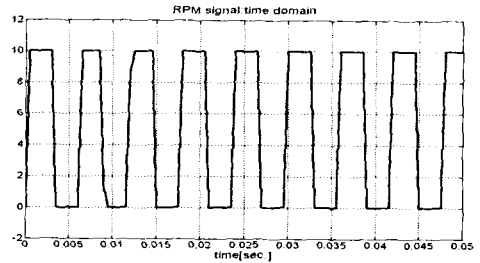
4.1 실차 실험

4.1.1 기준 신호의 처리

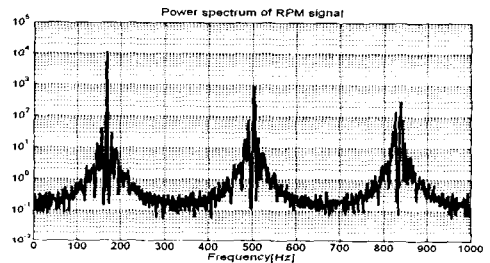
본 연구에서 실험에 사용할 차량은 6 기통 엔진을 탑재하고 있는 차량으로 타코미터 신호가 엔진 주파수의 3 배에 해당하는 주파수를 가진 사각파로 Fig.6 과 같다.

Fig.6 에서 나타나듯 차량의 실제 타코미터 신호는 엔진 주파수 값의 3 배수 성분만이 나타나고 고주파 영역으로 갈수록 신호의 파워가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 이 신호를 기준 신호로 사용할 경우 엔진 주파수의 3 배 성분만이 제어되므로 실내 엔진 부밍 소음과 관련된 200-400Hz 대역의 경우 제어 성능이 충분히 발휘되지 못하게 된다. 그러나 2 장에서 언급했듯이 대상 차량의 엔진 진동은 엔진 주파수의 0.5 배수에 해당하는 주파수에서 큰 값을 보이고 있으므로, 차량에서 얻은 타코미터 신호를 실시간으로 신호 처리하여 엔진 주파수의 0.5 배수의 주파수 성분을 가지게 하고 고주파 대역으로 갈수록 파워가 약해지는 현상을 제거

하였다. 또한 제어에 사용할 능동형 구동기의 공진주파수가 약 70Hz 부근이고 구동기의 특성상 공진 주파수 이하의 저주파수 대역에서는 충분한 제어력을 얻을 수 없으므로⁽¹⁾ 신호 처리된 타코미터 신호를 100Hz 의 cut-off 주파수를 가지는 고주파 통과 필터를 통과 시켜 Fig.7 과 같은 신호를 기준 신호로 사용한다.

