

이중 선체 선박의 충돌 강도 해석

이 경 언* · 원 석 희* · 백 점 기** · 이 제 명*** · 김 철 홍****

* 부산대학교 대학원, ** 부산대학교 조선해양공학과 교수, *** 부산대학교 조선해양공학과 조교수,
**** (주)현대미포조선

The Assessment of Structural Crashworthiness in Collision Using Double Skinned Structural Model

Kyung-Ern Lee* · Suk-Hee Won* · Jeom-Ki Paik** · Jae-Myung Lee***
and Cheol-Hong Kim****

* Graduate school of Pusan National University

** Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

*** Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

**** Hyundai Mipo Dockyard

요 약 : 선박의 충돌 또는 좌초 사고에 대응하기 위하여 위험 화물을 운반하는 선박의 경우 이중 선체를 채용하고 있으나 이중 선체의 충돌 에너지 흡수 정도와 내판의 파단 여부를 효과적으로 판단하는 기술은 아직 연구 대상으로 남아 있다. 본 연구에서는 실제 선박의 충돌강도 해석을 하기 위해서 상용해석코드인 LS-DYNA3D를 사용하고 다양한 시나리오에 따라 동적 해석을 수행하였다. 본 연구를 위하여 46K의 Chemical/Product Carrier를 해석 대상 선박으로 정하여 하중 조건과 충돌 속도를 달리하여 Energy-Indentation, Force-Indentation에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과 및 정보는 충돌 사고에서의 매커니즘과 충돌 강도 평가에 유익한 정보를 제공하게 될 것이라 판단된다.

핵심 용어 : 선박 충돌, *Energy-Indentation*, *Force-Indentation*,

ABSTRACT : To deal with ship collision or grounding, double hull structure has been applied to ships carrying dangerous cargoes. Studies about ability of double hull structure to absorb collision energy and determining fracture state are still under researching. In this study, commercial analysis code, LS-DYNA3D, is used to analyze collision strength of ships in various scenarios. 46K Chemical/Product Carrier is used as analysis subject ship. Study about Energy-Indentation and Force-Indentation is conducted under conditions that weight and collision velocity are changed. Results of this study are very helpful to make mechanism of collision accident clear and to supply useful information about collision strength criteria.

KEY WORDS : Ship collisions, Energy dissipation capability, Structural crashworthiness

1. 서언

최근 유조선이나 위험물 운반선의 사고에 의한 적재화물의 유출방지가 관심의 대상이 되고 있다. 1989년 알래스

카 연안에서 발생한 유조선 엑슨 발데즈호의 사고를 통해서 미국 영해를 운항하는 모든 유조선에 대하여 이중 선체 구조의 의무화를 규정한 “오염 방지법”을 제정, 발효 중에 있다. 이중 선체 구조에서는, 충돌이나 좌초시 내판에 처짐이 발생할 가능성도 있으며, 내판의 찢김, 파단에 의해 기름이 유출될 수 있기 때문에 좌초에 대하여 이중 선체 구조는 충돌에 대하여는 이중 선체의 충돌 메커니즘에 대하여 이해하는 것이 반드시 필요하다.

* erni76@pusan.ac.kr 051)510-2750

** jeompaik@pusan.ac.kr 051)510-2429

*** jaemlee@pusan.ac.kr 051)510-2342

**** nawonski@pusan.ac.kr 051)510-2750

**** tmdus@hmd.co.kr 052-250-3837

이런 선체 구조의 설계 기준은 충돌 사고가 발생했을 때 선체 내판이 파단되지 않을 만큼 충돌 강도가 충분하도록 하는데 있다. 이러한 충돌 강도 해석을 위하여 많은 연구가 행하여지고 있지만[1-3], 현실적으로 실험적 연구는 많은 시간과 비용 때문에, 이론적 방법은 매우 복잡하고 어려운 이유로 충돌 해석을 하는데 적절하지 못하다. 본 연구에서는 충돌 좌초문제에서 널리 사용되고 있는 범용해석코드인 LS-DYNA3D를 사용하여 실제 선박의 충돌 메커니즘과 선박의 충돌 안정성 평가를 시행하였다.

