
 論 文

大韓造船學會論文集
 第30卷第2號 1993年5月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 30, No. 2, May 1993

초대형 이중선체 유조선의 구조 설계

봉현수*, 김만수*, 이종구**

Hull Structural Design for 300K Double Hull VLCC

by

Hyon-Soo Bong*, Man-Soo Kim* and Jong-Koo Lee**

요 약

오늘날 과학은 놀랍게 발전하고 있고, 과학문명의 성장은 인류의 위대한 업적 중 하나로 높게 평가되어진다. 그러나 한편, 이러한 발전은 새로운 문제를 유발케 되었는데 즉, 지구환경 오염을 가져오게 된 것이다. 이 지구환경 오염의 현상은 지구를 황폐케 할 뿐 아니라, 인간 생존권조차 위협케 되었다.

지난 1970년대로부터 유조선의 건조가 가속화되면서 전 세계적으로 해상환경오염방지에 대한 관심이 높아지면서 급기야 IMO에서 유조선에 대한 이중선체 구조의 의무화를 규정화 하였다.

이러한 시대적 배경을 통하여 당사에서는 미래 선박으로서 초대형 이중선체 유조선을 개발케 되었고, 본고에서는 각종 국제규정을 만족시키는 300K 이중선체 유조선 개발 내용을 소개하며, 특히 화물창부에 대한 구조배치 및 직접구조계산을 수행한 내용을 소개코저 한다.

Abstract

Since the years of oil tanker production in the 70's, the concern of marine environmental protection is worldwidely increased, at last it is compulsorily ruled to product the double hull tanker by International Maritime Organization(IMO). Throughout these informative years Daewoo Shipyard has developed the double hull VLCC for a future vessel. This paper presents hull design for 300K double hull VLCC which was carried out to satisfy with statutory requirement of it, focused the structural arrangement and direct calculation in cargo hold area.

발 표: 1992년도 대한조선학회 추계연구발표회('92. 11. 14)

접수일자: 1992년 12월 14일, 재접수일자: 1993년 2월 6일

* 정회원, 대우조선공업(주) 선체설계실

** 대우조선공업(주) 선체설계실

1. 서 론

산업의 발달로 지구의 오염은 갈수록 심화되고 육지뿐만 아니라 바다의 해양환경 또한 오염의 도를 더해가고 있다. 이제 “무제한적 산업발전”은 “환경보존”이라는 커다란 장벽에 부딪혀 그 진로를 대대적으로 수정해야 할 시점에 이르렀다. 본고는 70년대에 봄을 타고 유조선이 건조되기 시작하여 80년대에 초대형화됨에 따라 유조선에 의한 해상오염이 날로 늘어가고 해상충돌, 좌초사고로 심지어 해양 생태계가 크게 위협 당하는 심각한 지경에까지 이르게 되었다. 일찌기 1967년 “TORRY CANYON”호, 1978년 “AMOCO CADIZ”호의 해난 사고에 의한 대량의 기름 유출사고로 IMO(International Maritime Organization)에서 “해양오염 방지협약 73/78”(MARPOL 73/78)을 발효하였고 1989년 3월 알래스카 연안에서 “EXXON VALDEZ”호 좌초사고로 대량의 원유 유출사고가 발생하여 특정지역의 해양오염 사고를 가져오게 되어, 급기야 미국에서는 선체의 외벽을 이중으로 해야 한다는 해양오염방지법 OPA 90(Oil Pollution Act of 1990) 발효 및 IMO에서는 1992년 3월 MEPC 32차(The Marine Environmental Protection Committee) 회의에서 국제 규칙화 하였다. 따라서 당사에서도 그간 약 30여척의 초대형 유조선(VLCC)을 건조한 경험을 최대한 살려 상기규정을 충분히 만족하는 보다 우수한 품질의 “초대형 이중선체 유조선의 개발”이 가장 큰 과제로 대두되어 경쟁력 있는 신세대 선박 확보에 노력을 가하고 있다. 특히 CAE 분야의 급속한 발전으로 종래의 단순수계산(單順手計算)의 불확실성에서 탈피하여 본 “초대형 이중선체 유조선의 구조 설계”에서도 ADDS(Advanced Design by Analysis)를 구사하여 대부분의 구조강도 계산을 수행하였다. 본고에서는 주로 직접계산에 의한 구조해석 분야를 간략히 소개코저 한다.

2. 설계 개요

본 선박의 주요제원 및 화물창 배치는 아래와 같다.

