

Cam 형상을 이용한 VSA (Variable Stiffness Actuator) 메커니즘 설계

Design of the VSA (Variable Stiffness Actuator) Mechanism Using Cam Shape

장시영¹, 송윤혜¹, 백윤수^{1,#}
Si young Jang¹, Yun hye Song¹, and Yoon Su Baek^{1,#}

¹ 연세대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)
Corresponding Author / E-mail: ysbaek@yonsei.ac.kr, TEL: +82-2-2123-2827
ORCID: 0000-0002-0772-3530

KEYWORDS: Human-Robot interaction (사람-로봇 상호작용), Variable stiffness actuator (가변 강성 구동기)

As the exoskeleton robot for the assistance of walking is on the rise, HRI (Human-Robot Interaction) come to be an important issue. So in this research the angle following Variable Stiffness Actuator by using cam for overcoming the limitation of volume and weight in existing mechanisms. For this mechanism determinant of stiffness is not an absolute value but it can be change from zero to rigid by the location of the pivot in the gage between the application point of the input force and output force. So it can be miniaturized and have the volumetric advantage by kinematic design. This variable stiffness system make the HRI effective and the safety from injury resulted from the malfunction and the wrong control can be guaranteed.

Manuscript received: April 23, 2018 / Revised: December 5, 2018 / Accepted: December 19, 2018

NOMENCLATURE

F_s = Generated by spring's force
 δx = Spring deflection distance
 θ = Intermediate link angular deflection
 q = Output link angular deflection
 p = Spring pretension distance
 β = Lever angular deflection
 $\varphi = q - \theta$

1. 서론

보건복지부의 장애인 현황 조사에 따르면 전체 장애인 수의 약 62%가 지체, 뇌병변 장애로 신체적 보조 수단이 필요한 환자들이 매우 높은 비중을 차지하고 있다.¹ 보행의 보조 수단을

필요로 하는 인구의 증가에 따라 전동휠체어 등의 이동 보조 수단들의 수요가 증가되어 왔지만, 최근에는 다시 걷고자 하는 환자들의 바람에 따라 외골격 로봇(Exoskeleton Robot)이 대두되며 많은 연구가 이루어지고 있다.

외골격 로봇이 이전까지의 보행 보조 수단과 차별되는 점은 환자의 근력을 보조해 줌으로써 장애를 극복해 일반인처럼 일상 생활을 영위할 수 있다는 점에 있다. 또한 로봇을 이용해 '정상 보행을 따라 걷는 것만으로 마비 환자 및 뇌졸중 환자의 장애 치료에 큰 훈련 효과 발생²을 입증하는 훈련 후기가 많이 보고됨에 따라 국내 선진 의료기관에서 로봇을 이용한 재활훈련이 이루어지고 있다. 외골격 로봇은 로봇이 동작하는 동안 착용자와 지속적으로 물리적 접촉이 발생하기 때문에 HRI (Human-Robot Interaction) 관련 선행연구가 필수적으로 이루어져야 한다.

사람과 로봇간의 상호 작용에 있어 부상을 방지하기 위해 적절한 강성을 유지하면서 힘을 전달해야 한다. 낮은 강성으로 느린 힘을 전달하거나 높은 강성으로 필요 이상의 힘을 전달할 경우 동작에 무리가 올 수 있기 때문에 상황에 따라 다른 강성을

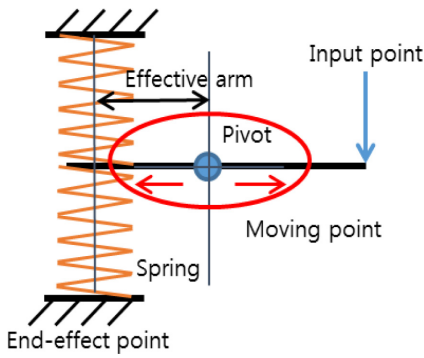


Fig. 1 Method of VSA

구현해주어야 한다.³ 이에 대한 대안으로 외골격 로봇에 VSA (Variable Stiffness Actuator)를 적용하기 위한 방법들이 많이 연구되고 있다. 선행연구된 VSA 구현 방법들은 의미 있는 가변 강성 크기와 반응속도를 구현 했지만, 가변 강성을 위한 모터가 추가되어 부피와 무게가 증가함으로 외골격 로봇에 적용하기 어려운 한계점이 있다.

