

# 사축식 유압 피스톤 펌프의 저속 마찰 특성 개선

## Improvement of the Low-speed Friction Characteristics of a Bent-Axis Type Hydraulic Piston Pump

홍예선 · 이상율 · 김치봉 · 김성훈 · 임현식 · 김성대

Yeh-Sun Hong, Sang-Yul Lee, Chi-Bung Kim, Sung-Hoon Kim, Hyeon-Sik Rhim  
and Sung-Dae Kim

**Key Words** : Low-speed Friction Characteristics(저속 마찰 특성), Bent-axis Type Hydraulic Piston Pump(사축식 유압 피스톤 펌프), CrSiN plasma coating(플라스마 코팅), Cylinder barrel(실린더 배럴)

**Abstract**: The hydraulic pump for a Electro-hydrostatic Actuator for aircrafts should be able to quickly feed large volume of oil into hydraulic cylinder in order to reduce the response time. On the other hand, it should be also able to precisely dispense small amount of oil by low-speed operation so that the steady state position control error of the EHA can be accurately compensated. This paper is focused on the investigation how the plasma coating surface treatment of cylinder barrel with CrSiN can contribute to the reduction of low-speed friction torque of a bent-axis type piston pump. The results showed that the reduction of the friction torque was not remarkable, but that the anti-wear characteristics of the CrSiN-coated cylinder barrel were much better than those of the original one.

### 기호 설명

- $A_b$  : 실린더 배럴의 유효 수압면적 ( $\text{mm}^2$ )
- $A_p$  : 피스톤의 단면적 ( $\text{mm}^2$ )
- $F_p$  : 실린더 배럴의 수직 하중 (N)
- $\mu_v$  : 밸브 플레이트의 마찰계수
- $\nu$  : 오일의 동점성 계수 ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
- $P_C$  : 각 실린더 챔버의 압력 (bar)
- $r_i, r_o$  : 밸브 플레이트 포트의 내측 및 외측 반경 (mm)
- $R_i, R_o$  : 밸브 플레이트 접촉면의 내측 및 외측 반경 (mm)
- $R_c$  : 실린더 배럴 하중 작용점의 회전 반경 (mm)
- $\theta, \omega$  : 펌프 구동축의 회전각( $^\circ$ ) 및 각속도(rpm)
- $\alpha$  : 밸브 플레이트의 포트 각 ( $^\circ$ )
- $T_f$  : 밸브 플레이트에 발생하는 마찰 토크 (Nm)

$T_p$  : 펌프 구동 토크 (Nm)

### 1. 서 론

항공기의 제어면을 구동하기 위해 현재까지 사용되고 있는 주된 방식은 전기식 위치제어기와 서보 밸브에 의해 피스톤 변위가 제어되는 유압실린더를 사용하는 것이다. 이러한 전기 유압식 서보 구동장치는 동적인 응답이 빠르다는 장점이 있으나, 서보 밸브에서의 압력 손실로 인해 시스템 전체의 최대효율은 이론적으로 38%를 넘을 수 없게 되어 있다<sup>1)</sup>. 그리고 엔진에 의해 구동되는 유압 펌프로부터 서보 밸브에 고압의 유압 오일을 공급하고, 또한 서보 밸브로부터 귀환되는 오일을 탱크로 연결하기 위해서는 긴 배관이 필요하게 된다. 따라서 배관에서의 추가적인 유체 에너지 손실, 배관의 높은 유지 보수비용, 배관의 무게로 인한페이 로드(payload) 감소 등을 감수해야 한다<sup>2,3)</sup>.

위와 같은 밸브 제어 방식 서보 구동장치의 단점을 해결하기 위하여 최근 도입되고 있는 방식이 Fig. 1과 같은 정유압 방식의 구동장치이다. 즉, 유압 펌프와 실린더를 직접 연결하여 폐회로를 구성하고, 유

접수일 : 2004년 7월 20일  
 홍예선(책임저자) : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
 E-mail : yshong@hau.ac.kr  
 이상율 : 한국항공대학교 재료공학과  
 김치봉 : 한화(주) 항공기술연구소  
 김성훈, 임현식, 김성대 : 한국항공대학교 대학원

압 펌프를 전기 모터로 구동하여 피스톤의 구동 속도와 변위를 제어하는 것이다. 이러한 방식의 구동 장치를 전기 정유압 구동 장치(Electro-hydrostatic Actuator, 이하 EHA로 약칭)로 칭하며, 유압 실린더와 유압 펌프, 펌프 구동용 전기 모터를 일체화하고, 특히 펌프와 모터를 소형화하기 위해 속도 제어 범위를 10,000 rpm 이상의 고속으로 높인다는 것이 구조적인 특징이다.

