

파도중 선박의 전복 현상 해석

姜 昌 求* · 高 昌 斗*

Analysis of Capsizing Phenomena of a Ship in Waves

Chang-Gu Kang* · Chang-Du Koh*

〈目 次〉

Abstract

1. 서 언

2. 선형운동방정식

3. 비선형 선체운동 해석

4. 파도중 복원력 곡선

5. 파도중 전복 현상 재현

6. 결 언

후 기

참고문헌

Abstract

In this paper, a program for the calculation of GZ curve for a ship in waves is developed and GZ curves for a ferry in the still water and in waves are calculated. And the added mass, damping, restoring forces and wave exciting forces are calculated by using the strip theory given by Salvesen, Tuck, Faltinsen. Capsizing simulations are performed in consideration of the nonlinear restoring forces of the ship in waves by using the Runge-Kutta 4-th order method.

1. 서 언

최근 일련의 해난사고에 따라서 황천에서의 선박의 전복 가능성에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 전복사고는 순간적으로 일어나며 인명과 재산을 일시에 상실하는 가장 무참한 사고 중의 하나이다. 이러한 사고는 선장 및 선원들이 평생 한번 당하는 것으로서 경험을 축적할 수 없는

상황이다. 따라서, 전복현상에 대한 많은 연구와 함께 이 연구결과를 선박운항자에게 교육하는 것이 절실하다. 하나의 방법으로서 전복 시뮬레이터에 의한 훈련이 좋은 방법이라고 생각한다.

파도중에서의 선박의 복원성능과 선미파(추파, following sea)와 선미측면파(추사파, stern quartering sea)에서의 顛覆現象에 대해서는 참고문헌 [1]에 잘 정리되어 있으며 본 보에서 이에

* 한국기계연구원 선박·해양공학연구소.

대하여 다시한번 재정리 수록하였다. 최근 일본에서는 Hamamoto, Kan, Iwashita 등 [2~6]에 의하여 추파중에서 선박 전복의 원인분석, 波기진력, 운항위험영역 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 선박의 파도중 복원력 계산 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 서해 웨리호의 각적하상태에서 복원력 변화, 파도중 복원력 변화를 계산하였다. 또, Salvesen, Tuck, Faltinsen[7]의 스트립 방법에 의한 선체운동 계산에 필요한 부가질량, 감쇠력, 복원력, 파기진력 등을 계산하였다. 그러나, 이들은 선형이론에 의한 힘이기 때문에 전복현상 시뮬레이션을 위하여 파도중 비선형 횡복원력을 계산하였다. 이들을 이용하여 Runge-Kutta 4차 방법을 이용하여 시간 시뮬레이션을 수행함으로써 전복현상을 규명하고자 한다.

2. 선형운동방정식

규칙파중에서의 선박의 운동을 계산하기 위해서는 상호연성을 포함한 완전한 6자유도 선박운동을 고려해야 한다. 선체운동에 대해서는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔으며, 일반적으로 강제운동 및 작은 운동을 가정하여 선형운동방정식을 사용한다. 이렇게 함으로써 종방향과 수평방향의 운동으로 분리하여 해석할 수 있다.

좌표계는 Fig. 1에서와 같이 3개 축에 의한 것이 사용된다. (x_0, y_0, z_0) 은 공간고정 좌표계이고, 입사파를 정의하는데 사용된다.

입사파의 속도포텐셜은 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_1(x_0, y_0, z_0)e^{i\omega_0 t} = (iga/\omega_0)e^{-ik(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)} e^{kz_0} e^{i\omega_0 t} \quad (1)$$

여기서, a 는 입사파 진폭이고, ω_0 은 파진동수, k 는 파수($2\pi/\lambda$), λ 는 파장, g 는 중력가속도, β 는 파의 진행방향이다.

규칙파중에서 선체운동은 Salvesen, Tuck, Faltinsen[7]과 Beck[8]의 스트립 이론을 사용하여 구

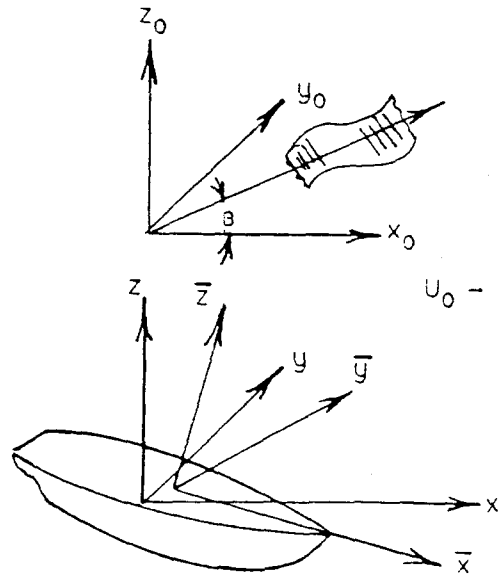


Fig. 1 Coordinate Systems

할 수 있다. 이에의한 선형 연립방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1,6} \{-\omega_e^2(M_{jk} + A_{jk}) + i\omega_e B_{jk} + C_{jk}\} \zeta_k = F_j^I + F_j^D \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

여기서, ζ_k 는 k 방향의 복소운동 진폭, M_{jk} 는 질량행렬, A_{jk} 는 부가질량행렬, B_{jk} 는 감쇠행렬, C_{jk} 는 정력학적 복원력행렬, F_j^I 는 Froude-Krylov 기진력, F_j^D 는 산란 기진력이다. 또, ω_e 는 만남진동수(encounter frequency)로서 다음식으로 구해진다.

$$\omega_e = \omega_0 - \frac{\omega_0^2 U_0}{g} \cos \beta \quad (3)$$

여기서, U_0 은 배의 전진속도, β 는 파 진행방향과 배 진행방향의 사이각이다.

