

용접 각 변형량 해석해를 이용한 용접 공정변수 최적화에 관한 연구

이 세 환*

*한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

A Study on an Optimization of Welding Process Parameters by using an Analytic Solution for the Welding Angular Distortion

Se-Hwan Lee*

*Korea power Engineering Company, Yongin 449-713, Korea

Abstract

Welding distortion is a current issue in many industrial parts, especially for heavy industry such as shipbuilding, plant industry. The welding process has many processing parameters influencing welding angular distortion such as heat input power, welding speed, gas flow rate, plate thickness and the welded material properties, etc. In this work, the conventional local minimization concept was applied to find a set of optimum welding process parameters, consisted of welding speed, plate thickness and heat input, for a minimum angular distortion. An analytic solution for welding angular distortion, which is based on laminated plate theory, was also applied to investigate and optimize the welding process parameters. The optimized process parameters and the angular distortion for various parametric conditions could be easily found by using the local minimum concept.

* Corresponding author : sehlee@kopec.co.kr

(Received August 23, 2003)

Key Words : Angular distortion, Optimization, Welding process parameters, Analytic solution, Local minimum

1. 서 론

용접 공정은 국부적인 가열로 인한 불균일한 온도 분포의 이력을 초래하여 변형과 잔류응력을 필수적으로 수반한다. 용접 변형은 잔류응력과 서로 상반관계를 가지고 존재하고 있으며, 구조물의 조립 공정에 시간적, 경제적인 손실을 가져오게 된다. 최근 이러한 잔류응력과 변형에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 변형 문제는 중공업 분야에서 조립공정의 진행에 있어 중요한 관심거리로 대두되고 있다. 궁극적으로, 용접 변형을 최소화 하면서 필요로 하는 강도와 조건을 만족하는 최적해를 찾는 방법을 필요로 하게 되었다.

용접 공정에 있어서 최적화 방법의 적용 사례는 많지 않으며 용접 변형을 최소화하는 조건을 찾는 방법은 거의 없는 실정이다. Galopin¹⁾ 등은 용접 비드의 형상과

용접 조건과의 상관관계를 실험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 통계적 회귀분석 방법을 이용하여 각 계수를 구하고 각 비드 형상을 정의하는 식을 구성하여 최적화에 이용하였다. 이러한 방법은 많은 수의 실험을 필요로 하며 통계적인 방법에서 생긴 오차를 포함하게 되므로 불합리하다.

용접 시 발생하는 변형량을 예측하는 방법은 수치적인 방법(numerical method)^{2,3)}을 이용하거나 해석해(analytical solution)를 이용하는 방법 그리고 실험에 의해 직접 측정하는 방법이 있다. 실험을 이용하여 용접 변형량과 각 공정 변수와의 관계를 구하는 방법은, 용접 공정의 특성상 많은 공정 변수를 포함하므로 보다 실제적인 관계를 구하는 것은 한계가 있다. 최근 컴퓨터 기술의 발달과 함께 유한요소법(finite element method)이나 경계요소법(boundary element method) 등의 수치해석적인 방법에 의하여 용접 변형량을 예측

하는 방법이 다수 개발되고 널리 사용되고 있다. 이러한 수치해석 방법은 실험적 방법에 비해 경제적인 비용을 절감하고 다양한 경우에 대한 예측이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 정확한 변형량 예측을 위해서는 3차원 해석 및 온도분포해석과 열/탄소성 해석 등을 모두 수행하여야하므로 막대한 계산을 필요로 하게 되는 단점을 가진다.

그러므로 해석적인 방법에 의해 보다 정확한 용접 변형량을 예측할 수 있다면 아주 효과적일 것이다. 해석적인 방법은 이와 같은 사고에 기초 하여 발달되었으며 최근 고전적인 탄성 이론에 바탕을 둔 고유변형률 (inherent strain) 개념을 사용한 방법^{4,5)} 및 수치해석적인 방법과 수학적 해석 방법을 동시에 이용하는 방법⁶⁾들이 개발되었다.

