

• 특집 • 방산제품 설계 및 시험 IV

## 병사를 위한 허리 보조 외골격 로봇: 군 적용 가능성 분석

# Back Support Exoskeleton Robot for Soldiers: Military Applicability Analysis

윤여훈<sup>1,#</sup>  
Yeo Hun Yoon<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 국방과학연구소 제 5기술연구본부 (The 5th R&D Institute, Agency for Defense Development)  
# Corresponding Author / E-mail: harry.yoon8+sc@gmail.com, TEL: +82-42-821-4303  
ORCID: 0000-0001-7668-6799

KEYWORDS: Exoskeleton robot (외골격로봇), Back support device (허리 보조 기구), Wearable robot (착용형 로봇), Assist device (근력 보조 기구)

*In this paper, we examine the exoskeleton robot which can support the muscular strength of the soldiers handling the front load and its applicability in the military field. In fact, in the questionnaire survey on the military applicability of exoskeleton robots, many soldiers reported that they felt immensely fatigued due to the heavy load on their back during the operation. Most of the exoskeleton robots in the military have been developed to reduce fatigue during the mobility and movement of soldiers. Research on the exoskeleton robots to support the waist has been carried out with emphasis on its role in assisting performance of repetitive work in the industrial field or the medical field. To examine the studies on conventional back support exoskeleton robots and to find out the functions required to apply a back-support exoskeleton robot to soldiers, we have classified the existing back support exoskeleton robots into power type, supported body, waterproof grades, and others based on weight, purpose, working time, etc. Apparently, the shape of the exoskeleton robot suitable for application in the military field and the required performance is presented in the present work.*

Manuscript received: July 6, 2018 / Revised: August 31, 2018 / Accepted: September 7, 2018

### 1. 서론

최근 인체 능력을 증강시켜주거나 활동을 보조하는 외골격 로봇 연구가 활발히 진행되고 있다. 외골격 로봇은 주로 인체 움직임을 유도하거나 근력을 지원하는 형태로 개발되어 재활 분야<sup>1,2</sup>에서 활용되어 왔다. 최근에는 산업현장에서 외골격 로봇을 적용하려는 시도가 있었다. 산업 현장에서 외골격 로봇은 인체 유연성과 로봇 힘 증폭 장점을 결합하여 생산성 향상에 도움을 줄 수 있다. 산업현장에서 외골격 로봇은 주로 무거운 물체를 옮기기 위하여 근력을 지원해주거나 불편한 자세로 작업을 하는 노동자의 근골격계 부담을 덜어주는 형태로 개발되었다.<sup>3</sup>

이러한 외골격 로봇은 능동형과 수동형으로 분류할 수 있다. 능동형은 하나 이상의 구동기를 통하여 힘을 증강시켜주거나 인

체 관절부의 움직임을 돕는다. 이러한 구동기들은 전기 모터, 유압 실린더, 공압 실린더, 인공 근육 등과 같은 형태로 구성될 수 있다. 수동형은 능동 구동기 사용 없이 재료 성질을 사용하거나 스프링 또는 댐퍼 등과 같은 수동 요소로 인체 움직임에 따라 에너지를 저장한 후 필요로 하는 자세에서 도움을 줄 수 있다. 예를 들어 수동형 허리 보조 외골격 같은 경우 사람이 물건을 들어올리기 위하여 상체를 구부리는 에너지를 수동 요소에 저장하여 상체를 들어올리는 자세에서 도움을 줄 수 있다. 또한 외골격 로봇은 보조하는 인체 부위에 따라 분류할 수 있다. 다리를 보조해주는 하지형 외골격 로봇, 팔을 보조해주는 상지형 외골격 로봇, 팔과 다리를 모두 보조해주는 전신형 외골격 로봇 등으로 분류한다.<sup>4</sup>

이러한 외골격 로봇 중 군사 분야에서 연구되고 있는 형태는 주로 다리를 보조해주는 하지형 외골격 로봇이다. 병사 기동성과

근지구력을 보조하여 전투력을 향상시키는 목적으로 개발되고 있다.<sup>5</sup> 하지만 군 운용을 위해 효과적인 외골격 형태 로봇/장치에 대한 체계적인 조사 및 연구가 제시된 바 없어 현존하는 외골격 로봇/장치에 대한 기술을 실제 군사용으로 적용하기에는 아직 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 실제 병사들이 필요로 하는 외골격 로봇을 알아보고자 설문조사를 실시하였다. 이러한 설문조사 결과를 바탕으로 허리 보조 외골격 로봇이 실제 병사에게 적용 가능한지를 알아보고 기존 연구를 분석하여 군대에 적합한 구조를 알아보고자 한다.

