
 論 文

大韓造船學會誌
 第27卷 第3號 1990年 9月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol.27, No.3, September 1990

안벽계류해석

오 태 명*, 엄 덕 준*

Quay Mooring Analysis

by

Tae-Myoung Oh* and Deuk-Joon Yum*

요 약

안벽에 계류된 선박에 대한 준정적(Quasi-Static) 계류해석 방법이 정식화되었다. 본 해석방법은 태풍내습시의 안벽 계류나 Load-Out시의 계류계 설계 그리고 터미널의 초기 설계등에 효율적으로 사용될 수 있다. 대개 10~20개의 계류삭으로 이루어지는 전체 계류계의 탄성거동은 계류삭의 길이가 대부분 짧고, 같은 평면에 있지 않으므로 인해 복잡한 비선형 현상을 보인다. 이를 처리하기 위하여 외력에 대해 전체 계류계가 준정적 거동을 한다는 가정하에 상기 거론한 모든 비선형 현상을 고려할 수 있는 하중증가법(Load Increment Technique)이 채택되었다.

Abstract

This paper presents the quasi-static mooring analysis model for a vessel moored at the quay. The results of this analysis will aid the designer in determining the mooring configuration for the surface vessels subjected to wind, current and wave forces. And it will also help him in selecting the equipment for the fixed mooring system. The cumulative elastic behavior of the mooring lines invokes a complicated nonlinear problem since the mooring lines are relatively short and hang in air as noncoplanar configurations. This nonlinear mooring problem is solved in this paper by the load increment technique in which the external load is increased step by step taking all sources of nonlinearity into account.

1. 서 론

태풍이 항내로 내습하게 되는 경우 항내의 안벽에 계류되어 있는 구조물의 태풍으로부터의 안전성 여부나 또한 대형 해상 철구조물의 load-out시 사용되는 계류계의 설계, 안벽이나 sea islands 같은 터미널의 설계

등에 있어서 계류계의 안전성 해석은 매우 중요하다. 이러한 안전성 검토의 주된 내용은 예상되는 바람, 조류, 파도등에 의한 외력과 그에 의한 운동에 견딜 수 있는 계류계의 선택 및 신뢰성 해석이라 할 수 있다. 즉, 적절한 계류계는 외력에 의해 구조물이 원하는 위치에서 너무 벗어나지 않게 하는 동시에 계류계 각각의 구성요소(계류삭, ship bollard, yard bitt, mooring

발표: 1989년도 대한조선학회 추계 연구발표회('89.11.11)

접수일자: 1989년 12월 1일, 재접수일자: 1990년 6월 8일

* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

winch 등등)의 손실을 막을 수 있도록 선택되어야 한다. 그러나 현재의 경우 이러한 계류계의 선택은 대개 작업자의 경험이나 간단한 수계산, 또는 복잡한 수학적 모델을 통한 해석 등에 의존하여 왔기 때문에 초기 설계 단계에서 좀 더 빠르고 정확하게 계류계를 선택할 수 있는 계산방법의 정립과 이에 따른 전산처리의 중요성이 더욱 대두되었다.

본 논문은 이러한 요구에 대하여 준정적 해석법을 도입하고[1], 태풍 내습시의 안벽계류나 load-out시의 계류계 설계 그리고 터미널의 초기설계등에 사용되도록 마련되었다. 대개 10~20개의 계류삭으로 이루어지는 전체 계류계의 탄성거동은 계류삭의 길이가 대부분 짧고, 같은 평면에 있지 않음으로 인해 복잡한 비선형 현상을 보인다. 이를 처리하기 위하여 외력에 대해 전체 계류계가 준정적 거동을 한다는 가정하에, 외력의 증가에 따른 평형위치를 찾아가는 하중증가법을 채택하였다. 여기에서 각 재질에 대한 탄성은 강제 계류삭과 같이 선형적이라는 가정을 할 수 있는 것과 합성로우프 또는 방형재 등과 같이 비선형적인 경우를 모두 포함하였다.

2장에는 본 논문에서 사용한 계류계 해석방법의 정식화를 위한 기본 가정, 좌표계등과 해석과정이 소개되어 있다. 3장에는 바람, 조류, 파도 등에 의한 외력을 계산하는 과정이 있으며, 4장에는 계류계에 대한 전반적인 특성과 함께 주어진 계류계의 구체적인 해석방법이 나와 있다. 또한 이와 같은 방법을 적용하여 작성된 컴퓨터 프로그램 'QUMOOR'를 이용하여 이상화된 상자형바아지의 안벽계류 문제와 250K VLCC의 태풍대비 안벽 계류 문제를 해석한 결과를 5장에 수록하였다.

