

이중 선각 유조선의 최적 구조 설계 시스템 개발

장창두*, 나승수**

Development of Optimum Structural Design System for Double Hull Oil Tankers

by

Chang-Doo Jang* and Seung-Soo Na**

요 약

저자들에 의해 기 제안한 바 있는 일반화 경사처짐법을 이용하여 이중 선각 유조선의 최적 구조 설계 시스템을 개발하였다. 최적화 기법으로는 직접탐색법의 일종인 Hooke와 Jeeves 방법을 사용하여 이산화변수를 용이하게 처리할 수 있도록 하였다.

일반화 경사처짐법과 최적화 기법을 결합하여 선급규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계 프로그램과 일반화 경사처짐법에 의한 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 최소 중량 설계 프로그램을 개발하였다.

개발한 프로그램을 이용하여 tank 배치를 고려한 이중 선각 유조선의 최적 구조 설계를 수행하여 실적선의 설계 치수 및 선각 중량과 비교하였으며, 최소 중량을 주는 tank 배치와 tank type을 결정할 수 있었다.

Abstract

An optimum structural design system for double hull oil tankers is developed based on the generalized slope deflection method which was previously proposed by the authors. For the optimization technique, the Hooke & Jeeves direct search method is applied to the minimum weight design problems with discrete design variables.

A minimum weight design program is developed for the longitudinal members by the classification rules and for the transverse frames and the bulkhead members by the generalized slope deflection method.

접수일자 : 1999년 8월 10일, 재접수일자 : 1999년 10월 28일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

** 정회원, 목포대학교 선박해양공학과

By this program, a minimum hull weight design of double hull oil tankers considering tank arrangement is performed and the design results are compared with existing ship. It is possible to find optimum tank arrangement and efficient types of hull structures for the minimum weight design of double hull oil tankers.

1. 서 언

근년에 들어 대형 유조선의 잦은 해난 사고에 의한 해상 오염의 심각성으로 인하여 해양 환경 보존에 대한 관심이 고조되고 있다.

1981년 발효된 국제해사기구의 해상 오염 방지법(MARPOL 73/78)을 준수하기 위해 ballast 전용 tank를 설치한 Narrow wing tanker가 등장하게 되었으며, 근년 미국 의회에서 해상 오염 방지를 강화하기 위해 관련 법규(OPA90)를 개정함에 따라 새로운 선형의 개발이 절실히 요구되고 있다.

그러므로 이 새로운 유형의 유조선 즉, 이중 선각 유조선에 대한 구조 설계 방법을 정립하는 것은 매우 필요한 일이라 할 것이다.

지금까지 최적화 기법을 통한 종강도 부재의 설계는 적용이 용이하여 실제 설계에 적용하고 있으며, 횡강도 부재의 설계는 직접 해석을 수행하므로 아직 실제 설계에 적용하기는 어려운 점이 많으나 활발한 연구가 진행되고 있다^(1~4).

선체의 횡강도를 해석하기 위해서는 인접한 몇 개의 화물창을 3차원 coarse mesh 해석을 수행한 후 2차원 fine mesh 해석을 수행⁽⁵⁾하는 것이 일반적이지만 계산 시간이 막대하게 소요되므로 설계용 해석 방법으로 적당하지 않다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 효율적이며 간편하게 3차원 효과를 고려하고 빠른 시간내에 횡강도 해석을 수행할 수 있는 간이 입체 강도 해석 방법을 제시하고자 한다. 본 방법은 선저 및 갑판 girder의 강성을 표현하기 위해 먼저 각 girder 위치 별로 인접 2개 화물창에 걸쳐 2차원 frame 해석을 수행하고, 여기서 구한 각 girder의 spring 강성을 이용하여 3차원 효과를 고려한 폭방향으로의 구조해석을 수행하도록 하였다.

Web frame 구조물의 횡강도 해석 방법으로는 일반화 경사처짐법을 이용^(6~10)하였으며 전술한 간이 입체 강도 해석법⁽¹¹⁾과 결합하여 3차원 효과를 고려할 수 있게 하였다.

최적화 기법으로는 이산화 변수를 취하기가 용이한 Hooke & Jeeves 직접탐색법⁽¹²⁾을 이용하였으며 횡강도 해석 프로그램과 결합하여 최소 중량 설계 프로그램을 개발하였다.

