

論 文

강체 충돌선의 충돌을 고려한 이중선체 유조선의 구조설계

이 상 갑* · 박 수 송**

Structural Design of Double Hull Tanker in Collision by Rigid Colliding Ship

Sang-Gab Lee · Soo-Song Park***

〈 목 차 〉

Abstract	3.3 재료의 파단변형률
1. 서 론	3.4 웹 프레임 간격
2. 수치 시뮬레이션 시나리오	3.5 스트링거 간격
3. 충돌 시뮬레이션	3.6 이중선체 간격
3.1 피충돌선의 충돌위치	4. 결 론
3.2 충돌선의 충돌속력	참고문헌

Abstract

The object of this study is to get the superior double hull structure to its crashworthiness against collision comparing absorbed energy capacities of its various types with each other, varying material properties, collision positions and velocities, and structural arrangements such as double hull width, web and stringer spaces, etc. Local absorbed energy capacities, failure behaviors and damage extents of their members are also considered during collision in addition to the estimations of their global ones. This paper describes a series of numerical simulations of collisions between DWT 45,000 oil tanker(struck ship) and DWT 10,500 rigid one(striking ships) using Hydrocode LS/DYNA3D. Collisions are assumed to occur at the middle of struck ship with striking one moving at right angle to its centerline.

* 한국해양대학교 해양시스템공학부
 ** 대동조선(주) 기본설계팀

The following remarks were obtained through this study: More flexible the double hull structure is, much superior its crashworthiness against collision is. The increment of double hull width does not give much influence than other factors do. The exact use of material property such as failure strain is also important on the numerical simulation of collision.

1. 서 론

선박의 충돌 시 선각구조의 파괴양상(Failure Mode), 충돌 흡수에너지(Absorbed Energy of Collision) 및 손상(Damage)에 대한 선체의 구조 강도를 예측할 수 있으면 올바르게 경제적인 이중선체구조(Double Hull Structure)의 설계가 가능할 것이다. 충돌사고의 경우 화물창 격벽의 파괴, 특히 내판 파단(Fracture of Inner Shell)은 다량의 기름을 유출시킬 수 있는 직접적인 원인이 되므로 이러한 선박의 설계에 있어 내판 파단에 필요한 충돌력(Collision Force)을 정확히 산출하여 이중선체 유조선의 충돌강도를 평가할 수 있어야 한다. 충돌 흡수에너지는 충돌 전후의 운동에너지(Kinetic Energy)의 차이로서 두 선박구조의 탄·소성변형, 좌굴, 파단 등의 구조파괴변형으로 인하여 흡수되는 에너지이다. 바람직한 내충돌 구조로서는 이러한 흡수에너지가 크고 건조비가 저렴하여야 할 것이다.

최근 성능이 우수한 컴퓨터의 발전과 함께 자동차 충돌해석 분야에 상용화되어 있고 군사분야에도 훌륭한 성과를 주고 있는 동적 비선형 범용 유한요소 프로그램 MSC/DYTRAN[1], LS/DYNA3D[2] 등을 선박의 충돌/좌초 문제의 수치 해석에 사용하고 있다. 실선 규모의 이중선체 유조선의 충돌/좌초해석을 수행하여 여러 구조부재의 거동을 파악하고 새로운 이중선체 설계 개념과 에너지 흡수 메커니즘(Mechanism)을 제시하고 있다[3~6]. 기존의 좌초실험[7]을 이용하여 LS/DYNA3D의 검증용 위한 수치 시뮬레이션의 결과는 대체로 만족스러웠다[8].

다양한 시나리오의 실선 규모 충돌 실험의 제약성으로 인하여, 보다 다양하고 체계적인 피충돌선

의 이중선체(Double Side Hull) 구조변경을 통한 수치 시뮬레이션을 수행하여 피충돌선 선체구조의 각 부재별 손상거동의 파악과 동시에 흡수에너지의 능력을 비교 검토하여 보다 내충돌에 우수한 선각구조를 제시할 필요가 있다고 사료된다.

본 연구는 여러 형태의 이중선체 유조선의 충돌에 대한 흡수에너지 능력을 비교 검토하여 내충돌에 우수한 이중선체구조를 얻는데 그 목적이 있다. 여기서는 선체 재료의 물성치, 충돌 속도, 피충돌선에서의 충돌위치 등을 변화시켰고, 이중선체의 폭, 웹 프레임(Web Frame) 및 스트링거(Stringer) 간격 등의 구조 배치도 변화시켰다. 이중선체구조의 전체 흡수에너지 능력, 손상거동 및 손상영역 뿐 만 아니라, 각 부재에 대해서도 고려함으로써 각 부재의 충돌에 대한 내충돌의 기여도를 평가하였다.

LS/DYNA3D를 이용하여 DWT 45,000급 유조선의 피충돌선과 DWT 10,500급 유조선의 충돌선에 대한 충돌 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 충돌선이 피충돌선의 종단면 중심에 수직으로 충돌하는 것으로 가정하였다. 작은 치수의 보강재(Stiffener)의 플랜지(Flange) 등도 Shell 요소를 사용하였으며 피충돌선은 변형체로 모델링하였다. 피충돌선의 내충돌 특성 파악과 수치 시뮬레이션의 소요 시간의 절약을 위하여 충돌선을 강체(Rigid)나 강체와 같은 탄성체로 간주하여 일반적으로 충돌해석을 수행한다[6, 9, 10]. 본 연구에서 충돌선은 강체로 간주하여 모델링하였다. 충돌 시뮬레이션을 통한 선체손상거동에는 재료의 물성치와 운동에너지의 영향에 크게 좌우됨으로 파단변형률(Failure Strain)을 고려하였고, 변형률 속도 의존성(Strain Rate Dependent) 재료를 사용하였다.

