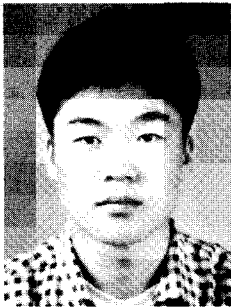


전자-유압식 서보밸브의 개발 동향



조 정 대

(KIMM 산업기술연구부)

- '94. 2 부경대학교 제어계측(학사)
- '96. 2 한국해양대학교 제어계측(석사)
- '96. 3 - 현재 한국기계연구원 연구원



윤 소 남

(KIMM 산업기술연구부)

- '86. 2 제주대학교 기계공학(학사)
- '90. 2 부경대학교 유압제어(석사)
- '94. 2 부경대학교 유압제어(박사)
- '94. 7 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서론

1950년 미국의 무그(MOOG)에 의하여 탄생된 전자-유압식 서보밸브(이하 서보밸브라 함)는 전기적인 입력에 비례한 유체출력을 내는 기구로 고출력, 고밀도, 고정도 특성과 더불어 매우 빠른 속응성을 갖고 있기 때문에 현재 일반 산업분야뿐만 아니라 군용, 항공용에 이르기까지 널리 이용되고 있으며^[1], 높은 재현성과 객관적인 데이터를 필요로 하는 각종 유압 시뮬레이터 및 놀이기구에도 이 서보밸브가 사용되고 있다.

그림 1에 서보밸브의 종류^[2]를 보였으며, 표 1 및 표 2에는 현재 국내에서 개발계획으로 있는 노즐-플래퍼형(Force Feedback Type)과 DDV(Direct Drive Servo Valve)의 사양에 대해서 MOOG사의 카탈로그 내용^[1]과 동경정밀(주)의 카탈로그 내용^[3]을 정리한 것이다. 표 1과 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 동일유량 상태에서 성능을 비교해 보면 DDV는 항공용 노즐-플래퍼형 서보밸브보다 성능이 떨어지고, 산업용 노즐-플래퍼형 서보밸브와는 비슷하나 중립점 누설특성이나 오염관리면에서는 매우 우수하다.

근래에 들어서 서보제어계의 중요성이 날로 증가되면서 서보밸브의 수요가 급증하고 있는 상태이다. 본 논고에서는 서보제어계에 대해서 간단히 기술하고, 본 논고의 주제인 서보밸브에 대해서 논하기로 한다. 서보밸브에 대해서는 현재 국내 및 국외의 개발동향 그리고 국내개발의 문제점 등을 나열하고, 서보밸브 성능과 관련된 인자들의 특성을 설계 및 제작과 관련지어 설명하기로 한다. 마지막으로 서보밸브뿐만 아니라

라 서보제어계의 동특성 향상을 위하여 사용되
는 디더(Dither)에 대한 원리 및 사용한계에 대
해서 설명하기로 한다.

2. 서보제어계 개요

종래에는 기계계를 설계한 후, 제어계를 기계
계에 맞추어 설계하는 방식을 취해왔으나 이는
제어계의 성능을 충분히 발휘하는데 장애요소로
작용했다. 따라서 기계계와 제어계의 매칭이 매

우 중요하며 제어대상인 기계를 제어계의 일부로
검토해야 한다. 이는 서보제어계를 구성하려면
먼저 제어를 고려한 시스템 설계 계획이 필요함
을 의미한다. 여기에서는 서보제어계를 설계할
때의 절차에 대해서 간단히 설명하기로 한다^[4].

가) 제어방식 결정

1) 제어구성 방법

사양조건에 따라서 밸브제어방식, 펌프제어방
식인지를 결정한다.