개발한 프로그램의 유용성을 확인하기 위해 실적선인 150K DWT 이중 선각 유조선을 대상으로 하여 DnV 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계, 직접 해석에 의한 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 최소 중량 설계를 수행하고, tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하여 최적의 tank 배치를 결정하고자 한다.

2. 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계

선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계를 위해서는 갑판 부분을 제외한 나머지 치수를 선급 요구 최소 치수로 결정하고, 종강도를 맞추기 위해 갑판 부분의 치수를 변화시켜 가며 최적화 기법을 이용하여 중앙단면적이 최소가 되도록 갑판 부분의 치수를 결정한다.

2.1 목적함수

선체 중앙 단면의 단면적을 목적함수로 정의한다.

$$F = \sum_{i=1}^{N_0} (b * t)_i + \sum_{j=1}^{N_1} A_j \quad (1)$$

여기서, b_i : 각 판재의 폭

t_i : 각 판재의 두께

N_p : 판재의 개수

A_j : 종보강재의 단면적

N_s : 종보강재의 개수

z_{dr} : 갑판에서의 선급 요구 최소 선각 단면 계수

z_{deck} : 갑판에서의 선각 단면 계수

z_{br} : 선저에서의 선급 요구 최소 선각 단면 계수

z_{btm} : 선저에서의 선각 단면 계수

2.2 설계변수

일반적으로 유조선에서는 갑판보다 선저가 중구조가 되기 때문에 갑판을 제외한 모든 부재 치수를 선급 요구 최소 치수로 결정하고 종강도를 맞추기 위해 갑판 치수만을 설계변수로 정한다.

2.3 제한조건

제한조건은 갑판에서의 선급 요구 최소 치수, 선저와 갑판에서의 선급 요구 최소 선각 단면 계수로서 이 조건을 만족하는 범위 내에서 중앙단면적이 최소가 되도록 설계변수를 결정한다.

$$G(1) = 1 - t_{dr} / t_{deck}$$

$$G(2) = 1 - z_{dr} / z_{deck} \quad (2)$$

$$G(3) = 1 - z_{br} / z_{btm}$$

여기서, t_{dr} : 선급 요구 최소 갑판 두께

t_{deck} : 설계된 갑판 두께

2.4 최적화 기법

최적화 기법은 직접탐색법의 일종인 위반함수법을 고려한 Hooke & Jeeves 방법을 이용하였다.

이 방법은 국부 탐색과 전체 패턴 이동을 반복하면서 최적점을 찾아가는 방법으로서 국부 최소값에 빠질 가능성은 높지만 빠른 시간 내에 해를 찾을 수 있어 공학 문제 해결에 널리 이용되고 있다.

2.5 설계 결과 및 고찰

설계 대상으로는 Fig. 1에서 보인 것같이 DnV 입급선인 150K DWT 이중 선각 유조선을 선정하였다. Fig. 2는 최소 중량 설계에서 얻은 치수를 바탕으로 종강도 부재에 대한 중앙단면도를 작성한 것으로 대부분의 설계 치수가 실적선과 거의 대동소이함을 알 수 있다.

