

스카이 훅 제어를 이용한 6X6 견마 차량의 주행 안정성 향상 방안 연구[§]

전수희* · 이정한* · 유완석*† · 김재용**

* 부산대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소

Study on Improving Stability of 6×6 Skid-Steering Vehicle by Employing Skyhook Control Method

Su Hee Jeon*, Jeong Han Lee*, Wan Suk Yoo*† and Jae Yong Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

** Agency for Defense Development

(Received December 24, 2010 ; Revised June 27, 2011 ; Accepted June 29, 2011)

Key Words : Vehicle Driving Stability(차량 주행 안정성), Sky-hook Control(스카이 훅 제어), Multi-variable Control(다변수 제어)

초록: 견마로봇이 야지 노면에서 주행할 때 로봇에 설치되어 있는 각종 장비의 보호를 위하여 주행 안정성을 높이는 것이 중요하다. 견마로봇의 주행 안정성을 평가하는 데에 있어서 차체의 수직 가속도, 롤 각가속도, 피치 각가속도의 영향이 지배적이다. 가속도가 발생한다는 의미는 차체에 그만큼의 힘이 가해진다는 것을 의미한다. 따라서 차체에 작용하는 힘의 크기를 조절함으로써 차량의 안정성을 향상시킬 수 있다. 차량의 안정성을 높이기 위한 하나의 방법으로 MR 댐퍼와 스카이 훅 제어기법을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 6X6 견마로봇에 대하여 MR 댐퍼에 스카이 훅 제어기법을 적용하였으며, 수직 가속도 및 롤, 피치 각가속도를 줄이는 방향으로 제어하여 차량의 주행 안정성을 향상시켰다

Abstract: In order to protect equipment such as controllers, it is important to improve the driving stability of 6×6 skid-steering vehicles driven on rough roads. The estimation and improvement of the driving stability should be based on the vertical acceleration, roll acceleration, and pitch acceleration. These variables will be used to achieve multivariable control and increase the vehicle driving stability. In this study, to improve vehicle stability by reducing the vertical acceleration, roll angular acceleration, and pitch angular acceleration, the skyhook control method is employed to control MR(Magnetorheological) dampers equipped with the vehicle. The proposed control system is tested in multibody dynamic simulation.

1. 서 론

스키드 조향 방식의 견마로봇 차량은 야지 노면을 주행하며 다양한 작업을 수행하게 되는데, 작업을 수행하는 데에 필요한 각종 장비와 제어기를 보호하기 위해서는 차량이 안정적으로 주행하여야 한다. 특히 거친 노면을 주행할 때 차량의 안정성과 관계되는 요소로는 수직 가속도, 롤 각가속도,

피치 각가속도가 있으며 이들 요소들의 크기가 클수록 차체에 전달되는 충격 또한 커져 차량의 안정성을 해치므로 각종 장비의 훼손이 발생할 가능성이 커진다.

본 연구에서는 6X6 견마로봇 차량에 스카이 훅 제어를 적용하여 차량이 특정 주파수를 가지는 정현파 형태의 직선 도로를 주행할 때 차체에서 발생하는 수직 가속도와 롤 각가속도, 피치 각가속도의 발생을 줄이는 방안에 대하여 연구하였다. 견마로봇 차량 모델은 Lu 에 의하여 연구되었던 일반 4 륜 차량 모델과 달리⁽¹⁾ 6 개의 암(arm)과 6 개의 바퀴로 구성되어 있으며 일반 차량 모델의 수직 현가장치와 다르게 토션 스프링으로 현가장

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

치가 구성되어 있는 것이 특징이다. 견마 로봇 차량에 스카이 훅 제어를 적용하기 위해서 차체의 움직임과 암의 회전에 사이의 방향성을 정의한 후 수직, 물, 피치 세 방향에 대하여 각각의 스카이 훅 제어를 적용하였으며 그에 대한 댐핑 계수를 구하기 위한 시뮬레이션을 수행하고 passive control 견마로봇 차량의 상태와 비교하였다.

견마로봇 차량 모델은 ADAMS 를 이용하여 모델링 하였고 MATLAB 의 SIMULINK 를 이용하여 제어 알고리즘을 구성한 후 ADAMS 와 co-시뮬레이션을 수행하였다.

