

論 文

광양항 LNG 터미널 접근항로 안전성에 관한 시뮬레이션 연구

정 태 권* · 홍 종 해**

A Simulation Study on the Safety of the Approach Channel of LNG Terminal at Kwangyang Harbour

Tae-Gweon Jeong · Jong-Hae Hong***

Abstract	4. 선박조종시뮬레이션에 의한 LNG 터미널 접근항로의 안전성 검토
1. 서 론	5. 결 론
2. 광양항 LNG 터미널 항만건설 계획	참고문헌
3. LNG 터미널 접근항로의 적정성 검토	

Abstract

This study aims at examining the safety of the would-be approach channel of LNG Terminal at Kwangyang Harbour, by utilizing Captains 2000 port-design simulator. Six competent shipmasters or navigators participated in this study. The developed model ship was a 70,200DWT (138,000m³) LNG carrier. The environmental conditions were maximum flood-and-ebb current condition and wind condition.

To evaluate the navigational safety, two categories were analyzed, which were measures of vessel's proximity and shiphandler's subjective evaluations.

With respect to the effects of the worst environmental conditions on transit safety, it was concluded that the would-be approach channel was safe on basis of the support of four tugs of 3,200hp or more and current speed of 0.5knots or less.

* 정희원, 한국해양대학교 해사대학 조교수

** 정희원, 해양수산부 사무관

1. 서 론

본 연구는 광양항 자가용 LNG 터미널 접근항로 계획안의 타당성을 ECO/SimTech사의 Captains 2000 시뮬레이터를 이용하여 검증하고 문제점이 발견될 경우 적정한 대안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 즉, 선행연구[1][2]에서 제시된 LNG 터미널 및 그 접근항로에 대하여 바람, 조류, 수심 등과 같은 자연 조건을 고려하여 모델선박인 138,000m³ (70,200DWT)급 LNG 선박의 접·이안 가능성과 적절한 접·이안 방법, 통항 안전성 등을 선박조종 시뮬레이터를 이용하여 확인하고 그 결과 문제점이 도출되면 새로운 선박 조종 방법, LNG 터미널 및 수역시설의 조정 등과 같은 대안을 마련한다.

본 연구의 내용은 다음과 같다.

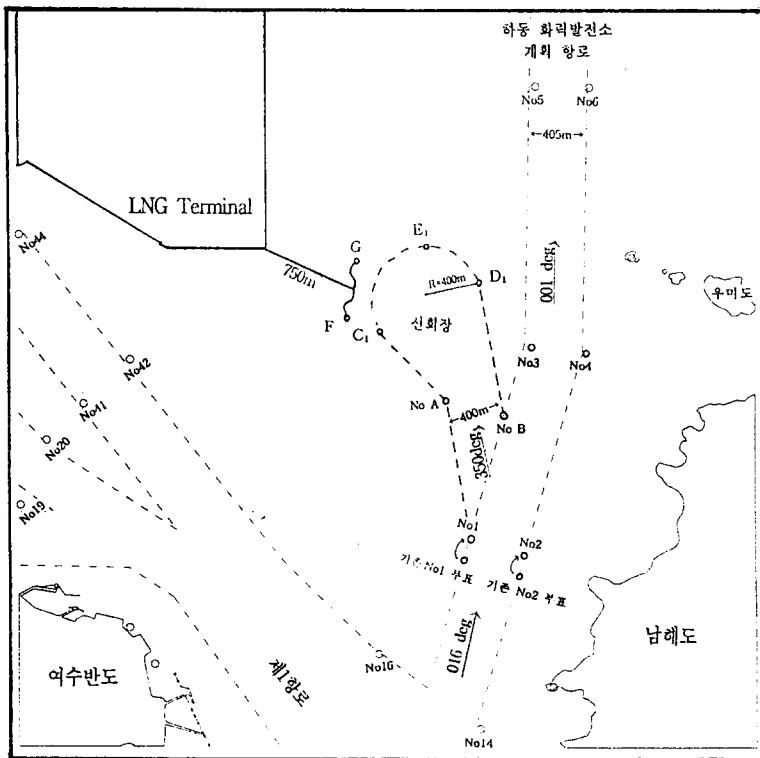
- (1) 항만시설물 설계기준에 따른 LNG 터미널 접근항로의 배치와 항로폭 및 수심

- (2) LNG 터미널 접근항로에 설치할 항로표지의 종류 및 위치
- (3) 선회장의 위치, 면적, 수심
- (4) LNG 터미널 접근항로에서의 안전성
- (5) 예산의 소요량

2. 광양항 LNG 터미널 항만건설 계획

광양항 LNG 터미널은 광양제철소 자가발전용 연료에 대한 신규 수요의 급격한 증가와 아울러 GREEN ROUND 등 국내·외 각종 환경오염 규제에 따라 청정 연료인 LNG의 사용 필요성 때문에 건설계획이 추진되고 있다.

LNG 터미널은 138,000m³ 급(70,200DWT) LNG 전용 선박이 안전하고 원활하게 접·이안 및 하역을 할 수 있도록 계획되어 있다. 이 계획안에는 <그림 1>과 같이 트레슬(Trestle)의 길이 750m, 접근



<그림 1> LNG 터미널 접근항로의 계획안

항로 폭 400m, 선회장의 지름 800m로 되어 있다.

3. 항만시설물 기준에 따른 LNG 터미널 접근항로의 적정성 검토

여기서는 LNG 선박의 통항 안전성에 대한 시뮬레이션 검토에 선행하여 LNG 부두의 접근항로의 설계가 항만시설물 설계기준에 적합한지를 PIANC Rule[3], 미국의 항만시설물 설계기준[4][5], 우리나라 및 일본의 「항만시설물 설계기준서」[6]에 제시된 관련 설계기준으로 비교 검토하기로 한다.

