
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 4 號 1996年 11月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 4, November 1996

Tank 배치를 고려한 유조선의 최소 중량 설계

장창두*, 나승수**

Minimum Weight Design of Oil Tankers Considering Tank Arrangement

by

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

요 약

선체 중량이 최소가 되는 설계를 수행하기 위해서는 선체 중량이 최소가 되는 tank 배치의 결정이 선행되어야 하며, 결정된 tank 배치 내에서 선체 중량이 최소가 되는 구조 부재의 배치 및 치수를 결정하여야 한다.

선체 중량이 최소가 되는 tank 배치를 하기 위해서 저자들에 의해 개발된 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계 프로그램과 일반화 경사처짐법에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계 프로그램을 결합하여 화물창부의 선각 중량을 구하였으며, 중량 추정 공식에 의해 횡격벽 및 선수미부 등의 중량을 구함으로써 선체 전체의 최소 중량 설계 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 tank의 개수, web의 개수 및 종격벽의 위치 변화에 따른 선각 중량 변화를 알아보았으며, 실선 설계에 적용하고자 MARPOL을 만족하는 다양한 tank 배치를 결정하고 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하여 이들 중 선각 중량이 작게 되는 tank 배치를 구하였으며 실적선의 선각 중량과 비교 검토하였다.

Abstract

For the minimum weight design of ship structures it is desirable that tank arrangement is predetermined to obtain the minimum weight and then structural arrangement and scantling of each member is determined to obtain the minimum weight within the given tank arrangement.

접수일자 : 1996년 4월 23일, 재접수일자 : 1996년 8월 1일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

** 정회원, 목포대학교 조선공학과

To carry out the tank arrangement to give minimum weight a minimum weight design program which covers whole ship structures is developed by the combination of minimum weight design program of longitudinal members by classification rules and minimum weight design program of transverse members by generalized slope deflection method which were developed by the authors. The hullweight is estimated by summation of the weight of cargo hold part and the weight except cargo hold part which can be estimated by the empirical formula.

In this study, the variation of hullweight is shown with the number of tank, the number of web and the location of longitudinal bulkhead. For the application of actual design alternative designs of tank arrangement which satisfy MARPOL regulation are determined. And several minimum weight designs of whole ship structures are carried out to obtain the tank arrangement which gives minimum weight and then the hullweight is compared with that of existing ship.

1. 서 언

선체 중량을 최소화하기 위해서는 선체 중량이 최소가 되는 tank 배치의 결정과 결정된 tank 배치 내에서 중량이 최소가 되는 구조 부재의 배치 및 치수를 결정하는 방법이 있다.

그 동안 tank 배치가 주어졌을 때 최소 중량을 주는 구조 부재의 배치 및 치수 결정을 하기 위해 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계^[1,2,3] 및 직접 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계^[4,5,6]을 수행하여 왔지만 최소 중량을 주는 tank 배치를 구하기 위한 연구는 별로 이루어지지 않고 있다.

최소 중량을 주는 tank 배치를 얻기 위해서는 선수부와 선미부를 제외한 화물창의 길이가 주어졌을 때 tank의 길이, web의 간격 및 종격벽의 위치를 변화시켜 가며 최소 중량 설계를 수행하고 화물창 부분의 선각 중량을 최소화하는 tank의 길이, web의 간격 및 종격벽의 위치를 결정하여야 한다.

또한, 위에서 언급한 화물창 부분의 선각 중량과 횡격벽 및 선수미부 등의 중량을 경험적인 중량 추정 공식^[7]을 이용하여 구함으로서 선체 전체의 중량을 추정할 수 있다.

특히, 횡강도 부재의 최소 중량 설계를 위한 횡강도 해석 방법으로는 이미 저자들에게 의해 개발되어 횡강도 해석 수행시 그 유용성을 확인한 바 있

는 일반화 경사처짐법^[8,9] 및 신 등가 곡선보 이론^[9,10]을 적용하였다.

