



PWR Space Grid 레이저 용접
실시간 감시장치 개발

Development of Laser Weld Monitoring System
for PWR Space Grid

韓國原子力研究所

2

30 - 48

提 出 文

韓 國 原 子 力 研 究 所 長 貴 下

本 報 告 書 를 "PWR Space Grid 레이저 용접 실시간 감시장치 개발" 課 題 的
年 次 報 告 書 로 提 出 합 니 다 .

1998 年 6 月 30 日

研 究 室 名 : 原 子 力 光 機 電 技 術 開 發 팀

課 題 責 任 者 : 鄭 鎮 滿

研 究 員 : 金 哲 中

研 究 員 : 金 玫 錫

要 約 文

I. 題 目

PWR Space Grid 레이저 용접 실시간 감시장치 개발

II. 研究의 目的 및 重要性

본 연구는 KNFC사에서 사용하고 있는 PWR space grid 레이저 용접기에 적용하기 위한 광학식 용접 실시간 감시장치 개발 및 실험실적 실증을 목표로 하였다.

최근 PWR space grid 용접은 TIG 용접에서 Nd:YAG 레이저 용접으로 바뀌고 있다. 이러한 레이저 용접의 장점은 적은 투입열량으로 높은 용입깊이를 얻을 수 있으며, 빠른 용접속도로 생산성을 높일 수 있다. 현재 레이저 용접의 광학적 감시 방식 중에 용접부위에서 방출하는 빛의 강도에 따라 용접 상태를 판단하는 방법이 많이 사용하고 있는 추세이다. 그러나 용접 pool에서 방출되는 2 개의 파장을 선택하여 비교함으로써 용접 중 일어나는 상태에 대한 보다 많은 정보를 알 수 있다. 본 연구팀에서는 원자력 중장기 연구개발을 통하여 고도의 기술이 요구되는 레이저 용접 중 용접 상태를 광학적 방식을 이용하여 실시간으로 감시하는 기술을 상당부분 축적하였으며, 이 기술을 이용하여 국내의 PWR space grid 레이저 용접에 적용하여 space grid 용접 불량률 감소를 목적으로 본 연구 개발에 착수하였다.

III. 研究의 內容 및 範圍

본 연구에서는 PWR space grid 교차점 용접부위에서 방출하는 빛을 이용하여 용접상태를 감시할 수 있는 장치를 개발하였으며, 이를 이용하여 용접부위에서 방출되는 2개의 파장을 측정하는 실험을 수행하였다. 아울러 용접신호 분석을 위하여 용접상태와 신호상태를 비교 분석하였다.

본 연구에서 개발한 연구 내용 및 범위는

첫째, space grid 레이저 용접시 용접공정 감시용 광학장치를 개발하였으며,

둘째, 개발된 장치를 이용하여 용접시 발생하는 용접신호를 수집, 분석하였다.

따라서 이장치를 이용하여 PWR space grid 레이저 용접기에 공정적용을 위한 실험실적 실증실험을 하였다.

IV. 研究 結果 및 活用に 대한 建議

가. 연구 개발 결과

. 레이저 용접 감시장치 개발

- 시제품 1 대 제작

. 레이저 용접실험분석

- 레이저 용접 pool 크기 측정

- 레이저 용접깊이 측정

나. 활용에 대한 건의

연구 결과물인 PWR space grid 용접 감시용 PWR space grid 제작분야에서 QC 용으로 활용할 수 있으며, 밀폐된 좁은 구역에서의 레이저를 이용한 가공에서도 활용할 수 있다. 특히 일반 산업분야인 레이저 가공분야에서 활용될 수 있을 것으로 판단되므로, 본 과제를 사업 현장에 활용하기 위한 관련 산업체와의 기술이전 사업이 요구된다.

SUMMARY

I. Project Title

Development of Laser Weld Monitoring System for PWR Space Grid

II. Objectives and Importance of the Paper

We developed the Laser welding monitoring system for PWR space grid. The demands for this monitoring system were applied to the process control in space grid welding. The advantage of the laser welding of space grid is lower input energy and deeper welding depth, and higher speed welding for productivity. The optical monitoring method for laser welding is tending for defining the welding quality of thermal radiation from welding pool. This optical monitoring system using the 2 wavelength signals from welding pool can be applied to the optimization of welding quality. We had many experimental techniques of optical monitoring for laser weld. This method can be used for the real time space grid welding monitoring.

This team had proceeded the application of optical monitoring in PWR space grid laser weld and decreasing the inferior ration. Therefore, we are trying to develop the weld control system.

III. Scope and Contents of the Project

We used optical monitoring technology of thermal radiation from weld pool to develop the monitoring control system for PWR space grid laser welding in this program. Then, we investigated the analysis technique for measuring data of 2 wavelength from weld pool. The scope and contents of the project are as follows ;

- 1) Development of the optical monitoring system for space grid laser welding
 - 2) Development of the measuring data analysis algorithm and the real-time control technology using this system
- Conduction of PWR space grid laser welding with this monitoring system for demonstration

IV. Results and Proposal for Applications

Results

- . Development of the welding monitoring system
 - Fabrication of 1 unit for demonstration.
- . Experiments of laser weld
 - Measurement of laser welding pool size.
 - Measurement of laser welding depth.

Proposal for Application

An Optical monitoring system for laser weld has been developed. The laser weld measuring data and the real-time control of laser system has been investigated. We expect that the developed optical monitoring system can be applied to make PWR space grid successfully for the QC and to apply sealed area of laser weld. Therefore, the technology transfer project with related company will be demanded.

目 次

제 1 장 서론	13
제 2 장 용접공정 감시용 광학장치	14
제 1 절 서 언	14
제 2 절 KNFC(Lumonics) 레이저 광학계 분석	15
제 3 절 Monitoring 광학계 설계 및 제작	21
제 3 장 Space Grid 용접 및 신호 분석	34
제 1 절 서 언	34
제 2 절 Space Grid의 레이저 용접	35
제 3 절 용접 Pool에서 발생하는 용접 신호 분석	44
제 4 장 제어기술연구	49
제 1 절 용접 감시 장치 구성	49
제 2 절 광 신호 측정 및 분석 프로그램구성	53
제 5 장 결론	58
참 고 문 헌	59
별 첨	60

그림 目 次

그림 2-1. 레이저 광학계 (Laser Beam Path)	16
그림 2-2. 광확대기 내부도 (Internal View of Collimator)	17
그림 2-3. 광확대기 조절표 (Collimator Control Dial Settings)	18
그림 2-4. 제어용 계통도 (Control Block Diagram)	19
그림 2-5. 외부연결 터미널 (Interface Terminal Panel)	20
그림 2-6. 파장별 투과율 특성곡선 (Typical Transmittance Function)	22
그림 2-7. 색수차별 투과율 및 강도의 특성곡선 (Profiles of Transmittance and Intensity for Chromatic Filtering)	23
그림 2-8. 검출기 파장별 반응률 (Spectral Responsibility of Detector)	26
그림 2-9. 검출기 회로도 (Circuit of Detector)	26
그림 2-10. 레이저 빔 반사용 Hot mirror 투과율 (Transmittance of Hot Mirror for Laser Beam)	28
그림 2-11. 신호 측정용 반사거울의 투과율 (Hot and Cold Mirror Transmittance for Signal Detectors)	29
그림 2-12. 레이저 전송 렌즈 군 단면 (Lens Profile for Laser Beam)	30
그림 2-13. 위치별 집광 빔 크기(Through-Focus Spot Diagram)	31
그림 2-14. 감시장치 평면도 (Layout of Monitoring System)	32
그림 3-1. 이송속도에 따른 용입깊이 (Melting Depth VS Speed)	36
그림 3-2. 이송속도에 따른 열영향부 (Thermal Effect Area VS Speed)	37
그림 3-3. 레이저 출력에 따른 용입깊이 (Melting Depth VS Laser Power)	38

그림 3-4. 출력에 따른 용융점 크기 (Laser Spot Size VS Laser Power)	39
그림 3-5. 초점위치에 따른 용입깊이 변화 (Melting Depth VS Focus)	40
그림 3-6. 424 W에서 $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ 값(Decay of $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ in 424W)	46
그림 3-7. 389 W에서 $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ Y'값(Decay of $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ in 389W)	46
그림 3-8. 424 W에서 $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ 값(Decay of $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ in 424W)	47
그림 3-9. 레이저 용접 신호(Laser Welding Signal of 530, 950nm)	48
그림 4-1. 용접 감시 장치 구성도 (Diagram of Weld Monitoring System) ..	49
그림 4-2. 광 신호 검출부 구성도 (Diagram of Optical Signal Detector) 50	
그림 4-3. 마이크로프로세서 및 컴퓨터 인터페이스 구성도 (Diagram of Micro-processor and PC Interface)	51
그림 4-4. 광 신호 측정 프로그램 flowchart (Flow Chart of Optical Signal Program)	53
그림 4-5. 제어데이터 입력화면 (Input Screen of Control Data)	54
그림 4-6. 광 신호 측정프로그램 화면 (Screen of Optical Signal Determination Program)	55
그림 4-7. 광 신호 분석프로그램 flowchart (Flow Chart of Optical Signal Analysis Program)	56
그림 4-8. 함수별 그래픽 표시화면(Graphic Display Screen of Functions)57	

表 目 次

표 2-1. JK701H 레이저 사양 (JK701H Laser Specifications)	16
표 2-2. 파장별 투과율 (Transmittance of Mirrors)	27
표 3-1. 레이저 용접 변수(Laser Weld Parameters)	35
표 3-2. Space grid 용접 변수 (Laser Welding Parameter for Space Grid)	41
표 4-1. 광 신호 검출장치 제어기능 및 재원(Control Function and Specification of Optical Signal Monitoring)	55

寫 眞 目 次

사진 2-1. 검출기 (Detector)	25
사진 2-2. 제작된 레이저 감시장치 (Laser Monitoring System)	33
사진 3-1. PWR space grid	42
사진 3-2. PWR Space Grid 교차점 (Cross Point of PWR Space Grid)	42
사진 3-3. 레이저 펄스 파형(Laser Pulse Wave)	43
사진 3-4. 교차전 용접단면 (Cross Section of Weld)	43
사진 4-1. 광 신호 검출부 (Detector of Optical Signal)	51
사진 4-2. 실리콘 포토다이오드 (Si Photo-diode)	51
사진 4-3. 마이크로프로세서 및 컴퓨터 인터페이스 보드(PC Interface Board of Micro-processor)	52

제 1 장 서론

기존 레이저 용접에서의 용접상태 평가방식은 용접 후 용접부위를 파괴 측정하여 용접부위 측정결과에 따른 레이저 용접변수를 결정하는 방식이다. 최근에는 이런 파괴적 분석 방식 대신, 레이저 용접 중 용접부의 용융되는 매질에서 방출하는 빛을 측정하는 새로운 방식의 실시간 레이저 용접 감시장치가 개발되고 있다. 탄산가스 레이저 용접에서의 용입깊이를 측정하는 방식은 여러 해 전에 K.Lankalapalli[1] 등에 의해서 연구가 진행되었으며, D. Hand[2] 등은 광학적 신호 분석으로 Nd:YAG 레이저 용접에서의 용입 깊이 신호를 측정한 연구를 예로 들 수 있다.

광학적 방식에 의한 용접 상태감시는 우리나라에서도 관심이 크게 일어나고 있다. 색수차에 의한 용접 신호 분석은 용융된 크기와 응고시간을 비교하여 용접 pool 의 크기, 용입 깊이 및 집광 렌즈의 초점 위치탐지를 중심으로 연구를 진행하고 있다.

이에 본 연구팀에서는 실시간 용접 공정 감시 장치를 개발하여 고도의 용접기술이 기술이 요구되는 PWR space grid 레이저 용접의 품질 관리 연구에 기여할 목적으로 연구에 착수하였다. 본 연구에서는 광학장치를 이용하여 레이저 용접 공정 적용을 위한 용접 감시장치를 개발하였으며 이를 이용한 용접 신호 분석 실험을 수행하였다. 아울러 실시간 용접 신호 분석을 통한 용접 제어장치를 설계하였다.

제 2 장 용접공정 감시용 광학장치

제 1 절 서 언

지난 수년간에 걸친 실험으로 레이저 가공 과정 중 광학적 방식을 이용한 용접 감시에 관해 많은 연구가 진행되었다. 이러한 광학적 레이저 공정 감시방식은 용접 표면에서 방출하는 빛을 검출하여 가공상태를 감시하였다. 그러나 검출기 위치의 공간적 제약 및 방향 등 여러 가지 단점을 포함하여 실제로 사용하는데 있어 제한을 받아왔다. 그러나 최근에는 레이저 집속방향에서 용접 부위의 방출 빛을 검출하고, 이용한 용접부에서 방출하는 여러 파장을 동시에 사용하므로, 이러한 단점이 상당부분 해소되었다. 최근에는 여러 파장의 신호를 동시에 분석하여 용접부의 크기 및 레이저의 초점 변화 등을 감시하는 연구가 진행 중에 있다.

이러한 광학적 방식의 용접 상태 감시의 장점은 레이저 가공과정에서 용접상태를 감시할 수 있다는 것이다. 기존의 광학적인 방식은 레이저 빔이 조사하는 방향에서 용융부 빛의 신호를 검출하는 것이 아니라, 용융부의 측면 또는 경사면에 검출기를 두고 신호를 측정하였다. 또한 대부분은 검출기 1개를 사용하여 측정하였고, 검출된 신호의 파장은 용융부에서 나오는 전파장 또는 자외선 및 적외선등 여러 파장을 사용하여 측정하였다.

특히 기존의 측정된 data의 분석은 신호의 강약 또는 특정시간에서의 변화 등으로 가공 상태를 판단하였다. 그러나 이번 연구의 특징은 용접 레이저 빔 방향에서 용융부의 빛의 신호를 측정하므로, 밀폐된 공간에서 신호 측정이 가능하다. 용융부의 530nm, 950nm 의 파장을 동시에 측정하므로 보다 세밀한 분석이 가능하다.

제 2 절 KNFC(Lumonics) 레이저 광학계 분석

레이저를 이용한 space grid 용접은 미국의 WH 및 ABB-CE사에서 수행하고 있으며 국내에서는 KNFC사가 유일하게 미국 WH사의 PWR space grid 레이저 용접기를 도입하여 1996년 하반기부터 PWR용 space grid를 생산하고 있다. 이는 기존의 TIG 용접에 비해 용입깊이가 깊고 투입용량이 적으며, space grid의 비틀림이 적다는 장점이 있다. 그러나 기존의 레이저 용접에 있어 grid의 불량 용접이 있을 경우, 17x17 space grid 전체를 재 용접해야 한다. 이에 반해 용접 감시장치를 활용하여 용접 상태를 감시하면, 펄스 레이저 용접중 매 펄스마다 grid의 용접 상태를 감시할 수 있다. 따라서 매 펄스의 용접상태에 따라 펄스 수를 조절할 수 있다. 이는 레이저 펄스마다 용접상태를 감시하므로 grid 공정 관리에서 괄목할 만한 진전을 얻을 수 있다. 특히 기존의 용접장치에 이런 광학적 감시기술을 적용하기 위해서는 기존의 레이저 광학계 분석이 필수적이다. 이런 광학적 분석을 근거로 space grid의 주요 상태인 용입깊이 및 기하학적 구조의 미세한 조절을 가능케 하고 있다.

1. KNFC사가 보유한 Lumonics Lasers 광학계

KNFC사가 보유한 Lumonics 레이저 가공기의 기본 model은 JK 701 H형이다. 기본 사양은 표 2-1과 같다. 기본적으로 flash-lamp를 이용하여 pumping 하였지만, pumping chamber는 ceramic reflector를 사용한 특징이 있다.

표 2-1. JK701H 레이저 사양 (JK701H Laser Specifications)

내용	규격
Max. Mean Power	550 Watt
Max. Pulse Energy	70 Joule
Max. Peak Power	7.0 kW
Pulse Width Range	0.5 msec. to >50 msec.
Repetition Rate	0.2 to 500 Hz

Lumonics 레이저의 광학계 구조는 그림 2-1과 같다. 레이저광을 발생하는 laser rod 및 flashlamp와 발진된 레이저를 공진하는 전후 발진 거울이 있다. 전면의 발진 거울을 통해 방출하는 레이저 빔은 bending mirror 뒷면에

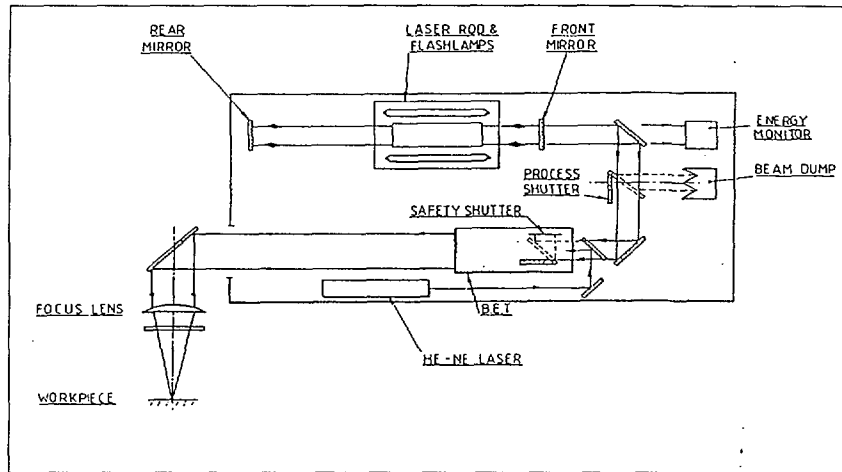


그림 2-1. 레이저 광학계 (Laser Beam Path)

있는 레이저 출력 검출기로 발진출력이 측정된다. 주 레이저 빔은 process shutter 와 safety shutter를 지난다. 레이저 공진기에서 발진된 레이저 빔은 자체의 발산각을 갖고 있다. 빔의 발산각은 레이저 가공시 집광된 레이저 빔의 크기를 좌우하므로 발산각을 줄이기 위하여 광확대기를 사용하였다. 광확대기를 지난 레이저 빔은 집광렌즈를 통하여 가공 물질에 집광되며, 광확대기 배율은 집광 빔의 크기에 영향을 미친다.

Lumnonics 레이저는 zoom type 의 광 확대기가 사용되었다. 광확대기의 구조는 그림 2-2 와 같다.