2. 해석 방법

선체는 강제 운동을 하며, Fig. 1과 같이 안벽과 인접하여 계류되어 있다. 선체에 작용하는 외력은 풍력, 조류력 및 파도에 의한 시간평균 표류력등의 정적힘과 1차 파력 및 시간에 따라 서서히 변화하는 저진동 표류력 등의 동적힘으로 나누어진다. 선체는 외력이 작용하지 않는 초기 평형상태 위치로부터 정적힘에 의하여 새로운 평형상태로 움직이게 되며, 위의 위치를 중심으로 동적힘에 의해 야기되는 선체운동을 경험하게 된다. 선체가 경험하게 되는 6자유도 변위에서, 수직운동의 경우 선체의 움직인 변위에 비례하는 정적복원력에 의해 평형상태를 찾아가게 된다. 그러나 수평운

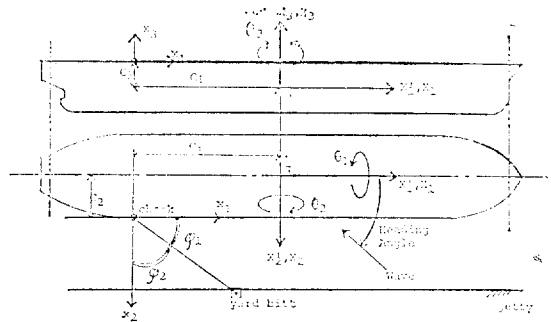


Fig. 1 Coordinate system

동의 경우에는 전적으로 계류계에 의한 복원력을 지니게 된다. 결국 계류계에 의한 복원력이 외력에 의한 새로운 평형상태의 위치를 결정하는데 있어 가장 중요한 인자가 되며, 그 계류계의 정적 하중-변위 곡선에 의해 결정된다. 정적 하중-변위 곡선은 계류된 구조물이 외력을 받지않은 초기 평형상태 위치로부터 수평방향의 변위를 벗어나는데 필요한 힘을 그 변위의 합수로 나타낸 것으로 그 계류계의 초기 인장력, 외력의 크기와 방향 그리고 계류계의 구성에 따라 정해지게 된다. Fig. 2는 정적 하중-변위 곡선의 한 예를 보여준다. 그 계류계의 정적 하중-변위 곡선이 결정되면, 외력에 의한 새로운 평형상태 위치가 결정되며, 그 위치에 파도에 의한 선체운동을 더함으로 각 계류삭의 인장력을 계산할 수 있다. 이상의 과정을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 각 입사각에 따른 평균 풍력, 조류력 그리고 파력의 결정
- 2) 선체의 원하, 종경사 및 횡경사에 따른 정적 복원력의 계산
- 3) 주어진 계류계 내에서 각 계류삭의 탄성계수

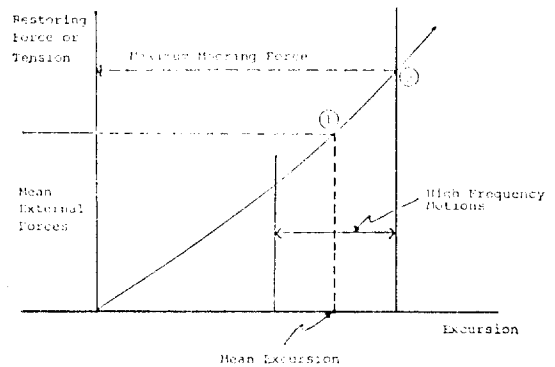


Fig. 2 Static load-excision curve

행렬 결정

- 4) 전체계류계의 탄성계수 행렬 결정
- 5) 정적 하중-변위 곡선의 작성
- 6) 외력에 대한 평형상태 계산—Fig. 2에 보여진 점 1
- 7) 파도로 인한 배 운동에 기인하는 변위 증가에 따른 각 계류사의 인장력 계산

좌표계로는 공간에 고정된 $G-X_1' X_2' X_3'$ 좌표계와 선체의 무게중심에 원점이 고정된 $G-X_1 X_2 X_3$ 좌표계를 도입하였다. 이들의 관계는 Fig. 1에 도시하였다. 선체 무게중심의 병진운동은 X_1', X_2', X_3' 방향에 대해 각각 U_1, U_2, U_3 로 표시되며, 선체의 무게중심에 대한 회전운동은 X_1', X_2', X_3' 축에 대한 배의 회전 각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 로 표시된다.

Fig. 1에는 계류삭 n 을 나타내기 위하여 $G-X_1 X_2 X_3$ 좌표계에서 각각의 방향으로 C_1, C_2, C_3 만큼 떨어진 배 초오르에 원점이 있으며 $G-X_1' X_2' X_3'$ 고정 좌표계와 평행한 계류삭 좌표계 $C_n-x_1 x_2 x_3$ 이 나타나 있다. 선체운동이 작다고 가정하면, 결국 계류삭 n 을 잡고 있는 배 초오르 n 의 변위는 다음으로 표시된다.

$$d_i = U_i - C_{ij}\theta_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기에서

- d_i = 배 초오르 n 의 i 방향 변위
 - U_i = 무게중심의 i 방향 병진운동 ($i=1, 2, 3$)
 - θ_j = j 축에 대한 무게중심의 회전운동 ($j=1, 2, 3$)
 - C_{ij} = 배 초오르 n 의 위치를 나타내는 위치 행렬
- $$= \begin{bmatrix} 0 & -C_3 & C_2 \\ C_3 & 0 & -C_1 \\ -C_2 & C_1 & 0 \end{bmatrix}$$

을 나타내며, 식(1)의 j 첨자와 같이 같은 첨자가 두번 사용되는 것은 그 첨자에 대한 합을 의미한다.

