

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.8.1023

ISSN 1226-4873

## 동역학 모델을 활용한 서비스용 지능형 로봇의 현가 시스템 설계 및 최적화

최성훈\* · 박태원\*† · 이수호\* · 정성필\* · 전갑진\* · 윤지원\*

\* 아주대학교 기계공학부

### Design and Optimization of Intelligent Service Robot Suspension System Using Dynamic Model

Seong Hoon Choi\*, Tae Won Park\*†, Soo Ho Lee\*, Sung Pil Jung\*, Kab Jin Jun\* and Kab Jin Jun\*

\* Dept of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received March 16, 2009 ; Revised May 31, 2010 ; Accepted June 16, 2010)

**Key Words:** Intelligent Service Robot(서비스용 지능형 로봇), Suspension System(현가 시스템), Dynamic Model(동역학 모델), Design Optimization(설계 최적화)

**초록:** 최근에, 서비스용 지능형 로봇이 공공기관에서 방문객들에게 건물을 안내하고 정보를 제공하는데 사용되어지고 있다. 이 로봇은 지면 위치 인식 방식의 센서를 가지며 마름모형태의 네 바퀴로 스스로를 지탱한다. 로봇의 작동은 구동부분과 내부 구조가 하나의 결합된 몸체로 구성되어 있기 때문에 고르지 못한 장소에서는 제한을 받는다. 이와 같은 상태가 지속되면 로봇의 정밀한 부분에서 이상 징후가 발견 될 것이고, 각각의 연결 부위가 약화 될 것이다. 따라서 로봇의 동역학 모델이 만들어 졌고, 서스펜션과 함께 구동 특성들을 위한 모의실험도 이루어 졌다. 이 서스펜션 시스템은 로봇의 각 부분에 미치는 충격들을 줄이는데 최적화 되었다.

**Abstract:** Recently, an intelligent service robot is being developed for use in guiding and providing information to visitors about the building at public institutions. The intelligent robot has a sensor at the bottom to recognize its location. Four wheels, which are arranged in the form of a lozenge, support the robot. This robot cannot be operated on uneven ground because its driving parts are attached to its main body that contains the important internal components. Continuous impact with the ground can change the precise positions of the components and weaken the connection between each structural part. In this paper, the design of the suspension system for such a robot is described. The dynamic model of the robot is created, and the driving characteristics of the robot with the designed suspension system are simulated. Additionally, the suspension system is optimized to reduce the impact for the robot components.

- 기호설명 -

#### 1. 서론

- Kmain : 주 현가 탄성계수(N/mm)
- kmain : 주 현가 탄성계수(N/mm)
- Kfront : 전방 보조현가 탄성계수(N/mm)
- Krear : 후방 보조현가 탄성계수(N/mm)
- Cmain : 주 현가 감쇠계수(N-sec/mm)
- Cfront : 전방 보조현가 감쇠계수(N-sec/mm)
- Crear : 후방 보조현가 감쇠계수(N-sec/mm)

최근 공공 기관을 중심으로 방문객들에게 다양한 편의를 제공하기 위한 서비스용 지능형 로봇의 활용이 늘어나고 있다. 지능형 로봇이란 주위의 환경을 인식하고 이를 바탕으로 상황을 판단하여 동작하며, 인간과 상호작용을 하는 로봇을 말한다. 주로 지정된 장소를 이동하여 서비스를 제공하며 최근에는 무선 네트워킹을 이용하여 실시간 서비스 제공 및 서비스 지역의 모니터링이 가능한 로봇들이 개발되어 시범적으로 운용되고 있다.