본 연구에서는 외골격 로봇을 착용한 환자가 보행할 때 필요한 물리적 강성을 캠 형상으로 구현함으로써 기존의 VSA 대비 소형화/경량화를 이루고 외골격 로봇의 HRI 개선을 목표로 한다.

2. 메커니즘 분석

2.1 VSA의 원리

본 연구에서 가변 강성을 구현하기 위한 방법으로 SEA (Series Elastic Actuator)의 원리를 이용한 VSA 메커니즘에 가변 강성을 구현해주는 액추에이터 대신 캠 형상을 접목시켰다.

SEA 개념은 지렛대의 원리를 이용한 것으로 Fig. 1의 가운데에 레버가 놓여있고, 레버의 한쪽 끝점(End-Effect Point) 양 옆으로 Pretension이 걸린 스프링이 장착되어 있다. 스프링과 힘을 가해주는 위치는 고정되어 있고, 피벗의 위치를 변화시켜 힘이 전달되는 입력 점(Input Point)에서 피벗까지의 거리와 피벗에서 끝점까지의 거리의 비율 즉, Effective Arm의 길이 조절을 통해 가변 강성을 구현할 수 있다.⁴

비틀림 스프링(Torsion Spring)에서 발생하는 탄성력을 Fig. 2와 같이 가상의 선형 스프링(Linear Spring)으로 변환하여 비틀림 스프링 상수를 가상의 선형 스프링에 관한 식(1)로 변형할 수 있다.⁴

$$K_t = \frac{T_t}{\delta\gamma} = \frac{F_t r_t^2}{X r_t^2} = K_s r_t^2 \tag{1}$$

Fig. 3은 선형 스프링이 장착된 VSA 메커니즘으로 식(1)을 이용해 가변 강성에 대한 식을 유도했다.

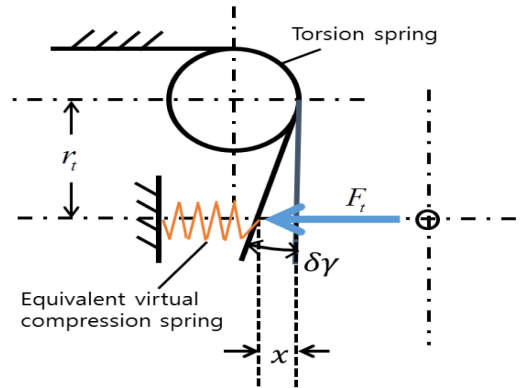


Fig. 2 Elastic force of virtual linear spring

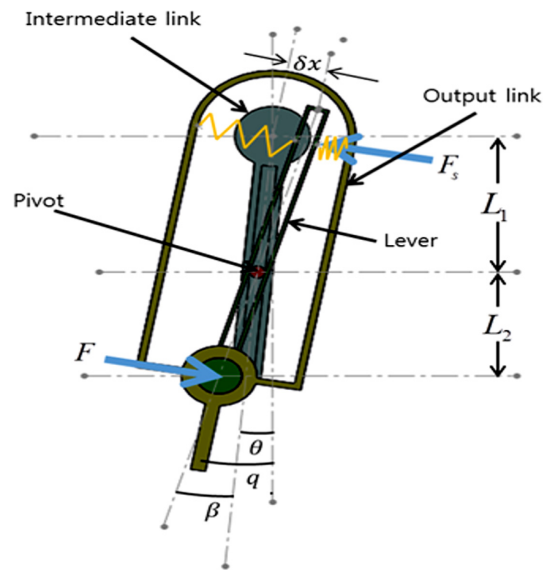


Fig. 3 Design concept of VSA

입력 링크(Intermediate Link)의 동력을 출력 링크(Output Link)에 전달하기 위해서는 양쪽 2개의 선형 스프링에서 같은 탄성력으로 회전력 전달이 이루어진다. 이에 발생하는 힘을 구하면 식(2)와 같다.

$$F_s = K_s(p + \delta X) - K_s(p - \delta X) = 2K_s L_1 \sin\beta \tag{2}$$

출력 링크에서 힘 F에 의해 발생하는 토크 T는 식(3)과 같이 회전 중심부터 L1+L2의 거리에서 발생하게 된다.

$$T = F(L_1 + L_2) = F_s \alpha (L_1 + L_2) \tag{3}$$

토크 T를 변형하기 위한 phi와 beta 사이의 관계식은 식(4)와 같다.

$$\sin\phi = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \sin\beta \tag{4}$$

식(2)-식(4)로부터 강성 K에 관한 식을 계산할 수 있다.

