

# 라키-보기 구조를 갖는 카트의 계단 등반 성능 최적화 Optimization of the Stair-climbing ability of cart with Rocker-bogie mechanism

\*홍희승<sup>1</sup>, #김종철<sup>1</sup>, 김동욱<sup>1</sup>, 김선호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>H. S. Hong<sup>1</sup>, #J. W. Kim(jongkim@snu.ac.kr)<sup>1</sup>, D. M. Kim<sup>1</sup>, S. H. Kim<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Optimization, Rocker-bogie, Stair-climbing.

## 1. 서론

가정용 서비스 로봇에 대한 다양한 연구가 여러 분야에서 진행되고 있는 상황에서, 실내 이동을 위해 로봇의 운동성에 중추적인 역할을 담당하고 있다고 할 수 있는 주행 유닛 부분에 대한 연구는 전체 연구 분야 중에서도 필수적인 분야라고 말할 수 있다.

본 연구에서는 로봇에 적용되는 다양한 주행 메커니즘 중에서, 바퀴를 이용함에도 다리 구동 방식만큼의 힘지 적용력을 갖는 것으로 보이는 수동형 링크 구조 바퀴 구동 방식을 선택했다. [1] Rocker-bogie 구조는 수동형 링크 구조 바퀴 구동 방식의 기본 형태로, 현재 널리 이용되고 있다. Rocker-bogie 구조의 시작은 NASA 에서 화성탐사로봇으로 제작한 MER(Mars Exploration Rover - Sojourner, Spirit, Opportunity 등)들로 볼 수 있다. [2]

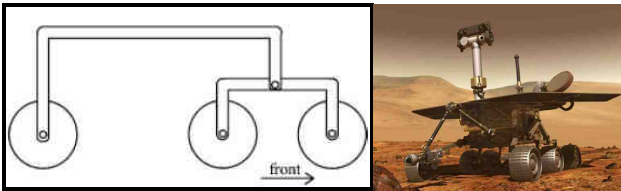


Fig. 1 Rocker-bogie structure and MER with the rocker-bogie suspension system

Rocker-bogie 구조를 적용하면 문턱과 같은 실내에서의 다양한 장애물의 극복과 함께 최대의 장애물이라고 할 수 있는 계단 등반을 위해 바퀴 구동의 장점인 평지에서 빠른 속도 유지와, 다리 구동 방식의 장점인 힘지 적용력을 가진 rocker-bogie 구조의 효과를 기대할 수 있다.

Rocker-bogie 구조를 적용한 기구가 계단을 등반하는 경우는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 가정용 서비스 로봇과 같이 각 바퀴가 구동하여 계단을 등반하는 경우, 그리고 또 한가지는 쇼핑 카트와 같이 외부의 견인력에 의해 계단을 오르는 경우이다. 본 연구에서는 이 두 가지 경우에서, 사람 또는 그와 같은 외부의 견인력을 이용하여 실내를 이동하는 기구에 적용하는 경우에 대해 진행하였다. 따라서 이는 Rocker-bogie 구조가 화물을 적재하고 이동하는 경우 즉, 계단을 등반하는 짐수레와 같은 경우로 볼 수 있다.

본 연구와 유사한, 수동형 링크 구조 바퀴 구동 방식의 주행 시스템에 대해서 계단등반의 상황에 대해서 최적화를 진행한 연구들이 있었다. [3, 4] 하지만, 이들 연구는 바퀴의 크기를 모두 같도록 하고, 설계변수의 수를 제한하는 등의 한계를 가진 연구였다.

따라서 본 연구에서는 Rocker-bogie 구조를 갖는 cart 의 각 설계변수에 모든 바퀴 크기와 각부 링크의 길이를 포함하여 계단 등반성능의 최적화를 진행하였다.

## 2. 최적화 문제 정의

Rocker-bogie 구조를 갖는 기구의 계단등반 성능 최적화를 위하여 다음과 같은 최적화 문제를 정의했다.

