

LQ 기법을 이용한 수중 운동체의 마지막(Terminal) 유도 알고리즘 설계

김삼수 이갑래 이재명 전완수 박성희

국 방 과 학 연 구 소

Design of Terminal Guidance Algorithm for Underwater Vehicles Using LQ Technique

Sam-Soo Kim, Kap-Rai Lee, Jae-Myoung Lee, Wan-Soo Jeon and Song-Hui Park

Agency for Defence Development

ABSTRACT

For a Stationary moving-target, the design technique of guidance system for underwater vehicle with a seeker of strapdown type is developed. Using perturbation theory, a new method which linearizes the nonlinear intercept geometry is proposed. On the basis of the linearized system modeling, LQ and PID design technique is used to determine the structure and gain of the guidance system. Some simulation results applied underwater engagement are represented to show that the proposed guidance law is superior to the other guidance laws as pursuit, Bang-Bang, PN and APN.

1. 서론

중. 장거리 표적에 대응하는 유도시스템은 보통 중간유도(Midcourse Guidance)와 마지막(Terminal) 유도 단계로 나누어 진다. 일반적으로 중간 유도단계에서는 시선 유도(Line-of-sight Guidance)와 항법 유도(Navigational Guidance)등의 방식을 사용하며, 마지막 유도 단계에서는 주로 유도 무기내의 장착된 탐색기(Seeker)로서 표적정보를 얻는 탐색유도(Homing Guidance) 방식을 사용한다. [1]

탐색 유도는 유도체내에 장착된 탐색기의 종류 및 특성에 따라 크게 추적(Pursuit)유도와 비례항법(Proportional Navigation : PN)유도 법칙으로 크게 대별된다. 탐색기의

출력형태, 표적 속도 등의 표적 특성 및 탐색시 자체의 잡음 특성 등의 여러 요인을 고려하여 적합한 유도법칙을 선택하여야 한다. [2] 최근에는 프로세서의 발달로 인하여 추적 필터(Tracking filter)를 사용한 보완된 비례항법(Augmented PN) 유도법칙에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [3,4,5]

보완된 비례항법 유도법칙을 제외한 기존의 유도법칙들은 표적과 유도체의 상대각 또는 각 변화율만을 이용함으로써 [6], 능동(Active) 탐색시 얻어지는 상대거리 등의 정보를 제대로 이용하지 못하는 단점이 있다. 이것은 표적과 유도체간의 기하학적 운동모델이 비선형 성분이 강하게 포함되어 있어서 선형화가 곤란함에 따라, 선형 시스템에서 개발된 해석 및 설계기법들을 적용할 수없기 때문이다.

연구대상인 수중 유도체는 능동 탐색시 상대거리와 상대각이 탐색기의 출력이 되며 탐색기의 표적탐지 폭이 작은 것이 특징이며 또한 탐색기가 수중유도체의 진행 전방방향으로 몸체에 고정(Strapdown)되어 있다.

수중유도체의 이와 같은 제약조건으로 인해 유도궤적 설계는 비례항법 유도법칙과 유사한 유도궤적은 무리가 따르며, 추적유도궤적과 비슷하게 하여야 한다.

제어시스템의 해석과 설계이론들을 [7,8] 유도시스템에 똑같이 적용하기 위해서는 표적과 유도체간의 기하학적 운동모델을 탐색기 출력자료들의 상호 관계식의 선형화 유도 시스템 모델링이 필수적이다.

본 연구에서는 수중 유도체의 탐색유도법칙을 개발하기 위하여 표적과 수중 유도체간의 기하학적 평면을 구성하고 상대각 뿐만 아니라 상대거리를 포함하는 새로운 방식의 선형화 유도시스템 모델링을 제안하였다. 또한 제안된 방식의 유도법칙으로 LQ 기법을 적용하여 유도시스템 구조설계를 하였으며 유도 이득 설계는 시스템의 단순화 및 자동 조종 시스템과의 관계를 고려하여 주파수 영역에서의 고전적인 설계법을 사용하였다.

또한 기존의 추격유도, 비례항법 유도, 뱅뱅유도(Bang-Bang guidance), 보완된 비례항법 유도 및 제안된 유도법칙과의 성능 비교를 빛나간 거리(Miss distance)와 명중시간에 대해 실시하였다.

서론에 이어 2장에서는 수중 운동체의 유도시스템 모델링을 새로이 제안하고, 3장에서 마지막 유도알고리즘 설계과정에서 LQ 이론을 적용한 구조설계와, 자동 조종 시스템과의 연관성 등의 이유로 고전적인 주파수 영역에서의 이득 설계 과정으로 나누어 설명한다. 4장에서는 제안된 유도법칙과 기존의 유도법칙과 성능 비교를 몇가지 조건에 따라 수행하고 결과분석을 하였으며, 마지막으로 결론을 제시하였다.

2. 수중 운동체의 유도시스템 모델링

수중 유도체의 중간 유도단계에서는 항법유도와 탐색형태(Search Pattern) 수행법을 함께 사용하며, 이 두 단계의 수행 중에 표적을 탐지하면, 그 다음 마지막 유도단계로 연결된다.

