

선박 자동항로 추종알고리즘에 관한 연구

이 병 결* · 김 종 화**

A Study on the Automatic Route Tracking Algorithm of Ships

Byung-Kyul Lee* · JongHwa Kim**

ABSTRACT

The steering of a ship requires the integration of course-keeping control, track-keeping control and turning control. To construct the synthetic control algorithm, two main control algorithms are needed. One is the decision making algorithm to give a priority among course-keeping control, turning control and track-keeping control. The other is the algorithm generating control command corresponding to each control algorithm under various conditions, such as cruising direction, current location of a ship against the optimal route and the state of motion. It is important that a control command is to be given as a form of rudder angle suitable for the characteristics of the ship and the rudder.

In this paper, we presents a synthetic control algorithm that generates the rudder command angle to track the optimal route which is composed of straight lines among way points with keeping a required error limit. The control algorithm comprises three main algorithms. A course-keeping algorithm is used to eliminate the deviation of yaw angle between the optimal route and a current route. A track-keeping algorithm plays a role in tracking the optimal route among way points. A turning control algorithm is needed to generate an optimal turning route and a control command to track it. The effectiveness of the proposed control algorithm is assured through computer simulations.

* 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정 제어계측 전공

** 한국해양대학교 제어계측공학과 교수

제 1 장 서 론

암초나 장애물과 같은 항해가 불가능한 해역의 정보를 데이터 베이스로 구축하고, 이를 토대로 숙련된 항해사가 출발점에서 목표점까지 항로를 설정한다면 선박의 좌초를 방지할 수 있다. 또한, 평면 레이더의 온라인 정보를 이용하여 같은 해역을 항해중인 선박의 항해 정보에 따라 새로운 항로를 생성한다면 충돌을 방지할 수 있다. 이를 위해 설정된 항로를 자동으로 추종하도록 선박 운동을 제어하는 알고리즘이 구성되어야 한다.

상황에 따라 회두각 유지제어, 선회제어, 항로 추종제어 중에서 무엇을 실시할 것인가 우선 순위를 결정해야 한다. 우선 순위가 결정된 다음에는 선박의 진출입 방향과 최적항로와의 위치관계를 따져 조타 방향과 크기를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 전자해도상에서 변침점에 대해 직선으로 이루어진 최적항로가 설정되었다는 가정하에, 설정된 최적항로를 요구되는 오차범위에서 추종할 수 있도록 상황에 따라 제어 알고리즘의 우선 순위를 결정하는 우선순위 결정알고리즘을 제안하고, 각각의 제어 알고리즘에 있어서 선박의 진출입 방향이나 최적 항로에 대한 선박의 현재위치 등을 고려하여 조타명령을 생성하는 알고리즘에 관한 연구를 수행하고자 한다.

제 2 장 좌표계 및 선박운동

2.1 선박운동 묘사를 위한 좌표계

자동 생성된 최적항로를 지도상에 표시하고, 최적항로 추종시 선박의 실제위치를 고정직교좌표계로 변환하기 위하여 좌표계 및 선박조종운동에 대하여 다음과 같이 가정한다. 선박의 항해방향, 즉 회두각(yaw angle)을 측정하는 자이로컴파스의 기준인 진북과 절대좌표계의 Y_0 축이 일치한다. 선박조종운동은 수평면내 강체운동이며, 선속이 일정할 경우 전진방향(surge) 운동의 변화는 무시하고 횡방향(sway), 회두방향(yaw) 운동만을 고려한다.

그림 2.1은 선박운동에 관련된 좌표계와 변수들을 나타낸 그림이다. $O-X_0Y_0Z_0$ 좌표계는 고정절대좌표계로 자동 생성되는 최적항로와 항해 중 선박 위치를 묘사하는 기준이 된다. $G-xyz$ 좌표계는 원점이 선박 무게중심 G 에 고정되어 선박과 함께 움직이는 운동좌표계로 선박운동의 주요변수 묘사에 이용된다. x, y, z 는 전진방향, 횡방향, 회두방향이다. u, v 는 $G-xyz$ 좌표계에서 x, y 방향에 대한 선속도, r 은 z 방향에 대한 각속도이며, X, Y, N 은 각각에 대한 외력 및 모멘트이다. ψ 는 고정절대좌표계에서 진북 또는 Y_0 와 선박의 전진방향과의 각이며, δ 와 β 는 $G-xyz$ 좌표계에서 각각 선박의 타각과 타각에 의해 만들어지는 선박의 횡류각이다.



