

직동력 고응답(Power-By-Wire) 액추에이터 시스템 개발 Development of PBW Actuator System

손자덕 · 정호경 · 박성환

J. D. Sohn, H. K. Chung and S. H. Park

1. 서론

본 해설에서는 전기모터로부터 직접 전달되는 동력을 이용하여 작동되는 유압펌프 조립체와 유압 액추에이터 등이 일체로 구성되어 있는 직동력 고응답 액추에이터 시스템 개발 내용을 소개한다.

일체형 액추에이터는 EHA(Electro Hydrostatic Actuator) 또는 PBW(Power By Wire) Actuator로 호칭되며, 서보전동기 · 유압펌프 · 액추에이터의 구성품들이 모듈화되어 제어기의 제어로 작동되는 직동력(Direct Drive), 고응답(High Performance) 액추에이터 시스템의 기술개발을 위하여 설계 · 제작 및 실험을 행하였다.

2. 기술 개발 배경

항공기 비행조종면 작동 및 굴삭기 등의 일반 산업분야에는 유압액추에이터를 적용하고 있으나 이러한 유압식 액추에이터는 큰 탱크가 있는 용량이 큰 중앙공급식 유압파워시스템이 필요하다. 즉 유압펌프 및 펌프를 구동하기 위한 동력원장치, 유체를 저장하는 탱크, 별도로 설치된 유압구동기와 연결되는 공급배관 등이 필요하다. 이러한 종래의 유압시스템은 정비성과 에너지손실, 누설위험, 소음발생, 저응답성 뿐만 아니라 항공기의 경우 항속모드에서도 유압장치의 작동이 필요하므로 에너지 효율에 불리한 문제점이 있다. 이러한 문제점 해소를 위한 개념으로 각 유압장치 구성품을 일체로 모듈화한 액추에이터 시스템을 선진국에서는 90년대 후반 부터 개발하여 항공기 · 일반산업용으로 개발품을 운용 중에 있어, 국내에서도 핵심기술확보를 위한 개발 진행 필요성이 대두되었다.

3. PBW 액추에이터의 정의 및 특징

3.1 PBW 액추에이터 시스템의 정의

그림 1의 시스템 구성도에서 나타낸 바와 같이

유압펌프와 서보전동기 등의 기기가 유압실린더와 일체로 구성된 시스템으로서, 전기신호로 제어하며 비행조종면 등을 작동하는 모듈화된 액추에이터로 정의된다.

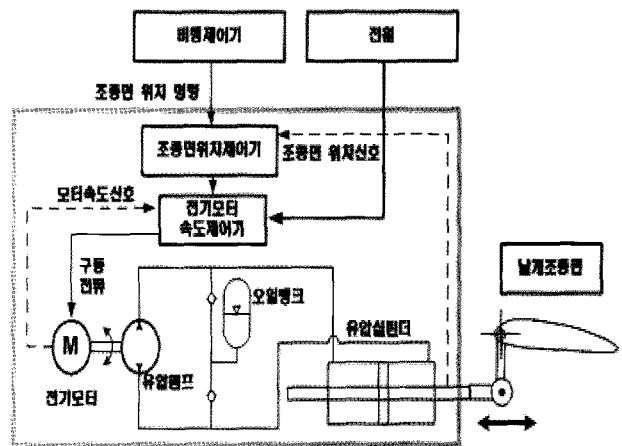


그림 1 시스템 구성도

3.2 시스템의 구성 특징

그림 1의 시스템 구성도에서 보여주는 것처럼 유압동력은 액추에이터와 직결된 유압펌프에 의하여 발생된다. 유압펌프는 정용량형 유압식펌프를 사용하며 펌프의 작동은 서보전동기에 의하여 구동된다. 액추에이터의 유량 및 작동방향은 전동기의 회전방향과 속도를 가변제어 하므로써 별도의 제어밸브 없이 펌프의 유량 및 방향을 변경시킨다.

