

비대칭 손상 선박의 잔류 종강도 평가를 위한 간이 해석 알고리즘 개발

정준모^{1,†} · 남지명¹ · 이민성¹ · 전상익¹ · 하태범²
인하대학교 조선해양공학과¹
한국선급 기술연구소²

Development of a New Simplified Algorithm for Residual Longitudinal Strength Prediction of Asymmetrically Damaged Ships

Joonmo Choung^{1,†} · Ji-Myung Nam¹ · Min-Seong Lee¹ · Sang-Ik Jeon¹ · Tae-Bum Ha²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University¹
Research and Development Center, Korean Register of Shipping²

Abstract

This paper explains the basic theory and a new development of for the residual strength prediction program of the asymmetrically damaged ships, being capable of searching moment–curvature relations considering neutral axis mobility. It is noted that moment plane and neutral axis plane should be separately defined for asymmetric sections. The validity of the new program is verified by comparing moment–curvature curves of 1/3 scaled frigate model where the results from new algorithm well coincide with experimental and nonlinear FEA results for intact condition and with nonlinear FEA results for damaged condition. Applicability of new algorithm is also verified by applying VLCC model to the newly developed program. It is proved that reduction of residual strengths is visually presented using the new algorithm when damage specifications of ABS, DNV and IMO are applied. It is concluded that the new algorithm shows very good performance to produce moment–curvature relations with neutral axis mobility on the asymmetrically damaged ships. It is expected that the new program based on the developed algorithm can largely reduce design period of FE modeling and increase user conveniences.

Keywords : Asymmetry (비대칭성), Collision (충돌), Grounding (좌초), Moment plane (모멘트 평면), Neutral axis plane (중립축 평면), Residual strength(잔류 강도), Iterative–incremental approach (증분 반복법), Average compressive strength (평균 압축 강도)

1. 서론

선박은 해상에서 조류, 바람, 파도 등의 극한 환경 및 충돌, 좌초, 폭발과 같은 예기치 못한 사고에 항상 노출되어 있다. 원유운반선, 화학운반선과 같은 선박에 있어서 충돌 및 좌초와 같은 사고는 구조적 손상뿐만 아니라 주변 환경까지 위협하게 된다. 국제해사기구 (IMO, international maritime organization) 신개념 선박 건조 기준 (GBS, goal based ship construction standard)을 통하여 비손상 선박의 종강도 뿐만 아니라 좌초 및 충돌과 같은 중대 손상 (major damage) 선박의 잔류 종강도 (residual longitudinal strength)를 확보하도록 명시하고 있다.

선박은 충돌 또는 좌초로 인한 침수 및 횡경사된 상태에서도 주변 항구에 피항을 위한 최소한의 강도를 가져야하는데 최소한의 강도를 통상적으로 잔류 종강도로 정의한다. 잔류 종강도를

추정하는 방법에는 설계식, 간이 해석 (simplified method), 비선형 유한 요소 해석 (nonlinear FEA) 등이 주로 사용된다.

Maestro and Marino(1988), Wang, et al.(2002), Paik, et al.(1998)은 손상 선박의 잔류 종강도에 관한 연구를 수행한 바 있다. Maestro and Marino(1988)는 압축을 받는 보강판에 대한 유효면적의 개념을 도입하여 손상을 입은 비대칭 선체단면에 대한 소성 모멘트를 추정하였으며, Paik, et al.(1998)은 대칭 손상을 가정하고, 손상 부분의 구조 부재가 없는 것으로 가정하여 잔류 종강도를 평가한 바 있다.

비선형 유한 요소 해석법은 가장 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있는 방법으로 알려져 있을 뿐만 아니라, 모멘트 증가에 따른 보강판 요소의 붕괴 현상을 가시화할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 모델링 및 해석을 위한 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 종강도는 요소의 크기와 초기 변형도에 매우 민감한 단점이 있다.

간이 해석법은 통상 선체에 작용하는 곡률을 점진적으로 증가시키면서 굽힘 모멘트와의 관계를 찾아가는 증분 반복법 (incremental-iterative approach)을 의미하는데, Smith, et al. (1988)에 의하여 처음 제안되었으며, 현재 IACS (2010a, b)에서 비손상 선박의 최종 종강도를 예측하기 위한 방법으로 채택하고 있다. 이 방법은 보강판의 평균 압축 강도를 예측하는 방법에 따라 해의 정확도가 좌우된다. 증분 반복법은 기하학적 형상이나, 하중이 대칭인 경우에만 적용이 가능하며, 비대칭 선박 또는 손상에 대한 엄밀해는 아직 제시된바 없다. 본 논문에서는 증분 반복법을 이용하여 비대칭 손상된 선체의 잔류 종강도를 결정하는 새로운 알고리즘을 제시하고, 이를 탑재한 프로그램의 개발 사례를 소개하고자 한다. 또한 개발 프로그램의 타당성을 검증하기 위한 유한요소해석 결과와의 비교를 수행하고자 한다.

