

# 비행체 용접용 전자빔 용접장치 개발



한 유 희

(KIMM 용접기술연구부)

- '78 연세대학교 기계공학과 (학사)
- '84 독일 브라운슈바이크 공대 기계공학과 (석사)
- '87 독일 브라운슈바이크 공대 기계공학과 (박사)
- '87-'89 독일 항공우주연구소 연구원
- '89-현재 한국기계연구원 책임연구원



서 정

(KIMM 용접기술연구부)

- '82 부산대학교 기계공학과 (학사)
- '84 부산대학교 대학원 기계공학과 (석사)
- '92 포항공대 기계공학과 (박사)
- '84-'87 부산대학교 조교
- '87-'88 포항공대 Research Assistant
- '92-'93 포항공대 기계공학과 Post-Doc.
- '93-현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서 론

전자빔 용접 (Electron Beam Welding, EBW) 은 선진국에서는 이미 성숙단계에 접어든 기술이며, 주로 사용되는 분야는 원자력 기술 및 우주·항공 분야이다. 이 분야의 핵심부품 및 기술을 선진국으로 부터 도입하던 우리나라는 상대적으로 전자빔 용접에 친숙하지 못하고 있으나, 최근 항공산업 육성과 함께 국내에서도 핵심부품을 제조할 기회가 확대됨에 따라 전자빔 용접에 대한 관심이 커지고 있으며, 아울러 방산용 핵심부품의 제조에도 점차 수요가 확대되고 있다.

상기한 바와 같이 점차 확대되어 가는 전자빔 용접기술 수요에 부응하고 독자적인 기술개발의 계기를 만들기 위해서 용접형 비행체를 제작할 수 있는 전자빔 용접 시스템을 국내에서 개발하였다.

## 2. 기술적 특성

전자빔 용접이 기존의 용접방법과의 차이점은 다음과 같다.

- 출력밀도(Power density)가 높다.  $10^7$  W/cm<sup>2</sup>
- 소위 Key hole 효과에 의한 재료 심부까지 열전달이 이루어 진다.
- 용가재를 사용하지 않아도 된다.
- 비드폭이 좁고 입열량이 적어 열변형이 거의 없다.
- 진공상태에서 용접이 이루어 지므로 산화가 방지된다.
- 용접제품의 품질의 재현성이 우수하다.

- 출력범위는 1~300 kW이며, 용접깊이는 0.5mm에서 300mm에 이른다.
- 용접대상 재료의 범위가 넓다.

비행체는 주로 Al 합금 또는 Titan 합금으로 구성되어 있다. Titan 합금의 경우 전적으로 전자빔 용접으로 수행되고 있으며, Al 합금의 결합에는 리벳 또는 볼트 체결이 주로 사용되고 있다. 리벳 또는 볼트 결합은 성숙된 기술로써 이종금속 결합에도 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있으나, 접합면(체결면)이 필수적이고 강도에 비해 무게가 증가되는 단점과 함께 기밀성이 요구되는 곳에서는 필히 부수적인 조치가 필요하다. 따라서, 생산공정단계가 많아지고 제품의 내구성의 제한으로 제품수명의 단축 또는 사용환경의 제한 등의 문제점이 야기될 수 있다. 이에 반해 용접을 적용할 경우 무게대비 강도향상 효과와 더불어 사용환경 제한 내지 수명단축 문제가 해결될 수 있다.

### 3. 시스템 설계

현재 전자빔 용접기의 추세를 보면 대형 롤, 가스터어빈 블레이드 용접 등 대형 작업물을 용접하기 위한 대형 시스템으로 되어가고 있으며, 외국의 경우는 대형작업물 용접을 위한 전자빔 용접기가 개발 및 생산되고 있다. 대형작업물 용접

