

이동 로봇의 서스펜션 댐핑계수 변화에 따른 장애물이 있는 경사로 주행에 관한 연구

Study on Driving a Bumped Slope of Mobile Robot According to Changing the Damping Coefficient of Suspensions

전 봉 수¹, 김 자 영², 이 지 흥⁺

Bongsoo Jeon¹, Jayoung Kim², Jihong Lee⁺

Abstract Most of outdoor mobile robots have a suspension on each wheel in order to relieve the shock by ground obstacles and to improve the driving stability. Typically, in the actual operations, the suspensions have been used under a given set of conditions as all the damping and spring coefficients of the suspensions are fixed. However, it is necessary to readjust the coefficients of the suspensions according to surface conditions that may cause the unstable shaking of a robot body at high speed driving. Therefore, this paper is focused on the mobility analysis of an outdoor robot when the coefficients of suspensions (in particular, damping coefficients) are changed while driving on an uneven road surface. In this paper, a semi-active suspension with twelve damping coefficient levels was used and a small sized vehicle with the suspensions was employed to analyze the mobility dependent on a change of the damping coefficient. And the mobility was evaluated through driving experiments on a bumped slope.

Keywords Rough-terrain Robots, Damping Coefficient Control, Semi-Active Suspension

1. 서 론

오늘날 이동 로봇은 서비스 로봇, 군사용 로봇, 탐사 목적 로봇에 이르기 까지 많은 분야에 걸쳐서 각각의 목적에 맞게 활발한 연구가 진행되고 있다^[1-6]. 먼저 박물관 안내 로봇이나 청소 로봇 등과 같은 서비스 목적 로봇의 경우 실내에서의 정밀한 위치 이동을 목표로 하여 연구되어 왔으며, 군사용 로봇이나 탐사 목적 로봇 분야

에서는 로봇의 실외 위치 추정뿐만 아니라 장애물 회피 및 경로제어 등의 연구가 진행 되어 왔다. 특히 군사용 로봇이나 탐사 목적 로봇은 장애물 극복 능력을 향상시키기 위하여 다양한 구조가 연구되었는데, 대표적으로 견마로봇이나, 화성 탐사 로봇을 예로 들 수 있다^[6-11]. 두 분야의 로봇 모두 야외 환경에서 안정적으로 주행 하는 것이 공통된 목표이지만 견마로봇과 같은 군사용 로봇의 경우, 장애물에 의해 받는 충격으로부터 차체 강성을 유지하기 위하여 화성 탐사 로봇과는 달리 복잡한 링크 구조의 메커니즘을 채택하기 보다는 각각의 바퀴에 서스펜션이 독립적으로 장착된다. 반면 화성 탐사 로봇의 경우 군사용 로봇에 비해 매우 느린 속도로 주행하므로 지면 굴곡이나 장애물들로 인한 충격이 상대적으

Received : Feb. 25. 2016; Revised : Mar. 28. 2016; Accepted : Apr. 6. 2016

※This work was supported by research fund of Chungnam National University.

⁺Corresponding author: Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Gung-Dong, Youseong-Gu, Daejeon, Korea (jihong@cnu.ac.kr)

¹Mechatronics Engineering, Chungnam National University (bbs120@empas.com)

²Mechatronics Engineering, Chungnam National University (jaya@cnu.ac.kr)

로 작기 때문에 장애물 극복을 위한 다양한 구조를 채택할 수 있다. 대표적으로 rocker-bogie 링크 구조가 사용되고 있으며 로봇 바퀴의 지름보다 큰 장애물도 안정적으로 극복할 수 있는 장점이 있다. 군사용 로봇은 그 목적에 맞게, 상용 차량에 비하여 야지 환경에서 더 안정적으로 주행할 수 있다. 하지만, rocker-bogie 링크 구조를 갖는 화성 탐사 로봇만큼의 장애물 극복 능력을 보여주지 못한다. 반면 화성 탐사 로봇의 경우 상대적으로 뛰어난 장애물 극복능력을 갖지만, 그 구조를 군사용 로봇이 채택하기에는 완충작용이 없어 차체강성을 유지하기 어렵다는 단점이 있다. 최근에는 군사용 로봇분야에서 화성 탐사 로봇과 같이 야지환경에서의 장애물 극복능력을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 대표적인 예로 카네기 멜론 대학교의 Crusher가 있다. Crusher는 arm-link 구조와 서스펜션의 효과적인 결합으로 로봇 바퀴의 지름보다 큰 장애물을 극복할 수 있으며 서스펜션에 의한 완충작용으로 rocker-bogie 링크 구조에 비하여 상대적으로 충격에 강하다. 결과적으로 야지 환경에서 차체강성을 유지하며 지면의 장애물을 효과적으로 극복하기 위해서는 화성 탐사 로봇과 같은 링크 구조와, 지면 장애물로부터의 충격을 완화시킬 수 있는 서스펜션의 효과적인 결합이 필요하다. 하지만, 이러한 로봇들이 고정된 스프링상수와 댐핑계수를 갖는 서스펜션을 장착하면 그 서스펜션의 성능에 맞춰 주행능력이 결정되고 결국 주행능력을 최대로 높일 수 없다는 한계에 부딪힌다. 특히 야지환경에서와 같이 지면이 고르지 못한 경사로가 있는 지형에서는 장애물의 크기가 일정하지 않음에도 불구하고 모든 서스펜션의 스프링상수와 댐핑계수가 고정되어 로봇이 장애물로부터 받는 충격으로 인한 몸체의 움직임을 제어할 수 없고, 장착된 서스펜션의 완충 한계 범위 내에서 로봇이 주행 가능한 경사로의 등반각도가 결정 된다. 반면, 에어 서스펜션이나 MR댐퍼와 같이 감쇠력 조절이 가능한 서스펜션을 사용하면, 주행 중 지면의 상황에 따라 서스펜션의 성능을 변화시킬 수 있으므로 로봇 몸체의 움직임변화를 제어할 수 있게 되어, 감쇠력 조절이 불가능한 서스펜션을 장착한 로봇에 비해 경사로에서 더 높은 주행성능을 기대할 수 있다^[10-15].