2. 견마로봇 동역학 모델링

2.1 차량 모델링

차량의 주행 안정성 향상을 위한 시뮬레이션을 위하여 다음의 2 가지를 가정할 수 있다. 첫 번째 가정으로는 차량은 직선 도로 위를 주행하며, 두 번째 가정은 암 자체는 모터에 의하여 회전하지는 않지만 강성에 의한 회전은 발생할 수 있다는 것이다.

본 연구에 사용된 차량은 6 개의 바퀴와 6 암으로 구성되어 있으며, 차체와 암, 그리고 암과 바퀴 사이에는 회전 조인트(revolute joint)로 연결되어 있다. 이를 토대로 차량의 자유도를 계산해보면 Table 1 과 같이 총 18 자유도 시스템을 알 수 있다.

본 차량의 현가장치는 팔과 차체 사이의 회전 스프링(torsion spring)과 댐퍼로 구성되어 있다. 이 회전 스프링은 비선형 특성을 가지며 댐퍼는 선형 특성을 가진다. 이 때, i 번째 암과 차체 사이에 부착된 회전 스프링과 댐퍼에 의한 반력을 구하는 식은 다음과 같다. 이 때 K' 은 회전스프링의 강성을 나타내며 θ_i 와 θ_i^{ini} 는 각각 i 번째 암의 각도와 i 번째 암의 초기 각도를 나타낸다. 그리고 C 는 암의 감쇠계수를 의미한다.

$$T_i = K' \cdot (\theta_i - \theta_i^{ini}) + C \cdot \dot{\theta}_i \quad (1)$$

이 때 비선형 특성을 가지는 스프링의 암 각도에 대한 토크 강성 변화 곡선은 다음과 같은 5 차다항식의 형태로 유도된다.

$$K' \cdot \theta_i = -2032.86 \cdot \theta_i - 4320.86 \cdot \theta_i^2 + 9366.22 \cdot \theta_i^3 - 10681.14 \cdot \theta_i^4 + 6021.12 \cdot \theta_i^5 \quad (2)$$

타이어 모델의 경우 Magic Formula 모델을 적용하여 타이어에 작용하는 모든 방향의 힘들을 고려하였다.⁽²⁾

위의 수식 (1)과 수식 (2), 그리고 Magic Formula 모델을 이용하여 노면에 의하여 발생하는 타이어의 힘들과 현가장치의 토크를 운동방정식에 입력하여 차체에 작용하는 힘을 구한 후, 이를 아래의 운동방정식의 힘과 관련된 항에 대입하여 수식 (3)과 같은 형태를 가지는 차량의 운동방정식을 유도할 수 있다. 이 때 M 행렬은 차량의 질량 및 질량관성모멘트와 관련된 행렬이며 Φ_q 행렬은 구속방정식의 자코비안 행렬이고 \ddot{q} 은 차체 및 각 암에서 발생하는 가속도 벡터이며 λ 는 조인트에 발생하는 반력에 관한 벡터이다. 그리고 Q 는 차체에 작용하는 힘과 관련된 벡터이고 γ 는 구속방정식을 편미분 하였을 때 자코비안을 제외한 나머지 항들을 우항으로 옮긴 벡터를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (3)$$

그리고 차량은 바퀴에 장착되어 있는 모터 (motor)를 이용하여 주행하게 되는데 본 연구에서는 40km/h 로 달릴 수 있도록 토크를 인가하여 주행하도록 하였다. 이를 Fig. 1 과 같이 상용 동역학 프로그램인 ADAMS 를 이용하여 견마로봇 차량을 모델링 하였다.

Table 1 Degree of freedom of the 6X6 vehicle

13 bodies	1 chassis	1X6=6	78DOF	18DOF
	6 arms	6X6=36		
	6 wheels	6X6=36		
12 joints	6 rev joint (chassis-arm)	6X5=30	-60DOF	
	6 rev joint (chassis-wheel)	6X5=30		

