

## 선수 충돌 상황별 손상거동에 관한 연구

### A Study on the Extents of Damage of a Bow Structure According to Collision Scenario

김 귀 미\*      김 근 원\*      신 기 수\*  
Kui-Me Kim      Geun-Won Kim      Ki-Su Shin

#### Abstract

The rescue methods for the marine casualties are limited due to the characteristics of operation environment of the vessel. Especially the most of marine accidents have been occurred at the bow structure of ship. Moreover the failure of bow structure may lead to catastrophic mishaps.

In this paper, the extents of damage of a bow structure fracture subject to collision accident was investigated by using numerical method. The computer simulation approach by using Finite Element Method was employed to accomplish this goal. A finite element model, a 3D model of ship, has been utilized to evaluate damage of bow structure according to collision scenario.

In conclusion, we have demonstrated that the plastic deformation occurred at the bow structure. Also it was shown that the collision angle clearly plays a role in determining amount of damage of ship structures.

Keywords : Finite Element Method, Marine Accident, Bow Structure, Plastic Deformation

#### 1. 서론

선박은 해상에서 운용되는 독립적인 구조물로 충돌로 인한 재해 발생시 육상과 달리 대처할 수 있는 방안이 매우 제한된다. 따라서 해양사고 발생 시 인명손상, 재산손실, 환경오염 등 큰 피해를 입게 된다. 해군함정도 이러한 해양사고의 위협에 항상 직면하고 있으며, 매년 크고 작은 사고들이 발생한다. 특히 작전임무 수행을 위해 거친 해상 상태에서도 운용이 불가

피한 함정의 경우 충돌로 인해 손상을 입는 경우가 자주 발생한다.

충돌로 인한 대표적인 손상부분은 선수부로, 선수구조의 손상은 침수를 발생시키고 이로 인해 선박 트림에 문제를 발생시킨다. 이후 침수영역이 확대되면 선체구조가 붕괴되어 한 순간에 침몰될 가능성이 높다. 또한 거친 해상상태에서 선수 트림의 상태로 운항을 하다보면 프로펠러가 수면위로 노출될 가능성이 높아지고, 이는 기동력의 저하로 이어진다. 특히 함정 선수부의 경우 함포와 탄약 저장소가 있으며, 좁은 격실 구조로 이루어져 승조원의 거주 공간보다는 페인트 등 필수물품을 저장하는 창고로 활용된다. 이러한 이유로 함정의 선수부 충돌사고 화재/폭발로 이어질 가능성이

† 2012년 2월 24일 접수~2012년 5월 25일 게재승인

\* 국방대학교(KNDU) 국방과학학과

책임저자 : 김귀미(gw3502@naver.com)

높다. 실제 미합 DENVER(LPD-9)의 훈련 중 함정간 충돌로 선수부가 완전히 붕괴된 사례 및 일본 해상자위대 소속 호위함 구라마함의 상선과의 선수부 충돌 후 페인트 창고에 화재가 발생하여 손상된 사례는 좋은 예이다.

또한 연평해전에서 사용되었던 북한 함정을 군사분계선 밖으로 밀어내는 ‘선수충돌 전술’ 등과 같이 함정을 무리하게 운영하는 경우 아군 함정의 선수부가 크게 손상되어 침몰할 가능성이 높아진다. 따라서 함정 선수부 충돌사고 예방 및 피해를 최소화 하기 위하여 운영중인 함정의 내충돌성 평가는 필수적이다.

함정의 내충돌성 평가는 다양한 상황별로 실제 충돌시험을 수행하는 것이 가장 좋은 방법이다. 그러나 위험부담과 고비용으로 인해 다양한 조건하에서 실제 시험을 수행하는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 유한요소해석 등을 통한 시뮬레이션 접근법은 결과예측을 위한 유용한 방법중의 하나이다.

본 연구에서는 유한요소 수치해석을 통해 충돌 상황별 선수 구조의 손상 형태와 손상량을 도출하였다.

