

狹水道에서 操舵에 의한 新針路 進入操船에 關한 研究

安昌洙* · 尹点東**

A Study on the Maneuvering Characteristics of a Vessel Changing Course by Using Control Surface in a Narrow Channel

Abstract

This paper treats maneuvering characteristics of changing course of a vessel using her control surface in a narrow channel with strong current. The author made a mathematical model analyzing course changing maneuver of a vessel and calculated the values of maneuvering motions of a 100,000 G/T LNG vessel passing through Pudo channel in the way of Incheon harbour entrance.

A very large LNG sea terminal and sea berth had been constructed in the year of 1996 in Incheon outer harbour areas and LNG tankers of 100,000 gross tons have started entering Incheon harbour since October, 1996 carrying LNG through the Pudo channel, which was designed and constructed in the period of 1930 years for the passing of vessels around the size of 5,000 gross tons.

Therefore it was a utmost important thing to verify safe passing of the large LNG tankers with some methods of theoretical and mathematical models calculating the vessels maneuvering motions in the first part of 1996 year.

In this paper, the author proposed mathematical models of calculating maneuvering

* 한국해양대학교대학원 해사수송학과

** 한국해양대학교대학원 해사수송학과 교수

motions of the very large LNG tanker and calculated passing tracks of the vessel through the channel and compared the calculated results with those of maneuvering simulations by a desk-top simulator.

In general the motions with the calculated values and the simulated motions are very well coincided with each other.

記號說明

d	: 홀수
k	: $2d/L$
K	: 선회성지수
K'	: 무차원화된 선회성지수
L	: 선체길이 (L_{PP})
m	: 선체질량
m'	: 무차원화된 선체질량
m'_x	: 무차원화된 선수방향의 부가질량
m'_{xh}	: 천수에 있어서의 무차원화된 선수방향 부가질량
m'_y	: 무차원화된 정횡방향의 부가질량
m'_{yh}	: 천수에 있어서의 무차원화된 정횡방향 부가질량
N_δ	: 타각에 의한 모우먼트 미계수
N'_δ	: 무차원화된 모우먼트 미계수
$N'_{\delta h}$: 천수에 있어서의 무차원화된 미계수
N_r	: 각속도에 의한 1차항 저항 모우먼트 미계수
N'_r	: 무차원화된 미계수
N_{rr}	: 각속도의 2차항에 의한 저항모우먼트 미계수

- N'_v : 횡방향속도에 의한 모우먼트 미계수
 N'_{ih} : 천수에 있어서의 무차원화된 미계수
 n'_z : 수직축주위의 무차원화된 관성모우먼트
 r : 선회각속도
 \bar{r} : 무차원화된 선회각속도
 \dot{r} : 선회각가속도
 $\dot{\bar{r}}$: 무차원화된 선회각가속도
 S_T : 조타명령후 각속도가 생길 때까지 선박의 진출거리
 x_i : 선수방향진출거리
 y_i : 정횡방향진출거리
 t : 시간
 \bar{t} : 무차원화된 시간
 T : 무차원화된 추종성지수
 u : 선수방향선속
 v : 정횡방향선속
 Y_δ : 타각에 의한 횡방향힘의 미계수
 Y'_δ : 무차원화된 미계수
 Y_r : 각속도에 의한 횡방향 힘의 미계수
 Y'_r : 무차원화된 미계수
 Y_v : v 에 의한 횡방향 힘의 미계수
 Y'_v : 무차원화된 미계수
 Y'_{ih} : 천수에 있어서의 무차원화된 미계수
 δ : 타각
 σ : 침로안정성 판별식의 근

第1章 序論

우리는 오늘날 그 이전의 歷史에서는 볼 수 없었던 변혁과 도전이 소용돌이치는 격변의 사회속에서 삶을 영위하고 있다. 이러한 격변과 도전은 항만에서도 크게 일어나고 있으며 특히 선박을 항만에 출입항시키는 선박조종의 분야에서는 더욱 그러하다.

세계의 거의 모든 항구들은 수백년전 부터 그곳에 있었으며 수백톤 내지 수천톤 크기의 선박들이 오랜동안 출입하고 있었고 세계 제 2차 대전 직후만 하더라도 상선으로서 제일 크다는 선박이 G/T 1만톤급 선박이었다. 그러나 오늘날은 똑같은 항구에 수십만톤의 VLCC가 출입하는 곳이 많다. 물론 항만의 수심이 준설되고 부두가 대폭으로 개조 내지는 신설된 것은 사실이지만 항만의 기본적인 지형이나 해상(海象)이 근본적으로 바뀐곳은 드물다. 정도의 차이는 있지만 세계 도처의 항구에서 출입항하는 선박이 커졌기 때문에 항만이 상대적으로 좁아져서 여러 가지 어려운 문제들이 발생하고 있고 그중에서도 특히 선박의 조종이 문제되고 있는 것이다.

우리나라에서도 동해항에서부터 인천항까지 이러한 선박 출입항의 문제가 생기지 않는 항구는 하나도 없다.

특히 1996년에 길고 굴곡이 심하며 협소한 수도를 통과 하여야 입항이 가능한 인천항에 대형 LNG 基地와 10만 G/T의 LNG VLCC가 접안할 sea berth가 건설되었고, 여기에 G/T 10만톤이나 되는 대형 LNG선이 출입하면서 부터는 협수도에서의 操舵操船에 관한 이론적인 연구의 필요성이 더욱 절실하여 졌다.

이 연구의 목적은 제약된 환경조건하에서 예선의 도움없이 어떻게 하면 대형선박이 자력으로 굴곡이 심한 항로에서 정확하게 예정된 침로를 따라서 新針路에 들어 갈 수 있는가를 이론 및 실무적으로 연구 규명하는데 있다.

1950년대 이후 操舵에 의한 선박의 조종에 관한 문제는 일본이나 구미 등의 세계 선진해운국에서 연구가 활발하게 이루어져 왔고 오늘날은 이러한 문제에 관한 연구가 거의 완성된 단계에 있지만 그것은 어디까지나 선박을 건조하는 과정에서 어떻게 하면 보다 좋은 조종성능을 갖는 선박을 건조할 것인가 하는 造船的인 관점에서 이루어진 것이었고 이미 건조된 선박을 어떻게 하면 안전하게 조종하여 해상교통의 안전을 확보할 수 있는가 하는 操船的인 연구는 아니었다.