본 연구에서는 최종 변형량을 수치해석으로 구하지 않고 해석적 방법으로 구한 결과로부터 얻어진 상태방정식을 직접 최적화 방법에 이용하여 용접 공정변수의 최적조건을 구하였다. Son⁵⁾ 등은 용접 후 남는 변형량 중에서 판 두께 방향으로의 불균일 온도분포로 인한 각 변형량을 고유변형률을 포함하는 적층판 이론(laminated plate theory)을 이용하여 계산하였다. 이러한 용접 각 변형량 결과식에는 주요 용접 공정변수인 용접 속도, 판 두께, 입력량 등을 포함하고 있으며, 이들 세 가지를 제어 변수로 최적화에 이용하였다. 결과적인 최적화 값은 각각의 변수가 일정한 구간 내에서 변화하는 경우의 해인 국소 최적해(local minimum)를 계산하였으며, 적용한 최적화 방법은 용접 각 변형량 외에 다른 조건은 배제한 비구속 최적화(unconstrained minimization) 방법을 사용하였다. 또한 최적 조건에 수렴하기 위한 탐색 방법(direction search method)은 Fletcher-Reeves방법과 BFGS방법을 사용하여 해의 수렴성과 결과를 비교하였다. 결과적인 최적화 해는 수렴성과 정확성이 보다 높게 나타난 Fletcher-Reeves 방법을 사용하여 각 조건에 대한 최적화 해를 구하였다.

2. 용접 각 변형량 예측

용접에 의해 발생하는 각 변형의 예측 방법은 실험에 의한 결과를 이용하는 방법과 앞서 설명한 수치해석에 의한 방법으로 나눌 수 있으며, 최근에는 컴퓨터 기술의 발달과 함께 수치해석적 예측 방법이 널리 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 최적화 계산 과정에 바로 이용할 수 있는 해석적인 방법에 의한 예측 방법을 이용하고자 한다. 본 해석에 사용된 해석적 방법에 의한 각 변형량 예측 방법⁵⁾을 간단히 소개하면 다음과 같다.

2.1 적층판 이론을 이용한 변형모델

용접 각 변형량은 두께방향으로의 불균일한 온도분포로 발생하는 소성변형의 결과이다. 따라서 소성영역을 적절하게 예측하고 상응하는 변형량을 계산하는 것이 중요하다. 소성영역의 예측은 이론해로부터 온도분포를 예측하는 방법⁷⁾을 사용하여 한계온도 이상의 온도이력을 갖는 영역을 정하고 등가 열변형량을 예측하였다. 이러한 변형율을 등방성(isotropic)인 선형탄성체로 이루어진 일정 두께 h 를 가지며 무한평판인 Fig. 1과 같은 모델로 가정하였다. 그림에서 $\epsilon^*(x_3)$ 은 고유변형률(eigenstrain)을 나타내며 모델은 이러한 고유변형률을 가지는 적층판으로 가정된다. 타원형의 계재물과 주변의 적층판들이 균질한 재료라고 가정하면 x_3 방향으로의 변위 u_3 는 결과적으로 다음 (1)식과 같이 계산된다^{8,9)}.

$$u_3 = -\frac{1}{2}a_2(2|x_2| - a_2)(\kappa_{11}^* + \nu\kappa_{22}^*) \quad (1)$$

위 식에서 변위의 함수로 나타난 곡률(κ^*)성분은 계재물이 가지고 있는 고유변형률이 판의 두께방향의 함수이므로 위 식과 같이 나타난다. 위 식에 용접시 발생하는 수축 변형률이 한계온도 영역까지만 존재한다고 가정하고 그때의 고유변형률을 갖는 계재물의 형상이 Fig. 2와 같을 때, 즉 고유변형률을 가지는 계재물이 한쪽으로 치우쳐 존재할 때를 가정하여 고유곡률값은 다음과 같다.

$$\kappa^* = \frac{C_{11} - C_{12}}{D_{11} + D_{12}} \int_{h^{(2)} - h^0}^{h^{(3)} + h^{(2)} - h^0} \epsilon^* x_3 dx_3 \quad (2)$$

여기서, 각 외부강성행렬 성분은 $C_{11} = E/(1 - \nu^2)$,

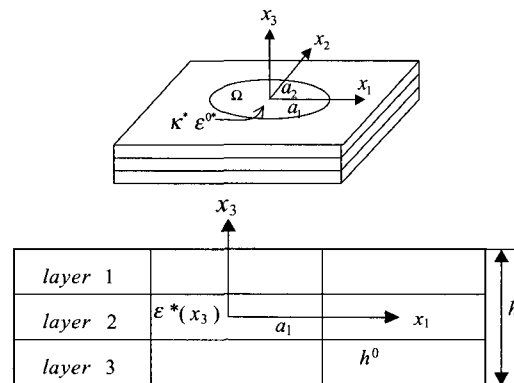


Fig. 1 Infinite plate containing an elliptical cylindrical inclusion with an eigenstrain

