

전기-유압 액추에이터를 이용한 굴삭기 에너지 절감에 관한 기초 연구

윤홍수[†] · 안경관^{*} · 이병룡^{*} · 강종민^{**} · 김재홍^{**}

A study on Energy Saving of the Excavator using Electro-Hydraulic Actuator

Hong Soo Yoon, Kyung Kwan Ahan, Byung Lyong Lee, Jong Min Kang and Jae Hong Kim

Key Words : Energy Savings(에너지 절감), Electro-Hydraulic Actuator System(전기-유압 액추에이터 시스템), Hybrid Excavator(하이브리드 굴삭기)

Abstract

Today, hydraulic systems play an important role in modern industry for the reasons that hydraulic actuator systems take many advantages over other technologies with high durability and the ability to produce large forces at high speeds. In recent years, electro-hydraulic actuator systems, which combine electric and hydraulic technology into a compact unit, have been adapted to a wide variety of force, speed and torque requirements. Moreover these systems resolve energy consumption and noise problems characteristic existed in the conventional hydraulic systems. Therefore, these systems have a wide range application fields especially in an excavator. So the purpose of this paper is to demonstrate efficiency of the energy saving and present some control algorithms which apply to electro-hydraulic actuator system in the bucket of the excavator. Experiments are carried out to verify the effectiveness of the proposed system with various external loads as in real working conditions.

1. 서 론

오늘날 전 세계적으로 국제 유가 상승 및 기존의 원전 고갈과 신규 유전이 격감함에 따라 다양한 산업 분야에서 에너지 절감에 대한 기술이 절실히 요구되고 있다. 대표적으로 자동차 산업에서는 HEV(Hybrid Electric Vehicle) 자동차와 수소연료 전지를 이용한 자동차의 연구·개발이 많이 진행되어 있다. 또한 현재는 자동차에 초점을 맞추어 하이브리드 시스템이 개발되고 있다. 그러나 현재 건설 중장비 분야에서는 에너지 효율을 높이기 위하여 기계적 장치의 중량 감소와 작업 모드

변화에 따른 연료 분사량 조절 등의 엔진 효율을 높이기 위한 기계적인 장치 개선을 하고 있는 실정이다. 이에 건설 중장비 산업은 자동차 산업에 비해, 에너지 절감 기술이 뒤쳐져 있으며, 하이브리드 개념의 에너지 절감 기술이 개발 필요성이 요구되고 있다. 실제로 2006 년도에 하이브리드 기술의 선진국인 일본은 차량용 하이브리드 기술을 응용한 굴삭기를 건설기계 박람회에 출시 하였다.

유압시스템의 기술의 꽃이라고 불리는 건설 중장비 산업, 특히 굴삭기(Hydraulic excavator)는 기구학적 유연성과 유압시스템의 장점인 단위 면적당 출력이 크며, 직선 운동과 회전 운동 모두 쉽게 사용할 수 있고, 고속 응답이 가능하여 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 그러나 기존 굴삭기 시스템은 엔진이 구동되면 엔진과 연결된 유압 펌프를 항상 구동하는 기계적 메커니즘으로 구성 된다. 이때 유압 회로 내를 순환하는 작동유는 작

[†] 회원, 울산대학교 기계자동차공학부 대학원

E-mail : floodyoon@hotmail.com

TEL : (052)251-2821 FAX : (052)259-1680

^{*} 울산대학교 기계자동차공학부

^{**} 불보그룹코리아(주)