3. 외력 및 복원력

3.1. 풍력 및 조류력

선체의 수면위 노출된 부분에 작용하는 풍력은 특히 안벽이나 터미널 등에 계류된 선박이 대부분 경하상태로 떠있는 것을 고려하면 전체 계류 외력중 큰 부분을 차지한다. 또한, 선체의 수면 아래 부분에 작용하는 조류력은 대부분의 경우 풍력보다는 작지만, 강한 조류가 존재하는 곳에서는 그 크기가 커지게 된다. 여기에서는 VLCC에 작용하는 풍력과 조류력을 구하는데 널리 사용되는 CCIMF(Coil Companies International Marine Forum)[2]의 방법을 사용하였다.

OCIMF에서는 풍동시험을 통하여 배의 요목들로 무

차원화된 풍력계수와 모멘트 계수를 구하였으며 또한 에인수조시험을 통하여 조류력에 관한 계수를 구하여 제곱함으로써 컴퓨터 프로그램화 할 수 있게 하였다. 이 결과들은 탱커선형에 대해서는 바로 쓸 수 있으나, 탱커선형과 많이 다른 배에 대해서는 다른 방법에 의해 구해야 한다. 그러나 다른 선형에 대해서도 초기 목적의 선계상, 그리고 계류계의 정성적인 경향을 알기 위한 목적이려면 OCIMF 방법으로 풍력과 조류력을 구하여도 무방할 것이다.

3.2. 파력

계류된 구조물에 작용하는 파력은 1차 선형 파력 및 2차 비선형 표류력으로 나누어지며, 비선형 표류력은 시간 평균 표류력 및 시간에 따라 서서히 변화하는 저진동 표류력으로 나누어진다. 저진동 표류력은 1차 선형파력에 비해 비록 작은 양이지만, 비교적 낮은 고유진동수를 가진 계류계와의 공진으로 인해 계류된 구조물의 대진폭 수평운동을 야기시킬 수 있으므로, 계류계 해석에 있어 매우 중요한 의미를 지니게 된다. 준정적 해석법에 따라 시간 평균 표류력은 정적힘의 한 성분이며, 1차 선형 파력 및 저진동 표류력은 그들이 야기시키는 선체운동으로 바뀌어 정적힘에 의한 평형상태 위치에 더해지게 된다.

1차 선형 파력 및 그에 의한 선체운동은 스트림이론 [3] 또는 3차원 산란이론 [4]에 의해 구할 수 있다. 또한 2차 비선형 표류력은 유한 수심에서 구조물에 작용하는 유체압력을 직접 적분함으로써 계산할 수 있다 [5]. 그러나 대부분의 배가 계류되는 항만내의 천수해역에서 계류계 및 계류삭의 비선형성을 고려하여 저진동 표류력에 의해 야기되는 선체 수평운동을 구한다는 것은 매우 힘들기 때문에 여기에서는 선형계류계의 운동값을 사용하였다.

3.3. 조수변화에 따른 계류력

조수 변화(של물 또는 밀물)에 따른 수면 변화나 선박의 loading/unloading 작업에 따른 흘수변화는 그 선체에 수직으로 작용하며, 큰 값을 가질수도 있으므로 그 정도에 따라 계류계의 해석시 고려되어야 할 것이다.

3.4. 정적 복원력

여기에서는 다음식에 따라 정적 복원력을 고려하였다.

- 1) 횡 경사; $L^x_{rest} = W \cdot GM_T \cdot \theta_1$ (2)
- 2) 종 경사; $L^y_{rest} = W \cdot GM_L \cdot \theta_2$ (3)
- 3) 침하; $F^z_{rest} = \rho \cdot g \cdot A \cdot U_3$ (4)

