
 論 文

大韓造船學會誌
 第24卷 第4號 1987月 12月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 24, No. 4, December 1987

FTM을 이용한 파형격벽의 최적구조설계

任尙鎡* · 金基和** · 梁永淳*

Optimum Structural Design of a Corrugated Bulkhead by using Flexible Tolerance Method

by

S.J. Yim* · G.H. Kim** · Y.S. Yang*

Abstract

In this paper, merits and demerits of Nelder and Mead Penalty Function Method (SUMTNM) and Flexible Tolerance Method (FTM) are investigated from the standpoint of generality, accuracy and efficiency. SUMTNM is combined with Nelder and Mead Method and SUMT, but FTM improves the values of the objective function by using information provided by feasible points as well as certain nonfeasible points termed near-feasible points. Therefore, FTM uses more information than SUMTNM for minimizing object function.

The structural analysis of a vertically corrugated bulkhead is performed by collapse mechanism and plate buckling analysis. Based on the results of this analysis, minimum structural weight design of a corrugated bulkhead by use of above two optimization techniques is carried out by investigating the effects of sizes of bulkhead on the structural weight.

1. 서 론

에너지 절약에 대한 요구가 확대됨에 따라 보다 효율적이고 경제적인 선박의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이를 위해서는 선체 구조에 대한 정밀한 구조 해석과 최적화 기법의 개발이 필요하다[1, 2].

파형 격벽(corrugated bulkhead)은 보강격벽(stiffened bulkhead)에 비해 maintenance가 용이하고, 화물을 싣고 내리는데 편리하며, 열 하중에 팽창이 자유로운 이점이 있어 최근 많이 사용되고 있다. 수평 파형 격벽은 각 파형판에 작용하는 하중의 크기에 따라 부재의

치수를 조절할 수 있어 경제적인 면에서는 수직 파형 격벽에 비해 유리하나, 횡격벽의 경우 선체가 굽힘 하중을 받을 때 이에 대한 지지력이 약하므로 수직 파형 격벽을 주로 사용한다. 파형 격벽에 대한 연구는 J.B. Caldwell[3]에 의해 강도 해석이, A.K. Basu 등[4]에 의해 최적 설계가 행해진 바가 있으나 아직 연구 실적이 미비한 상황이다.

일반적으로 선체 설계에서 사용되는 목적 함수는 비선형이고, 매우 복잡한 함수로 표시되므로, 그 gradient를 구하기가 매우 힘들어 대부분 direct search method를 사용한다[5].

본 논문에서는 최적화 기법의 개발에 대한 기초연구

접수일자 : 1987년 8월 25일, 재접수일자 : 1987년 10월 14일

* 정회원, 서울대학교 공과대학

** 서울대학교 대학원

로서, Nelder and Mead Method[6]에 SUMT를 결합한 SUMTNM 프로그램과 Flexible Tolerance Method[7]를 사용한 FTM 프로그램의 장, 단점을 일반성, 정확성, 효율성의 관점에서 비교하였다. 그리고, 파형 격벽에 대해 collapse mechanism에 의한 극한 설계(limit design)[8]와 평판의 좌굴 해석을 통해 설계 가능 영역을 설정한 다음, 이 영역을 제한 조건(constraints)으로 하여 위의 두 최적화 기법에 의해 최소 중량을 갖는 파형 격벽의 최적 설계 문제를 해석하였다[9].

2. 최적화 이론

2.1. Nelder and Mead External Penalty

Function Method(SUMTNM) [6]

Nelder 및 Mead의 방법은, 원래 구속조건이 없는 최적화 문제를 reflection, expansion, contraction 및 reduction 과정을 통해 최적치가 구해지는 방법인데, 이를 구속조건이 있는 문제에 적용하기 위해, 설계 변수가 feasible region을 벗어나는 경우 목적 함수에 penalty를 더해 주어 feasible region으로 넘어오게 하는 SUMT(Sequential unconstrained minimization technique)의 기본개념을 Nelder 및 Mead의 방법에 가미시켰다. 즉 기본문제가 다음과 같을 때

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f(x) \\ &\text{subject to} && g_i(x) \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \tag{1}$$

External penalty function P 는 다음과 같다.

$$P(x, r_k) = f(x) + r_k \sum_{i=1}^m |\min\{g_i(x), 0\}| \tag{2}$$

여기서, r_k : penalty 계수

2.2. Flexible Tolerance Method(FTM) [7]

일반적으로 비선형 최적화 문제의 프로그램 내에는 설계 변수가 최적값 근처에 도달하게 되면서, (2)식의 penalty 계수(r_k)가 무한대로 커져가는 수치적인 불완전 현상이 가끔 발생하는 등, 주위의 많은 constraint line으로부터 제약을 받는다. 이런 경우, 변수의 이동에 대한 그 방향과 크기의 시행 착오로 인하여 제한 조건과 최적값의 조건을 동시에 만족하는데 많은 어려움이 있다. FTM은 이러한 일반적 형태의 약점을 보강한 방법으로 feasible point뿐만 아니라 non-feasible point중 일부, near-feasible point의 정보를 동시에 활용하여 목적 함수의 값을 점차 개선하여 최적값을 구한다.

