

탄소섬유 복합재를 이용한 경량 착용형 로봇의 개발

이재열*† · 전광우** · 최재연* · 정구봉* · 서진호* · 최일섭*** · 신광복****

A Development of the Lightweight Wearable Robot with Carbon Fiber Composite

Jeayoul Lee*†, Kwangwoo Jeon**, Jeayeon Choi*, Goobong Chung*, Jinho Suh*,
Ilseob Choi***, Kwangbok Shin****

ABSTRACT: In this paper, we evaluate structural integrity of the wearable robot by using finite element analysis, which is made of CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) composite materials to be lightened. On the basis of the ASTM(American Standard Test Method), mechanical tests of the material are carried out in tensile, compressive and shear test for analytical evaluation. With the tested composite material, the main frame and two femoral frames of the robot is redesigned to satisfy the lightening design requirements. It is verified with the structural analysis that the redesigned frames are good for the part of the wearable robot.

초 록: 본 논문은 착용형 근력지원 로봇의 경량화를 위하여 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 복합재료의 적용 설계와 유한요소해석을 이용한 안전성 평가 내용을 기술하였다. 금속재 프레임으로 제작된 착용형 근력지원 로봇에 대하여 탄소섬유 복합소재로 대체하였고, 적용 재료에 대하여 ASTM을 기준으로 인장, 압축 그리고 전단 시험을 통하여 해석적 평가를 위한 기계적 물성시험을 수행 하였다. 구조해석 결과를 이용하여 설계된 경량 착용형 근력지원 로봇의 메인 프레임 및 대퇴부 프레임은 경량 설계의 설계요구조건을 만족하였으며 제작된 로봇이 기존 금속재 프레임 대비 경량화 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 경량 착용형 로봇(Lightweight wearable robot), 복합재료(Composite materials), 유한요소해석(Finite element analysis), 파손평가(Failure evaluation)

1. 서 론

산업 현장에 로봇을 보급하기 위한 연구는 활발히 진행 중이며, 설비의 정형화와 생산 단가의 절감 등에 기여하고 있다. 산업 현장에서 로봇을 적용하기에는 설치 공간, 작업 요소, 작업의 정밀도, 반복성 등을 고려하여야 한다. 작업

공간의 위치가 높고 크레인의 사용에 제한이 많은 경우 이를 사용하기 위한 별도의 기구물이 설치되어야 하는 번거로움이 있다. 또한, 협소한 공간에서 중량물을 이동 및 설치하는 경우는 현재까지도 인력을 투입하여 작업이 이루어지고 있다. 본 연구의 적용 대상은 Fig. 1과 같이 제철소의 고로와 전로, 전기로 등 철과 비철을 제조하는 공정상의

Received 28 May 2015, received in revised form 13 June 2015, accepted 13 June 2015

*R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence

*†R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence, Corresponding author (E-mail: jylee0914@kiro.re.kr)

**Design Technology Center, Defence and Aerospace Division, Hankuk Fiber Co., Ltd.

***Technical Research Lab., POSCO

****Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat National University



Fig. 1. Construction site for constructing and marinating the ladle

각종 로(Converter)에 들어가는 내화물을 축조하는 공정에 작업 인력 2명 이상이 내화물(중량 20~60 kg)을 높은 정밀도로 축조하는 경우이다. 이러한 작업은 중량물의 반복 이송작업에 따라 높은 작업 피로도를 유발한다. 따라서 작업자의 근력을 보조하는 착용형 로봇을 사용하는 것은 매우 효과적일 것이다.

작업자의 반복 작업 피로도 및 중량물의 효율적인 작업을 위하여 작업자의 근력을 보조하는 착용형 로봇은 군사, 재활 목적 등으로 지속적으로 개발되고 있으며, 산업 현장 적용에 대한 연구도 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 미국 Lockheed Martin에서는 외골격 착용형 로봇인 HULC를 군사적 목적으로 개발하였으며[1], 일본의 HONDA는 이동성 향상을 위한 보조 로봇을 개발하였다[2]. 국내의 HEXAR SYSTEM에서 하지보행보조기기 및 하지근력증강로봇을 개발하였다[3].

외골격 착용형 로봇은 산업용 로봇과 달리 사람이 착용하여 장소나 공간에 제약을 받지 않고 활용 할 수 있어 다 목적으로 사용할 수 있다는 장점을 지닌다. 외골격 착용형 로봇의 경우 사람의 골격형태와 유사한 형태로 기구를 구성하고 관절이 회전할 수 있는 구동 시스템을 장착하여 근력을 증강 시킬 수 있도록 구성된다. 본 논문에서 언급하는 착용형 로봇은 지면과 접촉이 없는 로봇으로 전체 로봇의 무게를 사용자가 감당하여야하는 단점을 지닌다.

효율적인 측면에서 착용형 로봇의 경우 구조물의 경량화가 가장 중요하며 소재의 경량화가 필요하다. 로봇 프레임에 대한 경량화를 위하여 로봇 분야에서는 최적 설계를 통한 비철금속소재의 적용이 활발히 이루어지고 있으나 복합재료에 대한 적용 연구는 제작단계, 설계의 난이도, 적용분야의 제한 등으로 활발히 이루어지고 있지 못하는 실정이다. 기존 금속재 대비 비강성/비강도(specific stiffness/specific strength)의 특성이 우수한 복합소재는 기존 금속재와 달리 다양한 파손형태를 나타냄으로 설계단계에서부터 파손에 대한 정확한 평가가 수행되어야 한다[4-6].