부가질량과 감쇠계수는 Frank[9]의 쏘오스 분포법에 의한 경계치 해석법으로 구했으며, 기진력은 Haskind관계를 이용하여 구한다.

3. 비선형 선체운동 해석

파도중 전복현상에 가장 큰 영향을 주는 항은 횡복원력($GZ \cdot W$)이다. 여기서, W 는 배의 무게이다. 2절에서 언급한 선형운동방정식에서는 작은 운동을 가정하여 GZ 를 $GM \cdot \zeta_4$ 로 근사하면 횡복원력은 $GM \cdot \zeta_4 \cdot W$ 로 단순화되지만, 횡동요 ζ_4 가 커지면 GZ 는 $GM \cdot \zeta_4$ 와 다르게 비선형효과가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 2).

따라서, 본 연구에서는 전복현상의 규명에 초점을 맞추기 때문에 횡복원력항을 제외하고 모든 유체력 계수들은 STF 스트립방법에서 구해진 값을 사용하고, 횡복원력은 순간순간 선체의 각 station에서 파도와 선체의 상대적인 운동을 고려하여 정밀하게 계산되었다. 이렇게 계산된 횡복원력과

STF스트립방법에 의해서 구해진 유체력계수들을 이용하여 시간 시뮬레이션을 수행한다. 시간 시뮬레이션은 정도가 높은 Runge-Kutta 4차방법을 사용하여 수행되었다.

4. 파도중 복원력 곡선

파도중에서의 복원력은 파정(波頂)이 선박 중앙에 있을 때 최저가 되며, 파저(波底)가 선박 중앙에 있을 때 최고가 되는 것이 일반적인 현상이다. 이것은 선박 형상의 특성상 선수(船首)와 선미(船尾)의 연직방향 형상변화가 크고 선박 중앙 부분의 연직방향 형상변화가 적은 데서 기인한다. 서해 해리호에 대한 정수중, 파도(파고 2m, 파장 30m, 파도진행방향과 선박진행방향사이 각 = 45°)

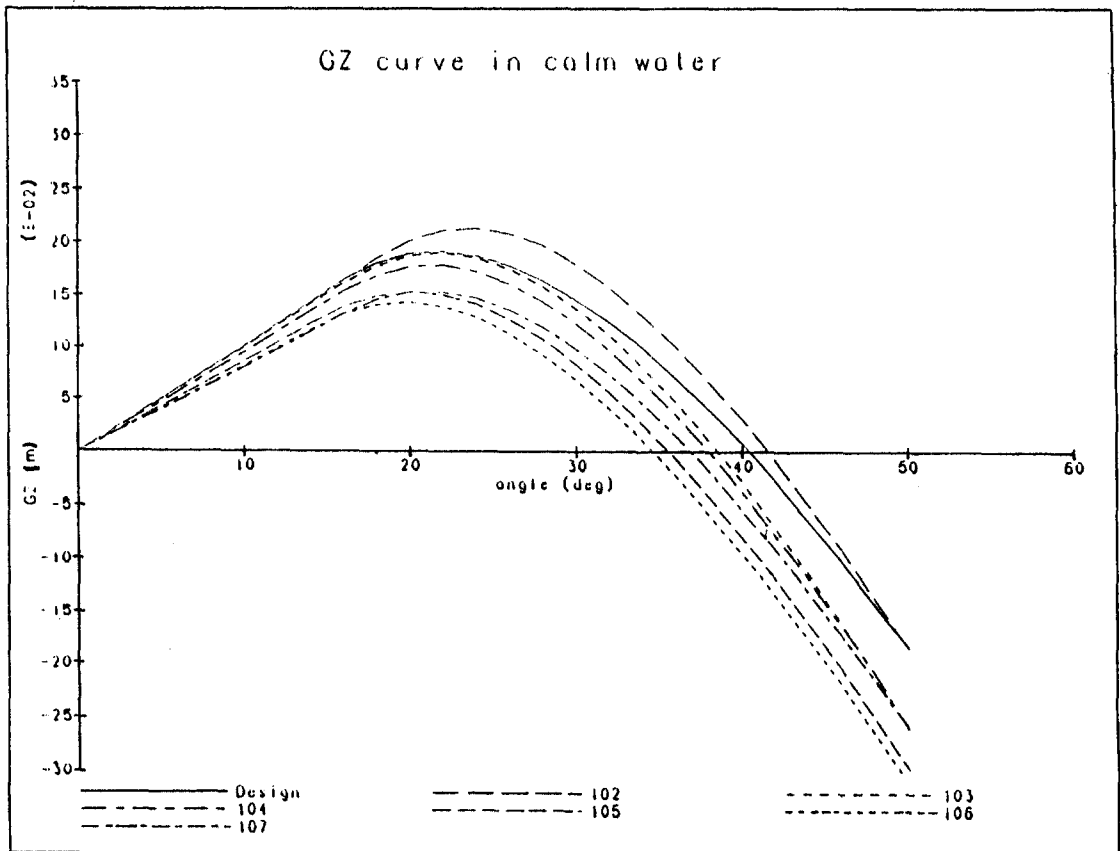


Fig. 2 GZ curve in calm water
(정수중에서의 복원력 곡선)

중 복원력 곡선을 계산하여 Fig.2~4에 표시하였다. 이 그림에서 각 곡선번호에 대한 선박상태는 다음과 같다.