3.1 LNG 터미널 접근항로의 폭 및 배치

3.1.1 항로폭

LNG 터미널 접근항로의 폭은 400m로 계획되어 있다. 이것은 LNG 터미널에 출입하는 선박의 선폭 48.2m, 길이 288m를 기준으로 한 것이다.

- (1) PIANC Rule은 선폭의 8~10배를 항로폭으로 요구하므로 접근항로의 폭은 386~482m가 된다.
- (2) 미국의 항로 설계 기준은 선폭의 5.4~8.5배를 항로폭으로 요구하므로 접근항로의 폭은 260~410m가 된다.
- (3) 우리나라 및 일본의 항만설계기준은 항로의 거리가 길지 않고 빈도도 크지 않은 항로의 경우 선체길이의 1배를 요구하므로 접근항로의 폭은 288m가 된다.

이상에서 살펴본 항만시설물 설계기준의 요구 기준을 종합하면 항로폭 260~482m를 요구하고 있으므로 현재 제안된 LNG 터미널 접근항로의 폭 400m를 감안하면 비교적 적정한 수준이라고 판단된다.

3.1.2 접근항로의 배치

본 연구의 LNG 터미널 및 접근 항로 배치 결정 요소는 <표 1>과 같다. 만곡도의 경우 우리나라 및 일본의 항로 설계 기준은 가능하면 30° 미만을 요구하고 있으므로 본 연구의 LNG 부두 접근항로의 만곡도는 26°~27°로서 이 기준에 부합하다고

볼 수 있다.

곡률 반경의 경우 PIANC Rule은 최소 5L, 즉 1440m(5×288m), 미국의 항만시설물 설계기준은 만곡도가 25° 미만이면 최소 3L, 즉 864m(3×288m)이고 길이가 500ft 이상이면 2133.6m 이상을 요구하고 있다. 또 우리나라 및 일본의 항만시설물 설계기준은 4L, 즉 1152m(4×288m)를 요구하고 있다. <표 1>의 곡률 반경 1250m는 우리나라 및 일본의 항만 시설물 설계 기준에는 부합하나 PIANC Rule 및 미국의 항만 시설물 설계 기준에는 미흡하다.

직선거리의 경우 PIANC Rule은 최소 10L, 즉 2880m(10×288m) 이상을, 미국의 항만시설물 설계 기준은 최소 5L 즉 1440m(5×288m)을 요구하고 있다. <표 1>의 직선거리 1570m는 미국의 항만시설물 설계기준에는 부합하나 PIANC Rule에는 미흡하다.

조류 방향과 항로 방향과의 사이 각의 경우 PIANC Rule에서는 10° ~15° 를 넘지 않도록 요구하고 있는데 <표 1>에서 이 각도는 22° ~32° 로서 이 기준을 만족하고 있지 않다.

따라서 LNG 부두 접근항로의 배치는 항만시설물 설계기준에 다소 미흡한 것으로 보여지나 No. 1 부표 통과할 때 예선의 도움을 받는다면 적정한 것으로 판단된다.

<표 1> 항로 배치 결정 요소

	만곡도	곡률 반경	직선 거리*	조류방향과의 사이각	
				창조류	낙조류
제1안	026°	1250m	1570m	031°	022°
제2안	027°	900m	1300m	032°	023°

* 직선거리는 변침 완료후의 지점에서 선회장 중심까지의 거리임

3.2 항로 수심

LNG 터미널의 항로수심은 DL(-) 14.0m로 계획되어 있다. 이것은 LNG 터미널 출입선박의 길이 288m, 만재흘수 11.25m를 감안한 것이다.

- (1) PIANC Rule에서는 항로 수심의 경우 open

sea 해역에서 총선저 여유수심을 홀수의 20%로 정하고 있으므로 약 2.3m의 여유 수심이 필요하다. 따라서 필요 수심은 13.55m가 된다.

- (2) 한국 및 미국, 일본의 항로 설계 기준은 파랑에 의한 영향, 선체침하(squat)에 의한 영향, 트림(Trim)에 의한 영향 등을 고려하여 정하도록 하고 있다. 이에 따라 계산한 필요 수심은 13.75m이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 항로 설계 기준이 요구하는 수심의 크기는 13.55~13.75m이므로 계획된 수심 14m는 적절한 값으로 평가된다.

3.3 선회장 크기

LNG 터미널의 선회장의 지름은 800m로 계획되어 있다. 이것은 출입선박의 길이 288m를 감안한 것이다.

- (1) PIANC Rule에서는 선체길이의 2.3배를 직경으로 하는 원을 선회장으로 요구하므로 선회장 크기는 직경 662m가 된다.
- (2) 미국, 우리 나라 및 일본의 항로설계기준은 최소한 선체 길이의 2배를 직경으로 하는 원을 선회장으로 요구하므로 선회장 크기는 직경 576m가 된다.

이상에서 살펴본 선회장 크기에 대한 설계기준을 종합하면 선회장 직경은 576~662m이므로 계획된 직경 800m 크기의 선회장은 적절한 크기로 판단된다.

4. 선박조종시뮬레이션에 의한 LNG 터미널 접근항로의 안전성 검토

여기에서는 138,000^m³급(70,200DWT)의 LNG 운반선을 모델선박으로 입력하여 Captains 2000 시뮬레이터를 이용하여 최악의 환경조건에서의 LNG 터미널 접근항로에 대하여 선박의 통항안전성을 검증하기로 한다.

