한국항해항만학회지 제35권 제10호, pp. 823~827, 2011 (ISSN-1598-5725)
Journal of Navigation and Port Research
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2011.35.10.823

Smith법에 의한 손상 유조선의 잔류강도 평가 연구

안형준* · 백덕표** · †이탁기

*,** STX조선해양 주식회사, † 경상대학교 조선해양공학과, 해양산업연구소

A Study on Residual Strength Assessment of Damaged Oil Tanker by Smith Method

Hyung Joon Ahn · Deok-Pyo Baek** · † Tak Kee Lee*

*,** Hull Basic Design Team, STX Offshore & Shipbuilding, Changwon, 641-839, Korea*
† Dept. of Naval Archi. & Ocean Eng., Gyeongsang National Univ., Institute of Marine Industry, Tongyoung, 650-160, Korea

요 약 : 2016년 7월부터 강제 적용 예정인 목표기반 선박건조 기준(GBS)의 설계단계의 기능요건 중 잔류강도 평가 부분은 현재의 유조선 설계, 건조 규칙인 공통구조규칙에는 아직 포함되어 있지 않은 실정이다. 기능요건에 포함된 잔류강도 부분은 충돌이나 좌초와 같은 해상사고 시 발생가능한 선체손상을 고려하여 강도측면의 제한조건을 규정함으로써 사고시에도 일정부분 선박의 안전을 확보하려는 것이다. GBS에서 주로 다루고 있는 위험도에 근거하여 잔류강도를 평가하기 위해서는 다양한 손상에 대한 광범위한 평가 작업이 필요하다. 이때, 매번 비선형 유한요소해석을 수행하기보다 선체구조를 보강판 요소의 집합으로 보는 간이화된 강도 해석법의 하나인 Smith법이 유용할 것이다. 본 연구에서는 좌초사고로 인해 선저가 손상된 경우를 대상으로 Smith법을 적용하여 최종강도 평가를 수행하였으며, 3개의 화물창 구역을 모델링하여 수행한 비선형 구조해석 결과와의 비교를 통해 Smith법을 적용한 결과의 정도를 확인하였다.

핵심용어 : 잔류강도, Smith법, 목표기반 선박건조 기준, 공통구조규칙, 최종 굽힘모멘트

Abstract : *The present Common Structural Rules for double hull oil tanker is not included the residual strength, which is one of the functional requirements in design part of Goal-based new ship construction standards (GBS). The GBS will be enforced after July 1, 2016. The requirement related residual strength has the goal to build safe ship even if she has the specified damages due to marine accidents including collision and grounding. In order to assess the residual strength based on risk for structural damages according to GBS, tons of nonlinear FE analysis work taking into account various types of damage will be needed. The Smith's method, a kind of simplified method for the strength analysis is very useful for this purpose. In this paper, the residual strength assessments based on ultimate strength using Smith's method were carried out. The objected ship is VLCC with stranding damage in bottom structures. Also, the results were compared with that of nonlinear FE analysis using three cargo hold model.*

Key words : *residual strength, Smith method, GBS, Common Structural Rules, ultimate bending moment*

1. 서 론

IMO에서는 설계수명 동안 안전한 선박을 건조하도록 강제할 목적으로 GBS(Goal-based new ship construction standards)를 2016년 7월 1일 이후 계약되는 선박에 적용할 예정이다 (국토해양부, 2010). 현재 길이 150m 이상인 유조선에 대하여는 IACS의 공통구조규칙(Common Structural Rules)에 따르도록 되어 있는데 (IACS, 2010), IMO에서는 CSR이 GBS를 잘 따르고 있는지를 2012년 이후 검증할 예정으로 알려져 있다.

GBS에는 설계단계에서 고려해야 할 기능요건을 제시하고 있는데, 설계수명, 환경조건, 구조강도 등을 포함하여 7개 항목을 제시하고 있다. 선박을 설계, 건조하는 조선소가 이들 기능요건들을 만족시킬 수 있도록 IACS에서 선급들의 공동 연구를 통해 만든 규칙이 공통구조규칙이다. 하지만, Fig. 1에 제시된 GBS의 설계단계 기능요건 중 잔류강도(residual strength)와 잉여강도(Structural redundancy)는 아직까지 공통구조규칙에 반영되어 있지 못한 상태이다.

