

Flip 모션을 이용한 신개념 필드 로봇 플랫폼의 큰 장애물 등반 정적 해석 및 실험

Static Analysis and Experimentation on Obstacle-overcoming for a Novel Field Robotic Platform using Flip Motion

서 병 훈, 신 명 석, 정 경 민, 서 태 원*
(ByungHoon Seo¹, Myeongseok Shin¹, Kyungmin Jeong², and TaeWon Seo^{1,*})

¹School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

²Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract: The ability to overcome obstacles is necessary for field robots for various applications including the ability to climb stairs. While much research has been performed focusing on overcoming obstacles, the resulting robots do not have sufficient ability to overcome obstacles such as stairs. In this research, the purpose is to overcome relatively large obstacles by flipping locomotion through the modification of the stair climbing robotic platform of the previous research. We propose two scenarios to overcome large obstacles: a rear wheel driving system and an elevation system using a ball screw. The research is performed based on static analyses on obstacle-climbing. As the simulation results indicate, we determined the optimal posture of the robot for climbing obstacles for rear wheel driving. Also, an elevation system is analyzed for obstacle climbing. Between the two scenarios an elevation system is determined to reduce the operating torque of the actuator, and the prototype was recently assembled. The climbing ability of the robotic platform is verified. We expect the application area for this robotic platform will be in accident areas of nuclear power plants.

Keywords: static analysis, field robot, field robot platform, overcoming large obstacle, prototype

1. 서론

오늘날 의료, 산업, 서비스 등 여러 분야에서 개발되고 있는 로봇들은 그 다양성과 함께 실 생활에 적용되는 범위도 점차 넓어지고 있다. 특히 화재현장, 전쟁터, 재난현장 등지에서 사용되는 필드 로봇은 기존에 사람이 직접 하던 화재진압, 폭발물 제거, 정찰, 방사능 물질 제거와 같은 사람이 하기 힘든 일, 또는 할 수 없는 일을 대신하여 사람이 직접 할 시 발생할 수 있는 인명손실을 미연에 방지하기 위해 개발되고 있다.

이들 필드 로봇들이 실제 사용되는 환경에는 그 크기와 형태가 다양한 장애물 등이 존재하기에 로봇에 주어진 임무를 완벽히 수행하기 위해서는 이러한 장애물 극복 능력이 필수적이다. 지난 2011년, 후쿠시마 원자력 발전소에 투입되었던 로봇들이 장애물 극복 능력의 한계로 인해 누출 부위 검사 미션을 완전히 수행하지 못 한 사례는 필드로봇에 있어 다양한 장애물 극복 능력이 얼마나 중요한지를 보여준다.

장애물을 극복하는 로봇 플랫폼에 관한 연구는 많은 경우 계단 등반을 목표로 하며, 이는 로봇의 성능을 비교하는 중요한 척도가 된다. 실제 다양한 형태의 장애물들이 존재하지

만, 가장 많이 만나게 되고 또 그 크기와 형태가 다양하기에 극복하기 힘든 장애물이 계단이기 때문이다. Minnesota 대학의 Loper [1]는 계단등반을 목표로 하는 로봇 플랫폼으로, 바퀴에 Spoke가 부착된 형태로 계단을 등반한다. iRobot 사의 Packbot [2] 시리즈는 트랙 타입으로, 본체에 부착된 보조트랙을 이용하여 계단을 등반한다. Packbot과 비슷하게 flipper를 이용하여 계단을 극복하는 사례가 많이 발표되고 있는 실정이다[3,4].

하지만 이런 로봇들은 구조적 특성상 특정 계단에 대한 등반 능력은 우수하나 계단 크기에 민감하고, 또 로봇 본체의 크기보다 큰 장애물을 극복할 수 없으며 그 한계가 드러난다. 로봇 크기보다 큰 장애물을 극복하는 연구로는 동경 공업대에서 만든 구조 로봇[5]이 있다. 이 로봇은 공압 액츄에이터를 이용하여 60cm에서 최대 1m 높이의 장애물을 점프하여 넘을 수 있다. 큰 장애물을 극복하는 또 다른 연구로는 Boston Dynamics의 Sand Flea [6]가 있다. 이 로봇은 RC 자동차 형태의 플랫폼에 연료를 동력으로 사용하는 피스톤을 이용하여 최대 8m까지 점프를 할 수 있다. 이러한 로봇들은 축적된 에너지를 일시에 방출, 피스톤으로 바닥에 충격을 가해 발생하는 반력을 이용하여 등반을 하기에 내구성의 문제가 있다. 또한 딱딱한 지면이 아닌, 충격을 흡수하는 모래나 땀과 같은 지면에서의 등반 능력은 차이가 있다. 이렇듯 지면의 상태에 따라 등반 능력이 달라지고 점프를 하기에 정확하고 안정적인 등반이 어려우며, 점프를 위한 에너지 축적과정이 오래 걸린다. 또한, RHex [7]는 탄성이 있는 반원형 다리를 이용, 점프를 한 후 장애물의 턱을 짚고 등반을 한다. 하지만 이런 등반방식 역시 장애물의 턱에 앞발이 걸려야 등반이 가

