

주변 유체를 고려한 선박 충돌해석 기법 연구

이상갑^{†*}, 이정대^{**}

한국해양대학교 조선해양시스템공학부*
대우조선해양주식회사 구조 R&D TEAM**

Ship Collision Analysis Technique considering Surrounding Water

Sang-Gab, Lee^{†*} and Jeong-Dae, Lee^{**}

Korea Maritime University, Division of Naval Architecture and Ocean System Engineering*
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Ship & Marine Structure R&D Team**

Abstract

Collision analysis problems between ship to ship can be generally classified into the external mechanics(outer dynamics) and internal mechanics(inner dynamics). The former can be also dealt with the concept of fluid-structure interaction and the use of rigid body dynamic program, depending on the ways handling the hydrodynamic pressure due to surrounding water. In this study, full scale ship collision simulation was carried out, such as a DWT 75,000 ton striking ship collided at right angle to the middle of a DWT 150,000 struck ship with 10 knots velocity, coupling MCOL, a rigid body mechanics program for modeling the dynamics of ships, to hydrocode LS-DYNA. It could be confirmed that more suitable damage estimation would be performed in the case of the collision simulations with consideration of surrounding water through the comparison with the collision simulation results of fixed struck ships without it. Through this study, the opportunity could be obtained to establish a more effective ship collision simulation technique between ship to ship.

※Keywords: Collision analysis between ship to ship(선박 간 충돌해석), External mechanics or outer dynamics(외부 역학적 문제), Internal mechanics or inner dynamics(내부 역학적 문제), Ship motion program MCOL(선박 운동 프로그램 MCOL), Full scale ship collision simulation(실선 충돌 수치 시뮬레이션), Surrounding water(주변 유체)

접수일: 2006년 12월 26일, 승인일: 2007년 3월 31일

† 교신저자: sglee@hhu.ac.kr, 051-410-4306

1. 서론

선박 간 충돌해석 문제는 일반적으로 외부 역학적 문제와 내부 역학적 문제로 분류할 수 있다 (Petersen 1982, Pedersen 1995). 전자는 충돌력 (collision force)과 충돌선 및 피충돌선의 침수표면(wet surface)에 작용하는 동유체력 등의 작용 하에 발생하는 두 선박의 강체운동을 취급하고, 후자는 충돌 시 두 선박의 구조적 손상 거동을 평가한다.

이러한 두 역학적 문제는 별개로 다루어지거나 어떤 경우에는 동시에 함께 취급되기도 한다. 외부 역학적 문제는 주위 유체로 인한 동유체력을 취급하는 방법에 따라 크게 2가지로 다루어질 수 있다: 유체-구조 연성 개념과 강체 동역학 프로그램. 동유체력은 크게 관성력(inertia force), 복원력(restoring force), 점성항력(viscous drag force)과 조파력(wave force) 등으로 나눌 수 있다 (Petersen 1982, Pedersen 1995, Suzuki et al. 2001, Le Sourne et al. 2001).

유체-구조 연성 기법은 크게 ALE(Arbitrary Lagrangian-Euler) Coupling과 General Coupling으로 나눌 수 있고, Vreedeledt et al.(1993), Lensealink and Thung(1993), Che and Jang (1995), Mizukami et al.(1996) 및 Gu and Wang(2001) 등은 비선형 동적 유한요소 프로그램 LS-DYNA(LSTC 2003)와 MSC/DYTRAN(MSC 2002) 등을 사용하여 ALE Coupling을 이용한 실선 충돌 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그러나 전산기 환경이 급격히 발전하였고 사용 프로그램의 기법이 고도화되고 있지만 해석 시간이 매우 크고, 구조물과 주위 유체의 유한요소 절점들이 합병(merge)되어야 하는 등의 제약으로 충돌 시 두선박의 큰 거동을 정확히 나타내기가 곤란하다.