## 2. 근력증강로봇 군 운용을 위한 설문조사

### 2.1 설문조사 개요

설문조사는 2018년도 1월 8일부터 12일까지 “근력증강 로봇 군 운용개념”이라는 제목으로 수행되었으며, 총 4개 부대를 대상으로 진행하였다. 신뢰성 있는 설문 결과를 위해서 응답 인원은 군 경력 5년에서 10년 이상인 구성원들로 섭외하였다. 본 설문에서는 임무 수행 현황 조사(9문항), 근력증강로봇 군 운용을 위한 설문 조사(4문항), 자유 기타 의견(1문항)으로 구성하고 근력증강로봇 유형(하지로봇형, 상하지로봇형)을 고려한 대표적인 운용분야 4가지를 중점적으로 선정하였다. 설문 인원은 A부대 20명, B부대 20명, C부대 20명, D부대 12명, 총 52명을 대상으로 수행되었다.

### 2.2 설문 조사 결과

설문 결과는 4개의 분야 중 허리 보조 외골격 로봇이 적용될 수 있는 분야인 보병 임무와 탄약 상하차/장애물 운반 및 설치 임무 수행 현황 조사 결과를 제시하였다. 모든 설문 문항에는 중복 응답을 할 수 있도록 하였고 임무 수행 현황 조사 경우 정성적, 정량적 분석을 위해 근력증강로봇에 요구되는 성능 부분과 임무 부하가 심한 신체 부위(물품) 및 동작 유형으로 분류하여 임무 유형별로 결과를 분석하였다.

### 2.3 설문 조사 결과 분석

Fig. 1 보병부대 공용화기 도수운반/화력지원 임무 설문 결과에서는 최대 20 - 30 kg 부하를 운용하는 인원이 19명 중 10명으로 가장 많으며 최대 부하 물품은 탄약이 가장 많음을 알 수 있었다. 이와 같은 부하를 운용하는 임무 지속시간은 4 - 16시간 사이가 가장 많았다. 또한 가장 힘들었던 동작 유형은 고 중량물 운반/적재이며 큰 부하를 받는 신체 부위는 손목이 12명으로 가장 많았고, 허리는 9명으로 그 다음으로 많았다. 이때 피로를 가장 많이 느낀다고 생각하는 신체 부위는 허리가 10명으로 가장 많았고, 허벅지와 무릎 관절이 8명으로 그 다음으로 많음을 알 수 있었다.

Fig. 2 탄약 상하차, 장애물 운반/설치, 교량가설 임무 설문 결과에서는 최대 50 kg 부하를 운용하는 인원이 37명중 16명으로 가장 많으며 최대 부하 물품은 탄약이 가장 많았다. 이러한 임무

지속시간은 4 - 12시간 사이가 가장 많았다. 또한 가장 힘들었던 동작 유형은 고 중량물 운반/적재이며 큰 부하를 받는 신체 부위는 허리가 25명으로 가장 많았으며 무릎 관절을 대담한 인원은 20명으로 그 다음으로 많았다. 이때 피로를 가장 많이 느끼는 부위는 허리가 27명으로 가장 많으며 무릎관절을 대담한 인원은 19명으로 그 다음으로 많았다.

위 임무 수행 설문 결과를 통하여 군에서는 보병 임무 및 운반 설치 임무 중에 공용화기 탄약이나 전자, 자주포 탄약 등 20 kg 이상 고 중량물을 긴 시간(4시간 이상)동안 운용하는 병사가 많음을 알 수 있다. 또한 이러한 고 중량물을 운반/적재하는 동작이 병사들은 가장 힘들다고 느끼며 그 때 손목과 허리가 부하를 많이 받으며 피로를 많이 느낀다는 것을 알 수 있었다.

설문 조사 결과를 통하여 병사들은 임무 중에 허리를 보조해줄 수 있는 외골격 로봇을 필요로 함을 알 수 있었다. 현재까지 개발된 허리 보조 외골격 로봇을 살펴보고 병사들이 사용할 수 있는 허리 보조 외골격 로봇 구조와 타 분야 허리 보조 외골격 로봇과 차별점은 무엇인지 알아보려 한다.

## 3. 기존의 허리 보조 외골격 로봇

### 3.1 분석 방법

기존 허리 보조 외골격 로봇을 분석하기 위한 방법으로 전자 문헌 검색을 기반으로 진행하였다. 모든 문헌검색은 Google Scholar를 통해 2001년부터 2018년 사이에 발행된 논문을 대상으로 하였다. 검색되어진 논문들은 제목과 초록을 통해 1차로 분류하였고, 허리 보조 외골격 중 들어올리는 모션을 보조를 하는 논문을 2차로 분류하였다. 검색어는 다음과 같다.

Back Support, Assistive Device and Wearable Robot and Exoskeleton Robot. 이 중 정적 지지를 목적으로 만들어진 외골격 로봇은 제외하였다. 추가적으로 상품화되어 판매를 하고 있는 허리 보조 외골격 로봇은 구글 검색을 통하여 사이트에 접속하여 사양과 정보를 획득하였다. 최종적으로 분류된 25종 허리 보조 외골격 로봇을 구동 형태 기준으로 정리하였다.

