

## 기술논문

## 니오븀의 전자빔 용접성

안병훈\*, 윤종원\*, 김숙환\*\*

\*동의대학교 신소재공학과

\*\*포항산업과학연구원

## Electron beam weldability of Niobium

Byung Hun An\*, Jong Won Yoon\*, Sook Hwan Kim\*\*

\*Department of Advanced Materials Engineering, Dong-eui University

\*\*Research Institute of Industrial Science &amp; Technology

## ABSTRACT

Electron beam (EB) weldability of pure grade Nb sheet was studied. One of Nb sheets was as-annealed and the other was cold rolled. Microstructures, Vickers hardness, and transverse weld tensile test were carried out for the base metal, the heat affected zone (HAZ) and weld metal. In the case of the EB welds made using the annealed Nb sheet, fine equiaxed grains and coarse grains were dominant at the base metal and the HAZ, respectively, and columnar grains were observed at the weld metal. For the EB welds made using the cold rolled Nb sheet, elongated grains in the rolling direction at the base metal, and the microstructures of the weld metal and the HAZ are similar to those of the EB welds made using the annealed Nb sheet, respectively. For both annealed and cold rolled Nb sheet, the width of the HAZs are unusually wide in spite of using high density heat source, i.e. electron beam, and the grain sizes of both HAZs are similar. When tensile test was carried out using the transverse weld specimens, the failure occurred at the HAZ for both EB welds made using Nb sheets annealed and cold rolled, respectively and the tensile strengths of both specimens were 161MPa. Vickers hardness of EB welds made using annealed Nb was 56-57 Hv at both base metal and weld metal, 52-53 Hv at the HAZ. On the other hand, Vickers hardness of EB welds made using cold rolled Nb was 97-99 Hv at the base metal, but the hardness values of weld metal were similar to those obtained at the weld metal of annealed Nb.

**Key Words** : Niobium, electron beam welding, mechanical properties, microstructure

## 1. 서론

최근 극한의 효율과 성능을 지닌 전자소자들이 초전도 재료를 이용하여 개발되고 있으며<sup>[1]</sup>, 이러한 초전도 재료는 소비전력을 상당히 감소시킬 수 있는 신소재로 각광받고 있다. 1911년 네덜란드의 카메링 오네스가 수은에서 초전도 현상을 처음 발견한 이래 초전도 재료의 무한한 응용가능성이 제안되고 연구개발 되어 왔다. 1987년 액

체질소로 냉각하여도 초전도성을 나타내는 고온 초전도 물질이 발견되면서 초전도 응용기술의 경제성과 실현 가능성이 한층 더 높아지게 되었으며 새로운 응용분야도 출현하게 되어 세계적인 기술개발의 열기가 달아오르게 되었다. 1990년대 중반기 이후 초전도 마이크로웨이브 공동기가 본격적으로 도입되기 시작하여 최근에 건설되는 입자 가속기는 대부분 초전도 재료로 만들어진 공동기를 이용하여 입자들에 에너지를 가한다. 초

전도 소재의 하나인 Nb은 입자가속기의 에너지 공급용 SRF(Superconducting Radio Frequency) Cavity 소재로 이용되고 있다. 고순도 Nb으로부터 만들어지는 SRF Cavity는 딥 드로잉 금속성형을 통하여 반구형의 half cell을 만들고 이들을 조립하기 위하여 전자빔 용접이 적용되고 있다. 전자빔 용접은 극저온에서 초전도 특성을 확보하기 위하여 용접금속과 열영향부의 폭을 최소화 하고 고품질의 용접부를 획득하기 위해서 이용된다. 그러나 고순도 Nb SRF Cavity의 미세조직과 기계적, 전자기적 특성들에 영향을 주는 전자빔 용접에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 이전의 연구에서 Nb소재를 SRF Cavity에 적용키 위해 어닐링 되어있는 Nb 판재를 반구형상으로 성형하여 전자빔 용접 후 용접부의 기계적 특성을 평가하였다.<sup>[2-4]</sup> 하지만 딥 드로잉 금속성형 공정 동안 어닐링된 Nb 판재가 심한 소성변형을 받기 때문에 어닐링 Nb 판재를 사용하여 전자빔 용접성을 평가한 이전의 연구결과로서는 SRF Cavity 제작 공정에 수반되어진 Nb의 심한 가공변형을 고려하지 않았기 때문에 Nb 판재의 전자빔 용접성 평가가 불충분 하였다. 따라서 본 연구에서는 용접금속 및 열영향부의 미세조직, 인장강도, 비커스경도를 중심으로 어닐링된 Nb과 냉간압연된 Nb의 전자빔 용접성을 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험소재

