특 집 : 고에너지 응용기술의 최근 동향

대형 전자빔 용접장치의 적용사례 고찰

정 인 철

Study on Application Examples of Electron Beam Weld Equipment with High Capacity

In-Chul Jung

1. 서 론

집적된 전자를 금속에 조사하여 용융 접합하는 전자빔 용접은 최소의 입열로써 요구되는 금속재료의 두께를 한번에 접합시킬 수 있는 고 에너지 접합방법이다. 그러나 전자의 거동특성으로 반드시 진공환경이 요구된다는 점에서 제품 적용에 상당한 제약을 가지며, 따라서 전자빔 용접이 반드시 요구되는 큰 제품의 경우에는 필수적으로 대형 진공설비가 필요하다.

진공을 유지하기 위한 진공설비는 기본적으로 진공챔버와 진공펌프가 있으며 이와 함께 제품을 움직이는 기계장치 및 장치 제어부분이 필요하다. 또한 대형 챔버가 요구되는 제품은 대부분 후판 용접이 많으므로 최소 60kW 이상의 고 용량 전자총이 필요하며 용접작업의 효율성을 높이기 위해 CNC 관련 S/W가 적용된다.

현재 전자빔 용접이 요구되는 대형 제품은 주로 중공업 분야, IT분야 및 특수한 연구개발 분야 등을 들 수 있다. 중공업 분야로서는 원자로 부품, 터빈 다이아프램, 핵융합 설비 등이 있으며 IT분야는 최근 많은 설비투자가 이루어지고 있는 LCD 제작설비, 반도체라인이 이에 해당된다. 그 외에 해외에서는 로켓 개발이나 특수 재질의 기기 등에 대형 전자빔 용접장치가 적용되고 있다.

본 고찰은 보유하고 있는 대형 전자빔 용접장치를 활용하여 현재까지 적용된 제품의 용접 특성에 따른 최적 용접조건의 설정, 용접선 추적 S/W의 활용, 및 용접결과에 대한 정성적 평가에 대해 기술하였다. 아울러 추진중인 120kW-120kV으로의 용량승격이 완료되는 '06년 초에는 국내에서 요구되는 대부분 제품의 전자빔 용접에 대한 공정 지원이 가능하게 되었다는 점에서 보다 적극적인 활용을 기대할 수 있다.

2. 적용장치의 특성

대형 진공챔버를 갖는 전자빔 장치는 진공챔버의 내부 공간을 최대로 활용하기 위해 보통 갠츄리 또는 매니퓨레이터 형태의 전자총 이동식으로 구성된다.

수년 전에 자체적으로 제작설치 완료한 본 전자빔 용접장치는 60kW-60kV 용량으로서 X, Y, Z, Tilting, Rotating의 5축 전자총 이동식이며 테이블의 회전기능이 부가되어 3-D 곡면용접이 가능한 구조로 되어 있다. 진공챔버는 5.5 x 5.8 x 4.0m (최대 작업물 크기 4.2 × 4.5 × 2.0m)의 체적을 가지며 연속 운전시 30분 이내에 5×10^{-4}torr 요구 진공도를 갖는다.

2차 전자 용접선 추적과 CNC 제어방식을 적용하며, 전자빔은 X, Y축에 대해 최대 5° 편향, Line, Circle Elips 형태의 빔 편향제어가 가능하다.

3. 전자빔용접 적용 사례

3.1 PECVD 장치부품 Heating plate

LCD장치의 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 공정에 사용되는 Heating plate는 LCD기판을 가열하는 열판으로서 Susceptor 라고도 한다. 상온에서부터 450℃까지 가열되는 열 사이클을 가지며 판 내부에 열선을 가지고 있는데 이 열선 커

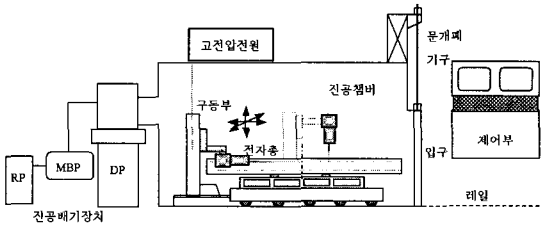

Fig. 1 대형 전자빔 용접장치의 전체구조

Table1 Heating plate 용접변수 조건 (용입깊이 25mm)

항목	설정값	항목	설정값
가속 전압 (kV)	60	빔 진동 폭	200
빔 전류 (mA)	~	빔 진동 주파수 (Hz)	800
초점 전류 (mA)	718 (표면713기준)	총 모재간거리 (mm)	330
용접속도 (mm/min)	~	챔버 진공도 (Torr)	5×10^{-4}
빔 진동 타입	'O'	조인트 갭 (mm)	0.1 이하

버와 본체를 접합시키는 접합 방법으로 전자빔 용접이 적용된다.