2.1 주요제원 및 특기사항

Length(Overall) :	322.0 M
Length(B.P) :	320.0 M
Length(Scantling) :	315.832 M
Breadth(Mld) :	58.0 M
Depth(Design) :	31.0 M
Draft(Scantling) :	22.0 M
Draft(Design) :	20.8 M
Cb	: 0.817
Speed(Service) :	15.5 Knot
Class :	DNV+1A1 “TANKER FOR OIL”
S.W.B.M(Rule Req.) :	Hogging 6,856,581 KN-M
	Sagging 6,132,643 KN-M
Steel Grade :	Mild steel, HT32, HT36
Specific Gravity of cargo oil(Scantling) :	1.025

2.2 화물창(C.O.T) 배치

본고에서는 선박 전체길이의 약 80%을 차지하는 화물창 구조설계에 초점을 맞추었으며 기타 선미, 기관실, 선수부 구조는 기존의 선박과 대동소이하므로 연구 과제에서 제외되었다. 아래 Fig.1 General Arrangement에서 보는 바와 같이 화물창은 15개의 C.O.T와 1쌍의 S'lop Tank 및 5쌍의 Ballast Tank 로서 구성되어 있다. 각쌍의 Ballast Tank는 선체 중심선부에서 좌, 우로 구분배치되고 그 모양은 “L”형을 이루고 있다. 본 Ballast Tank는 서언에서 언급한 바와 같이 해상환경 오염 방지 목적의 최소 이중격벽 배치규정을 충분히 만족토록 되어있다. 화물창 구조배치시 주요 고려 사항은 아래와 같다.

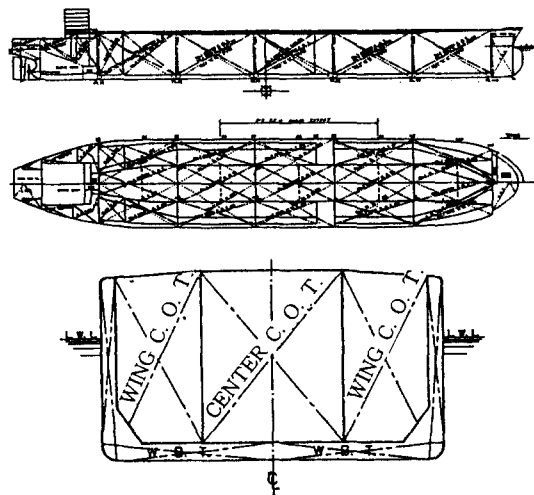


Fig.1 General arrangement

- (1) 약 200만 Barrel(318,000M³) 이상 적재 가능한 Cargo Volume 확보
 - (2) Ballast draft 유지 가능한 Ballast 용량 확보
 - (3) 좌초/충돌시 기름 유출량 최소화 규정 만족
 - (4) Marpol 규정 만족(Double Hull 폭 2.0M이상)
- 상기 기본 사항들을 만족시키며 복원성, Trim 조건 등에 적합한 일반배치를 완성하였다.

2.3 화물창부의 구조 특징

중앙단면 형상은 Ship Side 하부구조물 Square, Slant, Hopper등 3가지 Type을 안으로 검토했으나 이중선체격벽과 Double Bottom과의 교차점이 고응력 부인 점을 감안하여 Hopper 구조를 채택하였고 Deck) 의 Sheer Strake는 Square Type을 채택하였다. 특히 Hopper 구조부는 Sub-Model 기법을 사용하여 아주 면밀하게 구조해석을 수행하므로써 고응력 부에 대한 구조적 결함을 가능한한 줄이는 노력을 기했다. 각 Tank의 크기를 결정하는 종격벽의 위치는 Tank 배치와 구조적 안정성을 동시에 평가하면서 결정되었다. Cross Tie 구조는 Center Tank 혹은 Wing Tank에 배치하는 것을 상호비교 검토하였으나 성능과 기능측면에서 그 우열을 가늠하기가 무척 어려웠다. 본고의 경우에는 Cross Tie의 위치를 Wing Tank에 두어 Double Side 구조와 Longitudinal Bulkhead 구조를 연결하는 비교적 안정한 구조를

선택했다. 특히 Full Load 상태에서 Sagging Moment를 줄이기 위해 No.3 Cargo Tank에 Recessed Ballast Tank를 배치하였으며 Web Frame Space 와 Longitudinal Stiffener의 Space는 최적 구조배치 System을 이용하여 배치하였다. 종강도 측면에서 선급 요구치보다 약 11% 이상의 여유치를 갖도록 설계되었으며 Partial Loading에 의한 Sloshing Damage 를 방지키 위해 Center Tank에 Swash Bhd를 배치하고, Full Load 황천운항시 Ballast없는 선저보강도 검토하였다. 그외에도 Double Hull 구조로 인한 도장량 증가에 대한 대비책으로 도장 작업의 용이화와 감소에 대한 검토도 병행하였다. 결정된 중앙단면 형상은 Fig.2 Typical Midship Section과 같다.

