

## LNG선의 계류 안전성의 평가에 관한 연구

김 세 원\*

### A Study on the Evaluation of Mooring Safety of LNG Ships

*Se-won Kim\**

〈목 차〉

Abstract

1. 서론
2. 선박 계류설비의 설계기준
3. 선박에 작용하는 외력

4. LNG선의 계류설비에 대한 외력 산정
  5. 평택항만에서 LNG선의 계류 한계력 평가
  6. 결론
- 참고문헌

### Abstract

The ship's safe mooring stability is a principles for the safe cargo handling works at the mooring berth. Today numerous standards, guidelines and recommendations concerning mooring practices, fittings and equipments exist throughout the worldwide maritime industries.

In recently, the mooring facilities were constructed as dolphin types at the open sea area apart far from shoreside instead of enclosed coastline area in accordance with increasing ship's size and for preventing environmental pollution. Therefore the exciting wave condition must be considered as a basic environmental criteria with the wind force and current force for all of the mooring ships at the sea berth facilities.

In this study, this added wave force as one of the environmental external forces by using the theoretical formula was applied to the LNG ship in Pyeongtaeg harbor needed the special mooring stability of the sea berth.

Through this research, it can be confirmed that wave force is the very important factor in the mooring force and the strength of wave force works much more in the full laden condition than in the lightship condition. And also the wave force changes to non-linear states according to the wave frequency and wave length. In addition, the maximum limit criteria of environmental force of prohibiting the entering ship on the berth and loading works controlled by the port authority concerned of Pyeongtaeg port fully

\* 정회원, 한국해양대학교 교수

satisfies the condition of the mooring limit force recommended by OCIMF that the safe permitted force of the mooring line have to be within 55 % of MBL.

### 1. 서론

최근의 선박은 조선기술과 첨단과학의 비약적인 발달에 힘입어 전용선화되고 대형화되면서 선박의 안전은 곧 인간 생활 환경의 안전과 직결되는 상황으로 인식되기에 이르렀으며, 특히 대형 유조선의 해양사고로 인한 유류 유출은 막대한 해양 자산의 손실, 환경의 파괴 및 오염을 초래하고 있다.

선박이 접안계류 중에 받는 각종 외력에는 풍력, 조류력 및 파강제력, 해류력, Surge력 등의 복합외력이 작용하며, 일반적으로 계류안벽이 위치하는 항만은 외해로부터 차폐된 정온해역 및 천해(淺海)해역이 대부분이다. 이러한 차폐해역에서는 주로 바람 및 조류에 의한 외력이 계류선박에 탁월하게 작용한다. 그러나 특히 VLCC, 대형 광탄선 및 LNG운반선과 같은 일부 선박들은 외해에 완전히 노출된 Sea Berth에 계류하여 하역작업을 함으로써 바람 및 조류에 의한 외력 뿐만 아니라 파도에 의한 힘, 즉 파강제력의 영향에 대해서도 고려할 필요가 있다. 이러한 모든 작용외력을 취급하여 계류력을 검토한 연구는 일부 있기는 하나, 아직 일반화되어 현장에서 적용하기에는 어려운 초기단계에 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 계류 접안중인 LNG선박을 대상으로 자연환경의 변화에 따른 선체에 작용하는 풍력, 조류력 및 파강제력에 의한 계류외력을 산정하고, 그에 따른 계류줄의 억제 한계력을 산출하여 종합적인 한계외력과의 비교를 통하여 선박의 계류 안전성을 평가하고자 한다.

### 2. 선박 계류설비의 설계기준

선박 계류장치는 선박을 일정한 장소에 정박시키는 시설로서 국제적으로 일정한 기준을 정하여 선박 크기에 따라서 적절한 장비를 장착하여 선박의 안전을 확보하도록 하고 있다.

한편 계류작업, 계류장치 및 계류설비와 관련된 수많은 표준, 기준 및 권고사항들이 전 세계 해양 산업에 걸쳐 존재하지만, 그 중에서도 일반화되어 있는 기준으로는 선급규칙을 들 수 있다. 이 규칙에서는 계류줄의 기준으로 하나의 경험치에 의하여 가이드 라인으로써 마련하고 있지 선급의 조건(condition)으로서는 설정하고 있지 못하다. 이들은 배수량과 선박치수 조건을 사용하여 얻은 의장수로부터 구해내며, 계류설비의 설계나 설치에 대한 선급규칙은 거의 설정되어 있지 않다. 또한 안전작업하중, 재질의 강도, 구조상의 보강재, 계류원치나 설비의 설치방법 등에 대한 정보도 일부만 규정하고 있을 뿐이다.

그리하여 특별히 석유회사국제해운포럼(OCIMF: Oil Companies International Marine Forum)에서는 “대형선의 안전계류에 대한 지침 및 권고사항”을 규정하여 VLCC 및 LNG 운반선들의 계류설비의 기준을 따로 설정하여 적용하고 있다. 이 지침 및 권고사항에서는 묘박장비에 대한 내용은 구체적으로 포함하고 있지 않지만, 다만 어느 크기의 선박에서나 다 적용할 수 있는 일반적인 기본사항과 계류설비에 대해서 권고하고 있다.

