

## 반능동 현수장치의 실시간 시뮬레이션용 궤도차량 모델 개발

손영일\* · 이종호 · 송병석

고등기술연구원 제품기술연구센터 제어기술팀

### Development of a Tracked Vehicle Model for Real-time Simulation of Semi-active Suspension System

Young-Il Sohn\* · Jong-Ho Lee · Byung-Suk Song

Center for Product Design Technology, Institute for Advanced Engineering, Yongin P.O. Box 25,  
Gyeonggi-do 449-863, Korea

(Received 7 October 2002 / Accepted 30 April 2003)

**Abstract** : In this study, a real-time simulation model was developed for tracked vehicles with in-arm type semi-active hydro-pneumatic suspension unit using MATLAB S-functions. Since the vehicle model uses relative coordinates and massless link elements, the developed model has an enhanced analytic time performance. Through the comparison of simulation results with multi-body software(DADS), the vehicle model is verified.

A controller using on-off skyhook control algorithm is designed with the pilot-controlled proportional valve based on conventional damper characteristics. Exploiting the developed tracked vehicle model with other subsystem model such as a controller model, a suspension unit model, and a test road model, computer simulations are carried out. Control simulation results with the developed tracked vehicle model show that the semi-active suspension control system has a better performance than the conventional suspension system.

**key words** : In-arm hydro-pneumatic suspension unit(암내장형 유기압 현수장치), Semi-active suspension control(반능동 현수제어), Tracked vehicle(궤도차량), Real-time simulation model(실시간 해석모델), S-function(시스템 함수), Skyhook control(스카이훅 제어)

### 1. 서론

과거 군수분야의 현수장치는 노면으로부터의 진동과 충격을 흡수하여 어느 수준이상의 승차감을 확보하기만 하였지만 최근에는 야지에서 빠른 속도로 주행할 수 있도록 함으로써 피탄 확률을 줄여 생존성을 증대하고, 노면의 요철에 의한 동체의 진동을 최소화함으로써 포탑 안정화 시스템의 부담을 줄여 화포의 사격정확도 증대에 기여할 수 있는 높은 수준의 야지주행성능을 가지는 현수장치가 요구

되고 있다. 이러한 야지주행성능은 기동성능 중에 하나로서 단순히 대출력의 엔진만으로 획득할 수 없고 우수한 현수장치가 뒷받침되어야 한다. 초기 군용차량의 현수장치는 주로 토션바 시스템(Torsion Bar System)을 사용하였으나 높은 전투력이 요구됨에 따라 탑재무기의 증대, 체계장비의 증가 등으로 중량이 증가하게 되었고, 증가된 중량에 대응하고 더 나은 기동성능을 얻기 위해 가스스프링과 댐퍼를 하나의 유니트로 만들어 로드암에 포함시킨 암내장형 유기압 현수장치(In-arm Hydro-pneumatic Suspension Unit, ISU)가 등장하였다.

\*To whom correspondence should be addressed.  
sonyi@iae.re.kr

현재 사용되는 유기압 현수장치는 수동형으로서 성능향상에 상당한 제한이 있다. 이에 기존 민수분야에서 연구, 개발해 온 반능동 현수장치를 개량, 개조하여 대중량의 군수용 지상차량에 설치함으로써 기동성을 향상시킬 필요가 있다. 또한 기동성향상을 좌우하는 노면과의 충돌현상(Bottoming)을 최소화하기 위해 가·감속 및 범프(bump)노면 등에 의한 피칭 운동을 억제하는 자세제어를 행하여야 할 필요가 있다. 이를 위하여 민수 분야에서 양산단계까지 이르러 활발히 적용된 바 있는 반능동/능동 현수시스템의 설계 기술이 최근에 와서는 군수분야에서도 활발하게 적용되고 있다.<sup>1-9)</sup>

반능동 현수 시스템은 반능동 유기압 현수장치, 차량의 상태 계측을 위한 각종 센서, 그리고 차량의 각종 상태량으로부터 현수장치의 댐핑 특성을 가변하기 위한 제어 알고리즘을 탑재할 제어기 등으로 구성된다. 이 중 제어기의 성능검증을 위해서는, 실제 시작차량을 제작하여 수행하는 차량시험이 필수적인데 많은 제약이 있으므로, 시뮬레이션 기법을 많이 도입하여 사용하고 있다. 제어기를 시뮬레이션을 통하여 검증하는 과정은 추후 실제 시작차량의 제작 전에 반능동 현수장치의 적용효과를 미리 분석하고, 실제 시작차량단계에서의 수많은 시행착오에 미리 대응하고, 실제 수행이 어려운 시험환경을 쉽게 구현하여 대응할 수 있다는 장점이 있으며 이를 통하여 개발기간과 개발비용의 감소효과를 얻을 수 있다. 제어기의 실시간 제어 알고리즘의 검증을 위해서는 실시간의 차량 시뮬레이션 환경이 구축되어야 하는데, 이러한 환경은 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)라고 불리워지고 있으며, 실제 하드웨어인 제어기와 소프트웨어로 구성되는 차량모델이 실시간 시뮬레이션 내에 동시에 존재하는 구조이다.

