

IMV를 이용한 굴착기 작업장치 궤적제어 Trajectory Control of Excavator Actuators Using IMV

정규홍^{1*}
Gyuhong Jung^{1*}

Received: 21 Apr. 2020, Revised: 18 May 2020, Accepted: 19 May 2020

Key Words : IMV(독립 미터링 밸브), Bi-Directional Proportional Flow Control Valve(양 방향 비례 유량제어밸브), Excavator(굴착기), Hydraulic Control(유압제어), Trajectory Control(궤적제어)

Abstract: The IMV is a combination of four two-way valve systems which replace a conventional four-way spool valve to improve efficiency mostly in excavator hydraulics. As the environmental regulations for construction equipment have tightened, some overseas advanced companies have released commercial excavators in which the MCV is implemented with the IMVs. Development of the IMV type MCV relies on the control algorithm as well as the robust performance of proportional flow control valves. In this study, the IMV controller was designed and verified with experiments for the excavator working unit, which determines the IMV mode of operation and the extent of the valve opening in consideration of the load conditions on hydraulic actuators. First, the open-loop controller was designed with a joystick command vs. a PSV reference current map comprising several control parameters in to compensate for the different flow characteristics and non-linearities of two-way flow control valves. Second, the closed-loop controller was designed with the PI control fed by the actuator displacement and outputs actuator percent effort equivalent to the operator's joystick command. Finally, the performance of the IMV type MCV was verified with the trajectory control of position references derived from the energy consumption test standard. Experimental results showed the control performance of the IMV developed in this study, and suggest that future studies to be conducted to advance technical progress.

기호 설명

p_{SR} : PSV reference pressure, Pa

p_{SC} : PSV control pressure, Pa

p_S : supply pressure, Pa

Q_S : supply flow, m³/sec

p_C : FCV control pressure, Pa

TH : threshold of actuator percent effort(actPE), %

i_{DB} : PSV control current for deadband, A

MIx : meter-in actPE control parameters, %

MOx : meter-out actPE control parameters, %

$x_{sa}, x_{sb}, x_{ar}, x_{br}$: flow control valve displacement, m

x_p : actuator displacement, V

$(x_p)_{ref}$: actuator displacement reference, V

K_p : proportional gain of position controller, %/V

T_i : integral time of position controller, sec

1. 서론

IMV는 유압시스템의 4방향 스플밸브를 4개의 2방향 밸브로 대체하여 독립적인 유로단면적 조절기능을 이용하여 밸브에서의 압력손실을 저감할 수 있을 뿐만 아니라 유압 작동기 작동조건을 제반 센서로

* Corresponding author: ghjung@daejin.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Daejin University, Gyeonggi 11159, Korea

Copyright © 2020, 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.

파악한 후 에너지절감에 적절한 작동모드를 적용함으로써 효율향상을 도모하는 전기유압밸브이다. 대표적인 건설기계인 굴착기는 운전자가 조작하는 조이스틱 작동량에 따라 리모트 컨트롤밸브에서 파일럿 압력이 조절되고 이 압력이 4방향 스폴밸브에 작용해서 발생하는 변위에 의해 붐, 암, 버킷 실린더와 선회모터가 작동되는 방식이다. 기존의 4방향 스폴밸브로 설계된 MCV(main control valve)는 기계적인 구조로 유압 작동기 공급과 배출유로가 연동되므로 밸브에서 발생하는 압력손실과 작동모드를 능동적으로 조절할 수 없는 반면에 IMV는 제어기에서 운전자 조작량과 유압 작동기에 작용하는 부하를 파악하고 독립적으로 공급과 배출유로를 가변시켜 최적효율이 발생하는 작동상태로 유연하게 대처할 수 있는 장점을 갖는다.^{1,3)} IMV는 하나의 유압 작동기 구동에 4개 밸브가 필요하므로 제조원가가 높고 MCV가 커지는 단점으로 인해 현재는 대형 굴착기에만 적용되어 개발되고 있다.⁴⁾ Fig. 1은 기존 MCV와 IMV방식 MCV의 구동을 비교하는 그림이다. IMV방식 MCV 개발을 위해서는 IMV의 핵심부품인 2방향 비례 유량제어밸브 개발이 선행되어야 하며 이를 바탕으로 IMV를 구동하는 제어기와 운전자 조작신호로부터 굴착기 작업장치를 구동하는 제어 알고리즘을 구현해야 한다.

본 연구에서는 IMV방식 MCV 시제를 제작하고 설계된 제어기를 이용해서 굴착기 작업장치를 구동하는 성능평가시험을 실시하였다. 비례 솔레노이드밸브와 유량제어밸브로 구성되는 2단 비례 유량제어밸브는 IMV 기본 구성요소로서 유량제어특성은 이전에 수행된 연구^{5,7)}를 활용하였으며 개발된 비례 유량제어밸브 16개를 하나의 블록에 집적하여 MCV 시제를 제작하였다. IMV 제어기는 붐, 암, 버킷 실린더 전후진 시의 작동모드를 결정하는 알고리즘과 운전자가 조작하는 조이스틱 작동량으로부터 2단 비례 유량제어밸브를 구동하는 개루프 제어기로 구성되며 주어진 작동기 경로를 추종하는 자율작업에는 피스톤 변위를 비례적분제어로 되먹임하는 폐루프 제어기가 추가된다. 설계된 제어 알고리즘은 DSP를 이용하여 임베디드 프로그램으로 구현하였고 전용으로 설계, 제작된 인터페이스 회로를 통해 IMV를 구동하였다. Fig. 1은 굴착기 에너지 소비량 시험방법인 JCMAS H020의 작업 사이클을 나타내며 이로부터 붐, 암, 버킷을 동시에 구동하는 복합동작의 기준 작업변위를 도출한 후 시험을 통해 개발된 IMV 제어기의 제적 추종성능을 평가하였다. 본 논문에서 연구된 IMV 제어기는 개발 초기 단계에서 작업장치 부하와 비례 유량제어밸브 성능특성을 고려한 복합구동의 성능평가를 목적으로 하였으며 최적의 성능을 구현하는 제어기 설계연구는 향후 진행할 예정이다

