

# 유압 전자 파일럿밸브를 이용한 섬유송출기 속도제어에 관한 연구

이재구\*, 김도태\*\*, 김성동\*\*\*

## A Study on Speed Control of Textiles Let off Using Hydraulic Solenoid Pilot Valve

Jae Gu Lee\*, Do Tae Kim\*\*, Sung Dong Kim\*\*\*

\* 금오공과대학교 강사 \*\* 경일대학교 기계공학부 \*\*\* 금오공과대학교 기계공학부

### Abstract

Machine of textiles let off is equipment supplying constantly fabrics. Nowadays, as it is replaced band-brake type with hydraulic motor driven type, we looked into characteristic of hydraulic solenoid pilot direction valve (SPDV) for controlling acceleration performance of hydraulic motor. This study deals with controlling the initial speed of textiles let off machine.

Finally, to control the initial speed of hydraulic motor, we controlled the adjustment screw of SPDV by a hand.

Test which was carried out in the laboratory shows that initial speed of textiles let off could be improved by controlling adjustment screw of SPDV. Also, the results of experiment work were compared with dynamic characteristic of other on/off solenoid direction valve (SDV).

**Key words:** Machine of textiles let off (섬유송출기), Hydraulic solenoid pilot direction valve (유압전자 파일럿 변환밸브), Adjustment screw (조정나사), on/off Solenoid direction valve (전자변환밸브), Dynamic characteristic (동특성).

### 1. 서론

시스템의 부하를 회전시키기 위해 유압구동에 의한 방식은 유압펌프와 유압모터의 행정 용적제어에 의하여 구동부의 회전속도 및 회전력을 변화시키면서 동력을 전달하는 장치인 유압전동장치 (Hydrostatic Transmission, HST)는 기본적으로 유압에너지를 발생시키는 유압펌프와 이를 기계적 에너지로 바꾸는 유압모터가 폐회로로써 구성되어 회전동력을 전달하게 하는 장치이다.

이러한 HST는 유압펌프를 작동시키는 엔진이나 전기모터 등이 공급할 수 있는 출력범위내에서 하중의 변화에 따른 무단변속이 가능하고 큰 동력을 제어할 수 있기 때문에 대형차량, 전투궤도차량, 불도저, 굴삭기 등 군용 및 건설 산업용으로 많이 응용되고 있으나 일반적으로 기어형태의 기계식 동력 전달장치에 비하여 효율이 15~20% 정도 낮다는 단점 때문에 이러한 동력전달을 극대화하도록 적절하게 제어한 가변용량펌프-가변용량모터 (PVMV) 시스템으로 다변수 제어 입력과 상태변수들을 간략화한 Crossover 제어 방식<sup>(1)</sup>에 의하여 펌프, 모터의 용적을 한 개의 제어 입력으로 치환하여 PI (Proportional Integral) 제어에 의하여 HST의 효율을 고려한 속도제어<sup>(2)</sup>와 디지털 형태의 밸브인 고속전자밸브를 톱니파형

반송파(Saw - Toothed Carrier Wave)를 이용한 개선된 변조율 조절 방식으로 제어<sup>(3)</sup>함으로서, HST 속도제어 시스템의 과도응답 및 정상상태 응답특성을 개선한 고속전자밸브를 이용한 유압 전동장치의 속도제어에 관한 연구<sup>(4)</sup>는 PC 기반 하에서 또는 고가의 서보개념의 유압기기를 사용하였다. 그러나 실제 산업현장에서는 시스템의 정밀제어 및 빈번한 정지, 동작이 요구되는 시스템에서는 응답성이 빠른 서보개념의 펌프제어가 필요하나 시작과 끝 동작만의 속도제어 및 정밀도를 요하지 않는 경우에는 고가의 유압시스템 보다는 저가의 유압시스템을 요구하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 유압구동에 의한 섬유유출장치 송출장치에 적용시키고자 가격이 저렴하고 시스템회로가 간단하며 유압구동부의 완전한 초기속도를 구하기 위하여 스트로크 조정불이 전자 파일릿 제어밸브를 적용하여 수학적 모델을 확립하고 동특성 실험을 통하여 ON/OFF 솔레노이드 제어밸브와 과도응답특성을 비교, 확인하고자 한다.

## 2. 섬유 송출기 유압시스템의 구성

본 연구에서 대상으로 하는 섬유송출 유압시스템의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다.