본 논문에서는 설비 작업자의 근력지원 및 반복 피로도 저감을 위한 착용형 근력 지원 로봇의 경량화를 위한 탄소 섬유 복합재료를 적용하는 설계와 프레임의 안전성 평가를 위한 평가 내용을 기술하였다.

2. 착용형 로봇의 개발

작업자의 중량물 이동 작업을 지원하기 위한 착용형 로봇의 개발을 위하여 Fig. 1과 같이 중량물을 들어 올리는 동작을 기준으로 발목 관절이 고정된 것으로 가정하고 무릎 관절, 고관절 그리고 어깨 관절을 포함하는 3개의 링크로 모션 모델을 구현하였다. 중량물을 들어올리기 위한 인간의 근육과 뼈는 매우 복잡한 메커니즘으로 운동을 하지만, 근력을 지원하는 기구의 메커니즘은 단순한 형태에서 개발되어야 한다. 이를 위해 고관절에 대하여 회전에 토크를 인가하여 대퇴부 및 허리 근력을 지원하기 위한 형태로 개발되었다. 작업자는 중량물을 들기 위하여 Fig. 2의 (1)와 같이 초기 동작으로 준비 및 대상물을 파지하고 (2)와 같이 발목관절, 고관절을 기준으로 상승하게 된다. 이때, 개발된 착용형 로봇은 작업자의 동작을 인식하고 고관절 위치에 장

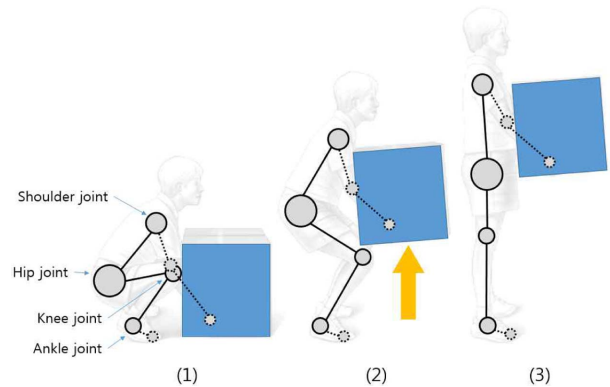


Fig. 2. Lift-up an object motion and simple 3-link model that moves in a sagittal plane

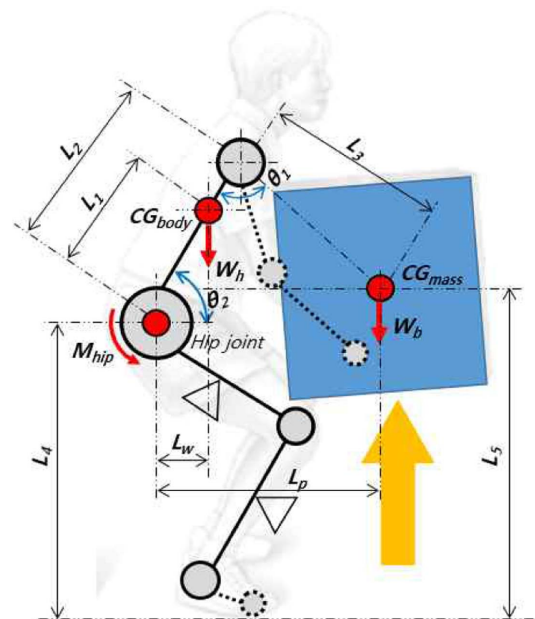


Fig. 3. Schematic of the lift-up motion

Table 1. Design requirement of the wearable robot

L_1	600 mm	W_L	55 kg
L_2	350 mm	W_b	25 kg
L_3	600 mm	M_{hip}	235 Nm
Weight of robot		15 kg	
Capacity		Max 25 kg	
Actuation joint		Hip joint	
Hip-joint actuation angle		+130~-50°	
Drive type		Stand alone	

착된 전기 모터와 감속기를 통하여 상체가 일직선이 되는 위치(3)까지 회전 동작을 수행하게 된다. Fig. 3은 작업자가 중량물을 들어 올리는 동작에 대한 기구학 문제를 정의하였고, 이를 통해 고관절 구동기의 필요 토크를 계산하였다.

작업자의 몸에 장착되어야 하고 발목 관절을 기준으로 중량물을 들어 올려야 함으로 착용형 로봇의 무게는 반드시 작업자에 부담이 되지 않도록 경량 설계되어야 한다. 로봇 자중을 최소화하기 위하여 개발된 착용형 로봇의 구성은 고관절을 구동하기 위한 기구부를 포함하여 대부분의 소재를 경량 알루미늄 프레임으로 구성하였으며 대부분의 취부 부품들은 엔지니어링 플라스틱으로 구성하였다.

Table 1은 착용형 로봇의 1차 설계요구조건을 나타내고 있다. 착용형 로봇의 경우 구동부를 포함한 전체 무게가 15 kg을 넘지 않도록 설계하였으며, 착용하는 작업자의 고관절 위치에 구동기를 배치하였다.

또한, 개발 목표 사양으로 착용형 로봇이 들어 올릴 수 있는 최대 중량물의 무게는 30 kg 미만으로 선정하였다. 이때, 작업자의 허리 관절에서 작용되는 굴곡 모멘트[7]는 235 Nm로 Fig. 3의 동작 중에 발생하는 것으로 작업자의 상체 중량과 중량물의 무게를 포함한 것이다. 고관절 구동기의 적용 가능한 최대 토크는 로봇의 무게를 고려하여 경량형으로 개발되어야 한다. 이를 위해 출력 토크는 감소가 필요하여 중량물 무게 25kg을 들어 올리는 경우 최대 토크 150 Nm로 개발 되었다. 또한, 작업자의 허리에 작용하는 굴곡 모멘트를 상쇄 시키도록 개발하였다. 최종으로 프레임에 적용되는 최대 토크는 250 Nm로 선정하였다.

