

로봇 기반 원격 레이저 용접에 관한 연구

강희신*, 서정*, 조택동**

*한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

**충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

Study on Robot based Remote Laser Welding

Hee-Shin Kang*, Jeong Suh* and Taik-Dong Cho**

*Intelligent Manufacturing System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

**BK21 Mechatronics Group, Chungnam National University

Abstract

Remote Laser welding technology for manufacturing automotive body is studied. Laser welding and industrial robot systems are used for the robot based laser welding system. The laser system is used 1.6kW Fiber laser(YLR-1600) of IPG. The robot system is used HX130-02 of Hyundai Heavy Industry(payload : 130kg). The robot based laser welding system is equipped with laser scanner system for remote laser welding. The welding joints of steel plate and steel plate coated with zinc are butt and lapped joints. The quality test of the laser welding are through the observation the shape of bead on plate and cross-section of welding part. During past three years the laser system, 4kW Nd:YAG laser (HL4006D) of Trumpf was used and the robot system, IRB6400R of ABB (payload:120kg) was used. The new laser source, robot and laser scanner system are used to increase the processing speed and to improve the process efficiency. This paper introduces the robot based remote laser welding system to resolve the limited welding speed and accuracy of the conventional laser welding system.

Key Words: Laser, welding, robot, scanner, remote welding

1. 서론

자동차의 경량화, 안전도 향상, 생산성 향상을 달성하기 위하여 차체 레이저 용접기술이 자동차 업계의 핵심기술로 대두되고 있다. 선진국에서는 기존 저항 점용접의 차체 조립공정을 레이저 용접으로 대체하여 차체 경량화 및 생산성 향상을 달성하고 있고, 국내 자동차 업계에서도 고출력 Nd:YAG 레이저와 6축 로봇을 접목한 레이저 용접 생산기술을 개발 및 적용하고자 많은 노력을 기울이고 있다.^{1,2} 자동차 차체 용접을 위해 사용되고 있는 저항 점용접 공법은 저항 점용접기의 기하학적 구조와 용접특성으로 인해 적용범위가 한정적이고 용접효율이 낮아서 자동차 설계 및 생산방식의 발전에 장애 요인이 되어 새로운 용

접 및 접합공법을 적용하려는 시도가 국내외 자동차업계에서 이루어지고 있다.³⁻⁵

본 연구에서는 자동차 제조용 로봇 시스템에서 가장 필요로 하는 핵심기술인 자동차 차체 원격 레이저 용접기술과 더불어 용접품질 검사기법, 로봇 제어기술에 관하여 연구를 수행하였다. 산업현장에서 로봇을 이용하여 자동 공정을 실현할 때 일반적으로 계획된 로봇 경로를 미리 작업자가 로봇에게 교시(Teaching)하여 일련의 반복 작업이 이루어진다. 용접하고자 하는 용접물의 용접경로가 단순할 경우에는 앞서 언급한 교시 작업이 쉽지만 복잡한 용접경로를 갖는 대상물의 경우에는 많은 시간과 시행착오가 필요하다. 특히, 항상 수직으로 빔이 주사되어야 하는 레이저 용접의 특성상 비선형 형태의 용접물의 경우에는

작업자가 용접면에 수직이 되도록 로봇을 교시하는 작업이 대단히 어렵게 된다. 로봇을 이용한 레이저 용접 시스템의 용접속도를 향상시키기 위해 많은 연구가 수행되어져 왔다.^{6,7} 이러한 문제점을 원격 레이저 용접 기술을 이용하여 해결하고자 하였다. 본 연구에서는 로봇이 용접점 사이를 이동시 기존 시스템 보다 용접속도를 향상시킬 수 있는 용접 공정으로 로봇 기반 원격 레이저 용접 시스템을 구축하고, 원격 레이저 용접 시스템을 이용하여 기초적인 용접실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 본 연구를 통하여 구성된 원격 레이저 용접 로봇 시스템이다. 레이저 발진기는 IPG사 1.6kW급 파이버 레이저 시스템이며, 로봇은 현대중공업(주)의 HX130-02를 활용하였다. 레이저 및 로봇과의 인터페이싱을 토대로 3차원 레이저 용접 시스템을 구축하고, 시작품 제작용 용접 지그를 설계 제작하여 레이저 용접 시스템에 대한 기초 성능시험 및 평가를 실시하고자 하였다. Fig. 2는 원격 레이저 용접 시스템의 제어를 위한 전체 시스템 구성을 보여 준다. 차체 부품 용접을 위한 3차원 레이저 용접시스템은 레이저와 로봇을 이용하여 구성될 수 있다. 레이저 발진기로부터 나온 레이저 빔은 광파이버를 통해 로봇 암(arm)의 끝단에 부착된 용접헤드까지 전송되고 로봇의 각 축을 움직임으로써 3차원 용접을 수행하게 된다.

