

유압식 굴삭기 효율 향상을 위한 HPM 시스템 개발

Development of the HPM System to Improve Efficiency of the Hydraulic Excavator

권용철^{1*} · 이경섭² · 김성훈¹ · 구병국¹

Yong Cheol Kwon^{1*}, Kyung Sub Lee², Sung Hun Kim¹ and Byoung Kook Koo¹

Received: 15 Oct. 2019, Accepted: 04 Nov. 2019

Key Words : Excavator(굴삭기), Electro-Hydraulic Pump Control System(전자유압 펌프 제어 시스템), Closed Center Type MCV(폐심형 MCV), Hydraulic System Efficiency Analysis(유압 시스템 효율 분석)

Abstract: The HPM (High-speed Power Matching) system is an electro-hydraulic control system. It directly controls the swash plate of the pump by selecting four-loop logic based on joystick signals, pump flow, and pressure signal to improve the efficiency and controllability of construction machines. In the NFC (Negative Flow Control) system, a typical pump control system using conventional open center type MCV, the loss is continuously generated by flow through the center bypass line even when the excavator is not in operation. Also, due to the slow response of the pump that indirectly controls the flow rate using the pressure regulator, peak pressure occurs at the start or stop of the operation. Conversely, the HPM system uses an MCV without center-by-pass flow path and the swash plate of a pump for the HPM is controlled by a high-speed proportional flow control valve. As a result, the HPM system minimizes energy loss in standby state of the excavator and enables peak pressure control through rapid electro-hydraulic control of a pump. In this paper, the concept of the HPM system algorithm is introduced and the hydraulic system efficiency is compared with the NFC system using the excavator SAT (System Analysis Tool).

기호 설명

F_{cyl} : 실린더 힘, N

P_{head}, P_{rod} : 실린더 헤드, 로드 압력, bar

A_{head}, A_{rod} : 실린더 헤드, 로드 면적, m²

P_A, P_B : 유압 모터 A, B 포트 압력, bar

P_B : 유압 모터 B 포트 압력, bar

P_p : 펌프 압력, bar

v_{cyl} : 실린더 속도, m/s

w_{mot} : 유압모터 회전속도, rad/s

Q_p : 펌프 토출 유량, l/min

R_{mot} : 유압 모터 감속기 기어비

R_{ring} : 굴삭기 링기어 기어비

V_{mot} : 유압모터 배제 체적, cm³

η_{sys} : 시스템 효율

E_{loss} : 에너지 손실, kJ

W_{cyl} : 실린더 소비 동력, kW

W_{mot} : 유압 모터 소비 동력, kW

W_p : 펌프 공급 동력, kW

* Corresponding author: yongcheol.kwon@doosan.com

1 Advanced Research Team, Hydraulic component business R&D Division, Doosan Corporation Mottrol BG, Changwon, 508-77 51528, Korea

2 Hydraulic component business R&D Division, Doosan Corporation Mottrol BG, Changwon, 508-77 51528, Korea

Copyright © 2019, 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.

1. 서 론

HPM(High speed Power Matching) 시스템은 유압식 굴삭기의 시스템 효율과 조작성 향상을 위해 폐심형(closed center type) MCV(Main Control Valve)를 사용

하고, 굴삭기 joystick 입력 신호와 펌프의 토출 유량 및 압력 신호를 기반으로 유량 제어, 압력 제어, 마력 제어, 최소 압력 제어 모드의 4 loop logic 중 최적의 한 개 모드를 자동 선택하여 펌프의 유량을 직접 제어하는 펌프 전자 제어 시스템이다.

Fig. 1(A)와 같이 종래의 개심형(Open center type) MCV를 사용하는 대표적인 펌프 제어 시스템인 NFC(Negative flow control) 시스템은 시스템이 요구하는 펌프 유량을 제어하기 위해 MCV center by pass 유로를 통해 pump 제어를 위한 pilot 압력 신호를 형성한다. 이 때, 굴삭기 대기 상태에서 펌프 제어용 pilot 압력 신호를 약 40 bar로 유지해야 하는데, 이로 인해 굴삭기가 대기 상태에도 center bypass 유로를 통해 유량 손실이 지속적으로 발행하게 된다.

NFC 시스템에 사용되는 펌프는 사판과 기계적인 feedback link로 연결되어 있어 복잡한 구조로 동작하는 압력 regulator에 의해 펌프 유량이 제어 되는데, 이 경우, 펌프의 상대적으로 늦은 응답성으로 인해 굴삭기 동작 시작 또는 정지 시 발생하는 시스템 내의 peak 압력 방지를 위한 별도의 조치가 필요하다. 또한, NFC 시스템용 펌프는 엔진 stall 방지를 위한 펌프 최대 마력 제한이 기계적인 servo piston에 의해 동작되기 때문에 엔진 동력을 최대한 효율적으로 사용하는데 제약이 있다.¹⁻²⁾