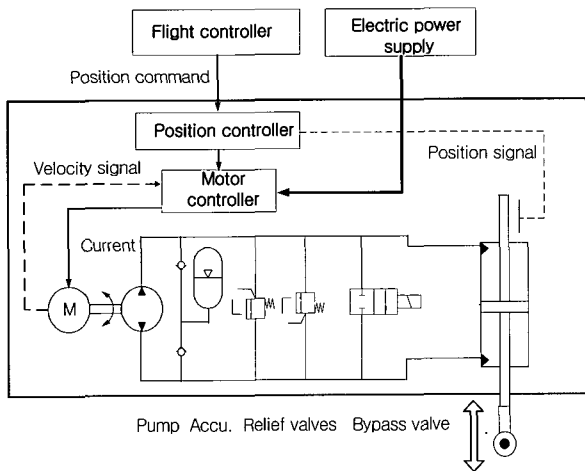
EHA의 소형화된 유압 펌프는 실린더의 피스톤을 신속하게 명령된 위치로 보내기 위해 가급적 높은 속도로 회전할 수 있어야 하며, 그 반면에 정적인 제어 오차를 보상하는 단계에서는 100 rpm이하의 저속으로 스틱 슬립(stick-slip) 없이 회전할 수도 있어야 한다.

EHA용 펌프로는 작동 압력 350 bar, 최대회전 속도 10,000 rpm 이상의 조건을 허용하면서 누설 및

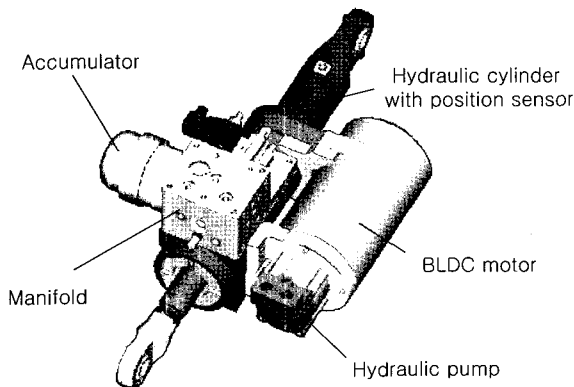
마찰 손실이 적고, 정지와 기동, 반전을 반복하는 사용 조건에서도 사용이 가능한 사축식 피스톤 펌프가 가장 적합하다고 할 수 있다.

Hong은 Fig. 2와 같은 구조의 사축식 피스톤 펌프에서 마찰손실이 발생하는 축 베어링, 베벨 기어, 피스톤의 볼 조인트와 피스톤 헤드, 실린더 배럴과 밸브 플레이트 사이에 대한 마찰력 모델을 유도하고, 10,000 rpm의 속도범위까지 마찰력을 계산하여 실험치와 비교하였으며, 실린더 배럴과 밸브 플레이트, 축 베어링에서의 마찰이 전체 마찰 손실의 대부분을 차지함을 보여주었다<sup>4)</sup>.

본 논문은 EHA용 유압 펌프에 대한 기초 연구의 일환으로서, 사축식 유압 피스톤 펌프의 실린더 배럴과 밸브 플레이트 간에 발생하는 마찰력과 마모를 500 rpm이하의 저속 영역에서 감소시키기 위하여 실린더 배럴이 밸브 플레이트와 접촉하는 표면을 플라즈마 코팅에 의해 개질시킴으로써 달성된 효과에 대해 보고하고자 한다.



(a) Block diagram



(b) Schematic diagram

Fig. 1 Configuration of EHA system

## 2. 사축식 피스톤의 기본 구조

본 논문의 연구 대상인 사축식 피스톤 펌프는 Fig. 2와 같이 베벨 기어를 사용하여 실린더 배럴을 구동한다. 따라서 유니버설 조인트를 사용하는 방식에 비해 급가속, 급감속, 동적인 방향 전환이 가능하다는 특징을 갖는다. 본 논문에 필요한 주요 사양으로는 실린더 배럴의 경사각 =  $40^\circ$ , 배제 용적 =  $4.88\text{cc/rev}$ , 피스톤 수 ( $N$ ) = 5, 실린더 보어의 단면적 ( $A_p$ ) =  $70.85\text{ mm}^2$ , 실린더 챔버 중심축의 회전반경 ( $R_c$ ) =  $9.5\text{ mm}$ 이다.