2. 잔류 종강도 예측 프로그램 개발

2.1 모멘트 평면과 중립축 평면의 정의

선체가 자유 수면 대비 만큼 횡경사 되었을 때, 선체에 작용하는 수직 굽힘 모멘트 (수직 굽힘 모멘트는 중력 방향으로의 하중에 의한 모멘트이므로 호깅 모멘트 및 새깅 모멘트만을 의미하지는 않음)는 자유 수면과 직교한다고 가정한다. 선체의 회전 대신 모멘트 작용 각도를 회전 시키면 자유 수면과 평행을 이루는 평면을 모멘트 평면으로 정의하여, Fig. 1에 나타내었다.

횡경사 이후에도 횡경사 이전의 선체 좌표계를 사용한다고 가정하였을 때 (선장 방향 x, 선폭 방향 y, 선고 방향 z), 단면 전체가 y평면 (xz 평면)에 대하여 재료 대칭성을 유지하고, 단면의 형상도 대칭성을 유지하고, 하중의 대칭성도 유지할 때 비로소 단면은 대칭으로 간주될 수 있다(Choung & Kim, 2010).

단면이 완벽한 대칭이면서, 단면의 어떠한 부재도 좌굴 또는 항복이 발생하지 않았다면 모멘트 평면은 도심을 통과하는 탄성 중립축 평면과 동일하다. 그러나 모멘트 증가로 인하여 일부 압축 영역이 좌굴하거나 항복한다면, 압축 영역과 인장 영역의 모멘트가 평형을 이루기 위해 중립축은 인장 영역으로 이동할 것이며 이를 비탄성 중립축 평면으로 정의한다. 전술한 3가지 대칭성을 모두 만족한다면 모멘트 평면은 비탄성 중립축과 계속 평행하게 이동할 것이다. 즉 중립축의 이동만 발생하고 회전은 발생하지 않는다.

그러나 세 가지 대칭성 중에서 한 가지라도 만족하지 못한다면 탄성 중립축 평면은 도심을 통과하지만 모멘트 평면과는 평행을 이루지는 않는다. 더욱이 모멘트가 증가하면 일부 단면에서는 비탄성 효과가 발생하기 시작하면서 비탄성 중립축은 이동과 회전을 하기 시작한다. 현재 IACS (2010a, b)에서 제시하는 증분 반복법에서는 완전 대칭성을 만족하는 경우에만 비탄성 중립축을 찾는 알고리즘이 제시되어 있으며, 중립축의 이동과 회전을 동시에 고려할 수 있는 알고리즘을 개발되어 있지 않다.

본 논문에서는 IACS (2010a, b)에서 제시하는 인장 및 압축 영역의 하중 평형 조건외에 하중 벡터 평형 조건을 추가함으로써 중립축의 이동과 회전을 동시에 탐색할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 하중 벡터 평형 조건은 압축을 받는 영역의 하중 도심과 인장을 받는 영역의 하중 도심을 연결하는 하중 벡터는 반드시 모멘트 평면과 직교해야 하는 조건이다(Boresi, et al., 1992).

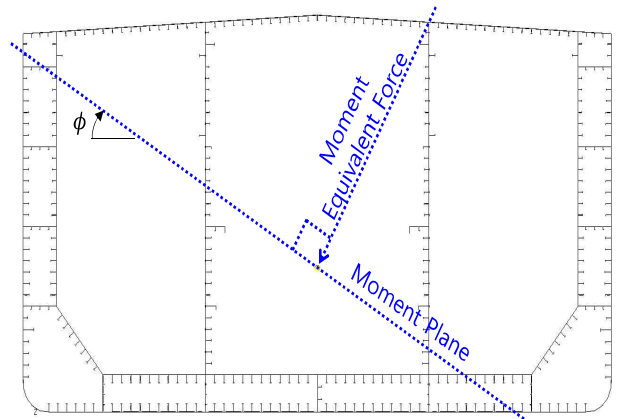


Fig. 1 Definition of moment plane

2.2 보강판 요소 정보

증분 반복법을 적용하기 위해서는 선체 중앙 단면도를 이루는 보강판 요소 및 판 요소로 이산화해야 한다. 본 연구에서 판 요소로서는 PL(plate bar)을 지원하며, 보강판 요소는 FB (flat bar), TB (tee bar), AB (angle bar)를 지원하며, 모서리 요소 (hard corner element)로서 HLB1 (hard corner angle bar1), HLB2 (hard corner angle bar2), HCB (hard corner cruciform), HFB (hard corner flat bar)를 지원한다. 이와 같은 8가지 요소가 공간 상에서 이루는 위치와 각도를 정의함으로써 선체의 중앙 단면을 구성할 수 있다. 8가지 요소의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 요소의 형상, 위치, 각도뿐만 아니라 각 요소의 재료 정보 (초기 항복 강도 및 탄성 계수)가 동시에 제공될 필요가 있으며, Table 1은 완성된 입력 파일의 예를 나타낸다.

