

상지 보조 소프트로봇의 의복화를 위한 디자인 개발 프로세스

홍유화 · 박주연 · 남윤자 · 박대근¹⁾ · 조규진²⁾ · 김연주[†]

서울대학교 의류학과

¹⁾Istituto Italiano di Tecnologia

²⁾서울대학교 기계공학과

Design Development Process for Clothing of Upper Limb Assistive Wearable Soft Robot

Yuhwa Hong, Juyeon Park, Yun Ja Nam, Daegeun Park¹⁾, Kyu-Jin Cho²⁾, and Youn Joo Kim[†]

Dept. of Textiles, Merchandising and Fashion Design, Seoul National University; Seoul, Korea

¹⁾Advanced Robotics, Istituto Italiano di Tecnologia; Genoa, Italy

²⁾Dept. of Mechanical and Aerospace Engine, Seoul National University; Seoul, Korea

Abstract: This study proposes a design process for an upper limb assistive wearable soft robot that will enable the development of a clothing product for an upper limb assistive soft robot. A soft robot made of a flexible and soft material that compensates for the shortcomings of existing upper limb muscle strength assistive devices is being developed. Consequently, a clothing process of the upper limb assistive soft robot is required to increase the possibility of wearing such a device. The design process of the upper limb auxiliary soft robot is presented as follows. User analysis and required performance deduction-Soft robot design-upper limb assistive wearable soft robot prototype design and production-evaluation. After designing the clothing according to the design process, the design was revised and supplemented repeatedly according to the results of the clothing evaluation. In the post-production evaluation stage, the first and second prototypes were attached to actual subjects, and the second prototype showed better results. The developed soft robot evaluated if the functionality as a clothing function and the functionality as the utility of the device were harmonized. The convergence study utilized a process of reducing friction conducted through an understanding and cooperation between research fields. The results of this study can be used as basic data to establish the direction of prototype development in fusion research.

Key words: soft robot (소프트로봇), wearable device (웨어러블 디바이스), assistive device (보조장치), design process (디자인 프로세스), functional clothing development (기능성의류 개발)

1. 서 론

임상 현장에서 환자 뿐만 아니라 의료인들도 많은 질병을 경험하고 있다(Cha et al, 2007; Choi et al, 2006; Szeto et al., 2010). 의료인의 경우, 환자의 병증을 판단하는 과정에서 동일자세를 반복하여 취하기 때문에 근골격계 질환의 발생빈도가 높다(Park, 2019). 특히 외과수술은 섬세하게 수행되어야 할 작업임과 동시에 무거운 장비를 들거나, 상체를 굽힌 부동자세로 일 정시간동안 작업해야 하기에 의료인들에게 피로 및 목, 허리, 어깨의 근골격계 통증을 발생시키고 있다(Choi et al., 2016;

Szeto et al., 2010). 동일 자세를 유지해야 하거나 반복하는 직업군의 경우, 특정 신체부위에 근 피로도가 집중, 누적되어 근 파열, 골절 등의 근골격계 질병들이 발생하기 쉽다(Jeong, 2010). 특히, 어깨 근 피로도에 가장 큰 영향을 주는 요소는 팔의 무게에 의한 중력으로(Choi et al., 2016), 중력보상을 하는 보조로봇을 착용하면 근육의 피로를 줄이는 것이 가능하다는 연구결과도 있다(Song et al., 2015). 또한, 스프링의 반동 등을 이용하여 물리적인 인체 움직임을 보조하는 수동형 상지 근력 보조기구가 상용화되어 있다(Fig. 1). 그러나 이와 같은 수동형 상지 근력 보조기구는 단단한 강성소재로 만들어져 착용 시 오히려 신체에 부담이 갈 수 있으며, 스프링의 반동으로 인한 부상을 유발하는 위험성을 가지고 있다. 또한, 효율적인 사용을 위해서는 인체와의 적합성이 요구되나, 비용과 구조적인 면에서 맞춤형 제작이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 기존 상지 근력 보조기구들의 단점을 보완한 유연하고 부드러운 소재의 소프트로봇이 개발되고 있지만(Hong et al., 2006), 신체에 맞도록 형태를 유지하지 못한다는 단점이 있다. 따라서, 이러한 장

[†]Corresponding author; Youn Joo Kim

Tel. +82-82-880-8768

E-mail: Jull24@hanmail.net

© 2021 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1. “Long arm brace”. (n. d.).

치의 착용 가능성을 증대시키기 위해서는 상지 보조 소프트로봇의 의복화 과정이 필요하다.

본 연구에서 개발하고자 하는 상지 보조 웨어러블 소프트로봇은 인체의 근피로도를 보완할 수 있는 소프트로봇을 의복화한 것으로서 인체와 소프트로봇의 착용 적합성과 활용성을 위해서 소프트로봇과 의복이 상호보완적으로 설계되어야 하는 특성을 가진다. 특히 인체에 로봇이 효과적으로 고정되어야 힘의 보상을 받을 수 있으므로 다른 기능성 의복 및 센서 기반의 스마트의류에 비해 정확성 및 활용성이 더욱 강조된다. 따라서, Lee and Lee(2019), Lee(2007)의 연구와 같이 의복 디자인과 공학기술의 적절한 융합이 필요하며, 의복 개발 프로세스와 제품개발 프로세스를 접목하여 효율성을 높여야 할 필요성이 있다. 그 뿐만 아니라, 인체와 소프트로봇, 의복과 소프트로봇의 상호작용이 평가되어야 하므로 센서 기반 스마트의류 디자인 프로세스(Cho & Lee, 2013)를 접목하여 설계하였다. 본 연구의 궁극적인 목표는 상지 보조 웨어러블 소프트로봇의 개발을 통해 반복적인 팔 동작 및 장시간의 부동자세가 요구되는 외과 수술을 진행하는 의료인을 대상으로 근육 피로에 의한 노동력 저하나 근골격계 파손 등의 문제를 줄이고자 함에 있다.

2. 이론적 배경

2.1. 소프트로봇

로봇은 인간의 삶을 조금 더 편하게 하고, 인간이 수행하기 힘든 어렵고 위험한 일을 하게 하도록 개발되기 시작하였다. 하지만, 강성기반의 하드웨어 로봇 분야는 로봇의 기능성이나 움직임에 있어서 유연하지 못한 단점이 발견되었다. 따라서, 한계점을 극복하기 위해서 자연계 생물의 움직임을 모방한 생체역학 시스템을 도입한 소프트로봇이 개발되었다. 연성기반의 소프트로봇은 외부 환경에 대한 적응성이 향상되도록 유연성과 신축성을 포함하는 부드러운 성질을 반영하여 로봇의 기능에 대한 효율성을 증대시킬 수 있게 되었다. 특히 신체적 움직임에 제한적인 사람들을 보조하거나, 인체의 능력보다 효율적인 물리적 움직임을 기대하는 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있다. 소프트로봇이 활용될 수 있는 곳으로 기대되는 분야는 공

업, 농업, 화해, 식품 산업, 의료 및 재활, 개인 보조기기, 수중 탐사, 군용, 엔터테인먼트 등 일상생활과 산업 전반에 걸쳐 있으며, 특히, 발목과 무릎 동작을 돕기 위한 능동형 소프트 보조 장비(Stirling et al., 2011) 걷는 동안 일어나는 물질대사의 에너지 효율을 증가시키는 엑소슈트(Asbeck et al., 2015; Wehner et al., 2013), 케이블 혹은 공압 기반 근육 구동기를 사용한 상지 및 하지 재활 시스템(Galiana et al., 2012; Ueda et al., 2010)등 재활, 근력 보조 등의 연구 분야에 활발하게 적용되고 있다. 그러나 실용화를 위해 소재 개발, 연속체 모델링 및 제어, 구동기 효율 향상 등 해결해야 할 문제들이 많아 지속적인 연구가 필요하다.

현재까지 개발된 팔의 무게를 지탱하기 위한 로봇은 하드웨어와 소프트 형태로 구분할 수 있다. WREX(“Mobile Arm Supports Archives”, 2017), Armon Edero (Mastenbroek et al., 2007)와 같은 하드웨어의 경우에는 바(bar) 형태의 연결 구조에 스프링 및 구동기 등을 사용하여 중력에 대항하여 팔다리를 밀어내는 방식을 취하고 있다. 그러나 인체의 자연스러운 움직임과 관절의 복잡성을 구현하기에는 장치의 크기와 무게의 제한을 받게 된다. 그에 비해 meal assistive exoskeleton(Koo et al., 2014; Park et al., 2015), Harvard EXO 슈트(O’Neil et al., 2017)와 같은 소프트로봇은 폴리머나 직물과 같이 부드럽고 유연한 소재를 사용하여 관절 점에 고정해 힘을 전달시키고 케이블이나 공압 인공 근육을 사용하여 고정된 팔다리를 당기거나 밀면 보조 토크가 대상 관절에 적용되는 방식으로 움직임을 보조하도록 개발되었다.

