

## 와이어 구동식 중량물 권양 시스템을 위한 퍼지제어기 설계 및 작업자 모델링

### Operator Modeling and Design of Fuzzy Controller for a Wire-Driven Heavy Material Lifting System

송보웨이\* · 서현덕\* · 이연정\*

Bo-Wei Song, Hyun-Duk Seo, and Yun-Jung Lee<sup>†</sup>

\*경북대학교 IT대학 전자공학부,

<sup>†</sup>School of Electronics Engineering, College of IT Engineering, Kyungpook National University

#### 요 약

본 논문에서는 중량물을 들어 올리는 작업자를 돕기 위한 와이어 구동식 권양 시스템의 제어기와 제어기 설계를 위한 작업자 모델링을 제시한다. 와이어 구동식 중량물 권양 시스템은 사람이 전체 제어루프에 포함된 인간지원시스템의 일종이다. 사람의 제어 특성 모델과 물건을 들어 올리는 작업자의 힘을 덜어주어야 하는 요구조건을 고려한 퍼지제어기 설계 방식을 제안한다. 또한 권양 초기 구간에서 중량물의 무게를 자체적으로 측정하여 구동될 수 있는 방식도 소개한다. 마지막으로 성능 검증을 위해 실험을 통하여 제어기의 무게 측정의 정확도를 분석하고 중량물을 작업자가 작은 힘으로 편하게 들어 올릴 수 있는지 그 결과를 분석한다.

**키워드** : 인간지원시스템, 인간-기계 동시제어, 중량물 권양, 근력 지원 시스템.

#### Abstract

This paper presents design methods of a fuzzy controller and an operator model for a wire-driven heavy material lifting system helping human workers. The wire-driven heavy material lifting system is a kind of human-assistive systems in which a human is involved in the control loop. Thus, human's control characteristics and requirement of reducing worker's force to lift a heavy material are considered in the design process of the proposed fuzzy controller. An automatic weight measurement algorithm during the early stage of lifting is also introduced. Finally, the effectiveness and performance of the proposed system are proved by experiments.

**Key Words** : Human-assistive device, Human-in-the-loop system, Heavy material lifting system, Power assist system.

## 1. 서 론

사람이 무거운 물체를 들어 올리는 작업을 하는 경우는 공장에서 여행가방을 컨베이어 장치에 올리는 작업, 물류센

터에서 택배 물품의 상차 작업, 의료분야의 환자이송작업, 농촌 및 어촌에서의 상품 적재 작업 등 다양한 분야에서 찾아볼 수 있다. 이러한 작업 환경의 특징은 중량물의 무게나 형태가 가변적이고 작업 장소가 고정적이지 않을 수 있으므로 완전 자동화된 시스템 또는 화물이송 이동로봇[1, 2] 등으로 작업자를 대체하기 어렵다는 것이다.

작업자의 극심한 피로와 신체의 국부적인 통증까지도 유발하게 되는 중량물 수동 이동 작업을 도와주기 위하여 작업자가 작은 힘만으로도 물체를 들어 올릴 수 있도록 보조적으로 도와주는 장치에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 기존의 장치들은 PLAD(personal lift assistive device), 착용형 로봇(wearable robot), IAD(intelligent assist device) 등 크게 3가지로 분류해 볼 수 있다(그림 1 참조).

첫째, PLAD는 착용형 수동 시스템으로 신체의 일부에 밴드타입의 탄성체를 부착하는 방법으로 몸을 굽혔다가 펼 때에 탄성밴드의 도움으로 작은 힘으로 원래 자세로 복원될 수 있는 이점이 있다. 그러나 몸을 웅크리거나 쪼그려 앉을

접수일자: 2013년 9월 17일

심사(수정)일자: 2013년 10월 10일

게재확정일자: 2013년 10월 15일

<sup>†</sup> Corresponding author

이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 연구 결과임(No. 2012R1A1A2008856). 또한 이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

때에는 오히려 더 많은 힘을 들여야 하는 단점이 있다[3].



그림 1. 인간 지원 장치 연구 동향

Fig. 1. Conventional research for human-assistive device

둘째, 착용형 로봇은 착용형 다관절 능동 시스템으로 작업자의 근전도 신호 등을 이용하여 작업자의 의도에 따라 중량물 이동 작업을 가능하게 해주는 시스템이다. 그러나 작업자의 신체적 조건에 따라 미세 조정이 필요하며 다관절의 복잡한 시스템이고 매우 고가여서 범용적으로 실용화되기에는 아직 어려운 단점이 있다[4, 5].

셋째, IAD는 와이어 구동 시스템으로서 작업자가 햅틱 인터페이스를 이용하여 조작하는 시스템이다. 기존에 개발된 IAD 시스템은 버튼 조작 또는 장갑형 핸들러를 이용하여 직접적인 작업자의 의도 파악은 용이하나 별도의 햅틱 장치의 착용 및 조작은 역으로 작업자를 불편하게하고 조작 장치가 커지는 단점이 있다[6, 7].

본 논문에서는 작업 공간이 고정적이지 않은 경우에 초점을 맞추어 이에 적합한 와이어형 구조의 비착용형 시스템을 대상으로 한다. 또한, IAD와 달리 와이어에 센서를 부착하여 별도의 핸들러 없이 맨손으로 직접 물체나 와이어 손잡이를 쥐고 조작하는 시스템에 대해 논하고자 한다. 앞으로 이러한 본 논문의 대상 시스템인 중량물 권양 장치를 WHAD(wire-driven human assistive device)로 칭하기로 한다.