- Design : 설계 당시 만재 출항 상태
 102 : 1993년 10월 10일 출항당시 멀치액젓, 과승, 상갑판상 화물, 자갈이 없었다고 가정한 상태
 103 : 102상태에서 자갈 7.3톤을 조타기어실에 실은 상태
 104 : 103상태에서 상갑판상에 화물(멀치액젓)을 실은 상태
 105 : 104상태에서 승객 143명이 과승한 상태
 106 : 105상태에서 승객화물 4톤을 적재한 상태 (즉, 1993년 10월 10일 출항상태)
 107 : 106상태에서 자갈 7.3톤을 제거한 상태

Fig. 2는 정수중에서의 각 상태에 대한 복원력 곡선이고, Fig. 3은 파고 2m의 파정이 선체 중앙에 왔을 때의 복원력 곡선이며, Fig. 4는 파고 2m의 파도가 파저가 선체 중앙에 왔을 때의 복원력 곡선이다. Fig. 5~11은 위의 각 상태에 대한 파정, 파저가 선체 중앙에 왔을 때와 정수중에서의 복원력을 비교한 것이다.

대체로 설계상태(Design)의 복원력 곡선은 102상태와 103상태 중간에 들어가는 것을 알 수 있고, 102상태에서 106상태로 바뀌어 감에 따라 복원력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 선박의 무게가 증가함에 따라 흘수가 증가하여 횡동요(rolling) 각도가 커질 때 수면이 상갑판 상에 빨리 도달하기 때문이다.

특이한 것은 자갈을 무게 중심보다 낮게 실었음에도 불구하고 정수중 소각도를 제외하고는 복원력이 상당히 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 전체적으로 흘수가 증가했을 뿐만 아니라 선미가 깊이 잠기게 되어 복원력 손실이 많아지게 된 것이다.

또, 상태 104와 105를 비교함으로써 과승이 복원력 감소에 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 특히, 파정이 선체 중앙에 올 때의 복원력 곡선에서는 자갈 적재와 과승이 복원력 손실에 제일 큰 영향

을 미쳤으며 상태 106의 경우 복원력이 심각하게 상실된 것을 볼 수 있다.

이상의 검토로부터 과승과 자갈적재가 복원력 상실에 가장 큰 영향을 미친 것으로 판단되며, 나머지 상갑판상의 멀치액젓과 승객화물은 상대적으로 적은 영향을 미쳤다.

5. 파도중 전복 현상 재현

파도중 전복현상을 재현하기 위해서 일반적인 선체운동 계산 프로그램을 이용하여 서해체리호에 대한 운동성능을 계산하였으며, 이 결과로부터 유체동력학적 특성을 도출하였다. 파도중에서의 전복현상과 같은 대각도 횡동요 운동시 복원력의 변화가 선박 성능에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 각 순간마다 선박의 자세 및 파도 위치를 고려하여 복원력을 계산하고 이 결과를 이용하여 전복현상에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 적용된 선속과 해상상태는 다음과 같다.

- 선 속 : 10노트
 평균 풍 속 : 5.5m/s (기상청 자료)
 순간최대풍속 : 10.5m/s (기상청 자료)
 파 고 : 2m (해경 자료)
 파 장 : 30m (파고 2m에 해당하는 파장)

파도 2m에 대하여 선체운동계산결과 중에서 프로펠러 위치에서 파와 선박의 상대운동은 Table 1과 같다.

Table 1. 프로펠러 위치에서의 파와 선박의 상대운동

배의 진행방향과 파도 진행 방향의 사이각	30°	45°	60°	90°
프로펠러 위치에서의 상대운동 진폭(m)	1.72	1.67	1.17	0.1

승객증언에 의하면 사고직전에 “뿔”하는 소리를 들었다고 하는데 이것은 프로펠러가 물 밖으로 나

와 엔진이 공회전하는 소리로 추정된다. 사고당시의 선미 흘수가 2.764m이기 때문에 racing이 발생하려면 프로펠러위치에서의 상대운동이 1.5m이상 되어야 하기 때문에 배와 파도의 진행방향 사이각은 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 범위에 있는 것으로 추정된다. 이 범위에 대한 파도중 전복현상 시뮬레이션 계산결과를 Fig. 12~Fig. 15에 보여주고 있으며, 이들로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 12와 Fig. 13에서 보는 바와 같이 파고 2m, 파도방향 45° (선미로부터)의 경우 설계 상태(Design)와 출항상태(106)모두 전복현상을 볼 수 없다. 그러나, 파도방향이 30° 로 바뀌면 설계상태(Design)에서는 전복현상이 일어나지 않지만(Fig. 14) 출항상태에서는 전복하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 15). 이러한 결과로부터 설계상태의 복원력보다 운항상태의 복원력이 심하게 저하되면 전복할 수 있는 가능성이 급증하게 됨을 알 수 있다.

파랑주의보는 파고 2.5m에서 발령되기 때문에 이만 사고처럼 파랑주의보가 발령되지 않는 파고 2m에서 전복사고가 발생할 수도 있는 문제가 발생하였다. 선박 안전성 기준도 기상 예보 발령 기준에 맞추어 전면적인 재검토가 이루어져야 한다.

6. 결 언

파도중 선박의 횡복원력 계산 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 파도중 전복현상을 해석할 수 있는 시간시뮬레이션 프로그램을 개발하였다.

