

IMV를 사용한 유압굴삭기 붐 동작의 에너지 절감 효과

Energy Saving Effect in Boom Motion of Excavator using IMV

허준영 · 이민희

Jun Young Huh and Min Hee Lee

1. 서 론

유압굴삭기 운전자가 붐 실린더나 암 실린더 등의 액추에이터를 조작하기 위해서는 조이스틱을 사용하여 6포트 3위치 방향제어밸브에 제어된 감압을 인가하여 스톱 위치를 제어한다. 이에 따라 유량이 유입되는 미터인 오리피스스를 통해 액추에이터로 기름이 흘러들어가고 한편으로는 유출되는 미터아웃 오리피스스를 통해 유량은 탱크로 귀환된다. 따라서 기존의 MCV(Main Control Valve)형 유압굴삭기는 액추에이터 작동시 미터인과 미터아웃의 2개의 오리피스스를 통과하도록 되어 있다. 따라서 붐 다운 동작과 스윙 모터 브레이크, 암 인(in)과 같은 음의 부하가 걸리는 경우에도 미터인과 미터아웃의 2개의 오리피스스를 통과해야 하므로 이 방법의 에너지 소비량은 매우 크다¹⁾. 이를 개선하기 위하여 다양한 IMV(Independent Metering Valve) 방법이 제안되었다. Shenouda는 4개의 IMV밸브에 의해 제어되는 텔레핸들러의 붐 액추에이터 동작에 대하여 준정적 모델을 사용하여 에너지 절감 효과를 나타내기 위한 시도를 하였다²⁾. B. Eriksson은 IMV의 다양한 형태로 2포트/2위치 양방향 비례제어밸브의 구성에 대하여 연구하였다³⁾. K. Choi는 IMV를 준정적으로 모델링하여 유압굴삭기에서 에너지 절감 효과를 검증하기 위해 기존의 MCV 시스템과 펌프 소비 동력을 비교하는 시뮬레이션을 수행하였다⁴⁾. W. Dong은 로드 센싱 기능을 갖는 IMV를 제안하였고 에너지 절감을 검증하기 위해 AMESim 소프트웨어를 사용하여 기존의 굴삭기 시스템과 비교하였다⁵⁾. L. Ge는 6 ton 유압굴삭기에 대하여 실험을 통하여 기존의 로드 센싱 시스템과 비교하여 붐 동작과 암 동작에 대하여 각각 15%와 5.6%의 에너지 절감효과가 있음을 보였다⁶⁾. H. Park은 압력피드백을 사용하는 IMV에 대해 에너지 절감의 효과를 검증하기 위하여 준정적 모델을 사용하여 해석하였고, AMESim을 사용하여 시뮬레이션 하였다⁷⁾.

에너지 절감 효과를 나타내기 위하여 MCV를 사

용하는 기존 굴삭기와 IMV를 사용한 굴삭기 시스템을 비교하기는 쉽지 않다. 왜냐하면 MCV는 스톱 방식을 사용하고, IMV는 대부분 포켓 방식이어서 밸브에서의 오리피스 면적과 오버랩 등에서 차이가 있다. 또 기존 굴삭기에서 붐 다운 등의 경우에 음의 부하의 영향을 최소화하기 위해 스톱 오리피스스의 면적을 적절히 설계하고 에너지 절감을 위해 네가티브 또는 포지티브 컨트롤 방식을 채택하여 저렴하지만 효율적인 조치를 취하고 있기 때문에 같은 조건에서 서로를 비교하기 위해서는 이와 같은 효율적인 조치들을 모두 반영하여 서로를 비교해야 한다. 그리고 근래에는 붐 다운과 암 인 시에 스톱 내부에 체크밸브로 구성된 재생회로를 통해 재 공급되는 회로를 갖고 있다⁸⁾.

본 해설에서는 가능한 한 유사한 조건에서 기존의 MCV가 갖고 있는 주된 장점들을 반영한 가운데 IMV를 사용하는 것과 비교하고, IMV를 사용했을 때 에너지 절감의 효과가 있다고 하면 그 이유는 무엇인가를 살펴보고자 한다. 기존 MCV와 가능한 한 동일한 조건에서의 작동을 위해 압력평형밸브를 사용하였다. 굴삭기 붐 동작에 대하여 AMESim으로 비선형 동적 모델링하여 에너지 절감 효과를 시뮬레이션을 통하여 알아본다.

