

전기식 하지 외골격 로봇의 구동기 에너지 효율 향상을 위한 클러치 메커니즘 설계

Design of Clutch Mechanism for Increased Actuator Energy Efficiency of Electrically Actuated Lower Extremity Exoskeleton

김호준¹, 김완수², 임동환¹, 한창수^{3,✉}
Ho Jun Kim¹, Wan Soo Kim², Dong Hwan Lim¹, and Chang Soo Han^{3,✉}

¹ 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)
² 한양대학교 공학기술연구소 (Research Institute of Engineering & Technology, Hanyang University)
³ 한양대학교 로봇공학과 (Department of Robot Engineering, Hanyang University)
✉ Corresponding author: cshan@hanyang.ac.kr, Tel: +82-31-400-5247

Manuscript received: 2015.8.6. / Revised: 2015.10.28. / Accepted: 2015.11.17.

This paper reports on the development of a roller-cam clutch mechanism. This mechanism can transfer bidirectional torque with high backdrivability, as well as increase actuation energy efficiency, in electrical exoskeleton robots. The developed mechanism was installed at the robot knee joint and unclutched during the swing phase which uses less metabolic energy, thereby functioning as a passive joint. The roller-cam clutch aimed to increase actuation energy efficiency while also producing high backdrivability by generating zero impedance for users during the swing phase. To develop the mechanism, mathematical modeling of the roller-cam clutch was conducted, with the design having more than three safety factors following optimization. Titanium (Ti-6AL-4V) material was used. Finally, modeling verification was done using ANSYS software.

KEYWORDS: Roller-Cam clutch mechanism (롤러-캠 클러치 메커니즘), Exoskeleton robot (외골격 로봇), Backdrivability (역구동성), Energy efficiency (에너지 효율), Design optimization (최적 설계)

기호설명

F_{in}, F_{on} = The normal forces generated via contact
 F_t, F_{ot} = The tangential forces generated via contact
 F_i, F_o = The resultant forces of normal and tangential forces
 α_c = Strut angle
 R_{oi} = The inner radius of outer race
 R_i = The radius of inner race
 R_r = The radius of roller

R_{oo} = The outer radius of the outer race
 N_r = The number of rollers
 μ = The coefficient of friction
 L_r = The length of the roller
 ν_i, ν_r = Poisson's ratios for the inner race and roller
 E_i, E_r = The moduli of elasticity for the inner race and roller
 $Thick_o$ = The thickness of the outer race
 σ_y = The compressive yield strength of the material

1. 서론

최근 군사, 산업, 재활 등 다양한 분야에서 외골격 로봇이 개발되고 있다.¹ 특히, 착용자의 근력을 증강시키는 외골격 로봇은 중량물의 하중을 지지할 수 있는 구동기를 가지고 있으므로 착용자에게 하중이 가해지지 않으며, 제어 알고리즘을 통해 착용자의 동작 의도를 파악하여 작동하고 있다. 이러한 외골격 로봇들은 크게 전기식과 유압식 유형의 구동 방식을 가지고 있다. 미국의 UC Berkeley에서는 유압식 구동기를 이용한 'BLEEX'를 개발하여 착용자의 근력을 증강시켰고,² 일본의 Tsukuba 대학에서 개발한 'HAL'은 전기식 구동기를 이용하여 최대 40kg의 하중을 지지할 수 있도록 개발되었다.³ 또한, 한국의 한양대학교에서는 전기식 구동기를 이용하여 최대 35kg의 하중을 지지할 수 있는 'HEXAR'를 개발하였다.⁴

하지만 위의 외골격 로봇들은 효율적인 에너지 구동 메커니즘에 대한 고려를 하고있지 않다. 외골격 로봇의 설계 기준이 되는 인체의 하지는 보행 시 중력의 자연에너지를 이용하거나 근육의 탄성 특성을 이용하여 근육 에너지 사용을 최소화하는 방향으로 움직임으로써 에너지의 효율을 높인다.⁹ 하지만 외골격 로봇은 인체의 복잡한 근육 메커니즘을 하나의 구동기로만 표현되며, 착용자의 모든 움직임과 동일하게 움직이기 위해 지속적으로 작동되기 때문에 불필요한 에너지 사용이 발생하게 되어 효율성이 떨어지게 된다.