4. PBW 액추에이터 시스템의 개발

4.1 개발 목표성능

표 1은 액추에이터시스템 개발 설계요구조건이며 Parker사에서 개발한 항공기 조종면 작동용 EHA의 성능규격(Performance Specification)을 참조하였다. 본 개발원고에서는 PBW 액추에이터의 Hard Ware (시스템/유압펌프/액추에이터) 설계에 대하여 기술하고 시스템의 목표성능 특성실험 결과에 대하여 기술한다.

표 1 Performance Req. for Actuator System

Classification	Requirements
Stroke	$\pm 33.5\text{ mm}$
Weight	50 kgf
Stall Force	$15,700\text{ kgf}$
No-load Velocity	$122.9 \sim 142.5\text{ mm/s}$
Loaded Velocity	$73.1 \sim 88.6\text{ mm/s}$ @ $10,125\text{ kgf}$
Output Power	8.2 kW
Frequency Response	$3.8\text{ Hz at } -3\text{ dB, } -90^\circ$
Operating Pressure (max.)	210 kgf/cm^2
Pump Rotating Speed (max.)	$10,000\text{ rpm}$

4.2 액추에이터 시스템 설계

4.2.1 시스템 유압회로도

PBW 액추에이터시스템은 폐회로 유압식 구동기의 원리에 기초한다. 시스템의 핵심 구성품은 정용량 · 고성능의 양방향 사판식 피스톤펌프이다. 액추에이터의 출력과 속도, 방향은 BLDC 서보전동기에 의해 속도 및 방향이 제어되는 유압펌프에 의해 조절되며, 펌프 흡입관로의 캐비테이션 방지 및 공기유입 방지 목적의 저압 $5.5\text{ kg/cm}^2(80\text{ psi})$ 축압기로 구성된다.

그림 2는 시스템의 유압회로도이며 표 2는 주요구성품의 사양을 나타낸다.

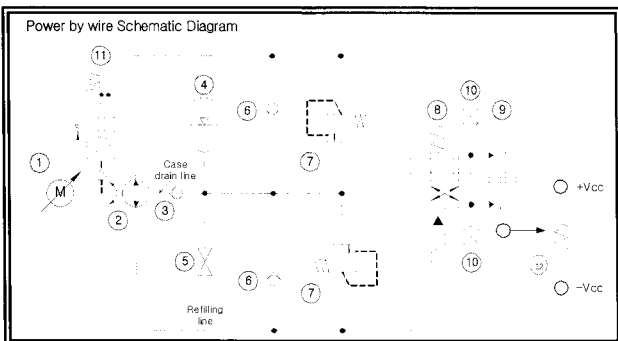


그림 2 PBW 액추에이터 시스템의 유압회로도

4.2.2 액추에이터 시스템 설계

액추에이터시스템의 설계는 유압펌프와 액추에이터의 유체발생의 연결을 위한 최적 배치설계가 관건이다. 외부의 튜빙 없이 매니폴드 내부에 유체관로를 형성하여 크기 최소화를 도모하였으며 또한 외부누설의 위험성을 배제하였다. 또한 펌프와 액추에이터간 유체흐름의 균일한 동적특성을 위하여 대칭적 유로

설계를 하여 In-Out Flow와 Out-In Flow가 동일하도록 설계하였다.

그림 3은 PBW 액추에이터시스템의 모델링형상이며 그림 4는 매니폴드 내부의 In-Out Flow 관로를 나타낸다.