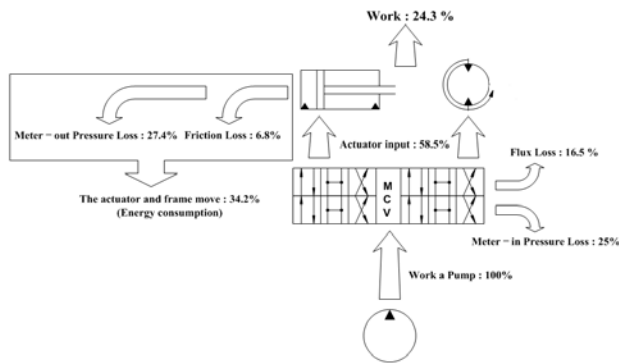


Fig.1 The energy flowing map of the hydraulic excavator system

업이 필요하지 않을 시에도 유압펌프를 구동시켜 불필요한 에너지 손실을 발생 시킨다. 또한 작업자의 조작은 MCV(Main Control Valve)에 의하여 제어되는데, 이 유압 장치에서 압력 손실, 유동 손실 등 많은 에너지 손실이 발생시켜 Fig. 1 과 같이 실제 작업 효율은 23~25% 정도의 실정이다. 따라서 유압 메커니즘을 개선하지 않고서는 실질적인 유압 시스템의 효율을 개선하는 것은 한계가 있다.

유압 시스템에서는 정확한 속도 제어, 물리적인 크기, 제어 용이성, 신뢰성, 비용 절감 등을 개선하기 위하여 많은 연구·개발 되고 있다. 현재 대부분의 유압 시스템에서의 효율적인 단점을 해결하기 위하여 Fig. 2 와 같은 전기-유압 액추에이터 시스템(Electro-Hydraulic Actuator System, EHAS)이 제안 되었다. EHAS 는 항시 구동되는 엔진과 가변 유압 펌프를 대신하여 전기 모터와 고정형 유압 펌프를 일체화 시켜 사용한다. 제어는 기존의 서보 밸브나 비례제어밸브, 가변 유압펌프의 사판각 제어대신, 전기 모터의 회전수와 회전방향제어로 시스템이 작동하게 된다.

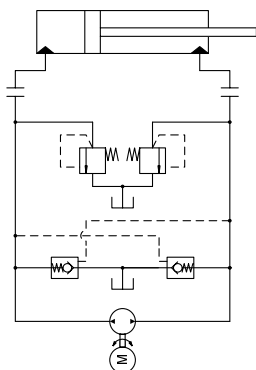


Fig. 2 Schematic diagram of EHAS

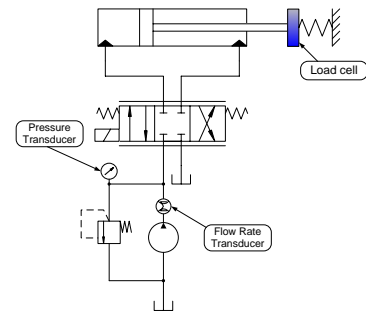
따라서 액추에이터 작동 시에만 전기 모터를 구동하여, 유압 펌프를 구동하게 되므로 기존의 에너지 손실에 대해 상당한 절감 효과를 얻을 수 있다. 이와 관련하여 Andersson, J.와 Krus, P.는 기존의 밸브 제어 방식의 유압 시스템과 비교하여 EHAS에 대하여 시스템 모델링과 시뮬레이션으로 에너지 절감 효과를 검증하였다.^{1,2)} 또한 Rahmfeld R.과 Ivantysynova M.은 산업 기계에 적용하여 기존의 유압 시스템 보다 EHAS이 에너지 절감 효과가 우수한 특징을 보여주는 것을 시뮬레이션을 통해 검증 하였다.³⁾

본 연구의 목적은 EHAS 를 AMESim software 를 이용한 모델링 및 시뮬레이션 해석을 통하여 에너지 절감 효과를 검증 하고, EHAS 을 굴삭기 버킷(Bucket)에 적용하여 에너지 절감형 굴삭기에 관한 기초 연구이다.

