

용접 조립보의 최소 생산 비용에 관한 연구

장창두*, 서승일*

A Study on the Minimum Production Cost of Welded Built-up Beams

by

Chang Doo Jang* and Seung Il Seo*

요 약

본 연구에서는 경제적이고, 품질이 우수한 용접 조립보의 생산을 위해 요구되는 조건을 컴퓨터 시뮬레이션 방법 및 최적화 방법을 이용해서 찾고자 한다. 이를 위해 용접 조건과 가열 조건 등 조립보의 생산 과정을 지배하는 변수를 선정하고, 이 변수에 따라 조립보 생산비를 추정할 수 있는 모델을 제시하여, 생산에 따른 제한 조건을 만족시키면서, 생산비가 최소가 되는 생산 변수를 구하였다. 더 나아가서 설계 및 생산의 통합 제어를 위해 용접 조립보의 생산에 따른 총 비용을 산출할 수 있는 추정식을 제시하고, 선급 규정에 따라 설계하는 과정까지 포함하여 최적화를 수행하였다. 또한 곡직 가열이 불가능한 경우를 가정하여, 가중치법에 기초한 다목적 최적화 기법을 도입하고 최소 비용과 최소 변형의 절충해를 얻는 방법을 제시하였다.

Abstract

In this study, to find an economical production method which yields welded built-up beams with high quality, simulation techniques and optimization method are used. At first, fabrication variables such as welding current, voltage and speed and heated depth and breadth are selected and fabrication cost of a built-up beam is expressed by these parameters, which is optimized under the constraints. As advanced studies, total production cost including the fabrication cost and the material cost of the beam is expressed by the fabrication and design variables, and optimized with the design constraints by the class rules. In addition, assuming that heating for straightening is im-

접수일자 : 1994년 6월 14일, 재접수일자 : 1994년 7월 13일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

possible, the optimization method of multi-objective functions based on the weighting method is applied to obtain the compromised optimal solutions of the total production cost and the welding deformation.

1. 서 론

용접 조립보 제작의 주요 과정은 먼저 웨브와 플랜지의 결합을 위해서 용접을 수행하고, 용접 변형을 교정하기 위해 웨브의 일단을 가열하는 것으로 이루어진다. 이러한 작업은 숙련된 작업자의 경험에 의존하고 있으므로 많은 시행착오가 따르고 있다. 생산성과 품질 향상이 조선소의 경쟁력 확보를 위해 긴밀히 요구되는 현재의 상황에서는, 경험을 탈피하고 이론에 기초한, 자동화된 생산 방법의 개발이 급선무라 할 수 있다. 그러나 자동화를 위한 생산 방법은 여러 가지가 존재할 수 있으므로, 단순히 자동화된 방법보다는 어떤 철학에 바탕을 둔 생산 방법의 모색이 필요하게 된다. 조선소에서는 생산 비용의 감소가 바로 이윤으로 직결하므로 비용의 감소가 최우선이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최소 비용으로 용접 조립보를 생산해 낼 수 있는 방법을 찾고자 한다. 이를 위해 개발된, 생산 과정 시뮬레이션 방법을 이용하여, 조립보 생산에 소요되는 비용을 용접과 가열 조건과 같은 생산 변수로 표현하고, 최소 비용이 산출되는 생산 방법을 찾고자 한다. 이 과정이 완료되면 컴퓨터에 의한 통합 생산 체계의 확립을 염두에 두고, 용접 조립 부재의 생산 과정을 조립 부재의 설계 과정과 통합하여 동시에 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다. 설계 과정은 언급에서 요구하는 기준에 따르고, 생산 과정은 위에서 언급한 작업 방법을 반영하게 되며, 목적 함수로는 조립보의 강재 비용을 포함하여 용접 조립보의 생산에 수반되는 총 비용이 된다. 재질 변화나 공기 등의 이유로 곡직 가열이 불가능할 경우에 대해서는 가중치법에 기초한 다목적 함수의 최적화 기법을 도입하고, 최소 생산 비용과 최소 용접 변형의 절충해를 얻는 방법을 제시한다.

선체 구조의 설계 최적화에 대한 연구는 이미 오래 전부터 수행되어 왔고, 현재에는 조립보 뿐 아니라 선체 구조 전체에 대한 최적화의 단계에 와 있는 상황이다[1]. 그러나 대부분의 구조 최적화의 목적은 중량 감소이었다. 그런데 근래에는 조선소의 경쟁력 확보 차원에서 생산비의 감소가 요구되었고, 여기에 부응하기 위해 생산비 최소화를 위한 구조 설계 방법에 대한 연

구도 수행되고 있다[2]. 현재의 생산비 최소화를 위한 연구에서는 생산 관련 비용의 추정을, 용접선의 길이 등 간단한 파라미터에 의존하고 있는데, 선체 건조 작업을 실질적으로 반영하기 위해서는 용접 길이 뿐 아니라 용접 속도 차이에 따른 노무비의 변화, 변형 교정을 위한 곡직 가열 비용 등도 생산비 산정 시에 포함되어야 한다. 본 연구에서는 간단한 선체 구조 부재이긴 하지만, 조립보를 대상으로 하여, 설계 및 생산 전 과정에 소요되는 비용을 생산비 추정 모델에 반영하고, 전 과정을 통합하여 최적화를 수행함으로써, 진정한 생산비 최소화를 추구하고자 한다.