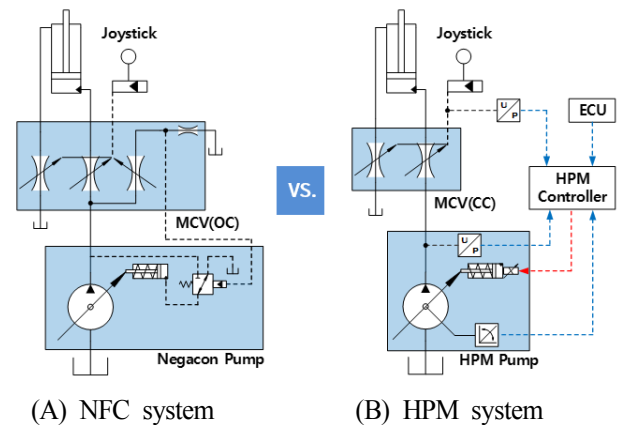


Fig. 1 Schematics of NFC system and HPM system

반면, Fig. 1(B)의 HPM 시스템은 center by pass 유로가 없어 굴삭기 대기 상태에서 유량 손실이 없는 폐심형 MCV를 사용하며, 펌프 제어기가 joystick pilot 압력, 펌프의 사판 각도 및 토출 압력신호들을 입력 받아, 펌프의 사판을 직접 구동시키는 고속 비례 제어 밸브(이하 HPV, High speed Proportional flow

control Valve)가 적용되어 있다.

HPM 펌프는 굴삭기 동작 대기 상태에서 사판의 각도를 최소로 제어하여, 불필요한 유량 손실을 더욱 최소화 할 수 있으며, 굴삭기 동작 시작 또는 정지 시, MCV spool의 유로가 순간적으로 닫히는 현상에 의해 발생하는 유로 내 압력 peak를 방지하기 위한 빠른 사판각도 제어가 가능하다. 또한, HPM 펌프는 엔진의 net 마력보다 펌프의 최대 setting 마력이 높거나, 엔진의 응답성이 펌프보다 느려 순간적으로 펌프의 부하가 엔진의 공급 마력보다 높을 경우 발생하는 엔진 stall 및 회전 속도 drop 현상을 고속 power matching 전자 제어를 통해 방지할 수 있으며, 엔진 동력을 펌프가 최대한 효율적으로 사용할 수 있도록 제어할 수 있다.

본 논문에서는 HPM 시스템 algorithm 개념을 소개하고, 자체 개발한 굴삭기 시스템 자동 분석 tool을 이용하여 HPM 시스템과 NFC 시스템의 유압 시스템 효율을 비교 분석 하였다.

2. 제어 로직

2.1 펌프 구조 및 제어

Fig. 2(A), (B)는 EPPRV(Electric Proportional Pressure Reducing Valve)를 사용한 기존 전자 제어 펌프와 HPV를 사용한 HPM 펌프의 유압 회로도 및 펌프 유량 제어 시의 block diagram을 나타낸다.³⁻⁴⁾

기존 대부분의 전자 제어 펌프 시스템은 Fig. 2(A)와 같이 펌프의 유량을 제어하기 위해 유량 명령 신호를 적분하여 압력 지령으로 변환하고, 펌프의 압력을 제어하기 위해 펌프 토출 압력을 기계적으로 feedback 받는다. 이 경우, 유량 명령을 압력 명령으로 바꾸어 주는 적분기가 제어 프로그램에 포함되어야 하며, 복잡하게 동작하는 전자식 압력 regulator 때문에 빠른 응답성을 확보할 수 없다.

반면, Fig. 2(B)와 같이 HPM 펌프의 경우, 독자 개발된 HPV가 사판을 고속으로 직접 구동하는 단순한 구조이고, 펌프 유량 제어 신호는 제어기를 거쳐 HPV를 구동하는 전류 지령으로 바로 입력되므로 EPPRV를 사용한 기존 전자 펌프에 비해 빠른 응답성을 확보할 수 있다.

Table 1은 HPM 펌프, EPPRV가 장착된 전자 regulator type 펌프 그리고 기계식 regulator type 펌프가 동일한 부하 압력(200 bar) 조건에서 사판이 최소 각도에서 최대 각도로 움직일 때의 상승 시간, 그 반

