

# 파워시프트 변속기 유압시스템의 PWM 제어 실험 연구

## Experimental Investigation on PWM control of Power-shift Transmission Hydraulic System

김대철 · 이재규 · 강영선 · 이재천

D. C. Kim, J. K. Lee, Y. S. Kang and J. C. Lee

**Key Words** : Power-shift transmission(파워시프트 변속 방식), HSSV(고속전자밸브), PWM(펄스폭 변조)

**Abstract:** The major system of an agricultural power-shift tractor is the transmission, using power-shift. Because the transmission performance depends on the hydraulic control system, the most important aspect of the optimization is the design of the hydraulic control system. This study was conducted to improve a pressure modulation characteristics of the power-shift transmission hydraulic system. It has been tried to replace an existing pressure modulation method with a digital control by using HSSV(High Speed Solenoid Valve). The performance of the PWM control system in power-shift hydraulic transmission has been evaluated by means of experiment.

### 1. 서 론

파워 시프트(power-shift) 트랙터의 핵심 기술은 파워시프트를 이용한 유압 변속기이며, 특히 유압 제어기에 의해 트랙터의 변속 성능이 결정되므로 이러한 유압 제어기를 최적 설계하는 것이 가장 중요하다.<sup>1)</sup> 현재 파워시프트는 변속기에서 유압에 의한 토크 부하의 과도한 변동을 방지하기 위한 연구 및 노력이 계속 되고 있지만 대부분 기계적 동특성의 조합으로 이루어진 모듈레이팅 밸브를 이용하는데 그치고 있다.<sup>2)</sup> 하지만 기계적 동특성만을 이용한 모듈레이팅 밸브로는 최적 유압 곡선을 유도해 내는데 한계가 있으며, 변속기의 사용에 따른 작동유의 온도 상승은 점도 및 비중의 변화를 초래하고, 기구의 노후와 함께 지속적이고 균일한 클러치 압력제어에 악 영향을 미쳐 그 특성이 달라짐은 자명하다.

한편, 최근 전자공학 및 컴퓨터공학 기술의 진보로 각종 센서가 기능 및 내환경성면에서 우수한 성능을 가지게 되었고, 마이컴이 보편화되면서 기계를 전자

회로로 제어하는 메카트로닉스(mechatronics) 기술은 급속도로 발전해 왔다.<sup>3)</sup> 이와 같은 여건에서 힘입어 자동차용 자동 변속기에서는 작동유압을 디지털로 제어하는 기술이 이미 개발되었지만 트랙터의 변속 시스템에 적용된 적은 없었다.

유압 제어 방법의 대체 안으로 고속전자밸브를 이용하는 방법이 있다. 고속전자밸브는 고가로 알려진 서보밸브는 물론, 비교적 저가로 알려진 비례전자밸브보다 가격 면에서 저렴하다. 또한, 그 특성이 오염에 민감하지 않으며 제어방법이 간단하기 때문에 실린더의 위치제어나 압력제어용으로 많이 사용되고 있다. 그 예로서 펌프의 사판각도 제어, 농기계나 트랙터의 위치제어 또는 자동차 변속기, 브레이크장치 등의 압력제어 등 여러 분야에 사용되고 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 파워시프트 변속 시스템의 PWM 제어를 위해 디지털 형태의 밸브인 2방향 고속 전자밸브를 이용하였다. 파워시프트 변속기 PWM 제어 시스템을 디자인 하고, 실험 장치를 구성하였다. 또한, 실험을 통하여 제어 특성을 분석하고 정리하였다.

### 2. PWM 파워시프트 변속 시스템 설계

#### 2.1 파워시프트 변속 시스템

파워시프트 유압 제어 시스템의 기본 구조는 Fig.

접수일 : 2009년 6월29일, 게재확정일 : 2009년 8월 7일

김대철(책임저자): 동양물산기업(주) 중앙기술연구소

E-mail : dckim@tym.co.kr Tel : 041-851-7741

김대철, 이재규, 강영선 : 동양물산기업(주)

중앙기술연구소

이재천: 계명대학교 기계·자동차공학부

1과 같고 클러치 작동시 이상적으로 요구되는 작동 압력은 Fig. 2와 같다.

