

과도 수파중의 복합실린더에 작용하는 쇄파력에 관한 연구

조효제* · 구자삼** · 이상길***

Wave Force Acting on Cylinders in Transient Waves

Hyo-Jae Jo*, Ja-Sam Goo** and Sang-Kil Lee***

KEY WORD : Transient Wave 과도수파, Breaking Wave 쇄파, Time Domain Analysis 시간영역해석, Impulse Response Function 충격응답함수, Transfer Function 전달함수

ABSTRACT: It is important to estimate exactly wave forces acting on various types of offshore structures under the severe environmental conditions in the ocean site. This paper presents an easy experimental method which deals with transient waves. The proposed scheme made it possible to generate breaking waves at any position in the wave tank by changing the maximum slope of the component waves. The theoretical and experimental methods were investigated by generating concentrated waves which acted on a single and multiple cylinders. The waves forces increased rapidly when the models encountered breaking waves. The theoretical results underestimates the forces due to breaking waves. Therefore, the effects due to breaking waves should be considered carefully in the design process of a structure under the influence of breaking waves.

1. 서론

최근 들어 해양개발을 목적으로 여러 가지 형식의 해양구조물이 제안되어 설계, 건조되고 있다. 특히 심해저에서의 석유개발을 위한 부유식 해양구조물 뿐만 아니라 북해와 같은 빙해역을 가지는 열악한 해상조건에도 적용할 수 있는 대형 구조물들도 건설되고 있다. 미래에는 부유식 해양구조물이 해양 석유 개발을 위한 석유 시추선 뿐만 아니라 해상공항, 해양 플랜트, 해양 레저시설 등에도 적용되어 이에 대한 중점적인 연구가 필요하다. 따라서, 각각의 주어진 기능을 성공적으로 수행할 수 있고 안전하게 가동할 수 있는 부유식 해양구조물의 설계를 위해서는

구조물에 미치는 외력을 정확하게 평가하는 것이 중요한 연구과제라고 생각된다.

이러한 해양구조물은 끊임없이 파도, 바람, 조류 등의 외력을 받고 있으며, 이중에 해상 상태에서의 가장 큰 외력은 파도에 의한 것이다. 미소 진폭에 의한 파력의 추정에는 포텐셜 이론의 계산에 따른 방법이나 해양구조물의 각 부재요소를 2차원 주상체로 취급하는 Hooft의 방법 등이 이용된다(Hooft, 1971). 하지만, 해양환경이 거칠게 되어 파랑의 파고가 구조물의 직경에 비해 상대적으로 커지게 되면 비선형성을 고려한 파력해석이 필요하게 된다. 그러나 이론적 계산에 있어서는 완전한 수식모델링의 어려움 때문에 완전 비선형 파력 산정법은 아직 정립되어 있지 않은 실정이다.(이창호, 1998)

- * : 한국해양대학교 해양시스템 공학부
- ** : 부경대학교 조선해양시스템 공학과
- *** : 한국해양대학교 대학원 해양시스템 공학과

파력중 비선형 성분의 특성을 조사하기 위하여 수조에서 높은 파고를 가지는 파를 생성시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 과도수파 발생법을 이용한 집중파를 생성시키는 방법이 있다. 과도수파 발생법은 Takezawa가 주파수 영역에서 조파기의 전달함수와 성분파의 위상속도를 고려하여 발생시키는 방법이 주로 이용된다(Takezawa, 1968, 1970). 그리고 Reid는 특정한 수조에 대한 실험식을 제안하고 이로부터 과도수파를 재현하고 있지만 이 방법은 실험식을 사용하고 있기 때문에 다른 수조에서 재현하기에는 어려움이 따른다(Reid, 1991). Park 등은 지배방정식인 나비에스토크 방정식에 유한차분법을 적용하여 수치해석 함으로써 과도수파를 수치적으로 재현하고 있다(Park, 1996).

