

쓰나미의 공진주기파를 고려한 항내 계류선박의 시계열 해석

조익순*·이윤석**·이충로***

*한국해양대학교 해사산업연구소, **한국해양대학교 운항훈련원, ***한국해양수산연수원

A Time Domain Analysis of Moored Ship Motions with Resonant Period of a Tsunami

Ik-Soon Cho *·Yun-Sok Lee **·Choong-Ro Lee ***

* Research Institute of Maritime Industry, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

** The Center of Ship Operation, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

*** Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 608-829, Korea

요약 : 최근 지구온난화의 영향으로 지구가 불안정기에 접어들어 지구적 규모의 재해가 자주 발생하고 있는 가운데, 어떻게 하면 이러한 재해를 예방하고, 피해를 최소화 할 것인지에 대해 고려해 봐야 할 시점이다. 특히 거대지진에 의한 쓰나미의 발생을 경고하고 있는 상황이기 때문에 쓰나미에 의한 계류선박의 영향을 고려하는 것은 대단히 중요한 일이다. 또한 항내 계류선박의 장주기 동요에 동반하는 선체동요로 인하여 하역중지나 계류시설의 손상에 관한 문제가 보고되었다. 이러한 장주기 동요의 주요 발생 원인이 항내 장기주파와 계류선박의 고유주기가 일치하는 공진현상에 의한 것으로, 수조실험을 통해 공진현상의 계류선박에의 동요영향을 파악하였다. 그리고 쓰나미의 내습으로 인한 항내 계류중인 선박의 거동에 대한 수치 시뮬레이션을 행하여 공진주기파를 고려한 선박운동에의 영향 및 계류하중을 실험적으로 평가한다.

핵심용어 : 쓰나미, 공진주기파, 항내계류선박, 시계열 해석

Abstract : Recently, the earth scale disaster is occurring frequently. Under the effects of global warming, the weather has become unseasonable worldwide. Hence, the earth is experiencing unstable condition with many disasters such as storms and flood damages as well as earthquake. Therefore, it is necessary to consider what we can do to prevent disasters. Consequently, recent warnings indicate that there is a potential risk of massive earthquakes. Consideration of the effects of tsunami to the moored ship is very important. Operational problems such as moored ship motions sometimes become remarkable with large amplitude and long periods in harbor. Moored ship motions may cause the breakage of mooring systems such as mooring lines, fenders or quay. Large and long period moored ship motions are caused by resonant effects. In this paper, the moored ship motions within a harbor by the large-scale tsunami and the effects on the motions and mooring loads with resonant effects are investigated by numerical simulations.

Key words : Tsunami, Resonant period, Moored ship motion in harbor, Time domain analysis

1. 서론

지구 온난화의 영향으로 지구가 불안정기에 접어들어 지진, 홍수, 태풍과 같은 많은 재해 피해를 입고 있는 가운데, 우리가 어떻게 하면 이러한 재해를 예방하고, 재해 발생시 피해를 최소로 줄일 수 있을지를 고려해 봐야 하는 시점이다.

한편, 지진과 같은 재해는 확률론적 관점에서 보면 주기적으로 발생했던 것으로 알려져 있다. 이러한 관점에서 우리나라와 접해있는 일본 연안에 향후 30년 이내에 거대 지진이 발생할 확률이 대단히 높다고 경고하고 있다. 거대 지진은 통상 대규모의 쓰나미를 발생시키게 되고, 우리나라 연안에도 그 영향이 있을 것으로 예상되고 있다.

2004년 12월 인도네시아 수마트라섬 연안에서 발생한 쓰나

미 피해에서 알 수 있듯이, 쓰나미는 그 피해 범위가 굉장히 넓고 쓰나미의 높이가 약 10m에 이르는 지역도 있을 것이라고 말하고 있다.(Kubo et al., 2005) 이러한 쓰나미가 발생하여 항내에 내습하게 되면 계류 중인 선박은 계류선이 절단되어 표류에 이르거나, 좌초나 안벽 등에 충돌하여 대형 사고로 연결될 가능성이 높다.

