

선수 충돌시 구조 붕괴 거동에 대한 수치해석(제1보)

신영식 · 박명규*
현대중공업, *한국해양대학교

Numerical Simulation of Structural Response in Bow Collision (1st Report)

YOUNG-SIK SHIN AND MYUNG-KYU PARK*

Hyundai Heavy Ind. co., *Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

KEY WORDS: Bow collision 선수 충돌, Structural behavior 구조 거동, Collision bulkhead 충돌격벽, Dynamic time integration explicit solution 동적 시간 적분 양의 해, Bulbous bow 구상선수, Collision critical speed 충돌 임계 속도

ABSTRACT: In this paper a complicated structural behavior in collision and its effect of energy transmission to the collision bulkhead was examined through a methodology of the numerical simulation to obtain a ideal bow construction and a location of collision bulkhead against head on collision. At present the bow structure is normally designed in consideration of its specific structural arrangements and, internal and external loads in these areas such as hydrostatic and dynamic pressure, wave impact and bottom slamming in accordance with the Classification rules, and the specific location of collision bulkhead by SOLAS requirement. By these studies the behavior of the bow collapse due to collision was synthetically evaluated for the different size of tankers and its operational speed limits, and by the results of these simulation it provides the optimal design concept for the bow construction to prevent the subsequent plastic deformation onto or near to the collision bulkhead boundary and to determine the rational location of collision bulkhead.

1. 서 론

여러 가지 형태의 선박 충돌로 인해 과거 수많은 해양오염은 물론 귀중한 인명과 재산의 손실이 있어왔던 사례들을 기억하고 있다. 특히 유해 액체화물, 기름 및 방사선 물질 등을 운반하는 선박이 항구 또는 연 근해에서 충돌, 좌초 및 폭발 등의 원인으로 해당 화물이 유출되어 오염이 되었을 경우에는 사안에 따라 화물의 경제적 가치보다 적게는 수백 배에서 많게는 어느 한 국가에서도 감당하기 어려울 정도의 손실을 야기 할 수 있다. 가장 최근에 일어난 대규모 오염사고로는 국내에서는 1995년 남해안에서 발생한 140,000 DWT "Sea Prince"호가 엔진고장으로 해안 안벽과 충돌 좌초로 인해 남해안 일대가 크게 오염되었고 이로 인해 환경파괴는 물론이고 보상 및 복구비용으로 재산적 손실도 심대하였다. 국외에서는 전형적인 대규모 오염사고는 미국 알래스카 해안에서 좌초한 유조선 "Exxon Valdez"호가 대표적 사례로 막대한 보상은 물론 이로인해 미국정부가 Oil Pollution Act 90(OPA 90)을 제정하게된 동기가 되었고 곧 이어서 IMO에서도 이중 선체구조의 유조선의 의무화하게 되었다.

이런 점에서 볼 때 충돌현상을 조사하고 합리적인 방법으로 충돌을 감안한 설계개념을 정립하는 것이 매우 필요하다고 본다. 충돌사고로 발생하는 이러한 해상오염을 방지 또는 최소화하기 위하여 충돌에 의한 붕괴거동과 파괴 형태, 구조 형태 별 충돌 에너지 흡수 능력을 검토함으로써 목적에 맞는 효과적인

내충돌 구조조건을 얻는 것이 중요하다. 선박충돌에 의한 붕괴 거동과 파괴형태는 충돌선의 선형, 충돌속도, 충돌 각도, 충돌선의 선수구조 및 파충돌선의 선측 구조 형태, 충돌위치, 흡수, 화물 적하 여부, 해상상태 등 여러 요소들에 의해 영향받으며 충돌 현상도 크게 다르게 나타난다. 그러나 선박 충돌 현상으로부터 국부적 또는 전체적으로 선체 구조 부재의 충돌 저항을 정확히 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 더구나 충돌 현상은 기본적으로 동적인 비선형 문제이므로 동적 거동과 파괴 특성의 영향을 선형별로 자세히 조사 검토하는 것이 중요하다.

처음 선박충돌 응답해석은 Minorsky(1959)에 의해 1959년에 발표되었다. 그는 26척의 선박간 충돌사고 자료를 근거로 충돌시 손상된 강재 체적과 충돌 흡수 에너지간의 선형적 관계를 제시하였다. 이 방법은 이후 실험적 방법 등을 통해 수정되었다.

대표적인 실험 방법으로는 1968년 GKSS에서 Woisin(1976)이 1:1.2와 1:7.5 축척의 선수 와 선측 모형을 제작하여 충돌모형 실험이 수행되었다. 이 실험에서 충돌 메카니즘과 원자력선의 방호벽에 대한 많은 일반적인 자료는 얻었으나 "충돌에너지-지배시간" 및 "충돌에너지-관통깊이"의 상관관계는 당시의 계측기 여건상 구하지 못했다. 이러한 축소 모델 방법에 의한 실험은 치수효과에 의한 강재 및 부재의 크기, 용접부 등의 영향으로 모델 크기에 따라 구조적 응답이 다르게 나타나므로 정도의 문제가 있을 수 있다

Ohnishi et. al.(1982)은 선수구조의 붕괴현상을 파악하기 위해

단순한 선수골조 해석을 수행하고 이의 정도를 검증하는 방법으로 유조선 및 컨테이너선의 선수 모형 (1/10 축척)을 제작하여 정적 붕괴실험을 하였다. 이 정적 실험 결과와 골조 구조해석 결과가 유사하였으며 선수부 “하중-붕괴량” 곡선을 구하여 선수 붕괴하중을 추정하는 도표를 제시하였다. 그러나 실제 충돌 현상과 상당히 다른 양상이 나타나므로 응용에 활용하기는 부적절 하다고 보여진다.