표 2 PBW 액추에이터 시스템 구성품 사양

품명	사양
서보전동기조립체	270Vdc, 80A, 10,000rpm, 리졸버 속도센서
펌프조립체	$5.2\text{ cm}^3/\text{rev}$, 사판/피스톤식, 고정용량형
액추에이터조립체	양로드, 복동식, 변위센서 내장(측정범위 $\pm 2.0\text{ in}$)
축압기조립체	사용압력 5.5 kg/cm^2 , 작동저용량 300cc, 금속벨로우즈형

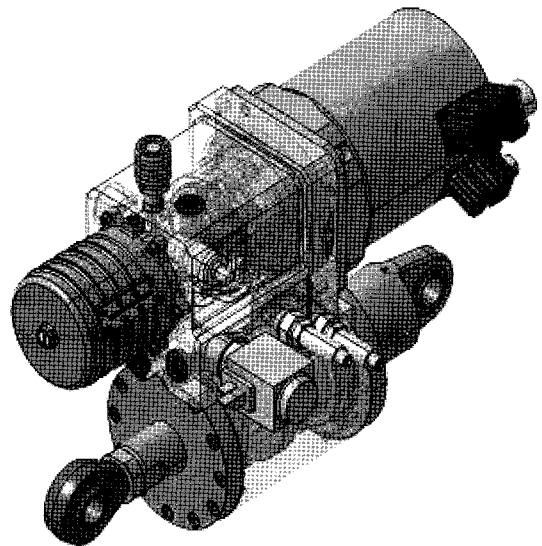


그림 3 PBW 액추에이터 시스템 모델링 형상

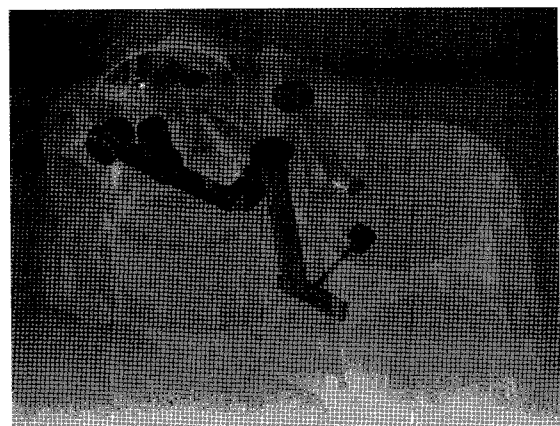


그림 4 PBW 액추에이터 매니폴드 유체관로

4.2.3 유압펌프 설계

PBW 액추에이터용으로 고속, 고압 및 소형의 고성능 유압펌프의 성능획득을 위하여 항공용 사판식 피스톤 펌프를 선정하여 개발하였다. 회전속도 10,000rpm(max.), 배제용적(Displacement Volume per Revolution) $5.2\text{cm}^3/\text{rev}$, 토출압력 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 성능사양에 PBW 액추에이터의 작동특성에 부합되도록 양방향 펌프로 설계하였다.

펌프에서(로) 토출 및 흡입되는 Out-In 유량 외의 누설유량(Case Drain 유량)은 매니폴드 내부의 관로를 통하여 축압기로 저장되도록 연결되어 있다.

PBW 액추에이터에 적용된 유압펌프의 설계규격은 다음 표 3과 같다.

표 3 Hydraulic Pump Specification

Classification	Specification
Displacement Volume	$5.2\text{cm}^3/\text{rev}$
Operating Pressure (max.)	$210\text{kgf}/\text{cm}^2$
Pump Rotating Speed (max.)	$10,000\text{rpm}$
Hydraulic oil	MIL-F-83282 or MIL-F-5606
Operating Temp.	$-40 \sim +135^\circ\text{C}$
사판각도 (Swashplate Angle)	17.5°
피스톤 행정거리	11.0mm
피스톤 수	7개
피스톤 직경	9.355mm

유압펌프의 설계 모델링 형상은 그림 5와 같으며, 그림 6은 유압펌프의 성능해석(CFD해석)을 위한 사판식 피스톤펌프 회전체 그룹의 해석 모델링을 나타낸다.

그림 7은 사판식 피스톤펌프에서 중요한 부품중의 하나인 양방향 유압펌프의 밸브플레이트(Port Plate) 설계형상을 나타낸다.