WHAD는 작업자를 도와 중량물을 함께 들어 올리는 역할을 담당하므로, 전체 시스템은 제어 관점에서 살펴보면 중량물의 위치 및 속도를 사람과 WHAD가 동시에 제어하는 이른바 Human-in-the-loop 제어시스템이다.

기존에 Sawai 등은 중량물을 들어 올리는 시스템의 모델에서 사람이 인식하는 무게와 관성력에 관여하는 무게를 조절하는 방식을 제안하였으며 모터의 위치 제어를 위해서는 선형제어기를 사용하였다[8]. Terashima 등은 와이어의 진동 등을 시스템의 불확실성으로 간주하고 강인한 안정성을 만족하면서 작업자가 가하는 힘에 비례하는 물체의 속도를 생성하는 제어기를 제안하였다[9]. 그러나 이들 기존 연구에서는 Human-in-the-loop 제어시스템의 관점에서 작업자의 의도와 운동에 대한 고려가 없으며, 중량물의 무게를 사전에 가정해야하는 제약점이 있다.

본 논문에서는 작업과정에서 사람의 영향력을 분석하기 위해 사람의 제어 특성을 모델링하는데 적합한 퍼지모델을 사용한 작업자 모델링 방법을 제시하고, 사람이 느끼는 중량물의 무게와 안정성 등을 동시에 고려할 수 있는 퍼지제어기를 제안한다. 또한 중량물의 무게를 측정하는 알고리즘을 포함한 전체 제어시스템의 성능을 실험을 통하여 검증한다.

본 논문의 구성은 먼저 전체 시스템 구성 및 작업자 모델

링에 대해 언급하고, 다음에 제어시스템 설계를 다루며, WHAD 시스템의 성능 검증을 위한 실험과정을 소개한다. 마지막으로 결론과 향후 과제에 대해 요약한다.

## 2. 전체 시스템 구성 및 작업자 모델링

WHAD 시스템의 전체 개념도와 구성은 그림 2, 3과 같다. 작업자는 중량물에 대한 시각 및 감각 정보를 통해 들어 올리는 위치( $p$ )와 중량물의 이동속도( $v$ )를 인식하고, 힘( $F_h$ )을 물체에 인가한다. 제어기는 중량물의 무게를 포함하는 와이어 장력( $F_l$ )을 측정하고 작업자가 가한 힘의 크기( $F_h$ )에 따라 중량물을 들어 올리는 액추에이터의 힘( $F_m$ )을 조절하는 방식으로 WHAD 시스템이 동작된다.

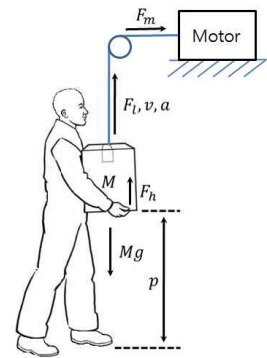


그림 2. 와이어 구동 인간지원시스템의 전체 개념도  
Fig. 2. Schematic drawing of WHAD system

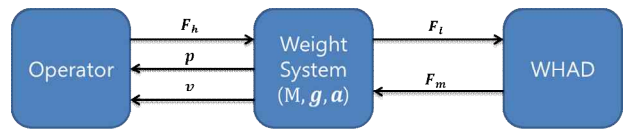


그림 3. 와이어 구동 인간지원시스템의 전체 구성도  
Fig. 3. System block diagram of WHAD

작업자가 지면으로부터 중량물을 들어 올릴 때, 작업자가 인가하는 힘( $F_h$ )과 센서로부터 측정되는 와이어 장력( $F_l$ )과 액추에이터의 힘( $F_m$ )과의 관계식은 식 (1)과 같다. 즉, 작업자가 지면으로부터 중량물을 들어 올릴 때, 센서로부터 측정되는 힘( $F_l$ )은 액추에이터의 힘( $F_m$ )과 같다. 이는 물체의 운동에 필요한 힘( $Ma$ )과 물체에 작용하는 중력( $Mg$ )의 합에서 작업자가 인가한 힘( $F_h$ )을 뺀 것과 같다.

$$F_l = F_m = Ma + Mg - F_h \quad (1)$$

한편, 그림 4는 작업자가 WHAD를 사용하지 않은 상태에서 자연스럽게 5Kg의 물체를 들어 올릴 경우 측정된 힘( $F_h - Mg$ )의 결과를 보여준다. 측정방법은 3차원 모션 캡처 장비(VICON)를 사용하여 시간에 따른 중량물의 위치 데이터를 입력받은 다음 미분 연산을 통하여 시간에 따른 힘의 크기 관계로 나타내었다.

물건을 들어 올려야 한다는 작업의 목적과 들어 올려야

하는 목표 위치가 주어졌을 경우 어떠한 과정을 거쳐 사람이 그림 4와 같은 패턴의 힘을 생성하는 것인가에 대해 생각하여보자. 사람은 그림 5와 같이 시각정보 입력과 뇌에서의 판단 및 계획, 그리고 팔의 동작을 사용한다고 볼 수 있다. 작업자의 모델링은 그림 4와 같은 패턴의 분석과 작업자의 판단부와 동작부에 대한 가정을 통하여 그 구조를 먼저 정하고 파라미터 선정을 통하여 제시된 모델이 그림 4와 같은 패턴을 생성할 수 있음을 보임으로서 모델의 타당성을 검증하는 과정을 통하여 이루어진다.