3. 구조계산 일반사항

앞장의 Fig.2 "Typical Midship Section" 형상을 기초로 선급 규정 요구치를 만족하는 주요 판재 및 종강도 내부재에 대한 초기 치수를 결정하고 단순 선급규정으로 검증하기 힘든 고응력부-선저판/내저판, 이중선저 종늑골/횡늑골, Hopper 구조, Web Frame, Stringer 등-에 대한 FEM 직접 계산을 수행하였다. 선박의 경우 육상 고정구조물과 달리

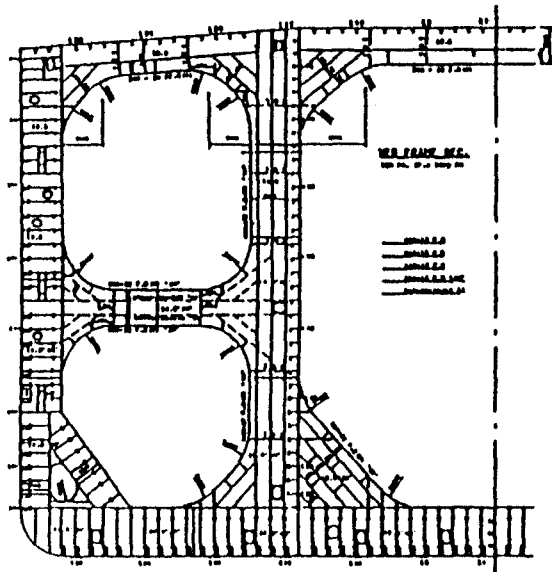


Fig.2 Typical midship section

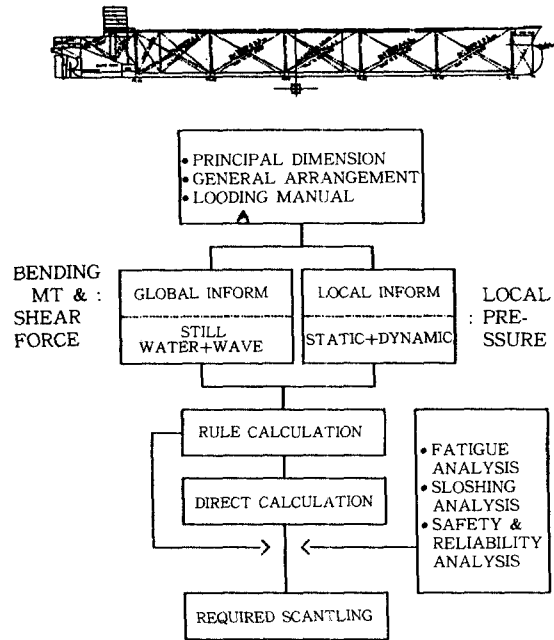


Fig.3 Scantling procedure for ship

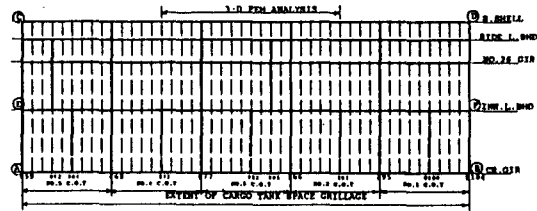
각종 경계 조건이 확실치 않고 부력을 받으며 물위에 떠있는 부유체로서 경계 조건 설정이 난해하며, 정수 중에 머물지 않고 파도가 치는 해상상태에서 운항하게 되므로 외적 하중 조건이 까다로울뿐 아니라 내적으로도 정규분포되지 않은 선체자중과 화물의 적재로 하중조건이 다양한 형태로 나타남에 의한 경계조건 설정이 어려워 각 선급마다 약간씩 상이한 계산조건을 요구하고 있다. 본고에서는 가능한 상기 조건의 어려움을 극복하는 가정을 설정하여 계산을 수행하였다. 본고의 계산 절차는 Fig. 3 "Scantling Procedure for Ship"의 Flow Chart와 같다.