지금까지 장주기파 중에서의 선체 운동은 각 방면에서 연구를 행해왔지만, 주기도 길고, 상하 운동도 동반하는 쓰나미에 의한 계류선박의 동적동요 해석에 대한 연구는 극히 드물다.

따라서, 본 연구에서는 계류선박의 동요에 큰 영향을 미치는 쓰나미의 공진주기파를 고려한 수치 시뮬레이션을 수행하여, 그 결과를 통하여 궁극적으로는 쓰나미 발생시 항내 선박의 안전 확보 및 예상되는 항내피해의 경감 대책 수립을 위

* 대표저자 : 조익순(중신회원), ischo@bada.hhu.ac.kr 051)410-4102

** 중신회원, lys@bada.hhu.ac.kr 051)410-4476

*** 정회원, crlee@seaman.or.kr 051)620-5825

한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 수조실험을 통한 계류선박의 공진현상 파악

항내 장주기파와 계류선박의 고유주기가 일치하는 공진현상에 의해 계류선박의 장주기 동요가 발생하여 계류시설의 손상 뿐 아니라 하역중지, 항만가동을 저하 등의 문제가 보고되고 있다. 이러한 공진현상에 의한 계류선박에의 동요영향을 파악하기 위해 수조실험을 행하였다.

모형선이 Fig. 1과 같은 상태로 계류되어 있는 경우, 파 주기별 Surge의 선체 동요량을 측정하여 공진현상의 발생확인 및 선체동요의 변화를 확인해 보았다. Surge에 대한 모형선의 고유주기는 5초로 사전판측되었으며, 파 주기별 선수 및 선미의 최대변위 결과를 나타낸 것이 Table 1이다. 모형선의 고유주기와 일치하는 파주기(5초)에서 모형선의 공진현상이 발생하여 선수방향으로 최대 25cm, 선미방향으로 20cm가 움직이는 것을 확인하였다. 이는 공진현상이 없는 경우와 비교해 수배의 선체동요가 발생한다는 것을 의미한다.

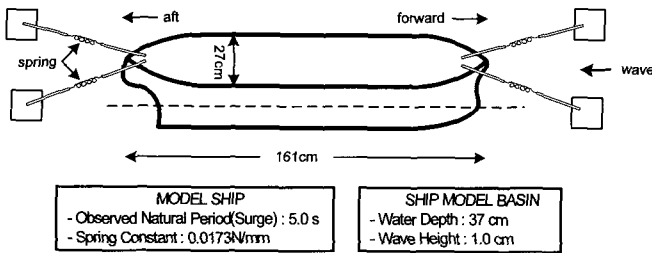


Fig. 1 Sketch of experiment

Table 1 Maximum amplitude of ship movement

Wave Period	Forward Direction	After Direction
3sec	3 cm	3 cm
4sec	6 cm	4 cm
5sec	25 cm	20 cm
6sec	10 cm	9 cm

3. 시계열 해석

3.1 계류선박의 시계열 해석

쓰나미에 의한 계류선박의 동요 시뮬레이션은 Fig. 2에서 나타내는 것과 같이 선체동요, 계류삭 장력 및 방현재 반력 등에 관한 해석은 비선형인 계류력 및 불규칙적인 외력을 대상으로 하기 때문에 시간영역에 있어서 운동방정식을 수치적으로 푸는 방법이 일반적이다. 수치계산에서는 유체력 및 파랑 강제력의 주파수 해석, 선체동요의 시계열 시뮬레이션으로 운동방정식을 푸는 2개의 부분으로 구성된다. Fig. 2는 수치계산 기법의 개요 및 흐름을 나타낸다. 주파수 해석에서 구해진 조파 저항력, 파랑강제력은 시계열 시뮬레이션에 있어서 운동방

정식의 계수 및 외력항으로서 이용된다.(Kubo et al., 1999)

본 연구에서도 종래의 안벽계류 선박의 해석방법과 같이 식 (1)의 운동방정식을 푸는 것에 의해 시계열 해석이 가능하다. (久保등, 1987)

$$\sum_{i=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \left\{ \int_{-\infty}^t \dot{x}_i(\tau) L_{ij}(t-\tau) d\tau + D_i(t) \right\} + \sum_{i=1}^6 \{C_{ij} + G_{ij}\} x_i(t) = F_j(t) (j=1,2,3,\dots,6) \quad (1)$$

여기서 M_{ij} :선체 질량 및 관성모멘트, $m_{ij}(\infty)$:불변 부가질량 및 모멘트, L_{ij} :지연함수, D_i :점성항, C_{ij} :정적복원력 계수, G_{ij} :계류력 계수, F_j :외력항이다.

