
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷第 1 號 1996年 2月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 1, February 1996

용접 조립보의 가공 자동화에 관한 연구

장창두*, 서승일**

A Study on the Automatic Fabrication of Welded Built-up Beams

by

Chang Doo Jang* and Seung Il Seo**

요 약

용접에 의해 발생된 조립보의 종굽힘 변형은 다음 공정에서 판과 결합되기 위해서 교정되어야 한다. 변형의 교정은 숙련된 기능공들의 경험에 의한 곡직 가열을 통해 수행되고 있는데, 이 작업은 시행착오적 과정을 거치면서 이루어 지므로 상당한 공수가 소요된다. 본 연구에서는 가열에 의한 곡직 변형량을 추정할 수 있는 방법을 제시하고, 이 방법을 활용하여 용접 조립보의 생산 과정을 재현할 수 있는 시뮬레이션 방법을 개발함으로써, 조립보 제작 시의 생산성을 향상하고자 한다.

Abstract

Longitudinal deformation due to welding of built-up beams must be straightened for attachment with plates. Straightening of deformation is carried out by much experienced workers and requires much time and labor. In this study, a procedure to calculate the required reverse curvatures to straighten the welding deformation is presented and a method to simulate the fabrication procedures for the built-up beams is developed for the purpose of improvement of productivity.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 춘계연구발표회('95. 4. 20)

접수일자 : 1995년 8월 31일, 재접수일자 : 1995년 11월 17일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

** 정회원, 한진중공업(주) 산업기술연구소

1. 서론

용접에 의해 발생된 조립보의 종굽힘 변형은 다음 공정에서 판과 결합되기 위해서, Fig. 1과 같이 역곡률을 주도록 웨브의 끝단을 가열함으로 교정된다. 현재 각 조선소에서는 이 작업을 숙련된 기능공들의 경험에 의한 곡직 가열을 통해 수행하고 있으나, 이 과정은 변형 교정이 달성되는 추이를 지켜 보면서 가열 위치 및 가열 영역의 면적을 조절해야 하는 시행착오적인 작업이므로 상당한 공수가 소요되는 것이다. 이런 경험에 의존한 작업 방법을 이룬 연구의 뒷받침으로 효율성을 높이고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

지금까지 구조물의 가열에 의한 변형을 해석하기 위해서 많은 연구가 수행되어 왔다. 근래에는 컴퓨터의 발달로 열탄소성 해석과 같은 수치적 방법을 변형 예측의 수단으로 활용하고 있다. 평판 가열시의 변형을 예측하기 위해 Moshaiov 등[1]은 경계요소법에 기초한 열탄소성 해석을 수행하였고, 신[2]은 평판을 띠판(strip)으로 이산화시킨 다음 자유도를 줄여서 열탄소성 해석을 수행하였다. Ueda 등[3]은 평판 선상 가열법의 실용화를 위해 3차원 열탄소성 해석을 수행하고 가열 조건과 고유변형도 사이의 관계를 구하고, 고유변형도에 의한 변형량을 계산하였다. 그러나 이와 같은 열탄소성 해석은 탄소성 반복 과정의 비선형성 해석을 위해 막대한 계산 시간이 소요되고 있어서 효율면에서 문제가 따르고 있으며, 실용 관점에서 정확성의 문제가 따르게 된다[2]. 열탄소성 해석의 비효율성을 피하기 위해 Nomoto 등[4]은 선상 가열법에 의한 곡면 가공 과정을 대상으로 간단한 이론에 따라 변형을 지배하는 인자를 찾고, 실험을 통해 변형 추정식을 정립하여 탄성 해석만으로 가열 조건에 따르는 변형을 시뮬레이션하는 방법을 제시하였다.

현재까지의 연구 결과를 토대로 하여, 본 연구에서는 먼저 가열에 따른 변형을 해석하고자 효율성과 정확성 면에서 문제가 있는 기존의 열탄소성 해석을 피하고, 실용적인 간이 열탄소성 해석법을 제안하여, 실험을 통해 이 방법의 유용성을 입증

하고자 한다. 또한 제안된 변형 해석법을 활용하여 용접 조립보의 생산 과정을 재현할 수 있는 시뮬레이션 방법을 개발하고, 이 방법을 통해 곡직 가열 조건과 같은 작업 조건을 이론적 바탕 위에서 제시함으로써 경험에 의존하는 작업 방법을 탈피하고, 생산성 향상을 기하고자 한다.

