

독립제어 밸브에 의한 굴삭기 버킷 액추에이터 압력제어 Bucket Actuator Pressure Control by Independent Metering Valve for Excavator

양주호* · 정태랑***
Joo-Ho Yang* and Tae-Rang Jung***

(Received 10 March 2016, Revision received 7 June 2016, Accepted 7 June 2016)

Abstract: A cylinder control system of the conventional construction machine has been controlled by hydraulic spool valves. This system is low-cost but system efficiency is not high. Recently, to improve this, all valves are controlled electronically and independently. Bu and Yao suggested four way electronic hydraulic control valve system. It is called IMVT(Independent Metering Valve Technology). The purpose of the study is to find proper IMV pressure control method for excavator and to validate excavator's bucket regeneration energy effect by controlling the IMV system. In this paper, we mathematically describe the bucket system of excavator first. And then, based on these results, we design the control system which is divided into two operations(none regeneration or regeneration).The results of the experiment show the desirable performance and usefulness of the designed control system.

Key Words : Independent metering valve, Electronic controlled valve, Pressure control, Construction equipment

1. 서 론

최근 환경 문제와 화석 연료의 고갈로 인해 내연기관의 연비는 건설기계에도 있어서도 중요한 문제가 되었다. 높은 힘을 요구하는 건설기계의 특성상 힘의 밀도가 높은 유압 시스템이 주로 사용되는데 이 시스템은 저가로 구성할 수 있는 장점에 반해 시스템의 효율이 낮다. 그렇기 때문에 유압 시스템의 효율을 개선하는 시도가 건설기계 분야에서 활발하게 진행되고 있다.¹⁾

근래에 들어 전자식 밸브의 성능이 탁월하게 개선되어 감에 따라 기존의 건설기계의 유압 시스템에서 사용되는 기계식 유압 스푼 밸브를 제거하고 전자식 밸브로 대체하는 시도가 많이 진행되고 있다.²⁾ 앞서서 Bu와 Yao가 전기식 밸브로 구성된 4 방향 IMV(Independent Metering Valve) 시스템을 제안하였고³⁾ 여러 연구자들의 시도로 기존의 유압식 스푼 밸브가 달성하지 못했던 밸브의 독립성을 확보할 수 있게 되었다. 이러한 전자식 밸브가 적용된 독립적인 밸브 시스템을 이른바 IMV 시스템이라 한다.

*** 정태랑(교신저자) : 불보건설기계코리아 유압제어팀
E-mail : taerang.jung@volvo.com, Tel : 055-260-7304
*양주호 : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : yangjh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6193

*** Tae-Rang Jung(corresponding author) : Department of Hyd. Control team, Volvo Construction Equipment Korea.
E-mail : taerang.jung@volvo.com, Tel : 055-260-7304
*Jo-Ho Yang : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University.
E-mail : yangjh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6193

IMV 시스템은 전자식 밸브를 각각 독립적으로 제어함으로써 밸브가 부하에 능동적으로 대응할 수 있기에 기존의 유압식 스톱 밸브를 이용한 시스템보다 그 효율성이 뛰어난 것으로 보고되고 있다.⁴⁾

이러한 장점들로 인해 Caterpillar, John Deere 등 건설기계 분야의 여러 업체에서 이 시스템을 적용 또는 시도하고 있으나⁵⁾ 단순 동작을 반복하는 실린더가 사용되는 시스템에 한정되고 있다. 건설기계에서 그 용도와 시장이 가장 큰 굴삭기에 있어서도 IMV 시스템을 적용하려는 많은 시도가 일어나고 있지만 굴삭기 동작의 특성을 반영한 IMV 컨트롤 시스템을 구축하는 것은 쉽지 않은 문제이다.

본 연구에서는 굴삭기 시스템을 수학적으로 해석하였다. 그 결과를 토대로 굴삭기의 버킷 동작을 비 회생과 회생 동작으로 나누어 제어 시스템을 구축하였고 IMV가 적용된 시험 장치에서 실험하였다.