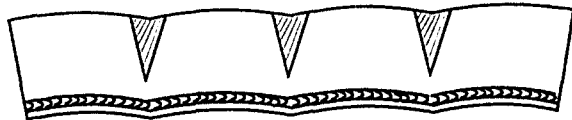


Fig. 1 Corrected deformation after heating the web plate of the beam

2. 용접 조립보 생산 과정의 최적화

2.1 용접 조립보의 생산비 항목

용접 조립보를 제작하는데 수반되는 용접 작업 시의 소요 비용으로는 용접 재료비, 노무비, 전력 사용료, 부대 비용 등을 들 수 있고, 곡직 작업 시에 소요되는 비용으로는 가스 사용 비용, 노무비 등을 들 수 있다. 용접 재료비는 소모되는 용접봉량에 비례하게 되는데, 이는 용접봉 용융 속도로 나타 낼 수 있고, 노무비는 용접 시간에 비례하므로 부재 길이와 용접 속도로 표현할 수 있다. 전력 사용료는 용접 시 소요되는 전기 에너지에 비례하므로, 용접 전류, 전압, 속도 및 부재 길이로 나타낼 수 있다. 부대 비용은 보통 용접에 직접 소모되는 경비의 일정 비율로 산출할 수 있다. 또한 곡직 작업 시의 가스 사용 비용은 일정한 토치로써, 일정한 온도까지 가열한다고 간주했을 때, 투입 열량에 비례한다고 볼 수 있다. 또한 노무비는 가열 시간에 비례한다고 볼 수 있는데, 가열 시간은 가열 면적과 가열면의 두께에 의해 정해지게 된다. 각 비용을 식으로 표시해 보면 다음과 같다.

$$\text{용접봉 재료비 } C_r = \frac{M_R}{v} L f_1 \quad (1)$$

$$\text{노무비 } C_l = \frac{L}{v} f_2 \quad (2)$$

$$\text{전력사용비 } C_e = \frac{iVL}{v} f_3 \quad (3)$$

$$\text{곡직 비용 } C_h = \frac{A_h t_w}{V_h} f_2 + c \rho T_h A_h t_w f_4 \quad (4)$$

부대 비용 : (용접봉 재료비 + 노무비 + 전력 사용비 + 곡직 비용) 의 일정 비율로 결정함

여기서, M_R = 용접봉의 단위 시간당 용융 중량으로써, CO₂ 용접시, 용접봉 지름 $\phi=1.4\text{mm}$ 일 때, 다음 식과 같이 주어진다[3].

$$M_R = 1.29 \times 10^{-5} i^2 E_{xt} + 0.184i \quad (\text{g/min}) \quad (5)$$

E_{xt} = 전극팁과 모재 간의 거리 (mm)

v = 용접봉 진행 속도

L = 조립보의 길이

f_1 = 용접봉 단위 중량 당 가격

f_2 = 단위 시간 당 노무비

i = 용접 전류

V = 용접 전압

f_3 = 단위 열량 당 전력 요금

A_h = 곡직 가열 면적

t_w = 가열되는 웨브의 판두께

V_h = 단위 시간 당 가열할 수 있는 영역의 부피

T_h = 가열 영역의 최고 온도

f_4 = 가열 시 소모되는 가스의 단위 열량 당 비용

c = 강재의 비열

ρ = 강재의 밀도

2.2 용접 조립보의 생산에 따르는 제한 조건

조립보의 생산을 위한 용접 작업 시에는 용접기의 아크 특성에 따라 안정된 아크 발생을 위해 일정한 전류 및 전압의 관계가 존재하고, 적정한 용접부의 결합 강도를 위해 선급에서 제시하는 각장 제한 조건이 있다. 또한 곡직 가열 작업 시에는 용접 변형량을 상쇄하기 위한 가열 조건이 필요하게 된다. 조립보 생산에 따르는 제한 조건을 정리하면 다음과 같다.

1) 안정된 아크 발생을 위한 전류와 전압의 관계식
CO₂용접시, 용접봉 지름 $\phi=1.4\text{mm}$, 가스 공급 속도 20 l/min 일 때, 전류와 전압 관계식은 다음과 같다.

$$V=0.05i+16(V) \quad (6)$$

2) 각장 제한 조건

$$l_a \geq l_r \quad (7)$$

여기서, l_a = 실제 용접 각장으로 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$l_a = \sqrt{\frac{2\eta M_R}{\rho v}} \quad (8)$$

η = 용착 효율

l_r = 선급 등에서 요구되는 각장 기준

3) 용접 전류의 허용 범위

용접부의 적절한 충격 인성치 확보와 용접기의 특성을 고려하여 허용 전류의 제한을 부과 한다.

$$i \leq i_a \quad (9)$$

여기서, i_a = 허용 전류의 최대치

4) 조립보의 최대 변형이 허용 변형 이하가 되기 위한 곡직 가열 조건

조립보의 용접 변형이 허용 변형량을 넘지 않기 위해서는 대부분의 경우 곡직 가열이 수행되어야 한다. 곡직 가열의 실시를 위해서는 먼저 용접에 의한 변형량을 추정해야 하는데, 다음 식을 이용해서 용접에 의한 균일 곡률을 구할 수 있다[4].

