

## 용접부 품질향상을 위한 지능형 용접 와이어 공급 장치 개발

이재석\*, 손영일, 박기영, 이경돈(고등기술연구원)

### Development of Intelligent Filler Wire Feeding Device for Improvement of Weld quality

J.S. Lee, Y.I. Sohn, K.Y. Park, K.D. Lee (Institute for Advanced Engineering)

#### ABSTRACT

This paper describes an intelligent filler wire feeding device which can control 3- dimensional seam tracking and the filler wire speed by measuring the gap position and the joint gap width in laser welding. By means of visual sensor controlled filling the missing material into the joint gap and 3 dimensional seam tracking, lineup errors from manufacturing tolerances and the repeatability of lineup jigs and weld robot can be balanced and at an even seam quality which avoids weld defects. In this paper, we assessed weld quality in 2mm sheets of Al6061 which had various gap width by using the intelligent filler wire feeding device.

**Key Words :** Wire feeding device(와이어 공급 장치), Filler wire(용접 와이어), Nd:YAG Laser(Nd:YAG 레이저), Gap(간극), Seam tracking(용접선 추적), Visual Sensor(영상 센서)

#### 1. 서론

레이저 용접의 대부분은 모재 용융에 의한 용접으로 용접전 판재의 전단과 정렬이 용접부 품질에 중요한 변수로 되고 있으며 특히, 알루미늄 합금의 레이저 용접에서는 강도 저하, 기공 및 균열 발생 등으로 그 적용에 많은 제약을 가지고 있다. 또한 레이저 용접에서는 작은 빔 초점 스팟(spot)으로 인해 용접부에 갭(gap)이 발생하면 빔 에너지의 손실로 용접부의 불량 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 용접 와이어(filler wire)를 사용하는데 이는 용접 이음부의 허용 갭 확장과 용착부의 금속학적인 조절에 의한 크랙(crack) 방지가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 용접부 맞대기 이음을 레이저 용접하기 위해서는 모재의 정렬상태가 용접부 품질에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 위한 정렬지그의 반복정밀도와 모재의 전단 상태가 매우 좋아야 한다. 그러나 변형에 민감한 박판이나 용접선이 긴 모재인 경우와 특히 3차원 구조물을 가진 용접선에서는 정렬오차에 따른 gap이 발생하게 된

다. 이와 같이 gap 변화가 있는 모재를 용접할 경우 일정한 공급 속도에 의한 용접 와이어의 공급은 용접부 품질의 저하를 가져오게 된다. 따라서 불균일한 크기의 gap을 가지고 있는 용접부 품질을 향상시키기 위해서는 gap 크기에 따라 용접 와이어의 공급 속도를 조절해 주어야 한다.<sup>1</sup>

본 연구에서는 용접선의 3차원 추적오차와 이음부의 gap 크기를 동시에 측정하여 용접선의 3차원 추적제어(3D seam tracking, 초평면에서 용접선 추적과 빔 초점제어)를 하고 용접선의 gap 크기에 따른 용접 와이어의 공급량을 제어하므로 용접부의 품질을 향상시킬 수 있는 지능형 용접 와이어 공급 장치(Smart Micro Control system 이하 SMC)를 개발하였다. 이를 이용하여 2mm 두께의 A6061 판재에 다양한 gap을 주고, ND:YAG Laser 용접을 수행하여 지능형 용접 와이어 공급 장치에 의한 용접성 품질 평가를 수행하였다.

#### 2. 실험 조건

##### 2.1 용접 시편

본 연구에서는 불균일한 크기의 gap을 가지고 있는 3차원 용접 부를 실험을 위하여 그림 1과 같이 간단히 모델링 하였다. 두께 2mm, 폭 100mm, 길이 300mm인 A6061 판재에 불균일한 크기의 gap을 만들기 위하여 50mm간격으로 0.1mm~0.5mm의 홈 가공을 하고 두 개의 평판을 붙여서 50mm간격으로 gap의 크기가 0.2mm~1.0mm가 되는 맞대기 용접을 수행하였다.

