

전자빔 용접의 활용

Application of Electron Beam Welding

한라산업기술연구소 정군석, 김갑동, 박재형, 조영래
한국기계연구원 레이저기술연구그룹 한유희, 서정

I. 서론

전자빔 용접(Electron Beam Welding : EBW)은 고유의 우수한 용접 특성에도 불구하고, 장비 제작 비용의 과다함과 제한적인 작업 환경으로 인하여 현재로서는 우주 항공 산업, 원자력 산업, 반도체 장비 산업 등의 특수한 분야에서만 선호되고 있다. 그러나 산업이 다양해지고, 고도화함에 따라 그 중요성이 인지되어 응용 범위가 차츰 확대되고 있다. 현대 산업이 고부가가치 산업으로의 도약과 아울러 용접에 대한 기능적 요구가 증대됨에 따라 전자빔 용접은 필연적으로 그 적용범위가 확대될 것으로 예상된다.

본 논문에서는 전자빔 용접기를 이용하여 다수의 실제 프로젝트를 수행한 과정과 용접성에 대해서 서술하였다.

우선적으로 전자빔 용접 기술 개발 경위와 기본 원리 및 장점에 대하여 서술하고 실제 사용 중인 전자빔 용접기의 기본 구조와 활용 가능성에 대하여 서술한 후 마지막으로 수행된 사례들에 대하여 그 내용을 기술하였다.

II. 전자빔 용접의 소개

1. 역사적 배경

1869년 물리학자인 Hittorf and Crookes가 음극선 발생을 성공한 이래 많은 과학자들이 그것의 응용

을 도모하였다. 1948년부터 물리학자 Steigerwald는 강력한 빔 발생기를 전자현미경에 적용하고 시계 부품이나 초경 금형의 천공, 용해, 용접 등을 시도하였다.

그 후 산업 현장에 활용할 수 있는 전자빔 용접기(Electr on Beam Welder)는 독일 Stuttgart의 Carl Zeiss Company에서 개발되었다. 그들은 전자현미경으로 실험을 하던 중 전자빔의 출력을 증가시키자 시험편이 용융되어 증발하는 것을 발견



Fig. 1 우주공간에서의 전자빔 용접

하였다. 이를 계기로 빔 출력을 제어함으로써 금속의 용해, 응고가 가능하다는 결론을 얻어 전자빔 용접이 탄생하게 되었다. 이 때 개발된 전자빔 용접의 좁고 깊게 용입되는 장점이, 미국에서 때마침 진행하고 있던 우주 개발 계획에 활용 타당성이 입증되어 Zeiss의 기술과 특허권을 도입하여 장비 생산을 활성화시켰다.

이 후 전자빔 용접은 영국, 프랑스, 일본 등지로 제작 기술이 전파되어 본격적으로 개발이 진행되었다. 이 역시 초기에는 원자력, 우주 항공, 군수 산업에 이용할 목적이었으나 자동차, 정밀측정장비, 의료기기, 반도체 산업 등 다른 산업 분야로 빠르게 확대되어 가고 있다.

2. 전자빔 용접기의 원리

전자빔 용접은 전자빔을 한 점에 수렴시켜 얻은 고밀도의 에너지를 이용하여 재료를 용융시킴으로써 이루어진다. 전자빔 발생기(Electron Beam Generator) 내부의 음극(Cathode)에서 열전자를 방출하면 고전압에 의해 양극(Anode)으로 가속된다. 가속 전압은 10kV~150kV가 많이 사용되지만 경

우에 따라 600kV의 높은 전압을 사용하는 경우도 있다. 높은 에너지를 가지고 가속된 전자가 용접 가공물에 닿으면 전자의 운동에너지는 열 에너지로 변환되어 금속을 응용시키게 된다. 전자의 속도는 Fig. 2와 같이 가속 전압에 따라 차이가 생기지만 대체로 빛의 속도의 약 20~60% 정도가 용접에 사용된다. 전자빔의 초점 위치는 전자 회로에 의한 자기 집속 렌즈(Magnetic focusing lens)로 제어하며, 편향 렌즈(Deflection coil)에 의하여 빔의 굴절 및 일반 용접에서의 운봉효과(Weaving)를 얻을 수 있다. 이 빔 형상 제어 장치들은 양극과 재료 사이에 위치하고 있다.