* Corresponding Author

Manuscript received July 7, 2014 / revised September 10, 2014 / accepted September 15, 2014

서병훈, 신명석, 서태원: 영남대학교 기계공학부

(gongdroid4@gmail.com/kor10043@naver.com/taewon_seo@yu.ac.kr)

정경민: 한국원자력연구원(kmjeong@kaeri.re.kr)

※ 본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력 기술개발 사업, NRF-2014M2A8A4048106).

※ 이 논문은 2014 제 29회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음.

능하기에 상당히 불안정하며, 등반을 위한 제어 역시 매우 복잡하다는 단점이 있다.

이처럼 큰 장애물을 극복하는 로봇에 관한 다양한 연구가 진행되고 있으나, 안정적이며 정확한 등반을 위해서는 보다 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 본 논문은 이전연구를 통하여 개발한 안정적이며 빠른 속도로 다양한 형태의 계단을 등반하는 새로운 로봇 플랫폼[8]을 이용하여 큰 장애물의 극복 가능성을 검증하는 것을 목표로 한다. 이전에 개발한 로봇 플랫폼인 FlipBot은 메인 바디와 지지다리로 구성되어 있다. FlipBot은 지지다리로 지면을 딛고 마치 사람이 덤블링을 하듯이 메인 바디를 회전시켜 장애물을 등반하는 flip locomotion을 구현할 수 있다. 이 로봇은 기존의 flipper를 이용하는 방식을 벗어나 몸체 자체를 회전시키면서 장애물을 극복한다는 특징이 있다. 본 연구에서는 FlipBot의 body flip 기능을 이용하여 몸체를 장애물의 벽면에 부착, 등반하는 방식으로 큰 장애물을 극복에 대한 정적해석을 다룬다[9].

기존 연구[8] 증명된 로봇의 계단 등반 특성은 다음과 같다. a) 다양한 크기의 계단 등반 가능성, b) 크기와 무관한 빠른 등반 속도 (1 step/s), c) 마찰에 의존하지 않는 안정된 등반. 위와 같은 3가지 장점을 기반으로 본 연구에서는 계단 뿐만 아니라 상대적으로 큰 장애물을 극복할 수 있음을 증명하려 한다.

본 논문은 다음과 같은 순으로 구성되어 있다. II 장에서는 로봇 플랫폼과 큰 장애물을 극복하기 위한 등반 시나리오를 설명한다. III 장에서는 장애물 극복 시나리오를 바탕으로 정적 해석이 수행되며 시나리오들에 대한 비교가 수행된다. IV 장에서는 실제 제작한 로봇의 prototype이 제시하며 실험 결과가 제시된다. V 장에서는 본 논문의 결론이 제시된다.

II. FlipBot의 큰 장애물 등반 시나리오

1. 로봇 플랫폼

큰 장애물을 극복하기 위한 새로운 로봇 플랫폼의 모습이 그림 1에 도시되어 있다. 로봇은 메인 바디와 모듈 형태로 제작된 후륜 구동부로 이루어져 있다. 로봇의 메인 바디는 양쪽에 트랙형 바퀴가 부착되어 있으며, 내부에 구동모터와 몸체를 회전시키는 flip 모터가 장착되어 있다. 로봇은 앞서 언급한 바와 같이, 마치 사람이 덤블링을 하듯이 후륜부를 지지대 삼아 메인 바디를 회전시키는 flip motion을 구현 할

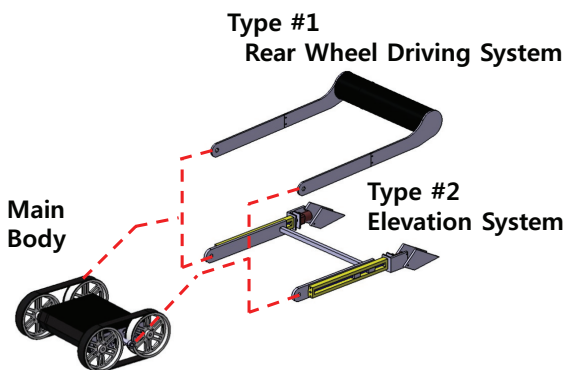


그림 1. 로봇의 구성.
Fig. 1. Robot platform structure.