최적화 기법으로는 이산화 변수를 취하기가 용이한 Hooke & Jeeves 직접탐색법^[11]을 이용하였으며, 종강도 부재의 최소 중량 설계 프로그램^[12]과 횡강도 부재의 최소 중량 설계 프로그램^[13]을 결합하여 유조선 전체의 최소 중량 설계 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 개발한 프로그램을 이용하여 먼저 MARPOL을 고려하지 않고 주어진 화물창 길이 안에서 tank의 개수, web의 개수 및 종격벽의 위치를 변화시켜 가며 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하여 선각 중량 변화에 영향이 큰 요소를 찾고자 한다. 또한, 실제 설계에 적용하고자 MARPOL을 고려하여 MARPOL을 만족하는 실적선과 유사한 tank 배치를 수행하고, 각 tank 배치에 따라 유조선 전체의 최소 중량 설계를 수행하여 선각 중량이 작은 tank 배치를 찾고자 하며 실적선의 선각 중량 및 설계 치수와 비교 검토하고자 한다.

2. 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계^[12]

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.

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

- 여기서, b_i : 각 판재의 폭
- t_i : 각 판재의 두께
- N_f : 판재의 개수
- A_j : 종늑골의 단면적
- N_s : 종늑골의 개수

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.

$$\begin{aligned} G(1) &= 1 - t_{dr} / t_{deck} \\ G(2) &= 1 - Z_{dr} / Z_{deck} \\ G(3) &= 1 - Z_{br} / Z_{btm} \end{aligned} \quad (2)$$

- 여기서, t_{dr} : 선급 요구 최소 갑판 두께
- t_{deck} : 설계된 갑판 두께

- 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

2.4 최적화 기법⁽¹¹⁾

최적화 기법은 이산화 변수를 취하기가 용이한 Hooke & Jeeves 직접탐색법을 이용한다. 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.

3. 일반화 경사처짐법에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계⁽¹³⁾

횡강도 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계를 위해서는 선체 중앙부를 한 web 간격만큼 떼어내 web frame 구조물로 모델링한 후 일반화 경사처짐법⁽⁸⁾ 및 신 등가 곡선보 이론⁽¹⁰⁾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 목적함수

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

$$\begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^{N_f} (W_H * W_T + F_B * F_T)_i * L_i \\ &+ \sum_{j=1}^{N_s} (A_B * W_T)_j \end{aligned} \quad (3)$$

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

3.2 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.

3.3 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.

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

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

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

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

4. Tank 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계

선체 전체의 최소 중량 설계를 위한 tank 배치를 하기 위해서는 tank의 길이, web의 간격 및 종격벽의 위치 변화를 고려하여 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계 및 직접 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계를 수행하고 화물창부의 선각 중량을 최소로 하는 tank의 길이, web의 간격 및 종격벽의 위치를 결정하여야 한다.

또한, 최소 중량 설계를 통해 구한 화물창부의 선각 중량과 횡격벽 및 선수미부의 중량을 경험적인 중량 추정 공식을 이용하여 구함으로써 선체 전체의 중량으로 확장시킬 수 있다.

4.1 선체 전체의 중량 추정⁽⁷⁾

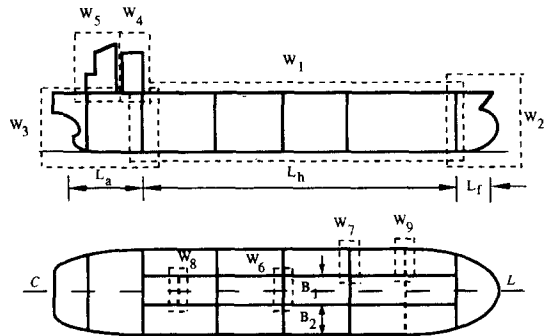


Fig. 1 Partition of ship structure for hullweight estimation

Fig. 1에서 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_j)을 산출하고 각 tank 별 web 개수를 곱하여 화물창부의 종강도 및 횡강도 부재의 중량을 구한다. 여기서, 선체 길이 방향의 중량 변화를 고려하기 위해 방형계수를 이용한 중량 감소율을 적용하여 화물창부

의 선각 중량을 구한다.

또한, 횡격벽의 중량, 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.

$$\begin{aligned}
 W_{Total} = & W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 \\
 & + W_6 * N_{B1} + W_7 * N_{B2} \\
 & + W_8 * N_{B3} + W_9 * N_{B4}
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 W_1 = & (W_l * L_h + W_{lc} * N_{lc} + W_{lu} * N_{lu}) \\
 & * \{0.4 + 0.6(3 + C_B)/4\}
 \end{aligned}$$