2. 가열에 의한 조립보의 종변형 해석

곡직 작업은 Fig. 1과 같이 가열을 통해 역변형을 줌으로써 변형을 교정하는 것을 말한다. 가열 영역의 형상은 Fig. 1과 같이 역삼각형이고, 강재의 표면이 적색이 될 때 까지 가열하므로 가열하는 온도는 거의 균일하다고 볼 수 있다.

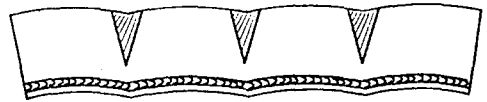


Fig. 1 Corrected deformation after heating the web plate of the beam

Fig. 2와 같은 조립보의 단면에서 가열 영역에 만 소성변형도가 발생하고, Euler 보이론을 적용한다고 가정하면 다음과 같은 응력-변형도 관계식이 성립한다.

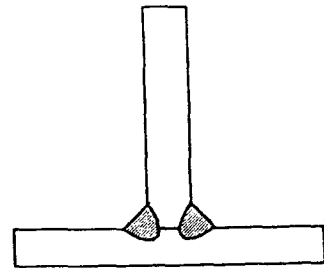


Fig. 2 Sectional view of the built-up beam

$$\sigma_i = E_i(\epsilon_0 + y_i \frac{1}{r} - a_i T_i - \epsilon_{ip}) \quad (1)$$

$$\sigma_e = E(\epsilon_0 + y \frac{1}{r} - aT) \quad (2)$$

여기서,

σ_i = 소성 영역의 응력

E_i = 소성 영역의 영률

ϵ_0 = 중립축에서 보의 균일 변형도

$\frac{1}{r}$ = 보의 곡률

α_i = 소성 영역의 선팽창 계수

y_i = 중립축으로부터 소성 영역의 중심까지의 거리

T_i = 소성 영역의 온도 변화

ϵ_{ip} = 소성 영역의 소성변형도

σ_e = 탄성 영역의 응력

E = 탄성 영역의 영률

α = 탄성 영역의 선팽창 계수

y = 중립축으로부터 탄성 영역까지의 거리

T = 탄성 영역의 온도 변화

평형 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \epsilon_0 \left(\int E dA_e + \int E_i dA_i \right) \\ & + \frac{1}{r} \left(\int E y dA_e + \int E y_i dA_i \right) \quad (3) \\ = & \int E_i (\alpha_i T_i + \epsilon_{ip}) dA_i \\ & + \int E \alpha T dA_e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \epsilon_0 \left(\int E y dA_e + \int E y_i dA_i \right) \\ & + \frac{1}{r} \left(\int E y^2 dA_e + \int E y_i^2 dA_i \right) \quad (4) \\ = & \int E_i (\alpha_i T_i + \epsilon_{ip}) y_i dA_i \\ & + \int E \alpha T y dA_e \end{aligned}$$

여기서, A_i = 소성 영역의 면적

A_e = 탄성 영역의 면적

(3), (4)식으로 부터 ϵ_0 와 $\frac{1}{r}$ 를 구하고, 가열

영역 내에서만 소성변형도가 존재한다고 가정하여, 소성변형도의 적분된 값을 수축력 및 수축 모멘트로 표현하면, 평형 방정식 및 항복 조건식으로 부터 다음 식이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} F_p = & \frac{S_i + S_e}{S_e Z_e - R_i^2} \left[(-F_y + \frac{S_i(F_t + f_t)}{S_i + S_e} \right. \\ & + \frac{R_i(M_t + m_t)}{Z_i + Z_e} - F_t) Z_e \\ & + (-M_y + \frac{R_i(F_t + f_t)}{S_i + S_e} \\ & \left. + \frac{Z_i(M_t + m_t)}{Z_i + Z_e} - M_t) R_i \right] \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_p = & \frac{Z_i + Z_e}{S_e Z_e - R_i^2} \left[(-F_y + \frac{S_i(F_t + f_t)}{S_i + S_e} \right. \\ & + \frac{R_i(M_t + m_t)}{Z_i + Z_e} - F_t) R_i \\ & + (-M_y + \frac{R_i(F_t + f_t)}{S_i + S_e} \\ & \left. + \frac{Z_i(M_t + m_t)}{Z_i + Z_e} - M_t) S_e \right] \quad (6) \end{aligned}$$