4. 직접 계산

선급 규정에 따른 계산은 본고에서 생략하며 특기할 사항은 초기 주요 부재 배치와 선급규정 요구치간의 적절한 조화를 이루면서 구조배치를 하여 선각중량의 최적화 및 용접장/부재수 등을 줄여 건조비를 최소화하는 노력을 기울였다. 광폭의 Web Frame과 Longitudinal Stiffener 배치는 생산량을 줄이는데 큰 영향을 미쳤으나 선각 중량의 현격한 증가를 가져왔고 Wide Breadth/Long Span에 의한 부가적인 Large Deflection 발생으로 구조적 결함의 여지가 많은 것으로 판단되었다. 직접 계산 방법은 먼저 E/R Front Bhd와 선수부 Collision Bhd부까지의 Cargo Hold부를 Beam Grillage Model하여 선박전체에 가해지는 Hull Girder Bending Moment와 Shear Force를 구한 다음, 화물창 중앙부에 대해 3D-Coarse Mesh 해석을 수행하여 각 하중 조건별로 대체적인 경향을 분석하고 중, 횡부재중 고응력부를 별도로 2D 혹은 3D Fine Mesh Analysis를 수행하여 상세 구조 검토를 하였다. 최근 Hardware의 급속한 발달로 주요 관심부재에 대해서는 아주 잘게 Fine Mesh 분할을 병행 실시하여 2~3개 Hold에 대해 3-D Semi-Fine Mesh를 수행하는 기법을 이용하고 있으나 당사 H/W의 용량과 반복되는 Computer Run Time의 Loss 및 Model의 복잡성 등을 방지하는 목적에서 별도의 2-D Fine Mesh로 분할하는 기법을 사용하였다. 특히 Ansys Program의 경우 Coarse Mesh Model의 경계조건을 Automatic Transferring하는 기능을 보유하고 있기 때문에 이에 대한 유리점을 이용하였다고 볼 수 있다.

4.1 2-D Beam Grillage

상기에서 언급한 바와 같이 Cargo Hold부 전체를 Beam 요소로 치환하여 Grillage Modelling하였다. 종부재로는 Longitudinal Bulkhead, Double Side와 Bottom Girder가 있으며, 횡부재는 Trans. Water Tight Bulkhead, Web Frame, Swash Bulkhead로



BOUNDARY CONSTRAINTS

GLOBAL AXIS	POSITION	COMPONENT NUMBER					
		1	2	3	4	5	6
POINT A	1	1	1	1	1	1	1
POINT B	2	1	1	1	1	1	1
POINT C	3	1	1	1	1	1	1
POINT D	4	1	1	1	1	1	1
POINT E	5	1	1	1	1	1	1
POINT F	6	1	1	1	1	1	1
POINT X-B	7	1	1	1	1	1	1
ALL POINTS	8	1	1	1	1	1	1

