

# 선박의 Springing 진동 현상과 예측 방법

이 수 목\* · 정 건 화\*

## Vibrational Behavior of Ship Springing and Its Prediction

Soo-Mok Lee and Kun-Hwa Jung

### ABSTRACT

Springing phenomena of ships is introduced with its concept, research history and approach methodology. Being a hydroelasticity problem, non-linear vibration and stochastic process, springing was formulated and modeled in vibration point of view separating hydrodynamic force into system properties and excitation force. Both RAO and response spectrum as well as wave spectrum were presented as a case study of springing analysis for a flexible vessel with wide breadth. The effect of advance speed, heading angle and loading condition were investigated as parametric study. The results and observations showed availability of analysis for the prediction of the ship springing behavior.

### 1. 서론

선박의 스프링잉(springing) 진동은 선박이 파도를 만났을 때 파도의 유체력에 의해 선체에 발생하는 진동으로서 길고 유연한 선체의 구조에서 흔히 발생한다. 이러한 스프링잉 진동이 장기간 선체에 발생하는 경우 피로누적에 의한 구조물의 파손 가능성이 있으므로 설계단계에서 예측을 위한 해석적 방법이 요구된다.

일반적으로 파도에 대한 선박의 응답 및 부재에 걸리는 동적 하중은 주로 강체(rigid body) 운동적 측면에서 접근되어 왔으나 선박이 점차 대형화되면서 유연구조(flexible structure) 거동이 뚜렷이 나타나기 시작하였는데 스프링잉 현상은 그 대표적 예이다. 스프링잉은 기본적으로 물과 구조간의 상호작용에 의해 발생하는 유탄성적인 현상으로서 주파수에 따른 특성치 변화가 심하며 유체기진력의 비선형성도 강하다. 또한 불규칙한 해양파에 의한 응답에 대해 통계적 이해가 요구된다.

본 논문에서는 이러한 스프링잉 진동의 개념을 연구 현황과 아울러 소개하고, 거동 예측을 위한 해석적 접근방법을 실제 사례와 함께 제시하였다. 주요 파라미터 변화가 스프링잉 응답에 미치는 영향을 조사하여 그 결과의 객관적 타당성을 확인하였다.

### 2. Springing의 개념 및 연구 현황

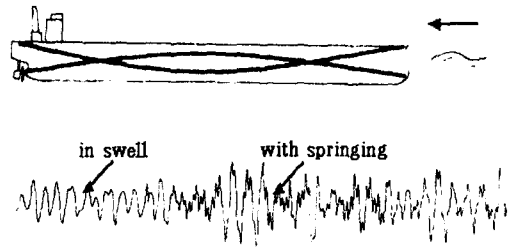


Fig.1 Springing behavior of ship

\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

Fig.1은 파랑속을 향하는 선박의 스프링잉 거동을 개념적으로 보여준다. 그림에서 보듯이 선체는 주로 2절 진동모드 거동을 하며 스프링잉은 간헐적이고 불규칙적으로 나타나는 것으로 알려져 있다. 이는 스프링잉이 선속과 조우각 등에 매우 민감함을 암시한다.

주파수 영역에서 선체의 응답(주로 중앙부에서의 굽힘 모멘트)을 관찰하면 Fig.2와 같이 두 개의 peak 응답 (bi-modal response)이 나타나는 때 이때 저주파 역의 부드러운 peak는 파도의 힘에 의한 강제 변형 (enforced deformation)으로서 완전 강체의 선박구조에서도 나타나는 응답이다. 반면, 고주파 역의 예리한 peak는 선체 고유진동모드가 파도 기진력과 공진하여 나타나는 응답, 즉 springing으로서 유연한 선박구조일수록 잘 나타난다. 기진력의 측면에서 이러한 springing 응답에 해당하는 파도 성분은 매우 작지만 응답은 크게 나타나는 것이 흥미로운데, 감쇠력이 매우 적은 진동 모드의 특성 및 파도 유체력의 비선형적 기진 메커니즘을 이유로 들 수 있다.