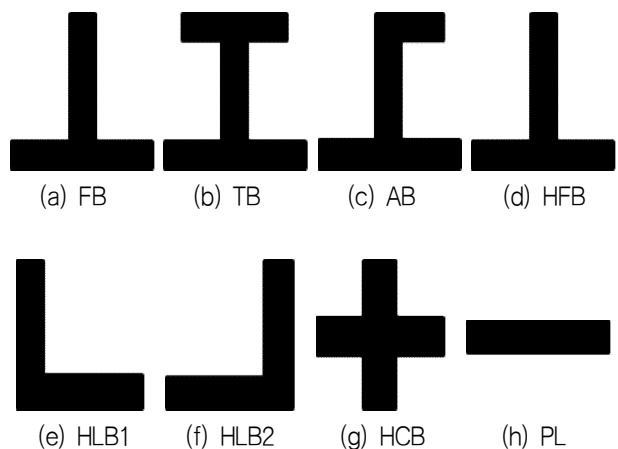


Fig. 2 Types of section element

Table 1 Example of input file

EID	Pattern	Type	Web Dir	Y-loc	Z-loc	Pressure	bp	tp
1	FLAT	FB	270.0	-1140.0	2235.0	0.0	750.0	14.5
2	FLAT	AB	180.0	-2915.0	2784	0.0	850.0	15.5
3	FLAT	TB	0.0	-950.0	0.0	0.0	950.0	23.5
4	FLAT	HFB	0.0	-1140.0	0.0	0.0	950.0	18.0
5	FLAT	HLB1	180.0	-3000.0	30500.5	0.0	426.0	17.0
6	FLAT	HLB2	180.0	-9400.0	14960.0	0.0	475.0	20.80
7	FLAT	HCB	0.0	1140.0	3000.0	0.0	950.0	19.00
8	FLAT	PL	332.1	-2867.0	311.6	0.0	954.0	19.00

bw	tw	bf	tf	s0p	s0w	s0f	Ep	Ew
175.0	11.5	0.0	0.0	235.0	235.0	0.0	206000.0	206000.0
250.0	10.0	90.0	14.0	235.0	235.0	235.0	206000.0	206000.0
650.0	11.5	200.0	28.5	235.0	235.0	235.0	206000.0	206000.0
500.0	14.5	0.0	0.0	235.0	235.0	0.0	206000.0	206000.0
273.3	16.7	0.0	0.0	235.0	235.0	0.0	206000.0	206000.0
550.0	38.2	0.0	0.0	235.0	235.0	0.0	206000.0	206000.0
400.0	16.0	0.0	0.0	235.0	235.0	0.0	206000.0	206000.0
2362.0	19.0	0.0	0.0	235.0	0.0	0.0	206000.0	0.0

2.3 평균 압축강도 간이식

중분 반복법에서 보강판 또는 판 요소의 평균 압축 강도를 정확히 예측하는 것은 가장 중요한 부분이다. IACS (2010a, b)에서는 모서리 요소가 압축을 받을 때 좌굴이 발생하지 않는 탄성 강소성 곡선을 적용할 것을 권장하고 있다. 반면 보강판 또는 판 요소의 경우 압축시 좌굴로 인한 압축 강도의 저하는 고려해야 한다 (Fig. 3 참조).

본 연구를 통하여 개발된 프로그램은 Cho, et al. (1998)과 IACS (2010a, b)에서 제시한 평균 압축 강도 간이식을 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. Cho, et al. (1998)의 평균 압축 강도 간이식은 최종 강도의 함수로 표현되며, 본 프로그램에서는 Lee (1992), Paik, et al. (1996), Cho, et al. (1998)이 제시한 최종 강도 간이식을 선택적으로 적용할 수 있도록 개발하였다. IACS (2010a, b) 평균 압축 강도 간이식의 경우, 5가지 붕괴 모드별 평균 압축 강도를 제시하고 있으며, 본 연구에서는 최소의 최종 강도를 제시하는 모드에 대한 평균 압축 강도를 간이식을 사용하도록 설정하였다.

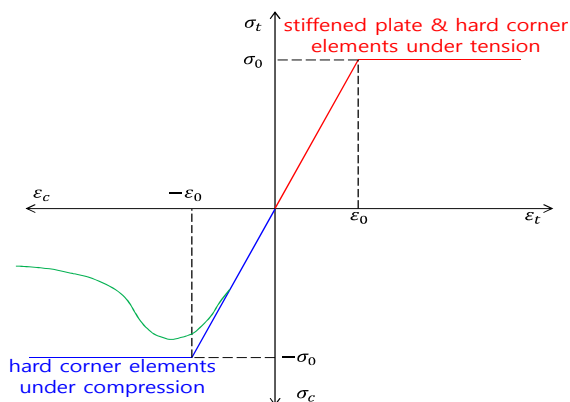


Fig. 3 Typical stress strain curves for hard corner, plate, and stiffened panel elements