이러한 선박 충돌자료와 실험 결과들을 근거로 다수의 충돌 간이식과 수학적 모델들이 제시되기도 하였다(Chang *et al.*, 1990; Kierkegaard, 1993; Amdahl and Soreide, 1981; Lehman and Yu, 1995). 또한 구상선수와 같이 국부적인 압괴 현상을 파악하기 위한 방법으로 기본 구조부재들에 대해서 압괴실험을 수행하고 간이 해석적 방법을 제시하기도 하였다(Ohtsubo and Suzuki, 1993; Abramowicz and Jones, 1984; Pedersen *et al.*, 1993; Wierzbicki, 1983; Jones and Birch, 1990). 그러나 실제 충돌사고가 발생하였을 경우 충돌시의 속도, 충돌각도, 해상 상태, 피충돌선의 상대적인 충돌 회피노력 등의 상황에 대해서 당직 운항선원 일부를 제외하고는 알 수가 없고 또한 충돌 실시간과 관입량 관계가 정확히 기록되지 않기 때문에 충돌현상을 조사 분석하기위한 모델 실험은 상세한 해석기법과 동시에 수행되어야만 그 정도를 검증할 수 있다고 사료된다.

그리고 충돌 현상을 조사하기 위한 방법으로 탄소성 변형, 압괴(crushing), 파단(rupture), 변형속도(strain rate) 영향 등의 요인들을 고려하여 구조물에 대한 동적 비선형 구조해석이나 수학적 접근으로 수행하는 수치 해석적 방법이 있으며, 이들 결과로부터 충돌 응답현상을 분석하고 이 결과를 설계 응용에 적용하는 방법이 효과적이다. 이러한 수치 해석적 방법으로 연구가 다수 수행되었다(Egge and Bockenbauer, 1991; Che and Jang, 1995; Valsgard and Pettersen, 1983; Paik and Pedersen, 1995; Shin and Park, 1999).

본 연구에서는 우선 크기가 다른 유조선이 강체에 직각으로 선수 충돌시 선수 부분의 구조적 붕괴 거동과 이 영향에 의한 충돌격벽(collision bulkhead)의 안전성을 검토하고 충돌에너지를 최대한 흡수할 수 있는 연성 내 충돌 구조 설계의 응용과 SOLAS에서 규정하고 있는 충돌격벽의 위치를 결정할 수 있는 자료를 얻기 위해 가상 충돌시나리오에 따라 수치해석 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 현재 설계되어 있는 유조선 및 정유 운반선들의 선수충돌시 일어나는 선수부의 구조적 거동을 살펴보고 기존선박들의 선수부 내충돌 구조 설계의 방향을 제시하고자 한다.

2. 충돌조건 및 가상 시나리오

2.1 충돌선 모델

본 연구에서는 대상 충돌선으로 10.5K, 35K, 73K 및 100K DWT 정유운반선과 300K DWT 대형유조선을 각각 그 대상으로 하였으며, 그 주요 치수는 Table 1에서 보여주고 있다. 대상 모델 선박 선정은 해양 환경을 극심하게 오염시킬 수 있는 유조선 및 정유 운반선으로 정하였고 각각 그 크기별로 대표할 수 있도록 하였다.

Table 1 Principal dimensions of striking ship models

Dwt	Lbp (m)	B (m)	D (m)	Displacement (metric ton)
10.5K	107.0	18.2	10.7	13,349
35K	174.5	27.4	17.0	39,061
73K	249.0	32.24	19.7	87,274
100K	234.0	42.0	21.0	96,594
300K	314.0	58.0	31.0	342,917

이들로부터 충돌응답 현상의 유용한 자료를 얻을 수 있고 또한 이들 전후 비슷한 크기의 유조선들의 구조응답 경향도 예측할 수 있을 것이다.

이들 유조선은 MARPOL 규정에 따라 이중선체구조를 가지고 있으며 이에 따라 내측 충격벽이 설치되어 있어서 충돌격벽과 주변의 선수구조가 상대적으로 견고하게 되어있다.

2.2 가상 충돌 시나리오

선박 충돌사고에 대한 충돌 시나리오는 현실적으로 무수히 많은 경우가 발생할 수 있겠다. 본 연구에서는 이들 선박이 만재 흡수 상태에서 평균 설계 속도 15 knots의 속력으로 해상 구조물, 안벽 또는 교각등 강체에 정면 충돌하는 경우만을 고려하였다.

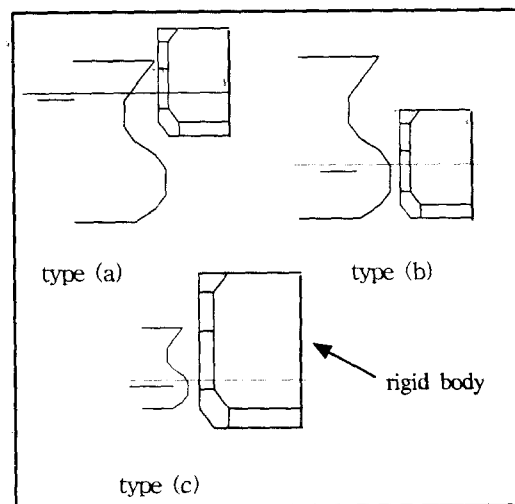


Fig. 1 Typical type of collision scenario

이는 SOLAS 규정에 의한 충돌격벽 위치까지 충돌에너지 영향을 조사 분석하기 위함이다. 따라서 경사 충돌의 경우는 정면 충돌에 비하여 그 손상 양태가 다르나 비교적 손상량이 작으므로 본 연구에서 고려하지 않았다

Fig. 1은 선박의 선수 충돌 가상 시나리오를 분류한 것으로 type (a)는 선수부 후레어(flare), type (b)는 구상 선수(bulbous bow)부분, type (c)는 선수부의 후레어와 구상선수의 전반적인 부분이 모두 피충돌체에 충돌하는 경우를 보이고 있다.