수 있다. 로봇은 이 flip motion을 이용하여 몸체를 장애물의 벽면에 부착시킬 수 있고, 이를 통해 큰 장애물을 극복한다. 이와 관련된 자세한 내용은 이전 연구 [8]에 제시되어 있다.

FlipBot의 모듈형 구조에 뒤쪽의 파트들을 그림 1과 같이 설계하면 다음과 같은 두 가지 큰 장애물의 등반 시나리오가 가능하다: RWDS (Rear Wheel Driving System) and ES (Elevation System). 다음 절에서는 큰 장애물을 안정적으로 극복하기 위한 두 가지 방안과 그 등반 시나리오가 제시된다.

2. 장애물 등반 시나리오 I: rear wheel driving system

큰 장애물을 극복하기 위한 시나리오 1이 그림 2에 도시되어 있다. 로봇은 메인 바디와 뒷바퀴, 그리고 이 두 부분을 연결시켜 주는 링크로 이루어져 있다. 로봇은 평지를 주행하다 장애물을 만나면(a) 몸체를 90° 뒤집어 장애물의 벽면에 몸체를 부착시킨다. 이 때 뒷바퀴는 지면과 접촉, 구동이 이루어진다(b). 뒷바퀴는 메인 바디가 큰 장애물의 벽면과 지속적인 접촉을 유지하도록 만들어 주고, 플랫폼의 트랙을 구동시키는 모터의 토크는 플랫폼의 자중보다 크다. 따라서 로봇은 뒷바퀴가 로봇을 밀어주고, 메인 바디는 장애물의 벽면에 붙어 타고 오르는 방식으로 등반을 한다(c). 장애물의 턱에 다다르는 순간, 로봇은 몸체를 바닥을 향해 회전시키며 등반을 마치고(d) 트랙 구동으로 인해 전진하며 뒷바퀴를 끌어 올린다(e-f).

3. 장애물 등반 시나리오 II: Elevation system

큰 장애물을 극복하는 또 다른 방법은 볼 스크류를 이용한 수직상승 시스템이다. 뒷바퀴의 구동으로 인해 로봇이 전체적으로 전진하며 장애물을 극복하는 이전 시나리오와 달리, 후륜부는 지면에 고정된 상태로 링크 길이가 늘어나며 몸체를 밀어 올려 수직으로 상승하며 장애물을 극복한다. 이와 같은 방식으로 큰 장애물을 극복하는 시나리오가 그림 3에 도시되어 있다. 로봇은 앞선 시나리오와 마찬가지로, 평지를 주행하다 장애물을 만나게 되면 장애물의 벽면에 부착하기 위해 몸체를 90° 회전하여 뒤집고(a), 이 때, 링크의 고정부분 말단에 부착된 지지대는 지면과 접촉하여 마찰력을 제공, 로

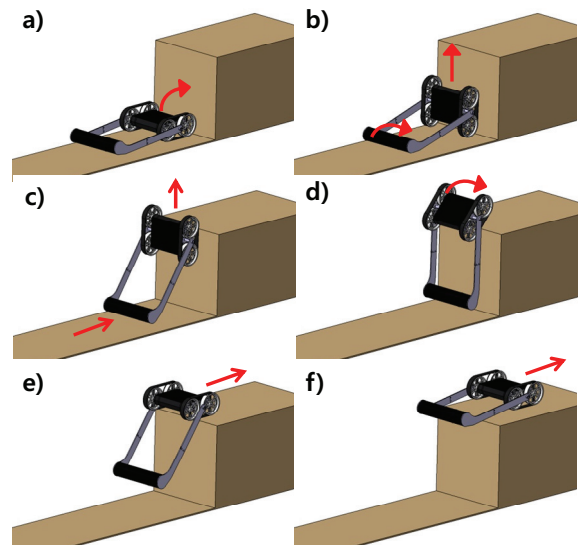


그림 2. 장애물 극복 시나리오 I: RWDS.
Fig. 2. Overcoming scenario I: RWDS.

