

선미파, 선미사파를 받는 선박의 과도 운동 추정에 대한 연구

권창섭^{†*}, 여동진^{**}, 이기표^{***}, 윤상웅^{***}

삼성중공업(주) 조선해양연구소^{*}, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{**}
서울대학교 조선해양공학과^{***}

Prediction of Extreme Ship Motions in Following and Quartering Seas

Chang Seop Kwon^{†*}, Dong Jin Yeo^{**}, Key Pyo Rhee^{***} and Sang Woong Yoon^{***}

Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd. ^{*}
Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI), KORDI^{**}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{***}

Abstract

Recently, researches to find rational mathematical model for prediction of capsizing have been progressed by ITTC. Lee(1997) developed a mathematical model which describes 6 DOF transient motions, such as capsizing, of a ship in regular waves. In this study, a mathematical model for prediction of capsizing in following and quartering seas is developed based on Lee's model. And factors affecting prediction of capsizing are analyzed through comparing simulation results with experimental results. Present simulation results are compared with ITTC bench mark test results. In rolling tests with beam seas and free runs with stern quartering seas, capsizing events are predicted well. But calculated roll angle is larger than experimental one. It is found that nonlinear manoeuvring coefficients don't affect the prediction of capsizing events.

※ Keywords: Capsize(전복), Following seas(선미파), Quartering seas(선미사파)

1. 서론

선박 전복에 관한 연구는 예전부터 이루어져 왔지만 많은 경우, 그 메커니즘이 명확히 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 이는 전복 현상의 원인이 매우 복잡하게 얽혀있다는 것을 반증한다고 볼 수 있다.

접수일: 2006년 8월 11일, 승인일: 2007년 1월 2일

†교신저자, changseop.kwon@samsung.com, 042-865-4370

파랑 중 선박의 거동에 대해서는 이동근 등(2006), 홍도천과 홍사영(2005)의 연구가 있었고, 이현호(1997)는 전복의 메커니즘을 살펴보기 위해 파랑 중 선박의 6 자유도 과도 운동을 모사할 수 있는 수학 모형을 제시하였다. 또한, 최근 ITTC 에서는 전복 예측과 관련하여 매우 활발한 연구가 진행되어 왔다. (조석규 등 2005) 참여한 팀들이 각자 다른 수학 모형을 사용하여 수치적으로 계산하고, 실험 결과와

비교를 통해 최적의 수학 모형을 찾기 위한 연구를 수행한 바 있다. Abdul(2000)는 수학 모형의 자유도가 전복 예측에 미치는 영향을 분석하였으며, 이승준(2006)은 1 자유도 모형으로 전복에 대한 이론연구를 수행하였다. Umeda(2000)는 비선형 조종계수가 브로우칭에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 이러한 기존의 연구들을 바탕으로 파랑 중에서 선박의 전복 발생 가능성과 전복에 이르는 소요시간을 예측하는 데 영향을 미치는 인자들을 분석하고자 한다.

2. 수학 모형

2.1 좌표계

좌표계는 Fig. 1 과 같이 z 축이 연직 상방을 향하는 우수 직각 좌표계로, S-x₀y₀z₀의 공간 고정 좌표계와 O-xyz 의 이동 관성 좌표계, 그리고 G-x_by_bz_b 의 물체 고정 좌표계로 구성된다. 이동 관성 좌표계의 z 방향 원점은 정수 중에서의 수선면을 기준으로 한다.

