

선체 선각구조의 최종 종강도 평가에 관한 연구

이훈곤^{†*}, 이주성^{**}

현대중공업(주) 조선사업부 구조설계부^{*}, 울산대학교 조선해양공학부^{**}

On the Ultimate Longitudinal Strength Assessment of Ships' Hull Structure

Hun-Gon Lee^{†*} and Joo-Sung Lee^{**}

Hull Initial Design Dept., Shipbuilding Div., Hyundai Heavy Industries^{*}
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Ulsan^{**}

Abstract

This paper is concerned with a practical guide for the ultimate longitudinal strength assessments of ships' hull structure. Rigorous non-linear structural analysis for three tanker models has been carried out to examine the ultimate strength behavior. Formula of estimating the ultimate longitudinal strength has been proposed which is modified with the results of non-linear finite element analysis of hull girders. Computational reliability and accuracy of the large-scale non-linear finite element analysis and the proposed simplified formula are verified through comparing their results with that of 1/3 scale frigate model test and DNVs program. Additionally, the ultimate longitudinal strength for ten tanker models is compared with those by the method specified in the 2nd Draft of common structural rule for tankers, which is being developed by IACS.

※Keywords: Ultimate longitudinal strength(최종 종강도), Non-linear finite element analysis(비선형 유한요소해석), Hull girder(선체거더)

1. 서론

최근 선박의 강인함(Robust)을 제고하기 위하여 국제 해사 기구 및 국제선급연합에서는 선박 구조에 관한 규정을 수정하고 있다. 이러한 동향은 지난 선박 사고 중 매우 큰 피해로 기록되고 있는 2002년 발생한 유조선 프레스티지(Prestige)

호의 사고로 인해 유발되었으며, 이에 따라 각 기관에서는 중앙단면의 최종강도 평가를 규정화시키려는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이와 관련하여, 국제선급연합에서 추진중인 유조선 공통 선각 규칙에 새로운 규정으로 적용되고 있으며, 2010년 발효를 목표로 진행 중인 국제해사기구(IMO)의 신개념 선박구조 기준(Goal Base Standards)에도 이 사항을 도입하여 규정에 대한 추진이 이루어지고 있다.

접수일: 2006년 1월 5일, 승인일: 2006년 4월 9일

† 교신저자: hgoni@hhi.co.kr, 052-230-3533

또한, ISO TC8/SC8/WG3 에 의해 선체구조의 최종강도 한계상태 평가법에 관한 국제표준(ISO 18072)이 발의되어 심의 중에 있다.

본 논문에서는 선체선각구조 중앙 단면의 최종 종강도 평가법을 구축하기 위해 우선 3 척의 탱커 모델에 대해 상용 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 비선형 구조해석을 수행하였고 그 결과를 참고하여 기존에 제안된 최종 종강도 추정식을 보완하여 제안하였다. 비선형 구조해석 결과와 제안된 추정식은 1/3 Frigate 모델에 대한 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였고, 최근 개발 중에 있는 탱커의 공통규정에서 제안하는 최종 종강도 추정방법과도 비교하였다. 본 연구를 통해 선각의 최종 종강도해석을 위한 비선형해석방법을 정립하였다. 본 논문에서 제안하는 최종 종강도에 대한 추정식은 선박의 초기설계 단계에서 설계자가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

2. 최종 종강도 평가에 관한 선급 규정

중전의 선급 규정에서는 최종강도 평가에 대해서 규정화되지 않았지만, 최근 국제선급연합(International Association of Classification Societies)에서는 새로운 유조선 및 살물선에 대한 공통 선급 규칙을 제정하면서, 선각의 최종 종강도 평가에 관한 내용을 법규화하려는 움직임을 보이고 있다. 또한, 국제해사기구(International Marine Organization)의 신개념 선박 구조 기준(Goal Based Standard)에서도 선박 중앙 단면의 최종강도에 대한 규정을 새로이 포함하려고 준비하고 있다.

2005 년 3 월에 발행된 유조선의 선각설계를 위한 공통 규칙에 따르면 극한 해상상태(Extreme at Sea Condition)에서 계산되어진 새깁굽힘모멘트 즉, 정수중 새깁굽힘모멘트와 파랑중 새깁굽힘모멘트와의 합에 대해서 선박의 선각구조가 견딜 수 있도록 아래의 식(1)을 제시하였다.

$$1.0 M_{sw} + 1.3 M_{w,sag} < M_u / 1.1 \tag{1}$$

여기서, M_{sw} : 정수중 새깁 굽힘모멘트
 $M_{w,sag}$: 파랑중 새깁 굽힘모멘트
 M_u : 새깁 최종 굽힘 강도

종강도 최종 굽힘 강도 (hull girder ultimate bending capacity), M_u 는 선각이 붕괴되는 상태에서 견딜 수 있는 굽힘 모멘트 최대값으로 정의할 수 있다. 이때 종굽힘모멘트에 의한 붕괴는 중부재의 좌굴, 최종강도, 항복응력에 의해 결정되며, 선각 중앙 단면의 새깁상태 최종 굽힘강도는 비선형 굽힘모멘트와 곡률의 상관관계 곡선에서의 최대값을 의미한다.