GBS의 기능요건에 의하면, 선박은 충돌, 좌초 또는 침수와 같은 손상된 조건에서 파랑과 내부 하중을 견딜 수 있도록 설계되어야 하며, 잔류강도 계산 시에는 영구변형과 좌굴후 거동을 포함하여 선체구조의 최종 잔존 부하능력(ultimate reserve capacity)을 고려하도록 하고 있다.

GBS는 위험도 기반 설계를 상당부분 도입하고 있는데 (이, 2011), 이는 강도평가에 있어 확정론적인 평가법보다는 확률론적인 평가법을 적용하는 것을 포함하고 있다. 잔류강도를 충돌이나 좌초사고 등의 해상사고로 인해 손상을 입은 선체구조를 고려한 단면계수나 최종강도를 기준으로 평가하는 것이 일반

* 연회원, hjahn@onestx.com 055)548-1302
** 연회원, scbaek@onestx.com 055)548-3242
† 교신저자 : 연회원, tklee@gnu.ac.kr 055)772-9193

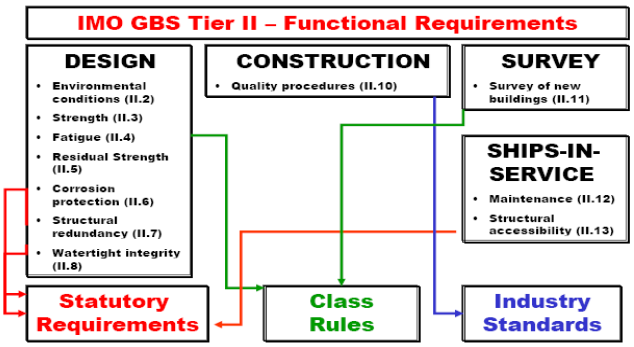


Fig. 1 Goal-based functional requirements for ship structure including residual strength

적이라고 할 때 (ABS, 1995; Wang et al., 2009), 확률론적인 방법을 적용하기 위해서는 다양한 손상 및 하중 조건들을 고려한 광범위한 해석이 필수적일 것이다. 이러한 광범위의 해석을 효율적으로 수행하기 위해서는 매번 해를 구하기 위해 많은 시간과 노력을 드는 시간소비적인 비선형 유한요소해석법을 적용하기 보다는 선체구조를 보강판 요소의 집합으로 보아 해석에 드는 시간과 노력을 최소화시킬 수 있는 간이화된 해석법을 적용하는 것이 필요하다. 예를 들면, 이상화구조요소법 (Paik et al., 1996)과 Smith법 (Smith, 1987) 등이 있다.

본 연구에서는 간이해석법으로서 잔류강도의 해석에 널리 사용되고 있으며, 그 정도가 입증된 Smith법을 적용하여 개발된 프랑스 선급의 프로그램을 이용하여 좌초손상을 고려한 유조선의 최종강도를 계산하였으며, 정도를 확인하기 위하여 3개 화물창 구역까지 모델링한 비선형 유한요소해석도 수행하였다.

2. 대상선박 및 손상 시나리오

본 연구에서는 STX조선해양이 설계한 320K 초대형 원유운반선을 대상선박으로 설정하였으며, Fig. 2에는 대상선박의 일반배치도와 주요 제원은 다음과 같다.

수선간 길이 (LBP) :	319.00 m
강도평가용 길이 (Lscant) :	315.29 m
폭 (Breadth) :	60.00 m
깊이 (Depth) :	30.50 m

해상사고 중 좌초를 고려하였으며, 가장 심각한 손상으로 생각할 수 있는 경우인 선체 중앙의 선저부에서 이른바 정지형 좌초 (stranding)를 겪는 경우를 대상으로 하였다. 이때, 최대 손상영역은 정지형 좌초에 의해 손상 확대가 이루어지는 선체중앙부 영역으로 하였다. 선체중앙부에 최대 손상을 가정한 것은 일반적으로 선체중앙부 근처에서 최대 굽힘모멘트가 작용하므로 이 부분의 강도 저하가 선박의 안전에 가장 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 실제 사고에서도 선체 중앙의 선저부에 이와 유사한 손상이 발견되고 있기도 하다 (Kitamura, 1996).

