

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.2.105

소형 굴삭기용 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템의 특성

김준식[†] · 이승현^{*} · 이재원^{**}
(2007년 9월 5일 접수, 2008년 1월 11일 심사완료)

The Characteristic of the Hydraulic Control System with Bleed-off Center Type of a Compact Excavator

Jun Sik Kim, Seung Hyun Lee and Jae Won Lee

Key Words : Hydraulic Control System(유압 제어 시스템), Compact Excavator(소형 굴삭기) Control Region(제어 영역), Bleed-off Center Type(브리드 오프 센터형)

Abstract

In this study, the characteristics of the hydraulic control system with bleed-off center type of a compact excavator were analyzed using developed analysis program. From the parametric analysis, the effects of each factor were revealed. Through the simulation with varying parameters, the system parameter effects on the controllable region and the pump pressure and load pressure variations were studied. The results were compared with the experimental ones. The results and discussions of the present paper could aid in the performance improvement of a hydraulic control system of a compact excavator.

기호설명

$A_{ij}(x)$: 포트 i 와 j 사이의 개구면적 [m^2]	P_i : 포트 i 에서 압력 [bar]
A_i : i 포트의 수압면적 [m^2]	Q_i : 포트 i 에서 유량 [l/min]
B : 점성 감쇄 계수 [$Nsec/m$]	Q_{ij} : 포트 i 에서 j 로 흐르는 유량 [l/min]
C : 누유 계수 [$m^5/sec/N$]	V_i : i 포트의 콘트롤 볼륨 [m^3]
D, d : 스펴 직경 [m]	x : 이동변위 [m]
K : 스프링 계수 [N/m]	β : 유체의 체적탄성계수 [N/m^2]
M, m : 질량 [Kg]	ϕ : 펌프의 사판각도 [$^\circ$]
N : 유압 펌프의 회전속도 [rad/sec]	

1. 서론

소형 굴삭기 등의 건설기계는 장소가 협소한 도심 건설 현장에서 굴삭 작업, 정지 작업, 덤프 작업 등 다양한 목적으로 사용되고 있으며, 그 활용도가 점점 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 건설기계의 유압 제어 시스템은 건설

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 대학원 자동화공학과

E-mail : jskim@kinst.ac.kr

TEL : (032)496-4730 FAX : (031)496-4618

^{*} 한양대학교 메카트닉시스템공학과

^{**} 인하대학교 기계공학과

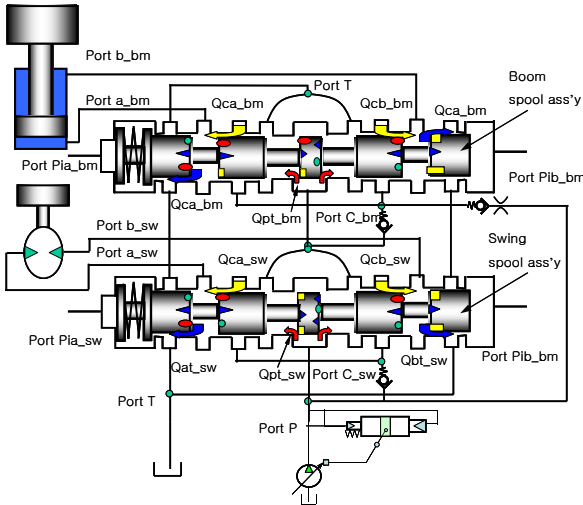


Fig. 1 Modeling of a hydraulic control system with bleed-off center type

기계의 작업 성능 및 효율을 지배적으로 결정하고 있으며, 유압 제어 시스템의 회로 구성 형식 및 내부 유압 부품의 구조에 따라 작업 성능 및 에너지 효율 등이 다양한 형태로 나타난다. 소형 굴삭기가 우리 주변 생활 환경에 다양한 형태로 많이 사용되고 있음에도 중대형 굴삭기에 비해 그 기술적 연구는 많이 진행되어 있지 않았다. 기존 연구에서는 기본 회로 분석 등의 기초 연구 수준에서 수행되어 왔고, 유압 부품의 내부 구조에 따른 작업 성능 및 동적 부하 변동에 따른 작업 성능과 에너지 효율 등을 구체적으로 제시하지 않았다. (1-4)

본 논문에서는 현재 건설기계 제작사에서 많이 채택되고 있는 소형 굴삭기용 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템을 모델로 선정하여 기본 성능을 해석하고 시스템의 성능을 지배하는 방향 제어 밸브의 스톱 노치 형상에 따른 시스템 영향을 구체적으로 분석하고, 동적 부하 변동에 대한 시스템의 응답 특성 및 부하 변동에 따른 동력 효율과 동력 손실 등을 고찰하여 소형 굴삭기의 저진동 및 에너지 저감, 조작성 용이성등의 성능 개선 설계에 참고가 되도록 하였다.