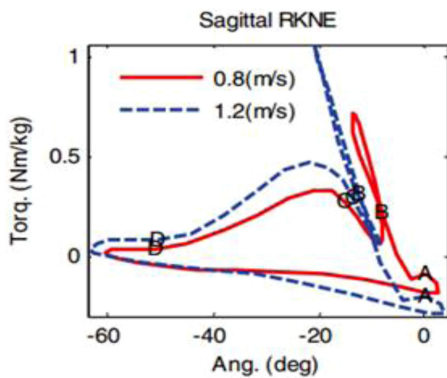


Fig. 4 Sagittal right knee angle/torque plot

$$K = \frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{2}{r_i^2} K_t \alpha^2 (L_1 + L_2)^2 \cos \varphi \quad (5)$$

스프링은 항상 평형을 유지하려고 하기 때문에 φ 는 항상 0에 근사치를 유지하게 되고, 본 연구에 사용할 선형 스프링에 관한 식으로 변환하기 위해 식(1)을 식(5)에 대입하면 식(6)과 같다.

$$K_{(\varphi=0)} = 2K_s \alpha^2 (L_1 + L_2)^2 \quad (6)$$

식(6)을 통해 강성을 결정하는 변수가 α 인 것을 확인 할 수 있다. 즉, 강성이 길이의 비율에 따라 변하기 때문에 소형화/경량화가 충분히 가능하다.

따라서 본 연구에서는 선형 스프링과 캠 형상을 이용해 피벗의 위치를 제어함으로써 변수를 제한하고 L_1 과 L_2 의 비를 통해서 보행 중 가변 강성을 구현하였다.

2.2 보행 데이터 분석

보행 시 필요한 가변 강성의 범위를 선정하기 위해 정상인의 보행 데이터를 분석했다.

Fig. 4는 보행에 이상이 없는 일반인이 느린 보행 속도와 보통 보행 속도로 걸을 때 각도에 따르는 토크 값을 페이즈(Phase)에 따라 A (Heel Strike), B (Foot Flat), C (Heel Off), D (Toe Off) 4단계로 구분하여 나타냈다.⁵

강성은 식(7)과 같이 정의된다.

$$\frac{\Delta torque}{\Delta angle} \quad (7)$$

식(7)에 따라 Fig. 4의 기울기가 강성임을 알 수 있다. 보행 보조를 받기 위한 사람들의 경우 걸음 속도가 느릴 것이라는 가정하에 0.8 m/s 보행 속도의 데이터를 분석했다.

A에서 B를 거쳐 C까지 높은 강성을 필요하고 D부터 다시 A로 돌아오는 구간에서는 낮은 강성이 유지된다. Fig. 4를 통해 사람의 보행에서 무릎은 -4°~18° 범위에서 높은 강성을 필요로 하는 것을 확인할 수 있다. 높은 강성의 설계 지표로 Fig. 5와 같이 보행에 문제가 없는 일반인이 한발로 뛰었다 착지했을 때

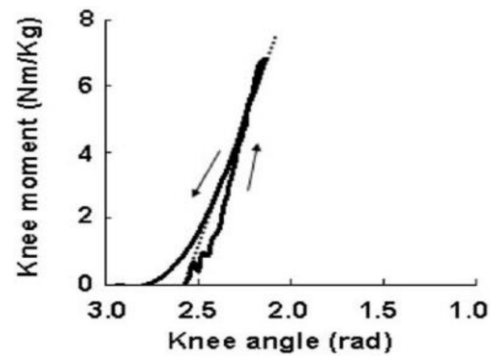


Fig. 5 Knee stiffness on jumping data plot⁶

의 강성 분석 데이터를 참고해 최대 강성이 1516 Nm/rad임을 확인 했다.

