

비틀림 봉 중력보상기를 적용한 외력증강기 구조해석

최형식[†] · 이동준¹ · 조종래¹

(원고접수일 : 2012년 1월 30일, 원고수정일 : 2012년 3월 7일, 심사완료일 : 2012년 4월 13일)

Structure Analysis of an Exoskeleton with a Torsion Bar Gravity Compensator

Hyeong-Sik Choi[†] · Dong-Jun Lee¹ · Jong-Rae Jo¹

요약 : 이 논문에서는 비틀림 봉을 기반으로 한 중력보상기가 적용된 새로운 외력증강기를 이용하여 인체 다리관절에 작용하는 부하를 경감시키는 방법에 대해 제안한다. 비틀림 봉 특성을 추정하고 측정하기 위하여 설계와 구조 해석을 행하였다. 설계와 구조해석을 바탕으로 매우 경량이고 소형인 새로운 외력증강기를 개발하였다. 구조해석은 외력증강기를 매우 경량으로 하기위해 최적두께의 링크에 대한 FEM해석을 행하였다.

주제어 : 비틀림 봉, 중력보상기, 외력증강기, 유한요소해석

Abstract: In this paper, a technical method of reducing torque load of exoskeleton device, with using of a gravity compensator based on a torsion bar, for human leg joints, is proposed. Design and structure analyses and also performance test were performed to estimate and to measure the characteristics of the torsion bar. On the basis of design and structure analysis, a new light and compact exoskeleton device has been developed. For the purpose of lightening and optimizing thickness of the links, FEM analysis has been performed.

Key words: Torsion bar, Gravity compensator, Exoskeleton, FEM analysis

1. 서론

산업체에서는 숙련공의 고령화에 따른 인력수급 문제나 무거운 작업물의 수작업 이송으로 인한 근골격계 질환 같은 산업재해 방지에 대한 관심, 신체장애자의 재활 및 군인들의 무거운 군장문제 해결을 위해 외력증강장치에 대한 연구와 관심을 많이 기울이고 있다.

국외에서는 오래전부터 하지용 외력 증강기에 대한 많은 연구를 해오고 있다. 버클리 대학에서는 군사적 목적으로 사용자의 배낭 중량을 경감시키기 위해 유압으로 작동되는 BLEEX시스템에 대한 심도있는 연구를 수행하여 실용화 단계에 이르고 있다[1]. 또한, Raytheon사에서 유압실린더를 적용

함으로써 중량을 80kg 이상 중량을 경감시키는 착용형 장치(XOS2)에 대한 연구를 수행하였다[2]. MIT의 바이오메카트로닉스 그룹에서는 에너지 축적을 위해 골반과 발목에 스프링 장치를 설치한 반수동 경량 외력증강기를 연구하였다[3]. 그리고 일본 츠크바대학교에서는 노약자와 장애인에 대한 보행을 지원하는 하지 착용형 로봇 HAL을 개발하여 실용화하였으며, 가나가와 공대의 Wakisaka는 공압을 이용하여 사람을 들어 올리게 하는 착용형 로봇을 개발하였다[4-5].

국내에서는 경우 과학기술원에서 환자에게 가해지는 무게를 조절할 수 있고 지지기능을 갖는 보행보조용 로봇에 대한 연구를 수행하고 있으며, 한

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계시스템공학과, E-mail : hchoi@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4297)

¹ 한국해양대학교 기계시스템공학과

양대에서 공사현장에서 작업자들의 근 골격계 질환 예방을 위해 근력을 증강시키는 착용형 전동로봇에 대한 연구를 수행하고 있다[6-7].

하지만, 현재 연구가 진행 중인 외력증강장치의 경우에는 전동형 구동기를 이용하고 있기 때문에 전원 공급 문제가 있다. 전원공급이 어려운 벽지의 산업현장에서는 외력증강장치를 사용하는 것이 불가능하게 된다.

본 연구에서는 전원공급 문제를 대폭 개선하거나 외부전원을 사용하지 않고 비틀림 봉 스프링의 복원력으로 관절기구에 가해지는 관절의 비틀림하중을 저감시키는 중력보상기구를 갖는 신개념의 하지외골격기구를 개발하였다. 중력으로 인해 다리 관절에 가해지는 토크부하를 저감시키는 새로운 개념의 저하중 외력증강기를 제작하여 장치의 구조와 동작특성에 대한 연구를 수행하였다.