이 논문에서는 어떻게 操舵하면 협소한 수도에서 대형선박을 정확하게 신침로에 진입시킬수 있는가 하는 것을 이론적인 수식으로 정립하고, 인천항 입항수로에 있는 부도수도를 택하여 10만 G/T선박의 수도 통과 조선에 관하여 조종동작 및 궤적을 수치계산하였으며, 안전항과를 위하여 받을 수 있는 조석류의 한계속도도 계산하였다.

10만 G/T의 LNG선박에 대한 대략의 조종운동미계수를 산출하고 이 선박의 부도통항 조선을 desk-top simulator에 의하여 simulation하였으며 계산결과와 simulation 결과를 비교 검토한 결과 큰 태두리에서 양자는 일치 하였으며 연구결과가 실제의 조선에 훌륭하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과는 협수도 통과 조선에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

第 2 章 操舵操船에 관한 理論式의 定立

2. 1 船舶의 操縱運動方程式 및 針路安定性 判別式

정온한 海面에서 船舶이 運動할 때 surge, sway 및 yaw를 표시하는 運動方程式은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X \\ m(\dot{v} + ur) &= Y \\ I_z \dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.1)$$

그러나 操舵操船運動의 대강을 파악하기 위하여서는 (2.1)식의 sway와 yaw운동 방정식에서 非線形項을 버리고 線形項만으로 方程式을 만들어 數式을 풀이 하여도 선체 운동에 관한 充分한 結果를 얻을 수 있고^{1), 4), 5), 6), 7), 15)} 방정식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} m'_y \dot{v}' - (Y'_r - m')r' - Y'_v v' &= Y'_\delta \delta \dots\dots\dots ① \\ n'_z \dot{r}' - N'_r r' - N'_v v' &= N'_\delta \delta \dots\dots\dots ② \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.2)$$

(2.2) 식의 ②에서 v' , \dot{v}' 항을 계산하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} v' &= \frac{1}{N_v} (n'_z \dot{r}' - N_r \dot{r}' - N_\delta \delta) \\ v' &= \frac{1}{N_v} (n'_z \ddot{r}' - N_r \dot{r}' - N_\delta \dot{\delta}') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.3)$$

(2.2)식의 ①에 (2.3)식을 代入하여 수식을 처리하면 (2.4)식과 같은 操縱 운동 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{m'_y n'_z}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)} \ddot{r}' + \frac{-(m'_y N_r + Y'_v n'_z)}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)} \dot{r}' + r' \\ &= \frac{N_v Y_\delta - Y'_v N_\delta}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)} \delta + \frac{m'_y N_\delta}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)} \dot{\delta}' \\ T_1 T_2 \ddot{r}' + (T_1 + T_2) \dot{r}' + r' &= K \delta + K T_3 \dot{\delta}' \dots\dots\dots(2.4) \end{aligned}$$

단,

$$T_1 + T_2 = \frac{-(m'_y N_r + n'_z Y'_v)}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)}$$

$$T_1 T_2 = \frac{m'_y n'_z}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)}$$

$$T_3 = \frac{m'_y N_\delta}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)}$$

$$K = \frac{N_v Y_\delta - Y'_v N_\delta}{Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)} = \frac{\dot{r}'_s}{\delta}$$

舵角 $\delta = 0$ 인 때에는 (2.4)식의 우변이 zero가 되므로 (2.4)식은 다음과 같이 처리할 수 있다.

$$(m'_y n'_z) \ddot{r}' + [m'_y (-N_r) + n'_z (-Y'_v)] \dot{r}' + [Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)] r' = 0$$

$$\{(m'_y n'_z) \sigma^2 + [m'_y (-N_r) + n'_z (-Y'_v)] \sigma + [Y'_v N_r + N_v (m' - Y_r)]\} r' = 0$$

위의 수식에서 침로 안정성에 관한 判別式을 만들면 다음과 같다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots\dots\dots(2.5)$$

침로안정조건 : $\sigma < 0$

즉, $A > 0, B > 0, C > 0$ 이다.

$A = m'_1 n'_2 > 0$ 항상 成立한다.

$B = m'_1(-N_r) + n'_2(-Y_r) > 0$ 항상 成立한다.

$C = |Y_r| |N_r| + (m'_1 - Y_r)N_r \geq 0$ (N_r 의 크기에 따라서 좌우된다).

定舵角을 줄때는

$\dot{r} \approx 0$ 및 $K' T_2 \delta' \approx 0$ 으로 되므로 (2.4)식은 다음과 같이 된다.

$$(T_1 + T_2) \dot{r} + r = K' \delta$$

$T_1 + T_2 \approx T_1 = T$ 로 하면,

$T \dot{r} + r = K' \delta$ 로 되고 이 方程式을 풀면 操舵와 旋回角速度에 관한 解를 얻을 수 있다.³⁾

$$r(t) = K' \delta (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \dots\dots\dots(2.6)$$

2. 2 一定角度變針할때의 狀態分析

일정각도 ϕ_d 를 변침할 때 타각 $\delta = \delta_1$ 을 주어서 변침을 한다고 하면 optimum rudder action은 그림 2.1과 같다.

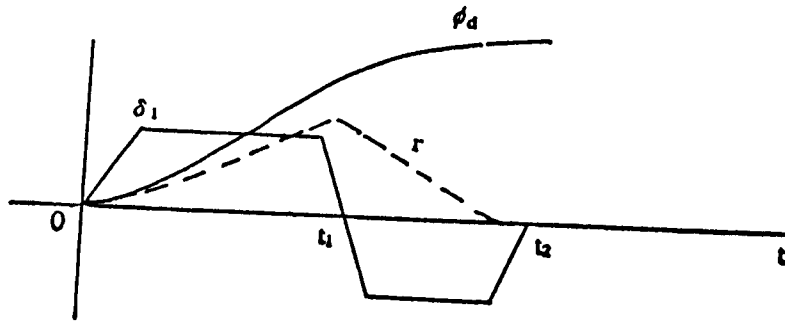


그림 2.1 optimum rudder action

그러나 타각을 주는 시간은 극히 짧은 시간이므로 이것을 무시하면 그림 2.2와 같고 角速度에 관한 수식은 (2.7)과 같다.

