

PD 제어기를 이용한 회전전동장치의 동특성에 관한 연구

김재경*(조선대 대학원 기계설계공학과), 김종태(조선대 대학원 기계설계공학과),
김택현(조선대 기계설계공학과), 오택열(경희대 기계공학과)

A Study on Dynamic Characteristics of Rotating Transmission Using PD Control

J. K. Kim(Mechanical Design. Eng. Dept., CSU), J. T. Kim(Mechanical Design. Eng. Dept., CSU)
T. H. Kim(Mechanical Design. Eng. Dept., CSU), T. Y. Oh(Mechanical. Eng. Dept., KHU)

ABSTRACT

The rotating transmission is made up of belts, mass disks and gears. This precise piece of equipment is controlled electro-mechanically by the motor and operation program. The control strategy of the transmission can be changed by belts' stiffness and change of the mass and gear. This transmission can be modeled as a rigid body, and also finds broad application in such diverse fields as machine tools, the cruise control system in automobiles, and control in the attitude and gimbals of spacecraft. The study of the rotating transmission excited by its base motion is not only able to predict the rotational performance, but obtain the fundamental data for vibration isolation.

In this thesis, we studied the response abilities such as steady overshoot, undershoot and ect. and the response velocities such as rising time, settling time, and ect. in the rotating transmission through PD control experiment.

Key Words : DSP(디지털 신호 처리장치), overshoot(오버슈트), rising time(상승시간), settling time(정착시간)

1. 서론

제어기의 설계기법은 증기엔진과 속도조정기의 개발⁽¹⁾을 시작으로 산업혁명과 함께 자동화에 선행하는 기술인 기계화에 대한 많은 연구가 시작되었다. 그로부터 19세기 중반까지는 직관적인 발견에 의하여 발전하다가 제어시스템의 정확도를 높이기 위한 노력의 결과, 피드백 시스템의 진동이나 불안정성이 문제가 됨에 따라 자동제어이론의 필요성이 야기되어 J.C. Maxwell, E.T. Routh, G.B. Airy 등에 의해 제어이론에 관한 연구가 시작⁽²⁾되었으며, 20세기에는 주파수응답 및 복소함수 개념이 도입되어 제어이론은 체계화되기 시작하였고, 1932년에 H. Nyquist는 정현파(sinusoidal wave) 입력에 대한 개루프 시스템의 주파수 응답을 이용하여 폐루프 시스템의 안정도를 비교적 쉽게 관찰할 수 있는 방법을 제시하였다. 1945년 H. W. Bode는 Nyquist 안정도 판별법을 이용하여 피드백 증폭기 설계방법을 크게 향상시켰다. 또한, 1948년 W. R. Evans는 폐루프 시스템의 안정도를 나타내는 특성방정식의 근의 경로를 시스템 파라미터 변화에 따라 도해적으로 나타냄⁽³⁾으로써 제어시스템의 성능 및 안정도 해석 그리고 설

계에 이용할 수 있는 근궤적법을 개발하였다.

세계 제2차 대전 중에는 궤환제어방식에 근거한 자동조정비행기, 포 조준시스템, 레이더안테나 제어 시스템 등 기타 군사적 시스템의 설계와 제작⁽⁴⁾에 주파수응답법과 근궤적법에 관한 제어이론 뿐만 아니라 실제적인 제어문제에 관해서도 필수적이었으며 자동제어의 이론과 실제에 큰 추진력이 되었다. 이에 따라 Laplace 변환이나 복소수평면해석 등 새로운 이론과 정교한 부품요소의 개발이 촉진되었다.

1950년대에는 미국의 Bellman과 Kalman 그리고 러시아의 Pontryagin 등에 의해 최적제어 이론이 소개⁽⁵⁾되었으며, 마이크로프로세서 전자공학이 발달함에 따라 아날로그 및 디지털 컴퓨터가 제어기로 사용되기 시작하였다. 따라서 상태공간 모델을 이용하여 복잡한 제어 시스템의 해석 및 설계가 가능해졌으며, 이 상태공간 접근법은 인공위성 제어에 적용될 수 있었다.

