

# IMV를 사용한 유압굴삭기 붐 동작의 에너지 절감 Energy Saving in Boom Motion of Excavators using IMV

허준영<sup>1</sup>

Jun Young Huh

Received: 21 Feb. 2017, Accepted: 13 Jun. 2017

**Key Words** : Independent Metering Valve(IMV), Excavator(굴삭기), Pressur Balance(압력평형), Pump power (펌프 동력)

**Abstract:** Energy consumption of conventional hydraulic excavators controlled by MCV is considerable when negative load is applied because the meter orifice and meter-out orifice are machined in one spool. Therefore, IMV is introduced to save energy use of hydraulic excavators, but existing hydraulic excavators have various advantages so it is difficult to make a clear comparison. In this study, we compare the use of an existing MCV excavator that has many advantages such as negative control, and IMV for boom up and down operation, and if IMV is used to save energy, we will examine the cause. If possible, for comparability under the same conditions, both systems use pressure balance valves to minimize power consumption when not using power in the actuator. The orifice area at each notch of each valve is calculated, and energy saving is verified by comparing the two systems through simulation.

## 1. 서 론

유압굴삭기 액추에이터의 작동은 운전자가 조이스틱을 사용하여 6포트 3위치 방향제어밸브의 스톱 위치를 직접 제어한다. 이에 따라 액추에이터로의 유입 및 유출되는 유량은 동시에 제어된다. 따라서 붐-다운 동작과 스윙 모터 브레이크, 암-인과 같은 음의 부하가 걸리는 경우에 목표로 하는 제어를 수행하기 위해서는 충분한 배압이 리턴 측에 형성되어야 하므로 이 방법의 에너지 소비량은 매우 크다.<sup>1)</sup> 이를 개선하기 위하여 다양한 IMV(Independent Metering Valve) 방법이 제안되었다. Shenouda는 4개의 IMV밸브에 의해 제어되는 텔레핸들러의 붐 액추에이터 동

작에 대하여 준정적 모델을 사용하여 에너지 절감 효과를 나타내기 위한 시도를 하였다.<sup>2)</sup> B. Eriksson은 IMV의 다양한 형태로 2포트/2위치 양방향 비례제어 밸브의 구성에 대하여 연구하였다.<sup>3)</sup> K. Choi는 IMV를 준정적으로 모델링하여 유압굴삭기에서 에너지 절감 효과를 검증하기 위해 기존의 MCV 시스템과 펌프 소비 동력을 비교 하는 시뮬레이션을 수행하였다.<sup>4)</sup> W. Dong은 로드 센싱 기능을 갖는 IMV를 제안하였고 에너지 절감을 검증하기 위해 AMESim 소프트웨어를 사용하여 기존의 굴삭기 시스템과 비교하였다.<sup>5)</sup> 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 보였다.<sup>6)</sup> H. Park은 압력피드백을 사용하는 IMV에 대해 에너지 절감의 효과를 검증하기 위하여 준정적 모델을 사용하여 해석하였고, AMESim을 사용하여 시뮬레이션 하였다.<sup>7)</sup>

에너지 절감 효과를 나타내기 위하여 MCV를 사용하는 기존 굴삭기와 IMV를 사용한 굴삭기 시스템을 비교하기는 쉽지 않다. 왜냐하면 MCV는 스톱 방식

\* Corresponding author: huh@koreatech.ac.kr

<sup>1</sup> School of Mechatronic Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

Copyright © 2017, KSFC

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.

을 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 오리피스의 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.

본 연구에서는 지금까지 여러 가지 연구가 있어 왔지만 가능하면 비슷한 조건에서 기존의 MCV가 갖고 있는 주된 장점들을 반영한 가운데 IMV를 사용하는 것과 비교하고, IMV를 사용했을 때 에너지 절감의 효과가 있다고 하면 그 원인은 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 검증한다.