3. 메커니즘 모델링

3.1 캠 설계를 위한 강성 데이터 해석

가변 강성이 필요한 구간은 -4°~18°임을 확인했다. 최대 강성을 필요로 하는 약 -11°에서 1516 Nm/rad이 구현되면서 가변 강성 구간에서 보행 강성 데이터 경향을 추종할 수 있도록 Curve Fitting을 통해 식(8)과 같이 4차 함수로 표현했다.

$$stiffness = f(angle) = 34 + 395.9332 \times (angle) + 138.9766 \times (angle)^2 + 10.99814 \times (angle)^3 + 0.24996 \times (angle)^4 \quad (8)$$

소형화를 위해 VSA 메커니즘의 크기 결정요소인 L_1+L_2 의 값은 30 mm, 강성 결정요소인 선형 스프링 상수는 2 N/mm로 설계조건을 정하고, 2장에서 증명한 강성 식(6)과 식(8)을 이용해 Effective Arm Length에 관한 식으로 변형하면 식(9)와 같다.

$$effective\ arm\ length\ (L_2) = \frac{30}{\left(\sqrt{\frac{f(angle)}{3600}} + 1\right)} \quad (9)$$

식(8)과 식(9)를 통해 -4°~18° 사이의 Effective Arm을 구할 수 있다. 낮은 강성이 요구되는 구간에서는 34 Nm/rad으로 설계했으며, 운동성이 떨어지지 않도록 Fig. 6과 같이 경사 60° 미만의 완만한 자유 곡선으로 나타냈다. 이때 L_1 의 길이는 캠의 변위가 됨으로 Pitch Curve를 유추할 수 있다.

3.2 VSA 메커니즘 요소들의 설계

캠 형상을 이용하여 가변 강성을 구현하기 위해서는 입력 링크, 피벗, 캠, 레버, 출력 링크 총 5개의 요소가 필요하다.

캠은 본 연구에서의 핵심 부품으로써, 추가적인 모터 없이 기구적 특성만으로 가변 강성을 이뤄내기 위한 부품이다. 회전 각도에 따라 피벗의 위치를 결정하고 가변 강성을 일으키는 역

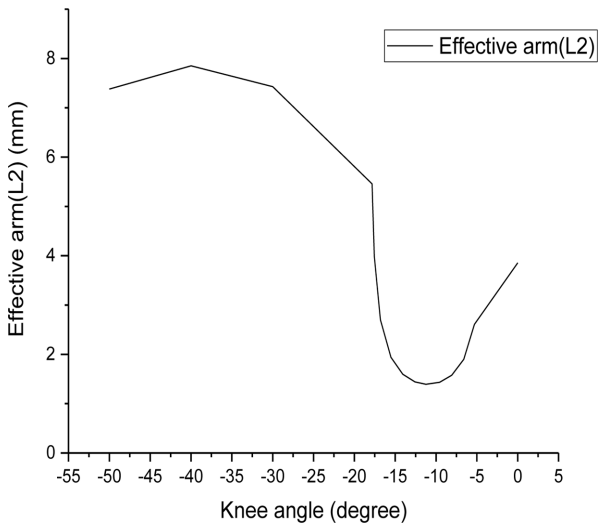


Fig. 6 Knee angle/effective arm data plot at gait cycle

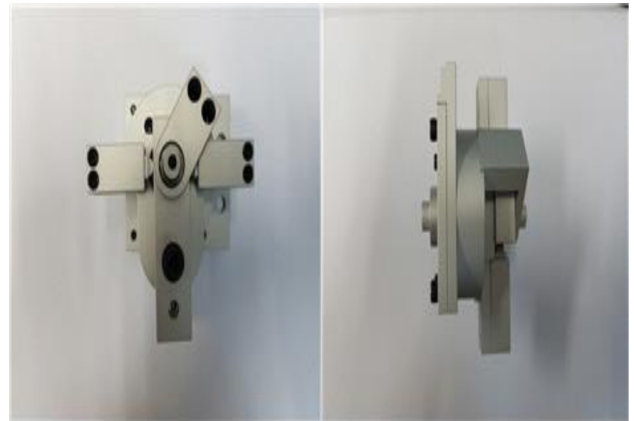


Fig. 8 manufactured VSA mechanism

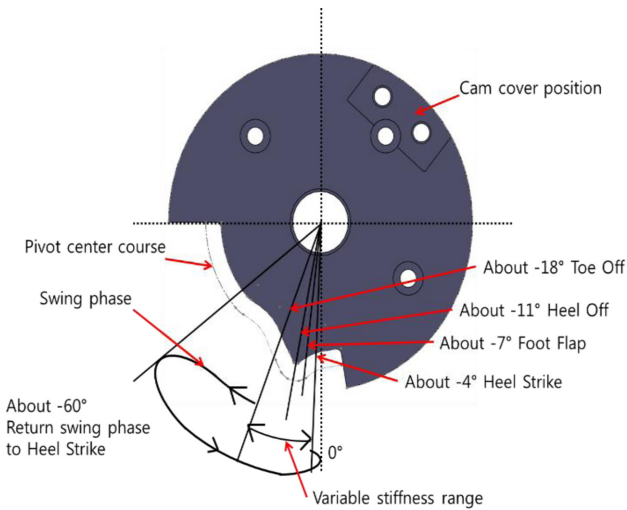


Fig. 7 VSA Cam design

할을 한다.

