

研究論文

9%Ni 강의 전자빔 용접성에 관한 연구 (I)

- 전자빔 특성과 용입 -

김 숙 환* · 강 정 윤**

A Study on the Electron Beam Weldability of 9%Ni Steel (I)

- Penetration and Electron Beam Characteristics -

S. H. Kim* and J. Y. Kang**

Key words : electron beam welding (전자빔 용접) penetration (용입) electron beam characteristics (전자빔 특성) 9%Ni steel (9% 니켈강) energy density (에너지 밀도) beam size (빔 크기)

Abstract

This study was performed to evaluate basic characteristics of electron beam welding process for a 9%Ni steel plate. The principal welding process parameters, such as working distance, accelerating voltage, beam current and welding speed were investigated. The AB (Arata Beam) test method was also applied to characterize beam size and energy density of the electron beam welding process. The electron beam size was found to decrease with the increase of accelerating voltage and the decrease of working distance. So, in case of high voltage (150kV), spot size and energy density of electron beam were revealed to be 0.9mm and $6.5 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ respectively. The accelerating voltage among the welding parameters was found to be the most important factor governing the penetration depth. When the accelerating voltage of electron beam was low ($\leq 90\text{kV}$), beam current and welding speed did not affect on the penetration depth significantly. However, in case of high voltage ($\geq 120\text{kV}$), the depth of penetration increased very sensitively with the increase of beam current and the decrease of welding speed.

* 정회원, 포항산업과학연구원 접합가공연구팀

** 정회원, 부산대학교 금속공학과

1. 서 론

전자빔 용접은 집속시킨 고밀도 에너지 전자빔을 열원으로 사용하기 때문에, 단시간에 국부적으로 가열, 용융과 증발현상을 일으켜 열에너지를 용접하고자 하는 면에 직접 가할 수 있는 키홀(key hole) 현상에 의해 용접되는 것이 특징이다. 이와같은 특징 때문에 전자빔 용접은 열전도와 복사사에 의해 용융되는 종래 아크용접보다 좁고 깊은 용입을 얻을 수 있다. 따라서 전자빔의 크기, 형상 및 에너지 밀도는 용융특성에 큰 영향을 미친다.

전자빔의 에너지 밀도에 영향을 미치는 주요인자는 가속전압, 빔 전류, 빔 크기등이 있다. 전자빔 용접에 있어서 빔 형상 및 그 에너지 밀도는 용입 깊이, 비이드 폭, 용접결합등의 발생에 큰 영향을 미치고, 용입기구 및 용접부의 거동 해명에 관하여 필수적인 인자라는 것은 잘 알려져 있지만¹⁾ 초점위치와 빔 직경을 정확히 측정하는 것은 어려운 작업이다. 전자빔의 직경을 측정하는 일반적인 방법²⁾으로는 pin hole을 이용한 방법, slit를 이용한 방법, Arata Beam(이하 AB로 표기) 시험법, 휘도(輝度)를 측정하는 방법등이 주로 사용되고 있지만 미소전류 전자빔에 국한되어 실제 용접에 이용되고 있는 고출력 전자빔에 대해서는 그다지 많은 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에 있어서는 9%Ni강의 전자빔 용접에 관한 연구의 일환으로 가속전압과 초점위치에 따른 실제 집속된 전자빔 크기의 변화를 AB

시험법으로 검토하고, 용접조건에 따른 9%Ni강의 용입특성에 관하여 검토하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

본 실험에서 사용한 모재는 액화천연가스(LNG)의 저장탱크로 널리 사용되고 있는 두께 23mm의 9%Ni강이고, 화학성분 및 기계적 성질은 표 1의 (a) 및 (b)와 같다.

2.2 전자빔 기본특성 평가시험

본 실험에 사용한 전자빔 용접기(NEC 13-9-11, 15kW)는 그림 1과 같으며 전자빔의 기본특성은 AB 시험법³⁾으로 검토하였다. 이 시험법은 실제의 용접조건을 적용하더라도, 전자빔의 기본특성을 평가할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 그림 2는 사용한 시편의 형상과 측정된 방법을 나타낸 것이다. 여기서 active parameter (a_b , 이하 a_s 로 표시)는 D_o/D_i (D_o : 초점렌즈로부터 시편까지 거리, D_i : 초점렌즈로부터 초점까지 거리)로 정의 된다. 용접은 진공도 1.2×10^{-4} torr 이하에서 가속전압 60~150kV, 빔전류 30mA, 용접속도 2,000mm/min의 조건으로 실시하였다. 전자빔에 의해 용융된 금속으로 인하여, 용융부 근처의 모재가 용융되지 않도록 하기 위하여 down-slope 용접을 실시하고,