NOTE 1: FIXED

Fig.4 2-D Beam grillage model

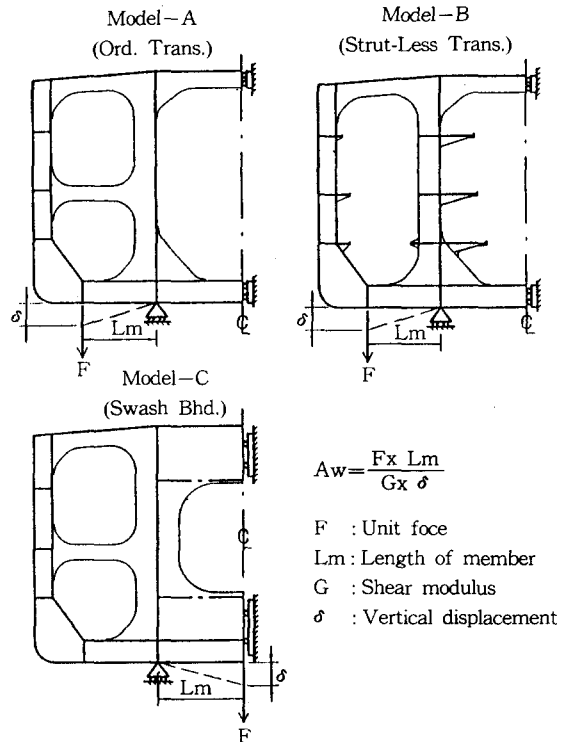


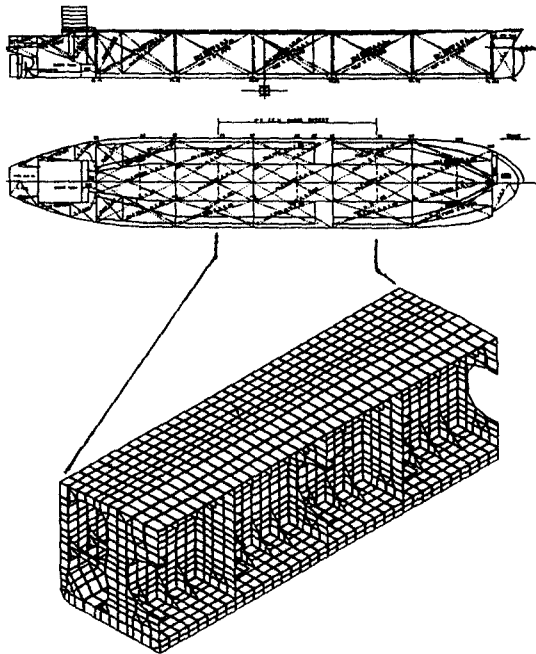
Fig.5 Shear factor & equation

구성되어 아래 Fig.4 2-D Beam Grillage Model과 같고 Web Frame의 폭방향 Shear 효과는 간단히 검출하기 어려우므로 아래와 같이 해당 Web Frame의 2-D Finite Element Model을 이용하여 Shear Area를 구하여 Grillage Model에 적용하였으며 그 상세는 Fig.5 Shear Factor & Equation과 같다.

4.2 3-D Coarse Mesh Analysis

4.2.1 Model Extent

Model 범위는 No.2, 3, 4 Hold로 택하였고, No. 3 Hold를 주 계산 Hold로 삼았다. Lateral Pressure를 받는 Skin Plate는 모두 면외요소(Elastic Quadrilateral Shell), In-Plane Pressure를 받는 Plate는 면내요소(Membrane Shell)로 하였고 면외요소 보강재는 3-D Elastic Beam 요소, 면내요소 보강재는 Truss(2D 혹은 3D Spar) 요소를 하였으며 Model



해석 Program : Ansys. 4.4A(Produced by "Sasi")
 Element No. : Plate Element(Elastic Quadrilateral shell)
 3236 EA
 Membrane Element : 2027 EA
 3D Beam Element : 2490 EA
 Truss Element : 984 EA
 Total Element No : 8737 EA

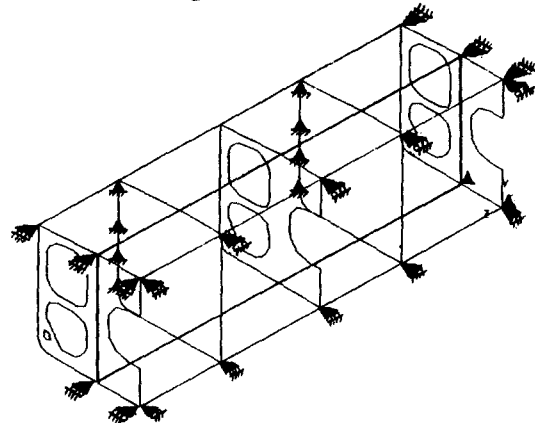
Fig.6 Model extent & element numbers

의 간소화를 위하여 2~3개의 Stiffener를 Lump하는 기법을 활용하였다. 3-D Coarse Mesh Model 형상은 Fig.6과 같다.

4.2.2 Boundary Condition

전술한 바와 같이 부유(浮游)중인 선박의 일부분을 Model로 택하여 경계조건을 적절히 적용하는 작업은 매우 난해하므로 작업의 단순화 및 용이화를 위해 Bottom Grillage 해석을 수행했으나 그 결과치를 3-D Model에 구조 강도를 검토하고자 하는 대상물을 종강도 부재와 횡강도 부재로 구분하여 경계 조건을 부여하므로써 실제 선박에서 발생하는 것과 가장

Model 1. For longi member :



Note: Shear force is applied into model 1, but the effect of hull girder bending moment shall be controlled separately.

Model 2. For trans. member :

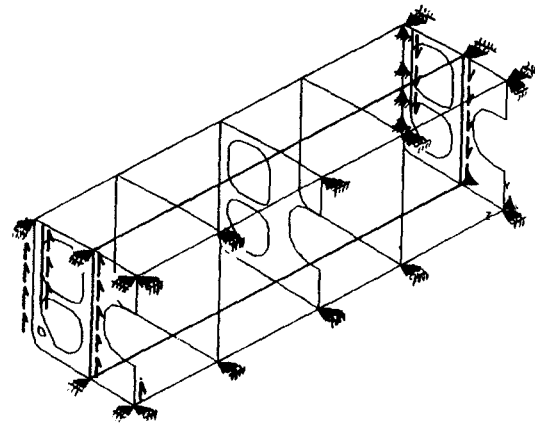


Fig.7 Boundary condition

유사한 경계 조건을 만들기 위한 노력을 하였으며 그 상세는 Fig.7 Boundary Condition과 같다.

4.2.3 Loading Condition

본고에 적용한 Loading은 DNV 선급 규정 PT3 CH.1 SEC.13을 만족하며 아래와 같은 유형으로 실시하였다.