Fig. 7은 앞서 검증한 3.1을 기반으로 설계한 캠 형상이다. 캠의 중동절 역할을 하는 피벗의 반지름만큼 Pitch Curve를 오프셋하여 캠의 표면을 결정했다. 보행 각도인 0°~60° 범위를 확보하기 위해 피벗의 지름을 고려해 -3°~90°까지 운동구간을 넉넉하게 확보했다. 또한 VSA를 조립했을 때 축 방향 부품탈락을 막아주기 위한 캠 덮개(Cam Cover)가 조립 될 수 있도록 자리 파기 설계를 했다.

Fig. 8는 VSA를 가공 조립한 모습이다. 재질은 알루미늄 6061을 사용해 가공 했으며, 동력 전달 시 경도가 약해 알루미늄이 뭉개지는 현상이 발생할 것이 우려되는 부분에 경질의 후처리를 진행했다.

3.3 측정 시스템 설계

VSA의 가변 강성을 측정하기 위해서는 출력 링크를 고정시

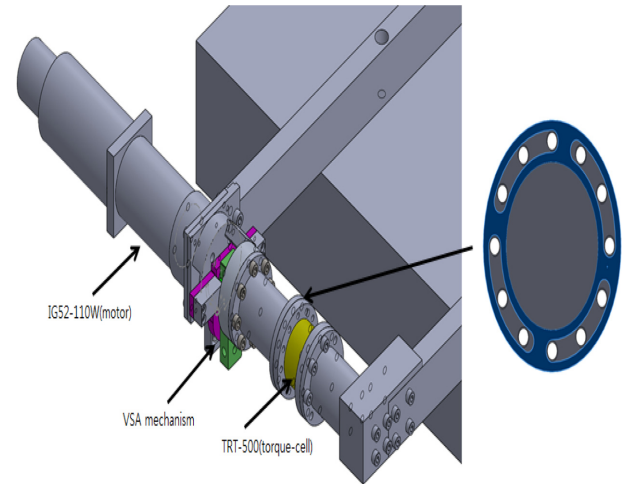


Fig. 9 Torque measurement system & variable angle connector

킨 상태에서 입력 링크의 변위를 바꿔줘야 한다. 따라서 Fig. 9와 같이 정반에 VSA 메커니즘을 고정 시키고 토크셀(Torque-Cell)을 이용해 입력 각도에 따른 토크의 변화를 측정하는 방식으로 접근했다. 여러 각도에 대한 강성을 측정하기 위해 가변 각도 커넥터를 토크셀 앞에 위치시켜 원하는 각도까지 회전을 시킨 후 볼트 체결을 통해 완전 체결을 이루도록 설계했다.

4. 캠 VSA 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시뮬레이션

설계한 VSA의 검증을 위해 ‘Solidworks’의 Motion Study Tool을 이용해 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션 초기 조건으로 출력 링크가 움직일 수 없도록 구속을 한 뒤 입력 링크에 각도의 변위를 주었을 때 변하는 토크 값을 받아 강성 계산을 하였다.