$$\begin{aligned} &\text{min.} && f(x) \\ &\text{sub. to} && h_i(x) = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

$$g_i(x) \geq 0, \quad i=m+1, \dots, p \tag{3}$$

이 기본식을 다음과 같이 치환한다.

$$\begin{aligned} &\text{min.} && f(x) \\ &\text{sub. to} && \phi^{(k)} - T(x) \geq 0 \end{aligned} \tag{4}$$

$\phi^{(k)}$ 는 k 번째 search에서 설계 변수들로 구성된 polyhedron의 크기를 나타내는 값으로, feasibility에 대한 flexible tolerance criterion으로 사용된다.

$$\phi^{(k)} = \min\left\{\phi^{(k-1)}, \frac{m+1}{r+1} \left(\sum_{i=1}^{r+1} \|x_i^{(k)} - x_{i+2}^{(k)}\|^2\right)^{1/2}\right\}$$

$$\phi^{(0)} = 2(m+1)t \tag{5}$$

여기서, t = 초기 polyhedron의 크기

m = 등식 제한 조건의 갯수

n = 설계 변수의 갯수

k = no. of stages for search

r = $n-m$: 자유도수

$x_i^{(k)}$ = polyhedron의 i 번째 정점

$x_{r+2}^{(k)}$ = polyhedron의 무게 중심

(가장 나쁜 정점은 제외함)

$T(x)$ 는 설계 변수의 제한 조건 위반 정도를 측정하는 기준으로 다음의 값을 사용한다.

$$T(x) = \left\{ \sum_{i=1}^m h_i^2(x) + \sum_{i=m+1}^p \min^2(0, g_i(x)) \right\}^{1/2} \tag{6}$$

설계 변수들이 feasible region안에 있으면 $T(x)=0$ 이 되고, 멀리 떨어져 있을 수록 $T(x)$ 는 더 큰 값을 가지게 된다.

설계 변수의 위치는 다음과 같이 결정된다.

- feasible ; $T(x)=0$
- near-feasible; $0 \leq T(x) \leq \phi^{(k)}$
- non-feasible ; $T(x) > \phi^{(k)}$

만일 설계 변수가 non-feasible region에 있으면 $\phi^{(k)} \geq T(x)$ 를 만족할 때까지 $T(x)$ 를 줄여 주어 적어도 near-feasible region까지 설계 변수를 옮겨 주어 계산을 계속 수행한다. 비 증가 함수 $\phi^{(k)}$ 를 제한 조건 위반의 한계로 사용함으로써 계산이 진행될수록 설계 변수들의 제한 조건 위반량은 점차로 줄어들게 된다. $f(x)$ 의 최소값에 도달하면 그 값은 정류치가 되어 $\phi^{(k)}$ 는 zero가 되어 결국 feasible region의 값이 최적값이 된다. $f(x)$ 와 $T(x)$ 를 줄여가는 과정은 Nelder and Mead method의 4가지 기법을 일반적으로 사용하며, $\phi^{(k)} < \epsilon$ 을 만족하면 계산을 종료한다.

2.3. 두 방법의 비교, 고찰

두 방법의 장·단점을 비교하는 기준으로 다음 세 가지 특성을 사용한다.

- 1) 일반성 (generality); 정식화된 문제에서 문제의 다양성에 대해 일관적인 해를 찾아 내는가?
- 2) 정확성 (accuracy); 도출된 해가 경해에 얼마나 가까운가?
- 3) 효율성 (efficiency); 해의 도출까지 얼마의 계산 시간을 소요하는가?

위의 세가지 특성을 기준으로 15개의 수학적 문제에 대해 초기값과 수렴 한계를 변화시켜가며 두 방법을 비교하였다[Table 1, 2, 3].

SUMTNM 프로그램은 특정한 초기값에서 수렴하지 않고 발산하는 경우가 5개 있었다. 이는 초기값이 non-feasible point이고, 목적 함수의 값을 음으로 하는 경우에 발생하였다. 즉, (2)식의 penalty 함수에서 계수 $r_k=1000f(x)$ 를 사용하는데 $f(x)$ 값이 음수이면 r_k 도 음수가 되어 계산이 수행되어 감에 따라 $f(x)$ 값은 점점 최소화 되지만, feasible region이 search vector 방향과 반대쪽에 위치할 경우 결국(-∞)에서 발산하게 된다. 그리고, 국부 최소값에 도달한 경우가 4개 있었는데, 초기값이 non-feasible point인 경우가 대부분이