이 프로그램을 이용하여 파랑중 복원성 계산 및 선체운동 시뮬레이션을 수행한 결과 파랑 중 복원성이 급격히 줄어들어 전복을 유발하였다고 추정한다. 생존 승객이 사고직전 “횡”하는 소리를 들었다고 증언했는데 이것은 프로펠러가 물 밖으로 나오는 racing으로 판단되며, 선체운동 계산결과 파도방향(배의 진행방향과 파도 진행방향의 사이각)이 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 사이에서 일어날 수 있는 것으로 추정되었다. 이 범위에서 전복 시뮬레이션 결과 약 30° 근처에서 전복이 발생하는 것을 볼 수 있었다.

앞으로 해수가 bulwark를 넘어 들어와서 갑판에 남게 됨으로써 발생하는 복원력상실, 방수구를 통한 해수의 입출효과를 포함하여 시간시뮬레이션

을 할 수 있는 프로그램 개발이 필요하다. 선박안전법규측면에서는 파도중 횡복원력 감소로 인한 전복발생확률을 줄이기 위하여 선박 안전성 기준에 파도중 횡복원력이 포함되어야 한다. 또한, 선박안전성 기준은 기상예보 발령의 각종 기준에 맞추어 재조정 되어야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 자체 연구과제 “연안여객선의 복원성능 해석 및 안전성 연구(KD020)”의 결과의 일부입니다.

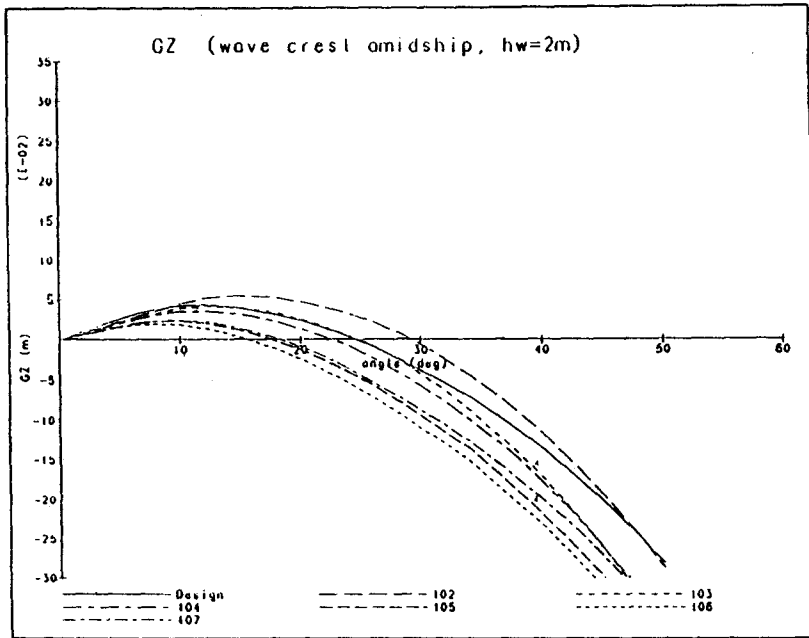


Fig. 3 GZ curve (wave crest amidship, hw=2m)
 (파고 2m의 파정이 선체 중앙에 왔을 때
 의 복원력 곡선)

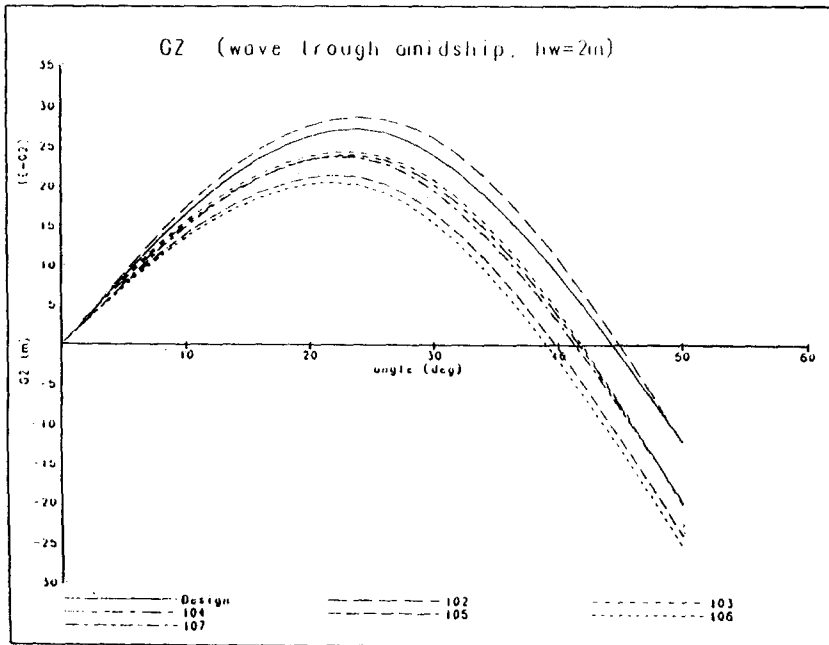


Fig. 4 GZ curve (wave trough amidship, hw=2m)
 (파고 2m의 파저가 선체 중앙에 왔을
 때의 복원력 곡선)

