

**研究論文**

## 9%Ni 강의 전자빔 용접성에 관한 연구 (II)

- 비이드형상에 미치는  $a_b$  parameter의 영향 -

김 숙 환\* · 강 정 윤\*\*

### A study on the electron beam weldability of 9%Ni steel (II)

- Effect of  $a_b$  parameter on bead shape -

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

**Key words** : electron beam welding(전자빔 용접) bead shape(비이드 형상) weld defect(용접결함) 9%Ni steel(9% 니켈강) active parameter ( $a_b$ )

### Abstract

Welding defects, such as porosity and spike, have sometimes occurred in deep penetration electron beam welds. These defects are known to be one of the serious problem in electron beam welds. So, effects of active parameters ( $a_b$ ) on bead shape and occurrence of defects in electron beam welds of heavy section 9%Ni steel plates were investigated. Partial penetration welding in flat position, and deep penetration welding of 10 ~ 28mm depth were investigated in this study. It is desirable to select low accelerating voltage and above the surface focus position  $a_b \geq 1.2$  at which a wine-cup shaped bead is obtained to avoid the welding defects such as spike and root porosity. When the accelerating voltage of electron beam was low (90kV), active parameter ( $a_b$ ) did not influence on the bead width, penetration depth and weld defects significantly. However, in case of high voltage ( $\geq 120kV$ ), active parameter ( $a_b$ ) was sensitively associated with penetration depth and weld defects, i. e. when the active parameter ( $a_b$ ) was in the range of 0.6 to 1.0, the depth of penetration was always over the target (23mm), while the depth of penetration was dramatically decreased with further increase of active parameter ( $a_b$ ). The weld defects were decreased with the increase of active parameter ( $a_b$ ), resulting in the decrease of energy density of the focused beam in the root part of fusion zone

\* 정회원, 포항산업과학연구원 집합가공연구팀

\*\* 정회원, 부산대학교 금속공학과

## 1. 서 론

전자빔 가공은 고진공중에서 고속으로 가속된 전자의 운동에너지를 이용하는 방법으로 절단, drilling, 용접 및 열처리 등에 적용되고 있다. 그러나 전자빔의 산업적 응용이라는 관점에서 보면 용접이 가장 많고 경량화 및 원가절감을 위하여 최근 생산현장으로의 보급은 급속히 증가하고 있다.<sup>1)</sup>

또한, 전자빔 용접의 최대 장점은 후판을 1pass로 용접할 수 있다는 것으로 최근 대형진공실을 이용한 대출력 전자빔 용접기 등이 개발되어 대형구조물로의 적용이 급격히 증가하고 있다.<sup>2,3)</sup> 하지만 용입이 깊어질수록 용접현상은 더욱 복잡하게 되고 조건에 따라서 용입특성 뿐만 아니라 전자빔 용접특유의 결함이 발생하는 경우도 있다. 그리고 부분용입 용접시 spike가 형성되면 root 기공이나 cold shut 등의 결함이 현저하게 발생하여 용접부 성능저하의 원인<sup>4)</sup>이 되고 있다.

한편 spike 발생경향은 용접변수나 사용소재에 따라서도 달라지지만 spike가 가장 현저하게 발생하는 조건의 원인으로서 급속이 키흐에서 격렬하게 분출하는 현상과 이것이 용융지 후면으로 반전하여 다시 키흐 내부로 유입하는 현상이 교대로 반복됨에 따라서 키흐 주변에 존재하는 용융급속량이 주기적으로 변화하게 된다. 즉, 간헐적인 용융현상에 따라 발생하는 spike는 키흐 후방에 존재하는 용융급속의 주기적인 유동에 의한 현상<sup>5)</sup>이라고 말할 수 있는데 일반적으로 심용입 용접을 행하

는 동시에 sharp한 용입을 얻었을 때 발생하기 쉽다고 알려져 있다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 먼저 빔 초점위치 즉, active parameter ( $a_0=D_0/D_i$ ,  $D_0$ 는 초점렌즈로부터 시편까지의 거리,  $D_i$ 는 초점렌즈로부터 초점까지의 거리, 이하  $a_0$ 로 표기) 변화에 따른 가속전압과 용입깊이 등의 상관성을 조사하였다. 그리고 부분용입시 발생할 수 있는 결함의 형태와 결함 방지조건을 설정하기 위하여 spike 및 기공의 발생경향에 미치는  $a_0$ 의 영향을 검토 하였다.

## 2. 시험재 및 실험방법

### 2.1 시험재

본 실험에서 사용한 소재는 액화천연가스(LNG)의 저장탱크로 널리 사용되고 있는 두께 23mm의 9%Ni강을 대상으로 하였다. Table 1은 시험재의 화학조성 및 기계적 성질을 나타낸 것으로 주요 성분으로서 0.07% 탄소와 9%를 상회하는 Ni를 포함하고, P 및 S의 함량도 매우 낮아 저온인성이 우수하고 불순물 원소의 함유량이 낮은 저탄소 9%Ni강이다.

### 2.2 전자빔 용접비이드 및 결함특성 평가

비이드 외관 및 spatter 등과 같은 결함 발생에 미치는 용접조건의 영향을 검토하기 위하여 전자

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	9.292	0.033	23	QLT

(a) Chemical composition

Tensile property			$vE_{196}$ (J)
YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	
671	729	30	220

(b) Mechanical property

빔 기본특성을 검토한 제1보의 결과를 근거로 다음과 같은 용접조건을 선정하였다.  $a_b$ 값은 0.6 ~ 1.6의 범위에서 0.2간격으로 6단계 변화시켰다. 용접속도는 진공도  $<1.2 \times 10^{-4}$  torr에서 가속전압에 관계없이 용입깊이가 급격히 증가하는 500mm/min로 일정하게 하였다. 가속전압은 90 ~ 150kV, 빔 전류는 두께 23mm를 1pass로 용접할 수 있는 가속전압의 한계전류인 50 ~ 70mA로 설정하였다.