2.4 단면 GUI, 손상의 적용, 계산 조건 설정

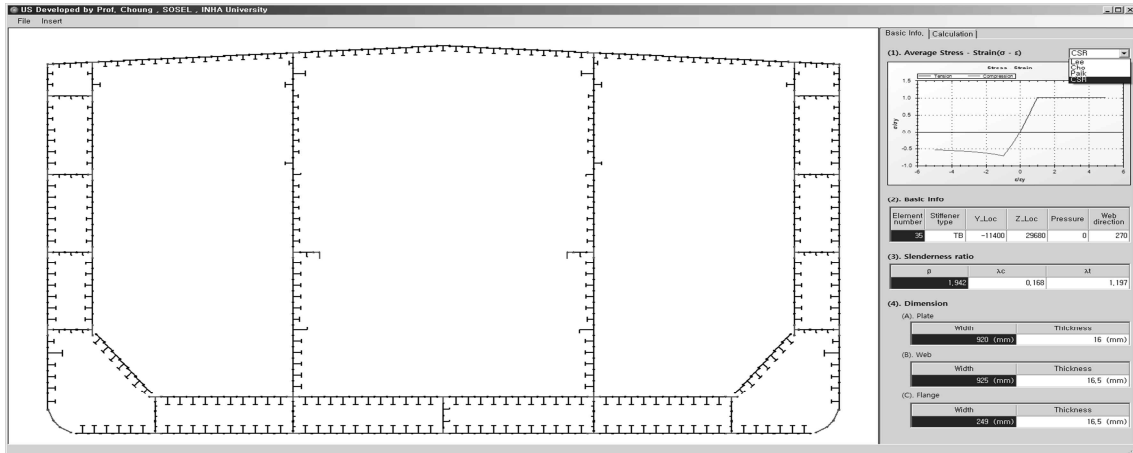
본 연구에서는 비손상 및 손상 선박의 종강도를 계산이 가능하도록 프로그램을 개발하였다. 손상의 경우 충돌 및 좌초로 인한 손상의 크기와 위치를 ABS(1995a, b), DNV(2009), IMO(1978)의 규정에 따라 선택할 수 있도록 개발하였다.

Fig. 4(a)는 선체 단면 정보 파일을 읽은 후의 단면을 나타내고 있으며, 보강판 요소를 GUI상에서 선택할 경우 평균 압축 강도 및 세장비 (판 세장비, 보강재 세장비, 보강판 세장비)를 가시적으로 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 손상을 정의하기 위한 규정을 선택하고, 손상을 가시화한 결과를 나타낸다.

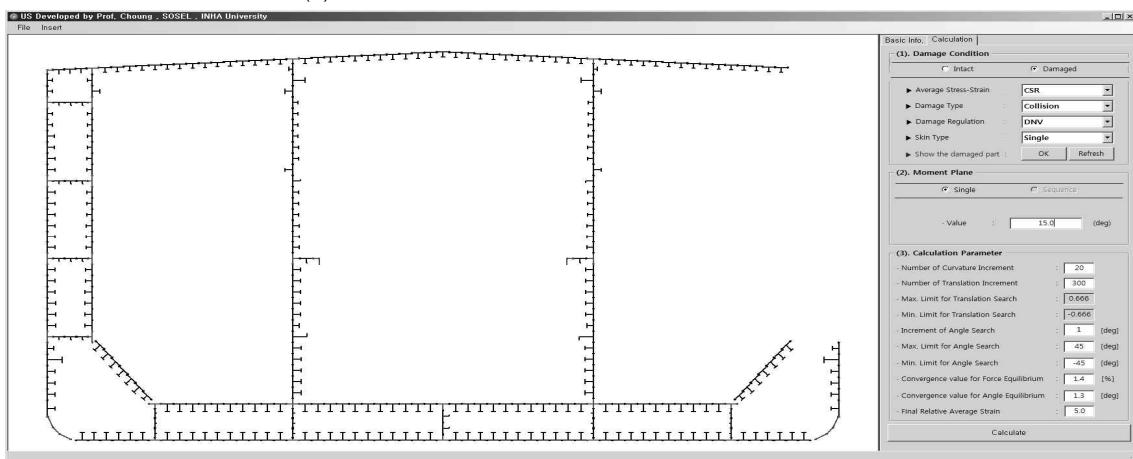
손상 후 선체의 횡경사도를 예측하는 것은 불가능하기 때문에 계산을 수행하고자 하는 횡경사를 정의할 수 있도록 하였으며, 계산을 수행하기 위한 수렴 조건을 사용자가 직접 설정할 수 있다. 횡경사 후 초기 도심으로부터 가장 멀리 떨어진 요소까지 거리의 2/3를 종립축의 이동 범위로 설정하여 이동 탐색을 수행할 수 있으며 기본값으로 20등분을 제시하였다. 또한 횡경사 각도 즉, 모멘트 평면으로부터 특정 각도 범위 내에서 특정 각도 증분으로 탐색이 가능하도록 프로그램이 개발되었다 (기본값은 $\pm 45^\circ$ 탐색 각도 및 1도 증분 각도).