한편, 횡방향의 최대 손상범위는 미국선급협회 (ABS, 1995)가 제시하고 있는 것을 기준으로 설정하였으며 (Table 1 참조), 깊이 방향의 경우는 선저 외판만 손상된 경우와 선저 외판 및 내저판이 동시에 손상된 경우로 구분하였다. 이때, 내저판의 손상폭은 선저 외판의 1/2로 설정하였다. 횡방향으로는 선체중심선을 기준으로 대칭적인 손상이 발생하며, 길이방향의 손상은 화물창의 약 1/2이 손상을 입은 것으로 가정하였다. 그리고 비교를 목적으로 비손상상태를 포함하여 총 3가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. Table 2에는 본 연구에서 수행한 해석의 손상범위를 보여주고 있다. 표에서 알 수 있듯이 Case 1은 선저판만 손상을 입은 경우이며, Case 2는 선저판과 내저판이 동시에 손상을 입은 경우로 가정하였다. 이때, 선저판의 횡방향 손상범위는 미국선급협회의 기준에 의거 B/6인 10m로 설정하였고, 내저판의 손상범위는 선저판 손상의 1/2로 가정하였다.

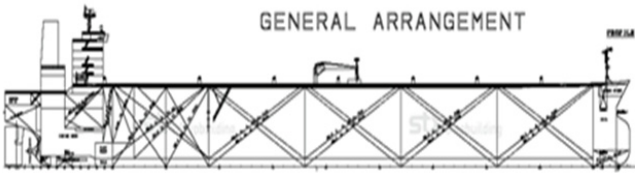


Fig. 2 General arrangement of objected oil tanker

Table 1 Damage range in grounding by ABS

	side damage	bottom damage
longi. dir	N/A	N/A
trans. dir	Min (0.7h, b) for deck level 3/4b for below-deck level	Max (B/6, 4m)
vertical. dir	Max (B/6, 4m)	3/4 H for C.L area 1/4H for non-C.L area

b: breadth between side shell and side longi. bulkhead
h: vertical damage area of side shell
B: breadth of ship
H: height between bottom and inner bottom

Table 2 Damage cases and damage range

Case	Damage range (m)	
	Bottom plate	Inner Bottom plate
0	No damages	No damages
1	22.7 (long.), 10.0 (trans.)	No damage
2	22.7 (long.) 10.0 (trans.)	22.7 (long.) 5.0 (trans.)

3. Smith법에 의한 잔류강도 평가

먼저 Smith법에 의한 잔류강도를 평가하기 위하여 프랑스 선급협회에서 개발한 프로그램 (MARS 2000)을 이용하였으며, Fig. 3은 Smith법을 적용한 단면 형상을 보여주고 있다. 이 프로그램은 IACS의 공통구조규칙 (CSR)을 기준으로 개발된 것이며, 선체구조에 대한 scantling은 물론 최종강도를 포함한 선체강도를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 최종강도를 기준으로 한 잔류강도를 평가하기 위하여 손상된 구역의 부재들에 대한 Bending efficiency는 0%로 가정하였다.