용접에 의해 발생하는 곡률은 다음 식으로 계산한다.

$$\frac{1}{r} = \frac{0.487 \frac{\alpha}{c\rho} Q y_i}{(1 + 0.487 \frac{\alpha E Q}{c\rho \sigma_Y A_{ef}}) I} \quad (10)$$

여기서, $\frac{1}{r}$ = 용접에 의한 보의 균일 곡률

$$Q = 0.24 \frac{\eta_a i V}{v} \quad (\text{cal/mm})$$

- η_w = 아크 효율
- i = 용접 전류 (A)
- V = 용접 전압 (V)
- v = 용접 속도 (mm/sec)
- α = 선팽창 계수
- $\frac{\alpha}{c\rho} = 7.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{cal}$ (강의 경우)
- E = 탄성 계수
- I = 조립보 단면의 2차모멘트
- A_{ef} = 보의 유효 단면적

$$\frac{1}{A_{ef}} = \frac{E_i}{E_i A_i + \int E dA_e} + \frac{E_i y_i^2}{E_i y_i^2 A_i + \int E y^2 dA}$$

- σ_Y = 재료의 항복 응력
- y_i = 중립축으로부터 소성 영역의 중심까지의 거리
- y = 중립축으로부터 탄성 영역까지의 거리

균일 곡률에 의한 변형량은 다음 식과 같이 구해진다.

$$\delta(x) = \frac{L}{2r} \left(1 - \frac{x}{L}\right)x \quad (11)$$

여기서, L = 보의 길이

(11)식에 의해 계산된 변형량을 상쇄하기 위해서 필요한 가열 지점의 수는 다음 식을 이용해서 구할 수 있다[4].

$$N_h = \frac{L}{\sqrt{\frac{8\delta_\alpha}{\frac{1}{r}}}} \quad (12)$$

여기서, N_h = 가열 지점의 수
 δ_α = 허용 변형량

가열 지점에서 용접 변형을 상쇄하기 위해서 요구되는 집중 곡률의 크기는 다음 식으로 구해진다.

$$c_i = \frac{1}{N_h + 1} \frac{L}{r} \quad (13)$$

여기서, c_i = 집중 곡률의 세기

요구되는 집중 곡률을 산출하기 위해 필요한 가열 조건은 다음의 방정식을 수치적으로 해결함으로써 얻어진다.

$$c_i = \int \frac{m_p}{EI} dB = \frac{M_p(B, H)}{EI} \quad (14)$$

여기서, B = 가열 영역의 폭
 H = 가열 영역의 깊이
 M_p = 집중 수축 모멘트

$$m_p = \frac{Z_i + Z_e}{S_e Z_e - R_i^2} \left[(-F_y + \frac{S_i(F_i + f_t)}{S_i + S_e} + \frac{R_i(M_t + m_t)}{Z_i + Z_e} - F_t) R_i + (-M_y + \frac{R_i(F_i + f_t)}{S_i + S_e} + \frac{Z_i(M_t + m_t)}{Z_i + Z_e} - M_t) S_e \right] \quad (15)$$

$$m_p = \int E_i y_i \epsilon_{ip} dA_i = \text{수축 모멘트}$$

$$F_t = \int E_i \alpha_i T_i dA_i, \quad M_t = \int E_i y_i \alpha_i T_i dA_i$$

$$f_t = \int E \alpha T dA_e, \quad m_t = \int E y \alpha T dA_e$$

$$F_y = \int \sigma_Y dA_i, \quad M_Y = \int \sigma_Y y_i dA_i$$

$$S_i = \int E_i dA_i, \quad S_e = \int E dA_e$$

$$Z_i = \int E_i y_i^2 dA_i, \quad Z_e = \int E y^2 dA_e$$

$$R_i = \int E_i y_i dA_i, \quad A_i = \text{가열 영역의 면적}$$

A_e = 가열 영역 이외의 탄성 영역의 면적

필요한 총 가열 영역의 면적은 다음 식으로부터 구해진다.

$$A_h = \sum_{i=1}^{N_h} \frac{H_i B_i}{2} \quad (16)$$

여기서, A_h = 가열 영역의 총 면적
 H_i = 가열 지점 i 에서 가열 영역의 깊이
 B_i = 가열 지점 i 에서 가열 영역의 높이

2.3 목적 함수

각장 제한 조건식으로 부터 용접 속도는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{2\eta M_R}{\rho l_r^2} \\
 &= \frac{2\eta}{\rho l_r^2 60} (1.29 \times 10^{-5} i^2 E_{xt} + 0.184i) \text{ (mm/sec)} \\
 &= d_1 i^2 + d_2 i \quad (17)
 \end{aligned}$$

2.2의 제한 조건을 고려하여 조립보의 생산 비용을 추정할 수 있는 식을 정립해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_F &= C_r + C_l + C_e + C_h \\
 &= \frac{1}{2\eta} \rho l_r^2 L f_1 + \frac{L}{d_1 i^2 + d_2 i} f_2 + \frac{i(0.05i + 16)}{d_1 i^2 + d_2 i} L f_3 \\
 &\quad + \frac{A_h t_w}{V_h} f_2 + c \rho T_h A_h t_w f_4 \quad (18)
 \end{aligned}$$

(18)식을 통해서 알 수 있듯이 용접 조립보의 생산 비용은 용접 전류를 변수로 해서 표현할 수 있다.

2.4 생산비 최적화 결과

실제의 비용 계수를 고려하였을 때, 용접 전류의 변화에 따른 생산비의 변화를 그림으로 나타내 보면 Fig. 2 와 같다. Fig. 2 에 따르면 용접 전류의 증가에 따라 생산비는 감소된다는 것을 알 수 있다. 따라서 최대 허용 전류의 범위에서 가능한 한 빠른 속도로 용접하는 것이 비용면에서 유리하게 된다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 생산비에 가장 민감한 영향을 미치는 항목이 노무비이므로 노무비의 비용 계수를 변경시켰을 때, 용접 전류에 따른 생산비의 변화를 보면 Fig. 3와 같이 된다. 노무비가 감소함에 따라 전체 생산비 중에서 전력 사용비와 곡직 비용의 비율이 증가하여, 최소 비용이 되는 용접 전류가 존재하고 있다. 즉 전류가 증가함에 따라 노무비는 감소하나, 전력 사용비와 곡직 비용은 증가하므로, 상충 효과에 의해 최소 비용이 되는 최적치가 존재한다. 그러나 용접 전류에 따른 생산 비용의 변화량은 전반적으로 미소하므로, 생산 비용 최소화 이외의 관점에서 용접 조건이 결정되어도 생산 비용은 최소치와 큰 차이를 보이지 않는다.

