

# 사판식 유압모터의 특성실험 ( I )

염 만 오\* · 윤 일 로\*\*

(1999년 9월 22일 접수)

## Characteristic Experiment of Swashplate Type Axial Piston Motor ( I )

Yum Man Oh and Yoon Il Ro

**Key Words:** Characteristic Experiment(특성실험), Swashplate Type Axial Piston Motor(사판식 액셀 피스톤모터), Ball Joint(구계수), Leakage Flow Characteristic(누설유량특성), Max. Drag Torque(최대정지토크), Pressure Rise Ratio(압력상승률)

### Abstract

The purpose of this study is to construct a testing equipment with which several characteristics of the domestically developed swashplate type axial piston motor can be tested and to develop a software with which the data from experiment can be stored and can be applied. The results of the study are as follows; 1) The leakage flow and the torque of the motor being stopped is propotional to supply pressure and their relation can be showed by linear equations. 2) The motor movement is not smooth below 50 rpm but it moves smoothly up 170 rpm. 3) When the motor starts or stops, the pressure rise ratio effects decisively to the max. torque.

### 기호설명

- N : 유압모터의 회전수
- P1 : 유압모터 입구압력
- P2 : 유압모터 출구압력
- Q1 : 유압모터 입구유량
- Q2 : 유압모터 출구유량
- T : 유압모터 출력축 토크

### 1. 서 론

유압모터는 작동유의 유체에너지를 받아 부하 축을 연속 회전시키는 유압기기이다. 유압모터는 공급 작동유의 압력을 제어함으로써 부하축의 출력토크를 조절할 수 있고, 유량을 제어함으로써 부하축의 회전속도를 제어할 수 있다. 유압모터

는 전기모터에 비하여 출력/자중비 즉, 출력밀도가 크기 때문에 굴삭기, 크레인 등의 각종 중장비와 항공기, 자동차 등의 수송장비 및 각종 산업기계에 여러 형태로 활용되고 있으며 그 수요도 계속 증가 하고 있다.<sup>(1)</sup> 유압모터의 종류로는 기어형, 베인형, 액셀 피스톤형 등이 있으며 부하의 특징, 작업환경 등에 의하여 그 선택이 결정된다.

액셀 피스톤형 유압모터는 고압, 고속용으로 사용되며 사축식과 사판식(이하 사판식 유압모터라 함)이 있다. 사판식 유압모터는 사축식 유압모터에 비하여 구조가 간단하며 보수 유지가 간편하고 저렴하여 최근 산업계에서 고압, 고속용 유압모터로 사용되고 있다. 사판식 유압모터는 압유가 피스톤을 미는 힘과 피스톤과 접하고 있는 경사판 표면에 수직인 반력과의 합력에 의하여 피스톤 및 실린더 블록을 돌리려고 하는 토크가 생기고 이 토크가 부하 축을 회전시킨다.

사판식 유압모터의 성능향상을 위한 연구결과가 다수 발표되고 있다. 小林俊一<sup>(2,3)</sup>은 사판식 유

\* 회원, 경남대학교 기계자동화공학부  
E-mail:yummanoh@kyungnam.ac.kr  
TEL : (0551)249-2615 FAX : (0551)249-2617

\*\* 경남대학교 대학원 기계공학과

압모터의 피스톤 구부(球部)·Slipper 베어링부의 탄성문제와 윤활문제를 연립시켜 응력분포, 변형과 윤활상태를 규명하였다. 方義<sup>(4)</sup>는 사판식 유압모터의 기동·저속시에 구계수(Ball Joint)부의 마찰 특성을 규명하기 위해 구계수부를 회전시켜 마찰특성을 계측하는 방법을 제안하였다. 小林俊<sup>(5)</sup>은 사판식 유압모터의 기동·저속시에 성능개선을 목적으로 피스톤과 실린더보어간의 마찰력을 구하기 위해 피스톤·실린더를 탄성체로 가정하여 해석 및 실험에 의한 평가와 검정을 행하였다. 松本和幸<sup>(6)</sup>은 사판식 유압모터의 기술·개발자료를 제공할 목적으로 실험에 의해 사판식 유압모터의 실제 작동 조건에서 구계수부의 마찰 특성을 정량적으로 파악했다. 또한 Williamson<sup>(7)</sup>은 유압모터 내부의 각 습동부의 거동은 파악하지 않고 유압모터를 하나의 블랙박스로 하여 유압모터의 기동·저속시의 특성을 파악했다.