본 논문에서는 궤도차량의 반능동 현수 제어기의 성능검증을 위한 실시간 시뮬레이션 모델의 개발을 목적으로 한다. 궤도차량은 험로를 고속으로 달리기 때문에 기존의 선형모델로는 불충분하며, 비선형모델이 필요하다. 또한, 궤도로 인하여 한 로드휠의 거동이 다른 로드휠에 영향일 미치게 되는 효과인 bridging 효과가 반영되어야 한다. 기존의 다물체

차량동역학 이론을 바탕으로 한 모델들은 궤도와 부싱들의 연결을 다물체로 모델링한 수백자유도의 모델이 주종이었는데, 복잡성으로 인하여, 실시간 적용에는 문제가 있다. 기존 상용프로그램인 DADS<sup>10)</sup>에서는 궤도부분 모델을 다물체 차량동역학 모델을 사용하지 않고 구현하였는데, 이는 수백개에 달하는 궤도링크를 각각의 강체로 모델링하지 않고 super-element라는 개념을 도입하여 해결한 것이다. 이 모델은 궤도링크의 질량과 부싱 성분들을 고려하지 않았으므로 실제 모델과는 거리가 있지만, 기존 해석방법과 비교하여 해석시간이 빠르면서도 실험과 비교하여 어느 정도 검증된 모델이다. 실제 실험과의 비교결과 차륜의 거동에 있어서는 super-element 모듈의 경우 실제 실험결과와는 많은 차이를 보이고 있으나, 차체의 거동에 있어서는 어느 정도 일치하는 결과를 보여주고 있음을 확인하였다.

이와는 달리, 상대좌표계를 사용하여 개발된 Recurdyn과 같은 상용모델의 경우, 기존 상용 프로그램 해석방법이 가지고 있는 속도문제를 보완하고, 궤도링크를 각각 강체와 부싱의 연결로 모델링을 하여 상당히 빠른 계산시간을 가진다. 그러나 궤도 하나하나를 강체로 모델링하여 자유도가 늘어나게 되어 실시간 적용에는 아직 제약이 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 궤도부분의 모델은 DADS의 super-element의 개념을 이용하여 개발하였고, 차체 및 로드암의 부분의 모델은 다물체 차량동역학 이론을 이용하여 구성하였다. 또한, 차체의 중량에 비해 유기압 현수장치 내부부품들의 중량은 무시할 만하므로, ISU부분은 기구학적인 모델링으로 구현하였다. 상대 조인트 좌표계를 사용하여 운동방정식의 수를 줄이고 전체의 해석시간을 줄일 수 있었다. 또한, 수식 행렬의 계산과정 중 소모적인 행렬성분(0이나 1)을 미리 수식으로 유도함으로써, 상당한 해석시간을 줄일 수 있었다.

개발 목표 중 롤 모드는 우선적인 고려대상에서 제외되어, 개발된 모델은 차체가 3자유도를 가지며, 6개의 로드암은 회전 조인트로 차체와 연결되어 1개의 회전자유도만을 가져서 총 9개의 자유도를 가

지는 2차원 모델이다. 개발된 모델에는 유기압 현수 장치에 반능동 제어 알고리즘을 적용하였으며, Profile IV 노면 주행 시뮬레이션의 결과를 기존 수동형 현수장치를 장착한 차량모델의 결과와 비교하였다.

## 2. 실시간 궤도차량 모델링

### 2.1 상대좌표계를 이용한 궤도차량 기구학 해석

본 논문에서 개발한 궤도차량 모델은 차체와 6개의 로드암 및 로드휠, 그리고 궤도로 구성되어 있는 모델로서, 차체의 롤 모드와 횡방향 모드를 고려하지 않은 2차원 모델이다. 차체의 경우 피치 모드와 종방향 모드, 그리고 상방향 모드의 3자유도를 가지며, 각각의 로드암은 차체와 회전조인트로 연결되어 각각 1개씩의 회전자유도만을 가지게 되어 총 9 자유도를 가지는 모델이다.

무한궤도는 노면의 궤적에 따른 궤도 길이의 변화를 계산하여 이에 상응하는 스프링 힘을 계산, 로드암에 부가하였다. 궤도에 의한 고주파 성분이 차체 거동 및 승차감에 영향을 주지만, 이 성분은 궤도차량이 요철노면과 같은 노면을 지날 때의 거시적인 운동의 분석에 미치는 영향은 적은 편이며, 모델의 목적이 실시간으로 제어 가능한 현수제어 알고리즘 및 제어기 검증에 있기 때문에 무한궤도의 고주파 특성을 무시하였다.

차량의 운동방정식의 유도는 아래와 같다. 김상섭<sup>11)</sup>과 Haug<sup>12)</sup>의 다물체 동역학 해석방법에 따랐으며 상대조인트 좌표계를 사용하여 해석시간을 줄여 주었다.