4.1 선박조종 시뮬레이션 과정

LNG 터미널 접근항로 안전성 평가를 위한 시뮬

레이션은, 조류, 바람 등에 관한 데이터베이스의 개발, 모델선박의 조종 특성 분석을 통한 선박 수확 모델의 개발, 조종자의 모델선박 조종, 조종 결과의 분석과정으로 이루어진다. 특히 본 연구에서 모델선박의 조종은, 승무 경험이 많은 선장이나 도선사의 의견을 참고한 후 이론을 토대로 표준조종모델을 만들고 이 모델에 따라 항해사 및 선장의 경험에 있는 연구진이 직접 한다.

4.1.1 시뮬레이션 데이터베이스의 개발

시뮬레이션을 위한 데이터베이스는 영상 데이터베이스, 레이더 데이터베이스, 수심 데이터베이스 및 조류 데이터베이스의 4가지로 이루어진다. 이들 데이터 베이스를 국립 해양조사원이 발행한 해도와 조류도, 광양항 LNG 터미널 건설 예정지의 건설계획도면, 관련 사진 등을 기초로 하여 구축하였다.

4.1.2 선박운동방정식의 개발

광양항 LNG 터미널에 출입할 선박들 중 규모가 가장 크고 따라서 조종 성능이 제일 열악할 것으로 예상되는 적재용량 138,000^m³(70,200DWT)급 MOSS TYPE LNG 선박을 모델선박으로 정하였다. 이 모델선박의 제원은 <표 2>와 같고 이 모델선박의 수학 모델은 Heuristic Type Mathematical Model[7]이다.

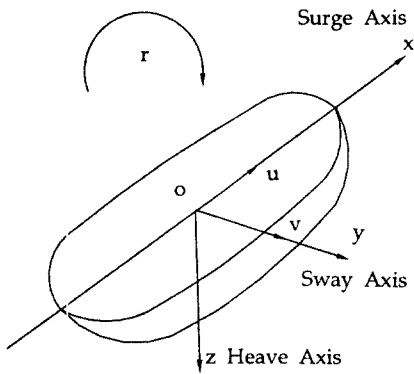
<표 2> 모델선박의 제원

명 세	크 기
전장(LOA)	288m
수선간장(LBP)	274m
선폭(B)	48.2m
만재 홀수(d)	11.25m
경하 홀수(d)	9.75m
재화중량톤(DWT)	70,200ton
LNG 적재량	138,000 ^m ³
풍압면적(측면만재시)	7,775 ^m ²
풍압면적(정면만재시)	1,613 ^m ²
수압면적(측면만재시)	3,082.5 ^m ²
수압면적(정면만재시)	542.2 ^m ²
프로펠라형	고정형
축수	1
속력(전진전속)	20.3kts
마력	39,000SHP
RPM	86
총톤수(G/T)	117,000ton

1) 좌표계

본 시뮬레이션에 사용한 선박운동방정식의 좌표계는 <그림 2>와 같다.

선박의 중앙지점 O로부터 선수쪽 방향을 X축, 우현쪽을 Y축, 선저쪽 방향을 Z축의 양(+)의 방향으로 하는 고정된 직각 좌표계를 사용하여 Surge, Sway 속도 및 Yaw 율을 표현한다. Surge 속도는 u(m/s)로 나타내고, Sway 속도는 v(m/s)로, Yaw 율은 r(rad/s)로 나타낸다.



<그림 2> Axis system

2) 선박운동방정식

최종 선체운동방정식은 기본 선체 운동방정식 d_1, d_2, d_3 에 바람과 조류의 영향, 예선의 영향을 가산하여 구성된다. 즉, Surge 속도 $d(1)$, Sway 속도 $d(2)$, Yaw rate $d(3)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} d(1) &= \int_0^t \left(d_1 + \frac{UW}{K_{(23)}} + \frac{UC}{K_{(16)}} + \frac{T_{xt}}{K_{(36)}} \right) dt \\ d(2) &= \int_0^t \left(d_2 + \frac{VW}{K_{(24)}} + \frac{VC}{K_{(17)}} + \frac{T_{yt}}{K_{(37)}} \right) dt \\ d(3) &= \int_0^t \left(d_3 + \frac{RW}{K_{(25)}} + \frac{RC}{K_{(18)}} + T_{mt} \right) dt \end{aligned} \right\} (1)$$

단,

d_1, d_2, d_3 : 기본방정식으로 구한 선박의 종방향, 횡방향 가속도, 선수 각가속도
 UW, VW, RW : 바람의 영향에 의한 선박의 종

방향, 횡방향 가속도, 선수 각가속도

UC, VC, RC : 조류에 의한 선박의 종방향, 횡방향 가속도, 선수 각가속도

T_{xt}, T_{yt}, T_{mt} : 예선에 의한 선박의 종방향, 횡방향 가속도, 회두 모멘트임.

여기서 식 (1)을 적분하면 선수 이동거리, 횡방향 이동거리, 회두각을 구할 수 있어 바로 다음의 위치와 선수 방위를 계산할 수 있다. 이 적분은 보통 오일러(Euler) 적분법을 이용한다.