2. 수치 시뮬레이션 시나리오

기존의 충돌 수치 시뮬레이션[4, 5]에서는 피충돌선을 3개 웹 프레임 간격의 양단에 대칭조건을 취하였으나, 본 연구에서는 Fig. 2.1과 같이 피충돌선은 화물창의 격벽(Bulkhead) 까지 포함하는 5개 웹 프레임 간격을 취하여 횡방향은 중앙 종단면에서 구속하고 종방향은 중앙단면을 대칭으로 그리고 화물창 격벽의 자유도는 구속하지 않았다. 이렇게 함으로써 피충돌선의 경계조건에서 충돌에 의한 동적 소성거동이 충분히 발생하지 않도록 할 수 있다. 피충돌선 주위의 유체의 영향은 무시하였고, 충돌선은 10%의 부가 질량을 추가하여 고려하였다. 본 연구에서는 선축구조의 각 부재에 대한 충돌 흡수에너지 능력 및 시간에 대한 이력(History)의 정보를 구하기 위하여 Fig. 2.2와 같이 각 주요 부재별로 구분하였다. 선체는 연강으로 가정하였고 충격에 의한 재료의 변형률 속도 의존성과 비선형 변형률 경화도 고려하는 탄소성 재료로서 물성치는 Table 2.1과 같다.

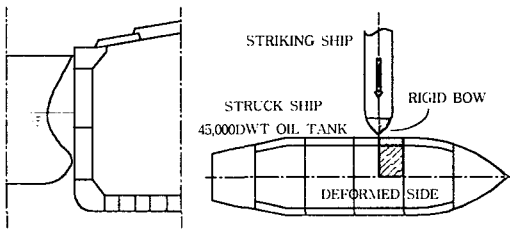


Fig. 2.1 Numerical model outline

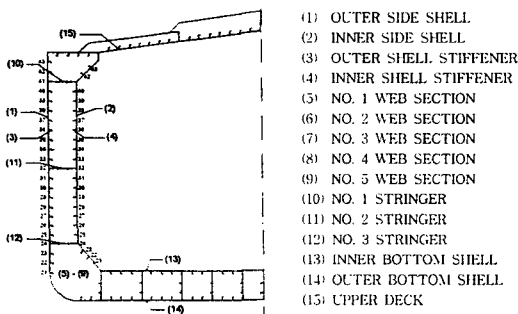


Fig. 2.2 Members of struck ship

Table 2.1 Material properties

Density	7850 kg/m ³
Young Modulus	206 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Yield Stress	235 MPa
Ultimate Stress	445 MPa
Dynamic Yield Stress	D : 40.4 s ⁻¹ , p : 5
Failure Plastic Strain	0.2
Strain-Stress Relationship	
Plastic Strain	Stress (MPa)
0.00000	235
0.01583	245
0.19786	445
0.50000	445

Table 2.2는 피충돌선 DWT 45,000급 유조선의 주요치수를 보여주고 있다. 본 연구에서 수행할 충돌 수치 시뮬레이션의 시나리오는 Table 2.3과 같이 6가지 경우에 대하여 고려한다. 여기서 Original Type이란 Table 2.2에서와 같은 본 연구의 6가지 경우의 기준이 되는 선축 구조이다. Case 1은 충돌선을 피충돌선의 중앙 웹 프레임에 그리고 웹 프레임 사이에 충돌시키는 2가지 경우, Case 2는 충돌선 속도를 4.0, 5.0 및 6.0 knots로 충돌시키는 3가지 경우, Case 3는 피충돌선의 탄소성 재료의 파단변형률을 0.1, 0.2 및 0.3으로 변경시키는 3가지 경우, Case 4는 웹 프레임의 간격을 2.64 및 3.01m로 변경시키는 2가지 경우, Case 5는 스트링거의 갯수를 2개 및 3개로 변경시키는 경우이고, 마지막 Case 6는 이중선축 간격을 1.6, 2.0 및 2.4m로 변경시켰을 경우를 말한다. 이때 이중선축구조가 재배치되었을 때 각 부재 치수는 변경을 시키지 않으므로 구조배치의 영향을 보다 명쾌히 비교·검토할 수 있을 것이다.

Table 2.2 Dimension of struck ship (m)

LBP×B×D-Scantling Draft	171.0×32.2×18.0-12.2
Double Bottom Depth (db)	2.15 → 2.30 Center Side
Side Hull Width (ds)	2.00
Web Space	2.64
Stringer Space	15.90 A/B 9.60 A/B 4.16 A/B

Table 2.3 Collision scenarios

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Original Type	to Web	5.0 kt	0.2	2.64 m	3	2.0 m
Collision Position	between Web					
Speed		4.0 kt 6.0 kt				
Failure Strain			0.1 0.3			
Web Space				3.01 m		
Stringer Number					2	
Hull Width						1.6 m 2.4 m

재료의 변형률이 파손치에 도달하면 유한요소를 없애지게 함으로써 판 부재 등의 찢어짐을 가능하게 한다. 이 경우 보(Beam)나 트러스(Truss) 요소들은 파단변형률에 대한 강성이 Shell 요소에 비하여 큼으로 본 연구에서는 매우 작은 치수의 보강재의 플랜지 등도 모두 쉘 요소를 사용한다. 본 시뮬레이션의 대표적인 피충돌선과 충돌선의 유한요소 모델링은 Fig. 2.3과 같고, 약 15,000개의 쉘 요소로 구성되어 있다. 충돌선의 총 중량은 모델링에 고루 분포시킨다.