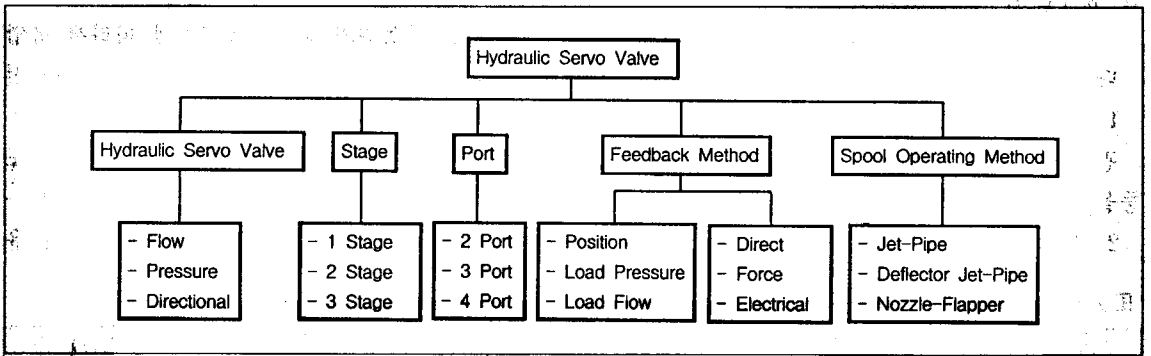


그림 1. 서보밸브의 분류

표 1. MOOG사 서보밸브의 특성비교

밸브 종류	D633 (DDV)	Moog34 (EHV)	J073-103 (EHV)	J079-103 (EHV, Electric F/B)	규격 (Mil-V-27162 SAE Arp490)
제작회사	JMOOG	MOOG	JMOOG	JMOOG	-
적용분야	-	항공	산업용	산업용	항공
작동압력	280 bar	210 bar	210 bar	210 bar	
무부하 정격유량	40LPM/70bar	41.6LPM/70bar	38LPM/70bar	38LPM/70bar	정격유량의 ±10% 허용
주파수 특성	60Hz/-3dB 80Hz/-90°	125Hz/-3dB 150Hz/-90°	90Hz/-3dB 110Hz/-90°	50/-3dB 80/-90°	-
Null Leakage	1.2LPM/140bar	1.2LPM/70bar	1.32LPM/70bar	1.32LPM/70bar	-
Linearity	-	-	-	-	±7% 이하
Symmetry	-	-	-	-	±5% 이하
Hysteresis	0.2%/140bar	-	2% 이하	0.5% 이하	3% 이하
Threshold	0.2% 이하	-	0.5% 이하	0.2% 이하	1% 이하
Null Shift	5%/55°C	-	2%/56°C	2%/56°C	2% 이하
작동온도	-20~ 80°C	-	-40°C ~135°C	-20~80°C	
오염도	15µm	-	10µm	10µm	
중량(kg)	1.9	-	1.2	1	

2) 구동방식
직선운동형(실린더)인지 회전운동형(유압모터)인지 결정한다.

3) 제어동작
부하에 대한 제어가 위치, 속도, 가속도인지 결정한다.

나. 블록선도 결정

시스템 전체에 대한 블록선도를 계획하여, 입력신호, 출력신호 등을 명확히 하고, 피드백요소를 생각한다.

다. 사양확인

- 1) 각종 물리인자 확인
관성능률, 질량, 스프링정수, 점성계수, 마찰력 등을 확인
- 2) 부하의 동작범위

최대속도, 최대가속도, 최대필요력 결정

3) 응답속도

정상특성 및 주파수특성 고려

4) 정도

정상편차, 외란의 영향, 분해능 등을 검사

라. 등가부하압력 계산

- 1) 요구속도 범위 및 각종 감속비율 결정
- 2) 요구부하로부터 등가부하압력 계산

마. 액츄에이터와 서보밸브 선정

1) 직선운동인가 회전운동인가에 따라서 유압실린더 및 유압모터를 선정하고, 서보밸브를 선정한다.

2) 부하압력, 부하유량곡선으로부터 부하선도를 그리고, 서보밸브와 액츄에이터의 부하압력-유량곡선이 부하곡선용 포함하는 서보밸브와 유

표 2. 동경정밀(주) 서보밸브의 특성비교

밸브 종류	SH03(DDV)	403F(고안정형 EHV)	225F(고속형 EHV)
제작정격유량(LPM)	10~60	3.2~63.6	3.5~56.5
적용분야	범용	로봇, 산업용	시험기, 가진기
작동압력(MPa)	0~21(35)	1~21	1~21(35)
공급측내압(MPa)	31(52)	31	31(52)
리턴측내압(MPa)	7	21	21
사용온도범위(°C)	-10~60	-10~80	-10~80
작동유점도범위(cSt)	10~400	10~400	10~400
내부누설(LPM)	0.12~0.5	0.63~1.84	0.6~3.2
Hysteresis	<1	<2	<2
Threshold(% , No Dither)	<0.2	<0.1	<0.5
Null Shift (%)			
10~100%Ps 변화	>1	>1	>2
30°C 온도변화	>2	>1	>2
주파수특성(Hz)			
입력 ±25%, -3dB	>90(70)	>20	>100(70)
-90°	>150	>45	>120
정격스폴변위(mm)	±1.5	±2	±0.3~±0.8
정격전류(A)	±1.6	±0.03	±0.03
코일저항(Ω)	8.6	200	200
중량(kg)	2.8	1.1	1.0

압모터를 선정한다.