었다. 그러므로, SUMTNM 사용시 초기값으로 목적 함수값을 양으로 하고, feasible point로 하는 것이 바람직하다. 그리고, 제한 조건에 복잡한 등식 제한조건 $h(x)=0$ 이 있을 때 $h(x) \geq 0$, $h(x) \leq 0$ 두 경우를 검토해야 하는데 주로 한 경우에서 최소값에 도달하는데, 이 때도 국부 최소값에 도달하는 경우가 대부분이다. 또한 등식 제한 조건을 $-\epsilon \leq h(x) \leq \epsilon$ 으로 치환하여 계산을 수행하여도 국부 최소값에 빠지는 경우가 대부분이며, 계산 시간이 엄청나게 소요된다. 그러므로, 등식 제한 조건이 있는 문제는 SUMTNM 사용시 상당한 주의를 해야 한다. FTM 프로그램은 15문제 모두에서 경해에 가까운 해를 찾았다. 하지만, computer CPU time은 모든 문제에서 SUMTNM보다 많이 소요되었다. 이는 계산시 feasible point뿐 아니라 near-feasible point까지 보다 많은 정보를 활용하고, 실제 변수가 non-feasible region에 있을 경우 제한 조건들로 구성된 $T(x)$ 값을 줄여 나가는데 많은 시간이 소요되기 때문일 것이다. 수렴 한계 ϵ 을 변화시켜본 결과, 수렴 한계는 일반적으로 10^{-5} 이 적당하다고 알려져 있는데,

Table 1 Results for no.1 case

	Starting Point	SUM-TNM	FTM	Starting Point	SUM-TNM	FTM	Starting Point	SUM-TNM	FTM	Starting Point	SUM-TNM	FTM
x_1	1.0	1.028	1.000	5.0	1.791	0.998	0.1	1.266	1.033	-5.0	diverge	1.001
x_2	5.0	4.686	4.702	5.0	3.400	4.739	1.0	3.726	4.586	-5.0	---	4.693
x_3	5.0	3.901	3.875	5.0	3.262	3.826	1.0	2.263	4.022	-5.0	---	3.885
x_4	1.0	1.331	1.373	5.0	1.260	1.380	0.0	2.342	1.312	-5.0	---	1.369
F	---	17.053	17.017	---	22.336	17.013	---	23.775	17.088	---	---	17.019
t	---	0.3	0.3	---	0.3	0.3	---	0.3	0.3	---	---	0.3
ϵ	---	10^{-4}	10^{-4}	---	10^{-4}	10^{-3}	---	10^{-4}	10^{-4}	---	---	10^{-4}
CPU (10^{-3} sec)	---	278	3724	---	282	5890	---	285	1628	---	---	---

Table 2 Results for no.2 case

	Starting Point	SUMTNM	FTM	Starting Point	SUMTNM	FTM
x_1	5.54	5.334	5.101	10.0	9.522	5.279
x_2	4.40	4.277	4.282	10.0	9.783	4.668
x_3	12.02	11.880	10.229	10.0	9.651	10.425
x_4	11.82	11.696	11.470	10.0	9.920	12.129
x_5	0.702	0.741	0.805	1.0	0.460	0.756
x_6	0.852	0.882	0.886	1.0	0.505	0.879
F	---	135.55	133.70	---	188.95	135.08
t	---	0.3	0.5	---	0.3	0.5
ϵ	---	10^{-4}	10^{-2}	---	10^{-4}	10^{-3}
CPU(10^{-3} sec)	---	373	7212	---	370	16516

Table 3 Results for no. 3 case

	Starting Point	SUMTNM	FTM	Starting Point	SUMTNM	FTM
x_1	0.5	0.838	1.371	1.0	1.125	1.311
x_2	0.5	0.066	0.022	1.0	0.025	0.023
x_3	0.5	1.246	0.924	1.0	1.318	0.999
F	—	0.1782	0.090	—	0.095	0.0901
t	—	0.5	0.5	—	0.5	0.5
ϵ	—	10^{-4}	10^{-4}	—	10^{-4}	10^{-4}
CPU(10^{-3} sec)	—	295	2656	—	305	1812

10^{-3} 정도를 사용해도 최소값에는 큰 변동이 없고 CPU time에는 상당한 차이가 있는 경우에 종종 접했다. 그러므로, 문제의 특성에 따라 적절한 수렴 한계를 선택해야 한다. 이상의 결과에서 일반성과 정확성은 FTM이 우수하고, 효율성 면에서는 SUMTNM이 뛰어났다.