유도시스템의 선형화 모델링을 만들기 위해 먼저 그림 1과 같이 표적과 수중 유도체간의 기하학적 평면을 정의하였다.[9]

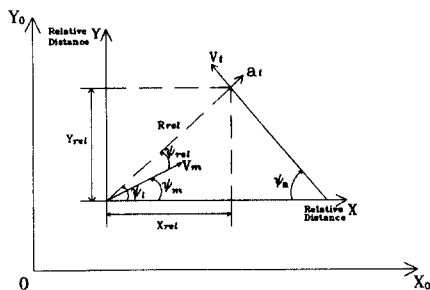


그림 1. 표적과 수중 유도체 간의 기하학적 운동 평면

Fig 1. Relative geometry of guidance system

그림 1에서 표적과 수중 유도체의 속도의 크기는 동속이라고 가정하였다. 그리고 기하학적 운동평면에서 기준 좌표계 0X0Y0는 중간 유도단계에서 표적을 탐지한 그 순간의 수중 유도체의 동체 좌표계의 수평면 좌표와 동일하게 정의하였으며, 표적은 기준좌표와 표적이 이루는 방향각(Asspect Angle)으로 직진하는 것으로 가정하였다. 그림 1은 수평면에서의 모델이나 수직면에서도 같은 방법으로 전개 가능하다.

또한 실제상황 및 수식의 간략화를 위하여 수중 유도체와 표적 속도 벡터가 각각의 동체좌표의 X축과 일치한다고 가정하면 그림 1에서 ψ_a 와 ψ_m 은 표적과 수중 유도체의 속도벡터가 기준 좌표계의 X0축과 이루는 각을 타나내며 ψ_{rel} 은 탐색기의 출력자료의 하나로서 표적과의 상대각(bearing)을 표시한다. 또한 X_{rel} , Y_{rel} 는 상대거리 R_{rel} 의 X_0 , Y_0 좌표계로의 투영된 거리를 나타내며, 상대거리 R_{rel} 도 탐색기의 출력이다.

이제 그림 1의 기하학적인 기본 관계식을 정리하면 다음이다.

$$\dot{X}_{rel} = -V_m \cos(\psi_m) - V_t \cos(\psi_a) \quad \text{--- (1)}$$

$$\dot{Y}_{rel} = -V_m \sin(\psi_m) + V_t \sin(\psi_a) \quad \text{--- (2)}$$

$$\psi_l = \tan^{-1}(Y_{rel} / X_{rel}) \quad \text{--- (3)}$$

$$R_{rel} = \sqrt{X_{rel}^2 + Y_{rel}^2} \quad \text{--- (4)}$$

$$\psi_{rel} = \psi_l - \psi_m \quad \text{--- (5)}$$

$$\dot{\psi}_c = \dot{\psi}_m \quad \text{--- (6)}$$

일반적인 유도무기에서는 식 (4)의 빛나간 거리(Miss distance)를 최종 출력으로 정의하나, 수중 유도체에서는 식 (5)의 표적 상대각 ψ_{rel} 에 탐색기의 제한 특성상 더 큰 비중을 두어야 한다. 그리고 식 (6)의 입력 관계식에서 시간 지연은 일단 무시하였으며, 최종 상설계시 수평면의 동특성(dynamics)을 고려하였다.

앞서의 고려사항과 더불어 탐색기 출력 ψ_{rel} 와 R_{rel} 를 상태변수로 하는 간략한 선형화 유도 시스템 모델링을 정리하면 식 (7)의 가정을 전제로 식 (8) ~ 식 (11)과 같다.

$$\psi_m = \psi_{m0} + \psi_e \approx \psi_{m0} + \psi_{rel} \quad \text{--- (7)}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_{relp} &= -V_m \cos(\psi_{m0} + \psi_{rel}) - V_t \cos(\psi_a) \\ &= V_m \sin(\psi_{m0}) \psi_{rel} \\ &\quad - \{ V_m \cos(\psi_{m0}) + V_t \cos(\psi) \} \quad \text{--- (8)} \end{aligned}$$

$$\dot{Y}_{rel} = -V_m \cos(\psi_{m0}) \psi_{rel} - \{ V_m \sin(\psi_{m0}) + V_t \sin(\psi) \} \quad (9)$$

$$R_{rel} = X_{rel} + Y_{rel} \quad (10)$$

$$\dot{\psi}_c = \dot{\psi}_{rel} \quad (11)$$

식 (7)의 가정은 요격점(Intercept point)을 향하는 궤적에서 표적 상대각 ψ_{rel} 만큼 섭동(perturbation)되었다는 것인데 이 가정은 ψ_{rel} 의 최대값이 작은 값이므로 타당하며 식 (8), (9)는 ψ_{rel} 에 대해 미소각 근사(Small Angle Approximation)법으로 식 (1), (2)를 정리한 것이다.

또한 식 (10)은 ψ_{rel} 가 미소각이므로 $X_{rel} \gg Y_{rel}$ 가 되므로 $(X^2_{rel} + Y^2_{rel})^{1/2}$ 을 근사하는데 문제가 없다.