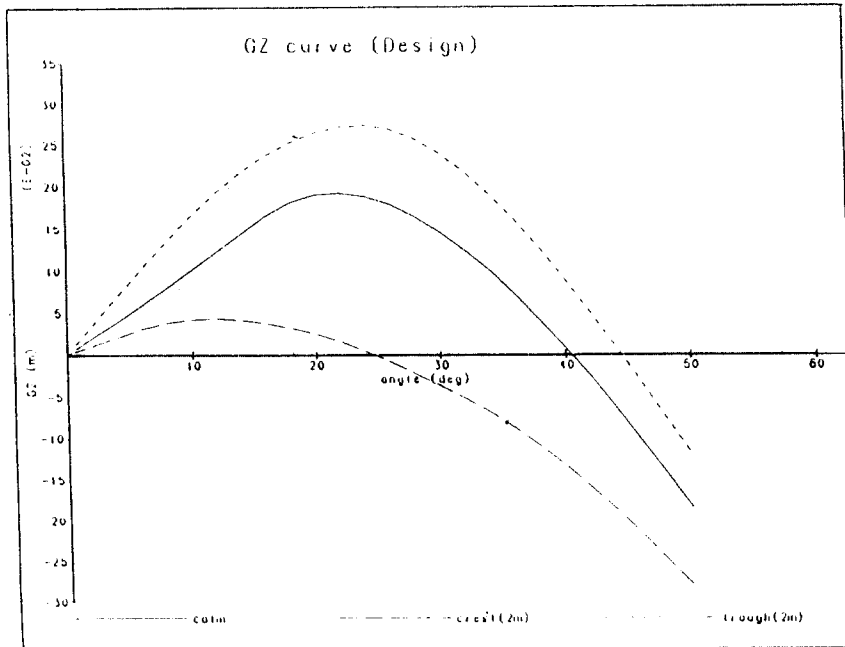


Fig. 5 GZ curve (Design)
(복원력 곡선 - Design)

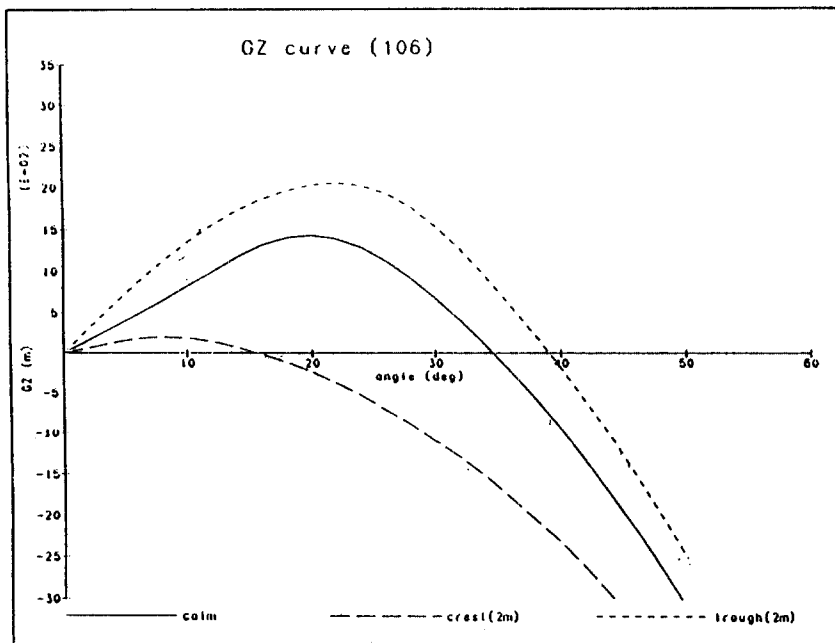


Fig. 6 GZ curve (102)
(복원력 곡선 - 102)

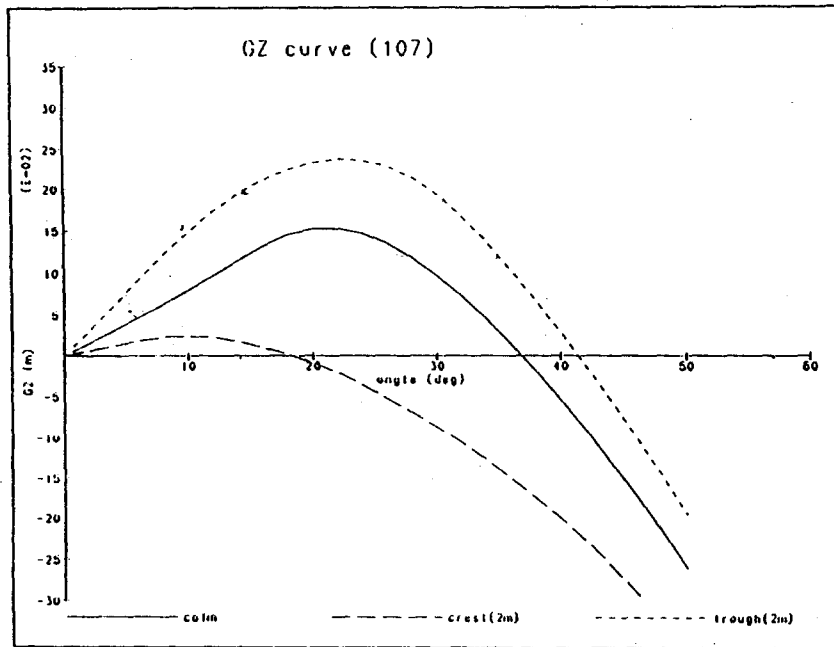


Fig. 7 GZ curve (103)
(복원력 곡선 - 103)

