

용접부 품질향상을 위한 지능형 용접 와이어 공급 장치 개발

이재석[#], 손영일^{*}, 박기영^{*}, 이경돈^{*}

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

Jae Seok Lee[#], Young Il Sohn^{*}, Ki Young Park^{*} and Kyoung Don Lee^{*}

ABSTRACT

In laser welding, automatic seam tracking is important to adjust the laser head position in real time as it moves along the seam. Also if the joint gap is occurred, filling the missing material into the joint gap is necessary to prevent welding defects and bad welding quality. In general, the joint gap width is not constant along the seam due to a variety of reason. So it is essential to control the filler wire speed into the joint gap to acquire good welding quality.

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. We call this device as Smart Micro Control system(SMC).

To achieve this objective, we assessed weld quality in 2mm sheets of Al6061 which had various gap width by using the developed device. From the experimental results, It was found the possibility that the developed device could be used in welding various 3-dimensional structures.

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

1. 서론

레이저 용접의 대부분은 모재 용융에 의한 용접으로 용접 전 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.¹ 이를 방지

접수일: 2006년 7월 26일; 게재승인일: 2006년 6월 16일

교신저자: 고등기술연구원 로봇/생산기술센터

E-mail tough@iae.re.kr Tel. (031) 330-7338

* 고등기술연구원 로봇/생산기술센터

하기 위해 용접 와이어(filler wire)를 사용하는 데 이는 용접 이음부의 허용 갭 확장과 용착부의 금속학적인 조절에 의한 크랙(crack) 방지가 가능하다는 특징을 가지고 있다.¹ 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 된다. 이와 같이 gap 변화가 있는 모재를 용접할 경우 일정한 공급 속도에 의한 용접 와이어의 공급은 용접부 품질의 저하를 가져오게 된다. 따라서 불균일한 크기의 갭을 가지고 있는 용접부 품질을 향상시키기 위해서는 갭 크기에 따라 용접 와이어의 공급 속도를 조절해 주어야 한다.^{1,2,3} 또한 용접작업은 일반 기계가공 공정에 비해 보다 힘들고, 상대적으로 유해한 환경에서 행하여 진다는 점에서 어려운 작업으로 인식되고 있는 상황으로 사회의 전반적인 생활 수준 향상과 더불어 숙련된 용접인력 공급의 문제를 겪게 될 전망이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 용접공정의 자동화는 필수적이고 이를 위해 용접선을 스스로 감지해 추적하는 장치의 개발은 반드시 선결되어야 하는 문제로서 용접선의 형상과 경로변화에 따라 적용할 수 있는 센서 시스템의 개발이 필수적이다.⁴ 최근 이러한 요구에 따라 용접자동화 시스템에 시각센서를 적용한 용접 자동화 시스템의 적용에 관한연구가 진행되고 있다. 그러나 기존의 시각센서를 이용한 용접선 추적시스템은 영상처리 시간이 비교적 많이 소요되고, 용접 중 발생하는 스패터가 laser stripe와 함께 영상에 포함됨으로써 용접선의 영상처리에 많은 어려움이 수반되었다.⁵

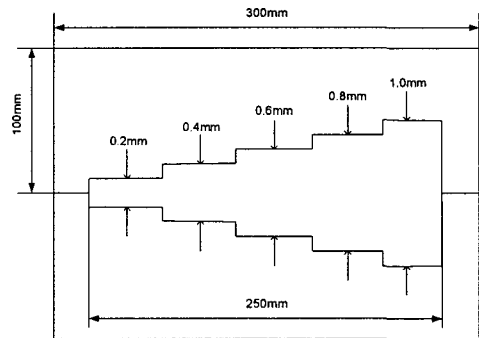
본 연구에서는 로봇을 이용한 레이저 용접 전체 경로에 대해서 먼저 용접선의 3차원 추적오차(용접 평면상에서 용접선 추적오차와 레이저 헤드의 포커싱 오차)와 이음부의 갭 크기를 용접용 레이저인 Nd:YAG Laser의 오프라인상태에서 동시에 측정 한 후 Nd:YAG Laser의 온라인 상태에서 추적오차를 보정하고 용접선의 갭 크기에 따른 용접 와이어의 공급량을 제어하여 용접함으로써 스패터 및 레이저 stripe의 겹반사와 같은 외란들에 강건하게 적응하는 지능형 용접 와이어 공급 장치(Smart Micro Control system : 이하 SMC)를 개발하였다. 이를 이

용하여 2mm 두께의 A6061 판재에 다양한 갭을 주고, Nd:YAG Laser 용접을 수행하여 지능형 용접 와이어 공급 장치에 의한 용접성 품질평가를 수행하였다.