식 (8) ~ 식 (11)을 상태 공간 방정식 형태로 다시 정리하면 다음이다.

$$\dot{X} = AX + BU + D \quad (12)$$

$$Y = CX \quad (13)$$

$$X = [X_{rel} \ Y_{rel} \ \psi_{rel}] \quad U = \dot{\psi}_c$$

$$Y = [R_{rel} \ \psi_{rel}]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & V_m \sin \psi_{m0} \\ 0 & 0 & -V_m \cos \psi_{m0} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} a \\ b \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

$$a = -(V_m \cos(\psi_{m0}) + V_t \cos(\psi_a))$$

$$b = -(V_m \sin(\psi_{m0}) + V_t \sin(\psi_a))$$

3. 마지막 유도 알고리즘 설계

식 (12), (13)과 같이 유도 시스템이 구성되었으므로 이 시스템 모델을 사용하여 유도 알고리즘을 설계하여야 한다. 유도 시스템에서의 알고리즘 설계에서도 운동 제어기 설계에서의 기법[7]을 그대로 적용하여, 먼저 알고리즘의 구조를 결정하고, 그 다음 최적의 유도 이득을 결정하면 된다.

(1) 유도 알고리즘 구조 결정 문제

일반적으로 마지막 유도단계에서는 빛나간 거리(miss distance)가 가장 중요한 성능 결정요소이지만, 수중 운동체에서는 탐색기가 몸체에 고정되어 있는 방식(strapdown type)이므로 표적 상대각 ψ_{rel} 가 더 중요한 고려사항으로 대두된다.

구조 결정 문제란 식 (12)의 상태변수들을 어떤 구조로 궤환(feedback) 시킬 것인가를 설계하는 것이다. 이것은 먼저 대상 시스템의 개루프(open loop) 주파수 해석을 하여 출력에 대한 상태변수 각각의 영향을 조사하고, 시스템의 제한영역 범위에서 대략적인 LQ 설계를 한다. LQ 설계이득으로서 페루프 주파수 해석을 실시함과 동시에 특이치분리 해석(Singular Value Decomposition : SVD)을 하여 시스템의 특성을 분석한다. 분석된 시스템의 특성으로서 최종적인 제어구조(여기서는 유도 알고리즘 구조)를 결정한다.

이러한 방법을 수중 운동체의 유도시스템의 알고리즘 구조 결정에 대해 적용하면, 먼저 개루프 시스템에 대해 입력($\dot{\psi}_c$)과 빛나간 거리와 표적 상대각 출력에 대한 주파수 영역에서의 응답을 나타내면 그림 2와 같다. 이 경우 ψ_{m0} 는 표적과 수중 운동체의 속도 등을 고려하여 20도일 때를 택했다.

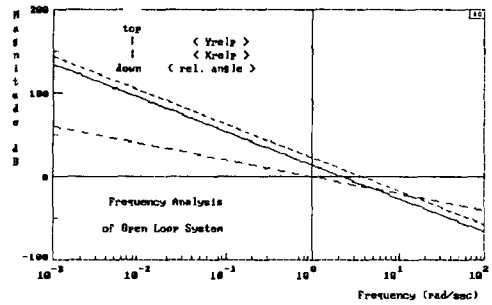


그림 2. 유도 시스템의 개루프 주파수 응답

Fig 2. Open loop freq. response of the guidance system

그림 2에서 맨위의 직선이 입력($\dot{\psi}_c$)에 의한 Y_{rel} 상태변수의 응답을 표시한 것이며 표적 상대각(ψ_{rel}) 출력은 상대적으로 작다. 여기서 알 수 있는 것은 입력에 대한 X_{rel} 와 Y_{rel} 의 응답이 상당히 민감하여 구조설계에서 반드시 고려해야 한다는 것과 지나친 주파수(cross-over frequency)도 설계 제한 주파수 범위를 벗어난다는 것이다.

유도 시스템의 제한 주파수 범위를 정하는 문제는 중요하다. 상태변수들의 입력 주기가 0.5 ~ 1초정도이므로 설계 제한 주파수 영역을 1 rad/sec 정도로 결정하였다[10]. 이러한 설계 제한 조건을 기준으로 LQ 설계를 한 결과를 표 1에 나타내었으며, 설계된 유도 이득으로서 구성된 페

루프 시스템의 주파수 응답 곡선이 그림 3이고, 이것의 특이치 분리 곡선이 그림 4이다.

표 1. 유도 시스템의 개략적인 LQ 설계 결과

Table 1. LQ design for determination of structure of guidance system.

