



특집

국방기술에서의 소음진동

지상전투차량의 능동 현수장치 개발방안

고영진*, 김승균

(두산DST(주) 방산연구소)

1. 머리말

현수장치는 차량의 하중을 분산 지지하고, 노면으로부터의 진동 및 충격을 흡수할 뿐만 아니라 선회, 가·감속 등에 의한 자세변화를 억제하는 역할을 하는 동역학적으로 매우 중요한 요소이다.

이러한 현수장치 주요 기능인 승차감과 자세 제어, 조종 안정성 등은 서로 상충하는 경향을 보여주고 있어 설계 시 절충을 필요로 하며, 이러한 설계목표를 동시에 달성하는 데는 한계가 있다. 따라서 민수분야의 경우 승차감을 중시하는 경향인 반면 군수분야의 경우 승차감보다는 기동성을 확보하기 위한 조종 안정성에 중점을 두어 개발되어 왔다.

최근 지상전투차량의 경우 조종 안정성은 야지 주행성능(cross-country performance)과 관련되어 피탄 확률을 줄임으로써 생존성을 확보할 수 있는 성능인자로 인식되면서 그 요구수준이 높아지고 있다. 또한 노면의 요철에 의한 진동을 최소화함으로써 차량 및 탑재장비의 안전성을 높이며, 야지 주행 시 포탑 안정화 시스템의 부담을 줄여 화포의 사격 정확도를 향상시키기 위해 진동제어 기능에 대한 요구도 갈수록 높아지고 있다.

이와 같이 진동제어 기능을 확보하면서도 야지 주행성능을 높이는 것은 단순히 대출력의 엔진 만으로는 획득할 수 없고, 기존의 현수 시스템 성능보다 더 우수한 현수장치가 뒷받침되어야 하므로 능동/반능동 현수장치와 같은 현수 제어 시스템의 개발이 요구되고 있다.

초기 지상전투차량의 현수장치로 단위 중량당 흡수 에너지가 높은 토션바 시스템(torsion bar system)이 주로 사용되었으나, 스프링 작용을 하는 질소 가스와 감쇠 작용을 하는 유압유로 구성되어 현수특성이 향상되었을 뿐만 아니라 자세 제어 까지도 가능한 유기압 현수장치(hydropneumatic suspension system)가 등장하였으며, 최근에는 전기모터를 이용하여 반응속도를 빠르게 함으로써 유기압 현수장치에 비해 향상된 성능을 나타내는 것으로 알려진 전기-기계식 현수장치(electric-mechanical suspension system)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

또한 스프링 및 감쇠력이 고정된 수동형 현수장치는 승차감과 조종 안정성 또는 접지력의 동시 성능향상이 불가하고 상호절충이 필요한 형태이며, 대상 차량의 목적에 따라 한쪽 기능 또는 역할을 강조하여 튜닝(tuning) 함으로써 성능향상에 상당한 제한이 있다. 이러한 한계를 극복하

