

강인한 운동제어기의 최적 설계를 위한
고전적 기법과 현대적 기법의 결합

김 삼 수

국방과학연구소

The Combined Classical/Modern Technique
for Optimal Design of Robust Motion Controller

Sam-Soo Kim

Agency for Defense Development

ABSTRACT

This paper propose a optimal design method for robust motion controllers of underwater vehicles using the combined technique between classical and modern theories. The proposed method is presented which utilizes classical control methods to obtain a good robustness and modern control methods to set optimal gains. LQ, SVD, multivariable frequency analysis and Bode-Root Locus (BRL) plot are used.

1. 서론

제어 시스템을 설계하는 방법에는 주파수 영역 설계법과 시간 영역 설계법으로 크게 대별된다. 고전적인 설계 기법들은 주로 주파수 영역에서 이루어졌으며, LQ 조절기(Linear Quadratic regulator)를 필두로 하는 현대적인 설계 기법들은 시간 영역에서의 해석에 의존하였다. 초기의 현대 제어 이론이 주파수 영역에서의 해석을 등한시하여, 실제적인 적용 측면에서 강인성(robustness)등과 같은 많은 문제점을 야기 하였다. 특히 고주파수 영역에서의 피제어 시스템 모델의 정확도에 의해 강인성이 크게 좌우된다.^[1] 그러므로 최근의 현대적인 제어 설계 기법에는 단일 입출력(Single Input Single Output:SISO)에서는 루프 지나침 주파수(loop crossover frequency)로서, 여러 입출력 시스템(Multi-Input Multi-Output:MIMO)에서는 LQ조절기의 루프전달 행렬의 특이치 분리(Singular Value Decomposition:SVD) 방법을 사용하여 주파수 영역에서의 루프 형성(loop

shaping)를 한다.^[2] 피 제어시스템이 단일 입출력이면, 고전적인 비례-적분-미분(Proportional-Integral-Derivative : PID) 제어 기법과 현대적인 LQ 조절기 방법의 결과에서의 차이는 거의 없다. 왜냐하면 두가지 방법 모두가 설계된 제어 시스템의 루프 지나침 주파수를 가장 중요한 설계인자로 설정하기 때문이다. 수중 운동체의 운동제어기를 먼저 고전적인 PID 제어 설계이론을 사용하여 기본 설계하고^[3], 이득의 최적성과 제어기 구조(structure)의 보완 및 겹겹을 위해 LQ와 특이치 분리 방법을 이용하였다. 고전적인 설계기법을 먼저 적용한 이유는 다음과 같다.

- 1) 시스템 방정식이 6자유도 비선형 방정식이나, 일정 속도에서 선형화 하여 수평면과 수직면 운동방정식으로 분리 하면 쉽게 단일 입출력 시스템으로 표현 할수 있다.^[4]
 - 2) 오차 신호의 적분 기능(Integral action)을 원하는 제어 루프에 첨가하려면 일반적으로 현대 제어에서는 전시스템을 확장(augment)시켜야 하며, 이것은 자동조정의 구조를 복잡하게 하지만, PID 제어는 필요한 루프에만 삽입하면 되므로 간단하다.
 - 3) 제어대상인 주 모드(main mode)에 대한 제어시스템의 이득 민감도(gain sensitivity)을 간단히 알수있다.^[5]
 - 4) 모든 시스템 변수가 가관측(observable)하다.
 - 5) 해석과 설계가 PID 제어 법칙이 간단 명료하다.^[6]
- 본 논문에서는 수중운동체의 운동제어기를 설계하는 방법으로 고전적인 PID 기법과 현대적인 LQ 설계기법과 특이치 분리 기법등을 적용하여 제어기 구조 결정과 강인성을 고려한 최적 이득 결정문제를 해결하는 방법을 제시하였다. 즉 강인성을 고려한 최적 이득 결정을 위해 주 모드에 대한 제어 시스템의 이득 민감도를 이용한 고전적인 제어이론을

기본으로 LQ 설계기법과 특이치 분리 방법을 적용하였으며, 적절한 제어구조의 선정을 위해 다변수 주파수 해석(multivariable frequency analysis)방법을 사용하였다.

서론에 이어 2장에서는 피 제어시스템인 수평면 운동방정식에 대해 간략히 설명하고, 3장에서 제어기 구조를 결정하기 위해 주 모드 궤환 구조와 다변수 주파수 해석을 통한 몇가지의 필요한 궤환루프를 추가하는 방법을 기술한다. 4장에서는 앞에서 선택된 제어기 구조에 따라, 구동장치의 대역폭과 명령 입력 샘플링 주기를 장인성의 제한조건으로 고려하여, 결합된 보드 근궤적(Bode-Root Locus: BRL)그림 방법[5]을 주로한 고전적인 설계기법과 LQ 및 특이치 분리기법의 현대적인 설계기법을 상호결합 적용하여 최적 이득을 결정하였다. 이어서 시뮬레이션 및 결과분석을 5장에서 기술하였으며 마지막으로 결론을 제시하였다.