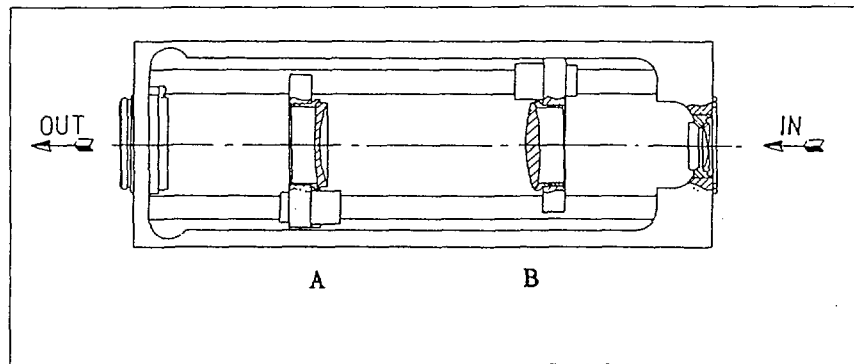


그림 2-2. 광확대기 내부도 (Internal View of Collimator)

이 광학계는 가공 물체의 특징에 따라 배율을 조절할 수 있게 하는 것이다. 그림 2-2에서 앞부분의 렌즈(A)는 그림 2-3에서 X 축인 ratio를 나타내며, 뒷부분인 렌즈(B)는 그림 2-3에서 Y 축인 Focus 위치를 나타낸다. 이번 space grid 레이저 용접에 사용된 ratio 값은 395이며, Focus 값은 602이다. 따라서 cross point 용접시 필요로 하는 출력 450W 정도에서의 배율은 약 2.7 정도이다. 이때 확대된 beam 의 직경은 약 27 mm 정도를 나타낸다.

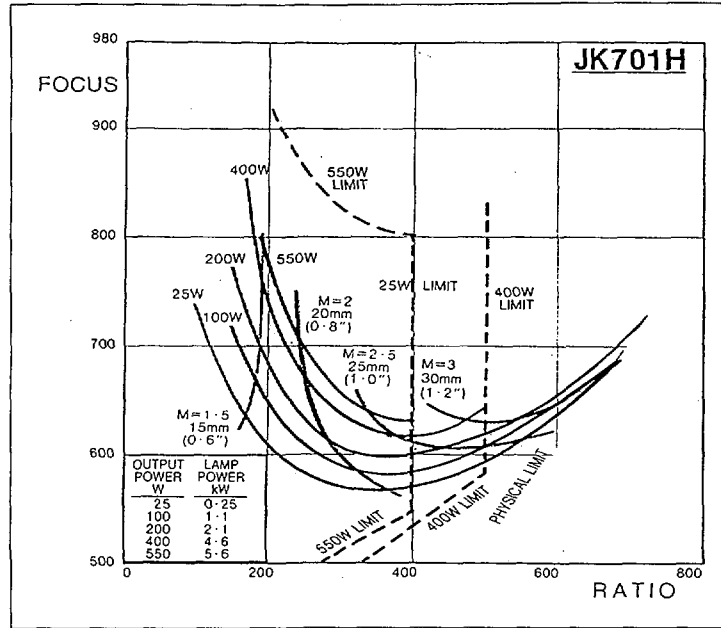


그림 2-3. 광학대기 조절표 (Collimator Control Dial Settings)

또한 레이저 펄스 발진중 첨두출력을 임의로 변화시킬 수 있는 pulse shaping 기능이 있다. 그러나 이런 pulse shaping 기능은 space grid 용접에서는 사용하지 않고 있다. 레이저의 기본사양을 감안하면 Zr-4 재질의 space grid 용접에서는 용입깊이가 약 2.5 mm 정도이다.

2. Lumonics Lasers 와 FUNAC CNC 와의 연결

레이저의 제어는 그림 2-4와 같이 Micro Processor 에 의해서 제어된다. 레이저 발진부의 제어는 레이저 출력, 레이저 제어, pulse shaping 및 레이저 안전 shutter 부분의 제어부분과 flashlamp의 전원 공급부분의 제어부분

으로 나타내며, 외부와의 연결은 조정부분과 CNC 와 같은 external interface 부분으로 나눌 수 있다.

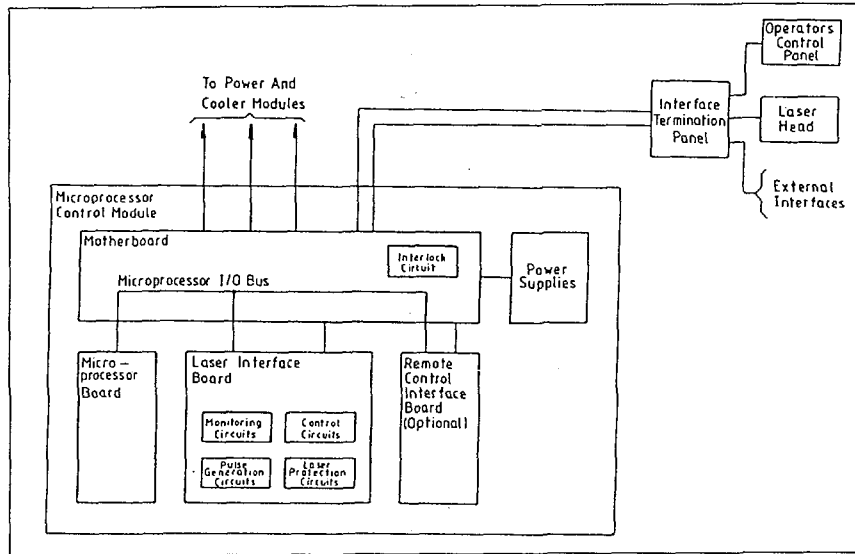


그림 2-4. 제어용 계통도 (Control Flow Diagram)

External interface 부분 중 실제적인 interface 부분은 그림 2-5와 같다. 외부의 interface 는 RS-232C 와 CNC 와 직접 연결하여 제어할 수 있게 설계되어 있다. Funac CNC 는 RS-232C 가 가능하나 CNC 제어의 신속한 제어를 위해서 CNC parameter interface를 이용하여 직접제어하고 있다. 따라서 레이저의 연격 제어는 CNC를 이용하여 직접 제어할 수 있다.

외부터미널을 통하여 전송할 수 있는 data 는 레이저 parameter 인 pulse 폭, peak power 및 펄스 반복율이며, 추가로 shutter 의 on/off를 통하여 레이저를 기본적으로 제어할 수 있다. 또 다른 기능으로 미리 program 된 레이저 발진 data를 통하여 program file 레이저 data를 전송할 수 있다.

여기서는 CNC에서 미리 구성된 data를 CNC 단자를 통하여 전송하는 방식을 채택하였다.

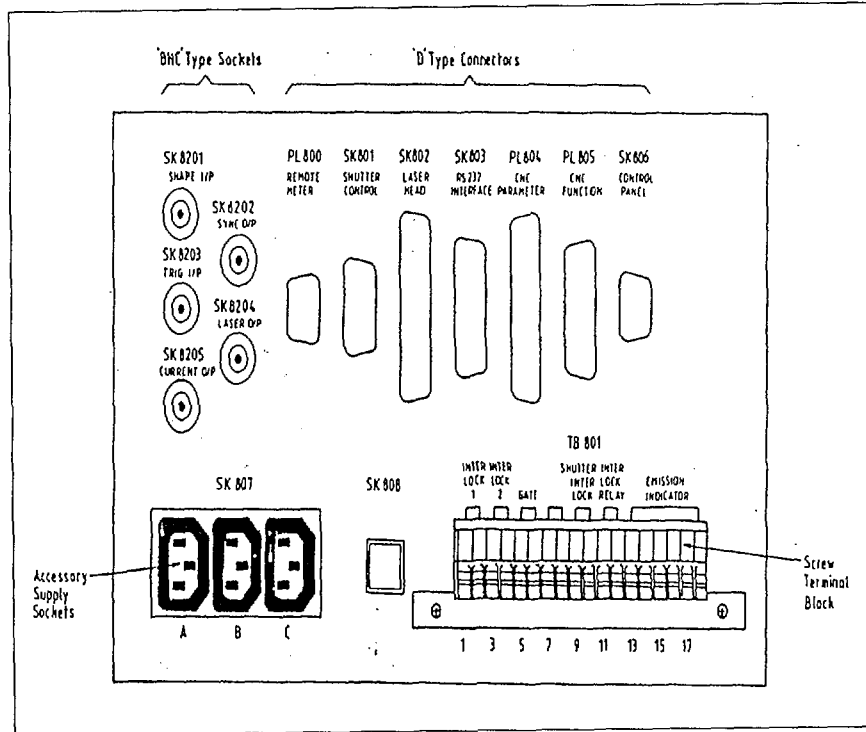


그림 2-5. 외부연결 터미널(Interface Terminal Panel)

따라서 space grid의 용접상태를 제어할 수 있는 I/O 단자는 광학적 감시 장치의 RS-232C port를 이용하면 용접 상태를 제어할 수 있다.

제 3 절 Monitoring 광학계 설계 및 제작

펄스형 Nd:YAG 레이저 용접기에서 매 레이저 펄스가 종료되는 순간부터 용융부의 응고는 시작된다. 그러므로 응고시간동안 레이저 용접 pool 의 크기변화는 용접 pool에서 나오는 빛의 세기와 색수차를 이용하여 실시간으로 측정할 수 있다. 용융 pool에서 방출된 신호는 광학계의 색수차를 이용해서 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 신호는 용접 pool의 크기변화에 대한 정보를 갖고 있으며, 이를 이용하여 용접과정을 감시할 수 있다.

펄스형 레이저 용접에서 펄스사이의 off 시간 동안 용접부에서 방출되는 빛의 세기는 기하급수적으로 감소한다. 광신호의 세기는 응고시간동안의 용접 pool의 내부변화에 따라 급속도로 변화하는데 이는 크기의 변화와 관계가 있기 때문이다. 레이저 용접 pool 크기 변화는 그림 2-6 과 같이 광학계의 색수차에 따른 파장별 투과율의 차이로 측정된다.

따라서 용접 pool에서의 위치에 따라 투과율이 다르게 나타난다. 또한 용접 pool에서 방출되는 빛은 조리개의 크기에 따라 파장의 투과율이 다르게 된다. 이때 조리개의 크기에 따라 용융 pool 의 검출 크기가 결정된다. 즉, 용접 pool 의 크기에 따라 pool에서 방출되는 빛을 집광하면, 검출크기가 다르게 된다. 따라서 조리개 크기가 일정하면 용접 pool 의 크기도 일정한 면만 보게된다. 측정에 사용되는 sensor에 의해서 파장별 측정 크기를 알 수 있다. 역으로 표현하면, 파장에 따라 용융부를 검출할 수 있는 범위가 다르게 된다. 용융부에서 발생하는 여러 파장중 특정파장을 검출기에서 선택적으로 수광하기 위해서 검출부의 sensor 앞에 band pass filter를 설치하였다.

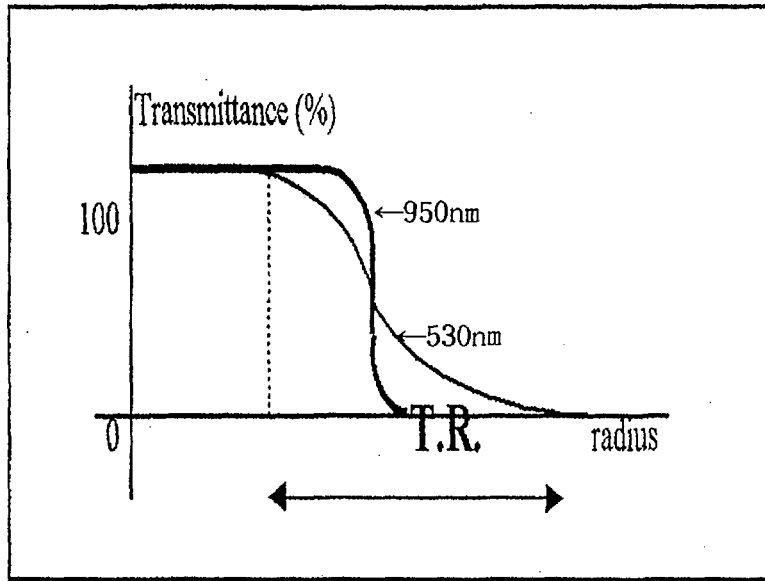


그림 2-6. 파장별 투과율 특성곡선
(Typical Transmittance Function)

용접된 용융 pool에서 나오는 빛의 파장을 적절히 선택하면 그림 2-6 과 같은 파장별 투과 특성으로부터 용융 상태를 알 수 있다. 파장별 용접 pool 의 크기에 따라 투과된 빛의 세기가 다르기 때문에 용융 pool 의 응고 시간 의 변화에 따라 응고 과정을 알 수 있고, 이런 투과율 특성을 갖는 파장을 적절히 이용하면 용접 pool 의 크기 변화를 알 수 있다. 이를 이용하여 초점 의 변화 및 용접 상태를 추정할 수 있다.

1. 이론적 배경

그림 2-7에서는 수광부의 크기를 일정하게 하고 두 파장 λ_1 과 λ_2 의 투과율과 광원의 크기를 나타낸 그림으로 λ_2 에 대해 초점을 맞추면 수광부에 대응하는 광원의 크기는 7이 되고 투과율은 6이 된다. 광학계의 색수차 때문에 λ_1 은 초점이 안맞게 되고, 따라서 λ_1 에서는 수광부에 대응하는 광원의 크기가 8이 되고 투과율은 5가 된다.

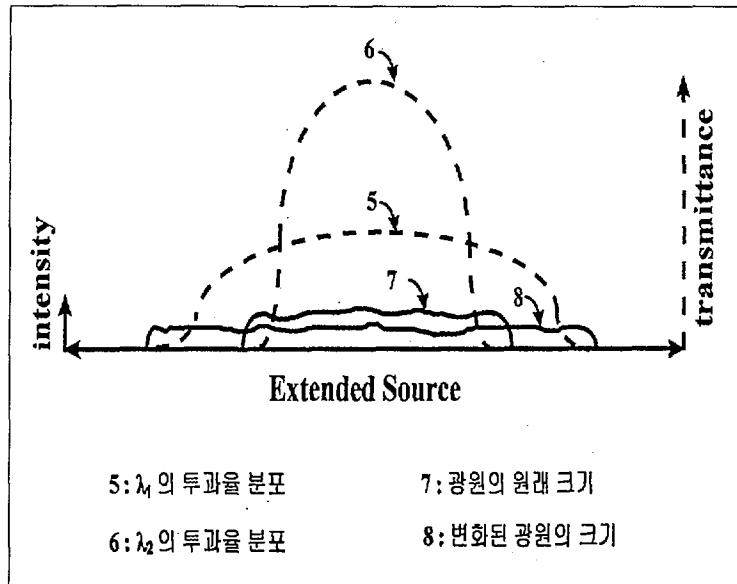


그림 2-7. 색수차별 투과율 및 강도의 특성곡선

(Profiles of Transmittance and Intensity for Chromatic Filtering)

펄스형 레이저 용접에서 용접상태를 측정하기 위해 용융 pool에서 나오는 빛을 파장별로 분리하여 측정하였다. [3, 4] 펄스형 레이저의 매 펄스사이

의 응고 과정중 용융 pool에서 나오는 950nm (X 신호, 그림2-7에서의 λ_2)와 530nm (Y 신호, 그림2-7에서의 λ_1)를 측정한다. 각 신호의 파장별 band 폭은 10nm 이다. 이런 광학계에서 레이저 펄스가 끝나는 부분, 즉 용융 pool의 냉각이 시작되는 부분에서 빛 신호 측정을 시작하면 용융 pool의 냉각과정에서 발생하는 신호의 변화를 측정할 수 있다. 초기신호를 X, Y라 하고 나중 신호를 X', Y'라 하면 신호분석에 대한 algorithm[4] 은 $\ln(X/Y)$, $\ln(X/X')$ 와 $\ln(Y/Y') - 1.79\ln(X/X')$ 을 이용하면 초점변화와 용융 pool의 크기 변화를 알 수 있다. 여기서 X', Y'의 값은 신호 측정간격 시간 후의 X, Y 신호 값이다.

매 펄스에서 레이저 빔이 조사되는 동안 용융 pool의 크기는 조금씩 커진다. 그러나 펄스 끝부분에서는 급격히 냉각이 시작되며, 이때 용융 pool의 직경은 한번 멈추다가 작아지게 되고 용융 pool의 온도는 계속해서 내려간다. 용융 pool의 크기가 잠시 멈추는 곳의 직경을 용융 pool 크기라고 가정하면, 냉각 직전의 $\ln(X/Y)$ 값으로 초점의 변화를 알 수 있다. 또한 레이저 출력의 변화는 냉각 직전의 $\ln(X/X')$ 값으로 알 수 있다. 이 값의 변화로 용융 온도의 감소를 알 수 있고, 이로 인해 레이저 출력의 변화를 알 수 있다.

용융 pool의 크기의 변화는 $\ln(Y/Y') - 1.79\ln(X/X')$ 최소 값의 변화로 알 수 있다. 구해진 최소 값이 도달하는 시간으로 용접 pool의 집광된 레이저 spot 크기를 알 수 있다. 매 펄스 사이에 쉬는 시간의 $\ln(Y/Y') - 1.79 \ln(X/X')$ 값을 측정하면, 그 시간 사이의 용접 pool의 크기를 알 수 있다. 시간 변화에 따르는 용접 pool의 크기는 용접 깊이와 상관관계가 있다. 즉, 용입 깊이가 깊으면 용접 pool의 크기가 천천히 작아지고, 용입 깊이가 낮으면 용접 pool의 크기가 빨리 작아진다. 이러한 상관관계를 이용하여 용입 깊이, 초점 위치 등을 파악할 수 있고, 이러한 상관관계 등을 규명하여 space grid의 레이저 용접을 감시할 수 있다.

2. 검출 sensor

용융부에서 발생하는 빛 에너지의 파장에 따라 검출된 신호는 검출 sensor에 의하여 전기신호로 변환된다. 사용된 검출 sensor는 Si-Photo diode 로 사진 2-1과 같은 ThroLab 사의 DET 100 model을 사용하였다.