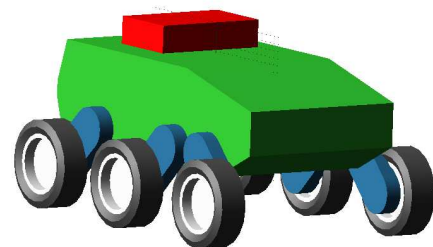


Fig. 1 Vehicle Model by ADAMS

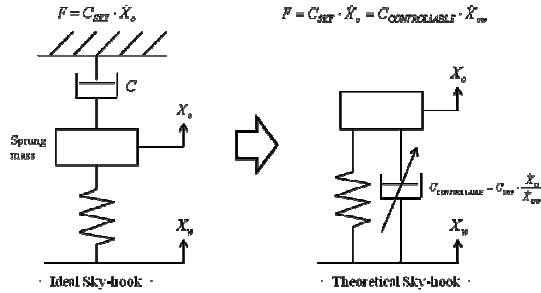


Fig. 2 2-DOF system with sky-hook damper control

3. MR 댐퍼를 이용한 스카이 훅 제어기 설계

스카이 훅 제어란 Fig. 2 와 같이 가상의 고정된 높이의 천장과 스프링 상 질량(sprung mass) 사이에 가상의 감쇠기가 장착되어 있어 스프링 상 질량의 진동을 감소시킬 수 있다는 이상적인 내용의 이론이다.⁽³⁻⁷⁾ 하지만 실제로는 가상의 천장과 스프링 상 질량 사이에 감쇠기를 장착할 수 없기 때문에 스프링 상 질량과 스프링 하 질량(unsprung mass) 사이에 감쇠기를 부착하여 스프링 상 질량의 수직 속도를 피드백 받아서 제어를 수행하게 된다.

즉, 수식 (4) 또는 (5)와 같이 스프링 상 질량과 스프링 하 질량의 속도의 부호에 따라 힘의 인가 여부가 결정된다.

$$\dot{X}_s(\dot{X}_s - \dot{X}_w) > 0 \text{ 인 경우 } F = C \cdot \dot{X}_s \quad (4)$$

$$\dot{X}_s(\dot{X}_s - \dot{X}_w) \leq 0 \text{ 인 경우 } F = 0 \quad (5)$$

이 때 \dot{X}_s 은 스프링 상 질량의 속도를 의미하고 \dot{X}_w 은 스프링 하 질량의 속도를 의미하며 C 는 스카이 훅제어기의 감쇠계수, F 는 스프링 상 질량에 작용하는 감쇠력을 의미한다.

스카이 훅 제어 알고리즘을 견마로봇 차량에 적용할 경우, 일반 수직 현가장치가 장착된 차량 모델에 스카이 훅 제어를 적용하는 경우와 차이점이 발생하게 된다. 스프링 상 질량은 차량의 차시(chassis)에 해당하고 스프링 하 질량은 차량의 암에 해당하게 된다. 본체는 수직 방향, 롤 방향, 피치 방향으로 병진 운동 또는 회전 운동이 발생하고 암은 본체의 운동에 따라 현가장치의 강성에 의하여 시계방향 또는 반시계 방향으로 회전이 발

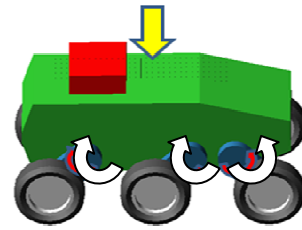


Fig. 3 Motion of vehicle arm generated by chassis vertical acceleration

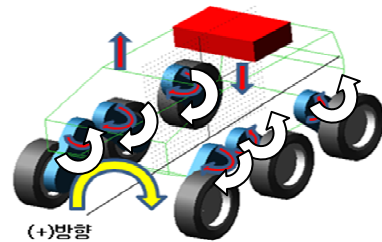


Fig. 4 Motion of vehicle arm generated by roll angular acceleration

생한다. 이 때 차량의 본체와 암 사이에 발생하는 속도의 방향성에 의존하여 감쇠력 작용 여부를 판단하게 된다. 스프링 상 질량과 스프링 하 질량에 발생하는 속도의 방향성을 결정하기 위하여 본체의 운동 상태에 따른 암의 거동을 분석해보면 다음과 같다.

첫째, 차체에 아래쪽 방향으로 가진이 발생하는 경우 Fig. 3 와 같이 앞쪽 암은 반시계 방향으로 각가속도가 발생하고 중간, 뒤쪽 암에는 시계방향으로 각가속도가 발생하게 된다. 그리고 차체에 윗방향으로 가진이 발생하는 경우에는 회전 방향이 반대로 발생하게 된다.

둘째, Fig. 4 와 같이 차체가 (+)방향으로 롤 회전이 발생하는 경우 차체에는 오른쪽 아래 방향 힘이 차체의 왼쪽에는 위쪽 방향 힘이 발생하게 된다. 이 때 오른쪽 앞쪽 암의 경우에는 시계 방향으로 arm 이 회전하고, 오른쪽 중간과 뒤쪽 암의 경우에는 반시계 방향으로 회전하게 된다. 왼쪽 암의 경우에는 반대방향으로 암 회전이 발생하게 된다.