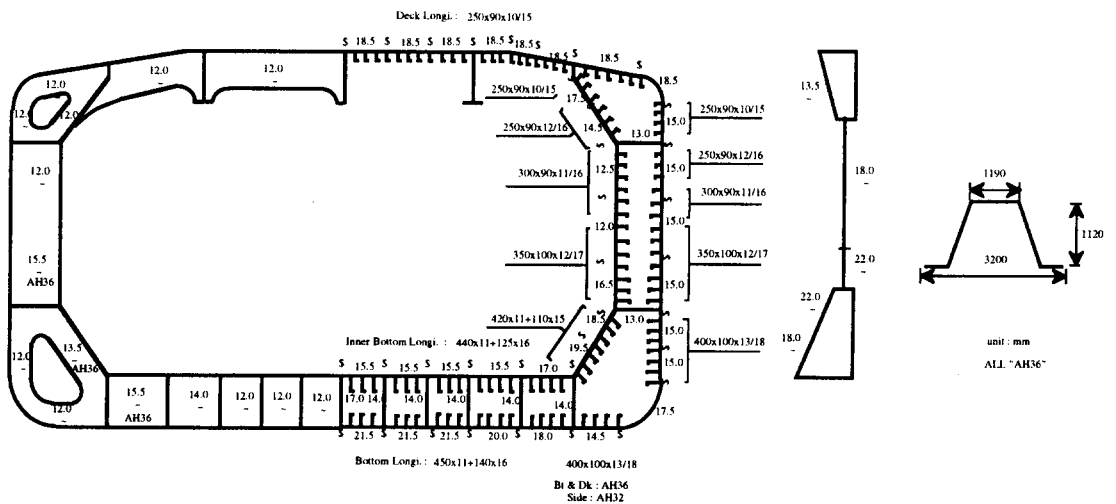


Fig.1 Existing design ship(150K D/H Tanker:DnV Classification)

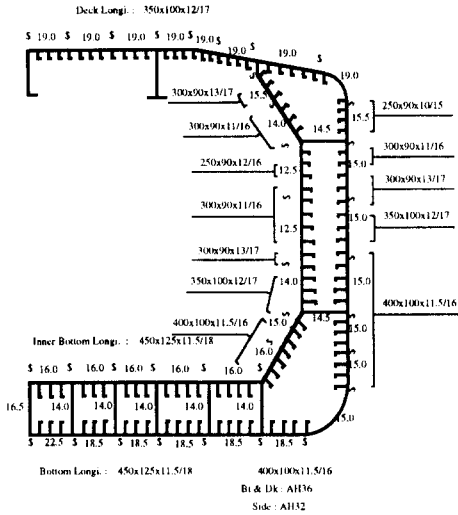


Fig. 2 Present design for longitudinal member

3. 일반화 경사처짐법에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계

횡강도 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계를 하기 위해서는 선체 중앙부를 한 web 간격만큼 떼어내 web frame 구조물로 모델링한 후 일반화 경사처짐법⁽⁹⁾에 의해 횡강도 해석을 수행하여 각 부재에 발생하는 응력을 계산하고 이 응력이 허용 응력 범위 안에 있으면서 선각 중량이 최소가 되도록 부재 치수를 결정한다.

3.1 횡강도 해석 결과의 정도 비교

일반화 경사처짐법(GSDM)을 이용하여 3차원 효과를 고려한 횡강도 해석 프로그램을 개발하고, 개발한 프로그램의 정도를 검증하기 위해 실적선인 150K DWT 이중 선각 유조선을 대상으로 하여 구조 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서, FEM은 SAP6를 이용하여 3차원 coarse mesh 해석에 의한 2차원 fine mesh 해석을 수행한 결과이다. 또한, 2-D spring을 이용한 GSDM은 기존의 한 화물창 내의 spring을 이용한 결과이며, 본 연구에서 제안하고 있는 3-D spring을 이용한 GSDM은

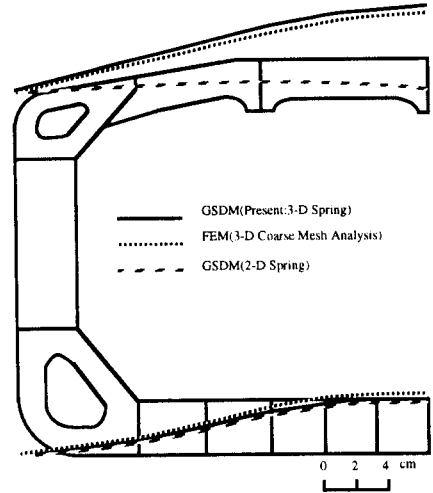
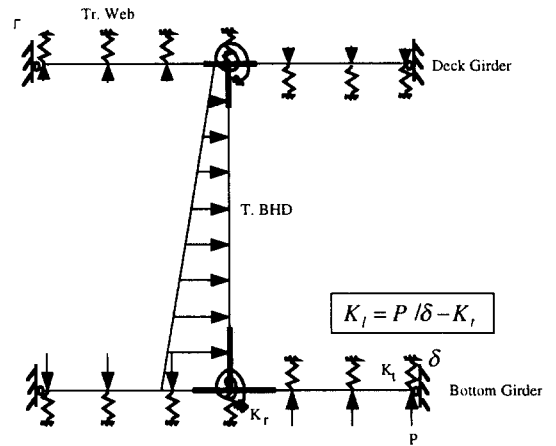


Fig. 3 Comparison of deflections for several modeling methods



K_t : Linear spring of trans. web obtained by beam theory
 K_1 : Linear spring of girder obtained by 2-D frame analysis
 K_r : Torsional spring of stool obtained by beam theory

Fig. 4 2-D frame modeling of longitudinal members for one girder space

Fig.4에서 보인 것같이 선체 길이 방향으로의 해석을 통해서 구한 spring을 이용한 결과이다.

