

쓰나미에 의한 계류 선박의 동적 동요 해석에 관한 연구

조익순*

* 고베대학 외국인 연구자

A Study on Dynamic Analysis of Moored Ship Motions by Tsunami

Ik-Soon Cho*

* Visiting Research Fellow of Kobe University, Kobe 658-0022, Japan

요약 : 최근 거대 지진에 의한 쓰나미 발생 확률이 대단히 높다고 경고하고 있다. 특히, 항만내의 선박 운용이라는 관점에서, 쓰나미에 의한 막대한 재산 및 인명 피해가 염려되기 때문에 쓰나미에 의한 계류 선박의 영향을 고려하는 것은 대단히 중요한 일이다. 쓰나미가 발생하면 항만 부근에서 입출항중의 선박은 표류를 시작하게 되며, 계류중인 선박도 계류색이 절단되어 표류에 이를 가능성이 높다. 또한, 좌초 및 안벽 충돌 등에 의한 엄청난 사고가 발생할 가능성이 존재한다. 한편, 쓰나미는 수 분 정도의 성분파를 포함하고 있기 때문에 계류 선박의 장주기 운동과 공진할 가능성이 높으며, 쓰나미의 유속은 항내에서 발생하는 조류에 비해 대단히 크기 때문에, 큰 항력이 선박에 작용할 가능성이 있다. 본 연구에서는 대규모 쓰나미의 내습으로 인한 선박 운동의 관점에서 수치 시뮬레이션 과정을 검토하고, 선박 운동에의 영향 및 계류 하중을 수치 실험으로 평가한다.

핵심어 : 쓰나미, 계류 선박, 동요 시뮬레이션, 시계열 해석, 계류 시스템

Abstract : Recent warnings indicate that there is a potential risk of massive earthquake. These earthquakes could produce large-scale tsunamis. Consideration of the effect of Tsunami to the moored ship is very important because it brings the loss of life and vast property damage in a viewpoint of ship operations within a harbor. If a tsunami occurs, a ship in a harbor may begin drifting in case of ship entering and departing harbor, and breakage of mooring rope and drifting of moored ship are happened. And extremely serious accident, such as stranding and collision to a quay, might occur. On the other hand, since the tsunami consists of approximately component waves of several minutes, there is a possibility of resonance with the long period motion of mooring vessel. As the speed of Tsunami is much faster than tidal current in a harbor, a strong resisting force might act on the moored ships. In this paper, the numerical simulation procedure in the matter of ship motions due to the attack of large-scale tsunamis are investigated and the effects on the ship motions and mooring loads are evaluated by numerical simulation.

Key words : Tsunami, Moored ship motion, Numerical simulation, Time domain analysis, Mooring system

1. 서론

최근 일본 연안에 향후 30년 이내에 거대 지진이 발생할 확률이 대단히 높다고 경고하고 있다. 거대 지진은 통상 대규모의 쓰나미를 발생시키게 되고, 넓은 지역에 걸쳐 발생이 예상되고 있으며, 쓰나미의 높이가 약 10m에 이르는 지역도 있을 것이라고 말하고 있다(Kubo et al., 2005). 이러한 쓰나미가 발생하여 항만내에 내습하게 되면, 입출항 중의 선박은 표류를 시작하고, 계류중인 선박도 계류색이 절단되어 표류에 이르게 된다. 또한, 좌초나 안벽 등에 충돌하여 탱커의 경우 기름 유출 등의 사고 발생도 염려된다.

일반적으로 쓰나미는 완만하게 수위가 상승 및 하강을 하는 것으로 알려져 있지만, 쓰나미에는 수분 정도의 성분파가 포함되어 있기 때문에 계류 선박의 장주기 운동과 공진할 가능성이 있다. 그리고, 쓰나미의 유속은 수 m/s 정도로 보통 항내

에서 발생하는 조류와 비교해 현저히 크고, 이로 인해 큰 항력이 계류 선박에 작용할 가능성이 높다.

하지만, 장주기와 중에서의 선체 운동은 지금까지 각 방면에서 연구를 행해 왔지만, 주기도 길고, 상하 운동도 동반하는 쓰나미에 의한 선박의 계류 문제에 대해 수치 계산을 이용하여 보고된 연구는 거의 존재하고 있지 않은 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 쓰나미를 외력으로써 입력, 계류 선박의 동요에 대한 수치 시뮬레이션을 수행한다. 궁극적으로는 쓰나미 발생시 항만내 선박의 안전 확보 및 예상되는 항만 피해의 경감을 그 목적으로 한다.