그림 2.1 좌표계와 선박조종 관련 변수

2.2 선박 위치좌표를 얻기 위한 좌표변환

자이로컴파스의 출력인 회두각과 횡류각을 이용함으로써 그림 2.2와 같은 개념으로 쉽게 선박의 위치 좌표를 구할 수 있다. 현재 시각 $k\Delta t$ 에 대한 선박의 무게중심 G의 절대 위치좌표를 $P_k(x_k, y_k)$ 라고 하면 샘플링시간 Δt 동안 이동한 거리는 $V \Delta t$ 이다. 따라서 $(k+1)\Delta t$ 시각에 있어서 선박의 현재 위치좌표는 다음과 같은 순환적 구조로 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + (V \Delta t) \sin(\psi - \beta) \\ y_{k+1} &= y_k + (V \Delta t) \cos(\psi - \beta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

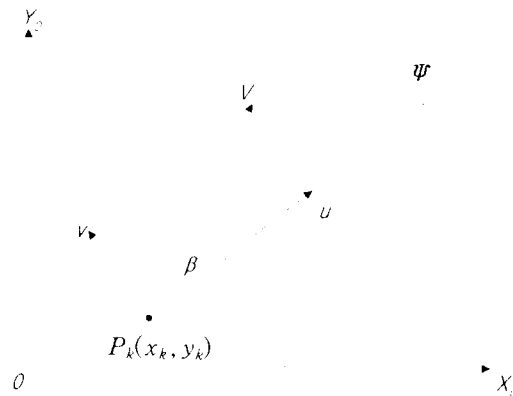


그림 2.2 선박의 위치좌표를 얻기 위한 좌표변환

2.3 수직편차 알고리즘

2.3.1 직선운동 수직편차 알고리즘

그림 2.3에서 변침점 P_i 와 P_{i+1} 사이의 현재 선박 위치에 대한 수직 대응좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_h &= x_i + t_h(x_{i+1} - x_i) \\ y_h &= y_i + t_h(y_{i+1} - y_i) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\text{단, } t_h = \frac{(x_{i+1} - x_i)(x_k - x_i) + (y_{i+1} - y_i)(y_k - y_i)}{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

따라서 수직편차 D 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \sqrt{(x_k - x_h)^2 + (y_k - y_h)^2} \quad (2.3)$$

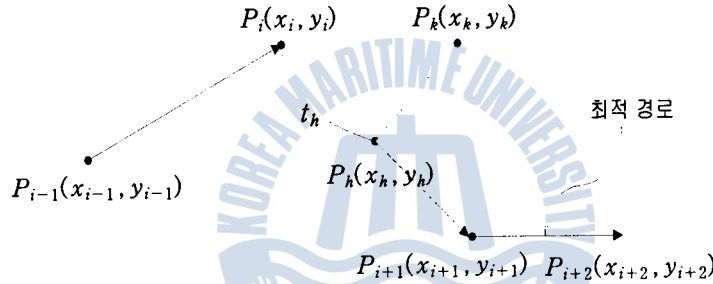


그림 2.3 직선운동시 최적항로상 수직 대응좌표

2.3.2 선회운동 수직편차 알고리즘

선회운동시 변침점 사이의 직선에 접하는 원을 최적항로로 설정하고, 추종여부를 판단하기 위해 그림 2.4와 같이 선회운동의 반지름과 중심점 $R_{xy}(x_{R0}, y_{R0})$ 를 이용하여 수직편차를 계산할 수 있다.