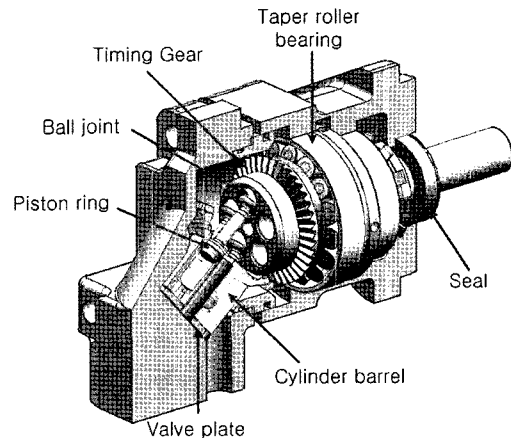


Fig. 2 Schematic diagram of a bent-axis type piston pump

### 3. 밸브 플레이트의 마찰 모델

본 논문에서 관찰하고자 하는 실린더 배럴과 밸브 플레이트의 접촉면은 Fig. 3과 같은 형상을 갖는다.

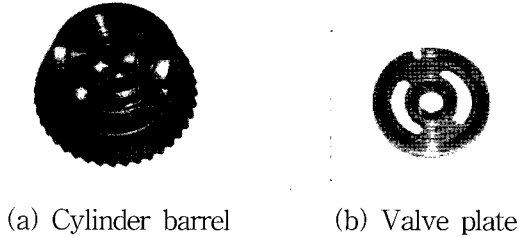


Fig. 3 Contact surfaces of cylinder barrel and valve plate

일반적으로 밸브 플레이트와 실린더 배럴 간에 발생하는 마찰 토크( $T_f^y$ )는 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>5,6)</sup>.

$$T_f^y = \left[ \sum_{i=1}^N A_b P_{C_i} \right] \mu_v R_c \quad (1)$$

여기에서

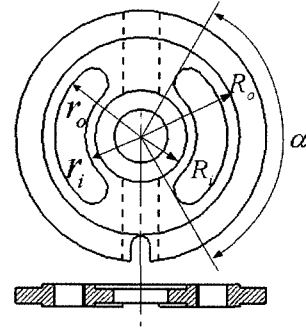
- $P_{C_i}$  = 각 실린더 챔버의 압력
- $\mu_v$  = 마찰계수
- $R_c$  = 실린더 하중 작용점의 회전반경
- $A_b$  = 실린더 보어의 단면적
- $A_b$  = 각 실린더 챔버의 유효 수압면적
- $= A_b - \frac{\pi}{2N} \left\{ \frac{(R_o^2 - r_o^2)}{\ln(R_o/r_o)} - \frac{(R_i^2 - r_i^2)}{\ln(R_i/r_i)} \right\}$
- = 실린더 수

$R_i, r_i, R_o, r_o$ 는 밸브 플레이트의 포트 형상과 관련된 부호로서 Fig. 4에 그 수치를 표시하였다. 그리고  $R_c$ 는 각 실린더 챔버에서 실린더 배럴을 누르는 힘들의 합력이 작용하는 점의 회전반경에 해당되는데, 그 값은 토출 포트에 5개의 실린더 챔버 중 2개 또는 3개가 지나가면서 주기적으로 변하게 된다.

펌프의 부하압력=100 bar, 회전속도=50 rpm 일때 펌프 구동축이 1회전하는 동안 각 실린더 챔버의 압력  $P_{C_i}$  을 측정하면 Fig. 5와 같다. 흡입에서 토출 압력으로 또는 토출에서 흡입 압력으로 바뀔 때의 압력 구배는 기본적으로 밸브 플레이트의 포트

형상에 의해 결정되고 압력 오버슈트는 회전속도의 영향을 많이 받는다.