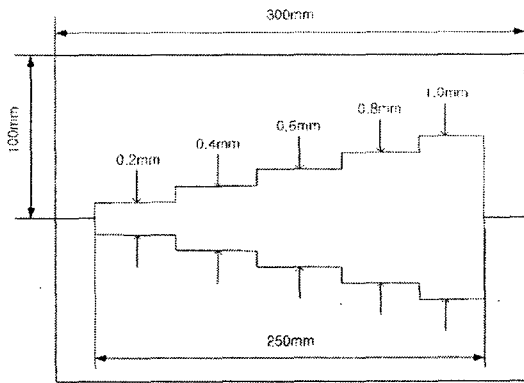


Fig. 1 A6061 2mm thickness sheets with various gap size

## 2.2 용접 와이어 여유 Factor 결정

불균일한 크기의 gap을 가지고 있는 용접부 품질을 향상시키기 위해서는 gap 크기에 따라 용접 와이어의 공급 속도를 조절해 주어야 하므로 정해진 gap에 따른 용접 와이어의 공급 속도를 먼저 산출해야 한다. 두께  $t$ (mm), gap  $g$ (mm)인 두개의 판재를 직경  $d$ (mm)인 용접 와이어를 이용하여 용접속도  $V_{weld}$  (m/min)로 맞대기 용접을 할 경우에, 두 개의 판재 사이에 발생한 gap만을 채우기 위한 용접 와이어의 공급 속도  $V_{filler(gap)}$  (cm/min)는 다음 식과 같다.

$$V_{filler(gap)} = \frac{400tgV_{weld}}{\pi d^2} \quad (1)$$

여기에 적절한 상하비드를 형성하기 위해 여유 factor(F)를 도입하였으며, 이 때 모재로 공급되는 용접 와이어의 공급 속도  $V_{filler}$ 는 식(2)와 같이 주어진다.

$$V_{filler} = \frac{400tgV_{weld}}{\pi d^2} \times F \quad (2)$$

(2)식에서 여유 factor F값은 용접 모재에 따라 다르게 결정이 되는 상수로 St 37 plate 맞대기 용접의 경우에  $F=1.2$ 정도의 값을 갖는다.<sup>1</sup> 본 실험에서

는 모재 A6061 판재에 대한 F값을 결정하기 위하여 먼저 F값은 gap의 크기에 관계없이 일정한 값이라고 가정하고 두께 2mm인 두 개의 판재를 이용하여  $gap=0.3mm$ 로 고정시키고 직경 1.2mm인 용접 와이어를 이용하여 용접속도 3(m/min)에서 적절한 상하비드를 형성하는 값인  $F=1.8$ 로 결정하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 방법

그림 1과 같이 gap의 크기가 불균일하게 변하는 용접 부를 용접 와이어의 속도를 조절하여 균일한 용접품질을 얻기 위해서는 먼저 용접부의 gap 크기와 3차원 용접선 추적제어를 수행하여야 하고 또한 3차원 추적오차도 측정을 하여야 한다. 본 실험에서는 off-line 상태에서 용접부의 gap 크기와 용접선의 3차원 추적오차를 측정된 다음, 이 값들을 사용하여 on-line 상태에서 용접선의 3차원 추적제어를 하면서 동시에, 각 용접부의 gap 크기에 따른 용접 와이어의 공급 속도를 제어할 수 있는 지능형 용접 와이어 공급 장치(SMC)를 개발하여 용접성 품질평가를 수행하였다.

### 3.2 지능형 용접 와이어 공급 장치

본 실험에 사용된 지능형 용접 와이어 공급 장치(SMC)를 그림 2에 나타내었다. 3.1절에서 설명한 바와 같이 SMC를 이용한 레이저 용접은 gap 크기와, 용접선의 3차원 추적 오차를 측정하기 위한 off-line scan mode와, 이때 측정된 값들을 바탕으로 용접 와이어의 속도를 제어하며 레이저 용접을 수행하는 on-line control mode인 총 2단계로 이루어진다.

