

특정 사축식 피스톤 유압서보모터의 개발 및 성능분석

A Developmental Study of Bent Axis Piston Type Hydraulic Servo Motor for Military Applications

이 대옥* 김 학성 안 태영(국방과학연구소) 김 고도 김 기수(동명중공업)
D.O.Lee H.S.Kim T.Y.Ahn(ADD) K.D.Kim K.S.Kim(THI)

ABSTRACT

This paper is prepared as a developmental study of tilted axis piston type hydraulic motor for military applications. The high power precision hydraulic motor requires more advanced techniques to design, analyze, manufacture, test and evaluate. We are trying to build a HW/SW technology base about hydraulic motor by accomplishing this study completely. We manufactured four preproduction models and performed the test and evaluation with the developmental specifications and test equipments. These results will be used in performance analysis and estimation, and the advanced model development for the military and commercial hydraulic motors.

1. 서론

유압모터는 유압원으로부터 공급되는 유압력을 기계적 에너지로 변환하여 부하의 회전운동을 발생시키는 유압 액츄에이터로서 그 효율성이 날로 증대되고 있다. 유압모터는 기어식 모터, 베인식 모터, 플린저(피스톤)식 모터가 주종을 이루고 있으며, 특수목적에 사용되고 있는 고정밀 대출력 모터의 경우는 축식 피스톤형이 사용되고 있다. 고정밀도와 고효율이 요구되지 않는 산업용의 기어식 및 베인식 유압모터는 국내의 유압전문업체에서 제작공급하고 있으나, 전투차량의 명중률향상에 지대한 영향을 미치는 군사용의 고정밀 고효율 소형 유압모터는 취약한 국내 기술기반과, 선진국으로부터 기술이전이 불가하여 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 현실을 감안하여 군사용 고정밀 사축식 유압모터의 개발에 착수함으로써 국내기술기반을 구축하고자 하였으며, 이를 통하여 설계, 가공 및 측정기술의 향상은 물론 산업용 모터의 독자개발에 기여할 수 있을 것이다.

유사모델에 대한 설계자료 및 성능규격을 검토 분석하여 데이터베이스를 구축하였으며, 기술분석 및 시험평가를 수행하면서 설계제작상의 미비점을 보완설계 하였다. 특히 시험평가방법 및 성능규격의 타당성을 입증하기 위한 노력을 기울였으며, 전용 치공구 및 게이지 등의 확보를 통한 유압모터의 성능향상을 시도하였다.

2. 시스템 설계 및 성능

유압모터의 성능을 규정함에 있어 적용되는 속도로는 정격속도(rated speed), 과속도(over speed), 저속도(low speed) 등이 있으며, 토크성능은 정격 토크(rated torque), 정지마찰 토크(stalled torque), 토크 맥동

(torque pulsation)으로 표시된다. 유압모터의 효율은 작동시 누유손실로 인해 토출되는 유량의 이론토출 유량에 대한 비인 체적 효율(volumetric efficiency), 작동시 마찰손실로 인해 실제 발생하는 토크의 이론토크에 대한 비인 토크 효율(torque efficiency) 등이 있다. 또한 설계시 고려사항으로 누유(케이스 드레인, 축시일, 외부, 정지상태 누유 등), 내구성, 외관특성(형상, 중량, 윤활, 설치위치, 내압, 파손압, 전단, 균형 등), 환경조건(습도, 저온, 고온, 충격, 진동 등), 설계 및 구성, 식별 및 표시, 호환성, 안전성, 인간공학, 제작표준등이 있으며 이러한 모든 인자들을 고려하여 유압모터를 설계하여야 한다.

개발대상 모터의 제원은 사축식 피스톤형 정용량형 유압모터로서 작동압력 1600psid, 정격속도 4700rpm, 정격토크 2.57kgf-m, 체적배제량 15.57cc/min, 체적효율 97%, 토크효율 94% 등으로서 그 구조 및 분해도를 그림1과 그림2에 도시하였다.

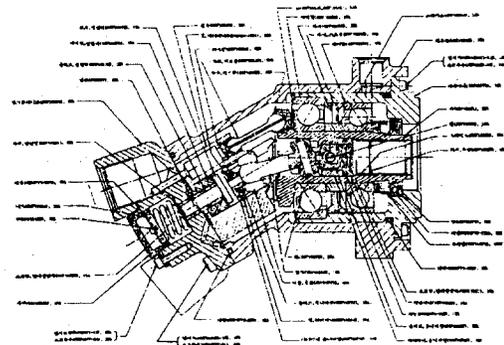


그림 1 정용량형 사축식 피스톤 모터의 구조

표1. 성능인자에 영향을 주는 설계요소

성능인자	설계요소
체적효율	- Port 손실의 효율화 - 실린더 블록과 피스톤의 적정 틈새유지 - 실린더 블록과 밸브 플레이트사이의 적정 틈새유지
토크오크효율 (Breakaway Torque, Running Torque, Stall Torque)	- 운동부의 마찰력 최소화 - 출력축 지지용인 베어링을 마찰이 적은 볼 또는 롤러 베어링을 사용 - 피스톤이 실린더 플레이트내에서 운동시 Bore 측면과의 마찰을 최소화하도록 Rod Alignment를 조정 - 실린더 블록과 밸브 블록의 접측면이 유압적 평형을 이루도록(Hydrostatic 베어링 역할이 가능토록) - 회전부품들을 Drag현상이 최소화 되도록 (Windage Loss의 최소화) - 피스톤 조립부에서의 마찰 및 움직임을 가능한한 최소화
응답성	- 유압변환시 모터의 빠른 응답성을 얻기 위해서 회전체의 관성모멘트를 최소화 - 회전체를 간단화 시키면서 무게분포가 회전중심에 가깝도록 설계
소음	- 공기전파 소음(모터에서 직접 발생하는 소음)의 최소화 - 유체전파 소음(공동, 유로내의 난류화로 인한 소음, 압력맥동에 의한 소음)의 최소화 - 구조전파 소음(외부와 연결되는 배관, 설치부)의 최소화 - 일반적인 소음수준은 70~80dB
수명	- 베어링의 수명을 기준으로 모터의 수명 고려

