

# 고정밀 60kW 급 전자빔 용접시스템 국산화 개발 The domestic development of 60kW Electron Beam Welding System

정원희, 엄기원, 정인철(두산중공업(주) 기술연구원)

**ABSTRACT** The main characteristic of the Electron Beam Welding technique is its high energy density which produces thin and deep welds with very little distortion. High accelerated electrons, focused in a beam of 0.5 ~ 2mm diameter, produce narrow welds with deep penetration. The result is a small HAZ as well as a low and uniform distortion which is predictable within very narrow limits. But the small diameter of the EB increases the requirements for the equipment control system for centering the beam on the welding joint in order to avoid any lack of fusion. Therefore, in this paper, we introduce the system developed at our company and the quality of welding zone, the detail function of system.

**Key Words :** Electron Beam Welding(전자빔 용접), 3D trajectory Planning( 궤적생성),

## 1. 서 론

전자빔 용접은 고진공중에 음극을 가열하여 방출한 전자를 고전압으로 가속하고 전자코일로 집속시켜 형성된 고정밀도 에너지 빔을 피용접물에 조사하여 용융접합시키는 용접방법으로써, 일반 아크에 비해 천배이상의 고에너지 밀도를 가지며 질량이 작은 전자를 고속, 고정밀도로 제어가능한 특성을 가지고 있다<sup>(1)</sup>. 특히 전자빔 용접에서 용접조인트 갭은  $\pm 0.5\text{mm}$  이하의 가공정밀도와 Fit-up 공차, 매니플레이터의 정밀한 3차원 궤적제어를 요구하고 있다<sup>(2)</sup>.

본 논문에서는 당사에서 국내 최초로 국산화에 성공한 이동형 60kW 급 전자빔 용접시스템을 소개하고, 각 시스템 개발내용 및 용접 건전성에 대한 성능을 검증하였다.

## 2. 전자빔 용접시스템 구조

전자빔 용접시스템은 전체 진공형, He 분위기 하의 대기압형, 국부 진공형으로 나누어 지나, 우수한 용접품질 확보와 시스템 안정성 측면에서 본 시스템은 전체 진공형태로 제작되었다. 크게 전자빔 발생부와 시스템 제어부, 진공펌프부로 나눌 수 있다.

### 2.1 전자빔 발생부

60kW 를 경계로 저전압형과 고전압형으로 나누며, 제어방식에 따라 2 극과 3 극 전자총으로 구분한다. 본 시스템은 3 극 전자총으로써 블록타입의 음극(cathode)과 Wehnelt 전극, 양극(anode)이 일직선으로 정렬되어 있으며, 양극을 통과한 빔은 초점렌즈와 편향코일에 의해 피용접물에 정밀조사되게 된다<sup>(1)</sup>. 음극의 재질은 LaB<sub>6</sub> 이고 블록타입이기 때문에 수명이 길며, 전자빔 발생효율이 높다.

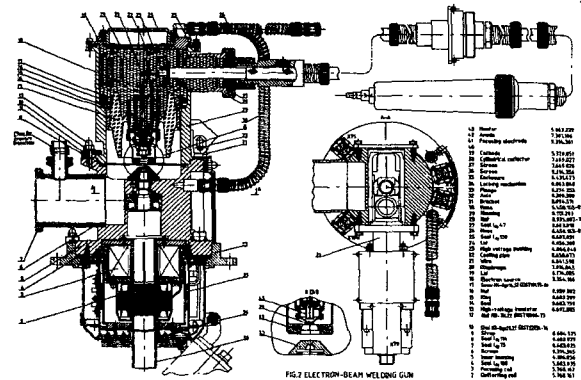


Figure 1. The diagram of electron gun

### 2.2 고전압부

고전압부는 전자총에 인가되는 가속전압, 필라멘트 가열전원과 각종 제어전원을 발생시키는 장치로써, 일반적으로 380V 전원을 입력으로 하여 1 차권선에서 600Hz 와 3~7.4%로 평활

화시키고, 2 차권선에서 0.5%이내로 안정화시킨다. 또한 출력의 안정성을 위해서 고전압의 저리플화, 전자총내 아킹(Arcing)발생을 대비한 회로의 빠른응답, 높은 신뢰성을 지니도록 설계되었다. 내부회로는 냉각오일로 채워져 있으며, 4극 컨넥터를 사용하고 있다<sup>(1)</sup>.