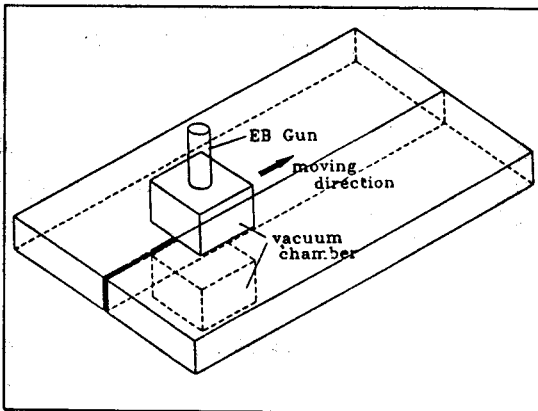


그림 1. 소형진공작업실을 이용한 대형작업물 용접 방법

을 위해서는 소형 진공작업실 이용방식과 대형 진공작업실 이용방식의 두가지 방법이 고려될 수 있다.

소형 진공작업실을 이용한 대형작업물 용접방식은 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 진공작업실이 EB Gun과 함께 이동하는 방법이다. 이 방식에서는 진공작업실이 소형이므로 제작경비가 적다는 장점을 가질 수 있으나, 진공작업실과 시편 표면사이에 있는 Sealing 재료의 마멸 등에 의해 진공 유지에 어려움이 있다. 또한, 용접 시작점과 끝점에서는 새로운 판재를 대어 진공을 유지해야 하며, 작업물의 형상에 따라 개별적으로 제작되어야 한다.

한편, 대형진공작업실을 이용한 대형 작업물 용접방법은 EB Gun이 고정되어 있고 작업물이 구동장치에 의해 이동하는 방법과, 작업물은 고정되어 있고 EB Gun이 이동하는 방법으로 구분될 수 있다. 본 연구 제작된 전자빔 용접기는 EB Gun이 고정되어 있고 작업물이 구동장치에 의해 이동하는 방법을 채택하였다.

본 연구에서 개발된 시스템 (그림 2 참조)은 전자총부 (Electron beam gun), 진공작업실 (Working chamber), 고전압 전원장치 (High voltage supply), 진공장치 (Vacuum system), 제어 및 조정장치 (Control and adjustment instrumentation)의 기본요소들로 구성되어 있다. 전자총부와 고전압 전원장치는 현재 국내에서 개발중에 있으므로 외국제품을 사용하게 되었다. 이 두 부분을 제외한 진공작업실 (Working chamber), 진공장치 (Vacuum system), 제어 및 조정장치 (Control and adjustment instrumentation)는 국내기술로 제작하였으며, 이에 대해서 간단히 언급하고자 한다.

#### 3.1 작업실 (Working chamber)

작업실은 작업물, 용접기구, 작업물 위치조정기구 등을 수용할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 여러 필수적인 안정 요구조건이 요구되며, 특히, 제작시에 작업실에 작용하는 대기압이 고려되어 져야 한다.