강체 동역학 프로그램 중의 하나인 선박 운동 프로그램 MCOL을 LS-DYNA와 연계되어 실선 충돌 수치 시뮬레이션이 다수 수행되었다(Kuroiwa et al. 1995, Kuroiwa 1996, Kitamura et al. 1998, Kitamura 2000). 선박의 강체운동에서 회전이 작다는 단점이 있었으나, 동유체 점성 감쇠(hydrodynamic viscous damping)와 대회전 역학

(large rotation mechanics)을 도입하여 보다 개선된 MCOL 프로그램이 개발되어 선박-잠수함 및 선박-선박 간의 충돌해석을 수행하여 실험과 사고 결과와의 비교 검토를 통한 검증도 수행되었다(Le Sourne et al. 2001, 2003). MCOL은 LS-DYNA에서 *BOUNDARY_MCOL option을 통하여 연계되어 있으며, Fig. 1은 그들의 외부 충돌 역학적 개념을 보여주고 있다. 매 시간 단계에서 내부 역학적 문제와 MCOL에 필요한 충돌력 계산은 LS-DYNA에서 수행되고, 이 충돌력을 MCOL이 전달 받아서 두 선박의 강체로서의 운동을 계산하여 새로운 두 선박의 위치를 LS-DYNA에 전달한다(LSTC 2003). MCOL에서의 계산 시간은 LS-DYNA에 비하여 무시할 수 있을 정도로 짧은 편이다.

본 논문에서는 LS-DYNA와 MCOL을 연계하여 DWT 75,000톤 충돌선이 DWT 150,000톤 피충돌선의 선측 중앙에 수직으로 충돌하는 시나리오에 대하여 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하고, 피충돌선이 고정된 시나리오의 결과와 비교 검토함으로써 선박 충돌 시 발생하는 주변 유체의 영향을 고찰하고자 하였다.

2. MCOL의 구성

MCOL은 두 선박의 강체 운동과 그에 따른 주변 유체의 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 6개의 입력 파라메타(input parameters)가 필요하다(Ferry 2002): 질량 행렬(mass matrix), 유체

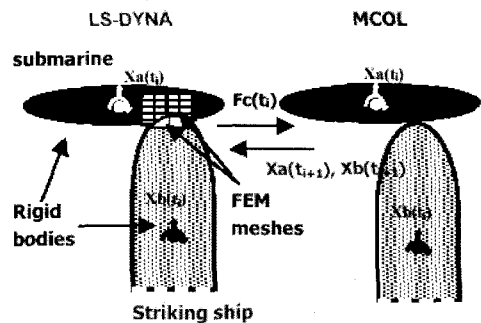


Fig. 1 Collision simulation system of LS-DYNA and MCOL(Le Sourne et al. 2001)

정복원 행렬(hydrostatic restoring matrix), 부력 기준 파라메타(bouyancy reference parameter), 부가관성 행렬(added mass matrix), 점성 감쇠 및 양력면(viscous damping and lifting surface) 및 조파감쇠 행렬(wave damping matrix).

질량 행렬

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, m : 강체 질량,
 I : 강체질량 관성모멘트.

유체 정복원 행렬

$$K = \rho g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_w & A_w y_w & -A_w x_w & 0 \\ 0 & 0 & A_w y_w & J_{wx} & -J_{wx y} & 0 \\ 0 & 0 & -A_w x_w & -J_{wxy} & J_{wy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, A_w : 수선면적,
 x_w, y_w : 이동좌표계에서의 수선면적 도심좌표,
 J_{wx}, J_{wy}, J_{wxy} : 수선면적 관성모우멘트.

부력 기준 파라메타

$$[x_b, y_b, z_b, W, B, \phi, \theta, \psi] \quad (3)$$

여기서, x_b, y_b, z_b : 이동좌표계에서의 부심좌표,
 W : 선박 중량,
 B : 선체에 작용하는 부력,
 ϕ, θ, ψ : 이동좌표축에 대한 초기각도.

