

# 어깨 근력보조를 위한 엑소수트 설계

## Design of Exo-Suit for Shoulder Muscle Strength Support

전 광 우<sup>1</sup> · 김 태 환<sup>2</sup> · 김 승 우<sup>2</sup> · 김 정 준<sup>2</sup> · 정 현 준<sup>†</sup>  
Kwang-Woo Jeon<sup>1</sup>, TaeHwan Kim<sup>2</sup>, SeungWoo Kim<sup>2</sup>,  
JungJun Kim<sup>2</sup>, Hyun-Joon Chung<sup>†</sup>

**Abstract:** In this study describes the design of Exo-suit to assist those who work in unstructured positions. The present study aimed to analyze various types of work, especially those performed in unstructured postures by heavy industry workers. Based on the motion capture analysis results, an attempt was made to develop a shoulder muscle-assistive Exo-suit capable of assisting a wearer who is working using shoulder muscles. In the present study, as the first step of developing a shoulder muscle-assistive Exo-suit, different working scenarios were simulated, and the corresponding motion data were estimated using motion capture devices. The obtained motion data were reflected in the design of the Exo-suit. The main structure of the shoulder muscle-assistive Exo-suit was made of a carbon fiber-reinforced composite to obtain the weight reduction. The shoulder muscle assistive Exo-suit was designed to fully cover the range of motion for workers working in unstructured postures.

**Keywords:** Exo-suit, Shoulder Muscle Assistive, Wearable Suit, Composite Materials

### 1. 서 론

우리나라는 최근 유례없는 출산율의 하락과 기대수명 증가로 인해 생산가능 인구의 비중은 줄어들고 고령인구 비중이 늘어나는 현상을 맞이하고 있다. 이에, 산업계에서는 생산인구 감소에 따른 대책으로 정년연장 등을 방안으로 마련하고 있는 실정이다<sup>1)</sup>. 우리나라의 65세 이상 고령화 인구 비율은 2015년 12.1%에서 2030년 24.3%로 초고령 사회로 진입을 앞두고 있다. 특히, 경제적 활동을 수행하는 고령 노동자의 경우 2010년 이후 지속적으로 상승하고 있으며 이는 고령화 사회의 구조적 특징으로 볼 수 있다<sup>2)</sup>.

우리나라는 국제 표준산업분류(ICIS)의 C에 해당하는 제조

업 기반의 산업이 발달한 실정이며, 이러한 제조업은 노동 집약적 생산에 기반을 두고 있다. 로봇 및 자동화 시스템을 통한 제조업의 생산 자동화 프로세스를 구축하여 노동 집약적 산업 구조를 탈피하고자 하는 노력을 수행하고 있으나 체계화 되지 않은 생산 프로세스의 경우 로봇 및 자동화 시스템을 적용하는 것에 어려움이 있다. 이에, 사람의 노동력을 바탕으로 생산 과정을 수행하는 분야의 경우 열악한 근로 환경과 과도한 근로 부담으로 인한 산업재해가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 로봇 및 자동화 시스템의 도입이 어려운 산업분야의 경우 노동자의 근력을 보조하는 역할을 수행하는 웨어러블 로봇이 대안으로 대두되고 있다. 웨어러블 로봇은 구조에 따라 견고한 외피를 갖는 외골격형과 옷감(textile), 인공근육 등의 유연 구조체의 웨어러블 슈트로 구분된다<sup>3)</sup>. 외골격형 웨어러블 로봇은 1960년대 GE 연구소의 주관으로 미해군의 지원을 받아 개발한 Hardiman를 시작으로 국방, 산업분야에 다양한 형태로 개발되었다<sup>4)</sup>. 외골격형 웨어러블 로봇은 구동 방식에 따라 능동형/수동형으로 구분되며 능동형의 경우 모터, 감속기, 제어기, 배터리, 센서등의 장치를 통해 근력을 보조하는 방식이며 수동형의 경우 탄성체를 통해 근력을 보조하는 방식으로

Received : Oct. 31. 2022; Revised : Dec. 5. 2022; Accepted : Dec. 8. 2022

※ This research was financially supported by the Institute of Civil Military Technology Cooperation funded by the Defense Acquisition Program Administration and Ministry of Trade, Industry and Energy of Korean government under grant No. 19-CM-GU-01