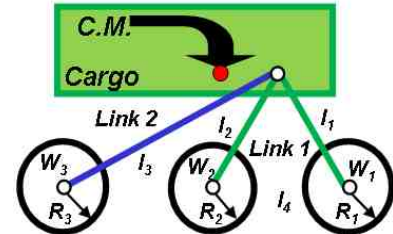


Fig. 2 Kinematic structure of rocker-bogie for the optimization problem definition

Rocker-bogie 구조는 Fig 2 에서 알 수 있듯이 2-D 의 기구학 구조를 가지며, 여기에 대해 7 개의 설계변수를 선정했다. 7 개의 변수는 각 바퀴( $W_1, W_2, W_3$ )의 반경인  $R_1, R_2, R_3$  와 Link1 과 Link2 의 각 링크 길이인  $l_1, l_2, l_3, l_4$  이다. 여기에 더하여 cart 의 무게중심은 cargo 가 Link1 에 고정되어있고 가정하였으므로 마찬가지로 Link1 에 고정된 것으로 가정하였다.

이와 함께 최적화 문제정의에서 cart 가 등반할 계단의 종류도 noise factor 로 3 가지를 선정했다. Fig 3 에서  $N_2$  의 경우가 일반적인 계단의 크기이다.

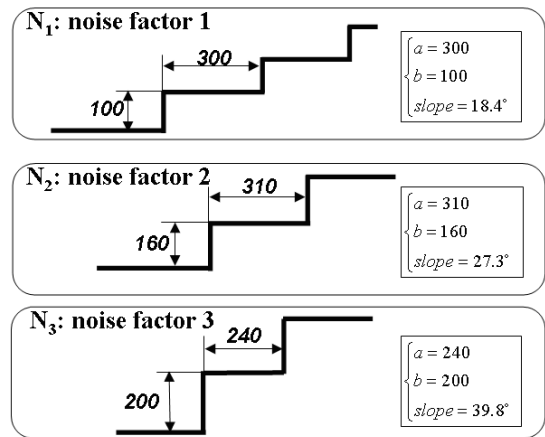


Fig. 3 3 types of stair conditions

짐이 실린 상태에서 Cargo 가 최대한 안정적인 상태를 유지하기 위해서 1. 무게중심의 궤적이 최대한 안정될 것, 2. Cargo 의 각도를 최소화 할 것을 목적함수에 적용시켰다. 따라서 무게중심의 궤적이 계단의 기울기를 갖는 직선에 대한 차이 값의 평균에 대한 편차를 최소화 하는 것과 함께 Cargo 의 최대 기울기를 최소화 하는 것을 본 연구의 최적화 목표로 설정하였다. 따라서 정의된 목적함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & f(l_1, l_2, l_3, l_4, R_1, R_2, R_3) \\ & = 0.5 \times (\text{C.M.의 이동 궤적과 직선간 차이의 편차}) \\ & + 0.5 \times (\text{Cargo의 최대 각도}) \end{aligned}$$

마지막으로 최적화 문제의 제한 조건을 정의하였다. 우선 본 경우를 고려하여, 일반적으로 사용되는 상용 쇼핑 cart 의 사이즈를 참조하여 각 설계변수의 제한조건을 설정

하였다. 여기에 더하여 링크와 바퀴 사이에 존재하는 구조적인 제약을 포함하는 제한 조건을 포함하였다. 이 제한 조건들을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} R_i \leq l_i \leq 500 & (i=1,2) \\ 25 \leq R_i \leq 244 & (i=1,2,3) \\ l_4 > R_1 + R_2 \\ l_1 + l_2 \geq l_4, l_2 + l_4 \geq l_1, l_4 + l_1 \geq l_2 \\ l_3 - R_3 > l_2 + R_2 \end{cases}$$

### 3. 최적화 방법 및 진행

앞서 2 절에서 정의된 최적화 문제에 대해 다구찌 방법론을 통한 최적화를 진행하였다. 본 최적화 문제는 smaller-the-better 문제로 무게중심 궤적의 진직 오차와 Cargo 의 최대 기울기를 최소화 하는 것을 목적으로 정하였다. 이 진직 오차와 최대 기울기를 2 절에서 Noise Factor 로 제시한 3 가지 계단의 형상을 적용하여, S/N 비를 구하고, 그 S/N 비를 최대화한다. 본 최적화에 대한 S/N 비의 정의는 다음과 같다.

$$SN = -10 \cdot \log \left| \frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2}{3} \right| \quad [dB]$$

$y_i$  : Tracking Error with  $i$ -th noise factor

각 설계변수들에 대한 1 차 최적화에 대한 수준(level)은 선행탐색을 통해서, 다음의 Table 1 과 같이 선정했다.

