

論 文

마산항 출입 항로의 개선 방안에 관한 시뮬레이션 연구

김 환 수*

A Simulation Study on the Improvement of the Entrance Channel of Masan Harbour

Kim Whan Soo

〈 목 차 〉

Abstract	3.2 시뮬레이션 및 분석
1. 서론	3.2.1 2항로에 대한 시뮬레이션 실시 결과 및 분석
2. 마산항 출입 항로의 문제점 및 개선안 초안	3.2.2 2항로 개선안에 대한 시뮬레이션 실시 결과 및 분석
2.1 출입 항로의 문제점	3.2.3 부도수도 우회항로 신설안에 대한 시뮬레이션 실시 결과 및 분석
2.2 출입 항로의 개선안 초안	
3. 현항로 및 항로 개선안 초안에 대한 시뮬레이션 검증	4. 마산항 출입 항로의 개선 방안 종합
3.1 시뮬레이션의 개요 및 준비	5. 결론
3.1.1 항로적정성 검증 시뮬레이션의 개요	참고문헌
3.1.2 선박운동방정식의 구축	
3.1.3 조류 및 수심 데이터 베이스의 구축과 바람의 입력	

Abstract

This work aims at examining the navigational safety of the entrance channels of Masan harbour and suggesting the way to improve ships' navigational safety through the channels.

It has been found, from the on-scene investigation of the navigational safety at Masan, that the depth of the Budo-Sudo channel is not deep enough to cater for the largest vessel visiting the harbour, and that the No.2 navigational channel is not wide enough for the vessel.

An additional new waterway, therefore, has been recommended to be established in the south of the Budo-Sudo channel so that the deep draft vessel can detour. The No.2 navigational channel has been recommended to be widen. The width of the channel was suggested to be 280 meters.

A waterway design simulation methodology has been applied to examine the safety of the newly suggested channels. New channels have been proved to be safe from the experiment.

* 정회원, 한국해양대학교 교수

1. 서론

창원 기계 공단이 급속히 발달함에 따라 마산항을 통한 수출입 물동량도 날로 증가하고 있다. 이에 따라 마산항을 출입하는 선박도 기존의 2-3만톤급 선박에서 5만톤급 Car Carrier 및 컨테이너선으로 그 크기가 점점 커져가고 있다[1]. 이와 같이 출입하는 선박이 대형화하고 있음에도 불구하고 마산항의 출입 항로는 중형선이 주종을 이루던 시기에 개설된 것을 그대로 쓰고 있다. 따라서 출입하는 선박의 크기에 비해 항로의 폭이 좁고 수심이 낮아 대형선의 안전 출입이 크게 위협을 받고 있는 실정이다. 이와 같은 출입항 선박의 항행상의 위협을 줄이기 위해서는 기존 항로를 개선하기 위한 방안을 마련하여 새롭게 항로를 설정해 주어야만 한다.

이에 따라 본 연구에서는 마산항 출입 항로의 적정성을 현장 답사 및 시뮬레이션 실험을 통해 검증한 후 개선안을 제시하고, 이 개선안에 대해 항로 설계 시뮬레이션 검증을 거친 뒤, 마산항을 출입하는 5만톤급 대형 Car Carrier가 안전하게 출입할 수 있는 새로운 항로로 제시하였다.

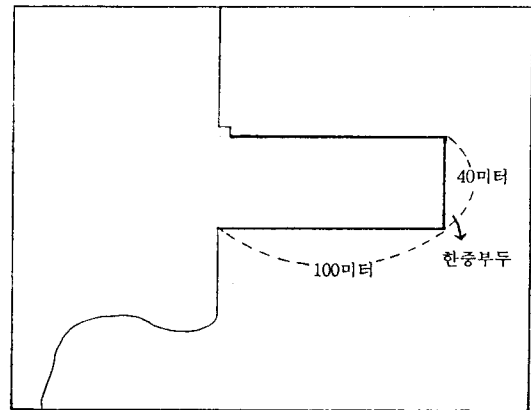
2. 마산항 출입 항로의 문제점 및 개선안 초안

2.1 출입 항로의 문제점

마산항 출입 항로는 항계 밖의 부도수도와 항계 내의 1항로 및 2항로의 3개 항로로 되어 있다. 부도수도는 폭 900미터, 길이 4,500미터, 수심 8.8 - 13.4미터의 왕복 통항 항로이며, 1항로는 1부두 및 2부두에 출입하는 선박들이 이용하는 폭 195미터, 수심 11 - 14.2미터의 항로이며, 2항로는 3부두, 4부두, 5부두 및 한중부두에 출입하는 선박들이 이용하는 항로로서 폭은 180 - 210미터이고 수심은 10.9 - 12.8미터이다.

마산항 진입 항로인 부도수도는 폭은 넓으나 수심이 8.8미터에 불과하여 대형 Car Carrier가 이 수로를 이용할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 그리고 2항로는 수심이 다소 낮을 뿐만 아니라 항로

의 폭도 좁아 4부두에 출입하는 대형 Car Carrier 및 컨테이너선의 안전 항해에 지장을 주고 있으며, 실제로 갑서말 서쪽 저수심 해역에 좌초한 사고도 여러 건이 있었음이 현장 답사를 통해 확인되었다. 그리고 출입항로의 문제점은 아니지만 항행 안전과 관련한 문제점 중의 하나로서 한중부두 전면의 남쪽 저수심 해역이 안전측면에서 문제가 있는 것으로 현장 답사에서 확인되었다. 즉 한중부두는 <그림 2-1>에서 보는 바와 같이 ㄷ자형 폐쇄형 부두로 되어 있어서 선박이 접안할 때 부두와 거의 나란하게 진입할 수 밖에 없으며, 이에 따라 바람이 강한 경우에는 선박이 남쪽의 저수심 구역으로 압류될 위험이 매우 큰 것으로 확인되었다.



<그림 2-1> 한중부두의 형태 및 규모

2.2 출입 항로의 개선안 초안

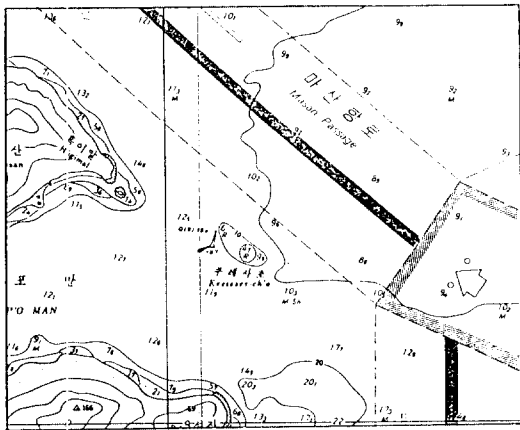
(1) 부도수도의 개선안

부도수도의 경우 수심이 낮아 대형 Car Carrier가 이 수로를 이용해 출입할 수 없는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 부도수도를 출입 최대 선박이 통항할 수 있는 수심인 수심 12미터까지 준설하는 것이 제일 바람직하다. 그러나 준설 해역이 매우 넓은 관계로 준설에 상당한 비용이 소요될 것이 예상되는 반면, 구례사초 좌측 해역은 <그림 2-2>에서 보는 바와 같이 10.3미터 이상의 깊은 수심을 가지고 있으므로, 대안으로 <그림 2-3>과 같

이 수심이 양호한 구례사초 좌측 해역에 폭 400 내지 500미터의 우회항로를 신설 지정할 것을 제안한다. 이와 같이 우회항로를 개설해 잠정적으로 사용하되 최종적으로는 준설 예산을 확보하여 부도수도를 수심 12미터까지 준설하도록 하며, 이와 같이 단계적으로 항로를 개선해 나가는 것이 바람직할 것이다.

그리고 부도수도를 수심 12미터까지 준설할 때까지는 부도수도로는 홀수 8.8미터 이하의 선박만 통항하도록 제한하고, 그 이상의 선박은 구례사초 좌측항로로 우회하도록 하여야 할 것이다. 한편 우회항로 이용 대상 선박들 중 홀수 8.8미터 이상 10미터 미만의 선박들은 현재의 관행과 같이 부도수도과 부도 사이의 일반선박출입금지구역선(수심 10미터)을 따라 출입할 수 있게 하는 것이 통항량 분산을 위해 바람직하므로, 이를 위해서 홀수 8.8미터 내지 10미터 선박용 추천 항로를 개설할 필요가 있다. 이렇게 할 경우 마산항 출입 선박의 크기를 세 그룹으로 나누어서 홀수 8.8미터 미만의 선박은 부도수도로, 홀수 8.8 내지 10미터의 선박은 부도수도 북방의 추천항로로, 그리고 홀수 10미터 이상의 선박은 구례사초 아래쪽의 우회항로로 통항하도록 하면 좋을 것이다.