2. 충돌 시나리오

본 해석을 위하여 46K Chemical/Product Carrier를 해석 대상으로 정하였다. Table 1은 해석 선박의 주요치수를 나타내고 있다.

Table 1 대상 선박의 주요 치수

Length B.P (m)	174.00
Breadth (m)	32.20
Depth (m)	18.80
Design draft (m)	11.00
Design speed (knots)	15.2
Width of double side (m)	2

피충돌체는 대상 선박의 mid-ship을 포함하는 One-holder를 해석대상으로 하여 실 치수에 따라 모델링하였고, 구속조건은 경계조건으로 구현해주었다. Trans. Bulkhead가 지나가는 부분은 고정으로, Center Bulkhead와 만나는 부분에서는 단순지지로 하여 실제 선박에서의 경계조건보다 더욱 비관적으로 경계조건을 설정하였다. 피충돌체의 총 요소수는 대략 14만개이고 요소 크기는 100~150mm이다. 충돌체는 46K 선박의 선수부를 강체로 하여 모델링 하였다. Fig.1은 본 해석 대상 선박의 typical web section을 보여주고 있다. [4]

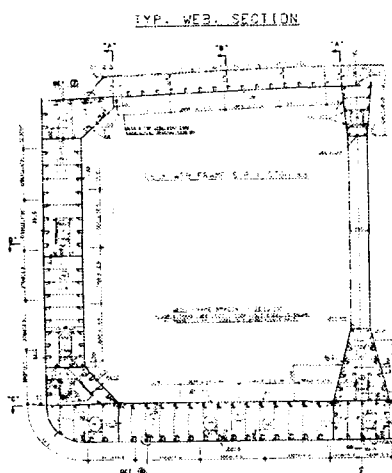


Fig. 1 Typical web section

본 해석시에는 Design speed를 기준으로 하여 충돌의 속도를 5, 10, 15 knots로 변화를 달리 하였다. 또한, 충돌부위를 달리하기 위하여 피충돌체는 Full loading condition으로 하고, 충돌체는 Loading condition을 바꿔가며 시리즈 해석을 수행하였다. Table 2는 Loading condition을 설명하였고, Fig.2는 충돌 모델을 그림으로 간략하게 보여주고 있다.

Table 2 Loading condition

Loading condition	Displacement (tonne)	draft(m)
Ballast draught	29552.7	6.81
Cargo loading draught	56277.9	12.2
No.2 group loading condition	38971.3	8.78

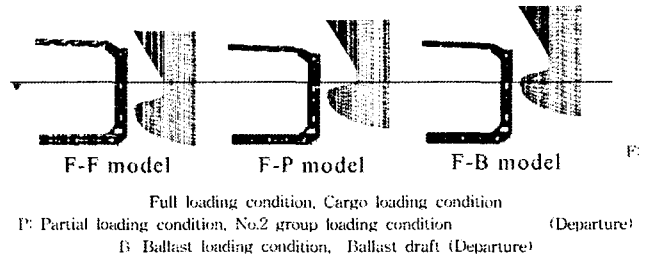


Fig. 2 해석 대상의 Draft

F-F model의 경우에서 web frame에 충돌하는 경우, web frame 사이에 충돌하는 경우를 별도로 해석하여 선박의 충돌 강도를 비교 분석하였다. web frame에 충돌하는 경우를 On web frame에서 OW Model이라 하고 web frame 사이에 충돌하는 경우를 Between web frame에서 BW Model이라 하였다.

3. 유한요소해석

변형률 경화 효과, Necking 효과, 파단 변형률을 고려하였으며, Fig.2와 같이 F-F model, F-P model, F-B model의 3가지 하중 상태에서 충돌 속도를 5, 10, 15 knots로 변경하면서 해석을 진행하였다.