사판식 유압모터의 국내 수요는 그다지 많지 않아 대부분 수입에 의존하여 사용하여 왔으나 최근 기존의 유압기기 생산업체에서 독자적인 모델을 개발한 상태이며 따라서 이에 관한 특성실험 및 연구는 없는 실정이다.

본 연구는 국산화 개발한 사판식 유압모터의 성능개선을 위한 기술자료를 제공하고 현장에서 효율적인 활용을 위한 자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 즉 사판식 유압모터의 정지시 및 기동시의 특성을 측정하기 위한 실험장치를 제작하여 재특성을 계측하고, 또한 계측값을 저장 및 활용할 수 있는 소프트웨어의 개발을 목적으로 한다. 또한 향후 최근의 제어이론을 도입하여 사판식 유압모터의 최적 속도제어 및 위치제어에 관한 연구를 계속하고자 하며 이 경우 본 연구에서 얻은 각종 측정값을 활용하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 사판식 유압모터의 구조

국산화 개발한 사판식 유압모터의 주요제원은 Table 1과 같다.

### 2.2 실험장치의 구성

#### 2.2.1 실험장치

유압모터의 성능시험을 위한 실험장치의 개략

Table 1 Main specification of hydraulic motor

Item	Specification
Displacement	45 [cc/rev]
Rated Pressure	150 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Max. Speed	1770 [rpm]
Brake Release Pressure	30 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Rated Output Power	30HP
Swashplate Angle	15°
Number of Piston	9

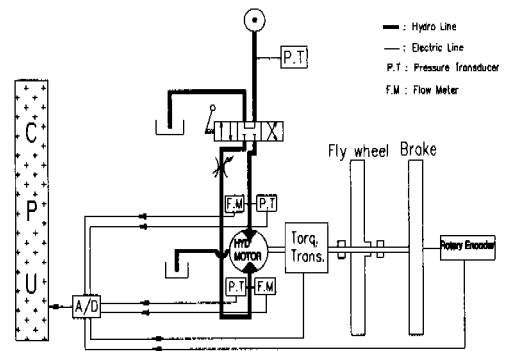


Fig. 1 Experimental apparatus

도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 수동식 방향전환밸브를 사용하여 유압모터의 방향을 제어하며 유압모터의 출구포트에 유량조절밸브를 달아 유량을 제어한다(meter-out회로). 또한 관성력을 크게 하기 위해 모터출력축에 플라이휠을 장착하였으며, 토크를 변화시키기 위해 브레이크장치를 장착하였다. 모터의 입·출구 포트의 압력과 유량은 압력트랜스듀서와 Flow Meter로 측정한다. 드레인 라인의 압력과 온도는 압력트랜스듀서와 온도센서로 측정한다. 모터의 회전수는 모터리 엔코더로 측정하고, 출력축의 부하토크는 토크 트랜스듀서로 측정한다. 각 계측기에서 검출된 데이터는 A/D, D/A변환기(AX5622B)를 통하여 PC에 저장하여 필요에 따라 활용한다. 실험장치에 사용된 계측기의 사양은 Table 2와 같다.

#### 2.2.2 데이터 처리용 소프트웨어 개발

Fig. 1에서 검출센서에서 검출한 데이터의 처리와 전자밸브 및 서보밸브 등의 제어를 위한 소프

**Table 2** Specification of sensors

Sencer	Model	Maker	Characteristics
Pressure Transducer	Z/744-01 ZA	SENSOTEC (미국)	Strain Gage Type Capacity: 2000PSI Output: 0-5 [V]
Flow Meter	FLSC-28	OMEGA Technologies Co.(미국)	Range : 1.75-16GPM Max. Pressure:5000(PSIG) K-Factor : 4100(Pulse/Gal)
Rotary Encoder & F-I Converter	ENB-500 -3-3	(주)AUTO-NI CS(한국)	Encoder : 500 Pulse F.I Converter : 0-4000Hz Output : 0-20mA Linearity:± 0.15%
Torque Transducer		(주)대성 (한국)	

트웨어를 개발하였으며, 사용언어는 BORLAND C++ 3.2로 하였다.