위에서, W = 배의 배수량

$$GM_T = \text{횡방향 메타센터 높이}$$

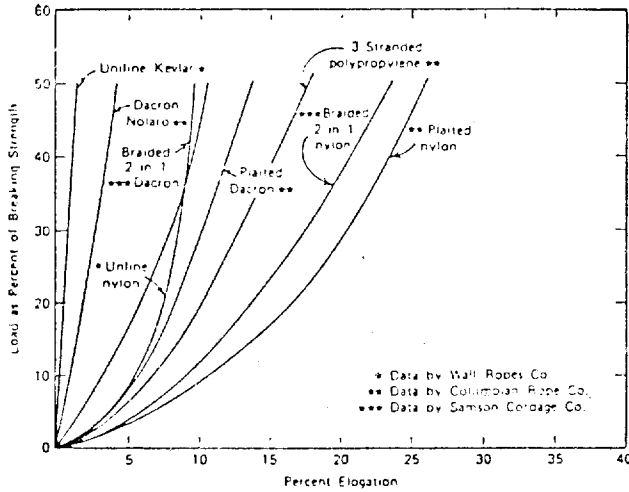


Fig. 3 Typical load-elongation curve for synthetic fiber ropes

- GM_L = 중방향 메타센터 높이
- ρ = 물의 밀도
- g = 중력 가속도
- A = 배의 수선 면적

4. 계류계 해석

4.1. 평형 방정식

외력에 의해 움직이게 된 계류 구조물의 에너지는 그 구조물을 잡고 있는 계류삭의 길이가 늘어남으로 발생하게 되는 탄성 에너지에 흡수되게 된다. 합성섬유 로우프로 구성된 계류삭의 탄성계수는 Fig. 3[6]에 보여진 것처럼 응력과 변형도 사이에 비선형 특성을 보이고 있으며, 보다 정확한 해석을 위해서는 계류삭에 걸리게 되는 인장력의 함수로 표시되는 Young's modulus에 대한 정확한 값이 요구된다. 부록 1에는 이러한 비선형 계류삭의 모델링 방법이 요약되어 있으며, 또한 비선형 계류삭의 선형화 과정도 요약되어 있다.

Fig. 1에 보여진 것처럼 공간에 고정된 좌표계 $G-X_1' X_2' X_3'$ 와 $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 각을 가지는 계류삭 n 의 탄성계수는 다음과 같이 주어진다.

$$K_{ij} = k_n \begin{bmatrix} a_x^2 & a_x a_y & a_x a_z \\ a_y a_x & a_y^2 & a_y a_z \\ a_z a_x & a_z a_y & a_z^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서,

- a = 계류삭 n 의 방향 여현
- k_n = 계류삭 n 의 길이 방향의 탄성 계수
- $= E(T) \cdot A/l_0$ (6)

여기에서,

- A = 계류삭의 총 단면적(계류삭의 갯수 \times 각 단면적)
- l_0 = Yard bitt에서 ship bollard까지의 계류삭 길이
- 결국 계류삭 n 이 가지게 되는 복원력 f_i 및 복원 모멘트 m_i 는 X_1', X_2', X_3' 축에 평행한 3개의 성분을 가지게 되며, 다음의 형태로 주어진다.

$$f_i = K_{ij} d_j = K_{ij}(U_j - C_{jk} \theta_k), \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$m_i = C_{ij} f_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

만일 계류계가 N 개의 계류삭으로 구성되어 있다면, 배의 무게중심을 지나는 복원력 F_i 는 다음처럼 주어지며,

$$F_i = \sum_{n=1}^N (K_{ij} U_j + A_{ij} \theta_j), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (9)$$

여기에서,

$$A_{ij} = -K_{ik} C_{kj}$$

또한 무게중심 G 에 대한 복원 모멘트 M_i 는 다음식으로 주어진다.

$$M_i = \sum_{n=1}^N (A_{ij}^T U_j + B_{ij} \theta_j), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

여기에서,

$$B_{ij} = C_{ik} A_{kj}$$

A^T = transpose matrix of A -matrix

이상에서, 정적 평형 방정식은 외력과 (9)(10)식으로 주어진 탄성 복원력 그리고 (2)(3)(4)식으로 주어진 정적 복원력의 평형을 고려함으로써 얻어질 수 있다. 결국,

$$F_{elast} + F_{rest} = F_{ext} \quad (11)$$

(11)식의 행렬 방정식은 구하고자 하는 미지수인 선박의 병진운동 U 와 회전운동 θ 를 풀 수 있는 6개의 연립방정식을 표시하고 있다.

4.2. 하중 증가법

(11)식으로 주어진 평형 방정식의 계수들은 각 계류삭에 작용하는 인장력과 각 계류삭의 방향 여현에 따라 달라지므로 구조물의 변위가 작은 부분에서만 어느 일정한 값이 유효하게 되어, 큰 외력을 받는 대변위 비선형계류 문제를 단번에 푸는 것은 오차를 유발한다. 이러한 비선형 문제를 푸는 가장 간단한 방법은 외력이 0인 상태부터 시작하여 총합력과 같아질 때까지 외력을 조금씩 증가시켜 나감으로 푸는 것이다. 즉, 외력이 증가되는 각 단계에서 평형 방정식의 모든 계수를 구하고, 미지수를 구한 후 평형 상태가 이루어졌는지 검사하고, 평형 상태가 이루어지면 또 외력을 증가시키는 방법으로 해석하게 된다.

이러한 단계별 과정은 각 단계에서 slack되는 계류삭이나 안전계수가 1이 넘어 끊어지는 계류삭, 또는 처음에 slack되어 있다가 외력이 증가함에 따라 인장력

을 받게 되는 계류삭등을 다 고려할 수 있게 된다.

5. 적 음 예

5.1. 상자형 바아지

Fig. 4와 같이 수심이 23m인 해역에 8개의 계류삭과 2개의 방현제로 안벽에 계류된 상자형 바아지의 계류계를 해석하였으며, 그 계산 결과는 OSCAR[7]의 결과와 비교하였다. OSCAR 프로그램은 비선형 계류삭을 사용할 수 없으며, 오직 선형화된 계류삭만 입력시킬 수 있다.