본 실험에 사용된 소재는 두께 3mm 어닐링된 판재와 이 판재를 중간 어닐링 처리 하지 않고 2mm의 두께로 냉간압연한 Nb 판재이다. Nb 판재의 화학조성은 Table 1에 제시하였다. 용접 시험편의 크기는 가로 x 세로, 89mm x 75mm이며 두께는 각각 3mm, 2mm 이다. 용접 이음부는 milling 가공하여 이음부의 틈새를 최소화 하였다. 전자빔 용접전 Nb판재 용접이음부는 아세톤 용액에 담가 약 5분간 초음파 탈지 후 알코올에 세척하여 건조시킨 후 I Square 맞대기 용접을 하기 위해 준비하였다.

Table 1. Chemical composition (in wt.%)

Nb	Ta	W	Ti	Fe
99.9	0.0254	<0.0001	<0.0001	<0.0001

### 2.2 전자빔 용접

전자빔 용접기의 용량은 최대 가속전압 150kV, 빔 전류 100mA까지 성능을 발휘할 수 있다. Nb 시험편을 용접지그에 고정시키고 진공챔버에 장입 후 용접조건은 Bead-on-plate 용접 실험을 통하여 상·하부에 건전한 용접부를 형성할 수 있는 Table 2에 제시한 조건을 사용하였다. 전자빔의 초점위치는 판재 표면에 오도록 하였으며 가속전압 130kV, 빔전류 37mA(3mm 두께 판재), 24mA(2mm 두께 판재), 용접속도 0.6m/min으로 하였다. 진공도는  $1.2 \times 10^{-4}$  Torr로 유지 하였다.

Table 2. Electron beam welding condition

Nb Sheet Condition (Thickness)	Acceleration Voltage (kV)	Beam Current (mA)	Weld Speed (mm/min)
Annealed (3mm)	130	37	600
Cold-rolled (2mm)	130	24	600

### 2.3 인장 시험 및 비커스 경도 시험

어닐링된 Nb과 냉간압연된 Nb의 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장시험과 비커스 경도 시험을 실시하였다. Fig. 1에 제시된 바와같이 용접 비드는 인장시험편 표점거리의 중앙에 위치시키고 상·하부 비드를 제거하지 않은 상태 그대로 로드셀 용량 10ton, Cross-head speed 5mm/min의 속도로 시험하였다. 어닐링된 Nb과 냉간압연된 Nb 판재를 I Square 맞대기 전자빔 용접한 쿠폰으로부터 채취한 인장시험편을 동일조건에서 3개씩 시험하여 최대인장강도, 항복강도, 연신율을 측정하였다. 또한 전자빔 용접 단면을 마운팅, 그라인딩, 폴리싱 후 에칭하여 Vickers 경도 시험기를 이용하여 하중 500g, 압입자 유지시간 10sec, 용접부 중심을 기준으로 1mm 간격으로 용접금속, 열영향부, 모재 단면의 경도를 측정하였다.

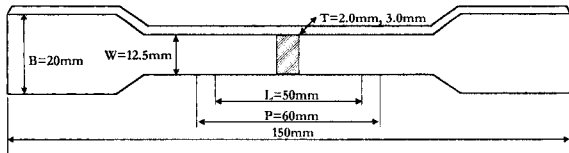


Fig. 1 Dimension of transverse weld tensile specimen.

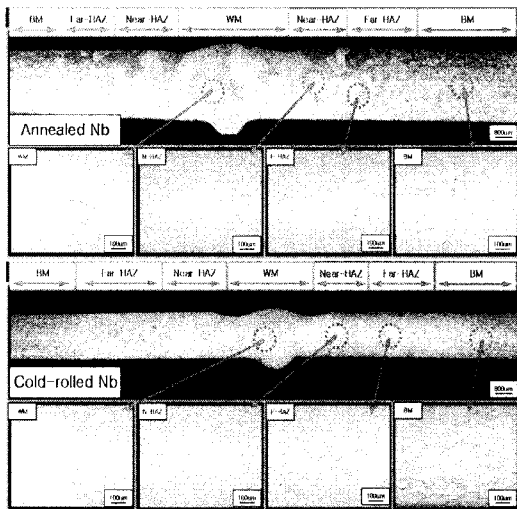


Fig. 2 Macro and microstructure of electron beam welds for both annealed and cold rolled Nb sheet.