2. 시스템

Fig. 1에 근래의 MCV를 갖는 붐 업 유압회로도 나타낸다. 붐 다운 조이스틱이 조작되면, 조이스틱 압력에 의해 붐 홀딩밸브가 해제되며, 펌프의 토출측은 붐 실린더 로드측으로 연결되고, 붐 헤드 유량은 주 제어밸브를 거쳐 탱크로 배출된다. 붐 다운 시 붐 실린더 헤드에서 탱크로의 유로는 붐의 하중을 지지하기 위해 작게 설계되어 있으면 본 유로의 개방 정도에 따라 붐의 하강 속도가 결정된다. 붐 하강 시 붐 실린더 헤드측의 압력은 통상 100~150bar이고, 로드측의 압력은 통상 10bar 미만이다⁸⁾. 이 압력의 차이에 의해 붐 헤드측에서 배출된 일부

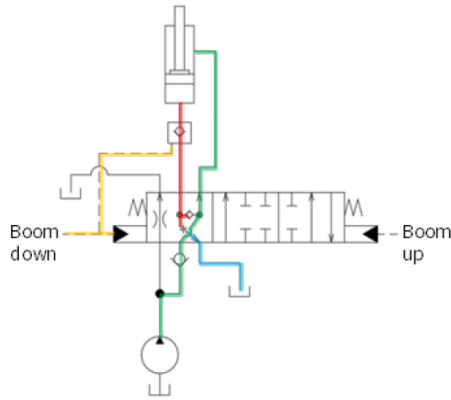


Fig. 1 Boom circuit of an excavator

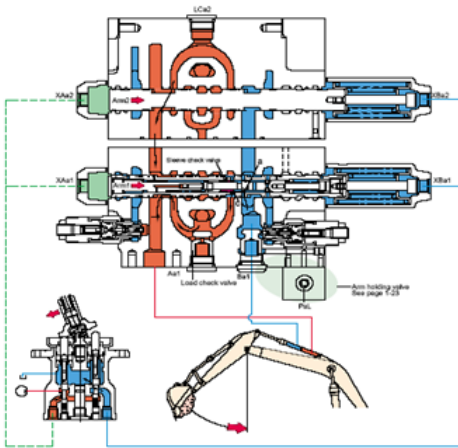


Fig. 2 An example of MCV spool with inner check valve

유량이 Fig. 2에 나타난 바와 같은 스톨 내부에 체크밸브로 구성된 재생회로를 통해 붐 로드측으로 재 공급된다. 이와 같은 재생을 통해 붐 다운 시 펌프의 토출유량을 감소시키고, 붐 실린더 로드측에서의 캐비테이션을 방지할 수 있도록 되어 있다. 그러나 붐 다운 시에 스톨 내부의 체크밸브가 열리기 위해서는 약 100bar의 압력차가 필요하고 배출된 일부의 유량만이 로드측으로 합류되기 때문에 재생 효과는 있으나 근본적으로 해결되었다고는 할 수 없다. 따라서 본 해설에서는 액추에이터 작동시 항상 미터인과 미터아웃의 2개의 오리피스를 통과하도록 되어있는 기존의 MCV와 미터인과 미터아웃 오리피스를 각각 독립적으로 제어할 수 있는 IMV의 작동을 비교하고자 한다. 다만 해설에 사용된 MCV에는 스톨 내부에 체크밸브로 구성된 재생회로가 없는 종래의 MCV를 대상으로 하였다.