2.2. 디자인 프로세스

디자인 프로세스는 일련의 현상을 파악하고 다양한 정보들을 조합하고 불필요한 변수들을 제거하면서 최적의 해결방안을 도출하는 과정으로 정의되고 있다(Kim, 2003). 즉, 디자인 프로세스는 목적을 지닌 문제해결 행위로 현재의 사실을 기본으로 미래의 가능성에 대하여 접근하는 과정이라 할 수 있다(Cho & Lee, 2013). 디자인 프로세스는 개발하고자 하는 제품의 종류, 최종 사용자, 개발과정 등에 따라서 다양하게 변화될 수 있다.

일반적인 디자인 프로세스는 Kim(2003), Lee(1999)가 제시한 것처럼 [정보조사-컨셉 및 디자인 설정-디자인 개발 및 제작-디자인 평가-생산]의 과정을 거치는 것이 일반적이다. 의복 디자인 평가의 경우 의복 자체의 품평회를 거칠 뿐, 사용자 착용평가와 그에 대한 보완 및 수정단계는 실시되지 않는 경향을 보인다. 특히 소비자의 특정요구를 반영하기 보다는 트렌드 및 시장의 흐름을 반영하여 디자인을 진행하는 것이 일반적이다. 그에 비해 인간공학 및 기능성 특수의복 디자인 프로세스에서는 최종사용자의 문제를 해결하여 더 나은 의복을 제작하는데 목적이 있으므로, 그에 따른 다양한 의복 평가가 실시되며, 평가로 도출된 문제점을 해결하는 것을 중시하는 경향을 보인다. 이와 같은 인간공학적 디자인 프로세스는 Dunne(2004), Kang and Kim(2011), Kim et al.(2007), Lamb and Karral(1992),

Table 1. Design process

Author		Design Process							
Regan et al. (1998)	Problem recognition	Problem definition	Exploration of problem	Search for alternatives	Evaluation and decisions	Specification of Solution	Communication of solution		
Lamb and Karral (1992)	Problem identification		Preliminary Ideas	Design refinement	Prototype development		Evaluation		
Kim et al. (2007)	Product design characteristics analysis			Motion measurement and characterization	Product design by applying motion		Product design feasibility evaluation		
Lee (1999)	Information collection and analysis		Concept setting	Design development	Designing	Sample production	Review		
Kim (2003)	Information collection and analysis		Concept setting	Design concept setting	Design	Sample production and evaluation	Review		
Cho and Lee (2013)			Concept Setting	System level design	Device positioning	Modeling	Final product development		
Dunne (2004)	Identification of user	Identification of user needs	Identification of architectural requirements	Preliminary aesthetic design	Identification of design decisions	Selection of alternatives	Identification of evaluation criteria	Evaluation of alternatives	Selection of solution
Kang and Kim (2011)			Design sketch	Pattern design	fitting	Fitting and modify	Sewing	Finished product evaluation	

Regan et al.(1998), 등의 연구에서 사용된 바가 있으며, 그 차이는 Table 1에서 제시하고 있다. 인간공학적 디자인프로세스를 살펴보면, Lamb and Karral(1992)의 연구에서는 현행 문제 상황을 인식하고 해결하기 위한 디자인을 개발하였으며, FEA 소비자 요구 모델을 통해 디자인 프로세스를 문제 정의와 평가의 2단계로 세분화하였다. FEA 소비자 요구 모델의 핵심은 고객이므로, 디자이너들은 목표 고객에 앞서 소비자 파악에 주력해야 한다는 것이다. 이 연구들은 사용자의 요구 및 문제 상황을 정확히 인식하는 데서 연구가 출발하는 것에 공통점이 있었으며, 이것은 인간공학적 디자인 프로세스 중 필수적인 단계라고 사료된다. 다음 단계로서, 개발 단계에서 Kang and Kim(2011), Dunne(2004) 등은 반복적인 샘플제작을 프로세스에 적용하여 사용자와 의복 간의 상호작용이 효율적으로 이루어질 수 있도록 보완하는 과정을 설계하였으며, Kim et al.(2007), Cho and Lee(2013)등의 연구에서는 사용자의 움직임에서 발생하는 불편함을 줄일 수 있도록 제품의 위치 설계에 중점을 두었다는 점에서 특징을 가진다. 마지막으로 Lamb and Karral(1992), Kim et al. (2007), Cho and Lee(2013)는 착용자의 평가에 의해서 문제를 해결하였는지 검증하였다. 이처럼 인간공학적 제품 개발 과정에서는 사용자 중심의 디자인 요소가 반영되어야 하며, 사용자 평가에 의한 반복적인 샘플제작은 필수적이다. 이와 같이 사용자가 참여하는 다양한 방식의 착용평가는 디자인 프로세스를 사용자의 입장에서 검증할 수 있는 효과적인 인간공학 적 평가방법이 될 수 있다. 종합하여 볼 때, 인간공학적 디자인 프로세스는 의복을 개발하기 위한 분석과정과 디자인 설정,

제작과정은 일반적인 의복 디자인 프로세스와 유사하게 진행되지만, 제작 후 평가결과에 따라 진행해 온 디자인과 개발과정을 검토하고 수정하는 단계가 추가될 수 있다. 이러한 수정과 보완의 과정은 적합한 수준의 사용자 평가가 도출되기까지 반복적으로 이루어지는 순환구조를 가진다.

본 연구에서 제시하는 상지 보조 웨어러블 소프트웨어는 일반적인 의류에 소프트웨어가 부착된 의류로서, 의복으로서의 기능 뿐 아니라, 효율적으로 근력을 보조해야 하는 기능성 의복이다. 따라서, 일반적인 의복 디자인에 국한된 것이 아닌 인간공학 적 제품 디자인의 범주에도 해당된다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 참고하여 기존 의류 디자인 프로세스와 인간공학 적 제품개발 프로세스가 접목된 사용자 중심의 기능성 의복 디자인 프로세스를 제시하고자 하였다.

3. 연구방법

3.1. 피험자 선정

본 연구에서는 유사환경 및 자세에 의해 상지의 근골격계 통증을 경험하고 있는 의료인을 사용자로 선택하였다. 의사 그룹은 복강경수술도구를 잡고 팔을 일정 각도로 유지한 부동자세로 수술을 진행하기 때문에, 팔에 대한 근골격계의 피로도가 높은 직업군이다. 사용자 요구성능을 도출하기 위한 인터뷰 대상은 복강경 도구를 사용하여 수술을 진행하는 외과의사로서 비뇨기와 1인, 산부인과 2인, 암 관련 학과 2인으로 구성하였다.

또한 소프트웨어의 기능성을 효율적으로 구현하기 위해서는

Table 2. Subject's body dimensions

Item	Size measurement	The 7th Size Korea 20~39 aged men standard size (n = 1523)
Chest circumference	98 cm	97.2 cm
Waist circumference	81.3 cm	83.1 cm
Hip circumference	96.8 cm	96.5 cm
Height	178.6 cm	173.5 cm

각 힘줄 라우팅 구조 및 Tri-LAS와 같은 소프트웨어의 구조의 세밀한 계측이 적용되어야 하므로 소프트웨어가 부착될 의복 역시 개인 맞춤형으로 제작되어야 할 필요성이 있다. 따라서, 의복 설계 및 평가에는 제 7차 Size Korea(2015) 기준 20~30대 평균 사이즈를 가진 남성 연구참여자 1인을 선정하였고, 선정된 연구참여자를 대상으로 의복의 설계, 제작 및 평가를 진행하였다. 연구참여자의 인체 계측치수는 다음 Table 2와 같다.

