

복합 링크 구조 기반의 가변형 구형로봇 설계

강형석¹ · 조성건² · 이동규² · 김병규^{1,3,†}¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과³한국항공대학교 KAU 로봇연구센터

Design of a Transformable Spherical Robot Based on Multi-Linkage Structure

Hyeongseok Kang¹, Seonggun Joe², Dongkyu Lee² and Byungkyu Kim^{1,3}.¹Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.²School. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.³KAU Robot Research Center, Korea Aerospace Univ.

Abstract

We propose a variable frame structure connected with telescopic mast-shaped shaft for a robot displaying outstanding ability to cross obstacles, and for effective traction control. The wireless control system was built to extend and contract a deployable mechanism, which is shaped into a hoberman sphere assembled with frame structures. In order to develop important parameters for efficient locomotion, we derived an Euler-Lagrange equation for the spherical robot. According to the equation, the DC motor was selected. A prototype mechanism was tested and a Finite-Element Analysis (FEA) was conducted in parallel. Using these data, we constructed a deployable spherical robot with structural stability. The deployable robot moved at a speed of 0.85 m/s from 520 mm to 650 mm.

초 록

본 연구에서는 외골격 크기를 변화하여 효과적으로 구동력을 조절하고 우수한 장애물 통과능력을 가진 구형로봇을 구현하였다. 호버만구를 외골격으로 채택하고 슬라이더-크랭크 구조의 확대-수축 메커니즘을 설계하여 무선으로 로봇의 크기변화와 이동제어가 가능하도록 제어시스템을 구축하였다. 로봇의 효율적인 구동에 필요한 주요 변수를 확인하기 위하여 오일러-라그랑주 운동방정식을 세워 해석하였고, 이를 바탕으로 DC 모터를 선정하였다. 로봇의 성능을 평가하기 위해 Prototype의 기초 구동실험을 진행함과 동시에 유한요소 해석을 통해 구조적 안정성을 보완한 최종 모델을 제작하였다. 결과적으로, 외경 기준 최대 650 mm에서 최소 520 mm까지 수축/팽창이 가능한 로봇이 0.85 m/s로 주행이 가능한 것을 확인하였다.

Key Words: Spherical Robot(구형 로봇), Extension·Contraction Mechanism(확대·수축 메커니즘), Frame Structure(외골격 구조)

1. 서 론

무너진 건물터미나 인간이 접근하기 어려운 지역을 탐사하기 위한 로봇으로 제안된 로봇의 메커니즘은 2륜 또는 4륜 구동을 기반으로 한 로봇으로 개발되어

왔다. 이러한 원형 바퀴를 사용하는 로봇의 경우 바퀴와 지면간의 안정적인 접촉을 유지하기 때문에 높은 주행성능을 가지고 있으나, 바퀴의 반지름 보다 높은 장애물을 효과적으로 회피하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다[1]. 선례 연구자들은 이러한 한계를 극복하기 위해 Fig. 1 과 같이 로봇의 바퀴 크기를 조절하여 형상을 변형하는 방법을 적용한 가변형 탐사로봇을 제안하였다.

Received: Oct. 19, 2017 Revised: Nov. 08, 2017 Accepted: Nov. 20, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-300-0101, E-mail: bkim@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

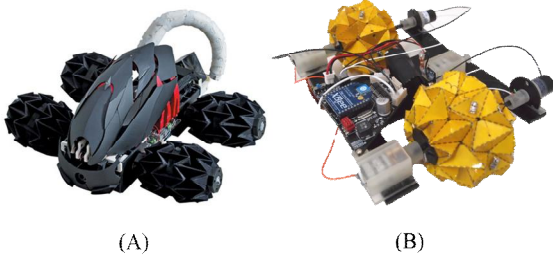


Fig. 1 The proposed mechanism for exploration to overcome obstacle whose height is greater than radius of wheel through variable wheel based on origami method (a) SNUMAX[2] (b) The Deformable wheel robot using magic-ball origami structure[3]

그러나 바퀴의 직경 또는 크기에 따라 부피 변화량에 제한이 있기 때문에 효과적인 장애물 극복능력의 상승을 기대하기 어렵다. 이와 반면, 로봇의 몸체를 구동부로 사용하는 구형 로봇은 부피 변화량의 제한이 바퀴구동방식에 비해 효율적이고, 마찰을 고려한 외피를 외골격 외부에 부착하여 험지에서의 주행 성능 개선이 가능하다. 따라서 현재까지 개발된 구형 로봇은 매우 다양한 형태와 구동 방식으로 개발되어 왔으며 지속적인 연구 개발이 이루어지고 있다[4, 5].