비이드 폭과 용입깊이는 profile projector (V-16E)를 사용하여 실물의 20배로 확대시켜 측정하였다. 결합율은 용착금속의 중심부를 기준으로 30x40mm 영역에 존재하는 결합을 200배로 확대하여 Image Analyzer로 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 비이드형상에 미치는 $a_b$ 의 영향

고밀도 에너지 빔을 이용하는 전자빔 용접은 кип 현상에 의해서 용접되는 것이 특징이다. 따라서 용접조건에 따라 용융금속의 유동현상이 다르기 때문에, 용접조건은 비이드의 형상 및 외관, 용접 결합 등에 직접적인 영향을 미치게 된다. 우선  $a_b$ 값에 따른 비이드의 폭 및 깊이의 변화를 조사하여 보았다. 용접전압 및 전류는 각각 90kV-70mA, 120kV-60mA 및 150kV-50mA의 3조건으로 설정하였다.

그림 1 ~ 그림 3은 각각 90kV-70mA, 120kV-60mA 및 150kV-50mA인 조건으로 용접한 경우  $a_b$ 값에 따른 비이드 단면의 형상을 나타낸 것이다. 같은 용접조건이라도  $a_b$ 값에 따라서 용입깊이 및 비이드 폭의 차이가 크고, 전압이 높을수록 그 차이가 아주 큰 경향이 있다. 한편 비이드 폭은 용입깊이가 깊을수록 좁은 것을 볼 수 있다.

즉, 그림 1 ~ 그림 3을 비교하여 보면, 90kV에서는  $a_b$ 값에 관계없이 모두 와인 컵(wine cup) 모양의 비이드 형상을 나타내고, 120kV 및 150kV에서는 대체로 고밀도 에너지빔 용접에서 나타나는 전형적인 우물(well) 모양의 비이드 형상을 나타내고 있지만,  $a_b$ 값이 큰 1.4와 1.6에서는 와인 컵(wine cup) 형상을 나타내고 있는 것이 특징이다.

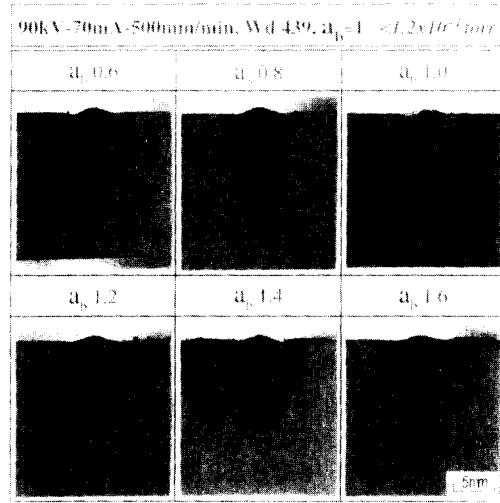


Fig. 1 Variations of bead shape with active parameter

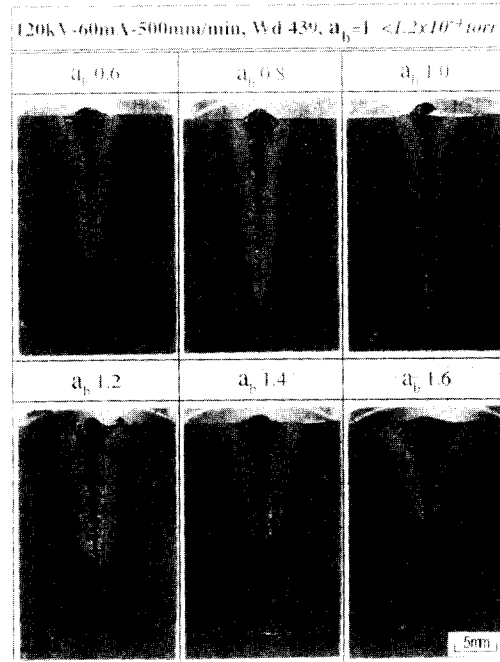


Fig. 2 Variations of bead shape with active parameter

90kV의 조건에서는 전자빔의 에너지 밀도가  $2 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup> (제1보의 결과)로 비교적 낮고, 전자빔

의 직경도 1.5mm 내외로 초점위치를 중심으로 상당히 넓은 범위에서 비슷한 값을 나타내기 때문이라고 생각된다. 또한, 120kV 및 150kV라도  $a_b$ 값이 1.4이상에서는 와인 컵(wine cup) 모양으로 변화하는 것은 집속된 전자빔의 위치가 시편의 표면에서 멀리 떨어져 있기 때문에 에너지밀도가 낮을 뿐만 아니라 전자빔의 크기가 커지기 때문에 형성된 것으로 생각된다.

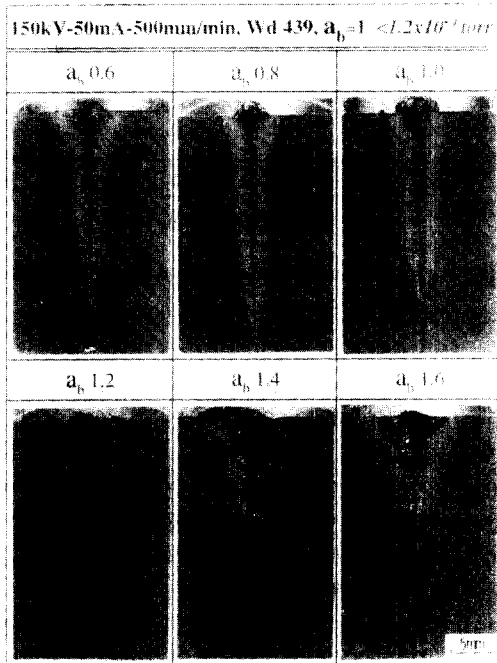


Fig. 3 Variations of bead shape with active parameter

그림 4는 앞의 사진들로부터 측정된 비이드 폭의 변화를  $a_b$ 값의 변화에 따라 나타낸 것이다. 비이드 폭은 표면(P/S표시), 표면에서 용입깊이의 1/2 지점(P/2로 표시)에서 측정하였다. 90kV의 경우,  $a_b$ 값의 변화에 따라 표면 비이드 폭은 크게 변화하지 않지만, 에너지 밀도와 출력이 높은 120kV와 150kV의 경우에는 한계값이 나타나고 있다. 즉 120kV의 경우,  $a_b$ 값이 0.8 ~ 1.2의 범위에서 표면 비이드 폭이 약 5mm정도로 좁지만, 이를 벗어난 범위에서는 증가한다. 더욱 출력이 높은 150kV의