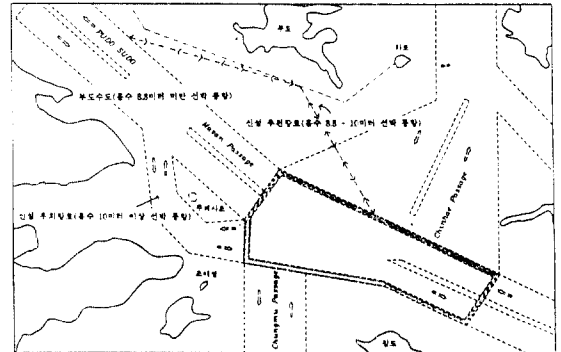
대 선박 선폭(50,000DWT급의 Car Carrier - 32.3미터)의 6배가 채 되지 않는 실정이다. 국제 항로 설계 지침인 PIANC Rule에서 왕복 통항 항로의 경우 출입 최대 선박 선폭의 8 내지 10배를 항로 폭으로 확보할 것을 권장하고 있는 점을 감안할 때, 이 폭은 출입하는 선박의 규모에 비해 너무 좁다는 것을 알 수 있다. 한편 2항로의 적정성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 실시하여 보았으며, 그 결과 2항로의 항로폭이 좁은 것으로 확인되었다(3.2.1절). 따라서 2항로의 항로폭을 <그림 2-4>와 같이 확장하는 안을 제안하며, 새로운 항로폭은 PIANC Rule의 규정에 따라 최대 선폭 32.6미터의 8배에 여유폭 20미터를 추가한 280미터로 한다. 그리고 수심은 12미터로 한다.



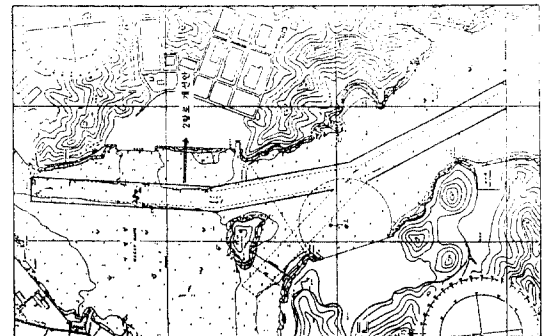
<그림 2-2> 구례사초 부근 수역 상세도

(2) 2항로의 개선안

2항로의 항로폭은 180미터에 불과하여 출입 최



<그림 2-3> 마산항 출입 항로(부도수도)의 개선안
(구례사초 좌측 우회항로 신설 지정)



<그림 2-4> 마산항 출입 항로(2항로)의 개선안
(항로폭을 280미터로 확장)

3. 현항로 및 항로 개선안에 대한 시뮬레이션 검증

3.1 시뮬레이션의 개요 및 준비

3.1.1 항로 적정성 검증 시뮬레이션의 개요

대상 항로를 출입항 예정 선박이 안전하게 통항할 수 있는지를 검증하는데 사용되는 기법이 항로 적정성 검증 선박조종 시뮬레이션이다. 이 방법은 실제 항로의 제반 환경 조건을 시뮬레이션 시스템에 입력하고 거기에 출입항 선박중 조종 성능이 최악인 최대의 선박에 대한 선박운동모델을 입력한 뒤 휴먼 알고리즘에 의해 모델 선박이 항로를 통항하도록 시험하여 항로상에서의 선박의 운항 안전성을 평가해 보는 방법이다. 선박의 운동은 각 선박의 구동 원천이 되는 기관의 힘과 방향을 조종하는 타에 의해 좌우되며, 이들 기관 및 타에 의한 선박의 반응은 선체의 크기 및 선형마다 차이가 있을 뿐만 아니라 수면하에 잠긴 선체의 모양에 따라서도 달라진다. 실제로 가장 근접한 선박운동 시뮬레이션을 실시하기 위해서는 실제 선박과 동일한 반응을 나타낼 수 있도록 선박모델을 구성하여 사용하여야만 한다. 그리고 선박의 운동은 본선 자체의 특성에 부가하여 외부로부터 받는 힘에 의해 크게 좌우되므로 외력으로 작용하는 바람, 조류, 수심에 관한 정확한 정보의 입력이 매우 중요하며 이들 정보들은 데이터베이스 형태로 시스템에 입력된다.

본 연구에서는 영국의 Maritime Dynamics사에서 개발한 Off Line Port and Waterway Design Simulator를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

3.1.2 선박운동방정식의 구축

3.1.2.1 대상 선박

항로적정성 검증을 위해서는 해당 항로 출입항 선박중 조종 성능이 가장 열악한 선박을 대상으로 하여 시뮬레이션을 실시하여야 한다. 마산항을 출입항하는 선박중 조종 성능이 가장 나쁜 선박은 출입항 선박중 가장 큰 선박의 하나인 길이 190미

터의 50,000DWT급 Car Carrier이다. 이 선박은 본 연구의 대상 수로인 부도수도 및 2항로를 통해 마산항으로 출입하는 선박이다. 실험 대상 선박의 제원을 <표 3-1>에 나타내 보인다.

<표 3-1> 실험 대상 선박의 제원 (50,000DWT급 Car Carrier)

명 세	크 기
전장(Lpp)	190m
선폭(B)	32.3m
흘수(d)	11.6m
깊이	21.3m
축수	1
주기관형	저속디젤
풍압면적(측면)	2,580m ²
풍압면적(정면)	1,056m ²

명 세	크 기
가속 시간(최대 선속의 2/3)	400초
감속 시간(최대 선속의 1/3)	750초
좌현 선회권 선회정상속도	6kts
최종 선회경(Circle Diameter)	400m
속력(전진 전속)	19.5kts
속력(후진 전속)	10kts
전속 전진 기관 회전수	90rpm
전속 후진 기관 회전수	70rpm

3.1.2.2 선박운동방정식의 기본 원리

시뮬레이션을 위한 선체 운동 수학적모델 중 McCallum에 의해 개발된 모델을 기초로 하여 선박운동방정식을 구성하였으며, McCallum Model의 기본 원리는 다음과 같다.

흐르는 유체에 선체를 고정시킬 경우 선체에 미치는 힘은 <그림 3-1>과 같이 크게 유체의 흐름 방향에 직각으로 작용하는 lift force와 유체의 흐름 방향에 평행하게 작용하는 drag force 두 가지로 나눌 수 있으며, 이 힘들은 다음과 같이 계수로 표시될 수 있다[2].

$$\text{Lift Coefficient} = C_L = \frac{L}{1/2 \rho AV^2}$$

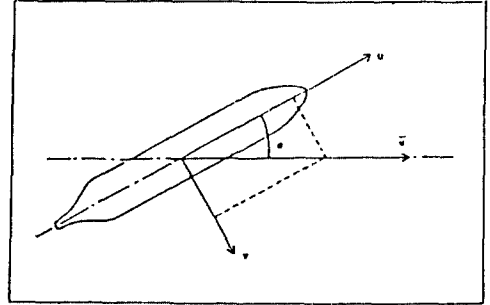
Drag Coefficient =

$$C_D = \frac{D}{1/2 \rho AV^2} \quad (3.1)$$

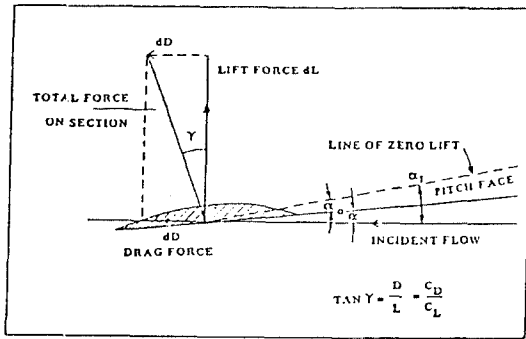
여기서, ρ 는 유체 밀도, A는 유체를 받는 면적, V는 유체 속력을 말한다.

선체와 유체가 이루는 각(drift angle)을 α 라 하면 <그림 3-3>과 같이 선체에 미치는 유체의 속도는 surge 속도(u)와 sway 속도(v)의 벡터 합이 된다.

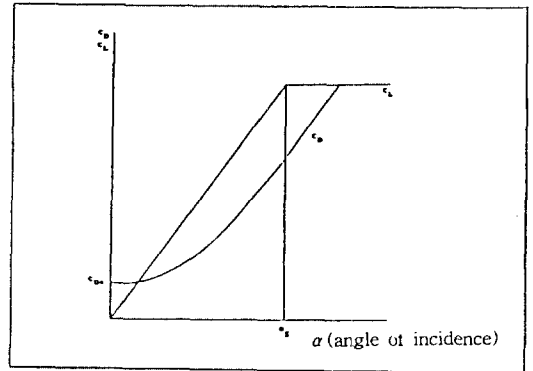
$$\vec{u}^2 = u^2 + v^2 \quad (3.2)$$



<그림 3-3> Surge and Sway Velocities for a Hull at Drift Angle α



<그림 3-1> Forces on a Hydro Foil



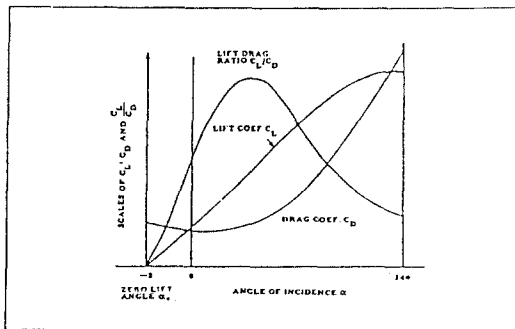
<그림 3-4> Idealized Lift and Drag Characteristics for Inclined Hull Form

그리고 drift angle α 는 surge와 sway 속도와 관계가 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v}{u} \quad (3.3)$$

특정한 형태의 선체 모양에 미치는 lift와 drag force를 정확하게 구하기는 불가능하므로 선체에 미치는 lift와 drag force는 <그림 3-4>와 같이 이상적 형태로 나타낼 수 있다고 가정한다.