여기서, $F_p = \int E_i \epsilon_{ip} dA_i$ = 수축력 ,

$m_p = \int E y_i \epsilon_{ip} dA_i$ = 수축 모멘트,

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

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

$F_y = \int \sigma_Y dA_i$, $M_y = \int \sigma_Y y_i dA_i$

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

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

$R_i = \int E y_i dA_i$, σ_Y = 항복 응력

가열 영역 내에서 소성변형도는 분포되어 있

나, 가열 영역의 길이는 보 전체의 길이에 비해 무시할 만큼 작으므로, 한 점으로 이상화할 수 있다. 따라서 소성 변형도를 길이에 걸쳐 적분한 값을 집중 수축 모멘트로 정의하고, 이로 인한 집중 곡률을 다음과 같이 정의한다.

$$c_i = \int \frac{1}{r} dB$$

$$= \int \frac{m_p}{EI} dB = \frac{M_p}{EI} \quad (7)$$

여기서, c_i = 집중 곡률의 세기
 B = 가열 영역의 폭
 M_p = 집중 수축 모멘트

집중곡률에 의한 변형량은 다음식으로 구해진다.

$$0 \leq x \leq x_i \text{인 경우, } \delta(x) = c_i x (1 - \frac{x_i}{L}) \quad (8)$$

$$x_i \leq x \leq L \text{인 경우, } \delta(x) = c_i x_i (1 - \frac{x}{L}) \quad (9)$$

여기서, x_i = 집중 곡률의 위치
 L = 보의 길이

3. 가열에 의한 변형량 계측 실험 및 해석 결과와의 비교 검토

가열에 의한 변형량 계측 실험은 Fig. 3와 같이 물을 분사하면서, 산소-아세틸렌 토치로 특정 영역을 표면의 색이 적색으로 될 때까지 가열하고, 바로 물에 의해 급냉 시킴으로 실시하였다.

실험 결과와 본 연구에서 제시한 방법에 따른 계산 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타나 있다. 실험 결과와 해석 결과는 양호한 일치를 보임을 확인할 수 있고 따라서 본 해석 방법의 타당성을 입증할 수 있다.

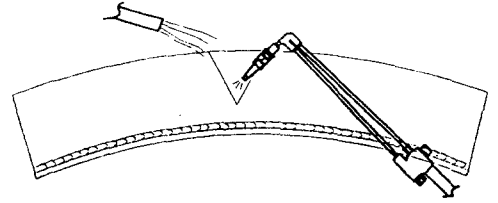


Fig. 3 Sketch of experimental work for heating of the built-up beam

가열 영역의 정의는 Fig. 4와 같고, 계측된 결과는 Table 1과 같다.

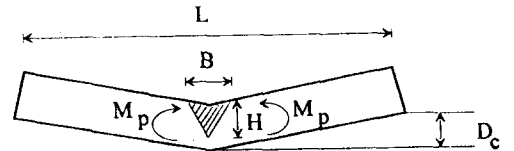


Fig. 4 Definition of heated depth and breadth

Table 1 Measured deformations of the built-up beams by central heating

Member Size(mm)	Length (mm)	Mat.	Heated Breadth (mm)	Heated Height (mm)	Max De-orm. (mm)
75×8	2000	MS	30.0	54.0	4.0
100×8	2000	MS	40.0	60.0	4.0
150×8+75×10	4000	MS	80.0	100.0	5.0
200×10+90×10	4000	MS	90.0	130.0	6.0
250×10+100×12	4000	MS	80.0	160.0	3.0
150×8+75×10	4000	AH32	60.0	100.0	4.0
200×10+90×10	4000	AH32	80.0	120.0	2.5
250×10+100×12	4000	AH32	90.0	150.0	4.0