1. Seniro Researcher, KIRO, Pohang, Korea (jeonkw@kiro.re.kr)

2. Researcher, KIRO, Pohang, Korea (ksw6035, kthwan, jkim@kiro.re.kr)

† Principal Researcher, Corresponding author: Intelligent Robotics R&D Division, KIRO, Pohang, Korea (hjchung@kiro.re.kr)

개발되고 있다<sup>5,8)</sup>. 이때, 능동형 외골격 웨어러블 로봇의 경우 구동기 및 전력을 구성하는 부품의 무게 등에 의해 높아진 시스템 자중을 착용자에게 전가시키는 단점을 지닌다. 이러한 단점을 개선하기 위해 별도의 구동기 및 배터리 시스템이 장착되지 않는 수동형 외골격 웨어러블 장치가 개발되고 있는 실정이며, 경량화에 초점을 맞춰 사용자가 필요로 하는 국부 위치의 근력만 보조하는 모듈형 근력지원 엑소수트의 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>9)</sup>.

이에, 본 논문에서는 제조업 중 높은 노동 강도와 열악한 환경에 빈번히 노출되는 중공업 분야 근로자를 대상으로 비정형 자세 작업을 분석하고 작업자의 근력을 보조 할 수 있는 어깨 근력보조 엑소수트를 개발하고자 하였다. 중공업 분야에서 발생하는 비정형 작업은 선박 및 플랜트 구조물의 용접(Welding) / 연삭(Grinding) 작업으로 좁은 환경과 자세로 인해 작업자의 근피로도가 높은 것으로 알려져 있다. 특히, 선박의 하부나 해양 플랜트 내부 구조물 용접 및 연삭 작업의 경우 작업자가 공구의 하중을 장시간 지지하는 오버헤드(Overhead) 작업이 주로 수행되고 있다. 이에, 본 논문에서는 근로자의 어깨 근력보조를 위한 엑소수트 개발을 위해 작업조건을 모사하고 이를 모션캡처 장치를 통해 작업 시 발생하는 모션정보와 소요토크를 산출하였다. 산출된 모션정보 및 소요토크는 어깨 근력지원 장치의 설계에 반영하였다. 설계된 근력지원 엑소수트는 근로자의 취사선택에 따라 근력보조 모드와 자율 운동 모드로 전환이 가능하도록 설계하였다. 어깨 근력보조 장치는 비정형 작업을 수행하는 근로자의 관절 가동범위(ROM, Range of Motion)를 만족하며 작업 시 요구되는 토크를 발생시켜 근로자의 근지구력 향상에 기여하도록 개발하였다.

## 2. 어깨 근력보조 엑소수트 적용 환경 분석

국내의 산업구조는 제조업 기반의 건설, 금속가공, 자동차 산업, 중공업 등의 노동집약 형태의 산업이 발전해 왔다. 그러나, 국내 생산인구의 고령화에 따라 근로자의 평균 연령이 증가하고 있는 현 시점에서 노동집약적 산업구조는 근로자의 기피 및 근골격계 부상의 위험성을 갖는다. 특히, 선박을 건조하는 중공업 분야의 경우 환경의 제약에 따라 자동화 및 로봇 시스템의 적용이 불가능한 경우가 발생하며 인력을 통한 비정형 작업을 수행하는 경우가 다수이다. 이에, 본 논문에서는 대형 선박 제조를 수행하는 중공업 분야에서 발생하는 비정형 작업에 대하여 분석하고 이를 바탕으로 어깨 근력지원 엑소수트 시스템이 적용 될 수 있는 방안을 고려했다.

근력지원 엑소수트는 근로자의 취사선택에 따라 근력보조 모드와 자율 운동 모드로 전환이 가능하도록 설계하였다. 어

깨 근력보조 엑소수트는 비정형 작업을 수행하는 근로자의 관절 가동범위(ROM-Range of Motion)를 만족하며 작업 시 요구되는 토크를 발생시켜 근로자의 근지구력 향상에 기여하도록 개발하였다.