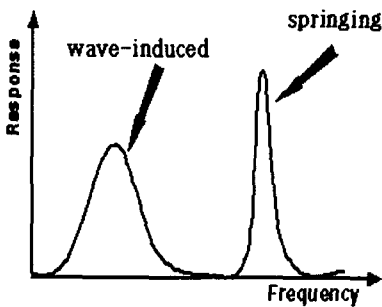


Fig.2 Typical response spectrum

초기의 스프링잉 현상은 미국의 오대호를 운항하는 길고 가는(slender) 선박들에서 흔히 발견되었는데 비교적 잔잔한 파랑조건에서도 잘 관찰되었으며 심한 경우 중앙부 종강도 설계의 재고를 요구하기도 했다[1]. 일본의 Kagawa 등은 수조실험을 통하여 springing 현상을 체계적으로 관찰하였으며, 대양을 향하는 선박의 굽힘 응력을 계측하고 이로부터 스프링잉 응답을 예측하는 간이식을 도출하였다[2,3]. Faltinsen 및 Jensen 등은 유탄성학(hydroelasticity)적 관점에서 문제를 접근하여 스프링잉 응답 해석을 위한 이론적 방법을 마

련하고 그 결과들을 제시하였다[4,5]. 또한 선박과 같은 전진속도는 없지만 상대적으로 훨씬 유연한 구조를 가진 TLP (Tension Leg Platform) 등의 해양구조물에서도 이러한 springing 현상이 잘 발견되어 관련된 연구들이 다수 발표되었다 [6,7].

### 3. 해석적 접근

#### 3.1 운동 방정식

선박의 스프링잉 진동해석을 위한 모델로는 선체를 길이 방향으로 하나의 보(beam)로 가정하는 strip 방법을 도입한다. 따라서 각 단면에서의 2차원 물성치를 부여하고 불균일 Timoshenko 보로 모델링한다. 이러한 경우 연속체 모델에 대한 방정식은 식(1)과 같이 일반적인 보에 대한 관계식으로 이상화 될 수 있으며[8] 이 때 전자는 단면의 상하 운동에 대한 관계식, 후자는 단면의 회전운동에 관계된 식이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu GA \left( 1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \varphi \right) \right] &= m_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - F(x, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ EI \left( 1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \mu GA \left( 1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \varphi \right) &= m_s r^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $EI(x)$  및  $\mu GA(x)$ 는 수직방향의 굽힘 및 전단 강성이며  $\varphi(t, x)$ 는 굽힘에 의한 단면 기울기,  $w(t, x)$ 는 전체 수직 변위이다.  $m_s(x)$  및  $m_s r^2(x)$ 는 단위길이당 선박의 질량 및 질량관성이며  $\eta$ 는 구조 감쇠계수이다.  $F(x, t)$ 는 단면의 수직방향의 외력으로서 모든 유체력의 항을 포함한다. 이러한 외력은 식(2)와 같이 주어지는데,

$$\begin{aligned} F(x, t) = - \left[ \frac{D}{Dt} \left\{ m(\bar{z}, x) \frac{D\bar{z}}{Dt} \right\} + N(\bar{z}, x) \frac{D\bar{z}}{Dt} \right. \\ \left. + \int_{-\tau}^{\bar{z}} B(z, x) \frac{\partial b}{\partial z} \Big|_{z+w} dz \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $m$ ,  $N$  은 각각 단면의 부가질량 및 유체 감쇠력을 각각 나타내며,  $B$ 는 임의단면의 특정높이에서의 선폭이다. 전미분  $\frac{D}{Dt}$  는  $\frac{\partial}{\partial t} - V \frac{\partial}{\partial x}$  를 의미하고  $V$ 는 선박의 전진 속도,  $\bar{z}$  는 선체와 수면과의 상대 변위를 나타낸다. 우항의 마지막 식은 파 강제력 (wave force)으로서 진동계의 실질적인 기진력이 된다.

일반적으로 선형적인 구조계에 있어 식(1)에서 언급된 물성치들은 시간 및 주파수에 대해 불변이나(invariant), 식(2)의 물성치들 즉 부가질량 및 유체 감쇠력 등은 주파수 변화 특성이 매우 강하며 대표적으로 원형 단면에 대해 무차원적으로 예시하면 Fig.3와 같다.

