

KAERI/RR-2163/2001

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

KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소 소장 귀하

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

2002년 1월 일

과제책임자 : 김수성

참 여 자 : 양명승
김웅기
이도연

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 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 레이저용접 응용에 필요한 기본자료를 제공하였고, 지르칼로이-4 피복관에 적절한 용접조건을 선정하여 실제의 지지체 용접샘플이 제작되어, 이에 따른 용접부의 검사가 수행되었다. 아울러 레이저용접은 첨단 기반기술로서 응용분야가 넓은 뿐만 아니라 그와 연관관계도 매우 높아서 곧바로 활용기술들을 개발할 수 있으므로 산업적 측면에서도 파급효과가 클 것으로 기대된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

가) 핵연료봉 지지체 부착용 레이저용접 샘플 실험

- 기하학적 구조에 따른 용접시편 설계 및 제작
- 핵연료봉 전용 용접챔버 설계 및 제작
- 지지체용접용 제어프로그래밍 설계 및 제작

나) 핵연료봉 지지체용접의 성능시험

- 미세경도 및 파열 시험
- 고온 부식시험
- 미세조직 관찰

다) 핵연료봉 지지체용접부의 방사선투과시험

- 마이크로 포커스 X-선 검사장치 개발
- 지지체용접부의 미세 결함 분석

IV. 연구개발 결과 및 활용계획

가) 지지체용접용 레이저시스템 개발

중수로 핵연료봉 지지체부착을 위한 초정밀 레이저용접시스템이 개발되었으며, 여기서 레이저빔을 전달하는 광섬유전송부, 지지체용접을 위한 챔버 그리고 미세용접을 제어하는 감시부로 구성되어 있다.

나) 지지체 용접용 주변기기 개발

중수로 핵연료봉에 지지체를 부착하기 위한 용접치구와 초정밀 레이저를 사용하는 직선 및 곡선행로의 용접제어 프로그래밍 등을 설계 제작하였다.

다) 지지체 용접의 성능시험 및 샘플제작

중수로 핵연료봉 지지체용접을 위한 기하학적 구조형상에 따른 용접특성의 조사 및 용접샘플을 제작하였으며, 이에 따른 지르칼로이-4지지체용접부의 기계적 시험과 야금학적 특성을 관찰하였다.

이 연구 결과는 국내의 중수로 핵연료봉 제조에서 요구되는 지지체 및 간격체 부착 등에서 사용될 수 있는 초정밀 레이저를 이용한 용접기술에 활용된다. 현재 국내에서 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 지지체의 기하학적 형상구조에 따른 용접특성 조사가 수행되었다. 따라서 레이저를 이용한 지지체부착용 용접결과는 중수로 핵연료봉의 지지체 및 간격체의 제조공정에 필요한 기초자료로 활용될 예정이다. 아울러 향후 한국원전연료주식회사와 긴밀히 협조하여 생산공정에 적용하기 위한 레이저용접의 성능시험 및 실증실험을 계속 수행해 나갈 예정이며, 이를 통하여 레이저용접의 실용화를 실현하고 동시에 국내 정밀가공업계에서 제반 응용기술이 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. Experiments of laser welding samples for the appendage of bearing pads of PHWR nuclear fuel elements

- i) Preparation of welding specimens on joint configurations
- ii) Design and manufacturing of laser welding chamber
- iii) Development of welding programming
- iv) Development of welding controller device

B. Implementation of performance tests for appendage welding of PHWR nuclear fuel elements

- i) Microhardness and burst tests
- ii) Corrosion test in elevated temperature
- iii) Microstructure test of laser welded specimen

C. Implementation of radiography test for appendage welding of PHWR nuclear fuel elements

- i) Development of micro-focussing X-ray inspection device
- ii) Analysis of welding defects of appendage welding

IV. Result and Proposal for Applications

A. Development of laser systems for the appendage welding

The laser welding system for attachment of bearing pads in fuel elements was developed and it consisted in optical fiber transmission part, shielding chamber for the appendage welding and monitoring part for micro-welding.

B. Development of peripheral devices for the appendage welding

Fixtures for the appendage welding and welding programming with rectilinear and curvilinear paths for attachment of bearing pads were designed and manufactured.

C. Performance tests and manufacturing of samples of the appendage welding

The laser welding characteristics on the joint geometries of bearing pads was investigated and the welding samples were manufactured. Accordingly, mechanical and metallurgical tests in Zircaloy-4 welded specimens were implemented.

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 CANDU nuclear fuel elements with bearing and spacer pads. The laser apparatus having a stable resonator with 200W of the

average power was independently developed by the domestic technology. Also, peripheral devices, such as an optical fiber transmission device using Nd:YAG laser, a welding nozzle and a welding monitoring part, were developed, and further, The laser welding characteristics on the joint geometries of Zircaloy-4 bearing pads was investigated. 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 CANDU nuclear fuel manufacturing. Further experiments will be made in close cooperation with manufacturer 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 material processings may be activated in the local precision processing industry.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 Zr-4 지지체용접 기술현황	3
제 1 절 Zr합금의 용접특성 분석	3
제 2 절 레이저용접의 특성 분석	4
제 3 절 브레이징접합의 특성 분석	25
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	32
제 1 절 지지체 레이저용접의 샘플 분석	32
1. 시험편 및 실험방법	32
2. 용접제어장치 설계 및 보완	36
3. 지지체용접부의 특성 조사	41
제 2 절 지지체용접부의 성능시험	50
1. 미세경도 및 파열 시험	50
2. 고온 부식시험	54
3. 미세조직 시험	57
제 3 절 지지체용접부의 검사	59
1. 용접검사 시스템 구성	59
2. 지지체용접부의 검사 분석	61
제 4 장 결 론	68
참 고 문 헌	70

표 목 차

표 2.1.1	원소 및 합금들의 중성자 흡수단면적	4
표 2.1.2	Zr, Ti 및 스테인리스강의 물리적 특성비교	4
표 2.1.3	Zircaloy-2와 Zircaloy-4의 화학조성	5
표 2.2.1	레이저를 이용한 재료가공분야	15
표 2.2.2	재료가공용 레이저의 종류	21
표 3.1.1	지지체 및 피복관 용접샘플의 형상	37
표 3.1.2	지지체용접용 제어프로그램	38
표 3.2.1	지지체용접 샘플의 파열시험 결과	53
표 3.2.2	지지체용접 샘플의 부식시험 조건	55

그림 목 차

그림 2.1.1 Zircaloy-2 및 Zircaloy-4의 수증기 및 수중에서 부식데이터	6
그림 2.2.1 레이저빔과 재료와의 상호작용	15
그림 2.2.2 레이저 재료가공시 빔밀도와 빔 상호작용 시간과의 관계	19
그림 2.2.3 레이저를 이용한 키홀용접의 원리	22
그림 2.3.1 Zr-4 표면에서의 Be층의 미세단면	28
그림 2.3.2 Zr-Be 브레이징된 미세조직	28
그림 2.3.3 영역별 Be-brazed 시편의 미세조직 단면	29
그림 2.3.4 350℃, 부식시간에 따른 weight gain	30
그림 2.3.5 72 Hr, 부식온도에 따른 weight gain	31
그림 3.1.1 지지체 및 피복관 용접샘플의 형상	33
그림 3.1.2 지지체부착을 위한 정밀 용접치구	33
그림 3.1.3 지지체부착을 위한 용접챔버	34
그림 3.1.4 지지체부착을 위한 용접공정 순서	35
그림 3.1.5 지지체 레이저용접 제어장치	37
그림 3.1.6 레이저를 이용한 지지체용접단면 (×50)	42
그림 3.1.7 지지체구조 B의 출력별 root face 길이 및 용입의 영향	43
그림 3.1.8 레이저를 이용한 지지체용접 샘플의 외관형상 (×8)	46
그림 3.1.9 지지체시편의 gap에 따른 용입 비교	48
그림 3.1.10 레이저출력에 따른 열변형 비교	49
그림 3.2.1 레이저 및 브레이징을 이용한 미세경도부 위치	51
그림 3.2.2 레이저 및 브레이징을 이용한 미세경도치 비교	52
그림 3.2.3 파열시험후 파열된 지지체 용접샘플	54
그림 3.2.4 지르칼로이-4 부식시험 장치	55
그림 3.2.5 부식시간에 따른 용접시편의 색깔 변화	56