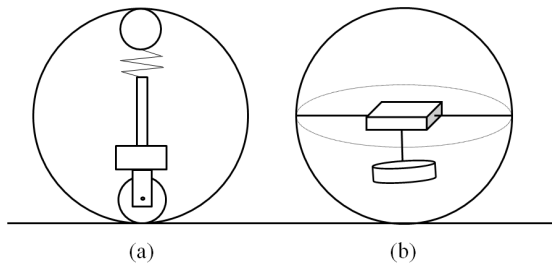


Fig. 2 (a) Ball robot[6] (b) Pendulum based robot[7]

대표적인 로봇의 구동 방식은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 Wheel 기반의 구동방식과 Shaft-pendulum 기반의 구동방식으로 구분이 가능하다[6, 7]. Wheel 기반의 구동방식은 구형로봇의 각운동량 보존 구동방식으로서 구 내부에 비치된 Wheel의 회전을 통해 구 내벽과 접촉하여 로봇을 구동시키는 방식이다. 또한, 여러 개의 바퀴를 각각 다른 방향으로 배치한 뒤 로봇의 운동방향에 대한 자유도를 가질 수 있다. 반면,

Shaft-pendulum 기반의 구형로봇은 구 내부에 연결된 중심 축의 회전을 통해 로봇의 Rolling motion 을 구현한다. 또한, 구 내부에 비치된 moment pendulum 에 의해 무게중심을 이동시켜 로봇의 방향전환을 구현할 수 있다.

제안된 외골격 가변형 구형로봇의 메커니즘은 외골격의 부피변화가 가능하다[8]. 또한, 로봇의 방향전환 메커니즘은 Shaft-pendulum을 기반으로 한 운동방식의 구형로봇을 제안하였다. 지형지물에 따른 외골격 부피 변화의 빠른 응답을 확보하기 위해 외골격 구조와 가변형 축에 각각 Multi-link 방식과 Telescopic mast 구조를 적용하였다. 따라서 가변형 축의 변화에 따른 외골격 부피변화에 대한 빠른 응답반응을 도출할 수 있다.

Multi-link 방식을 적용한 외골격 구조는 복합 링크와 조인트를 연결하여 설계하였다. 또한, 로봇의 링크부에 집중된 하중을 분산시키기 위한 형상과 재료를 고려한 외골격 부를 설계하였다.

Telescopic mast 구조를 적용한 가변형 축의 구동은 3절 Slide-crank 방식의 기구메커니즘을 적용하여 단일 축 방향 운동에 대한 효과적인 위상제어가 가능하다. 따라서 구형 로봇의 외골격 부피는 Operator의 명령이나 혹은 지형지물에 따른 외력에 대한 피드백을 통해 정밀 제어가 가능하다.

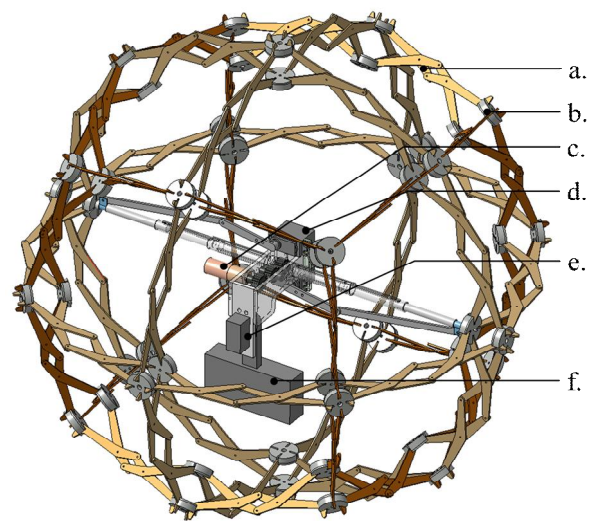


Fig. 3 a. Link, b. Joint, c. DC Motor, d. Servo-motor at slide-crank, e. Servomotor at pendulum, f. Pendulum

2. 상세 설계

2.1 링크 설계

로봇의 외골격을 설계하기 위해 차용된 호버만 구(Hoberman sphere)의 부속품은 일반적으로 두 종류의 링크와 조인트로 구성되어 제작이 가능하다[9]. 선례 연구에서 제안된 호버만 구의 링크들은 동일한 형상을 갖고 있지만 본 연구에서 제안된 로봇의 외골격 구조는 네 종류의 링크와 두 종류의 조인트로 구성하였다. 이는 로봇의 조립과 분해를 용이하게 하고 지면과의 접촉면을 최소화할 통해 마찰력 감소를 위해 링크의 형상과 크기 변화가 불가피 하기 때문이다. 따라서 Fig. 4 와 같이 총 세 개의 Linkage 를 결합하여 로봇의 외골격 구조를 설계하였다.