또한 지연함수 및 불변 부가질량은 식(2), (3)과 같이 표현된다.

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (2)$$

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\sigma) + \frac{1}{\sigma} \int_0^{\infty} L_{ij}(\sigma) \sin \sigma t d\sigma \quad (3)$$

여기서 $A_{ij}(\sigma)$:각주파수 σ 에 대한 부가 질량, $B_{ij}(\sigma)$:각주파수 σ 에 대한 감쇄계수이다. 첨자 i 및 j 는 선체운동의 운동모드를 나타내며, 1: Sway, 2: Surge, 3: Heave, 4: Pitch, 5: Roll 그리고 6: Yaw이다. 첨자 ij 는 j 모드에 있어서 i 모드의 운동에 발생하는 계수를 나타낸다.

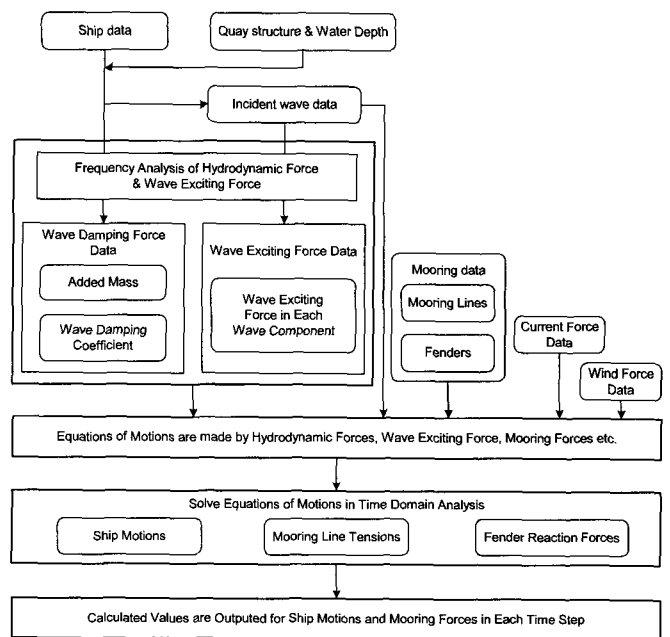


Fig. 2 Outline and flow of the numerical simulations

3.2 수위변동 및 유속 설정

대상 항만 및 대상 선박의 계류 부두주변에 있어서 쓰나미

의 수위변동 및 유속을 설정한다. Fig. 3은 대상 부두의 선체 중심위치 근방에 있어서의 쓰나미의 수위변동 및 유속의 시계열 계산 결과이다. 또한 수위변동 스펙트럼 분석 결과를 통해 수 분 정도의 성분파가 포함되어 있다는 것을 알 수 있다.