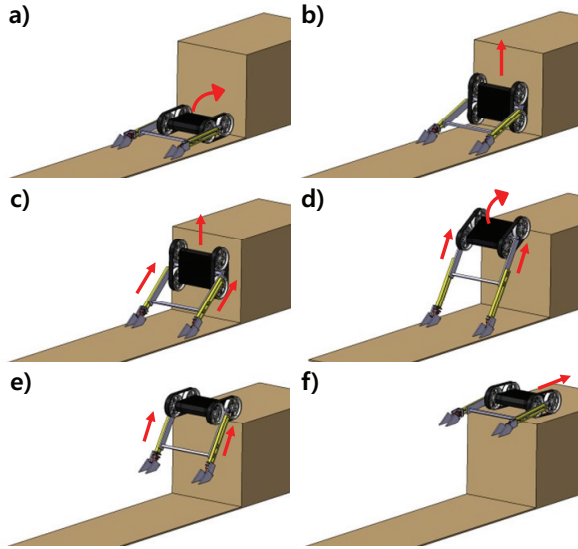


그림 3. 장애물 극복 시나리오 II: ES.

Fig. 3. Overcome scenario II: ES.

붓이 등반하는 동안 뒤로 미끄러지지 않도록 지탱해 준다(b). 링크의 고정부분에 부착된 모터의 동력이 기어를 통해 전달 되면 스크류 축이 회전을 하고 볼 하우징이 상승하게 되며, 케이스 말단에 위치한 메인 바디 역시 상승하게 된다. (c) 스크류의 행정거리만큼 상승하던 로봇이 장애물의 턱에 다다르게 되면 물체를 바닥 면을 향해 회전시키며 등반을 마친다 (d). 이후 링크의 축을 역방향으로 회전, 고정부분을 끌어당기며 늘어난 링크를 다시 줄인다(e). 링크의 길이가 원래대로 줄어들면서 등반을 마친다(f).

III. 장애물 등반 정적 해석

본 장에서는 본 논문의 목적인 큰 장애물을 안정적이며 효율적인 극복을 위해 앞서 제시한 두 시나리오를 정적 해석을 수행한다.

1. RWDS

시나리오 1과 같이 등반하기 위해, 로봇이 벽면에 부착하는 초기 자세는 그림 4와 같이 세 가지로 구분할 수 있다. Case (1)은 지면과 메인 바디가 이루는 각도가 90° 이며, Case (2)는 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$, Case (3)는 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ 이다. 세 경우 모두 지면과 몸체가 이루는 각도에 따라 필요한 힘이 달라진다. 따라서 장애물 등반을 위해 유리한 초기자세와 이에 따른 뒷바퀴의 힘을 찾고자 한다. 해석은 수직과 수평 힘, 모멘트 평형 방정식을 이용하여 로봇의 몸체에 작용하는 반력이 0이 되는 순간을 해석한다. 로봇에 작용하는 힘과 변수들이 아래 그림 5에 정의되어 있다.

세 가지 초기 자세에 대해, 자유 물체도에 따른 수평, 수직 힘의 합력은 아래와 같이 모두 동일하다.

$$\sum F_x = F_1 \quad N_2 = 0, \quad F_2 = \mu_{s2} N_2 \quad (1)$$

$$\sum F_y = F_2 + N_1 \quad (W_1 + W_2 + W_3) = 0 \quad (2)$$

모멘트 평형 방정식은 세 가지 초기 자세에 따라 아래와 같이 다르게 계산된다.

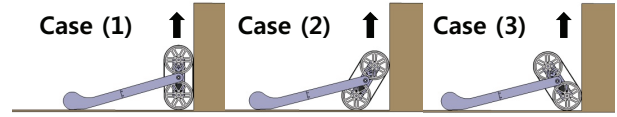


그림 4. RWDS 시나리오에서의 3가지 초기 조건.

Fig. 4. Three initial conditions for RWDS.

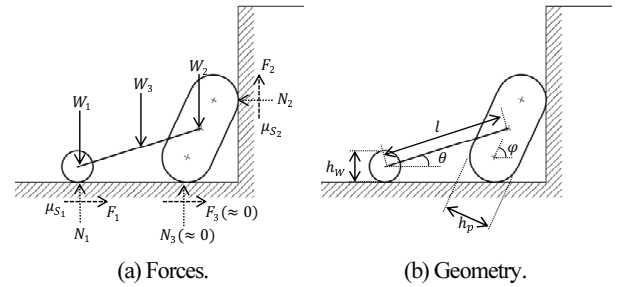


그림 5. 정적해석을 위한 기호.