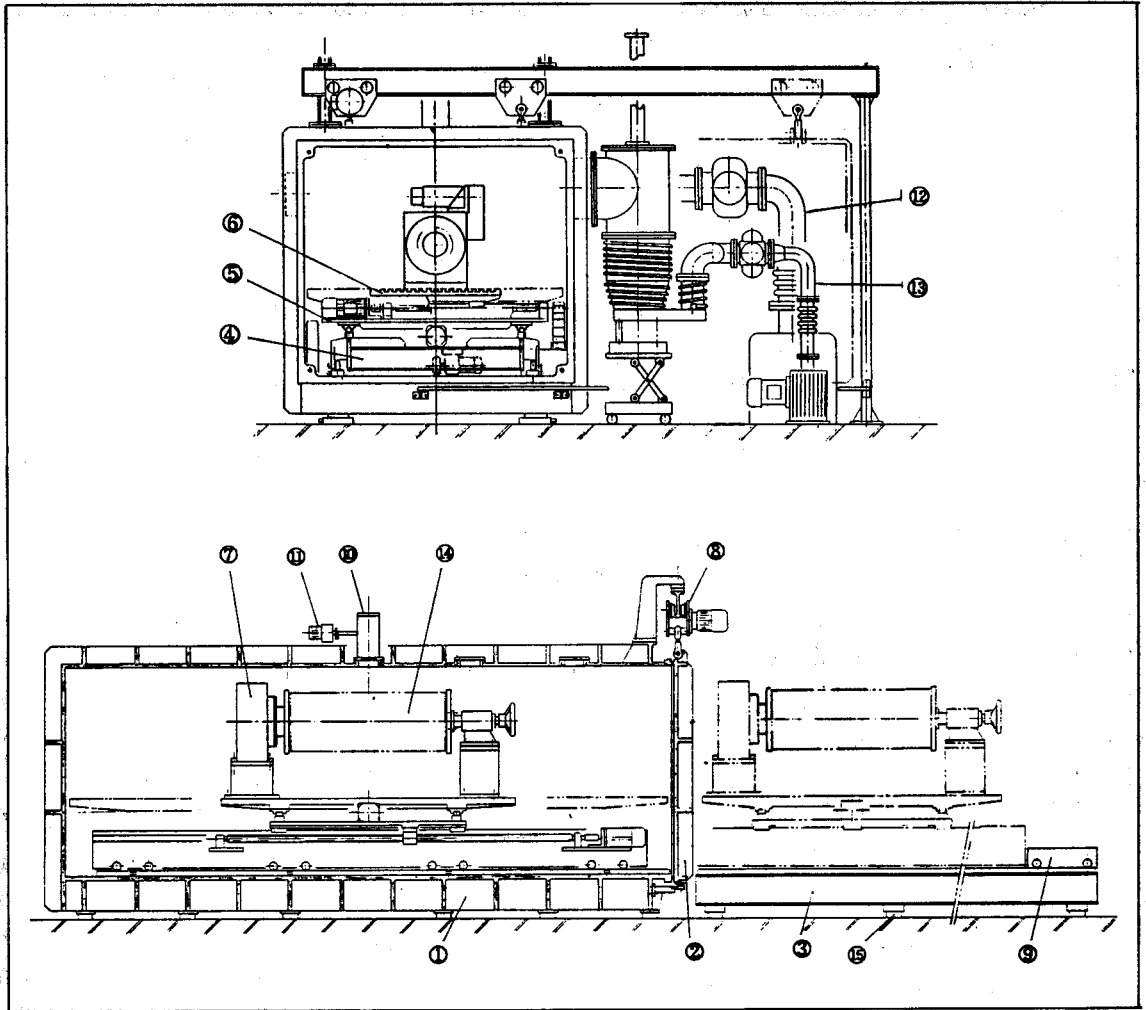


그림 2. 전자빔 용접기의 구성도

- 1: Chamber, 2: Door, 3: Sub base, 4: Carriage, 5: X-pallet, 6: Y-pallet, 7: Rotary table  
8: Trolley, 9: Moving car, 10: E.B. gun, 11-13: Pump line, 14: Specimen, 15: Level vise

비틀림 현상은 작업실에 부착되어 있는 전자총의 빔축, 용접지그위에 있는 작업물의 위치, 편향 장치의 정밀도 등에 영향을 미치므로 적절한 기계적 강도를 가지는 작업실을 설계하는 것만으로 충분하지 않으며, 예상되는 비틀림 현상을 고려해야 한다. 정육면체나 실린더 형이 아닌 대형 작업실의 경우, 비틀림을 최소화하기 위해 유한요소 해석을 이용하여 설계되어질 수 있으며, 작업실의 비틀림 현상을 방지하기 위한 보강재의 설치 방

법이 요구된다. H 2.4m x W 2.1m x L 6m 의 대형 직육면체 진공작업실의 경우에 대해 FEM 해석을 시도하여 벽 두께 및 보강재의 갯수 등을 계산하였다. 그림 3은 진공 작업실의 도면을 나타내고 있다.