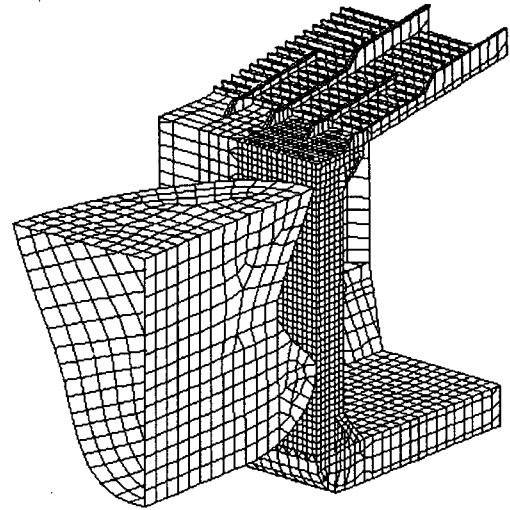
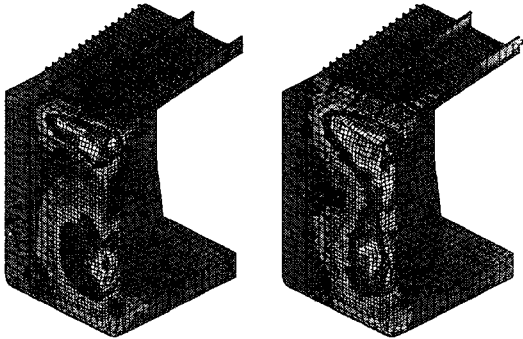


Fig. 2.3 Mesh configuration of deformable striking and struck models

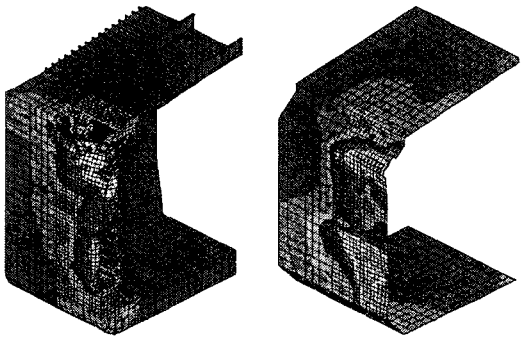
3. 충돌해석 시뮬레이션

Fig. 3.1은 Original Type의 피충돌선의 충돌 후의 동적거동을 보여주고 있다. Fig. 3.1(a)와 (b)는 각각 외판과 내판에 파단이 발생하는 순간에서의 피충돌선의 손상 및 응력분포를 보여주고 있다. Fig. 3.1(c)와 (d)는 충돌선이 되튀는(Rebounding) 순간에서의 피충돌선 전체와 내판에서의 손상 및 응력의 분포를 보여주고 있다. Figs. 3.2~3.7은 각 시나리오의 피충돌선 흡수에너지, 충돌력 및 충돌선의 충돌속력의 충돌선의 관입량(Penetration)에 대한 이력의 전반적인 거동을 보여 주고 있다. 여기서 충돌선의 관입량은 충돌선이 강제임으로 선수끝단에서 측정하였다. Fig. 3.8은 앞의 6가지 경우 중에서 대표적으로 Case 1의 피충돌선의 각 부재별의 흡수에너지를 Original Type과 비교하여 충돌선의 관입량에 대한 이력을 보여주고 있다. 각 시나리오에 대한 부재별 흡수에너지의 이력을 나타내는 그래프의 갯수가 너무 많기 때문에 Figs. 3.9~15와 같이 Original Type과 각 시나리오에 대하여 각 부재들의 흡수에너지를 충돌선의 관입량에 대한 이력으로 한 그래프에 나타내었다. Figs. 3.2~3.8의 경우에는 각 그래프에 외판 및 내판이 파손되는 순간과 충돌선이 되

튀는 순간의 충돌선의 관입량을 각각 원형, 사각형 및 마름모꼴의 심볼로 나타내고, Figs. 3.9~3.15의 경우에는 외판 및 내판이 파손되는 순간의 관입량을 수직직선으로 표시하여 각 경우를 상대적으로 비교·검토하는데 도움을 주고자 하였다.



(a) Rupture of outer shell at 0.27 sec (b) Rupture of inner shell at 1.09 sec



(c) Rupture at rebound at 1.98 sec (d) Rupture of inner shell at rebound 1.98 sec

Fig 3.1 Typical rupture configuration of struck ship of original type

3.1 피충돌선의 충돌위치 (Case 1)

피충돌선의 선측 충돌부위의 유연성에 기인하는 것으로 충돌선이 피충돌선의 웨브 프레임과 사이에 충돌할 경우, 전체적으로 피충돌선의 충돌

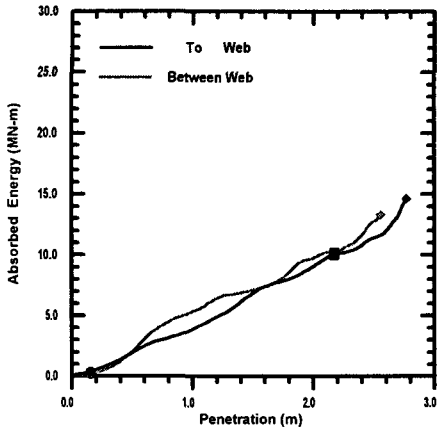
흡수에너지, 충돌선의 충격력과 속력의 경향은 비슷하지만 웨브 프레임 사이에 충돌되는 경우가 피충돌선의 충돌에너지의 흡수율이 약간 높고 충돌선도 약간 미리 정지하는 것을 볼 수 있다. 부재 중 외판과 외판 보강재는 웨브 프레임 사이에 충돌하는 경우에, 웨브 프레임과 스트링거는 웨브 프레임에 충돌할 경우에 충돌에너지의 흡수율이 조금 더 높다. 어느 경우에도 외판이 충돌에너지의 흡수율이 가장 높고, 웨브 프레임 사이에 충돌할 경우는 외판 보강재가, 웨브 프레임에 충돌할 경우는 웨브 프레임이 충돌에너지의 흡수율이 외판 다음으로 높다는 것을 알 수 있다.