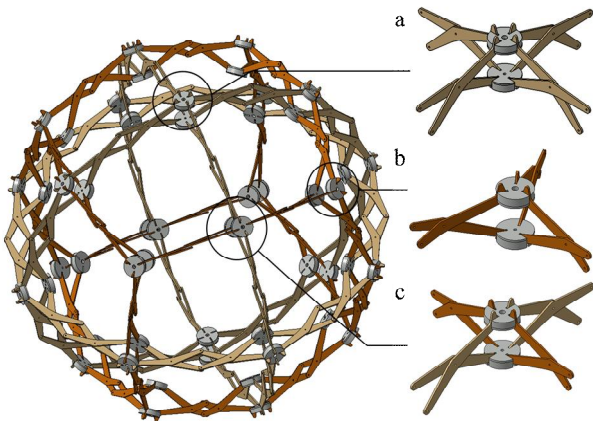


Fig. 4 a. Linkage type 1, b. Linkage type 2, c. Linkage type 3

2.2 확대·축소 메커니즘 설계

외골격의 크기 변화는 가변형 축의 운동을 통해 제어 가능하다. 따라서 telescopic mast 구조[10]를 기반으로 설계된 가변형 축은 복수의 단으로 구성되어 축간 유격을 최소화하기 위해 축 사이의 슬릿을 통해 결합하여 볼트로 고정시켰다. 그리고 가변형 축의 최소·최대 길이 변화량은 외골격의 내경 변화량과 일치하기 때문에, 외골격의 크기 변화는 축의 길이 변화와 연계되어 이뤄진다. 가변형 축의 안정적인 구동을 위한 3절 Slide-crank 방식의 기구메커니즘[11]은 두 개의 서보 모터를 통해 작동된다. 이 때, 서보 모터의 자중과 서보모터의 회전관성에 의한 로봇의 무게중심의 변화를 최소화하기 위해 구동축을 중심으로 상단부

와 하단부에 각각 대칭하여 위치시켰다. 본 논문에서 제안된 가변형 축의 구동원리는 Fig. 5 와 같다.

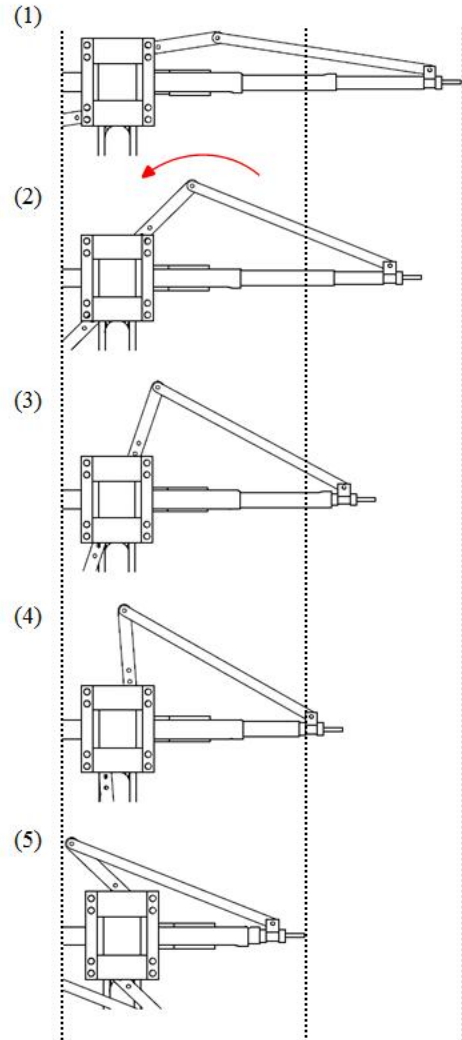


Fig. 5 Locomotive principle of Slide-Crank mechanism

Figure 5 의 (1) ~ (5) 사이의 과정은 슬라이더-크랭크의 구동 방식을 보여준다. 슬라이더-크랭크 구조의 각 연결부는 Link 와 Joint 의 결합으로 구성 되어 있다. 서보모터가 회전하면 서보모터 구동부에 장착된 링크가 회전함에 따라 가변형 축의 길이방향 운동이 발생한다. 각 링크부의 길이는 Slider-crank 기구의 운동해석을 통해 Slider 의 최소값, 최대값을 결정하였으며, Crank 의 길이를 90 mm 로 설계했다.