본 논문에서는 실린더형 구조물에 작용하는 비선형유체력, 특히 쇄파력의 특성을 조사하기 위하여, 수조시험에서 과도수파 발생법을 이용한 집중파를 재현하여 대파고 비선형 파랑중의 실린더에 작용하는 파력을 측정하였다. 이때 사용한 실험모델로는 단독 실린더와 정사각 지점에 네 개의 실린더를 설치한 복합실린더를 채택하였다. 쇄파에 따른 파력의 변화를 조사하기 위하여 파가 완전히 쇄파되는 상태, 쇄파 직전의 상태, 쇄파되지 않은 상태를 선정하여 각각의 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

그리고, 파력의 시간영역 해석법을 이용한 이론해석에 의한 결과를 실험치와 비교함으로써, 이론해석법의 적용 가능성을 조사하였다. 여기서 사용한 이론 해석방법은 임의 파형에 대한 외력의 시간이력은 효율적으로 추정할 수 있지만 선형의 가정을 유지하고 있으므로 비선형성이 강한 쇄파력을 추정한다는 것은 한계가 있다. 그러나 쇄파중의 실험치와 이론치를 비교함으로써 선형해석에 의한 파력에 비하여 쇄파력의 크기가 어떻게 변화하며, 쇄파로 인한 비선형 파력의 정량적인 크기를 조사하였다.

2. 이론 해석

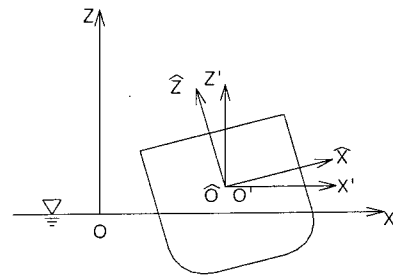


Fig. 1 Coordinate Systems

파랑중 해양구조물에 작용하는 유체력 산정을 위해서 구조물을 강체로 가정하고, 유체는 비점성, 비압축성, 비회전으로 가정한 다. 주파수 영역에서의 유체력은 특이점분포법을 이용하고, 시간영역 응답함수는 주파수 영역에서 얻어지는 파강제력 전달함수로부터 Fourier변환하여 얻어진다. 이와 같은 이론의 정식화를 위하여 Fig.1과 같이 정수면상에 원점 O 를 가지고, Z 축의 양의 방향이 상방으로 향하는 공간 고정 좌표계 $O-XYZ$, 물체와 함께 운동하는 물체 고정 좌표계 $O'-X'Y'Z'$ 와 공간 고정 좌표계와 평행한 물체 고정 좌표계 $O'-X'Y'Z'$ 를 사용한다.

2.1 파강제력의 전달함수

본 논문에서는 선형이론에 의거하여 계산을 수행하고 있지만, 약비선형이론인 섭동전개법에 의한 압력의 표시식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(X, Y, Z, t) &= -\rho g Z - \varepsilon \rho [\phi_i^{(1)} + gZ^{(1)}] \\
 &\quad - \varepsilon^2 [\rho \phi_i^{(2)} + \frac{\rho}{2} |\nabla \phi^{(1)}|^2 + \rho \{X^{(1)}\} \cdot \nabla \phi_i^{(1)} \\
 &\quad \quad \quad + \rho g Z^{(2)}] + O(\varepsilon^3) \\
 &= P(0) + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 위첨자(1)과 (2)는 각각 1차 및 2차 항에 해당하고, 아래첨자는 편미분을 나타낸다. 그리고 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, t 는 시간, ϕ 는 속도포텐셜, $\{X\}$ 는 변위벡터를 나타낸다. 1차 속도포텐셜 및 변위는 1차 경계치 문제와 운동방정식으로부터 얻어지고, 2차 속도포텐셜은 2차 경계치문제로부터 얻어진다. 구조물에 작용하는 힘과 모멘트는 압력을 침수표면에 대해 적분함으로써 구해진다.

$$\{F_k(t)\} = - \int_{S_H} P(X, Y, Z, t) \{n_k\} dS, \quad (k=1\sim6) \quad (2)$$

여기서 k 는 각각의 운동모드를 나타내고, n_k 는 각각의 모드에 대한 넓은 의미의 방향여현, S_H 는 침수표면을 나타낸다. 구조물에 작용하는 파랑강제력은 섭동전개에 의해 이상과 같이 얻어지지만 이를 1차까지만 취하고, 이를 단위파고에 대해 표시하면 다음과 같이 1차 파랑 강제력에 대한 주파수 응답함수를 얻을 수 있다.

$$\{H_k^{(1)}(\omega)\} = (\rho \int_{S_H} -i\omega(\phi_k^{(1)} + \phi_{Dk}^{(1)}) \{\hat{n}\} dS) \quad (3)$$

여기서 ϕ_I 는 입사파, ϕ_D 는 산란파에 대한 속도포텐셜을 나타낸다.