Fig. 1에서 유로가 열리면 라인 압력은 오리피스를 통과하면서 일차적으로 감소되고 이 압력은 다시 어큐뮬레이터의 스프링 반력과 균형을 이루면서 서서히 증가하여 클러치를 원활하게 작동시킨다. 어큐뮬레이터의 행정이 끝나면 클러치의 작동압력은 라인 압력까지 상승하며, 이때 클러치는 충분한 토크 용량을 확보하게 된다. 반대로 유로가 탱크와 연결되면 오일은 오리피스를 통과하지 않고 바로 체크 밸브를 통하여 신속한 압력 저하가 일어난다.<sup>1)</sup>

이와 같은 기능은 부드러운 유압 곡선을 생성함으로써 변속시 발생하는 과대 토크를 방지하고 변속 충격 및 변속 품질을 개선시켜 궁극적으로 승차감을 향상 시킨다.

## 2.2 PWM 제어 시스템 설계

고속 전자 밸브를 이용한 파워시프트 변속 압력 제어 시스템을 개발하기 위하여 타당한 PWM 시스템을 구상하였다. 파워시프트 트랙터의 유압 변속부로는 전진 및 후진을 제어하는 셔틀(shuttle)클러치, 변속단을 제어하는 쉬프트(shift)클러치, 외부에 동력을 공급하는 PTO(power take off)클러치가 있으며, 이중 특히 셔틀 및 쉬프트 클러치의 압력을 제어하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 전·후진 클러치를 대상으로 PWM 제어 시스템을 설계하고 시험 평가를 통하여 PWM 파워시프트 클러치 압력 제어 시스템 개발 기술을 확보하고자 한다.

제안된 PWM 변속압 제어 시스템은 Fig. 3과 같다. 본 시스템은 2방향 온-오프 고속전자 밸브와 방향 제어 밸브를 이용한 방법으로서, 방향 제어 밸브가 중립시 전·후진 클러치는 탱크와 연결되어 동력 전달이 차단되지만, 방향 제어 밸브가 작동하게 되면, 한쪽 클러치의 유압라인은 압력공급라인과 연결된다. 이때 고속전자 밸브는 수msec단위로 개폐를 반복함으로써 압력 모듈레이션을 실시하게 된다. 유압이 공급되면 클러치의 압력은 스프링의 반발력을 이겨 마찰판과 접촉하며 압력 모듈레이션에 의해 변속 충격을 방지 할 수 있다. 그러나 직관적으로 클러치가 스프링을 밀며 이동할 때는 유량유입에 따른 압력변화가 크지 않으나, 완전히 밀착된 후에는 소량의 유량에도 급격한 압력 상승이나 혹은 압력 제어의 불안정성을 동반함을 알 수 있다. 이는 오일의 비

압축성에 기인하는 것으로 이를 방지하기 위하여 적절한 어큐뮬레이터를 선정하여 장착할 필요가 있다. 어큐뮬레이터의 역할은 클러치의 압력판이 마찰판과 접촉후 압력 모듈레이션을 진행하는 동안 작동하여 압력제어를 용이하게 하며, 디지털 밸브에 의해 발생하는 압력맥동을 감소하는 역할을 한다.