<Mathematical Models>[10], [11]

No. 1 $f(x) = x_1x_4(x_1 + x_2 + x_3) + x_3$

subject to;

$$x_1x_2x_3x_4 - 25 \geq 0$$

$$1 \leq x_i \leq 5, \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - 40 = 0$$

No. 2 $f(x) = 0.0204x_1x_4(x_1 + x_2 + x_3)$

$$+ 0.0187x_2x_3(x_1 + 1.57x_2 + x_3)$$

$$+ 0.0607x_1x_4x_5^2(x_1 + x_2 + x_3)$$

$$+ 0.0437x_2x_3x_5^2(x_1 + 1.57x_2 + x_4)$$

subject to;

$$0.001x_1x_2x_3x_4x_5x_6 - 2.07 \geq 0$$

$$1 - 0.00062x_1x_4x_5^2(x_1 + x_2 + x_3)$$

$$- 0.00058x_2x_3x_6^2(x_1 + 1.57x_2 + x_4) \geq 0$$

$$x_i \geq 0, \quad i=1, \dots, 6$$

No. 3 $f(x) = x_1x_2(2 + x_3)$

subject to;

$$P_1(x) = \frac{\pi^2 E}{24L^2} x_1^3 x_2 [(x_3^3 + 6x_3^2 + 8)$$

$$- (x_3^3 + 12x_3^2 + 36x_3 - 16x_3^3 + 48x_3^2 + 64)^{\frac{1}{2}}]$$

$$P_2(x) = \frac{(0.0358)\pi^2 E}{(1-\nu^2)} \frac{x_2^3}{x_1} (2 + x_3)$$

$$P_3(x) = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)} \frac{x_2^3}{x_1} \frac{(2 + x_3)}{x_3^2}$$

$$P_4(x) = \frac{\pi^2 E}{L^2} \frac{x_1^3 x_3 x_3^2 (1 + 2x_3)}{8 + 6x_3^2 + x_3^3}$$

$$+ \frac{4Gx_2^3(2 + x_3^2)}{x_1(8 + 6x_3^2 + x_3^3)}$$

$$P_5(x) = \sigma y \cdot x_1 \cdot x_2 (2 + x_3)$$

$$g_i(x) = P_i(x) - 1000 \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 5$$

$$x_j \geq 0, \quad j=1, 2, 3$$

여기서, E : 재료의 탄성계수 (10^7 psi)

σ_y : 항복응력 (25 ksi)

L : 기둥의 길이 (25 inch)

G : 재료의 전단계수 ($E/2(1+\nu)$)

ν : 재료의 포아송비 (0.3)

3. 파형 격벽의 구조 해석 [8]

3.1. 구조 해석을 위한 가정

파형 격벽은 상·하단 stool과 수직 파형판으로 구성 되어 있다. 이에 대한 구조 해석의 간략화를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 재료는 모두 연강(mild steel)을 사용하며, 안전율은 1.5로 한다.
- 2) 용접된 부분은 완전히 부착된 것으로 한다.
- 3) stool web는 man hole이 없는 평판으로 한다.
- 4) 상·하단 stool에 사용되는 재료의 두께는 각각 일정한 것으로 한다.
- 5) 하중은 정수압에 의한 삼각형 분포의 하중이 작용한다.

3.2. 파형 격벽판(Corrugated Bulkhead Plating)

1) 소성 hinge의 발생으로 인한 격벽 전체의 붕괴 상·하단 stool은 각각 갑판과 double bottom에 고정 되어 있으며, 파형 부분의 한주기(one pitch)를 폭으로 하는 보로 가정한다. 파괴 형식과 붕괴 하중(w_i)는 다음과 같다. w_i 는 i 번째 mode의 bottom에서의 하중의 크기이다.

$$w_1 = 6 \frac{h_1(M_j - M_i) + h(M_p + M_i)}{h_1(h^2 - h_i^2)}$$

$$w_2 = \frac{12hM_p}{(h_2 - h_i)(h - h_2 - h_j)(h + h_2 + h_i - h_j)}$$

$$w_3 = \frac{6h}{h_3(h - h_j)} \left[\frac{M_p}{h - h_j - h_3} + \frac{M_i}{h - h_j + h_3} \right] \quad (7)$$