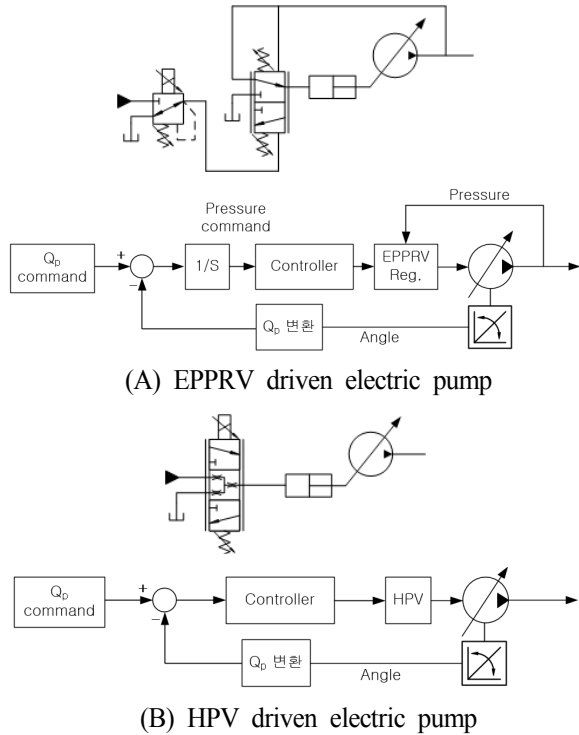


Fig. 2 Comparison of EPPRV and HPV driven type electric pump

대인 하강 시간을 비교한 step 응답 시험 결과이다. Step 응답 시험은 140 cc/rev의 배제 체적을 갖는 동일 사양의 펌프를 사용하여 진행 되었다. HPM 펌프는 기계식 압력 regulator type 펌프에 비해 약 4배, EPPRV가 장착된 전자 regulator type 펌프에 비해 약 2배의 빠른 응답성을 가지고 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 HPM 펌프의 빠른 응답성으로 인해 폐심형 MCV를 사용하는 유압식 굴삭기 시스템에서도 peak 압력 제어가 가능하다. 반면, EPPRV가 장착된 전자 regulator type 펌프를 사용하는 경우에는 펌프의 상대적 느린 응답성으로 높은 압력 peak가 발생하여, 이를 억제하기 위한 별도의 PPRV(Peak Pressure Reducing Valve)를 장착하여야하기 때문에 전체 시스템 가격이 상승할 수 있다.

Table 1 Comparison of dynamic response according to pump type

Step response	HPM pump	Electric regulator pump	Mechanical hydraulic regulator pump
Rising time	39 ms	75 ms	170 ms
Falling time	45 ms	60 ms	190 ms

2.2 HPM 시스템 제어 알고리즘

HPM 시스템의 전체 block diagram은 Fig. 3와 같다. 현재, HPM 시스템은 펌프 전자 제어를 주목적으로 하기 때문에 joystick pilot 압력에 의해 제어되는 기계식 MCV를 사용하지만, 특정 기능 향상을 위해 Arm 실린더 재생 기능(Arm regen.), 주행 직진(T/S, Travel Straight) 기능 밸브의 경우, EPPRV를 사용한 전자 제어를 수행하였다. Arm regen. valve는 Arm 동작 시의 cavitation 방지, regen. 효율 극대화를 통한 digging force 증가를 목적으로 하고, 주행 직진 밸브는 주행 복합 동작에서 압력 충격 감소 및 효과적인 flow sharing 제어를 수행한다.

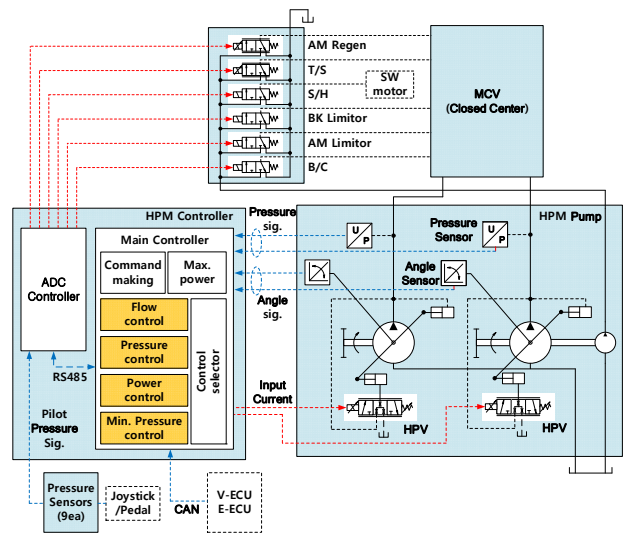


Fig. 3 Block diagram of HPM system

HPM control logic의 개념도는 Fig. 4과 같다. HPM controller는 joystick 입력 신호에 따라 미리 계획된 유량, 압력, 마력 특성 곡선을 사용하여 제어 명령값을 결정한다. 이 때, 펌프의 최대 제한 마력값은 굴삭기 ECU(V-ECU, E-ECU)로부터 CAN 통신을 통해 엔진의 설정 속도, 실제 속도, 작업 모드, joystick 신호 및 펌프의 현재 마력값을 입력 받아 엔진의 최대 동력을 초과하지 않으면서, 급격한 부하 증가로 인한 엔진 회전속도 drop이 발생하지 않도록 최대 마력 제어 algorithm에 의해 결정된다.

유량, 압력, 마력 제어는 특성 곡선에 의한 각각의 제어 명령값을 추종하기 위해서 펌프 사판 각도와 토출 압력을 feedback 받아 폐루프 제어(closed loop control)를 수행하며, 펌프의 제어 logic 선택은 제어 출력값들 중에서 최소값을 선택하여 결정된다. 따라서, 굴삭기가 특정한 부하 조건에서 제어 logic 선택과 제어 명령값 크기는 입력 신호에 따른 유량, 압력,

마력제어의 특성곡선 설계에 따라 결정된다. 특성 곡선은 굴삭기 시스템의 동역학 특성을 기반으로, 경험치에 의해 설계되는데, 이 특성곡선 튜닝을 통해 운전자가 굴삭기 운전 중 느끼는 감성 특성 또한 조정할 수 있다.