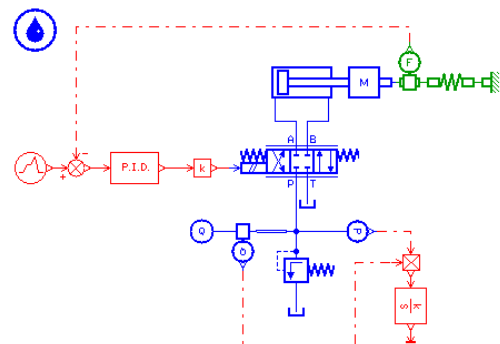
2. EHAS 의 AMESim 모델링 및 해석

2.1 AMESim 모델링

유압 해석으로 상용화된 Tool 인 AMESim 을 사용하여 기존 유압 시스템과 EHAS 의 모델링은 각각 Fig. 3 과 Fig. 4 와 같다.



(a) Hydraulic circuit



(b) AMESim modeling

Fig. 3 Schematic of conventional hydraulic actuator systems

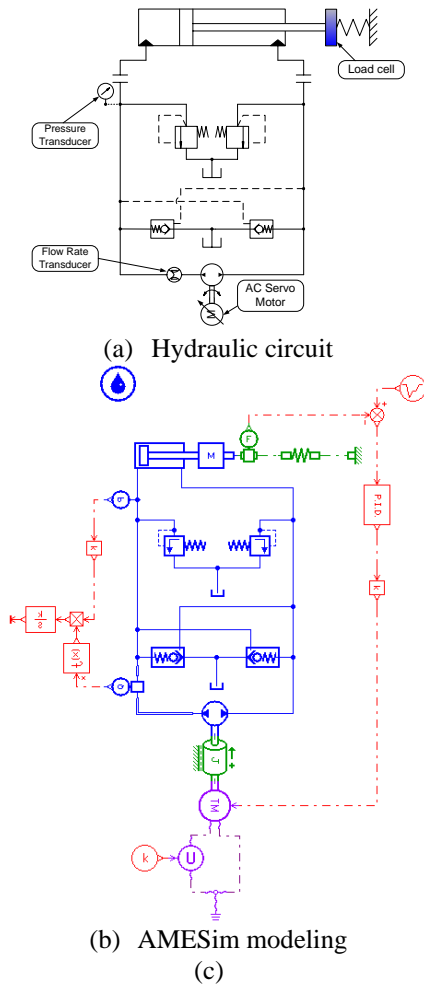


Fig. 4 Schematic of Electro-Hydraulic Actuator System modeling

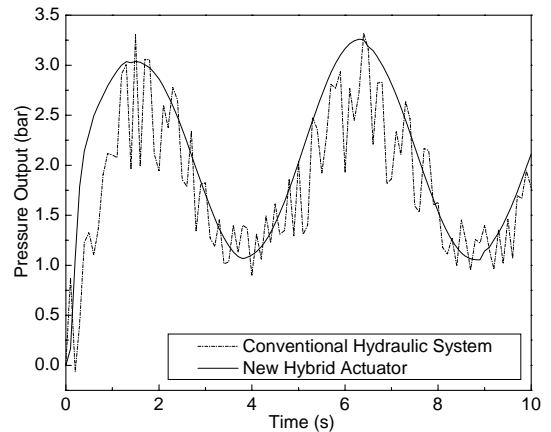
Fig. 3의 기존 유압 시스템에 대한 모델링은 방향 전환 솔레노이드 밸브를 사용하여 유압 실린더를 제어하게 되고, Fig. 4의 EHAS에 대한 모델링은 전기 모터의 방향과 속도 제어로 실린더를 제어 한다. 따라서 기존 유압 시스템은 항상 일정한 압력과 유량이 유압 회로를 순환하고 있고, EHAS는 실린더를 구동 시킬 때만 전기 모터를 사용한다.