열선의 커버 부분은 AL5052 재질이며, 본체는 AL6061-T6 이며, 크기는 세대 (Generation) 수에 따라 소형에서부터 한변 길이가 2000mm 이상의 대형이 있다.

Table. 1은 용입 깊이 25mm의 경우에 대한 적용 용접조건을 예로서 나타낸 것이다. 용접 후 가공하지 않는 제품으로서 매끈한 용접표면이 요구되어 오버 포커싱(Over-focusing) 기법을 사용하였다.

Heating plate와 같이 용접선 궤적이 복잡한 형상을 갖는 용접선 교시를 위해 Auto CAD도면으로부터 CNC궤적을 생성하는 도구를 활용하면 빠르고 정확한 교시작업이 가능하다.

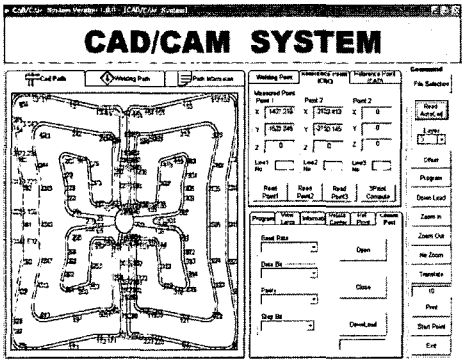

Fig. 1 곡선용접용 프로그램

Fig. 2 7th Heating plate 곡선용접부 형상

3.2 LCD 제작장치용 Vacuum chamber

LCD 패널제작 공정에 사용되는 진공챔버는 주로 AL6061소재의 후판으로 되어 있다. 소형은 판재 자체를 가공하여 챔버 형태로 제작할 수 있으나, LCD제작 설비의 효율화에 따른 대형 진공챔버는 극후판 두께의 알미늄 원소재 제작의 어려움으로 판재를 접합하여 제작한다. 이 경우 전자빔 용접이 매우 효과적으로 적용될 수 있다.

실 용접에 있어서 길이 2000~3000mm의 판재를 조립하여 용접하기 위해서는 별도의 고정용 지그가 필요하며, 또한 용접시작과 끝단부에 빔의 시작과 끝부분 크레이터 처리를 위한 별도의 엔드 탭과 완전 용입을 위한 뒷판을 추가로 부착하여야 한다.

제품의 실제 용입 깊이는 약 110mm로서 UT로 확

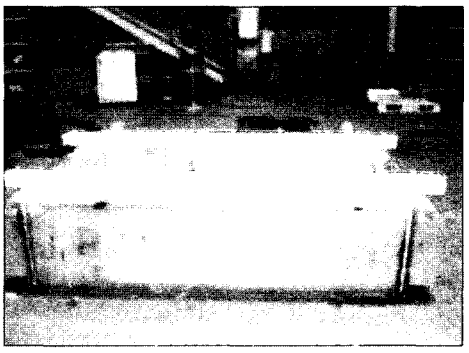

Fig. 3 Vacuum chamber 형태

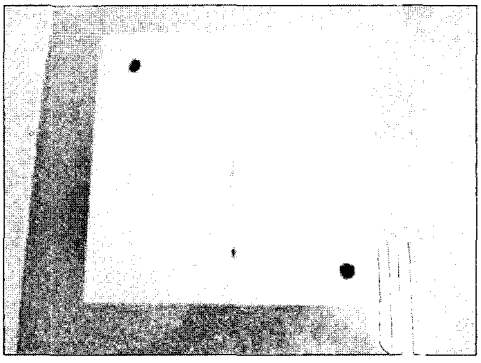

Fig. 4 AL두께110mm 시편단면형상

인할 수 있으며, 엔드 탭과 모재의 경계부위에서는 미소한 결함이 발견되었으나 허용범위 내 포함된다. 또한 모재의 시작지점에서 일정 구간부터 변형에 의해 용접 조인트 갭이 발생되어 시작지점보다 끝 지점 에서의 용입 깊이는 약간 증가되는 경향이 있으므로 견고한 변형 방지 기구설치가 필요하다.