<그림 3-4>에 나타나 있는 것과 같이 lift와 drag force는 stall angle α_s 까지는 거의 수직적으로 상승한다. 작은 aspect ratio(종횡비)를 가질수록 stall angle은 커지며, 보통 선박의 경우 아주 작은 aspect ratio를 가지므로 45° 이상의 stall angle을 가진다. 실제로 선박의 drift angle이 45°



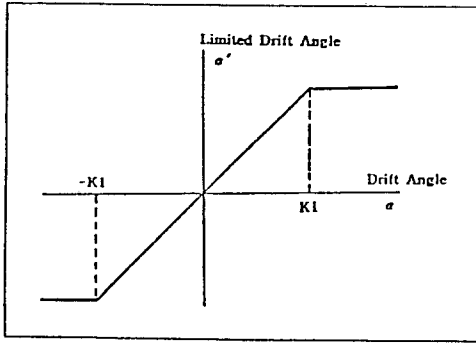
<그림 3-2> Characteristics of Lift and Drag Forces expressed by Coefficients

를 넘는 경우는 드물기 때문에 <그림 3-2>를 고려할 때 <그림 3-4>와 같이 이상화시킨 lift와 drag 특성을 이용하더라도 수학 모델 구성에 큰 영향을 받지 않는다[3].

그리고 <그림 3-5>와 같이 이상적 lift force의 특성을 나타내는 limited drift angle의 개념을 도입하면,

$$\begin{aligned} |\alpha| &\leq K1 \text{ 일 경우 } \alpha' = \alpha \\ \alpha &> K1 \text{ 일 경우 } \alpha' = K1 \\ \alpha &< -K1 \text{ 일 경우 } \alpha' = -K1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

으로 표현할 수 있다.



<그림 3-5> Limited Drift Angle

3.1.2.3 선체에 미치는 유체역학적 lift와 drag force 식(3.1)에 나타나 있는 바와 같이 흐르는 유체에 놓인 선체에 미치는 lift(L_H)와 drag force(D_H)는 유체의 속도의 제곱에 비례한다.

따라서 선체에 미치는 lift force는 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$L_H = K7 \times \bar{u}^2 \times \alpha' \quad (3.5)$$

선체에 미치는 drag force는 α 가 0일 때는 작은 잔류 drag와 α 의 제곱에 비례하는 drag force로 구성된다[4]. 이것을 수식으로 표현하면,

$$D_H = K8 \times \bar{u}^2 \times K9 \times \bar{u}^2 \times \alpha^2 \quad (3.6)$$

이 된다. 여기에서 $K8 \times \bar{u}^2$ 은 α 가 0일 때의 잔류 drag량을 나타낸다.

3.1.2.4 프로펠라 유효 슬립과 후류 속도
선박 프로펠라의 실슬립비(S_r)은

$$S_r = 1 - \frac{V_a}{p \times n} \quad (3.7)$$

이다. 여기서 V_a 는 프로펠라 대수 전진 속도, p 는 pitch, n 은 회전속도를 의미한다.

그리고 프로펠라 전진 속도 대신에 선박의 속도 V 를 사용하여 또다른 슬립비를 구할 수 있는데 이를 명목슬립비(S_a)라고 하고 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$S_a = 1 - \frac{V}{p \times n} = 1 - \frac{u}{p \times n} \quad (3.8)$$

보통 선박조종을 하여 보면 속력이 작을수록 슬립비는 커진다. 그러나 실제 조종중에 정확한 실슬립이나 명목슬립을 구하기가 어려우므로 이를 간편하게 하기 위해 유효슬립비(S_e)라는 것을 생각해 내고 이를 수식으로 표시하면

$$S_e = 1 - \frac{u}{U_0} \quad (3.9)$$

이 된다. 여기서 U_0 는 throttle setting speed를 말한다.

선박의 후류속도(slipstream velocity) U_s 는 평정상태(equilibrium condition)에서는 평정속도 U_0 에 가까워진다. 이때 $u = U_0$, $S_e = 0$ 가 된다.

선박조종중 선속 u 는 drift angle α 로 인해 선체의 저항이 증가하므로 감소한다. 그리고 프로펠라 회전이 감소할수록 유효 슬립비는 증가한다. 따라서 프로펠라 뒤 쪽의 후류속도는 선박조종중에 감소를 하게 된다. 다만 선속과 같은 양으로 감소하지는 않는다. 따라서 프로펠라 뒤 쪽의 후류속도 U_s 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_s = U_0 (1 - f(S_e)) \quad (3.10)$$

유효슬립비와 후류속도 사이에는 선형적인 관계가 있다는 것이 확인되어 있으므로 유효슬립비와 후류속도와의 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다.

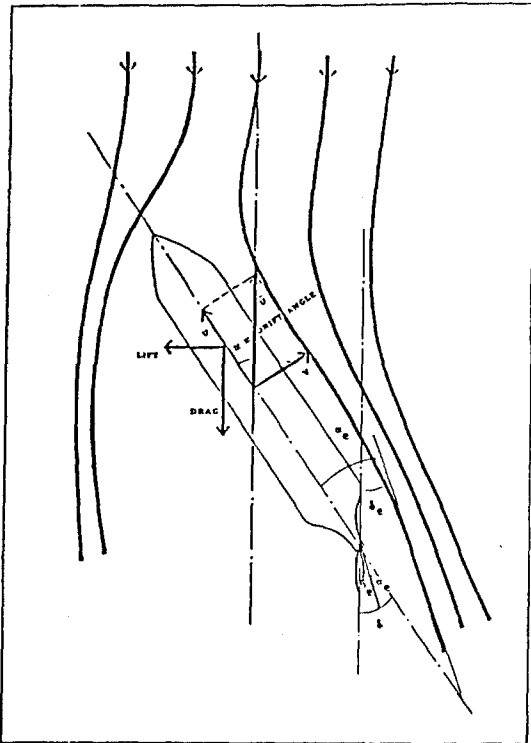
$$U_s = U_0 (1 - K4 \times S_e) \quad (3.11)$$

그리고 선미부분의 유체 흐름이 선수미선과 α_e 라는 각을 이루고 흐르고 있으므로 후류벡터속도는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\overline{U}_s = \frac{U_s}{\cos(\alpha_e)} \quad (3.12)$$

3.1.2.5 타에 미치는 lift와 drag force

<그림 3-6>에서 알 수 있듯이 타에 미치는 힘은 실제 타의 각에 좌우되는 것이 아니고 타와 그 주위의 유체 흐름이 이루는 각에 의해 좌우된다. 만약 타각은 주어져 있으나 그때 타가 그 주위의 유체 흐름 방향과 평행하다면 타에 미치는 lift force는 없을 것이다.



<그림 3-6> Lift and Drag Forces and Fluid Stream of a Ship at a Drift Angle α

여기서 유효 drift angle α_e 가 실제 drift angle α 와 비례한다고 가정하면 다음과 같이 표시할 수 있다[5].

$$\alpha_e = K2 \times \alpha \quad (3.13)$$

유효타각 δ_e 는 타의 중심선과 그 주위의 유체 흐름 방향이 이루는 각으로 정의되며, 타각을 δ 로 할 때 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_e = \delta - \alpha_e \quad (3.14)$$

그리고 타도 유효타각이 실효값을 넘으면 선체의 경우와 마찬가지로 stall 현상이 일어나므로 제한유효타각(δ_e') 개념을 도입하여 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

$$\begin{aligned} |\delta_e| < K3 \text{ 일 경우 } \delta_e' &= \delta_e \\ \delta_e > K3 \text{ 일 경우 } \delta_e' &= K3 \\ \delta_e < -K3 \text{ 일 경우 } \delta_e' &= -K3 \end{aligned} \quad (3.15)$$

따라서 타에 미치는 lift force (L_R)와 drag force (D_R)을 식으로 표시하면 다음 식(3.16), (3.17)과 같이 된다.

