

실험적 접근을 통한 제어기 설계

° 신 시 중 전 기 준

경북 대학교 공과 대학 전자 공학과

Controller Design with Experimental Approach

Si Joong Shin and Gi Joon Jeon

Dept. of Electronics, Kyungpook National University

Abstract

The classical control theory has been developed successfully for the design of a system controller and has evolved continually. Even though sophisticated simulation techniques and software packages are available, there is still some difficulty in the design of a complex system controller at desk. So the trial and error method is sometimes used to design a new controller, but it requires excess time and cost. This paper suggests a controller design method through the experimental approach. The basic concept is to adjust gradually the design parameters of the controller to the simulation results and experimental data of a similar real system. This method will be a very useful and easy way to design an accurate and/or optimal controller for a real plant while reducing time and giving a good solution at a reasonable cost.

1. 서론

이동차량에 장치/ 탑재되어 안정된 목표물 관측을 가능하게 하는 안정화 장치(stabilization system)는 차량에 고정되어 지지되는 고정된 부위인 플랫폼에 지지되면서 고저 및 선회방향의 두 방향에 대한 자유도를 가지는 반사경 블록(reflect mirror block)을 가지며, 이 블록에 장치 되어 차량의 움직임이 반사경에 미치는 외란의 양을 감지하여 궤환해 주는 감지센서인 속도적분 자이로(rate integrating gyro)와 이 오차 신호를 여파하고 필요한 구동력을 발생시키는 제어기의 역할에 의하여 움직이는 차량에 탑재되어서도 안정한 시계를 제공해 준다.

일반적으로 차량이 야지를 움직이는 경우 이에 의한 외란의 스펙트럼을 분석해 보면 수십Hz - 수십Hz에 대부분의 에너지 분포 [1, 2, 3]를 가지게 된다. 또한 운용자가 원하는 제어명령은 이 외란의 대역보다 낮은 주파수 대역에 존재하게 되므로, 시스템

의 페루프 응답대역폭은 수십Hz 이내이면 충분하다. 따라서 차량용 안정화시스템의 주요 설계관점[4, 5, 6]은 다음과 같은 사항에 역점을 두어야 한다.

- (1) 운용 대역폭 내에서의 안정성
- (2) 외란에 대한 강인성
- (3) 정상상태오차의 최소화

제어기의 구현에 있어 제어대상인 반사경블록(plant)은 기계적 관성, 점성, 스프링력등이 필요한 수준으로 설계되고 제작되어진다. 그러나 제작된 실제 플랜트는 설계목표에 완벽하게 일치되지 못하게 되며 설계에 근간을 두고 제어기를 제작하여 시험할 경우 제어성능은 예상치와는 상당히 벗어나는 결과를 가져오고 있어서, 이의 수정/보완은 상당한 시간적비용과 축적된 노하우를 요구하게 된다.

Ziegler 와 Nicols 의 실험적 접근[7]에 의한 PID 제어기의 이득조정에 관한 방법이 제시된 이래 제어기 설계의 실험적 방법에 대한 연구는 별다른 진전이 없었으며, 고성능 컴퓨터의 등장으로 제어기 설계보다 제어대상 플랜트의 보다 정확한 모델링에 관한 연구가 활발히 진행 되었으나, 이를 기초로 설계된 제어기의 실장에 있어 실행-수정의 과정에 상당한 시간이 요구 된다.

본 제안내용은 제어기의 이득을 직접 조정하지 않고, 주파수 특성에 의한 영점, 극점, 위상이동을 근간으로 제어기 요소 설계에 관한 연구이다. 그 결과 기존의 PID 이득조정 방법보다 빠르게 제어기 설계를 가능케 하며, 설계된 제어기의 실장 과정에서 발생하는 실행-수정에 소요되는 시간이 거의 필요치 않게 되었다. 특히, 설계성능과 실장 제작 플랜트의 각 요소의 오차가 심각해지는 정밀 플랜트의 제어기 설계시 유사 플랜트 제어기를 이용하여 실험적인 방법으로 새로운 목표플랜트의 최적의 제어기 설계에 대한 연구 이다. 여기에서 유사플랜트란 플랜트의 주파수 응답 특성이 상이하나, 시스템의 차수가 같은 시스템으로 정의 한다. 유사플랜트의 제어기를 설계할 경우 기존의 플랜트

