

멀티채널 서보컨트롤러 모듈 설계 Design of Multi-Channel Servocontroller Module

정규홍
G. H. Jung

1. 서론

유압시스템은 매우 큰 구동력을 발생시킬 수 있으므로 대용량의 부하구동에 적합하지만 비선형적인 유량특성과 온도에 따라 크게 변화되는 점성 및 누유 등으로 인하여 개루프 제어방식으로는 만족스러운 성능을 얻기가 곤란하다. 서보밸브는 유압작동기의 압력, 속도, 위치를 정밀 제어하는 전기유압식 폐루프 시스템에서 전기적인 신호로 밸브를 조절함으로써 유량이나 압력을 제어하여 작동환경변화에 대하여 안정적이면서도 향상된 응답성능을 가능케 하는 핵심적인 요소이다. 서보밸브 응용분야는 우주항공이나 방위산업을 비롯하여 일반 산업용으로 인장, 피로 및 재료 시험기, 운동재현기(motion simulator), 가진기, 플라스틱 사출성형기, 터빈제어 등과 같이 매우 다양하다.

일반적인 유압서보시스템의 구성요소는 유압실린더나 유압모터의 유압작동기, 제어되는 물리적인 양을 측정하기 위한 센서, 지령신호 발생장치, 서보밸브와 서보컨트롤러로 구성된다. 여기서, 서보컨트롤러는 지령신호와 작동기의 현재 상태를 나타내는 센서출력신호와 오차로부터 작동신호를 연산하는 제어기회로와 서보밸브를 작동시키기 위한 전기적인 신호를 발생시키는 구동회로로 구성된다. 그림 1은 PID-제어기와 전류구동회로로 구성되는 서보컨트롤러를 이용한 유압실린더 위치제어 시스템의 블록선도를 나타낸다.

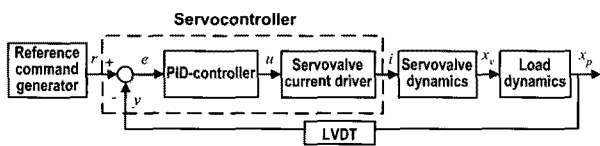


그림 1 위치제어 유압시스템

통상적으로 서보컨트롤러는 전기유압식 서보시스템이 아날로그방식으로 설계되었으므로 PID-제어기도 연산증폭기로 구성된 아날로그 회로이며 밸브구

동회로도 전력트랜지스터를 이용한 아날로그로 구현되었으나 디지털 컴퓨터 기술이 급속히 발전함에 따라 최근에는 마이크로 컨트롤러를 활용한 디지털방식의 첨단화된 서보컨트롤러가 상용화되고 있다. 대부분의 자동화기기가 디지털화되는 이유와 유사하게 디지털방식의 서보컨트롤러에서는 상위제어기로부터 지령신호를 아날로그 전압 대신에 디지털통신으로 수신하므로 잡음에 의한 영향을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 양방향 통신을 이용하여 서보컨트롤러 및 제어시스템에 대한 진단(diagnosis)기능을 구현할 수 있는 장점이 있다. 이외에도 마이크로 컨트롤러를 활용하면 무선통신(wireless communication)으로 원격제어시스템을 구성할 수 있고 비선형 제어알고리즘과 통합제어시스템의 설계가 가능하므로 디지털방식 서보컨트롤러의 활용과 관련기술의 개발이 더욱 확대될 것으로 예상된다.

서보컨트롤러의 주요기능은 그림 1에서와 같이 지령신호의 수신, 폐루프 제어기, 서보밸브 구동회로로 구분될 수 있으며 어느 기능을 디지털화하는가에 따라 그림 2에 나타난 바와 같은 3가지 설계방식이 있다. 서보밸브 구동회로는 전압과 전류구동방식이 있으며 그림 2에서는 일반적인 구동방식인 전류구동회로로 표기하였다.

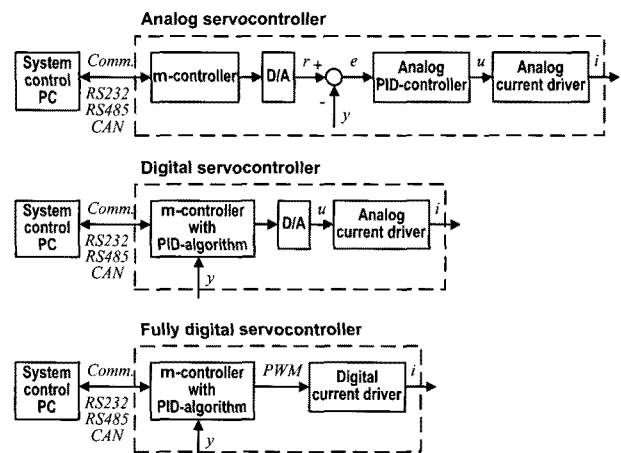


그림 2 디지털 서보컨트롤러의 설계방식

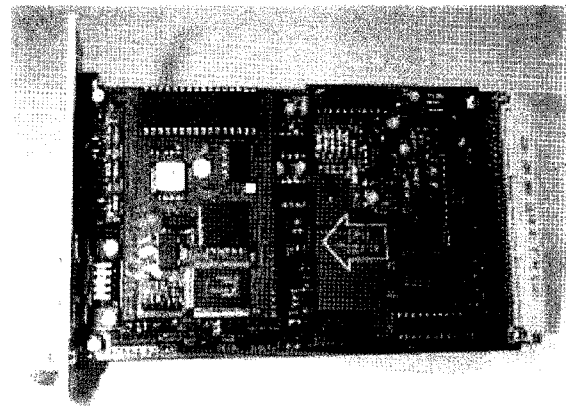
첫 번째 설계방식에서는 마이크로 컨트롤러에서 지령신호를 직렬통신으로 수신한 후 D/A를 통하여 아날로그 전압으로 변환하는 기능만이 구현되며 두 번째 설계방식에서는 서보컨트롤러에 내장된 펌프 제어기능을 마이크로 컨트롤러에서 연산알고리즘으로 구현한 후 연산결과를 D/A변환하여 전류구동회로에 입력으로 작용하도록 설계된다. 이러한 방식의 설계에서는 마이크로 컨트롤러에서 수행되는 프로그램으로 제어기의 연산이 구현되므로 PID-제어기 이득의 설정과 변경이 간편하게 하고 PID-제어기뿐만 아니라 다양한 제어알고리즘을 구현할 수 있는 장점이 있다. 세 번째 설계방식은 서보컨트롤러의 모든 기능을 디지털방식으로 구현하는 것으로 제어기 연산결과를 PWM으로 출력하여 전류구동회로에서 서보밸브 코일의 전류가 제어된다. 완전 디지털화된 서보컨트롤러는 응답이 매우 빠른 서보밸브의 전류를 실시간으로 제어하기 위하여 마이크로 컨트롤러의 연산주기가 매우 작아야 하므로 DSP (digital signal processor)를 일반적으로 활용하여 설계되고 있다.