4.2.3 표준 조종모델의 결정

시뮬레이션 실험을 실시하기 전에 먼저 모델선박을 목표 지점까지 이동시키는데 필요한 표준적인 조종 모델을 설정한다. 이 표준조종모델은 조류, 바람의 상태, 모델선박의 조종 특성 등에 따라 다르며 승선 경험이 많은 선장 또는 도선사의 의견을 참고하여 설정한다. 본 연구에서는 출선자세로 접안한 후 그 자세에서 출항하는 것으로 하였다. 그 이유는 LNG 선박과 같은 위험화물선의 경우 비상 시에는 언제든지 자력으로 출항할 수 있도록 출선 자세의 입항을 권고하기 때문이다.

4.2.4 예비 및 본 시뮬레이션

설정된 표준조종모델의 타당성을 검증하고 필요에 따라 모델을 수정하기 위해 예비 시뮬레이션을 실시하고, 이를 토대로 하여 필요시 표준조종모델을 수정한다.

선박운항에 소요되는 실시간 차원에서 시뮬레이터를 이용하여 선박조종 시뮬레이션을 실시하며 모델선박의 궤적을 출력하여 근접도와 제어도를 파악하며, 조종자의 심적 부담도, 조종의 난이도 등 조종자의 주관적 평가도 파악하여 기록한다.

4.2.5 시뮬레이션 평가

위의 시뮬레이션 결과 수집된 각종 자료들을 바탕으로 선박 운항 안전성을 주관적 및 통계적 방법을 이용해서 분석 및 평가한다.

시뮬레이션 결과를 평가하는 방법에는 선박의 근접도 평가, 선박의 제어도 평가, 조종자의 주관적 평가가 있다. 시뮬레이션 횟수, 대상 해역 및 선박의 특성 등에 따라 세가지 방법 모두를 이용하여 평가하기도 하고, 제어도 평가를 제외하고 두 가지 평가방법만을 이용하여 평가하기도 한다.

1) 선박의 근접도 평가

선박의 근접도 평가는 다음과 같이 한다. 먼저 접근시 위험이 예상되는 기준점 또는 기준선을 설정한다. 그리고 이 기준점 또는 기준선과의 최근접거리를 측정한다. 접·이안 안전성 평가의 경우 선회장 외곽선이 위험 기준선이 될 수 있으며, 항로상의 출입안전성을 평가할 때는 항로외곽선 또는 특정 부표가 기준선 또는 기준점이 된다. 그리고 이들 거리에 대한 확률분포를 구하여 평가대상지점을 벗어날 확률을 구한다. 여기서 최근접거리는 선박이 어떤 기준점 또는 기준선을 지날 때 선박의 끝과 기준점 또는 기준선과 가장 가까운 거리를 말한다.

한편 최근접거리의 확률분포를 정규분포라 가정하고 이것으로 기준점을 침범할 확률을 구한다.

TNO의 보고[8]에 따르면 LNG선박의 경우 이 침범확률이 항로경계에서는 0.001, 항만내 또는 방파제 입구에서는 0.0001보다 작을 때 안전하다고 평가한다. 본 연구에서는 시뮬레이션 구역이 항내이고 특히 위험선인 LNG선이 대상 선박이므로 침범확률 0.0001을 근접도 평가의 기준으로 삼는다.

2) 선박의 제어도 평가

선박의 제어도에 대한 평가는 특정수역에서의 모델 선박의 조종량의 평가로서 선박조종상의 어려움이 예상되는 수역을 대상으로 한다. 평가 내용은 선수방위변동량, 요레이트, 타각사용량, 기관사용량, 선박의 속력, 선박의 편이량 등이다. 본 연구에서는 근접도 평가만으로 소기의 목적을 달성할 수 있으므로 이를 생략하기로 한다.

3) 조종자의 주관적 평가

시뮬레이션으로 선박 통항의 안전성을 평가하는데 있어 전술한 객관적 평가는 매우 중요하며 그 의미도 크다. 그러나 선박은 인간인 조종자가 제어 시스템의 내부에 포함되며, 조종자가 판단하고 제어한다는 측면에서 계량화되지는 않는 부분이지만 조

종자의 주관적 평가를 동시에 고려하여야만 한다.

이 평가의 주요 내용은 조류 및 바람 등의 외력 조건하에서 특정 해역, 특정 부두에의 접·이안 및 입출항 조건과 관련하여 선박의 특성에 따라 개개의 조종자가 느끼는 심적 부담도, 조종의 난이도 등이 된다.

4.3 시뮬레이션 실시 조건

4.3.1 바람 및 조류

본 연구에서는 환경 조건인 바람과 조류는 가급적 예상되는 최대의 값을 입력하여 시뮬레이션한다.

시뮬레이션 대상 해역은 광양항 LNG 터미널 인근 해역으로서, 광양항의 탁월풍은 겨울철 북서풍이므로 이를 바람 방향으로 정하고, 풍속은 광양항의 출입의 허용 풍속인 26 kts[9]로 하여 실험한다.

그리고 조류는 <표 3>과 같이 최강 창조류와 최강 낙조류로 하였는데 LNG 터미널 접근항로의 경우 021° 0.9 kts, 192° 1.4 kts[10]를 각각 입력한다.

<표 3> 시뮬레이션 실시 조류 및 바람

자 연 조 건		LNG 터미널 접근항로
바람(탁월풍)		NW 26kts
조 류	창조류	021° 0.9kts
	낙조류	192° 1.4kts

4.3.2 항로 및 항로표지

본 연구의 선박조종 시뮬레이션 대상 항로는 LNG 터미널 접근항로이다. LNG 터미널 접근항로는 <표 4> 및 <그림 1>과 같이 구성되어 있다.