2. 수중운동체의 수평면 제어시스템

수중 운동체의 발사에서 명중까지의 전 궤적을 크게 구분하면 중간유도(mid-course guidance)과정과 마지막(terminal)유도 과정으로 나눌수 있다. 여기서 요구되는 유도명령어를 수평면에서 살펴보면 침로 명령어와 침로 변화율 명령어를 비롯하여, 롤 명령어가 전 유도과정에서 0으로 주어진다. 그러므로 대상 수중 운동체는 수평면에서는 롤 제어기, 침로 변화율 및 침로제어기의 설계가 필요하다. 한편 6자유도(degree of freedom)를 갖는 수중운동체의 비선형 운동방정식은 다음과 같은 수평면 운동방정식으로 선형화 된다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

여기서 각각의 벡터와 행렬은 다음과 같다.

$$x = [v \ \dot{\psi} \ \psi \ \dot{\phi} \ \phi \ 1] \quad u = [\delta_r \ \delta_\phi]$$

$$y = [\psi \ \phi]$$

$$A = \begin{bmatrix} -2.5 & -13.9 & 0 & 0 & 2.1 \\ -0.7 & -8.2 & 0 & 0 & -0.1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1 & 0.6 & 0 & -1.1 & -0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -8.0 & 0 \\ 3.2 & 0 \\ 0 & 0 \\ -0.5 & 15.3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

상태변수 중 v 는 동체 좌표계에서 전방에 대한 우직각 측면 방향으로의 운동체 속도를 표시하고 ψ ϕ 는 오일러각(Euler angle) 중 요(yaw), 롤(roll)을 나타낸다. 또한 제어입력 중 δ_r 는 방향타(rudder) δ_ϕ 는 롤 제어입력을 나타낸다.

3. 제어기 구조 결정문제

이장에서는 목표로 하는 제어시스템의 설계사양을 만족하는 제어기 구조를 실제적인 측면, 즉 시스템의 복잡성 및 성능이라는 측면에서 가장 적절하게 선정하는 문제를 살펴보기로 하자. 고전적인 제어설계기법을 적용하려면 단일입출력 시스템으로 구성해야 하므로 주 모드를 제어대상으로 궤환루프를 형성한다. 그러나 수평면 제어시스템과 같이 침로와 롤이 서로 결합되어 있다면 주모드 외에 가장크게 서로 영향을 주는 상태변수를 찾아내어 궤환루프를 만들어 주어야한다. 그리고 이론적으로 최적인 전상태변수(full state)궤환 시스템은 자동조정의 구조가 매우 복잡하게 되는 단점이 있다.

이제 현대적인 다변수 주파수 해석기법을 이용하여 적절한 궤환루프 선정순서를 나열하면 다음과 같다.

- (I) 피제어 시스템의 개루프 주파수 해석을 한다(그림1)
- (II) 대강의 주파수 영역에서 LQ 설계를 한다.(표1,그림2)
- (III) 페루프 주파수 응답그림을 분석한다. (그림3)

먼저 주제어 모드를 출력으로 하여 상호결합의 정도를 파악한다. 그림1에서 (1,2)와 (2,1)의 곡선은 개루프에서 롤제어 입력에 의한 침로응답과 방향타에 의한 롤응답을 각각 나타낸다. 개루프에서는 각 제어 입력에 대해 침로의 저주파 응답은 크게 영향을 받는것을 볼수있다.

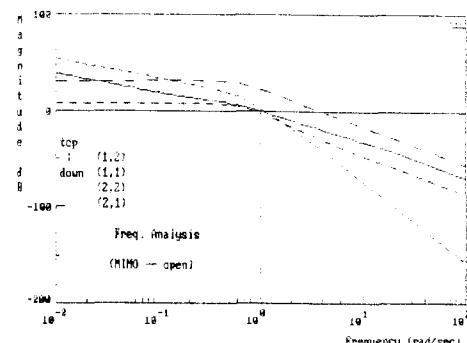


그림1. 수평면 제어 시스템의 개루프 주파수 응답
Fig.1. Open loop freq. response of the horizontal control system

페루프 시스템의 대역폭을 10(rad/sec)정도가 되도록 LQ 설계를 하면 전상태 이득 행렬(full state gain matrix)은 표1과 같다. 표1에서 1열은 침로에 대한 각 상태들의 최적 이득값들을 나타낸다. 1열에서는 5행의 롤의 이득값이 침로와 침로변화율 이득을 제외 하고는 가장크고, 2열에서는 침로의 이득값이 가장크다. 그리고 표1의 이득행렬으로 페루프 시스템을 구성하면 특이치의 주파수 응답은 그림2와 같다.