Fig. 6은 실린더 챔버 압력 측정 장치의 구성을 보여 준다. 실린더 챔버 내에 Keller사의 초소형 압력센서를 내장하였으며, 센서의 리드 선은 펌프의 구동축



$R_i$	6.25 mm	$r_i$	7.4 mm
$R_o$	13.25 mm	$r_o$	11.6 mm
$\alpha$	120°		

Fig. 4 Dimension of valve plate

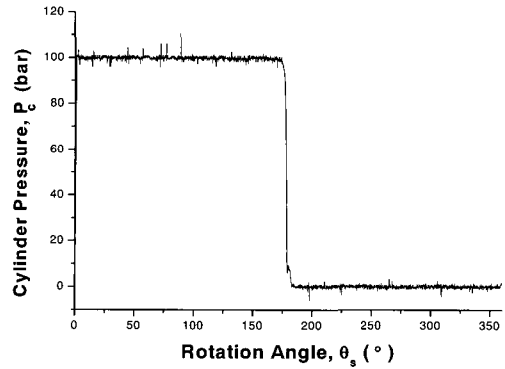


Fig. 5 Change of cylinder chamber pressure as function of shaft rotation angle (load pressure= 100 bar,  $w= 50$  rpm)

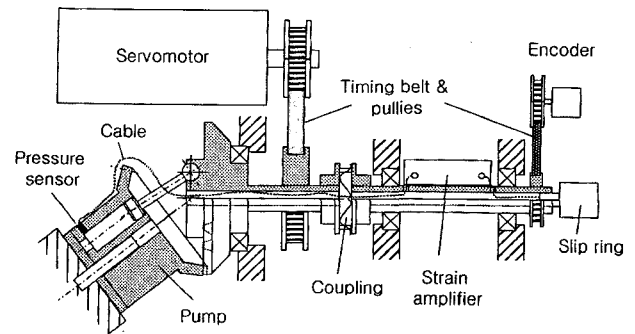


Fig. 6 Experimental apparatus for cylinder chamber pressure measurement

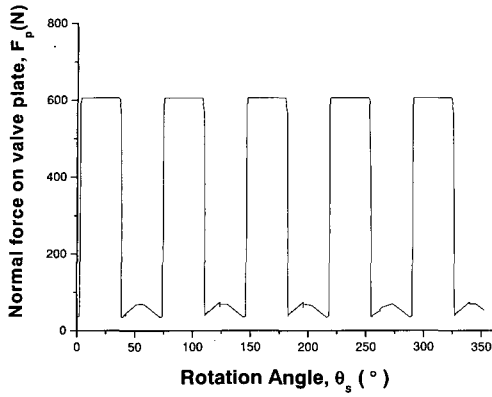


Fig. 7 Change of normal force acting on cylinder barrel as function of shaft rotation angle (load pressure= 100 bar,  $\omega$ = 50 rpm)

을 통해 펌프 외부로 인출하였고, 구동축과 함께 회전하는 스트레인 앰프에 의해 증폭된 압력 신호는 슬립 링(slip ring)을 통해 데이터 처리용 PC로 입력시켰다. 펌프는 서보 모터와 타이밍 벨트에 의해 회전시켰으며 펌프의 회전각은 별도의 인코더로 측정하였다.

본 논문에서 펌프의 실린더수는 5개이므로 각 실린더 챔버는  $72^\circ$ 의 위상각을 가지고 차례대로 저압→고압→저압의 순서로 변화한다. 따라서 이들 5개 실린더 챔버의 압력이 유효 수압면적에 작용하여 동시에 실린더 배럴을 밸브 플레이트로 압착시키는 수직력은 Fig 7과 같이  $72^\circ$ 의 주기로 맥동을 하게 된다.

실린더 배럴과 밸브 플레이트 사이의 마찰계수,  $\nu$ 는 구동축이 200 rpm이하의 속도로 회전하는 영역에서는 주로 고체마찰, 또는 고체마찰과 유체마찰이 혼합된 상태에서 결정된다고 볼 수 있다. 따라서 이 마찰계수는 측정을 통해 확인할 수밖에 없다.

실린더 배럴과 밸브 플레이트의 저속 상대 회전에서 문제가 되는 것은 유체 윤활막이 충분히 형성되지 못하므로 실린더 배럴보다 표면경도가 낮은 밸브 플레이트의 마모가 심화된다는 것이다.

밸브 플레이트는 실린더 배럴보다 경도가 낮도록 일반적으로 황동으로 제작된다. 이에 반해 실린더 배럴의 접촉면은 높은 경도와 내마모성을 갖도록 표면 질화처리를 한다. 일반적으로 질화층의 두께는 약  $20 \mu\text{m}$  정도이며, 표면에서 약 900 Hv의 최대 경도를 갖는다.