2.2 운동 방정식

2.1 과 같이 설정된 좌표계 상에서 선박의 운동은 다음과 같이 뉴턴 제 2 법칙으로 기술될 수 있다.

$$[Inertia + Added Inertia][Acceleration] = -F_{INERTIA+ADDED INERTIA} + F_{GRAV} + F_{EXTERNAL} \quad (1)$$

$$(F_{EXTERNAL} = F_{FroudeKrylov} + F_{Diffraction} + F_{Radiation} + F_{Rudder} + \dots)$$

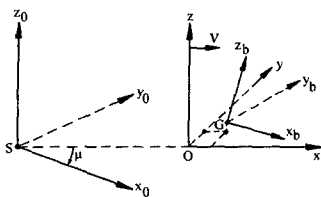


Fig. 1 Coordinates system

2.3 External force

2.2 절의 운동방정식에서 우변에 존재하는 힘 성분 중 선체에 작용하는 외력 항은 다음 식 (2)와 같이 Froude-Krylov force (Buoyancy force 포함), diffraction force, 그리고 선체의 운동으로 인한 radiation force 가 있고, 이외에도 조종 운동에 의한 힘, 타에 의한 힘, 추력 등으로 분류될 수 있다.

$$\begin{aligned} X_F &= X_{FK} + X_{RUD} + X_{T-R} \\ Y_F &= Y_{FK} + Y_{DIF} + Y_{RAD} + Y_{MAN} + Y_{RUD} \\ Z_F &= Z_{FK} + Z_{DIF} + Z_{RAD} \\ K_F &= K_{FK} + K_{DIF} + K_{RAD} + K_{RUD} + K_{DAMP} \\ M_F &= M_{FK} + M_{DIF} + M_{RAD} \\ N_F &= N_{FK} + N_{DIF} + N_{RAD} + N_{MAN} + N_{RUD} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 각 외력 성분에 대해 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

2.3.1 Buoyancy force, Froude-Krylov force

정압력과 입사파에 의한 압력을 선체의 표면에 대해 적분하여 부력과 Froude-Krylov force 를 계산한다.

2.3.2 Diffraction force (산란력)

Morrison 공식이 속도에 의한 점성력 항과 가속도에 의한 관성력 항으로 나누어지는 것을 활용하여, 파에 의한 힘을 상대속도와 상대가속도에 의한 성분으로 나누어 계산하였다 (이현호 1997).

2.3.3 Radiation force (방사력)

시간 영역에서 기억 효과를 고려하는 방법으로는 충격 응답 함수법을 이용한다.

2.3.4 조종 운동에 의한 힘

비선형 조종 계수는 Kijima et al.(1990)의 추정식을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} Y_{\infty}(v, r) &= \frac{1}{2} \rho L d U^2 \left[\begin{aligned} &Y'_{\infty} v + Y''_{\infty} r + Y'''_{\infty} |v| + Y''_{\infty} |r| + \\ &(Y'''_{\infty} v + Y'''_{\infty} r) v' r' \end{aligned} \right] \\ N_{\infty}(v, r) &= \frac{1}{2} \rho L^3 d U^2 \left[\begin{aligned} &N'_v v + N'_r r + N''_v |v| + N''_r |r| + \\ &(N'''_{vv} v + N'''_{rr} r) v' r' \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

2.3.5 횡동요 감쇠력

횡동요 감쇠력은 Ikeda(2004)의 Equivalent linear damping 을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Roll damping moment} = B_{eq} \left| \dot{\phi} \right| \quad (4)$$

$$B_{eq} = B_F + B_E + B_L + B_{BK} \quad (5)$$

3. 동유체력 계수 계산 결과 검토

본 연구에서 계산된 동유체력 계수 결과를 검증하기 위하여 S-175 선형에 대하여 서울대학교에서 보유한 Ship Motion Program(SMP)의 동유체력 계수 계산 결과와 비교하여 보았다. Fig. 2, 3 은 본 연구의 계산 결과와 SMP 의 계산 결과를 비교한 그림이다.

Fig. 2, 3 에 나타난 것과 같이 본 연구의 계산 결과와 SMP 의 계산 결과에 있어 부가질량과 감쇠계수를 비교한 결과 두 경우가 상당한 부분에 있어 매우 유사한 결과를 주는 것을 확인할 수 있었다.