유조선 공통 규칙에서는 최종 종강도를 구하는 방법으로 단일 단계 식(single step procedure)이라는 간이식을 제시하고 있다. 이 간이식에서는 압축하중으로 인해 좌굴이 발생한 상갑판의 부재들은 응력감소계수만큼 면적이 일부분만 강도에 영향을 끼치게 되며, 이 감소된 면적과 나머지 부위의 부재로만 계산된 단면계수를 기준으로 상갑판과 선저외판에서 항복응력에 도달하는 상태의 각 굽힘모멘트 중 작은 값을 최종강도라고 정의하고 아래의 식(2)와 (3)을 제안하였다.

$$M_{u,dk} = Z_{red} \sigma_{yd,dk} \tag{2}$$

여기서, Z_{red} : 상갑판의 감소된 단면계수

$$I_{red} / (Z_{dk,mean} - Z_{NA,red})$$

I_{red} : 감소된 종강도 2 차 모멘트 단, 상갑판에 대해서는 좌굴 후 감소된 유효 면적(A_{eff})으로 계산된 값.

A_{eff} : 상갑판의 보강판 좌굴 후 감소된 유효 면적 (σ_u / σ_{yd}) A

A : 상갑판의 보강판 면적

$\sigma_{u,dk}$: 상갑판의 보강판에 대한 최종강도

$\sigma_{yd,dk}$: 상갑판의 보강판에 대한 항복응력

$Z_{dk,mean}$: 선저부터 상갑판까지 수직 거리

$Z_{NA,red}$: 감소된 단면에서 선저부터 중립축까지 거리

$$M_{u,btm} = \sigma_{yd,btm} I_{red} / Z_{NA,red} \tag{3}$$

여기서, $\sigma_{yd,btm}$: 선저판의 보강판에 대한 항복응력

3. 본 연구의 최종 종강도 평가 방법

3.1 상용 프로그램을 이용한 최종 종강도 해석

기하학적인 비선형성과 재료적 특성치의 비선형성을 고려하고 상용 비선형 유한 요소 프로그램 (ABAQUS)을 이용하여 최종 종강도를 구하는 본 연구에서의 방법은 다음과 같다.

3.1.1 유한 요소 모델

해석 모델 범위로 횡격벽 사이의 화물창을 설정하면 가장 바람직하지만, 해석의 효율 측면에서 다음과 같이 정의한다(Fig.1).

- 종방향 : 한 개 횡부재 간격
- 횡방향 : 비대칭 경우 선쪽, 대칭 경우 반쪽
- 깊이방향 : 전체 깊이

또한, 판 및 보강재의 좌굴에 대한 변형형상을 가능한 정확히 구현하기 위하여 보강재를 포함하여 모든 판은 4 절점 판요소로 하며, 보강재 간격으로 최소 6 개 요소 이상, 횡부재 간격으로는 좌굴모드의 반파 간격으로 최소 6 개 요소 이상이 되도록 하였다.

3.1.2 초기 변형

초기 변형의 효과를 고려하기 위하여 Fig. 2 와 같이 1 개의 독립 판별이 4 번 단순지지일 경우 발

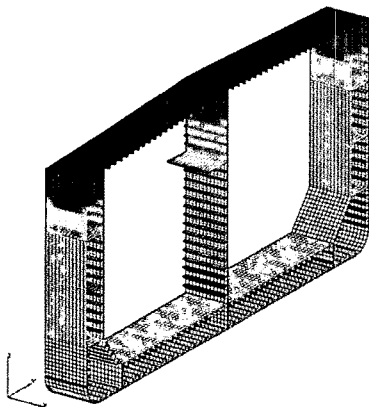


Fig. 1 Analysis model for analysis by ABAQUS

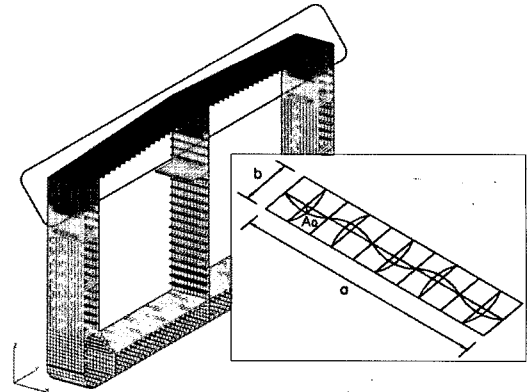


Fig. 2 Initial imperfection of stiffened plate

생이 예상되는 좌굴모드를 상갑판 및 외판 상부의 모든 판별에 초기변형을 고려한다. 초기변형은 응집변형에 의한 예상 변형량을 압축응력이 작용하는 상부 구조 전체에 반영하고 식(4)에서 정의되는 변형 형태로 가정한다.

$$w = A_0 (\sin n\pi x/a \sin x\pi/b) \tag{4}$$

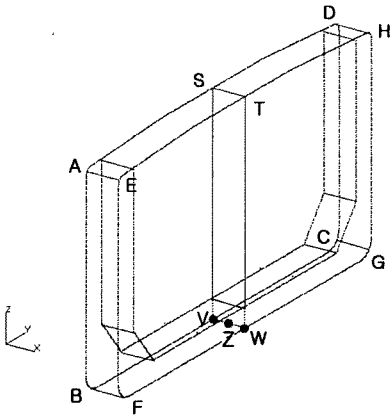
- 여기서, A_0 : 초기 처짐량
- n : 좌굴 모드의 파 개수
- a : 보강판의 길이 즉, 횡부재 간격
- b : 보강재 사이의 길이

3.1.3 경계 및 하중조건

Fig. 3 에서 볼 수 있듯이, 해석모델 양 단면은 평면을 유지하며 동일 회전각을 갖도록 종방향 변위를 변화시키며, 각 절점에 대하여 모든 회전각은 구속하였다. 하중조건으로는 종굽힘모멘트를 받는 양단면에 강제회전변위를 점차 증가시켜주는 변위증분법과 굽힘모멘트를 점차 증가시켜주는 하중증분법 모두 적용할 수 있다.