#### 2.2.1 위치

Fig. 1은 차체와 대표되는 로드 암의 연결그림을 보여준다. 여기서 로드암과 ISU의 위치와 회전관계는 식 (1), (2)와 같다.

$$\mathbf{r}_{r_i} = \mathbf{r}_b + \mathbf{A}_{\phi_b} \mathbf{s}^{\phi_i} - \mathbf{A}_{\phi_r} \mathbf{s}^{r_i} \quad (1)$$

$$\dot{\phi}_{r_i} = \dot{\phi}_b + \dot{\phi}_{r_i/b} \quad (2)$$

여기서, 절대좌표계  $\mathbf{Y} = [\mathbf{r}_b^T, \phi_b, \mathbf{r}_{r_i}^T, \phi_{r_i}]^T_{21 \times 1}$

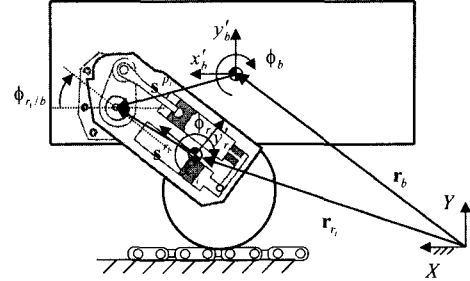


Fig. 1 Tracked vehicle model

상대좌표계  $\mathbf{q} = [\mathbf{r}_b^T, \phi_b, \phi_{r_i/b}]^T_{9 \times 1}$  이다.

또한,  $\mathbf{r}_b = [x_b, y_b]^T$ ,  $\mathbf{r}_{r_i} = [x_{r_i}, y_{r_i}]^T$ ,  $\phi_{r_i}$ 이며,  $\phi_{r_i/b} = \phi_{r_i} - \phi_b (i=1, \dots, 6)$  이다.

$\mathbf{A}_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$ 는 회전행렬이며,  $\mathbf{s}^{\phi}$ 는 차체 중심에서 본 로드 암 회전조인트까지의 절대위치벡터,  $\mathbf{s}^{r_i}$ 는 암 중심에서 본 회전조인트까지의 절대위치벡터, 그리고  $\mathbf{s}^{\phi_i}$ 는 로드암 중심에서 본 로드 휠 중심까지의 절대위치벡터이다.

#### 2.1.2 속도

차체와 ISU의 위치(식 (2))를 시간에 대해서 미분하면 속도를 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{r}}_{r_i} = \dot{\mathbf{r}}_b + \mathbf{u}_i \dot{\phi}_b + \mathbf{v}_i \dot{\phi}_{r_i/b} \quad (3)$$

$$\dot{\phi}_{r_i} = \dot{\phi}_b + \dot{\phi}_{r_i/b} \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{u}_i = \mathbf{B}_b \mathbf{s}^{\phi_i} - \mathbf{B}_{r_i} \mathbf{s}^{r_i}$ ,  $\mathbf{v}_i = -\mathbf{B}_{r_i} \mathbf{s}^{r_i}$ 이며,  $\mathbf{B}_b, \mathbf{B}_{r_i}$ 는 차체와 로드 암의 회전 행렬을 미분한 행렬이다.

위 속도관계식을 행렬로 나타내면

$$\dot{\mathbf{Y}} = \check{\mathbf{B}} \dot{\mathbf{q}} \quad (5)$$

운동방정식에 사용될 가상변위식은

$$\delta \mathbf{Y} = \check{\mathbf{B}} \delta \mathbf{q} \quad (6)$$

여기서,  $\check{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{22} & \mathbf{0}_{21} & \mathbf{0}_{21} & \dots & \mathbf{0}_{21} \\ \mathbf{0}_{12} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{I}_{22} & \mathbf{u}_1 & \mathbf{v}_1 & \dots & \mathbf{0}_{21} \\ \mathbf{0}_{12} & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{I}_{22} & \mathbf{u}_6 & \mathbf{0}_{21} & \dots & \mathbf{v}_6 \\ \mathbf{0}_{12} & 1 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$  로서 속도변환

행렬이다.<sup>11)</sup> 그리고  $I_{22} = I_{2 \times 2}$ ,  $0_{21} = 0_{2 \times 1}$  이다.

2.1.3 가속도

속도관계식 (5)를 시간에 대해서 미분하면 가속도 식은 다음과 같다.

$$\dot{Y} = \ddot{B}\dot{q} + C\dot{q} \tag{7}$$

여기서,  $C$ 는  $\ddot{B}$ 를 시간에 대해 미분한 행렬이다.

2.2 암내장형 유기압 현수장치, 궤도모델 및 노면 접촉 모델

Fig. 1과 같이 ISU 모델은 슬라이드 크랭크 등 여러 성분이 연결된 1자유도 링크 구조이지만, 본 논문에서는 각 링크를 질량이 없는 기구학 구속 조건으로 유도하였다. 이러한 가정은 링크의 질량이 차체나 로드 휠 등의 질량에 비해 상대적으로 작기 때문에 가능하다.

