

# 유압 구동식 이족 로봇의 구동을 위한 탑재식 유압 파워 유닛의 에너지 효율적 제어

## Energy Efficient Control of Onboard Hydraulic Power Unit for Hydraulic Bipedal Robots

조부연<sup>1</sup>·김성우<sup>1</sup>·신승훈<sup>1</sup>·김민수<sup>2</sup>·오준호<sup>3</sup>·박해원<sup>†</sup>  
 Buyoun Cho<sup>1</sup>, Sung-Woo Kim<sup>1</sup>, Seunghoon Shin<sup>1</sup>, Min-Su Kim<sup>2</sup>,  
 Jun-Ho Oh<sup>3</sup>, Hae-Won Park<sup>†</sup>

**Abstract:** This paper proposes a controller to regulate the supply pressure of the hydraulic power unit (HPU) for driving a bipedal robot. We establish flow rate models for charging accumulator, actuating joints and leaking from actuators and spool valves. This determines the pump driving motor speed to satisfy the demanded flow rate for operating the bipedal robot without the energy loss caused by the bypass through a pressure regulating valve. We apply proposed controller to an onboard HPU mounted on top of bipedal robot platform with twelve degrees of freedom. We implement air-walking motion and squat motion which require variable flow rate to the bipedal robot. Through this experiment, the energy efficiency of proposed controller was verified by comparing the electric energy consumed when the controller was applied and when the pump operated at constant speed. We also shows the capability of the HPU's control performance to regulate supply pressure.

**Keywords:** Hydraulic Actuating System, Energy Efficient Control, Bipedal Robot

### 1. 서 론

유압 파워 유닛(Hydraulic Power Unit, HPU)은 유압 구동식 로봇을 동작함에 있어 구동기에 동력을 발생시키기 위한 가장 핵심적인 장치이다. 이 HPU가 로봇 내부에 탑재될 경우, HPU의 에너지 효율적 구동 문제가 매우 중요시된다. 한정된 에너지 용량으로 로봇을 구동하는 만큼, 불필요한 에너지 소모는 로봇의 구동 시간을 단축시키기 때문이다. 또한 에너지 소산에 의해 기름 온도의 증가를 야기하며, 이를 억제하기 위해서는 추가적인

냉각 장치가 필요하게 된다. 이는 로봇의 무게를 불필요하게 증가시키는 요인이 된다. 따라서 HPU를 통해서 공급된 유압 에너지를 낭비 없이 활용하기 위한 구동 방법이 요구된다.

HPU의 에너지 효율적 구동은 펌프로부터 공급되는 유량을 어떻게 활용하는지와 연관이 있다. 펌프에 의해서 공급되는 유량보다 밸브 및 구동기를 통해서 소모되는 유량이 더 많을 경우에는 공급 단 압력이 감소하여 구동기의 출력 토크의 저하로 이어질 수 있다. 반면, 구동기에서 소모되는 유량보다 많은 유량을 펌프에서 공급할 경우, 공급 단의 압력 상승으로 인해 내부 누유량이 증가하게 된다. 뿐만 아니라 과도한 압력 상승은 관로의 파단을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 공급 단에 과도한 압력이 가해지지 않도록 일반적으로 릴리프 밸브와 같은 압력 제어 밸브를 사용한다. 그런데 공급 단에서 리턴 단으로 바이패스 되는 과정에서 유체 에너지 중 기계 에너지로 전환되지 않은 에너지는 기름 온도 상승을 야기하며, 결국 유압 제어 성능의 저하로 이어지게 된다. 따라서 HPU에서는 로봇 동작을 구현하기 위해 필요한 유량만큼만 공급할 수 있도록 펌프 속도를 제어할 필요가 있다.

Received : Nov. 30. 2020; Revised : Jan. 19. 2021; Accepted : Mar. 23. 2021

※ This work was supported by Development of core technology for advanced locomotion/manipulation based on high-speed/power robot platform and robot intelligence [10070171] project from Ministry of Trade, Industry and Energy of the Republic of Korea

1. Ph.D. Candidate, Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea (jobuuu, tjddn0077, ssh9138@kaist.ac.kr)

2. Researcher, KAIST, Daejeon, Korea (becool@kaist.ac.kr)

3. Emeritus Professor, Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea (jhoh@kaist.ac.kr)

† Assistant Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea (haewonpark@kaist.ac.kr)

이를 위해 본 논문에서는 HPU의 에너지 효율적 구동을 실현하기 위하여 공급 단 압력을 제어하기 위한 유량 모델을 도입하여 펌프에서 공급해야하는 유량을 유도하고, 이를 HPU의 속도 제어에 활용할 것이다. 이러한 과정을 통해서 설계된 제어 방법을 실제 이족 로봇에 적용시킴으로써 안정적인 압력 추종 성능을 만족시킴과 동시에 펌프를 일정 속도로 구동하였을 때보다 에너지 효율이 높아짐을 실험적으로 보일 것이다.