표1. 제어기 구조 결정에 이용한 전상태 이득 행렬
Table 1. Full gain matrix for determination
of controller structure
($Q = CTC$, $R = I$, $\rho = 0.01$)

제어변수\상태	U	$\dot{\psi}$	ψ	$\dot{\phi}$	ϕ
침로	-0.013	1.145	9.998	-0.016	-0.251
롤	-0.008	0.056	0.188	1.071	9.982

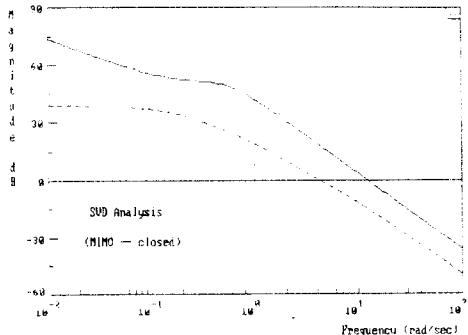


그림2. 수평면 제어시스템의 특이치 분리 해석

Fig.2. Singular value analysis of the horizontal control system

세 번째 단계로서 전상태 이득행렬으로 페루프 시스템이 구성되면 각상태변수를 입력으로 하여 페루프 주파수 응답을 구해야 하며 이그림과 전상태 이득행렬을 분석하여 제어기 구조를 결정한다. 침로를 출력으로 하는 다변수 주파수 응답곡선은 그림3이며, 롤과 블변화율에 의해 저주파수에서 크게 영향을 받음을 알수있다. 또한 롤을 출력으로 한 다변수 주파수 응답곡선은 그림4에 나타 내었는데, 침로의 영향을 많이 받고 있음을 알수있다. 종합해서 기술하면 궤환 투프를 결정하는 방법은 최적 전상태 이득행렬에서 이득의 크기순서와, 페루프 주파수 응답곡선에서의 크기순서의 조합으로서 제어기 구조를 선정하는 것을 제안한다. 제안된 방법으로 제어기 구조를 선정하면 침로 제어기에서는 침로와 침로변화율 외에 롤각을 궤환시키며 롤제어기에서는 롤과 롤변화율 외에 침로를 궤환 시키는데 그림5에 나타내었다.

그림 5에서 상호결합 이득 $K_{\phi C}$, $K_{\psi C}$ 를 없애면 전형적인 PID 제어기 형태이다. 앞으로의 설계 및 시뮬레이션에 사용될 제어기 구조는 PID 제어기와 그림5의 수정된 제어기 및 전상태변수 궤환 제어기를 대상으로 한다.

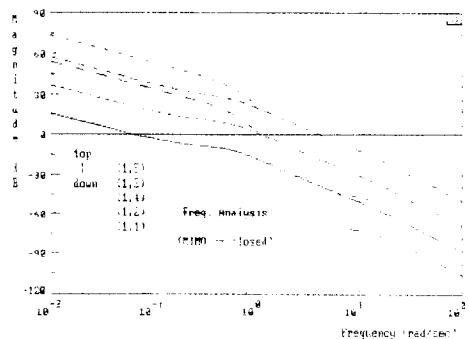


그림3. 페루프 주파수 응답 (침로 출력)

Fig.3. Closed loop freq. response
(w.r.t heading output)

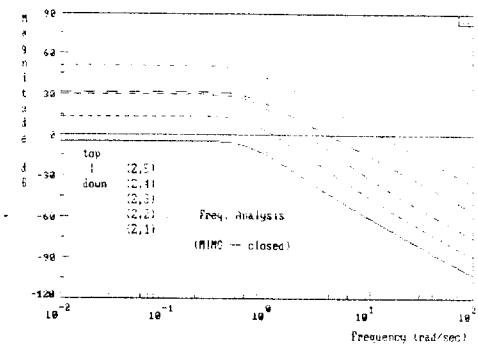


그림4. 페루프 주파수 응답(롤 출력)

Fig.4. Closed loop freq. response
(w.r.t roll output)