Fig. 5. Symbols for the static analysis.

Case (1):

$$\sum M_A = \left(\frac{h_w}{2} + l \sin \theta \right) F_1 + \left(\frac{h_p}{2} + l \cos \theta \right) F_2 - \left(l \cos \theta W_2 + \frac{1}{2} l \cos \theta W_3 \right) = \mu_{s2} N_2 \quad (3)$$

Case (2):

$$\sum M_A = \left(\frac{h_w}{2} + l \sin \theta + \frac{s}{2} \sin \theta \right) F_1 + \left(\frac{h_p}{2} + l \cos \theta + \frac{s}{2} \cos \theta \right) F_2 - \left(l \cos \theta W_2 + \frac{1}{2} l \cos \theta W_3 \right) = 0 \quad (4)$$

Case (3):

$$\sum M_A = \frac{h_p}{2} F_1 + \left(\frac{h_p}{2} + l \cos \theta + \frac{s}{2} \cos \theta \right) F_2 - \left(l \cos \theta W_2 + \frac{1}{2} l \cos \theta W_3 \right) = 0 \quad (5)$$

위 힘과 모멘트 평형식을 연립하여 뒤쪽 바퀴에 필요한 힘 F_1 을 계산하면 다음과 같다.

Case (1):

$$F_1 = \frac{l \cos \theta \left(W_2 + \frac{1}{2} W_3 \right)}{\frac{h_p}{2} + l \sin \theta + \mu_{s2} \left(\frac{h_p}{2} + l \cos \theta \right)} \quad (5)$$

Case (2):

$$F_1 = \frac{l \cos \theta \left(W_2 + \frac{1}{2} W_3 \right)}{\frac{h_w}{2} + l \sin \theta + \mu_{s2} \left(\frac{h_p}{2} + l \cos \theta + \frac{s}{2} (\sin + \mu_{s2} \cos \theta) \right)} \quad (6)$$

Case (3):

$$F_1 = \frac{l \cos \theta \left(W_2 + \frac{1}{2} W_3 \right)}{\frac{h_p}{2} + \mu_{s2} \left(\frac{h_p}{2} + l \cos \theta + \frac{s}{2} \cos \theta \right)} \quad (7)$$

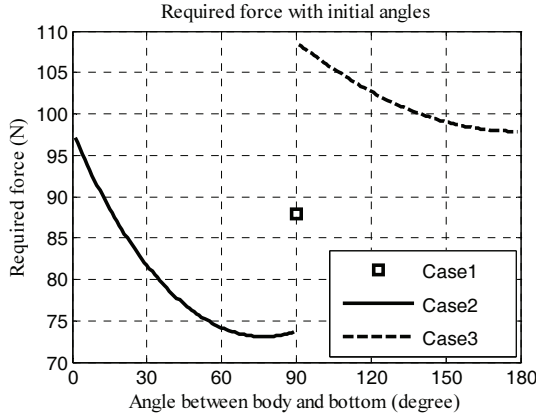


그림 6. 세 가지 초기조건에 따른 뒷바퀴 힘 (F_1).
 Fig. 6. Rear wheel force (F_1) according to the angle for three initial cases.

위의 계산된 힘이 뒤쪽 바퀴에서 필요한 힘이 되며, 이 힘이 정지/운동 마찰력보다 크지 않으면 뒤쪽 바퀴의 동력으로 로봇을 상승시킬 수 있다. 그림 4에서 도시된 초기 자세가 실제 로봇을 등반시키는 데에 있어서 가장 큰 힘이 필요한 자세가 되므로, 본 정적해석으로 계산한 식이 뒤쪽 바퀴의 필요 최대 토크를 계산하는 가이드라인이 될 수 있다.

그림 6에 세 가지 초기 자세에 대한 필요 뒷바퀴 힘(F_1)이 도시되어 있다. 기구 파라미터 값은 참고문헌 [8]의 값을 사용하였다. 정적 해석을 통하면 세 가지 자세의 힘이 중간 자세인 Case (1)에서 불연속 적으로 변함을 알 수 있다. 즉 초기 자세에 따라 매우 민감함을 알 수 있다.