4. ITTC 실험 결과와의 비교

본 연구에서 제안된 모형의 검증을 위하여 ITTC

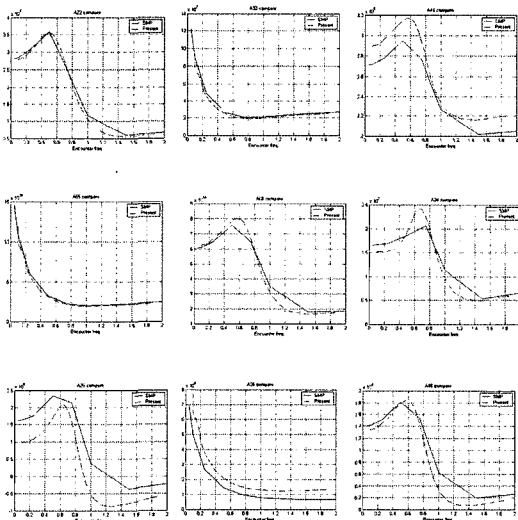


Fig. 2 Calculation results of added mass

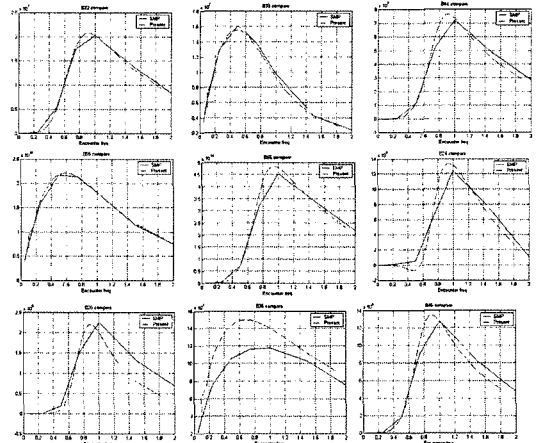


Fig. 3 Calculation results of damping coefficients

에서 수행한 선박의 전복 실험 결과와 비교하였다. 실험에 사용된 모형선은 어선 종류에 속하는 purse seiner 의 축척비 1/15 모형선으로써 제원과 선형은 다음의 Table 1 과 Fig. 4 에 나타났다.

4.1 GZ 계산 결과

Fig. 5 는 Ayaz(2003)의 GZ 계산 결과와 본 논문의 계산 결과를 비교한 것이다. 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 1 Principal particulars of purse seiner model

Lpp	2.3 m	X_{CG}	0.087 m (aft)
B	0.507 m	C_b	0.597
D	0.205 m	KG	0.224 m
T	0.176 m	GM	0.0667 m

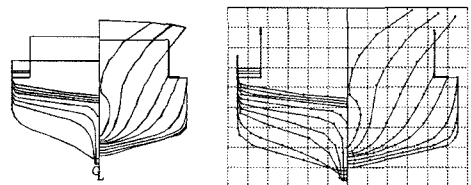


Fig. 4 Body plan

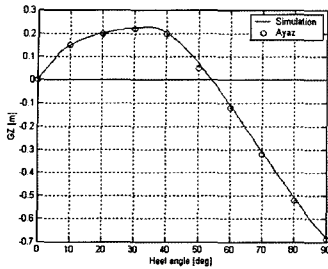


Fig. 5 GZ curve

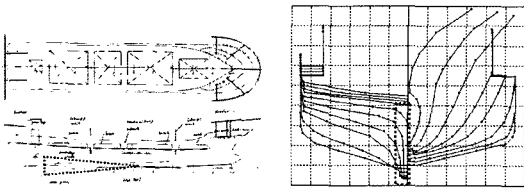


Fig. 6 Skeg

4.2 횡동요 감쇠의 보완

기존의 연구 결과가 횡동요 크기를 과도하게 추정하는 경향이 있었으므로 본 연구에서는 횡동요 감쇠력을 더욱 정확히 추정하기 위해 purse seiner 의 skeg 효과를 고려할 수 있는 방안을 살펴보았다. Fig. 6은 purse seiner 선형에 부착된 skeg를 나타낸 그림이다.