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

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

$$W_4 = 75 * (L_d * B * 5 / 1000)^{0.67}$$

$$W_5 = 15 * (L_d * B * 5 / 1000)$$

$$W_6 = 9 * (B * D / 100)^{1.53} * (2B_1 / B) * \sqrt{k}$$

$$W_7 = 9 * (B * D / 100)^{1.53} * (2B_2 / B) * \sqrt{k}$$

$$W_8 = 0.4 * W_6$$

$$W_9 = 0.4 * W_7$$

W_k : center tank 내의 횡부재 중량

W_{lu} : wing tank 내의 횡부재 중량

N_k : center tank 내의 횡부재 개수

N_{lu} : wing tank 내의 횡부재 개수

N_{B1} : center tank 내의 수밀격벽 개수

N_{B2} : wing tank 내의 수밀격벽 개수

N_{B3} : center tank 내의 비수밀격벽 개수

N_{B4} : wing tank 내의 비수밀격벽 개수

k : 재료상수

4.2 목적함수

web 간격을 등간격으로 가정하고 횡격벽의 개수, web의 개수 및 종격벽의 위치 변화를 고려하

여 선체 전체의 선각 중량(W_{total})을 목적함수로 정의한다.

4.3 설계변수

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

4.4 제한조건

tank 배치를 하기 위한 제한조건은 MARPOL 규정(SBT, PL 등)이 있으며 package program (SIKOB)을 이용하여 위반 여부를 검토한다.

5. 최소 중량 설계 결과 및 고찰

5.1 설계 대상

설계 대상으로는 Fig. 2에서 보인 것같이 최근에 건조된 실적선인 280K VLCC(DnV 선급)로서 최소 중량을 주는 tank 배치를 위해 MARPOL 규정을 만족하는 다양한 tank 배치를 수행하고, 각 경우에 대해 최소 중량 설계를 수행하여 선각 중량이 가장 작게 되는 배치를 얻고자 한다.

5.2 설계 하중 조건

Fig. 3은 DnV 선급에서 규정하는 설계 하중 조건으로서 full load condition, ballast load condition 및 abreast load condition 등 6가지 하중 조건을 선택하였다.

5.3 Tank 배치의 선택

최소 중량을 주는 tank 배치를 구하기 위해 center tank 폭을 선평의 41~46% 내에서 변화시킨 경우와 tank 길이를 변화시킨 경우를 택하였으며 각 경우의 principal dimension, 화물창 및 선부미부의 길이를 변화시켜 MARPOL 규정을 만족하도록 주요 특성치를 결정하여 Table 1에 나타

내었다.

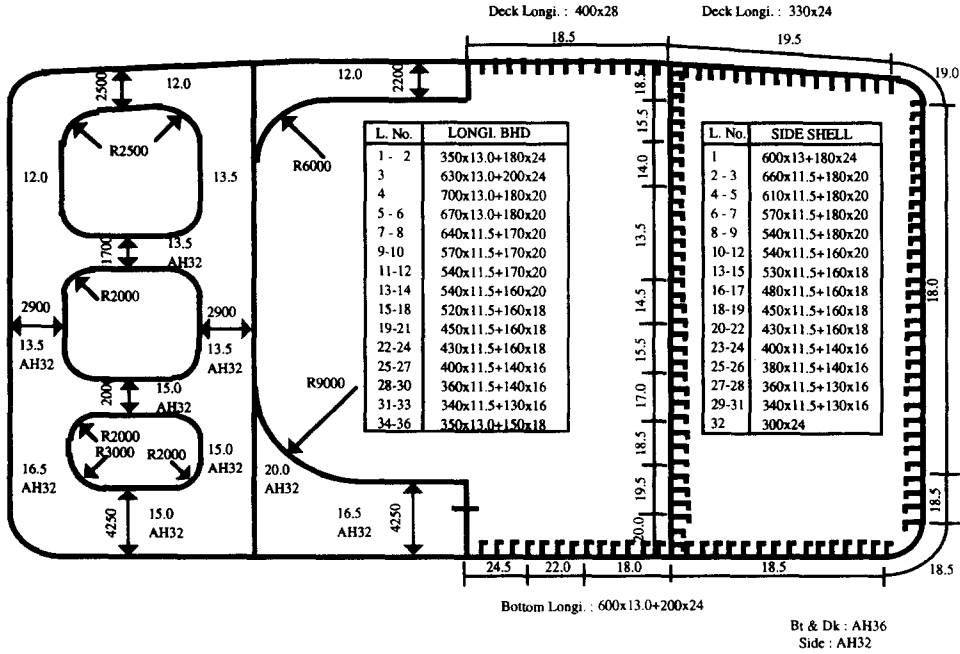


Fig. 2 Existing Design ship(280K oil tanker:DnV classification)