## 2. 시스템

### 2.1 유압회로

Fig. 1 (a)에 제안된 IMV를 적용한 유압회로 구성을 나타낸다. 여기서 붐 실린더는 3포트 3위치 방향제어밸브로 표시된 2개의 IMV로 제어되며 여기서 사용된 IMV는 양방향으로 제어된다. Fig. 2에 3포트 3위치 방향제어밸브로 표시된 IMV의 내부 상세 회로도도를 나타낸다. 이것은 압력평형밸브①와 미터인밸브②, 미터아웃밸브③로 구성되어 있다. 여기에는 압력평형밸브①가 설치되어 있어서 미터인밸브② 통과 전후의 압력차가 1.6 bar가 되도록 작동한다. 따라서 붐 실린더에서 유량을 필요로 하면 우선적으로 붐 실린더로 보내고, 붐 실린더에서 유량을 필요로 하지 않을 경우에는 제어밸브가 닫히면서 펌프의 토출유량은 전부 압력평형밸브를 통하여 저압으로 탱크로 복귀된다. 붐 실린더에 부하가 걸리더라도 제어밸브 전후의 압력차를 일정하게 유지시키기 때문에 오직 제어밸브의 교축면적에 의해 정해진 유량이 붐 실린더로 보내진다. 즉, 부하변동에 거의 영향을 받지 않는 조건으로 붐 실린더는 작동된다. 한편 Fig. 1 (b)에 기존 MCV의 스톱 형태를 간단하게 4/3비례방향제어밸브로 나타내어 붐 실린더를 제어하는 유압회로도도를 나타낸다. 여기에도 압력평형밸브①이 설치되

어 위에서 설명한 IMV와 같은 조건으로 작동한다.

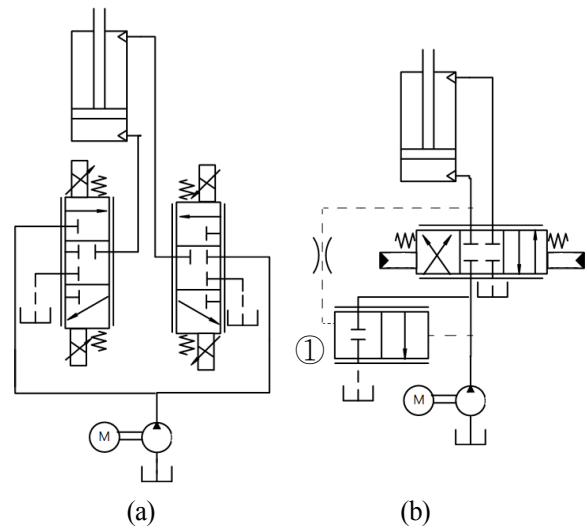


Fig. 1 Hydraulic circuit of boom cylinder using (a) proposed IMV, (b) conventional MCV

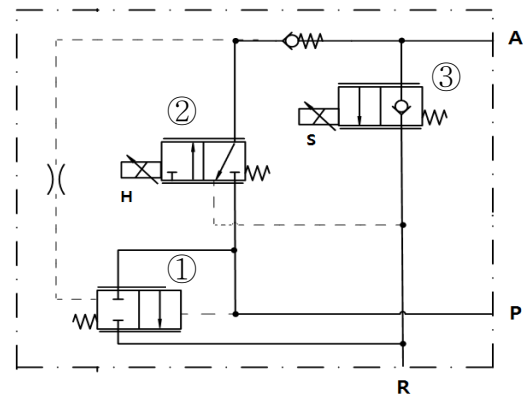


Fig. 2 Hydraulic circuit of the proposed IMV

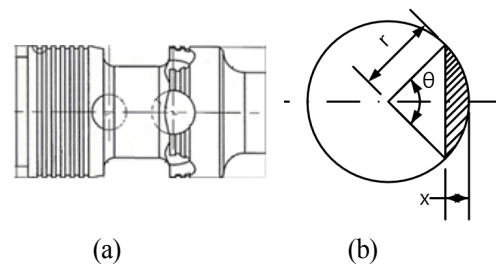


Fig. 3 (a) Schematic diagram of meter-in valve and (b) shape of circular orifice

### 2.2 노치(notch) 해석

제안된 IMV의 미터인밸브의 스톱 형상을 Fig. 3 (a)에 나타낸다. 이 밸브는 원형 노치를 가지고 있고, 이것을 Fig. 3 (b)에 나타낸다. 여기서  $x$ 는 스톱 스트로크이고, 빗금친 부분의 면적은 유량이 통과하는 오

리피스 면적으로 아래와 같이 산출된다.

$$\text{호의 면적: } A_a = \frac{1}{2}r^2\theta$$

$$\text{삼각형의 면적: } A_t = r^2\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}$$