2.2 시간 영역에서의 파강제력

과도수파와 같은 임의의 형상의 불규칙파 중에서의 파강제력은 시간영역에서 해석할 필요가 있다. 시간영역 해석법으로 Hsu의 방법은 불규칙파의 시간이력(time history)에서 제로 크로스(zero cross)점을 찾아 각 반파장에 해당하는 주파수의 규칙파로 가정하여 파강제력을 계산하는 방법이다(Hsu, 1970). 이 방법은 계산 시간을 단축시키는 이점이 있지만, 파형이 급격히 변화하거나 변동 표류력을 고려하는 경우에는 파강제력을 정확하게 평가할 수 없다. 본 논문에서는 주파수영역에서 얻어지는 파강제력의 전달함수를 Fourier 변환함으로써 얻어지는 임펄스 응답함수(impulse response function)를 이용하는 계산법을 적용하였다(Kim, 1991).

즉, 시간영역에서의 파강제력은 다음식과 같이 임의형상의 파형과 임펄스 응답함수의 convolution 적분의 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_k^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_k^{(1)}(\tau) \zeta(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

여기서 $h_k^{(1)}(\tau)$ 는 k 모드의 1차 파강제력의 임펄스 응답함수이고, $\zeta(t)$ 는 파형의 시간이력을 나타낸다. 임펄스 응답함수는

$$h_k^{(1)}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_k^{(1)}(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (5)$$

와 같이 표현되고, $H_k^{(1)}$ 는 1차 파강제력의 전달함수이다. 이와 같은 계산방법에 의하면 임의의 형상의 파형에 해당하는 각 순간의 파강제력을 추정할 수 있지만, 선형중첩에 의존하고 있으므로 쇄파가 일어나는 비선형 영역에서는 적용의 한계가 있을 것으로 사료된다.

3. 모형 및 실험방법

3.1 모형

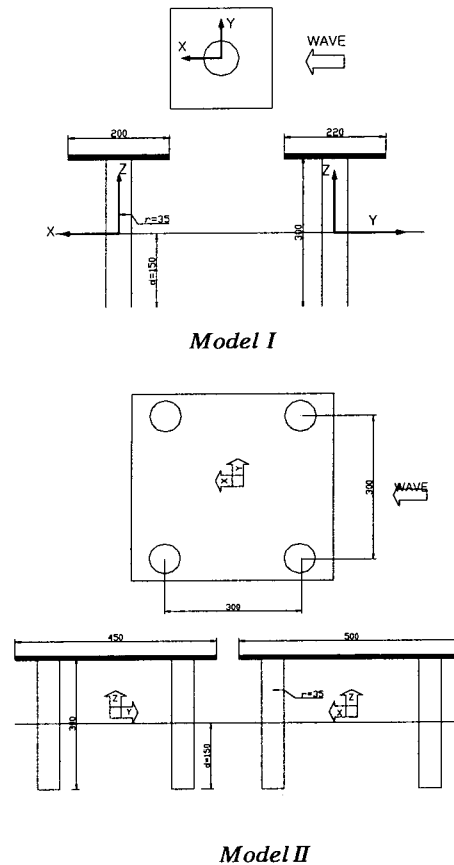


Fig. 2 Feature of Models

이론계산과 실험에 사용된 모형은 Fig.2와 같이 직경 70mm의 실린더를 사용하였다. 또한 실린더들의 상호간섭효과를 조사하기 위하여 Model II에서는 실린더 간격을 300mm 떨어뜨려 4개로 구성된 복합실린더를 채택하였다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 실린더에 작용하는 파력을 측정하기 위하여 폭 1m, 길이 25m, 깊이 1m의 조파수조를 이용하였다. 그리고 파력은 1kg용 Load cell형식인 2분력계로부터 측정하였다. 그리고, 급격하게 변화하는 파형을 정밀하게 측정하기 위하여 센스의 감도가 빠른 servo식 파고계를 사용하였다.