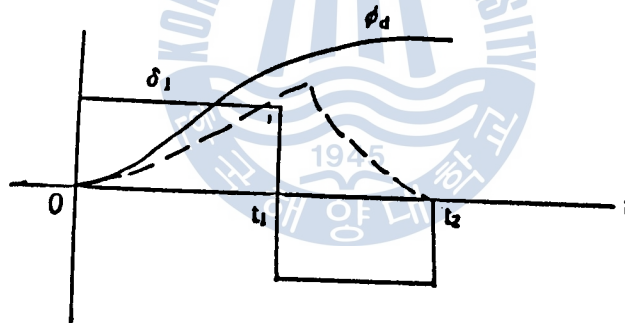


그림 2.2 조타시간을 무시한 rudder action

$$r'(t) = r'_1(t) + r'_2(t)$$

$$r'_1(t) = K \delta (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$t = 0 \sim t_1$$

$$r'_2(t) = K \delta_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T}}) - K \delta_1 (1 - e^{-\frac{t-t_1}{T}}) \dots \dots \dots (2.7)$$

그러나 $t = 0 \sim t_2$ 까지 일관성을 두기 위하여 그림 2.3과 같이 생각한다.

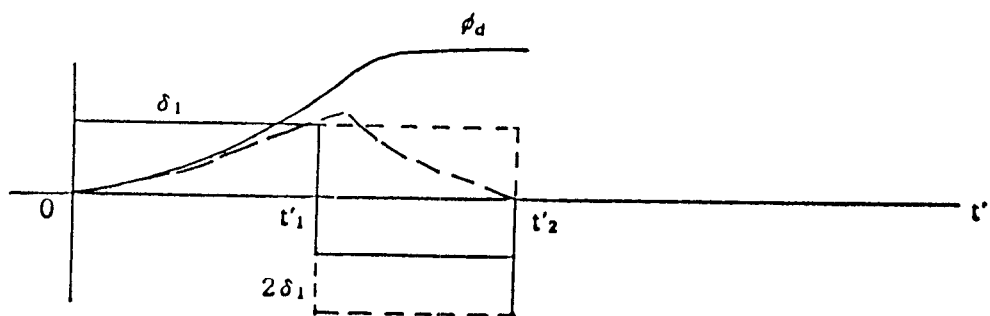


그림 2.3 $K' \delta_1 - 2K' \delta_1 = -K' \delta_1$

그러므로 (2.7)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r'(t) = K' \delta_1 (1 - e^{-\frac{t}{T}}) - 2K' \delta_1 (1 - e^{-\frac{(t-t_1)}{T}}) \dots \dots \dots (2.8)$$

操船操船이 즉, 變針이 完了 되었을 때의 條件을 식 (2.8)에 넣으면 다음과 같다.

條件(1)

$$t = t_2 \text{ 때 } r'(t_2) = 0$$

$$r'(t_2) = K' \delta_1 (1 - e^{-\frac{t_2}{T}}) - 2K' \delta_1 (1 - e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}})$$

$$= -K' \delta_1 [1 + e^{-\frac{t_2}{T}} - 2e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}}] = 0$$

$$\therefore 1 + e^{-\frac{t_2}{T}} - 2e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}} = 0$$

條件(2)

$$t = t_2 \text{ 일때 } \phi(t_2) = \phi_d$$

$\phi(t)$ 에 대한 계산은 다음과 같다.

$$\phi(t_2) = K' \delta_1 \int_0^{t_2} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) dt - 2K' \delta_1 \int_0^{t_2} [1 - e^{-\frac{(t-t_1)}{T}}] dt$$

$$\phi(t) = \int r'(t) dt + c \quad (c \text{는 초기조건에서 zero이다})$$

$$\phi_d = K \delta_1 [t - T + T e^{-\frac{t}{T}}]_0^{t_2} - 2K \delta_1 [t - T + T e^{-\frac{(t+t_1)}{T}}]_{t_1}^{t_2}$$

$$= K \delta_1 (t_2 - T + T e^{-\frac{t_2}{T}})$$

$$- 2K \delta_1 [t_2 - T + T e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}} - t_1 + T - T e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}}]$$

$$\phi_d = K \delta_1 [(2t_1 - t_2) + T (e^{-\frac{t_2}{T}} - 2e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}} + 1)]$$

그러므로 다음의 條件이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} e^{-\frac{t_2}{T}} - 2e^{-\frac{(t_2-t_1)}{T}} + 1 &= 0 \dots\dots\dots \text{條件①} \\ \phi_d &= K \delta_1 (2t_1 - t_2) \dots\dots\dots \text{條件②} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.9)$$

식(2.9)에서 t_1 및 t_2 를 구할 수 있고 操舵操船 問題를 解決할 수 있다.

第3章 100,000 G/T LNG 船舶의 微係數推定

3. 1 船舶의 主要目

Disp. : 120,194 톤

Lpp×B×T : 290×46.8×12 (m^3)

B/T : 3.9

L/B : 6.2

C_B : 0.72

Rudder area ratio = $1/60 = \frac{290 \times 12}{60} = 58m^2$

Speed : 20 kt (인천항 항로 내에서는 12 kt로 제한)

3. 2 質量과 관계되는 無次元化數⁶⁾

$$m' = 120,194 / \frac{1}{2} \rho l^2 d = 0.232 \text{ (단 } d : \text{ 흘수)}$$

$$m'_{\text{v}} = 1.75 \times 0.232 = 0.407$$

$$n'_{\text{z}} = 0.029$$

3. 3 微係數計算

3. 3. 1 深水에서 Bare hull에 대한 微係數^{12), 13), 15)}

$$Y_r = -\frac{1}{2} \pi k - 1.4 C_B B/L = -0.293$$

$$Y_{\text{r}} = \frac{\pi}{4} k = 0.065$$

$$N_r = -k = -0.083$$

$$N_{\text{r}} = -0.54k + k^2 = -0.038$$

$$A=0.012, \quad B=0.024, \quad C=-0.003$$

$$\sigma_1 = 0.12, \quad \sigma_2 = -2.12$$

이 LNG선은 Bare hull 만으로는 침로 불안정 선박인데 그 원인은 L/B가 거의 6정도로 작은 값에 기인한다고 생각 된다.

3. 3. 2 淺水에 대한 Bare hull의 微係數 (h=1.25T)^{12), 13)}

천수에 관한 미계수는 침수미계수에 수정계수를 곱하여 구할 수 있다.

$$m' = 0.232$$

$$m'_{\text{vh}} = 4 \times m' = 0.928$$

$$n'_{zh} = 1.66 \times n'_z = 0.048$$

$$Y'_{vh} = 4.54 \times Y'_v = -1.330$$

$$Y'_{rh} = 1.5 \times Y'_r = 0.098$$

$$N'_{vh} = 5 \times N'_v = -0.415$$

$$N'_{rh} = 3.2 \times N'_r = -0.123$$

$$A=0.045, \quad B=0.178, \quad C=0.108$$

$$\sigma_1 = -0.75, \quad \sigma_2 = -3.2, \quad T = 1.3$$

3. 3. 3 推進機와 Rudder가 부착된 상태에서 深水에서의 微係數¹⁵⁾

위의 微係數는 船體에 screw propeller 와 舵板이 있는 상태로 수정되어야 한다.