본 논문에서 제시하는 방법 외에도 펌프로부터 공급된 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 유압 시스템의 구성 및 제어 방법에 대한 연구가 다수 진행된 바 있다. 그에 대한 대표적인 예로는 Switched Inertance Hydraulic Systems가 있다<sup>13</sup>. 이들은 기술이 발전함에 따라 고속의 스위칭 밸브가 개발되면서, Pulse Width Modulation 방식을 유압 시스템에 적용한 예라고 할 수 있다. 전기 시스템에서의 ‘스텝 다운 DC-DC 컨버터’ 혹은 ‘벽 컨버터’로 알려져 있는 이러한 시스템의 구조는 공급 단과 연결되는 밸브의 열고 닫는 시간의 비율인 duty를 조절함으로써 압력을 조절하게 된다. 이 시스템의 손실은 밸브에서의 스위칭 손실에 의해서만 나타나기 때문에 에너지 효율이 매우 높다. 문제는 전기 시스템에서의 스위칭 주파수는 적게는 20 kHz부터 1 MHz까지 높은 주파수를 보임에 반해, 유압 시스템의 스위칭 주파수는 최대 500 Hz에 불과하여, 유체의 속도를 유지하기 위해 물리적 관성(Inertance)이 높을 필요가 있다. 이와 관련된 선행 연구들은 물리적 관성을 얻기 위하여 스위칭 밸브와 구동기 사이를 긴 관로로 연결하거나 추가적인 기계 부품을 부착한 바 있다. 이러한 구조가 각 구동기마다 적용될 필요가 있어 전체적인 구조가 복잡해진다는 단점이 있다. 따라서, 가벼운 다리 설계가 필요한 이족 로봇에 적용하기에는 부적합하다.

시스템 복잡도를 줄이기 위하여 공급 단의 압력을 여러 단계로 나누어 운용하는 방식도 제시된 바 있다<sup>14</sup>. 생물의 대사 작용이 혐기성 대사(anaerobic metabolism)와 호기성 대사(aerobic metabolism)로 나뉘어서 작용함에 착안하여 고안된 아이디어는 관절에서 높은 토크를 필요로 할 때는 고압의 공급 단에 연결하고, 그 외의 상황에서는 저압에 공급 단에 연결함으로써 실현된다. 이렇게 공급 단의 압력을 선택적으로 운용함으로써 구동기에서 발생하는 누유 등의 손실을 줄여 높은 에너지 효율을 얻을 수 있다. 이를 실제 시스템에 구현하기 위해서는 각 구동기에 두 가지의 공급 단과 하나의 리턴 단의 세 가지의 관로가 연결 되어야하며, 고압 공급 단 혹은 저압 공급 단을 선택하기 위한 스위칭 밸브도 필요하다. 앞서 언급한 Switched Inertance Hydraulic Systems 보다 시스템 복잡도 면에서 유리하나, 하나의 관로와 스위칭 밸브가 추가적으로 설치 되어야 하는 만큼, 본 시스템에서 사용되는 이족 로봇 시스템에 적용하기에는 어려움이 따른다.

따라서 하나의 펌프 시스템을 통해서 한 가지의 공급 압력

단을 효율적으로 운용하는 것이 가장 현실적인 방안이다. 이와 관련한 연구 중에서도, 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프를 이용하여 공급 단의 압력 레벨에 따라 피스톤 펌프의 사판 경사도를 조절하여 공급 유량을 제어하는 방법이 제시된 바 있다<sup>15</sup>. 이 경우, 사판의 기울기를 조절하기 위한 기구적인 장치를 요하기 때문에 HPU의 크기가 증가할 수 있다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 펌프 출력 단에 솔레노이드 밸브를 설치하여 공급 단의 압력이 목표 압력에 도달하는 순간, 펌프 출력을 일시 리턴 부에 연결하여 공급 단에 더 이상 유량이 공급되지 않도록 제어하는 방법도 제시되었다<sup>16</sup>. 하지만 솔레노이드 밸브가 스위칭할 때 HPU의 출력 단이 고압 부와 저압 부가 번갈아가며 연결이 되기 때문에 펌프를 구동하는 모터의 부하가 지속적으로 변동하여 소음을 야기시킬 뿐만 아니라 기계적으로 악영향을 끼칠 수 있다.

본 논문에서 제시되는 방법은 단일 공급 압력 구조에서의 펌프 구동 속도 제어만으로 에너지 효율을 극대화하는 것에 의의가 있다. 이는 일반적으로 사용되는 산업용 유압 시스템이 아닌, 본 논문에서 사용되는 로봇과 같이 전체적인 시스템의 크기가 소형화 되어야 할 필요가 있는 유압 시스템에 적용하기 매우 적합한 방법이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 펌프를 통해서 공급되는 유량의 효율적 사용을 위한 모델을 도입하고, 이를 기반으로 공급 단의 압력을 제어하기 위한 펌프 속도 제어를 설계할 것이다. 3장에서는 설계된 제어기를 사용하여 이족 로봇을 구동할 것이다. 이 때, 유량 변동에 따른 펌프 속도의 제어 없이 정속 구동을 했을 때와의 에너지 소모량을 비교함으로써 본 논문에서 제시한 제어기의 에너지 효율성 및 효용성을 보이고자 한다.