Fig. 3에서 보면 2차원 효과만을 고려한 spring에 의한 구조해석 방법은 선저에서는 화물창내의 자체하중이 인접 화물창에서 전달해 오는 하중보다 상대적으로 커 처짐이 별 차이가 없으나 갑판에서는 인접 화물창에서 전달해 오는 하중이

화물창내의 자체하중보다 커 처짐 형태가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다.

하지만, 본 연구에서 제안하고 있는 3차원 효과를 고려한 spring에 의한 구조 해석 방법은 3차원 FEM 해석 결과와 비교해 볼 때 국부적인 차이는 있지만 전체적으로 경향이 비슷하며 별 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서, 화물창에 girder가 있는 선박은 본 연구에서 제안하고 있는 방법을 이용하여 구조해석을 수행하여도 무리가 없다고 생각한다.

3.2 목적함수

목적함수는 각 부재의 균일 단면 web 및 flange의 단면적에 부재의 길이를 곱한 값과 bracket이 붙은 부분의 부피와의 합으로 정의한다.

$$F = \sum_{i=1}^{N_E} (W_H * W_T + F_B * F_T)_i * L_i + \sum_{j=1}^{N_B} (A_B * W_T)_j \tag{3}$$

여기서, N_E : 부재 개수

N_B : bracket의 개수

A_B : bracket의 면적

L_i : 각 부재의 길이

W_H : web의 높이

W_T : web의 두께

F_B : flange의 폭

F_T : flange의 두께

3.3 설계변수

설계변수로는 web의 높이 및 두께, 하부 flange의 폭과 두께, 곡면부의 반경이며 각 부재마다 설계변수를 달리 정한다.

설계변수를 줄이기 위해 상부 flange로 작용하는 외판은 종강도 부재의 최소 중량 설계에서 구한 두께를 사용하며 폭은 유효폭으로 정의한다.

3.4 제한조건

제한조건은 각 부재에서 발생하는 등가 응력 및

전단 응력이 허용 등가 응력 및 허용 전단 응력 범위 안에 있도록 하며 web 및 flange의 좌굴 방지를 위한 최소 두께로 정한다.

$$G(i) = 1 - \sigma_i / \sigma_a \quad (i=1, \dots, N_E)$$

$$G(j) = 1 - \tau_j / \tau_a \quad (j=1, \dots, N_E) \tag{4}$$

$$G(k) = 1 - s / 80W_T \quad (k=1, \dots, N_E)$$

여기서, σ_a : 허용 등가 응력($180 f_1 N/mm^2$)

τ_a : 허용 전단 응력($85 f_1 N/mm^2$)

σ_i : 부재에 발생하는 등가 응력

τ_j : 부재에 발생하는 전단 응력

s: 보강재의 간격

f_1 : 재료상수

3.5 설계 결과 및 고찰

Fig. 5는 가장 낮은 최적치를 주는 치수를 바탕으로 web frame의 설계를 수행한 것으로 실적선의 치수와 비교해 볼 때 대체로 유사함을 알 수 있다.

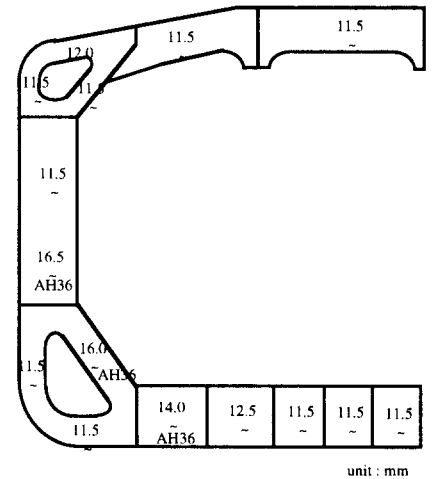


Fig. 5 Present design for transverse member

4. 직접 해석에 의한 횡격벽 부재의 최소 중량 설계

횡격벽의 종류로는 크게 평면격벽과 파형격벽

2가지로 나눌 수 있는데 일반적으로 평면격벽은 크기가 큰 유조선에 많이 사용되며 파형격벽은 살물선 및 크기가 작은 유조선에 많이 사용된다.