3.3 Cu 재질 Roll sleeve

냉각 롤으로 사용되는 Roll sleeve는 약 1350mm의 직경을 가지며 원통 형상으로 되어 있다. 냉각채널을 구성하는 홀을 가공한 뒤 원형 링으로서 입구를 막으며, 이 때 전자빔 용접을 적용하여 용접하므로서 Cu소재의 특성을 그대로 유지한다.

본 용접 전 전자빔을 사용하여 Point 가접과 선 가접의 2단계 가접을 실시한다. 선 가접의 경우 빔 전류 50~70 mA, 임의 간격을 두고 적정 길이로 간헐 용접(Intermittent welding)을 사용하였다. 모든 용접은 위보기 자세로 진행하였으며, 바깥쪽 조인트를 용접한 후에 안쪽 조인트를 용접하였다.

용접 시작부와 끝부분에 엔드 탭을 부착할 수 있는 구조가 아니기 때문에 용접의 시작과 끝부분이 약 300mm 가량 겹쳐지도록 중첩하여 용접하였다.

용접 시작시 빔 전류를 업 슬로프(Up-slope), 끝에서는 빔 전류를 계단식 다운 슬로프(Down-slope)으로 주었다. 특히 용접 끝부분에서는 초점 전류도 계단식으로 업 슬로프를 주어 스파이크 결함이 비드 표면으로 연장되는 것을 방지하고자 하였다.

표면 비드 넓이는 8mm로 나타났으며 외관 결함은 관측되지 않았다. Fig. 6은 용접 후 비드 외관을 나타낸 사진이며, 아주 미려한 용접 비드 형태를 갖는 것을 확인할 수 있다. 용접부 가공 전에 UT를 통해 내부 결함은 없는 것으로 판정하였고, 용입 깊이는 안쪽 조인트 부위가 23~25mm, 바깥쪽 조인트 부위는 20~22mm인 것으로 추정할 수 있었다. 이는 요구 사양인 20mm 용입 깊이를 만족한다.

용접부 사상 작업을 마친 후 누출 시험을 실시하였다. 12 bar의 수압을 1시간 동안 유지한 시험 결과 전체 부위에 누출이 없는 것으로 확인되었다.

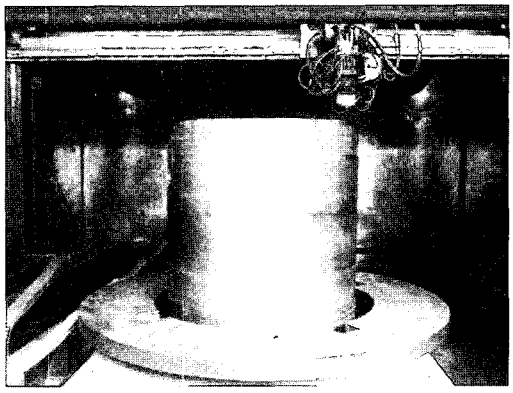

Fig. 5 Roll sleeve 셋업 형태

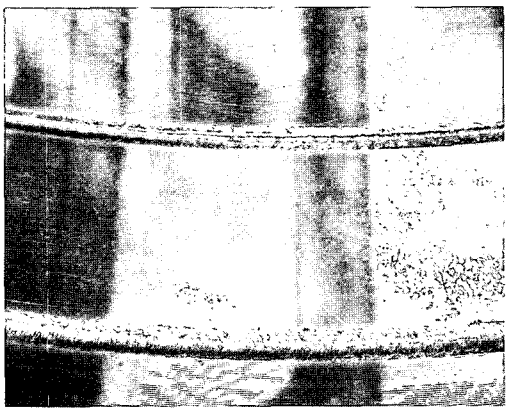

Fig. 6 Cu 용접부 표면

3.4 박판 형태의 스테인레스강 셀

두께2.5mm를 갖는 스테인레스 재질의 원추 형태 셀 제품에 대한 길이방향 맞대기 조인트를 용접하는 제품에 대해 적용성 시험을 하였다. 보통 박판은 동종재질의 받침대 (Backing plate)가 사용되나 받침대 제거에 따른 추가 공정이 소요되고 모재 손상의 우려가 있다. 따라서 받침대 없이 일정한 이면비드을 얻기 위한 정확한 빔 변수설정과 정밀한 용접 공정의 유지가 본 용접에 있어 매우 중요하다.