작업실에는 내부를 관찰할 수 있도록 여러개의 창(Window)이 만들어져 있으며, 작업자가 X선의 영향으로 부터 보호받기 위해 X-Ray 차폐에 대한 규정을 준수하였다. 국내에서는 이에 대한

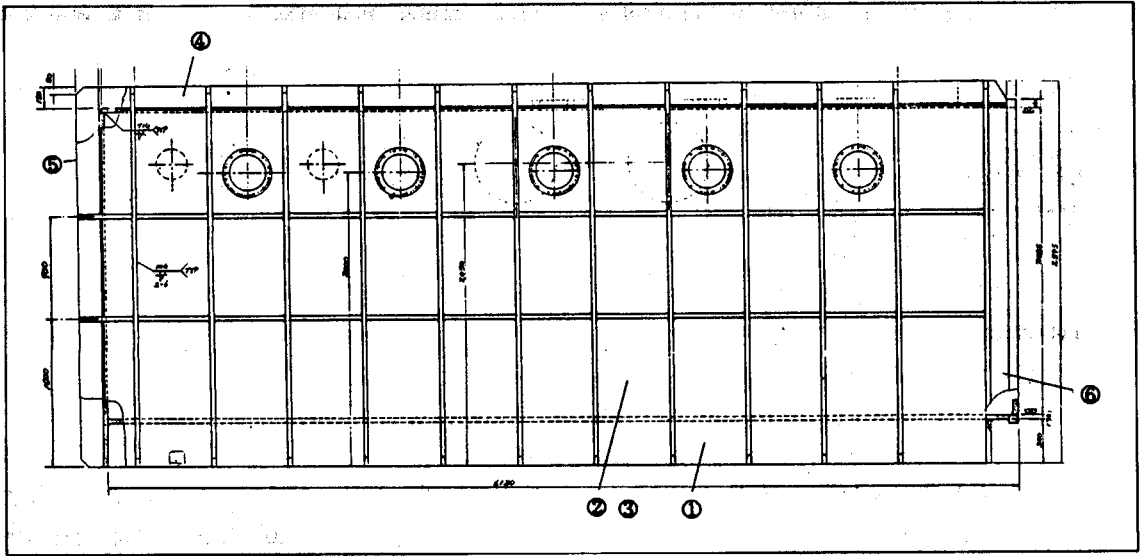


그림 3. 진공작업실의 도면

1: Bottom, 2: Front wall, 3: Back wall, 4: Roof, 5: Left wall, 6: Door

뚜렷한 규정이 미비된 관계로 독일의 규정을 참조할 수 있다. 즉,

- 1) DIN 54 113 Part 1-3 : 500kV 가속전압까지의 X-Ray 장비에 대한 방사선 차폐규정
- 2) Röntgenverordnung (RöV, Röntgen 규정) : 1973년 3월 1일 제정 (연방법률공보 Part 1) RöV 15와 17장에 의하면 1년동안 허용되는 X-Ray의 등가량(Equivalent dose),  $Dq[rem]$ 는 다음과 같이 규정된다.

control 영역  $Dq > 1.5rem$   
 감시영역  $0.15rem \leq Dq \leq 1.5rem$  (3.1)  
 감시없음  $Dq < 0.15rem$

한편, 진공작업실 벽 두께의 계산을 위해서는 British Standards Institution의 Nomogram (계산표)를 참조하였다. 참고자료에 의하면 진공작업실에서의 피폭량의 안전성 규정은 다음과 같다.

진공작업실 표면에서 5cm 떨어진 곳에서의 피폭량  $\leq 0.1mR/h$  (3.2)

조건식 3.2에 의하면 1년동안 연속적으로 작업하였을때 등가량은  $Dq=0.876rem$ 이 되나 준비시간을 제외한 실제 용접작업 시간은 하루에 4시간 정도라고 보면 식 3.1의 감시없음 영역에 들 수 있는 결과가 나온다. EB Gun High Power Supply는 60kW (60kV, 1000mA)이므로 이 조건에서의 X-Ray 산출량을 계산하였다. 이로 부터 진공작업실의 벽 두께를 결정하였으며, 투시창은 24mm의 납유리를 사용해서 차폐하였다. X-Ray 측정장치를 사용하여 용접중에 발생하는 X-Ray를 검출한 결과 X-Ray가 충분히 차폐됨을 알 수 있었다.