3.2 충돌선의 충돌속력 (Case 2)

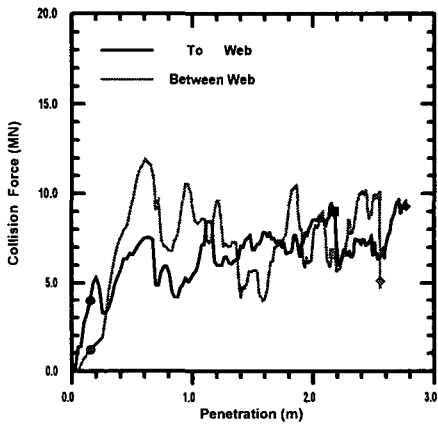
충돌선의 충돌속력이 증가함에 따라 충돌선의 관입량은 증가하지만 되튀는 시간은 별로 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 충돌에너지의 흡수율도 증가하고 있다. 충돌선의 관입량이 같을 때는 흡수에너지의 크기는 비슷함을 알 수 있다. 피충돌선의 각 부재도 거의 같은 경향을 보여주고 있고, 외판이 충돌에너지 흡수율이 가장 높고, 웨브 프레임, 외판 보강재 등의 순서대로 높다. 스트링거와 내판은 내판의 파단이 시작됨에 따라 흡수에너지가 증가함을 알 수 있다.

3.3 재료의 파단변형률 (Case 3)

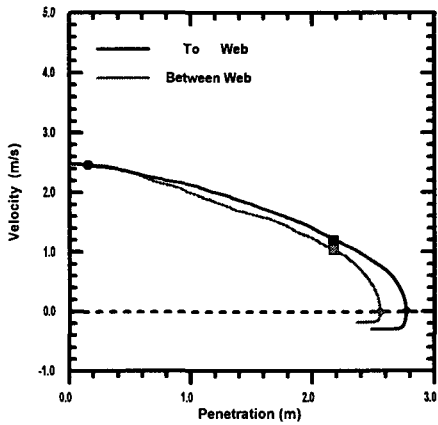
피충돌선의 재료 파단변형률이 증가함에 따라 피충돌선 전체 및 각 부재의 충돌에너지의 흡수율은 매우 크게 증가하고 있고, 충돌선의 충돌속력과 관입량도 현저히 줄어들고 있다. 파단변형률이 큰 선체의 강판을 사용하는 것이 가장 효과가 클 것으로 사료되고, 본 연구와 같은 충돌 시뮬레이션에서는 파단변형률의 선택이 해석결과에 큰 영향을 줄 것임으로 보다 정확한 실험 데이터를 이용하여야 할 것이다.