Skeg는 bilge keel과 유사한 작용으로 횡동요 감쇠를 일으킨다고 볼 수 있으므로, bilge keel 감쇠력을 추정하는 식을 응용하여 skeg에 의한 횡동요 감쇠력을 나타내는 식을 다음 식(6)~(8)과 같이 추가하였다(Ikeda 2004).

$$B_{SK} = B_{SKN} + B_{SKH} \tag{6}$$

$$B_{SKN} = \frac{8}{3\pi} \rho r_{cb}^3 b_{SK} \omega R_o f^2 C_D \tag{7}$$

$$B_{SKH} = \frac{4}{3\pi} \rho r_{cb}^3 D^2 \omega R_o f^2 \left\{ \begin{matrix} - \left(-22.5 \frac{b_{SK}}{\pi r f R_o} - 1.2 \right) \\ A_2 + 1.2 B_2 \end{matrix} \right\} \tag{8}$$

4.3 Roll decay test

Fig. 7은 보완된 수학 모형을 통한 수치모사 결과와 roll decay test 결과를 비교한 것이다. 좌측이

전진속도가 없는 경우, 우측이 전진속도가 있는 경우이다. 두 경우 모두 실험 결과에 근접하는 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

4.4 선회 시험 (타각 35°)

Fig. 8은 35° 선회 시험 결과이다. 좌측의 횡경사각은 실험 결과에 비해 대략 2°정도 작게 계산되었고, 우측의 선수 동요각은 실험 결과와 비슷한 경향을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

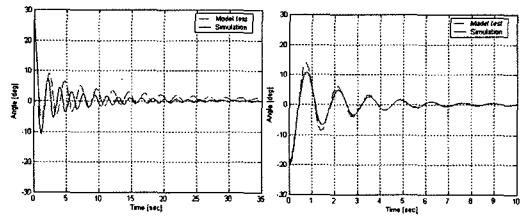


Fig. 7 Roll decay test

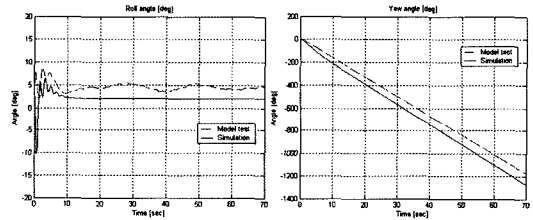


Fig. 8 Turning circle test

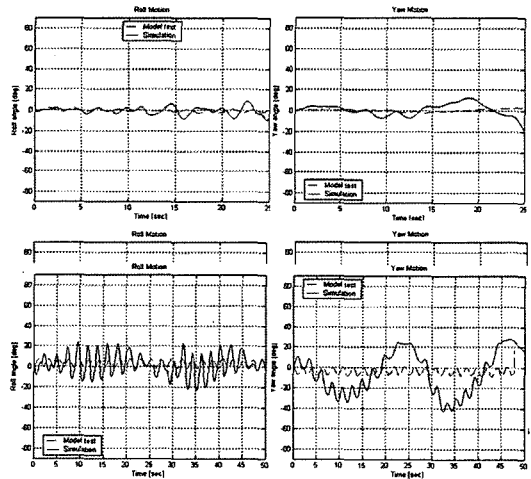


Fig. 9 Free running test (Fn=0.2)

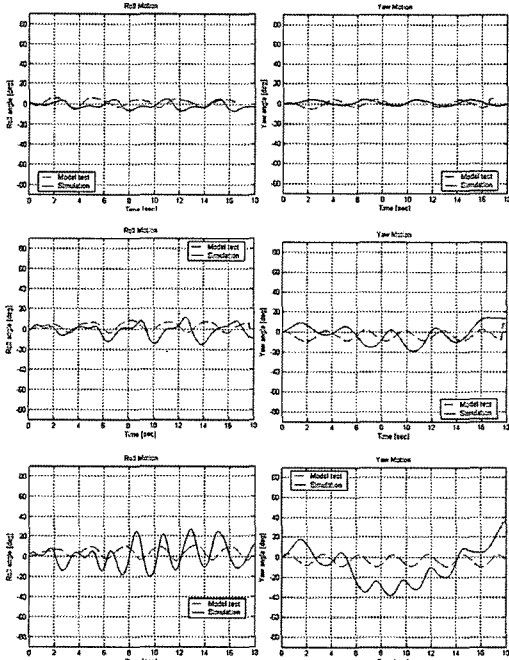


Fig. 10 Free running test (Fn=0.3)