## 2. 유량 모델링 및 펌프 속도 제어기 설계

불필요한 에너지 손실 없이 원하는 압력 레벨을 유지할 수 있도록 하기 위해서, 펌프는 로봇이 구동하는 데에 필요한 만큼의 유량을 공급해야한다. 이를 만족하기 위해서 펌프에서 공급된 유량이 어떻게 사용되는 지 모델링할 필요가 있을 것이다. 펌프에서의 입력 유량은 어큐물레이터의 충전 및 방전, 구동기에 동력 전달, 밸브 및 구동기 내부에서의 누유를 보상하기 위해 사용된다고 가정하여 모델링하고, 이를 기반으로 펌프 속도 제어기를 설계할 것이다.

### 2.1 어큐물레이터 모델

먼저, 공급 단에 입력된 유량의 일부는 어큐물레이터에 에너지를 충전하는 데에 사용된다. 일반적으로 많이 사용되는

가스 충전식 어큐뮬레이터는 전기 시스템의 캐패시터와 비슷한 역할의 요소로서, 공급 단의 압력이 증가함에 따라서 어큐뮬레이터 내부의 질소 챔버가 압축되어 에너지가 충전된다. 어큐뮬레이터 내부에 충전 되어있는 질소 가스는 오일에 비하여 높은 압축성을 나타내기 때문에 압력 상승에 의한 오일의 체적 변화는 무시하고, 오직 질소 가스의 체적 변화만 고려하도록 한다. 이를 수학적 모델로 나타내기 위하여 질소 가스는 외부와의 열 교환이 발생하지 않은 단열 과정(다방지수  $n = 1.4$ )을 따른다고 가정하겠다. 작동 전 상태에서 질소 가스의 압력 및 체적을 각각  $P_{g,pre}$ ,  $V_{g,pre}$ , 어큐뮬레이터 충전 상태에서 질소 가스의 압력 및 체적을 각각  $P_g$ ,  $V_g$ 라고 했을 때, 다음의 식 (1)을 따르게 된다.

$$P_g V_g^n = P_{g,pre} V_{g,pre}^n = const \quad (1)$$

식 (1)을 시간에 대해서 미분하여  $\dot{V}_g$ 에 대한 수식으로 정리하게 되면 다음의 식 (2)와 같다.

$$\dot{V}_g = -\frac{\dot{P}_g}{n P_g} V_g = -\frac{\dot{P}_g}{n P_g} \left( \frac{P_{g,pre}}{P_g} \right)^{\frac{1}{n}} V_{g,pre} \quad (2)$$

어큐뮬레이터 외벽이 견고하여 압력에 의한 변형이 발생하지 않는다고 가정했을 때, 어큐뮬레이터 내부의 질소 챔버의 체적  $V_g$ 와 오일 챔버의 체적  $V_o$ 의 합은 일정하다고 할 수 있다. 이는 질소 챔버의 체적의 변화량과 오일 챔버의 변화량의 합은 0임을 의미하며, 오일 챔버의 순간 체적 변화  $\dot{V}_o$ 은 오일 챔버 내에 유입된 유량  $Q_{acc}$ 와 같게 된다. 이를 정리하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_o = -\dot{V}_g = Q_{acc} \quad (3)$$

공급 단의 오일 압력  $P_s$ 와 어큐뮬레이터의 충전 압력  $P_g$ 가 서로 평형을 이룬다고 가정했을 때( $P_s = P_g$ ), 식 (2)와 식 (3)을 결합하면 어큐뮬레이터에 유입(유출)되는 유량  $Q_{acc}$ 과 공급 단 압력  $P_s$ 의 상관 관계를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{acc} = \frac{1}{n} \frac{V_{g,pre}}{P_s} \left( \frac{P_{g,pre}}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} \dot{P}_s \quad (4)$$

## 2.2 구동기 모델

밸브를 통해서 구동기로 공급되는 유량은 구동기 내부 챔버의 압력을 변화시키고 그에 따라서 출력 단 링크를 구동하게

된다. 연속방정식을 기반으로 하여 구동기를 통해서 소모되는 유량  $Q_{act}$ 를 수식화하면 다음의 식 (5)처럼 나타낼 수 있다<sup>7,8)</sup>.

$$Q_{act} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{V_{c,i}}{\beta_e} P_{c,i} + A_{p,i} \dot{x}_{p,i} \right) \quad (5)$$

식 (5)에서  $N$ 은 로봇 구동을 위해 사용되는 총 구동기의 수이며,  $V_{c,i}$ 는 각 구동기의 챔버 체적,  $\beta_e$ 는 오일의 등가 부피 탄성 계수,  $P_{c,i}$ 는 챔버 압력,  $A_{p,i}$ 는 피스톤 면적,  $\dot{x}_{p,i}$ 는 피스톤의 구동 속도를 나타낸다. 오일의 등가 부피 탄성 계수  $\beta_e$ 의 경우 오일의 특성뿐만 아니라 오일의 압력 및 관로 탄성 등 복합적인 요인에 의하여 값이 변화한다. 때문에 bulk modulus를 구하기 위한 다양한 모델이 제시 되어있다<sup>8)</sup>. 그 중에서 본 논문에서는 Lee의 모델을 채택하여  $\beta_e = 1.4 \times 10^4$  bar로 설정하고, 모델의 단순화를 위하여 bulk modulus 값이 압력에 따라 변하지 않는다고 가정하였다. 그 외의 구동기 내부 체적 등의 계수들은 설계 모델을 기반으로 값을 도출하였다.