위 결과에서는 세 가지 시나리오를 비교할 수 있다. 세 가지 시나리오에서 Case (3)의 경우 가장 큰 뒷바퀴 힘이 필요함을 알 수 있다. 중요한 점은 Case (2)의 경우에서 최적값을 도출할 수 있는데 본 로봇의 경우 약 75° 기울어져 저 있는 상태일 때, 가장 적은 힘인 약 73N으로 등반이 가능하다는 것을 알 수 있다. 즉, RWDS 방식을 사용할 경우 Case (2)에서 가장 최적의 자세값을 가짐을 알 수 있다.

2. Elevation System

ES의 경우에 대한 정적해석을 수행한다. ES의 경우 볼 스크류가 몸체를 들어 올릴 만큼 충분한 힘이 있는지 계산해야 한다. 앞선 해석과 마찬가지로, 수직과 수평, 모멘트 평형 방정식을 사용하여 로봇의 메인 바디에 작용하는 반력이 0이 되는 순간을 해석한다. 편의를 위해 그림 7에 로봇의 자유물체도와 정적 해석식을 정리하였다. 계산 방법은 로봇을 세 파트로 나누고 각각의 파트와 모멘트에 대한 평형식을 도출하여 링크 방향으로 필요한 힘 (F_1)을 도출한다. 그림 6의 식들을 연립하여 계산하면 쉽게 F_1 을 계산할 수 있다. 위 식과 앞서 사용한 파라미터를 이용하여 계산을 하면 결과적으로 F_1 은 47.5N으로 계산된다. 이 값은 앞의 RWDS과 비교하면 상대적으로 적은 값이라 할 수 있다.

IV. 고찰 및 시제품 실험

1. 정적 해석결과에 대한 고찰

본 연구의 정적 해석을 통해 알아낸 사실은 다음과 같다. 우선 로봇의 RWDS에 대한 정적 해석을 통해 초기 자세에

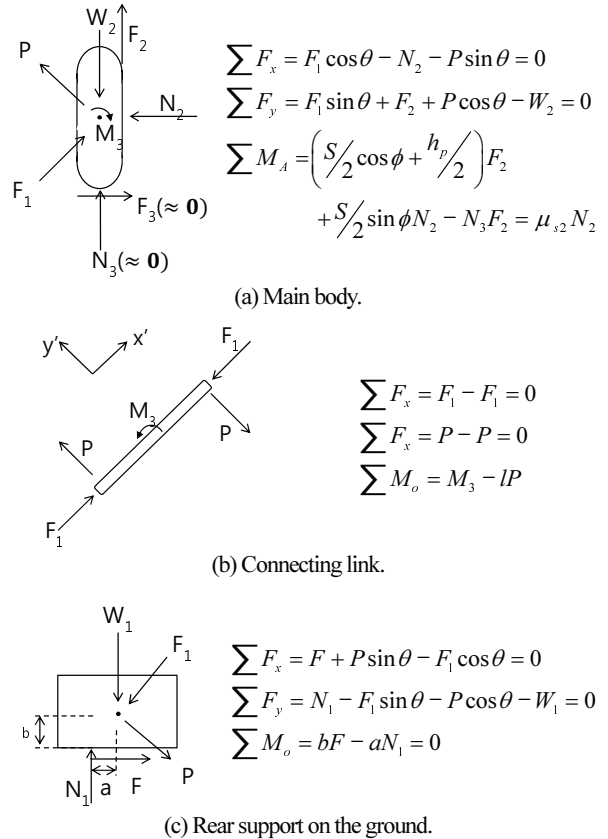


그림 7. ES 해석을 위한 자유물체도.
 Fig. 7. Free body diagram and equations for ES.

따라 최적의 자세가 있음을 확인하였다. 이는 RWDS 형태의 경우 장애물 등반을 위해 자세를 정확하게 제어하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 두 번째는 로봇의 ES에 대한 해석을 통하여 ES가 RWDS에 비해 적은 힘으로 등반이 가능함을 확인하였다. 실제 ES의 경우 RWDS에 비하여 속도 등에서 단점이 있을 것으로 예상되나, 로봇의 구동기 설계 관점에서 더 효율적인 시나리오라 할 수 있다.

해석적으로는 효율적인 방법을 확인하였으나, 실제 실험을 통한 검증이 필요하다. 다음 절에서는 로봇 시제품 제작에 대한 내용을 설명하며 추후 연구계획에 대해서도 설명한다.