Table 1. Chemical composition and mechanical property of 9%Ni steel used

Chemical composition (wt. %)							Thickness (mm)	Remarks
C	Si	Mn	P	S	Ni	Sol-Al		
0.07	0.25	0.68	0.004	0.001	9.262	0.033	23	QLT

(a) Chemical composition

Tensile property			vE ₁₉₆ (J)
YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	
671	729	30	220

(b) Mechanical property

시편의 각도는 40°로 하였다. 그리고 실제 용접작업시 양호한 비드 외관을 얻을 수 있고, 스패터(spatter) 및 용접부 내부 결함 등이 발생하지 않은 초점위치를 파악하기 위하여, 인위적으로 전자빔의 초점위치를 조정할 수 있는 dial값을 5종류로 변화시켜 실험을 행하였다.

전자빔의 크기는 전자빔 주사후 용융부의 자취를 3배로 확대한 사진을 Image Analyzer를 사용하여 각각의 위치에서 폭과 면적으로 측정하였다.

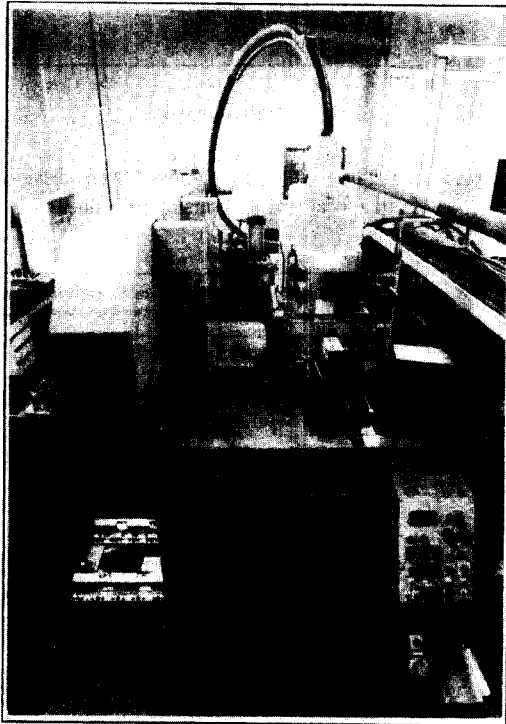


Fig. 1 General view of electron beam welding system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 AB시험법에 의한 전자빔 기본 특성 검토

전자빔 용접시 용입깊이, 비드 폭 및 용접결함 발생에 영향을 미치는 인자중에서 가장 중요한 인

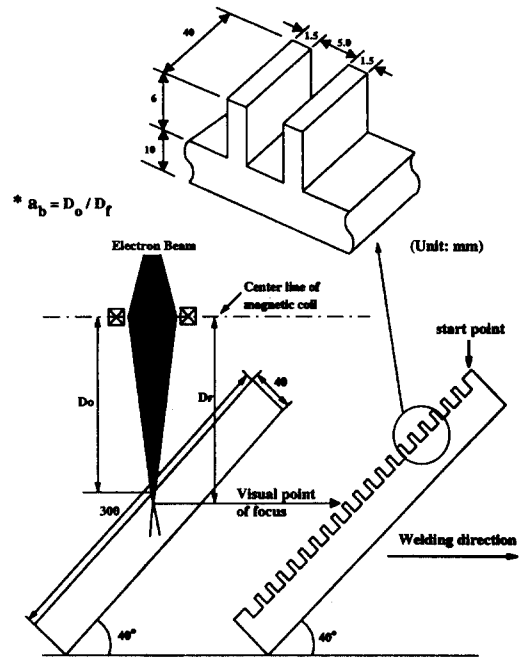


Fig. 2 An AB test piece made from 9%Ni steel

자는 전자빔의 직경과 에너지 밀도이다. 전자빔의 직경은 가속전압과 초점위치에 따라 변화한다. 실제 전자빔 용접기를 조작할 때 초점위치는 dial값으로 설정된다. 가속전압과 초점위치(dial 값)에 따른 전자빔 직경의 변화를 측정하기 위하여, AB 시험편으로 용접한 후 전자빔 자취를 조사하여 보았다.