3.1.4 응력-변형도 관계의 정의

응력과 변형도 관계는 탄성-완전소성(Elasto-Perfect Plastic)이라고 가정하며, 항복기준은 Von-Mises 의 항복조건을 적용하였다.



Plane ABCD	Rigid plane : Independent point V Constrained in D_x, R_x, R_y, R_z
Plane EFGH	Rigid plane : Independent point W Constrained in D_x, R_x, R_y, R_z
Mid-plane between Plane ABCD and EFGH	D_x
Line ST, VW	In case of half model : D_y In case of full model : D_y, R_x, R_z
Point Z	D_z
Point V, W	$(\pm) \theta_y, (\pm) M_y$

Fig. 3 Boundary constraint for enforced rotational displacement

3.2 비선형 해석 방법 검증

상용 프로그램(ABAQUS)을 이용한 최종 종강도 해석의 타당성을 입증하기 위해서 Dow(1991)가 수행한 함정구조의 1/3 축소 모형의 실험결과와 비교하였다.

3.2.1 Dow의 함정구조 모형

Fig. 4는 함정구조 모형의 중앙단면도를 나타낸다. 그림에서는 부재치수 뿐만 아니라, 재료의 물성치도 나타내었다.

Fig. 5에서는 함구조 모형의 해석모형을 보여주고 있다. 또한 초기 변형량을 반영한 부위를 표시하고 있다.

한편, 초기변형량이 최종강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Smith et al.(1988)이 제안한 세 가지 초기 변형량을 고려하여 각각 해석을 수행하였다.

Table 1 Value of initial deflection

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Slight	0.61	0.41	0.17	0.10	0.18	0.40
Average	2.43	1.62	0.68	0.40	0.73	1.59
Severe	7.29	4.86	2.04	1.19	2.18	4.76

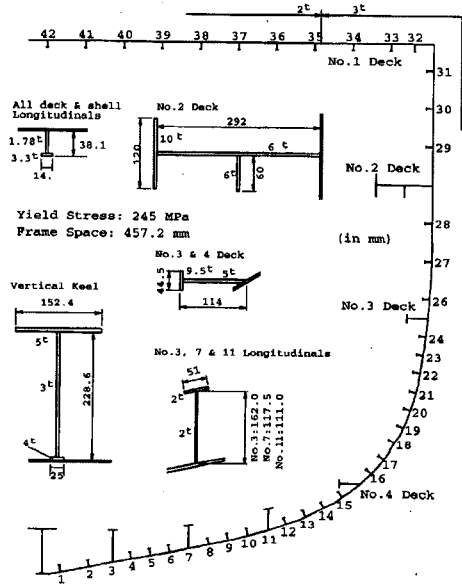


Fig. 4 Midship section of Dow's frigate model

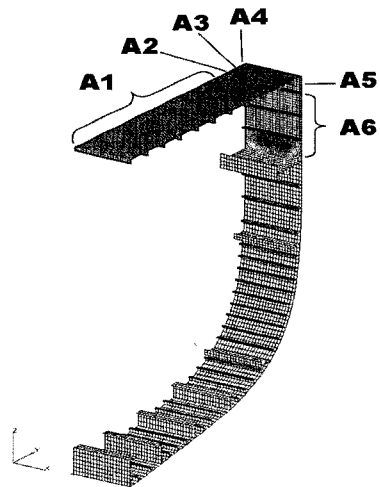


Fig. 5 Analysis model of Dow's frigate model

해석모델에 반영된 초기 변형량은 아래와 같이 주어지며, Fig. 5 에 표시된 각 위치에서 초기변형량의 값을 Table 1 에 열거하였다.

$$\begin{aligned}
 A_0 &= 0.025 \beta^2 t \text{ for slight level} \\
 A_0 &= 0.1 \beta^2 t \text{ for average level} \\
 A_0 &= 0.3 \beta^2 t \text{ for severe level}
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, A_0 : 초기 처짐량
 β : 보강판의 세장비
 t : 판두께

재료의 응력과 변형도 관계는 탄성-완전소성으로 가정하였고, 탄성계수는 207000 N/mm², 포아송비는 0.3, 항복응력은 245 N/mm² 값을 이용하였다.

3.2.2 결과 비교 및 검토

Fig. 6 은 Dow 항구조 모형에 대한 수직굽힘모멘트와 변위각의 상관곡선을 나타내고 있으며, 최초 좌굴 발생에서부터 붕괴될 때까지의 과정을 나타내고 있다. 이 그림은 실험치를 둥근 점으로 표시하였고, 각 점선들은 유한요소해석으로부터 얻은 결과를 표시한 것이다.