### 3.2 분석 결과

Table 1은 위 분석을 통하여 얻어진 결과이다. 1번부터 9번까지는 수동형 허리 보조 외골격 로봇이고, 10번부터 25번까지는 능동형 허리 보조 외골격 로봇이다. 수동형은 주로 스프링이나 탄성 스트랩을 이용하여 에너지를 저장했다 보조를 해주는 형태가 많았다. 능동형은 주로 전기모터를 많이 사용하고 일본의 논문에서는 인공 근육을 많이 사용하는 경향을 보였다. 그리고 허리를 보조해주는 형태는 10종, 전신을 보조해주는 형태는 8종, 엉덩관절을 보조해주는 형태는 8종으로 분류할 수 있었다. 방수 등급은 대부분이 표기가 안 되었거나 언급이 없었지만 이 중 ATOUN사 MODEL Y<sup>34</sup>는 높은 방수 능력(IP55등급)을 가지고 있었다. 무게에서는 대부분 논문에선 표기가 안되어 있지만 수동형은 대체로

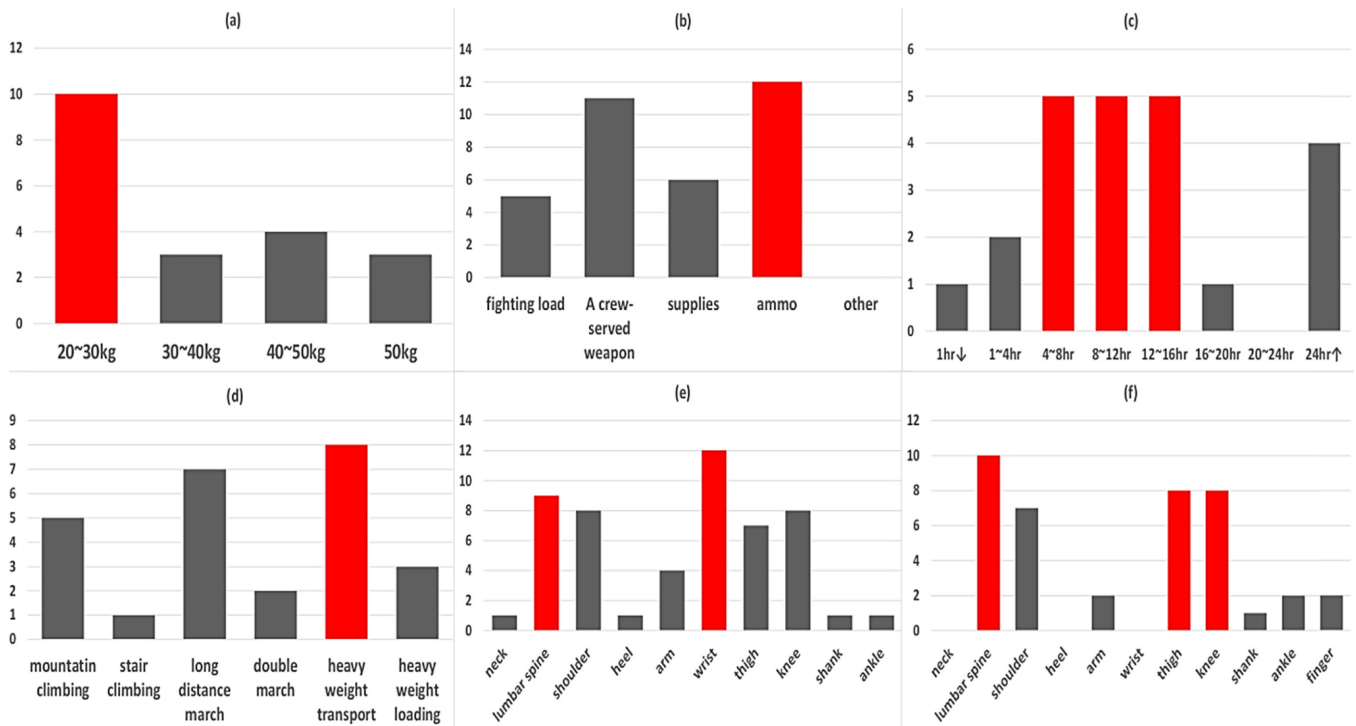


Fig. 1 Survey results of the operation of the infantry units (a crew-served weapon manual handling and fire support) (a) maximum operating load (19 people) (b) maximum operating loading item (19 people) (c) mission duration for maximum load operation (19 people) (d) the most difficult type of motion (19 people) (e) the body parts under load (17 people) (f) the body parts that feel the most fatigue (17 people)

