

PBW(Power-By-Wire) 액추에이터의 제어기 개발 Development of a Controller for PBW Actuator System

박두환 · 송정민 · 박흥신 · 박성환

D. H. Park, J. M. Song, H. S. Park and S. H. Park

1. 서 론

본 해설에서는 항공기용으로 개발되고 있는 PBW 액추에이터의 정밀 위치제어를 위한 제어기 개발 내용을 소개한다.

항공기의 경우 비행조종 컴퓨터에서 작동명령을 실행하면 제어기를 통하여 가변속 모터가 작동되고 모터에 연결된 메카니즘을 통해 양방향 펌프를 구동시킨다. 펌프의 양방향 구동으로 유압유의 방향과 압력을 변화시켜 액추에이터를 작동시킨다. 이때 피스톤의 작동거리를 LVDT 등의 위치센서를 이용하여 제어기에 피드백 시켜 액추에이터 작동의 정확성을 판단하여 정밀제어가 이루어진다.

이러한 구조로 구동되는 항공기용 PBW 액추에이터의 제어기를 개발하기 위하여 제어기의 H/W와 적용 알고리즘에 대한 설계, 제작 및 실험을 진행하였다.

2. 기술 개발 배경

항공기는 비행자세 제어를 위한 조종면의 작동 또는 항공기 이착륙시의 착륙장치와 같은 항공기의 주요 장치들을 작동하기 위하여 고출력, 정밀한 위치제어, 빠른 응답성 등의 장점을 가지고 있는 유압시스템을 채택하고 있다.

현재의 항공기용 유압시스템은 탱크, 유압펌프, 축압기, 필터류, 각종 밸브 및 다지관류를 포함한 대형의 주 유압동력원, 항공기의 비행조종을 위한 각각의 작동기와 이에 요구되는 고압의 유압배관으로 구성된다. 이러한 유압시스템은 주 유압동력원의 고장으로 관련된 전체 유압시스템이 마비될 수 있으며, 복잡하게 설치된 고압의 유압배관을 이용하므로 이와 관련한 위험요소(배관의 파손, 누유 등)를 가지고 있다. 특히, 군용기의 경우 유압배관이 적 화력에 대해 노출되어 있으므로 항공기 유압시스템 전체의 기능 상실 위험과 같은 큰 취약점을 가지고 있다.

기존 유압시스템의 이러한 단점을 해결하기 위하여 선진국에서는 PBW(Power-by-Wire) 액추에이터

를 개발하고 있다.

PBW 액추에이터는 액추에이터에 전기동력을 직접 제공함으로써 유압라인과 이와 관련된 위험요소를 획기적으로 줄이거나 전체를 제거할 수 있으며, 중앙 집중식 유압공급장치를 각각의 전기모터, 펌프, 축압기, 액추에이터, 밸브류 등으로 소형화하여 하나로 통합하는 개념으로 외부의 전기 신호만으로 자체 제어기를 가지고 구동속도 및 변위를 제어하기 때문에 기존 유압 시스템의 단점인 항공기 취약성 및 안전성을 높일 수 있을 뿐만 아니라 항공기의 중량 감소, 중량 감소에 의한 연료비 절감, 정비 비용 감소 효과도 기대할 수 있다.

3. PBW 액추에이터 시스템

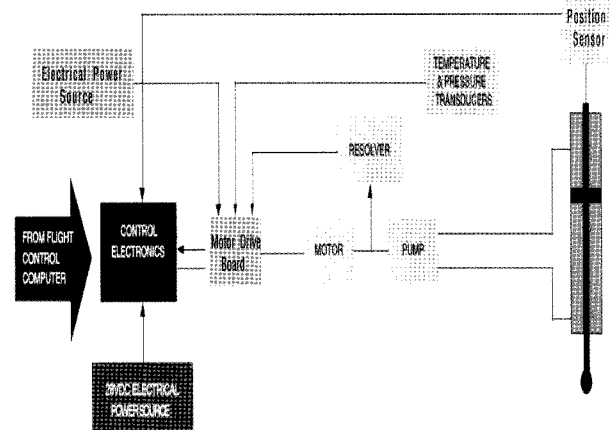


그림 1 시스템 구성도

그림 1은 PBW 액추에이터 시스템의 블록도를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 PBW 액추에이터 시스템은 액추에이터조립체, 펌프조립체, 축압기조립체, 모터조립체, 모터드라이버, 제어기, 센서류, 전원으로 구성되고, 제어기가 상위 제어기에서 위치지령을 받아 액추에이터의 위치를 제어하게 된다.