셋째, Fig. 5 와 같이 차체가 피치 방향에 대하여 회전하는 경우 차체의 앞쪽에는 아래 방향 힘이 발생하게 되고 차체의 뒤쪽에는 위쪽 방향 힘이 발생하게 된다. 이 때 암의 거동은 오른쪽 앞, 뒤쪽에 위치한 암은 반시계 방향으로 회전하고 오른쪽 중간 암은 시계방향으로 회전하게 된다.

Table 2 Directional definition for damping force

	차체 방향	right-front	right-middle	right-rear	left-front	left-middle	left-rear
수직 방향	위(+)	ccw (+)	cw (-)	cw (-)	ccw (+)	cw (-)	cw (-)
	아래(-)	cw (-)	ccw (+)	ccw (+)	cw (-)	ccw (+)	ccw (+)
롤 회전	(-) 회전	cw (-)	ccw (+)	ccw (+)	ccw (+)	cw (-)	cw (-)
	(+) 회전	ccw (+)	cw (-)	cw (-)	cw (-)	ccw (+)	ccw (+)
피치 회전	(-) 회전	cw (-)	ccw (+)	cw (-)	cw (-)	ccw (+)	cw (-)
	(+) 회전	ccw (+)	cw (-)	ccw (+)	ccw (+)	cw (-)	ccw (+)

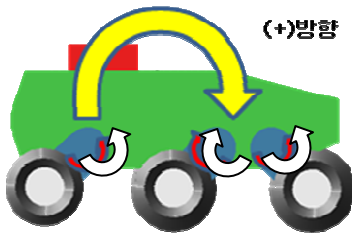


Fig. 5 Motion of vehicle arm generated by chassis pitch angular acceleration

즉, 차체와 암이 아래 Table 2 와 같이 움직이거나 회전하는 경우 암에 감쇠력이 토크의 형태로 작용하여 차량의 주행 안정성을 높이는 데에 기여하게 된다.

4. 스카이 훅 제어기의 감쇠 계수 결정

차량이 노면을 주행하였을 때 차량의 상태를 판단할 수 있는 요소로는 수직 가속도, 피치 각가속도, 롤각가속도 성분이 있는데 각각의 방향에 스카이 훅 제어기를 적용하게 된다. 그래서 각 방향에 대한 스카이 훅 감쇠 계수를 정의하여야 할 필요가 있다.⁽⁸⁾ 먼저 수직 방향 성분에 대해서만 스카이 훅 제어를 적용하였을 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 주행노면은 Fig. 6 과 같은 형태의 정현파 노면이며 수직 방향 스카이 훅 제어기를 제외한 나머지 방향에 대해서는 감쇠 계수를 0으로 인가하고 시뮬레이션을 수행하였다.

6X6 차량이 주행하게 될 노면 형상은 Fig. 6 과 같은 정현파 형태로써 파장은 2.5m, 진폭은 0.05m이다.