따라서 빗금친 부분의 면적( $A_d$ )은

$$\begin{aligned} A_d &= A_a - A_t \\ &= r^2\cos^{-1}\frac{(r-x)}{r} - r^2\sin(\cos^{-1}\frac{(r-x)}{r}) \\ &\quad \cos(\cos^{-1}\frac{(r-x)}{r}) \end{aligned} \quad (1)$$

한편 오리피스를 통과하는 유량을 산출할 때 수력 반경이 필요하기 때문에 빗금친 부분의 둘레( $L_c$ )를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} L_c &= r\theta + 2r\sin\frac{\theta}{2} \\ &= 2r\cos^{-1}\frac{(r-x)}{r} + 2r\sin(\cos^{-1}\frac{(r-x)}{r}) \end{aligned} \quad (2)$$

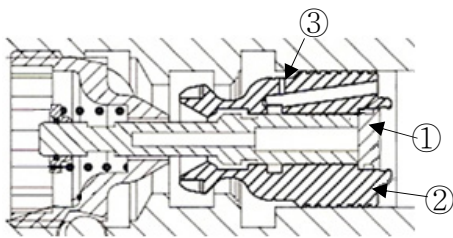


Fig. 4 Schematic diagram of meter-out valve

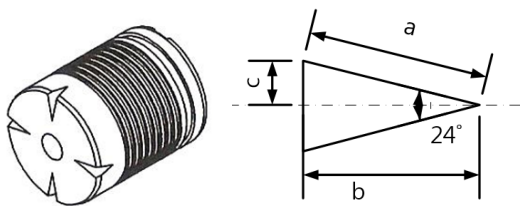


Fig. 5 (a) Schematic diagram of pressure balance valve and (b) V shape orifice

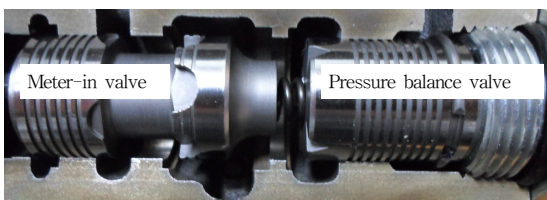


Fig. 6 Photo of meter-in valve and pressure balance valve

Fig. 4에 제안된 IMV의 미터아웃밸브의 포켓 형상을 나타낸다. ①번 스톱은 비례 솔레노이드의 아마추어에 연결되어 있다. 입력전류가 가해지면 솔레노이드 흡인력이 발생하고 반대편 스프링력에 대하여 제어스풀을 움직이게 된다. 이때 소량의 유량이 탱크로 흘러나가고 보충되는 유량이 ③번의 고정 오리피스를 통해 들어오게 된다. 이때 압력강하가 생기고 강하된 압력이 메인 포켓②의 오른쪽 면에 작용하므로 메인 포켓은 열리게 된다. 이 밸브의 제어스풀도 원형 노치를 가지고 있으므로 위에서 설명한 방식으로 오리피스 면적과 둘레를 산출할 수 있다.

Fig. 5 (a)에 압력평형밸브의 형상을 나타낸다. 이 밸브는 V형 노치를 가지고 있고, 이것을 Fig. 5 (b)에 나타낸다. 스톱 스트로크( $x$ )에 따라 생기는 유량이 통과하는 오리피스 둘레와 면적은 아래와 같이 산출할 수 있다. Fig. 6에 미터인밸브와 압력평형밸브의 사진을 나타낸다.