개발 소프트웨어의 구성은 크게 A/D 조정부, D/A 조정부, DO, DI조정부, 디스플레이부와 디스플레이 조정부, 데이터취득부, 저장부, 제어알고리즘 선택부로 되어 있다. 각 부분의 기능으로, A/D조정부는 데이터 채널을 선택하고, 센서계인과 옵셋 조정이 가능하도록 구성하였으며, D/A조정부는 D/A 채널 선택과 초기 제어신호값의 조정 및 제어신호의 Delay 시간을 조정할 수 있도록 구성하였다. DO, DI조정부는 각8개 채널중 1개 채널을 선택하여 사용할 수 있도록 구성하였다. 디스플레이부에서는 디스플레이 시간과 출력신호의 범위를 조정하고, 측정데이터를 2개의 그래프에, 제어신호를 별도의 그래프에 실시간 디스플레이할 수 있도록 구성하였다.

2.2.3 실험방법

전기모터를 구동시켜 유압펌프를 가동하고 방향전환밸브로 유압모터의 운동방향을 제어한다.

실험은 먼저 유압모터가 정지한 상태에서, 즉 회전수 0에서 유압모터 입구측 압력을 증가시키면서 각각의 압력에 대해 출력축의 토크 및 유압모터 내부의 누설유량을 유압모터의 드레인라인에서 측정한다.

다음으로 유압모터의 귀환회로에 부착된 유량 제어밸브로 귀환유량을 조절하여 유압모터의 회전수를 변화시키면서 각 회전수에서의 유압모터 입·출구의 압력, 입·출구의 유량(이 경우 입·

출구의 유량차는 누설유량임), 출력축의 토크를 계측한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 누설유량특성

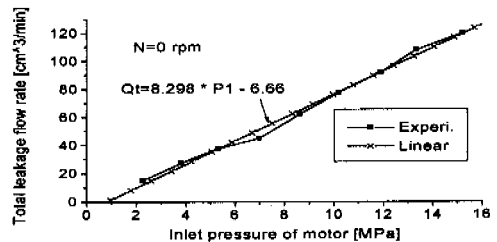
유압모터의 귀환측 유량조절밸브를 전폐하고, 출력축의 브레이크를 작동시켜 유압모터를 정지시킨 상태에서 공급압력을 상승시키며 누설유량을 계측한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 경우 플라이휠은 부착하지 않았으며, 관성효과  $GD^2$ 은 약 11.956[ N m<sup>2</sup>]이다. 또한 작동유의 온도는 28 ± 2 [°C]로 유지하였다.

Fig. 2에서 공급압력상승과 더불어 누설유량은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 2% 오차범위에서 Fig. 2의 실험결과를 1차함수로 근사하면 기울기는 8.298, 절편은 -6.66이다.

3.2 공급압력 변화에 따른 토크특성

유압모터가 정지한 상태에서 유압모터 입구의 압력을 상승시키면서 이에 대응한 출력축의 토크를 계측한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3으로부터 유압모터의 입구측 압력이 약 3.92[MPa]에서부터 압력상승과 더불어 토크는 선형적인 증가 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것을 허용오차 2% 이내에서 1차함수로 근사화하면 기울기 2.8098, 절편 -3.875이었다. 유압모터를 실기에 설치하여 사용하는 경우 이 실험결과를 이용하여 유압모터에 공급되는 압유의 압력에 대응한 출력토크를 쉽게 알 수 있다.



**Fig. 2** Relation between pressure and leakage folw rate

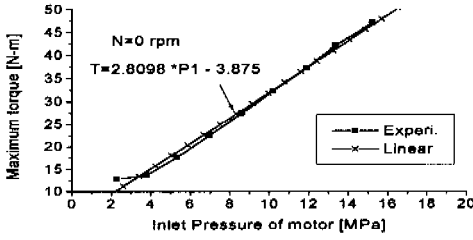


Fig. 3 Relation between pressure and torque

3.3 회전수 변화에 따른 특성

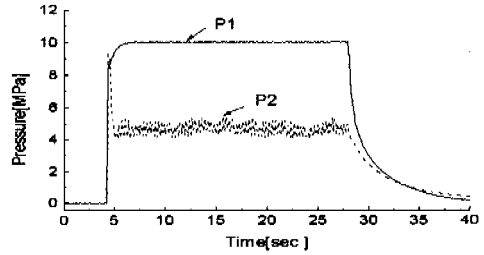
유압모터의 귀환라인에 설치된 유량제어밸브를 조정하여 유압모터의 회전수를 4가지 즉 1.4rpm, 50rpm, 170rpm, 273rpm으로 변화시키면서 유압모터 입·출구의 압력, 유량 및 출력축의 토크를 계속하였으며 이 경우 릴리프 밸브의 압력을 9.8[MPa]로 설정하였고, 작동유의 온도는 28± 2 [°C]범위로 유지했다.