## 2. 선박충돌역학

### 가. 외부역학(External Mechanics)

선박의 충돌 역학은 외부역학과 내부역학으로 구분할 수 있다. 충돌 후 초기 운동에너지의 일부는 피충돌체의 소산에너지로 흡수되며( $E_T$ ), 충돌체와 피충돌체는 충돌 전보다 작은 운동에너지를 가지게 된다. 이러한 충돌을 비탄성 충돌이라 정의하며, 본 연구에서는 선박과 피충돌체의 비탄성 충돌 문제를 다룬다. 충돌과정에서 외부역학적 관계는 운동량 및 에너지 보존에 관한 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다.

#### Momentum Equilibrium

$$\vec{M}_1 \cdot \vec{V}_1 + \vec{M}_2 \cdot \vec{V}_2 = (\vec{M}_1 + \vec{M}_2) \cdot \vec{V}_3 \quad (1)$$

#### Energy Equilibrium

$$\frac{1}{2}(M_1 \cdot V_1^2 + M_2 \cdot V_2^2) = \frac{1}{2}(M_1 + M_2) \cdot V_3^2 + E_T \quad (2)$$

여기서,  $M_1$  : Mass of striking body,  $M_2$  : Mass of struck body,  $V_1$  : Velocity of striking body prior to collision,  $V_2$  : Velocity of struck body prior to collision,

$V_3$  : Velocity of the combined striking and struck body after contact,  $E_T$  : Total Dissipated(of Absorbed) Energy due to Collision 이다.

### 나. 내부역학(Internal Mechanics)

내부역학에서는 충돌시 선체 파손에 의해 소산되는 에너지가 유발시키는 선체의 손상과 구조응답 문제를 다루게 된다. 충돌과정에서 발생한 비가역적 소산에너지( $E_T$ )는 선박 구조의 소성변형, 압괴(Crushing), 찢김(Tearing), 파단(Fracture) 등의 형태로 구조물 내부로 흡수된다. 이 에너지는 소성변형에너지( $E_{Plastic-strain}$ ), 감쇄( $E_{Damping}$ ), 마찰( $E_{Friction}$ ), 온도상승( $E_{Thermal}$ )의 합으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_T = E_{Plastic-strain} + E_{Damping} + E_{Friction} + E_{Thermal} \quad (3)$$

여기서,  $E_T$  : Total Dissipated(or Absorbed) Energy due to Collision,  $E_{Plastic-strain}$  : Plastic Strain Energy,  $E_{Damping}$  : Damping Energy,  $E_{Friction}$  : Friction Energy,  $E_{Thermal}$  : Thermal Energy 이다.

### 다. 재료의 변형률

구조충격 문제에서는 변형률의 변화가 커지므로 이에 따른 동 항복응력의 변화를 고려하여야 한다. 식 (4)는 재료의 변형속도 효과를 반영하기 위한 Cowper와 Symonds(1957)에 의하여 제안된 식으로 본 연구에서는 연강에 대한 식의 계수 C와 q를 각각 40.5와 5를 사용하였다.

$$\frac{\sigma_{YD}}{\sigma_{YS}} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/q} \quad (4)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}$  : Strain rate,  $\sigma_{YD}$  : Dynamic flow stress,  $\sigma_{YS}$  : Static flow stress, C and q : Constrants for a particular materia 이다.

## 3. 유한요소해석

### 가. 모델링

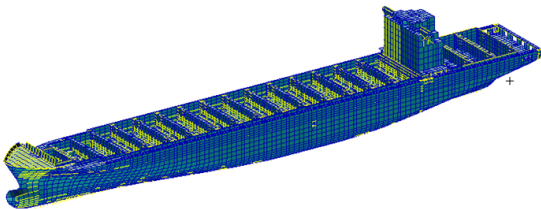
본 연구에서는 해석용 선체 모델이 특정순항 속도를 가지고 이동하다 고정경계로 설정된 피충돌체와 충돌

하는 상황을 구현하였으며, 충돌하는 동안 접촉면인 선수 부분은 소성 대변형(Plastic Large Deformation)이 발생하므로 탄소성 요소로 모델링 하였고, 피충돌체(Rigid Wall)는 단단한 강체 요소로 모델링 하였다. 그리고 충돌해석시 마찰 및 온도상승 효과는 고려하지 않았으며, 해수에 의한 선체구조의 침식, 부식효과 및 용접으로 인한 재료의 강성변화는 고려하지 않았다. 그리고 연구수행을 위하여 범용구조해석 프로그램인 MSC. Patran 및 MD Nastran Explicit Nonlinear Solution 을 이용하였다.