### 3.2 진공 시스템 (Vacuum system)

용융 용접, 진공 브레이징 등의 용접기술에서의 진공의 사용은 용접부위를 대기의 해로운 가스나 증기로 부터 보호하고자 하는 것이다. 전자빔 용접에서는 이외에도 많은 요구조건들에 의해 진공이 필요하게 된다. 전자총에서는 Cathode의 산화 방지, 전자들이 Narrow 빔에 Collimate 해야 하며, 전기적 단락 (discharge) 방지가 필수적이다.

작업실에서 진공의 존재는 전자가 산란되지 않고 먼거리를 이동하게 하며, 전자빔 용접기에서 진공 시스템은 여러 기술적 이유에 의해 중요한 부분을 차지하고 있다.

대기는 가스(Oxygen, Nitrogen, etc) 와 수증기로 이루어져 있다. 진공상태에 의해 증기들은 응축되어 액체상태로 변환하나, 가스의 경우는 이러한 현상이 이루어지지 않는다. 가스나 증기는 자유전자와 분자들로 이루어져 있으며, 이러한 입자들은 질량을 가지고 온도에 따른 속도로 이동한다. 이러한 입자들이 장벽을 만나면 에너지가 충격 표면적에 대한 압력으로 나타나게 된다. 따라서, 진공기술에서 중요한 항은 입자밀도(Particle number density)이다.

압력의 기본단위는 다음과 같다.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.02 \text{ kg/cm}^2 = 750 \text{ Torr (mm Hg)}$$

$$1 \text{ atm} = 1013 \text{ mbar}$$

전자빔 용접기에서 저진공 (Soft vacuum)은  $p = 1 \sim 10^{-3} \text{ mbar}$ , 고진공은  $p = 10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ mbar}$  로 고려되고 있다. 진공을 하는 중에 가스입자들은 대부분 공간의 이동이 제약받을 뿐만 아니라 일부는 흡착 영향에 의해 고체의 표면에 붙여 있게

된다. 표면에 붙어 있는 가스 입자들을 떼어내는 것은 압력보다는 진공시간, 벽 표면상태와 온도, 작업물 이송장치, 작업물 등에 영향을 받게 된다. 고진공상태 즉,  $p < 10^{-3}$ 에서는 많은 가스입자들이 공간에서의 자유이동 보다는 고체의 표면에서 발견된다. 따라서, 표면이 거칠고, 작업실 벽이 더럽고 깊은 골을 가지는 이송장치 (예: Motor winding) 또는 넓은 면적을 가지는 작업물의 경우, 강력한 펌프를 사용하더라도 진공을 만드는 시간이 오래 걸리게 된다.

간혀져 있는 체적의 진공은 대기압에 의해 간혀진 공기를 강제로 배출해야 함을 의미한다. 예를 들어 빔 발생기 안에서  $10^{-5} \text{ mbar}$ 의 진공을 얻기 위해서는 공기는  $10^8$  계수로 미리 압축되어야 하므로 진공펌프로는 이를 수 없는 일이며, 같은 종류의 펌프를 하나더 부착하더라도 성공할 수 없다. 왜냐하면 압력 감소에 따라 사용되는 펌프의 작동원리가 물리적 법칙과 조건에 따라 적절하게 채택되기 때문이다. 이러한 이유로 인해 Mechanical pumps (Rotary vane pumps, Roots pumps), Kinetic pumps (Turbomolecular pumps, Oil diffusion pumps), Condensation pumps (Cryogenic pumps) 등이 사용된다. 본 연구에서 제작된 전자빔 용접기에 사용된 진공시