2.2 AMESim 해석

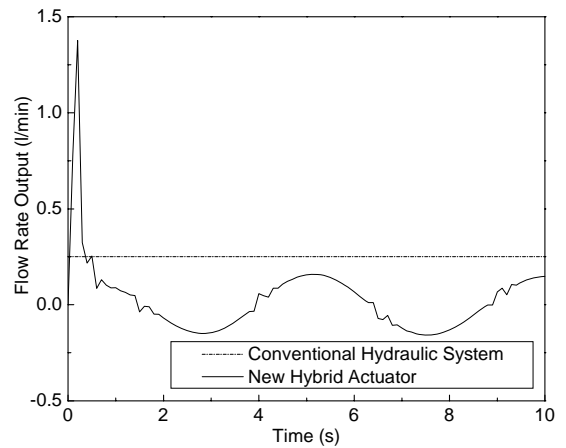
기존 유압 시스템에 대하여 EHAS의 에너지 절감 효과를 확인하기 위하여, 참조값(Reference value)을 입력하여 시뮬레이션을 하였다. 그리고 에너지 소비량을 계산하기 위하여, 압력 센서와 유량 센서를 통해 Fig. 5와 같이 압력과 유량을 해석 하였다. 그리고 에너지 소비량은 식 (1)에 의해 계산된다.

$$E = \int_0^t P(t)Q(t)dt \quad (1)$$

여기서 P는 압력, Q는 유량, t는 시뮬레이션 시간



(a) Pressure signal



(b) Flow rate signal

Fig. 5 Comparison of system responses

이다. 기존 유압 시스템에 대하여 EHAS의 에너지 절감 효과를 확인하기 위하여 식 (2)에 의해 계산하였다.

$$EnergySaving(\%) = \frac{E_{conv} - E_{EHAS}}{E_{conv}} \times 100 \quad (2)$$

식 (2)에서 E_{conv} 와 E_{EHAS} 는 각각 기존 유압 시스템의 에너지 소비량, EHAS의 에너지 소비량이다. 식 (1)과 식 (2)에 의해 계산된 기존 시스템에 대하여 EHAS의 에너지 효율은 46.33%였다. 시뮬레이션 결과, EHAS이 기존 유압 시스템보다 에너지 절감적인 시스템으로 검증 할 수 있었다.

3. 실험 장치의 구성

EHAS을 굴삭기 버킷(Bucket)에 적용시킨 실험 장치의 구성은 Fig. 6과 같으며, 실험 장치의 채원은 Table 1에 나타내었다.