제작된 장치의 관절회전 반경과 보상력을 최대한으로 할 수 있도록 비틀림 봉의 역학적해석과 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 장치의 중량을 최소화하기 위하여 링크모델의 최적두께에 대한 유한요소 해석을 하였다.

2. 비틀림 봉의 특성 및 역학적 해석

2.1 비틀림 봉의 특성

비틀림 봉을 적용한 중력보상기의 구조는 Figure 1에서와 같이 링크와 링크 사이에서 일어나는 관절의 회전운동을 장치의 링크내부를 따라 설치되는 비틀림 봉의 비틀림 탄성력을 이용하여 베벨기어를

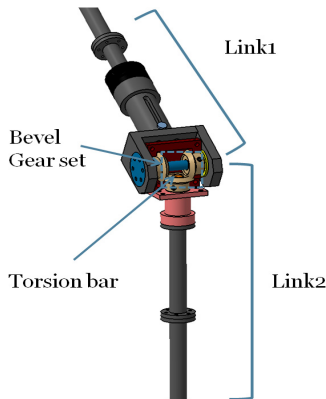


Figure 1: Joint link with gravity compensator

통해 힘의 방향을 90도 변경하여 외부에서 가해지는 힘을 감쇄시키는 구조이다. 이와 같은 구조는 비틀림 봉이 링크 역할을 함으로써 링크의 두께를 줄이는 반면 강성을 높일 수 있는 장점이 있다.

중력보상기는 요구되는 보상력으로부터 비틀림 봉의 지름과 길이를 산정한 후 기구부를 설계하여 수직하중을 받는 회전관절 기구부에 적용하는 것이 적합하다.

2.2 비틀림 봉의 역학적 해석

보상력을 결정하는 비틀림 봉의 사양 결정을 위한 운동역학적 계산모델은 관절기구 설계인자를 제공한다. 관절기구 링크에 작용하는 하중을 중력보상기에서 감쇄시키는 원리는 Figure 2에 보이는 바와 같으며, 비틀림 봉의 허용 토크와 전단응력은 아래 식 (1)로부터 구한다.

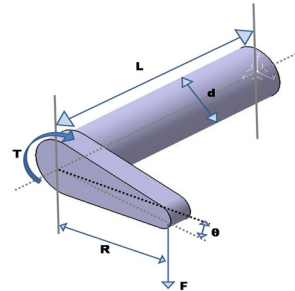


Figure 2: Structural mechanism of a torsion bar

$$T = FR\cos\theta \tag{1}$$

여기서, T ; 비틀림 봉의 토크, F ; 링크에 작용하는 하중, R ; 비틀림 봉 중심에서의 하중 작용점까지의 거리, θ ; 비틀림 봉의 회전각, d ; 비틀림 봉의 지름. 비틀림 봉 재질에 따른 허용전단응력 τ_{max} 는 식 (2)로부터 구한다.

$$\tau_{max} = \frac{16T}{\pi d^3} \tag{2}$$

여기서, 보상토크 T 와 허용전단응력에 따라 비틀림 봉의 지름 d 를 결정할 수 있다. 중력보상기의 보상력과 비틀림 봉 허용 회전각과의 관계는 식 (3)으로 정리된다.

$$\theta = \frac{32}{\pi d^4} \cdot \frac{T \cdot L}{G} \tag{3}$$

여기서, L ; 비틀림 봉의 길이, G ; 재료의 횡 탄성계수
 상기 식 (1)~(3)은 회전관절부의 중력보상기에 의한 보상력과 설계인자 사이의 관계를 나타낸다. 중력보상기의 용량은 비틀림 봉의 특성치로부터 결정되므로 이를 하지용 외골격기구에 적용하였다. 최적의 중력보상기를 외골격기구에 적용하면 전동기와 같은 전기장치를 사용하지 않아도 작업자 또는 장애자가 보행할 때 하지관절에 작용하는 토크를 회전각에 비례하여 보상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 중력보상기의 핵심 부품인 비틀림 봉의 특성을 규명하는데 중점을 두었다.

2.3 비틀림 봉의 시뮬레이션 해석

제작된 비틀림 봉의 특성을 분석하는 실험을 수행하기 이전에 시뮬레이션 해석을 수행하여 정량적 통계자료를 얻기 위해 사용한 열처리된경강선(KS D3501-SWB)의 물성치는 Table 1 및 Table 2에 보이는 바와 같다.