3.2. 상지 보조 웨어러블 소프트웨어 디자인 프로세스 제안

상지 보조 웨어러블 소프트웨어는 일상적으로 착용하는 의복이 아닌 단순 작업으로 인해 상지에 가해지는 힘을 경감시키고자 하는 특수한 목적이 있다. 그러므로, 착용자의 요구성능 및 기능의 정확성, 효용성이 충족되어야 하며 특히 차별화된 기능적 특성이 개발 과정에서 잘 반영할 수 있도록 디자인 프로세스가 설계되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 기능성 의복과 관련된 디자인 프로세스의 선행연구(Cho & Lee, 2013; Dunne, 2004; Regan et al., 1998; Kang & Kim, 2011)을 참고하여 총 4단계의 디자인 프로세스 과정을 제안하였다(Fig. 2).

본 연구에서 제시하는 상지 보조 소프트웨어 디자인 프로세스는 [최종 사용자 분석 및 요구성능 도출 - 소프트웨어 설계 - 상지 보조 웨어러블 소프트웨어 프로토타입 디자인 설계 및 제작 - 평가]로 구분되었으며, 의복 평가의 결과에 따라 디자인의 수정 및 보완이 반복 실행되었다.

3.2.1. 사용자 분석 및 요구성능 도출

첫 번째 단계인 최종 사용자 분석 및 요구성능 도출단계에서는 문제 탐색을 진행함으로써, 외과적 수술을 진행하는 의사가 겪고 있는 근골격계 통증에 관한 문제를 제기하였다. 다음으로 최종 사용자의 근무 환경 및 사용자 필요 성능에 대한

조사를 바탕으로 의복의 사용자 요구성능을 도출하였다. 이 단계에서는 최종 사용자의 요구성능을 조사하기 위해서, 대학병원에 재직 중이며 복강경 수술을 주로 진행하는 의사 5인을 대상으로 하여 그룹면접조사(FGI: Focus Group Interview)를 진행하였다. FGI는 한 시간 가량 진행되었으며, 수술 업무환경, 업무시의 통증, 상지 보조 소프트웨어의 필요성, 소프트웨어 요구성능에 관한 내용을 자유롭게 말하게 하였다. 모든 내용은 녹음되었으며, 이후 연구자가 이를 카테고리화하여 정리하였다.

3.2.2. 소프트웨어 설계

소프트웨어의 설계단계에서는 어깨에 가해지는 힘을 분산시키기 위한 소프트웨어의 기능 및 설계를 진행하였다. 이는 서울대학교 공과대학과의 협업으로 이루어졌으며, 설계된 소프트웨어의 최종적인 의복화를 위하여 필요한 요소들을 의류학과 공학의 학제 간에 논의하는 융합연구가 진행되었다.

3.2.3. 상지 보조 웨어러블 소프트웨어 프로토타입 설계 및 제작

프로토타입 디자인 설계 및 제작단계로 로봇의 인체 적합성 뿐 아니라, 심미성을 고려하여 디자인을 설계하였다. 특히, 사용자의 요구가 반영된 디자인을 설정하되 포함되는 로봇의 구조를 염두에 두고 디자인을 설계하는 것에 중점을 두었다. 더욱이, 인체에 적합한 패턴설계, 기능성 소재의 선정, 경량 부자재 선정, 적절한 봉제 방법 등을 고려하였다.

3.2.4. 평가

제작과정을 거친 프로토타입의 평가를 진행하는 네 번째 단계에서 CLO 3D(CLO Virtual Fashion Inc.) 프로그램을 이용하여, 가상착의에 의한 의복압 및 변형률의 분석을 통해 의복의 맞음새 및 적합성을 평가하였다. 본 의복은 가동구조상 밀착의복으로 디자인되었으나, 지나친 밀착은 소프트웨어의 벨트와 라우팅의 힘 구조에 영향을 미치므로 압박감에 대한 평가가 필요하다. CLO 3D 프로그램은 가상착의 결과가 실제착의와 거의 유사하며, 착용시 생기는 문제점을 시뮬레이션으로 사전에 알 수 있고, 패턴 변경이 용이하다는 점(Ha, 2017)이 복잡한 소프트웨어 설계방식에 부합하기 때문에 1차 프로토타입의 검증 도구로써 선택하였다. 1차 검증 후, 다시 프로세스의 세 번째 단계로 돌아가 반복적인 수정과 보완 프로세스를 거쳐 2차 프로토타입을 제작하였다.

2차 프로토타입 평가에서는 소프트웨어의 컨셉과 기능의 적

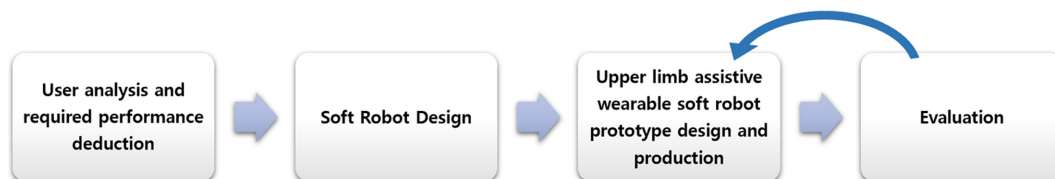


Fig. 2. Upper limb assistive wearable soft robot design process.

Table 3. Questionnaires of prototype evaluation

Categories	Questions	Categories	Questions
Fitness	Neck circumference	Movement adaptations	Upright posture
	Chest circumference		Both arms raised as far as possible
	Armscye circumference		Both arms raised 90 degrees
	Waist circumference		Both arms raised 70 degrees
	Hip circumference		Elbow bent 60 degrees and the arm raised 70 degrees
	Thigh circumference		Right arm raised to the side as far as possible
	Sleeve circumference		90-degree back bent posture
	Wrist circumference		Overall movement adaptability
	Shoulder width		Design factors
	Chest width	I like the color	
	Back width	I like the fabric	
	Total length	Easy to operate device	
	Sleeve length	No clothing interference when operating the device	
	Hip length	I feel the same feeling like wearing traditional clothes	
	Zipper length	No inconvenience caused by the device	
	Overall size	The weight of the device is not burdensome	
		Upper limb assist function is satisfactory	
		Do not feel harm to human body	
		The device feels safe from external shocks	
	The device is attached in a comfortable position		
	Easy to put on and take off		

합성 여부를 피험자 착의 평가를 통하여 검증하였다. 소프트로봇을 착의한 후, 7점 리커트 설문문을 통하여 1차와 2차 프로토타입을 비교하는 치수적합성, 동작적합성, 디자인 요소 관련 평가를 진행하였다. 치수적합성 항목은 의복패턴을 구성하기 위한 인체의 기본 둘레 및 너비, 길이항목 중 올인원 슈트형태의 의복패턴에 적용되는 치수항목을 선정하였다. 동작적합성에 관한 항목은 Park and Kim(2012)의 작업자세에서 어깨동작에 따른 피로도와 작업부하 측정에 관한 연구에서 사용된 어깨와 팔 관절의 벌림과 모음각도 항목을 참고하였으며, FGI 결과에서 도출된 의료인의 작업자세를 반영하여 항목을 수정하였다. 디자인 요소 관련 평가는 웨어러블 의복의 사용성 평가를 진행한 Lee(2014)의 연구를 참고하여, 개발 의복에 맞도록 항목을 수정하여 사용하였다. 질문 항목은 Table 3에 표기하였다. 각 항목에 대한 응답은 4점이 적절한 것으로 표기되었으며 1점이 매우 작다/매우 불편하다/전혀 그렇지 않다를 의미하며 7점이 매우 크다/매우편하다/매우 그렇다를 의미하였다. 또한, 착용시 각 부위의 맞음새가 어색하거나 동작 시 불편한 부위가 있다면 그것이 의복 혹은 앵커링 어느 쪽의 문제인지, 각 디자인 요소에 군더더기나 개선해야 할 점은 없는지와 더불어 전체적인 소재구성과 디자인 선호에 관한 구체적인 심층인터뷰를 함께 진행하였다.