### 3. 선박에 작용하는 외력

선박의 계류장치는 바람, 조류, 조석, 통과선박의 Surges, 파도, 너울, 부진동, 얼음 및 홀수변화 등의 요소들에 의하여 일어나는 힘을 부분적으로나 또는 가능하면 전부 억제할 수 있어야 한다.

전통적인 선박부두에 있어서 계류장치의 배치가 수학적 해석이 가능한 최대의 풍력과 조류력에 적용할 수 있도록 설계되었다면, 각 터미널에서 추가적으로 일어날 수 있는 Surge, Wave 혹은 Ice조건 등으로 선박 계류력에 고려해야 할 만한 외력에도 견딜 수 있어야 되지만, 이러한 힘들의 크기는 모델실험이나 현장관측이나 동역학 컴퓨터 프로그램

램 등을 통하여 얻기 전에는 해석하기가 어렵다.

선박이 특수한 상황이 발생할 수 있는 터미널에 입·출항을 하기 위해서는 계류조건의 설계에 있어서 그러한 초과조건들을 충족시킬 수 있는 적절한 장치들을 설비해야 한다. 특히 외해의 시버스에서 접안작업하는 선박들은 위에서 언급한 여러 가지 외력중에서도 풍압력, 조류력 및 파강제력에 의하여 발생하는 힘들을 적절한 계류줄의 증가를 통하여 보완시켜야 한다.

### 3.1 풍력(Wind force)

선박에 작용하는 풍력은 선박의 종축에 평행하게 작용하는 Longitudinal Force와 종축에 직각방향으로 작용하는 Transverse Force의 2종류로 분류할 수 있다.

선박에서의 풍력은 수면 위에 드러난 수선상부 면적에 따라서 또한 변화를 하며, 유조선의 경우에 Head Wind는 전체의 수면상부 면적 중에 작은 일 부분에 영향을 미치므로 종방향 힘은 상대적으로 작고, Beam Wind는 선박의 수면상 횡방향 면적에 작용하므로 대단히 큰 횡방향 힘을 미친다.

VLCC의 경우 어떤 주어진 풍속에서 최대 횡방향 풍력은 최대 종방향 풍력의 약 4~6배 정도나 된다. 예를 들면 250K DWT 크기의 공선상태의 유조선에 50노트의 바람이 불면, 최대 횡방향 힘은 약 320톤 정도이고, 종방향 힘은 약 60톤 정도이다.

그리고 선체의 구조적인 특성으로 인하여 정선수, 정선미 및 정형에서 정면으로 부는 바람을 제외하고는 선체에 작용하는 풍력은 바람이 부는 방향과 동일한 방향의 합성풍력을 나타내지 않는다. 예를 들면 250K DWT 크기의 유조선에 있어서 선수에서 45° 방향의 바람은 선수로부터 약 80° 방향의 상대풍력을 가지며, 이 경우에 풍력이 작용하는 점은 횡중심선의 앞쪽이 되고 선체에는 요잉모멘트를 발생시키게 된다.

### 3.2 조류력(Current force)

선박에 계류장치 배치를 위한 계류력 평가를 할 때에는 풍력에 추가하여 반드시 조류력을 감안하

여야 한다. 일반적으로 선박에 있어서 조류력의 변화성은 조류속력과 방향을 바람에서와 비슷한 형태로 감안하여야 한다. 조류력은 선체에 있어서 UKC(Under Keel Clearance)의 의하여 큰 영향을 받으며, UKC의 감소에 따라서 선체에 미치는 힘은 급격히 증가하게 된다.

대부분의 터미널은 조류력의 영향을 최소화하기 위하여 조류방향과 거의 평행하도록 부두를 축조하며, 선박의 종방향 축에 대하여 작은 각도(약 5°)일지라도 커다란 횡방향의 힘을 발생시키므로 유의해야만 한다. 모델실험에서 250K DWT 크기의 만재한 유조선에서 선수방향의 1노트의 조류는 UKC 2m의 경우에 약 5톤의 힘이 발생하였지만, 1노트의 정횡방향의 조류에 대해서는 동일한 UKC 조건에서도 약 230톤의 막대한 힘을 발생시켰음을 알 수 있다.

### 3.3 파강제력(Wave force)

일반적으로 선박의 표준계류장치의 제작 규정에서는 파랑의 영향은 고려하지 않으나, 특별히 파랑의 영향을 많이 받는 항구에서는 따로 고려한다고 규정하고 있다.

그러나 시버스와 같은 접안시설의 경우에는 파랑이나 너울의 영향을 많이 받으며, 주로 주기 10초 전후의 단주기파와 주기 1분 전후의 장주기파에 의한 영향을 많이 받는다. 사실 황천시 외해에 노출된 항에서는 너울로 인한 선박의 운동이 어떠한 값을 초과할 경우에는 선체, 계류시스템 및 항만설비 등에 손상을 가져올 수 있으며, 이러한 한계는 보통 계류시스템에서 계류줄이나 계류원치에 대한 상한으로 지정하고 있다.