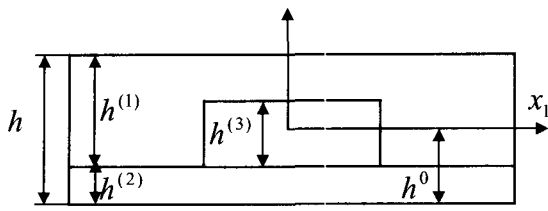


Fig. 2 Shape of inclusion in one lamina

$C_{12} = \nu E / (1 - \nu^2)$ 이고 굽힘강성행렬 성분은 다음과 같다.

$$D_{ij} = \int_{-h^0}^{h^0} C_{ij} x_3^2 dx_3, \quad (ij = 11, 12) \quad (3)$$

2.2 용접부 각 변형량 예측식

온도분포 이론식으로부터 결정된 소성영역의 크기를 식(1)에 대입하여 각 변형량을 예측하였다. 각 변형량 예측 계산을 용이하게 하기 위하여 Fig. 3과같이 소성영역의 형상을 가정하였다⁵⁾. 즉, 열전달 방정식으로부터 얻은 반원형의 영역(Fig.3 (a))을 동일 면적의 직사각형(Fig.3(b))으로 소성영역의 영역을 결정하였다. 결과적으로 식(2)의 고유곡률은 아래 식과 같다.

$$\kappa^* = \frac{6(1-\nu)}{h^3(1+\nu)} r_p (2h^0 - r_p) \varepsilon^* \quad (4)$$

위 식(4)를 변위식(1)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 재료물성치, 판 두께와 입열량의 함수로 구성된 최종 변위식을 얻을 수 있다.

$$u_3 = \frac{3\alpha q(1-\nu)(T_m - T_0)}{8\rho c \nu e h^3(T_0 - T_p)} \left[h - \sqrt{\frac{2q}{\pi \rho c \nu e (T_p - T_0)}} \right]$$

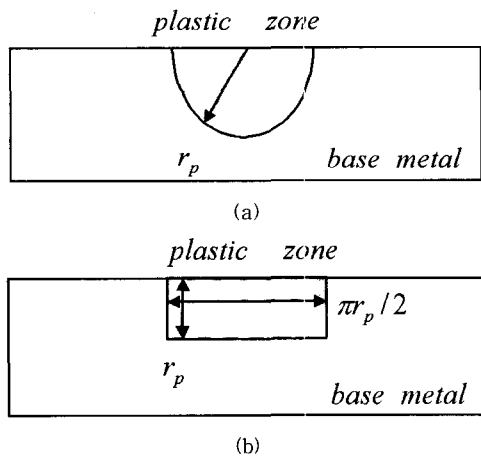


Fig. 3 Idealization of plastic zone shape

$$= \left[\sqrt{\frac{2q\pi}{\rho c \nu e (T_p - T_0)}} - 8|x_2| \right] \quad (5)$$

여기서, u_3 는 각 변형량, α 는 700 °C에서의 열팽창 계수, ν 는 포아송비, T_p 는 소성영역이 발생하는 한계온도(700 °C), q 는 입열량(ηVI), T_m 은 모재 용융온도, T_0 는 대기온도, ρ 는 밀도, c 는 비열, h 는 판 두께, e 는 자연대수값(2.718)이며 x_2 는 각 변형량 측정/계산점의 위치이며 본 연구에서는 일정위치 100 mm에서의 각 변형량으로 정하여 결과를 나타내기로 한다. 위의 식에서 포함된 변수를 계산에 편리하도록 서로 정리하면 다음 (6)식과 같이 나타나고, 입열량 q 를 용접속도 v 로 나누면 단위길이 당 열의 입력(net heat input)으로 표현되고 이를 $Q(=q/v)$ 라 정의하였다.

$$u_{3m} = \frac{3\alpha L(1-\nu)(T_m - T_0)}{8h^3(T_0 - T_p)} \left[h - \sqrt{\frac{2L}{\pi(T_p - T_0)}} \right] \left[\sqrt{\frac{2\pi L}{(T_p - T_0)}} - 8|x_2| \right] \quad (6)$$

여기서, $L=Q/\rho c e$ 이며 $Q=q/v$ (J/mm) 로 정의된다.

3. 최적화 과정

최적화는 위 결과식 (5)와(6)를 이용하여 각각 따로 계산에 이용하였으며 (5)식은 용접 입열량(q)과 속도 성분(v)을 구분하여 각각을 공정변수로 두고 계산하였으며, (6)식은 입열량과 속도 성분을 하나의 변수로 보고 판 두께(h)와 단위 길이 당 입열량(Q)을 변수로 하여 계산하였다. 결과적으로 사용된 주요 공정변수(설계변수)는 용접 속도(v), 용접 입열량(q)와 판 두께(h)로 하였다. 모든 계산식에 사용된 재료는 AISI 1042로 계산에 필요한 물성치는 Table 1 나타내었으며, 그 물성치는 공학적 측면에서 강성이 거의 없다고 가정할 수 있는 온도인 700 °C의 값을 사용하였다¹⁰⁾.