현재 표 1에 나타난 성능사양을 목표로 PBW 액추에이터 시스템에 대한 개발이 진행 중이다.

표 1 PBW 액추에이터 시스템 사양

항목	목표사양
Stroke	±33.5mm
Weight	50kg
Stall Force	15,700kgf
No-load Velocity	122.9~142.5mm/sec
Loaded Velocity	73.1~88.6mm/sec @10,125kgf
Output Power	8.2kW
Frequency Response	3.8Hz@-3db, -90°
Operating Pressure(max.)	210kgf/cm ²
Pump Rotating Speed(max.)	10,000rpm

4. 제어기 개발

4.1 알고리즘 개발

제어기 알고리즘 개발은 제어대상 시스템이 개발 중인 관계로 유사시스템을 이용하여 먼저 진행하고, 추후 도출된 알고리즘을 개발된 시스템에 적용하여 최적 알고리즘을 선정할 계획으로 진행하였다.

아래의 표 2에 유사시스템의 사양을 나타내었다.

표 2 알고리즘 개발 유사시스템 사양

항목	사양	
실린더	형식	편로드, Tie Rod식
	내경	Φ50
	로드외경	Φ35.5(Λ로드)
	정격 압력	7MPa
	추력	2~14KN(미는 측) 1~7KN(당기는 측)
	로드속도	5~50mm/s(미는 측) 5~50mm/s(당기는 측)
정밀도	±0.3mm	
위치 센서	형식	Absolute 자왜센서
	출력	0~10V/0~200mm
유압 펌프	형식	외접 기어 펌프
	토출량	2cc/rev
	회전수(max.)	3,000rpm
	정격압력	7MPa
모터	정격압력	10MPa
	형식	Servo Motor
	출력	0.75kW
	정격회전수	3,000rpm
모터 드라이버	정격토크	2.39Nm
	형식	Servo Pack
모터 드라이버	출력	0.75kW
	전원	AC200V 3Φ

그림 2에 알고리즘 개발을 위해 구성된 PBW 액추에이터 유사시스템의 시험 구성도를 나타내었다.

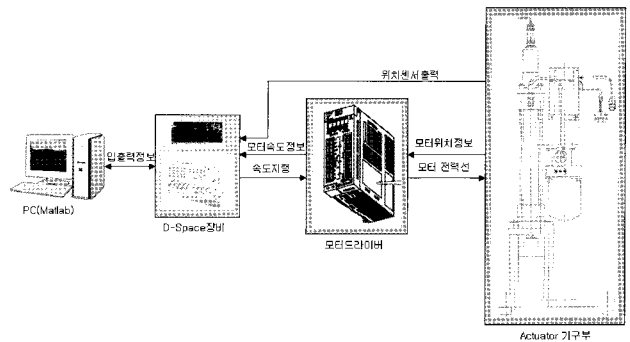


그림 2 알고리즘 개발 유사시스템 시험구성도

그림 2 나타낸 바와 같이 제어 알고리즘 개발을 위한 유사시스템 시험 구성은 PC기반의 Matlab/S imulink를 사용하였고, 제어기의 입출력은 D-Space사의 DS1104 장비를 이용하였다.

4.1.1 신호압축법

PBW 액추에이터 시스템의 알고리즘 개발을 위한 시스템의 모델링 기법으로 신호압축법을 사용하였다. 일반적으로 단일 입출력을 가지는 시스템의 전달함수의 특성은 시스템의 임펄스 응답과 같다. 그러나 실제 시스템에서 이러한 임펄스 응답을 측정하기에는 시스템에 무리가 따른다. 이러한 문제점을 개선하고 시스템의 임펄스 응답을 쉽게 얻을 수 있는 방법으로 신호압축법을 사용할 수 있다. 그림 3에 신호압축법의 원리에 대한 개략도를 나타내었다.