또 LNG 터미널 접근항로의 항로표지는 <그림 1>에서와 같이 하동 화력발전소 진입항로와 LNG 터미널 접근항로의 연결 부위에 No. A와 No. B부표를, 선회장의 좌우측 경계에 좌현 부표(No. C₁)와 우현부표(No. D₁)를, LNG 터미널 양끝에 작업용 등대 F, G를 신설한다. 다만 No.1, No.2 부표는 기존의 것을 이설하여 사용하는데, 현위치에서 북북동쪽으로 350m 이동한다.

<표 4> LNG 터미널 접근항로 및 선회장 명세

	항로 경계	항로			선회장
		경위도	경위도	경위도	
LNG 터미널	좌측	No.1 부표 (34° 51' 55" N127° 48' 14" E)	No.A 부표 (34° 51' 23" N, 127° 48' 07" E)	No.C ₁ 부표 (34° 52' 39" N, 127° 47' 46" E)	지점(34° 52' 48" N, 127° 47' 58" E)을 중심 으로 반경 400m의 원임.
	우측		No.B 부표 (34° 52' 22" N, 127° 48' 23" E)	No.D ₁ 부표 (34° 52' 57" N, 127° 48' 12" E)	

<표 5> LNG 터미널 접근항로의 항로표지의 상세

명칭	부표종류	위치	등질	광도	비고
No. 1	좌현부표	34° 51' 55" N / 127° 48' 14" E	Fl G 4s	75cd	이설
No. 2	우현부표	34° 51' 52" N / 127° 48' 29" E	Fl R 4s	75cd	이설
No. A	좌현부표	34° 52' 23" N / 127° 48' 07" E	Fl(2) G 6s	75cd	신설
No. B	우항로 우선부표	34° 52' 22" N / 127° 48' 23" E	Fl(2+1) G 6s	75cd	신설
No. F	등대	34° 52' 44" N / 127° 47' 35" E	Fl Y 4s	75cd	신설
No. G	등대	34° 52' 57" N / 127° 47' 38" E	Fl Y 4s	75cd	신설
No.C ₁	좌현부표	34° 52' 39" N / 127° 47' 46" E	Fl(2) G 4s	75cd	신설
No.D ₁	우측부표	34° 52' 57" N / 127° 48' 12" E	Fl(3) R 6s	75cd	신설

위에서 설명한 항로표지의 상세는 다음 <표 5>와 같다. 신설 혹은 이설되는 항로표지의 광도는 35cd이면 충분하지만 주간 식별을 편리하게 하기 위하여 75cd[11]로 높였다.

4.3.3 예선의 적정마력 및 척수 산정

LNG 터미널 인근 해역은 저수심이고 출입하는 선박은 대형 LNG선이기 때문에 예선의 도움 없이는 조선이 불가능하다.

선박의 조종을 보조하는 예선의 척수 및 마력은 선박의 크기, 모양, 접근수로, 부두 시설의 위치 및 종류, 기타 환경 조건 등과 예선의 활동 위치에 영향을 받는다.

본 연구에서 선박의 접·이안 작업에 필요한 예선의 마력 및 척수[12]를 구하기 위하여 다음과 같이 정한다.

- ① 안벽의 전방 적당한 거리 예를 들어 80~

150m에서 일단 선체를 정지시키고 안벽에 평행하게 예선으로 민다.

- ② 선박의 정횡방향이동 대지속력을 최대 0.05m/s로 한다.
- ③ 바람, 조류 속력에 따른 풍압, 수압의 횡저항을 구한다.
- ④ 예선의 소요 Thruster를 전 저항의 1.5배로 한다. 위의 4개항을 기본으로 하여 소요마력의 계산은 다음과 같은 과정으로 한다. 먼저 풍압의 횡저항을 식(2)에 의거하여 계산한다.

$$R_{ay} = \frac{1}{2} \rho C_{ay} B v_a^2 \dots\dots\dots (2)$$

단, R_{ay} 는 풍압횡저항(ton), ρ 는 공기밀도로 $0.125 \times 10^{-3} \text{ (ton sec}^2 \text{ m}^{-4})$ C_{ay} 는 풍압횡저항계수, B 는 수선상 선체의 정횡투영면적(m^2), v_a 는 풍속(m/s)이다. 그런데 풍압횡저항계수는 선형에 따라 다르지만 기관이 선미에 있는 50,000DWT 탱커는 만

재상태에서 0.669, 150,000DWT 탱커는 만재상태에서 0.950이다. 본 연구의 모델선박인 70,200DWT LNG 선박의 경우는 이를 보간하여 구하면 0.726이 된다.

그리고, 수압저항을 식(3)에 의거하여 계산한다.

$$R_{wy} = \frac{1}{2} \rho C C_{wy} L d (v_s + v_c)^2 \dots\dots\dots (3)$$

단, R_{wy} 는 수압횡저항(ton), ρ 는 해수밀도 즉 0.1046(ton), C 는 천수영향계수, C_{wy} 는 침수에서의 횡저항계수, L 은 선체길이 즉 수선간장(m), d 는 평균흘수(m), v_s 는 선체의 횡이동대지속력(m/s), v_c 는 조류의 속력(m/s)이다. 천수영향계수 C 는 수심에 대한 평균흘수의 비로 구할 수 있는데 여기서는 이 비가 1.2(14/11.25)이므로 3.6을 사용한다. 수압의 횡저항계수 C_{wy} 는 60,000DWT 탱커가 0.81, 100,000DWT 탱커가 0.97이므로, 이를 보간하여 구하면 70,200DWT LNG 탱커는 0.85가 된다.