Table 1에는 300 tonf의 외력이 바아지를 안벽으로 미치는 경우에 방현제를 부록 1의 방법대로 선형화시킨 것과 비선형 모델을 사용한 경우의 결과 비교를 OSCAR 프로그램의 결과와 함께 나타내었다. 대체로 본 프로그램의 선형화된 결과와 OSCAR프로그램의 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 또한 선형화와 비선형화의 경우에 있어 그 값이 일치하여 부록 1의 선형화

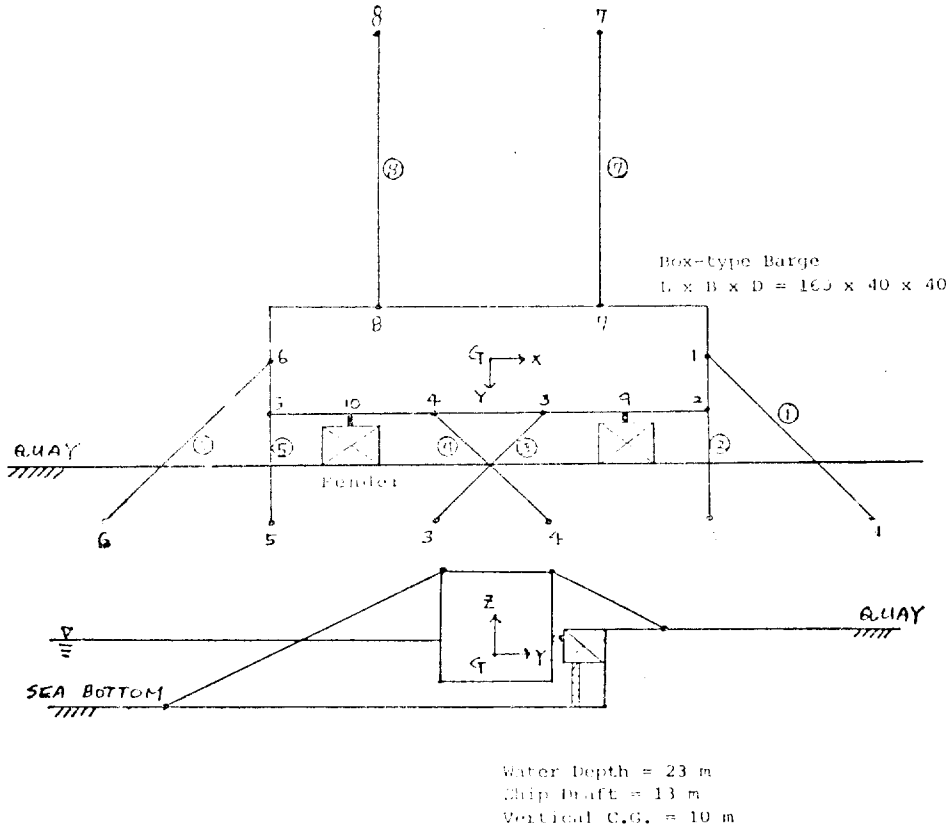


Fig. 4 Mooring arrangement for box-type barge

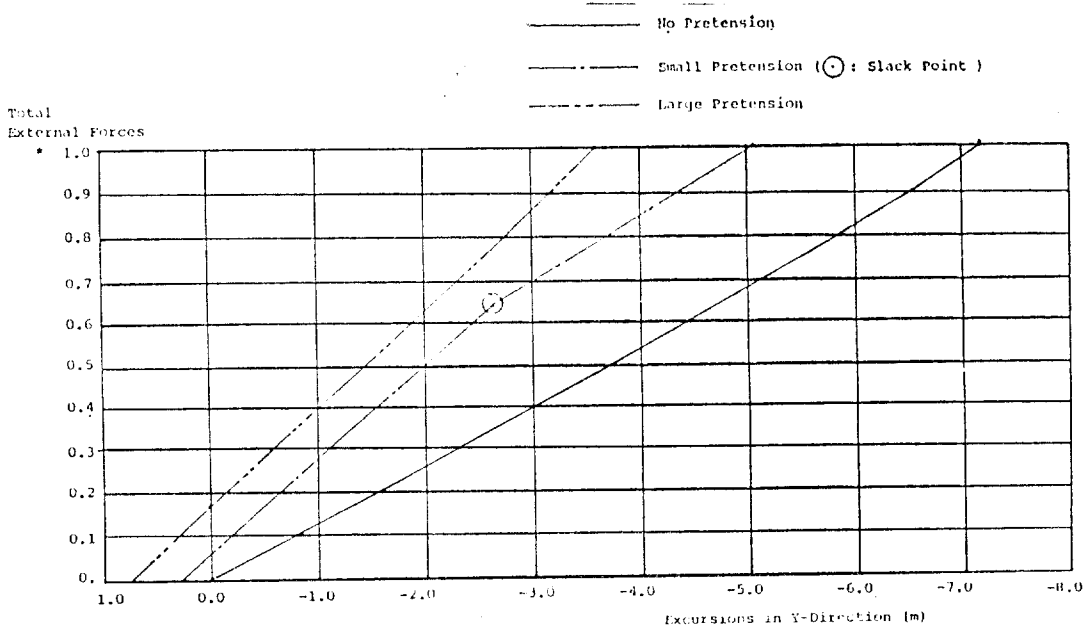


Fig. 5 Excursions in Y-direction with the pretension variations(barge)

