

용접 비드 형상에 대한 용접공정 변수의 민감도 해석에 관한 연구

A study on the sensitivity analysis of welding process parameters on weld bead geometry

이세환*(전남대 대학원 기계공학과), 양영수(전남대 기계공학과)

ABSTRACT

The welding technology and qualities are developed significantly, in recent years, in the use of automated processing technology and welding robot systems. But, these automated welding technologies have many difficulties for finding the optimal welding parameter conditions. Because of the lack of mathematical model for determination of optimal welding process parameters.

In this study, the sensitivity analysis of the empirical equations for finding weld bead width, height and penetration depth by using the published formulae. The selected major welding process parameters effected to weld bead geometries are the welding speed, current, voltage and weld wire diameter.

1. 서론

최근의 용접 기술은 컴퓨터와 자동화 기술의 발달에 힘입어 상당한 발전을 가져왔다. 특히 용접 로봇을 이용한 용접 자동화 공정의 응용은 요즈음 산업현장에서 널리 보급되고 있다. 그런데 완전한 용접 자동화 과정을 위해서는 아직도 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점 중에서 가장 중요한 한 가지는 얻고자하는 최적의 용접 결과를 미리

예측하고 적절한 용접 공정 변수를 선택하는데 있다.

아크를 이용한 용접공정의 최적화는, 지금까지 여러 가지 방법에 의해 연구되어 왔다. 그 중에서도 용접시 강도나 적절한 용접성을 평가하는 방법으로 용접비드(bead)의 크기나 형상을 많이 선택하고 있다. 그러나 용접비드 형상에 관한 용접공정 변수의 영향은 많은 변수들을 내포하고 있기 때문에 그 관계를 명확하게 규명하기란 어려운 것이 사실이다. 1972년 Jones 등은[1], 실험적 결과에 근거한 방법으로 소위 "tolerance box approach"를 제시하였다. 이 방법은 부분적으로 상당한 성공을 거두었지만 몇 가지 중요한 공정 변수만을 가지고 접근하려고 하여도 상당히 복잡한 과정을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 방법을 근거로, McGlone과 Chadwick[2,3]은 서브머지드(submerged) 아크용접의 용접비드 형상과 용접 변수와의 관계를 수학적 해석 방법에 의해 알아내고자 하였다. 또한 필렛 형상의 GMA 용접시 용접공정 변수와 용접비드 형상과의 관계에 관한 연구가 Doherty[4]등에 의하여 진행되었다.

최근에 용입 깊이(penetration)에 관한 용접 공정 변수의 변화에 관한 연구를 유한요소해석(finite element method)방법을 이용하여 알아내고자 하는 방법도 시도되고 있다 [7]. 하지만 이러한 방법은 한 가지의 공정

변수를 다양하게 변화시켜 전체적인 영향을 판단하기 어려운 점을 가지고 있을 뿐 아니라 수치해석 방법의 한계성을 극복하지 못하는 점을 가지고 있다.

최근에는 컴퓨터의 대용량화와 중앙처리장치(CPU)의 발달로 실험을 기초로 한 통계적 방법에 의해 적절한 용접공정 변수를 선택하고 이들의 상관 관계를 수식화하는 방법이 연구되고 있다. Chandell[5]은 GMA 용접을 이용한 용접공정 변수들과 용접비드 형상과의 관계를 수식화하는 방법을 처음으로 시도하였다. 그 후 Yang[6]등은 SAW의 용접 전극의 극성, 전극의 직경, 용접전류, 아크 전압, 용접속도, 용접기 파워 소스와 flux의 염기도 등을 변수로 하여 용접부의 면적을 알아내고자 하였다. Kim[8]등은 Chandell의 연구 결과를 기초로 하여 그 결과의 검증과 통계처리를 이용한 새로운 용접비드 형상에 관한 수식을 만들었다.

앞에서도 언급하였지만 로봇을 이용한 효과적인 용접 비드 형상의 제어를 위해서는 용접공정 변수들을 포함하는 수학적 모델의 개발이 필수적이라 할 것이다. 또한 이러한 수학적 모델은 반드시 재료나 용접의 위치 등에 의해서도 광범위하게 만족하는 수식이어야 할 것이다.