### 2.3 시스템 제어부

당사 시스템은 5 축 매니플레이터와 전자총 시스템을 PC 에서 통합제어할 수 있도록 설계되었으며, 진공펌프의 작동 모니터링과 제어가 가능하다. Windows 95 를 기반으로 한 PC 와 Fanuc CNC 는 DNC2 통신프로토콜을 통해 작업코드를 전송하며, 전자빔 시스템의 인터페이스는 전용 486 컨트롤러를 통해서 PC 에서 빔변수(빔전류, 초점전류, ...)를 조절할 수 있게 하였다. 그림 2 는 전체 시스템 구성도이다.

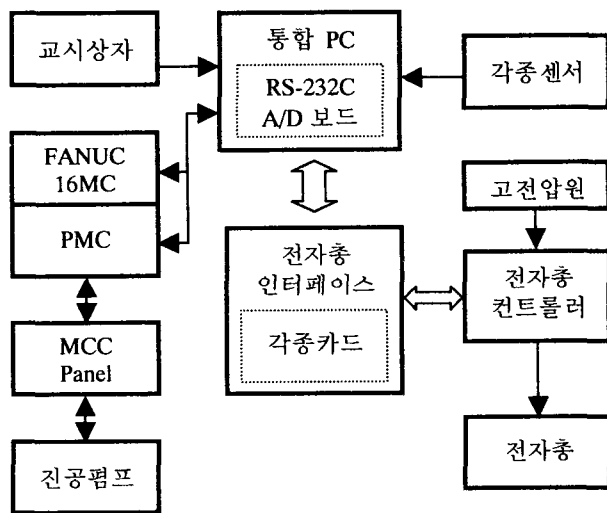


Figure 2. The scheme of EBW system

또한 용접선 추적을 위해서 용접선 주변에 조사되는 빔의 2 차전자를 검출하여 화상처리를 통한 위치제어를 입력받아 실시간 갱신리 이동이 가능토록 하였다. 용접선 추적오차는 0.2mm 이내이며, 화상처리의 오류를 대비하여 사용자의 강제 보정도 가능토록 병렬처리를 하였다. 그리고, 전자빔의 기동과 종료시 및 특수한 경우에 전자빔 변수 프로파일이 함수형태를 가질 수 있는 기능이 내장되어 있다.

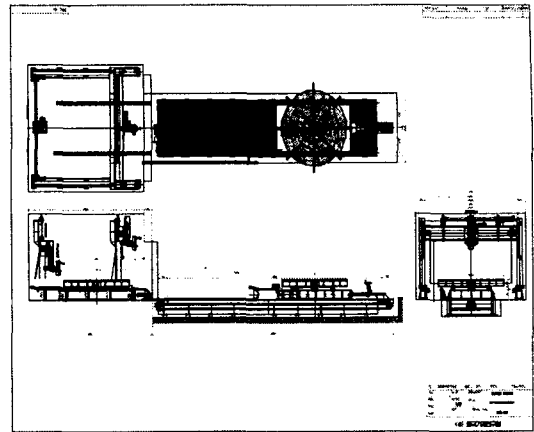


Figure 3. The drawing of manipulator and turn table

#### 2.3.1.3 차원 궤적계획

용접작업은 연속경로 계획법(continue path trajectory planning)에 의해 정밀한 5 축 매니플레이터의 용접경로를 생성시켜야 한다. 그러므로 3 차원 용접경로에 대해서는 지엽적 경로수정과 2 계 도함수까지 연속성이 보장되는 B-Spline 을 이용하여 경로를 생성하고, 특징은 아래와 같다<sup>(4)</sup>.

- 1)  $N_{i,k}(t) = 1$
- 2) 각각의 기저함수는 모든 파라메타 값에 대해 0 이나 양의 값을 가진다.
- 3) 스플라인의 최대 차수는 정의되는 다면체의 꼭지점 수로 제한된다.
- 4) 스플라인은 Convex hull 의 특성이 강하다.

주어진 데이터에 대한 전체 궤적( $P(t)$ )은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad (1)$$

식(1)의  $N_{i,k}(t)$ 는 다음과 같이 정의되는 기저함수이다.