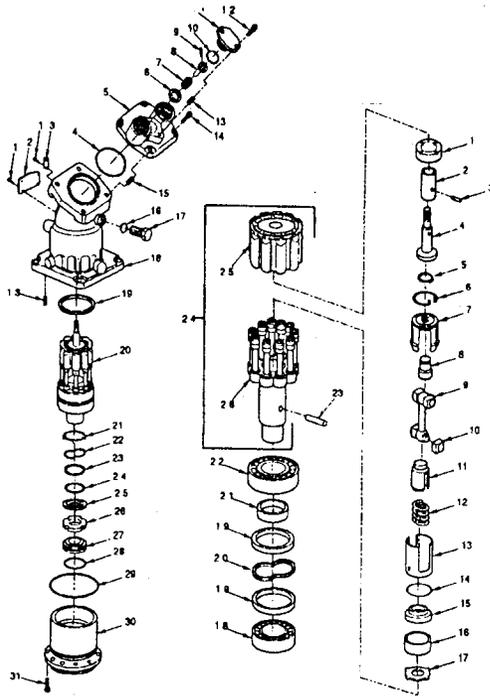


그림2. 정용량형 사축식 피스톤 모터의 분해도

유압모터의 출력축에 가해지는 부하의 크기와 공급되는 차압은 모터의 속도와 정미 출력 토크를 결정하는 요소이다. 모터의 속도는 유입되는 유량에 비례하며, 모터의 출력 토크는 압력에 비례하나, 모터의 속도 또는 출력 토크를 감소시킬 때는 압력에 따라 변하는 내부누유, 속도에 따라 변하는 토크 손실 등에 의해 비례관계가 성립하지 않는다.

군사용 고정밀 유압모터의 성능을 만족시킬 수 있는 제품을 개발하기 위해서는 표1에 보여준 것처럼 주요 성능인자에 영향을 주는 요소들을 고려하여야 한다.

또한 유압모터의 성능을 보장하기 위해서는 가공 및 측정 기술은 물론 구성품별 재질선택이 매우 중요하다. 표2는 구성품별 적용 재질을 보여주고 있다.

3. 성능특성 시뮬레이션

유압모터의 모델링을 수행함에 있어 배관의 동특성이나 마찰손실 등에 의한 압력손실은 무시하고, 체적탄성계수가 일정하다고 가정하였으며, 유압유의 압축성을 고려하였다.

<모터 유량 방정식>

$$Q_1 = D_m \omega_m + K_{lm}(P_1 - P_2) + K_{em}P_1 + \frac{V}{\beta} \frac{dP_1}{dt}$$

$$Q_2 = D_m \omega_m + K_{lm}(P_1 - P_2) - K_{em}P_2 - \frac{V}{\beta} \frac{dP_2}{dt}$$

표2. 구성품별 적용 재질

주요부품명	요구성질	적용 재질		
		일반모터	군사용	본모터
Cylinder Block	내마모성 내식성 내소성	- 동합금(고백합 동합금)	- 표준모질 : 황동제열 - 속도, 좌충유, 압력, 온도 등이 맞지 않을 경우에는 Ductile Iron을 대체재질 - 고온, 저점도의 특수한 경우에는 열변형과 마모가 적은 공구강	AlBrC2,3 원심주조/단조
		- Cr-Mo강을 침탄	- 표준모질 : 침탄강 - 작동유로서 연료를 사용하는 경우에는 Tungsten Carbide Coated Piston	SACM645 질화
Piston	내마모성			
Piston Rod & Connecting Rod	내마모성 강도	- 질화강 - Ni-Cr강 - Ni-Cr-Mo강	- 표준모질 : 침탄강 - 특수한 경우에는 M50 공구강	SACM645 질화
Valve Plate (Valve Connecting Rod)	내마모성	- 질화강 - Cr-Mo강을 침탄 처리	- 단조강	SNCM 21H 단조
Piston Shoe	내마모성 내소성	- 고백 황동/정동	- Bronz 또는 Ductile Iron	C6782BE,BD
Housing	주조성 내압성 내식성	- 구상흑연주철/피수철 - Al합금(경합표시)	- Al합금	AC4C-T6 AC4D-T6
Bearing	내마모성 열변형		- 특별히 긴 수명이 요구될 때는 진공용용 M50 공구강	
Shaft	강도	- Cr-Mo강 - 질화강	- SCM435, 420	SCM440

< 부하 유량 방정식 >

$$Q_L = D_m \omega_m + (K_{im} + \frac{K_{em}}{2}) P_L + \frac{V_1}{4\beta} \frac{dP_L}{dt}$$

$$Q_L = (Q_1 + Q_2)/2, P_L = P_1 - P_2$$

Q_1, Q_2 : 각 포트 유량 (in^3/s)

P_1, P_2 : 각 포트 압력 (psi)

D_m : 모터의 배제 용적 (in^3/rad)

ω_m : 모터 속도 (rad/s)

K_{im} : 모터의 내부누유 계수 ($in^3/s/psi$)

K_{em} : 모터의 외부누유 계수 ($in^3/s/psi$)

