

다중 작동기를 가진 부하감응 유압서보장치의 포화방지 알고리즘 Anti-Saturation Algorithm for a Load Sensing Hydraulic Servo System with Multiple Actuators

이 춘 호, 최 필 환, 김 철 수 (현대정공 기술연구소)

Choon-Ho Lee, Pil-Hwan Choi, Chul-Soo Kim (HDPIC)

ABSTRACT

A load sensing hydraulic system is widely used to military and commercial mobile applications for its high running efficiency. Although its concept and general control schemes are well known, the poor maneuverability of simultaneous multioperation of actuators still remains to be solved. In this paper, a new control algorithm is proposed to prevent the saturation of the system in such operating conditions, in which the total required flowrate of actuators may exceed the pump supply flowrate. The effectiveness of the proposed algorithm is verified through experiments.

Key Words : Load sensing control (부하감응제어), Anti-saturation(포화방지)

1. 서 론

차량 유압장치의 가동중 동력손실을 줄이고 시스템 효율을 향상시키기 위한 노력이 계속되어, 초기 사용된 고정 용량형 펌프에서 가변 용량형 펌프로의 변경 사용이 일반화되었으며, 그 후 요구부하에 맞춰 동력을 공급하는 부하감응 유압장치가 널리 사용되게 되었다. 이 부하감응 제어방식은 유압 액추에이터의 부하압력을 펌프의 조정기로 궤환하여 부하에 필요한 유량을 부하압력보다 조금 높은 압력(일반적으로 약 20 bar)으로 공급하도록 펌프 토출유량을 제어하여 시스템의 동력 손실을 최소화할 수 있기 때문에 차량 유압장치등에 널리 사용되어지고 있다. 그러나 이 제어방법을 사용한 유압장치는 시스템 특성상 쉽게 불안정해질 수 있기 때문에 시스템 설계시 주의를 요한다. 이 제어 장치의 안정성과 관련하여, Backe⁽¹⁾ 및 Krus⁽²⁾ 등은 펌프 조정기로의 부하압력값의 궤환을 파일럿 압력이 아닌 전기신호에 의해 제어하므로써 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있음을 보였으며, Nakamura⁽³⁾는 굴삭기에 이를 적용하기 위한 시스템 모델을 만들고 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

굴삭기등과 같이 복수의 액추에이터가 동시 작동되는 장치에 있어 부하감응 제어방식을 사용할 경우 부하가 작은 액추에이터로 펌프 유량이 편류될 수 있다. 이것을 방지하기 위해 각 액추에이터

유량제어밸브 선단에 압력보상밸브를 설치하여 각 유량제어밸브의 압력 강하량을 동일하게 유지시키고, 이를 통하여 유량제어밸브의 제어유량이 밸브의 개도량에 비례하게 할 수 있다. 그러나 복수의 액추에이터를 복합구동시 액추에이터 소요유량의 합이 유압펌프의 최대 토출유량을 초과하면 펌프 토출유량의 부족상태가 발생한다. 이러한 펌프의 포화현상(Saturation)이 발생되면 유압 펌프로부터 토출된 유압유는 저압측 액추에이터에 우선적으로 흐르고 고압측 액추에이터로는 충분한 유압유가 공급되지 않아 액추에이터의 복합구동을 효율적으로 할 수 없게 된다.

상업용 장비에서는 포화현상이 발생하면 숙달된 작업자의 감각에 의하여 이를 감지하고 유량제어밸브의 개도명령을 수동으로 적절히 줄여 포화현상을 해소시키며 작업한다. 그러나 군용 장비의 경우 작업자에게 이와 같은 높은 숙련도를 기대하는 것은 다소 무리가 있다. 따라서 군용 장비를 개발함에 있어 작업자의 숙련도와 무관하게 유압 펌프의 최대 공급유량의 범위내에서 항상 안정되고 정밀한 작업이 이루어지도록 하기 위해서는, 여러 액추에이터를 동시에 작동시킬 때 발생하는 포화현상을 자동적으로 감지하고 이를 방지하므로써 시스템의 성능 및 액추에이터 조작성을 향상시키는 제어방법의 개발이 필요하다. 포화현상의 발생을 방지하기 위하여 압력보상 밸브의 설계를 변경하거나 밸브등을

추가하는 방법등이 개발되어 소개되고 있으나 밸브 설계가 매우 어렵고 복잡하여지는 단점이 있다.