(a) Absorbed energy

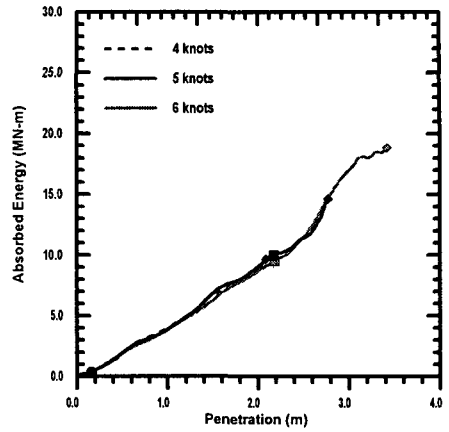


(b) Collision force

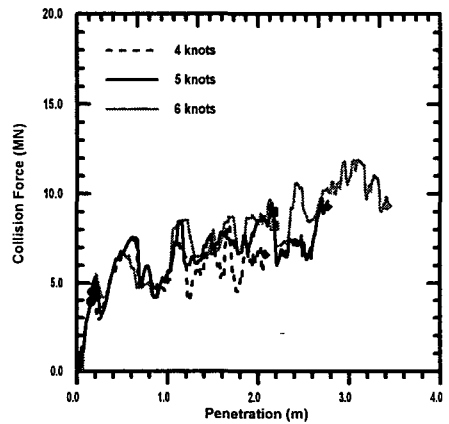


(c) Velocity

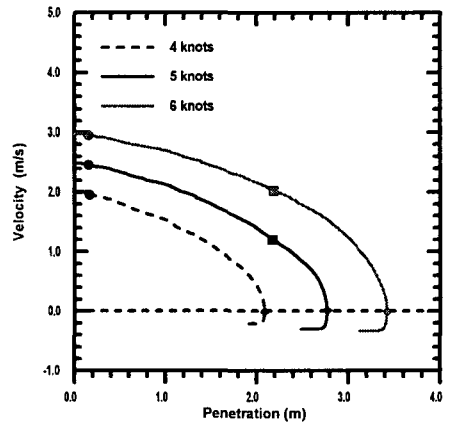
Fig. 3.2 Global response of Case 1



(a) Absorbed energy

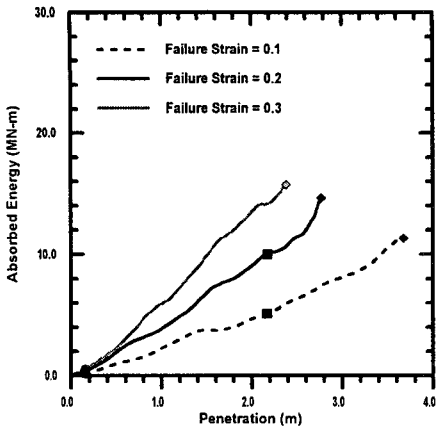


(b) Collision force

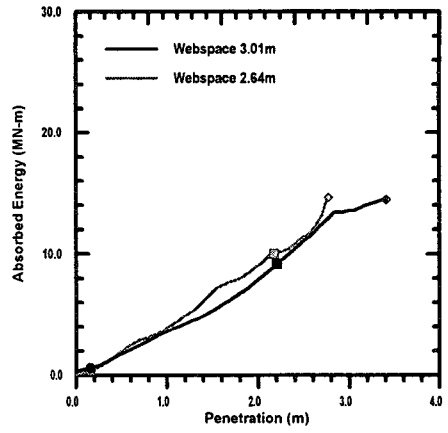


(c) Velocity

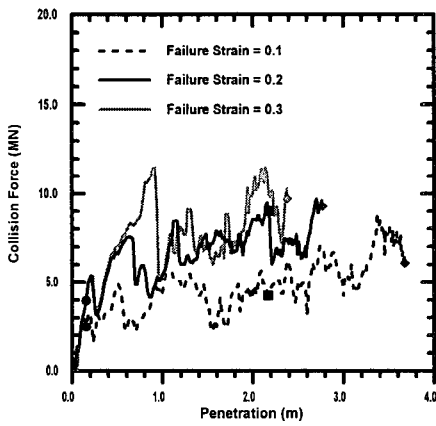
Fig. 3.3 Global response of Case 2



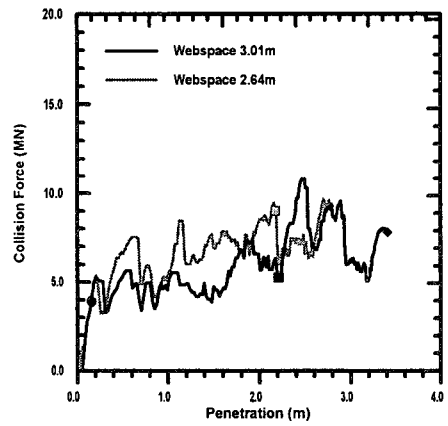
(a) Absorbed energy



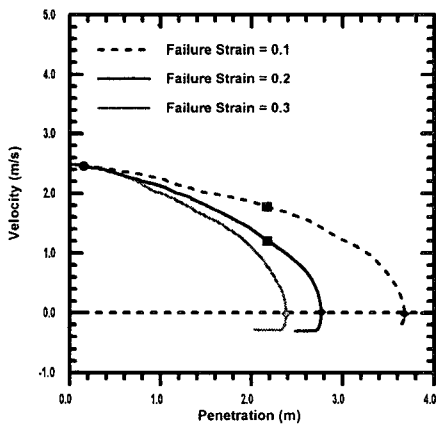
(a) Absorbed energy



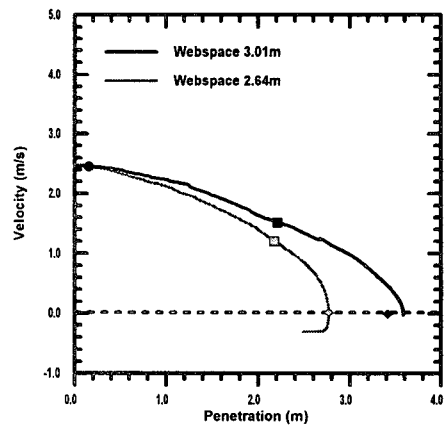
(b) Collision force



(b) Collision force



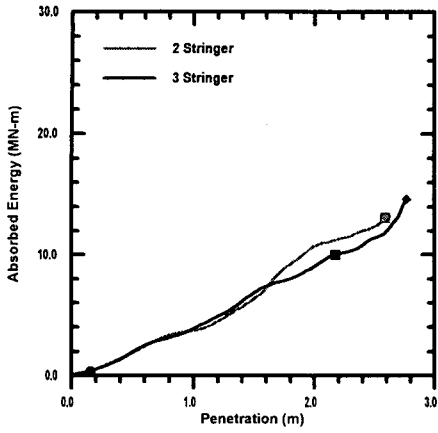
(c) Velocity



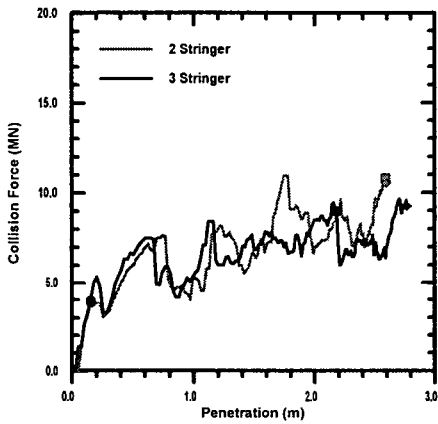
(c) Velocity

Fig. 3.4 Global response of Case 3