원격 레이저 용접 장치의 용접성에 관하여 기초 연구를 수행하기 위해 일반 철판과 아연도금 철판의 맞대기 및 겹치기 용접을 수행하고 인장 시험과 용접부 관찰을 통해 최적의 용접변수를 찾고자 실험을 수행하였다. 실시간으로 레이저 용접 중의 품질을 측정할 수 있는 기법에 대한 연구로 플라즈마와 온도를 측정하여 용접 품질을 판별하는 기법에 대한 기초 실험을 하였다. 원격 레이저 용접 시스템의 전체 시스템 정밀도를 판별하기 위해 차체 부품에 대한 패턴 용접 실험을 수행하였다.

Table 1은 원격 레이저 용접 로봇 시스템의 장치의 핵심 장치를 표로 정리한 것이다. 시스템을 구성

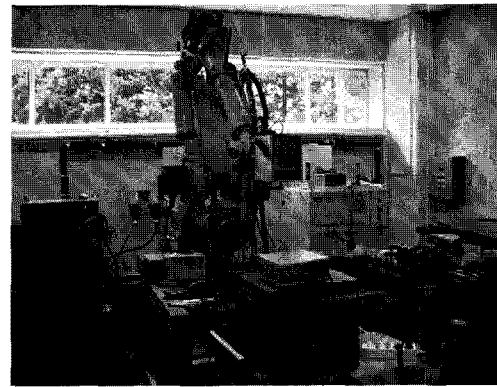


Fig. 1 Robot based remote laser welding system.

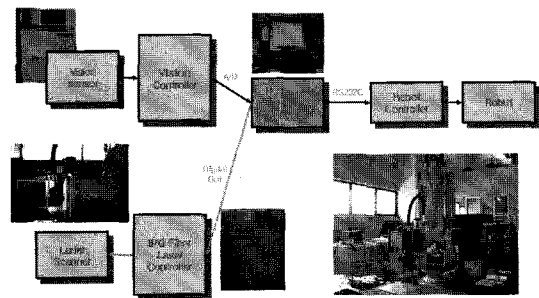


Fig. 2 Control schematic of remote laser welding system.

Table 1 Core units of remote laser welding system.

Laser source	1.6kW High power fiber laser
Focusing unit	Collimation, Beam expander/ Image transfer optics, F-theta lens
Scanning unit	XY 2-axis scanner
Global handling system	Industrial Robot
Workpiece Clamping device	Jig, Clamping
Welding position sensing and process monitoring	CCD vision stereo-photogrammetry, Optical emission monitoring
Main control system	PC based Controller Path optimization, Process simulation, interface with all devices

하는 핵심장치는 레이저 발진 장치, 레이저 광학계, 광학계 이송을 위한 산업용 6축 로봇, 용접시편을 고정하기 위한 지그 및 클램핑 장치, 레이저 광 정밀 조사를 위한 레이저 거리 센서, 레이저 용접 품질 측정을 위한 품질 모니터링 장치, 전체 시스템 제어를 총괄하는 PC 기반 제어기 등으로 구성된다. 광학계는 2축 레이저 스캐너와 초점장치로 구분된다. 초점 거리를 일정하게 유지하기 위해 F-theta 렌즈를 사용하였다. 제어기 간 통신 방식은 RS232C 방식을 사용하였다.