제어기를 유사플랜트의 제어기로 사용하여 시스템인식 및 모델링에 이용하므로써 제어기 설계시 플랜트의 미지요소에 의한 설계오류를 줄여주고, 실제 플랜트에 대한 정확한 모델링을 가능케 해 주므로써 최적의 제어기 설계에 근접 할 수 있는 장점을 제공한다. 또한 주어진 매개변수를 사용하지 않고 실제 플랜트의 특성자료를 계측기로 측정하여 이용하므로 설계자료와 실제품의 차이점을 분석하여 이를 실제 설계에 반영 할 수 있도록 실험적 방법으로 자료를 추출코자 한다.

여기에서 추출되고 제시된 실험자료는 미국 T.I.사가 제작한 포수조준경[8]과 국내에서 제작한 목표플랜트인 BU1을 사용하여 추출하였다.

II. 안정화 시스템

김발(gimbal)형태의 플랜트를 가지는 조준경 시스템은 그림1과 같이 구성 되어 있으며 근사 선형화된 모델로 표현 되어 진다. 안정화란 시스템이 제한된 범위내에서 구동입력이나 외란잡음이 인가될때 반사경에 의한 시선(LOS:Line of Sight)이 요구되는 범위내에서 목표물에 유지 되는것을 말한다. 시스템의 입력은 조종자의 조준선이동을 위한 손잡이명령이며, 외란잡음은 차량의 움직임에 의한 롤(roll), 피치(pitch), 요우(yaw) 변위에 의한 외란이다. 그림1을 간소화 시킨 특성 블록도는 그림2와 같다.

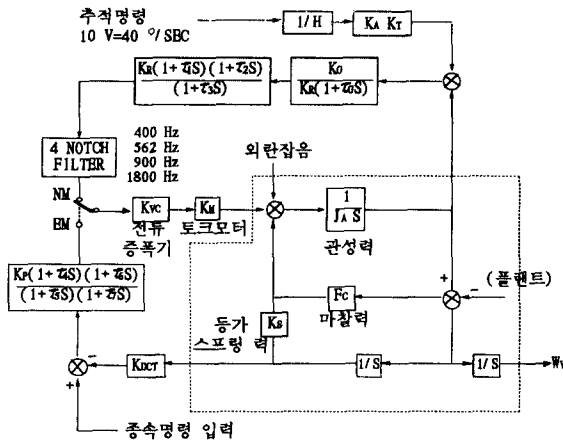


그림 1. 조준경 안정화 시스템 블록도

Fig. 1. Sight System Blockdiagram

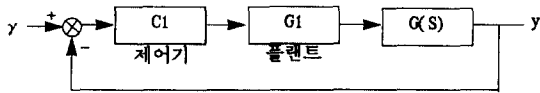


그림 2. 시스템 블록도

Fig. 2. System Blockdiagram

III. 유사 시스템 제어기 분석

1. 모델링을 위한 실험적 접근

앞장에서 언급된 것과 같은 제어 시스템에서 그림 2의 플랜트 G1이 유사플랜트 G2로 바뀌어질 경우 불안정 하여 발전할 수 있다. 목표플랜트 G2의 모델링을 위하여 기존 제어 시스템에서 플랜트 G1을 제거한후 G2를 연결하고, 제어기의 입력이 없는 상태에서 발전이 일어나지 않으면 별다른 조작없이 새로운 시스템을 관측 할 수 있으나, 발전 현상이 보일 경우에는 비례제어기 이득조정후 수행 할 수 있다. 따라서 특별한 목적을 위해서는 궤환경로를 차단하여 이러한 발전현상을 제거한 상태에서 실험을 수행 할 수 있다.

본 실험에서 목표플랜트 BU1을 기존의 플랜트와 교체하여 전원을 인가할 경우 발전현상이 나타나므로 비례제어기 이득을 조정후 진행 할 수 있었다. 실험에서는 플랜트의 전달특성 추출에 관심이 있으므로 궤환경로를 차단하고 플랜트 동작 및 출력 측정에 필요한 부분만으로 실험을 수행 하였으며 관련 블록도는 그림3과 같다.