Table 1 Characteristics of several design ship (unit : m)

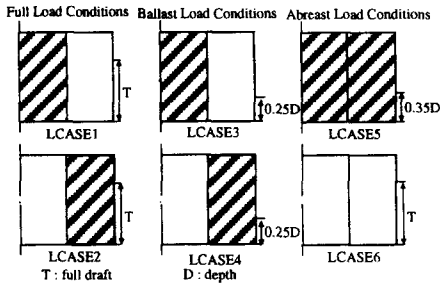


Fig. 3 Loading conditions

Particulars	ORG	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	
Length	315.0					
Breadth	57.2					
Center Tank	26.1	23.52	26.1	23.52		
Depth	30.4	30.9	30.3	31.2		
Draft	20.8					
Block Coeff.	0.828					
Hold Length	250.7	251.0	250.8			
Forebody	13.25	12.91	13.15			
Aftbody	51.05					
No. of T/bhd	Obhd(c)	6	5	5	6	6
	Sbhd(c)	2	3	3	0	0
	Obhd(w)	5	5	6	5	5
	Sbhd(w)	2	0	0	0	0
Trans. Space	5.45	5.23	5.70			
Longi. Space	0.87	0.84	0.87	0.84		

5.4 최소 중량 설계 결과 및 고찰

Tank 배치시 선각 중량 변화의 영향 요소를 알아보기 위해 MARPOL을 고려하지 않고 주어진 화물창 길이 안에서 tank 배치 결정을 위한 parameter인 tank의 개수를 5~8개, web의 개수를 4~9개, 종격벽의 위치를 실적선의 위치(OR)를 기준으로 선폭(B)의 $\pm 5\%$ 변화를 주어 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하였으며 그 결과를 Fig. 4~6에 나타내었다.

Fig. 4에서 보인 것같이 tank의 개수 변화에 대해 tank 개수가 작아질수록 즉, tank의 길이가 길어질수록 선각 중량은 작게 되며 그 영향은 상당히 큼을 알 수 있다.

Fig. 5에서 보인 것같이 web의 개수 변화에 대해 web의 개수가 많아질수록 즉, web의 간격이 작아질수록 선각 중량이 작아지지만, 단위 길이당 중강도 부재의 중량은 줄어들고 횡강도 부재의 중량은 늘어나 전체적인 선각 중량의 변화는 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 6에서 보인 것같이 종격벽의 위치 변화에 대해 본 설계 대상의 경우 실적선의 위치(OR)에서 멀어질수록 선각 중량이 커짐을 알 수 있으며 그 영향은 상당히 큼을 알 수 있다.

이 결과로부터 최소 중량을 얻기 위한 tank 배치를 하기 위해서는 tank의 개수 및 종격벽의 위치가 선각 중량 변화에 영향이 크므로 이를 결정할 때 더욱 주의를 해야 할 것으로 생각된다.

Table 2는 MARPOL을 만족하는 tank 배치에 대한 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행한 결과를 나타낸 것으로 화물창부 중강도 부재의 중량과 횡강도 부재의 중량을 비교하고 있으며, 횡격벽 및 선수미부 등의 중량을 고려하여 선체 전체의 중량을 비교하고 있다.

각 배치에 따라 선각 중량을 비교하면 center tank 폭이 선폭의 46% 정도인 ALT1, ALT3이 41% 정도인 ALT2, ALT4 보다 화물 용량을 맞추기 위한 선박의 깊이가 상대적으로 낮아 선각 중량이 적어짐을 알 수 있으며 횡격벽의 개수가 적은 ALT1, ALT3이 실적선보다 선각 중량이 적어짐을 알 수 있다.

따라서, 최소 중량 설계를 하기 위해서는 화물 용량을 맞추기 위한 center tank 폭에 따른 적절한 선박의 깊이를 결정하여야 하며 MARPOL 규정을 위배하지 않는 범위에서 한 tank의 길이를 최대로 늘리는 설계(ALT1, ALT3)가 바람직하다고 생각한다.