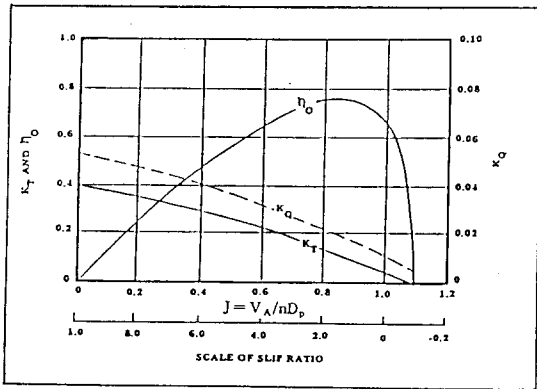
$$L_R = K10 \times \overline{U}_s^2 \times \delta_e' \quad (3.16)$$

$$D_R = K11 \times \overline{U}_s^2 + K12 \times \overline{U}_s^2 \times \delta_e'^2 \quad (3.17)$$

3.1.2.6 프로펠라에 의한 추력

프로펠라에 의한 추진력은 throttle setting과 프로펠라 슬립의 크기에 의해 좌우된다. <그림 3-7>에서 보는 바와 같이 추력계수 K_t 는 직경이 D_p 인 프로펠라의 경우 명목슬립비 S_a 와 거의 일정한 비율로 변한다. 주어진 throttle setting 값에 대하여 추력 T 가 유효슬립비 S_e 와 일정 비례 관계에 있다고 가정하면 추력 T 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$T = T_0(1 + K6 \times S_e) \quad (3.18)$$



<그림 3-7> Typical Curves of Thrust, Torque and Efficiency for Propeller

여기서, T_0 는 일직선으로 전진 운동할 때의 평정 추력이다. 이때 추력과 throttle이 일정 비례 관계에 있다고 가정하면, T_h 를 throttle setting 값이라고 할 때 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$T = K5 \times T_h \times (1 + K6 \times S_e) \quad (3.19)$$

3.1.2.7 선박운동방정식의 구성

본 논문에서 사용한 수학 모델에서는 선체의 움직임을 세 가지의 자유 운동 즉 두 가지의 힘과 한 가지의 모멘트로 표시한다. 지구에 고정된 좌표축에 관한 선박의 운동방정식을 뉴턴의 법칙으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} X_0 &= m \ddot{x}_0 \\ Y_0 &= m \ddot{y}_0 \\ N &= I_z \ddot{\psi}_0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

여기서 \ddot{x}_0 와 \ddot{y}_0 는 각각의 방향의 가속도를, $\ddot{\psi}_0$ 는 z_0 축에 관한 회두각가속도를 나타낸다.

X_0 와 Y_0 는 x_0 및 y_0 방향에 작용하는 총힘의 양을 나타낸다. x_0 와 y_0 는 선체 중심을 기준으로 한 직교좌표 방향을 나타낸다.

m 은 선체 질량을 나타낸다.

N 은 선체중심에 작용하는, z_0 축과 평행한 총모멘트를 나타낸다.

I_z 는 z_0 축에 작용하는 선체의 관성 모멘트를 나타낸다.

ψ 는 선수미선과 x_0 축이 이루는 yaw 각을 나타낸다.

고정축 x_0 와 y_0 를 가지는 지구에 고정된 좌표계 대신 선수미선을 x 축, 선체정횡선을 y 축으로 하는 움직이는 좌표계를 생각해 보면, x 축과 y 축에 작용하는 힘 X 와 Y 를 X_0 와 Y_0 를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi \\ Y &= Y_0 \cos \psi - X_0 \sin \psi \end{aligned} \quad (3.21)$$

이 때 속도는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_0 &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned} \quad (3.22)$$

여기서 u 와 v 는 각각 x 축과 y 축 방향의 선체 속도를 의미한다. 위의 식을 시간에 대하여 미분하면,

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 &= \dot{u} \cos \psi - \dot{v} \sin \psi - (u \sin \psi + v \cos \psi) \dot{\psi} \\ \ddot{y}_0 &= \dot{u} \sin \psi + \dot{v} \cos \psi + (u \cos \psi - v \sin \psi) \dot{\psi} \end{aligned} \quad (3.23)$$

(3.23)식을 (3.20)식에 대입한 뒤 그 결과값 X_0 와 Y_0 를 (3.21)식에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{u} - v \dot{\psi}) \\ Y &= m(\dot{v} + u \dot{\psi}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

위의 (3.24)식과 (3.20)식의 세번째 식으로부터 (3.25)식과 같은 선체운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{u} - v \dot{\psi}) - \text{surge equation} \\ Y &= m(\dot{v} + u \dot{\psi}) - \text{sway equation} \\ N &= I_z \ddot{\psi} - \text{yaw equation} \end{aligned} \quad (3.25)$$

위의 각 식은 선박의 surge, sway, yaw 운동을 각각 나타내고 있다. 그리고 (3.25)식에 부가 질량

효과를 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X &= m_1 \dot{u} - m_2 v \dot{\psi} \\ Y &= m_2 \dot{v} + m_1 u \dot{\psi} \\ N &= I_z \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (3.26)$$

x축 방향의 부가 질량은 m_1 에, y축 방향의 부가 질량은 m_2 에, 그리고 z축 방향의 부가 관성은 I_z 에 포함되어 있으며, 이들은 크기에 변함이 없이 일정하다고 가정한다.

x축과 y축 방향의 힘과 z축 방향의 모멘트는 프로펠러, 타, 유체역학에 의해 선체에 작용하는 외부 힘의 합을 의미한다. <그림 3-8>은 조종중인 선박이 작용하는 힘과 모멘트를 나타낸다.

선수미선과 평행하게 선체에 미치는 힘들을 합하면 다음과 같은 surge 방정식이 얻어진다.

$$m_1 \dot{u} - m_2 v \dot{\psi} = T + L_H \sin \alpha - D_H \cos \alpha - L_R \sin \alpha_e - D_R \cos \alpha_e \quad (3.27)$$

따라서 surge 가속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{u} = \frac{1}{m_1} (T + L_H \sin \alpha - D_H \cos \alpha - L_R \sin \alpha_e - D_R \cos \alpha_e + m_2 v \dot{\psi}) \quad (3.28)$$

선수미선과 직각인 방향으로 선체에 미치는 힘들을 합하면 다음과 같은 sway 방정식이 얻어진다.

$$m_2 \dot{v} + m_1 u \dot{\psi} = -L_H \cos \alpha - D_H \sin \alpha + L_R \cos \alpha_e - D_R \sin \alpha_e \quad (3.29)$$

따라서 sway 가속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{v} = \frac{1}{m_2} (-L_H \cos \alpha - D_H \sin \alpha + L_R \cos \alpha_e - D_R \sin \alpha_e - m_1 u \dot{\psi}) \quad (3.30)$$

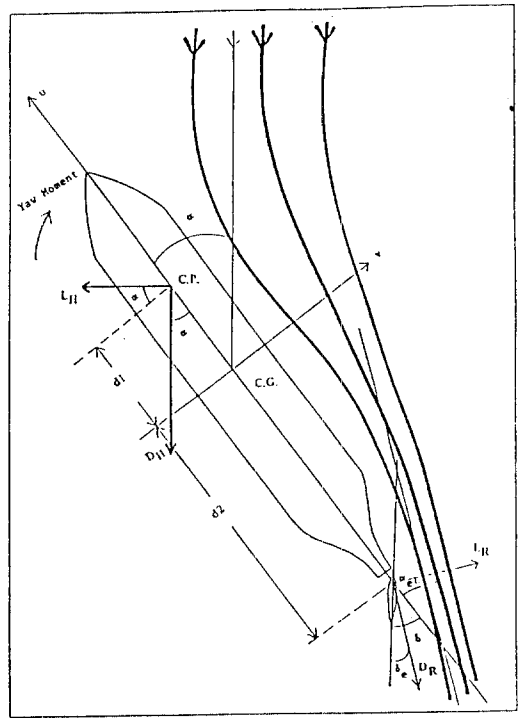
선체에 미치는 저항 토크는 회두방향의 반대 방향으로 작용하며, 회두속도의 제곱에 비례한다고 가정하면 저항 토크는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$N_v = K I_3 \dot{\psi} | \dot{\psi} | \quad (3.31)$$

yaw 방정식은 선체의 무게중심에 미치는 모멘트로 구성되므로 우선 선체와 타의 압력 중심을 알아야 한다. drift angle의 변화에 따라 압력 중

심이 약간 변하기는 하지만 선체와 타의 압력 중심은 선체와 타의 중심선상의 일정한 위치에 존재한다고 가정하여도 무방하다.

<그림 3-8>에서와 같이 선체 압력 중심은 선체의 무게중심으로부터 $d1$ 만큼 앞쪽에 위치하고, 타의 압력 중심은 선체의 무게중심으로부터 $d2$ 만큼 뒤쪽에 위치한다. 선체 무게중심에서의 모멘트를 계산하면 yaw 방정식은 다음과 같이 표시될 수 있다.



<그림 3-8> Forces and Moments Acting on a Manoeuvring Ship

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} &= \frac{1}{I_z} (-N_v - L_H d1 \cos \alpha - D_H d1 \sin \alpha \\ &\quad - L_R d2 \cos \alpha_e + D_R d2 \sin \alpha_e) \end{aligned} \quad (3.32)$$

이들 각 surge, sway, yaw 가속도 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{\psi}$ 를 구한 다음 이들 가속도를 오일러 공식을 이용하여

시간에 대해 적분하면 각각의 속도를 구할 수 있다.