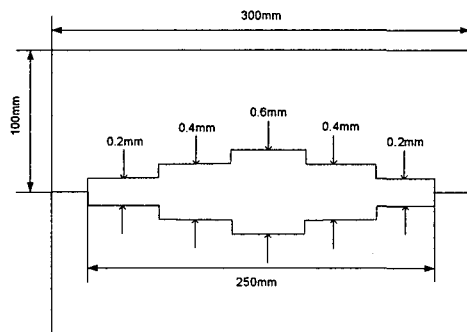
2. 실험 조건

2.1 용접 시편

본 연구에서는 불균일한 크기의 갭을 가지고 있는 3차원 용접부를 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 모델링 하였다. 두께 2mm, 폭 100mm, 길이 300mm인 A6061 판재에 불균일한 크기의 갭을 만들기 위하여 50mm 간격으로 홈 가공을 하고 두 개의 평판을 붙여서 50mm 간격으로 갭의 크기가 변하는 Fig. 1(a), (b)와 같은 시편을 제작하여 용접실험을 수행하였다.



(a) Specimen #1



(b) Specimen #2

Fig. 1 Specimens with various gap size

2.2 용접 와이어의 여유 Factor 결정

불균일한 크기의 갭을 가지고 있는 용접부 품질을 향상시키기 위해서는 갭 크기에 따라 용접 와이어의 공급 속도를 조절해 주어야 하므로 정해진 갭에 따른 용접 와이어의 공급 속도를 먼저 산출해야 한다. 두께 $t(\text{mm})$, 갭 $g(\text{mm})$ 인 두개의 판재를 직경 $d(\text{mm})$ 인 용접 와이어를 이용하여 용접속도 V_{weld} (m/min)로 맞대기 용접을 할 경우에, 두 개의 판재 사이에 발생한 갭만을 채우기 위한 용접 와이어의 공급 속도 $V_{filler}(g)$ (cm/min)는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\pi d^2}{4} \times \frac{V_{filler}(g)}{100} = t \times g \times V_{weld}$$

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

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

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

식(2)에서 여유 factor F값은 용접 모재에 따라 다르게 결정이 되는 상수로 DIN St 37 plate(독일국가규격) 맞대기 용접의 경우에 $F=1.2$ 정도의 값을 갖는다.² 본 실험에서는 모재 Al6061 판재에 대한 F 값을 결정하기 위하여 먼저 F값은 갭의 크기에 관계없이 일정한 값이라고 가정하고 두께 2mm인 두개의 판재를 이용하여 갭을 0.3mm로 고정시키고 직경 1.2mm인 Al4047 용접 와이어를 이용하여 용접속도 3.0(m/min)에서 적절한 상하비드를 형성하는 값인 $F=1.8$ 로 결정하였다.¹

3. 실험

3.1 지능형 용접 와이어 공급 장치(SMC system)

Fig. 1과 같이 갭의 크기가 불균일하게 변하는 용접부를 용접 와이어의 속도를 조절하여 균일한 용접품질을 얻기 위해서는 먼저 용접부의 갭 크기와 용접선의 3차원 추적제어를 수행하여야 한다. 본 실험에서는 용접용 레이저인 Nd:YAG 레이저의 오프라인 상태에서 용접부의 갭 크기와 용접선의 3

차원 추적오차를 측정된 다음, 이 값들을 사용하여 Nd:YAG 레이저의 온라인 상태에서 용접선의 3차원 추적제어를 하면서 동시에 각 용접부의 갭 크기에 따른 용접 와이어의 공급속도를 제어할 수 있는 Fig. 2와 같은 지능형 용접 와이어 공급장치(SMC system)를 개발하여 용접성 품질평가를 수행하였다, Fig. 2에서 보는 것과 같이 SMC 시스템은 시각센서를 이용한 에러보상 시스템으로 3차원 레이저 용접을 수행하기 위한 산업용 로봇, 로봇 제어기, 비전 모듈(CCD카메라, 영상처리를 하기 위한 Host PC, 머신 비전용 다이오드 레이저), 계측된 용접선의 3차원 추적 오차를 보정하기 위한 2축 모션 제어시스템, 용접부 갭 크기 변화에 대응하기 위한 용접 와이어 공급기로 이루어져 있다.

