

군장신항만의 항주파로 인한 계류안정성해석

김재수* · 공병승*** · 홍남식**

*동아대학교 해양공학과

***동서대학교 건축·토목시스템공학부

**동아대학교 토목공학부

Mooring Analysis due to Ship Wave at Gunzang New Port

JAE-SOO KIM*, BYUNG-SEUNG KONG*** AND NAMSEEG HONG**

*Dept. of Ocean Engineering, Donga University, Busan, Korea

***Division of Civil and Architecture, Dongseo University, Busan, Korea

**Division of Civil Engineering, Donga University, Busan, Korea

KEYWORDS: Ship waves 항주파, Boussinesque equation Boussinesque 방정식, Mooring stability 계류안정성

ABSTRACT: This study performed a numerical simulation to predict the development of ship waves and their propagation in the shallow water region of Gunzang New Port and to examine the stability of taut line mooring at the sea wall using the design criteria. In order to predict the propagation of ship waves based on the speeds of various ships under complicated and shallow water depths, a computer model was constructed based on the Boussinesque equation with a fixed coordinate system. Additionally, an investigation of the stability was made by applying MOSES under the environmental loadings estimated by OCIMF.

1. 서 론

일반적으로 개방해역에서 발생한 항주파는 전파되어 갈수록 에너지가 감소되어 결국 소멸된다. 그러나, 항내처럼 수역면적이 좁거나 연안해역의 항로등과 같이 수로의 폭이 좁은 경우, 그리고 해안으로 접근함에 따라 수심이 낮아지는 경우는, 발생된 항주파가 굴절, 반사, 회절 및 천수효과 등으로 변형하게 되어 파고가 증폭되는 경우도 생기게 된다. 연안에서의 항주파에 의한 피해로는 제방의 손실 및 해안선의 침식, 정박중인 소형선박의 과도한 요동으로 인한 위험성등이 있다. 이와 같은 항주파가 문제시 되는 경우에 대한 대책을 수립하기 위하여서는 항주파의 발생 이외에도 전파에 따른 변형에 관하여도 예측하고 분석할 필요가 있다.

항주파의 전파로 인한 파의 변형에 대하여 행해진 연구로는 Kofoed-Hansen(1996), Kirk(1998), Raven(2000), Chen and Sharma(1995)등이 있다. 그러나, 이들 모델은 선박을 중심으로 이동좌표계를 도입하여 천해역에 적용하기는 아직 부족하다. 그러므로, 항주파의 전파 및 변형이 중요시되는 천해역의 항로 및 수로에 적용성이 탁월한 Boussinesque 방정식을 토대로 항주파를 계산할 필요가 있다(김재수 등, 2008).

본 연구에서는 천해역과 같은 실해역에서의 복잡한 항로나

다양한 선속에 대한 항주파를 예측하기 위하여 고정좌표계에서 비선형 파동모형을 적용한 항주파 수치모형을 구축한 후 군장신항만에 적용하여 항주파를 모의하고, 안벽 전면에서의 항주파로 인한 계류안정성을 조사한다. 항주파로 인한 계류안정성을 조사하기 위하여 MOSES를 적용하며, OCIMF에 의한 환경하중을 사용한다. 또한, 추가로 50년빈도 설계조건에 대한 계류안정성도 MOSES를 사용하여 조사하였다.

2. 항주파의 수치모델

2.1 적용파랑 모형

본 연구에서 적용한 파랑 모형은 천해역에서의 적용성이 좋은 확장 Boussinesque방정식(Madsen and Sorensen, 1992)에 저면마찰 및 쇄파모형을 부가한 아래 식을 적용한다.

$$\eta_t + p_x + q_y = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} p_t + \left(\frac{p^2}{d}\right)_x + \left(\frac{pd}{d}\right)_y + gd\eta_x - r_1 + f_1 + ep \\ = \left(c + \frac{1}{3}\right)h^2(p_{xxt} + q_{yyt}) + cgh^3(\eta_{xxt} + \eta_{xyy}) \\ + hh_x\left(\frac{1}{3}p_{xt} + \frac{1}{6}q_{yt} + 2cgh\eta_{xx} + cgh\eta_{yy}\right) \\ + hh_y\left(\frac{1}{6}q_{xy} + cgh\eta_{xy}\right) \end{aligned} \tag{2}$$