시간 t 에서의 surge, sway, yaw 속도를 각각 $u_t, v_t, \dot{\psi}_t$ 라하고 시간 t_1 에서의 surge, sway, yaw 속도를 각각 $u_{t_1}, v_{t_1}, \dot{\psi}_{t_1}$ 이라 하면

$$\begin{aligned} u_{t_1} &= u_t + \int_t^{t_1} \dot{u} dt = u_t + \dot{u} \Delta t \\ v_{t_1} &= v_t + \int_t^{t_1} \dot{v} dt = v_t + \dot{v} \Delta t \\ \dot{\psi}_{t_1} &= \dot{\psi}_t + \int_t^{t_1} \ddot{\psi} dt = \dot{\psi}_t + \ddot{\psi} \Delta t \end{aligned} \quad (3.33)$$

(단, $\Delta t = t_1 - t$)

이 된다. 그리고 이들 속도를 각각 시간에 대하여 적분하면 일정 시간 동안 선박이 이동한 각 방향의 거리 및 회전각이 구해진다.

3.1.3 조류 및 수심 데이터 베이스의 구축과 바람의 입력

정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 정확한 선박 운동모델의 입력에 추가하여 정확한 수심, 조류 및 바람의 입력이 필수적이다. 수심 및 조류는 데이터 베이스를 구축하여 시스템에 직접 입력하며, 바람은 중요 바람 몇 종류를 선택하여 시뮬레이션 실행시마다 입력하게 된다. 수심에 대한 데이터 베이스는 현행 해도상의 수심을 기준으로 하여 만들어 2항로 개선안의 경우 준설 수심을 12미터로 하여 구축하였다.

조류는 최강의 조류를 입력하여야 하므로 약최대조시의 최강창조류와 최강낙조류에 대한 데이터를 데이터 베이스화하여 입력하였다. 그리고 바람은 최악의 바람을 입력하여 실험하여야 하므로 선박 진행 방향에 직각으로 부는 25노트의 바람을 입력하여 시뮬레이션을 실시하였다.

3.2 시뮬레이션 및 분석

3.2.1 2항로에 대한 시뮬레이션 실시 결과 및 분석

현재 사용되고 있는 2항로의 폭이 출입하는 최대 선박인 50,000DWT급 Car Carrier의 통항에

적합한 것인지를 검증해 보기 위해 입항 시물레이션을 5회 실시하였다. 조류는 335도 방향으로 흐르는 0.9노트의 창조류를 입력하였다. 그리고 낙조류는 선박 진행 방향과 나란한 방향으로 흐르므로 이에 대한 검증은 생략하였다. 바람은 선박 진행 방향에 직각인 94도 방향의 25노트의 바람을 입력하였다.

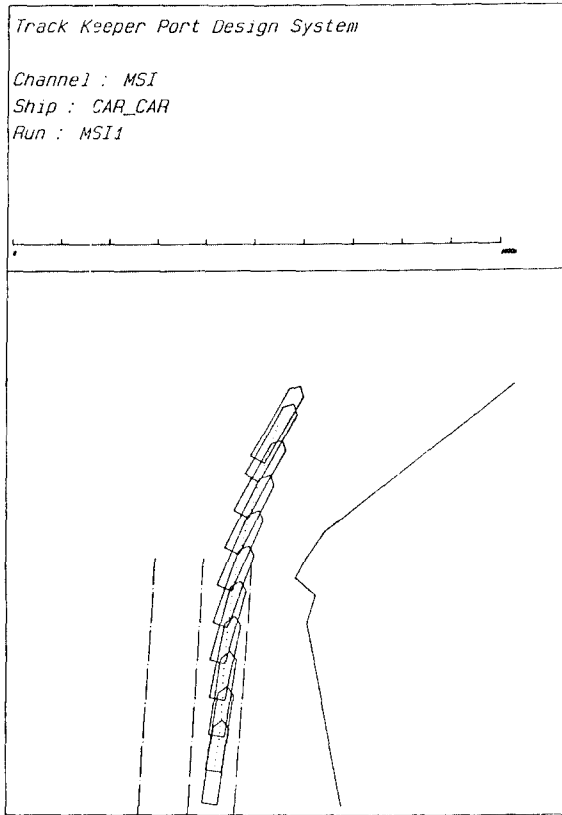
<그림 3-9>는 대상 선박인 50,000DWT급 Car Carrier가 94도 방향의 25노트의 바람을 받으며 최강 창조류하에서 입항하는 경우의 시물레이션 결과이다. 항로폭이 좁아 우측 항로의 끝단을 벗어나며 입항함을 알 수 있다. <그림 3-10>은 기존 2항로에 대한 입항 시물레이션 종합 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대 swept path 폭이 88 미터이고, 항로 외곽까지의 최근접 거리가 마이너스 8 미터로서 항로 외곽선을 벗어나 저수심 해역을 침범하므로 입항선의 안전이 확보되지 못함을 알 수 있다.

이와 같이 시물레이션 결과 2항로의 항로폭이 현장 답사에서 확인된 바와 마찬가지로 대형선의 출입에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 2항로의 항로폭을 확장하는 방향으로 항로를 개선할 필요성이 있음을 알 수 있다.

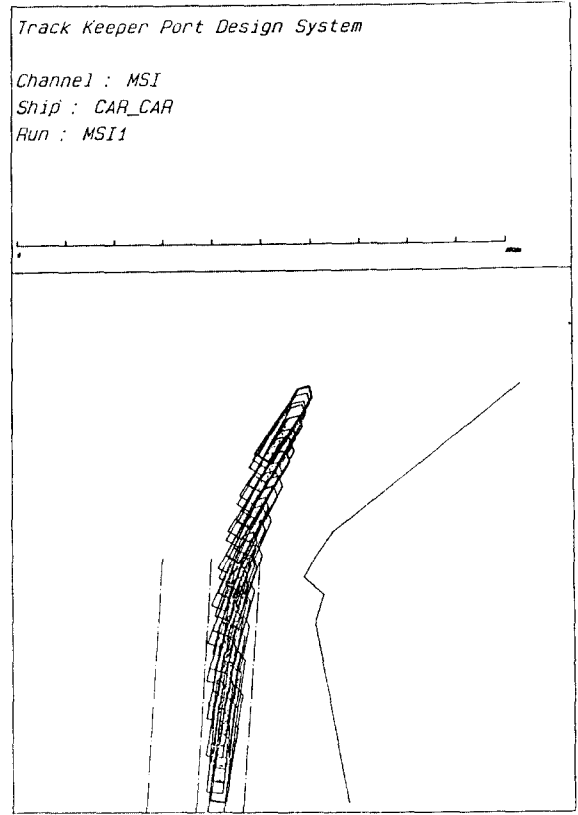
3.2.2 2항로 개선안에 대한 시뮬레이션 실시 결과 및 분석

2항로의 항로폭을 <그림 2-4>에서와 같이 280미터로 확장하고 수심을 12미터로 증대시키는 안에 대해, 출입하는 최대 선박인 50,000DWT급 Car Carrier의 안전 통항이 확보되는지 여부를 검증해 보기 위해 입항 시물레이션과 출항 시물레이션을 각각 10회씩 총 20회의 시물레이션을 실시하였다. 조류는 335도 방향으로 흐르는 0.9노트의 창조류를 입력하였다. 그리고 낙조류는 선박 진행 방향과 나란한 방향으로 흐르므로 이에 대한 검증은 생략하였다. 바람은 선박 진행 방향에 직각인 94도 방향의 25노트의 바람을 입력하였다.

<그림 3-11>은 대상 선박인 50,000DWT급 Car Carrier가 94도 방향의 25노트의 바람을 받으며



<그림 3-9> 기존 2항로에 대한 입항 시뮬레이션 결과
(최강창조류 및 94도 방향의 25노트의 정횡풍)



<그림 3-10> 기존 2항로에 대한 입항 시뮬레이션
종합 결과
(최강창조류 및 94도 방향의 25노트의 정횡풍)