- (1) Minimum Draft Condition(LC-1,2)
- (2) Tank Test Condition(LC-3,4)
- (3) Full Abreast Condition(LC-5)
- (4) (Full Load+Dynamic) Condition(LC-6,7)
- (5) (Ballast+Dynamic) Condition(LC-8)

상기 (1)항은 선급 규정의 만족을 위한 하중 조건이며 (4)항은 Full Load 상태에서 Max. Hull Girder Bending MT와 Shear Force를 적용하면서 Center Tank 혹은 Wing Cargo Tank를 공창으로 두고 계산하였으며 (5)항은 Ballast Condition에서 파도의 정부(Crest)를 적용한 하중조건이다. 상세 적용내용은 Fig.8 Loading condition table에 나타나 있다. 계산의 편의를 위해 Hull Girder Shear Force는 모든 Model에 적용하였고 각 하중 조건별 Hull Girder

Load Case	Plan	(1) Section	(2) Section
LC-1 Min-draft1			
LC-2 Min-draft2			
LC-3 Tank Test Condition1			
LC-4 Tank Test Condition2			
LC-5 Full Abreast Condition			
LC-6 (Full Load+Dynamic)1			
LC-7 (Full Load+Dynamic)2			
LC-8 Ballast+Dynamic			

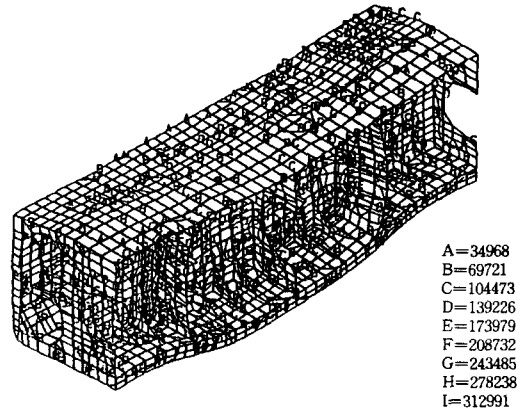
Fig.8 Loading condition table

S.W.B.M.T는 별도로 구하여 계산에 적용하였다.

4.2.4 해석 결과

1) 종강도

각 경계 및 하중조건에 의해 검토한 결과 LC-5 Full Abreast Condition에서 Inner Longi. Bhd에서 전단응력이, LC-6,7 Full Load Condition 및 LC-8 Ballast Draft Condition에서 Bottom shell의 압축응력이 크게 나타나 그에 대해 적절히 보강을 하였다. 해석 결과의 일례는 아래 Fig.9 Deformation and stress와 같다.



Global model: Typ. longi. elevation:

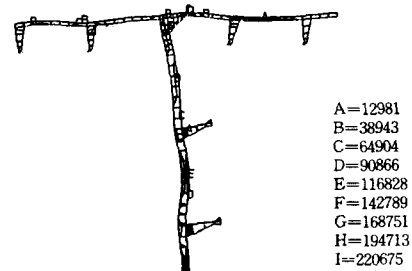


Fig.9 Deformation and stress

Double Bottom 구조의 경우 변형 형상과 길이 방향 압축응력 분포는 Fig.10 Deformation and Longitudinal Axial Stress와 같으며 그에 대한 구조 보강방법은 아래와 같이 Combination된 Normal Stress와 Buckling Strength를 구하고 4.2.5항의

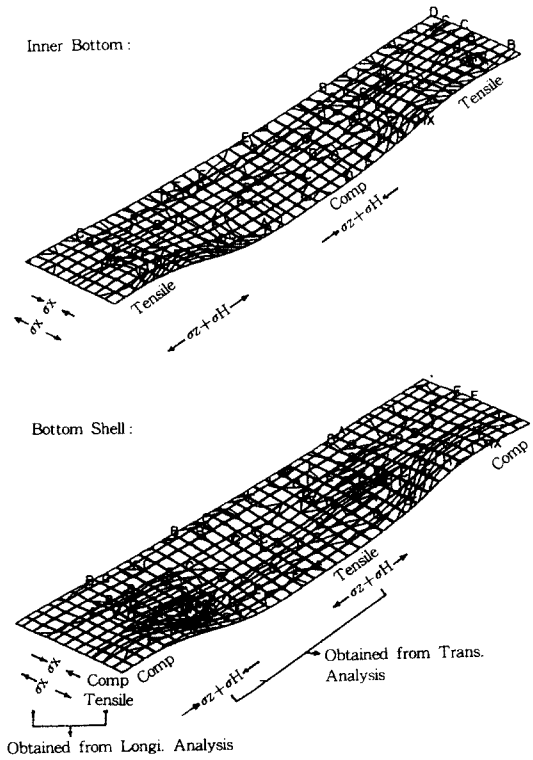
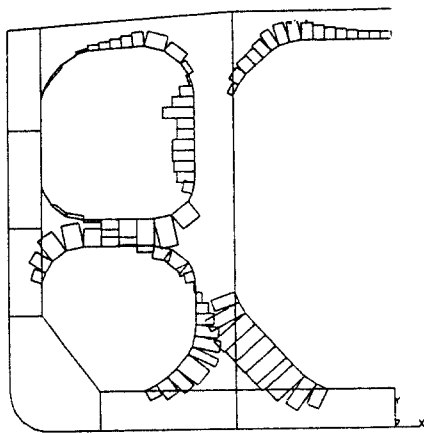