부가관성 행렬

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & | & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & | & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & | & Z_p & Z_q & Z_r \\ \hline K_u & K_v & K_w & | & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & | & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & | & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, M_{ij} : i 방향 가속도에 기인하는 j 방향의 부가관성.

점성 감쇠 및 양력면

$$\left[\rho, \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}, C_D, A, n_x, n_y, n_z, x_c, y_c, z_c \right] \quad (5)$$

여기서, ρ : 물의 밀도,
 $\partial C_L / \partial \alpha$: 날개의 받음각,
 C_D : 항력계수,
 A : 양력면의 면적,
 n_x, n_y, n_z : 양력면의 수직벡터,
 x_c, y_c, z_c : 양력면의 압력 중심.

조파감쇠 행렬

$$[\omega, \text{Damping matrix } (C_{ij})] \quad (6)$$

여기서, ω : 파 주파수(encounter frequency),
 $C_{ij} = f(\omega)$: 조파 감쇠력.

3. 충돌 시나리오 및 시뮬레이션 모델

DWT 75,000톤 충돌선이 DWT 150,000톤 피충돌선의 선측 중앙에 수직으로 10노드로 충돌하는 시나리오에 대하여 피충돌선이 고정된 경우와 LS-DYNA와 MCOL을 연계하여 주위의 유체의 영향을 고려한 시나리오에 대하여 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하고 그들의 결과를 비교 검토 하였다. Fig. 2는 충돌선이 피충돌선의 중앙부에 수직으로 충돌하는 전체 유한요소 모델을 보여주고 있다. 충돌 수치 시뮬레이션을 위한 유한요소 모델

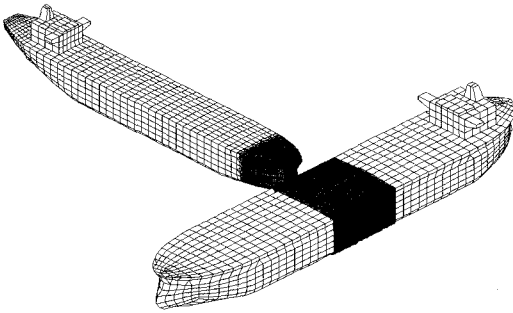


Fig. 2 Total configuration of finite element mesh

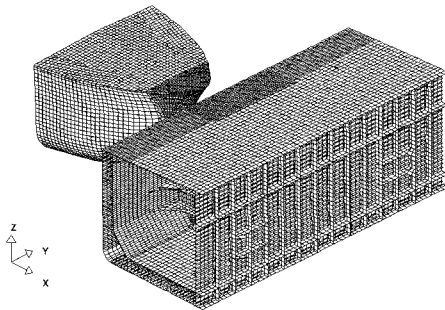


Fig. 3 Deformable body configuration of finite element mesh

의 전선은 강체로, 충돌 부위는 파단이 가능한 탄소성 재료로 구성되어 있다. Fig. 3은 강체부위를 제외한 유한요소 모델을 보여 주고 있다.

충돌 및 좌초 등의 수치해석 시뮬레이션에서의 구조부재의 파단(fracture) 특성으로서 파단이 발생하는 부재의 두께에 대한 유한요소 크기의 비와 재료의 파단 변형률(failure strain)은 연관성이 있고(Tornquist 2003, 이상갑 등 2006), 그 이외에도 용접선을 기준으로 하는 파단조건 등이 있다. 그러나 본 연구에서는 주변유체의 고려 유무에 대한 영향을 비교 검토하는 것으로서 용접선 파단기준은 사용하지 않았으며, 상세 유한요소는 대체로 25~30 정도의 부재의 두께에 대한 유한요소 크기의 비를 갖고 0.2의 파단 변형률을 사용하였다.