Table 1: Mechanical properties of SW-B

Strength (kg/mm ²)	Elasticity (%)	El.Coeff. (GPa)	Application
125~145	9	210	Spring

Table 2: Material properties of SW-B

Diameter (mm)	Length (mm)	Weight (g)	Density (kg/m ³)
6	335	74.083	6,143

비틀림 봉에 하중 2.5kgf를 가할 때 스프링강의 중심축으로부터 레버의 하중 작용점까지의 거리가 215mm이므로 비틀림 모멘트는 537.5 kgf·mm이다. 이 때 작용하는 등가응력은 Figure 3에서와 같이 시편 양단에서 적색을 띄어 응력이 집중되는 원인은 시편을 고정하기 위해 지름 3mm인 구멍을 가공하였기 때문이다.

비틀림 봉의 응력은 Figure 4에 보이는 바와 같이 시편 단면의 전단응력이 봉의 중심으로부터 멀어

질수록 커지며 봉 표면에서의 최대 전단응력은 124.22MPa이므로 허용치에 비해 여유가 있음을 알 수 있었다.

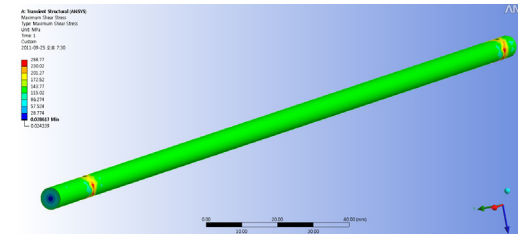


Figure 3: Equivalent stress analysis of torsion bar

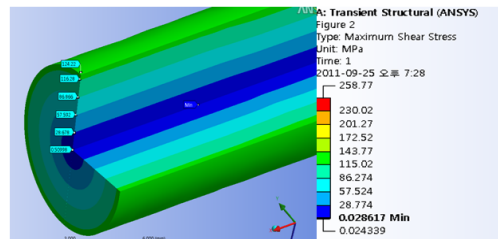


Figure 4: Stress analysis of torsion bar

2.4 비틀림 봉의 특성 실험

본 논문에서는 비틀림 봉의 기계적 특성을 알아보기 위하여 실험 장치를 제작, 성능 실험을 진행하였다. 실험결과와 신빙성확보를 위해 앞 절의 해석식을 통해 산출한 결과를 Table 4에 나타내었다. 실험을 위해 제작한 실험 장치의 구성은 Figure 5와 같다. 실험에 사용된 비틀림 봉은 길이 335mm 지름 6mm의 스프링 강이고 하중이 걸리는 링크는 헬리컬 베벨기어로 연결되어 링크에 걸리는 하중의 변화에 따라 비틀림 봉의 비틀림 각을 측정하여 이를 계산된 이론 값과 비교하여 제작된 비틀림 봉에 걸리는 부하에 따른 각도변화를 측정하였다.

실험결과에 따르면 외부부하가 클수록 오차가 약간 증가하는 경향이 있지만 해석결과가 실험결과와 유사함을 알 수 있고, 이 오차는 실험결과를 바탕으로 탄성계수를 약간 조정하면 매우 근사한 값을 구할 수 있다. 실험결과가 해석결과와 유사하므로 해석을 통해 비틀림 봉 기반의 중력보상기를 이용하는 하지근력증강기의 성능을 해석하고 이를 바탕으로 설계할 수 있음을 확인하였다.

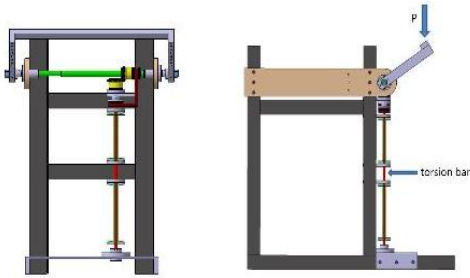


Figure 5: Performance test of torsion bar

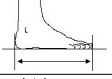



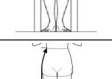
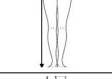
Table 4: Torsional angle in accordance with the applied torque