본 연구에서는 1차적 조사로서 충돌 가상 시나리오 중에서 선수하부, 즉 구상선수 부분이 충돌하는 경우를 주 관심 대상으로 하여 가상 충돌 시나리오에서 type (b)만을 고려하였다. 단 35K의 경우 대표적 예로 type (c)도 수행하여 비교하였다.

이들 가상 시나리오는 실제 사고 데이터로부터 참고한 것으로서 단독 또는 복합적 충돌 현상으로 나타난다.

Photo 1은 type (b)의 시나리오에 해당하는 실제 사고가 난 선박의 모습이며, 사진에서 보듯이 구상선수부 부위가 국부적으로 손상이 일어난 전형적인 구상선수 부분 충돌 붕괴 모습을 보여주고 있다.



Photo 1 Damaged bulbous bow after collision

선박의 충돌 양태는 동일 크기의 선박이 충돌하는 경우도 있겠으나 대부분 충돌선과 피충돌선의 크기와 운항 홀수에 따라 Fig. 1의 시나리오와 같이 각각 충돌 위치가 다르게 된다. 충돌선이 만재 상태로 운항 중에 충돌할 경우는 비록 피충돌선이 소형이라 해도 type (a)와 같이 선수 후레어가 먼저 접촉되면서 구조저항에 따라 주변으로 소성 대변형이 발생된다.

발라스트 홀수에서는 대부분 구상선수가 충돌 접촉면이 될 것이다. Type (b)처럼 구상선수가 충돌되는 경우 구상선수의 구조 자체가 원통형으로 내부 구조 부재들이 강 구조로 배치되어 있어서 기본적으로 내충돌 구조로 형성되어 있고, 충돌저항이 크며, 충돌거동은 비교적 강체 양상을 보이며, 손상부위가 적게 나타난다. 선수 후레어와 구상선수의 돌출 길이는 비슷하나 일반적으로 구형선수가 300~1000mm 가량 더 돌출되므로 충돌선이 피충돌선보다 소형인 경우에는 충돌시나리오 type (c)가 적용될 수 있으며 이 때 선수부 손상 상태는 구상선수와 후레어 부분이 거의 동시 접촉과 비슷하게 충돌하기 때문에 전체적인 양상을 보이게 될 것이다.

3. 수치 시뮬레이션 해석

그동안 선박 충돌 응답 해석을 위한 많은 간이식들이 개발

되었으나 유한 요소법은 가장 유용한 해석 방법중의 하나이며 정도 또한 높다. 그러나 모델링 및 수치계산에 방대한 시간이 소요되는 어려움이 있다. 따라서 지금까지 이러한 방법으로 크기별 다중 선박의 충돌현상을 실제 상태대로 정도 높게 시도한 바가 없었다고 사료된다. 다만 일부 이론적으로 유도하거나 간단한 실험적 방법으로 유도된 간이식들은 국부적인 현상만을 기준으로 하였기 때문에 실지 선박에서의 충돌응답 현상과는 큰 차이가 있다고 사료된다.

그래서 가장 바람직한 방법으로 유용한 정보를 얻고 높은 정도를 갖기 위해서는 해당 구조물에 대한 전선 모델과 수치계산을 수행하는 것이 매우 중요하다. 이러한 해석적 방법으로 본 연구에서는 동적 비선형 유한 요소법 구조해석이 이용되었다. 본 해석은 이러한 방법을 이용하는 상용 프로그램 MSC/DYTRAN으로 본 연구의 충돌 현상을 구현하였다.

3.1 수치 해석용 모델

Fig. 2는 수치해석 모델의 전체 구성을 보여주고 있다.

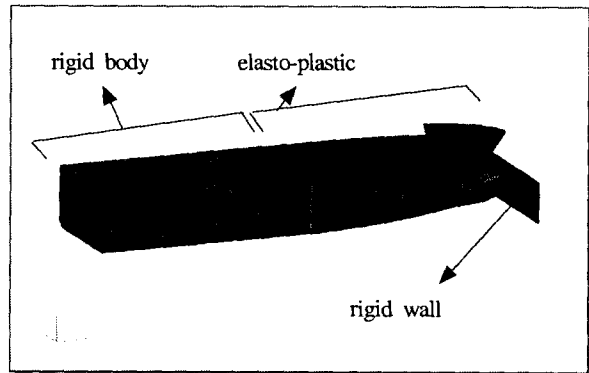


Fig. 2 Typical numerical analysis model

충돌하는 동안 접촉면의 선수 부분은 소성 대변형(plastic large deformation)을 유발하므로 탄소성 요소로써 상세 모델링 하였으며, 나머지 부위(No.1 hold 이후)는 강체 요소로 치환하였고, 또한 피충돌체(rigid wall)는 단단한 강체로 보고 역시 강체 요소로 모델링 하였다.