교신저자 홍남식: 부산광역시 사하구 하단2동 840

051-200-7794 hns0817@dau.ac.kr

$$\begin{aligned}
 & q_t + \left(\frac{q^2}{d}\right)_y + \left(\frac{pq}{d}\right)_x + g d \eta_y - r_2 + f_2 + \epsilon p \\
 & = \left(c + \frac{1}{3}\right) h^2 (q_{yyt} + p_{xyt}) + c g h^3 (\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) \\
 & \quad + h h_y \left(\frac{1}{3} q_{yt} + \frac{1}{6} p_{xt} + 2 c g h \eta_{yy} + c g h \eta_{xx}\right) \\
 & \quad + h h_x \left(\frac{1}{6} p_{yt} + c g h \eta_{xy}\right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, p, q 는 x, y 방향의 유량, h 는 수심, ϵ 는 수면변동량, $d = \epsilon + h$, i 는 흡수경계에서의 흡수계수이며, c 는 분산항의 보정계수이다.

쇄파에 의한 에너지 소산은 와동점성계수를 이용하여 아래 식과 같은 운동량으로 나타내며

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \nu (p_{xx} + p_{yy}) \\
 r_2 &= \nu (q_{xx} + q_{yy})
 \end{aligned} \tag{4}$$

또한, 저면 마찰항 f_1, f_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_{1r} &= \frac{f_r}{2d^2} p \sqrt{p^2 + q^2} \\
 f_{2r} &= \frac{f_r}{2d^2} q \sqrt{p^2 + q^2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 f 는 마찰계수로 0.1을 사용한다.

2.2 조파 경계조건

선박의 항해에 의한 교란은 이동선박을 세장형 물체로 가정하여 선수에서 이동조파 Source로 선미에서 Sink로 보고 근사화 한다 (Tuck, 1966; Chen and Sharma, 1995). 즉, 식 (6)과 같이 선박의 진행에 따라 선박이 배제시킨 유량 q_s 가 선수에서 횡방향으로 분리되어 배출되며, 선미에서 유입된다고 본다. 좌우 대칭인 선박에서는 양측으로 배출되는 유량은 같으므로 선박진행 중심선상(y_s)에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$q_{s|y_s, r} = \pm \frac{1}{2} V_{sr} \frac{dS_r}{dx_r} \tag{6}$$

식(6)에서 $S = S(x_s)$ 는 배제단면적으로 포물선 함수로 다음식으로 가정한다.

$$S(x_s) = S_0 \left[1 - \left(\frac{2x_{sr}}{L_{sr}}\right)^2 \right] \tag{7}$$

여기서 S_0 는 선체 중앙의 배제단면적이다.

3. 군장신항에서의 항주파 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 개요

수립된 모델은 선박의 운항에 따른 항주파의 생성, 전파, 굴절 및 회절로 인한 항내파랑을 재현하는 것으로 MATLAB을

기반으로 프로그래밍 된다. 선박의 운항속도, 규격, 운항경로 등을 고려할 수 있으며 선박 정지후의 파랑전파 현상도 재현할 수 있다. 또한, 대부분이 5초미만의 단주기파인 항주파가, 항로준설지역과 같이 급격한 지형변화가 존재하는 천해지역에서 발생할 수 있는 해의 불안정성을 극복한다. 이동선박을 세장형 물체로 가정하여 이동 조파 Source 및 Sink로 보고 발산파와 횡파를 독립적으로 산정하여 중첩 적용한다.