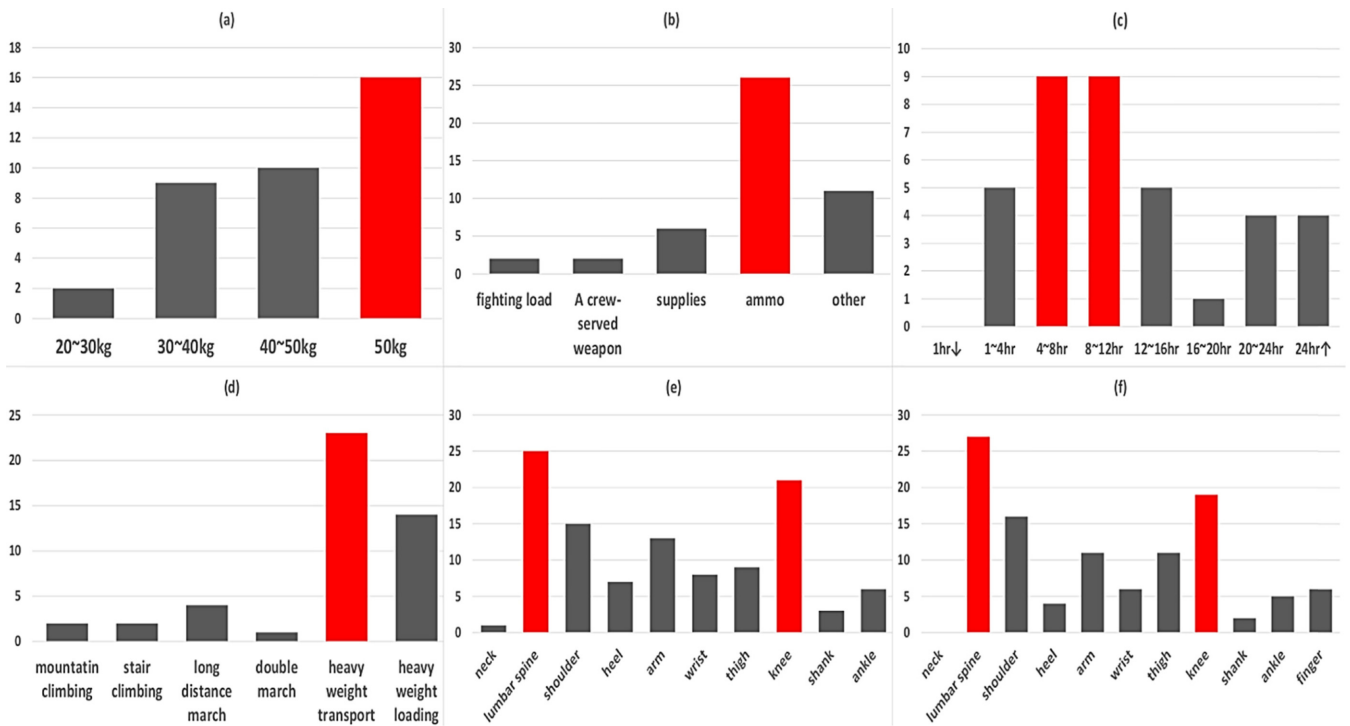


Fig. 2 Survey results of ammo loading/unloading, obstacle transport/installation, bridge construction mission (a crew-served weapon manual handling and fire support) (a) maximum operating load (37 people) (b) maximum operating loading item (37 people) (c) mission duration for maximum load operation (37 people) (d) the most difficult type of motion (37 people) (e) the body parts under load (35 people) (f) the body parts that feel the most fatigue (34 people)