3. 실험 결과

레이저 및 로봇과의 인터페이싱을 토대로 원격 레이저 용접 시스템에 대한 기초 실험을 수행한 결과이다. 원격 레이저 용접 장치의 용접성에 관하여 기초 연구로 최적의 용접조건을 찾기 위해 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 용접을 수행하였다. 용접시편의 용접부 관찰과 인장시험을 통해 용접조건을 찾았다. 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 용접 실험 결과를 분석하여 겹치기 용접을 수행하고 아연강판에 대한 인장시험을 수행하였다. 원격 레이저 용접 시스템의 전체 시스템 정밀도를 판별하기 위해 차체 부품에 대한 패턴 용접 실험을 수행하였다. 패턴은 원형, C형, S형, 사각형 등을 만들었으며, 로봇이 이동하면서 레이저 스캐너를 이용하여 고속으로 패턴을 형성하였다. 실시간으로 레이저 용접 중의 품질을 측정할 수 있는 기법에 대한 연구를 위해 레이저 용접을 하면서 플라즈마와 온도를 측정하여 용접 품질 판별의 가능성에 대한 실험을 하였다.

구성된 로봇 기반 원격 레이저 용접시스템을 이용하여 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 및 겹치기 용접을 수행하기 전에 철판에 기초 레이저 용접 실험을 수행하였다. 레이저 출력을 레이저 발전기의 최고 출력인 1.6kW으로 설정하고 용접속도를 가변하면서 용접부의 단면 변화를 관찰하였다. Fig. 3은 IPG사의 1.6kW 급 파이버 레이저를 이용하여 4mm의 철판에 레이저 용접을 한 후 용접부를 절단하여 단면을 찍은 사진이다. 초점 위치에서 레이저 출력을 1.6kW로 설정하고 로봇의 이동속도를 1, 2, 3, 4m/min로 가변하면서 실험을 수행하였다. 레이저 발전기에서 발생된 레이저 광을 파이버를 통해 레이저 스캐너 까지 전송한 후 레이저 스캐너를 통해 레이저 광을 주사하였다. 레이저 광 조사 시 레이저 스캐너는 고정으로 설정한 상태에서 로봇이 이동하면서 원격 레이저 용접을 수행하였다. 용접속도를 가변하기 위해 6축 산업용 로봇의 속도를 가변하였다. 1kW 대의 레이저 출력이지만 4mm 정도의 철판 용접이 가능함을 확인할 수 있었다. 기초 실험을 통해 얻은 결과를 통해 파이버 레이저를 이용할 경우 기존 Nd:YAG 레이저에 비해 낮은 출력으로도 같은 두께의 철판을 용접하는 것이 가능함을 알 수 있었다. 로봇을 고정된 상태에서 레이저 스캐너를 이용한 레이저 용접을 병행하여 레이저 용접실험을 수행하였다.

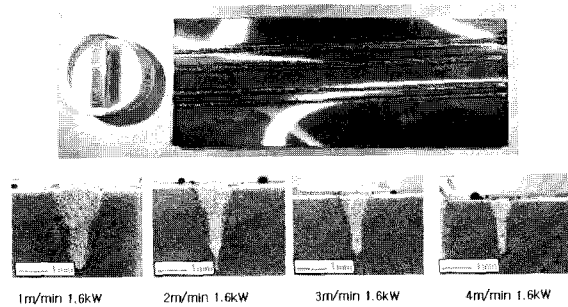


Fig. 3 Cross-section of laser welding steel plate (4t) using IPG fiber laser.

원격 레이저 용접을 위한 최적의 용접조건을 찾기 위해 1mm 두께의 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 용접을 수행하였다. 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 용접을 수행한 후 용접시편의 용접부 관찰과 인장시험을 통해 실험결과를 분석하여 용접조건을 찾았다. Table 2는 일반 철판과 아연도금강판의 레이저 용접된 인장시편을 보여 준다. 레이저 용접 조건은 용접속도를 1m/min에서 6m/min까지 1m/min씩 가변하였고, 레이저 출력은 400W부터 1600W까지 200W씩 가변하면서 인장시편을 제작하였다. 레이저 용접시편의 기계적 강도를 측정하기 위해 Instron사의 만능시험기(Universal Testing Machine)를 이용하여 인장강도 값을 측정하였다. 표에서 “(W)”로 표기된 시편은 용접부에서 파단이 일어났다. 용접부 파단 조건 보다 입열량이 많은 조건에서는 전체적으로 모재강도 이상으로 인장강도 값이 측정되었다. 레이저 용접시편의 전후면을 관찰하여 용접부 형성이 불량한 조건에서 실험을 중단하였다. 강도 값이 모재강도 보다 낮은 일부 시편은 레이저 용접 특성 상 시편의 정렬과 맞대어 지는 시편단면의 상태, 시편 고정장치의 정밀도 등의 문제점 때문에 발생하였다.