$$\text{둘레: } 2(a+c) = 2\left(\frac{x}{\cos 12^\circ} + x \tan 12^\circ\right)$$

$$\text{면적: } bc = x \frac{x}{\cos 12^\circ} \sin 12^\circ = x^2 \tan 12^\circ$$

$$(b = x, \text{ spool stroke})$$

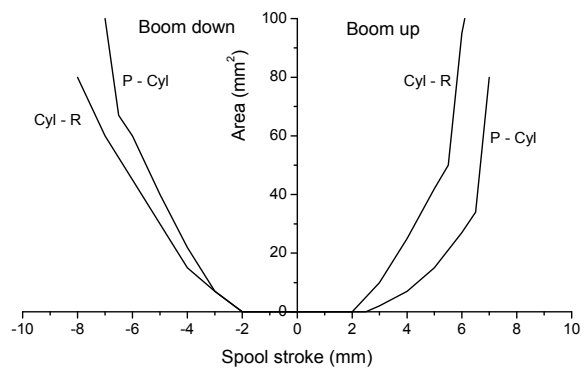


Fig. 7 Orifice area of the conventional MCV boom spool

Fig. 7에 기존 MCV의 붐 제어 스톱의 오리피스 면적을 나타낸다.  $x$ 축은 스톱 스트로크이고  $y$ 축은 오리피스 면적을 나타낸다. 우 반면은 붐업영역이고 좌 반면은 붐다운 영역이다. 붐업 영역에서 스톱이 변위 되었을 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 붐다운 영역에서 실린더에서 탱크로 연결된 오리피스 면적(Cyl-R)이 펌프

에서 실린더로 연결된 오리피스 면적(P-Cyl)보다 작게 되어 붐다운 시에 붐 자중의 위치에너지를 이용할 수 있도록 설계된 것을 볼 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 고찰

굴삭기의 붐 동작을 붐실린더가 관절형 붐과 링크로 연결되어 회전하는 것이 아닌 단순히 수직으로 세워진 실린더의 업과 다운 동작에 대해서 제안된 IMV를 사용하였을 때 에너지 절감 효과를 비선형 동적 모델을 사용하여 AMESim으로 시뮬레이션하되로서 조사하였다. 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

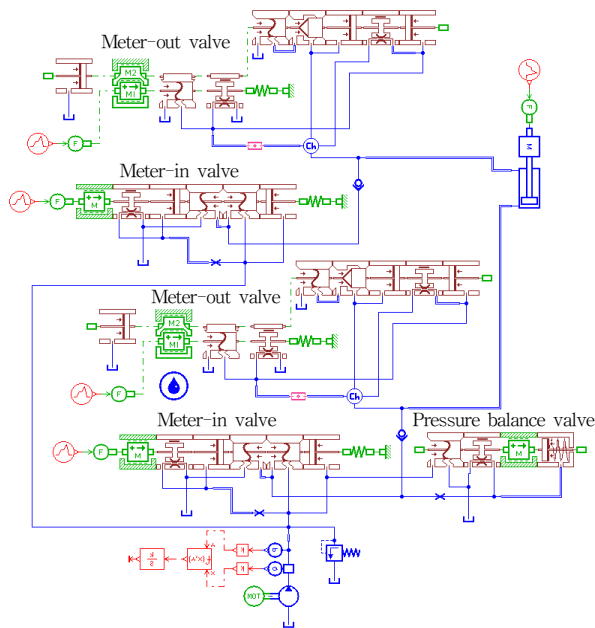


Fig. 8 AMESim model using the proposed IMV

Fig. 8에 제안된 IMV를 사용한 붐 실린더의 업 다운 동작을 시뮬레이션하기 위한 AMESim 모델을 나타낸다. Fig. 9는 기존의 MCV를 사용한 AMESim 모델이다. IMV에서와 마찬가지로 같은 조건의 상태에서 제어되도록 하기 위하여 압력평형밸브①를 설치하였다.