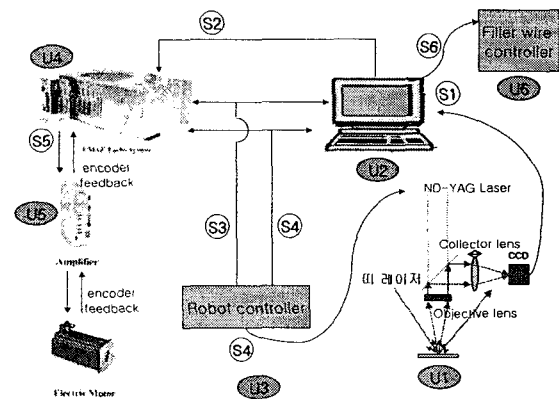


Fig. 2 Smart Micro Control System

off-line scan mode에서 gap의 3차원적 위치와 크기를 측정하는 것은 광 삼각법을 응용한 것으로

레이저 헤드가 붙어 있는 로봇을 전체 용접 path에 대하여 움직이면서 헤드 대물렌즈의 초평면부근의 용접선에 100mW의 띠 형태의 레이저 다이오드를 CCD와 일정각도(본 실험에서는 25°)로 조사시켜 난반사된 빛으로부터 SMC의 비전 광학부(U1)의 CCD에서 Fig.4와 같은 띠 레이저의 2차원 영상(S1)을 얻고 IEEE 1394 Interface를 통하여 Host PC(U2)로 전달한다. Host PC에서는 이때 받은 영상신호를 이용하여 용접선의 위치를 검출하고, 검출된 용접선의 위치를 바탕으로 하여 gap의 크기를 계산한다.<sup>2,3,4</sup> 데이터 처리량을 줄이기 위해서 1차적으로 띠 레이저의 대략적인 위치를 검출한다. 띠 레이저는 영상에서 수직방향의 막대 형태로 보여 지게 되는데 이 영역을 ROI(Region Of Interest)로 잡고 2차적으로 이 ROI의 수직방향의 띠 레이저 광의 에너지의 분포를 분석하여 용접선의 위치 및 gap의 크기를 검출하게 된다. ROI에서 수직방향의 에너지의 분포를 히스토그램화한 다음 에너지 분포의 히스토그램이 최소화되는 지점을 찾으면 이 지점이 초점 평면상에서 용접선의 위치가 되며, 용접선의 근처에서 적절한 문턱치(threshold)의 적용을 통하여 gap의 크기를 검출할 수 있다. 같은 방법으로 수평방향의 에너지의 분포를 히스토그램화한 다음 에너지 분포의 히스토그램이 최대화되는 지점을 찾으면 이 지점이 광축방향에서 용접선의 위치가 되어서 용접선의 3차원적인 위치(용접선의 3차원 추적 오차)를 최종적으로 알 수 있게 되고, 측정된 용접선의 3차원 추적오차로부터 생성된 모션프로그램(S2)을 모션제어기(U4)에 다운로드 한다. S3는 로봇 궤적에 대한 전체 용접구간의 시작과 끝점을 나타내고 S4는 전체 용접구간 중 실제 Nd:YAG레이저를 이용하여 용접을 수행하는 구간을 나타내는 신호로 로봇 컨트롤로(U3)로부터 각각 모션 제어기, Host PC, Nd:YAG 레이저로 보내져서, off-line scan mode와 실제 용접을 수행하는 on-line control mode를 동기화 시키는데 사용하게 된다. 측정된 3차원 추적 오차로부터 생성된 모션 프로그램이 모션 제어기에 다운로드 되면, on-line control mode로 레이저 용접을 할 수 있는 준비상태가 완료되며, 레이저 용접을 시작하게 되면 로봇과 레이저 헤드사이에 부착된 2축 stage는 다운로드된 모션 프로그램에 의하여 off-line scan mode에서 측정된 3차원 추적 오차를 보상(S5)하게 된다. 또한 측정된 gap 크기를 바탕으로 현재 용접부에 필요한 용접 와이어의 공급량(S6)을 Host PC로부터 용접 와이어 공급 장치 제어기(U6)에 전달하여, 용접 와이어의 속도를 용접부 gap 크기에 따라 조절하므로 균일한 용접품질을 얻을 수 있다.

### 3.3 용접 와이어 공급 장치의 속도 calibration

그림 2에서 용접 와이어 공급 장치(U6)에 들어갈 수 있는 입력전압은 0~10V로서 실제 용접 와이어 공급 장치에 의한 공급 속도를 측정하여 그림 3과 같이 입력전압(V) 대비 용접 와이어의 공급 속도(cm/min)와의 관계를 식 (3)을 이용하여 보간 하였다.

