

## 특집

차량용 능동 엔진 마운트

# 전동식 능동형 엔진 마운팅 시스템

곽 문 규\*

(동국대학교 기계로봇에너지공학과)

### 1. 머리말

현재 배기가스로 인한 환경 파괴와 고유가 시대의 연비 향상을 위하여 자동차의 경량화 및 엔진의 고출력에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이로 인해 엔진의 소음진동이 커지고 차체 경량화로 인해 작은 가진원에 의한 소음진동 유발 가능성이 점점 커지고 있다. 이에 대한 대책으로 컨벤셔널(고무)마운트, 하이드로릭 마운트, ECM(스위처블마운트)등이 개발되어 차량에 적용되어 소음진동을 저감하고 있으나, 최근 고객의 소음진동의 요구수준 및 점점 발전하고 있는 파워트레인의 다양한 진동원의 효과적인 차체로의 차단을 위한 능동형 마운트의 개발을 필요로 하는 상황에 와있다. 따라서 차량의 엔진 특성, 지지방식 등 다양한 조건에 따른 능동형 마운트의 개발이 요구되고 있는 상황이다. 전동식 능동 엔진 마운트는 엔진 마운트와 별도로 장착되는 분리형의 기본개념을 바탕으로 아이들시 진동저감 및 주행 시의 소음진동까지 저감이 가능한 광대역주파수의 엔진발생 진동을 제어하는 기능을 가지고 있어 적용 영역이 광범위하여, 다른 산업분야도 적용 가능성이 큰 것으로 파악된다.

일본을 비롯하여 유럽 각국에서는 배출가스 저감과 연비향상을 위하여 끊임없는 노력을 하고 있다. 이와 더불어 유가의 불안정으로 인한 고유가 시대에 소비자들은 고연비의 차량을 선호하게 되었다. 이러한 소비자의 요구를 만족시키기 위해 최근 일본에서는 가변실린더 시스템(VCM, variable cylinder management)을 장착한 차량을 출시하여 많은 국가에서 호평을 받고 있고, 시장개방과 더불어 국내 시장에도 시판되어 많은 관심을 받고 있는 실정이다. 이러한 가변 실린더 시스템은 가속할 때나 무거운 짐을 실었을 때는 실린더 6개를 모두 사용하지만 엔진에 부하가 작게 걸릴 때는 실린더 3개 또는 2개가 작동하지 않는 시스템이다. 하지만 3개 또는 4개의 실린더만 작동할 때는 진동이 많아지므로 이를 제어하기 위한 기술이 필요하게 된다. 이와 같이, 엔진의 연소되는 실린더 수가 변함에도 불구하고 큰 충격이 없도록 엔진의 진동을 잡아주는 것이 ACM(active control engine mount) 시스템이다. 즉, ACM은 VCM 작동 시 엔진 RPM에 따른 진동의 변화를 모니터링 한 후 엔진의 진동을 상쇄시키기 위해 엔진 앞·뒤 마운트의 액추에이터를 작동시켜 진동을 상쇄시키는 장치이다.

앞으로, 국내 자동차사에서도 이와 유사한 기

\* E-mail : kwakm@dongguk.edu / (02) 2260-3705

능을 지닌 엔진을 적용한 차량이 개발 될 것으로  
예상이 되고 있어, 아이들 및 주행 시의 진동소음  
저감을 위한 전동식 능동 엔진 마운트의 적용이  
점차 증가 할 것으로 예상된다. 전동식 능동 엔진  
마운트에 적용된 구동기는 스피커에 일반적으  
로 사용되는 voice coil type과는 반대로 질량체가  
움직이고 스프링에 의한 공진을 이용하여 제어  
력을 증폭하는 선형 액추에이터 타입이다. 이러  
한 방식의 선형 액추에이터(ALA, active linear  
actuator)는 국내에서는 개발 사례가 거의 없는 것  
으로 파악 되었다. 차량용 선형 구동기가 개발 될  
경우, 기술적 파급 효과 및 기타 응용 사례가 크  
게 증가 할 것으로 예상된다.