HPM control logic은 앞서 설명한 유량, 압력, 마력 제어 외에 펌프 부하 압력이 설정된 최소 압력보다 낮을 경우에 선택되는 최소 압력 제어 logic이 포함되어 있으며, 이는 굴삭기 대기 상태에서 불필요한 유량 손실을 최소화 하면서, 굴삭기 초기 동작 응답성을 확보하는데 목적이 있다. 또한, Peak 압력 방지를 위한 anti-peak pressure 제어가 포함되어 있다.

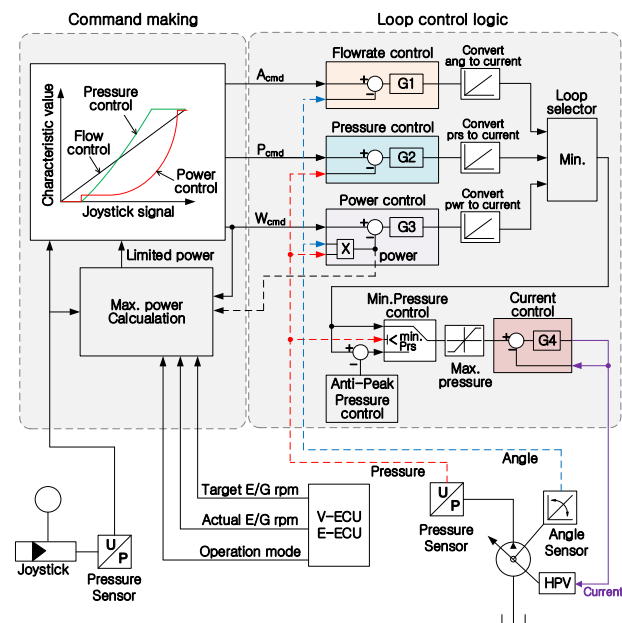


Fig. 4 Concept of HPM system control logic

아래 Fig. 5는 HPM 시스템의 급속 Boom 상승 단독 동작 시험 시 측정된 Boom cylinder 속도에 따른 power, 압력 및 cylinder 변위와 동작 구간 별로 선택된 유량, 압력, 마력 제어 영역을 나타낸다. Joystick을 step 입력으로 최대 위치까지 급격히 조작하였을 때, 초기에는 Boom의 큰 관성에 의해 속도가 천천히 증가하면서 펌프 토출 압력과 Boom cylinder head 압력(P_{head})이 최대 180 bar까지 급속히 상승한다. 그 후, Boom 상승 속도가 증가하면서 펌프와 cylinder head 압력이 감소하게 된다.

압력 제어는 초기 동작 시점에서 peak 압력을 제어하여 부드러운 초기 동작을 가능하게 한다. 마력 제어는 actuator 속도에 비해 부하가 크게 작용하는 구간에서 동작하여 에너지 효율을 최적화하며, 부하 압

력 변화에 따른 actuator의 속도가 제어되므로 운전자에게 부하의 감성(load feeling)을 직관적으로 느낄 수 있도록 할 수 있다. 상대적으로 부하가 작은 구간에서 동작하는 유량 제어는 운전자의 조작 입력에 따라 설정된 유량보다 실제 펌프의 공급 유량이 큰 구간에서 동작하며, 설정된 유량만큼만 제어하여 유량 손실을 최소화 한다.

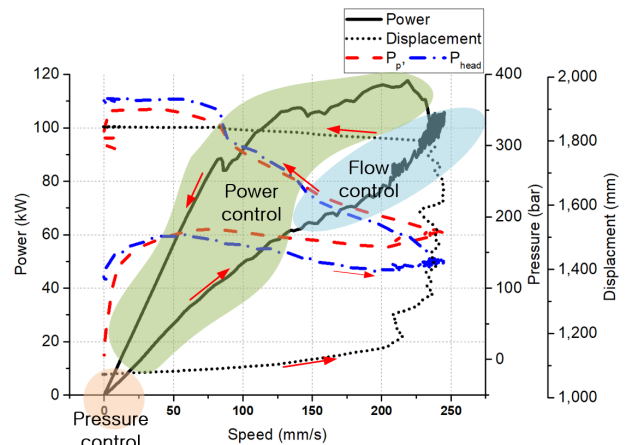


Fig. 5 Block diagram of HPM system

아래 Fig. 6는 power-speed 그래프에서 HPM 시스템의 제어 logic 영역에 대한 개념을 보여준다. Power-speed 그래프에서 기울기는 압력을 의미하며, HPM controller는 초기 동작 시점에서 압력 제어를 수행하고, 부하 영역에서는 마력 제어, 부하가 작은 영역에서는 유량 제어를 수행한다. 또한, 마력 제어와 유량 제어가 변이하는 구간에서는 제어 모드 변환이 안정적으로 이루어 질 수 있도록 하였다.