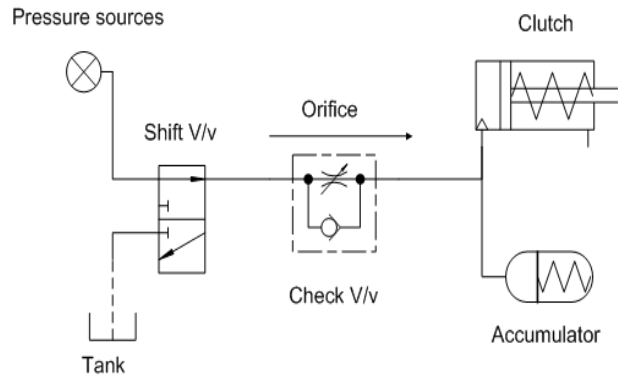


Fig. 1 Hydraulic control system for power-shift transmission clutch

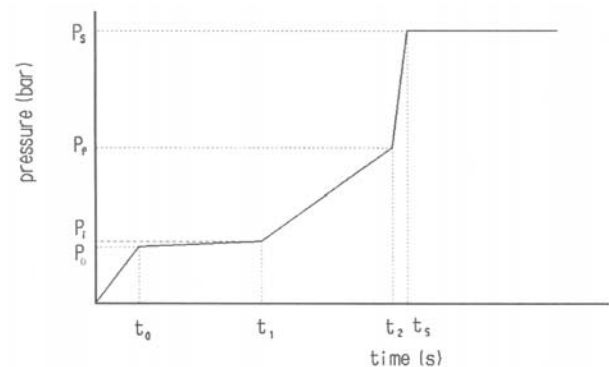


Fig. 2 Required clutch pressure profile

## 3. PWM 파워시프트 변속 시스템 실험

### 3.1 실험 장치 구성

시험 장치는 클러치 부하 시험 장치와 고속전자 밸브블록, 데이터 수집장치 및 계측 소프트웨어와 같이 주요한 4가지 부분으로 구성되어 있다.

#### 3.1.1 클러치 부하 시험기

Fig. 4는 클러치 부하 시험 장치의 회로도로서 유압 모터를 이용하여 클러치 입력축을 구동시키고, 클러치가 접속시 출력축의 유압 모터에 의해 부하를 발생시킴으로서 트랙터 파워트레인의 엔진 및 구동 부하를 모방하였다. 입력 및 출력축에 토크미터와 rpm센서를 장착하여 물리량을 측정하도록 하였으며,

입력축의 구동속도 및 구동력은 오일펌프의 공급유량 및 압력에 의해 결정되며, 출력축 부하량은 릴리프밸브의 설정압력에 의해 발생한다.

것이다. Table 1은 매니폴더 구성품의 제원을 나타내고 있고, Fig. 7 클러치 유압제어 시스템의 신호 계통도를 나타내고 있다.

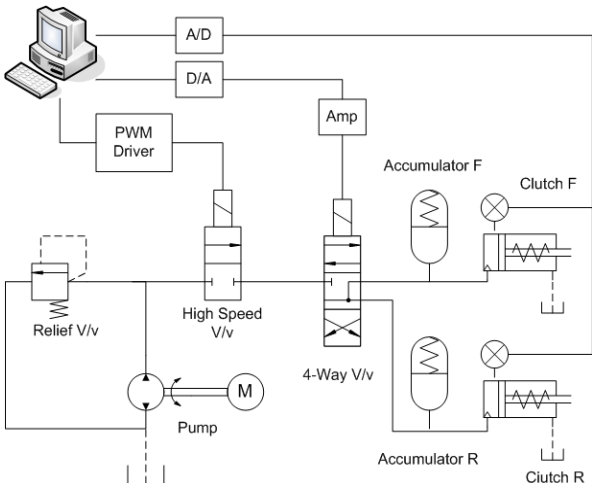


Fig. 3 Proposed PWM hydraulic control system of power-shift shuttle

### 3.1.2 고속 전자 밸브 매니폴더

Fig. 5는 온오프 고속전자밸브, 어큐물레이터, 제어밸브로 구성된 유압제어 매니폴더이며, Fig. 6은 매니폴더 내부의 유압회로를 도시화한 것이다. Fig. 6에서 고속전자밸브 1개와 방향제어밸브 1개를 이용하면 PWM 변속압력 제어시스템 설계안을 방향 구현 할 수 있다. 또한, 별도로 구성된 고속전자밸브를 추가하여 사용할 경우 방향 제어밸브 없이 4개의 고속전자밸브만 이용하여 전·후진 클러치의 압력을 제어할 수 있도록 구성하였다. 이는 향후 클러치 압력 제어시스템을 다양한 설계안으로 구현하기 위한