2. 항만내 계류 선박의 동요 해석

2.1 계류 선박의 시계열 해석

일반적으로 계류 선박의 동요 해석은 계류색 장력 및 방현

* 대표저자 : 조익순(정회원), iks23@hanmail.net +81-90-3675-8105

재 반력 등 비선형적인 계류력 및 불균칙적인 외력을 대상으로 하기 때문에 시간 영역에 있어서 운동 방정식을 수치적으로 푸는 방법이 일반적으로 이용되고 있다(Kubo et al, 1999). 쓰나미에 의한 계류 선박의 동요 해석은, 종래의 안벽 계류 선박의 해석방법과 같이 식(1)의 운동 방정식에 의해 시계열 해석이 가능하다.

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

여기서, $M_{ij}(\infty)$: 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 : 외력항, t : 시간, τ : 적분변수, 첨자 ij 는 j 모드에 있어서 i 모드의 운동에 영향을 주는 것을 의미한다.

또한, 지연 함수 및 불변 부가질량은 식(2), (3)와 같이 표현된다.

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

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

여기서, $A_{ij}(\sigma)$: 각주파수 σ 에 대한 부가 질량, $B_{ij}(\sigma)$: 각주파수 σ 에 대한 감쇄계수이다.

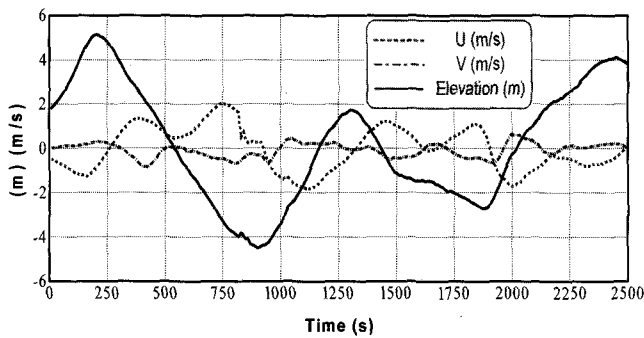


Fig. 1 Time series of surface elevation and currents of a tsunami

2.2 수위 변동 및 유속 설정

대상 항만 및 대상 선박의 계류 부두 주변에 있어서의 쓰나미의 수위 변동 및 유속을 설정한다. Fig. 1은 대상 부두의 선체 중심 위치 근방에 있어서의 쓰나미의 수위 변동 및 유속에 대한 시계열 계산 결과이다(越村, 2003). 또한, Fig. 2는 수위 변동의 스펙트럼 계산 결과로, 그림을 통해 수 분 정도의 성분파가 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

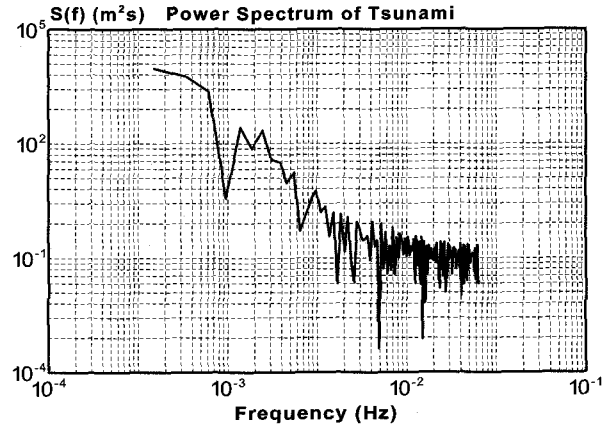


Fig. 2 Spectrum result of surface elevation

2.3 쓰나미의 수위 변동으로부터 성분파, 속도 포텐셜 및 유속의 설정

일반적으로 쓰나미의 수치 계산에서는 임의지점에 있어서 수위 변동 및 유속이 산출된다. 한편, 선체에 작용하는 파랑 강제력에 의한 유압력은 선체 중심 위치(좌표 원점)에 있어서 속도 포텐셜에 의해 구해진다. 여기에서 쓰나미 계산부터 산출된 수위 변동을 이용하여 다음과 같은 순서로 속도 포텐셜 및 유속을 계산하게 된다.