본 연구에서는 컴퓨터에 의해 제어되는 전자유압식 부하감응 제어방법을 사용한 군용 유압식 굴삭장비를 대상으로, 하드웨어에 대한 설계변경 없이 복수의 액츄에이터를 동시 구동시킬 때 발생하는 포화현상을 자동으로 감지하고 이를 방지할 수 있는 제어 알고리즘을 제안하고 실험을 통하여 제안 알고리즘의 효용성을 검증한다.

2. 시스템 개요

2.1 시스템 구성

전자유압식 부하감응 유압장치의 제어방법에 관한 연구를 위하여 제작한 실험장치를 Fig.1에 나타내었다. 유압펌프는 두 유량제어밸브(CMX1, CMX2)로부터 최대 부하압력을 되먹임 받아 공급압력이 최대 부하압력보다 설정차압 만큼 높게 유지되고, 설정마력을 넘지 못하도록 부하감응 제어와 전마력 제어를 실시하였다. 포화가 발생하지 않은 경우에는 유량제어 밸브의 비례제어 솔레노이드를 구동하기 위하여 입력값에 비례하는 신호를 출력하게 된다. 부하압력과 토출압력의 측정값을 이용하여 포화현상의 발생여부를 판별하고 포화현상이 발생하면

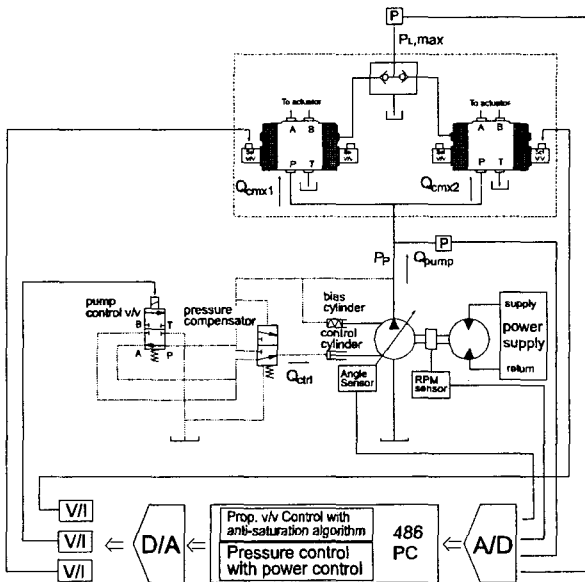


Fig. 1 Experimental apparatus

포화방지 알고리즘에 따라 기준 밸브 구동신호를 감소시켜 출력하게 된다. 실험장치 구성부품의 제원은 아래와 같다.

Power supply	: 350 hp
유압펌프	: 98 cm ² /rev
유량제어밸브	: 100 l/min
D/A, A/D	: 12bit
압력센서	: 700 PSI/Volt
VI converter	: 70 mA/Volt
Angle sensor	: 1.11 mA/Deg
486 IBM 호환기종 컴퓨터	

2.2 시스템 모델링

유압펌프와 밸브사이의 제어용적에 대한 유량 연속 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{V_c}{\beta} \dot{P}_p = Q_{PUMP} - Q_{CMX1} - Q_{CMX2} - Q_{ctrl} - Q_{leak} \quad (1)$$

유량제어 밸브 CMX1은 유체력을 이용하여 밸브 양단의 압력차에 무관하게 입력신호에 비례한 유량이 흐르도록 설계된 밸브⁽⁴⁾로써 식(2)와 같이 근사화 될 수 있다.

$$Q_{CMX1} = K_1 I_1 \quad (2)$$

CMX2 밸브는 내부에 부하압력 피드백 파일릿 라인을 가진 것을 제외하고는 CMX1 밸브와 동일하다. 이 밸브는 부하압력이 증가함에 따라 유량이 감소하고 최대압력에서 유량은 영(0)이 된다. 최대압력의 크기는 입력신호의 크기에 따라 변화하고 식(3)과 같이 근사화된다.

$$Q_{CMX2} = K_2 (I_2 - K_{pl} P_L) \quad (3)$$

Q_{PUMP} 는 회전속도 및 사판각에 비례하는 값으로 식(4)와 같다.

$$Q_{PUMP} = 2R_p \tan \phi A_p N (\omega / 2\pi) \quad (4)$$

Fig.2에 펌프 제어시스템의 블록선도를 나타내었다.