MS = Mild Steel

AH32 = High Tensile Strength Steel (Yield Stress 32 kgf/mm²)

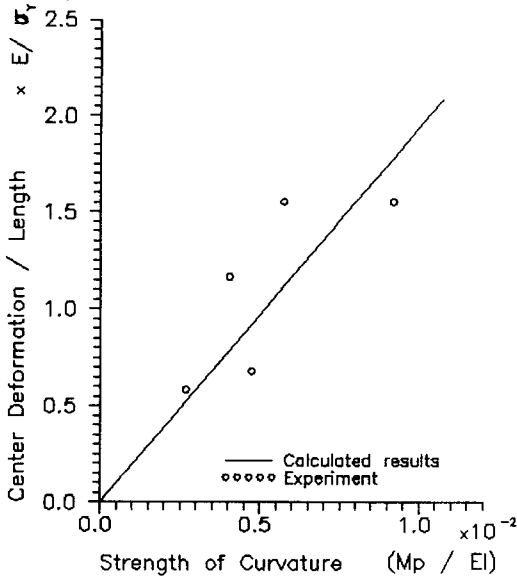


Fig. 5 Comparison of calculated heating deformations with experiments (for mild steel)

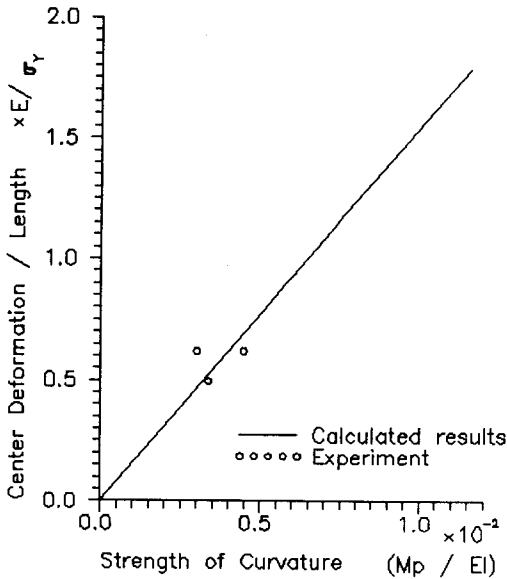


Fig. 6 Comparison of calculated heating deformations with experiments (for high tensile strength steel)

4. 용접 조립보의 생산 과정

4.1 변형 교정을 위한 역곡률의 계산

용접으로 발생한 변형을 교정하기 위해서는 곡직 가열을 실시해야 하는데, 가열 실시를 위해서는 사전에 용접 변형을 상쇄하기 위해서 필요한 역곡률을 알아야 한다. 가열 지점에서 용접 변형을 상쇄시키기 위해서는 가열 지점 상호 간의 변형에 미치는 영향을 파악해야 한다. 이것은 다음과 같은 단위 곡률에 의한 영향 계수를 도입함으로써 가능하다. 즉, x_i 에 단위 집중 곡률이 존재할 때, x_j 에서의 변형량은 Fig. 7을 참고로 다음과 같이 된다.

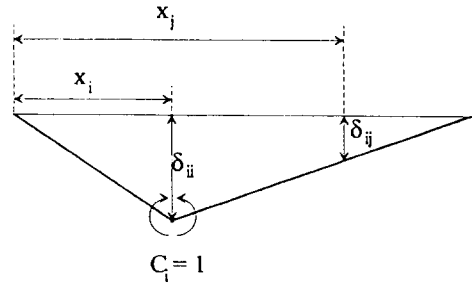


Fig. 7 Definition of influence coefficient

$$0 \leq x_j \leq x_i \text{ 인 경우, } d_{ij} = x_j \left(1 - \frac{x_i}{L}\right) \quad (10)$$

$$x_i \leq x_j \leq L \text{ 인 경우, } d_{ij} = x_i \left(1 - \frac{x_j}{L}\right) \quad (11)$$