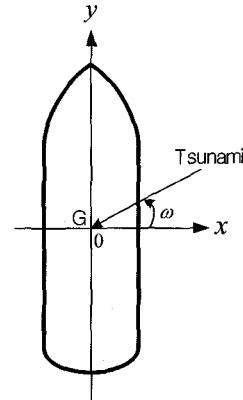


Fig. 3 Coordinate system for velocity potential

Fig. 3과 같이 정선 중인 선체 중심 주위의 좌표계에 있어서 입사각 ω 로 쓰나미가 진입하는 경우를 고려한다. 이 때 쓰나미의 수위 변동(η)과 이것에 의한 속도 포텐셜은 식(4), (5)와 같이 표현한다.

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

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

여기서, 계수 A_j, B_j 는 푸리에 계수, σ_j, k_j 는 j 번째 성분파의 각주파수 및 파수, h 는 수심이다. 또한 설정된 속도 포텐셜부터 선측 방향(x 방향) 및 선수미 방향(y 방향)의 유속은 다음 식으로 계산된다.

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

$$+ \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[B_j \sigma_j \frac{1}{\sinh k_j h} \sin(\sigma_j t + k_j x \cos \omega + k_j y \sin \omega) \right] \cos \omega$$

$$+ \frac{A_{N/2} \sigma_{N/2}}{2k_j} \frac{1}{\sinh k_{N/2} h} \cos(\sigma_{N/2} t + k_{N/2} x \cos \omega + k_{N/2} y \sin \omega) \cos \omega$$

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

$$+ \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[B_j \sigma_j \frac{1}{\sinh k_j h} \sin(\sigma_j t + k_j x \cos \omega + k_j y \sin \omega) \right] \sin \omega$$

$$+ \frac{A_{N/2} \sigma_{N/2}}{2k_j} \frac{1}{\sinh k_{N/2} h} \cos(\sigma_{N/2} t + k_{N/2} x \cos \omega + k_{N/2} y \sin \omega) \sin \omega$$

쓰나미 수위 변동은 불규칙파로부터 산출되기 때문에 F.F.T에 의해 성분파로 분해하여 성분파별로 속도 포텐셜 및 유속이 주어진다. 또한, 파 방향도 성분파별로 Lissajous Figure를 작성함으로써 보다 정확한 파 방향의 입력이 가능해진다.

2.4 유압력의 산출

유압력은 유속의 시계열을 작성해서 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.

3. 적용 사례 및 선체 동요 해석

3.1 대상 선박 및 계산 조건

쓰나미의 초기 파형에 의한 계류 선박의 동요 영향을 조사하기 위해, Fig. 4과 같이 시버스(Sea Berth)에 계류되어 있는 135,000 m^3 LNG선을 대상으로 검토했다. 대상 선박은 지름 42 mm 와이어 로프 16개 및 4기의 방현재로 계류되어 있는 상태로, 계류선의 초기 장력은 각 10ton이다. 이때 대상 선박의 Surge와 Sway의 고유 주기는 136초 및 61초이다. Fig. 5은 계류선의 장력 특성 곡선을, Fig. 6은 방현재의 반력 특성 곡선을 나타내고 있다. 여기서, 계류선의 파단 하중은 127 ton이며, 방현재의 최대 허용 반력은 416 ton(65% 압축시)이다.