최적화에 사용된 목적함수는 위 결과식(5)와(6)의 각 변형량식을 사용하였으며 결과적으로 주어진 공정변수의 범위 내에서 각 변형량을 최소로 하는 공정변수를 찾는 것이 목적이다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

Table 1 Material properties of AISI 1042 at the critical temperature 700°C

Material property	Value
Density	7.844 Mg/m ³
Thermal expansion coefficient	17.6×10 ⁻⁶
Specific heat	846 J/kg°k
Melting temperature	1530 °C

Minimize: $F(X) = u_3$ or u_{3m} Objective Function
 $X = v, h, q$ and Q Design Variables
 Subject to: $X_i^L < X_i < X_i^U, i = 1, N$ Side Constraints
 (7)

위 (7)식의 목적함수(objective function)를 최소화 하는, 즉 주어진 일정 구간 내에서 각 변형량을 최소화 하는 국소 최소(local minimum)값을 얻는 문제로 정의 하였다. 이때 식(5)의 경우 각 변형량에 영향을 주는 공정변수, 즉 최적 조건을 만족하는 설계변수(design variable) X 값은 각 적용 식(5)와(6)에 대해 각각의 v, h, q 그리고 Q 를 얻을 수 있다. 그리고 각 설계변수의 구간은 하한 경계값(lower bound)과 상한 경계값(upper bound)을 임의로 정하여 입력하였다. 식(5)를 이용하는 경우의 계산은 세 변수(v, h, q) 모두를 임의 구간 값에서 모두 비교하는 방법과 한 가지 변수를 일정한 값으로 고정하고 나머지 두 공정변수를 구간 값을 주어 계산하는 방법을 사용하여 각 경우의 결과를 비교하였다.

유사하게 (6)식의 각 변형량 식을 이용한 경우는 공정변수를 단위 길이 당 입열량(Q)와 판 두께(h)의 두 가지 구간 경계조건 내에서 최소의 각 변형량을 만족하는 각 공정변수의 최적 조건을 구하였다. 또한 본 문제는 비구속 최적화 문제로 위에서 언급한 경계값 조건 외의 제한 조건은 없다. 위의 경계값 조건의 초기값은 해를 갖는 조건을 만족하는 구간을 정하여 구간내의 임의의 값으로 정하여 입력하였다.

최적화 계산에 사용된 방법은 비구속 최적화(unconstrained minimization)로 문제로 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)의 방법과 수치 계산시 저장 공간을 줄일 수 있는 Fletcher-Reeves의 켈레경사도법(conjugate gradient method)를 사용하여 수렴성을 비교하였다^{11,12)}. 두 가지 계산 방법을 비교한 결과 보다 Fletcher-Reeves 방법이 보다 빠른 수렴성과 정확한 해를 가짐을 알 수 있었고 최적화 결과에서는 그 계산 결과를 보여주기로 한다. 본 문제에 사용된 계산은 최적화 상용 프로그램인 DOT(Design optimization tool)를 사용하였으며 그 결과를 확인하기 위해 Matlab 프로그램의 최적화 툴을 이용하여 비교한 결과 큰 차이가 없음을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

본 최적화 문제에서 구한 결과는 공정변수의 임의 구간에서 각 변형량의 최소 값을 구하고 동시에 공정변수 값을 구하였다. Table 2에는 결과식 (5)와 (6)을 각각 적용한 경우를 Case 1과 Case 2로 크게 구분하였고, Case 1의 경우는 세 가지 변수를 모두 일정 구간에서 변화시켜 해를 구한 G1 및 G2 조건, 용접 속도를 상수 값으로 주고 계산한 경우 그리고 판 두께를 상수 값으로 계산한 경우로 나누어 계산하였다. Case 2의 경우는 판 두께와 단위 길이당 입열량 조건을 변수로 한 각 경우에 대해 결과를 비교하였다. 또한 Table 2에 각 계산에 사용된 변수의 국소 구간 값을 표시하였다.