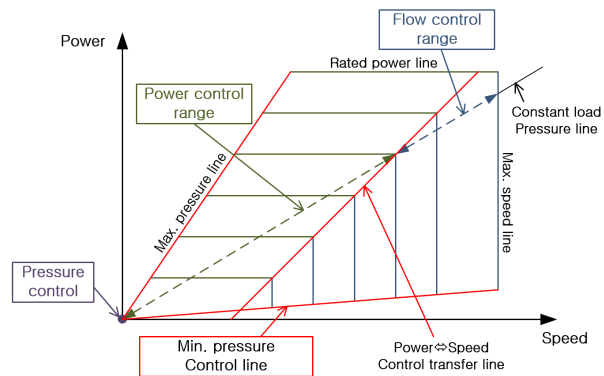


Fig. 6 4 loop logic selection concept

3. 시스템 분석 tool

굴삭기 유압 시스템의 전체 효율은 유압 공급원인

펌프에서 최종 유효 work을 수행하는 actuator까지의 에너지 손실을 감안하여, 식(1)을 이용하여 계산된다.⁵⁾

$$\eta_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^3 W_{cyl,i} + \sum_{j=1}^3 W_{mot,j}}{\sum_{k=1}^2 W_{p,k}} \quad (1)$$

$$W_{cyl,i} = F_{cyl,i} \cdot v_{cyl,i}$$

$$W_{mot,j} = \Delta P_{mot,j} \cdot Q_{eq,mot,j}$$

$$W_{p,k} = P_{p,k} \cdot Q_{p,k}$$

$$F_{cyl,i} = (P_{head,i} - P_{rod,i}) \cdot (A_{head,i} - A_{rod,i})$$

$$\Delta P_{mot,j} = P_{A,j} - P_{B,j}$$

$$Q_{eq,mot,j} = V_{mot,j} \cdot \omega_{mot,j} \cdot R_{mot,j} \cdot R_{ring}$$

$$i = 1; Boom, 2; Arm, 3; Bucket$$

$$j = 1; Swing, 2; Travel(R), 3; Travel(L)$$

$$k = 1; Pump1, 2; Pump2$$

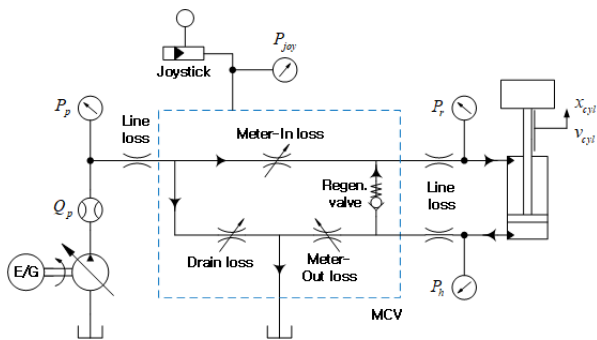


Fig. 7 Energy loss of excavator hydraulic system

굴삭기 유압 시스템의 에너지 손실은 Fig. 7과 같이 MCV에서 주로 발생하며, 식(2)에서와 같이 MCV에서는 주로 교축 밸브의 압력 손실로 인한 meter-in, meter-out, drain 손실이 발생한다. 본 논문의 효율 분석에서는 유로의 손실 에너지는 전체 손실에 대비하여 매우 작다고 가정하고 효율 분석에 고려되지 않는다.

$$E_{loss} = E_{pump} + E_{regen} - E_{act} \quad (2)$$

$$\cong E_{meterinloss} + E_{meteroutloss} + E_{drainloss}$$

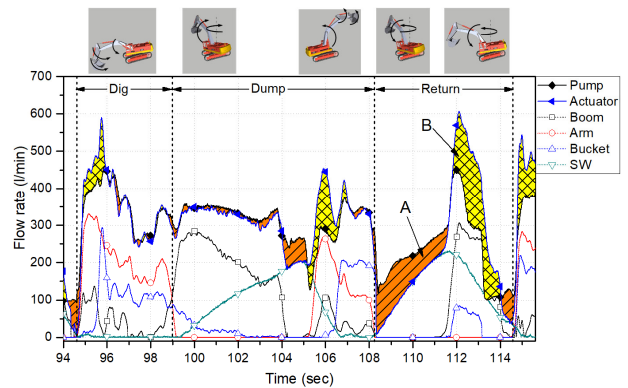
$$E_{meteringloss} = \Delta P_{orifice} \cdot Q_{orifice} \cdot \Delta t \quad (3)$$

교축 밸브에서 발생하는 Metering loss는 식(3)과 같이 유량이 흐르는 교축 밸브 전후의 압력차이, 통과 유량, 동작 시간을 곱하여 계산된다. MCV spool(BM1, BM2, AM1, BK, SW)의 각 동작 모드에