시뮬레이션 대상해역은 Fig. 1에서 보듯이 군장신항만 남측 지역으로 도류제와 방파제로 둘러싸인 비교적 정온해역이며, 선박의 서로 다른 입·출항 경로에 따른 항주파의 발생 및 전파현상을 조사한다. 격자간격은 5m 등격자로 조밀하게 정하여 상대적으로 짧은 선장을 가진 선박이 운항할 경우에도 이동 조파 Source 및 Sink를 줄 수 있게 한다. 그리고, 대상해역의 수심도는 Fig. 2에 나타내었으며, 대상선박의 규격 및 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

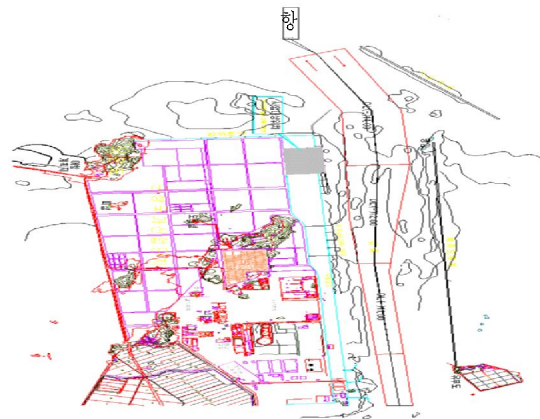


Fig. 1 Study area

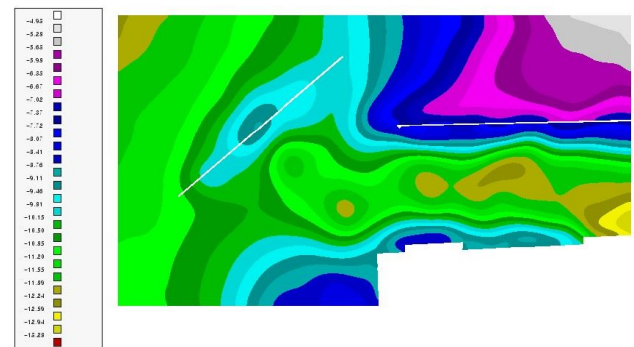


Fig. 2 Bathymetry of model area (before dredging)

Table 1 Characteristics of ship

Class	Length (m)	Width (m)	Draft (m)	Speed (knots)	Ref.
18,000DWT	161	23.6	9.6	8	
1,000DWT	67	10.9	3.9	8	
50GT	17	4.4	2.0	15	

Table 2 Period and wave height near ship path

18,000 DWT		1,000 DWT		50GT		Ref.
Period (sec)	Height (m)	Period (sec)	Height (m)	Period (sec)	Height (m)	
2.60	0.7	2.60	0.25	5.46	0.6	

Table 3 Wave height and direction in front of sea wall due to ship waves

	18,000 DWT		1,000 DWT		50GT		Ref.
	Height (m)	Dir. (deg)	Height (m)	Dir. (deg)	Height (m)	Dir. (deg)	
Entry	0.07	32	0.03	29	0.08	41	
Departure	0.06	10	0.02	9	0.08	20	

주) 항주파 방향은 안벽 접선의 남측으로 부터 시계방향의 각도임

3.2 시뮬레이션 결과

선박의 운항에 따라 선박주위에서 발생한 항주파의 주기 및 파고는 대상선박별로 나누어 Table 2에 나타내었다.

해경선의 경우 선장이 짧음에도 불구하고 선박의 운항속도가 다른 선박에 비해 2배 정도 되어 파고 및 주기가 다소 크게 나타났다. 그러므로, 대형선박의 운항시 선박운항속도를 10Knots이하로 낮출 것을 권장한다.

대상선박별로 입·출항시 운항단계별에 따른 발생 항주파의 전파 시뮬레이션을 수행하였으며, Fig. 3에 해경선(50GT)이 출항할때의 운항단계별 3차원 파고분포를 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 대상선박의 운항조건에 의해 발생하는 항주파의 주기가 워낙 짧은 반면 항내의 수역면적이 확대하여 부진동등의 현상은 전혀 발생하지 않으며 항내의 정온에 영향을 미치지도 않는 것으로 보인다. 그리고, 항주파로 인한 안벽 전면에서의 파고평균치와 방향은 Table 3에 나타냈으며 Table 3에서 보듯이 그 영향은 미미한 것으로 보인다. 결론적으로 선박의 운항속도를 본 시뮬레이션에서 적용한 속도 이하를 유지할 경우 항주파로 인한 영향은 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 선박계류 안정성 조사