그림 3.2.6	브레이징 및 레이저를 이용한 지지체 접합단면 (×50)	58
그림 3.3.1	지지체용접용 X-선 검사시스템 구성도	60
그림 3.3.2	지지체 용접용 X-선 검사시스템	61
그림 3.3.3	중수로용 핵연료 집합체의 모형도	62
그림 3.3.4	레이저를 이용한 Zircaloy-4 지지체용접 샘플	62
그림 3.3.5	지지체용접부의 정밀검사를 위한 기하학적 배치	63
그림 3.3.6	X-선 발생장치의 초점크기	64
그림 3.3.7	X-선 영상 (a) 원영상 (b) Histogram equalized image (c) Averaged image (d) Averaged and histogram equalized image	65
그림 3.3.8	지지체1의 레이저용접부 검사 (a) 전단부, (b) 중앙부, (c) 후단부	66
그림 3.3.9	지지체2의 레이저용접부 검사 (a) 전단부, (b) 중앙부, (c) 후단부	66

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 피복관 사이와 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 내구수명에 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 비접촉 공정으로 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]

본 연구는 최근에 핵연료봉의 부착물에 대한 레이저용접관련 문헌의 종합정리, 지지체와 피복관재료의 적합한 용접변수 조사, 그리고 실제적인 모델인 중수로 핵연료봉의 지지체 용접구조 등의 기술 검토 및 용접샘플을 제작하였으며, 이와 병행하여 지지체용접부의 적정 용입에 대한 고찰, 용접 gap의 영향 그리고 열변형 등의 실험 및 결과 분석을 주된 내용으로 하였다. 아래의 제 2 장에서는 Zr합금의 용접특성 분석, 레이저용접의 특성 및 브레이징접합의 특성 분석에 대해서 언급하였으며, 제 3 장에서는 핵연료봉 지지체부착을 위한 레이저용접부의 특성에 대하여 정리하였다. 특히 지지체 용접샘플 제작시 기계적 시험, 고온 부식시험 그리고 야금학적 관찰에 대하여 기술하였으며, 또한 지지체용접을 위한 이음구조의 개선 및 적합한 용접 공정의 선정에 대하여 전반적으로 기술하였다.

제 2 장 Zr-4 지지체 용접의 기술현황

제 1 절 Zr합금의 용접특성 분석

1. Zr합금의 개요

지르코늄(Zr)과 그 합금은 대기중의 가스들과 반응성이 크지만 표면에 형성된 아주 안정된 지르코늄 산화물(ZrO_2) 때문에 해수, 수증기 및 산분위 기에서 내식성이 우수하여 원자로의 구조재 및 핵연료 피복재, 화학 플랜트, 석유화학 및 식품산업 등에 널리 사용되고 있다[6,7]. 이중 지르코늄 합금이 가장 많이 사용되고 있는 분야는 원자로의 구조재 및 핵연료 피복재이다. 이것은 지르코늄 합금이 수냉 원자로의 고온 수증기 및 방사선 조사 분위기에서 내식성이 우수하고, 표 2.1.1 및 표 2.1.2 와 같은 열중성자 흡수 단면적이 작고(0.18 barns), 가공성, 고온강도 및 연성이 양호할 뿐 아니라 탄성계수와 열팽창계수가 작아 열변형 저항이 커서 용접변형이 작기 때문이다.

원자력 분야에서 지르코늄 합금은 안전과 직결되는 주요 부품에 사용되고 또 용접으로 제조되고 있기 때문에 이들의 용접관련 문제는 아주 중요하다. 예를들면 핵연료봉은 그 봉단이 용접으로 밀봉되며 연소중 용접부에서 방사성 핵분열 물질의 누출이 없도록 용접부에 기공 등 용접결함이 없이 제조되어야 한다[8]. 여기서는 지르코늄 합금의 특성과 용접에 미치는 제성질과 지금까지 Zr합금에 적용되고 있거나 연구중인 용접법에 대하여 알아본다.

2. 지르코늄 합금의 특성

2.1. 순수 지르코늄

순수 지르코늄의 주요 물리적 성질은 표 2와 같다. 순수 지르코늄의 α/β

변태온도는 862°C로서 저온에서 안정한 α 상(HCP)을 가지고 고온에서는 β 상(BCC)을 갖는다. 순수 지르코늄에 Al, Be, Cd, Sn, Hf, C, O, N 등의 원소를 첨가하면 α 상을 안정화하고, α/β 변태온도를 상승시킨다. 한편 V, Cr, Mo, Co, Ni, Fe, Nb, Cu, H 등의 원소들이 첨가되면 β 상이 안정화되고, α/β 변태온도는 감소된다. 그러나 이들 대부분의 원소들은 Zr에 제한된 범위로 고용된다. 수소가 Zr에 고용되면 300-1000°C 범위에서 취성을 초래할 수 있다.

표 2.1.1 원소 및 합금들의 중성자 흡수단면적

	Barns
Beryllium	0.009
Magnesium	0.059
Lead	0.17
Zirconium	0.18
Zircaloy -4	0.22
Aluminum	0.23
Tin	0.63
Niobium	1.1
Nitrogen	1.9
Iron	2.56
Molybdenum	2.55
Austenitic stainless steel	3.1
Nickel	4.5
Titanium	6.1
Hafnium	104
Boron	750
Cadmium	2,520
Gadolinium	48,890

표 2.1.2 Zr, Ti 및 스테인리스강의 물리적 특성비교

	Zr	Ti	Stainless steel
density, g/cm ³	6.5	4.5	7.9
thermal conductivity, cal/cm°C	0.05	0.045	0.035
coefficient of thermal expansion, deg Cx10 ⁻⁶	6.4	8.5	17.3
melting point, °C	1845	1670	1450
heat viscosity, cal/gx°C	0.07	0.13	0.12

2.2. 지르코늄 합금

초기 원자로의 핵연료 피복재로서 미국에서는 오스테나이트 스테인리스강이 사용되었으나 염화물(chloride)에 의한 응력부식균열 발생과 중성자 흡수 단면적이 크기 때문에 Zircaloy-2 가 개발되었다. 이것은 Zr에 Sn, Fe, Cr과 Ni 등의 원소가 첨가된 것으로 핵연료 피복재의 표준이 되었으나 Ni은 수소를 흡수하여 수소화합물(Hydride)을 생성하고 피복재를 취화하기 때문에 Ni 대신에 Fe를 첨가하여 수소흡수율을 감소하면서 내식성을 유지하는 Zircaloy-4 가 개발되어 현재 가장 많이 사용되고 있다. 표 2.1.3은 Zr, Zircaloy-2와 Zircaloy-4의 물리적 성질이다. 그림 2.1.1은 Zircaloy-2와 Zircaloy-4의 수증기 및 수중에서의 부식시험결과를 비교하고 있다. Zircaloy-2는 중수형 원자로의 1차 냉각계통 압력관과 비등경수로(BWR) 등 일부 핵연료 피복재로 사용되고 있다. Zircaloy-4는 Zircaloy-2와 비교하여 거의 모든점에서 비슷하나 이미 언급된바와 같이 수소흡수를 감소하기 위하여 개발되었다.

표 2.1.3 Zircaloy-2와 Zircaloy-4의 화학조성

COMPOSITION, Weight percent		
Element	Zircaloy-2 UNS R60802	Zircaloy-4 UNS R60804
Tin	1.20 - 1.70	1.20 - 1.70
Iron	0.07 - 0.20	0.18 - 0.24
Chromium	0.05 - 0.15	0.07 - 0.13
Nickel	0.03 - 0.08	---
Fe + Cr + Ni	0.18 - 0.38	---
Fe + Cr	---	0.28 - 0.37
Oxygen	0.09 - 0.16	0.09 - 0.16
Silicon	0.005 - 0.012	0.005 - 0.012
IMPURITIES, Weight percent maximum		
Aluminum	0.0075	0.0075
Boron	0.00005	0.00005
Cadmium	0.00005	0.00005
Carbon	0.0270	0.0270
Cobalt	0.0020	0.0020
Copper	0.0050	0.0050
Hafnium	0.0100	0.0100
Hydrogen	0.0025	0.0025
Magnesium	0.0020	0.0020
Manganese	0.0050	0.0050
Molybdenum	0.0050	0.0050
Nickel	---	0.0070
Nitrogen	0.0080	0.0080
Tungsten	0.010	0.010
Titanium	0.0050	0.0050
Uranium (total)	0.00035	0.00035

