



KR0101204

KAERI/RR-2080/2000

원자력기반연구

Basic Research For Nuclear Energy

핵연료 가공용 초정밀 레이저 용접기술 개발

Study on the High-precision Laser Welding
Technology of Nuclear Fuel Elements Processing

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소 소장 귀하

본 보고서를 “핵연료 가공용 초정밀 레이저 용접기술 개발” 과제의
연구보고서로 제출합니다.

2001년 1 월 일

과제책임자 : 김 수 성

참 여 자 : 양 명 승
김 용 기
이 도 연

요 약 문

I. 제 목

핵연료 가공용 초정밀 레이저 용접기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구는 중수로 핵연료봉의 제조를 위한 지지체 및 간격체의 부착방법을 위해서 기존의 브레이징 공법에 비해 고밀도 에너지를 이용한 용접방법이 필요하며, 특히 원자로 내에서 핵연료 연소시 접합부의 안전성과 핵연료의 성능 향상을 고려할 때 반드시 선행되어야 할 과제이다. 핵연료봉의 지지체는 연소시 원자로 내의 인접 연료봉과 일정 간격으로 유지되면서, 연료봉에 냉각수가 흐르는 방향으로 부착하게 되어 연료봉과 압력관사이의 마찰로 발생될 수 있는 피복관 마모를 방지해 준다. 또한, 이것은 중수로 핵연료봉들이 원자로에서 가동되는 동안 손상이 잘 되는 부위가 지지체와 간격체이기 때문에 건전한 접합은 핵연료의 안전성과 수명에 직결된다고 할 수 있겠다.

중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체 부착의 중요성으로 인하여 원자력 분야의 핵연료가공관련 레이저를 이용한 용접기술이 세계적인 추세에서 볼 때 점차 연구가 수행되고 있으며, 앞으로도 이러한 분야의 지속적인 연구는 매우 중요하다고 하겠다. 따라서 본 연구는 중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체 부착을 위한 레이저용접 제작에 필요한 기본자료를 제공하였고, 지르칼로이-4 피복관에 적절한 용접조건을 선정하여 실제의 지지체의 용접시편이 제작되어, 이에 따른 용접부의 특성이 분석되었다. 아울러 레이저용접은 첨단 기반기술로서 응용분야가 넓을 뿐만 아니라 그 연관관계도 매우 높아서 곧바로 응용기술들을 개발할 수 있으므로 산업적 측면에서 파급효과가 클 것으로 기대된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

가) 핵연료봉 지지체 부착용 레이저용접 시스템 개발

- 초정밀 레이저 발진부 설계 및 구성
- 광섬유 전송부 설계 및 제작
- 레이저용접 감시부 및 제어부 설계 및 제작

나) 핵연료봉 지지체 및 간격체의 레이저 용접실험

- 용접시편 및 용접치구 준비
- 기하학적 용접구조 조사
- 레이저 용접변수 선정

다) 핵연료봉 지지체 및 간격체의 레이저 용접특성 연구

- 지지체용접의 적정 용입 분석
- 지지체와 피복관간의 용입 분석
- 지지체 용접의 열변형 조사

IV. 연구개발 결과 및 활용계획

가) 초정밀 레이저용접기 구성

레이저 침투출력 10 kW 및 평균출력 200 W 급의 안정된 구조로 개발된 공진기는 펄스폭 0.1-10 ms로 가변될 수 있으며 반복율은 최대 100 pps이며, 레이저빔의 spot size는 300-400 μm 으로 나타났다.

나) 지지체 부착용 주변장치 개발

초정밀 레이저를 사용하는 코어직경 400 μm 의 광섬유 전송부, 용접감시부 및 제어부 등의 주변기기를 설계 제작하였다.

다) 지지체 용접의 최적화 및 샘플제작

중수로 핵연료봉의 지지체와 피복관의 용접실험에서 GI 400 μm 의 광섬유를 사용하였을 때, 비드폭이 1.0 mm 이하의 seam 용접과 용입은 0.3mm 정도 얻을 수 있었다.

이 연구 결과는 국내의 핵연료봉 제조에서 요구되는 지지체 및 간격체 부착 등에서 사용될 수 있는 첨단 레이저를 이용한 용접기술에 활용된다. 현재 국내에서 레이저 침투출력 10 kW, 평균출력 200 W의 안정된 공진기를 가지는 초정밀 레이저가 개발되었고, 이를 바탕으로 Nd:YAG 레이저로 이용하는 광섬유 전송장치, 용접노즐부, 감시부 및 제어부 등의 주변기기가 자체적으로 개발되었으며, 이를 이용한 지르칼로이-4 피복관과 지지체의 이음구조를 가지는 용접실험이 수행되었다. 따라서 광섬유를 이용한 레이저용접 결과는 중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체 제조공정에 필요한 기초자료로 활용될 예정이다. 아울러 2차 년도에는 한국원전연료주식회사와 긴밀히 협조하여 생산공정에 적용하기 위한 레이저용접의 실증 실험을 수행해 나갈 예정이며, 이를 통하여 레이저용접의 실용화를 실현하고 동시에 국내 정밀가공업계에서 제반 레이저용접기술이 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 기술개발을 추진할 예정이다.

SUMMARY

I. Project Title

Study on the high-precision laser welding technology of nuclear fuel elements processing

II. Objectives and Importance of the Project

The proper welding method for appendage of bearing pads and spacers of PHWR nuclear fuel elements is considered important in respect to the soundness of weldments and the improvement of the performance of nuclear fuels during the operation in reactor. The probability of welding defects of the appendage parts is mostly apt to occur and it is connected directly with the safety and life prediction of the nuclear reactor in operation.

Recently there has been studied all over the world to develop welding technology by laser in nuclear fuel processing, and the appendage of bearing pads and spacers of PHWR nuclear fuel elements. Therefore, the purpose of this study is to investigate the characteristics of the laser welded specimens and make some samples for the appendage of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements. This study will also provide the basic data for the fabrications of the appendage of bearing pads and spacers. Especially the laser welding is supposed to be used in the practical application such as precise materials manufacturing fields. In this respect this technology is not only a basic advanced technology with wide applications but also likely to be used for the development of directly applicable technologies for industries, with high potential benefits derived in the view point of economy and industry.

III. Scope and Contents of the Project

The items covered in this study are as follows:

- A. Development of laser welding devices for the appendage of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements
 - i) Design and construction of laser beam generator
 - ii) Design and manufacturing of optical fiber transmission
 - iii) Development of welding monitoring device
 - iv) Development of welding controller device

- B. Welding experiment of the appendage of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements
 - i) Preparations of welding specimen and fixtures
 - ii) Investigation of welding geometry
 - iii) Optimizations of laser welding variables

- C. Study on the characteristics of laser welded specimen of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements
 - i) Analysis of weld beads for bearing pads
 - ii) Analysis of weld penetrations for bearing pads and cladding tubes
 - iii) Investigation of welding distortion for bearing pads

IV. Result and Proposal for Applications

A. Construction of high-precision laser welding device

The developed laser generator, which has a stable structure with $10kW$ of the laser peak power and $200W$ of the mean power, is variable in a range of $0.1-10ms$ pulse width. Its repetition rates were $100pps$ at maximum and the spot size of the laser beam appeared to be $300-400\mu m$.

B. Development of peripheral devices for the bearing pads welding

Peripheral devices using the laser generator, such as the optical fiber transmission section with $400\mu m$ of the core diameter, the coupler section and the welding control section, were designed and fabricated.

C. Optimization of welding variables and manufacturing of welding samples of the appendage of bearing pads

The laser welded specimens were investigated and were experimentally manufactured by utilizing the optical fiber of GI $400\mu m$. As a result, the seam welding with the bead of $1.0mm$ or less and the weld penetration of $0.3mm$ could be accomplished.

The results of this research and development are to be applied to development of the welding technology using the laser beam that can

be used in PHWR nuclear fuel elements including small parts, and special metal. The laser apparatus having a stable resonator with 10kW of the laser peak power and 200W of the average power was independently developed only by the domestic technology. Also, peripheral devices, such as an optical fiber connecting device using Nd:YAG laser, a coupler section and a welding control section, were manufactured, and further, the bearing pads and spacers, which was a precise parts of nuclear fuel elements, were experimentally welded by using the laser apparatus and the peripheral devices. For applying the results of this research and development, the results of laser welded specimens using the optical fiber transmission and peripheral devices will be provided as basic data for the appendages of PHWR nuclear fuel manufacturing. Further experiments will be made in close cooperation with manufacturers in order to apply the welding of bearing pads and spacers using the laser to the production process of nuclear fuel elements. Through such experiment, the related technologies will have to be accumulated over a long time so that commercialization of the laser welding may be demonstrated and all of the laser processing technologies may be activated in the local precision processing industry.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 국내외 기술현황	3
제 1 절 국내 지지체용접의 현황	3
제 2 절 최근 국외의 기술동향	11
제 3 절 레이저용접의 특성 및 전망	21
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	26
제 1 절 레이저용접시스템 개발	26
1. 레이저장치 설계 및 구성	26
2. 광섬유전송부 설계 및 제작	31
3. 레이저용접감시부 설계 및 제작	34
4. 레이저용접제어부 설계 및 제작	40
제 2 절 지지체용접부의 특성조사	46
1. 시편준비 및 실험방법	46
2. 지지체용접의 최적화	53
3. 지지체용접부의 특성조사	58
제 3 절 지지체 용접샘플 제작	61
1. 레이저용접구조 조사	61
2. 용접샘플 제작 및 분석	63
제 4 장 결 론	66
참 고 문 헌	68

표 목 차

표 2.1.1	고주파 유도가열의 power source 제원	7
표 2.2.1	중수로형 핵연료 제조관련 용접공정의 평가표	13
표 3.1.1	광섬유전송형 Nd:YAG 레이저용접기 사양	27
표 3.1.2	칼라 CCD 카메라 사양	37
표 3.1.3	이송테이블의 사양	40
표 3.1.4	마이크로스테핑 드라이버의 사양	42
표 3.1.5	지지체 용접용 제어 프로그램	43

그림 목 차

그림 2.1.1	CANDU 핵연료다발에 부착되는 지지체와 간격체 개략도	4
그림 2.1.2	핵연료봉의 부착물을 위한 고진공용 브레이징장치	6
그림 2.2.1	레이저를 이용한 지지체 용접단면 (x 50)	17
그림 3.1.1	Nd:YAG 레이저발진부 개략도	29
그림 3.1.2	펄스레이저 Beam의 공간분포 Profile	30
그림 3.1.3	Direct beam head 광학계	31
그림 3.1.4	광섬유 전송형 광학계의 구성도	32
그림 3.1.5	지지체 용접용 감시장치 구성도	36
그림 3.1.6	지지체 용접용 감시장치	37
그림 3.1.7	지지체 용접용 감시카메라 장치	39
그림 3.1.8	지지체 용접용 제어장치	41
그림 3.2.1	지지체 및 피복관 용접시편의 형상	46
그림 3.2.2	지지체부착을 위한 용접치구 개략도	47
그림 3.2.3	지지체부착을 위한 용접 설딩박스	48
그림 3.2.4	지지체용접을 위한 광학 커플러장치	50
그림 3.2.5	지지체용접을 위한 레이저용접시스템	51
그림 3.2.6	지지체 용접감시를 위한 모니터 화면	52
그림 3.2.7	펄스에너지에 의한 용접비드와 용입의 관계	54
그림 3.2.8	브레이징과 레이저출력 80W의 용접된 단면 비교 (x50)	55
그림 3.2.9	레이저출력에 의한 피복관의 적정 용융깊이 비교	56
그림 3.2.10	레이저출력에 따른 용입 비교 (x50)	57
그림 3.2.11	용접 gap에 따른 용입의 비교	59
그림 3.2.12	레이저출력에 의한 용접변형량의 비교	60
그림 3.3.1	지지체용접에 적합한 기하학적 구조형상	62
그림 3.3.2	지지체와 피복관 부착을 위한 용접샘플 모양 (x8)	64

제 1 장 서 론

중수로 핵연료의 제조를 위한 연료봉 용접기술의 제반 특성중 이들 부착물의 적합방법의 선정에 대한 타당성 조사는 원자력분야의 핵연료 가동시 접합부의 안전성과 핵연료 성능향상을 고려할 때 반드시 필요한 것이다. 중수로형 핵연료봉에 부착하는 지지체와 간격체는 핵연료 다발내에서 피복관사이와 일정한 간격을 유지하도록 접합시킨다. 이것은 원자로 내에서 핵분열시 피복관과 피복관사이의 간격, 그리고 핵연료다발과 압력관과의 간격을 유지하여 냉각수를 잘 흐르게 하고, 또한 냉각수의 흐름으로 인한 피복관의 진동으로 생기는 마모를 방지하기 위함이다. 그리고 이 핵연료봉에 부착된 지지체와 간격체는 원자로에서 가동되는 동안 피복관과 이탈될 가능성이 높은 부위이기 때문에 건전한 접합은 원자로내에서 핵연료 성능의 안전성과 내구 수명에 직결된다고 할 수 있겠다.

이러한 핵연료 가공관련 부착물의 중요성으로 인하여 원자력 산업분야의 핵연료봉 부착물에 대한 접합방법에 대하여 꾸준히 연구가 수행되고 있으며, 현재 핵연료봉 부착물을 위한 상용화 단계의 접합방법은 크게 브레이징, 저항용접, 초음파용접 그리고 레이저용접으로 분류될 수 있다. 이상의 실제적인 접합부의 특성, 접합구조 설계 등 경제적인 관점에서 고려할 때 브레이징은 접합공정이 용이하나 반면에 용가재인 Be의 화학적 유독성을 가지며, 또한 피접합물 형상에 따라 적용이 제한되어 있다. 저항용접은 생산공정에서 매우 유리하나 열변형의 문제와 작업조건이 까다롭다. 현재 핵연료봉의 부착물에 대한 용접연구는 인도의 Bhabha 원자력센터에서 저항용접, 초음파용접 그리고 레이저용접으로 실험을 수행중에 있으며, 특히 레이저에 의한 방법으로는 용가재를 필요로 하지 않으므로 핵연료봉의 부착물제작이 레이저용접으로 사용될 것으로 검토중에 있다.[1][2][3] 이와 같은 예로는 PWR 핵연료에서 spacer grid의 용접, 핵연료 피복관의 He 가스 밀봉용접, 온도 측정을 위한 티타늄 열전대용접 그리고 개량형 핵연료 특수부품의 정밀용접

등에서 매우 다양하게 활용되고 있는 실정이다.[4]

레이저를 이용한 용접은 고밀도 열원으로 인한 에너지 투입량이 대입열 전기용접보다 적어서 야금학적으로 여러 문제점을 야기할 수 있는 열영향부(HAZ)가 작고 재료의 열변형을 최소로 줄일 수 있다. 피용접물과의 비접촉공정으로 브레이징이나 아크용접의 용접봉에 의한 용접부의 결함, 저항용접의 전류에 의한 피해를 없앨 수 있으며, 정밀제어가 가능하므로 고속용접과 용접자동화에 유리하고 생산성을 향상시킬 수 있다. 또한 광섬유를 이용한 레이저는 광학기기에 의해 레이저빔의 전송이 가능하고 타용접방법으로는 접근이 불가능한 지역에서도 가공이 가능하며 특히, 1.06um 파장을 가지는 Nd:YAG 레이저는 장거리 전송으로 원격용접, 고속용접 그리고 정밀용접의 관점에서 가장 매력적인 요소로 등장하고 있다.[5]

따라서 본 연구는 최근에 핵연료봉의 부착물에 대한 레이저용접관련 문헌의 종합정리, 지지체와 피복관재료의 적합한 용접변수 조사, 그리고 실제적인 모델인 중수로 핵연료봉의 지지체 샘플제작 등의 기술 검토를 내용으로 하였으며, 이와 병행하여 지지체용접부의 비드와 단면과의 영향, 적정 용입에 대한 고찰 그리고 열변형 등의 실험 및 결과 분석을 주된 내용으로 하였다. 아래의 제 2 장에서는 국내외의 지지체부착물에 대한 용접기술의 동향, 레이저용접 특성 및 전망에 대해서 언급하였으며, 제 3 장에서는 핵연료봉 지지체부착을 위한 레이저용접시스템 개발에 대하여 정리하였다. 특히 지지체용접부에서 적절한 용입을 위한 용접특성 조사와 핵연료 성능향상을 위한 용접구조에 대하여 기술하였으며, 앞으로 지지체용접을 위한 용접구조의 개선 및 적합한 작업조건의 선정에 대하여 전반적으로 기술하였다.

제 2 장 국내외 기술 현황

제 1 절 국내 지지체용접의 현황

1. 지지체 부착의 목적

중수로형 핵연료집합체는 UO_2 소결체가 장입된 두께 0.4mm, 외경 13mm인 연료봉 37개의 다발로 구성되어 있으며, 핵연료 집합체내에서 Zr-4 피복관 사이는 일정한 간격을 유지하도록 피복관 외면에 그림 2.1.1에서와 같이 지지체 및 간격체로 가공된 부착물을 접합시킨다. 이는 원자로 내에서 핵분열 반응이 일어나는 동안 37개의 연료봉으로 이루어진 핵연료집합체내에서 tube와 tube사이의 간격과, 핵연료 집합체와 압력관의 간격을 유지하여 냉각수가 잘 흐르게 하고, 냉각수의 흐름으로 인한 tube의 진동 때문에 생기는 tube의 손상을 방지하기 위함이다.

핵연료의 종류에 따라 부착물의 형태가 다른데, 캐나다의 핵연료 제조회사에서 얇은 두께의 Zr-4 피복관 외면에 부착물을 접합시키는 방법으로 전기저항용접에 비해 낮은 온도에서 수행되므로 열영향부에 의한 접합부의 변형이 적기 때문에 중수로형 핵연료 제조공정에서는 부착물을 접합방법으로 브레이징이 적용된다.[6]

2. 접합 재료

Zircaloy-4는 Zirconium에 Sn, Fe, Cr 등의 원소를 첨가한 Zr합금으로서, 냉간가공후 $510^{\circ}C \sim 520^{\circ}C$ 에서 2시간동안 응력완화 열처리된 Zircaloy-4 피복관은 grain 크기가 길이방향으로 평균 $15\mu m$, 두께방향으로 $4 \sim 5\mu m$ 이며, $480 \sim 520$ Mpa의 항복강도와 $560 \sim 600$ Mpa의 인장강도를 가진다. 냉간가공후 $600 \sim 640^{\circ}C$ 부근에서 6~7시간동안 Annealing된 Zr-4 판재는 결정립이 성장되어 $12 \sim 15\mu m$ 크기의 epiaxial grain을 가지

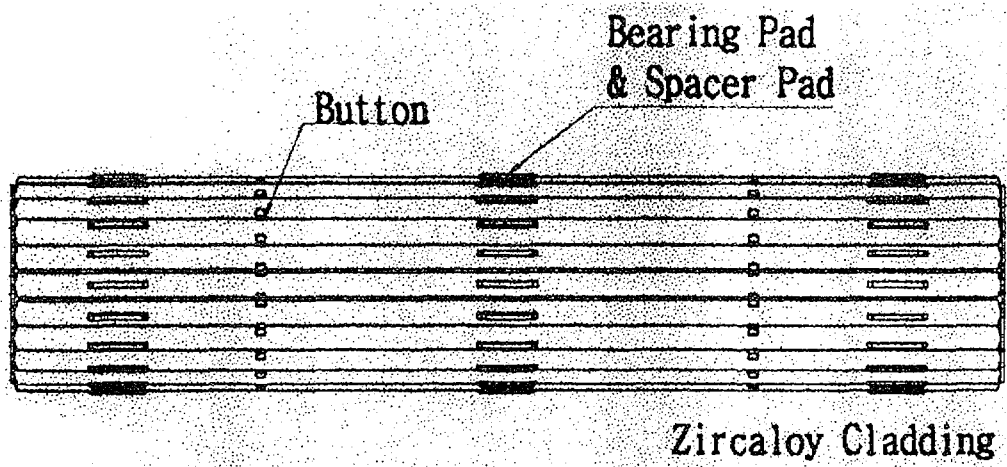


그림 2.1.1 CANDU 핵연료다발에 부착되는 지지체와 간격체 개략도

며, 약 350Mpa의 항복강도와 약 510 Mpa의 인장강도를 나타낸다.[7] 그리고 고온반응성이 높은 Zr이 질소, 수소, 산소등과 결합하면 부식저항과 연성이 감소되므로 10^{-4} mbar 이상으로 그림 2.1.2와 같은 고진공에서 브레이징장치가 사용되어야 한다.