전동식 능동형 엔진 마운팅 시스템은 개념적으  
로 엔진의 진동으로부터 차체에 전달되는 가진  
력을 전동식 구동기를 이용해 상쇄시키는 방식  
의 그림 1과 같은 엔진 마운팅 시스템을 나타낸  
다. 그림 1에서 알 수 있듯이 차량의 엔진 운전 상  
태에 대한 정보(RPM)와 가속도 신호를 입력신호  
로 이용하고 제어 알고리즘을 이용하여 제어신  
호를 생성해 구동기에 전달하는 형태로 이루어  
져 있다. 복합적방식의 능동형 엔진 마운트는 하  
이드로 마운트와 분리되어 제어 구동력을 발생  
시키도록 되어 있다.

전동식 구동기(ALA)는 내부의 진동질량체를  
구동시켜 제어 기진력을 엔진 서브프레임에 전

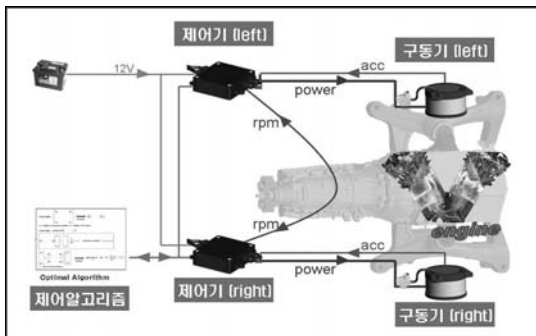


그림 1 전동식 능동형 엔진 마운팅 시스템 개략도

달하는 구동기인데 큰 힘과 높은 주파수 작동이  
가능하다. 이 구동기는 하이드로 마운트와 분리  
되어 차체 서브프레임 하단에 직접 장착되어 엔  
진으로부터 전달되는 진동을 상쇄하는 전동식  
능동 동흡진기(dynamic damper)의 개념을 가진다.

그림 2는 제작된 구동기의 3D 형을 보여준다.  
전동식 능동 엔진 마운트는 자기장 속에서 자기  
장과 수직으로 교차하는 도선에 전류가 흐를 때  
도선이 힘을 받는 로렌츠의 법칙을 이용하여 구  
동력을 발생시켜 내부의 질량을 움직여 관성력  
을 발생하게 되어 엔진으로부터 전달되는 차체  
의 진동을 상쇄시키게 된다. 전자기부에 의해서  
발생 되는 제어력과 함께 진동질량체와 이를 지  
지하는 스프링의 공진을 이용함으로써 상대적  
으로 큰 제어력이 필요한 저주파 구간에서 제어  
력을 극대화시킬 수 있다.

비교적 작은 에너지로 효과적인 성능을 발휘하  
는 구동기 설계기술과 제작기술 그리고 구동기  
를 제어하는 제어기술이 전동식 능동형 엔진 마  
운팅 시스템의 핵심기술이라 할 수 있다. 구동기  
설계에서 가장 중요한 핵심 기술은 자석 및 진동  
질량체의 형상 결정이다. 기본적인 형상 외곽 사  
이즈는 장착할 차량의 설치 공간에 의해 결정되  
며, 최대 성능을 위한 설계를 위해서는 전자기력  
해석에 의한 제어력 계산이 필요하다. 구동기는  
전자기력 외에도 진동질량체와 스프링 탄성의  
적절한 조합에 의한 공진을 이용 하는 최적설계  
로 원하는 작동 주파수 대역과 필요로 하는 전달