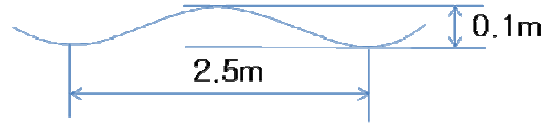


Fig. 6 Sine wave road profile

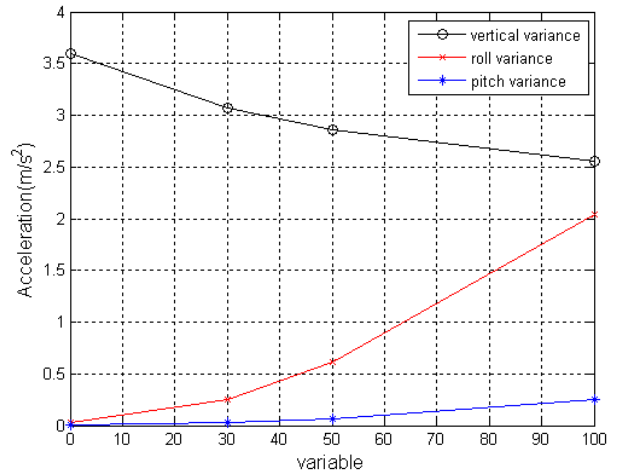


Fig. 7 Variance distribution on vertical damping coefficient

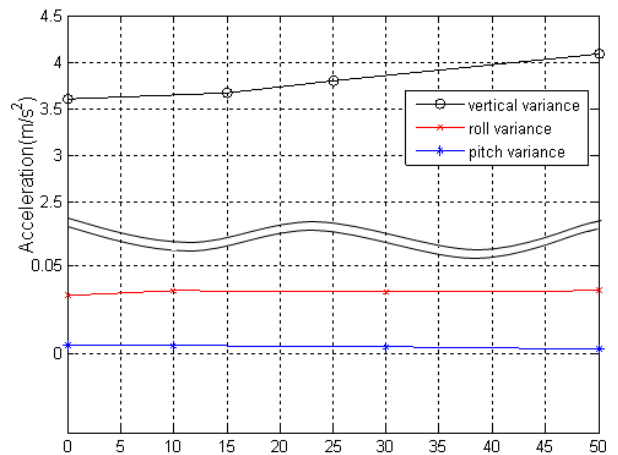


Fig. 8 Variance distribution on pitch damping coefficient

시뮬레이션을 수행한 후 차량의 상태 판별을 위하여 가속도의 평균값에 대한 분산을 계산한 성능지수를 이용하여 차량의 상태를 판별하였다. 차량의 상태를 비교한 그래프와 표는 4 장의 마지막 부분에 수록되어 있다.

Fig. 7 은 수직 방향 스카이 훅 제어기만을 고려한 경우의 수직 가속도, 피치 각가속도, 롤 각가속도의 성능지수를 계산한 그래프이다.

수직 방향 감쇠 계수값이 증가함에 따라 수직 가속도의 성능지수는 줄어드는 반면, 롤 각가속도의 성능지수는 수직 감쇠 계수값이 0 일 때에

Table 3 Vehicle acceleration variance about vertical damping coefficient

damping coefficient	vertical acc variance	roll acc variance	pitch acc variance
0N· s/m	3.6008	0.0336	0.0046
30N· s/m	3.0681	0.2520	0.0243
50N· s/m	2.8646	0.6152	0.0631
100N· s/m	2.5608	2.0461	0.2508

Table 4 Vehicle acceleration variance about pitch damping coefficient

damping coefficient	vertical acc variance	roll acc variance	pitch acc variance
0N· s/m	3.6008	0.0336	0.0046
10N· s/m	3.6710	0.0365	0.0043
30N· s/m	3.7935	0.0356	0.0037
50N· s/m	4.0184	0.0361	0.0023

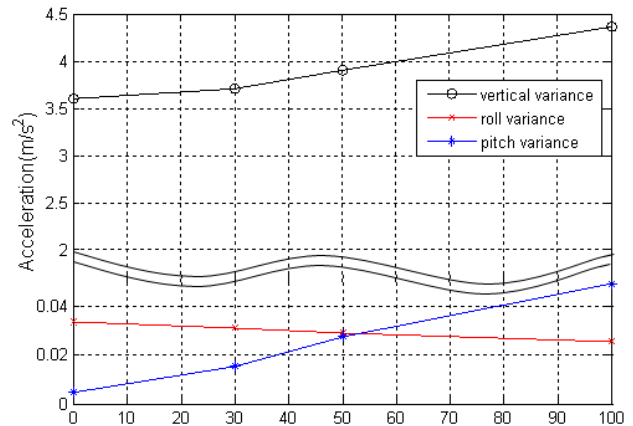
Table 5 Vehicle acceleration variance about roll damping coefficient

damping coefficient	vertical acc variance	roll acc variance	pitch acc variance
0N· s/m	3.6008	0.0336	0.0046
30N· s/m	3.7021	0.0310	0.0154
50N· s/m	3.9046	0.0287	0.0275
100N· s/m	4.3680	0.0252	0.0488

비하여 최대 4 배 정도 높아졌음을 알 수 있다. 이를 Table 3 에 수치적으로 정리하였다.

Passive 차량 모델인 경우와 비교하였을 때 가장 우수한 성능을 내는 수직 방향 스카이 훅 감쇠 계수는 30N· s/m 인 경우임을 알 수 있다.

그리고 피치 방향 성분만 스카이 훅 제어를 적용하였을 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 피치 방향 스카이 훅 제어기를 제외한 나머지 방향에 대해서는 감쇠 계수를 0 으로 인가하였으며 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 8 과 같다.