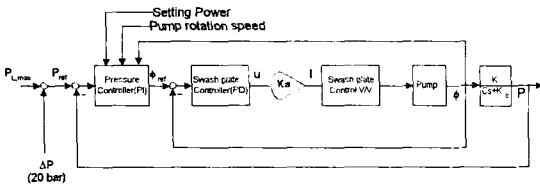


Fig.2 Block diagram of pump control system

3. 알고리즘 설계

포화현상을 극복하기 위하여 펌프의 사판각, 펌프의 토출압력과 부하압력의 신호등을 제환하여 이러한 현상이 발생하는 경우를 감지하고, 펌프사판각이 최대 경사각을 유지하면서도 펌프 토출압력이 최대 부하압력에 대해서 설정차압을 유지하도록 유량제어 밸브로의 입력신호를 조절한다.

3.1 포화감지 알고리즘

포화방지 알고리즘을 수행하기 위해서는 먼저 포화 발생여부를 판단해야 한다. 포화현상이 발생하는 경우는 펌프의 최대토출 유량보다 복수개의 액츄에이터 요구 부하유량의 합이 클 경우로, 이때는 펌프의 토출압력과 최대 부하압력 사이에 설정차압이 유지되지 않는다. 가속 또는 감속시 부하압력의 순간 변화속도가 펌프 사판의 해당 응답속도보다 급격하여 토출압과 부하압력 사이의 설정차압이 유지되지 못하는 경우도 고려하여야 한다.

$$\left(a < \frac{dP_r}{dt} < b \right) \&\& \left((P_r - P_i) < \Delta P_{\text{preset}} \right) \quad (5)$$

위의 식(5)는 포화 상황을 판단하기 위한 것으로 첫번째 조건에서 부하압력의 변화가 매우 급격할 경우는 제외하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 비어스 스프링을 가지는 가변펌프는 사판이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 사판의 시상수 크기가 다르기 때문에 부하압력 변동률의 증가 한계치 $b(+)$ 와 감소 한계치 $a(-)$ 는 다르게 설정하였다. 그리고 두번째 조건은 제어되는 펌프 토출압력이 최대 부하압력에 대해서 설정차압을 제대로 유지하지 못하는 경우를 나타낸다. 이러한 두가지 조건을 동시에 해당하는 경우에 포화방지 제어를 수행하게 된

다. 즉 펌프의 부하감응 제어가 설정차압을 유지하지 못하는 경우는 펌프 토출유량이 부하측의 요구 유량보다 작은 경우나 부하압력의 급격한 변동을 따라가려는 과도응답의 과정에이이다. 즉 위의 조건은 기본적으로 펌프 토출압이 부하압력에 대해서 설정차압을 유지하고 있는가를 조사하며 그리고 그것이 단지 유량의 부족에 기인한 것인지를 판단하게 된다.

3.2 포화방지 알고리즘

위 조건식(5)를 만족하여 포화현상이 발생된 것으로 판단되면 각 액츄에이터의 부하유량을 줄이기 위하여 밸브의 입력을 감소시켜 주게 된다. 이상적인 방법으로는 각 밸브에 인가되는 입력을 측정할 수 있기 때문에 인가되는 입력에 해당하는 밸브의 요구유량을 계산하고 펌프가 토출할 수 있는 유량을 계산하여 동일한 비율로 각 밸브의 입력을 줄여주면 될 것이다. 그러나 실제로는 각 밸브의 입력을 측정하기 어려운 경우도 있고 입력에 따른 밸브의 요구유량을 부하압력의 변화와 관계없이 정확하게 예측하기란 쉽지 않다. 본 연구에서도 Vickers사의 밸브 관련 자료를 토대로 유량을 계산하여 적용하여 보았지만 계산된 유량이 실제 측정된 유량값과는 잘 일치하지 않음을 알 수가 있었다. 따라서 밸브의 입력과 관계없이 포화조건에 해당하면 매 샘플링 주기마다 모든 밸브의 입력을 동일 비율로 감소시켰다.