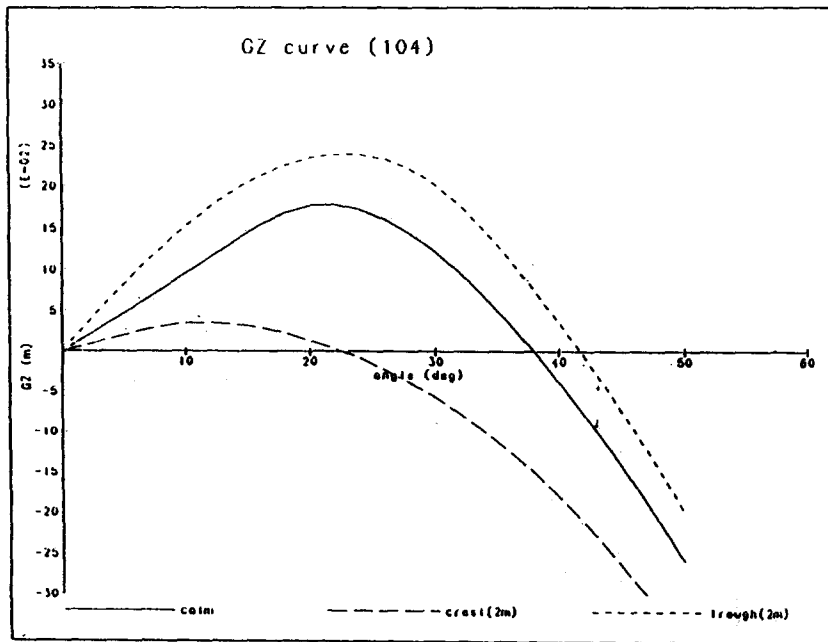


Fig. 8 GZ curve (104)
(복원력 곡선 - 104)

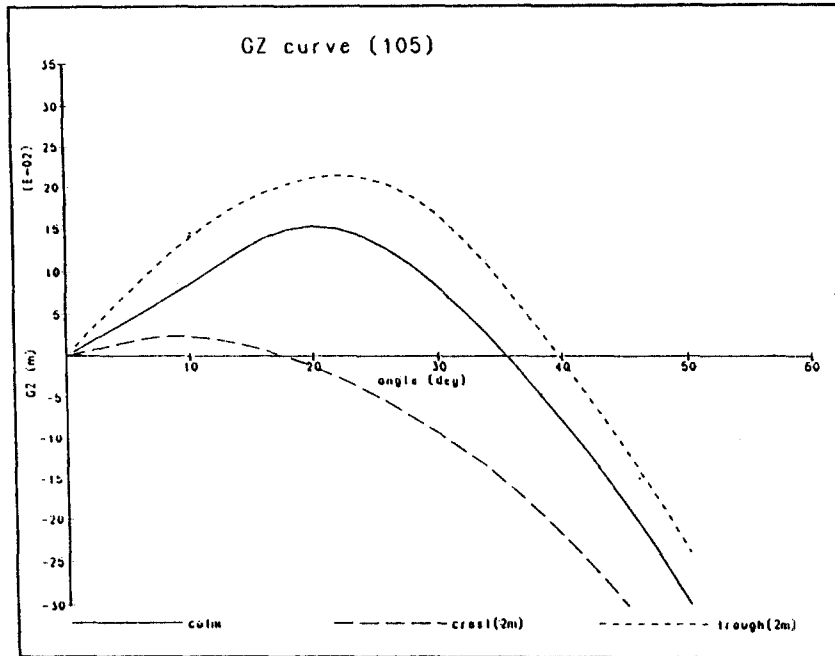


Fig. 9 GZ curve (105)
(복원력 곡선 - 105)

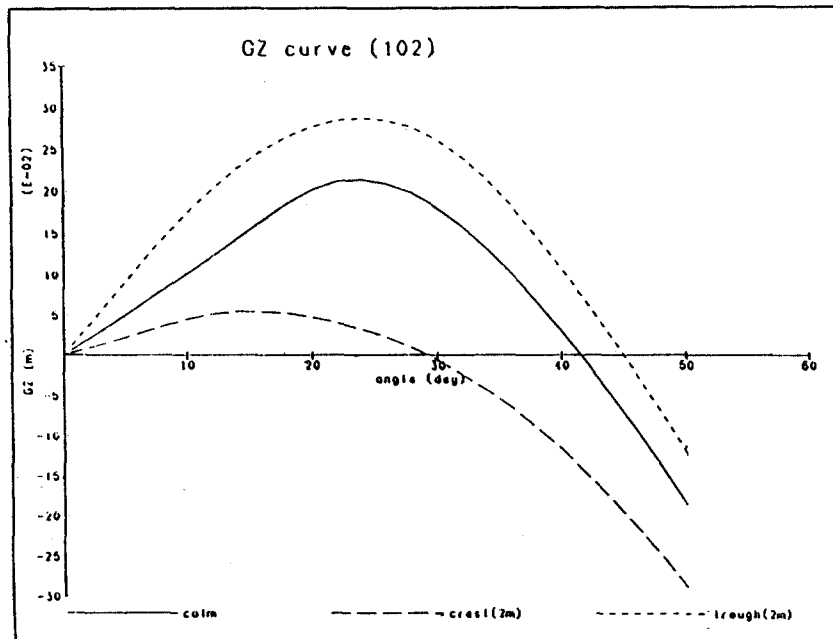


Fig. 10 GZ curve (106)
(복원력 곡선 - 106)