이러한 비효율성 문제를 해결하고자 스프링, 댐퍼, 탄성 와이어 등 기계적인 요소들을 결합하여 인체의 근육 모델과 비슷하게 표현한 생체 근육 모방형 메커니즘 (Biomimetic Mechanism)을 적용하거나, 효율성을 높일 수 있는 보행 구간 내에서 구동기를 제어함으로써 에너지의 효율을 향상시키고 있다. 미국의 Michigan 대학에서는 인체가 달릴 때 하지에서 발생하는 용수철 현상을 이용하여 탄성체를 무릎에 부착하여 에너지를 저장하고 방출하는 메커니즘을 개발하였다.⁵ 또한, Arizona 대학에서는 탄성을 지닌 와이어를 이용한 텐던 (Tendon) 메커니즘을 발목에 적용하여 구동기 에너지 사용을 36J에서 21J로 줄여 구동 에너지 효율을 높였으며,⁶ 네덜란드의 Delft 대학에서는 인체의 Muscle-Tendon 시스템이 스프링 역할을 한다라는 점에 착안하여 스프링을 이용한 Series Elastic Actuation(SEA)와 Parallel Elastic Actuation(PEA) 방

식을 적용하여 구동 에너지 효율을 높였다.⁷ 한국의 생산기술연구원에서는 반 능동적 유압 시스템 (Semi-Active Hydraulic System)을 이용하여 인체 보행 구간 중 에너지 저장 및 소멸이 가능한 음의 일률 (Negative Power) 구간과 유각기 (Swing) 구간에서 제어적으로 구동을 멈추고 스프링 메커니즘을 이용하여 구동 에너지 효율을 높이는 유압식 외골격 로봇을 개발하였다.⁸

본 연구에서는 기존의 전기식 외골격 로봇의 에너지 효율을 높이기 위해 인체 보행 에너지가 적게 쓰이는 구간에서 제어적으로 동력 전달이 되지 않는 메커니즘을 고려하였다. 하지만 위의 유압식 외골격 로봇과는 다르게 전기식 외골격 로봇은 감속기를 사용하여 구동력을 전달하므로 특정 메커니즘 없이는 위와 같은 반 능동적 시스템을 구축할 수 없다. 이를 해결하기 위해 인체의 보행 에너지의 특성을 분석하여 특정 구간에서의 메커니즘 적용에 대한 유용성과 메커니즘을 적용할 관절을 선정하였고, 이를 수동 관절과 같이 동작하기 위해 감속기와 연결되어 있는 링크를 기계적으로 단절할 수 있는 클러치 메커니즘을 제안하여 반 능동적 전기 시스템 (Semi-Active Electric System)을 통해 구동 에너지 효율을 높이하고자 하였다.

2. 메커니즘 개발 및 선정 배경

2.1 인체 보행 데이터 분석

외골격 로봇의 구동부 및 자유도 배치 등의 설계 사양과 다양한 메커니즘 및 제어 전략들은 인체 보행에 대한 특성 분석을 통해 선정 및 개발된다.²⁻⁸ 인체 동작 데이터를 기준으로 다양한 설계 및 제어 개발이 가능한 이유는 외골격 로봇은 인체의 크기, 무게, 관절의 특성과 동일하며, 로봇의 동작은 인체의 동작과 일치하다라는 가정을 바탕으로 하였기 때문이다.¹¹

본 연구에서는 위의 가정들을 바탕으로 보행 시 인체의 신진대사 에너지 (Metabolic Energy)에 대한 특성을 분석하여 특정 구간에서의 메커니즘 적용을 통한 반 능동적 전기 시스템 구축의 유용성을 확보하고, 위의 특정 구간내에서 메커니즘을 적용하고자 인체 보행 데이터를 이용하여 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 관절을 선정하였다.

Fig. 1과 같이 보행 구간은 최초 접지 (Initial Contact) 부터 전 유각기 (Pre-Swing)까지인 입각기 (Stance Phase)와 다음 지면에 최초 접지 전까지인 유각기

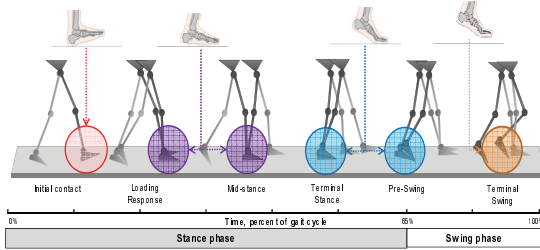


Fig. 1 The gait cycle of normal human walking

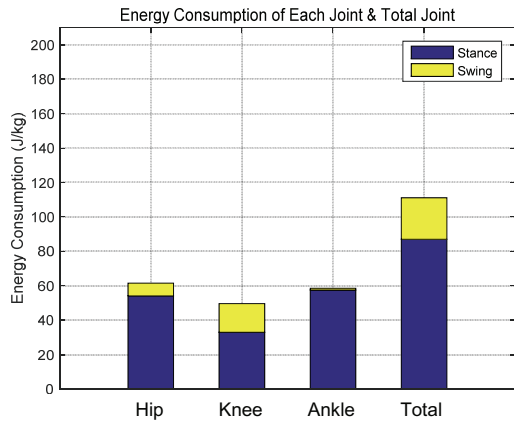


Fig. 2 Energy consumption of each joint (hip, knee, ankle) and total in stance and swing phase

(Swing Phase)로 나눌 수 있다.

