

중량물 핸들링 지원용 기계적 궤환방식 공압 외골격 Arm 개발 Development of a Pneumatic Exoskeleton Arm for Handling of Heavy Workpiece

*국금환¹, 최대봉², 정해성³

*K. H. Kuk(kkh@gnu.ac.kr)¹, D. B. Coi², H. S. Jong³

¹ 경상대학 제어계측공학과, ² 한국기계연구원 지능기계연구센터, ³ 경상대학 제어계측공학과

Key words : Exoskeleton Arm , Mechanical Feedback, Pneumatic Arm, Handling of Heavy Workpiece

1. 서론

국의 대표적인 제조업용 로봇 메이커들의 경우, 최근 새로운 시장 개척을 위한 500kg 이상 초중량물 핸들링 로봇개발을 통한 물류혁신을 꾀하고 있다. 이와 같이, 그동안 생산 공정의 자동화·무인화가 지속적으로 추진되고 있는 것과는 대조적으로 생산공정 속에서 각종 생산장비용 소재와 공작물의 입출력을 하는 수작업자 자체의 육체능력 지원을 위한 기계적 방법의 연구는 상대적으로 등한시 되었다.

최근 향상된 메카트로닉스기술을 활용한 기계적인 인간 육체기능의 향상을 위한 연구가 꾸준히 보고되고 있다. 인간의 육체기능을 외부 부착 기계의 도움으로 강화하기 위한 입는 로봇의 대표적 연구는 군사용으로 개발한 BLEEX(Berkeley Lower Extremity Exoskeleton)와 일반용인 HAL-3(Hybrid Assistive Limb)을 들 수 있다^(1,2). 군인이 중량물 짐을 등에 질 때, BLEEX는 이 짐의 중량 대부분이 외골격으로 만들어진 등판·넓적다리·정강이·발을 통해 직접 지면에 전달되도록 설계되었다. 이를 통해 BLEEX를 착용한 군인은 중량물 짐의 무게를 아주 가볍게 느끼게 된다. HAL-3 역시 하반신 근력을 기계적으로 지원하기 위한 시스템으로, 입는 로봇 자체 중량이 외골격을 통해서 지면에 직접 전달되는 구조로 되어 있다. 두 경우 모두 입는 로봇 자체 중량이 로봇 착용자에게 부하로 작용하지 않도록 되어 있다. 국내 연구로는 인체 상지 근력지원을 위한 입는 로봇과 노인·환자 보행 보조용 로봇을 들 수 있다⁽³⁾. 상지 근력지원 입는 로봇은 HAL-3에서 적용된 근전도(EMG)센서 외에 힘센서를 복합적용하고 있으나, 상지 근력지원용 구조기에 입는 로봇 자체 중량이 직접 로봇 착용자에게 부하로 작용한다. 노인·환자 보행 보조용 로봇의 경우, 별도로 주행하는 주행체와 그 위의 캐스트 워커가 동력을 하체에 전달하는 구조기에 입는 로봇 자체 중량은 착용자에게 비교적 부하가 된다. 상기 연구들의 경우, 부분적으로 허벅지 압력센서와 같은 비교적 저가의 센서개발 노력도 있지만, 입는 로봇 구현을 위해 고가 센서와 고가 모터 및 고기능 제어를 기본적으로 적용하고 있다.

본 논문에서는 유공압을 이용한 간이자동화 접근과 유사한 접근에 의해 공장의 중량물 핸들링 작업을 위한 하나의 단순구조 저가 입는 로봇 구조를 제안하고, 작동 원리 및 해석방법을 보이고자 한다.

2. 로봇 저가격화를 위한 공압 외골격 arm 설계

제조업용 로봇과 같이 입는 로봇 역시 통상 로봇 기구부에 해당되는 액추에이터 내장 외골격(exoskeleton), 제어기, 센서로 구성된다. 일반 제조업용 로봇의 경우 액추에이터에 부착된 센서를 별도로 구분하지 않지만, 입는 로봇의 경우 로봇 착용자의 동작 의도 감지가 중요하기에 별도로 구분하였다. 이 3개 주요 구성 요소와 동력원에 대한 기존 입는 로봇과 제안한 입는 로봇의 비교 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 첫 번째 차이점은 대부분의 제조업용 로봇과 같이 제안한 입는 로봇이 자체 동력원을 내장하지 않는 점이다. 이점은 입는 로봇의 장점이며 동시에 적용상 제한을 의미한다. 즉, 입는 로봇 자체의 내장 동력원을 제거함으로써, 입는 로봇은 가벼워지고 기계적 최대출력도 커지게 된다. 반면 입는 로봇을 착용한 현장 작업자는 제한된 일정 구역내 이동과 동작만 가능하다. 그 이유는 입는 로봇 착용 시 작업자 구역에