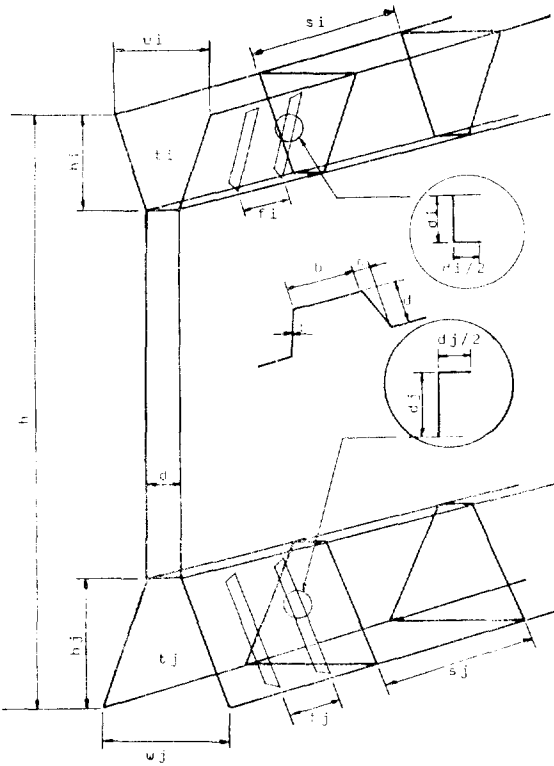


Fig. 1 Modeling of corrugated bulkhead

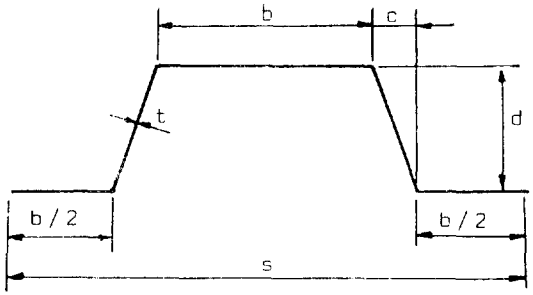


Fig. 3 One pitch of corrugation

$$M_p = \sigma_a \frac{td}{2} (2b + \sqrt{c^2 + d^2})$$

$$M_i = \sigma_a \frac{t_i w_i}{4} (4s_i + w_i) \left(\frac{s}{s_i} \right)$$

$$M_j = \sigma_a \frac{t_j w_j}{4} (4s_j + w_j) \left(\frac{s}{s_j} \right) \quad (8)$$

여기서, σ_a : 허용응력, $s=2(b+c)$

$w_{1,2,3,4}$ 중 최소값 w_{min} 이 설계하중 ρsh 보다 크게 설계 되어야 한다.

$$G(1) = w_{min} - \rho sh \geq 0 \quad (9)$$

그리고, $40^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 범위에서 설계한다.

$$G(2) = \tan^{-1}(d/c) - \frac{2}{9}\pi \geq 0$$

$$G(3) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(d/c) \geq 0 \quad (10)$$

2) 파형판의 flange의 좌굴

형 하중의 작용으로 인해 파형판의 flange에 압축력이 작용하여 좌굴의 위험이 있다. 좌굴 응력은 $\frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$ 이며, 일반적으로 flange판의 길이(폭)에 비해 매우 길다. 그리고, 경계조건을 단순지라 가정하면 $k=4$ 이다. 좌굴 방지를 위해 좌굴응력이 항복응력보다 크게 설계한다.

$$G(4) = 60 - b/t \geq 0 \quad (11)$$

3) 파형판의 flange와 web에 소성 hinge발생

파형판의 flange와 web는 양단이 고정되어 있고 단위 길이를 폭으로 하는 보로 가정한다. 하중은 파형판에 걸리는 최대하중 $\rho(h-h_j)$ (1)이 균일하게 가해진 상태이다. flange와 web에 소성 힌지가 발생하지 않기 위해서는

$$G(5) = 4\sigma_a t^2 / b^2 - \rho(h-h_j) \geq 0$$

$$G(6) = 4\sigma_a t^2 / (c^2 + d^2) - \rho(h-h_j) \geq 0 \quad (12)$$

3.3. Bulkhead Stools

격벽이 갑판과 바닥면에 접촉하는 양 끝단에는 연결의 용이함과 보강의 효과를 고려하여 일반적으로 사다

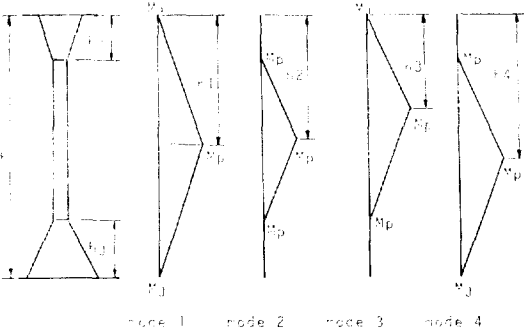


Fig. 2 Bulkhead total collapse modes

$$w_4 = \frac{6h}{(h-h_i)(h-h_j)(h+h_i+h_j)} \cdot \left[M_p \frac{2h-h_i-h_j}{h_i-h_j} + M_j \right]$$

여기서 $h_{1,2,3,4}$ 는 각 mode에서 상단 stool의 끝부분에서 격벽의 소성 힌지까지의 거리이며, M_p, M_i, M_j 는 각각 파형판과 상, 하단 stool의 파형부분 한 주기에 (s) 대한 소성 모멘트이다.