Table 1 List of retrieved back support exoskeleton robots

No	Name	References (Company)	Power type	Supported body	IP code	Other
1	PLAD (Personal augmentive lifting device)	Whitfield, <sup>6</sup> Eramaki, <sup>7</sup> Frost, <sup>8</sup> Godwin, <sup>9</sup> Lotz, <sup>10</sup> Sadler, <sup>11</sup> Graham <sup>12</sup>	Passive (Elastic straps)	Back	-	Discomfort shoulder (10%), knee (40%)
2	PAS Power assist suit	Araie <sup>13</sup>	Passive (Spring and ratchet)	Full body	-	8 kg, agricultural
3	Wearable moment restoring device	Wehner <sup>14</sup>	Passive (Spring)	Back	-	
3	BNDR	Ulrey <sup>15</sup>	Passive (Springs)	Hip joint	-	Chest pain
4	Happyback	Barret <sup>16</sup>	Passive (Bungee cords)	Back	-	Crop harvest
5	Bendezy	Barret <sup>16</sup>	Passive (Springs)	Full body	-	.
6	SSL Smart Suit Lite	Imamura <sup>17</sup>	Passive (Elastic belts)	Back	-	Nursing care
7	SPEXOR	Rijcke <sup>18</sup>	Passive (Cam)	Full body	-	Nursing
8	LAEVO V2.5	Bosch <sup>19</sup>	Passive (Cam)	Hip joint	-	2.8 kg, chest pad
9	Back X	Suit X <sup>20</sup>	Passive	Hip joint	-	3.4 kg
10	Strengthen Upper Limb Exoskeleton	Deng <sup>21</sup>	Active (Hydraulic actuator)	Upper	-	
11	Power Assist Wear	Li <sup>22</sup>	Active (Pneumatic actuator)	Back and Hip joint	-	
12	Quasi-Active Exoskeleton	Kim <sup>23</sup>	(Quasi)-Active (Electric Motor, Knee)	Full body	-	
13	PARM Power-Assist Robot Arm	Kadota <sup>24</sup>	Active (Pneumatic actuator)	Back and arms	-	
14	Muscle Suit	Kobayashi, Nakamura <sup>25</sup>	Active (McKibben)	Back and arms	-	6.5 kg
15	Exoskeleton power assist system	Naruse <sup>26</sup>	Active (Electric Motor, Cables)	Full body	-	11 kg
16	Human-robot integrated exoskeleton	Ryu (Hyundai-Rotem) <sup>27</sup>	Active (Electric motor)	Full body	-	
17	WSAD	Luo <sup>28</sup>	Active (Motor + band)	Back	-	
18	HAL Hybrid assistive limb	Kawabata (Cyberdyne) <sup>29</sup>	Active	Full body	-	
19	HAL_LB03	Cyberdyne <sup>30</sup>	Active	Hip Joint	IPX4	3 kg, 3 hr
20	A Lower-Back Robotic Exoskeleton	Zhang <sup>31</sup>	Active (Electric motors)	Full body	-	
21	Back-Support Exoskeleton	Toxiri <sup>32</sup>	Active (PEA + bungee cord)	Hip joint	-	
22	Wearable Power Assist Wear	Hirotsu <sup>33</sup>	Active (Pneumatic artificial muscle)	Back	Waterproof Actuator	
23	MODEL Y	ATOUN <sup>34</sup>	Active	Hip joint	IP55	4.4 kg, 4 hr
24	H-WEX	Hyundai Motors <sup>35</sup>	Active	Hip Joint	-	
25	INNOPHY Standard	INNOPHY <sup>36</sup>	Active (McKibben)	Back	-	6.6 kg

가벼운 경향을 보였다. 능동형은 구동기가 가지는 무게에 구동기를 제어하기 위한 부가적인 요소가 많이 필요 하기 때문에 무게가 무거운 경향을 보였다. 구동시간에서는 수동형은 배터리와 같은 에너지를 공급해줄 요소가 필요 없으므로 무한대 작동 시간으로 판단하였다. 능동형에서 구동 시간은 판매하고 있는 제품을 제외하고는 대부분 언급되지 않았다. 더불어 BNDR<sup>15</sup>은 장시간 사용시 가슴 통증이 느껴진다는 단점을 표기하였고 PLAD<sup>6-12</sup>실험에서 일부 참여자가 어깨와 무릎의 불편함을 표기하였다.

더불어 대부분 연구 결과 분석은 피실험자 척추 기립근에 근전도(EMG, Electromyography) 센서를 부착하여, EMG 신호 크기 변화를 가지고 비교하였다. 대부분 논문에서 피실험자 EMG 신호는 감소하였고, 그 중 일부는 EMG 신호 감소를 척추 4번과 5번(L4/L5)에 걸리는 압축력 감소로 표현하였다. 대부분 전면 부하를 취급하는 노동자 근골격계 질환이 척추 4번과 5번(L4/L5)에 걸리는 압축력에 기인한다는 연구 결과를 공통적으로 인용하였다.<sup>37</sup>

추가적으로 몇몇 연구에서는 수동형 외골격 로봇이 인체공학적으로 장점이 있지만, 착용자와 인터페이스에서 불편함을 제거하는 것이 해결해야할 문제점이라고 언급하였다. 수동형 외골격 로봇에서 다른 문제점으로는 잠재적으로 착용자 다리 근육 활성도가 증가되는 점을 서술하였다.<sup>17</sup>

능동형 외골격 로봇에서는 더 많은 부하를 감소시킬 수 있는 잠재력이 있지만, 크고 무거운 구동기가 존재하기 때문에 전체 시스템 무게가 무거울 수밖에 없다는 단점이 있다. 시스템 무게가 무거울수록 구동기가 작동하지 않는 상황에서는 오히려 인체에 부하를 증가시키는 역할을 한다고 언급하였다.<sup>24</sup> 또한 능동형 외골격 로봇은 인체 의도를 인식하여 구동기를 인체 의도에 맞게 동작 시켜야 한다는 단점이 있다. 이러한 의도 인식 기술은 매우 어려운 기술이며 구동기를 제어하는 기술과 함께 해결해야 하는 문제점이다.