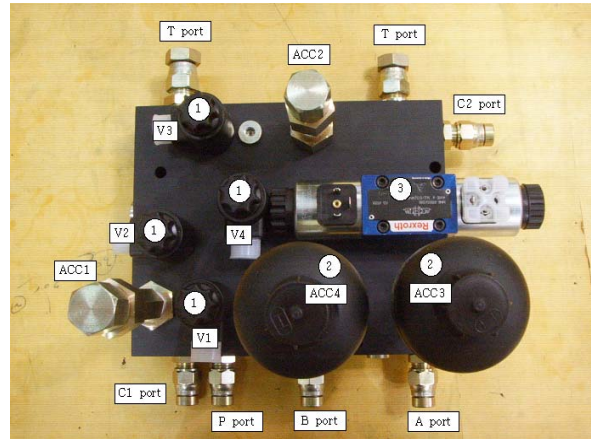


Fig. 5 Photo of clutch control Manifold

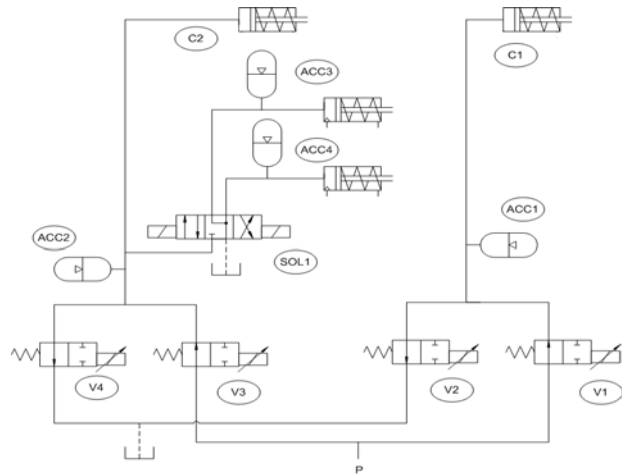


Fig. 6 Hydraulic circuit of clutch control manifold

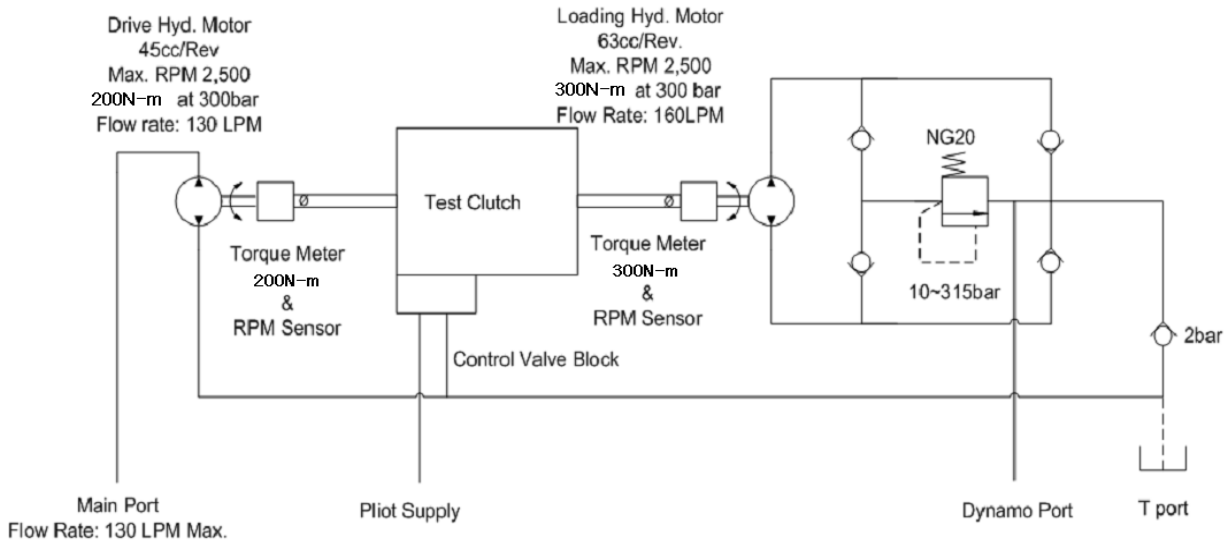


Fig. 4 Schematics of clutch testing device

Table 1 Specification of hydraulic component

Component	Specification
High speed Valve	Pmax : 100bar Qmax : 10lpm
Accumulator	Pre pressure : 1.5bar Normal volume : 160cc
Directional Valve	Pmax : 60lpm Qmax : 315bar