상태변수	Xrelp	Yrelp	ψ_{rel}
이득값	0.001	0.001	1.75

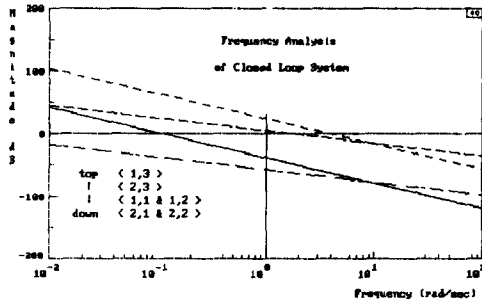


그림 3. 유도 시스템의 페루프 주파수 응답

Fig 3. Closed loop freq. response of guidance system

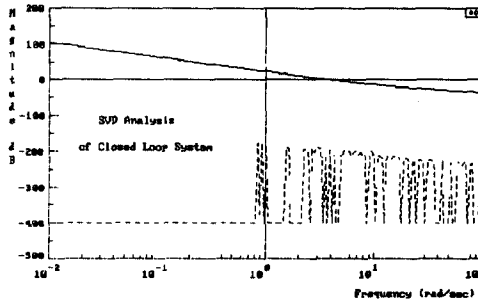


그림 4. 페루프 유도 시스템의 특이치 분리 해석

Fig 4. Singular value analysis of the closed loop guidance system

그림 3에서 가장 크기가 큰 (1,3)곡선은 표적 상대각을 제한 입력으로 했을 때의 빛나간 거리에 대한 주파수 응답을 나타내며, (2,2)는 Yrelp의 입력에 대한 표적 상대각 ψ_{rel} 의 응답을 표시한 것이다. 그림 3과 그림 4를 비교해보면 페루프 유도 시스템에서는 ψ_{rel} 가 미치는 영향이 가장 크며, 탐지 폭제한 조건으로 인해 Xrelp와 Yrelp의 이득을 크게 할 수 없으며, 특이치 해석 곡선의 지나침 주파수

가 3rad/sec 정도로 설계 사양을 벗어난 것은 자동 조종 시스템의 영향이 고려되지 않았기 때문이다.

동속도 직진 주행이라는 표적 모델링의 제한 조건과 식 (12), (13)의 유도 시스템은 ψ_{rel} 에 크게 영향을 받으므로 유도 시스템 구조 설계에서는 표적이 회피 기동을 하거나 표적과의 방향각(aspect angle)에 영향을 덜 받도록 고려되어야 한다. 이러한 목적을 위하여 표적 상대각 ψ_{rel} 에 적분기능(integral action)을 추가하기로 한다. 이것을 블록선도로 표시하면 그림 5이다.

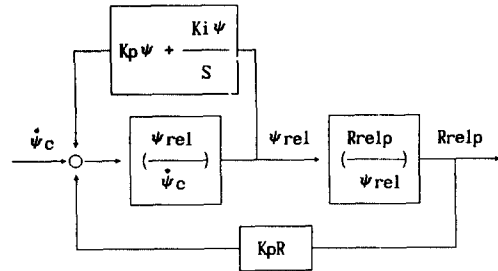


그림 5. 설계된 유도 시스템의 구조

Fig 5. The designed structure of guidance system

(2) 강인성을 고려한 유도이득 설계문제

유도 시스템의 강인성을 보장하기 위한 설계 제한 주파수 영역과 제어 시스템의 자체 동특성(dynamics)을 고려하여 적절한 유도 이득을 설계하여야 한다. 수중운동체의 자동조종(autopilot) 특성에 의해 그림 6에서의 개루프 전달함수는 각각 식 (14), (15)와 같다.

$$\left(\frac{\psi_{rel}}{\dot{\psi}_c} \right) = \frac{10(S+3)}{S(S+2.6)(S+15)} \quad - (14)$$

$$\left(\frac{Rrelp}{\psi_{rel}} \right) = \frac{-8.9}{S} \quad - (15)$$

그런데 식(12)의 모델링에서는 $(\psi_{rel}/\dot{\psi}_c) = 1/S$ 이므로 모델링과 실제의 수중운동체의 자동조종시스템의 동특성을 비교하면 그림 6과 같다.

그림 5의 유도시스템의 이득을 설계하기 위해서는 먼저 표적 상대각(ψ_{rel})루프를 설계한 다음 Rrelp루프를 설계한다. 그런데 식(14)를 자동조종시스템의 상태 변수들로 다시 구성하여 LQ 이론으로 설계하면 전상태 제한(full state feedback)이 필요하므로 수학적으로 이득은 최적이나, 유도 시스템이 복잡해지고 자동조종시스템과 결합

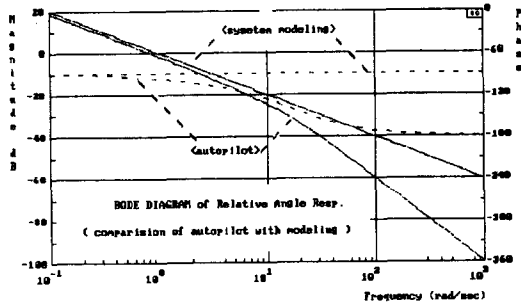


그림 6. 표적상대각에 대한 개루프 시스템 응답 특성
 Fig 6. Open loop freq. response of Ψ_{rel} loop

되므로(coupled) 고전적인 주파수 영역에서의 설계를 하기로 한다. 또한 단일 입출력 (Single Input Single Output:SISO) 시스템에서는 LQ 설계법이나 고전적인 주파수 영역에서의 설계법은, 전달함수의 지나침 주파수(cross-over frequency)를 설계제한 조건으로 설정하므로, 근본적으로 차이점은 없다.