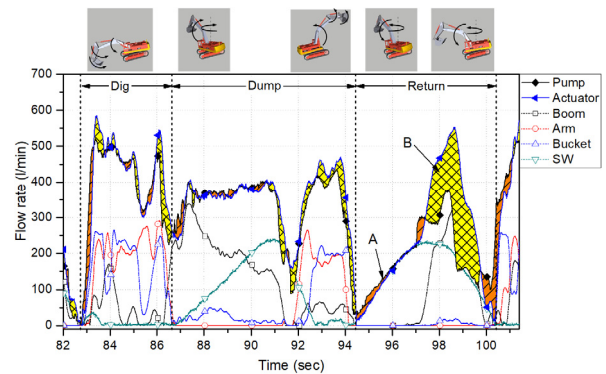
따라 흐르는 유량을 파악하기 위해 각 actuator로 흐르는 유량 측정을 위한 유량계 등을 장착하여 검출한다고 하더라도, 유로 합류 동작에 따른 유량과 regen. 유량 등을 측정하는 것은 불가능하다. 따라서, 조이스틱 입력 신호를 기반으로 spool 동작을 판단하고, 각 spool 포트에 흐르는 유량을 계산하였다.

4. 유압 시스템 효율 비교 분석

30 ton급 NFC 시스템 굴삭기와 HPM 시스템 굴삭기의 동일한 굴삭 작업 1 cycle에 대해 펌프와 각 actuator의 유량을 비교한 시험 결과는 Fig. 8(A), (B)와 같다. 굴삭 작업은 3단계로 이루어져 있으며, 굴삭 작업 1cycle은 흙파기(Digging) → 180° swing 및 상차(Dump) → 초기 위치 복귀(Return)의 과정으로 동작한다.



(A) NFC system



(B) HPM system

Fig. 8 NFC and HPM system test results

Fig. 8의 A면적은 Actuator들이 소비하는 유량보다 펌프의 공급 유량이 더욱 큰 것을 나타낸다. 상대 비교를 통해 HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 펌프의 과공급된 유량이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 특히, Return 동작 중 swing 동작만 주로 하는 구

간에서는 joystick 입력에 의해 설정되는 유량보다 실제 actuator가 사용하는 유량이 작은 구간으로써 유량 제어가 선택되어 필요한 만큼의 유량만 공급되므로 펌프 유량 손실이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. B 면적은 Boom down 또는 Arm in 동작 시, regen. valve 동작으로 인해, 펌프의 공급 유량보다 actuator의 소비 유량이 더 큰 것을 나타낸다. HPM은 재생 (regen.) 효율을 regen. 전자 비례 제어를 통해 NFC보다 의도적으로 향상되도록 조정하여, B면적이 NFC보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

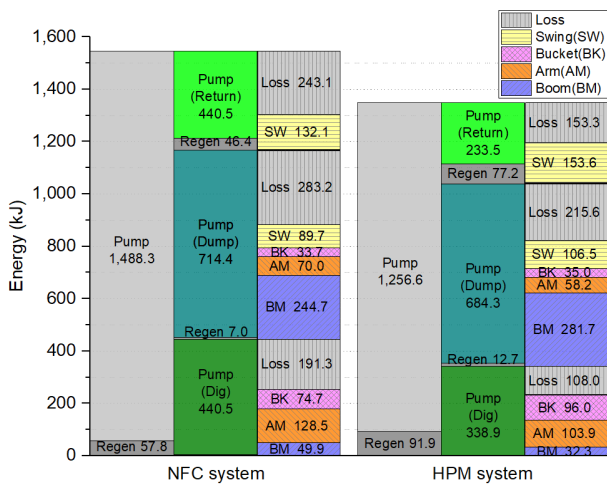


Fig. 9 Comparison of pump energy distribution

위의 Fig. 9는 NFC 시스템과 HPM 시스템의 굴삭 작업 1 cycle 동안 동작 단계 별로 펌프의 공급 에너지와 regen. valve를 통해 재생되는 에너지 그리고 동작 구간 별로 각 actuator에서 사용되는 에너지 및 손실 에너지를 나타낸다. NFC 시스템 대비 HPM 시스템의 총 손실 에너지는 약 33%(717.6kJ → 476.9kJ) 감소하였다.

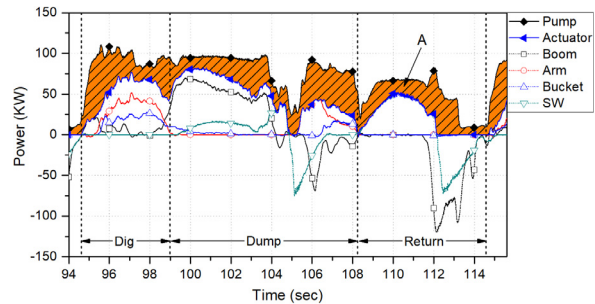
식(1)에 의해 계산된 유압 시스템 효율은 Table 2와 같이 NFC는 55.7 %, HPM는 69.4 %로써 HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 유압 시스템 효율은 약 13.7 %p 증가되었음을 확인할 수 있다. 특히, 선회 동작과 boom down 동작이 주로 일어나는 Return 구간에서 HPM 시스템은 NFC 시스템 대비 효율이 26.4 %p로 가장 크게 증가하였는데, 그 이유는 HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 상대적으로 시스템이 필요한 유량만큼만 공급하여 에너지 손실이 더욱 감소하였기 때문이다.