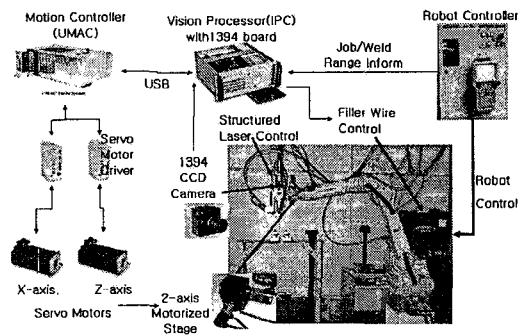


Fig. 2 A schematic diagram for a SMC system

3.2 실험 방법

앞에서 언급한 바와 같이 SMC를 이용한 레이저 용접은 용접 대상 joint가 결정 되면, Fig. 3과 같이 설계된 로봇 path상에서 갭 크기와, 용접선의 3차원 추적 오차를 측정하기 위한 오프라인 스캔모드(off-line scan mode)와, 이때 측정된 값들을 바탕으로 용접선의 3차원 추적제어와 용접 와이어의 속도를 제어하며 레이저 용접을 수행하는 온라인 컨트롤모드(on-line control mode)인 총 2단계로 이루어진다. 용접 대상 조인트가 바뀌지 않게 되면 용접이 끝난 후 시편을 교체하여 위의 과정이 반복적으로 수행되게 된다. 즉 Fig. 4와 같은 비전 모듈로 이루어진 레이저 헤드가 달린 로봇을 전체 용접 path에 대하여 움직이면서 헤드 대물렌즈의 초평면 부근의 용접선(seam)에 100mW의 띠 형태의 레이저 다이오드를 CCD와 일정각도(본 실험에서는 25°)로 조사시켜 난반사된 빛으로부터 SMC의 비전 모듈의 CCD에서는 조사된 띠 레이저의 영상을 얻고

IEEE 1394 Interface를 통하여 Fig. 2의 Host PC로 전달한다. Host PC에서는 이때 받은 영상신호를 이용하여 용접선의 위치(용접선 추적 오차)를 검출하고, 검출된 용접선의 위치를 바탕으로 하여 갭의 크기를 계산한다.^{3,6,7} 온라인 컨트롤모드에서는 검출된 용접선의 추적오차(focusing error, seam tracking error)를 바탕으로 로봇과 레이저 헤드사이에 부착되어 있는 2축 스테이지를 이용하여 오차를 보상하게 된다. 또한 측정된 갭 크기를 바탕으로 현재 용접부에 필요한 용접 와이어의 공급 속도를 계산하여 Host PC로부터 용접 와이어 공급 장치 제어기에 전달하여, 용접 와이어의 속도를 용접부 갭 크기에 따라 조절함으로써 균일한 용접품질을 얻을 수 있는 레이저 용접을 최종적으로 수행하게 된다.