* E-mail : youngjin@doosan.com

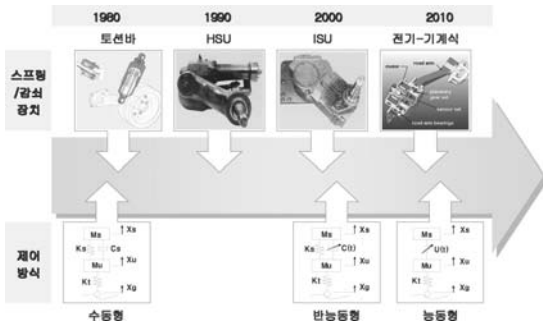


그림 1 현수 제어시스템 개발 추세

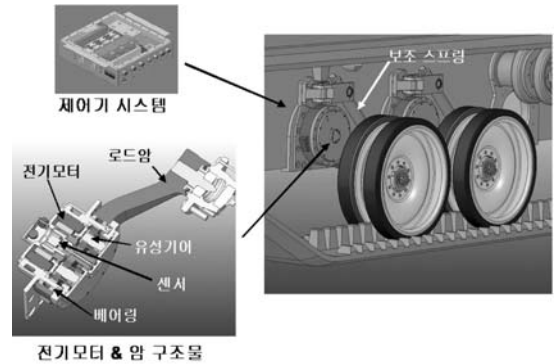


그림 2 전기-기계식 능동 현수장치 구성

기 위하여 일반적으로 감쇠력 만을 조정하는 반 능동형 현수장치와 스프링 및 감쇠력을 동시에 조정하는 능동형 현수장치가 제안되어 연구, 적용되고 있다.

2. 전기-기계식 능동 현수장치

전기-기계식 능동 현수장치 시스템은 종래의 유기압식 능동 현수장치 시스템이 유압이나 공압 작동기(actuator)를 사용하여 차량의 자세, 스프링 및 감쇠력을 조정하는 것과는 달리 전기 모터가 그 역할을 담당하도록 구성된 현수장치이다.

전기-기계식 능동 현수장치의 경우 전기모터를 이용함으로써 유압이나 공압 작동기를 사용하는 유기압식 능동 현수장치에 비해 상대적으로 반응속도가 우수하며, 이에 따라 실제 차량에 적용 시 유기압식 능동 현수장치가 가지는 반응속도에 따른 문제점들을 어느 정도 해소하여 보다 향상된 현수특성을 구현할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 유압이나 공압 작동기를 작동시키기 위한 부가적인 장치가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 다만 전기모터를 구동할 수 있는 동력원이 필요하나, 이는 현재 활발하게 개발이 진행 중인 하이브리드(hybrid) 또는 전전기식(all-electric) 동력장치와 연계하여 사용이 가능하므

로 그 활용도는 높다고 할 수 있다.

이러한 장점 때문에 미국에서는 이미 시뮬레이션 및 실험실 시험 등을 통해 그 성능을 검증하였고, 실제 차량에 적용하여 전체 시스템에 대한 입증시험을 진행하는 등 미래전투체계(future combat system, FCS) 유인 지상차량(manned ground vehicle, MGV)에 적용할 현수장치로서 주목 받고 있다.

전기-기계식 능동 현수장치는 차량의 종류에 따라 그 적용 형태가 다소 달라질 수는 있으나, 주요 구성은 그림 2와 같이 크게 전기모터, 압 구조물, 보조 스프링(auxiliary spring), 제어기 시스템(controller system)으로 구분할 수 있다.

전기모터는 제어기의 명령에 따라 능동 제어를 위해 필요한 토크를 생성시키는 역할을 수행할 뿐만 아니라, 필요 시 에너지를 생산하기 위한 발전기(generator)로도 동시에 사용되는데, 이는 기존의 시스템에서 주로 열의 형태로 소산되는 에너지를 활용하기 때문에 전체시스템의 에너지 효율성을 증대시키는 효과를 발휘한다.

압 구조물은 휠과 전기모터 사이에 장착되어 능동 제어를 위해 전기모터에서 생성한 토크를 휠에 전달하는 역할을 수행한다. 전기모터와 압 구조물 연결부에는 감속기가 장착되어 있어 설정된 감속비에 의해 작동 속도를 조절하고, 토크

를 증대시키는 역할을 한다. 감속기의 형태는 작동 방식에 따라 달라질 수 있는데, 주로 차륜형 차량에 적용되는 선형 작동 방식에는 별도의 감속기와 회전운동을 선형 직선운동으로 변환시키는 랙과 피니언(rack and pinion)의 조합이 사용되며, 궤도형 차량에 적용되는 트레일링 암(trailing arm) 형태의 회전형 작동 방식에는 유성기어(planet gear)가 사용된다.