2. IMV 버킷 시스템의 수학적 해석

본 연구에서 고려하고 있는 제어 목표는 실린더의 압력이고, 그에 따른 제어 대상은 Fig. 1에 나타낸 것 같이 전자밸브와 펌프이다. IMV 시스템의 목적에 맞게 전자밸브와 펌프를 제어하기 위하여 펌프 출구단과 실린더 양쪽 챔버에 압력 센서를 설치하였다.

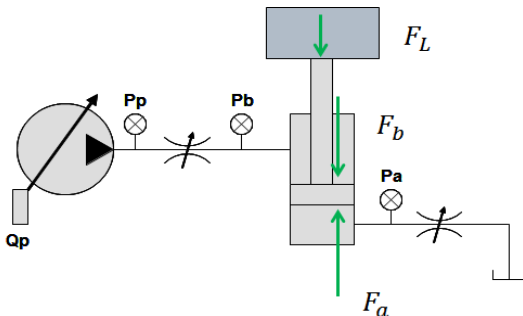


Fig. 1 Hydraulic bucket system

제어 시스템을 구축하기 위한 시스템 해석은 다음과 같다. 실린더에 부하 F_L 이 작용하고 있을 때 실린더 챔버 a에 미치는 힘은 식 (1)과 같다.

$$F_a = F_b + F_L \quad (1)$$

식 (1)을 압력과 면적 관계식으로 풀어서 쓰면 식 (2)와 같다.

$$P_a A_a = P_b \times A_b + F_L \quad (2)$$

실린더 챔버 a의 압력에 관해서 전개하면 식 (3)이 되고

$$P_a = P_b \times \frac{A_b}{A_a} + \frac{F_L}{A_a} \quad (3)$$

식 (3)을 실린더 챔버 a에 가해지는 부하압력에 관한 식으로 이항하게 되면 식 (4)와 같다.

$$\frac{F_L}{A_a} = P_a - \frac{P_b}{R} \quad (4)$$

여기서, $R = \frac{A_b}{A_a}$ 이다.

이때 $\frac{F_L}{A_a}$ 를 dP_L 이라 두면 식 (5)와 같다.

$$dP_L = P_a - \frac{P_b}{R} \quad (5)$$

식 (5)에 의하여 P_b , P_a 의 관한 식으로 식 (6)과 같이 전개를 할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_b &= R(P_a - dP_L) \\ P_a &= dP_L + \frac{P_b}{R} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 P_a 의 값은 전자밸브가 만들어 내는 압력 손실 값 P_{a_c} 로 한정짓게 되면 식 (7)과 같이 실린더 챔버 a에 하중 되는 부하압력 dP_L 에 따라 생성되어야 할 목표 압력 P_{b_r} , P_{a_r} 을 계산할 수가 있다.

$$P_{b,r} = R(P_{a,c} - dP_L) \quad (7)$$

$$P_{a,r} = dP_L + \frac{P_{b,r}}{R}$$

3. 제어시스템 설계

3.1 비 회생 회로의 제어시스템 구성 및 동작

Fig. 2는 굴삭기 버킷의 동작에서 비 회생 동작에 대한 기존의 유압식 스폴 밸브 시스템이다. Fig. 3은 IMV로 구성된 유압시스템이다. 기존의 스폴 타입 유압시스템과 달리 4개의 전자식 밸브(2,3,4,5)가 회로에 추가되고 실린더(6)에 유량을 공급하는 펌프(1)와 각 밸브와 펌프를 제어하는 컨트롤러(7), 레버(8)로 구성된다.