○ Ψ_{rel} 루프 설계

이 논문에서 시스템의 루프설계에 사용한 설계 기법은 근궤적(root locus) 그림, 결합된 보드 근궤적 (Combined Bode-Root Locus:BRL) 그림, 보드선도 (Bode diagram) 및 시간 응답(time response) 등을 주로 사용하였다.

설계 대상 루프의 이득에 따른 전체적인 극점의 이동 양상을 살펴보면, 이득의 크기에 상관없이 대상루프는 안정(Stable)함을 그림 7의 근궤적 그림으로 알 수 있다.

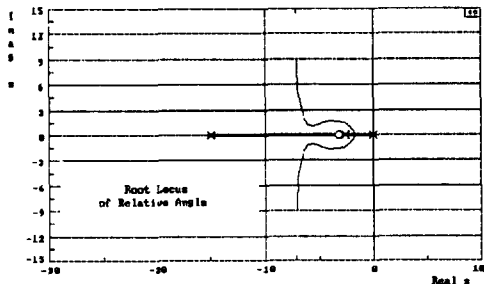


그림 7. Ψ_{rel} 루프의 근궤적 그림
 Fig 7. Root locus plot of Ψ_{rel} loop

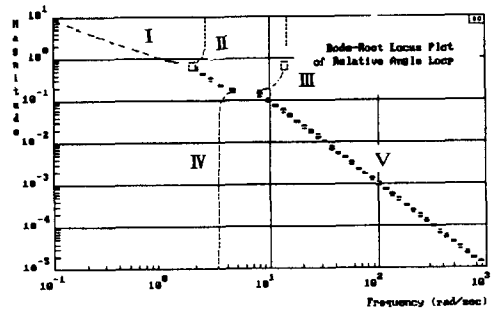


그림 8. Ψ_{rel} 루프의 결합된 보드 근궤적 그림
 Fig 8. BRL plot of Ψ_{rel} loop

그림 8의 결합된 보드 근궤적 그림은 보드 선도 상에 근궤적을 그리는 것인데 세로축에 이득값의 역수를 나타내고 가로축은 극점의 크기를 표시한다. 이 그림은 이득에 따른 페루프 극점의 위치, 대역폭 및 이득민감도(gain sensitivity) 등의 설계 정보를 담고 있는데, 특히 이득민감도는 일반적인 LQ 설계기법으로는 알 수 없는 것으로 PID 설계에서 시행 착오를 줄이고, 최적에 근접하는 제어기 설계를 가능하게 할 뿐 아니라, 강인성 검증에도 유용하게 사용된다. 그림 9에서 (I),(II),(V)번선은 극점 $S=0$ (I)와 극점 $S=-2.6$ (II)이 이득이 커짐에 따라 복소공액으로서 $S=-\infty$ 로 커짐을 나타내며, (III),(IV)선은 극점 $S=-15$ (III)가 영점 $S=-3$ (IV)으로 접근하여 서로 상쇄됨을 보여준다. 이득 민감도는 극점 $S=0$ 는 이득이 0.1에서 1구간에서 가장 민감하며 극점 $S=-2.6$ 은 반대로 이 구간에서 가장 둔감하다. 또한 극점 $S=-15$ (III)은 이득이 $2 \sim 10$ 정도의 구간에서 극점이 크게 변한다. 설계 제한 주파수 영역과 이득 민감도를 고려하여 이득을 1.5로 정하였으며 이 때의 페루프 극점의 위치를 네모(□)로 표시하였다.

설계된 Ψ_{rel} 루프의 보드 선도는 그림으로 나타내었는데 교환에 의한 정상상태 오차 및 초기 설계 조건과 다른 상황에서도 탐색기의 좁은 탐지 영역으로 인한 표적상실(target loss)이 일어나지 않도록 적분항(Kia)을 추가하였다. 각 경우 모두 위상 및 이득여유는 80도 및 300dB 정도로 충분함을 알 수 있다.

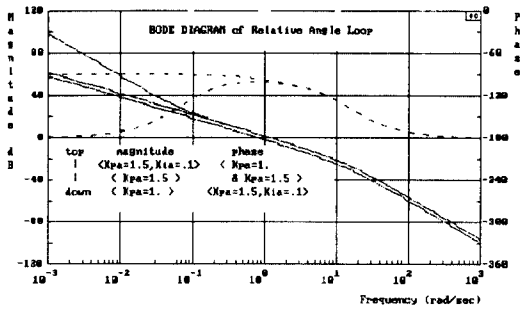


그림 9. Ψ_{rel} 루프의 보드 선도 그림

Fig 9. Bode Diagram plot of Ψ_{rel} loop

그림 9의 각 경우에 대해 시간 응답곡선은 그림 10에 나타내었으며, 적분항($K_{ia}=0.1$)을 넣었을 때 8%정도의 초과 응답(overshoot)을 나타내는데 이것은 뒤쪽의 Rrelp 루프의 설계와 관련하여 단순한 추격(pursuit) 유도 방식과 다른 점으로서, 마지막 유도의 최종목표는 빗나간 거리(miss distance)를 줄이고, 명중시간을 줄이는 것이므로, 표적 상대각 Ψ_{rel} 응답에서 초과응답을 보이는 것이다.