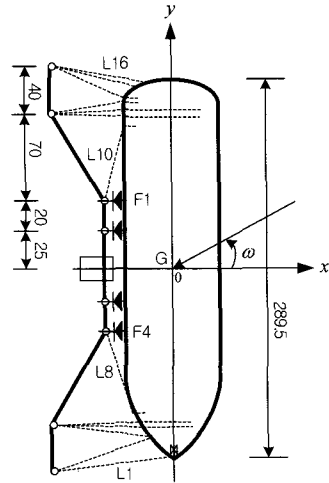


Fig. 4 Mooring arrangement of target ship

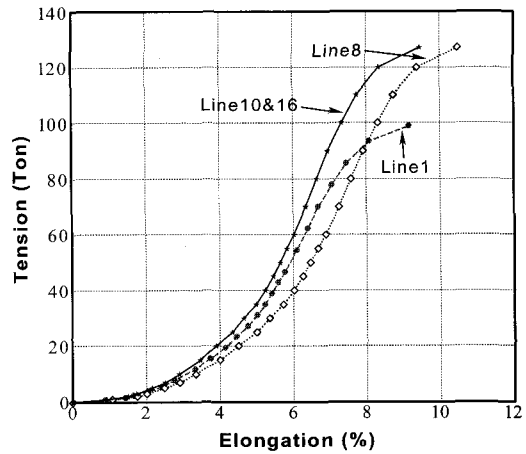


Fig. 5 Property of mooring lines

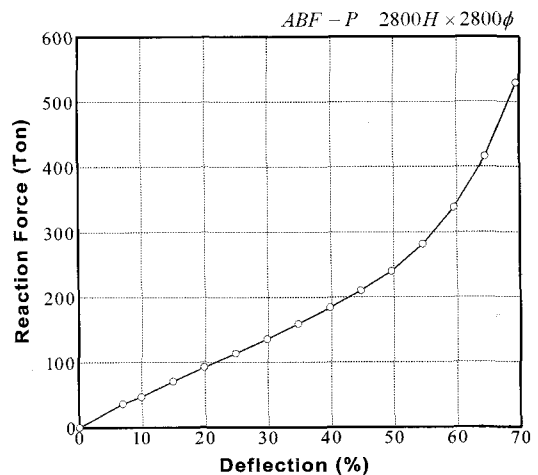


Fig. 6 Property of fender

3.2 성분파의 추출 방법 및 FFT에 의한 재현

Fig. 1의 수위 변동 및 유속의 시계열을 FFT에 의한 성분파로 추출한다. 수위 변동의 데이터수(N)는 256개, 샘플링 간

격(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 재현되는 경우가 있다. 따라서, 여기서는 역치파 진폭(Threshold wave height)을 설정하여, 신체에 작용하는 파랑 강제력이나 유속 산출에 이용하는 성분파수(N_e)를 한정하여 계산한다.

본 연구에서는 역치파 진폭을 2.5cm로 설정하며, 이 때 추출되는 성분파 개수 N_e 는 21개가 되며, 성분파의 주기는 $T=2,560s \sim 80s$ 로 분포하여, Surge와 공진하는 성분을 포함한 추출 방법이 된다.

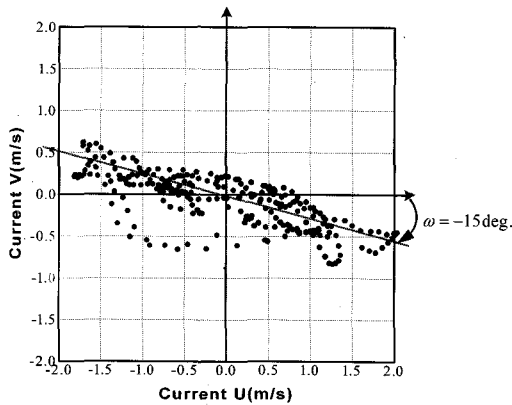


Fig. 7 Determination of wave direction by particle velocity data

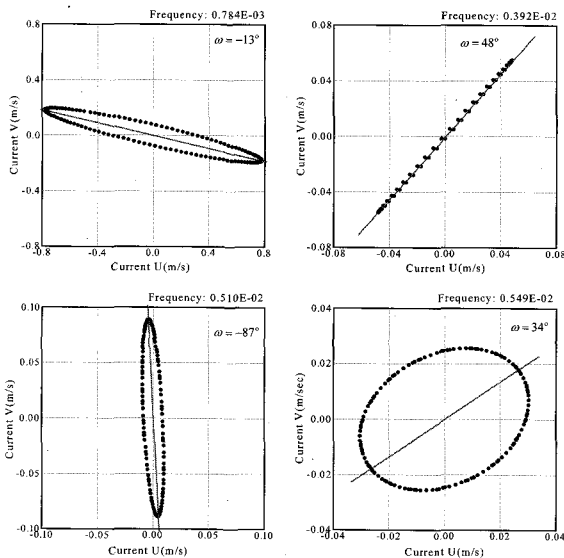


Fig. 8 Wave direction of the component waves by Lissajous figure

계류중 선체 동요에 큰 영향을 미치는 파 방향의 설정에 대해서는 Fig. 7과 같이 유속 진폭 데이터를 플로팅해서 주 파향을 결정한다($\omega = -15 \text{ deg.}$). 하지만, 주방향만을 입력하게 되면 다방향 불규칙파(Multi-directional random waves)의 특

성을 무시하게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 Lissajous Figure를 작성하여, 성분파별로 파향을 보다 정확하게 입력함에 따라 계산 정도가 향상 된다는 연구가 있다(久保 외, 2005). 따라서, 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 성분파의 주파수별로 Lissajous Figure를 작성하여 파향으로써 입력하여 계산한다.