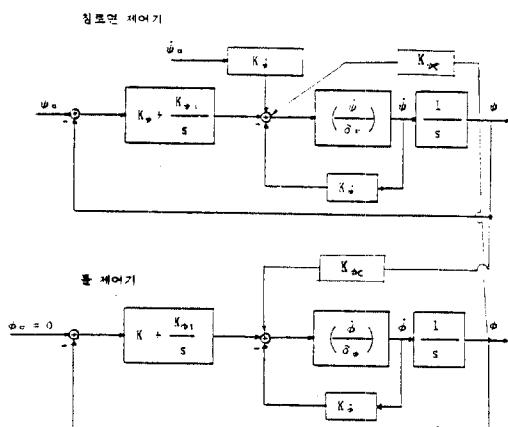


그림5. 결합투프를 가진 변형 제어기 구조

Fig.5. The modified controller structure
with a combined loop

4. 장인성을 고려한 최적 이득 결정 문제

제어기 설계에서의 제한 조건은 시스템 자체의 제한 요인을 제외하면 일반적으로 구동기(actuator)의 대역폭이다. 개발예정인 구동기의 대역폭이 20Hz 정도이고, 보통의 경우 제어기의 대역폭은 제거해야 할 동태(dynamics)의 대역폭의 1/3로 정하는데[7], 그러면 제어 시스템의 제한 대역폭은 6Hz 정도이다. 구동기에 의한 제한 대역폭보다 더 중요한 것이 유도제어부를 디지털 제어 시스템으로 구성 함으로써 생기는 유도제어기의 제어 입력 명령주기 즉, 샘플링율(sampling rate)이다. 샘플링율을 정하기 위해서는 페루프 시스템의 대역폭이나 이와같은 개념인 상승시간(rising time)을 기준으로 하며, 경험(rule of thumb)적으로 시스템 대역폭의 6~10배나, 상승시간내에 2~4번이다. 그러므로 유도제어부의 제어입력 계산주기를 0.1초로 정하였으므로 페루프 제어 시스템의 대역폭은 1.6Hz를 넘지못하며 이것을 라디안으로 표시하면 10.6rad/sec이다.

표2. 제어기 설계 사양

Table 2. Design specification of controllers.

제어기 \ 사양	상승시간(초)	초과응답율(%)	정상상태 오차
침로 변화율	0.8	3	0.3 (2초이내)
침로 제어기	1.2	3	0
롤 제어기	1.0	3	0

그다음 앞서의 대역폭 제한 조건과 함께 유도에서 필요한 각각의 제어기 설계사양을 표2와 같이 설정하였다.

(1) 고전적 기법의 제어기 설계

고전적 제어기 설계기법은 주로 균궤적 그림과 보드선도를 주로 사용하는데 이들의 특성 및 새로운 방법인 결합된 보드 균궤적 그림에 대해 간단히 기술하면 다음과이다. 일반적으로 균궤적 그림은 피제어 시스템에서 하나 또는 그이상의 대개변수가 주어진 범위내에서 변화될 때 균의 궤적을 조사하기 위해 그린다. 대개변수는 피제어 시스템의 시스템 계수값이나 제어 이득 값이 될수있으나, 제어기 설계에 있어서는 제어기 이득값에 따른 균의 변화를 표시한다. 이에반해 보드선도는 크기(magnitude)의 점근선을 사용하여 전달 함수의 계루프 극점과 영점의 위치를 결정할수 있고, 계루프 주파수 응답 특성을 알수있다. 또한 페루프 전달함수의 보드 선도로부터 제어시스템의 주파수 응답특성과 안정성 및 대역폭등을 결정하는데 더 유용하다. 그러나 보통의 보드 선도로는 페루프 극점의 위치를 알 수 없는 단점이 있다. 이 두방법의 단점을 보완하기 위해 결합된 보드 균궤적 그림법은 보드 선도상에 균 궤적을 그리는 것이다. 이것은

근래의 전자공학의 급속한 발달로 인해, 더이상의 새로운 알고리즘의 계산없이, 보드선도와 균궤적 방법을 단순히 결합 시킴으로써 이득 민감도를 비롯한 많은 설계정보를 제어기 설계자에게 알려준다. 특히 이득 민감도는, LQ설계 기법에서는 알수없는 것으로 PID 제어 설계에 있어서 시행착오를 줄이고 최적에 근접하는 제어기 설계를 가능하게 할뿐 아니라, 장인성 검증에도 유용하게 활용할 수있다. 이러한 방법을 사용한 고전적인 기법의 제어기 설계순서를 흐름도에 나타내면 그림6과 같다.

