
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 2 號 1996年 5月
 Transactions of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 33, No. 2, May 1996

균일 분포 횡하중 및 축하중을 받는 격자형 구조물의 최적 소성설계법

정태준*, 김기성*, 박영호**

Optimum Plastic Design Method of Grillages under Uniformly Distributed Lateral Loads and Axial Forces

by

T. J. Chung* , K. S. Kim* and Y. H. Park**

요 약

균일 분포 횡하중이 작용하는 격자형 구조물의 극한 해석법의 개발에 대한 이전의 연구(참고 문헌 1과 5)를 검증해 보았고, 붕괴 이론에 있어서 면내력의 영향을 고찰 하였다.

논문의 주된 내용은 최소 중량과 최소 비용을 갖는 격자형 구조물의 최적설계법을 개발하였고, Pareto 해석법을 적용하여 다목적 함수를 갖는 구조물에서 최적 절충해를 구하는 최적화 기법을 소개하였다.

Abstract

In this study, a review is made of the previous work(Ref. 1 and 5) for the development of the limit design method of the flat rectangular grillages under the lateral pressure. And the effect of the in-plane loads on the collapse theory is considered.

The main part of the work is devoted in developing the standard design method of grillages under the criteria of minimum weight and minimum cost.

In the final part, it was shown that Pareto solution methods can be easily applied to structural optimization with the multiple objectives, and the designer can have an appropriate choice from those Pareto optimal solutions.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9)

접수일자 : 1995년 12월 27일, 재접수일자: 1996년 3월 12일

* 정회원, 인하대학교 선박해양공학과

** 정회원, 해군본부 조함단

1. 서론

1.1. 격자형 구조물의 설계 개요

선박의 구조물은 많은 부분이 격자형 구조물 (grillages)의 형태로 이루어져 있으며, 이는 선체 구조 중량의 상당 부분을 차지하게 된다.

본 논문에서는 이러한 높은 이용도를 갖는 격자형 구조물의 최적 구조 요소에 대하여 중량과 생산 비용에 있어서 다양한 목적 함수의 영향에 대하여 연구하였다.

선박의 갑판이나 탱크의 하부 갑판등의 격자형 구조물에 균일한 횡하중이 작용하는 경우 소성 붕괴 이론을 적용하여 구조물이 최소 중량을 갖는 최적 설계 과정을 개발하였고, 축방향의 하중이 작용시 그에 대한 영향을 고려해 보았다. 이와 같이 설계된 격자형 구조물에 대하여 재료비 및 용접비등을 고려한 생산 비용을 계산한다.

격자형 구조물의 최소 중량 및 최소 생산 비용을 위한 최적 설계를 수행하고 그 결과에 대하여 여러개의 가능한 최적해를 모두 구하여 최적 절충해(Pareto optimal solution)를 선택하는 방법을 소개하였다.

1.2. 격자형 구조물의 이상화 및 가정

균일 횡하중 및 축하중이 작용하는 격자형 구조물의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, 해석 절차를 간단히 하기 위해 각 교차점에서의 보강재는 서로 직교를 이루는 것으로 이상화하고, 기타 관련된 가정들은 다음과 같다.

- (1) 평판과 보의 재료는 탄성-완전 소성이다.
- (2) 보의 전체 소성 모우멘트는 $M_p = \sigma_y \cdot Z_p$ 이다. 여기서 Z_p 는 소성 단면계수이다.
- (3) 비틀림과 전단 및 좌굴의 영향은 무시한다.
- (4) 격자형 구조물의 전체 굽힘을 고려할때, 평판은 각각의 보강재에 유효폭을 갖는 것으로 가정한다.
- (5) 평판에 균일하게 작용하는 극한 하중은 線荷重(line loads)으로 보강재에 분포되고, Foulkner의 공식에 의하면:[5]