또한, 무한궤도 모델<sup>12)</sup>의 경우, 위에서 언급한 바와 같이 궤도 길이 변화에 따라 스프링장력이 로드 휠에 작용하도록 구현하였으며, 트랙의 링크는 로드 휠의 점선에 대해서 입력 로드 수만큼 나뉘어 적용되도록 모델링하였다. 휠-노면의 접촉 모델은 전후력(Shear force)을 고려하지 않은 Bekker의 모델을 적용하였다.

2.3 운동방정식

절대좌표계에서 차체와 로드 암의 운동방정식을 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta Y_b \\ \delta Y_r \end{bmatrix}^T \left( \begin{bmatrix} M_b & 0 \\ 0 & M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y}_b \\ \ddot{Y}_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_b \\ Q_r \end{bmatrix} \right) = 0 \tag{8}$$

여기서,  $Q_b$ 는 차체에 가해지는 외부 힘과 토크,  $Q_r$ 는 로드암에 가해지는 외부 힘과 토크이며,  $Q_b = [F_b, n_b]^T$ ,  $Q_r = [F_r, n_r]^T$ 로 정의된다. 여기에는 현수장치, 궤도 등에 의한 힘과 토크가 포함된다. 또한,

$$M_b = \text{diag}(m_b, m_b, J_b)_{3 \times 3},$$

$$M_r = \text{diag}(m_r, m_r, J_r)_{6 \times 6} \text{ 이다.}$$

식 (8)을 다시 간략히 표현하면,

$$\delta Y^T (M \ddot{Y} - Q^A) = 0 \tag{9}$$

$$\text{여기서 } M = \begin{bmatrix} M_b & 0 \\ 0 & M_r \end{bmatrix}_{9 \times 9}, Y = \begin{bmatrix} Y_b \\ Y_r \end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

위에서 유도된 식 (6),(7)을 식 (9)에 적용하면,

$$\ddot{B}^T M \ddot{B} \ddot{q} = \ddot{B}^T Q^A - \ddot{B}^T M C \dot{q} \tag{10}$$

이렇게 운동방정식을 상대조인트 좌표계를 이용하여 단순한 상미분방정식으로 유도하였으며, 이 방정식을 이용하여 궤도차량 모델의 운동방정식을 구하였다.

2.4 모델 구성 및 검증

본 연구에서 개발된 궤도차량 모델에 반동동 제어 알고리즘을 추가한 제어 시뮬레이션 기반을 Matlab/Simulink 상에서 구현하기 위해 차량모델을 S-Function<sup>13)</sup>으로 구성하였다. 구성된 Simulink 모델은 Fig. 2와 같으며, 차량모델, ISU모델, 제어기와의 성능 비교를 위한 제어 알고리즘모듈, 제어기와의 연결을 위한 interface 모듈 등으로 구성되어 있다.

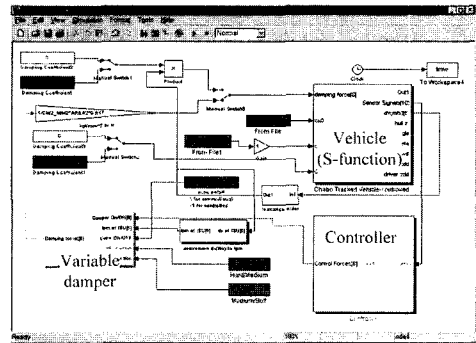


Fig. 2 2Dimensional simulation model of tracked vehicle (Simulink model with S-function)

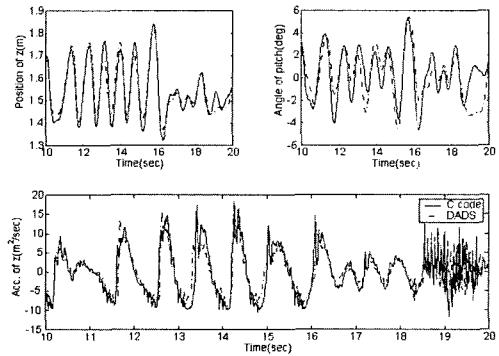


Fig. 4 Comparison of simulation result of C model and DADS model

이렇게 구성된 모델의 검증을 위해 다물체 동역학 상용 해석 소프트웨어인 DADS를 이용한 궤도차량 모델의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 두 궤도차량 모델을 Profile IV노면에 동일한 조건(시속 40kph)에서 주행시켜 보았다. 두 모델의 차체 수직 변위, 피치각, 수직가속도를 Fig. 3에서 비교하였는데, 상당히 유사한 결과를 보여준다.

### 3. 제어 알고리즘 구성

#### 3.1 제어 알고리즘

개발하고자 하는 제어시스템의 성능 목표는 Profile IV노면에서 차체에 과도한 피치각으로 인하여 노면과 충돌하는 현상인 bottoming 현상이 없이 주력 전차 수준의 최고 속도인 40kph로 주행을 가능하게 하는 것이며 이때의 평균 흡수동력을 6W 이내로, 최대가속도를  $25 m/s^2$  이내로 유지하도록 하는 것이다. 이를 위해서 제어대상은 피치(pitch)모드와 바운스(bounce)모드를 대상으로 하였으며, 롤(roll)모드는 제외하였다.