그림 3 ~ 그림 6은 AB시험법으로 시험한 결과를 정리한 것이다. 즉, 고진공(1.2×10^{-4} torr) 하에서 빔전류를 30mA, 용접속도를 2,000mm/min로 일정하게 하고 결보기 초점(이하 F로 표기)을 439mm로 설정한 후 가속전압(60kV, 90kV, 120kV, 150kV) 및 dial값을 F-20 ~ F+60(F값에서 dial을 -20 ~ +60까지 변화)으로 변화시킨 경우, 빔 직경의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 F자 뒤에 표기된 기호 및 숫자의 의미는 결보기 초점 439mm를 기준으로 하여 -인 경우 아래, +는 위에 둔 것을 의미하고, 숫자는 dial상의 숫자를 의미한다. 즉, 숫자가 클수록 기준점에서 거리가 멀어지

는 것을 의미한다.

그림 3은 가속전압을 60kV로 한 것이고, 빔 직경은 dial값이 F-20에서 F+60으로 변화함에 따라 2.6mm에서 2mm 정도로 감소하지만, dial 값을 변화시켜도 빔이 집속되지 않고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 4 ~ 6에서 알 수 있는 바와같이, 가속 전압이 90kV 이상으로 증가하면, 모든 dial 값에서

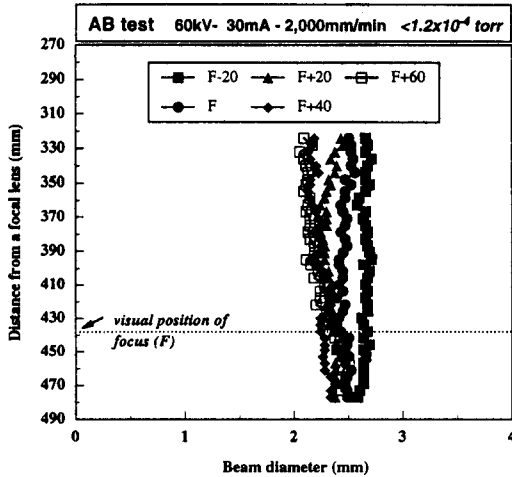


Fig. 3 Variations of beam diameter with distance from a focal lens in terms of dial values

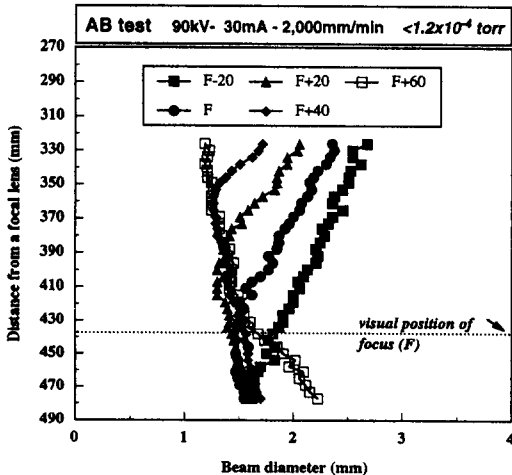


Fig. 4 Variations of beam diameter with distance from a focal lens in terms of dial values

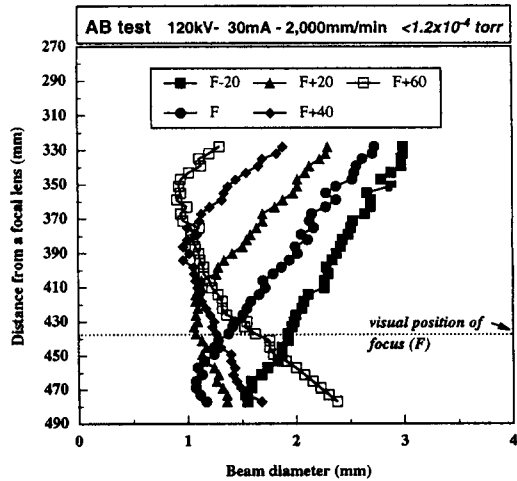


Fig. 5 Variations of beam diameter with distance from a focal lens in terms of dial values

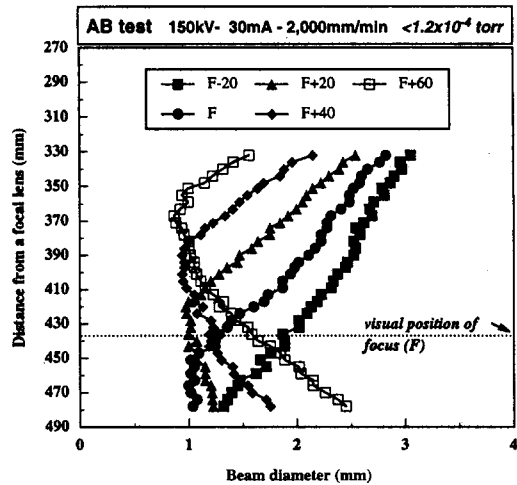


Fig. 6 Variations of beam diameter with distance from a focal lens in terms of dial values

빔이 집속되는 경향을 보이며, dial값의 증가에 따라 빔이 집속되는 위치가 렌즈(위)쪽으로 점차 이동하는 경향이 있다.