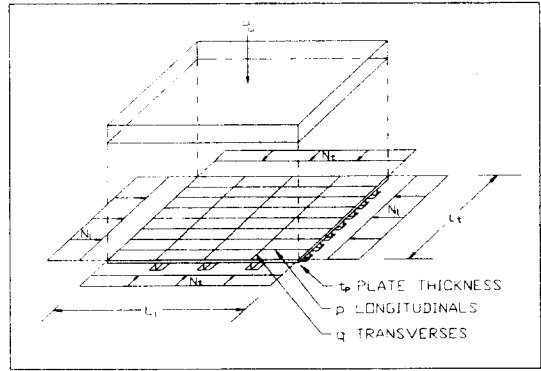


Fig. 1 Definition of structure and loading

$$w_b = \frac{1}{2} \cdot P_u \cdot b$$

$$w_a = \frac{1}{2} \cdot P_u \cdot b \left(2 - \frac{b}{a}\right) \tag{1.1}$$

여기서, w_b, w_a = 단위 길이당 線荷重

b, a = 보강재의 길이

$a \geq b$ 이다.

2. 격자형 구조물의 소성 붕괴 이론

2.1. 기본 개념

1장의 가정들은 평판 보강의 격자형 구조물을 전체 길이가 L_x 과 L_y , 전체 소성 모우멘트가 M_p 및 M_y , 線荷重(line loads)이 w 와 w_y 인 평판이 없는 격자 구조물의 형태로 바꿀 수가 있는데, 이것은 작용 하중에 대한 붕괴 모드를 결정하는데 필요하게 된다.

2.2. 붕괴 모드와 설계 공간

2.2.1. 기본 붕괴 모드

1장의 가정(5)와 격자형 구조물의 각 교차점에서 작용하는 내부 반력 R이 동일하다는 가정을 이용 하여 각 방향 보의 굽힘 모우멘트 선도를 나타내면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 격자형 구조물에서 p의 갯수가 짝수, q의 갯수가 홀수이고, 횡방향의 보가 종방향의 보

를 지지하고 있다고 가정하면, 종방향 보의 r번째 구간에서의 굽힘 모우멘트는 다음과 같이 표현할 수 있다.[5]

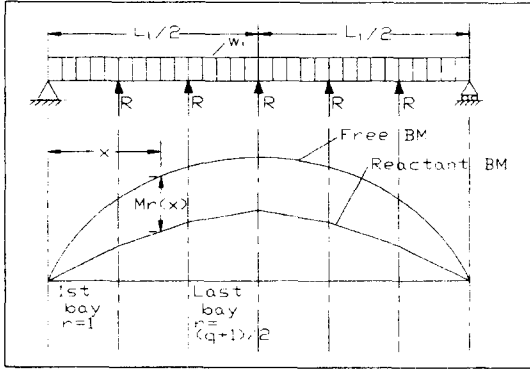


Fig. 2(a) The 4x5 grid - longitudinal beam loading and BM diagram

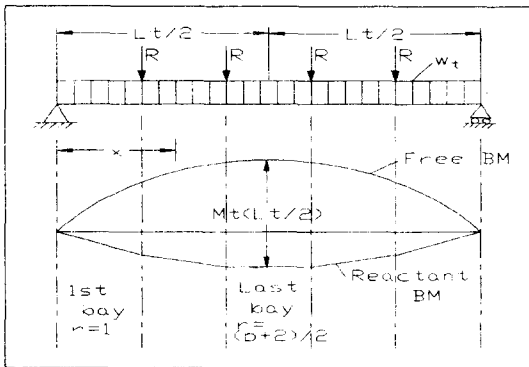


Fig. 2(b) The 4x5 grid - transverse beam loading and BM diagram

$$M_r(x) = \frac{(q+1)}{2} w_l l_i x - \frac{1}{2} w_l x^2 - \frac{(q+2-2r)}{2} R x - r \frac{(r-1)}{2} R x \quad (r=1, 2, \dots, \frac{q+1}{2}) \quad (2.1)$$

$r = \frac{(q+1)}{2}$ 를代入하여 종방향 보의 최대 굽힘 모우멘트를 구하면 다음과 같다.

$$M_{pl} = M_{\frac{q+1}{2}}(x_{\frac{q+1}{2}}) = \frac{(q+1)^2}{8} \left[(1-\alpha_l) + \frac{\alpha_l^2}{(q+1)^2} \right] w_l l_i^2 \quad (0 \leq \alpha_l \leq 1) \quad (2.2)$$

여기서, $\alpha_l = \frac{R}{w_l l_i}$ 이다.