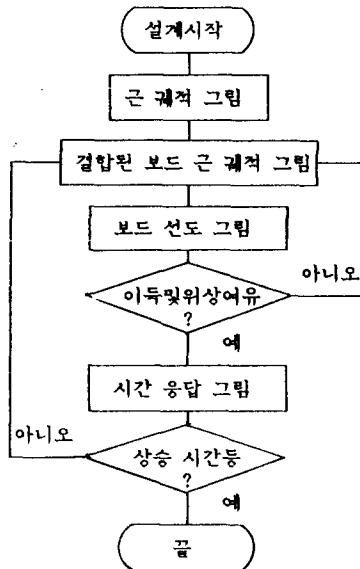


그림6. 고전적 기법의 제어기 설계흐름도

Fig6. Flow chart of controller design using classical technique

식(1)(2)에서 출력을 $\dot{\psi}$ 와 ϕ 로 하여 계루프 전달 함수를 구하면 식(3),(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\psi}/\delta r &= \frac{3.24s^3 + 17.0s^2 + 15.94s + 4.24}{s^4 + 11.84s^3 + 23.8s^2 + 15.6s + 5.1} \\ &= \frac{(3.24)(s+4.14)[(s+0.55)^2 + 0.092]}{(s+1.53)(s+9.51)[(s+0.4)^2 + 0.43^2]} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\phi/\delta_y = \frac{15.27s(s+1.2)}{(s+1.53)[(s+0.4)^2 + 0.43^2]} \quad (4)$$

그림5의 제어기 구조에서 결합루프를 제거한 침로면 제어기 설계과정을 설명한다. 침로 변화율 유도 명령어가 마지막 유도(homing)단계에서 필요하므로, 침로제어기는 침로 변화율 제어루프를 먼저 설계한 후에 설계된 루프를 새로운 시스템으로 하여 설계하였다. 제어이득 $K\dot{\psi}$ 는 3으로 정해진

다. 침로 제어기의 세로운 개루프 전달함수는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}\psi/\delta_r &= \frac{(\dot{\psi}/\delta_r)}{s[1 + 3(\dot{\psi}/\delta_r)]} \\ &= \frac{3.24(s+4.14)[(s+0.56)^2+0.09^2]}{s(s+3.0)(s+17.5)[(s+0.54)^2+0.23]}\end{aligned}\quad (5)$$

식(5)와 침로 제어 시스템에 대한 근 궤적은 그림7이다. 또한 결합된 보드 근 궤적은 그림8에 나타내었다.

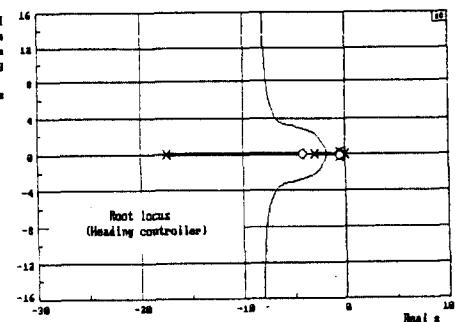


그림7. 침로제어기의 근 궤적

Fig7. Root locus of heading controller

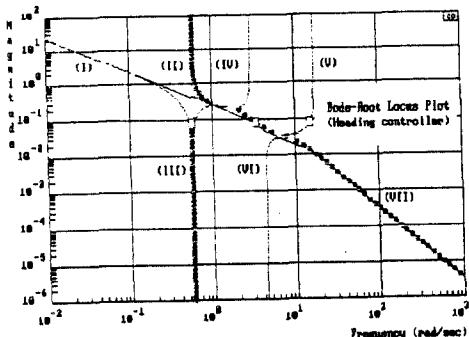


그림8. 침로 제어기의 결합된 보드 근 궤적 그림

Fig. 8 BRL plot of heading controller

그림8의 결합된 보드 근 궤적 그림은 세로축에 이득값의 역수를 나타내고 가로축은 극점의 크기를 표시하며, 보통 보드 선도에서의 크기 점근선(magnitude-asymptotic line)과 함께 그린다. 이 그림에서 (I)번에서 (III)으로 연결된 곡선은 극점 $s=0$ 인 영점 $s=-0.56 \pm j0.09$ 에 이르는 선이며, (II), (IV), (VII) 번선은 극점 $s=-0.54 \pm j0.23$ (II)과 극점 $s=3.0$ (IV)이 이동하여 크기가 무한대로 점근하는 선(VII)을 형성한다. (V), (VI)번선은 극점 $s=17.5$ (V)가 영점 $s=-4.14$ (VI)로 이동하는 선이다. 이들 민감도는 이득이 2까지는 $s=0$ (I)의 극점이 가장 민감하고, 2-10 까지는 (II), (IV) 극점이 민감하며 10-50까지는 (V)선이 민감함을 알 수 있다. 대역폭

제한 조건과 이득 민감도를 고려하여 이득이 12 일때의 폐루프 극점의 위치를 네모(□)로 나타내었다.

이제 침로 제어기에 대한 보드선도는 그림 9에 나타내었는데 교란에 의한 정상상태 오차를 줄이기 위해 적분 제어항($K\psi_I=0.05$)을 넣었을 때의 그림은 굵은 선으로 표현되어 있다. 각 경우 모두 위상 및 이득 여유는 90도 및 무한대로 변하지 않음을 알 수 있다. 그림9의 각경우에 대한 시간 응답곡선은 그림10에 나타내었으며, 설계사양을 만족함을 알 수 있다.