시스템 구성에서 구동부 유압모터의 완전한 초기 회전속도를 제어하기 위하여 체크밸브 불이 전자파일릿 변환밸브를 사용하였으며 본 연구의 대상을 SPDV라 한다. 유압 출력장치는 최대출력이 5.5 KW인 전동기에 연결된 토출유량이 0 ~ 35 cm<sup>3</sup>/rev인 가변용량형 피스톤 펌프를 사용하였다. 구동부 유압모터의 초기 작동시 완전한 회전속도를 제어하기 위한 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전자 파일릿 변환밸브의 스트로크 조정나사를 이용하여 유량을 제어함으로써 엔드 캡으로부터의 유량이 충분히 제한되므로 수격작용과 같은 소음을 경감시키고 구동부 액츄에이터의 가속을 조절 가능토록 구성하였다.

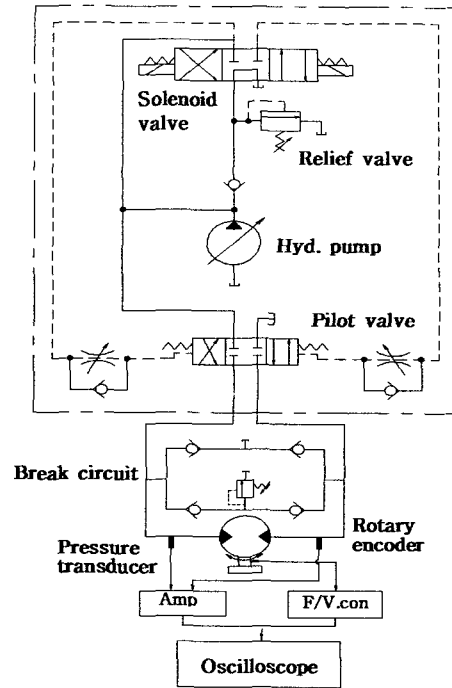


Fig. 1 Configuration of textiles let off system

## 3. 시스템의 해석 및 모델링

Fig. 1과 같이 구성된 섬유송출 유압 시스템에서 실제로 수동으로 제어되는 SPDV의 모델링은 Fig. 2와 같으며 다음과 같은 가정으로써 단순화하였다.

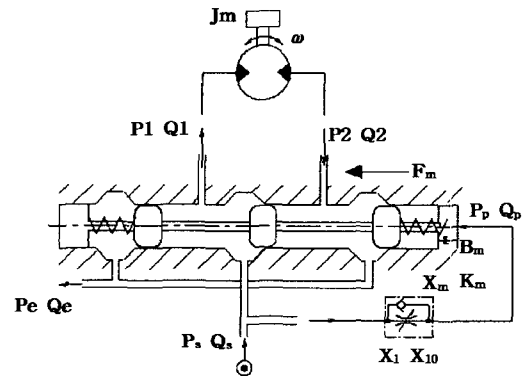


Fig. 2 Configuration of pilot operated valve

- i) 온도에 따른 점성의 변화는 무시한다.
- ii) 밸브 및 구동부에서의 누설 및 마찰손실은 무시한다.
- iii) 전자 파일럿 변환밸브에서의 유체력(fluid force)은 무시한다.

Fig. 2에서 유압모터의 공급측 유량을  $Q_1$ , 유압모터의 귀환측 유량을  $Q_2$ , 펌프에서의 공급유량을  $Q_s$ , 파일럿밸브의 공급 유량을  $Q_p$  라고 하면 파일럿밸브를 통과하는 전체시스템의 유량은 연속방정식<sup>(6)</sup>에 의해 다음 식과 같다.

$$Q_s - Q_p - Q_1 - Q_2 = \frac{V_T}{\beta} \frac{dP_s}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $\beta$ 는 유체의 체적탄성계수,  $P_s$ 는 유압펌프의 공급압력,  $V_T$ 는 전체의 관로용적을 나타낸다. 체크밸브의 오리피스를 지나는 유량은 다음 식과 같다.

$$Q_p = C_d w (X_{10} + X_1) \sqrt{\frac{2(P_s - P_p)}{\rho}} \quad (2)$$

여기서,  $C_d$ 는 체크밸브의 오리피스 유량계수,  $w$ 은 체크밸브의 개구폭,  $X_{10}$ 은 체크밸브의 초기 변위,  $X_1$ 은 스트로크 조정나사 변위량,  $\rho$ 는 작동유의 밀도,  $P_p$ 는 파일럿밸브의 공급압력을 나타낸다.