선수 부분의 충돌 한계 조건은 충돌격벽까지 충돌에너지가 전달되어 주변의 구조 부재가 소성 변형하는 것까지를 기준으로 하였다. 이 이상은 충돌격벽의 목적에 반하는 구조응답이므로 이는 충돌격벽의 위치를 조정하는 기준이 되기 때문이다.

선수구조는 강구조 형태의 구조부재들이 복잡하게 배치되기 때문에 일반적으로 강성 구조형태를 취하고 있다. 충돌접촉이 일어나는 초기부터 압축력을 받으면 충돌격벽으로 에너지가 전달되어서 붕괴 부분이 적더라도 주변 구조부재에 상당히 많은 소성변형을 야기하게 된다. 이러한 충돌 응답성을 자세히 조사 분석하기 위해서는 최소한 충돌격벽 뒤 No.1 hold까지는 탄소성 모델링이 필요하다 하겠다.

3.2 재료 물성치

본 대상 선박은 연강 및 고장력강(higher tensile steel)을 쓰며,

본 해석에서는 소성 경화(strain hardening) 현상을 고려한 탄소 성 재료를 적용하였다.

재료물성치는 다음과 같다.

Mass density	$7.85 \times 10^5 \text{ ton/mm}^2$
Modulus of elasticity	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
Poisson ratio	0.3
Yield stress of mild steel	235.0 N/mm ²
higher tensile steel	315 or 355.0 N/mm ²
Hardening modulus	$1.18 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
Rupture strain	0.2

3.3 재료 변형속도(strain rate) 효과

선체 충돌문제는 동적 현상이므로 변형속도 영향을 받는 재료의 물성 특성의 변화로 다루어야 한다. 동 항복응력 σ_y 는 Cowper & Symonds가 제안한 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}} = 1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/p} \quad (1)$$

- 여기서, σ_y : 재료의 동적 항복 응력
- σ_{y0} : 재료의 정적 항복 응력
- D, p : 재료에 따른 상수값
- mild steel : D = 40.4
- p = 5
- high-tensile steel
- : D = 335
- p = 5

3.4 부가질량(added mass)

충돌선의 감속에 의하여 유발되는 동적 유체 반력(dynamic water reaction)에는 해수의 부가질량 효과를 포함하며, 본 해석 시는 선체 질량의 20% 값을 부가질량으로 고려하였다. 이들 부가질량의 기준은 충돌관련 보고서들에 이용된 부가질량을 참고하였는데, 일반적으로 충돌선은 5-20%, 피충돌선은 20-40% 범위였으며 이에 대한 허용기준은 자세한 보고서를 근거로 재 검토되어야 한다고 사료된다.

4. 해석 결과

충돌 선박은 10.5K 정유운반선에서 300K VLCC까지의 선형 별 유조선에 대하여 만재 상태에서 최대 15.0 knots의 속도로 충돌하는 것으로 해석하여 서로의 결과를 비교하였으며, 충돌 시나리오는 type (b)로 구상선수가 충돌면에 접촉되어 붕괴되는 시나리오를 중심으로 해석하였다. 이중 35K 정유운반선의 경우에는 충돌 시나리오 type (b)와 (c)를 수행하여 손실 에너지 및 임계속도, 시간등을 대표적 사례로서 비교하였다.

4.1 변형(deformation) 및 붕괴(collapse) 기구

Fig. 4~6은 35k DWT 정유운반선의 충돌 후 0.4초 때의 변

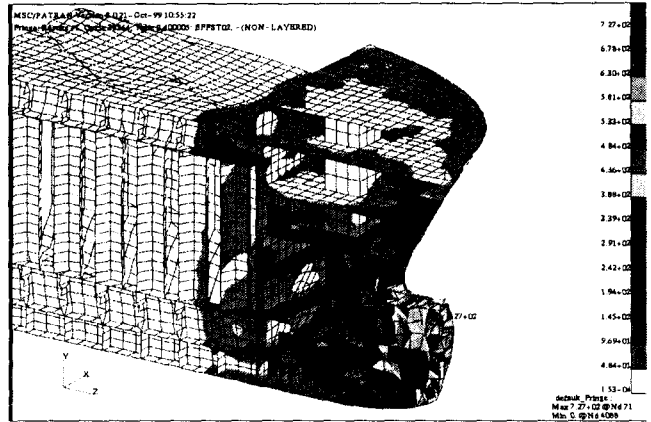


Fig. 4 Bow deformation and stress contour (35K)-type(b)

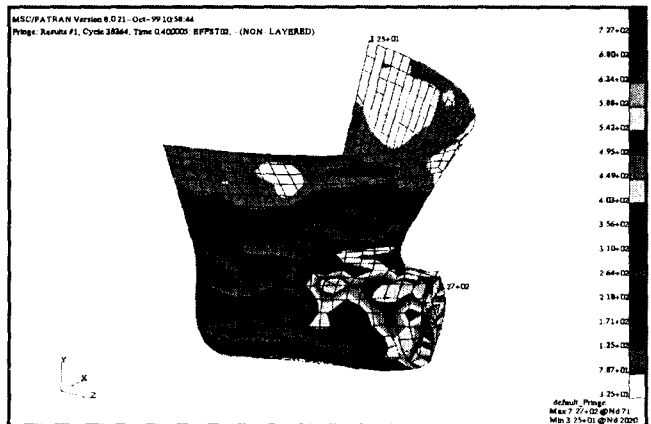


Fig. 5 Shell deformation and stress contour (35K)-type(b)

