전자빔을 이용한 초전도 3차 하모닉 고주파 공동기의 용접

Welding of the 3rd Harmonic Superconducting RF Cavity Using Electron Beam

홍만수*, 권혁채*, 박인수*, 손영욱*, 김영찬*, 정진화*, 최진혁*, 황정연*, 송상근, 김숙환****

*포항가속기연구소/POSTECH

**포항산업과학연구원

ABSTRACT 포항가속기는 선형가속기 및 저장링을 통하여 2.5GeV의 고에너지 전자빔 생성과 저장, 유지 되고 있다. 저장링에서 안정적으로 방사광을 추출하여 각종 실험 및 연구를 위하여 이를 제공하고 있다. 이를 위해서 전자가 매우 안정적이고 높은 집적도를 가진 전자다발 형태로 유지되어야 한다. 전자다발의 집적도가 높을수록 전자간의 상호 간섭으로 보유에너지가 더 빠른 시간에 소진되어 전자빔의 수명이 짧아진다. 3차 하모닉 RF 공동기는 전자다발의 운동방향으로 길게 늘려서 전자밀도를 줄여 전자빔의 운전수명을 개선하기 위한 장치이다. 공동기의 제작은 소재준비, 성형, 가공, 용접, 연마, 열처리 등의 여러 공정을 거쳐 완료된다. 본 보고서에서는 공동기의 제작 공정 중 전자빔을 이용한 시험용접, 본용접, 용접부 검사 및 용접부의 연마와 결과에 대하여 기술하였다.

1. 서 론

공동기의 소재로 사용되는 니오븀(Nb)은 2468℃의 매우 높은 융점 가지고 있는 금속으로 약 9K 이하의 극저온에서 초전도체의 성질을 띠게 된다. Nb는 상온에서 안정된 금속이지만 약 260℃ 이상의 고온에서는 대기중의 산소, 질소 및 수소 등과 매우 높은 친화력을 갖는 활성금속이다.

성형가공(press작업 및 마무리 가공)으로 준비된 공동기는 용접 전에 화학처리를 통하여 오일, 그리스, 산화막 등 표면의 오염원을 사전에 제거한다. 공동기의 용접은 고온에서 대기가스에 의한 용접부 산화 및 질화에 따른 취성증가 등 기계적 성질의 악 영향을 방지하기 위하여 고진공 환경에서 전자빔용접을 실시한다. 불완전한 용접 결과는 공동기 cell의 적도부에 높은 자기장으로 인하여 quench가 발생되거나 cell-beampipe 접합부의 높은 전기장에 의한 발열작용이 일어남으로 적정 용접 비이드 형성이 매우 중요하다.[1]

공동기는 기본적으로 초고진공의 환경에서 운영되므로 용접부는 균열 등 진공누설을 야기할 만한 용접 결함이 없어야한다. 본 연구에서는 초전도 공동기 제작을 위한 주요공정인 공동기의 용접을 시험용접을 통한 용접조건을 도출하고 실제 본 용접에 적용하였으며, 이에 따른 그 결과와 용접부 진공성능검증 및 공동기 성능에 직접적으로 관계하는 공동기 내면의 기계적 형상 확보를 위한 연마 공정에 미치는 용접 비이드의 상관관계를 확인하였다.

2. 시험용접

2.1 시험편준비

265㎜(길이) × 105㎜(폭) × 2.8㎜(두께)의 본 제품과 동일한 Nb 판재와 84㎜(직경) × 2000㎜(길이) × 2.8㎜(두께)의 Nb 파이프를 사용하였고 화학조성은 Table 1과 같다. 시험편은 용접전에칭과 탈 이온수를 사용한 화학세척을 통하여 시험편의 오일, 그리스, 산화막 등을 제거하였다.

Table 1. 니오븀 판재의 불순물 성분

C	O	N	H	Ta	W	Ti
<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0145	<0.0014	<0.001

2.2 시험방향

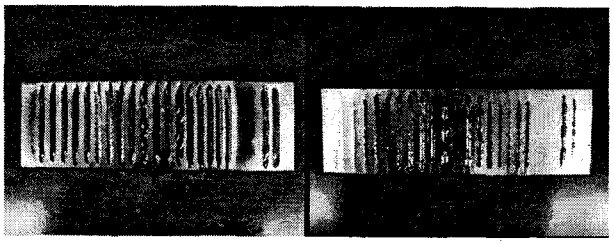
공동기의 성능을 달성하기 위하여 요구되는 용접부는 완전용입 형태로 이면비이드의 형상은 약 4mm의 폭과 완만한 비이드가 요구된다. 또한, 용접 스패터, 언더컷 및 불완전한 용접부가 발생하지 않아야 한다. 이와 같은 용접부의 형성

을 위한 용접 기본조건은 BOP(Bead-On-Plate)를 통하여 확보하고 시험용접을 통한 도출된 용접조건을 실제 제품에 적용하기 위하여 각 용접조건에 대한 용접 결과의 재현성을 확인한다. 용접 후 냉각시간에 대한 모재, 열영향부 및 용접부에 대한 표면 산화를 확인하여 적정 냉각시간을 확인한다.