그림 7은 상기 실험결과를 가속전압과 dial값에 따른 최소 전자빔 직경의 변화를 정리한 것이다. 이것으로 부터 가속전압이 증가할수록 최소 전자빔 직경은 감소하고, 120kV이상의 가속전압에서는

약 1mm 정도의 전자빔 직경을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 같은 가속전압에서 dial값의 증가에 따라 전자빔 직경은 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 전자빔 직경에 미치는 영향은 초점위치보다도 가속전압이 훨씬 큰 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

전자빔 광학의 연구결과에 의하면, 전자빔 최소 직경과 가속전압, 빔 전류, 초점거리와의 상관관계는 다음 (1) 식⁴⁾으로 제안되고 있다. 여기서 r_s : 최소 빔 직경, $Z=174 (I^{1/2}/V^{3/4}) (z/r_1)$, z : 렌즈와 피용접물과의 거리 (cm), I : 빔 전류 (A), V : 가속 전압 (V), r_1 : 렌즈에서 전자빔 중심까지의 거리 (cm)이다.

$$r_s = 5.9 \times 10^4 \times Z^{5/2} \times I^{5/4} \times V^{-15/8} \times r_1^{-3/2} \quad (1)$$

(1) 식에 $Z=174 (I^{1/2}/V^{3/4}) (z/r_1)$ 를 대입하여 정리하면, (2) 식과 같이 된다.

$$r_s = (2.356 \times 10^{10} \times I^{5/2} \times z^{5/2}) / (V^{15/4} \times r_1^4) \quad (2)$$

이 식으로 부터, I 와 r_1 가 일정하다고 가정하면 다음 (3) 식으로 표현할 수 있다.

$$r_s = A \times z^{5/2} / V^{15/4} \quad (3)$$

(3) 식으로 부터, 렌즈와 피용접물 까지 거리 z 가 증가하면, 최소 빔 직경은 2.5승에 비례하여 커지지만, 가속전압 (V)의 약 4승에 비례하여 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 단위와 지수를 감안하면, 전자빔 직경에 미치는 영향은 가속전압이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 여기서 렌즈와 피용접물까지 거리 z 는 본 실험의 dial값으로 표현될 수 있으며, dial 값이 증가하면 초점위치가 렌즈쪽에 접근하므로, z 값은 작아진다. 결국, dial 값이 증가하면 최소 빔 직경은 2.5승에 비례하여 감소한다.

최소 전자빔 직경과 가속전압 및 초점거리 (dial 값)와의 상관관계를 검토한 실험결과 (그림 7)는 전자빔 광학이론 연구에서 제안 식 (1)로부터 설명이 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 실험한 가속전압 90 ~ 150kV 범위에서 최소 전자빔 직경을 나타내는 초점위치와 dial 값의 상관관계를 조사한 것이다. 60kV의 가속전압에

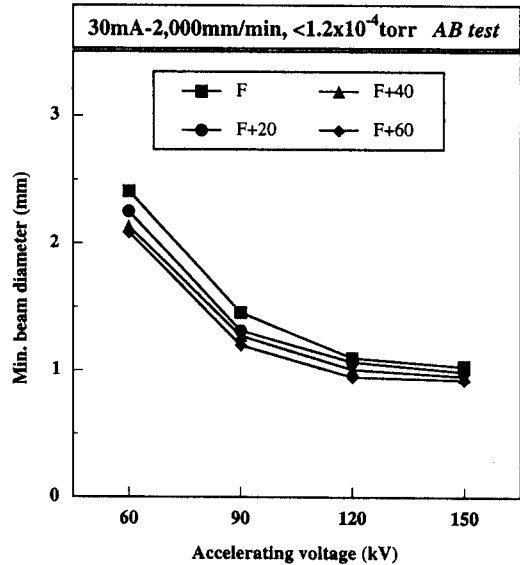


Fig. 7 Relationship between accelerating voltage and min. beam diameter at various dial values