본 논문에서는 실린더 배럴과 밸브 플레이트 간의 저속 마찰계수를 감소시키기 위한 방안으로서, 실린더 배럴의 접촉면에 대해 마찰특성이 좋은 CrSiN 박막 코팅을 시도하였다. 그리고 저속 마찰시의 내마모

성을 높이기 위해 기존 재질 대신에 질화 처리된 밸브 플레이트와 CrSiN 초경 박막이 코팅된 실린더 배럴을 조합하였을 때 마찰 계수와 내마모성이 얼마나 개선되는 지를 비교하였다.

여기에서 마찰면의 고체 마찰 특성과 내마모성을 높이기 위해 플라즈마 코팅 공법을 이용하여 초경 박막을 금속 표면에 입히는 것은 일반화 되어 있으나, 본 논문은 CrSiN이라는 새로운 소재를 선정하여 플라즈마 코팅 공정 개발을 시도하였다는 측면과 이 CrSiN 박막을 유압 펌프의 저속 마찰특성 및 내마모성 개선에 응용하였다는 측면에서 신규성을 갖는다.

#### 4. 마찰계수 측정 및 마찰 토크의 추정

##### 4.1 마찰계수 측정장치의 구조

Fig. 8은 본 연구에서 제작한 마찰계수 측정장치의 구조를 보여 준다.

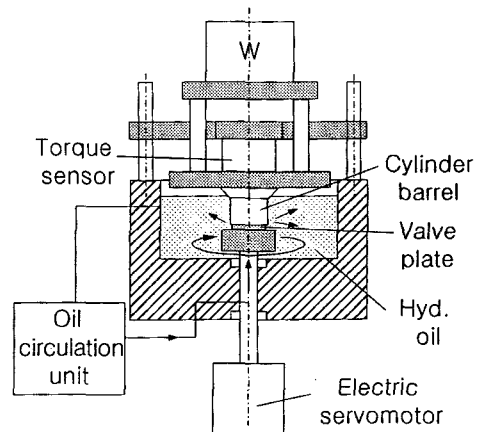
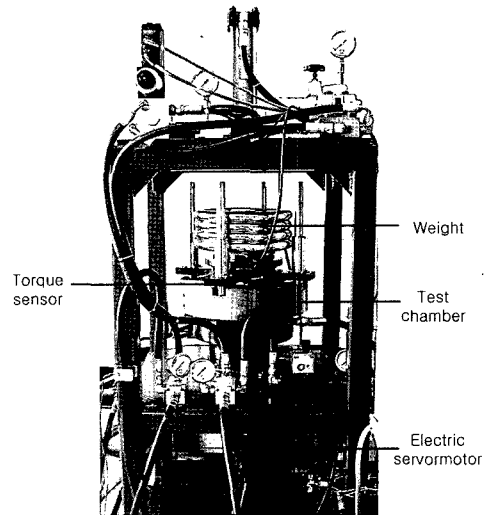


Fig. 8 Configuration of tribometer

이 장치는 실제 실린더 배럴과 밸브 플레이트에 추를 이용하여 수직력을 가한 상태에서 밸브 플레이트를 강제로 상대 회전을 시킬 때의 구동 토크를 측정함으로써 마찰계수를 확인할 수 있다. 상부의 실린더 배럴은 회전방지가 된 토크 센서에 고정되고 추의 하중을 직접 받는다. 하부의 밸브 플레이트는 전기 서보 모터에 의해 회전된다. 실린더 배럴과 밸브 플레이트는 펌프 하우징에서와 같이 오일에 잠겨 있는 상태로 유지되며, 밸브 플레이트의 구동축과 포트를 통해 접촉면의 마모 입자를 세척하기 위한 오일이 공급된다.

4.2 실린더 배럴의 표면처리 조건과 마찰계수 측정 결과

Table 1은 앞에서 설명한 바와 같이 실린더 배럴의 표면과 밸브 플레이트의 재질에 대한 3가지의 시험 조건을 열거한 것이다. 실린더 배럴에 CrSiN 코팅을 함으로써 코팅이 안 된 배럴보다 표면 조도(Ra)가 0.106  $\mu\text{m}$ 으로 더 좋게 나타났다. CrSiN 코팅막 자체의 경도는 2000 Hv에 달하여 마모가 거의 되지 않으면서 조도가 좋기 때문에 마찰계수가 낮은 것이 특징이다. 스틸 밸브 플레이트는 황동 밸브 플레이트보다 조도가 더 좋은 상태로 가공되었다.