[12-17]의 선행연구는 주로 상용차량에 MR댐퍼를 장

착하고 스카이 훅 제어 방식을 적용하여 노면으로부터의 충격에 의한 차체의 움직임을 억제하여 승차감을 향상시키는 데에 목적이 있다. 이와 같이, 주로 차량의 승차감을 향상시키기 위하여 차체에 전달되는 진동을 최소화하는 방법을 찾는 연구가 활발히 진행되어 왔지만, 경사로에서 장애물을 잘 극복할 수 있도록 하기 위한 접근 방식은 다를 수 있다.

본 논문에서는 야지 환경에서의 비교적 빠르고 안정적인 주행을 목적으로 제작된, 4-bar linkage구조와 서스펜션이 결합된 구조를 갖는 야지 고속 주행 로봇(CALEB 9)을 제시한다. 특히 실제 상용차량에 장착되는 댐핑계수를 조절할 수 있는 서스펜션을 장착하여 댐핑계수를 조절할 수 없는 서스펜션으로만 장착된 로봇 보다 더 높은 장애물 극복 능력을 갖도록 한다. 또한 다물체 동역학 해석 프로그램(ADAMS)을 이용하여 CALEB 9을 모델링하고 장애물이 있는 경사로 지형에서의 주행 시뮬레이션을 통해 로봇의 운동성을 분석한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 로봇에 장착된 서스펜션의 댐핑계수를 조절하여 장애물이 있는 경사로 지형 극복능력을 향상시킬 수 있음을 보이고, 야외에서 CALEB 9의 경사로 주행 실험을 통해 실제 이동 로봇에의 적용 가능성을 검증한다.

2. 서스펜션이 장착된 로봇의 운동성 분석

일반적으로 상용차량이나 군사용 로봇, 또는 몇몇의 이동 로봇은 주행 안정성을 높이기 위해 각 바퀴에 서스펜션이 장착되는데, 그 서스펜션의 스프링 상수와 댐핑계수는 각 차량의 무게를 고려하여 설정되며 일반적으로 장착되는 모든 서스펜션이 동일한 값의 스프링상수와 댐핑계수를 갖는다. 따라서 야지 주행을 목적으로 개발된 차량이더라도 그 서스펜션이 갑작스러운 속도 변화와 장애물 극복, 굴곡이 심한 지형에서의 주행에 있어서 최적이라고 말하기 어렵다. 따라서, 이 절에서는 서스펜션이 장착된 로봇의 운동성을 분석한다.

2.1 로봇의 운동성 분석

Fig. 1은 서스펜션을 갖는 로봇의 기본적인 운동성을

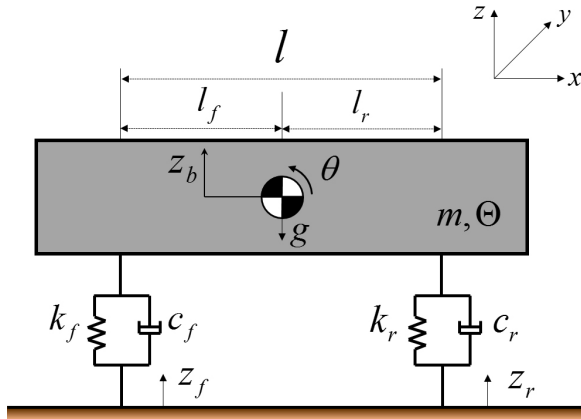


Fig. 1. 1/2 Vehicle model

분석하기 위한 1/2차량 모델로 현가상질량과 타이어의 스프링상수, 댐핑계수를 무시하고 2차원 평면상에 표현한 것이다. 이 모델은 강체로 가정한 현가상질량(로봇몸체)의 상하운동(bounce motion)과 피치운동(pitch motion)의 2자유도를 갖는다. m 과 Θ 는 각각 현가상 질량과 관성모멘트를 나타내며 c 는 댐핑계수를, k 는 스프링상수를 나타내며 아래첨자 f 와 r , b 는 각각 전방과 후방, 차체를 나타낸다. g 는 중력을 나타내고, l_f 와 l_r 은 각각 차체의 질량중심부터 앞 바퀴와 뒷바퀴까지의 거리를 나타낸다. 뉴턴의 운동 제2법칙을 적용하여 모델의 운동을 표현하고 정리하면 (1)과 같은 현가상 질량의 운동에 대한 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_b \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_f + c_r & -l_f c_f + l_r c_r \\ -l_f c_f + l_r c_r & l_f^2 c_f + l_r^2 c_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_b \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_f + k_r & -l_f k_f + l_r k_r \\ -l_f k_f + l_r k_r & l_f^2 k_f + l_r^2 k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_b \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_f \dot{z}_f + k_f z_f + c_r \dot{z}_r + k_r z_r \\ l_f c_f \dot{z}_f + l_f k_f z_f - l_r c_r \dot{z}_r - l_r k_r z_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 우변은 도로면의 거칠기와 차량의 속도에 의해 차체에 가해지는 힘을 수직방향의 속도와 변위로 나타낸 것이다. 현가상질량(로봇몸체)의 상하운동과 피치운동이 커지는 것은 결국 주행안정성뿐만 아니라, 주행 능력을 감소시키는 원인이 되며 (1)에 정리된 바와 같이, 몸체의 상하운동과 피치운동을 작게 하기 위해서는 스프링상수와 댐핑계수의 적절한 설정이 요구된다.