4. 결 과

4.1. 사용자 분석 및 요구성능 도출

4.1.1. 문제 탐색

인체의 자세 및 관절의 운동 범위는 효율적으로 업무를 수행

하거나 능률적인 일상활동을 수행하는데 큰 영향을 미친다. 그러나 어깨 부위의 근골격계는 복잡한 해부학적 구조로 되어 있으므로 운동 범위(ROM)가 넓으며 자유도(DOF)가 높게 발생한다. 이와 같은 특성으로 인해 어깨 부위의 근육이나 관절은 누적 피로도가 높은 부위로서 반복작업에 쉽게 피로를 경험하며 장애가 많이 발생하는 부위라고 할 수 있다. 특히 외과이나 치과 의사와 같이 장시간 팔을 올린 자세를 유지해야 하는 직업을 가진 사람들에게는 어깨 부위의 장애 및 불편사항이 수차례 보고되고 있다(Ludewig & Cook, 2000; Szeto et al., 2010;). 본 연구의 참여자는 평균적으로 1일 2~3회 외과수술을 시행하며 각 수술에 소요되는 시간은 평균 2~4시간이었다. 집도 시 3~3.5 kg의 복강경용 내시경 장비를 들고 선 자세를 유지해야 하며 신체 전체의 움직임이 없이 주로 상체와 팔의 움직임만으로 몇 가지 제한된 수술 동작을 반복해서 진행하고 있었다. 또한, 연구에 참여하고 있는 의사군만 아니라 동일한 방법으로 수술을 집도하는 동료 의사 역시 만성적인 어깨 통증을 호소하고 있었으며, 허리, 목, 어깨 등에서 통증이 최대 만나절 동안 유지되고 있었다. 이와 같이 불편한 자세, 긴 작업시간, 힘의 지속 정도, 치료기구 사용 시 손의 지지점 부족 등으로 인해서 발생하는 신체적 부담과 통증은 작업의 결과에도 영향을 미치고 있다(Cha et al., 2007; Choi et al., 2006; Choi et al., 2016).

4.1.2. 사용자 요구성능 도출

FGI를 통해 살펴본, 상지 보조 웨어러블 소프트로봇에 대한 사용자요구성능은 기능성, 심미성, 착탈의 용이성, 쾌적성, 위생 관리성으로 나누어 볼 수 있었다. 해당 항목들은 Francis-Morcillo et al.(2020)가 제시한 웨어러블 디자인 요구성능 요소

에서 본 연구에 맞도록 필요한 항목들을 조정하여 기술하였다.

1) 기능성: 본 연구에서 개발하고자 하는 상지 보조 웨어러블 소프트로봇은 팔을 들고 있는 자세에서 팔의 무게 및 팔에 가해지는 힘을 경감시켜 작업능률을 향상시키고 신체기능을 증진시키는 실용적인 목적을 가진다. 수술 시 착용자는 2개 이상의 의복을 착용하므로, 의복 및 소프트로봇 무게의 경량화가 요구되며, 신체 활동 및 자세의 제한이 없어야 한다.

2) 심미성: 상지 보조 웨어러블 소프트로봇은 수술복 내에 착용하게 되므로 수술복의 간섭을 받지 않는 적당한 크기의 것으로 솔기가 적고 단순한 형태가 바람직하다. 패션성의 목적으로 심미적인 욕구를 충족시킬 수 있는 차별성이 느껴지는 디자인이 요구되며, 색상과 문양이 시각적으로 자극이 없어야 한다.

3) 착탈의 용이성: 교차 수술이 진행되는 경우, 수술실의 이동에 소요되는 시간은 30초~1분 이내로 짧은 시간 안에 환복이 가능하도록 설계되어야 한다.

4) 쾌적성: 흡습성 및 통기성이 좋아 착용자가 수술 중 더위나 땀 등으로 인해 불편함을 느끼지 않도록 환기구의 설계와 소재의 선정에 유의하여야 한다.

5) 위생관리성: 수술 실내에서 혈액과 같은 체액 및 세균에 의한 오염 시 상지 보조 웨어러블 소프트로봇의 세척문제가 대두되었다. 세척용 기구인 오토클레이브 내 고압, 고열 세척 및 강한 성분의약품 세정에 견딜 수 있을 정도의 내구성이 요구된다.

4.2. 소프트로봇 설계

어깨에 가해지는 근육 피로는 일반적으로 팔 무게로 인해 발생하기 때문에 팔 무게를 지탱함으로써 줄일 수 있다. 따라서, 상지 보조 소프트로봇은 힘 프로파일 발생 장치, 힘 방향 가이드를 위한 이동식 힘줄 라우팅 구조(tendon routing) 구조, 그리고 Tri-LAS (Tri-Looped Anchoring Structure)로 구성되었다. 힘 프로파일 발생 장치는 어깨의 각도에 따라 바뀌는 필요보조력을 형성해주는 장치이다. 힘 방향 가이드를 위한 힘줄 라우팅 구조는 작업 시 발생하는 굽힘/뽐 (flexion/extension), 벌림/좁힘(abduction/adduction) 상태에 대해 팔 무게를 보상해주기 위한 장치이다. 본 구조는 굴곡과 외전에 해당하는 이동 방향으로 보조력을 동시에 전달하여 팔을 올리는 방향에 따라 변화하는 무게와 방향력을 결합하여 원하는 방향의 보조 토크를 생성한다. Tri-LAS는 고리 형 벨트 구조와 의복으로 구성되어 어깨에서 허벅지까지 고정력을 분배하고 전달하여 고정력이 신체의 특정 부분에 집중되는 것을 방지하는 역할을 한다. 또한, 다양한 몸통 자세에서도 앵커링 성능을 유지하기 위해 착용자의 신체 표면 변형으로 인한 루프 벨트의 장력 변화를 최소화하는 구조로 설계되었다. 즉, 본 앵커링 구조는 바로 선 자세에서 힘을 받는 부분이 충분한 고정력으로 고정되었을 때, 몸을 좌우로 굽히거나 비틀 때 앵커링 구조가 느슨해지면서 고정력이 떨어지는 것을 방지한다. 본 소프트로봇에 사용되는 동력은 액추에이터의 크기와 무게를 최소화하기 위해 수동 힘 프로파일 생성기를 사용하여, 어깨의 수직 각도에 따라 보조력을 생성한다

(Park and Cho 2015; Park and Cho 2017).

4.3. 상지 보조 웨어러블 소프트로봇 프로토타입 설계 및 제작

본 연구에서 제시하고 있는 상지 보조 웨어러블 소프트로봇은 새로운 형태의 기능성 의복으로서, 이러한 의복은 보조 장치가 자연스러운 외관을 가지도록 내장되어 있어야 하며, 일상 생활에서 착용하는 의복으로서의 심미성도 있어야 한다. 또한, 착용자가 이물감 없이 편안하게 착용할 수 있어야 하며, 착탈의 과정에서 불편함을 느끼지 않게 설계되어야 한다. 그뿐만 아니라, 의복 부분은 로봇의 기능성을 해하지 말아야 하므로, 장치의 구조를 유지하고 움직임을 방해하지 않는 구조로 설계해야 한다. 이 모든 것이 충족되었을 때 인체공학적인 설계가 이루어졌다고 할 수 있다. 사전 조사 및 분석 결과를 토대로 하여, 기초 아이디어 스케치를 진행하면서 구체적인 디자인 전개를 시행하였다.

4.3.1. 1차 프로토타입

이 단계에서는 소프트로봇을 의복화하기 위해 문제점을 탐색하는 과정을 선행하였다. 밀착 의복 위에 소프트로봇을 부착한 상태에서의 Tri-LAS는 직선 형태의 벨트와 곡면 형태의 인체의 적합성의 문제로 인해 어깨점, 목옆점, 허리 부위에서 들뜸 현상이 발생하였다. 또한, 신축성이 거의 없으며 밀도가 높아 유연성이 부족한 벨트가 신체를 감싸고 있으므로 착용 시 벨트의 움직임으로 인한 쓸림 및 불편함이 발생하고 있었다. 착용 시 벨트에 대한 부담감을 감소시켜야 할 필요성이 대두되었다. 따라서 고정된 벨트 위치 외에 움직이는 벨트 부분은 안쪽에 케이싱(casing)에 의한 터널을 만들어 피부와 직접 닿아서 쓸림이나 상처가 발생하지 않도록 설계하였다. 벨트와 터널 사이의 마찰력을 최소화하기 위한 적절한 길이를 고려하였으며, 벨트의 방향, 비클과 벨트 교차점 위치선정에 있어서 정확한 인체의 특정 위치에 대한 검증을 통한 위치선정으로 동작 거부감이 없도록 하였다. 여밈 위치의 선정에 있어서 벨트의 흐름을 방해하지 않는 선에서 착탈의가 쉽도록 설계하였다.