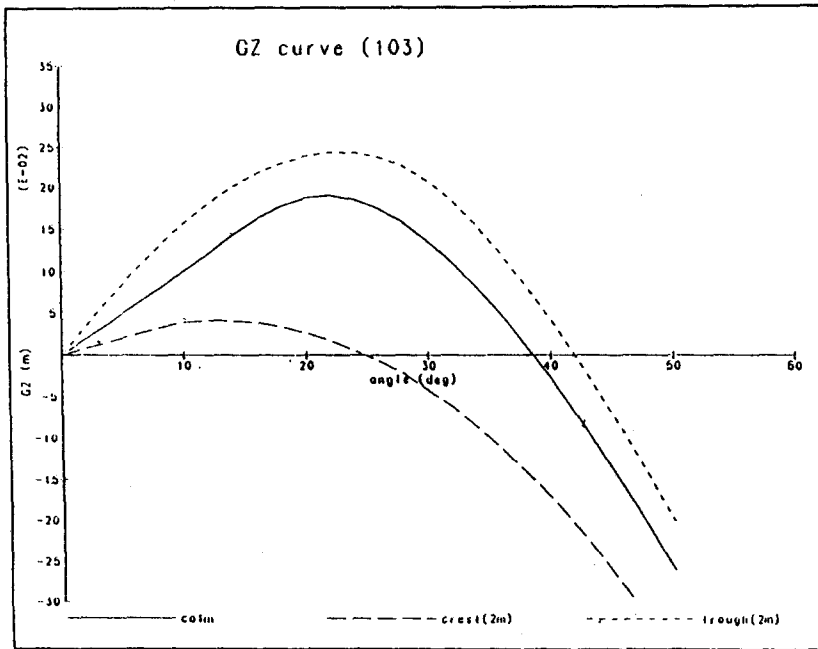


Fig. 11 GZ curve (107)
(복원력 곡선 - 107)

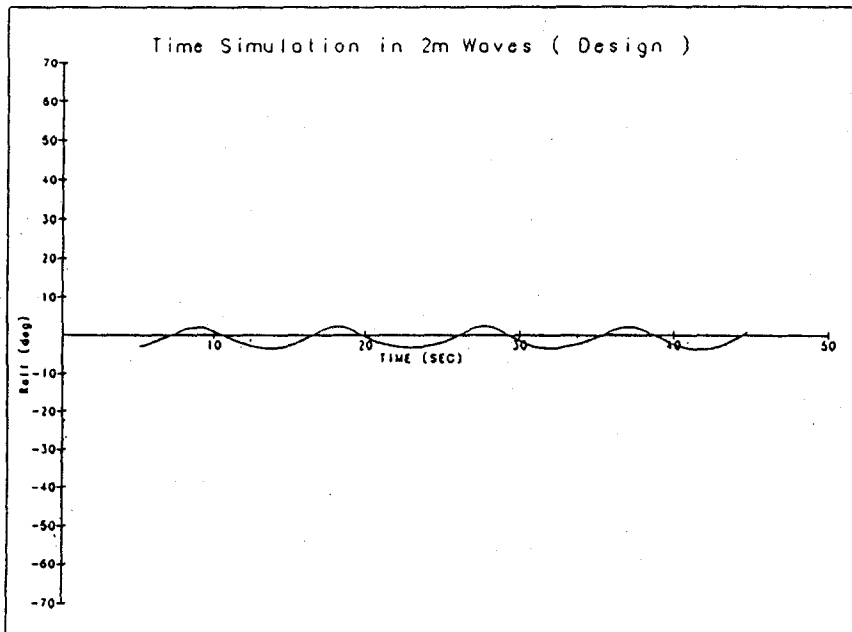


Fig. 12 Time Simulation in 2m waves (Design, $\beta=45^\circ$)
(2m 파도중 시뮬레이션 결과 - 설계상태, 파도방향 45°)

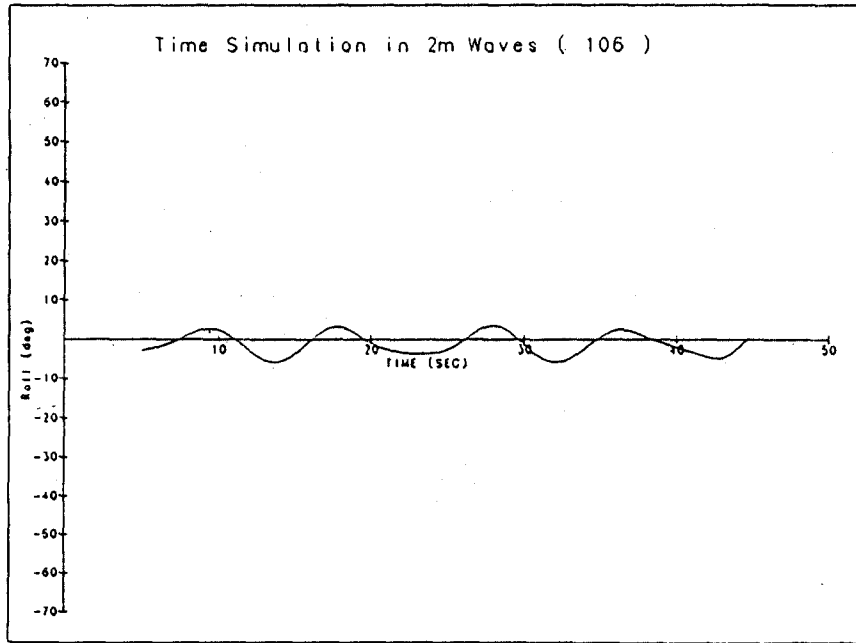


Fig. 13 Time Simulation in 2m waves (Departure, $\beta=45^\circ$)
 (2m 파도중 시뮬레이션 결과 - 출항상태, 파도방향 45°)