보조 스프링은 차량의 정적 하중(static weight)을 지지하는 수동형 스프링의 역할을 수행한다. 이는 전기모터가 동적 하중만을 담당하게 하여 전기모터의 부담을 감소시켜줄 뿐만 아니라 전기모터의 출력 요구조건과 중량, 크기 및 소요 동력을 최소화시켜 실제 차량에 적용할 수 있는 가능성 및 효율성을 높여주게 된다. 또한 제어 기능 상실 시에도 제한된 범위에서 차량의 기동이 가능하도록 하는 역할도 수행한다.

제어기 시스템은 제어 알고리즘이 내장된 제어기(controller), 서보증폭기(servo amplifier), 각종 센서류(sensors) 등으로 구성되며, 차량의 각 위치에 장착된 센서류로부터 차량의 자세 및 휠에 관한 정보를 획득하여 제어기에서 차체의 자세 유지에 필요한 제어량을 계산 후 이를 서보증폭기를 통해 최종적으로 전기모터로 전달함으로써 출력 토크를 제어하는 기능을 수행하게 된다. 그림 3에서는 전기-기계식 능동 현수장치 적용된 차륜형 차량에 대한 시스템 아키텍처(architecture)를 보여주는데, 그 기본적인 구성은 궤도형과 동일하다.

전기-기계식 능동 현수장치가 적용된 예로 UTC-EM에서는 Kollmorgen사의 다이렉트 드라이버 모터를 근간으로 하여 1990년 후반 이후부터 2000년대 초반까지 그림 4와 같이 차륜형 차량인 HMMWV, LMTV, MTV와 궤도형 차량인 Lancer에 전기-기계식 능동 현수장치를 적용하는 연구를 진행해오고 있으며, 여기에 적용된 전기-기계

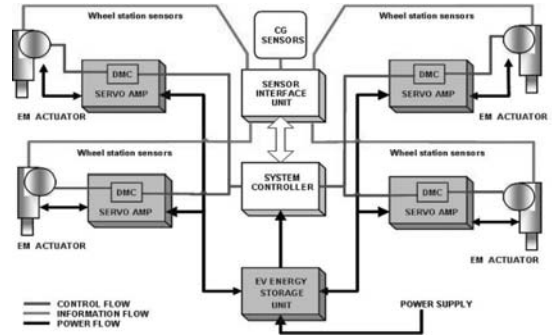
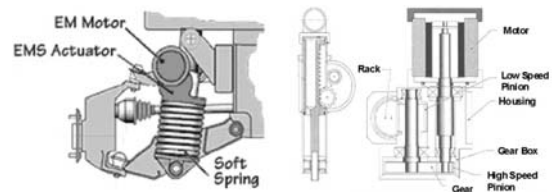


그림 3 전기-기계식 능동 현수장치 시스템 아키텍처



그림 4 전기-기계식 능동 현수장치 적용차량



(a) 차륜형 차량

(b) 궤도형 차량

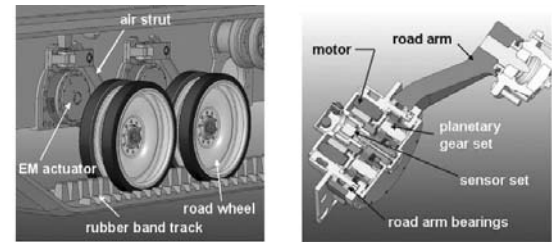
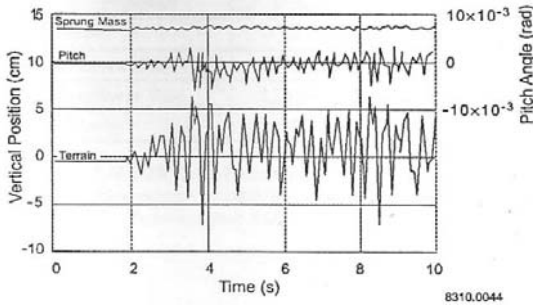
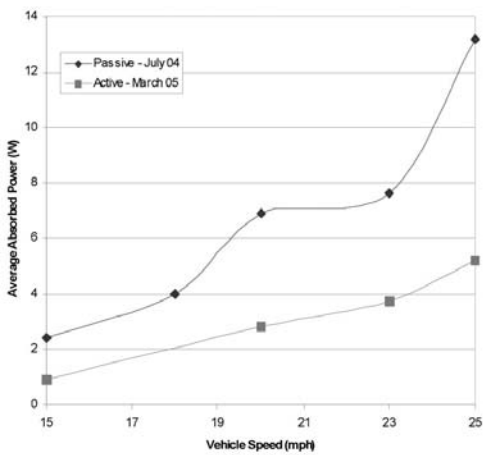