위의 두 가지 구간에 대한 인체 보행 데이터를 분석 및 비교하기 위해 12명의 피실험자에 대하여 30kg의 중량물을 메고 4kph의 속도로 각각 3회씩 총 36번의 보행 실험을 실시하였다. 실험 장비는 VICON 사의 모션 캡처 장비를 사용하였고 AMTI Force Platform을 사용하여 지면 반발력을 측정하였다.

반 능동적 전기 시스템의 유용성을 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 두 구간에 대한 고 관절, 슬 관절, 족 관절의 신진대사 에너지 사용량과 전체 관절의 신진대사 에너지 사용량 그래프를 나타내어 분석하였다. 위의 그래프와 같이 평지 보행에서 유각기의 신진대사 에너지 사용량은 총 신진대사 에너지 사용량의 15.2% 정도로 입각기에서의 사용량보다 적다. 이는, 유각기에서 인체가 전진할 때에 중력의 영향으로 움직이기 때문이며 유각기에서의 관절은 수동 진자 (Passive Pendulum)의 형태로 가정한다.¹⁰ 그러므로 본 연구에서는 유각기 구간에서 감속기와 링크 사이를 단절하는 클러치 메커니즘을 적용하여 반 능동적 전기 시스템을 구축하고자 하였다.

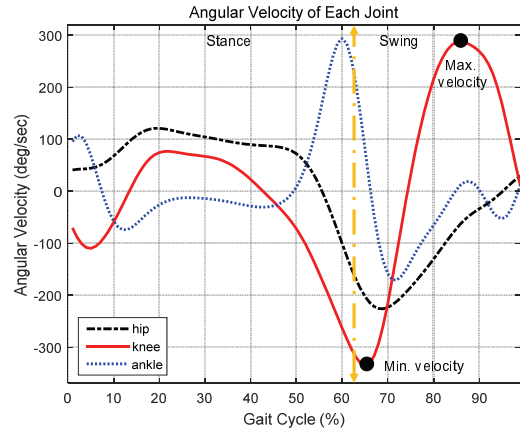


Fig. 3 The mean angular velocity of each joint in stance and swing phase

메커니즘을 적용할 관절을 선정하기 위해 유각기 구간 내에서 각 관절의 각속도를 비교하였다. 기존의 전기식 외골격 로봇은 감속기의 마찰 보상을 위해 추가적인 에너지를 사용하며, 각속도가 증가함에 따라 마찰 보상력도 증가한다.¹² 그러므로 상대적으로 큰 각속도 값을 갖는 관절에 메커니즘을 적용하여 에너지 효율을 높이고자 하였다. Fig. 3은 실험에서 얻어진 각 관절의 평균 각속도를 두 구간으로 나누어 나타낸 것이다. 위의 그림과 같이 유각기에서 슬 관절의 각속도가 상대적으로 다른 관절 대비 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 감속기의 마찰 보상을 위한 추가적인 구동 에너지는 슬 관절에서 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 수동 진자로 가정할 수 있는 유각기 구간에서 상대적으로 큰 마찰 보상 에너지를 필요로 하는 슬 관절에 수동 관절을 갖게 할 수 있는 클러치 메커니즘을 적용하였다.

2.2 클러치 메커니즘 선정

유각기에서 로봇의 슬 관절을 수동 관절의 형태로 전환하기 위해서는 모터와 감속기가 설치되어 있는 입력 링크부와 감속기와 연결되어 있는 출력 링크부 사이를 단절해야 한다. 또한, 입각기에서는 구동력 전달을 위한 양방향 전달이 가능해야 하며, 두 구간의 전환 시 빠른 연결/단절 전환이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 위의 목적을 만족할 수 있는 클러치 메커니즘 중 롤러-캠 (Roller-Cam) 클러치 메커니즘을 고려하였다. 본 메커니즘 원리는 안쪽과

바깥쪽 Race가 있고 Race 사이에 롤러가 있어 두 Race 사이의 공간이 롤러의 지름보다 작아지면 두 Race가 연결이 되고 반대로 커지면 단절이 된다.¹⁴ 그러므로 안쪽 Race의 캠 형상에 따라 양 방향 토크 전달이 가능하며, 어떠한 각도에서도 연결이 가능하기 때문에 다른 개념의 클러치 메커니즘^{13,17}보다 짧은 구동 전달시간을 가질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 위의 목적에 적합한 롤러-캠 클러치 메커니즘을 선정하였다.

3. 롤러-캠 클러치 메커니즘

3.1 메커니즘 작동 원리

위의 절에서 선정된 롤러-캠 클러치 메커니즘을 이용하여 양방향 전달과 빠른 연결 및 단절이 가능한 메커니즘을 개발하고자 하였다. 하지만 기존에 사용되는 롤러-캠 클러치 메커니즘은 한방향 전달만 가능하며 두 Race의 양방향 단절상태를 가질 수 없으므로¹⁴ 본 연구에서는 앞서 설명한 목적에 맞는 새로운 메커니즘을 개발하였다.