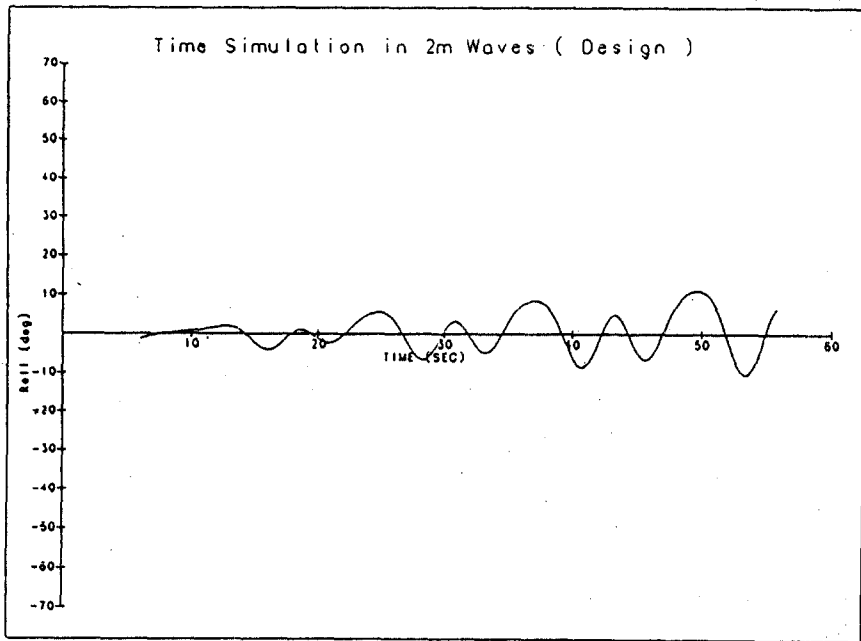


Fig. 14 Time Simulation in 2m waves (Design, $\beta=30^\circ$)
 (2m 파도중 시뮬레이션 결과 - 설계상태, 파도방향 30°)

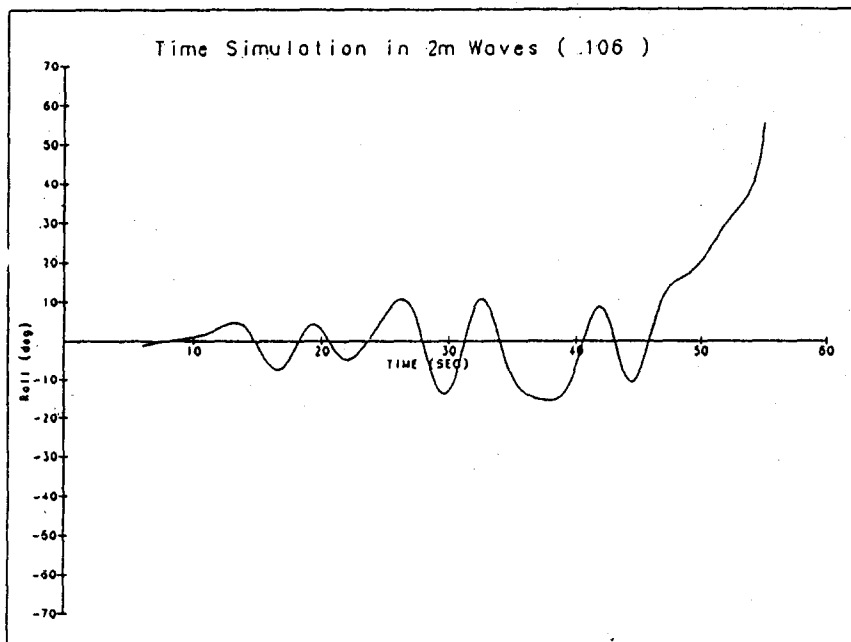


Fig. 15 Time Simulation in 2m waves (Departure, $\beta=30^\circ$)
(2m 파도중 시뮬레이션 결과 - 출항상태, 파도방향 30°)

참고문헌

- [1] 황중홀, "선박의 전복현상과 운항대책", 1980.
- [2] Hamamoto, M. and Tsukasa, Y., "An Analysis of Side Force and Yaw Moment on a Ship in Quartering Waves", J. of Soc. of Naval Arch. of Japan, vol. 171, 1992.
- [3] Kan, M. and Taguchi, H., "Capsizing of a Ship in Quartering Seas, (Part 4, Chaos and Fractals in Forced Mathieu Type Capsizing Equation)" J. of SNAJ, vol. 171, 1992
- [4] Hamamoto, M., Kim, Y.S., Matsuda, A. and Kotani, H., "An Analysis of a Ship Capsizing in Quartering Seas", J. of SNAJ, vol. 172, 1992
- [5] Iwashita, H., Ito, A., Okada, T., Ohkusu, M., Takaki, M. and Mizoguchi, S., "Wave Forces Acting on a Biunt Ship with Forward Speed in Oblique Sea", J. of SNAJ, vol. 171, 1992
- [6] Hamamoto, M, Matsuda, A. and Ise, Y., "Ship Motion and the Dangerous Zone of a Ship in Severe Following Seas", J. of SNAJ, vol. 175, 1994
- [7] Salvesen, N., Tuck, E.O., Faltinsen, O., "Ship Motions and Sea Loads," SNAME Transaction, Vol. 78, 1970.
- [8] Beck, R.F., et al., "PNA-Motions in Waves," SNAME, 1989.
- [9] Frank, W., "Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids," Report No. 2375, DTRC, 1967.