Fig. 1은 컨테이너선 형상 및 실제 선박의 유한요소 모델링을 나타낸 것으로 요소수는 76,772개, 1차원 Bar요소와 2차원 Shell 요소로 구성되어 있다



a) Container ship configuration



b) Modeling configuration

Fig. 1. Finite element model

Fig. 2는 경계조건으로 피충돌체의 6자유도를 구속 하였으며, 선체 모델에 15/25 kts 두종류의 순항속도를 부여하여 피충돌체와 충돌시켰다. 접촉조건은 adaptive contact으로 설정하여 선체 모델이 피충돌체와의 접촉, 재료적 비선형성, 파단등의 비선형 대변형 해석이 가능하도록 설정하였다.

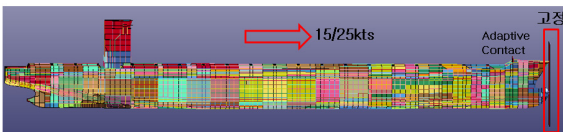


Fig. 2. Boundary conditions

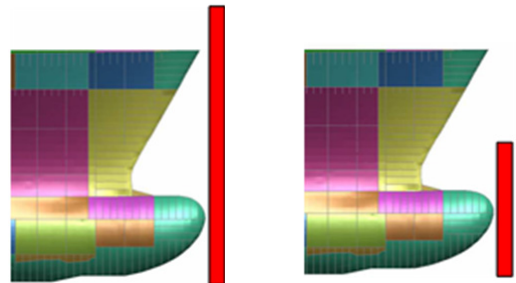
Table 1은 해석시 사용된 선박의 재료 물성치를 나타낸 것이다. 프로그램 해석을 위한 물성치 입력은 변형률 효과(Strain Rate Effects)를 고려하여 Elastoplastic 모델(MAT24)를 선택하여 입력하였다.

Table 1. Material

구 분	값	구 분	값
Yield strength	280 MPa	Elastic modulus	210 GPa
Density	7850 kg/m <sup>2</sup>	C, q	40.5, 5
Poisson ratio	0.3	Max. plastic strain	0.33

나. 해석 시나리오

선박 충돌사고는 무수히 많은 유형으로 가정할 수 있다. 그러나 현실적인 해석결과를 얻기 위해서는 기존사례의 충돌상황을 묘사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 대표적인 사고사례를 바탕으로 충돌 위치, 속도, 각도를 변화시켜 충돌 에너지가 선수구조에 미치는 영향을 분석하였다.



a) Type 1

b) Type 2

Fig. 3. Collision types

Fig. 3은 충돌 위치에 따라 설정한 두가지 시나리오 유형을 보여주고 있다. 첫번째 유형은 충돌선 선수부 전단 부분 모두가 피충돌체에 충돌하는 경우이고, 두번째 유형은 충돌선의 선수부 하단 즉, 구상 선수(Bulbous Bow) 부분이 피충돌체에 충돌하는 경우로 설정하였다.

충돌속도는 컨테이너선의 설계속도인 15 knots(7.716 m/s)와 함정에서 운항하는 속도 25 knots(12.86m/s)인 경우를 고려하였다. 충돌각도는 대표적인 충돌각인 정

면(90°)과 사면(30°, 45°)인 경우를 고려하여 Table 2와 같이 총 12가지 시나리오에 따라 충돌 에너지가 선수에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 2. Scenario

순번	충돌 위치	충돌 각도	충돌 속도	시나리오명
1	선수부 전체 (유형 1)	30°	15 kts	H_30_15
2			25 kts	H_30_25
3		45°	15 kts	H_45_15
4			25 kts	H_45_25
5		90°	15 kts	H_90_15
6			25 kts	H_90_25
7	선수부 하단 (유형 2)	30°	15 kts	L_30_15
8			25 kts	L_30_25
9		45°	15 kts	L_45_15
10			25 kts	L_45_25
11		90°	15 kts	L_90_15
12			25 kts	L_90_25

다. 해석결과

Fig. 4는 충돌 후 손상에 대한 유한요소해석 결과를 나타내며 충돌체와 접촉이 되는 부위에 국부적으로 붕괴 손상을 입고 있음을 알 수 있다.