- 바. 펌프 구동축동력을 결정
- 사. 계의 안정성, 동특성, 정도 검토
- 아. 유압유닛 사양결정

3. 노즐-플래퍼형 서보밸브

3.1 서보밸브의 구성

그림 2에 본 논고의 주제인 노즐-플래퍼형 서보밸브의 내부구조에 대한 개략도를 나타내었다. 서보밸브는 코일, 전자석, 아마추어로 구성된 토크모터부와 노즐, 플래퍼로 구성된 1단 증폭부, 스푼과 슬리브 및 필터로 구성된 2단 유압부로 나눌 수 있다. 슬리브는 유량특성을 향상시키기 위하여 내부에 환형의 슬롯을 형성하거나 사각형 포트를 만들기도 하며, O 링이 없이 금속접촉에 의한 씬(Seal)을 이용하기도 한다. 서보밸브에 내장된 필터는 20(μ m) 정도의 능력을 갖고 있으며, 필터내부에는 노즐 및 스푼의 안정성을 위하여 0.2(mm) 미만의 오리피스가 내장되어 있다.

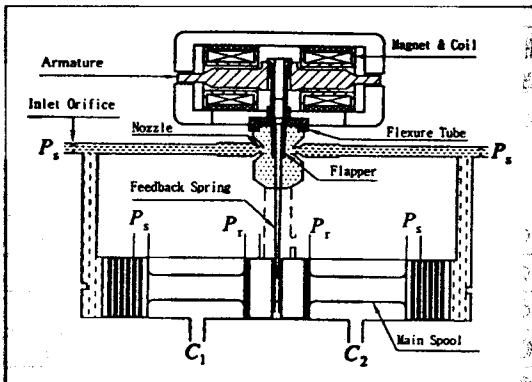


그림 2. 노즐-플래퍼형 서보밸브의 구성

3.2 서보밸브의 작동원리

그림 3에 노즐-플래퍼형 서보밸브의 작동원리

에 대한 흐름도를 나타내었다. 전기입력부에서 입력지령신호와 디더신호가 코일에 인가되면 자석에 자력이 발생하고, 자속방향으로 아마추어가 움직이게 된다. 아마추어에 직결되어 있는 플래퍼가 어느 한방향으로 움직이게 되면 플래퍼 양단의 노즐부에 압력차가 발생하고 이 압력차이에 의하여 메인스풀이 움직여 유량을 토출하게 된다. 이 때, 스푼의 움직임에 따라 피드백 스푼링이 같은 방향으로 움직이게 되고, 이 결과로 플래퍼 양단의 노즐 차압이 일정하게 되며, 메인스풀은 이동을 멈추게 된다. 서보밸브 시스템에서는 피드백스프링이 서보기구 역할을 하고, 입력전류에 비례하는 출력이 발생하는 기구이다.

