

Aluminum 1060의 저출력 전자빔 용접부 bead 특성

이돈배, 우윤명, 김기환, 김창규
한국원자력연구소

요 약

하나로 핵연료의 피복관과 봉단마개 재료로 사용되는 Aluminum 1060의 전자빔 용접부의 비드 특성을 조사하기 위하여 bead-on-plate 용접을 하였다. 비드의 단면을 절단하여 가속전압, 빔 전류, 용접속도에 따른 비드의 폭과 용입 깊이의 변화를 측정하고 용접부에 발생한 용접결함을 관찰하였다. 실험결과 가속전압과 빔 전류의 증가에 따라 용입 깊이는 직선 비례적으로 계속 증가하였지만 비드폭은 그 증가율이 감소하는 경향이였다. 용접속도의 증가에 따라서 비드 폭과 용입깊이는 감소하는 경향을 보였다. 또한 빔 출력이 높은 용접부의 root부에 다수의 porosity 가 발생하는 것을 관찰 할 수 있었으며 핵연료 봉단 마개의 porosity와는 다른 것을 확인하였다.

1. 서 론

Aluminum은 소성가공이 용이하고 낮은 중성자흡수 단면적을 갖고 있기 때문에 연구용 핵연료의 피복관 및 부품으로 널리 사용된다. 1995년 준공되어 가동 중에 있는 하나로의 핵연료 피복관과 봉단마개 재료로 Al 1060이 사용된다. 일반적으로 알루미늄 재료는 용융온도가 낮고 용접점열이 크기 때문에 국부 가열이 어려우며, 특히 순수 알루미늄의 경우 열전도도가 매우 높아서 용접 할 때 열 영향부가 커지고 공기 중에서 산소와 접촉하여 산화물 피막을 형성하여 용접을 어렵게 하기 때문에 정밀한 용접을 위해서는 에너지 밀도가 높은 열원이 필요하며 결함이 없는 건전한 용접부를 얻기 위해서는 불활성 분위기에서 용접을 해야한다. 전자빔 용접은 진공(1×10^{-4} mmHg이하)중에서 filament를 전기저항으로 가열할 때 표면으로부터 방출되는 전자를 고속으로 집속시킨 전자beam을 열원으로 이용하는 것으로서 용접에 적용할 경우 에너지 집중도가 매우 높기 때문에 비드폭이 좁으면서 용입이 깊은 심용입 특성을 나타내어 고속용접과 열변형이 극히 적은 용접을 가능하게 한다. 하나로의 운전에 사용하는 핵연료는 AECL이 개발한 연구용 핵연료와 같은 종류이다. 하나로 핵연료 제조공정 중에서 피복관과 봉단 마개를 용접하는 기술은 피복관 두께가 매우 얇고(0.76mm) 접합부위의 직경($\phi 7.87$)도 비교적 작을 뿐 아니라 핵연료봉과 피복관 사이에 미세한 틈이 존재하기 때문에 매우 정밀한 용접이 이루어지지 않으면 그 품질을 만족하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 핵연료 봉단 마개 용접부의 칫수를 고려하여 낮은 출력으로 Aluminum 1060 plate에 전자빔 용접을 적용하였을 때 그 비드 특성을 조사하여 핵연료 봉단 마개 용접을 위한 자료로 활용하고자 하였다..

2. 실험방법

가속전압과 빔 전류 및 용접속도의 변화에 따른 비드의 특성을 알아보기 위하여 길이 60mm, 폭 25mm, 두께6mm의 Aluminum 1060 plate에 bead-on 용접을 수행하였다. 가속전압은 각각 60kV, 90kV, 120kV로 설정하고 빔 전류를 4.5mA에서 16mA 까지 변화시켰다. 또 가속전압 90kV에서 빔 전류를 각각 4.5mA, 10mA로 일정하게 유지하고 용접속도를 변화 시키면서 용접을 실시하였다. Focusing lense의 중심으로부터 workpiece의 표면까지의 거리와 빔의 초점거리의 비인 Beam active parameter($a_b=D_o/D_f$)는 모든 조건에서 1.0으로 일정하게 유지하였다. 용접부를 절단하여 연마한 후 NaOH 30% 용액으로 4분 동안 부식시켜 금속현미경으로 용접부의 단면을 관찰하고 비드폭과 용입 깊이를 측정하였다. 실험에 사용한 재료의 화학성분은 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Chemical composition of Al 1060(wt%)

Al	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	others
99.6	0.25	0.05	0.35	0.03	0.03	0.03