충돌선 및 피충돌선에 사용된 유한요소의 개수는 Table 1에 요약되어 있다. 충돌선 및 피충돌선은 크게 연강(mild steel)과 고장력강(high tensile

Table 1 Finite element numbers of each ship model

Element		Type	Striking	Struck
Deformable body	Nodes		18,314	38,301
	Shell elements		20,066	41,766
	Beam elements		7,591	16,101
Rigid body	Nodes		1,512	16,382
	Shell elements		2,006	16,382

Table 2 Material properties

Property	Mild steel	High tensile steel
Young's modulus	206.0 GPa	206 GPa
Density	$7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Yield stress	235.0 MPa	315.0 MPa
Ultimate stress	445.0 MPa	525.0 MPa
Failure strain	0.2	0.2
Dynamic yield stress constants	$D=40.4 \text{ s}^{-1}$ $p = 5$	$D=3200.0 \text{ s}^{-1}$ $p = 5$

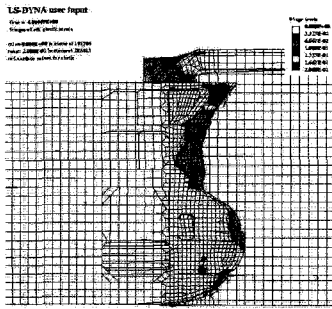
Table 3 Stress & plastic strain relationship

Property	Mild steel			
	Plastic strain	0.000	0.0158	0.198
Stress (MPa)	235.0	245.0	445.0	445.0
Property	High tensile steel			
	Plastic strain	0.000	0.0158	0.198
Stress (MPa)	315.0	325.0	525.0	525.0

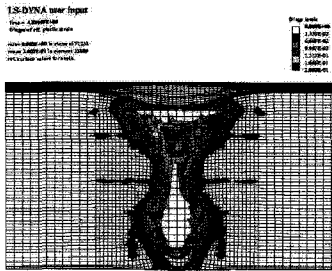
steel, AH32)으로 구성되어 있으며, 재료 물성치는 Table 2에 요약되어 있고, 응력과 소성변형률의 관계는 Table 3과 같다. MCOL에 필요한 입력 파라메타 중 부가관성 및 조파감쇠 행렬은 ADMAS 프로그램(조호제 1991)을 사용하여 계산하였다.

4. 충돌 수치 시뮬레이션

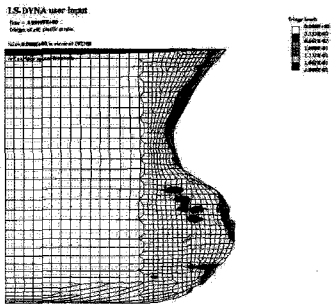
실선 충돌 수치 시뮬레이션의 결과로서 충돌선과 피충돌선의 파손상태를 유체를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 각각 Fig. 4와 5에 나타내었다. 파손상태를 보다 자세히 살펴보기 위하여 강



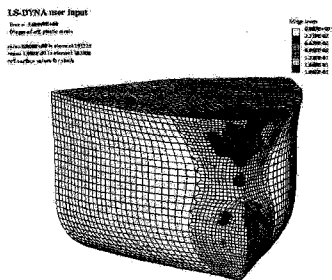
(a) bow and side structure



(b) side structure

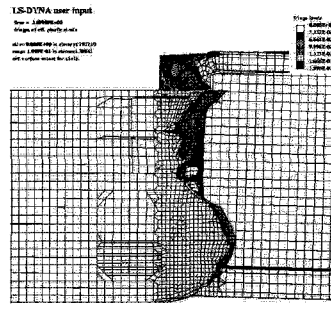


(c) bow structure

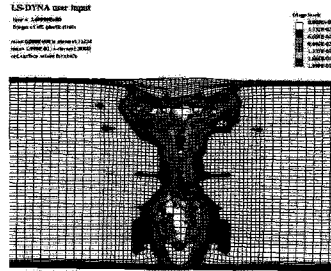


(d) bow structure

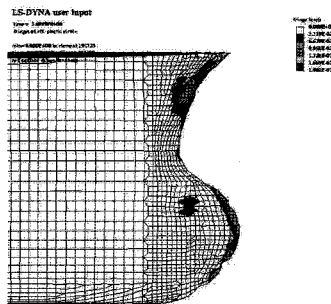
Fig. 4 Damage configuration of simulation w/o surrounding fluid (t=4.8 sec)