밸브 플레이트의 TDC 또는 BDC에서 흡입/토출구 시작 지점까지의 각도는 그림 7에 나타낸 바와 같이 37° 로 설계하였다.

4.2.4 액추에이터 설계

액추에이터 실린더의 압력면적을 동일하게 하기 위하여 대칭적(Symmetrical Actuator)으로 설계하여

유체균형이 이루어 지도록 복동식의 양로드로 설계하였다. 액추에이터 씰은 고속 왕복작동용 저마찰의 동적특성이 우수한 테프론 재질의 항공용 셸링시스템으로 선정하였다. PBW 액추에이터시스템과 같이 양방향의 폐회로 구성에서는 양방향 토크 및 유체유량을 동일하게 하면 제어 알고리즘 구성의 단순화가 가능하다. 액추에이터 내부에는 변위센서(LVDT)를 내장하여 위치제어 및 계측이 가능하도록 되어있다. 그림 8은 액추에이터의 설계 형상이다.

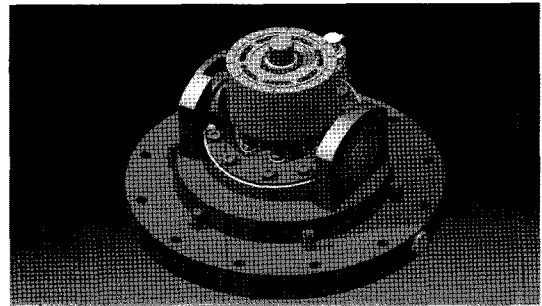


그림 5 PBW 액추에이터용 유압펌프 형상

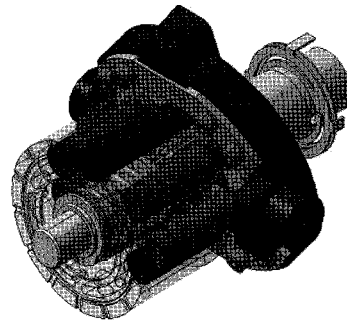


그림 6 펌프 회전체그룹 모델링 형상

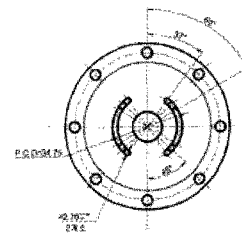


그림 7 유압펌프 밸브플레이트 형상

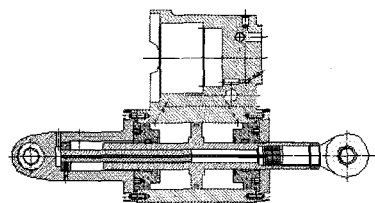


그림 8 PBW 액추에이터 설계형상

5. PBW 액추에이터의 성능시험

5.1 PBW 액추에이터 시험장치의 구성

PBW 액추에이터의 목표성능시험을 위하여 전용 부하시험장치를 설계하여 제작하였다. 시험장치의 구성품은 PBW액추에이터 설치블록과 부하실린더, 그리고 변위/속도센서와 로드셀 센서 및 부하실린더의 압력을 조절하여 원하는 부하를 생성할 수 있는 부하제어밸브(서보밸브)로 이루어져 있다.

그림 9는 PBW 액추에이터 성능시험을 위한 시험장치 구성도이다.