Load (kgf)	T (kgf*mm)	τ (Kgf/mm ²)	Theoretical Θ (°)	Measured Θ (°)
2.5	540.40	12.74	3.86	3.88
5	1094.02	25.80	7.72	7.86
7.5	1678.33	39.57	11.58	12.06
10	2301.42	54.26	15.44	16.53
12.5	2987.58	70.44	19.31	21.46
15	3727.67	87.89	23.17	26.78

3. 하지용 외력 증강기의 설계

3.1 하지용 외력증강기의 구조

Table 5: Data sheet of biomechanics (단위 : mm)

신체	평균	표준 편차
 발 직선길이	249	11.1
 앉은 무릎높이	508	22.2
 앉은 오금 높이	398	20.6
 앉은 엉덩이 너비	350	19.5
 다리 가쪽길이	1053	47.9
 살 앞뒤 길이	775	62.9

기구부의 설계에 앞서 설계 기준을 정하기 위하여 기존의 통계자료를 활용하였다. 설계 기준점은 착용자의 신체조건에 따라 변하는데, 본 논문에서는 Table 5의 체중 70kg, 신장 175cm의 35~39세 성인 남성을 기준으로 설계를 하였다.

중력보상기를 적용한 하지용 외력증강기의 기구학적인 전체 구성도는 Figure 6에 보이는 바와 같이 전체 높이 953mm, 폭 321mm, 중량 7.8kg인 6자유도를 갖는다. 사용자가 착용하였을 때 기초적인 보행과 특정 자세에서 관절에 무리를 주는 외력을 자연스럽게 보조할 수 있는 구조로 설계하였다.



Figure 6: Joint structure of exoskeleton

Figure 6은 하지용 외력증강기의 관절구성을 나타내는 개념도로 신체사이즈는 개개인마다 모두 다르므로 이를 고려하여 외력증강기의 회전 중심을 조정할 수 있는 가변링크를 적용하고 양쪽 무릎과 고관절엔 중력보상기를 적용하였다. 또한 일반적인 업무수행이 원활하도록 무게를 줄이고, 형태의 조잡함을 피하기 위하여 중공 바(bar)를 이용하여 비틀림 방지 역할과 형태를 잡아주는 링크로 기구부를 설계하였다. Table 6는 설계된 하지용 외력증강기의 규격이다.

Table 6: Specification of exoskeleton

Height	953(mm)	
Weight	7.8(kg)	
Gravity compensator	Left leg	gear set+torsion bar
	Right leg	gear set+torsion bar

하지용 외력증강기의 관절은 2자유도를 가지며 자연스럽게 동작할 수 있도록 구성하고, 관절운동 범위는 인체의 부분적 관절운동에 따른 제한각은 인체표준치수 통계자료에 근거하여 정하였다. 피치 운동을 하는 무릎 및 발목관절에는 중력으로 인해 관절에 생기는 부하를 완화시키기 위해 고안한 중력보상기를 채용하고 비틀림 봉이 삽입되는 골절부는 가급적 얇게하여 가볍고 협소한 환경에서도 사용되고 충분한 강도를 갖도록 최적설계를 하였다. Figure 7은 인체에 용이하게 부착할 수 있도록 결합장치를 갖는 외력증강기의 개념도이다.



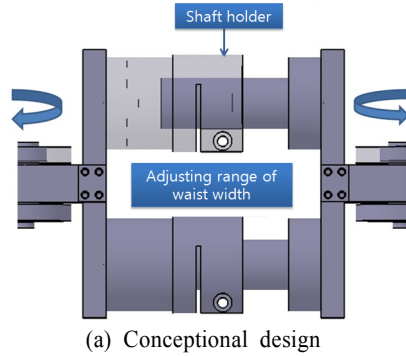
Figure 7: Design of the exoskeleton

3.2 외력증강기 기구부 설계 및 제작

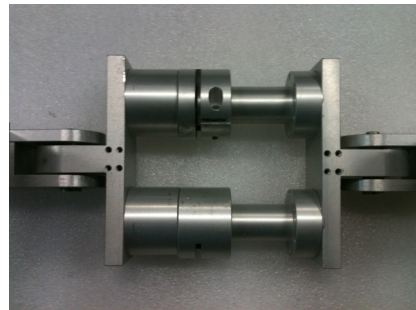
하지용 외력증강기의 고관절 기구부는 Figure 8 과 같은 자유도를 가지며, 자연스러운 동작을 갖도록 홀더를 이용한 가변링크로 구성하였다.