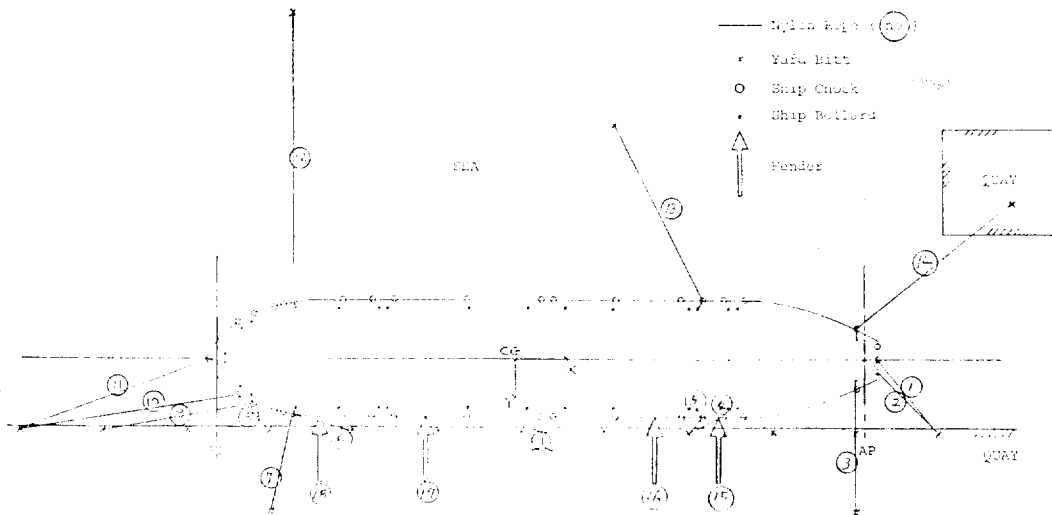


Fig. 6 Mooring arrangement for 250K VLCC

방법이 정당화되나, 파도에 의한 1m의 좌우동요 운동을 포함시켰을때의 방현재의 안전계수에는 많은 차이가 나타나고 있다. 이는 여기에서 사용한 방현재의 특성이 부록 1에 보여진대로 40%변형(1.4m변형)시까지는 선형적인 특성을 가지며 그 다음부터 심한 비선형 현상을 보이는데 기인하는 것으로, 결국 방현재를 선형화 시켰을때 외력이 커지게 되면 많은 해석 오차를 가져올 수 있으므로 결과 해석에 세심한 주의를 하여

야 한다.

Fig. 5는 각각의 초기 인장력 분포에 따른 바아의 Y방향 변위를 보여주고 있다. 여기에서는 300 tonf의 외력이 바아지를 안벽에서 부터 밀어내는 경우를 생각 하였으며, 이 경우 방현재는 곧 slack되어 계류삭의 역할을 거의 못하므로 방현재를 제거한 후 8개의 계류삭을 가지고 해석하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 초기 인장력이 커지게 되면 전체 계류계가 점점 stiff하게

Table 1 Analysis results for barge
(attack angle=270 deg)

Program		QUMOOR		
Method		Linear	Linear	Non-Linear
Final Equilibrium Position	U_y	1.12	1.1292	1.2155
	U_z	-0.01	-0.0083	-0.0082
	θ_x	0.19	0.1917	0.1438
Safety Factor	1	25.91	24.684	25.793
	2	60.47	59.284	82.669
	3	30.23	28.830	31.191
	4	30.23	28.830	31.191
	5	60.47	59.284	82.669
	6	25.91	24.684	25.793
	7	13.16	13.125	12.419
	8	13.16	13.125	12.419
	9	3.23	3.216	3.344
	10	3.23	3.216	3.344
Safety Factor (including 1m wave motion)	1	41.85	40.113	43.097
	2	0.	slack	slack
	3	78.79	77.257	96.595
	4	78.79	77.257	96.595
	5	0.	slack	slack
	6	41.85	40.113	43.097
	7	9.01	8.896	8.566
	8	9.01	8.896	8.566
	9	1.85	1.821	1.049
	10	1.85	1.821	1.049

Table 2 Analysis results for 250K VLCC
(attack angle=270 deg)

Program		QUMOOR		
Method		Linear	Linear	Non-Linear
Initial Equilibrium Position	U_x	0.01	0.0153	0.0127
	U_y	0.03	0.0277	0.0216
	U_z	0.0	-0.0043	-0.0042
	θ_x	-0.03	-0.0288	-0.0232
	θ_y	0.0	0.0007	0.0005
	θ_z	0.02	0.0207	0.0154
Final Equilibrium Position	U_x	-0.25	-0.2608	-0.2622
	U_y	1.35	1.3522	1.3024
	U_z	0.00	-0.0022	0.0155
	θ_x	-0.11	-0.1111	0.2243
	θ_y	0.00	0.0005	-0.1346
	θ_z	-0.09	-0.0894	-0.0313