**Fig. 9** Vehicle acceleration variance about roll damping coefficient

차량의 상태를 결정하는 데에 있어서 수직 가속도의 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있는데 이에 대한 원인을 분석해보면 다음과 같다. 첫 번째, 차량이 주행하는 일반적인 암의 각도 범위에서는 암 타입 현가장치의 강성의 크기가 비교적 작은 편이기 때문에 차체가 아래쪽으로 많이 가라앉아서 주행을 하게 된다. 이로 인하여 회전 질량 중심이 바닥과 가까운 곳에 위치하게 되어서 각 가속도가 발생할 수 있는 범위가 줄어들게 된다. 이에 반하여 저주파 범위에서 상대적으로 수직가속도가 차체에 미치는 영향이 커지게 된다. 두 번째 이유는 노면의 형상에 의한 것이라고 할 수 있다. 노면이 차량에 대하여 좌우 대칭의 형태를 가지고 있으므로 롤 방향 각 가속도의 영향이 수직 방향 가속도에 비하여 차체에 상대적으로 영향을 덜 끼치게 된다. 그래서 수직 가속도의 성능지수와 롤, 피치 각가속도의 성능지수를 그래프로 비교하기에는 어려움이 있어 이를 Table 4 에 수치적으로 정리하였다.

피치 방향 스카이 훅 제어기만을 고려한 경우, 수직 방향에 대한 성능지수는 점점 높아지는 반면 피치 방향에 대한 성능지수는 감소함을 알 수 있다. Passive 차량 모델이 주행한 경우와 비교하였을 때 가장 우수한 성능을 내는 피치 방향 감쇠 계수는 30N· s/m 인 경우임을 알 수 있다.

롤 방향 스카이 훅 제어기 만을 적용한 경우에 대해서도 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 9 와 같다.

차량의 상태를 결정하는 데에 있어서 수직 가속도의 영향이 가장 크기 때문에 롤, 피치 각가속도의 성능지수를 그래프로 비교하기에는 어려움이 있기 때문에 이를 Table 5 에 수치적으로 정리하였다.

롤 방향 감쇠 계수가 증가함에 따라 롤 방향에 대한 성능지수가 점점 낮아지는 반면에 수직 방향과 피치 방향에 대한 성능지수가 1.21 배 내지 10 배 정도 증가함을 알 수 있다. 이 경우에는 Passive 차량 모델이 주행한 경우와 비교하였을 때 가장 우수한 성능을 내는 것은 롤 방향 감쇠 계수가 $0N \cdot s/m$ 인 경우임을 알 수 있는데 이는 견마로봇 차량이 정현과 노면을 주행할 때 롤 감쇠 계수에 의한 스카이 혹은 제어기의 영향이 극히 미미하다는 것을 의미한다. 그리고 수직 방향과 피치 방향과 달리 롤 방향 variance 의 값이 $10N \cdot s/m$ 에서 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이에 대한 원인을 분석해보고자 6X6 차량이 정현과 노면 위를 주행하였을 때 수직 방향, 피치 방향 및 롤 방향에 대하여 가속도 영역에 대한 주파수 응답 분석을 실시하였다. 이 때 수직 방향과 피치 방향의 경우, Fig. 10 과 Fig. 11 에서와 같이 낮은 주파수에서는 진폭이 크지

만 주파수가 점점 커짐에 따라 진폭이 거의 0 에 가까워지는 반면, 롤 방향의 경우에는 수직 방향과 피치 방향에 비하여 높은 주파수에서도 상대적으로 진폭이 큰 것을 Fig. 10 와 Fig. 11 에서 확인할 수 있다. 이로 인한 영향이 롤 방향 응답에 반영되었다고 할 수 있다. 즉, 차량 자체의 특성에 의하여 롤 방향 variance 가 감쇠계수가 $10N \cdot s/m$ 일 때 일시적으로 증가하였다가 다시 감소한 것이라고 할 수 있다.

5. 스카이 혹은 제어기를 적용한 차량의 주행 시뮬레이션

4 장 에서 진행한 simulation 결과를 토대로 수직 방향 스카이 혹은 감쇠 계수는 $30N \cdot s/m$, 피치 방향 스카이 혹은 감쇠 계수는 $30N \cdot s/m$, 롤 방향 스카이 혹은 감쇠 계수는 $0N \cdot s/m$ 을 선정하여 3 방향 모두에 대하여 적용하여 Fig. 6 의 정현과 노면에 대한 주행 simulation 을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 10 과 같다.