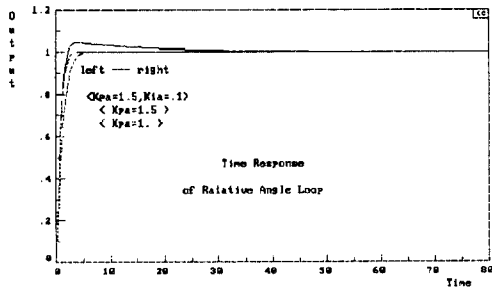


그림 10. Ψ_{rel} 루프의 시간 응답 그림

Fig 10. Time response plot of Ψ_{rel} loop

○ Rrelp 루프 설계

앞에서 설계된 Ψ_{rel} 루프를 기초로 한 새로운 Rrelp의 개루프 전달함수는 식(16)과 같이 구해진다.

$$\left(\frac{Rrelp}{\Psi_c} \right) = \frac{-92.4(S+3.2)}{(S+0.07)[(S+1.8)^2 + 0.3^2](S+13.9)} \quad (16)$$

식(16)에서 (-)부호를 곱해주어서, 근궤적, 결합된 보드 근궤적, 보드선도 및 시간응답을 나타내면 각각 그림 11, 그림 12, 그림 13 및 그림 14이다. 그림 11의 근궤적을 살펴보면 어느 이득(Kpr)보다 크면 루프가 불안정해짐을 알 수 있으며, 그림 12에서는 $Kpr=1.7$ 이상에서는 복소공

액으로 나타낸 극점이 속이 빈 동그라미로 표시됨으로서 루프가 불안정함을 나타냈다. 그림 12에서 이득 민감도가 가장 둔감한 구간 및 설계제한 주파수 영역 이내이며, 시뮬레이션 수행시 탐색기 탐색폭 제한 조건을 만족하는 이득으로서 $Kpr=0.001$ 을 선택하였다. 그 때의 페루프 극점의 위치는 네모(□)로 표시하였다.

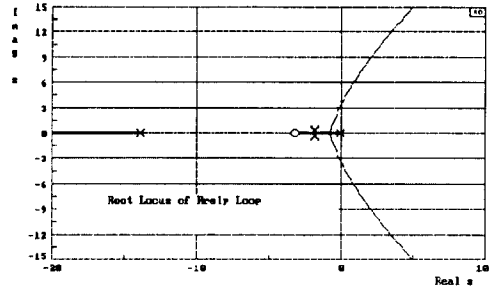


그림 11. Rrelp 루프의 근궤적 그림

Fig 11. Root locus plot of Rrelp loop

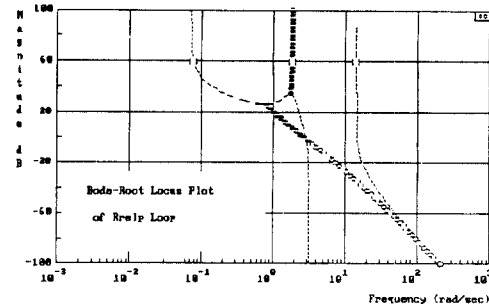


그림 12. Rrelp 루프의 결합된 보드 근궤적 그림

Fig 12. BPL plot of Rrelp loop

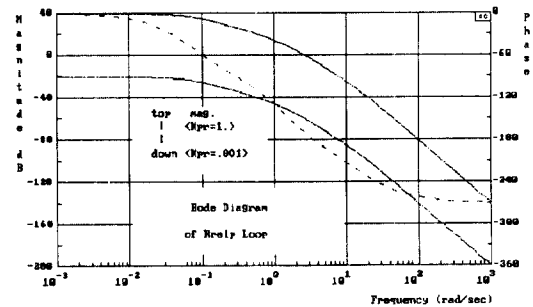


그림 13. Rrelp 루프의 보드 선도 그림

Fig 13. Bode diagram of Rrelp loop

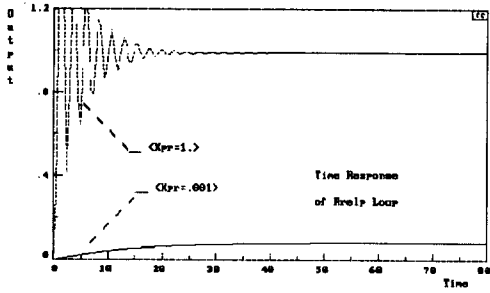


그림 14. Rrel 루프의 시간 응답 그림

Fig 14. Time response plot of Rrel loop

그림 13의 보드 선도를 살펴보면 이득(Kpr)이 1일 때는 이득 및 위상여유가 각각 2dB 및 4도 정도로 약간의 외란 및 잡음 등으로 불안정해질 수 있음을 보여준다. 그런데 이득을 0.001로 상당히 작게 잡은 이유는 빗나간 거리를 줄이려면 이득을 0.1 정도로 해야하나 그렇게하면 몸체부착(Strapdown)형 탐색기의 탐지폭을 벗어나게 되므로 곤란해진다. 그림 13의 각 경우에 대한 Rrel 루프의 시간 응답은 그림 14인데 탐색기의 탐지 제한폭이 큰 제약조건이 되고 있음을 알 수 있다.