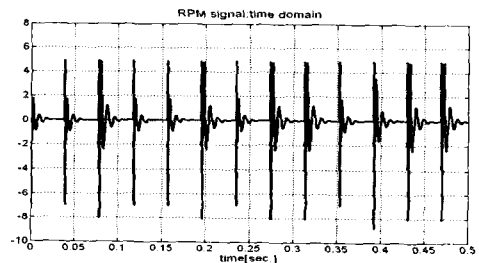


(a) time domain

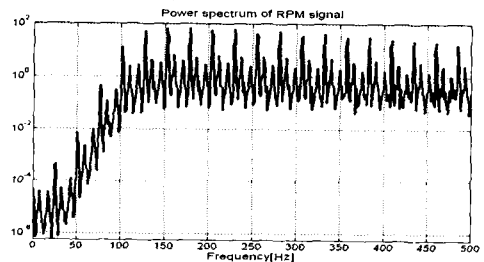


(b) frequency domain

Fig. 6 Tachometer signals of the vehicle



(a) time domain



(b) frequency domain

Fig. 7 Modified tachometer signal

4.1.2 실차 실험 장치

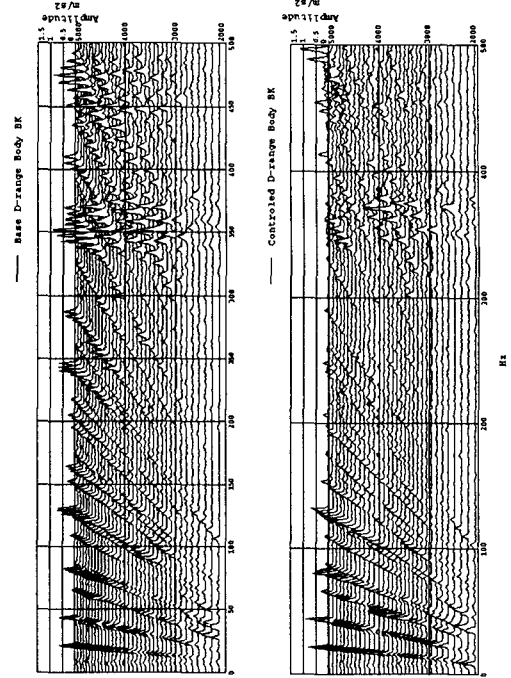
제어용 구동기는 엔진 마운트의 차체쪽 브라켓에 상하방향 진동을 가할 수 있도록 설치되었으며 전체 실차 실험 장치는 Fig.4 에서 제시한 것과 유사하다.

차량이 실제 주행할 때 엔진에 걸리는 부하와 유사한 조건을 만들기 위하여 차량을 다이내모에 올려놓고 변속기를 D 단으로 설정하여 실험하였다. 제어 알고리즘은 노면에서 들어오는 잡음 형태의 외란이 존재하지 않는 상황이므로 혼합 제어기 중 feed-forward 제어 방법 만을 사용하였다.

4.2 실험 결과

4.2.1 성능 지표가 엔진 진동인 경우

차체로 전달되는 진동을 성능지표로 한 경우 Fig.8 과 같이 엔진 주파수의 0.5 배 성분분에 해당하는 주파수 대역에서의 진동이 감소하는 것을 알 수 있다. 이 때 실내의 소음은 변화가 없음을 확인할 수 있다. Fig.8 (a), (b)의 결과는 타코미터의 신호가 일정하게 유지되도록 실험자가 가속 페달을 조절하면서 수행한 경우이며 Fig.8 (c)는 LMS 프로그램을 이용하여 실험자가 연속적으로 가속 페달을 밟아 약 2000-5500rpm 사이의 타코미터 영역의 결과를 얻은 것이다. Fig.8 (c)에서 100Hz 이상의 전 영역의 타코미터 신호에 대해서 감소하는 것을 알 수 있다.



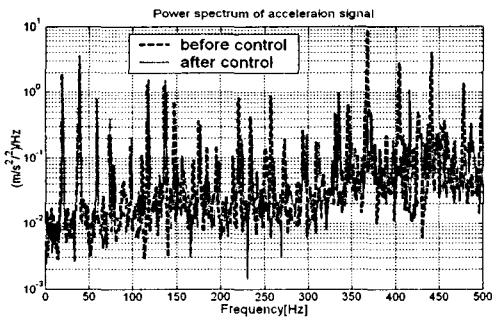
(c) LMS results

Fig. 8 Experiment results I
cost function is engine vibration

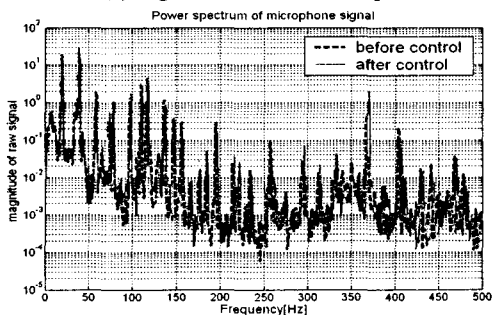
구동기와 센서가 설치된 제어 지점에서의 진동 제어를 진행하는 동안 타 위치의 마운트 및 운전석 아래의 차체 floor 부분의 각방향으로의 진동을 측정하였으며 그 결과 제어 지점에서 진동을 줄이기 위해 구동기가 작동하더라도 타 위치에서 진동이 증가하지 않음을 확인하였다.

4.2.2 성능 지표가 엔진 부밍 소음인 경우

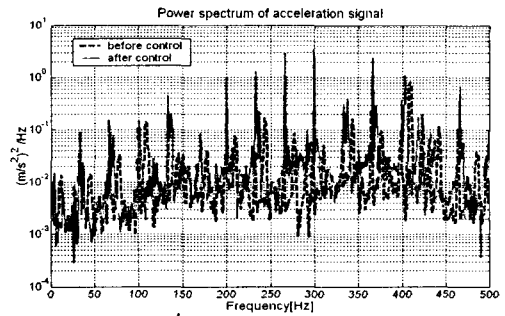
엔진 진동과 실내 엔진 부밍 소음 사이의 추가적인 경향을 알아보기 위하여 성능지표를 운전석 부근의 소음으로 잡고 제어를 수행하여 보았다.