제어 대상 궤도차량에는 전·후 2개의 가속도 센서, 피치가속도를 측정하기 위한 피치각속도 자이로를 장착하였으며, 6개의 로드 압에는 RVDT를 장착하여 로드 압의 운동을 측정하게 되며, 차량 쪽으로부터 속도신호를 받게 된다. 또한, 6개의 ISU에는 on-off 솔레노이드밸브(solenoid valve)를 이용하여 감쇠력을 2단으로 변환할 수 있는 가변 댐핑 매니폴드(damping manifold)를 사용하였다. 각종 센서 신호는 A/D변환 등을 통하여 디지털 신호로 변환한 다음, 저대역필터, 적분기, 그리고 DC offset을 제거하기 위한 고대역필터 등의 신호처리를 거쳐서 제어 알고리즘을 위한 입력신호로 계산되게 되며, 가속도 센서의 경우 궤도로 인하여 들어오게 되는 차속에 따라 변하는 일정주파수의 가진신호를 노치필터(Notch filter)를 이용하여 제거한다.

제어 알고리즘은 on-off skyhook 제어 알고리즘을 사용하였다. 전·후 두 개의 가속도 센서로부터 차체의 무게중심점에서의 상방향 속도를 계산하며 아래와 같이 skyhook 제어이득을 곱하여 제어력을 계산한다. 또한, 피치 자이로에서 계산된 피치각속도에도 피치 가속도 제어이득을 곱하여 피치 제어 토크

값을 계산하게 된다.

$$F_{sky} = -C_{sky} \cdot \dot{z}_{hull} \quad (11)$$

$$T_{prate} = -C_{prate} \cdot \dot{z}_p \quad (12)$$

이 제어력과 제어 토크값은 각 로드 압에 분배되어 각 ISU의 피스톤에서의 압력으로 계산되게 되며, 각 로드압에 장착된 RVDT에서 측정된 로드압의 각 도로로부터 로드압의 각속도를 계산한다.

이제 이러한 물리량 들을 이용해서, on-off skyhook 제어알고리즘에 의한 hard, soft 단의 변경 알고리즘을 아래와 같이 구현한다.

$$\begin{aligned} & \text{if } F_{total} \cdot \theta > 0 \\ & \quad \text{damper} = \text{hard setting} \\ & \text{else} \\ & \quad \text{damper} = \text{soft setting} \end{aligned} \quad (13)$$

시뮬레이션에서는 lookup table로 구현된 hard 특성과 soft 특성값을 통하여 댐핑 매니폴드로 인한 압력을 계산하고, 이를 이용하여 차체의 ISU 장착지점에 작용하는 등가 토크로 변환하여 DADS 모델 혹은 C언어 궤도차량 모델에 입력하여 시뮬레이션을 진행하게 된다.

#### 3.2 가변 댐퍼의 특성 선정

기존의 댐핑 매니폴드의 경우 오리피스(orifice)에 판스프링으로 개폐되는 메인밸브가 병렬로 장착되어 있는 구조로 되어 있다. 오리피스에 흐르는 유량에 의하여 압력차가 발생하게 되며, 이 압력차가 판스프링에 미리 주어진 예변위에 의해서 메인 밸브를 닫아 주고 있는 힘보다 크게 되면 메인밸브가 열리게 되며, 판스프링이 최대로 열리게 되는 점 이후로는 다시 하나의 오리피스처럼 동작하는 특성을 가진다.

가변댐퍼는 이 기존 댐핑 매니폴드의 특성을 기반으로 하여 구성하였으며, 이 방법으로는 아래의 세 가지 정도를 들 수 있다.<sup>14-15)</sup>

1) 직접 제어식 비례 트로틀 밸브(Directly controlled proportional throttle valve) : 기존 오리피스에 병렬적으로 가변오리피스를 추가하는 구조이며 설계변경이 쉬우나 메인밸브가 열리는 점 이후의 가변범위가 좁은 편이다. 특성곡선은 Fig. 4와 같다.