Be 금속은 열중성자 흡수 단면적이 적고 용융점이 높아 원자로내에서 안정한 원소이다. 그리고 Zr-Be 합금은 $975\text{ }^{\circ}\text{C}$ · Zr-5 w/o Be의 조성에서 공정반응을 일으켜 Zr과 Be의 융점보다 낮은 온도에서 용체를 형성하므로, Zr-4의 확산 brazing 용가재로 사용된다. 금속 Be를 용융시켜 박막의 Be을 부착물의 양면에 진공 증착하므로써, diffusion brazing의 용가재로 사용한다.

3. 브레이징 공법

가. Principles of Diffusion brazing

Brazing이란 liquidus 가 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상이고 모재의 solidus 보다는 낮은 용가재를 사용하여, 적당한 온도로 가열하면 용가재가 용융되어 접합면 사이에 Wetting 되고, capillary force에 의해 flow된 다음 응고되어 접합이 되는 것이다. 일반적인 brazing과 박막확산 brazing과의 차이를 보면, brazing 온도에서 모재와 용가재의 용융이 일어나지 않으며, 용가재가 모재로 확산된 다음 특정조성에 공정이나 포정반응 또는 minima를 갖는 전율고 용체에서 용체가 형성된다. 이러한 박막확산 brazing에서는 용가재의 양을 정확히 조절하여야 하는데, 과도한 양의 용체가 형성될 경우 모재의 erosion을 발생시키고, 이와는 반대로 너무 적은 양의 용체일 경우는 접합면 사이의 gap을 채울수 있는 충분한 양의 용체가 없으므로 접합면에 기공이 남게 된다. 따라서 용가재의 양은 접합면의 두께 (gap size)와 가열시간 등을 고려하여 균일하게 유지되어야 한다.

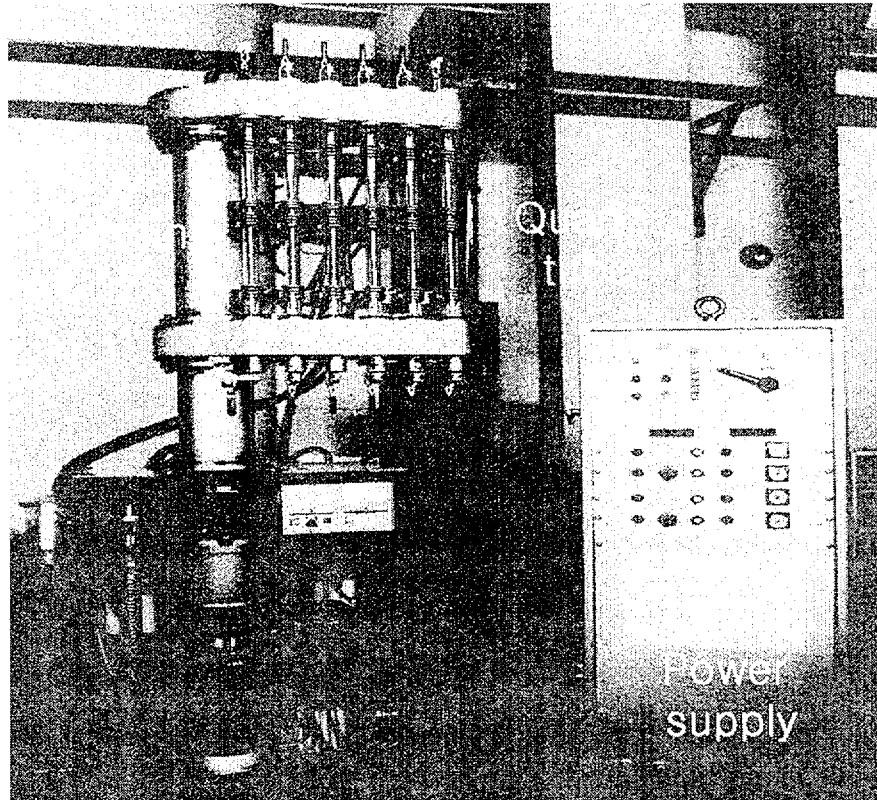


그림 2.1.2 핵연료봉의 부착물을 위한 고진공용 브레이징장치

나. Characteristics of Induction Heating

변압기에서 1차측에 전압을 걸면 2차측이 무부하 이더라도 변압기의 온도상승이 있다. 이것은 변압기의 철심에 생기는 자속이 1차측 전압이 교변하는 것에 따라 교변하여 철심속에서 hysteresis 손실 및 유도전류에 의한 저항손실에 기인하는데, 여기서 유도전류에 의한 저항손실로서 가열하는 것을 유도가열이라 한다. 고주파 가열이란 고주파의 전자계를 금속체에 가해 금속체에서 발열이 되는 것인데, 가열방식에 따라 고주파 저항가열과 고주파 유도가열로 나누어진다. 고주파 유도가열은 inductor라는 coil을 사용해 금속체와 적당한 간격을 (Air gap) 유지하여 유도가열하는 것이다. 교류를 통한 coil 속에 놓여진 금속체에는 변압기의 2차 권선에 기전력이 발생하는 것과 같이 금속체에 기전력이 생겨 유도전류가 흐르는데 이것을 와류(eddy current)라 한다. 와류는 금속체의 표면에 집중하며 단면내부에 들어갈수록 지수적으로 감소하고(skin effect) 위상이 늦어지게 된다.

Coil 속의 피가열체는 coil속에 전류가 흐를때 전자기 유도법칙에 따라 피가열체 표면에 coil과 반대방향으로 전류가 유도되는데, 주파수가 높을수록 가열효율이 좋으므로 보통 임계주파수의 5배 이상의 주파수를 선정한다. 그러나 주파수가 너무 높으면 skin effect 나 proximity effect 등을 고려하여야 하므로 용도에 따라 적당한 주파수를 선정하여야 한다. 고주파 유도가열의 power source 제원은 표 2.1.1과 같다.

표 2.1.1 고주파 유도가열의 power source 제원

Item	Characteristics
Power source input	220V AC, 60-Hz, 3Ø, 50 KVA
High-frequency oscillation system	plate-turning Self-Oscillation
Oscillating frequency	350 KHz
Plate output	35 KW

다. Diffusion-Brazing Parameters

직경 13mm, 두께 0.4mm Zr-4 tube 외면에 Zr-4 부착물을 접합시키는 diffusion-brazing을 수행하기 위한 절차는 부착물에 용가제인 금속 Be의 물리적 증착, 피복관 외면에 부착물을 부착시키는 tack welding, 그리고 brazing의 순으로 이루어진다. 따라서 diffusion-brazing을 수행하기 위해 연구된 변수들은 다음과 같다.

1) Joint preparation

(1) Joint design : 부착물을 피복관 외면에 부착시키는 tack welding은 전기 저항 용접방식인데 tack welding 후 일정한 brazing gap을 유지하고, 용접시에 최소의 용접전류로서 저항 열이 가능한 weld joint 부위에 발생하도록 부착물에 두가지 모양의 bossage(projection)을 고려하였다.

- line bossage

- Point bossage

(2) Part cleaning : Tack welding 할 때 weld joint의 표면조건에 따른 표면저항의 변화와 brazing할 때 표면조건에 따른 wettability 변화, pore 발생등을 배제하기 위해 접합할 부착물의 세척 방법을 고려하였다.

- Vapour degreasing & rinse

2) 용가제 두께

용가제인 금속 Be은 Mo을 가열원으로 하여 진공증착 방법으로 부착물의 양면에 증착시킨다. 여기서 용가제 두께에 따른 경납접합부의 성질 변화를 고려하여 금속 Be 박막 두께를 결정하였다.

3) Tack welding 변수

Tack welding은 피복관의 정해진 위치에 부착물을 고정시키는 동시

에 brazing gap을 일정한 간격으로 유지하는 것이다. 용접방식은 capacitor type의 전기저항용접으로 discharge energy와 welding pressure가 고려되었다.

4) Brazing cycle

점용접 후 형성되는 brazing gap과 금속 Be 용가재 박막 두께 등과 관련된 brazing cycle은 규정하는 brazed joint의 요구조건을 만족하도록 결정하였다.

라. Requirements of Brazed Joint

Brazed joint의 규제항목들은 경납합금층 두께, tube최소두께, 열영향부에서 결정립수, Zr-4간의 직접결합 길이, 오목형 용대의 깊이, 비용착 Be과 기포의 크기, crack길이, 표면 결함 등이 있다.

1) 경납 합금층 두께(Braze alloy thickness)

Be이 Zr-4내로 확산되어 형성된 공정조성의 접합부를 braze alloy라 하며, 냉각수에 노출된 braze alloy의 두께는 부착물의 최하단에서 피복관 축방향에 수직거리로 0.16mm 보다 작아야 한다.

2) Zr-4 tube의 최소두께(sheath wall thickness)

Braze alloy에 용해되지 않는 Zr-4 tube의 최소두께는 0.342mm이어야 한다.

3) 열영향부의 결정립수(Number of grain in the heat affected zone)

Brazing에 의해 미세구조와 기계적 성질이 변화된 피복관의 영역을 열영향부라 하며, 임의 횡단면에 놓인 열영향부에서 결정입자수는 2개 이상이어야 한다.

4) Zr-4간의 직접결합(Zr-4 to Zr-4 bond)

경납합금층에서 Zr-4 끼리의 결합을 직접결합이라 하며 직접결합의 길이는 경납합금 길이의 20%이내 이어야 한다. 그러나 결정입자가 계면을 가로질러 형성되어 있을 때는 직접결합으로 간주하지 않는다.

5) 오목형 융대의 깊이 (the depth of re-entrant fillet)

경납접합부에서 육안으로 관찰할 수 있는 braze alloy를 fillet라 하며, fillet의 표면에서 육안으로 하단부가 식별되는 것을 오목형 융대 (re-entrant fillet)라 한다. 오목형 융대의 깊이는 0.25mm이하이어야 한다.

6) 비융착 Be(Free Be) 및 기포(void)

경납합금층에 용해되지 않은 잔류 Be를 비융착 Be라 하고, 경납합금층내에서 완전히 결합된 영역으로 둘러싸인 비결합 영역을 기포라 한다. 경납접합부의 임의 횡단면내 모든 기포나 비융착 Be 영역의 누적길이는 임의 횡단면에서 부착물 길이의 25%이내이어야 하며, 임의의 기포 혹은 비융착 Be영역은 fillet 표면에서 0.25mm이상 떨어져 있어야 한다.

7) Crack 길이

경납합금의 균열은 0.04mm이어야 하며, 부착물이나 tube으로 침투되어서는 안된다.

8) 표면결함(surface discontinuities)

경납접합부는 crevice나 핀홀 등의 표면불연속이 있어서는 안된다.

(1) Crevice : fillet 표면에서 하단부가 보이지 않는 2차원 결함.

(2) Pinhole : fillet 표면에서의 1차원 결함.

제 2 절 최근 국외의 기술동향

1. 인도의 지지체 부착물에 대한 용접기술 개발 동향

여러 종류의 가압경수로 핵연료 다발 생산에는 다양한 형태의 용접, 브레이징기술 및 장비가 사용된다. 이 다발들은 19, 22, 28, 37개의 원소형 태로 이루어지고 접합설계에 있어서는 유일한 것이다. 가압중수로 핵연료 다발에서 모든 접합부분은 어떤 기계적 접합부분 없이 용접되거나 납땜된다. 저항용접, GTAW, 레이저용접 그리고 브레이징은 다른 형태의 지르코늄 합금을 결합하는데 관련된 핵연료 다발 제조에 사용된다. 이 보고는 다른 형태의 가압중수로 핵연료 다발 제조에 있어 인도의 Bhabha 원자력 연구센터에서 수행된 최근의 기술적 진보 및 작업을 기술하고 있다.[1][2][3] 다른 핵심 부품의 광범위한 생산과 기술개발에서 얻어진 많은 경험이 생산을 위한 결합기술을 평가, 개발 및 감정하는데 이용된다. 개선된 신뢰성과 생산품의 경제성을 달성하는데 다양한 결합 과정을 이용한다. 현대의 용접개발, 개선된 용접의 질과 일관성을 달성하는 방법, 용접 감시의 향상 등이 기술된다. 어떤 장비의 고유한 제조에서 성공적으로 수행된 작업, 제조과정 자동화 그리고 감시 시스템을 포함하고 있는 본 보고에서 더 나은 결합, 편리한 생산 그리고 개선된 핵연료 성능을 향한 노력들에 대하여 기술한다.

인도의 원자력계획은 출발부터 고유한 핵연료 다발 생산에 초점을 맞추고 있다. 그러므로 애초부터 다른 원자로에서 사용되는 용접과 다양한 재료의 결합을 포함하고 있는 제조 기술개발을 목적으로 하고 있다. 이러한 노력의 결과로서 레이저용접, GTAW 그리고 저항용접을 포함하는 현대 용접기술을 사용하고 있는 국제 표준에 맞게 원자로의 주요한 부품들이 부분적으로 제조되고 있다. 현재 8개의 가압경수로 형태의 원자로가 있고 약간의 원자로가 건설중에 있다. 국내에 있는 이러한 원자로에 사용하기 위해 핵연료 집합체와 제어봉 집합체들이 정규적으로 생산된다. 이것들은 엄격한 사양으로 다른 형태의 용접을 포함하고 있다.

핵연료 다발들은 고온, 고압, 기계적 응력, 부식, 피로, 크립 그리고 조사와 같은 열악한 상황에서 운전해야만 한다. 용접의 건전성은 원자로의 안전하고 효율적인 운전을 위해서 절대적으로 필요하다. 노심 성분들은 전체 운전 기간중 거의 무결함으로 운전되도록 요구된다. 향상된 제품을 위한 더욱 더 새로운 기술을 개발하는데 지속적인 노력이 이루어지고 있다. 개선된 절차와 장비가 다양한 부품 생산에서 개발되고 응용되어 왔다.

2. 적절한 접합기술 선택

용접기술에서 여러 가지의 개발이 이루어졌고 많은 최근의 방법들이 현재 다양한 노심 부품제조에 유용하게 사용되고 있다. 우리는 계속적으로 존재하고 있는 공정을 평가하고 기술제품들을 개선하는 관점에서 선택적으로 더 나은 것을 찾고 있다. 핵연료 제조에 사용되어 온 결합 과정은 다음 요건을 만족해야만 한다. a) 건전한 야금학적 구조, b) 적절한 강도, c) 부식 저항성, d) 접합 품질의 신뢰성 및 일관성, e) 기하학적 용접 그리고 재료의 적응성, f) 대량 생산을 위한 적응성, g) 비파괴검사를 위한 적응성, 그리고 h) 경제성 등을 들 수 있다. 가압중수로에서 지르코늄 합금은 핵연료와 다른 집합체들에서 사용된다. 이 합금의 용접가능성은 우수하다. 그렇지만 반응성이 강하기 때문에 용접중에 대기 기체들에 대해 적절한 보호를 필요로 한다. 용접시간이 짧고 발생하는 열이 작은 것이 지르코늄 합금에 가장 바람직하다. GTAW, 저항, 전자빔, 레이저, 초음파, 자기 펄스 그리고 다른 방법들이 기술적으로 지르코늄 합금을 용접하는데 고려할 만하다. 가압중수로 핵연료 다발에서 이용되는 세가지 형태의 접합기술은 다음과 같다. i) 봉단 용접, ii) 지지체와 간격체 용접 그리고 iii) 상하단 플레이트 용접을 들 수 있다. 표 2.2.1에서는 이들 접합에 이용될 수 있는 다양한 용접방법들이 주어져 있다. GTAW, 저항용접 그리고 브레이징 같은 방법은 여러 형태의 핵연료 제조에서 성공적으로 적용되어 왔다. GTAW, 저항용접은 지르칼로이-4 봉단용접에 사용되어 왔다. 이와 같이 현재 지르칼로이-4 피복관에 대한 레이저용접,

표 2.2.1 중수로형 핵연료 제조관련 용접공정의 평가표

JOINTS	COMPONENTS	RESISTANCE WELDING	BRAZING	LASER WELDING	EB WELDING	GTAW
End cap welding	Ø 13.15 & 11.5 0.4mm thick. Clad tube/End caps	A	E	C	C	B
Appendage welding	Ø 13.15 & 11.5 Clad tube/0.6 to 1.6mm thick spacers and bearing pads	A	B	C	D	E
End plate welding	Machined end caps/ 1.6mm thick end plates	A	E	C	C	C

*[Bhabha Atomic Research Centre]

- A- Excellent.
- B- Acceptable.
- C- Feasible, Commercial viability to be seen.
- D- Feasibility is to be checked.
- E- Not considered.