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1과 Fig. 2는 용접속도 V_b 를 735mm/min로 일정하게 유지하고 빔 전류를 5mA, 7mA, 10mA로 변화시키면서 용접하였을 때 가속전압과 비드 폭 및 용입 깊이의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 가속전압이 증가함에 따라 비드 폭은 증가하지만 90kV 이상으로 가속전압이 높아지면서 그 증가율은 감소하는 경향이다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가속전압이 증가할수록 용입 깊이는 직선 비례적으로 증가하며 그 증가율은 빔 전류가 높을수록 크게 되었다. 또한 같은 빔 출력이라도 가속전압이 높을 때 용입 깊이가 더 깊은 것으로 나타났다. Fig. 3은 가속전압 120kV, 용접속도 735mm/min로 일정하게 유지하고 용접하였을 때 빔 전류와 비드폭 및 용입 깊이의 관계를 나타낸 것이다. 빔 전류가 증가함에 따라 비드 폭과 용입 깊이가 증가하였으며 용입 깊이는 빔 전류가 증가함에 따라 거의 비례적으로 증가하는 경향이며 비드 폭은 빔 전류가 10 mA 이상으로 증가함에 따라 그 증가율이 급격히 감소한다. 즉 빔 출력이 증가함에 따라 용입 깊이는 계속 증가하지만 비드폭은 어떤 점에서부터는 그 증가가 둔화되어 용입 깊이와 비드폭의 비가 점차 증가하게 된다.

Fig. 4는 가속전압 90kV, 빔 전류 10mA에서 용접속도와 비드 폭 및 용입 깊이의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 용접속도가 증가할수록 비드폭과 용입 깊이는 다소 감소하는 경향이다. Fig. 5는 용입 깊이가 각각 다른 비드의 root부분을 나타낸 것이다. Fig 5(a)는 가속전압 90kV, 빔전류 5mA로 용접한 것이고 비드의 용입 깊이는 0.7mm이다. 또 Fig 5(b)는 가속전압 120kV, 빔전류 7mA, 용접하였을 때 비드의 root 부분을 나타낸 것이며 비드의 용입 깊이는 2.0mm이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 용입 깊이가 깊은 용접부의 root부분에 10-30 μ m정도인 다수의 작은 porosity가 집중적으로 존재하고 있었으며.

용입 깊이가 깊을수록 porosity의 발생 수가 많은 것으로 관찰되었다. 이러한 porosity는 용융지 바닥에서 일어나는 용융 금속의 심한 요동(fluctuation)으로 인한 bubbles[1,2]일 가능성이 큰 것으로 생각된다. 실제 핵연료 봉단 마개 용접에서 발생하는 가장 큰 문제점은 Fig 6과 같은 porosity의 발생이다. 그러나 그 크기는 200-400 μ m 정도나 되며 피복관과 봉단마개 틈새 가까운 곳에 발생하는 것이 특징이다[3]. 이것은 Fig. 5(b)에 나타난 porosity와는 그 발생 원인이 전혀 다른 것으로 생각된다. 재료 자체의 문제나 용접조건의 문제가 아니라 핵연료봉의 구조와 제조 공정이 진행되는 동안 흡수된 수분이나 개스, 기타 불순물이 원인인 것으로 생각된다.

4. 결론

- 1) 가속전압과 빔 전류가 증가함에 따라 용입 깊이는 비례적으로 증가하고 비드 폭은 어느 정도 증가 하다가 그 증가율이 감소한다.
- 2) 용접속도가 증가함에 따라 비드 폭과 용입 깊이는 감소한다.
- 3) 빔 출력이 큰 용접부의 비드의 root부분에서 많은 porosity가 발생하였으나 핵연료 봉단 마개 용접부에 발생한 porosity와는 다른 것을 확인하였다.

5. 참고문헌

1. Michio Tomie, Nobuyuki Abe, "Tandem Electron Beam Welding" Trans. JWRI vol. 17 No.2 1988
2. Yoshaki Arata, Michio Tomie "Observation of molten metal flow during EB welding" Trans. JWRI vol. 16 No. 1, 1987
3. 김창규 등, 연구로용 핵연료 재료개발, KAERI/RR-1756/96