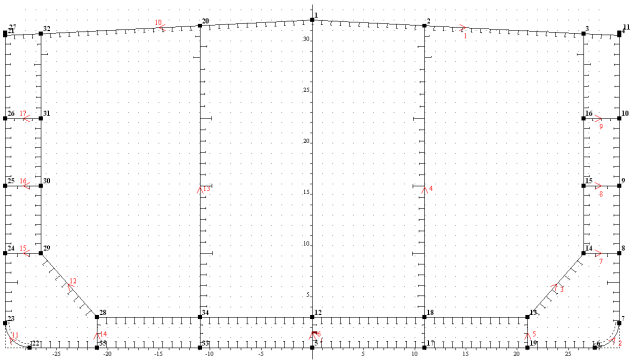


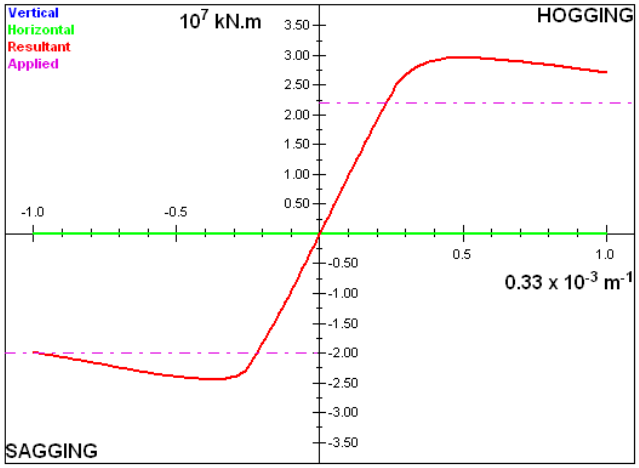
Fig. 3 Geometry of cross section for Smith method

Fig. 4와 Table 3은 선급 프로그램을 이용하여 계산된 결과를 보여주고 있다. 새깅 및 호깅 조건에 대한 계산을 수행하였으며, 그림에서 실선은 선체구조의 최종 굽힘모멘트 내하능력이며, 일점쇄선으로 표시된 것은 각 경우에 대한 정수중 굽힘모멘트와 흘수 변경을 고려한 굽힘모멘트이다. 이때, 흘수는 손상조건에서의 기본 안정성 계산을 통해 침수로 인해 변경된 값을 적용하였다.

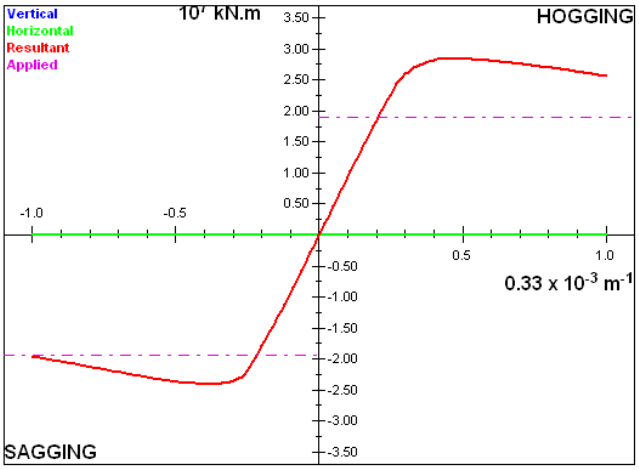
Table 3에 의하면, 새깅상태에서의 잔류강도는 최종 굽힘모멘트를 기준으로 할 경우 손상이 없는 상태 대비 98~98.4% 수준이었으며, 호깅상태의 경우는 93.5~95.9% 수준인 것으로 조사되었다. 호깅상태에서 더 큰 감소를 보이는 것은 호깅시 좌초로 인해 손상을 입은 것으로 가정한 선저에 압축하중이 작용하기 때문이라 판단된다.

Table 3 Results of hull girder ultimate bending capacity by Smith method

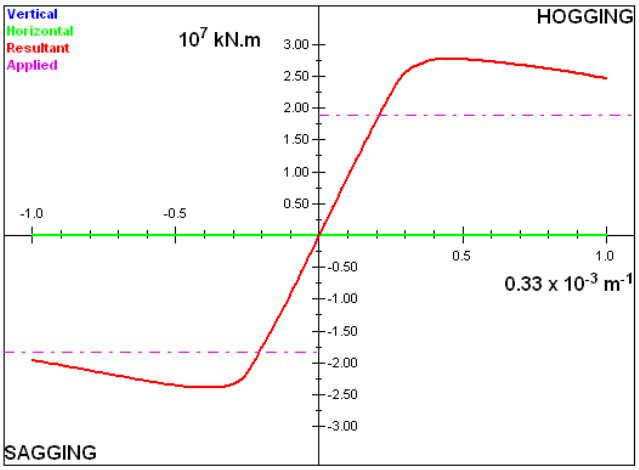
Case		Ultimate B.M. (kN.m)	Ratio (%)
0	Sagging	-22,208,930	100
	Hogging	26,959,260	100
1	Sagging	-21,862,410	98.4
	Hogging	25,862,250	95.9
2	Sagging	-21,763,100	98.0
	Hogging	25,214,300	93.5