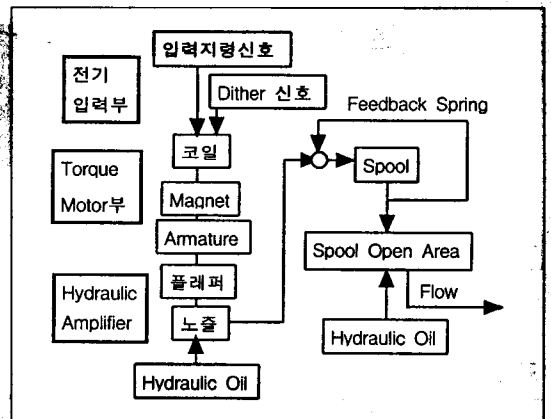


그림 3. 노즐-플래퍼형 서보밸브의 작동원리

3.3 서보밸브의 성능과 부품정도

서보밸브는 시스템에서 가장 중요한 요소이기 때문에 요구되는 성능도 매우 엄밀하다. 스푼끝단부의 확대도를 그림 4에 나타내었다. 입력 신호에 따라 출력유량이 제어되지만 이 유량은 끝단부의 개도(Open Area)에 비해하기 때문에 이 개도를 얼마나 정밀히 제어하고 유지하는가가 핵심이다. 시스템 전체의 오차 및 변동량은 스푼 위치로 집중되기 때문에 개도(X)에 대한 오차의 비율 그 절대치의 크기에 따라서 서보밸브의 가공정도가 나오게 된다. 일례로서 $P \rightarrow C_1$, $P \rightarrow C_2$

부 끝단의 랩(Lap)량에 따라서 유량특성이 변하고, 스펀면의 조도 및 진원도, 구성부품의 열팽창에 의해서도 그 특성이 변하게 된다.

서보밸브 각 구성요소들의 성능관계를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 주파수응답 즉, 서보밸브의 동특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 토크모터부의 코일과 피드백 스프링이다. 따라서 동특성 개선을 위해서는 기본

적으로 성질이 우수한 코일 및 고주파수 특성을 갖는 피드백 스프링이 필요하게 된다.

4. 디더(Dither)

토크모터(Torque Motor) 또는 포스모터(Force Motor)와 스펀(Spool)로 구성되어 있는 서보밸브는 토크모터의 전자기 특성이나 슬리브

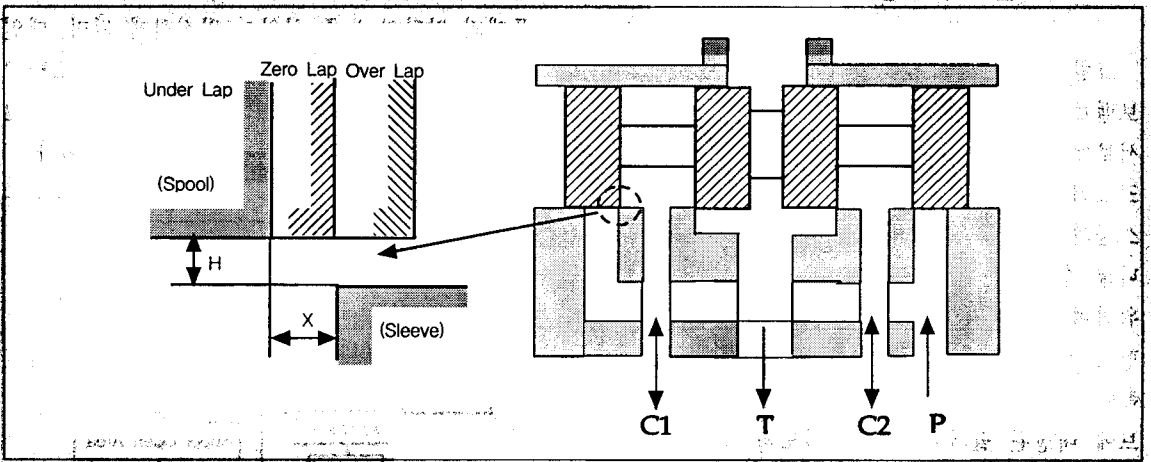


그림 4. 스펀 끝단부의 형상

표 3. 서보밸브 구성요소와 성능과의 관계

중요부품명	내구 수명	정적 성능 특성									중립점 특성				동특성 (주파수 응답)
		디더	정격 유량	내부 누설	스레 솔드	히스테 리시스	유량 게인	대칭 도	직선 성	압력 게인	중립점 바이어스	중립점 쉬프트	중립점 압력	불감 대	
토크 모 터 부	코일		○	○			○	◎	◎		◎	◎			◎
	자극				○	○		○	○		○				○
	튜브		○	○	○	○	○	○	○			○			○
	아마추어		◎	○		○	○	○	○		○	○			○
유압 전 단 증폭 부	영구자석	◎		◎				○	○	○		◎	○		○
	플래퍼	◎	○		◎			○	○	○	○	○	○		○
	노즐	○		◎	◎			◎	◎	◎	○	◎	◎	○	
	오리피스	○		◎	○			◎	◎	◎	○	◎	◎	○	
4방 안내 밸브 부	피드백스프링	○		◎		○	○	◎		○	○			○	◎
	스풀	◎	○		◎	◎	◎		◎	○	◎	◎	◎	◎	○
	슬리브	◎	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	○
	필터	○		○				○	○	○		○	○	○	○