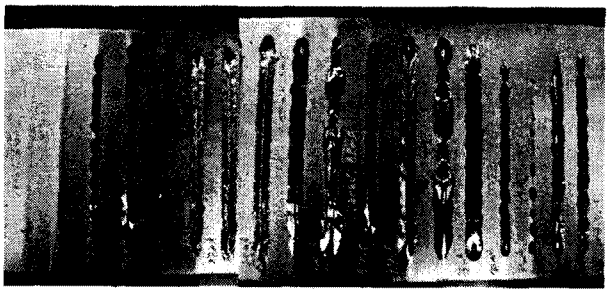
2.3 시험조건

전자빔용접장치 15KW-150kV급을 사용하여 하향자세로 빔 조사, 가속전압을 130kV-150kV, 용접전류를 28mA-40mA, 용접속도는 420mm/min-600mm/min, 빔 초점위치 조정, 등의 시험조건을 변경하면서 시험편을 용접하였다.

Fig. 1은 시험편에 BOP를 실시한 결과 사진으로 용접조건의 변경에 따른 용접비이드의 차이를 보여주고 있다.



(a) 전면비이드 (b) 이면비이드



(c) 이면비이드

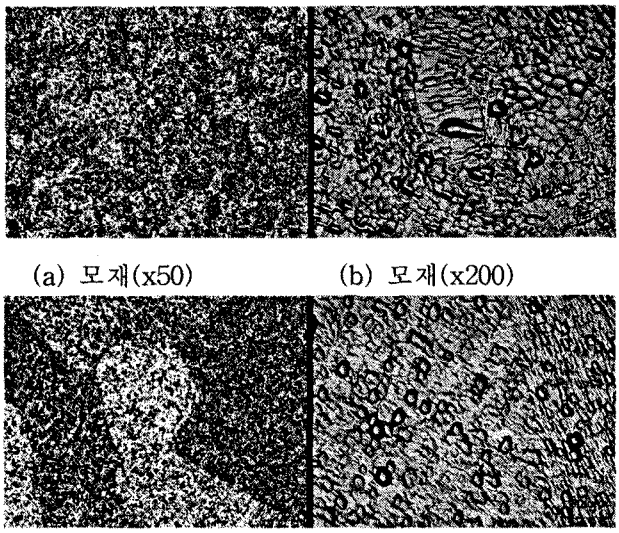
Fig. 1 시험편 BOP : 가속전압 130kV, 용접속도 600mm/min에서 가속전류를 28mA-40mA 범위에서 가변 하였음.

Fig. 2는 모재와 용접부 단면의 현미경조직 사진으로 모재 상태에서 치밀한 금속조직이 용접열에 의해 용융부의 조직이 조대화된 상태를 잘 나타낸다.

3. 본용접 및 시험, 연마

3.1 본 용접

Fig. 3은 공동기의 Layout과 용접부를 도시하였다. 공동기의 용접순서는 적도, 빔파이프-튜너 플랜지-플랜지 그리고 공동기 cell-빔파이프 (최종 assembly)의 순으로 진행된다.



(a) 모재(x50) (b) 모재(x200)

(c) 용접금속(x50) (d) 용접금속(x200)

Fig. 2 모재와 용접부의 마이크로 구조비교

Table 2는 시험용접을 통하여 도출한 cell의 적도와 Iris(cell과 빔파이프의 접합부)구간의 용접을 위한 적정 용접조건으로 실제 용접에 적용하였다. 공동기의 용접에서 적도부와 Iris부의 용접비이드 형상과 용접열에 의한 공동기의 수축 등 기하학적 형상 변화 등이 공동기의 특성에 큰 영향을 준다. 특히 적도부의 용접 후 cell의 용접수축량을 반드시 측정하여야 한다. 이 값은 빔파이프의 가공 길이 확정의 기준이 된다. Fig. 4와 Table 3에서 적도용접부의 용접 후 수축량 측정위치와 그 결과 값을 나타낸다.

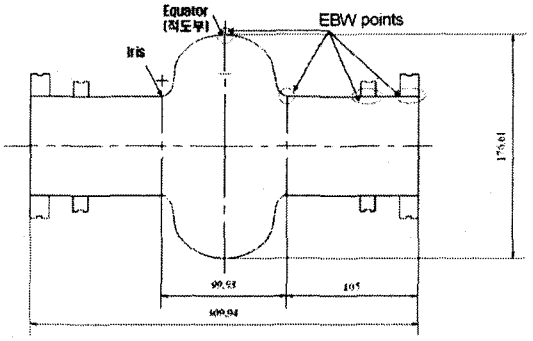


Fig. 3 3차 하모닉 공동기의 용접부 위치

공동기의 각부 실제 용접에서 빔 전류와 가속전압, 용접속도, 빔 초점거리 등의 기본용접조건 이외에 조립, 가접의 유무, 오버랩, 냉각 등에 의해서도 용접 결과에 큰 영향을 끼쳤다. Fig. 5는 실

제 제품의 용접에 대한 사진이다.