2. 시스템의 해석

2.1 소형 굴삭기용 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템의 구성

본 논문에서 사용한 소형 굴삭기용 브리드 오프

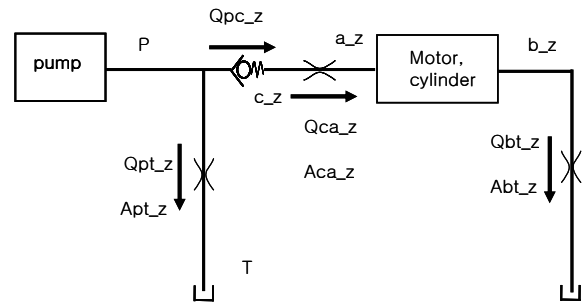


Fig. 2 Modeling of a hydraulic control system with bleed-off center type

센터형 유압 제어 시스템은 붐 실린더, 암 실린더, 버킷 실린더, 선회 모터, 주행 모터, 브리드 오프 센터형 방향 제어 밸브, 가변 용량형 펌프 등으로 Fig. 1 과 같이 구성되어 있다.

시스템의 부하 측으로 유입되는 유량은 방향 제어 밸브의 스톱 변위에 따라 펌프에서 토출되는 유량을 탱크로 브리드 오프되는 량을 제어함으로써 제어된다. 본 논문에서 각 액추에이터의 제어 방식이 크게 다르지 않으므로 붐 실린더의 작동에 대해서 해석하고 고찰한다.

2.1.1 방향 제어 밸브 모델링

스풀은 파일럿 압력에 의해 이동되고 스톱의 이동에 따라 각 포트간의 개구 면적은 변하게 된다. 각 포트간의 개구 면적은 스톱 랜드형 및 엔드밀형, 드릴형, 브이펀치형등으로 구성되어 있다. 브리드 오프 센터형 방향 제어 밸브는 중립위치에서 펌프 포트는 열려 있고 각 스톱의 펌프 공급 라인은 직렬과 병렬로 연결되어 있다. 시스템의 정상 상태에서의 유량 및 개구 면적은 식 (1)과 식 (2)와 같고, 각 포트의 유량방정식은 식 (3)과 식 (4)와 같이 표시된다. (5)

$$Q_{ij-z} = C_d A_{ij-z}(x) \text{sign} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{i-z} - P_{j-z}|} \quad (1)$$

$$A_{ij-z}(x) = A_{\text{land-z}}(x) + \alpha_{ij-z} A_{\text{endmil-z}}(x) + \beta_{ij-z} A_{\text{drill-z}}(x) + \gamma_{ij-z} A_{\text{vpunch-z}}(x) \quad (2)$$

$$\frac{dP_p}{dt} = \frac{\beta}{V_p} (Q_p - Q_{pt-z} - Q_{pc-z}) \quad (3)$$

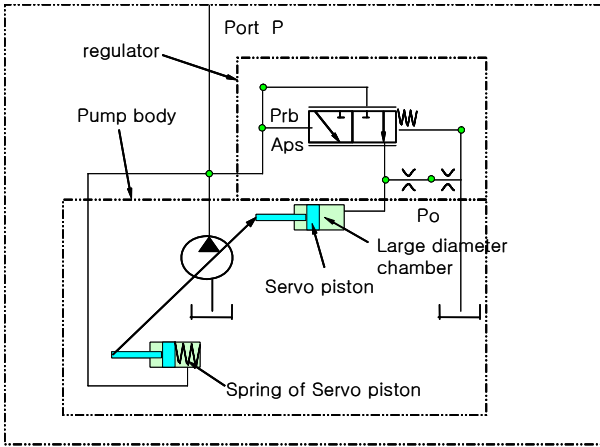


Fig. 3 Hydraulic circuit of variable pump

$$\frac{dP_{c-z}}{dt} = \frac{\beta}{V_c} (Q_{pc-z} - Q_{ca-z}) \quad (4)$$

본 논문에서 첨자 i 와 j 는 압력 포트명을 지칭하고 z 는 스톨명, C_d 는 유량 계수, ρ 는 유체 밀도, $\alpha_{ij-z}, \beta_{ij-z}, \gamma_{ij-z}$ 는 노치 갯수를 의미한다. 방향 제어 밸브의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$P_{pia-z} A_{pia-z} - P_{pib-z} A_{pib-z} = m_{sp-z} \ddot{x}_{sp-z} + B_{d-z} \dot{x}_{sp-z} + K_{d-z} x_{sp-z} \quad (5)$$