Fig. 3에 IMV를 적용한 붐 유압회로 구성을 나타낸다. 여기서 붐 실린더는 ①~④의 4개의 IMV로

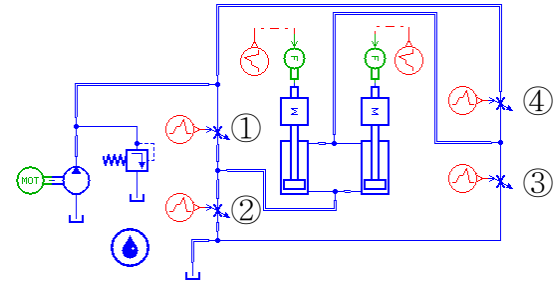


Fig. 3 Boom circuit of an excavator using IMV

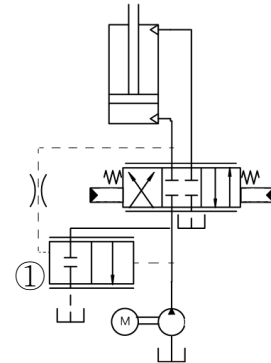


Fig. 4 Boom circuit of an excavator using MCV with a pressure compensator

제어되며 여기서 사용된 IMV는 압력평형밸브를 포함하고 있고 양방향으로 제어된다. 여기서 압력평형밸브의 역할은 붐 실린더에서 유량을 필요로 하면 우선적으로 붐 실린더로 보내고, 붐 실린더에서 유량을 필요로 하지 않을 경우에는 펌프의 토출유량을 저압으로 탱크로 복귀시킨다. 붐 실린더에 부하가 걸리더라도 제어밸브 전후의 압력차를 일정하게 유지시키기 때문에 오직 제어밸브의 교축면적에 의해 정해진 유량이 붐 실린더로 보내진다. 즉, 부하 변동에 거의 영향을 받지 않는 조건으로 붐 실린더는 작동된다^{9,10}.

한편 Fig. 4에 기존 MCV의 스톨 형태를 간단하게 4/3비례방향제어밸브로 나타내어 붐 실린더를 제어하는 유압회로도를 나타낸다. 여기에도 압력평형밸브①이 설치되어 위에서 설명한 IMV와 같은 조건으로 작동한다.

Fig. 5에 기존 MCV의 붐 제어 스톨의 오리피스 면적을 나타낸다. x 축은 스톨 스트로크이고 y 축은 오리피스 면적을 나타낸다. 우 반면은 붐업영역이고 좌 반면은 붐다운 영역이다. 붐업 영역에서 스톨이 변위되었을 때 실린더에서 탱크로 연결된 오리피스 면적(Cyl-R)이 펌프에서 실린더로 연결된 오리피스 면적(P-Cyl)보다 크게 되어 붐업 시에 배압이 적게

걸리도록 설계되었다. 마찬가지로 봄다운 영역에서 실린더에서 탱크로 연결된 오리피스 면적(Cyl-R)이 펌프에서 실린더로 연결된 오리피스 면적(P-Cyl)보다 작게 되어 봄다운 시에 봄 자중의 위치에너지를 이용할 수 있도록 설계된 것을 볼 수 있다.

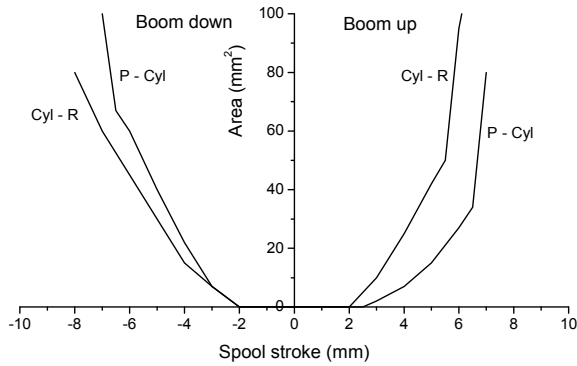


Fig. 5 Orifice area of the conventional MCV boom spool

3. 시뮬레이션 및 고찰

굴삭기의 봄 동작을 봄실린더가 관절형 봄과 링크로 연결되어 동작하는 것이 아닌 단순히 수직으로 세워진 실린더의 업과 다운 동작에 대해서 기존의 MCV를 사용했을 때와 IMV를 사용하였을 때의 에너지 절감 효과를 비선형 동적 모델을 사용하여 AMESim으로 시뮬레이션하므로써 조사한다. Table 1에 사용된 시스템의 파라미터를 요약하여 나타낸다.

Table 1 System parameters

Total mass being moved	2000 kg
Piston diameter	100 mm
Rod diameter	60 mm
Viscous friction force	100 N/(m/s)
Max. pump flowrate	83.25 l/min

Fig. 6에 기존의 MCV에 가해진 입력신호를 나타낸다. 입력은 스톱의 양단에 가해지는 조작력(N)이다. 0.5초에서 1.5초 사이에 조작력이 선형적으로 200N까지 증가하여 2.5초간 유지하고 다시 1초 동안에 0N으로 떨어져서 0.5초가 유지했다가 봄다운을 같은 형상으로 동작되도록 하였다. 제안된 IMV 시스템에 대해서는 동일한 봄 동작을 하도록 슬레노이드 흡인력(N)을 입력하였다.