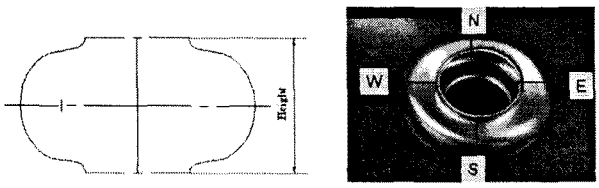


Fig. 4 용접수축량 측정 위치

Table 3 용접후 적도 용접부의 수축량

Cell #1			Cell #2			Cell #3		
전	후	변위	전	후	변위	전	후	변위
88.85	88.35	0.50	95.51	95.12	0.39	101.17	100.80	0.37
88.74	88.20	0.54	95.46	95.04	0.42	101.27	100.87	0.40
88.71	88.20	0.51	95.31	94.85	0.46	101.30	100.90	0.40
88.77	88.32	0.45	95.33	94.95	0.38	101.21	100.83	0.38
평균		0.50	평균		0.41	평균		0.39

3.2 누설검사

공동기는 초고진공 환경 조건에서 사용이 된다. 용접이 완료된 공동기를 1×10^{-10} torr · ℓ/sec이하의 누설감도를 갖는 헬륨누설검사기를 이용하여 누설검사를 실시한 결과 8×10^{-10} torr · ℓ/sec의 누설률을 갖는 초고진공 진공 성능을 확보하였다.[2]

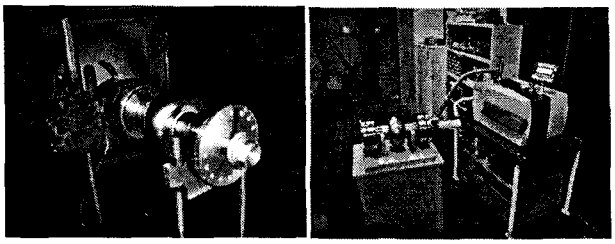


Fig. 5 공동기 용접 Fig 6 누설검사

3.3 용접부 연마

공동기의 RF 특성은 공동기내면의 기하학적 형상과 표면상태 등이 직접 관계한다. 용접으로 접합된 cell의 이면 용접비이드는 원심력을 이용한 연마기계를 사용하여 연마석으로 세라믹을 cell의 내부에 넣어 회전시키면서 일정하게 연마(CBP : Centrifugal Barrel Polishing)하였다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 본 공동기는 총 16회의 연마작업을 통하여 cell의 내면에 대한 형상과 표면을 확보하였다. 연마에 의한 무게는 연마 전 5411.95g에서 5180g으로 231.95g이 줄었다.

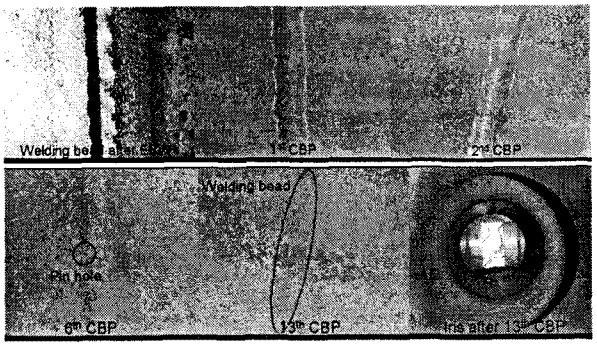


Fig. 6 연마(CBP)전,후 Cell 내면 용접부의 표면상태

4. 결과

전자빔을 이용한 초전도 공동기의 용접기술을 확보하기위한 본 연구 결과는 다음과 같다.

1) 시험용접을 통하여 각 용접조건의 조합에 대한 용접비이드의 형상을 확인하였는데 빔 초점이 Focusing 될 수록 비이드형상은 봉우리가 높아지면서 언더컷이 발생했다.
2) 가속전압 130kV, 빔전류 37mA(Equator), 34mA(Iris),용접속도 600mm/min의 Cell EBW에 대한 적정용접 조건을 도출하였다
3) 실제 제품의 용접부에 대한 헬륨누설검사를 실시한 결과 용접부의 누설율이 8×10^{-10} Torr · ℓ/s 이하로 초고진공 진공성능을 확보하였다.
4) 총16회의 연마를 통하여 내부표면을 확보하였다.

후기

본 연구는 MOST 및 POSCO 지원하의 기반기술연구 프로그램의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

1. Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays, RF Superconductivity For Accelerators, p. 115-117
2. JIS : Heliun Leak Testing Method, JIS Z2331. (1991)