Fig. 10의 시뮬레이션 값을 통해 VSA 메커니즘이 L_1 과 L_2 의

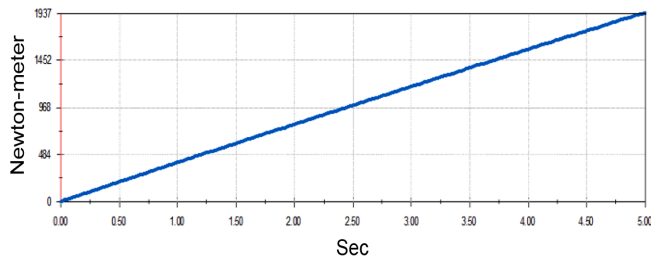


Fig. 10 Simulation by using motion study

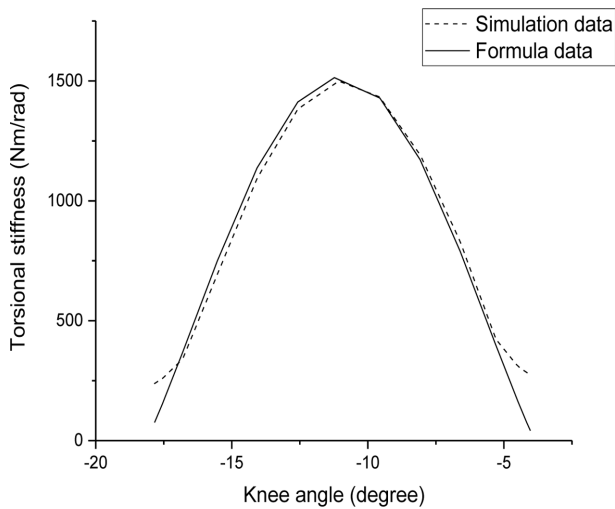


Fig. 11 Comparison simulation/formula stiffness data

비율에 따라 가변 강성이 이루어지고 있음을 확인했다. Fig. 11는 3.1절에서 설계한 PCC를 캠 설계에 적용하기 위해 식(9)의 데이터와 시뮬레이션을 통해 얻은 강성데이터를 가변 강성 구간인 $-4^{\circ}\sim-18^{\circ}$ 까지 비교하여 나타내었다.

캠의 경우 가변 강성 구간의 양 끝단에서 운동성 확보를 위해 완만한 곡선으로 이루어져, 낮은 강성으로 이어지는 부분에서 약간의 차이가 발견됐지만 이는 보행에서 고려해야 할 가변 강성 구간이 아니기 때문에 의미 있는 지점이 아니다.

정상인의 보행 강성 데이터와 캠 VSA의 강성 실험 값을 각도에 따라 비교해 Fig. 12에 나타냈다. 캠VSA가 목표 강성인 34 Nm/rad-1516 Nm/rad까지 구현 되고 가변 강성의 추세를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 실험 결과

Fig. 13의 모터는 DNJ사의 110 W급 BLDC를 사용했으며, 토크셀은 Transducer Techniques 사의 TRT-500을 사용했다.

3.3절에서 설계한 측정시스템으로 특정 각도에 고정 시키고, 모터의 위치 제어를 통해 300 Pulse(약 0.125°)로 시뮬레이션상과 유사한 각도 차를 주어 VSA의 출력 링크에서 발생하는 토크셀의 데이터를 취득해 강성을 계산했다.