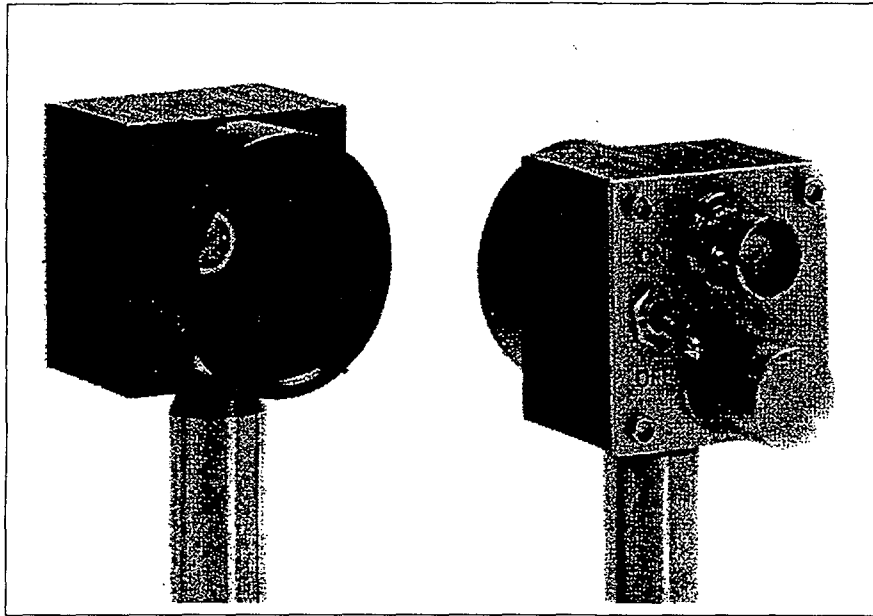


사진 2-1. 검출기 (Detector)

DET 100 model은 직경 25mm 규격의 일반적인 용도의 나사 규격을 갖고 있어 장치구성시 많은 도움이 되었다. DET 100 model의 광학적 특성은 그림 2-8 과 같다. 이번 설계에 필요한 파장은 950nm 와 530nm의 두 파장이다. 그러나 추후 색수차의 조건에 따라 630nm 와 750nm 및 900nm 파장을 선택할 수 있게 사용하여야 하므로, 다양한 파장에 따라 감도의 최적화가 필요하다. 그림 2-8에서 보는바와 같이 950 nm 에서의 감도는 60A/W 정도이며, 530 nm에서는 1/2정도의 감도를 갖는다.

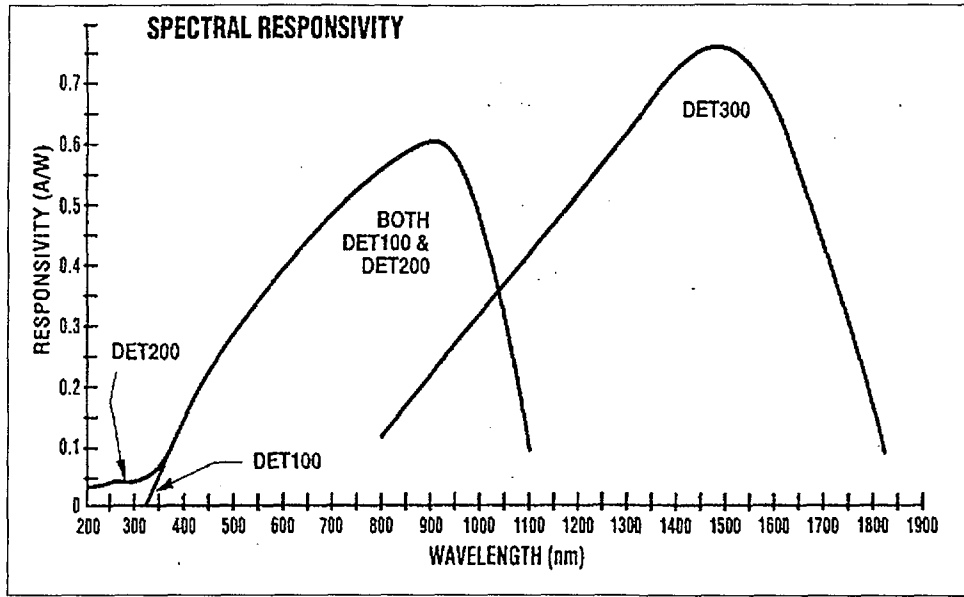


그림 2-8. 검출기 파장별 반응률 (Spectral Responsibility of Detector)

검출기의 내부회로도에는 그림 2-9 와 같다. 이 detector는 내부에 bias 용 전원을 갖고 있어, 외부 noise로부터 안전하게 동작할 수 있다. 또한 sensor 의 응답속도가 10ns로, 용접 중 발생하는 신호를 100kHz 이상 검출할 수 있다.

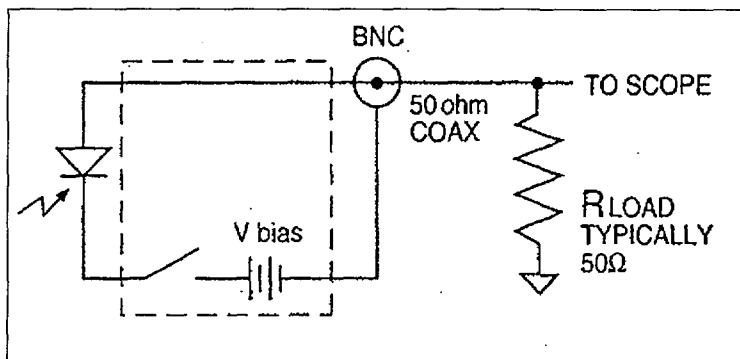


그림 2-9. 검출기 회로도 (Circuit of Detector)

3. 반사거울

감시장치에 사용되는 거울은 2 가지 종류를 사용하였는데, 약 900 nm 이하의 파장만을 투과하는 Hot mirror 와 700nm 이상만 투과하는 cold mirror 이다. 사용된 거울들의 파장별 투과율은 표 2-2와 같다. 표 2-2와 같은 거울을 적절히 이용하면 파장 검출기에서 수광할 수 있는 레이저 파장의 투과율을 적절히 분배할 수 있다.

표 2-2. 파장별 투과율 (Transmittance of Mirrors)

파장	530nm	632nm	750nm	950nm
Hot Mirror	90%	93%	93%	45%
Cold Mirror	0%	0%	83%	88%

가. 주 레이저 빔 반사용 hot mirror

주 레이저 빔은 입구 측과 출구 측이 90도 방향으로 놓여 있으므로 이런 구조에서 1064nm 의 레이저 빔을 반사하기 위해서 Hot mirror를 사용하여야 한다. 여기에 사용된 hot mirror 의 투과율 곡선은 그림 2-10 과 같다.

여기서 Nd:YAG 레이저 빔의 반사율은 거의 100%에 가깝다. 그러나 이번에 사용한 신호의 파장은 530nm 와 950nm 의 파장을 사용하므로 이들 파장은 hot mirror에서 적당한 투과율로 투과된다. 이번에 사용된 530nm 파장에서는 약 100%의 투과율을 가지고, 950nm 파장에서는 약 60%의 투과율을 갖는다. 또한 hot mirror 는 60mm x 40mm x 4t 의 규격으로 제작하였다.

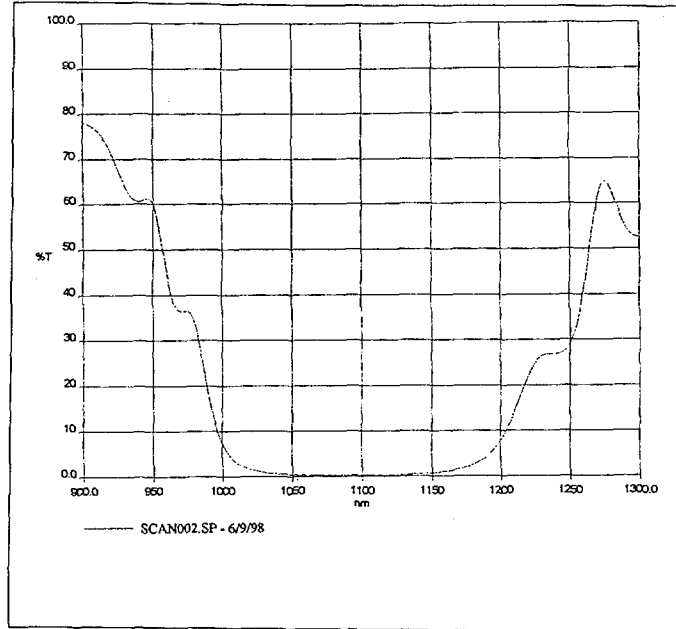


그림 2-10. 레이저 빔 반사용 Hot mirror 투과율
(Transmittance of Hot Mirror for Laser Beam)

나. 신호 측정용 거울

그림 2-14에서 보는바와 같이, 용융 pool에서 방출된 빛의 측정신호는 hot mirror를 통과하여 cold mirror를 지나면서, 530nm 와 950nm 의 파장이 적당히 분배되어 검출기에서 감응된다. 또한 집광부분의 레이저 형태를 감시하기 위하여 camera를 설치한다. camera의 영상전달을 위하여 첫 번째 hot mirror를 통과한 신호는 두 번째 hot mirror를 사용하여 감시한다. 이때 사용된 hot mirror 의 파장별 투과율은 530nm 에서 45-50%, 950nm에서 약 90%의 투과율을 갖는다. 따라서 cold mirror 의 투과율인 530nm에서 0%, 950nm에서 88%를 곱하면 최종 검출기에 들어가는 신호의 값을 알 수 있다. 따라서

최종 투과율은 530nm에서는 40%, 950nm 검출기에서는 80%의 투과율을 알 수 있다. 그러나 530nm 검출기에 950nm 파장의 투과율은 5.4% 정도이나, 950nm 검출기에 530nm 파장의 투과율은 0%에 가깝다. 따라서 이런 배열의 거울 구조에서 파장별 검출은 매우 양호하다.

이때 사용된 신호 검출기용 hot 및 cold mirror의 투과율은 그림 2-11과 같다.

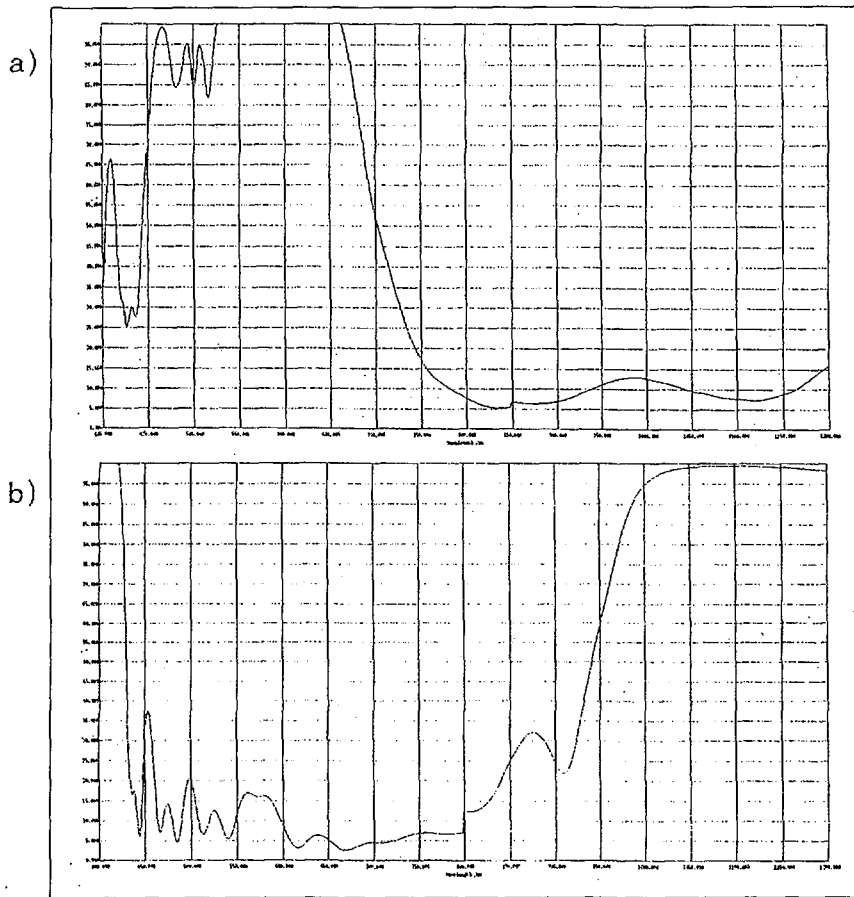


그림 2-11. 신호 측정용 거울의 투과율(a)Hot Mirror, b)Cold Mirror)

(Hot and Cold Mirror Transmittance for Signal Detectors)

4. 레이저 빔 전달 광학계

광섬유를 이용한 레이저 빔 전달에서 여러 개의 광섬유를 사용할 경우 광섬유와 광섬유사이에 렌즈를 이용한 집광장치를 설치 사용해야한다. 이번 설계에서 입구측의 광섬유 직경은 $800\ \mu\text{m}$ 출구 측의 직경은 $1000\ \mu\text{m}$ 를 기준으로 설계하였다. 이는 입, 출구각의 각도를 동일하게 유지하여야 출구점에서의 spot size 가 커지기 때문이다. 실제 연구소가 보유한 Rofin-sinar laser의 입구측 측정된 광섬유의 F# 값은 3-4 정도이다. 또한 레이저의 최대출력인 1.2KW의 전송을 위하여, 사용되는 렌즈 및 hot mirror의 내구성을 고려하여 초점거리는 약 100 mm, 렌즈의 직경은 약 38mm 정도를 사용하였다. 이때 출구측의 광섬유에 입사되는 입사각도를 입구측과 동일한 F#을 갖도록 하였다. 그러면 렌즈의 수차에 의하여 집광된 spot 크기가 커지므로 입구 광섬유의 직경 $800\ \mu\text{m}$ 보다 큰 광섬유를 사용하여야 한다. 그림 2-12는 설계된 렌즈 군이다.

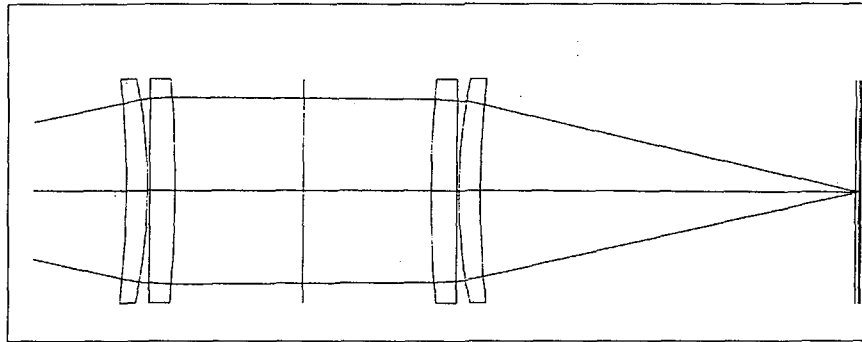


그림 2-12. 레이저 전송 렌즈 군 단면 (Lens Profile for Laser Beam)

설계된 collimate 렌즈와 집광 렌즈는 동일한 규격을 사용하였다. 렌즈의 재질은 SF-11을 사용하였으며, Meniscus 렌즈와 RCX 형 렌즈를 사용하였다. Meniscus 렌즈의 반경은 69.5mm 와 130.0mm를 사용하였고 RCX 렌즈의 반경은 153.4mm를 사용하였다. 또한 렌즈의 양면은 1064nm 의 AR 코팅을 하였다. 이런 렌즈의 배열을 갖고 집광된 경우를 가정해서 spot 크기를 simulation 하였다. 그림 2-13의 경우 spot의 크기는 위치별로 변화하나, 초점위치에서 820nm 정도의 크기를 갖는다. 직경 1000 μm 의 광섬유로 집광할 시 초점의 변화가 $\pm 0.2\text{ mm}$ 에서 직경 크기변화는 약 100 μm 정도이다

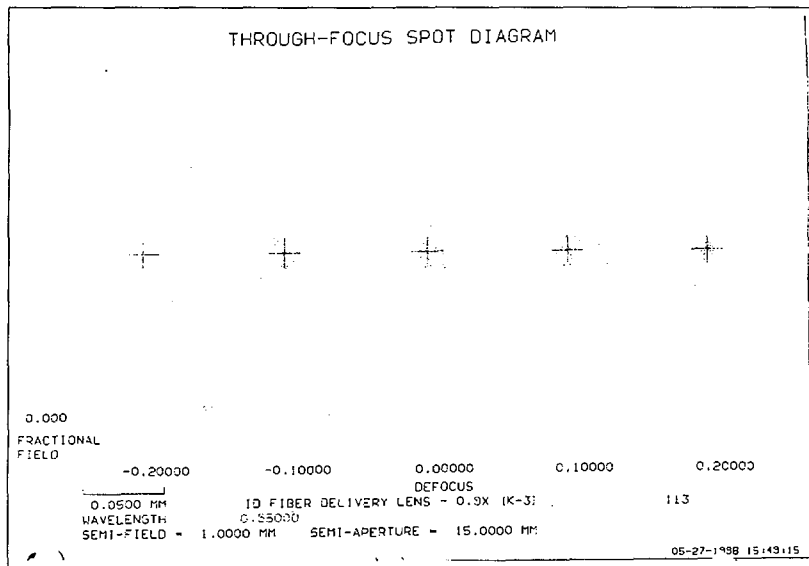


그림 2-13. 위치별 집광 빔 크기(Through-Focus Spot Diagram)

그러므로 1000 μm 의 광섬유에 집광할 시 초점의 변화는 $\pm 0.2\text{mm}$, spot 의 크기는 약 900 μm 정도이므로 무리 없이 집광시킬수 있다.

5. 장치설계 및 제작

기본적인 광학계 설계를 마친 후 장치의 설계 및 제작에 들어간다. 설계의 기본 개념은 주장치 안에 전송 광학계, mirror 및 filter 류의 광학부품, 신호 detector, 집광 감시를 위한 camera 및 monitor등 기본 부분과 신호 수집 및 전원 공급장치의 전자 부분이다. 그림 2-14 는 감시장치의 평면도이다. 장치의 크기는 600mm x 300mm x 110mm 정도의 크기를 갖는다. 또한 광축의 높이는 평면에서 32 mm의 위치하여 설계하였다.