이러한 수정을 하여 주기 위하여서는 비슷한 船體에 관한 bare hull만의 경우와 추진기와 타판이 부착된 경우의 수치를 찾아서 그것들을 비교하는 방법으로 수정계수를 찾을 수 있다.¹⁵⁾

Model No.	Model No.	미계수비
8,1,1	8,0,0	완전선의 미계수/bare hull 미계수
$Y'_v = -0.335$	-0.309	1.1
$Y'_r = 0.089$	0.064	1.4
$N'_v = -0.095$	-0.121	0.8
$N'_r = -0.077$	-0.064	1.2

8,1,1 model은 (추진기+타)를 표시하고 8,0,0은 bare hull을 표시한다.

bare hull 만의 미계수에 의한 판별식의 근의 값은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = +0.005, \quad \sigma_2 = -0.33 \text{ (bare hull만으로는 } \sigma_1 \text{이 양(+))으로 됨에 유의할 것.}$$

推進機와 舵板이 부착된 LNG 船의 深水중 微係數

$$m' = 0.232, \quad m'_y = 0.407, \quad n'_z = 0.029$$

$$Y'_v = -0.293 \times 1.1 = -0.322$$

$$Y_r = 0.065 \times 1.4 = 0.091$$

$$N_v = -0.083 \times 0.8 = -0.066$$

$$N_r = -0.038 \times 1.2 = -0.046$$

$$A=0.012, \quad B=0.028, \quad C=0.006$$

$$\sigma_1 = -0.24, \quad \sigma_2 = -2.09, \quad T = 4.2 \quad ^{15)}$$

위의 값은 LNG선이 deep sea에서 갖는 선체의 조종운동 특성을 나타내는 미계수들이다. 항만, 협수도 등의 천수역에서의 선박 조종운동에서는 천수에 관한 미계수를 얻어서 이것을 운동계산에 이용하여야 한다.

3. 3. 4 淺水에 있어서의 微係數^{11), 13)}

천수(h=1.25T)에 대한 미계수 수정

$$m'_{xh} = m' \times 1.3 = 0.302$$

$$m'_{yh} = m' \times 4 = 0.928$$

$$n'_{zh} = n'_z \times 1.66 = 0.048$$

$$Y'_{vh} = Y'_v \times 4.54 = -1.462$$

$$Y'_{rh} = Y'_r \times 1.5 = 0.137$$

$$N'_{vh} = N'_v \times 5 = -0.330$$

$$N'_{rh} = N'_r \times 3.2 = -0.147$$

$$A=0.045, \quad B=0.207, \quad C=0.160$$

$$\sigma_1 = -0.98, \quad \sigma_2 = -3.62, \quad T = 1.02 \quad ^{15)}$$

Y_δ 및 N_δ 값 계산 (심수)^{2), 3)}

$$\text{Rudder force} = 2.2 \times \frac{1}{2} \rho A u^2 \sin \delta \cos \delta$$

$$= 1.1\phi 58 \times 36 \times \frac{1}{2} \sin 2\delta$$

$$= 1.1\phi 58 \times 36 \times \delta \quad (\sin 2\delta \simeq 2\delta)$$

단, $\rho = 0.015$, $A = 58m^2$, $u = 6m/sec$

$$Y_{\delta} \delta = 2297 \rho \delta$$

$$Y'_{\delta} = \frac{2297 \rho}{\frac{1}{2} \rho l u^2} = +0.037 \text{ (십수)}$$

Rudder moment

$$N_{\delta} \delta = -2.2 \times \frac{1}{2} \rho A u^2 \sin \delta \cos \delta \times \frac{l}{2}$$

$$\simeq -2297 \rho \delta \times \frac{l}{2}$$

$$N'_{\delta} = \frac{-2297 \rho \delta \times \frac{l}{2}}{\frac{1}{2} \rho l^2 u^2} = -0.018 \text{ (십수)}$$

위의 값들은 앞으로의 조종운동계산의 기초가 된다.

$$Y_{\delta h} = 0.074$$

$$N_{\delta h} = -0.036$$

K'의 값의 계산

$$K'(\text{십수}) = \frac{N_v Y'_{\delta} - Y'_v N'_{\delta}}{Y'_v N_r + N'_v (m' - Y'_r)} = -1.50$$

$$K = -0.030/sec, \quad K\delta = 0.03 \times 15^\circ = 0.46^\circ/sec$$

$$K'(\text{천수}) = -0.83$$

$$K = -0.017/sec, \quad K\delta = 0.26^\circ/sec$$

3. 4 微係數計算 結果에 대한 檢證²⁾

위의 미계수는 100,000 G/T LNG선의 주요목에 의하여 추정 계산한 값이므로 유체 역학적인 기초위에서 만들어지는 일반 선체운동의 계산식에 의하여 이것을 검증할 필요가 있고 그 계산 결과의 비교는 다음과 같다.

$$n_z r = N_{\delta} \delta - N_{rr} r^2 \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{1}{n_z} (N_\delta \delta - N_{rr} r^2) \\ \frac{dt}{dr} &= \frac{n_z}{N_\delta \delta - N_{rr} r^2} \\ dt &= \frac{n_z}{N_{rr}} \frac{dr}{\left(\sqrt{\frac{N_\delta \delta}{N_{rr}}}\right)^2 - r^2} \\ t &= \alpha \int \frac{dr}{\left(\sqrt{\frac{N_\delta \delta}{N_{rr}}}\right)^2 - r^2} = \alpha \frac{1}{2\sqrt{\frac{N_\delta \delta}{N_{rr}}}} \log \frac{\sqrt{\frac{N_\delta \delta}{N_{rr}}} + r}{\sqrt{\frac{N_\delta \delta}{N_{rr}}} - r} \\ t &= \frac{\alpha}{2\beta} \log \frac{(\beta + r)}{(\beta - r)} \quad \text{단, } \alpha = \frac{n_z}{N_{rr}}, \beta = \sqrt{\frac{N_\delta \delta}{N_{rr}}} \\ r(t) &= \beta \left(\frac{e^{\frac{2\beta}{\alpha} t} - 1}{e^{\frac{2\beta}{\alpha} t} + 1} \right) \dots \dots \dots (3.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_z &= 2m \times (0.24l)^2 = 2 \times \rho C_B l B d \times (0.24l)^2 \\ &= 0.083 \rho l^3 B a (\text{침수}) \end{aligned}$$