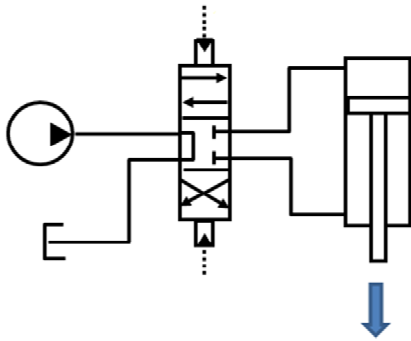


Fig. 2 Hydraulic spool valve system

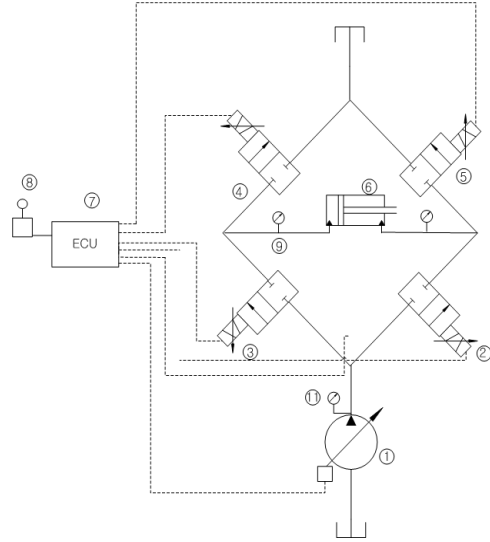


Fig. 3 None regeneration IMV system

3.2 비 회생 회로의 제어 알고리즘

Fig. 4는 IMV가 적용된 버킷 제어시스템의 비 회생 회로의 제어 알고리즘이다. 전체 블록의 구성은 크게 압력 계산과 유량 계산, 밸브 면적 계산, 전류값 환산으로 구분된다.

압력계산에서는 레버 입력이 들어오게 되면 Look up Table1에 따라 레버 입력에 따른 전자밸브가 만들어 내는 초기 압력(Pa_c)이 결정된다. 이

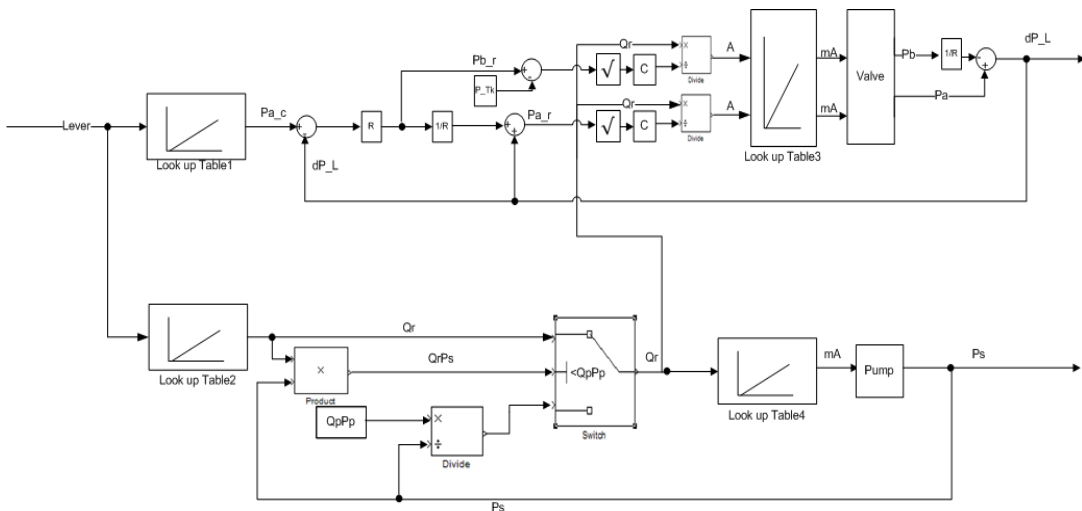


Fig. 4 Control block diagram of none regeneration system

는 밸브가 기본적으로 생성하는 압력차로서 밸브 제조사에서 그 값을 제공하고 있다. 이 값을 근거로 Look up Table1을 만든다. 그 값에 실린더 양단 압력센서를 통해 계산된 챔버 a의 부하 압력(dP_L)을 빼고 실린더 면적 비(R)를 곱해 주게 되면 어떤 부하에 대해서 생성되어야 할 챔버 b의 필요 압력(Pb_r)이 계산되게 된다. 필요압력 Pa_r 은 계산된 Pb_r 압력 값에 실린더 면적비(R)를 나누어 주고 부하 압력(dP_L)을 더해 주어 도출된다.