Table 1 Experiment conditions

	Cylinder barrel			Valve plate		
	Material & surface treatment	Hv	Ra	Material & surface treatment	Hv	Ra
I	steel, nitrided	614.5	0.149	brass -	123.5	0.484
II	steel, CrSiN coated	2465	0.106	brass -	123.5	0.484
III	steel, CrSiN coated	2465	0.106	steel nitrided	224.7	0.336

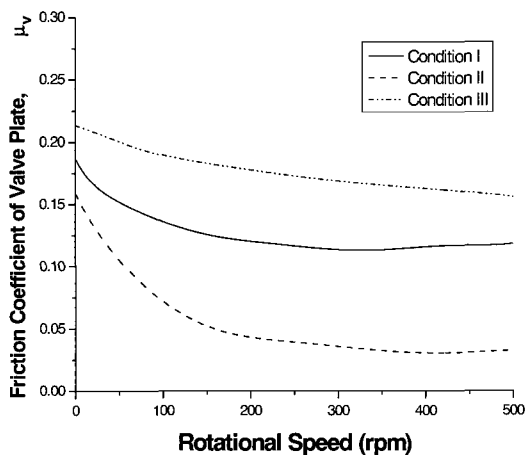


Fig. 9 Measured friction coefficients

Fig. 9는 밸브 플레이트와 실린더 배럴 간의 마찰계수를 Table 1의 3가지 조건에 대해 측정한 결과를 보여 준다. 200 rpm 이상에서는 조건 II의 마찰계수가 원래 부품으로 구성된 조건 I 보다 1/3 이하로 작아 졌고, 조건 III은 시편들의 표면 조도가 더 좋은데도 불구하고 마찰계수가 오히려 증가한 것을 볼 수 있다. 이것은 나중에 마모 시험 결과를 이용하여 다시 설명되겠지만, 황동 밸브 플레이트의 경우, 상대적으로 경도가 훨씬 높은 실린더 배럴에 의해 깎여 나가는 연삭 마모(abrasive wear)가 진행되는 반면, 스틸 밸브 플레이트의 경우에는 마모 입자가 마찰면에 다시 고착되는 응착 마모(adhesive wear)가 진행되기 때문인 것으로 판단된다.

5. 밸브 플레이트에서의 마찰 토크 계산

부하압력=100bar, 펌프 회전속도=50rpm 일때, 앞에서 측정된 마찰계수를 이용하여 계산한 실린더 배럴과 밸브 플레이트간의 마찰 토크는 Fig. 10과 같다. 그림에서 보면, 실린더 챔버 5개 중 3개가 토출 포트에 놓이는 구간에서 조건 II의 부품을 사용하면 조건 I보다 마찰 토크가 약 0.13 Nm 만큼 감소하는 것으로 나타났다.

밸브 플레이트의 마찰토크가 감소한 효과로 인해 펌프의 구동 토크가 실제로 감소되는 효과를 측정하였을 때의 결과는 Fig. 11과 같다. 조건 I과 조건 II의 구동 토크의 평균치를 구해 그 차이를 구하면 약 0.1 Nm 만큼 감소한 것으로 나타나 계산치와 유사하였다. 그림에 표시된 이론 구동 토크의 평균치는 7.77 Nm이다. 따라서 이 마찰토크의 감소로 인한 토크 효율의 감소 효과를 계산하면 약 1%에 불과하였다.

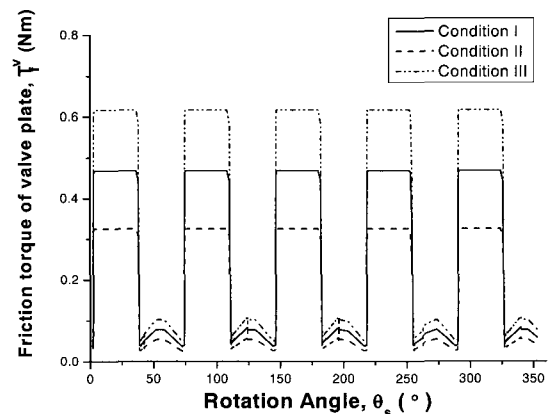


Fig. 10 Computed friction torque of valve plate (load pressure=100bar, w=50rpm)

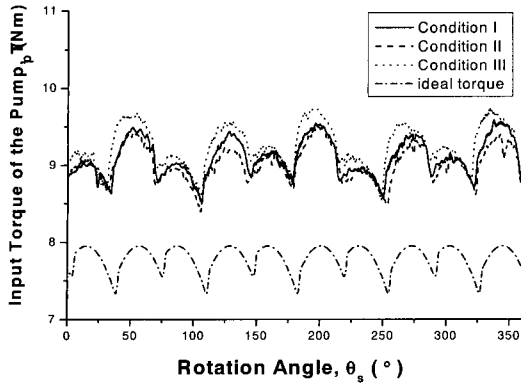


Fig. 11 Measured input shaft torque (load pressure= 100 bar,  $\omega = 50$  rpm)