Table 3은 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 용접을 수행한 후 인장강도 값을 측정한 결과값을 표로 정리한 것이다. 일반 철판과 아연도금철판의 모재강도값은 일반 철판이 272.8MPa이고 아연도금강판이 377.4MPa이었다. 레이저 용접속도를 1m/min에서 6m/min까지 1m/min씩 가변하였고, 레이저 출력은 400W부터 1600W까지 200W씩 가변하여 원격 레이저 용접실험을 수행하였다. 기계적 강도를 측정하기 위해 인스트론(Instron)사의 만능시험기를 이용하였다. 용접부에서 파단이 발생한 시편은 표에서 “(W)”로 표기하였다. 인장시험 시 용접부에서

Table 2 Laser welding specimens of steel plate & steel plate coated with zinc.







steel plate (1t)	
	800W, 1m/min
	1600W, 2m/min
	800W, 1.5m/min
steel plate coated with zinc (1t)	
	800W, 2m/min
	1400W, 1m/min
	1000W, 1m/min

Table 3 UTM test results of laser welding specimens.

steel plate (272.8MPa)							
power speed	400w	600w	800w	1000w	1200w	1400w	1600w
1m/min	248.6(W)	287.8	289.6	242	282.1	284.2	284.5
1.5m/min			284.5	281.5	282.9	279.9	282.5
2m/min			297.7	214.7(W)	225.5(W)	276.5	277
3m/min			290.1	258.1(W)	286.3	287.1	289.7(W)
4m/min					282.1(W)	278.4	318.3
5m/min						287	282.6(W)
6m/min							226.2(W)

steel plate coated with zinc (377.4MPa)							
power speed	400W	600W	800W	1000W	1200W	1400W	1600W
1m/min	309.6 (W)	358.1	362.3	367.3	370.1	378.6	368.7
1.5m/min		360.8(W)	376.3	372.2	364.5	337.3(W)	370.1
2m/min	153.2 (W)	355.5(W)	378.7	382.5	365.7	366.5	365.9
3m/min			313.5(W)	379.7	376.8	377	372.2
4m/min					202.5 (W)	370.9	369.8
5m/min						181.2(W)	367.3
6m/min						288.1(W)	374

파단이 발생한 조건 보다 입열량이 많은 조건에서는 전체적으로 모재강도 이상으로 인장강도 값이 측정되었다. 일부 시편은 시편 상태가 레이저 용접에

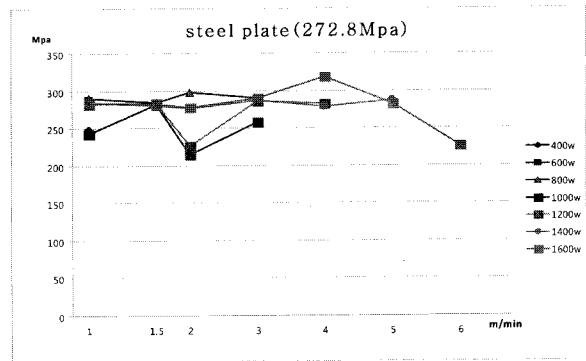


Fig. 4 Graph of UTM test results(steel plate).

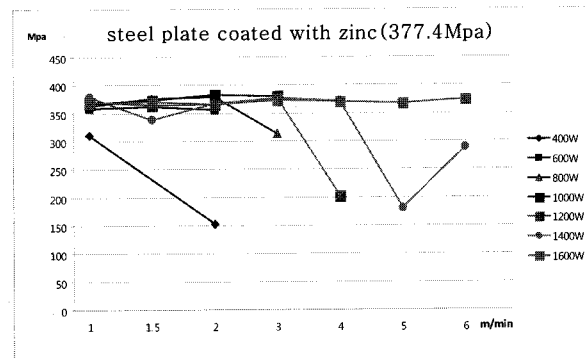


Fig. 5 Graph of UTM test results(steel plate coated with zinc).