V_1 : 배관과 모터사이의 양측체적 (in^3), $V_1 = 2V$

β : 체적탄성계수 (psi)

P_L : 부하압력 (psi)

< 밸브 유량 방정식 >

$$Q_1 = K_q X_v - 2K_c P_1$$

$$Q_2 = K_q X_v + 2K_c P_2$$

$$Q_L = K_q X_v - K_c P_L$$

K_q : 유량이득 ($in^3/s/in$)

K_c : 유량압력이득 ($in^3/s/\psi$)

x_v : 밸브변위 (in)

< 밸브-모터 유량 방정식 >

$$K_q X_v = D_m \omega_m + (K_{im} + \frac{K_{em}}{2}) P_L + \frac{V_1}{4\beta} \frac{dP_L}{dt}$$

< 구동부 운동방정식 >

모터의 토크 방정식은 $T_m = D_m(P_1 - P_2) - T(\omega_m, P_1, P_2) - B_v \omega_m$ 로 표시되며, 부하의 점성 및 탄성을 무시하고 관성만을 고려하면 다음식으로 표시된다

$$T_m - T_L = J_m \frac{d\omega_m}{dt}$$

따라서 구동부의 운동방정식은

$$D_m P_L = T_L + T(\omega_m, P_1, P_2) + B_v \omega_m + J_m \frac{d\omega_m}{dt}$$

T_L : 부하 토크 ($in-lb$)

B_v : 모터 점성마찰계수 ($in-lb/(rad/s)$)

J_m : 모터에 대한 전체 관성모멘트 ($lb-in-s^2$)

T_f : 모터의 마찰토크 손실 ($in-lb$)

표3은 시뮬레이션에 적용된 인자들의 값을 보여주고있다.

표3. 모터의 물리적 특성

인 자	품성치
D_m (모터 배제용적)	0.1512(in^3/rad)*
β (체적 탄성 계수)	1.2x10 ⁵ (psi)
K_t (전체 누유 계수)	650x10 ⁶ ($in^3/s/psi$)
J_m (모터 관성 모멘트)	50.5x10 ⁻⁴ ($lb-in-s^2$)
B_v (점성 마찰 계수)	0.055($in-lb/rad/s$)
T_{st} (스티션 마찰력)	8 ($in-lb$)
T_c (쿠롱 마찰력)	4 ($in-lb$)
V_t (모터 검사 체적)	1.14(in^3)
R (플랜지 피치원 반경)	0.759(in)
A_p (피스톤 유효 단면적)	0.1302(in^2)
J_m' (등가 모터 관성모멘트)	0.573($lb-in-s^2$)
$4\beta/V_t$	420x10 ³ (psi/in^3)

$$*D_m(\theta) = 2A_p R \sin \alpha \sum_{i=1}^n (1 - \cos(\theta + (i-1)2\pi/n))$$

유도한 모델을 MATLAB 패키지를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 정격 속도(4700rpm)의 경우 무부하시 모터 토크 및 속도선도를 그림3에 도시하였다. 점성마찰 계수를 증가시키면 응답특성에는 변화가 없으나 정상 상태에서의 오차가 커진다. 점성마찰은 점동부의 표면 거칠기나 유온에 따라서 값이 변하므로 가공 및 오일의 선정시에 주의할 기울여야 한다. 누유계수가 증가하면 안정성이 높아지나, 뎀핑이 증가하여 응답성이 떨어지므로 가능하면 줄이는 것이 좋다. 스틱션 마찰토크를 증가시키면 고속 구동에서는 응답성 및 안정성에 별다른 영향을 주지 않지만, 저속 구동시에는 이 스틱션 마찰이 지배적이므로 저속 구동 특성이 좋은 모터를 선정해야 한다. 마찰토크는 기하학적 구조나 제조시에 정해지는 인자로서 최소한으로 줄일 수 있도록 가공해야 한다.

저속구동(25 rpm)의 경우 무부하시 모터 토크 및 속도 선도를 그림4에 도시하였다. 점성마찰계수를 증가시킨 경우 정격속도에서와 마찬가지로 응답성에는 변화가 없으나 정상 상태에서의 오차가 커진다. 정격속도에서와 마찬가지로 누유계수값이 너무 커지면 응답성이 떨어지고, 정상상태 오차가 커지므로 이 값을 줄여야 한다. 마찰토크는 저속 구동시에 중요한 인자로서 속도뿐만 아니라 부하압력에도 다소 영향을 받기 때문에 정확한 분석이 요구된다.

공급유량이 마찰토크 손실을 극복하여 모터가 회전할 수 있는 최소 공급유량보다 적으면 모터가 진동하거나 발산함을 그림5에 보여주고 있다. 이러한 결과는 저속특성 시험에서도 잘 나타났다. 부하의 관성을 유압모터의 관성에 부가한 등가모터관성모멘트를 모델링에 추가한 경우 그림6과 같이 저속 영역에서도 마찰력에 의한 이상 거동은 보이지 않고 정상적인 응답을 보여주었다. 이것은 마찰토크에 비해서 관성 모멘트의 증가에 따른 토크가 상대적으로 크기 때문이다.

결론적으로 파라미터의 변경에 따른 모터의 응답특성은 고속구동에서 보다는 저속구동에서 모터의 거동이 쉽게 변동되므로 저속구동시의 모터의 특성이 중요하며, 모터의 배제용적은 기하학적 구조로 인하여 실린더 회전각에 따라 맥동하나 그 변동율이 적어서 모터의 응답특성에는 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있었다. 향후 펌프의 맥동 및 밸브의 동특성이 모터의 응답성에 어떠한 영향을 주는지를 시뮬레이션할 필요가 있으며, 특히, 배관의 길이나 탄성률에 따른 체적탄성계수값, 배관의 마찰 손실 및 동특성 등을 모델링에 추가하여야 할 것이다.