그림 5 전기-기계식 능동 현수장치 적용방식

식 능동 현수장치의 적용방식은 그림 5와 같다.



(a) HMMWV



(b) Lancer

그림 6 전기-기계식 능동 현수장치 적용차량 시험결과

전기-기계식 능동 현수장치의 효율성을 확인하기 위해 실시한 시험결과는 그림 6과 같다.

차륜형 차량인 HMMWV의 경우 노면의 굴곡 변화에 대한 차체의 거동(sprung mass, pitch)을 확인하였으며, 64 kph 실험실 시험 결과 노면의 굴곡 변화에 대한 절연 효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 궤도형 차량인 Lancer의 경우 속도별로운 전석에서의 평균흡수동력을 비교하였으며, CEM 2-inch RMS 노면 주행 결과 수동형에 비해 평균흡수동력이 약 40 % 수준 정도로 향상되었음을 확인하였다.

이와 같은 시험결과를 통해 전기-기계식 능동 현수장치는 지상전투차량에서 요구하는 높은

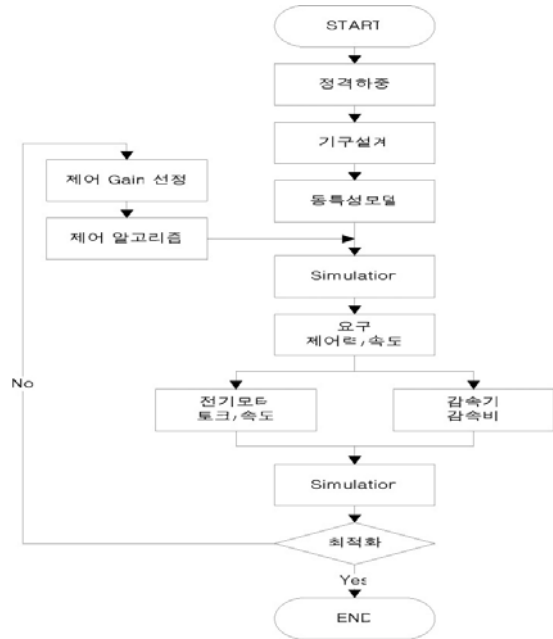


그림 7 전기-기계식 능동 현수장치 개발과정

수준의 요구조건을 만족시키기 위한 우수한 현수장치인 것으로 검증되었다.

3. 전기-기계식 능동 현수장치 개발방안

전기-기계식 능동 현수장치의 개발은 그림 7과 같이 제어 알고리즘을 포함하는 동특성해석을 통해 요구 제어력을 산출하고, 이를 통해 구현 가능한 전기모터 및 감속기의 사양을 선정하는 과정을 반복적으로 수행하여 최적의 제어 게인(gain)을 도출해내는 과정으로 진행된다.

이 연구에서는 수동 현수장치가 적용된 궤도차량을 대상으로 상기 개발과정에 의거 전기-기계식 능동 현수장치의 개발을 진행하였으며, 그 과정에서 능동 현수장치에 대한 효율성도 해석적으로 확인해 보았다.

수동 현수장치가 적용된 차량의 동특성해석 모델은 상용 다물체 해석 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 그림 8과 같이 구성하였다.