$$\text{단, } \rho = \frac{1025}{1000} \times \frac{1}{9.8} = 0.105$$

$$\begin{aligned} N_\delta \delta &= 2 \times 2.2 \times \frac{1}{2} \rho A u^2 \sin \delta \cos \delta \times \frac{l}{2} \\ &= 2452 \rho \sin \delta \cos \delta \times l = 1226 \rho l \times 2 \delta \\ &= 2452 \rho l \delta = 642 \rho l (\text{침수}) \quad \text{단, } \delta = 15^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{rr} r^2 &= -4 \times \left[\frac{1}{64} \rho d l^4 r^2 + 22 \times 10^{-4} \rho (B + 2d) l^4 \right] r^2 \\ &= -0.1144 \rho d l^4 r^2 (\text{침수}) \end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{n_z}{N_{rr}} = \frac{2 \times 0.083 \rho l^3 d B}{0.1144 \rho d l^4} = 1.45 \frac{B}{l}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{N_{\delta} \delta}{N_{rr}}} = \sqrt{\frac{642 \rho l}{0.1144 l^3 d \rho}} = \sqrt{\frac{5612}{l^3 d}} = 0.0044$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0.0044$$

$$r(t) = 0.0044 \times 57.3 = 0.25^\circ/\text{sec}$$

타각 15°를 사용할 때 추정 계산한 미계수를 이용한 각속도는 $r_s = 0.26^\circ/\text{sec}$ 인데
검증을 위한 계산 방법에 의한 그것은 0.25°/sec이다. 따라서 본 연구에서 추정된 미
계수들은 조종운동계산에서 충분히 이용 가능함을 알 수 있다.

第4章 100,000 G/T LNG 船舶의 부도水道 通航 操船에 대한 數值計算

港內, 港界부근 또는 좁은 수도에서 操船할 때는 舵角使用은 原則적으로 15°로 制限
하는 것이 좋다.^{2), 3), 8), 9), 12), 14)}

4. 1 바람이나 潮汐流가 없을 때의 操縱運動計算

부도전방에서 침로 030°에서 052° 침로로 변침시의 運動

$$\left. \begin{aligned} \phi_d &= K' \delta_1 (2t_1 - t_2) \\ e^{-\frac{t_2}{T}} - 2e^{-\frac{(t_2 - t_1)}{T}} + 1 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$22^\circ/57.3 = -0.8(-15^\circ/57.3)(2t_1 - t_2)$$

$$2t_1 - t_2 = 1.83$$

$$t_2 = 2t_1 - 1.83$$

$$e^{-\frac{(2t_1-1.83)}{1.02}} - 2e^{-\frac{(t_1-1.83)}{1.02}} + 1 = 0$$

$$6.23e^{-\frac{2t_1}{1.02}} - 2 \times 6.23e^{-\frac{t_1}{1.02}} + 1 = 0$$

$$e^{-\frac{t_1}{1.02}} = 1.92 \text{ or } 0.08$$

$$-\frac{t_1}{1.02} = 0.65 \text{ or } -2.53$$

$$t_1 > 0 \therefore t_1 = 2.58$$

$$2.58 \times 290 = 748m$$

$$t_2 = 2 \times 2.58 - 1.83 = 3.33$$

$$3.33 \times 290 = 966m$$

$$T = 1.02$$

$$S_T = 1.02 \times 290 = 296m$$

$$T = 296 \div 6 = 49 \text{ 초}$$

4. 2 강한 潮汐流가 있을 때의 操縱運動計算

부도전방 변침점에서의 문제점은 다음과 같다.

부도등대 접근 co.는 030° 이고 조류의 방향은 045° 이다. 따라서 선수미선은 조류방향과 port quarter에서 15° 의 각도를 이루게 되고 해도에 나와있는 최대 유속은 $5.1kt = 2.62m/sec$ 이다. 이 조류는 그림 4.1에서 보듯이 좌현회두를 일으키기 때문에 침로를 유지하기 위하여 대응타는 우현으로 주어야 한다.

이때 주어야 할 대응타각을 계산하여 보면 다음과 같다.

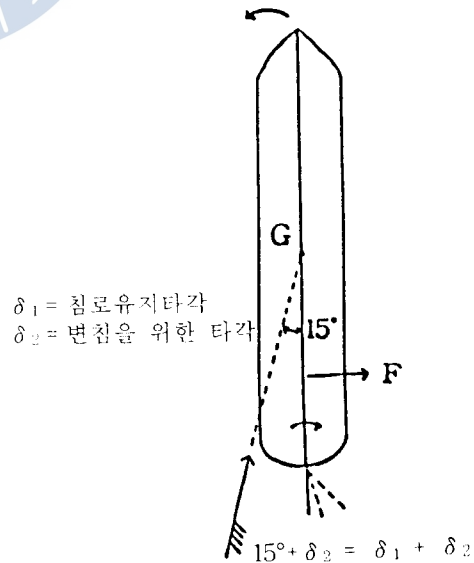


그림 4.1

변침시의 타각 = $\delta_1 + \delta_2$

(1) 대응타각계산

① 선속 $12kt = 6.17m/sec$ (해상교통안전법의 제한속도)유속 $5.1kt = 2.62m/sec$

$$2 \times 2.2 \times \frac{1}{2} \rho_w A u^2 \sin \delta \cos \delta \times \frac{l}{2}$$

$$= 0.5 \times \frac{1}{2} \rho_w \times 2.62^2 l \times d \times 0.2l \quad (\text{Y force를 구한 후 lever를 곱하였다.})$$

$$2297 \sin 2\delta = 2389$$

$$\sin 2\delta \neq 1.4$$

즉, δ 없음

대응타각이 없으므로 操船不可能이다.