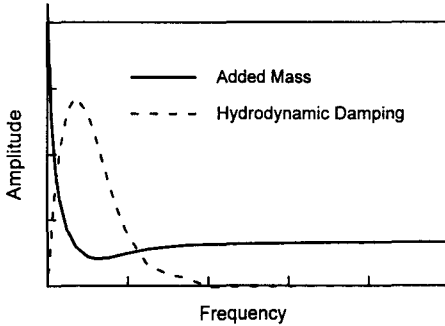


Fig.3 Frequency variation of added mass and hydrodynamic damping

### 3.2 진동계 모델

수치적인 해법을 위해서 앞의 연속계의 관계식을 유한요소로 구성된 이산계 관계식으로 변환하면 식(3)와 같은 행렬 방정식으로 표현하고 Fig.4와 같이 도식화 할 수 있다.

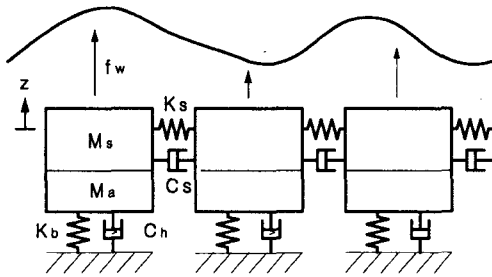


Fig.4 Vibration model for ship springing

$$[M_s + M_a]\{\ddot{z}\} + [C_s + C_h]\{\dot{z}\} + [K_s + K_b]\{z\} = \{f_w\} \quad (3)$$

여기서,

$\{z\}$  : 보 모델 각 절점의 수직 및 회전 변위 벡터

$[M_s]$  : 선체 질량 행렬 (구조, 의장품, 화물등)

$[M_a]$  : 외부 물에 의한 부가질량 행렬

$[C_s]$  : 선체 내부 감쇠 행렬 (구조, 화물등)

$[C_h]$  : 외부 물에 의한 유체역학적 감쇠 행렬

$[K_s]$  : 선체 구조 강성 행렬

$[K_b]$  : 외부 물에 의한 부력 행렬

$\{f_w\}$  : 파도에 의한 기진력 벡터

이다.

### 3.3 파도에 의한 기진력

파도에 의한 기진력은 임의단면에서 선체에 미치는 변동압력의 합으로 계산된다. 대상 단면에 대해 특정 주파수의 파도에 의한 힘은 식(4)와 같이 표현될 수 있다 [9].

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_{keel}^{surface} \Delta p(x, y, z, t) 2 dy \\ &= B(x)\xi - 2k\xi \int_{-T}^0 y e^{kz} dz \\ &= B(x)\xi e^{-kT} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $k$ 는 파수 (wave number),  $\xi$ 는 해당 단면에서의 파고, 그리고  $T$ 는 Smith correction 을 고려한 단면의 등가 흘수이다.

선형파(linear wave) 이론에서는 수심에 따라 선체에 미치는 변동압력이 지수적으로 감소한다. Smith effect라고 부르는 이러한 효과는 springing 진동의 기진력과 관련하여 중요한 개념을 가지는데 동일한 파고 혹은 해상상태를 통과하는 선박이라 하더라도 흘수(draft)가 깊으면 그만큼 감소된 변동압력이 선체에 작용함을 의미한다. Fig.5에 지름이 20m, 흘수가 10m인 원형단면에 대해 Smith 수정치  $e^{-kT}$ 의 주파수 변화를 제시하였다. 주파수가 상승할수록 크기가 급격히 떨어짐을 볼 수 있다.

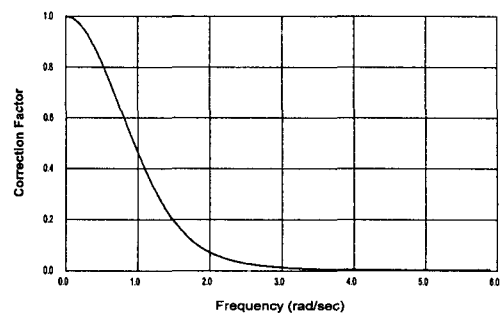


Fig.5 Smith correction of a circular section

파도에 기인한 변동력은 선체의 운동을 고려하지 않은 Froude-Krylov력과 선체와 파도간의 상호작용을 고려한 회절력(diffraction force)의 두 가지를 포함한다. 또한 파고에 비례하는 선형적 기진력 뿐만 아니라 비선형적 기진력도 고려하여야 하나 그 개념과 유도과정이 복잡하므로 본 고에서는 설명을 생략하기로 한다.