WOP (Wheel Over Point)와 $P_i(x_i, y_i)$ 사이의 거리 D_{wop} 는 다음과 같다.

$$D_{wop} = \frac{R}{\tan(\frac{\theta}{2})} \quad (2.4)$$

선회운동의 중심점 $R_{xy}(x_{R0}, y_{R0})$ 는 $R_0(-D_{wop}, R)$ 좌표를 원점(0,0)에 대하여 $\frac{3}{2}\pi + \Psi_{i-1}$ 만큼 회전한 후, $P_i(x_i, y_i)$ 만큼 수평이동한 것이다.

$$\begin{bmatrix} x_{R0} \\ y_{R0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{3}{2}\pi + \Psi_{i-1}) & -\sin(\frac{3}{2}\pi + \Psi_{i-1}) \\ \sin(\frac{3}{2}\pi + \Psi_{i-1}) & \cos(\frac{3}{2}\pi + \Psi_{i-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -D_{wop} \\ R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

선회운동시 수직편차 D_{radial} 은 배의 현재좌표 $P_k(x_k, y_k)$ 와 선회운동의 중심점 $R_{xy}(x_{R0}, y_{R0})$ 사이의 거리에서 배의 선회반경 R 을 빼주면 구할 수 있다.

$$D_{radial} = \sqrt{(x_k - x_{R0})^2 + (y_k - y_{R0})^2} - R \quad (2.6)$$

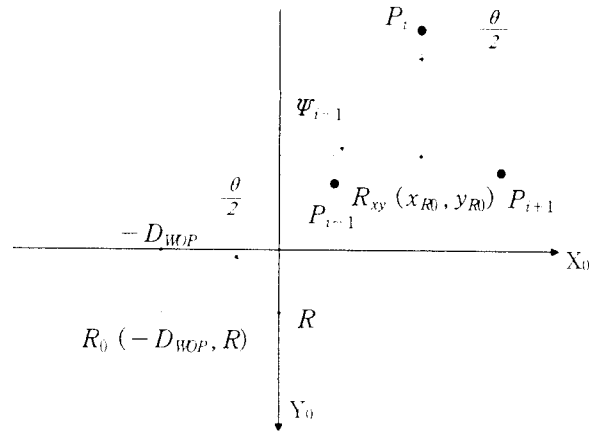


그림 2.4 선회운동시 수직편차

2.4 조타기 수학 모델

현재 실선에서 많이 사용하는 선동유압식 조타기는 가변 유량펌프로써 유량을 자유롭게 제어하여 유압실린더를 움직임으로써 타가 회전하도록 되어 있다. 펌프 유량이 정격내에 있다면, 조타기는 다음과 같이 모델링된다.

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \quad (2.7)$$

여기서 δ^* 는 명령타각, δ 는 실제타각, T_E 는 시정수로 실선에서 $T_E=2.5$ (sec).

$\dot{\delta}_{\max}=3.0$ (deg/sec)가 많이 사용되고 있다.

2.5 선박 조종운동방정식

일반적으로 선박의 조종운동방정식은 선체, 프로펠러, 타에 기인하는 유체력의 비선형성이나, 유체의 점성과 관성의 상호간섭에 의한 영향 등으로 비선형 방정식으로 묘사되지만 선형화시키거나 무시함으로써 얻어지는 선형 조종운동방정식을 많이 사용한다. 횡류각과 회두각속도가 타 각입력 δ 만의 함수로 표현된 Nomoto의 응답모델 선박 조종운동방정식은 다음과 같다^[1].

i) $\gamma - \delta$ 응답모델 $T_1 T_2 \ddot{\gamma} + (T_1 + T_2) \dot{\gamma} + \gamma = K\delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (2.8)$

ii) $\beta - \delta$ 응답모델 $T_1 T_2 \ddot{\beta} + (T_1 + T_2) \dot{\beta} + \beta = K_\beta \delta + K_\beta T_{3\beta} \dot{\delta} \quad (2.9)$

$K_\beta \approx 0.4K, T_{3\beta} \approx 0.3T_3$ 인 관계를 이용하여 근사하면 다음과 같다.

$$T_1 T_2 \ddot{\beta} + (T_1 + T_2) \dot{\beta} + \beta = 0.4K\delta + 0.3KT_3 \dot{\delta} \quad (2.10)$$

여기서 T_1, T_2 는 추종 및 안정성 계수이고, T_3 는 타각에 대해 미분제어 효과를 발휘하여 침로안정에 도움을 주는 계수이며, K 는 선회능력에 관련된 계수이다.