유량계산은 레버 입력에 따라 요구되는 유량(Qr)은 Look up Table2에 따라 결정된다. 요구되는 유량(Qr)은 실린더의 속도 명령치인데 그 값은 정해져 있기 때문에 테이블화를 할 수가 있다. 하지만 펌프의 사양은 한정되어 있기 때문에 요구한 대로 유량을 토출해 줄 수 없다. 그렇기 때문에 펌프의 사양 내로 유량을 제한시켜 줄 필요가 있다. 이를 위해 펌프의 요구 유량(Qr)에 실제 펌프의 토출 압력을 예측하고 곱하여 필요한 파워를 계산한다($Qr \cdot Ps$). 이를 펌프의 허용 파워($Qp \cdot Pp$)로 제한하여 최종 유량을 계산해 낸다. 계산된 최종 유량은 밸브의 면적 계산에 이용되고 또한 Look up Table4를 거쳐 펌프의 전류값으로 환산되어 출력된다.

밸브 면적 계산은 앞서서 2장의 밸브 면적의 수학적 해석에 따라 오리피스 유량 방정식에 지배를 받게 되므로 계산된 요구 압력(Pa_r, Pb_r)과 요구 유량(Qr)으로 면적 A 를 계산할 수가 있다. 오리피스 유량계수(C) 값은 실험값으로 이미 알고 있는 값이다.

전류값 계산은 계산된 면적을 열기위해 전자밸브에 인가될 전류값을 환산하는 과정이다. 이는 실험값으로 테이블화 할 수 있으며 Look up Table4에 수치화되어 있다. 이로 인해 환산된 계산값이 mA 값으로 출력되어 밸브로 전달되게 된다.

3.3 회생 회로의 제어시스템 구성 및 동작

Fig. 5는 회생 동작의 스폴 타입 유압시스템이다. Fig. 6은 IMV로 구성된 유압 시스템이다. Fig. 5의 기존의 스폴 타입 유압시스템과 달리 5개의 전자식 밸브②,③,④,⑤,⑥가 회로에 추가되고, 여기서

밸브⑥은 회생을 위해 추가된 밸브이다. 실린더⑦에 유량을 공급하는 펌프①와 각 밸브와 펌프를 제어하는 컨트롤러⑧, 레버⑨로 구성된다.

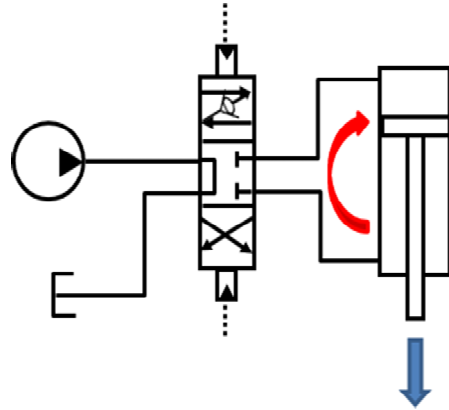


Fig. 5 Hydraulic spool valve system

동작은 조작자가 레버⑨를 동작하게 되면 컨트롤러⑧에서 전자밸브③,⑤가 동작하고 실린더 압력차에 따라 회생밸브⑥가 동작하여 펌프①의 유량이 실린더로 공급되어 실린더가 확장(Expansion) 된다.