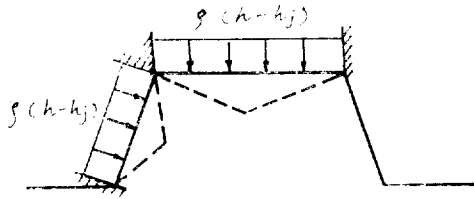


Fig. 4 Mode of failure of trough flange and web

리꼴형의 stool을 사용한다.

1) stool 외판의 좌굴

파형판의 flange와 같은 조건으로 좌굴응력이 허용응력보다 크게 설계한다.

$$G(7) = 60 - f_i/t_i \geq 0$$

$$G(8) = 60 - f_j/t_j \geq 0 \tag{13}$$

2) stool 외판의 보강재의 붕괴

stool의 web와 web 사이에 굽힘과 좌굴에 견디기 위해 여러개의 보강재를 붙인다. 이 보강재를 유효폭 비가 1.0이고, 양단 단순지지된 보로 해석한다. 하중 상태는 상단 stool은 삼각형 분포, 하단 stool은 사다리꼴형 분포이다. 보강재는 Fig. 1에 표시한 형태를 사용한다.

(i) 상단 stool

$$M_{s_i} = \frac{\rho f_i h_i^3}{9\sqrt{3} \cos^2 \theta_1} \tag{14}$$

$$G(9) = \sigma_a \cdot z_i - M_{s_i} \geq 0 \tag{15}$$

(ii) 하단 stool

$$M_{s_j} = \frac{\rho \cdot f_j}{6 \cos^2 \theta_2} \cdot x_2 (h_j - x_2) (3h - h_j - x_2) \tag{16}$$

여기서

$$x_2 = h - \sqrt{h^2 - h \cdot h_j + h_j^2/3}$$

$$G(10) = \sigma_a \cdot z_j - M_{s_j} \geq 0 \tag{17}$$

z_i, z_j 는 각각 상·하단 stool의 유효폭을 flange로 하는 보강재의 소성단면계수이다.

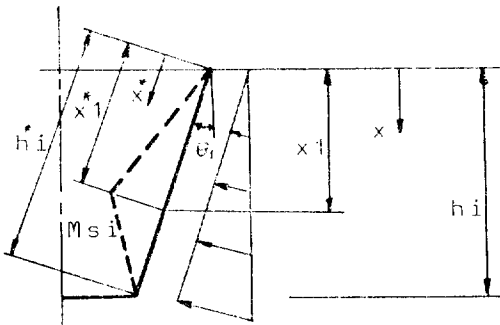


Fig. 5 Collapse mode of upper stool stiffeners

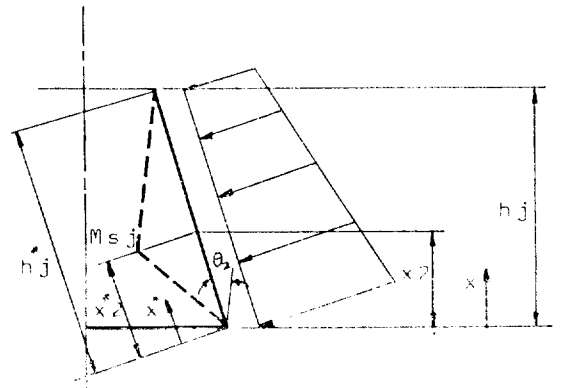


Fig. 6 Collapse mode of lower stool stiffeners

4. 파형 격벽의 최적 설계

4.1. 파형 격벽의 이상화

1) model 1

3절에서 가장한 격벽 model(Fig.1)에 대해 h, s_i, s_j 를 제외한 14개의 치수를 설계 변수로 택하여 격벽 전체에 대한 설계를 행하였다. 상, 하단 stool의 web간격 (s_i, s_j)은 각각 갑판과 이중저의 종방향 girder 간격과 일치하게 설계하므로 입력 자료로 고정시킨다.

2) model 2

실선과의 비교를 위해 220k bulkcarrier의 deeptank bulkhead에 대해 파형판만을 대상으로 계산을 수행, 비교하였다. 설계변수는 파형판의 치수중 b, c, t 만을 택하였으며, 나머지 치수는 실선과 같은 값으로 고정하였다.

Table 4 Input data

	model 1	model 2
Depth(h)	14.33m	22.7m
Breadth	22.94m	—
s_i	3.00m	2.67m
s_j	2.37m	2.67m

4.2. 최적화 모델

(1) 목적 함수(F)

1) model 1에서는 파형판과 상·하단 stool 모두를 포함한 격벽의 전 중량을 목적함수로 하였다.

2) model 2에서는 파형판의 단위폭당 단면적으로 취하였다.

$$F = 2(b + \sqrt{c^2 + d^2})t/s$$

여기서 파형판의 web 높이 $d=120\text{cm}$ 이다.

(2) 제한 조건

3절의 구조 해석의 결과에 의해

$$G(i) \geq 0, \quad i=1, 10$$

$$x_j \geq 0, \quad j=1, 14$$

24개의 식을 제한 조건으로 하였다.