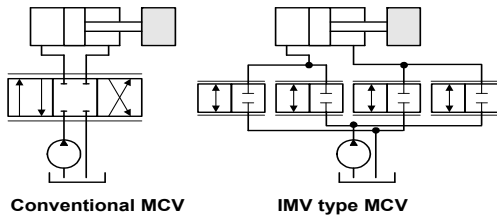


Fig. 1 MCV configurations

2. IMV 비례 유량제어밸브

본 연구에서는 22톤 굴착기 MCV에 적용되는 IMV를 전기적인 신호로 구동되는 비례 유량제어밸브(flow control valve, FCV) 4개로 설계하였다(Fig. 3 참조). 설계된 비례 유량제어밸브는 대용량 유량을 공급하기 위해 상시 저압형 3방향 비례 솔레노이드 밸브(proportional solenoid valve, PSV)와 파일럿 압력(p_{SC})에 비례하여 스폴변위가 발생하는 2방향 유량제어밸브의 2단 구조를 갖는다. Table 1은 제작된 비례유량제어밸브의 주요 설계사양이다. Fig. 4는 본 연구에서 동일 사양으로 개발된 IMV 블록 4개를 집적하여 제작된 MCV이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 4개 IMV 중 IMV3를 구성하는 4개 비례 유량제어밸브에 대한 정 방향과 역 방향 시험결과를 나타내는데 비례 솔레노이드밸브 전류에 대한 제어유량의 불감대, 히스테리시스, 정방향과 역방향 유량제어특성 등의 정특성이 모두 다름을 알

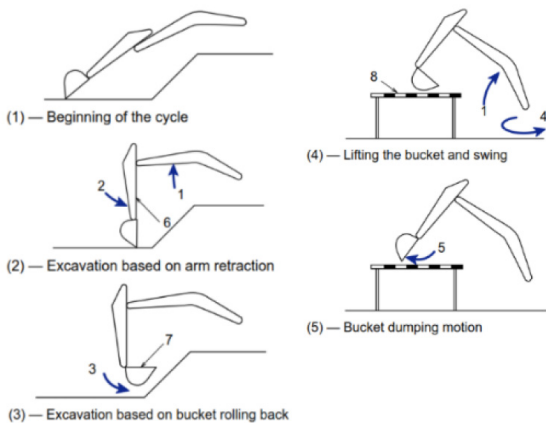


Fig. 2 JCMAS H020 work cycle

수 있다. 나머지 3개 IMV도 동일한 사양으로 설계되었으나 비례 유량제어밸브에 대한 시험결과는 성능 차이를 나타내었다. 여기서, 정방향은 Fig. 3의 p_S 압력포트에서 p_C 압력포트로 유량이 흐르는 것이고 역방향은 반대로 정의된다. IMV 비례 유량제어밸브에 요구되는 핵심성능은 누유가 발생되지 않을 것, 비례 솔레노이드밸브 전류에 비례하는 선형적인 유량제어 특성, 양 방향 동일한 유량제어특성, 4개 비례 유량제어밸브의 동일한 성능특성 등이다. 개발된 MCV의 비례 유량제어밸브는 요구 성능에 다소 미흡한 시험결과를 나타내었으며 특히, Fig. 5(b) 역방향 유량제어 시험에서는 비례 솔레노이드밸브 전류가 증가할 때 특정 전류 값에서 높은 유량이 순간적으로 발생하는 유량점프현상이 있음을 알 수 있다. IMV 제어기에서는 비례 유량제어밸브의 비선형성을 제어 파라미터로 보상하여 적절한 유압 작동기 구동성능을 구현하였다. 이와 같이 IMV 하드웨어 성능차이를 제어 파라미터로 보상하는 방식은 하나의 시제만을 다루는 개발단계에서는 유효하지만 양산에는 적용될 수 없으므로 향후에는 안정된 성능의 IMV 개발이 필요하다고 판단된다.

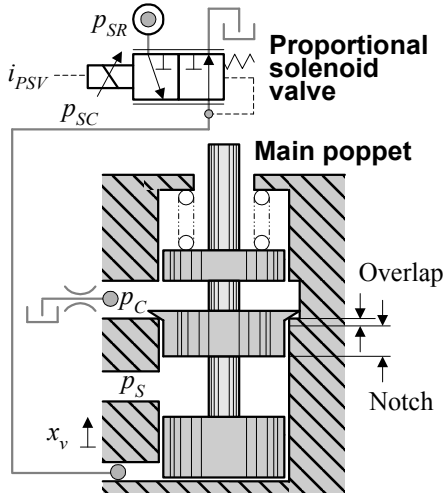


Fig. 3 Schematic configuration of proportional FCV

Table 1 Specifications of Proportional FCV

Item	Unit	Value
Spool diameter	mm	30
Valve overlap	mm	2
Spring stiffness	N/mm	200
Initial spring compression	mm	3
# of notches	-	4
notch radius	mm	2
Valve stroke	mm	10

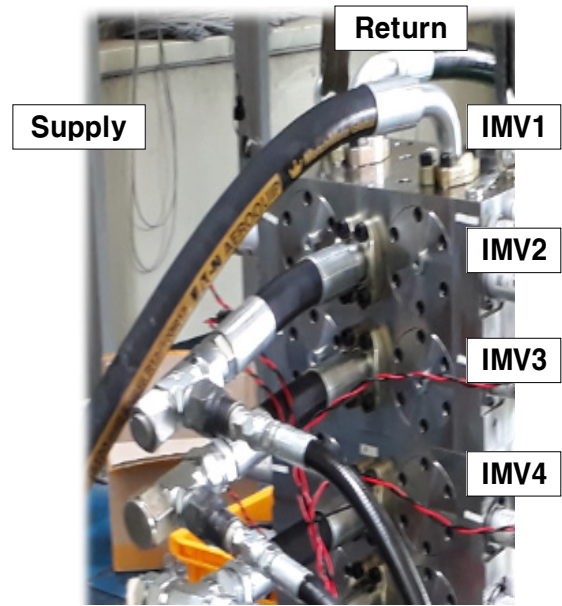
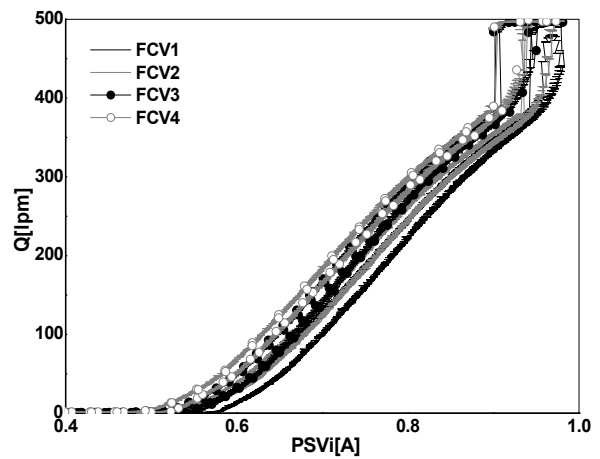
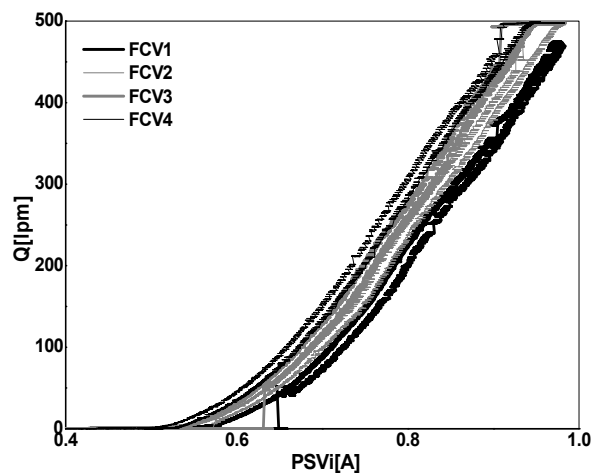