특히 스웨이 진폭이 크게 되면 안벽면 상의 방충재와 선박의 충돌이 격렬하게 되지만 이에 의해 방충재와 선박의 외판손상이라는 것보다도 계류한계가 먼저 발생한다. 계류줄은 하나가 끊어지면 남은 계류줄에 과대한 힘이 작용하므로 일단 계류줄의 절단이라는 사고가 발생하면 계류줄은 하나씩 계속 절단되게 된다. 이 사이 선박에서는 새로운 계류줄을 내어서 이와 같은 긴급사태에 대응하게 되

지만 대응할 수 없는 경우에는 긴급 출항하게 된다. 바람과 파가 격심하여 긴급출항도 불가능한 최악의 경우에는 항에서 표류, 안벽에 얽힘, 침몰이라고 하는 사고가 생기기도 한다.

일반적으로 선박의 안전한계기준에 따르는 허용 선박운동은 선박운동기준의 한계를 초과하게 되며, 비록 간행된 자료는 그렇게 많지 않으나 항만당국 및 선박 조종자의 기준에 대한 의견을 따른 경우보다도 초과하는 것으로 되어 있다.

#### 4. LNG선의 계류설비에 대한 외력 산정

LNG선에 있어서 계류장치의 설계를 위해서는 OCIMF에 의하여 공포된 VLCC의 외력조건에 대한 설계지침을 준용하도록 되어 있다. 그러므로 원양구역을 항행하는 선박으로 16K DWT이상의 모든 탱커는 항구적인 장비로서 선상에서 이용할 수 있는 계류 억제력이 아래 조건들 중 어느 하나의 환경조건을 만족시킬 수 있는 설계한계를 설정하여 적용한다.

외력조건 중에는 다음과 같이 풍력과 조류력에 대한 구체적인 기준만을 설정하고 있고, 특히 수심과 흘수와와의 비율은 그 선박의 만재상태를 기준으로 하여 1:1.1을 사용하도록 규정하고 있다. 또한 풍속은 수면상 10m 높이에서 30sec동안의 정상풍의 평균속력으로 가정하고, 유속은 선박의 전 흘수에 걸친 평균속력으로 가정한다. 다만 이 Mooring Condition에서는 계류에 동역학적인 영향을 미칠 수 있는 파강제력 조건은 포함하지 않는다.

##### (1) 바람

풍향에 관계없이 전 방향을 기준으로 한 최대풍속 : 60 노트(30.87 m/sec)

##### (2) 조류 방향 및 조류력의 한계

- ① 선수미 방향과 000° 및 180° 방향의 조류 : 3 노트(1.5 m/sec)
- ② 선수미 방향과 010° 및 170° 방향의 조류 : 2 노트(1.0 m/sec)
- ③ 선체 정횡 방향의 최대 조류 : 3/4 노트(38.6 cm/sec)

##### (3) 파강제력

파에 의해서 발생할 수 있는 파강제력에 대해서는 고려하지 않는 것으로 하고, 어떤 특수한 부두에 있어서 외부 주위환경이 위의 기준치를 초과할 경우에 필요로 하는 추가적인 계류설비에 대해서는 부두 운영자가 책임을 지는 것이 원칙이다. 이렇게 초과장력의 위험으로부터 육상과 선박의 장비를 보호하고, 장비부족의 위험으로부터 인명을 보호하기 위해서는 선박에서 예상되는 것과 부두에서 예상되는 것 사이에 명확한 경계를 짓는 것은 확실한 운영체제를 통하여 가능한 것이다.

#### 4.1 풍압력의 산출

계류설비 설계시에 무어링 포스 계산을 위해서는 다음의 풍압방정식을 이용하고, 이 방정식에 의하여 LNG선에 미치는 풍압력을 OCIMF에서 정하고 있는 접안 한계풍속인 60노트까지 계산하도록 한다.

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot V^2 \cdot (A \sin \phi + B \cos \phi) \text{ (kN)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\rho_a$ : 공기 밀도(1.28kg/m<sup>3</sup>),  $C_a$ : 풍력계수(0.998),  $V$ : 풍력(0~60 Kts),  
 A: 만재상태의 수면상 측면 풍압면적, B: 만재상태의 수면상 정면 풍압면적,  
 1 Ton · force = 9.80665 kN

#### 4.2 조류력의 산출

조류력의 계산은 풍압력과 거의 동일한 형태의 방정식을 이용하며, 조류가 선체에 입사하는 방향을 고려할 때 선체의 선수미선에 대하여  $\alpha$ 의 각으로 입사하면 측면적에 작용하는 힘은  $\sin \alpha$ 에 비례하므로 선수미선에 대하여 직각방향으로 흐르는 조류가 가장 큰 영향을 미침을 쉽게 알 수 있다.

$$R_w = \frac{1}{2} \rho_w C_w W^2 (A' \sin \phi + B' \cos \phi) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $\rho_w$ : 해수밀도(1025kg/m<sup>3</sup>),  $C_w$ : 조류력계

수(2.33), W: 조류력(0~3.0 Kts),

A': 만재상태의 수면하 투영측면적, B': 만재상태의 수면하 투영정면적

4.3 파강제력의 산출

OCIMF에서는 파에 의해서 발생할 수 있는 파강제력에 대해서는 고려하지 않는 것으로 한다고 규정되어 있으나, 파강제력은 다음의 식으로 구할 수 있다.