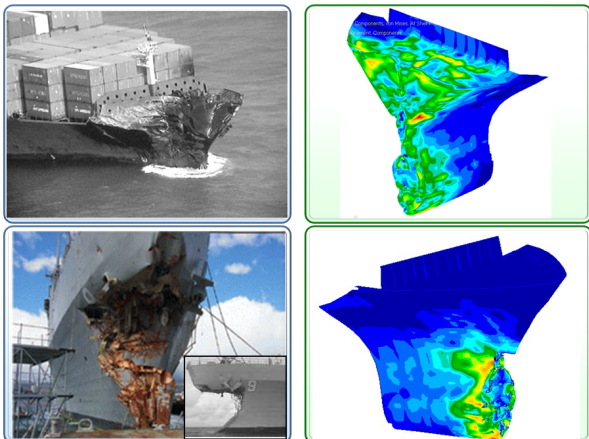


Fig. 4. Compare actual configuration with FE results

그림과 같이 선수부 전체에 충돌하는 경우는 선수 후레어부터 구상선수 부분까지 전체적으로 영향을 주

고 있다. 선수부 하단에 충돌한 경우 선박의 구상선수 부분에만 국부적인 영향을 준다. 유한요소 해석 결과 손상형상은 실제 선수부의 손상 형상과 유사함을 알 수 있다.

에너지 소산에 가장 큰 영향을 주는 인자는 충돌 각도이다. 정면에서 충돌할 경우와 사면(30°, 45°)에서 충돌할 경우는 에너지 소산량 측면에서 큰 차이가 발생한다. 이러한 차이는 선박 충돌시의 거동 및 손상형태로 설명할 수 있는데, Fig. 5(a)와 같이 선박이 정면으로 충돌할 때 선수부의 구상선수는 압괴거동에 의한 접힘(Folding) 등의 현상이 발생한다. 또한 선수부 충돌 부위에 국부적인 손상을 발생하게 되는데, 이러한 손상은 선체가 초기 운동에너지의 많은 부분을 흡수하였음을 의미한다. 이후 선체는 손상과 함께 결국에 정지하게 된다.

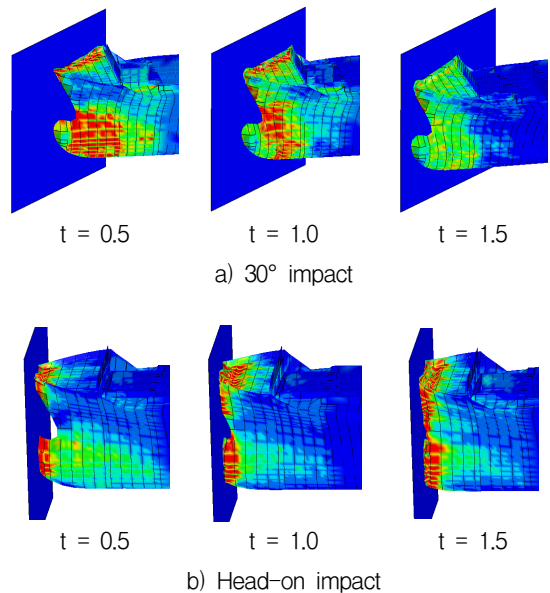


Fig. 5. Impact behavior

사면 충돌시 선수부는 초기 충돌부에서 정면 충돌과 유사한 형태의 압괴 거동에 의한 접힘 현상이 발생하나, Fig. 5(b)와 같이 충돌 이후 구상선수의 횡방향 거동이 나타난다. 따라서 선박이 가지는 초기 운동에너지가 손상 거동에 영향을 주는 에너지로 흡수되기 보다는 횡방향의 운동에너지의 형태로 변환됨을 해석결과를 통해 확인할 수 있었다.

Table 3은 충돌 시나리오별 소산에너지 및 초기 운

충돌 에너지 대비 에너지 흡수율을 나타낸 것이다. 충돌 시 선체 내부로 소산된 에너지는 여러 형태의 에너지로 변환된다. 본 연구에서 감쇄, 마찰 등의 효과는 고려하지 않으므로 흡수된 에너지는 선수구조의 손상 거동에 영향을 미치게 된다. 또한 소산 에너지가 크다는 것은 선체내 흡수된 에너지의 양이 많다는 것을 나타낸다.