† Corresponding Author, Park@ajou.ac.kr  
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

지능형 로봇은 관련 기술의 급속한 발달에 따라 그 기능과 적용 가능한 범위가 점차 확대되고 있다. 그러나 경제적인 측면에서나 기능적인 측면에서 킬러 어플리케이션의 부재로 인하여 시장 형성 초기 단계이며, 관련된 산업도 초기 상태이다. 가까운 미래에 지능형 로봇 산업이 인간의 생활에 미칠 파급력을 일찍부터 파악한 일본, 미국, 독일 등의 로봇 기술 선진국들이 현재 주도적인 연구를 수행하고 있으며, 우리나라의 경우 정부에서 차세대 성장 동력 산업으로 선정하여 체계적으로 로봇산업을 육성 중에 있다.<sup>(1-3)</sup>

일반적으로 지정된 장소에서 활용되는 서비스용 지능형 로봇은 핵심 기능인 자율 주행 중의 안정성과 서비스 제공을 위하여 지속적으로 로봇의 위치를 파악할 필요가 있다. 이를 위해 다양한 방법이 연구 중에 있다. 대표적인 위치 인식 방식으로는 엔코더, 초음파, 적외선 센서를 이용한 위치 인식 방식이 있다. 또한 전파를 이용한 위치 인식 기술도 개발되었으며, 앞서 언급한 방법들을 통합하여 로봇에 적용한 위치 인식 시스템이 활용되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

지면 위치 인식 방식을 적용한 서비스용 지능형 로봇이 공공기관 방문객을 대상으로 안내 도우미 역할과 실시간 정보 제공을 목적으로 개발 중이다. 현재 평탄한 지면 이외에서 활용이 어려운 점을 개선하기 위하여 현가 시스템 적용이 필요하며, 이를 통하여 부가적으로 자율 주행 시 발생하는 미세한 진동과 문턱 등으로 통과할 때에 로봇에 가해지는 충격으로부터 로봇의 정밀 구성부품을 보호할 수 있다. 다양한 지형에서 로봇을 운용하기 위한 현가장치와 그 제어 알고리즘이 연구되고 있으며,<sup>(6,7)</sup> 로봇의 현가 시스템 설계를 위해 동역학 모델이 활용되고 있다.<sup>(8)</sup>

본 논문에서는 개발 중인 서비스용 지능형 로봇에 적용될 현가 시스템을 설계하였다. 로봇의 동역학 모델을 활용하여 현가장치 비적용 로봇과 적용 로봇의 요철이 포함된 지면에서의 구동 특성을 비교하였다. 또한, 요철 구간 통과 시 발생하는 수직 방향 가속도가 로봇에 주는 영향을 최소화하기 위하여 로봇 현가 시스템의 최적화를 수행하였다.

## 2. 서비스용 지능형 로봇

개발 중인 지능형 로봇은 로봇의 상부에 터치

스크린을 통해 다양한 정보를 실시간으로 제공하며, 방문객이 원할 경우 특정 장소까지 로봇이 직접 안내할 수 있도록 고안되었다. 무선 네트워킹을 통하여 실시간으로 업데이트된 정보를 제공하며, 또한 상부에 설치된 CCD 카메라를 통하여 통제실에서 주변 상황을 살펴볼 수 있다. 기본적으로 전방 지형 감지를 위하여 레이저 스캐너를 사용하고 2차적으로 초음파 센서를 통하여 전방 위 장애물 감지가 가능하다.

로봇의 현재 위치를 감지하기 위해 지면으로부터 위치를 인식하는 방법이 본 로봇에 적용되었다. 위치를 인식하기 위해 위치 센서는 항상 지면으로부터 40mm이내의 거리에 위치해야 한다. 또한, 센서의 위치는 구동 차축과 동일 선상에 위치하여야 해야 한다. 따라서 구동 바퀴를 위치 인식 센서 좌우에 위치시키고, 지면에서 수직 방향을 축으로 회전 가능한 보조 바퀴를 로봇 본체 전, 후방에 설치하였다. 구동부의 배치로 인하여 현가 시스템이 적용되지 않은 경우, 높이가 낮은 요철은 내부 프레임의 작은 범위의 탄성 변형 및 보조 바퀴의 컴플라이언스에 의해 통과가 가능하다. 그러나 일정 높이 이상에서는 전면의 보조 바퀴가 요철을 지나갈 때에 중앙의 구동 바퀴가 지면과의 접촉을 유지하지 못하여 동작 제어가 불가능하고 불안정한 상태가 된다. 이러한 센서 특성에 근거한 구동부 구조로 인하여 간단한 요철이 있는 환경에서도 운용상의 어려움이 발생한다. 또한, 요철을 통과하더라도 지면으로부터의 충격이 상부의 부품들에 그대로 전달되며 로봇이 로비와 같은 평탄한 지형에서 운영되더라도 미세한 진동은 내부 구성 부품에 전달된다.