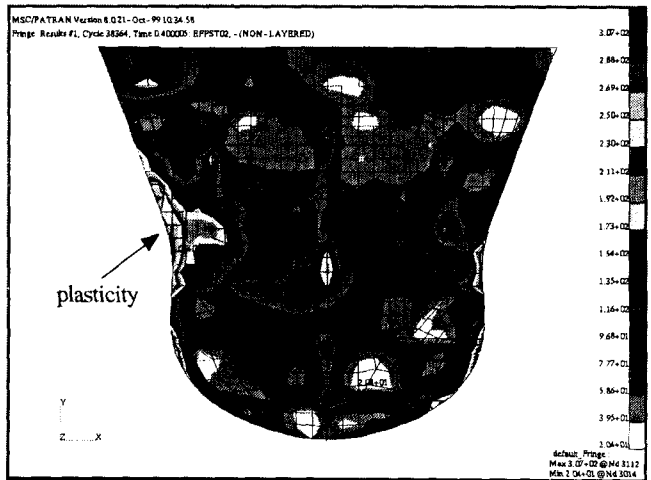


Fig. 6 Deformed collision bulkhead and stress contour (35K)-type(b)

형된 모습과 그 때의 등가 응력 분포의 모습을 보여주고 있다.

Fig. 4 및 5에서와 같이 시나리오 type (b)에 의한 구상선수의 충돌은 Photo 1 및 Woisin이 GKSS에서 수행한 선박간 충돌 시뮬레이션 실험에서 원자력선 방호벽에 충돌한 “Esso Malaysia”호 선수 모델의 손상과 유사한 양태를 보이고 있다. 이는 소성 대변형에 의한 붕괴 범위는 구상선수와 주위 구조 부분에만 국부적으로 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 충돌 후 0.4초 때 충돌격벽의 응력 분포를 보여 주고 있다. 여기서 충돌격벽의 허용응력값을 정적 항복응력값으로 가정하였다. 충돌후 구조부재의 허용 기준을 파단 변형률(rupture strain)의 값으로도 판단할 수 있겠지만 비록 파단 변형값에 도달하지 않았다 할 지라도 그 재료가 소성상태가 되면 이미 이러한 범위에 있는 구조 부재들은 충돌 직후 외부 또는 내부 수압에 견딜수 있는 강도와 강성이 저하하여 구조적 역할이 상실되었다고 볼수 있으므로 이는 설계 측면에서의 허용 기준이 되어야 한다고 사료된다.

또한 충돌문제에서의 재료 소성 여부는 충돌 후의 동적 항복 응력값으로 소성 상태를 판단해야겠지만 실제의 선체구조의 주 재료인 연강과 같은 금속에서의 변형률 값을 보고된 실험 결과에 의하면 1.0의 값을 넘지 못하며 이는 충돌 후 재료의 항복응력 증가는 정적 항복응력값과 비교하여 약 20% 정도의 증가를 가져올 뿐이었다. 그러므로 충돌을 고려한 설계를 할 때 허용 응력을 고려하여 재료의 정적 항복응력으로 기준 하여도 무리가 없다고 판단하였다.

선수부의 충돌 현상을 살펴보면, 초기 충돌 후 구상선수가 붕괴되고, 이후 여기서 흡수된 에너지가 Fig. 4 및 5에서 보듯 구상선수 근처와 충돌격벽 사이 부재들의 붕괴 없이 곧바로 선수부 외판을 타고 후방으로 전달되어 충돌격벽에 도달되며, 여기서 흡수된 에너지로 충돌격벽, 특히 외판과 충돌 격벽이 접하는 부분에서 소성이 발생되고 있음을 알 수 있다.

이는 충돌후 충돌 관입량(penetration depth)의 값이 비록 최초 접촉면에서 충돌 격벽 까지의 길이보다 훨씬 적더라도 충돌격벽은 이미 소성에 도달됨을 알 수 있다. 결국 화물의 유출 사고가 없는 임계 충돌 속도의 정의는 충돌 관입량의 함수가 아닌 충돌 격벽의 응력값이 소성에 도달할 때로 정의하는 것이 타당하다고 본다.

Fig. 7 ~ 9는 100K 정유운반선의 충돌 후 1.1초 때의 변형 및 응력 분포의 모습이고, Fig. 10은 10.5k 정유운반선의 충돌 후 1.0초 때, 그리고 Fig. 11은 300K 대형 유조선의 충돌 후 1.1초 때의 변형 및 응력 분포의 모습을 각각 보여 주고 있다.

100K에서도 35K 경우의 변형된 모습과 매우 유사하며, 충돌 범위는 35K때와 마찬가지로 구상 선수부위의 붕괴 거동도 국부적이며 충돌 격벽의 소성 상태도 가장자리에서 먼저 소성에 도달하였음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9에서 보면 중앙 종 거어더가 위치하고 있는 부위에서도 소성 상태의 높은 응력값을 보여주고 있으며, 이는 선수 충돌 후 선수부에서 흡수한 충돌 에너지값은 가장 먼저 선수 외판으로 전달되어 충돌격벽의 위치에서 소성 상태에 도달하며, 그 다음으로 중앙 종 거어더를 통하여 2차적으로 충돌격벽에 충돌 에너지를 전달하고 있음을 알 수 있다.