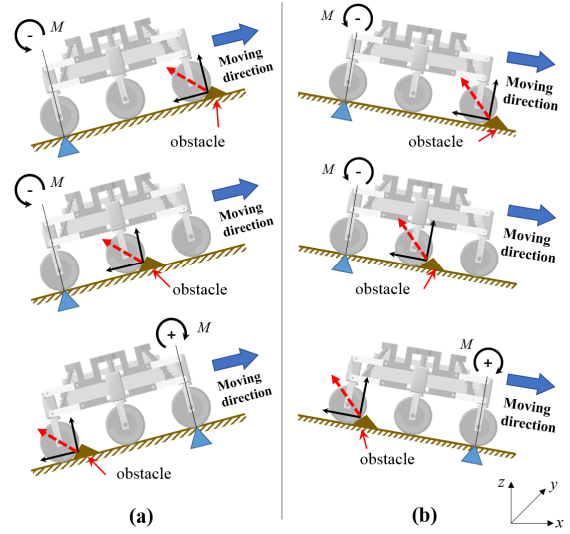


Fig. 2. Analysis model of robot movement by obstacles

Fig. 2의 (a), (b)는 로봇의 각 서스펜션의 스프링상수와 댐핑계수가 적절한 값으로 동일하게 설정되어 있는 경우를 가정하고, 경사로 지면에 장애물이 있는 경우, 그 장애물과 각 바퀴가 충돌하면서 발생하는 로봇의 운동을 도시한 것이다. 먼저 Fig. 2의 (a) 오르막 경사로에서 장애물이 없는 경우에도 경사각에 따른 질량 관성모멘트에 의해 뒤쪽 서스펜션에 힘이 가해지게 된다. 이어서 장애물이 앞 바퀴에 닿게 되면, 그 충격량이 앞쪽 서스펜션에 먼저 전달되어 완충작용을 하며 완전히 완충되지 못하고 남은 힘에 의한 모멘트(M)는 뒤쪽으로 전달된다. 이 경우 뒤쪽 서스펜션은 경사각에 의한 질량관성 모멘트에 장애물로부터 받은 충격에 의한 모멘트(M)가 더해져 더 큰 압축 변위를 갖는다. 결과적으로 로봇 몸체는 피치운동이 커지게 되며, 그 크기에 따라 앞 바퀴가 지면으로부터 떨어지거나 접지력이 점점 감소하게 된다. 즉, 오르막 경사로에서의 피치운동의 증가는 주행안정성뿐만 아니라 구동력을 감소시키는 원인이 된다. 오르막 경사로에서의 연속적인 운동에 있어서 로봇은, 장애물이 앞 바퀴에 닿아 주행안정성이 낮아지며 앞으로 진행하게 되고 뒷바퀴에 장애물이 닿게 되면 순간적으로 모멘트(M)가 앞 바퀴를 기준으로 발생하여 주행안정성이 무너지는 것을 잡아 줄 수 있지만, 앞 바퀴에 장애물이 닿았을 때와 마찬가지로 서스펜션에 의해 완충되지 못하고 남은 힘만 앞으로 전달되므로 결과적으

로 로봇의 주행 안정성은 낮아지게 된다. Fig. 2의 (b) 내리막 경사로에서는 오르막 경사로 운동에서와 마찬가지로 장애물에 의한 로봇의 피치운동이 증가되며, 뒷바퀴에 장애물이 닿으며 진행방향(+x)으로의 주행 안정성이 낮아지게 된다.

에어 서스펜션(air suspension)을 사용하지 않는 경우 일반적으로 스프링상수를 변화시키는 것은 물리적으로 어려우나, MR댐퍼나 Semi-active 서스펜션을 사용하면 댐핑계수를 변화시키는 것이 가능하다. 또한 (1)에 근거하여 볼 때, 앞쪽 서스펜션의 댐핑계수와 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수를 달리하여 로봇의 피치운동과 수직운동을 제어하는 것이 가능하다. 다음 절에서는 다물체 동역학 해석 프로그램(ADAMS)을 사용한 경사로 주행 시뮬레이션을 통해 로봇의 운동성을 확인하고 각 서스펜션의 댐핑계수를 다르게 설정하여 로봇의 경사로 주행능력을 향상시킬 수 있는지에 대한 가능성을 확인한다.