Table 2 Data input range of process parameters for variable cases

Case 1	Range of processing variables		
	Velocity(v) (mm/s)	Thickness(h) (mm)	Heat input(q) (W)
G1	1-20	5-30	800-3000
G2	1-50	5-30	800-3000
v4	4	1-100	200-3000
v10	10	1-100	200-3000
v50	50	1-100	200-3000
v100	100	1-100	200-3000
h10	1-10	10	200-3000
h30	1-10	30	200-3000
h50	1-10	50	200-3000
Case 2	Thickness(h) (mm)	Net heat input(Q=q/v) (J/mm)	
Q1	10-40	1000-3000	
Q2	10-40	1000-4000	

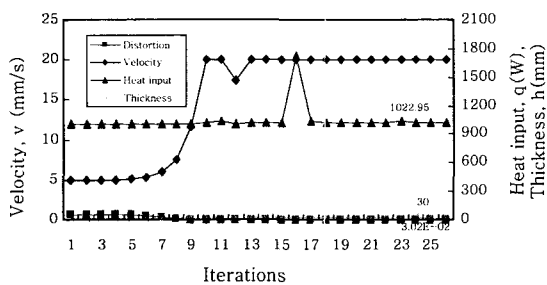
4.1 용접 속도, 판 두께 및 입열량 변수 경우

Fig. 4(a)와 4(b)는 Table 2의 각 조건에서 G1과 G2의 최적해 수렴 과정 및 그 결과를 각각 나타내고 있다. 용접 속도 구간을 1-20 mm/sec인 조건 G1의 경우에는 속도 구간을 1-50 mm/sec로 한 구간 G2에서 보다 최소 각 변형량은 두 배 이상 크게 나타났다. 그러나 그 크기는 10^{-2} mm 단위로 아주 적게 나타남을 알 수 있었다. 또한 입열량 구간에서의 초기값 1000 W 부근에서의 결과를 나타냈으며 초기치 값의 변화에 대해 민감하게 변화하였다. 판 두께의 최적 조건은 계산 범위 내에서 가장 큰 30 mm로 나타났으며 이러한 결과는 두께가 두꺼울수록 용접 각 변형량이 적은 결과로 판단된다. 결과적으로 판 두께의 경우는 주어진 구간에서 용접 각 변형량에 대해 역비례의 선형적인 함수 관계에 있음을 알 수 있다. 이와 유사하게 주어진 구간에 대한 속도 변수에 대한 최적 조건은 각각의 상한 경계값인 20 mm/sec 와 50 mm/sec로 나타났으며 속도가 빠를수록 각 변형량이 적은 결과를 잘 반영하고 있다.

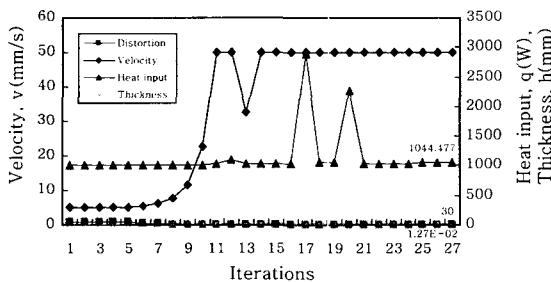
4.2 일정 용접 속도시 판 두께 및 입열량 변수 경우

용접 속도를 각각 4, 10, 50, 100 mm/sec로 일정하게 하고 나머지 두 변수인 판 두께와 용접 입열량을 주어진 구간에서 변화시킨 최적화 결과는 Fig. 5-8에서 보여주고 있다. 상대적으로 저속도 구간인 Fig.5-6에서는 용접 속도가 커질수록 입열량은 작아져 최소 각

변형량의 크기는 줄어들고 있으며, 판 두께의 변화는 초기에 주어진 구간 상한값인 100 mm로 수렴하였다. 그러나 속도가 50 mm/sec, 100 mm/sec조건에서는 속도가 빨라지는 조건에서 입열량 최적값이 200 W에서 208 W로 오히려 증가하면서 판 두께는 감소함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 상대적으로 용접 속도가 빨라지면 판 두께와 입열량 변수가 각 변형량에 대한 선형함수만으로 표현되지 않음을 의미한다. 또한 일정