### 2.1 중공업 분야 적용 환경 분석

어깨 근력지원 엑소수트 시스템을 개발하기 위해 중공업 현장 방문을 통해 어깨 근력지원이 요구되는 작업을 분석하고 이를 통해 적용 가능성을 평가하였다. 현장 방문을 통한 비정형 작업분석은 삼성중공업을 대상으로 수행하였으며, N,000Ton TEU(컨테이너 선박) 선박 제조 공정을 대상으로 하였다. 대형 선박 제작은 외부에서 블록단위의 구조체로 제작되어 최종적으로 블록들 간의 조립이 이루어지게 된다. 이때, 각 블록들 간의 조립은 용접을 통해 수행되고 용접으로 인해 발생하는 비드는 연삭을 수행한다. 이러한 블록간의 조립에 수행되는 용접과 연삭작업은 지상 도크(dock)에서 수행되며 도크의 공간적 제약에 의해 인력을 통해 수행된다. 선박 블록단위 조립을 위한 용접 및 연삭 작업에 있어 근로자의 어깨 근력보조가 필요한 구간은 크게 3가지로 구분 할 수 있다. 첫번째로는 선저 구간(Case 1), 두번째로는 선수 및 선미의 경사구간(Case 2), 세번째로 선체 벽면 구간으로 구분되며(Case 3), 선저구간의 경우 근로자의 머리 위 선체의 하부를 작업하는 구간으로 가장 높은 피로감을 나타낸다. [Fig. 1]은 선박제조 시 발생하는 구간별 작업 모션에 대해 나타낸다.

### 2.2 환경모사 인체동작 분석

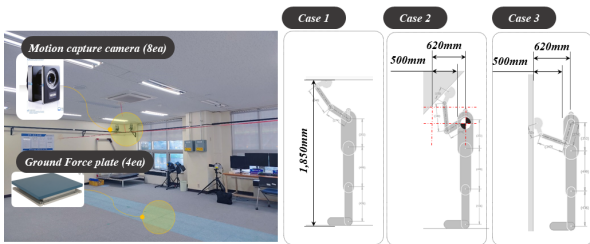
선박 건조 과정에서 발생하는 비정형 자세의 현장 분석을 통해 도출된 3가지 모션에 대하여 모션캡처 장치를 이용한 동작 분석을 수행하였다. 모션캡처는 상부에 설치된 Vicon社의 모션 캡처 카메라(motion capture camera) 8대와 하부에 설치된 4대의 지면반력기(ground force plate)로 구성된다. 모션캡



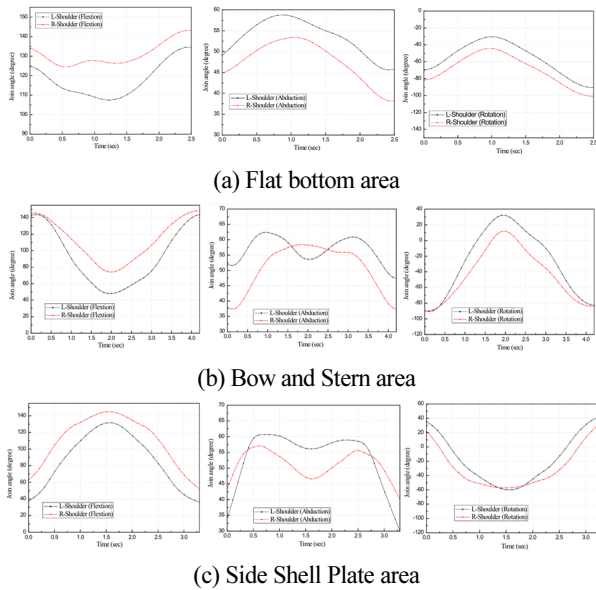
[Fig. 1] Working motion for shipbuilding of various section

처는 현장에서 분석된 3가지 모션을 모사하기 위해 [Fig. 2]와 같은 기준을 통해 수행하였으며, 작업 시 근로자에게 가해지는 외력을 모사하기 위해 현장에서 사용되는 공구(2.4 kg)를 소지하고 모션캡처를 수행하였다.

[Fig. 3]과 [Table 1]은 3가지 작업 자세를 바탕으로 모션 캡처를 통해 도출된 어깨 관절의 운동 범위를 나타낸다. [Fig. 3]의 (a)는 선저 구간에서의 어깨 관절 운동 범위를 나타내며, [Fig. 3]의 (b)는 선수 및 선미의 경사구간, [Fig. 3]의 (c)는 선체 벽면 구간 작업 시 작업자의 어깨 관절 운동 범위를 나타낸다. 이때, 인체에 가장 부하가 높게 발생하는 굴곡(Flexion)과 신전(extension) 방향의 어깨 관절의 각도는 Case 2와 Case 3에서 각