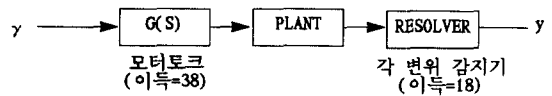


그림 3. 실험을 위한 플랜트 및 주변구성도

Fig. 3. Experimental Blockdiagram of Plant and Peripheral

2. 유사 플랜트 해석 및 모델링

플랜트의 전달특성을 구하기 위하여 먼저 플랜트에서 궤환경로를 차단하고 플랜트 앞단의 적절한 곳을 선택하여 준비된 신호발생기를 이용하여 플랜트에 알고 있는 신호를 인가한다. 일반적으로 신호분석기는 자체적으로 이러한 신호 발생기를 갖추고 있으므로 별도의 신호원을 준비할 필요는 없다. 본 실험에서는 휴렛팩커드사의 "HP3563A Control Signal Analyser"를 사용 하였다. 인가하는 신호는 플랜트의 특성에 따라 랜덤, 소인, 소인스위프등의 신호형태를 선택하여 사용할 수 있으며, 여기서는 소인스위프를 사용한다.

조준경 플랜트에 대하여 신호공급기를 그림 4와 같이 연결하고 플랜트의 전달특성을 구하는 실험을 하였다. 이때 인가되는 신호의 진폭은 가능하면 큰 입력을 선택하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있으나, 일정이상의 입력이 인가되면 출력이 포화되어 오히려 잘못된 결과를 얻을 수 있으므로 반복적인 실행과정을 거쳐 최적의 입력진폭을 찾는 것이 중요하다. 입력되는 신호의 주파수 범위는 측정하고자 하는 대역의 주파수를 고려하여 선택하게되며, 여기서는 0.1 - 10 Hz의 대역을 선택하였다. 입력전압은 250-500 mV를 인가하였으며, 400 mV이상일 경우 포화되었다. 이때 얻어진 모터토크를 포함한 플랜트의 응답특성 곡선이 그림5a에, 신호분석기의 "CURVE FIT"에 의하여 교정된 2 극점 보드선도가 그림5b에 나타나 있다. 이는 제작사의 설계변수

에서 2극점으로 해석하고 있으므로 이를 참조 하였다.

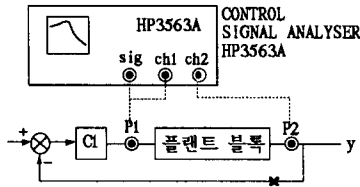


그림 4. 플랜트 모델링을 위한 실험연결도
Fig. 4. Cable Connection for Plant Modeling

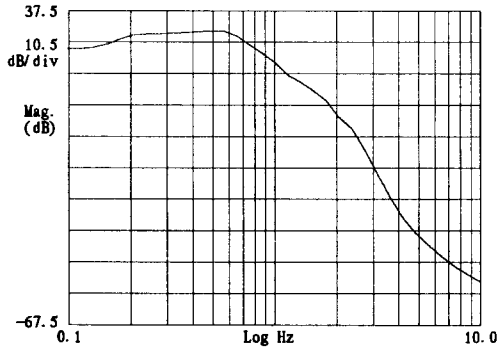


그림 5a. 플랜트 주파수 응답 곡선
Fig. 5a. Frequency Response of Plant

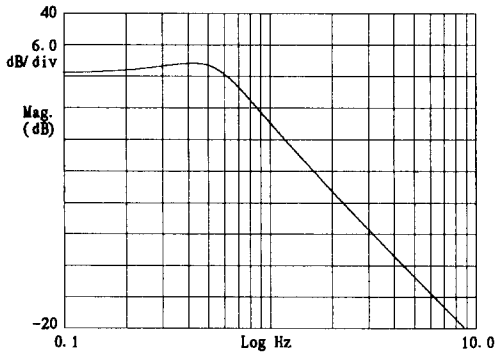


그림 5b. "CURVE FIT"된 플랜트 응답특성 곡선
Fig. 5b. Modified Bode Plot by "CURVE FIT" Function

| S Synthesis | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------|
| POLES | 2 | ZEROS |
| 1 | -239.591m ± j 468.627m | 0 |
| Time delay = 0.0 S | | Gain = -7.75661 |
| Scale Frequency = 1.0 | | |