**Corrosion Data
for Zircaloy-2
and Zircaloy-4
in Steam
and Water**

Source: Kass,
ASTM STP 368

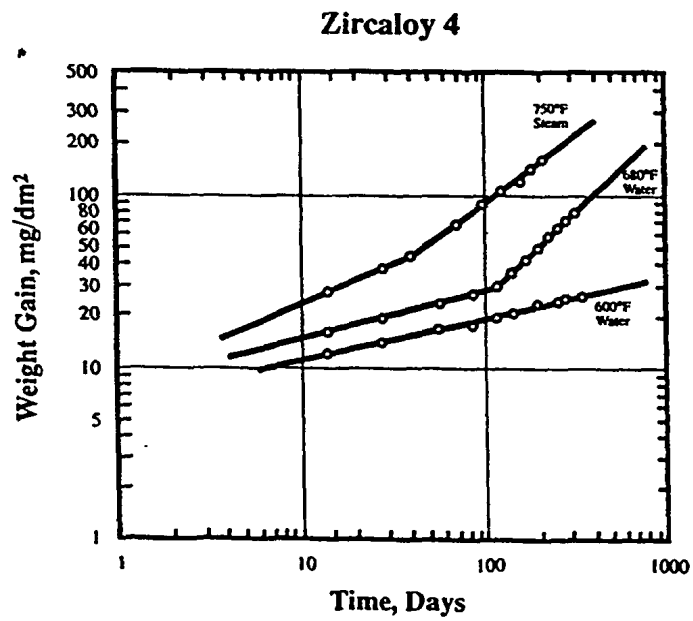
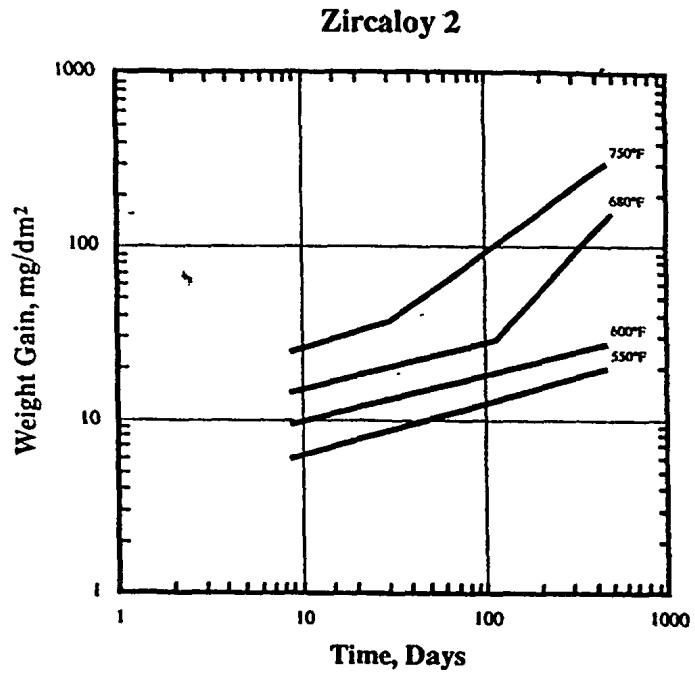


그림 2.1.1 Zircaloy-2 및 Zircaloy-4의 수증기 및 수중에서 부식데이터

핵연료 피복관으로 사용되고 있는 seamless Zr 합금 튜브는 ASTM 규격 B353으로, 화학 공업용 내식재인 Zr 합금은 ASTM 규격 B551로, 순수 Zr은 ASTM Grade B 60702로 규정된다. 그리고 Zircaloy-2와 Zircaloy-4는 각각 UNS R60802와 UNS R60804로 구분된다.

3. Zr합금 용접에 영향을 미치는 인자

3.1. 가스오염

Zr은 반응성이 강한 금속으로 대기와 반응하여 오염될 뿐 아니라 수소, 질소, 산소 등에 의하여 취화된다. Zr은 대기중에서 가열시 온도에 따라 색깔이 변한다. 즉 400℃에서 색깔변화가 시작되고, 500℃ 정도에서는 밝은 황색, 600℃ 정도에서는 황색에서 청색의 범위로 변하고, 700℃ 정도에서는 황색에서 회색 범위로 색깔을 갖게 된다. 특히 용융상태의 Zr은 유기물 및 무기 화합물 등에 의해 기공을 형성한다. 고온에서 질소, 산소 및 수소 등은 Zr으로의 용해도는 높지만 이들을 아주 소량만 고용하여도 경도는 증가하고 연성은 감소한다. 따라서 고순도의 불활성 기체 또는 고진공 분위기가 요구된다.

3.2. 잔류응력과 변형

Zr은 표 2.1.2와 같이 스텐리스강 및 티타늄과 비교하여 탄성계수와 열팽창계수가 작아 용접에 따른 용접부의 잔류응력과 변형이 작다. 그러나 용접 중에는 견고한 치구를 사용하여야 한다. 그리고 두꺼운 판재 경우에는 치구에서 용접된 상태 그대로 용접부의 두께 25 mm 당 594℃에서 1시간씩 증가시키면서 응력제거 열처리를 하는 것이 바람직하다.

3.3. 이음설계

Zr은 약 316℃ 정도에서 강도가 급격히 강화되고 모서리 용접이음의 경

우 용착금속에서 연화되기 때문에 강재보다 더 많이 이동할 수 있다. 그러므로 블록 가접이나 역방향 용접을 할때에 외부적 구속에 의해 변형되지 않도록 배열유지되어야 한다. 따라서 이음설계는 가능하면 용접을 수용하고 균형을 유지할 수 있어야 하기 때문에 완전 용입홈의 T형상 이음과 동일면에서 여러 개의 필릿(fillet) 이음을 피하는게 바람직하다.

4. 용접기술의 방법

Zr 합금의 용접 및 접합으로는 용접, 브레이징, 고상 및 확산 접합법으로 크게 나눌 수 있다. 용접으로는 TIG(GRAW), MIG(GMAW), 플라즈마 아크용접(PAW), 전자빔 용접(EBW) 및 레이저 빔 용접(LBW) 등이 있으나 이중 TIG가 가장 널리 사용되며 기타 용접법은 특정 목적에 국한되어 사용되고 있다. 그러나 피복아크용접(SMAW)에 의한 Zr 용접은 플럭스에 의한 오염으로 용접부가 취화되기 때문에 사용될 수 없다. 고상 접합법으로는 저항 엷셋버트용접, 자력저항 엷셋버트용접, 마찰용접, 폭발용접 등이 포함된다. 확산 접합법은 고상 확산법과 넓게는 고상 접합법으로 분류가 가능하지만, 최근 각광을 받고 있는 새로운 접합법인 액상 확산접합법과는 구별된다. 여기서는 이중 중용한 용접법에 의한 Zr 용접에 대하여 살펴본다.

4.1. TIG용접

TIG 용접법으로 Zr 합금의 판매 및 관류를 불활성 분위기 또는 챔버를 사용하여 용접되고 있다. 핵연료봉의 제조 시 이산화 우라늄 소결체를 지르칼로이 피복관에 장입한 후 봉단마개 플러깅(plugging)한 후 챔버내부를 불활성 가스로 유지하고 연료봉을 원주방향으로 회전시키면서 양단이 용접된다. 연기서는 불활성 가스로는 He을 사용하며, TIG 토치를 고정시키고 연료피복관을 원주방향으로 회전하면서 용접한다. 핵연료 피복관의 TIG 용접 시 내부에 장전된 UO_2 펠렛(pellet)이 용접열에 의한 빠르고 높은 온도의 가열에 의한 열충격으로 파손될 위험이 있기 때문에 기타 용접법의 연구가 많

이 수행되고 있다.

Zr 합금 용접부의 건전성은 용접부 외관의 변색정도에 따라 판단될 수 있다. 가장 이상적인 불활성 가스 실드(shield) 효과는 물론 고진공 중에서 용접하는 것으로 Zr 합금의 용접금속의 색깔은 금속광택이 있는 은백색을 띤다. 실제적으로 붉은 청색 및 청색까지도 양호한 용접으로 간주될 수 있다. 그러나 Zr 용접부의 건전성을 변색정도에 따라 판정하는데는 주의가 필요하다. 또 용접챔버 내부에 고순도 Ar 가스를 흘려주고 또 산소, 질소 및 공기 등을 동시에 불어 넣어 주면서 GRAW 용접을 하면 Zr 합금은 산소농도 5,000 ppm 이상이 되어 비드표면이 회흑색으로 나타난다.

4.2. 저항용접

저항용접은 용접할 재료의 비저항과 용접시 접촉면에서 전기저항에 의해 발생된 열에 의해 용접부가 가열되고 이어 가압력에 의해 수행된다. Zr합금이 저항용접될 수 있는 Zircaloy-2의 경우 전기저항은 20℃에서 74×10^6 ohm-cm로서 탄소강의 5배나 된다. 핵연료 봉단마개용접에 사용되는 저항용접법으로는 저항 업셋버트 용접법(resistance upset butt welding, RWBW)과 자력저항 용접법(magnetic force resistance welding, MFRW)이 있다. 이들의 차이는 크게는 가압력을 작용하는 방법이다.