횡방향 보의 최대 굽힘 모우멘트 역시 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$M_{pt} = M_t \left(\frac{L_t}{2} \right) = \frac{(p+1)^2}{8} \left[1 + \frac{\delta \alpha_l}{(q+1)} \frac{p(p+2)}{(p+1)} \frac{w_l}{w_t} \right] w_t l_i^2 \quad (2.3)$$

여기서, δ 는 전체 격자형구조물의 길이비 (L_t/L_t)이다.

횡방향 보가 종방향 보에 의해 지지되고 있다고 가정하면, 각 방향 보의 최대 굽힘 모우멘트는 다음과 같다.

$$M_{pt} = M_{\frac{p+2}{2}}(x_{\frac{p+2}{2}}) = \frac{(p+1)^2}{8} \left[1 - \frac{p(p+2)}{(p+1)} \frac{\alpha_t}{(p+1)} \right] w_t l_i^2$$

$$M_{pt} = M_t \left(\frac{L_t}{2} \right) = \frac{(q+1)^2}{8} \left[1 + \frac{(q+1)}{(p+1)} \frac{\alpha_t}{\delta} \frac{w_t}{w_l} \right] w_l l_i^2 \quad (2.4)$$

여기서, $\alpha_t = \frac{R}{w_t l_i}$, $0 \leq \alpha_t \leq 1$ 이다.

이것은 모든 붕괴 모드중 가장 중요한 것이고, 단순 지지된 모든 격자형 구조물에 대하여 적용할 수 있으며, '기본 붕괴 모드'라고 한다.

2.2.2. 설계 공간 및 기타 붕괴 모드

다양한 붕괴 모드를 효율적으로 설명하기 위하여 Fig. 3에서와 같은 '설계 공간(design space)'의 개념을 도입하고자 한다. Fig. 3에서 선분 PP'은 Eq. (2.2) 및 (2.3)을 이용하여 그릴 수가 있고 기본 붕괴 모드를 나타낸다.

설계점 O는 R=0, 즉 붕괴시 각 방향 보 사이의 상호 작용이 존재하지 않는 경우를 나타낸다. Fig. 3에서 설계점이 O로부터 점차 멀리 떨어지게 되면 각 방향 보의 크기는 점점 더 불균형을 이루게 되며, 점 P를 지나게 되면, 즉 $\alpha_l > 1.0$ 또는 $R > w_l l_i$ 이면, 붕괴 모드는 기본 모드로부터 새로운 모드로 변하게 된다. Fig. 3에서 구간 PQ

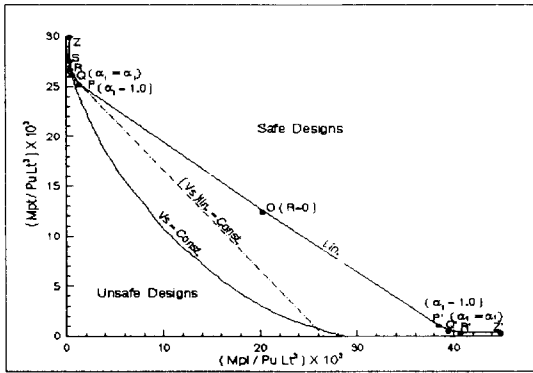


Fig. 3 The design space

는 $R > w_l l_i$ 인 경우를 보여주고 있으며, 이때의 소성 굽힘 모우멘트는 다음과 같이 계산할 수가 있다.

$$M_{pl} = M_l(x_i) = \frac{(q+1)^2}{8} \left[1 - \frac{qa_i}{(q+1)} \right]^2 w_l l_i^2 \quad (2.5)$$

여기서,

$$1 \leq a_i \leq \frac{(q+1)}{q} \cdot \frac{(3q+1) - \sqrt{(3q+1)^2 - 8q^2}}{2q} \quad (q \text{는 홀수})$$

횡방향 보의 소성 굽힘 모우멘트는 붕괴 기구가 기본 붕괴 모드와 유사하기 때문에 Eq. (2.3)을 이용하여 계산한다.