2.2 야지 고속 주행 로봇: CALEB 9

Fig. 3은 6개의 독립적인 4-bar linkage 구조를 갖고 각각 독립적으로 작동하는 감쇠력 조절이 가능한 서스

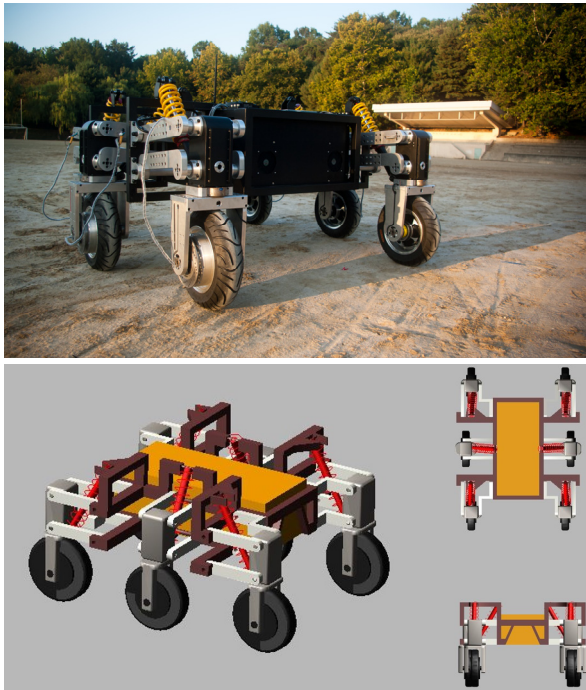


Fig. 3. A Rough-terrain robot: CALEB 9

Table 1. Specification of CALEB 9

Max Velocity	10 m/s	Total Weight	800 kg
Max Slope	20°	Robot Size (mm)	1460*2180*990
Arm Displacement	25 cm	Steering Angle	-90° ~ 90°

펜션을 장착한 주행 로봇(CALEB 9)과 다물체 동역학 해석 프로그램(ADAMS)에서 모델링 한 것을 나타내고 있다. CALEB 9은 야지에서의 고속 주행을 목적으로 개발되었으며 앞, 뒤 바퀴에 장착된 서스펜션의 방향과 가운데 바퀴에 장착된 서스펜션의 방향이 다르다는 것이 가장 큰 특징이다. 앞, 뒤 바퀴에 장착된 서스펜션은 로봇의 주행방향과 일치하는 방향으로 장착되어 서스펜션이 장애물에 의한 충격을 효과적으로 완화시킬 수 있도록 하였고, 가운데 바퀴에 장착된 서스펜션은 주행방향과 수직한 방향으로 장착하였는데, 이것은 고속 선회 주행 시에 발생하는 원심력에 의해 로봇의 몸체가 Roll 방향으로 기울어져 안정성이 무너지는 것을 잡아 주기 위한 것이다. 특히 가운데 바퀴가 앞, 뒤 바퀴의 위치에 비하여 좌우로 더 떨어져서 위치하도록 설계하여 고속 선회 주행 안정성을 더 높였다. 그 외 로봇의 제원은 Table 1에 정리하였다.

3. 서스펜션의 댐핑계수에 따른 이동 로봇의 경사로 주행 운동성 분석 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경

앞 절에서 소개한 CALEB 9의 운동성을 분석하기 위해 ADAMS를 활용하여 시뮬레이션 환경을 모델링 하였다. 야지 환경과 같이 지면의 굴곡이 심하고 장애물이 많은 지형에서 주행하는 이동 로봇은, 엔진이나 모터의 출력 성능 보다는 서스펜션의 성능에 의해 안정성을 유지하며 주행할 수 있는 최대 속도가 정해진다. 이 절에서는 본 논문에서 제안하는 서스펜션의 댐핑계수만을 조절하여 장애물이 있는 경사로에서의 주행능력을 높일 수 있음을 증명하기 위한 시뮬레이션을 진행한다.

Fig. 4는 CALEB 9의 바퀴반지름보다 낮은 높이의 장애물이 있는 경사로 지형을 나타낸다. 오르막 경사각은 10°, 20°, 30°이며 내리막 경사로로는 오르막 경사로에 비

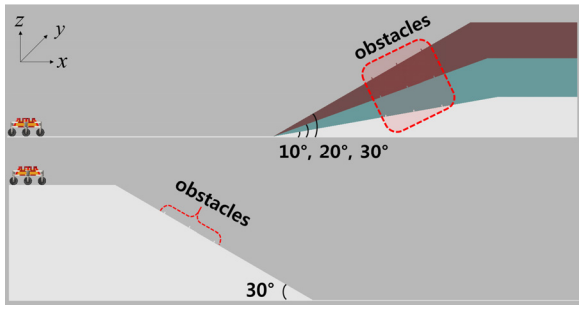


Fig. 4. Simulation environments: Uphill and Downhill slopes

해 상대적으로 로봇이 주행을 완료하지 못할 것을 기대하기 어려우므로 10°, 20°의 경사로에서의 시뮬레이션은 생략하고, 로봇의 운동성만을 확인하고자 30°의 경사로에서만 시뮬레이션을 하였다. 로봇 바퀴의 지름은 40 cm로 일반적으로 평지에서는 20 cm이하의 장애물을 충분히 극복 가능하다. 따라서, 본 시뮬레이션에서는 5 cm와 10 cm높이의 장애물 3개를 경사로 중간에 연속적으로 배치함으로써 쉽게 극복하기 어려운 환경을 만들었다. 또한 모든 서스펜션이 동일한 스프링상수와 댐핑계수를 갖는 상태에서의 로봇 운동성을 분석하기 위하여 6개의 서스펜션의 스프링 상수와 댐핑계수는 기본 값으로 각각 8000 N/m, 2200 Ns/m로 맞췄다. 추가로 장애물로부터 받는 충격 외에 다른 요소가 로봇의 주행성에 영향을 주는 것을 방지하고 지면과 바퀴의 슬립이 주행성에 영향을 미치지 않도록 마찰계수를 0.9로 설정하였다. 로봇의 주행속도는 2 m/s로 입력하였으며 오르막 지형과 내리막 지형에서 각각 2가지 경우로 나누어 시뮬레이션 하였다. 첫 번째는 모든 서스펜션의 스프링 상수와 댐핑계수를 기본 값으로 동일하게 설정하고 시뮬레이션을 하였으며, 두 번째는 앞쪽 서스펜션과 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수를 다르게 하여 주행하였다. 가운데 바퀴에 연결된 서스펜션은 앞 절에서 설명한 바와 같이 진행방향에 수직으로 장착되어 고속 선회 주행 안정성을 잡아주기 위한 역할로 설계된 것으로, 경사로에서 로봇의 운동성에 주는 영향이 작다고 가정하고 댐핑계수는 기본 설정대로 2200 Ns/m를 유지하였다.