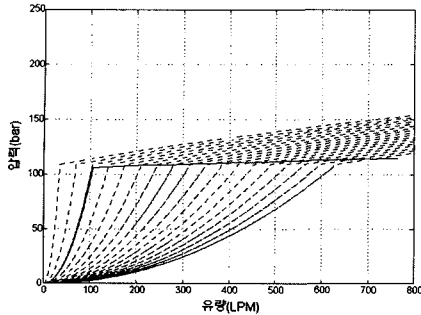


Fig. 4 Characteristic curves of the directly controlled proportional throttle valve

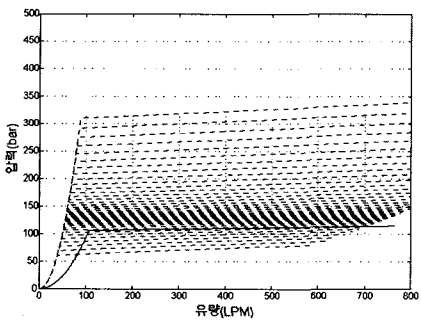


Fig. 5 Characteristic curves of the directly controlled proportional pressure valve

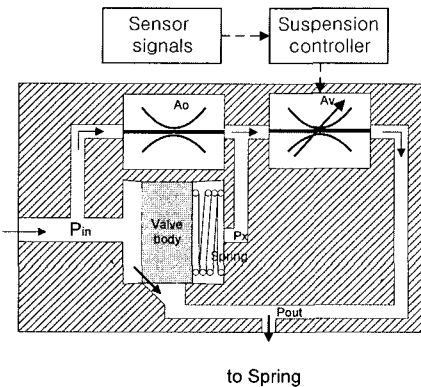


Fig. 6 Schematic diagram of pilot-controlled proportional valve

2) 직접 제어식 비례 압력 밸브(Directly controlled proportional pressure valve) : 메인 밸브의 스프링의 예변위를 변화시켜 주기 위한 작동기를 추가하여 메인 밸브가 열리는 점을 변화시키는 것으로 Fig. 5 와 같이 메인 밸브가 열리기 전의 특성은 고정되어서 성능이 좋지 않다.

3) 파일럿 제어식 비례제어밸브(Pilot-controlled proportional control valve) : 직렬로 두 개의 오리피스를 사용하며 한 개의 오리피스의 개도를 조절하여 메인밸브를 개폐하는 구조이며 그 구조는 Fig. 6과 같다. 가변 오리피스의 직경을 솔레노이드 밸브 등으로 가변시켜 주게 되면 Fig. 6에서  $P_x$ 가 가변되게 되며 이에 따라서 메인밸브가 열리게 되는 점이 변화하게 된다. 이러한 형태의 가변댐퍼는 폭넓은 가변특성을 얻을 수 있으나, 기존 댐핑 메니폴드의 대대적인 구조변경이 필요하다.

앞서 설명한 3개의 가변댐퍼 형태 중 2)번의 경우는 실제 적용하기에는 성능에 문제가 있다고 생각되며, 1)번과 3)번의 경우는 설계 파라메타의 변경을 통하여 어느 정도 적절한 가변범위의 확보가 가능하리라고 생각된다. 시뮬레이션 상에서는 가장 좋은 성능을 내는 것으로 생각되는 3)번의 형태로 가변댐퍼를 가정하고 그 범위를 결정해 보기로 하였다. 3)번 형태의 가변댐퍼를 적용하였을 때의 구조 및 이 때의 특성 방정식은 아래와 같다.

메인밸브가 열리기 전의 압력-유량 관계식은 아래 식(14), (15)와 같다.

$$P_e - P_{out} = \frac{\gamma}{2g} \times \left( \frac{Q}{C_d \times A_{eq}} \right)^2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{A_o^2} + \frac{1}{A_v^2} \quad (15)$$

여기서  $P_e$  는 입력쪽 압력,  $P_{out}$  는 출력쪽 압력,  $Q$  는 유량,  $C_d$  는 오리피스의 손실계수,  $\gamma$  는 유체계수이며,  $A_o$  는 고정오리피스의 면적,  $A_v$  는 가변 오리피스의 면적이다.  $A_{eq}$  는 고정오리피스와 가변 오리피스를 포함한 등가 오리피스의 면적으로 식 (15) 에서 계산된다.  $A_i$  는 메인밸브에서 입력 쪽의 압력 작용면적,  $A_x$  는 메인밸브에서 출력 쪽의 압력 작용 면적이다.

메인 밸브가 열리는 점에서의 메인 밸브의 방정식은 메인 밸브 바디 양쪽에 동작하는 힘이 평형을 이루는 시점으로서 다음 식 (16)과 같은 방정식으로 표현된다.

$$P_{in}A_i - P_xA_x = F_s(S) \quad (16)$$

여기서  $F_s(S)$ 는 예변위  $S$ 로 인하여 작용하는 스프링 힘이다.

따라서 메인벨브가 열리는 점의 유량은 아래 식 (17)과 같이 표현되며 가변 오리피스  $A_v$ 의 가변을 통해서 Fig. 7과 같이 이 지점 및 이후의 특성을 제어할 수 있게 된다.

$$Q = C_d \sqrt{\frac{2gF_s(S)}{\left(\frac{A_i}{A_o^2} - \frac{(A_i - A_v)}{A_v^2}\right)}} \quad (17)$$

이러한 가변밸브의 특성 중에서 hard와 medium, soft의 세 단을 선택하여 제어알고리즘에서 사용하였다.