그 다음 예선의 소요 마력을 식(4)를 이용하여 구한다.

$$T = (R_{ay} + R_{wy}) \times 1.5 \dots\dots\dots (4)$$

마지막으로 예선의 소요전달마력을 통상으로 쓰이는 예선(VSP)을 기준으로 식(5)를 이용하여 구한다.

$$EHP = T \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

이들 식을 이용하여 선체의 수선간장 274m, 흘수 11.25m, 풍압면적 7,775m² 인 모델선박이 필요로 하는 예선의 소요전달마력을 구한다.

<표 6>에서 보듯이 풍속 23 kts, 조류의 속력 0.5

kts이하이면 3,700마력 예선 4척이, 풍속 20 kts, 조류의 속력 0.5 kts이하이면 3,200마력 예선 4척이, 풍속 17 kts, 조류의 속력 0.6 kts이하이면 3,500마력 예선 4척이, 풍속 14 kts, 조류의 속력 0.7 kts이하이면 3,800마력 예선 4척이, 풍속 8 kts, 조류의 속력 0.8 kts이하이면 4,200마력 예선 4척이 필요함을 알 수 있다.

한편 광양항의 3,000마력 이상 예선 현황을 살펴보면 97년 10월 현재, 3,000마력 2척, 3,100마력 1척, 3,200마력 2척, 3,400마력 2척, 3,600마력 2척, 4,200마력 3척 등 12척이 있다. 충분한 예선의 확보가 필수적인 것이므로 광양항의 현재의 상황을 고려할 때 풍속 20 kts, 조류의 속력 0.5 kts이하 일 때 3,200마력 이상 예선 4척의 도움을 받아 출입하는 것이 안전한 접·이안 조선을 위해서는 필요하다고 생각된다.

4.4 선박조종 시뮬레이터를 이용한 선박통항 안전성 평가

여기서는 새로 건설된 광양항 LNG 터미널에 출입할 70,200 재화중량톤급 대형 LNG선박의 접근항로에서의 안전성 여부를 선박조종시뮬레이션 기법을 이용하여 점검하고 그 결과를 분석한다.

그 방법은 각각의 상황에 대하여 시나리오를 작성한 후 승무경험이 충분한 연구진으로 구성된 시뮬레이션 수행팀이 시나리오에 따라 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 분석 평가한다.

4.4.1 LNG 터미널 시뮬레이션 조건과 변수

1) 독립변수

시뮬레이션의 외력조건을 조류, 바람, 시계, 주야

<표 6> 소요 예선의 마력 및 척수

풍속 (kts)	조류속력 (kts)	횡저항		총 횡저항	소요마력	필요 예선의 척수
		풍압	수압			
23	0.5	49.40	47.41	96.81	145.22	3,700마력 이상 × 4척
20	0.5	37.38	47.41	84.79	127.19	3,200마력 이상 × 4척
17	0.6	27.03	63.93	90.96	136.44	3,500마력 이상 × 4척
14	0.7	18.30	82.93	101.23	151.85	3,800마력 이상 × 4척
8	0.8	5.99	104.39	110.38	165.58	4,200마력 이상 × 4척
8	0.9	5.99	128.31	134.3	201.45	5,040마력 이상 × 4척

등을 들 수 있지만 본 연구에서는 조류, 바람을 독립변수로 두었다. 바람의 경우는 315° 26 kts, 창조류 021° 0.9 kts, 낙조류 192° 1.4 kts로 각각 구분하여 시뮬레이션 수행을 최악의 환경 조건으로 선택하여 수행하였다.

2) 종속변수

선박운항 안전성을 평가하기 위하여 사용한 종속변수는 선박의 근접도이다. 선박 근접도는 항로 경계 혹은 선회장의 경계 등의 기준점과의 최근접 거리와 이를 이용한 침범확률을 채택하였다.

3) 시나리오 설계

입항의 경우 창조류, 낙조류시 각각 5회 등 모두 10회의 시뮬레이션을 실시하였고 출항의 경우에도 같은 방법을 적용하여 총 20회의 시뮬레이션을 실시한다.

4.4.2 LNG 터미널 및 접근항로의 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션의 분석은 항로경계 등과의 근접 정도를 나타내는 근접도 평가와 최종 조선자의 주관적 평가로 한다. 또 입·출항 모두 분석을 하여야 하나 출항의 경우는 입항의 경우에 비하여 조선상의 어려움이 없으므로 여기서는 생략하기로 한다.

1) LNG 터미널 및 접근항로의 근접도 평가

LNG 터미널 및 접근항로의 기준점은 입항의 경우 <그림 1>의 No. 2 부표, No. B 부표, E₁점이고 출항의 경우는 C₁점, No. A 부표, No.1 부표이다. 근접도 평가란 이들 기준점까지의 최근접거리로 표현하여 분석한다.

LNG 터미널 및 접근항로의 근접도 변수의 기술통계량은 <표 7>과 같다. No. 2 부표와의 최근접거리는 창조류일 때 73.3m, 낙조류일 때 77.5m이고 No. B 부표와의 최근접거리는 창조류일 때 93.1m, 낙조류일 때 90.3m로서 이들은 거의 차이가 없다. 다만 E₁점과의 거리는 창조류일 때 367.0m, 낙조류 321.5m로서 창조류일 때가 더 크게 나타나는데 이는 조선자가 선미쪽에서 받는 조류를 의식하여 미리 좌회두한 것으로 파악된다.

또한 입항시 모델선박의 항적에 대한 복합 플롯

결과는 <그림 3>, <그림 4>와 같다. 항적을 보면 창조류일 때가 낙조류일 때보다 전반적으로 더 넓게 나타나고 있다. 이것은 선미쪽에서 받는 조류의 영향으로 선박의 제어가 쉽지 않기 때문으로 생각된다.