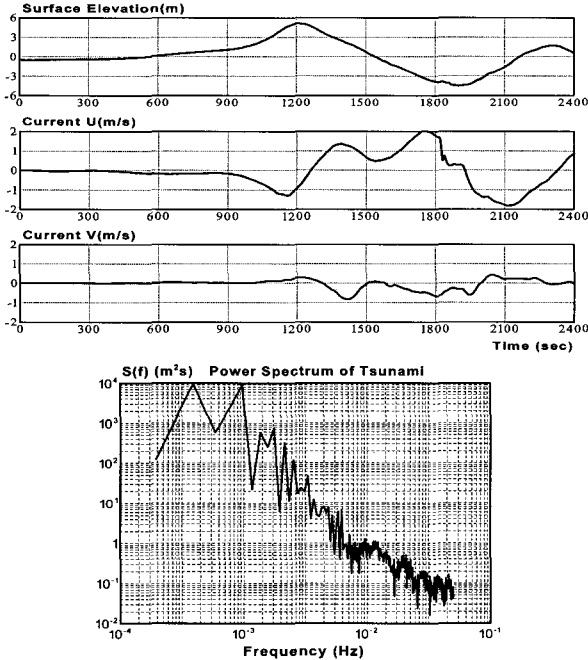


Fig. 3 Time series of surface elevation and currents

3.3 쓰나미 파형으로부터 성분파, 속도포텐셜 및 유속의 설정

일반적으로 쓰나미의 수치계산에서는 임의지점에 있어서 수위변동 및 유속이 산출된다. 한편, 선체에 작용하는 파랑 강제력에 의한 유압력은 선체중심위치에 있어서 속도포텐셜이 주어지는 것에 의해 구해진다. 여기에서 쓰나미 계산에서 산출된 수위변동을 이용하여 속도포텐셜 및 유속을 계산하게 된다. 선체중심 주위의 좌표계에 있어서 입사각 ω 로 쓰나미가 진입하는 경우 쓰나미의 수위변동과 속도포텐셜은 식(4), (5)와 같이 표현한다. (조, 2005)

$$\eta = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{z=0} \quad (4)$$

$$\Phi = \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[\frac{A_j \sigma_j}{k_j} \frac{\cosh k_j (h+z)}{\sinh k_j h} \sin(\sigma_j t + k_j x \cos \alpha + k_j y \sin \omega) \right] + \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[-\frac{B_j \sigma_j}{k_j} \frac{\cosh k_j (h+z)}{\sinh k_j h} \cos(\sigma_j t + k_j x \cos \alpha + k_j y \sin \omega) \right] + \frac{A_{N/2} \sigma_{N/2}}{2k_j} \frac{\cosh k_{N/2} (h+z)}{\sinh k_{N/2} h} \sin(\sigma_{N/2} t + k_{N/2} x \cos \alpha + k_{N/2} y \sin \omega) \quad (5)$$

여기서 A_j, B_j 푸리에 계수, σ_j, k_j : j 번째 성분파의 각주파수 및 파수, h : 수심이다. 또한 설정된 속도포텐셜부터 선측방향(x 방향) 및 선수미방향(y 방향)의 유속은 다음 식으로 계산된다.

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[A_j \sigma_j \frac{1}{\sinh k_j h} \cos(\sigma_j t + k_j x \cos \omega + k_j y \sin \omega) \right] \cos \omega + \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[B_j \sigma_j \frac{1}{\sinh k_j h} \sin(\sigma_j t + k_j x \cos \omega + k_j y \sin \omega) \right] \cos \omega + \frac{A_{N/2} \sigma_{N/2}}{2k_j} \frac{1}{\sinh k_{N/2} h} \cos(\sigma_{N/2} t + k_{N/2} x \cos \omega + k_{N/2} y \sin \omega) \cos \omega \quad (6)$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[A_j \sigma_j \frac{1}{\sinh k_j h} \cos(\sigma_j t + k_j x \cos \omega + k_j y \sin \omega) \right] \sin \omega + \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[B_j \sigma_j \frac{1}{\sinh k_j h} \sin(\sigma_j t + k_j x \cos \omega + k_j y \sin \omega) \right] \sin \omega + \frac{A_{N/2} \sigma_{N/2}}{2k_j} \frac{1}{\sinh k_{N/2} h} \cos(\sigma_{N/2} t + k_{N/2} x \cos \omega + k_{N/2} y \sin \omega) \sin \omega \quad (7)$$

한편, 쓰나미의 수위변동은 불규칙파로부터 산출되기 때문에 F.F.T(Fast Fourier Transform)에 의해 성분파로 분해하여 성분파별로 속도포텐셜 및 유속이 주어진다.

3.4 유압력의 산출

유압력은 유속의 시계열을 토대로 식(8)와 같이 주어진다.(The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002)

$$F_c = 0.5 \rho_0 C V^2 B \quad (8)$$

여기서 C : 유압계수, V : 유속, ρ_0 : 해수밀도, B : 선체의 수면하 면적이다.