식(2)에서 스트로크 조정량에 의해 파일럿밸브에 공급되는 유량  $Q_p$ 와 유압모터 입구측의 유량  $Q_1$ 사이의 유량의 변화특성은 연속방정식을 적용하면 다음 식과 같다.

$$Q_p - C_d w (X_{m0} + X_m) \sqrt{\frac{2(P_p - P_1)}{\rho}} = D_m \omega + \frac{V_1}{\beta} \frac{dP_1}{dt} \quad (3)$$

여기서,  $X_{m0}$ 와  $X_m$ 은 파일럿밸브 스톱의 초기 위치 및 변위,  $D_m$ 과  $\omega$ 은 유압모터의 배제

용적과 회전각속도,  $V_1$ 은 유압모터 입구측 관로 용적을 나타낸다.

Fig. 2에서 파일럿 밸브 스톱의 운동방정식<sup>(6)</sup>은 다음 식과 같다.

$$F_m = M_m \frac{d^2 X_m}{dt^2} + B_m \frac{dX_m}{dt} + k_m (X_{m0} + X_m) = A_p P_p \quad (4)$$

여기서,  $F_m$ ,  $M_m$ ,  $B_m$ ,  $k_m$ 은 밸브 스톱을 미는 힘, 스톱의 질량, 점성감쇄계수, 스프링계수를 나타내며  $A_p$ 는 밸브스톱의 단면적을 나타낸다.

초기 운전시 유압모터 구동부에서의 운동방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$D_m (P_1 - P_2) = J_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + B_m \cdot \omega \quad (5)$$

여기서,  $J_m$ 은 유압모터와 부하의 관성모멘트,  $\omega$ 는 회전 각속도를 나타낸다.

#### 4. 실험장치 및 방법

실험은 솔레노이드 밸브 전원 인가시 유압구동모터의 회전속도 특성들을 체크밸브의 스트로크 변위에 따른 결과 선도들을 비교하였으며, 실험장치는 Fig. 1과 같다. 펌프의 구동은 전기모터에 연결된 인버터(inverter)의 교류 전원 주파수를 조절함으로써 펌프속도를 제어하였으며, 액추에이터부의 초기 가속도 성능은 솔레노이드 밸브 전원 인가시 유압모터의 속도와 입구측 압력의 변화하는 모습으로부터 조사되었다. 유압모터의 회전속도는 모터축 측에 장착된 로터리 엔코더에서 측정된 주파수를 주파수/전압 변환기(F/V 컨버터)를 이용하여 검출하였으며 유압모터 입구측 관로에서의 압력측정은 계측시 실험장치의 진동이나 잡음(noise)에 의해 계측 값이 산만해짐에 따라 스트레인 앰프의 증폭기능과 저역통과 필터(차단주파수 10Hz)의 기능을 사용하여 측정하였다. 실험장치에 사용된 기기의 상세한 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of experimental apparatus

Equipment		Specification
Electric power unit	Electric motor	1770 [rpm] 5.5 [kW]
	Inverter	60 [Hz] 1200 [rpm]
Hydraulic system	Hydraulic pump	35 [cm <sup>3</sup> /rev]
	Hydraulic motor	3.75 [cm <sup>3</sup> /rad]
	Relief valve	350 [bar]
Sensor	Rotary encoder	30 [pulse/rev]
	F/V converter	10V [DC] at 0~1.5 [kHz]
	Pressure transducer	250 [bar] 1.5 [mV/V]

### 5. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 인버터 입력 주파수 15Hz로서 초기 동시 전자 파일럿 변환밸브의 스트로크 변위에

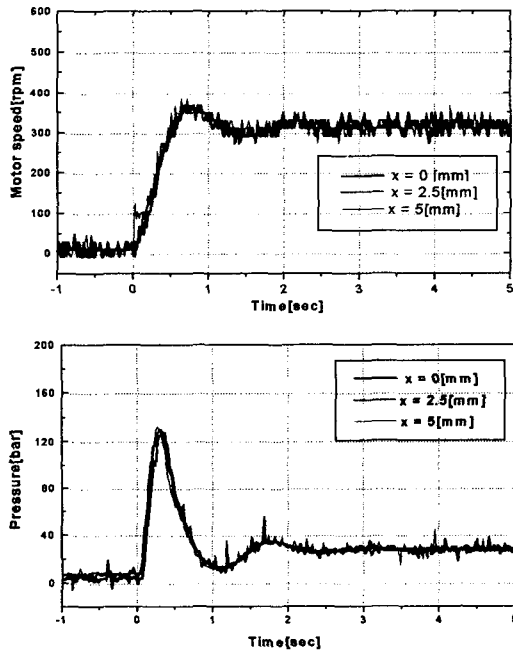


Fig. 3 Comprison of motor speed and pressure when initial action ( $\omega = 15 \text{ Hz}$ )

따른 유압모터의 속도와 입구측 압력을 나타내는 실험결과 선도이다. 초기상태의 스트로크 변위 ( $x = 0\text{mm}$ )에서 최대변위 ( $x = 5\text{mm}$ )일 때의 정상상태에서의 정착시간은 압력선도에서 2.5sec, 그때의 압력은 25bar, 회전 속도 선도에서는 1.5sec와 310rpm를 보이고 있으며, 과도응답에서의 최대상승압은 130bar, 회전속도는 360rpm를 나타내고 있다.