[Fig. 2] Test set-up for motion capture analysis



[Fig. 3] Results of motion capture for shoulder joint angle

[Table 1] Results of shoulder joint angle

Test results	Left shoulder joint			Right shoulder joint		
	x	y	z	x	y	z
Flat bottom	13.14°	<b>26.98°</b>	59.95°	15.14°	<b>18.77°</b>	56.41°
Bow / Stern	14.88°	<b>95.74°</b>	58.51°	21.00°	<b>74.01°</b>	75.04°
Side shell	31.55°	<b>95.77°</b>	16.37°	17.79°	<b>93.48°</b>	20.16°

x : Abduction/Adduction, y : Flexion/Extension, z : Rotation

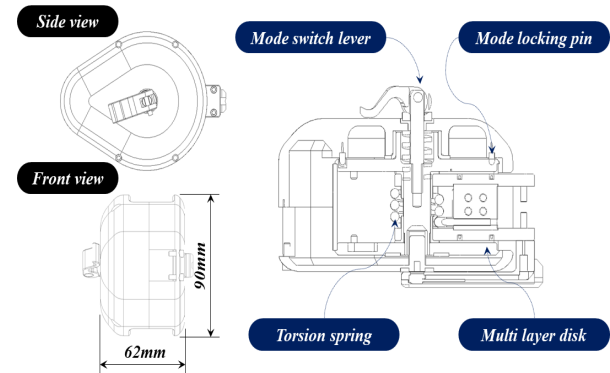
각 95.74°와 95.77°로 나타남을 확인하였으며, Case 1의 경우 26.98°로 나타남을 확인하였다.

### 3. 어깨 근력보조 엑소수트 설계

#### 3.1 탄성 모듈 설계

적용 환경 분석을 통해 도출된 인체 동작범위를 바탕으로 근로자가 사용이 가능한 어깨 근력지원 엑소수트를 설계하였다. 어깨 근력지원 엑소수트는 보조력 발생시키는 탄성 모듈, 시스템을 지지하는 경량화 구조체, 착용자와 엑소수트를 연결시키는 착용형 하니스로 구성하였다. 본 연구에서는 비틀림 스프링이 갖는 탄성력을 바탕으로 어깨 근력을 보조 할 수 있는 탄성 모듈을 설계하였으며, 시스템의 전체 무게를 저감시킬 수 있도록 복합재를 사용하여 시스템 구조체를 구성하였다.

[Fig. 4]는 설계된 탄성 모듈의 형상을 나타낸다. 탄성 모듈은 내부의 비틀림 스프링과 연결된 디스크를 통해 사용자에게 보조력을 전달하도록 구성하였다. 어깨 근력보조 엑소수트에 적용된 탄성 모듈의 경우 다관의 디스크와 이에 연결된 비틀림 스프링을 바탕으로 외부에 장착된 모드전환 레버를 통해 작동되며 보조력을 필요로 하는 경우에 한하여 비틀림 스프링과 연결된 디스크가 구조체에 결합되도록 설계를 수행하였다. 설계된 근력지원 모듈은 두가지 모드에 따라 상이한 동작 범위를 갖는다. 보조력을 필요로 하지 않는 자유동작 모드에서는 최대 195°의 회전반경을 갖으며, 보조력 발생 모드에서는 사용자가 설정한 위치에서부터 60°의 회전 반경을 갖도록 구성하였다. 탄성 모듈에 적용된 비틀림 스프링은 SUS304WPA 재질을 사용하였으며, 4 mm의 선경에 20 mm의 내경을 갖도록 구성하였다. 이때, 권선은 4.4이며, 최종 비틀림 각도는 60°가 되도록 구성하였다. 설계된 비틀림 스프링의 최대 하중은 종단에서 4.47 Nm 가 발생하도록 구성하였다. 비틀림 스프링이 적용된 탄성 모듈은 각 어깨 관절에 부착되며 최대 8.94 Nm