파형격벽은 수직된 평판을 구부러 반복 파형 구조를 갖는 구조물로 이루어지기 때문에 모델링을 할 때 하나의 파형 구조를 보요소로 치환하여 상하부 stool과 연결된 2차원 frame 구조물로 이상화시킬 수 있다.

횡강도 해석 기법으로는 일반화 경사처짐법을 이용하였으며 전술한 Hooke & Jeeves 방법과 결합하여 최소 중량 설계 프로그램을 개발하였다.

개발한 프로그램을 이용하여 횡강도 해석을 통한 파형 구조의 최적 형상 및 두께를 찾아 실적선과 선각 중량 및 설계 치수 등을 비교 검토하고자 한다.

4.1 목적 함수

파형격벽의 부피를 목적 함수로 하였다.

4.2 설계 변수

파형격벽의 높이, 상부 flange의 폭, 상부 두께, 그리고 길이가 12m 이상인 경우에는 하부 두께까지를 포함하여 설계 변수로 택하였다.

4.3 제한 조건

파형격벽의 굽힘 및 전단 강도를 유지하기 위한 허용 굽힘 및 허용 전단 응력을 제한 조건으로 하며, 또한 좌굴에 의한 강도를 유지하기 위해 좌굴 응력을 제한 조건으로 잡는다.

4.4 설계 결과 및 고찰

Fig. 6은 최소 중량 설계 결과에서 얻은 가장 낮은 치수를 기준으로 파형 격벽의 설계를 수행한 것으로 실적선과 비교해 볼 때 실적선보다 약간 작게 됨을 알 수 있다. 여기서, 상하부 stool의 판 및 보강재는 선급 규정에 의해 치수를 결정하였다.

5. Tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계

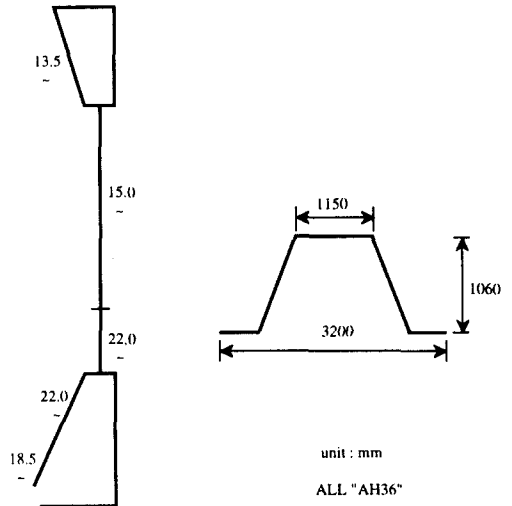


Fig. 6 Present design for transverse bulkhead member

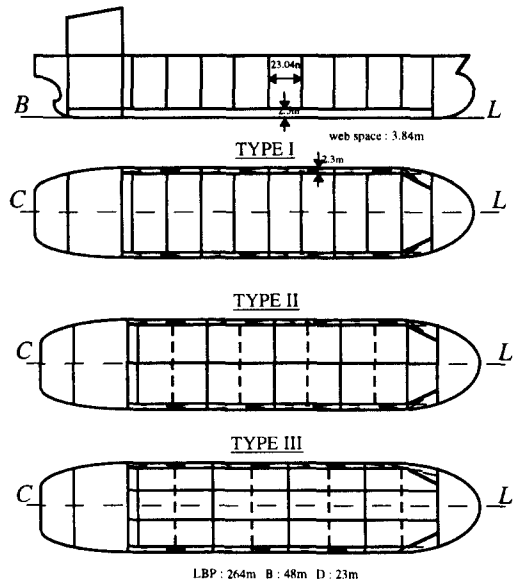


Fig. 7 Tank arrangement

선체 전체의 최소 중량 설계를 위한 tank 배치를 결정하기 위해서는 Fig. 7에서 보인 것같이 tank의 길이, web의 간격 및 종격벽의 위치 변화를 고려하여 화물창부의 선각 중량을 최소로 하는 tank의 길이, web의 간격 및 종격벽의 위치를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 선박의 크기에 따라 설치해야 할 최적의 종격벽의 개수를 알아보기 위해 종격벽이 없는 경우(TYPE I), 종격벽이 1개 있는 경우(TYPE II)와 2개 있는 경우(TYPE III)에 대한 구조 설계를 수행하여 중량이 작게되는 종격벽의 개수를 제시하고자 한다. 여기서, TYPE I은 전술한 3차원을 고려할 수 있는 spring을 이용하여 횡강도 해석을 수행하였으며, TYPE II, III는 2차원 spring을 이용하여 횡강도 해석을 수행하였다. 또한, 횡격벽은 TYPE I의 경우에는 파형격벽, TYPE II, III 경우에는 평면격벽이 있는 것으로 가정하였다.

5.1 선체 전체의 중량 추정[13]

Fig. 8에서 보인 것같이 선체 전체를 화물창부, 선수 및 선미 부분으로 나누어 앞에서 구한 단위 길이당 종강도 부재의 중량(W_i)과 화물창 길이를 곱하고, center tank 및 wing tank 별로 한 web frame당 횡강도 부재의 중량(W_{tc}, W_{tw})을 산출하고 각 tank 별 web 개수를 곱하여 화물창부의 종강도 및 횡강도 부재의 중량을 구한다.

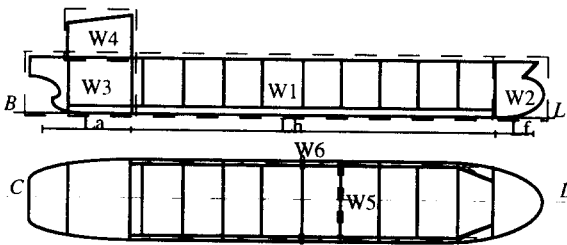


Fig. 8 Partitioning of ship structure for hull weight estimation

그리고, center tank 및 wing tank 별로 횡격벽 부재 한개의 중량(W_5, W_6)을 산출하고 화물창부의 횡격벽 개수를 곱하여 화물창부의 횡격벽 부재의 중량을 구한다.

또한, 선수미부의 중량 및 선실 등의 중량은 다음의 중량 추정 공식을 이용하여 구하고 앞에서

구한 화물창부의 선각 중량을 합해 선체 전체의 선각 중량(W_{Total})을 구한다.

$$W_{Total} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 * N_{B1} + W_6 * N_{B2} \quad (5)$$

여기서,

$$W_1 = (W_f * L_h + W_{tc} * N_{tc} + W_{tw} * N_{tw}) * \{0.4 + 0.6(3 + C_B)/4\}$$

$$W_2 = 160 * (L_f * B * D * C_B / 1000)^{0.728}$$

$$W_3 = 530 * (L_a * B * D * C_B / 1000)^{0.469}$$

$$W_4 = 334 * (L_a * B * 5 / 1000)^{0.183}$$

W_{tc} : center tank 내의 횡부재 중량

W_{tw} : wing tank 내의 횡부재 중량

N_{tc} : center tank 내의 횡부재 개수

N_{tw} : wing tank 내의 횡부재 개수

N_{B1} : center tank 내의 횡격벽 개수

N_{B2} : wing tank 내의 횡격벽 개수

5.2 목적함수

Web 간격을 등간격으로 가정하고 횡격벽의 개수, web의 개수 및 종격벽의 위치 변화를 고려하여 선체 전체의 선각중량(W_{total})을 목적함수로 정의한다.

5.3 설계변수

Tank 배치를 하기 위한 설계변수로는 횡격벽의 개수, web의 개수 및 종격벽의 위치로 정한다.

5.4 설계 결과 및 고찰

최소 중량을 주는 tank 배치를 얻기 위해 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하여 선각 중량이 가장 적은 배치를 얻고자 한다.

Table 1은 DnV 선급에 따라 tank type별로 선체 전체를 종강도 부재, 횡강도 부재, 횡격벽 부재, 선수부분, 선미부분으로 나누어 각 부분별로 중량을 구하고 서로 합한 선체 전체의 중량을

나타내고 있다.