전자빔 용접기에서 용입 깊이는 전자빔의 출력의 크기에 의존하는 것이 아니라, 출력의 집속, 즉 밀도에 의해 결정된다. 이것을 식(1)에 나타내었다.

$$D = k \cdot I^{0.25} \cdot V^{3.5}$$

D : 전력 밀도
 k : 전자총 상수 (1)
 I : 빔 전류
 V : 가속 전압

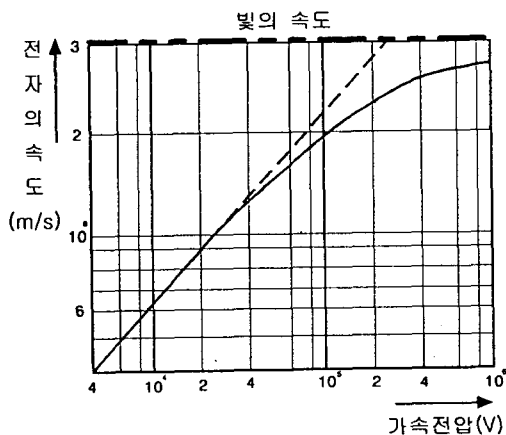


Fig. 2 가속전압에 따른 전자의 속도

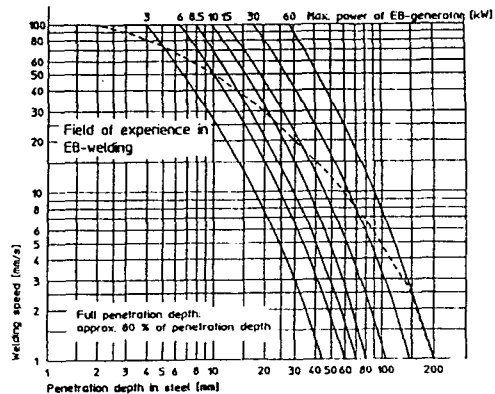


Fig. 3 Steel에서의 출력별 용입깊이 도표

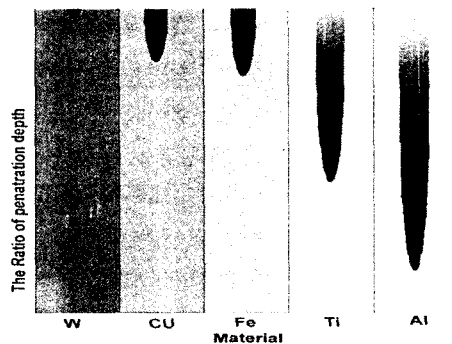


Fig. 4 금속별 용입 깊이 비교표

여기서 k는 전자총 상수로서 전자총의 구조와 사용 물질에 따라 결정된다. 식(1)에서 전압의 증가가 전류보다 용입 깊이면에서는 더 큰 효과를 올릴 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에는 전자빔 용접의 출력에 따른, 강재에 대한 용입 깊이를 나타내었으며, 다른 종류의 금속에 있어서의 용입 깊이의 차이를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 용접 소재의 비중에 반비례하여 용입이 가능하다는 것을 알 수 있다.

3. 전자빔 용접의 장점

- (1) 높은 에너지 밀도와 용접 효율(High energy density and efficiency)

전자빔 용접은 대단히 높은 에너지 밀도와 용접

효율을 가지기 때문에 같은 두께 용접시 입열량이 아크 용접에 비하여 1/50밖에 되지 않으며 용입 깊이와 폭의 비가 20:1에 달한다. 그리고 300mm 정도의 깊이까지 1회에 완전 용입할 수 있고, 용접 속도도 빠르다. Table 1은 각종 용접 방법에 대한 용접 특성을 나타내었다.