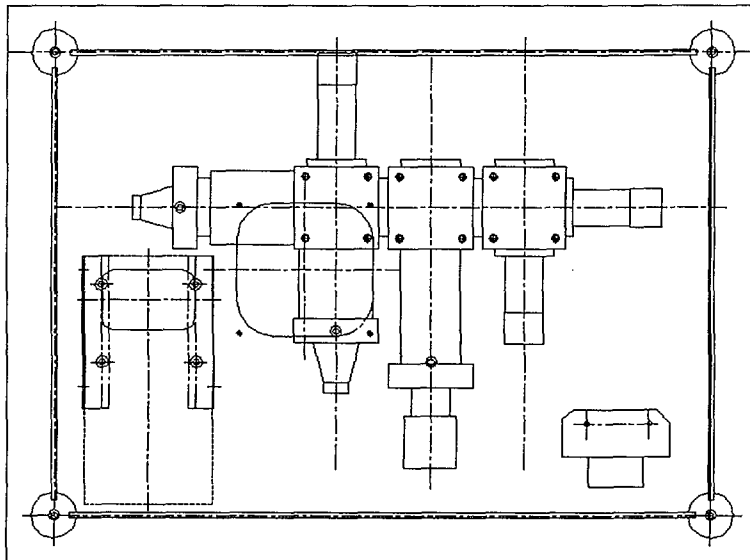


그림 2-14. 감시장치 평면도 (Layout of Monitoring System)

레이저 빔이 출구 쪽 광섬유에 집광시키기 위해서는 입구 측 레이저 빔의 위치조절이 필요하다. 따라서 입구 측의 collimate lens 군은 X-Y 방향으로 이동할 수 있게 설계하였으며, 출구 측의 집광 렌즈는 Z 축으로 이동하여 위

치를 조절할 수 있게 설계하였다. 조절가능 변위는 각각 $\pm 5\text{mm}$ 정도의 여유를 가지고 위치정밀도는 $80\mu\text{m}$ 정도를 갖게 설계하였다.

제작된 레이저 감시장치의 내부 사진은 사진 2-2와 같다. 감시장치 평면도에서 보는바와 같이 추후 검출 파장의 변화에 따른 변형을 염두에 두고 제작하였다. 사진에는 camera monitor가 제거된 상태의 사진이며, 레이저 전송된 출력을 측정할 수 있는 추가기능을 설치하였다. 제작된 장치는 레이저가공의 감시기능 뿐 아니라 추후, 외부장치의 제어 및 추가적인 파장검출을 위하여 변형 및 기능을 쉽게 하기 위해 package 형으로 제작하였다.

장치제작의 각 부분의 실제설계도는 부록에 있다.

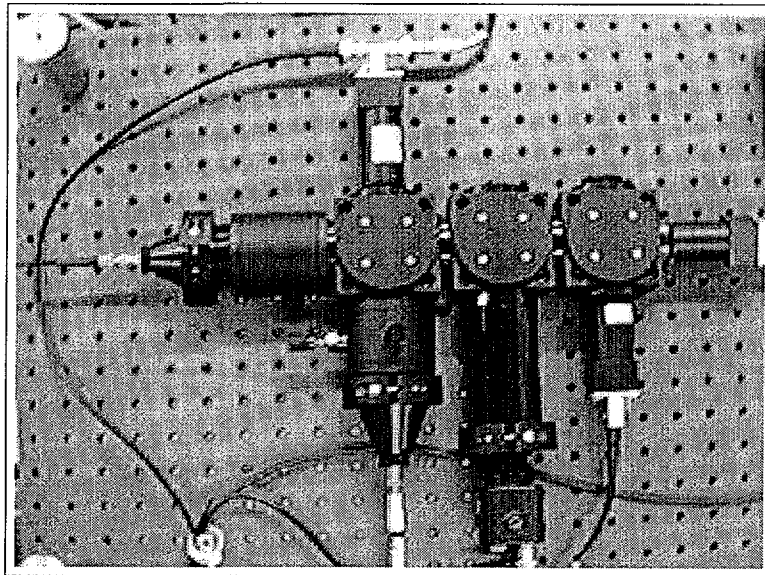


사진 2-2. 제작된 레이저 감시장치 (Laser Monitoring System)

제 3 장 Space grid 용접 및 신호 분석

제 1 절 서 언

Space grid의 용접상태는 전체적으로 용접 구조물의 금속적인 요인 및 용접 구조의 형상에 따라 많이 다르게 된다. 또한 용접 도구인 레이저 빔의 광학계에 따라 변화가 많다. 이번 space grid의 레이저 용접에서는 cross point의 레이저 용접에 대하여 용접상태를 집중적으로 실험, 분석하였다. 레이저 변수는 첨두출력, 평균출력 및 초점거리의 변화를 변수로 하여 용접상태 변화를 분석하였다. 또한 용접 중 초점의 변화가 용입상태에 어떤 영향을 미치는가를 관찰하였다.

용접 상태의 감시는 레이저 용접 중 발생하는 빛의 파장별 신호로 평가하였고, 용접부는 육안 및 파괴 검사에 의하여 분석 비교하였다. 용접부의 용접상태가 양호한 부분과 신호의 특성을 비교분석 하였고, 신호분석으로 레이저 용접상태를 추정하였다. 매 용접마다 수집된 파장별 data를 분석하여, 용입깊이를 추정하였다. 또한 용접 data 처리기술을 이용하여, 초점위치를 실시간으로 제어할 수 있는 방식을 고안하였다.

Space grid의 용접 및 용접감시를 구분해 보면 다음과 같다.

1. 레이저 용접 : space grid의 레이저 용접에서 평균출력에 의한 용융체적 분석.

2. 레이저 용접 중 방출되는 신호 분석 : 용접 상태에 따라 변화하는 파장별 신호의 특성분석.

이 장에서는 laser 용접과 용접 pool 에서 방출되는 파장별 신호의 분석에 대해서 기술하고자 한다.

제 2 절 Space Grid의 레이저 용접

Space grid 교차점 레이저 용접의 변수는 표 3-1과 같다. 이번 grid 용접에서는 반복율과 펄스 폭을 고정하였고 보호가스는 Ar gas를 사용하였다. 가변변수로는 첨두출력을 변화하여, 즉 평균출력을 변화하여 용접하였다.

Space grid 교차점의 용접부는 레이저가 윗 방향에서 조사하므로 Zr-4 재질의 모재가 흘러 내려 초점거리가 변화할 것이다. 교차점 용접시 레이저 펄스 수에 따라 모재의 용융 깊이와 집광렌즈의 초점거리가 다르게 나타난다. 그러나 집광렌즈의 광학계에서 초점부근에 심도가 있기 때문에 그 심도를 적절히 감안하여 실험 및 분석하였다.

표 3-1. 레이저 용접 변수(Laser Weld Parameters)

레이저 변수	변수
평균출력	320 - 420 W
반복율	17 PPS
펄스폭	9 msec.
펄스수	12 pulse

1. 집광렌즈 이송에 따른 용접상태

레이저 반복율은 17PPS, 펄스폭은 9msec, 펄스 수 12 pulse로 하였고 그림 3-1 은 두 가지의 평균출력과 용접 중 이송속도를 변화하여 실험한 용입 깊이를 나타낸 것이다. 이 그림에서 용입깊이는 출력이 크면 깊게 나타난다. 그리고 nozzle 의 이송속도가 적당해야만 용입깊이가 최대로 나타난다. 이는 용융모재가 레이저 빔을 흡수하여 용융하는데 이송속도가 너무 빠르면 집광 렌즈의 초점이 맞지않은 결과로 생각된다.

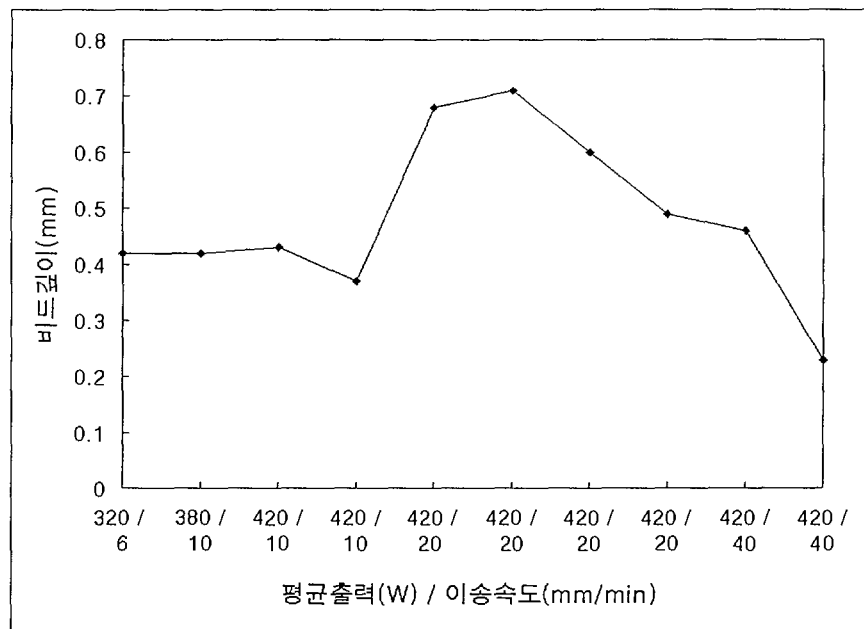


그림 3-1. 이송속도에 따른 용입깊이 (Melting Depth VS Speed)

또한 모재가 용융되면서 레이저의 초점위치가 다르게 되므로 노즐의 이동 속도와 흘러 내려오는 용융속도가 동일하면 전체적으로 깊은 용입상태를 얻을 수 있다. 그림 3-1을 보면 평균출력 420W에서는 이송속도가 약 20 mm/sec

일 때 가장 깊은 용입을 얻었다.

용접시 용접부의 열영향부 크기를 조사하였다. 그림 3-2 는 레이저 용접 시 모재의 열영향부 크기의 분포도이다. 열영향부의 크기는 같은 레이저 출력에서 용융량이 적을수록, 집광렌즈의 초점이 맞지 않을수록 크게 나타난다. 그러나 이런 조건을 벗어나면 열영향부 크기는 적을 것이다.

그림 3-2에서 평균출력 380W 에서는 열영향부의 크기가 이송속도인 6~10 mm/min 범위에서 거의 일정하나, 평균출력 420W 에서는 이송속도 10mm/min 에서 많은 열영향부를 갖는다. 이는 용접모재가 용융되어 흘러 내리는 속도보다 초점의 이송속도가 너무 늦으므로 많은 열영향부를 갖는 것으로 보인다. 그러나 이송속도가 40 mm/min 가 되면 너무 빠른 이송속도로 인해 용접 모재에 레이저 흡수율이 적어진다.

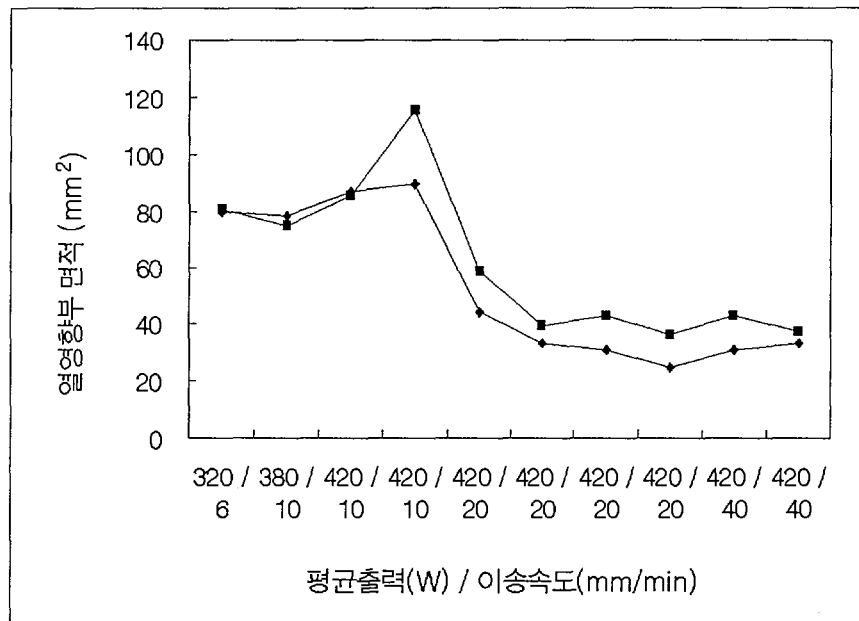


그림 3-2. 이송속도에 따른 열영향부 (Thermal Effect Area VS Speed)

2. 레이저 평균출력에 의한 용입상태

레이저 평균출력을 300 - 450W 정도로 변화하여 용접부의 용입깊이를 측정하여 나타낸 것이 그림 3-3이다. 이 그림에서 출력이 크면 용입깊이는 깊어지나 424W 이상에서는 적어진다. 이는 출력이 과대하면 용융부의 모재가 기화하여 없어지는 것으로 생각된다. 또한 초점의 변화가 없이 측정하였으므로 레이저 출력이 과대하면, 용융할 때 사용되는 열량보다 열영향부에 많은 에너지를 사용한 것으로 생각된다. 따라서 초점한 용접에서는 적당한 레이저 출력으로 최대의 용입깊이를 얻을 수 있다.

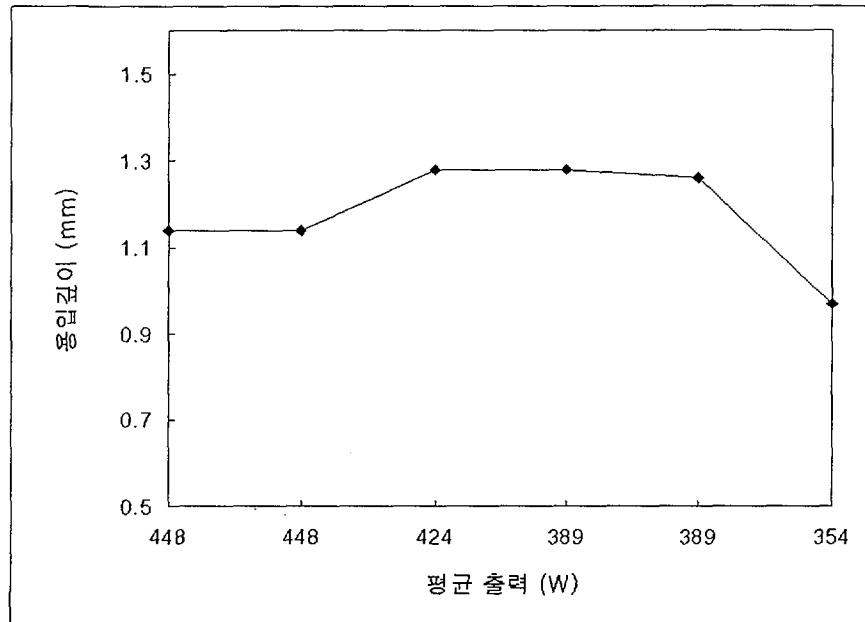


그림 3-3. 레이저 출력에 따른 용입깊이 (Melting Depth VS Laser Power)

레이저 용접 중 초점의 위치를 변화시키지 않고 용접할 경우에 용융점 크기를 측정하였다. 출력변화에 따른 용융점 크기의 변화는 그림 3-4와 같다.

여기서 레이저 출력의 변화에 무관하게 용융점 크기는 거의 비슷함을 알 수 있다. 이는 모재가 레이저 빔을 흡수하여 용융하기 시작하면, 초점의 변화가 없는 한 레이저 spot 크기와 거의 비슷하게 용융점 크기를 갖는다는 것을 알 수 있다.

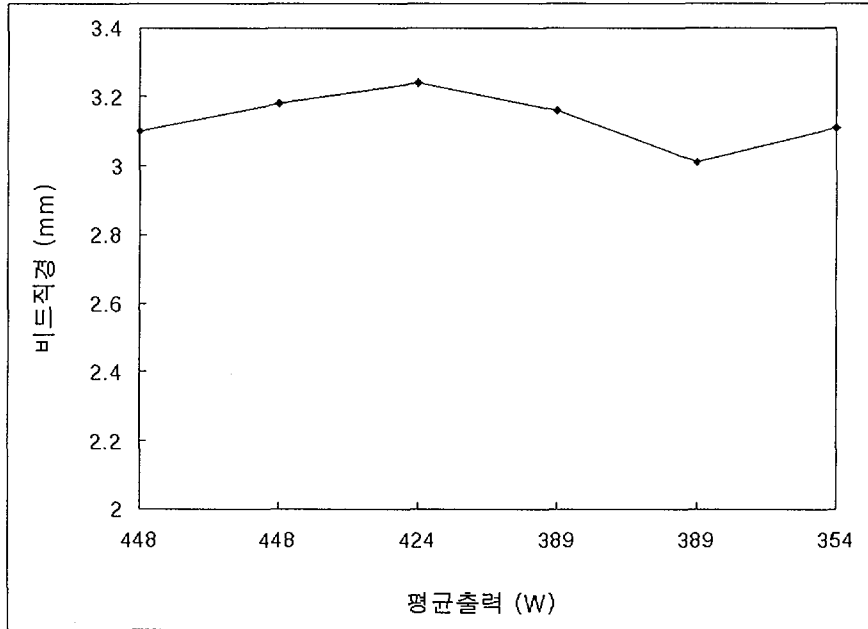


그림 3-4. 출력에 따른 용융점 크기 (Laser Spot Size VS Laser Power)

3. 초점위치에 따른 상태변화

레이저 용접에서 평균출력을 고정하고, 집광렌즈의 초점위치를 변화시켜 용접실험을 하였다. 이때 사용된 레이저 변수는 표 3-1과 같으며 집광렌즈의 이송속도는 60mm/sec 로 하여 용접실험을 수행하였다.

초점의 위치변화는 기준 초점 4.5mm를 0mm로 설정하여 용접하였다. 초점

위치는 0mm를 기준으로 -1.5mm에서 +1.0 mm 까지 0.5mm 씩 변화하였고 그림 3-5에 측정한 용입깊이를 보여준다. 용입깊이는 초점에 따라 다르나, 전체 변화 선도는 약 -0.5mm 이상에서 깊은 용입을 나타내었다.

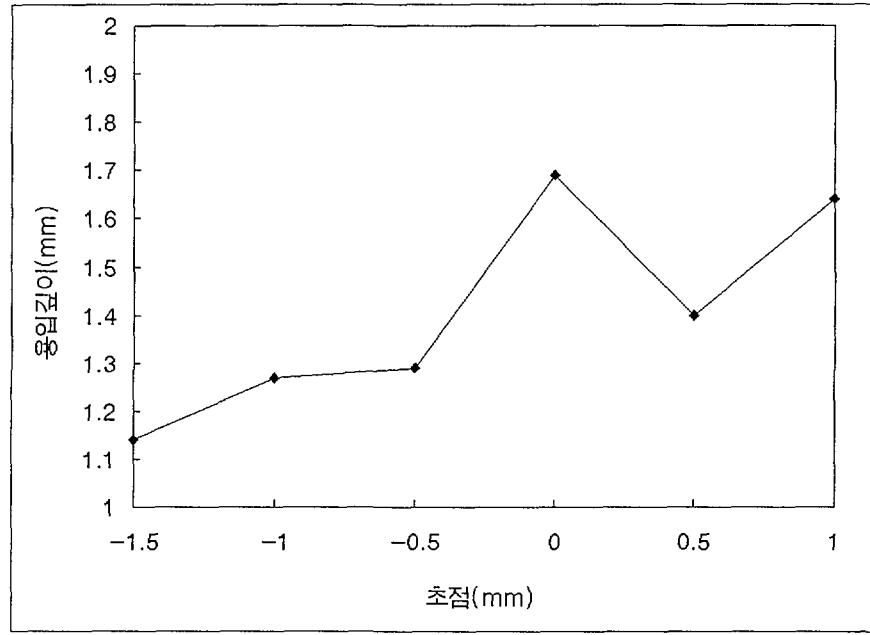


그림 3-5. 초점위치에 따른 용입깊이 변화
(Melting Depth VS Focus)

4. Space Grid의 레이저 용접

분석된 space grid 레이저 용접 시편의 data를 갖고, 실제 17 X 17 space grid의 교차점 용접을 수행하였다. 레이저 용접시 주변공기와의 오염과 산화 방지를 위하여 Ar gas를 사용하였고 주로 사용된 Ar gas의 유량은 용접 nozzle 끝부분에서 20psi 상태를 유지한 약 120 liter/min이다. 실험에 사용

된 용접 nozzle 의 직경은 약 8.0 mm이고 표 3-2 와 같은 변수로 space grid 용접을 수행하였다.