3. 소성 붕괴 이론에 영향을 미치는 인자들

2장에서는 격자형 구조물에 극한 분포 하중 P_u 만이 작용 하는 것으로 가정하였으나, 실제로는 격자형 구조물의 구조 부재는 일반적으로 굽힘 모우멘트 뿐만아니라 축하중 및 전단력을 받게 되는데, 이러한 인자들의 영향은 소성 모우멘트 값을 $\sigma_y \cdot Z_p$ 이하로 감소하게 한다.

실제적인 경우에 있어서 전단력의 영향은 일반적으로 매우 작기때문에 본 연구에서는 고려하지

않았다.

소성 모우멘트에 축하중의 영향이 크지 않을지라도, 축하중은 상부 갑판, 바닥 및 격벽등의 선박의 격자형 구조물에 존재하게 되는데, 이는 선체 굽힘 모우멘트 또는 외부의 수압등에 기인하는 것이다.

4. 최소 중량의 격자형 구조물 설계 과정 개발

4.1. 일반 절차

전체 길이가 L_i 및 L_j 로 주어진 평판 보강의 격자형 구조물은 규정된 붕괴 압력 P_u 및 축하중 N_i, N_j 에 대하여 설계된다. 그에 대한 설계 과정은 다음 세가지의 주된 측면으로 구분된다.

- (1) 보의 구성의 선정
 - 종·횡방향 보의 최적 갯수 p와 q의 선정
- (2) 평판 두께의 선택
- (3) 보의 설계
 - 소성 모우멘트 M_{pl} 과 M_{pl} 의 최적값 선정
 - 요구되는 소성 모우멘트에 대한 보의 최적 단면 형상의 설계.

4.2. 보의 구성

보의 갯수 p와 q의 최적값의 선정은 최적화의 문제로서 취급될 수 있으며 유일해를 얻게 된다.

p와 q의 넓은 범위에 대해 계산하여 최소 중량의 보의 구성 뿐만아니라 최적 설계에 대해 관련된 기타 모든 정보를 제공한다.

4.3. 평판의 두께

평판의 두께 t_f 는 종·횡방향 사이의 간격과 그 면적에 작용하는 설계 붕괴 압력(design collapse pressure) P_u 및 재료의 항복 응력 σ_y 와 관계된다. Johansen의 소성 힌지선 이론(yield-line theory)을 적용하여 평판의 두께를 계산할 수 있는 식을 다음과 같이 유도할 수 있으며, 사용 기호는 Fig. 4에 나타내었다.[8]

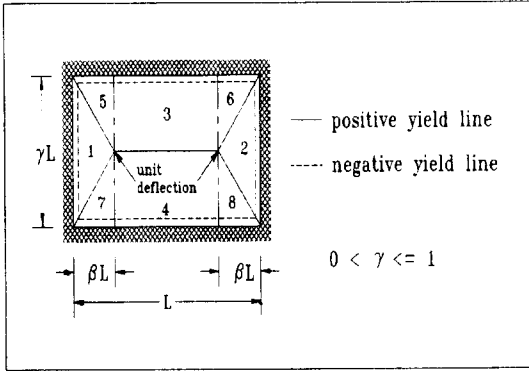


Fig. 4 Yield line of the plate

$$t_p = L \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma\beta}{3}\right)}{\left(\frac{2}{\gamma} + \frac{\gamma}{\beta}\right)}} \cdot \sqrt{\frac{P_u}{\sigma_y}} \quad (4.1)$$

여기서, L 은 종·횡방향 보 사이의 간격중에서 큰 값을 나타낸다.

4.4. 보의 설계

4.4.1. 소성 굽힘 모멘트의 결정

다음 단계는 결정된 종·횡방향 보의 갯수 p, q 및 평판의 두께 t_p 를 가지고 보강재의 체적 V_s 가 최소가 되는 보의 소성 힌지 모멘트 M_p 과 M_{pl} 의 값을 결정하는 것이다.

격자형 구조물의 최소중량 설계 방법을 개발하는데 있어서, 소성 모멘트의 값이 가장 작게 되는 조건인 $\alpha_1 = 1$ (즉, Fig. 3에서 설계점 P)을 적용 하여 소성 모멘트 M_p 과 M_{pl} 의 값을 결정할 수 있다.