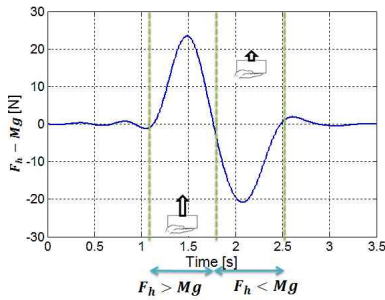


그림 4. 사람이 중량물을 들어 올릴 때 힘의 패턴

Fig. 4. The force pattern when a human lift a object

그림 5의 작업자 모델 구조는 다음과 같은 가정 하에 정한 것이다. 사람은 중량물의 위치 및 속도 정보( $p, v$ )를 시각을 통해 입력받은 후, 사고 과정을 통하여 힘의 예상 크기 패턴( $F_d$ )을 생성한다. 힘  $F_d$  패턴 생성을 두 부분으로 나누어 보면, 물체를 들어 올리는 초기 및 중기에는 힘 제어를 실시하고 목표 위치 부근에서는 목표 위치에 정지하기 위하여 속도에 따른 힘 패턴을 생성한다. 생성된 힘  $F_d$  패턴이 팔의 근육계로 명령되면 팔은 자체 동특성( $G(s)$ )에 따라 최종적인 힘  $F_h$  을 출력한다.

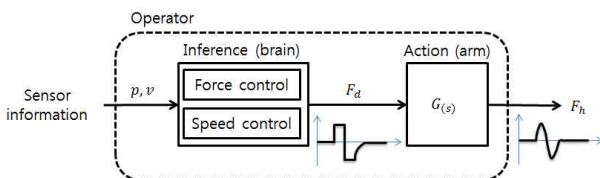


그림 5. WHAD 시스템 작업자 모델 구조

Fig. 5. Structure of operator model in WHAD system

그림 5의 판단 및 동작 부분을 구체적으로 모델링하는 것에 대하여 살펴보자. 먼저 위치 정보를 보고 예상 힘의 패턴( $F_d$ )을 만들어내는 판단부는 사람의 사고 및 판단 논리와 가장 유사하게 표현할 수 있는 퍼지논리 모델을 사용하여 모델링한다. 출력의 형태를 수식으로 표현할 수 있는 TS(Takagi-Sugeno) 퍼지방식을 사용하여 판단부를 그림 6과 같이 If/then 규칙으로 구성한다[10]. 규칙은 가속운동에 필요한 힘을 생성하는 것(Rule 1), 최소한의 힘을 주어 중력에 의해 감속이 일어나도록 하는 것(Rule 2), 그리고 목표 위치에 정지하기 위해 속도에 비례하는 힘을 생성하는 것(Rule 3)으로 구성된다. 각 규칙의 출력 힘에서 물체의 무게( $Mg$ )가 더해지는 것은 사람이 무게를 측정하여 힘을 생성한다는 의미가 아니라 사람이 물체를 들고 정지해 있기 위해 기본적으로 물체의 중력을 상쇄하는 힘을 무의식적으로

로 출력하게 되는 것을 표현한 것이다.

- Rule 1. If  $p/p_d$  is S, then  $F_d = c_1 + Mg$ .  
 Rule 2. If  $p/p_d$  is M, then  $F_d = c_2 + Mg$ .  
 Rule 3. If  $p/p_d$  is B, then  $F_d = -kv + Mg$ .

그림 6. 사고 및 판단 과정에서의 TS 퍼지규칙  
 Fig. 6. TS fuzzy rules in a process of inference

다음 단계에서는 사고과정을 거쳐 생성된 힘의 패턴( $F_d$ )을 입력받아 근육을 통해 실제 힘( $F_h$ )으로 출력하는 동특성 부분( $G(s)$ )을 모델링 한다. 사람의 시각 입력에 대한 팔 근육의 반응에 대한 동특성은 S. Lee 등에 의해 식 (2)와 같은 구조적 모델이 제안된 바 있다[11, 12]. 본 논문에서는 2차 동특성 시스템으로 표현되는 이 모델을  $G(s)$ 에 적용한다.

$$G(s) = \frac{b_v s + k_v}{a_m s^2 + b_m s + k_m} e^{-s T_d} \quad (2)$$

이제 그림 5와 같은 작업자 모델이 그림 4의 예와 같은 힘의 패턴을 생성하기 위한 판단 및 동작부의 파라미터들을 결정하여 보자. 그림 6의 퍼지규칙의 입력에 대한 소속도 함수는 그림 7과 같이 정한다. 물체의 무게( $M$ )가 5Kg 인 것을 알고 그림 4에서 힘의 최대·최소 크기로 부터  $c_1$ 과  $c_2$ 는 각각 24N, -23N 로 정한다. 시각 입력에 대한 반응의 지연시간  $T_d$  값은 일반적인 사람의 동특성에 대한 기준연 구결과에 따라 180ms로 정한다[12]. 그 외의 파라미터들은 Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 그림 5의 모델 출력과 그림 4의 실제 출력 간의 오차를 최소화하도록 정한다.