Fig. 4는 설계된 착용형 로봇의 형상을 나타내었다. 착용형 로봇의 구성은 고관절 구동기를 기준으로 메인 프레임과 대퇴부 프레임으로 나누어진다. 고관절 구동기는 전기 모터와 하모닉 드라이브로 구성된 구동기로 양방향에 절대각 회전각 센서(absolute encoder)와 증분형 회전각 센서(incremental encoder)를 부착하여 위치 제어를 수행하였다. 고관절 구동기의 구성은 프레임 및 케이스는 알루미늄(AL-7075-T6) 소재를 적용하였고 회전축은 크롬-몰리브덴 강재에 열처리를 적용하여 강도를 보강하였다.

제작된 1차 착용형 로봇은 Fig. 5와 같이 구성되었으며, 작

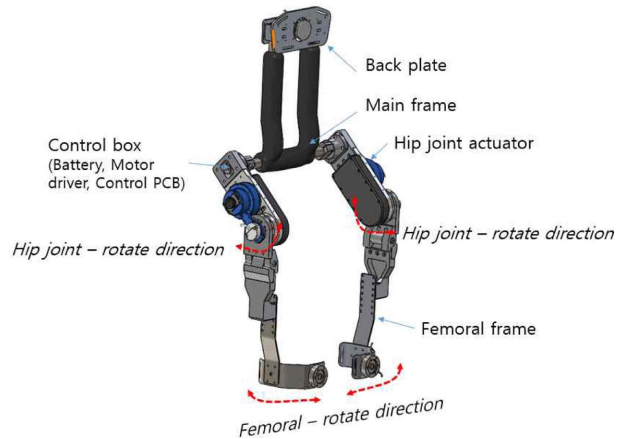


Fig. 4. Design of the wearable robot(hip joint actuation)



Fig. 5. First develop model of the wearable robot

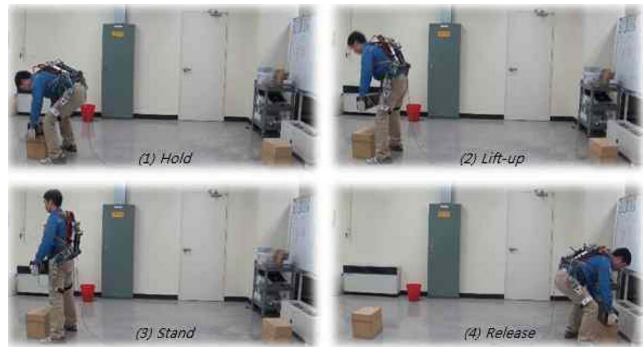


Fig. 6. Motion test(hold, lift-up, stand, release)

업자가 착용 후 동작 시험을 진행하였다. 작동 시험 및 착용 시험을 통하여 성능 검증을 실행하였고, 요구 토크를 낮추고 프레임의 경량화를 통해 2차 시제품 제작을 진행하였다. Fig. 6은 착용형 로봇을 이용하여 내화물 벽돌 25 kg에 대하여 모션 시험을 수행한 내용을 나타내었다.

1차 착용형 로봇은 동작 시험을 통해 중량물을 들어 올리는 작업이 유용한 것을 확인하였으나, 개발된 로봇의 무게가 전체 구성품(전장품, 배터리 등)을 포함한 경우 18 kg의 무게로 제작되었다. 이로 인해 작업자의 부하 중량이 증가되어 시험 시 작업자의 중량 부담이 가중되는 문제가 발

생되었다. 따라서 경량화를 위하여 2차 제작은 Fig. 3의 구성에서 메인 프레임과 대퇴부 프레임을 경량소재로 대체하고 고관절 구동기를 단순화 시키는 형태로 개발 방향을 선정하였다. 착용형 로봇의 경량화를 위해 메인 및 대퇴부 프레임에 탄소섬유/에폭시 복합재를 적용하고 T300 탄소섬유 평직 프리프레그(T300 Carbon fiber/epoxy woven prepreg)를 선정하였다.

Fig. 7은 탄소섬유/에폭시 복합소재가 적용된 메인프레임과 대퇴부 프레임의 설계 형상을 나타내었다. Fig. 7-(1)

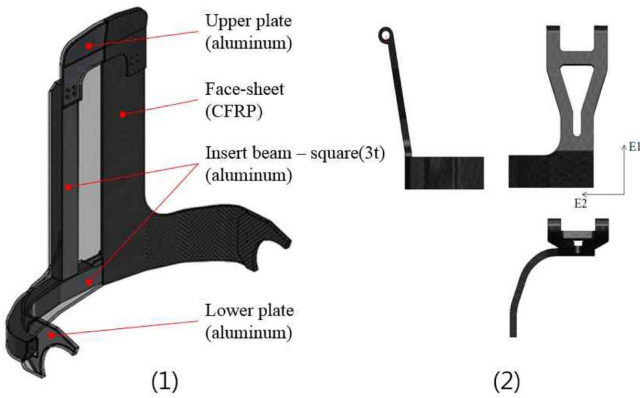


Fig. 7. Design of the CFRP frame part

의 메인 프레임은 강성 증대 및 전장부, 배선부를 용이하게 구성하기 위하여 중공형 알루미늄 프레임을 동시 성형하는 하이브리드 형태로 설계하였다. Fig. 7-(2)는 대퇴부 프레임을 나타내었으며, 대퇴부 고정을 위한 프레임과 회전 미끄럼 베어링을 동시에 성형하는 형태로 설계하였다.