기 가설된 공압 라인에 입는 로봇의 유연한 일정길이 공압 라인을 직접 연결(커플링 방식)하여 압축공기를 공급받아야 하기 때문이다. 두 번째 차이점은 센서와 제어가 없는 점이다. 자동차 power steering의 기계적 궤환방식을 적용함으로써 전용 센서와 제어가 없이 공압 밸브만으로 입는 로봇 액추에이터인 공압 모터 회전 각도를 원하는 각도만큼 제어할 수 있다. 마지막 차이점은 공압을 사용함으로써 전기 모터 자체와 저속 출력용 감속기, 전용드라이버 세트가 하나의 소형 경량 공압 모터로 바뀌게 된 점이다. 즉 제조업용 로봇의 작업공간에 대응되는 입는 로봇의 착용 영역이 하나의 구속조건이 되지만, 공압과 기계적 궤환방식의 적용으로 경량 저비용의 입는 로봇을 구현할 수 있다. 입는 로봇이 상지 근력 지원(강화)용인 경우, 입는 로봇 자체의 중량이 로봇 착용자에게 직접 부하로 작용하기에, 입는 로봇의 경량화는 실용적으로 중요하다. 또한 공압 모터와 밸브만 적용한 최소 비용의 기계적 궤환방식 저가 로봇이 안정적으로 작동되면, 제안한 입는 로봇을 생산 현장 작업자용으로 손쉽게 보급할 수 있다.

Table 1 Comparison of wearable robots

	기존 입는 로봇	제안한 입는 로봇
액추에이터 내장 외골격	- 입는 로봇 중량의 지면 전달 기능과 착용자 근력 강화 기능 - DC 모터, 유압실린더	- 착용자 근력 지원(강화) 기능 - 공압 모터
제어기	- PC 급 전용제어기 - 디지털 지능제어	- 제어기 없음 - 기계적 궤환제어
센서	- 비교적 고가의 전용센서	- 센서 없음
동력원	- 소형화된 전용 동력원 내장	- 자체 동력원 없음 - 공장의 공압라인 이용

3. 공압 외골격 arm의 제작과 실험

제작한 공압 외골격 arm을 자동차 power steering 과 대응시켜 설명하면, 조향용 유압 밸브 하우징에 연결된 조향핸들은 그림 1의 공압 밸브(②)의 케이스에 고정된 막대 ①에 해당되고, 조향용 유압 실린더 출력축에 연결된 자동차 바퀴는 그림 1의 공압 모터(③)의 출력 축에 고정된 외골격 arm 하부 ④에 해당된다. 그림 1에 적용한 모터는 180도만 회전 가능한 single 베인 타입이다. 현재 기계적 궤환방식으로 직접 적용할 수 있는 상용 공압 밸브(②)가 없기에, 그림 1의 실험용 공압밸브(②)는 공압모터를 그림 2와 같이 개조하여 만들었다.

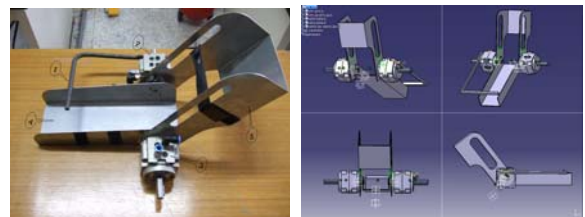


Fig. 1 Pneumatic exoskeleton arm

구체적으로 그림 2의 좌측 그림에서 밸브 케이스에 나란히 뚫린 2개의 밸브 포트는 모터 케이스에 구멍을 뚫어 새롭게 만든 포트이다. 즉, 축과 평행하게 두 포트를 만들어 줌으로써 그림 2 우측과