조류의 경우와 마찬가지로 파가 선체에 입사하는 방향을 고려할 때 선체의 선수미선에 대하여  $\alpha$ 의 각으로 입사하는 것으로 보면, 측면적에 작용하는 힘은  $\sin \alpha$ 에 비례하므로 선수미선에 대하여 직각 방향의 파가 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

구속된 부체에 파가 입사한 경우의 변동 유체압력에 의한 힘, 즉 파강제력을 고려할 때, 이 유체압력  $P_w$ 는 평면 입사파의 속도 포텐셜  $\phi_0$ 와 평면 입사파에 의한 디플렉션 포텐셜  $\phi_1$ 을 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$P_w(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \{ (\phi_0 + \phi_1) e^{-i\omega t} \}$$

$$= i\omega \rho (\phi_0 + \phi_1) e^{-i\omega t}$$

이 유체압력  $P_w$ 에 의한  $k$  방향의 파강제력을  $F_k e^{-i\omega t}$  라 하면

$$F_k e^{-i\omega t} = - \int \int_{S_H} P_w n_k dS$$

$$= - \int \int_{S_H} i\omega \rho (\phi_0 + \phi_1) n_k dS \cdot e^{-i\omega t}$$

..... (3)

로 된다. 따라서 파강제력의 복소진폭  $F_k$ 는 다음과 같다.

$$F_k = -i\omega \rho \int \int_{S_H} (\phi_0 + \phi_1) n_k dS, \quad (k=1\sim 6)$$

..... (4)

디플렉션 포텐셜  $\phi_1$ 이 구해지면 위 식에 의해 파

강제력을 계산할 수 있으며, 컴퓨터 프로그램(WOTH2, FOR)을 이용하여 계산한다.

5. 평택항만에서 LNG선의 계류 한계력 평가

우리나라의 LNG선박들이 이용하는 LNG 적·양하지를 보면, 선적지는 인도네시아 및 중동지역으로 대부분 열대지역에 위치하고 있어서 자연 외력조건들은 양하지인 평택항만의 조건에 비하여 훨씬 정온수역의 안전한 조건을 갖추고 있다. 그러므로 LNG선박들이 적·양하지 항만에 계류정박하여 하역작업을 운용하는 동안에 조우하는 각종 자연 외력조건들 중에서 평택항만의 조건이 가장 약 조건임을 알 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 우리나라 최초의 LNG인수기지인 평택항만에서의 LNG운반선의 운용과 관련하여 부두시설은 Sea Berth 형식을 기준으로 하고, 자연외력 조건들을 이 지역에서 지금까지 관측된 최대의 기상조건을 적용하도록 한다. 그리고 추가로 평택 항만 당국에서 항만시설 및 선박의 안전확보를 위하여 별도의 LNG선 입항조건을 설정하여 운용하고 있는 한계조건을 적용하여 LNG선박의 계류안정성 평가에 적용하여 각종 계산을 수행하도록 한다.

<표 1> LNG선의 주요 요목

Items	Value
Length O. A.	277.00 M
Length B.P.	266.00 "
Breadth Moulded	43.40 "
Depth to upper deck(moulded)	26.00 "
Depth to trunk deck(moulded)	32.75 "
Designed draft(moulded)	11.30 "
Scantling draft(moulded)	12.00 "
Gross Tonnage	95,376 Tons
Net Tonnage	28,612 "
Light Ship Con.	30,266 "
Full Load Dept. DWT	75,782 "
Ballast Departure DWT	53,042 "

5.1 대상 선박의 개요

선박의 계류안정성을 평가하기 위하여 이용할 선박은 LNG화물 135,000m<sup>3</sup> 적재 용량의 멤브레인 형의 LNG 선박을 선택하였으며, 이 선박의 중요한 요목은 <표 1>과 같다.

5.2 평택항 지역의 자연환경 조건

이 평택항 지역의 기후는 우리 나라 전국의 기상 현상과 비슷하지만 특히 중위도에 위치하여 4계절이 뚜렷하며, 연중 기온변화가 매우 심하다. 겨울철에는 한랭한 시베리아 고기압이 발달하여 서고동저형의 기압배치를 나타내고, 한냉 건조한 북서~북풍이 불며, 여름철의 기압배치는 북태평양 고기압의 발달로 남고북저형으로 되어 고온다습한 편남풍이 불고, 봄, 가을철에는 양쯔강기단 및 오츠크해의 기단에 의한 계절풍의 교차기로 풍향이 일정치 않으며, 풍속도 일반적으로 약하나 때때로 돌풍이 불기도 한다.

1) 평택항만의 기상 조건

이 지역 측후소에서 관측, 기록한 최근 20년 간의 자료를 분석, 정리한 것을 보면 이 지역에서의 최대 기상 조건은 <표 2>와 같다.

<표 2> 평택항만의 기상 요소

항 목	단 위	크 기	자료 관측 출처	
바람	최대 풍속	m/sec	WNW 25.7	인천측후소
	순간 최대 풍속	m/sec	WSW 32.0	인천측후소
조류	최대 창조류	knot	SE 2.4	인천측후소
	최대 낙조류	knot	NE 2.9	인천측후소
파랑	최대 파고	m	WNW 2.58 (주기 : 2.58 sec)	아산항개발 보고서

2) 항만당국의 선박 입출항 제한 조건

평택 항만당국에서는 선박의 안전확보를 위하여 아래와 같이 자연환경에 대한 한계조건을 설정하여 선박의 입출항 및 하역작업을 통제하고 있다.