○ Rrel 루프의 Ψ_{rel} 응답에 미치는 영향

Rrel 루프가 Ψ_{rel} 응답에 미치는 영향을 알아보기 위해 먼저 그림 5의 유도 시스템 블록선도에서 Rrel 입력에 의한 Ψ_{rel} 의 출력에 대한 페루프 전달함수를 구하면 식(17)로 되며, Ψ_c 입력에 대한 Ψ_{rel} 의 페루프 전달함수는 식(18)로 표시된다.

$$\left(\frac{\Psi_{rel}}{Rrelp}\right) = \frac{0.1(S+3.2)}{(S+0.08)[(S+1.8)^2 + 0.3^2] (S+14)} \quad - (17)$$

$$\left(\frac{\Psi_{rel}}{\Psi_c}\right) = \frac{15.57(S+0.067)(S+3.2)}{(S+0.07)[(S+1.81)^2 + 0.345^2] (S+13.9163)} \quad - (18)$$

전체적인 Ψ_{rel} 의 응답은 식(17)과 식(18)이 합쳐져야 하며, 실제로 두 식을 더하면 극점과 영점이 서로 상쇄되고, 결국 식(18)과 비슷한 형태만 남게된다. 이러한 행상을 보드선도 그림과 시간응답 그림으로 나타내면 각각 그림 15와 그림 16이다.

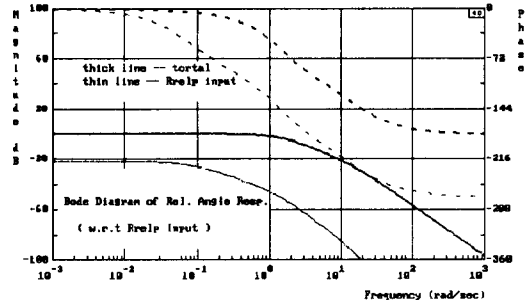


그림 15. Rrel에 의한 Ψ_{rel} 의 보드 선도 비교 그림

Fig 15. Bode diagram of Ψ_{rel} with Rrelp input

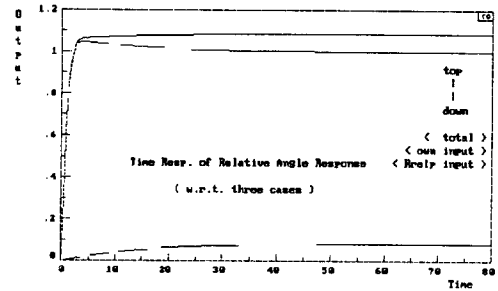


그림 16. Rrel에 의한 Ψ_{rel} 의 시간 응답 비교 그림

Fig 16. Time response of Ψ_{rel} with Rrel input

그림 15와 그림 16을 살펴보면 제안된 유도 시스템의 구조에서 Rrel의 입력은, 빗나간 거리를 줄이기위해 표적 상대각 Ψ_{rel} 를 8%정도 초과 응답하도록 하는 역할을 할 수 있다. 또한 제안된 구조는 탐색기의 탐지폭만 어느 정도 크게 된다면 Rrel의 이득을 크게하여 명중시간을 최소화 시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

제안된 유도법칙의 성능을 추적(pursuit)유도, 뱅뱅(bang-bang)유도, 비례항법(Proportional Navigation : PN)유도 및 보완된 비례항법(Augmented PN)유도 등의 기존의 유도법칙들과 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 사용된 시뮬레이션 프로그램은 탐색기, 유도제어 알고리즘, 자동 조종장치, 추진모델 등의 수중 운동체의 전체 시스템 모델을 포함하고 있으며 6 자유도(Degree of Freedom : DOF)의 비선형 운동 방정식을 4차 Runge-Kutt 적분법으로 궤적을 구했다.

성능 비교 항목으로는 빛나간 거리와 탐지 후 명중까지의 시간으로 정하였으며, 표적은 피탐된 후 속도를 10노트에서 15노트로 변경하여 직진 주행하는 경우와, 속도 변경과 동시에 최대 7°/sec의 선회율로 회피하는 회피기동의 2 경우에 대해 시뮬레이션 하였다.

PNG 및 APNG는 수중 운동체와 같이 탐색기가 몸체에 고정되어 부착되어 있고 탐지 빔 (beam) 폭이 상당히 좁게 제한되어 있는 경우에는, 일반적인 유도이득 (3 ~ 4 정도)을 적용하면, 큰 선회를 유도명령으로 인해 표적상실 (target loss)을 일으킨다. 이것을 방지하기 위해 유도이득을 줄이면, 표적과의 상대거리가 짧아졌을 때에는 선회를 명령어가 작게 되어 또한 표적상실이 일어난다. 이런 이유로 PNG와 APNG에서는 표적상대각 ψ_{rel} 에 따라서 추격 (pursuit) 유도와 병행하게 되었다. 즉 탐색기의 ψ_{rel} 출력이 탐지 빔 폭의 1/2 이하이면 PNG나 APNG를 그대로 쓰고, 그 이상이면 추격유도의 유도 명령어를 사용하였다.