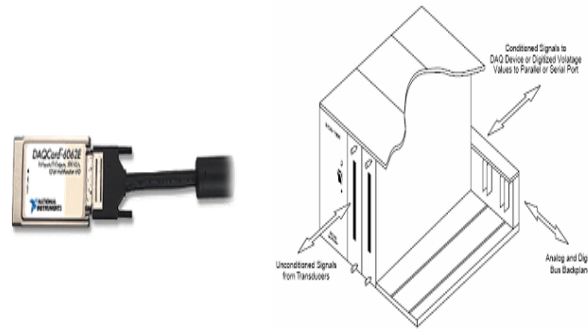


Fig. 8 DAQcard and SCXI-Chassis

### 3.1.3 계측 장치

Fig. 8은 데이터 계측 및 제어를 위해 NI(National Instruments)에서 제공하는 DAQCard-6062E 및 SCXI-Chassis의 모습이다. DAQCard-6062E는 센서로부터 들어오는 아날로그 신호를 컴퓨터가 처리할 수 있는 디지털 형태의 데이터로 변환시켜주며, 입력 범위, 계측 속도(sampling rate), 해상도(resolution)등 주요한 기능이 DAQCard의 성능에 의해 결정된다. SCXI-Chassis는 신호가 분배되는 일종의 터미널 역할을 하며 신호조정(signal conditioning)기능을 탑재하여 신호의 잡음 제거 및 증폭하고, 고전압(high voltage)로부터 시스템을 보호하는 역할을 한다.

### 3.1.4 계측용 소프트 웨어

계측용 소프트웨어는 NI의 LabVIEW를 이용하였으며, 물리량 계측 및 밸브 제어를 실행하도록 프로그래밍 하였다. Fig. 9는 프로그래밍된 LabVIEW의 컨트롤 패널로서 계측데이터의 입력 게인(gain) 및 sampling rate를 입력 할 수 있다. 또한 컨트롤 스위치를 이용하여 방향제어밸브의 전진 및 후진 압력을 제어 할 수 있도록 하였으며, 각 센서로부터 입력되는 신호와 실시간으로 계산된 고속전자밸브의 듀티비(Duty ratio)를 확인할 수 있도록 구성하였다.

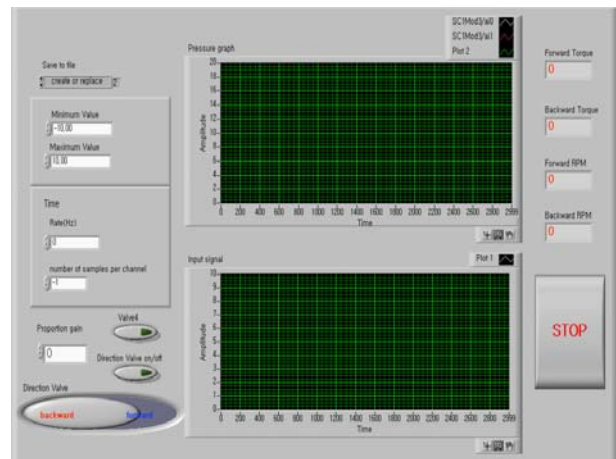


Fig. 9 LabVIEW front panel view of clutch control and measurement

## 3.2 실험 방법

PWM 변속압력 제어 시스템을 위해 Fig. 10과 같이 실험 장치를 구성하였다. 유압펌프를 이용하여 클러치 구동압력 및 부하압력, 밸브 매니폴더에 압력을 각각 공급하였다. 입력 및 출력측에 연결된 토크미터 및 rpm센서, 그리고 밸브블록 출력측에 장착된 압력센서는 DAQ장치를 거쳐 PC로 데이터를 전송하도록 하였다. PC로부터 나오는 밸브 제어 입력 신호는 DAQ 및 PWM Amplifier를 거쳐증폭되며, 고속전자밸브 및 방향제어 밸브를 구동하게 된다. 다음의 순서를 따른다.