그림 3은 지령신호를 수신하는 기능만이 디지털화된 Moog사의 2채널 서보컨트롤러를 나타낸다. Moog사에서는 최근 Power PC 마이크로 프로세서와 DSP를 결합하여 PWM 방식으로 전류를 제어하는 디지털 인터페이스 밸브(D636 Digital Interface Valve)를 개발하였다(그림 4 참조). Moog사에서 개발된 디지털밸브는 서보밸브와 서보컨트롤러가 일체화된 밸브이며 CAN 통신과 PWM 전류제어 기능뿐만 아니라 진단기능과 스폴밸브의 특성을 소프트웨어로 변경시킬 수 있는 기능이 포함되어 있다. 현재 디지털방식 서보컨트롤러의 시장점유율은 1%미만으로 알려져 있으나 유압시스템이 적용되는 많은 자동화기계가 통신기능을 활용하는 방식으로 디지털화됨에 따라 디지털방식 서보컨트롤러의 응용은 점차 증가될 것으로 예상되며 Moog사에서는 D636 디지털밸브를 시작으로 모든 밸브의 디지털화를 계획하고 있다고 알려져 있다.

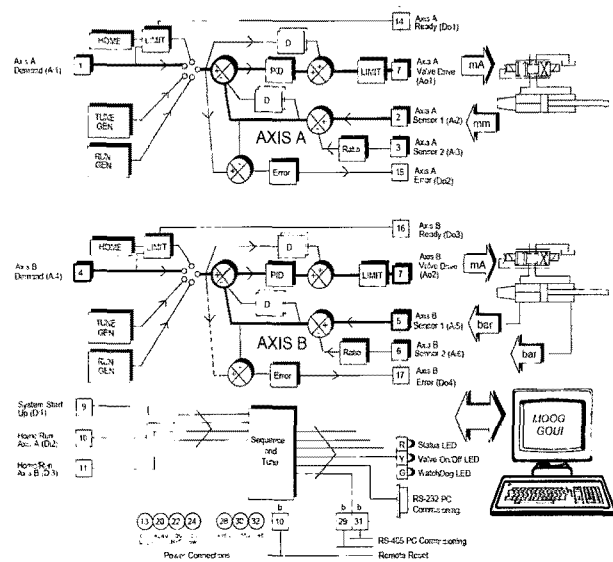
이와 같이 서보컨트롤러는 서보밸브를 사용하는 전기유압식 제어시스템에서 필수적인 요소이며 디지털화를 통하여 제어시스템의 기능을 향상시킬 수 있다. 통상적으로 서보컨트롤러는 서보밸브 제작회사에서 밸브특성을 고려하여 적절하게 설계하므로 서보

밸브와 서보컨트롤러를 일체로 구입하여 사용하나 서보컨트롤러의 가격이 서보밸브와 비슷하게 매우 고가이고 범용으로 설계된 기능이 개발하고자 하는 유압제어시스템에 불필요하거나 충분치 못한 경우에는 부가적인 설계가 필요하게 된다.

본 해설에서는 다수의 서보밸브를 채택하는 유압제어시스템 개발에서 개발비용을 낮추고 개발목적에 필요한 기능만을 적절하게 구현할 수 있는 멀티채널 서보컨트롤러 모듈의 설계에 대하여 살펴보고자 한다. 서보컨트롤러의 설계방식은 그림 2의 두 번째 방식이며 게임기용 운동재현기에 적용된 3-채널 서보컨트롤러와 H_{∞} 전실제어기가 내장된 서보컨트롤러를 이용한 펀로드유압실린더의 위치제어시스템에 적용된 예를 살펴보고자 한다.



(a) Eurocard형 서보컨트롤러



(b) 작동 개략도

그림 3 M2000 2-axis analog PID controller

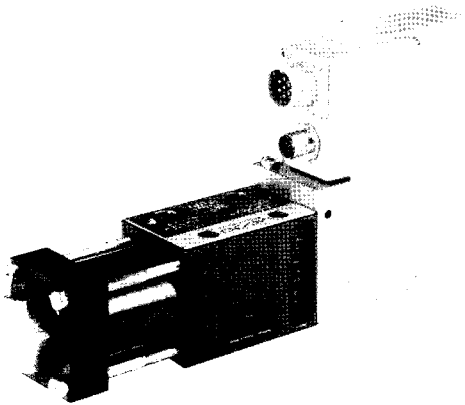


그림 4 D636 디지털 인터페이스밸브

2. 서보밸브 구동회로 분석

2.1 서보밸브의 구조 및 작동원리

전기적인 신호로 밸브 위치를 제어할 수 있는 서보밸브는 밸브의 내부구조에 따라 1단(single-stage) 및 2단(two-stage) 밸브로 구분된다. 1단 밸브는 전기적인 신호로 발생하는 자력에 의하여 밸브 위치가 결정되는 단순한 구조로서 응답이 빠르지만 제어유량이 작으므로 주로 압력제어용으로 사용되고 유압작동기의 변위나 속도를 제어하는 경우에는 대부분 2단밸브가 사용된다.

그림 5는 토크모터, 노즐 플래퍼, 스톱밸브로 구성되는 2단 서보밸브의 내부구조를 나타낸다. 토크모터 코일에 전류가 흐르면 자력에 의하여 아마추어(armature)가 회전하고 아마추어에 일체로 조립된

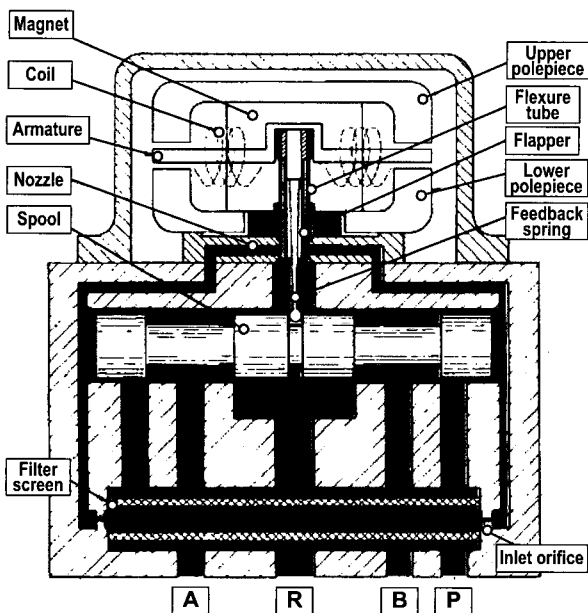


그림 5 2단 서보밸브 내부 구조도

플래퍼가 한쪽으로 기울어지면서 노즐 단면적이 변화하게 되며 이에 따라 노즐배압도 변화된다. 스톱양단에 작용하는 노즐배압에 의하여 스톱 변위가 발생되면 다시 스톱과 플래퍼를 연결하는 피드백 스프링에 의하여 플래퍼가 중립위치로 돌아오게 되며 이때 노즐배압이 평형을 이루므로 스톱이 정지하게 되는 구조이다.