로봇에 현가 시스템을 적용함으로써 문턱 등의 요철이 있는 환경에서 운용이 가능하게 되어 기존의 평지 위주로 운영이 국한되었던 점을 개선할 수 있다. 추가적으로 지면으로부터 상부의 전자 기기에 진동이 미치는 영향을 줄일 수 있다. 위치 센서에서 요구되는 조건과 각 부품들 간의 간섭, 구동부의 특성 등의 설계 조건을 충족시키는 현가 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다.

전, 후방 보조 바퀴 각각에는 수직 방향의 단순 현가장치를 적용하고, 중앙의 좌, 우측 구동 바퀴는 하나의 차축으로 묶어 일체형 차축 현가장치를 적용하였다. 일체형 차축 중앙부에는 본래의 위치에 위치 인식 센서를 설치하여 본체 상

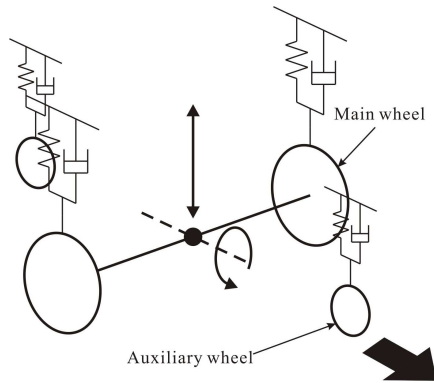


Fig. 1 Schematic of suspension system of intelligent service robot

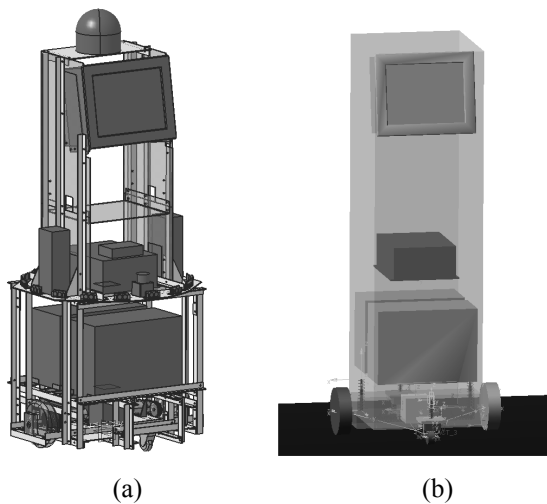


Fig. 2 Internal structure design (a) and dynamic model (b) of intelligent service robot

부의 현가 작용과는 상관없이 지면과 일정한 거리를 유지하도록 설정하였다.

### 3. 서비스용 지능형 로봇

Fig. 2 (b)와 같이 서비스용 지능형 로봇에 대한 강체 동역학 모델을 구현하였다. 총 13개의 body가 사용되었고, 로봇의 주요 구성 부품들인 센서, 제어용 컴퓨터, 안내용 컴퓨터, 배터리, 알루미늄 프레임은 집중질량으로 대체하였다. 스프링, 댐퍼를 포함한 현가 시스템을 로봇의 본체와 기구학 조인트로 연결하였다. 현가 시스템의 안정성을 평가하기 위해 현가장치가 적용되지 않은 경우 통과할 수 있는 5mm 요철(Fig. 3의 Bump A)에 대하여 현가장치가 적용된 로봇 모델과 적용되지 않은 모델을 실제 운용 속도인 100mm/sec