3.2 시뮬레이션 결과분석

Fig. 5는 10 cm높이의 장애물이 있는 30°의 오르막

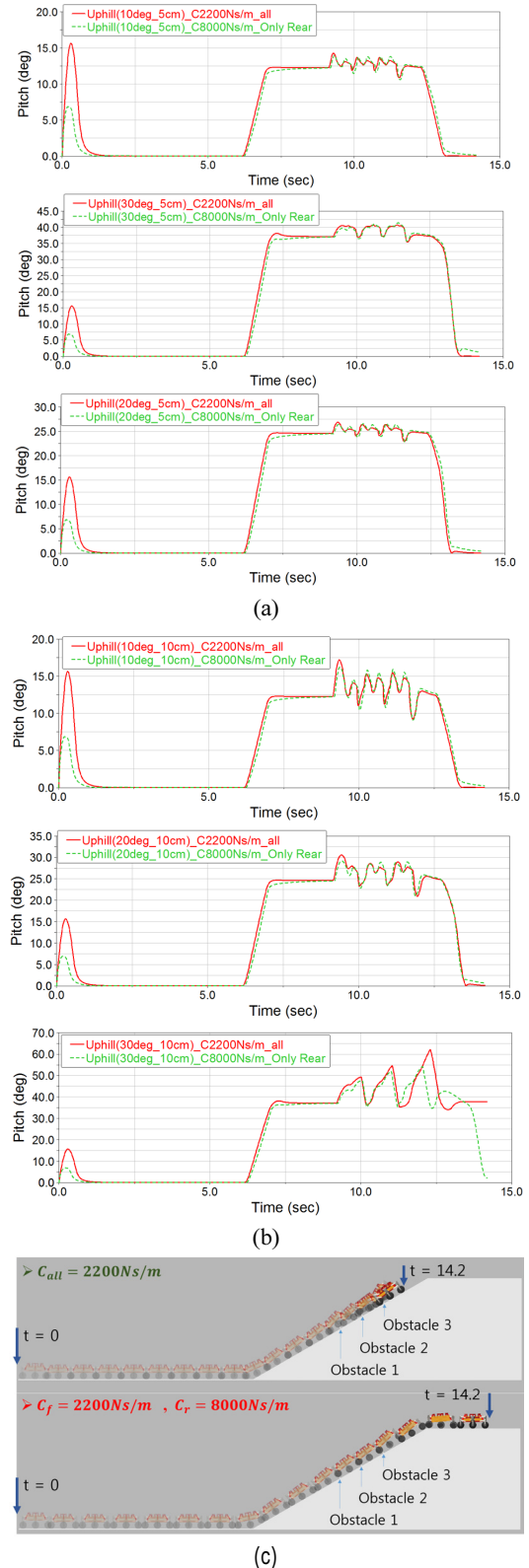


Fig. 5. Comparison of pitch motion when adjusting the damping coefficients on the uphill climb

경사로에서의 주행시뮬레이션 결과와 함께, 각각 5 cm와 10 cm의 장애물이 놓여있는 10°, 20°, 30°의 오르막 경사로에서 모든 서스펜션의 댐핑계수를 같게 설정했을 때와 다르게 설정했을 때의 로봇의 Pitch각도를 나타내고 있다. 먼저 Fig. 5 (a)의 결과 그래프를 보면 30°까지의 오르막 경사로에서 5 cm높이의 장애물은 로봇의 주행성에 큰 방해가 되지 않았다는 것을 짐작할 수 있으며 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수를 높여준 경우, 경사로 진입 후에 발생하는 피치방향으로의 움직임이 상대적으로 작아진 것을 확인할 수 있다. 반면 (b)의 결과그래프와 (c)의 주행 시뮬레이션 결과를 볼 때, 10 cm의 장애물이 있는 30°기울기의 경사로에서는 로봇이 경사로를 완주하지 못하였으나, 20°이하의 경사로에서만 완주한 것을 확인할 수 있다. 주목할 것은, 로봇에 장착된 모든 서스펜션의 댐핑계수가 같은 상태에서는 10 cm의 장애물이 있는 30°기울기의 경사로를 극복할 수 없지만 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수를 높인 경우, 같은 지형에서 장애물을 극복하고 주행을 완료할 수 있다는 것이다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 스프링상수와 댐핑계수가 모두 같게 설정된 이동 로봇의 경사로 등반능력이 상대적으로 낮게 평가될 수 있다는 것을 증명한다. 위 시뮬레이션에서는 단순히 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수만 높여 장애물 경사로에서 주행 극복능력을 높일 수 있음을 가정하였지만, 2.1절의 (1)에서 로봇의 운동성을 수식으로 정리한 바와 같이, 로봇의 상하운동과 피치운동은 앞쪽과 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수에 상관관계가 있음을 주의해야 한다. 따라서 장애물이 연속적으로 존재하고 지면의 굴곡이 심한 경사로에서는 앞 뒤 서스펜션의 최적 댐핑계수를 찾는 것을 통해 이동 로봇의 경사로 주행능력을 최대한 높일 수 있음을 기대할 수 있다.