1960년도 이전에는 주로 단일입출력 시스템에 적절한 제어방법인 주파수역 접근법이 사용⁽⁶⁾되었으나, 1960년대 이후의 우주탐험계획, 미사일시스템의 개발, 그리고 복잡한 공정의 효율적 제어 목표에 자극을 받아 다변수 시스템의 최적제어, 적응제어 등 새

로운 제어이론과 그 실용화방법에 관한 연구가 활발 해졌으며, 1970년 후반부터는 주파수역 접근법과 시간역 접근법 중에서 각각의 좋은 특성만을 이용하려는 노력이 시작되어 Doyle과 Stein,⁽⁷⁾ 그리고 Zames⁽⁸⁾ 등에 의하여 시간 및 주파수역 접근법이 개발되었다.

최근에는 공학과 의학 분야에 관련하여 인공지능적인 제어기술처럼 수학적으로 모델링하기 힘든 시스템이라 할지라도 퍼지 추론 방법^(9,10)이나 신경회로망^(11,12)을 이용하여 실제적인 제어 문제를 해결할 수 있는 폭이 확대되어 가고 있다.

이처럼 현대의 산업과 문명이 빠른 속도로 발전 하면서 각종 공정과 시스템들이 대형화되고 고도화 됨에 따라 제어공학의 필요성은 더욱 높아지고 있으며 공학과 과학의 발전에 중요한 역할을 해 오고 있다.

회전전동장치는 질량, 벨트, 풀리로 이루어진 시스템으로, 서보모터와 실행프로그램에 의해 전자적으로 제어되는 장치이다. 시스템의 제어문제는 질량의 변화, 여러 가지 강성을 가지는 벨트, 기어비율의 변화를 조절함으로써 다양하게 변화시킬 수 있다^(13,14,15). 특히, 강체로서 모델된 시스템에서 실행되는 제어 문제는 공장기계의 위치제어, 자동차의 순항제어, 그리고 우주선의 자세 및 적재 제어 등과 같은 다양한 분야에 적용할 수 있다.

2. 회전 시스템의 실험장치

이 실험에서 사용한 회전전동장치는 Fig. 1과 같이 세 개의 부 시스템으로 구성되어 있다.

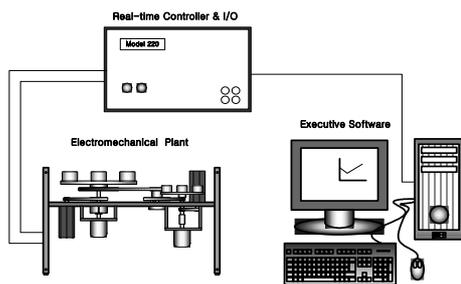


Fig. 1 The experimental control system

첫 번째는 벨트/질량 기구, 액추에이터 그리고 센서들로 구성된 기전시스템이다. 여기에는 설계의 주안점은 DC 서보 모터, 고 해상력 인코더, 조정 가능한 관성, 그리고 가변성의 기어비율을 재구성이 가능한 시스템의 형태이다.

다음은 실시간 제어기에 기초한 DSP(Digital Signal Processor: 디지털 신호 처리장치), 서보 액추

에이터 인터페이스, 서보 증폭기, 보조 전원공급 장치를 포함한 실시간 제어기(real-time controller)이다. 디지털 신호 처리장치는 연속 또는 이산시간으로 설계된 제어기를 높은 건본 추출비율(sampling rate)로 실행시킬 수 있다. 또한 제어기는 궤적 명령들을 해석하고 데이터 획득, 궤적 발생, 그리고 시스템 상태와 안정성 확인과 같은 기능 등을 한다. 논리 게이트 배열은 모터의 정류와 인코더 펄스를 변환한다. 두 개의 보조 DAC(Digital to Analogue Converter: 디지털-아날로그 변환기)를 이용하여 실시간 아날로그 신호를 측정한다.

세 번째 부 시스템은 PC의 Windows 상에서 작동하는 실행 프로그램이다. 이 프로그램은 회전전동장치에 대한 사용자 인터페이스이며 제어기의 설명, 궤적의 정의, 데이터의 획득, 그림, 시스템의 실행 명령 등을 가능케 한다. 제어기는 매우 다양한 형태의 블록선도와 동역학적 규칙을 사용할 수 있다. 사용자 인터페이스는 사용자가 다루기 쉬운 강력한 실험적인 환경을 제공한다.