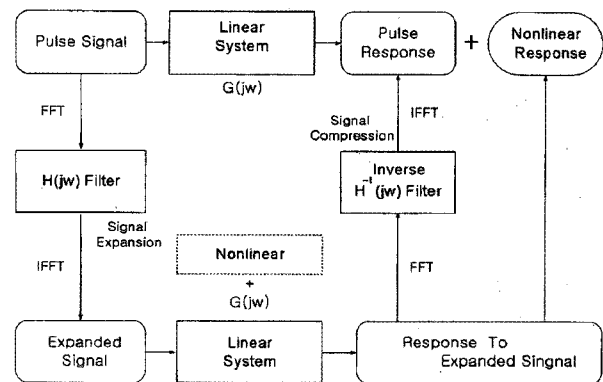


그림 3 신호압축법의 원리

시스템의 주파수응답을 측정하기 위한 입력신호는 넓은 주파수범위에서 평탄한 파워 스펙트럼을 가지는 것이 바람직하다. 필요한 주파수영역까지 임펄스

특성을 가진 파형을 Fourier 변환하고 주파수영역에서 위상지연을 가져오는 수학적인 신장필터를 통과 시키면, 주파수 특성이 일정한 파워를 가지면서 위상 지연을 가진 신호를 만들 수 있다. 이 신호를 역 Fourier 변환에 의해 시간영역으로 바꾸면 그림 4와 같이 크기는 작고, 시간적으로 긴 시험신호(test signal)가 구해진다. 여기서 구한 시험신호를 측정대상인 시스템에 입력하고 측정된 출력을 주파수영역에서 위상전진을 가지는 필터를 통과 시킨 후 역 Fourier 변환 시키면 시간영역에서의 임펄스응답이 구해진다. 이러한 방법으로 임펄스응답을 구하는 것을 신호압축법이라 한다.

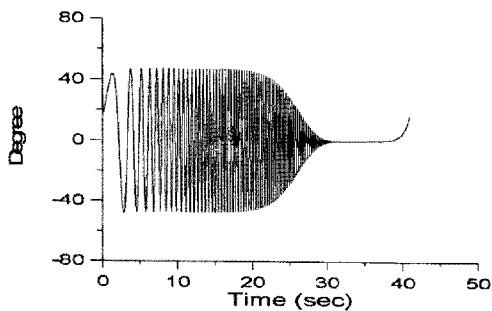


그림 4 신호압축법에서의 시험신호

4.1.2 신호압축법을 이용한 모델링

가. 모터드라이버와 모터 모델링

시스템 전체에 대한 모델링 작업을 진행하기에 앞서 모터드라이버와 모터에 대한 모델링 작업을 진행함으로써 신호압축법을 이용한 모델링 작업의 신뢰성을 확인하고 전체 시스템에서 전기 기반 시스템이 미치는 영향을 확인하였다.

그림 5에 모터드라이버와 모터에 대한 임펄스 응답을 확인하기 위하여 약 100Hz의 대역폭을 가지며, 시스템이 충분히 추종할 수 있도록 $\pm 1000\text{rpm}$ 의 속도지령이 시스템에 인가되는 시험신호를 생성하였다.

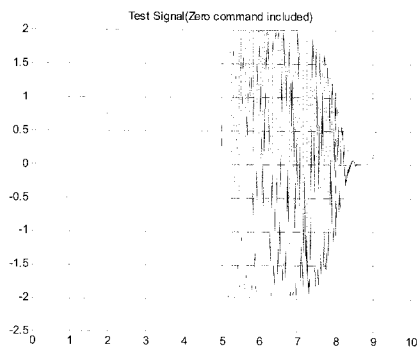


그림 5 모터드라이버와 모터에 대한 시험신호

시험신호는 초기에 5초동안 Zero Command가 인가 될 수 있도록 조정하였다.

아래의 그림 6에 시험신호에 대한 시스템 출력을 나타내었다.

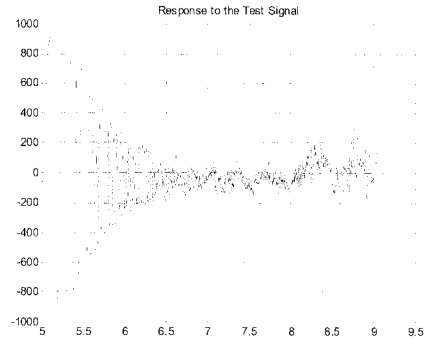


그림 6 시험신호에 대한 출력(모터속도)

출력신호를 이용하여 신호압축 작업과 고주파 비선형요소 제거작업을 통하여 보드선도를 작성하고 시스템의 보드선도와 유사한 동특성을 가질 수 있도록 2차 지연 모델 및 3차 지연 모델을 생성하였다.