Fig. 4는 위의 클러치 개념을 이용한 개념 설계도이다. 왼쪽 그림은 연결과 단절 상태의 개념도이다. 유각기 구간에서는 안쪽 Race가 바깥쪽 Race와 단절될 수 있도록 두 Race의 사이 공간을 롤러의 지름보다 크게 만들어(점선) 수동 관절이 되도록 하였다. 반대로, 입각기 구간에서는 두 Race가 연결될 수 있도록 두 Race의 사이 공간을 롤러의 지름보다 작게 만들어(실선) 서로 맞물리게 함으로써 구동력 전달이 가능하도록 하였다. 또한, 양방향 구동력 전달을 위해 그림과 같이 롤러를 기준으로 양쪽 Race 공간이 좁아지는 캠 형상을 갖도록 하였다. Fig. 4의 오른쪽 그림은 왼쪽 그림의 단면도이다. 서보모터를 이용하여 안쪽 Race의 Trigger 캠을 움직임으로써 두 Race가 연결 또는 단절 상태를 갖도록 하였다. 유각기 구간에서는 안쪽 Race의 캠과 롤러 사이에 공간이 생겨 Fig. 4(a)와 같은 형태가 됨으로써 수동 관절을 갖도록 하였고, 입각기 구간에서는 안쪽 Race의 캠과 롤러가 만나 Fig. 4(b)와 같은 형태가 되어 양방향 동력 전달이 가능하도록 하였다. 또한, 연결 상태 시 단면도 B-B와 같이 바깥쪽 Race와 롤러, 안쪽 Race가 일직선상에 놓이게 하여 동력 전달에 의한 힘이 가해져도 현 상태에서 벗어나지 않는 Singularity 위치를 만듦으로써 연결 상태를 유지하기 위한 추가적인 에너지가 발생하지 않도록 하였

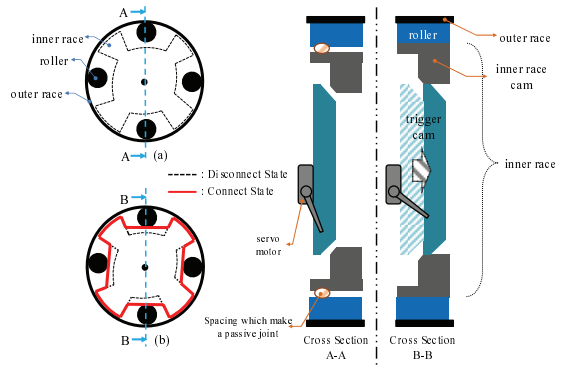


Fig. 4 Conceptual design of a novel roller-cam clutch mechanism: (a) Disconnect state, (b) Connect state

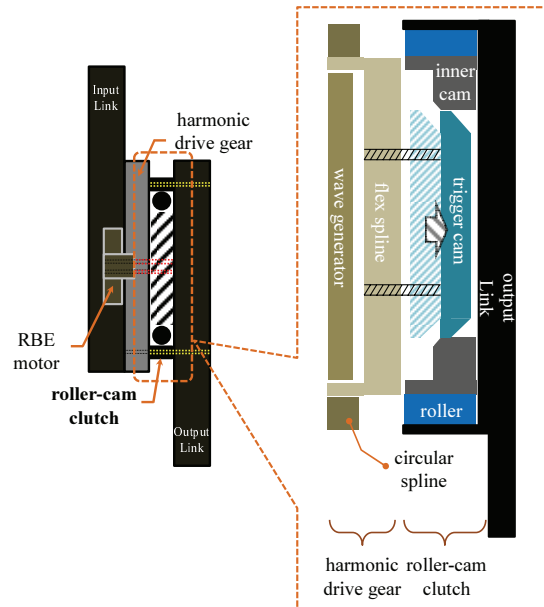


Fig. 5 Conceptual cross-sectional view of actuator system with a novel roller-cam clutch mechanism

다. 즉, 연결과 단절의 모드 변경 (Mode Change) 시에만 서보모터의 에너지가 사용되도록 개발하였다.

Fig. 5는 본 연구의 메커니즘이 외골격 로봇의 구동부에 설치되었을 때의 개념 설계 단면도이다. 입력 링크부에 설계되어 있는 기어 (Harmonic Drive Gear)의 출력 부분 (Flex Spline)이 본 메커니즘의 안쪽 Race와 연결되고, 바깥쪽 Race는 출력 링크부와 연결된다.

3.2 롤러-캠 클러치 수학적 모델링

위의 작동 원리를 가지는 롤러-캠 클러치 메커니즘을 설계하기 위해 구동력 전달 상태의 수학적 모델링을 실시하였다.