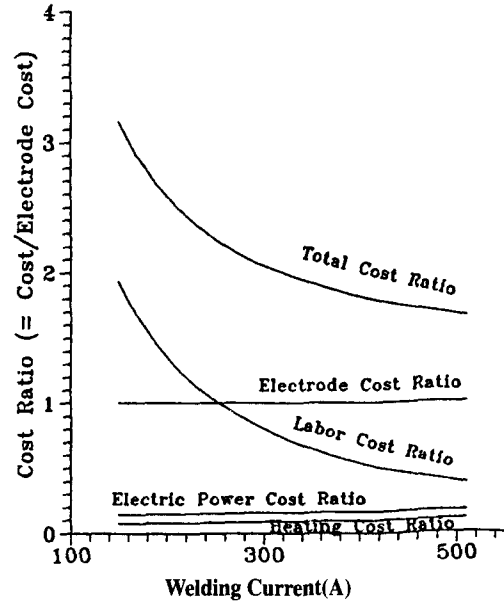


Fig. 2 Change of fabrication cost of the welded built-up beam (beam length=8m, leg length $l_r=6$ mm, electrode cost=3,579 won, electrode cost factor $f_1=1.5$ won/g, labor cost factor $f_2=1.4$ won/sec, electric power cost factor $f_3=3.0 \times 10^5$ won/J and heating cost factor $f_4=3.0 \times 10^5$ won/J)

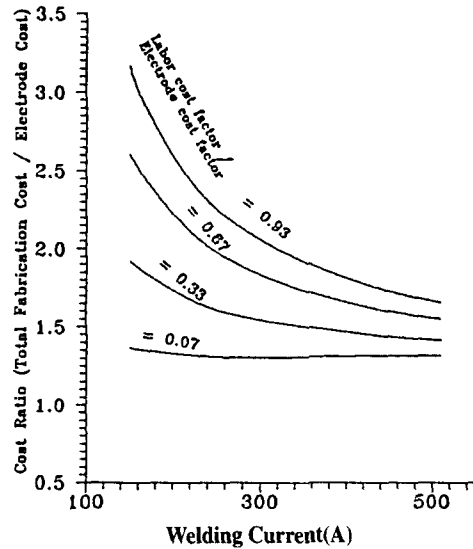


Fig. 3 Variation of total fabrication cost with the change of labor cost factor (beam length=8m, electrode cost factor $f_1=1.5$ won/g)

3. 용접 조립보의 설계 및 생산 과정의 최적화

최근에 조선소의 경쟁력 강화의 일환으로 각광을 받고 있는 컴퓨터에 의한 통합 생산 체계(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)는 근본적으로 컴퓨터에 의해 생산 전 과정을 시뮬레이션해 보는 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 조립보에 대해서 설계 및 생산 과정을 통합하여 최적화함으로써 CIMS의 토대를 구축하고자 한다.

조립보의 설계는 통상의 경우 선급 규정을 따르고 있고, 생산 과정은 2. 장의 과정을 따르고 있다.

3.1 조립보 설계에 따르는 제한 조건

대부분의 선급 규정에서는 조립보의 설계 시에 압력에 의한 굽힘 응력 기준 및 압축에 의한 좌굴 응력 기준을 제시하고 있다. 대표적인 선급인 노르웨이선급(DNV)의 조립보 설계 기준[5]을 제한 조건으로 삼는다.

- 1) 허용 굽힘 응력의 관점에서 단면 계수의 요구치

$$Z = \frac{100S^2b_s p}{\sigma_a} \text{ (cm}^3\text{)} \tag{19}$$

여기서, Z = 단면 계수의 요구치 (cm³)
 S = 보의 span (m)
 b_s = 하중이 가해 지는 폭 (m)
 p = 설계 압력 (kN/mm²)
 σ_a = 허용 굽힘 응력 (N/mm²)

- 2) 허용 전단 응력 관점에서 웨브의 단면적 요구치

$$A_w = \frac{0.07Sb_s p}{f_{ml}} + 10ht_k \text{ (cm}^2\text{)} \tag{20}$$

여기서, A_w = 웨브 단면적 요구치 (cm²)
 h = 보의 높이 (m)
 f_{ml} = 재료 계수
 = 1.0 (연강의 경우)
 t_k = 부식 여유(mm)

- 3) 전체 좌굴을 방지하기 위한 제한 조건

$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_{as}}{0.85} \tag{21}$$

여기서, $\sigma_c = 0.001E \frac{I_A}{Al^2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \tag{22}$

I_A = 유효폭을 포함한 보의 2차 모멘트 (cm⁴)
 A = 유효폭을 포함한 보의 단면적
 σ_{as} = 계산된 압축 응력
 l = 보의 길이 (m)

- 4) 비틀 좌굴을 방지하기 위한 제한 조건

$$\sigma_{ct} \geq \frac{\sigma_{as}}{0.9} \tag{23}$$

여기서, $\sigma_{ct} = \frac{\pi^2 E I_w}{10^4 I_p l^2} (m^2 + \frac{K}{m^2}) + 0.385E \frac{I_T}{I_p} \tag{24}$

$$K = \frac{C l^4}{\pi^4 E I_w} 10^6 \tag{25}$$

m = 좌굴 반파장의 수
 I_T = St Venant의 관성 모멘트(cm⁴)
 I_p = 판과의 결합점에서 극관성 모멘트(cm⁴)
 I_w = 판과의 결합점에서 뒤틀림 정수
 (Warping constant, cm⁶)
 C = 결합된 판에 의한 강성 계수