(a) Case 0 (None damage condition)



(b) Case 1



(c) Case 2

Fig. 4 Comparison of bending moment and curvature

4. 비선형 유한요소해석에 의한 최종 굽힘모멘트의 정도 비교 및 결과 분석

Smith법에 의해 계산된 최종 굽힘모멘트의 정도를 확인할 목적으로 3개의 화물창 구역을 모델링하여 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 5는 화물창 해석을 위한 비손상 상태의 모델링을 보여주고 있다. 모델링 범위는 선체 중앙부 화물창을 포함하여 3개 화물창 구역으로 하였다.

Fig. 6에는 손상을 입은 경우에 대한 해석 결과이며, 각각 호깅 및 새깅상태에 대한 선저부의 응력 분포를 보여주고 있다. Table 4는 Fig. 6의 비선형 유한요소해석 결과를 정리한 것으로, 비손상 선체에 대한 최종 굽힘모멘트의 비율은 새깅상태에서 약 97~98% 수준이며, 호깅상태에서는 약 93.1~95%로 나타났다.

Table 5에서는 Smith법에 의한 것과 3개의 화물창 모델을 이용한 비선형 유한요소해석 결과를 비교하여 보여주고 있다. 이때, 비율은 동일한 조건에서 계산한 Smith법에 의한 계산 결과를 비선형 유한요소해석에 의한 결과와 비교한 것이다. Table 5에서 알 수 있듯이, Smith법으로 계산한 결과가 비선형 유한요소해석 결과보다 약 0.5~1% 정도 큰 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Smith법에 의한 계산이 역학적 가정을 포함하여 간이화된 계산 절차를 따르고 있음을 생각할 때, 매우 높은 정도를 보여주는 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 수행한 계산은 앞서 언급한 바와 같이 손상부에 포함되는 부재의 굽힘 효율을 0%로 가정한 것이므로 GBS의 기능요건에 포함된 잔류강도에 대한 기술에서 좌굴후 거동은 포함하고 있으나, 좌초와 같은 사고시 선체구조에 발생가능한 영구변형은 포함하고 있지 않음에 유의할 필요가 있다. 좌초사고시 선저에 발생가능한 영구변형으로는 선저판의 찢김 (tearing), 국부변형 (dent) 등과 선저판에 부착된 2차부재의 굽힘 변형 등을 고찰할 수 있다 (Kitamura, 1996). 이러한 영구변형과 관련해서는 발생가능한 변형의 종류와 이에 따른 영향을 파악할 필요성이 있으며, 이를 유효적절하게 반영할 수 있는 기법의 도입이 중요할 것으로 생각된다.

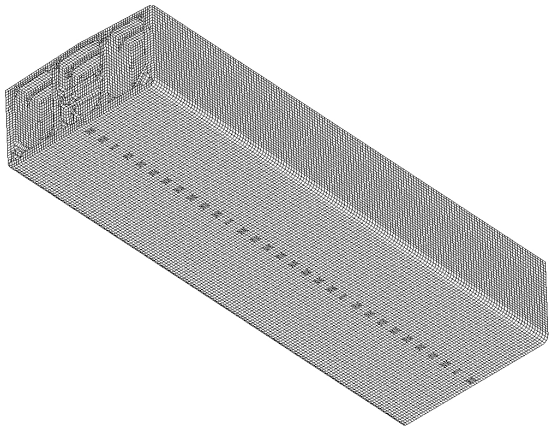


Fig. 5 Cargo hold modeling for nonlinear FE analysis

Table 4 Results of hull girder ultimate bending capacity by Nonlinear FEA using three cargo hold model