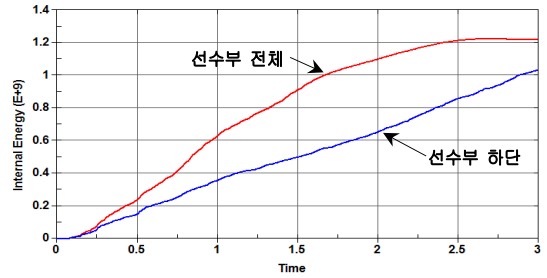
Table 3. FE results

순번	시나리오	초기운동 에너지(J)	소산 에너지(J)	에너지 흡수율
1	H_30_15	5.95E8	2.32E7	3.8 %
2	H_30_25	1.65E9	5.74E7	3.5 %
3	H_45_15	5.95E8	6.15E7	10.3 %
4	H_45_25	1.65E9	1.62E8	9.8 %
5	H_90_15	5.95E8	4.31E8	72.4 %
6	H_90_25	1.65E9	1.20E9	72.7 %
7	L_30_15	5.95E8	2.06E7	3.4 %
8	L_30_25	1.65E9	5.79E7	3.4 %
9	L_45_15	5.95E8	5.79E7	9.7 %
10	L_45_25	1.65E9	3.81E8	8.5 %
11	L_90_15	5.95E8	3.81E8	64.0 %
12	L_90_25	1.65E9	1.05E9	63.6 %

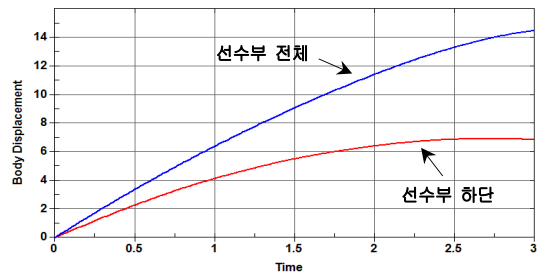
#### 4. 결과분석

##### 가. 충돌 위치별

Fig. 6은 충돌 위치별 시간-내부에너지 변화량 및 충돌 위치별 손상량을 나타낸다. 충돌 위치에 따른 에너지 소산 정도를 비교하기 위해 시나리오 6번과 12번을 비교하면 선수부 전체가 충돌하는 경우는 1.2E9(J), 선수부 하단부만 충돌하는 경우에는 1.05E9(J)을 선체 내부에서 소산시킨다. 선수부 전체가 충돌하는 경우가 선수부 하단부만 충돌할 때보다 약 114.3 %의 에너지를 흡수한다. 시나리오 5번과 11번의 경우도 선수부 하단부만 충돌하는 경우 선수부 전체 충돌하는 경우에 비해 약 113.2 %의 내부 에너지를 흡수한다. 선수부 전체가 충돌하는 경우가 선수부 하단만 충돌하는 경우에 비해 많은 에너지를 흡수하지만 손상을 받는 영역의 면적이 크기 때문에 손상 길이는 더 작게 나타난다.