스톱이 정지된 정상상태에서는 아마추어에 작용하는 자력과 피드백 스프링에 의하여 되먹임되는 힘이 평형을 이루므로 서보밸브 스톱변위는 토크모터 코일에 흐르는 전류에 비례한다. 따라서 스톱변위를 제어하기 위해서는 전류를 제어해야 하며 코일의 저항은 온도에 따라 변화되므로 서보컨트롤러에서는 전류제어기를 통하여 파라미터 및 작동환경변화에 따른 외란을 보상하여 일정한 전류를 제어할 수 있도록 설계된다.

2.2 서보밸브 코일의 결선방식

서보밸브 코일은 2개로 구성되고 독립된 4개의 단자가 외부 커넥터로 연결되는 형태로 설계된다. 서보밸브를 서보컨트롤러에 연결할 때 사용되는 대표적인 코일 결선방식은 그림 6과 같으며 일반적으로 병렬접속이 사용된다. 그림 6에서 I 는 병렬접속에서 코일에 흐르는 정격전류를 나타내며 직렬접속으로 구동하는 경우에는 정격전류의 반에 해당되는 전류로 제한되어야 한다.

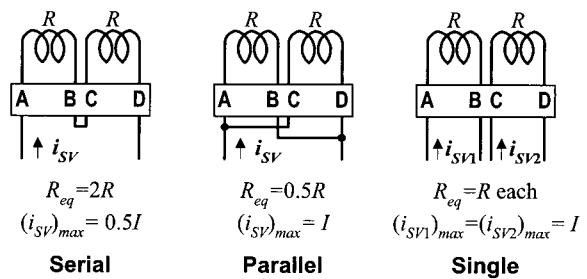


그림 6 서보밸브 코일결선방식

2.3 전류구동회로 분석

그림 7은 서보컨트롤러에서 서보밸브 코일의 전류를 제어하는 전류구동회로를 나타낸다. 여기서, SV+와 SV-는 2.2절의 결선방식에 의하여 전류구동회로에 연결되는 서보밸브 코일을 나타내고 코일에 흐르는 전류의 방향에 따라 스톱변위의 방향이 결정된다. 전류구동회로의 입력전압(v_d)은 서보밸브에 흐르는 전류를 shunt 저항(R_0)으로 측정된 전압(v_i)과 덧셈

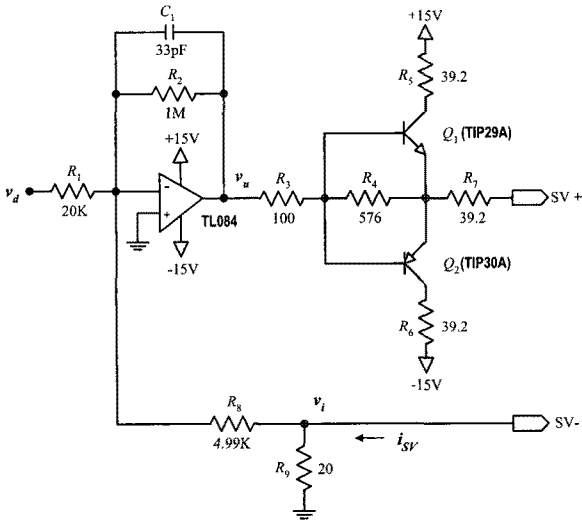


그림 7 전류구동회로

연산증폭기에서 합하여져 반전(inverting)된 후 푸시-풀 구동회로(push-pull driver)에 공급된다. 덧셈 연산증폭기의 정상상태 이득은 $R_2/R_1 = 1\text{M}/20\text{K} = 50$ 으로 매우 큰 값이므로 입력전압과 되먹임 이득이 곱해진 shunt 저항의 전압 합이 거의 영인 상태에서 서보밸브에 흐르는 정상상태의 전류가 결정된다. 즉, 서보밸브 코일에 전류가 흐르지 않는 상태($v_i = 0$)에서 양의 v_d 전압이 인가되면 덧셈 연산증폭기에서는 음의 출력전압 v_u 가 발생되므로 pnp 트랜지스터인 Q_2 가 통전되어 -15V 전압원에서 전류를 잡아당기게 되므로 서보밸브 전류(i_{SV})는 음의 값으로 나타나며 음의 전압으로 발생하는 shunt 저항의 전압이 되먹임 되는 구조를 갖는다. 덧셈 연산증폭기의 입출력전압에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$v_u(s) = -\frac{R_2}{R_1(1 + R_2C_1s)} \left[v_d(s) + \frac{R_1}{R_8} v_i(s) \right] \quad (1)$$

식 (1)과 같이 유도된 전류제어회로의 전달함수로부터 전류제어기는 1차 지연을 갖는 비례제어기임을 알 수 있으며 비례이득(R_1/R_2)이 크므로 정상상태에서 연산증폭기 출력전압(v_u)을 영으로 가정하여 관계식을 유도하면 다음 식 (2)와 같다.

$$v_i = -\frac{R_8}{R_1} v_d \quad (2)$$

또한 되먹임 경로에서 서보밸브에 흐르는 전류 i_{SV} 는 R_8 과 R_9 을 통하여 분류되지만 $R_8 \gg R_9$ 이므로 대부분의 전류는 shunt 저항 R_9 을 통하여 흐르게

된다. 따라서 $v_i = R_9 i_{SV}$ 를 이용하여 전류구동회로 입력전압과 서보밸브 전류사이의 관계식을 유도하면 다음 식과 같다.

$$i_{SV} = -\frac{R_8}{R_1 R_9} v_d = -K_a v_d \quad (3)$$

식 (3)은 전류구동회로 입력전압에 대하여 발생하는 서보밸브 전류의 정상상태 관계식이며 K_a 는 전류이득으로 mA/V의 단위를 갖는다. 전류구동회로에서 shunt 저항 R_9 은 서보밸브의 정격전류와 입력전압의 범위(또는 D/A 변환기 출력전압의 범위)를 고려하여 분해능을 최대로 활용할 수 있는 값으로 결정되는 것이 바람직하다.