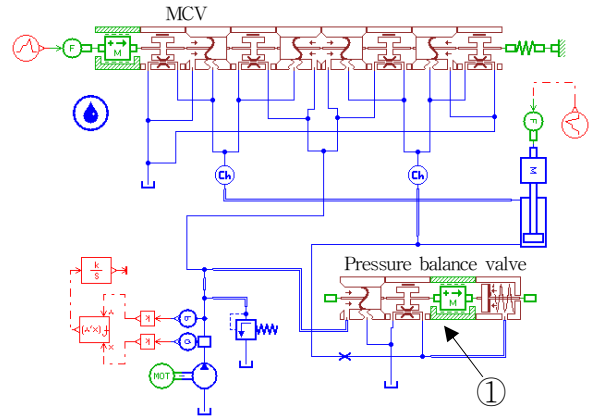


Fig. 9 AMESim model using the conventional MCV

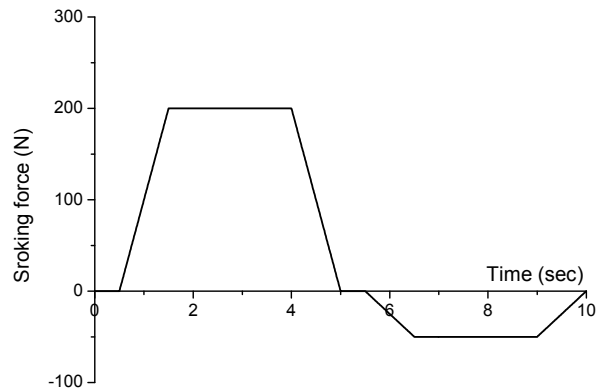


Fig. 10 Input signal of the conventional MCV boom spool

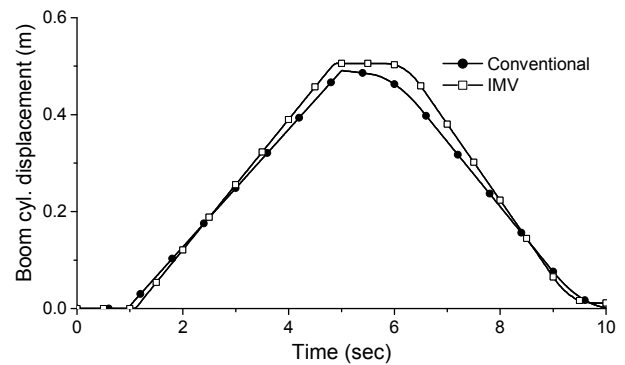


Fig. 11 Boom cylinder rod displacement

Fig. 10에 기존의 MCV에 가해진 입력신호를 나타낸다. 입력은 스톱의 양단에 가해지는 조작력(N)으로 나타낸다. 0.5초에서 1.5초 사이에 조작력이 선형적으로 200N까지 증가하여 2.5초간 유지하고 다시 1초 동안에 0N으로 떨어져서 0.5초가 유지했다가 붐다운을 같은 형상으로 동작되도록 하였다. 제안된 IMV 시스템에 대해서는 동일한 붐 동작을 하도록

솔레노이드 흡인력(N)을 입력하였다.

Fig. 11에 붐 실린더 로드 변위를 나타낸다. 시간에 따른 붐 실린더 로드의 상하강 곡선은 종래 MCV를 사용하는 경우와 IMV를 사용한 경우가 비슷한 형상으로 변위되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12에 스푼의 변위를 나타낸다. 기존 MCV의 스푼의 변위를 심볼 ●을 갖는 곡선으로, 붐 상승에 사용된 IMV 미터인 밸브의 스푼변위를 △으로, 붐 하강에 사용된 IMV 미터아웃 밸브의 스푼변위를 ▽으로 나타내었다.