Table 1 각종 용접법의 에너지밀도 및 용접효율

| 용접법 | 에너지 밀도(W/cm) | 용접 효율(㎖/k) | 용입의 형상 |
|---------------|------------------------|--|------------|
| 가스 용접(산소아세틸렌) | $10^2 - 10^3$ | 0.2 - 0.5 | 얕다 |
| 아크 용접 | $5 \times 10^2 - 10^4$ | 0.8 - 2 (Tig) 2 - 3 (Mig) 4 - 10 (SMA) | 얕다 |
| 플라즈마 아크 용접 | $10^3 - 10^6$ | 5 - 10 | 에너지 밀도에 비해 |
| 전자빔 용접 | $10^5 - 10^8$ | 20 - 30 | 에너지 밀도에 비해 |
| 레이저 용접 | $10^5 - 10^7$ | 15 - 25 | 깊다 |

(2) 최소의 변형(Minimizing of distortion)

용접시 모재에 발생하는 변형(Distortion)은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 성분의 제한된 면적에서의 열적 영향에 의한 열적 변형(Thermal distortion)이고, 다른 하나는 고체상태에서 녹았던 금속의 수축에 의한 구성 성분의 변형이다. 전자빔 용접에서는 입열량이 작고, 용접 단면에 대하여 평행으로 가열되므로 수축(Shrinkage)과 굴곡(Bending)량이 아크 용접에 의해 발생한 것보다 훨씬 작아진다. 예를 들면 두께 12mm를 용접했을 때 아크(Arc)로 용접한 경우는 수축량이 0.5mm인데 반해 전자빔 용접의 경우 0.1mm로서 20%에 지나지 않는다. 이러한 특징은 부분품의 기계 가공을 완전히 마친 후 용접을 실시하는 공정 설계를 가능케 한다.

(3) 난용접성 재료의 결합(Joining unweldable materials)

금속 가운데는 용접시 크랙(Crack) 발생으로 인하여 용접 불가능한 것으로 간주되는 것이 있다. 크랙은 고체 물질의 열영향 부분의 파단강도(Fracture strength)를 초과한 수축에 의해 틈

(Strain)이 발생한 것이다. 전자빔 용접에서의 수축 틈은 아주 작기 때문에 크랙 발생 가능성이 적고, 경우에 따라 다른 방법으로 용접했을 때 발생한 크랙을 전자빔 용접으로 보수하는 것도 가능하다.

(4) 초점조정으로 원거리 용접(Long focus)

전자 렌즈(Electron lens)의 초점 길이는 아주 길다. 전자빔 용접기는 자기 초점 렌즈(Magnetic focusing lens)와 용접판 사이의 거리가 1m 이상에서도 용접이 가능하다. 용접사(Welder)가 접근할 수 없는 아주 좁은 곳도 전자빔은 1mm의 틈새를 통과하여 용접할 수 있으며, 설치된 위치가 기하학적으로 용접이 불가능한 제약된 위치에서도 용접이 가능하다.

(5) 광범위한 용접 두께(Wide thickness range)

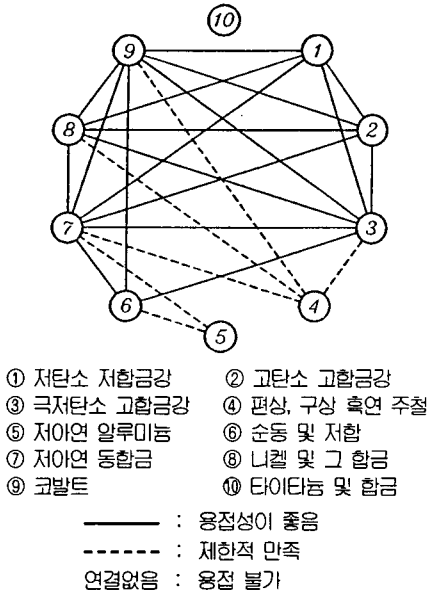
용접 파라미터(Parameter)의 조정에 의해 한 대의 용접기를 사용하여 여러 종류의 두께 용접이 가능하다. 그리고 두꺼운 물체와 얇은 것의 용접이 가능하다. 일반적인 용접에서는 아주 얇은 것과 두꺼운 것의 용접은 열이 열전도의 상이함에 따라 용접이 불가능하다. 하지만 전자빔 용접에서는 열이 그 물질 내에서 발생되어 지기 때문에 두께의 차이에 상관없이 용접이 가능하다.