표 1. 진공시스템 사양

SYMBOL	DESCRIPTION	REMARK
P1	ROTARY VACUUM PUMP	22kW
P2	MECHANICAL BOOSTER PUMP	11kW
P3	ROTARY VACUUM PUMP	7.5kW
P4	MECHANICAL BOOSTER PUMP	2.2kW
P5, P6	OIL DIFFUSION PUMP	12kW : HEATER
P7	ROTARY VACUUM PUMP	0.4kW
P8	TURBO MOLECULAR PUMP	0.4kW
V1~V10	VALVE WITH AIR CYLINDER ACTURATOR	
G1, G2	LEAK SENSING GEISSER TUBE	
VS1, VS2	VACUUM SWITCH : $10^{-2}$ Torr ON	
VS3	VACUUM SWITCH : ATM ON	FINISHED PYZZY
M1, M2, M3	PIRANI GAUGE : PT-3PM	NO-C-NC
MN1, MN2	PENNING GAUGE : CT-3PM	NO-C-NC

시스템의 사양은 표 1에 나타나 있으며, 그림 4는 진공배기 계통도를 나타낸다. 현재 진공상태는 헬륨이온 leak 측정 장치로 충분히 점검되어 상태가 양호하다.

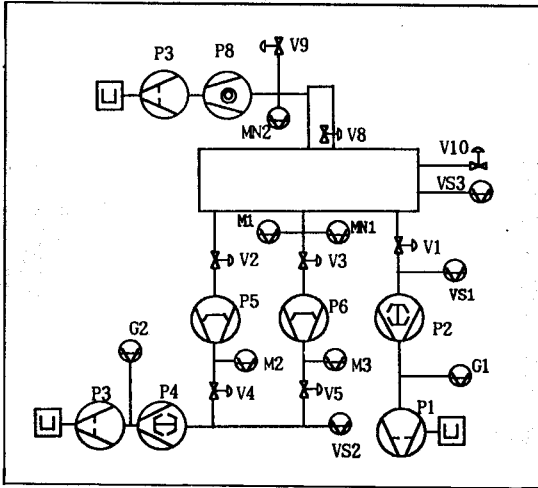


그림 4. 진공배기 계통도 (Symbol은 표 1. 참조)

### 3.3 구동장치

구동장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 X-Y table, Rotary table, Tail-stock 등으로 구성되어 있으며, X-Y table위에 회전구동부가 설치되어 있다. x축, y축 및 회전구동부는 각각 Servo-Motor로 구동되도록 되어 있으므로 각 Servo-Motor의 사양을 결정하였다. Servo-Motor의 선정기준은 다음에 준하였다.

- Motor의 정격 출력 = 가속 출력  $P_a$ 의 50~100%
- Motor의 최고 회전 속도 =  $N_M$ 이상
- Motor의 정격 Torque = 이송 Torque  $T_L$ 이상
- 회전자(모터의) 관성  $G_{DM}^2$  합계부하  $G_{DL}^2$ 의 1/K 이상 (K=2~3정도)
- 모터의 관성을 포함하여 가감속에 필요한 Torque를 계산하여 Motor의 최대Torque  $T_P$  이하

### 3.4 조정 시스템 (Control system)

전자빔 용접 시스템은 CNC 시스템으로 조정되

도록 되어 있다. 조정시스템 데스크에서 진공배기장치, 구동장치 및 시스템 전반에 대한 감시 및 제어가 가능하다. 현재의 조정기능은 전자빔 제어부와 따로 독립적으로 구성되어 있으므로 각각 개별적으로 작동시켜 용접을 해야 한다. 그러나, 전자빔 용접의 공정특성을 충분히 파악함에 따라 향후 빔 전류, 렌즈전류 및 가속전압 등의 변수조정을 CNC에서 수행할 수 있도록 하여 중앙에서 시스템 전반의 제어가 가능하도록 할 예정이다.

## 4. 성능 평가

앞의 설계기준에 의해 제작된 전자빔 용접시스템의 사진이 그림 5에 나타나 있다. 전자빔 용접기의 성능평가지 국내에는 관련규정이 없어 독일 규격 DIN32505를 참조하였다. 이 규정에서 제시하고 있는 사항은 6항목으로 각 항목별로 3~4개의 세부 기준치를 제시하고 있다. 6개의 항목은 1) 가속전압의 안정성, 2) 빔전류, 3) 렌즈전류, 4) 용접속도, 5) 구동장치의 정밀도 및 6) 전자빔 위치 정밀도로 분류된다.