저항업셋버트 용접은 공압 또는 유압으로 가압력을 작용하나 자력저항용접은 용접부의 형성을 정밀하게 제어된 힘을 전자석을 이용하는 방법으로 종래의 저항 업셋 맞대기 용접법과는 다르다. 용접전류와 시간이 정밀제어됨과 동시에 용접가압력 제어도 우수하기 때문에 1/120-1/60초의 범위의 아주 짧은 시간에 용접된다. 이들 저항 용접은 용접시 모재가 용융되지 않기 때문에 결정립 성장이 최소화되고 또 용접부에 고융점 또는 산화반응이 강한 금속들에 의한 오염이 최소화되기 때문에 용접부의 내식성 또는 내균열이 향상되는 것이 장점이다.

4.3. 레이저용접

최근 레이저 시스템의 급속한 개발로 그 응용에 관한 연구가 많이 진행 중에 있다[9,10]. 그러나 핵연료 봉단 마감용접에 레이저가 아직 사용되고 있지는 않지만 그 가능성은 아주 좋다. 또한 Zircaloy-4의 레이저 빔을 이용한 표면개질(surface modification)로 내식성을 향상시키기 위한 연구가 많이 진행중에 있다. 핵연료 피복재인 지르코늄 합금을 봉단마개용접에 고출력 레이저 용접기를 사용한다면 다른 용접법과 비교하여 제 2 절의 레이저 용접특징에서 나열했듯이 많은 장점들이 예상된다.

4.4. 전자빔 용접

전자빔 용접은 고진공 챔버내에서 용접할 수 있기 때문에 Zr 합금 용접 시 불순가스 흡수 방지의 관점에서는 최적이라 생각한다. 그러나 피용접물의 형상크기가 제한되는 것이 단점이다. Zr 합금의 전자 빔 용접의 한 예가 원자로용 연료채널이다. 이 Zircaloy-4의 용접조직은 GTAW 용접과 같이 침상 α 조직이지만 냉각효과에 의해 Zircaloy-4의 용접조직이 된다. 이 경우 Zircaloy-4에 첨가된 합금원소가 진공중에서 증발되는 효과를 고려하여 용접재료를 사용할 필요가 있겠다.

4.5. 고상확산접합

Zr과 기타 금속과의 이종금속이 용접과 접합에서는 두 금속 모두를 전율 고용하는 경우를 제외하고는 일반적으로 취약한 금속간 화합물이 생성되므로 실제로 건전한 이음을 얻기가 불가능하다. 따라서 이 경우에 확산접합법을 사용하면 양호한 접합강도를 얻을 수 있다. 최근에는 핵연료 재처리 시설에서 내식성 관점으로부터 배관계통에 스테인리스강과 Zr 합금과의 이종재료의 이음에 대한 접합이 확산압접으로 개발되고 있다. 이종접합에서는 폭발 압접, 열간압접 및 고상확산접합 등이 연구검토되고 있다.

5. 미세조직

5.1. 용접부의 미세조직

Zr-4에서 용접부에 나타나는 주요 미세조직은 용접 입열에 따른 가열 및 냉각 열사이클에 의해 결정되는 냉각속도와 관계된다. 용접부에 따라 입열량이 다르기 때문에 용접부에서 생성되는 미세조직도 다르게 나타날 것이다 [11,12]. 우선 용접부에 따른 미세조직을 살펴본다.

5.1.1. TIG용접

TIG(GTAW) 용접은 저항용접이나 레이저 용접에 비하여 가열 및 냉각 속도가 느린 대략 $10-10^2$ °C/sec 정도이기 때문에 미세조직은 조대한 입자의 Widmanstätten 조직으로 나타난다[13]. 이 조직은 주상정 β 입자(columnar β grain)와 아시클러 α 판상(acicular α -plate)로 구성된다. 그러나 열영향부(HAZ)는 용접시 도달한 peak 온도에 따라 3가지 영역으로 구분된다.

- (a) 최고온도가 β 상에 도달한 영역(975°C 이상)
- (b) 최고온도가 $\alpha+\beta$ 상 영역으로 도달한 영역(825-975°C)
- (c) 최고온도가 변태온도 아래에 도달하여 재결정과 결정립 성장 (α -grain) 영역(825°C)

여기서 용접시 β 와 $\alpha+\beta$ 영역으로 가열된 위의 (a)와 (b)의 경우에는 열영향부의 미세조직은 Widmanstätten α 조직으로 구성된다.

5.1.2. 저항용접

저항용접은 1초 이내의 아주 짧은 시간에 완료되기 때문에 가열 및 냉각 속도가 대략 10^3 °C/sec로 빠르다[13]. 따라서 용접부의 미세조직은 마르텐사이트 형태조직 또는 아주 미세한 Widmanstätten α 조직으로 구성된다.

5.1.3. 미세조직의 특징

이상과 같이 Zircaloy-4를 두 용접법으로 용접할 때 나타나는 Widmanstätten α 조직에는 그 형상에 따라 basketweave α 와 parallel plate α 가 있다. 이와같은 형상(morphology)의 차이는 $\beta \rightarrow \alpha$ 로의 변태시 성장기구(growth mechanism)의 차이라기 보다는 오히려 핵생성 기구(nucleation mechanism)의 차이 때문이다. 즉 이것은 β 상에 고용되지 않는 제 2상의 량과 크기와 관련되고 또 이들은 β 입계에서 우선 핵생성 장소로 역할을 하기 때문으로 생각된다.

Widmanstätten α 판상들은 edge 성장에 의해 길이 방향으로 확장되고 합금원소들을 거절함으로써 횡방향으로 두꺼워진다. α -판상은 제 2상 입자와 β -입자계면으로부터 핵생성된다. 즉 Fe, Cr 등의 합금원소들의 확산이 이 판상들의 성장속도를 지배한다. 이와같은 성장거동은 Aaronson 등에 의해 제시된 오스테나이트에서 탄소의 확산에 의해 성장이 지배되는 Widmanstätten 페라이트 판상의 확산성장기구와 유사하다. 미세조직의 변화를 냉각속도의 변화에서 살펴보자. 냉각속도가 증가함에 따라 Zircaloy-4에 나타나는 미세조직은 lenticular $\alpha \rightarrow$ basketweave (또는 parallel plate) $\alpha \rightarrow$ martensitic α 으로 나타난다.

여기서는 Zircaloy-4의 용접부에서 형성되는 주요한 미세조직 lenticular α , basketweave α 와 parallel plate α , martensitic α 에 대하여 살펴보자.

- Lenticular α 조직

이 조직은 느린 냉각속도의 결과로 발생하는 경계가 들쭉날쭉 불규칙한 조대한 판상형 조직이다.

- Basketweave Widmanstätten 조직

이 조직은 구 β 입자 (prior β grain) 내의 많은 면(plate)들로부터 α -plate 들이 불규칙하게 석출되기 때문에 형성되는 것으로 알려지고 있다.

이들 석출로부터 α 상이 핵생성되고 다소 불규칙하게 배위(oriented)되기 때문에 마치 광주리를 엮듯이 상호연결된다. 이는 냉각 중 β 입자 내에서의 제 2상을 포함한 핵생성 장소에서 α 판상이 핵생성되는데 이 α 판상들은 β 상의 입방대칭(cubic symmetry) 때문에 많은 해빗면(habit plane)으로부터 성장한다. 이들은 아주 길게 성장하기 전에 인접 다른 α 판상들에 의해 성장이 방해되어 중단될 때까지 계속 성장한다.

- Parallel plate Widmanstätten 조직

이 조직은 구 β 입자 내에서 α 판상들이 동일 해빗면(habit plane)에서 석출된 긴판상(plate)들이 서로 평행하게 나타난다. 핵생성 장소가 없는 곳에서는 α 판상들이 결정입계로부터 성장이 시작된다. 이 경우 해빗면이 가장 유리하고 한 집단의 평행판상(parallel plate)들이 결정입내로 성장하여 평행한 판상조직으로 된다. 이때 입내 작은 입자들이 핵생성 장소가 될 수도 있다.

- Martensite α 조직

이 조직은 아주 빠른 냉각속도의 결과로 무확산 변태(diffusionless transformation)의 결과로 철계에서 나타나는 마르텐사이트 형태와 형성모드 및 형상에서 유사하다.