## 2.3 누유 모델

밸브 및 구동기 등 기구 사이의 상대 운동이 발생하는 곳에서는 작은 틈이 생기기 마련이다. 이 틈 사이에 압력 차가 나타나면 누유가 발생한다. 뿐만 아니라 본 시스템에서 사용되는 이단 스톱 밸브의 경우, 스톱의 위치를 제어하기 위해 tare flow라는 큰 누유가 생긴다<sup>9)</sup>. 이러한 누유는 일반적으로 양단의 압력 차에 비례하게 되며, 이 누유를 보상하기 위한 유량  $Q_{leak}$ 를 수식화하면 다음의 식 (6)처럼 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>.

$$Q_{leak} = \sum_{i=1}^N (C_{v,i} P_s + C_{p,i} P_{p,i}) \quad (6)$$

식 (6)에서  $C_v$ ,  $C_p$ 는 각각 밸브와 피스톤의 내부 누유 계수를 뜻하며,  $P_s$ ,  $P_p$ 는 각각 공급 단의 압력, 피스톤 양단에서 발생하는 압력 차이를 나타낸다. 본 논문에서 사용되는 밸브인 Moog사의 30 series의 사양서를 기반으로 하여, 밸브 누유 계수  $C_v$ 는  $1.6 \times 10^{-3}$  LPM/bar로 설정하였다. 피스톤 누유 계수  $C_p$ 는 실험적으로 도출하여, 회전형 구동기의 경우  $2.4 \times 10^{-5}$  LPM/bar, 직동형 구동기의 경우  $1.0 \times 10^{-5}$  LPM/bar를 적용하였다. 관로에서 외부로 발생하는 누유는 발생하지 않는다고 가정하였다.

## 2.4 펌프 속도 제어기 설계

펌프에서 토출되어야 하는 유량  $Q_p^d$ 는 앞서 유도한 유량 모델의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서 각 모델에서 사용된 계수

들은 다소의 모델 오차를 포함할 수 있다. 이를 보상하기 위해 서 비례-적분 제어기를 추가하여  $Q_p^{fb}$  만큼 추가적으로 유량을 공급한다. 펌프에서의 토출 유량  $Q_p$ 는 펌프의 회전 당 토출 체적  $q_p$ 와 펌프 속도  $w_p$ 에 비례하며, 최종적으로 이를 정리하면 공급 단의 압력 설정 값  $P_s^d$ 를 추종하는 HPU의 펌프 속도 지령 값  $w_p^d$ 을 식 (7)과 같이 도출할 수 있다.

$$w_p^d = Q_p^d / q_p = (Q_{acc}^d + Q_{act}^d + Q_{leak}^d + Q_p^{fb}) / q_p \quad (7)$$

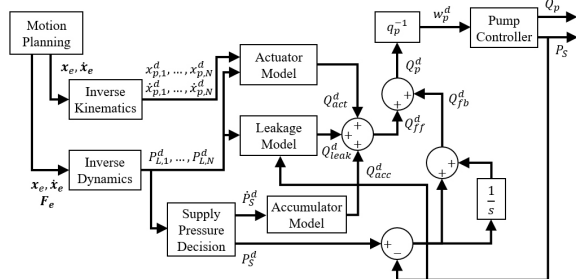
$$Q_p^{fb} = K_p (P_s^d - P_s) + K_I \int (P_s^d - P_s) dt \quad (8)$$

피드백 제어 유량  $Q_p^{fb}$ 를 구하기 위한 식 (8)에서의 피드백 제어 게인  $K_p$ ,  $K_I$ 은 각각 0.30 LPM/bar, 0.30 LPM/(bar·s)을 채택하였다(LPM은 Liter Per Minute를 의미).

[Fig. 1]은 본 장에서 제시한 제어 프레임워크를 도식화한 것이다.  $Q_{acc}$ ,  $Q_{act}$ ,  $Q_{leak}$ 를 결정하기 위해서는 각 관절을 구동하기 위한 구동기의 위치  $x_p^d$  및 속도  $\dot{x}_p^d$ , 압력  $P_L^d$ 이 필요하며, 이는 역기구학 및 역동역학을 통해서 계산된다.

한편, 구동기 단에서 요구되는 필요 속도 및 압력 정보를 통해 공급 단의 최소 요구 압력 값  $P_{s,min}^d$ 를 구할 수 있다. 로봇이 동작을 수행하기 위해 필요한 압력보다 지나치게 높게 공급 단 압력을 설정하는 것은 밸브에서 더 큰 누유를 발생시키며, 이는 에너지 측면에서도 손해일 것이다. [Fig. 1]의 ‘Supply Pressure Decision’에서는  $P_{s,min}^d$ 보다 크면서도 제어의 안정성을 위하여 20~30% 정도의 마진을 둔 공급 단의 압력 설정 값  $P_s^d$ 을 생성한다.

이 프레임워크를 통해 생성된 펌프 속도 지령 값  $w_p^d$ 는 펌프 모터 제어기에 전달하여 펌프가 해당 속도로 구동 되도록 한다.