저항용접 그리고 초음파용접의 향상된 기술을 개발 중에 있다. 그리고 상하단 플레이트 용접을 위해서는 GTAW, 레이저 그리고 저항용접이 적용될 수 있다. 레이저용접, 저항용접 그리고 전자빔용접에서 발생하는 열은 작고 용접변형이 매우 적다. 그리고 이것은 접합점에 우수한 건전성을 얻을 수 있다. 전자빔용접은 진공에서 수행되고 종종 용접중이나 후에 반응성 금속에서 대기 가스로부터 용융금속에 매우 좋은 보호막을 제공한다. 저항용접은 높은 생산율, 자동화 용이성, 대량생산의 경제성, 작은 HAZ, 그리고 여러 가지의 매력적이고 독특한 특징을 가지고 있다. 가압중수로에서 핵연료 다발들은 양산 용접을 해야 하는데 저항용접이 가장 많이 사용되고 있다. 상용화되고 있는 용접 공정중에서 많은 부분을 차지하고 있는 방법은 핵연료봉의 밀봉을 위한 봉단마개 용접이다. 이러한 봉단용접은 핵연료 피복관과 봉단마개가 양단에서 용접된다. 먼저 하단 봉단마개는 아르곤가스 분위기에서 용접된다. 그러나 상단 봉단용접은 특정한 압력에서 헬륨 분위기하의 챔버내에서 수행된다. 이때 헬륨은 진공 및 기체 압력을 표준화되고 미리 결정된 압력을 유지하기 위해 세심하게 제어되어야 한다. 이러한 봉단용접과 상하단 플레이트 용접방법의 성능에 대해 기술하면 아래와 같다.[1]

가. 가스 텅스텐 아크용접(GTAW)

이 용접법은 BWR 핵연료봉과 가압중수로 제어봉에 폭넓게 사용되어 왔다. 일반적으로 가스 토오치를 사용하며, 주로 파이프용접에서 제살 불이기용접에 의해 많이 사용되고 있다. 용접중에 발생하는 열이 많고 온도가 높아짐에 따라 넓은 영역이 가열된다. 주변기기들은 공기중에 차폐를 제공하는 챔버에서 용접이 수행되며, 자동용접 작업시 정교한 기술로 적절하게 제어되어야 한다. 전력공급에서 불안정한 오차, 소모품에서 열악한 마모 등이 열악한 용접을 초래하는 변수가 발생할 수 있다. 이 방법은 용접공정이 느리므로 자동화는 양산 생산을 위해서 필수적이다. 기계화 및 자동화 중 비능률적이고 용접결함의 원인이 되는 많은 문제들이 산재되어 있다. 이러한 문제

들을 극복하기 위해 용접제어(AVC)가 적용되는데 모재와 전극사이의 간격을 유지하기 위한 제어시스템이 이용된다. 최근에 개발된 용접기에서 통합된 적응성을 갖는 용접시스템은 짧은 회로검출, wire feed AVC, 그리고 진동주 AVC 등이 구성된 것이다. 이것은 용접시간에서 어떤 편차를 보정하기 위해 제어하는 것으로 적절하게 조절을 해야 한다. 현재 아크 전압용으로 제어를 위한 장비개발은 인도의 Bhabha 원자력연구센터에서 수행되고 있다. 현재의 동력원을 이용하는 TIG용접은 대부분의 접합 요건을 충족시킨다. 가압중수로 봉단용접의 TIG용접은 실험단계에서의 다발과 조사시험용 연료봉에 대해서 성공적으로 수행된 바가 있다. GTAW는 많이 상용화되고 있는 기술이면서 간편하고 경제적이다. 그러나 현재는 대량생산에서 강한 강점을 가지고 있고, 매우 짧은 용접주기를 가지고 있는 저항용접이 사용되고 있다.

나. 전자빔 용접

역사적으로 핵연료 원소 용접에서 처음으로 전자빔 용접을 이용하였다. 전자빔 용접에서 발생하는 열은 작고 그 열은 협소한 영역에 영향을 미친다. 용접은 진공상태에서 이루어진다. 이것은 지르칼로이 용접에 적합하다. 용접은 챔버내에서 수행된다. 지르칼로이 접합의 용접부분에서 주석과 크롬의 고갈은 부식저항성에 영향을 미친다. 또한 작업공정이 느리고 가격이 비싸다. 두번째로 봉단용접을 할 때 주입가스를 채우는데 있어 특별한 준비가 필요하다.

다. 레이저 용접

레이저는 핵연료봉 부품소재의 융합 용접에 있어 매력적인 열원이다. 이것은 진공이나 방호적인 환경을 요구하지 않는다. 좀더 깊은 침투가 달성되고 우수한 빔의 유연성에 있어서 유리하다. 레이저는 매우 작은 점에 집중될 수 있고 에너지 밀도는 $10\text{MW}/\text{cm}^2$ 만큼 높일 수 있으며, 전자빔과 유사하게 깊은 침투가 달성된다. 또한 레이저는 투명한 창을 통해 침투할 수 있

고, 특수한 핵연료부품 가공시 챔버내에서 수행될 수 있다. 유독성이 있고 방사성을 가지는 핵연료가공에 있어서도 원격으로 레이저를 이용한 glove box에서 처리될 수 있다. 그동안 Bhabha 원자력센터에서는 핵연료봉 봉단 용접의 응용에 레이저용접을 연구해 왔으며, 이러한 접합부위에 양호한 상태의 용접이 레이저로 달성되었다. 실제로 핵연료공장에서 생산 및 이용에서의 주요인자는 바로 비용이다. 그러나 이러한 레이저용접은 결합있는 저항용접을 보완하기 위해 사용되어 왔다.

레이저는 광학을 통해 기동하는 빔에 대해 특히 매력적이다. 수치적인 제어가 가능하고 기존의 방법에 비해 유연성이 크다. 레이저용접은 이러한 장점을 살려서 핵연료봉의 부착물 용접에 유용한 기술이다. 원격조정 장비로 광섬유를 이용하는 빔의 조작 가능성으로 인해 부착물 용접에 대한 레이저의 이용범위가 확대되어 가고 있다. Bhabha 원자력 연구센터에서는 레이저용접 개발이 수행되었고, 특히 핵연료봉에 부착되는 두가지 형태의 지지체와 간격체의 용접방법을 제시해 줄 수 있었다. 그동안 레이저용접관련 변수들은 최적화되었고 적절한 레이저용접장비에 대한 사양이 도출되었다. 레이저용접은 기술적으로 가능하고 대량생산에 대해 상업적으로 실행 가능하게 하는 공정방법이다. 레이저용접된 지지체모양을 그림 2.2.1에서 보여주고 있다.

라. 진공 브레이징

진공 브레이징은 국내뿐만 아니라 국외에서 가압중수로 핵연료 다발 부착물에 대한 접합에 대해 피복관과 지지체를 접합하는데 사용되어 왔다. 이 분야에 대해 인도의 Bhabha 원자력 연구센터에서는 현장작업이 수행되어 왔다. 진공 브레이징공정에서 적절한 습식 특성, 충분한 강도를 제공하고 부식 저항성 접합을 형성하게 하는 적절한 용가재가 선택되어야 한다. 이러한 활용에는 Zr-5%Be 합금이 적당하다. 진공 챔버에서 접합부위 열 주입으로 납땜이 이루어진다. 그동안 진공 침전과 주입 납땜 과정은 개발되어 왔고



그림 2.2.1 레이저를 이용한 지지체 용접단면 (x 50)

가능한 양호한 접합부분이 얻어진다. 그러나 브레이징 기술은 베릴륨의 유독성과 높은 처리 비용 때문에 제조자에게 호의를 주지 못한다.[3] 반대로 브레이징의 공정조건이 까다롭고, 또한 바람직하지 않은 많은 열이 변화를 주는 영역에서 피복관 재료의 특성에 영향을 미치게 된다.

마. 저항 용접

저항용접은 광범위한 기술경험과 작업후에 개발되었고, 특히 핵연료봉의 부품용접으로 발전된 우수한 기술이다. 핵연료가 장전된 핵연료봉의 부착물 용접기술은 이미 정규적으로 사용되고 있다. 많은 수의 핵연료 다발들은 우수한 성능으로 요구된 연소도까지 조사되어 왔다. 그리고 작업이 복잡하고 유독성의 베릴륨과 연관이 있는 브레이징의 선택적인 기술에 비해 피복관에 부착물 용접에 대한 기술을 향상시키기 위해 꾸준히 수행되었다. 그 과정에서 개발된 저항용접 장비가 설계되어 제작되었다. 또한, 이러한 용접 공정에서 접합 강도를 결정함으로써 시험되고 평가되었다. 피복관 내경은 붕괴시험으로 검사되었고, 또한 접합부에 대한 부식시험도 수행되었다. 접합부위는 모든 시험에서 양호한 결과를 나타냈다.

최근에 개발된 저항용접장치 부분중에 변환장치 기술과 D.C 동력원에서 상당한 발전이 이루어졌다. 특히 진동수 공급부는 특별한 지역에서 잇점을 제공한다. 이러한 잇점들은 핵연료제조의 응용을 위해 평가되어 왔다. 이러한 시스템은 아직 표준화되지 못했고 가격이 고가이다. 소형 크기, 정밀한 용접제어 그리고 개선된 성능과 같은 잇점들이 핵연료봉 제조의 응용에서 유용하다. 생산공정중에 로봇을 사용하였을 때 중간 진동수 단위는 감소된 크기와 무게로 인해 상당히 공정의 비용을 줄이기 때문에 매우 유리하다.

3. 용접시스템의 개발

핵연료제조 장비개발은 실제로 공정 개발과 동시에 착수되었다. 광범위한 생산에 부합하는 용접방식에서 공정조건을 선택하고 개발하기 위한 노력이 이루어져 왔다. 이러한 제조 장비들이 다음과 같이 설계되었다.[2]

-저항용접에 기반을 둔 봉단용접 장비가 설계 제작되었다. 또한 여러 개 선된 특징들이 설계에 포함되었다.

-핵연료 펠렛을 장전하면서 핵연료봉에 부착물의 저항용접을 위한 장비가 설계 제작되었다. 제조된 장비는 주문되고 정규적인 양산 생산에 이용된다.

-브레이징 작업과 같이 속이 빈 피복관에 부착물 용접개발이 완성되었다. 실험장비는 개념화되어 설계되었고, 세부사항은 생산을 위해 진행 중에 있다.

GTAW 그리고 레이저용접이 표준의 비파괴검사를 이용하여 평가되었다. 그러나 이러한 검사는 저항용접에 적용할 만큼 준비가 되어 있지 않았다. 그러므로 품질보증은 기본 샘플의 용접강도와 금속현미경 사진과 같은 그러한 파괴검사에 의존한다. 아울러 현재까지는 통계적 품질보증이 적용되고 있다. 지난 수년동안 핵연료 성능시험에서는 만족할 만 했고 핵연료 파손율은 상당히 감소되어 왔다.

온라인 감시와 feed back 제어기술에서는 앞에서 기술된 저항용접에서 언급했듯이 보통의 비파괴 검사에 부합하지 않는다. 핵연료봉의 봉단용접에 대해 100% 헬륨 누출시험이 수행된다. 이것은 용접의 건전성을 보증하는데 적당하지 않다. 그러므로 기하학적으로 해석이 가능한 초음파 검사에 대한 개발이 수행되었다. 이것은 엄격한 품질보증의 사양에 부합되는지를 알아보기 위해 취해졌다. 일반적으로 용접결함은 봉단용접의 초음파 검사를 이

용하여 찾아낼 수 있다. 또한 저항용접의 온라인 모니터링에서 상당한 작업이 수행되었다. 인도의 Bhabha 원자력 연구센터에서는 용접품질의 신뢰성을 증가시키기 위해서 여러 용접 모니터링 계획을 연구하였다. 처음에는 여러 용접변수를 제어하기 위한 노력이 이루어졌지만 적절하지 않은 것으로 나타났다. 이것은 동력학적으로 변수를 측정하는 요건을 초래하였다. 동적 저항(DR)에 기반을 둔 용접모니터는 시스템에 연결되었고 용접에 대해 DR 곡선을 도출하였다. 스폿(spot) 용접과 같지 않게 사출 용접에 대해 DR 곡선을 특성화하는 것은 어려운 일이다. 용접은 파괴적으로 검사되고 결과는 상관관계를 가지는 곡선으로 나타났다. 매우 좋은 해석이 도출되었고 DR 창이 가능한 용접에 대해 특성화 되었다. DR 용접 모니터와 연관되어 있는 폐환 제어에 대해 데이터는 1/2 주기 기간보다 긴 동안 수집되어야만 한다. 전극 이동에 의해 측정될 때 용접업셋의 연구 또한 이루어졌다. 이 작업은 효과적인 품질보증을 위해서는 다중 모니터링 시스템이 필요하다는 것이 알려졌다. 또한 AE(acoustic emission) 기술이 모니터링을 위해 많은 분야에서 사용되어 왔고 스폿용접의 품질보증에 대해서는 유망한 기술이다. 다양한 용접에 대해 인도의 Bhabha 원자력 연구센터에서는 AE 검사에 대한 작업을 수행하였고 고무적인 결과를 제공하였다.

가압중수로 핵연료 다발은 완전히 용접된 구조이다. 현재까지의 여러 접합 기술은 이러한 핵연료 다발에 지르코늄을 용접하기 위해 인도에서 사용되어 왔다. 많은 기하학적으로 복잡한 핵연료 구조들이 품질과 건전성이 우수하게 성공적으로 용접되었다. 특히 레이저를 이용한 부착물 용접과 봉단 용접기술이 개발되었다. 최근에는 용접장비 및 기술이 품질을 개선시키고 핵연료 폐기율을 감소시키고 신뢰성을 향상시키기 위해 이용되어 왔다. 레이저 용접, 전자빔용접, GTAW 그리고 저항용접으로 평가되었고, 용접강도, 피복관 붕괴시험, 접합부의 야금학적 분석과 부식 검사가 철저히 사양에 부합되도록 수행되었다. 또한 저항용접에서 향상된 기술, 즉 온라인 모니터링은 핵연료 다발에서 품질과 신뢰성을 향상시키기 위해 이용되었다.

제 3 절 레이저용접의 특성 및 전망

1. 레이저용접의 특성

레이저의 특성은 광선의 고유한 성질을 가지는 우수한 단색성, 간접성, 직진성과 휘도에 의한다. 이러한 모든 성질이 중요한 것은 아니며, 어떠한 경우에는 이러한 특성이 장점이 될 수도 있다. 그러나 재료가공에서 가장 중요한 것은 레이저출력의 조절이 광범위하며, 펄스당 에너지는 mJ에서 수십 J까지 가능하며 또한 반복율과 펄스크기의 변화가 가능하다. 현재 일반 산업계에서 널리 사용되는 열원은 전기아크의 에너지이며, 이에 반하여 레이저는 고에너지 밀도를 가지는 종래의 열원으로서 얻을 수 없는 첨단 가공기능을 가지고 있다. 레이저용접은 국소적으로 순간 가열이 가능하여 열에 예민한 소재나 특히 높은 용점을 가지는 지르코늄이나 티타늄 등의 피가공물에 쉽게 용접을 할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

일반적으로 레이저용접은 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 사용되고 있으며, 현재 각각의 특성을 살려 산업 현장에서 활용되고 있다. 그중 파장이 1.06 μ m인 Nd:YAG 레이저는 광섬유 전송이 가능하므로 밀폐된 장소나 곡면부위의 용접이 용이하며, 특히 펄스폭과 반복율을 자유로이 제어할 수가 있으므로 반사도가 높거나 용융점이 큰 재료의 용접이 가능하다.[8] Nd:YAG 레이저는 CO₂ 레이저에 비해 파장이 1/10 정도로 짧고 펄스형이기 때문에 섬세하고 정밀한 제품에 요구되는 정밀용접이나 절단에 매우 유리하다. 또한, 작업환경이 특수한 원자력 시설에서는 방사선에 의한 접근이 어렵거나 제염이 문제되는 장소에서 광섬유의 전송기구를 이용하여 원격조작이 가능하므로 레이저의 장점을 최대한 발휘하여 사용하게 되면 널리 실용화될 것으로 기대된다. 이와 같이 레이저 용접상의 특성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

초점에 집중되는 레이저에 의해 발생하는 고열을 이용하므로 섬세하고 정밀한 용접이 가능하고, 특히 용융점이 높은 재료 등의 다양한 재료의

용접에 적합하며, 순간적인 레이저와 가공물질의 작용에 의한 재료가공으로 적은 에너지를 이용하여 열변형이 적으며, 레이저에 의한 원격 비접촉의 가공이면서 가공물에 기계적인 힘을 가하지 않고 연약한 재질의 가공이 가능하며, 레이저 출력제어가 자유로워 생산공정의 자동화에 적용이 쉽고 생산성을 높일 수 있으며, 특히 Nd:YAG 레이저는 광섬유에 의한 전송이 가능하며 협소한 작업공간이나 차폐된 실내에서의 원격가공이 쉽고, 광섬유에 의한 레이저 출력의 분리 및 합성이 가능하며 작업효율을 높일 수가 있으며, 진공이나 특수한 작업환경을 필요로 하지 않아 용접공정이 단순하여 생산성을 높일 수 있다.

또한, 레이저의 광섬유 전송특성을 살린 원격용접의 활용이 증대되고 있으며 산업 현장에서도 레이저에 의한 생산성 향상 및 광섬유 합성에 의한 출력증강 및 반복율 증대 등이 활용되고 있다. 최근에는 고출력인 2 kW Nd:YAG 레이저를 이용한 용접이 전자빔에 비하여 거의 동등하게 열변형이 적고 대기 중에서도 깊은 용입을 얻을 수가 있는 장점을 가지고 있다. 특히 광섬유를 이용하면 기존 방법으로 불가능하거나 용접할 부위가 협소한 곳에 위치하고 있을 때 Nd:YAG 레이저는 매우 우수한 능력을 가지고 있고, 특히 용접물의 형상이 복잡한 3 차원용접에도 가능하다. 근래에는 미국의 웨스팅하우스 및 일본의 미쯔비시 중공업의 원자력산업에서는 노후화된 증기발생기의 전열관 내부에 대한 보수용접이 원격방법으로 광섬유 전송 기구가 사용되고 있는 것으로 보고되고 있다.[9][10]

현재 수행되고 있는 원자력분야에서의 용접은 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며, 특히 핵연료봉의 밀봉용접은 빼놓을 수 없는 핵심기술이다. 또한 최근 들어 특수재질 및 용접기법에 따른 새로운 기술이 날로 향상되어 보급되고 있다. 일반적으로 정밀부품 제조를 위한 방법은 TIG용접, 저항용접, 레이저 및 전자빔용접 등을 들 수 있다. 용접법중 실제로 용접부의 기계적 특성, 용접성 및 용접공정의 관점에서 볼 때 TIG용접은 높은 입열로 인한 열변형이 심하며, 용접부의 결함 발생이 문제가 되고 있다. 저항용접은

품질면에서는 여타의 용접보다 우수하나 장비의 복잡성에서는 다소 불리하며, 고속 입자의 광선을 이용하는 레이저용접은 원격작업과 품질면에서는 유리하나 작업조건이 매우 까다롭다. 또한 높은 에너지 밀도의 전자빔을 이용하는 전자빔용접은 공정에서 고진공 챔버가 필요하고 보수 유지비가 많이 든다. 따라서 정밀부품의 제조를 위한 작업조건과 비용이 고려된 적절한 용접법의 선택이 필요하게 된다.

실제로 원자력분야에서의 응용뿐만 아니라 전자부품 제조업계에서 Nd:YAG 레이저에 의해 응용될 수 있는 3차원용접의 몇 가지 예증으로 첫째로 서로 형상이 다른 얇은 파이프관의 레이저용접인 경우 좌측 로울러에서 성형 사출되어 오는 가공물이 거의 열변형 되는 일이 없이 용접된 제품으로 완성되어진다. 둘째로 최근에는 생산라인의 자동화로 컬러 TV 브라운관의 소형 전기총 레이저용접의 경우를 들 수 있다. 컬러 TV의 전력절감과 소재절약에서 볼 때 전자총을 소형화하려는 방법으로 초정밀용접할 수 있는 Nd:YAG 레이저를 이용하였고,[11] 또한 용접위치를 감시하는 방법과 생산라인의 작업장에서 자동제어할 수 있는 하나의 통합시스템을 완성했다. 셋째로 미국 Abraham사의 터빈엔진 열교환기인 인코넬재료 용접에서 이미 실용화되고 있다.[12] 이상과 같이 Nd:YAG 레이저는 먼저 제어성이 우수하고 대량생산이 가능하며 광범위한 응용분야에서 에너지절약과 자원절약으로 기존의 방법에서는 볼 수 없는 우수한 장점을 가지고 있으며, 최근에는 마이크로시닝 산업분야에서도 그 위력이 발휘되면서 차츰 그 유효성이 인식되기 시작하였다. 향후 CAD 및 CAM이나 로봇 등과 결합하여 CNC 제어기술에 의한 자동화 시스템이 이루어지면 FA 및 FMS에서 필수 불가결한 중심적인 기구로 성장하여, 특히 정밀가공관련 제조분야에 대해 파급효과가 클 것으로 기대된다.