5.3. 집합조직

Zr합금을 냉간가공하면 소성변형에 의해 집합조직(texture)이 발생한다. 이 집합조직은 Zr 합금의 물리적 및 기계적 성질과 내식성 등에 큰 영향을 미친다. 이러한 집합조직이 있는 Zr 합금을 용접하게 되면 용접부의 물리적 및 기계적 성질이 불균일하게 될 수 있다.

제 2 절 레이저용접의 특성 분석

1. 레이저기술의 개요

레이저는 1960년 마이먼 (Theodore H. Maiman)이 양쪽 끝에 은도금한 직경 약 1 cm 정도의 루비 단결정 막대에 플래시 램프로 빛을 강하게 여기 시켜서 파장 694nm인 레이저를 처음 작동한 이래로 오늘날까지 다양한 종류의 레이저가 개발되었다. 레이저(LASER)는 “유도 방출에 의한 광증폭”(Light Amplification by Stimulated Emission Radiation)으로 각 영어 단어의 머리글자를 따서 만든 접두어이다. 이러한 특성은 단색성(monochromatity), 직진성(directionality), 휘도(brightness), 가간섭성(coherence) 등이다. 이러한 성질을 이용하여 측정, 금속과 비금속의 가공, 의학, 군사, 정보, 홀로그래피(holography) 등 여러산업분야에 응용되고 있다. 특히 자동차 산업분야와 항공산업분야에 가장 많이 활용되고 있다.

레이저를 이용한 가공기술은 특수 가공기술(non-traditional machining technology)의 하나로 광에너지에 의한 물리적 가공방법이다. 즉 전기적인 에너지가 고밀도의 빛에너지 형태로 변환되어 가열, 응용, 승화 등에 의하여 가공이 이루어진다. 또 레이저 가공기술은 열을 조절하는 기술로서 재료의 물리적 및 화학적성질 또는 내부 조직변화를 이루는 방법이다.

따라서 레이저 가공은 열원의 특성, 가공물의 성질, 가공 공정변수, 가공기의 광학시스템의 특성에 따라 응용범위와 성능이 결정된다. 레이저의 재료 가공 분야에서 응용은 표 2.2.1과 같이 용접, 표면개질, 합금, 절단, 드릴링 등과 같이 광범위하다.

레이저를 이용한 용접기술개발은 이러한 특성과 변수들을 조절하는 기술에 달려 있다. 또한 레이저의 에너지 밀도가 증가됨에 따라 그림 2.2.1과 같이 금속표면에서 일어나는 현상이 변한다. 즉 에너지 밀도가 10^5w/cm^2 이하에서는 그림 2.2.1과 같이 금속내부로만 열전달되는 가열단계이다. 에너지 밀도가 10^5w/cm^2 정도에는 용점에 도달하여 용융계면이 그림 2.2.1(b)와 같

이 금속내부로 전달되는 용융단계이다. 에너지 밀도 10^6-10^7w/cm^2 범위에서는 용융계면은 내부로 이동됨과 동시에 표면온도가 비등점 이상으로 되어 그림 2.2.1(c) 와 같이 재료의 증발단계가 시작된다. 또 에너지 밀도가 $2.5 * 10^7\text{w/cm}^2$ 이상이 되면 레이저 에너지가 이들 증발되는 물질에 흡수되어 원자를 이온화시켜 플라즈마를 발생한다.

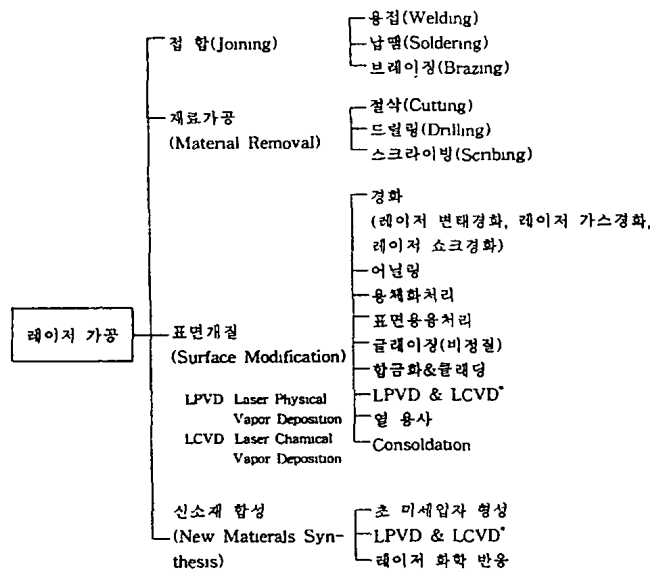


표 2.2.1 레이저를 이용한 재료가공분야

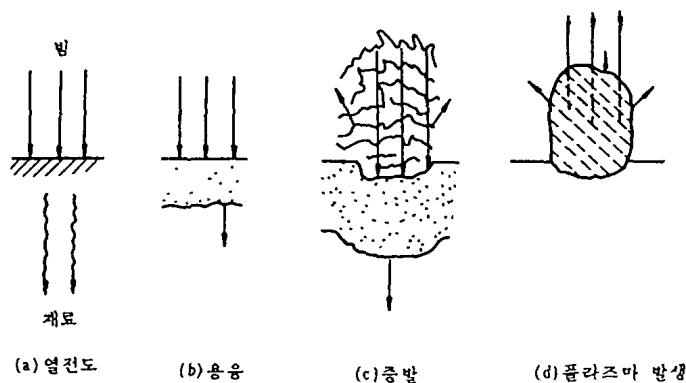


그림 2.2.1 레이저빔과 재료와의 상호작용

2. 레이저용접의 특징

레이저에 의한 금속 및 비금속 용접의 장점 및 단점은 다음과 같다.

1) 장점

- ① 고에너지 밀도의 빔을 이용하여 재료를 고속가열, 용융 또는 증발시키기 때문에 열영향부(HAZ)가 좁고 열변형이 작다.
- ② 光으로 가공하기 EOans에 재료의 변형과 오염이 없다.
- ③ 光을 아주 작은 크기로 접속시켜 아주 좁은 용접폭을 얻을수 있다.
- ④ 질량이 없는 에너지 빔을 사용함으로써 고경도 및 취약한 재료도 가공할 수 있다.
- ⑤ 비접촉 가공법이므로 공구와 치구가 간단하고 또 공구의 마모도 없다.
- ⑥ 이종금속 접합도 가능할 뿐아니라 용접시 용접봉도 필요없다.
- ⑦ 대기중에서 용접이 가능하므로 진공이 필요치 않다.
- ⑧ 정밀용접 및 복잡한 모양의 부품 가공이 가능하다.
- ⑨ 가공 및 용접시 진동과 소음이 없고 작업환경이 깨끗하다.
- ⑩ 인체에 유해한 x-ray의 발생이 없으며 전기장이나 자기장의 영향을 크게 받지 않는다.
- ⑪ 접근이 곤란한 부분이나 내부가 봉합된 부분의 가공이 가능하다.

2)단점

- ① 투자비용과 작동비용이 많이 소요되는 고가공정이다.
- ② 반사율이 높은 재료는 용접 및 가공이 어렵다.
- ③ 레어저 빔은 표면 열원에 의한 가공이므로 가공재료의 두께와 깊이에 제한이 있다.
- ④ 가공에 대한 변수가 많기 때문에 종래 기술에 비해 표준화가 덜 되어 훈련된 인원이 필요하다.

3. 빔출력 (beam power)

1) 출력(power)

빔출력은 용접의 경우에 용입깊이와 용접속도에 영향을 미친다. 통상의 호칭으로 연속 정격출력에서는 watt로 나타내지만 펄스당 에너지인 joule로 나타내기도한다. 시간에 따른 출력형태(종모드)로는 CW(continuous wave), gated pulse, spike pulse, super pulse, hyper pulse 등이 있으므로 용도에 적합한 형태를 이용할 필요가 있다. 펄스경우에는 첨두출력(peak power)과 평균출력(average power) 그리고 펄스 주파수와 duty에 따라 가공성향이 달라지므로 응용분야에 따라 적합한 조건을 선정할 필요가 있다.

2) TEM모드(Transverse ElectroMagnetic mode)

레이저는 일정한 크기의 광속을 갖고 있지만 광의 단면은 균일하지 않으며 어떤 형태로 분포된다. 주파수 모드(종모드)에 대하여 이러한 단면의 에너지 분포형태를 횡모드라 하며 TEM_{pq}로 나타낸다. 레이저 빔 모드는 레이저 공진기 양단을 반복하는 광자들이 전자기장에 의해 결정된다. TEM모드는 레이저 발진기의 내부 광학부품들의 곡률반경, 양반사경 사이의 거리, 방전관의 구경과 구성, 내부 광학부품의 배치 형태에 따라 결정된다.