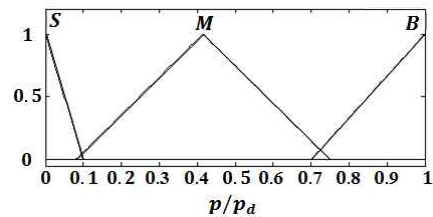


그림 7. 위치정보의 입력함수에 대한 소속도

Fig. 7. The membership function for variable  $p/p_d$

그림 8은 목표 위치( $p_d$ ) 대비 실제 위치( $p$ )와 이동 속도 ( $v$ ) 정보를 입력받아 그림 6의 퍼지규칙을 이용하여 힘의 예상 패턴( $F_d$ )을 생성한 결과이고, 그림 9는 최종적인 힘의 출력( $F_h$ )을 작업자 모델 출력과 실제 사람의 힘 출력(그림 4)과 비교한 결과이다. 그림 9로부터 제시한 작업자 모델이 실제 사람의 힘 출력과 매우 유사한 패턴을 생성할 수 있음을 알 수 있으며, 이로부터 판단 및 동작부로 분리한 WHAD를 조작하는 작업자의 모델링이 합당함을 알 수 있다. 그림 8과 그림 9의 그래프를 얻기 위해 선정된 나머지 파라미터들은 각각  $k = 6.5$ ,  $a_m = 0.0833$ ,  $b_m = 2$ ,  $k_m = 12$ ,  $b_v = 0$ ,  $k_v = 12$ 이다.

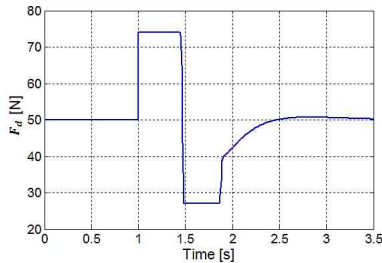


그림 8. 작업자의 사고 과정에서 생성되는 힘의 예상 패턴  
Fig. 8. The expected pattern of force in operator's inference

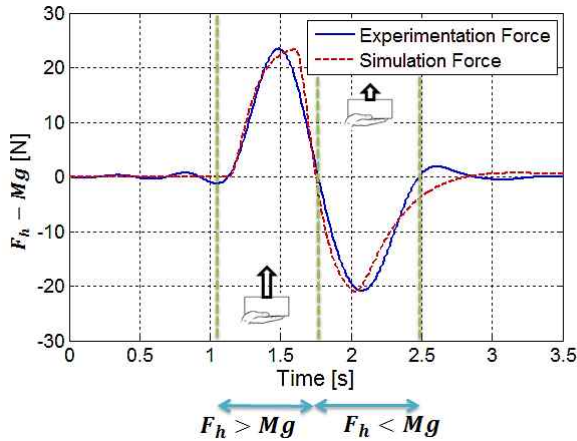


그림 9. Simulink 환경에서 작업자 모델링 결과  
Fig. 9. Experimental result of human modeling in Simulink

### 3. 제어 시스템 설계

#### 3.1 제어 시스템 구성

작업자와 협업하여 일을 수행하기 위한 WHAD의 제어기 구성은 그림 10과 같다.

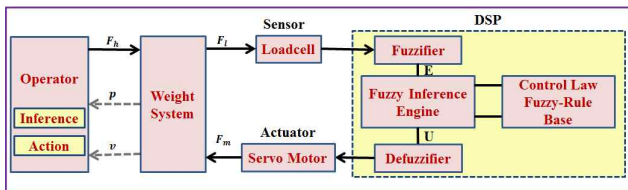


그림 10. WHAD 제어기 구조  
Fig. 10. Architecture of control system in WHAD

먼저 물체를 와이어로 감아올릴 때 센서를 사용하여 와이어의 장력( $F_i$ )과 물체의 가속도를 측정하고 미리 측정해 놓은 물체의 무게 정보를 함께 사용하여 작업자가 인가한 힘의 크기( $F_h$ )를 계산한다. 여기서 물체의 무게 측정 방법은 다음 절에서 기술한다. 제어기에서는 퍼지추론을 거쳐 작업자의 힘에 따른 액추에이터를 구동시키는 힘( $F_m$ )을 출력한다.

물체에 가해지는 작업자의 힘과 모터 출력 힘의 합은 중력을 보상하고 물체를 가속시키게 된다. 적절한 제어를 통하여 모터의 출력 힘을 크게하면 작업자의 힘이 작아도 물체의 동일한 운동을 발생시킬 수 있다. 즉, 모터의 힘과 작업자의 힘은 상호 보완적인 관계를 갖게 되는데 이를 분석하면 그림 11 및 식 (3)과 같다.

$$F_h + F_m = (F_h \cdot acc + F_h \cdot g) + (F_m \cdot acc + F_m \cdot g) \quad (3)$$

$$= (m_1 a + m_2 g) + [(M - m_1) a + (M - m_2) g]$$

여기서  $F_h \cdot acc, F_h \cdot g, F_m \cdot acc, F_m \cdot g$  는 각각 작업자의 힘( $F_h$ )과 모터의 힘( $F_m$ ) 중 가속에 필요한 힘과 중력을 보상하기 위한 힘이다.