Fig.10 Deformation and longitudinal axial stress

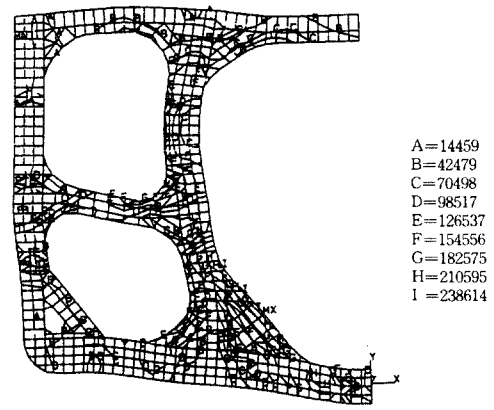
Allowable Stress Criteria에 의해 고응력부에 대한 적절한 보강을 실시하였다.

2) 횡강도

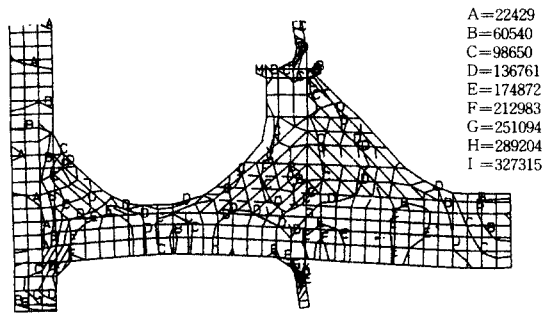
계산결과 LC-1,2,6,7에서 Web Frame에 LC-3,4에서 Trans, Bulkhead상의 Stringer에 응력이 크게 나타나고 특히 Stringer의 연결되는 Longitudinal



Truss axial stress



Web equivalent stress



Stringer equivalent stress

Fig.11 Deformation and stress

Stiffener Toe 부분의 집중응력에 주의를 기울여야 한다. 해석 결과의 일례는 아래 Fig.11 Deformation and Stress와 같다.

Double Bottom과 Double Side 구조가 연결되는 Hopper 구조부의 구조 형상이 복잡하고 용접량이 많아 응력이 크게 나타난다. 따라서 아주 잘게 Mesh 된 Model을 이용하여 응력 분포의 원활화를 기하는 구조로 개선하여 구조적 결함을 보완하였다.

4.2.5 허용응력

선급에서 규정하는 허용응력 기준은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Allowable stress criteria

Member	Stress	Value N/mm ²	Remarks
Main Plate	Normal	190 f1	(Local Bending + Hull Girder) Stress
	Equivalent	225 f1	(Normal + In-Plane) Stress
Longi. Girder	Normal	190 f1	(Local Bending + Hull Girder) Stress
	Mean Shear	90 f1 or 100 f1	90 f1: Single Flange 100 f1: Double Flange
	Equivalent	225 f1	(Normal + In-Plane) Stress
Tran. Member	*1 Normal	160f1 or σ_s	$\sigma_s = \sigma_u K \sqrt{1 - (P/PC)}$
	Mean Shear	90 f1 or 100 f1	-
	*2 Equivalent	180 f1	(Normal + In-Plane) Stress

*1 Bracket Toe부위는 선급에서 규정하는 적당한 Factor를 곱하여 설정한다.