Fig. 9에 포텐셜의 계산에 의한 쓰나미의 수위 변동 및 유속의 재현 결과를 나타낸다. 수위 변동에 대해서는 양호한 재현을 보이고 있지만, 유속은 실제보다 크게 평가되고 있어, 수치 계산에서는 유속의 절대치를 맞추기 위해 특정 계수를 곱해 계산을 행한다.

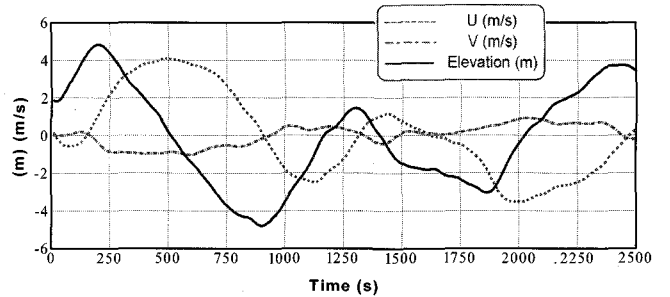


Fig. 9 Reproduction of surface elevation and particle velocity by velocity potential

3.3 수치 시뮬레이션을 이용한 계류 선박 동요 해석

계류 선박의 시계열 수치 시뮬레이션을 통해 유압력의 고려 유무에 따른 계류 선박의 동적 동요를 해석한다.

(1) 유압력을 고려하지 않은 경우

유압력을 고려하지 않은 경우 선체 동요량의 시계열 계산 결과를 Fig. 10에 나타낸다. Sway의 경우 최대 동요량이 4m, Heave는 4.8m로 큰 동요량이 발생하고 있다. 그리고, Roll는 1 deg 정도의 동요가 있으나, Pitch 및 Yaw에 대해서는 미소한 동요만이 있는 것을 알 수 있다. 또한, 결과로부터 Heave의 동요는 쓰나미의 수위 변동과 일치하고 있는 것도 알 수 있다.

Fig. 11에 계류선 Line 1(Bow line), Line 8(Bow spring line), L10(Stern spring line), L16(Stern line)의 장력 및 방현재 Fender 1(Stern side), Fender 4(Bow side)의 반력 시계열 결과를 나타내고 있다. 계류선의 파단 하중은 127 ton이며, 사용 하중을 42.3 ton(안전률 3으로)으로 하면, 각 계류선에 있어서 사용 하중을 넘어서는 장력이 발생하고 있다. 방현재에 대해서도 최대 허용 반력이 416 ton이기 때문에, 큰 압축 변형이 발생하고 있으나, 한계 허용 범위 이내이다.

(2) 유압력을 고려한 경우

유압력을 고려한 경우 선체 동요량의 시계열 계산 결과를 Fig. 12에 나타낸다. Fig. 10과 비교를 하면 Sway의 경우 유압력 효과에 의해 다른 동요 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 계류선 장력 및 방현재의 반력을 나타내고 있다.