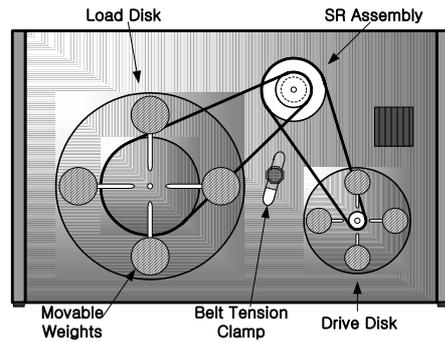


Fig. 2 Top view of rotating transmission

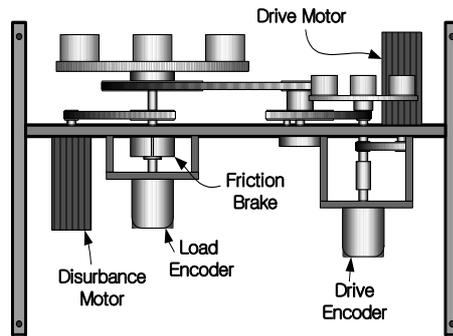


Fig. 3 Front view of rotating transmission

Fig. 2와 3에서 회전전동장치는 드라이브 디스크(drive disk), 로드 디스크(load disk), 속도조절 어셈블리(Speed Reduction assembly) 사이에 타이밍벨트(timing belt)가 연결되어 있는 구조를 갖는다.

디스크는 $\pm 360\text{deg}$ 회전이 가능하며, 서보 모터의

축에 연결된 피니언을 이용하여 모터의 회전운동이 벨트를 통하여 디스크에 전달된다. 인코더는 디스크의 위치를 실시간으로 측정된다. 다양한 관성은 황동질량 변화로 조절하고, 속도의 변화는 벨트 풀리와 속도조절 어셈블리를 교환하여 조절한다. 또한 드라이브 디스크에서 황동질량의 최대 이동범위는 대략 2.5cm~5.5cm 이고, 로드디스크의 황동질량의 최대 이동범위는 대략 4cm~12cm 이다.

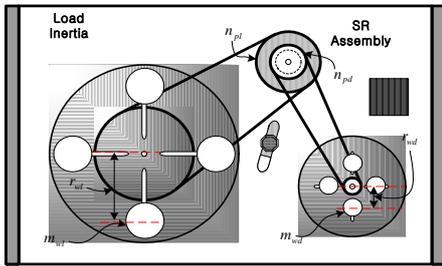
드라이브 디스크와 드라이브 모터는 1대1로 연결되어 있으며, 로드 관성은 속도조절 어셈블리 때문에 드라이브 모터와 다른 속도로 회전한다.

드라이브와 외란 모터는 컨트롤러 박스 안에 있는 서보증폭기와 파워 서플라이에 의해 전자적으로 작동한다. 기어비율은 속도조절 어셈블리의 위아래 풀리의 사이즈를 선택을 통하여 바꾼다.

3. 실험 방법 및 결과

본 실험에서는 다양한 동역학적 구성 중 Table 1 과 같이 플랜트를 구성하여 제어실험을 행하였다.

Table 1. Test cases for plant identification



Test Case	n_{pd}	n_{pl}	m_{wd} (kg)	m_{wl} (kg)	r_{wd} (cm)	r_{wl} (cm)
1	-	-	0.2 (4x)	0	5.0	-
2	-	-	0	0	-	-
3	24	36	0	0	-	-
4	24	36	0	0.5 (4x)	-	10.0
5	24	36	0.2 (4x)	0.5 (4x)	5.0	10.0

Test case 1은 드라이브 디스크에 4개의 200g 질량을 연결하고 속도조절 어셈블리 풀리는 연결하지 않는다.