[Fig. 1] Pump controller diagram: the controller determines pump speed reference  $w_p^d$  based on the feedforward flow rate  $Q_{ff}^d = Q_{acc}^d + Q_{act}^d + Q_{leak}^d$  derived by models and the feedback flow rate  $Q_{fb}^d$

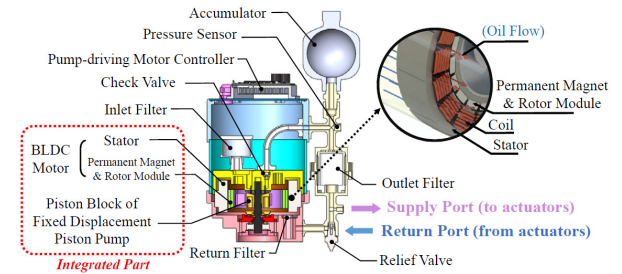
### 3. 실험 및 검증

앞서 설계한 펌프 속도 제어의 에너지 효율성 및 압력 제어의 안정성을 실험적으로 보이기 위하여, 실제 HPU에 제어기를 적용하여 이족 로봇에 여러가지 동작을 구현하였다.

#### 3.1 실험 환경 구성

[Fig. 2]와 [Table 1]은 각각 본 실험에서 사용되는 소형 HPU의 단면도 및 그에 대한 사양을 나타낸 것이다. 그리고 [Fig. 3]과 [Table 2]는 각각 소형 HPU를 통해서 구동되는 이족 로봇의 형상 및 그에 대한 사양을 나타낸 것이다. 이들 모두 본 저자들이 자체적으로 개발한 플랫폼으로 소형 HPU은 이족 로봇의 몸통에 탑재되어 구동된다. HPU를 구동하기 위한 전기에너지는 외부의 파워 서플라이를 통해서 공급된다.

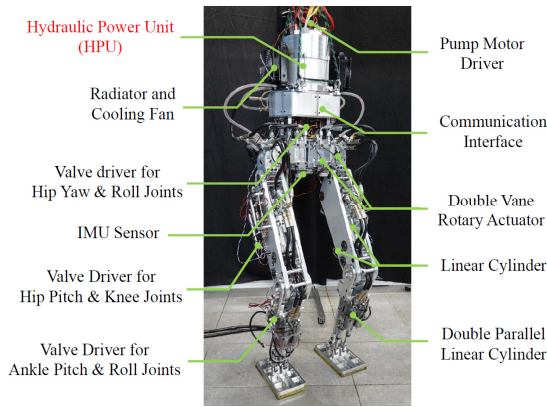
본 실험에서는 이족 로봇을 통해 전진 보행 동작과 스쿼트 동작을 수행한다. 이 때, 전진 동작은 허공에 매달린 상태에서 진행한다. 보행 동작은 시간에 따른 필요 유량 변동이 크게 나타나기 때문에 공급 단의 압력 추종 성능 및 제어기의 에너지 효율성을 평가하는 데에 적합한 동작이다. 한편, 스쿼트 동작은 무릎 관절에서의 높은 토크를 요구하는 동작으로, 공급 단의



[Fig. 2] Section view of the designed HPU. The oil supplied in actuators is delivered through ‘Supply port’, and the returned oil from actuators get back through ‘Return port’ to the tank. The oil returned through the gap of the stator makes the forced convection condition

[Table 1] Specification of the onboard HPU

Width	192 [mm]
Height	264 [mm]
Dry Weight	8.7 [kg]
Maximum Operating Pressure ( $P_{s,max}$ )	210 [bar]
Maximum Output Flow Rate ( $Q_{p,max}$ )	9.39 [LPM]
Accumulator Volume ( $V_{g,pre}$ )	0.5 [L]
Pre-charged Gas Pressure ( $P_{g,pre}$ )	60 [bar]
Tank Volume	4.1 [L]



[Fig. 3] Hydraulically actuated bipedal robot, LIGHT, is developed in Humanoid Robot Research Center, KAIST. A Hydraulic Power Unit (HPU) is embedded inside of LIGHT's upper body. LIGHT has 12 actuators in total

[Table 2] Specification of the bipedal robot, LIGHT

Degree of Freedom	12
Total Weight (without PC and Battery)	55.5 [kg]
Height	1.33 [m]
Leg Length	0.81 [m]

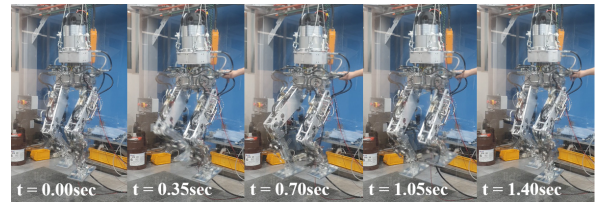
압력을 제대로 유지하지 못할 경우 자세가 무너질 수 있다. 이 또한 펌프속도 제어기의 성능을 확인하기 위한 동작으로 적절하다.

### 3.2 HPU 제어를 통한 이족 로봇 구동 실험

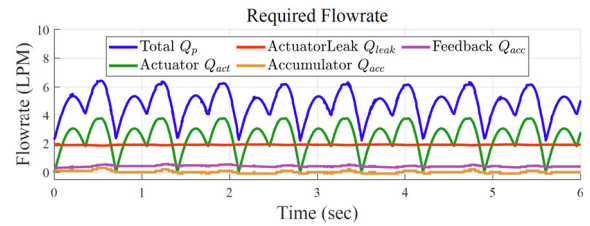
#### 3.2.1 전진 보행 동작 적용 실험

전진 보행 동작의 경우, [Fig. 4]와 같이 양 발을 번갈아가며 로봇 기준으로 시상면(sagittal plane) 상에서의 스윙 동작을 시행한다. 양 다리는 0.7초 동안에 0.35 m만큼 앞으로 발을 딛는 스윙 동작을 수행하게 된다. 공급 단의 압력 지령 값 및 압력 제어 밸브의 상한 압력 설정 값은 100 bar로 설정하였다. 이 동작을 수행하기 위해 필요한 유량을 [Fig. 5]을 통해 확인할 수 있으며, 최대 6.3 LPM의 유량이 요구된다.