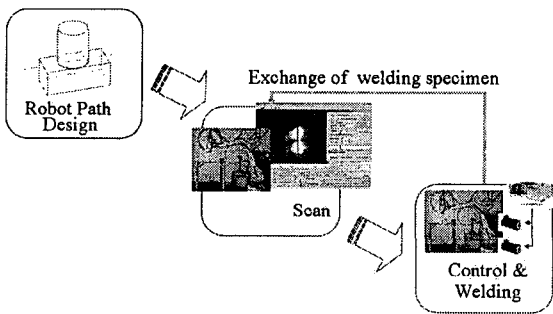


Fig. 3 3D laser welding procedure by using SMC system

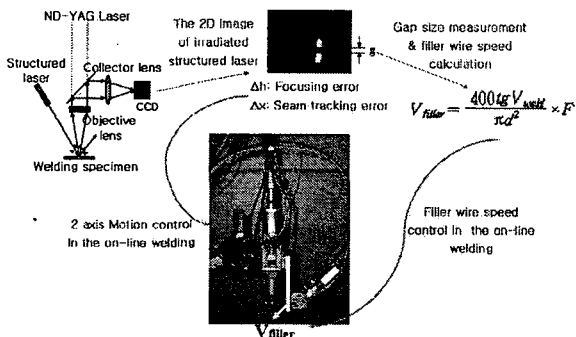


Fig. 4 The vision module of SMC system and control mode operation

3.3 비전 측정 원리 및 영상처리 방법

오프라인 스캔모드에서 비전모듈의 CCD에서 얻어지는 영상데이터로부터 용접선의 위치와 갭의 크기를 측정할 때 영상처리 시 데이터 처리량을 줄이기 위해서 1차적으로 띠 레이저의 대략적인 위치를 검출한다. 용접부가 단순한 맞대기 용접부일 때는 Fig. 5와 같이 조사된 다이오드 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 갭의 크기를 검출하게 된다. 용접부에 조사된 다이오드 레이저는 갭부분에서는 반사가 되지 않으므로 ROI에서 수직방향의 에너지의 분포를 히스토그램화한 다음 에너지 분포의 히스토그램이 최소화되는 지점을 찾으면 이 지점이 초점 평면상에서 용접선의 위치(초점 평면상에서 용접선 추적 오차)가 되며, 용접선의 근처에서 적절한 문턱치(threshold)의 적용을 통하여 갭의 크기를 검출할 수 있다. 또한 Fig. 5에서 보듯이 광축방향의 높이 변화 y값이 CCD평면상에서는 픽셀 값의 변화 x로 나타나게 되므로 앞에서와 같은 방법으로 수평방향의 에너지의 분포를 히스토그램화한 다음 에너지 분포의 히스토그램이 최대화되는 지점을 찾으면 이 지점이 광축방향에서 용접선의 위치(초점 거리 오차)가 되어서 용접선의 3차원적인 위치(용접선의 3차원 추적 오차)와 갭의 크기를 최종적으로 알 수 있게 된다.

비전모듈의 CCD카메라에서 얻어지는 조사된 다이오드 레이저의 2차원 영상은 Fig. 5에서 보듯이 용접부위가 맞대기 이음일 경우 단순한 일자 형태가 나오게 되지만 용접 부위가 3차원 구조물일 경우에는 joint 형태에 따라 다양한 모양의 영상이 얻어지게 되고, 각각의 영상에 맞는 알고리즘을 적용하여 데이터베이스화 하여 3차원 구조물의 경우에도 갭의 크기 및 용접선의 3차원 추적오차의 측정이 가능하다. 본 실험에서는 3차원 구조물에서 원하는 갭의 크기를 임의로 만들기가 어려우므로, Fig. 1과 같은 맞대기 이음에서 개발된 시스템의 성능 실험을 하였다.

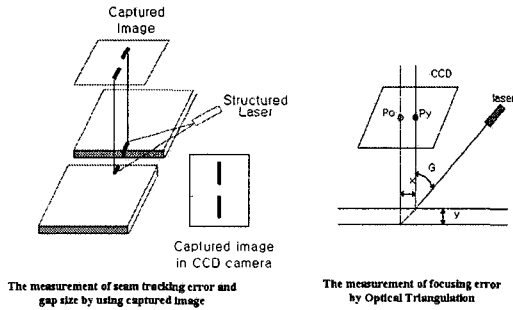


Fig. 5 A method for the measurement of 3 dimensional seam tracking error and gap size

3.4 용접 와이어 공급 장치의 속도 보간

Fig. 2의 filler wire control을 하게 되는 filler wire feeder기에 들어가는 입력 전압은 0~10V로서 실제 feeder기에 입력되는 입력 전압(V) 대 용접 와이어 공급 속도(cm/min)를 측정하여 식(3)과 같은 관계식을 얻었다.

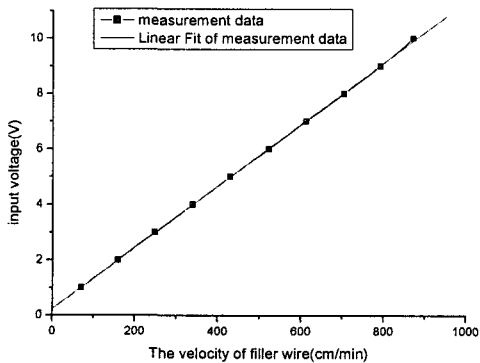


Fig. 6 Input voltage to the speed of filler wire

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

3.5 실험 결과

3.5.1 오프라인 스캔모드에서 갭 측정 및 용접 와이어 공급 속도 제어

SMC를 이용하여 오프라인 스캔모드에서 Fig. 1(a)와 같은 용접부에 조사시킨 때 레이저의 CCD에서 획득한 각 갭에서의 영상과 이것을 이용하여 비전 알고리즘을 써서 측정한 갭 크기를 Fig. 7, 8에 각각 나타내었다.