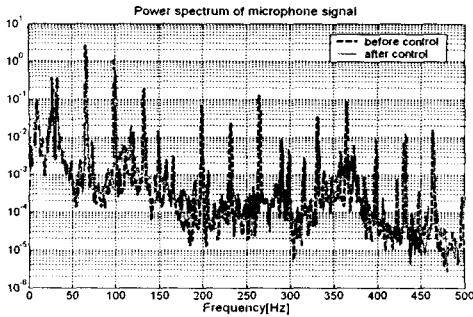
(a) engine vibration at 4500rpm



(b) engine booming noise at 4500rpm



(a) engine vibration at 4500rpm



(b) engine booming noise at 4500rpm
Fig. 9 Experiment results
 cost function is engine booming noise

이 경우 주행 중에 생기는 노면에서의 소음 등을 제외하고 엔진 부밍 소음만을 주로 고려하기 위해서 기어는 N 단에 두고 정차한 상태에서 차량의 rpm 만을 올려가면서 실험을 수행하였으며 그 결과 Fig.9 에서 보듯 실내 소음은 감소하나 줄어든 해당 주파수에서 구동기가 매우 강하게 진동함을 알 수 있다.

4.3 타 마운트에서의 제어 실험

조수석 앞쪽 마운트에 차체에 상하방향으로 부착하여 실험한 결과 4.2 절의 결과와 같이 차체로 전달되는 엔진 진동이 감소하여도 실내 엔진 소음이 감소하지 않는다. 따라서 다른 위치의 마운트에서의 추가 실험을 통하여 엔진 진동이 차체로 전달되는 주된 경로를 조사하였다.

이를 위하여 제어용 구동기를 4.2 절의 제어 위치와 동일한 위치에서 방향만을 전후 방향으로 바꾼 위치, 전방의 하단에 위치한 마운트에 상하 방향 위치에 다시 설치한 후 각각 4 장과 동일한 실험을 수행하였다.

추가 실험 결과 4.2 절에서 언급한 것과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

이상의 결론에서 마운트의 한 지점에서의 진동이 감소시킬 경우 실내에서 발생하는 엔진 부밍 소음에 큰 영향을 주지 못함을 확인할 수 있었으며 이는 엔진에서 발생한 진동이 다양한 경로를 통하여 차체에 전달되어 엔진 부밍 소음을 발생시키고 각각의 경로로 전달되는 진동의 크기가 유사하므로 한 지점에서 차체로 전달되는 진동을 제어할 경우 실내 소음에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다.

5. 결론

엔진 부밍 소음은 샤시로 전달된 엔진 진동에

의해서 차체가 구조 진동 형태로 발생하는 소음으로 엔진 진동과 함께 주.정차 시 승차감 저하에 요인이 된다. 본 논문에서는 이러한 두 요소들 간의 관계를 알아보기 위하여 진동을 발생시키는 제어용 구동기를 설치하고 적절한 제어 알고리즘을 제안하고 성능 지표를 진동과 소음으로하여 실차 실험을 수행하고 이 때 각각의 변화를 알아보았다.

성능 지표를 진동으로 한 경우의 실험 결과 구동기가 장착된 마운트 한곳에서 차체로 전달되는 엔진 진동을 저감시키더라도 실내 엔진 부밍 소음에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었으며 실내 소음을 성능 지표로 사용한 경우는 실내 엔진 부밍 소음은 줄어들지만 구동기에서 과도한 진동을 유발함을 확인하였다. 이를 통하여 엔진 진동이 차체로 전달되는 경로가 다양함을 예측할 수 있으며 하나의 마운트에서 진동을 저하 시키더라도 실내 엔진 부밍 소음은 줄어들지 않음을 알 수 있다.

향후 엔진 진동이 어떠한 경로와 크기를 가지고 진동 에너지를 차체로 전달하는지에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 BK21 사업단과 ㈜현대자동차의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 박만복., 2002, "구조물의 진동 제어를 위한 전자식 구동기 설계 및 응용", 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (2) 오시환,박영진 등, 1998, "도로부밍소음 저감을 위한 ANC 기술 개발", 한국과학기술원 프로젝트 연구 보고서.
- (3) 한국자동차공학회, 자동차기술 핸드북, 3 권 6 장.
- (4) B. Widrow, S. D. Stearns, 1985, "Adaptive Signal Processing", Prentice-Hall INC.