본 연구에서 적용되는 소프트로봇은 신체에 유연하게 부착되기 때문에 신체의 움직임이나 표면의 변화는 로봇의 기능성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 의복 디자인에 따른 성능 변화를 평가하기 위해 1차 프로토타입은 원피스형과 투피스형의 두 가지 유형의 디자인을 전개하였다. 원피스형은 벨트 및 앵커링을 의복에 고정함으로써, 착탈의가 편리하도록 설계하였다(Fig. 3 좌측). 특히 원피스형의 경우 앵커링의 위치가 고정되어 있으므로 착의 시 앵커링의 위치 조정의 시간이 단축된다는 장점이 있었다. 그러나, 원피스형의 여밈은 가슴 부분에 벨트의 케이싱이 부착되어야 하므로 여밈이 등 쪽에 존재하도록 설계되었다. 투피스형은 원피스형의 여밈 위치에 의한 환복의 불편사항을 개선하며, 의복에 의한 인체 간섭을 줄이기 위해 앵커링이 존재하는 각 부위에 부분적으로 의복 설계를 한 형태로 디자인하였다(Fig. 3 우측). 또한, 투피스형은 상·하의

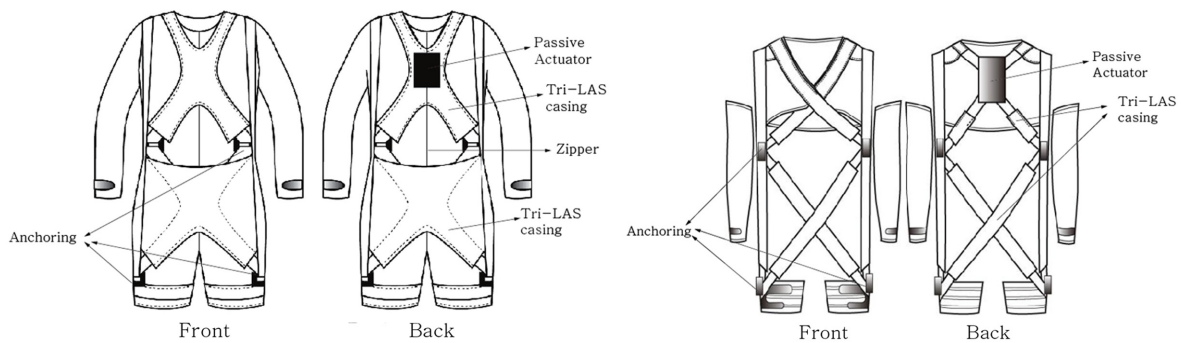


Fig. 3. Design idea of 1st prototype (left: one-piece type, right: two-piece type).

탈부착식으로, 원단으로 튜브를 만들어 벨트를 감싼 후 튜브끼리 고정하는 방식으로 설계되었으며 신체 움직임 제한을 최소화하고자 하였다.

4.3.2. 소재

장치의 움직임에 방해가 되지 않도록 벨트와의 마찰력이 적은 소재가 고려되었다. 하지만 표면이 지나치게 매끄러워 벨트의 미끄러짐이 발생하면, Tri-LAS의 힘 분배에도 영향을 미치므로 벨트의 움직임에 방해가 되지 않는 적절한 소재가 고려되었다. 또한, 한 번 착용하면 2~4시간을 착용하게 되므로 지나치게 인체를 가압하는 소재는 부적합하다고 판단되었다. 또한, 수술 시 땀 등에 의한 불편사항을 개선하고자 통기성이 있으며, 적당한 신축성이 있는 소재를 선정하였다. 소재의 물성은 다음과 같다(Table 4).

4.3.3. 1차 프로토타입 설계 및 제작

소프트로봇과 의복은 개인맞춤으로 진행해야 하므로 연구참여자 1인의 사이즈를 참고하여 설계 및 제작을 진행하였다. Stretch Fabrics Pattern Making (Keith Richardson, Fairchild Books. The U.K.)에서 제시하는 신축성 원단의 제도법과 Julie Ltd. (Canada)의 Skate Clothes Pattern을 복합적으로 사용하여 의복의 신축력을 계산하여 설계하였다. 의복 설계에는 Yuka apparel CAD system(Youth Hitech)이 사용되었으며, 제작된 프로토타입은 다음과 같다(Fig. 4).

4.4. 1차 프로토타입 평가

4.4.1. 의복압과 변형률 평가

의복 설계의 적합성 파악을 위해 CLO 3D(CLO Virtual Fashion Inc.)를 사용한 3차원 가상착의 평가를 통해 의복의 변형률, 의



Fig. 4. 1st prototype (left: one-piece type, right: two-piece type).

복압의 자료를 수집, 분석하였다(Table 5). Clo에서의 변형률은 의복이 외력에 의해 변형되는 정도를 백분율과 색상표로 나타낸 것이고, 의복압은 원단의 단위 면적당 적용되는 변형의 힘으로서, -100 gf/cm²부터 100 gf/cm²까지의 수치와 색상표로 나타낸 것이다. 소프트로봇의 3차원 가상착의 시 의복압과 변형률을 수치와 색분포도로 제시하였다. 색분포도는 힘이 0에 가까울수록 녹색, 힘이 많이 적용되는 부위는 붉은색으로 표현된다. 그 결과, 전체적으로 신축성이 없는 루프가 지나가는 부분과 하의 밑단 부분에서 지나치게 타이트하다고 판명되었으며, 변형률의 경우는 어깨(134.05%), 전완(121.05%), 허벅지(117.8%)에서 높게 기록되고 있어, 의복의 여유량이 많이 부족하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 의복압의 경우, 전완 (70 gf/cm²), 허벅지(59.06 gf/cm²), 어깨점(34.04 gf/cm²), 엉덩이 돌출점 (33.93 gf/cm²)에서 높게 나오는 것으로 나타났다. 따라서, 변형률과 의복압이 높게 나오는 부분은 의복으로서 불편함을 줄 가능성이 있고, Tri-LAS의 움직임을 방해하는 요소로 작용하므로 패턴의 수정이 요구되었다.







4.4.2. 맞춤새와 디자인 사용성 평가

투피스형 프로토타입은 인체와의 접촉면이 적기 때문에, 착

Table 4. Fabric properties

	Composition(%)	Density(loop/5.0 cm)	Tensile strength(N)
Bodice	Polyester 93.2%	Wale 87.6	Wale 689.9
	Polyurethan 6.8%	Course 127.8	Course 551.8
Belt casing	Polyester 100%	Warp 399.6	Warp 760
		Weft 185.6	Weft1300

Table 5. Evaluation of 1st prototype

	Front	Back	Side (right)			
Strain (%)				Lateral shoulder	134.05	
				Mesosternal	107.50	
				Axillary level at midspine	112.80	
					Lateral waist	111.45
					Buttock protrusion	114.35
					Mid thigh-front	118.55
					Mid thigh-back	117.05
					Biceps	106.55
					Forearm	121.05
Clothing pressure (gf/cm ²)				Lateral shoulder	34.04	
				Mesosternal	26.25	
				Axillary level at midspine	12.84	
					Lateral waist	11.64
					Buttock protrusion	33.93
					Mid thigh-front	61.52
					Mid thigh-back	56.60
					Biceps	21.40
					Forearm	70.01

용 시 구속감이 적다는 장점이 있었다. 하지만, 최소한의 케이싱만으로 둘러져 있으므로 앵커링의 고정력이 부족하여 힘의 분산이 적절하게 이루어지지 않았다. 또한, 착탈의 시 Tri-LAS 벨트 부분의 꼬임 현상이 발생하는 등으로 인해 불편함이 발생하였다. 반면 원피스형 타입은 인체에 밀착된 형태이므로 착용 시 답답함을 느끼기도 하였지만, 착탈의가 편리하고 앵커링 구조의 적절한 고정으로 기능성이 저하되지 않는 디자인으로 판단되었다.

4.5. 2차 프로토타입 설계 및 제작

1차 프로토타입의 평가결과, 두 가지 유형의 디자인 중 원피스 형태의 웨어러블 소프트로봇을 토대로 디자인을 수정한 후, 다시 디자인 설계 및 제작의 단계로 회귀하여 디자인 아이디어를 논의하고 디자인을 발전시키도록 하였다. 디자인 수정사항은 다음과 같다. 첫 번째로, 3차원 가상착의 평가를 통하여 의복압이 높게 나왔던 허벅지 부위 및 여유량이 부족한 어깨, 전완 부위의 패턴에 여유량을 줄 수 있도록 수정하였으며, 피험자에게 착의 후 맞음새 및 여유량이 좋지 않은 부분을 고려하여 패턴을 수정 보완하였다.