- 5) 웨브의 국부 좌굴을 방지하기 위한 제한 조건

$$\sigma_{cw} \geq \frac{\sigma_{as}}{0.8} \tag{26}$$

여기서, $\sigma_{cw} = 3.8E (\frac{t_w - t_k}{h_w})^2 \tag{27}$

t_w = 웨브의 판두께 (mm)
 h_w = 웨브의 높이 (mm)

- 6) 플랜지의 국부 좌굴을 방지하기 위한 제한 조건

$$t_f = 0.05b_f + t_k \tag{28}$$

여기서, t_f = 플랜지의 판두께 (mm)
 b_f = 플랜지의 폭 (mm)

3.2 목적 함수

조립보의 설계 및 생산 과정의 통합 최적화를 위해서는 조립보의 설계 변수에 따른 강재의 재료비를 생산 비용에 포함시켜야 한다. 조립보의 재료비는 다음 식과 같이 표현 된다.

$$C_m = (h_w t_w + b_f t_f) L \rho f_5 \quad (29)$$

여기서, C_m = 조립보의 재료비
 f_5 = 강재의 단위 중량 당 가격

따라서, 조립보의 총 생산 비용 C_p 는 다음과 같이 표현 된다.

$$C_p = C_r + C_l + C_e + C_h + C_m$$

$$= \frac{1}{2\eta} \rho l_r^2 L f_1 + \frac{L}{d_1 i^2 + d_2 i} f_2 + \frac{i(0.05i + 16)}{d_1 i^2 + d_2 i} L f_3$$

$$+ \frac{A_h t_w}{V_h} f_2 + c \rho T_h A_h t_w f_4 + (h_w t_w + b_f t_f) L \rho f_5 \quad (30)$$

3.3 최적화의 결과

변수의 변화에 따른 목적 함수의 변화를 살펴 보기 위해, 총 생산 비용이 일정한 경우 조립보의 단면적과 용접 변수와의 관계를 도식해 보면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 실제 단면 변수는 웨브의 높이 및 두께, 플랜지의 폭 및 두께이나 2차원 그림으로 표시하기 위해 단면적을 변수로써 도식하였다. 변수가 목적 함수에

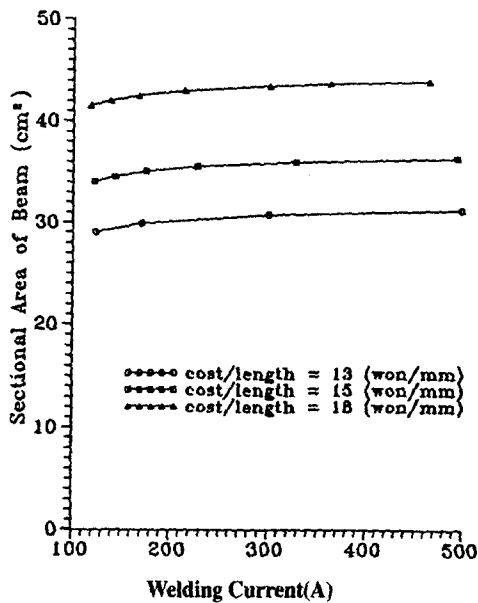


Fig. 4 Relation of sectional area of the beam and welding current at constant production cost(cost factor $f_1=1.5$ won/g, $f_2=1.4$ won/sec, $f_3=3.0 \times 10^{-5}$ won/J, $f_4=3.0 \times 10^{-5}$ won/J, $f_5=0.5$ won/g)

미치는 민감도를 살펴 보고자 먼저, 조립보의 단면적을 일정하게 하고, 용접 전류의 변화가 총생산 비용에 미치는 영향을 도식화하면, Fig. 5와 같이 된다. 용접 전류를 일정하게 하고 조립보의 단면 변화가 총생산 비용에 미치는 영향을 도식화 하면 Fig. 6와 같다.

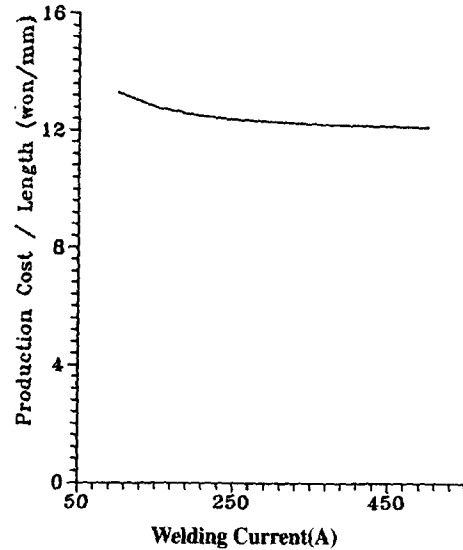


Fig. 5 Variation of production cost with the change of welding current (beam size=200×10+90×10)

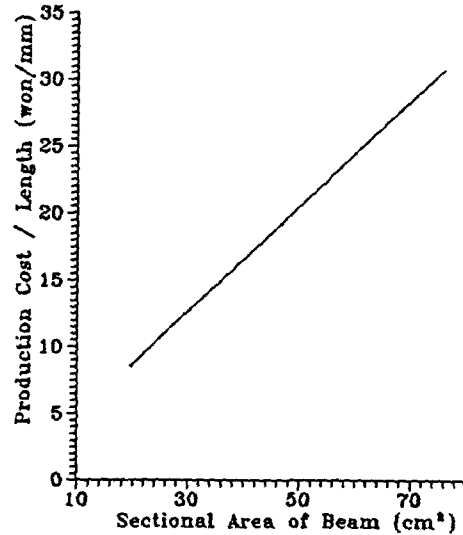


Fig. 6 Variation of production cost with the change of sectional area of the beam (welding current $i=300$ A)

Fig. 5 및 Fig. 6로 부터 용접 전류의 변화가 총 생산 비용의 변화에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있고, 총 생산 비용에 지배적인 영향을 미치는 변수는 조립보의 단면적임을 알 수 있다.