본 연구에서는 위에서 언급한 검증된 기존 수식을 바탕으로 하여 용접 공정변수들이 용접 비드의 형상에 서로 어느 정도의 상관 관계를 가지면서 영향을 주는지를 간단한 수학적 방법을 이용하여 알아보고자 하였다. 기존의 수식에 사용되었던 용접 방법은 GMAW를 사용하였으며, 비드 형상에 영향을 미치는 용접 공정변수로는 용접 전류, 전압, 용접 속도 그리고 용접 와이어의 직경으로 하였다. 또한 용접 비드 형상 인자로는 비드 폭(bead width), 비드 높이(bead height), 용입 비드 깊이(bead penetration)의 세 가지로 하였다.

초기의 민감도(sensitivity)의 응용 범위는 대부분 구조물의 최적 설계나 제어 시스템의 수학적 모델에서 다양한 파라미터의 효과를 평가하기 위해 주로 사용되어왔다[8]. 그런데

최근 근사 해석, 해석적(analytic) 모델의 개선 그리고 설계 경향의 평가 등에 민감도 해석을 전개하고 응용하고 있다. 보다 최근에는 그 응용 범위가 확대되어 생리학, 열역학, 물리화학 그리고 공기역학과 같은 분야까지 확대되고 있다. 이러한 분야의 연구는 해석적 모델의 변수의 변화를 평가하고 변수 변화에 민감하지 않은 설계를 하기 위해 민감도 방법을 이용하고 있다.

위 내용과 마찬가지로, 본 연구에 이용된 민감도 개념은 용접 비드 형상에 영향을 미치는 몇 가지 용접공정 변수들의 영향을 알아보는 것을 목적으로 하였다. 민감도 계산은 기존의 통계 결과식을 각 변수에 대하여 직접 미분하는 방식을 선택하였다.

2. 용접 조건 및 수학적 모델

2.1 용접 조건

용접 비드 형상에 주로 영향을 주는 용접공 변수는 용접 와이어의 직경, 용접 전압, 전류 그리고 용접 속도로 결정하고 실험을 하였다.

실험에 사용된 용접공정 변수의 적용은 용접 와이어 1.2mm 와 1.6mm, 용접 속도 조건은 세 가지로 25, 33, 41mm/min, 용접 전류는 180, 260, 360A를 각각 적용하였으며 용접 전압은 20, 25, 30V를 선택하였다. 용접 실험에 사용된 용접기는 GMAW를 사용하였고, 로봇 제어기와 연결하여 토치의 위치나 이동을 지시하도록 하였다. 또한 사용된 용접 전극 와이어는 1.2, 1.6mm의 두 가지를 선택하여 사용하였다. 그 화학적 성분은 Table 1.에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of welding electrode wire

C	Mn	Si	S	P	Cu
0.07-0.15%	1.0-1.5%	1.6-1.85%	0.035%	0.025%	0.5%

용접에 사용된 재료는 AISI 1204 연강판을 사용하였으며, Table 1.에 화학적 조성을 나타내었다. 시험편의 크기는 200×75×12mm 이고 용접 방법은 부분 용입, 1패스(single

pass), bead on plate로 하였다. 용접 비드의 크기 측정은 용접 후 끝단 효과(end effect) 등을 무시할 수 있는 위치를 자른 다음 시편의 한쪽 부분을 폴리싱(polishing)한 후 2.5% 질산 용액에 부식시켜서 용입 깊이 등을 측정하였다.

2.2 수학적 모델

용접 비드 형상과 그에 영향을 주는 용접 공정 변수의 정량적인 관계를 알아보기 위하여 앞에서 언급하였던 네 가지의 용접공정 변수들을 모두 독립변수로 하고 용접 비드의 폭(width), 높이(height) 그리고 용입 깊이(penetration)를 종속변수로 한 관계는

$$Y = f(D, V, I, S) \quad (1)$$

여기서, Y 종속변수(비드 형상)

D 와이어 직경 V 용접 전압

I 용접 전류 S 용접 전류

(1)식과 같이 표현 할 수 있고, 이러한 관계를 규정지어주는 식은 다음과 같다[3].