### 3.3 제어 시뮬레이션

최종 제어성능을 평가하기 위하여, 궤도차량 모델에 현수장치 제어알고리즘과 가변밸브를 추가한 모델을 구성하여 Profile IV노면을 40kph로 주행하는 제어시뮬레이션을 수행하였다. 전투용 궤도장갑차량에 있어서 가장 중요한 것은 야지에서의 생존성을 보장하는 빠른 기동력이다. 이러한 빠른 기동이 가능하려면 굴곡이 심한 야지에서 빠른 속도로 주행 시 차체의 과도한 피치각의 변화와 이로 인한 노면과의 충돌가능성을 최대한 막는 것이 가장 중요하다. 또한, 두 번째로는 고속의 야지주행시의 탑승자가 용인할 수 있을 정도의 승차감의 유지를 들 수 있다. 따라서 여기서는 최대 피치각, 최대가속도 및 흡수동력 등을 주된 성능인자로 삼아서 그 성능을 보고자 하였다.

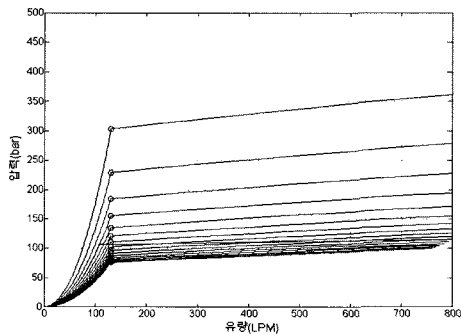


Fig. 7 Characteristic curves of the pilot-controlled proportional valve

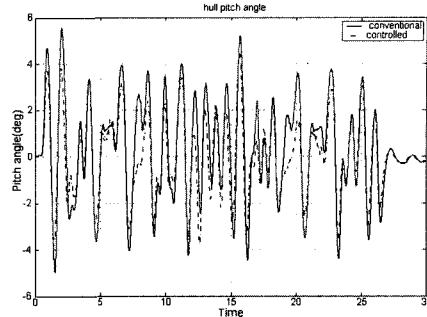


Fig. 8 Comparison of vehicle pitch angles

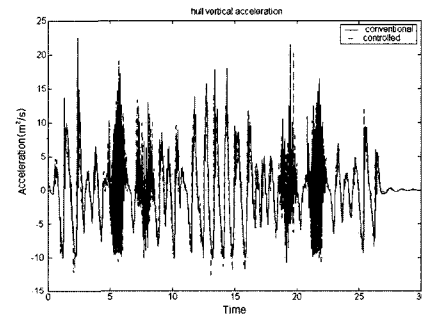


Fig. 9 Comparison of vehicle vertical accelerations

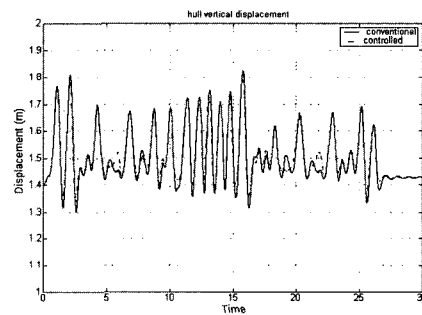


Fig. 10 Comparison of vehicle vertical displacements

Fig. 8은 피치각을 비교한 것이며, 최대 피치각이 약 20% 정도까지 감소함을 보여준다. 이 시뮬레이션 결과는 본 연구에서 설계한 반능동 현수장치의 적용 시 야지에서의 고속 주행하에서 차체가 노면과 충돌할 수 있는 경향을 상당히 줄여줄 수 있음을 보여준다. Fig. 9는 차체의 상방향 가속도를 비교한 것이다. 최대값이 약간 감소하였으며, 전체적 경향에서는 비슷한 성능을 보여주고 있으며, 이는 승차감은 기존 차량의 승차감 수준을 유지하고 있음을 보여준다. Fig. 10은 차체의 상방향 변위의 비교 그

래프로, 제어 시에 상방향 변위가 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 피치 모드 뿐 아니라, 차체의 바운스 모드에서의 자세변화도 억제되고 있음을 볼 수 있다. Table 1에서는 차체의 피치각, 최대가속도, RMS 가속도 및 흡수동력을 비교하였다. 비교한 결과 기존에 대비하여 최대 피치각은 20%정도 감소하였으며, 가속도값과 흡수동력은 약간 감소하였으나 비슷한 수준으로 유지됨을 확인하였다.

Table 1 Comparison of the control performances

	Conventional damper	Controlled damper
Max. vertical acceleration	22.5 ㎉	21.1 ㎉
Max. pitch angle	5.6 deg	4.5 deg
RMS vertical acceleration	5.1 ㎉	4.8 ㎉
Average absorbed power	9.1 W	8.9 W

이상의 결과에서, 본 연구에서 설계한 반능동 현수장치의 적용 시, 야지에서 고속주행에 따른 과도한 피치각 발생을 억제시켜주어 주행 시 우려되는 노면과의 충돌현상의 가능성을 줄여주고 있음을 확인할 수 있으며, 승차감은 기존 차량의 성능을 유지하는 것을 확인하였다. 승차감의 경우 기존차량이 6W의 조건을 만족시키지 못하고 있는데 이를 위해서는 다단댐퍼나 연속댐퍼 및 이에 맞는 제어 알고리즘의 검토가 필요하리라고 생각된다.