3.1 해석 결과

- Force, Energy와 Indentation의 관계

Force는 이중선체 구조모델과 강체 모델과의 접촉 반력으로 정의 되며 Indentation은 강체 모델의 진입량에 의해

정의된다. 그리고, Energy는 Force-Indentation의 그래프에서 해당 면적을 적분한 것으로 정의 한다.

3.1.1 F-F model

- 충돌 특성

Fig.4 OW Model의 유한 요소 해석 결과로서 Indentation-Force 그래프이다. OW Model은 충돌체가 피충돌체의 웨브에 접촉되면서 웨브가 반력이 급격히 증가하다가 곧 웨브가 항복하여 반력이 감소(1)한다. 계속 진입하여 외판이 파단이 시작되면서 반력이 줄어든다(2). 이후, 충돌체의 선수 Flare가 선측의 Upper deck에 충돌하기 시작하면서 반력이 급격하게 증가하다가(3), 종내 내판이 파단됨에 따라 반력이 감소(4) 하게 된다.

Fig.5는 BW Model의 유한 요소 해석 결과로서 Indentation-Force 그래프이다. BW Model은 충돌체의 선수부가 외판의 웨브 프레임 사이에 충돌하여 하중이 증가(1)한다. 충돌체가 진입함에 따라 외판이 파단되기 시작하여 저항력이 감소(2)되다가 충돌체의 선수 Flare가 선측의 Upper deck에 충돌하기 시작하면서 반력이 급격하게 증가(3)하게 된다. 끝내 내판이 파단되면서 하중이 감소(4)하게 된다. 두 Model의 해석 결과를 바탕으로 하여 Energy-Indentation관계를 정리하였다. 충돌 위치는 같은 model에서는 아래와 같은 충돌 속도가 작은 경우보다 큰 경우가 피충돌체의 흡수에너지는 더 큰 것임을 알 수 있다. 또한, 처음 충돌이 시작된 순간부터 web frame에 부딪히는 OW model이 약 2m까지는 BW model보다 흡수에너지가 크게 되다가, 그 이후에는 충돌체의 접촉부위가 더욱 큰 형상을 가지게 되는 BW model의 흡수에너지가 더 크게 됨을 알 수 있다.

이중 선체의 충돌 강도 성능은 내판이 파단하지 않는 한계 상태까지의 외부 충돌 에너지의 흡수 능력으로 평가할 수 있다[5]. 본 연구에서는 각 속도에서 계산되어진 흡수에너지를 기준으로 하여 속도의 변화에 따른 흡수에너지와 속도와의 관계식을 도출하였다(Fig.7). 이 관계식으로부터 이 해석 모델의 속도 변화에 따른 에너지 흡수 능력을 Fig.7에서처럼 추정하였다. Fig.7에서 충돌체의 운동에너지와 피충돌체의 흡수에너지를 비교하여 다음과 같이 선박의 안전성을 검토하였다.

$$\Delta E > W_C : \text{Unsafe}$$

$$\Delta E < W_C : \text{Safe}$$

ΔE : Kinetic energy, W_C : Absorbed energy

Fig.9은 내판이 파단되기 시작했을 때의 변형 모습을 나타내었다.