여기서, d_{ij} = 영향 계수

가열 지점에서 용접 변형을 교정하기 위해 필요한 역곡률은 다음의 연립 방정식의 해를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$\{ \delta_i \} = [d_{ij}] \{ c_i \} \quad (12)$$

$$\{ c_i \} = [d_{ij}]^{-1} \{ \delta_i \} \quad (13)$$

여기서, $\{ \delta_i \}$ = 가열 지점에서의 변형량

{ c_i } = 가열 지점에서 변형을 상
쇄하기 위한 역곡률

용접에 의한 균일 곡률 발생시, 가열점에서 변형을 상쇄하기 위해서 요구되는 집중 곡률을 (13) 식에 의해 구해 보면 Fig. 8과 같은 결과가 얻어지고, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$c_i = \frac{1}{N_h + 1} \frac{L}{r} \quad (14)$$

여기서, N_h = 가열점의 수

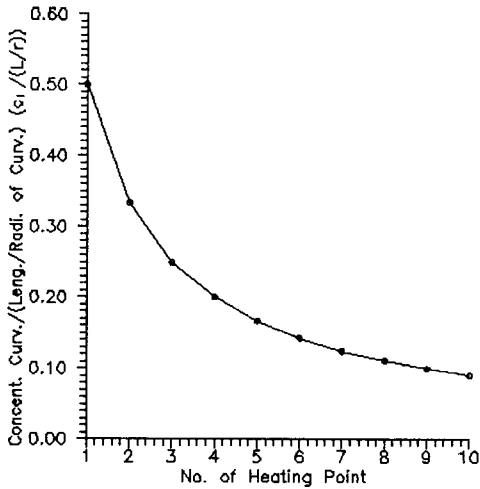


Fig. 8 Relation between concentrated curvatures and the number of heating points to cancel the deformation due to uniform curvature

4.2 요구되는 역곡률을 얻기 위한 가열 조건 계산

용접 변형을 교정하기 위해 요구되는 역곡률이 (13)식으로 부터 계산되면, 이 역곡률을 만들기 위해서 필요한 가열 조건을 계산해야 한다. 가열 지점에서 가열 영역의 폭 및 깊이는 (6)식과 (7)식에 기초한 다음의 방정식의 해로부터 구해 질 수 있다.

$$c_i = \frac{1}{EI} M_{ib}(H, B) \quad (15)$$

여기서,

$M_{ib}(H, B)$ = 가열 지점 i에서의 수축모멘트

H = 역삼각형인 가열영역의 깊이, Fig.4 참조

B = 역삼각형인 가열영역의 폭, Fig.4 참조

요구되는 역곡률을 산출하기 위한 가열 영역의 폭과 깊이의 조합을 계산한 결과는 Fig. 9과 같다. Fig. 9으로 부터 알 수 있듯이, 요구되는 역곡률을 산출하는 가열 영역의 폭과 깊이의 조합은 무수히 많다. 그러나 실제 곡직 가열 작업시에는 이들 결과 중에서 가열에 따른 비용이 최소가 되는 조합을 선택하는 것이 유리하다. 가열에 따른 비용을 대표할 수 있는 인자로는 가열 영역의 면적을 선택할 수 있는데, 가열 영역의 폭 변화에 따른 가열 면적의 변화는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에 따르면 가열 영역의 폭이 좁고, 이에 따라 가열 영역의 깊이가 클수록 가열 영역의 면적이 감소된다는 것을 알 수 있다. 이는 깊이의 증가에 따라 단면에서 변형을 저항하는 부분이 감소하기 때문이라 사료된다. 통상적으로는 조립보 단면의 중립축으로부터 먼 지점에 수축력을 많이 분포시키는 것이 역곡률 산출 측면에서 유리할 것으로 생각되나 깊이의 증가에 따라 변형을 저항하는 부재를 감소시킨다고 생각하면 본 연구의 결과가 물리적으로 설명될 수 있다.