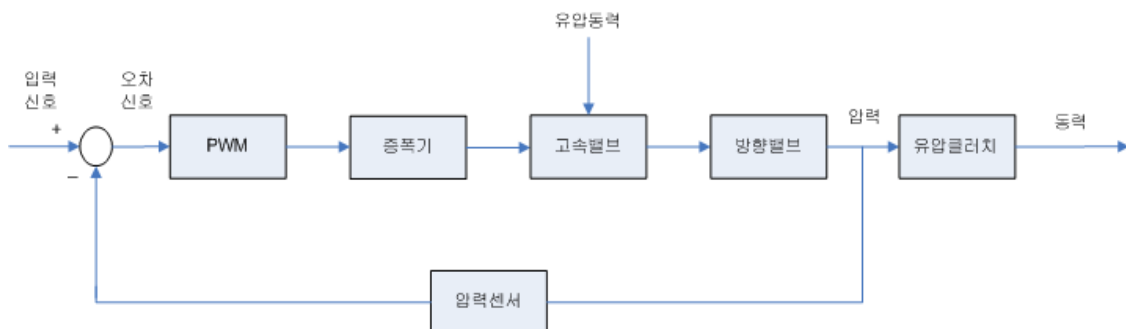


Fig. 7 Block diagram of clutch control system with PWM signal

- 1) 유압 펌프를 이용하여 클러치 부하 시험기 및 밸브블록에 압력을 공급 한다.
- 2) LabVIEW 프로그램을 실행하여 압력변조신호를 계산하고, 이는 다시 증폭기를 통해 PWM 신호로 변환되어 고속전자밸브를 구동시킨다.
- 3) 방향제어 밸브는 클러치와 연결되며, 이때 고속전자밸브는 압력변조를 실시한다.
- 4) 압력센서로부터 피드백된 클러치의 압력을 입력 지령 신호와 비교하여 오차를 측정하고 PWM 듀티를 실시간으로 계산한다.
- 5) 클러치의 압력, 입출력축의 토크 및 회전속도를 측정하여 PC로 저장한다.
- 6) 실험 조건으로 어큐뮬레이터 사용 유무, 비례게인의 변화, 부하량등을 변화시키며 시험을 실시한다.



Fig. 10 Test rig for power-shift clutch test

시험을 각 조건에 맞추어 수행하고, 측정된 데이터를 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다.

어큐뮬레이터의 사용 유무에 따라 제어 성능을 실험한 결과, Fig. 11에서와 같이 어큐뮬레이터를 사용하지 않을 때는 현재의 시스템으로 클러치 변속압 제어가 불가능함을 확인하였다. 또한 어큐뮬레이터를 사용할시 적절한 예압 및 체적을 선정하여야 제어 성능이 우수하며, 그렇지 않을 경우 응답속도가 늦거나, 특정 압력 영역에서 원활한 제어가 되지 않음을 확인하였다.

입력되는 지령 신호 형태에 따라 압력 제어 성능을 평가하였다. 압력을 디지털 제어시 마이컴에 의해 압력 제어가 이루어지며, 차량의 종류 및 동작 상태에 따른 다양한 압력 변조가 이루어 질 것이므로 다양한 입력 신호에 의한 제어 성능을 평가할 필요가 있다. Fig. 12에서와 같이 입력 신호의 기울기를 조

절하여 실험한 결과 신호의 기울기가 어느 정도 커질 때 제어 성능이 불안정해짐을 확인하였다.