- 입항금지 : 풍속 15 m/sec 이상, 시계 1해리 이하  
파고 1.2 m 이상, 선박크기 130,000 m<sup>3</sup> 이상
- 접안금지 : 풍속 20 노트(10 m/sec) 이상, 시계 1해리 이하
- 하역중지 : 풍속 30 노트(15 m/sec) 이상, 파고 1.5 m 이상
- 접안속도 : 0.2 노트(10 cm/sec) 이하

5.3 LNG선의 계류 한계력 산출

1) 계류중인 LNG선의 만재상태에서의 계류력 산정

LNG선박의 만재상태에서의 한계풍속을 구하기 위해서는 본선이 장착하고 있는 계류줄의 전체 최대장력을 구하여 이 계류장력을 한계외력으로 간주하고, 각 외력의 분력을 산출하도록 한다.

그러므로 LNG선박이 만재상태로 Sea Berth에 계류중 계류력에 영향을 미치는 풍력, 조류력 및 파강제력의 3가지 외력 요소 중에 풍력에 의한 한계력을 산출하기 위해서는 조류력과 파강제력을 그 지역의 최대값으로 설정하면 풍력의 한계력을 산출할 수 있다.

(1) 본선의 최대 무어링 포스 산출

본선에는 와이어 로프( $\phi$  44mm, 6×37 IWRC, 280m×MLB 124톤) 18기를 설치하여 평택항의 LNG Sea Berth에 계류하게 된다. 평택항에서의 돌핀 계류는 주로 우현계류를 하며, 이 때 잡는 그룹별 무어링 라인의 구체적인 배치를 보면 먼저 전부에는 헤드 라인 2개, x 축에 대한 직각 브레스트 라인 3개, 사각 브레스트 라인 2개 그리고 선수 스프링 라인 2개를 설치하고, 후부에는 스텐 라인 3개, x 축에 대하여 직각 브레스트 라인 2개, 사각 브레스트 라인 2개 그리고 선미 스프링 라인 2개를 설치하여 전체적으로 18개의 계류줄을 잡게 된다.

만재선박의 접안상태에서 각 계류줄의 길이와 y 축에 대한 편각은 경하상태와 동일한 것으로 간주해도 큰 차이가 없으나 각 계류줄의 양각은 차이가 나게 된다. 만재상태의 양각은 돌핀 위에 설치된

〈표 3〉 LNG선의 만재상태에서의 최대 무어링 포스 산정

구분 라인명칭	라인수	라인 번호	라인 길이(m)	라인 양각 값(Cos α)	y축 라인 각(Sin β)	그룹별 장력	
						100%	55%
헤드 라인	2	17, 18	84	003° (0.9986)	038° (0.6157)	152.5	83.9
직각 브레스 라인	3	14, 15, 16	70	004° (0.9976)	090° (1.0000)	371.1	204.1
사각 브레스트라인	2	12, 13	74	004° (0.9976)	-057° (0.8387)	207.5	114.1
전부 스프링 라인	2	10, 11	60	005° (0.9962)	-013° (0.2250)	55.6	30.6
스틴 라인	3	1, 2, 3	89	003° (0.9986)	-032° (0.5299)	196.8	108.2
직각 브레스트 라인	2	4, 5	66	004° (0.9976)	090° (1.0000)	247.4	136.0
사각 브레스트 라인	2	6, 7	80	004° (0.9976)	050° (0.7660)	189.5	104.2
후부 스프링 라인	2	8, 9	65	004° (0.9976)	012° (0.2079)	51.4	28.2
총 계	18 sets					1,471.4	809.5

Bitt의 평균수면상 높이와 선박의 만재상태의 평균 홀수에서 Upper Deck까지 높이를 라인길이와 함께 이용하여 양각(Sin β)의 값을 구하면 된다.

그러므로 그룹별 각각의 계류줄이 선체를 지탱할 수 있는 계류장력(H)은 다음 식에 의하여 계산한다.

$$H = T \cos \alpha \cdot \sin \beta \dots\dots\dots (5)$$

(2) 최대 풍압력 산출

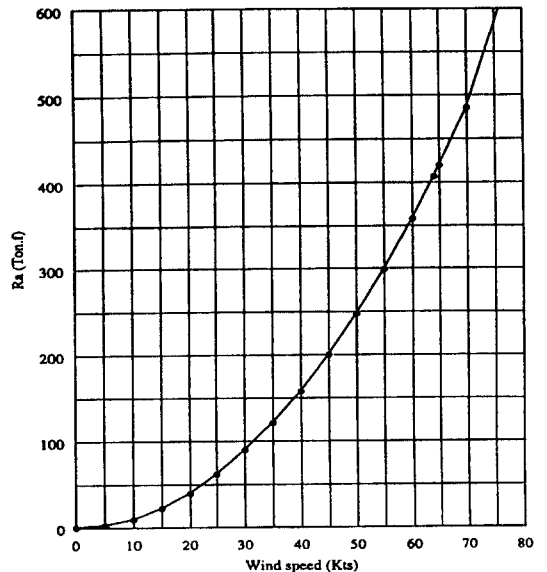
풍압방정식을 이용하여 선체에 미치는 풍압력을 평택항 지역에서의 자연조건 중에 풍력은 지금까지 관측된 순간최대풍속은 32m/sec로 관측되었으므로 최대 풍속력을 계류현측에서 선체 정횡방향으로 62.2노트로 부는 것으로 설정하고, 최대풍압력을 산출하면 <그림 1>과 같다.