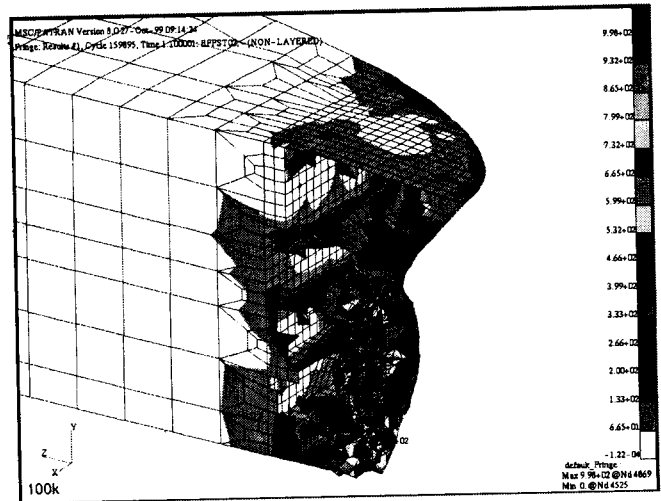


Fig. 7 Bow deformation and stress contour(100K)

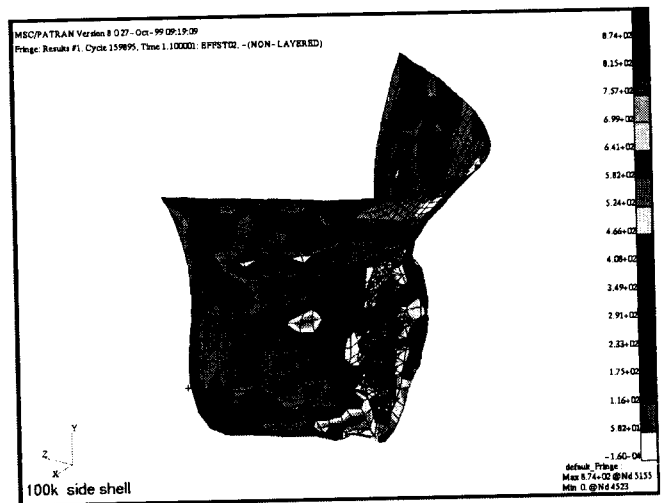


Fig. 8 Shell deformation and stress contour(100K)

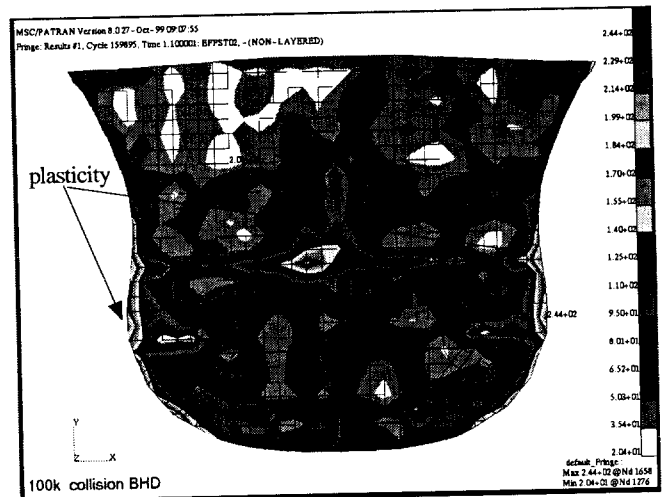


Fig. 9 Deformed collision bulkhead and stress contour(100K)

결국 충돌격벽의 소성 변형 또는 파단은 선수부의 흡수 충돌 에너지를 이들 연속된 주 부재로부터 어느 정도로 전달받는가에 따라 그 정도가 결정되며, 충돌을 고려한 선수부의 설계는 주 부재의 에너지 흡수능력에 따라 결정되어진다고 할 수 있다.

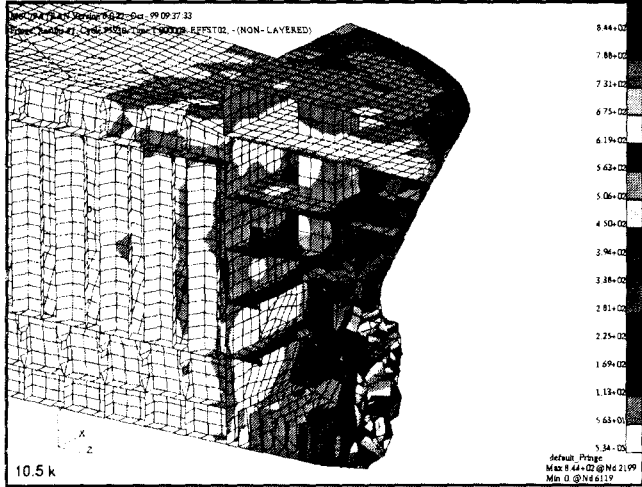


Fig. 10 Bow deformation and stress contour (10.5K)

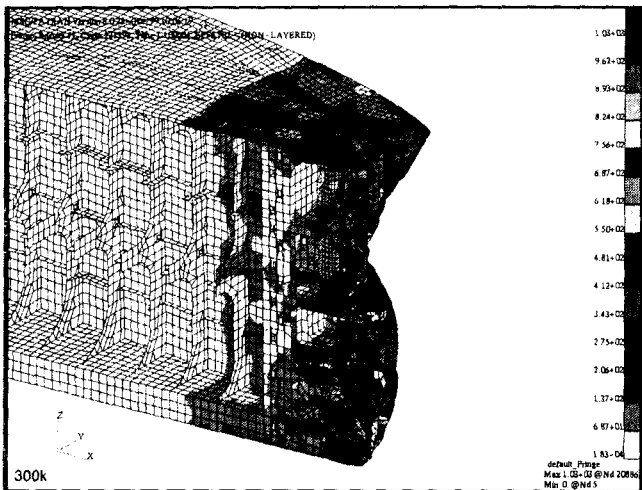


Fig. 11 Bow deformation and stress contour (300K)

4.2 충돌 임계 속도(critical speed, Vcr)

충돌 임계 속도는 선박이 충돌 후 충돌격벽이 국부적이라도 처음 항복 응력에 도달했을 때로 정의하였다.