2.3 Shaft-pendulum 설계

로봇의 무게중심을 변화시키기 위한

Shaft-pendulum 의 운동은 3자유도 만족하여야 한다. 이를 만족하기 위해 서보모터를 활용하여 무게추의 진자운동을 통한 로봇의 방향전환을 유도하였다. 또한 로봇의 전, 후진 시 Shaft-pendulum 부가 구동축의 회전관성에 의해 운동이 가능하도록 설계하였다.

이에 따라, 지형지물의 형상이나 외력에 무관하게 로봇의 무게중심을 중앙에 위치시키는 것이 가능하다. 이러한 효율적인 로봇의 구축조건과 시스템의 배치를 통해 외력이 없는 상태에서도 메커니즘 자체의 효과적인 평형유지가 가능하므로 로봇의 Default 상태에도 배터리 소모를 최소화 할 수 있다.

3. Theoretical analysis

3.1 Driving dynamics

본 논문에서 제안한 외골격 가변형 구형 로봇을 구동하기 위해 필요한 DC 모터를 선정하기 위해서 외골격과 연결된 구동축 회전에 필요한 토크를 계산하여야 한다. 따라서 해당 토크 값을 산출하기 위해 Euler-Lagrange equation[12, 13]을 활용하였다.

Lagrange equation 은 다음과 같이 정의된다.

$$L(\theta, \omega, t) = K_1 + K_2 + T_1 + T_2 - U_1 - U_2 \quad (1)$$

이 때, K_1 는 외골격의 운동에너지, K_2 Pendulum의 운동에너지, T_1 외골격의 회전에너지, T_2 Pendulum의 회전에너지, U_1 외골격의 위치에너지, U_2 Pendulum의 위치에너지이다.

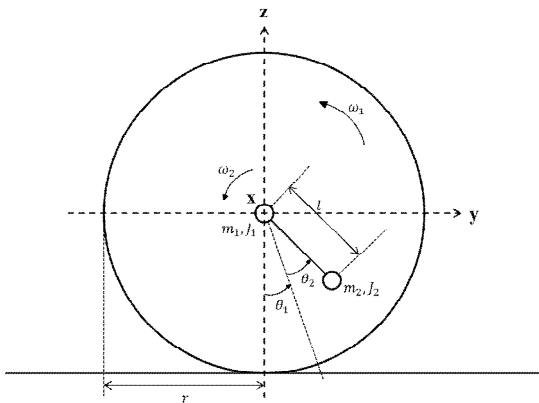


Fig. 6 Simplified model for driving dynamics analysis[13]

Figure 6에 기술한 변수는 다음과 같이 정의된다.

θ_1 은 외골격의 회전각, ω_1 외골격의 각속도, J_1 외골격의 관성모멘트, M_1 외골격의 회전중심에 대한 집중질량, θ_2 Pendulum의 회전각, ω_2 Pendulum의 각속도, J_2 Pendulum의 관성모멘트, M_2 Pendulum의 질량, r 은 외골격의 반지름, l 은 중심에서 Pendulum 까지의 거리를 의미한다.

이를 바탕으로 외골격과 Pendulum의 운동에너지, 회전에너지, 위치에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$K_1 = \frac{1}{2} M_1 (r\omega_1)^2 \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} M_2 [(r\omega_1 - l \cos(\theta_1 + \theta_2)(\omega_1 + \omega_2))^2 + (l \sin(\theta_1 + \theta_2)(\omega_1 + \omega_2))^2] \quad (3)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} J_2 (\omega_1 + \omega_2)^2 \quad (5)$$

$$U_1 = 0 \quad (6)$$

$$U_2 = M_2 g l (1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)) \quad (7)$$

오일러-라그랑주 방정식을 편미분하여 외골격에 구동에 필요한 토크에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -T \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = T \quad (9)$$

여기서 T 는 외골격과 Pendulum 사이의 토크이다. 따라서 최종적으로 정리된 식은 다음과 같다.

$$-T = \alpha_1 [J_1 + J_2 + M_1 r^2 + M_2 r^2 + M_2 l^2 - 2M_2 r l \cos(\theta_1 + \theta_2)] + \alpha_2 [J_2 + M_2 l^2 - M_2 r l \cos(\theta_1 + \theta_2)] + M_2 r l \sin(\theta_1 + \theta_2) (\omega_1^2 + \omega_1 \omega_2) + M_2 g l \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

$$T = \alpha_1 \{J_2 - M_2 r l \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2 l^2\} + \alpha_2 (J_2 + M_2 l^2) + M_2 g l \sin(\theta_1 + \theta_2) + M_2 r l \sin(\theta_1 + \theta_2) (\omega_1^2 + \omega_1 \omega_2) \quad (11)$$

중요 변수들의 구동 토크에 대한 경향성을 파악하기

위해 유도된 식에 각각의 변수 값의 변화에 따른 토크 값을 확인하였다.