선박계류에 대한 검토는 군장신항만 남측안벽(3공구) 축조공사 대안설계의 선박 계선형식에 대해 수행한다. 실제 선박의 조건은 50,000DWT급 및 30,000DWT급 선박을 기준으로 하여 만재(Fully draft) 및 경하시(Ballast)에 대해 수행하며, 계류 환경조건에 대한 정역학 및 동역학적 계선해석 (Mooring analysis)을 수행하여 계류된 선박의 변위, 계류선의 최대장력 및 방충재의 반력을 구한다. 계류선의 장력 및 선박의 변위를 검토대상 선박이 일반적으로 보유하고 있는 계류 선의 최소파

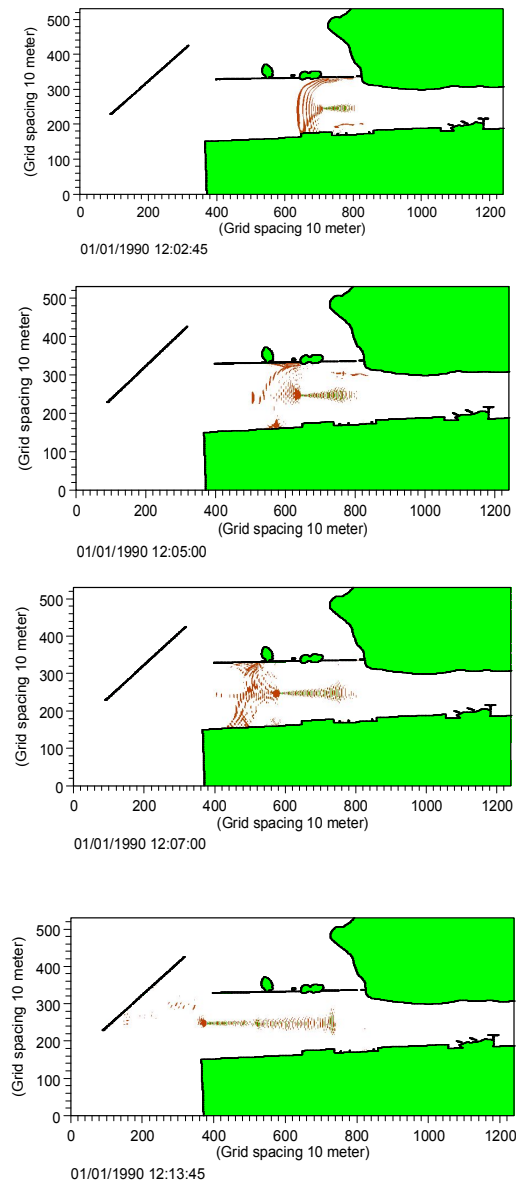


Fig. 3 Two dimensional view of ship waves by the entry of small boats(50GT)

단력(Minimum breaking load) 및 계류된 선박의 최대 허용변위 등과 비교함으로써, 계선형식의 타당성을 검증한다. 방충재의 반력은 방충재의 안전성을 검토하는 데에 반영된다. 또한 상기의 결과들을 분석하여, 계선하중을 산정하여 각 구조물별의 설계하중을 고찰한다. 정역학적 및 동역학적 계선해석을 위하여 미국의 Ultra Marine사에서 개발한 MOSES (Multi operational structure engineering simulator) 프로그램을 사용하였다. 정역학적 계선해석에서는 계류된 선박에 작용하는 바람과 조류의 힘, 파랑이 진행방향으로 끄는 힘(파표류력, Wave drift force) 등이 고려되었고, 이때 사용된 바람 및 조류에 의한 하중은 OCIMF(Oil Companies International Marine Forum)의 "Prediction of Wind and Current Loads on VLSSs"

보고서에 제시되어 있는 방법에 따라 계산하였다. 동역학적 계선해석에서는 이들 정역학적 하중과 파랑의 진동운동에 의한 동역학적 효과(Dynamic effect)를 고려하여 계선해석을 수행하고 계류색에 걸리는 장력 및 계류된 선박의 변위 등을 출력하였다. MOSES 컴퓨터 프로그램에서는 Wave-spectrum을 이용한 주파수영역 해석방법을 사용하고 있다.