(a) G1 case



(b) G2 case

Fig. 4 Result of optimization for cases of G1, G2

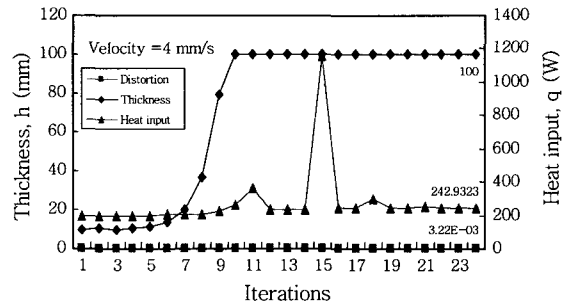


Fig. 5 Result of optimization for a case of v4

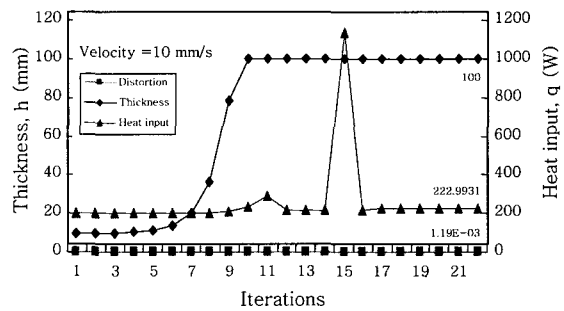


Fig. 6 Result of optimization for a case of v10

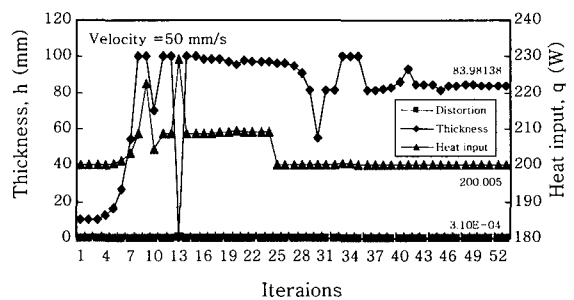


Fig. 7 Result of optimization for a case of v50

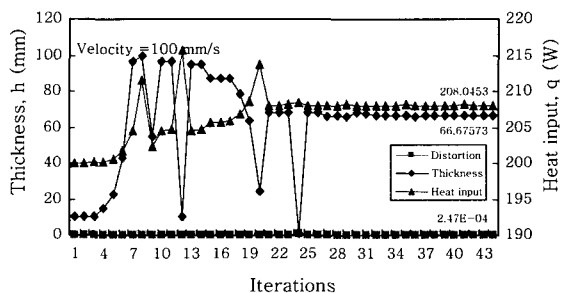


Fig. 8 Result of optimization for a case of v100

속도조건에서 판 두께와 입열량 관계에서 최적의 조건이 존재하고 있음을 나타낸다. 위와 같은 결과는 참고 문헌⁵⁾에 나타난 판 두께의 변화에 따른 각 변형량 변화를 보면 잘 알 수 있다.

4.3 일정 판 두께시 용접 속도 및 입열량 변수 경우

Fig. 9-11은 Case 1의 h10, h30과 h50의 결과를 보여주고 있다. 여기서는 앞 장의 속도 상수 조건과 마찬가지로 판 두께를 상수로 고정하고 나머지 용접속도와 입열량 조건을 일정 구간에서 변화시킨 계산 결과이다. 주어진 구간 내에서 두께가 일정한 경우는 용접속도는 세 가지 조건 모두 상한 경계값인 10 mm/sec에 수렴하면서 최소 각 변형량을 값을 가졌다. 입열량 조건은 판 두께가 증가함에 따라 선형적으로 비례하여 감소하면서 최소 각 변형량에 접근함을 알 수 있었다. 결과로부터 주어진 구간에서 각 변형량에 대한 용접 속도