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot V^2 \cdot (A \sin \psi + B \cos \psi) \quad (\text{kN})$$

$$= \frac{1}{2} \times 1.28 \times 0.998 \times 32^2 \times (6,148.70 \sin \psi + 1,362.702 \cos \psi)$$

$$= 4,021.6 \text{ (kN)}$$

$$= 410.1 \text{ (Ton.f)}$$



〈그림 1〉 LNG선의 만재상태에서의 최대 풍압력

(3) 최대 조류력 산출

이 LNG선박의 만재상태에서의 최대의 조류력 산정을 위하여 평택항에서 관측된 조류에 대한 자

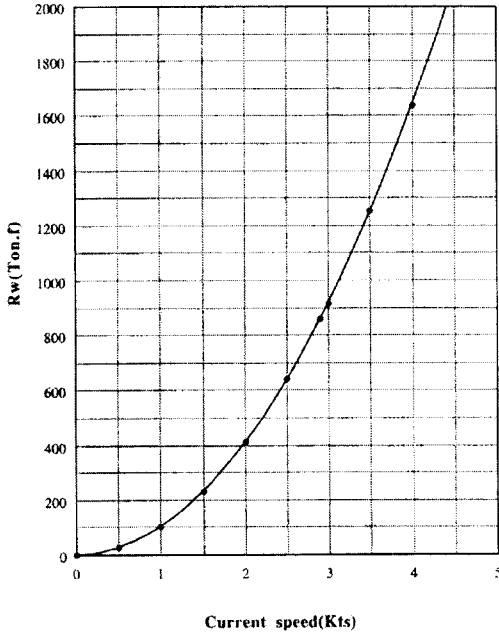
료 중에서 최대값을 적용하면 된다. 즉, 조류는 평균대조기에 최강속도 2.9노트(1.49 m/s)로 접안 현측의 정횡방향으로 흐르는 것으로 가정하여 계산하면 다음과 같다.

$$R_w = \frac{1}{2} \rho_w C_w W^2 (A' \sin \psi + B' \cos \psi)$$

$$= \frac{1}{2} \times 1025 \times 2.33 \times 1.49^2 (3,169.2 \sin \psi + 517.27 \cos \psi)$$

$$= 8,401.8 \text{ (kN)}$$

$$= 856.7 \text{ (Ton} \cdot \text{f)}$$



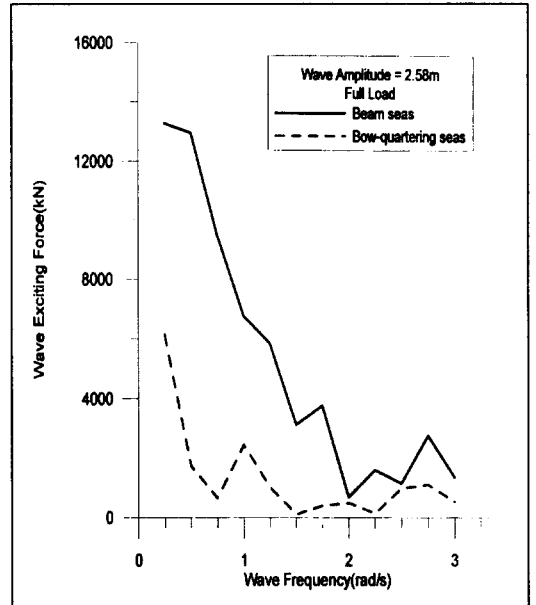
(그림 2) LNG선의 만재상태에서의 최대 조류력

(4) 최대 파강제력 산출

이 LNG선박의 만재상태에서의 파강제력 산정을 위하여 평택항에서 관측된 파랑에 대한 자료 중에서 최대값을 적용하도록 한다. 즉, 파강제력 계산을 위한 컴퓨터 프로그램(MOTH2. FOR)을 이용하여 파고 2.58m, 주기 5.81sec의 파에 대하여 선체에 대한 입사각(선수미선의 선미를 0°로 하여 시계방향으로 측정함)을 2가지 경우로 나누어 파강제력을 산출하면 다음과 같다.

$$F_2 = -i\rho\omega \iint_{S_n} (\phi_0 + \phi_1) n_k dS, (k=2)$$

- ① 정횡파(입사각 090°) : 6,429.0 kN = 655.5 Ton.f
- ② 사각파(입사각 135°) : 1,906.0 kN = 194.4 Ton.f



(그림 3) LNG선의 만재상태에서 파고 2.58m에서의 최대 파강제력

2) 계류중인 LNG선의 만재상태에서의 한계풍력의 산정

이 LNG선박의 만재상태에서 본선에 설치된 계류줄의 최대 허용장력(H)은 <표 3>과 같이 1,471.4톤이므로 이 장력에 대한 각종 외력의 한계력을 산출하면 된다. LNG선박이 접안 계류중에 받는 외력에 의한 한계력을 산출하기 위해서는 계류력에 영향을 미치는 풍력, 조류력 및 파강제력의 3가지 요소중에 2가지 요소를 그 지역의 자연환경 조건에 의한 최대값으로 설정하고 나머지의 한계력을 산출하면 된다.