$$Y = a(D)^b(V)^c(I)^d(S)^e \quad (2)$$

여기서, a, b, c, d와 e는 보호가스 공급속도, 재료의 종류 등에 의하여 영향을 받는 경험 계수이며 상수 값을 갖는다. 이러한 값의 계산은 회귀분석방법(regression analysis)을 사용하여 계산하는데 Kim등은 일반 통계처리 code인 SAS를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻어내었다[9].

$$W = (D^{0.4294}V^{0.7083}I^{0.3518}S^{-0.4590}10^{-0.0905}) \quad (3)$$

$$H = (D^{-0.1255}V^{-0.7183}I^{0.6387}S^{-0.2295}10^{0.3339}) \quad (4)$$

$$P = (D^{-0.5668}V^{0.0130}I^{1.4005}S^{-0.3641}10^{2.3098}) \quad (5)$$

이 결과 식은 네 가지 용접공정 변수와 용접 비드 형상의 관계를 수학적으로 표현한 식이다. 이러한 수식의 관계를 몇 가지 시험을 거쳐서 다중 상관관계 계수(coefficient of

multiple correlation)를 구하여 정확성을 입증하였으며 이론적인 수식 결과와의 비교에서도 적용이 가능함을 밝혀진 수식이다.

본 연구에서는 이 세 가지의 수식을 이용하여 각각의 용접공정 변수가 비드 형상에 어느 정도의 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 미분을 이용한 각 변수의 민감도를 구하였다. 앞에서 정의한 용접 비드 형상은 아래 Fig.1과 같고 그림에 비드 폭, 높이 그리고 용입 깊이 등을 표시하였다.

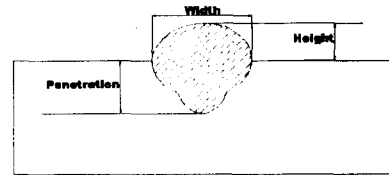


Fig.1 Schematics of weld bead geometry

3. 민감도 해석

공학에서의 민감도 계산과 응용의 주된 흐름은 최적제어와 자동화된 구조물의 최적설계에 있어서 최적 해를 찾기 위한 검색 방향을 구하는데 사용되고 있다. 이러한 검색 방향 탐색은 도함수(미분치)를 사용하는 기법에 기반을 둔 수학적 프로그래밍 방법의 사용을 선도하고 있다고 할 수 있다. 즉 최적화의 과정을 조사한 결과 시간과 비용을 크게 하는 가장 큰 요인은 도함수의 계산이었다. 결과적으로, 최적의 조건을 찾는 효율적인 계산을 위해 민감도 해석에 관한 관심이 강조되고 있다.

그런데 최근의 컴퓨터 기술의 발달과 구조 해석분야의 많은 발전으로 유한요소법(finite element method)이 많이 사용되면서 정적인 응답(static response)을 갖고, 변위를 기초로 한 유한요소 수식에 미분을 이용한 민감도 해석 방법이 많이 사용되고 있다. 현재 이용되고 있는 방법을 보면 유한 차분법(finite difference method)과 해석적 방법(analytical method)으로 크게 나눌 수 있고 해석적 방

법에는 각 설계변수에 대한 직접적인 미분을 이용한 직접법(direct method)과 특히 최적 제어 이론에서 폭 넓게 사용되는 수반 변수법(adjoint variable method)으로 나눌 수 있다. 각 방법의 이용은 설계 변수의 수와 응용되는 영역에 따라 장, 단점을 가지고 있다. 본 문제에서는 각 용접공정 변수가 정해짐에 따라 용접 비드의 형상이 정의되는 정적인 응답을 갖는 경우를 다중 회귀 분석(multiple regression analysis) 방법에 의한 통계 처리 결과 만들어진 수식을 이용하여 직접 미분법에 의한 민감도를 알아보려고 하였다.

4. 결과 및 고찰

용접 공정 변수의 변화량에 따른 용접 비드의 형상 변화는 용접부 강도의 평가나 용접공정의 경제성 문제에서 중요하게 고려하여야 할 문제이다. 또한 자동화 공정의 운용에도 상당히 중요한 변수가 되리라 생각된다.