그림 5c. "CURVE FIT"에 의한 영점,극점 자료
Fig. 5c. Pole and Zero Data by "CURVE FIT" Function

실험적으로 얻어진 플랜트의 응답특성으로부터 전달 함수를 구하기 위해서 먼저 유사 플랜트에 대한 그림 5b의 보드선도로부터 선형적으로 근사화된 전달함수를 도출해 본다.

참고문헌[9]의 방법으로 그림 5b에 주어진 특성으로부터 전달 함수를 구하기 위해서는 그림 5b에서 이득변화주파수(coner frequency)를 찾아야 한다. 여기서는 신호분석기의 "CURVE FIT"에서 얻어진 자료(그림 5c)를 이용한다. 이득변화 주파수를 구한후 -20 dB/decade 로 변화하는 주파수를 ω_1 이라하면 $1/(1+j(\omega/\omega_1))$ 을 전달함수 식에 추가하고, -40 dB/decade 로 변화하는 주파수를 ω_2 라하면 $1/[1+2\zeta(j\omega/\omega_2)+(j\omega/\omega_2)^2]$ 을 전달 함수식에 추가하는 방법으로 플랜트의 전달함수를 구하면 식(1) 과 같다. 그래프에서 이득은 모터토크(31dB)와 플랜트 뒷단의 리플버부분(25dB)의 이득을 빼 주어야 한다. 여기서 0.239 Hz에서 중근을 가지므로 -40 dB/decade의 기울기가 된다.

$$\frac{K}{1+2\zeta(j\omega/\omega_2)+(j\omega/\omega_2)^2} \quad (1)$$

윗식에서 K값은 시스템이 "0"차계이므로 $20\log K = -28.2$ dB (28.5 -31.6 -25.1)의 수식을 이용하면 $K=(10)^{-1.41}$ 이 되어 K 값을 구할 수 있으며, $\omega_2 = 0.239*2\pi$ 가 되며, ζ 는 위상 변위 및 보드선도의 움직임으로 0.6 정도임을 알 수 있다. 이들을 식(1)에 대입하면 플랜트의 전달함수는 식(2) 와 같다.

$$\frac{0.039}{1+2*0.6*(j\omega/1.5)+(j\omega/1.5)^2} \quad (2)$$

이제 실험적 방법에 의한 플랜트 전달 특성으로부터 전달함수를 찾아내었으므로 식(2)로 부터 분자부분을 1 로 하고 다시 쓰면 식(3)과 같이 된다.

$$\frac{1}{11.4 S^2 + 20.5 S + 25.6} \quad (3)$$

식(3)의 분모 부분인 특성 방정식의 계수는 각각 관성, 점성, 스프링력을 의미하는 플랜트의 각각의 요소값이 된다. 이제 구해진 플랜트 모델에 적용된 제어기의 분석을 통하여 목표플랜트의 제어기 요소값을 찾을 수 있을 것이다. 이 수치들은 T.I 사가 제공한 변수 값과는 차이를 보여주고 있으나, 이는 실험 주파수 범위인 0.1-10Hz에서는 설계된 변수보다 더 정확하게 도출되어진 자료로 볼 수 있다. 실제 제작된 플랜트에서는 제품마다 조금씩 다르긴 하지만 비슷한 결과를 보여주므로 실험플랜트에 있어서는 더 유효한 자료라고 생각 된다.

3. 목표플랜트의 모델링

목표플랜트 BU1의 동특성을 확인 하기 위하여 그림 4와 동일한 방법으로 BU1의 주파수 전달특성을 구하였으며 얻어진 곡선 및 영점, 극점 자료가 그림6a, 그림6b 및 그림6c에 나타나 있다.