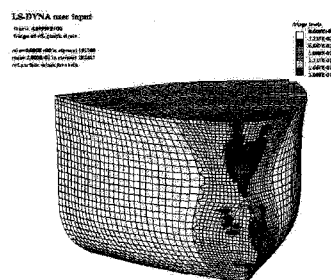
(a) bow and side structure



(b) side structure

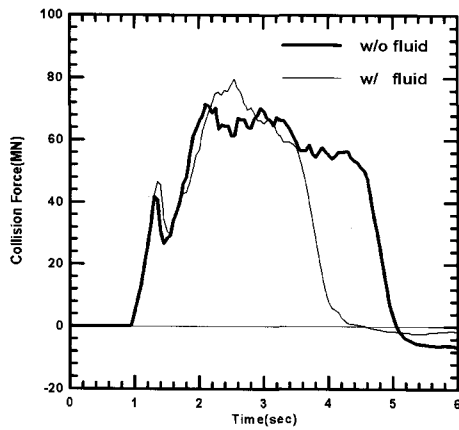


(c) bow structure

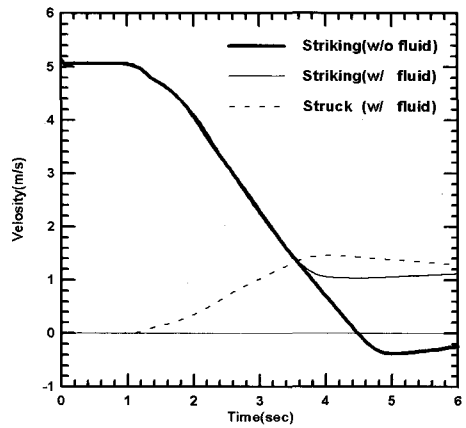


(d) bow structure

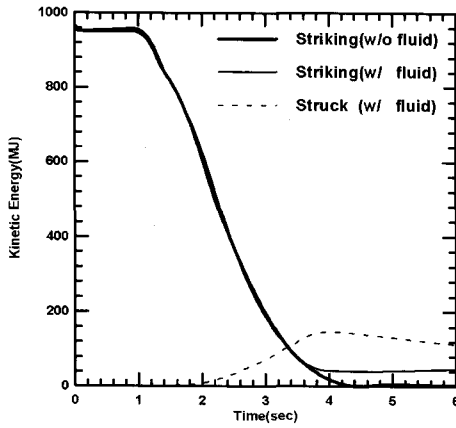
Fig. 5 Damage configuration of simulation w/ surrounding fluid (t=3.6 sec)