제 3 장 자동 항로추종 제어알고리즘

속련된 항해사가 전자해도상에서 정해주는 변침점을 토대로 변침점 사이에 직선으로 최적항로가 설정되었다는 가정하에, 설정된 최적항로로부터 선박의 진행방향인 기준회두각과 최적항로의 위치좌표를 구한다. 선박이 항해함에 따라 자이로콤파스를 통해 선박의 회두각을 알 수 있고, 선박의 전진방향 속도와 횡방향 속도를 통해 선박의 현재 위치좌표를 구할 수 있다. 앞에서 구한 기준회두각 및 최적항로의 위치좌표와 선박의 회두각 및 위치좌표 사이의 오차, 즉 회두각 편차와 수직편차 그리고 변침점에따라 조타명령 결정알고리즘으로 상황에 맞는 조타명령을 생성하여 최적항로를 정해진 오차범위 내에서 자동으로 추종하는 시스템을 그림 3.1과 같이 구성할 수 있다.

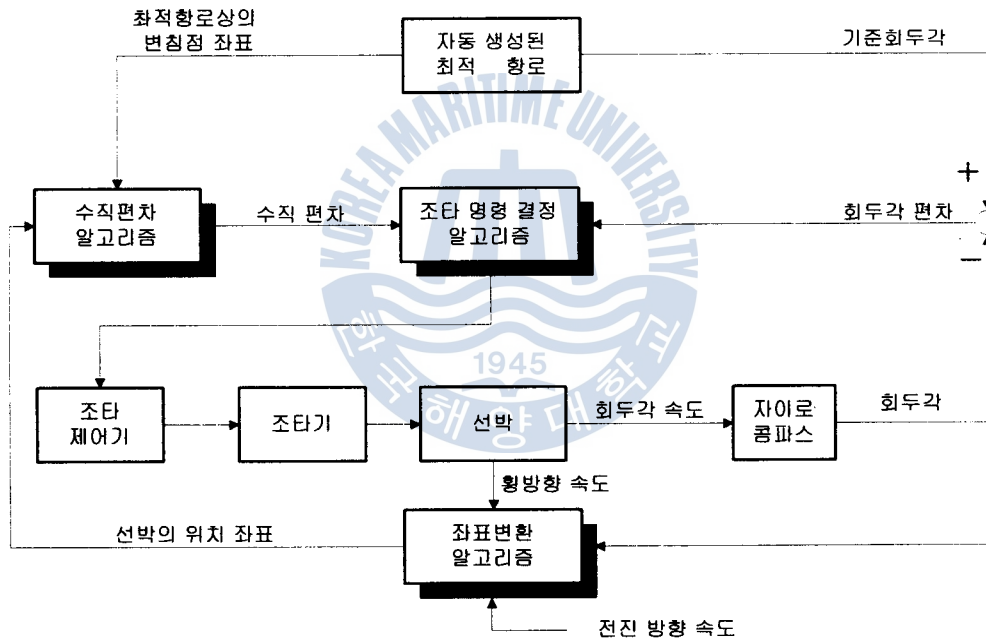


그림 3.1 항로추종 제어알고리즘

3.1 조타명령 결정알고리즘

자동 생성된 최적항로를 추종하도록 조타명령을 내리는 데 영향을 미치는 요소는 최적항로상의 변침점 좌표, 최적항로 회두각, 수직편차 등 크게 3가지이다. 이 요소들에 따라 조타명령의 우선순위가 결정된다. 최적항로 자동추종을 위한 조타명령 우선순위 결정알고리즘은 그림 3.2와 같다.