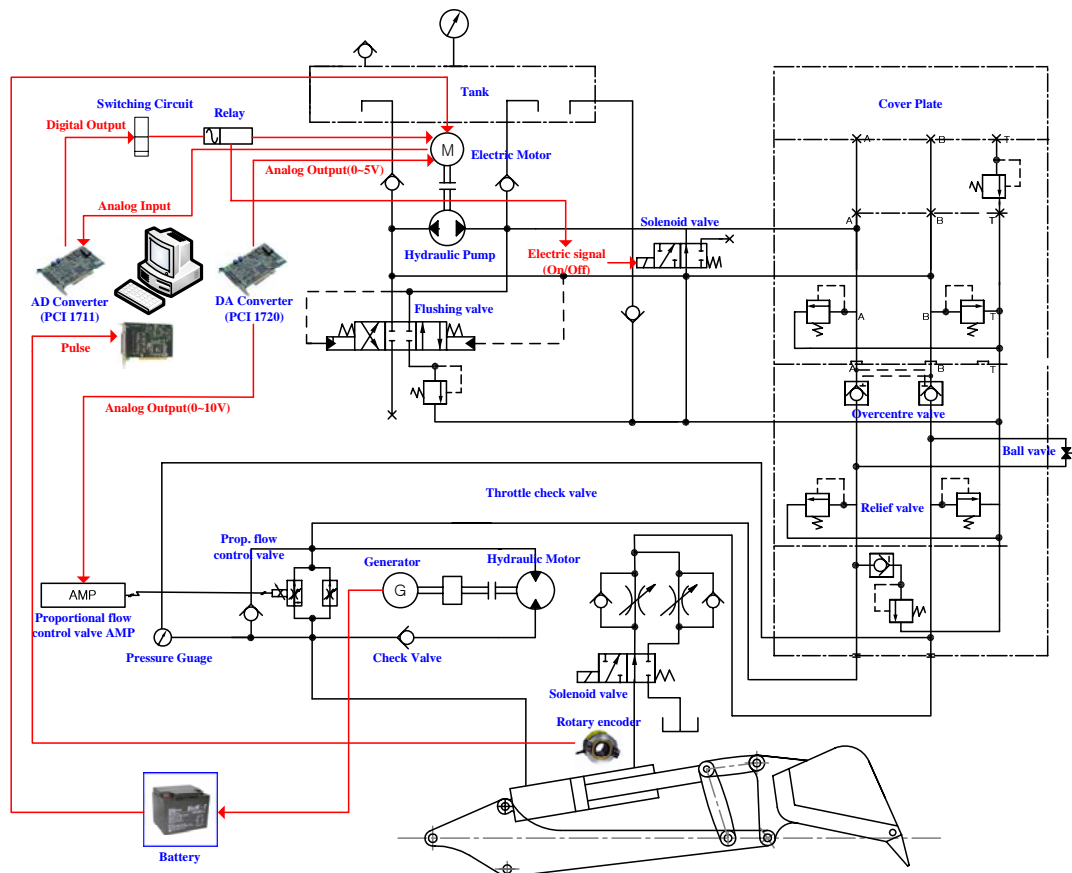


Fig. 6 Scheme diagram of the excavator system

Electro-Hydraulic Actuation System(EHAS) 구성하기 위하여 BLDC 모터의 사양은 15KW(20.4HP), 최대회전 속도 3200RPM, 입력 전압 72VDC, 최대 입력 전류 196A 이다. EHAS 구동원으로 BLDC

Table 1 Specifications of experimental apparatus

	Model & Specification
BLDC motor	15KW, 3200RPM, 72VDC, 196A
Hydraulic pump	34.3cc/rev, 2500RPM
Flushing Valve	320bar, 80L/min
Prop. flow valve	4~6bar, 3.5L/min
Overcentre valve	350bar, 30L/min
Flow control valve	250bar, 65L/min
Check valve	320bar, 400L/min
Relief valve	320bar, 50~120L/min
Amplifier	0~10V, 0~1.5A
Rotary Encoder	360Pulse, 3phase, Totem pole
A/D board	Advantech PCI-1711, 12bit 16ch
D/A board	Advantech PCI-1720, 12bit 4ch
Counter board	PCI QUAD04

모터와 직결하는 유압 펌프는 일정 토출을 하는 기어 펌프로 34.3cc/rev 의 용적을 가지며 최대 회전 속도 2500 RPM 이다. BLDC 모터와 기어 펌프 사이에 토크 센서를 체결하여 시스템이 작동 시에 압력 대비 토크 값을 확인 한다. 그리고 파일럿 압력에 의해 작동을 하는 Flushing valve 는 폐회로의 특징을 가지는 위 시스템의 유압 회로 보호의 목적으로 사용 되었으며, 유압 실린더와 근접한 Solenoid valve 는 버킷이 하강할 때 충격으로부터 Rotary encoder 를 보호하기 위한 것이다. 또한 유압 회로 내에 설치되어 있는 Relief valve 와 Check valve 는 각각 고압으로 인한 시스템 보호의 목적과, 유량 제어의 목적이다. 그리고 유압 실린더가 후진 할 때 회수되는 유량으로 Hydraulic motor-Generator 를 구동하기 위하여 유량 제어의 목적으로 Proportional flow control valve 가 사용 되었다. 이때 회생 된 전기 에너지는 Battery 로 충전되어 전기 모터를 구동하게 된다.