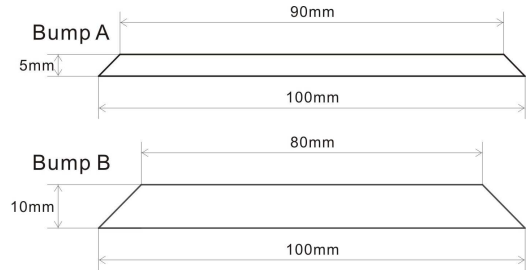


Fig. 3 Bump shapes

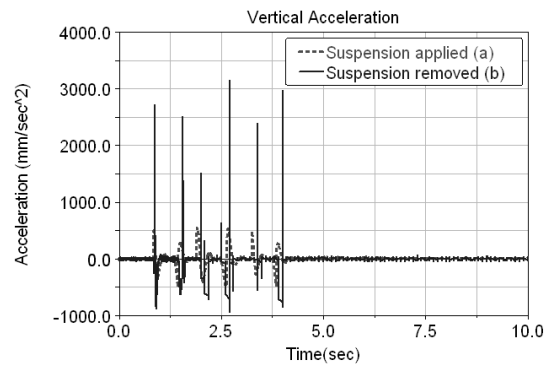


Fig. 4 Vertical acceleration in dynamic analysis of passing over bump

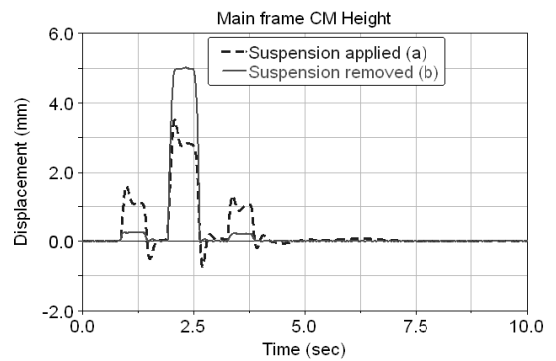


Fig. 5 Main frame height in dynamic analysis of passing over bump

의 속도로 통과시켜, 그 거동의 차이를 비교하였다. 해석에 적용된 요철은 기본적으로 로봇이 건물 내에서 가장 흔하게 접하게 되는 작은 문턱을 고려하였으며, 그 형상은 Fig. 3과 같다.

Fig. 4는 앞서 제시한 요철을 통과할 때의 로봇 중앙부의 제어용 컴퓨터가 받는 수직 방향 가속도를, Fig. 5는 동일한 조건에서 수직 방향 변위를 보여준다. 수직 방향 최대 가속도가  $1.5 \text{ m/s}^2$  을 넘어설 경우 충격에 의해 센서 및 제어장치의 기능이 저하될 우려가 있다. 현가장치가 적용된 경우, 상부 구조에 가해지는 수직가속도(Fig. 4

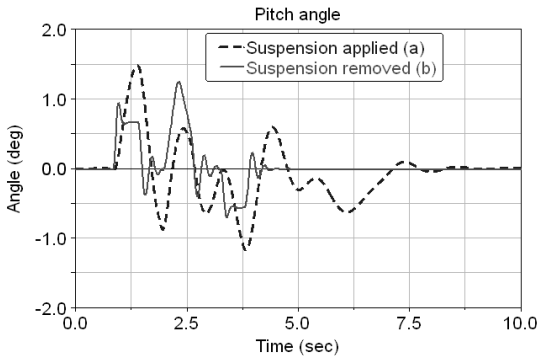


Fig. 6 Pitch angle in dynamic analysis of passing over bump

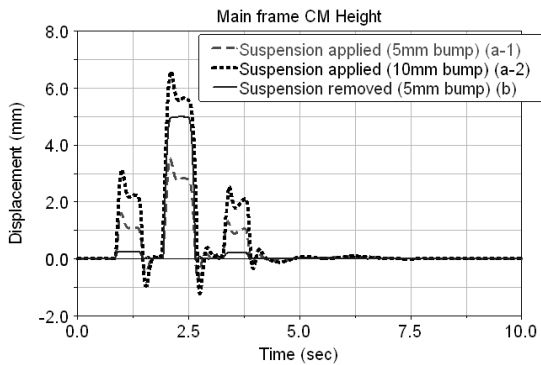


Fig. 7 Main frame height in dynamic analysis of passing over different bumps

(a)가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. 수직 방향 변위에 있어서는 보조 바퀴가 요철을 통과하는 경우에는 그 변위가 증가하나, 구동 바퀴가 요철을 통과하는 시점에서는 그 변위가 줄어들었다.