[Fig. 4] Elastic module for shoulder assistive Exo-suit

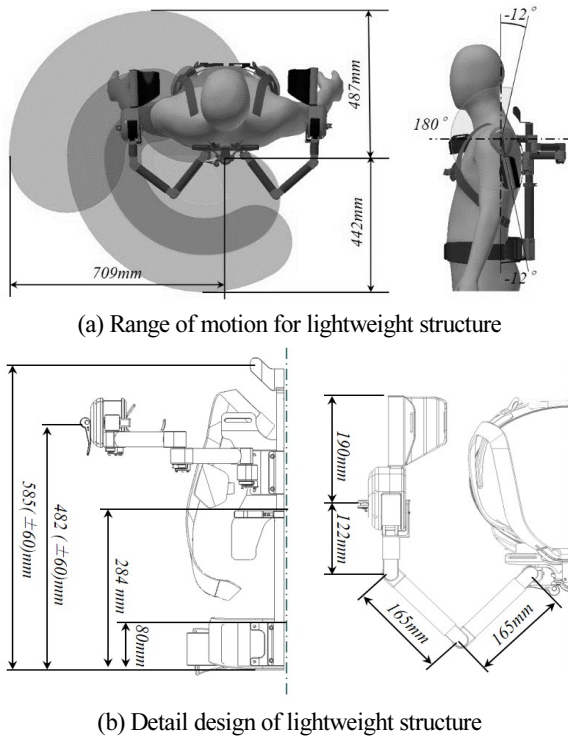
의 보조력을 전달 받을 수 있도록 구성하였다.

### 3.2 경량화 구조체 설계

어깨 근력지원 엑소수트를 구성하는 구조체는 시스템 대부분의 무게를 차지하고 있어 경량화가 요구된다. 특히, 사용자가 착용하는 근력지원 엑소수트의 경우 시스템 자체 자중이 과다할 경우 근력지원의 효과가 저감되며 사용자의 피로도가 증가한다. 이에, 어깨 근력보조 엑소수트의 구조물은 대표적인 경량화 소재로 알려진 탄소섬유강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced plastic)를 사용하여 구성하였다.

근력보조 엑소수트를 구성하는 경량화 구조체는 사용자의 자유도를 제한하지 않는 가동범위(ROM)을 만족하여야 한다. 이에, 모션캡처를 통해 도출된 사용자의 관절 가동범위와 경량화 구조체 구성에 따른 근력지원 엑소수트의 가동범위를 [Fig. 5]의(a)와 같이 확인하였다. 구성된 경량화 구조체의 경우 모션캡처를 통해 확인된 사용자의 동작범위와 일반적인 인체의 동작범위를 모두 만족 할 수 있도록 설계를 수행하였다. [Fig. 5]의 (b)는 동작범위를 반영한 경량화 구조체 설계 사양을 보여준다.

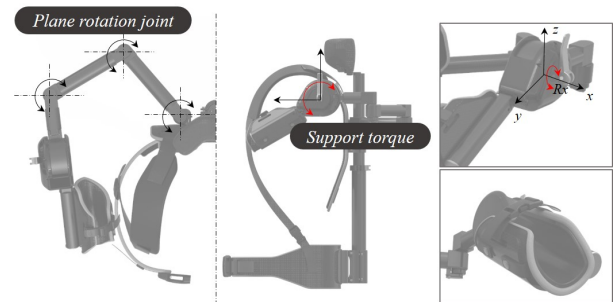
일반적으로 어깨 구조는 구형태의 상완골이 견갑골에 정합된 형태로 굴곡(Flexion), 신전(Extension), 내회전(Internal rotation)을 통해 3차원 운동이 가능하도록 구성된다<sup>10)</sup>. 이에, 어깨 근



[Fig. 5] Configurations of lightweight structure

력보조를 위해 설계된 엑소수트의 경우 사용자의 편의성 증대를 위해 인체와 체결되는 말단에 3차원 궤적 생성이 가능한 최소한의 관절을 갖추어야 한다. 본 연구에서 개발되는 어깨 근력보조 엑소수트의 경우 중력방향으로 발생하는 공구의 지속적인 자중과 비정형 자세로 인해 발생하는 근 피로도 저감을 위해 중력방향의 근 보조력 생성이 가능한 형태로 구성되었다. [Fig. 6]은 어깨 근력보조 엑소수트의 자유도를 나타낸다. [Fig. 6]의 좌측은 어깨 관절의 운동을 통해 발생하는 평면이동( $T_x, T_y$ )을 구현하기 위한 관절의 형태를 보여준다. 평면이동을 위해 구성된 관절은 3개의 다관절로 구성되며 각각 저마찰 부싱(Bushing)을 적용하여 회전( $R_z$ )이 가능하도록 구성하였다. 중력방향의 회전( $R_x$ )은 어깨 관절과 동일한 평면에 위치한 탄성 모듈을 통해 회전이 가능하도록 구현하였다. 어깨 근력보조 엑소수트에 적용된 다관절과 중력보상 모듈을 통해 구성된 자유도의 경우 어깨의 굴곡과 신전으로 발생하는 움직임을 추종 할 수 있으며 내회전의 경우 [Fig. 6]의 우측과 같이 인체-엑소수트 간 체결부에 유격을 통해 자유롭게 회전하도록 구성하였다. 이에, 평면회전 다관절과 중력방향 탄성 모듈로 구성된 어깨 엑소수트의 자유도가 어깨 관절의 운동을 통해 발생하는 3차원 궤적을 추종 할 수 있다.