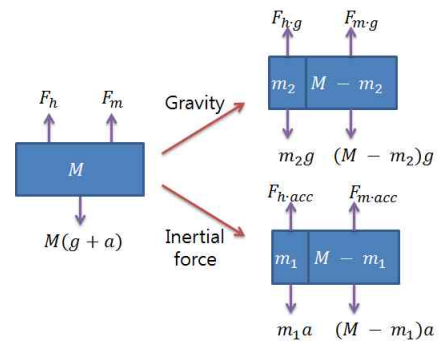


그림 11. 제어기 설계를 위한 관성력과 중력의 구분  
Fig. 11. Discrimination of inertial force and gravity for controller design

따라서 제어기 설계시 기본적인 상황에서는 입력된 힘( $F_h$ )과 출력되는 힘( $F_m$ )은 비례관계를 가지도록 하면 된다. 추가적으로 다양한 제어 조건을 반영하기 위하여 WHAD 설계를 위해 다음과 같은 3가지의 경우를 고려한다. 첫째, 사람이 발휘하는 힘은 기계처럼 일정한 힘을 유지하기 힘들기 때문에 작업자가 정지하기 위해 힘을 일정하게 유지할 경우 와이어, 중량물, 시스템 기구부의 진동과 센서의 노이즈에 둔감하도록 제어기를 설계한다. 둘째, 과도한 힘이 입력될 경우 시스템의 안전성을 위해 중량물의 무게가 무겁게 느껴지도록(속도가 제한되도록)하는 것을 고려하여 설계한다. 셋째, 중량물을 들어 올릴 경우 가속 및 감속 구간에서 인가해주는 힘의 크기를 조절하여 작업자가 느끼는 무게가 가볍도록 제어기를 설계한다.

그림 12는 이상의 3가지 고려사항을 반영한 제어기를 If/then 방식의 퍼지규칙으로 구성한 것을 나타낸다. 규칙후건부의 각 계수들은 식 (4)~(7)과 같이 결정된다. 여기서  $a_1$ 과  $a_2$ 는 작업자가 느끼는 관성 무게( $m_1$ , 그림 11 참조)에 상관있는 상수를 나타내며,  $a_1$ 은 과도한 힘에 대한 시스템의 안정성을 위해 중량물의 무게가 무겁게 느껴지도록 하고,  $a_2$ 는 안전한 가감속 구간에서 무게가 가볍게 느껴지도록 설계한다.  $b_1$ 과  $b_2$ 는 각 제어규칙의 출력함수간에 연결을 시키기 위한 상수이다.  $F_m \cdot safe$ 와  $F_h \cdot safe$ 는 각각 안전한 가감속 구간에서 모터와 작업자의 최대 힘이다.  $F_m \cdot 0$ 와  $F_h \cdot 0$ 는 시스템이 반응하는 모터와 작업자 힘의 최소값이다. 그리고 퍼지제어 규칙의 입·출력( $F_h \cdot acc, F_m \cdot acc$ )에 작



업자가 담당하는 중량( $m_2g$ )과 모터가 담당하는 중량( $M-m_2g$ )을 더하면 최종적으로  $F_h$ 와  $F_m$ 이 얻어진다(식(8),(9) 참조).

- |   |
|---|
| Rule 1. If $F_h \cdot acc$ is NB, then $F_m \cdot acc = (a_1 F_h \cdot acc - b_1)(M - m_1)$ . |
| Rule 2. If $F_h \cdot acc$ is NS, then $F_m \cdot acc = (a_2 F_h \cdot acc + b_2)(M - m_1)$ . |
| Rule 3. If $F_h \cdot acc$ is ZO, then $F_m \cdot acc = 0$ .                                  |
| Rule 4. If $F_h \cdot acc$ is PS, then $F_m \cdot acc = (a_2 F_h \cdot acc - b_2)(M - m_1)$ . |
| Rule 5. If $F_h \cdot acc$ is PB, then $F_m \cdot acc = (a_1 F_h \cdot acc + b_1)(M - m_1)$ . |

그림 12. WHAD 제어기의 퍼지규칙  
Fig. 12. Fuzzy rules of WHAD controller

$$a_1 = \frac{1}{2m_1} \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{1}{m_1} \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{F_m \cdot safe}{M - m_1} - a_1 F_h \cdot safe \quad (6)$$

$$b_2 = a_2 F_h \cdot 0 - \frac{F_m \cdot 0}{M - m_1} \quad (7)$$

$$F_h \cdot acc = F_h - m_2g \quad (8)$$

$$F_m \cdot acc = F_m - (M - m_2g) \quad (9)$$

한편  $F_h \cdot acc$ 에 대한 소속도는 그림 13과 같으며 이를 적용한 제어기의 입·출력 함수 관계는 그림 14와 같다. 소속도 함수의 구간값은 작업자 모델과 퍼지제어기를 연결한 시뮬레이션을 통하여 정하였다. 그림 14를 얻기 위해 적용된 각 상수의 값은  $m_1 = m_2 = 5Kg$ ,  $M = 20Kg$ ,  $F_h \cdot safe = 40N$ ,  $F_m \cdot safe = 90N$ ,  $F_h \cdot 0 = 10N$ ,  $F_m \cdot 0 = 0N$ 이다.