○ : 관계있음, ◎ : 매우 관계있음

표 4. 서보밸브의 기본(표준)사항

정 격 유 량(LPM)	1~1000	
정 격 압 력(P_R , kgf/cm ²)	210,350	
사용압력범위(kgf/cm ²)	P_R	
공급측내압(kgf/cm ²)	$1.5 \times P_R$	
리턴측내압(kgf/cm ²)	P_R	
내부누설(LPM)	소량	
히스테리시스(%)	2~3	
스레숄드(%)	0.1~0.5	
중립점 쉬프트	공급측 80~110%입력	2%이하
	리턴측 0~20%입력	2%이하
	유온 40~50°C 변화	2%이하
	가속도 1g	0.2~0.5이하
중립점 압력계인%(PS/%IR)	공급압력의30%이상/ 정격전류의1%입력	
정 격 전 류(mA)	7.5~120	
주파수특성(Hz)	대형:100~200 소형:400~500	

(Sleeve)와 스펴 사이의 마찰력 때문에 히스테리시스와 데드밴드(Dead Band) 등이 존재하며, 미소한 오차신호를 추종하는 서보기구에 이 서보밸브가 사용되는 경우는 이러한 영향을 무시할 수 없다. 이를 해결하기 위해서 자주 디더를 사용하고 있지만 비선형성 때문에 정량적인 해석이 곤란하고 이로 인하여 디더에 대한 연구도 매우 적은 편이다. Kaneko^[5]의 연구결과를 요약해 보면 다음과 같다.

① 점성마찰계수가 0.4 이상이면 디더는 유효하며, 점성마찰계수가 큰 만큼 필요한 디더진폭은 작아져서 좋으나 서보계로서는 과도한 감쇄는 바람직하지 못하므로 마찰계수는 0.6~0.8이 적당하다.

표 5. 중요구성부품의 정도수준

	가공정도	정도수준	영향특성	가공법/측정법
스플 슬리브	진원도 원통도 면조도 랜드폭치수정도 랜드끝단부 랜드끝단면조도 경도 틈새	기본특성 IQ특성 히스테리시스 스레숄드 중립점근방 특성 수명 기본특성	기본특성 IQ특성 히스테리시스 스레숄드 중립점근방 특성 수명 기본특성	- 랜드폭치수는 스펴, 슬리브 기준 - 램프관리로서 절대치측정은 곤란 - 저점도액을 흘려 램프를 유량과 압력관계로 간접적 측정 - 슬리브 유로단면 형상가공과 유로와 스펴랜드폭과의 램프관리는 곤란
노즐 오리피스	Hole Diameter Hole 길이 플래퍼면 직각도 고정방법 경도	좌우대칭 좌우대칭 좌우대칭 열팽창	온도쉬프트 수명	- 2개의 상호차는 0이기 때문에 치수의 절대치 측정은 곤란. 저점도액을 흘려서 유량과 압력의 관계를 구하고, 간접적으로 치수를 측정
플래퍼	면 평면도 면 평행도 튜브와의 고정 노즐과의 틈새 경도	50~100 μ m (노즐/오리피스 직경에 따라 다름)	기본특성 온도쉬프트 수명	- 입력신호에 대한 좌우 이동량의 대칭성
피드백스프링	스프링정수와 안정성 끝단부의 내마모성	직진도 단면치수	유량계인 수명	
아마추어 자극	재질 자료 열처리	변형	안정성 대칭성	- 열처리 매우 중요
코일	권수 상호저항치	상호차 $\pm 0\%$ 근방	대칭성 직선성 온도특성	- 좌우의 상호차를 최소로 함

② 유효한 디더주파수는 스펙과 스프링의 고유진동수의 2~4배까지가 적당하다.

③ 디더진폭은 디더주파수에 따라서 변하며, 입력정현파의 진폭에 의해서도 약간 변하지만 적정한 디더 주파수 범위에서는 1 이상 즉, 고체동마찰력의 10배 이상의 진폭을 주면 디더는 유효하다.

무그^[6]에서는 디더 범위를 100~400[Hz], 디더진폭을 $\pm 20\%P.P$ 로 추천하고 있다.