롤러-캠 클러치 메커니즘은 안쪽 Race의 캠과 바깥쪽 Race의 안쪽 면이 롤러와 접촉하여 연결되며 롤러와 Race 사이에 선 접촉이 일어나 응력이 발생하게 된다. 본 절에서는 연결 상태에서의 구동력 전달과 접촉에 의해 발생하는 응력에 대해 모델링 하였다.¹⁴

Fig. 6은 두 Race가 롤러에 접촉하여 구동력을 전달할 때의 자유물체도 (Free Body Diagram) 표현한 것이다. 모델링의 단순화를 위해 한 방향 연결이 가능한 One-Way 클러치에 대하여 모델링 하였다.

먼저, 구동력 전달 (τ_c) 관계식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_c = F_i \cdot \sin \alpha_c \cdot R_{oi} \cdot N_r \quad (1)$$

여기서, Strut Angle (α_c)는 식(2)와 같이 두 Race가 연결되기 위한 중요한 조건을 가지게 된다.

$$\mu > \tan \alpha_c \quad (2)$$

위의 식과 같이 적용 재질의 마찰계수(μ)가 조건보다 작게 되면 롤러와 두 Race 사이에서 미끄럼이 발생하여 연결되지 않게 된다.

두 Race가 롤러에 의해 연결되면 안쪽 Race와 롤러, 바깥쪽 Race의 안쪽과 롤러 사이에 선 접촉에 의한 응력이 발생하게 된다.

먼저, 안쪽 Race의 캠과 롤러 사이에 발생하는 응력은 Spalling과 Brinelling을 야기시킬 수 있다. 이 응력을 접촉응력 (Contact Stress) 또는 압축응력 (Compressive Stress, σ_c)이라 하며 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{F_i \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_r}\right)}{L_r \cdot 4 \cdot \left(\frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_r^2)}{E_r}\right)}} \quad (3)$$

또한, 바깥쪽 Race의 안쪽과 롤러 사이에 발생하는 응력은 피로파손 (Fatigue Failure)을 야기시킬 수 있다. 이러한 Circumferential 응력을 인장 후프 응력 (Tensile Hoop Stress, σ_h)라 하며 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

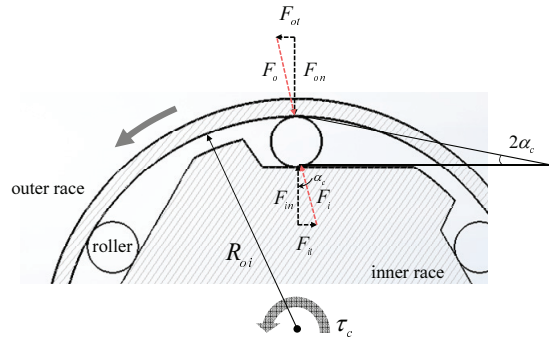


Fig. 6 A free-body diagram (FBD) of the roller-cam clutch mechanism

$$\sigma_h = \left(\frac{\sigma_c}{c_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_r \cdot R_i \cdot N_r \cdot \cos \alpha_c}{(R_r + R_i) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{oi}}\right) \cdot \left(\frac{R_{oi}^2 + R_{ri}^2}{R_{oi}^2 - R_{ri}^2}\right) \quad (4)$$

$$\text{where } c_1 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\frac{4(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{4(1-\nu_r^2)}{E_r}}}$$

본 연구의 롤러-캠 클러치 메커니즘이 목표 토크 값을 문제없이 전달하기 위해서는 위의 두 가지 응력 (σ_c, σ_h)에 대한 파손이 발생 하지 않도록 설계되어야 한다. 즉, 설계된 롤러-캠 클러치에서 재질의 항복강도 (Yield Strength)와 인장강도 (Tensile Strength)가 롤러와 두 Race 사이에서 발생하는 σ_c 과 σ_h 보다 커야 한다. 또한, 구동력 전달 시 롤러와 Race 사이의 미끄럼이 발생하지 않도록 설계 되어야 한다.

4. 롤러-캠 클러치 최적설계 및 검증

4.1 롤러-캠 클러치 최적설계

위의 목적을 갖는 설계를 하고자 롤러-캠 클러치 메커니즘을 최적화 하기위해 먼저 민감도 분석을 통한 설계 변수 선정을 실시하였다.

Fig. 7과 같이 롤러-캠 클러치 메커니즘 크기에 대한 고려가 가능하고 응력 식(3)과 식(4)에 포함되어 있는 설계 변수 ($Thick_o, L_r, R_{oo}, R_r, N_r, \alpha_c$)를 설정하였다. 선정한 변수들 중 Race와 롤러와의 접촉 응력 및 인장 응력에 민감한 변수를 찾고 불필요한 설계 변수를 없애고자 파라메트릭 스터디 (Parametric Study)를 이용하여 민감도 분석을 실시 하였다.