### 2.5 미세조직 관찰

어닐링된 Nb 및 냉간압연 Nb 판재의 전자빔 용접 쿠폰으로부터 각각 다이아몬드 cutter를 이용하여 용접단면을 채취하고 마운팅, 그라인딩, 폴리싱 한 후 애칭하여 광학현미경을 이용하여 전자빔 용접된 어닐링 되어있는 Nb과 냉간압연된 Nb의 용접금속, 열영향부, 모재의 조직을 비교 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미세조직 관찰

Fig. 2는 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb의 전자빔 용접시험부의 미세조직을 보여주고 있다. 두 용접된 시험편에서 열영향부의 폭이 8~10mm로 매우 넓으며, 어닐링된 Nb 용접금속에서는 매우 커다란 주상정이 관찰 되었고 모재의 경우 작은 등축 결정립으로 이루어져 있었다. 냉간 압연된 Nb의 모재는 압연방향을 따라 연신된 결정립이 관찰되었으며 용접금속과 열영향부에서는 어닐링된 Nb과

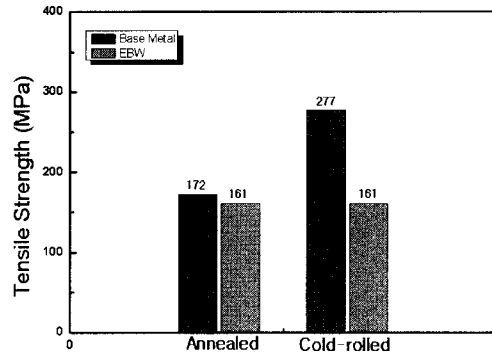


Fig. 3 Tensile strength of base metal and electron beam welded coupon for both annealed and cold rolled Nb sheet.

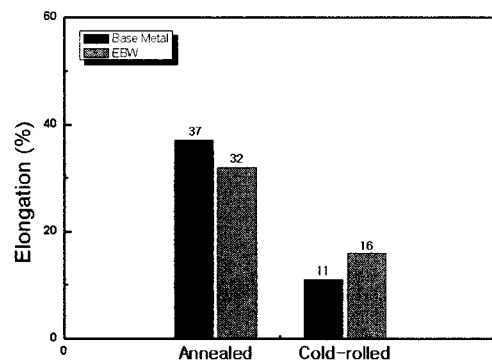


Fig. 4 Elongation of base metal and electron beam welded coupon for both annealed and cold rolled Nb sheet.

유사한 크기의 결정립이 관찰 되었다. 어닐링된 Nb 판재와 냉간압연된 Nb 판재 전자빔 용접시 두 경우 모두 열영향부 폭이 넓으며 유사한 조직을 가지고 있다. 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb의 열영향부에서 조직이 비슷한 이유는 열사이클에 의해 회복, 재결정, 결정립 성장의 과정을 거치면서 조대한 결정립이 생성되었다고 판단된다.<sup>[3-5]</sup>

### 3.2 인장강도

Fig. 3과 Fig. 4는 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb 모재와 전자빔 용접시험편의 인장강도와 연신율 결과를 보여주고 있다. 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb 전자빔용접 시험편 모두 Fig. 5에 보듯이 열영향부에서 파단되었으며 두 경우 모두 인장강도는 161MPa로 측정되었고 어닐링된 Nb 모재의 인장강도 172MPa, 냉간압연된 Nb 모재의 인장강도 277MPa에 비해 각각 8%, 42%가 저하하였다.

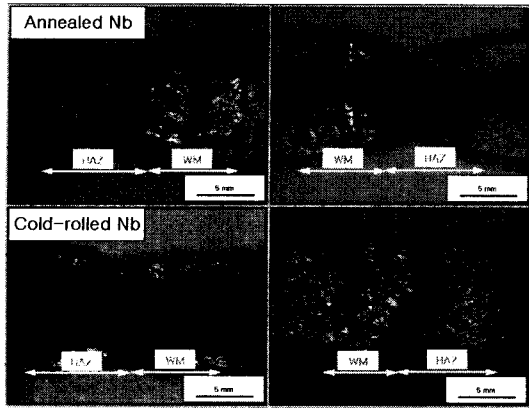


Fig. 5 Fracture configuration of transverse weld tensile samples.