Fig. 4 MCV implemented with 4 IMVs



(a) forward flow vs PSV current



(b) reverse flow vs PSV current

Fig. 5 Comparison of 4 FCVs flow rate in IMV3

3. IMV 작동모드

IMV 작동모드는 Fig. 6과 같이 유압 실린더에 연결되는 A, B 포트 압력과 피스톤 운동방향의 작동조건에 따라 결정된다. 동력모드(powered mode)는 펌프 공급유량으로 피스톤을 구동하는 것이고 재생모드(regeneration mode)는 편로드 실린더에 동일한 압력을 작용시켜 에너지를 절감하는 모드이다. 재생모드는 실린더로 공급되는 유량을 조절하는 미터인과 실린더로부터 배출되는 유량을 조절하는 미터아웃으로 분류된다. 회생(recuperation)모드는 외부 부하에 의해 피스톤 속도가 역전되어 공급포트로 배출되는 유량을 저장하거나 다른 작동기 구동에 재사용한다.⁸⁾ 굴착기 MCV에 적용되는 IMV는 효율향상이 주된 목적이므로 각종 센서를 이용해서 작동상태를 파악한 후 적절하게 회생모드를 적용하는 것이 필요하지만 별도의 유압 에너지 저장장치와 굴착기 작업장치의 복합동작에 대한 심도있는 분석이 미비한 본 연구에서

회생모드는 고려하지 않았다. 선진사에서 개발된 굴 굴착기도 IMV 공급유로에 부하 체크 밸브(load check valve)가 2개 연결되어 있어 작동기에 작용하는 외부 부하에 의해 배출되는 고압의 유량이 다른 작동기로 공급되지 않으므로 회생모드는 적용하지 않는 것으로 추측된다.

본 연구에서는 선회운동은 제외하고 굴착기 작업 장치를 구동하는 붐, 암, 버킷 실린더에 적용되는 IMV 작동모드를 설계하였으며 Fig. 7의 각 모드에 대한 특징을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

(1) 동력 전진모드(powered extension, PE)

FCV4를 최대로 개방하여 피스톤 로드 측은 귀환 유로에 연결하고 FCV1으로 피스톤 헤드 측에 공급되는 유량을 조절하여 피스톤을 전진시키는 작동모드로 붐 실린더 전진 시 적용된다. 피스톤 속도를 조절하는 FCV1의 유량흐름은 정방향이며 미터인 제어이다.

(2) 저압 재생모드(low-side regeneration, LSR)

FCV4를 최대로 개방하여 피스톤 로드 측은 귀환 유로에 연결하고 FCV2로 피스톤 헤드 측에서 귀환 유로로 배출되는 유량을 조절하여 피스톤을 후진시키는 작동모드로 작업장치 자중으로 후진하는 붐 실린더에 적용된다. 피스톤 속도를 조절하는 FCV2의 유량흐름은 정방향이며 미터아웃 제어이다.

(3) 고압 재생 미터아웃 모드

(high-side regeneration, HSR: meter-out)

FCV1을 최대로 개방하여 피스톤 헤드 측은 공급 유로에 연결하고 FCV3로 피스톤 로드 측에서 공급 유로로 배출되는 유량을 조절하여 피스톤을 전진시키는 작동모드로 암과 버킷 실린더에 전진 시 적용된다. 피스톤 속도를 조절하는 FCV3의 유량흐름은 역방향이며 미터아웃 제어이다. 본 연구에서 제작된 FCV3에 대한 성능시험에서 확인된 바와 같이 역 방향 유량제어 시에는 유량점프 현상이 나타나므로 원활한 속도제어에 문제가 발생한다.

(4) 고압 재생 미터인 모드

(high-side regeneration, HSR: meter-in)

FCV3을 최대로 개방하여 피스톤 로드 측은 공급 유로에 연결하고 FCV1으로 피스톤 헤드 측에서 공급되는 유량을 조절하여 피스톤을 전진시키는 작동모드로 암과 버킷 실린더 전진 시 적용된다. 피스톤

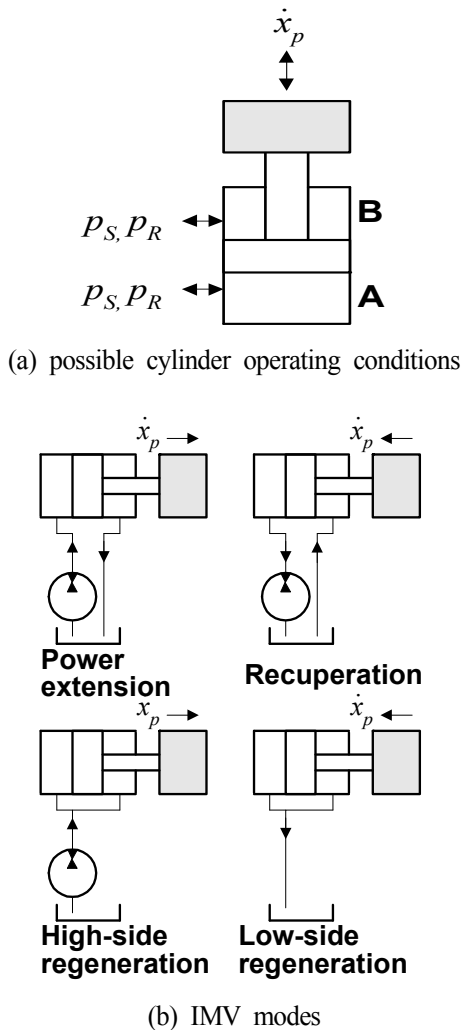


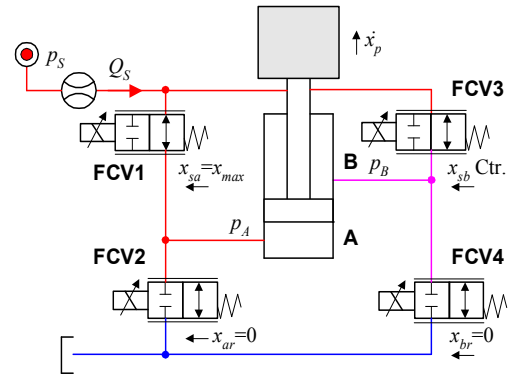
Fig. 6 Definition of the mode concept

속도를 조절하는 FCV1의 유량흐름은 정방향이며 미터인 제어이므로 역 방향 유량점프 현상이 나타나지 않는다.