관절부의 제한각은 인체의 경우 106°가 한계이지만 외력증강기의 제한각은 142°로 함으로서 인체의 제한각보다 크게 하여 인체착용의 편의성을 최대한 제공하도록 설계하였다.

하지용 외력증강기의 무릎 및 발목 관절기구는 Figure 8 및 9와 같이 각각 2자유도(발목)와 1자유도(무릎)를 가지며 무릎관절의 경우 운동범위 확대에 따른 부하토크가 다른 관절에 비해 크기 때문에 비틀림 봉의 비틀림 각도로 보상력을 크게 하였다.

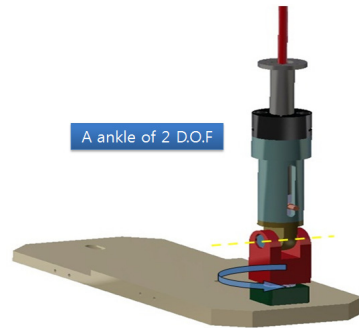


(a) Conceptual design



(b) Manufactured joint

Figure 8: Feature of the coax joint



(a) Conceptual design

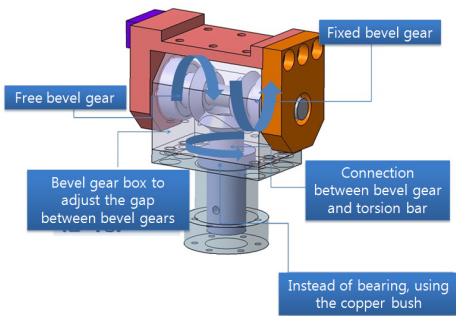


(b) Manufactured joint

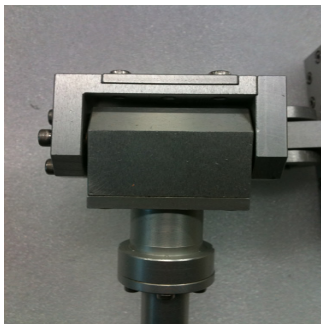
Figure 9: Feature of the ankle joint

또한 기어박스 내에서 스파이럴 베벨기어 3개가 맞물려서 작동하도록 하여 기어 간의 유격을 축소시키고 횡축의 베벨기어 두개는 한쪽이 힘을 전달하는 고정단이고 다른 한쪽은 기어 사이의 간극을 유지하는 자유단으로 하였다. 발목관절의 경우 Figure 9와 같이 인체의 움직임을 근사적으로 따라 움직일 수 있도록 2축 관절로 하였다.

인체의 발목관절 제한각은 인체의 통계자료를 근거로 할 때 70° 정도이나 이를 더욱 여유가 있도록 90°로 해서 Figure 10과 같이 제작하였다.



(a) Conceptual Design

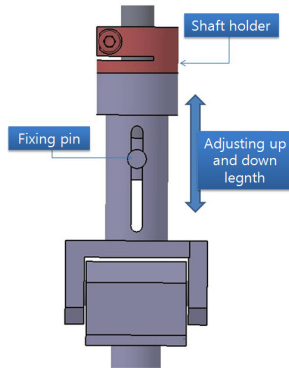


(b) Manufactured joint

Figure 10: Feature of the knee joint

하지용 외골격기구는 착용자의 신체조건이 다양하므로 신체치수 통계자료를 토대로 링크 평균길이를 결정하고 착용자의 신장에 맞추어 링크길이를 조정할 수 있도록 가변형 링크를 채용하였다. Figure 11에서 보는 바와 같이 링크는 봉과 브래킷으로 구성하고, 지주스탠드의 봉 길이로 브래킷의 면압을 조절한 후 간단히 고정하는 편의성을 고려하였다. 또 가변링크 봉 내부에 비틀림 봉을 고정하

여 외력으로 인해 발생하는 비틀림각을 보상하고 불의의 비틀림 봉 파단 혹은 손상을 방지토록 하였다. 이렇게 하여 다양한 근력보조기능을 갖도록 하여 구성부품을 간소화하고 구성을 단순화시켰다.