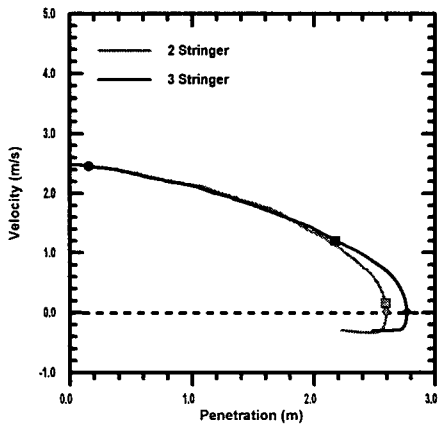
Fig. 3.5 Global response of Case 4



(a) Absorbed energy

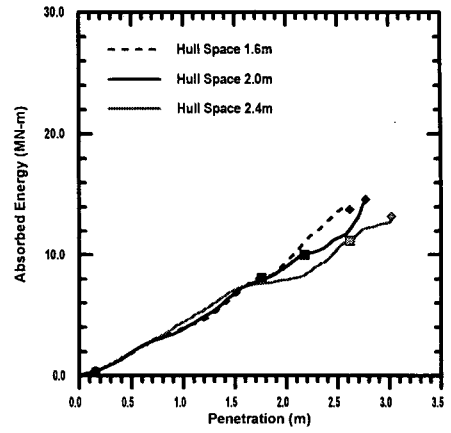


(b) Collision force

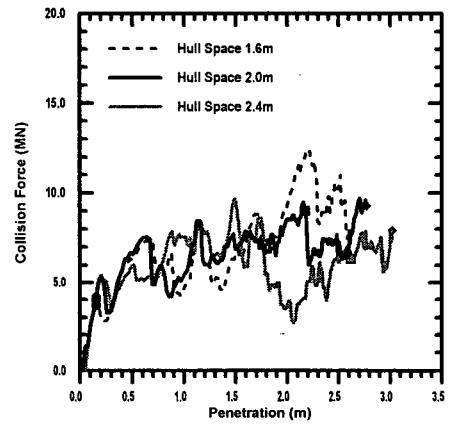


(c) Velocity

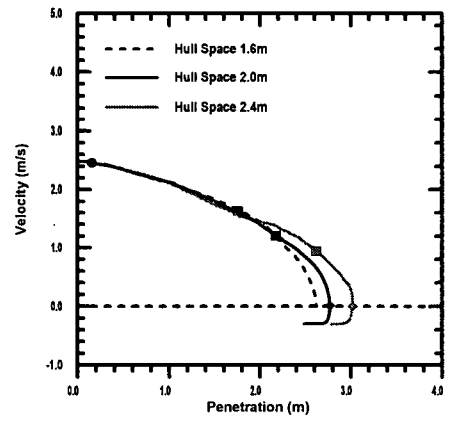
Fig. 3.6 Global response of Case 5



(a) Absorbed energy

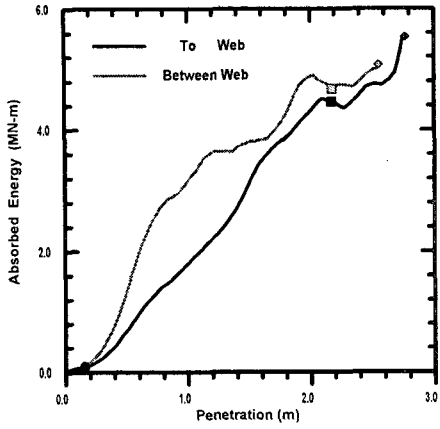


(b) Collision force

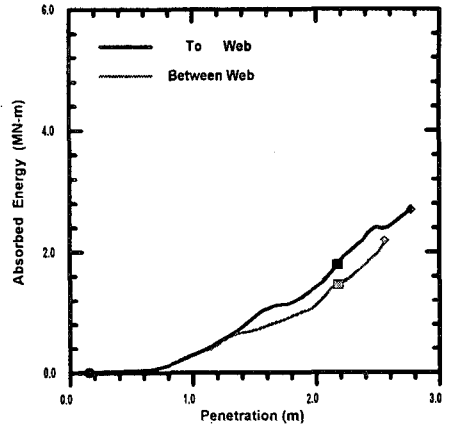


(c) Velocity

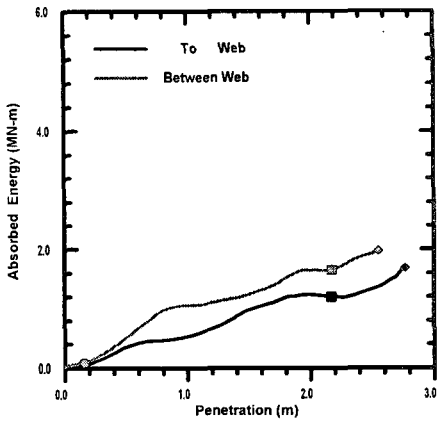
Fig. 3.7 Global response of Case 6



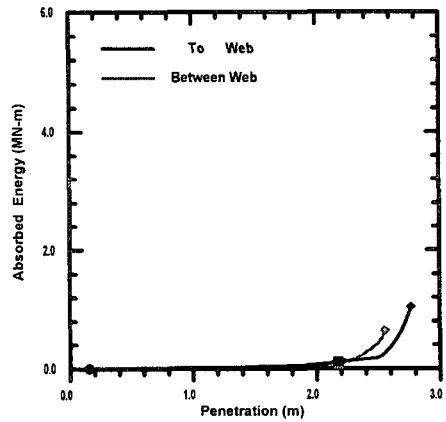
(a) Outer shell



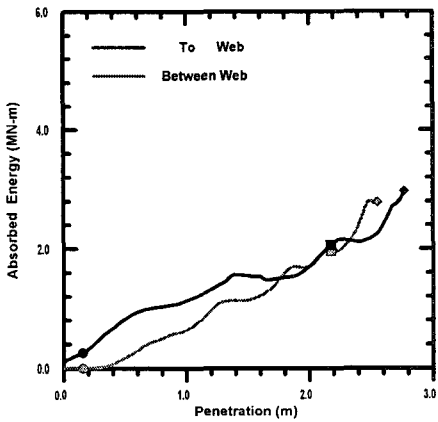
(d) Stringer



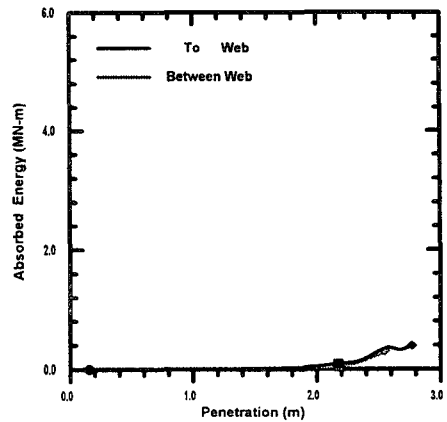
(b) Outer shell stiffener



(e) Inner shell



(c) Web



(f) Inner shell stiffener

Fig. 3.8 Member response of Case 1 (cont.)