경량화 구조체의 경우 사용자의 신체적 차이를 고려하여 대한민국 30대 남성 표준 신장(174 cm)을 기준으로 설계하고 신장의 변화에 따른 착용 용의성을 확보하기 위해 구조체의 길이 변화가 설계치수를 기준으로  $\pm 60$  mm가 가변되도록 구성하였다. 시스템을 구성하는 구조체 중 복합재료가 적용된 부위는 허리 지지대, 등 지지대, 경추 지지대와 시스템의 하중을 지지하는 주 구조물, 시스템의 자유도를 구성하는 링크 구조물로 구성된다. 복합재료를 적용한 구조체의 경우 섬유 방향에 따라 설계자가 강성 및 강도를 조절 할 수 있는 이점이 있고 단일방향 섬유를 주 하중방향에 맞춰 설계 할 경우 비교적 적은 소재의 사용으로도 강도 및 강성을 확보 할 수 있는 장점을 지닌다<sup>11)</sup>. 이에, 본 경량화 구조체의 경우 주 하중방향에 따라 T700 단일방향 탄소섬유 프리프레그(uni-direction carbon fiber pre-preg)를 적용하고 적용하였고 전단응력 및 면내파손을



[Fig. 6] Degree of freedom for shoulder assistive Exo-suit

[Table 2] Stacking sequence of composite structure

Part	Composite structure	
	Stacking sequence	Mat
Main structure	$[0^{\circ}_2/90^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}_2]^T$	T700 UD/T300 Woven
Back holder	$[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]^S$	T700 UD/T300 Woven
Waist holder	$[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]^S$	T700 UD/T300 Woven
Neck holder	$[0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}_2/0^{\circ}]^S$	T700 UD/T300 Woven

방지하기 위해 T300 직조형 탄소섬유 프리프레그(woven carbon fiber prep-reg)를 사용하여 내면 및 외면에 적층하여 구조체를 구성하였다. [Table 2]는 복합재가 적용된 경량 구조체의 정보를 보여준다.

### 3.3 경량화 구조체 안전성 평가

어깨 근력보조 엑소스uits 적용 경량 구조체의 설계에 따른 제작에 앞서 구조적 안전성을 평가하였다. 일반적으로 금속재와 달리 이방성(anisotropy) 특성을 지닌 복합재료는 모재균열(matrix cracking), 층간분리(delamination), 섬유파손(fiber breakage) 등과 같은 다양한 형태의 파손이 발생 할 수 있다. 따라서, 파손 평가 시 복합재료의 파손 특성이 반영될 수 있는 평가 기법을 사용하여야 한다. 대표적인 복합재의 파손평가 기법인 Tsai-Wu는 텐서다항식 기준식으로 파손모드의 예측은 어려우나 파손의 발생 유무를 평가 할 수 있어 구조 안전성 평가에 널리 활용되고 있다. 어깨 엑소스uits를 구성하는 구조체 중 가장 높은 하중이 적용되는 주 구조물(Main structure)에 대하여 유한요소 해석을 통한 구조 안전성 평가를 진행하였다. 어깨 엑소스uits의 주 구조물은 원형의 파이프 형태의 상부 구조물과 하부 구조물로 구성된다. 구조 안전성 평가는 주 구조물에 적용되는 하중에 대한 복합재의 파손을 평가하기 위해 Tsai-Wu 파손 평가 지수를 통해 수행하였다. [Table 3]은 복합재 구조물에 적용된 재료의 물성을 나타낸다.