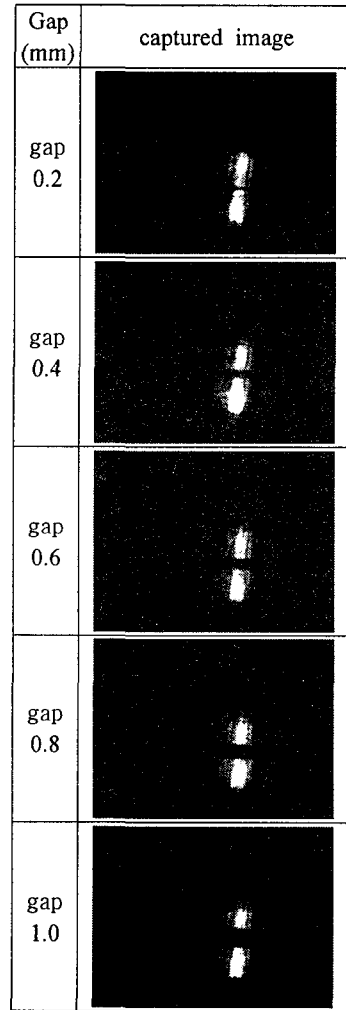


Fig. 7 The image according to gap size

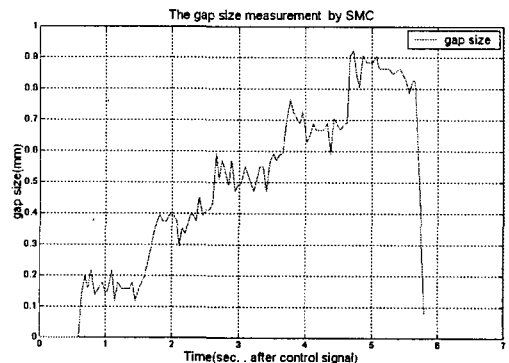


Fig. 8 The measurement result according to gap size

SMC를 이용하여 Fig. 8과 같이 측정된 갭 크기를 식(2)에 대입하면 변화하는 갭 크기에 따른 적정 용접 와이어의 공급 속도를 계산할 수 있고, 식(3)에서 필요한 공급 속도를 얻기 위한 입력전압을 알 수 있으므로 갭 크기에 해당하는 용접 와이어의 공급 속도를 제어할 수 있다. Fig. 9는 Fig. 8에서 측정된 갭 크기를 이용하여 용접 와이어의 공급 속도를 제어하며 측정한 그래프를 나타낸 것이다.

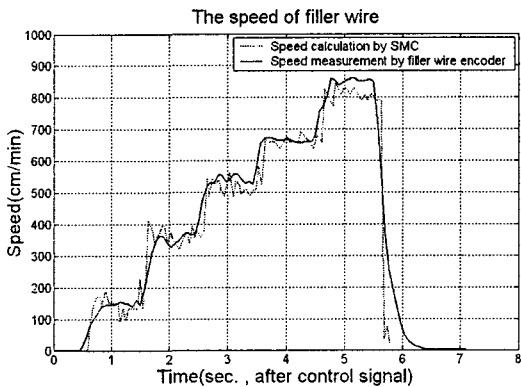


Fig. 9 The control of filler wire speed according to gap size

Fig. 9에서 점선으로 나타낸 것은 SMC를 이용하여 측정된 갭 크기에 따라 식(2)에 의해서 계산되는 용접 와이어의 적정 공급 속도이며, 실선으로 나타낸 것은 용접 와이어 엔코더를 부착하여 측정된 용접 와이어의 실제 공급 속도이다. 갭 변화에 대응하여 적절한 속도로 용접 와이어가 공급 되는 것을 알 수 있다.

3.5.2 용접선의 3차원 추적오차 측정 및 3차원 추적제어

SMC를 이용하여 오프라인 스캔모드에서 Fig. 7과 같은 띠 레이저의 영상을 전체 용접구간에 대하여 얻게 되면, 3.3절에서 설명한 영상처리 알고리즘을 적용하여 용접선의 3차원 추적오차를 구할 수 있고 이 때 측정값들을 이용하여 온라인 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, 레이저 용접중에는 용용

풀이 만들어 지기 때문에 본 실험에서 빔 초점위치(defocusing depth)는 모재 표면으로부터 -1mm로 설정하여 빔 초점 제어를 하였다. 용접선의 3차원 추적오차와 이것을 이용하여 용접선 추적제어를 수행한 결과를 Fig. 10~ Fig. 11에 각각 나타내었다.