Table 1 Comparison of hull weight with existing ship(150K D/H Tanker)
(unit:Ton)

	Existing Ship	TYPE I	TYPE II	TYPE III
Longi. Weight	8807	8872	9113	9513
Trans. Weight	2373	2113	3726	3655
T. BHD Weight	2770	2529	2312	1534
Forebody Weight	800	971	971	971
Aftbody Weight	3450	3395	3395	3395
Hull Weight	18200	17880	19518	19069

본 연구에서 얻어진 선각 중량과 실적선의 선각 중량을 비교하면 TYPE I은 대체적으로 유사하지만 TYPE II, III는 상당히 커짐을 알 수 있다. 이것은 150K DWT 이중 선각 유조선은 화물창 중앙부에 종격벽을 설치하지 않아도 충분한 강도를 갖고 있어 종격벽을 설치하면 그만큼 선각 중량이 증가되며, 선박의 크기가 커진다면 종격벽을 1개나 2개를 설치해야 오히려 선각 중량이 작아질 것으로 판단된다.

6. 결 언

이중 선각 유조선의 최적 구조 설계를 하기 위해 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계, 직접 해석에 의한 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 최소 중량 설계, 그리고 선체 길이 방향으로 확장시켜 tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하였다.

각 설계 방법에 따라 최소 중량 설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 3차원 효과를 고려한 spring에 의한 2차원 web frame 구조 해석 방법은 3차원 막요소를 사용한 유한요소 해석 결과와 비슷한 결과를 주며

계산 시간면에서는 훨씬 유리하다.

2) 중량 추정의 정확성 면에서 볼 때 횡격벽 부재의 중량 추정시 상하부 stool은 선급 규정에 의한 치수를 이용하고 파형격벽 부분은 최소 중량 설계 치수를 이용하는 것이 바람직하다.

3) 본 설계 대상의 경우 최소 중량을 주는 tank type은 화물창 중앙에 종격벽이 없는 경우 (TYPE I)가 바람직하다.

4) 향후 연구 방향으로선 tank type 및 선급 규정 변화에 따른 대형 이중 선각 유조선의 최적 구조 설계를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Grove, T., "Study on VLCC with D/B & D/S", DnV, 1990.
- [2] 서울대학교 공학연구소, 대우조선공업주식회사, OIL TANKER 및 BULK CARRIER의 최적 구조 설계 시스템 개발(I), 1988.
- [3] 서울대학교 공학연구소, 대우조선공업주식회사, OIL TANKER 및 BULK CARRIER의 최적 구조 설계 시스템 개발(II), 1990.
- [4] 서울대학교 공학연구소, 대우조선공업주식회사, OIL TANKER 및 BULK CARRIER의 최적 구조 설계 시스템 개발(III), 1991.
- [5] 대우중공업, Finite Element Structural Analysis, Technical Report, No.5049-H002, 1990.
- [6] Jang C. D. and Na S. S., "On the Minimum Structural Weight Design of Oil Tankers by Generalized Slope Deflection Method", PRADS'87, Norway, 1987.
- [7] Jang C. D. and Na S. S., "Computer Aided Optimum Structural Design of Actual Oil Tankers(VLCC)", Proc. 2nd Int. Conference CADMO88, 1988.
- [8] Jang C. D. and Na S. S., "On the Optimum Structural Design of MARPOL Tankers Considering Tank Arrangement", Proc. 3rd Int. Conference CADMO91, 1991.
- [9] 나승수, "일반화된 경사 처짐법에 의한 선체의 횡강도 해석 및 최소 중량 설계에 관한 연구",

- 서울대학교 박사학위논문, 1988.
- [10] 염재선, "일반화된 경사 처짐법을 이용한 Corrugated Bulkhead의 최소 중량 설계", 서울대학교 석사학위논문, 1990.
- [11] 조윤식, "이중 선각 유조선의 간이 입체 강도 해석법", 서울대학교 석사학위논문, 1991.
- [12] Hooke, R. and Jeeves, T. A., "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", J. of the Assoc. for Computing Machinery, vol.8, No.4, 1961.
- [13] 장창두, 나승수, "Tank 배치를 고려한 유조선의 최소 중량 설계", 대한조선학회논문집, 제33권 제4호, 1996.