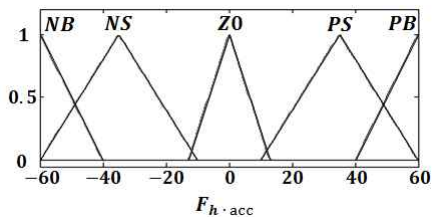


그림 13. WHAD 제어기에 사용된 소속도  
Fig. 13. The membership function for variable  $F_h \cdot acc$

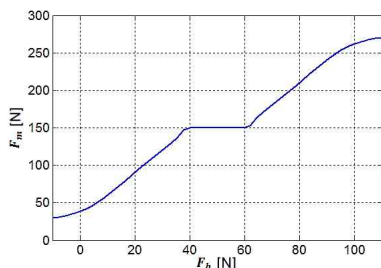


그림 14. WHAD 제어기의 입·출력 관계  
Fig. 14. Input versus output of WHAD controller

### 3.2 중량물 무게 측정 알고리즘

WHAD를 개발하기 위해서는 중량물의 무게( $M$ ) 변화에 따라 액추에이터에서 공급하는 힘( $F_m$ )의 크기가 달라지는 것과 중량물 상차 작업의 특성상 중량물의 무게가 일정하지 않은 경우가 대부분인 것을 고려해야 한다. 이를 해결하기 위해서는 매 작업마다 변화되는 중량물의 무게를 측정하는 것이 필요하다. 그러나 기존 연구에서는 사전에 중량물의 무게를 알고 있다는 가정 하에 제어기 설계를 하였다[9]. 본 논문에서는 중량물 측정을 위해 별도의 사전 측정 과정 없이 중량물을 들어 올리는 과정에서 하나의 센서만을 이용하여 와이어의 장력을 측정하는 알고리즘을 제안한다.

작업자가 지면에 놓여진 중량물을 일정한 힘으로 들어 올릴 때의 센서값( $F_l$ )의 파형(그림 15)을 관찰하면, 센서값( $F_l$ )이 증가하다가 중량물이 지면에서 떨어지는 순간 진동한 후 수렴하는 현상을 보인다. 이 때, 정확한 무게를 측정하기 위해서는 수렴상태의 센서값( $F_{mass}$ )을 알아야 한다.

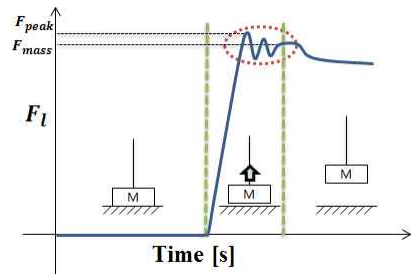


그림 15. 중량물 무게 측정 원리  
Fig. 15. Weight measurement principle

그림 16은 측정된 힘의 패턴을 토대로 중량물의 무게를 자동화된 방식으로 측정하는 알고리즘을 순서도 형식으로 나타낸 것이다. 첫 번째 단계로  $F_l$ 이 특정 값( $c$ )보다 크게 인식되면 작업자가 중량물을 권양하기 시작했음을 인지한다.

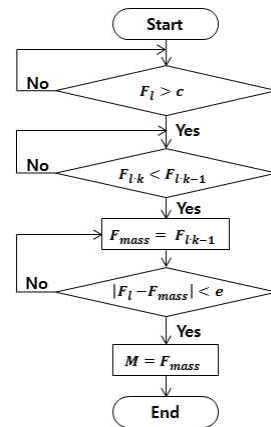


그림 16. 무게 측정 알고리즘  
Fig. 16. Weight measurement algorithm

두 번째 단계로는 중량물 권양시 센서값이 증가하다가 줄어들기 시작하는 순간의 힘( $F_{peak}$ )을 인지한다. 세 번째 단계로 일정한 시간 범위 내에서 최소 오차 허용 범위 ( $|F_l - F_{mass}| < e$ )를 벗어나는 센서값의 유무를 판단한다. 끝

으로 센서값이 최소 오차 허용 범위를 벗어나지 않는다면, 정상상태에 도달한 것으로 간주하여 이전에 측정된 센서값으로 무게를 계산한다. 중량물 측정 알고리즘의 정확도에 대한 평가는 실험 결과에서 기술한다.

### 4. 실험 및 결과

이 장에서는 본 논문에서 제안한 중량물 권양을 위한 와이어 구동형 인간지원시스템의 성능을 평가한다. 그림 17은 실험에 사용된 WHAD의 기구부를 나타낸다. 기구부는 무게 측정용 센서 로드셀과 액추에이터로 사용된 서보모터, 중량물과 모터를 연결해주는 와이어와 지지대로 구성된다. WHAD 구동에 필요한 기구부 및 제어부 구성품의 제원은 표 1과 같다.

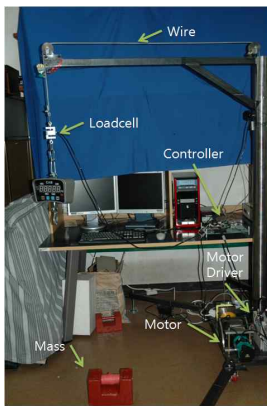


그림 17. WHAD의 이미지  
Fig. 17. Image of WHAD

표 1. WHAD의 제원

Table 1. Parameter components of WHAD

Component	Specification
Main Processor (DSP)	. TMS320F28335 . 32bit integer C28X Core + FPU . 150MHz / 150MMAC / 300MFLOPS . RAM : 68KByte, FLASH : 512KByte
Force Sensor (Loadcell)	. SBA-50L . Standard Force Range : 50kg (490N) . Combined Error : < 0.03 %
Actuator	. SGMJV-08ADA2C . Rated Output : 750W, Power Supply Voltage : 200 VAC . Max. Speed : 6,000rpm, Rated Speed : 3,000rpm . Instantaneous Peak Torque : 8.36Nm, Rated Torque : 2.39Nm . Serial Encoder : 20 bit incremental, Option : With holding brake (24VDC)
SMPS	. 1CH : 24V/1.5A (for holding brake) . 4CH : 5V/10A, 12V/4.2A, 12V/4.2A, 24V/2.5A (for motor and control unit) . 1CH : 3.3V/6A (for Loadcell)