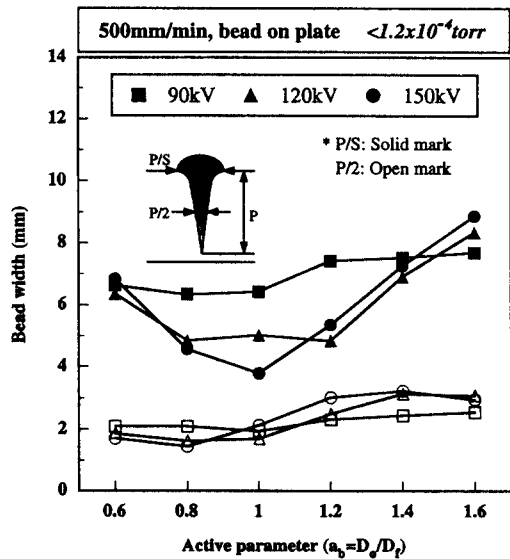


Fig. 4 Variations of bead width with active parameter at various positions

경우,  $a_b$ 값 1.0에서 비이드 폭의 극소점이 나타나는 것이 특징이다.

용입깊이 1/2지점의 비이드 폭은 용접조건에 관계없이  $a_b$ 값이 1.0이하에서 일정하지만,  $a_b$ 값이 1.0이상에서 약간 증가하는 경향을 나타내고, 증가 폭은 90kV보다 120kV 및 150kV가 크다. 또한 표면 비이드 폭은 1/2지점의 비이드 폭보다 2-3배 이상 넓다.

이것은 제1보에서도 언급한 바와 같이 가속전압이 90kV에서 120kV로 증가하면 에너지 밀도가 2배로 증가하여  $4 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 에 이르고 최소 전자빔 직경도 약 1mm정도로 작아진다. 따라서 90kV에서는 나타나지 않았던 최소 표면 비이드 폭이 초점위치 부근인  $a_b$ 값 0.8 ~ 1.2 범위에서 나타나고 있다. 그리고 용입깊이의 1/2 위치에서 비이드 폭은  $a_b$ 값이 증가함에 따라 약 1.5mm에서 3mm까지 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있으나  $a_b$ 값이 0.8과 1.0 위치에서 가장 작은 1.6mm를 나타내었다. 이러한 결과는 집속된 전자빔이 시편 표면( $a_b = 1.0$ )에서 멀어질수록 시편에 충돌되는 전자빔의 에너지 밀도 뿐만 아니라 크기가 커지기 때문에 비이드 폭은 증가한다. 따라서 집속된 전자빔을 시편 표면이나 약간 아래에 위치하는 것이 전자빔에

너지 흡수효율 측면에서 전체적인 비이드 폭을 줄일 수 있는 효과적인 방법임을 알 수 있다.

또한, 150kV의 조건에서는  $a_b$ 값의 증가에 따라 명확한 표면 비이드 폭의 경향을 잘 나타내주고 있다. 용입깊이의 1/2 위치에서는  $a_b$ 값이 1.0이상으로 증가함에 약 3mm까지 증가하고 있다. 이러한 경향은 150kV의 경우 에너지 밀도가 높고 집속할 수 있는 전자빔의 크기가 작을 뿐만 아니라 제1보에서 나타낸 바와 같이 집속된 전자빔의 주변에서 전자빔의 크기가 저 전압(90kV)에 비해 큰 폭으로 변화하기 때문에 나타난 현상으로 해석된다. 즉, 시편의 표면에 집속된 경우 ( $a_b=1.0$ ) 가장 작은 표면 비이드 폭을 나타낸 것으로 생각되며, 집속된 전자빔이 표면에 머물러질수록 시편 표면에 전자빔의 크기는 커지기 때문에 시편에 충돌되는 전자빔의 에너지 밀도는 작아져 충분한 키홀을 형성하지 못하여 표면 비이드 폭은 증가하게 된다. 그러나 용입깊이의 1/2 위치에서 비이드 폭은  $a_b$ 값이 증가함에 따라 120kV의 경우와 마찬가지로 완만한 증가를 나타내고 있지만  $a_b=0.8$ 에서 가장 작은 1.4mm의 비이드 폭을 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 표면과 용입깊이의 1/2 위치에서 비이드 폭이 가장 작게 형성되는  $a_b$ 값의 위치가 다른 이유는  $a_b=1.0$ 인 경우 표면에서 집속된 전자빔의 크기가 가장 적기 때문에 표면에서 비이드 폭이 가장 적게 나타나는 반면, 표면에서의 에너지 손실이 커 내부로 전자빔이 침투할 수 있는 전자빔의 능력 및 에너지의 효율이 작아지기 때문에 비이드 폭이 다소 증가하게 된다. 그러나  $a_b=0.8$ 인 경우에는 집속된 전자빔이 시편의 내부에 위치하기 때문에 표면 비이드 폭은 다소 증가하지만 시편 내부에서 집속된 전자빔의 크기가 작고 고밀도 전자빔의 에너지 전환 효율이 크기 때문인 것으로 생각된다.

이상으로 부터 가속전압이 90kV에서 150kV로 증가할수록 비이드 형상은 와인 컵(wine cup)형상에서 우물(well)형상으로 변화하고, 표면 비이드의 최소폭은 6.5mm에서 최소 3.7mm로 감소함을 알 수 있다. 또한, 표면 비이드 폭은  $a_b$ 값에 따라서 변화하고 고출력인 150kV에서는  $a_b=1.0$ 에서 최소의 표면 비이드 폭을 나타내었다.