이 곡선에서는 최종강도까지의 거동은 실험결과

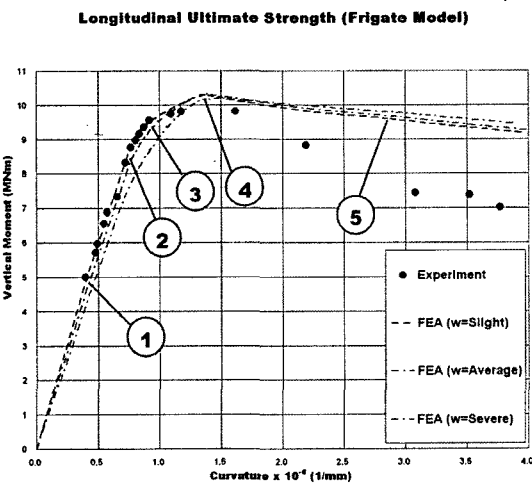


Fig. 6 Bending moment-curvature relationship of frigate model

와 잘 일치하고 있지만, 최종강도 이후의 거동은 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 상갑판 보강판이 좌굴 및 최종강도 이후 거동 즉, 보강판의 붕괴 이후 하중제하(unloading)에 대한 실제 거동을 구조해석에서 정확히 반영하지 못하기 때문으로 보인다. 이와 관련하여, Masahiko Fujikubo(2005)는 비선형 유한요소 해석에서 국부적인 붕괴모드를 고려한 결과 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다고 주장하고 있다. 하지만, 본 논문 목적은 최종강도 값을 얻고자 하는 것이므로 붕괴거동 후의 하중제하현상에 대해 정확히 분석하지 않았다.

Fig. 6 에서 ①~⑤기호로 표시된 점들은 각 구조에서 좌굴이나 항복점에 도달하는 상태를 표시하는데, 아래와 같이 각 위치에서 굽힘모멘트-곡률 곡선의 기울기에 변화가 발생하는 상태를 표시한다.

- ① : 상갑판의 좌굴 발생
- ② : 상갑판의 항복 도달
- ③ : 선저외판의 항복 도달
- ④ : 선저거더의 항복 도달
- ⑤ : 중앙 단면이 붕괴되는 상태

각 상태별로 붕괴거동을 분석해보면, 수직 굽힘모멘트에 증가에 따라 상갑판 부위가 압축력에 의해 좌굴이 발생한 후 항복응력에 도달하면서 상갑판 부위 및 외판 상부 구조까지 붕괴가 급격히 확산되면서 최종상태에 도달하게 된다. 이 때, 즉 최종 상태에서는 선저 구조가 항복응력에 도달한 상태임을 확인할 수 있다. 이후 제하상태에서는 굽힘모멘트가 감소하지만 상갑판 및 선저부의 항복 범위가 확대되면서 변위각이 계속해서 증가되는 현상이 나타났다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 각 상태별 응력 분포를 나타내고 있다. 이 그림은 상갑판의 좌굴 및 붕괴가 진행되면서 응력이 0 Mpa 인 위치가 점차 밀어붙어가고 있음을 보여준다. 따라서 최종강도값에 영향을 줄 수 있는 중요한 요인인 중립축의 변화가 재료의 소성화 및 기하학적인 변형에 따라서 적절

히 반영되고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 좌굴 모드와 붕괴 모드를 보여주고 있다. 두 그림에서는 변형 형상을 확대하여 표시하였다.

초기 처짐량의 차이에 따른 영향은 Fig. 6 에서 각각 점선, 일점쇄선 그리고 이점쇄선으로 나타내었다. 세가지로 초기 변형량의 차이를 두어 계산한 결과, 초기 변형량이 커질수록 강성과 최종강도의 값은 감소하지만, 그들이 최종상태에 주는 영향은 미미하다고 볼 수 있다. 이는 보강판의 거동에서는 보강재가 충분히 역할을 하므로 초기처짐의 크기에 대해 민감하지 않다고 판단된다.

위와 같이 상용프로그램을 이용하여 최종 종강도 해석을 수행한 결과, 실험결과와 비교적 잘 일치함을 보여줌으로써 이 해석방법으로 최종강도를 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다.