실제 해상의 랜덤파는 그 파형의 주파수 분포를 표현하는 파도 스펙트럼 (wave spectrum)으로 정의되는데 이는 주어진 해상상태의 대표적 파고 및 주기 등의 파라미터로부터 그 분포가 가정된다. 이러한 분포 방식에는 Pierson-Moskowitz 방식, ITTC 방식, ISSC 방식, JONSWAP 방식 등이 있다 [9].

### 3.4 응답

파도에 대한 선체의 응답은 RAO와 응답 스펙트럼으로 표시할 수 있다. 이중 RAO (Response Amplitude Operator)는 단위 높이를 가진 정현파 파도가 입사된다고 가정한 경우 선체의 응답을 나타낸 것으로서 진동계에서 전달함수 혹은 주파수 응답함수의 의미를 가진다. 반면 응답 스펙트럼 (PSD)은 RAO에 다양한 파고와 주기를 가진 파도의 기진력을 작용한 실제의 응답을 나타내는데 식 (5)와 같은 관계식으로 표현할 수 있다. 일반적으로 springing 응답을 표현하기 위해서는 선박 중앙부에서의 굽힘 모멘트를 사용한다.

$$\text{응답 PSD} = \text{RAO}^2 \times \text{파도 PSD} \quad (5)$$

## 4. 해석 예

스프링잉 해석 사례로서 아래와 같은 가상적 광폭 유조선 및 기본적 해상 조건을 설정하였다.

- 선장 (L.B.P) : 270 m
- 선폭 (Bmld.) : 60 m
- 선고 (Dmld.) : 20 m
- 흘수 (draft) : 7.85 m
- 유의 파고 ( $H_{1/3}$ ) : 5 m
- zero crossing 주기 ( $T_z$ ) : 8 sec

실제 해석작업은 springing 전용해석 프로그램을 사용하였다 [10].

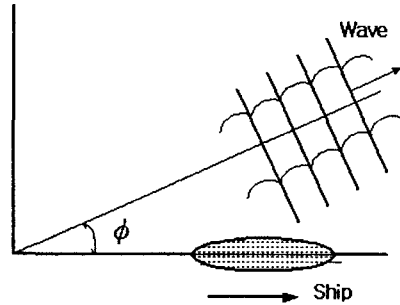


Fig.6 Definition of heading angle

Fig. 6과 같이 배가 파도와 일정한 각도를 이루며 달릴 때 조우 주파수는 식(6)과 같이 주어진다.

$$\omega_e = \omega_i - \frac{\omega_i^2}{g} V \cos \phi \quad (6)$$

여기서,

$\omega_e$  : 달리는 배에서의 파도와 조우주파수

$\omega_i$  : 정지상태에서 관찰된 파도의 입사주파수

$V$  : 선박의 진행속도

$\phi$  : 파도방향과 선박방향간의 각도

$g$  : 중력가속도

본 절에서는 이러한 선속, 조우각도, 하중조건 등이 springing 응답에 주는 영향을 사례를 통해 분석해 보았다.

### 4.1 선속 효과

선박의 속도 효과를 알아보기 위하여 정지한 경우와 전진속도가 있는 경우 ( $V = 10$  m/s)에 대해 해석을 수행하였다. Fig.7는 조우주파수에 대한 파도 스펙트럼으로서 전진속도가 있는 경우 파도의 에너지가 고주파 대역으로 대폭 이동함을 볼 수 있다. Fig.8은 두 경우의 RAO를 보여주는데 1 rad/s 이내 저주파 역의 응답 peak는 그 크기가 유사하나 고주파역의 스프링잉 성분(3 rad/s 근처)은 선속이 있는 경우의 응답도가 훨씬 높음을 볼 수 있다. Fig.9의 실제 응답 PSD는 식(5)의 관계로부터 앞의 두 결과에서 예상할 수 있듯이 전진속도가 있는 경우 스프링잉 응답이 뚜렷하며 정지된 경우는 스프링잉 응답이 거의 없다. 이러한 결과는 대개의 경우 배가 파도를 거슬러 전진할 때 스프링잉이 발생한다는 관측 사실과 일치한다.