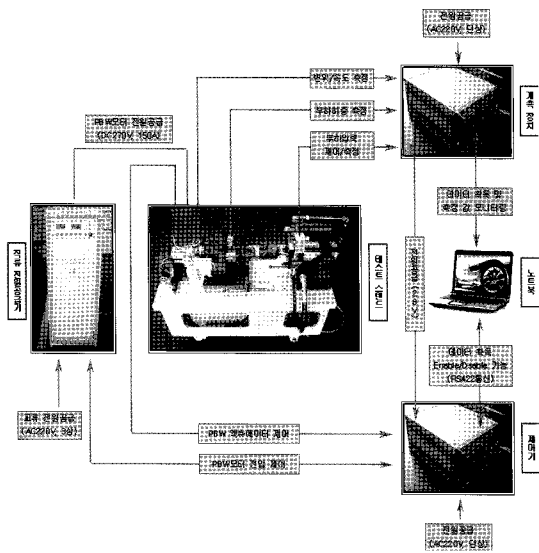


그림 9 부하시험장치 구성도

5.2 성능시험

PBW 액추에이터를 제작하여 개발 목표사항 평가를 위한 성능시험을 수행하였다. 핵심구성품인 유압펌프의 성능확보를 위하여 다수의 부품 설계보완을 통하여 만족스러운 펌프성능을 획득하였으며, 시스템에 장착하여 액추에이터 목표성능시험을 수행하였다

5.2.1 유압펌프 성능특성

유압펌프의 성능 목표사항에 대한 성능시험을 유압펌프 전용시험장비에서 수행하였다. 유압펌프의 양방향(CW/CCW) 특성이 균일한 특성결과를 보였으며 최대 토출압력인 210 kg/cm^2 , 최대압력에서의 토출유량은 배제용적 $5.2 \text{ cm}^3/\text{rev}$ 의 약90%의 성능 결과를 획득하였다.

다음 그림 10, 11, 12, 13은 유압펌프의 “회전속도(N)-토출유량(Q)”, “압력(P)-토출유량(Q)”의 결과를

나타내고 있다.

본 원고에서는 PBW 액추에이터의 정격조건 (12.7 N.m , 150 kg/cm^2 at $6,700 \text{ rpm}$)을 고려하여 회전속도 $6,700 \text{ rpm}$ 에서의 결과값을 기술한다.

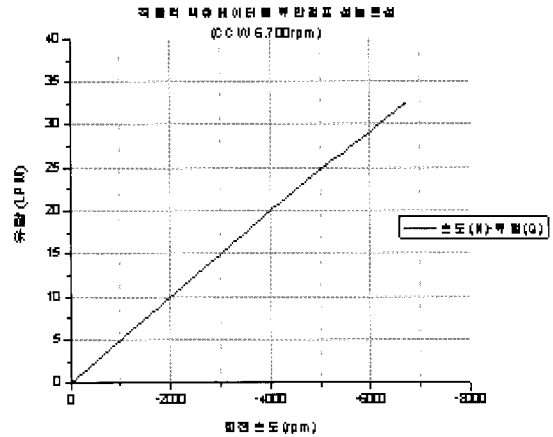


그림 10 유압펌프 CCW 성능특성(N-Q)

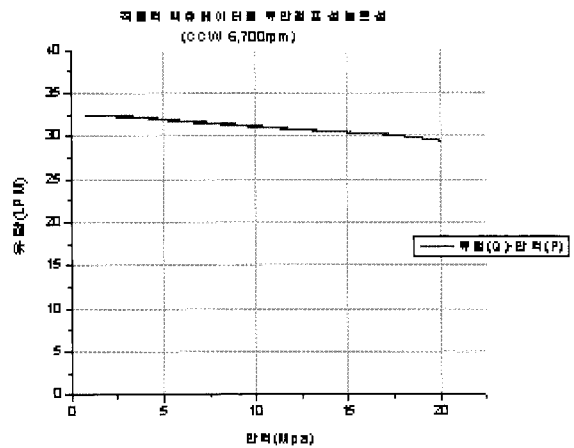


그림 11 유압펌프 CCW 성능특성(P-Q)