그림 5는 그림 1~ 그림 3에서 각 조건별로  $a_b$ 값에 따른 용입깊이의 변화를 정리한 것이다. 먼저 90kV 조건의 경우  $a_b$ 값에 따른 용입깊이는 10 ~

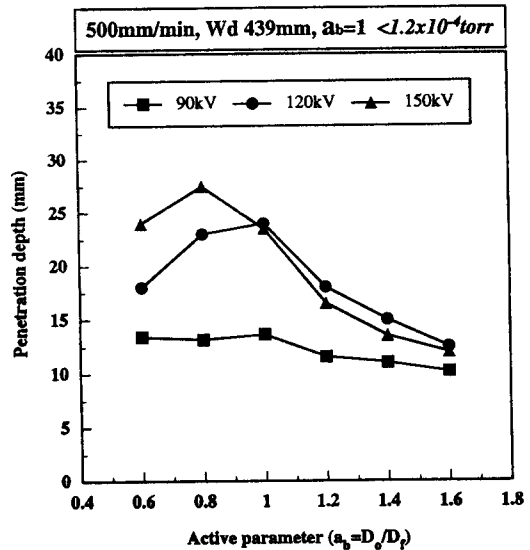


Fig. 5 Variations of penetration depth with active parameter

13mm 범위로서 그 변화가 그다지 크지 않다. 즉  $a_b=1.0$ 의 기준보다 낮은 범위에서는 용입깊이가 13mm정도로서 일정하지만, 그 이상에서는 10mm 정도까지 감소하고 있다. 이것은 앞에서 설명하였지만, 90kV의 조건에서 에너지 밀도가  $2 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 로 비교적 낮고 전자빔의 직경도 초점근처의 넓은 범위에서 비슷한 값을 나타내기 때문이라고 생각된다. 그러나 120kV 및 150kV 조건의 경우는  $a_b$ 값이 증가함에 따라 용입깊이가 증가하여 최대 값을 나타낸 후 다시 점차 감소하는 경향을 보이며, 이러한 최대 점을 기준으로 할 때  $a_b$ 값이 낮은 쪽이 높은 쪽에 비해 용입이 깊다. 왜냐하면 초점위치가 시편의 내부에 존재하게 되면 시편에 침투하는 전자량과 충돌 발열 에너지의 흡수 전환 효율이 좋기 때문이다.

따라서 120kV 및 150kV 조건에서 용입범위는 각각 13 ~ 23mm 및 12 ~ 27mm 정도이며, 최대 용입깊이는 각각  $a_b=1.0$ 에서 23mm 및  $a_b=0.8$ 에서 27mm정도이다. 또한, 150kV의 경우에 시험재 두께인 23mm정도의 용입깊이를 얻기 위한 조건은  $a_b=1.0$ 임을 확인할 수 있다.

이와 같이 고전압( $\geq 120\text{kV}$ ) 조건에서  $a_b$ 값에 따라 용입특성이 명확히 나타나는 것은 저 전압( $<$

90kV) 조건에 비해 에너지 밀도가 높고, 빔 직경도 작기 때문이다. 또한  $a_b$ 값에 따른 용입깊이의 차이는 에너지 밀도 외에 초점위치에 따른 빔 cavity의 크기, 용융금속의 배출정도등에도 기인한다. 즉  $a_b=1.0$  부근에서는 최소직경의 전자빔이 시험편 표면에 위치하여 에너지 밀도가 최대로 되고, 용융에 의한 표면개구부가 좁아 용융금속이 배출되기 곤란하게 된다. 따라서 빔 cavity내에 용융금속이 머무는 시간이 다소 길어지기 때문에 깊은 용입을 얻게 된다. 또한  $a_b < 1.0$ 인 경우에는 빔의 초점이 시편 내부에 위치함으로써 용융에 의한 표면개구부의 크기가 증가하여 용융금속이 쉽게 배출될 뿐만 아니라 시편 내부에서의 에너지 밀도가 크기 때문에 용입도 깊게 된다. 그러나  $a_b > 1.0$ 인 경우에는 전자빔의 초점이 시편의 상부에 위치하기 때문에 시편 표면에서의 용융에 의한 개구부가 크고, 시편 내부로 갈수록 에너지 밀도가 낮아 상대적으로 용입도 작아지게 된다.

또한, 집속된 전자빔의 초점위치가 시편의 상부에 있을 때 ( $a_b > 1.0$ ) 시편에 충돌되는 전자빔의 크기도 크고 상당히 많은 고밀도 에너지가 시편 표면 상부에서 소실된다. 반면 초점위치가 내부에 있을 때는 ( $a_b < 1.0$ ) 상대적으로 전자빔의 에너지 흡수 전환효율이 크기 때문에 에너지밀도가 클수록 이러한 현상은 더욱 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 $a_b$ 값에 따른 용접부 결합 발생특성

일반적으로 전자빔 용접시의 결합은 거의 대부분 부분용입의 경우에 발생되며, 그 종류도 기공, cavity, spike, 저온균열, 고온균열등 매우 다양하다. 이러한 결합들은 주로 전자빔 및 재료의 특성에 의존하게 된다. 재료의 특성에서는  $O_2$ ,  $N_2$  등 가스 및 Mn, Mg, Zn 등 휘발성 원소의 영향이 크고, 기공발생에도 매우 민감하다고 알려져 있다. 또한 전자빔 특성에서 중요한 인자는 초점부근의 형상, 에너지 밀도등과  $a_b$ 값을 비롯하여 재료 내에서 전자빔 선단부의 곡률이 중요하며, 반경 0.5mm 전후가 root 기공이 발생하는 한계값으로 되어 있다.<sup>7)</sup>

이러한 인자들 중에서도 특히  $a_b$ 값은 용입깊이 뿐만 아니라 결합형성을 좌우하는 주요인자로서

전향에서 검토한 용접조건 및  $a_b$ 값의 범위에서 결합의 발생 정도를 검토하였다.