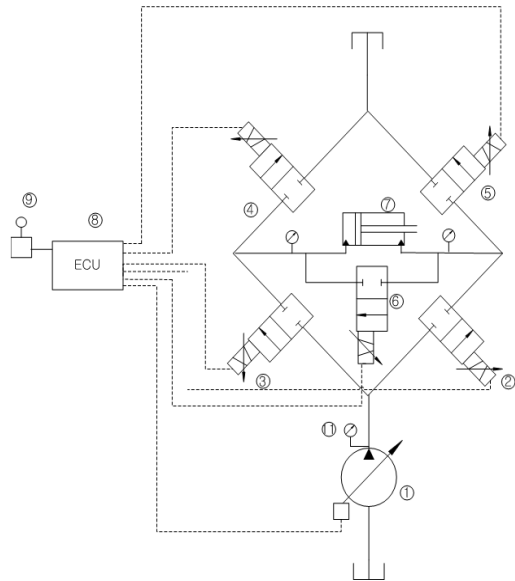



Fig. 6 Regeneration IMV system

3.4 회생 회로의 제어시스템 구성 및 동작

Fig. 7은 회생 동작의 제어 알고리즘이다. 모든 계산 방법은 동일하나 회생 밸브의 면적을 계산하기 위해 밸브 면적 계산 부분에 Fig. 7의  블록이 추가되었다. 회생 밸브의 압력차는 실린더의 압력차에 의해 생성되고 이로 인해 유량이 회생할 수 있다. 그러므로 밸브 면적 계산에서 사용되는 압력차는 앞서서 계산된 요구압력 (P_{a_r} , P_{b_r})이 사용된다.

4. 실험 및 결과

시스템의 수학적 모델링에 따라 제어 시스템을 설계하였고, 이를 시험하기 위하여 아래와 같은 구성으로 준비하였다.

실험 장치의 구성은 Fig. 8과 같다. 실린더⑧에 유량을 공급하는 펌프①②와 5개의 전자밸브③④⑤⑥⑦ 각 콤포넌트들을 제어하는 컨트롤러⑨, 레버⑩ 압력센서⑪⑫로 구성된다.

비 회생 동작은 조작자가 레버⑩를 동작하게 되면 컨트롤러⑨에서 전자식 밸브④⑥와 펌프①

②에 지령을 보내어 펌프가 유량을 실린더의 챔버 a로 공급하여 실린더가 확장된다. 이때 회생 밸브⑦는 동작하지 않는다.