4.3. 계산 결과 및 고찰

1) model 1

설계 변수의 초기값(Table 5)을 변화시켜가며 SUMTNM과 FTM 프로그램에 의해 최소중량설계를 한 결과는 Table 6, 7과 같다. 2.3절에서 예상할 수 있는 바와 같이 SUMTNM은 local minimum에 빠지는 경우가 많았는데, 초기값을 대충 예상되는 값을 넣어 줌으로써 최소값을 찾는데 걸리는 노력을 줄일 수 있었다. FTM은 본 문제와 같이 설계 변수가 많고 제한 조건이 복잡한 비선형 함수로 구성되어 있을 경우 계산 시간의 증가가 더 심하게 나타났다. 이에 대한 개선책으로 다음 2가지 방법을 사용했다. 먼저 설계 변수의 초기값을 모두 같은 order로 조절하여 넣어 주었다. 두께의 변화는 길이의 같은 양의 변화에 비해 전체 무게에 미치는 효과가 크다. 하지만, FTM 프로그램 내에서 설계변수들에 의해 구성되는 polyhedron은 임의의 설계 변수에 가중치를 두어 구성되지 않기 때문에 두께와 같이 미세한 양으로 변화되어야 할 변수도 전체 polyhedron의 크기에 의해 그 변화량이 지배를 받으므로 수많은 시행착오를 거쳐야 한다. 그러므로, 미리 각 설계 변수에 따라 가중치를 두어 초기값을 선정한다.

본 계산에서는 모든 설계 변수의 초기값을 1.0 order로 하였다. 즉 Table 5의 초기값에 $b, c, d, f_i, d_i, t_j, d_j$ 는 0.1배, h_i, w_i, h_j, w_j 는 0.01배 그리고 t, t_i, t_j 값은 그대로 사용했다. 두번째로는, iteration수를 제한하여 제한된 범위까지에서 구한 설계변수값을 다시 초기값으로 하여 재계산을 하였다. 두번째 계산에서는 초기 polyhedron의 크기를 결정하는 t 값을 먼저보다 작게 한다. Iteration수는 100번으로 하였으며, t 는 초기 계산에서는 1.0정도를, 재계산에서는 0.5정도를 사용하였다. 이와 같이 여러번 계산을 반복하면 거의 모든 초기값에서 최소값에 도달할 수 있을 것이다. Table 6, 7의 값은 둘다 두번 반복 계산한 값이다.

제산시 제한 조건식 $G(1)$ 에서 붕괴 하중은 대부분의 경우 w_2 였으며, 문제가 되는 제한조건은 $G(4) \sim G(8)$ 의 극부 붕괴에 관한 식들이었다. 좌굴문제는 경계 조건을 단순 지지로 가정하였으며, 판의 post buckling behavior로 인해 문제점이 없으리라 생각된다. 그리고, $G(5), G(6)$ 의 파형판의 극부소성인시발생은 경계 조건은 양단 고정이나, 하중을 충분히 잡았고, 보로 가정 한 자체가 충분한 안전성을 고려한 것이다.

2) model 2

실제 적벽의 stool 부분의 구조적 복잡성으로 인해 전체 중량을 비교하기가 어려움이 있어 파형판 부분만을 목적함수로 하여 계산한 결과 Table 8에 나타난 바와 같이 SUMTNM이 11%, FTM이 15%정도 신선의 중량보다 감소했다. 이 결과는 실제 사용 규격품, 작

Table 5 Model 1 starting point

	A	B	C	D	E
$b(\text{cm})$	75.0	55.0	67.0	75.0	45.0
c	25.2	42.0	40.0	54.0	36.0
d	86.4	56.0	53.5	72.0	48.0
t	2.0	1.9	1.8	1.6	1.2
h_i	248.0	200.0	254.0	248.0	248.0
w_i	300.0	250.0	190.0	168.0	168.0
t_i	1.0	1.5	0.8	1.0	1.0
f_i	45.0	48.0	30.0	45.0	45.0
d_i	10.0	10.0	8.0	10.0	8.0
h_j	252.0	250.0	240.0	252.0	280.0
w_j	400.0	300.0	300.0	250.0	250.0
t_j	2.0	1.4	1.8	1.8	1.5
f_j	30.0	25.0	40.0	50.0	35.0
d_j	10.0	10.0	12.0	12.0	12.0