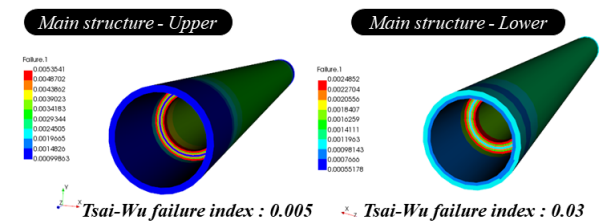
구조 안전성 평가는 상용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 2020 R2를 사용하였다. 해석 조건은 어깨 엑소스uits의 탄성 모듈에서 발생하는 최대 모멘트를 주 구조물에 MPC(multi point constrain) 구속조건을 통해 인가하였다. 해석에 사용된 유한요소 모델은 상부 주 구조물의 경우 43,233개의 질점과 32,871개의 요소를 갖도록 구성하였으며, 하부 주 구조물의 경우 61,608개의 질점과 44,674개의 요소를 갖도록 구성하였다. 유한요소 모델의 각 구조물의 하부에 체결되는 영역을 고정하여 해석을 수행하였다. [Fig. 7]은 유한요소 해석을 통한 복합재 구조물의 안전성 평가 결과를 보여준다.

어깨 근력보조 엑소스uits 적용 복합재 구조물의 안전성 평

[Table 3] Material properties of composite structure

Mat	T700 UD	T300 Woven	Mat	T700 UD	T300 Woven
$E_x$	130,000	61,500	$X_t$	2,000	850
$E_y$	10,000	61,330	$Y_t$	56	850
$E_z$	10,000	61,330	$Z_t$	56	50
$\nu_{xy}$	0.285	0.125	$X_c$	2,000	425
$\nu_{yz}$	0.02154	0.28	$Y_c$	56	425
$\nu_{zx}$	0.02154	0.28	$Z_c$	56	170
$G_{xy}$	5,060	3,730	$S_{xy}$	72	210
$G_{yz}$	3,850	3,000	$S_{yz}$	40	105
$G_{zx}$	5,060	3,000	$S_{zx}$	72	105

Unit : MPa



[Fig. 7] Structural integrity results of composite structure



[Fig. 8] Configurations of Exo-suit

가 결과 파손을 결정하는 Tsai-Wu 파손 지수가 1 이하인 0.03과 0.005로 나타나 구조적 안전성을 확보하였음을 확인하였

다. 이에, 설계안에 따라 어깨 근력보조 엑소수트에 적용될 경량 구조체 제작을 수행하였다. 경량화 구조체 제작은 성형 제품의 품질 및 성능이 우수한 오토클레이브(autoclave) 공법을 사용하여 제작하였다. 오토클레이브 공법은 제작품 형상에 따라 적층된 적층판(laminate)을 진공백(vacuum back)에 위치하고 챔버에 일정 온도(125°C)와 압력(6 bar)을 가해 성형하였다. 제작이 완료된 경량화 구조체를 바탕으로 사용자가 착용하기 위한 하니스를 구성하였다. 착용형 하니스는 사용자의 피로감을 저감시키기 인체와 접촉하는 부위에 15t~30t 가량의 충진재를 부착한 형태로 제작하였으며 사용자의 흉부와 복부에 각각 버클 형태의 체결점을 구성하였다. 이때, 착용형 하니스는 사용자의 신체 치수에 따라 조절이 가능한 형태로 구성하였다. 제작이 완료된 탄성 모듈, 경량화 구조체 그리고 착용 하니스를 통합하여 [Fig. 8]과 같이 착용형 근력지원 엑소수트 시스템을 구성하였다. 착용형 근력지원 엑소수트 시스템은 4.8 kg의 중량을 갖으며 각 탄성 모듈 당 4.5 Nm의 최대 보조력을 발생함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문은 산업현장에서 발생하는 비정형 자세 작업자의 어깨 근력보조를 위한 엑소수트를 개발하였다.

어깨 근력보조 엑소수트 개발을 위해 실제 선박제조 공정에서 발생하는 근로자의 비정형 자세에 대하여 분석하고 이를 바탕으로 설계요구사항을 도출하였다. 작업 환경 분석을 통해 도출된 3가지 비정형 자세에 대해 작업환경 모사 및 모션캡처를 통하여 비정형 자세 작업에서 발생하는 어깨 관절의 구동 범위를 산출하였다.

모션캡처를 통해 산출된 결과를 바탕으로 어깨 근력보조 엑소수트의 설계를 수행하였다. 어깨 근력지원 엑소수트는 탄성체를 이용한 수동형 탄성모듈을 갖으며, 탄성 모듈을 사용자 편의를 위해 보조력 발생 모드와 자유회전 모드로 전환이 가능하도록 설계하였다. 어깨 근력보조 엑소수트를 구성하는 구조체는 경량화 효과를 얻기 위해 탄소섬유 강화 복합재(T700 UD/T300 Woven)를 적용하여 설계하였다. 복합재가 적용된 경량 구조체는 유한요소 해석을 통해 구조적 안전성을 검증하였다.