2. 로봇 시제품 설계 및 제작

본 연구팀에서는 ES 시스템에 대한 로봇 시제품을 제작하기로 결정하였다. 제작된 로봇 시제품이 그림 8에 나타나 있다. 메인 바디의 크기는 360 x 400 x 160 mm³ (L x W x H)다. 링

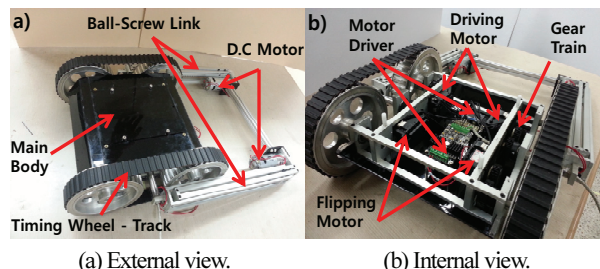


그림 8. 로봇 구성도.
 Fig. 8. Robot prototype.

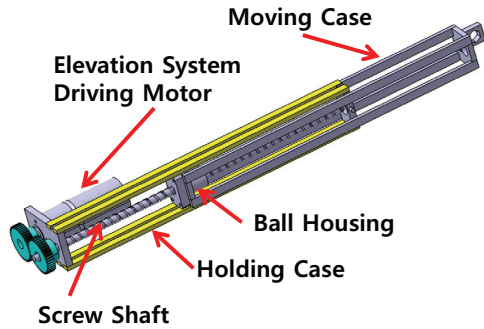


그림 9. ES를 위한 ball-screw 링크 설계.

Fig. 9. Link design based on a ball-screw for ES.

크의 길이는 수축 시 390mm 이며, 등반을 위해 늘어날 경우 715mm 이며 목표 등반 장애물은 로봇길이의 1.5배인 540 mm 이다. 로봇의 총 무게는 약 8kg으로, 트랙은 양면 타이밍 벨트를 사용하였고, 로봇의 프레임 제작에는 Al6061이 사용되었다. Flip motion과 로봇의 구동을 위한 4개의 서보모터 (48W)와 이들 모터를 구동할 driver가 메인 플랫폼에 장착되어 있고, 각 모터의 동력전달은 기어를 통해 이루어진다. 로봇의 전체적인 프레임은 로봇 몸체의 중심을 기준으로 대칭 구조로 이루어져 있고 모터 역시 회전의 영향력을 고려해 대칭적으로 배열하였다. Elevation system은 링크 말단에 부착된 DC 모터(41.3W)로 구동되며 로봇의 전원은 외부 DC supply를 통해 공급된다.

ES의 링크길이 변화는 볼 스크루를 이용하여 구현된다. 그림 9에 가변링크가 도시되어 있다. 볼 스크루를 구동시키는데 필요한 토크는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{F_l l}{2\pi\eta} \quad (8)$$

여기서 F_l 는 정적 해석을 통해 구한 필요 힘, l 은 볼 스크루의 리드, η 는 볼 스크루의 효율로 0.8~0.9이다. 위 식을 바탕으로 DC 모터를 선정하였다. 링크는 크게 고정부분과 이동부분으로 나누어진다. 스크루 축은 고정 Case에 부착되어 있고, 이와 평행한 위치에 모터가 장착되어 있고 기어를 통해 연결되어 있다. 이동 Case의 한 쪽 말단은 볼 하우징과 연결, 반대편 말단은 로봇 메인 바디의 중심축과 연결된다. 기어로 전달된 동력에 의해 스크루 축이 회전을 하게 되면 하우징이 상승 또는 하강하며, 이와 연결된 이동 Case가 움직이며 링크의 전체적인 길이가 변하게 된다.

3. 로봇 등반 실험

제작한 시제품을 바탕으로 실험을 수행하였다. 실제 실험에서는 초기 위치에서 F 값이 실제 로봇과 바닥의 마찰력보다 크게 되어 슬립이 발생하였다. 실제 실험을 수행하기 위해서는 바닥과 로봇의 큰 마찰력이 필수적이다. 본 실험에서는 마찰력의 영향을 줄이고, ES의 성능을 검증하기 위하여 초기 위치를 그림 10(a)와 같이 변경하여 실험을 수행하였다.

그림 10에 로봇의 큰 장애물 등반 사진이 도시되어 있다. 장애물의 크기는 540 mm로, 로봇의 높이나 길이에 비해 상대적으로 매우 큰 장애물이다. 그림에 도시된 바와 같이 로봇은 큰 장애물을 효과적으로 등반하였음을 알 수 있다.