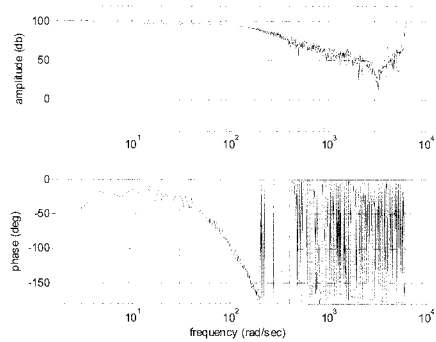


그림 7 출력(모터속도)과 2차 모델의 보드선도

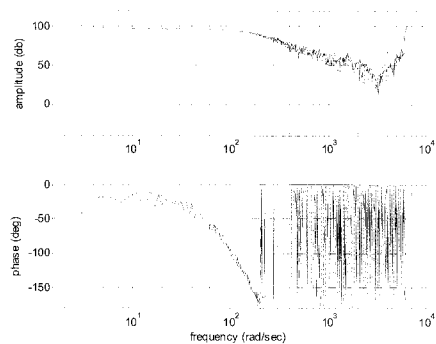


그림 8 출력(모터속도)과 2차 모델의 보드선도

그림 7과 그림 8에서 붉은색으로 표시된 보드선도가 생성된 모델의 보드선도이며, 파란색으로 표시된

보드 선도가 실제 모터드라이버와 모터 시스템의 보드 선도이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 3차 지연 모델이 시스템과 더 유사한 것을 확인할 수 있다.

이렇게 생성된 2개의 모델과 실제 시스템에 동일한 시험신호를 인가하여 모델링의 신뢰성을 확인하였다.

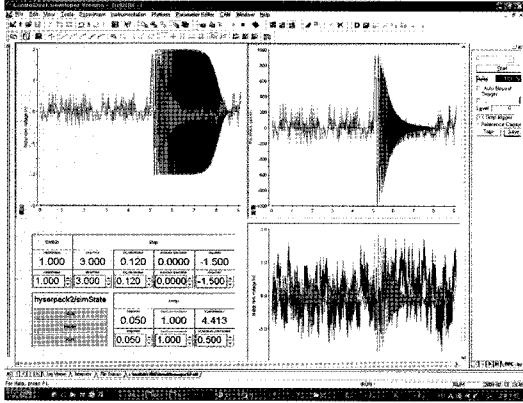


그림 9 모델링된 시스템과 실제 시스템 비교시험

그림 9에 모델링된 시스템과 실제 시스템의 비교 시험 화면을 나타내었다. 이러한 시험을 통하여 획득한 출력 data를 모델별로 그림 10과 그림 11에 나타내었다.

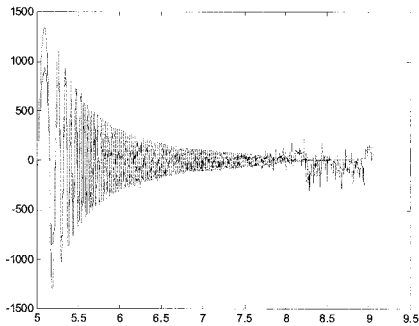


그림 10 2차 지연 모델과 실제 시스템 출력비교

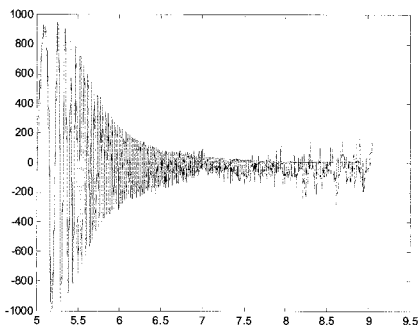


그림 11 3차 지연 모델과 실제 시스템 출력비교

그림 10과 그림 11에서 확인할 수 있듯이 모터와 모터드라이버 시스템에 대한 모델링은 3차 지연 모델이 더 실제 시스템과 근사한 것을 알 수 있다.

그림 12와 그림 13은 Step 지령에 대한 2차 지연 모델과 3차 지연모델에 응답을 실제 시스템과 비교한 것이다. 그림에서 파란색으로 표시된 것이 실제 출력이고, 녹색으로 표시된 것이 모델 출력이다.

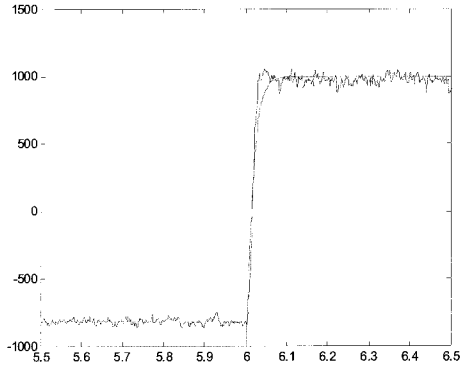


그림 12 2차 지연 모델과 실제 시스템 스텝응답 비교

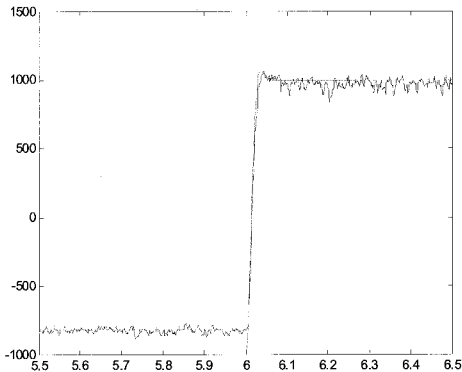


그림 13 3차 지연 모델과 실제 시스템 스텝응답 비교

이상의 시험을 통하여 신호압축범에 의한 모델링 작업이 신뢰성을 가질 수 있음을 확인할 수 있으며, 모터드라이버와 모터 시스템의 모델링은 3차 지연모델이 실제 시스템의 과도응답을 잘 표현함을 알 수 있다.