과도수파의 생성은 미소진폭파 이론을 기초로 하여 위상속도를 고려하여 일정 지점에 집중파가 발생되도록 하였다. 각각의 성분파는 최대파경사각이 같도록 파고와 주기를 선정하였다. 그리고 쇄파가 파력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각각의 최대파경사각을 달리하여 완전히 쇄파되는 경우(Case I), 파정의 극소 부분만 쇄파되는 경우(Case II), 전혀 쇄파 되지 않는 경우로 최대파경사각에 따라 CaseIII 와 CaseIV로 나누었다. 이에 대한 각각의 최대파경사각은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 List of Cases

	Case I	Case II	Case III	Case IV
최대파경사각	0.130	0.120	0.110	0.100

4. 결과 및 고찰

4.1 1차 파강제력의 전달함수

Fig.3 및 Fig.4 는 Model I 과 Model II의 1차 파강제력에 대한 주파수 응답함수를 나타낸다. 그림중 ○과 ◇은 surge와 heave에 대한 파력이고 △은 pitch 모멘트를 나타낸다. Model II의 경우에는 위상을 고려한 실린더간의 간섭효과로 인하여 주파수 10rad/sec 근처에서 파강제력이 거의 영으로 되는 것을 알 수 있다.

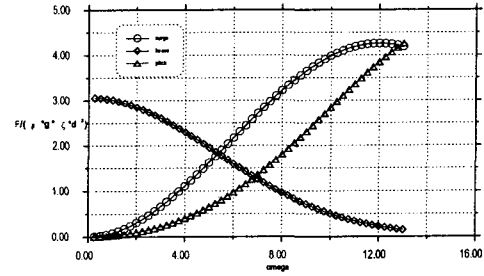


Fig. 3 Wave Exciting Force and Moment (Model I)

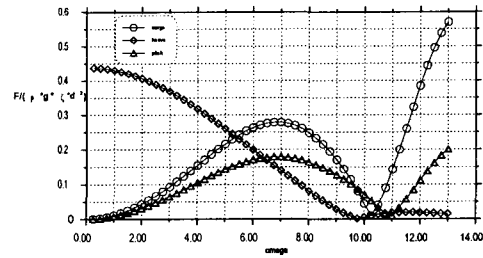


Fig. 4 Wave Exciting Force and Moment (Model II)

4.2 과도수파중의 파강제력

Photo 1에서 Photo 6은 각 모델이 분력계에 고정되어 있을 때, 각각의 case에 대한 파랑 형상을 나타내고 있다. 이들 사진에 의하면 쇄파의 유무를 확연하게 구별할 수 있다. 단 실린더가 4개의 경우에는 가능하면 쇄파의 영향을 크게 하기 위하여, 쇄파지점이 조파기 쪽의 실린더에서 발생하도록 하였다.

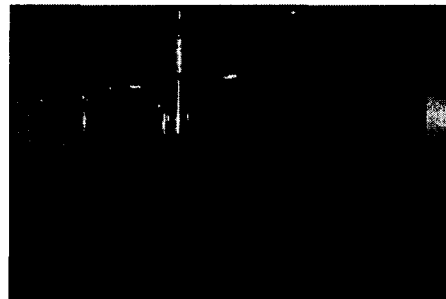


Photo 1 Wave Profile on the Cylinder (Case III, Model I)



Photo 2 Wave Profile on the Cylinder
(Case II, Model I)

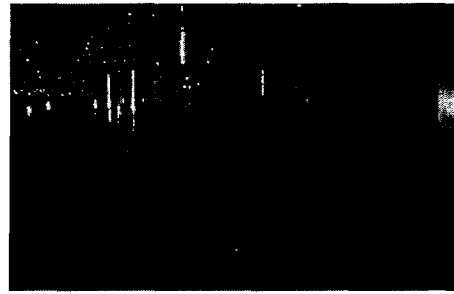


Photo 6 Wave Profile on the Cylinder
(Case I, Model II)

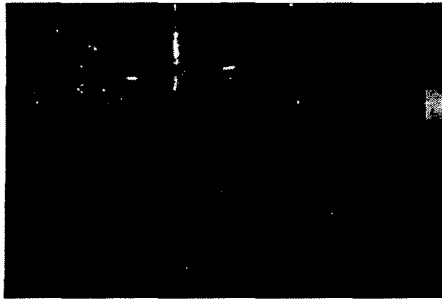


Photo 3 Wave Profile on the Cylinder
(Case I, Model I)