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_i - t)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (2)$$

( $k$ =스플라인의 차수,  $i$ =경유점의 index)

여기서,  $x_i$ 는 각 구간을 정의하는 knot vector 로써 uniform knot 와 non-uniform knot 로 설정가능하다.

### 2.3.2 운영 프로그램

운영 프로그램에는 용접교시작업, 시스템 감시기능, 진공제어 및 진단과 전자빔 변수 설정기능, 각종 환경설정 기능을 가지고 있다. 프로그래밍은 Visual C++ 6.0 을 사용하였으며, 윈도우 95 를 기반한 펜티엄급 PC 에서 구동된다.

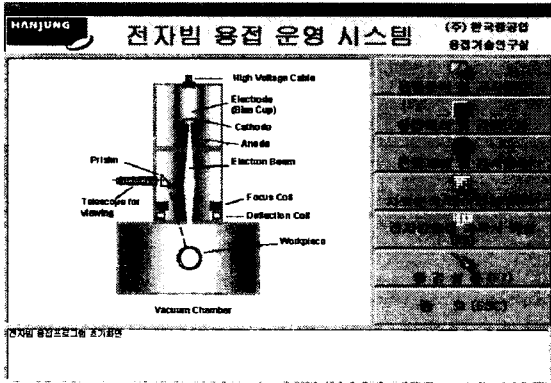


Figure 4. The main menu of operating program

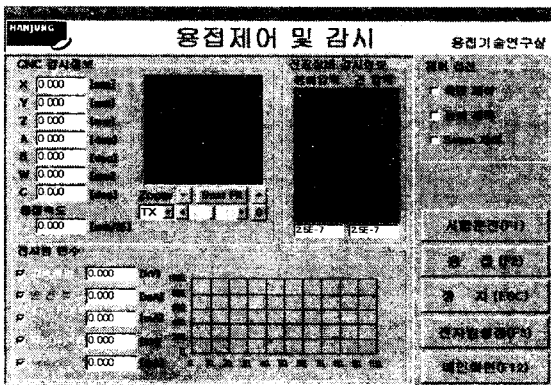


Figure 5. The monitoring screen of CNC and Beam

### 2.4 진공펌프부

발생된 전자가 모재에 도달하기 전까지 산란을 방지하기 위해서는 챔버진공이 필수적이며, 진공배기장치의 용량을 산출하기 위해 요구조건을 진공도  $5 \times 10^{-4}$ Torr 까지 30 분내 배기를 목적으로 한다면, 배기장치의 산출식은 다음과 같다.

$$T = (V/S) \ln(P_1/P_0) * k \quad (3)$$

여기서, T : 배기시간, V : 챔버용적, S : 배기속도,  $P_1$  : 초기압력,  $P_0$  : 최종압력, k : 진공도별 분자 이동거리에 따른 상수

상기 식을 이용하여 설비를 선정하였으며, 본 직결 운전형과 분리 운전형중 직결 운전형을 선택하였으며, 직결 운전형이 전력소비가 적고 배

기시간이 다소 빠르다. 진공은 4 단계로 이루어진다. Rotary Pump 에서 약 30~50Torr 이하로 진공을 시키고, Roots Pump 에서  $2 \times 10^{-2}$ Torr 까지 배기시키고, 그 이상은 Diffusion Pump 에서 담당하고 있다<sup>(1)</sup>. 전자총부분은 터보 분자펌프를 이용하여 별도 고진공시킨다.

### 3. 전자빔 용접시스템 제작

전자총의 회전운동에 의한 각축에 작용하는 모멘트를 최소화하고 이동축의 경량화 및 진공챔버내에서 최대 이송거리 확보를 위해 새로운 설계개념을 도입하였다.