그림 6은  $a_b$ 와 가속전압에 따른 spike 발생 특성을 그림 1 ~ 3의 조건으로 시험하여 정리한 것이다. 즉, 90kV의 조건에서는  $a_b$ 에 관계없이 spike의 root 형상이 완만한 blunt spike가 형성된다(그림 7 참조). 그러나 120kV 이상에서는  $a_b$ 의 조건에 따라 spike root부가 아주 예리한 sharp spike와 완만한 blunt spike가 나타남을 알 수 있다(그림 8과 9 참조). 이러한 결과는 앞에서 설명한 바와같이 90kV조건에서는  $a_b$ 값에 따른 전자빔 직경의 크기 변화가 작을 뿐만 아니라 에너지 밀도가 낮기 때문에 blunt spike가 형성되는 것으로 생각된다. 그러나 고전압( $\geq 120kV$ )에서는  $a_b$ 값에 따른 전자빔 직경의 크기 변화가 크고 에너지 밀도도 크기 때문에, 특히  $a_b \leq 1.0$ 의 조건에서 고밀도 에너지가 키홀을 통하여 시편의 root부에 도달될 확률이 증가하게 된다. 따라서 가속전압이 클수록 sharp spike의 발생 영역이 넓어지고  $a_b \leq 1.0$ 의 조건에서 sharp spike가 발생할 가능성이 높아지게 된다. 이것은 용착금속 길이방향 중앙 절단면에 대해 나타난 그림 7 ~ 그림 9로 부터 blunt (90kV) 및 sharp (120kV, 150kV) spike의 발생특성이 잘 나타나 있다. 또한, 이들 sharp spike의 주변에는 예외없이

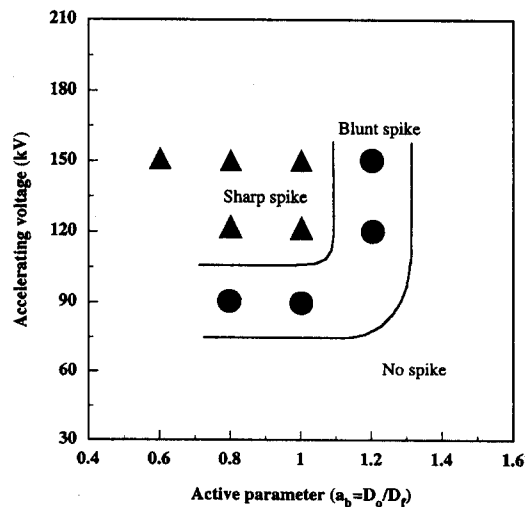


Fig. 6 Variations of spiking phenomena with active parameter and accelerating voltage

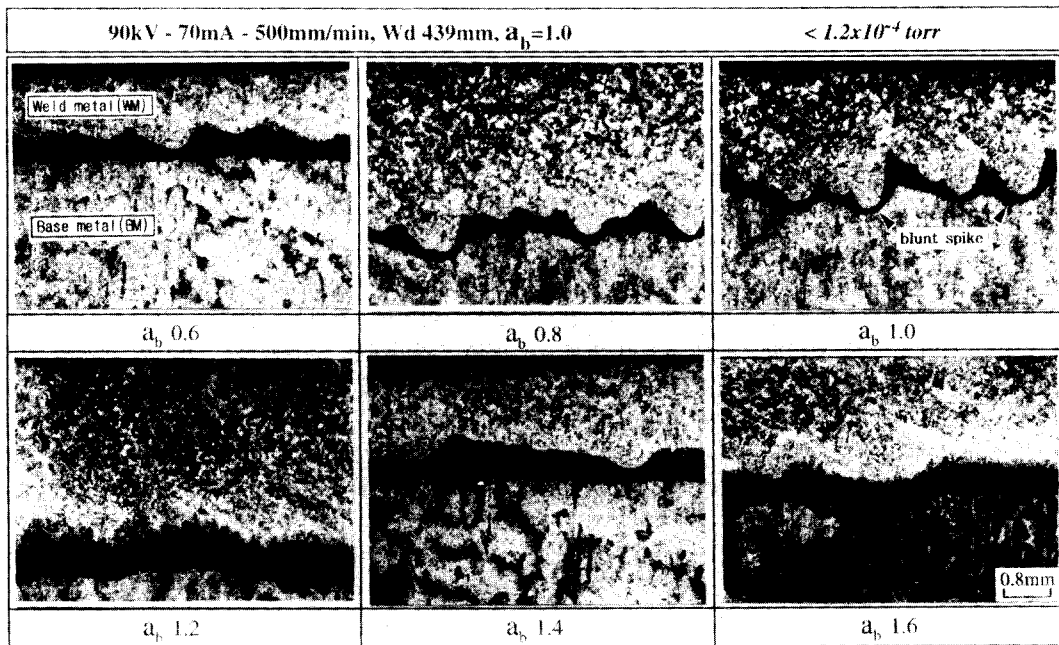


Photo. 7 Longitudinal sections through the roots of partially penetrated welds at various active parameters

다량의 기공을 포함하고 있기 때문에 가속전압과  $a_b$  값에 따른 기공발생 특성을 검토하고자 하였다.

그림 10 ~ 12는 기공발생 특성에 미치는 가속전압(90kV, 120kV, 150kV)과  $a_b$  값의 관계를 나타낸 것이다. 가속전압이 증가할수록 뚜렷한 기공의 발생경향이 나타나고 있으며,  $a_b \leq 1.0$ 의 조건에서 주로 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 10과 같이 90kV에서는  $0.8 \leq a_b \leq 1.2$ 의 범위에서 약간의 결함이 존재하지만 크기가  $0.001 \sim 0.01 \text{mm}^2$ 로 아주 작았다. 그러나 가속전압 120kV인 그림 11의 경우  $0.8 \leq a_b \leq 1.0$  범위에서 가장 많은 결함이 발생되고 있음을 보여주고 있고 이 범위를 벗어남에 따라 결함의 수는 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 한편, 150kV 조건에서의 기공발생 특성을 나타낸 그림 12에서는  $a_b$  값이 증가함에 따라 기공발생량은 급격히 감소하지만  $a_b \leq 1.0$ 의 조건에서 주로 발생하고 있다. 특히  $a_b = 0.6$ 의 조건에서 가장 많이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한, 결함은 root부 기공이 주종을 이루고 있고, 부분적으로 cold shut 및 길게 연신된 균열 형태의 결함도 일부 관찰됨으로서,