여기서 A_{pia-z}, A_{pib-z} 는 각각 A_{pia} 와 A_{pib-z} 의 스톨 수압 면적이고, $m_{sp-z}, B_{d-z}, K_{d-z}$ 는 방향 제어 밸브의 스톨 질량, 스톨 댐핑 계수, 스톨 스프링 상수이다.

2.1.2 가변 용량형 유압 펌프

본 논문에서는 펌프의 내부 부품 정보를 알 수 없는 관계로 현장에서 5 톤급 굴삭기에 사용되고 있는 모델을 근거로 펌프 회로상의 특성을 고려하여 모델링 하고 특성을 파악한다. Fig. 3 은 가변 용량형 유압 펌프의 유압 회로이다. 초기에는 서보 피스톤의 스프링에 의해 펌프 사판각이 최대가 되어 펌프 토출 유량이 최대가 된다. 펌프 압력이 상승시 레귤레이터 압력 Pra 가 형성되고, 레귤레이터는 스프링력을 이기고 우측으로 밀리어 펌프 압유는 레귤레이터를 통해

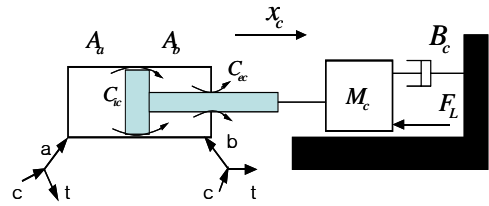


Fig. 4 Modeling of hydraulic cylinder

대경실로 압유가 공급된다. 이때 펌프 압력 Pra 를 증가시키면 레귤레이터는 Pra 와 레귤레이터 스프링의 힘 평형에 의해 개도가 결정되고, 그 밸브 개도량은 서보 피스톤의 대경실 압력을 상승시키게 된다. 서보 피스톤은 좌측으로 밀리게 되고 사판각은 감소되며 펌프 토출 유량은 최소 범위 내에서 감소하게 된다. 펌프 압력이 과도하게 상승되어 최대가 되면 레귤레이터가 우측으로 최대 위치로 밀리게 되어 대경실로 고압이 형성되어 서보 피스톤은 좌측으로 밀리며 펌프는 최소 유량을 토출하게 된다. 따라서, 유압 펌프는 펌프 압력에 따라 펌프의 유량을 최대 범위 내에서 제어할 수 있고, 과도한 펌프 압력 상승시 펌프 유량을 최소로 제어하는 유량 컷 오프 특성을 나타낸다.

본 펌프는 펌프 압력과 레귤레이터의 스프링의 힘 평형에 유량이 제어될 수 있도록 하였다. 펌프 포트에서 펌프의 유량 관계는 식 (6)과 식 (7)과 같다.

$$Q_p = D_p N \cos \varphi, \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 14.6^\circ \quad (6)$$

$$\dot{\varphi} + \tau_{c1} \varphi = \tau_{c2} A_{ps} P_p \quad (7)$$

여기서 D_p 는 펌프 배제용적, N 은 펌프 회전속도, φ 는 펌프 사판각, τ_{c1}, τ_{c2} 는 시정수, A_{ps}, A_{pss} 는 유량 제어 레귤레이터의 수압면적이다.

2.1.3 유압 실린더

편 로드 유압 실린더의 각 포트에서 연속 방정식과 힘 평형 방정식은 식 (8)~식 (10)과 같다.