그림 7의 전류구동회로에서 shunt 저항이 20Ω 인 경우와 51Ω 인 경우에 대하여 전류이득을 구해보면 다음과 같다.

$$R_9 = 20\Omega: K_a = 12.475\text{mA/V}$$

$$R_9 = 51\Omega: K_a = 4.89\text{mA/V}$$

위의 결과로부터 출력전압의 범위가 $\pm 5\text{V}$ 인 D/A 변환기를 사용한다고 하면 $R_9 = 20\Omega$ 의 경우에는 최대 62mA, $R_9 = 51\Omega$ 인 경우에는 최대 24mA의 전류를 제어할 수 있음을 알 수 있다.

2.4 상용 아날로그 서보컨트롤러

서보밸브 제작회사에서는 판매하고 있는 다양한 종류의 서보밸브를 활용하여 페루프 제어시스템을 구성할 수 있도록 전류구동회로와 더불어 PID-제어기가 내장된 서보컨트롤러를 공급하고 있으며 그림 8은 아날로그방식 범용 서보컨트롤러의 기능블록선도를 나타낸다. 서보컨트롤러의 기능을 살펴보면 페루프 유압제어시스템의 지령신호(r)는 되먹임 되는 센서출력신호(y) 및 영점조정 신호(z)와 더해져 PID 제어기능의 연산증폭기에 입력된다. PID-제어기의 출력신호는 서보밸브 스펴에 발생하는 마찰을 감소시켜 동특성을 향상시키기 위한 부가적인 디더(dither) 신호와 더해져 2.3절에서 설명된 기능의 전류구동회로에 입력전압으로 작용하여 서보밸브 코일의 전류를 제어하게 된다.

아날로그방식 서보컨트롤러에서는 영점조정을 비롯하여 PID-제어이득, 디더 신호 주파수 및 진폭, 지령신호 전압이득 등의 설정을 모두 포텐시오메터(potentiometer)로 조정하므로 튜닝이 번거로운 뿐만

아니라 다수의 서보밸브로 구성되는 유압시스템에서는 작동변수를 정확하게 동일한 값으로 설정하는 것이 쉽지 않은 단점이 있다. 이외에도 아날로그 지령신호에서 발생하는 잡음의 영향으로 인한 상위 제어기와와의 통신문제와 페루프 제어기로 내장된 PID-제어기만을 사용해야 하므로 시스템의 응답성능 개선에 한계가 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 점차적으로 서보컨트롤러의 기능이 디지털 방식으로 개발되고 있으며 디지털 제어기에서는 제어기연산이 프로그램으로 수행되므로 온-라인으로 제어이득을 변경하거나 작동조건에 따라 제어기의 구조를 변경하는 등의 다양한 설계가 가능한 장점이 있다.

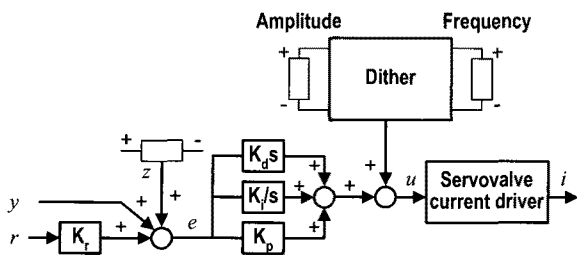


그림 8 아날로그 서보컨트롤러의 기능블록선도

그림 9는 Moog사의 1채널 아날로그 서보컨트롤러를 보여준다. 설명된 바와 같이 다수의 포텐시오메터를 이용해서 작동변수를 설정하도록 회로가 설계되어 있으며 연산증폭기로 설계된 PID-제어기와 2개의 바이폴러 트랜지스터를 이용한 전류구동회로로 구성된다.

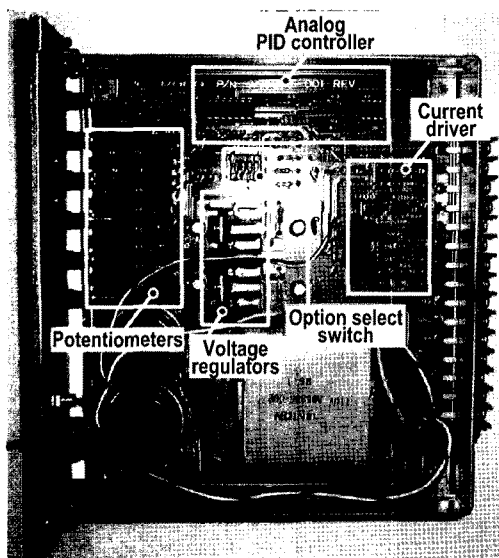


그림 9 Moog J121-001 서보컨트롤러

3. 전류구동회로 성능시험

다수의 서보밸브를 사용하는 유압제어시스템을 개발함에 있어 상용 서보컨트롤러를 대신하여 설계목적에 적합한 제어알고리즘이 구현된 멀티채널 서보컨트롤러를 사용하기 위하여 전류구동회로를 제작한 후 성능을 시험하였다. 시험에 사용된 서보밸브는 Moog사의 J076-104모델과 TSS사의 304F모델이며 정격전류는 J076-104가 병렬결선으로 40mA이고 304F는 직렬결선으로 20mA이다. D/A변환기 출력전압의 범위가 $\pm 5V$ 일 때 밸브구동에 필요한 정격전류를 발생시키기 위하여 J076-104 구동 시에는 그림 7의 구동회로에서 shunt 저항(R_0)을 20Ω 으로 설계하였고 304F 구동 시에는 51Ω 을 적용하였다.

정상상태 특성을 확인하기 위하여 가변저항을 이용하여 전류구동회로의 입력전압(v_d)을 $-5V \sim +5V$ 까지 $0.5V$ 단위로 변화시키면서 발생하는 서보밸브 구동회로의 shunt 전압(v_i)을 측정하였으며, 결과를 그림 10에 나타내었다. 실험결과 서보밸브 코일 전류는 입력전압에 대하여 선형적으로 발생함을 확인하였으며 이론식으로부터 계산된 결과와 5% 이내로 일치하였다. Shunt 저항 값에 무관하게 되먹임 되는 shunt 전압은 식 (2)를 만족하므로 $v_i = -0.25 v_d$ 이며 51Ω 의 경우에는 20Ω 에 비하여 되먹임 경로로 흐르는 전류에 의한 부하효과의 영향이 크게 되어 이론식과의 오차가 다소 크게 나타나게 됨을 확인하였다.