1차 프로토타입에서 터널형 구조의 봉제 방식 마감이 좋지 않고, Tri-LAS 벨트의 움직임에 따라 봉제선에 걸리게 되는 문제가 발생하여, 상침과 지그재그 스티치에서 커버스티치로 변경하였다. 이와 같은 봉제법의 변경으로 시접 부분이 쓸리거나 불편함을 느끼지 않게 함과 동시에 Tri-LAS 벨트가 몸의 동작에 맞게 잘 움직일 수 있도록 보완하였다. 또한, 심미적으로 디

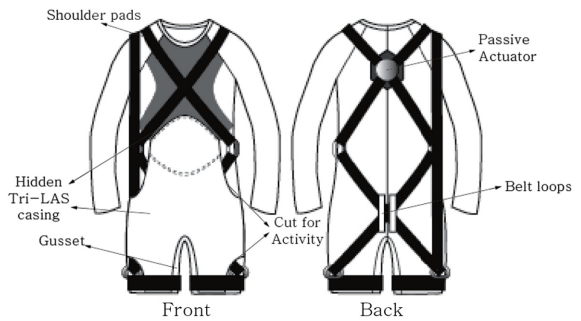


Fig. 5. Design of 2nd prototype.

자인이 깔끔하게 보이도록 Tri-LAS 벨트가 외부로 노출되어서 움직임의 방해로 받는 현상을 줄이기 위해서 절개라인 디자인을 일부 수정하였다. 심미성의 향상을 위해서 소재와 소재의 색상 조합을 변경하였다. 또한, 상지 보조 소프트로봇의 밀착성이 낮아 의복과의 유격이 생기는 문제를 해결하기 위해 어깨에는 패드를 삽입하고 엉덩이 부분에 무게를 추가하여 2차 디자인 설계를 보완하였다. 벨트 고리 등 사용하는 부자재도 더욱 경량 및 소형의 제품으로 변경하고, 고리가 필요하지 않은 부분은 삭제하여 앵커링 및 고리 부위의 신체적 부담이 경감되도록 하였다(Fig. 5).

4.6. 2차 프로토타입 평가

4.6.1. 상지 보조 웨어러블 소프트로봇 착용평가

의복 맞음새의 적합성을 검증하기 위해 의복의 외관에 대한



Fig. 6. Wear test of upper limb assistive wearable softrobot (left: 1st prototype, right: 2nd prototype).

주관적 평가와 착용자의 주관적 감각평가를 복합적으로 실시한다(Lee, 2014). 특수 의복의 경우, 이에 더하여 의복의 특성에 맞는 평가항목을 추가하여 평가하기도 한다. 본 연구에서는 웨어러블 소프트로봇의 평가를 함에 있어서 의복에 대한 평가와 더불어 소프트 로봇에 관한 치수 적합성, 동작 적합성, 디자인 요소 관련 평가가 동시에 시행되었다. 평가를 위한 척의 모습은 다음 그림과 같다(Fig. 6).

우선 치수 적합성에 관한 평가를 살펴보면(Fig. 7), 1차 프로토타입은 목둘레, 허벅지 둘레, 어깨너비, 소매 둘레, 손목 둘레, 앞땀, 옷길이, 밑위 길이, 지퍼 길이 등에서 다소 작게 느끼고 있었다. 목둘레, 겨드랑이 둘레, 허리둘레, 뒤통, 소매길이를 제외하고는 다소 작게 느끼고 있는 것으로 보아 1차 가상 척의 결과와 마찬가지로 의복의 인체 밀착정도가 높은 것으로 나타났다. 프로토타입 2의 경우에는 목둘레, 허벅지 둘레, 어깨너비, 옷 둘레, 밑위 길이 등에서 다소 작게 느끼고 있었

으며, 가슴둘레, 겨드랑이 둘레, 소매 둘레, 손목 둘레, 소매길이, 지퍼 길이 등에서 적당하게 느끼고 있는 것으로 보아 1차 프로토타입과 비교하면 2차 프로토타입에서는 여유분이 적당하게 보완되었음을 알 수 있다. 하지만, 허리둘레에서 다소 크다고 판단한 점에 유의해야 하는데, 허리 부위에서는 Tri-LAS 벨트의 앵커링 지점이 존재하므로 허리둘레의 여유분이 과도하게 설정되면 앵커링 위치가 변동할 수 있기에 주의하여야 할 것이다. 1차와 2차의 프로토타입은 전반적으로 다소 작게 느껴진다고 응답하였으나, 의복이 밀착 의복으로서 다소 작게 느껴지는 것은 적절하게 설계된 것이라고 볼 수 있다. 소매 둘레 및 손목 둘레, 어깨너비 등 팔 관련 항목에서는 1차 프로토타입과 비교하면 2차 프로토타입에서 적당하다고 평가되었는데, 이는 팔의 편안함이 중요한 의복의 특성상 2차 프로토타입에서 팔 부위 사이즈 문제는 개선이 되었다고 여겨진다. 또한, 밑위 길이 부분에서는 두 가지 유형의 프로토타입에서 둘 다 약간 짧다고 대답하였는데, 이는 배색 부위에 벨트의 움직임에 의해 신축성 없는 소재를 적용하였기에 신축성이 줄어들었기 때문이며, 재보완이 요구된다.

동작 적합성 부분에서는 팔의 각도를 변경하여 드는 자세에서 의복이 동작을 구속하는지, 소프트로봇에 의해 동작에 방해 받을지에 관련하여 평가하였다(Fig. 8). 1차 프로토타입의 경우 팔을 위로 높이 드는 자세이거나 팔에 회전력을 준 상태에

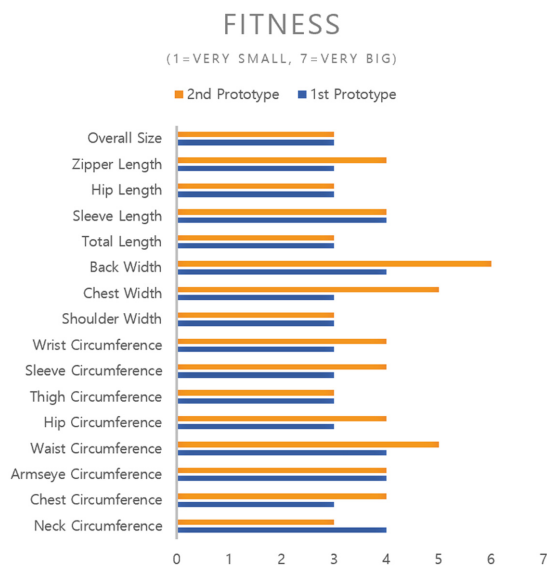


Fig. 7. Fitness evaluation.

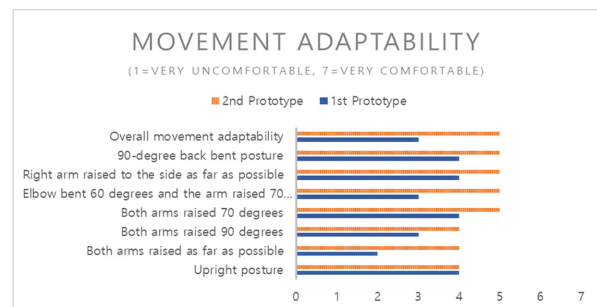


Fig. 8. Movement adaptability evaluation.

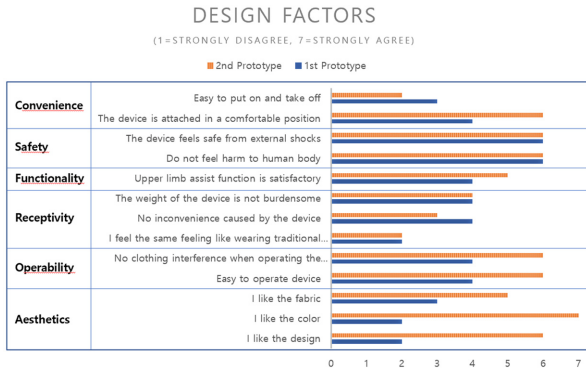


Fig. 9. Design factors evaluation.

서 들어 올리는 자세에서 불편함을 느낀 것으로 나타났는데, 이는 1차 프로토타입의 소매 둘레나 길이가 다소 짧게 설계된 것에서 기인한 것으로 2차 프로토타입의 보완 설계 후 보통으로 개선된 것으로 나타났다. 그 외에도 2차 프로토타입은 1차 프로토타입에 비해서 다소 편하게 느끼고 있는 것으로 나타났다. 2차 프로토타입의 보완 설계가 적절하게 이루어진 것으로 나타났다.