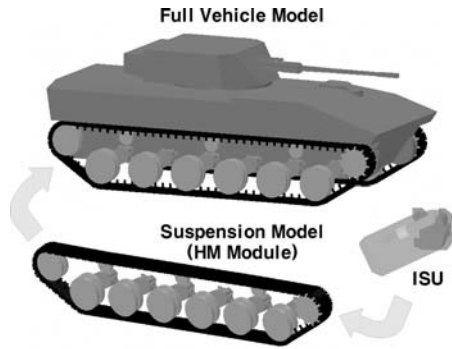
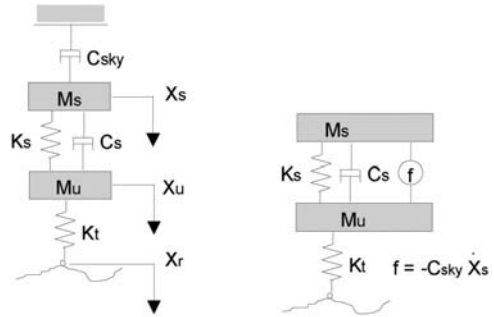


그림 8 동특성해석 모델 구성



(a) Concept of Sky-hook

(b) Actual Sky-hook

그림 10 스카이-훅 댐핑 제어

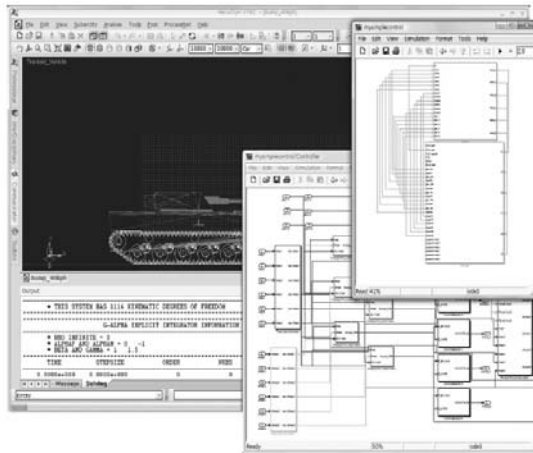


그림 9 Co-simulation 모델 구성

수동 현수장치가 적용된 차량의 동특성해석 모델에는 스프링 및 감쇠력이 고정된 압내장형 유기압 현수장치(in-arm hydro-pneumatic suspension unit, ISU)를 적용하여 수동 현수장치에 의한 동적거동을 분석할 수 있도록 구성하였으며, 여기에 능동 제어 개념을 적용하기 위해 RecurDyn에서 제공하는 컨트롤 툴킷을 이용하여 plant input/output을 정의하고, 이를 Matlab/Simulink로 구성된 제어기 모델과 인터페이스를 구성함으로써 Matlab/Simulink를 기반으로 한 Co-simulation을 수행할 수 있도록 그림 9와 같이 구성하였다.

전기-기계식 능동 현수장치의 제어를 위해 간단하면서도 우수한 성능을 발휘하는 스카이-훅 댐핑 제어 이론과 전기-기계식 능동 현수장치에 적용하기 위해 제안된 NCFS(near constant force suspension)의 두 가지 제어 알고리즘을 적용하였다.

(1) 스카이-훅 댐핑 제어 이론

스카이-훅 댐핑 제어 이론은 1974년에 Karnopp 등이 제안한 이론으로, 현재는 이론적 정립은 물론 민수쪽에서는 반능동 현수장치로 양산적용이 완료된 단계에 있을 정도로 그 효용성 또한 검증된 바 있는 간단하면서도 우수한 제어방식이다⁽¹⁾.