4. 적용 사례 및 시계열 해석

4.1 대상 선박 및 계산 조건

쓰나미에 의한 계류 선박의 시계열 해석을 위해 Fig. 4와 같이 Sea Berth에 계류되어 있는 90,000 D.W.T. 광석운반선을 대상으로 검토했다. 대상 선박은 4기의 방현재 및 계류삭 16개로 계류되어 있는 상태로 계류삭의 초기장력은 각 10ton이다. Table 2는 계류삭의 특성으로 파단하중은 127 ton이며, 사용하중을 42.3 ton(안전율이 3인 경우)으로 한다. Table 3은 공기식 방현재(ABF-P)로 최대허용 반력이 416 ton(65%압축시)이다.

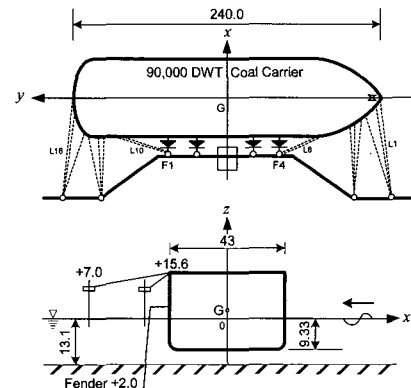


Fig. 4 Mooring arrangement of 90,000 D.W.T. Coal carrier

이때 대상 선박의 Surge와 Sway의 고유 주기는 각각 150초 및 85초이다. 좌표계는 선체중심위치를 원점으로 하여 x축 정방향향이 북방향이고, y축 정방향향이 서방향이다.

Table 2 Details of mooring lines

Name	Diameter	Breaking Tension
Wire ropes	42mm	127 tonf

Table 3 Details of fenders

Name	Type	Max. Deflection
ABF-P 2800H×2800L	Pneumatic	65%

4.2 성분파의 추출 방법 및 FFT에 의한 재현

Fig. 3에 나타난 수위 변동 및 유속의 시계열을 대상 선체 중심위치(좌표원점)에 있어서 데이터로 한다. 먼저, FFT에 의한 성분파로 추출한다. 수위 변동의 데이터수(N)는 256개, 샘플링 간격(Δt)은 10초이며, 수위 변동의 원 파형은 약 2500초에 의해 결정된다. FFT에 의해 추출한 성분파를 전부 취급하는 경우, 주파수 분해에 의해 실 파형에 없는 단주기 성분이 강조되어 장주기파의 초월 성분이 재현되지 못하는 경우가 있다. 따라서 여기서는 역치파 진폭(Threshold wave height)을 설정하여, 선체에 작용하는 파랑 강제력이나 유속 산출에 이용하는 성분파수(N_e)를 한정하여 계산한다.

본 연구에서는 역치파 진폭을 5cm 및 2cm로 설정하며, 이때 추출되는 성분파수 N_e 는 21개 및 37개가 된다. 이는 장주기 선체동요의 공진성분을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우로 구분하여 평가할 수 있도록 역치파 진폭을 적의 조절하여 설정한 것이다. 역치파 진폭이 5cm인 경우 성분파의 주기는 $T=5, 120s \sim 160s$ 로 분포하여 장주기 선체동요인 Surge(150초) 및 Sway(85초)와 공진하는 주기성분을 포함하지 않았다. 반대로 역치파 진폭이 2cm인 경우, 성분파의 주기는 $T=5, 120s \sim 81s$ 로 분포하여 장주기 선체동요인 Surge, Sway와 공진하는 성분을 포함하는 추출방법이 된다.

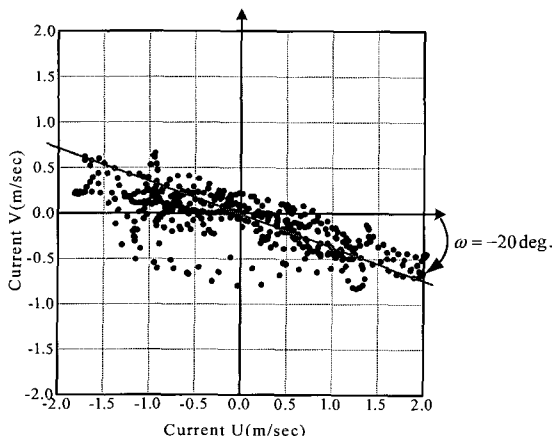


Fig. 5 Determination of wave direction by current data

계류중 선체 동요에 큰 영향을 미치는 파 방향의 설정에 대해서는 Fig. 5와 같이 유속 진폭 데이터를 플로팅해서 주 파 방향을 $\omega = -20$ 도로 결정하고 성분파의 주파수별로 Lissajous figure를 작성하여 파향을 입력한다.