적합하게 준비 되지 않아서 측정값이 모재강도 값 보다 낮게 측정이 되었다.

Fig. 4, 5는 인장시험 후 결과 값을 그래프로 표시한 것이다. 용접부 상하면이 양호한 시편들에서 모재강도 값 이상으로 인장강도 값이 측정이 되었다. 아연도금강판의 경우 400W, 1200W, 1400W의 출력 중 속도를 증가시킨 후 강도 값이 급격히 하락함을 알 수 있었다. 1600W의 최대 출력에서는 속도를 가변하여도 강도 값이 유지됨을 알 수 있었다. Table 4는 1mm 두께의 일반 철판과 아연도금철판의 맞대기 용접을 수행한 후 결과 값을 토대로 겹치기 용접을 수행한 것이다. 용접이 어려운 아연도금강판은 용접속도가 0.8m/min, 1.1m/min에서 레이저출력을 가변하여 실험을 했다. 일반 강판은 용접속도가 0.2m/min, 0.5m/min에서 출력을 가변하였다. 일반 강판과 비교하여 아연도금강판의 용접부 상하면의 비드가 불균일하며 스파터가 많이 발생하였다. 추가 실험을 통해 아연도금강판의 겹치기 용접 시 간극 유지방법 적용실험과 인장시험을 할 계획이다.

구성된 원격 레이저 용접시스템을 이용하여 프레스 단품을 고정할 수 있도록 간단한 시험용 지

Table 4 Lapped joint specimens after remote laser welding.

steel plate (1t)						
power speed	1200W		1400W		1600W	
	upper	lower	upper	lower	upper	lower
0.2m/min						
0.5m/min						
0.8m/min						
1m/min						
1.3m/min						
1.5m/min						

steel plate coated with zinc (1t)						
power speed	1200W		1400W		1600W	
	upper	lower	upper	lower	upper	lower
0.2m/min						
0.4m/min						
0.6m/min						
0.8m/min						
1.1m/min						
1.3m/min						
1.5m/min						

그를 제작한 후 차체부품에 대하여 레이저용접 실험을 하였다. Fig. 6은 로봇 레이저 용접 시스

템을 이용한 용접 실험 결과물이다. 로봇에 부착된 레이저 스캐너를 이용하여 원격 레이저 패턴

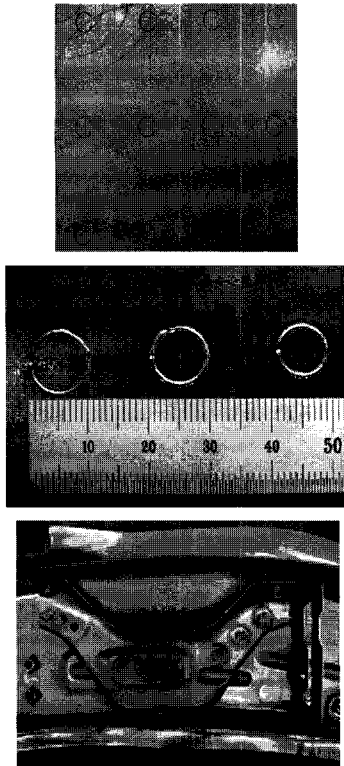


Fig. 6 Remote laser welding samples.

용접을 수행하였다. 직선, 원형 패턴, C형 패턴 등 다양한 패턴에 대한 기초적인 용접 실험을 수행하였다. 레이저 패턴 용접을 토대로 자동차용 부품인 사이드멤버(side member)에 원격 레이저 패턴 용접을 적용하였다. 추가 실험을 통해 원격 레이저 용접을 적용한 차체 부품에 대한 금속학적 분석과 기계적 성질에 대한 시험과 분석을 하고자 한다. 로봇과 레이저 스캐너를 동기화하여 용접경로를 이동하므로써 기존 저항 용접과 레이저 용접시 로봇이 멈추는 시간을 제거할 수 있기 때문에 빠른 용접속도로 용접이 가능함을 확인하였다.