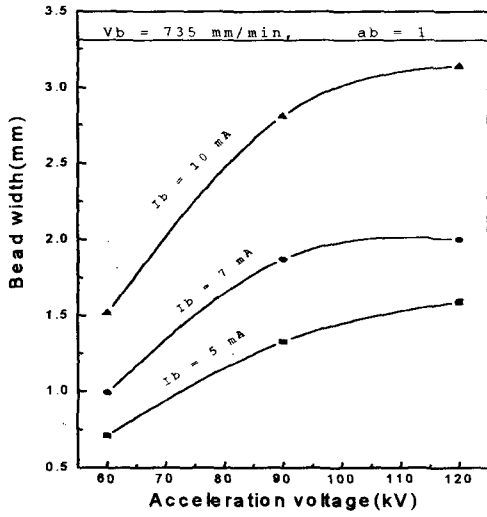


Fig. 1 Relation between acceleration voltage and bead width

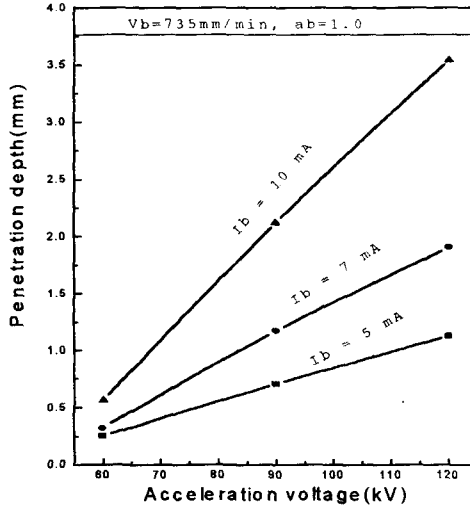


Fig. 2 Relation between acceleration voltage and penetration depth

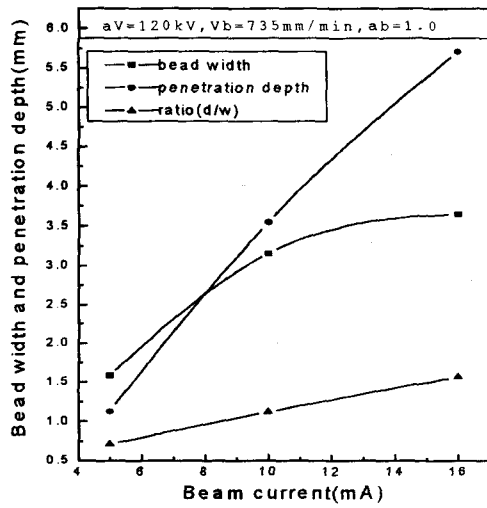


Fig. 3 Relation between beam current I_b and cross section of the bead

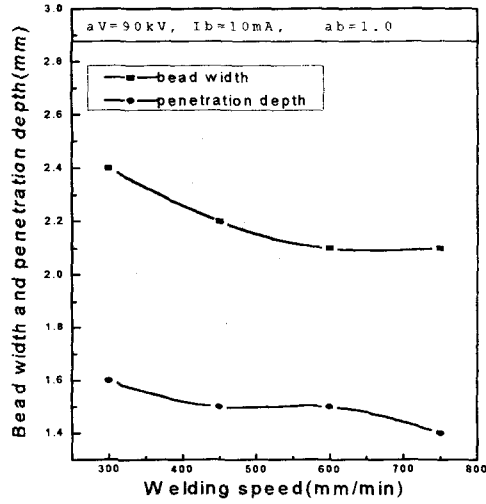


Fig. 4 Relation between welding speed V_b and cross section of the bead

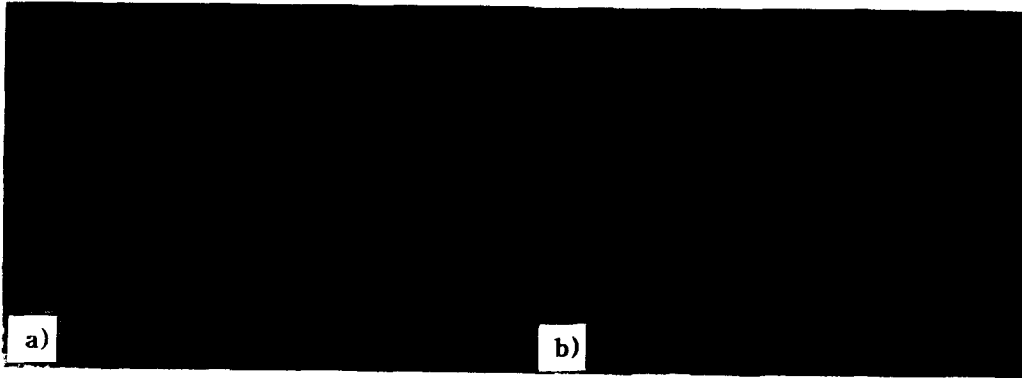


Fig. 5 Optical micrographs showing the cross section(root area) of EB welds.($\times 100$)
a)90kV, 5mA, b)120kV, 7mA



Fig. 6 Optical micrograph showing the porosity occurred between clad and plug($\times 50$)