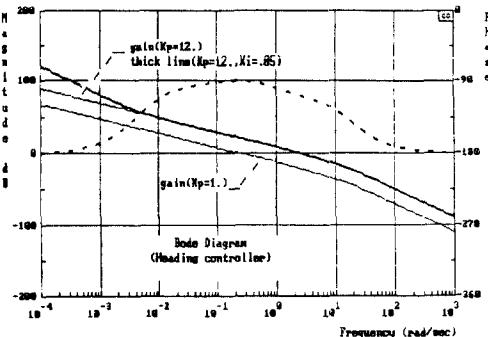


그림9. 침로 제어기의 보드선도

Fig9. Bode diagram of heading controller

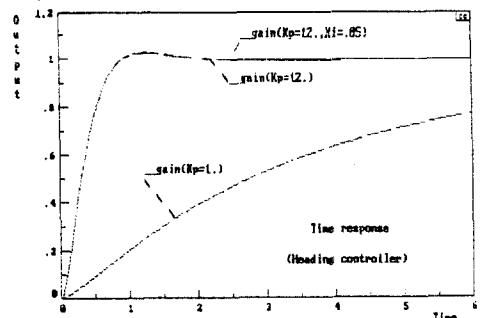


그림10. 침로 제어기의 시간응답

Fig10. Time response of heading controller

같은 방법으로 롤 제어기 설계를 수행하며, 이들의 설계된 이득값들은 $K\phi = 3$, $K\psi = 12$, $K\psi_I = 0.05$ 와 $K\phi_L = 1.2$, $K\phi = 3$, $K\phi_L = 0.02$ 이다.

(2) 현대적 기법의 제어기 설계

식(1)의 수평면 제어 시스템을 침로와 롤을 출력으로 2 입력 2 출력의 여러 입출력 시스템(MIMO)으로 구성한다. 먼저 개루프 시스템에 대한 주파수 특성분석과 특이치 분리 해석법을 통해 개루프 지나침 주파수 등의 개루프 시스템의 특성을 확인한다. 그다음 성능지수 안의 제어입력의 하중요소(weighting factor)를 변화시키면서 LQ설계를 수행한다. 장인성 점검을 위해 설계된 LQ 제어기의 지나침 주파수를

제한 대역폭과 확인 하기위해 특이치 분리 해석을 하고, 조건을 만족하면 시간 응답그림으로 설계사양을 만족 하는지를 조사한다. 이러한 일련의 설계순서를 흐름도로 나타내면 그림11 이다.

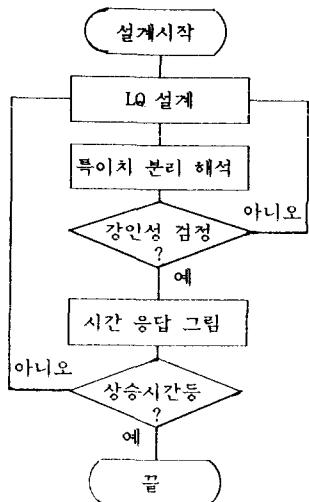


그림11. 현대적 기법의 제어기 설계 흐름도
Fig.11 Flow chart of controller design using modern technique

피제어 시스템의 개루프 특성해석은 3장에서 설명되었으며 이제 하중요소를 변화 시키면서 LQ 설계를 수행하여 이득 행렬을 구했으며 동시에 특이치 분리 해석을 하였다. 시행 착오 법으로 결정된 최적 이득 행렬 및 그때의 특이치 해석곡선은 표 3과 그림 12에 나타 내었다.

표3. LQ 설계된 최적 이득 행렬

Table3. Optimal gain matrix using LQ design technique

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & .2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad \rho = 0.1$$

제어변수\상태	v	$\dot{\psi}$	ψ	$\dot{\phi}$	ϕ
침로	-0.15	3.78	11.17	-0.11	-0.29
롤	-0.11	0.08	0.17	1.48	3.14

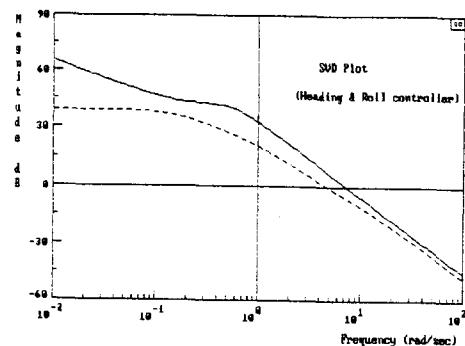


그림12. LQ 설계된 페루프 시스템의 특이치 분리해석
Fig12. SVD of closed loop system using LQ design technique