3. 경량 착용형 로봇의 개발

3.1 적용재료 물성평가

착용형 로봇 프레임에 적용된 탄소섬유/에폭시 적층 복합재료의 기계적 물성 및 파손 평가를 위한 파손 거동을 확인하기 위해 인장시험은 ASTM D3039[8]을 압축시험은 ASTM D3410[9]을 전단시험은 ASTM D5379[10]에서 제시한 형태로 시편을 제작 및 시험을 수행하였다. 기계적 물성 평가는 각 시험 당 4개의 시편을 시험하였고, Fig. 8은 탄소섬유/에폭시 적층 복합재료의 인장 시험평가의 응력-변형률 곡선을 나타내며 Fig. 9와 Fig. 10은 각각 압축 그리고 전단 시험평가의 응력-변형률 곡선을 나타내었다.

탄소섬유/에폭시 적층 복합재료의 기계적 물성평가를 통해 나타난 결과를 Table 2에 정리하였다. 물성평가를 통해 획득된 기계적 물성은 구조 해석평가에 적용하였다. 기계적 물성평가는 각 방향성을 갖는 복합재료의 특성을 고려하

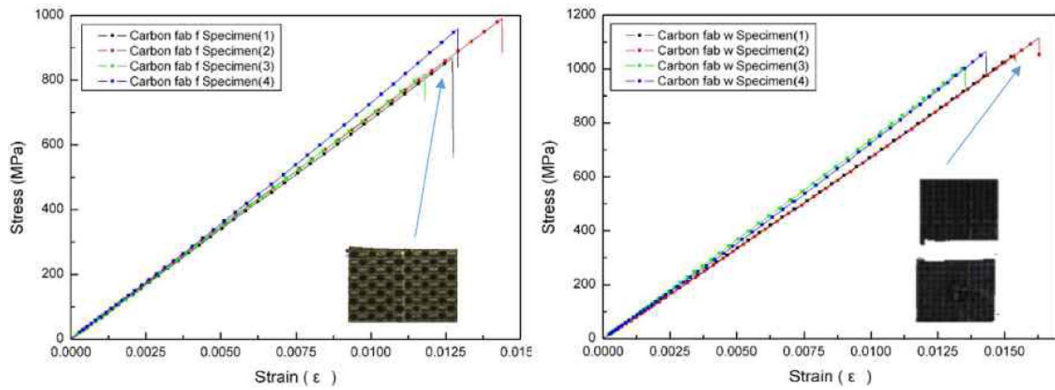


Fig. 8. S-S curve of tensile test (fill (left), warp (right) direction)

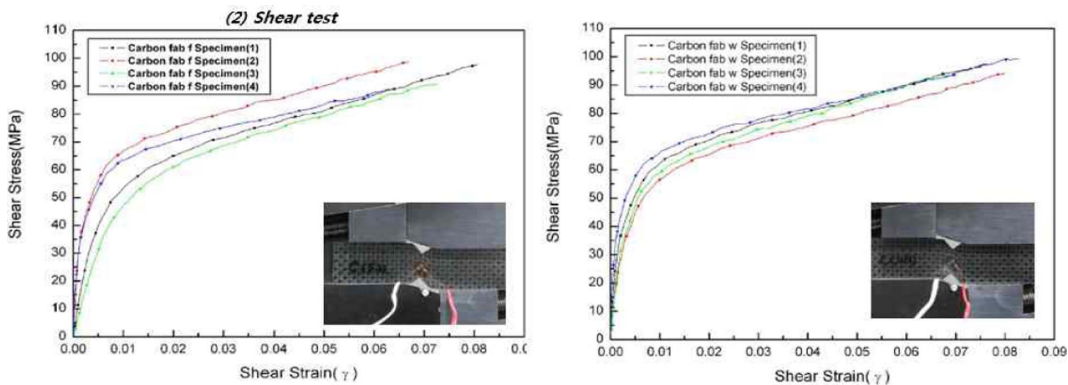


Fig. 9. S-S curve of shear test (fill (left), warp (right) direction)

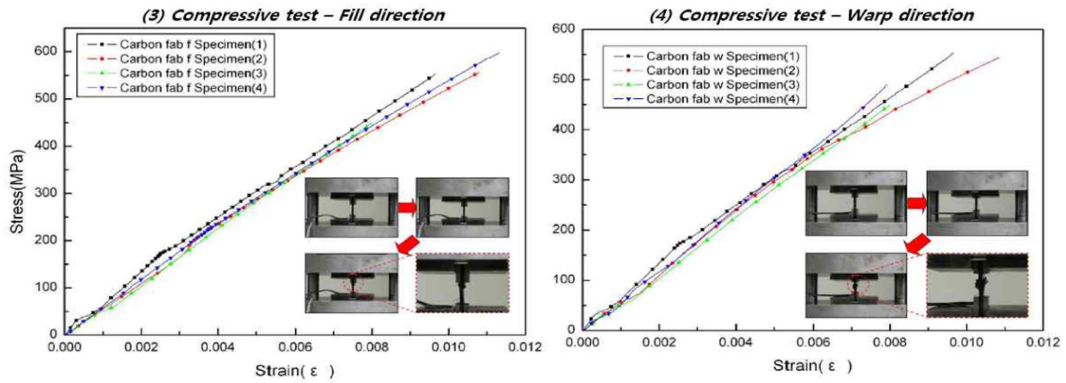


Fig. 10. S-S curve of compressive test (fill (left), warp (right) direction)