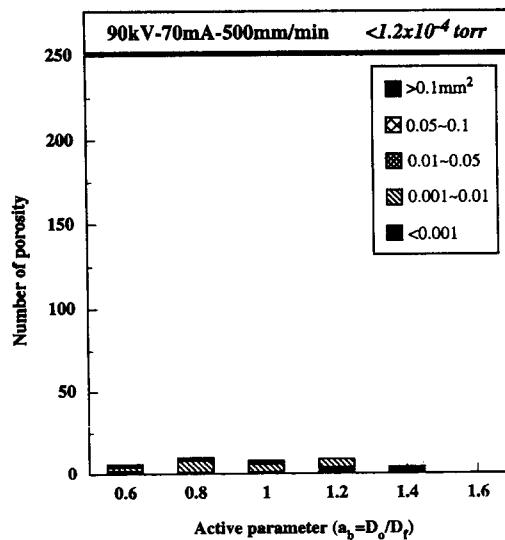


Fig. 10 Relationship between active parameter and porosity

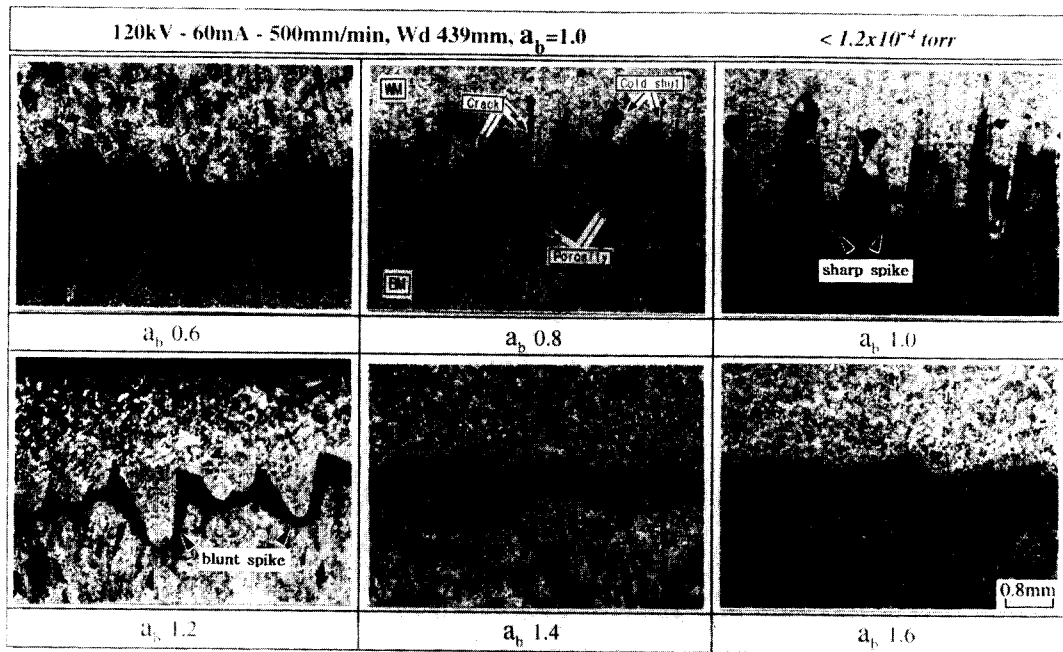


Photo. 8 Longitudinal sections through the roots of partially penetrated welds at various active parameters

발생하는 결함의 종류는 120kV의 경우와 거의 비슷하다. 그러나 기공은 120kV의 경우보다 비교적 크고, 일부 둥근 형태의 기공들이 서로 합쳐져 크고 길게 늘어진 형태를 나타내며, 연신된 균열은 대부분 ripple 선상에서의 융합불량인 cold shut로부터 발생된 것으로 확인되었다. 이와같이 고전압이 될수록 root부 기공이 커지고 발생하는  $a_b$ 의 범위가 확대되는 것은 고에너지 밀도 전자빔에 의한 용융금속의 비등현상에 기인한 것으로 생각되고 좁고 깊은 root부에서 일어나기 때문에 기공으로 잔존하기 쉬운 결과로 해석된다.

이상의 결과들을 종합하면 결함의 발생은 spike, 특히 예리한 형상을 가진 spike의 존재와 상관성이 있음을 알 수 있다. Fig.6에서 볼 수 있는 바와 같이, spike는 고전압일수록 형성되기 쉽고, 고전압에서도  $a_b$ 값이 1.0이하의 일정 범위에서 예리한 형상을 나타낸다. 즉 예리한 spike의 형성 한계는 120kV 이상의 고전압이며, 120kV에서는  $a_b$ 값이 0.8 및 1.0의 범위이지만, 150kV에서는 0.6의 조건에서도 형성되어 그 범위가 확대되고 있다. 또 이