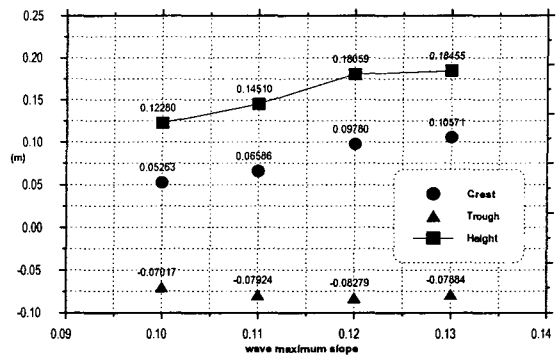


Fig. 5 Relationship Between Maximum Wave Slope and Wave Height

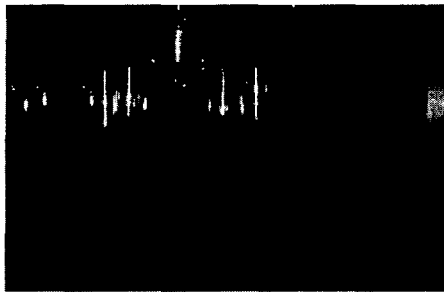


Photo 4 Wave Profile on the Cylinder
(Case III, Model II)



Photo 5 Wave Profile on the Cylinder
(Case II, Model II)

실제 관측한 파형으로부터 쇄파와 최대파고와의 관계를 조사하기 위하여 최대파경사각에 따른 최대파고를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 의하면 쇄파가 발생하기 시작하는 최대파경사 0.12까지 증가하던 최대파고가 최대파경사 0.13에서 증가율이 갑자기 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 파가 쇄파함에 따라 파고가 낮아진 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 관측지점에서 최대파경사 0.13인 case I의 파형에 대한 시간이력을 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8에서는 Fig. 6의 집중파중가 Model II가 입사할 경우 파랑강제력에 대한 이론계산과 실험결과를 각각 나타낸 것이다. 이에 의하면 이론계산 결과에 비하여 실험값이 더 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 쇄파에 의한 비선형 파력의 영향이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

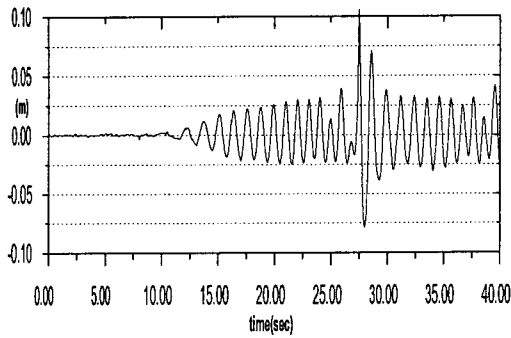


Fig. 6 Measured Wave Profile(Case I)

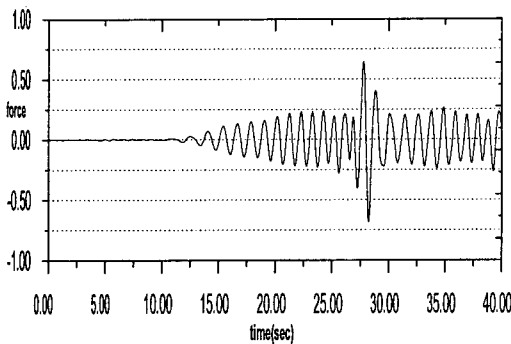


Fig 7 Theoretical Wave Force in Time Domain (Case II, Model II)

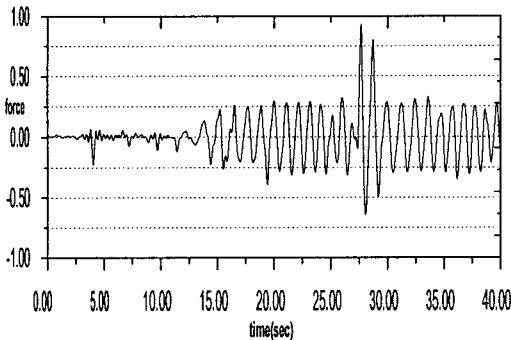


Fig 8 Experimental Wave Force in Time Domain (Case I, Model II)

그리고 쇄파가 발생할 경우와 발생하지 않을 경우의 파력을 비교하기 위하여 두 개의 Model 각각에 대하여 최대과경사각 별로 최대과 강제력을 Fig.9에 나타내었다. 여기서 \triangle 및 \blacktriangle 은 단수 실린더(Model I)에 대한 이론 및 실험치이고, \circ 및 \bullet 은 복수 실린더(Model II)에 대한 이론 및 실험치이다.