30° 기울기의 내리막 경사로 주행 시뮬레이션결과, 모든 서스펜션의 댐핑계수를 같게 설정했을 때와 다르게 설정했을 경우 모두 로봇이 무사히 주행을 완료하였지만, Fig. 6의 결과그래프에서 보여지듯이 로봇의 피치운동이 오르막 경사로 시뮬레이션 결과와는 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 오르막 경사로에서는 장애물에 의해 상하운동과 피치운동이 발생하여 로봇이 뒤로 기울어지는 것을 줄이기 위해 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계

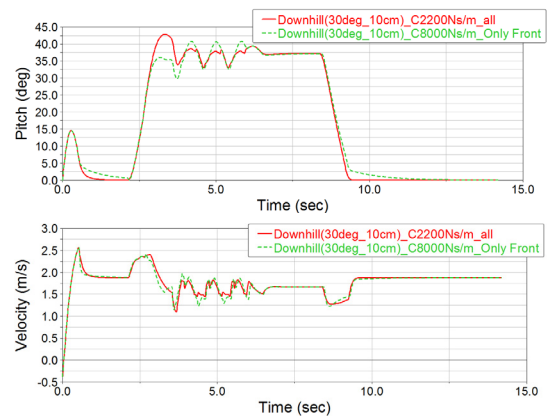


Fig. 6. Comparing pitch motion and velocity when adjusting the damping coefficients of suspension on the downhill slope

수를 높임으로써 경사로 극복 능력을 높일 수 있음을 가정하였다. 반면, Fig. 6의 Pitch운동 그래프에서 모든 서스펜션의 댐핑계수를 같게 설정한 경우의 그래프를 보면 내리막 경사로 초기에 피치운동이 크게 발생하여 주행안정성이 무너진 것을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 오르막 경사로 극복능력을 향상시키기 위해 가정한 것처럼 내리막 경사로에서 앞쪽 서스펜션의 댐핑계수를 크게 한 후 다시 시뮬레이션 한 결과, 내리막 경사로 진입 초기에 발생한 피치운동은 상당히 감소되는 것을 확인할 수 있으나, 연이어 있는 장애물을 통과하는 경우에는 모든 서스펜션의 댐핑계수가 같은 경우보다 피치운동이 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 내리막 경사로에서는 진행방향으로의 가속과 내리막 경사도로 인한 질량관성모멘트가 더해져 진행방향으로의 피치운동이 크게 일어나는 것은 분명하다. 하지만 Fig. 6의 피치운동 결과그래프를 이해하기 위해서는 2.1절의 (1)에서 정리한 바와 같이 앞쪽 서스펜션과 뒤쪽 서스펜션의 상관관계를 이해할 필요가 있다. 로봇의 상하운동과 피치운동은 앞쪽이나 뒤쪽 서스펜션의 스프링상수, 댐핑계수와 독립적이지 않으며 상호보완적이다. 따라서 앞서 가정한 것처럼 한 부분의 댐핑계수를 임의로 변경하는 것으로 피치운동의 감소가 최적으로 발생할 것이라는 기대는 하기 어렵다. 한쪽 방향에서 받은 장애물에 의한 충격은 서스펜션에 의해 일부가 완충되며 완충되지 못하고 남은 힘이 모멘트로 작용하여 반대쪽 서스펜션에 영향을 주게 되는데, 실제로 내리막 지형

에서 앞쪽 서스펜션의 댐핑계수를 높인 경우, 뒷바퀴가 장애물에 닿아 발생하는 충격이 앞쪽 서스펜션에 전달 되었을 때 높은 댐핑계수로 인한 순간적인 강성이 증가 되어 그 힘이 감소되지 못하고 회전 모멘트를 발생시킨다. 그 결과 로봇의 피치운동은 더 증가하게 된다. 이러한 운동성은 오르막 경사로에서도 같으며 한쪽 방향의 댐핑계수 변화만으로 피치운동을 원활히 제어하기는 어렵다. 결국 경사로 주행성을 높이기 위한 최적 댐핑 계수를 찾는 방법이 요구된다. 만약 스프링상수를 변화시키는 것도 가능하다면 장애물이 있는 경사로 극복 능력이 더 높아질 수 있을 것이다. 하지만, 에어 서스펜션을 사용하지 않는 이상, 일반적으로 서스펜션의 스프링강성을 변화시키는 것은 어렵다. 따라서 본 절에서는 댐핑계수만 변화시켜 로봇의 장애물 경사로 극복능력이 높아질 수 있음을 확인하였는데, 이는 댐핑계수가 높으면 완충 시 스프링의 감쇠 저항력이 커지므로 상대적으로 서스펜션의 순간적인 강성이 높아지고, 반대로 댐핑계수가 낮으면 완충 시 댐퍼로 인한 스프링 감쇠 저항력이 낮아져 순간적으로 유연한 움직임을 갖는 특성을 이용한 결과이다.

4. 실험을 통한 검증 및 결과분석

2.2절에서 소개한 CALEB9은 실제 상용 차량에 장착되는 감쇠력 조절이 가능한 서스펜션이 모든 바퀴에 독립적으로 장착되어 있으며 수동으로 감쇠력을 12단계로 조절할 수 있다.

Fig. 7은 CALEB9을 이용하여 실험을 하기 위해 약 9°의 기울기를 갖는 경사로에 5 cm높이를 갖는 방지턱을 설치한 실험환경이다. 방지턱이 없는 경우 CALEB9은 2 m/s의 속도로 경사로를 충분히 극복할 수 있다. 실험은 모든 서스펜션의 감쇠력을 1단계로 설정한 경우와 앞쪽 서스펜션의 감쇠력을 1단계, 뒤쪽 서스펜션의 감쇠력을 12단계로 설정한 두 가지 경우로 나누어 진행하였다.