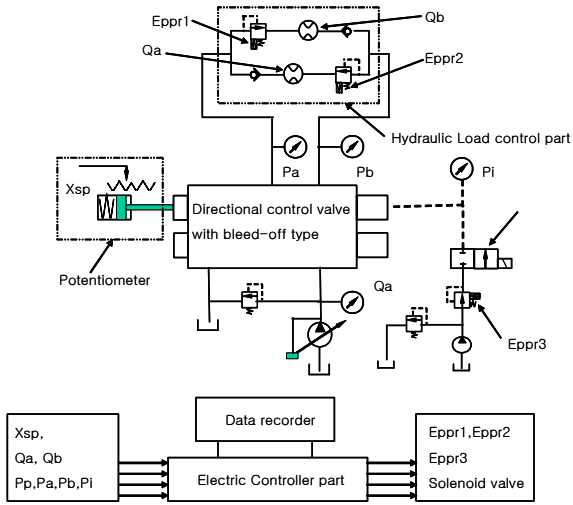


Fig. 5 Schematic diagram of experiment

$$\frac{dP_a}{dt} = \frac{\beta}{V_{ao} + A_a x_c} (Q_{ca} - Q_{ca} - A_a \dot{x}_c - C_{ic} (P_a - P_b)) \quad (8)$$

$$\frac{dP_b}{dt} = \frac{\beta}{V_{bo} - A_b x_c} (Q_{cb} - Q_{cb} + A_b \dot{x}_c - C_{ec} P_b + C_{ic} (P_a - P_b)) \quad (9)$$

$$A_a P_a - A_b P_b = M_c \ddot{x}_c + B_c \dot{x}_c + F_L \quad (10)$$

여기서, V_{ao}, V_{bo} 는 초기부피, F_L 는 실린더에 작용하는 외력, C_{ic}, C_{ec} 는 피스톤의 누설계수이다. M_c, B_c 는 실린더 질량과 점성계수이다.

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

3.1 시뮬레이션 및 실험

앞 절에서 유도한 각 부품들에 대한 해석 결과를 이용하여 모델링하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템의 기본 특성을 해석하고 고찰하였다.

본 논문에서는 방향 제어 밸브의 개구 면적 변화에 대한 시스템 특성 민감도와 작업 조건의 변화 즉 부하 압력 크기의 변화에 대한 시스템의 제어 영역의 변화 및 동력 효율 등에 어떠한 영향을 미치는지 규명하였고 부하 압력의 주기적 변동에 따른 시스템의 안정성을 해석하였다. Fig. 5 는 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템에

Table 1 Major parameters for the hydraulic control system with bleed-off center type

Components	Parameter	Value
Oil	Bulk modulus	9×10^7 [N/m ²]
	Density	870 [kg/m ³]
Directional control valve	Diameter of Spool	0.0150 [m]
	Spring constant	145000 [N/m]
	Mass of spool	0.6 [kg]
	Discharge coeff.	0.61
	Damping coeff.	0.015
Hydraulic cylinder	Total mass	80 [kg]
	sectional area, a	0.0254 [m ²]
	sectional area, b	0.087 [m ²]
	Maximum stroke	0.6 [m]
Variable discharge pump	Volumetric displacement	0.250×10^{-4} [m ³ /rev.]
	Rate rpm	2000 [rpm]

대한 특성 시험의 개념도이다. Fig. 5 와 같이 시험 장치를 구성한 후 Eppr3 를 이용하여 피스톤 압력을 서서히 증가시켜 주면 방향 제어 밸브의 스톱은 서서히 이동하고 이때 각 변수들의 데이터를 감지하여 데이터 레코더를 통해서 기록하게 된다. 실린더의 부하는 방향 제어 밸브의 상단에 설치된 Eppr1 과 Eppr2 를 사용하여 설정하도록 되어 있다. Table1 은 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템에 대한 주요 제원인데 각 제원들은 실제 사용하고 있는 제원과 최대한 동일하게 취했다. 여기서 스톱 간극에 의한 누유량은 매우 작아서 무시하였고, 유량 계수는 유체가 비압축성이라고 가정하여 일반적인 유압유의 유량계수인 0.61 을 사용하였다.

Fig. 6 은 붐 스톱에 대해 현재 건설기계 제작사에서 사용되고 있는 스톱의 각 노치 치수들을 측정하고, 프로그램화하여 계산한 개구면적선도이다. Fig. 7 은 본 논문에서 사용한 유압 펌프의 특성 곡선이다.