나. 시스템 모델링

PBW 액추에이터 시스템의 제어 알고리즘 개발을 위하여 모터드라이버와 모터 시스템에 대한 모델링 작업과 동일한 방법으로 전체 시스템에 대한 모델링 작업을 진행하였다.

그림 14에 시스템의 응답성을 확인할 수 있는 시험신호를 나타내었다. 전체 시스템에 대한 임펄스 응

답을 확인하기 위하여 약 1Hz의 대역폭을 가지며, 시스템이 충분히 추종할 수 있도록 $\pm 30\text{mm}$ 의 위치지령이 시스템에 인가되는 시험신호를 생성하였다.

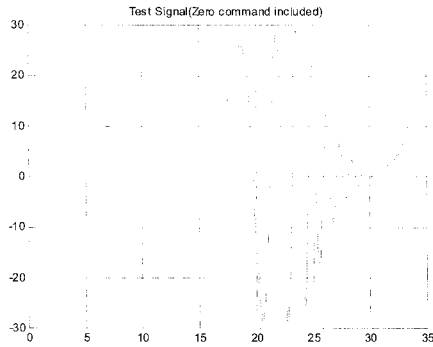


그림 14 시스템에 대한 시험신호

시험신호는 초기에 16초동안 Zero Command가 인가 될 수 있도록 조정하였다.

아래의 그림 15에 시험신호에 대한 시스템 출력을 나타내었다.

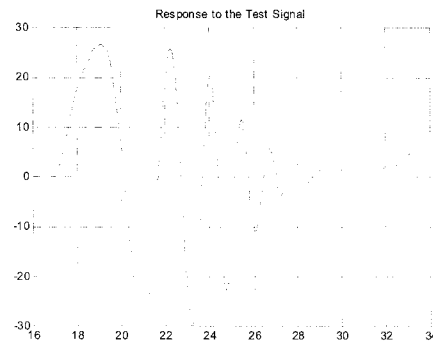


그림 15 시험신호에 대한 출력(액추에이터 위치)

출력신호를 이용하여 신호압축 작업과 고주파 비선형요소 제거작업을 통하여 보드선도를 작성하고 시스템의 보드선도와 유사한 동특성을 가질 수 있도록 2차 지연 모델을 생성하였다.

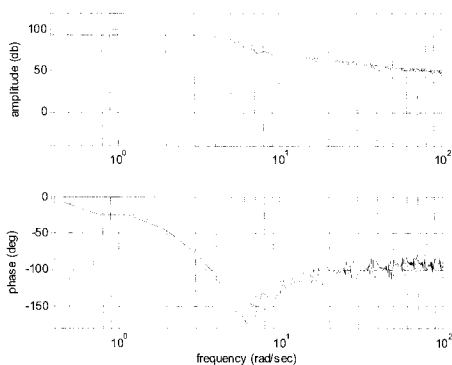


그림 16 출력(액추에이터 위치)과 2차 모델의 보드선도

모터드라이버와 모터 시스템에 대한 모델링 작업과 동일하게 동일한 위치지령에 대한 생성된 모델의 출력과 실제 출력의 비교시험을 진행하였다. 그림 17의 결과에서 녹색으로 표시된 것이 실제 액추에이터의 위치 출력이고, 파란색으로 표시된 것이 생성된 2차 지연 모델의 출력이다. 생성된 2차 지연 모델이 느린 위치지령에 대해서는 실제 시스템과 유사하나 빠른 위치지령에 대해서는 실제 시스템과 상이한 면이 있음을 확인할 수 있다.