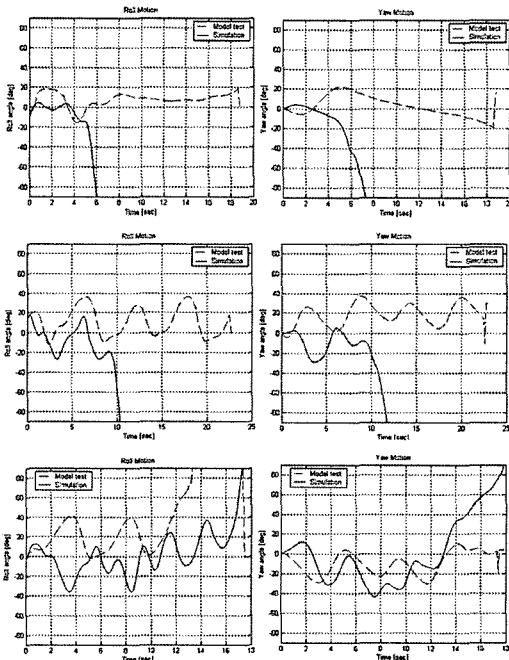


Fig. 11 Free running test (Fn=0.4)

4.5 자유항주 시험 ($H/\lambda = 1/15, \lambda/L = 1.5$)

Fig. 9~11 은 각각 F_n 가 0.2, 0.3, 0.4 인 경우에 대하여 자유항주 시험을 수치모사한 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 좌측이 횡동요각, 우측이 선수 동요각이며, 위에서부터 입사각이 5 도, 15 도, 30 도인 경우에 해당된다. 이 경우 실험 결과와 비교할 때 횡동요가 다소 크게 계산되는 문제가 있지만, 전복 예측 관점에서는 일치하는 결과를 보여주었다.

4.6 전복 예측에 대한 skeg 의 영향 분석

Table 2 는 skeg 의 영향을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때, 전복 발생 유무 예측 결과를 정리한 것이다. Skieg 의 영향을 고려하지 않았을 때는 실험 결과에 비해 전복이 많이 발생하는 것으로 예측되었지만, skeg 의 영향을 고려한 후에는 예측 결과가 실험 결과에 부합되는 것을 확인할 수 있다.

4.7 전복 예측에 대한 비선형 조종계수의 영향

비선형 조종 계수가 전복 예측에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 검토해 보았다. 비선형 조종 계수

Table 2 Effect of skeg on prediction of capsizing

F_n	Heading angle	Model test	W/ Skieg	W/O Skieg
0.0	$90^\circ (\lambda/L=1.0)$	-	-	-
	$90^\circ (\lambda/L=1.5)$	-	-	-
0.2	5°	-	-	-
	15°	-	-	-
	30°	-	-	Capsize
0.3	5°	-	-	-
	15°	-	-	Capsize
	30°	-	-	Capsize
0.4	5°	Capsize	Capsize	Capsize
	15°	Capsize	Capsize	Capsize
	30°	Capsize	Capsize	Capsize

Table 3 Effect of nonlinear manoeuvring coefficients on prediction of capsizing

Fn	Heading angle	Model test	W/	W/O
			Nonlinear	Nonlinear
0.0	90°($\lambda/L=1.0$)	-	-	-
	90°($\lambda/L=1.5$)	-	-	-
0.2	5°	-	-	-
	15°	-	-	-
	30°	-	-	-
0.3	5°	-	-	-
	15°	-	-	-
	30°	-	-	-
0.4	5°	Capsize	Capsize	Capsize
	15°	Capsize	Capsize	Capsize
	30°	Capsize	Capsize	Capsize