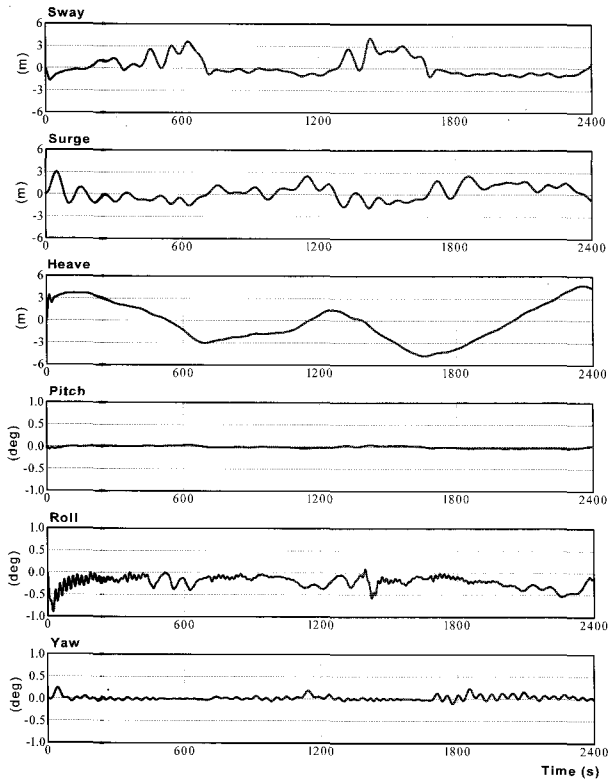


Fig. 10 Calculation result of moored ship motion without currents

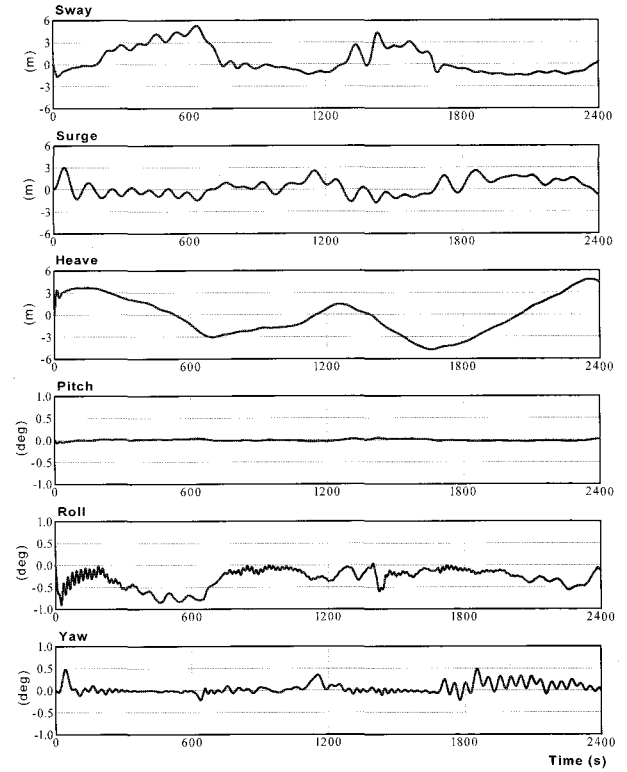


Fig. 12 Calculation result of moored ship motion with currents

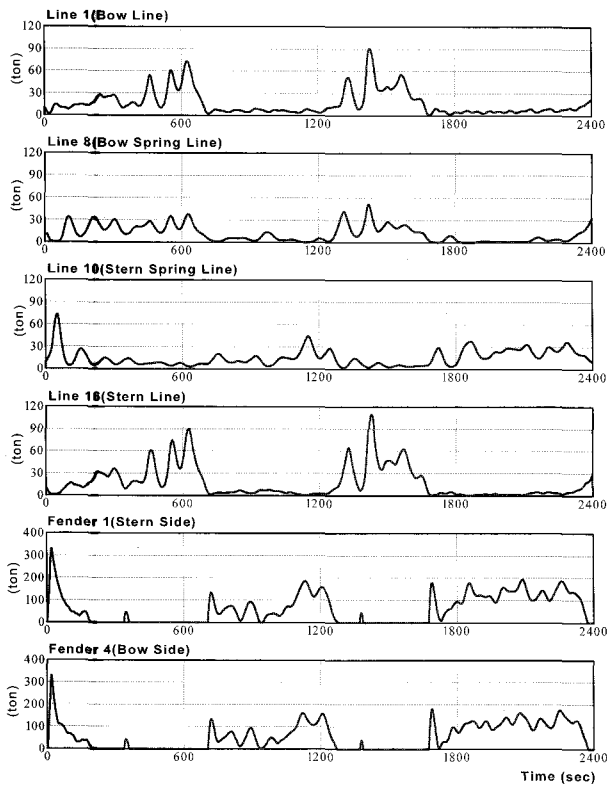


Fig. 11 Calculation result of mooring loads without currents

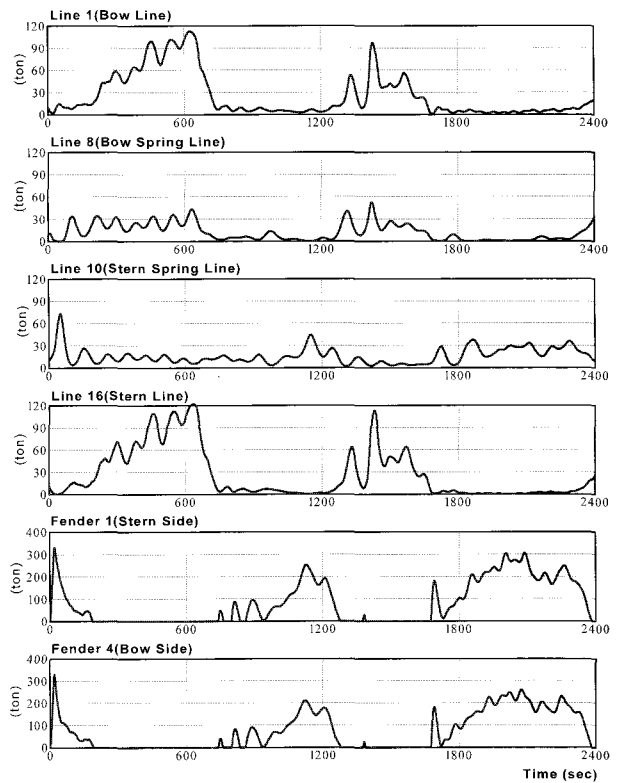


Fig. 13 Calculation result of mooring loads with currents

계류선은 한계치에 가까운 120 ton에 달하는 장력이 발생, 계류선 절단의 위험성이 대단히 높은 것을 알 수 있으며, 유압력을 고려하지 않은 Fig. 11과 비교를 하면, Line 1(Bow line) 및 Line 10(Stern line)에 큰 장력 변화가 있는 것을 알 수 있다. 또한, 방현재도 허용 범위내지만, 300 ton을 넘는 반력이 발생, 대단히 큰 압축 변형 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

유압력을 고려한 경우, 쓰나미에 의한 수위 변동, Sway에 있어서의 공진현상, 그리고, 유압력의 효과가 계류 시스템에 작용하여, 계류선의 파손이나 방현재의 파손에 의한 기름 유출이나 안벽 시설의 손상의 가능성이 높은 상태이다.

4. 결 론

본 연구에서는 쓰나미에 의한 계류 선박의 동적 동요를 해석하기 위해, 쓰나미에 의한 계류 선박의 동요 해석 방법을 검토했다. 그리고, 쓰나미 성분과의 추출 방법을 통해 유압력의 고려 유무에 따라 계류 선박의 동요량, 계류선 장력 및 방현재 변형량 등의 영향에 대한 동요 시뮬레이션을 통해, 계류 선박의 계류 안전성을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 쓰나미에 따른 계류 선박의 동적 동요 수치 시뮬레이션 결과 Sway 성분이 비교적 큰 동요가 발생하여, 계류선과 방현재에 과도한 하중이 작용함이 확인되었다.