허리 보조 외골격 로봇에서 능동형과 수동형이 공통적으로 가지는 문제점으로는 엉덩 관절이나 어깨 관절과 같은 복잡하고 다양한 관절에서 움직임을 자연스럽게 따라가며 보조해줄 수 있는 인체 공학적 설계가 필요하다는 점이다.<sup>3</sup>

위와 같이 기존 허리 보조 외골격 로봇 문헌들을 분석하여 각 특징 별로 분류하고, 각각 분류에 따른 장/단점을 분석해 보았다. 이러한 조사 내용을 바탕으로 병사에게 허리 보조 외골격 로봇을 적용하기 위하여 어떠한 형태가 적합한지, 군 환경에서 필요로 하는 특징은 무엇인지를 분석해보려 한다.

**4. 허리 보조 외골격 로봇의 군 적용 가능성**

산업 현장과 군사 분야의 외골격 로봇에서 가장 큰 차이점은 로봇이 작동되는 환경이다. 대부분 산업용 외골격 로봇은 전원을 공급받기 쉬운 공장 내부에서 운용되고, 군사용 외골격 로봇은 외부 전원을 공급받기 어려운 외부 환경에서 작동된다. 또한 외부

환경에서 작동되기 때문에 혹독한 환경(우천, 눈보라, 먼지 등)에서도 정상적으로 작동해야 될 필요성이 있다. 그래서 군 환경에서 허리 보조 외골격 로봇이 적용된다면 내 환경성을 필요로 한다. 더불어 외부에서 작동되기 때문에 장비에 문제가 생겼을 때 쉽게 대처할 수 있도록 간단한 구조나 모듈 형태로 제작되어 파손된 부품을 쉽게 교체 가능하도록 해야 한다. 그리고 신속하고 은밀하게 작전을 수행해야하는 병사에게 모터의 소음이나 착용하는데 많은 시간을 필요로 하는 장비는 치명적이라고 할 수 있다.

이러한 군사 분야 특수성을 고려하면 추가적인 에너지원을 필요로 하고, 방수/방진 구조에 불리하며, 소음을 유발할 수도 있는 능동형의 허리 보조 외골격 로봇은 군 환경에 불리하다. 군 환경에서 수동형 허리 보조 외골격 로봇을 적용하는 게 유리하지만 수동형 경우 특정 부하에 맞춰 설계되기 때문에 전면 부하 무게가 특정 범위에 들어오지 않는다면 사용자에게 적합한 지원을 해주지 못 할 수도 있다. 하지만 이러한 장단점들을 고려했을 때 병사용 허리 보조 외골격 로봇은 특정 임무에 맞는 수동형으로 개발되는게 적합하다고 할 수 있다.

**5. 결론**

본 논문에서는 병사를 위한 허리 보조 외골격 로봇의 군 적용 가능성에 대하여 검토하였다. 외골격 로봇은 주로 재활 분야에서 시작하여 산업 분야로 그 영역을 넓혀 왔다. 군사용 외골격 로봇은 주로 병사 기동력을 향상시켜주는데 집중되었다. 우리는 근력증강로봇 운용에 관한 설문조사에서 병사들은 무거운 부하를 오랜 시간 운용해야 하며, 이러한 임무에서 허리는 가장 큰 부하를 받고, 또한 가장 큰 피로감을 느낀다는 것을 알 수 있었다. 군사용 허리 보조 외골격 로봇의 적합한 형태를 알아보기 위하여 기존 허리 보조 외골격 로봇을 분석하였다. 총 25종 허리 보조 외골격을 분석하였고, 이를 구동 형태, 보조해주는 신체 부위, 방수등급(IP Code), 기타(무게, 용도, 작동시간 등)로 분류하여 정리하였다. 각각 분류를 통하여 능동형은 많은 힘을 보조해줄 수 있지만 방수/방진 등 환경적인 측면에서 불리하고 무게가 무거운 단점이 있었고 수동형은 가볍고 간단한 구조를 가지기 때문에 환경적인 측면에서 유리하지만 수동 소자를 이용하기 때문에 특정 범위 하중에서만 도움을 줄 수 있다는 단점이 있었다. 또한 기존 연구에서 착용자에 적합한 인체공학적 설계가 공통적으로 부족하다는 점을 알 수 있었다. 기존 연구 분석을 통하여 군에서 필요로 하는 모든 조건을 만족시키는 허리 보조 외골격 로봇을 찾을 순 없었다. 하지만 허리 보조 외골격 로봇이 인체의 부담을 줄여 근 골격계 부상 위험을 낮출 수 있는 가능성을 확인하였다.