시뮬레이션에 사용된 각각의 유도법칙을 설명하면, 뱅뱅 유도는 유도명령어를 5°/sec와 10°/sec로 하였는데 10°/sec는 최대 탐지거리의 1/3에 해당하는 거리에 도달하면 선택된다. 특히 뱅뱅유도에서는 유도제한각 (dead band angle)의 선정이 중요한 요점인데, 안정성을 고려하여 2도로 하였다. 추격유도는 유도이득을 제안된 유도법칙과 같이 1.5로 하였다. (PNG + pursuit) 유도에 쓰인 PN 유도이득은 3이고 pursuit 유도이득은 1로 하였다. 또한 (APNG + pursuit) 유도에서 선회를 유도이득은 1.8로 설계되었으며, pursuit 유도이득은 1로 선정하였다. 제안된 유도법칙은 앞절에서 설계된 바와 같은 이득을 사용하였다.

이제 성능 비교 결과로서 빛나간 거리, 명중시간에 관해 정리하면 표 2와 표 3과 같다.

표 2의 빛나간 거리에 대한 성능을 살펴보면 제안된 유도법칙이 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있으며, 표 3의 명중시간에서는 명중조건이 길이 20m, 너비 100m, 깊이 5m 인 표적이므로 유도체적이 단속 주행 (intermittent run) 형태 [4]가 되는 뱅뱅 유도법칙과 제안된 유도법칙이 별 차이 없이 가장 좋은 성능을 나타내었다.

표 2. 빛나간 거리에 대한 성능 비교

Fig 2. Performance comparison for miss distance

초기 aspect 각 회피 유무 유도법칙		0°	45°	90°	180°
Bang - Bang	유	4.84	4.21	6.35	5.69
	무	3.57	5.24	4.43	5.56
Pursuit	유	3.33	2.49	3.66	2.36
	무	4.50	3.59	3.34	5.25
PN + pursuit	유	4.50	4.24	5.20	3.50
	무	6.43	5.70	3.96	4.86
APN + pursuit	유	5.02	4.85	4.91	3.43
	무	5.24	2.23	3.30	6.03
제안된 유도법칙	유	2.46	2.47	2.54	2.36
	무	3.24	2.45	2.20	3.15

표 3. 명중시간에 대한 성능 비교

Fig 3. Performance comparison for hitting time

초기 aspect 각 회피 유무 유도법칙		0°	45°	90°	180°
Bang - Bang	유	48.84	60.36	81.3	146.68
	무	33.25	36.95	66.3	146.46
Pursuit	유	48.9	60.36	81.3	146.08
	무	33.25	38.75	66.3	146.47
PN + Pursuit	유	49.45	60.9	81.3	146.08
	무	33.3	36.75	63.3	146.46
APN + Pursuit	유	50.1	60.45	82.45	146.63
	무	33.3	36.95	66.28	146.47
제안된 유도법칙	유	48.85	60.36	81.3	146.08
	무	33.25	36.95	66.3	146.48

5. 결론

탐색기가 몸체 고정 부착형(strapdown type)인 수중 운 동체의 마지막 유도(terminal guidance)법칙을 개발하였다. 제안된 유도법칙은 추격유도(pursuit guidance)법칙에서 표적 상대거리 정보를 더 이용하는 방안이다.

유도법칙을 개발하기 위해 먼저 새로운 방식의 선형화 유도 시스템 모델링을 제안하였다. 제안된 선형 유도 시스템 모델링으로부터, 유도시스템 구조 및 유도이득을 설계 하는 방안을 제시하였다. 또 시뮬레이션 결과 기존의 여러 유도법칙들 보다 성능이 우수함을 보였다.

6. 참고문헌

- [1] R.G.Lee et al. Guided Weapons, Royal Military College of science, Brassey's Defence Publishers, 1988
- [2] R.Goodstein, Guidance Law Applicability for Missile Closing, AGARD Lecture Series No.52 on Guidance and Control of Tactical Missiles, North Atlantic Treaty Organization, 1972
- [3] 송택렬, 유도무기의 유도개념 및 설계기술 발전추세, 제1차 유도무기 유도조종 학술대회 논문집, PP35-43, 1991
- [4] 탁민재, 류혁, 수동형 탐색기를 장착한 호밍 미사일의 요격성능 향상을 위한 적응 단속기동, '90 한국 자동 제어 학술회의 논문집, P469 - 474, 1990
- [5] D.G.Hull, J.L.Speyer and D.B.Burris, Linear Quadratic Control Law for Dual Control of Homing Missile, J.Guidance, Vol 13, No 1, P137-144, 1988
- [6] M.Guelman, The Closed-Form Solution of True Proportional Navigation, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol AES-12, No 4, P472-482, 1976
- [7] 김삼수, 강인한 운동제어기의 최적설계를 위한 고전적 기법과 현대적 기법의 결합, '90 한국자동제어 학술회의 논문집, P485-492, 1990
- [8] 김종식, 선형 제어 시스템 공학, 청문각, 1988

- [9] J.H.Taylor. Handbook for the Direct Statistical Analysis of Missile Guidance Systems Via CADET, The Analytic Sciences Corporation, 1975
- [10] K.J.Astrom, B.Wittenmark, Computer-Controlled System, Prentice-hall, Inc. 1984