4.4.2. 보의 단면 형상의 설계

보 설계의 마지막 단계는 요구되는 소성 모멘트 M_p 를 보의 적절한 단면 형상의 치수로 전환하는 것이다.

Fig. 5와 같은 유효폭의 평판을 갖는 T-형 보의 단면 형상에 대하여 웹 두께 t_w 와 관련된

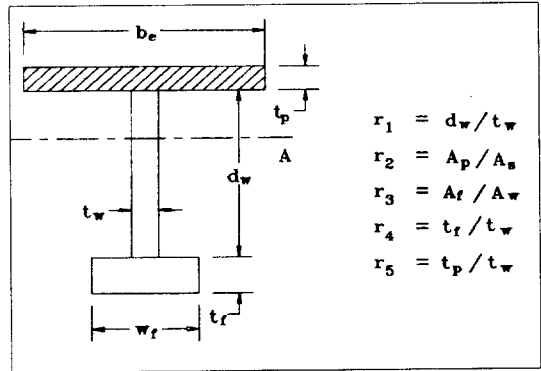


Fig. 5 General beam cross-section

$$\begin{aligned} r_1 &= d_w / t_w \\ r_2 &= A_p / A_s \\ r_3 &= A_f / A_w \\ r_4 &= t_f / t_w \\ r_5 &= t_p / t_w \end{aligned}$$

몇몇 무차원 변수로 표현할 수가 있으며, 보강재의 단면적 A_s 와 소성 단면 계수 Z_p 는 t_w 와 관계되는 다음과 같은 식으로 나타낼 수가 있다.[1]

$$A_s = r_1(1 + r_3)t_w^2 \quad (4.2)$$

$$Z_p = \{r_1(1 + r_3)\}^2 \left[\frac{1 + r_2(2 - r_3)}{4} - \frac{r_3(r_3 - r_4/r_1)}{2(1 + r_3)^2} + \frac{r_2 r_5}{2r_1(1 + r_3)} \right] t_w^3$$

($A_s \geq A_f$ 일때) (4.3)

또는

$$Z_p = r_1 \left[r_3 \left\{ r_1 + \frac{r_5}{2r_2}(r_2 - 1) + \frac{1}{2}r_4 \right\} + \left\{ \frac{1}{2}r_1 + \frac{r_5}{2r_2}(r_2 - 1) \right\} + \frac{1}{4}r_2 r_5 \left(1 + \frac{1}{r_2^2} \right) \right] t_w^3$$

($A_s < A_f$ 일때) (4.4)

$M_p = \sigma_y \cdot Z_p$ 로부터 Z_p 는 계산 되어지고, r_1 및 r_4 가 주어진다면, 변수 r_2, r_3, r_5 및 t_w 의 적절한 값은 Eq. (4.2), (4.3) 및 (4.4)를 이용하여 시행착오법(trial and error method)으로 반복적인 계산을 수행하여 구할 수가 있다.

5. 설계 응용 및 고찰

5.1. 개요

격자형 구조물의 기본 설계 모델을 다음과 같이 정의하고 다양한 설계 변수에 대한 구조물의 중량과 생산 비용의 변화를 고찰해 보기로 한다.

격자형 구조물의 기본 설계 모델

- 격자형 구조물의 전체 길이 $L_l = 9\text{ m}$
- 격자형 구조물의 전체 폭 $L_t = 6\text{ m}$
- 작용 봉괴 압력 $P_u = 0.12\text{ MN/m}^2$
- 재료의 항복 응력 $\sigma_y = 240\text{ MN/m}^2$
- 경계 조건 단순 지지(simply supported)
- 최대 허용 웹 깊이 / 두께 비 $r_1 = 45.0$
- 보의 플랜지 두께 / 웹 두께 비 $r_4 = 1.5$

균일조물의 최적 설계를 위한 소성 설계법을 정식화하여, 최소 중량과 최소 비용에 대한 최적 보의 갯수와 보의 크기를 결정할 수 있도록 하였으며, 그 설계 과정을 Fig. 6에 나타내었다.