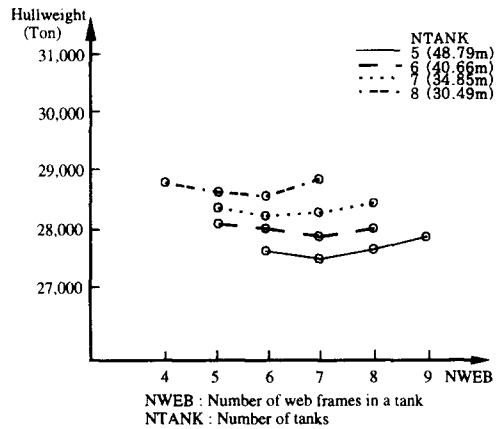


Fig. 4 Weight variation with the tank length

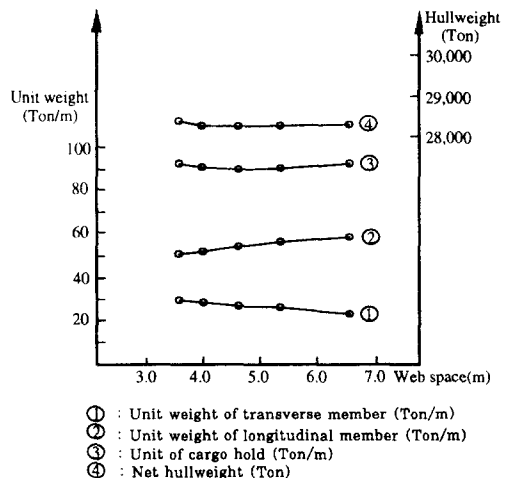


Fig. 5 Weight variation with the web space

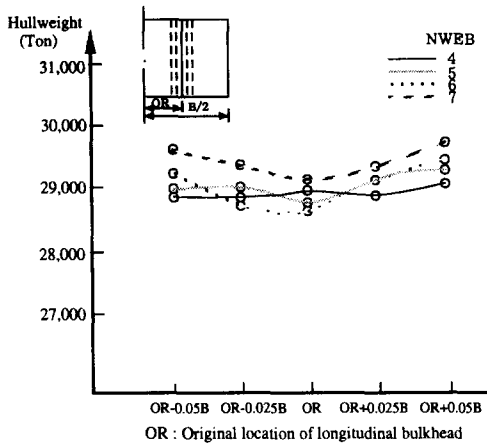


Fig.6 Weight variation with the location of longitudinal bulkhead(NTANK=8)

Table 2 Comparison of hullweight according to tank arrangement (unit : Ton)

	Existing Ship	ORG	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4
Longi. Weight	13193	13211	13319	13032	13499	13577
Trans. Weight	5545	5480	5669	6033	5619	5943
Tbhd Weight	4018	3978	3527	3965	3452	3580
Hold Weight	22756	22669	22515	23030	22570	23100
Etc. Weight	5812	5892	5892	5913	5875	5959
Net Weight	28568	28561	28407	28943	28445	29059

Fig. 7은 실적선에 해당하는 배치에 대한 중앙부의 재설계를 수행한 것으로 실적선의 설계 치수와 비교할 때 거의 비슷한 결과를 보여 주고 있다.

결론적으로 본 tank 배치의 경우 tank 배치 변화에 따른 선각 중량의 변화는 약 500 Ton 정도로서 각 tank 배치의 경우 모두 엄선된 배치임을 감안할 때 tank 배치의 결정시 매우 세심한 주의가 필요하다고 사료된다.

6. 결 언

유조선의 최소 중량 설계를 수행하기 위해 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계, 일반화 경사처짐법에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계 및 선체 길이 방향으로 확장하여 tank 배치를 고려한 유조선 전체의 최소 중량 설계를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유조선 전체의 중량을 줄이기 위해서는 tank 배치의 결정이 선행되어야 하며 결정된 tank 배치를 이용하여 구조 부재의 배치 및 치수 결정이 수반되어야 한다.

2) tank의 길이 변화 및 종격벽의 위치 변화에 따른 선각 중량의 변화는 상당히 크며, web의 간격 변화에 따른 선각 중량의 변화는 그다지 크지 않다.

3) 최소 중량을 주는 tank 배치를 하기 위해서는 화물 용량을 맞추기 위한 적절한 선박의 깊이를 결정하여야 하며 MARPOL 규정을 위배하지 않는 범위에서 tank의 길이를 최대한 늘리는 편이 바람직하다.