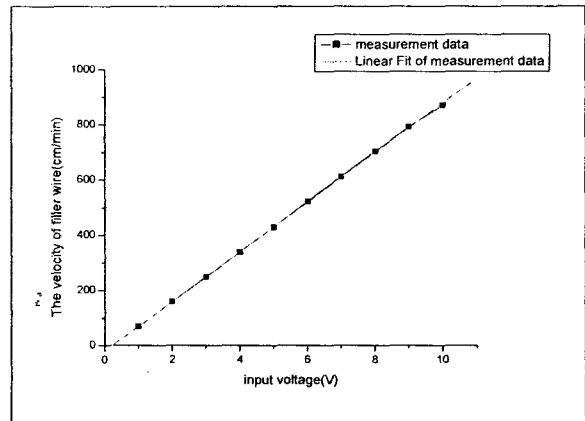


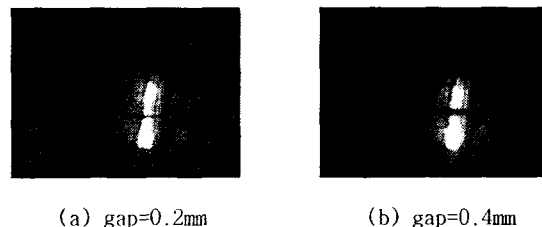
Fig. 3 Input voltage to the velocity of filler wire

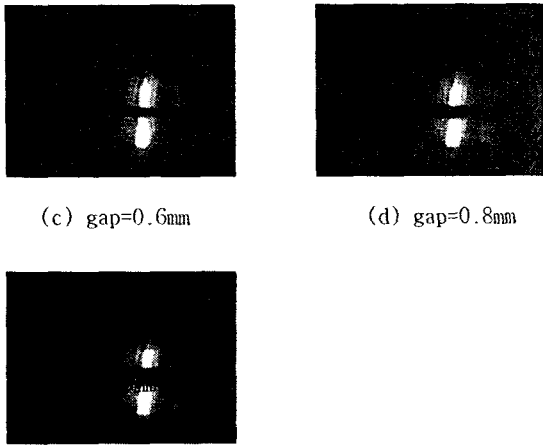
$$V_{input} = \frac{V_{filler} + 19.9}{89.9} \quad (3)$$

### 3.4 실험 결과

#### 3.4.1 Off-line scan mode에서 gap 측정 및 용접 와이어 공급 속도 제어

SMC를 이용하여 용접시퀀스를 off-line scan mode에서 용접부에 조사시킨 띠 레이저의 CCD에서 획득한 각 gap에서의 영상과 이것을 이용하여 비전 알고리즘을 써서 측정된 gap 크기를 그림 4, 5에 각각 나타내었다.





(c) gap=0.6mm  
(d) gap=0.8mm  
(d) gap=1.0mm  
Fig. 4 The image according to gap size

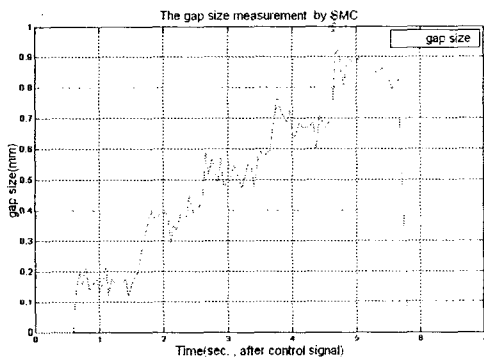


Fig. 5 The measurement result according to gap size

SMC를 이용하여 그림 5와 같이 측정된 gap 크기를 식 (2)에 대입하면 적정 용접 와이어의 공급 속도를 계산할 수 있고, 식 (3)에서 필요한 공급 속도를 얻기 위한 입력전압을 알 수 있으므로 gap 크기에 해당하는 용접 와이어의 공급 속도를 제어할 수 있다. 그림 6은 그림 5에서 측정된 gap 크기를 이용하여 용접 와이어의 공급 속도를 제어하며 측정된 그래프를 나타낸 것이다.