본 연구에서는, 기존 수식에 포함되어 있는 비드 형상에 영향을 주는 공정 변수 중에서 용접 와이어의 직경은 일반적으로 판매하는 크기가 정해져 있으므로 변수로서의 의미가 약하다고 생각하고 결과에서 제외하였다. 하지만 민감도 해석 결과는, 종류를 1.2mm와 1.6mm의 두 가지를 변화하였을 때 각 변수의 변화에 대하여 가장 민감한 결과를 보였다. 용접 전압의 경우도 전류가 결정되면 그 값에 따라 정해지므로 본 문제에서는 제외하고 민감도 변수로는 용접 전류와 속도를 선택하였다. 전체적인 민감도의 계산은 용접 와이어의 직경은 1.2mm, 용접 전압은 25Volt., 용접 속도는 35mm/min, 그리고 용접 전류는 270A로 고정된 조건에서 계산하였으며, 이러한 값은 실제로 용접에 사용되는 값으로써 그 의미가 있다고 할 것이다. 또한 용접시 동일한 입열 량이 들어가도록 속도와 전류의 값을 선택하여 실제 비드 폭의 크기를 비교하였다.

Fig.2에는 용접 전류의 변화량에 따른 용접 비드 폭의 민감도를 보여주고 있다. 각각의 변수 즉, 용접 속도와 전류의 민감도를 각

변수에 대한 편미분 값으로 구하여 실험에 사용한 전류의 구간 값으로 나타내었다. 그림에서 보면 용접 전류를 변화시킬 경우 용접 전류 자체의 변화에 대해서는 용접 비드 폭에 영향이 가장 적다고 볼 수 있으며, 다음으로 용접 속도의 민감도를 보면, 용접 속도가 커지면 비드 폭은 작아지므로 음의 값을 가지면서 그 크기는 전류의 경우보다 약 3배 정도의 민감도 크기를 갖는다.

마찬가지로, Fig.3도 비드 폭에 관한 민감도 결과를 전체의 속도 변화구간 25-50mm/min의 사이에서의 변화 값으로 나타내었다. 속도 변화에 따른 전류의 민감도는 전류 값 자체 변화와 마찬가지로 전체 속도 구간에서 아주 적은 변화 폭을 가지고 그 크기도 아주 작음을 알 수 있다. 그러나 속도의 민감도는 전체구간에서 큰 폭으로 변화하면서 약 1.75의 민감도 변화 폭을 보였다. 즉 전류 값을 변화시키는 것 보다 용접속도를 변화하는 것이 용접 비드 폭의 크기를 변화하는데 유리한 것으로 나타났다.

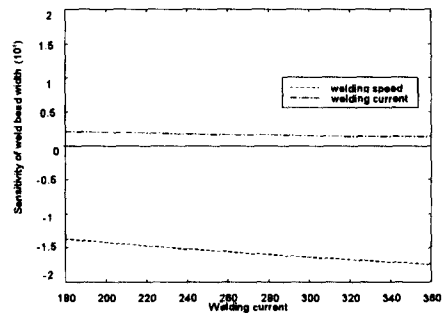


Fig.2 Sensitivity result for current variation (weld bead width: $\partial W/\partial I, \partial W/\partial S$ vs current)

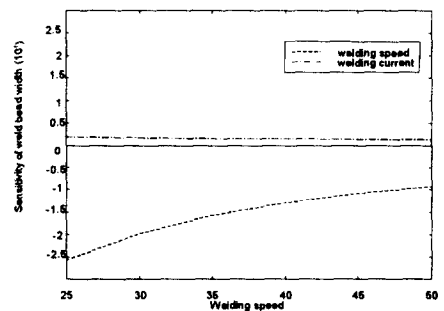


Fig.3 Sensitivity result for speed variation (weld bead width: $\partial W/\partial I, \partial W/\partial S$ vs speed)