같은 출력의 레이저라도 TEM 모드에 따라 가공성능이나외부 광학시스템의 수명에 영향을 미치게 되므로 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 절단용으로 가장 큰 에너지 밀도를 가지며 동일한 위상의 파면을 가지며 그 출력은 Gaussian 분포이다. TEM₀₀같은 저차모드를 사용하나 용접 및 열처리 등에는 고차모드(multimode)를 사용한다.

3) 편광(polarization)

레이저빔은 전자파의 일정이므로 전파와 자파를 가지고 있다. 이중에서 전자 벡터의 진동 방향을 편광이라고 한다. 편광면은 육안으로 볼 수 없고

다분히 개념적으로 직선 편광, 원편광, 타원편광으로 나뉘어진다. 광이 물질에 되어, 반사, 흡수될 때 편광면의 방향에 따라 다른성질을 갖게된다. 용접시 편광의 영향은 용접속도가 3m/min. 이상일 때 나타나는데, 이는 입사광의 편광에 따라 반사율이 변하기 때문이다.

4) 발산(divergence)

레이저빔은 발산이 적지만 완전히 collimated beam이 아니기 때문에 발진기에 따라 발산각을 갖는다. 발산각이 크면 빔 전송거리에서 제약을 받게 되므로 발산각이 작을수록 우수한 레이저라고 할 수 있다. 발산각은 beam expander로 조정할수 있다.

5) 출력밀도

개략적인 출력밀도는 다음과 같이 계산할 수 있다. 초점거리를 f , 초점심도를 b , 입사빔의 직경을 d , 파장을 λ 라고하면 초점직경 d_0 는 다음과 같다.

$$d_0 = 1.27\lambda fM^2/d + a d^3/f^2$$

앞의 항은 회절효과에 의한 것이고, 뒷항은 광학부품의 구면수차에 의한 것이다. 여기서 M^2 값은 beam quality factor k 의 역수로 2kW급까지 저차모드인 경우 1.5-3, 0.0286, meniscus인 경우 0.0187, 그리고 aspheric 렌즈인 경우 0이다. 초점심도는 $b=8\lambda / \pi (f/d)^2$ 로부터 구할수 있다. 초점심도는 일반적으로 직경이 5% 증가하는 범위까지의 거리를 말하며 출력밀도는 9.3% 감소하게 된다. 한편 출력밀도는 초점의 직경 d_0 대한 면적당 평균 에너지 밀도이므로 $w=4p/\pi d^2$ 으로 나타낼 수 있다. 실제로는 초점으로 가장 중심부에서 밀도가 가장 높고 직경방향으로 퍼짐에 따라 낮아진다.

4. 레이저에 의한 재료가공

레이저용접시스템은 레이저 종류, 사용 목적, 가공재료의 특성에 따라 구성요소는 다소 상이하나, 일반적인 용접시스템은 레이저 발전기 및 전원장치 (power supply), 냉각장치 및 구동장치 등으로 구성된다.

레이저는 목적 위치까지 빔전송되고 레이저 헤드부분은 렌즈와 미러를 사용하여 초점을 만드는 부분이다. 레이저는 전반사와 부분반사의 미러사이를 왕복하면서 증폭된다. 부분 반사경인 출력경을 통하여 외부로 출력된 레이저 빔을 여러 가지 광학장치를 이용하여 가공위치까지 전송시킨 후 집속 광학부품을 사용하여 미소초점으로 집속시켜 아주 높은 출력밀도($10^3 \sim 10^9 \text{w/cm}^2$)을 얻어 각종 재료의 가공에 이용하는 것이 그림 2.2.2에서와 같이 레이저를 이용한 재료가공의 용접원리이다. 이러한 경우 재료에 강력한 에너지를 가지고 있는 레이저빔이 입사되면 표면에서 반사와 흡수가 일어난다. 표면에 흡수된 레이저 빔은 열에너지로 바뀌어 열전도에 의해 재료내부로 전달된다.

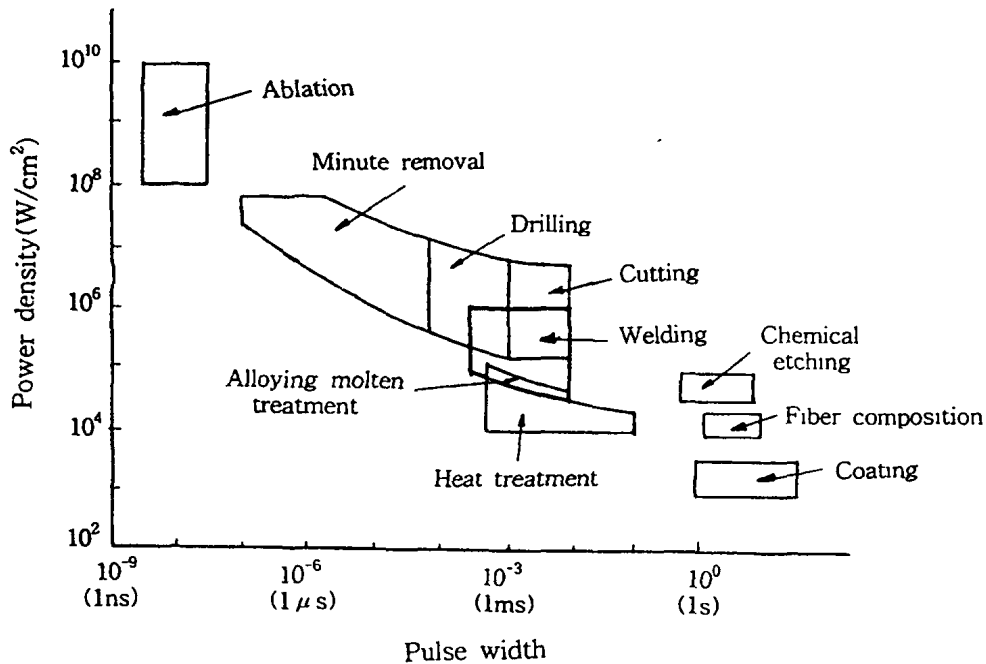


그림 2.2.2 레이저 재료가공시 빔밀도와 빔 상호작용 시간과의 관계

출력밀도가 $\sim 10^5 \text{W/cm}^2$ 이상이 되면 흡수된 재료표면의 온도가 융점이 상으로 상승되어 액상계면이 형성되고 재료내부로 확장된다. 금속의 합금화 (alloying 과 cladding)와 용접에 이용되는 출력밀도범위이다. 출력밀도가 10^7W/cm^2 이상으로 더욱 증가하면 재료의 액상표면으로부터 국부증발현상이 발생하는데 이를 이용하여절단과 천공이 된다. 출력밀도가 10^9W/cm^2 이상이 되면 증발물질들이 레이저빔을 흡수하여 플라즈마를 형성한다. 이 플라즈마는 레이저 빔을 반사 또는 흡수하기 때문에 금속표면으로 되는 레이저 빔의 효율을 크게 떨어뜨린다.

5. 재료용접에 영향을 미치는 인자

일반적으로 용접품질은 용접폭, 용입깊이, 열영향부, 미세조직, 경도, 인장, 피로, 연성 등으로 평가되며 이에 영향을 미치는 레이저 용접관련 인자들은 다음과 같다.

1) 열원(레이저빔)

출력, TEM 모드, 출력형태, 발산각, 출력 안정성, 출력 가변범위, 초점거리, 초점심도, 집속렌즈의 형상, 초점위치, 빔의 진동

2) 용접기

가공물의 위치결정, 강성, 진동, 안정성, 용접속도, 스패터(splatter)방지, 폼(fume)제거.

3) 가공물

반사율, 표면조도, fir-up, 재질밀도, 비등점, 융점, 이음형상, 이음정성

4) shield gas

종류, 압력, 유량, 초점위치, 광축정렬

6. 레이저 종류

레이저의 종류는 대단히 많고 그 분류방법도 다양하지만 이중 재료용접 및 가공에 사용되는 레이저는 표 2.2.2와 같다.