Table 1 Level of the design parameters

level	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
#1	350	200	550	375	60	60	60
#2	400	250	600	450	75	75	75
#3	450	300	650	525	90	90	90

### 4. 최적화 결과

앞서 정의된 최적화 내용에 대해 다구찌 방법론을 통하여 목적함수에 대한 최적값의 탐색을 통해 최적화 결과를 얻어내었다. 최적화 결과로 도출된 설계변수 결과값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} l_1 &= 400, l_2 = 250, l_3 = 550, l_4 = 450 \\ R_1 &= 90, R_2 = 120, R_3 = 75 \end{aligned}$$

위의 설계변수 결과값을 적용하여 그림으로 나타내면, 아래 Fig. 4 와 같은 형상의 rocker-bogie 형상이 나온다.

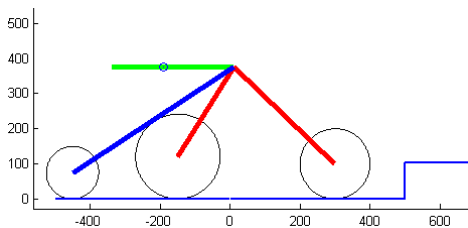


Fig. 4 Optimized result of kinematic structure of the rocker-bogie

최적 설계 변수값을 적용한 rocker-bogie 구조의 세가지 계단에 대한 이동 궤적은 다음의 그림과 같이 나타난다. 다음의 Fig 5, Fig 6, Fig 7 은 각각  $N_1, N_2, N_3$  의 noise factor 를 적용한 계단 형상의 차이에 따라 달라지는 무게중심 궤적의 형상을 나타낸다.

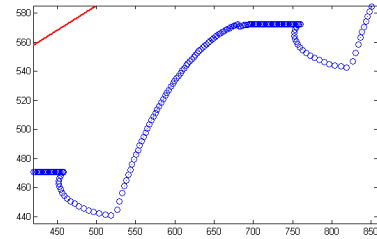


Fig. 5 C.M. path of the optimized rocker-bogie ( $N_1$ )

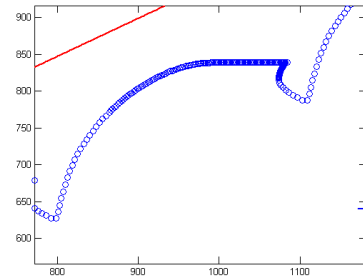


Fig. 6 C.M. path of the optimized rocker-bogie ( $N_2$ )

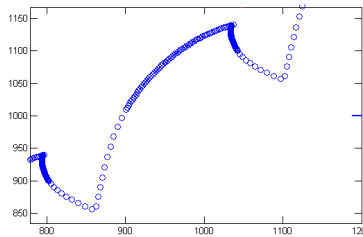


Fig. 7 C.M. path of the optimized rocker-bogie ( $N_3$ )

### 5. 결론

본 연구에서는 계단을 등반하는 경우에 적용 가능한 Rocker-bogie 구조를 갖는 외부 견인력을 통해 구동하는 cart 의 계단 등반 성능 최적화를 진행하였고, 그 결과를 도출하였다. 최적화를 진행하기 위해 앞서 최적화 문제정의를 수행하였으며, 정의된 문제를 다구찌 방법론에 의해 해결하였다. 여기에는 다양한 계단의 형상을 Noise Factor 로 선정하여 다구찌 방법론에 적용하였다.

이렇게 얻은 최적설계변수는 Test 제품을 제작하여 최적화 성능 검증을 진행하고, 그 후 실물을 제작하는데 이용될 것이다.

### 후기

이 논문은 ERC 사업에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

1. 우준규, 김연훈, 이청희, 장준현, 김문상, 박윤근, “계단 적응형 6 차륜 수동형 링크 구조 주행로봇,” 한국자동차공학회 2000년도 동력전달계, 진동소음, 차량운동성능, 타이어운동특성 부문 학술강연 논문집, 126-129, 2000
2. Matijevic, J., “Sojourner, The Mars Pathfinder Microover Flight Experiment,” Space Technology, 17, 143-149, 1997
3. Meghdari, A., Pishkenari, H. N., Gaskarimahalle, A. L., Mahboobi, S. H. and Karimi, R., "A Novel Approach for Optimal Design of a Rover Mechanism", Journal of Intelligent and Robotics Systems, 44, 291-312, 2005
4. Thomas Thueer, Ambrose Krebs, Roland Siegwart, and Pierre Lamon, "Performance Comparison of Rough-Terrain Robots—Simulation and Hardware", Journal of Field Robotics 24(3), 251–271, 2007