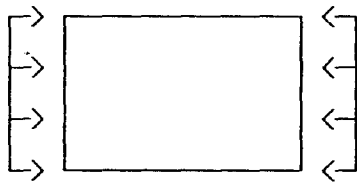
*2 Hencky-Von Mises :

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2}$$

f1 : Material factor

2) Buckling Stress Criteria[3]

- Uni-Axial Compression



Ideal Elastic Buckling Stress :

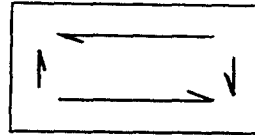
$$\sigma_{el} = 0.9KE \left(\frac{t - tk}{1000S} \right)^2 \quad (\text{N/mm}^2)$$

Critical Buckling Stress :

$$\sigma_c = \sigma_{el} \quad \text{When } \sigma_{el} < \sigma_f/2$$

$$= \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_{el}} \right) \quad \text{When } \sigma_{el} > \sigma_f/2$$

- Shear



Ideal Elastic Buckling Stress :

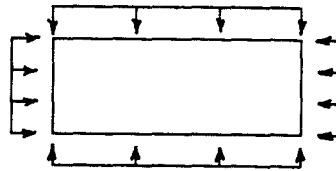
$$\tau_{el} = 0.9KtE \left(\frac{t - tk}{1000S} \right)^2$$

Critical Buckling Stress :

$$\tau_c = \tau_{el} \quad \text{When } \tau_{el} < \sigma_f/s$$

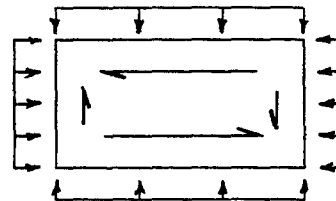
$$\tau_c = \tau_f \left(1 - \frac{\tau_f}{4\tau_{el}} \right) \quad \text{When } \tau_{el} > \sigma_f/2$$

- Bi-Axial Compression



$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right) n \leq 1$$

- Bi-Axial Compression and Shear



$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx,q}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx,q} \sigma_{cy,q}} + \frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy,q}} n \leq 1$$

상기 식에서 Panel에 개구(開口)가 있을 경우는 적당한 방법으로 "K" Factor를 조정하여 좌굴강성을 검토한다.

5. 결 론

이상에서 언급한 바와 같이 새로운 Type의 초대

형 이중선체 유조선 구조설계에 대해 간략히 소개하였다. 아직 전세계적으로 실적 운항 선박이 없고 연구자료도 미흡하여 구조계산 및 해석의 내용도 일천(日淺)했으리라 생각되며 향후 항해중 파랑 변동압에 의한 Fatigue Analysis, 선체의 동적 운동에 의한 Sloshing Analysis에 대해서도 상세한 검증이 필요하리라 본다. 일반적으로 화물창 중앙부에 대한 구조계산은 많이 수행되고 있으나 화물창 선수, 미부에 대한 검증이 등한히 되어 구조적결함이 발생하는 경우가 많다. 따라서 상기 내용의 계산을 계속 수행 예정이며 특히 화물창 선수, 미부에 대한 계산시 화물창과 기관실, 화물창과 선수창과 연결부에 화물창으로부터 전달되는 구조적 불연속성에 의한 결함을 검토키 위해 기관실부 혹은 선수창부로 확장된 Model을 이용하는 것이 바람직하리라 본다. 한편, 최근 유럽의 대형 5개 조선소가 공동개발 공표한 E3-Type(Ecological, Economical, European) 초대형 이중 선체 유조선에서 볼 수 있는 바와 같이 선박가능의 고급화에 초점을 맞추어 선주의 시선을 끌고 있으며, 기존의 틀에서 벗어난 과감한 새로운 형태의 신상품소개를 볼 때 여느때보다 우리의 노력이 더욱 배가 되어야 하리라 본다.

참 고 문 헌

[1] 봉현수의 1명, "Recent Development of VLCC

Design and Construction in Dshrn", Proceeding of Prads '92, Volume 2, May 92.

- [2] IMO, Regulation 13F of Marpol 73/78, Annex I
- [3] Det Norske Veritas, *Rules for Classification of Steel Ship*, Jan 1991.
- [4] Tanker Technology, "An Owner's Approach to VLCC Structural Performance Management and the VLCC for the year 2000", Tanker Technology, June 1992.
- [5] KEIZOU Yamazaki의 6명, "150K Double Hull Tanker의 구조설계", IHI 기술보고서 제32권 3호, 92년 5월.
- [6] 백점기, "유조선 엑스발데즈호 좌초사고의 교훈", 대한조선학회지, 제29권 2호, 1992년 6월.
- [7] LR, "E3 Tanker Yard Innovate Without Jeopardising Price", Lloyd's list, Monday Sep. 14 1992.
- [8] 임종식, "IMO 이중선체 규칙의 채택과 향후 전망", 대한조선학회지, 제29권 제3호, 1992년 9월.
- [9] 봉현수, "초대형선박에 있어서의 신기술개발", 대한조선학회지, 제29권 제3호, 1992년 9월.
- [10] 봉현수의 2명, "이중선체 초대형유조선의 개발", 선박구조연구회, 연구발표회논문집, 1992년 9월.