비드 높이(height)에 대한 결과는 Fig.4와 Fig.5에 나타났다. 비드 폭의 결과와 거의 유사한 형태를 나타내지만 민감도의 크기(order)에 있어서 전체적으로 10배 정도의 차이를 보이고 있다. 먼저 Fig.4의 용접 전류에 대한 속도와 전류의 민감도를 보면 비드 폭의 경우와 마찬가지로 전류의 경우는 거의 변화가 없으며 속도의 경우는 전류의 약 3배 정도 크기의 음의 민감도를 보이고 있다. Fig.5에 나타난 용접 속도에 대한 민감도의 변화를 보면 비드 폭의 민감도와 비교하여 그 크기는 조금 크게 나타나지만 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

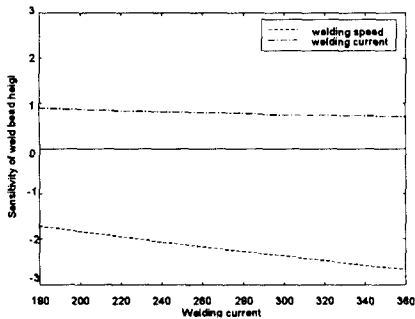


Fig.4 Sensitivity result for current variation (weld bead height: $\partial H/\partial I, \partial H/\partial S$ vs current)

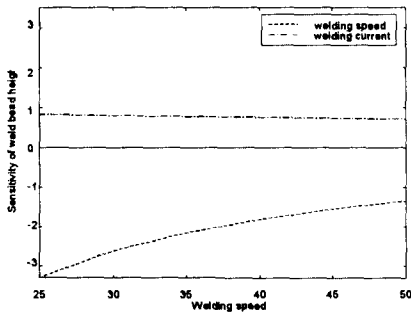


Fig.5 Sensitivity result for speed variation (weld bead height: $\partial H/\partial I, \partial H/\partial S$ vs speed)

Fig.6,7에서는 용접 비드의 용입 깊이 (penetration)에 관한 민감도를 나타내고 있다. 먼저 용접 전류의 변화에 대한 용접 속도와 전류의 용입 깊이에 대한 민감도를 보면 전류의 경우는 전류가 커짐에 따라 그 자

체의 민감도가 상당히 미소하다고 할 수 있지만 커짐을 보이는데 이것은 비드 폭이나 높이의 경우와는 상반되는 양상이다. 즉 높은 전류 구간에서는 저 전류일 때 보다 전류의 영향이 커진다는 것을 보여준다. 또 속도의 변화에 대해서는 다른 형상 조건의 경우와 유사하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 전체적인 민감도의 크기를 비교해 보면 동일한 용접 조건을 적용하였을 때 비드 폭이나 높이와 비교하여 보면 가장 작은 크기(10^{-2} order)를 가지고 변화함을 보여준다. 이러한 결과는 용입의 깊이는 용접 비드의 폭이나 높이에 비하여 용접 전류나 속도의 용접 공정 변수에 대하여는 보다 덜 민감하게 변화함을 알 수 있다.

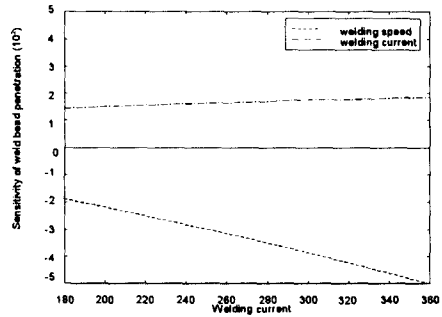


Fig.6 Sensitivity result for current variation (weld bead penetration: $\partial P/\partial I, \partial P/\partial S$ vs current)

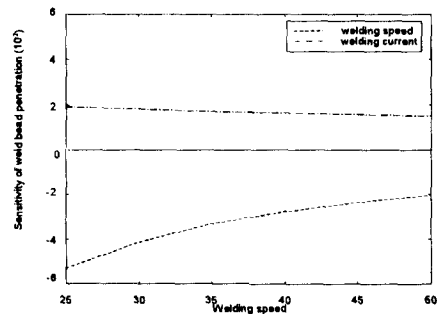


Fig.7 Sensitivity result for speed variation (weld bead penetration: $\partial P/\partial I, \partial P/\partial S$ vs speed)

이상의 민감도 해석으로부터 다른 조건은 동일하게 한 다음 용접 전류와 속도를 가지고 동일한 입열량을 가지도록 하였을 때의

Table 2. Weld bead width, height and penetrations for each S(speed), I(current)

Case & variable	I	S	Width	Height	Penetration
min. I /max. S	180	50	8.86	229.95	1.60
min. S /max. I	360	25	15.54	422.68	5.43
min. S /mid. I	270	25	14.04	351.73	3.63
max. S / mid. I	270	50	10.21	297.92	2.82

용접 비드의 폭, 높이 그리고 용입 깊이의 값을 Table 2.에 나타내었다.