Test case 2은 질량과 벨트풀리를 모두 제거한 형

태의 시스템이며, Test case 3은 각각의 디스크에서 질량을 제거하고 벨트만이 연결된 시스템이다. Test case 4는 로드디스크에 4개의 500g 질량을 체결하고 벨트로 연결된 시스템이다. 마지막으로 Test case 5는 드라이브 디스크와 로드디스크에 질량이 체결되어 있으며 벨트로 연결된 형태의 시스템 구성하였다. 이를 통해 제어특성을 알 수 있었다

실험에 사용한 매개변수 값들은 Table 2와 같다.

Table 2. system parameters values

Parameter	Value
J_{dd}	0.0003567 (kg · m ²)
J_{dl}	0.00853 (kg · m ²)
J_{wd}	0.002101 (kg · m ²)
J_{wl}	0.0206 (kg · m ²)
c_1	0.00396 (N · m/rad/s)
c_2	0.0197 (N · m/rad/s)
k	9.937 (N · m/rad)

우선 비례게인, 미분게인이 시스템에 미치는 영향과 강제 PD제어에 따른 응답특성에 대해 알아보았다. 여기서 시스템 구성은 Test case 1과 같이 구성하였다.

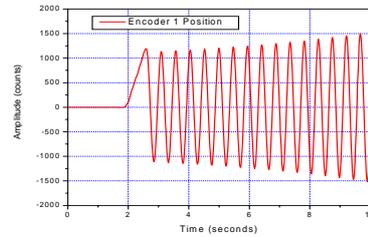


Fig. 4 Time response of the proportional gain ($k_p=0.084$)

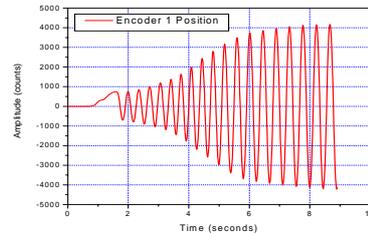


Fig. 5 Time response of the proportional gain ($k_p=0.168$)

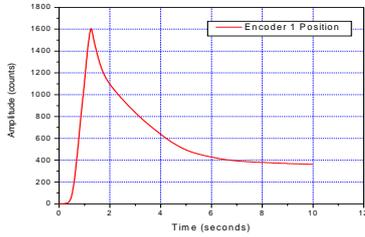


Fig. 6 Time response of the derivative gain ($k_d=0.0105$)

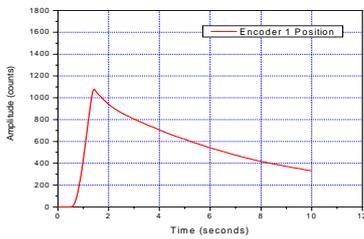


Fig. 7 Time response of the derivative gain ($k_d=0.0210$)

Fig. 4~5에서와 같이 비례게인 k_p 값이 2배로 커짐에 따라 상승시간은 0.496sec 만큼 감소하고 19%의 오버슈트와 6.64%의 언더슈트가 발생하여 진동은 심해지고 시스템은 불안정하였다.

Fig. 6~7에서와 같이 미분게인 k_d 가 값을 2배로 증가함에 따라 언더슈트가 현저하게 감소하고 상승시간이 0.469sec 만큼 정착시간이 0.779sec 만큼 증가하여 시스템의 안정도는 좋아지지만 응답속도가 감소했다.

다음은 고유주파수와 감쇠비를 통하여 강체 PD 제어를 확인한다.

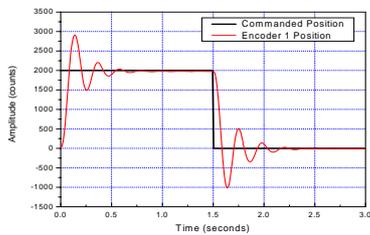


Fig. 8 Step response of rigid body PD control ($\omega_n = 4\text{Hz}$, $\zeta = 0.2$)

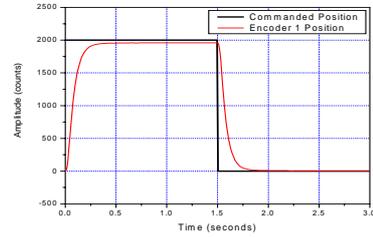


Fig. 9 Step response of rigid body PD control ($\omega_n = 4\text{Hz}$, $\zeta = 1.0$)