Figure 7 은 Pendulum 의 무게변화와 회전각에 따른 토크 변화를 나타낸 그래프이다. Pendulum 의 질량(M_2) 값이 변함에 따라 토크는 선형적으로 변화하기 때문에 Pendulum 의 질량이 클수록 로봇의 구동 응답 속도는 매우 빠를 것이다. 그러나 Pendulum 은 물리적으로 로봇과 동일한 계(System)에 위치하고 있기 때문에 Pendulum 의 질량 증가는 곧 로봇의 전체무게의 증가로 연계되기 때문에 Pendulum 의 질량 선정에 대한 최적 설계가 필요하다. 또한 Pendulum 의 회전각에 따라 토크 값이 비선형 거동 특성을 가지므로 Pendulum 의 운동에 대한 구속조건을 통해 필요한 토크 값을 조절할 수 있다.

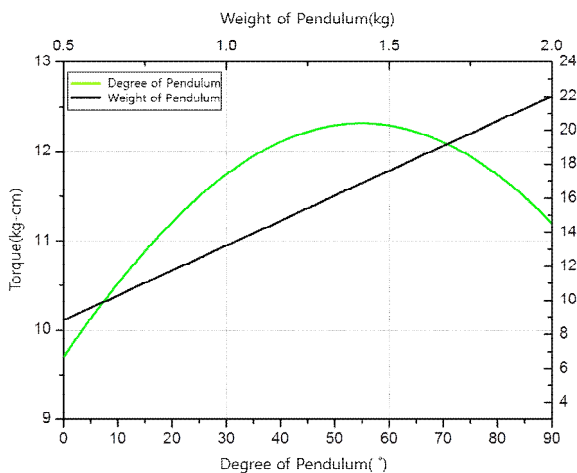


Fig. 7 Torque change for Pendulum's weight and degree

3.2 모터 선정

본 논문에서 제안된 로봇을 효과적으로 구동하기 위해서는 구동축을 회전시키기 위한 1 개의 DC 모터, Slide-crank 메커니즘을 구동하기 위한 2 개의 서보모터 그리고 Shaft-pendulum 구동을 위한 한 1 개의 서보모터가 필요하다. 특히, DC모터에 연결된 Spur gear 와 Idling gear 등으로 구성된 Gear box 를 구동하기 위해서는 Gear 간 마찰과 구동토크를 고려하여 충분한 안전계수를 적용한 모터를 선정 할 필요가 있다.

본 논문에서 제안된 로봇의 DC모터는 실제 구동 토크 대비 안전계수 2를 적용하여 선정되었다.

3.2.1 DC 모터 선정

모터의 종류 중 스피 기어로 구성된 기어헤드를 가진 모터는 무게가 가볍지만 토크 전달률이 낮아 본 연구에서 원하는 높은 토크를 얻기가 어렵다. 반면 유성 기어의 경우 제작비용이 상대적으로 높고 고-감속비일수록 축 방향 길이를 증가시키지만 높은 토크 전달률을 갖고 있다. Eq. 10의 식을 적용하여 반지름이 최소, 최대일 때의 토크를 추정하였다. 이를 기준으로 모터를 선정하여 Table 2과 같이 15 V 에서 44.9 rpm, 10 kgf·cm 의 성능과 1/189 기어비를 가진 기어드 모터가 선정됐다.

Table 1 Maximum and minimum torque according to radius variation of exoskeleton

	max	min
radius(mm)	325	260
Torque(kgf·cm)	10	8.25

Table 2 Geared DC Motor Specification

감속비 (Reduction ratio)	1/189
Rated Torque(kgf·cm)	10
Rated Speed(RPM)	44.9
No Load Speed(RPM)	52.9

2.3.2 서보모터 선정

앞서 기술한 바와 같이 Slide-crank 구조로 설계된 축을 움직이기 위해 2 개의 서보모터가 사용되었으며, 이때 Duralumin 으로 제작된 호버만 구를 수축 및 확대하기 위해 필요한 힘을 측정하였다. 다섯 차례의 반복 측정한 결과, 확장 시 필요한 힘의 평균은 약 2.41 kgf 이고, 수축 시 필요한 힘은 약 2.20 kgf 로 측정되었다. 또한, Slide-crank 구조에서 Crank 의 길이가 9 cm 이므로 확장과 수축 시 필요한 토크는 각각 21.69 kgf·cm, 19.8 kgf·cm 로 계산된다. 이를 기준으로 선정된 서보모터(Highest Rock Crwaling Servo CR800)의 토크는 6 V 기준 19.30 kgf·cm, 7.4 V 기

준 23.20 kgf-cm 이다.