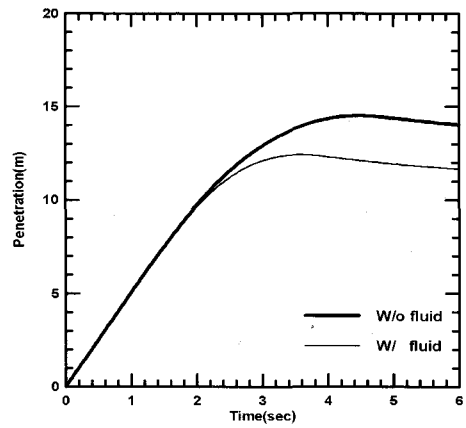
(a) collision force



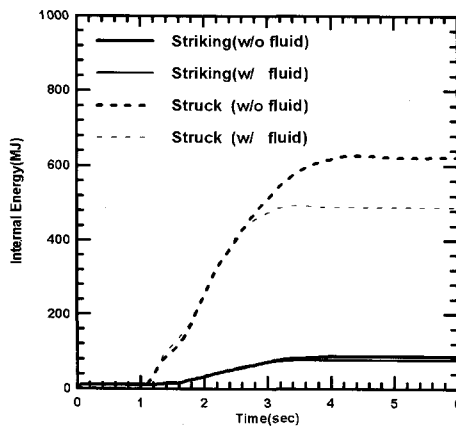
(d) collision velocity



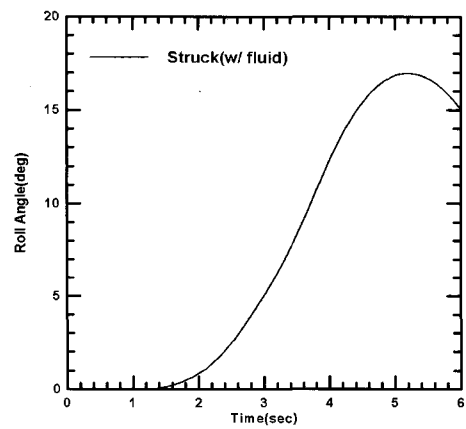
(b) kinetic energy



(e) penetration



(c) internal energy



(f) rolling angle of struck ship

Fig. 6 Responses of collision simulation

체부위를 제거하였다. 충돌력, 충돌 운동에너지, 흡수에너지, 충돌속력, 관입량, 그리고 피충돌선의 롤링각도 등을 Fig. 6(a)-(f)에 각각 나타내었다.

Fig. 4 및 5에서 알 수 있듯이 충돌선의 선주구조부는 피충돌선의 선측구조에 비하여 손상이 상당히 작은 것으로 보아 전자의 강성이 후자에 비하여 매우 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 6(d)에서 확인할 수 있듯이 유체를 고려하지 않았을 경우에는 충돌선이 충돌 후 약 4.8초에서, 유체를 고려하였을 경우에는 약 3.6초에서 리바운딩(rebounding)이 발생하였다. 피충돌선이 고정되어 있을 경우에는 주위 유체를 고려하여 피충돌선이 운동을 하는 경우에 비하여 Fig. 6(e)에서 예상할 수 있듯이 충돌선이 피충돌선에 훨씬 크게 관입되었고, 그에 따라 전자의 경우가 피충돌선 선측구조에 손상이 훨씬 크게 발생하였다.

Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 피충돌선이 고정되어 있는 경우가 주위 유체를 고려한 경우에 비하여 충돌력의 최대치는 약간 작지만 충돌선의 리바운딩이 늦게 발생함으로써 보다 약 1초 이상 동안 훨씬 크게 발생하였다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 충돌선이 리바운딩되는 순간까지는 충돌선의 운동에너지의 감소는 같은 경향을 보였고, 주위 유체를 고려한 경우 충돌선은 리바운딩된 후에도 운동에너지를 작지만 유지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 후자의 경우 약 2초 정도부터 피충돌선의 운동에너지가 발생하기 시작하다 충돌선이 리바운딩하는 약 4초 후에는 점점 감소하기 시작함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6(d)에서 알 수 있듯이 피충돌선의 충돌속력의 거동에서 유추할 수 있다.