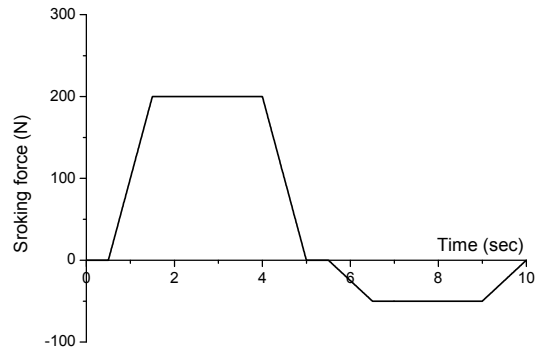


Fig. 6 Input signal of the conventional MCV boom spool

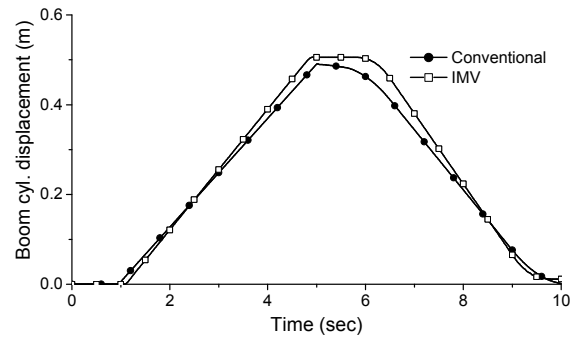


Fig. 7 Boom cylinder rod displacement

Fig. 7에 봄실린더 로드 변위를 나타낸다. 시간에 따른 봄 실린더 로드의 상하강 곡선은 종래 MCV를 사용하는 경우와 IMV를 사용한 경우가 비슷한 형상으로 변위되는 것을 볼 수 있다.

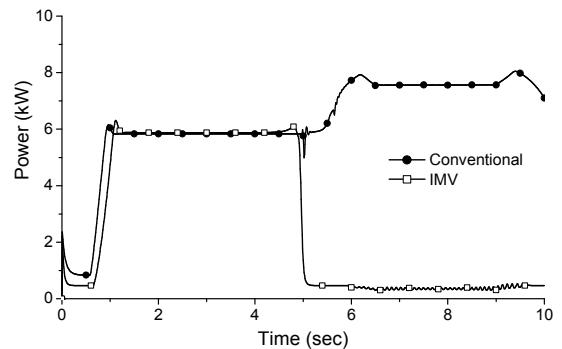


Fig. 8 Consumed pump power

Fig. 8에 소모된 펌프동력을 나타낸다. 5초 이후에는 봄 다운 동작을 나타내는데 IMV의 경우는 거의 동력을 소모하고 있지 않은 반면에 종래의 MCV를 사용하는 경우에는 봄 다운 동작에서도 상당한 동력손실이 일어남을 볼 수 있다. 그 원인을 파악하기 위해서 봄 다운시에 미터아웃 오리피스에서의 동력

손실을 Fig. 9에, 미터인 오리피스에서 동력손실을 Fig. 10에 각각 나타낸다. Fig. 9에서 IMV의 경우에는 고주파 진동이 수반되고 있지만 붐 다운 시의 무거운 붐의 자중을 제어하기 위한 미터아웃 오리피스를 통한 동력손실은 두 경우에 사다리꼴 형상의 비슷한 양상을 나타낸다. 즉, 동력손실의 크기는 비슷하다. 그러나 붐 다운시에 미터인 오리피스에서 동력손실을 나타낸 Fig. 10에서는 종래의 MCV는 동력손실이 크게 발생한 반면에 IMV는 거의 0에 가깝게 나타난 것을 볼 수 있다.