회전수 1.4rpm인 경우의 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우 플라이휠은 부착하지 않았고 브레이크도 작동하지 않았다. 실험장치를 가동하고 약 5초 후 방향전환밸브를 작동시켜 유압모터를 회전시키고 28초 후 유압모터를 정지시켰다. 회전수 1.4rpm인 경우의 회전수 측정은 본 연구에서 사용한 로타리 엔코더로 검출하는 것이 불가능하여 타이머를 이용하여 측정하였다.

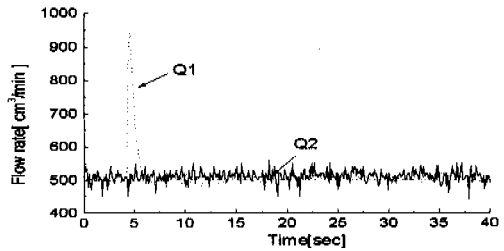
Fig. 4에서 (a)는 유압모터 입·출구의 압력을, (b)는 유압모터 입·출구의 유량을, (c)는 출력축의 토크를 나타낸다. 그리고 (d)는 (a), (b)의 출구 압력과 출구유량의 계측값에서 떨림부분을 확대한 것이다.

(a)에서 유압모터의 회전 초기에 입구의 압력상승보다 출구의 압력상승이 큰데 이는 출구의 유량조정밸브를 미소하게 개방한 상태이기 때문에 출구측 압유가 원활히 탱크쪽으로 빠져 나가지 못한데 기인한 것으로 생각된다.

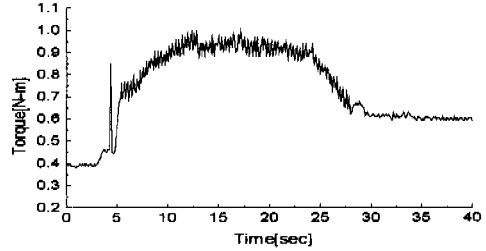
(b)에서 유압모터 기동시 입구측에 큰 피크유량이 나타나는데 이 원인은 기동시 급상승 ((a)에서 약 9.8[MPa])한 압유가 유압모터에 순간적으로 유입되면서 유압모터에 있는 기름을 순간적으로 압축하기 때문인 것으로 생각한다. 그리고 모터 입·출구의 유량의 초기치가 약 570[cm<sup>3</sup>/min]인 것은 Flow Meter의 보정시 읍셋을 570으로 하였기



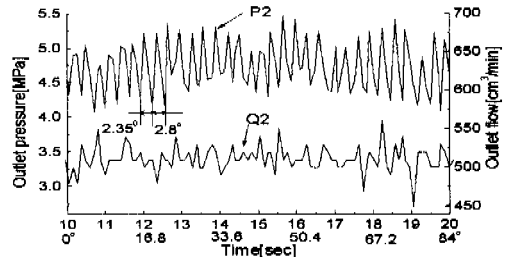
(a) Pressure of inlet and outlet



(b) Flow rate of inlet and outlet



(c) Torque



(d) Outlet pressure and flow rate

Fig. 4 Characteristics of motor at 1.4rpm

때문이다.

(c)에서 사판식 모터의 회전중의 토크값의 떨림

은 유압모터 전후의 압력차 (P1-P2)의 변동과 출력축에 부착된 장치들의 축이 편심되어 운동하는 것에 기인한 결과로 생각된다.

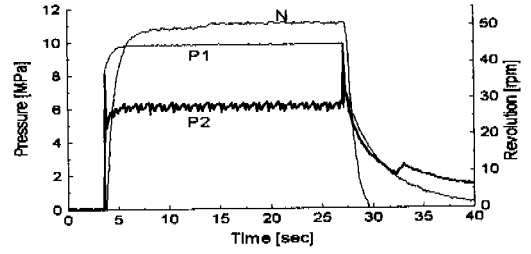
(a), (b)에서 출구압력과 출구유량의 계측값에 맥동이 나타나는데 이 부분을 확대하여 (d)에 나타내었다. 맥동의 원인이 유압모터 자체에 있는지 부하축을 포함한 부하부에 있는지를 파악하기 위해 출력축의 토크변환기와 부하장치를 제거하고 공급압력과 유량을 Fig. 4와 동일하게 하여 실험을 행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 출구압력과 출구유량이 Fig. 4의 경우와 유사함을 알 수 있다. 따라서 출구압력과 출구유량에 나타나는 맥동의 원인은 출력축을 포함한 부하장치에 있는 것이 아니고, 유압모터 자체에 있는 것임을 알 수 있다. 즉, 유압모터의 피스톤 개수가 홀수개(9개)이므로 공급포트와 귀환포트에서의 피스톤수가 실린더 블록이 회전할 때마다 4개, 5개로 달라지게 되는 것과 저압측(귀환포트)의 피스톤이 고압측(공급포트)으로 회전하고 고압측의 피스톤이 저압측으로 회전할 때 생기는 큰 운동량변화 때문인 것으로 생각된다. 이 맥동 때문에 모터의 축방향 힘이 변동하게 되고 이는 유압모터의 회전력을 변동시켜 모터의 회전이 불규칙적으로 된다고 생각한다. Fig. 5에서 압력변동과 유량변동의 주기는 약 0.28초 (2.35도)와 0.33초 (2.8도)임을 알 수 있다.