(6) 이종 금속의 용접(Dissimilar metals welding)

전자빔 용접은 광범위한 이종금속(Dissimilar metals)의 결합에 사용될 수 있다. 이종 금속간 용접은 동일 구조물 내에서의 부분적으로 차별화된 기계적 특성을 요구할 때나 열 혹은 전기 전도성과 기계적 강도를 동시에 요구될 경우 및 고가의 재료를 절약하기 위한 목적으로 널리 사용된다.

이종 금속의 용접시 물리적인 성질이 제한 조건이 될 수 있으나 두 모재간의 금속학적인 거동이 중요하다. Table 2에 이종 금속간의 용접성을 나타내었다.

Table 2 이종 금속간의 용접특성



(7) 다층 투과 기능(Multiple penetration)

전자빔용접에서는 여러장의 얇은 판재를 겹쳐 용접하고자 할 때, 각각의 두께를 합한 것과 같은 두께의 한 장의 판재를 용접할 때와 같은 파라미터의 출력이 요구된다. 이 기능은 전자빔만의 독특한 특징이며, 새로운 개념의 구조 설계를 가능케 하여 준다.

4. 전자빔 용접기의 구조

전자빔 용접기는 전자빔을 발생시키기 위한 전자총과 고전압 발생 장치 및 제어장치를 포함한 빔 발생기, 진공 분위기를 유지하고 X선 차폐를 할 수 있는 진공 작업실, 용접을 원격 제어할 수 있는 가동부와 그 제어 장치 및 진공 배기 장치의 4개 부분으로 크게 분류할 수 있다.

전자총은 음극(Cathode), 양극(Anode), 제어 전극(Control electrode)으로 구성된 3극관의 구조로 되어있다. 이들의 기능은 각각 자유 전자의 방출, 빔의 가속 그리고 빔 전류 제어이다. 전자총을 떠난 빔은 집속(Focusing coil), 편향 렌즈(Deflection coil)를 통하여 원하는 형태로 제어되어 용접 가공

면에 도달한다. 전자총은 수직 하향(1G)에서 수평(2G)까지의 자세에서 사용할 수가 있으며 각각에 대하여 서로 상이한 용접 특성을 가진다.

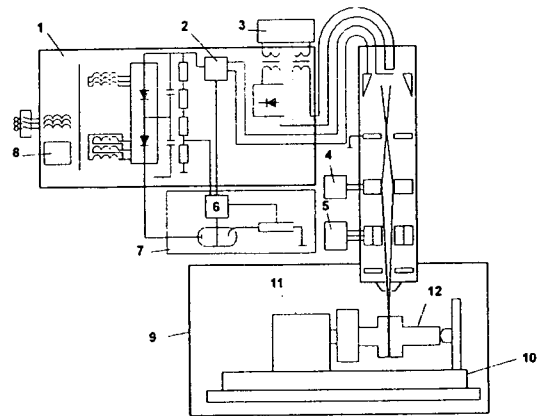
전자빔은 높은 진공 중에서 좋은 특성을 나타내므로 진공 작업실을 요구한다.

그리고 이 작업실은 전자빔이 물체에 충돌할 때 생기는 X선을 차폐할 수 있는 기능을 가져야 한다. 차폐를 하기 위하여서는 벽체의 두께가 충분히 계산되어야 하고, 저전압형에서는 스틸 챔버를 사용하지만 가속 전압이 100kV 이상의 고전압형이 되면 납(Lead) 차폐제를 겸하여 사용하여야 한다.

사정에 따라서 특수한 구조의 장치를 이용하여 부분 진공이나 비진공 하에서 용접이 이루어지는 경우도 있는데 이 때에도 X선으로부터 작업자를 보호하는 방안은 수립되어야 한다.

진공 작업실 내부에서 용접은 원격 제어하여야 하는데, 전자총이 고정되어 있고 용접 대상물을 구동시키는 방식과 전자총을 구동하는 방법이 사용되고 있다.

Fig. 5는 전자빔 용접기의 기본 구조와 빔발생기의 제어회로를 나타낸 것이다.