Fig. 10 (A), (B)는 NFC 시스템과 HPM 시스템의 동작 구간 별 펌프와 각 actuator들의 power 변화를 나타내며, A 면적은 펌프가 공급하는 동력과 actuator

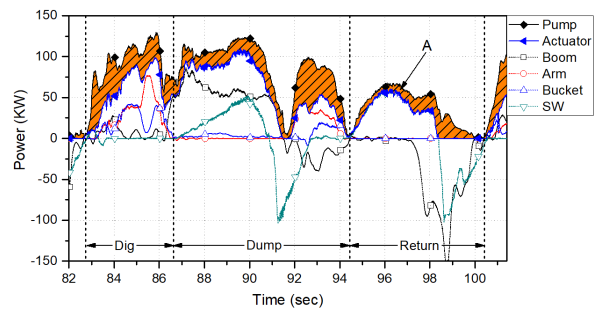
Table 2 Comparison of hydraulic system efficiency

Operation mode	NFC	HPM	Adv.
Digging	57.6 %	68.7 %	+11.1 %p
Dump	61.3 %	70.4 %	+9.1 %p
Return	41.0 %	67.4 %	+26.4 %p
Total	55.7 %	69.4 %	+13.7 %p

에서 사용된 동력의 차이로써 동력 손실을 의미한다. HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 시스템 효율이 13.7 %p 증가한 만큼 동력 손실이 감소한 것을 A면적 감소를 통해 확인할 수 있다. 참고로, Power 곡선에서 0 보다 작은 값은 Boom down 시 위치에너지(□), swing 정지 시의 제동 에너지(▽)로써 재생 가능한 에너지를 의미한다.⁶⁻⁸⁾



(A) NFC system



(B) HPM system

Fig. 10 Comparison of power

Fig. 11에서 NFC 시스템과 HPM 시스템이 actuator에서 전체 소비한 에너지는 각각 806 kJ, 871 kJ로써 HPM 시스템이 약 65 kJ만큼 에너지를 더 소비하였다. 그 이유는 Boom 상승 동작 시, 속도 향상을 위해 의도적으로 Boom spool의 개구 면적을 크게 설계하여, 에너지 소비량이 증가하였기 때문이다. 즉, HPM 시스템은 향상된 작업 성능을 위해 에너지를 더욱 많이 소비하였음에도, Fig. 11의 전체 에너지 손실 분석 결과에서 볼 수 있듯이 유압 시스템 손실이 더욱

감소하여 전체 유압 시스템 효율은 증가하였다. HPM 시스템의 에너지 손실은 NFC 시스템 보다 meter-in, meter-out, drain loss 총량이 각각 12.4 %, 44.5 %, 60.9 %로 감소하였다.