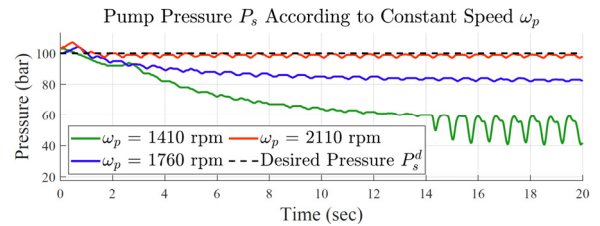
본 논문에서 제시한 펌프 속도 제어기의 에너지 효율성을 비교하기 위해서 제어기를 이용해서 실시간으로 펌프의 속도를 변동한 경우와 펌프 속도를 일정하게 유지한 경우에 대해 에너지 소모량을 비교하였다. 후자의 경우, 동작 중에 공급 단의 압력의 저하가 발생하지 않는 펌프 속도를 찾을 필요가 있다. [Fig. 6]은 전진 보행 동작을 수행했을 경우에 펌프 속도에 따른 공급 단의 압력 변화를 나타낸 것이다. 그래프를 통해서 확인할 수 있듯, 2110 rpm의 속도로 정속 구동하는 경우에는 압력이 설정 값 부근에서 유지됨을 확인할 수 있다. 반면, 그보다 낮은 속도로 구동할 경우 압력이 시간이 지남에 따라 지속



[Fig. 4] A snapshot of bipedal robot's air-walking motion: the step period is 0.7 second and the step length is 0.35 m in forward direction



[Fig. 5] Required flow rate for the air-walking motion. The highest flow rate to perform the air-walking motion is about 6.3 LPM

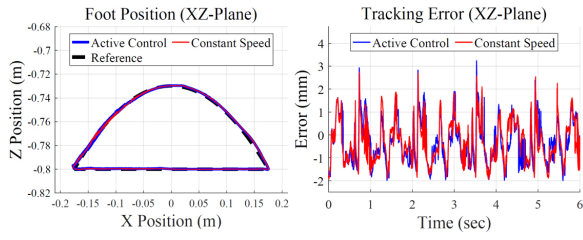


[Fig. 6] Changes of the supply pressure for several pump speed (1410 rpm, 1760 rpm and 2110 rpm) during air-walking motion. When the pump speed is too slow, the pump output flow rate is less than discharged flow rate by actuators and valves. As a result, the supply pressure drop occurs

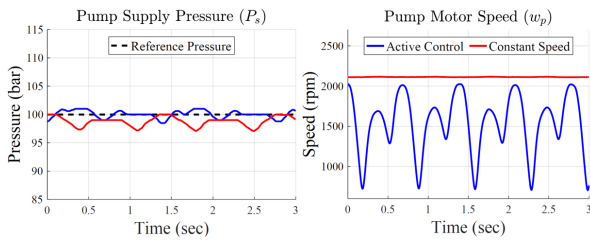
적으로 떨어짐을 확인할 수 있다. 공급 단의 압력 저하는 실제로 지면에서 보행 시, 보행 성능 저하에 큰 영향을 미칠 수 있다.

[Fig. 7]의 두 그래프는 각각 설계한 펌프 속도 제어기와 정속 구동하였을 때의 발 끝의 궤적 및 추종 오차를 나타낸 것이다. 펌프 속도 제어기와 정속 제어기의 각각의 위치 오차는 3.3 mm, 2.5 mm 이하를 나타낸다. 이 때, 공급단의 압력은 [Fig. 8]의 왼쪽 그래프처럼 압력도 비슷한 수준에서 유지되는 반면, [Fig. 8]의 오른쪽 그래프와 같이 펌프의 구동 속도에서 확연한 차이가 나타남을 볼 수 있다.

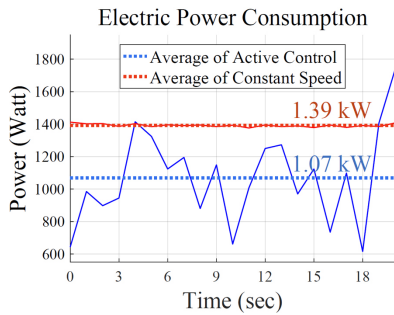
[Fig. 9]는 파워 서플라이를 통해서 공급된 전기 에너지의 변화를 나타낸 것이다. 정속으로 구동하였을 경우의 평균 소모 에너지가 약 1.39 kW에 달하는 데에 반하여, 본 논문에서 제시한 제어기를 적용하였을 경우 평균 약 1.07 kW로 에너지 소모가 줄어들었음을 확인할 수 있다. [Fig. 5]를 통해서 확인할 수 있듯, 보행 동작을 수행하는 데에 요구되는 유량은 최대