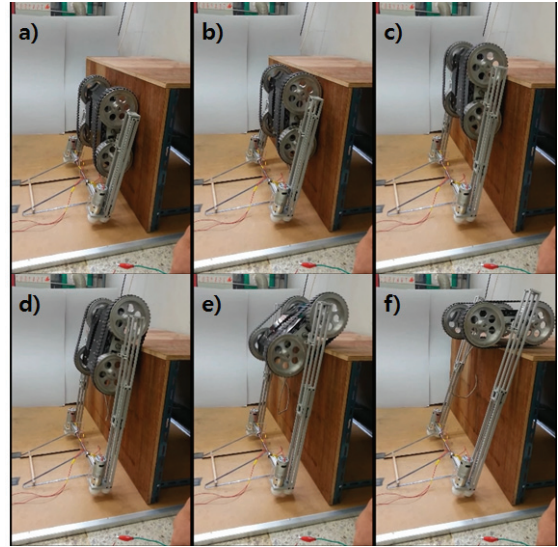


그림 10. 큰 장애물 등반 사진.

Fig. 10. Large obstacle overcoming.

V. 결론

본 연구에서는 flip motion을 이용하여 큰 장애물을 극복하는 로봇 플랫폼에 대한 정적 해석 및 시제품 제작을 수행하였다. 후륜을 구동하는 RWDS 방식과 가변링크를 이용한 ES 방식에 대한 정적해석을 수행하였다. RWDS 방식의 경우에는 초기 자세에 대해 민감한 결과를 보였으며, 후륜의 필요 힘을 최소화하는 자세를 계산하였다. RWDS 방식과 ES 방식의 비교를 통하여 ES 방식의 경우에는 더 적은 힘으로 구동이 가능함을 검증하였다. ES 방식을 기반으로 하여 시제품을 제작하였고, 등반실험을 수행하여 그 성능을 검증하였다. 본 로봇은 원자력발전소 사고상황에서 사용될 예정이다.

REFERENCES

- [1] S. D. Herbert, A. Drenner, and N. Papanikolopoulos, "Loper: a quadruped-hybrid stair climbing robot," *2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, pp. 799-804, 2008.
- [2] <http://www.irobot.com/us/learn/defense/packbot.aspx> (retrieved at 07/08/14).
- [3] Duke robot flipper, <http://people.duke.edu/~jag27/robot.html> (retrieved at 09/16/2014)
- [4] K. Ohno, S. Morimura, S. Tadokoro, E. Koyanagi, and T. Yoshida, "Semi-autonomous control system of rescue crawler robot having flippers for getting over unknown-steps," *Proc. of the 2007 IEEE/RSS Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, pp. 3012-3018, 2007.
- [5] H. Tsukagoshi, M. Sasaki, A. Kitagawa, and T. Tanaka, "Design of a higher jumping rescue robot with the optimized pneumatic drive," *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain, pp. 1276-1283, 2005.
- [6] http://www.bostondynamics.com/robot_sandflea.html (retrieved at 07/08/14).
- [7] http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html (retrieved at 07/08/14).
- [8] B. H. Seo, H. G. Kim, M. H. Kim, K. M. Jeong, and T. Seo,

“FlipBot: a new robotic platform for fast stair climbing.”
International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 14, no. 11, pp. 1909-1914, 2013.

- [9] M. S. Shin, B. H. Seo, K. M. Jeong, and T. Seo, “Development of robotic platform using flip motion for obstacle overcoming.”
Proc. of 2014 29th ICROS Annual Conference (ICROS 2014) (in Korean), Daegu, Korea, pp. 396-397, 2014.



서 병 훈

2012년 영남대학교 기계공학과(공학사).
 2014년 영남대학교 기계공학과(공학석사). 2014년~현재 영남대학교 기계기술 연구소. 관심분야는 기계 설계, 필드로봇 및 장애물 등반 로봇.



신 명 석

2014년 영남대학교 기계공학과(공학사).
 2014년~현재 현재 영남대학교 석사과정 재학 중. 관심분야는 필드 로봇 및 장애물 등반로봇, 기구설계 및 해석, 최적설계.



정 경 민

1988년 서울대학교 기계공학과(공학사)
 1990년 카이스트 기계공학과(공학석사).
 1995년 카이스트 기계공학과(공학박사).
 2002년~현재 대전 원자력 연구원 소속.
 관심분야는 모바일 로봇.



서 태 원

2003년 서울대학교 기계항공공학(공학사). 2008년 서울대학교 기계항공공학(공학박사). 2010년~현재 영남대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 기계설계, 최적설계, 로봇제어, 로봇 경로계획.