2. 레이저용접의 유용성 및 전망

레이저 발명 이후 1970년 후반부터는 고출력을 이용한 상용화 제품이 등장하면서, 레이저장치는 매우 범용적으로 사용하는 기기로 특정의 용접에서는 레이저의 유용성이 인정되었으나 아직 특수한 생산 공정에서의 직접적인 활용에는 문제가 있었다. 그러나 레이저의 기술이 급속한 발전으로 현장에 적절하게 사용될 수 있고 또한 경제적인 레이저장치가 보급되고 있는 실정에 와 있다. 특히 레이저용접은 제어성이 우수하고 기존 방법과는 찾아볼 수 없는 우수한 점을 가지고 있으며, 최근에 와서 그 위력이 발휘되면서 점점 그 유용성이 인식되기 시작하였다. 특히 원자력 핵연료가공분야에서 뿐만 아니라 일반산업의 정밀 제조업계에서도 신뢰성이 있고, 융통성이 있는 효과적인 용접방법임을 제시될 수 있으며, 그에 따른 정밀가공산업의 레이저용접 활용은 급속도로 증가추세에 있다고 볼 수 있다.

초정밀 레이저용접은 일반적인 저항용접, 고주파용접 및 TIG 용접에서 얻을 수 없는 미세한 부위의 용접이 가능하다는 강한 장점을 가지고 있으며, 특히 용융점이 높고 공기 중에 산화되는 비철금속 등과 같은 매우 까다로운 소재의 용접에 적합하다. 또한 산업현장에서 레이저용접기와 컴퓨터 및 CNC controller를 결합시켜 공장 생산라인의 자동화를 용이하게 실현할 수 있으므로 생산성 향상 및 수출증대를 기할 수 있다. 아울러 초정밀 레이저용접은 유연한 광섬유를 이용하여 정밀부위를 원격으로 신속하게 작업할 수 있는 특징을 가지고 있으며, 또한 spot 용접상태를 화면을 통하여 실시간으로 감시할 수 있다. 이에 따른 레이저용접의 활용성으로 인해 산업계의 타 업종에 걸쳐 파급효과가 커서 고부가가치의 신제품을 창출할 수 있다. 최근에 국내에서는 전자공업의 반도체공정에서의 레이저슬더링, 마킹 그리고 초정밀가공 기술개발에 따라 레이저용접에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이며, 정밀부품가공에 사용되는 레이저용접기의 개발이 절실히 요구된다. 따라서 관련 기기의 국산화에 의해 가격을 절감시킴으로써 레이저용접 응용 기술의 활성화를 기할 수 있으며 파급효과가 클 것으로 기대된다.

따라서 레이저용접의 잇점을 충분히 발휘하기 위해서는 특수목적에 맞는 용접주변기기의 설계 및 제작과 이를 이용하는 현장 기술자사이의 긴밀한 협조가 요망된다. 이로 인하여 더욱 신뢰성이 있고, 광섬유를 이용한 레이저용접이 보급되어 새로운 기술력이 이루어지면 핵연료가공의 정밀부품 뿐만 아니라 의료용 동위원소용기나 가이드와이어, 각종 이종금속의 용접분야에 적용될 수 있으며, 한국원자력연구소에서는 핵연료봉의 지지체용접 샘플 제작과 더불어, 타 산업계에서의 응용분야 확대를 위해 현장업계와의 연계를 계속적으로 추진할 예정이다. 또한 한국원자력연구소 및 핵연료제조업계와 공동실험을 통하여 시제품제작 및 성능평가를 수행하고, 이를 바탕으로 핵심기술을 업계에 전수함으로써 신속하게 상업화가 이루어지도록 지원할 것이다. 향후 수년 후에는 국내에서도 중수로 핵연료가공분야에서 그 수요가 증대되어 레이저용접된 제품의 생산으로 크게 기여할 것으로 본다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 레이저용접시스템 개발

1. 레이저장치 설계 및 구성

Nd:YAG 레이저는 Nd (Neodymium, 원소주기율표 번호60)이 1% 내외로 doping 된 YAG (Yttrium Aluminum Garnet) 단결정에 섬광램프 등의 강한 빛으로 펌핑시켜 발생시키는 적외선 레이저 광인데 출력이 세고 동작형태가 다양하여 CO₂ 레이저와 더불어 산업용 레이저로 많이 사용된다. 펄스형 Nd:YAG 레이저는 레이저 출력 형태가 펄스형이므로 첨두출력이 세고 다양한 가공변수를 구현할 수 있으며 광섬유로 원거리 전송이 가능하여 용접용으로 특히 많이 사용된다.

고출력 산업용 Nd:YAG 레이저장치는 국내의 주력산업인 전기 전자 및 정밀기계, 자동차, 조선 등 주요분야에서 제품의 신뢰성 제고와 생산성 향상을 위하여 공장자동화를 적극적으로 추진하고있는 경우가 많으며 이 경우 Nd:YAG 레이저는 원격 가공장치로 대단히 중요한 위치를 차지하고 있다. 광섬유 전송형 레이저용접기는 펄스형 혹은 연속발전형 Nd:YAG 레이저를 지름 400-1000 um의 광섬유로 전송하여 고밀도의 레이저 광으로 비접촉 용접하는 특수용접 장치이다. 이는 광섬유를 사용하므로 로봇과 결합하기가 용이하며 원거리전송이 가능하므로 자동화 용접, 오염된 표적의 가공, 가공 부위가 협소하여 일반 용접기가 접근 할 수 없는 곳의 용접 및 3차원 가공이 용이하다. 또한 레이저용접은 레이저의 집속성을 이용하여 다양한 가공특성을 얻을 수 있으며 이중금속간 용접, 박판과 후판의 용접, 초정밀용접 등 특수분야나 고부가가치의 미세용접에 사용된다.

최적의 가공특성을 얻기 위한 용접부위의 파워밀도 제어는 적절한 광학계의 구성과 레이저 변수의 조절로 이루어지며 여러 개의 광섬유로 분

기시켜 용접하기도 한다. 레이저용접은 가공에 소요되는 에너지를 전적으로 레이저 광에 의존하여야 하므로 용접부위의 침투출력 뿐만아니라 평균출력도 충분히 커야한다. 광섬유전송형 정밀용접용 Nd:YAG 레이저장치는 표 3.1.1에서 나타낸 바와 같이 표적에서의 에너지 밀도를 높이기 위하여 400um 정도의 굵기가 가는 광섬유를 사용하여야 하며 광섬유의 종류도 GI(Grade Index) type이 SI(Step Index) type보다 좁고 깊은 용접에 적합하다. 본 레이저용접기의 기본구성은 200W급 펄스형 Nd:YAG 레이저와 400um 구경의 GI type 광섬유 2개로 전송되는 용접시스템이다.

표 3.1.1 광섬유전송형 Nd:YAG 레이저용접기 사양

구 분	세부항목	개발내용	비 고
레이저장치	평균출력	200 W max.	실용적인 이송속도 확보
	침투출력	12 kW max.	정밀용접 가능
	펄스에너지	50 J max.	4분기 이상 용접시 가능
	펄스폭	0.05~20 ms	Remote Control 가능
	주파수	단 발 ~ 1 0 0 Hz	Remote Control 가능
용접기장치	분기장치	2분기	양쪽면 용접가능
	광섬유 굵기	400~800 um	입사광학부 설계
	광섬유 감시기	실시간감시	입/출구 양쪽 사용
	가공물치	용접용	교체가능

레이저발전부는 공진거울(전반사경과 출력경)과 aperture, 레이저로드, 섬광램프 및 펌핑반사체로 그림 3.1.1에서와 같이 구성되어 있다. 여기서 레이저 발전부의 각각의 부품을 요약하면 다음과 같이 기술하고자 한다. 레이저 공진거울은 전반사경과 출력경의 두가지로서 거울의 상대적인 거리와 자체 거울면의 곡률반경은 레이저로드나 aperture의 구경에 의해 제한을 받는 횡모드 특성을 결정하게 된다. 출력경 반사도는 정밀용접용 레이저경우 약 60% 인 거울을 사용하게 된다. 레이저 공진기내의 aperture는 레이저빔의 횡모드 크기를 조절하여 레이저의 퍼짐성을 줄이고 레이저로드 등의 부품을 강한 광선으로부터 보호하는 역할을 한다. 보통 multimode로 동작시킬 경우 위치에 따라 달라지지만 레이저스폿 크기보다 약간 작게 한다. 그리고 레이저로드는 매우 단단한 등방성의 보석으로 섬광램프로부터 광펌핑에 의해 에너지를 공급받아 1.06um의 레이저빔을 발생시키는 핵심부품이다. 레이저로드의 크기는 목표로 하는 최대 평균출력과 출력빔 발산각을 고려하여 구경과 길이를 결정한다. 레이저로드를 광학계를 통하여 펌핑시키는 섬광램프는 전기적 에너지를 다양한 spectrum 분포를 갖는 광에너지로 변환시켜 주는 부품이다. 내부에 충전된 가스의 종류 및 압력 그리고 전류밀도의 세기에 따라 광의 분포가 달라져 펌핑 효율이 변하게 된다. 펌핑효율은 섬광램프에서 발광되는 광의 spectrum 중 Nd +3 ion의 흡수 대역인 600-800 nm에서 발광하는 광의 상대적 크기에 따라 결정된다. 펌핑반사체는 섬광램프에서 발광하는 광을 레이저로드에 집속시켜 주는 역할을 하는 부품으로 그 형태는 타원형으로 하고 있다. 타원형 반사체의 반사되는 면은 거울과 같이 되어 있으며 내구성을 고려할 때 금도금 반사면이 가장 많이 사용되고 있다. 금도금 타원반사체는 펌핑효율은 좋으나 일반적으로 레이저로드에서 펌핑 에너지분포가 균일하지 못한 단점을 가지고 있다. 이러한 반사체는 레이저로드에서의 펌핑 균일도를 향상시켜 공간적인 강도분포가 일정한 고품질 레이저빔을 얻고자 하는데 사용되고 있다.

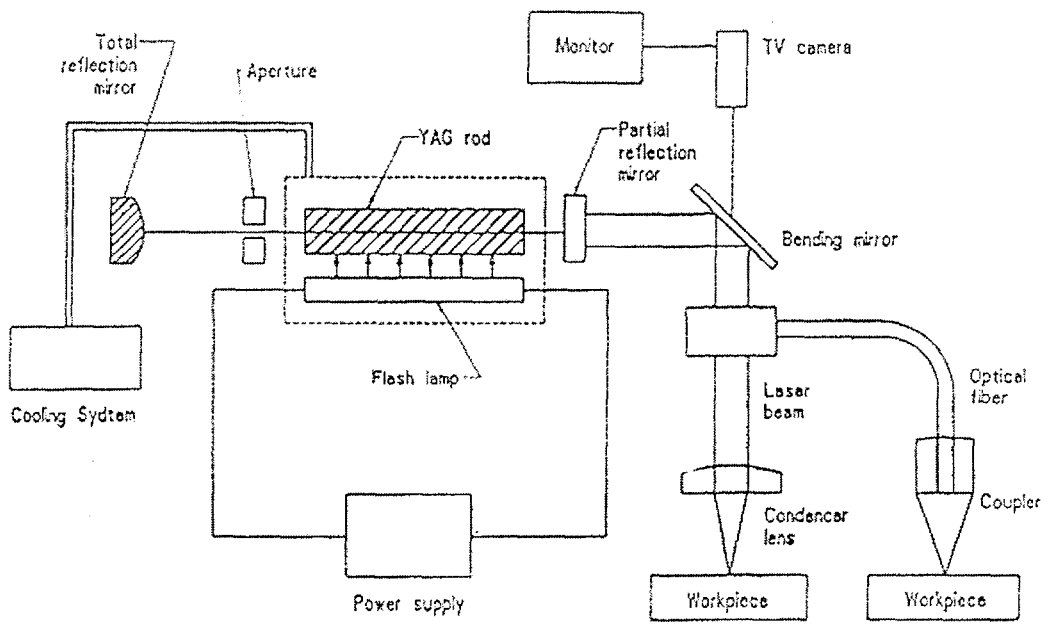


그림 3.1.1 Nd:YAG 레이저발진부 개략도

레이저빔의 출력특성은 공간적 특성과 시간적 특성으로 대별된다. 사용된 정밀 용접용 레이저장치의 일반적인 특성은 다음과 같다.

발진파장 : 1064nm

펄스 주파수 : single - 100Hz

펄스폭 : $80\mu s$ - 10ms

최대출력 : 200W

첨두출력 : 12kW

최대펄스에너지 : 50J

출력안정도 : $\pm 10\%$ 이내

Optical Fiber Delivery : 400~1000 μm SI or GI type

공간분포는 빔의 진행경로에 관한 정보와 고유특성이 합성되기 때문이며 고출력의 레이저빔을 특성의 왜곡없이 예민한 측정기 센서에 결상 시키기도 쉽지 않다. 대표적인 공간분포 분석장치를 이용한 레이저빔의 특성은 다음 그림 3.1.2에서와 같다.

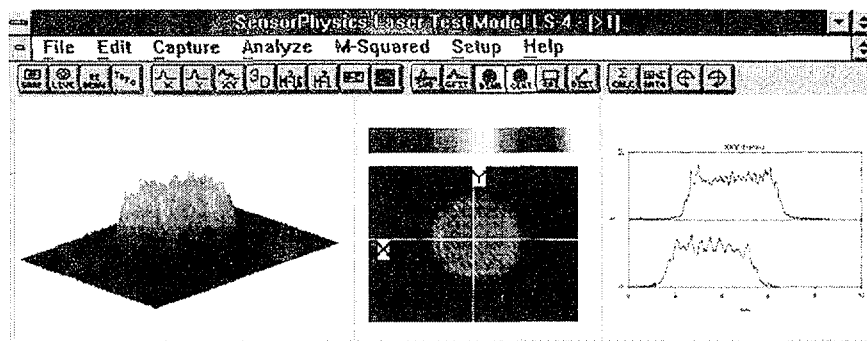


그림 3.1.2 펄스레이저 Beam의 공간분포 Profile

2. 광섬유 전송부 설계 및 제작

레이저빔을 광학렌즈를 사용하여 표적에 바로 입사시키는 장치가 그림 3.1.3과 같은 직사광학계 구조의 빔전송 장치이다. 발진된 레이저빔의 광학적 특성을 그대로 가지고 있으므로 절단이나 드릴링 등 에너지 밀도가 높은(작은 레이저빔 spot size)장치에 사용된다. 빔 확대기를 사용하여 확대된 빔을 가공물체가 있는 위치까지 전송한 후 45° 반사거울로 반사시켜 집광 렌즈로 가공물체에 조사시킨다. 본 실험에서는 광섬유를 이용한 빔전송장치를 사용하였다.

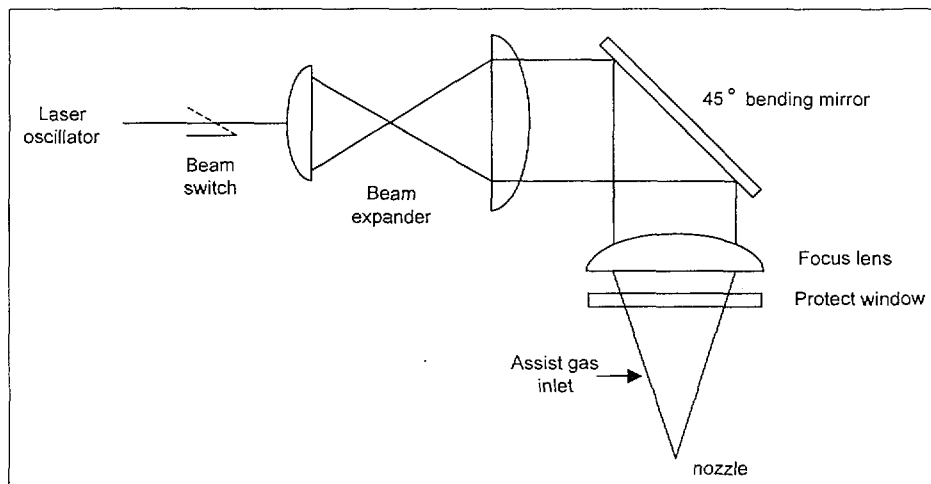


그림 3.1.3 Direct beam head 광학계

그림 3.1.4에서와 같이 광섬유를 사용한 전송장치는 용접이나 절단시에 광섬유의 특징을 이용할 수 있으며, 특히 원거리 전송이 용이한 장점이 있다. 진원의 빔모양을 얻을 수 있고 빔의 공간 분포를 광섬유의 종류에 따라 다르게 할 수 있는 특징이 있다. Step index type(SI)의 광섬유는 공간적으로 균일한 에너지 분포를 가진 레이저광을 얻을 수 있고, grade index type(GI)의 광섬유는 가운데가 가장자리 보다 에너지 밀도가 센 형태의 레이저 광을 얻을 수 있다. 광섬유의 종류와 굵기를 적절히 선택함으로써 각각 다른 용접특성을 얻을 수 있다.

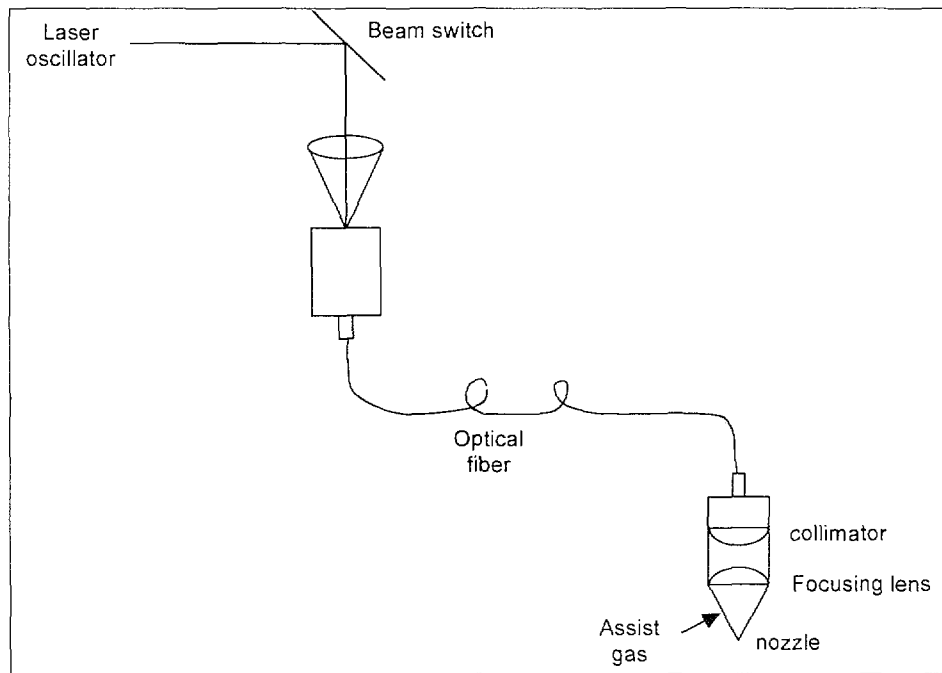


그림 3.1.4 광섬유 전송형 광학계의 구성도

광섬유를 이용한 전송광학계의 가장 큰 장점은 원거리 전송이 가능하고 따라서 원격가공에 적합하다. 앞에서 언급한 광속확대기, 열반사거울 및 집광렌즈로 이루어진 레이저 전달장치 대신에 광섬유를 이용하여 레이저를 전송하게 된다. 광섬유 전송부는 그림 3.1.4와 같이 input coupling 장치, 광섬유 및 output coupling 장치로 구성된다.