[Fig. 7] Foot position trajectories with respect to sagittal plane (left) and its tracking error (right). Blue line denotes the case of the active control and red line denotes that of the constant speed control with 2110 rpm. The maximum position error of the active control and constant speed control show 3.3 mm and 2.7 mm, respectively



[Fig. 8] Supply pressure (left) and pump speed (right) when the robot performs the air-walking motion. The blue line and the red line correspond to the case of applying the active control and constant speed control, respectively

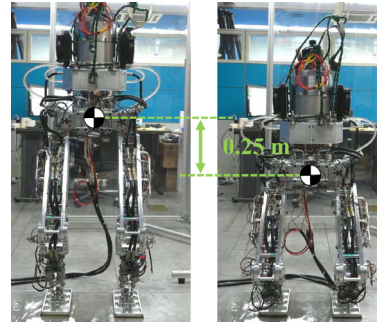


[Fig. 9] Consumed electric input power. The case applying the designed controller shows about 1.07 kW, while the case applying the constant speed controller shows about 1.39 kW for the same air-walking motion

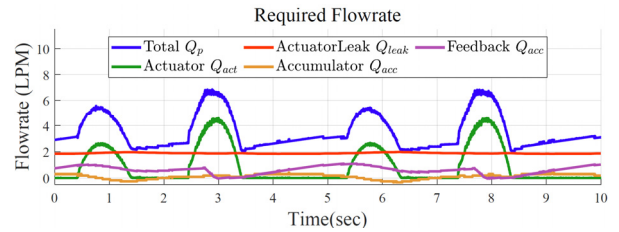
6.3 LPM 부터 최저 2.2 LPM 까지 변동하게 되는데, 펌프를 정속으로 구동할 때는 유량이 적게 필요한 순간에도 과도하게 유량을 공급하는 탓에 공급 압력이 상승하여 압력 제어 밸브를 통해서 빠져나가게 된다. 이 유량은 결국 열 에너지로 소산되어 실험 결과와 같은 소모 에너지의 차이를 야기시킨다.

### 3.2.2 스쿼트 동작 적용 실험

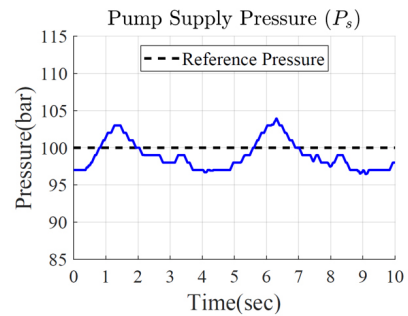
본 실험에서는 [Fig. 10]와 같이 몸통의 무게 중심이 0.25 m 만큼 수직 방향으로 왕복 운동하는 스쿼트 동작을 수행한다.



[Fig. 10] A snapshot of bipedal robot's squat motion: The center of mass position of the robot moves vertically 0.25 m for 1.0 second



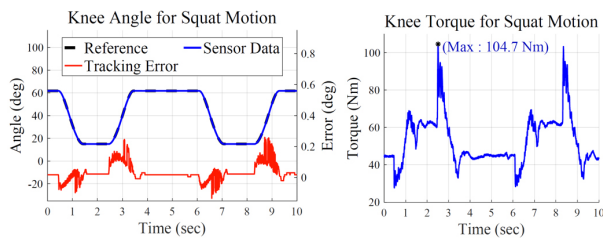
[Fig. 11] Required flow rate for the squat motion. The highest flow rate is about 6.6 LPM to perform the squat motion



[Fig. 12] Supply pressure when the robot performs the squat motion. The supply pressure maintained around the reference pressure (100 bar). The maximum pressure error is about 3.5 bar

이 동작을 수행하기 위해 [Fig. 11]처럼 최대 6.6 LPM의 유량이 요구된다.

본 논문에서 제시한 제어기를 사용하여 동작을 수행한 결과, [Fig. 12]와 같이 최대 압력 오차가 3.5 bar로 유지됨을 확인할 수 있었다. 이 동작을 수행하는 동안에 최대 104.7 Nm의 토크가 작용함을 [Fig. 13]의 오른쪽 그래프를 통하여 확인할 수 있다. 설계된 로봇 정보 기준으로 공급 압력이 100 bar일 때 인가할 수 있는 무릎 토크가 157 Nm 임을 감안했을 때, 스쿼트 동작 동안의 104.7 Nm의 토크는 무시할 수 없을 만큼 크다. 그럼에도 불구하고 [Fig. 13]의 왼쪽 그래프를 통해서 확인할 수 있듯, 무릎 관절의 위치 오차가 0.23% 이내로 높은 위치 제어 정밀도를 나타냄을 확인할 수 있다.