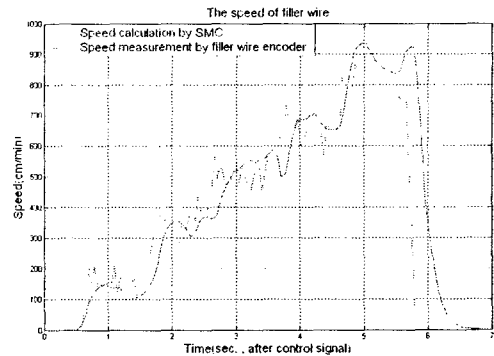


Fig. 6 The speed measurement of filler wire

그림 6에서 점선으로 나타낸 것은 SMC를 이용하여 측정된 gap 크기에 따른 용접 와이어의 필요 공급 속도이며, 실선으로 나타낸 것은 용접 와이어 encoder를 부착하여 측정된 용접 와이어의 실제 공급 속도이다. 여기서 공급 속도가 용접 와이어 공급 장치 모터의 가속으로 인한 응답시간으로 인하여 세틀링 시간을 포함해서 약 0.2초의 시간 지연이 발생하였다. 따라서 이러한 시간 지연을 가지고 용접을 수행하게 된다면, gap이 변하는 시작구간에서는 적절한 용접 와이어의 공급이 이루어 지지 않게 되어 균일한 용접 품질을 얻을 수 없게 된다. 또한 현재의 용접 방향과 반대의 경우인 gap이 작아지는 경우 역시 약 0.2초의 시간지연이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 약 0.2초의 시간지연을 보상해 주어야 한다. 0.2초의 시간지연을 보상한 후 다시 용접 와이어의 공급 속도를 엔코더를 이용하여 측정된 결과를 그림 7에 나타내었으며 gap 변화에 적절하게 용접 와이어가 공급되는 것을 알 수 있다.

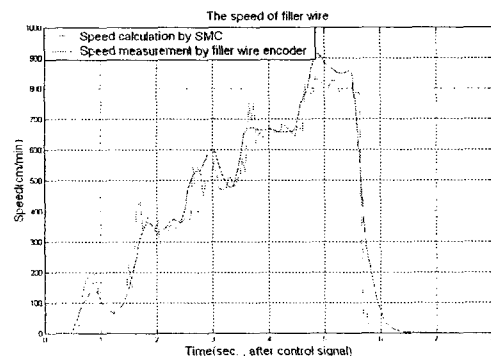


Fig. 7 The compensation effect by 0.2sec time delay

### 3.4.2 용접선의 3차원 추적오차 측정 및 3차원 추적제어

SMC를 이용하여 off-line scan mode에서 그림 4와 같은 피 레이저의 영상을 전체 용접구간에 대하여 얻게 되면, 광삼각법과 광강도의 peak detecting 알고리즘을 적용하여 용접선의 3차원 추적오차를 구할 수 있고 이 때 측정값들을 이용하여 on-line 용접 시에 SMC로 용접선의 3차원 추적오차를 보정하여 용접선의 3차원 추적제어를 할 수 있게 된다. 용접선의 3차원 추적오차는 광축방향(Z축)의 빔 초점오차(높이오차)와 대물렌즈의 초점평면상에서 용접선 추적오차로 이루어져 있으며, 본 실험에서 빔 초점 위치(defocusing depth)는 모재 표면으로부터 -1mm로 설정하여 빔 초점 제어를 하였다. 용접선의 3차원 추적오차와 이것을 이용하여 용접선 추적제어를 수행한 결과를 그림 8, 9에 각각 나타내었다.

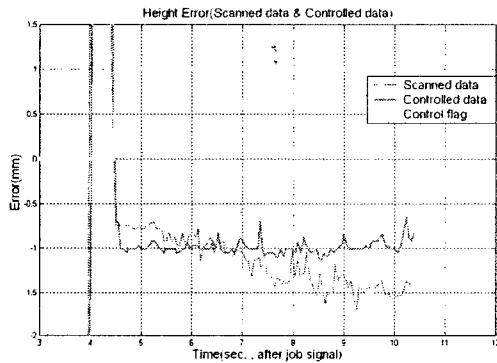


Fig. 8 Focusing error without SMC control and with SMC control

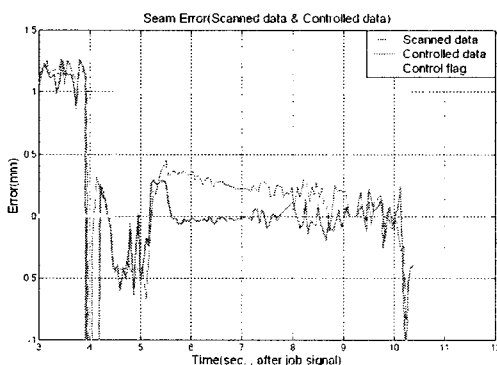


Fig. 9 Seam tracking error without SMC control and with SMC control

여기서 점선으로 표시된 오차는 off-line scan mode에서 측정된 용접선의 3차원 추적오차를 나타내고, 실선은 off-line scan mode에서 측정된 오차를