표 3-2. Space grid 용접 변수
(Laser Welding Parameter for Space Grid)

변수	변수 값
평균출력	400-420 W
반복율	17 PPS
펄스폭	9 msec.
펄스수	12 -14 pulses
보호가스	순수 Ar.
초점거리	약 120 mm
노즐크기	직경 8.0mm
spot size	약 2.3 mm

레이저 용접기로 용접된 space grid의 전체 모양은 사진 3-1 과 같다. 사진의 space grid는 17 x 17 의 W/H 형이며 현재 KNFC 사에서 생산되는 동일한 형태이다.

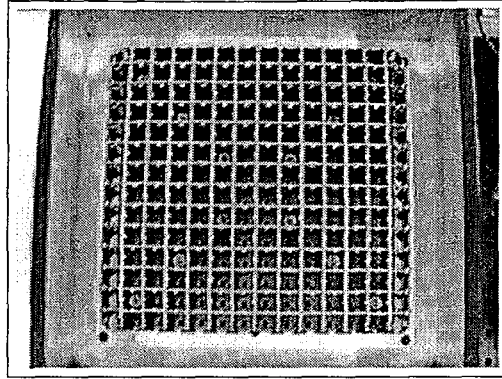


사진 3-1. PWR Space Grid

사진 3-1은 space grid 전체모양의 교차점이고, 사진3-2는 교차점 하나의 확대된 사진이다. 용융점 크기의 직경은 2.7 mm 정도이며, 좋은 용접상태를 보였다.

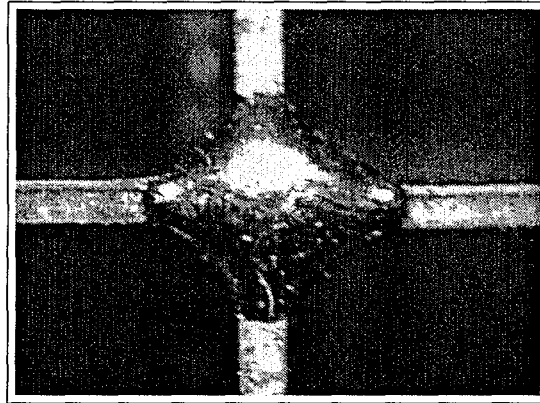


사진 3-2. PWR Space Grid 교차점 (Cross Point of PWR Space Grid)

레이저 용접에 사용된 펄스 형태는 사진 3-3과 같다. 사진 3-3에서 레이저 펄스의 길이는 9 msec를 보여준다. 또한 펄스발진의 처음부분에서 아주 높은 첨두출력이 나타났다.

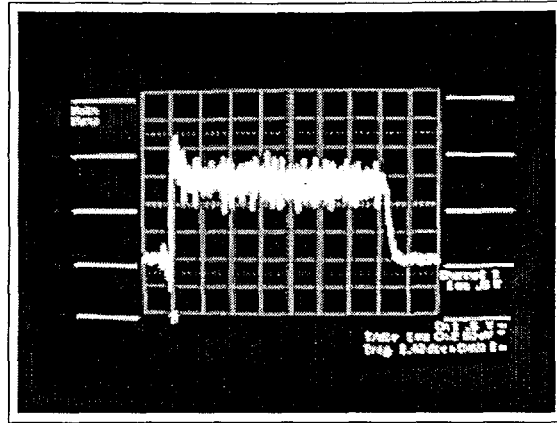


사진 3-3. 레이저 펄스 파형(Laser Pulse Wave)

용접된 교차점의 용입단면을 관찰하기 위하여 용입시편을 절단한 다음, 연마지의 입자크기 180, 320, 600, 1200 순으로 연마하였다. 최종적으로 $0.05\mu\text{m}$ 알루미나 분말을 이용하여 polishing 하였다. polishing 된 시편은 methanol 95%와 HNO_3 5%를 섞은 혼합 용액으로 전해 에칭하였다. 사진 3-4는 교차점의 레이저 용접 단면사진이다. 사진 3-4에서 용입깊이는 약 2.7mm 정도이며, 용입주변의 아무런 결함도 발견하지 못했다.

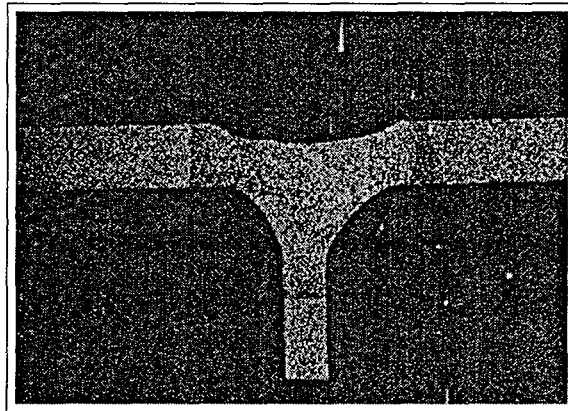


사진 3-4. 교차점 용접단면 (Cross Section of Weld)

제 3 절 용접 Pool에서 발생하는 용접 신호 분석

용접 pool에서 발생하는 빛은 집광렌즈를 이용하여 전송 광섬유로 집광되며, 집광렌즈의 색수차를 이용하여 용접 상태를 감시한다.

space grid 교차점 용접 후 용접면에서 방출되는 용접 빛의 신호는 집광렌즈를 통하여 $1000\mu\text{m}$ 의 광섬유로 집광되어 되 돌아온다. 즉 $1000\mu\text{m}$ 의 광섬유는 레이저 빔을 전송하는 기능과 용융 pool의 신호 수집을 검출기로 전송하는 역할을 한다.

사용된 집광렌즈의 재질은 SF-11을 사용하였고, 초점거리는 200mm 이다. 950nm와 530nm 파장의 빛은 색수차가 많으며, 신호 수집용 파장으로 사용하였다.

950nm는 Nd:YAG 레이저의 파장인 1064nm와 광학적으로 거의 유사하기 때문에 선정하였다. 그리고 1064nm 파장은 용접시 950nm 파장의 신호 검출기에 거의 영향을 주지 않는다.

530nm 파장의 선택은 Si 검출기의 크기와 속도의 검출영역에서 색수차가 950nm와 멀리 떨어져 있기 때문에 선정하였다.

사용된 530nm와 950nm의 신호는 Si 검출기에서 충분히 검출할 수 있으며, 10nm의 폭을 갖는 band pass filter에 의하여 광섬유로 역 전송된 950nm와 530nm 신호도 충분히 감지할 수 있다. 530nm, 950nm 검출기에서 나온 각 신호는 A/D converter를 통하여 computer로 전송되며, sampling speed는 약 100 KHz로, Sampling point마다 200회 이상 수집할 수 있다. 또한 sampling은 레이저 pulse 시작으로부터 적당히 지연시킨 시간부터 가능하다. 지연시간은 0.1msec 간격으로 조절할 수 있다.

PWR space grid의 교차점 용접은 펄스형 Nd:YAG 레이저로 수행하였으며, 레이저 용접 조건은 17 Hz, 9msec이며 cross point를 용접하였다.

8.5msec 지연시간부터 매 펄스마다 10 μ sec 와 250회의 신호를 측정하였다. 또한 용접시 펄스 수가 12 회면 용접이 가능하기 때문에 12 pulse 까지 사용하였다.

레이저 신호는 950nm(X) 와 530nm(Y)의 두 파장을 수집하였다. 레이저 신호의 수집은 레이저 펄스가 거의 끝나는 8.5msec 부터 10 μ sec 간격으로 250 회를 수집하였다. 여기서 950nm(X')의 값은 10 μ sec 후의 950nm 파장의 크기이며, 530nm(Y')의 값은 10 μ sec 후의 530nm 파장의 크기이다. 레이저 용융 pool의 변화는 용융부의 냉각과정에서 일어난다. 즉 레이저 빔이 off 하는 순간부터 용융 pool 의 크기가 급속도로 응축된다. 신호 $\ln(Y/Y')$ - 1.79 $\ln(X/X')$ 의 계산 값을 처음부터 계산하여 최소 값이 나타나는 곳까지의 시간을 계산하면, 집광렌즈의 초점 크기와 용융 pool 의 크기가 같을 때까지의 시간을 알 수 있다. 계산한 시간은 펄스와 펄스사이에서 측정이 가능하다.

시간 변화에 의한 spot 크기 계산 방정식인 $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ 식으로 용접 pool의 크기 변화를 알 수 있고, 이 변화를 감지하여 용접 pool 의 형태를 알 수 있다.

레이저 변수인 반복을 17 Hz, 펄스폭 9msec 를 기준으로, 레이저를 발진 하였으며 그림 3-6 에서는 평균출력이 424W, 그림 3-7 에서는 389W 로 용접 하였을 경우 용융 pool에서 발생하는 $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ 분포값을 측정 하여 결과를 그림 3-4 와 비교하였다. 그림 3-6과 3-7을 비교한 최대 값은 그림 3-7이 그림 3-6 보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 3-4에서 직경의 크기를 비교하면, 평균출력 424W에서 크게 나타나는 것과 동일하다. 여기서 x 축은 매 펄스 종료후 10 μ sec 씩 250 개의 data값을 수집한 횟수이며, Y축은 $\ln(Y/Y')-1.79\ln(X/X')$ 의 계산 값이다.

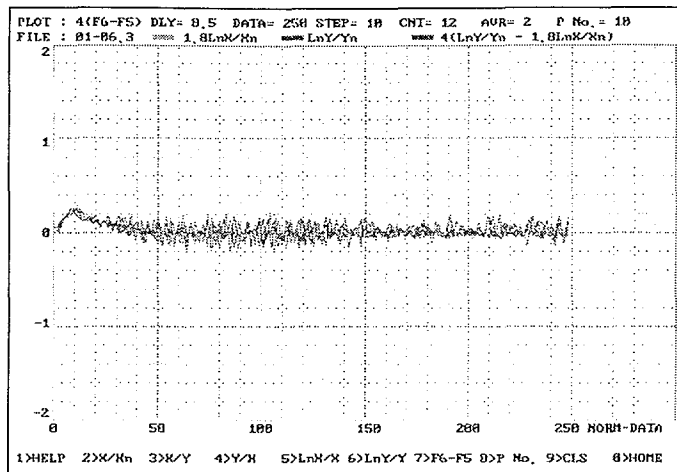


그림 3-6. 424 W에서 $\text{Ln}(Y/Y') - 1.79\text{Ln}(X/X')$ 값
(Decay of $\text{Ln}(Y/Y') - 1.79\text{Ln}(X/X')$ in 424W)

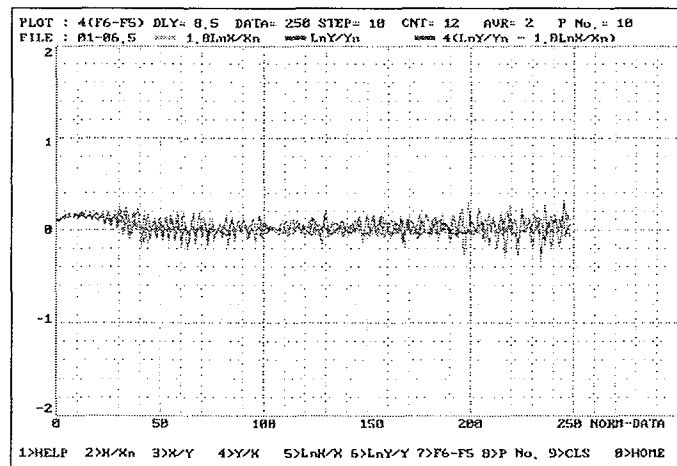


그림 3-7. 389 W에서 $\text{Ln}(Y/Y') - 1.79\text{Ln}(X/X')Y'$ 값
(Decay of $\text{Ln}(Y/Y') - 1.79\text{Ln}(X/X')$ in 389W)

이는 실제의 용융부 직경의 크기를 측정 한 값과 비교하여 잘 맞는 경향이 있다. 이번에는 레이저 변수인 평균출력 424W, 반복을 17 Hz, 펄스폭 9msec 를 기준으로 펄스별 용융상태를 검사하였다. 그림 3-8은 $\ln(Y/Y') - 1.79 \ln(X/X')$ 의 값을 여러 번 반복한 신호의 배열이고 여기서 X 축은 펄스 수를 나타내고 Y 축은 $\ln(Y/Y') - 1.79 \ln(X/X')$ 의 값을 나타낸다. 그림에서 최소 값은 용접 pool 의 크기와 용접 깊이를 얻는 중요한 data 가 된다.

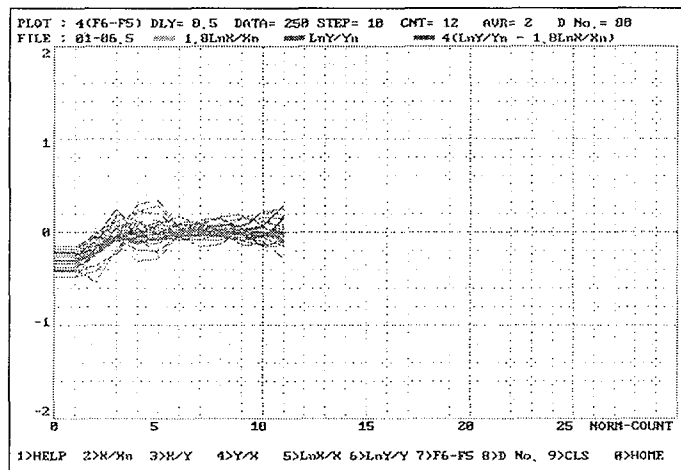


그림 3-8. 424 W에서 $\ln(Y/Y') - 1.79 \ln(X/X')$ 값
(Decay of $\ln(Y/Y') - 1.79 \ln(X/X')$ in 424W)

그림 3-9 는 용접 중 발생하는 신호의 크기이다, 이 신호에서 보면 3 또는 4 번째 레이저 펄스가 지나야만 용융 pool에서 나오는 신호가 안정됨을 알 수 있고 그후의 신호크기는 거의 일정하다. 따라서 이 신호의 분석으로도 5번 펄스 이후 레이저 용접이 안정됨을 알 수 있다.

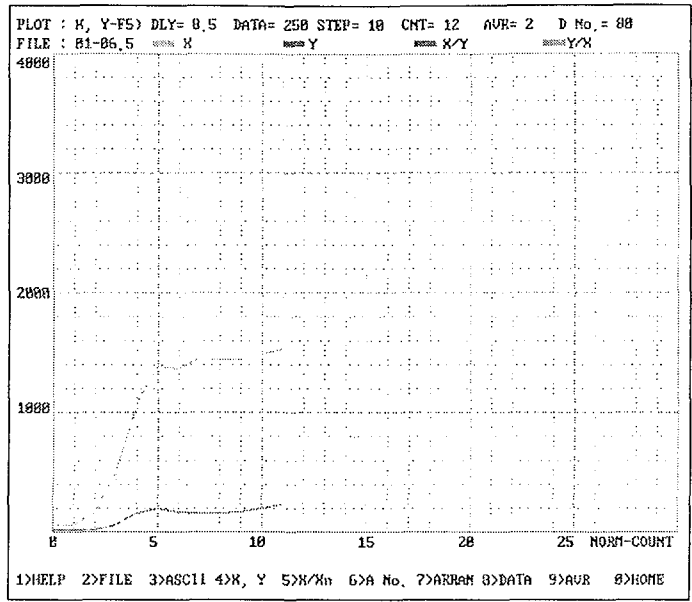


그림 3-9. 레이저 용접 신호
 (Laser Welding Signal of 530, 950nm)

제 4 장 제어기술연구

제 1 절 용접 감시 장치 구성

레이저 신호검출을 위하여 실리콘 포토 다이오드, 고속 12 bit 아날로그/디지털 변환회로와 동기/지연처리 및 제어를 위하여 RISC 마이크로 프로세서로 회로를 구성하였다. 측정된 데이터는 병렬 인터페이스로 데이터를 전송하여 IBM PC에서 처리하도록 하였다. 장치전체의 구성은 그림 4-1 과 같다.

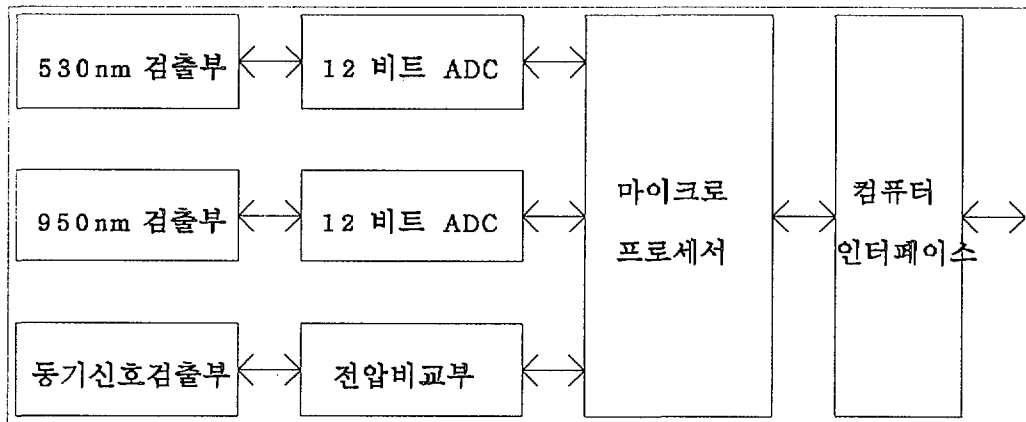


그림 4-1. 용접 감시 장치 구성도
(Diagram of Weld Monitoring System)

사용되는 각 부분별 구성과 기능은 다음과 같다.