전기 모터의 방향은 PC 에서 A/D board 와 switching circuit 을 통해서 Relay 를 작동시켜 정·역회전을 하게 된다. 또한 유압 실린더의 속도는 PC 에서 전기 모터에 전압을 공급하여(0~5V) 결정

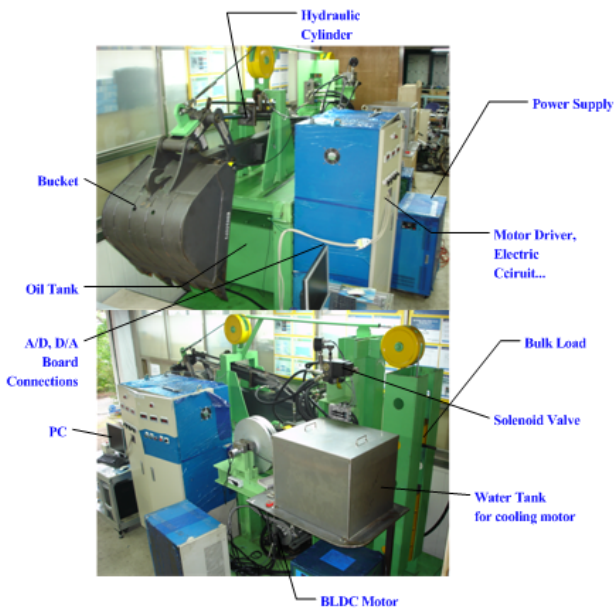


Fig. 7 Photograph of experimental apparatus

되며, 에너지를 회생 시키기 위한 유압 모터의 속도는 PC 에서 Proportional flow control valve amplifier 에 전압을 공급하여(0~10V) 결정한다.

마지막으로 실험 조건은 실제 굴삭기의 작업 조건을 재현 하기 위하여 유압 실린더를 Bulk 하중(0~100Kg)에 직결하여 다양한 하중 조건에서 전기 모터의 속도를 변화 시키면서 회생 되는 에너지를 검증한다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 유압 시스템과 전기-유압 액추에이터 시스템을 유압 해석 Tool 인 AMESim 을 이용하여 모델링 및 해석을 통해 에너지 효율을 비교하였다. 전기-유압 액추에이터 시스템이 기존 시스템에 대하여 약 45% 에너지 효율이 우수하다는 결과를 얻었다. 그리고 전기-유압 액추에이터 시스템을 굴삭기 버킷에 적용시키고, 유압 실린더가 후진 작동 할 때 회수 되는 유량으로 Hydraulic motor-Generator 를 구동시켜 회생된 전기에너지를 Battery 에 저장시켜 이를 다시 전기 모터 구동에 사용하는 에너지 절감형 굴삭기에 관한 유압 회로 설계 및 벤치 시스템 개발을 하였다.

향후 이 시스템의 에너지 절감 및 회생률을 검증하고, 본 연구를 응용하여 굴삭기를 대상으로 기존 굴삭기 유압 시스템의 효율을 높이기 위해

전기-유압 액추에이터 시스템을 굴삭기에 적용시키고, 에너지 회생하는 기술을 접목시켜 차세대 에너지 절감형 하이브리드 굴삭기 개발에 적용하고자 한다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성 사업으로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

- (1) Andersson, J., Krus, P., and Storck, K., November 15-17, 1999, "Modeling and Simulation of Heat Generation in Electro-Hydrostatics Actuation Systems" *Proc. of the 4th JHPS int. Symposium on Fluid Power, Tokyo, Japan.*
- (2) Andersson, J., Krus, P., and Wallace, D., September 11-13, 2000 "Multiobjective Optimization of Hydraulic Actuator System", *Proc. of ASME Design Automation Conf. , Baltimore, USA.*
- (3) Rahmfeld R., Ivantysynove M., 2000 "Displacement Controlled Linear Actuator with Differential Cylinder-A Way to Save Primary Energy in Mobile Machines", *Proc. of the 5th int. Conf. on Fluid Power Transmission and Control(ICFP'2001), Hangzhou, China, pp. 79-91.*