는 Kijima et al.(1990)의 추정식을 이용하여 계산하였다. Table 3은 비선형 조종 계수가 전복의 예측에 미치는 영향을 분석한 것이다. 선형 조종 계수만을 고려했을 때와 예측 결과에 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 선박의 전복 현상을 예측하기 위해서 이현호(1997)가 제시한 수학 모델을 바탕으로 Ikeda의 횡동요 감쇠력 추정식을 추가하여 수학 모델을 정립하였다. 정립된 수학모델에 대한 검증을 위하여 우선 서울대학교에서 보유한 SMP의 S-175 컨테이너선에 대한 동유체력 계수 계산 결과와 비교를 수행하였다. 이 결과 부가질량과 감쇠계수에 대하여 두 결과가 비슷한 경향을 보여주는 것을 확인하였다.

실험 결과와의 비교를 통한 검증을 위해서는 Purse seiner 선형에 대한 실험 결과와 비교하였다. 우선 Ayaz의 GZ 계산 결과와 본 연구의 계산 결과를 비교하여 이 값이 매우

정확하게 계산되었음을 확인하였다.

기존의 연구 결과가 횡동요 크기를 과도하게 추정하는 경향이 있었으므로 본 연구에서는 횡동요 감쇠력을 더욱 정확히 추정하기 위해 skeg 효과를 고려할 수 있는 감쇠력 모형을 제안하였다. 이 결과 skeg에 의한 감쇠력 모형이 횡동요 예측 및 전복 발생 예측에 있어 실험 결과에 보다 일치하는 결과를 보이는 것을 확인하였다.

비선형 조종 계수들을 고려하였을 경우 전복 예측에 발생하는 차이를 확인한 결과 이러한 비선형 조종 계수들의 존재가 전복 발생 유무에 차이를 발생시키지 않는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 이동근, 홍사영, 이경중, 2006, “파랑 중 손상선박의 거동에 관한 이론적 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 1 호, pp. 1-14.
- 이승준, 2006, “횡동요에 기인하는 전복에 대한 1-자유도계 모형의 이론해석,” 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 1 호, pp. 22-31.
- 이현호, 1997, 유체력의 시간 변화를 고려한 규칙파 중 선박의 안정성 해석, 서울대학교 석사학위논문
- 조석규, 홍사영, 이경중, 경조현, 김영식, 2005, “ITTC 손상선박 안정성 수치해석 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 5 호, pp. 435-447.
- 홍도천, 홍사영, 2005, “손상침수로 자세 변화된 바지형 선박의 파랑하중해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 4 호, pp. 379-387.
- Abdul M., 2000, Numerical Modeling on Extreme Motions and Capsizing of an Intact Ship in Following and Quartering Seas, Osaka University Ph. D. Dissertation.
- Ikeda, Y., 2004, “Prediction Methods of Roll Damping of Ships and Their Application to Determine Optimum Stabilization Devices,”

Marine Technology, Vol. 41, No. 2, pp. 89-93.

- Kijima, K., Nakiri, Y., Tsutsui, Y. and Matsunaga, M., 1990, " Prediction Method of Ship Manoeuvrability in Deep and Shallow Water," MARSIM & ICSM 90, Tokyo, Japan.
- Naoya U., 1999, "Nonlinear Dynamics of Ship Capsizing Due to Broaching in Following and Quartering Seas," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 4, pp. 16-26.
- Zafer A., 2003, Manoeuvring behaviour of Ships in Extreme Astern Seas, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Ph. D. Dissertation.
- Zafer. A., Spyrou, K.J., Vassalos, D., 2001, "An Improved Numerical Model for the Study of Controlled Ship Motions in Extreme Following and Quartering Seas," The Proceedings of IFAC Conference on Control Application in Marine Systems, Glasgow, UK.



< 권 창 섭 >



< 여 동 진 >



< 이 기 표 >



< 윤 상 웅 >