Fig. 3.8 Member response of Case 1

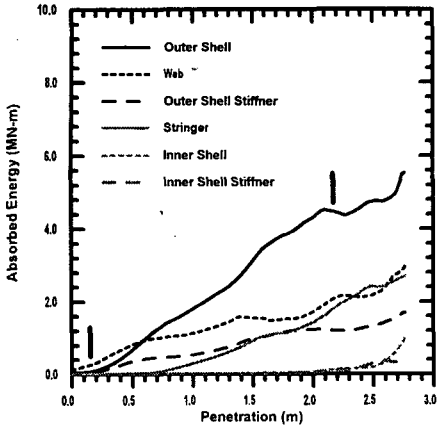


Fig. 3.9 Member responses of Original Type

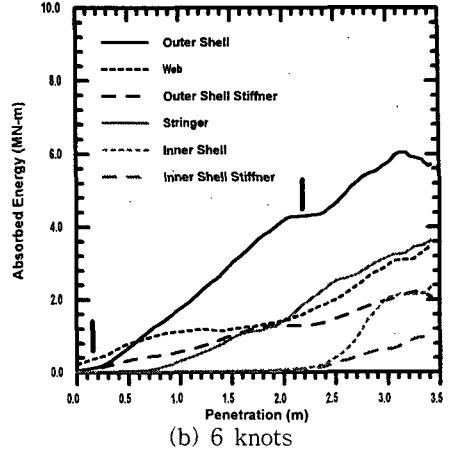


Fig. 3.11 Member responses of Case 2

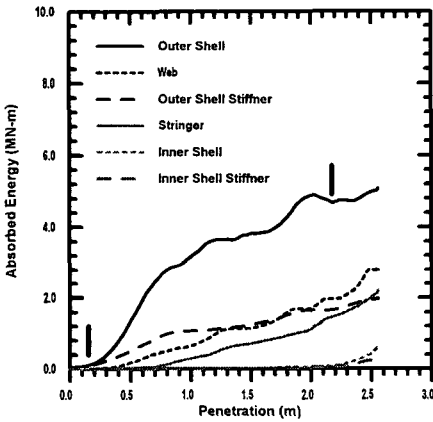
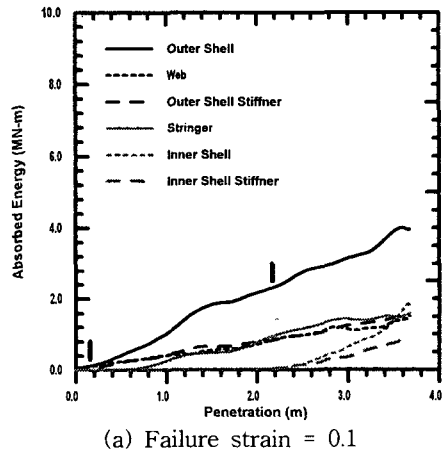
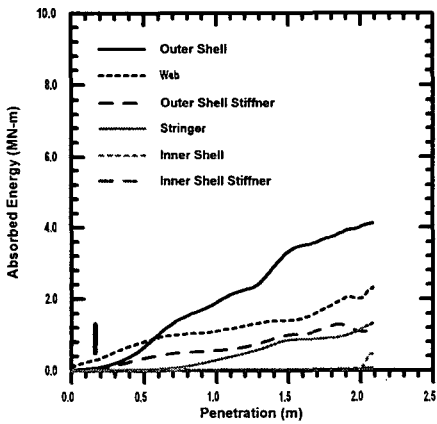


Fig. 3.10 Member responses of Case 1

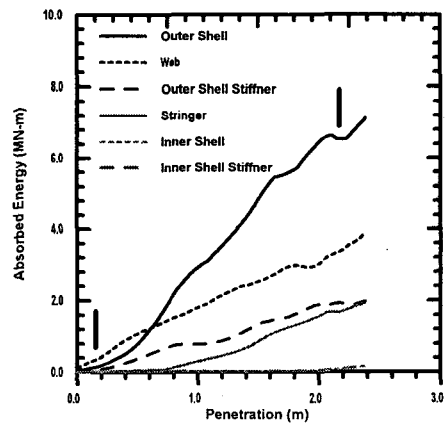


(a) Failure strain = 0.1



(a) 4 knots

Fig. 3.11 Member responses of Case 2 (cont.)



(b) Failure strain = 0.3

Fig. 3.12 Member responses of Case 3

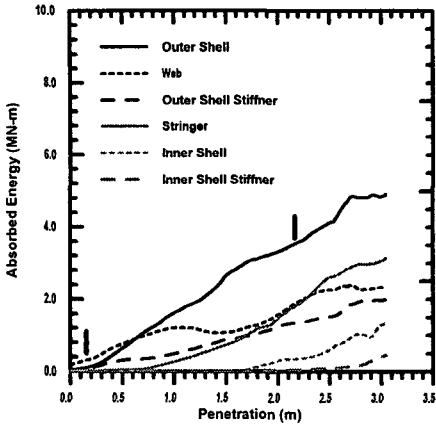
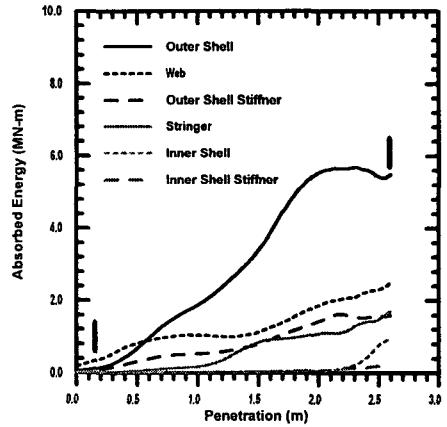


Fig. 3.13 Member responses of Case 4



(b) Hull space 2.4m

Fig. 3.15 Member responses of Case 6

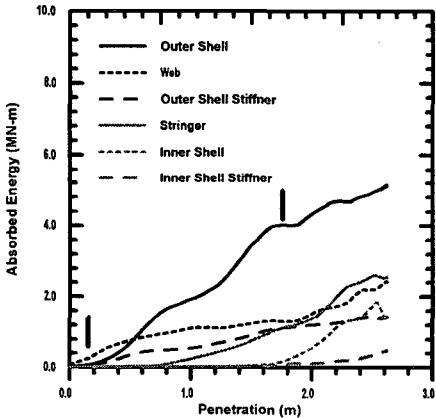
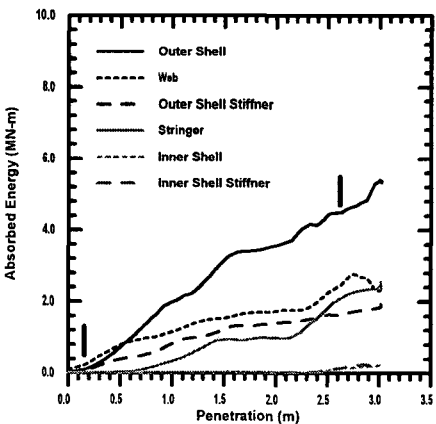


Fig. 3.14 Member responses of Case 5



(a) Hull space 1.6m

Fig. 3.15 Member responses of Case 6 (cont.)