#### 4.1 중량물 무게 측정 실험

본 절에서는 3.2절에서 소개한 중량물 측정 알고리즘을 이용한 다양한 중량물의 무게 측정 실험 결과에 대해 기술한다. 실험에 사용된 중량물의 무게는 20Kg, 25Kg, 30Kg이며, 실험은 각각의 중량물에 대해 5번씩 실험을 진행하였으며 측정된 결과는 표 2와 같다. 실제 중량물의 무게와 실

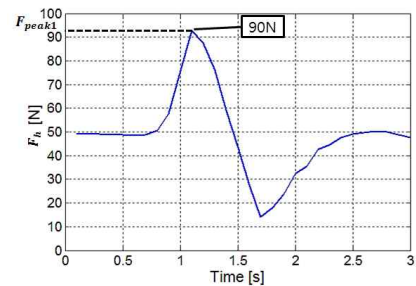
험을 통해 얻은 측정값을 비교하면 평균 오차율은 약 5% 내로 정확하게 측정되고 있음을 확인할 수 있다.

표 2. 중량물 무게 측정 실험 결과의 오차율  
Table 2. The error rate of weight measurement experiment

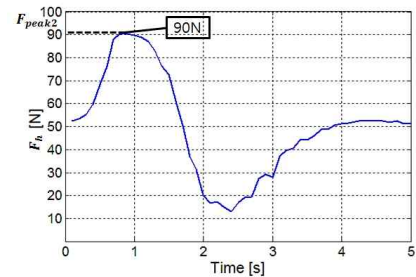
No. Mass	1st	2nd	3rd	4th	5th	error (%)
20Kg	21.35	19.29	21.86	19.80	20.77	4.88
25Kg	26.40	24.25	26.49	25.90	26.86	5.12
30Kg	31.21	30.28	29.01	29.81	29.81	1.81

#### 4.2 WHAD의 성능 검증 실험

그림 10의 WHAD를 구성하여 20Kg(M)의 중량물을 작업자가 5Kg의 힘으로 느껴지도록 실험을 진행하였다. 그림 18은 실제 실험을 통해 작업자가 느끼는 힘의 크기 변화를 측정된 그래프이다.



(a)



(b)

그림 18. 작업자 힘의 패턴 비교  
(a) WHAD 미사용하는 경우 (b) WHAD 사용하는 경우  
Fig. 18. Comparison of operator's force patterns  
(a) A case without WHAD (b) A case with WHAD

실험 결과를 살펴보면, 작업자가 20Kg의 중량물을 들고만 있을 경우 약 50N의 힘으로 느끼고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림 4의 힘의 패턴과 비교할 경우, 가감속구간이 뚜렷하게 구분되어 WHAD 장비를 사용하면서도 사람이 장비없이 물건을 들어 올릴 때와 유사한 힘의 패턴 보임을 확인할 수 있다. 작업자가 중량물 권양시 최대로 느끼는 힘 ( $F_{peak2}$ )은 90N이다. 단, 사람이 직접 물건을 들어 올리는 시간과 WHAD를 사용하여 물건을 들어 올리는 시간에 있어서는 차이가 있다.

4.3 제어기 특성을 조절한 WHAD의 성능 변화 검증 실험

WHAD에 사용된 퍼지제어기의 파라미터 조절에 따라 작업자가 느끼는 힘의 크기를 크게 또는 작게 느끼도록 조절하여 주는 것에 대해 살펴보자. 작업자가 보다 편하게 중량물을 들어 올릴 수 있도록 가속구간에서는 식 (4)~(7)에서  $m_1$ 의 질량을 5Kg에서 2Kg으로 수정한다. 이 때, 그림 19는 가속구간에서 작업자가 중량물의 무게가 작은 힘으로 느껴질 수 있도록 수정한 입·출력 관계를 나타내며, 그림 20은 WHAD 사용 유무에 따른 실제 작업자가 사용하는 힘의 크기 측정 결과를 보여준다. 실험 결과, 작업자가 WHAD를 사용하여 20Kg의 중량물을 들어 올릴 경우, 가속구간에서는 그림 18의 경우보다 작은 최대 70N의 힘( $F_{peak3}$ )으로 물체를 들어 올린 것을 확인할 수 있다.