3.2 로봇구조에 대한 응력해석

본 논문에서 제안한 외골격 가변형 구형 로봇의 구조적 안정성을 확인하기 위해 유한요소 해석 (COMSOL Multiphysics®)을 활용하여 외골격을 구성하는 Linkage와 가변형 축에 가해진 분포하중에 대한 결과를 확인 하였다.

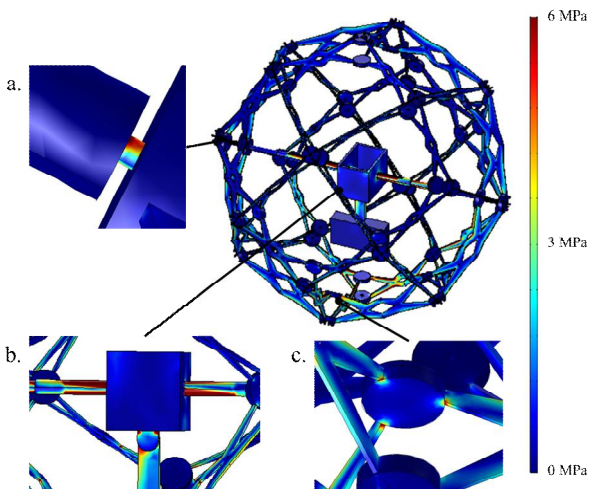


Fig. 8 Stress distribution a. End of the shaft, b. Shaft-hoberman connection part, c. Bottom part

Figure 8과 같이, 외골격 부는 지면과 접촉되는 지점을 포함하여 비교적 고른 응력분포를 보이고 있다. 이와 반면, Fig. 8-b와 같이 가변형 축 상, 하단부에 응력이 집중 되는 것을 볼 수 있다. 이는 Pendulum의 무게로 인해 로봇의 몸체에 고정된 가변형 축 끝단에서 가장 큰 하중에 작용하였기 때문이다.

유한요소 해석에서 가장 힘을 많이 받는 곳을 확인한 결과 Fig. 8의 c에서 좌측을 Link-Joint 부, 우측을 Link-Link 부라 할 때 σ_{max} 값이 약 6 MPa 임을 Fig. 8을 통해 확인 할 수 있다. 이는 Duralumin의 인장강도가 420 - 500 MPa인 점을 고려했을 때 구조적으로 하중에 의한 파단이 일어나지 않는다고 할 수 있다.

따라서, Acrylic이 Duralumin보다 밀도가 약 2배 가량 낮기 때문에 로봇 구조물의 경량화가 가능하지만, 가변형 축이나 Link 간 하중에 의한 응력집중에 따른 구조의 파손 혹은 파단을 방지하기 위해

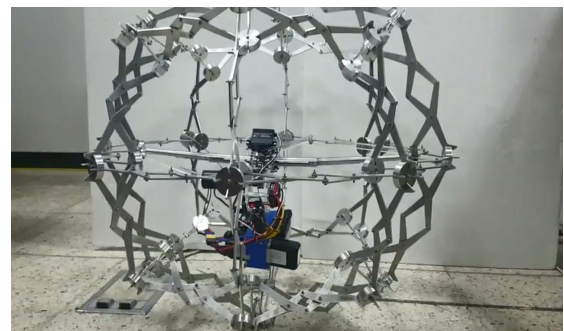
Duralumin으로 제작하는 것이 바람직하다.

Table 3 Material property of Duralumin and Acrylic[14-18]

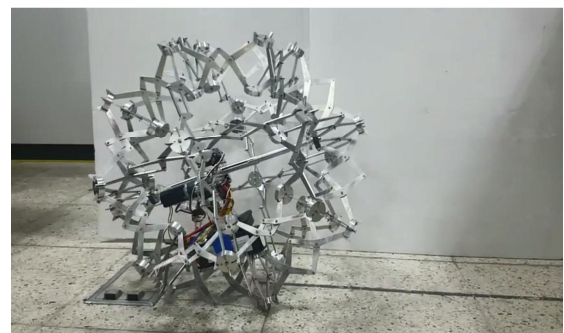
	Duralumin	Acrylic
Density(g/cm^3)	2.8	1.19
Modulus of elasticity(GPa)	73	2.8
Tensile strength(MPa)	420 - 500	69

4. 실험 및 결과

Slide-crank 구조와 연결된 서보모터를 구동하여 외골격의 크기를 조절했다. 크기 변화를 통해서 얻은 내경과 외경의 최대, 최소값은 Table 4과 같다.