② 선속 $12kt = 6.17m/sec$ 유속 $4kt = 2.06m/sec$

$$2 \times 2.2 \times \frac{1}{2} \rho_w A u^2 \sin 2\delta \times \frac{l}{4}$$

$$= 0.5 \times \frac{1}{2} \rho_w \times 2.06^2 \times l^2 \times T \times 0.2$$

$$2 \times 2.2 \times 58(6.17 - 2.06 \cos 20^\circ)^2 \times 0.25 \sin 2\delta$$

$$= 1144 \sin 2\delta \text{ ton} \cdot \text{m}$$

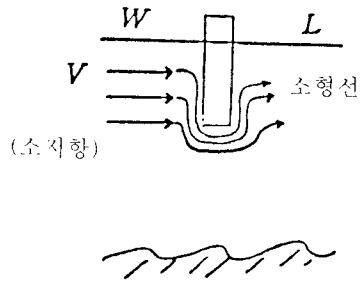
$$0.5 \times 2.06^2 \times 290 \times 12 \times 0.2 = 1477 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

$$\sin 2\delta \neq 1.3$$

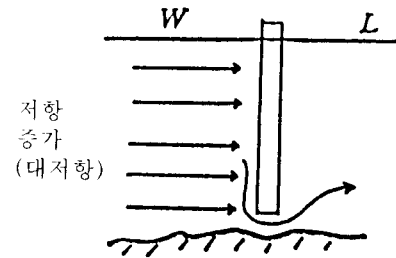
따라서 操船不可能하다.

이렇게 操船不可能으로 나오는 理由は VLCC는 shallow water effect 가 크게 작용하기 때문이다. 예를 들면 길이 100m, draft 4m인 소형선박에 똑같은 유속 4kt를 넣고 계산하여 보면 조류에 대한 대응타각은 不過 $5^\circ \sim 6^\circ$ 정도 밖에 되지 아니한다.

※그림 4.2를 보면서 생각하면 쉽게 이해할 수 있다.



(a) 심수에서의 유체 흐름



(b) 천수에서의 유체 흐름

그림 4.2

(2) 적절한 대응타각과 한계유속에 대한 계산

협수로, 항계부근 또는 항내에서 선박 조종시 대응타각의 사용은 15° 정도로 제한 되어야 한다. 왜냐하면 15° 이상의 대각도 대응타각의 사용은 다음 조종동작을 적절하게 취할 수 없게 하기 때문에 곧 위험을 초래할 수 있다.

$$2 \times 2.2 \times \frac{1}{2} \rho_w A (6.17 - x)^2 \sin 15^\circ \cos 15^\circ \times \frac{l}{2}$$

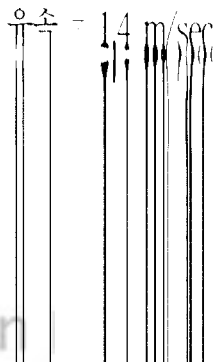
$$= 0.5 \times \frac{1}{\rho_w} x^2 l \times d \times 0.2l (= Y_w \text{ Force} \times \text{lever})$$

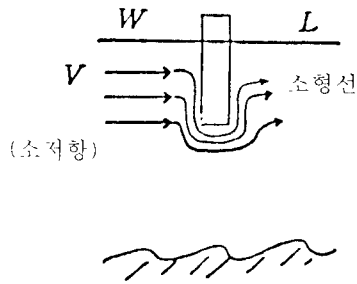
$$31.9(6.17 - x)^2 = 348x^2$$

$$316x^2 + 392x - 1215 = 0$$

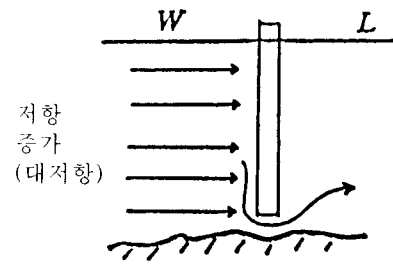
$$x = 1.4 \text{ or } -2.7$$

단. $\cos 15^\circ \approx 1$





(a) 심수에서의 유체 흐름



(b) 천수에서의 유체 흐름

그림 4.2

(2) 적절한 대응타각과 한계유속에 대한 계산

협수로, 항계부근 또는 항내에서 선박 조종시 대응타각의 사용은 15° 정도로 제한 되어야 한다. 왜냐하면 15° 이상의 대각도 대응타각의 사용은 다음 조종동작을 적절하게 취할 수 없게 하기 때문에 곧 위험을 초래할 수 있다.

$$2 \times 2.2 \times \frac{1}{2} \rho_w A (6.17 - x)^2 \sin 15^\circ \cos 15^\circ \times \frac{l}{2}$$

$$= 0.5 \times \frac{1}{\rho_w} x^2 l \times d \times 0.2l (= Y_w \text{ Force} \times \text{lever})$$

$$31.9(6.17 - x)^2 = 348x^2$$

$$316x^2 + 392x - 1215 = 0$$

$$x = 1.4 \text{ or } -2.7$$

단, $\cos 15^\circ \approx 1$

유속 = 1.4 m/sec

1.4 m/sec = 2.8 kt

한계유속 = 2.8kt

따라서 15°의 舵角을 주면서 course steady가 될 수 있는 最大流速은 2.8kt이다.

이 이상의 유속에서는 침로 불안정이 되어서 操船에 위험이 따른다.

(3) 부도전방 변침과정에서의 문제점

100,000 G/T LNG선박이 부도전방의 co. 030°에서 co. 052°로 변침하기 위하여 15°의 타각을 사용할 때 선박은 거리로는 $1.02 \times 290 = 296\text{m}$ 진행후, 시간으로는 $296 \div 6.17 = 48\text{초}$ 경과후에 각속도 $0.26^\circ/\text{sec}$ 로 turning할 것이다. 그러나 타를 잡는 시간과 유속이 있기 때문에 실제의 진행거리는 $(6+48) \times (6.17+1.4) = 463\text{m}$ 진행후 본격적인 선회가 이루어질 것이다. 그리고 변침이 완성되려면 그 이후에 적어도 $22 \div 0.26 = 85\text{초}$ 가 경과되어야 한다. 따라서 변침시작으로부터 변침이 완성될 때까지 요하는 총시간은 다음과 같다.

$$t = \frac{1}{2}(\text{타각을 주는데 요하는 시간}) + T + \phi_d / 0.26$$

$$= 6+48+85=139=2\text{분 } 19\text{초, 진행거리}=139 \times 6.2=862\text{m}$$

그리고 변침시에는 course 유지에 필요한 대응타각 15°와 변침에 필요한 타각 15°를 합하여 st'd 30°정도 내외의 舵角을 선미방향에서 조류가 올 때까지 유지하고 있어야 한다.

그리고 조류가 우현선미방향에서 오기전에 舵角을 反對로 주어야 한다.