디자인 요소에 관한 평가는 심미성과 조작성, 수용성, 기능성, 안전성, 편의성 항목으로 분류되었다(Fig. 9). 심미성 항목인 디자인과 색상, 소재에 관련되어 2차 프로토타입의 평가가 1차 프로토타입보다 크게 향상된 것으로 보인다. 유색 색상을 사용한 1차 프로토타입과 달리 깔끔한 무채색을 사용하고, 보다 신축성 있는 경량 소재를 사용하였기에 2차 프로토타입의 평가가 높게 나타나고 있었다. 또한, 소프트웨어의 조작성 부분에서 2차 프로토타입이 더 높은 평가를 받았는데, 봉제법과 패턴을 수정을 통해 소프트웨어의 Tri-LAS 벨트의 움직임이 유연해졌기 때문으로 보인다. 그러나, 의복의 수용성 항목에서는 일반 옷보다 불편함을 느낀다고 평가하였는데, 이는 밀착 의복이며 소프트웨어가 부착된 특수기능복으로써, 일반 의복과는 다른 목적성을 가지기 때문에 불편함을 느끼고 있는 것으로 나타났다. 하지만, 착용감과 실용성의 향상을 위해 인체에 대한 부담감을 감소시킬 방안을 마련해야 할 것이다. 기능성 항목은 2차 프로토타입에서 더 향상된 것으로 나타나고 있었으며 이는 조작성 항목과 마찬가지로 봉제법, 패턴설계 및 소재의 보완이 효과적으로 이루어진 것임을 알 수 있었다. 안전성 부분은 두 가지 프로토타입 모두 안전하다고 느낀다고 답하였다. 반면 편의성 면에서는 두 의복 모두 입고 벗기가 불편하다고 답하였는데, 밀착 의복이며 여밈이 등 방향에 있어 옷을 갈아입을 때 불편함을 느끼고 있는 것으로 나타났다. 이는 소프트웨어의 Tri-LAS 벨트가 인체의 앞부분을 가로지르는 방식으로 설계되어 있어 불가피하게 뒤 여밈으로 설계하였기에 나타나는 현상으로 보이며, 이는 소프트웨어의 설계단계에서 추가적인 보완이 필요한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 상지 보조 웨어러블 소프트웨어를 위한 설계 프로세스를 제시하고 이를 기반으로 상지 보조 소프트웨어의 의복화된 제품을 개발하였다. 소프트웨어의 의복화를 통해 인체 적합성을 높이며, 착용의 편의성과 소프트웨어의 효율성을 높일 수 있는 디자인을 탐구하고자 하였다. 개발 과정은 Dunne(2004), Regan et al.(1998), Kang et al.(2011), Cho and Lee(2013)의 프로세스 과정을 바탕으로 연구의 목적에 맞도록 4단계의 디자인 프로세스 과정을 설정하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다. 첫째, 타겟 그룹 면접 조사를 통하여 문헌 조사만으로 파악할 수 없는 작업환경과 관련한 실질적 정보를 비롯하여 상지 보조 웨어러블 소프트웨어 개발에 관한 의견을 자유롭게 파악하였다. 이를 통해, 사용자의 요구성능을 기능성, 심미성, 착용의 용이성, 쾌적성, 위생관리성으로 구분하였고, 상지 보조 웨어러블 소프트웨어의 전반적인 디자인 콘셉트를 정리하였다. 상지 보조 웨어러블 소프트웨어는 새로운 형태의 기능성 의복으로서, 소프트웨어의 기능성과 효율성, 의복의 인체 적합성 및 착용감을 향상시킬 수 있도록 설계하는 것을 기본적인 목표로 삼고 디자인 방향성을 설정하였다.

둘째, 인간공학적 디자인프로세스를 반영하여, 사용자의 요구성능에 부합할 수 있도록 프로토타입의 제작과 평가를 거쳐서 보완작업을 반복하였다. 1차 프로토타입의 디자인 설계의 실효성을 검증하기 위해서 3차원 평가를 통해 가상 의복압과 변형률을 평가하였다. 평가를 통하여 소프트웨어의 구동을 방해하는 요소를 수정하였으며 의복의 맞춤새를 검증하고 패턴설계에 반영하였다. 2차 프로토타입 설계에 있어서 1차 프로토타입의 문제점을 수정하고 보완한 디자인을 설계하였다. 제작 후 평가단계에서 1차와 2차 프로토타입을 실제 피험자에게 착용하여 치수 적합성 평가, 동작 적합성 평가, 디자인 요소 평가를 진행하고 개선점을 비교할 수 있게 하였다. 전반적으로 치수 적합성 및 동작 적합성 항목에서 2차 프로토타입이 더 나은 결과를 보였고, 디자인 요소 관련 항목에서는 심미성 및 조작성, 기능성 항목에서 더 좋다고 느낀다고 답하였다. 다만 수용성과 편의성 항목에서는 둘 다 불만족스러운 반응을 보였는데, 이는 의류의 보정 뿐만 아니라 공학적 측면에서의 보조기구 보정도 함께 이루어져야 할 부분이라고 사료된다. 동작성과 심미성 등에서는 긍정적 평가를 얻었지만, 향후 프로토타입 고도화 시에 기능과 편의적인 부분을 더 발전시키기 위해서는 추가적으로 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 소프트웨어와 의복을 융합시키기 위해 인간공학적 프로세스를 적용하여 의복개발을 진행한데서 의의가 있다. 또한, 학제 간 융합연구로 각 요소의 상호작용을 고려하여 디자인을 설계한데서 의의를 찾을 수 있다.

첫째, 디자인 설계 시, 로봇장치 설계와 의복 설계가 동시에 고려되어야 한다는 점에서 차별성을 가진다. 소프트웨어와 의복의 동시 설계가 이루어지는 경우, 각 분야에서 조금이라도 변

화가 발생한다면, 해당 분야에 대한 지식과 이해를 바탕으로 연쇄적인 보완 및 수정이 이루어져야 한다. 예를 들면, 로봇의 벨트의 마찰력에 의한 앵커링의 길이 조절에 의해 의복의 절개 및 여밈 등이 동시에 변화할 수 있으므로, 즉각적인 보완을 위해서는 개발자들은 해당 내용에 대한 충분하고 정확한 파악이 필요하다. 특히, 본 연구와 같은 학제 간의 융합 연구에서는 상호 간의 연구 분야에 대한 이해와 협력을 통해서 마찰을 줄여 나가는 과정을 수행하였다.

둘째, 평가단계에서 의복의 맞춤새 및 적합성뿐 아니라, 로봇의 기능성이 동시에 평가되어야 한다는 점에서 차별성을 가진다. 소프트로봇을 의복화 하는 과정에서 의복과 로봇 중 한 분야만 좋게 평가되었다면, 성공적인 설계과정을 거쳤다고 할 수 없으므로, 의복 기능으로서의 기능성과 장치의 효용성으로서의 기능성이 잘 조화를 이루고 있는지 평가하였다.

본 연구는 소프트로봇의 특성상 특정인물의 신체사이즈 및 근육의 움직임에 반영하여 소프트로봇의 구조를 설계해야 했으므로 특정 1인을 대상으로 개인맞춤의복을 제작하고 평가하였다는 연구의 제한점을 가진다. 향후 소프트로봇 구조와 의복 패턴의 보완을 통해 더욱 넓은 범위의 사람에게 착용 가능한 사이즈 개발의 필요성이 있다고 하겠다. 따라서 본 연구의 결과를 통하여 융합 연구에서의 프로토타입 개발 방향성을 확립하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다. 추후보다 넓은 범위의 피험자를 포괄하는 웨어러블 보조기구의 개발 연구로 발전시켜 나가야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. NRF-2016R1A5A1938472).