4.3 수치 시뮬레이션에 의한 계류선박의 영향 해석

계류선박에 대한 수치 시뮬레이션을 이용하여 장주기 선체 운동과의 공진주기파를 포함하는 경우와 포함하지 않았을 때의 계류선박 및 계류시스템에의 영향을 조사한다.

1) 선체 동요 영향

장주기 선체운동과의 공진주기를 포함하지 않는 경우의 선체 동요량의 시계열 계산 결과 및 각 선체동요 계산결과에 대한 스펙트럼 해석결과를 Fig. 6에 나타내고 있다. 병진운동인 Sway의 경우 최대 동요량이 4.36m의 큰 동요량이 발생하고 있다. 그리고 회전운동의 경우 Yaw는 미소한 동요만이 있었으나, Roll은 1도 정도의 동요가 있다.

공진주기파를 포함하는 경우의 선체 동요량의 시계열 계산 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. Fig. 6과 비교를 하면 공진현상에 의해 전체적인 선체동요의 경향은 비슷하나, 많은 동요가 있다는 것을 알 수 있다. 하단의 선체동요의 스펙트럼 계산 결과를 보면 Sway의 경우 파주기와 대응하여 저주파수대역에 피크가 있는 반면, Yaw는 선체 고유주기에 대응하여 고주파수 대역에 피크가 있다는 것을 알 수 있다.