그림 2 구동기 형상

력을 조절할 수 있어야 하며, 내구 수명을 만족하는 강건설계가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 차체(서브프레임)에 적용되는 엔진 기진력에 대한 정보가 필요하며, 구동기 작동시 가장 많은 응력을 받는 스프링 및 코일 지지부의 형상 결정이 강건 설계의 핵심 요소 기술이라 할 수 있다. 코일 지지부의 경우 진동질량체와 코일의 간섭을 방지하고 공극을 최소화 할 수 있는 설계 파라미터의 최적화가 필요하다. 자속에 영향을 미치는 코일 지지부 재질 선정 및 제작, 조립성을 고려한 형상 역시 구동기 설계의 중요 요소 기술이다. 그리고 전자계 설계의 최적화를 통하여 코일에서 발생하는 열이 주변 환경 영향에서도 구동기 성능 및 내구에 영향을 주지 않도록 하여야 한다. 이 구동기는 가진과 응답 사이의 작동 주파수 영역에서 약간의 위상 차이를 보인다. 이러한 위상 차이가 시스템 제어알고리즘 작동에 문제가 되지 않도록 위상차가 발생하는 주파수 영역대 상에서 위상을 보정하는 제어알고리즘의 설계가 필요하다. 구동기에는 진동 측정을 위한 가속도계가 장착되어 서브프레임의 가속도 신호를 계측한다.

그림 3은 그림 2의 구동기에 대한 수학적 모델

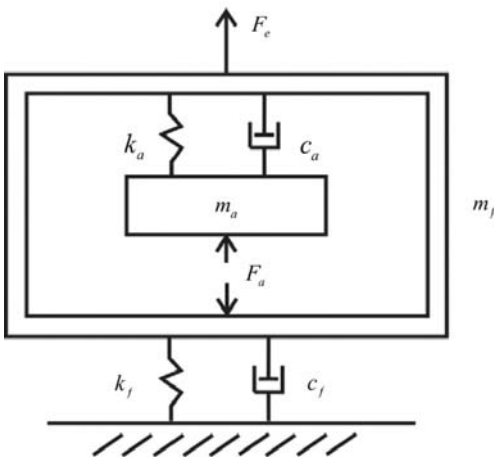


그림 3 시스템의 동적 모델

을 나타낸다.

여기서  $m_a$ ,  $c_a$ ,  $k_a$ ,  $m_f$ ,  $c_f$ ,  $k_f$ 는 각각 ALA와의 내부 질량, 댐핑계수, 스프링상수와 차량 프레임의 질량, 댐핑계수, 스프링상수를 나타낸다. 그리고  $F_a$ 는 내부 질량의 진동으로 인해 발생한 기진력을 나타낸다. 만일 프레임이 진동하지 않는다면 기진력 식은 다음과 같다.

$$F_a = -m_a \ddot{x}_a \quad (1)$$

그림 4는 ALA를 고정된 프레임에 장착하고 힘 트랜스듀서를 사이에 부착하여 계측한 전달력에 대한 크기와 위상에 대한 선도이다. 그림 4로부터 ALA의 동적 거동은 이론 모델로부터 유추한 바와 유사함을 알 수 있다. 그러나 높은 주파수에서 고차모드가 나타남을 알 수 있으며 제어