이용하여, on-line 용접 시에 SMC를 이용하여 용접선의 3차원 추적제어를 했을 때의 제어오차를 나타낸다. 짧은 실선으로 나타나 있는 control flag는 로봇의 전체 궤적 중 실제 레이저 용접이 수행되는 구간을 나타내는 것으로 SMC를 이용하여 용접선 3차원 추적제어가 시작되는 점이다. 레이저 용접의 시작 부분에서 로봇의 동적 특성으로 인하여 로봇의 정지 상태에서 용접선 추적제어를 하다가 0.5초 후 로봇이 용접구간을 움직이면서 레이저로 용접이 시작되는데, 시작점은 gap이 없는 곳에서 시작을 하게 되므로 gap이 없는 0.5초간 정지상태의 제어구간에서는 초평면에서 용접선 추적제어가 잘 이루어 지지 않는데 이 부분은 실제 레이저 용접구간이 아니므로 큰 문제가 되지 않으며, 사용된 CCD카메라의 해상도를 높이고 광학 filter등의 적용으로 해결 가능하다.

### 3.4.3 지능형 용접 와이어 공급 장치를 이용한 레이저 용접

본 연구에서 개발한 “지능형 용접 와이어 공급 장치”인 SMC를 이용하여 맞대기 용접을 수행하였으며, 용접품질을 비교하기 위하여 그림 1의 시편에 gap 크기에 따라 용접 와이어의 속도제어를 하지 않은 것과 속도제어를 한 것을 비교하였으며, 그림 10에 용접부 단면을 나타내었다. 여기서 용접조건은 용접속도는 3.0m/min, 여유 factor는 1.8로 하였으며 제어를 하지 않은 경우는 gap 0.45mm에서의 공급속도로 용접부 전 구간을 용접하였다. 실험결과 gap이 0.45mm 보다 큰 부위에서는 용접 와이어가 gap 사이의 빈 공간을 메우지 못하여 용접 비드가 부족한 현상을 볼 수 있다. 반면 용접 와이어의 공급속도를 제어한 경우는 충분한 용접 비드가 형성되는 것을 볼 수 있다.

Gap	without control	with control
gap 0.2		
gap 0.4		
gap 0.6		

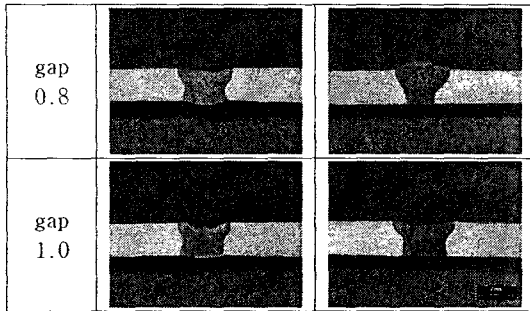


Fig. 10 Welding bead shape without/with controlled wire feeding

#### 4. 결론

불균일한 gap을 가지고 있는 판재의 맞대기 용접에서 용접품질을 향상시키기 위해 지능형 용접 와이어 공급 장치를 개발하였다.

따라서 레이저를 용접 모재에 CCD와 일정각도를 가지고 조사하여 난반사된 빛을 집광시켜 이의 영상을 CCD를 이용하여 취득하고 취득된 영상에 영상처리 알고리즘을 적용하여 용접선의 3차원적인 위치를 검출하고 이 용접선 주위에서 gap의 크기를 검출하였다. 개발된 시스템은 검출된 gap의 크기와 용접선의 3차원적 위치(용접선의 3차원 추적 오차)에 따라서 필러 와이어 공급 장치의 공급 속도 제어와 용접선의 3차원 추적 제어를 통하여 불균일한 gap을 가지고 있는 판재의 맞대기 용접의 경우에 대응할 수 있도록 한다.

개발한 시스템을 이용하여 용접 이음부에 불균일한 gap 크기를 가지고 있는 두께 2mm의 A16061판재에 대하여 레이저 용접을 수행하여 시스템을 검증하였다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 고등기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Oliver Kropla, "A sensor system for Quality Assurance in Laser Welding with Filler Wire", SPIE Vol.2246, pp. 188-197, Laser Materials Processing and Machining, 1994
2. 배재욱, "레이저 용접을 위한 고속 용접선 추적 알고리즘", 1997년 국제자동제어학술회의(KACC) 논문집 pp.52-56

3. John E. Agapakis, "Approaches for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting", Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No. 5, Oct, 1990.
4. Gonzales, R. G., Woods R.E., Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.