### 4.3 전진각 변화

선속은 10m/s에 유지한 채 선박의 전진 각도 (heading angle)를 변화하여 응답의 변화를 관찰하였다. 전진각을 180° 에서 150° 및 120° 로 변화시킨 경우 Fig.10의 파도 스펙트럼은 약간의 변화를 가져오나 Fig.11의 응답 RAO 및 Fig.12의 응답

PSD는 스프링잉 성분에 대해 상당한 차이를 보였다. 흥미 있는 것은 파도에 직각으로 항진하는 경우 ( $\phi=180^\circ$ )보다 약간 비스듬히 진행하는 경우 ( $\phi=150^\circ$ )가 더 큰 스프링잉 응답을 나타냈다는 점이다. 이는 동일한 파장을 가진 파도에 대해 조우 방향에 따라 조우 주파수 및 유효 조우파장이 복합적 작용한 결과로 보인다.

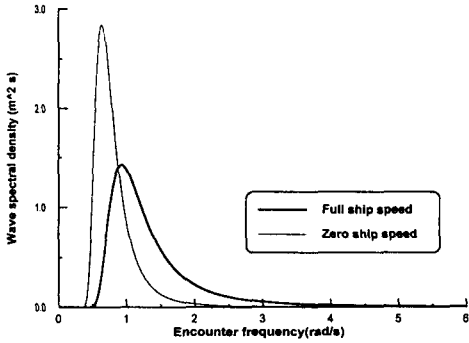


Fig.7 Wave PSD (ship speed)

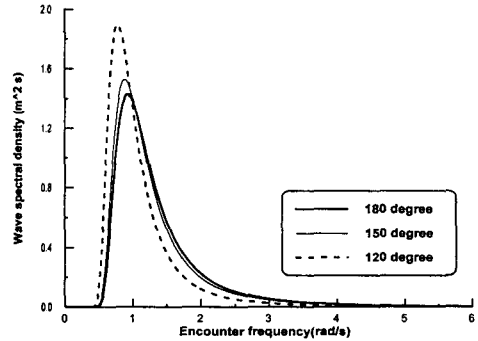


Fig.10 Wave PSD (heading angle)

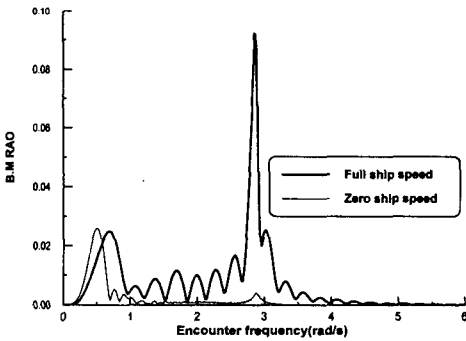


Fig.8 Bending moment RAO (speed)

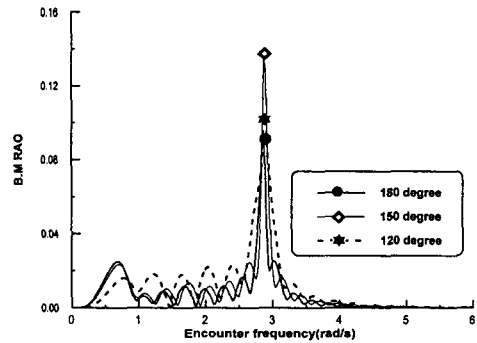


Fig.11 Bending moment RAO (angle)

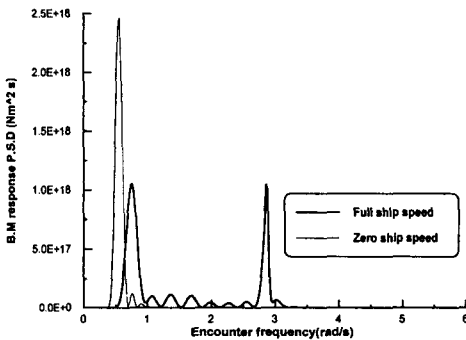


Fig.9 Bending moment PSD (speed)

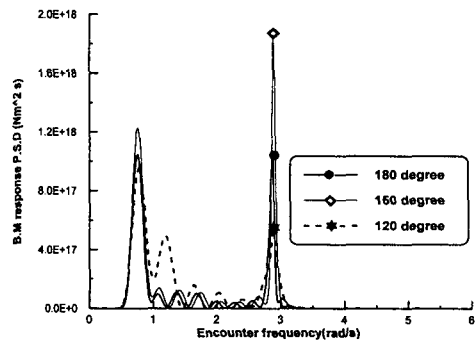


Fig.12 Bending moment PSD (angle)