Minorsky의 이론과 운동량 보존의 법칙으로 다음과 같이 충돌 임계속도(Vcr)을 구할 수 있다.

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2E_{cr}}{m}} \tag{2}$$

여기서 Ecr : 충돌 해석 수행 후 충돌격벽이 처음 항

복응력에 도달한 시간에서의 흡수 에너지
 m : 부가질량을 포함한 선박의 중량

또한 충돌시의 흡수에너지는 충돌 후 속도 감소에 따른 손실 운동에너지(Ekin)로 모두 전환되는 것으로 가정한다.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m(v_0^2 - v_x^2) \tag{3}$$

여기서 v₀ = 선박의 초기 충돌시 속도
 v_x = 충돌 후 충돌격벽에 처음 항복응력이 발생한 시간에서의 선박의 속도

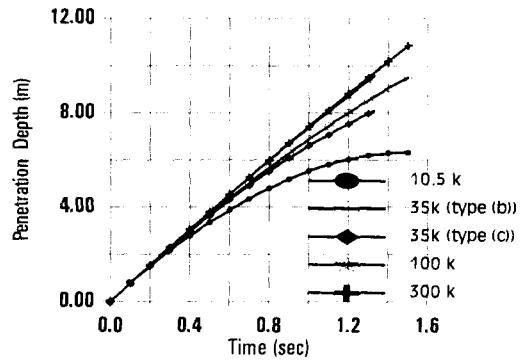


Fig. 12 Penetration depth-time relation

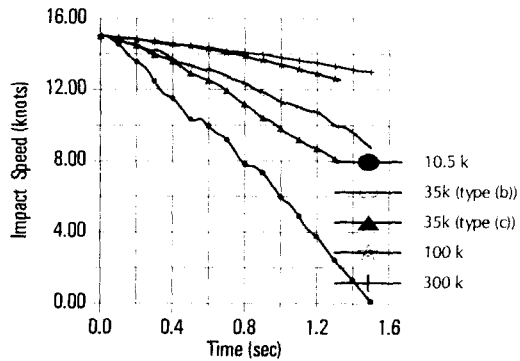


Fig. 13 Impact speed-time relation

Fig. 12에서 14는 관입량, 충돌속도 및 손실 운동에너지에 대한 시간의 변화를 보여주고 있다. 여기서 선박의 크기별로 각각 그 변화량이 다르며, 특히 같은 크기의 35K 정유운반선에서도 충돌 시나리오 type (b) 및 (c)에 따라서도 서로 차이가 있음을 알 수 있다.

또한 충돌 격벽이 최초 항복에 도달한 시간 및 그 때의 손실 운동 에너지, 그리고 충돌 임계 속도를 구하면 Table 2와 같다.

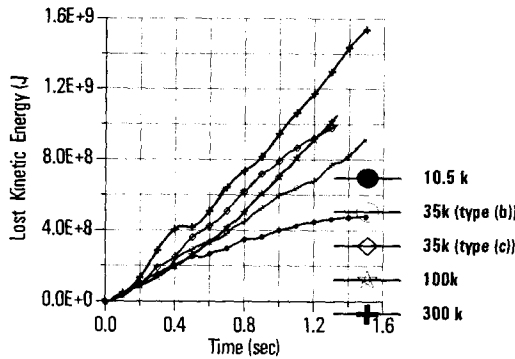


Fig. 14 Lost kinetic energy-time relation

Table 2 Summary of critical time, lost energy and speed

DWT	critical time (sec)	lost energy (J)	speed (knots)
10.5K(type b)	1.0	4.0×10^8	13.75
35K(type b)	0.4	2.27×10^8	6.05
35K(type c)	0.4	2.51×10^8	6.37
100K(type b)	1.1	8.084×10^8	7.27
300K(type b)	1.1	1.06×10^9	6.28

위의 표에서 살펴보면 선박의 크기에 따라 임계 속도가 각각 차이가 있으며, 특히 10.5K 정유운반선이 다른 선박에 비하여 충돌 격벽 전부의 선수 부분이 상대적으로 충돌 에너지를 많이 흡수하는 구조배치로 설계되어 있음을 알 수 있다.

이와 같이 선박의 크기별로 관입량, 손실에너지, 임계 속도 등이 일관성이 없이 각각 다르며, 이는 선수부의 설계가 충돌을 고려하지 못하고 설계되어 있다는 것을 알 수 있으며, 그럼에도 충돌격벽의 위치를 선박의 선형과 속도에 관계없이 일정하게 적용하는 것은 불합리한 방법이라고 사료된다.

그러므로 설계 측면에서 선수부의 설계가 선박의 선형, 선종 및 설계 속도에 따라 적용할 수 있는 설계 개념과 적용 공식이 필요하며, 향후 이러한 관점에서 최적의 선수부 설계 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수치해석 시뮬레이션 방법을 이용하여 크기 별 유조선이 강체에 정면으로 충돌했을 때를 가정하여 수행하였으며 이러한 방법은 추후 선박간 충돌(ship to ship collision)에서의 “충돌하중-변형 및 응력”의 상관관계를 비교하여 충돌을 고려한 설계와 충돌격벽의 위치를 제시할 수 있는 기초 연구가 된다고 본다. 따라서 본 연구결과는 이러한 가정된 시나리오 범위 내에서 다음과 같이 결론을 제시하고자 한다.