Table 2 Roll sleeve 용접변수 조건 (용입깊이 20mm)

항목	설정값	항목	설정값
가속 전압 (kV)	60	빔 진동 폭	200
빔 전류 (mA)	~	빔 진동 주파수 (Hz)	1600
초점 전류 (mA)	749 (표면740기준)	총 모재간거리 (mm)	230
용접속도 (mm/min)	~	챔버 진공도 (Torr)	5×10^{-4}
빔 진동 타입	'O'	조인트 갭 (mm)	0.1 이하

Table 3 두께2.5mm 스테인레스강 용접조건

항목	설정값	항목	설정값
가속 전압 (kV)	60	빔 진동 폭	50
빔 전류 (mA)	~	빔 진동 주파수 (Hz)	800
초점 전류 (mA)	746 (표면740기준)	총 모재간거리 (mm)	230
용접속도 (mm/min)	~	챔버 진공도 (Torr)	5×10^{-4}
빔 진동 타입	'O'	조인트 갭 (mm)	0.1 이하

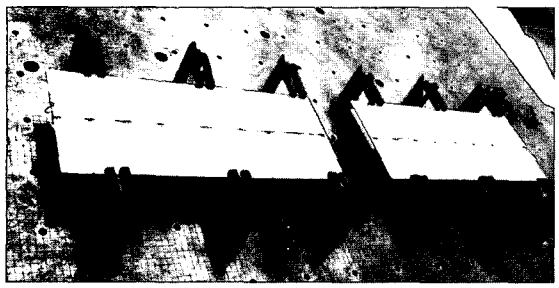

Fig. 7 시편 셋업형태

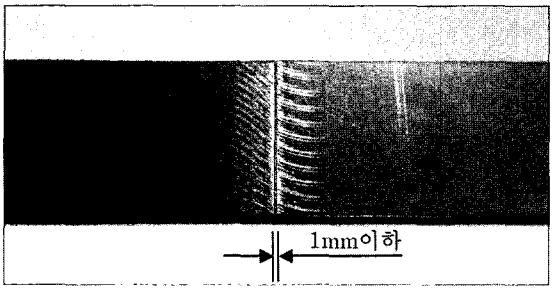

Fig. 8 이면부 용접비드

시편은 TP304 스테인레스강 두께 2.5mm 평판을 폭300mm◈길이1000mm의 크기로 2장 맞대기 조인트 형태로 용접을 실시하였다.

용접 후 이면 비드 형태는 Fig. 8과 같으며 균일한 높이의 연속적인 형상을 가지고 있어 완전 용입을 확인할 수 있다. 인장시험 결과는 열영향부에서 파단이 발생되었고, 굽힘 시험 결과는 No open defect의 결과로서 본 시험 조건을 제품을 적용토록 하였다.

4. 결 론

전자빔 용접이 요구되는 대형 제품은 기존의 아크 용접 또는 타 접합방법으로는 요구 조건이 만족되지 않는 경우에 주로 적용되며, 고가의 장치 가격으로 인해 용접비용이 상대적으로 높은 편이다. 반면에 입열 저감에 따른 용접부 변형이 최소화되며 레이져 및 프라즈마로서 불가능한 후판 용접이 가능할 뿐 아니라 진공조건하에서 용융하므로 고 산화성의 비철금속 접합에도 유리한 특성을 가지고 있다. 그러나 용접시에는 반드시 진공 챔버 내에 용접물을 장입해야 하므로 제품 크기에 제약조건이 있는 단점이 있다.

보유중인 전자빔 용접장치는 대형 진공챔버를 가지며 두께가 두꺼운 소재 용접이 가능한 고 용량의 전자총이 자유로이 이동할 수 있는 효율적인 구조로 되어 있다. 현재까지 적용된 여러 제품 가운데 대형 장치의 잇점을 효과적으로 적용한 몇 가지의 제품을 예를 들어 고찰하였다. 그 중에서도 IT산업의 Heating plate와 LCD장치 Vacuum chamber의 용접에 대해 살펴보았고, 또한 Cu 재질의 Roll sleeve, 박판의 셀 형태의 제품 등의 적용 결과를 검토하였다.

향후에는 발전설비 기기, 핵융합 설비 기자재, 특수제품의 대형기어를 비롯하여 중공업분야의 주요 기자재 제작에 적극 활용 예정이다. 앞으로 점차 대형화 및 전문화되고 있는 여러 산업분야의 발전추세로 볼 때 전자빔용접의 적용은 보다 활성화될 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

1. Dipl.-Ing. H. Schultz : Electron beam welding, Abington publishing (1993), 115-120
2. Gunther Rabensteiner, et al : Welding Metallurgy of stainless steels (1988), 78-96
3. Giedt, W. H., and Tallerico, L. N. : Prediction of Electron Beam Depth of Penetration. Welding Journal 67(12), (1988). 299-305