제작이 완료된 어깨 근력지원 엑소수트의 경우 4.8 kg의 중량을 갖으며 사용자에게 각 어깨 관절당 4.5 Nm의 보조력을 전달할 수 있도록 제작되었다. 제작된 어깨 근력지원 장치는 비정형 자세로 장시간 근로하는 노동자에게 근력을 보조함으로써 근골격계 부상 및 생산성 향상에 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### References

- [1] C. H. Lee, "The Impact of Population Aging and Changing Economic Activity of Older Males on the Labor Force Structure," *Journal of Korean Economics Studies*, vol. 25, pp. 5-44, Jun., 2009, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01214829>.
- [2] J. S. Kim, and H. Y. Cho, "Another View on the Social Discourse of Productive Aging in Korea," *Journal of Social Science*, vol. 24, no. 2, pp. 7-28, 2017, [Online], <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002230711>.
- [3] S. H. Bae, J. G. Shin, I. S. Huh, and S. H. Kim, "A Study on Qualitative Usability Assessment Guideline of the Wearable Industrial Robots for Interacting with the Upper Extremities," *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, vol. 39, no. 2, pp. 129-141, Apr., 2020, DOI: 10.5143/JESK.2020.39.2.129.
- [4] General Electric Company, "Research and development prototype for machine augmentation of human strength and endurance," *Materials Science*, May., DOI: 10.21236/ad072 4797.
- [5] Y. H. Yoon, "Back Support Exoskeleton Robot for Soldiers: Military Applicability Analysis," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 35, no. 10, pp. 925-931, Oct., 2018, DOI: 10.7736/KSPE.2018.35.10.925.
- [6] A. B. Zoss, H. Kazerooni, and A. Chu, "Biomechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 11, no. 2, pp. 128-138, Apr., 2006, DOI: 10.1109/TMECH.2006.871087.
- [7] S. -S. Yun, B. B. Kang, and K. -J. Cho, "EXO-Glove PM: An Easily Customizable Modularized Pneumatic Assistive Glove," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1725-1732, Jul., 2017, DOI: 10.1109/LRA.2017.2678545.
- [8] L. Gerez, J. Chen, and M. Liarokapis, "On the Development of Adaptive, Tendon-Driven, Wearable EXO-Gloves for Grasping Capabilities Enhancement," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 422-429, Apr., 2019, DOI: 10.1109/LRA.2019.2890853.
- [9] A. Moyon, E. Poirson, and J. -F. Petiot, "Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations," *28<sup>th</sup> CIRP Design Conference*, Nantes, France, pp. 284-289, 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.028.
- [10] S. W. Jang and Y. S. Kim, "Three dimensional range of motion measurement method based on anatomical criteria posture for shoulder motion analysis," *Journal of Digital Contents Society*, vol. 21, no. 2, pp. 423-428, Feb., 2020, DOI: 10.9728/dcs.2020.21.2.423.
- [11] C. S. Hong, "Technology and Status of Composites Applications," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 34, no. 5, pp. 334-341, 1994, [Online], <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO199411919491664.page>.



**전 광 우**

2011 한밭대학교 기계설계공학과(학사)  
2013 한밭대학교 기계설계공학과(석사)  
2022~현재 경북대학교 기계공학과(박사과정)  
2015~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 국방 로봇, 시스템 최적화, 경량화 설계, 군집 로봇



**김 정 준**

2015 경희대학교 컴퓨터공학과(학사)  
2017 경희대학교 컴퓨터공학과(석사)  
2021~현재 UNIST 인공지능학과(박사과정)  
2017~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 컴퓨터 비전, 영상처리, 인공지능



**김 태 환**

2022 금오공과대학교 기계시스템공학과  
(학사)  
2022~현재 한국로봇융합연구원 연구원

관심분야: 바이오 로봇, 의료 로봇, 웨어러블 로봇



**정 현 준**

1996 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)  
2005 University of Iowa (석사)  
2009 University of Iowa (박사)  
2015 한국로봇융합연구원 선임연구원  
2021~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원  
/본부장

관심분야: 동역학, 최적화 알고리즘, 인공지능, 로보틱스



**김 승 우**

2021 영남대학교 기계공학과(학사)  
2022~현재 경북대학교 기계공학과(석사과정)  
2022~현재 한국로봇융합연구원 연구원

관심분야: 제조 로봇, 인체 착용 로봇