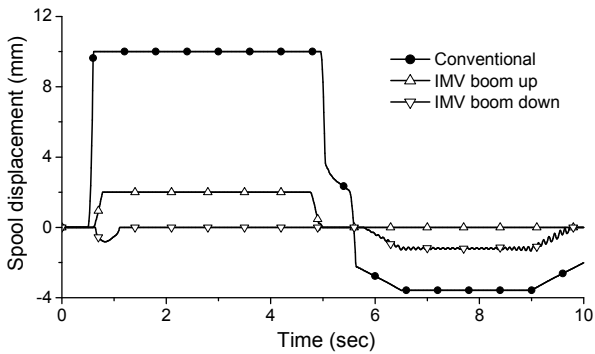


Fig. 12 Spool displacement

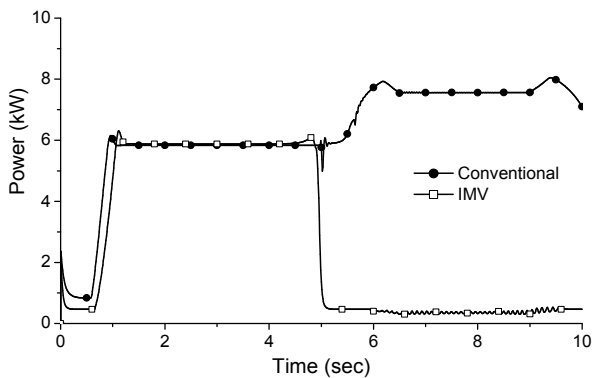


Fig. 13 Consumed pump power

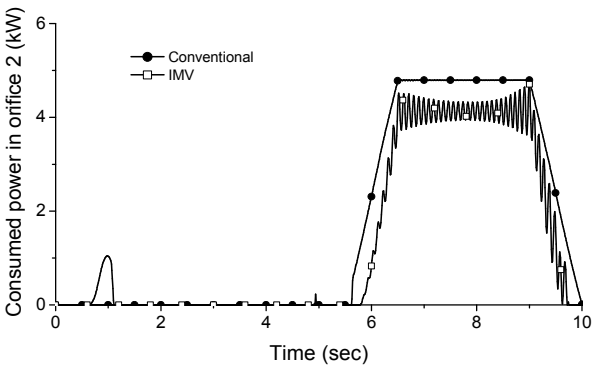


Fig. 14 Consumed power through meter-out orifice during boom down movement

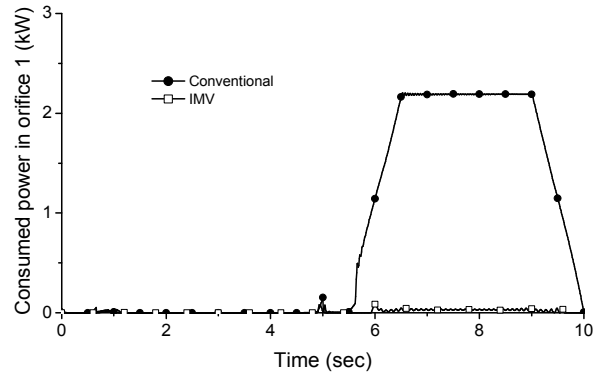


Fig. 15 Consumed power through meter-in orifice during boom down movement

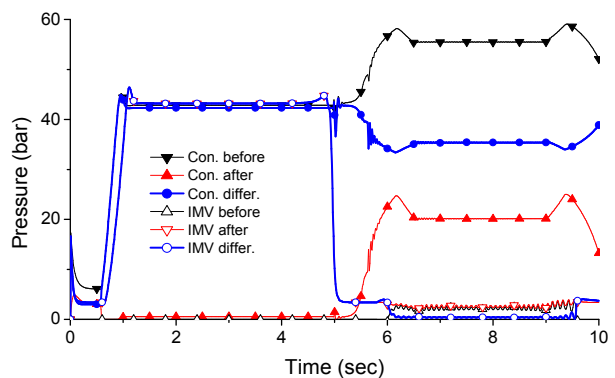


Fig. 16 Pressures about meter-in orifice during boom down movement

Fig. 13에 소모된 펌프동력을 나타낸다. 5초 이후에는 붐 다운 동작을 나타내는데 IMV의 경우는 거의 동력을 소모하고 있지 않은 반면에 종래의 MCV를 사용하는 경우에는 붐 다운 동작에서도 상당한 동력손실이 일어남을 볼 수 있다. 그 원인을 파악하기 위해서 붐 하강시에 미터아웃 오리피스에서의 동력손실을 Fig. 14에, 미터인 오리피스에서 동력손실을 Fig. 15에 각각 나타낸다. Fig. 14에서 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 Fig. 15에서는 종래의 MCV는 동력손실이 크게 발생한 반면에 IMV는 거의 0에 가깝게 나타난 것을 볼 수 있다. 그 원인을 파악하기 위해 붐 하강시에 미터인 오리피스 전후의 압력과 압력차를 조사하기 위해서는 Fig. 16에서 5초 이후의 그래프를 검토하면 된다. 그림에서 ▼는 MCV 미터인 오리피스를 통과하기 전의 압력이고, ▲는 MCV 미터인 오