본 연구에서 개발된 시스템은 위의 1)~3)항 및 6)항은 모두 DIN 32505에서 제시하는 한계치를 만족하며, 5)항의 구동장치 정밀도는 KS에서 제시하는 기준치를 만족하고 있다. 용접속도의 경우 적정 용접변수가 도출되지 않은 상태에서 몇 가지 시편을 제작하였다.

그림 6과 7은 각각 연강과 AI 합금(6061)의 맞대기 용접한 단면을 나타내고 있다. 본 연구에서 개발된 용접시스템으로 양호한 용접성을 나타내는 용입깊이는 다음과 같다.

- Steel : 130 mm
- Copper : 100 mm
- Aluminum : 300 mm
- Titanium : 160 mm

향후 다양한 금속을 대상으로 실험을 함으로써 장비에 대한 특성 파악을 지속적으로 할 계획이다.

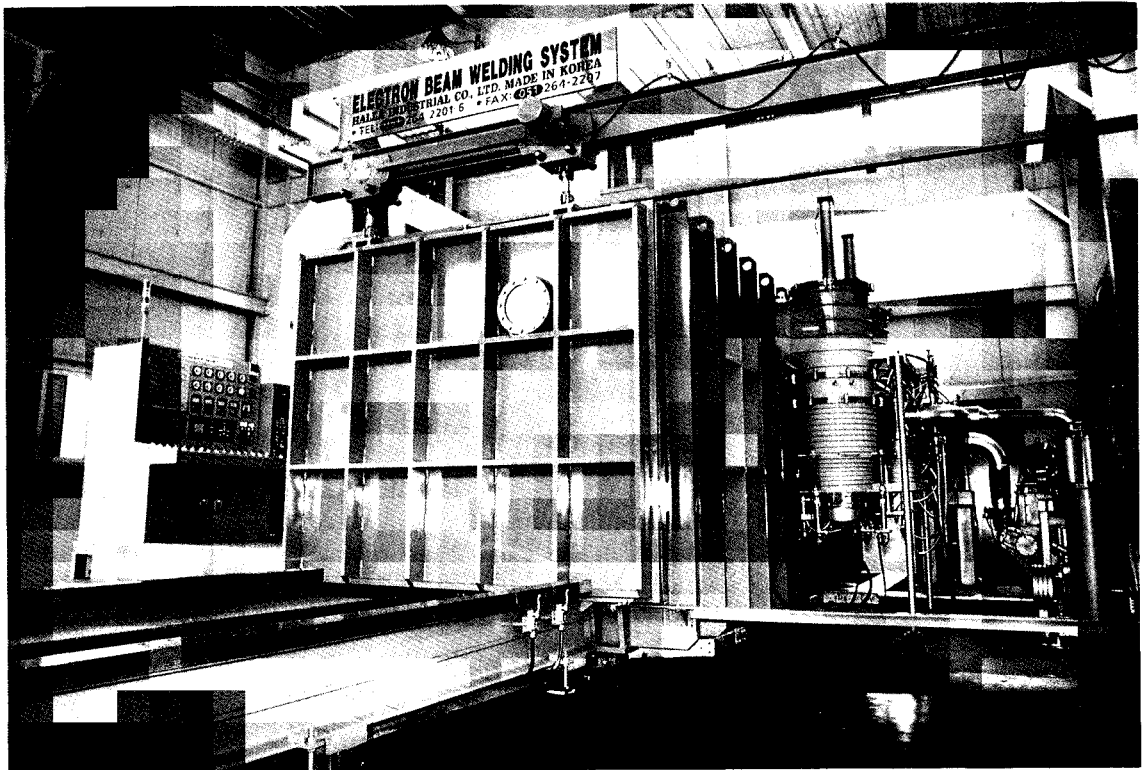


그림 5. 제작된 전자빔 용접 시스템

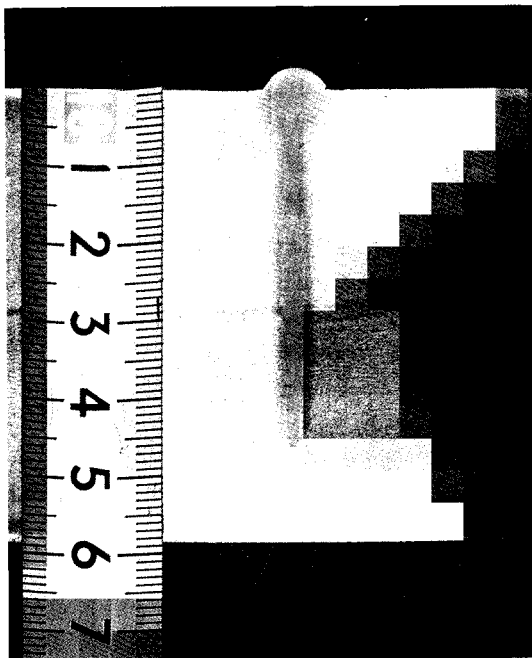


그림 6. 연강시편의 용접단면

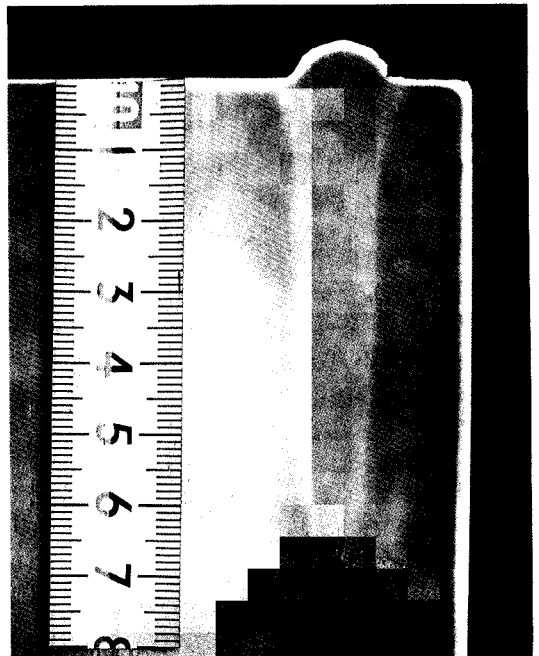


그림 7. 알루미늄(6061) 시편의 용접 단면

## 5. 결론

본 논문은 용접형 비행체를 정밀하게 용접할 목적으로 전자빔 용접기를 설계 제작함에 있어 전자빔 용접의 기술적 특성을 고려한 설계기법과 장비의 성능검사를 취급하였다.