#### 4. 결론

궤도차량의 야지주행성능을 높이기 위해서 기존 수동형 유기압 현수장치를 응용하여 반능동 유기압 현수장치 제어를 개발하고자 하며, 이를 위해 제어기의 성능을 HILS 환경에서 검증이 가능하도록 실시간 2D 궤도차량 모델을 개발하였다. 또한 여기에 on-off skyhook 제어 알고리즘을 기초로 한 유기압 현수장치의 반능동 제어 알고리즘을 추가하고 수동형 유기압 현수장치를 바탕으로 한 가변댐퍼를 설계하였다. Matlab/Simulink를 이용하여 구성한 제어 시뮬레이션 결과는 기존 현수장치 장착 차량에 대비하여 승차감은 기존차량 수준으로 유지하면서

야지주행성능이 향상되는 것을 보여주고 있다.

향후로는 개발 중인 알고리즘을 실제 Prototype 제어기에, 실시간 궤도차량 모델을 DSP 보드에 이식하여 연계한 실시간 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 (주)대우종합기계의 연구비 지원(궤도차량용 반능동형 유기압 현수장치 제어기 개발(II))으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### References

- 1) L. R. Miller, C. M. Nobles, "The Design and Development of a Semi-active Suspension for a Military Tank", SAE 881133, 1988.
- 2) A. Deakin, D. Crolla, A. Shovlin, "Design of Limited Bandwidth Active Control Strategy for a 6x6 Combat Support Vehicle", Proceeding of AVEC 1998, pp.779-784, 1998.
- 3) D. W. Park, S. B. Choi, Y. S. Kang, M. S. Suh, M. J. Shin, K. J. Choi, "Vibration Control of a Tracked Vehicle with ER Suspension Units (II) - Modeling and Control of a Tracked Vehicle", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.23, No.11, pp.1960-1969, 1999.
- 4) Y. I. Sohn, H. S. Park, Y. K. Lim, W. S. Choi, B. S. Song, Y. J. Ko, S. G. Kim, "Sky-hook Control of Tracked Vehicle Active Suspension", Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp.277-282, Muju, Korea, May 1999.
- 5) I. Youn, J. Im, H. Shin, J. Lee, M. Shin, "Performance Evaluation of Control Algorithms for 1/2 Tracked Vehicle with Semi-Active Suspension System", Transaction of KSAE, Vol.9, No.4, pp.139-147, 2001.
- 6) I. Youn, J. Im, "Performance Improvement of 1/2 Tracked Vehicle with Respect to Ride Comfort using Preview Information", 2002 Spring KSAE Conference Proceeding, Vol.II, pp.876-882, 2002.



- 7) Y. Kim, B. kwak, Y. Park, "Preview Control of Tracked Vehicle Suspension", Vehicle Vibration & Powertrain, Movement Ability Symposium, KSAE, pp.96-101, October 2001.
- 8) Y. Kim, K. S. Kim, Y. Park, "Robust Preview Control of High Mobility Tracked Vehicle", 2002 KSAE Spring Conference Proceeding, Vol. II, pp.868-875, 2002.
- 9) T. Y. Kim, Y. B. Lee, C. H. Lee, J. H. Lee, "Development of a Semi-Active In-Arm Suspension Unit in Tracked Combat Vehicles", 2001 KSAE Autumn Conference Proceeding, Vol.1, No.2, pp.929-934, 2001.
- 10) DADS User's Manual, CADSI, USA, 1993.
- 11) E. J. Haug, "Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System Vol. I : Basic Method", Allyn and Bacon, 1989.
- 12) S. S. Kim, M. J. Vanderploeg, "A General and Efficient Method for Dynamic Analysis of Mechanical Systems Using Velocity Transformations", J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Transactions of ASME, Vol.108, June, pp.176-182, 1986.
- 13) M. K. McCullough, E. J. Haug, "Terra- Dynamic of High Mobility Track Vehicles", Technical Report 85-22, Center for Computer Aided Design, The Univ. of Iowa, December 1985.
- 14) Writing S-functions, Matlab/Simulink manual, Mathworks, 2000.
- 15) F. Wößner, P. Causemann, "Continuously Adjustable Shock Absorbers Comparison, Calculation and Optimization", Proceedings of AVEC 1992, pp.309-314, September 1992.
- 16) S. So, K. Cho, "A Study on the Variable Damping Characteristics of the Continuous Controlled Semi-active Suspension System and the Effect Analysis of the Vehicle Motion Performance", Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.190-198, 1999.
- 17) J. H. Lee, Y. I. Sohn, B. S. Song, J. H. Kim, "Dynamic Analysis of Tracked Vehicle with Hydro-Pneumatic Suspension System", 2000 KSAE Autumn Conference Proceeding, Vol. II, pp.746-751, 2000.