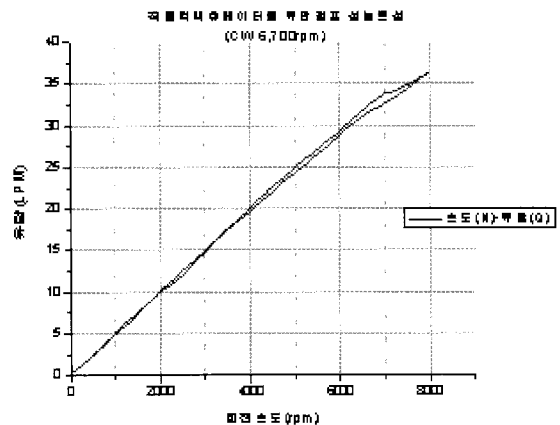


그림 12 유압펌프 CW 성능특성(N-Q)

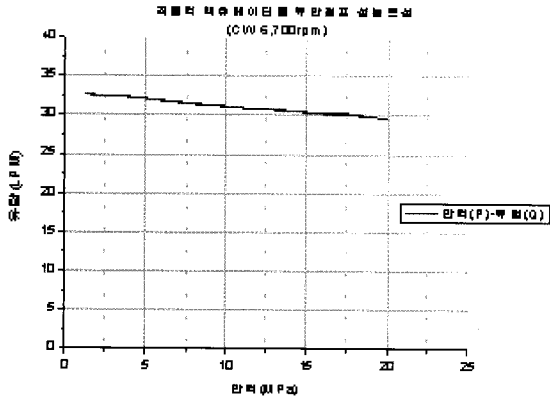


그림 13 유압펌프 CW 성능특성(P-Q)

5.2.2 액추에이터 시스템 성능시험

PBW 액추에이터의 개발 목표사항 평가를 위한 성능시험을 수행하였다. 본 원고에서는 액추에이터 작동속도, 최대구동력(Stall Force) 및 응답성능 특성에 대하여 기술한다.

그림 14는 부하시험장치에 장착된 PBW 액추에이터 시스템의 완성시제품을 나타낸다.

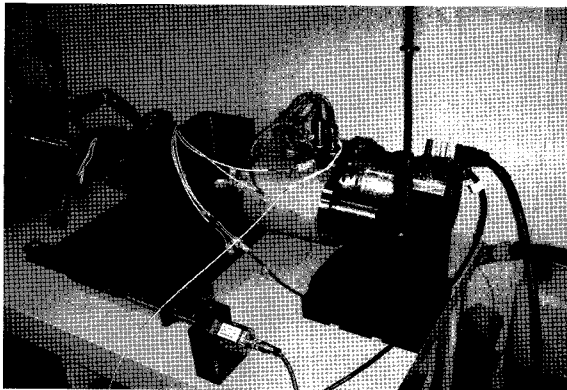


그림 14 부하시험стен드에 장착된 PBW 액추에이터 시스템

그림 15는 액추에이터 Stall Force 성능특성을 나타낸다. 액추에이터 최대구동력 개발 목표성능인 15,700kgf 시험을 위하여 부하실린더의 부하제어를 최대로 조절한 상태에서 액추에이터의 서보전동기를 구동하여 그림 13과 같이 부하압력 210 kg/cm², 최대구동력 16,000kgf의 성능을 확인하였다.

그림 16은 액추에이터 무부하속도 특성을 나타낸다. 무부하속도시험은 액추에이터 속도제어 명령을 인가하여 액추에이터의 작동성능 목표사항인 122~142mm/s를 만족하는 130mm/s의 결과를 획득하였다.

그림 17은 액추에이터 부하속도 특성을 나타낸다.

부하속도시험은 액추에이터 속도제어 명령을 인가하여 액추에이터의 작동성능 목표사항인 73~88mm/s를 만족하는 82mm/s의 결과를 획득하였다.