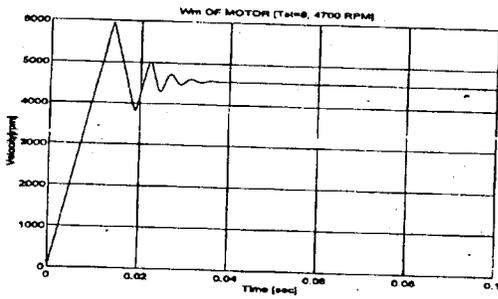
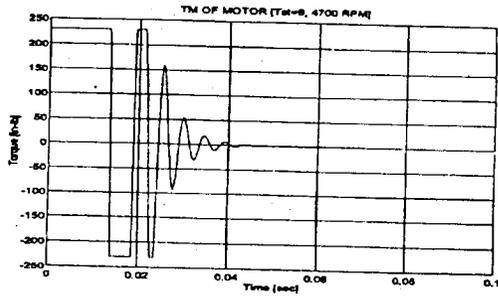


그림 3. 유압모터의 토크 및 속도 선도(4700rpm)

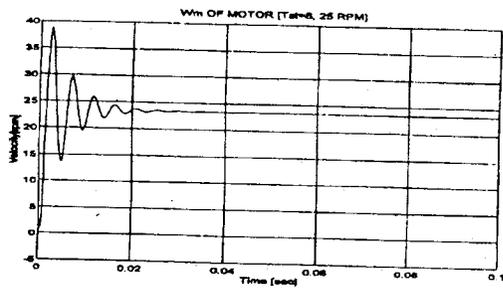
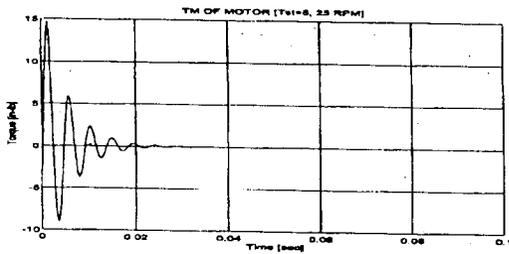


그림 4. 유압모터의 토크 및 속도 선도(25rpm)

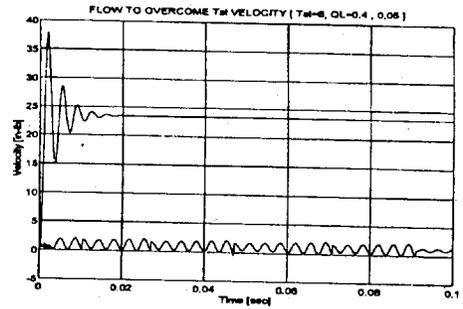
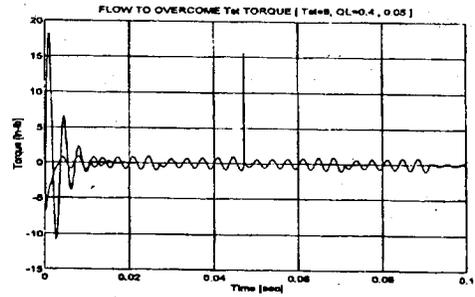


그림 5. 공급유량의 변화에 따른 유압모터의 토크 및 속도선도($Q_L=0.4, 0.05$)

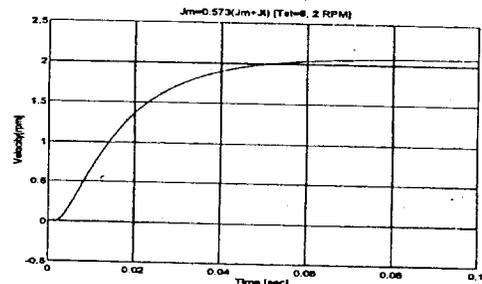
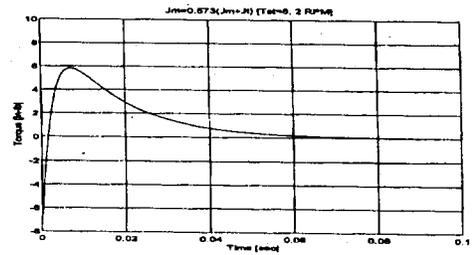


그림 6. 부하관성 모멘트 적용시의 토크 및 속도선도 ($J_m'=0.573 \text{ lb-in-s}^2, \omega_m=2 \text{ rpm}$)

4. 제작공정

유압모터의 설계제작은 생산기술이 뒷받침되지 않으면 불가능하다. 군사용 고정밀 유압모터에 대한 수차의 시행착오를 거쳐 확립된 주요 구성품의 대표적인 제작공정을 그림7에 도시하였다.