References

- Asbeck, A. T., Schmidt, K., & Walsh, C. J. (2015). Soft exosuit for hip assistance. *Robotics and Autonomous Systems*, 73, 102-110. doi:10.1016/j.robot.2014.09.025
- Cha, J. H., Ryu, T. B., Choi, H. S., Lee, J. B., Kim, M. K., Chung, M. K., & Jeong, C. H. (2007). Survey of musculoskeletal disorders in Korean dentists. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 26(2), 137-147. doi:10.5143/jesk.2007.26.2.137.
- Cho, H., & Lee, J. H. (2013). A study of design process for sensor-based smart clothing based on requirement engineering. *Science of Emotion and Sensibility*, 16(3), 397-408.
- Choi, M. G., Choi, S. B., & Cha, S. E. (2006). A survey on the subjective symptoms and risk factors of musculoskeletal disorders in dentists. *Journal of the Korean Society of Safety*, 21(6), 106-115.
- Choi, S. W., Lee, J. C., Jang, H. D., Jeon, M. C., Kim, J. H., Kim, C. H., Park, S., & Shin, B. J. (2016). Work-related musculoskeletal disorders among spine surgeons. *Journal of the Korean Orthopaedic Association*, 51(6), 464-472. doi:10.4055/jkoa.2016.51.6.464
- Dunne, L. E. (2004). *The design of wearable technology - Addressing the human-device interface through functional apparel design*, Unpublished master's thesis, Cornell University, New York.
- Francés-Morcillo, L., Morer-Camo, P., Rodríguez-Ferradas, M. I., & Cazón-Martín, A. (2020). Wearable design requirements identification and evaluation. *Sensors*, 20(9), 2599. doi:10.3390/s20092599
- Galiana, I., Hammond, F. L., Howe, R. D., & Popovic, M. B. (2012, October). Wearable soft robotic device for post-stroke shoulder rehabilitation: Identifying misalignments. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 317-322). Vilamoura, Algarve, Portugal; IEEE. doi:10.1109/iro.2012.6385786
- Ha, H. J. (2017). Study on torso patterns for elderly obese women for vitalization of the silver clothing industry - Applying the CLO 3D program. *The Research Journal of the Costume Culture*, 25(4), 476-487. doi:10.7741/rjcc.2017.25.4.476
- Hong, G. J., Kim, G., Gwon, D. G., Yu, M. H., & Kim, N. G. (2006). Characteristics of the upper limb muscular activities using orthosis with artificial pneumatic rubber muscle. *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, (pp. 443-444) Jeju, Korea; KSPE.
- Jeong, B. Y. (2010). Ergonomics' role for preventing musculoskeletal disorders. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(4), 393-404. doi:10.5143/JESK.2010.29.4.393
- Kang, S. R., & Kim, Y. K. (2011). The problem of fit in wearable computers - Introduction of a design process based on clothing construction, *Journal of the Korean Society of Fashion Design*, 11(4), 119-134.
- Korean Agency for technology & Standards. (2015). The report of national anthropometric survey of Korea 2015. Seoul: KATS
- Kim, S. J., Park, J., Lee, W. S., Yoon, S. H., Jung, K. H., Kim, M. S., & Yoo, H. C. (2007). Development of an ergonomic product design methodology based on natural human motion analysis, *Journal of the Korean Society of Ergonomics Conference*, (pp. 354-357) Kimhae, Korea; ESK.
- Kim, I. Y. (2003). 특집 : 고기능 스포츠레저웨어와 섬유패션산업 ; 스포츠웨어의 디자인 프로세스 [Development of design process for sports wear], *Fiber Technology and Industry*, 7(4), 457-470.
- Koo, I., Yun, C., Costa, M. V., Scognamiglio, J. V., Yangali, T. A., Park, D., & Cho, K. J. (2014, September). Development of a meal assistive exoskeleton made of soft materials for polymyositis patients. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 542-547). Chicago, IL, USA: IEEE.
- Lamb, J. M., & Kallal, M. J. (1992). A conceptual framework for apparel design. *Clothing and Textiles Research Journal*, 10(2), 42-47. doi:10.1177/0887302X9201000207
- Lee, H., & Lee, J. (2019). A study on the development of wearable smart fashion product - Focused on the construction of optimized functionalities for particular needs. *Fashion & Textile Research Journal*, 21(2), 133-140. doi:10.5805/sfti.2019. 21.2.133
- Lee, H. J. (1999). *패션 머천다이징 [Clothing merchandising]*. Seoul: Kyohaksa.
- Lee, J. R. (2014). Eco-friendly smart outdoor jacket production and usability evaluation. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 38(6), 845-856. doi:10.5850/JKSC.2014.38.6.845
- Lee, S. Y. (2007). *Study on a model of design process for smart*

- sportswear, *Unpublished master's thesis*, Yonsei University, Seoul, Korea.
- 'Long arm brace'. (n. d.) *Modern Medical*. Retrieved January 12, 2021, from <https://mdmshop.kr/product/%EA%B8%B4%ED%8C%94%EB%B3%B4%EC%A1%B0%EA%B8%B0-%EA%B0%81%EB%8F%84%EC%A1%B0%EC%A0%88%ED%98%95/34/category/27/display/1/>
- Ludewig, P. M., & Cook, T. M. (2000). Alterations in shoulder kinematics and associated muscle activity in people with symptoms of shoulder impingement. *Physical therapy, 80*(3), 276-291. doi: 10.1093/ptj/80.3.276
- Mastenbroek, B., de Haan, E., van den Berg, M., & Herder, J. L. (2007). Development of a mobile arm support (Armon) - Design evolution and preliminary user experience. *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics* (pp. 1114-1120). Noordwijk, Netherlands: IEEE.
- 'Mobile Arm Supports Archives'. (2017). *JAECO Orthopedic*. Retrieved February 9, 2021, from <http://jaecoorthopedic.com/product-category/mobile-arm-supports/>
- O'Neill, C. T., Phipps, N. S., Cappello, L., Paganoni, S., & Walsh, C. J. (2017). A soft wearable robot for the shoulder - Design, characterization, and preliminary testing. *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (pp. 1672-1678). London, United Kingdom: IEEE.
- Park, D., & Cho, K. J. (2015). Design and simulation of the adjustable weight bearing system to adjust the torque change by the distal joint on 2DOF body limb. In *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 647-651). Busan, South Korea: IEEE.
- Park, D., & Cho, K. J. (2017). Development and evaluation of a soft wearable weight support device for reducing muscle fatigue on shoulder. *PLoS One, 12*(3), e0173730. doi: 10.1371/journal.pone.0173730
- Park, D., Koo, I., & Cho, K. J. (2015). Evaluation of an improved soft meal assistive exoskeleton with an adjustable weight-bearing system for people with disability. *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (pp.79-84). Singapore, Singapore: IEEE.
- Park, J. S., & Kim, J. Y. (2012). Workload evaluation of various shoulder posture by using muscle force, fatigue and psychophysical workload. *Journal of the Ergonomics Society of Korea, 31*(2), 281-289. doi:10.5143/JESK.2012.31.2.281
- Park, Y. M. (2019, February 14). *과로하는 의사들 근골격계 질환에 스트레스 달고산다* [Overworking doctors are stressed out by musculoskeletal disorders]. *The Medical Times*. Retrieved December 06, 2020, from <https://www.medicaltimes.com/Users/News/NewsView.html?ID=1124382>
- Regan, C. L., Kincade, D. H., & Sheldon, G. (1998). Applicability of the engineering design process theory in the apparel design process. *Clothing and Textiles Research Journal, 16*(1), 36-46. doi:10.1177/0887302X9801600105
- Song, J. Y., Kim, H. G., & Yoon, J. W. (2015). Development of an assistant robot for use in hot forging work sites and its performance evaluations using electromyographic signals. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 21*(5), 427-433. doi:10.5302/J.ICROS.2015.15.9021
- Stirling, L., Yu, C. H., Miller, J., Hawkes, E., Wood, R., Goldfield, E., & Nagpal, R. (2011). Applicability of shape memory alloy wire for an active, soft orthotic. *Journal of materials engineering and performance, 20*(4), 658-662. doi:10.1007/s11665-011-9858-7
- Szeto, G. P. Y., Ho, P., Ting, A. C. W., Poon, J. T. C., Tsang, R. C. C., & Cheng, S. W. K. (2010). A study of surgeons' postural muscle activity during open, laparoscopic, and endovascular surgery. *Surgical endoscopy, 24*(7), 1712-1721. doi:10.1007/s00464-009-0834-3
- Ueda, J., Ming, D., Krishnamoorthy, V., Shinohara, M., & Ogasawara, T. (2010). Individual muscle control using an exoskeleton robot for muscle function testing. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 18*(4), 339-350. doi:10.1109/TNSRE.2010.2047116
- Wehner, M., Quinlivan, B., Aubin, P. M., Martinez-Villalpando, E., Baumann, M., Stirling, L., Holt, K., Wood, R., & Walsh, C. (2013). A lightweight soft exosuit for gait assistance. *2013 IEEE international conference on robotics and automation* (pp. 3362-3369). Karlsruhe, Germany: IEEE.

(Received 27 October, 2020; 1st Revised 28 November, 2020; 2nd Revised 26 December, 2020; 3rd Revised 4 January, 2021; Accepted 29 January, 2021)