평택항 Sea Berth에서의 한계풍속력 계산을 위



하여 다음과 같은 일반적인 한계풍력 산출식을 이용하여, 조류력은 2.9노트로 고정하고, 파강제력은 위와 같이 2가지 경우로 나누어 적용하면 다음과 같은 한계풍력 및 풍속을 구할 수 있다.

$$R_a \text{ wind max} = H_{\text{total m.f.}} - (R_w \text{ current max} + F_{\text{wave max}}) \dots\dots\dots(6)$$

- ① 파가 계류현측의 선체 정횡(090°)으로 들어오는 경우

$$R_a \text{ wind max} = 1,471.4 - (856.7 + 655.6) = (-)40.9 \text{ (Ton} \cdot \text{f)}$$

조류가 정횡방향으로 2.9노트로 흐르는 상황에서 파고 2.58m의 파를 역시 정횡방향에서 받을 경우에는 Sea Berth에 접안한 상태에서 선박의 무어링 포스를 약 40톤 정도 초과하여 접안계류가 불가능한 상태임을 알 수 있다.

- ② 파가 선체의 정횡 사각(135°)로 들어오는 경우

$$R_a \text{ wind max} = 1,471.4 - (856.7 + 194.4) = 420.3 \text{ (Ton} \cdot \text{f)}$$

조류가 정횡방향으로 2.9노트로 흐르는 상황에서 파고 2.58m의 파를 정횡 사각방향에서 받을 경우에는 접안한 선박의 무어링 포스의 여유력은 약 420톤으로 <그림 1>을 이용하여 계류 한계풍속은 약 63노트를 얻을 수 있다.

그러나 OCIMF에서 LNG선에 대하여 권고하고 있는 사항은 계류선박의 안전확보를 위한 각 계류줄의 최대 허용장력은 그 라인의 MBL의 55%이므로 이 규정을 적용하면 안전 무어링 포스는 약 809톤이므로 정횡방향의 2.9노트의 조류력만으로도 안전계류 한계력을 초과하는 상황에 이르게 된다.

- 3) 계류중인 LNG선의 만재상태에서의 한계조류력의 산정

이 LNG선박의 만재상태에서 본선에 설치된 계류줄의 최대 허용장력(H)은 <표 3>과 같이 1,471.4톤이므로 이 장력에 대한 조류력의 한계력을 산출하면 된다. LNG선박이 접안 계류중에 받는 조류력에 의한 한계력을 산출하기 위하여는 평택항 지역에서 관측된 순간최대풍속은 32m/sec이므

로 정횡방향의 최대 풍속력을 62.2노트로 설정하고, 파랑은 주기 5.81sec, 파고 2.58m의 최대 정횡 파고로 설정한다.

$$R_w \text{ current max} = H_{\text{total m.f.}} - (R_a \text{ wind max} + F_{\text{wave max}}) \\ R_w \text{ current max} = 1,471.4 - (410.1 + 655.6) = 405.7 \text{ (ton} \cdot \text{f)}$$

이 조류 한계력 약 406톤에 대한 조류의 속력을 구하기 위하여 <그림 2>를 이용하여 정횡방향 조류속력 약 2.1노트를 얻을 수 있다.

- 4) 계류중인 LNG선의 만재상태에서의 한계파강제력의 산정

LNG선박이 접안 계류중에 받는 파강제력에 의한 한계력을 산출하기 위해서는 평택항 지역에서의 자연조건 중에 풍력은 지금까지 관측된 순간최대풍속은 32m/sec로 관측되었으므로 선체 정횡방향 최대 풍속력을 62.2노트로 설정하고, 조류력은 계류현측 정횡방향으로 최대 2.9노트로 설정한다.

그러므로 이 LNG선박은 만재상태에서의 파강제력의 한계력을 산출하면 다음과 같다.

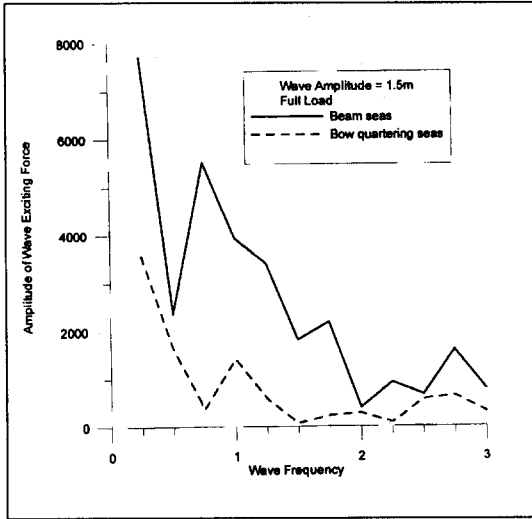
$$F_{\text{wave max}} = H_{\text{total m.f.}} - (R_a \text{ wind max} + R_w \text{ current max}) \\ F_{\text{wave max}} = 1,471.4 - (410.1 + 856.7) = 204.6 \text{ (ton} \cdot \text{f)}$$

이 파강제력의 한계력 약 205톤에 대한 파랑의 크기는 <그림 3>을 이용하면 파주기 5.81초, 파고 0.81m 및 파주기 2.10초, 파고 3.82m를 얻을 수 있다.