실시간으로 레이저 용접 중의 품질을 측정할 수 있는 기법에 대한 연구로 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 온도를 측정하여 용접 품질을 판별하는 기법에 대한 기초 실험을 하였다. 레이저 용접시 플라즈마 강도 검출을 이용한 용접 품질 모니터링을 위해서는 먼저 용접품의 불량 여부를 판단하기 위한 플라즈마 강도의 초기 기준값을 설정해야 한다. 기준값을 설정한 후 용접 중 발생하는 플라즈마 강도가 기준값의 최대 및 최소값 영역 내부에 존재하면 양호한 용접이 된다. Nd:YAG 레이저와 파이버 레이저를 이용하여

실험을 하였다. Nd:YAG 레이저의 경우 파워가 60W, 250W, 4kW를 병행해서 실험했으며 시편은 일반 스테인리스 시편을 사용하였다. 플라즈마 감지 센서는 UV용 1종과 IR용 2종을 사용하였다. 파이버 레이저의 경우 500W, 100W의 출력에 대해 실험을 하였으며 UV, IR 센서를 사용하였다. 실험결과 센서 신호는 양호하였고 레이저 용접 중 실시간으로 레이저 용접의 품질을 감시할 수 있었다.

Fig. 7은 Nd:YAG 레이저의 용접품질을 모니터링하기 위해 실험한 시편과 플라즈마 검출신호를 보여 준다. 강판에 지름 2mm의 세 개의 홀(hole)을 가공하여 기계가공 결합으로 인하여 플라즈마가 발생하지 않는 결합 부분을 감지할 수 있는지 확인하고자 하였다. 그리고 강판 위에 직경 2mm의 철사를 용접방향과 수직으로 교차하게 부착하여 레이저 초점거리 변화에 의한 플라즈마의 발생변화를 감지할 수 있는지를 확인하고자 하였다. 시편에 적용한 용접조건은 레이저 출력이 3kW이고 용접속도는 3m/min로 하여 실험을 수행하였다. 레이저 용접 중 여러 가지 원인에 의해 용접부가 일부 접합 안 되는 불량 발생 가능하다. 이러한 용접 불량을 정확히 발견할 수 있는지 시스템을 검증하기 위해 시편 용접부에 임의로 홀(hole)을 만들고 철사를 부착한 후 용접 중 발생하는 플라즈마 신호를 검출하여 도표로 나타낸 것이다. 선도에서 파란 원으로 표시된 부분은 시편의 홀 위치에서 발생한 파형이 된다. 파형을 분석해 보면 플라즈마가 소멸되면서 검은색(상부)의 UV 신호가 급감하고 온도를 나타내는 IR 신호(아래)가 소멸되었다. 이와 달리 철사가 위치한 부분에서는 플라즈마가 급격히 소멸 및 증가가 발생했으나 온도 관련한 IR 신호는 유지되고 있다. 초점거리의 변화로 플라즈마의 발생량은 변화하지만 소멸되지 않고 플라즈마의 발생은 계속되고 있음을 선도로부터 확인할 수 있었다. Fig. 8은 Nd:YAG 레이저의 용접품질 측정 실험을 토대로 파이버 레이저를 이용한 레이저 용접 중의 품질을 측정한 실험 결과이다. 원격 레이저 용접 시스템의 레이저 스캐너를 이용하여 철판에 레이저 광을 5번 주사하며 측정한 결과이다. 플라즈마와 온도 신호가 적정한 값으로 검출이 되어 실시간으로 품질을 감시할 수 있음을 확인하였다.

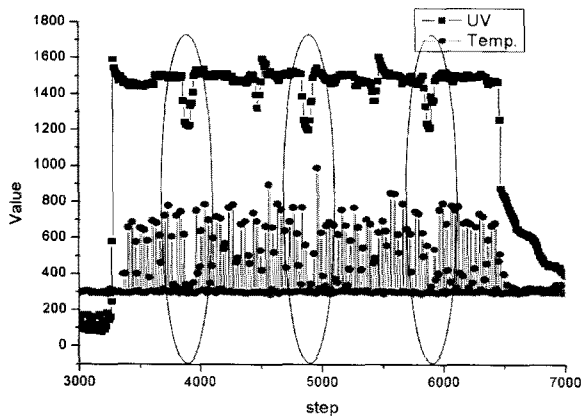
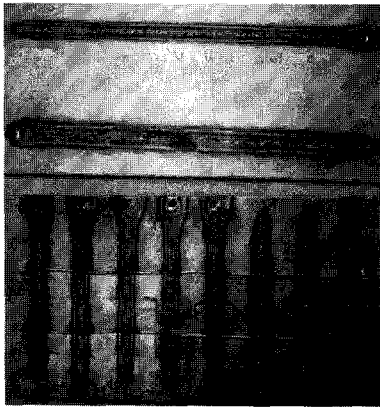