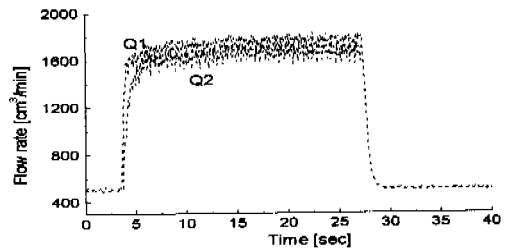
유압모터의 회전수 50rpm에서 행한 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우 실험조건은 Fig. 4의 경우와 동일하다.

Fig. 6의 (a)에서 유압모터의 정지시(기동 후 약 28초 후) 유압모터 출구에 충격압이 발생한다. 이는 모터를 정지시키기 위해 방향전환 밸브를 중립위치로 전환하면 모터 입구측의 압유는 유체 관성력에 의해 모터를 계속해서 회전시키려는 방

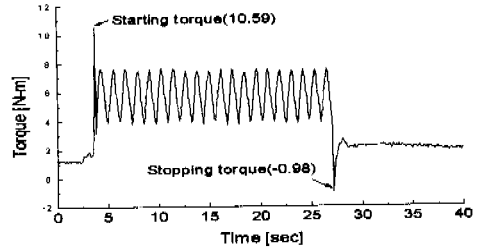
향으로 작용하게 되고 부하계의 질량 관성력 또한 모터의 회전방향으로 작용하는 반면 출구



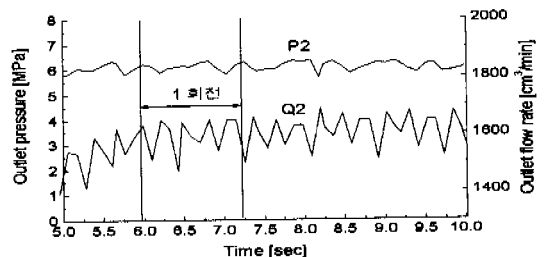
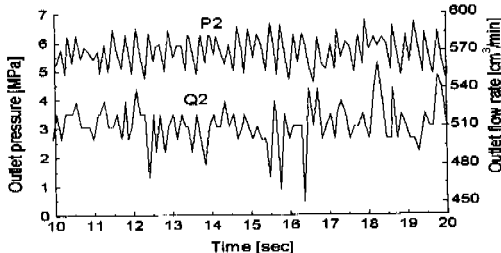
(a) Pressure of inlet and outlet



(b) Flow rate of inlet and outlet



(c) Torque



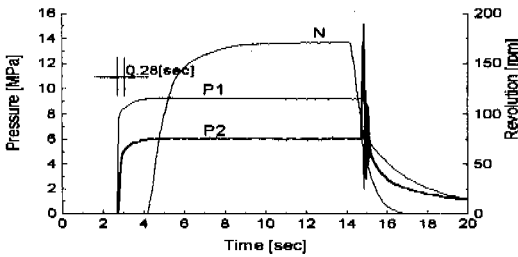
(d) Outlet pressure and flow rate

Fig. 5 Characteristics without load

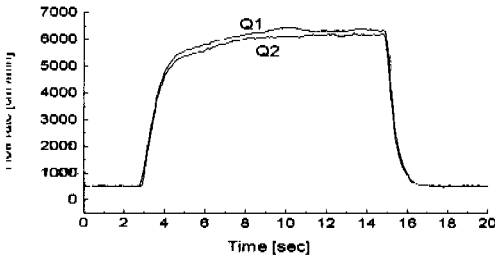
Fig. 6 Characteristics of motor at 50rpm

축의 압유는 모터를 정지시키는 방향으로 작용하기 때문이다. 이와 같은 이유로 Fig. 6의 (c)에서 알 수 있는 바와 같이 출력축에 정지토크가 발생된다.