전체 시스템에 대한 2차 지연 모델의 출력이 어느 정도 실제 시스템과 근사한 것에서 확인할 수 있듯이 앞서 진행된 모터드라이버와 모터 시스템의 모델링 작업의 결과 3차 지연 모델의 전기 기반 시스템 동특성은 전체 시스템에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

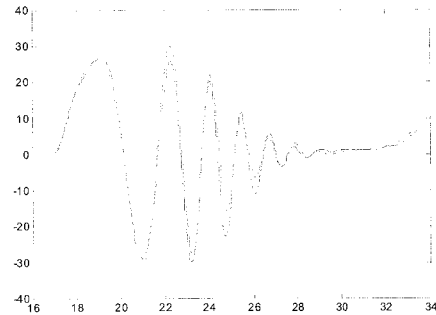


그림 17 2차 지연 모델과 실제 시스템 출력비교

4.1.3 알고리즘 적용 시험

신호압축법을 이용하여 생성한 전체 시스템의 2차 지연 모델에 PID제어 알고리즘과 SMC(Sliding Mode Control)제어 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 및 실제 시스템의 출력을 비교하였다.

그림 18은 Matlab/Simulink를 이용하여 제어 알고리즘을 구성하고 생성된 모델과 실제 시스템에 동일 위치지령을 인가하여 출력을 비교할 수 있도록 구성된 Simulink 블록을 나타낸다.

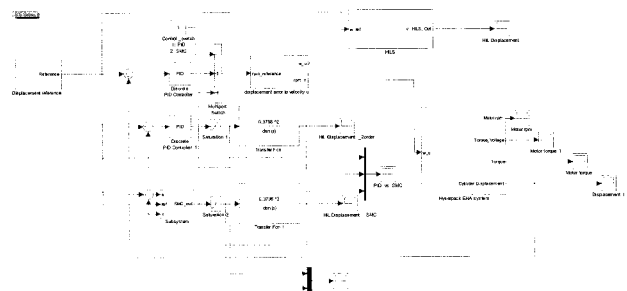


그림 18 알고리즘 적용을 위한 Simulink 블록

그림 19은 전체 시스템에 대한 2차 지연모델을 이용한 PID제어 알고리즘과 SMC제어 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 SMC제어 알고리즘이 좀 더 빠른 과도응답을 가짐을 알 수 있다.

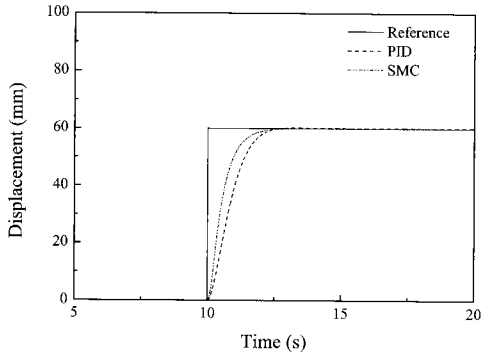


그림 19 PID제어 알고리즘과 SMC 제어알고리즘 시뮬레이션 결과

그림 20에 PID 제어 알고리즘을 실제 시스템에 적용한 시험 장면을 나타내었다.

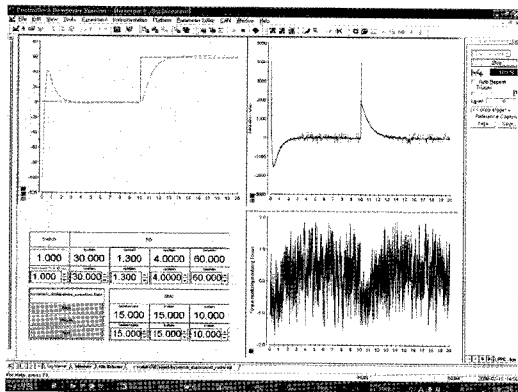


그림 20 PID제어 알고리즘 적용 시험

그림 21에 PID 제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과와 시험결과를 비교하였다.

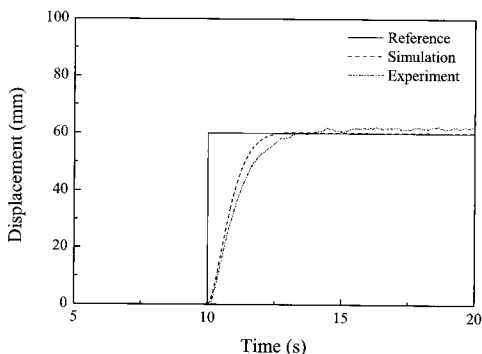


그림 21 PID제어 알고리즘 적용 시험결과 확인

그림 22에 SMC 제어 알고리즘을 실제 시스템에 적용한 시험 장면을 나타내었다.