Fig. 8 ~ Fig. 9 는 부하 압력이 100bar 인 경우의 붐에 대해 개구면적 Fig. 7 를 가지고 시뮬레이션한 결과와 실험 결과를 고찰한 것으로 실험 결과와 시뮬레이션 결과는 대체로 잘 일치하고 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 에서 방향제어 밸브의 변위가 5mm 이하까지 증가함에 따라

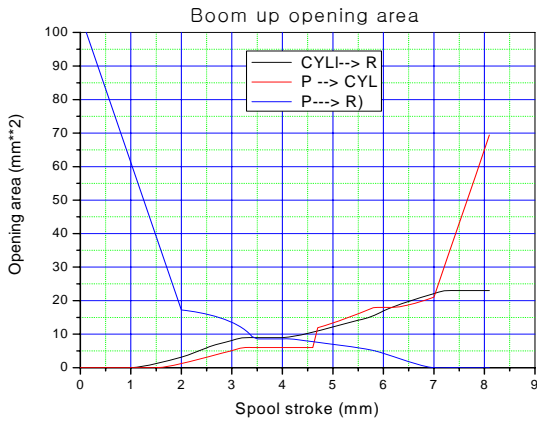


Fig. 6 Opening areas for three dominant passing lines in boom spool

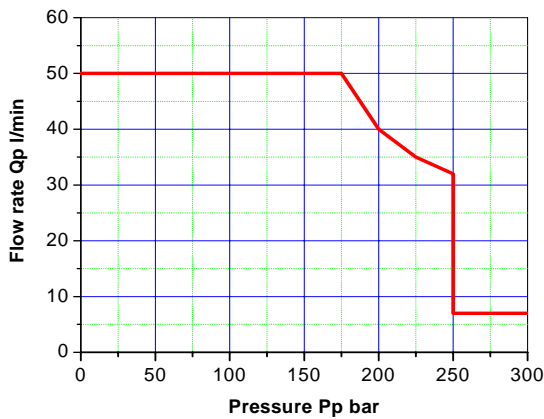


Fig. 7 Output flow rates according to the pressures of pump

브리드 오프되는 개구면적이 점점 작아지고 반대로 붐 실린더 측의 개구면적은 점점 증가하지만 붐 실린더의 부하에 의한 실린더 입구 측 압력이 펌프 압력이 증가하기 전까지는 펌프 압력이 부하 압력보다 상대적으로 낮아 실린더 측으로 유량이 유입되지 못하므로 실린더는 작동하지 못하게 된다. 이 경우 펌프 토출 유량은 대부분 브리드 오프되어 탱크로 빠져 나가기 때문에 동력 손실이 많게 된다. 이 상태에서 방향 제어 밸브의 변위를 증가시키면 브리드 오프 면적이 더욱 작아져 펌프 압력이 부하 압력까지 상승하게 되므로 실린더 측의 부하 압력을 이기고 실린더 측으로 유량이 유입되어 실린더가 작동하게 되고 방향제어 변위를 더욱 증가시키면

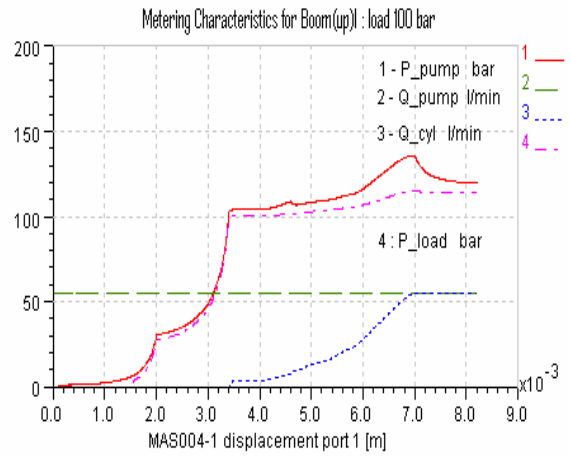


Fig. 8 Simulation results of static characteristics of bleed-off center type

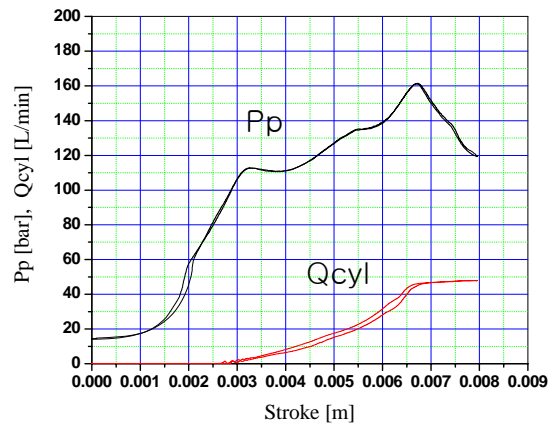


Fig. 9 Experimental results of static characteristics of bleed-off center type

펌프 유량은 브리드 오프되는 양은 작아지고 대부분 실린더 측으로 유입되어 실린더의 작동이 원활하게 된다.