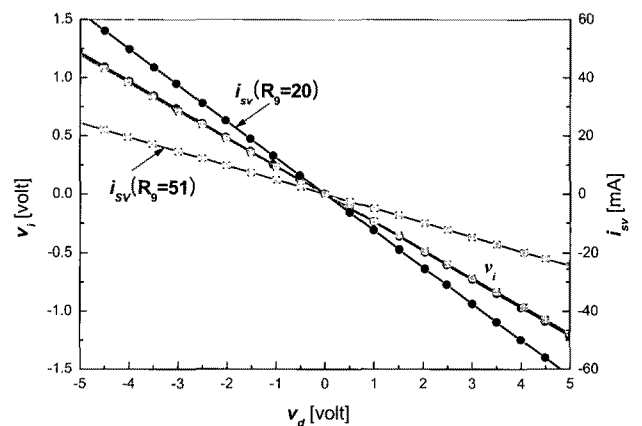
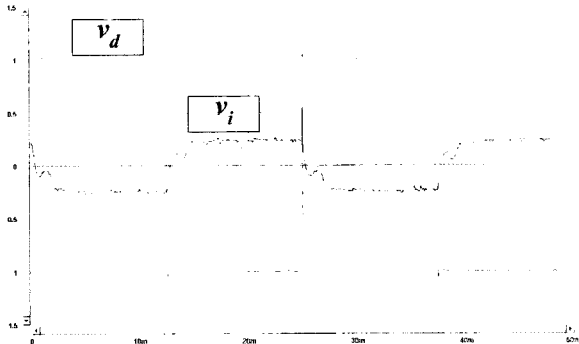


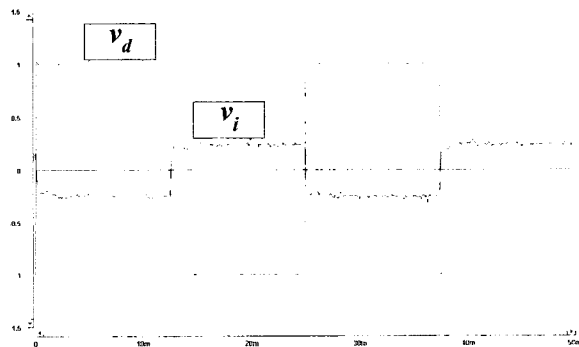
그림 10 전류구동회로 정특성

전류구동회로의 동특성은 함수발생기에서 40Hz, $\pm 1V$ 의 구형파 신호를 발생시켜 입력전압으로 인가하였을 때 나타내는 shunt 전압을 측정하여 시험하였으며 결과를 그림 11에 나타내었다. 전류이득이 큰

20Ω인 경우에는 상승시간이 약 2.5ms이고 연산증폭기가 포화되어 비선형적인 계단응답특성을 나타내었다. 이에 비하여 51Ω인 경우에는 상승시간이 0.1ms 정도로 작아지면서 매우 양호한 전류제어 특성을 나타내었다. 어느 경우에서나 큰 이득의 비례제어기에 의하여 전류가 제어되므로 오버슈트는 발생하지 않았다.



(a) 20Ω shunt 저항



(b) 51Ω shunt 저항

그림 11 전류구동회로 동특성

4. 멀티채널 서보컨트롤러 응용 예

4.1 게임기용 운동재현기

그림 12의 운동재현기는 상판(platform)과 하판(base)에 병렬로 연결된 3개의 유압실린더를 이용하여 경주용 자동차 운전 시 발생하는 운동감을 실시간으로 운전자에게 부여하기 위하여 설계된 온-라인 게임기이다. PC로 설계된 주제어기는 운전자가 조작하는 핸들, 가속페달, 브레이크 페달 및 기어단수의 상태 등을 반영하여 경주용 차량의 주행상태를 실시간으로 연산하여 영상화면과 관련된 자료를 처리하고 각 유압실린더의 기준지령신호를 발생시키는 기능을 갖는다. 마이크로 컨트롤러로 설계된 부제어기에서는 주 제어기로부터 전송된 기준지령신호를 추

종하도록 서보밸브를 제어하고 부수적인 유압시스템의 제어 및 운전자 작동신호를 주제어기로 전송하는 기능을 담당한다.

부제어기에 설계된 3채널 서보컨트롤러는 보다 간편하게 제어기의 성능을 튜닝 하면서 신뢰성 있는 위치제어 시스템을 구현하기 위하여 16비트 마이크로 컨트롤러를 이용하여 3개 편로드 유압실린더의 변위를 디지털방식으로 제어하고 D/A 변환기와 아날로그방식의 전류구동회로에서 서보밸브 구동전류를 제어하도록 개발되었다. 그림 13은 3채널 서보컨트롤러가 내장된 부제어기로 구성되는 위치제어 유압시스템의 블록선도를 나타낸다.

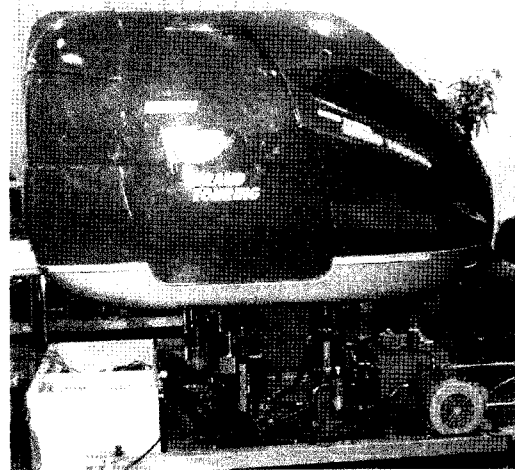


그림 12 3축 게임기용 운동재현기

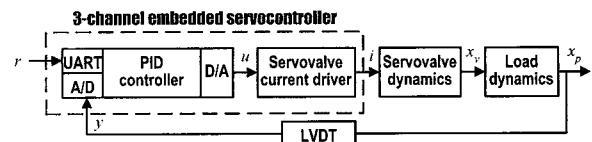


그림 13 3축 위치제어 유압시스템

개발된 3축 서보컨트롤러의 세부적인 설계사양과 기능은 다음과 같다.

■ 하드웨어

- 1) 80C196KC 20MHz
- 2) AD7874 A/D converter
: 12bit 분해능, 4채널, 19kHz 변환속도
- 3) AD7247A D/A converter(×2)
: 12bit 분해능, 2채널
- 4) 8251 USART
- 5) 93C46 EEPROM
: 1Kbit(64 word)

- 6) 16×4 LCD
- 7) Current driver
: Push-pull circuit with TIP31C, TIP32C

■ 시스템 프로그램

- 1) 디지털 PID 제어알고리즘
외부에서 비례, 적분, 미분제어이득이 온-라인으로 조절가능하며 각 채널에 대하여 2ms(500Hz) 주기로 디지털 제어를 수행한다.
- 2) 오프셋(offset) 전류 조절기능
개루프 제어모드에서 서보밸브에 인가되는 전류를 결정하며, 폐루프 제어모드 시에는 설정된 오프셋 전류가 제어기의 출력에 더해져서 서보밸브를 구동한다.
- 3) 전류제한(current limit) 설정기능
서보밸브에 인가되는 최대 전류를 설정된 값으로 제한하는 기능으로 유압실린더의 최대운동속도를 제한하는 역할을 한다.
- 4) 부 제어기의 내부정보 표시기능
16열×4행의 LCD에 표시모드에 따라 기준지령신호 및 변위계(LVDT) 출력신호, 제어기 이득, 오프셋 전류, 전류제한 값, 직렬통신의 상태 및 송수신 데이터 등을 나타낸다.