Fig. 6은 동일한 5mm 요철 통과 시 피치 각의 변화를 나타낸다. 두 해석 결과 모두 1.5deg 이내의 피치 각 변화를 보여준다. 현가장치가 적용되지 않은 로봇 모델의 피치 각 변화(Fig. 6(b))는 적용 모델에 비하여 더 작으며, 요철 통과 이후의 요동 또한 현가장치가 적용되지 않은 경우가 더 빠르게 안정화되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 요철의 높이를 10mm로 높인 경우(Fig. 3의 Bump B)의 요철 통과 해석을 수행한 결과를 나타낸다. 현가장치가 적용되지 않은 모델은 보조 바퀴가 요철을 통과하려는 과정에서 구동 바퀴가 지면과의 접촉 상태를 유지하지 못하고 주행 능력을 상실하여 요철을 통과하지 못하였다. 5mm 요철과 10mm 요철을 통과한 경우를 서로 비교해 볼 때 수직 변위의 경향은 대체로 비례한다.

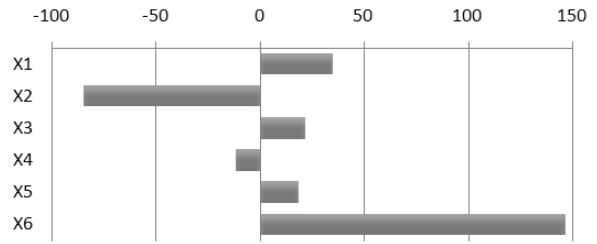


Fig. 8 Result of sensitivity analysis

요철 통과 해석을 통하여 지능형 서비스 로봇에 현가장치가 적용될 경우, 로봇의 구성품에 가해질 수 있는 수직가속도를 줄일 수 있음을 알 수 있고, 현가장치가 적용된 모델이 현가장치 비적용 모델이 운용될 수 없는 일정 높이 이상의 요철이 포함된 환경에서도 활용될 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 현가장치의 적용으로 인해 피치 각이나 요철 통과 후의 안정화 시간이 증가하는 단점이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

#### 4. 현가 시스템 최적화 설계

앞서 서비스용 지능형 로봇의 동역학 모델의 요철 통과 해석을 통하여 현가 시스템 적용의 효과를 살펴보았다. 로봇은 사람이 탑승하지 않으므로 승차감이 필요치 않으나, 요철을 통과할 때에 현가 시스템 상부의 수직 가속도로 인하여 로봇의 정밀 구성 부품이 파손되거나, 기능에 문제를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 본 로봇의 현가 시스템에서는 요철을 통과 시 발생하는 수직 가속도의 크기를 감소시킬 필요가 있다. 이를 위하여 동역학 해석 과정에서 주 바퀴 및 보조 바퀴에 설계 범위 내에서 설정된 현가 시스템의 탄성 계수 및 감쇠 계수가 적절한 값으로 선정되어야 한다.

로봇이 요철 통과 시 발생하는 수직가속도를 최소화 시킬 목적으로 각 설계 변수의 민감도 해석을 먼저 수행하였다. 민감도 해석에는 프라켓-버만 (Plackett-Burmann) 기법이 사용되었다.

선정된 설계 변수 간의 교호 작용을 무시하고 6개의 설계 변수에 대하여 PB-12run Table을 이용하여 현가장치가 적용된 로봇의 동역학 모델에 대하여 100mm/sec의 속도에서 5mm 요철 통과 해석을 수행하고 최대 수직가속도를 측정하였다. 민감도 해석 결과는 식 (1)과 같으며 이를 Fig. 8에 나타내었다.

**Table 1** Design parameters of robot suspension system for sensitivity analysis

Factor	Min.	Current	Max.
$K_{main}$	7.5	10	12.5
$K_{front}$	6	8.5	10
$K_{rear}$	5	6.5	8
$C_{main}$	0.2	0.3	0.4
$C_{front}$	0.3	0.4	0.5
$C_{rear}$	0.5	0.6	0.7

**Table 2** Selected design parameters for experimental dynamic analysis

Factor		(-1)	(0)	(+1)
$K_{main}$	$X_1$	8	10	12
$K_{front}$	$X_2$	6.8	8.5	10.2
$C_{rear}$	$X_6$	0.48	0.6	0.72