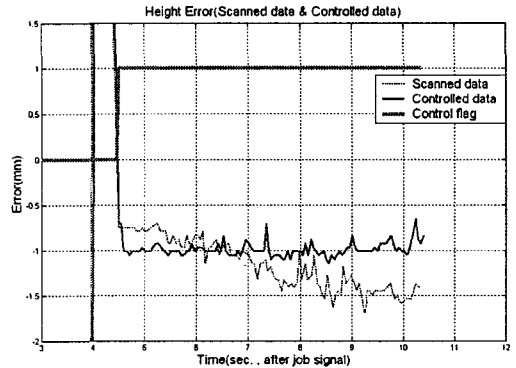


Fig. 10 Focusing error with/without SMC control (-1mm defocusing)

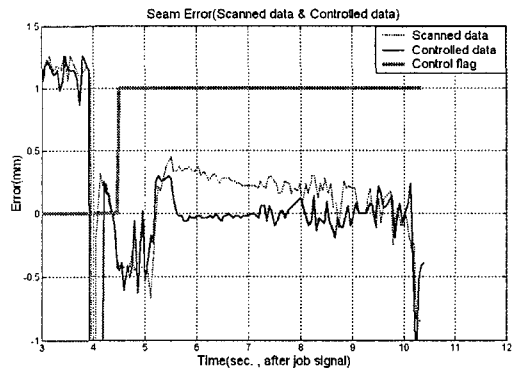


Fig. 11 Seam tracking error with/without SMC control

여기서 점선으로 표시된 오차는 오프라인 스캔모드에서 측정된 용접선의 3차원 추적오차를 나타내고, 실선은 오프라인 스캔모드에서 측정된 오차를 이용하여, 온라인 용접 시에 SMC를 이용하여 용접선의 3차원 추적제어를 했을 때의 제어오차를 나타낸다. 굵은 실선으로 나타나 있는 컨트롤 플래그(control flag)는 로봇의 전체 레직 중 실제 레이저 용접이 수행되는 구간을 나타내는 것으로 SMC를 이용하여 용접선 3차원 추적제어가 시작되는 점이다. 레이저 용접의 시작 부분에서 로봇의 동적 특

성으로 인하여 로봇의 정지 상태에서 용접선 추적 제어를 하다가 0.5초 후 로봇이 용접구간을 움직이면서 레이저로 용접이 시작되는데, 시작점은 갭이 없는 곳에서 시작을 하게 되므로 갭이 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.

3.5.3 지능형 용접 와이어 공급 장치를 이용한 레이저 용접

3.5.1~ 3.5.2절에 설명한 바와 같이 Fig. 1(a)의 시편을 이용하여 용접부의 갭 크기에 대응하는 용접 와이어의 공급 속도 제어(Fig. 9)와 용접선의 3차원 추적 제어(Fig. 10~ Fig. 11)를 통한 레이저 용접을 수행하였다. 용접 품질을 비교하기 위하여 Fig. 1(a)의 시편에 Fig. 12과 같이 용접 와이어의 속도제어를 하지 않고 속도를 일정하게 한 것과 갭 크기에 대응하여 속도제어를 한 것을 비교하였으며, 각각의 경우의 용접부 단면을 Fig. 13에 나타내었다. 용접조건으로 식(2)에서 용접속도 $V_{weld} = 3.0\text{m/min}$, 여유 factor $F = 1.8$ 로 하였으며 용접 와이어의 공급속도 제어를 하지 않은 경우는 갭(g) = 0.45mm 에 대하여 식(2)로부터 계산되는 적정 공급속도로 용접부 전 구간을 용접하였다. 실험결과 갭이 0.45mm 보다 큰 부위에서는 용접 와이어가 갭 사이의 빈 공간을 메우지 못하여 용접 비드가 부족한 현상을 볼 수 있다. 반면 용접 와이어의 공급 속도를 제어한 경우는 충분한 용접 비드가 형성되는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 방법으로 Fig. 1(b)의 시편에 대해서 Fig. 1(a)의 시편과 같은 방법으로 용접 와이어의 공급 속도 제어와 용접선의 3차원 추적 제어를 하여 레이저 용접을 수행하였고, 용접부 단면을 Fig. 14에 나타내었다. 이 경우에도 용접 구간에서 갭의 크기가 바뀌어도 균일한 용접 비드 형상을 얻을 수 있었다.