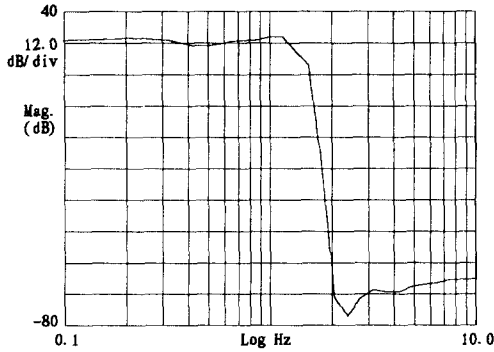


그림 6a. 플랜트 주파수 응답 곡선(BU1)
Fig. 6a. Frequency Response of BU1 Plant

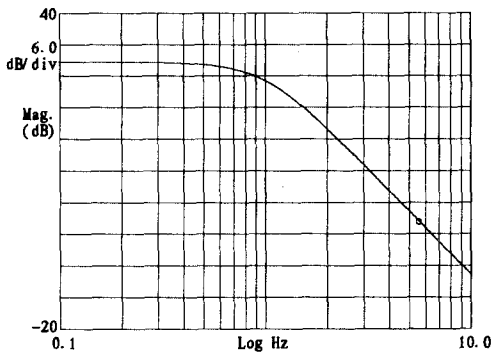


그림 6b. "CURVE FIT"된 BU1 플랜트 응답특성 곡선
Fig. 6b. Modified Bode Plot of BU1 by "CURVE FIT" Function

| S Synthesis | | | |
|-----------------------|---------------|----------|-------|
| POLES | | | ZEROS |
| 1 | -729.285m ± j | 656.984m | 0 |
| Time delay = 0.0 S | | | |
| Scale Frequency = 1.0 | | | |
| Gain = -32.9972 | | | |

그림 6c. "CURVE FIT"에 의한 BU1의 영점, 극점 자료
Fig. 6c. Pole and Zero Data of BU1 by "CURVE FIT" Function

측정된 BU1의 응답곡선은 예상치와는 상당히 다르게 비선형적인 특성을 가지고 있으나 이는 앞에서 지적한 바와 같이 시스템의 조립작업이 불량한 것이 원인이 될수 있는 사항이다. 따라서 유사시스템이 두개의 극점을 가지고 있으므로, 유사성을 근거로 유추하여 두개의 극점을 찾았다. 여기에서 구해진 전달특성과 III장 2절의 방법을 참고하여 목표플랜트의 모델식을 식(4)에 나타내었다.

$$\frac{1}{32.3 S^2 + 3.74 S + 0.44} \quad (4)$$

IV. 제어기 설계

1. 유사 플랜트의 제어모델 분석

III장의 방법으로 플랜트의 전달함수를 구했다면 이제 그림1에 주어진 블록도에서 점선으로 그려진 박스의 플랜트 수식을 알고 있다. 그의 다른 부분에 대해서는 동일한 센서, 동일한 모터를 사용할 경우, 기존의 알고 있는 전달함수를 사용 할 수 있으나, 이 자체 또한 정확한 실제 자료가 되지 못하므로 앞절에서 제시한 방법으로 각 부분별로 전달함수를 도출한 다음 보상이기 설계자료로 이용하는 것이 보다 적절한 제어기 설계가 될 것이다.

제어기는 사용되는 플랜트의 특성으로 두단계의 보상기 형태를 가지고 있으며, 지상보상 단계와 진상보상 단계로 구성되어 있다. 이는 플랜트에서 제한된 시스템의 대역폭을 증가시켜 시간영역에서의 추종 속도를 향상시키면서 정적위치 오차를 줄이기 위한 보상기로서, 기본적 설계개념은 일반적인 방법을 사용하고 있으므로 이에 접근하는 것은 어려운 일은 아니다. 그러나 보상기의 영점-극점의 배치에 있어서 일반적인 선택은 식(5)와 같이 표현되는 형태를 가지고 있으나, 유사 시스템의 경우는 조금 변형적인 배치를 가지므로 이것에 대한 사항은 시스템의 특성요소에 의한 설계노하우 라는 측면에서 고려할 내용이며, 본 제안의 주요 사항이 된다. 따라서 본 실험에서는 유사 시스템의 영점-극점 배치를 근간으로 하여 새로운 플랜트의 이득 및 영점, 극점의 위치를 설정하고자 하며, 특히, 본절에서는 기존 유사 플랜트의 특성을 실험적 방법으로 분석하고, 이미 주어진 설계요소에 의한 시뮬레이션 결과를 상호 비교하여, 실험적 접근에 의한 오류를 제거 하고자 한다.