4.1 이상시 선박계류안정성

4.1.1 설계 기준

계선해석에서 사용한 각 환경조건은 해양 물리환경 조사관측 및 설계하중을 기본으로 하였다. 파랑(Wave)은 파고=1.80m(50년 빈도; $H_{\frac{1}{10}}$ 유의파고), 평균주기=10.5sec로 해안에서 바다쪽으로 진행되는 파랑은 발생하지 않는 것으로 가정한다. 즉, 파랑은 선박의 180~360° 방향에서만 접근한다고 보고, 그 중 최대의 파랑하중을 유발할 수 있는 250~290°까지의 방향만 고려한다. 바람(Wind)은 모든 방향에 대해서 32.3m/sec의 순간 최대 풍속을 적용한다. 본 해석에서는 그 중 최대의 풍하중을 유발할 수 있는 230~340°의 방향만 고려한다. 조류(Current)의 경우는 해상조류 및 조석관측에 근거하였으며, 중조기의 최강유속을 사용하였다. 향후 지형변동에 따른 방향변화와 관측오차 등을 고려하고 해당지역이 접안선에 경사를 두고 변화하는 것을 감안하여 ±10°의 방향 오차를 고려한다.

즉, 창조류: -10~ 10°에서 0.72m/sec(2.00 knots)

낙조류: 170~190°에서 0.68m/sec(2.00 knots)

4.1.2 하중 산정 및 하중조합

정역학적 및 동역학적 계선해석을 위하여 사용한 MOSES 프로그램에서는 Wave-spectrum을 이용한 주파수영역 해석방법을 사용하고 있다. 파표류력(Wave drift force)은 MOSES에 내장되어 있는 공식을 사용하여 계산하고, 파랑의 진동운동에 의한 동적효과는 Wave-spectrum을 사용하여 주파수영역 해석방법으로 계산된다. 선박의 접안은 우현접안일 경우만 고려하였으며 환경하중(파랑, 바람, 조류)은 10°간격으로 재하하였다.

바람 및 조류에 의한 하중은 OCIMF에서 발간한 "Prediction of Wind and Current Load on VLCCs"에 제시되어 있는 방법에 따라 계산하며, 조류에 의한 하중계산을 위한 수심별 조류속도는 동일한 방법에 따라 다음과 같이 계산하였다.

창조류 : =1.41knots

낙조류 : =1.32knots

하중 조합은 바람과 파랑 및 조류의 작용방향을 고려하여 Table 4와 같이 조합하여 재하하였다. Fig. 4에 계선해석에서의 환경하중 재하방향을 표시하였다.

4.1.3 계선 해석(Mooring Analysis) 모델설계

미국의 Ultramarine Inc.에서 개발한 MOSES 프로그램을 사용하여 계선해석을 수행하였으며, 컴퓨터 모델링은 다음과 같이 하였다.

1) 선박모델

Table 4 Loading combination for mooring analysis

case	Loading direction[°] MOSES coordinate			case	Loading direction[°] MOSES coordinate		
	Wave	Wind	Current		Wave	Wind	Current
	01	250	250		170	07	290
02	250	250	180	08	290	290	0
03	250	250	190	09	290	290	10
04	260	260	190	10	250	230	190
05	270	270	190	11	290	310	350
06	280	280	350	12	290	340	350

대상 선박의 Hull shape는 한국해양연구원로부터 입수한 선박의 Hull shape에 대한 자료를 참조하였다. Fig. 5는 선박 모델링도를 나타낸다.