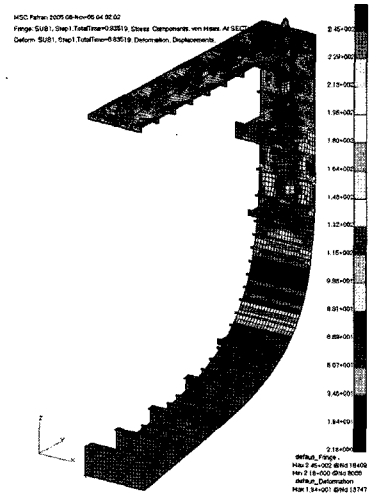


Fig. 8 Stress distribution at ⑤

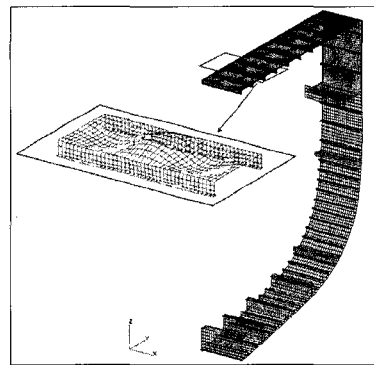


Fig. 9 Buckling mode of frigate model at state ①

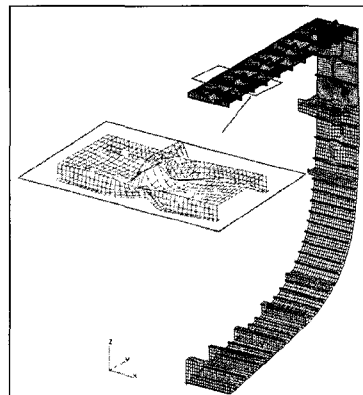


Fig. 10 Buckling mode of frigate model at state ⑤

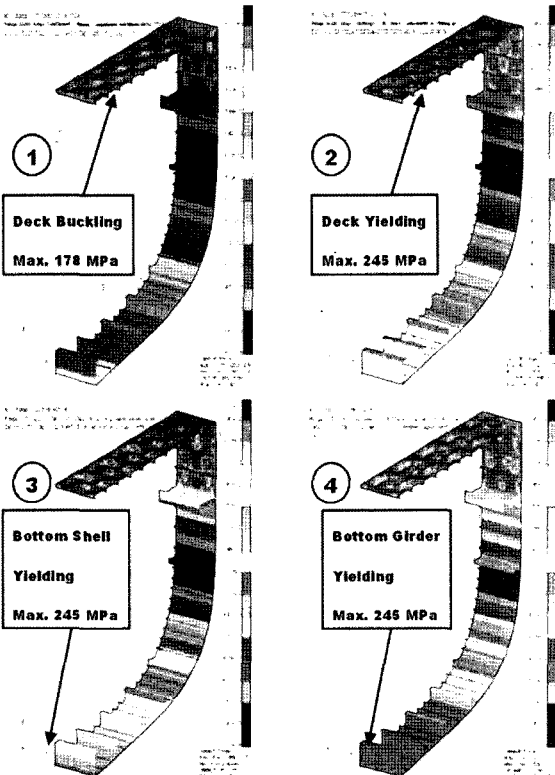


Fig. 7 Change of stress distribution at ①~④

4. 최종 강도 추정식

4.1 개요

주요 치수들과 중앙단면형상을 결정하는 초기 설계단계에서는 많은 반복계산을 수행해야만 한다. 또한 이 과정에서 최종 종강도에 대한 최적설계를 위해서 많은 양의 비선형 유한 요소 해석을 수행하는 데에는 많은 시간이 필요하나, 최종 종강도를 예측할 수 있는 추정식을 사용하면 초기설계단계에서 주요 치수들을 효과적으로 결정할 수 있다. 여기에서는 선각의 최종 종강도를 추정하는 기존에 제안된 공식을 이용하였고 그 결과를 비선형 구조해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한 여기에서 제안된 공식을 이미 건조된 10 척의 유조선 모델에 적용하고 그 결과를 노르웨이 선급에서 제시한 프로그램의 결과와 비교, 분석하였다.

4.2 최종 종강도 추정식

본 논문에서 이용한 최종 종강도 추정식은 Faulkner and Sadden(1979)이 제안한 공식을 사용하였으며, 본 논문에서는 현재 건조되는 유조선의 형상이 거의 비슷하다는 점을 감안하여, Hard Corner 효과를 고려할 수 있는 시스템인자(system parameter), ζ_s 는 상수 값으로 수정하여 아래의 식(6)을 제안하였다.

$$M_u = Z \sigma_u (1 + \zeta_s) = Z \sigma_{y,av} \phi (1 + \zeta_s) \quad (6)$$

여기서, M_u : 선각의 최종 종강도

ζ_s : 시스템인자

0.13 : 상갑판 압축시

0.08 : 선저부 압축시

σ_u : 최종 한계 응력

$\sigma_{y,a}$: 보강판의 평균 항복 응력

ϕ : 압축강도 매개변수

이 식에서 압축강도 매개변수, ϕ 는 Lee(1989)가 제안한 식을 사용하였으며, 본 논문에서는 면외하중의 효과는 고려하지 않았다.

Table 2 Details of tanker models

Ship No. Item	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Frame Space	5700	5700	4700	4750	4250	4320	4230	3980	3980	3440
Deck Structure										
Deck Area	14099	14177	11413	10383	10484	9038	8363	5973	6034	5720
Plate THK.	17.5	17.5	17.5	16	18	16	15.5	14	15	14
Plate Yield Stress (σ_y)	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
Stiffener Scantling	425 T	425 T	400 L	400 L	350 L	300 L	300 L	250 L	250 L	250 L
Spacing	935	975	850	855	850	850	830	780	780	790
Stiffener Yield Stress (σ_y)	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
Bottom Structure										
Bottom Area	35495	36410	24798	23710	21129	20601	19165	14400	14474	13453
Plate THK.	20	21	19	21	20.5	18	18	17	17	15
Plate Yield Stress (σ_y)	315	315	235	235	235	235	235	315	235	235
Stiffener Scantling	625 T	650 T	550 T	500 T	475 T	450 T	425 T	400 T	400 T	350 L
Spacing	935	975	850	855	850	850	830	780	780	790
Stiffener Yield Stress (σ_y)	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
Cross Sectional Area	103709	106038	64222	62845	53354	52482	50131	40779	41014	36735
Height of NA from Baseline	13.04	12.98	9.98	10.31	8.93	9.08	9.02	8.80	8.83	8.69
Moment of Inertia (I_y)	1343	1373	531	566	361	359	334	254	258	230
Section Modulus for Deck (2D)	77.41	78.81	40.48	40.17	31.43	30.08	27.91	21.00	21.33	19.60
Section Modulus for Bottom (2B)	103.0	105.7	53.22	54.94	40.38	39.52	37.06	28.86	29.16	26.42
Plastic Moment (Mp)	30401	30913	14956	15486	11287	11080	10398	8368	8166	7341