Fig. 12(a)는 차량이 정현과 노면 위를 주행하였을 때 차량의 수직 가속도를 나타내고 Fig. 12(b)는 차량의 롤 각가속도, 그리고 Fig. 12(c)는 차량의 피치 각가속도를 나타낸다. 이를 성능지수를 아무런 제어를 하지 않은 passive 차량의 경우, 수직 방향 스카이 혹은 제어기만을 적용한 경우, 그리고 피치 방향 스카이 혹은 제어기만을 적용한 경우, 수직 방향과 피치 방향 스카이 혹은 제어기를 적용한 경우에 대하여 Table 6 과 같이 수치적으로 비교하여 보았다.

이 때 수직 방향 및 피치 방향에 대한 스카이 혹은 제어기를 적용한 경우에 롤과 피치 성능지수가 크게 증가하지 않는 범위 내에서 수직 방향에 대한 차량의 안정성이 향상되었음을 알 수 있다.

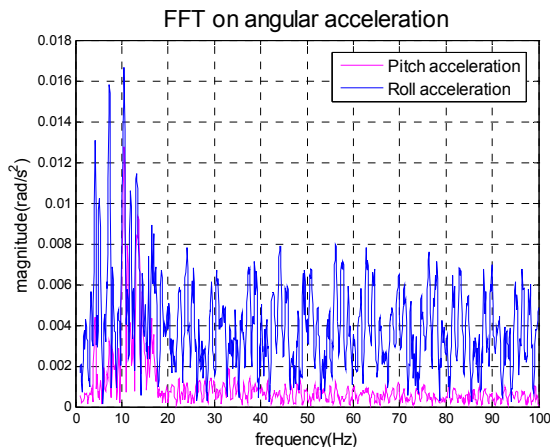


Fig. 10 Frequency response graph on Pitch & roll axis acceleration

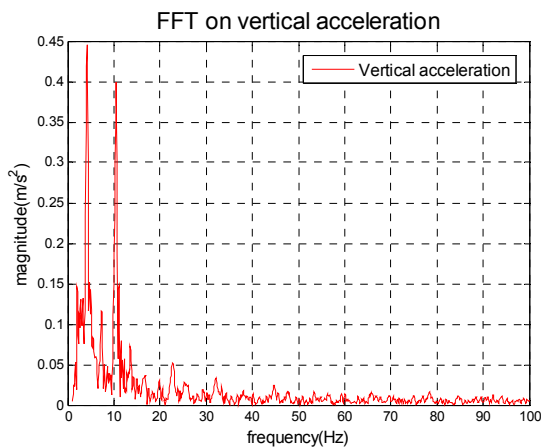
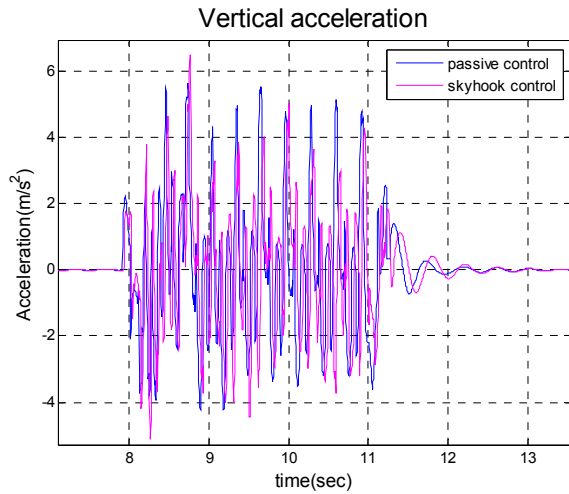


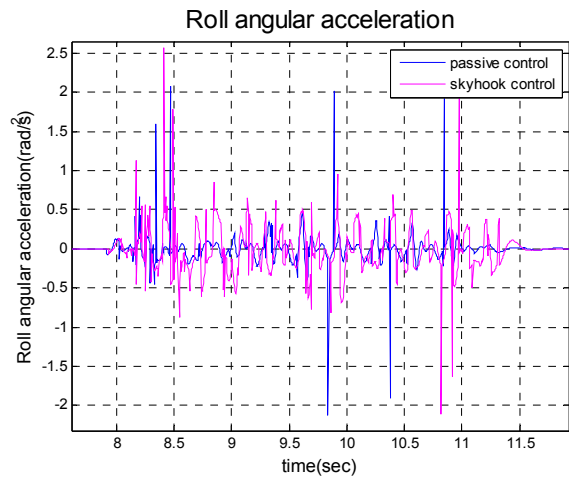
Fig. 11 Frequency response graph on vertical axis acceleration

Table 6 Comparison of vehicle acceleration variance about various damping coefficient