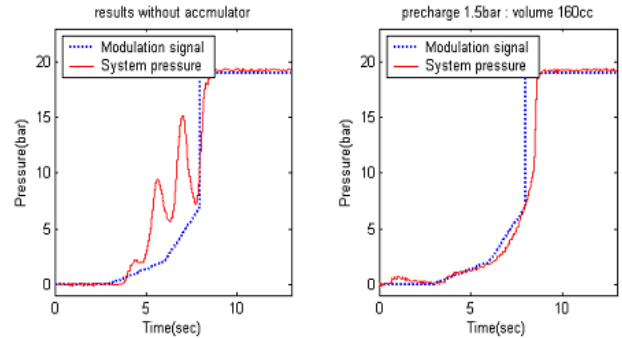


Fig. 11 Experimental results with/without accumulator

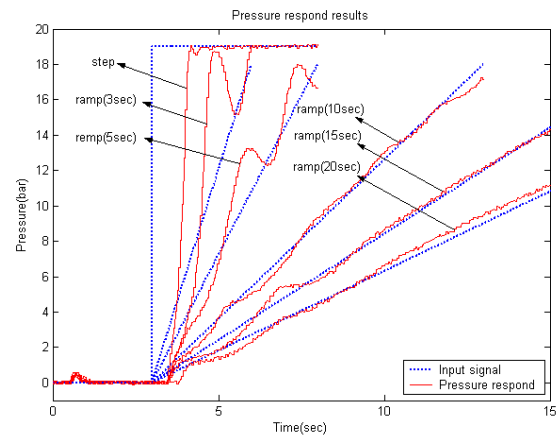


Fig. 12 Pressure response at different input signals

Fig. 13 및 Fig. 14는 고속전자 밸브를 이용하여 클러치 압력을 변조시키고 이때, 입·출력축의 회전속도 및 토크의 변화량을 측정한 것이다. 결과에서 보듯이, 압력 모듈레이션 제어는 우수하며, 모듈레이션시 입·출력축의 토크 크기 및 속도 변화의 특성을 잘 나타내고 있다. 이러한 자료를 이용하여 가속도 및 저크를 분석하면 차량이 출발할 때 발생하는 변속 충격을 알 수 있고 이를 토대로 차량 상태에 따라 변속 충격을 최소로 하는 압력 모듈레이션 신호를 역설계 할 수 있다. Fig. 15는 압력 모듈레이션을 일정하게 하고 차량의 구동 부하를 증가 시키며, 출력축 속도를 측정한 것이다. 트랙터의 정격 부하량 기준으로 10%에서 약 50%까지 부하량을 증가 시키며 속도를 측정한 결과 임의로 설정된 모듈레이션 압력이 정격 부하 30%에서 적합함을 알 수 있다. 이렇듯, 차량 상태에 따라 적합한 모듈레이션 압력을 설계하고 반영하여야 하므로, 이러한 설계 기술을 확보하는 것이 중요하다.