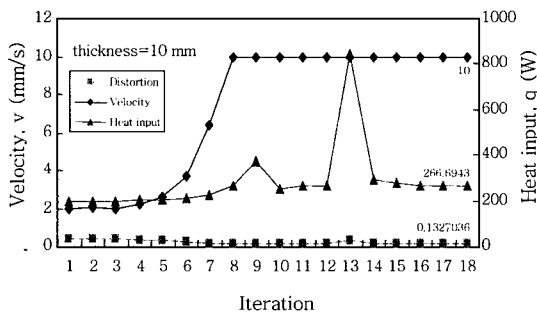


Fig. 9 Result of optimization for a case of h10

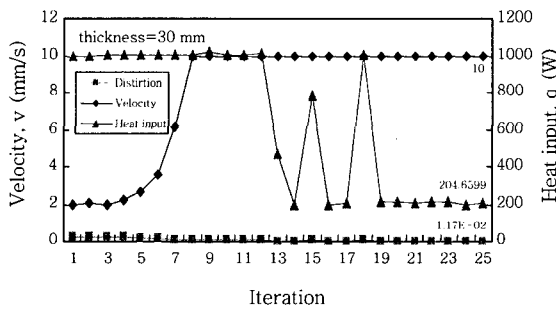


Fig. 10 Result of optimization for a case of h30

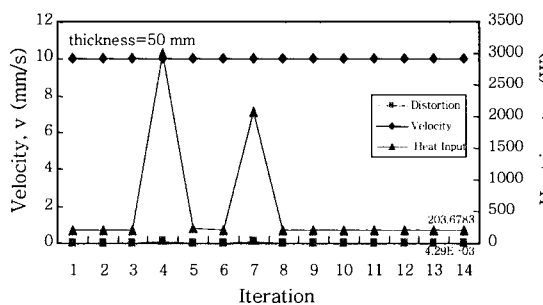


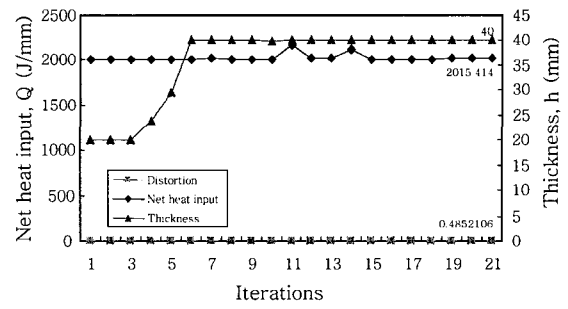
Fig. 11 Result of optimization for a case of h50

와 입열량 관계는 선형 관계에 있음을 알 수 있고 입열량을 속도로 나누어주면 두 변수는 하나의 변수로 만들어지며 다음 장에서 그 계산 결과를 고찰하였다.

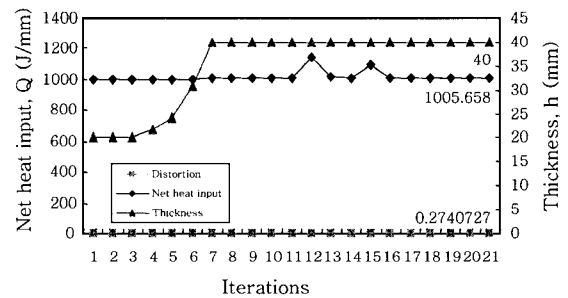
4.4 판 두께 및 단위 길이 당 입열량 변수 경우

단위 길이 당 입열량 변수와 판 두께를 공정변수로 하여 각 변형량을 나타낸 식(6)을 이용한 Ccase 2의 최적화 결과는 Fig. 12(a)와 (b)에 나타내고 있다. 여기서는 단위 길이 당 입열량 구간을 각각 3000과 4000 J/mm로 변화시킨 결과이다. 두 경우 모두 판 두께는 상한 경계값인 40 mm에 수렴하였으며, Fig. 13에 나타난 것처럼 상대적으로 높은 최소 각 변형량 결과를 보였다. 이러한 이유는 주어진 입열량 구간 경계값이 상대적으로 크게 주어진 결과로 판단된다. 또한 Fig. 12(a)의 결과에서 단위 길이 당 입열량 최적값은 약 2000 J/mm 그때의 최소 각 변형량은 0.485 mm 이고 Fig. 12(b)의 입열량 최적값이 약 1000 J/mm 일 때의 각 변형량 0.275 mm로 동일 판 두께 조건의 경우에 각 변형량은 입열량에 거의 비례하여 나타남을 알 수 있다.

각 적용조건에 대한 최적화 결과 각 변형량 분포를 보면 Fig. 13과 같다. 용접 속도를 상수 값으로 주어진 경우의 각 변형량 최적화 결과가 주어진 구간 내에서 가장 적은 각 변형량을 가짐을 알 수 있다. 즉, 본 연구 결과를 이용하면 용접부 설계 과정에서 먼저 용접 속도가 정해지면 각 변형량을 최소화하는 입열량 조건



(a) Q1 case



(b) Q2 case

Fig. 12 Result of optimization for cases of Q1, Q2

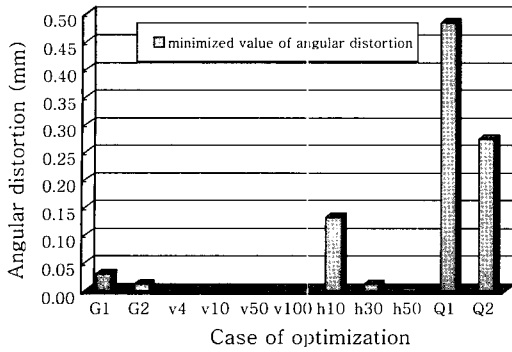


Fig. 13 Minimized angular distortions for various cases

및 판 두께를 찾는 것이 용이함을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 단위 길이 당 입열량 조건과 일정 구간의 판 두께를 설계변수로 계산한 결과의 최적 각 변형량 값이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 먼저 판 두께의 구간이 큰 원인이 있겠으나 판 두께나 입열량 조건이 먼저 결정된 경우에는 본 연구의 최적화 방법을 이용하면 보다 용이하게 나머지 공정 변수를 선택할 수 있겠다.