4.3 용접 조립보 생산 과정의 역학적 시뮬레이션

용접 조립보의 생산 과정을 제어하기 위해서는 그 과정을 컴퓨터로 시뮬레이션하는 것이 필수적이다. 지금까지 제시한 용접 변형 추정 및 곡직 가열에 의한 역변형 추정 과정을 이용하여 용접 조립보의 생산 과정을 컴퓨터로 시뮬레이션할 수 있는 흐름도는 Fig. 11과 같다.

조립보의 단면 형상 및 길이는 강도 설계 관점에서 결정되고, 용접 전류, 용접 전압 및 속도는 용접기의 아크 특성, 요구되는 각장, 용접부의 강

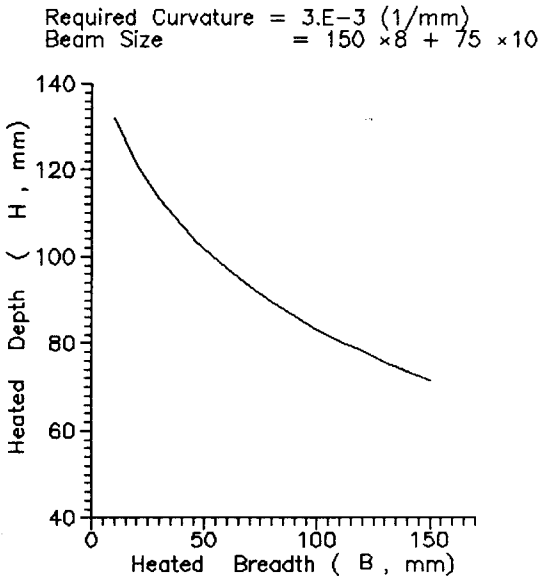


Fig. 9 Variation of heating conditions at constant curvature

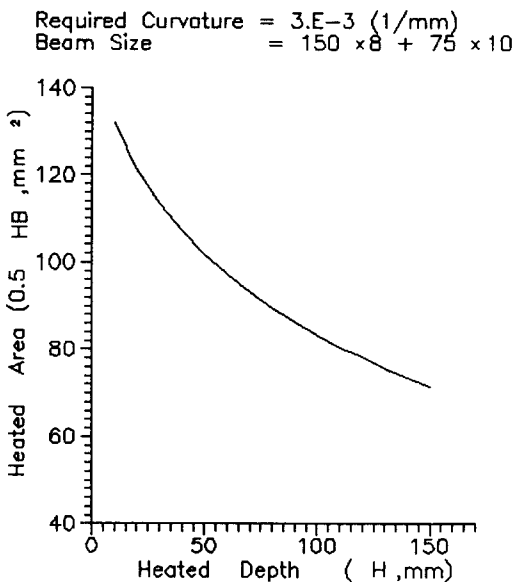


Fig. 10 Variation of heated area as functions of heated breadth at constant curvature

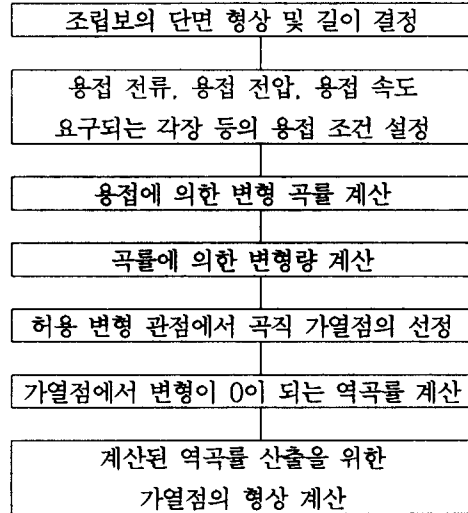


Fig. 11 Flow chart of computer simulation of fabrication process of welded built-up beams

도 확보 및 조선소의 관습 등에 의해 정해 진다. 조립보의 형상 및 용접 조건이 정해지면, 용접 변형 곡률 및 변형량이 계산된다. 다음으로는 조립 보 전 길이에 걸쳐 용접 변형량이 품질 및 허용 공차 오차의 관점에서 정해진 허용 변형량 이하가 되기 위해서 필요한 최소한의 가열 지점의 갯수를 정해야 하는데 다음 식으로 부터 계산될 수 있다.

$$N_h = \frac{L}{\sqrt{\frac{8\delta_a}{\frac{1}{r}}}} \quad (16)$$

여기서, N_h = 가열 지점의 수
 δ_a = 허용 변형량

가열 지점에서 용접 변형량이 상쇄되기 위한 역곡률을 (14)식으로 부터 계산하게 된다. 각 가열 지점에서 역곡률을 산출하기 위한 가열 영역의 형상은 (15)식으로 부터 계산된다.