부도 부근의 협수로 수심에서 draft 12m의 10만톤 LNG 탱커가 통과 할 수 있는 수로폭은 대략 2~3 cable의 폭 즉, 370~555m (chart가 확실치 않음) 밖에 되지 아니한다. 이러한 위험수로에서 30°정도의 대타각을 장시간 사용하면서 급히 반대의 대응타각을 주어야 한다는 것은 큰 위험을 초래할 수 있다. 따라서 이 수역에서 조류는 2kt 정도로 제한하는 것이 LNG선의 안전 운항상 절대로 필요하다고 보아진다. 2kt의 조류를 좌현선미 방향에서 15°각도에서 받고 항해할 시의 대응타각은 대략 다음과 같다.

$$2 \times 2.2 \times \frac{1}{2} \rho A u^2 \sin \delta \cos \delta \times \frac{l}{2}$$

$$= 0.5 \times \frac{1}{2} \rho \times 1^2 \times 290 \times 12 \times 0.2 \times l$$

$$1595 \sin 2\delta = 368$$

$$\sin 2\delta = 0.2307$$

$$2\delta = 13.3^\circ, \delta = 7^\circ$$

이 정도의 타각이라면 큰 위험없이 안전조선이 가능하다고 보아지지만 이 수역은 대단히 협소하므로 안전상 좋지는 않다. 따라서 앞으로 부도수도의 동쪽에 있는 해역을 새로운 항로로 당연히 개발하여야 할 것이다.

4. 3 부도전방 변침시의 船舶軌跡計算

$$\begin{aligned} r(t) &= K\delta(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \\ &= 0.0173 \times 15(1 - e^{-\frac{t}{48}}) \end{aligned}$$

단, $T = 1.02$, $l = 290$, $u_0 = 6.2m/sec$, $r_s = 0.26^\circ/sec$

$$\begin{aligned} \phi(t) &= K\delta \int (1 - e^{-\frac{t}{T}}) dt \\ &= K\delta (1 - T + Te^{-\frac{t}{T}}) \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{i=0}^{130} u_0 \cos \phi_i \\ y_i &= \sum_{i=0}^{130} u_0 \sin \phi_i \end{aligned}$$

단, K : 선회성지수

T : 추종성지수

표 4. 1 궤적계산

t 시간(초)	r 각속도(도/초)	ϕ 변침량	x 선수방향이동 거리	y 정횡방향이동 거리	x_c 2.8kt 조류 감안이동량	y_c 2.8kt 조류 감안이동량
10	0.05°/초	0.25°	62m	0.3m	67m	0.7
20	0.09	0.95	124	1.3	139	2.1
30	0.12	2.00	186	3.5	201	4.7
40	0.15	3.34	248	6.1	263	7.7
50	0.17	4.91	310	11.4	326	13.4
60	0.19	6.68	372	18.6	387	21.0
70	0.20	8.61	433	27.9	448	30.7
80	0.21	10.66	494	39.3	509	43.3
90	0.22	12.81	554	53.0	569	59.0
100	0.23	15.04	614	69.1	629	72.0
110	0.23	17.35	673	87.6	688	91.0
120	0.24	19.71	731	108.5	746	111.0
130	0.24	22.11	788	131.8	803	135.0