Fig. 8은 설계자가 선정한 설계 변수들의 경계

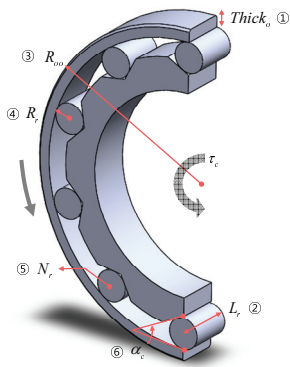


Fig. 7 Design variables which is related for mechanism size and stress equations

Table 1 Set the constant values of math model

ν_i, ν_r	E_i, E_r [N/mm^2]	μ	R_{o0} [mm]
0.342	113800	0.33	68

의 설계 변수에 민감하며, Fig. 8(b)와 같이 롤러와 바깥쪽 race에 의한 인장 후프 응력은 $\alpha_c, L_r, Thick_o$ 의 설계 변수에 민감하다.

따라서, 파라메트릭 스터디를 통하여 다섯개의 설계 변수 ($\alpha_c, N_r, L_r, Thick_o, R_r$)가 두 응력에 영향을 주는 것을 확인하였고 최적 설계를 위한 최종 설계 변수로 선정하였다.

선정된 설계 변수를 바탕으로 다음과 같이 최적 설계 문제를 정식화 하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && \alpha_c, N_r, L_r, Thick_o, R_r \\
 & \text{To minimize} && \sigma_h \\
 & \text{Subject to} && \frac{\sigma_y}{\sigma_c} \geq 3, 2 \leq \alpha_c \leq 15, \\
 & && 10 \leq N_r \leq 16, 2 \leq R_r \leq 6, \\
 & && 10 \leq L_r \leq 16, 5 \leq Thick_o \leq 10, \\
 & && strut = \mu - \tan \alpha_c > 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

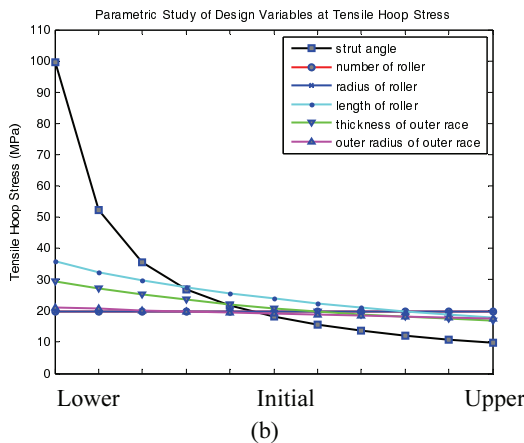
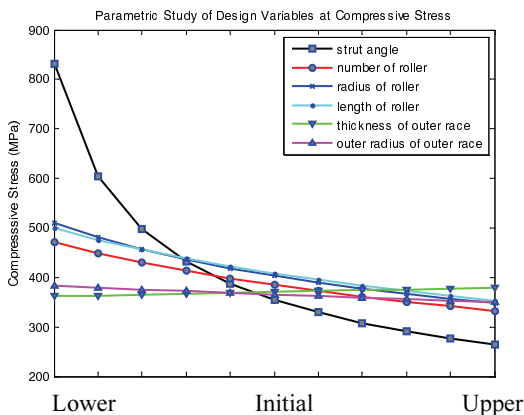


Fig. 8 Parametric study of design variables

값 내에서 여섯개의 설계 변수에 대한 두 응력의 변화 값을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)와 같이 롤러와 안쪽 Race의 캠에 의한 압축 응력은 α_c, R_r, L_r, N_r

위와 같이 인장 후프 응력 (σ_h)을 최소화 하고자 하였으며, 적용 재료의 항복 강도를 넘지 않는 수준의 압축 응력을 갖게 하기 위해 합리적인 안전계수 값 이상을 갖도록 설계하고자 하였다. 본 연구에서는 수학적 모델링의 간소화와 정확하지 않은 재료의 특성을 고려하여 3 이상의 안전계수를 갖도록 하였다.¹⁵ 또한, 본 연구에 적용할 모터와 감속기의 크기를 고려하여 설계하고자 롤러의 반지름(R_r), 바깥쪽 race의 두께 ($Thick_o$)를 위와 같은 범위로 설정하였으며, 롤러와 race와의 미끄럼이 발생하지 않도록 ($strut > 0$) 설계하고자 하였다.

최적화 설계를 진행하기 위해 알루미늄보다 압축, 인장 강도가 높으며 스텔보다 가벼운 티타늄 Ti-6AL-4V (Grade 5) 재질을 적용하였으며, Table 1과 같이 상수 값을 선정하였다. 또한, 목표 구동력 값은 입각기 구간에서 가반 하중을 포함한 외괄격 로봇의 무게인 88kg을 지지하기 위한 최대 토크 값인 80Nm을 전달할 수 있도록 설정하였으며, 티타늄의 압축 항복 응력 값은 $970 N/mm^2$ 로 설정하였다.