스카이-훅 댐핑 제어는 그림 10의 (a)와 같이 sprung mass(M_s)의 진동모드를 제어하기 위하여 sprung mass에 가상의 댐퍼(damper, C_{sky})를 부착하는 방식이다. 하지만 이를 실제 적용하기 위해서는 그림 10의 (b)와 같이 sprung mass와 unsprung mass(M_u) 사이에 식 (1)과 같은 하중을 작용시킬 수 있는 작동기를 설치하는 방식으로 제어하게 된다.

$$f = -C_{sky} \dot{x}_s \quad (1)$$

(2) NCFS 이론

NCFS는 전기-기계식 능동 현수장치 제어를 위해 텍사스 대학의 Joe Beno 등이 제안, 사용한 방법이다⁽⁴⁻⁶⁾. 기본적으로 현수장치는 sprung mass의 정적 하중을 지지하는 역할과 주행 시 노면의 거칠기로 인한 진동 및 차체의 흔들림에 대한 동적 하중을 전달하는 역할로 구분할 수 있는데, 차체에 전달되는 동적 하중을 완벽하게 차단하여 차량의 자세를 안정적으로 유지하고자 하는 것이 CFS(constant force suspension)의 개념이다.

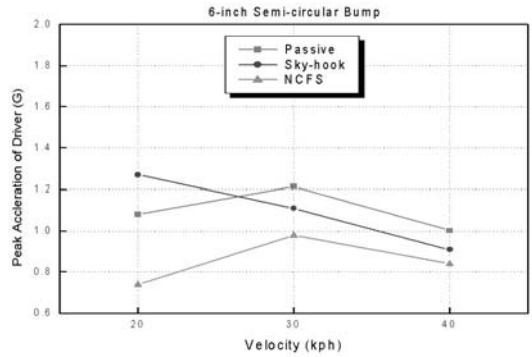
하지만 차체에 전달되는 동적 하중을 완벽하게 차단하는 것은 현실적으로 불가능하므로 실제 적용 시에는 이를 근사화한 NCFS의 개념이 적용된다. 따라서 수동형 스프링을 포함한 전체 현수시스템이 NCFS 시스템이 되도록 제어해 주는 시스템을 설계한다면 우수한 진동 절연 성능을 얻을 수 있으리라는 것이 NCFS 이론의 관점이다.

이러한 시스템은 기본적으로 동적 하중을 작동기로 상쇄시키는 것을 필요로 한다. 하지만 NCFS의 특성상 완벽한 진동 절연은 불가능하고, 완벽한 상쇄도 힘들기 때문에 sprung mass의 진동에 대한 대책이 필요하며, 스카이-훅 제어이론에 근간한 제어방식을 부가하여 식 (2)와 같은 방식으로 구현하는 것으로 실용화한 바 있다⁽⁶⁾. 그리고 롤과 피치 모드에도 스카이-훅 개념을 추가한 것을 적용하기도 하였다⁽⁶⁾.

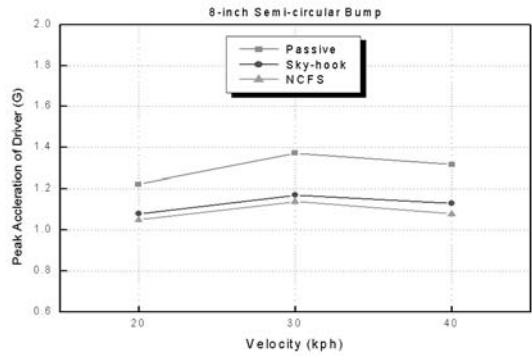
$$\tau = -f(\theta) - C_{sky} \dot{x}_s \quad (2)$$

구성된 차량 모델을 이용하여 반원형 범프와 표준 야지 지형인 프로필Ⅳ에 대해 각각 동특성 해석을 수행하여 수동 현수장치와 스카이-훅 댐핑 제어 및 NCFS를 적용한 능동 현수장치의 동적거동을 비교하였다.

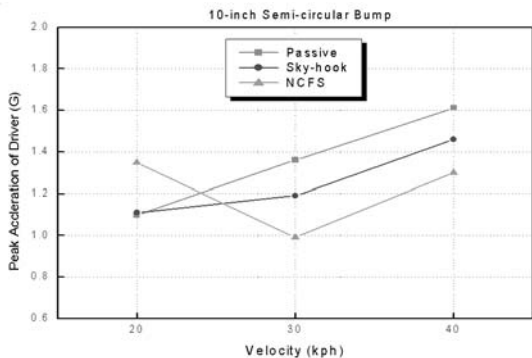
반원형 범프에 대해서는 범프를 20, 30, 40 kph로 주행할 때 운전석에서의 최대 순간가속도를



(a) 6인치 반원형 범프



(b) 8인치 반원형 범프



(c) 10인치 반원형 범프

그림 11 반원형 범프 해석결과

비교하였으며, 그 결과는 그림 11과 같다.