High voltage unit electric circuit diagram:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 - high voltage source | 2 - welding current stabilizer |
| 3 - bombardment current stabilizer | 4 - focus current stabilizer |
| 5 - beam deflection current source | 6 - accelerating voltage stabilizer |
| 7 - control tube unit | 8 - current limiter |
| 9 - vacuum chamber | 10 - table |
| 11 - rotary system | 12 - work piece |

Fig. 5 전자빔 용접기의 구조

Ⅲ. 전자빔 용접의 활용

1. 전자빔 용접의 활용 포인트

전자빔 용접의 특징을 살려서 생산에 적용하면 대체적으로 다음과 같은 부가가치를 얻을 수 있다.

- (1) 금속학적인 측면
 - 1) 텅스텐, 탄탈, 지르코늄 등 난용성 금속
 - 2) 알루미늄 합금의 열화에 의한 용접 강도 저하의 방지
 - 3) 타이타늄 등의 고온 산화의 방지
 - 4) 스테인레스 강의 카아바이드 석출 방지
 - 5) 이종 금속간의 용접
 - 6) 고니켈강의 고온 균열(Hot Crack) 저감
 - 7) 동, 은과 같은 열 전도성 재료의 용접 용이
 - 8) 용접부에 불순물, Gas 혼입 방지
 - 9) 도전체의 전기 전도율의 유지
- (2) 구조 설계적인 측면
 - 1) 완벽한 용접 및 결함 제거로 강도 및 신뢰성 향상
 - 2) 타 용접 방식으로 용접이 어려운 얇은 재료
 - 3) T-Joint의 투과 용접 적용
 - 4) 용접 강도의 향상으로 최종 생산품의 경량화 실현
 - 5) 용접 변형의 방지
 - 6) 용기 내부의 진공 봉합
 - 7) 외관상 용접면의 청결화
 - 8) 접근이 어려운 용접 조인트
 - 9) 내부에 물질을 충전시킨 상태에서 열영향 없이 용접 가능
 - 10) 예열 - 용접 - 서냉/후열 처리가 동시에 연계적으로 가능
- (3) 경제적 측면
 - 1) 후판 용접시 작업 시간 단축
 - 2) 용가재, Sealing Gas 및 Flux 등 부자재 절감

- 3) 대량 생산시 자동화로 생산성 향상
- 4) Gloove 가공 불필요
- 5) 용접 후 Grinding 등의 후처리 인건비 절감

2. 연구에 사용한 장비의 사양

본 연구에 사용한 전자빔 용접 시스템은 Ukraine Paton Institute에서 빔 발생기를 도입하고, 국내 기술로 나머지 시스템을 개발 제작한 것으로 Fig. 6 과 같은 외형을 가졌으며, Table 3 과 같은 사양으로 이루어져 있다.

Table 3 실험에 사용한 전자빔 용접기의 사양

| | |
|--------------|-------------------|
| 진공작업실 크기(mm) | L6000×W2400×H2400 |
| 가속 전압(kV) | 60 |
| 용접기 출력(kW) | 60 |
| 운전 진공도(Torr) | 10 ⁻⁴ |
| 구동 방식 | 전자총 수직고정 테이블식 |
| 가능공작물 크기(mm) | L3000×W1200×H1000 |
| 용접가능한 두께(mm) | 0.2 ~ 300 |

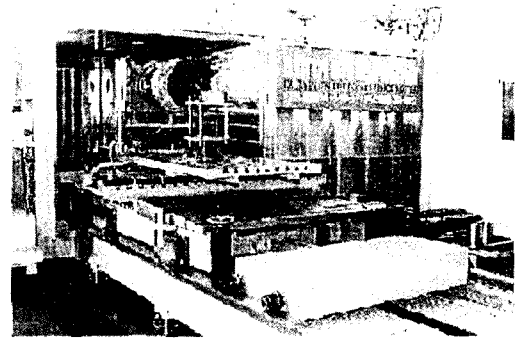


Fig. 6 전자빔 용접기의 외관

3. 활용사례

(1) 전자빔 용접을 이용한 개발 실적

Table 4에 열거한 사례는 신상품의 연구 개발 혹은 공정 개선을 목적으로 전자빔 용접을 활용한 사례들이다.