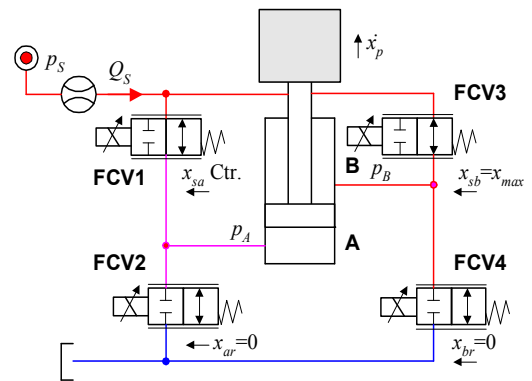
(5) 동력 후진모드(powered retraction, PR)

FCV3을 최대로 개방하여 피스톤 로드 측은 공급 유압에 연결하고 FCV2로 피스톤 헤드 측에서 배출되는 유량을 조절하여 피스톤을 후진시키는 작동모드로 압과 버킷 실린더 후진 시 적용된다. 피스톤 속도를 조절하는 FCV2의 유량흐름은 정방향이며 미터아웃 제어이다.

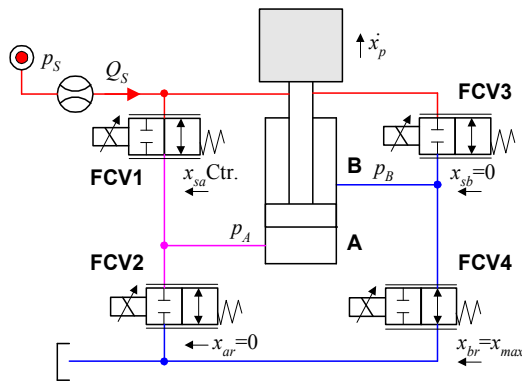
이상과 같이 설명된 IMV 작동모드에서 항상 두 개 유량제어밸브는 폐쇄된 상태, 하나의 유량제어밸브는 최대로 개방된 상태를 유지하고 다른 하나의 유량제어밸브 개도량으로 미터인 또는 미터아웃 제어를 통해 유압 실린더의 전후진 속도를 조절하게 된다. 두 개 이상의 유량제어밸브가 작동하는 경우는 유압 실린더 작동 중 모드가 전환될 때이며 본 연구에서는 모드전환(mode switching)은 고려하지 않았다. 따라서 모든 유압 실린더 작동은 정지된 상태를 거친 후 모드가 바뀌게 된다.



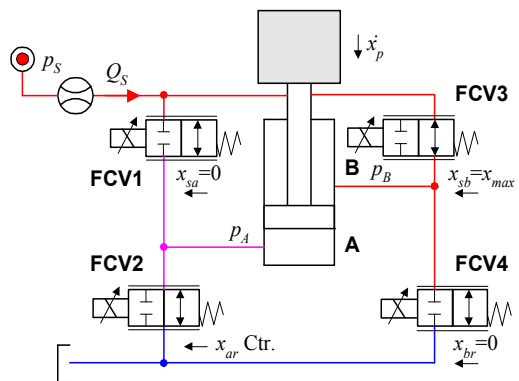
(c) high-side regeneration extension: meter-out



(d) high-side regeneration extension: meter-in

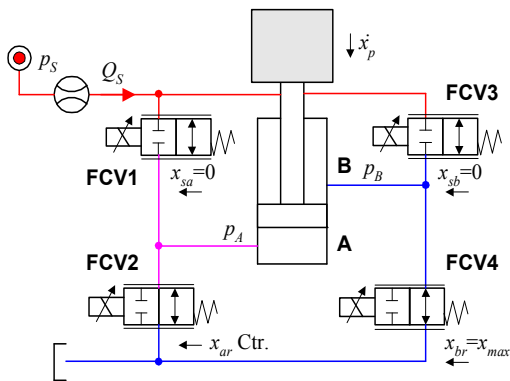


(a) powered extension



(e) powered retraction

Fig. 7 Operating modes in IMV control system



(b) low-side regeneration retraction

4. IMV 제어 알고리즘

기존 굴착기는 운전자가 조작하는 조이스틱 작동량이 리모트 컨트롤밸브에서 파일럿 압력을 발생시키고 이 압력이 MCV 스톱에 작용하여 유압 작동기에 연결되는 공급과 배출유로면적을 조절한다. IMV는 4개 유량제어밸브 스톱면위가 비례 솔레노이드밸브에서 발생하는 파일럿 압력에 의해 조절되므로 굴착기 유압 작동기 구동을 위해서는 운전자가 조작하

는 전자 조이스틱의 전기적인 출력신호로부터 비례 솔레노이드밸브 제어전류를 결정해야 한다. 본 연구에 적용된 IMV 작동모드에서 언급된 바와 같이 모든 작동모드에서 운전자의 조이스틱 작동량에 따라 가변되는 유량제어밸브는 하나이므로 IMV 유량제어밸브 특성시험 결과를 고려하여 조이스틱 작동량에 대한 기준전류 선도를 설계한 후 제어 파라미터 튜닝을 통해 적절한 구동성능을 구현하였다.