총생산 비용의 최소화를 위한 조립보의 설계 및 생산 조건을 구해 보면 Fig. 7와 같다. Fig. 7는 생산 조건을 대표할 수 있는 용접 전류의 변화에 따른 최적 단면적 결과를 도시화 한 것인데, 조립보의 단면은 용접 전류와 상관 없이 일정한 형상에서 최적이 된다. 이는 용접 전류에 비해 단면 형상이 목적 함수에 지배적인 영향을 미치기 때문이라 사료된다. Fig. 7의 결과는 결국, 단면 형상은 생산 조건에는 관계 없이 설계 조건에 의해서만 결정되고, 총 생산 비용은 용접 전류를 크게 하여 빠른 속도로 용접하면 감소된다는 것을 의미한다.

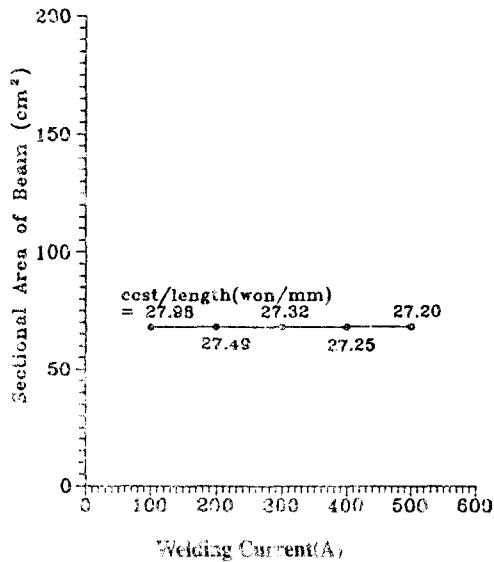


Fig. 7 Optimum results of design and fabrication of the welded built-up beam(span $S = 7m$, $b_s = 3m$, $p = 20kN/m^2$, $G_s = 180 N/mm^2$, $G_w = 100 N/mm^2$)

3.4 허용 용접 변형량을 제한 조건으로 도입한 경우의 최적화 결과

지금까지 용접 조립보의 생산 과정 중에 곡직 가열에 의해 변형을 교정하는 과정이 포함되어 있었다. 그러나, 가열에 의해 재료의 심각한 변화가 우려될 경우나 가열 작업에 따른 공기 지연을 막기 위한 경우 등, 여러 상황으로 곡직 가열이 불가능할 경우에는 설계 시부터 용접에 의한 변형량을 고려하여 곡직 없이도

조립보의 생산이 가능한 생산 방법을 모색해야 한다. 이를 위해서 곡직 가열 작업을 생략하고 용접 작업 시의 변형량이 허용 변형 이하가 되도록 설계 변수 및 생산 변수를 최적화할 필요가 있다. 따라서 총 생산 비용은 다음 식과 같이 된다.

$$C_p = C_r + C_l + C_e + C_m = \frac{1}{2\eta} \rho l_r^2 L f_1 + \frac{L}{d_1 i^2 + d_2 i} f_2 + \frac{i(0.05i + 16)}{d_1 i^2 + d_2 i} L f_3 + (h_w t_w + b_f t_f) L \rho f_5 \quad (31)$$

허용 용접 변형량에 관한 제한 조건은 다음 식과 같이 된다.

$$D_c \leq \delta_a \quad (32)$$

여기서, δ_a = 허용 변형량

D_c = 보 중앙에서의 용접 변형량

$$D_c = \frac{1}{r} \frac{L^2}{8} = \frac{0.487 \frac{\alpha}{c_p} Q y_i}{(1 + 0.487 \frac{\alpha E Q}{c_p \sigma_Y A_{ef}}) I} \frac{L^2}{8} \quad (33)$$

3.1절의 제한 조건과 함께 (33)식의 제한 조건을 부과하여 (31)식을 목적 함수로 하여 최적화를 수행한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8은 Fig. 7과는 달리 용접 전류의 증가와 함께 보의 단면적도 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 용접 전류의 증가에 따라 용접 변형량이 증가되므로 허용 변형량 제한 조건을 만족시키기 위해서는 보의 단면이 커져야 함을 의미한다. 최종적인 최적 결과는 용접 전류를 작게 하고, 이에 따라 용접 변형량을 감소시킴으로써 구해 질 수 있다.

4. 다목적 함수 최적화 기법을 도입한 용접 조립보의 설계 및 생산 최적화 결과

곡직 작업이 불가능한 경우에는 용접 조립보의 설계 및 생산 과정이 비용을 최소화하는 데에 초점을 두어야 할 뿐 만 아니라, 용접에 따른 변형을 최소화하는 데에도 비중을 두어야 한다. 이 경우에는 3.4절과 같이 허용 용접 변형량을 제한 조건으로 부과하여 최적화를 수행할 수도 있으나, 용접보의 설계 및 생산 과정을 최소 비용 뿐 아니라 최소 변형도 추구해야 하는 다목적 최적화 문제로 간주할 수도 있다. 본 연구에서는 여러 다목적 최적화 기법 중에서 가중치법(Weighting

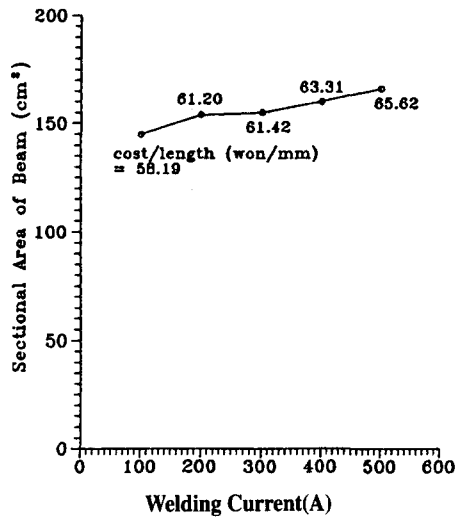


Fig. 8 Optimum results of design and fabrication of the welded built-up beam(heating cost is not included)

Method)[6]을 이용하여, 곡직 가열 작업을 실시하지 않는 경우의, 용접 조립보의 설계 및 생산 최적화 문제를 다루어 본다.