Table 2. Result of material property

		Modulus (GPa)	Strength (MPa)
Tension	Fill	69.17	905.8
	Warp	67.87	1025.3
Compression	Fill	60.37	510.18
	Warp	61.23	525.23
Shear	Fill	8.23	93.17
	Warp	6.95	95.18

여 Warp 방향과 Fill 방향의 시험편에 대해 각각 수행하였으며, 시험 시 발생하는 변형을 측정하기 위해 접착식 2축 스트레인 게이지(2-axial strain gauge)를 부착하고 Instron社의 만능재료시험기(instron 5982)를 통해 평가하였다. 적용수지는 등방성 소재를 적용하였다. 소재에 대한 시험평가를 통해 획득된 기계적 물성을 기준으로 파손 기준식을 적용 및 평가가 가능하도록 물성을 평가하였다.

3.2 구조해석을 통한 설계검증, 안전성 평가

착용형 로봇의 경량화를 위하여 설계된 메인 및 대퇴부 프레임의 설계검증을 위한 구조해석 평가를 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench v15.0을 이용하였다. 모델의 단순화를 위하여 Fig. 11과 같이 모델을 단순화하여 유한요소모델을 생성하였다. 메인프레임은 좌우 대칭모델로 구성하였다. 메인 프레임에 생성된 절점은 68,253개, 요소는 22,820개를 생성하고, 대퇴부 프레임에 생성된 절점은 41,057개, 요소는 13,250으로 생성되었다. 적용 요소는 8개의 절점을 가지고 적층판 구성이 가능한 Shell281 평판요소를 사용하였다. Fig. 12는 적층 정보에 따른 모델의 영역을 구분하여 나타내었고, Table 3은 각 영역에 대한 적층 정보를 나타내었다. 각 영역에 대한 적층 두께는 구성 부품의 체결의 용이성과 제작 시 이형의 편의 및 효율적인 제작 공정을 위하여 균일한 두께를 유지할 수 있는 치수를 선정하였다. 이때, 적층 정보는 Fig. 3과 같이 동작분석을 통

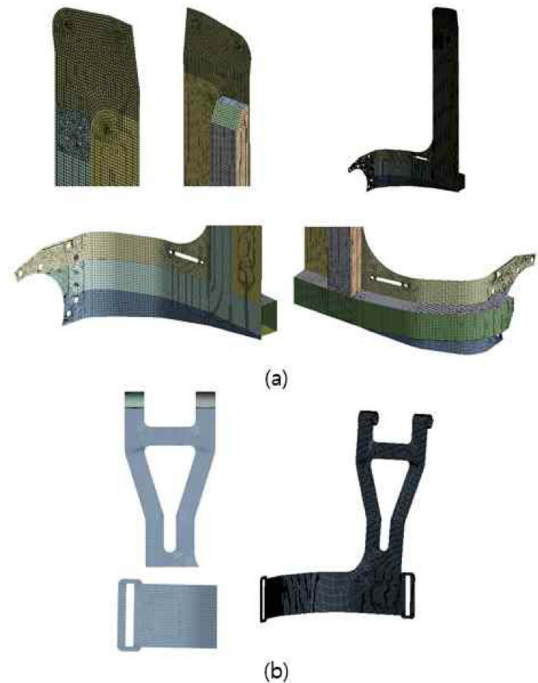


Fig. 11. Finite element model

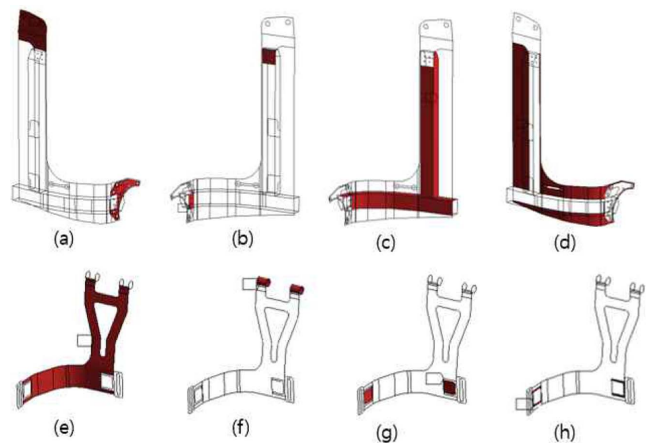


Fig. 12. Section area of the lay-up sequence

Table 3. Sequence information of the section area

Section area	Sequence	Thickness (mm)	
Main frame	(a)	$[(0/90)_6, (\overline{Al^* - 3t^{**}})]_S$	9
	(b)	$[(Al-2t), (Al-3t), (0/90)_6]$	8
	(c)	$[(Al-2t), (0/90)_6]$	5
	(d)	$[(0/90)_{12}]_S$	6
Femoral frame	(e)	$[(0/90)_{16}]_S$	8
	(f)	$[(0/90)_8]_S$	4
	(g)	$[(0/90)_3, (\overline{Al-5t})]_S$	8
	(h)	$[(0/90)_{6,0}, (\overline{Al-2.5t})]_S$	8