3.4 웨브 프레임 간격 (Case 4)

일반적으로 10등분되어 있는 화물창의 웨브 프레임의 간격을 9등분으로 나눈 경우와 비교하였다. 이중선체구조의 내충돌성은 선체 구조의 유연성에 의하여 많은 영향을 받는다고 할 수 있다. 후자인 경우가 기준 선박의 선체구조 보다 강성은 작지만 유연하다고 할 수 있다. 기준 선박과 충돌에너지의 흡수율이 낮지만 대체로 비슷함을 알 수 있고, 충돌선의 충돌속력 및 관입량 또한 모두 비슷한 경향을 갖는다. 그리고 각 부재도 충돌에너지의 흡수율은 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 이렇게 미소한 차이라면 이중선체구조의 중량 및 공수 질감이라는 인자를 고려한다면 웨브 프레임의 간격은 무리하지 않은 범위에서 늘이는 것도 고려할 수 있을 것이다.

3.5 스트링거 간격 (Case 5)

스트링거 간격에 차이가 있음에도 외판 및 내판의 파단시점과 충돌선의 관입량에 있어서도 비슷하고 간격이 커진 경우가 오히려 충돌에너지의 흡수율이 약간 높게 나타남을 알 수 있다. 충돌선이 크게 관입되면 외판과 외판 보강재에서 스트링거 간격이 큰 경우에 충돌에너지의 흡수율

이 다소 높아지고, 스트링거에서는 다소 낮은 흡수율을 가진다는 것을 알 수 있다. 이를 미루어 스트링거의 갯수도 웹 프레임과 같이 이중선체 구조의 중량 및 공수 절감이라는 인자를 고려한다면 무리하지 않는 범위에서 갯수를 줄이는 것도 고려할 수 있을 것이다.

3.6 이중선측 간격 (Case 6)

이중선측 간격의 변화에도 불구하고 외판 및 내판의 파단은 비슷한 시간과 충돌선 관입량에서 발생하고 있고, 충돌에너지의 흡수율은 이중선측 간격이 좁아짐에 따라 충돌선의 관입이 커지면서 약간 증가하고 있지만 큰 차이는 없고, 충돌선의 관입량과 되튀는 시간도 이중선측 간격이 증가함에 따라 약간의 증가가 있지만 이것 또한 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이중선측 간격이 2.4m 일 경우 오히려 에너지 흡수율이 약간 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이것으로 미루어 외판의 파단 후 충돌선의 접촉면적이 증대됨으로 이중선측 간격의 증대보다는 접촉면적의 확대가 충돌력의 감당에 큰 역할을 한다고 볼 수 있다. 충돌에너지 흡수 측면에서 이중선측 간격의 증감은 그다지 영향이 없다고 사료된다.

4. 결론

이중선체 유조선의 충돌 시 내충돌에 강한 이중선체구조의 특성을 파악하기 위하여 선체 재료의 물성치, 충돌 속도, 피충돌선에서의 충돌위치, 이중선측의 폭, 웹 프레임 및 스트링거 간격 등의 인자들에 대한 충돌 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 점을 발견할 수 있었다.

1. 이중선체구조는 유연할수록 충돌에너지의 흡수율이 대체로 증가하고 있다.
2. 선체 중량 및 공수의 절감이라는 면과 충돌에너지 흡수 면에서도 무리하지 않는 한 웹 프레임과 스트링거의 갯수를 줄이는 것을 고려해 보는 것도 좋을 것 같다.
3. 이중선측 간격은 충돌에너지 흡수 측면에서 그다지

영향이 없다고 사료된다.

4. 선체 재료의 파단변형률과 같은 물성치를 보다 정확히 파악하여야 할 것이다. 본 연구와 같은 동적 구조해석의 결과에 크게 영향을 미치는 인자 중의 하나이다.
5. 장래 내충돌 선체구조의 전조규정이 정해지면 실선 실험이 곤란한 선박의 경우 선체구조설계를 위한 효율적인 도구로서 본 연구와 같은 실선규모의 수치 시뮬레이션은 반드시 필요한 도구로서 많은 관심과 수치 시뮬레이션을 통한 정보를 축적하여야 할 것으로 사료된다.
6. 지금 수행 중인 탄성체의 충돌선을 이용한 수치해석 시뮬레이션을 통하여 본 연구의 결과를 검증하여, 보다 다양한 이중선측구조의 배치 변경을 통하여 본 연구에서 유추한 부분을 확인하고자 한다.

참고문헌

- [1] MSC/DYTRAN User's Manual, Ver. 4.5, The MacNeal Shwendler Corp. U.S.A., 1998.
- [2] LS/DYNA3D User's Manual, Ver. 9.40, Livermore Software Technology Corp., 1998.
- [3] H. Lensenlink et. al., "A 3-dimensional numerical simulation of the full scale Dutch-Japanese full scale ship collision tests with ALE fluid-structure interaction", FEM World Conf., Monte Carlo, Nov. 1993.
- [4] J.Y. Kim, K.J. Lee, J.M. Kang, D.H. Kim, S. Rashed and D. Xiang, "Behavior of double hull VLCCs in collision", PRADS '95, Sep. 1995.
- [5] J. Che and G. Jang, "Numerical simulation of structural response of D/H VLCC in collision", PRADS '95, Sep. 1995.
- [6] O. Kitamura, "Comparative study on collision resistance of side structure", Int. Conference on Designs and Methodologies

- for Collision and Grounding Protection of Ships, Aug. 1996.
- [7] J. Rodd and S. McCampbell, "Double hull tanker grounding experiments", Proc. of the 5th ISOPE Conference, The Hague, The Netherland, Vol 4, June 1995.
- [8] S.G. Lee and Y.G. Chung, "A Study on the critical collision speed of double hull VLCC", Proc. of the 7th ISOPE Conference, Hawaii, Honolulu, June 1997.
- [9] D. J. Ammerman and J. C. Daidola, "A comparison of methods for evaluating structure during ship collision", Int. Conference on Designs and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, Aug. 1996.
- [10] A. Sano, O. Muragishi, T. Yoshikawa, T. Motoi and A. Murakami, "Strength analysis of a new double hull structure for VLCC in collision", Int. Conference on Designs and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, Aug. 1996.