(a)



(b)

Fig. 9 Extension and Contraction Mechanism test of the spherical robot (a) Maximum size (b) Minimum size

Table 4 Minimum and maximum diameter of the spherical robot according to the slide-crank mechanism working

Diameter	min	max
inner(mm)	340	510
outer(mm)	520	650

실험 결과 외경이 최대 650 mm 에서 최소 520 mm 까지 확대·수축 하는 것을 확인했다. 가변형 축의 슬릿 길이에 따라 변화한 최대 변화량은 170 mm 로 측정되었다. 이 때 외경의 최대 변화량은 130 mm 로 측정되었다. 가변형 축의 변화량과 외경의 변화량이 일치하지 못한 것은 여러 단으로 구성된 축 사이의 유격과 Pendulum 의 무게로 인한 축의 변형이 가장 큰 원인으로 파악되었다. 이는 가변형 축의 각각의 단에 설계된 유격으로 인해 Fig. 9 (a) 와 같이 휘어 질 경우 Pendulum 의 중량이 증가함에 따라 휘어진 축 사이의 저항력이 비례하여 증가하였기 때문이다.

주행시험을 통해 로봇의 속도를 측정하였다. 로봇의 속도는 평지 주행 시, 0.85 m/s 의 속도로 측정되었다. 로봇의 최대 작동 가능한 속도는 약 3.207 m/s 이다. 이러한 이론속도와 실제 주행실험 간의 속도차이는 로봇의 외골격과 지면사이의 마찰로 인해 대부분의 동력을 손실하였기 때문이 발생한 것으로 판단된다.

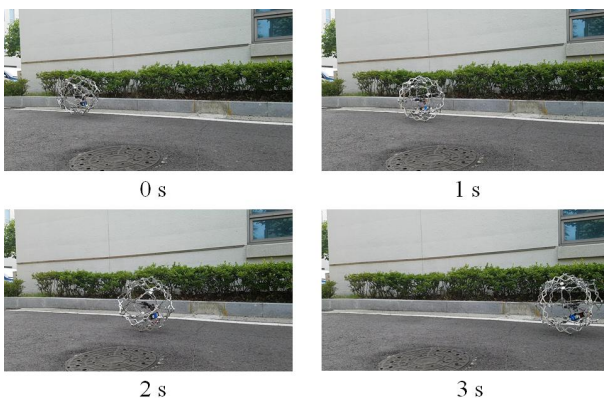


Fig. 10 Maneuverability test of the spherical robot in the flat ground field

5. 결론

본 논문에서 제안된 외골격 가변형 구형 로봇은 가

변형 축 길이의 변화를 통해 외골격 크기를 조절이 가능하다. 제안한 로봇의 메커니즘을 구현하기 위해 호버만 구를 차용하여 외골격을 설계하고, Slider-crank 구조 등의 기구학적 메커니즘을 적용하여 정밀한 위상 제어가 용이하도록 하였다. 로봇의 효과적인 구동을 위해 Lagrange 방정식을 통해 DC 모터의 토크 및 최대 속도를 결정하였다. 또한 설계된 메커니즘의 구조적 안정성을 평가하기 위해 유한요소해석을 통한 응력 분포를 확인하였다.

이를 바탕으로 확대·수축 메커니즘의 작동과 주행 속도에 대한 Field test 실험을 수행하였다. 확대·수축 메커니즘의 실험 결과 목표 변화량보다 작은 결과가 도출되었다. 이러한 원인으로서는 축 사이의 유격과 Pendulum 의 중량으로 인한 축의 변형으로 가변형 축의 운동이 원활하지 않기 때문이다. 이에 따라 정밀한 공차를 고려한 축 설계와 가공법을 통해 개선이 필요하다.

Field test 시험 결과 평지에서 로봇의 구동속도는 0.85 m/s 로서 이론속도 대비 실제 주행실험 간 속도 차이가 극명하였다. 이러한 원인은 로봇의 외골격과 지면사이의 마찰로 인해 대부분의 동력을 손실하였고, 이를 최소화 할 방법이 필요하다. 따라서 향후, 본 메커니즘의 효과적인 구동을 위해 외골격 부의 외피 조직(Shell) 을 접목하여 마찰력 감소 방안에 대해 연구가 필요하다.