*Al : Aluminum - AL6061-T6

**t : Thickness

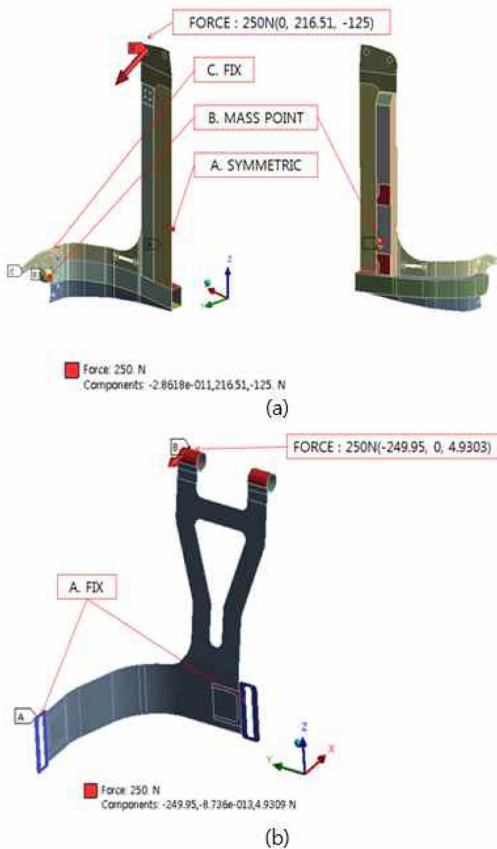


Fig. 13. Loading and boundary condition

해 발생하는 하중방향을 고려하여 굽힘에 대한 강성이 향상 되도록 선정하였다.

메인 프레임에 대한 해석 평가를 위한 하중 및 경계조건은 Fig. 13-(a)와 같이 구성하였다. 모델에 대한 대칭 조건을 적용하고 배터리 및 전장 구성품과 고관절 구동부의 각 결합 중심 위치에 질량요소(1kg 및 1.6 kg)를 적용 하였고, 고관절 구동기 체결 위치에 고정 조건을 적용하였다. 적용 하중은 상부 어깨 견착 지점에 250 N을 적용하였다. 대퇴부

프레임에 대한 해석 평가를 위한 하중 및 경계조건은 Fig. 13-(b)와 같이 대퇴부 체결 벨트 고정위치를 고정 조건으로 적용하고, 회전 미끄럼 베어링 영역에서 다리 안쪽 방향으로 수평 하중 250 N이 작용하는 조건을 적용하였다.

메인 프레임은 작업자에 견착되어 착용감에 영향을 줄 수 있는 착용형 로봇에서 가장 큰 부품에 속하며, 구동 모터가 장착되는 프레임이다. 따라서 진동 현상 발생 여부를 확인하고, 가진원인 모터에서 발생 예상 되는 진동수와 고유치 및 고유모드를 계산하였다. Fig. 14는 메인 프레임에 대한 고유진동수 해석 결과를 나타내었으며, 1차 굽힘(bending) 및 비틀림(twist) 거동에 대해 나타내었다. 1차 굽힘 거동에 대한 고유진동수는 150.39 Hz로 계산되었고, 1차 비틀림 거동에 대한 고유진동수는 1244.6 Hz로 계산되었다. 모터의 출력 주파수는 50 Hz으로 진동 영역에서 발생하는 문제가 없는 것으로 판단하였다.

Fig. 15는 메인 프레임에 대한 구조해석 결과를 나타내었으며, (1)은 최대 변형으로 프레임 상부 어깨 고리 위쪽에서 최대 변형 5.2 mm로 계산되었다. (2)는 최대 등가 응력을 나타내었으며, 등방성 소재인 알루미늄으로 구성된 프레임과 인서트에 대해 출력 하였다. 최대값 147.13 MPa로 항복 강도인 276 MPa 이내로 계산되었다. Fig. 16은 대퇴부

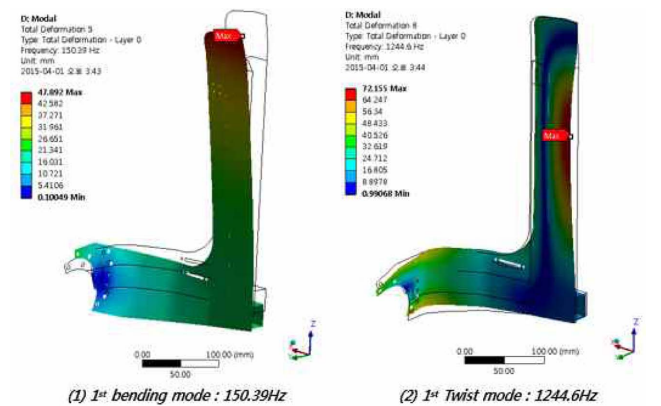


Fig. 14. Results of modal analysis

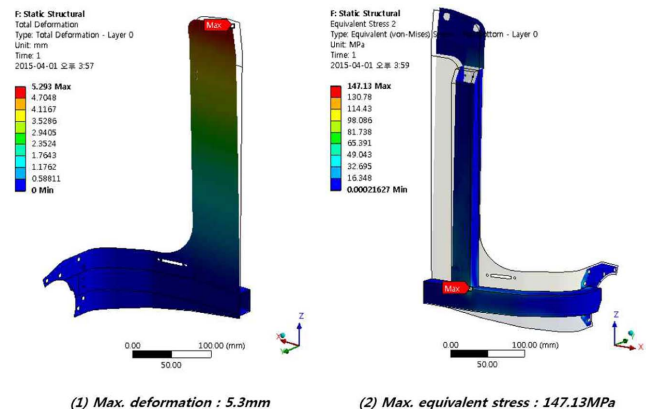


Fig. 15. Results of structural analysis (main frame)