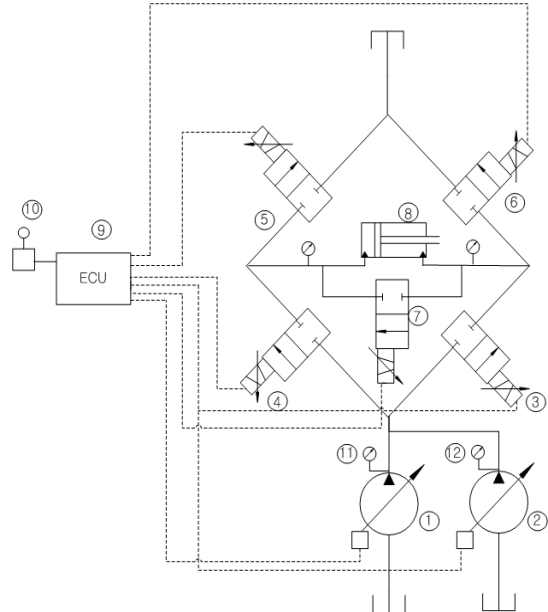


Fig. 8 Test bench

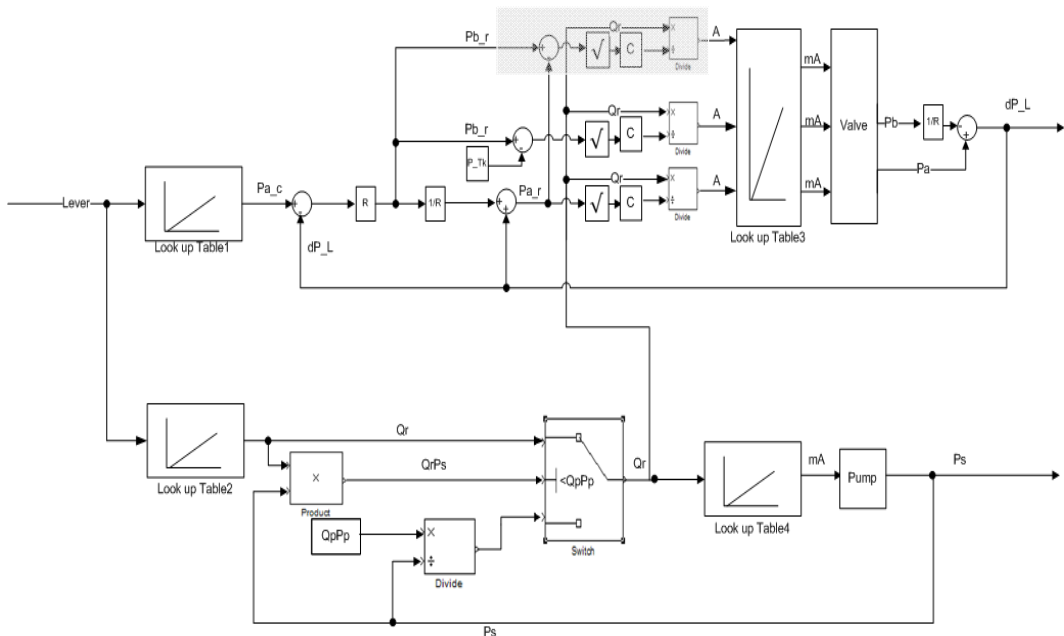


Fig. 7 Control block diagram of regeneration system

회생 동작은 조작자가 레버⑩를 동작하게 되면 컨트롤러⑨에서 전자식 밸브④⑥와 펌프①,②에 지령을 보내어 펌프가 유량을 실린더의 챔버 a로 공급되고 실린더의 챔버 b의 유량은 회생 밸브⑦가 동작하여 챔버 a로 공급된다.

실험 방법은 구성된 실험 장치에서 비 회생 동작과 회생 동작 각각에 레버입력을 직접 가하고, 그에 따른 필요압력 $P_{b,r}$, $P_{a,r}$ 과 실제 압력값 P_b , P_a 를 비교하였다.

4.1 비 회생 시스템의 실험 결과

Fig. 9의 (a)와 같이 레버입력을 가할 경우, 버킷 동작 초기에 버킷 중량에 따른 갑작스런 압력 상승이 Fig. 9의 (b)와 (c)의 1.2 ~ 1.6초와 같이 발생된다. 이로 인해 지령치 $P_{b,r}$, $P_{a,r}$ 와 실제 압력 P_b , P_a 의 오차가 발생하지만 현재 시스템의 자연스러운 과도 특성이다. 이후 정상 상태에서는 목표로 하는 지령치를 잘 추종하는 결과를 볼 수 있다.