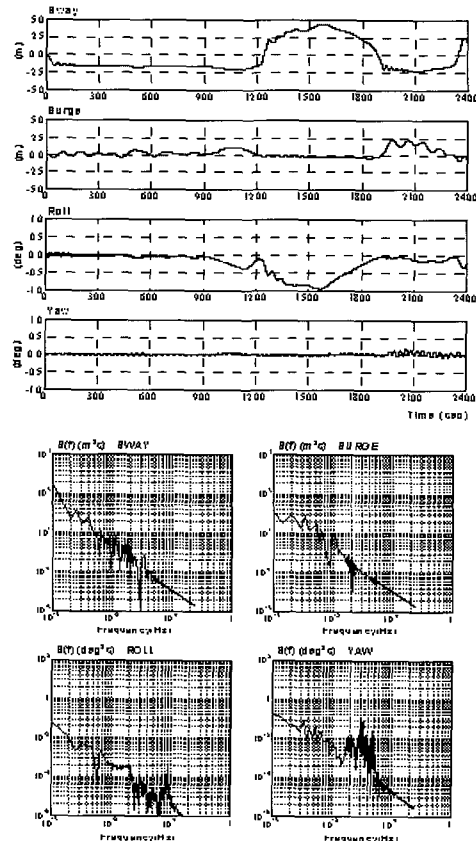


Fig. 6 Moored ship motion without resonant effects

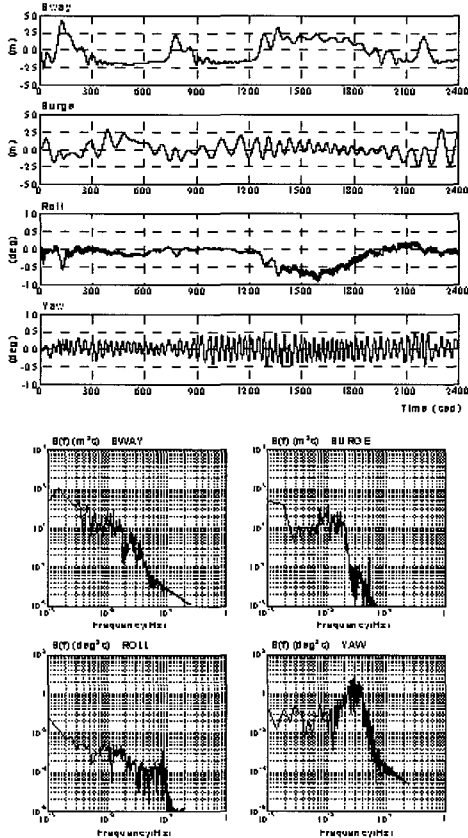


Fig. 7 Moored ship motion with resonant effects

2) 계류시스템 영향

Fig. 8에 공진주기파를 포함하지 않은 경우 계류삭 Line 1(Bow line), Line 8(Bow spring line)의 장력 및 방현재 Fender 1(Stern side), Fender 4(Bow side)의 반력 시계열 결과를 나타내고 있다. 각 계류삭에 있어서 사용 하중을 넘어서는 장력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 방현재에 대해서도 큰 압축 변형을 발생하고 있으나, 최대허용 반력인 416 ton보다 적은 허용 범위 내이다.

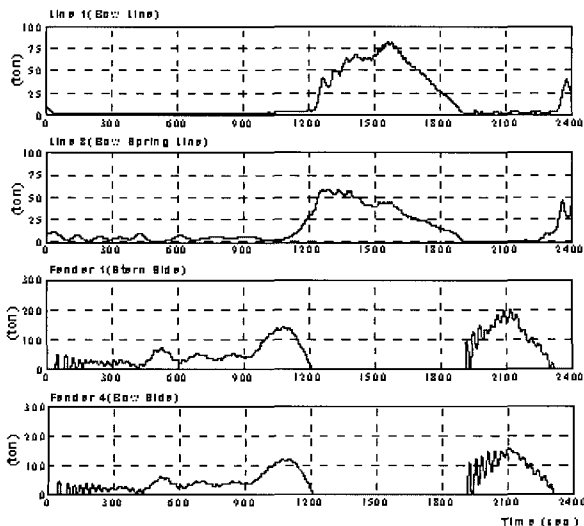


Fig. 8 Mooring loads without resonant effects

Fig. 9는 공진주기파를 포함한 경우의 계류삭 장력 및 방현재의 반력을 나타내고 있다. 계류삭은 모든 계류삭에서 사용 하중(42.3 ton)을 훨씬 넘어서는 장력이 발생하고 있다. 특히, Fig. 8과 비교를 하면 선체가 전후방으로 움직이는 것을 막아주는 선수·선미 Spring line(Line 8, 10)에 공진주기파를 고려하지 않았을 때보다 30 ton이상 장력이 증가하고 있는 변화를 알 수 있다. 또한 방현재도 허용 범위(416 ton)내이긴 하지만 300 ton에 가까운 반력이 발생, 대단히 큰 압축 변형 현상이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

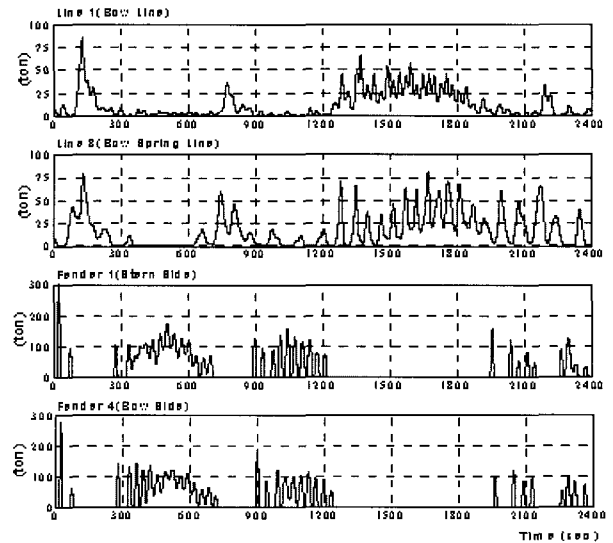


Fig. 9 Mooring loads with resonant effects

Table 4 Maximum and Minimum values of ship motions

Values		without Resonant Effects	with Resonant Effects
Sway (m)	Max.	4.36	4.27
	Min.	-2.25	-2.61
Surge (m)	Max.	2.36	2.90
	Min.	-0.81	-2.32
Heave (m)	Max.	5.23	4.16
	Min.	-4.40	-3.90
Roll (deg)	Max.	0.04	0.23
	Min.	-0.96	-0.91
Yaw (deg)	Max.	0.18	0.49
	Min.	-0.05	-0.51