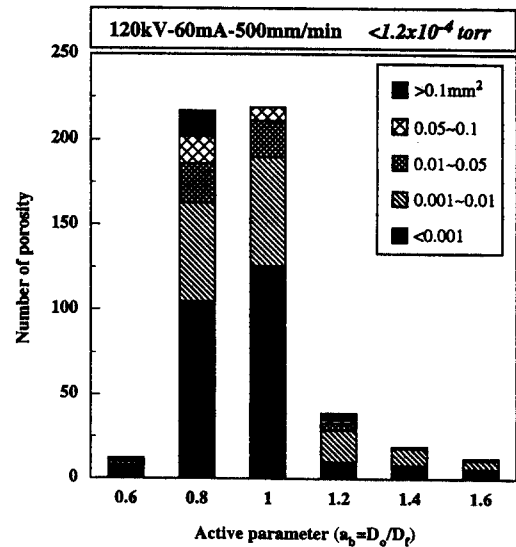


Fig. 11 Relationship between active parameter and porosity



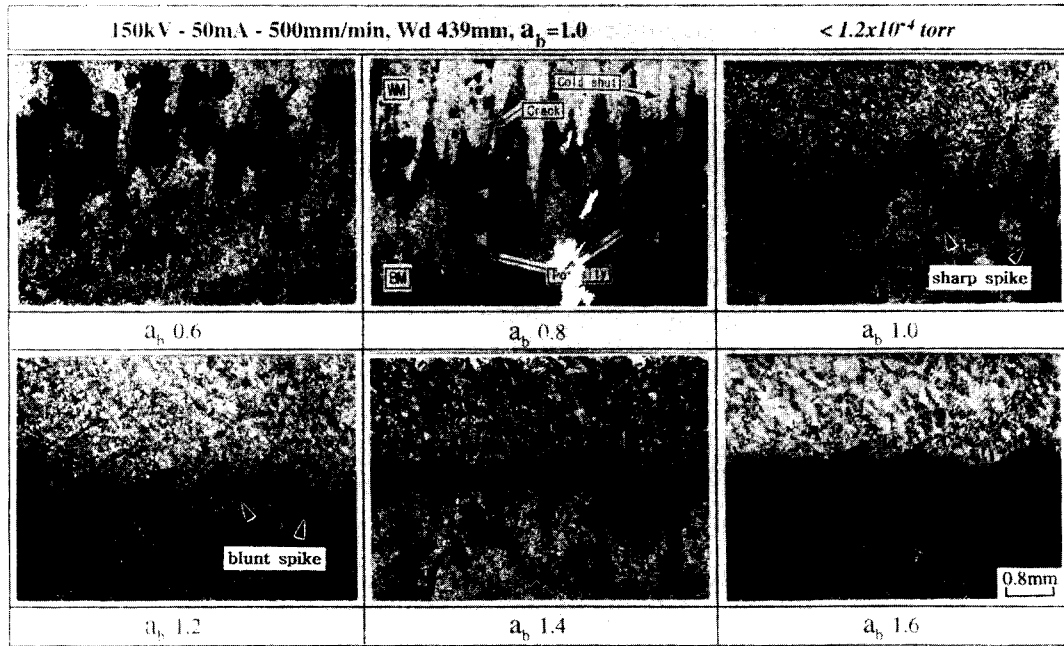


Photo. 9 Longitudinal sections through the roots of partially penetrated welds at various active parameters

러한 범위에는 약 23mm 이상의 용입깊이를 나타내는 조건이 모두 포함된다.

한편 blunt spike가 나타나는  $a_b$ 값의 영역은, 저전압인 90kV에서는 0.8 및 1.0의 범위이며, 비교적 고전압인 120kV에서는 1.2 부근이다. 이러한  $a_b$ 값은 14 ~ 20mm의 동일한 용접깊이를 나타내는 조건 중에서도 한정된 값으로서, 용입깊이와의 상관성을 보이지 않는다. 일반적으로 spike의 형성은 단속적인 용융현상과 전자빔 cavity 선단부에서 용융금속의 상태에 따라 결정된다고 알려져 있다.<sup>8)</sup>

즉, 어느 정도 이상의 에너지 밀도를 가지는 전자빔이 시편에 조사되면, 그 부분은 순간적으로 용융되고 증발하기 때문에 새로운 표면이 다시 가열되게 된다. Spike는 이러한 고속의 불연속 현상에 의해 형성되며 용융금속의 상태 및 모재중 개재물의 존재 등에 의해서도 영향을 받게된다. 따라서 청정도가 양호한 본 시험재의 spike 현상은 주로 에너지 밀도와 용접중 용융금속의 분포와 밀접한 관련이 있을 것으로 추정되어 塚本 등<sup>9)</sup>이 응고의 지연현상을 검토하기 위해 제시한 모델을 이용

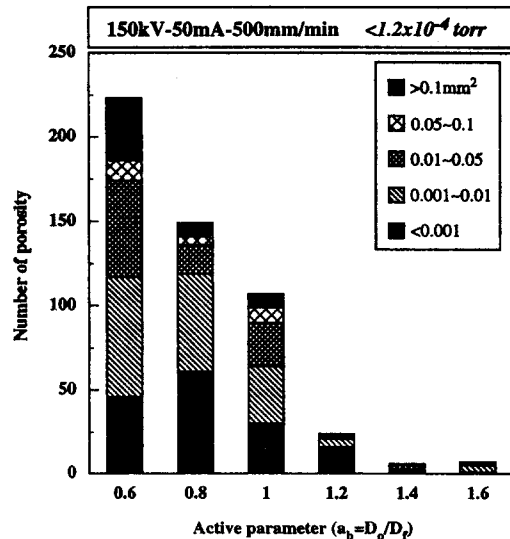


Fig. 12 Relationship between active parameter and porosity

하여 검토하였다.

즉, 초점위치가 시험편 내부에 있는  $a_b < 1.0$ 의 조건에서는 시편표면에서의 전자빔 직경이 크기 때문에 전자빔 cavity가 크게 형성된다. 또 전자빔 cavity 선단부에서는 에너지 밀도가 높고, 용융금속을 압박하여 상승시키는 추진력이 강하다. 따라서 용융금속이 쉽게 전자빔 cavity 밖으로 배출되어, cavity 선단부에서는 불연속 용융현상이 가속될 것으로 생각된다. 그러나 이러한 현상도 120kV 이상의 고전압과 각각의 전압별로 한정된  $a_b$ 값의 범위 내에서만 발생하여, 한계 에너지밀도가 존재함을 시사하고 있다. 즉, 120kV의  $a_b = 0.6$ 은 한계조건을 벗어나며, 150kV의  $a_b = 0.6$ 은 한계 값에는 포함되지만 전자빔 cavity 선단부에서의 에너지밀도 및 용융금속의 상승 추진력이 저하하여 기공들이 서로 합쳐지는 것으로 생각된다.