(a) Design



(b) Product

Figure 11: Design and product of the variable joint



Figure 12: Feature of a developed exoskeleton

하지용 외골격기구의 전체적인 조립상태는 Figure 12에 보인 바와 같이 허리관절, 무릎관절, 발목관절로 구성되고, 착용을 위해 착용패드와 인

라인 스케이트신발을 별도로 부착하였다. 이것의 실제 착용상태는 Figure 13에서 보는 바와 같이 가변링크의 조정과 착용 밴드를 이용하여 몸에 부착한다. 자유도는 허리부 3자유도, 무릎 관절부 1자유도, 발목 관절부 2자유도로 하였다.



Figure 13: Feature of a worned exoskeleton

3.3 외력증강기 기구부 구조해석

착용이 용이하도록 제작된 외골격기구의 중량을 최소화시키기 위해 링크 두께를 축소시키면서 외부하중에 대한 링크에 대한 모멘트 응력이 미치는 영향을 검토하였다. 알루미늄합금인 AL60 재료로 구성된 링크의 구조해석을 위해 유한요소법을 적용하였다. 하지용 외력증강기에 신체중량이 가해지는 하중과 이로 인해 발생하는 모멘트의 계산모델은 Figure 14에, 이들 기구의 하중조건과 재료의 물성치는 각각 Table 6 및 Table 7에 보인 바와 같다.

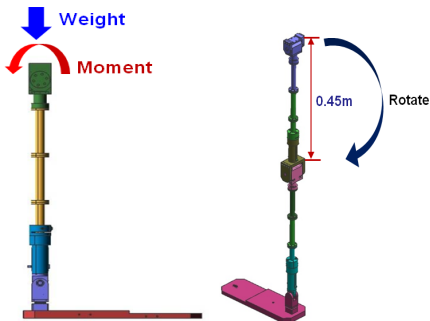


Figure 14: Schematic mechanism of exoskeleton applied by torque

해석을 수행하기 위해 기구부의 가해지는 하중 조건은 Table 7과 같으며 다리 링크의 특성은 Table 8과 같다.

Table 7: Payload of exoskeleton

	Max.Moment	Weight
Design condition	135N-m	300N

Table 8: Material property

Property	El.Coef. (%)	Max.St. (MPa)	Y.S (MPa)	Perm. St. (MPa)
AL6061	69	205	110	59.3

Figure 15는 FEM 해석을 위해 적용된 외관절 기구의 무릎부터 바닥면까지의 계산모델이다.

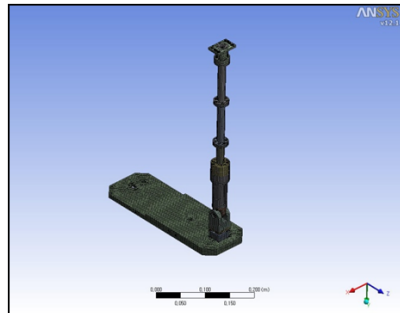


Figure 15: FEM Model of exoskeleton

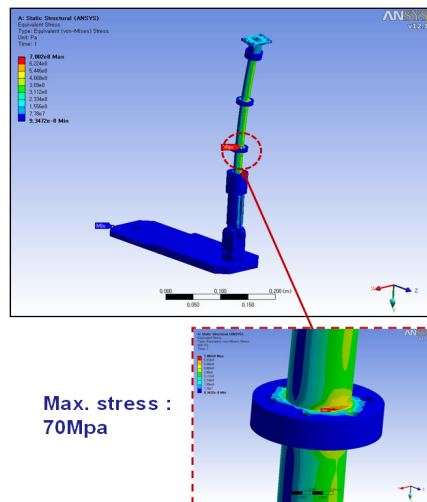


Figure 16: Stress analysis of exoskeleton link

상기의 배율 220으로 확대된 등가 응력분포를 갖는 계산모델에서 링크와 링크를 이어주는 이음부 부근에서 최대응력이 발생하고 그 크기는 70MPa 정도임을 확인할 수 있었다.

Figure 17은 총 변형량을 보여주는 것으로서 최대 변형은 모멘트가 발생하는 기어축 부에서 0.034m의 그림의 방향으로 생김을 알 수 있다.