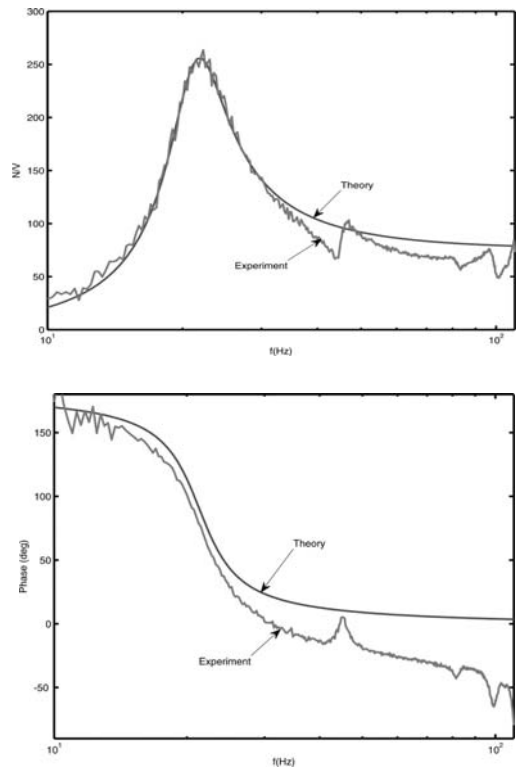


그림 4 ALA의 주파수 응답곡선

력 또한 저하됨을 알 수 있다. 위상은 이론값보다 약간 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 앰프를 거쳐 가면서 위상 지연이 발생하는 것으로 예상된다. 진동수가 올라갈수록 ALA의 동적 특성은 이론값과 차이가 발생한다. ALA의 고유진동수는 약 23 Hz로 나타났으며 고유진동수보다 큰 진동수에서 약 100 N/V 이상의 힘이 발생됨을 알 수 있다. 물론 이 성능은 앰프의 성능에 의해서도 좌우된다.

제어기는 엔진 정보와 가속도 신호를 A/D 입력 신호로 받아 제어알고리즘을 통해 계산된 제어력을 구동기 신호로 구현하는 장치를 나타낸다. 제어기는 A/D 변환을 위한 신호조정 장치와 고속의 연산이 가능한 마이크로프로세서, 그리고 구동기를 작동하기 위한 증폭앰프로 구성된다.

## 2. 제어 알고리즘

제어 알고리즘은 차량의 운전 정보와 진동에 대한 가속도 신호 입력으로부터 적절한 구동력을 계산하는 것을 의미하는데 크게 feedback과 feedforward의 두 방식이 사용된다(그림 5). 어느 경우든 차량 정보와 진동 신호를 이용해 각 운전 조건에서 엔진 기진력의 영향을 감소시켜 차량의 NVH 성능을 개선하는 것을 목적으로 한다.

dSpace사의 DS1104와 Autobox 장비를 이용해 제어 알고리즘을 실제 차량에 적용하였다. 이 장비들은 simulink block을 이용해 제어 알고리즘을 구현하게 된다. 이 글에서는 Proportional(P), Integral(I), Positive Position Feedback(PPF), Filtered-x Least Mean Square(FXLMS) 알고리즘이 고려되었다. 각각의 제어 알고리즘에 대한 블록 다이어그램은 그림 6, 7, 8과 같다.

P혹은 I제어는 측정신호에 게인 혹은 적분 보상전달함수를 네가티브 피드백이 되는 알고리즘으로 정상상태 오차를 줄이고 과도응답을 줄

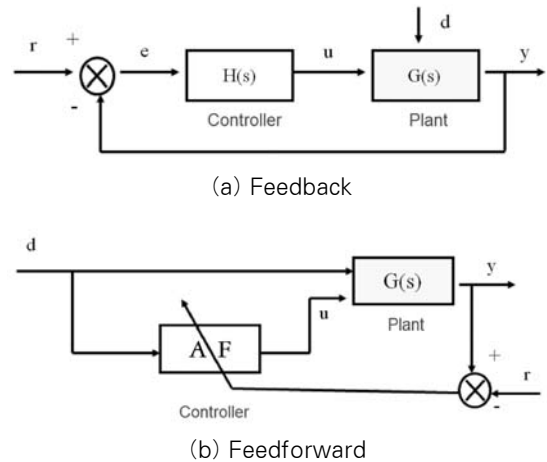


그림 5 제어 알고리즘 개략도

여 능동진동제어가 이루어지는 알고리즘으로 일반적으로 사용되는 제어 알고리즘이다. PPF제어는 특정 주파수에 대해 90도 위상 지연을 하여 능동 감쇠 효과를 주는 알고리즘이다. 따라서 고정 주파수에 대해 사용하면 좋은 효과를 얻을 수 있다. FXLMS알고리즘은 참조신호와 측정신호와의 관계를 이용하여 오차, 즉 측정신호를 줄여 줄 수 있도록 설계된 적응 제어기로서 기준 신호가 외부 교란에 대한 정확한 정보를 나타낼 수 있는 경우 효과적이다. 그러나 적응필터의 특성상 그림 8과 같이 계산이 복잡하며 수렴시간을 필요로 하게 된다.