위의 표를 보면 동일한 입열 량을 기초로 한 조건에서 각 용접 변수의 구간에서 최저 전류, 최고의 속도인 경우와 최저 속도, 최고 전류인 경우를 비교해 보면 비드 폭은 최저 속도인 경우가 최고 속도 최저 전류인 경우의 약 1.8배 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 속도에 민감하게 나타남을 보여준다. 마찬가지로 비드 높이도 거의 동일한 비율로 커짐을 보이고 있으나 용입 깊이의 경우는 최고 속도인 경우 약 3배 이상 커짐을 나타낸다. 이것은 앞의 민감도 해석에서 나타나는 전류의 고전류 영역에서의 민감도 상승으로 인하여 나타난 결과라고 볼 수 있다.

5. 결론

용접 비드의 형상을 표현하는 세 가지의 변수를 비드 폭, 높이와 용입 깊이로 하고 용접 전류와 속도의 용접 공정 변수 변화에 대한 비드 형상의 민감도를 통계처리에 의해 구해진 수식을 이용하여 직접 미분법에 의해 계산하고 동일한 입열 조건하의 속도의 변화와 전류의 변화에 대한 비드 형상 변수를 구해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 용접 공정 변수를 독립변수로 하여 비드 형상을 나타낸 수식을 이용하면 각 공정 변수에 관한 비드 형상의 민감도를 계산 할 수 있다.

[2] 용접 속도와 전류를 변수로 한 민감도 해석 결과 전류를 변화시키는 것보다는 용접 속도를 변화시키는 것이 보다 효과적임을 알았다.

[3] 비드의 폭과 높이의 경우는 속도의 변화와 전류의 경우 거의 동일하게 변화함을 보이고 용입 깊이의 경우는 고전류 부분에서 민감함을 보이므로 전류 량을 크게 할 경우는 속도 감소시 더 큰 효과를 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Jones, S.B., Doherty, J. and Slater, G. R., Welding Journal 56(7), 19, 1972
- [2] J.C. McGlone, "The submerged arc butt welding of mild steel: Part 1. The influence of procedure parameters on weld bead geometry", The welding institute report 79/1978/PE, 1978
- [3] J.C. McGlone, and D.B. Chadwick, "The submerged arc butt welding of mild steel: Part 2. The prediction of weld bead geometry from the procedure parameters", The welding institute report 80/1978/PE, 1978
- [4] J. Doherty, T. Shinoda and J. Weston, "The relationships between arc welding parameters and fillet weld geometry for MIG welding with flux cored wires" The welding institute report 82/1978/PE, 1978
- [5] R.S. Chandel, "Mathematical modeling of gas metal arc weld features", Proceedings

of the Fourth international conference on modeling of casting and welding processes, pp. 109-120, April, 1988

[6] L.J. Yang, R.S. Chandel and M.J. Bibby, "The effects of process variables on the bead height of submerged-arc weld deposits" Canadian metallurgical quarterly, Vol.31, No.4, pp. 289-297, 1992

[7] Subodh Kumar and S.C. Bhaduri, "Theoretical investigation of penetration characteristics in Gas Metal-Arc welding using finite element method", metallurgical and materials transactions B, Vol.26B, June, 1995

[8] Howard M. Adelman and Paphael T. Haftka, "Sensitivity analysis of discrete structural systems", AIAA journal, Vol.24, No.5, 1986

[9] I.S. Kim, W.H. Kwon and E. Siores, "An investigation of a mathematical model for predicting weld bead geometry", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.35, No.4, pp. 385-392, 1996