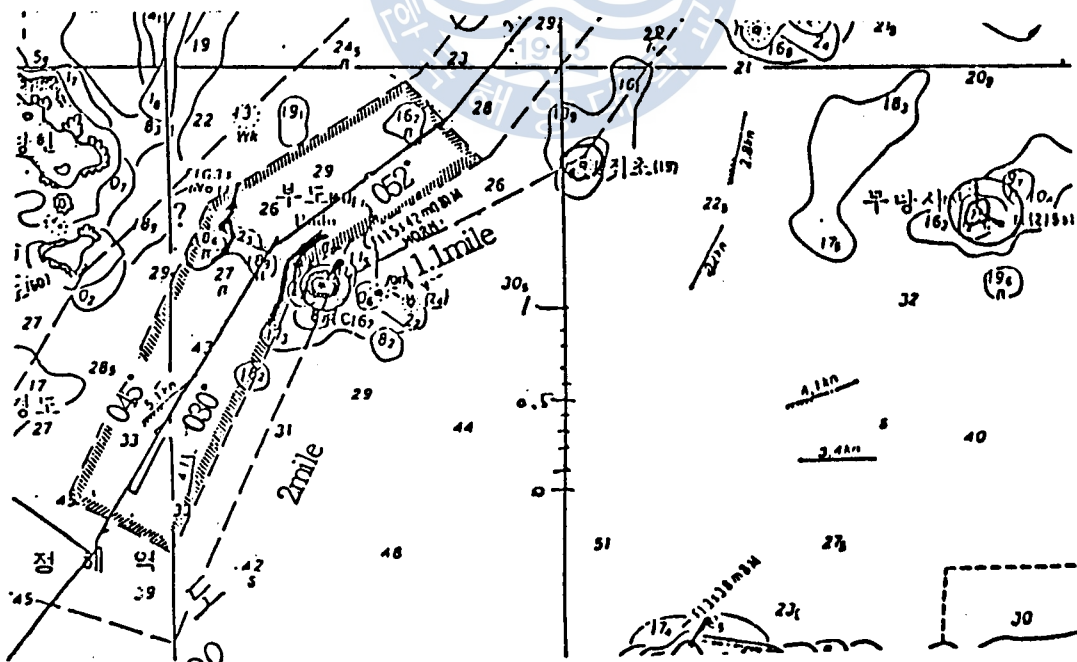


그림 4. 3 부도 협수도

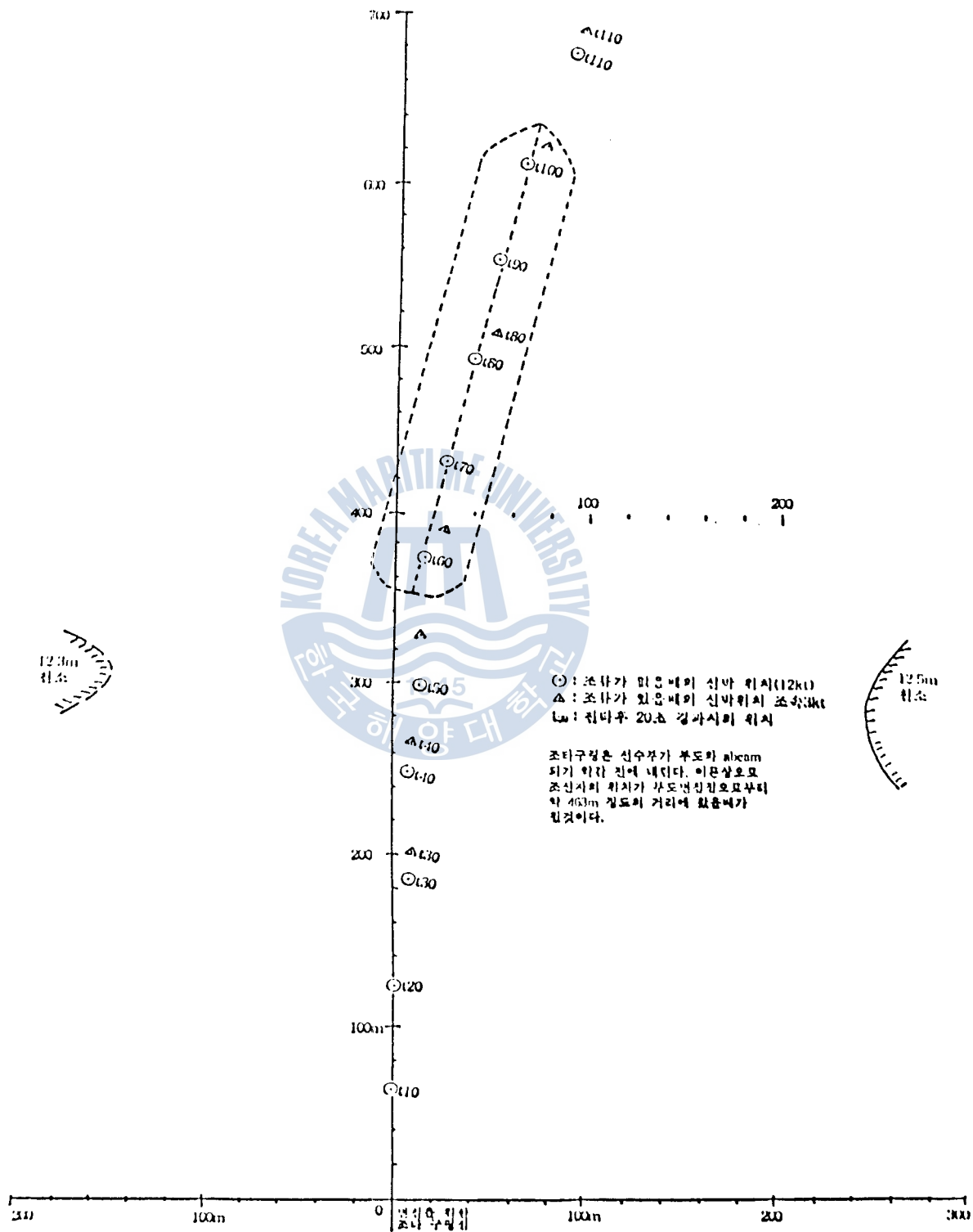


그림 4.4 100,000 G/T LNG 선박의 부도 통과 궤적도

第5章 結論

이상의 操舵操船에 의한 變針動作에 關한 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 특정 船舶의 개략적인 操縱性指數로부터 협수로에서 操舵에 의한 船舶의 變針運動 軌跡을 推定할 수 있는 計算式을 제안하였다.
2. 협수로에서 강한 潮汐流가 흐르고 있을 때는 潮汐流의 強度에 따른 船舶操縱危險 度를 推定할 수 있는 數式을 제안하였다.
3. 폭과 깊이가 같은 협수로라 하더라도 大型船의 操縱은 小型船의 그것에 비하여 월 등하게 큰 위험이 따른다.
4. 潮汐流가 강한 협수로에서는 大型船은 新針路에 들어가기 위하여 變針을 시작할 때 큰 舵角을 주어야 하고 變針이 完了되기전 적절한 시기에 큰 대응타각으로 船舶의 회두 惰力을 제어하는 것이 대단히 중요하다.
5. 100,000 G/T LNG 船이 부도 水道通航時 潮汐流限界는 2.8kt정도이다.
6. 仁川港의 부도 水道는 100,000 G/T 大型船의 通航路로서는 큰 危險이 있으므로 부도 水道의 東쪽으로 새로운 航路를 開設할 必要가 있다.

參考文獻

- 1) 尹点東, “操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的 把握에 關한 研究”. 韓國航海學會 誌, 第1卷 第1號(1997.8), pp. 27~43.
- 2) 尹点東, “巨大型船操船論” 亞成出版社, 釜山(1983.8) p. 34, 35, 42
- 3) 尹点東, “船舶操縱의 理論과 實務” 世宗出版社, 釜山(1997.9) p. 33, 200~201
- 4) 대한민국 수로국, “1996년 조석표 제 1 권” 찬명문화사, 서울(1995), p. 213
- 5) 衫原喜義, “理論運用學(船體運動編)” 海文堂, 東京(1967), p. 115.
- 6) 藤井齊 野本謙作, “操縱試驗法”, 日本造船學會 第2回 操縱性 シンポジウム(1970) pp. 2~8.

- 7) 丸山隣一, “巨大船の操船上 の 問題點”, 三光汽船海務部, 東京(1970. 6), pp. 1~9
- 8) 岩井聰, “操船論”, 海文堂, 東京(1972), p. 38.
- 9) 北澤昌永, “操船者側からの 問題點 の 提起および要望”, 日本造船學會 第3回 操縱性シンポジウム(1981), pp. 289~293.
- 10) 日本關西 造船協會, “造船設計便覽”, 海文堂, 東京(1983) p. 455.
- 11) 芳村康男 “外力下の 操縱性能” 日本造船學會, 運動性能 委員會 第2回 シンポジウム, 船舶の 船行安全 と 操縱性能”(1985. 12), p. 57.
- 12) 本田啓之輔, “操船通論”, 成山堂, 東京(1986), pp. 31~37.
- 13) 浜本剛實, 溝口純敏, “船體 に 働く 流體力の 推定法等”, 日本造船學會, 運動性能委員會 第4回 シンポジウム, 操縱性能 の 豫測 と 評價(1987. 12), pp. 52~53, 133~145.
- 14) 橋本進, “操船 の 基礎” 海文堂, 東京(1988), pp. 9~10.
- 15) C.L. Crane, H. Eda, A. Landsburg, “Controllability”, Principles of Naval Architecture Volume III(1989. 9) pp. 199, 244~248.