Fig. 6(c)에서 알 수 있듯이 충돌선의 경우 흡수에너지의 거동은 비슷하다는 것을 알 수 있다. 그러나 피충돌선의 경우에는 예상할 수 있듯이 피충돌선이 고정된 경우에 피충돌선의 선측구조가 더 큰 에너지를 흡수하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(f)는 주위 유체를 고려한 경우 피충돌선이 충돌선에 의해 충돌되면 롤링이 발생하기 시작하여 약 5초 정도에서 약 17도 정도로 최대치에 도달하였고, 그 후에 롤링이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 선박 운동 프로그램 MCOL을 LS-DYNA와 연계하여, DWT 75,000톤의 충돌선이 DWT 150,000톤의 피충돌선의 중앙에 수직으로 10노트의 속력으로 충돌하는 실선 충돌 수치 시뮬레이션을 수행하였고, 유체의 영향을 고려하지 않은 고정된 피충돌선과의 충돌 시뮬레이션 결과와의 비교 검토를 통하여 주변 유체를 고려하는 것이 보다 적합한 충돌 선박의 손상 평가를 수행할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구를 통하여 보다 효과적인 선박 간 충돌 수치 시뮬레이션의 기법을 확립할 수 있는 계기를 마련할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 이상갑, 윤여훈, 이정대, 2006, "소형유조선 이중저 구조기준 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 121-133.
- 조효제, 1991, 다방향파의 영향에 관한 연구, 박사학위논문, 동경대학교.
- Che, J. and Jang, K., 1995, "Numerical Simulation of Structural Response of D/H VLCC in Collision," Proceedings of PRADS'95, Korea, pp. 2.1036-2.1047.
- Ferry M., 2002, MCOL-theoretical manual, Technical Report, Principia Marine.
- Gu, Y. and Wang, Z.L., 2001, "An Inertia Equivalent Model for Numerical Simulation of Ship-Ship Collisions," Proceeding of ICCGS'01, Copenhagen, pp. 155-160.
- Kitamura, O., 2000, "Buffer Bow Design for the Improved Safety of Ships," Ship Structure Symposiumn Virginia.
- Kitamura, O., Kuroiwa, T. Kawamoto, Y. and Kaneko, E., 1998, "A study on the Improved Tanker Structure against Collision and Grounding," Proceedings of PRADS'98, pp. 173-179.
- Kuroiwa, T., 1996, "Numerical simulation of

actual collision & grounding accidents," Proceedings of International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, pp. 7.1-7.12.

- Kuroiwa, T. Kawamoto, Y., Kusuba, S. and Stillman, D., 1995, "Numerical Simulation of Collision and Grounding of Ships," Proceedings of MARIEN'95, pp. 66-70.
- Le Sourne, H., Donner, R., Besnier, F. and Ferry, M., 2001, "External dynamic of ship-submarine collision," Proceedings of ICCGS'01, Copenhagen, pp. 137-144.
- Le Sourne, H., Couty, N., Besnier, F., Kammerer, C. and Legavre, H., 2003, "LS-DYNA Applications in Shipbuilding," Proceeding of 4th European LS-DYNA Users Conference, A.II, pp. 1-16.
- Lenselink, H. and Thung, K.G., 1993, "Numerical Simulations of the Dutch-Japanese Full Scale Ship Collision Tests," Proceedings of the 3rd International Symposium on Structural Crashworthiness and Failure, Liverpool.
- LSTC, 2003, LS-DYNA User's Manual, Version 970, Livermore Soft Technology Corp.
- Mizukami, M., Masayuki, T., Nagahama, S. and Kamei, S., 1996, "Collision Simulation of a Double Hulled Structure with Uni-Directional Girder System," Proceedings of ISOPE'96, Los Angeles.
- MSC, 2002, MSC User's Guide, Version 2002 r2, MacNeal-Schwendler Corp..
- Pedersen, P.T., 1995, "Collision and grounding mechanics," Proceedings of WEGEMT'95, Copenhagen, 1, pp. 125-157.
- Petersen, M.J., 1982, "Dynamics of ship collisions," Ocean Engineering, 9, pp. 259-329.
- Suzuki, K., Ohtsubo, H. and Saiji, K.S., 2001, "A Simplified Internal and External Mechanics Model for Ship's Collision," Proceedings of PRADS'01, Shanghai, pp. 1301-1307.
- Tornqvist R., 2003, Design of Crashworthy Ship Structures, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark.
- Vredeveltdt, A.W., Wevers, L.J. and Lemmen, P.P.M., 1993, "Full Scale Collision Tests," Proceedings of the 3rd International Symposium on Structural Crashworthiness and Failure, Liverpool.



< 이상갑 >



< 이정대 >