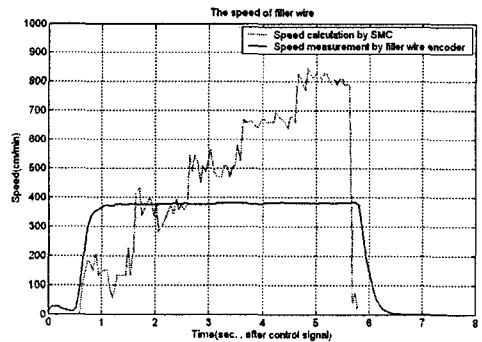


Fig. 12 Static filler wire speed in the various gap size section

Gap	without control	with control
gap 0.2		
gap 0.4		
gap 0.6		
gap 0.8		
gap 1.0		

Fig. 13 The welding bead shape without/with controlled wire feeding of Fig. 1(a)

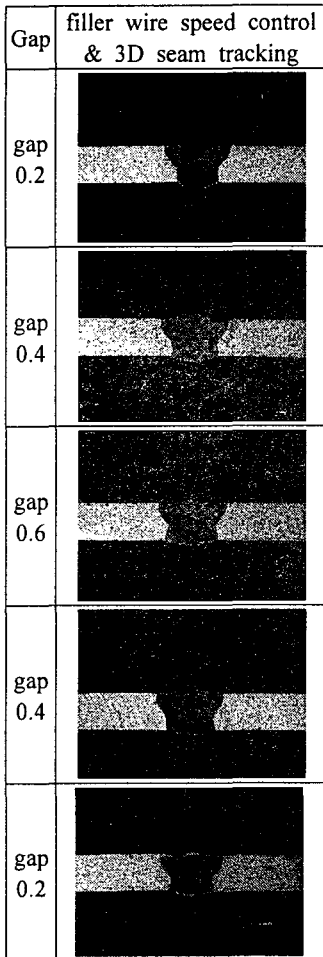


Fig. 14 The welding bead shape with controlled wire feeding of Fig. 1(b)

4. 결론

레이저 용접시 지그의 정렬 오차, 모재의 전단 상태에 따라 용접 이음부에 불균일한 갭이 발생할 경우에도 균일한 용접품을 얻기 위하여 용접부 갭 크기 변화에 대응할 수 있는 지능형 용접 와이어 공급 장치(SMC system)를 개발하였다. 개발된 시스템은 비전센서를 이용하여 용접선의 3차원 추적 오차와 용접부 갭 크기를 측정하고 이것을 이용하여 용접선의 3차원 추적 제어 및 용접 와이어의 공급 속도를 제어 하여 다양한 용접부 갭 크기에서도 양호한 용접 비드를 얻을 수 있었다. 또한 개발한 시스템은 3차원 구조물의 다양한 용접 이음에도 적용

할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Park, K. Y. and Lee, K. D., "Al5052 Welding by CO2 Laser using Filler Wire," J. of KSLP, Vol. 5, No. 1, pp. 13-22, 2002.
2. Kropla, O., "A sensor system for Quality Assurance in Laser Welding with Filler Wire," SPIE, Vol. 2246, pp. 188-197, 1994.
3. Bae, J. W., "A Fast Seam Tracking Algorithm for Laser Welding," Proceedings of the 12th KACC, pp. 52-55, 1997.
4. Yang, S. M., Cho, T. D. and Seo, S. H., "A study on Automation Seam Tracking of Arc Welding Using an Laser Displacement Sensor," Proc. of the KSPE Spring Annual Meetings, pp. 680-684, 1996.
5. Cho, T. D., Kim, O. H., Yang, S. M. and Cho, M. H., "A Study on Weld Line Detection and Wire Feeding Rate Control in GMAW with Vision Sensor," J. of KWS, Vol. 19, No. 6, pp. 517-52, 2001.
6. Agapakis, J. E., "Approaches for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting," Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No. 5, 1990.
7. Gonzales, R. G. and Woods, R. E., "Digital Image Processing," Addison-Wesley Publishing Company, 1993.