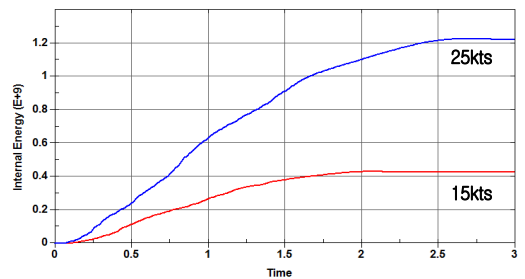
a) Time-Internal energy rate



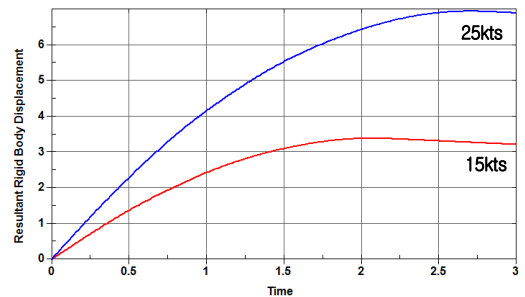
b) Time-Displacement rate

Fig. 6. Result for impact conditions

##### 나. 충돌 속도별



a) Time-Internal energy rate



b) Time-Displacement rate

Fig. 7. Result for impact speeds

Fig. 7은 충돌 속도별 시간-내부에너지 변화량 및 충돌 속도별 손상량을 나타낸다. 충돌 속도에 따른 에너지 소산 정도를 비교하기 위해 시나리오 5번과 6번을 비교하면 25 kts로 충돌시는 1.2E9(J)을, 15 kts로 충돌시는 5.95E8(J)을 선체 내부에서 소산시킨다. 또한 충돌 속도가 25 kts일 경우가 15 kts일 경우에 비해 약 2배 정도가 많은 에너지를 흡수한다. 소산된 에너지는 선박의 손상 거동에 관여하게 되므로 속도가 빠를 경우 손상 정도가 커지게 된다.

다. 충돌 각도별

Fig. 8은 충돌 각도별 시간-내부에너지 변화량을 나타낸다. 충돌 각도에 따른 에너지 소산 정도를 비교하기 위해 시나리오 8, 10, 12를 비교하면 충돌각도가 30°일 경우 5.79e7(J), 45°일 경우 3.81e8(J), 90°일 경우 1.05e9(J)을 선체 내부에서 소산시킨다. 30° 각도로 충돌할 때 에너지 소산량은 90° 충돌에 비해 약 5.5 % 정도이며, 45° 충돌의 경우 에너지 소산량은 90° 충돌에 비해 약 36.3 % 정도이다.

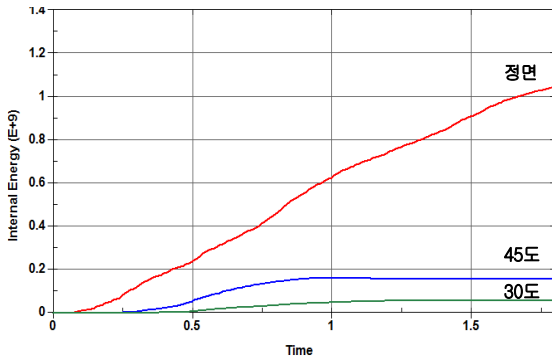


Fig. 8. Result of Time-Internal energy rate for impact angles

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 컨테이너 선 형상에 대한 충돌 상황별 선수 구조의 손상 형태와 손상량을 도출하였다.

연구결과 충돌위치별 손상거동은 선수부전체와 선수 부하단의 소산에너지가 각각 2.32E7~1.2E9(J), 2.06E7

~1.05E9(J) 범위를 가진다. 그리고 충돌속도에 따른 손상 거동은 25 kts 경우가 15 kts 경우보다 약 2배 이상의 에너지가 선체내로 흡수되면서 큰 손상이 발생된다. 또한 충돌각도별로 30° 각도로 충돌할 때 에너지 소산량은 90° 충돌에 비해 약 5.5 % 정도이며, 45° 충돌의 경우 에너지 소산량은 90° 충돌에 비해 약 36.3 % 정도이다.

결론적으로 에너지 소산에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 충돌각도이며, 정면과 사면 충돌에 따른 에너지 소산값을 통해 선박 충돌시 발생하는 충돌거동 및 손상형태를 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2012-H0301-12-2008).

References

- [1] 김재현, 박명규, “폭발에 의해 손상된 함정의 생존 시간 간이계산법 연구”, 해양환경공학회지 제10권 제4호, pp. 211~217, 2007.
- [2] 이동근, “손상선박의 생존성 평가 시스템에 관한 연구”, 대한조선학회논문집 제40권 제2호, pp. 34~40, 2003.
- [3] 이순섭, 이동근, 김기섭, “손상 선박의 안전성 향상 설계 기술 개발”, 대한조선학회논문집 제46권 제1호, pp. 69~77, 2009.
- [4] 이탁기, 김재동, 전태병, “유조선의 간이 충돌/좌초 강도 평가시스템 개발”, 한국해양환경공학회지 제2권 제2호, pp. 86~94, 1999.
- [5] 한대석, 임채환, 이탁기, 이제명, “LS-DYNA3D를 이용한 좌초 선박 손상평가”, 한국해양항만학회지 제31권 제3호, pp. 213~221, 2007.
- [6] Cowper, G. R, Symonds, P. S., “Strain Hardening and Strain-rate Effects in the Impact Loading of Canrilever Beams”, Brown University, Division of Applied Mathematics, Report No. 28, 1957.