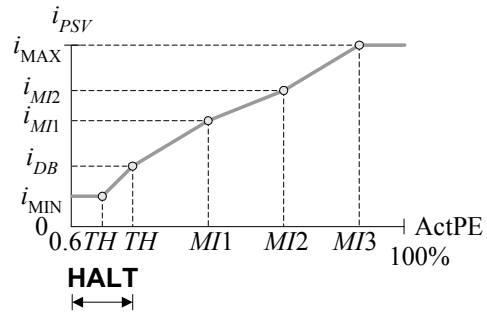
4.1 IMV 개루프 제어

IMV 개루프 제어는 조이스틱 작동량에 비례하는 유압 작동기 속도를 발생시키는 구동방식이며 Fig. 8에 퍼센트 작동기 조작량(ActPE, actuator percent effort)에 따른 비례 솔레노이드밸브 기준전류 선도를 미터인과 미터아웃 제어에 대해 나타내었다. 여기서 퍼센트 작동기 조작량은 전자 조이스틱 출력전압을 퍼센트로 나타낸 것으로 중립에서 0%이고 -100%에서 100%의 값을 갖으며 음은 유압 실린더 후진, 양은 전진을 나타낸다. Fig. 8은 독립된 제어 파라미터를 갖는 미터인과 미터아웃제어의 기준전류 선도이다. 예를 들어 봄 조작 조이스틱 작동량이 양인 경우에는 전진으로 미터인 제어 선도가 적용되고 음인 경우에는 후진으로 미터아웃 선도가 적용된다.

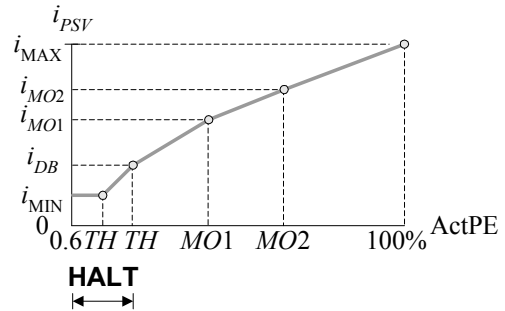
Fig. 8에서 TH는 유압 실린더 구동이 개시되는 임계 조작량으로 TH보다 조작량이 작으면 비례 솔레노이드 밸브는 불감대에 해당되는 i_{DB} 전류를 제어하여 유압 실린더는 정지된 상태를 유지한다. 본 연구에서 TH=5%로 설정하였고 HYDAC 비례 솔레노이드밸브의 $i_{MIN} = 0.2A, i_{MAX} = 1A$ 이다. i_{DB} 는 비례 유량제어밸브 특성시험결과로부터 튜닝되는 값으로 Fig. 5의 IMV3 시험결과를 살펴보면 0.55A에서 유량이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 IMV3 미터아웃 제어인 경우에는 FCV3의 정방향 유량이 발생되기 시작하는 0.55A이다. 미터인 제어 파라미터 $MIx, x = 1-3$ 과 해당전류, 미터아웃 제어 파라미터 $MOx, x = 1-2$ 와 해당전류는 IMV로 실제 굴착기 작업장치를 구동하면서 적절한 응답특성을 나타내도록 설정하였다.

4.2 IMV 폐루프 제어

IMV 폐루프 제어는 조이스틱 작동량에 비례하는 유압 작동기 변위를 발생시키는 구동방식으로 Fig. 9는 폐루프 제어알고리즘에 대한 블록선도이다. 폐루프 제어를 위해서는 유압 작동기의 변위 x_p 를 와이어 센서 등으로 측정된 후 기준입력 $(x_p)_{ref}$ 와의 오



(a) meter-in control



(b) meter-out control

Fig. 8 PSV reference current for actuator PE

차로부터 비례 솔레노이드밸브 기준전류를 연산해야 한다. 수동 조작모드에서는 기준입력 $(x_p)_{ref}$ 가 조이스틱 작동량으로부터 연산되고 프로그램 조작모드에서는 지정된 경로를 추종하도록 결정된다.

본 연구에서는 위치제어기로 비례적분 제어를 적용하였고 IMV 개루프 제어에서 설계된 퍼센트 작동기 조작량에 대한 비례 솔레노이드밸브 기준전류 선도의 임계 조작량 TH를 보상하기 위해 위치제어기 출력에 쿨롱 마찰특성의 비선형 함수를 적용하였다. 밸브 개도량이 일정한 상태에서 유압 작동기 변위는 지속적으로 증가하는 시스템으로 전달함수에 하나의 적분기를 포함하는 type 1이지만 불감대와 중력부하로 인해 비례제어만 적용하는 경우에는 정상상태 오차가 발생한다. 제어기 출력 u 로부터 연산되는 작동기 조작량(ActPEctr)으로부터 작동모드가 결정되고 작동모드에서 선택된 하나의 유량제어밸브는 최대로 개방되고 가변되는 유량제어밸브는 해당되는 미터인, 또는 미터아웃 기준전류 선도로 비례 솔레노이드밸브 전류를 제어하게 된다.