장비 규모가 큰 관계로 제작시 취급상의 어려움이 있었으며, 동시에 진공문제 해결이라는 난제가 있었다. 진공도는 현재  $2 \times 10^{-4}$  mbar 에 도달하는 시간이 35분에 이른다. 본 장비 개발로 인해 자체 기술 및 경험 축적과 함께 국내에서도 비행체 용접은 물론이며 유사제품을 용접구조로 변환시 시제품 제작을 할 수 있어 동분야에서 독자적인 연구개발이 가능하다고 본다.

## 참고 문헌

[1] A.H. 메레카 (寺井清譯) “電子ビーム溶接,” -

原理と實際-, 産報, 1972.

- [2] M. von Pirani, US Patent No. 868,600 (26 March, 1907).
- [3] British Patent No. 727,460 (Application date 8 September, 1951).
- [4] Anon, Metalworking Prod., 103, 20 November, 1959, 1879-82.
- [5] H. Kita, et al., *Japan-German Colloquium, Welding and Economics*, Tokyo(Jp), Session 3, 1983, 147-54.
- [6] W. Lehrheuer, DVS-Bericht Bd. 63 p. 48-52, DVS-Verlag, Düsseldorf 1980.
- [7] P. Anderl, DVS-Bericht Bd. 63 p. 48-52, DVS-Verlag, Düsseldorf 1980.
- [8] Y. Arata, *Trans. Jpn. Wdg. Res. Inst.* 11, 1982, No. 1, 25-20