하중 평형에 대한 평형 조건과 하중 벡터에 대한 평형 조건을 수렴 조건으로서 동시에 지정해야 한다. 본 프로그램에서 제시하는 수렴 조건의 기본값은 하중 오차 0.7%, 하중 벡터 오차각 1.3도이다. 사용자가 수렴 조건을 다시 정의할 수 있다.

IACS (2010a, b)에서는 단면을 구성하는 특정 보강판 요소의 평균 압축 변형률이 항복 변형률의 3배에 도달하면 계산을 종료시킬 것을 권장하지만, 횡경사로 인한 면적 2차 모멘트의 증가는 선박의 종강도 또는 잔류 종강도의 증가를 유발시킬 수 있기 때문에 평균 압축 변형률이 항복 변형률의 5배에 도달하면 계산을 종료시키도록 기본값을 설정하였다. 이 또한 사용자가 값을 지정할 수 있다.



(a) GUI for section elements and slenderness ratios



(b) GUI for damage realization and calculation parameters

Fig. 4 GUIs for residual strength prediction of intact and damaged ships

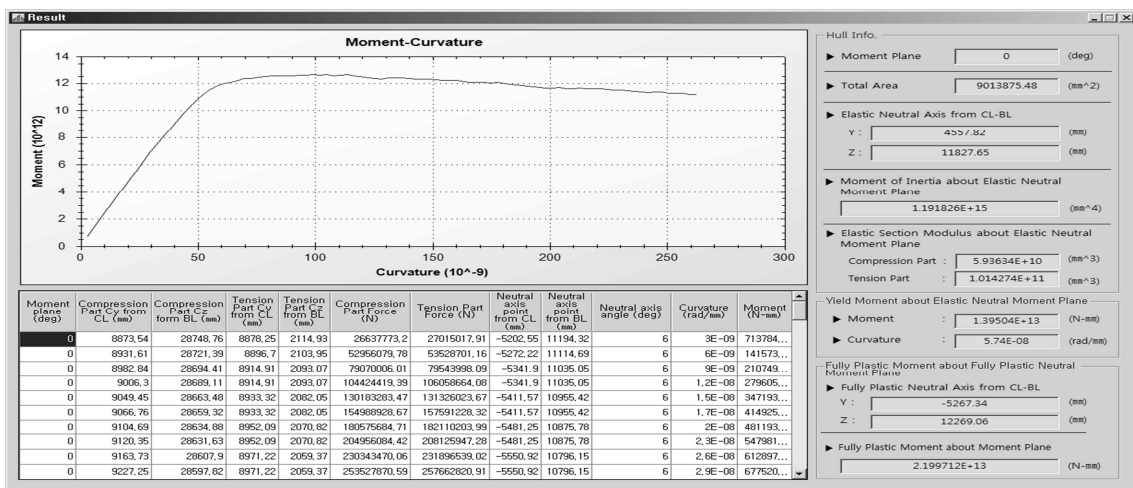


Fig. 5 GUI for result verification of residual strength calculation

2.5 결과 GUI

Fig. 5는 프로그램 실행 결과를 나타내는 GUI로서, 모멘트-곡률 선도뿐만 아니라, 종립축의 이동 및 회전 경로를 추적할 수 있는 정보를 동시에 제공한다. 또한 단면에 대한 각종 탄소성 정보

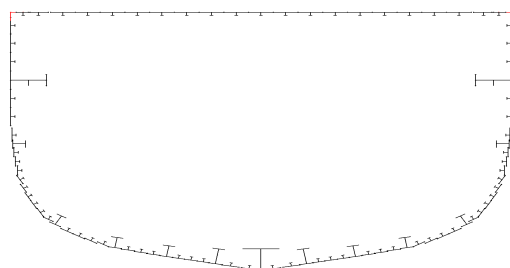
즉, 적용한 모멘트 평면, 단면적, 탄성 종립축 평면의 위치, 탄성 종립축 평면에 관한 면적 2차 모멘트, 압축 및 인장 영역에 대한 탄성 단면 계수, 탄성 종립축 평면에 관한 항복 모멘트/항복 곡률, 완전 소성 종립축 평면의 위치, 완전 소성 종립축 평면에 대한 완전 소성 모멘트 등을 종합적으로 제공한다.

3. 사례 연구

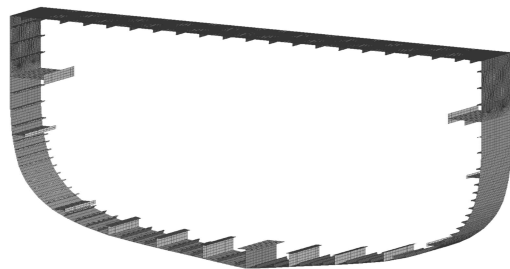
3.1 함구조 종강도 비교

본 논문에서는 함구조 (frigate) 1/3 축소 모형 실험 결과 (Dow, 1991)를 바탕으로 비손상 선박에 대하여 개발 프로그램의 유효성을 검증하였다. 이를 위하여 Fig. 6(a)에 보인 바와 같은 모델을 이용하여 증분 반복법 해석을 수행하였고, 또한 Fig. 6(b)와 같은 유한 요소 모델을 이용하여 비선형 유한 요소 해석도 병행하였다. 재료의 항복 응력은 245MPa이었으며, 탄성 계수와 프 아송비는 일반적인 강재의 물성치를 적용하였다. 증분 반복법 해석 수행시 IACS (2010a, b)의 평균 압축 강도를 적용하였다.