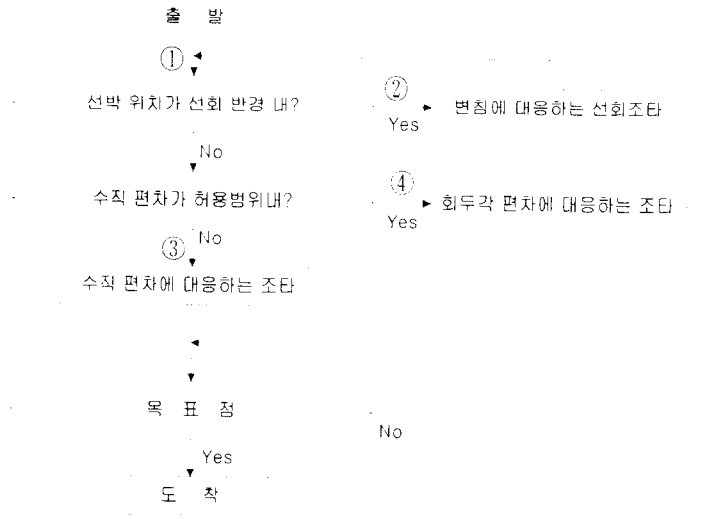


그림 3.2 조타명령 결정알고리즘

3.1.1 수직편차에 대응한 조타명령

선박이 선회반경 내에 있지 않고 최적항로상의 두 변침점 사이를 향해한다면, 최적항로와의 수직

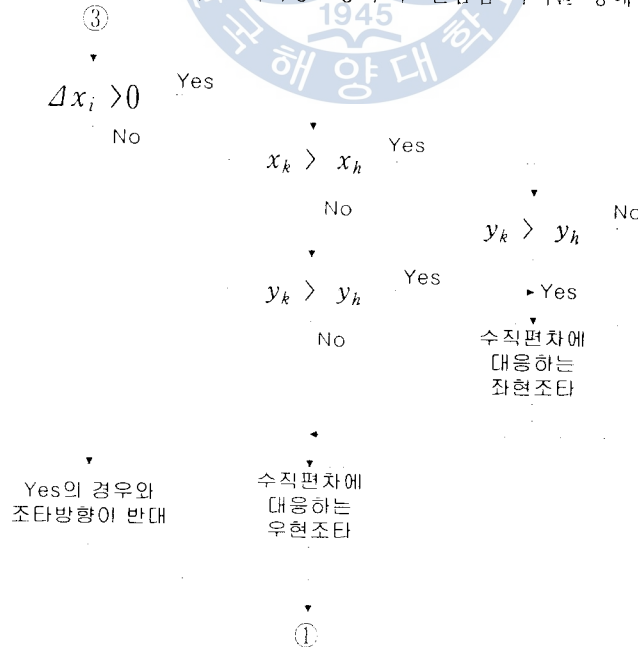


그림 3.3 수직편차에 대응한 조타명령

편차가 허용범위내에 있도록 조타각의 크기와 방향을 결정하여야 한다. 조타각의 크기와 방향을 선박이 선회반경 내에 있지 않고 최적항로상의 두 변침점 사이를 향해한다면, 최적항로와의 수직편차가 허용범위내에 있도록 조타각의 크기와 방향을 결정하여야 한다. 조타각의 크기와 방향을 결정하기 위해서는 선박의 항해 방향과 선박이 최적항로에 대하여 선박이 좌측에 있는지 우측에 있는지를 판별하여야 한다. 두 변침점의 x 좌표값 차이 Δx_i 를 계산함으로써 진행방향을 알 수 있고, 선박의 현재 위치좌표 $P_k(x_k, y_k)$ 와 최적항로상의 수직 대응좌표 $P_h(x_h, y_h)$ 의 x 와 y 의 좌표값의 대소를 판별함으로써 선박의 최적항로에 대한 위치를 알 수 있다. 이에 대한 알고리즘은 그림 3.3과 같다. 여기에서 ①, ③은 그림 3.2의 ①, ③과 동일하다.

3.1.2 최적항로상의 변침점에 대응한 조타명령

선박의 위치좌표에 대응하는 최적항로상의 좌표점이 변침점 좌표를 기준으로 선박의 선회반경 내에 있다면, 조타명령은 변침을 위한 조타명령을 내리는 것이 최우선이다. 또한, 변침명령 조타각의 크기와 방향은 변침점을 공유하는 최적항로 회두각들의 편차의 크기와 방향에 따라 결정되어야 한다. 이를 표현한 알고리즘은 그림 3.4와 같다.

그림 3.4에서 사용되는 용어는 다음과 같이 정의된다.

Ψ_i : 변침점 $i-1$ 과 i 사이와 i 와 $i+1$ 사이 기준 회두각

Ψ_{i+1} : 변침점 i 와 $i+1$ 사이 기준 회두각

$$\Delta\Psi = \Psi_{i+1} - \Psi_i$$

(x_{i-1}, y_{i-1}) 이전 변침점 좌표

(x_i, y_i) 현재 변침점 좌표

(x_{i+1}, y_{i+1}) 다음 변침점 좌표

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \Delta x_{i+1} = x_{i+1} - x_i$$

$$\Delta y_i = y_i - y_{i-1}, \Delta y_{i+1} = y_{i+1} - y_i$$

$$r_i = |\Delta y_i / \Delta x_i|, r_{i+1} = |\Delta y_{i+1} / \Delta x_{i+1}|$$

여기에서, ①, ②는 그림 3.2의 ①, ②와 일치한다.