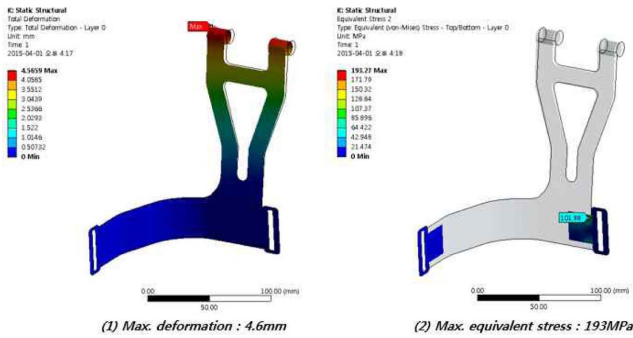


Fig. 16. Results of structural analysis (femoral frame)

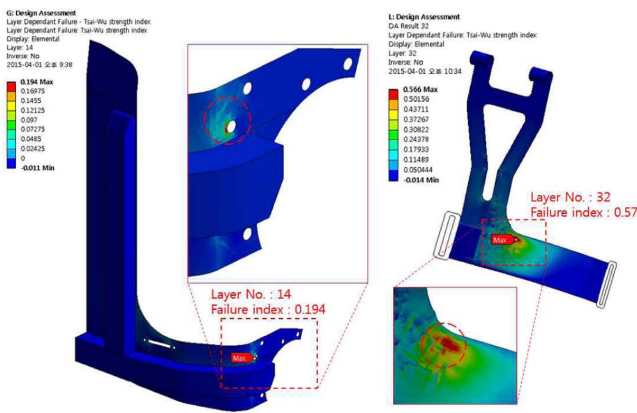


Fig. 17. Failure index of main and femoral frame using Tsai-Wu failure criteria

프레임에 대한 구조해석 결과를 나타내었으며, (1)은 최대 변형으로 회전 미끄럼 베어링 영역에서 최대 4.6 mm의 변형이 계산되었다. (2)는 최대 등가 응력을 나타내었으며, 알루미늄 밴드 인서트에 대해 출력 하였다. 최대값 193 MPa로 항복 강도인 276 MPa 이내로 계산되었다.

CFRP 복합재 적층판에 대한 파손평가를 위해서는 파손 경향이 일차원 혹은 이차원이 아니므로 파손평가는 금속 재질과는 달리 단순히 최대응력만으로 평가할 수 없다. 적층판에 대한 파손 예측은 매우 다양한 파손 기준식이 제시 된다.

본 논문에서는 층간 접근방법(ply by ply approach)에서 텐서다항기준식(Tensor polynomial criteria)중 대표적인 Tsai-Wu 파손 기준식을 적용하였다. Fig. 17의 왼쪽은 메인 프레임과 오른쪽은 대퇴부 프레임에 최대 파손 지수의 출력 층 번호와 파손 지수를 나타내었다. 각 프레임에 파손 지수 분석 결과에서 보듯이 파손 지수 1 미만으로 안전성을 확보한 것으로 확인되었다.

4. 착용형 로봇의 제작

해석 평가를 통해 구조적 안전성이 확보된 착용형 로봇

에 대한 제작을 수행하였다. 구동계를 구성하는 알루미늄은 기계가공을 통해 제작하였으며 환경 요인에 인한 부식 방지를 위해 산화피막(anodizing) 처리하였다. 탄소섬유/에폭시 복합소재 프레임의 제작은 단일몰드를 사용하였으며 우수한 성능을 보장받을 수 있는 오토클레이브(autoclave) 공법을 사용하였다. 중공형 알루미늄 프레임, 금속재 회전 미끄럼 베어링, 인서트 프레임 등이 포함된 이중부재가 결합된 형태이므로 동시성형을 통해 제작하였다. 제작된 제품의 접착층 분리(debonding)를 최대한 방지하기 위하여 이중 부재 간 접착부에 필름타입의 FM73 접착층(FM73 adhesive film)을 삽입하였다. 탄소섬유/에폭시 적용 복합재 프레임의 제작과정은 Fig. 18과 같다.

제작 공정은 첫 번째로 동시 성형 시 삽입되는 알루미늄 프레임 및 인서트와 금형에 대한 제작 후 설계된 치수에 따라 소재를 제단하였다. 설계된 적층정보에 따라 제단된 소재를 금형에 적층하고 내부에 삽입되는 알루미늄 파트를 배치하였다. 적층이 완료된 상태에서 진공백을 통해 내부에 발생하는 기공(void)을 제거하고 압착(compaction)시킨 후 오토클레이브를 통해 성형하게 된다. 성형이 완료된 부품을 탈형하고 표면 처리하여 제작을 완료하였다. 오토클레이브 성형은 Fig. 19에 나타난 온도-압력 이력곡선에 따라 수행하였고, Fig. 20은 탄소섬유/에폭시 적용 복합재가 적용된 메인 프레임과 대퇴부 프레임의 제작과정을 나타