Input coupling 부는 입사렌즈에 의해 레이저가 광섬유코어부분으로 집속되는 부분이다. 특히 SI(Step Index) 광섬유의 개구수(Numerical Aperture)는 0.22 정도를 갖는다. 따라서 레이저빔과 입사렌즈를 포함한 input coupler 의 수직정렬은 큰 장애가 되지 않으며 best focus를 찾는 것이 중요하다. 기하학적인 입사렌즈의 초점위치는 광섬유 끝면보다는 약간 앞에 위치하는 것이 좋다. 용접용 레이저빔 전달에 사용되는 광섬유의 직경은 300-1000um 정도의 step index 와 graded index형으로 구분된다. 대구경 광섬유의 경우 다중 횡모드를 전송시키므로 전송손실이 작으며 횡모드에 의해 레이저빔의 homonization 이 일어나 용접활용에 좋은 효과를 지니고 있으나 유연성이 떨어져서 피용접물에서의 스폿 크기를 작게 할 수 없는 단점을 가지고 있다. Output coupling 부는 광섬유에서 퍼져 나오는 빔을 집속시켜 용접물에 다시 재집속시키는 과정이다. 이때 용접물에서의 레이저 빔크기는 output 렌즈계의 imaging ratio는 피용접물까지의 작업거리 및 스폿 크기를 고려하여 사용자가 정하게 된다.

3. 레이저용접 감시부 설계 및 제작

가. 레이저용접 감시

중수로용 핵연료봉에 있어서 지지체 부착물을 연료봉 표면에 레이저를 이용하여 용접하기 위해서는 1 mm 이하의 크기를 가진 레이저빔을 정밀하게 제어하여 용접선을 추적해가야 한다. 1 mm 이하의 레이저빔을 이용한 마이크로용접은 용접폭이 1mm 이하로 매우 미세하기 때문에 용접시 기계적인 오차를 최대한 줄여야 한다. 오차를 줄이기 위해서는 정밀한 기계장치의 조작과 함께 오차가 발생했을 때 오차를 확인할 수 있는 감시장치가 요구된다. 오차를 확인한 후 오차를 정밀하게 보정해야 하기 때문이다. 용접부를 세밀하게 관측하기 위해서는 용접부 측면에서 비스듬하게 관측하는 방법과 레이저빔과 동일한 광축에서 수직으로 관측하는 방법이 있다. 비스듬한 위치에서 관측하는 방법은 감시장치를 임의의 위치에 설치할 수 있기 때문에 설치가 용이하지만 레이저 용접면과 관측면이 일치하지 않아 관측이 왜곡될 염려가 있다. 레이저빔과 동일한 광축에서 관측하게 되면 레이저용접 헤드와 관측카메라를 복합적으로 구성해야 하는 어려움은 있지만 용접면을 수직으로 관측할 수 있기 때문에 관측 초점면을 설정하기가 용이하고 관측과 동시에 용접거리 조절이 가능하여 레이저용접의 효율을 증가시킬 수 있기 때문에 마이크로 용접에서는 이와 같은 방법을 많이 활용한다. 특히 레이저를 이용한 마이크로 용접시 광축과 용접면을 수직으로 설정하기가 용이하여 본 연구에서도 용접면을 수직으로 감시하는 시스템을 구성하였다.

4축으로 구동되는 지지체 부착용 레이저장치에 설치된 레이저용접 헤드에는 관측용 카메라가 일체형으로 장착되어 있다. 레이저빔과 관측장치는 레이저빔 광축과 카메라 광축을 일치시키기 위하여 half-mirror를 사용하여 레이저빔을 90° 반사시켰으며, 반사된 빔축과 카메라 광축을 일치시켰다. 카메라장치는 레이저용접헤드와 일체형으로 제작되어 동시에 제어된다. 용접감시용 카메라를 장착한 레이저용접헤드는 4축으로 구성된 테이블의 수

직이동축에 고정된다. 레이저용접헤드 일체형 감시장치에는 초소형 고성능 칼라 CCD 카메라를 사용하였다.

나. 레이저용접 감시장치 구성

그림 3.1.5는 지지체용접용 감시 및 제어장치 구성도를 보여준다. 그림 3.1.5에서 볼 수 있는 바와 같이 다축으로 구성된 이동용 테이블에 설치된 레이저용접 헤드에 감시용 카메라장치가 일체형으로 부착되어 있다. 용접면에 초점이 맞추어지도록 50mm 초점거리의 렌즈와 확장링을 사용하였다. CCD 카메라 영상은 칼라모니터에 디스플레이 된다. 용접감시용 카메라로는 칼라 CCD 카메라를 사용한다. 사용된 카메라의 사양은 표 3.1.2와 같다. 일반적인 칼라 CCD 카메라는 흑백 CCD 카메라에 비해 고가이며 크기가 커지는 단점이 있지만, 최근에는 카메라헤드와 콘트롤러를 분리시켜 성능은 우수하면서도 소형화된 칼라 CCD 카메라가 다양하게 공급되고 있다. 칼라 CCD 카메라를 사용할 경우 용접시 발생할 수 있는 산화 등을 색으로 분별할 수 있기 때문에 용접품질을 효과적으로 감시할 수 있다. 일체형 용접감시 장치는 용접부를 감시할 뿐만 아니라 용접거리를 설정하는 기능도 가지고 있다. 즉 레이저용접헤드와 용접면과의 거리를 설정하고 감시장치의 초점이 이 거리에 설정하면 레이저용접헤드와 용접면과의 거리가 변화하였을 때, 영상의 초점이 흐려지게 되며 영상의 초점이 선명하게 되도록 거리를 조절하면 이 거리가 용접거리가 된다. 용접면에는 Nd:YAG 레이저빔이 조사되기 전에 저출력의 He-Ne 레이저빔이 조사되며 He-Ne 레이저빔의 초점은 용접면에 맺히도록 설정된다. 수mm 범위의 초점거리는 렌즈의 거리계로 조절하며 그 이상의 범위는 확장 링으로 조절한다. 현재 레이저용접헤드 끝면과 용접면과의 용접거리는 약 35mm로 설정되어 있다. 초점거리를 짧게 하려면 확장링의 폭을 증가시키고 초점거리를 길게 하려면 확장링의 폭을 감소시키거나 확장링을 제거하면 된다. 그림 3.1.6은 레이저용접헤드 일체형 관측장치가 부착된 레이저용접 감시 및 제어장치를 보여준다.

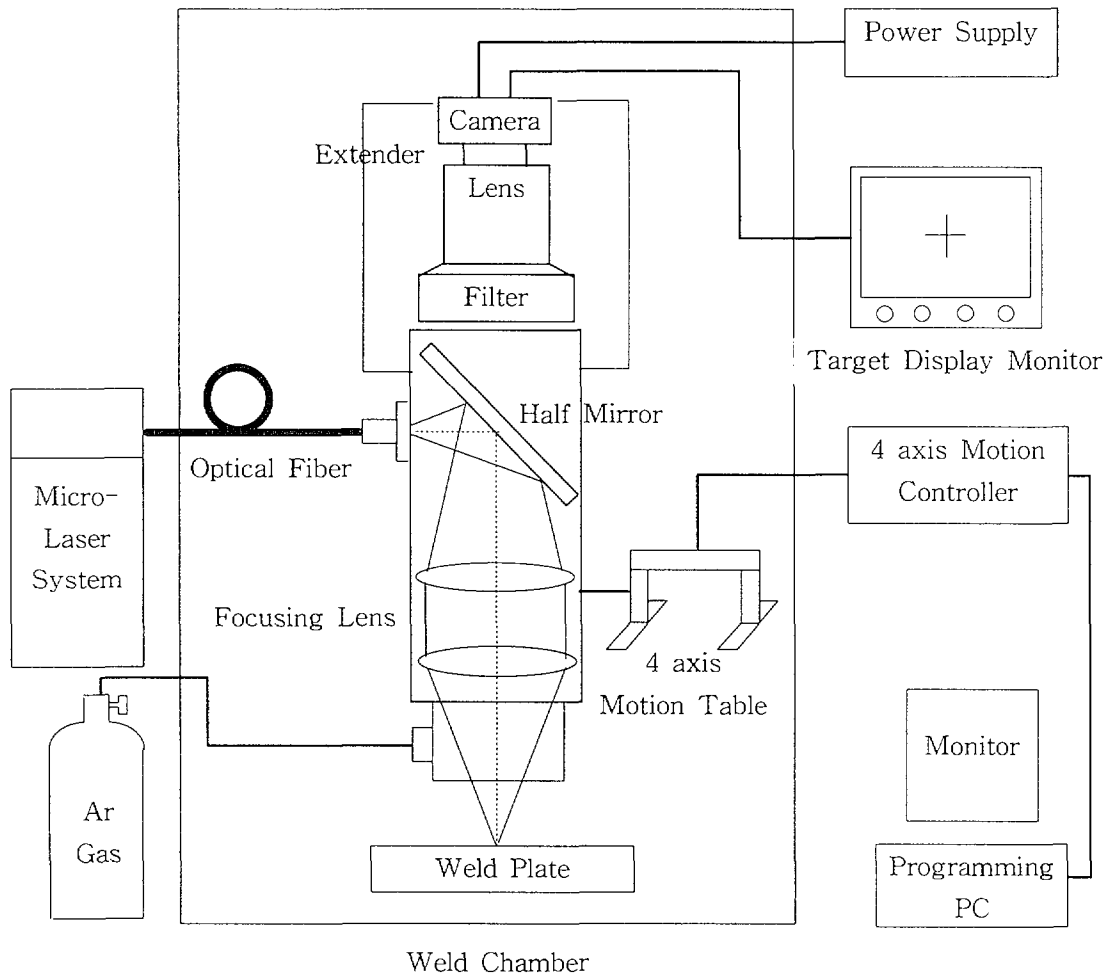


그림 3.1.5 지지체 용접용 감시장치 구성도

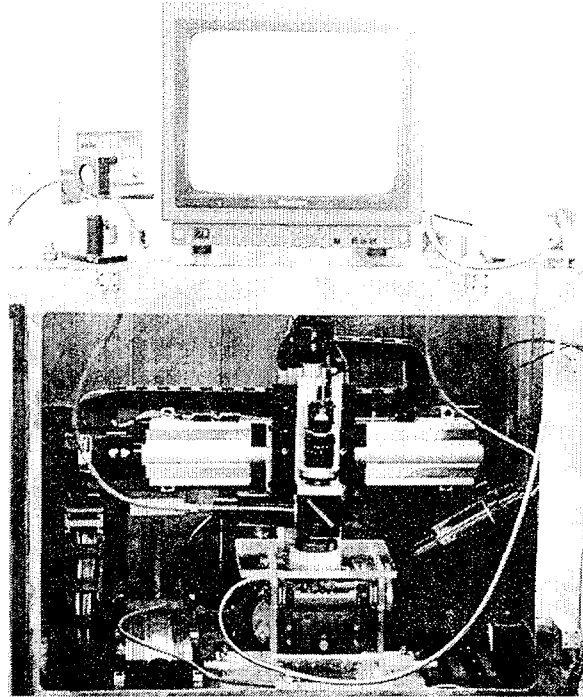


그림 3.1.6 지지체 용접용 감시장치

표 3.1.2 칼라 CCD 카메라 사양

항목	사양
모델	소니 XC-333
CCD size	1/4 inch
CCD 해상도	768×494
신호방식	NTSC
수평해상도	470 TV lines
최저조도	10.0 Lux
S/N 비	46dB 이상
렌즈마운트	NF/C 마운트
크기	22×22×30

카메라와 렌즈사이에는 폭 5mm의 확장 링이 삽입되어 있다. 확장 링은 렌즈와 카메라 CCD면 사이의 거리를 증가시켜 렌즈와 근접한 물체에 대해 초점이 맺히도록 하는 기능을 가지고 있다. 확장링의 폭이 증가하면 매우 근접한 물체의 관측이 가능하고 확장 링을 제거하면 원거리의 물체를 관측할 수 있다. 이와 같이 확장 링의 폭을 조정함으로써 현재 설정되어 있는 용접거리를 변화시킬 수 있다. 사용된 렌즈는 AVENIR의 C마운트 CCTV 렌즈이다. 모델 No.는 SE5018, F 1.8, 초점거리 50mm이며 30mm 직경의 필터를 장착할 수 있도록 되어 있다.

52mm 직경의 다양한 필터세트를 장착하기 위해 30mm/52mm 직경 변환 필터 어댑터를 제작하여 렌즈에 장착하였으며, 필터 어댑터 전면에 52mm 직경의 필터세트를 장착하였다. 장착된 필터세트는 UV 필터와 ND 필터 및 칼라필터로 구성되어 있으며, 산란되는 1.06 μ m 파장의 Nd:YAG 레이저빔과 용접시 발생하여 관측에 방해를 주는 강한 가시광선을 여과하고 용접불꽃을 적절히 차단하며 플라즈마 가스 등의 이물질이 렌즈표면에 부착되지 않도록 렌즈를 보호하는 기능을 담당한다. UV 필터는 자외선 및 적외선 차단과 이물질 부착 방지기능을 담당하며 ND 필터는 강한 가시광선 영역을 일정 수준으로 차단하며 칼라 필터는 관측에 방해되는 강한 가시광선 영역을 차단하는 역할을 수행한다. 그림 3.1.7은 제작된 감시카메라 장치를 보여준다.

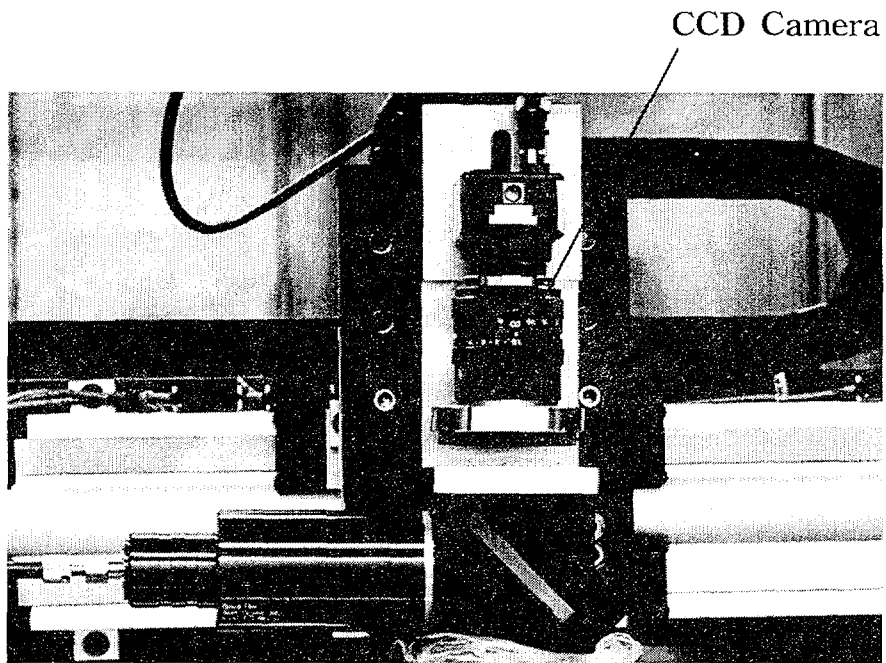


그림 3.1.7 지지체 용접용 감시카메라 장치

4. 레이저용접 제어부 설계 및 제작

가. 4축 구동 레이저 용접 제어장치

(1) 레이저용접 제어장치

지지체 부착물을 위한 연료봉의 표면에 용접하기 위해서는 정밀한 기계 및 제어장치가 필요하다. 용접부의 폭이 1mm 이하이기 때문에 정밀한 제어를 하지 않으면 요구되는 용접특성을 만족할 수 없다. 개발된 4축 구동 및 제어장치는 x-y-z 3축의 직선운동 축과 R1 축의 회전운동 축으로 구성되어 있다. 4축으로 구성된 본 구동장치를 이용하여 입체적인 용접위치 선정이 가능하도록 직선이동장치에는 레이저용접헤드를 설치하였고 회전운동축에는 지지체가 부착된 연료봉을 설치하였다. 그림 3.1.8은 개발된 지지체 부착용 레이저용접 제어장치를 보여준다.

(2) 레이저용접 제어장치 구성

레이저용접 제어장치는 3개의 단축 이송 테이블과 1개의 회전축, 4개의 드라이버 및 PC 장착 콘트롤러, 그리고 제어용 컴퓨터로 구성된다. 상하 수직으로 구동하는 이송테이블 위에는 레이저용접헤드를 고정할 수 있는 지그가 설치된다. 지지체가 부착된 연료봉은 회전축에 설치되어 있으며 직선운동하는 3축을 제어하여 레이저용접헤드를 이동시키면서 용접을 수행한다. 이송 테이블은 제어가 용이한 스테핑모터로 구동된다. 이송테이블의 사양은 표 3.1.3과 같다.

표 3.1.3 이송테이블의 사양

항목	X-Y축	Z축	회전축
축 모델	404300XR-MSD2H5L4C2M3 (PARKER)	404100XR-MSD2H5L4C2M3 (PARKER)	RT90-003 (PARKER) 3:1 감속
Travel	300 mm	300 mm	Free

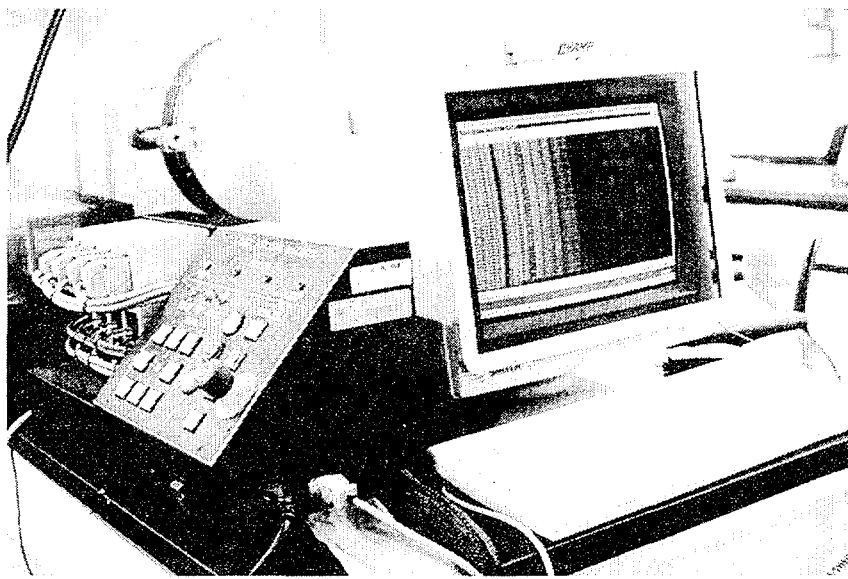


그림 3.1.8 지지체 용접용 제어장치

드라이버는 Parker의 OEM750X 모델이다. Parker의 OEM 모델은 가격대 성능이 우수하고 지지체를 레이저를 이용하여 용접하기 위한 직선운동 및 회전운동을 제어할 수 있는 제어시스템으로 적절한 기능과 성능을 가지고 있다. 표 3.1.4는 용접실험에 사용되는 드라이버의 사양을 보여준다. 제어용 컴퓨터로는 컨트롤러를 장착할 수 있는 데스크탑 PC를 사용하였다. 제어용 컴퓨터와 컨트롤러는 PC 버스로 연결되며 컨트롤러와 드라이버는 전용선으로 연결된다. 제어용컴퓨터에서 작성된 제어프로그램은 드라이버에 다운로드된 후에 실행된다. 제어프로그램은 조이스틱단자를 이용하여 임의 위치로 용접부를 이동시킬 수 있는 기능을 갖추고 있으며, 용접 파라메타가 선정된 후에는 파라메타를 설정하여 자동으로 용접을 수행할 수 있는 기능을 포함하고 있다.