한편, 시편표면에 초점이 위치한  $a_b = 1.0$ 에서는 표면의 전자빔 직경이 감소하여 용융금속의 배출구가 좁아지고, cavity 선단부에서의 에너지 밀도도 약간 저하하기 때문에 추진력도 약하다. 따라서 용융금속이 전자빔 cavity내에 다소 잔존하게 되고, 그 하부에서도 약간의 용융금속이 잔류할 수 있기 때문에 불연속 용융현상은 감소할 수 있다. 그러나 이 경우는 에너지 밀도가 상대적으로 높아 120kV 이상의 고전압에서 불연속 용융현상이 필연적으로 발생할 것이다.

이상에서 언급한 두 조건과는 달리 초점위치가 시편 상부에 존재하는  $a_b > 1.0$ 의 조건에서는, 표면에서의 전자빔 cavity는 크지만 그 선단부에서의 에너지 밀도가 낮기 때문에, 전자빔 cavity 하부에 용융금속이 잔존하기 쉽다. 따라서 이러한 조건에서는 불연속 용융현상이 거의 발생되지 않는다. 그러나 본 실험결과에서도 일부 나타났지만 이 조건에서도 가속전압이 크게 증가한다면  $a_b$ 값이 1.0에 가까운 곳에서도 spike가 형성될 수 있을 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 제어방법이 제안<sup>10)</sup>되고 있지만 근본적인 해결책은 아직 없는 실정이다. 이들 결합은 본질적으로 전자빔의 고밀도 특성에 기인한 것이기 때문에 초점의 위치를 조절하거나 빔 oscillation을 통하여 에너지밀도를 저하시키는 방법이 일반적으로 적용되고 있다.

#### 4. 결 론

가속전압과  $a_b$ 값에 따른 용접부의 용입 및 비이드형상과 결합발생 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 90kV의 경우  $a_b$ 값에 관계없이 표면 비이드 폭은 6.5 ~ 7.5mm, 용입깊이의 1/2 위치에서 비이드 폭은 2mm 내외로서 거의 일정하였으며, 비이드 형상은 모두 와인 컵(wine cup) 형상을 나타내어 약간의 blunt spike가 잔존할 뿐 기공 발생이 10개 이하로 아주 작았다. 그리고  $a_b$ 값에 따른 용입깊이는 10 ~ 13mm 범위로서 변화가 적으며  $a_b \leq 1.0$  범위에서는 용입깊이가 13mm로 일정하지만  $ab > 1.0$ 에서는 10mm 까지 감소하였다.

2) 에너지 밀도가 큰 120kV 및 150kV 조건에서는 각각  $0.8 \leq ab \leq 1.2$ ,  $a_b = 1.0$ 에서 표면 비이드 폭이 5mm와 3.7mm까지 감소하였고, 대부분 전형적인 우물(well) 형상의 비이드 형상을 나타내었지만  $a_b \geq 1.4$ 에서는 와인 컵(wine cup) 형상으로 변화하였다.

3) 고전압 ( $\geq 120kV$ ) 조건의 경우  $a_b$ 값이 0.6에서 1.6으로 증가함에 따라 용입깊이가 증가하여 최대값을 나타낸 후 다시 점차 감소하는 경향을 보이며, 이러한 최대점을 기준으로 할 때  $a_b$ 값이 낮은 쪽이 높은 쪽에 비해 용입이 깊다. 즉 120kV 및 150kV에서의 용입범위는 각각 13 ~ 23mm 및 12 ~ 27mm 정도이며, 최대 용입깊이는 각각  $a_b = 1.0$ 에서 23mm 및  $a_b = 0.8$ 에서 27mm 정도이다. 또한 150kV의 경우에서 목표시편 두께인 23mm의 용입깊이를 얻기 위한 조건은  $a_b = 1.0$ 임이 확인되었다.

4) 부분용입 조건에서 발생하는 결합의 대부분은 root부 기공이며, cold shut과 연신된 균열성 결합도 부분적으로 관찰되었다. 이들 결합의 발생은 spike, 특히 예리한 형상을 가진 spike의 존재와 밀접한 상관성이 있다. 즉 spike는 고전압일수록 형성되기 쉽고, 고전압 ( $\geq 120kV$ )에서도  $a_b \leq 1.0$  이하의 일정 범위에서 예리한 형상을 나타냄으로써, 에너지 밀도 및 용융금속의 분포에 영향을 받는다고 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. 金内 奉八: "電子ビ-ム加工", 電氣學會雜誌, Vol. 105, No. 10 (1985) pp. 29~31
2. 喜多, 和田, 本島, 飯店, 宇尾: "大型眞空容器への電子ビ-ム溶接の適用", 溶接學會論文集, Vol. 50, No. 3, (1981)
3. 佐藤, 下山, 高野, 南久利, 内川: 局所眞空動シ-ル方式電子ビ-ム溶接の實用化, 電子ビ-ム溶接研究委の資料, EBW-292-84 (1982)
4. 塚本 進, 入江宏定: "電子ビ-ム溶接における局所的な凝固の遅れの形成因子", 溶接學會論文集, Vol. 8, No. 2 (1990), pp. 15~21
5. 入江宏定, 塚本 進: "電子ビ-ム溶接における縦割れの發生機構", 溶接學會論文集, Vol. 6, No. 4 (1988), pp. 21~27
6. R. E. Armstrong: "Control of spiking in partial penetration electron beam welding", Welding Journal, Vol. 49, No. 8, (1970)
7. 荒田吉明: "特殊溶接技術の進歩", 鐵と鋼, Vol. 65, No. 9, (1979), pp. 1483~1492
8. 入江 宏定, 橋本 達哉, 稻垣 道夫: "電子ビ-ム溶接溶込み科程のミクロ的觀察", 溶接學會誌, Vol. 50, No. 11 (1981), pp. 1125~1129
9. 塚本 進, 入江 宏定: "電子ビ-ム溶接における溶融金屬の舉動 (第1報) -縦割れ發生機構-", 電子ビ-ム溶接研究委員會資料, EBW-313-83, (1983), pp. 1~20
10. Susumu Tsukamoto, Hirosada Irie: Prevention of welding defects using modified electron beam, IIW. Doc. IV-577-91, 1