1. 광 신호 검출부

용운 pool에서 발생하는 빛인 530nm 와 950nm 파장의 광 신호 및 동기를 검출하는 부분으로 그림 4-2 와 같이 구성되었다.

그림 4-2에서 광 신호 레벨조절은 다이오드 출력제어 회로에서 다이오드의 cathode 에 접속되는 load 저항을 변화시켜 조절하고, 동시에 증폭도 제어회로에서 amplifier 의 amplitude를 제어한다.

여기서 얻은 제어신호는 마이크로 프로세서로부터 입력된 데이터를 shift register 에 저장하여 제어한다.

제작된 보드와 다이오드는 각각 사진 4-1과 사진 4-2와 같다.

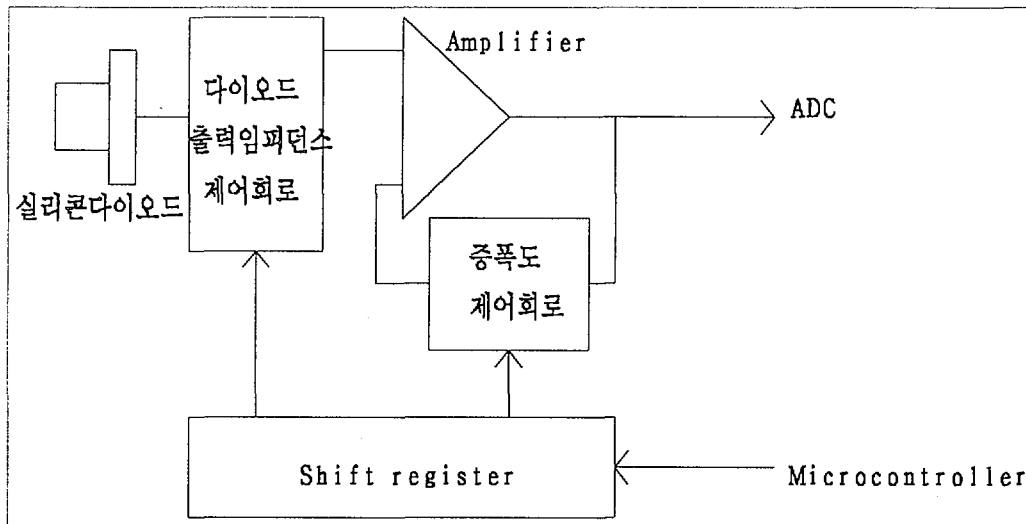


그림 4-2. 광 신호 검출부 구성도
(Diagram of Optical Signal Detector)

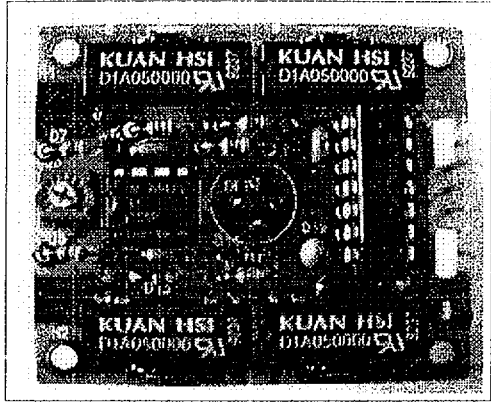


사진 4-1. 광 신호 검출부
(Detector of Optical Signal)

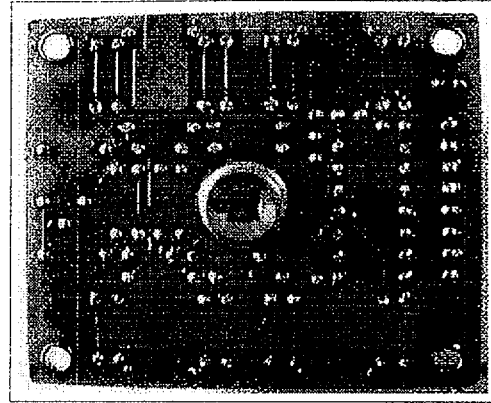


사진 4-2. 실리콘 포토다이오드
(Si Photo-Diode)

2. 마이크로 프로세서 및 컴퓨터 인터페이스

마이크로 프로세서는 RISC(Reduced Instruction Set of Computer) 방식의 1-chip 마이크로 콘트롤러를 사용하였으며 내장된 입/출력 포트를 사용하여 IBM PC 의 병렬인터페이스로 접속하였다. 이외에도 5 μ s의 변환속도를 가진 12 비트 A/D 변환기를 같은 보드에 내장하여 구성하였다. 장치구성은 그림 4-3과 같다.

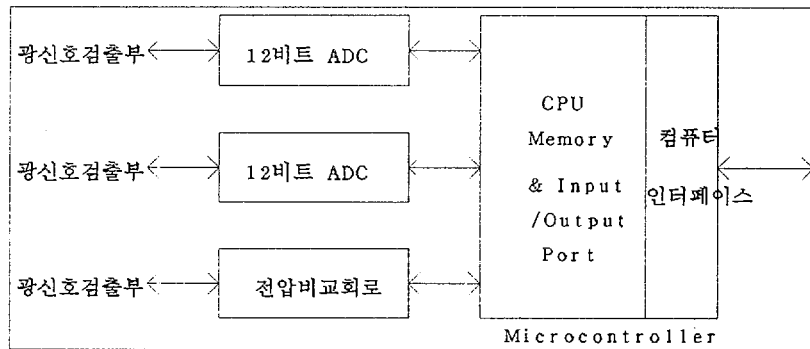


그림 4-3. 마이크로 프로세서 및 컴퓨터 인터페이스 구성도
(Diagram of Micro-processor and PC Interface)

마이크로 프로세서 및 컴퓨터 인터페이스 보드는 1 장의 보드로 구성하였으며 제작된 장치는 사진 4-3과 같다.

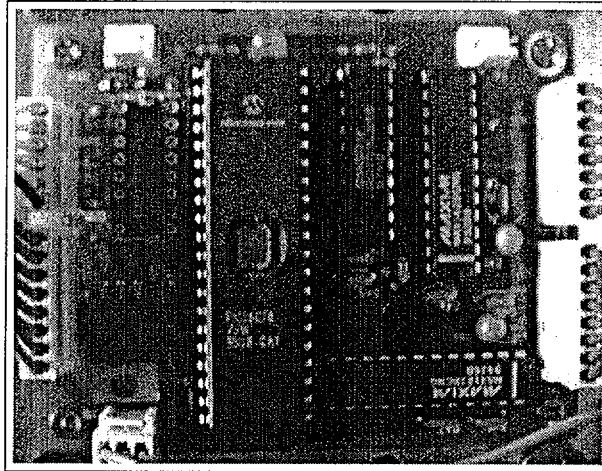


사진 4-3. 마이크로 프로세서 및 컴퓨터 인터페이스 보드
(Micro-process and PC Interface Board)

제작된 광 신호의 검출장치 재원은 다음과 같다.

규 격	재 원
분 해 능	12 BIT
측정속도	5 - 255 μ sec
동기 지연시간	0.01 - 25.5 ms
컴퓨터 인터페이스	Centronics Interface

제 2 절 광 신호 측정 및 분석 프로그램 구성

개발된 프로그램은 광 신호 측정에 관련하여 용접감시장치 제어를 위한 측정 프로그램과 측정된 신호를 각 함수별로 연산하여 그래프로 표시하는 분석 프로그램으로 분리되어 구성되었다. 각 프로그램에는 사용자 편의를 위하여 화면에서 help를 누르면 현재 화면에서의 사용법을 문자로 표시해주는 help 기능을 넣었다. 각 프로그램과 기능은 다음과 같다.

1. 광 신호 측정 프로그램

광 신호 검출을 위한 프로그램으로서 프로그램 flowchart 는 그림 4-4 와 같다.

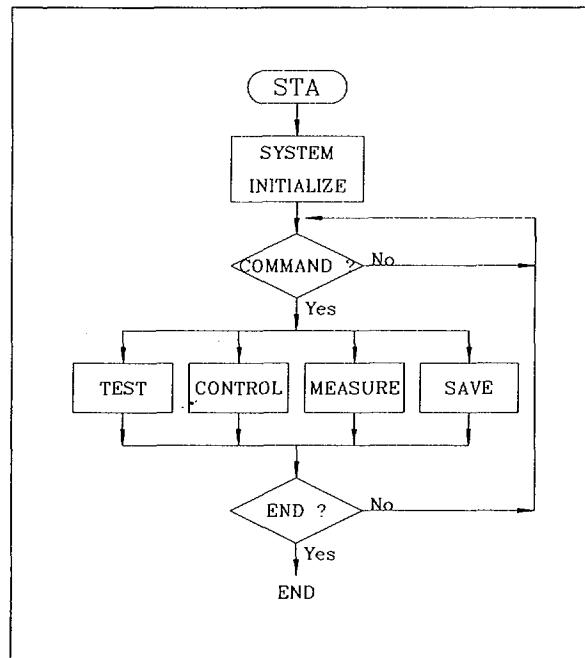


그림 4-4. 광 신호 측정 프로그램 flowchart
(Flow Chart of Optical Signal Program)

그림 4-4 와 같이 광 신호 측정 프로그램은 용접감시장치 동작에 관련된 데이터를 초기에 설정 후 IBM PC에서 측정에 관련된 제어를 하는데 각 기능은 다음과 같다.

- 장치 초기화 : 이전 동작시 사용된 상태를 광 신호 검출장치로 전송
- 테스트 : 광 신호 측정장치의 A/D 변환기능을 테스트하는 기능으로 delay 없이 1 회 측정 후 데이터 전송.
- Control : 광 신호 측정에 관련된 데이터를 수정하고 장치에 전송하는 기능으로 컴퓨터 표시화면은 그림 4-5 와 같고, 관련된 기능과 재원은 표 4-1 과 같다.

```

Control Data Assign

Delay Time (ns)      : 7
Measuring Data      : 58
Measuring Step (us) : 28
Pulse Count         : 688
Channel 1 Amplitude : IMPEDANCE = 2 K           AMPLITUDE = * 2
Channel 2 Amplitude : IMPEDANCE = 2 K           AMPLITUDE = * 2
Trigger channel     : TRIG POINT = 1 U

1>HELP 2>DELAY 3>DATA 4>STEP 5>COUNT 6>CH X 7>CH Y 8>TRIG 9>POWER 0>HOME
  
```

그림 4-5. 제어데이터 입력화면
(Input Screen of Control Data)

표 4-1. 광 신호 검출장치 제어기능 및 자원

(Spec. and Control Function of Optical Signal Monitoring)

기 능	재 원
동기 지연시간	0.01 - 25.5 ms
연속측정간격	5 - 255 μ sec
연속측정 데이터수	1 - 63
측정 펄스수	1 - 1000
센서저항	2, 20 200 Kohm
증폭도	1, 2, 4, 5

- 측정 : 설정된 데이터에 의해 측정을 하는 기능으로 최초 레이저 발생을 감지하여 설정된 펄스 수에 도달할 때까지 연속측정 및 측정된 데이터 전송을 한다.

- 저장: 측정 후 컴퓨터 메모리에 임시 저장된 데이터를 보관을 위하여 file name을 정하여 디스크로 저장하는 기능이다. 저장된 데이터는 차후 분석 프로그램으로 처리할 수 있다.

이상과 같은 측정프로그램은 그림 4-6과 같이 하나의 화면에서 기능선택에 따라 표시 및 화면설정이 달라진다.

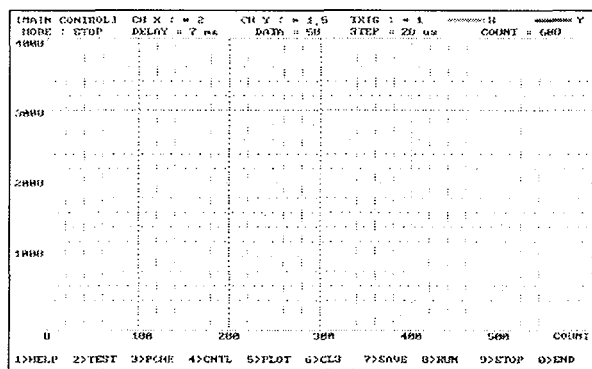


그림 4-6. 광 신호 측정 프로그램 화면

(Screen of Optical Signal Determination Program)

2. 광 신호 분석 프로그램

광 신호 분석 프로그램은 저장된 데이터를 읽어서 기능별로 연산하여, 그래프로 표시하는 프로그램으로 flow-chart 는 그림 4-7과 같다.

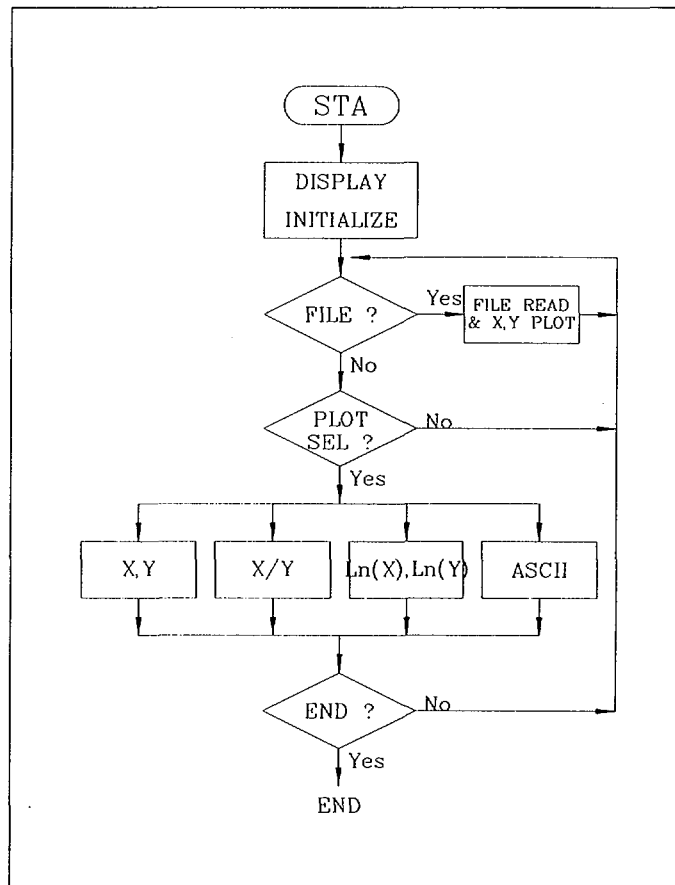


그림 4-7. 광 신호 분석 프로그램 flowchart
(Flow Chart of Optical Signal Analysis Program)

그림 4-7과 같이 광 신호 분석은 먼저 file name을 입력하면 지정된 디스크에서 file을 읽어서 메모리에 저장한다. 그리고 함수가 입력되지 않은 상태에서는 이전 데이터에 대한 측정값을 표시한다. 함수가 선택되면 선택된 함수로 연산되어 그림 4-8과 같이 표시된다.

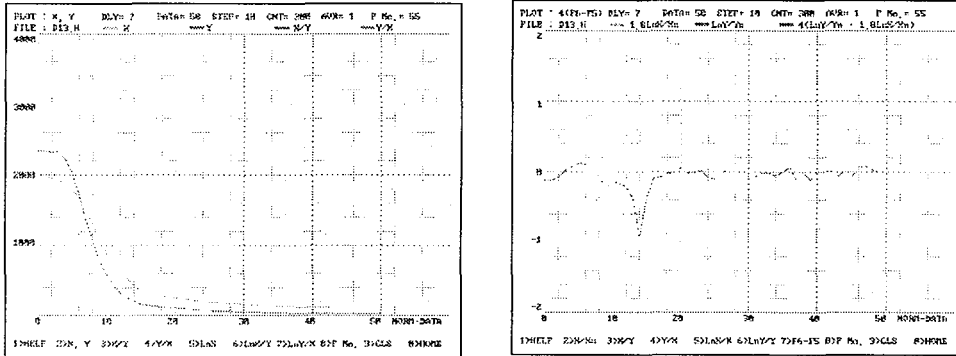


그림 4-8. 함수별 그래픽 표시화면
(Graphic Display Screen of Functions)

표시 가능한 함수는 다음과 같다.

- X, Y : 측정된 12 비트 데이터를 직접 표시
- X/Y : X/Y, Y/X 값 표시
- Ln(X), Ln(Y) : Ln(X), Ln(Y), Ln(X/Y) 및 Ln(Y/X) 값 표시
- ASCII : 측정된 데이터를 수치로 표시

제 5 장 결 론

본 PWR Space grid 레이저 용접 실시간 감시장치는 우선적으로 용접시 용융부에서 방출되는 빛의 세기를 측정하여 용접장치를 감시하는데 중점을 두고 설계 제작된 장치이다. 용접시 용융부에서 발생하는 신호의 측정이외에도 외부장치 신호처리 및 제어장치와 연결하면, 레이저 집광렌즈의 위치를 조절하여 최적의 가공상태를 얻을 수 있다. 이런 레이저 가공의 최적화를 목적으로 한 실용적 개발은 추후 필수적으로 해결하여야 할 문제이다.