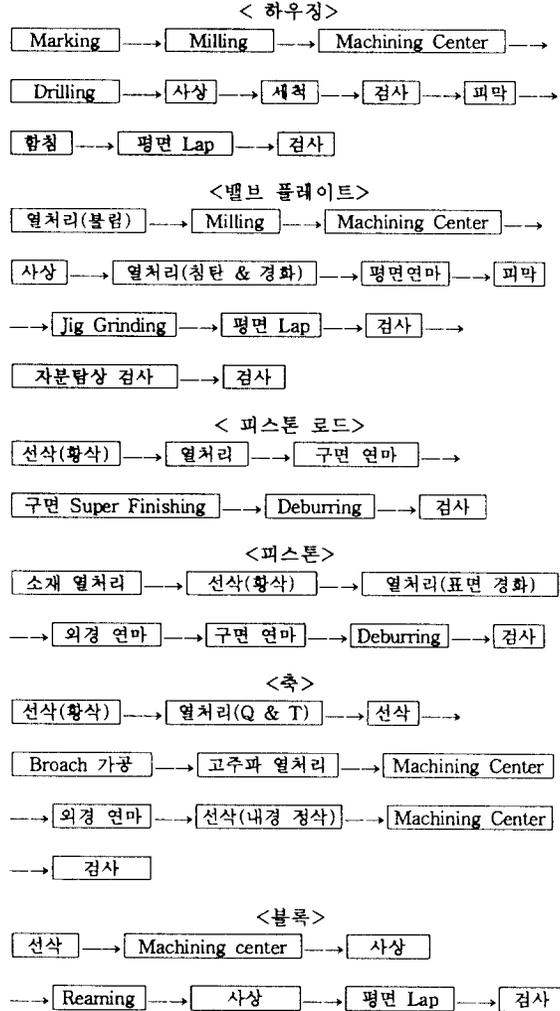


그림 7. 주요 구성품의 대표적인 제작공정도

주요 특수공정으로 열처리(Normalizing, 침탄법(고체 침탄법)), 호닝, 래핑 등이 있다. 래핑 가공으로써 치수 공차 및 형상공차를 만족시키기 위해서는 호닝 가공에서 최대한의 정밀도를 내야 한다. 호닝 가공시 가공상의 문제로 인하여 형상공차의 벗어남이 어느 한계를 넘어서면 래핑 가공에서 형상공차를 맞추기란 불가능하다. 호닝가공중에 생긴 Bellmouth, Barrel, Taper-In Open Hole, Rainbow 현상 등의 방지 및 수정은 일습씨상의 문제이므로 가공장비에서 얻을 수 있는 정밀도 및 형상공차를 내기 위해서는 작업자의

숙련과 경험이 필요하다. 호닝면에서 호닝작업에 의해서 생길 수 있는 현상을 수정하는 트리블슈팅 가이드가 있지만 가공장비로써 도면의 형상공차를 만족시키기는 극히 어려워 최종적인 형상공차를 만족시키려면 수작업(Hand Finishing)이 이루어져야 한다. 이러한 수작업 공정은 래핑으로 이루어지는데, 래핑은 래핑 바아에 램제(Lapping Compound)를 묻혀 왕복운동을 시킴으로써 램제에 의해 가공물 표면으로부터 극히 미소한 칩을 제거하여 치수가 정확한 매끄러운 다듬질면을 얻는 방법이다.

주요 가공장비의 특성을 표4에 나타내었다.

표4. 주요 가공장비의 특성

장 비 명	주요 가공품	Capacity
Spherical Superfinishing M/C <TOYO KUKI>	피스톤 로드 피스톤 피스톤 슈우 링크	Spindle Drive : 100~1500 rpm Superfinishing Unit Drive : 100~1500 rpm Swiveling Angle : 15' MAX 가공크기 : 외경구 ϕ 1.5~ ϕ 80 내경구 ϕ 5~ ϕ 50
Machining Center <TNV 50>	블록 축	500x400x500 Div : 1 μ M,
Horizontal Machining Center <BMC6C>	하우징	800x700x800 Div : 1 μ M Angle Div : 10'
Internal Honing Machine <PHOSA>	블록	Spindle Drive : 150~2500 rpm Reciprocating Motion's Table - Drive: 0~220 movements/min - Stroke : 0~100 mm

측정기술은 가공기술과 불가분의 관계로써 측정결과를 근거로한 재가공이 수행된다. 특히 차압 및 케이스 드레인 누유, 저속구동특성과 깊은 관련이 있는 블록의 Bore 부위(9곳)의 가공이 매우 중요하다. 블록의 Bore 부분은 Blind Hole 형태로써, 가공시 치수공차(ϕ 10.316 +0.007/-0.000)와 형상공차(∇ / 0.005)를 만족시키기가 매우 어려운 형상이기 때문에 가공 및 측정시 표5와 같은 공구 및 측정기가 필요하다.

표5. 주요 공구 및 측정기

구분	가공	측정
공구 측정기	End Mill(ϕ 9.6) → Micro Boring Bar(ϕ 10.13) → Mapal Reamer(ϕ 10.317) → Lapping(ϕ 10.317 +0.007/-0.000)	치수 : 3-Point Micrometer로 측정 형상공차(원통도): Electro-Air Plug Gage로 측정

여기에 사용된 Electro-Air Plug Gage는 Air Plug를 피측정물내에서 왕복/회전 시키면서 Air Nozzle(A, B, C)을 통해 나오는 공기량(틈새에 비례)을 전기적으로 변환시켜서 Column Gage에 지시되도록 하여 정밀측정을 수행한다.

5. 시험결과 및 고찰

설계제작된 유압모터의 성능시험은 자체 설계제작한 전용 성능시험장비를 이용하였으며(그림8), 성능요구조건 및 시험결과는 표6과 같다.