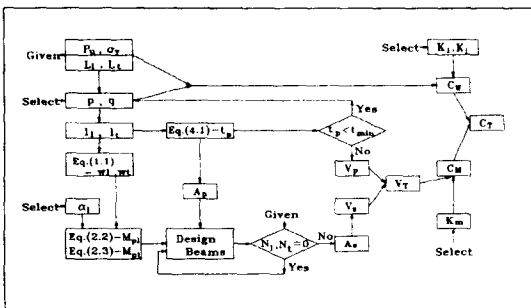


Fig. 6 flow diagram of design process

5.2. 중량 최적화

5.2.1. 보의 구성

구조물의 전체 체적 (즉, 이 값에 재료의 비중을 곱하면 전체 중량이 된다.)의 변화를 격자형 구조물의 전체 길이비 $\delta = 1.5$ 에 대하여 Fig. 7에 예시 하였으며, 최소 중량을 갖는 종·횡방향 보의 갯수는 $q \times p = 4 \times 20$ 이 됨을 알 수 있다.

격자형 구조물의 경계 조건의 영향을 분석하기 위하여 한쪽 방향으로만 보강을 했을때, 경계 조건이 단순 지지 또는 고정 지지인 경우의 전체 체적을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 경계 조건의 영향은 보의 수가 증가할수록 크게 나타나고, 보의 수가 적은 경우에 곡선이 급경사를 이루는 것은 이 경우에는 평판의 중량이 전체 중량에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

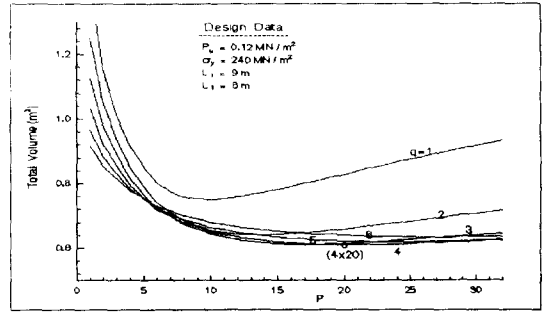


Fig. 7 Variation of grillage volume with p and q ($\delta = 1.5$)

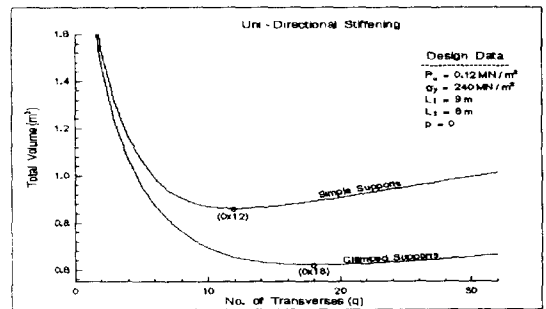


Fig. 8 Variation of grillage volume for uni-directional stiffening ($\delta = 1.5$)

5.2.2. 면내력의 영향

면내력(in-plane loads)은 보강재와 유효폭의 평판에 작용하는 축하중에 의해 발생하는 평균 응력으로 정의되어지는 '유효 응력'의 형태로 표현될 수 있으며, 이들 유효 면내력은 항복 응력 σ_y 와 비교할 수 있다.

전체 체적에 있어서 면내력의 영향은 $N_l = 80\text{ MN/m}^2$ 인 경우에 0.016 m^3 (2.6%) 증가하고, $N_l = 160\text{ MN/m}^2$ 인 경우에는 0.0636 m^3 (10.4%) 증가됨을 알 수 있다(Fig. 9 참조). 이때 작용하는 축하중은 재료의 항복 응력의 1/3과 2/3의 값과 같다.

보의 수가 작은 경우에는 축하중의 영향이 무시되었는데, 이 영역에서는 평판의 중량이 전체 중량의 많은 비중을 차지하고 있기 때문이다.