4.3 비교 대상 선박 모델

본 논문에서 이용할 추정식을 검증하기 위하여 Table 2 에 보인 실제 건조된 10 척의 유조선을 선정하였다. 선정된 유조선은 모두 이중선체 구조이며 적재하중톤수(dead weight tonnage)가 7 만 ~30 만톤 사이의 다양한 크기로 선정하였다. Table 2 에 각 유조선 모델의 상세 정보를 열거하였다.

4.4 최종 종강도 계산 결과

10 척의 유조선에 대한 결과를 Table 3 에 나타내었는데, 유조선의 공통 선각 규칙에서 제안하는 노르웨이 선급의 프로그램의 결과와 비교하였다.

Fig. 11 과 Fig. 12 에는 추정식(6)과 노르웨이 선급의 프로그램에 의한 결과로서 각각 새깅상태와 호깅상태의 최종 종강도를 비교목적으로 표시하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 상갑판에 압축력이 가해지는 새깅상태에서는 두 방법의 결과값이 거의 일치하고 있지만, 호깅상태에서는 노르웨이 선급 프로그램의 결과가 낮게 평가되고 있다. 이는 선급프로그램에서 이중 선저 효과를 반영하

Table 3 Summary of ultimate strength of models [MNm]

Item Ship No.	Sagging Condition		Hogging Condition	
	Proposed Formula	DNV's Program	Proposed Formula	DNV's Program
T1	20069	20750	28088	23129
T2	20136	20851	28965	23457
T3	11126	10782	13448	12092
T4	10663	10698	14129	12008
T5	8664	8222	10357	9370
T6	7730	7766	9794	8917
T7	7194	7284	9234	8337
T8	5261	5591	7888	6364
T9	5485	5685	7288	6450
T10	4998	5143	6322	5836

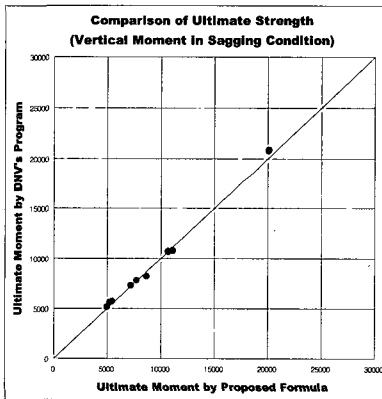


Fig. 11 Comparison of ultimate strength in sagging condition

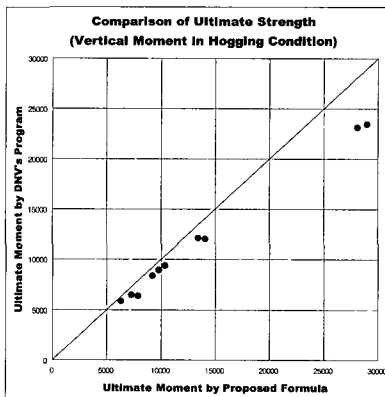


Fig. 12 Comparison of ultimate strength in hogging condition

지 못한다고 예상된다. 이에 대해서는 4.5 절에서 비선형 유한요소 해석을 통해서 검증하기로 한다.

4.5 계산결과와 검증

여기에서는 전절에서 구한 최종 종강도 값을 상용프로그램(ABAQUS)의 한 결과와 비교하여 이용하여 검증하였고 이를 위해 3 척의 유조선 모델을 선택하여 비선형 구조해석을 수행하였다.

대부분의 해석 조건은 3 장에서 언급된 조건을 이용하였으나, 일부 조건에 대해서는 계산 값과 일관성 있는 비교를 위해서 아래와 같이 가정하였다.

모델 범위 : 횡방향 전폭

초기 변형 형태 : 길이방향으로 5 개 반파 형상

초기 처짐량 (A_0) : $s / 200$, s 는 보강재 간격

항복응력 (σ_{yd}) : 235 N/mm² for 연강

315 M/mm² for 고장력강

탄성계수 (E) : 206000 N/mm²

부식여유(t_k) : 노르웨이 선급 규정

증분 방법 : 하중 증분법

해석 결과는 Table 4 에 나타내었다. 표에서는 세 유조선에 대해서 새김 및 호깅상태에 대한 최종 굽힘모멘트를 계산 방법에 따라 구분해서 표시하였다. 또한 계산 방법의 차이를 쉽게 비교할 수 있도록 유한요소해석의 결과값을 기준으로 (100%) 그에 대한 차이를 비율로 표시하였다.

비교에서 볼 수 있듯이, 본 논문에서 제안하고 있는 추정식을 사용하여 계산한 결과값은 유한요소해석 결과와 호깅 및 새김상태 모두 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 노르웨이 선급 프로그램을 이용한 계산 결과는 새김상태에서는 비교적 일치하였으나, 호깅상태에서는 10% 정도 낮게 평가되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 13~Fig. 15 는 세 유조선 모델에 대한 굽힘모멘트-곡률 사이의 관계를 나타내었다. 최종 종강도로서 최종 굽힘모멘트 값을 비교하기 위하여 추정식(6)과 DnV 선급 프로그램의 결과를 표시하였다.