- (2) 쓰나미의 수위 변동에 의한 파력뿐 아니라, 쓰나미에 의한 유압력을 함께 고려하는 것에 의해 계류 선박에 더욱 큰 동요가 발생함이 증명되었다.
- (3) 쓰나미에 의해 계류 시스템에 과도한 하중이 작용, 계류 선박에 의한 기름 유출, 계류 시스템 손상 등 항만내 피해 발생의 가능성이 존재한다.

본 연구에서는 속도 포텐셜의 계산시 반사의 영향을 고려하지 않고, 진행파만을 대상으로 계산하였기에 유속 등의 재현에 오차가 있는 것을 알 수 있다. 향후 반사파의 영향을 고려한 수치 시뮬레이션에 대해서는 추가적인 연구가 있어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 久保雅義, 趙翼順, 平山克也(2005), “港口における時系列波浪情報の予測に関する研究”, 日本航海學會論文集, 第112号, pp. 163~170.
- [2] 越村俊一(2003), “津波の数値解析技術とその応用”, 非破壊検査, Vol. 52, pp. 344-348.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Sakakibara, S., Kubo, M., Kobayashi, E., and Koshimura, S.(2005), “Dynamic Behavior of Moored Ship Motions Induced by Initial Attack of Large Scale Tsunami”, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering.
- [6] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan(2002), “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan”, pp. 24-25.

원고접수일 : 2005년 8월 11일

원고채택일 : 2005년 10월 18일