Safety Factor	1	45.35	42.831	31.512
	2	90.70	78.737	44.127
	3	slack	slack	**
	4	90.70	82.128	30.371
	5	90.70	91.876	24.773
	6	36.28	31.840	30.322
	7	slack	slack	slack
	8	120.93	** ¹⁾	**
	9	45.35	43.479	47.311
	10	45.35	40.112	42.023
	11	54.42	54.478	55.878
	12	18.14	18.419	20.125
	13	19.43	19.184	19.372
	14	30.23	19.242	18.474
	15	3.46	3.459	3.305
	16	3.33	3.331	3.249
	17	2.94	2.932	3.028
	18	2.77	2.781	2.922

1) ** means that line's safety factor is greater than 100.0.

Table 3 Comparison table for 250K VLCC

Program		QUMOOR	
Method		Linear	Non-linear
Safety Factor (including 0.9m wave motion)	1	** ¹⁾	**
	2	slack	**
	3	slack	slack
	4	**	35.799
	5	**	29.923
	6	36.338	34.757
	7	slack	slack
	8	slack	slack
	9	48.559	53.598
	10	44.082	46.501
	11	78.556	81.878
	12	15.106	16.233
	13	14.910	15.025
	14	15.839	15.317
	15	1.987	2.094
	16	1.944	1.667
	17	1.801	0.918(***) ²⁾
	18	1.743	0.763(***)

1) ** means that line's safety factor is greater than 100.0.

2) *** means that line's safety factor is less than 1.0.

되어 일정한 크기의 힘에 대하여 바야지가 많이 움직이지는 않게되나, 외력에 의한 최종 평형 상태에 과도에 의한 운동 변위가 더해지는 경우 각 계류삭에 과도한 인장력이 걸릴 수 있게 되며, 초기 인장력이 작아지게 되면 그 반대의 경향을 나타낸다. 결국 어느 일정한 외력과 과도에 의한 운동에 대해 선체가 조금 움직이며 그 때 각 계류삭에 과도한 인장력이 작용하지 않도록 하는 계류계의 설계에 있어, 초기 인장력 분포의 결정은 매우 중요하며, 많은 계산을 한 후 결정하여야 할 것이다.

5.2. 250K VLCC

개발된 프로그램의 실제 문제 적용을 위해서 250K VLCC [8]가 Fig. 6과 같이 안벽에 계류된 경우를 택하였으며, 600 tonf의 외력이 배를 안벽으로 미는 경우만을 택하여 계산을 수행하였다.

Table 2에서 보듯, 본 프로그램과 OSCAR의 결과는 거의 일치하나, 비선형 결과는 조금씩 다르며, 특히 최종 평형 상태에서 roll angle과 yaw angle이 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 방현재의 모델링에 따라 작용하는 인장력의 크기가 서로 다름으로 인해 나타나는 차이이다. 또한, Table 2에서는 알 수 없지만, 배가 과도에 의해 0.9m의 좌우동요 운동을 한다고 할 때 Table 3에서 보듯 상당한 결과 차이가 있음을 알 수 있다. 그러므로, 이 계류계는 600tonf의 외력과 과도에 의한 0.9m의 좌우동요운동이 배를 안벽으로 미는 경우에는 건디지 못함을 알 수 있으며, 결국 새로운 계류계를 설계하여야 한다. 그리고 이상에서부터 방현재가 중요하게 되는 경우, 즉, 배가 안벽으로 밀리게 되는 경우에는 방현재의 비선형 모델링이 필요하게 되며, 방현재의 선형화는 잘못된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본고는 태풍 내습시의 안벽 계류나 load-out시의 계류계 해석 그리고 터미널 등의 설계시에 사용될 수 있도록 예상되는 외력과 그에 의한 운동에 견딜 수 있는 계류계의 선택 및 신뢰성 해석에 대하여 서술 되었으며, 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

i) 준정적 해석법에 따라 정적힘에 의한 평형상태 위치를 정확히 예측할 수 있으며 이는 본 연구를 통하여 개발된 프로그램 QUMOOR가 안벽 계류, load-out시의 계류계 그리고 터미널등의 계류계 해석에 사용될 수 있다는 것을 의미한다.

ii) 각 재질에 대한 탄성은 선형적이라고 가정할 수 있는 경우와 합성로오포나 방현재등과 같이 비선형적인 경우를 모두 포함하여 해석할 수 있으며, 해석 도중 계류삭이 끊어지거나 slack되는 경우의 효과도 고려한다.

iii) 일정한 외력과 과도에 의한 운동에 대해 선체가 허용변위 안에 있도록 하며, 그때 각 계류삭에 과도한 인장력이 걸리지 않도록 하는 계류계의 선택시 초기 인장력의 분포는 매우 중요한 선택 인자가 되므로 충분한 고려가 있어야 한다.

iv) 대부분의 배가 계류되는 항만내의 천수해역에서 계류계 및 계류삭의 비선형성을 고려하여 저진동 표류력에 의해 야기되는 선체운동은 계류계 해석에 있어 매우 중요하며, 좀 더 많은 연구가 필요하다.