- (1) 시나리오 type (b)에 보인 구상선수의 충돌은 Woisin의 실험결과와 유사한 양태를 보이고 있다. 즉 소성 대변형에 의한 붕괴 범위는 주로 구상선수 부분에만 영향을 준다.
- (2) 충돌 압축력은 종방향 주 부재를 타고 후방으로 전달되며 격벽에서의 최대 탄소성 응답은 외판과 충돌격벽이 접하는 부분에서 발생된다.
- (3) 충돌격벽에서 액체화물이 유출되지 않을 수준의 임계 충돌 속도의 정의는 충돌 관입량의 함수가 아닌 충돌 격벽의 응력 값이 소성에 도달할 때로 정의하는 것이 타당할 것이다.
- (4) 선박의 크기별로 관입량, 손실에너지, 임계 속도 등이 일관성이 없이 각각 다르며, 이는 선수부의 설계가 충돌을 고려하지 않고 설계되어 있다는 것을 의미하며, 특히 충돌격벽의 위치를 선박의 선형, 선종 및 속도와 관계없이 일정적으로 적용하는 것은 불합리한 방법이라고 사료된다.
- (5) 충돌격벽의 위치는 선박의 질량, 충돌속도 및 선수부의 부재 강성 등의 함수일 것이다. 충돌격벽의 위치를 결정하기 위하여 먼저 최소의 부재로써 최대의 에너지를 흡수할 수 있는 선수부의 최적 설계가 제시되어야 할 것이며 또한 흡수된 충돌 에너지가 후방으로 전달되지 않는 구조 배치가 필요하다. 이는 수치 해석적 또는 실험적 방법으로 정도를 검증해야 한다.
- (6) 다음으로, 제시된 선수부의 내충돌 설계개념과 선박들의 선형 및 설계 속도에 따라 충돌격벽의 위치를 결정하는 상관관계식을 도출하고, 이를 유조선, 컨테이너선, 여객선, 살물선 등의 상선에 차등 적용하여 일반화된 식으로 검증할 수 있도록 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

Abramowicz, W., Jones, N.(1984). “Dynamic axial crushing of square tubes”, *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 2, No. 2, pp 179~08.

Amdahl, J., Soreide, T. H.(1981). “Energy absorption in axially compressed cylindrical shells with special reference to bulbous bows in collision”, *Norwegian Maritime Research*, No. 4, pp 2~11.

Chang, P. Y., Seibold, F. and Thasanatom, C.(1990). “A rational methodology for the prediction of structural response due to collisions of ships”, *SNAME Transactions*, Vol. 88, pp 173~193.

Che, J. S. and Jang, G. B.(1995). “Numerical simulation of structural response of D/H VLCC in collision”, *PRADS*, pp 2.1036~2.1047.

EGge, E. D. and Bockenbauer, M.(1991). “Calculation of the collision resistance of ships and its assessment for classification purposes”, *Marine Structures*, Vol. 4, pp 35~56.

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973/1978, Annex 1, Ch II, Reg. 13F.

International Convention for the Safety of Life at SEA, 1974 as amended, Ch. II-1, Reg. 10 & 11.

Jones, N. and Birch, R. S.(1990). “Dynamic and static axial

- crushin-g of axially stiffened square tubes”, J. of Mech. Engng. Science. Vol. 204, pp 293~310.
- Kierkegaard, H.(1993). “Ship bow response in high energy collision”, Marine Structures, Vol. 6, pp 359~376.
- Lehman, E., Yu, X.(1995). “Progressive of folding of bulbo-us bows”, PRADS, pp 2.1048~2.1059.
- Minorsky, V. U.(1959). “An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants”, J. of ship Research, Vol. 3, No. 1, pp 1~4.
- MSC/DYTRAN User’s Manual, V3.0, The MacNeal Shuwendler Corp. USA.
- Ohnishi, T, Kawakami, H., Yasukawa, W., Nagasawa, H.(1982). “On the ultimate strength of bow construction”, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, Vol. 151, pp 174~186.
- Ohtsubo, H., Suzuki, K.(1995). “The crushing mechanics of bow structure and its optimal design against head on collision”, PRADS, pp 2.1060~2.1071.
- Paik, J. K., Pedersen, P. T.(1995). “Collision strength analysis of double hull tanker”, Trans. of the Soc. of Naval Arch. of Korea, Vol. 32, No. 1.
- Pedersen, P. T., Valsgaard, S., Olsen, O., Spangenberg, S.(1993). “Ship’s impats; Bow collisions”, Int. J. Impact. Engng., Vol. 13, No. 2. pp 63~187.
- Shin, Y. S., Park, M. K.(1999). “A study on the bow collapse of high-speed passenger craft in collision with bridge pier”, J. of the Soc. of Maritime Safety”, Vol. 5-1, pp 1~9.
- Valsgard, S., Pettersen, E.(1982). “Simplifier nonlinear analysis of ship/ship collision”, Norwegian Maritime Research, No. 3, pp 2~17.
- Wierzbicki, T.(1983). “Crushing behavior of plate intersections, in structural crashworthness”, Butterworth and Co., London.
- Woisin, G.(1976). “Collision test of GKSS”, Translation from Jahrbuch der Schiffbau Technischnischen Gesellschaft, Germany.

2000년 3월 24일 원고 접수

2000년 5월 15일 수정본 채택