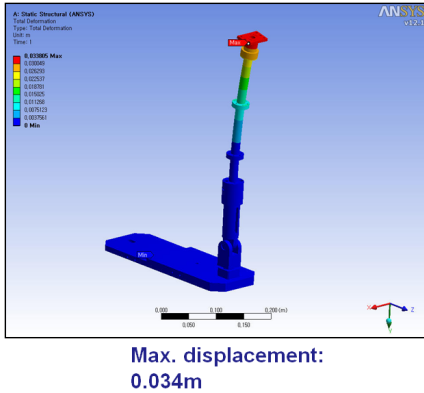


Figure 17: Strain analysis of exoskeleton link

Table 9: Analysis result

Equivalent Stress	Membrane)		Membrane+Bending	
	Calculation (MPa)	Stress limit	Calculation (MPa)	Stress limit (MPa)
	24.5	89(1.5S)	56.3	178(3S)

비틀림 봉에 부가되는 하중의 영향은 Table 10에 보인 계산결과와 같이 발생되는 평균응력(membrane stress)이 사용된 재료의 허용응력에 비해 작아서 굽힘응력까지 고려할 때 안전계수가 3 정도로 여유가 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 비틀림 봉의 복원력을 이용하여 중력으로 인해 인체에 가해지는 하중을 저감시키기 위해 중력보상기구를 도입하고, 기존의 전동식 하지용 외력증강기의 단점인 전원공급문제를 개선한 신개념의 외력증강기의 설계방법을 검토하였다. 관절기구의 동작반경과 보상력을 최대로 할 수 있는 비틀림 봉의 기구학적인 해석과 운동특성을 분석하

고, 유한요소해석과 시험을 통한 비틀림 봉의 성능을 확인한 결과 계산결과와 유사함을 확인하였다.

또한, 착용이 용이하도록 경량으로 제작한 외력증강기 링크의 응력 및 모멘트에 대한 FEM 해석을 하였고 이를 통해 3배의 안전계수 여유가 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010 - 0004372).

참고문헌

- [1] H. Kazerooni, "Human power extender : An example of human-machine interaction via the Transfer of Power and Information Signals", Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 565-572, 1998.
- [2] Erico Guizzo, Sarcos Exoskeleton Bringing Iron Man Suit Closer To Reality, US Army Research Laboratory, ARO in Review, Spectrum IEEE, 2010.
- [3] C. J. Walsh, K. Pasch and H. Herr, "An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intellegent Robots Systems, pp. 1410-1415, 2006.
- [4] H. Kawamoto and Y. Sankai, "Comfortable power assist control method for walking aid by HAL-3," IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 4, pp. 55-62, 2002.
- [5] T. Wakisaka, "Automated construction system for high-rise reinforced concrete buildings", vol.9, no.3, pp. 229-250, 2000.
- [6] C. Lee, I. Jeong, K. Seo and L. Lee, "Development of rehabilitation robot system for walking aid", IEEE Int. Conf. on Rob. & Auto., pp. 2468-2473, 2004.
- [7] M. I. No, K. Y. Lee, J. W. Lee and J. S. Lee,

“Conceptual design of support robot for shipbuilding to prevent musculoskeletal disorders”, 2007 Korea CAD/CAM Conference, pp. 726-734, 2007.

저 자 소 개



최형식(崔炯植)

1979년 고려대학교 기계공학 (공학사), 1987년 Univ. of South Carolina 기계공학(공학석사), 1989년 North Carolina 기계공학(공학박사), 1993년 한국기계연구원 Post Doctor, 2000년-현재 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부(교수). 관심분야: 휴머노이드 로봇, 무인

수중로봇, 제어시스템, 기계시스템 제어용 디지털제어기, 능동진동제어용 고속제어기, PID and Puzzy 제어이론, 적응제어, 강인제어



이동준(李東駿)

2004년 한국해양대학교 기계공학(공학사), 2011년 한국해양대학교 기계공학(공학석사)

관심분야: 기계공학, 로봇설계 및 구조해석, 휴머노이드 로봇, 무인수중 로봇, 동역학 해석, 햅틱마스터암로봇, 외력증

강로봇분야



조종래(趙琮來)

1982년 부산대학교 기계공학과 (공학사), 1984년 한국과학기술원 기계공학(공학석사), 1993년 한국과학기술원 소성가공학(공학박사), 1984년-1985년 한국중공업 원자력 압력 용기 설계실, 1986-1995 한국중공업 기술연구소 선임연구원,

1995-현재 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부 교수. 관심분야: 소성가공해석 및 비선형 해석, 실험응력해석 및 구조물의 열탄소성 해석, 구조물의 내진해석