허리 보조 외골격 로봇의 군 적용 가능성을 검토하고자 군사 분야 특수성을 검토하였고, 산업 현장과 달리 외부에서 주로 작동되는 군사용 외골격 로봇은 추가적인 에너지원이 필요한 능동형보다 수동형이 유리하다는 점을 알 수 있었다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 논문에서 인용한 설문조사는 2018년도 1월 8일부터 12일까지 “근력증강로봇 군 운용개념”이라는 제목으로 아주대 권용진 교수 연구팀과 공동으로 진행하였음.

## REFERENCES

- Kawamoto, H. and Sankai, Y., “Power Assist Method Based on Phase Sequence and Muscle Force Condition for HAL,” *Advanced Robotics*, Vol. 19, No. 7, pp. 717-734, 2005.
- Zeilig, G., Weingarden, H., Zwecker, M., Dudkiewicz, I., Bloch, A., et al., “Safety and Tolerance of the Rewalk™ Exoskeleton Suit for Ambulation by People with Complete Spinal Cord Injury: A Pilot Study,” *Journal of Spinal Cord Medicine*, Vol. 35, No. 2, pp. 96-101, 2012.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., and O’Sullivan, L. W., “Exoskeletons for Industrial Application and Their Potential Effects on Physical Work Load,” *Ergonomics*, Vol. 59, No. 5, pp. 671-681, 2016.
- Gopura, R. and Kiguchi, K., “Mechanical Designs of Active Upper-Limb Exoskeleton Robots: State-of-the-Art and Design Difficulties,” *Proc. of Rehabilitation Robotics International Conference*, pp. 178-187, 2009.
- Schiffman, J. M., Gregorczyk, K. N., Bense, C. K., Hasselquist, L., and Obusek, J. P., “The Effects of a Lower Body Exoskeleton Load Carriage Assistive Device on Limits of Stability and Postural Sway,” *Ergonomics*, Vol. 51, No. 10, pp. 1515-1529, 2008.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M., and Smallman, C. L., “Effect of an on-Body Ergonomic Aid on Oxygen Consumption During a Repetitive Lifting Task,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 44, No. 1, pp. 39-44, 2014.
- Abdoli-Eramaki, M., Stevenson, J. M., Reid, S. A., and Bryant, T. J., “Mathematical and Empirical Proof of Principle for an On-BODY Personal Lift Augmentation Device (PLAD),” *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, No. 8, pp. 1694-1700, 2007.
- Frost, D. M., Abdoli-E, M., and Stevenson, J. M., “PLAD (Personal Lift Assistive Device) Stiffness Affects the Lumbar Flexion/Extension Moment and the Posterior Chain EMG During Symmetrical Lifting Tasks,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol. 19, No. 6, pp. 403-412, 2009.
- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M., et al., “Testing the Efficacy of an Ergonomic Lifting Aid at Diminishing Muscular Fatigue in Women Over a Prolonged Period of Lifting,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 39, No. 1, pp. 121-126, 2009.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A., and Stevenson, J. M., “The Effect of an On-Body Personal Lift Assist Device (PLAD) on Fatigue During a Repetitive Lifting Task,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol. 19, No. 2, pp. 331-340, 2009.
- Sadler, E. M., Graham, R. B., and Stevenson, J. M., “The Personal Lift-Assist Device and Lifting Technique: A Principal Component Analysis,” *Ergonomics*, Vol. 54, No. 4, pp. 392-402, 2011.
- Graham, R. B., Agnew, M. J., and Stevenson, J. M., “Effectiveness of an On-Body Lifting Aid at Reducing Low Back Physical Demands During an Automotive Assembly Task: Assessment of EMG Response and User Acceptability,” *Applied Ergonomics*, Vol. 40, No. 5, pp. 936-942, 2009.
- Araie, T., Nishizawa, U., Ikeda, T., Kakimoto, A., and Toyama, S., “Evaluation of Labor Burden Reduction Achieved Through Wearing an Agricultural Power Assist Suit,” *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 7, No. 4, p. 202, 2017.
- Wehner, M., Rempel, D., and Kazerooni, H., “Lower Extremity Exoskeleton Reduces Back Forces in Lifting,” *Proc. of American Society of Mechanical Engineers Dynamic Systems and Control Conference*, pp. 49-56, 2009.
- Ulrey, B. L. and Fathallah, F. A., “Biomechanical Effects of a Personal Weight Transfer Device in the Stooped Posture,” *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 55, No. 1, pp. 1052-1056, 2011.
- Barrett, A. L., “Evaluation of Four Weight Transfer Devices for Reducing Loads on Lower Back During Agricultural Stoop Labor,” *Proc. of ASAE Annual International Meeting*, 2001.
- Imamura, Y., Tanaka, T., Suzuki, Y., Takizawa, K., and Yamanaka, M., “Analysis of Trunk Stabilization Effect by Passive Power-Assist Device,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 26, No. 6, pp. 791-798, 2014.
- De Rijcke, L., Näf, M., Rodriguez-Guerrero, C., Graimann, B., Houdijk, H., et al., “SPEXOR: Towards a Passive Spinal Exoskeleton,” *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, pp. 325-329, 2017.
- Laevo Exoskelet, “Leavo V2 Product Information,” <http://en.laevo.nl/laevo-v2-product-information> (Accessed 7 SEP 2018)
- SuitX, “BackX,” <http://www.suitx.com/backx> (Accessed 7 SEP 2018)
- Deng, M. J., Wang, Z., He, H. H., and Xue, Y., “Design and Weight Lifting Analysis of a Strengthen Upper Limb Exoskeleton Robot,” *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 437, pp. 695-699, 2013.
- Li, X., “Design of Wearable Power Assist Wear for Low Back Support Using Pneumatic Actuators,” Ph.D. Thesis, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 2013.
- Kim, W.-S., Lee, S.-H., Lee, H.-D., Yu, S.-N., Han, J.-S., et al.,