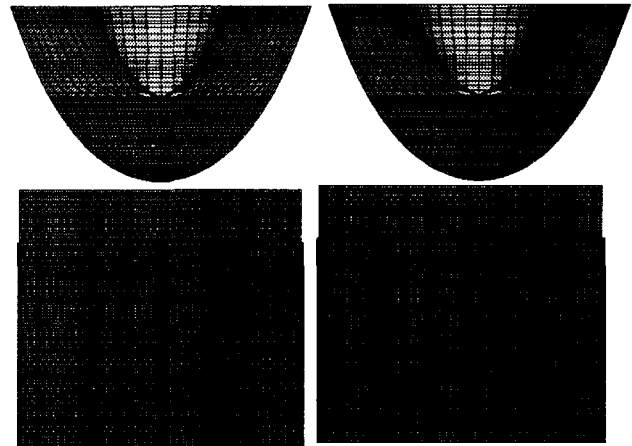


Fig. 3 OW Model 과 BW Model

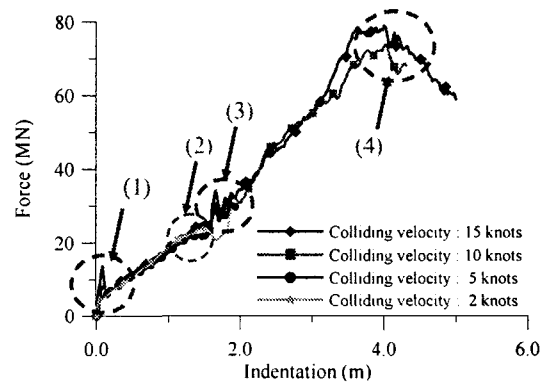


Fig.4 OW Model Force-Indentation

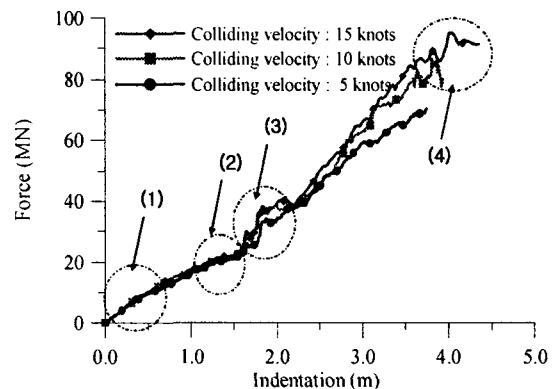


Fig.5 BW Model Force-Indentation

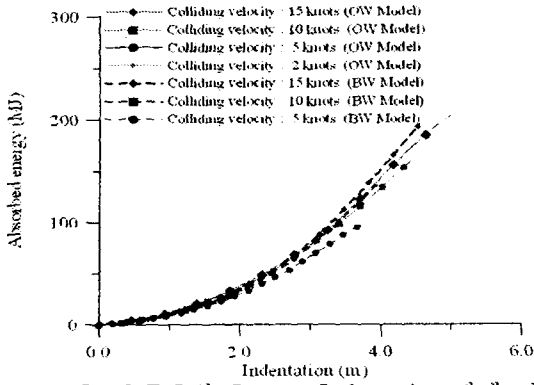


Fig.6 F-F의 Energy-Indentation 관계 곡선

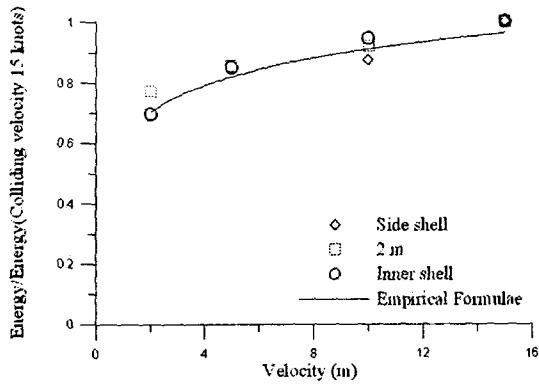


Fig.7 F-F의 Energy-Velocity 관계 곡선

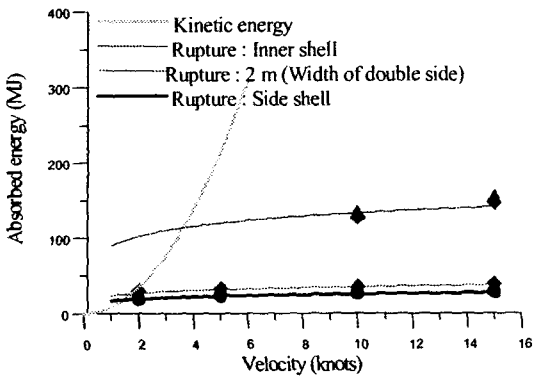


Fig.8 F-F의 Energy-Velocity 관계 곡선

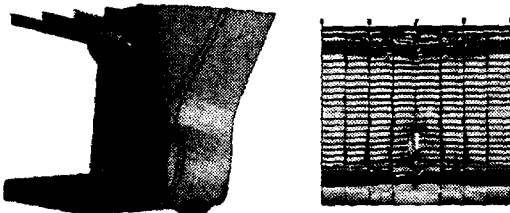


Fig.9 내판 파단시의 변형 형상

3.1.2. F-P Model

- 충돌 특성

Fig.10은 F-P model의 유한 요소 해석 결과로서 Indentation-Force 그래프이다. 충돌체가 피충돌체의 웨브에 접촉하기 시작하면서 반력이 급격히 증가하다가 곧 웨브가 항복하여 반력이 감소(1)한다. 계속 진입하여 외판이 파단이 시작되면서 반력이 줄어든다(2). 이후, F-F모델과는 달리 충돌체의 선수부가 계속 진입해 가면서 선측의 Stringer 부재의 압괴거동으로 급격하게 하중이 감소하다가(3), 중내 내판이 파단 됨에 따라 반력이 감소(4) 하게 된다. Fig.13에서 보듯이 충돌체의 운동에너지와 피충돌체의 흡수에너지를 비교하여 다음과 같이 선박의 안전성을 검토하였다.

$$\Delta E > W_C : \text{Unsafe}$$

$$\Delta E < W_C : \text{Safe}$$

ΔE : Kinetic energy, W_C : Absorbed energy

Fig.14은 내판이 파단되기 시작했을 때의 변형 모습을 나타내었다.