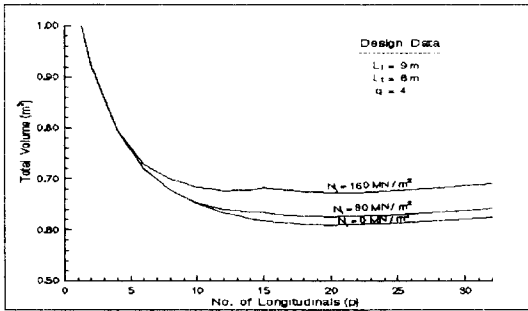


Fig. 9 Effect of longitudinal in-plane loads on grillage volume ($\delta=1.5$)

5.3. 비용 최적화

5.3.1. 격자형 구조물의 생산 비용의 결정

구조물의 비용 최적화(cost optimization)의 문제에서 다양한 비용 인자들의 정의가 필요하게 되는데, 격자형 구조물의 최소 비용 설계에서는 재료비와 생산비로 구분될 수 있으며, 본 연구에서는 다음과 같은 세가지 비용 인자를 고려하였다.

- (a)재료비에 관한 인자 K_m
- (b)보와 평판과의 용접비에 관한 인자 K_l
- (c)각 방향 보의 교차점 용접비 관한 인자 K_i

비용 인자의 영향을 고찰하기 위하여 기본 비용 인자를 다음과 같이 정의하였다.

기본 비용 인자

$$K_m = 2,500 \text{ (천원/m}^3\text{)}$$

$$K_l = 4.0 \text{ (천원/m)}$$

$$K_i = 2.5 \text{ (천원/unit)}$$

5.3.2. 생산 비용의 영향

격자형 구조물의 보의 구성(즉, 보의 갯수)에 대한 생산 비용의 영향을 고찰하기 위하여 기본 비용 인자중 재료비를 연강과 고장력강의 경우를 고려한 결과를 Fig. 10에 나타내었다

상기 결과에서 최소 비용 설계시의 보의 구성은 최소 중량 설계시의 구성과는 달리 보의 수가 증가할수록 생산 비용 역시 크게 증가함을 알 수 있다. Fig. 9에서 최소 비용 설계에 대한 보의 구성

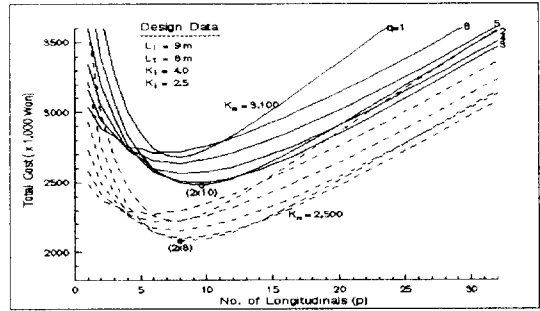


Fig. 10 Variation of production cost ($\delta=1.5$)

은 $K_m = 2,500$ (연강)일 때 $q \times p = 2 \times 8$, $K_m = 3,100$ (고장력강)일때는 $q \times p = 2 \times 10$ 이 된다. 이러한 결과는 최소 중량 설계(즉, $q \times p = 4 \times 20$)에 비해 보의 갯수가 크게 감소됨을 보여주고 있다.

5.4. 최적 절충해의 결정

격자형 구조물의 설계에서 최소 중량과 최소 비용에 있어서 최적점은 큰 차이가 있음을 알 수가 있으며, 어느 점을 최적 설계점(optimum design point)으로 결정할 것인가는 매우 어려운 문제일 것이다.

이와 같은 최소 중량 및 최소 비용과 같이 목적 함수 사이에 동일한 단위로 표시하기 어려운 문제에 대하여 여러개의 가능한 최적해를 모두 구하여 가중치나 우선 순위등의 영향을 고려하여 최적 절충해(Pareto optimal solution)을 구할 수가 있다. 이방법의 대표적인 기법으로는 가중치법(weighting method)과 제한 조건식법(ϵ -constraint method)등을 들 수 있는데, 본 논문에서는 가중치법을 이용하여 격자형 구조물의 최적 절충해를 제시해 보고자 한다.

격자형 구조물의 설계 문제를 가중치법으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Min. } F = k \left(\frac{TV}{TV_b} \right) + (1-k) \left(\frac{TC}{TC_b} \right) \quad (5.1)$$

여기서, TV = Total Volume (최소 중량)

TC = Total Cost(최소비용)

$TV_b =$ 최소 중량 설계시의 목적함수값
 $TC_b =$ 최소 비용 설계시의 목적함수값
 $k =$ 가중치 ($0 \leq k \leq 1$)

Eq. (5.1)을 이용하여 $\delta=2.0$ 인 격자형 구조물에 대한 최적 절충해를 구하여 도표로 나타내면 Fig. 11과 같고, 이를 분석해 보면, 최소 중량 설계는 $k=1.0$ 일때 $q \times p=5 \times 18$ 로서 보의 수가 상대적으로 많으며 판의 두께는 얇다. 반면에 최소 비용 설계는 $q \times p=3 \times 8$ 로서 용접비등을 최소로 하기 위해서 보의 수가 현저히 줄었고 판의 두께는 증가 하여 전체 중량은 크게 증가한다.