Fig. 7 The results of plasma intensity detecting using Nd:YAG laser.

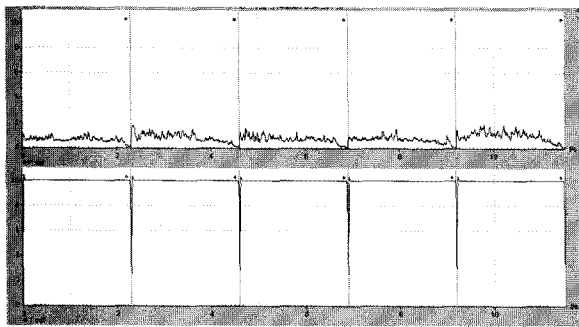


Fig. 8 The results of plasma intensity detecting using fiber laser.

4. 결론

레이저, 레이저 스캐너, 산업용 로봇 시스템 간의 인터페이싱을 토대로 원격 레이저 용접 로봇 시스템을 구축하고, 시작품 제작용 용접지그를 설계 및 제작하여 철판과 아연도금철판에 대한 원격 레이저 용접성에 대한 기초 연구를 수행하였다.

- 1) 원격 레이저 용접 시스템을 이용하여 철판 및 아연도금강판에 대한 맞대기 및 겹치기 용접 실험과 인장시험을 수행하여 원격 레이저 용접 조건을 확보하였으며, 추가 실험을 진행하여 아연도금강판의 겹치기 용접의 최적 조건 및 갭 유지 방법에 대한 연구를 진행하고자 한다.
- 2) 차체 부품에 대한 원격 레이저 패턴 용접 실험을 수행하였고 용접조인트 및 결함부를 분석하였다.
- 3) 레이저 용접 중 발생하는 플라즈마 및 온도 신호를 계측하고 신호 처리를 통해 레이저 용접의 품질 판별 기법에 관한 연구를 수행하였다.
- 4) 원격 레이저 용접의 기초 실험 결과를 토대로 아연도금강판의 겹치기 용접 및 레이저 용접 품질 검사기법에 대한 연구를 계속 진행하고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 성장동력사업의 지원을 받아 수행되었고 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Coste F. et al, "A Rapid Seam Tracking Device for YAG and CO₂ High Speed Laser Welding," Proc. ICALEO 85, pp. 217-223, 1998.
- 2) Eimermann T., "Hem Flange Laser Welding," 25th ISATA Symposium, No. 921089, Florence Italy, June 1992.
- 3) Beyer E., Klotzbach A., Fleischer V. and Morgenthal L., "Nd:YAG - Remote Welding with Robots," Proceedings of Lasers in Manufacturing, pp. 367-373, 2003.
- 4) Klotzbach A., Fleischer V., Morgenthal L. and Beyer E., "Sensor guided remote welding system for YAG-laser applications," Proceedings of Lasers in Manufacturing, pp. 17-19, 2005.
- 5) Graaf M. W. de, Aarts R. G. K. M., Meijer J., Jonker J. B., "Robot-sensor synchronization for real-time seam-tracking in robotic laser welding," Proc. 23rd Int. Cong. On Applications of lasers

and Electro-Optics, pp. 1301, 2004.

- 6) Aubry P., Coste F., Fabbro R., Frechett D., "2D YAG welding on non-linear trajectories with 3D camera seam tracker following for automotive applications," Laser Appls. Auto Industry, Section F-ICALEO, pp. 21, 2000.
- 7) Beyer, E., and Abels, P., 1992, "Process Monitoring in Laser Materials Processing," Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), pp. 433-438, 1992.