그림12의 최종적으로 LQ 설계된 페루프 시스템의 특이치 곡선 그림과, 그림2의 제어기 구조 결정을 위해 하중요소 Q , R 및 ρ 를 대강 설정해서 그린 특이치 곡선 그림과 크게 다른점은 같은 주파수에서의 특이치의 최대치와 최소치의 차이에 있다. 그림2에서는 12(rad/sec)의 지나침 주파수에서의 14.2dB의 차이를 나타낸 반면 그림12에서는 7.3(rad/sec)의 지나침 주파수에서 6.3dB의 작은 간격을 보였으며, 특히 장인성에 문제가 큰 고주파에서 그림12는 그림2보다 훨씬 작은 차이를 보았다. LQ설계에서 페루프 지나침 주파수는 하중요소 Q, R, ρ 를 조절 함으로서 조절 가능하며 또한 단순한 전상태변수 궤환으로는 제어시스템의 극점에는 영향을 주지 못하고 단지 페루프 전달함수의 영점만 이동시킬수 있다. 전 상태를 적분 기능으로 확장 시켜야 시스템의 극점을 원하는 곳으로 옮길수 있으나, 그렇게 하면 자동조정의 구조가 매우 복잡해진다. 그리고 낮은 지나침 주파수를 갖도록 LQ설계를 하면 시스템의 극점을 제거하도록 영점을 첨가하는 것과 같게됨을 알수 있었다.

이제 그림5의 수정된 제어기 구조에서 결합 이득은 표3에서의 값으로 각각 $K_{\psi_c} = -0.29$, $K_{\phi_c} = 0.17$ 로 정하였다.

5. 시뮬레이션 및 결과 분석

실제의 수중 운동 시스템에서는 제어 입력으로 작용하는 제어판(control surface)이 움직일 수 있는 각이 제한되어 있다. 대상 제어 시스템에서는 방향타와 롤 제어 입력이 각각 ±15(도), ±5(도)로 제한 되어 있다. 그리고 제어 시스템 구현을 마이크로 프로세스를 사용하여 디지털 제어로 하므로 입력 명령주기, 즉 제어 입력의 샘플링 율(Sampling rate)의 제한에 있다. 이장에서는 제어 입력의 제한 조건과 입력명령 주기의 고려없이, 간략화 시킨 선형 제어 시스템에 대해 설계된 제어기를 전체 비선형 운동 방정식에 적용하여 제어기의 성능을 검증한다. 침로 명령어를 80 (도)로 하고, 롤 명령어는 0(도)를 유지하도록 하여, (I)롤과

침로를 완전 분리한 제어기 (II)들과 침로 모두 한개의 걸 함루프를 가진 제어기 (III)전상태 궤환 제어기의 세가지 경우에 대해 시뮬레이션을 하였다. 그림13에서 시뮬레이션 결과를 나타 내었는데, 맨 위의 두그림이 침로와 방향타를 나타내고 중간의 그림이 깊이 명령어를 90(ft)로 했을때의 깊이와 승강타를 나타내며, 맨 밑의 그림이 롤과 티어 입력을 나타내었다. 세가지 제어기를 비교해 보면 침로에서 (I), (II)경우 모두 적분 기능을 넣었으나, 제어 입력이 제한 되었을때 야기되는 적분기 포화문제(integrator saturation, Reset wind up)는 조건부 적분(conditional integration)방법으로 해결하였다. 깊이 제어에서는 세경우 모두 같은 조건이며, 롤 제어기 에서는 적분기능(integral action)이 반드시 필요함을 알수있으며, 단순한 LQ 설계의 최적 전상태 궤환으로는 제어기 사양을 만족하지 못함을 알수있다.

지금 까지의 제어기 설계 과정에서의 고전적인 기법과 현대적인 기법의 결합적용 기법의 대강은 다음이다. 대부분의 운동체의 운동제어기(motion controller)는 피제어 상태 변수가 다른 피제어 상태변수나 보통의 상태변수 들이랑 서로 결합되어(coupled) 있으나, 주제어 상태 변수가 크게 영향력을 주므로 먼저 단일 출력력 시스템으로, 주 제어 모드에 대한 이득 민감도등의 경향을 조사한다음, PID 또는 알 수 없는 상태들의 결합정도와 상태들의 영향력을 현대적인 LQ설계 기법으로 파악한다. 앞의 과정을 거치면서, 주제어 모드가 아니지만 영향력이 큰 상태변수를 궤환시키는 구조를 확정한다. 다음 단계로는 하중요소를 변화 시키면서 LQ 설계를 수행하는 것으로, 앞의 PID 설계 이득을 기초로 하여, 그 이득과 유사한 설계결과를 얻도록 하중요소를 결정하도록 한다. 이 단계가 운동 제어기 설계에 있어서 고전적인 기법과 현대적인 기법의 결합이라고 할수 있다.