표 3.1.4 마이크로스테핑 드라이버의 사양

항목	사양
모델	OEM750(PARKER)
Torque	Short circuit protection
Speed	Auto-standby & self test
Input	3 Programmable inputs
Output	2 Programmable outputs
Accuracy	+/- 5 arc min
Repeatability	+/- 5 arc sec
Battery-backed RAM	2 KB
	Anti-resonance
	Wide range inductance

지지체부착을 위한 용접장치의 제어 프로그램은 다음 표 3.1.5와 같다. 이 프로그램은 제어장치를 조이스틱 방식 또는 자동으로 구동하며 레이저 장치의 ON/OFF 및 셔터를 제어할 수 있는 입출력 기능을 가지고 있어 설정된 프로그램에 따라 자동으로 용접할 수 있다.

표 3.1.5 지지체용접용 제어 프로그램

```

; PROGRAM NAME - Laser Welding Machine for Bearing Pad, jig-130
DEL SETUPP
DEF SETUPP
TRACE1
INFNC1-2P           ;INPUT #1(CONTROL MODE ENABLE S/W-ON)
DEFINED TO SELECT PROGRAM #1
INFNC2-A           ;NOMAL INPUT(EXTANDED INPUT)
INFNC3-A           ;NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC4-A           ;NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC5-A           ;NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC6-A           ;NOMAL INPUT(BCD CODE JOG MODE)
INFNC7-A           ;NOMAL INPUT(RUN S/W)
INFNC8-D           ;STOP INPUT(STOP S/W)
INFNC9-L           ;JOG SPEED SELECT INPUT
INFNC10-A          ;NOMAL INPUT(HOME S/W)
OUTFNC1-A          ;STANDARD OUTPUT(CONTROL BOX MODE
LED)
OUTFNC2-D          ;END OF TRAVEL LIMIT (ERROR LED)
OUTFNC3-B          ;MOVING/NOT MOVING AXIS(RUN LED)
OUTFNC4-A          ;STANDARD OUTPUT(EXTANDED OUTPUT LED)
INSELP,50          ;SELECT PROGRAM ENABLE, STROBE TIME IN
50MILLISECONDS
LH3,3,3,0          ;HARDWARE LIMIT SWITCH ENABLE
HOMV3,3,3          ;HOME VELOCITY
HOMVF1,1,1         ;HOME BACKUP VELOCITY
HOMBAC111          ;HOME BACKUP ENABLE
HOMEDG111          ;HOME EDGE
INFEN1             ;INPUT FUNCTION ENABLE
OUTFEN0            ;OUTPUT FUNCTION ENABLE
JOG0000            ;JOG(0=DISABLE,1=ENABLE)
JOGA50,50,50,50   ;JOG ACCELEATION
JOGAD100,100,100,100 ;JOG DECELEATION
JOGVL0.3,0.3,0.3,0.3 ;JOG VELOCITY LOW
JOGVH5,5,5,3      ;JOG VELOCITY HIGH
COMEXL111
ERROR00000001
ERRORP ERR         ;ERROR PROGRAM ASSIGNMENT
OUT0000
END

```

표 3.1.5 지지채용접용 제어 프로그램 (계속)

```

DEL MAINP                ;INPUT SCANNING PROGRAM
DEF MAINP
OUT1000

L
IF(IN=BXX1000XXXX) : GOSUB XUP      : JOG0000 : INFNC3-A : NIF
IF(IN=BXX1100XXXX) : GOSUB XDOWN   : JOG0000 : INFNC4-A : NIF
IF(IN=BXX1010XXXX) : GOSUB YLEFT   : JOG0000 : INFNC3-A : NIF
IF(IN=BXX1111XXXX) : GOSUB YRIGHT  : JOG0000 : INFNC3-A : NIF
IF(IN=BXX0100XXXX) : GOSUB ZUP     : JOG0000 : INFNC4-A : NIF
IF(IN=BXX0110XXXX) : GOSUB ZDOWN   : JOG0000 : INFNC4-A : NIF
IF(IN=BXX0111XXXX) : GOSUB QCW     : JOG0000 : INFNC5-A : NIF
IF(IN=BXX0010XXXX) : GOSUB QCCW    : JOG0000 : INFNC5-A : NIF
IF(IN=BXXXXXX1XXX) : GOSUB CWELD6  : NIF
IF(IN=B0X000X00X0) : GOTO SETUPP   : NIF
IF(IN=B01000X0001) : GOSUB HOMP    : NIF
LN
END
;***** JOG MODE PROGRAM *****
DEL XUP
DEF XUP                  ;X-AXIS UP JOGGING
JOG1000 : INFNC3-1K
END
DEL XDOWN                ;X-AXIS DOWN JOGGING
DEF XDOWN
JOG1000 : INFNC4-1J
END
DEL YLEFT                ;Y-AXIS LIFT JOGGING
DEF YLEFT
JOG0100 : INFNC3-2K
END
DEL YRIGHT               ;Y-AXIS LIFT JOGGING
DEF YRIGHT
JOG0100 : INFNC3-2J
END
DEL ZUP                  ;Z-AXIS UP JOGGING
DEF ZUP
JOG0010 : INFNC4-3K
END

```


표 3.1.5 지지체용접용 제어 프로그램 (계속)

```

DEL ZDOWN                ;Z-AXIS DOWN JOGGING
DEF ZDOWN
JOG0010 : INFNC4-3J
END
DEL QCW                   ;Q-AXIS CW JOGGING
DEF QCW
JOG0001 : INFNC5-4J
END
DEL QCCW                  ;Q-AXIS CCW JOGGING
DEF QCCW
JOG0001 : INFNC5-4K
END
DEL ERR
DEF ERR
GOTO MAINP
END
DEL CWELD6
DEF CWELD6
A,50
AD,50
;V,0.8                    ;0.8rps*5mm/r=4mm/s
;D,+40000                 ;5mm*40000/25000=8mm
V,0.6
D,+150000                 ;30mm
UTX1
GO0100
OUTX0
;D,-40000
D,-150000                 ;-30mm
GO0100
END
DEL HOMP                  ;HOMMING PROGRAM ALL AXIS
DEF HOMP
HOME111
END

```

제 2 절 지지체용접부의 특성조사

1. 시편준비 및 실험방법

본 실험에 사용된 시편은 그림 3.2.1과 같이 두께 1.5mm인 지르칼로이-4 지지체 2.3mm x 30mm, 두께 0.4mm와 외경 13.08mm 인 피복관으로 준비되었다. 지르칼로이-4 지지체에 존재하는 이물질들을 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 60℃로 건조시켰다. 이때 그림 3.2.2 및 3.2.3에서 나타난 바와 같이 레이저용접시 지지체의 용접변형 억제 및 산화방지를 위해서 특수하게 설계된 holding fixture와 설딩박스를 사용하였다.

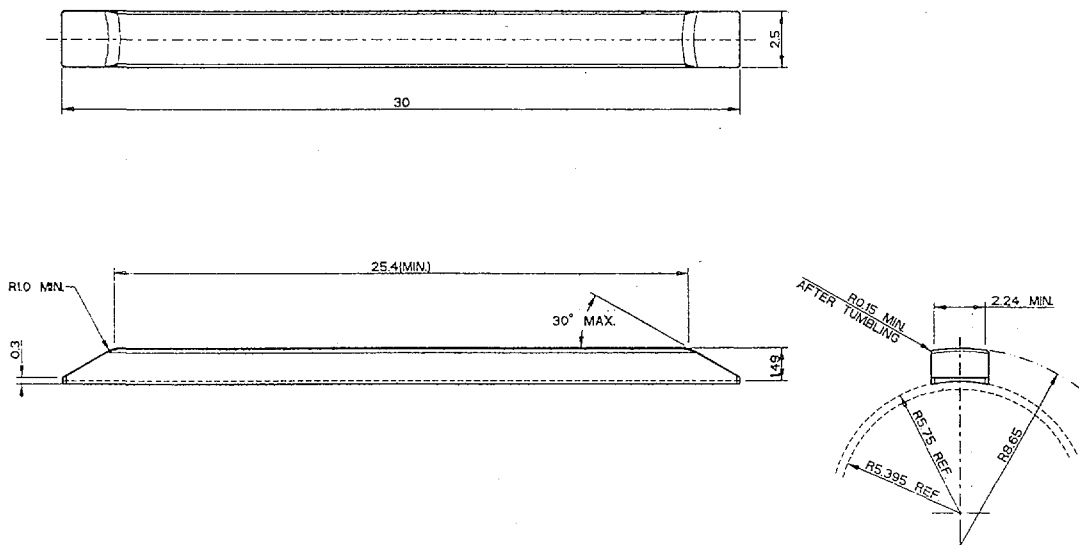


그림 3.2.1 지지체 및 피복관 용접시편의 형상

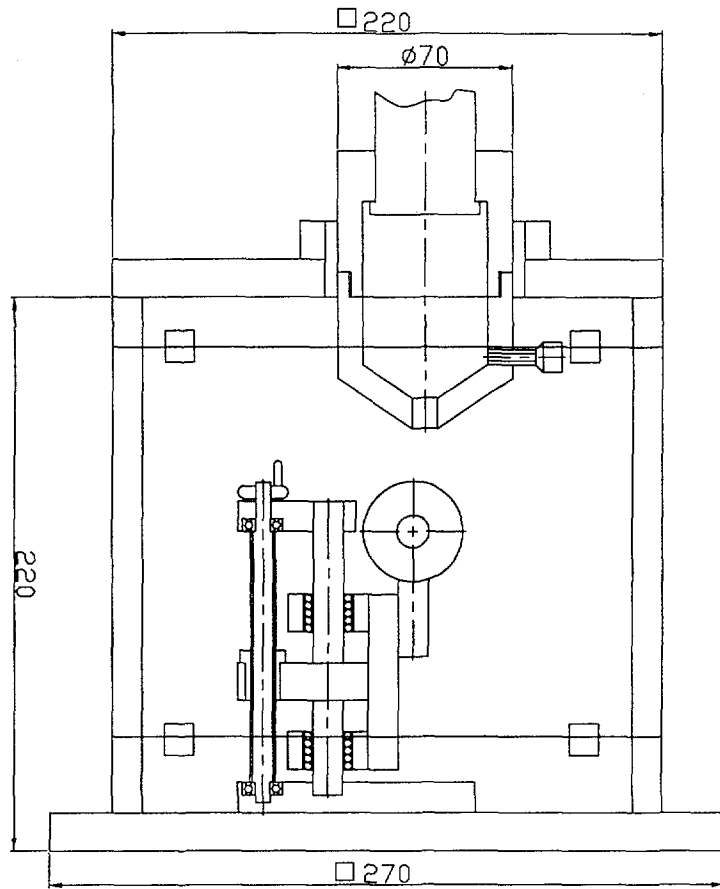


그림 3.2.2 지지체부착을 위한 용접치구 개략도

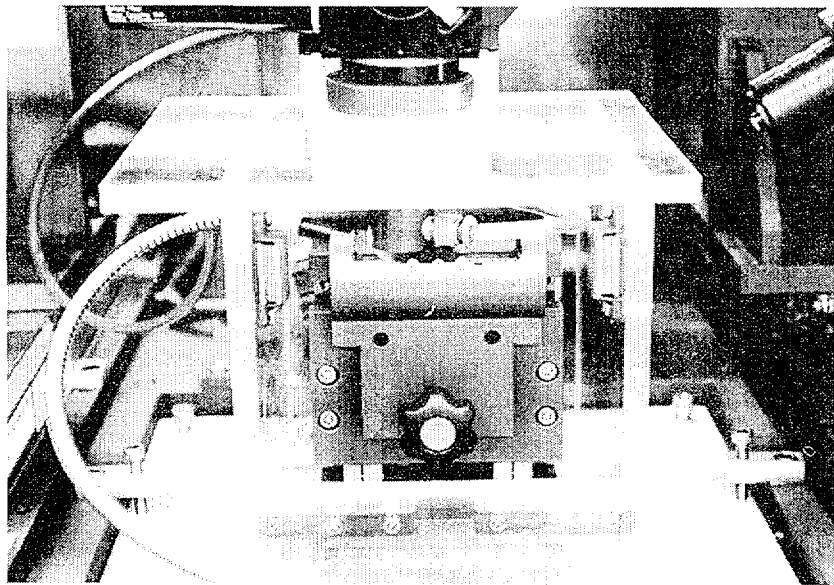
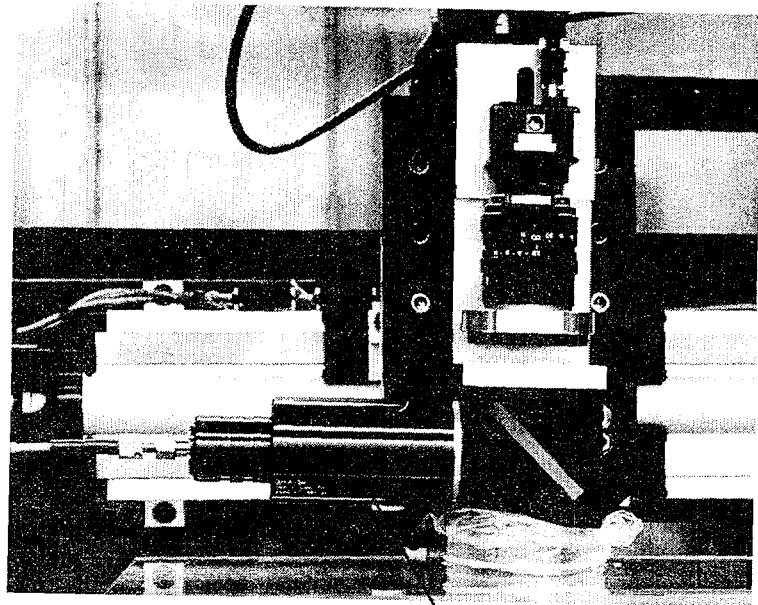


그림 3.2.3 지지체부착을 위한 용접 설딩박스

그림 3.2.4에서와 같이 레이저용접 실험을 위하여 원격 레이저전송이 가능한 빔전달장치를 이용하였다. 레이저를 효율적으로 이용하여 가능한 용접폭과 용입이 적절하게 용접되기 위해서는 높은 파워밀도를 갖도록 레이저를 집속시켜야 하고, 용접중에 집광렌즈의 흠제거 및 시험편의 산화방지를 위한 보호가스 고순도 헬륨의 사용이 필요하다. 이러한 미세용접의 요구조건을 만족하도록 그림 3.2.4과 같이 광학 출력커플러를 설계 제작하여 사용하였다.

그림 3.2.5는 지지체부착을 위한 전체적인 레이저용접시스템의 개략도를 보여주고 있다. 본 실험장치는 그림 3.2.5에서 나타난 바와같이 레이저발전부, 레이저헤드, 광섬유, 광섬유연결부 및 광학출구커플러로 구성되어 있다. 특히 광학출구커플러에 부착된 용접노즐은 레이저조사시 반사율이 높고 열전도도가 큰 구리로 만들었고, 나머지 부품들은 알루미늄으로 제작하였다. 이 용접노즐은 레이저용접시 핵심부분으로 집광렌즈에 의하여 집속된 레이저와 보호가스로 시험편에 도달하도록 하였으며 조정용 이동장치로 빔위치를 조절할 수 있도록 하였다. 레이저 초점은 노즐에서 시험편 표면까지의 거리를 6 내지 7 mm 정도에서 맞도록 하였다.

레이저용접 실험시 광학출구커플러에 연결된 용접노즐은 레이저절단보다는 가스압력이 낮으며, 이때 사용되는 보호가스도 용접부의 산화를 방지하기 위한 것으로 용융면을 채울 수 있도록 충분한 부피로 확산되는 것이 필요하다. 이러한 보호가스의 역할은 레이저용접시 플라즈마 형성에 높은 에너지를 요하는 헬륨이 레이저와 재료의 상호관계에 유리한 잇점을 가지고 있다. 그림 3.2.6에서 볼 수 있듯이 레이저가 시험편을 정확하게 초점위치를 가지도록 CCD 카메라와 광학출구커플러를 사용하여 정렬하였다. 초점의 위치는 다이오드레이저를 집광렌즈로 통하여 시험편에 초점을 맞히게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 가장 작은 초점이 될 때 용접을 수행하였다.