같이 내부 베인에 대한 밸브 케이스의 상대운동으로 밸브 입력 포트가 열리는 순간 밸브 내부 베인(밸브 스톱 기능)에 의해 막혀있던 같은 크기의 밸브 출력 포트가 열리는 구조이다. 밸브 출력 포트가 열리면 이 출력 포트를 통해 유출한 고압 공기가 대칭위치 공압 모터에 유입하여 모터 내부 베인을 회전 시킨다. 공압 모터 베인이 고정된 회전축은 다시 기계적으로 공압 외골격 arm 하부를 통해 공압 밸브 베인 중심축에 직결되어 있기에, 즉 기계적 케환방식, 공압 모터 출력 축은 공압밸브 케이스 회전각을 지속적으로 추종하게 된다. 또한 공압 모터 출력 축 회전 반력을 받는 모터 케이스는 공압 외골격 arm 상부(⑤)와 기계적으로 고정되고, 공압 외골격 arm 상부는 다시 팔 상부를 감싸도록 고정된다. 이와 같이 공압 모터를 공압 밸브로의 개조를 위해 공압 모터의 기존 입출력 포트는 모두 밀봉하였다.

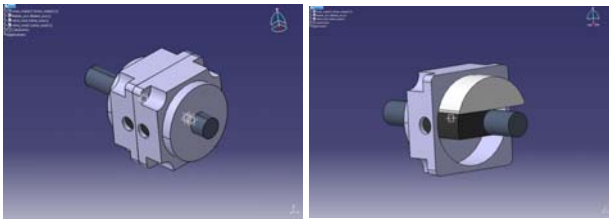


Fig. 2 Structure of pneumatic valve

그림 3은 제작한 공압 외골격 arm을 팔에 직접 장착하여 실험하는 광경으로, 착용자 팔 상부에 대한 팔 하부의 상대적 굽힘은 공압 밸브(②)의 케이스에 고정한 막대 ①를 회전시키게 되고, 고정한 막대 ①의 회전은 다시 이 막대에 기계적으로 고정된 밸브 케이스의 상대 회전운동(밸브 내부 베인에 대한)을 발생시킨다. 그림 3에서 공압 외골격 arm 상부는 착용자 팔 상부를 모두 감싸는 구조이지만 공압 외골격 arm 하부 반쪽은 열려있는데, 이것은 중량물 핸들링 작업 분석을 통해 작업자가 중량물 핸들링을 위한 팔 하부 굽힘 운동을 시작할 때만 외골격 arm 하부가 팔 상부에 대한 팔 하부 운동을 지원하도록 설계했기 때문이다. 중량물 핸들링 후 작업자가 외골격 arm을 다시 원위치로 펴는 것은 팔 힘만으로 이루어지기에, 공압모터가 이러한 팔을 펴는 운동을 방해 하지 않도록 공압모터 입출력 포트를 대기로 개방시켜 준다.

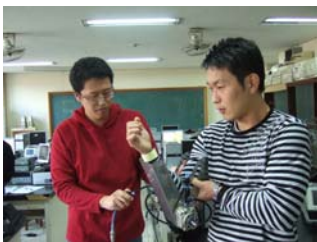


Fig. 3 Actuation of pneumatic exoskeleton arm

4. 공압 외골격 arm의 공압회로 해석

공압시스템 요소들의 다양한 용량(모터 용량, 밸브의 유효단면적, 공기압의 크기, 배관 유효단면적 등)에 대한 공압 모터에 직결된 외골격 arm의 기계적 토크와 회전속도 값을 실험으로 구하는 것은 비용과 소요시간 측면에서 비효율적이다. 따라서 공압 외골격 arm의 공압회로 최적설계를 위해 공압 모터 내 압력과 모터 축운동의 수치해석이 요구된다.

표 2의 수치해석 식은 직선운동용 공압 실린더의 위치제어 실험을 통해서 1차 검증한 것이다. 공압실린더에 대한 실험결과와 수치해석 결과의 비교를 통해서 실린더 상태를 등온상태 보다는 단열상태로 가정하는 것이 보다 실제현상에 가깝다는 것을 확인했기에 이곳에서는 단열상태식만 소개한다.

수치해석 모델을 수정하는 것은 용이하기에 상기 기계식 케환방식 유량제어 밸브(일종의 가변 유량제어 서보밸브) 적용 경우 뿐만 아니라, 리밋 스위치로 작동되는 2위치 방향제어밸브(일정 유체

공급 또는 차단)에 의한 공압모터 제어 경우도 손쉽게 해석할 수 있다. 특수한 구조의 전용 기계식 케환방식 유량제어 밸브 대신 리밋 스위치로 작동되는 상용 2위치 방향제어밸브를 적용하는 것이 가능하면 공압 외골격 arm 제작비용은 더 작아 진다.