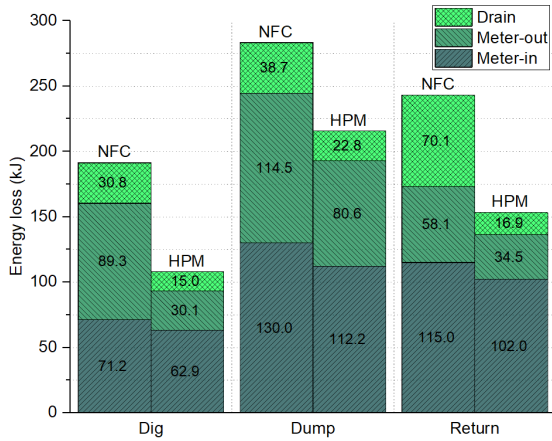


Fig. 11 Comparison of energy loss analysis

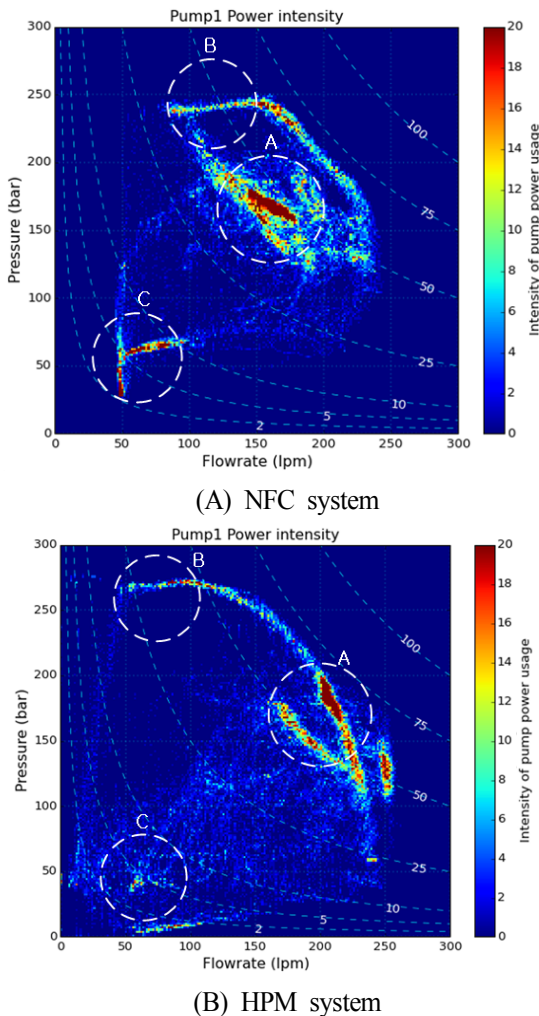


Fig. 12 Comparison intensity of pump power usage

Fig. 12은 굴삭 작업을 20 cycle 진행하는 동안 front 펌프(pump1)의 power 사용 빈도를 보여주는 압력-유량 그래프이다. 내부의 점선은 일정한 Power line(kW)을 나타낸다. A 영역은 주로 흙파기 작업 등에서의 고마력 운전 영역을 나타내며, HPM 펌프의 동작 마력은 약 70 kW로써 50 kW 영역에서 동작하는 NFC 시스템보다 약 20 kW 만큼 큰 힘으로 흙파기 작업을 수행한다. 고압 작업 영역인 B 영역에서의 HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 엔진의 net 마력 사용 영역이 확대된 것을 알 수 있다. 또한, C 영역은 대기 상태 등의 저부하 동작 시, 사용되는 저마력 영역으로써, HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 불필요한 동력 손실이 크게 감소하였다.

5. 결론

HPM 시스템은 굴삭기의 효율과 조작성 향상을 위해 폐식형 MCV와 HPV에 의해 사관을 직접 제어하는 고응답 전자 제어 펌프를 사용하여, 굴삭기 joystick 신호, 펌프의 사관각도 그리고 토출 압력 신호를 입력 받아 유량, 압력, 마력, 최소 압력 제어(4 loop logic) 중 최적의 제어 모드를 자동 선택하여 제어하는 펌프 전자 제어 시스템이다. 개심형 MCV를 사용하며, 압력 regulator에 의해 유량을 간접 제어하는 펌프를 사용하는 NFC 시스템의 경우, 대기 중에도 불필요한 동력 손실이 펌프 제어를 위해 필연적으로 발생하고, 제한적인 펌프 응답성으로 인해 초기 동작 또는 정지 시 높은 압력 peak가 발생하게 된다. 또한, 기계식 feedback 방식으로 제어되는 펌프의 마력 제어의 경우, 엔진의 동력을 최대한 효율적으로 사용하지 못한다는 단점이 있다. 반면, HPM 시스템은 전자 제어를 통해 시스템에 요구되는 최적의 마력 제어를 통하여 유압 시스템 효율을 증가시키며, 별도의 추가 밸브 장치 없이 펌프 압력 제어만으로도 peak 압력 감소가 가능하다.

따라서 본 논문에서는 시스템 분석 tool을 통하여 HPM 시스템의 특성을 분석하였으며, 굴삭 작업 효율 시험을 통하여 HPM 시스템은 NFC 시스템에 비해 효율이 약 13.7 %p 증가하여 연비 향상이 가능하며, 높은 부하 작업 시, 펌프의 더 높은 power 영역을 사용함으로써 생산성 증가가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 대기 모드에서 불필요한 동력 손실이 감소하였고, 마력 제어를 통해 엔진 동력의 사용 영역이 확대되는 것을 확인하였다.

References

- 1) M. Scherer, M. Geimer and B. Weiss, "Contribution on Control Strategies of Flow-On-Demand Hydraulic Circuits", Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp.531-540, 2013.
- 2) H. Murrenfoff and S. Gies, Fluidtechnik für mobile Anwendungen, Shaker Verlag, Aachen, pp.233-251, 2008.
- 3) J. Grabbel and M. Ivantysynona, "An Investigation of Swash Plate Control Concepts for Displacement Controlled Actuators", International Journal of Fluid Power, Vol.6, No.2, pp.19-36, 2005.
- 4) N. D. Manring, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, New York, pp.387-424, 2005.
- 5) M. Vukovic, J. Schmitz and J. Zhou, "Systematic Data Analysis for Optimal System Design", Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference, pp.155-163, 2018.
- 6) C. S. Joo and M. Stangl, "Application of Power Regenerative Boom system to excavator", Proceedings of the 10th International Fluid Power Conference, pp.175-184, 2016.
- 7) H. Inoue, "Development of Hybrid Hydraulic Excavators", Proceedings of the 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp.93-97, 2014.
- 8) Y. Yu, E. J. Jeong and K. K. Ahn, "Review of Energy Saving Technology of Hybrid Construction Machine", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.91-100, 2018.