4.1 제한 조건

곡직 가열의 실시가 곤란할 경우에도, 조립보의 설계 및 생산 과정의 제한 조건은 2.절 및 3.절에서 제시된 제한 조건과 동일한 제한 조건이 부과된다.

4.2 목적 함수

최소 비용을 위한 목적 함수는 (30) 식의 목적 함수에서 곡직 가열에 의한 생산 비용을 제외시킴으로써 (31)식과 같게 된다. 최소 변형을 위한 목적 함수는 최대 변형이 발생하는 보 중앙에서의 용접 변형량을 택함으로 (33)식과 동일하게 된다..

가중치법에 따른 최적의 절충해는 다음 식과 같이 표현할 수 있다[7].

$$F = k \frac{C_p}{C_{pB}} + (1 - k) \frac{D_c}{D_{cB}} \quad (34)$$

여기서, F = 최소 비용 및 최소 변형의 다목적 함수
 C_{pB} = 최소 비용 시의 목적 함수 값
 D_{cB} = 최소 변형 시의 목적 함수 값
 k = 가중치 (Weighting Factor)
 ($0 \leq k \leq 1$)

4.3 최적화 결과

용접 전류 및 조립보 단면적을 변화시켰을 때, 총 생산 비용과 중앙에서의 용접 변형량의 변화는 Fig. 9와 같다. Fig. 9을 통해 용접 전류의 증가에 따라 생산 비용은 감소하지만, 변형량은 증가됨을 알 수 있다. 또한 조립보의 단면적이 증가함에 따라 생산 비용은 증가하지만, 강성의 증가로 인해 변형량은 감소됨을 알 수 있다. 그러나, 용접 전류의 변화가 목적 함수에 미치는 영향은 단면적 변화가 미치는 영향에 비해 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 따라서, 최소 비용을 위해서는 전류를 크게 하여 빠른 속도로 용접을 실시하고, 조립보 단면의 크기는 설계 제한 조건을 만족시키는 것 중에서 최소치를 택하면 된다. 한편, 최소 변형을 위해서는 전류를 적게 하여 천천히 용접하고, 단면은 강성이 되도록이면 큰 것을 택하도록 해야 한다. 이와 같은 상충 요인을 절충할 수 있도록, 가중치법을 이용한 다목적 함수의 최적화를 실시하면 Fig. 10과 같다. 조립보의 설계 및 생산 과정은 가중치에 따라 최소 비용 측면과 최소 변형 측면을 절충해서 조절되게 된다. 즉, 최소 비용과 최소 변형의 중요도는 최종 결정자의 선택에 달려 있고, 선택된 중요도에 따른 가중치를 반영하여 설계 및 생산 과정이 최적화 된다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 가중치에 따라 최적화된 결과를 나타낸 것으로, 가중치 $k = 0$ 일 때는 최소 변형을 위한 설계 및 생산 변수의 결과를 나타낸 것이고, $k = 1$ 일 때는 최소 비용을 위한 설계 및 생산 변수를 나

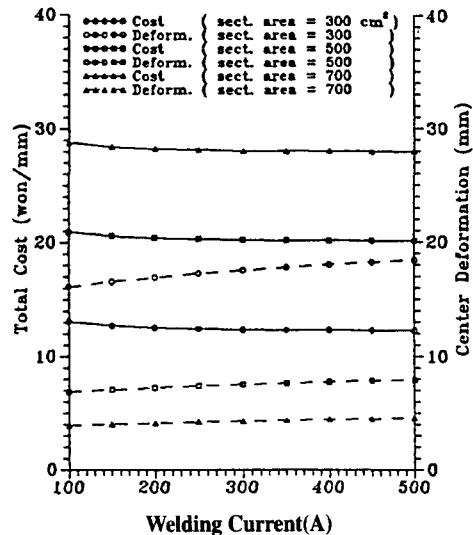


Fig. 9 Variation of total production cost and welding deformation at center(span S=7m)

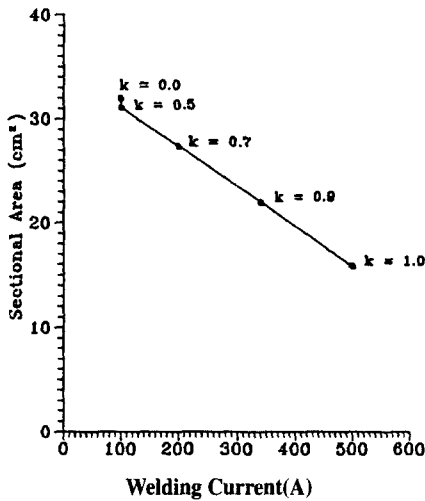


Fig. 10 Pareto optimal sectional area and welding current of the welded built-up beam (span $S = 4\text{m}$, $b_s = 0.6\text{m}$, $p = 20\text{kN/m}^2$, $\alpha_a = 180\text{ N/mm}^2$, $\alpha_{as} = 100\text{ N/mm}^2$)