Fig. 7은 횡경사 0도 (새깅 조건)에 대하여, 계산 결과를 비교하여 나타내었다. 실험, FEA 및 증분 반복법은 상당히 일치하는 것으로 보여지며, 특히 FEA와 증분 반복법은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 볼 수 있다.



(a) Model for incremental iterative approach



(b) Model for FEA approach

Fig. 6 Models for 1/3 scaled frigate

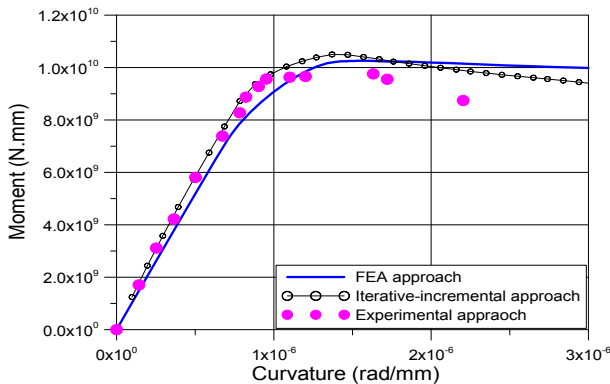
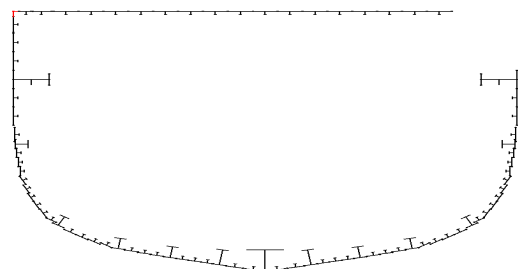


Fig. 7 Comparison of longitudinal ultimate strength of frigate hull girder

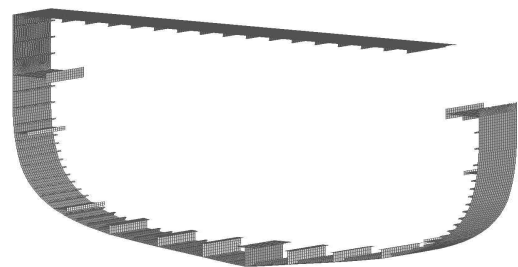
3.2 함구조 잔류 종강도 비교

본 논문에서는 비대칭 손상 선박의 잔류종강도의 유효성을 검증하기 위해 ABS(1995a, b) 충돌 손상 규정을 함구조(frigate) 1/3축소 모형에 적용하여 새깅 조건에서 FEA 및 증분 반복법의 해석을 동시에 수행하였다.

Fig. 8(a)는 ABS충돌 손상 규정을 적용한 개발 프로그램의 GUI를 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 유한요소 모델을 나타내고 있다. 증분 반복법을 이용한 해석 수행시 비손상 조건과 동일하게 IACS (2010a, b)의 평균 압축 강도를 적용하였다.



(a) Model for incremental iterative approach



(b) Model for FEA approach

Fig. 8 Models with collision damage by ABS for 1/3 scaled frigate

Fig. 9에서는 횡경사 0도(새깅 조건)에 대해 FEA와 증분 반복법을 이용한 계산 결과값을 그래프로 나타내었다.

Table 2는 새깅 조건에서 FEA와 증분 반복법으로 계산된 비손상 상태에서의 최종 종강도 값과 비대칭 손상 상태의 최종 잔류 종강도 값을 비교하여 나타내고 있다.

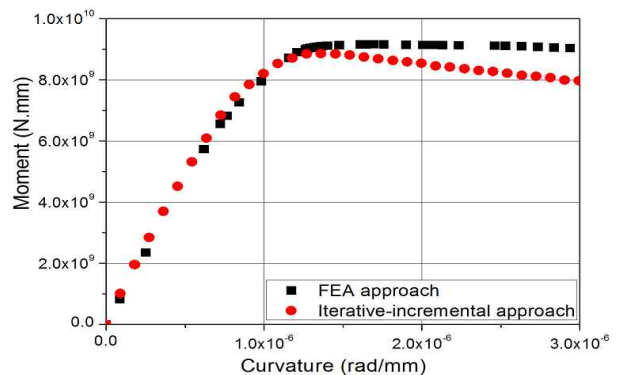


Fig. 9 Comparison of residual longitudinal ultimate strength of frigate hull girder

Table 2 Comparison of ultimate residual longitudinal moment of frigate hull girder (N·mm)

condition	FEA	Iterative-Increment
Intact	1.02E10	1.03E10
damaged	9.15E09	8.88E09

3.3 VLCC 잔류 종강도 비교

함구조 축소 모형의 비손상 상태에 대한 실험 결과, 유한요소해석 결과 및 본 연구에서 제시한 간이 해석 결과를 비교한 결과, 본 연구에서 개발한 간이 해석법의 유효성을 검증하였다. 또한 함구조 축소 모형이 충돌 손상을 가질 때 유한요소해석 결과를 본 연구에서 제시한 간이 해석 결과와 비교하여 충분히 타당한 결과를 제시하였기 때문에, 본 논문에서는 새로이 개발된 간이 해석법을 비손상 및 손상 실선에 적용하여 그 적용성을 검토하였다.