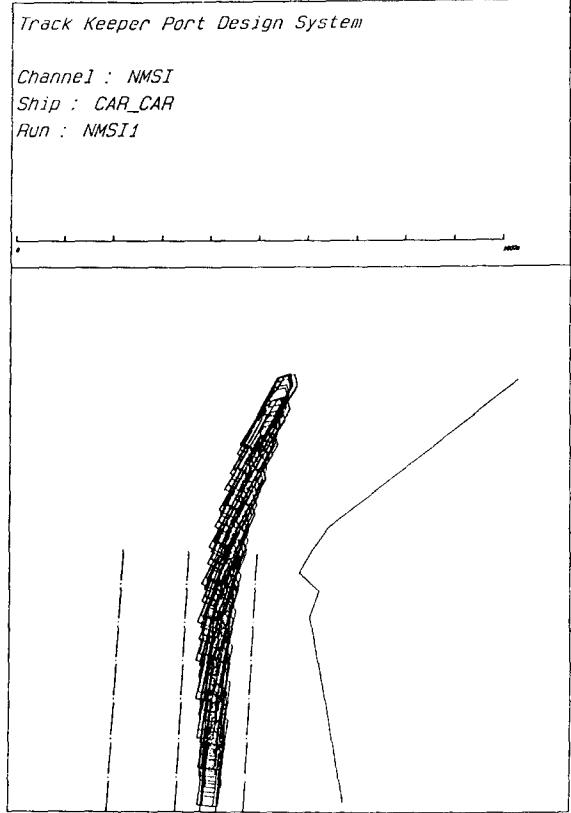
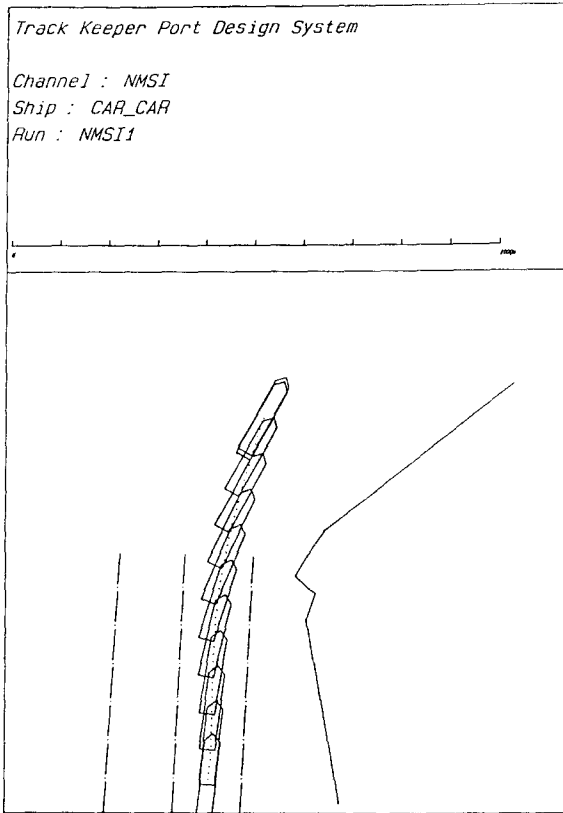
최강창조류하에서 개선된 2항로를 통해 입항하는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 항로폭이 충분하여 안전하게 입항함을 알 수 있다. <그림 3-12>는 개선된 2항로에 대한 입항 시뮬레이션 종합 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대 swept path 폭이 85미터이고, 항로 외곽까지의 최근접 거리가 40미터로서 선폭보다 넓은 여유폭이 확보되어 안전한 입항이 가능함을 알 수 있다.

<그림 3-13>은 대상 선박인 50,000DWT급 Car Carrier가 94도 방향의 25노트의 바람을 받으며 최강창조류하에서 개선된 2항로를 통해 출항하는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 항로폭이 충분하여 안전하게 출항할 수 있음을 알 수 있다. <그림 3-14>는 개선된 2항로에 대한 출항 시뮬레이션

종합 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대 swept path 폭이 70 미터이고, 항로 외곽까지의 최근접 거리가 38 미터로서 선폭보다 넓은 여유폭이 확보되어 안전한 출항이 가능함을 알 수 있다.

3.2.3 부도수도 우회항로 신설안에 대한 시뮬레이션 실시 결과 및 분석

부도수도 좌측에 우회항로를 신설하는 안에 대해, 출입 최대 선박인 50,000DWT급 Car Carrier가 안전하게 출입할 수 있는 항로인지를 검증해 보기 위해 총 15회의 시뮬레이션을 실시하였다. 입항 시뮬레이션의 경우 146도 방향의 0.9노트의 창조류 및 326도 방향의 0.6노트의 낙조류와 226



<그림 3-11> 2항로 개선안에 대한 입항 시뮬레이션 결과

(최강창조류 및 94도 방향의 25노트의 정횡풍)

<그림 3-12> 2항로 개선안에 대한 입항 시뮬레이션 종합 결과

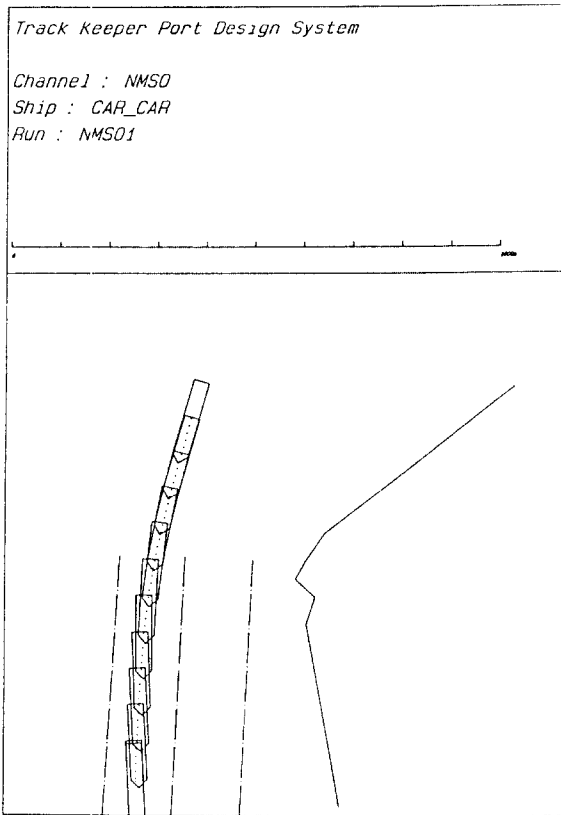
(최강창조류 및 94도 방향의 25노트의 정횡풍)

도 방향의 25노트의 정횡풍을 외력값으로 입력하여, 창조류의 경우와 낙조류의 경우에 대하여 각각 5회씩의 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 출항의 경우에는 조류가 선박의 진행 방향에 거의 평행으로 흐르므로 창조류의 경우에 대해서만 5회의 시뮬레이션을 실시하였다. 선박의 속력은 11노트를 입력하였다. <그림 3-15>는 0.9노트의 146도 방향의 창조류와 25노트의 226도 방향의 정횡풍하에서의 입항 시뮬레이션 결과이며, <그림 3-16>은 신설 우회항로에 대한 입항 시뮬레이션 종합 결과이다. <그림 3-16>에 나타난 바와 같이 최대 swept path폭이 105미터이고, 항로 외곽까지의 최근접 거리가 45미터로서 선폭의 약 1.5배가 여유폭으로 확보되어 안전한 입항이 가능함을 알 수 있다.

그리고 <그림 3-17>은 0.9노트의 146도 방향의 창조류와 25노트의 226도 방향의 정횡풍을 받으며 출항하는 출항선의 시뮬레이션 결과이며, <그림 3-18>은 신설 우회항로에 대한 5회의 출항 시뮬레이션 종합 결과이다. <그림 3-18>에 나타난 바와 같이 최대 swept path폭이 110미터이고, 항로 외곽까지의 최근접 거리가 40미터로서 선폭의 약 1.3배가 여유폭으로 확보되어 출항의 경우에도 안전한 통항이 가능함이 확인되었다.

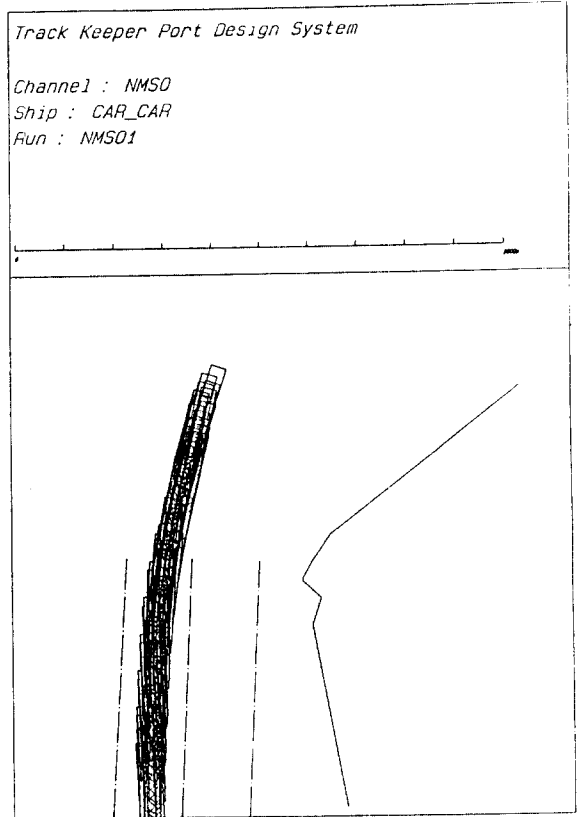
4. 마산항 출입 항로의 개선 방안 종합

2절에서 제안한 개선안 초안에 대해 시뮬레이션 검증을 거쳐 항로 개선 최종안을 마련하였으며, 이



<그림 3-13> 2항로 개선안에 대한 출항 시뮬레이션 결과

(최강창조류 및 94도 방향의 25노트의 정횡풍)



<그림 3-14> 2항로 개선안에 대한 출항 시뮬레이션 종합 결과

(최강창조류 및 94도 방향의 25노트의 정횡풍)