2) 계류색 모델

계류색은 선박의 크기를 고려한 Rope를 선택하여 모델링하였다. OCIMF에서는, VLCC(Very large crude carrier: 10 만~25만 DWT)의 경우, 계류된 선박의 과도한 움직임에 의해 출하대(Load arm)가 손상되는 것을 막기 위해 최소 42mm의 직경을 갖는 Wire rope를 사용하도록 권장하고 있으나, 본 부두의 계선에서는 조류 및 바람에 의한 선박의 움직임에 비하여 파랑에 의한 동역학적인 하중이 주도적인 하중이 되고 있다. 따라서, 이러한 동하중의 영향을 감소시키기 위해서는 연성을 가진 Rope를 사용하여야 하며, 본 계선해석에서는 이를 고려하였다. 즉, 계류색의 선택에 있어서, 탄성계수가 큰 Steel wire rope는 배제하였으며 기타의 Rope 중에 구조적으로 가장 불리한 하중을 유발하는 Polypropylene rope (8-strand plated rope : $E=1.75 \times \text{MPa}$)를 사용하여 모델링하였다.

컴퓨터 해석에 있어서, 모든 계류색은 팽팽하게 매어져 있는 상태(Taut line), 즉 직선으로 간주된다. MOSES에는 선박의 쇼크와 안벽의 계선주 사이의 계류색만 입력되므로 선박 갑판상의 원치와 쇼크 사이의 계류색에 대해서는 등가의 스프링으로 치환하여 입력하였다. 또한, 계류색 및 방충재의 배치는 대형 선박의 계류시 Breasting 계류색의 계선 길이가 너무 짧아서 조차의 변화에 대응이 어렵다고 판단되며, 본 부두의 경우 실제 선박의 접안시 Breasting 계류색을 사용할 가능성이 거의 없다. 따라서, Breasting 계류색은 모델링하지 않았다. Breasting 계류색이 존재하지 않으므로, 계류시의 환경하중이 선수 및 선미의 계류색에 집중될 소지가 있으며, 선박 길이 방향의 움직임이 과다하게 일어날 우려가 있다. 따라서, 본 계선해석에서는 Spring 계류색의 탄성계수 E를 다소 크게 산정하였다. 또한, 방충재는 압축에 대해서만 기능을 갖는 LINK로 설정하였다. Fig. 6은 선박 및 연결제의 모델링도를 나타낸다.