- 5) 기준지령신호 발생 기능
시험신호에 의하여 위치제어기의 성능을 평가하기 위하여 내부적으로 구형파와 정현파의 기준지령신호를 발생시키는 기능을 구현하였으며, 설정 가능한 주파수의 범위는 0.01Hz-10Hz이다.

- 6) 디지털 저주파필터
A/D 변환된 신호에 내재된 잡음을 제거하기 위하여 1차의 IIR 필터 연산기능을 갖는다.

- 7) 변위계 출력신호의 자동영점조정기능
각 실린더에 장착된 변위계 출력신호를 A/D 변환한 결과의 범위가 ±10V가 되도록 초기 실험을 통하여 획득된 전압특성 데이터로부터 내부적으로 보정하는 기능을 갖는다.

- 8) 설정된 부 제어기의 변수 값 저장
EEPROM에 저장되는 변수 값은 각 채널에 대한 제어기 이득, 오프셋 전류, 전류제한 값, 변위계 출력신호 보정계수, 엑셀과 브레이크 페달신호의 보정계수 등이다.

- 9) 기준지령신호의 크기조정기능
주 제어기에서 직렬통신을 통하여 수신된 각 실린더 기준지령신호의 크기를 조정함으로써 동일한 운

전상황에서 발생하는 운동감의 크기를 조정할 수 있는 기능을 갖는다.

10) 데이터 모니터링 및 저장기능

HP-VEE를 이용하여 제어성능을 파악할 수 있도록 직렬통신포트로부터 수신된 데이터를 표시하고 저장하는 기능으로 10ms마다 각 유압실린더의 기준 입력신호, 변위계 신호, 제어입력이 갱신된다.

그림 14는 3-채널 서보컨트롤러가 내장된 계임기용 운동재현기의 부제어기를 보여주고 그림 15는 실시간으로 유압실린더의 작동상태를 모니터링하는 PC 화면을 나타낸다.

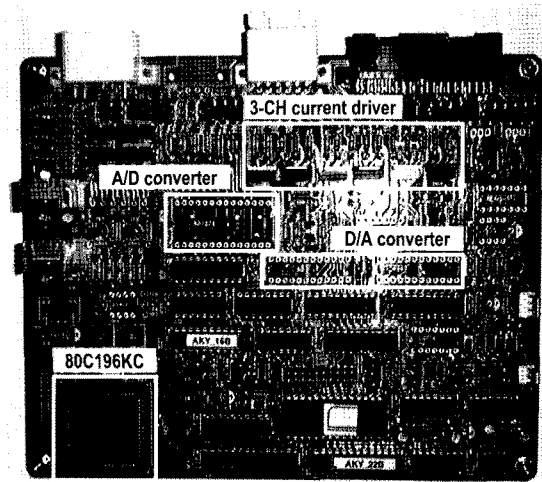


그림 14 3-채널 임베디드 서보컨트롤러

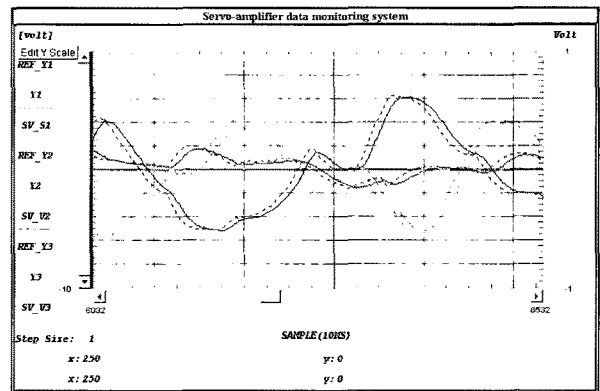
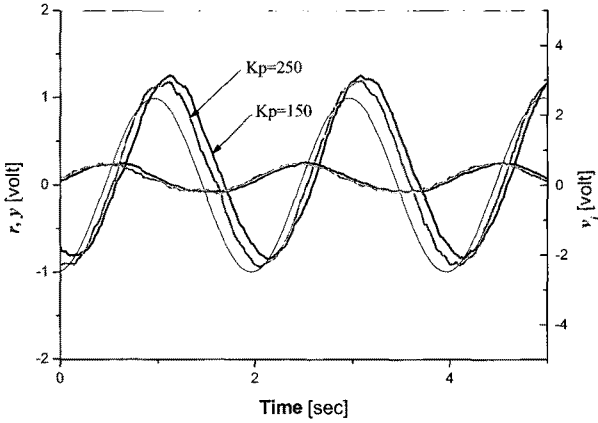


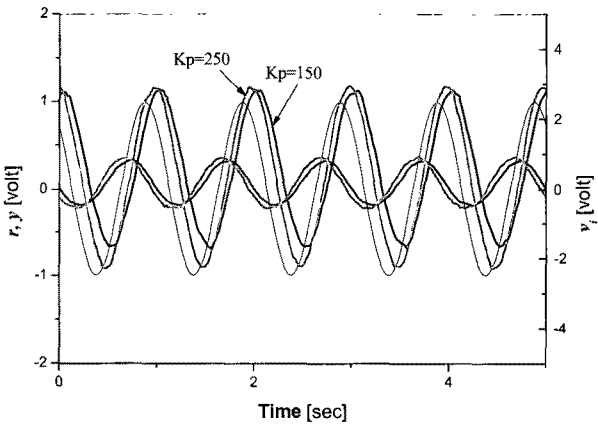
그림 15 데이터 모니터링 화면

그림 16은 내장된 함수발생기에서 발생된 정현파 지령신호를 이용하여 개발된 서보컨트롤러의 제어성능을 시험한 결과이다. 동적응답성능만을 살펴보기 위하여 디지털 위치제어기로는 비례제어만을 적용하였으며 비례이득의 변화에 따른 응답특성을 확인하였다. 운동재현기에 장착된 편로드 유압실린더

는 수직하중에 의한 부하로 인하여 비례제어만을 적용하면 오프셋 전류에 따라 정상상태 오차가 발생되며 비례이득이 클수록 양호한 추종성을 나타내는 것을 확인하였다. 그림 17은 게임기용 운동제현기의 작동중 발생하는 기준지령신호의 추종성을 보여준다.