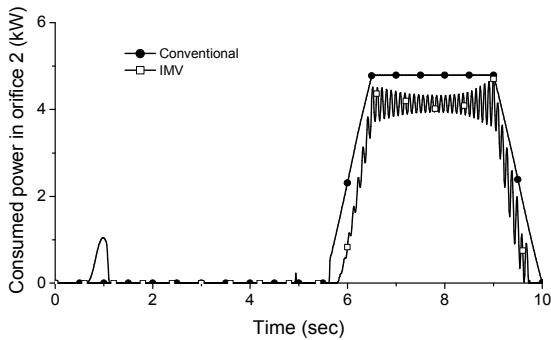


Fig. 9 Consumed power through meter-out orifice during boom down movement

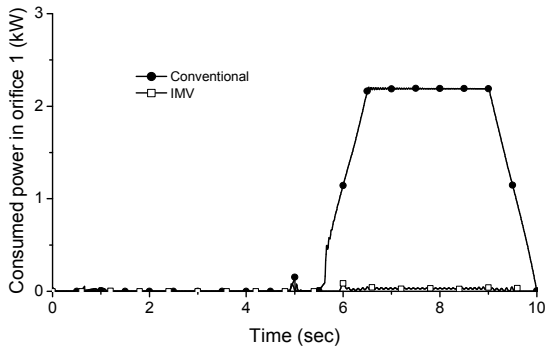


Fig. 10 Consumed power through meter-in orifice during boom down movement

그 원인을 파악하기 위해 붐 다운시에 미터인 오리피스 전후의 압력과 압력차를 조사한다. Fig. 6에 따르면 0~5초까지는 붐 업구간이고 0.5초 정지 후 5.5초 이후에는 붐 다운 구간이다. Fig. 6으로 나타낸 입력신호에 따른 붐 동작 제어스플에서 오리피스 전후의 압력과 압력차를 Fig. 11에 나타낸다. 그림에서 ▼는 MCV 미터인 오리피스를 통과하기 전의 압력(공급압력)이고, ▲는 MCV 미터인 오리피스를 통과한 후의 압력(붐 로드측 압력)이다. 그 차압을 심볼 ●을 갖는 곡선으로 나타내었다. 그리고

Fig. 12에서 ▽는 IMV 미터인 오리피스를 통과하기 전의 압력이고, △는 IMV 미터인 오리피스를 통과한 후의 압력이다. 그 차압을 심볼 ○을 갖는 곡선으로 나타내었다. Fig. 11의 심볼 ●을 갖는 붐 다운시에 MCV 미터인 오리피스 전후의 압력과 압력차는 Fig. 12의 심볼 ○을 갖는 IMV 미터인 오리피스 전후의 압력차보다 매우 큰 것을 볼 수 있다. Fig. 13에 붐 실린더 헤드측 유량을 나타낸다. 붐 실린더 작동에 필요한 유량은 두 경우에 비슷하므로 결국 동력손실은 미터인 오리피스 전후의 압력차가 가장 큰 요인인 것을 알 수 있다.

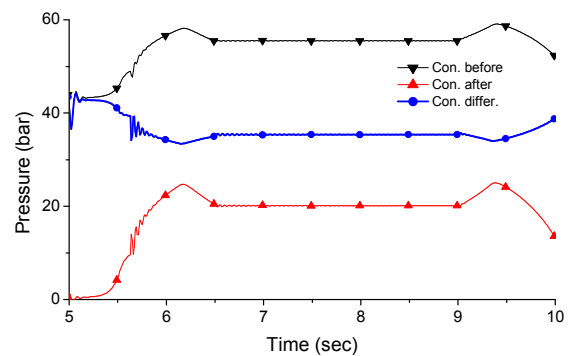


Fig. 11 Pressures about meter-in orifice during boom down movement

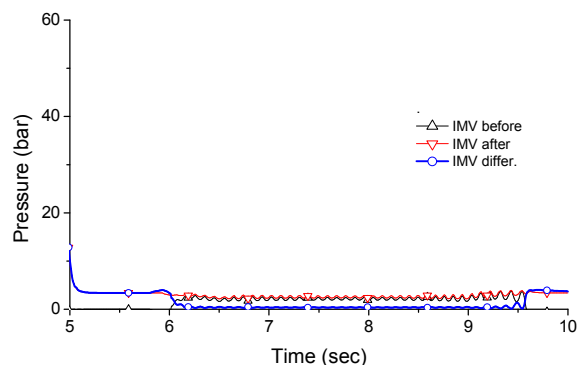


Fig. 12 Pressures about meter-in orifice during boom down movement

MCV에서 미터인 오리피스 전후의 압력차가 크게 발생한 이유는 액추에이터를 작동시킬 때 반드시 2개의 오리피스를 통과해야 하고, 붐 다운일 때도 마찬가지이다. 붐 다운시에 피스톤 헤드측으로는 로드측으로 들어가는 유량의 거의 2배에 가까운 유량이 나오게 되고, 오리피스를 통한 압력손실은 유량의 제곱에 비례하므로 상당히 큰 압력손실(48.5bar)이 발생한다. 이 압력은 실린더 헤드측에 그대로 작용