공진현상을 고려한 경우 쓰나미에 의한 수위 변동, 공진현상 그리고 유압력의 효과가 계류 시스템에 작용하여 계류삭 및 방현재의 파손에 의한 계류중인 선박의 선체손상에 따른 기름 유출이나 안벽 시설의 손상의 가능성이 높은 상태이다.

Table 4는 각 선체운동 모드에서 공진현상을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 최대/최소 진폭치를 비교하여 나타내고 있다. Table 5는 계류삭 및 방현재의 하중 최대치를 나

타내고 있다.

Table 5 Maximum values of mooring loads

Values	without Resonant Effects	with Resonant Effects
Line1 (Bow line)	82.71	86.64
Line8 (Bow spring line)	59.38	80.75
Line10 (Stern spring line)	38.49	67.95
Line16 (Stern line)	82.27	83.22
Fender1 (Stern side)	198.20	305.80
Fender4 (Bow side)	158.82	277.97

4. 결 론

본 논문에서는 쓰나미의 공진주기파를 고려한 계류선박의 영향 및 계류하중을 평가하기 위해, 먼저 수조실험을 통해 공진현상이 계류선박에 미치는 동요 영향을 확인하였다. 그리고 쓰나미 성분파의 추출 방법을 통한 동요 시뮬레이션을 통해, 공진주기파 포함여부에 따라 계류선박의 동요량, 계류삭 장력 및 방현재 변형량 등의 영향에 대해서 검토 및 평가하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모형선의 고유주기와 일치하는 파주기에서 공진현상이 발생하여, 공진현상이 발생하지 않는 경우보다 수배의 선체 동요가 발생하는 것을 수조실험을 통해 확인하였다.
- 2) 쓰나미에 의해 Sway등에 큰 동요가 발생하고, 그것에 따른 계류 시스템에도 과도한 하중이 작용하는 것을 수치 시뮬레이션을 통해 알았다.
- 3) 장주기 동요의 발생원인 되는 공진현상을 고려한 경우, 고려하지 않았을 때보다 큰 선체 동요량의 발생 및 계류하중이 작용하는 것을 알았다.

- 4) 쓰나미의 공진현상에 의해 계류 시스템에 과도한 하중이 작용, 계류시스템 및 선체 손상에 따른 계류 선박에 의한 기름 유출 등 항만내 피해 발생의 가능성이 존재한다.

항내선박의 재해 예방을 위해서는 선종, 선형의 차이에 따른 영향, 계류삭 및 방현재의 변경에 의한 계류력의 영향, 쓰나미의 높이, 파향 등에 따른 영향을 향후 상세히 검토하여, 계류선박의 운동을 제어할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 조익순(2005), "쓰나미에 의한 계류 선박의 동적 동요 해석에 관한 연구", 한국항해항만학회지, 제29권 8호, pp.661~666.
- [2] Kubo, M. and Sakakibara, S.(1999), "A Study on Time Domain Analysis of Moored Ship Motion Considering Harbor Oscillations, Proceeding of the 9th International Offshore and Polar Engineering", ISOPE, pp.574~581.
- [3] Kubo, M., Cho, I. S., Sakakibara, S., Kobayashi, E. and Koshimura, S.(2005), "The Influence of Tsunamis on Moored Ships and Ports, International Journal of Navigation and Port Research", Vol.29, No.4, pp.319~325.
- [4] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan(2002), Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan, pp.24~25.
- [5] 久保雅儀, 岡本俊弟(1987), "壁前面係留浮体の遅延關數を用いた時系列解析の精度向上に關する研究", 海岸工學講演會論文集, pp.611~615.

원고접수일 : 2006년 6월 12일

원고채택일 : 2006년 9월 8일