3.2 해석 결과 및 고찰

3.2.1 압력 크기에 대한 제어 영역

Fig. 10 은 부하 압력이 50 bar, 100bar 와 150bar 일 때 붐에 대해 펌프 압력과 실린더로 유입되는 유량 특성을 고찰한 그래프이다. Fig. 10 은 스톱 변위 2~6mm 에서 브리드 오프량을 많이 감소시킨 형태로서 부하 압력이 증가함에

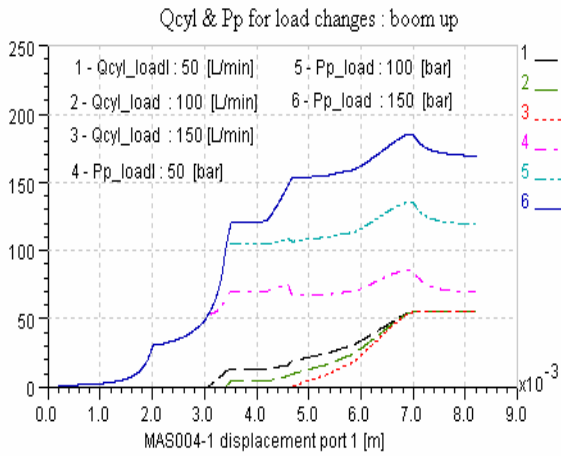


Fig. 10 Flow rate characteristics due to variations of load pressure

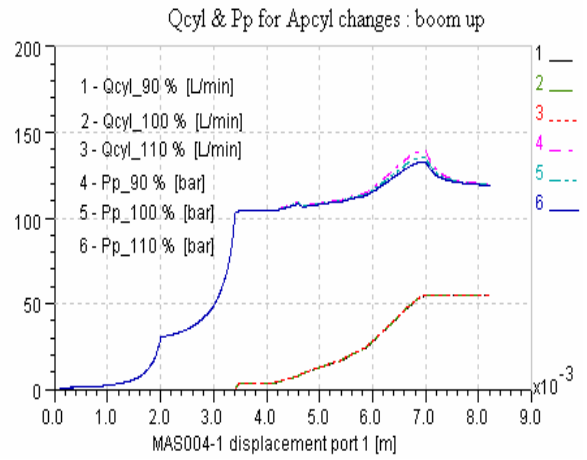


Fig. 12 Flow rate characteristics due to variations of opening area Apc : boom up

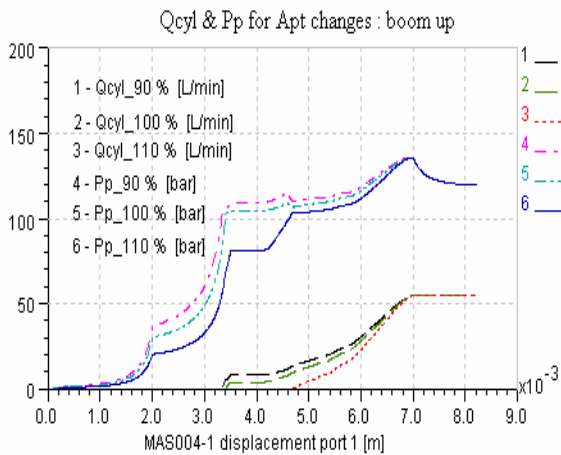


Fig. 11 Flow rate characteristics due to variations of bleed-off opening area : boom up