4.1.4 해석 방법

모든 계류색이 팽팽하게 매어져 있는 상태라는 가정에 맞도

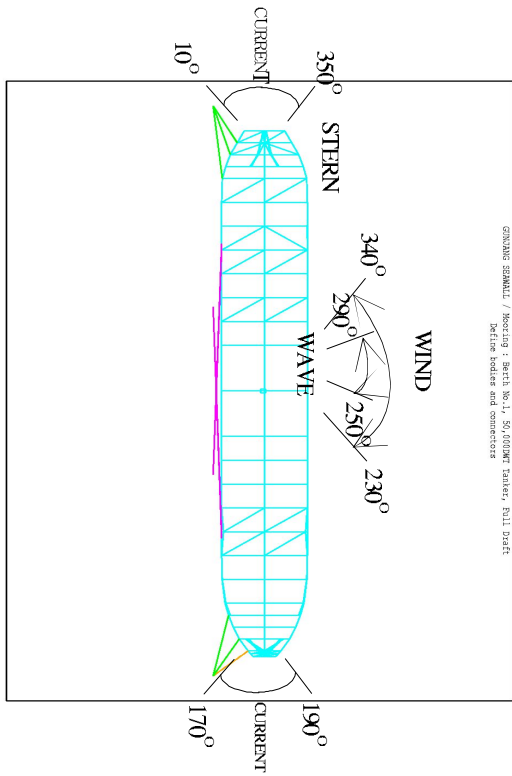


Fig. 4 Environmental loading direction on MOSES coordinate

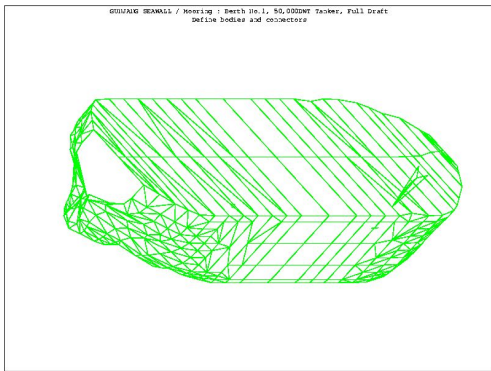
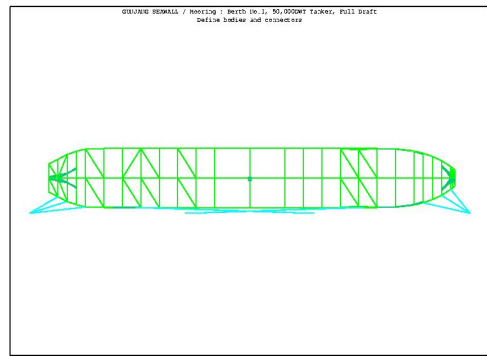


Fig. 5 Modeling of ship

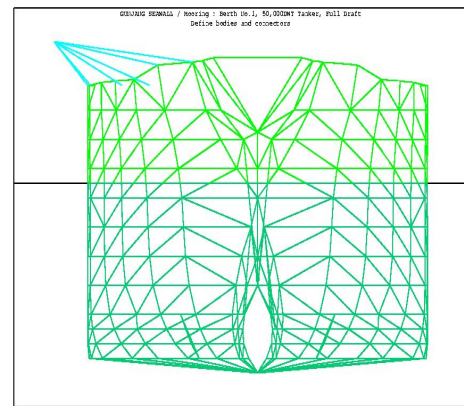
록 4~5ton의 프리텐션을 가하였으며, 이것은 연속되는 여러 가지의 하중조합에 대한 해석에 있어서 선박의 초기상태(Initial configuration)를 정의하게 된다. 총 4개의 해석모델을 만들었으며, 각 해석모델에 대하여 12개의 하중상태, 모두 합하여 48개의 경우에 대하여 해석하였다. 4.1.2절에서 정의한 바람, 조류, 파랑의 방향별 조합에 대해서 정역학적 해석과 동역학적 해석을 모두 수행하였다.

1) 정역학적 해석

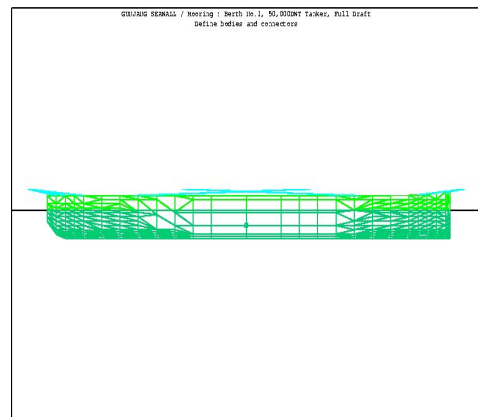
정역학적 해석에서는 계류책으로 구속되어있는 선박에 바람과 조류의 힘과 파표류력(Wave Drift Force)이 작용할 때의 선



(a) Full draft condition, x-y plane



(b) Full draft condition, x-z plane



(c) Full draft condition, y-z plane

Fig. 6 Modeling of ship and connector

박의 정역학적 평형상태를 계산하고, 계류된 선박의 변위와 계류책에 걸리는 인장력을 출력한다.

2) 동역학적 해석

앞에서 구한 정역학적 평형상태에서의 계류색과 방충제의강성을 고려하여 파랑의 진동운동에 의한 계류된 선박의 동적응답(Dynamic response)을 구하기 위하여 주파수영역에서의 동역학적 해석을 수행한다. 입력된 Hull shape data와 Strip theory를 사용하여 동역학적 해석에 필요한 선박의 동수역학적 특성치와 RAO(Response amplitude operator)를 계산하고, ISSC Wave-spectrum을 이용한 스펙트럼 해석을 수행하여 파랑의 진동운동에 의한 선박의 움직임과 계류색의 인장력 변화에 대한 통계적 값을 얻는다.