7. 참고 문헌

- [1] Michael Chernjowski, "Mooring of Surface Vessels to Piers", *Marine Technology*, Vol. 17, No. 1, Jan. 1980.
- [2] OCIMF, "Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs", 1977.
- [3] N. Salvesen, E.O. Tuck and O. Faltinsen, "Ship Motions and Sea Loads", *SNAME Transactions* 78, 1970.
- [4] C.J. Garrison, "Numerical Methods in Offshore Engineering, Chapt. 3-Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures: Three-Dimensional Source Distribution Methods", John Wiley & Sons, 1978.
- [5] D.J. Yum and T.M. Oh, "Second-Order Wave Exciting Forces on a Large Floating Structure", *Proc. of Seminar on Ship Hydrodynamics*, Seoul National University, Seoul, 1988.
- [6] H.O. Berteaux, "Buoy Engineering", John Wiley & Sons, 1976.
- [7] "User's Information for OSCAR", Ultramarine Inc., Nov. 4, 1988.
- [8] "Provisional Trim & Stability Booklet for Ship No. H480", Design Coordination Dep't, HHI, 1988.

부록 1. 비선형 계류삭의 모델링

1.1 합성 섬유 로우프

나일론, 테크론등 합성 섬유로 만들어진 계류삭은 해수에 젖어도 심하게 부식되지 않고, 강도도 크게 저하되지 않으며 취급하기가 용이하기 때문에 안벽계류, load-out시의 계류 문제나 터미널에서의 계류 문제에 가장 많이 쓰이는 계류삭이다. 이러한 합성 섬유 로우프는 재질, 구조, 구성방법 등에 따라 로우프의 강도, 탄성 계수비 등이 달라지게 되며, 이는 로우프 선택시 로우프 제조업자로 부터 제공되고 있다. 또한 합성 섬유 로우프는 정적힘이나 또는 과도나 요동하는 바람등과 같은 동적힘이나에 따라 로우프의 탄성 응답도 달라지게 되며, 이는 계류계 해석시 설계자가 고려해야 될 문제이다.

합성 섬유 로우프의 탄성 계수는 제조업자에 의해 응력-변형도 관계 또는 탄성계수-하중곡선으로 주어지고 있으며, 대개의 경우 비선형 특성을 나타내고 있다. 그러나 대개의 합성 섬유 로우프는 파괴 강도의 20~50% 범위에서 선형적인 탄성 특성을 가지고 있으므로, 공학적인 계산 목적상 대표적인 한가지 값의 탄성 계수를 사용하고 있다. 먼저 제조업자에 의해 합성 섬유 로우프 데이터가 제공되어 있는 경우에는 파괴강도의 40%의 하중이 작용할 시의 Young's modulus E 의 값을 택하며, 데이터가 없는 경우에는 젖은 나일론 로우프의 값인 $E=1.8128E5 \text{ tonf/m}^2$ 값을 사용한다.

1.2 방현재

방현재는 배가 안벽등에 계류될 때 배와 안벽에 손

실을 추지 않고 힘을 흡수하기 위해 설치되는 것으로, 배와 안벽을 동시에 보호할 수 있도록 선택되어야 한다. 방현재 종류에 따른 특성곡선이 여러가지 있지만, 대체로 반작용력-변형 곡선으로 주어지며, 합성섬유로우프와 마찬가지로 비선형 특성을 보여주고 있다.

본 고에서는 방현재는 배와 안벽사이에서 배와 안벽에 대해 수직인 힘(Y -방향)만 흡수한다고 가정하며, X -방향이나 Z -방향 힘은 흡수하지 못한다고 가정한다. 이는 방현재의 특성길이(대부분의 경우 특성지름)가 짧기 때문에 방현재와 배의 이동에 의해 야기되는 X -또는 Z -방향의 힘을 최소화 시키기 위한 것이다. 그러므로 방현재의 길이를 1,000m로 확장시키고, 등가의 탄성 특성값을 가지도록 원래 길이의 탄성 특성값을 고치게 된다. 또한 비선형 모델링을 사용하면 반복 계산에 의해 컴퓨터 CPU time이 증가하기 때문에 초기 계산 목적으로, 위의 방현재를 선형화 시킬 수 있으며, 그 과정은 아래와 같다.

i) 반작용력-변형 곡선에서 변형이 0인 지점부터 시작하여 선형적으로 생각할 수 있는 부분의 마지막 지점을 택한다.

ii) $AE=R/\epsilon$ 으로부터 AE 를 계산한다.

iii) ii)에서 계산된 AE 는 방현재의 특성 지름이 l_0 m인 경우이며, 이를 길이가 1,000m인 경우로 확장시킨다. 즉, $(AE)_e=(1,000.0/l_0)*AE$

이상의 선형화 가정은 i)에서 보듯 선형적 특성을 지닌 부분에서만 유효하며, 그 이상의 변형을 일으키는 경우 결과에 오류가 발생하므로 주의해야 한다.