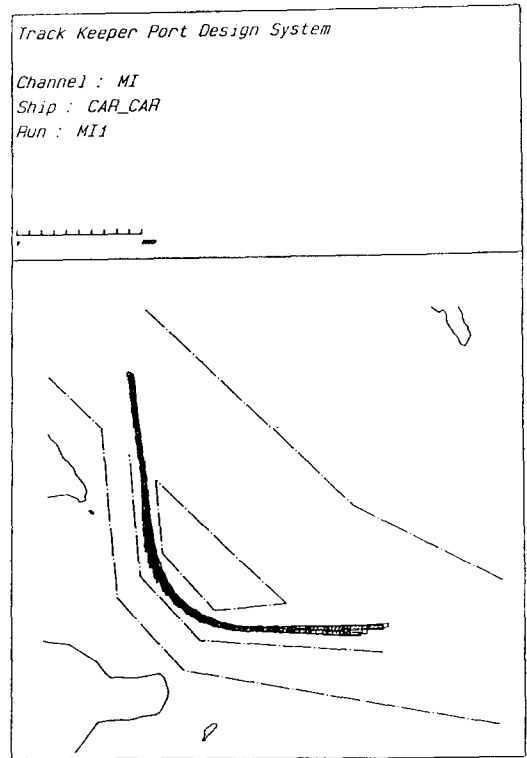
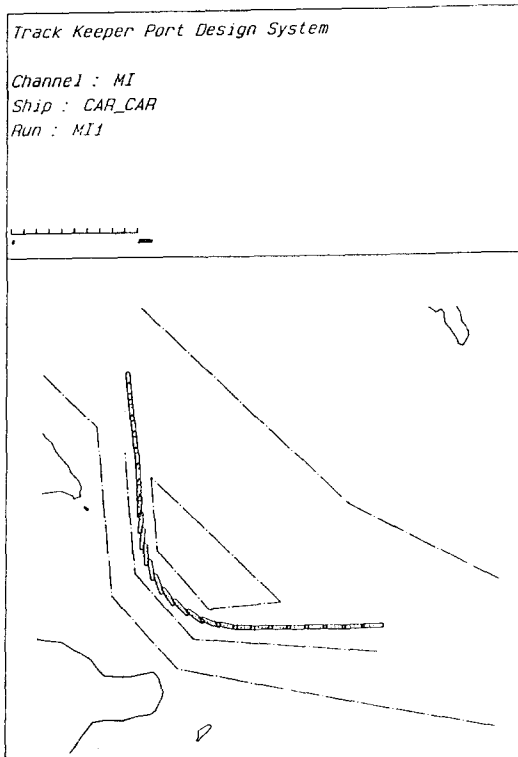
들을 기타 항행 안전 증진 방안과 함께 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

(1) 부도수도의 개선안

2.2절에서 제안한 부도수도 우회항로에 대해 시뮬레이션 검증은 실시한 결과 대상 선박인 50,000 DWT급 Car Carrier가 안전하게 출입할 수 있는 항로임이 확인되었다. 따라서 <그림 2-1>에서와 같이 수심이 양호한 구례사초 좌측 해역에 폭 400 내지 500미터의 우회항로를 신설 지정할 것을 제안한다. 이와 같이 우회항로를 개설해 잠정적으로 사용하되 최종적으로는 준설 예산을 확보하여 부도수도를 수심 12미터까지 준설하여야 할 것이며,

이와 같이 항로를 단계적으로 개선해 나가는 것이 바람직할 것이다.

그리고 부도수도를 수심 12미터까지 준설할 때까지는 부도수도로는 흘수 8.8미터 이하의 선박만 통항하도록 제한하고, 그 이상의 선박은 구례사초 좌측항로로 우회하도록 하여야 할 것이다. 한편 우회항로 이용 대상 선박들 중 흘수 8.8미터 이상 10미터 미만의 선박들은 현재의 관행과 같이 부도수도와 부도 사이의 일반선박출입금지구역선(수심 10미터)을 따라 출입할 수 있게 하는 것이 통항량 분산을 위해 바람직하므로, 이를 위해서 흘수 8.8미터 내지 10미터 선박용 추천 항로를 개설할 필요가 있다. 이렇게 할 경우 마산항 출입 선박의 크기를 세 그룹으로 나누어서 흘수 8.8미터 미만의



<그림 3-15> 부도수도 우회항로에 대한 입항 시물레이션 결과
(최강창조류 및 226도 방향의 25노트의 정횡풍)

<그림 3-16> 부도수도 우회항로에 대한 입항 시물레이션 종합 결과

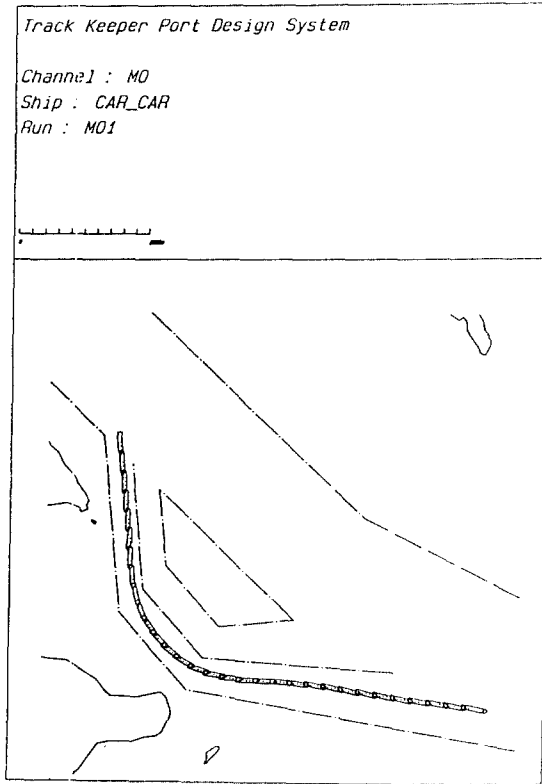
선박은 부도수도로, 흘수 8.8 내지 10미터의 선박은 부도수도 북방의 추천항로로, 그리고 흘수 10미터 이상의 선박은 구례사초 아래쪽의 우회항로로 통항하도록 하면 좋을 것이다.

구례사초 아래쪽에 우회항로를 신설하기 위해서는 다음 각호의 지점을 순차적으로 연결한 선안의 해역으로 마산항로(부도수도)를 수정하여 지정하여야 한다.

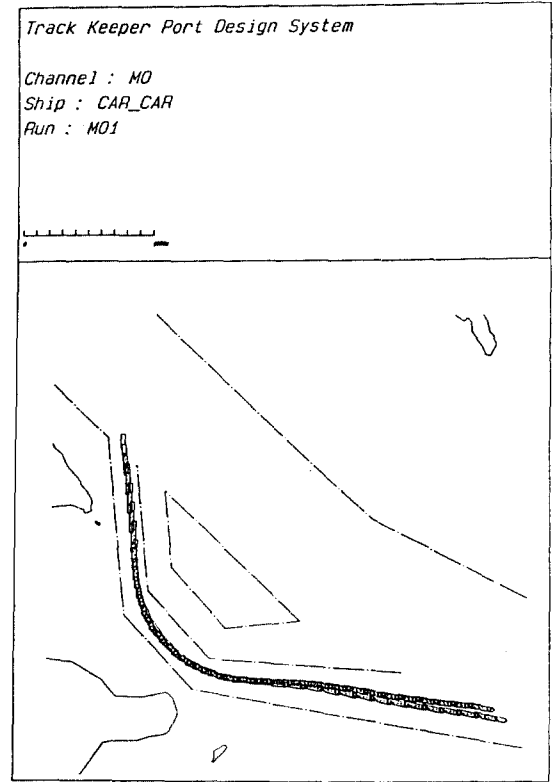
- ① 34° 58' 30" N, 128° 49' 28" E
- ② 35° 01' 32" N, 128° 47' 49" E
- ③ 35° 03' 56" N, 128° 41' 22" E
- ④ 35° 04' 48" N, 128° 39' 12" E
- ⑤ 35° 06' 25" N, 128° 37' 01" E
- ⑥ 35° 06' 02" N, 128° 36' 38" E
- ⑦ 35° 05' 08" N, 128° 37' 52" E

- ⑧ 35° 04' 25" N, 128° 37' 57" E
- ⑨ 35° 04' 07" N, 128° 38' 19" E
- ⑩ 35° 03' 50" N, 128° 40' 14" E
- ⑪ 35° 02' 52" N, 128° 42' 46" E
- ⑫ 35° 02' 17" N, 128° 43' 09" E
- ⑬ 35° 01' 07" N, 128° 46' 54" E
- ⑭ 34° 58' 09" N, 128° 47' 54" E
- ⑮ 35° 04' 24" N, 128° 38' 51" E
- a 35° 04' 55" N, 128° 38' 09" E
- b 35° 04' 36" N, 128° 38' 12" E
- c 35° 04' 22" N, 128° 38' 29" E
- d 35° 04' 24" N, 128° 38' 51" E

그리고 부도수도에 접해 있는 대수 속력 15노트 제한 구역을 다음 각호의 기점을 순차적으로 연결



<그림 3-17> 부도수도 우회항로에 대한 출항 시뮬레이션 결과
(최강창조류 및 226도 방향의 25노트의 정횡풍)



<그림 3-18> 부도수도 우회항로에 대한 출항 시뮬레이션 종합 결과
(최강창조류 및 226도 방향의 25노트의 정횡풍)

한 선안의 해역으로 수정하여 지정해야 한다.

- ① 35° 03' 56" N, 128° 41' 22" E
- ② 35° 04' 48" N, 128° 39' 12" E
- ③ 35° 04' 24" N, 128° 38' 51" E
- ④ 35° 04' 02" N, 128° 38' 51" E
- ⑤ 35° 03' 50" N, 128° 40' 14" E
- ⑥ 35° 03' 32" N, 128° 41' 00" E

그리고 충무항로와 마산항로가 만나는 두 지점 (잠도 좌측)은 다음과 같이 위치를 수정해 주어야 한다.