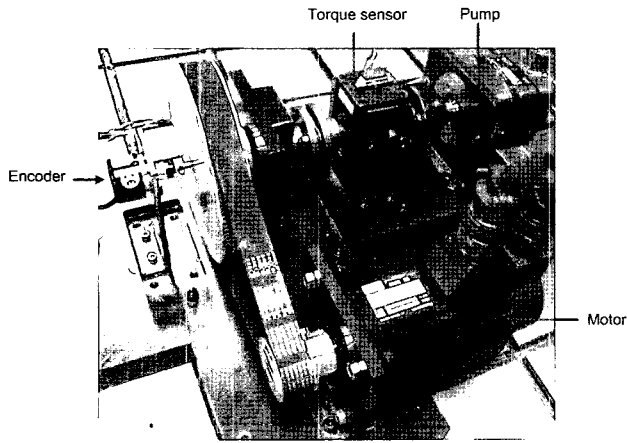


Fig. 12 Experimental apparatus for input shaft torque measurement

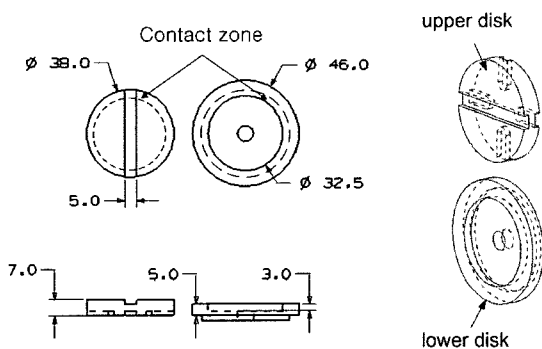
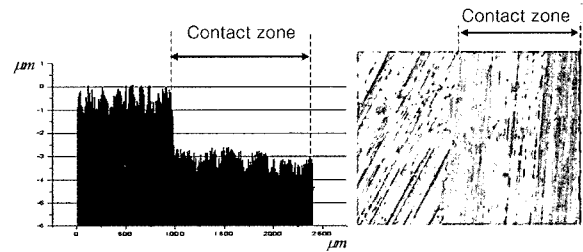


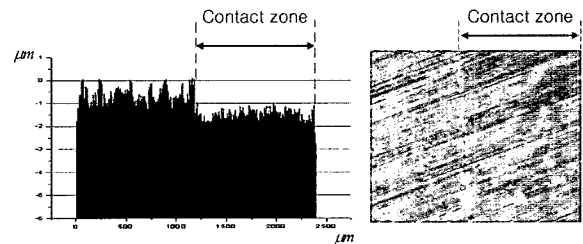
Fig. 13 Specimen for wear test

Fig. 12는 Fig. 11의 측정을 위해 구성한 실험장치를 보여 준다. 실험용 펌프의 배제 용적이 4.88cc/rev 이고, 실험조건이 부하압력= 100 bar, 회전속도= 50 rpm이므로 1.5 kW 출력의 서보 모터와 타이밍 벨트를 사용하여 펌프를 구동하였다.

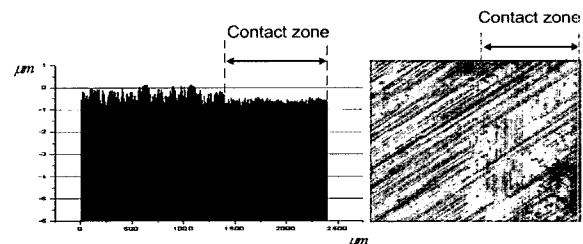
밸브 플레이트의 내마모 특성을 고려할 때 저속 회전 시에는 밸브 플레이트에서 선속도가 낮은 부위 즉, 반경이 작은 접촉면에서는 고체 마찰과 혼합 마찰이 이루어지기 때문에 마모가 발생하게 된다. 내마모성 측면에서는 조건 II나 조건 III의 경우가 조건 I 보다 훨씬 유리한 특성을 나타내게 된다. 이것을 확인하기 위하여 Fig. 8의 마찰계수 시험장치에 실린더 배럴과 밸브 플레이트 대신에 Fig. 13과 같이 Table 1의 조건과 동일한 표면 처리 조건을 갖도록 제작된 마모 시험 시편을 장착하였다. 박막 코팅이 된 상부 디스크는 하부 디스크에 링 형태로 접촉하여 마모를 발생시키게 되고, 시험 후 이 접촉면과 비접촉면의 높이차 및 표면 상태를 비교하여 내마모 특성을 평가하게 된다. 상부 디스크의 홈은 하부 디스크의 중앙 홈을 통해 공급되는 오일이 접촉면의 마모 입자를 세척하여 밖으로 배출시키는 통로 역할을 한다.