**Table 3** Result of experiment for response surface methodology

순번	$X_1$	$X_2$	$X_6$	Y
1	8	6.8	0.48	818.90
2	8	6.8	0.72	1160.66
3	8	10.2	0.48	695.90
4	8	10.2	0.72	945.25
5	12	6.8	0.48	815.00
6	12	6.8	0.72	1149.04
7	12	10.2	0.48	689.73
8	12	10.2	0.72	1047.18
9	0	0	0	887.47
10	7.57	0	0	899.60
11	12.43	0	0	907.46
12	0	6.43	0	960.95
13	0	10.57	0	833.73
14	0	0	0.45	714.57
15	0	0	0.75	1048.97

$$Y = 897.53 + 34.85X_1 - 84.97X_2 + 21.30X_3 - 12.01X_4 + 18.09X_5 + 146.61X_6 \quad (1)$$

총 5개의 설계 변수 중  $X_1, X_2, X_6$ 을 최적화 설계인자로 결정하여 중심 합성 실험 계획표에 따라 아래의 Table 2와 같이 각 수준을 설정하고 최적화를 위한 실험을 실시하였다.

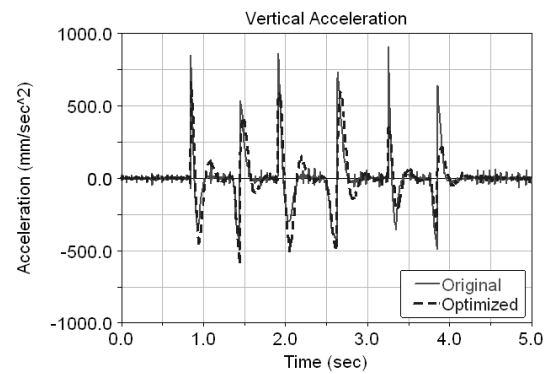
Table 3은 실험 계획에 따른 로봇 모델의 요철 통과 해석 결과를 보여준다. 가속도 최대값은 주로 주 바퀴가 요철을 통과한 후 후방 보조바퀴가

**Table 4** ANOVA table for verification of recursive model function

Factor	S	$\Phi$	V	F0	F(0.01)
Regression Variation	314135	3	104711	308.2	6.22
Residual Variation	3737	11	339		
Sum	317872	14			

**Table 5** Optimization result

Factor	current	Optimized
$K_{main}$	10	12
$K_{front}$	8.5	10
$C_{rear}$	0.6	0.2
Max. Acc.	908.53	663.58



**Fig. 9** Optimized vertical acceleration

지면에 접지할 때에 나타나는 것으로 나타났다. 실험 결과에 따른 최적화 과정을 통하여 추정된 회귀 모형 함수는 식 (2)와 같다.

$$Y = 879.74 + 8.20X_1 - 65.73X_2 + 154.16X_6 + 17.81X_1^2 + 13.62X_2^2 + 3.10X_6^2 + 13.91X_1X_2 - 8.63X_2X_6 + 12.55X_1X_6 \quad (2)$$

Table 4에서 F0 값이 F(0.01)보다 크므로 유의수준 1%한도 내에서 추정된 회귀 모형 함수가 신뢰성을 갖는 것을 알 수 있다. 설계 구속 조건과 현가 시스템에 적용 가능한 사양을 고려한 설계 변수를 Matlab이 제공하는 최적화 도구 중 SQP(Sequential quadratic programming)을 활용하여 최적화한 결과, 변수의 설정 범위 내에서  $K_{main}, K_{front}$ 는 그 값이 클수록,  $C_{rear}$ 는 그 값이 작을수록

최대 수직 가속도를 최소화시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그 결과는 Table 5와 같다.