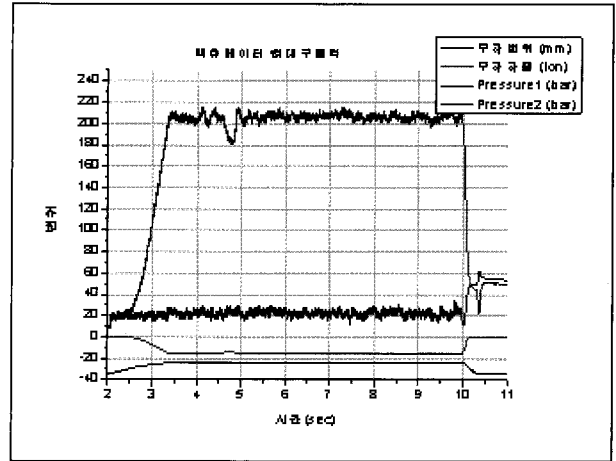


그림 15 PBW액추에이터 Stall Force 특성

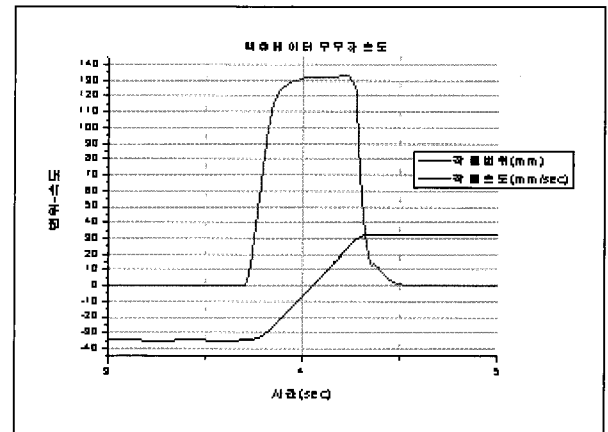


그림 16 PBW액추에이터 무부하속도 특성

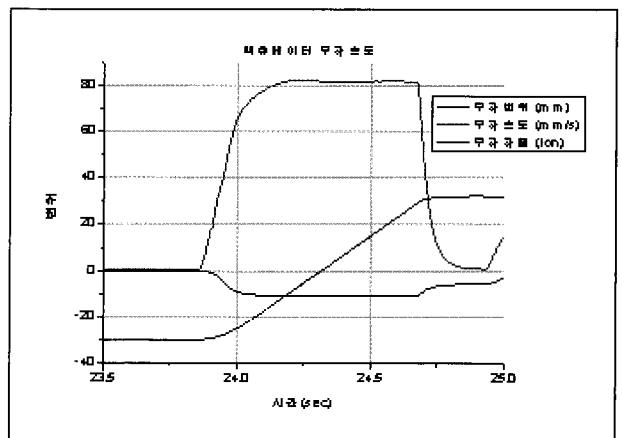


그림 17 PBW액추에이터 부하속도 특성

그림 18은 액추에이터 응답성 특성을 나타낸다. 응답성시험은 액추에이터 행정거리의 5%의 진폭명령

으로 Sine 위치제어 명령을 인가하여 액추에이터의 작동성능 목표사양인 3.8Hz at -3dB, -90°에 못 미치는 3.0Hz미만의 결과를 얻었으며, 제어장치의 응답성능 향상을 위한 보완을 진행하여 2009년 4월 경에 추가 성능시험을 계획하고 있다.

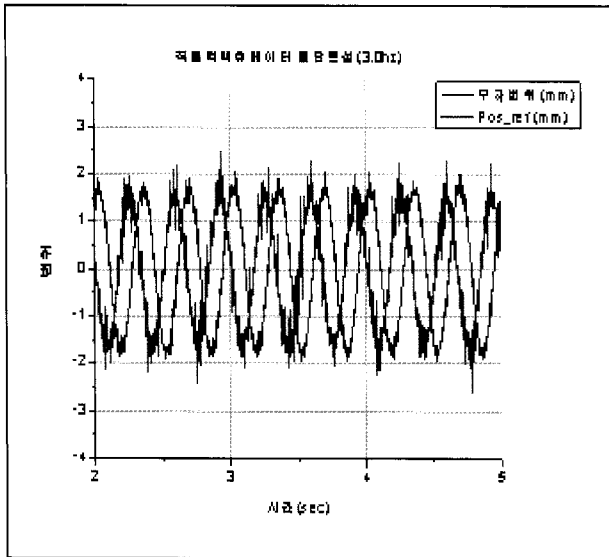


그림 18 PBW액추에이터 응답성 특성(입력주파수 3.0Hz)