Fig. 8은 2.4절에서 시뮬레이션을 한 것과 같이 2가지 경우로 나누어 실험을 진행하고 얻은 로봇 몸체의 각도 데이터를 출력한 그래프이다. 시뮬레이션 결과와 비슷하게 서스펜션의 감쇠력을 조절한 경우 경사로에서 장

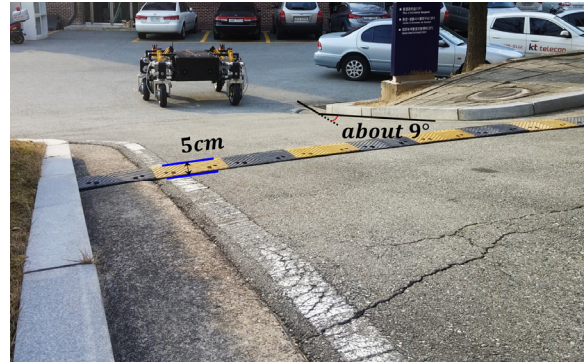


Fig. 7. Outside experimental place having a bumped slope

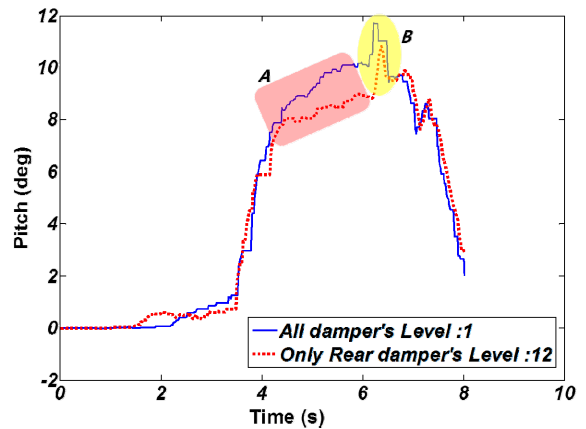


Fig. 8. Comparison of the pitch motion of CALEB9

애물로부터 받는 충격으로 인한 몸체의 움직임이 상대적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 먼저 A부분은 CALEB9이 경사로에 완전히 진입했을 때의 각도이며, B부분은 앞 바퀴가 방지턱에 닿아 충격이 발생한 부분이다. A부분에서 각도의 차이가 발생하는 이유를 분석해보면, 뒷바퀴의 댐퍼를 강하게 설정하여 뒷바퀴에 작용하는 상대적인 강성이 증가되고, 따라서 경사로에 오르는 도중 발생하는 관성모멘트를 억제해준 결과라고 볼 수 있다. B의 경우, 뒷바퀴의 댐핑계수만 강하게 하였을 때의 몸체각도가 상대적으로 작게 나타나지만, 이는 A구간에서 나타나는 각도 차이로 인한 것일 뿐 큰 의미는 없다. 중요한 것은 방지턱을 만난 순간에 발생하는 충격으로 인한 몸체 각도 변화율이다. 3.2절에서 언급한 바와 같이, 댐핑계수를 모두 낮은 레벨로 설정했을 때, 앞 바퀴에 장애물이 닿는 순간 발생하는 충격이 모멘트를 발생시켜 뒤쪽으로 전달되고 뒤쪽 서스펜션이 일

부를 완충시켜 그 힘의 크기를 줄이고 피치운동의 변화가 상대적으로 작을 수 있다. 마찬가지로, 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수를 높였을 때 앞 바퀴에 장애물이 닿아 발생하는 충격이 뒤쪽으로 전달된다. 하지만, 뒤쪽 서스펜션의 댐핑계수가 높아 순간적인 강성이 크므로 전달된 모멘트를 충분히 완충시키기 어렵다. 따라서 Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 댐핑계수가 낮은 레벨로 모두 같게 설정된 경우보다 순간적인 피치운동이 상대적으로 크게 발생하게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 동일한 스프링상수와 댐핑계수를 갖는 서스펜션을 장착한 이동 로봇이 지면에 장애물이 있는 경사로를 주행하는 경우, 장애물로부터 받는 충격으로 인한 몸체의 상하운동과 피치운동이 증가되어 경사로 극복 능력이 저하될 수 있음을 제시하였다. 이를 해결하기 위하여 각 바퀴에 감쇠력 조절이 가능한 서스펜션을 장착하고 각 서스펜션의 감쇠력을 다르게 조정하여 로봇몸체의 안정성이 낮아지는 것을 최소화 하고, 지면에 장애물이 있는 경사로를 극복할 수 있음을 시뮬레이션과 로봇을 이용한 실제 실험을 통해 가능성을 보였다. 하지만, 2.1절 (1)에서 정리된 바와 같이, 로봇의 상하운동과 피치운동은 앞, 뒤 서스펜션의 상호작용으로 이루어지므로, 2장과 3장에서 가정한 바와 같이 한쪽 방향의 댐핑계수만 조절하는 방법이 경사로 극복 능력을 최대 로 올려줄 수 있는 방법이라고 단정하기 어렵다. 따라서 경사로 극복능력을 최대 로 올릴 수 있는 최적의 댐핑계수 조절 방법을 찾는 지속적인 연구가 필요하다. 댐핑계수의 조절이 가능한 서스펜션을 사용하여 지면의 상황에 따라 감쇠력을 조절하는 다양한 방법이 제시되고 있으나, 대체로 상용차량에서 운전자의 승차감 향상과, 진동감소 등에 집중되어 있다.