5. IMV 구동 성능시험

본 연구에서 제안된 IMV 제어 알고리즘은 TI사의 F28335 DSP를 이용하여 임베디드 프로그램으로 설

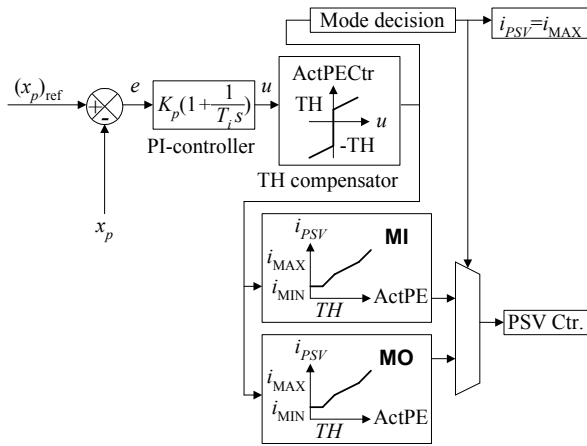


Fig. 9 Block diagram of IMV closed-loop control

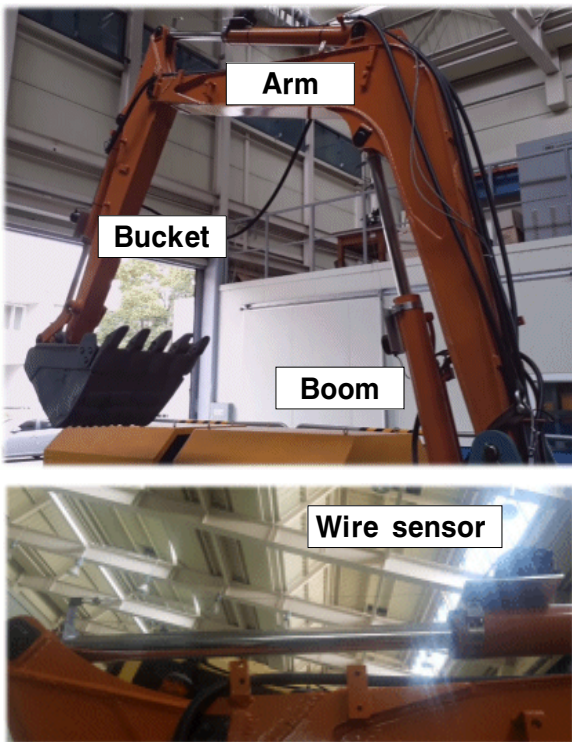


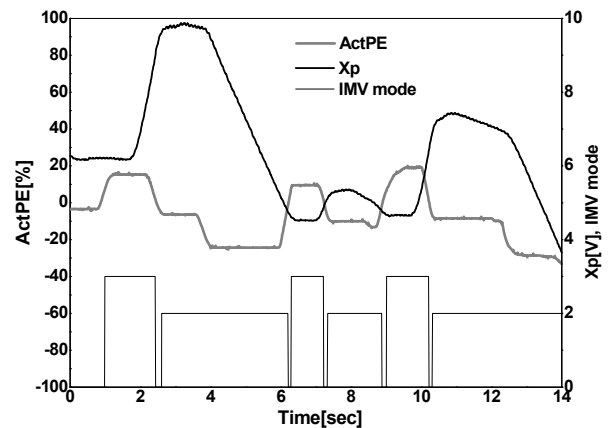
Fig. 10 Hydraulic cylinders and wire sensor

계하였으며 작동지령을 송신하고 제어성과 관련된 시험데이터를 획득하여 저장하는 기능은 PC에서 수행되는 모니터링 프로그램으로 구현하였다. Fig. 10은 2톤 굴착기 작업장치에 설치된 붐, 암, 버킷 실린더와 실린더 변위측정에 사용된 와이어 센서를 보여준다. 와이어 센서는 잡아당긴 줄의 길이에 비례하여 저항이 변하는 전위차계(potentiometer)로 12V 전원을 인가하면 출력신호가 70mm/V의 감도를 갖는다. 개발된 IMV는 22톤 굴착기용이나 IMV 제어 알고리즘의 기본 구동성능만을 검증하기 위해 구동시험에는 2톤 굴착기 작업장치를 활용하였으며 최대 500lpm 토출

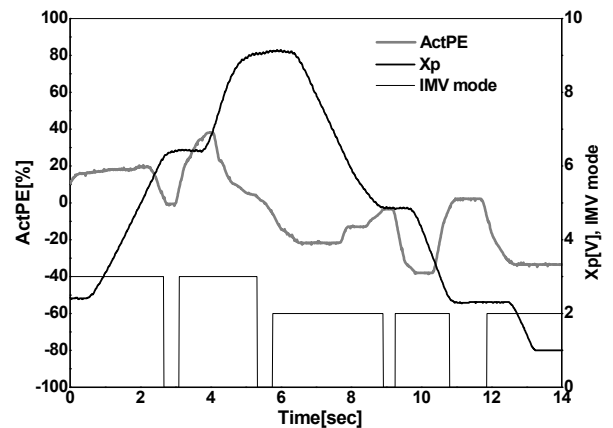
용량의 시험용 유압펌프는 일정한 공급압력을 유지하는 상태에서 시험하였다.

5.1 IMV 개루프 구동시험

IMV 개루프 제어에서 밸브 작동량을 결정하는 퍼센트 작동기 조작량(ActPE)은 모니터링 프로그램 내의 컨트롤 값이나 전자 조이스틱을 모사한 전위차계 전압으로 정할 수 있다. Fig. 11은 수동으로 조작되는 전위차계 출력전압을 입력으로 이용해서 암 실린더를 구동하는 시험의 응답을 보여준다. 암 실린더 전진 시에는 헤드와 로드 측에 모두 공급압력이 작용하는 재생회로가 적용되는데 미터아웃의 경우에는 비례 유량제어밸브가 역 방향으로 유량을 제어하며 이 때 발생하는 압력점프 현상으로 피스톤 변위가 급하게 변화하는 반면에 미터인의 경우에는 연속적인 유량제어로 전진 및 후진의 변위응답이 동일하게 나타남을 확인하였다. 작동기 조작에 따른 유압 실린더 변위의 응답지연은 약 1초로 다소 크게 발생



(a) HSR mode with meter-out control



(b) HSR mode with meter-in control

Fig. 11 Arm cylinder open-loop control

하였으나 이는 개루프 시스템 이득에 해당되는 퍼센트 작동기 조작량에 대한 기준전류 선도를 수정함으로써 단축시킬 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 11에 표시된 IMV 모드는 0=HALT, 1=PE(powerd extension), 2=PR(powerd retraction), 3=HSR(high-side regeneration), 4=LSR (low-side regeneration)을 나타내며 작동기 조작량에 따른 작동모드가 설계에서 의도된 바와 같이 변화됨을 확인하였다.

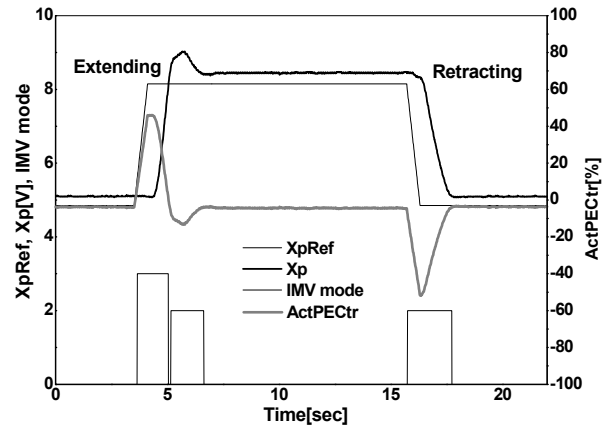
5.2 IMV 페루프 구동시험

페루프 제어에서는 기준입력 신호가 퍼센트 작동기 조작량(ActPE)과 유압 작동기 스트로크로부터 연산되며 모니터링 프로그램 내의 컨트롤 값으로 설정하여 성능비교를 위한 일정한 기준입력 신호를 발생시킬 수 있다.