#### 4.4 하중 및 홀수 변화

마지막으로 하중 변화 및 이에 따른 홀수 변화에 의한 springing 응답 변화를 관찰하였다. 선박의 대표적 하중조건으로서 가벼운 ballast 상태와 무거운 full load 상태에 대해 해석하였다. 이 경우 파도 spectrum은 두가지 경우가 동일하며 Fig.7의 full speed 혹은 Fig.10의  $\phi=180^\circ$ 의 경우와 같다. RAO는 Fig.13에 보인 바와 같이 full load일 때 증가된 질량으로 인해 springing 주파수가 낮아지며 깊어진 홀수로 인한 Smith effect에 의해 springing 응답도가 낮아진다. 이러한 경향은 Fig.14에 보인 실제 응답 PSD에서도 유사하다. 역시 실제 관찰되는 현상과 일치하는 결과이다.

이상의 해석 결과로부터 일반적 경향이 알려진 springing의 현상과 일치함을 확인하였고 이러한 접근 방법이 springing 거동 예측을 위한 해석적 도구로서 유용함을 확인하였다.

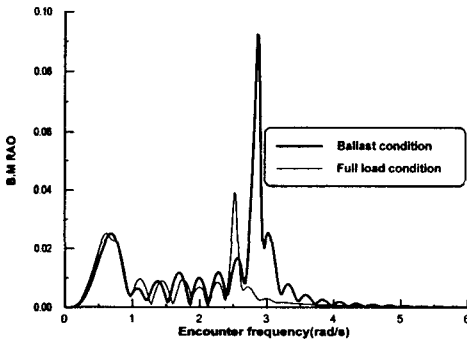


Fig.13 Bending moment RAO (loading)

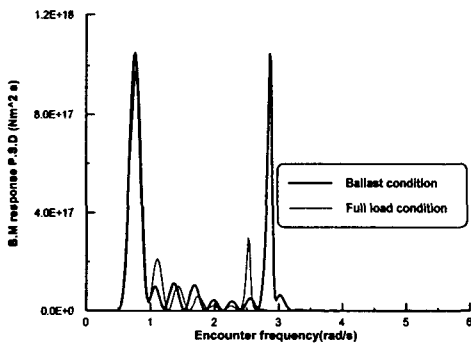


Fig.14 Bending moment PSD (loading)

#### 5. 결론

선박의 springing 진동에 대해 그 현상적 개념을 소개하고 거동 예측을 위한 해석적인 접근법을 제시하였다. 실선 해석 예의 결과가 springing의 일반적 거동 및 경향과 일치함을 정성적으로 확인하였다. 향후 보다 많은 실선에 대한 해석 및 계측을 통한 검증, 해상조건의 통계적 접근 등을 통하여 예측 신뢰도가 높은 해석적 방법의 도출이 가능하리라 본다.

#### 참고 문헌

- (1) A.W.Troesch, "Effects of Non-Linearities on Hull Springing ", 미국조선학회 호수/강 분과 동계 회의, 1984
- (2) K.Kagawa et.al., "A Study of Wave-induced Vibrations (I)", 일본조선학회 논문집 제 137 호, 1975
- (3) K.Kagawa et.al., "A Study of Wave-induced Vibrations (II)", 일본조선학회 논문집 제 141 호, 1977
- (4) S.Skjordal & O.Faltinsen, "A Linear Theory of Springing", Journal of Ship Research, Vol.24, 1980
- (5) J.Jensen & P.Pedersen, "Bending Moment and Shear Forces in Ships Sailing in Regular Waves", Journal of Ship Research, Vol.25, 1981
- (6) A.Naess et.al., "The Statistics of Springing-Response of a TLP", Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.2, 1992
- (7) E.Huse, et.al., "Third and Higher Order Content of TLP Springing Excitation", Offshore Technology Conference 7813, 1995
- (8) J.Jensen & M.Dogliani, "Wave-induced Ship Hull Vibrations in Stochastic Seaways", Marine Structures, Vol.9, 1996
- (9) R.E.D.Bishop & W.G.Price, "Hydroelasticity of ships", Cambridge University Press, 1979
- (10) J.Jensen, "Load and Global Response of Ships", Technical University of Denmark, 2000