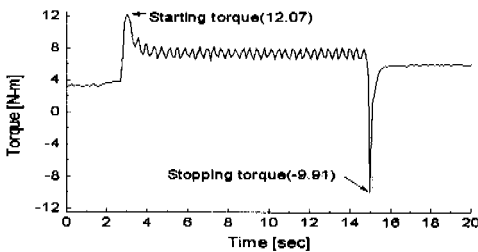
Fig. 6 (a)에서 출구축의 압력 맥동은 0.49[MPa] 정도로 Fig. 4의 경우에 비해 25%정도 감소되었고, 유량의 맥동은 Fig. 4와 유사함을 알 수 있다. 맥동의 감소는 회전이 빨라짐에 따라 저속시에 비해 유압모터 내부의 마찰이 감소되고 피스톤 단면적 변화의 영향이 감소한 것에 기인한 것이라 생각된다. 이 경우 압력과 유량의 변동주기는 1회전당 약 4회 정도, 즉 90° 로 나타났다.



(a) Pressure of inlet, outlet and motor revolution



(b) Flow rate of inlet and outlet



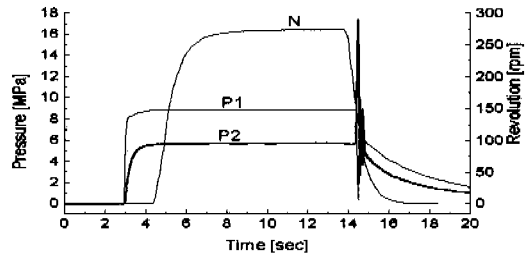
(c) Torque

Fig. 7 Characteristics of motor at 170rpm

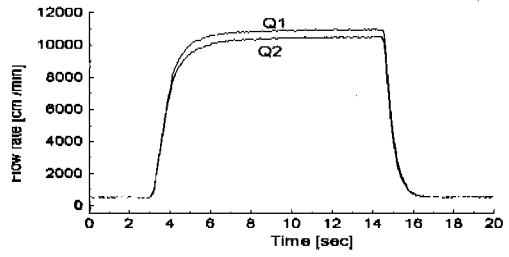
Fig. 6의 (c)에서 토크는 1회전 주기로 변동하고 있으며 이는 부하계를 연결하는 축 중심이 편심되어 있기 때문으로 생각된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 회전수 N=170rpm, 273rpm인 경우의 실험결과이다.

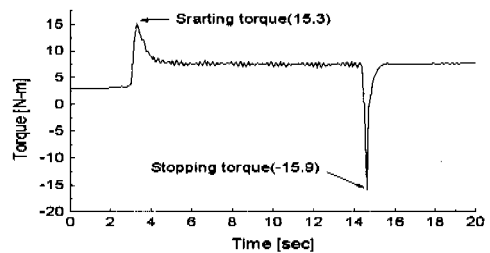
Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있는 것과 같이 회전수 170rpm 이상에서는 부하축의 회전이 원활하고 그 결과 입·출구의 압력과 유량 맥동이 거의 없음을 알 수 있다. 또한 정상운전 상태에서의 토크변동도 미소하므로 회전수 170rpm 이상에서 유압모터가 부하를 원활하게 구동시킬 수 있음을 알 수 있다. 기동토크 및 정지토크는 회전수와



(a) Pressure of inlet, outlet and motor revolution



(b) Flow rate of inlet and outlet



(c) Torque

Fig. 8 Characteristics of motor at 273rpm

더불어 증가하고 특히 정지토크가 기동토크에 비해 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 설명한 바와같이 모터의 정지시 급격한 압력변동에 기인한 것으로 생각한다.

유압모터의 입구측 압력의 상승에서부터 유압모터가 기동할 때까지의 시간을 응답지연시간이라 정의하면 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8의 (a)에서 응답지연시간은 각각 0.27, 0.28, 0.33초이며, 회전수가 증가함에 따라 지연시간이 길어짐을 알 수 있다.

3.4 기동토크에 따른 압력상승률 특성

압력상승률은 단위시간에 대한 상승압력으로 정의한다.