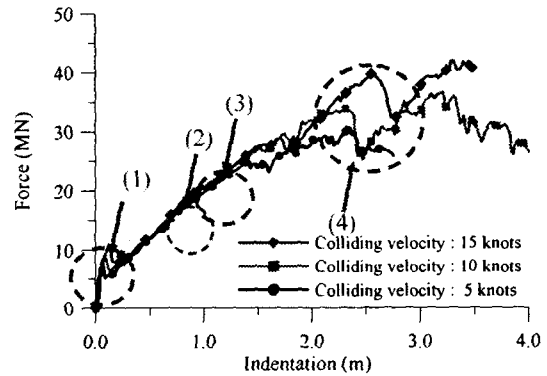


Fig.10 F-P의 Force-Indentation 관계 곡선

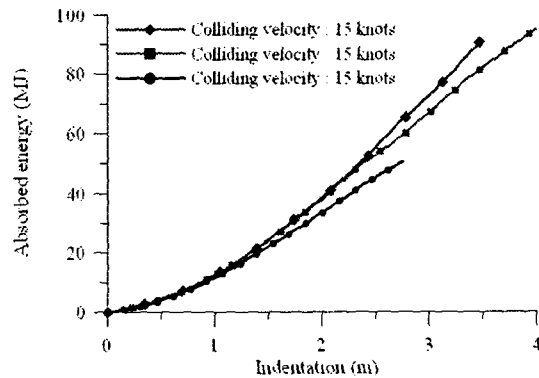


Fig.11 F-P의 Energy-Indentation 관계 곡선

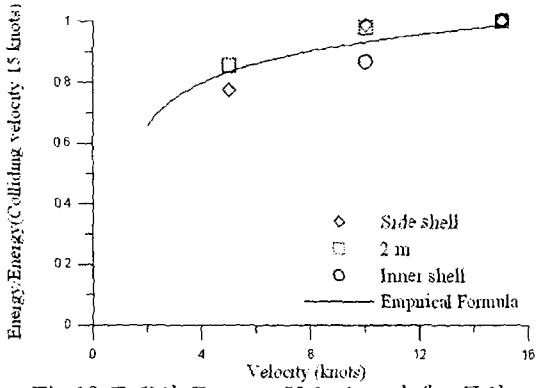


Fig.12 F-P의 Energy-Velocity 관계 곡선

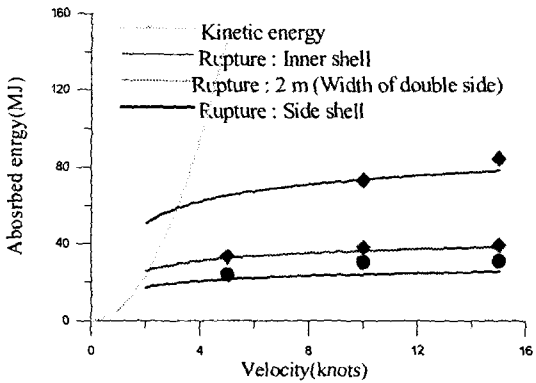


Fig.13 F-P의 Energy-Velocity 관계 곡선

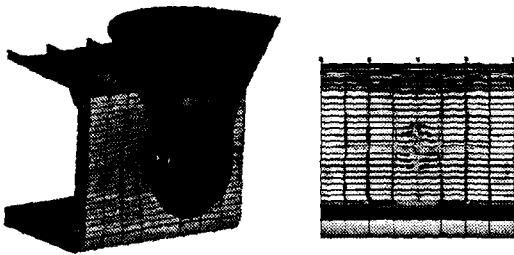


Fig.14 내판 파단시의 변형 형상

3.1.3 F-B Model

- 충돌 특성

Fig.14은 F-F model의 유한 요소 해석 결과로서 Indentation-Force 그래프이다. 충돌체가 피충돌체의 웨브에 접촉하여 하중이 급격히 증가하다가 곧 웨브가 항복하여 하중이 감소(1)한다. 외판이 파단이 시작되면서 하중이 줄어든다(2). 이후, 충돌체가 계속 진입해가면서 stringer가 좌굴하여 하중이 급격하게 감소하다(3), 끝내 내판이 파단 됨에 따라 하중이 감소(4) 하게 된다.

Fig.17에서 보듯이 충돌체의 운동에너지와 피충돌체의 흡수에너지를 비교하여 다음과 같이 선박의 안전성을 검토

하였다.

$$\Delta E > W_C : \text{Unsafe}$$

$$\Delta E < W_C : \text{Safe}$$

ΔE : Kinetic energy, W_C : Absorbed energy

Fig.18은 내판이 파단되기 시작했을 때의 변형 모습을 나타내었다. (Fig. 17)