설정된 설계 변수가 동역학 모델에서도 유효한 값인지를 확인하기 위해 동일한 요철 통과 해석을 수행하였다. Fig. 9를 통하여 기존의 각 바퀴별 최대 가속도가 대체적으로 감소하였음을 확인할 수 있으며 특히 기존의 최대 가속도 발생 구간의 수치는 크게 줄어들었음을 알 수 있다. Table 5의 하단에 나타난 최대 가속도 수치는 개선 전에 비하여 약 26.9% 감소하였다. 이러한 큰 감소율은 기존의 현가 상수들이 센서 특성이나 부품 간 간섭 등의 설계 요건에 중점을 두어 설정되고, 요철 통과 시의 수직가속도 외에 로봇의 가, 감속 시 발생하는 피치나 선회 시의 롤 등의 다른 주행 특성의 변화를 크게 고려하지 않은 데에서 기인한다고 생각된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 현재 개발 중인 공공 기관 서비스용 지능형 로봇에 적용될 현가 시스템을 고유의 설계 조건들을 고려하여 설계하였다. 설계된 로봇 현가 시스템의 동역학 모델을 활용하여 현가장치 비적용 로봇과 적용 로봇의 요철 통과 해석을 수행하여 두 모델간의 거동 특성을 비교하고, 현가 시스템 적용을 통하여 운용 가능한 환경이 확대될 수 있음을 확인하였다. 또한, 요철 구간 통과 시 발생하는 수직 방향 가속도가 상부 정밀 부품에 줄 수 있는 영향을 줄일 목적으로 로봇 현가 시스템에 대하여 설정 변수의 민감도 분석을 수행하고 최대수직가속도를 최소화시키기 위해 시스템을 최적화 하였다. 관련 연구를 통하여 서비스용 지능형 로봇의 현가 시스템과 프레임 설계에 관한 기반 기술을 축적하였으며, 향후 초기 개발 모델에 적용되어 실측 데이터를 통한 보다 체계적인 연구가 수행될 수 있을 것이다. 또한, 로봇 본체에 가해지는 수직가속도 뿐만 아니라 로봇의 자율 주행 시 발생할 다양한 상황에서서의 거동 특성을 파악하고, 이때에 로봇이 주변의 사용자들에게 가할 수 있는 위험을 회피하거나 최소화하기 위한 기계적인 메커니즘 개발 및 전자제어를 위한 연구가 수행될 수 있을 것이라 생각된다.

## 참고문헌

- (1) Lee, H. K., 2006, "Status and Forecasts of Intelligent Robot Industry," *Journal of the KSME*, Vol.46, No.5, pp. 37~43.
- (2) Kim, M. S., 2006, "Intelligent Robot Technology as Next-Generation Growth Engine," *Journal of the KSME*, Vol.46, No.5, pp. 50~55.
- (3) Kwon, S. K., 2005, "Concepts and Trends of Intelligent Robot," Electronics Information Center
- (4) Jin, J. C., 2008, "Introduction of Trend of Location Recognition System," *Information & Communications Magazine*, Vol. 25, No. 4, pp. 5~10.
- (5) Kim, E. T., Park, C. W., Kim, Y. S., Baik, S. W. and Moon, S. B., 2008, "Vision Based Localization Technology for Mobile Robot," *Communications of the KIISE*, Vol. 26, No. 4, pp. 12~21.
- (6) Iagnemma, K., Rzepniewski, A., Dubowsky, S. and Schenker, P., 2003, "Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain," *Autonomous Robots*, 14, 5-16.
- (7) Kim, J. Y., Kim, S. H., Jeong, J., Park, N. and Yang, H. S., 2005, "Design of Mobile Robot with Terrain-adaptive Mechanism for Three-dimensional Unstructured Environment," *Celebration of the 60th anniversary proceedings of the KSME 2005 autumn annual meeting*, pp. 2153~2158.
- (8) Moon, W. K., Kim, H. W., Yoo, W. S. and Huh, N., 2007, "ADAMS Simulation to Determine Spring and Damper for an Omnidirectional Robot," *Transactions of the KSAE 2007 Spring Annual Meeting of Busan. Ulsan. Gyeongnam branch*, pp. 57~61.
- (9) Park, S. H., "Understanding of Design of Experiments," Minyoungsa.
- (10) Jung, S. P. and Park, T. W., 2008, "Development of the Optimization Design Module of a Brake System," *Transactions of the KSAE*, Vol. 16 No. 3.
- (11) Gillespie, T., 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," SAE
- (12) 1992, "Truck Systems Design Handbook," SAE, PT-41
- (13) ADAMS User's Manual, 2002, MSC software
- (14) Kim, Y. S., 2004, "Introduction and Application of MATLAB," Nopee-Gipee