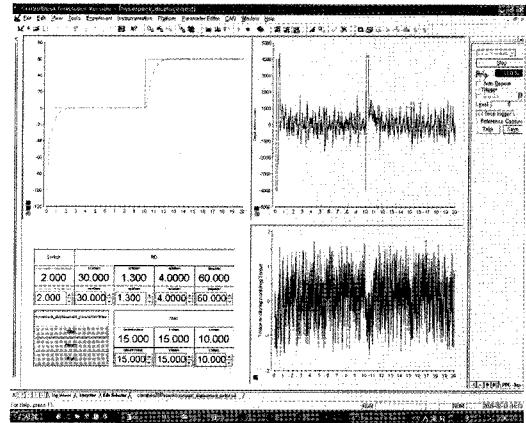


그림 22 SMC제어 알고리즘 적용 시험

그림 22에 PID 제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과와 시험결과를 비교하였다.

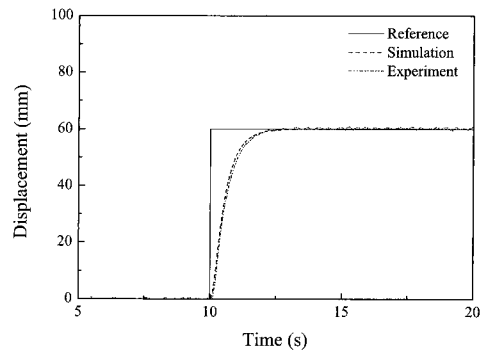


그림 23 SMC제어 알고리즘 적용 시험결과 확인

이상과 같이 PBW 액추에이터 시스템과 유사한 시스템에 PID 제어 알고리즘과 SMC 제어 알고리즘을 각각 적용하여 시뮬레이션과 시험결과를 비교하였다. 결과적으로 현재의 시스템에서는 SMC제어 알고리즘이 좀 더 적합한 것으로 판단되며, 추후 개발되는 PBW 액추에이터 시스템에 동일한 방법을 적용하여 최적의 제어 알고리즘을 도출할 것이다.

4.2 하드웨어 개발

PBW 액추에이터 시스템의 정밀위치 제어를 위한 제어기 하드웨어는 제어알고리즘 탑재의 용이성과 상위제어기, 모터드라이버, 액추에이터 기구부에 장착되는 각종 센서들과의 인터페이스를 고려하여 개발되어야 한다.

다음의 그림 24에 PBW 제어기 구성도를 나타내었다.

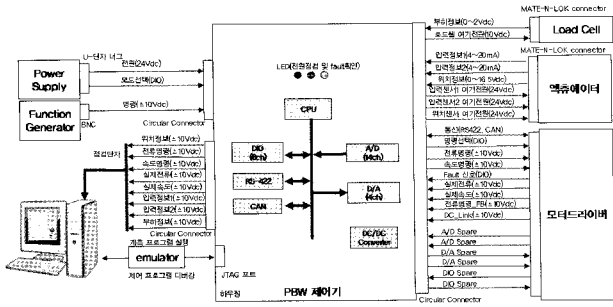


그림 24 PBW 제어기 구성도

PBW 제어기는 외부에서 24Vdc 전원을 공급받아 상위 제어기에서 전달되는 위치지령에 대하여 액추에이터의 실린더 위치를 해당되는 위치로 제어하기 위한 모터지령을 생성한다. 이때, 액추에이터에 장착된 위치센서, 압력센서의 정보를 피드백 받아 PBW 액추에이터의 위치제어를 수행한다.

이러한 역할을 수행하는 PBW 제어기의 하드웨어 개발사양을 표 3에 나타내었다.

표 3 PBW 제어기 개발사양

항목	개발사양	
시스템 전원	입력	24Vdc, 6A
	출력	24Vdc 센서여기전원
제어	CPU	TMS320F28335
	통신	RS422, CAN
인터페이스	A/D	10bit, 16ch 이상
	D/A	16bit, 4ch 이상
	필터	$f_c = 200Hz$
	제어신호	DIO 각각 8ch 이상
프로그램	펌웨어	CPU Core 셋팅용
	계측프로그램	Labview 이용

PBW 제어기는 크게 CPU Board와 Analog Board로 구성되며, 각 Board의 구성을 그림 25와 그림 26에 나타내었다.