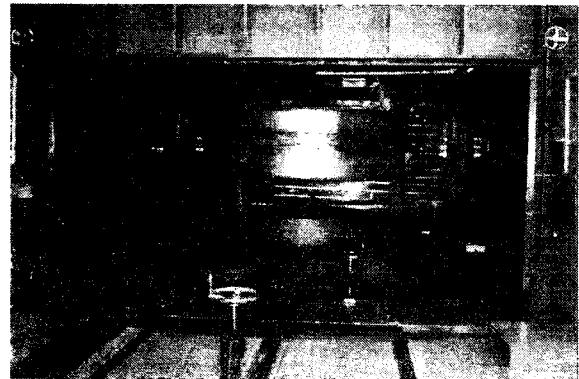


Photo 1. The scene out of door

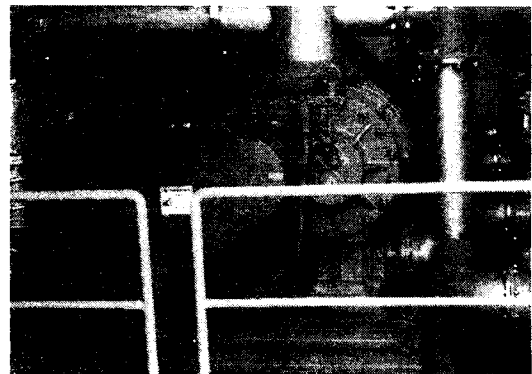


Photo 2. Roots Pump

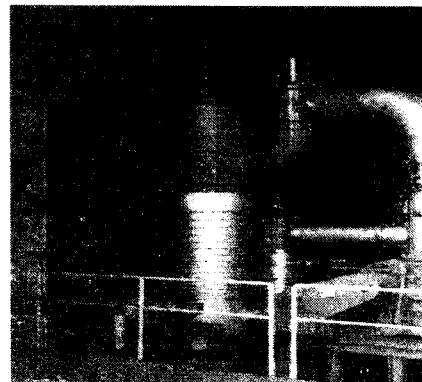


Photo 3. Diffusion Pump

#### 4. 전자빔 용접성능 검증

본 논문에서 설명된 시스템을 이용하여 각종 용접시험을 실시하여 시스템의 성능을 검증하였다. 2차원의 단순한 운동에서부터 3차원 운동까지 정밀하게 작동하였다. 탄소강에 대한 최대 용입시험에서는 약 100mm 까지 1Pass 로 양호한 결과를 얻었다. 다음은 각종 용접시험 사례이다.

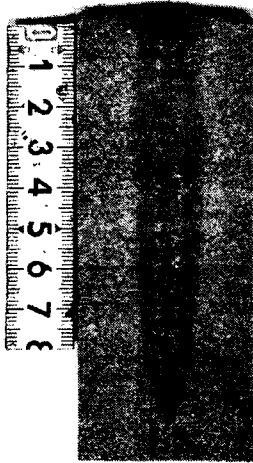


Photo 4. The cross section of C/S



Photo 5. The cross section of Ti material structure

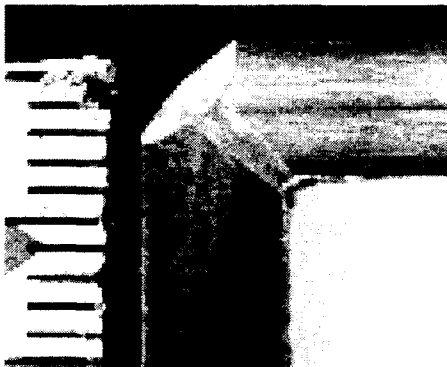


Photo 6. The cross section of SUS material structure

#### 5. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 국산화 개발된 이동형 60kW 급 전자빔 용접시스템을 소개하였다. 이 시스템은 현재 산업현장 적용을 위한 각종 시험을 실시중에 있으며, 장비의 우수성이 충분히 검증되었다. 그러나, 국내에서 전자빔 용접기술에 대한 기초 데이터 및 특성평가에 대한 부분이 미약하므로 향후에는 그에 대한 연구가 시급하다고 판단된다. 또한, 60kW 급 전자빔의 강도가 100mm 이상의 후판에서는 용입깊이에 대한 한계를 드러내고 있으므로 100kW 급 이상 고출력 전자빔 시스템에 대한 연구가 지속적으로 추진되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. Dipl. Ing. H. Schultz, "Electron beam welding", Abington Publishing, 1993.
2. O. Braun, Sulzer Brothers Limited, "Towards a full exploitation of the electron beam welding process"
3. E. Thompson, V. Patel, "Formulation of joint trajectory for industrial robots using b-spline", IEEE Trans on industrial electronics, Vol IE34, pp75-85, 1992
4. David F. Rogers, J. Alan Adams, "Mathematical elements for computer graphics", McGrawHill, 1990