Table 3 Dimensions of the VLCC

(length)	(breadth)	(depth)	Frame Space
320 m	60 m	30.5 m	5.68 m

Table 3에 보인 바와 같은 주요 치수를 가지는 대형 유조선(VLCC, very large crude oil carrier)에 ABS (1995a, b), DNV (2009), IMO (1997)의 충돌 및 좌초 손상을 적용하여 잔류 종강도를 평가하였다.

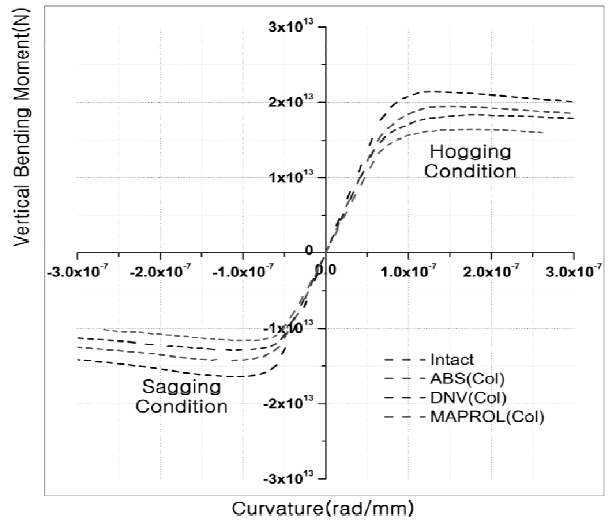
통상적으로 유조선의 경우 새김 조건 (모멘트 평면 0도)에서 종강도의 최소치를 보이지만 선저부 손상을 감안하여 호킹 조건 (모멘트 평면 180도)를 동시에 고려하였다. 모멘트 평면이 회전할 경우 잔류 종강도는 증가하는 양상을 보이므로 본 논문에서는 호킹 및 새김 조건만 고려하였다.

통상적으로 충돌 손상의 경우 IMO (1997, 이하 MARPOL로 지칭) 손상이 가장 크며 호킹 및 새김 조건에서 모두 최소 모멘트를 나타내었다(Fig. 10(a) 참조). 반면 DNV (2010)는 가장 큰 좌초 손상을 가정하기 때문에 잔류 종강도의 현저한 감소를 보임을 Fig. 10(b)로부터 확인할 수 있다.

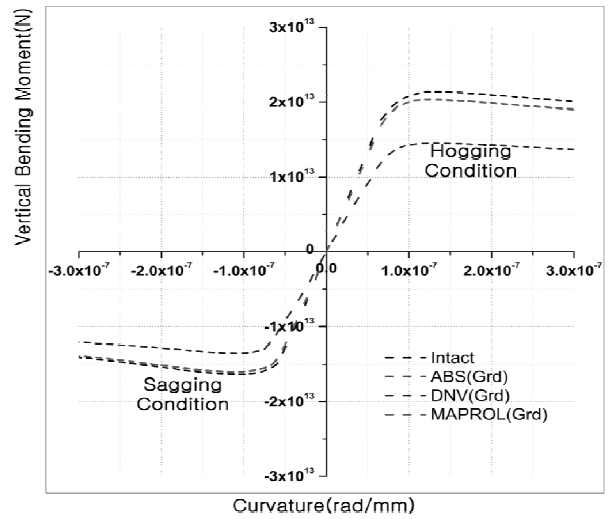
Table 4는 새김 및 호킹 조건에서 비손상 종강도 및 ABS (1995a, b), DNV(2009), IMO(1997)의 충돌 및 좌초 손상 규정을 적용한 잔류 종강도를 나타내었다.

Table 4 Comparison of ultimate residual longitudinal strengths for intact and damaged conditions (N·mm)

Damage	collision		grounding	
	sagging	hogging	sagging	hogging
Intact	1.64E13	2.13E13	1.64E13	2.13E13
ABS	1.42E13	1.94E13	1.60E13	2.03E13
DNV	1.28E13	1.83E13	1.35E13	1.45E13
IMO	1.16E13	1.64E13	1.61E13	2.03E13



(a) Collision



(b) Grounding

Fig. 10 Comparison of moment curvature curves for intact and damaged conditions

4. 결과

본 논문에서는 비대칭 손상된 선박의 잔류 종강도를 평가하기 위하여, 예측 프로그램을 개발하였다.

비대칭 손상 선박에 대한 잔류 종강도 예측 프로그램을 개발하기 위하여 선박 단면의 비대칭성을 3가지로 분류하였으며, 3가지 대칭성을 동시에 만족하지 않으면 비손상 선박이라도 비대칭 단면으로 간주되어야 하는 원인에 대하여 기술하였다.