- 5) 평택항의 입항 제한조건에 따른 조류 한계력의 산정

평택항만 당국에서는 항만시설 및 선박의 안전확보를 위하여 아래와 같은 별도의 LNG선 입항조건을 설정하여 운영하고 있다.

LNG선박이 평택항의 LNG 전용돌핀에 접안 계류 중에 계류력에 영향을 미치는 외력 중에 최대 풍속력 30 노트(15.43 m/sec)에 대한 풍압력은 <그림 1>를 이용하고, 파강제력은 파고 1.5 m, 주기 10초에 대하여 수치해석 컴퓨터프로그램을 이용하여 산정하면 <그림 4>와 같다.



(그림 4) LNG선의 만재상태에서 파고 1.50m에서의 최대 파강제력

그러므로 만재상태에서의 계류한계력과 그 한계력에 대한 최대 조류속력을 산정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_c \text{ current max} &= H \text{ total m.f.} - (R_a \text{ wind max} + F_w \text{ wave max}) \\
 &= 1,471.4 - (95.3 + 519.0) \\
 &= 857.1 \text{ (Ton} \cdot \text{F)}
 \end{aligned}$$

이 여유 계류한계력 약 857톤에 대한 최대 조류한계속력을 구하기 위해서는 <그림 2>를 이용하여, 정횡방향의 최대 조류속력은 약 2.9 노트를 얻을 수 있다.

그리고 OCIMF에서 LNG선에 대하여 권고하고 있는 각 계류줄의 최대 안전 허용장력은 그 라인의 MBL의 55%이므로 이 규정을 적용하면 안전 허용장력은 약 810톤이므로 여유 계류한계력은 약 196톤으로 정횡방향으로의 최대 조류속력은 약 1.4 노트임을 알 수 있다. 이를 통하여 만재상태에서도 OCIMF에서 규정하고 있는 정횡방향의 한계조류속력 0.75 노트를 충분히 충족시키고 있음을 알 수 있다

## 6. 결 론

이 연구를 통하여 Sea Berth에 계류중인 선박에

대한 주위의력으로 풍력과 조류력 외에 파강제력을 추가할 필요성이 절실하여 졌으며, 평택항만에서 관측된 최대 파고에 대한 파강제력을 평택항 시버스에 계류중인 LNG선박에 적용하여 최대 외력 조건에서의 계류안정성을 평가한 결과는 다음과 같다.

파강제력이 계류력에 아주 중요한 요소로 작용하고, 파강제력의 크기는 경하상태보다는 만재상태에서 더 크게 작용하고, 아울러 파주기 및 파장에 따라서 비선형적으로 변화하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 LNG선의 경우에 파고 1m의 파강제력의 크기는 조류 1노트와 거의 같은 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 평택항만 당국에서 입·출항금지 및 하역작업중지 조건으로 설정하고 있는 최대 외력조건은 OCIMF에서 규정하고 있는 계류줄의 안전 허용장력인 MBL의 55% 이내의 계류한계력의 조건을 충분히 만족시키고 있음을 확인할 수 있었다.

앞으로 파강제력의 요소에 대해서도 풍압력 및 조류력과 마찬가지로 모형실험과 시뮬레이션 등을 통하여 간단한 일반식을 도출하고, 수치해석 및 파력실험 등을 통하여 각종 선종별로 파고, 주파수, 주기 및 파장 등에 따른 “파력계수” 를 도출함으로써 쉽게 활용할 수 있는 방안을 찾아야 될 것이다. 더 나아가서는 풍력, 조류력 및 파강제력을 산정하는 컴퓨터프로그램을 개발함으로써 선박에 따른 계류한계력을 산출하는 데 있어서 보다 효율성을 기할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. OCIMF Publication, “Guidelines and Recommendations for the Safe Mooring of Large Ships at Piers and Sea Islands” Witherby & Co. Ltd. London, ECI. 1979
2. OCIMF Publication, “Mooring Equipment Guidelines(First Edition 1992)”, Witherby & Co. Ltd. London, ECI. 1992
3. OCIMF Publication, “Prediction of Wind and

- Current Loads on VLCCs”, Witherby & Co. Ltd. London, ECI. 1977
4. 日本造船學會, “大型船の 係船裝置計劃指針”, 海文堂出版(株), pp.3~37, 昭和47
  5. 公업진흥청, “대형선의 계선장치 계획기준”, 공업진흥청, pp.49~87, 1978
  6. 한국선급, “선급 및 강선규칙, 제4편 선체의 장” (사단법인) 한국선급, 2000
  7. 韓吉用, “바람 및 조류에 의한 안벽계류 선박의 계류력에 관한 연구”, 碩士學位論文, 韓國海洋大學校. pp.2~10, 1999
  8. 한국기계연구원, “대형 구조물 표류력 해석”, 부산수산대학교, pp.5~23, 1995