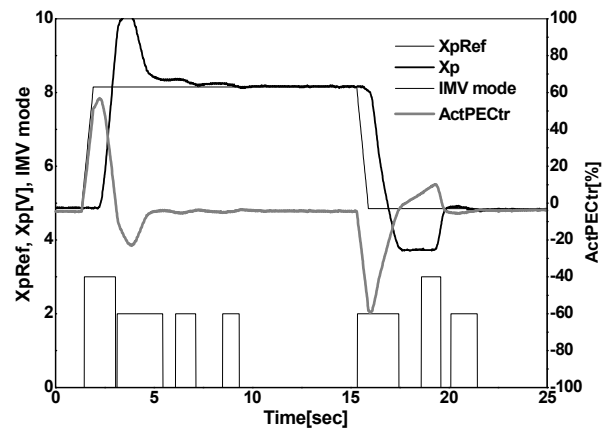
Fig. 12(a)는 비례이득이 $K_p = 25\%/V$ 인 비례제어와 피스톤 전진 시 미터인 제어를 적용하는 경우에 암 실린더의 제어성능을 나타낸다. 여기서 상수인 비례이득의 단위는 전위차계와 와이어 센서의 위치오차가 1V 발생하면 퍼센트 작동기 조작량이 25%로 계산된다는 의미이다. 기준입력 신호가 변화한 후 피스톤이 기동하는 시간지연은 약 1초였으며 다소 큰 비례이득으로 암 실린더 전진 시에는 오버슈트가 발생하였고 불감대의 영향으로 정상상태 오차가 존재하였다. 비례이득이 작은 경우에는 오버슈트는 발생하지 않으나 응답지연과 정상상태 오차가 다소 증가하게 된다. Fig. 12(b)는 정상상태 오차를 제거하기 위해 비례적분제어를 적용한 시험결과이다. 정상상태 오차만을 제거하기 위해 적분시간은 $T_i = 1\text{sec}$ 로 비교적 큰 값을 적용하여 이에 따라 정상상태 오차가 제거되었으나 과도상태에서는 피스톤 전진과 후진 모두에서 다소 큰 오버슈트가 발생하였다. 굴착기 작업장치 버킷 끝단의 주어진 경로를 추종하는 페루프 제어에서는 오버슈트가 발생되지 않도록 설계하는 것이 바람직하다고 판단되며 최적의 비례적분제어 이득 결정 시에도 임계값의 설계목표로 고려되어야 한다.

Fig. 13은 작업장치의 중력부하가 크게 작용하는 붐 실린더에 대한 제어성능이다. 붐 실린더 작동모드는 전진 시 PE이고 후진 시 LSR이다. 붐 실린더 제어기 비례이득은 $K_p = 40\%/V$ 로 암 실린더 제어이득보다 크게 설정하였다. 붐 실린더는 큰 중력부하로 인해 피스톤을 유압으로 구동하는 전진 시의 응답이 유량배출로 구동하는 후진 시의 응답보다 느리게 나

타났고 전후진 모두 오버슈트는 발생하지 않았다. 시험결과로부터 유압 실린더 사양 과 부하조건이 매우 다른 붐 실린더는 암과 버킷 실린더와 다른 독립적인 제어이득을 적용하는 것이 적절하다고 판단되었다.



(a) P-control



(b) PI-control

Fig. 12 Arm cylinder closed-loop control

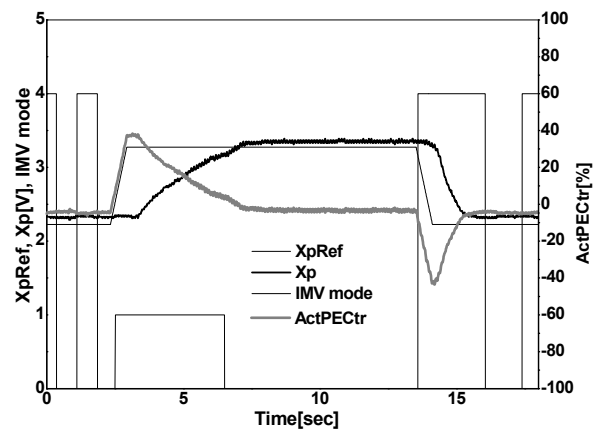


Fig. 13 Boom cylinder closed-loop control

5.3 궤적구동시험

붐, 압, 버켓 실린더를 동시에 구동하는 복합동작의 기준입력신호는 Fig. 2의 JCMAS H020 작업 사이클과 Fig. 10 시험대상 작업장치의 유효 운동범위를 고려하여 설정하였다. Fig. 14는 궤적구동시험에 적용된 붐, 압, 버켓 실린더의 기준입력신호와 전후진시에 적용되는 작동모드를 나타낸다. IMV는 기존 MCV에 비하여 붐 실린더 하강(LSR 작동모드)과 압과 버켓 실린더 전진(HSR 작동모드)시에 에너지 효율을 높일 수 있다.

Fig. 15는 IMV 페루프 제어기를 적용한 복합구동 시험결과이다. Fig. 15(a)는 붐, 압, 버켓에 동일한 비례이득 $K_p = 20\%/V$ 를 적용한 경우로 작업주기는 30초다. $K_p = 25\%/V$ 가 적용된 Fig. 12와 비교하면 압과 버켓에 오버슈트가 발생하지 않았으나 낮은 비례이득으로 붐 실린더는 거의 응답하지 않았다. 이로부터 붐 실린더 제어이득을 다르게 적용해야 한다는 5.2절 결과를 확인하였다. Fig. 15(b)는 압과 버켓에는 $K_p = 15\%/V$, 붐에는 $K_p = 40\%/V$ 의 제어이득을 다르게 적용한 복합구동 시험결과이고 작업주기는 20초이다. 감소된 비례이득과 증가된 기준입력신호 기울기로 압과 버켓의 과도응답 오차는 다소 증가하였으나 안정된 수렴특성을 나타내었고 증가된 비례이득으로 붐 실린더 추종성능이 향상됨을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 최근 굴착기 에너지 효율향상을 위해 개발되고 있는 IMV방식 MCV 시제를 제작한 후 설계된 구동 알고리즘을 임베디드 제어기에 구현하여 굴착기 작업장치를 대상으로 구동시험을 실시하고 제어성능을 평가하였으며 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) IMV에 집적된 4개의 2방향 비례 유량제어밸브에 대한 성능시험결과 4개 밸브 특성에 차이가 있음을 확인하였으며 시험을 통해 파악된 비례 유량제어밸브 특성을 고려하여 IMV 구동 알고리즘을 설계하였다. 양산적용을 위해서는 IMV 핵심부품인 비례 유량제어밸브의 성능을 개선해야 하지만 시험평가단계인 본 연구에서는 비례 유량제어밸브의 성능차이를 제어 파라미터에 반영하여 설계사양과 부하조건이 다른 굴착기 유압 작동기를 대상으로 구동성능을 근사하게 조정하였다.