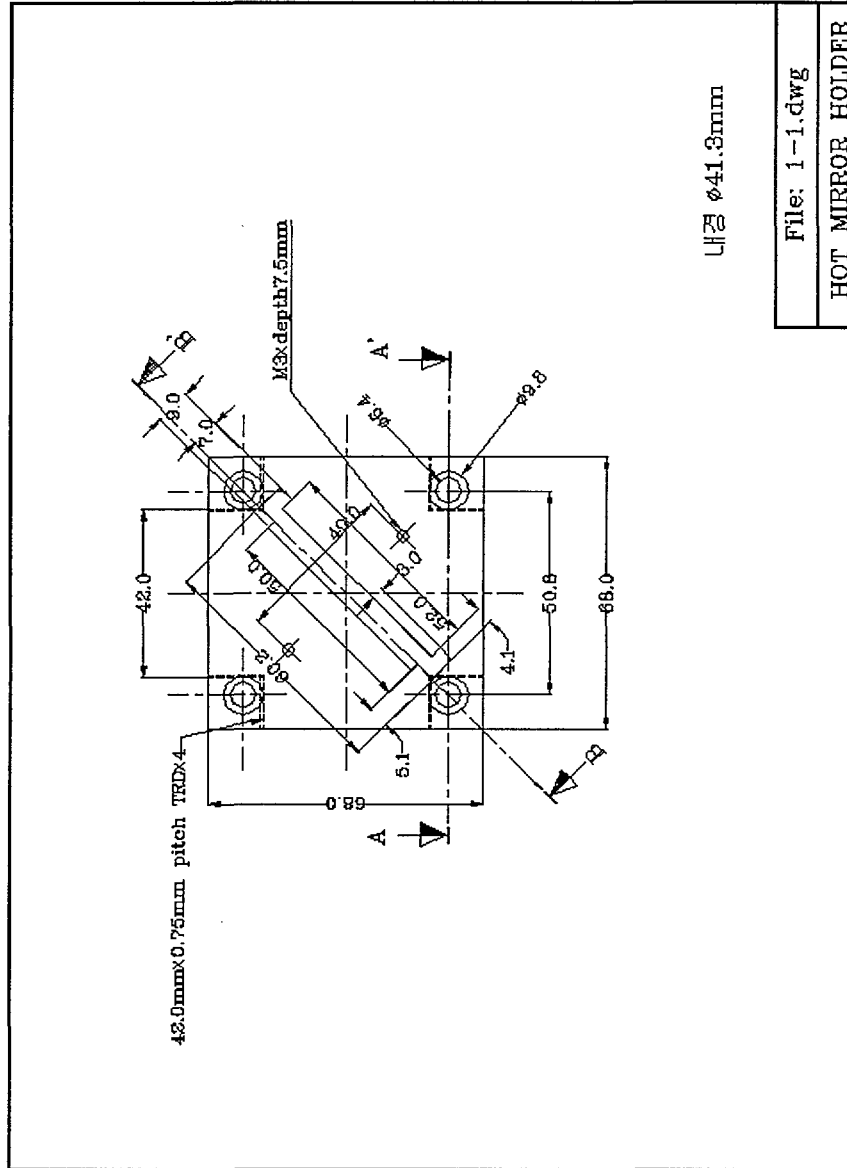
PWR space grid 레이저 용접의 감시 기술과 관련하여 중요한 Zr-4 재질과 Ar 보호가스의 용접특성을 기초로 하여, 레이저 용접시 용입부분에서 방출되는 분광신호를 측정하였다. 본 연구에서는 PWR space grid 레이저 용접시 기본적인 용접변수를 고정하고, 평균출력과 집광렌즈의 초점거리를 변화하여 실험하였다. 용접실험 중 용융부에서 방출되는 열신호 크기를 측정하였다. 실제 space grid의 레이저 용접시 용융부의 크기를 알기 위하여 530nm, 950nm 의 파장을 측정하였고, 광학계의 색수차를 이용하여 분석하였다. 측정 결과 용융 pool 의 크기가 2.3 mm 인 경우 0.2 mm의 변화를 감지하였다. 최적의 용융깊이를 얻기 위해서 집광렌즈를 이동하면서 용접하였다. 이동속도가 40mm/min일 경우 같은 레이저 출력에서 최대의 용입깊이를 얻었다.

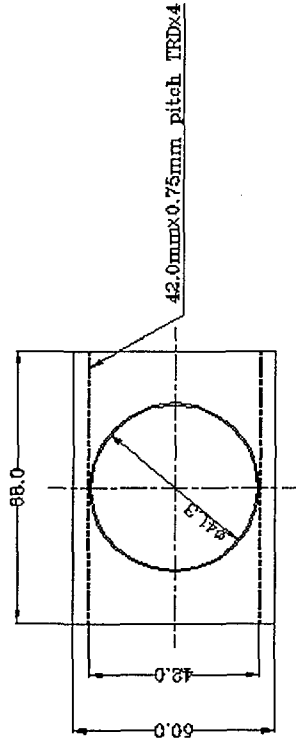
레이저 신호분석장치는 pulse 당 200 개 이상의 data를 10 μ s 이하의 속도로 수집할 수 있는 기능을 가진다. 수집된 data를 분석 program을 통하여 분석하고 용접상태를 판단하였다. 현재 신호처리결과와 용접부 상태를 비교, 분석한 결과 신호의 크기와 용접결과가 일치되는 것을 관찰하였다. 추후 계산된 출력신호를 이용하여 집광렌즈를 구동한다면, 자동적인 초점조절장치로서 레이저 원격가공에 있어 획기적인 기술향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] K.Lankalapalli and J.Tu(Nov., 1995) "Penetration Depth Estimation for monitoring CO₂ Laser Welding Processes", Proceeding of ICALEO '97:573-583.
- [2] D.Hand, F.Haran, C Peters and J.Jones (April,1997) " Full Penetration detection in Nd:YAG Laser Welding by Analysis of Oscillory Optical Signals:applicaton to overlap weld seam tracking", Proc. of XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, SPIE Proceedings 3092: 534-537.
- [3] C.Kim, S.Baik, M.Kim and C.Chung (April,1997) "Remote optical power and focus monitoring in pulsed Nd:YAG laser welding",Proc. of XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Comference, **SPIE Proceedings 3092** : 538-541.
- [4] C.Kim, M.Kim and C.Chung (To be published) " Auto-focus Control with Optical Monitoring Using Chromatic Aberration of Focusing Optics in Laser Welding ", **Proceedings of ICALEO '97**.

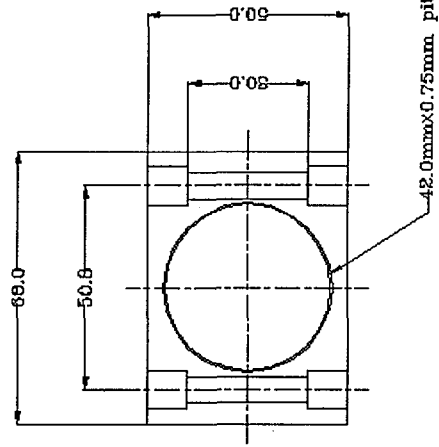
Appendix





내경 ø41.3mm

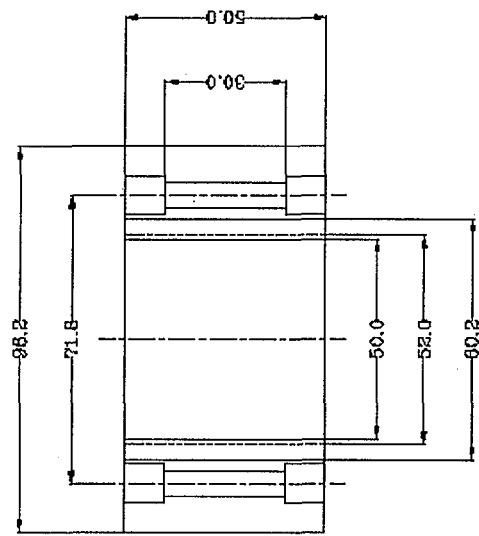
File: 1-2.dwg



SECT. A-A'

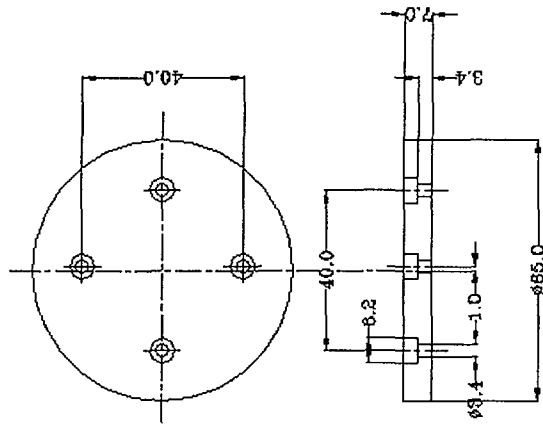
내경 $\phi 41.3\text{mm}$

File: 1-3.dwg



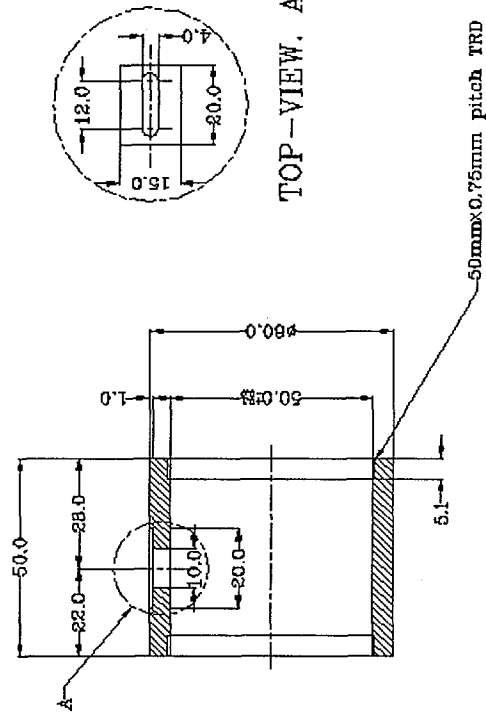
SECT. B-B'

File: 1-4.dwg



File: 2-1.dwg

HOT-MIRROR SUPPORT

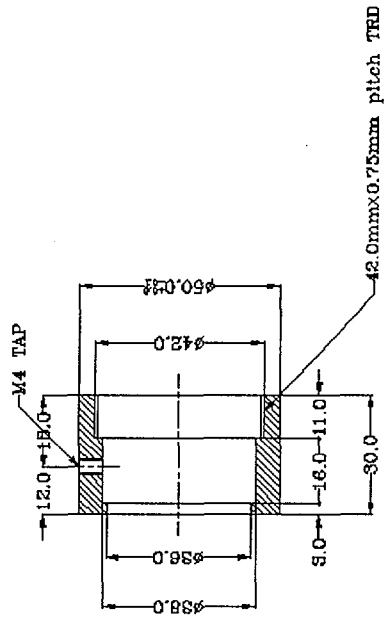


외경 $\phi 50.6\text{mm}$

TOP-VIEW, A

File: 3-1.dwg

Z-TRANSLATER



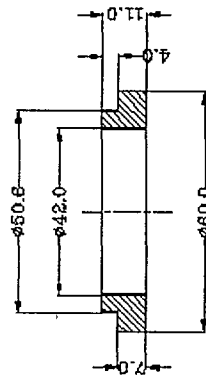
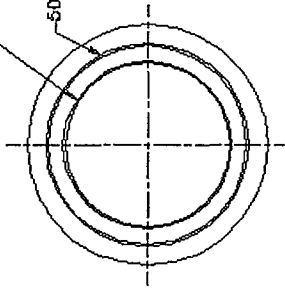
내경 $\phi 41.3 \text{mm}$