그러나 설계자는 극단적인 최소 중량 설계나 최소 비용 설계에서 벗어나 양자의 절충해를 Fig. 11에서 선택 할 수 있을 것이다.

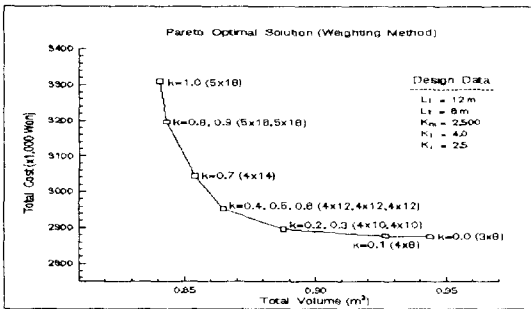


Fig. 11 The Pareto optimal set ($\delta=2.0$)

6. 결론

본 논문에서 연구되었던 예로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 중량 최적화의 경우에서 보의 수가 적을수록 평판의 중량이 전체 중량에 미치는 영향이 크게 되고, 보의 수가 많아지면 경계 조건의 영향이 크게 작용한다.

(2) 소성 굽힘에 있어서 면내력의 영향이 있다 할지라도 최소 중량 설계에서는 거의 무시될 수 있다. 그리고 평판에서의 막 응력(membrane stress)과 보에서의 전단 응력과 같은 기타 인자들은 비용 최적화 문제에서 최종적인 보의 구성에 있어서 현저한 영향을 미치지 않는다.

(3) 비용 최적화의 경우에서 최적 설계점은 보의 갯수에 매우 민감하게 반응하는데, 이것은 신뢰성 있는 비용 자료가 요구됨을 보여 준다.

(4) 최소 중량과 최소 비용 설계시의 최적점 사이에 적절한 가중치를 주어 양자의 최적 절충해를 선택할 수 있는 방법을 제시하였다.

상기와 같은 최적화 과정은 선박에서 균일 횡하중이 작용하는 탱크의 바닥이나 화물이 균일하게 배치되는 갑판등의 설계에 적절하게 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 1994년도 인하대학교 연구비의 지원에 의해 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] Kim, K. S., "Standard Design Method for Grillages in Ships", M. Sc. Thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, 1978.
- [2] Kim, K. S., "Strength Analysis as a Basic for Structural Design & Optimisation", Ph. D. Thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, 1982.
- [3] Kim, K. S., "Application of Plastic Design Method to Ship Grillages", PRADS, 1983.
- [4] 김기성, 한길영, "다목적함수 최적구조 설계", 인하대학교 산업과학기술연구소 논문집 제22집, 1994.
- [5] Caldwell, J. B. and Chowdhury, M., "Grids and Grillages: Strength Analysis and Design", Proc. of 'Int. Symp. on Steel Plated Structures', Paper No. 30, London, 1977.
- [6] "Design and Calculation Memorendom No. 1/58 - Structures Data Sheets No. 2100-2103", Naval Construction Division, Ship Department, Nov., 1958.
- [7] 양영태, "격자형 구조물의 최적설계에 관한 연구", 인하대학교 선박공학과 석사학위 논문, 1985.
- [8] Moy, S. S. J., "Plastic Methods for Steel and Concrete Structures", The Macmillan

Press Ltd., 1981.

- [9] Baker, J. and Heyman, J., "*Plastic Design of Frames Vol. 1 : Fundamentals*", Cambridge Univ. Press, 1969.
- [10] Caldwell, J. B., "*Structural Optimisation: What is wrong with it?*", C. S. Smith and J. D. Clarke(Eds.), 'Advances in Marine Structures', Elsevier Applied Science, 1986