한다. 한편 붐의 자중과 부하의 중력으로 인한 힘과 붐 실린더 로드측에 작용하는 압력의 합이 헤드측에 작용하는 유압력과 힘의 평형을 이룬다. 이 때 발생하는 붐 실린더 로드측 압력이 Fig. 11에서 약 20bar이고, 통과유량은 41ℓ/min, 오리피스 면적은 10.1mm²이다. 이 경우에 미터인 오리피스를 통한 압력손실은 약 40bar가 되어 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다.

반면에 IMV를 사용하면 붐 다운의 경우에 Fig. 3에서 탱크측으로 연결된 미터아웃 IMV ②를 사용하여 제어하고 미터인 IMV ③은 완전히 개방하고, 펌프측과 연결된 IMV ③과 ④는 완전히 닫는다. 그리고 펌프를 무부하시킨다. 따라서 붐 다운 시에 IMV 미터인 밸브 ③에서의 압력손실은 아주 작다. 참고로 사용된 압력평형밸브를 통해 탱크로 복귀되는 유량을 Fig. 14에 나타낸다. 두 경우가 비슷한 양상을 나타내고 있다.

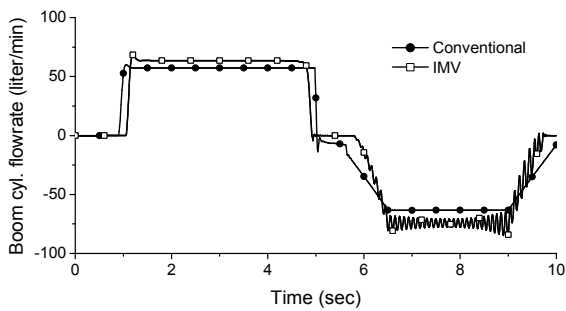


Fig. 13 Flowrate of boom cylinder

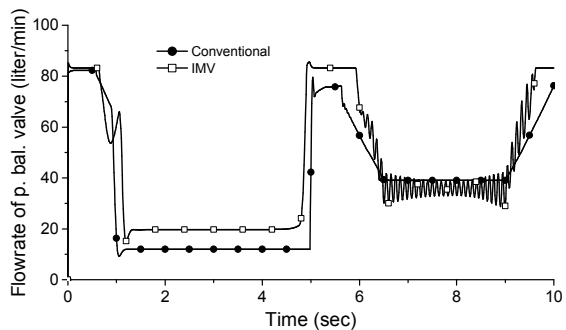


Fig. 14 Return flow through the pressure balance valve

Fig. 15에 본 연구에서 지정한 붐 동작을 1사이클 수행했을 때 소모되는 펌프동력의 총량을 나타낸다. 종래의 MCV를 사용했을 때 총 소모 동력은 62.6kW인 반면에 IMV를 사용할 경우에는 26.5kW의 동력만 소모되어 58%의 에너지 절감효과를 가져왔다.