$$G_c(S) = \frac{K_c (1 + T_1) (1 + T_2)}{(S + B / T_1) (S + 1 / BT_2)} \quad (5)$$

(여기에서 B > 1)

목표플랜트의 연구용 시제품은 조립수준이 완전히 정의되지 않은 상태에서 제작 되어졌기 때문에 출력특성이 선형구간이라고 예측되는 곳에서도 원하는 특성을 추출하기 힘들기 때문에 유사시스템을 참조하는 것은 이러한 부분의 보정에 가장 큰 장점을 제공해 준다.

2. 제어기 해석을 통한 설계방법의 제시

제어기를 제외한 나머지 부분의 전달함수를 $G(S)$ 로 하고, 제어기를 $G_c(S)$ 로 하여 페루프를 그림 7에 표현하였다. 또한 제어기의 영점-극점 배치에 관한 규칙성을 찾기 위하여 그림 8에 제어기를 제외한 부분의 전달특성 보드선도 및 제어기의 보드선도를 나타내었다.

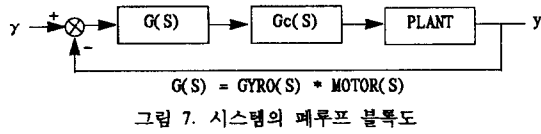


그림 7. 시스템의 페루프 블록도

Fig. 7. System Closed Loop Blockdiagram

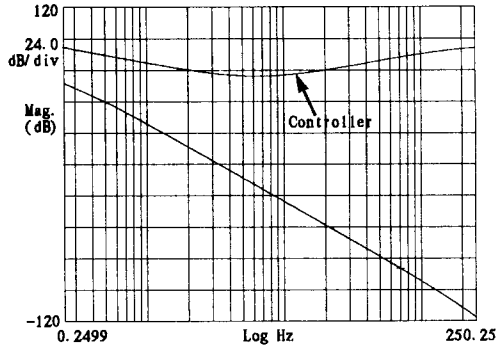


그림 8. 제어기 및 플랜트를 포함한 기타부분의 주파수 응답 특성

Fig. 8. Frequency Response of Controller and The Other Parts Including Plant

유사 플랜트의 제어기 설계법에 접근하기 위하여, 플랜트를 포함한 전체 시스템 개루프 전달특성을 신호분석기로 측정하고, 111장에서 분석된 자료와 주어진 설계 자료를 근거로 신호분석기의 "SYNTHESIS" 기능을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 9에 나타 내었다.

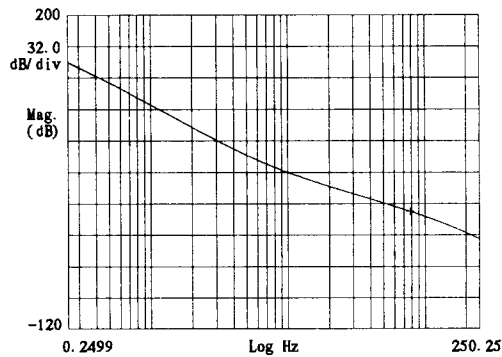


그림 9. "SYNTHESIS" 된 시스템 개루프 주파수 응답특성

Fig. 9. Open Loop Frequency Response by "SYNTHESIS" Function

그림 8 에서 위상이 -180 되는 지점에 두개의 영점을 배치하여 위상여유를 증가시키고, 하나의 극점은 거의 '영' 주파수 지점에 위치시켜 저주파 대역의 이득을 증가시켰다. 하나의 극점은 자이로의 전달함수가 가진 극점주위지점에 배치하여 이 주