반원형 범프에서의 해석결과를 보면 스카이-훅 댐핑 제어도 수동 현수장치에 비해 향상된 결과를 나타내었으나, NCFS를 적용한 경우가 전반적으로 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

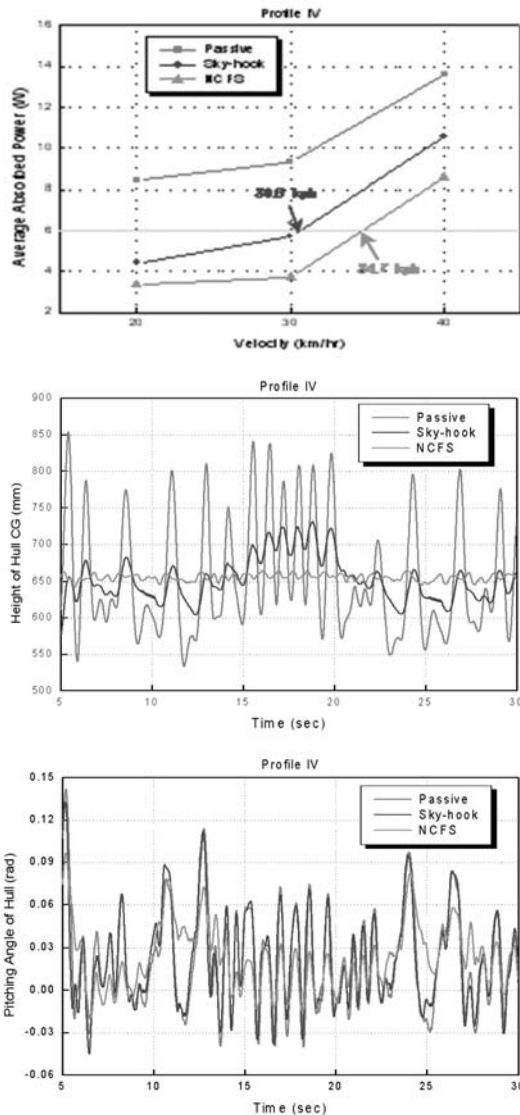


그림 12 프로필Ⅳ 해석결과

표준 야지 지형으로 사용되는 프로필Ⅳ에 대해서는 20, 30, 40 kph로 주행할 때 운전석에서의 평균 흡수동력과 40 kph로 주행할 때 차체의 수직방향 거동 및 피칭각을 비교하였으며, 그 결과는 그림 12와 같다.

프로필Ⅳ에서의 해석결과를 보면 반원형 범프에서의 결과와 마찬가지로 NCFS를 적용한 경우가 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 흡수동력

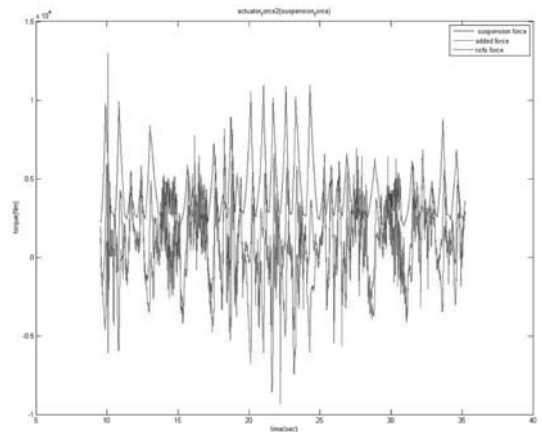


그림 13 요구 제어력 산출결과

한계치로 알려진 6 W를 기준으로 할 때, 수동 현수장치의 경우 한계치를 초과하였으며, 스카이-훅 댐핑 제어의 경우 최대 30.6 kph 까지 주행 가능한 반면 NCFS의 경우에는 34.7 kph 까지 주행이 가능한 것으로 확인되었다.