$$\text{밸브입력}(k) = \text{밸브입력}(k-1) * (1 - \alpha) \quad (6)$$

α 는 샘플링 주기 및 시스템 특성에 따라 설정된다. 일단 포화가 발생하게 되면 펌프 토출압과 최대 부하압과의 차이가 설정된 설정차압을 유지하지 못하고 거의 같게 되며, 이에 따라서 최대 부하압력이 가해지는 밸브 양단의 압력차가 작아져 입력과 무관하게 최대부하가 걸리는 액츄에이터 쪽으로는 유량이 거의 흐르지 못하게 된다. 그리고 위의 포화조건에 해당하지 않는 상태가 되면 즉 완전히 포화로부터 벗어나면 다시 밸브의 입력신호를 원래의 기준입력 상태로 증가시킨다. 본 연구의 실험에 있어서 밸브입력은 모두 램프 알고리즘을 통하여 밸브에 전달되었다. 램프시간은 시스템 특성에 맞춰 변화시켜가며 조정하였다. Fig.3은 포화방지 알고리즘 흐름도이다.

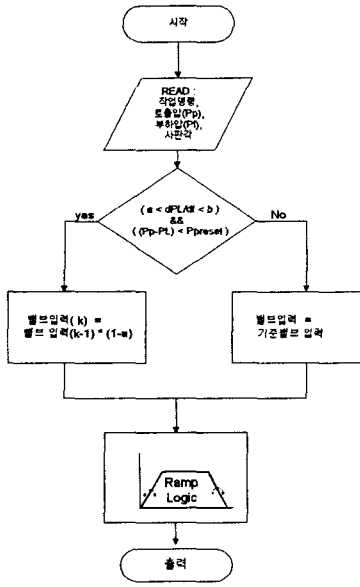


Fig.3 Flowchart of anti-saturation algorithm

4. 실험 결과 및 고찰

제한된 포화감지 및 포화방지 알고리즘의 효용성을 검증하기 위하여 실험을 실시하였다. 포화상황을 만들기 위해서 펌프를 저속으로 회전시키면서 포화방지 알고리즘이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 정현파와 계단신호를 유량제어 밸브에 입력하고 펌프 토출압, 최대 부하압력, 펌프 사판각, CMX1, CMX2 입력신호를 각각 측정하였다.

Fig.4와 Fig.5는 밸브입력을 영(0)에서 최대치까지 증가시키면서 포화방지 알고리즘을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우를 비교한 것이다. 두 경우 모두 펌프사판의 위치가 최대위치(≈ 17.5 도)까지 도달하였고, Fig.4의 경우 포화가 발생하여 펌프 토출압이 부하압력과 설정 부하감응 압력차를 유지하지 못하며 공급압력이 매우 불안정해지는 반면, Fig.5의 경우 밸브입력이 제한되어 설정압력차가 유지되며 공급압력도 안정됨을 알 수가 있다. Fig.6은 포화방지 알고리즘을 사용하고 두 유량제어밸브에서 다른 계단입력을 주었을 경우의 응답결과이다. 입력신호를 동일한 비율로 감소시켜 포화를 해소하고 토출압력과 최대 부하압력의 설정차압을 유지함을 알 수 있다.

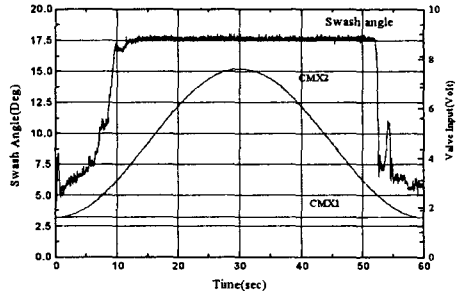
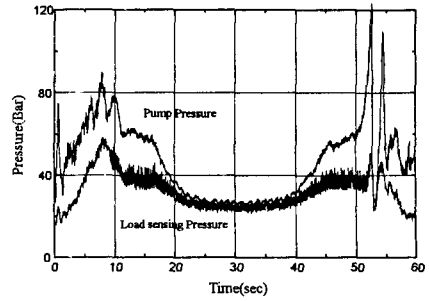