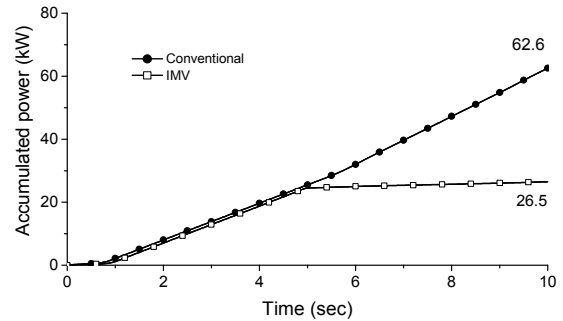


Fig. 15 Accumulated pump consuming power

4. 결 론

유압굴삭기 상차 작업 시에 붐 다운을 통해 회생 가능한 에너지는 전체 펌프 토출에너지의 약 15%로 알려져 있다. 본 해설에서는 이와 같이 재생 에너지를 얻기 위한 기초로써 유압굴삭기의 붐 작동에 대하여 기존의 MCV 굴삭기에서는 왜, 어떻게 에너지가 소모되는지와 IMV를 사용하면 어떻게 에너지를 절감할 수 있는지에 대하여 AMESim 시뮬레이션을 사용하여 비교하였다. 붐 실린더 업다운 동작에 대하여 IMV를 사용했을 때 기존의 MCV를 사용할 경우와 비교해서 58%의 에너지 절감의 효과가 있었다. 이 에너지 절감의 효과는 붐 다운과 같은 네가티브(-) 부하가 걸리는 경우에 MCV 타입에서는 항상 미터인과 미터아웃 오리피스가 있는 구조이어서 각각의 오리피스에서 압력손실을 피할 수 없는 반면에 IMV에서는 각각의 오리피스를 독립적으로 제어하여 오리피스에서 불필요한 손실을 줄일 수 있기 때문이다.

후 기

이 해설의 결과는 산업핵심기술개발사업(과제번호:10063469)으로 이루어졌음을 밝힙니다.

참고 문헌

1. J. D. Zimmerman, M. Pelosi, C. A. Williamson and M. Ivantysynova, "Energy Consumption of an LS Excavator Hydraulic System," ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition American Society of Mechanical Engineers, pp.117-126, 2007.
2. A. Shenouda, "Quasi-static hydraulic control systems

and energy savings potential using independent metering four-valve assembly configuration." Ph. D. Dissertation. Georgia Institute of Technology, 2006.

3. B. Eriksson, "Mobile Fluid Power Systems Design: with a Focus on Energy Efficiency," Ph. D. Dissertation. Linköping Universitet, 2010.
4. K. Choi, J. Seo, Y. Nam and K. Kim, "Energy-saving in excavators with application of independent metering valve." J. of Mechanical Science and Technology, Vol.29, No.1, pp.387-395, 2015.
5. W. Dong, Z. Jiao and S. Wu, "Compound Control Strategy for Independent Metering Directional Valve of Engineering Machinery by Simulation," Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China, 2014.
6. L. Ge, Z. Dong, W. Huang, L. Quan, J. Yang and W. Li, "Research on the Performance of Hydraulic Excavator with Pump and Valve Combined Separate Meter In and Meter Out Circuits," International Conference on Fluid Power and Mechatronics, Harbin, China, 2015.
7. H. G. Park, S. A. Nahian and K. K. Anh, "A Study on Energy Saving of IMV Circuit using Pressure Feedback," J. of Drive and Control, Vol. 13, No. 4, pp.31-44, 2016.
8. B. L. Kang, H. S. Ahn and A. R. Seo, "Development of Hydraulic Boom Energy

Recuperation System for Excavators," J. of Drive and Control, Vol. 14, No. 4, pp.95-101, 2017.

9. J. Y. Huh, "Energy Saving in Boom Motion of Excavators using IMV," J. of Drive and Control, Vol. 14, No. 3, pp.1-7, 2017.
10. J. Y. Huh and G. H. Jung, "Basic design for development of IMV for MCV," J. of Drive and Control, Vol. 15, No. 3, pp.49-56, 2018.

[저자 소개]



허준영

E-mail : huh@koreatech.ac.kr

Tel : 041-560-1142

1988년 부산대학교 기계공학과 박사.

1988년~1991년 현대중공업 건설장비사

업본부 연구소 선임연구원. 1992년~현

재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수. 유압 시스템 개발 연구에 종사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 유공압 건설기계학회 등의 회원, 공학박사



이민희

E-mail : mjjeon63@gmail.com

Tel : 052-259-2760

1986.2 인하대학교 졸업/석사. 1985.12~

현대중공업 건설장비사업본부후 유압시

스템, 유압부품 (M.C.V , 주행 및 선회/

감속기) 및 건설기계 장비 개발 업무 종

사. 2012.1 임원선임후 R&D부문장 역임, 2017.4~ 현대건설 기계상무/자문역. 2017.9~울산대학교건설기계공학과 겸임교수. 유공압건설기계학회, 대한기계학회 회원