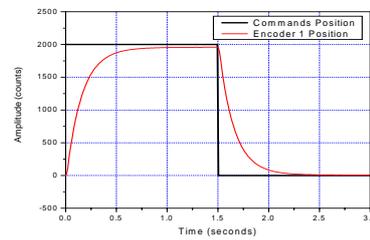


Fig. 10 Step response of rigid body PD control ($\omega_n = 4\text{Hz}$, $\zeta = 2.0$)

Fig. 8에서와 같이 저감쇠에서는 10.0545%의 오버슈트와 7.2265%의 언더슈트를 나타내어 큰 오버슈트와 정착시간을 갖으며 시스템에 진동이 발생하고 불안정해졌다.

Fig. 9에서와 같이 임계감쇠에서는 0.168sec의 상승시간을 나타내는데 이는 오버슈트가 없어지고 시스템이 안정되었다.

Fig. 10에서와 같이 과감쇠에서는 0.398 sec의 상승시간을 나타내어 시스템은 안정되나 매우 길어짐을 알 수 있었다.

다음은 응답특성을 변화시켜 각각의 PD제어에 따른 계단응답과 포물선응답에 대한 데이터를 얻었다.

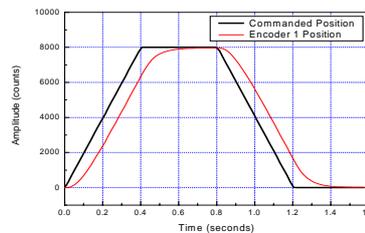


Fig. 11 Ramp response of PD control in test case 2 ($\omega_n = 4\text{Hz}$, $\zeta = 1.0$)

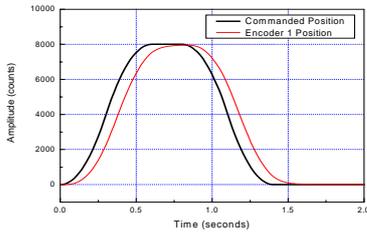


Fig. 12 Parabolic response of PD control
in test case 2 ($\omega_n = 4\text{Hz}$, $\zeta = 1.0$)

다음은 강체로서 모델링된 플랜트에 로드디스크에 질량을 추가하여 벨트로 연결하여 시스템을 2차로 증가시키고 시스템 동역학에 진동모드를 추가하여 응답특성을 알아보았다.

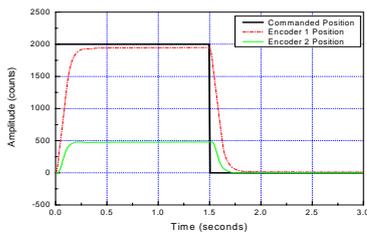


Fig. 13 Step response of 2DOF PD control
in test case 5 ($k_p = 0.35$, $k_d = 0.03$)

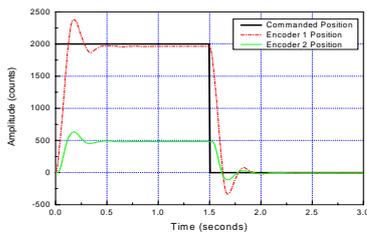


Fig. 14 Step response of 2DOF PD control
in test case 5 ($k_p = 0.35$, $k_d = 0.015$)

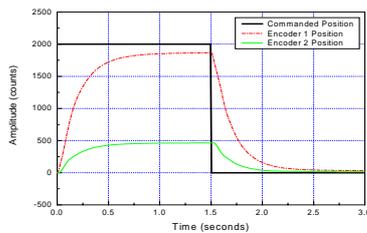


Fig. 15 Step response of 2DOF PD control
in test case 5 ($k_p = 0.15$, $k_d = 0.03$)

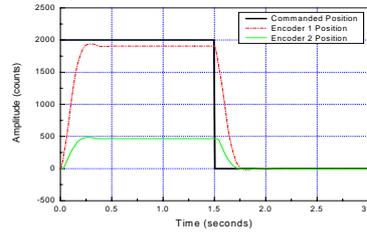


Fig. 16 Step response of 2DOF PD control
in test case 5 ($k_p = 0.15$, $k_d = 0.015$)

여기서 엔코더 2는 속도감소 어셈블리의 기어비율로 인해 로드디스크에서의 속도가 4배가 감소함으로써 진폭 값이 4배가 감소되었음을 알 수 있었다.