변침점에 대하여 선박의 진입 및 진출 방향에 따라 조타명령의 방향을 결정하여야 한다. 이 때, 변침각의 크기가 π 를 넘지 않도록 Ψ_i, Ψ_{i+1} 의 부호를 정해 주어야 한다. 그림 3.4는 직교좌표계에서 $\Delta x_i, \Delta x_{i+1}, \Delta y_i, \Delta y_{i+1}, r_i, r_{i+1}$ 를 이용하여 선박의 진입, 진출방향을 결정하는 것을 보여 준다.



그림 3.4 최적항로상의 변침점에 대응한 조타명령

3.1.3 회두각 편차에 대응한 조타명령

선박이 선회반경내에 있지 않고 수직편차가 허용범위내에 있다면 선박이 최적항로의 회두각을 유지하도록 조타명령을 내려야 한다. 이에 대한 알고리즘은 그림 3.6과 같다. 선회시 회두각들이 선박 진출입 방향에 따라 음(-)으로 계산됨으로써 오차를 발생시킬 우려가 있다. 이를 피하기 위해 양(+)의 값으로 환산한 다음 기준 회두각과 선박의 회두각이 같아 지도록 회두각 유지제어를 실시한다. 그림3.6의 ①, ④는 그림3.2의 ①, ④와 동일하다.

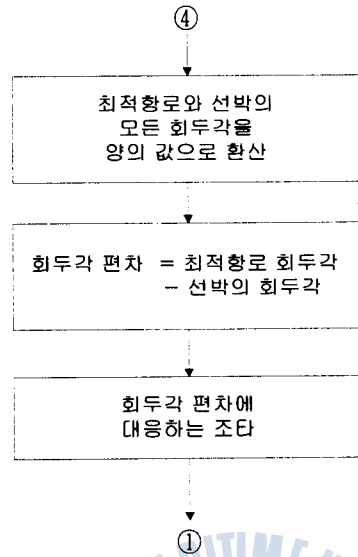


그림 3.6 회두각 편차에 대응한 조타명령

3.2 선회운동에 따른 항로추종

선박의 동역학적인 특성, 유체력의 비선형성 및 조타기 지연시간 등에 의하여 변침점에서 접원의 궤적을 따라 항로를 추종하기 위해서는 WOP_1 (Wheel Over Point)이 아닌 WOP_{in} 에

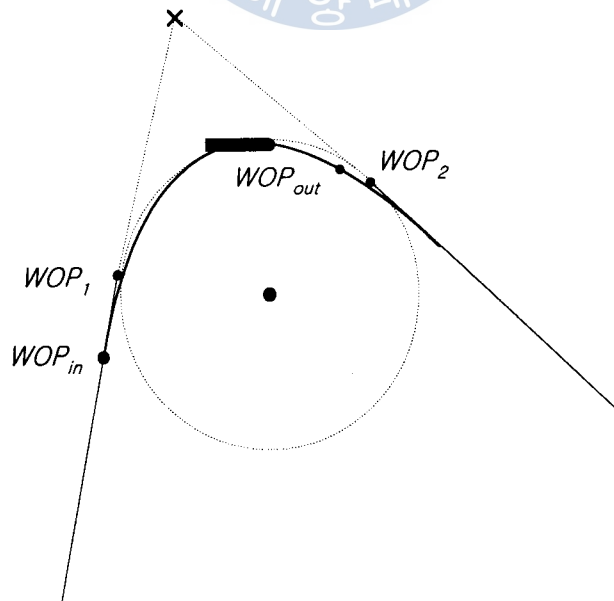


그림 3.7 실제 선회항로의 생성

서 선회를 시작하여야 한다. 변침각이 $\frac{\pi}{2}$ 일 때 WOP_{in} 은 최대선회반경 R_{max} 와 일치하고, 변침각이 $\frac{\pi}{2}$ 보다 크면 WOP_{in} 은 R_{max} 보다 커지고 변침각이 $\frac{\pi}{2}$ 보다 작으면 R_{max} 보다 작아진다. 또한, 최대선회반경은 선박의 속도에 따라 변화되고 선박과 조타기의 시정수에 영향을 받으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$WOP_{in} = R_{max} + \alpha_1(\theta - \frac{\pi}{2}) + (\alpha_2 T_E + \alpha_3 T_1)V \quad (3.2)$$

여기서, R_{max} 는 $\delta_R = \frac{\pi}{6}$ 일 때의 최대선회반경, θ 는 변침각, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 선박모델에 따른 상수, T_E 와 T_1 은 조타기와 선박의 시정수, V 는 선박의 속도를 나타낸다.