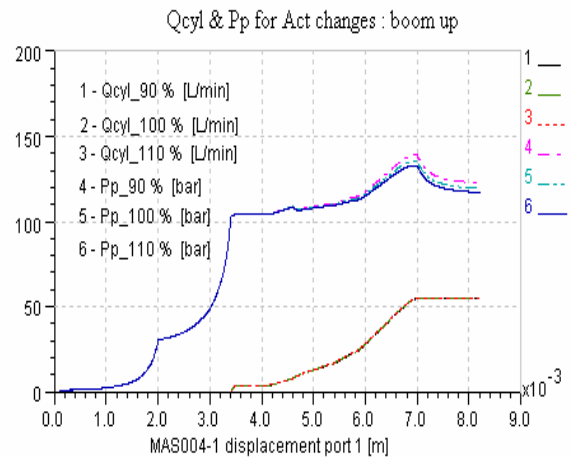


Fig. 13 Flow rate characteristics due to variations of opening area Act: boom up

따라 실린더로 유입되는 유량의 제어 범위가 작아지고 브리드 오프량이 작아지는 스톱 범위 5~7mm 에서 펌프 압력이 부하 압력보다 과도하게 높아 손실 동력이 커지는 특성을 나타낸다. 이는 부하 압력이 커짐에 따라 제어 영역이 협소해져 작동기의 제어성이 떨어짐을 의미한다.

3.2.2 개구면적 변화에 대한 특성

Fig. 11 은 부하 압력 100 bar 상태에서 펌프 포트에서 탱크 포트 사이의 개구 면적(Apt)를 90%, 100%, 110%로 변화 시키면서 유량 차이를 고찰한 것이다. Fig. 11 에서 동일한 스톱 범위에 대해

Apt 개구 면적이 커질수록 제어 영역이 작은 범위를 나타내며, 실린더 측으로 유입되는 유량이 감소하여 작동기 속도가 감소됨을 알 수 있다. 이는 Apt 가 커짐에 따라 펌프측 유량이 탱크로 브리드 오프되는 양이 많아져 실린더로 유입되는 유량이 작아지기 때문이다. 따라서 동일한 스톱 범위에 대해 Apt 개구 면적이 크기에 관계없이 같은 제어 영역이 범위를 나타내며, 실린더 측으로 유입되는 유량이 차이가 없어 작동기 속도가 같음을 알 수 있다.

Fig. 12 와 Fig. 13 은 부하 압력 100 bar 상태에서 각각 펌프 포트에서 실린더 포트 사이의 개구

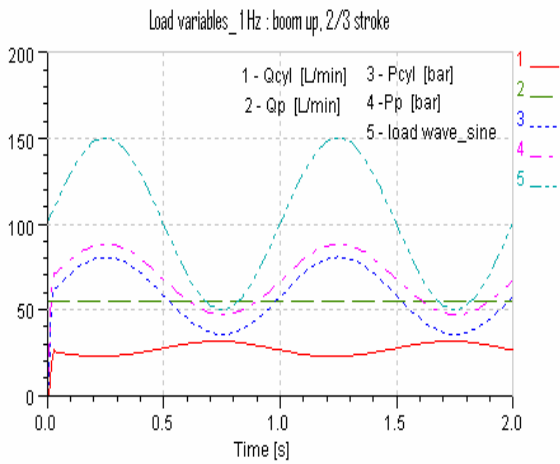


Fig. 14 System characteristics for variable load pressure in boom up spool stroke 67%

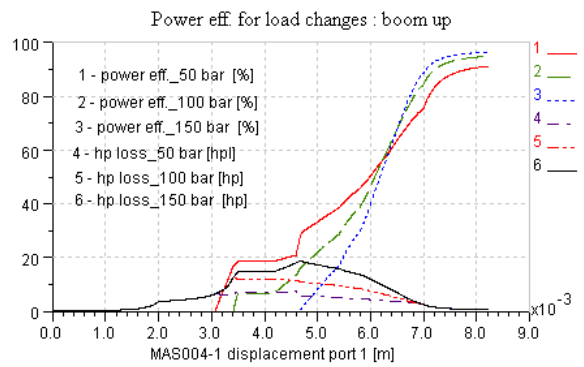
면적(Apc)과 실린더 포트에서 탱크 포트 사이의 개구면적(Act)를 90%, 100%, 110%로 변화시키면서 유량 차이를 고찰한 것이다. 약간의 펌프 압력 변화를 나타내며 특별한 특성 변화를 갖지 않는다.