필자는 현재 지면의 경사와, 장애물로 인한 로봇의 상하운동 및 피치운동이 발생하는 모든 상황에 대처가 가능하도록 실시간으로 최적 댐핑계수를 찾는 연구를 계속 진행하고 있다. 추가로 야지 환경에서의 주행 안정성 제어에 응용하기 위하여 실시간으로 댐핑계수 조절이

가능한 서스펜션이 필요하며 이를 해결할 수 있는 에어 서스펜션이나 MR댐퍼가 있지만, 그 부피와 무게를 고려할 때 오히려 로봇의 주행성능을 향상시키는데 제한적인 요소가 될 수 있다. 따라서 현재 수동으로 감쇠력 조절이 가능한 서스펜션을 대신하여 자동으로 실시간 감쇠 조절이 가능한 서스펜션을 개발하고 있다.

References

- [1] F. Matsuno and S. Tadokoro, "Rescue Robots and Systems in Japan", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic, 2004, pp. 12-20.
- [2] H.-K. Jeong, K.-H. Hyun, S.-H. Kim, Y.-K. Kwak, "Experimental Verification of Obstacle Avoidance Algorithm ELA Applicable to Rescue Robots," The Journal of Korea Robotics, vol. 4, no. 2, pp. 105-111, 2009.
- [3] Y.-L. Wei, C.-Y. Kim, M.-C. Lee, "Indoor Mobile Robot Heading Detection Using MEMS Gyro North Finding Approach," The Journal of Korea Robotics, vol. 6, no. 4, pp. 334-343, 2011.
- [4] T. Kamegawa, T. Yamasaki, H. Igarashi and F. Matsuno, "Development of The Snake-link Rescue Robot KOHGA," Proceedings of the 2004 IEEE International conference on Robotics and Automation, 2004, pp. 5081-5086.
- [5] A. Krebs, T. Thueer, E. Carrasco, R. Siegwart, "Towards torque control of the CRAB rover", Proc. Of The 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS), 2008.
- [6] T. Thueer, R. Siegwart, "Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots," Robotics and Autonomous Systems, vol. 58, no. 5, pp. 508-519, May, 2010.
- [7] Y.-J. Kim, B.-S. Jeon, J.-Y. Kim, J.-H. Lee, "Analysis for Stability for Passive Mechanisms of High Speed Mobile Robot on Rough Terrain," Journal of Korea Robotics Society, vol. 9, no. 2, pp. 124-131, 2014.
- [8] M. W. Bode, "Learning the forward predictive model for an off-road skid-steer vehicle," Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-07-32, 2007.
- [9] J. S. Albus, "4D/RCS : a reference model architecture for intelligent unmanned ground vehicles," Proc. Of SPIE Aerosense Conference, 2002, pp. 303-310.
- [10] S.-H. Joo, J.-H. Lee, "A Dynamic Modeling of 6x6 Skid Type Vehicle for Real Time Traversability Analysis over Curved Driving Path," Journal of Automation and Control Engineering, vol. 18, no. 4, pp. 359-364, 2012.

- [11] S.-H. Joo, J.-H. Lee, "A High-speed Autonomous Navigation Based on Real Time Traversability for 6x6 Skid Vehicle," Journal of Automation and Control Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 251-257, 2012.
- [12] C. Vassal, O. Sename, L. Dugard, P. Gaspar, Z. Szabo, J. Bokor, "A New semi-active suspension control strategy through LPV technique," Control Engineering Practice, vol. 16, no. 12, pp. 1519-1534, 2008.
- [13] G. Z. Yao, F. F. Yap, G. Chen, W. H. Li, S. H. Yeo, "MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system," Mechatronics, vol. 12, no. 7, pp. 963-973, 2002.
- [14] C. Vassal, C. Spelta, O. Sename, S. Savaresi, L. Dugard, "Survey and performance evaluation on some automotive semi-active suspension control methods: A comparative study on a single-corner model," Annual Reviews in Control, vol. 36, no. 1, pp. 148-160, 2012.
- [15] A. Unger, F. Schimmack, B. Lohmann, R. Schwarz, "Application of LQ-based semi-active suspension control in a vehicle," Control Engineering Practice, vol. 21, no. 12, pp. 1841-1850, 2013.
- [16] J. Yao, W. Shi, J. Zheng, H. Zhou, "Development of a sliding mode controller for semi-active vehicle suspensions," Journal of Vibration and Control, vol. 19, no. 8, pp. 1152-1160, 2013.
- [17] K. El Majdoub, D. Ghani, F. Giri, F. Z. Chaoui, "Adaptive semi-active suspension of quarter-vehicle with magnetorheological damper," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 137, no. 2, 2015.



전 봉 수

2014 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학사)
2014 ~ 현재 충남대학교 기계설계 · 메카트로닉스 공학과 석사과정

관심분야: 야지 주행로봇, 탐사로봇, 지형인식, 로봇 위치추정



김 자 영

2008 충북대학교 기계공학과(공학사)
2011 충남대학교 기계 · 기계설계 · 메카트로닉스 공학과(공학석사)
2011 ~ 현재 충남대학교 기계 · 기계설계 · 메카트로닉스 공학과 박사과정

관심분야: 야지 주행로봇, 탐사로봇, 지능제어, 지형 인식, 양팔 로봇 제어



이 지 홍

1983 서울대학교 전자공학과(공학사)
1985 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
1991 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1994 ~ 현재 충남대학교 메카트로닉스 공학과 교수

관심분야: 양팔 로봇 제어, 로봇 위치추정, 해양로봇 운영, 야지 주행 로봇