리피스를 통과한 후의 압력이다. 그 차압을 심볼 ●을 갖는 곡선으로 나타내었다. 그리고 ▽는 IMV 미터인 오리피스를 통과하기 전의 압력이고, △는 IMV 미터인 오리피스를 통과한 후의 압력이다. 그 차압을 심볼 ○을 갖는 곡선으로 나타내었다. 여기에서 심볼 ●을 갖는 붐 하강시에 MCV 미터인 오리피스 전후의 압력과 압력차는 심볼 ○을 갖는 IMV 미터인 오리피스 전후의 압력차보다 매우 큰 것을 볼 수 있다. 붐 실린더 작동에 필요한 유량(Fig. 17)은 두 경우에 비슷하므로 결국 동력손실은 미터인 오리피스 전후의 압력차가 가장 큰 요인인 것을 알 수 있다. MCV에서는 붐 하강 동작을 입력신호에 따라 제어하기 위해 붐 실린더 헤드측에 필요한 압력을 펌프에서 공급해주어야 하는 반면에 IMV를 사용하면 붐 하강의 경우에 미터아웃 IMV는 탱크 측으로만 연결되고, 펌프와는 연결되지 않는다. 따라서 붐 다운에 필요한 배압은 IMV 미터인 밸브와 무관하다. 그리고 펌프측과 연결된 미터인 IMV에는 네가티브 부하가 걸려 있기 때문에 거의 압력을 필요로 하지 않는다.

참고로 사용된 압력평형밸브를 통해 탱크로 복귀되는 유량을 Fig. 18에 나타낸다. 두 경우가 비슷한 양상을 나타내고 있다.

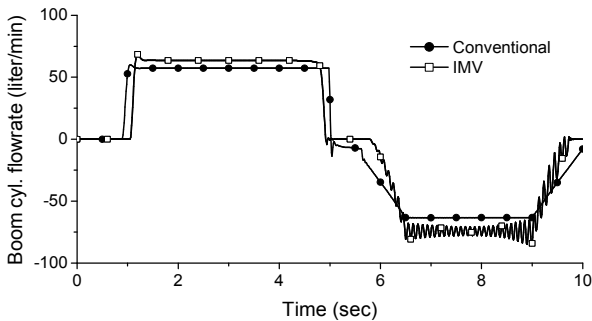


Fig. 17 Flowrate of boom cylinder

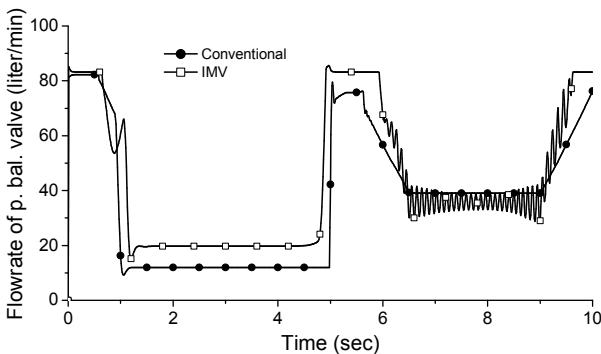


Fig. 18 Return flow through the pressure balance valve

Fig. 19에 본 연구에서 지정한 붐 동작을 1사이클 수행했을 때 소모되는 펌프동력의 총량을 나타낸다. 종래의 MCV를 사용했을 때 총 소모 동력은 62.6kW 인 반면에 IMV를 사용할 경우에는 26.5kW의 동력만 소모되어 58%의 에너지 절감효과를 가져왔다.

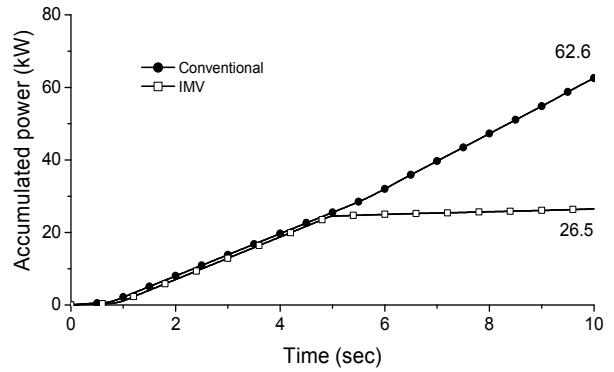


Fig. 19 Accumulated pump consuming power

#### 4. 결 론

본 논문에서는 일반적으로 많은 에너지가 소모되는 유압굴삭기의 붐 작동에 대하여 기존의 MCV 굴삭기 갖고 있는 주된 장점들을 반영한 가운데 IMV를 사용하는 것과 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 배압에 필요한 압력을 펌프에서 공급해 줘야 하는 반면에 IMV에서는 배압제어모드로 스위칭되어 펌프의 공급압력을 필요로 하지 않기 때문임을 확인하였다.

#### 후 기

이 연구는 2017년도 산업통상자원부의 산업핵심 기술개발사업 연구비(과제번호: 10063469) 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

#### References

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.