Fig. 14과 Fig. 16에서와 같이 비례게인 k_p 가 커짐에 따라 Fig. 13과 Fig. 14에서와 같이 미분게인 k_d 가 감소함에 따라 상승시간이 감소하고 진동은 심해지고 시스템은 불안정해지는 것을 알 수 있다. Fig. 15와 Fig. 16에서와 같이 k_d 가 증가함에 따라 언더슈트가 현저하게 감소하고 시스템의 안정도는 좋아지지만 상승시간과 정착시간이 증가하여 응답속도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 실험에서는 PD제어를 회전 시스템에 사용하여 응답특성을 확인하였다.

- 비례게인을 2배 증가시킴에 따라 상승시간은 0.496sec만큼 감소하고 19%의 오버슈트와 6.64%의 언더슈트가 발생하여 진동이 심해졌고, 미분게인을 2배 증가시킴에 따라 현저히 오버슈트와 언더슈트가 감소하나 0.469sec의 상승시간과 0.779sec의 정착시간의 증가하고 응답속도가 감소하였다.
- 저감쇠인 경우 10.0545%의 오버슈트와 7.2265%의 언더슈트로 인하여 진동이 발생하고 시스템이 불안정했고, 임계감쇠인 경우 0.168sec의 상승시간이 나타나고 오버슈트가 없어져 시스템이 안정되었다. 또한 과감쇠에서는 0.398sec의 상승시간을 나타내어 시스템이 안정되었으나 상승시간이 너무 길어 응답속도가 현저히 감소하였다.

이러한 결과들을 응용하여 공작기계, 항공역학, 자동차공학, 각종 분석 장치 등의 응답특성의 향상에 광범위하게 사용할 수 있을 것으로 기대되며, 회전시스템의 Controller 설계 시 유용한 기초 자료가 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박홍배 · 이균경. "최신 제어시스템", 서울: 반도출판사, 1993, pp.61~65, 581~595
2. Charles L. Phillips, Royce D. Harbor Feedback control systems , Prentice Hall, 1996,
3. James L. Melsa. Donald G. Schultz. Linear control systems , McGraw-Hill , 1969
4. 김종식 "선형 제어시스템 공학", 서울: 청문각, 1994, pp.111~123
5. C. M. Harris. Shock and Vibration Handbook, 4th ed., McGraw-Hill, 1997, pp.2.5~2.7, 37.12~37.15
6. Maciejowski, J. M.. Multivariable Feedback Design: Addison - Wesley, 1989.
7. Doyle, J. C. G. Stein.. "Multivariable Feedback Design : Concepts for a Classical/Modern Synthesis." IEEE Trans. on Auto. Control. AC-26: 4~16, 1981
8. Zames, G.. "Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformation, Multiplicative Seminorms, and Approximate Inverse." IEEE Trans. Auto. Control. AC-26:301~320, 1981.
9. Sugeno, G.. Industrial Applications of Fuzzy Control: North - Holland, 1985.
10. Zadeh, L. A.. "A Rational for Fuzzy Control," Trans. ASME. J. of Dynamic System Measurement and Control. 94:3~4, 1974.
11. Minsky, M. L.. Theory of Neural-Analog Reinforcement Systems and Its Application to the Brain-Model Problem Ph. D. Thesis, Princeton University, 1954.
12. Miller, T. R. S. Sutton. P. J. Werbos. Neural Network for Control. The MIT Press. 1990.
13. Benjamin C. KUO.. Automatic Control Systems Third Edition: Urbana-Champaign, 1972
14. 강철구 · 권육현 · 박영필 · 이교일 "현대제어공학" 서울: 희중당, 1993, pp.545~546, 755~756, 758~759
15. 김택현 · 정상화 · 이동하. "PD제어와 LQR을 이용한 병진 시스템의 제어특성 연구", 한국공작기계학회, 제10권, 제5호, pp. 78~84. 2001.2.