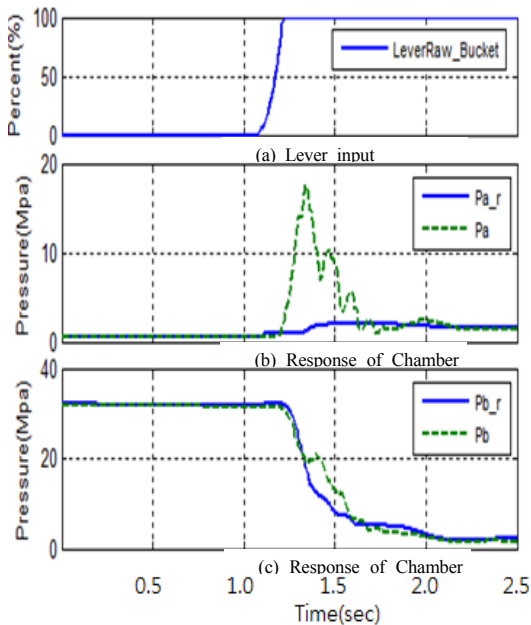


Fig. 9 None regeneration system test results

4.2 회생 시스템의 실험 결과

Fig. 10의 (a)와 같이 레버입력을 가할 경우, 버

킷 동작 초기에 버킷 중량에 따른 갑작스런 압력 상승이 Fig. 10의 (b)와 (c)의 1.2~1.6초와 같이 비 회생 동작과 동일하게 발생된다. 이로 인해 지령치 $P_{b,r}$, $P_{a,r}$ 와 실제 압력 P_b , P_a 의 오차가 발생한다. 이후 정상 상태에서 목표로 하는 지령치를 추종하는 형태를 보이나 비 회생 동작에 비해서 그 응답 특성이 좋지는 못하다. 원인은 시험 장치에 부착된 회생 밸브의 내경이 계산보다 작은 밸브가 장착되었다. 이로 인해 비 회생 동작에 비해 압력 오차도 크고 정상상태의 응답도 좋지 못한 것으로 생각된다.

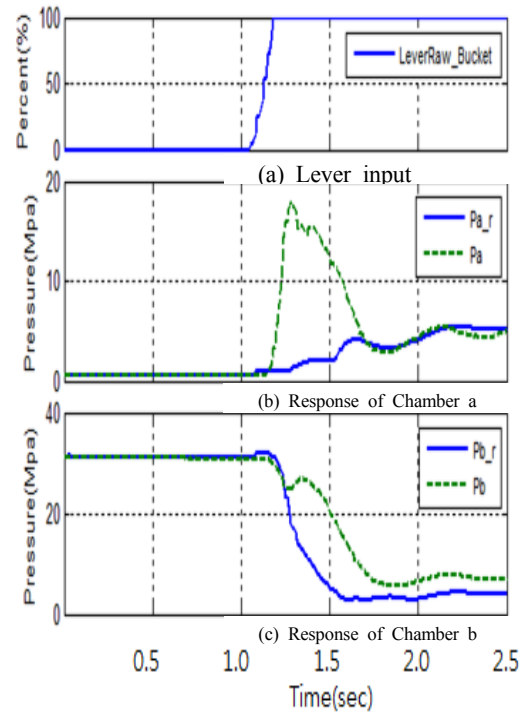


Fig. 10 Regeneration system test results

5. 결론

본 연구에서는 굴삭기의 버킷 시스템을 수학적 모델링하였고, 이 결과를 토대로 IMV를 적용하기 위한 제어 시스템을 구축하였다. 그리고 IMV가 적용된 시험 장치에서 응답 실험하였다.

시스템의 수학적 모델링을 통해 구축한 제어시

시스템을 적용하여 IMV 버킷 시스템의 액추에이터 압력을 원활히 제어할 수 있었다. 버킷 동작 초기에 버킷 자체의 중량으로 인한 압력상승은 있으나 정상상태에서는 비 회생 동작과 회생 동작 모두 지령치를 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술 연구비 (2015년)에 의하여 연구되었음.

References

1. T. R. Jung, G. H. Choi and J. H. Yang, 2015, "Bucket Actuator Pressure Control by Independent Metering Valve", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Spring conference, p. 74.
2. T. R. Jung, G. H. Choi and J. H. Yang, 2015, "A study on bucket actuator pressure control by Independent Metering Valve and regeneration energy for Excavator", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Autumn conference, p. 80.
3. F. Bu and B. Yao, 2001, "Integrated Direct/indirect adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuator with time-varying unknown inertia", in Proc. of IEEE/ASME Int Conf on Advance Intelligent Mechatronics, pp. 624-629.
4. E. A. Frankenfield, 1993, "Developing trends in hydraulics tied to elec-tronic controls," Control Engineering, Vol. 40, No. 5, pp. 62-66.
5. E. Kramer, 1990, "Electro hydraulic valve system." United States Patent (Re. 33,846).