표6. 유압모터의 성능요구조건 및 시험결과

항 목	요 구 조 건	시 험 결 과
정격토크	정격차압 112.5Kgf/cm ² , 정격속도 4700rpm에서 2.57 Kgf·m이상	CW : 2.76 CCW : 2.86
정지토크	정격차압 112.5kgf/cm ² 인 상태에서 1회전 범위내에서 4초를 90°간격으로 측정시 정지토크는 2.42Kgf·m이상	CW : 2.55 CCW : 2.68
초기마찰토크	수동조작으로 축 회전시 소요 토크는 9.22Kgf·cm이하	CW : 6.30 CCW : 6.20
과속도	5875~6000rpm의 속도로 30분간 간헐적으로 구동시 손상이 없어야 함	CW : 수락 CCW : 수락
토크 맥동	정격차압 및 정격속도(600, 2000, 4800rpm)로 구동시 토크 변동율은 ±10%이내	600 1.2/1.2
		2000 1.7/1.7
		4800 1.4/1.7
차압 및 계적효율	3240rpm으로 무부하 구동시 양포트의 차압은 8.43kg/cm ² (120psid)이하	CW : 4.22 CCW : 4.22
	부하를 인가하여 차압이 1600psid가 되었을때, 속도는 140rpm이상 떨어지지 않는 안됨	CW : 21 CCW : 43
저속 특성시험	정격속도에서 정지시까지 속도를 서서히 줄였을때 속도 및 압력에 불안정현상이 없어야 함	CW : 수락 CCW : 수락
케이스 드레인누유	공급압력 105.5kg/cm ² , 2,600±60rpm에서 케이스 드레인으로 나오는 누유는 165cc/min이하	CW : 135.5 CCW : 147.8
속시일 과 외부누유	정상 작동상태에서 속시일 누유 15방울 이내여야 하고, 외부누유는 없어야 함	수락
균형	최고속도 구동시 손상을 주는 이상진동이 없어야 함	수락
작동 및 소음	속도 3000rpm, 압력 35.2, 70.3, 140.6Kgf/cm ² 으로 각각 구동시, 과도한 소음이 없어야 함	수락
내구성 시험	250시간 구동시험 및 1000회의 기동-정지 시험시 파손이 없어야 함	수락
내압	입,출구 포트에 316.4Kgf/cm ² , 드레인포트에 10.5Kgf/cm ² 로 2분간 인가시, 누유없이 견디어야 함	수락
파손압	입,출구 포트에 527.3Kgf/cm ² , 드레인포트에 26.4Kgf/cm ² 로 2분간 인가시, 누유없이 견디어야 함	수락
전단	정격 토크의 3배 토크에도 비틀림이 없어야 함	수락
환경시험 (습도,저온,고온,기본 충격,저장 온도)	각 환경조건 적용중 및 후 성능요구조건을 만족하여야 함	수락

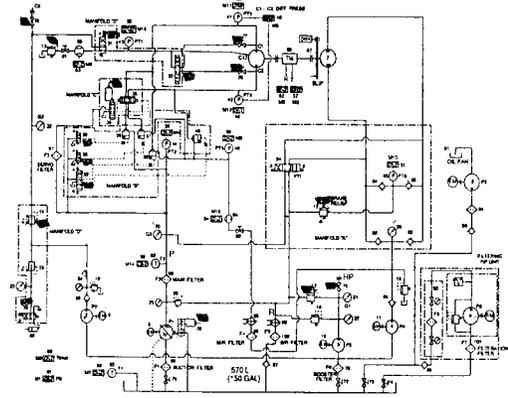
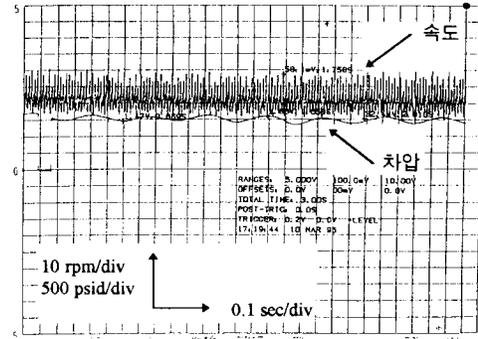
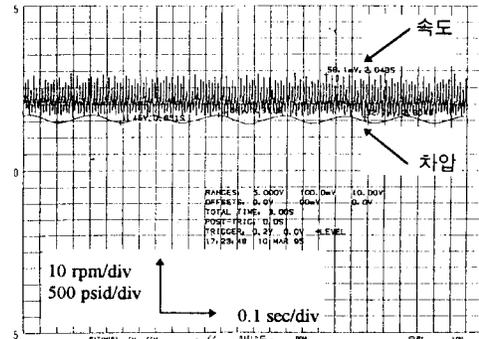


그림 8. 유압모터 성능시험장비의 유압회로도

그림9은 유압모터의 저속특성시험시 약 58-32 rpm, 1660-1470 psid의 회전속도 및 차압 선도를 보여주고 있으나, 시험회로상 0 rpm으로 감소할 경우 부하 인가용 모터 또한 0 rpm으로 접근함에 따라 압력부하형성이 급격하게 감소하는 상태가 되므로 이 이하의 저속시험은 수행할 수 없었다. 이의 해결방법은 플라이 휠과 같은 관성부하를 시험모터에 인가함으로써 보다 정확한 저속구동시험을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.