3.4.1 기동시의 압력상승률 특성

기동시 유압모터의 입구측 압력(P1)에 대한 압력상승률과 기동토크의 관계를 알아보기 위해 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8의 (a)에서 유압모터 기동부분을 확대하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 (a)~(c)에서 시간과 압력상승사이의 최대기울기는 기동초기에 나타나며 P1의 최대기울기의 끝점까지의 소요시간은 0.11초로 동일하고 상승압력은 각각 5.18, 6.21, 7.26[MPa]이 된다. 따라서 최대압력상승률은 각각 47.1, 56.52, 66.05 [MPa/sec]가 된다.

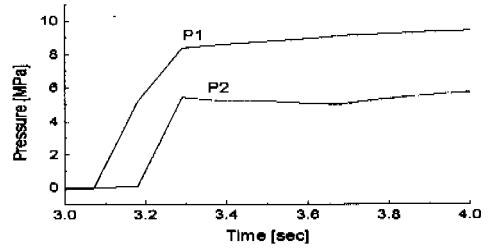
Fig. 10에 Fig. 9로부터 구한 기동시 최대압력상승률과 기동토크와의 관계를 나타내었다.

Fig. 10으로부터 기동토크는 유압모터의 출구측 압력상승률에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 정상상태의 토크는 유압모터 입·출구의 압력차로 결정되나 기동시의 토크는 기동시의 압력상승률에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다.

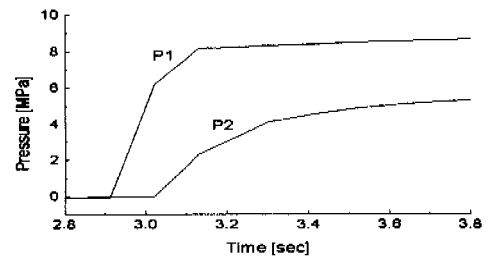
3.4.2 정지시의 압력상승률 특성

정지시 유압모터의 출구측 압력(P2)에 대한 압력상승률과 기동토크의 관계를 알아보기 위해 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8의 압력특성 (a)에서 유압모터가 정지할 때 나타나는 압력피크 부분을 확대하여 Fig. 11에 나타내었다.

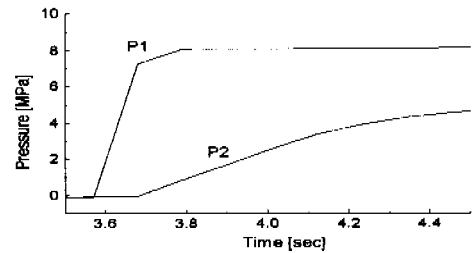
방향전환밸브로 유압모터를 정지시키는 경우 P2가 최대기울기 끝점까지 도달하는 시간은 기동시와 같이 0.11초로 동일하다. 따라서 모터의 정지시 기동시와 같은 방법으로 각 회전수에서의



(a) 50rpm



(b) 273rpm



(c) 412rpm

Fig. 9 Pressure rising rate of starting motor at various revolution

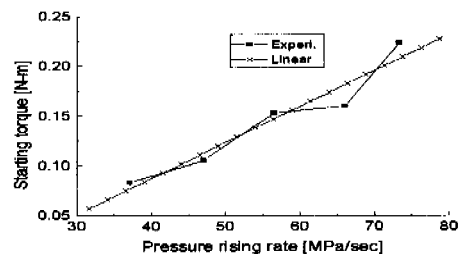
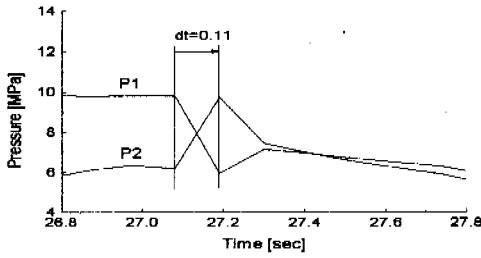
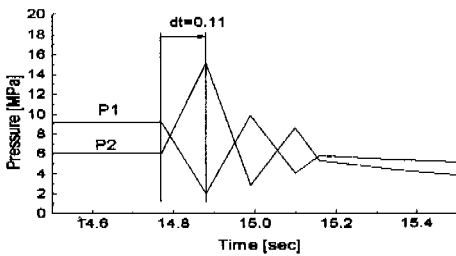


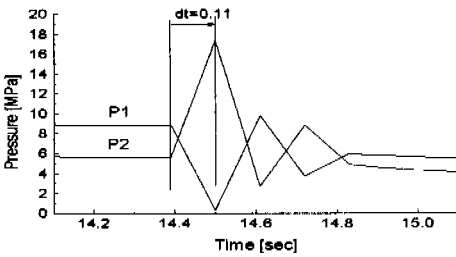
Fig. 10 Relation between pressure rising rate and starting torque