Case		Ultimate B.M. (kN.m)	Ratio (%)
0	Sagging	-22,208,930	100
	Hogging	26,959,260	100
1	Sagging	-21,763,840	98.0
	Hogging	25,611,279	95.0
2	Sagging	-21,546,202	97.0
	Hogging	25,099,071	93.1

Table 5 Comparison of hull girder ultimate bending capacity between Smith's method and Nonlinear FEA

Case		Ultimate B.M. (kN.m)		Ratio (%)
		Smith's method	Nonlinear FEA	
0	Sag	-22,208,930	-22,208,930	100.0
	Hog	26,959,260	26,959,260	100.0
1	Sag	-21,862,410	-21,763,840	100.5
	Hog	25,862,250	25,611,279	101.0
2	Sag	-21,763,100	-21,546,202	101.0
	Hog	25,214,300	25,099,071	101.0

Note: Ratio = Smith's method / Nonlinear FEA * 100 (%)

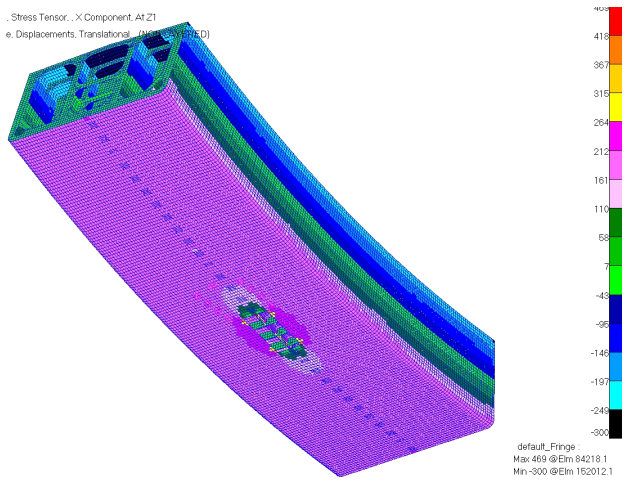
5. 결 론

국제해사기구의 GBS에 의하면, 충돌이나 좌초, 침수와 같은 사고를 당한 선박도 일정 수준의 잔류강도를 확보해야 한다고 규정하고 있다. 본 연구에서는 선체 중앙의 선저부가 좌초사고로 인한 손상을 입은 경우를 대상으로 간이화된 최종강도 평가기법인 Smith법을 적용하여 최종 굽힘모멘트의 상대적인 감소현상을 고찰하였고, 손상을 입은 화물창을 포함하여 3개의 화물창을 모델링하고 비선형 유한요소해석을 수행함으로써 그 정도를 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

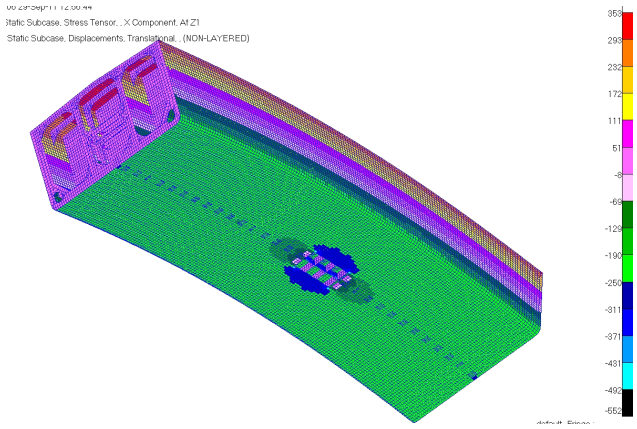
(1) 미국선급협회의 기준에 근거한 최대 손상범위에서 최종 굽힘모멘트는 비손상시에 대비하여 최대 약 5% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이중선체 유조선에서 내저판이 선저판 손상범위의 1/2수준까지 손상되더라도 최종 굽힘모멘트는 최대 약 6.9% 감소하고 있음을 확인하였다.