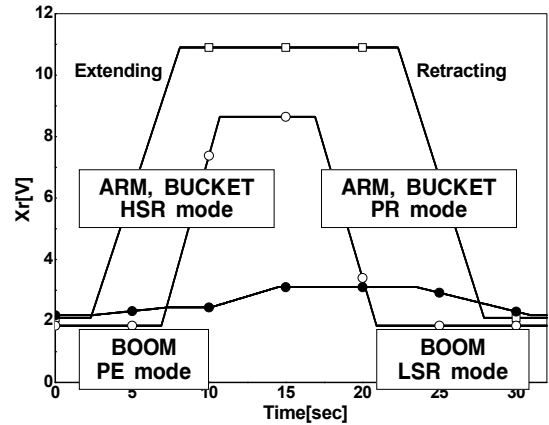
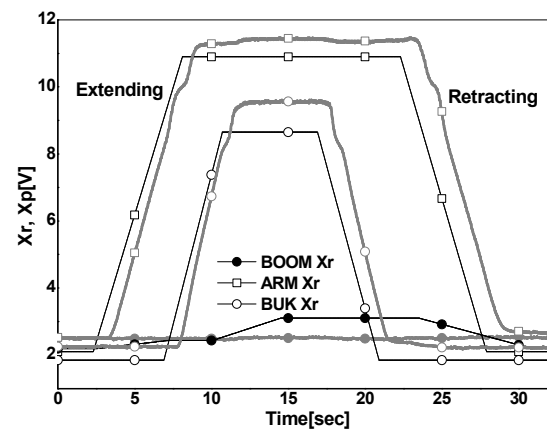
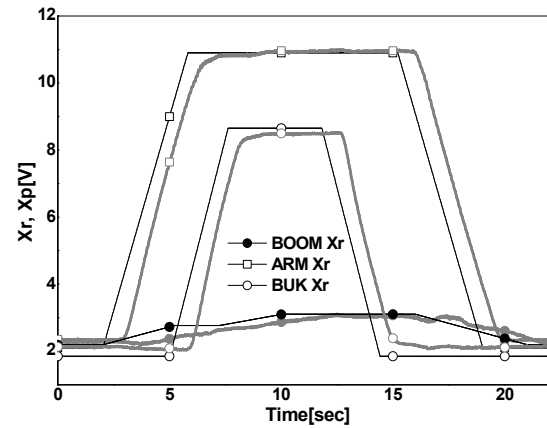


Fig. 14 Cylinder references and IMV mode



(a) $K_p=20\%$ for boom, arm and bucket



(b) $K_p=15\%$ for arm bucket, $K_p=40\%$ for boom

Fig. 15 Closed-loop control for compound motion

(2) 개루프 제어와 페루프 제어로 IMV 제어기를 구성하고 성능을 평가하였다. 우선 붐, 압, 버켓으로 구성되는 유압 작동기의 전후진 시 적용되는 작동모드를 설정하였고 운전자가 조작하는 조이스틱의 퍼센트 작동기 조작량으로부터 가변되는 비례 솔레노

이드밸브 기준전류 선도를 설계하여 조이스틱 작동량에 비례하여 유압 작동기 속도가 발생하는 개루프 제어기를 설계하였다. 개루프 제어성능 평가를 통해 HSR 작동모드에서는 역방향 유량점프가 발생하는 미터아웃보다는 정방향 유량제어가 적용되는 미터인 방식에서 적절한 응답성능이 나타남을 확인하였다. 유압 작동기 변위를 제어하는 폐루프 제어기는 개루프 제어기에 비례적분 제어기를 결합하여 유압 작동기 변위를 되먹임하는 방식으로 설계하였다. 유압 작동기는 일정한 밸브변위에 대해 지속적으로 변위가 증가하는 type 1 시스템이므로 이론적으로는 비례제어만 적용하여도 정상상태 오차가 발생하지 않지만 IMV의 불감대 특성과 유압 작동기에 작용하는 중력부하로 인해 비례제어 시에도 오차가 발생함을 시험으로 확인하였다. 비례적분제어기가 적용된 시험에서는 정상상태 오차는 제거되지만 매우 작은 적분이득을 적용하여도 오버슈트가 다소 크게 발생하였다.

(3) IMV방식 MCV를 이용한 굴착기 작업장치의 붐, 암, 버킷의 복합구동시험은 표준 작업조건으로부터 기준입력변위 궤적을 연산한 후 위치제어 오버슈트가 발생되지 않는 비례제어를 적용하였다. 복합구동 궤적추종성능을 암과 버킷에 비해 부하조건이 매우 다른 붐 실린더에 다른 이득을 적용함으로써 양호한 위치제어성능을 확보할 수 있었다. 폐루프 제어에서 발생하는 오버슈트는 붐, 암, 버킷을 동시에 작동시키는 복합동작 작업에 적절하지 않은 것으로 판단되었으며 최적 제어기 설계에서는 임계감쇠의 과도응답특성이 설계목표로 고려되어야 할 것이다.

IMV 상용화 개발을 위해서는 향후 버킷 끝단의 궤적을 추종하는 제어기와 작업효율을 향상시키기 위한 펌프 토출유량제어기에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) H. G. Park, S. A. Nahian and K. K. Anh, "A Study on Energy Saving of IMV Circuit using Pressure Feedback", Journal of Drive and Control, Vol.13 No.4, pp.31-44, 2016.
- 2) J. Y. Huh, "Energy Saving in Boom Motion of Excavators using IMV", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.3, pp.1-7, 2017.
- 3) A. Shenouda, Quasi-Static Hydraulic Control Systems and Energy Savings Potential Using Independent Metering Four-Valve Assembly Configuration, Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2006.
- 4) Caterpillar, Catalog for 336F XE Hydraulic Excavator, 2016.
- 5) G. H. Jung, "Static Analysis of Dedicated Proportional Flow Control Valve for IMV", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.39-47, 2018.
- 6) G. H. Jung, "Performance Test of Bi-Directional Proportional Flow Control Valve for IMV", Proceedings of 2019 Spring Conference on Drive and Control, pp.279-286, 2019.
- 7) G. H. Jung, "Development of IMV Control Algorithm for Excavators", Proceedings of 2019 Autumn Conference on Drive and Control, pp.77-86, 2019.
- 8) G. H. Jung, "A Research on the HILS Design for Excavator IMV Control System", Proceedings of 2017 Autumn Conference on Drive and Control, pp.151-157, 2017.