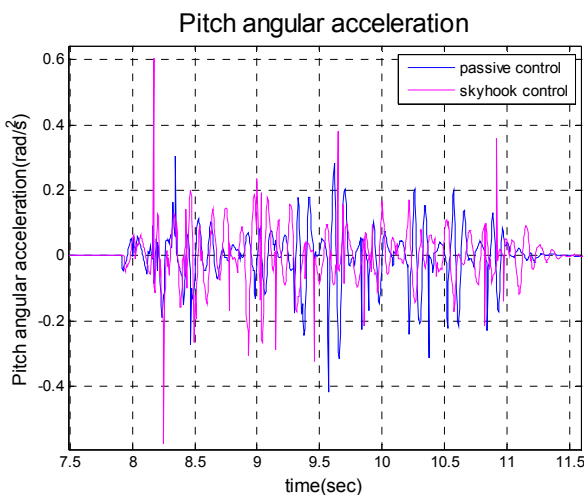
damping coefficient	vertical acc variance	roll acc variance	pitch acc variance
$0N \cdot s/m$	3.6008	0.0336	0.0046
vertical $30N \cdot s/m$	3.0681	0.2520	0.0243
pitch $30N \cdot s/m$	3.7935	0.0356	0.0037
vertical & pitch $30N \cdot s/m$	3.0837	0.0742	0.0052



(a) Comparison of vehicle vertical condition between sky-hook control and passive control



(b) Comparison of vehicle roll condition between sky-hook control and passive control



(c) Comparison of vehicle pitch condition between sky-hook control and passive control

Fig. 12 Vehicle condition applied to sky-hook control

6. 결론

본 연구에서는 무인 자율 주행 차량이 야지를 주행할 경우, 차량의 안정성을 높이기 위하여 견마로봇 차량 모델에 스카이 훅 제어가 수직 방향, 롤 방향, 피치 방향에 대하여 각각 적용되었으며 이에 대한 차체와 암의 방향 특성에 대하여 정의하였다. 또한 정현파 노면과 같은 특정 노면에 대한 감쇠계수를 추출하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서 주행한 노면에 대해서는 수직 및 피치 방향에 대한 스카이 훅 제어는 차량의 안정성을 높이는 데에 영향을 주는 유효한 감쇠 계수를 추출할 수 있었으나 롤 방향에 대한 스카이 훅 제어는 차량의 안정성을 높이는 데에 영향을 주지 못하였다. 그리고 추출된 감쇠계수를 차량 모델에 적용하여 제어를 적용하기 전과 후에 차량 주행 시뮬레이션을 진행한 후 결과를 비교하였다.

향후 특정 주파수를 가지는 정현파 형태의 규칙적인 노면이 아닌 ISO D 등급 이상의 임의의 야지 노면을 직선 주행할 경우, 차량의 상태에 따른 수직 방향, 롤 방향, 피치 방향 감쇠계수 데이터를 작성하여 차량의 안정성을 높일 수 있는 방안에 대하여 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기기술 특화 연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lu, J. and Depoyster, M., 2002, "Multiobjective Optimal Suspension Control to Achieve Integrated Ride and Handling Performance," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 807~821.
- (2) Pacejka, H. B., 1991, "4Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 21, pp.257~265.
- (3) Kim, J.Y., Lee, G.T., Song, C.I., Jeong, D.H., Seo, Y.J. and Yoo, S., 1996, "A study on the Performance of Car Active Suspension System by the Output Feedback and Sky-hook Control Method," *Journal of the KSMT*, Vol. 5, No. 4, New York, pp. 7~17.
- (4) Karnopp, D., Crosby, M.J. and Harwood, R.A., 1973, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators," *J.Engineering for Industry of the ASME*,

- No. 73-DET-122.
- (5) Kwak, B.H. and Park, Y.G., 1995, "Modal Sky-hook Dampers for Active Suspension Control," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 3, No. 4, pp.1~11.
- (6) Alleyne, A. and Hedrick, J.K., 1995, "Nonlinear adaptive control for active suspension," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 3, No. 1, pp.94~103.
- (7) Emura, J., Kakizaki, S., Yamaoka, F. and Nakajura, M., 2009, "Development of the Semi-Active Suspension System Based on the Sky-Hook Damper Theory," *Society of Automotive Engineers*, pp.17~26
- (8) Kim, J.S., 2009, "System Modeling and Control," *Kyobo*, Seoul, pp.211~241.