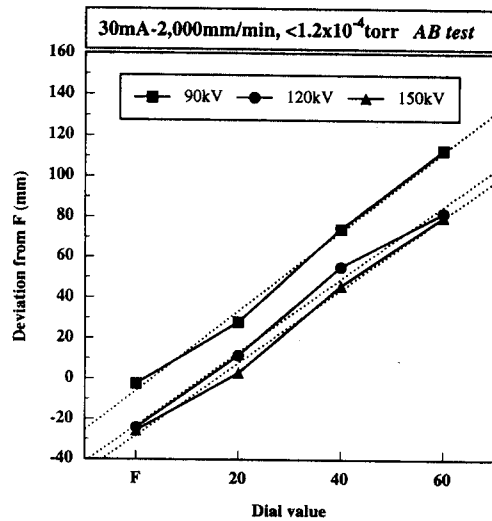


Fig. 8 Variations in deviation from F (visual position of focus) with dial value

서는 전자빔이 집속되지 않기 때문에 제외시켰다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와같이 가속전압 120kV, 150kV의 경우 dial 값에 대한 편차의 기울

기가 1.8이고 90kV에서는 기울기가 2.0으로서 거의 직선적으로 변화하고 있어 dial값에 기울기를 곱하므로써 실제의 초점위치 이동거리를 쉽게 계산할 수 있다. 따라서 이 그림은 용접시에 dial값으로부터 전자빔의 실제 초점위치를 알 수 있는 보정선으로 사용할 수 있고, 작업거리 (working distance, 이하 Wd로 표기)를 설정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

그림 9는 가속전압과 초점위치에 따른 전자빔의 에너지 밀도 변화를 나타낸 것이다. 가속전압이 60kV에서 150kV로 증가함에 따라 전자빔의 에너지 밀도는 $0.5 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 에서 $6.5 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 로 약 10배 이상 증가하고 있다. 또한 전자빔의 에너지 밀도는 동일한 가속전압에서도 dial값의 증가에 따라 다소 증가하며, 그 증가폭은 고전압측일수록 커지는 경향을 나타내고 있다. 즉, 가속전압이 높아질수록 미소한 전자빔 직경 차이가 에너지 밀도에 크게 영향을 미친다는 것을 의미한다.

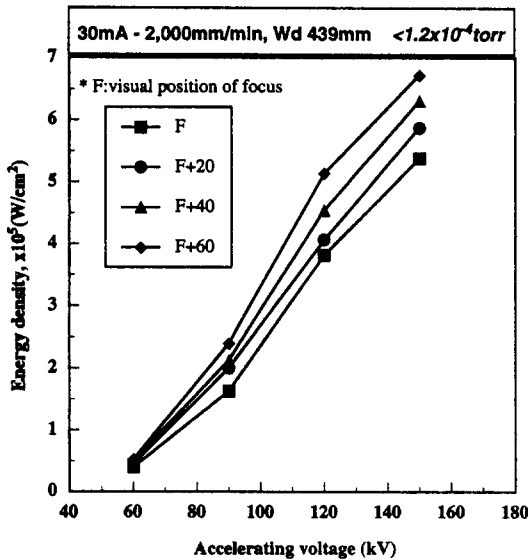


Fig. 9 Relationship between accelerating voltage and energy density at various dial values

3.2 용입특성에 미치는 용접조건에의 영향

AB시험법에 의한 전자빔의 기본특성을 토대로 9%Ni강의 용입특성에 미치는 용접조건에의 영향을

검토하여 보았다. 용입특성에 미치는 용접조건으로서의 가속전압, 빔 전류, 빔 직경, 용접속도, 진공도등이 있다. 본 실험에서는 이들 조건중에 진공도를 $<1.2 \times 10^{-4} \text{torr}$ 로 고정시키고, a_b 값을 1로 설정하였다. 여기서 a_b 는 D_o/D_i 이고, D_o 는 초점렌즈로부터 시편까지 거리, D_i 는 초점거리이다. 즉, $a_b=1$ 이라는 조건은 Wd와 초점거리가 439mm로 동일한 조건이다.