용접 변형이 교정되는 과정을 그림으로 나타내 보면 Fig. 12와 같다.

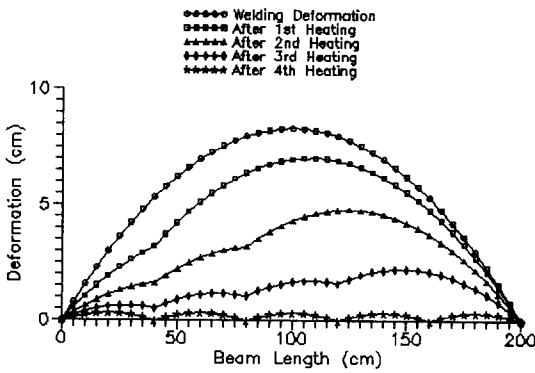


Fig. 12 Gradual straightening of the built-up beam

5. 결론

본 연구에서는 조립보의 용접 변형을 교정하기 위해 실시하는 곡직 과정을 이론적으로 해석하기 위해 간이 열탄소성 해석 기법을 제안하고 실험을 통해 그 유용성을 입증하였으며 본 방법을 토대로 조립보 생산 과정을 시뮬레이션할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 변형 교정을 위한 곡직 가열시의 종변형 해석을 위해, 간이 열탄소성 해석을 제시하고 실험을 통해 해석 결과의 정확성도 입증하였다. 탄소성 과정을 간단한 식으로 표현할 수 있으므로, 기존의 열탄소성 해석에 비해 극히 짧은 시간으로 변형 해석이 가능하다.

2) 본 연구에서는 간이 열탄소성 해석법에 기초하여 용접 조립보의 생산 과정을 시뮬레이션할 수 있는 알고리즘을 개발함으로써 경험에 의존하던 종래의 용접 조립보 생산 방법을 근본적으로 개혁함과 더불어 생산성 향상을 기할 수 있게 되었다.

3) 변형 교정 작업을 자동화하기 위해, 용접에 의한 종변형을 상쇄시킬 수 있는 역곡률 계산 방법을 제시하였다. 용접에 의한 균일 곡률 발생시,

가열점에서 변형을 상쇄하기 위해서 요구되는 집중 곡률을 계산해 보면, 균일 곡률 및 가열점의 수와 간단한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

4) 변형 교정을 위해 요구되는 역곡률을 산출할 수 있는 가열 방법을 간이 열탄소성 해석 기법의 결과 및 수치 해법을 통해 구할 수 있었다. 계산 결과를 통해, 요구되는 역곡률을 산출하기 위해서는 많은 가열 방법이 존재하지만, 가열 영역의 깊이를 증가시키는 작업 방법이 비용면에서 유리하다는 것이 밝혀 졌다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 '93 특정기초연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 동 재단에 감사를 표합니다. 또한 실험의 편의를 제공해 준 삼성중공업(주) 관계자께도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Moshaiiov, A. and Vorus, W. S., "The Mechanics of the Flame Bending Process: Theory and Applications", Jour. of Ship Research, Vol. 31, No. 4, 1987.
- [2] 신중계, "선상 가열에 의한 평판가공 Simulator 연구", 대한조선학회 논문집, 제29권, 제1호, 1992.
- [3] Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R. A., Okumoto, Y. and Kamichika, K., "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating (3rd Report) Relation between Heating Condition and Deformations", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, 1992 (in Japanese).
- [4] Nomoto, T., Ohmori, T., Satoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K. and Saitoh, M., "Development of Simulator for Plate Bending by Line-Heating", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168, 1990 (in Japanese).