Table 2 Motor pressure for numerical analysis

가) 노즐을 통한 질량유동률(단열 가역) $m' = (K \cdot Ae \cdot Pus) / (Tus)^{(1/2)} \cdot \omega$
나) 공압 모터 내 상태방정식(단열상태) $dP/dt = (-nP/V)(dV/dt) + (nRT/V)(dm/dt)$
다) 공압 모터 정지 중(일정 체적) i) 흡기측(1)의 음속충진(단열상태) ($P1/P0 \leq 0.528$) $P1 = \{P1i^{(1/n)} + P0^{(1/n)} \cdot R \cdot T0^{(1/2)} \cdot K \cdot Ae1 \cdot (1/V1) \cdot t\}^n$ ii) 흡기측(1)의 아음속충진(단열상태) ($P1/P0 > 0.528$) $\Delta P1 = n \cdot R \cdot T0^{(1/2)} \cdot K \cdot Ae1 \cdot P0 \cdot (P0/P1)^{(1-n)/n} \cdot \{1 - ((P1/P0 - 0.528)/(1 - 0.528))^2\}^{(1/2)} \cdot (1/V1) \cdot \Delta t$ $P1_{(t+\Delta t)} = P1_{(t)} + \Delta P1$ iii) 배기측(2)의 음속배기(단열상태) ($Pa/P2 \leq 0.528$) $P2 = \{Pa^{(1-n)/2n} - Pa^{(1-n)/2n} \cdot R \cdot T0^{(1/2)} \cdot K \cdot Ae2 \cdot (1/V2) \cdot (1-n) \cdot 2 \cdot t\}^{2n/(1-n)}$
라) 공압 모터 회전 중 i) 흡기측(1)의 아음속충진(단열상태) ($P1/P0 > 0.528$) $\Delta P1 = n \cdot R \cdot T0^{(1/2)} \cdot K \cdot Ae1 \cdot P0 \cdot (P0/P1)^{(1-n)/n} \cdot \{1 - ((P1/P0 - 0.528)/(1 - 0.528))^2\}^{(1/2)} \cdot (1/V1) \cdot \Delta t - n \cdot (\Delta V1/V1) \cdot P1$ $V1 = V1i + \Delta V1$ ii) 배기측(2)의 음속배기(단열상태) ($Pa/P2 \leq 0.528$) $\Delta P2 = n \cdot R \cdot Ta^{(1/2)} \cdot K \cdot Ae2 \cdot P2 \cdot (Pa/P2)^{(1-n)/n} \cdot (1/V2) \cdot \Delta t - n \cdot (\Delta V2/V2) \cdot P2$ $V2 = V2i + \Delta V2$

5. 결론

본 논문에서 저가의 단순구조 공압 입는 로봇을 소개하였다. 이 로봇은 자체 동력원을 내장하지 않기에, 이 로봇 착용자는 작업장의 공압 유연호스에 의하여 작업 범위가 제한된다. 제작한 입는 로봇의 작동실험 결과 공기의 압축성에 의해 외골격 arm 하부의 응답이 기대보다 늦었다. 이 응답을 빠르게 하는 방법과 전용 기계식 케환방식 공압밸브 대신 범용 방향제어 밸브(on-off 제어)를 적용하는 것, 그리고 중량물 자체의 부하를 팔 상부를 통해 신체 상체에 분산시키는 방법 등이 향후 연구에서의 일차적 개선 방향이다.

후기

본 논문은 중소기업청지원으로 중소기업생산환경혁신기술 개발사업으로 추진 중인 '차동장치 케이스 가공시 위험요소 해소와 노동경감을 위한 복합 정밀 가공장비 개발' 과제(2차년도)로부터 지원받아 수행한 연구결과이다.

참고문헌

1. A. Chu, etc., "On the Biomimetic Design of the BLEEX," p. 4345-4352, Procee. of the 2005 IEEE 2005.
2. H. Kawamoto, etc., "Power Assist Method Based on Phase Sequence Driven by Interaction between Human and Robot Suit," p. 491-496, Procee. of the 2004 IEEE Int. Workshop
3. 장혜연, 외, "노약자의 팔꿈치 거동 지원을 위한 착용형 로봇 개발," p.41-146, 한국정밀공학회지, 제25권 3호, 2008.