3.2.1 가속전압 및 용접속도의 영향

용입특성에 미치는 가속전압 및 용접속도의 영향을 검토하기 위하여, 빔 전류를 30mA로 일정하게 하고, 가속전압을 60, 90, 120, 150kV로 변화시키고, 용접속도를 100 ~ 2,000mm/min의 범위에서 5조건으로 변화시켜 용접한 후 용입깊이에 대하여 검토하여 보았다. 그리고 본 실험에서 사용한 용접기는 60kV에서 최대 40mA이기 때문에 전 가속전압 범위에서 안정한 전자빔을 출력할 수 있는 30mA의 일정한 조건을 사용하였다. 그림 10은 그 결과를 나타낸 것이다. 같은 가속전압에서 용접속도가 증가함에 따라 용입깊이는 감소하며, 가속전압이 클수록 감소하는 폭이 현저하게 증가하는 것

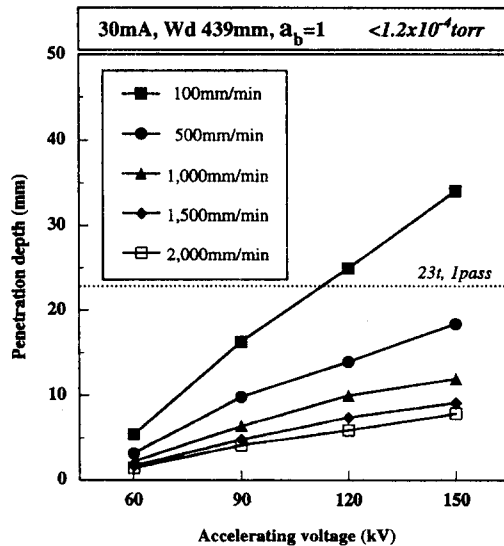


Fig. 10 Variations of penetration depth with accelerating voltages at various welding speeds

을 알 수 있다. 특히, 용접속도가 느린 100 및 500mm/min에서, 가속전압에 따른 용입깊이의 차이는 아주 크고, 가속전압 60kV와 150kV의 용입깊이를 비교하여 보면 약 7배 이상 차이가 있음을 알 수 있다.

용접속도가 느린 경우 가속전압에 따라 용입깊이가 현저하게 차이가 나는 이유와 가속전압이 높을수록, 용입깊이에 미치는 용접속도의 영향이 큰 이유를 알아보기 위하여 단위면적당 용접에 필요한 에너지 즉, 출력과 가속전압 및 용접속도와의 상관관계를 조사하여 보았다.

그림 11은 용접속도에 대하여 정리한 것이고, 그림 12는 가속전압에 대하여 정리한 것이다. 여기서 종축은 단위시간(분)에, 단위면적을 용융하는데 필요한 출력 ($W_0=W/P_dL$, W:출력, P_d :용입, L:용접길이)을 나타낸다. 즉, 단위면적의 모재를 용융시키기 위하여 소모된 에너지를 표시한다. 그림 11에서 가속전압이 60kV인 경우 W_0 가 모두 높고, 가속전압 90kV 이상에서는 100mm/min의 속도만이 높은 값을 나타내지만, 100mm/min를 제외한 용접속도에서는 W_0 값은 거의 일정한 값을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림 12로 부터 동일 가속전압에서는 용접속도가 느릴수록 W_0 값이

높다는 것을 알 수 있다.

먼저 가속전압 60kV에서 특히 용입깊이가 낮고, 용융에 필요한 에너지 W_0 값이 큰 이유를 고찰해보면 다음과 같다. 킨 현상으로 모재를 용융시키기 위해서는 일정한 에너지 밀도 (E_d) 이상이 필요하다. 그러나 그림 9에서 알 수 있는 바와같이 60kV의 경우 에너지 밀도가 아주 낮아 킨 현상에 의해 용융되는 양이 아주 적기 때문인 것으로 생각된다.

또한, 용접속도가 아주 느린 100mm/min에서 W_0 값이 큰 이유를 고찰해 보면 다음과 같다. 에너지 밀도가 같은 경우, 주어진 출력이 전자빔 용접의 용융기구인 킨 현상에 의해 모재를 용융시키는데 전부 이용된다면, 단위면적을 용융시키는데 필요한 에너지는 가속전압 및 용접속도에 관계없이 같을 것으로 생각된다. 결국, 용접속도가 느린 100mm/min의 경우 같은 면적을 용융시키는데 필요한 에너지가 높다는 것은 주어진 에너지가 킨 현상에 의해 모재를 용융시키는 것 이외에 열전도에 의해 소모되었을 것으로 생각된다. 이러한 열전도현상은 모재를 깊이 방향보다 폭 방향으로 용융(2차 용융) 시키거나, 모재를 폭넓게 가열할 것으로 예상된다. 따라서 용융 폭이 넓어지고, 용접 열