5. 결 론

적층판 이론을 이용한 해석적 방법에 의하여 용접 각 변형량을 예측한 변위식을 최적화 과정에 이용하였다. 각 변형량을 최소화 하는 주요 공정변수인 용접속도, 판 두께, 그리고 입열량의 최적 조건을 최적화 프로그래밍 기법을 이용하여 구하였다. Son⁵⁾ 등의 계산 결과로부터 주어진 입열량 및 용접속도 조건에서 판 두께의 변화에 대해 각 변형량이 비선형적으로 변화함을 알 수 있으며, 이러한 결과는 본 연구의 최적화 과정에서 적용한 각 조건내에서 최소의 각 변형량을 가지는 적절한 공정변수를 가짐을 나타낸다. 본 연구에서는, 이러한 조건을 찾기 위해 먼저 각 공정변수 조건에 용접 조건을 만족하는 각 공정변수의 국소구간을 나누어 비구속 국소 최적화 문제로 하였다. 속도, 판 두께 및 입열량의 세 가지 변수를 모두 구간 변수로 취하여 최적화한 결과 주어진 구간에서 용접 속도는 느릴수록 판 두께는 주어진 구간에서 상한 경계값에 수렴하는 결과로 나타났으며, 입열량은 이 두 가지 조건을 만족하는 적절한 최적 조건을 가짐을 알 수 있었다. 일정 용접 속도 조건에서는 입열량과 판 두께 사이에 각 변형을 최소화 하는 최적의 조건이 존재함을 알 수 있었다. 그러나 상한 및 하한 경계값에 수렴하는 최적 조건 결과와 초기

값에 민감하게 의존하여 해를 갖는 국소 최적 결과로부터 비구속 경계조건의 한계를 나타냈다. 그러므로 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 초기 조건 외에 다른 제한 조건을 주는 구속조건이 필요함을 알 수 있었다. 그러나 용접 공정의 특성상 주요 공정변수인 입열량 조건이나 용접속도 및 용접재의 판 두께 등은 일반적으로 많은 제약을 가진다. 그러므로 주요 조건들 중 하나 이상의 조건이 주어진 경우, 본 연구 결과를 이용하면 쉽게 입열량 조건이나 용접속도 조건을 찾을 수 있는 방법이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. M. Galopin and J. P. Boillot: Arc welding procedure optimization, Recent Trends in Welding Science and Technology, Metal Park, Ohio, ASM International, (1990), 587-591
2. Y. Ueda and T. Yamakawa: Analysis of thermal elastic plastic behavior of metals during welding by finite element analysis method, Journal of the Japan Welding Society, **42-6**, (1973), 567-577
3. K. Masubuchi: Analysis of welded structures, Pergamon Press, (1980), 235-327
4. S. I. Seo and C. D. Jang: A Study on the Prediction of Deformations of Welded Structures, Journal of KWS, **15-5** (1997), 64-73 (in Korean)
5. K. J. Son, Y. S. Yang and H. G. Beom: A Study on the Angular Distortion in Weldments using the Laminated Plate Theory, Science and Technology of Welding and Joining, **5** (2000), 245-249
6. S. I. Seo and C. D. Jang: A Study on the Prediction of Deformations of Welded Ship Structures, Journal of Ship Production, **15-2** (1999), 73-81
7. D. Rosenthal: The theory of moving source of heat and its application to metal treatment, Transaction of ASME, (1945), 849-866
8. H. G. Beom: The elastic field of an elliptic cylindrical inclusion in a laminate with multiple isotropic layers, ASME, Journal of Applied Mechanics, **66-1**, (1999), 165-171
9. H. G. Beom: Analysis of a plate containing an elliptic inclusion with eigencurvatures, Archive of Applied Mechanics, **68-6**, (1998), 422-432
10. C. D. Jang : A study on the prediction of deformations of plates due to line heating using a simplified thermal elasto-plastic analysis method, Journal of ship production, **13-1**, (1997), 22-27
11. N.G. Vanderplaats: Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill, Co. (1984)
12. DOT USERS MANUAL, Version 5.0, Vanderplaats Research & Development, Inc. (1999)