4.1.5 해석 결과

정역학적 및 동역학적 계산해석 결과를 검토하면 50,000 DWT급 선박계류시, 필요한 모든 계류색은 최소파탄력 80ton 이상의 강도를 가져야 하며, 선박길이 방향의 과도한 움직임을 방지하기 위해 Spring 계류색은 선수 및 선미의 계류색에 비해서 탄성이 다소 큰 것을 사용해야 한다. 또한, 검토대상 선박의 안전한 계류를 위하여 필요한 최소한의 계류색의 수는 Table 5와 같다. 또한, 이 지역은 비교적 조류가 강한 지역으로서 계류된 선박의 길이방향(접안선에 나란한 방향)의 움직임을 제어하기 위해서 4본 이상의 Spring 계류색(선수와 선미방향으로 각각 2본씩)을 사용하여야 한다. 해당 지역은 간만의 차가 심하고 하역시 선박홀수의 변화가 커서 짧게 맨 계류색(주로 Spring 계류색)의 경우에는 계류색 장력이 급속히 증가할 수 있다. 따라서, 선박의 계류시에는 Sprig 계류색의 길이가 길게 되도록 배치하여야 한다. 그리고, 최대 계선하중은 경하시 Wave 270°, Wind 270°, Current 190° 의 환경하중이 재하되었을 때 발생함을 알 수 있다.

4.2 항주파로 인한 선박계류안정성

항행 선박에의해 발생한 항주파의 주기가 5초이내이며 파고가 1m이내로 안벽 전면에서의 파고 또한 10cm 이내로 선박계류 안정성에 미치는 영향은 거의 미미할 것으로 판단되었다. 또한, 평상시의 조류(0.7m/sec) 및 바람(3.9m/sec)의 하중조건에 파고 0.1m, 파랑방향 45° 인 경우를 최악의 경우로 보아 비교적 적은선박인 30,000DWT급 선박에 대해 계류해석을 수행하였으며, 조류 및 바람의 방향도 최악의 경우를 고려하여 파랑의 방향과 동일하게 잡아 해석한 결과, 이상시의 경우에 비해 계류색 인장력, Ballard 견인력 및 방충제의 압축력이 현저히 줄어들음을 알 수 있었다.

Table 5 Minimum number of mooring lines

Class (DWT)	Stem sag	Stern sag	Spring sag	Total
50,000	3	3	2 X 2 = 4	10
30,000	3	3	2 X 2 = 4	10

5. 결 론

MOSES를 사용하여 이상시 계류안정성을 조사한 결과, 50,000DWT급 선박계류시, 필요한 모든 계류색은 최소 파탄력 80ton 이상의 강도를 가져야 하며 선박길이 방향의 과도한 움직임을 방지하기 위해 Spring 계류색은 선수 및 선미의 계류색에 비해서 탄성이 다소 큰 것을 사용해야 한다. 또한, 이상시에 견디도록 계류시스템이 설계된다면 항주파가 선박계류 안정성에 미치는 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2006학년도 동아대 학술연구비(국외장기파견과제) 지원에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 본 논문은 2008년 제주도에에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

김제수, 홍남식, 김상훈 (2008). “군장신항에서의 항주파 및 계류안정성 조사”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 해양공학회, 제주, 대한민국.

Chen, X.N. and Sharma, S.D. (1995) “A Slender Ship Moving at a near Critical Speed in a Shallow Channel”, Journal of Fluid Mechanics, Vol 291, pp 263-285.

Kirk, M.M. (1998) Investigation of High Speed Craft on Routes near to Land or Enclosed Estuaries, Research Project 420, Maritime & Coast Guard Agency.

Kofoed-Hansen, H. (1996) Technical Investigation of Wake Wash from Fast Ferries - Summary & Conclusions, Danish Hydraulic Institute.

Madsen, P.A. and Sorensen, O.R. (1992) “A New Form of the Boussinesque Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics Part 2”, Coastal Engineering, Vol 18, pp 183-204.

Raven, H.C. (2000) Numerical Wash Prediction Using a Free Surface Panel Code, Hydrodynamics of High Speed Craft Wake Wash & Motion Control, The Royal Institution of Naval Architects, London.

Tuck, E.O. (1966) “Shallow Water Flow Past Slender Bodies”, Journal of Fluid Mechanics, Vol 26, pp 81-95.

2008년 9월 3일 원고 접수
 2008년 9월 25일 최종 수정본 채택