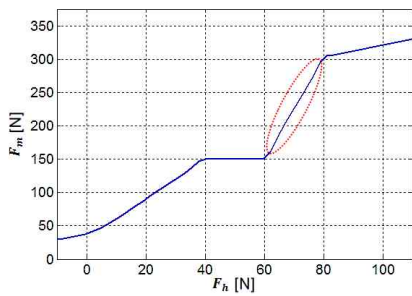
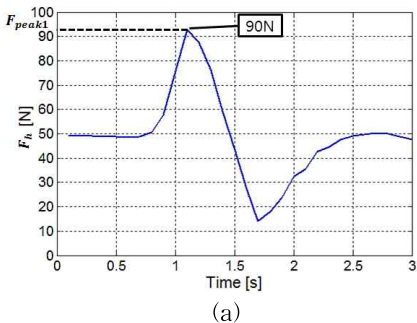
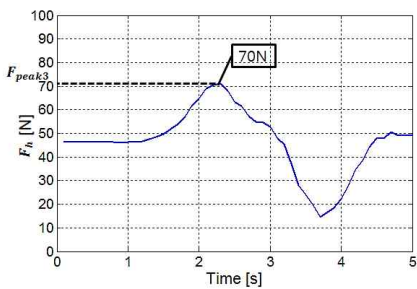


그림 19. WHAD 제어기의 입·출력 관계  
Fig. 19. Input versus output of WHAD controller



(a)



(b)

그림 20. 제어기 특성을 조절한 후, 작업자의 힘의 패턴  
(a) WHAD 미사용하는 경우 (b) WHAD 사용하는 경우  
Fig. 20. Comparison of operator's force patterns with the modified controller

(a) A case without WHAD (b) A case with WHAD

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 중량물을 들어 올리는 사람을 도와주기 위한 와이어 구동식 인간지원시스템에 대한 퍼지제어기 설계 및 작업자 모델링 방식을 제안하였다. 제안된 방법 중 작업자 모델링 과정에서는 사람이 중량물을 들어 올릴 경우, 사고 판단 과정과 근육을 통해 필요한 힘을 출력하는 과정으로 구분하여 모델링하는 방법을 제시하였다. 또한 작업자 모델링과 제어기 설계시 사람의 사고과정과 유사하게 표현이 가능한 퍼지논리를 적용하였다. 실험을 통하여 20Kg의 무거운 중량물을 작업자가 5Kg중의 힘으로도 편안하게 들어 올릴 수 있는 것을 검증하였다. 또한 기존 연구에서 중량물 무게를 알고 있는 사항으로 가정하는 것에 반해, 본 연구에서는 자체적으로 무게측정이 가능한 기능을 추가하였다.

실제 작업자의 특성은 성별, 나이, 체력 등에 따라 달라지므로 작업자 모델의 파라미터들도 고정시키기 어렵다. 추후 다양한 작업자를 고려하여 작업자 모델 파라미터의 불확실성이 존재하는 경우에도 적용 가능한 강인한 퍼지제어기 설계에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] S. Woo, K. Jung, J. Kim, J. Park, and S. Kim, "Velocity Control Method of AGV for Heavy Material Transport," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 394-399, 2010.
- [2] D. Jeong, J. Park, and Y. Kim, "Study on Design of Mobile Robot for Autonomous Freight Transportation," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 202-207, 2013.
- [3] C. A. Lotz, M. J. Agnew, A. A. Godwin, and J. M. Stevenson, "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, pp. 331 - 340, 2009.
- [4] R. Steger, S. H. Kim, and H. Kazerooni, "Control Scheme and Networked Control Architecture for the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3469-3476, 2006.
- [5] T. Kawabata, H. Satoh, and Y. Sankai, "Working Posture Control of Robot Suit HAL for Reducing Structural Stress," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2013-2018, 2009.
- [6] H. Kazerooni, "Intelligent Assist Devices," *Progress in Material Handling Research, The Material Handling Institute*, pp. 219-230, 2002.
- [7] H. Kazerooni, D. Fairbanks, A. Chen, and G. Shin, "The Magic Glove," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 757-763, 2004.

- [8] S. M. M. Rahman, R. Ikeura, S. Hayakawa, and H. Sawai "Design and Control of a Power Assist System for Lifting Objects Based on Human Operator's Weight Perception and Load Force Characteristics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3141-3150, 2011.
  - [9] T. Miyoshi, H. Kojima, and K. Terashima, "Development of Vertical Power-Assisted Crane System Considering Absolute Stability," *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4902-4908, 2006.
  - [10] J. Kim, J. Park, and D. Park, "Design of Stabilizing Takagi-Sugeno Fuzzy Controllers : An LMI Approach," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 51-60, 1998.
  - [11] S. Lee and H. S. Lee, "Modeling, Design, and Evaluation of Advanced Teleoperator Control Systems with Short Time Delay," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 607-623, 1993.
  - [12] C. C. Macadam, "Understanding and Modeling the Human Driver," *Vehicle System Dynamics*, vol. 40, nos. 1-3, pp. 101-134, 2003.
- 

**저 자 소 개**



**송보웨이 (Bo-Wei Song)**  
2012년 : 경북대학교 전자공학부 공학사  
2012년~현재 : 경북대학교 대학원  
전자공학부 석사과정

관심분야 : 지능 제어, 임베디드 시스템, 서비스 로봇  
E-mail : songbw123@163.com



**서현덕 (Hyun-Duk Seo)**  
2010년 : 경북대학교 전자공학부 공학사  
2013년 : 경북대학교 전자공학부 석사  
2013년~현재 : 연구실 인턴 연구원

관심분야 : 지능 제어, 임베디드 시스템, 서비스 로봇  
E-mail : hyun6160@daum.net



**이연정 (Yun-Jung Lee)**  
1984년 : 한양대학교 전자공학과 공학사  
1986년 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공  
학 석사  
1994년 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공  
학 박사  
1995년~현재 : 경북대학교 IT대학 전자공  
학부 교수

관심분야 : 생체모방 로봇, 서비스 로봇, 지능 제어, 임베디  
드 시스템  
E-mail : yjlee@ee.knu.ac.kr