모델선박의 기준점에서의 침범확률은 <표 8>에 나타나 있듯이 전 지점에서 TNO 보고의 권고확률인 0.0001보다 작게 나타나고 있다. 이로 볼 때 최악의 상태에서의 접안 조선은 안전한 것으로 파악된다.

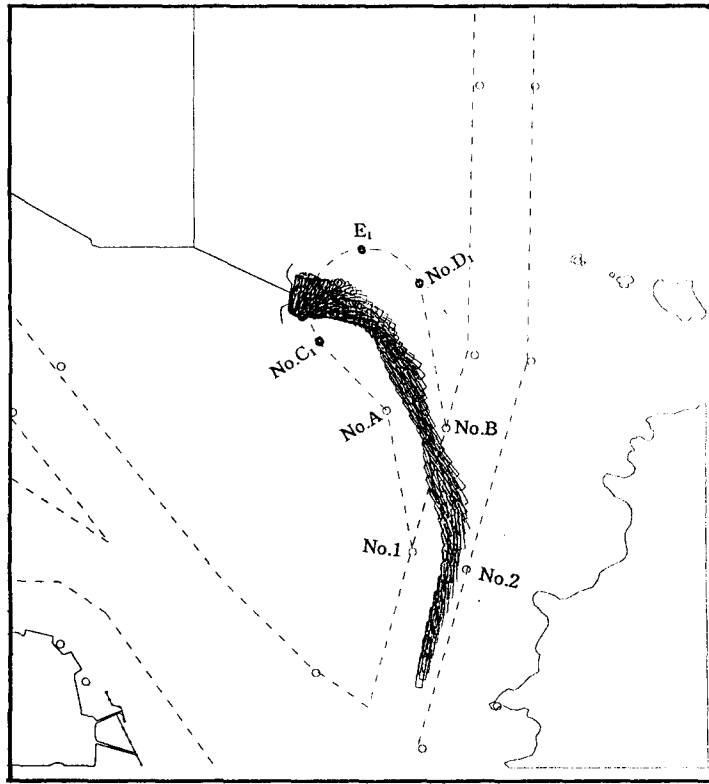
2) LNG 터미널 및 접근항로의 주관적 평가

입항시의 주관적 평가는 조선자가 느끼는 것으로서 창조류의 순조의 영향으로 인한 스트레스는 전반적으로 크게 나타난다. 근접도 평가에서 환경 조건 즉, 창조류 0.9 kts, 낙조류 1.4 kts에서의 근접도 평가를 보면 침범확률 즉, 좌초확률 혹은 충돌 확률이 낮아 안전성이 있게 나타난 것은 조류의 방향과 바람의 방향이 거의 66° ~ 123° 로 교차하여 풍압과 수압의 영향이 모델선박에게는 일부 상쇄되어 나타나기 때문이다.

그러나 실제적으로는 <표 6>에서 보듯이 횡방향 수압만을 고려하면 선회중 조류와 직각으로 작용이 있을 때 수압은 0.9 kts일 때 128.31(ton)으로 모델 선박 자체의 힘을 사용하기 않으면 4척의 예선이 전부 작용하여도 모델선박의 통제는 어렵다. 다행히 이 상태가 오래 지속되는 것이 아니기 때문에 모델 선박의 기관을 적절하게 사용하면 이 상태를 무난하게 벗어날 수 있다. 그러나 이때의 특별한 주의가 필요하다는 것이 조선자에게는 큰 부담을 주고 있다. 따라서 창조류 0.9 kts, 낙조류 1.4 kts하에서의 접안 조선은 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

<표 7> LNG 터미널 및 접근항로 근접도 변수의 기술통계량(입항)

기준점	최근접거리(창조류)			최근접거리(낙조류)		
	평균	표준편차	최소최근접거리	평균	표준편차	최소최근접거리
No. 2 부표	73.3	10.4	56.4	77.5	20.2	47.0
No. B 부표	93.1	16.1	70.5	90.3	23.9	65.0
E ₁ 점	367.0	50.5	296.1	321.5	18.4	296.1



<그림 3> LNG 터미널의 입항시 모델선박 항적의 복합 플롯(창조류)

<표 8> LNG 터미널 및 접근항로 기준점의 침범 확률(입항)

기 준 점	침범 확률(창조류)	침범 확률(낙조류)
No. 2 부표	0.00000	0.00006
No. B 부표	0.00000	0.00007
E1 점	0.00000	0.00000