Table 6 Model 1 SUMTNM output

	A	B	C	D	E
$b(\text{cm})$	77.01	70.38	65.32	78.30	57.76
c	28.91	44.52	43.91	57.83	41.03
d	84.55	63.64	57.76	70.33	60.38
t	1.29	1.18	1.09	1.32	1.01
h_i	193.00	192.50	197.30	203.50	219.80
w_i	128.30	217.50	153.80	140.30	156.80
t_i	0.72	0.50	0.39	0.56	0.63
f_i	48.31	31.28	23.89	37.16	40.75
d_i	6.12	3.86	4.00	4.82	5.19
h_j	80.70	133.60	207.00	70.60	200.40
w_j	227.50	192.60	191.20	82.40	173.50
t_j	0.29	0.37	0.66	0.72	0.47
f_j	18.20	9.48	41.58	44.58	2.39
d_j	8.87	8.63	17.24	5.07	15.26
Weight(m^3)	6.666	5.211	4.995	5.551	4.992

Table 7 Model 1 FTM output

	A	B	C	D	E
$b(\text{cm})$	59.13	56.32	53.85	43.24	40.17
c	67.04	59.61	38.38	42.75	25.70
d	78.23	69.96	60.56	64.87	65.04
t	1.02	1.01	0.99	0.74	0.74
h_i	125.10	270.00	259.80	307.5	284.30
w_i	246.00	287.00	164.1	146.3	123.20
t_i	0.19	0.29	0.42	0.59	0.63
f_i	9.20	11.52	23.49	37.47	39.68
d_i	11.55	5.76	7.46	7.71	9.59
h_j	177.30	152.40	207.00	237.70	220.3
w_j	151.50	246.60	176.80	129.80	187.5
t_j	0.81	0.85	0.60	0.79	0.44
f_j	42.30	49.06	33.87	47.43	21.66
d_j	12.44	13.91	16.40	20.03	16.19
Weight(m ³)	4.987	4.982	4.970	4.947	4.964

Table 8 Model 2 results

	실 선	SUMTNM	FTM
$b(\text{cm})$	133.50	117.62	129.95
c	0.00	42.23	66.82
t { flange	1.90	2.01	2.17
web	1.75	2.01	2.17
$F(\text{cm}^2/\text{cm})$	3.473	3.072	2.942
비 율	1.0	0.885	0.847

업조건(작업성, 작업 manhour)을 무시한 값이나, 그러한 조건을 고려한다 해도 8% 정도의 중량 감소를 예상할 수 있다.

5. 결 론

최적화 기법중 Nelder and Mead external penalty method와 flexible tolerance method의 장·단점을 비교하고, 수직 파형 격벽에 대해 collapse mechanism에 의한 구조해석과 최적 설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반성, 정확성 면에서는 FTM이, 효율성(CPU time) 면에서는 SUMTNM이 우수하다.
- 2) 최적 설계시 초기값은 가능한한 예상되는 값을

사용하는 것이 좋다. 그리고, SUMTNM의 초기값은 목적함수를 양으로 하는 feasible point로, FTM은 특히 제한 조건이 복잡한 비선형 함수들로 구성되어 있을 경우 각 설계 변수의 특성에 따라 초기값에 가중치를 두어 신중하고 iteration수를 제한하여 반복 계산하는 것이 최소값에 도달하는데 드는 노력을 줄일 수 있다.

3) 파형 격벽판만의 중량을 목적함수로 두고 최적 설계를 수행한 결과 작업성을 고려하지 않은 상태에서 실선에 비해 15% 정도의 중량이 감소했다.

참 고 문 헌

- [1] 魚民祐, “最小重量 및 建造費를 위한 船體 設計에 관한 研究”, 서울대학교, 조선공학과, 석사학위논문, 1983.
- [2] J. Moe and S. Lund, “Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphasis on Longitudinal Strength Members of Tankers”, RINA, Vol. 110, 1968.
- [3] J.B. Caldwell, “The Strength of Corrugated Plating for Ship’s Bulkheads”, RINA, 1955.
- [4] A.K. Basu and J.C. Chapman, “Optimum Design of Plates with Symmetrical Trapezoidal Corrugations Subjected to Lateral Pressure”, RINA, 1967.
- [5] C.V. Reklaitis, A. Ravindran and K.M. Ragsdell, “Engineering Optimization: Methods and Applications”, John Wiley and Sons, 1983.
- [6] J.A. Nelder and R. Mead, “A Simplex Methods for Function Minimization”, *Computer J.*, Vol. 7, 1965.
- [7] Himmelblau, D.M., “Applied Nonlinear Programming” McGraw-Hill, New York, 1972.
- [8] J.E. Cantwell, “Optimum Design for Production of a Deep Tank Corrugated Bulkhead”, Newcastle Univ., MA Thesis, 1976.
- [9] 김기화, “파형 격벽의 최적 설계”, 서울대학교, 조선공학과, 석사학위논문 1987.
- [10] W. Hock and K. Sdittkowski, “Test Examples for Nonlinear Programming Codes”, Springer-Verlag.
- [11] N.G.R. Iyenger and S.K. Gupta, “Programming Methods in Structural Design”, Edward Arnold.