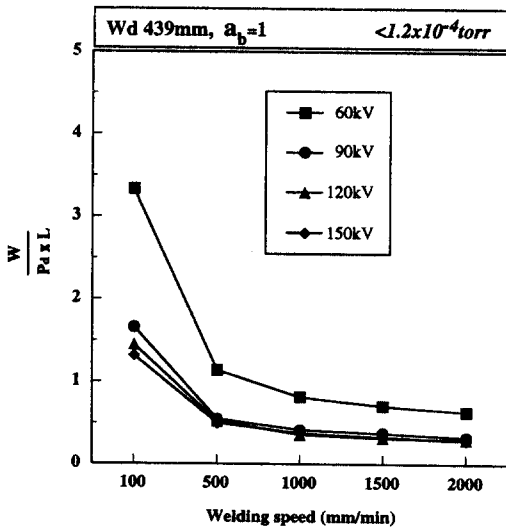


Fig. 11 Relationship between power per area and welding speed at various accelerating voltages

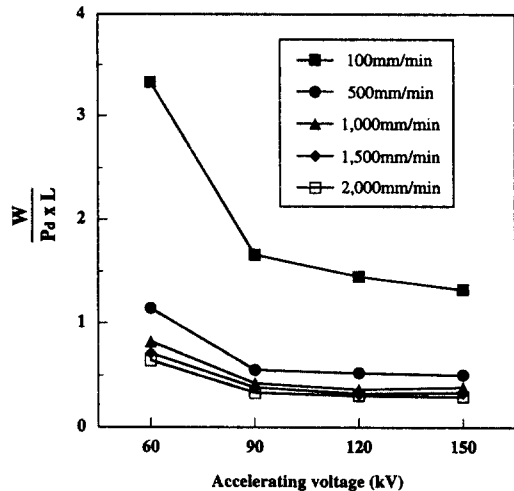


Fig. 12 Relationship between power per area and accelerating voltage at various welding speeds

영향부(HAZ) 폭도 넓어질 것으로 예상된다.

3.2.2 빔 전류의 영향

그림 10에서 알 수 있듯이 각 가속전압에서 용입 깊이가 급격히 변화하는 용접속도인 500mm/min을 기준 용접속도로 설정하여 빔 전류에 미치는 용입깊이의 변화를 조사하였다. 즉, 용접환경은 앞서 실시한 방법과 동일하게 유지하고 빔 전류만을 변화시켜 용입특성을 정리한 것이 그림 13이다. 빔 전류의 증가에 따라 용입깊이가 증가하는 일반적인 경향을 잘 나타내고 있지만 90kV 이하의 저전압측에서는 용입깊이의 증가가 상당히 완만하고 최대 용입깊이에 포화되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 120kV 이상의 고전압측에서는 현저하게 용입깊이가 증가함을 알 수 있었고 유사한 용입특성을 나타내었다.

이러한 결과는 앞서 언급한 식(1)으로부터도 잘 알 수 있듯이 가속전압이 증가할수록 최소 전자빔 직경은 거의 4제곱에 반비례 ($V^{-15/4}$)하여 감소하기 때문에 작아지지만, 빔 직경은 빔 전류가 증가하면 전류 ($I^{5/2}$)에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 가속전압이 큰 120kV 이상에서는 빔 전류의 증가에 따른 전자빔 직경의 증가보다 가속전압의 증가에 의한 전자빔 직경의 감소에 의한 에너지 밀도 증가 효과가 더 크기 때문에 용입깊이가 현저하게 증가한 것으로 생각된다. 또한, 가속전압과 빔 전류가 증가하면 용접입열량이 상대적으로 증가하고 아래와 같은 (4) 식⁵⁾의 관계에서 에너지 밀도도 상당히 커지기 때문에 그에 비례하여 용입깊이도 깊어지게 된다.

$$E_d = 1/\pi \cdot (2/S)^2 \cdot I^{1/4} V^{7/4} \quad (4)$$

여기서 $S = [(16^{1/3}k/\pi e) \cdot c^{2/3} f^{2/3} (T/j_e)]^{3/8}$ 이다.

그리고 k: 불쓰만 상수, e: 전하, c: 구면수차 계수, f: 렌즈의 초점거리, T: 음극의 온도, j_e : 음극의 포화 전자밀도 이다.

즉, 에너지 밀도가 높으면 키홀이 잘 형성되어 용접면에 직접 전자가 충돌하여 깊은 용입이 얻어지지만 에너지 밀도가 낮은 경우 키홀이 충분히 형성되지 못하여 용융금속의 열전도 및 복사로 대부분의 열이 소실되어 용입이 깊지 못한 것으로 생각된다.