비대칭 단면에서 탄성 중립축 평면은 항상 도심을 통과하지만 모멘트 평면과 일치하지 않기 때문에, 모멘트 평면은 중립축 평면과 반드시 분리 취급되어야 함을 제시하였다.

비대칭 단면에서 일부 요소가 좌굴하기 시작하면 중립축 평면(비탄성 중립축 평면)은 도심을 벗어나 이동과 회전하기 시작하며, 이를 탐색하기 위한 조건으로서 하중 평형 조건과 하중 벡터 평형 조건이 필요함을 제시하였다.

선체를 구성하는 보강판 요소를 8개의 종류로 구분하였으며, 다양한 평균 압축 강도 간이식을 적용하였다. 개발된 프로그램은 손상의 구현 및 중립축의 추적이 모두 가능하도록 GUI기반으로 개발되었다.

개발된 프로그램의 정확도를 검증하기 위하여 1/3 함구조 모델을 대상으로 비손상 상태와 비대칭 손상 상태의 종강도를 평가하였다. 비손상 상태의 경우, 실험, 유한요소해석 그리고 증분 반복법 결과에 대해 상당히 유사한 모멘트-곡률 곡선을 얻을 수 있었다. 그리고 ABS(1995a, b) 충돌 손상 규정을 적용한 비대칭 손상의 경우 유한요소해석과 증분 반복법을 이용하여 추정된 잔류 종강도가 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

개발된 프로그램의 적용성을 검증하기 위하여 VLCC를 대상으로 증분 반복법을 이용하여 모멘트 곡률을 도출하였다. 손상의 가정에 따른 최종 굽힘 모멘트의 감소 현상을 확인할 수 있었다.

후 기

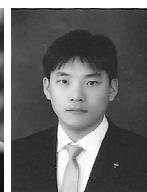
본 논문은 한국선급의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한 인하대학교 연구비 지원에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- American Bureau of Shipping (ABS), 1995a. *Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Tankers*. [Online] (Updated July 1995) Available at: <http://www.eagle.org/> [Accessed June 2010].
- American Bureau of Shipping (ABS), 1995b. *Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Bulk Carriers*. [Online] (Updated Nov. 1995) Available at: <http://www.eagle.org/> [Accessed June 2010].
- Boresi, A.P. Schmidt, R.J. Sidebottom, O.M., 1992. *Advanced mechanics of materials*. fifth Ed. John Wiley & Sons: New York.
- Cho, S.R. Choi, B.W. & Song, I.C., 1998. *Post-Ultimate Behaviour of Stiffened Panels subjected to Axial Compression*. 2nd International Conference on Thin-Walled Structures, pp.433-440.
- Choung, J. & Kim, Y.H., 2010. Study on Section Properties of Asymmetric-Sectioned Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(6), pp.843-849.
- Det Norske Veritas (DNV), 2009. *Rules for Classification of Ships Part 3 Chapter 1*. DNV
- Dow, R.S., 1991. Testing and Analysis of a 1/3-Scale Welded Steel Frigate Model, *Proceedings of the International Conference on Advances in Marine Structures*, 21~24 May, Dunfermline UK., pp.749-773.
- International Association of Classification Societies (IACS), 2010a. *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers*. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].
- International Association of Classification Societies (IACS), 2010b. *Common Structural Rules for Bulk Carriers*. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].
- International Maritime Organization (IMO), 1997. *MARPOL 73/78 & 1984 Amend Annex I Chapter III Requirement for Minimizing Oil Pollution from Oil Tankers due to Side and Bottom Damages*, IMO.
- Lee, J.S. & Yang, P.D.C., 1992. Reliability Assessment against Ultimate Bending Moment of Ships' Hull Girder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 29(1), pp.103-112.
- Maestro, M. & Marino, A., 1988. An Assessment of the Structural Capability of Damaged Ships: The Plastic Approach in Longitudinal Unsymmetrical Bending and the Influence of Buckling, *International Shipbuilding Progress*, 36(408), pp.255-265.
- Paik, J.K. Thayamballi, A.K. & Che, J.S., 1996. Strength of Ship Hull under Combined Vertical Bending, Horizontal Bending and Shearing Forces. *SNAME Trans*, 104, pp. 31-59
- Paik, J.K. Thayamballi, A.K. & Yang, S.H., 1998. Residual Strength Assessment of Ships after Collision and Grounding. *Marine Technology*, 35(1), pp.38-54.
- Smith, C.S. Davidson, P.C. Chapman, J.C. & Dowling, P.J., 1988. Strength and Stiffness of Ships' Plating under In-plane Compression and Tension. *RINA Transactions*, 130, pp.277-296.
- Wang, G. Chen, Y. Zhang, H. & Peng, H., 2002. Longitudinal Strength of Ships with Accidental Damages, *Marine Structures*, 15, pp.119-138.



정준모



남지명



이민성



전상익



하태범