Output optical coupler

그림 3.2.4 지지체용접을 위한 광학 커플러장치

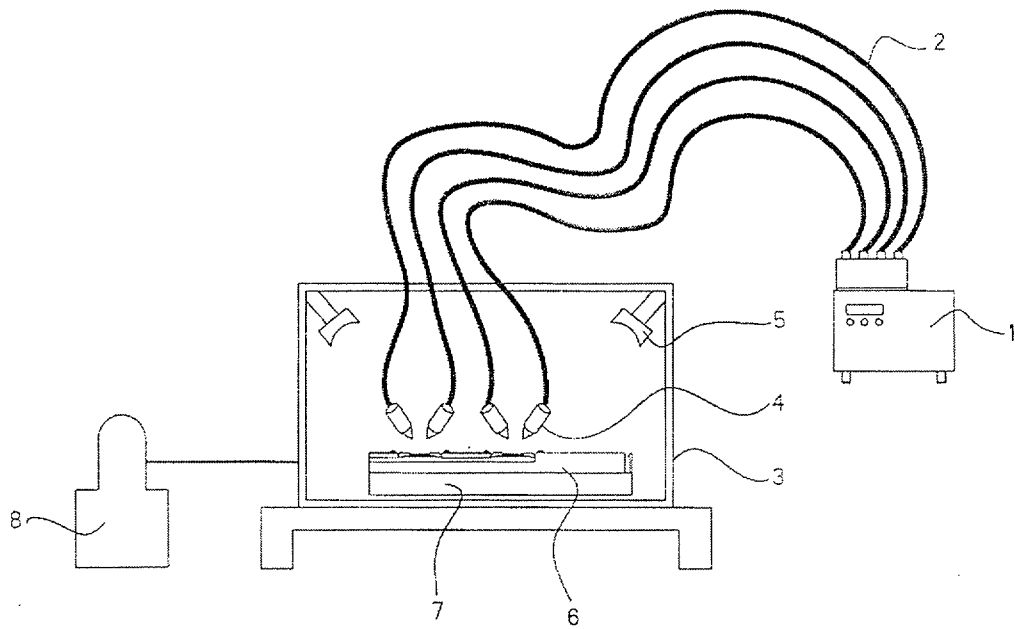


그림 3.2.5 지지체 용접을 위한 레이저용접시스템

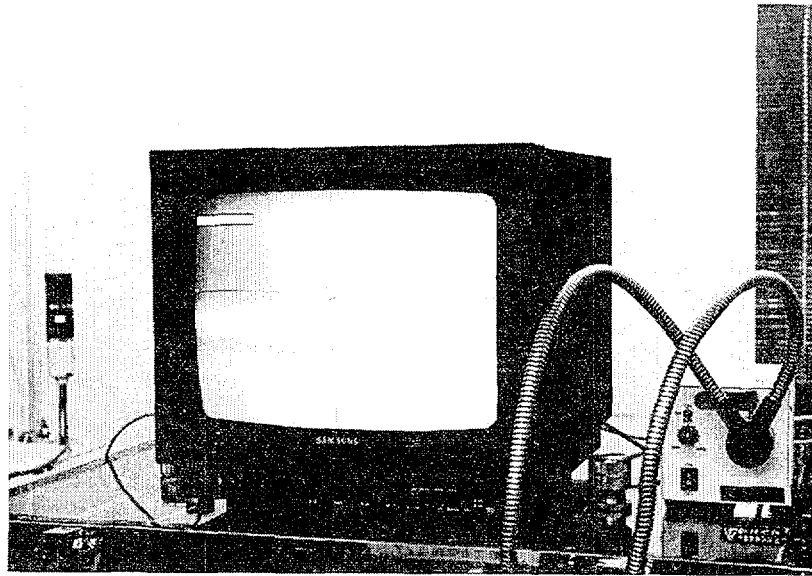


그림 3.2.6 지지체 용접감시를 위한 모니터 화면

2. 지지체용접의 최적화

레이저변수란 발진부에서 얻어지는 출력 특성 즉, 첨두출력 및 펄스 에너지 등을 제어하기 위하여 작업자가 바꿀 수 있는 변수들을 말하고, 그중에 레이저변수란 용접조건에 직접적인 영향을 주는 변수를 말한다. 일반적으로 레이저의 발산각이 커지면 spot size가 커질 뿐만 아니라 집광렌즈로 입사되는 레이저빔의 크기가 달라지게 된다. 특히 레이저용접에서 레이저변수에 의해 결정되는 파워밀도는 에너지가 시편에 입사되는 효율을 결정짓는데 중요한 역할을 하게 된다. 펄스형 Nd:YAG 레이저는 용접형상에 영향을 주는 레이저변수는 펄스에너지, 파워밀도, 펄스폭, 초점위치 및 용접속도 등이다. 본 내용은 이러한 여러 가지 변수에 따라 적합한 지지체와 피복관의 용접형상이 어떻게 변하는지 알아 보았다.

그림 3.2.7은 본 실험에 사용한 레이저발진부에서 섬광등에 가하는 충전전압을 변화시켰을 때 비드와 용접깊이의 관계를 나타낸 것이다. 그림 3.2.7에서 알 수 있듯이 펄스에너지의 증가에 따라 용접시편에서 나타나는 비드폭과 용입을 보여주고 있으며 대체로 증가함을 알 수 있다. 그림 3.2.8과 같이 용접시편의 비드와 용접깊이는 지지체 및 피복관에서 부착된 단면의 사진을 보여주고 있다. 그리고 실제적으로 지지체용접을 위해서는 그림 3.2.9에서 나타내듯이 피복관의 두께가 0.4mm 이므로 펄스에너지가 적어도 8J 즉, 레이저출력이 80W 이내에서 적절함을 알 수 있었다. 이때 얻어지는 비드폭은 1.0mm 정도이다. 그림 3.2.10은 레이저출력 60W와 90W에서의 지지체와 피복관의 용융정도를 비교한 것이다. 여기서 출력 60W에서는 용융깊이가 0.2mm 정도이나 반면에 출력 90W에서는 피복관의 두께 이상으로 용융됨을 알 수가 있었다. 그리고 레이저용접실험후 육안관찰에서는 레이저출력이 60W인 경우 비드가 매끈하게 나타났으나 반면에 출력 90W이상인 경우에는 비드의 표면이 거칠고, 용접부의 spattering 현상으로 용접시편 주변에 금속증기로 인한 미세한 산화 지르코늄분말이 산재해 있음을 알 수 있었다.

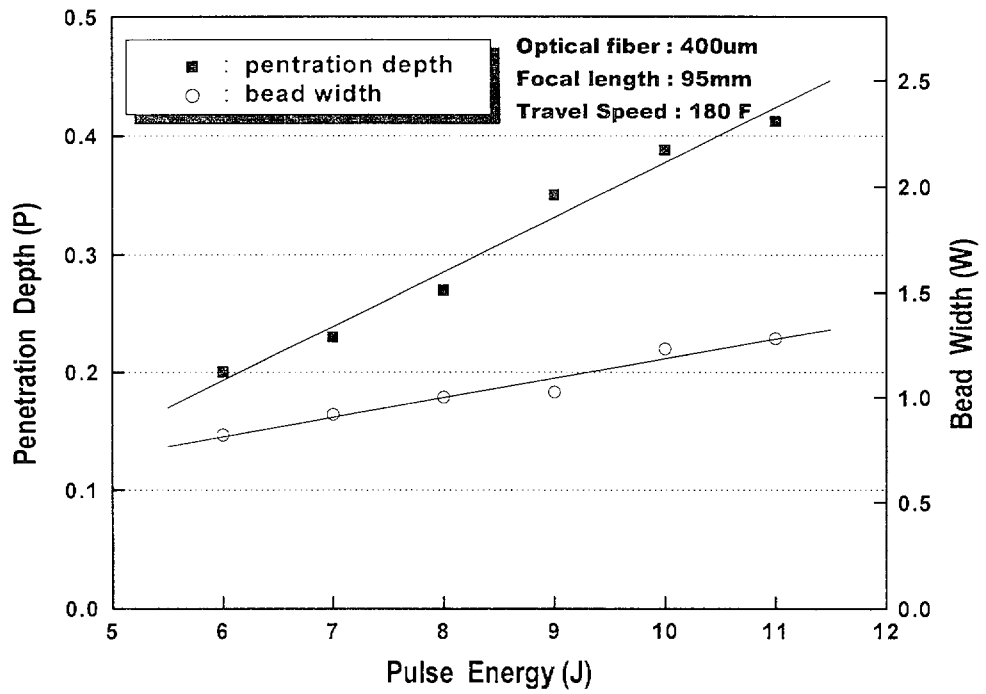
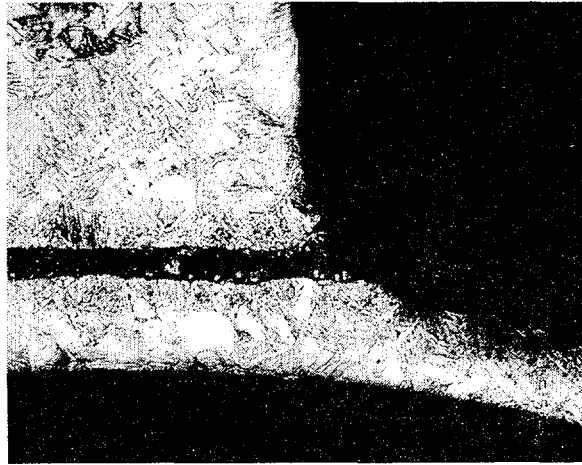
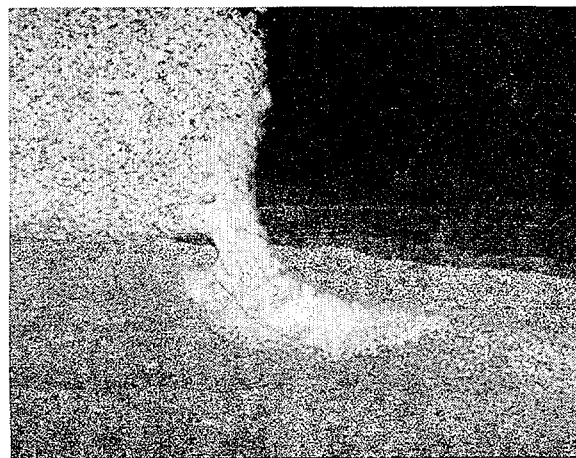


그림 3.2.7 펄스에너지에 의한 용접비드와 용입의 관계



[brazed specimen]



[laser welded specimen]

그림 3.2.8 브레이징과 레이저출력 80W의 용접된 단면 비교 (x50)

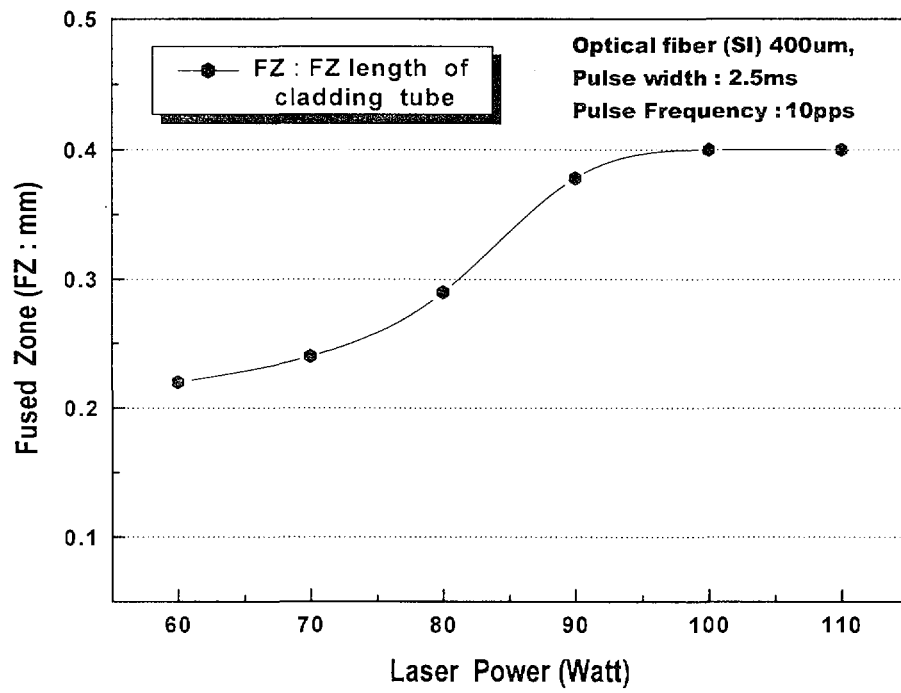
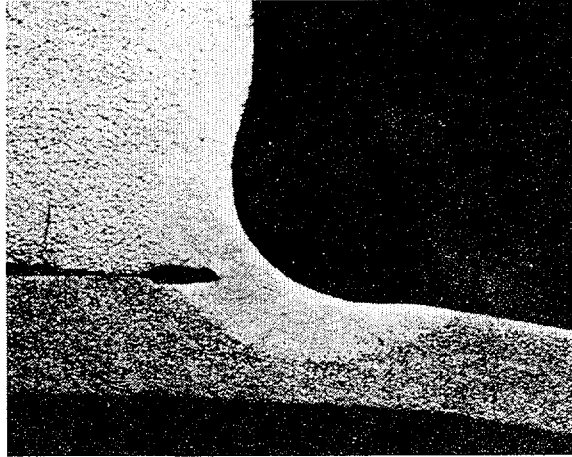
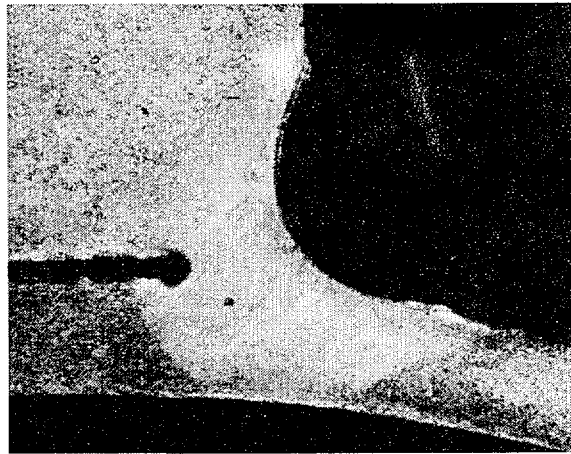


그림 3.2.9 레이저출력에 의한 피복관의 적정 용융깊이 비교



[laser power 60W]



[laser power 90W]

그림 3.2.10 레이저출력에 따른 용입 비교 (x50)

3. 지지체용접부의 특성조사

레이저용접은 작업에서 거론 되는 공정변수들을 기본적으로 이 용접법이 광선을 사용한다는 점을 감안하여 볼 때 예측할 수 있는 바와 같이 광학 전송계의 특성인 집광렌즈의 초점거리를 비롯하여 레이저빔 자체의 성질 그리고 용접시편의 gap 상태 등이 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 공정변수들은 용접장치가 정해지면 작업자로서 손댈 수 없는 부분이 있는 반면에 용접을 실시할 때마다 시편의 조건에 따라 작업자가 최적의 상태로 유지하여야 하는 조건이 있다. 따라서 레이저용접에서 용입형상에 영향을 주는 공정변수로는 초점위치, 보호가스, 용접속도 그리고 시편의 gap 상태 등을 들 수 있으나, 여기서는 핵연료봉의 지지체와 피복관의 gap 정도에 따른 용입형상이 어떻게 변하는지 알아 보았으며, 아울러 용접후에 발생하는 지지체와 피복관의 열변형으로 인한 치수상태를 알아 보았다.

그림 3.1.11은 레이저출력 60W, 80W로 일정하게 하고 시편의 gap 상태를 0.05mm 간격으로 변화시킬 때 용접되는 깊이를 조사한 것이다. 본 실험에서 초점의 위치는 시편표면에서 아래방향으로 1mm 정도로 이동하여 실험을 수행하였다. 그림 3.2.11에서 알 수 있듯이 gap 간격이 작을수록 용접깊이가 커짐을 나타내고 있으며, 레이저출력 60W와 80W에서는 현저하게 큰 차이를 보여주지 않고 있었다. 여기서 피복관과 지지체 사이의 간격은 가능하면 거의 밀착시킨 상태에서 용접을 수행하면 유리할 것으로 판단된다. 그림 3.2.12는 충전전압을 증가했을 때 즉, 레이저출력을 변화시킬 때 연료봉의 종변형 상태를 수치화하여 조사한 것이다. 여기서 용접변형의 측정방법은 용접선의 시작부분과 끝나는 부분에서 120° 방향으로 3번 측정하고 평균치로 하였다. 그림 2.3.2에서와 같이 레이저출력에 따른 변형량(용접후의 피복관 외경-용접전의 피복관 외경)은 출력 80W 이하에서 변형의 정도가 낮은 0.02mm 이며, 특히 용접시편에서는 용접선의 시작점보다 끝나는 부분에서의 변형량이 약간 커짐을 알 수 있었다. 이때 피복관과 지지체 부착을 위한 레이저용접의 이송속도는 분당 280mm으로 하였다.

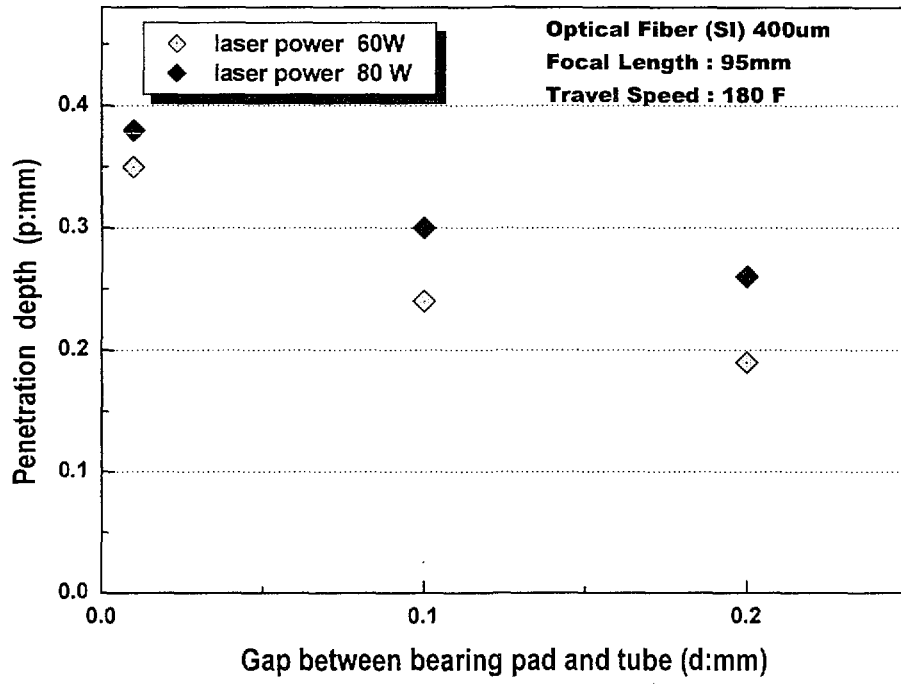


그림 3.2.11 용접 gap에 따른 용입의 비교

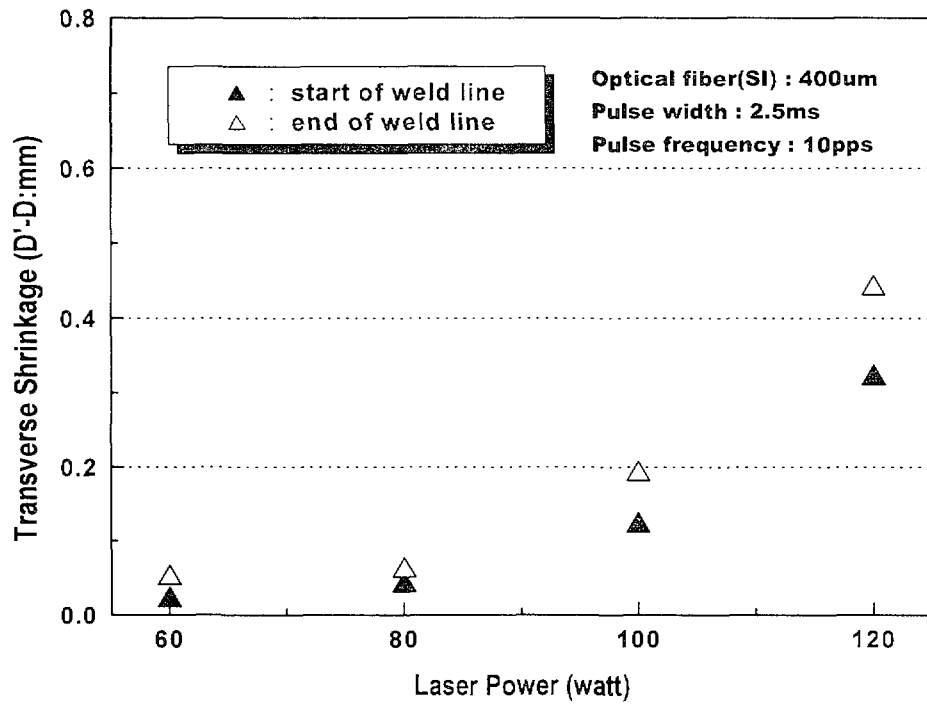


그림 3.2.12 레이저출력에 의한 용접변형량의 비교

제 3 절 지지체 용접샘플 제작

1. 레이저용접구조 조사

레이저용접에서의 기하학적 구조 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다. 일반적으로 재료의 열전달이 높은 것일수록 큰 의미를 갖게 된다. 레이저용접에서는 용융중에 응고가 일어나면서 제살 붙이기 용접이 수행된다. 여기서 레이저용접에 있어서 응고형태가 한 방향으로 일어나게 한다면 용접하기가 매우 용이해지며, 일반적으로 전기아크용접에서 용가재를 사용하는 용융방법보다 용접금속내의 용융흐름을 쉽게 일어나게 해 준다. 레이저용접 중에서 짧은 용접사이클로 인하여 균일한 온도분포를 이루어져야 하며, 레이저의 에너지공급과 용융되는 부피가 서로 일정하게 될 때 최적의 용접이 이루어지게 될 것이다.