[Fig. 13] Position tracking performance (left) and torque (right) measured at the knee joint during the squat motion. The maximum position error is 0.23% while the maximum measured torque is about 104.7 Nm

#### 4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 유압 구동기를 동작하기 위해 사용되는 유량에 대한 모델링을 진행함으로써 공급 단의 압력이 안정적으로 유지하면서 불필요한 유량이 공급되지 않는 펌프 속도 제어를 설계하였다. 이를 실험적으로 확인하기 위하여 허공에 로봇을 매달아 놓은 상태로 보행 패턴을 입력한 결과, 압력 제어 밸브를 통해서 빠져나가는 유량을 최소화함으로써 에너지 효율의 증대 효과 연음을 볼 수 있었다. 또한 공급 단에서의 안정적인 압력 제어를 통해 무릎에 고하중의 토크가 인가되는 스쿼트 동작도 문제 없이 수행할 수 있었음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 특정 순간에 로봇 동작을 수행하기 위해 HPU에서 공급해야 하는 유량을 계산하여 펌프 속도 지령 값을 도출한 바 있다. 하지만 점프 모션과 같이 순간적으로 높은 유량이 필요로 할 경우에, 펌프를 구동하기 위한 모터의 반응 속도가 낮아 요구되는 유량 공급 값을 충족하지 못할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 향후 연구에서는 모델 예측 제어와 같이 미래의 필요 공급 값을 반영하여 펌프 속도를 제어하도록 연구를 확장할 것이다. 더 나아가, 미래의 로봇 동작에 따른 관절의 최소한의 필요 공급 압력 값을 계산하여 HPU의 공급 압력 값을 최소로 유지함으로써 HPU의 에너지 효율을 더 증대할 수 있는 제어 기법을 향후 연구를 통해 제시할 것이다.

#### References

- [1] E. Guglielmino, C. Semini, Y. Yang, D. Caldwell, H. Kogler, and R. Scheidl, "Energy Efficient Fluid Power in Autonomous Legged Robotics," *Dynamic Systems and Control Conference*, California, USA, pp. 847-854, 2009, DOI: 10.1115/DSCC2009-2522.
- [2] S. Peng, H. Kogler, E. Guglielmino, R. Scheidl, D. T. Branson, and D. G. Caldwell, "The use of a hydraulic DC-DC converter in the actuation of a robotic leg," *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, pp. 5859-5864, 2013, DOI: 10.1109/IROS.2013.6697205.
- [3] G. Wu, J. Yang, J. Shang, Z. Luo, T. Zou, and D. Fang, "On the Design of Energy-Saving Fluid Power Converter," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 27769-27778, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2971669.
- [4] Y. Xue, J. Yang, J. Shang, and Z. Wang, "Energy efficient fluid power in autonomous legged robotics based on bionic multi-stage energy supply," *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 21, pp. 1445-1457, 2014, DOI: 10.1080/01691864.2014.946447.
- [5] J. Wei, K. Guo, J. Fang, and Q. Tian, "Nonlinear Supply Pressure Control for a Variable Displacement Axial Piston Pump," *Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 229, no. 7, pp. 614-624, 2015, DOI: 10.1177/0959651815577546.
- [6] K. Amundson, J. Raade, N. Harding, and H. Kazerooni, "Hybrid hydraulic-electric power unit for field and service robots," *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB, Canada, 2005, DOI: 10.1109/IROS.2005.1545452.
- [7] A. Akers, M. Gassman, and R. Smith, "Steady state modeling," *Hydraulic Power System Analysis*, CRC Press, 2006, ch. 3, pp. 31-76, DOI: 10.1201/9781420014587.
- [8] M. Jelali and A. Kroll, "Physically based modelling," *Hydraulic Servo-systems*, Springer Nature, 2012, ch. 4, pp. 53-95, DOI: 10.1007/978-1-4471-0099-7.
- [9] *30.SERIES MICRO SERVO VALVES*, 2018, [Online], <https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-Valves-30series-datasheet-en.pdf>, Accessed: October 5, 2020.



**조 부 연**

2015 한양대학교 기계공학과 학사  
2017 KAIST 기계공학과 석사  
2017~현재 KAIST 기계공학과 박사과정

관심분야: 보행 알고리즘, 유압 시스템 설계 및 제어, 기구 설계



**김 민 수**

2001 연세대학교 기계공학과 학사  
2004 KAIST 기계공학과 석사  
2009 KAIST 기계공학과 박사  
2016 삼성중공업  
2016~현재 KAIST 휴머니오이드로봇연구센터  
책임연구원

관심분야: 이족 보행 로봇 제어, 로봇 제어 시스템, 임베디드 시스템,  
유압 서보 시스템, 모터 설계 및 제어



**김 성 우**

2015 KAIST 기계공학과 학사  
2017 KAIST 기계공학과 석사  
2017~현재 KAIST 기계공학과 박사과정

관심분야: 유압 구동기 및 밸브 설계, 유압 구동기 제어, 강화 학습



**오 준 호**

1985~2020 카이스트 기계공학과 교수  
2004~2019 카이스트 휴머니오이드 로봇 연구  
센터 소장  
2020~현재 카이스트 특훈교수/석좌교수/명  
예교수

관심분야: 로봇 시스템 설계 및 제어



**신 승 훈**

2017 한양대학교 기계공학과 학사  
2019 KAIST 기계공학과 석사  
2019~현재 KAIST 기계공학과 박사과정

관심분야: 사족 로봇 시스템 설계 및 제어, 유압 구동기 및 밸브 설계



**박 해 원**

2005 연세대학교 기계공학과 학사  
2007 연세대학교 기계공학과 석사  
2012 미시간대학교 앤아버 기계공학과 박사  
2019~현재 카이스트 기계공학과 조교수

관심분야: 다족 보행 로봇 제어 및 설계