- ① 35° 04' 02" N, 128° 38' 51" E
- ② 35° 03' 56" N, 128° 39' 27" E

그리고 다음 세 지점을 연결한 선을 홀수 8.8미터 내지 10미터 선박을 위한 추천항로로 지정 고시해 주어야 한다

- ① 35° 04' 26" N, 128° 40' 08" E
- ② 35° 05' 28" N, 128° 39' 23" E
- ③ 35° 06' 00" N, 128° 37' 35" E

(2) 2항로의 개선안

기존 2항로의 항로폭은 50,000DWT급 선박의 출입에는 부족한 것으로 현장 답사 및 자료 검토를 통해 확인되었다. 그리고 2항로의 적정성을 검증하기 위한 시뮬레이션 실험에서도 항로폭이 좁

아 대형선의 안전 통항이 불가능한 것으로 확인되었다. 따라서 2항로의 항로폭을 <그림 2-4>와 같이 확장하는 안을 제안하며, 새 항로폭은 PIANC Rule의 규정에 따라 최대 선폭 32.6미터의 8배에 여유폭 20미터를 추가한 280미터로 한다. 그리고 수심은 12미터로 한다.

이와 같이 하기 위해서는 다음 각호의 기점을 순차적으로 연결한 선 안의 해역으로 2항로를 수정하여 지정한 후, 저수심 구역에 대해서는 수심 12미터까지 준설하여야 한다.

- ① 35° 09' 56.2" N, 128° 35' 35.5" E
- ② 35° 10' 43.2" N, 128° 35' 24.7" E
- ③ 35° 11' 47.8" N, 128° 35' 28.6" E
- ④ 35° 11' 47.8" N, 128° 35' 17.5" E
- ⑤ 35° 10' 42.0" N, 128° 35' 13.3" E

그리고 다음 각호의 지점에 부표를 설치하고 이들 부표는 동기 점멸 방식으로 운영하여야 한다. 기존 부표들은 가까운 새 위치로 이동하거나 철거한다.

- 우현부표: ① 지점 (35° 09' 56.2" N, 128° 35' 35.5" E)
- 우현부표: ② 지점 (35° 10' 43.2" N, 128° 35' 24.7" E)
- 우현부표: ㉠ 지점 (35° 11' 15.3" N, 128° 35' 26.6" E)
- 우현부표: ㉡ 지점 (35° 11' 32.8" N, 128° 35' 27.6" E)
- 우현부표: ③ 지점 (35° 11' 47.8" N, 128° 35' 28.6" E)
- 좌현부표: ④ 지점 (35° 11' 47.8" N, 128° 35' 17.5" E)
- 좌현부표: ㉢ 지점 (35° 11' 32.8" N, 128° 35' 16.7" E)
- 좌현부표: ㉣ 지점 (35° 11' 15.3" N, 128° 35' 15.6" E)
- 좌현부표: ⑤ 지점 (35° 10' 42.0" N, 128° 35' 13.3" E)
- 좌현부표: ⑥ 지점 (35° 10' 01.2" N, 128° 35' 23.3" E)

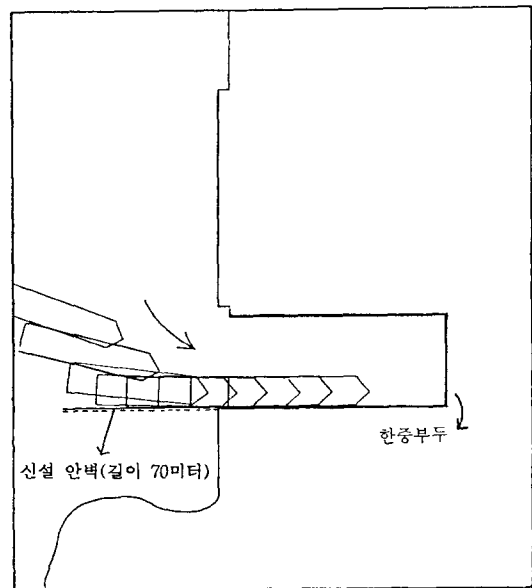
그리고 1항로의 우측 시작 지점을 다음 지점으로

로 이동 지정해 주어야 한다.

- ① 35° 09' 00.0" N, 128° 36' 11.0" E

(3) 한중부두 진입구의 개선안

현장 답사 결과 한중부두 입구의 남쪽 부분은 저수심 해역으로 부두에 출입하는 선박들의 안전 조선에 크게 위협을 주고 있는 것으로 확인되었다. 이 부두는 서쪽 입구만 개방되어 있는 ㄷ자형의 폐쇄형 부두로서, 입구 남쪽 부분이 저수심의 위험 해역인데도 불구하고 특별한 안전 시설이 없이 그대로 방치되어 있어서 출입하는 중량물 운반선 또는 바지선 등이 이 곳에 좌초할 위험이 매우 큰 실정이었다. 이러한 위험성을 제거하기 위해서는 <그림 4-1>과 같이 길이 70미터의 보호용 안벽을 남쪽 부두의 서측 끝단에 연결하여 설치하여야 할 것이다. 이렇게 보호용 안벽을 설치하게 되면 부두에 접안하는 선박들이 그림에서와 같이 안벽에 미끌어지면서 진입 접안할 수 있어서 도선 안전이 크게 증진될 것이다.



<그림 4-1> 한중부두 진입 구역의 개선안(안벽 설치)

5. 결론

마산항 출입 항로를 개선하기 위해 현장 답사 및 시뮬레이션을 통해 확인된 항로의 문제점을 분석하고 문제 항로를 개선하기 위한 항로 개선안 초안을 1차적으로 마련하였다. 그리고 이들 안에 대해 시뮬레이션 검증을 실시하여 그 타당성을 확인한 후 최종적인 개선안을 제시하였다. 제안된 항로 개선안을 요약하면 다음과 같다.

① 부도수도의 개선안

<그림 2-1>에서와 같이 수심이 양호한 구례사초 좌측 해역에 폭 400 내지 500미터의 우회항로를 신설 지정할 것을 제안한다. 이와 같이 우회항로를 개설해 잠정적으로 사용하되 최종적으로는 준설 예산을 확보하여 부도수도를 수심 12미터까지 준설하여야 할 것이며, 이와 같이 항로를 단계적으로 개선해 나가는 것이 바람직할 것이다. 그리고 부도수도를 수심 12미터까지 준설할 때까지는, 마산항 출입 선박의 크기를 세 그룹으로 나누어서 흘수 8.8미터 미만의 선박은 부도수도로, 흘수 8.8 내지 10미터의 선박은 부도수도 북방의 추천항로로, 그리고 흘수 10미터 이상의 선박은 구례사초 아래쪽의 우회항로로 통항하도록 하면 좋을 것이다.

② 2항로의 개선안

2항로의 항로폭은 50,000DWT급 선박의 출입에는 부족한 것으로 현장 답사 및 시뮬레이션 검증을 통해 확인되었다. 따라서 2항로의 항로폭을 <그림 2-4>와 같이 확장하는 안을 제안하며, 새 항로폭은 PIANC Rule의 규정에 따라 280미터로 하고, 수심은 12미터로 한다.

③ 한중부두 진입구의 개선안

한중부두는 서쪽 입구만 개방되어 있는 ㄷ자형의 폐쇄형 부두로서, 입구 남쪽 부분이 저수심의 위험 해역인데도 불구하고 특별한 안전 시설이 없이 그대로 방치되어 있어서 출입하는 중량물 운반선 또는 바지선 등이 이 곳에 좌초할 위험이 매우 큰 실정이다. 이러한 위험성을 제거하기 위해서 <그림 4-1>과 같이 길이 70미터의 보호용 안벽을 남쪽 부두의 서측 끝단에 연결하여 설치할 것을

제안한다.

사 사

이 논문은 1996년도 한국과학재단의 핵심전문연구과제(과제번호 961-1204-016-1) 연구비에 의해 연구되었으며, 지원해주신 재단에 감사드린다. 그리고 자문에 응해주신 한국도선사협회 마산지회의 이보연, 박춘길, 오정균 도선사님께 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 해운항만청, 연안해역의 항행환경조사 및 항로 개선에 관한 연구, 1994
2. Comstock, J. P., Principles of Naval Architecture, the Society of Naval Architects and Marine Engineers, N. Y., 1967, pp. 463-603
3. McCallum, I. R., A New Approach to Manoeuvring Ship Simulation, Doctoral Thesis of the Department of System Science of City University, London, 1976
4. ibid.
5. ibid.
6. Kettenis, D. L., "On the Mathematical Description of Ship Manoeuvring", Netherlands Ship Model Basin, Wageningen, Holland
7. Nomoto, K., "Problems and Requirements of Directional Stability and Control of Surface Ships", Journal of Mech. Eng. Sci., Vol. 14, No. 7, 1972, pp. 1-5
8. 김환수, "선박의 안전을 위한 최적 항로배치 및 항로폭 결정에 관한 연구", 해양안전학회지, 제 1권 제1호, 1995, pp. 9-25