- “Development of the Heavy Load Transferring Task Oriented Exoskeleton Adapted by Lower Extremity Using Quasi-Active Joints,” Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems -SICE, pp. 1353-1358, 2009.
24. Kadota, K., Akai, M., Kawashima, K., and Kagawa, T., “Development of Power-Assist Robot ARM Using Pneumatic Rubbermanuscles with a Balloon Sensor,” Proc. of Robot and Human Interactive Communication 18th International Symposium, pp. 546-551, 2009.
25. Kobayashi, H., Aida, T., and Hashimoto, T., “Muscle Suit Development and Factory Application,” International Journal of Automation Technology, Vol. 3, No. 6, pp. 709-715, 2009.
26. Naruse, K., Kawai, S., Yokoi, H., and Kakazu, Y., “Development of Wearable Exoskeleton Power Assist System for Lower Back Support,” Proc. of Intelligent Robots and Systems International Conference, pp. 3630-3635, 2003.
27. Ryu, H. T., Choi, J. Y., Yi, B.-J., Lee, J., Kim, D. J., et al., “Human-Robot Integrated Model of Upper-Extremity,” Proc. of Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence 9th International Conference, pp. 7-9, 2012.
28. Luo, Z. and Yu, Y., “Wearable Stooping-Assist Device in Reducing Risk of Low Back Disorders During Stooped Work,” Proc. of Mechatronics and Automation International Conference, pp. 230-236, 2013.
29. Kawabata, T., Satoh, H., and Sankai, Y., “Working Posture Control of Robot Suit HAL for Reducing Structural Stress,” Proc. of Robotics and Biomimetics International Conference, pp. 2013-2018, 2009.
30. Cyberdyne, “HAL Lumbar Type for Labor Support,” [https://www.cyberdyne.jp/english/products/Lumbar\\_LaborSupport.html](https://www.cyberdyne.jp/english/products/Lumbar_LaborSupport.html) (Accessed 7 SEP 2018)
31. Zhang, T., Tran, M., and Huang, H., “Design and Experimental Verification of Hip Exoskeleton with Balance Capacities for Walking Assistance,” Transactions on Mechatronics, Vol. 23, No. 1, pp. 274-285, 2018.
32. Toxiri, S., Calanca, A., Ortiz, J., Fiorini, P., and Caldwell, D. G., “A Parallel-Elastic Actuator for a Torque-Controlled Back-Support Exoskeleton,” Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 1, pp. 492-499, 2017.
33. Hirotsu, S., Cho, F., and Noritsugu, T., “Improvement of Wearable Power Assist Wear for Low Back Support,” Proc. of Multimedia Systems and Signal Processing International Conference, pp. 90-94, 2016.
34. Atoun, “Model-y,” <http://atoun.co.jp/products/atoun-model-y> (Accessed 7 SEP 2018)
35. Hyundai Motors, “Hyundai Showcases Advanced Wearable Robots at 2017 Geneva Motor Show,” <https://www.hyundai.news/eu/technology/hyundai-motor-leads-personal-mobility-revolution-with-advanced-robots/>(Accessed 7 SEP 2018)
36. Innophys, “Innophys Product Details,” <https://innophys.jp/product/standard/> (Accessed 7 SEP 2018)
37. Chaffin, D. B., Andersson, G., and Martin, B. J., “Occupational Biomechanics,” John Wiley & Sons, Ed. 4th, pp. 91-130, 2006.



#### Yeo Hun Yoon

B.S., M.S. candidate in the Department of Mechanical System Design, Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea in 2011, 2014, and Dual M.S in the Department of Optical Engineering, Rose-Hulman Institute of Technology, IN, USA, in 2014. He joined the 5th R&D Institute of Agency for Defense Development in 2014. His main research interests include mechanical design for Exoskeleton Robot and Military Robot.

E-mail : [harry.yoon8+sc@gmail.com](mailto:harry.yoon8+sc@gmail.com)