Fig. 14와 같이 실험결과는 시뮬레이션과 같은 경향을 보이며,

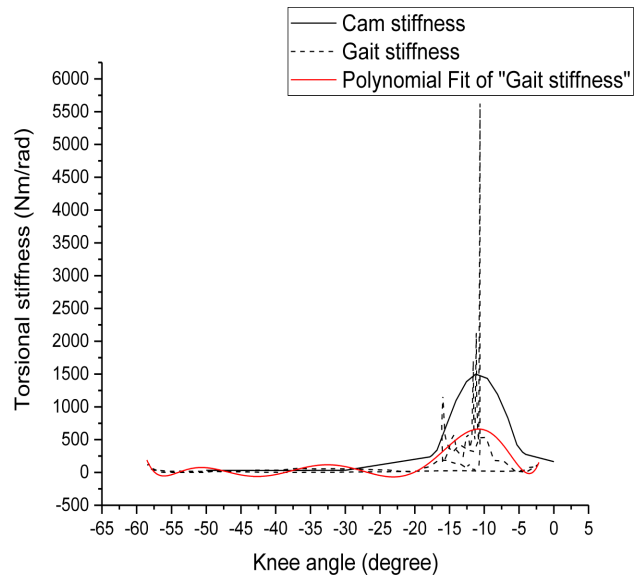


Fig. 12 Comparison gait/cam stiffness data

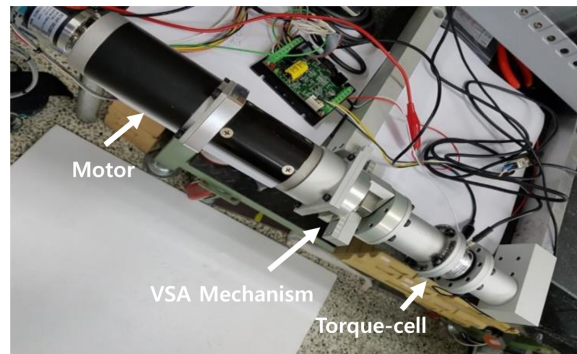


Fig. 13 VSA measurement system

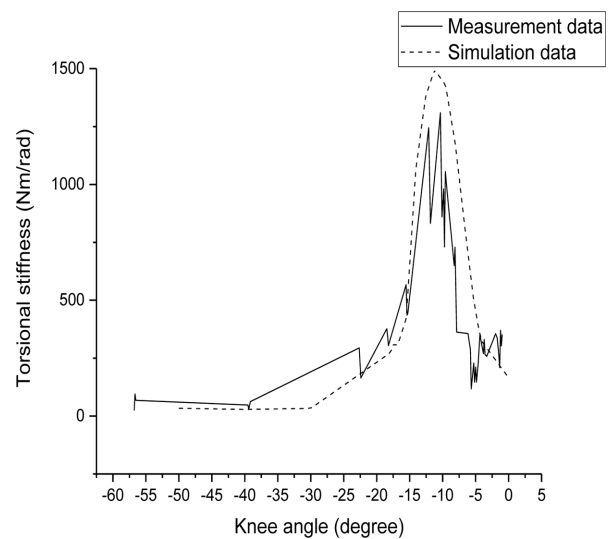


Fig. 14 Comparison simulation/measurement data

목표했던 강성의 약 80%인 1309 Nm/rad의 강성이 구현되는 것을 확인했다.

Table 1 Comparison of size and weight

	Cam VSA	AwAS-II
Length (mm)	88	180
Width (mm)	39.4	140
Weight (g)	357	1100

5. 결론

본 연구의 목표는 소형화/경량화를 통해 VSA를 외골격 로봇에 적용할 수 있는 가능성을 제시하는 것이다. 소형화/경량화를 위해 추가적인 모터 없이 피벗의 위치를 기구적으로 제어할 수 있는 캠을 제작했고, 이를 통해 취득한 강성 데이터를 시뮬레이션 데이터와의 비교를 통해 보행 시 필요한 가변 강성의 구현을 Fig. 14와 같이 확인했다. 캠을 이용한 VSA의 강성이 보행에 필요한 강성의 경향을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 개발한 캠 VSA는 Table 1과 같이 참조 VSA 모델 AWAS-II⁴ 대비 부피에서 약 50% 이하로 소형화, 무게에서 약 35% 이하로 경량화를 했다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 중견연구자지원사업(핵심연구지원사업) 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A2A2A01069067). 본 논문은 장시영의 학위논문을 바탕으로 작성되었다.

REFERENCES

1. Ministry of Health and Welfare, "Status of the Disabled Registration," http://www.mohw.go.kr/react/jb/sjb030301vw.jsp?PAR_MENU_ID=03&MENU_ID=0321&CONT_SEQ=344589&page=1 (Accessed 26 JUN 2019)
2. An, S. H., Kim, S., H., and Shin, Y. I., "The Effect of Progressive Speed Increase Training on Electromechanical Gait Trainer and Treadmill Training for Stroke Patients," *Journal of Coaching Development*, Vol. 9, No. 1, pp. 113-125, 2007.
3. Tonietti, G., Schiavi, R., and Bicchi, A., "Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 526-531, 2005.
4. Jafari, A., Tsagarakis, N. G., and Caldwell, D. G., "AwAS-II: A New Actuator with Adjustable Stiffness based on the Novel Principle of Adaptable Pivot Point and Variable Lever Ratio," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4638-4643, 2011.
5. Wang, S., Van Dijk, W., and van der Kooij, H., "Spring Uses in Exoskeleton Actuation Design," *Proc. of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 1-6, 2011.
6. Hobara, H., Muraoka, T., Omuro, K., Gomi, K., Sakamoto, M., et al., "Knee Stiffness is a Major Determinant of Leg Stiffness During Maximal Hopping," *Journal of Biomechanics*, Vol. 42, No. 11, pp. 1768-1771, 2009.



Si young Jang

Siyoung Jang received the M.S degree in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2017. His research interest is CAM mechanism design.
E-mail: sy0329@gmail.com



Yun hye Song

Yunhye Song received the M.S degree in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2019. Her research interest is CAM mechanism design.
E-mail: yhsong12@nate.com



Yoon Su Baek

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, South Korea. His research interest is magnetic levitation systems & control, vision servo control, macro & nano motion control, and wearable robots.
E-mail: ysbaek@yonsei.ac.kr