이 결과에 의하면 case I 과 case II에 해당하는 쇄파영역에서 이론치에 비하여 파력이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 쇄파가 발생하지 않는 영역에서 단수의 실린더의 경우 실험치와 이론치가 잘 일치함을 보여준다. 복수의 실린더의 경우에는 쇄파가 발생하지 않는 영역에서 이론과 실험간의 값의 차이를 보여주고 있는데, 이는 이론계산의 경우 모델의 중심, 즉 전면과 후면 실린더의 중간 위치에 집중과가 생성되는 것으로 가정하여 시뮬레이션함으로써 발생하는 오차로 판단된다.

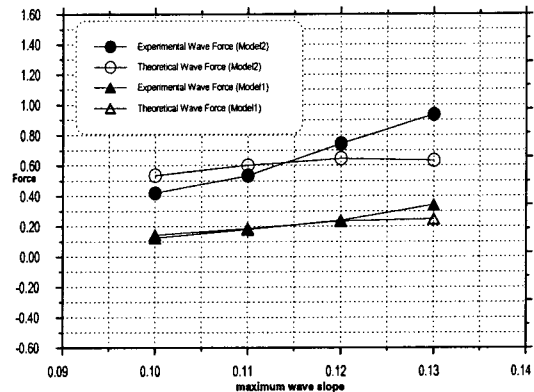


Fig. 9 Comparison on Experimental and Theoretical Maximum Wave Force

5. 결론

본 논문에서는 쇄파시 단수 및 복수 실린더에 작용하는 파력에 대해서 이론과 실험을 통하여 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 소형 조파수조에서 쇄파현상을 재현할 수 있는 과도수파 발생기법을 개발하였다.
- (2) 임의형상의 파형에 대한 시간영역 파력 계산법을 개발하였다.
- (3) 비선형의 영향으로 파고가 증가함에 따라 파력의 증가율이 점차 커지고, 특히 쇄파가 일어나는 영역에서는 급격하게 파력이 증가하는 특성을 알 수 있다.
- (4) 따라서 쇄파영역에 설치될 구조물을 설계할 경우 파랑강제력의 산정에 유의할 필요

가 있다.

참고문헌

- 이창호 등(1998), “불규칙파중의 인장계류식 해양 구조물의 비선형응답해석”, 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, p33-42.
- Chakrabarti, S. K.(1994), “Hydrodynamics of Offshore Structures”, Computational Mechanics Publications Southampton Boston, page 49-50
- Greenberg, M. D.(1971), “Application of Green’s Function in Science and Engineering”, Prentice-Hall, page 51-92.
- Hooft, J. P.(1971), “Mathematical Method of Determining Hydrodynamically Induced Forces on a Semisubmersible”, SNAME, Vol 79.
- Hsu, F. H. and Blenkarn, K. A.(1970), “Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Sea”, Offshore Technology Conference 1159.
- Kim, M. H. and Yue, D. K.,(1991) “Sum-and Difference-Frequency Wave Loads on a Body in Unidirectional Gaussian Seas”, Journal of Ship Research, vol.35, No2.
- Newman, J. N.(1978), “Marine Hydrodynamics”, The MIT Press, page 285-306
- Park, C. C. and Miyata, H.(1996), “Computational Study on the Characteristics of Nonlinear Wave Cased by Breaking Wave of Two-Dimensional Regular Periodic Wave”, 한국해양공학회지 제10권, 제3호, pp 50-61.
- Reid, J. S.(1991), “The Sideband Instability and Onset of Wave Breaking”, IUTAM Symposium Sydney, Australia.
- Rice, S .O.(1994), “Mathematical Analysis of Random Noise”, Bell System Technical Journal.
- Takezawa, S., Fukuhara, M. and Yamashita, S.(1968), “線型試験水槽で発生させた Transient Water wave の特性について”, 日本造船學會秋季講演會.
- Takezawa, S.(1970) “Transient Water Wave 中における船體運動の實測例について”, 日本造船學會春季講演會.