시계방향



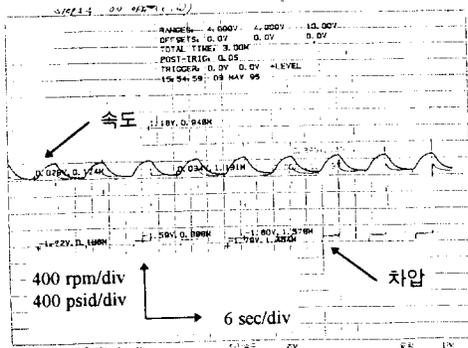
반시계방향

그림 9. 유압모터의 저속특성시험 결과 선도

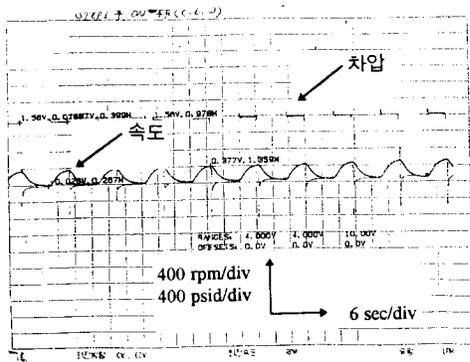
제품의 수명 및 신뢰성을 판정하는 내구성시험은 표7과 같이 구성되며, 단계별로 1회의 고압 구간과 1회의 저압 구간으로 된 반복 사이클로 구성된다. 정격 차압 112.5 +3.5, -2.1 Kg/cm²(1600 +50, -30 psid)에서 3±0.25 분간 구동하는 고압 구간후 즉시 저압 구간 56.2 +3.5, -2.1 Kg/cm²(800 +50, -30 psid)의 차압에서 12±0.5 분간의 구동되어야 한다. 내구성 시험의 초기 1 단계 및 최종 6 단계 후에는 극한 운동조건하에서 각 부품들의 내구도를 점검하기 위하여 500회의 기동-정지 시험을 수행하였으며, 각 기동-정지 시험 동안에는 결합체의 차압이 정격차압의 120~150% 가 유지되도록 하였다. 그림10은 유압모터의 내구성 시험중 1 단계 후의 기동-정지 시험 선도로서 속도 및 차압변위를 나타내고 있다.

표7. 내구성 시험 단계

시험 단계	시간 (Hr)	속도 (RPM)	차압 (Kg/mm ²)	케이스 및 출구 압력 (Kg/cm ²)	입구측 유온(℃)
1	22.5	1728±288	50~100	7.0 이하	37.7±2.7
2	37.5	3168±144	50~100	7.0 이하	50±10
3	112.5	4042±96	50~100	7.0 이하	50±10
4	22.5	4800±96	50~100	7.0 이하	50±10
5	5.0	960±96	50~100	7.0 이하	50±10
6	50.0	5280±96	60~100	7.0 이하	50±10



시계방향



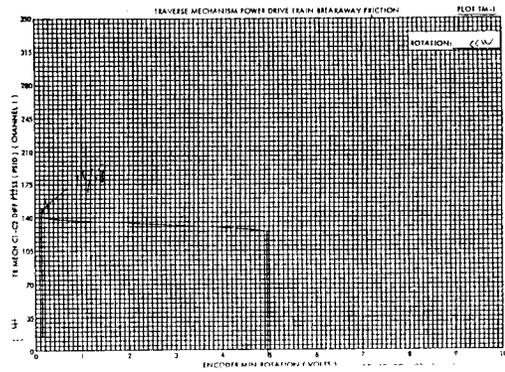
반시계방향

그림10. 내구성시험(1 단계) 후의 기동-정지 시험 선도

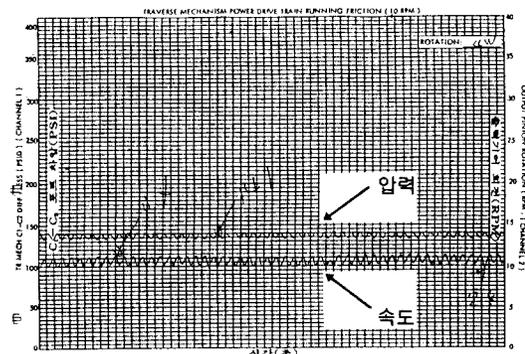
유압모터는 감속기 역할을 하는 선회장치에 결합되어 체계의 레이스과에 맞물려 대부하를 구동시킨다. 선회장치에 결합하여 마찰력 측정결과를 표8 및 그림11에 나타내었다.

표8. 선회장치 결합시험 결과

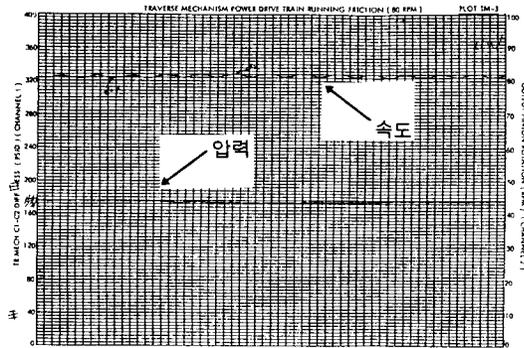
항목	시험조건	요구사항	시험결과		
초기 마찰	브레이크 압력포트 : 1600psig 공급 바이어스 압력 : 300-750psig	출력피니언 최초회전시 양포트사이의 최대차압 : 350psid 이하	CW	181	
			CCW	148	
작동 마찰	브레이크 압력포트 : 1600psig 공급 바이어스 압력 : 300-750psig (출력피니언 계속적인 회전유지 : 0.05-160rpm)	출력피니언 최초회전시 양 포트사이의 최대차압 : 350psid 이하 속도변동율 : 10% 이하	10rpm	CW	150/5.25%
				CCW	140/6.13%
			80rpm	CW	165/1.23%
				CCW	175/3.78%
			160rpm	CW	238/1.18%
				CCW	230/1.05%



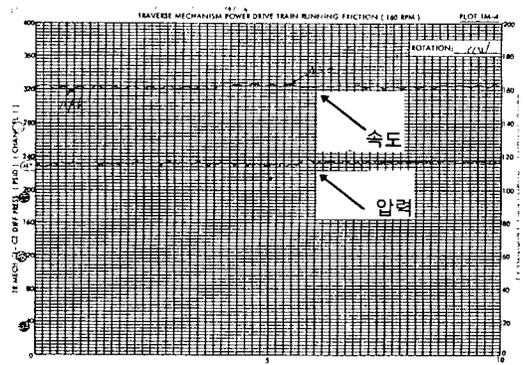
Breakaway Friction



Running Friction(10rpm)