## 3. 능동 진동 제어 실차 실험

위에서 소개한 제어 알고리즘은 수치 시뮬레이션 상에서는 모두 좋은 성능을 보여준다. 그렇지만 실차 조건은 수학 모델과 조건이 다르기 때문에 실제 적용 시 문제점을 파악할 필요가 있다. 앞에서 소개한 제어 알고리즘을 목표 차량에 적용하기 전에 그림 9와 같이 투산 차량을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 투산 차량의 경우 엔진 기진력에 의한 진동을 시

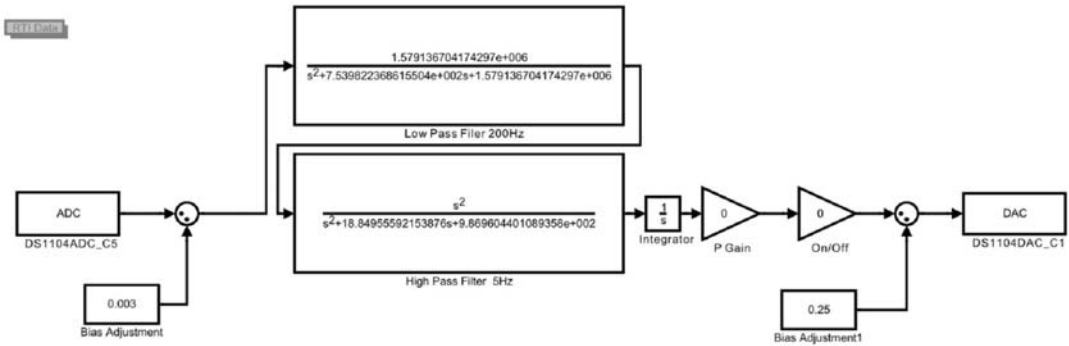


그림 6 P, I 제어 알고리즘 시뮬링크 블록 다이어그램

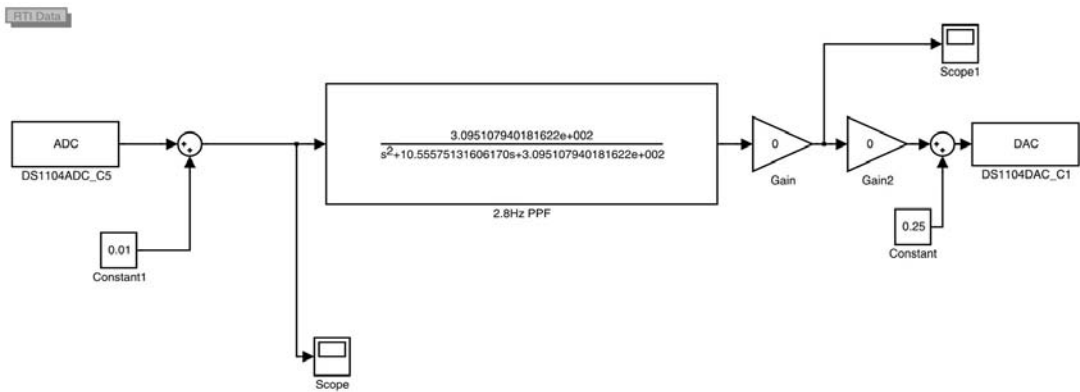


그림 7 PPF 제어 알고리즘 시뮬링크 블록 다이어그램

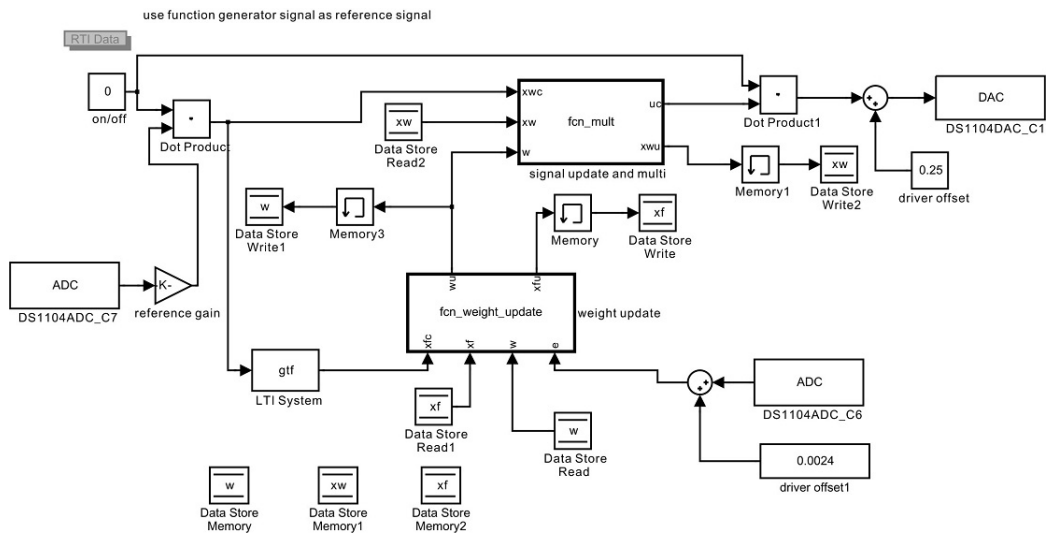


그림 8 FXLMS 제어 알고리즘 시뮬링크 블록 다이어그램



그림 9 시뮬레이션 실험에 사용된 차량 '투산' 과 ALA가 장착된 상태



그림 10 ALA와 센서가 장착된 상태

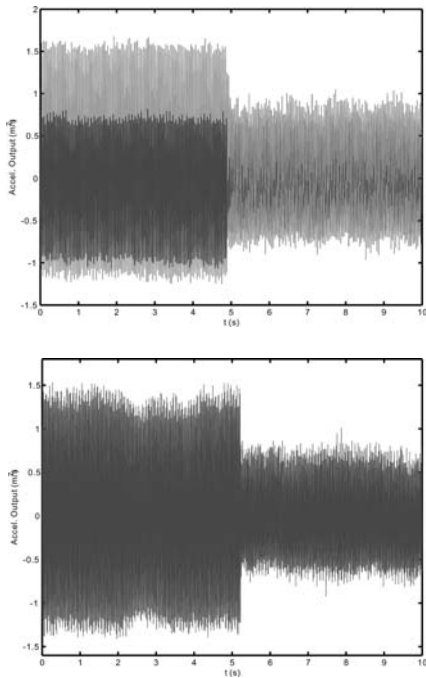