Tee joint 에서의 레이저용접은 특별히 열변형에 민감한 기하학적 구조를 가지게 된다. 이러한 용접부의 기하학적 형상은 대체로 용입비(aspect ratio)가 클 경우 자주 발생하게 되며, 용입비가 작을 경우 즉 비드폭이 넓을수록 용접된 단면적이 커져서 열변형을 방지할 수 있다. 여기서 핵연료봉의 지지체와 피복관의 용접구조에서는 그림 3.2.12에서와 같이 레이저출력에 따라서 열변형의 차이는 있으나 용접부에 대한 적정용입에서는 대체로 0.5 정도에서 양호한 결과를 얻을 수가 있었으며, 특히 원자력분야의 핵연료성능 향상 및 열전도를 증가하기 위해서는 펠렛 이음구조를 가지는 경우에서 볼 때 피복관과 지지체사이에서의 가능하면 전면적으로 용융될 수 있는 구조형태가 고려될 수 있다. 그림 3.3.1은 레이저를 이용하여 양방향으로 레이저를 조사시켰을 때 지지체의 쇄기모양을 가지는 용접구조로서 레이저빔이 안쪽으로 들어가서 용융되는 기하학적 형상을 개략도로 보여주고 있다. 따라서 2차년도에서는 레이저 용접구조를 새로 고안할 것이며, 핵연료성능 향상을 위해서 지지체와 피복관사이의 용융범위를 크게 하는 실험을 계속 추진할 예정이다.

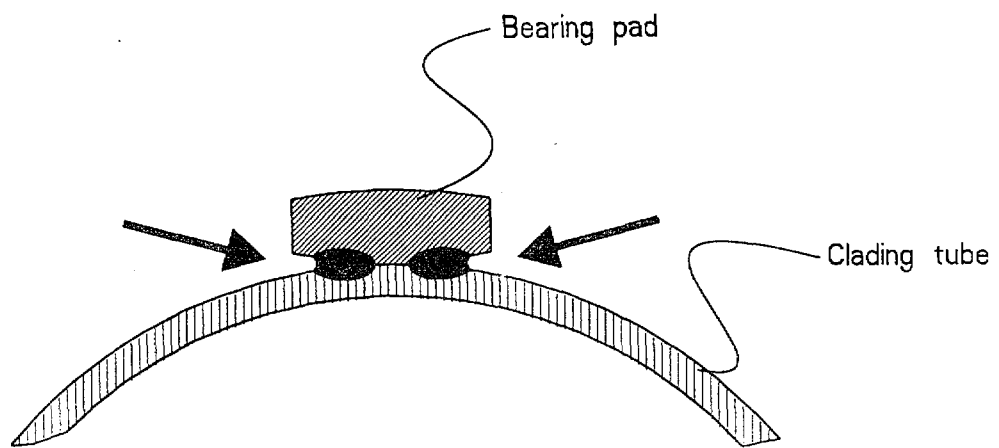


그림 3.3.1 지지체용접에 적합한 기하학적 구조형상

2. 용접샘플 제작 및 분석

지르칼로이 합금은 고밀도 에너지방법인 전자빔이나 레이저를 이용한 용접에 매우 우수하다. 전자빔 용접은 금속의 반응을 막기 위해 진공속에서 이루어졌으나 높은 증기압을 가지는 크롬, 주석등 일부 금속손실이 발생할 수 있다. 반면에 Nd:YAG 레이저용접은 진공을 사용하지 않고 매우 작은 빔크기를 가지고 있어서 열변형이 거의 없다. 그림 3.3.2는 광섬유 400um을 이용한 지르칼로이-4 지지체 용접샘플의 비드상태를 알아보기 위한 것이다. 여기서 펄스폭을 2.5ms, 평균출력을 90W로 하였을 때, 비드폭은 1.2mm 이상으로 나타났으며 용입비(aspect ratio)는 대체로 0.5로 나타났다. 그림 3.3.2에서와 같이 지르칼로이-4 지지체의 앞부분과 뒷부분의 육안관찰의 용접상태를 보여주고 있다. 이때 적합한 용접조건은 용접속도 280mm/min, 평균출력 80W, 펄스당에너지는 8J에서 보여주고 있다.

그림 3.3.2에서 볼 수 있듯이 레이저를 45° 방향으로 조사시킬 때 얻은 용접으로 대체로 만족하나 피복관과 지지체에 만나는 root부에서 약간의 용접불량이 발생할 수도 있다. 이러한 용접불량을 일으키지 않기 위해서는 가능한 피복관과 지지체의 간격을 작게 해야 하며, 이에 따른 고정지그의 설계가 중요한 사항이다. 또한 지지체의 강도면에서 볼 때 전면의 레이저용접될 경우 용접되는 단면적이 늘어나기 때문에 그만큼 기계적인 강도가 높으며 또한 부식특성에서도 유리한 점을 가지게 된다. 아울러 2차년도에는 지지체 부착실험에서 전면 용접방법의 레이저용접을 수행할 예정이다.

일반적으로 핵연료제조에서 피복관과 지지체의 용접이 끝난 후에 핵연료 소결체를 장입하는 것이 더 나은 방법으로 알려져 있다. 그 이유는 이산화우라늄(UO₂)을 다루어야 하는 기간을 줄일 수 있고, 제조의 용이성, 소결체에 대한 손상을 줄일 수 있기 때문이다. 하지만 이러한 기술은 피복관의 두께가 매우 얇아서 피복관과 소결체의 사이가 매우 좁고 또한 엄격한 품질이 필요하므로 지지체의 용접이 매우 까다로운 제조기술이다. 실제로 핵연료 제조에서 소결체과 피복관의 사이는 매우 좁기 때문에, 이때의 간격이 0.05

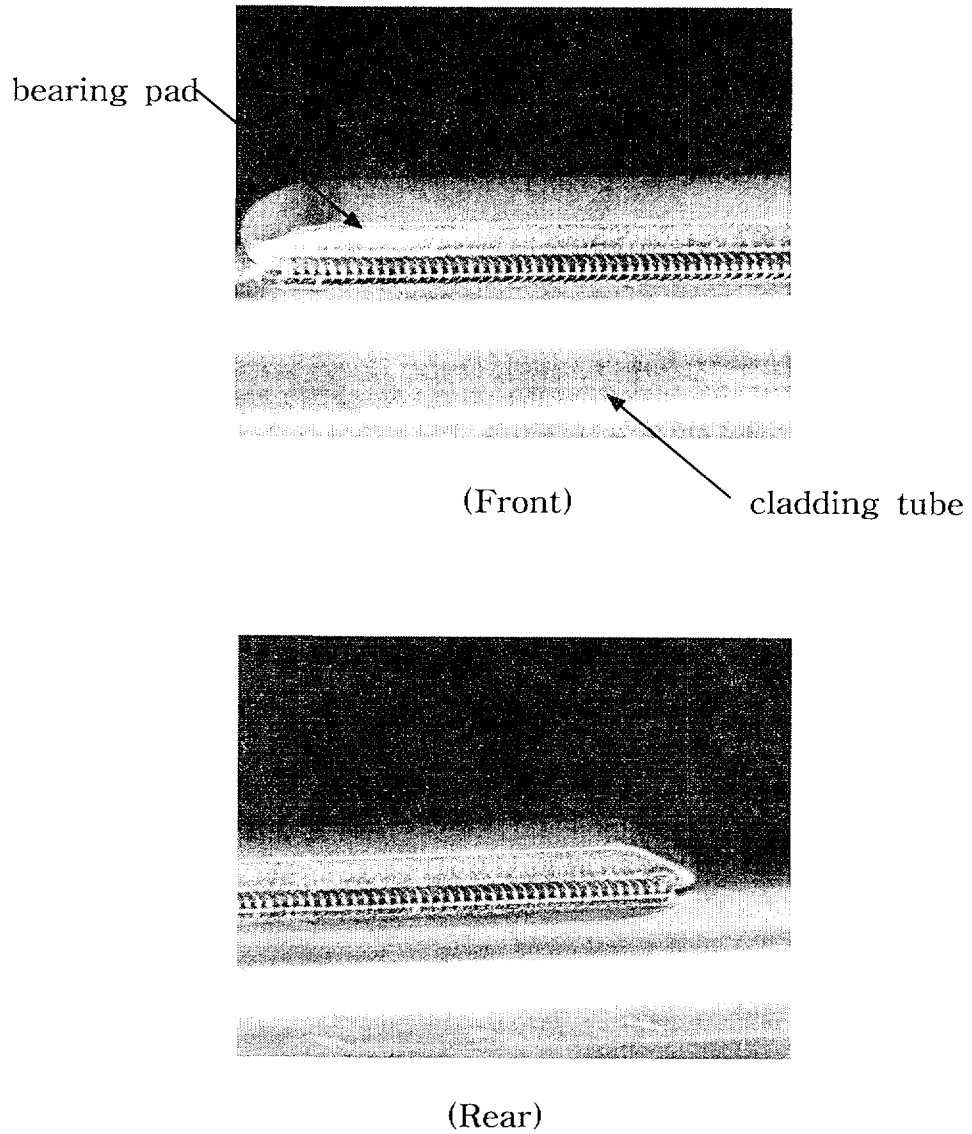


그림 3.3.2 지지체와 피복관 부착을 위한 용접샘플 모양 (x8)

에서 0.125mm 정도로 된다 하더라도 간격의 감소로 인해 소결체 장입이 허락될 수 없다. 이것은 피복관의 두께가 매우 얇아서 작은 열과 압력에도 피복관의 내경은 변화를 일으킨다. 따라서 이러한 작업은 용접후에 변형이 절대로 발생되지 않도록 이루어져야 한다. 그리고 원자로내에서 피복관과 지지체사이의 간격에서 용접부에 대한 부식균열이 발생할 지도 모른다는 염려가 나왔으며 이 문제와 더불어 용접물의 강도를 높이는 방법에 대한 연구가 2차년도에 수행할 예정이다.

제 4 장 결 론

본 연구는 초정밀 레이저용접기를 이용하여 중수로형 핵연료봉의 부착물에 대한 지지체와 피복관의 용접가능성을 조사하기 위하여 광섬유를 이용한 레이저용접실험을 수행하였다. 이에 따른 핵연료봉의 지지체부착물을 위한 용접연구의 결과를 아래와 같이 제시하고자 한다.

첫째로 현재까지 보고된 국외의 지지체부착물에 대한 용접관련 논문 및 기술문헌을 통하여 종합적으로 검토 정리하였다. 이를 통하여 핵연료봉의 부착물에 대한 용접방법 그리고 지지체용접부에 대한 기계적시험 및 단면사진을 조사하였다. 그리고 국내의 지지체부착을 위한 브레이징공정 및 작업공정의 문제점을 검토하여 이들 공정조건에 대한 용접방법에 미치는 영향의 인자들에 대한 조사를 행하였다.

둘째로 중수로 핵연료봉 지지체 및 간격체 부착을 위한 레이저시스템이 개발되었다. 초정밀레이저용접기의 성능에서는 첨두출력 10kW 및 평균출력 200W 급의 안정성을 가지며, 펄스폭 0.1-10 ms로 가변될 수 있고 반복율은 최대 100pps이며, 레이저빔의 spot size는 300-400 um으로 나타났다. 이러한 레이저를 바탕으로 Nd:YAG 레이저를 이용하는 코어직경 400 um의 광섬유 전송장치, 용접노즐부, 용접감시부 및 제어부 등의 주변기기가 자체적으로 개발되었다.

셋째로 지르칼로이-4 지지체부착을 위한 레이저용접실험을 수행하였으며, 이에 따른 지르칼로이-4 지지체용접의 적합조건과 용접부의 특성을 분석하였다. 본 실험결과에서는 지지체용접을 위해서 레이저출력이 적어도 80W 이고, 펄스에너지가 8-9J, 펄스폭 2.5ms 로 얻었다. 그리고 GI 400 um의 광섬유를 사용하였을 때, 레이저용접된 시편에서는 비드폭이 1.0 mm 이하, 70% 중복된 seam 형태와 용입은 0.3mm 정도로 나타났다.

결론적으로 본 연구에서는 중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체부착시 레이저용접기술과 이에 따른 용접부의 특성 조사를 통하여 레이저용접의

최적조건을 확립하고자 하였으며, 실제로 핵연료봉의 시편에 지지체를 부착하여 용접부의 작업조건을 위한 기본 방향을 제시하였다. 또한 이 실험 결과는 앞으로 국내의 핵연료봉 제조에서 요구되는 지지체 및 간격체 부착에서 사용될 수 있는 레이저용접공정의 기초자료로 활용될 예정이다. 아울러 2차년도에는 한국원전연료주식회사와 긴밀히 협조하여 생산공정에 적용하기 위한 레이저용접의 실증 실험을 수행해 나갈 예정이며, 이를 통하여 레이저용접의 실용화를 실현하고 동시에 국내 정밀가공업계에서 제반 레이저용접기술이 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 기술개발을 추진할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Pankajb. Desai, P.G. Kulkarni : Trend in Joining Technology
Development for PHWR Fuel Assemblies in India, (1999)
- [2] U.C. Gupta, R.N. Jayaraj, Meena, R., V.S. Sastry : Nuclear Fuel
Fabrication-Developing Indigenous Capability, (1997)
- [3] R.N. Jaya Raj, B. Laxminarayana, P.S.A. Narayanan : Improved
Techniques for Appendage Attachment to PHWR Fuel Elements
, Nuclear Fuel Complex, (1995) 3A-55
- [4] R.K. Welty : External Attachment of Titanium Sheathed
Thermocouples to Zirconium Nuclear Fuel Rods for the
Loss-Of-Fluid-Test (LOFT) Reactor, SPIE Vol. 247, 30 (1980)
- [5] 김도훈 : 레이저가공학, 경문사, (1990)
- [6] 최창범외 27명 : 중수로용 개량핵연료 시범집합체 제조, KAERI /RR
-1332/93 (1993)
- [7] 한필순 : 핵연료공학, 한국연자력연구소, (1986), pp.226-234
- [8] C. Dawes : Laser Welding - A Practical Guide, Abington
Publishing, (1992), 117
- [9] B. K. Henon : Orbital GTA Welding Replaces Nickel Convection
tubes, Welding Journal, Nov. (1991), pp.59-62
- [10] P. Modern, K. Schneider : Laser and Laser Material Processing
Research and Development at BNFL plc., UK., Proceeding of
LAMP '92, Nagaoka (1992). pp.963-968
- [11] P. G. Klemens : Heat balance and flow conditions for EB and
LBW, J. Applied Physics, Vol.47, No.5, (1976)
- [12] Bramson, M. A. : Infrared Radiation, A Handbook for
Applications, Plenum Press, New York, (1968)

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드		
KAERI/RR-2080/2000					
제목/부제	핵연료 가공용 초정밀 레이저 용접기술 개발				
연구책임자 및 부서명	김 수 성, DUPIC 핵연료개발팀				
연구자 및 부서명	양명승, 김용기, 이도연 (DUPIC 핵연료개발팀)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년도	2001. 1
페이지	p.	도 표	있음(V), 없음()	크 기	26 Cm.
참고사항	'00년도 기관 고유 사업				
비밀여부	공개(O), 대외비(),	급비밀	보고서종류	연구보고서	
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (300단어내외)	<p>본 연구는 중수로 핵연료봉의 제조를 위한 지지체 및 간격체의 부착방법을 위해서 기존의 브레이징 공법에 비해 고밀도 에너지를 이용한 용접방법이 필요하며, 특히 원자로 내에서 핵연료 연소시 접합부의 안전성과 핵연료의 성능 향상을 고려할 때 반드시 선행되어야 할 과제이다. 핵연료봉의 지지체는 연소시 원자로 내의 인접 연료봉과 일정 간격으로 유지되면서, 연료봉에 냉각수가 흐르는 방향으로 부착하게 되어 연료봉과 압력관사이의 마찰로 발생할 수 있는 피복관 마모를 방지해 준다. 또한, 이것은 중수로 핵연료봉들이 원자로에서 가동되는 동안 손상이 잘 되는 부위가 지지체와 간격체이기 때문에 건전한 접합은 핵연료의 안전성과 수명에 직결된다고 할 수 있겠다. 중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체 부착의 중요성으로 인하여 원자력 분야의 핵연료가공관련 레이저를 이용한 용접기술이 세계적인 추세에서 볼 때 점차 연구가 수행되고 있으며, 앞으로도 이러한 분야의 지속적인 연구는 매우 중요하다고 하겠다. 따라서 본 연구는 중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체 부착을 위한 레이저 용접 제작에 필요한 기본자료를 제공하였고, 지르칼로이-4 피복관에 적절한 용접조건을 선정하여 실제의 지지체의 용접시편이 제작되어, 이에 따른 용접부의 특성이 분석되었다. 아울러 레이저용접은 첨단 기반기술로서 응용분야가 넓을 뿐만 아니라 그 연관관계도 매우 높아서 곧바로 응용기술들을 개발할 수 있으므로 산업적 측면에서 파급효과가 클 것으로 기대된다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	레이저용접, 지지체, 간격체 광섬유, 피복관, 지르칼로이-4				

Bibliographic Information Sheet					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAREI/RR-2080/2000					
Title/Subtitle		Study on the High-precision Laser Welding Technology of Nuclear Fuel Elements Processing			
Project Manager and Dpt.		Kim, Soo Sung (DUPIC Nuclear Fuel Development Team)			
Researcher and Dept.		M. S. Yang (DUPIC Team), W. K. Kim (DUPIC Team), D. Y. Lee (DUPIC Team)			
Pub. place	Taejon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	2001. 1.
Page	p	Fig. & Tab	Y (0), N ()	Size	26 Cm.
Note	'00 Institute Basic Project				
Classified	Open(0), Outside(), Class ()		Report Type	Reserach Report	
Sponsoring Org			Contract No.		
Abstract (300 words)					
<p>The proper welding method for appendage of bearing pads and spacers of PHWR nuclear fuel elements is considered important in respect to the soundness of weldments and the improvement of the performance of nuclear fuels during the operation in reactor. The probability of welding defects of the appendage parts is mostly apt to occur and it is connected directly with the safty and life prediction of the nuclear reactor in operation. Recently there has been studied all over the world to develope welding technology by laser in nuclear fuel processing, and the appendage of bearing pads and spacers of PHWR nuclear fuel elements. Therefore, the purpose of this study is to investigate the characteristics of the laser welded specimens and make some samples for the appendage of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements. This study will be also provide the basic data for the fabrications of the appendage of bearing pads and spacers. Especially the laser welding is supposed to be used in the practical application such as precise materials manufacturing fields. In this respect this technology is not only a basic advanced technology with wide applications but also likely to be used for the development of directly applicable technologies for industries, with high potential benefits derived in the view point of economy and industry.</p>					
Subject Keywords (about 10 words)					
Laser Welding, Bearing Pad, Spacer Pad, Optical Fiber, Cladding Tube, Zircaloy-4					