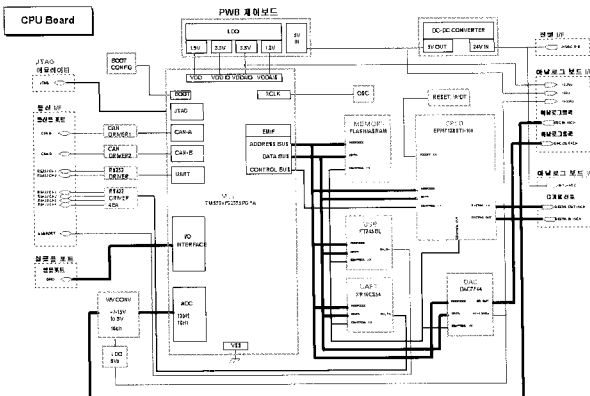


그림 25 PBW 제어기 CPU Board 구성도

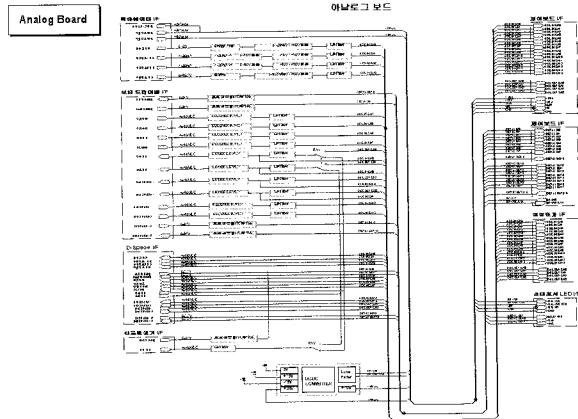


그림 26 PBW 제어기 Analog Board 구성도

CPU Board는 제어알고리즘이 탑재되어 상위제어기에서 전달되는 위치지령과 PBW 액추에이터에 장착된 각종 센서로부터 전달되는 액추에이터의 상태 정보를 이용하여 모터드라이버에 전달되는 모터지령을 생성하는 역할을 수행하며, Analog Board는 CPU Board에 전달되는 상위제어기로부터의 위치지령과 액추에이터 상태정보를 CPU Board가 정확하게 인식할 수 있도록 신호처리를 수행한다.

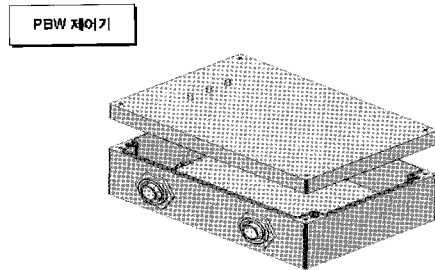


그림 27 PBW 제어기 형상

그림 27에 개발 진행 중인 PBW 제어기의 형상을 나타내었다.

5. 결론

PBW 액추에이터 시스템의 개발은 기존의 유압시스템의 단점을 획기적으로 개선할 수 있는 기술로 선진국에서는 기 진행되어 운용단계에 있으나, 국내에서는 아직 도입단계에 머물러 있다.

본 연구는 이러한 PBW 액추에이터 시스템의 핵심기술을 확보하기 위해 추진되었으며, 현재 국내 자체 기술을 바탕으로 제어기, 모터, 모터드라이버, 유압펌프, 액추에이터 등 각 구성품에 대한 개발이 진행 중에 있다.

'09년 4월에 각 구성품이 제작될 예정이고 앞서 소개한 기술을 통하여 PBW 액추에이터 시스템의 최적 제어기를 개발할 예정이며, 개발된 기술을 바탕으로 중·장기적으로 고정밀 프레스, 인장압축기 등의 일반 산업용으로 적용을 확대할 것이다.

후 기

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

참고 문헌

- 1) R. Navarro, "Performance of an Electro-HydroStatic Acuator on the F-18 Systems Research Aircraft", NASA/TM-9 7-206224.
- 2) V. Pastrakuljic, "Design and Modeling of a New Electro Hydraulic Actuator", Mechanical Engineering University of Toronto, 1995.
- 3) S. L. Booten, 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.
- 4) 윤정주, "수직 다관절 로봇 시스템의 슬라이딩 섭동 관측기를 가진 슬라이딩 모드 제어", 부산대학교 지능기계공학과 석사학위 논문, 2001.

[저자 소개]



박두환 (책임저자)

E-mail : doohwan.park@doosan.com
Tel : 055-269-5604
1976년 12월 25일생
2004년 창원대학교 전기공학과 석사 과정 졸업, 2004년 두산모트롤(주) 입사, 동 회사 기술연구소에서 제어기술관련 개발에 종사

[저자 소개]



송정민

E-mail : jungmin.song@doosan.com
Tel : 055-269-5602
1968년 2월 10일생
1994년 경남대학교 전기공학과 석사 과정 졸업, 1994년 두산모트롤(주) 입사, 동 회사 기술연구소에서 제어기술관련 개발에 종사

[저자 소개]



박흥신

E-mail : heungshin.park@doosan.com
Tel : 055-269-5600
1963년 1월 26일생
1997년 창원대학교 전기공학과 석사 과정 졸업, 1988년 두산모트롤(주) 입사, 동 회사 기술연구소에서 제어기술관련 개발에 종사

[저자 소개]



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