결과적으로, 본 논문에서는 새로운 패러다임의 구형 로봇인 외골격 가변형 구형로봇의 설계와 구조적 안정성, 구동 가능성 요소를 확인하였으며, 향후, 험지 탐사용 목적의 로봇 개발에 적용할 수 있는 새로운 메커니즘에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 2017년도 한국항공대학교 교비지원 연구비와 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2016R1E1A2A02946402).

References

- [1] Y. S. Kim, H. Kim, G. P. Jung, S. H. Kim, K. J.

- Cho, & C. N. Chu, "A new wheel design for miniaturized terrain adaptive robot." *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 30, pp. 32-38, 2013.
- [2] J. Y. Lee, B. B. Kang, D. Y. Lee, S. M. Baek, W. B. Kim, W. Y. Choi, & K. J. Cho, "Development of a multi-functional soft robot (SNUMAX) and performance in RoboSoft Grand Challenge." *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, pp. 63, 2016.
- [3] D. Y. Lee, J. S. Kim, S. R. Kim, J. S. Koh, & K. J. Cho, "The deformable wheel robot using magic-ball origami structure." *ASME Paper No. DETC2013-13016*, 2013.
- [4] Y. Zhai, M. Li, J. Luo, Y. Zhou, & L. Liu, 1490. "Research of the motion balance of spherical mobile robot based on fuzzy control." *Journal of Vibroengineering*, vol. 17, 2015.
- [5] D. Pokhrel, N. R. Luitel, S. Das, & D. N. Ray, "Design and development of a spherical robot (SpheRobot)." In *Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013)*, IIT Roorkee, India pp. 735-741, 2013.
- [6] A. Halme, J. Suomela, T. Schonberg, & Y. Wang, "A spherical mobile micro-robot for scientific applications." *ASTRA*, pp. 96, 1996.
- [7] K. Othman, "Dynamics control of pendulums driven spherical robot." In *Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications*. vol. 315, pp. 192-195, 2013.
- [8] H. S. Kang, S. G. Joe, D. K. Lee, & B. K. Kim, "Spherical robot for space exploration." *The Society for Aerospace System Engineering 2017 Fall Conf. Satellite System*, pp. 452-453, 2017
- [9] J. Cai, Y. Xu, & J. Feng, "Kinematic analysis of Hoberman's Linkages with the screw theory." *Mechanism and Machine Theory*, vol. 63, pp. 28-34, 2013.
- [10] B. Slack, U.S. Patent No. 8,826,840. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [11] Charles E. Wilson & J. Peter Sadler., 2003, *Kinematics and Dynamics of Machinery*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 44~46, 125~127, 2014
- [12] T. M. Atanacković, S. Konjik, & S. Pilipović, "Variational problems with fractional derivatives: Euler-Lagrange equations." *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 41, 095201, 2008
- [13] K. Landa, & A. K. Pilat, "Design and start-up of spherical robot with internal pendulum." In *Robot Motion and Control (RoMoCo)*, 2015 10th International Workshop on pp. 27-32, July 2015, IEEE.
- [14] M. A. Plaisier, & J. B. Smeets, "Object size can influence perceived weight independent of visual estimates of the volume of material." *Scientific reports*, pp. 5, 2015
- [15] M. Sayuti, A. A. Sarhan, T. Tanaka, M. Hamdi, & Y. Saito, "Cutting force reduction and surface quality improvement in machining of aerospace duralumin AL-2017-T4 using carbon onion nanolubrication system." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-8, 2013.
- [16] L. Vikingsson, C. M. Antolinos-Turpin, J. A. Gómez-Tejedor, G. G. Ferrer, & J. G. Ribelles, "Prediction of the "in vivo" mechanical behavior of biointegrable acrylic macroporous scaffolds." *Materials Science and Engineering: C*, vol. 61, pp. 651-658, 2016.
- [17] L. E. Bertassoni, G. W. Marshall, E. M. de Souza, & R. N. Rached, "Effect of pre-and postpolymerization on flexural strength and elastic modulus of impregnated, fiber-reinforced denture base acrylic resins." *The Journal of prosthetic dentistry*, vol. 100, pp. 449-457, 2008.
- [18] S. Shirkavand & E. Moslehifard, "Effect of TiO₂ nanoparticles on tensile strength of dental acrylic resins." *Journal of dental research, dental clinics, dental prospects*, vol. 8, pp. 197, 2014