또한 차량의 거동 측면에서도 NCFS를 적용한 경우가 차체에 전달되는 동적하중을 효과적으로 차단하여 차량의 자세를 가장 안정적으로 유지해 주는 것으로 확인되었다.

이와 같이 해석결과 중 가장 가혹한 조건인 것으로 판단되는 프로필Ⅳ 40 kph 주행 시의 요구 제어력을 산출하였으며, 그 결과는 그림 13과 같다.


요구 제어력 산출결과를 보면 -8,000 ~ 6,000 N·m의 토크 입력이 필요한 것으로 확인되었으나, 이는 제어성능과의 적절한 교환을 통해 제한된 범위 내에서 조정이 가능하다.

이러한 과정을 통해 산출된 요구 제어력을 기준으로 하여 우선 적용이 가능한 전기모터를 선정하고 다음 요구 제어력을 만족하는 감속기의 사양을 결정하게 되면 전기-기계식 능동 현수장치의 작동기에 대한 세부 설계사양을 도출할 수 있다.

6. 맺음말

이 연구에서는 지상전투차량에서 요구되는 조종 안정성 및 진동제어에 대한 요구조건 만족을 위해 현수 제어시스템의 발전추세 및 선진국의 개발동향 등을 분석하고, 이를 통해 최근 연구가 활발히 진행 중인 전기-기계식 능동 현수장치에 대해 고찰해 보았다.

전기-기계식 능동 현수장치는 응답속도가 우수한 전기모터와 감속비가 높은 유성치차의 조합을 통해 능동 가진력을 발생시키는 방식으로 기존 방식에 비해 상당히 우수한 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있으며, 실제 차량에도 적용되어 그 효용성이 검증됨으로써 미래 지상전투차량에 적용될 현수장치로 주목 받고 있다.

전기-기계식 능동 현수장치의 개발은 제어 알고리즘을 포함하는 동특성해석을 통해 요구 제어력을 산출하고, 이를 통해 구현 가능한 전기모터 및 감속기의 사양을 선정하는 과정을 반복적으로 수행하여 최적의 제어 계인을 도출해내는 과정으로 진행된다. 수동 현수장치가 적용된 궤도차량을 대상으로 이와 같은 개발과정을 진행하여 요구 제어력을 도출하였으며, 이로부터 전기모터와 감속기로 구성된 전기-기계식 능동 현수장치의 작동기에 대한 세부 설계사양 도출이 가능하다. 

참고문헌

- (1) Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A., 1974, "Vibration Control using Semi-active Force Generators," J. of Engineering for Industry, Vol. 96, No. 2, pp. 619~626.
- (2) 허승진, 1992, "자동차 능동형 샤시시스템 개발동향," 대한기계학회지, 제32권, 제10호, pp. 847~857.
- (3) 송병석, 손영일, 이종호, 2001, "차량 현가 제어시스템의 개요 및 개발현황," 제어·자동차·시스템공학회지, 제7권, 제3호, pp. 33~44.
- (4) Beno, J. H., et al., 1995, "Electromechanical Suspension for Combat Vehicles," SAE Paper No. 950775.
- (5) Weeks D. A., et al., 1997, "Control System for Single Wheel Station Heavy Tracked Vehicle Active Electromagnetic Suspension," SAE Paper NO. 971087.
- (6) Hoogterp, et al., 1997, "An Energy Efficient Electromagnetic Active Suspension System," SAE Paper No. 970385.
- (7) 손영일, 박혁성, 임영각, 최원석, 송병석, 고영진, 김승균, 1999, "궤도차량 능동현수계의 Sky-hook 제어", 한국소음진동공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집, pp. 277~282.