롤러-캠 클러치 메커니즘의 설계 변수 최적화를 위해 최적 설계 툴인 ‘P.I.A.n.O.’ 이용하였으며, 최적화의 수렴성과 컴퓨팅 계산시간의 효율성이 좋은 장점을 가진 점진적 이차 반응표현방법

Table 2 Comparison of design variables between initial value and optimized value

Design variables	Initial value	Optimized value	Unit
α_c	15	15	°
N_r	13	16	-
L_r	14	16	mm
$Thick_o$	6	8.3	mm
R_r	4	6	mm
Safety factor		3	
Strut		0.19	
Tensile hoop stress (σ_t)		14.48 MPa	
Compressive stress (σ_c)		323.38 MPa	

(Progressive Quadratic Response Surface Method, PQRS)을 최적화 기법으로 선정하였다.¹⁶ 최적 설계 결과, 총 3번의 Iteration 과정을 거쳤으며 45번의 해석 (Function Call)을 진행하였다.

Table 2는 롤러-캠 클러치 메커니즘의 최적화된 설계 변수들과 그에 대한 안전 계수를 나타낸 것이다. 설정한 안전계수와 롤러와 Race의 미끄럼이 발생하지 않는 설계 변수 값을 얻어낸 것을 확인할 수 있다.

4.2 롤러-캠 클러치 시뮬레이션 및 결과

위의 최적화 된 설계 값을 토대로 모델링 검증과 작동 검증하기 위해 ‘ANSYS’ 툴 안의 Static Structural을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 바깥쪽 Race를 ‘Fixed Support’ 조건으로 설정하였으며, 안쪽 Race의 회전 중심에 목표 구동력인 80Nm를 일정하게 작용하도록 설정하였다. 각 롤러와 안쪽, 바깥쪽 Race의 연결조건 (Connection Condition)은 Rough로 설정하였으며, 접촉면 부분의 Mesh는 Inflation 방법으로 적용하였다. 또한, Mesh 간격은 2mm로 설정하였다.

Fig. 9와 같이 해석을 통하여 326.39 MPa의 압축응력 값을 얻어내었으며 수학적 모델에서 얻어진 압축응력 값과 비교하였을 때 약 1%의 오차를 보여 수학적 모델에 대한 정확성을 확인하였다.

Fig. 10은 시뮬레이션을 통하여 입력 구동력 대비 출력 구동력의 변화를 확인하기 위해 안쪽 Race에 80Nm의 힘을 가하고 바깥쪽 Race를 고정하여 그에 대한 반력을 나타내었다. 그 결과 입력 값 대비 출력 값이 동일하게 나오는 것을 확인할

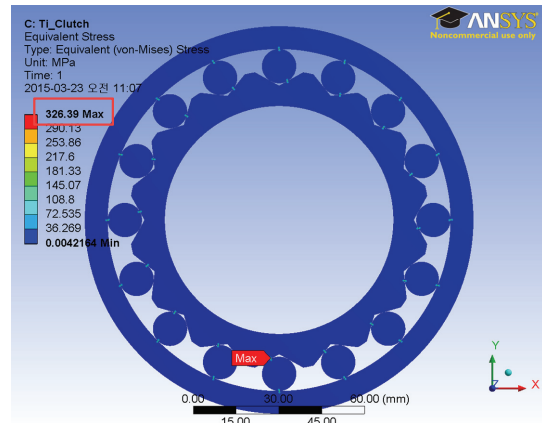


Fig. 9 Resultant of the contact stress values via ANSYS simulation

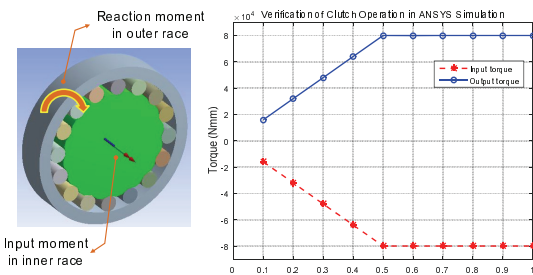


Fig. 10 Verification of roller-cam clutch operation via ANSYS simulation

수 있으며 이를 통해 두 Race가 연결됐을 때 구동력 전달이 정확하게 되고 있음을 확인하였다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 인체 보행 분석을 통한 인체의 신진대사 에너지 사용이 적으면서 감속기의 마찰 보상 에너지를 상대적으로 크게 필요로 하는 유각기 구간내의 슬 관절을 선정하여 클러치 메커니즘을 적용하였다.