표 2.2.2 재료가공용 레이저의 종류

Laser	Wavelength	Average power, pulse energy
CO ₂	10.6	<20kW CW pulsed
Nd:YAG	1.06	<1kW CW pulsed
Nd:Glass	1.06	<100J pulsed
Ruby	0.694	<100J pulsed
Excimer	0.308	<1J pulsed

이중 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저가 가장 널리 사용되고 있다. Nd:YAG 레이저는 적외선 구역의 파장을 방출시키므로 루비 레이저에 비하여 광자 에너지가 약간 작으나 지속파 또는 반복 속도가 큰 펄스 등 여러 가지 모드로 동작이 가능하므로 공업적으로 가장 많이 사용되고 있는 레이저 중 하나이다. CO₂ 레이저는 원적외선 구역이 10.6 μ m 파장인 고출력 펄스 또는 지속파를 방출시킬수 있으며 효율이 약 15% 이상으로 높기 때문에 ND:YAG와 함께 재료가공에 가장 중요하고 많이 사용되는 레이저이다.

7. 키홀(keyhole)

레이저를 이용한 용접은 고출력 레이저가 재료표면에 집속되기 때문에 깊은 용입이 그 특징이다. 이러한 집속되고 collimated 된 열원은 가공재료의 두께 방향으로 급속가열하여 재료를 증발(evaporation)하여 금속증기로 가득찬 공동(cavity, channel)을 형성한다. 이 연신된 형상으로 깊이가 폭보다 10배 까지가 된다. 그림 2.2.3에서와 같이 이 공동은 빔 이동방향으로 앞쪽에서는 넓고 뒤쪽에서는 좁아 키홀(keyhole)이라고 부른다. 이 공동은 흑

체(blackbody)의 역할을 하는데 이는 열을 재료내부로 분산시킬 뿐만아니라 레이저를 흡수한다. 키홀벽이 가열되면 온도는 비등점(boiling point) 이상으로 상승되어 필요한 증발을 공급한다. 이 키홀은 주위가 용융금속으로 둘러싸이고 금속증기와 동적평형을 이룬다.

용접가공물이 이동하면 용융지(weld pool)의 앞쪽에서는 용융되고, 뒤쪽에서는 응고가 된다. 키홀의 용입깊이와 용융지의 형태는 에너지 흡수량과 다양한 온도에서 반사량, 집속점(focused spot)에서의 레이저출력, 집속점의 크기, 이동속도(travel speed), 가스보호방법과 용접되는 금속의 열적성질 등에 의해 영향을 받는다. 가공물에서 키홀 상부로 증발된 합금은 플라즈마라고 하는 이온화가스를 형성한다. 이것이 키홀상부에 잔류하면 플라즈마는 레이저 일부를 흡수하고 모든 방향으로 되어 용접부의 용입깊이를 감소한다.

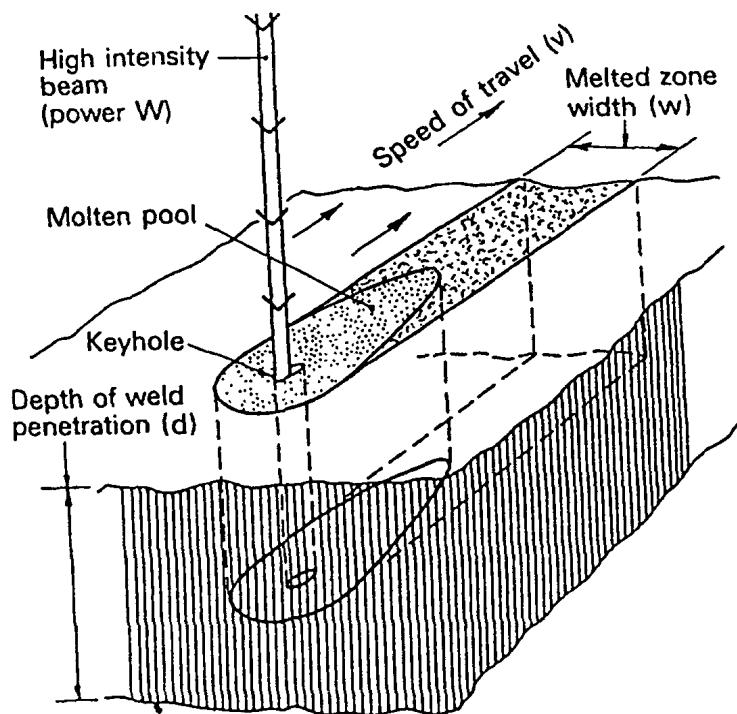


그림 2.2.3 레이저를 이용한 키홀용접의 원리

8. 레이저변수

레이저용접에서 주요한 독립 공정변수로는 입사 레이저 빔 파워 (incident laserbeam power), 입사 레이저빔의 직경, 흡수율(absorptivity) 과 용접시 레이저 빔의 이동속도(traverse speed)이다. 물론 용접이음설계, 보호가스(shielding gas), 맞대기 용접시 간격과 초점심도(depth of focus) 등도 중요한 역할을 한다. 종속변수로는 용입깊이(depth of penetration), 용접부의 미세조직과 금속학적 성질 등이 있다.

8.1. 빔출력

레이저용접에서 용입깊이는 레이저 빔의 파워밀도와 직접 관련되고 입사 빔 파워와 빔 직경과 관계된다. 대개 일정 빔 직경에서 빔 파워가 증가하면 용입이 증가한다. 즉 용입은 입사 레이저 파워에 거의 직선적으로 증가한다.

8.2. 빔직경

빔직경의 인자는 파워밀도를 결정하기 때문에 가장 중요한 변수중의 하나이다. 그러나 고출력 레이저에서는 측정하기가 아주 어렵다. 이는 빔 직경의 본성과 빔 직경에 대한 정의 때문이다. Gaussian 빔 직경은 파워분포의 중앙값이 $1/c^2$ 또는 $1/c$ 로 감소될 때 직경으로 정의된다. 중앙값을 $1/e^2$ 을 기초로하여 정의된 빔 직경은 총 파워의 80%이상을 포함하나 $1/c$ 로 정의된 빔의 경우에는 불과 60% 약간 상회하기 때문에 $1/e^2$ 로 정의되는 빔 직경이 권장된다.

8.3 흡수율

레이저용접의 효율은 피용접물의 빛 에너지 흡수에 달려있다. 레이저 가공에서 열전달은 피용접물에 의해 흡수된 에너지에 기초를 두어 계산된다. 금속의 적외선 흡수는 자유전자에 의한 전도흡수에 의존한다. 그러므로 흡수율은 용접된 재료의 전기적 비저항(electrical resistivity)의 함수이다. 금속

은 상온에서 불량은 적외선 에너지의 흡수체이지만 어떤 임계값(약 10^6-10^7W/cm^2) 이상에서 에너지 전달은 키홀(keyhole)을 경유하여 훨씬 더 효과적인 흡수로 이르게 된다. 일단 키홀이 형성되면 흡수율은 급격히 증가한다. 레이저는 키홀 내부에서 다중반사가 전자빔과 비교하여 수렴각이 크에도 불구하고 깊은 용입을 가능토록 한다. 그러나 레이저용접시 키홀 형성에 필요한 임계 에너지는 불량은 흡수율 때문에 전자빔의 임계 에너지($1.5 \times 10^5\text{W/cm}^2$) 보다 더 크다. 그럼에도 불구하고 이 키홀기구 (keyhole mechanism)에 의한 에너지전달이 알루미늄처럼 고반사율의 재료에도 효율적인 용접이 가능하게 한다.

8.4. 용접속도(Traverse speed)

Duley 등에 의해 레이저용접과 전자빔 용접에서 용접속도와 용입과의 상관관계를 비교 조사되었다. 이들에 의하면 레이저용접에서의 용입은 전자 빔 용접에서 보다 용입은 작았으나 용접속도가 증가함에 따라 두용접법에서 용입의 차이는 감소되었다. 그러나 이는 일단 키홀이 형성되면 달라진다. 키홀은 더 이상 입사된 레이저를 완전히 잡아둘 수 없기 때문이다. 레이저 또는 전자빔에서 키홀 용입은 순간적으로 일어난다. 용접속도가 아주 느릴때는 레이저용접의 용입깊이는 전자빔 용접에서 보다 훨씬 작다. 이는 플라즈마의 형성때문으로 입사빔을 감소하기 때문이다. 용접속도는 피용접재의 두께가 증가하면 감소하여야 한다. 일반적으로 용접속도가 빠를수록 용입이 제대로 되지 않으며 한편 용접속도가 낮을수록 과잉용융, 재료손실과 용접부의 관통이 발생한다.