4) 앞으로 이중 선각 유조선의 최소 중량 설계, 중간 갑판 유조선의 최소 중량 설계를 수행할 예정이며, 더욱 더 확장하여 건조비를 고려한 최소 건조비 설계를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Moe, J. and Lund, S., "Cost and Weight Optimization of Structures with special Emphasis on Longitudinal Strength Members of Tankers", *Norwegian Institute of Technology Report SKB II/M7*, Trondheim, 1967.

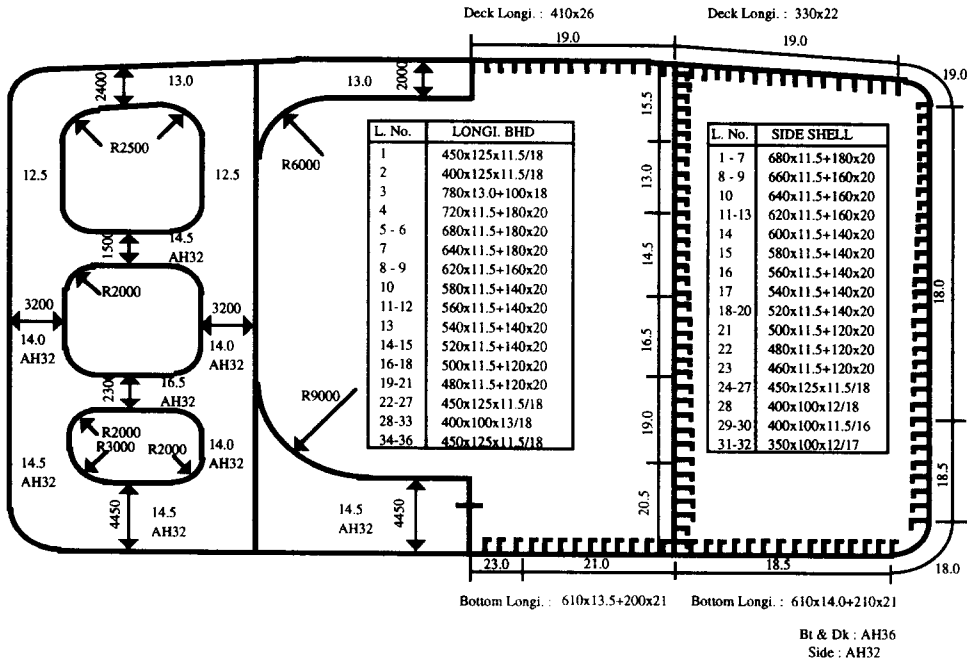


Fig. 7 Results of optimum design(DnV Classification)

[2] Moe, J., "Integrated Design of Tanker Structures", *European Shipbuilding*, No.3-4, 1972.

[3] Kitamura, K., "Studies on Optimization of Ship Structures(3rd report)-optimum design of longitudinal members of tanker", *J. of the Society of Naval Arch of Japan*, Vol.132, 1973.

[4] Moe, J., "Optimum Design of Statically Indeterminate Frames by means of Nonlinear Programming", *Norwegian Institute of Technology Report SKB II/M12*, Trondheim, 1968.

[5] Lund, S., "Optimization of Tank Frames by Means of SUMT Transformation and Behavior Models", *Norwegian Institute of Technology Report SKB II/M17*, Trondheim, 1970.

[6] Kavlie, D. and Moe, J., "Automated Design of Frame Structures", *J. of the Structural Division, ASCE*, Vol.97, No.ST1, 1971.

[7] 대우조선공업주식회사, 영업설계 단계에서의 선 각 중량 추정 방법, 1988.

[8] 장창두, 나승수, "선체 구조 해석 및 설계를 위한 일반화 경사처짐법 개발에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제29권, 제4호, 1992.

[9] 나승수, "일반화된 경사 처짐법에 의한 선체의 횡강도 해석 및 최소 중량 설계에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문, 1988.

[10] 장창두, 나승수, "신 등가 곡선보 이론에 의한 선체 corner 부의 응력 해석", 대한조선학회논문집, 제29권, 제4호, 1992.

[11] 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.

[12] 나승수, 민계식, 엄항섭, "Lloyd Rule에 의한 O/T의 최소 중량 설계", 대한조선학회 추계연구 발표회, 1985.

[13] 장창두, 나승수, "일반화 경사처짐법에 의한 유조선 횡강도 부재의 최소 중량 설계", 대한조선학회논문집, 제33권, 제3호, 1996.