또한, 선회운동을 마치고 직선운동으로 전환하기 위해서는 관성과 부가질량력 등을 고려할 때 WOP_2 가 아닌 WOP_{out} 에서 선회운동을 종료하고 직선운동의 회두각 유지제어를 통해 목표회두각에 추종하도록 유도하여야 한다. 본 논문에서는 목표 변침의 80%를 달성한 경우 직선운동으로 전환하도록 알고리즘을 작성하였다.

제 4 장 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션에 사용된 대상선박은 Cargo Ship으로 제원은 표 1과 같이 설정하였다.

표 4.1 Cargo Ship 제원표

선체길이 (L)	115 (m)	방형 계수 (C_B)	0.6
선 폭 (B)	16.4 (m)	최대 타각 (δ_{max})	30 (°)
평균흘수 (d)	3.3 (m)	조타기 시정수(T_E)	2.0 (sec)
트림량 (τ)	0 (m)	해수 평균밀도(ρ)	102.0 (Kgf/m ³)

모델에 대한 유체력 미계수와 질량 등의 모델 관련 계수와 추종 및 선회력 지수 등 조종관련 지수를 구한 후, 선박 동특성에 대한 Nomoto 모델의 Laplace 변환식을 구하면 다음과 같다.

$$i) \gamma - \delta \text{ 응답모델} \quad \frac{\gamma(s)}{\delta(s)} = \frac{3.08s + 0.176}{897s^2 + 124s + 1}$$

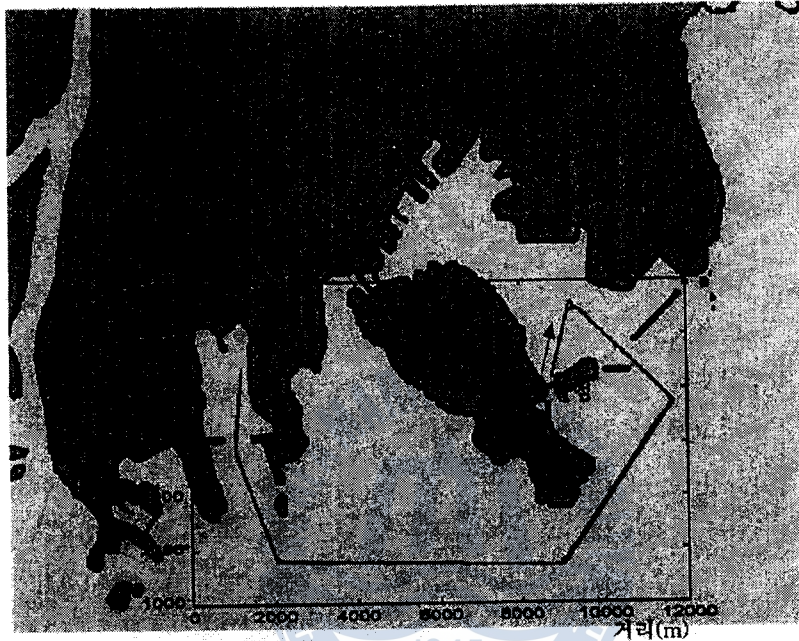
$$ii) \beta - \delta \text{ 응답모델} \quad \frac{\beta(s)}{\delta(s)} = \frac{0.37s + 0.07}{897s^2 + 124s + 1}$$

스텝조타시 정상 선회직경은 약 250(m)이고 이 때, 선박 선회운동의 WOP_{in} 은

$$WOP_{in} = 250 - \frac{125}{\pi}(\psi - \frac{\pi}{2})$$

가 된다. 배의 전진속도는 14(Knotts), 즉 약 6.0(m/s)로서 일정하다고 가정하였다.