5. 결 론

일체화된 유압식 액추에이터는 항공기의 조종면 작동기 또는 일반산업용 유압식 작동기에 적용 될 수 있는 제품으로서, 종래의 중앙공급식 액추에이터 시스템에 비하여 에너지효율이 월등히 양호하며 고 응답 고성능 및 정밀한 제어가 용이하다. 또한 정비성 측면, 비용적 측면에서 서보밸브를 이용한 유압시스템을 대체할 수 있는 장점이 있어 선진국에서 기 진행하여 운용단계에 있는 본 기술을 국내 독자적으로 확보하여 항공기, 유도무기 분야 외에도 모든 일반 유압산업분야에 확대 적용할 수 있는 기술이다.

본 연구에서는 EHA의 핵심기술 확보를 위한 선진국 항공용 EHA의 개발규격을 베이스로 진행하였으며, 설계 및 제작, 성능시험을 통하여 국내 자체적으로 액추에이터시스템 개발, 고성능 소형 항공용 피스톤식 유압펌프 개발기술 확보의 가능성을 확인할 수 있었다.

또한 일반산업용 적용처로 해외선진사의 양산제품의 적용처를 벤치마킹하여 고정밀 프레스장비, 인장 압축기 장비, 틸팅 열차 등의 산업분야에 PBW 액추에이터 개발기술의 적용을 중기 목표로 진행 중이다.

후 기

이 연구는 지식경제부 과제 지역산업중점기술개발사업의 연구비(과제번호:70000539) 지원에 의하여 수행하고 있음을 밝힙니다.

참고문헌

- 1) S. L. Bootten, C. R. Whitley, and A. D. King, "Flight Control Actuation Technology for Next-Generation All-Electric Aircraft", Technology Review Journal-Millennium Issue · Fall/Winter 2000, pp. 55~68.
- 2) S. Habibi, and A. Goldenberg, "Design of a New High-Performance ElectroHydraulic Actuator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 2, JUNE 2000, pp. 158~164.
- 3) R. Navarro, "Performance of an Electro-HydroStatic Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft", NASA/TM-97-206224.
- 4) 조현동, 황윤건, 박태조, "항공기의 직구동 액추에이터용 동축시일의 변형해석", 한국윤활학회 제47회 추계학술대회, 2008년도, pp. 227~232.

[저 자 소 개]



손자덕(책임저자)

E-mail : jadeok.sohn@doosan.com

Tel : 055-269-5565

1964년 10월 8일 생

1989년 인하대학교 기계공학과 학사 졸업,
1989년 현대정공 입사, 2006년 두산모트롤
입사, 동 회사 연구소에서 유압구동장치의

개발에 종사

[저 자 소 개]



정호경

E-mail : hokyung.chung@doosan.com

Tel : 055-269-5560

1957년 12월 18일 생

1985년 부산대학교 기계공학과 학사 졸업,
1985년 두산모트롤 입사, 동 회사 연구소
에서 유압장치의 개발에 종사



[저 자 소 개]



박성환

E-mail : shpark01@pusan.ac.kr

Tel : 051-510-3053

1967년 11월 8일생

1990년 부산대학교 정밀기계공학과 학사,

1992년 동대학원 석사, 1996년 동대학원

박사, 2005년 Tokyo Institute of

Technology 대학원 이공학연구과 기계제어시스템전공 박사,

2005년~현재 부산대학교 기계공학부 연구교수, 관심분야는

전기·유압서보시스템의 설계 및 제어, 수압시스템의 설계

및 제어, 철도차량브레이크 시스템