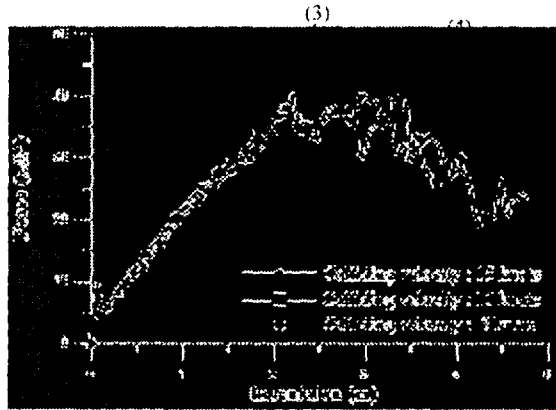


Fig.14 F-B의 Force-Indentation 관계 곡선

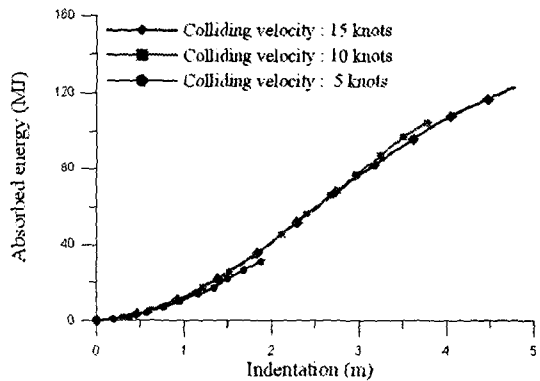


Fig.15 F-B의 Energy-Indentation 관계 곡선

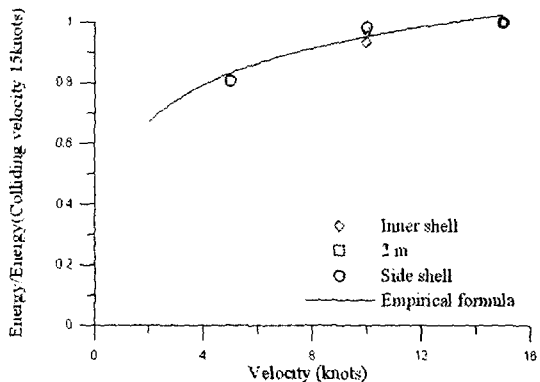


Fig.16 F-B의 Energy-Velocity 관계곡선

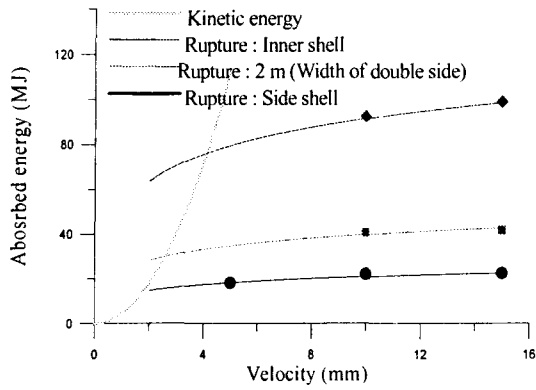


Fig.17 F-B의 Energy-Velocity 관계 곡선

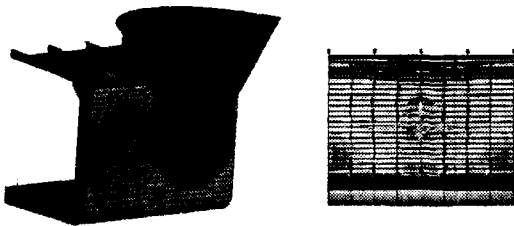


Fig.18 내판 파단시의 변형 형상

4. 고찰 및 고언

본 연구에서는 이중선체 선박의 충돌시 내충돌 강도를 평가하기 위해 하중 조건과 충돌 속도 하중이 작용하는 위치를 달리 하면서 상용해석코드인 LS-DYNA 3D를 사용하여 해석을 수행하였다. 이 해석 결과 Force, Energy-Indentation 그래프에서 충돌체 진입량의 증가에 따른 구조파손의 거동특성 및 내판이 파단되기 전까지의 힘과 에너지 흡수 능력을 분석하였다[6].

본 해석을 통하여 본 해석대상 선박인 이중선체선박의 내판이 파단이 발생할 때까지의 충돌부위별 메커니즘과

충돌선의 선속과 하중 조건에 따라서 이 선박의 안전여부를 확인할 수 있었다. 또한, 같은 동종의 선박이 아니더라도 피충돌선의 충돌 위치와 충돌선의 충돌에너지를 예측할 수 있다면 실제 선박의 충돌 사고에서도 피충돌선의 안전성을 예측해 낼 수 있을 것이다.

또한, 본 연구를 통하여 얻어진 결과들은 해양 오염 및 인적, 물적 손실을 방지하기 위하여 이중선체 구조의 합리적인 설계에 유용하게 사용되리라 사료된다.

5. 참고문헌

- [1] Jones, N., A literature survey on the collision and grounding protection of ships, Ship Structure Committee, Report No.SSC-283, 1979.
- [2] van Mater, P.R. and Giannotti, J.G., Critical evaluation of low energy ship collision damage theories and design methodologies, Literature Search and Review, Ship Structure Committee, Report No.SSC-285, 1979.
- [3] Pettersen, E., Analysis and design of cellular structures, Dept. of Marine Technology, The Norwegian Institute of Technology, Report No. UR-79-02, 1979.
- [4] Ou Kitamura, Comparative Study on Collision Resistance of Side Structure, Marine Technology, Vol. 34, No.4, Oct. 1997, pp293-308
- [5] J.K Paik and A.K. Thayamballi, "Ultimate limit state design of steel-plated structure", John Wiley & Sons, 2003
- [6] J.K. Paik, I.H. Choe and A.K. Thayamballi, On accidental limit state design of spherical type LNG carrier structures against ship collisions, 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships, Copenhagen, Denmark, July 1-3, 2001,