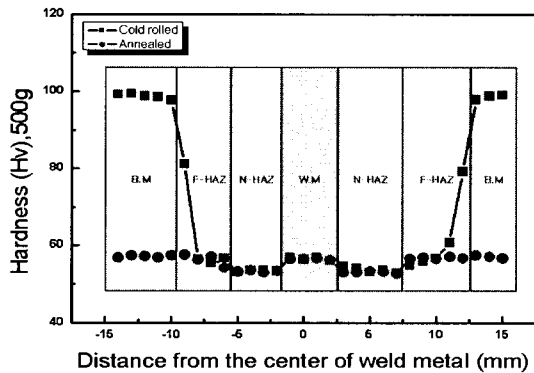


Fig. 6 Distribution of Vickers hardness across the electron beam welds for both annealed and cold rolled Nb sheets.

이전 연구자들의 결과에서도 모재 강도와 비교하여 용접된 Nb의 인장강도가 저하하는 경향을 보였다.<sup>[3]</sup> 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb 전자빔 용접 시험편의 파단은 동일하게 열영향부에서 일어났으며 인장강도 역시 동일한 값을 보여주고 있는데 이는 앞에 기술했듯이 열영향부에서 용접열사이클에 의해 어닐링 됨으로써 동일한 조직을 가지고 있기 때문이라 생각된다. 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb의 전자빔 용접 시험편의 연신율 각각 32%와 16%로 측정되었으나 all-weld-metal 인장 시험편이 아닌 것을 고려해야 한다. 연신율 또한 이전 연구자들의 결과와 유사하다.<sup>[3]</sup>

### 3.3 비커스 경도 시험

Fig. 6은 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb의 용접 시험편의 용접부 중심에서부터 모재에 이르기까지

의 경도분포를 측정한 결과이다. 어닐링된 Nb의 전자빔 용접 시험편의 경우 모재와 용접금속은 56~57Hv, 8~10mm의 매우 넓은 폭의 열영향부는 52~53Hv의 분포를 보였다. 냉간압연된 Nb의 경우 모재는 97~99Hv, 용접금속과 열영향부의 경도는 어닐링된 Nb의 전자빔 용접 시험편 용접금속과 열영향부의 경도와 각각 유사하다. 이것은 열사이클에 의해 냉간가공 효과가 소멸되었음을 의미한다. 경도 분포에서 알 수 있듯이 Nb 전자빔 용접시 용접입열이 매우 넓은 범위까지 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있으며 열영향부에서 경도가 가장 낮게 측정되었다. 이는 시험편 모두의 파단이 열영향부에서 발생한 것과 연관성이 있음을 시사한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 어닐링된 Nb와 냉간압연된 Nb의 전자빔 용접성을 조사하기 위하여 용접금속 및 열영향부의 미세조직, 인장강도, 비커스 경도 시험을 하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 어닐링된 Nb의 용융부는 매우 커다란 주상정 조직, 열영향부에서는 조대한 등축정, 모재의 경우 미세한 등축정이 관찰 되었다. 냉간압연된 Nb의 모재는 압연방향을 따라 연신된 결정립이 관찰 되었으며 용융부와 열영향부는 어닐링된 Nb와 그 조직이 유사하였다.
- (2) 어닐링된 Nb과 냉간압연된 Nb의 용접 시험편 모두 인장강도는 161MPa 정도를 나타내었으며 어닐링된 Nb 모재의 인장강도 172Mpa, 냉간 압연된 Nb 모재의 인장강도 277MPa에 비해 각각 8%, 42%가 저하하였다.
- (3) 냉간압연된 Nb 전자빔용접 시험편에서 열영향부와 용접금속의 경도분포가 어닐링된 Nb 전자빔 용접 시험편 열영향부와 용접금속의 경도 분포와 유사하여, 이것은 용접열사이클에 의해 냉간가공 효과의 소실이 발생하였음을 의미한다.

## 5. 참고문헌

- 1) 표준과학연구원 : 초전도 전자소자 응용기술 개

- 발, p. 3-11.
- 2) MG Rao and P Knesisel., Mechanical Properties of high RRR Nb, DESY Print, TESLA., p. 95-109, 1995.
  - 3) Jiang, H. Baars, D.; Zamiri, A. Antonie, C. Bauer, P. Bieler, T.R. Pourboghra, F.; Compton, C. Grimm, T.L., Mechanical Properties of High RRR Niobium With Different Texture, Vol. 17, p. 1291-1294, 2007
  - 4) Jiang, H. Bieler, T.R. Compton, C. Grimm, T.L., Mechanical properties, microstructure, and texture of electron beam butt welds in high purity niobium., Vol. 2, 12-16, p. 1359-1361, 2003.
  - 5) Feng Jicai, Wu Huiqiang, Zhang Bingang., Microstructure evolution of electron beam welded Ti3Al-Nb joint., Materials Characterization, Vol. 54, No. 2, p. 99-105, 2005.