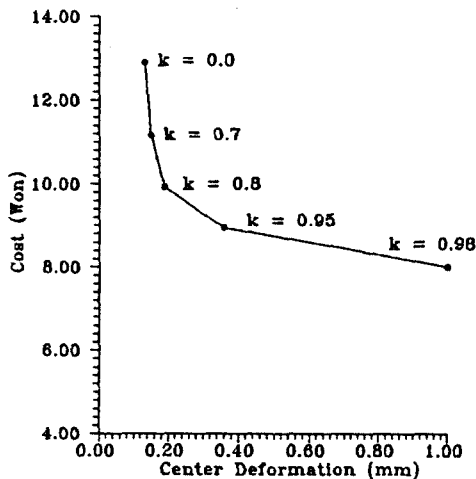


Fig. 11 Pareto optimal results of cost and deformation of the welded built-up beam (span $S = 4\text{m}$, $b_s = 0.6\text{m}$, $p = 20\text{kN/m}^2$, $\alpha_a = 180\text{ N/mm}^2$, $\alpha_{as} = 100\text{ N/mm}^2$)

타낸 것이다. Fig. 10에서 가중치 $k = 0.5$ 가 될 때까지 설계 및 생산 변수는 최소 변형 결과를 벗어나지 않고 있음을 볼 수 있는데, 이는 곡직 가열이 실시되지 못할 경우에는 대부분의 경우, 변형 최소화 관점에서 설계 및 생산 변수를 선택해도 큰 문제가 없다는 것을

의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 개발된, 조립보의 생산 과정 시뮬레이션 방법을 이용하여, 조립보 생산비 추정 모델을 제시하고, 생산비가 최소가 되는 용접 조건 및 곡직 가열 조건을 구하였다. 또한 설계 및 생산 자동화를 목표로 용접 조립보의 생산에 따른 총 비용을 산출할 수 있는 추정식을 제시하고, 선급 규정에 따라 설계하는 과정까지 포함하여 최적화를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 용접 조립보의 생산비를 추정할 수 있는 식을 정립하여 목적 함수로 택하고, 아크 특성 및 각종 기준 등의 제한 조건을 부과하여 최적화를 수행한 결과, 용접 전류를 가능한 한 증가시키는 것이 생산비 감소를 위해 유리하다는 결과가 얻어 졌다.

2) 선급 규정에 의한 설계 제한 조건을 생산에 따른 제한 조건과 함께 부과하고, 조립보의 강재비(Material Cost)를 목적 함수에 추가하여, 설계 변수 및 생산 조건의 최적화를 수행한 결과, 총 생산 비용 중에서 강재비가 차지하는 비율이 과도하여서, 설계 변수는 생산 조건과 무관하게 결정된다는 결과가 얻어 졌다. 그러나 재질 변화나 공기 단축 등의 이유로 곡직 가열이 불가능할 경우, 조립보의 전체 생산비 중에서 곡직 비용을 제외한 비용을 목적 함수로 하고, 설계 제한 조건 및 생산 제한 조건과 함께 허용 용접 변형량을 제한 조건으로 부과하여 최적화를 수행한 결과, 제한 조건을 위반하지 않는 보의 단면 크기는 용접 전류의 증가와 함께 증가해야 한다는 결과가 얻어 졌다. 최적 결과는 용접 전류를 가능한 한 감소시키고 이에 따라 단면 크기가 감소될 때 얻어 진다.

3) 곡직 가열이 불가능한 경우를 가정하여, 가중치 방법에 기초한 다목적 최적화 기법을 도입하고 최소 비용과 최소 변형의 절충해를 얻는 방법을 제시하였다. 총 생산 비용의 최소화를 위해서는 용접 전류를 증가시키고, 단면의 크기를 감소시키는 쪽이 유리하나, 최소 변형을 위해서는 용접 전류를 감소시키고, 조립보의 단면의 크기를 증가시키는 것이 유리하다는 결과가 얻어 졌다. 최소 비용과 최소 변형의 절충해는 가중치에 따라 달라 지나, 대체로 최소 변형 관점에서 설계 및 생산 변수를 선택하여도 절충해에서 크게 벗어나지 않는다.

후 기

끝으로 본 논문은 1992년도 한국학술진흥재단지원 연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며 동 재단에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] Jang, C. D. and Na, S. S., "On the Minimum Design of Oil Tankers by Generalized Slope Deflection Method", *PRADS 87*, 1987.
- [2] Bong, H. S., Hills, W. and Caldwell, J. B., "Methods of Incorporating Design for Production Considerations into Concept Design Investigations", *Journal of Ship Production*, Vol.6, No.2, 1990.
- [3] Miyake, H., Kokura, S. and Takano, Y., "Program for Flat Fillet Welding Parameters by CO_2 Arc Welding", *Transaction of the Japanese Welding Society*, Vol.4, No.1, 1986 (in Japanese).
- [4] 서승일, "용접 조립보의 설계 및 생산 자동화를 위한 기초 연구" 서울대학교 공학박사 학위논문, 1994 ("용접 조립보의 가공 자동화 관한 연구", 대한조선학회 논문집 발표예정).
- [5] "Rules for Classification of Ships - Hull Structural Design Ships with Length 100 Meters and Above", Det Norske Veritas, Part 3, Chapter 1, 1992.
- [6] 임상진, 양영순, "다목적함수 최적화기법에 의한 격자형 구조물의 최적설계", 대한조선학회지, 제25권, 제1호, 1988.
- [7] 김기성, 엄항섭, "다목적 함수의 최적 설계 기법", 대한조선학회지, 제30권, 제2호, 1993.