Fig. 4 Sinusoidal response without anti-saturation algorithm

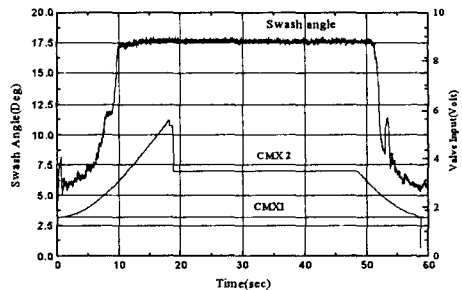
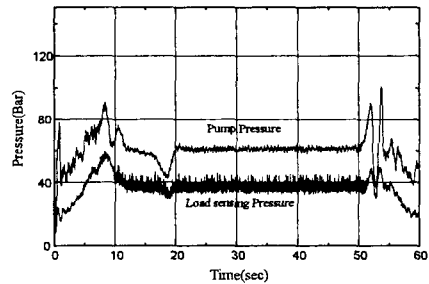


Fig. 5 Sinusoidal response with anti-saturation algorithm

기 호 해 설

C	: 체적 Capacitance
I_1, I_2	: CMX V/V 입력전류
K	: 비례상수
K_a	: 전류/전압 변환 계인
K_c	: 오리피스 저항계수
K_{PL}	: 부하압력 계환계수
K_1, K_2	: CMX V/V 유량계수
N	: 펌프 회전수
P_P, P_L	: 펌프 토출압과 부하압력
P_{PRESET}	: 압력 설정치
Q_{CMX1}, Q_{CMX2}	: 부하유량
Q_{CTRL}	: 제어유량
Q_{LEAK}	: 누유량
Q_{PUMP}	: 펌프 토출유량
R_P	: 펌핑 피스톤까지의 반경
V_C	: 펌프와 밸브간 오일 체적,
β	: 오일 체적 탄성계수
ϕ	: 펌프 사판각

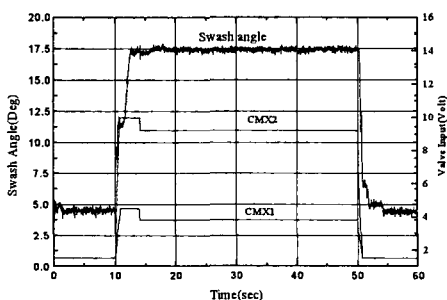
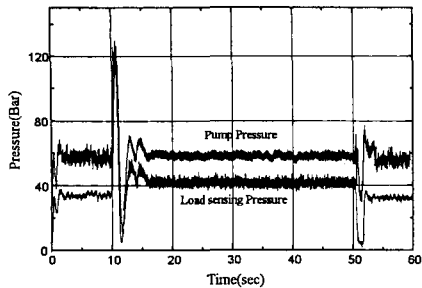


Fig. 6 Step response with anti-saturation algorithm
for CMX I = 4.5Volt, CMX II = 10Volt

5. 결 론

본 연구에서는 전자유압식 부하감응제어 유압강치에 있어, 복수 액추에이터의 동시 복합구동시 발생하는 포화현상을 감지하고 이를 방지하기 위한 제어 알고리즘을 도출하고, 제안 알고리즘의 효용성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 통하여 펌프 토출압력과 부하압력의 측정값을 이용한 포화감지 알고리즘을 통하여 포화현상의 발생여부를 판단할 수 있으며, 제안된 알고리즘을 이용하여 포화현상을 효율적으로 방지할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. W. Backe & B. Zahe, "Electrohydraulic Loadsensing", SAE Technical Paper 911814.
2. Petter Krus & Tomas Persson, "Dynamic Properties of Load Sensing Systems", International Conference on Fluid Power, pp. 261-270, 1987
3. Nakamura, "Simulation Study of Load Sensing Dynamics on Hydraulic Excavator", Fluid Power, pp. 477-482, 1993
4. VICKERS, "CMX Valve - Application Guide : General Description"
5. 한국과학기술원, "차기 전자 유압장치의 제어알고리즘 개발 및 시뮬레이션 프로그램 개발에 관한 연구", 연구보고서, 1996