Fig. 4는 인버터 입력 주파수 20Hz로서 스트로크 변위에 따른 결과선도이다. 정상상태에 도달하는 정착시간은 모터속도 선도에서 1.2sec, 압력 선도에서는 2.5sec로서 Fig. 3의 실험결과와 비교할 때 응답특성이 거의 일치됨을 알 수 있으며 과도 응답상태에서의 최대상승압은 170bar, 회전속도는 430rpm를 보이고 있다.

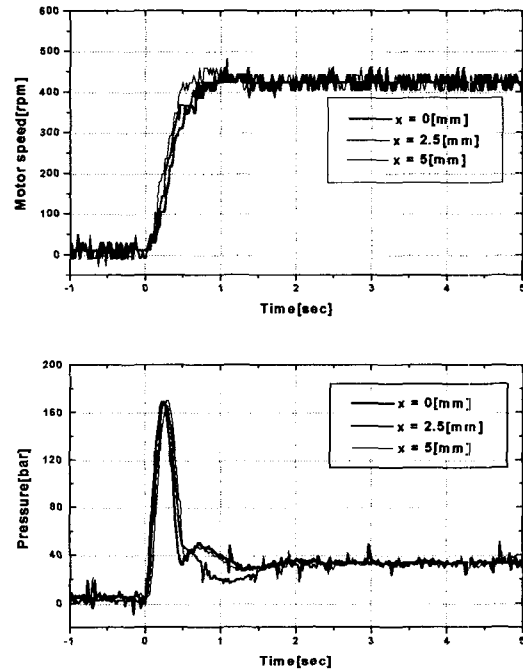


Fig. 4 Comprison of motor speed and pressure when initial action ( $\omega = 20 \text{ Hz}$ )

Fig. 5는 인버터 입력 주파수 25Hz 일 때의 유압모터 초기속도와 입구측 관로 압력을 나타내는 실험결과 선도이다. 모터속도 선도에서 스트로크 변위에 따른 결과선도는 과도응답 상태에서의 응

답시간은 늦어짐을 알 수 있으며, 정상상태에 도달하는 정착시간은 1.8sec, 압력선도에서는 2.8sec로서 인버터 입력 주파수가 증가함에 따라 과도 응답 상태에서의 최대상승압은 40bar, 520rpm으로 증가하고 응답시간은 늦어짐을 알 수 있다.

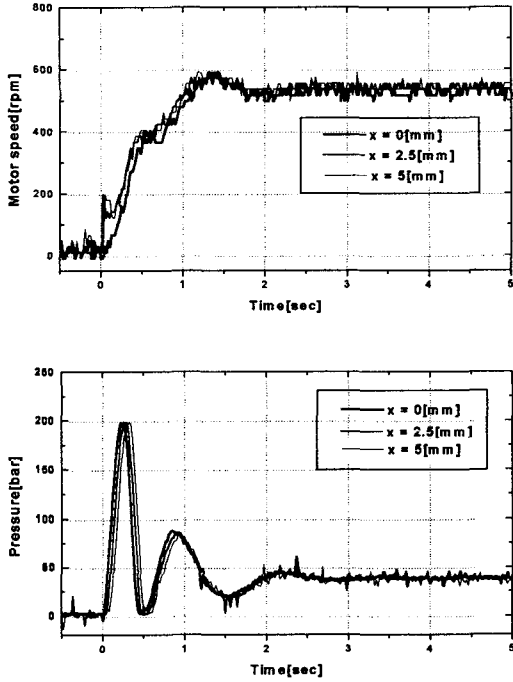


Fig. 5 Comprison of motor speed and pressure when initial action (  $\omega = 25$  Hz )

Fig. 6은 인버터 입력 주파수 15Hz인 경우로, 솔레노이드 ON/OFF 밸브(SDV)와 솔레노이드 파일럿 밸브(SPDV)와의 비교 선도이다. 스트로크 변위  $x = 2.5$ mm로서 과도 응답상태에서는 SPDV가 50rpm, 10bar 정도 적음을 알 수 있으며 정상상태에 도달하는 정착시간은 2.5sec로서 거의 일치됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 인버터 입력 주파수 25Hz로서 과도 응답상태에서 최대 상승압은 10bar, 모터 속도는 70rpm의 차이를 보이고 있는데, 이는 체크밸브의 스트로크 변위에 의해 응답특성들을 개선할 수 있음을 알 수 있다. 정상상태의 정착시간은 모터 속도 선도에서 2.5sec, 압력선도에서는 3sec를 보이고 있다.