3) LNG 터미널 및 접근항로의 분석 결과

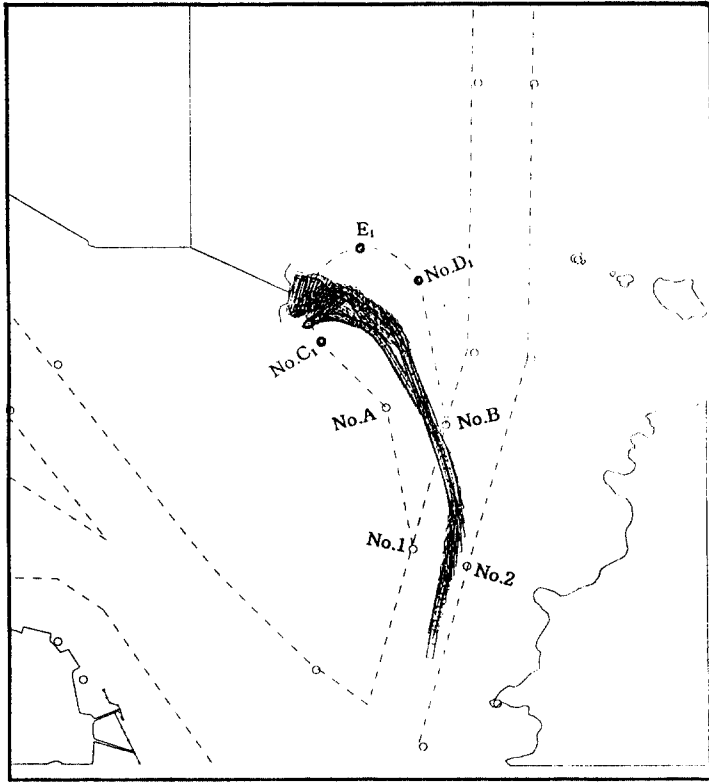
위에서 살펴본 바와 같이 LNG 터미널 접근항로의 계획안에 대하여 70,200DWT LNG선박으로 최악의 환경조건 바람 NW 26 kts, 창조류 021° 0.9 kts, 낙조류 192° 1.4 kts에서 운항 시뮬레이션의 분석 결과는 선박운항 안전성은 침범확률 0.0001 미만으로 확보되고 있다. 다만, 주관적 평가의 경우

최악의 기상조건하에서는 접이안 조선에 무리가 있으므로 LNG 터미널에의 접안 조선은 풍속 20 kts, 조류속 0.5 kts이하일 때 실시하고 3,200마력급 이상의 예선 4척을 사용할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 광양항 내의 LNG 터미널 및 접근항로에서의 선박운항 안전성 평가에 대한 것으로서, 새로 건설될 광양항 LNG 터미널에 출입할 70,200 DWT급의 대형 LNG 선박의 통항 안전성, 선회장의 크기 및 위치 등의 적정성을 관련 주요 항만 시설물 설계 기준의 검토 및 선박조종 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- ① LNG 터미널의 접근항로의 폭은 400m로서 PIANC Rule, 미국 및 일본 항만설계기준 26



<그림 4> LNG 터미널의 입항시 모델선박 항적의 복합 플롯(낙조류)

0~482m의 요구에 만족하고 있다. 또 접근항로의 수심은 DL(-)14m로서, PIANC RULE, 미국 및 일본 항만시설물 설계기준의 13.55~13.75m의 요구에 만족하고 있고, 선회장의 크기는 지름이 800m로서, PIANC Rule, 미국 및 일본 항만시설물 설계기준의 576~662m의 요구 조건보다 크다. 따라서 이들의 계획안은 적절한 것으로 판단된다.

- ② LNG 터미널 접근 항로 배치의 경우, 만곡도는 항만시설물 설계기준에 만족하나, 곡률 반경 및 직선거리, 조류 방향과 항로 방향과의 사이각 등은 만족하고 있지 않다. 그러나 No. 1 부표 통과할 때 적절한 척수의 예선 도움을 받는다면 접근항로의 배치는 적절하다고 판단된다.
- ③ LNG 터미널 접근항로의 항로표지는 No. 1

및 No. 2 부표는 이설할 필요가 있고 No. A, No. B, No. C1, No. D1 등의 등부표와 등대 F, 등대 G를 신설할 필요가 있는 것으로 판단된다.

- ④ LNG 터미널 접근항로 계획안에 대한 선박통항 안전성은 침범확률 0.0001 미만으로 확보된다. 그러나 LNG 터미널의 접안 조선은 풍속 20kts, 조류 0.5kts 이하에서 실시하여야 하고 이 경우 3,200마력 이상 예선 4척의 지원이 필요하다.

한편, 광양항 교통량의 증가에 따른 LNG 터미널 접근항로와 기존 제1항로의 연결부위의 통항 안전성 여부, 기존 제1항로와 광양항 주항로에서의 교통 흐름 등에 관한 연구가 필요하리라고 한다. 또 광양항 주항로와 하동발전소 진입항로 연결부, 하동발전소 진입항로와 LNG 터미널 접근항로의

연결부에서 LNG 선박과 다른 선박과의 교차 관계가 발생하므로 이곳에서의 안전 통항을 위한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- [1] 포항종합제철주식회사, “LNG 인수기지 건설 지점조사 용역보고서”, 1995, pp. 215~268.
- [2] 포항종합제철주식회사, “광양제철소 주변 하해조사보고서”, 1994
- [3] Permanent International Association of Navigation Congresses, International Commission for the Reception of Large Ships, “Report of Working Group IV”, 1980.
- [4] Department of the Navy Naval Facilities Engineering Command, “NAVFAC DM-26.1”, pp. 26.1-56 ~ 26.1-84
- [5] Department of Army, Corps of Engineers, “Hydraulic Design of Deep-Draft Navigation Projects”, 1983.
- [6] 해양수산부, “항만시설물 설계 기준서(상)”, 1993, pp. 609~613
- [7] Kim Whan Soo, “Port Design and Simulation: Validity of Microcomputer Aided Port Design Simulation and its Application”, 1990
- [8] Th. Elzinga & M.P. Bogaerts, “A Simulator Study for LNG Transport by Gas Carriers to Eemshaven, the Netherlands”, MARSIM 84, p.254
- [9] 해양수산부고시 제91-29호, “선박출항통제기준”, 1991
- [10] 국립해양조사원, “조류도”, 1995. 9
- [11] 해양수산부 “항로표지 업무 편람”, 1997, pp.76-3
- [12] 윤점동, “거대형선 조선론(조종특론)”, 아성출판사, 1983, pp.117-119