본 연구의 메커니즘은 빠른 연결/단절이 가능하고 양방향 토크 전달이 가능한 롤러-캠 형식의 클러치 메커니즘이며, 이를 이용하여 수학적 모델링을 진행하였다. 롤러-캠 클러치의 작동 시 문제가 야기될 수 있는 압축/인장후프 응력을 모델링하고 최적설계의 설계 목표로 선정하였다. 설계 크기와 두 응력에 영향을 미치는 6가지의 설계 변수를 선정하고, 파라메트릭 스터디를 통하여 목적

함수에 민감하게 반응하는 5가지 변수를 최종 최적 설계 변수로 선정하였다. 최적화 기법으로는 점진적 이차 반응 표현 방법을 적용하였고, 설계 안전계수 3을 만족하는 최적화 된 설계 변수 값을 이용하여 수학적 모델링 검증과 작동 검증을 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 시뮬레이션 결과 값과의 오차가 약 1%로 나와 수학적 모델에 대한 검증을 진행하였고, 입력 구동력에 대한 출력 값이 동일하게 나오므로써 구동력 전달이 정확히 되고 있음을 확인하였다.

추후 최적화 된 설계 변수 값을 이용하여 상세 설계와 1 자유도 테스트 베드를 제작하고, 실험을 통하여 외골격 로봇의 에너지 효율에 대한 검증 실험을 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부/방위사업청/민군기술협력진흥센터의 민군 겸용 기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며[13-DU-MC-16, 협지 적응형 하지근력 고반응 제어기술 개발], 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R1A2A2A01002887).

REFERENCES

1. Lee, H. D. and Han, C.-S., "Technical Trend of the Lower Limb Exoskeleton System for the Performance Enhancement," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 364-371, 2014.
2. Chu, A., Kazerooni, H., and Zoss, A., "On the Biomimetic Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (Bleex)," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4345-4352, 2005.
3. Sankai, Y., "Leading Edge of Cybernetics: Robot Suit Hal," *Proc. of the IEEE International Joint Conference on SICE-ICASE*, pp. P-1-P-2, 2006.
4. Kim, W., Lee, H., Kim, D., Han, J., and Han, C., "Mechanical Design of the Hanyang Exoskeleton Assistive Robot (HEXAR)," *Proc. of the IEEE International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 479-484, 2014.
5. Cherry, M. S., Kota, S., and Ferris, D. P., "An Elastic Exoskeleton for Assisting Human Running," *Proc. of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 727-738, 2009.
6. Hollander, K. W., Ilg, R., Sugar, T. G., and Herring, D., "An Efficient Robotic Tendon for Gait Assistance," *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 788-791, 2006.
7. Wang, S., Van Dijk, W., and Kooij, H., "Spring Uses in Exoskeleton Actuation Design," *Proc. of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 1-6, 2011.
8. Kim, H.-G., Lee, J.-W., Jang, J., Park, S., and Han, C., "Design of an Exoskeleton with Minimized Energy Consumption Based on Using Elastic and Dissipative Elements," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 463-474, 2015.
9. Umberger, B. R., "Stance and Swing Phase Costs in Human Walking," *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 7, No. 50, pp. 1329-1340, 2010.
10. Whittlesey, S. N., Emmerik, R. E., and Hamill, J., "The Swing Phase of Human Walking is Not a Passive Movement," *Motor Control-Champaign*, Vol. 4, No. 3, pp. 273-292, 2000.
11. Crowell, H. P., "Exoskeleton Power and Torque Requirements Based on Human Biomechanics," *Army Research Laboratory*, 2002.
12. Nef, T. and Lum, P., "Improving Backdrivability in Geared Rehabilitation Robots," *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 47, No. 4, pp. 441-447, 2009.
13. Irby, S. E., Kaufman, K. R., Wirta, R. W., and Sutherland, D. H., "Optimization and Application of a Wrap-Spring Clutch to a Dynamic Knee-Ankle-Foot Orthosis," *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol. 7, No. 2, pp. 130-134, 1999.
14. Chesney, D. R. and Kremer, J. M., "Generalized Equations for Roller One-Way Clutch Analysis and Design," *SAE Technical Paper*, 1997.
15. Robert, L. N., "Machine Design an Integrated Approach," *Pearson Prentice Hall Publishers*, pp. 19-20, 2006.
16. Na, J.-M., Park, C. H., Lee, S. M., and Choi, D.-H., "Sensitivity Analysis and Optimal Design of Rubber Mount," *Proc. of the Korean Society of Automotive Engineers Conference*, pp. 1494-1500, 2008.

17. Geeroms, J., Flynn, L., Jimenez-Fabian, R., Vanderborght, B., Vitiello, N., et al., "Design, Development and Testing of a Lightweight and Compact Locking Mechanism for a Passive Knee Prosthesis," Proc. of the IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 1016-1021, 2014.