(a) 0.5Hz sine



(b) 1Hz sine

그림 16 3-채널 서보컨트롤러의 주파수응답성능

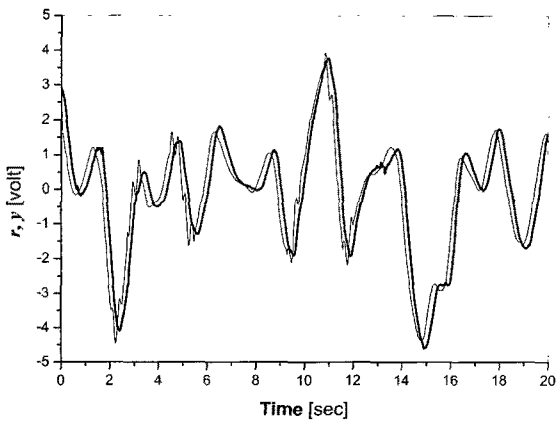


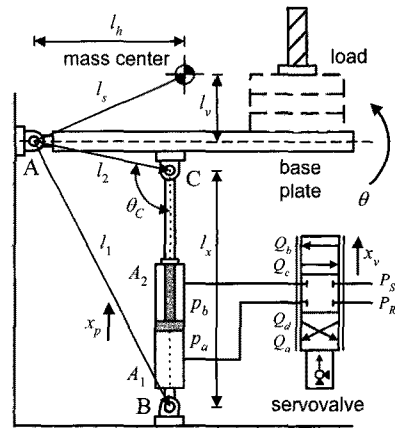
그림 17 유압실린더의 변위추종성능

4.2 편로드 유압제어시스템

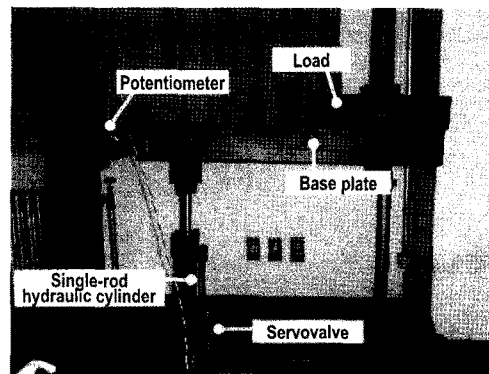
그림 18은 편로드 유압실린더와 서보밸브로 구성되는 전기유압식 서보시스템을 나타낸다. 서보밸브로 구동되는 편로드 유압실린더의 팽창 및 수축행정은 기초판을 A점에 대하여 회전시킨다. 이와 같은 폐루프 제어시스템에서 제어입력은 서보밸브 변위(x_v)이며 제어출력은 기초판의 회전각(θ)이다.

편로드 유압실린더는 한쪽 방향으로만 피스톤 로드 이동하므로 좁은 공간에서 설치가 용이한 반면에 팽창과 수축 시 수압면적의 차에 의한 비선형적 특성으로 인하여 부드러운 위치제어가 다소 어려운 단점이 있다.

상용 서보컨트롤러에 내장된 폐루프 제어기는 대부분 PID 제어방식이며 이득만을 조정할 수 있을 뿐 제어기 구조는 변경할 수 없으므로 목표설계사양과 제어대상 시스템의 특성을 고려하여 이에 적합한 제어시스템의 구축이 곤란하다. 본 설계에서는 편로드 유압서보시스템의 응답성능향상을 위하여 팽창과 수축행정 시의 비선형성을 보상할 수 있는 H_∞ 전설제



(a) schematic



(b) photo

그림 18 편로드 유압제어시스템

여기를 설계한 후 DSP를 이용하여 설계된 제어알고리즘을 구현하였으며 2.3절의 전류구동회로와 결합하여 제어성을 검증하였다.

H_{∞} 제어를 설계하기 위한 공칭선형모델의 차수와 형태는 수학적으로 모델링된 비선형 미분방정식으로부터 서보밸브의 동특성과 작동유체의 압축성을 무시하고 선형화를 통하여 식 (4)와 같은 2차의 전달함수로 가정하였으며 시스템 식별을 통하여 전달함수의 계수를 추정하였다.

$$H(s) = \frac{K}{(s+p_1)(s+p_2)} \quad (4)$$

식 (4)로 기술되는 유압시스템은 개루프 전달함수가 Type0 시스템이므로 비례제어기만으로 폐루프 시스템을 설계하는 경우에는 계단입력에 대하여 정상상태오차가 발생하게 된다. H_{∞} 제어기는 적절한 가중함수의 설계를 통하여 개루프 전달함수가 Type1과 Type2 시스템이 되도록 식 (5)와 식 (6)과 같이 제어기 전달함수를 설계하였다. Case I의 H_{∞} 제어기는 계단입력에 대한 정상상태오차를 제거할 수 있으며 case II는 램프형태의 지령신호를 정상상태오차 없이 추종할 수 있다.

$$\text{case I: } G_{c1}(s) = \frac{s+p_1}{K} \frac{\zeta_0 + \zeta_1 s}{(\tau_1 s)(\theta_0 + \theta_1 s)} \quad (5)$$

$$\text{case II: } G_{c2}(s) = \frac{s+p_1}{K} \frac{\zeta_0 + \zeta_1 s + \zeta_2 s^2}{(\tau_1 s)^2(\theta_0 + \theta_1 s)} \quad (6)$$

설계된 고차의 제어기 전달함수에 대한 실시간 해를 구하기 위해서는 고속으로 실수연산이 가능한 프로세서가 적합하다. 그림 19는 TI사의 TMS320C31 floating-point DSP를 이용하여 식 (5)와 식 (6)으로 설계된 H_{∞} 제어를 구현하고 내장된 전류구동회로에서 서보밸브 전류를 제어하는 기능의 서보컨트롤러를 보여준다. IIR 필터로 이산화된 H_{∞} 제어기 연산에 소요되는 시간은 채널 당 수 μs 이며 A/D 변환과 부가적인 알고리즘의 연산시간을 고려하여 샘플링 시간은 4kHz(250 μs)로 선정하였다.