Table 4 전자빔 용접의 활용 사례

| 항번 | 개발 내용 | 소재 | 적용분야 |
|----|-------------------------------------|--------------|---------|
| 1 | 압력 용기를 포함한 구조물 | Aluminum | 항공 우주 |
| 2 | 노즐 및 인젝터 | 내열강-동합금 이종 | |
| 3 | Landing Gear Shaft | 내열합금강 | 원자력 |
| 4 | 일체형원자로(SMART) 주 냉각재 펌프 | 스테인레스스틸 후판 | |
| 5 | 일체형원자로 제어봉 구동용 선형 스텝 모터 | 연자성강-비자성강 이종 | |
| 6 | Spent Fuel Basket | 스테인레스스틸 | |
| 7 | Turbine Diaphragm 적용시험 | 내열합금강 | |
| 8 | 마이크로 셀의 비가열 용접 | Titanium | 정밀 산업 |
| 9 | 0.2mm 두께의 튜브 제작 | 스테인레스스틸 | |
| 10 | 복수 기어의 치절 후 용접 결합 | 기계공구강 | |
| 11 | 유압기기용 Spool 용접 | 기계공구강 | 반도체, 전자 |
| 12 | Water 가공용 Target, Chamber, Diffuser | Aluminum | |
| 13 | LCD 제작용 Susceptor | Aluminum | |

(2) 전자빔 용접 활용 관련 사진

가. 금속별 용입 형상

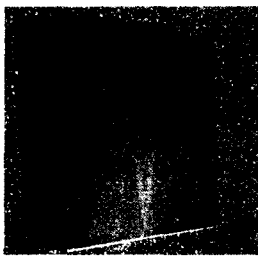


사진 1
C/St 100mm Penetration
I : 600mA V : 200mm/m

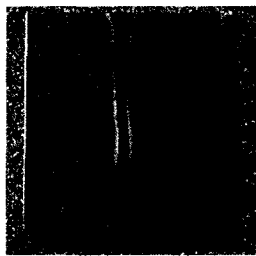


사진 2
Cr Alloy(SA387-22CL)100mm
I : 309mA V : 200mm/m

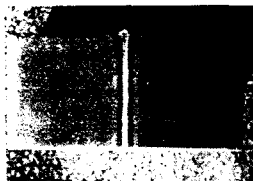


사진 3
Aluminum 400mm 용접
I : 200mA V : 800mm/m



나. 이종금속간의 용접

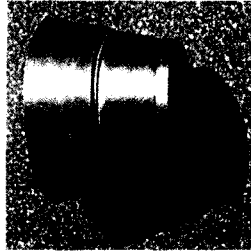


사진 4 동 합금의 용접

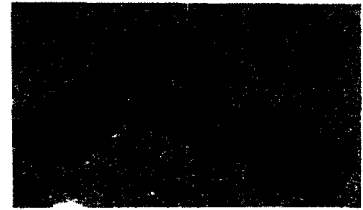


사진 5 동 합금의 Tee형 제작

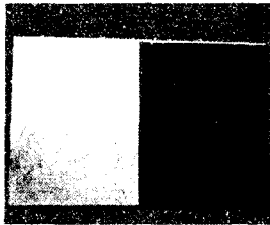


사진 6 스테인레스 스틸과 동 합금의 이종 금속간 용접

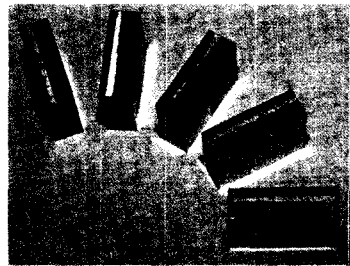
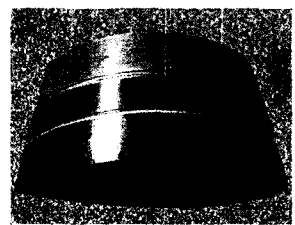