File: 4-1.dwg

Z-LENS HOLDER

42.0mm \times 0.75mm pitch TRD

50.8mm \times 0.75mm pitch TRD



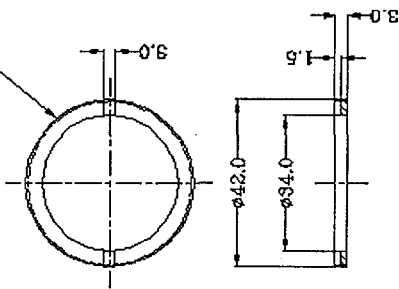
내경 $\phi 41.5$ mm

내경 $\phi 50.0$ mm

File: 5-1.dwg

ADAPTOR-RING

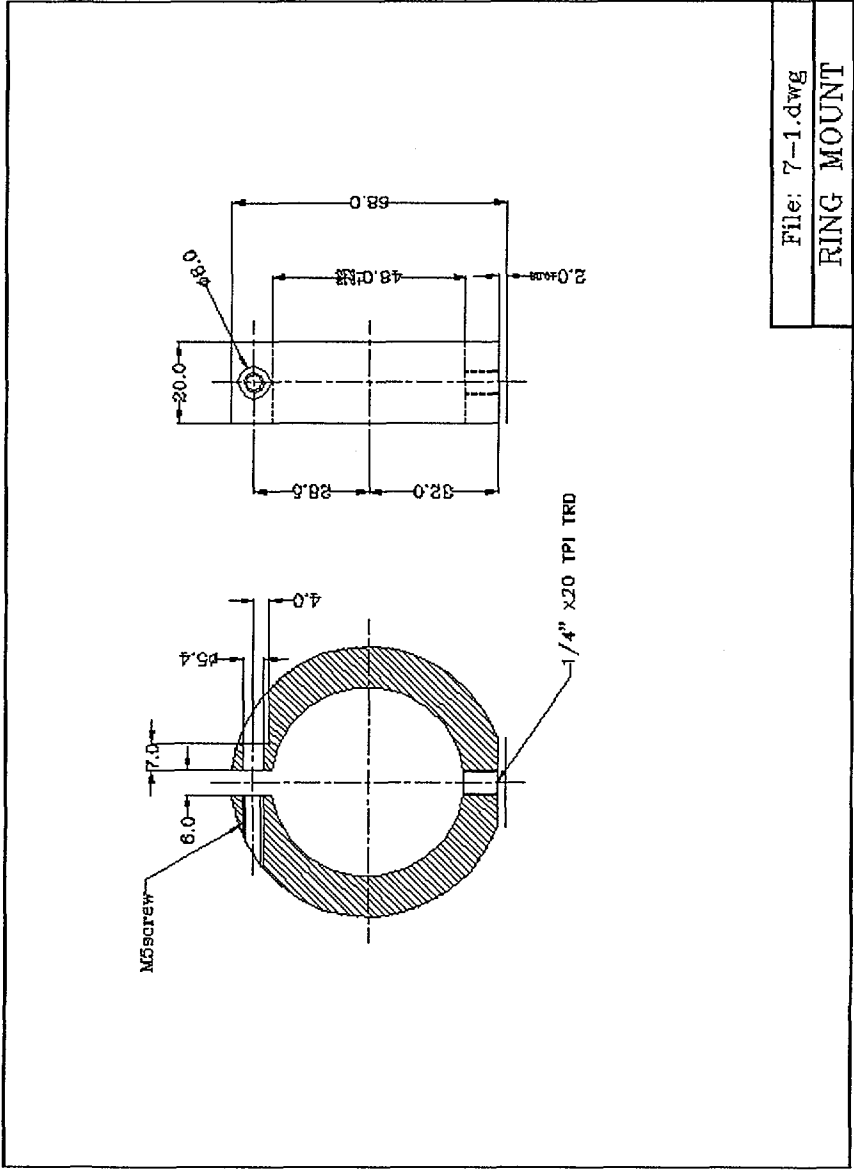
42.0mm x 0.75mm pitch



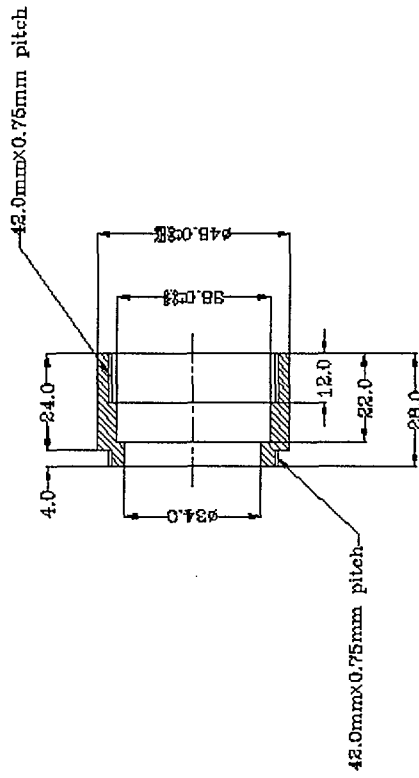
내경 $\phi 41.5\text{mm}$

File: 6-1.dwg

LENS RETAINER



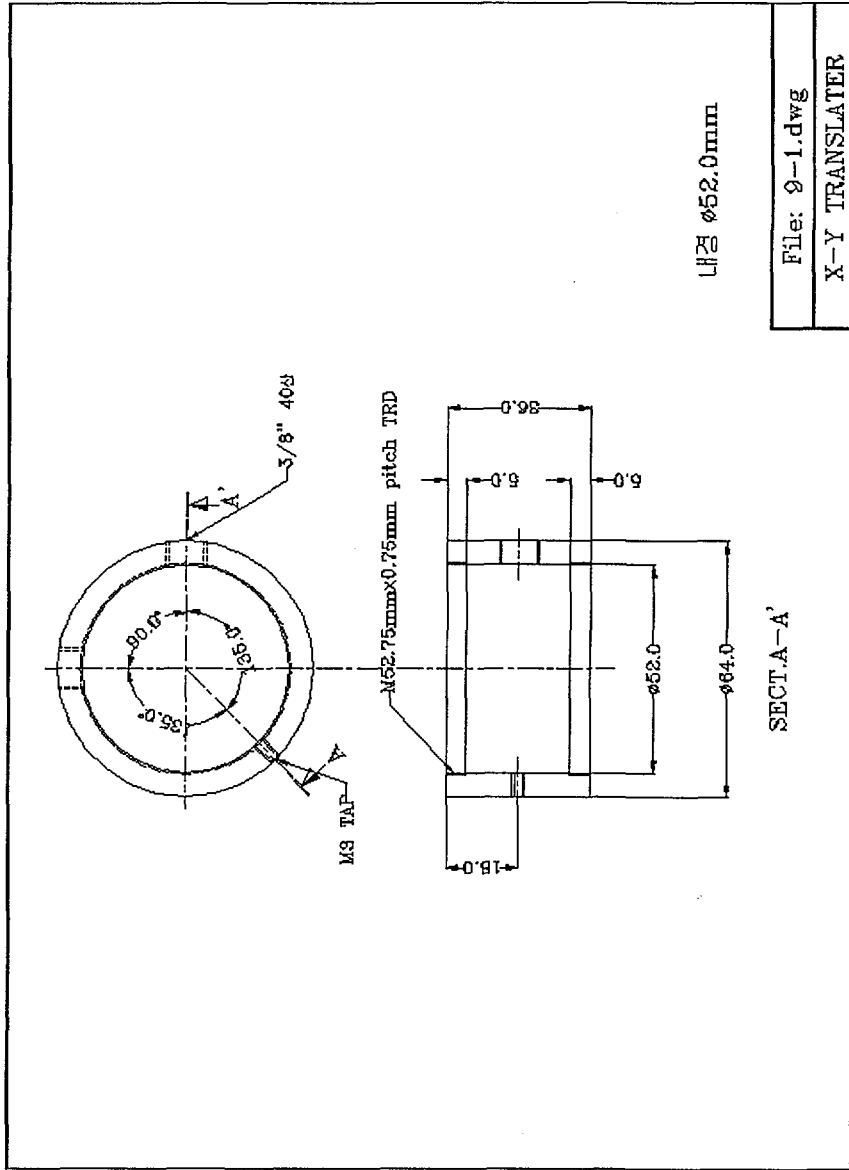
File: 7-1.dwg
RING MOUNT

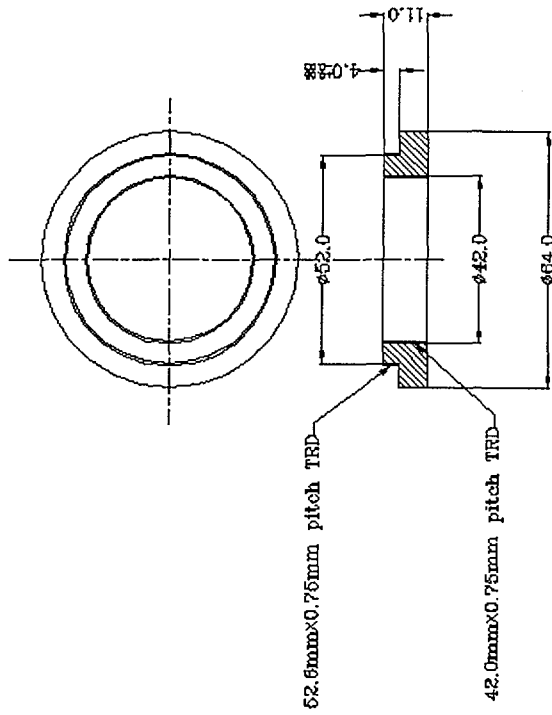


내경 $\phi 41.3\text{mm}$

File: 8-1.dwg

LENS HOLDER



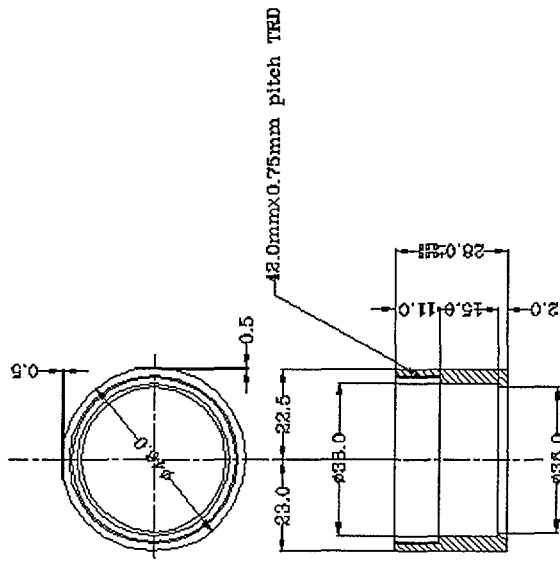


내경 $\phi 41.3\text{mm}$

내경 $\phi 50.0\text{mm}$

File: 10-1.dwg

X-Y ADAPTOR-RING

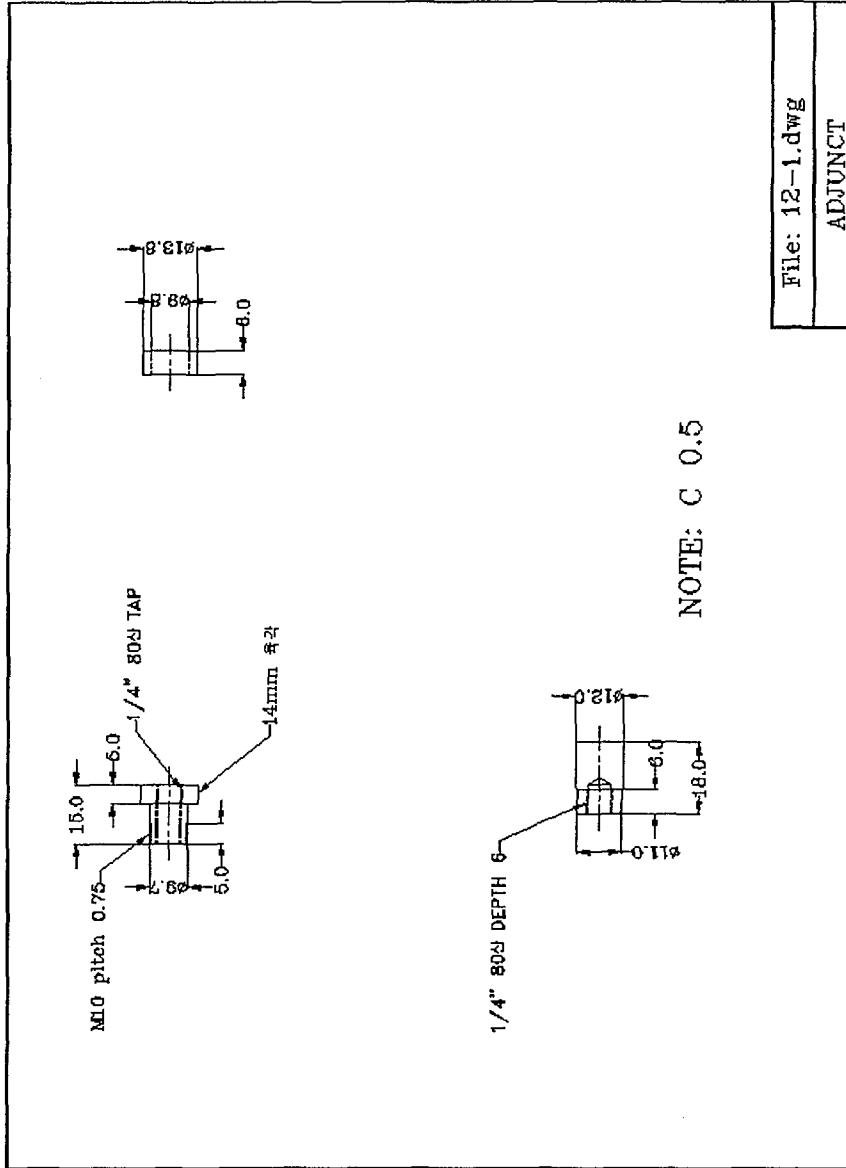


내경 $\phi 41.3\text{mm}$

MATERIAL: STAINLESS STEEL (304)

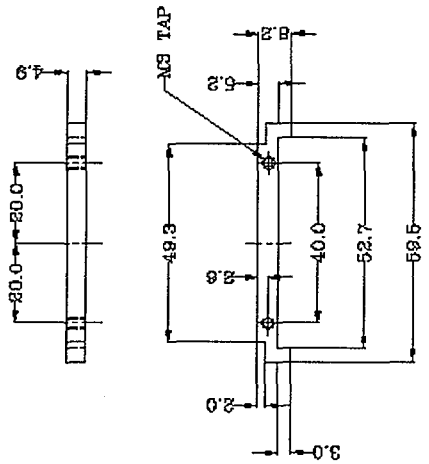
File: 11-1.dwg

X-Y LENS HOLDER

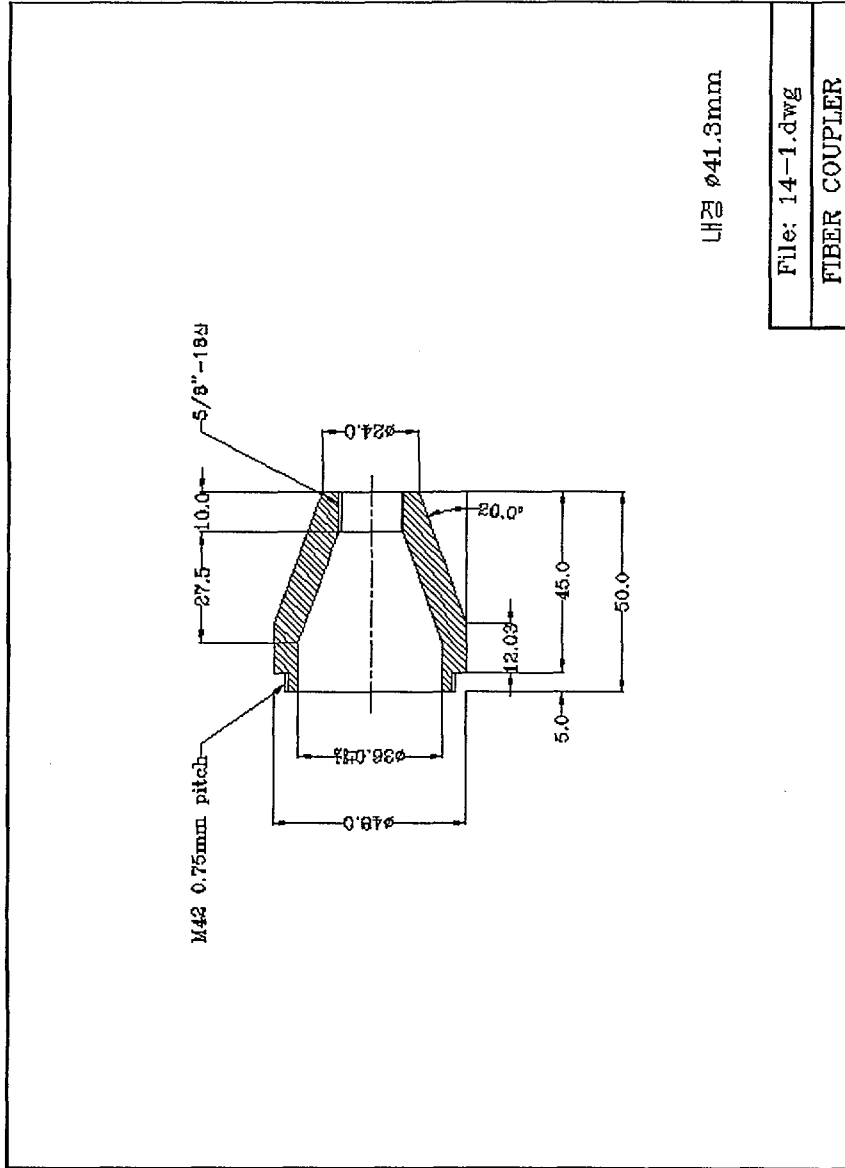


File: 12-1.dwg

ADJUNCT



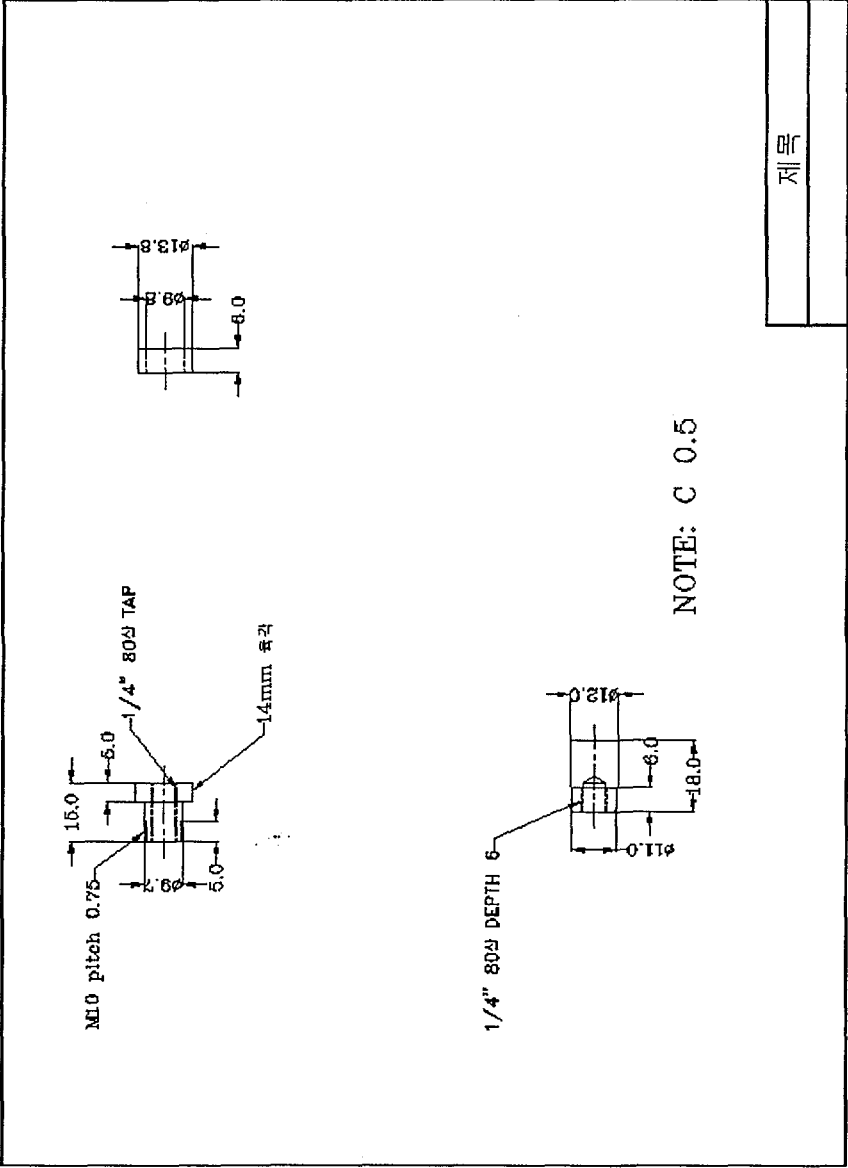
File: 13-1.dwg



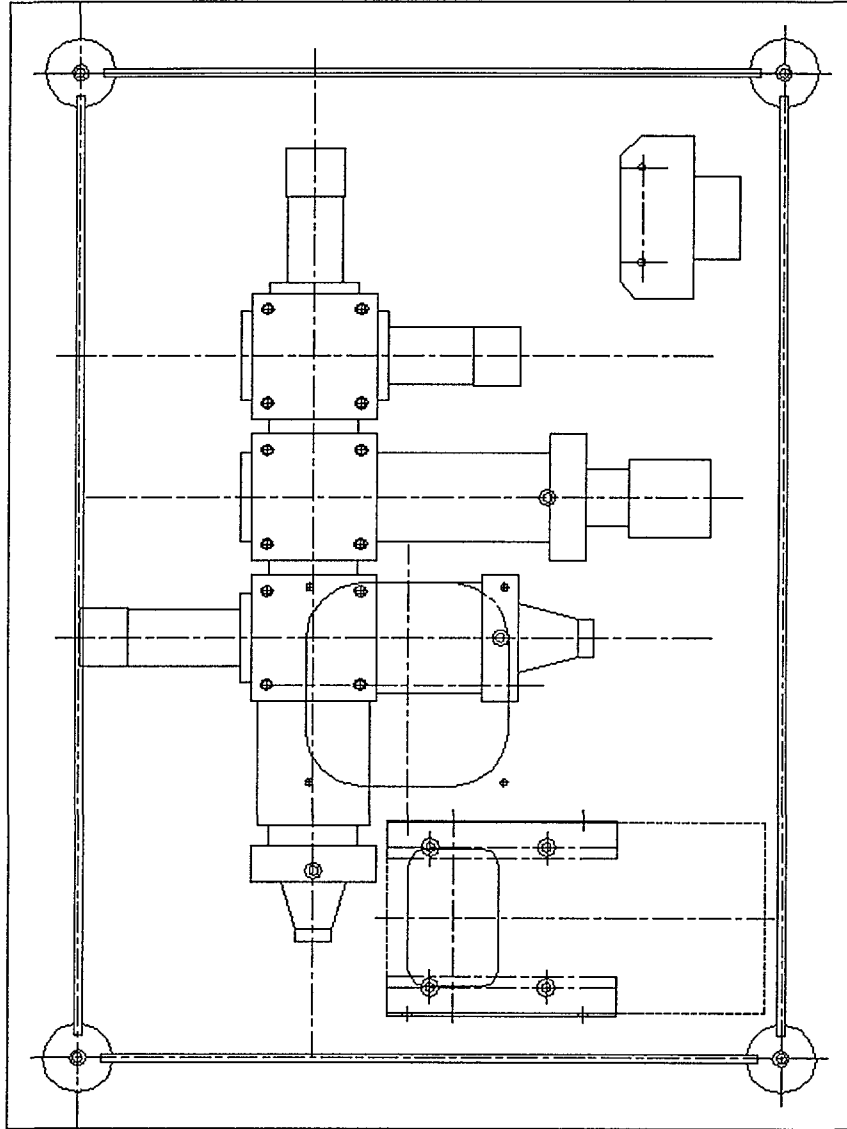
내경 $\phi 41.3\text{mm}$

File: 14-1.dwg

FIBER COUPLER



제 목



서 지 정 보 양 식						
수행기관보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드			
KAERI/RR-1827/97						
제목 / 부제	PWR Space Grid 레이저 용접 실시간 감시장치 개발					
연구책임자 및 부서명	정진만 (원자력 광기전기기술 개발팀)					
연구자 및 부서명	김철중("), 김민석 (")					
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1998. 6.	
페이지	78 P.	도표	유(O), 무()	크기	26 cm	
참고사항	'97 년도 자체연구과제					
비밀여부	공개(O), 대외비(), 급비밀	보고서 종류	연구보고서			
연구위탁기관		계약 번호				
초록 (300 단어 내외)	<p>KNFC에서 보유한 PWR space grid 레이저 용접장치에 적용하기 위한 용접 감시장치를 개발하였다.</p> <p>본 연구의 목적은 space grid 용접의 품질 및 공정관리를 하기 위한 광학적 감시장치를 개발하는 것이다.</p> <p>본 연구결과 광학계 색수차를 이용하여 용융 pool에서 방출되는 신호로부터 용접 pool의 크기변화를 측정하였고, 이로부터 용접 pool의 크기와 깊이에 대한 정보를 추출할 수 있음을 실증하였다.</p> <p>본 연구결과는 PWR space grid 레이저 용접공정에 적용할 경우, 용접 생산성 향상에 기여할 것이다.</p>					
주제명 키워드 (10 단어 내외)						
레이저 용접, 지지격자, 광학적 감시장치						

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET						
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code
KAERI/RR-1827/97						
Title / Subtitle		Development of Laser Welding Monitoring System for PWR Space Grid				
Project Manager and Dept.		Chin-Man Chung (Development of Opto-mechatronics Technology)				
Researcher and Dept.		Cheol-Jung Kim (Development of Opto-mechatronics Tech.) Min-Suk Kim (" ")				
Pub. Place	Taejeon	Pub. Org.	KAERI		Pub. Date	1998. 6.
Page	78 P.	Fig. and Tab.	Yes(0), No()		Size	26 cm
Note	'97 Research Project					
Classified	Open(0), Outside(), _Class		Report Type	Research Report		
Sponsoring Org.					Contract No	
Abstract (About 300 Words)		<p>The laser welding monitoring system was developed to inspect PWR space grid welding for KNFC.</p> <p>The demands for this optical monitoring system were applied to Q.C. and process control in space grid welding.</p> <p>The thermal radiation signal from weld pool can be get the variation of weld pool size. the weld pool size and depth are verified by analyzed wavelength signals from weld pool.</p> <p>Applied this monitoring system in space grid weld, improved the weld productivity</p>				
Subject Keywords (About 10 Words)		<p>Laser weld, space grid, optical weld monitoring.</p>				