(a) 50rpm



(b) 170rpm



(c) 273rpm

Fig. 11 Pressure characteristic of stopping motor

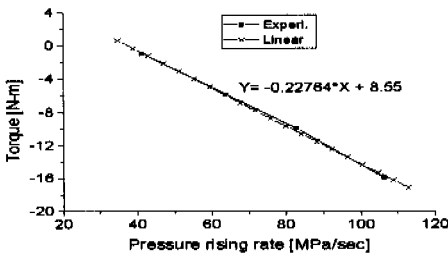


Fig. 12 Relation between pressure rising rate and drag torque

최대압력상승률을 구해보면 각각 41.23, 82.70, 106.2[MPa/sec]가 된다.

Fig. 12에 압력상승률과 정지토크와의 관계를 나타내었다.

Fig. 12로부터 정지시 유압모터 출구측의 압력 상승률이 클수록 정지토크는 기동시와는 역으로 증가하며, 유압모터 출구측의 압력상승률이 정지토크에 결정적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 고압력이 요구되는 유압시스템에 유압모터를 사용하는 경우 기동시와 정지시 Peak 압력의 영향을 줄이기 위해 압력제어밸브가 사용되고 있다. 이때 사용되는 압력제어밸브는 그 응답시간이 Peak압력까지의 상승시간보다 2배이상 빠른 것이 사용되어야 할 것으로 생각된다. 예를 들면 그림에서 170rpm 이상인 경우 설정압력 11.76[MPa]에서 압력제어밸브의 응답시간은 0.05 초 이하가 되어야 한다.

#### 4. 결론

국산화 개발한 사판식 액셀 유압모터의 특성을 파악하기 위해 실험장치를 구성하여 실험을 행하고, 계측한 각종 데이터를 저장하고 활용할수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 유압모터 정지시의 누설유량과 토크는 공급압력에 비례함을 알았다. 이 경우 누설유량  $Q_1$ 을 선형근사화하면  $Q_1 = 8.298 \times P1 - 6.66$ 이 되고, 토크 T는  $T = 2.8098 \times P1 - 3.875$ 가 되었다.

(2) 회전수 50rpm 이하인 경우, 압유가 순간적으로 모터에 유입되며 이로 인해 모터입구측에 있는 기름이 순간적으로 압축되어 피크유량이 나타났다. 이 경우 출구측 압유가 원활히 탱크로 빠져 나가지 못하기 때문에 유압모터는 원활한 구동을 하지 못함을 알 수 있었다.

(3) 회전수 170rpm 이상에서는 출구압력변동과 출구유량변동이 미세하였으며 따라서 이 경우 유압모터가 부하를 원활하게 구동시킬 수 있음을 알 수 있었다.

(4) 압력상승률이 유압모터의 기동시 및 정지시 최대토크에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있었다.



## 후 기

본 연구는 경남대학교 학술연구조성사업에 의한 연구비와 동명중공업(주)의 위탁연구비로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 1998, '98 산업기술수요조사 보고서(기계/설비), 통상산업부 산업기술정책연구소.
- (2) 小林俊一, 池谷, "斜板式アキシャルピストンモータ内のピストン球部スツパ軸受部の弾性靜壓潤滑(第一報, 理論解析)," 油壓と空氣壓, 21-6, 1990, pp. 78~84.
- (3) 小林俊一, 池谷, 1990, "斜板式アキシャルピストンモータ内のピストン球部スツパ軸受部の弾性靜壓潤滑(第二報, 流量測定)," 油壓と空氣壓, 21-7, pp. 711~718.
- (4) 方義, 池谷, 1992, "斜板式アキシャルピストンポンプ・モータの低速時におけるピストン~シリンドラ間潤滑状態(ピストンの軸回轉およびその影響)," 油壓と空氣壓, 23-3, pp. 294~301.
- (5) 小林俊一, 金子, 池谷, 1991, "斜板式アキシャルピストンモータの起動・低速時におけるピストン~シリンドラ間の摩擦特性," 油壓と空氣壓, 22-7, pp. 807~814.
- (6) 松本和幸, 池谷, 1991, "斜板式アキシャルピストンモータの起動・微速時における球継手部の摩擦特性," 日本機械學會論文集(C編), 57-538, pp. 2017~2022.
- (7) Williamson J., 1981, "Progress Towards ISO Standards for Starting and Low-Speed Characteristics of Hydraulic Motor," 6th Fluid Power Simposium, A3.