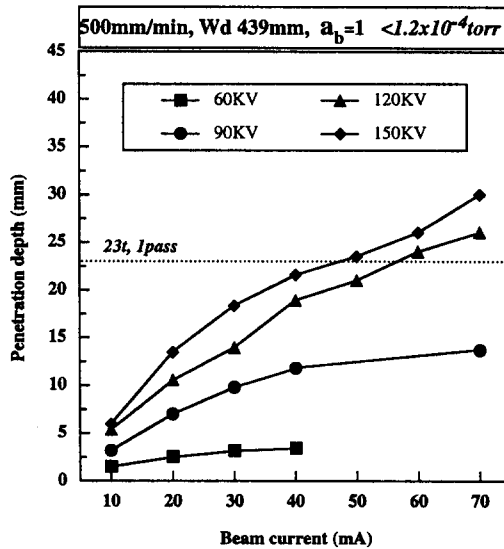


Fig. 13 Variations of penetration depth with beam current at various accelerating voltages

전자빔의 에너지 밀도 (E_d)는 가속전압 (V)의 7/4승, 빔 전류 (I)의 1/4승에 비례하기 때문에, 전자빔의 에너지 밀도를 높이기 위해서는 가속전압을 증가시키고 초점거리를 짧게 하는 것이 훨씬 효과적임을 의미하고 있다.

가속전압이 낮은 90kV 이하에서는 최소 전자빔 직경도 클 뿐만아니라 전류증가에 따른 빔 직경의 증가도 상대적으로 커져 에너지 밀도가 작아지기 때문에 빔 전류의 증가에 따른 용입깊이의 증가율도 상당히 낮고 일정한 용입깊이 이상에서는 포화되는 것으로 생각된다. 그리고 용접속도가 500mm/min로 일정한 조건에서 두께 23mm를 1pass로 완전용입할 수 있는 가속전압 및 빔 전류는 120kV-60mA와 150kV-50mA 이상이어야 함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

AB 시험법에 의한 전자빔의 초점위치와 직경 및 에너지밀도 등을 확인하고 용입특성에 미치는 용접조건에 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가속전압이 증가하고 초점거리가 짧아질수록 집속할 수 있는 최소 빔직경은 감소하여 150kV의 경우 약 0.9mm정도까지 감소하였다.

2) 실제 시편상에 용융되어 얻어지는 초점위치와 F의 편차 관계로부터 가속전압 90kV의 경우 기울기가 2.0, 120kV이상에서는 기울기가 1.8로 직선적인 관계를 나타내어 초점위치를 알 수 있는 보정선으로 적용할 수 있다.

3) 전자빔의 에너지 밀도는 가속전압이 증가할수록 증가하여 150kV가 60kV보다 약 10배이상의 큰 에너지밀도를 나타내었으며, 에너지 밀도를 높이기 위해서는 가속전압을 증가시키고 초점거리를 짧게하는 것이 훨씬 효과적이다.

4) 가속전압 및 용접속도가 감소할수록 단위면적당 더 큰에너지가 필요하였다. 이는 키흔현상에 의해 모재를 용융시키는 것 이외에 열전도에 의한 2차용융에 상당한 에너지가 소모된 것에 기인한 것으로 생각된다.

5) 빔 전류의 증가에 따른 용입특성은 고전압($\geq 120\text{kV}$)에서 지속적인 증가 경향을 나타낸 반면 저전압($\leq 90\text{kV}$)에서는 일정한 용입깊이에 포화되고 있음을 알 수 있다. 이는 저전압일수록 빔 전류 증가로 인한 빔 직경이 큰 폭으로 증가하기 때문에 에너지밀도가 현저히 저하한 것에 기인한 것으로

판단된다.

6) 두께 23mm의 시험재를 완전용입할 수 있는 조건은 빔 전류가 30mA로 일정한 경우 120kV-100mm/min와 150kV-300mm/min 정도이며, 용접속도가 500mm/min으로 일정한 경우에는 120kV-60mA 및 150kV-50mA이었다.

참 고 문 헌

1. 荒田吉明, 富江通雄, 寺井 清, et al.: "高エネルギー-密度ビ-ム形状の決定について(その2)", 電子ビ-ム溶接研究委員會資料 EBW-76-73, pp.1-16
2. 入江宏定: "電子ビ-ム溶接", 溶接學會誌, Vol. 64, No. 8 (1995), pp. 24-39
3. Yoshiaki Arata, Plasma, Electron & Laser Beam Technology, American Society Metals, (1986), pp. 178-189
4. A. H. Meleka: "Electron beam welding: Principle and practice", McGRAW-HILL Publishing Co. Ltd., (1971), p. 47
5. 黒田秀郎: "電子ビ-ム溶接", 日刊工業新聞社, (1971), p. 30