이 곡선에서는 단일 구조로 이루어진 상갑판이 압축을 받는 새김상태에서는 최종강도 이후부터는 급격한 붕괴가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 이에 비해 이중 구조인 선저부가 압축을 받는 호깅상태에서는 완만한 곡선형태로 붕괴가 진행됨을 알 수 있었다. 또한, T3 모델에서는 일부 구간에서 불연속적인 거동을 보이고 있는데, 이는 이중 구조 에서 선저외판보다 중립축에 더 가까운 화물창의 바닥을 구성하는 선저내판의 영향 때문으로 판단된다.

Table 4 Comparison with ultimate strength of 3 tanker models [MNm]

Ship No.		T3		T7		T9	
		M_u	Ratio	M_u	Ratio	M_u	Ratio
Sagging Condition	FEA	10872	100%	7110	100%	5639	100%
	Formula	11126	102%	7194	101%	5485	97%
	DNV's Prog.	10782	99%	7284	102%	5685	101%
Hogging Condition	FEA	13300	100%	9382	100%	7141	100%
	Formula	13448	101%	9234	98%	7288	102%
	DNV's Prog.	12092	91%	8337	89%	6450	90%

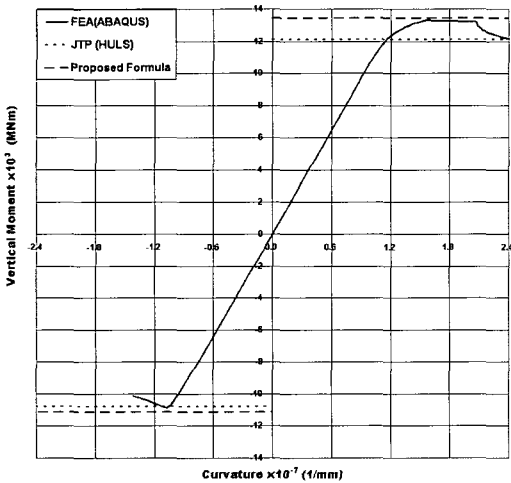


Fig. 13 Bending moment-curvature relationship of Tanker T3

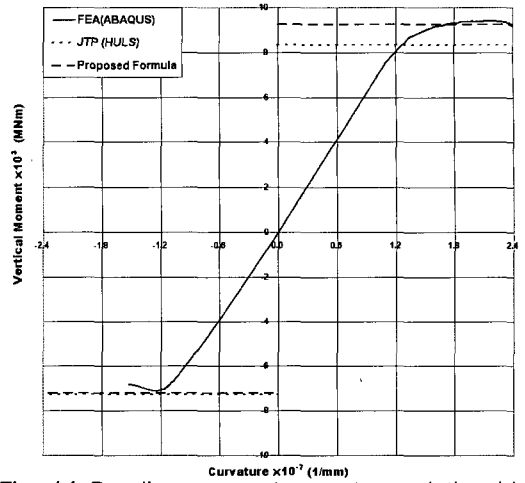


Fig. 14 Bending moment-curvature relationship of Tanker T7

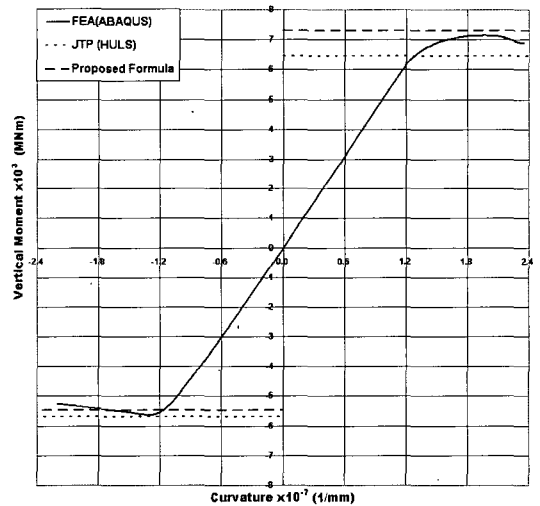


Fig. 15 Bending moment-curvature relationship of Tanker T9

5. 선급 규정에 의한 최종 강도 평가

이 장에서는 현재 건조되어 운행 중인 유조선의 최종강도가 최근 작성되고 있는 유조선 공통규칙에서의 요구치와 비교목적으로 계산하였다. 유조선 규정에서는 새김굽힘모멘트에 대한 최종 증강도 계산을 요구하며 이는 식(1)을 이용하여

Table 5 Estimation of ultimate strength for the tanker models in Table 2 with JTP' s rule (2nd Draft)

	B/D	M _T	M _U	M _U /1.1	Ratio	Remark
T1	1.97	20497	20069	18244	0.890	×
T2	1.97	20497	20136	18306	0.893	×
T3	2.08	10974	11126	10114	0.922	×
T4	1.87	9913	10663	9694	0.978	×
T5	2.20	8795	8664	7877	0.896	×
T6	2.10	8795	8664	7877	0.866	×
T7	2.00	7273	7194	6540	0.899	×
T8	1.54	4913	5261	4783	0.973	×
T9	1.54	4913	5485	4986	1.015	○
T10	1.58	4881	4998	4543	0.931	×

계산한다. 식(1)에서 보듯이 부분안전계수는 정수 굽힘 모멘트에 대해서는 1.0, 파랑 굽힘모멘트에는 1.3 이 주어지고, 안전계수는 1.1 로 주어져 있다. 결과는 Table 5 에 나타내었다.