(a) Condition I



(b) Condition II



(c) Condition III

Fig. 14 Cross section profile and wear trace of specimens

60 kg의 수직하중에서 3시간 동안 두 시편을 500 rpm으로 상대회전 시켰을 때 하부 디스크의 마모 상태를 비교하면 Fig. 14와 같다. 그림 왼쪽의 단층 조도 측정 결과를 보면 조건 I의 황동 디스크는 접촉면에서 비접촉면에 비해 약 3  $\mu\text{m}$  깊이의 마모가 생긴 반면, 조건 II는 약 1  $\mu\text{m}$ , 조건 III은 약 0.5  $\mu\text{m}$  깊이의 마모가 생겼다. 오른쪽의 마모 표면 상태를 보면, 조건 I의 경우는 본래의 연마 가공 결이 마모에 의해 생긴 무늬 결로 완전히 각여 나갔고 조건 II와 조건 III의 경우에는 본래의 연마 가공 결을 확연히 알아 볼 수 있을 정도로 마모량이 적은 것을 볼 수 있다. 조건 II가 조건 I보다 마모가 적은 것은 상부 디스크의 마멸이 거의 없고 마찰계수가 더 작기 때문이다. 조건 III의 경우에는 하부 디스크의 앞에서 설명한 대로 응착마모에 의해 접촉면의 요철이 마모 입자로 메워져 조도가 더욱 좋아진 것을 볼 수 있다. 그러나 마모량이 적기 때문에, 기존의 연삭 결은 거의 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 결론적으로 조건 II가 마찰계수와 내마모 특성 측면에서 가장 유리한 결과를 보여 주었다.

## 6. 결 론

500 rpm이하의 저속 구간에서 사축식 유압 펌프의 실린더 배럴과 밸브 플레이트 간에 작용하는 마찰 토크와 마모를 감소시키기 위해 실린더 배럴의 표면을 CrSiN 박막 코팅에 의해 개질시킬 경우, 마찰 계수는 코팅을 안했을 때보다 30% 이내로 감소하나 펌프 구동토크의 감소효과는 1% 정도에 불과하였다. 그러나 내마모 특성은 현저히 개선되는 것을 확인하였다. 그리고 밸브 플레이트 소재로서 황동 대신 스텔을 사용하면 마찰계수가 오히려 증가하였고, 내마모 특성은 코팅된 실린더 배럴을 사용하는 전제 하에서 황동 재질보다 미소한 차이로 좋게 나타났다.

따라서 실린더 배럴의 표면에 CrSiN 박막을 코팅하고 황동 재질의 밸브 플레이트를 사용하는 것만으로도 저속 영역에서의 내마모 특성을 크게 개선할 수 있음을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부의 항공우주기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다(과제명: EHA의 설계 및 성능해석에 관한 연구).

## 참고문헌

- 1) H. Merrit, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- 2) N. N, "Secondary by Name But Not by Nature", Aircraft Technology Engineering & Maintenance -April/May, pp. 28~33, 2001.
- 3) O. Sutton, "Super Jumbos: New Systems to Boost Performance, Cut Costs", INTERVIA, July/August, pp. 31~33, 1997.
- 4) Y. S. Hong & Y. H. Doh, "Analysis on the Friction Loss of a Bent-Axis Type Hydraulic Piston Pump", KSME Int. J., Vol. 18, No. 9, 2004.
- 5) J. H. Cho, "Dynamic Modeling and Analysis for Swash-Plate Type Axial Pump Control Utilizing Indexing Valve Plate", Univ. of Missouri-Columbia, 2000.
- 6) S. Kobayashi & K. Matusmoto, "Lubrication between the Valve Plate and Cylinder Block for Low-Speed Conditions in a Swash-Plate Type Axial Piston Motor", JSME, Vol. 59, No. 561, pp. 1512~1517, 1993.