그림 20과 그림 21은 각각 계단 및 램프 지령신호에 대한 응답을 나타낸다. 식별된 시스템을 대상으로 설계된 case I의 H_{∞} 건설제어기는 비례제어기가 적용된 시스템에 비하여 응답성능이 향상되고 특히, case II H_{∞} 제어기의 경우에는 램프 지령신호에 대해서도 정상상태 오차를 나타내지 않으므로 설계목

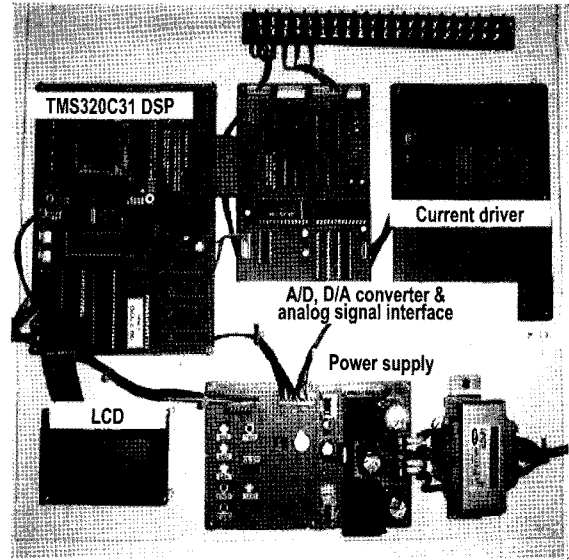


그림 19 DSP가 적용된 서보컨트롤러

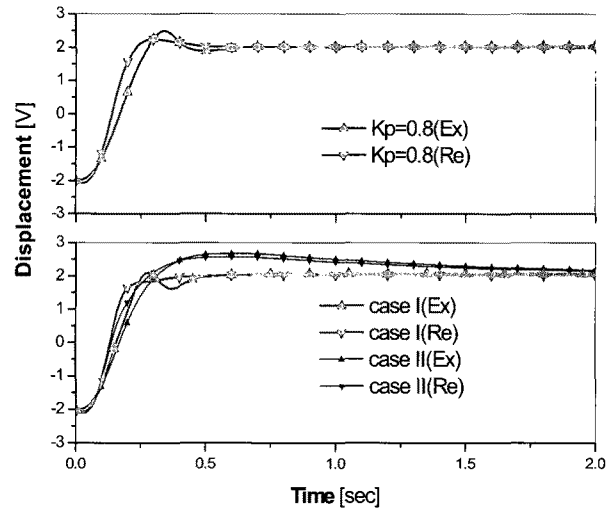


그림 20 DSP 서보컨트롤러의 계단응답

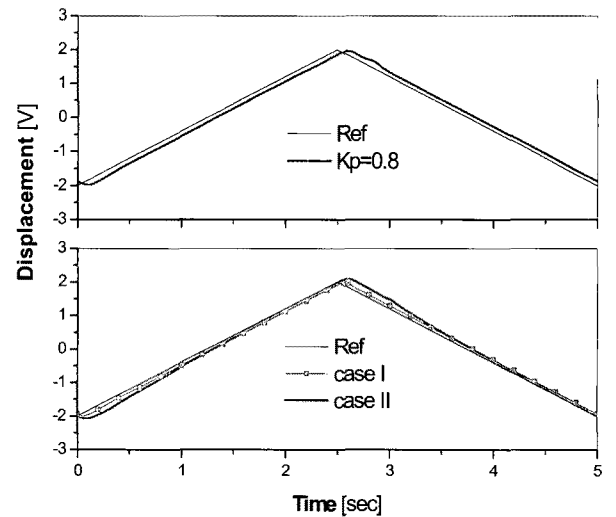


그림 21 DSP 서보컨트롤러의 램프응답

적에 부합함을 확인하였다. 이와 같이 디지털방식의 페루프 제어기를 사용하는 경우에는 대상시스템의 특성을 고려하여 설계목적에 적절한 서보컨트롤러를 구현하는 것이 가능하며 하나의 마이크로 컨트롤러를 사용하여 다수의 서보밸브를 구동할 수 있으므로 시스템개발비용의 절감과 성능개선의 이점이 있다.

5. 결 론

전기유압식 서보시스템에서 서보밸브는 전기적인 신호로 밸브변위를 신속하면서도 정밀하게 제어할 수 있으므로 페루프 제어시스템 개발에 있어서 핵심적인 요소이며 서보밸브를 작동시키기 위해서는 페루프 제어기와 전류구동회로로 구성되는 서보컨트롤러가 필요하다. 종래에는 아날로그방식으로 설계되었으나 디지털기술의 급속한 발전에 따라 최근 들어 디지털방식의 서보컨트롤러가 개발되어 상용화 되었으며 점차 확대될 전망이다.

일반적으로 범용 서보컨트롤러는 서보밸브제작회사에서 서보밸브와 일체로 공급하고 있으나 가격이 매우 높고 개발하려는 시스템에 적절치 않거나 불충분한 기능으로 인하여 부수적인 설계보완이 필요한 경우가 있다.

본 해설에서는 디지털방식으로 설계된 페루프 제어기와 아날로그방식의 전류제어회로를 결합하여 다수의 서보밸브를 구동할 수 있는 멀티채널 서보컨트롤러의 설계에 대하여 살펴보았으며 3축의 게임기용 운동재현기와 편로드 유압제어시스템에 활용된 예를 설명하였다.

마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털방식의 서보컨트롤러는 제어시스템의 튜닝이 간편하고 진단기능 등을 구현할 수 있으며 제어기의 구조변경이 곤란한 범용 서보컨트롤러에 비하여 제어대상 시스템의 특성에 적절하게 설계된 제어기를 구현함으로써 성능향상을 도모할 수 있는 장점이 있다.

PWM으로 서보밸브 전류를 구동하는 완전 디지털화된 서보컨트롤러는 전류제어에서 스위칭회로 설계와 정밀한 전류측정 등에 있어서 기술의 신뢰성이

요구되므로 다소 개발이 어렵지만 본 해설에서 설명된 멀티채널 서보컨트롤러는 아날로그방식의 전류구동회로를 사용하므로 아날로그방식의 상용 서보컨트롤러에 설계된 전류구동회로와 거의 동일한 성능을 갖도록 개발하는 것이 가능하다. 따라서 게임기용 운동재현기와 같이 다수의 서보밸브를 사용하면서 시스템작동에 적절한 기능의 서보컨트롤러의 개발이 필요한 경우에는 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- 1) H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc. 1967.
- 2) Moog, "Servocontroller J121-001 취급설명서"
- 3) 정규흥, 김대현, 이교일, "불균형 하중을 갖는 편로드 유압서보시스템의 H_{∞} 최적제어", 대한기계학회 91년도 춘계학술대회 논문집 (I), pp. 259~264, 1991.
- 4) 정규흥, 서정용, "게임기용 운동재현기의 하위제어기 설계", 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집(B), pp. 146~151, 2001.
- 5) 정규흥, "DSP를 이용한 편로드 유압서보시스템의 H_{∞} 최적제어", 대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집(A), pp. 515~520, 2001.

[저자 소개]

정규흥(책임저자)

E-mail: ghjung@daejin.ac.kr

Tel : 031-539-1974

1963년 7월 30일생

1993년 서울대학교 기계설계학과 박사 과정

졸업, 1993년 현대자동차 중앙연구소

선임연구원, 1995년~현재 대전대학교 컴



퓨터응용기계설계공학과 교수, 자동변속기 변속제어기 설계, 운동재현기 설계 및 메카트로닉스를 이용한 제어시스템 개발에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회, 한국자동차공학회 회원