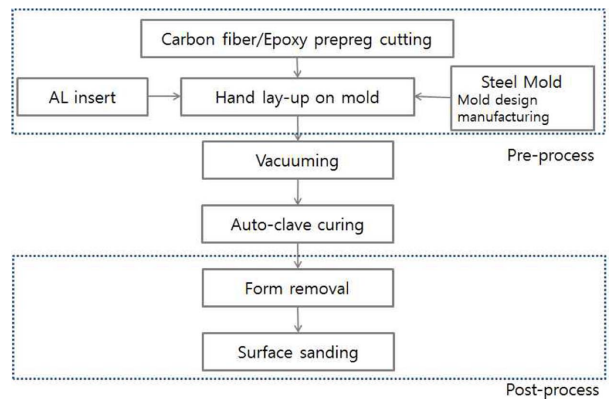


Fig. 18. Manufacturing procedure of CFRP frames

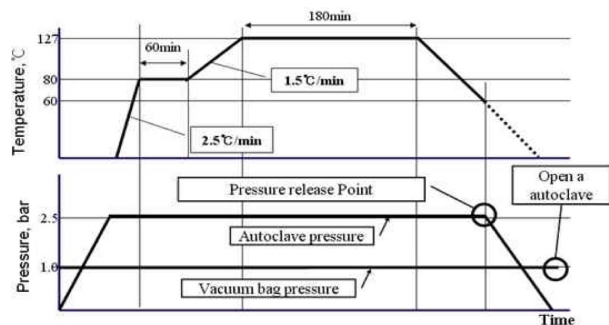


Fig. 19. Autoclave curing history

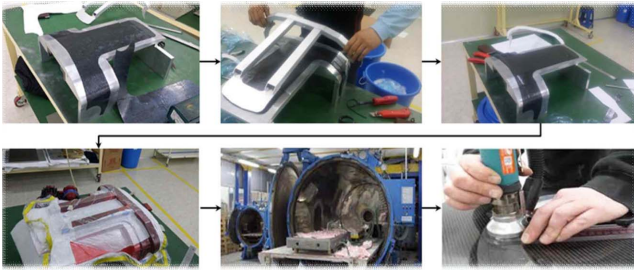


Fig. 20. Manufacturing procedure for composite frame



Fig. 21. Development of the lightweight wearable robot

내었다. Fig. 21은 최종 제작된 메인프레임과 대퇴부 프레임 그리고, 최종 제작된 경량 착용형 로봇을 나타내었다.

5. 결 론

착용형 근력 지원로봇에 대한 개발 과정 중 착용자의 작업 효율을 높이기 위하여 경량 착용형 로봇의 프레임의 경량화가 중요한 문제로 대두되었다. 일반적인 실용 로봇의 개발에서 경량화를 위한 연구 개발이 현재 조금씩 이루어지는 단계이지만, 대부분 구성 부품의 감소 또는 금속재 프레임의 위상최적화 설계를 통해 최적화 하는 수준이다. 본 연구에서는 착용형 로봇에 대하여 비강성/비강도가 높은 복합소재를 적용한 로봇 프레임의 설계, 해석 그리고 제작을 수행하였으며, 기존 금속재 프레임을 대체하여 1차 제작품 무게 15 kg에서 경량 복합소재를 사용하여 7 kg으로 경량화를 구현할 수 있었다. 착용형 근력 지원로봇의 개발에서 경량구조를 적용하여 사용자의 착용여건(휴대성, 미려도, 무게 감소로 인한 피로감 저하 등)이 개선되는 것을 확인하였고, 중량 감소로 인한 배터리 용량의 증대의 효과도 얻을 수 있었다. 또한, 금속재를 가공하여 외골격 형태로의

제작은 착용감을 향상 시키는 제작이 어렵지만, 경량 복합소재의 경우 성형성이 우수하여 사용자의 외골격 형태로 제작이 가능하며, 이를 통하여 착용형 로봇의 경우 착용 쾌적성이 증대되는 것을 알 수 있었다.

향후 프레임에 구동기를 일체화 하여 경량, 단순 그리고 미적효과를 위하여 외골격 동력 일체화 프레임 개발을 복합소재를 적용하기 위한 설계, 해석평가 기법에 대한 연구를 지속할 예정이다.

후 기

본 연구는 POSCO가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Vitrechova, S., Kutilek, P., and Jirina, M., "Wearable Lower Limb Robotics: A Review," *Journal of Biocybernetics and Biomedical Engineering*, Vol. 33, No. 1, 2013, pp. 96-105.
- Low, K.H., "Robot-assisted Gait Rehabilitation: From Exoskeleton to Gait Systems," *Defense Science Research Conference and Expo (DSR)*, 2011.
- Kim, W.S., Lee, H.D., Kim, D.W., Han, J.S., and Han, C.S., "Mechanical Design of the Hanyang Exoskeleton Assistive Robot(HEXAR)," *14th International Conference on Control, Automation and Systems*, Korea, 2014.
- Shin, K.B. and Lee, S.J., "Manufacture of Composite Railway Carbody Using Auto-Clave Curing Technology," *Journal of Composite Research*, Vol. 18, No. 2, 2005, pp. 52-58.
- Lee, J.Y., Jeon, J.S., Shin, K.B., Lee, S.J., and Jeong, J.C., "Evaluation of the Structural Performances of Sandwich Panels for the Material Selection of the Low Floor Bus Bodyshell," *Autumn Conference of Korean Society for Composite Materials*, pp. 176-180, 2006.
- Lee, J.Y., Shin, K.B., and Jeong, J.C., "Simulation of Low Velocity Impact of Honeycomb Sandwich Composite Panels for the BIMODAL Tram Application," *Journal of Composite Research*, Vol. 20, No. 4, pp. 42-50.
- Nordin, M. and Franklerl, V.H., "Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System(2nd edition)," *Philadelphia: Lea and Febier*, 1986.
- ASTM D3039/D3039M-14, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," *American Society for Testing and Materials*, 2014.
- ASTM D3410/D3410M-03, "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading," *American Society for Testing and Materials*, 2003.
- ASTM D5379/D5379M-12, "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method," *American Society for Testing and Materials*, 2012.