그림 11 Idle, 1500 RPM에서의 P 능동진동제어 센서신호

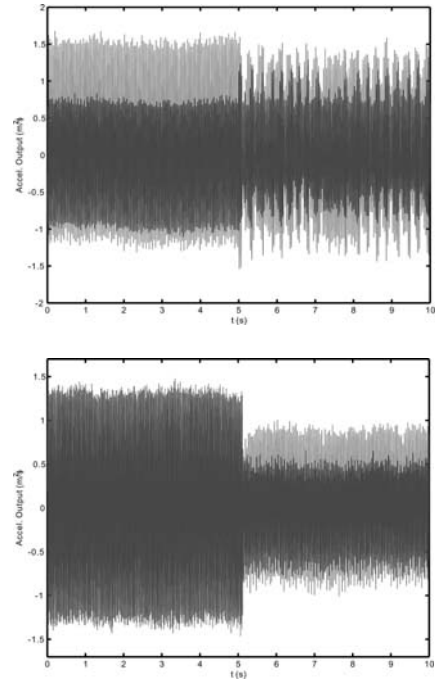


그림 12 Idle, 1500RPM에서의 PPF 능동진동제어 센서신호

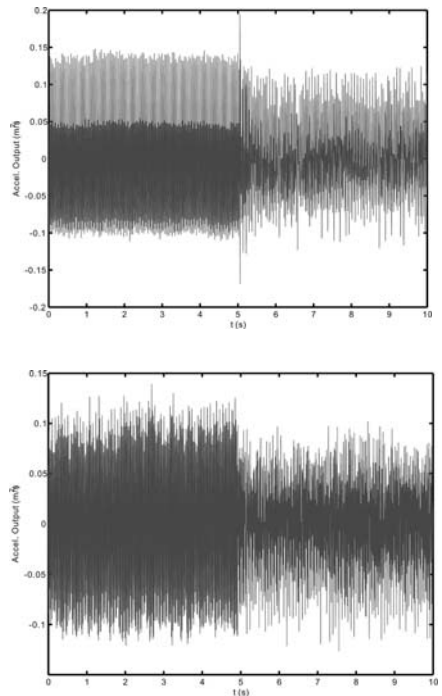


그림 13 Idle, 1500 RPM에서의 FXLMS 능동진동제어 센서신호

트에서 충분히 느낄 수 있을 정도여서 실험 대상으로 적절한 것으로 판단되었다. 투산 차량은 ALA장착을 위한 고정 지지대가 없으며 이를 위해 그림 10과 같이 투산 차량 서브프레임에 지그를 대어 ALA 중앙에 한 개를 장착하여 실험을 수행하였다. 이와 더불어 측정의 정확성을 위하여 3개를 센서를 추가로 이용하였다.

투산 차량은 80 Hz 이하에서 취약한 외부 교란에 의한 진동이 발생하며 ALA를 이용한 능동 진동 제어 시 큰 진동 저감 효과를 가질 수 있다. 투산 차량의 성능 여건상 2000 RPM 구간까지 중립 기어에서 각 IDLE, 1200, 1500, 1700, 2000 RPM의 특정 엔진속도에서 능동진동제어 실험을 하였다. 그림 11부터 13은 IDE과 1500 RPM에서의 각 제어 알고리즘에 의한 능동진동 제어 실험 결과이다.