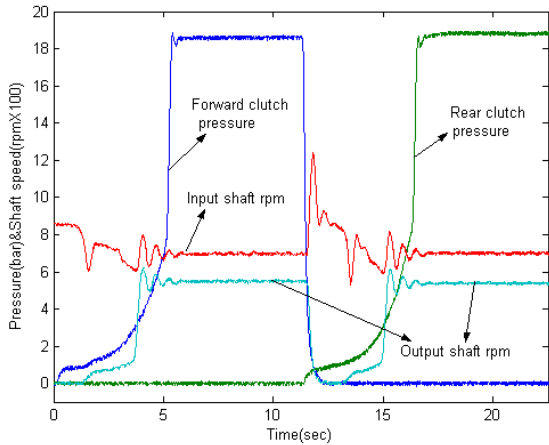


Fig. 13 Shaft speed with pressure modulation

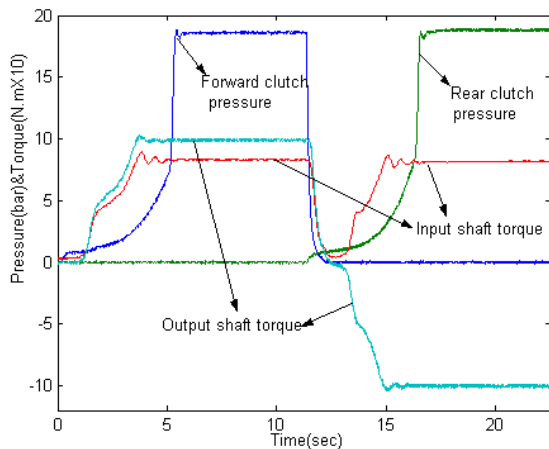


Fig. 14 Shaft torque with pressure modulation

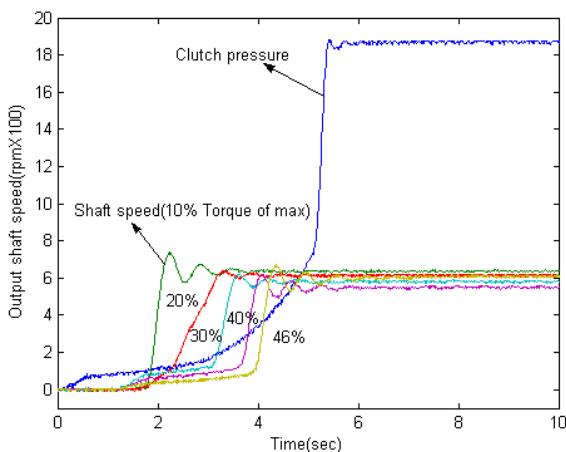


Fig. 15 Shaft speed at different load torque

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 파워시프트 트랙터의 변속압 제어 시스템을 디지털 방식으로 변화하기 위하여 고속 전자 밸브를 이용하고, PWM 제어 시스템을 설계하여 성능 평가를 실시하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 기존 압력 제어 방식은 최적의 압력 파형 및 기대 상태에 따른 다양한 압력 파형 생성이 불가능하므로, 디지털 압력 제어가 이루어 져야 한다.

(2) 고속전자 밸브를 이용한 PWM 파워시프트 변속 압력 제어 시스템을 설계하였다.

(3) PWM 변속 압력 제어 시스템 실험 장치를 구성하고 제어 성능을 평가하였다. 평가 결과 하드웨어 및 소프트웨어적으로 제어 성능을 개선할 수 있으며, 제어 성능은 우수한 것으로 판단된다.

(4) 클러치 부하 시험기에서 계측된 물리량은 차량 상태에 따른 최적의 압력 모듈레이션 신호를 역설계하는데 이용 될 수 있다.

## 참고 문헌

- 1) 김대철, “농업용 트랙터 변속기의 전·후진 파워시프트 변속 특성 해석”, 박사학위 논문, 서울대학교 대학원, pp. 4~49, 2002.
- 2) 남요상, “농업용 트랙터의 파워시프트 변속을 위한 유압 제어 시뮬레이션”, 박사학위 논문, 서울대학교 대학원, pp. 7~8, 2002.
- 3) 이호상, “트랙터용 파워시프트 전·후진 변속기의 설계 변수가 변속 품질에 미치는 영향”, 석사학위 논문, 서울대학교 대학원, pp. 57~58, 2003.
- 4) 박성환, 이진걸, “고속 전자 밸브를 이용한 유압 전동장치의 속도 제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제12권, 제7호, pp. 148~157, 1995.
- 5) 정헌술, 김형의, “2방향 전자밸브의 PWM 신호에 의한 압력제어 특성”, 대한기계학회논문집 A권, 제26권, 제 8호, pp. 1565~1576, 2002.
- 6) 송창섭, 양해정, “PWM 제어에 의한 솔레노이드-유량제어 방식 ABS의 제동압력 특성”, 한국정밀공학회지, 제14권, 제8호, 1997.
- 7) 박성환, 이진걸, “고속전자밸브로 제어되는 전기·유압 서보시스템의 특성 개전에 관한 연구”, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제7권, 제4호, pp. 288~294. 2001.