사진 7
알루미늄과 구리의 이종 용접

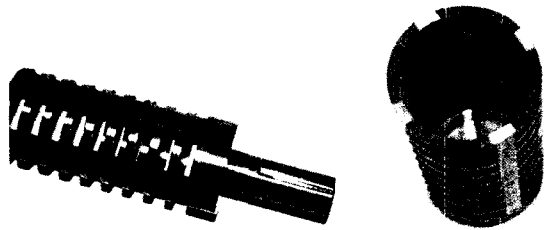


사진 8
비자성 스테인레스 스틸(A316L)과 연자성 스테인레스스틸(A430F)결합

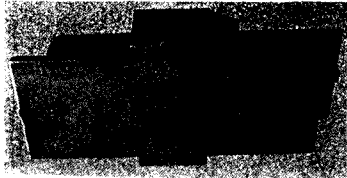


사진 9 직선용접에 의한 흰봉의 연결

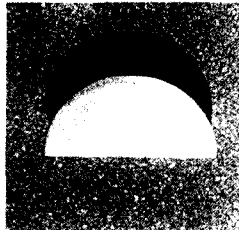


사진 10 회전하면서 흰봉의 연결

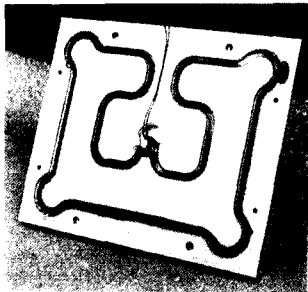


사진 11 복잡한 용접선의 추적(Aluminum)

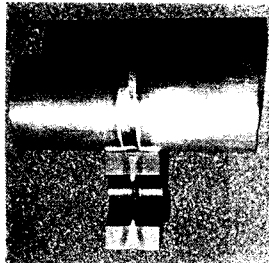


사진 12 Backbead의 형성

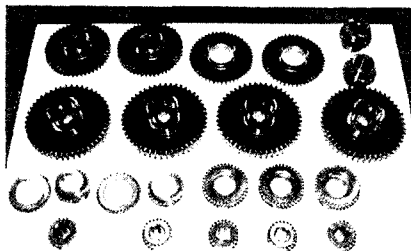


사진 13 다중 복합 기어의 치질 후 결함

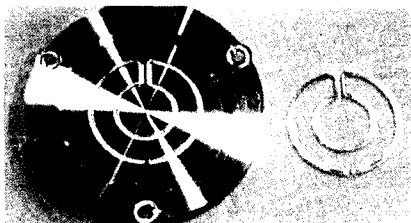


사진 14 곡선부의 비기열 정밀 용접

기술자들이 노력하였다. 전자빔 용접은 그 고유의 우수성에도 불구하고 장비 제작 비용의 과다함과 제한적인 작업 환경으로 인하여 특수한 목적 이외에는 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다. 작업 비용에 있어서 용접 가공물의 수량이 많으면 생산 라인을 전자동화시켜 높은 생산성과 품질 향상을 동시에 도모할 수가 있지만 그렇지 못할 경우는 경제성이 떨어지는 결점이 있다. 현재 전자빔 용접기는 자동차 공업 및 전자 부품 산업체 등에 경제성을 고려한 대량 생산용으로 전용화되어 많이 가동되고 있다.

그러나 정밀하고 높은 품질의 용접을 필요로 하는 산업 분야가 증가하면서 경제성과는 별개로 전자빔 용접을 활용하여야 하는 요구가 계속 증가하고 있다. 특히 우주 항공 산업, 원자력 산업, 반도체 장비 산업 및 복합 기능적 기계산업 등 최근 산업의 경향 변화와 더불어 수요 창출이 일어나고 있다.

본 논문에 언급된 활용 사례들은 몇 가지의 개발 프로젝터를 수행하면서 발생한 결과물 혹은 준비 과정의 시험에서 발췌한 것임을 밝혀 둔다.

참고문헌

1. S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer, Electron Beam Technology, John Wiley-Interscience Publication, pp.29-42, (1982)
2. J. V. Birnie, An Introduction to Electron Beam Welding, Physics in Technology, pp.116-122, (1976)
3. Dipl. -Ing. H. Schultz, Electron Beam Welding, Abington Publishing, pp. 1-91, (1993)
4. 杉山禎彦, 高エネルギー-密度溶接, 輕金屬溶接, pp. 18-20, (1996)

IV. 결론

전자빔 용접 장비를 1996년 제작 설치한 이래 용접 기술 개발과 수요 창출을 위하여 많은 연구