위 3가지 실험에서 P제어 실험이 능동진동제어 성능 면에서 높은 제어력을 보여주었다. 다만 FXLMS는 참조신호를 1차 오더로 사용하였으며 시험에 사용된 투산 차량의 경우 2차 오더가 더 높은 주파수 성분이지만 비트 현상으로 인하여 1

차 오더 타코미터 신호를 참조하였다. 이와 같은 문제점은 차후 해결해야 할 과제이다.

#### 4. 맺음말

주행 NVH 저감용 전동식 능동 마운팅 시스템은 광대역 주파수 구간에서 엔진으로부터 차체에 전달되어지는 진동을 상쇄하여 고객의 요구 사항을 만족시켜야 한다. 진동을 기존의 수동적인 방식에 의해 더 이상 저감시킬 수 없기 때문에 이 글에서는 ALA를 이용해 엔진 기진력을 상쇄시키는 능동적인 엔진 마운트에 대한 연구를 수행하였다.

이 글에서는 능동 마운트 시스템의 구성에 대해 간략히 설명하고 제어 알고리즘을 소개하였다. 제어 알고리즘을 적용한 결과 실차에서 진동을 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 차후 목표 차량에 대해 실험을 수행하고 문제점을 보완하여 상용화 할 수 있을 정도의 신뢰성을 확보할 예정이다. 아울러 보다 효율적인 제어알고리즘의 개발에 대한 연구도 병행될 예정이다. 