표에서 볼 수 있듯이, 유조선 공통 선각 규칙에 따라 평가하였을 때 대부분의 선박은 규정요구치에 약 10% 적다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 깊이 대비 선폭(B/D)의 비율이 적은(약 1.5) 선박에 대해서는 규정에 만족하거나 유사한 최종강도를 가지고 있다. 이는 단면계수에 크게 지배되는 최종강도에 대하여, 깊이 대비 선폭의 비율이 적은 선박은 종강도에 대한 단면계수가 충분한 여유를 가지도록 설계되기 때문이라고 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 선체 선각 구조의 최종 종강도 평가를 위하여 이미 발표된 논문 및 발행 예정인 “유조선에 대한 공통 선각 규칙 (Common Structural Rule for Tanker - 2nd Draft)” 을 조사하였다. 또한 최종강도 계산을 위해 상용 프로그램을 이용한 유한요소 해석 방법을 정립하였으며, 초기설계단계에서 활용할 수 있는 간이 추정식을 제안하고 결과를 검증하였다. 제안하는 추정식을 실제로 운항중인 10 척의 유조선에 적용하여 그

최종 종강도를 계산하였고 그 결과를 유조선 공통 규칙을 기준으로 최종강도에 대한 안정성을 평가해 보았다.

본 논문에서 제안한 추정식을 이용하면 초기설계 단계에서 최종 종강도에 대한 최적설계가 가능할 것으로 보이며, 또한 상용프로그램을 이용한 해석방법을 정립함으로써 최종 설계 단계에서 정확하며, 객관적인 최종 종강도 평가를 가능하게 하였다. 또한 현재 개발 중인 유조선 공통 규칙에서 추천하고 있는 노르웨이 선급 프로그램의 신뢰도를 평가하기 위해 본 논문의 결과와 비교해 보았다.

본 연구를 통해서 얻은 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있겠다.

- (1) 선박의 최종 종강도 평가를 위해서 상용 프로그램(ABAQUS)을 적용할 수 있음을 확인하였으며, 붕괴거동을 단계별로 확인할 수 있었다.
- (2) 상용프로그램 적용 방법을 검증하기 위해 1/3 축소 항정모형에 대한 실험결과와 비교한 결과, 최종상태 전까지는 좋은 일치를 보였으나 붕괴 이후 제하상태에서는 실험결과와 차이를 보였다.
- (3) 초기 변형량의 영향에 대해서는, 초기 변형량이 커짐에 따라 강성과 최종강도는 낮아지지만, 보강판의 보강재가 충분히 역할을 하기 때문에 최종강도에는 그리 민감하지 않음을 알 수 있었다.
- (4) 여기에서 제안하는 최종 종강도에 대한 추정식을 이용한 결과와 상용프로그램을 이용한 결과를 비교한 결과 최종강도 측면에서 좋은 일치를 보였다. 따라서 본 추정식은 초기 설계단계에서 최적설계를 위해 충분히 적용할 수 있음을 확인하였다.
- (5) 본 논문의 추정식의 결과와 노르웨이 선급 프로그램 결과와 비교한 결과, 새김상태에서는 비교적 일치하였으나, 호강상태에서는 선급 프로그램 결과가 10~20% 낮게 평가되었다.
- (6) 10 척의 실제 유조선에 대해 “유조선에 대한 공통 선각 규칙(Common Structural Rule for Tanker - 2nd Draft)” 의 허용치와 비교해 본

결과, 대부분의 선박이 10% 정도 적은 값이 계산되었다. 단, 깊이 대비 선폭의 비율이 적은(약 1.5) 선박의 최종강도는 허용치에 근사하였다.

향후 과제로서 본 논문에서 제안된 추정식에 대하여 유조선 외에 타 선종에 적용 가능성에 대한 검토가 이루어져야 할 것이며, 또한 본 논문에서 고려되지 않은 잔류응력, 전단력, 면외하중 등에 대한 영향 분석이 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 울산대학교의 지원으로 이루어진 것임을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Dow, R.S., 1991, "Testing and Analysis of a 1/3-Scale Welded Steel Frigate Model," Proc. Intl. Conf. on Advances in Marine Structures, Dunfermline Scotland, pp. 749-773.
- Faulkner, D. and Sadden, J.A., 1979, "Toward a Unified Approach to Ship Structural Safety," RINA Transactions, 120, pp. 1-28.
- IACS Team for Joint Tanker Project, 2005, Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers - 2nd Draft.

- Lee, J.S., 1989, Reliability analysis of continuous structural systems, PhD. Thesis. University of Glasgow, pp. 103-183.
- Masahiko Fujikubo, 2005, "Progressive Collapse Analysis of Ship's Hull Girder in Longitudinal Bending using Idealized Structural unit Method," Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.1, pp. 187-196
- Smith, C.S., Davidson, P.C.m Chapman, J.C. and Dowling, P.J., 1988, "Strength and Stiffness of Ship's Plating under In-Plane Compression and Tension," RINA Transactions, 130, pp. 277-296.



< 이 훈 곤 >



< 이 주 성 >