조타제어기는 실선에서 보편적으로 사용되어온 비례-미분제어기를 사용하였으며, 비례이득 $K_p=0.9$, 미분이득 $K_d=25.0$ 로 두었고 자이로컴파스는 회두각속도를 적분함으로써 회두각을 측정하는 것으로 가정하였다. 또한, 수직편차의 허용범위는 50(m)로 설정하였다.



한국해양대학교 부두를 출발하여 부산 외항으로 나간 다음 감천항에 들어오는 항로에 7개의 변침점을 잡고 이를 기준으로 시뮬레이션을 실시한 결과, 최적항로를 따라 추종함을 확인함으로써 자동항로 추종알고리즘이 옳게 구성되었음을 확인할 수 있다.

제 4 장 결 론

본 논문에서는 설정된 항로를 자동으로 추종하기 위해 기존의 회두각 유지제어, 선회제어, 항로 추종제어를 통합하여 자동항로 추종알고리즘을 제안하였다. 제안된 자동항로 추종알고리즘은 우선순위 결정알고리즘과 조타명령 생성알고리즘의 두 부분으로 구성되었다. 우선순위 결정알고리즘은 정해진 최적항로상에서 회두각 유지제어, 선회제어, 항로 추종제어 중 선박의 항해 상황에 적합한 제어알고리즘을 결정하는 역할을 수행한다. 또한, 조타명령 생성알고리즘은 선박의 진입 및 진출방향, 최적항로와 선박의 현재 위치좌표를 고려하여 조타명령을 생성하는 역할을 수행한다.

항로 추종시 최적항로와 선박의 현재위치 사이의 오차를 직선항로와 선회항로 구간에 대하여

각각 수직편차 알고리즘을 통해 오차를 구하고, 이를 제거하도록 조타명령을 생성함으로써 선박이 정해진 오차범위에서 운항하도록 하는 알고리즘을 제안하여 보다 정교한 항로추종이 가능하도록 하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

본 논문에서는 자이로컴파스의 회두각만을 케환시켜 선박의 현재 위치를 구하도록 알고리즘을 구성하였다. 이는 항해시 조류나 파도 등에 의해 발생하는 자이로컴파스의 오차에 영향을 받을 가능성이 크다. 이 문제를 해결하는 하나의 방법으로 GPS를 이용하여 선박의 현재 위치를 파악함으로써 보다 정교한 알고리즘을 구성할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Thor I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [2] Thor I. Fossen, Svein I. Sagatun & Asgeir J. Sørensen, "Design of Dynamic Positioning System Using Model-Based Control," *Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Control Application in Marine Systems(CAMS '95)*, pp. 16 ~ 26, May 1995.
- [3] Thor I. Fossen & Kunt Eilif Husa, "Backstepping Designs for Nonlinear Way-Point Tracking of Ships," *The 4th IFAC Conference on maneuvering and Control of Marine Craft (MICMC'97)*.
- [4] Thor I. Fossen, Jann-Peter Strand & Asgeir J. Sørensen, "Modelling and Control of Thruster Assisted Position Mooring Systems for Ships," *Proceedings of 4th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft(MICMC'97), 1997*.
- [5] Thor I. Fossen & Åslaug Grøtven, "Nonlinear Output Feedback Control of Dynamically Positioned Ships Using Vectorial Observer Backstepping," *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, TCST 6(3): 439 - 441, MAY 1998.
- [6] Trygve Laudval & Thor I. Fossen, "A Globally Stable Adaptive Ship Autopilot With Wave Filter Using Only Yaw Angle Measurements," *Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Control Application in Marine Systems (CAMS '95)*, pp. 262 ~ 269, May 1995.
- [7] Trygve Laudval & Thor I. Fossen, "Nonlinear Rudder-Roll Damping of Non-Minimum Phase Ships Using Sliding Mode Control," *Proceedings of the European Control Conference*, 1997.
- [8] Trygve Laudval & Thor I. Fossen, "Robust Adaptive Ship Autopilot with Wave Filter and Integral Action," *To appear in the Special Issue on Marine Systems Control, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1998
- [9] 류길수, 김종화, 조석재, 박석주, "ONEMAN BRIDGE INFORMATION SYSTEM," 지역 컨소시엄 보고서, 부산중소기업청, 1996.
- [10] 손경호, *부유체 조종 제어론*, 한국해양대학교, 1995.