파수가 전체시스템이 가진 최고 높은 주파수의 지점이므로 고주파 잡음을 제거하도록 위치 시켰다. 이때 배치된 극점과 영점의 위치를 미세하게 이동 시키면서, 전체 개루프 시스템의 근의 이동 경로나 안정성을 고려하면서 최적의 영점-극점을 찾아야 한다. 그림 8에서 두개의 영점, 극점의 값은 각각 1/0.25, 1/0.25, 0, 1/0.00082 이며 이 제시된 값을 기준으로 이득교차 지점이 70 Hz 정도가 되도록 개루프의 이득을 조정하기 위하여 제어기의 이득 K_c 를 결정하게 되므로 그값이 47000정도로 되었다. 높은 이득값은 한단계의 증폭단으로는 구현하기 힘들기 때문에 3단계로 나누어 그이득을 분산 하였다. 즉 자이로 오차 정류증폭단의 이득을 125배, 지상증폭단의 이득을 2.5배 그리고 진상증폭단의 이득을 151배로 하여 제어기의 전체이득을 달성하였다. 이상의 분석을 종합하여 일반적인 지상-진상제어기의 각각의 영점 및 극점 주파수를 결정하는 방법을 정리하면 다음의 절차로 요약된다.

체제, 두개의 극점중 하나는 저주파 대역에 위치시켜, 시스템의 차수를 한차수 증가시켜 속도 추종 성능을 향상시킨다.

둘째, 남은 하나의 극점은 가장 고주파 영역에 위치시켜, 고주파에서 유입되는 시스템 잡음을 제거토록 한다.

세째, 두개의 영점은 개루프 이득이 영이되는 지점의 위상여유를 최대화 할 수 있도록 위치를 정하여, 충분한 대역폭을 얻을 수 있도록 한다.

네째, 개루프의 이득이 영이되는 점이 시스템의 대역폭이 되므로 요구되는 대역폭을 설정하고, 필요한 대역폭이 되도록 제어기의 이득값을 설정하고, 필요시 이득을 분배하여 실장 가능토록 한다. 또한 너무 높은 이득에 의하여 시스템이 불안정한 영역으로 갈수 있으므로 세째번의 과정을 다시 확인 해야 한다.

다섯째, 플랜트에서 발생하는 특별한 공진주파수는 국부제거능력이 훌륭한 노치필터를 사용하여 제거한다.

3. 목표 제어기 설계

BU1플랜트와 제어기를 제외한 나머지 부분의 응답 특성 및 위상변화를 "SYNTHESIS"기능을 이용하여 그림 10에 나타내었다.

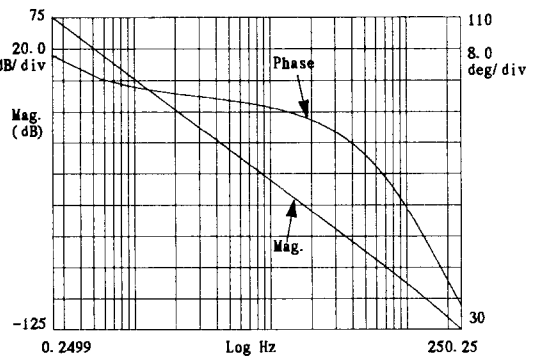


그림 10. 제어기를 제외한 시스템 주파수 응답 특성

Fig. 10. System Frequency Response without Controller

그림 10에서 목표플랜트의 제어기를 설계하기 위하여 앞에서 제시된 방법을 적용하면, 먼저 두개의 극점중 하나는 영주파수에 위치하기 위하여 순수 적분기를 추가하고, 하나의 극점은 최고주파수를 차지하는 자이로의 극점과 동일하게 설정하였다. 두개의 영점을 선정하기 위해서는 70 Hz 부근에서 위상여유가 최대가 되도록 선정하게 되므로 각각 10 Hz 및 60 Hz에 위치시키고 실제 값은 실장시의 부품선택시 약간의 조정을 취한다. 이렇게 하여 두개의 영점, 두개의 극점을 추가한후의 개루프 응답특성이 그림 11에 나타나 있다.