5. 국내의 개발 동향

국외에서는 MOOG사를 선두로 하여, 동경정밀, 렉스로스, 비커스, 우찌다 등이 노즐-플래퍼형 서보밸브, 제트-파이프(Jet-Pipe)형 서보밸브, DDV를 개발하여 세계 각국에 시판하고 있으며, 현재에는 PZT형 서보밸브, 자기기억합금소자를 이용한 서보밸브의 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다. 또한 자연친화적인 입장에서 염분이나 수분으로부터 밸브의 신뢰성을 보장할 수 있는 수용서보밸브(Water Hydraulic Servo Valve)의 개발에도 관심을 보이고 있다. 국내에서는 동명중공업(주)과 한화기계(주)가 수년간의 조립생산 기술축적을 바탕으로 밸브개발을 시도해 왔으나, 동특성 및 신뢰성 문제를 해결하지 못하여 여전히 과제로 남아 있는 상태이며, 꾸준한 연구 노력을 기울이고 있는 실정이다. 최근에는 민군겸용과제화하여 3여년 동안의 연구계획을 짜고 있는 상태라 전망이 매우 밝은 편이라 하겠다.

국내의 서보밸브 개발에 있어서 문제로 되는 것은 3장에서 밝힌 바와 같이 각 부품들에 대한 치수정도가 매우 엄격하기 때문에 이들을 어떻게 관리할 것인가 하는 것과, 2단으로 이루어진 서보밸브의 동특성과 관련된 인자들이 너무 많아 정량적으로 분석하기가 어렵다는 것이다. 설계사양에 적합한 서보밸브의 개발을 위해서는 다음과 같은 사항들을 점검하고 해결해야 할 것이다.

1) 동특성 향상을 위해서는 부품들의 특성 이

전에 시스템 조립기술을 고려해야 하는데, 기구학적 특성의 이해를 바탕으로 풍부한 경험과 정교한 기술을 갖추고 있어야 한다.

2) 재료의 특성변화 없도록 Welding 및 열처리 도중에 주의해야 한다.

3) Torque Motor 부에서는 전기 및 재료의 복합적인 기술을 구사할 수 있는 능력이 필요하다.

4) 노즐-플래퍼부에서는 동특성 관리에 신중을 기해야 한다.

5) 피드백스프링의 설계 및 제작시에 주의를 해야한다.

6) 스펙 및 슬리브의 중립점 특성에 주의하여 가공 및 조립을 수행해야 한다.

7) 전기적으로 정확한 신호처리가 필요하다.

6. 결 론

지금까지 노즐-플래퍼형(힉피드백형) 서보밸브에 대해서 성능에 영향을 미치는 물리적 인자 및 국내의 개발동향 등에 대해서도 간단히 알아보았다. 서보밸브의 개발은 초기의 역설계 과정에서부터 필요한 물리 인자를 도출하는 과정에 이르기까지 상당히 지루하고도 힘겨운 작업인 것은 사실이다. 다행히도 민군겸용 과제로 채택되어 6월부터 연구가 시작된다하니 매우 반가운 일이며, 유공압에 종사하는 한사람으로서 환영하는 바이다. 특히, 정밀가공 및 숙련된 조립 기술을 요구하는 서보밸브 개발에 다년간 풍부한 경험들을 축적해 온 회사들이 참여하였다는 것은 단기간 내에 성공적인 결과를 내고, 머지않아 국산품 서보밸브가 장착된 비행기, 군용장비가 생산될 것이며, 각종 시뮬레이터와 심지어는 놀이기구에 이르기까지 적용되는 쾌거를 이룰 것이라는 생각을 해 본다.

참 고 문 헌

[1] MOOG, MOOG Technical Bulletin, 141,

- pp. 3~7, 1978.
- [2] E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, Inc, pp. 174~180, 1961.
- [3] 동경정밀(주), "SH형 서보밸브", 기술자료, pp. 1~10, 1999
- [4] 佐藤俊雄, 油壓サーボ制御の設計, 大河出版社, pp. 112~132
- [5] 金子 敏夫, "サーボ弁のデザイナーについて", 日本機械學會關西支部209回講演會 pp. 5~8, 1961. 11.
- [6] MOOG, MOOG Catalogue 301 385, pp. 8, 1996.