3.2.3 부하변동에 시스템 응답특성

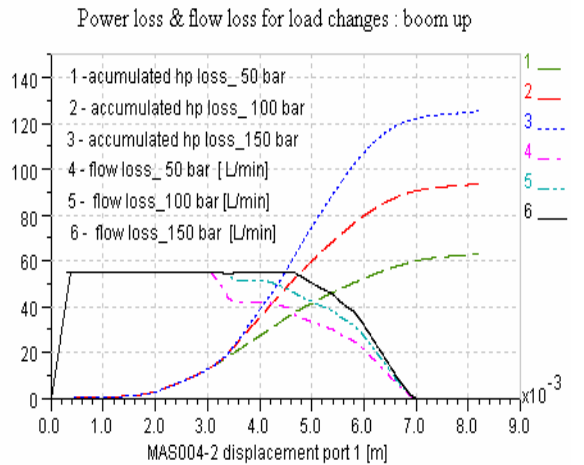
Fig. 14는 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템의 붐 스톱을 약 67%를 절환시킨 상태에서 부하 압력을 1.0Hz로 변동시키면서 펌프 유량 및 압력, 실린더 측 유량 및 압력을 고찰한 것이다. 부하 변동에 따라 펌프 토출 유량 및 압력은 입력과와 같은 과정으로 맥동하지만 실린더 측으로 유입되는 유량 및 압력은 안정스럽게 제어됨을 알 수 있다. 이는 펌프측의 맥동량이 방향 제어 밸브의 브리드 오프 개구면적(Apt)을 통해 탱크로 브리드 오프 되기 때문이며, 부하 압력의 변동에 관계없이 작동기 속도가 일정하게 제어되는 시스템으로 외란에 대한 시스템 안정도가 높음을 나타낸다. 따라서 운전자는 작업 조건, 즉 부하 압력의 변동에 영향이 적어 작동기의 진동이 작은 상태에서 안정한 속도감으로 안락하게 운전할 수 있음을 의미한다.

3.2.4 부하 변동에 따른 동력 효율

Fig. 15은 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템의 붐 스톱에 대해 부하 압력의 변동에 따른 동력 손실 및 동력 효율을 고찰한 것이다. 붐 스톱의 경우 부하 압력의 크기에 커짐에 따라 손실 동력 구간이 커지며 손실 동력 또한 커짐을



(a) Power efficiency & loss



(b) Accumulated power loss & flow loss

Fig. 15 Power efficiency and loss of boom up in load changes

알 수 있다. 이는 높은 부하 압력에서 동력 효율이 나쁘고 장비의 연비가 나쁨을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 방향 제어 밸브의 노치 형태 및 부하 변동 상태를 고려하여 소형 굴삭기용 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템의 성능을 해석하였고, 주요 설계 인자들의 변화가 유압 제어 시스템의 성능에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템에서 방향 제어 밸브의 스톱 변위의 임의의 위치에서 작동기의 작업 조건이 변하더라도 작동기로 유입되는 유량은 맥동없이 일정하게 유입되어 운전자의 안락한 운전이 용이하다.

(2) 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템에서는 부하의 크기가 커짐에 따라 일반적으로 제어 영역이 협소하게 되어 운전자의 작업의 용이성이 떨어진다.

(3) 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템에서 펌프 포트에서 탱크 포트에 가는 라인의 개구면적의 크기 변화는 제어 영역과 펌프 압력, 동력 효율에 중요한 영향을 미친다.

(4) 브리드 오프 센터형 유압 제어 시스템에서 부하 변동에 따른 동력 효율은 방향 제어 밸브의 스톱 변위 7-8mm 구간에서는 90% 수준으로 양호하나 스톱 변위 6mm 이하에서는 동력효율이 낮아 에너지 절감에 대한 개선 설계가 요구된다.

후 기

본 논문은 제일유압(주)과 공동으로 과제를 수행 하였습니다. 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Borghi, M., Milani, M., Paltrinieri, F. and Zardin, B., 2005, "Studing the Efficiency of a Compact Excavator Primary Workgroup Hydraulic Control System," SAE TP 2005-01-3618.
- (2) Christianson, R., Hamkins, E., Sagaser, T. and Duppong, G., 1997, "Performance Optimization of Compact Excavator with Open-Center Hydraulic Circuit," SAE TP 972769.
- (3) Lee, Y. J., Lee, S. H. and Song, C. S., 2000, "A Study on the Characteristic Analysis of the Load-Sensitive Hydraulic Pump Control System," *Journal of KSPE*, Vol. 17, No. 4, pp. 148~154.
- (4) Yosimura, Y. and Matsushita, K., 1994, "A Study of Leveling Control of Hydraulic Shovels by the Load Sensing System," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol.60, No.578, pp.3349~3356.
- (5) Watton, J., 1989, *Fluid Power System*, Prentice Hall.