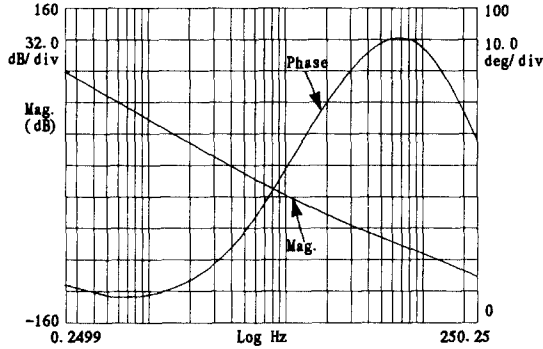


그림 11. 시스템 개루프 주파수 응답 특성
Fig. 11. Frequency Response of Open Loop System

그림 11에서 보면, 목표 대역폭인 70 Hz 지점에서 최대의 위상여유를 확보 하고 있다. 이제 대역폭 지점에서 제어기 이득이 영이 되어야 하므로 그림에서 약 81.5 dB(11,885배)의 이득이 요구된다. 이렇게 하여 설정된 제어기의 전달 특성이 식(6)에 나타나 있으며, 시스템 폐루프 응답 특성이 그림 12에 나타나 있다. 이를 근간으로 목표시스템에 실제 제어기를 제작후 시험한 결과 그림 12와 동일한 수준의 응답 특성을 구현 하였다.

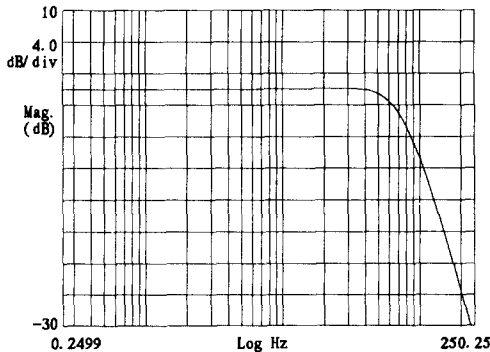


그림 12. 시스템 폐루프 주파수 응답 특성
Fig. 12. Frequency Response of Closed Loop System

최적의 제어기를 설계함에 있어 제어대상 플랜트를 충분히 해석하고 이해한다면, 제어기 설계에 큰 문제는 아니겠지만 설계된 제어기가 곧 최적의 제어기가 된다는 보장은 할 수가 없다. 따라서 여러차례의 수정을 거쳐 최적의 상태에 있는 유사플랜트/제어기가 있기만 하다면 이를 백분 활용 하는것이 효율적 방법이라고 하겠다. 기술적 경험이 부족한 상태에서 고도의 플랜트 제어기를 설계해야 하고, 기존의 특허권을 침해하지 않으면서 충분히 그 기술을 이전해야하는 분야에 있어서는 이 실험적 접근방법이 기대 이상의 효과를 낼수 있다.

실험적인 방법에 의한 제어시스템의 설계법은 실제 생산에 직접 적용되어질 수 있는 방법이므로 학자의 입장에서가 아니라 설계-연구-생산의 과정에서 보는 공학자의 입장에서는 내재된 실제적 가치를 인정할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 삼성전자, "조준경 안정화 동작 특성 분석," 연구보고서, 1991.
- [2] Texas Instruments Inc., "ME Manual," T.I. Publishing, 1982.
- [3] Kim Young Dae, "The Performance Upgrading for GPTTS's Drift and Tracking Assistance," *ATRC-510-02199*, 12-60, 1992.
- [4] 전 도 영, "조준경 제어기 설계," 위탁과제 연구 보고서, 1992.
- [5] Michel K. Masten, and Henry R. Sebesta, "Line-of-Sight Stabilization and Tracking System," *ACC Trans.*, 1477-82, 1987.
- [6] David Haessing, Jr and J. DeCoties, "Modern Control Methods Applied to Line-of-Sight Stabilization and Tracking System," *ACC Trans. LOS Stabilization*, 1491-98, 1987.
- [7] Ziegler, J.G., and N.B. Nichols, "Optimum Setting for Automatic Controllers," *ASME Trans.*, 759-68, 1942.
- [8] Texas Instrument Inc., "Specification for Gunner's Primary Tank Thermal Sight, Rev. J," T.I. Publishing, 1991.
- [9] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering, 2'nd edition," Prentice-Hall, 1990.
- [10] Hewlett-Packard Company, "HP3563A Operating Manual, Control Signal Analyser," WC 98205-1298, 1990.