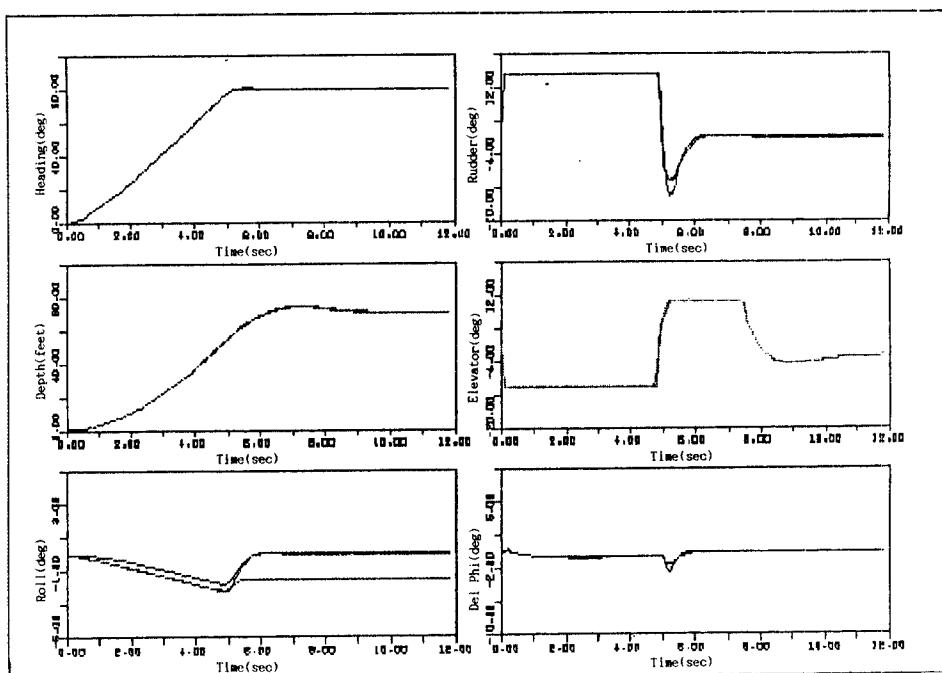


그림13. 최종적인 제어기 시뮬레이션
Fig13. Final simulation of all controllers

6. 결론

수중 운동체의 운동 제어기를 고전적인 PID기법과 현대적인 LQ 및 SVD 기법의 장점을 결합하여 설계하는 방법을 제시하였다. 이득 민감도를 비롯한 강인성을 보장하기 위한 고주파 영역 설계는 고전적인 제어 이론을 사용하여 설계하고, 이 설계를 기본으로 적절한 제어루프 및 최적제어를 정하기 위하여 SVD와 LQ의 현대적 기법의 장점을 적용 하였다.

설계 과정 및 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

- 여러 입출력 시스템의 제어기 설계에 있어서 주 제어 모드를 설정하고, 이 모드의 이득 민감도를 비롯한 고전적인 주파수 해석을 필수적으로 해야한다.
- 어떤 PID 설계 이득도 하중 요소의 선형에 따라 최적 이득이 될수 있으므로, 피제어 시스템의 상태변수 상호 간의 영향력과 강인성 영향 해석을 중요시 해야 한다.
- 시뮬레이션 결과를 제어 시스템에서 LQ 설계가 사양을 만족하지 못하였으나 적분 기능으로 제어 시스템을 확장 하면 된다. 그러나 이것은 자동 조종 시스템을 복잡하게 하므로, 이 논문에서 제시된 기법으로 수정된 제어기 구조를 가져야 한다.

7. 참고 문헌

- (1) F.W.Nesline, P. Zarchan, A classical Look at Modern control for Missle autopilot Design, AIAA Guidance and control conference, paper NO.122-1512, 1982
- (2) J.C. Doyle, G. Stein, Multivariable Feedback Design : Concepts for a Classical/Modern Synthesis, IEEE Trans. On Automatic control, Vol.Ac-26, Feb. 1981
- (3) T.E.Fortman, K.L.Hitz, An Introduction to Linear Control System, Marcel Dekker, Inc., 1977
- (4) B.D.O.Anderson, J.B. Moore, Linear Optimal control ,Prentice-hall, Inc., 1971
- (5) P.M.Thompson, Program CC-version 4- , System Technology, Inc., 1988
- (6) D.Gangsaas, K.R.Bruce, J.D.Blight, U.Ly, Application of Modern Synthesis to Aircraft Control : Three Case Studies, IEEE Trans. on Auto. Control, AC-31, 1986, pp 995-1014
- (7) K.J. Astron, B. Wittenmark, Computer - controlled system Prentice-hall, inc., 1984