(2) 간이화된 최종 굽힘모멘트 계산 기법인 Smith법에 의한 계산 결과는 3개의 화물창 구역을 모델링하여 수행한 비선형 구조해석 결과와 비교할 때, 1% 정도 높은 값을 주고 있어 충분한 정도를 갖는 것으로 나타났다.

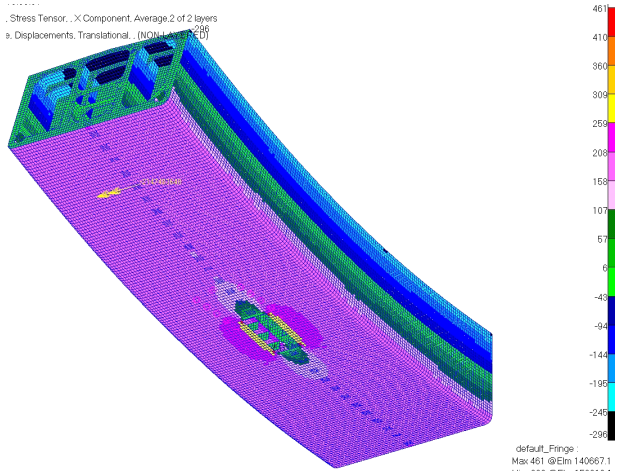
(3) GBS의 기능요건 중 잔류강도에 대한 것을 충실히 구현하기 위해서는 손상시 발생가능한 영구변형을 고려해 줄 수 있는 유효적절한 방안이 마련되어야 할 것으로 보인다.



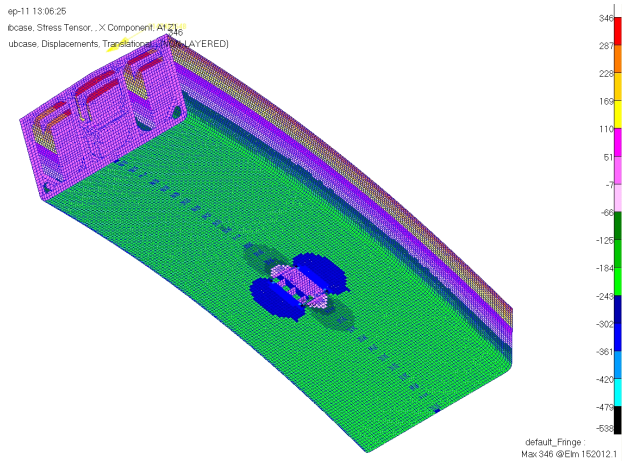
(a) Sagging condition in case 1



(b) Hogging condition in case 1



(c) Sagging condition in case 2



(d) Hogging condition in case 2

Fig. 6 Results of nonlinear FEA w/ stranding damage

참 고 문 헌

[1] 국토해양부 (2010), 국제해사기구(IMO) -제87차 해사안전위원회 회의 결과, p. 16.

[2] 이종갑 (2011), “위험도기반 선박안전설계”, 대한조선학회지, 제48권 제 2호, pp. 3-10.

[3] ABS (1995), "Guide for assessing hull girder residual strength".

[4] International Association of Classification Societies(2010), Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers.

[5] Kitamura, T. (1996), "Numerical simulation of actual collision & grounding accidents", Proc. of Int. Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, pp. 7.1-7.12.

[6] Paik, J.K., et al. (1996), "Ultimate strength of ship hulls under combined vertical bending, horizontal bending, and shear forces", Transaction SNAME 1996.

[7] Smith, C.S., et al. (1977), "Influence of local compressive failure on ultimate longitudinal strength of a ship's hull", Proc. 3th Int. Symposium on Practical Design in Shipbuilding (PRADS), Tokyo, pp. 73-79.

[8] Wang, G., Chen, Y., Zhang, H. and Shin, Y. (2000), "Residual strength of damaged ship hull", Ship Structure Committee Symposium, Ship Structural for the New Millennium: Supporting Quality in Shipbuilding, (http://www.shipstructure.org/2000sscsymposium_agenda.shtml)

원고접수일 : 2011년 10월 25일
심사완료일 : 2011년 12월 19일
원고채택일 : 2011년 12월 20일