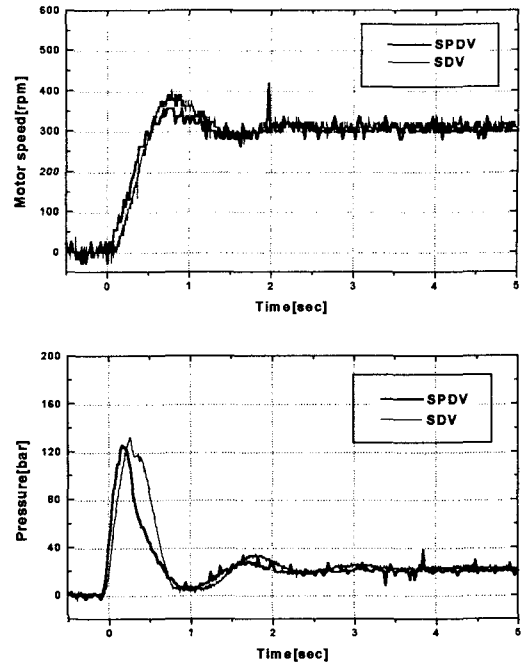


Fig. 6 Comprison of SPDV and SDV when initial action (  $\omega = 15$  Hz )

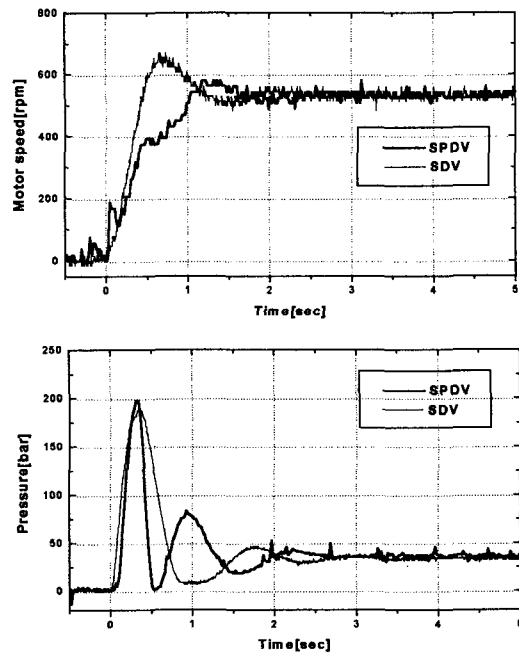


Fig. 7 Comprison of SPDV and SDV when initial action (  $\omega = 25$  Hz )

## 6. 결 론

유압 전자 파일럿 밸브를 이용하여 액츄에이터부의 초기속도를 제어할 수 있는 섬유 송출기 유압시스템을 구성하고 일반적인 온-오프 형식의 전자밸브와 비교, 동특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험 구성상 인버터 입력 주파수 25Hz이하에서의 스트로크 변위에 대한 응답선도와 상승시간은 미비한 차이를 보임으로서, 소유량 범위에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.
- (2) 과도 응답상태에서 SPDV가 SDV에 비해 적은 값을 보임으로서 초기 시동시 상승압에 의한 소음이나 진동현상을 완화시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 고가의 서보 및 비례제어밸브 대신에 저가의 SPDV 사용으로 과도응답 특성이 개선되었음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Neal, T.P., "Electrohydraulic Control of Hydrostatic Transmission", SAE 760687, 1976.
- (2) 전윤식, 장효환, "HST의 효율을 고려한 속도 제어", 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 1188~1193, 1993.
- (3) 박성환, 이진걸, "고속전자밸브를 이용한 유압실린더의 PWM제어에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제12권, 제7호, pp.138~147, 1995.
- (4) Hirohisa Tanaka, Kazuo Araki, "Electro-hydraulic Digital Control of 3-Way On/Off Solenoid Valves," 日本機械學會論文集, 第50巻, 第 458号, pp. 2663~2666, 1985.
- (5) Herbert E. Merritt, "Hydraulic control systems ", John Wiley, pp. 76~83, 1967.

- (6) A. B. Goodwin, "Fluid Power Systems The Macmillan Press LTD, pp.38~54, 1976.