Running Friction(80rpm)



Running Friction(160rpm)

그림11. 선회장치 결합시의 마찰력 선도

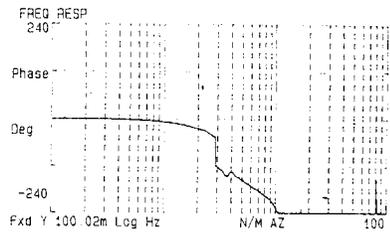
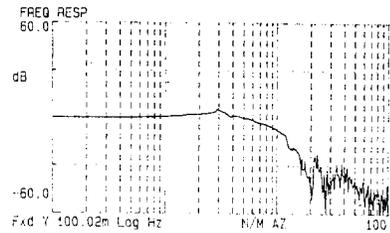
유압모터의 최종적인 성능은 체계에 장착하여 시간 및 주파수 영역의 성능시험을 통하여 입증할 수 있다. 표9는 체계 장착시험결과를 보여주고 있으며, 규격치보다 양호한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

표9. 체계 장착시험결과

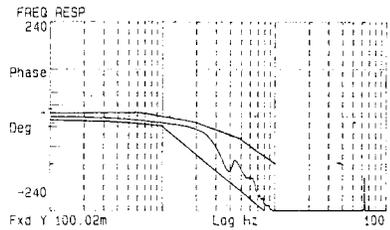
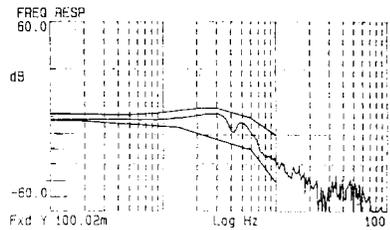
항 목	요 구 조 건	실 험 결 과
정상모드 선회속도(CW/CCW)	9.0초/1회전 이하	7.78/7.68
비상모드 선회속도(CW/CCW)	8.5초/1회전 이하	7.83/7.76
선회추적속도	0.25~30mil/sec 로 추적가능	1.13
비상모드 편류(좌/우)	0.5mil/sec 이하	0.3/0.3
선회동특성(정상/비상모드)	동특성 규격 선도	양호/양호(그림12)

성능시험을 수행하면서 시행착오를 거쳐 규격을 만족하는 제품을 개발하였으며, 케이스 드레인 누유, 저속특성 및 차압 항목은 생산기술측면에서 형상공차에 대한 지속적인 관리가 요망되며, 치공구 및 게이지의 향상이 양산품질보장에 기여하리라 생각된다. 선회장치 시험 및 체계 장착시험에서는 충분한 성능을 보여주었으며, 극심한 환경조건에서

도 성능이 입증되었다. 내구성시험을 거치면서 설계/제작상의 문제점을 도출하여 보완함으로써 수명시간을 입증하여 체계적용에 문제가 없도록 하였다.



정상 모드



비상 모드

그림 12. 체계 장착시 선회 동특성 선도

6. 결 론

군사용의 고정밀 소형 고효율 모터에 대한 국내기술기반 구축과 군전력증강을 목적으로 추진한 정용량형 사축식 피스톤 모터의 국산화 독자개발을 통하여 설계제작기술 확보와 데이터 베이스 구축활동을 성공적으로 완료하였다. 기술기반이 취약한 상태에서 유사 실물 분석자료, 군사 규격서, 선진업체 관련자료, 선회장치 규격서, 유사모델 관련 자료 등에 의한 유압모터 관련 규격 및 기술자료를 창생하였고, 시험평가방안을 확립하여 성능을 입증하였다.

관련자료 수집을 통한 기술분석을 근거로 설계제작 및

시험평가를 수행하였고, 보완설계 및 시험평가 방법을 개선 시켜 품질향상을 기하였으며, 제작 및 측정 기술과 밀접한 관련이 있는 무부하시 양포트사이의 차압 초과, 케이스드래인 누유 과다, 저속영역에서의 속도변동률 초과, 내구성 시험시의 부품파손 등의 문제점이 발생하였으나, 전용 치공구 및 게이지 등의 확보, 기술분석, 설계변경 등을 통하여 해결하였다.

본 유압모터의 독자개발은 부가가치가 높은 유압분야 핵심부품의 기술확보는 물론 각종 무기체계에 적용되는 고정밀 유압모터의 개발 및 민수용 모터의 독자개발에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 본 개발기술을 토대로 각종 유압모터 및 유압펌프의 개발을 수행하여 군전력증강 및 외화결약에 기여하고자 한다.

7. 참고 문헌

- 1.H.E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1967
- 2.고정밀 대출력용 사축식 피스톤형 유압모터의 기술분석, 국과연, 1994.12
- 3.Raymond P. Lambeck, Hydraulic Pumps and Motors : Selection and Application for Hydraulic Power Control Systems, Marcel Dekker,Inc., New York, 1983
- 4.G.J.Schoenau, R.T.Burton, and G.P.Kavanagh, "Dynamic Analysis of a Variable Displacement Pump," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, ASME, Vol.112, pp.122-132, Mar. 1990
- 5.MIL-H-46170, Hydraulic Fluid, Rust Inhibited, Fire Resistant Synthetic Hydrocarbon Base
- 6.MIL-M-7997C, General Specification for Constant Displacement Aircraft Hydraulic Motors
- 7.MIL-STD-810E, Environment Test Methods, Jul. 1989
- 8.MIL-STD-1472, Human Engineering Design Criteria for Military Systems Equipment and Facilities