제 3 절 브레이징 접합의 특성 분석

1. 지지체 부착의 특성

현재 중수로형 핵연료집합체는 고리원자력 발전소 등에 사용되는 가압경수로형 핵연료와는 다른 특징들을 가지고 있다. 그 중 하나는 핵연료재료인 지르칼로이-4 피복관에 지지체(bearing pads) 및 간격체(spacer pads)가 부착되어 연소시 로내에서 인접 연료봉들과 일정간격을 유지하고, 또한 최외각 연료봉에 냉각수가 흐르는 방향으로 지지체가 부착되어서 연료집합체가 장전되는 압력관 내벽과 간격을 유지하며, 연료봉과 압력관 사이의 마찰로 발생될 수 있는 피복관 마모를 방지한다. 이들 지지체와 간격체의 부착물들은 베릴륨(Be)을 용가재로 사용하여 브레이징으로 접합된다. 이것은 다른 접합과 비교하여 지지체와 피복관 사이에 틈 발생을 방지할 수 있어 간격부식을 방지할 수 있고, 또 미세조직 변화의 영향을 작게 할 수 있기 때문이다.

베릴륨이 유독성이 있음에 불구하고 지르칼로이-4 브레이징에서 용가재를 사용하는 것은 Zr-Be 이 975℃에서 공정온도를 가지기 때문으로 이들의 융점에 비해 비교적 낮은 온도에서 접합이 가능할 뿐만 아니라 열중성자 흡수 단면적이 작고 열전도도가 크기 때문이다.[14] 그러나 지르칼로이-4를 베릴륨을 사용하여 브레이징하면 모재와 용가재 사이의 계면으로 액상의 Zr-Be 공정합금이 침투 또는 확산됨에 따라 금속간 화합물이 생성될 뿐만 아니라 미세조직에도 변화된다. 따라서 이러한 현상은 피복관 유효 두께를 감소시킬 수가 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

2. Be 증착 및 브레이징 분석방법

지르칼로이-4 판재를 시편 지그위에 장착한 후 스퍼터링 챔버의 양극에 부착하고 지름 200mm의 원형의 고순도 Be을 음극에 위치하고, 챔버내부를 2×10^{-5} Torr 이상의 진공으로 만든 후 일정한 압력의 Ar 분위기에서 플라즈마를 발생시켜 증착층 두께가 약 $10\mu\text{m}$ 이 되도록 5시간 스퍼터링하는 것

이다. 브레이징시편은 음극 스퍼터링 장비를 사용하여 수행할 수 있으며, Be 증착된 시편을 진공로의 기판위에 쌓은 후 진공도를 2×10^{-5} Torr이하의 분위기로 만든 다음 브레이징온도 1020°C까지 가열속도 15°C/min로 가열된다. 다음에는 브레이징부의 특성 분석으로 시간을 변화시켜서 Be 용가재를 사용한 지르칼로이-4 지지체를 브레이징 하였을 때 브레이징부의 특성변화는 아래의 방법에 의해 분석되었다.

2.1 미세조직 조사 및 경도측정

브레이징된 시편들의 미세조직을 관찰하기 위하여 각 시편을 Be 증착면과 수직 및 수평 두 방향으로 마운팅하여 사용된다. 증착면과 수평인 시편은 Zr-Be 계면으로부터 0.3mm씩 연속적으로 연마하여 미세조직 및 확산 깊이를 조사하였고, 한편 증착면과 수직인 시편은 그대로 확산깊이와 미세조직을 광학현미경으로 관찰할 수 있다. 이때 사용된 부식용액은 HF 5%, HNO₃ 45%, H₂O 50% 용액으로 약 5초간 부식하였다. 그리고 Be 증착면과 수직 방향으로 미세조직관찰된 시편을 미소경도기로 Be-Zr계면으로부터 0.14mm 간격으로 경도를 측정할 수 있으며, 이때의 하중은 500g 으로 정하게 된다.

2.2 X-선 회절법

브레이징접합시 Be 용가재가 모재로 확산하여 형성된 금속간화합물은 각 시편의 시편으로부터 수 μm 씩 단계적으로 연마하여 X-선 회절로 분석하였다. 사용된 X-선은 CuK α 이고 20각도의 회절상은 ASTM code를 사용하여 Zr-Be 금속간화합물로 규명하였다.

2.3 Be 농도측정

지르칼로이-4 모재에서 Be의 확산속도를 구하기 위하여 브레이징 온도에서 유지시간이 다른 3개의 시편을 선택하여 확산깊이에 따른 Be 농도를 측정하는 것이다. Be은 주기율표에서 원자번호가 4번으로 EPMA로 농도변화 조사가 어렵기 때문에 형광분석법(flurospectrometry) 으로 Be 농도를

측정할 수 있다. 시편 표면으로부터 0.25mm 씩 칩상태로 채취하여 무수황산나트륨과 황산용액에 용해시켜 Be 량을 분석할 수 있다. 칩의 오차범위는 $\pm 0.001\text{mm}$ 인 만능밀링기를 사용하여 채취하게 된다.

2.4 부식시험

Be 용가제로 지르칼로이-4를 브레이징하였을 때 확산 침투된 영역의 부식특성 조사는 Be를 증착하고 브레이징한 시편, as-received 상태의 시편, 브레이징온도로 열처리된 지르칼로이-4 의 3가지 시편을 준비하여 사용된다. 각 시편은 ASTM G-2 규격에 따라 autoclave에서 온도 350℃ 및 5MPa(50bar) 수증기압의 조건하에 일정기간의 부식후 시편 중량 증가를 측정할 수 있다. 부식시간은 24, 48, 72 및 96시간으로 변화시킨다. 그리고 온도는 300, 350, 400 및 450℃로 변화하고 72시간 부식시켜 온도 변화에 따른 부식율의 조사가 일반적으로 많이 수행되고 있다.

3. 지지체접합부의 특성 분석

그림 2.3.1은 브레이징하기 전에 Be이 지르칼로이-4 표면에 증착시킨 것을 나타내고 있으며, Be층 두께 측정에 사용되었다. 그림 2.3.2는 브레이징부 전체의 사진으로 Be 증착층으로부터 모재로 Berk 확산 침투된 영역을 보여주고 있다. 여기서 지지체의 브레이징부에서는 둥근형상의 결정체들이 생성되어 있는데 이들은 Zr-Be 금속간화합물로서 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그림 2.3.3은 그림 2.3.2보다 큰 배율의 미세조직을 보여주고 있으며, 40분 동안 브레이징한 것으로 Be이 모재로 확산 침투함에 따라 나타내는 것을 영역별로 보여주고 있다. 그림 2.3.3에서와 같이 전 브레이징 영역을 3가지로 나눌 수 있다. 즉 Be/Zr 계면에서는 모재쪽으로 멀어질수록 조대한 결정입내에 점차적으로 크기가 작은 입자들이 존재하며, 이것은 영역 II 이며 영역 I 과는 뚜렷하게 구분된다. 또한 영역 III에서 오른쪽으로 멀어짐에 따라 α -lath 들이 서로 연결되어 마치 광주리를 짜듯이 basketweave

조직이 나타내며, Be 확산침투에 따라 생성되는 석출입자들이 아주 감소된 부분이 영역 III임을 보여주고 있다.



그림 2.3.1 Zr-4 표면에서의 Be층의 미세단면

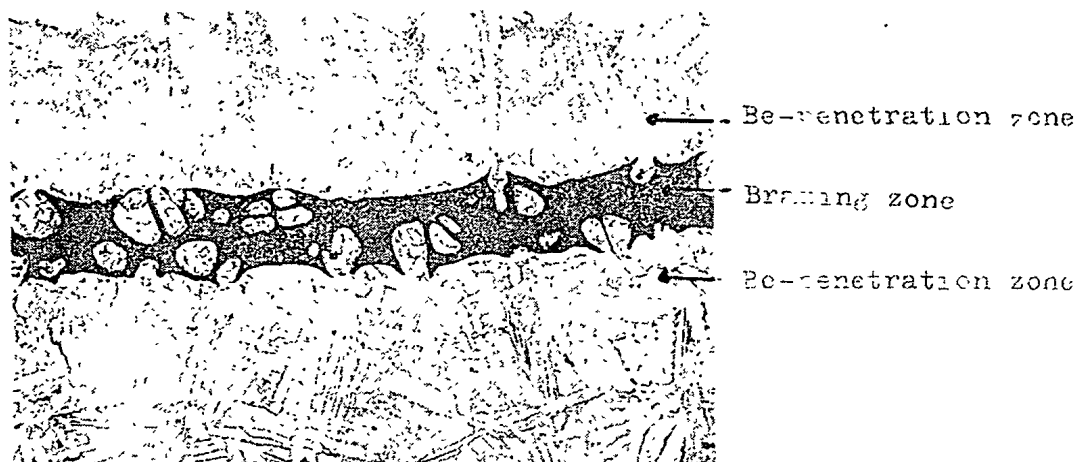
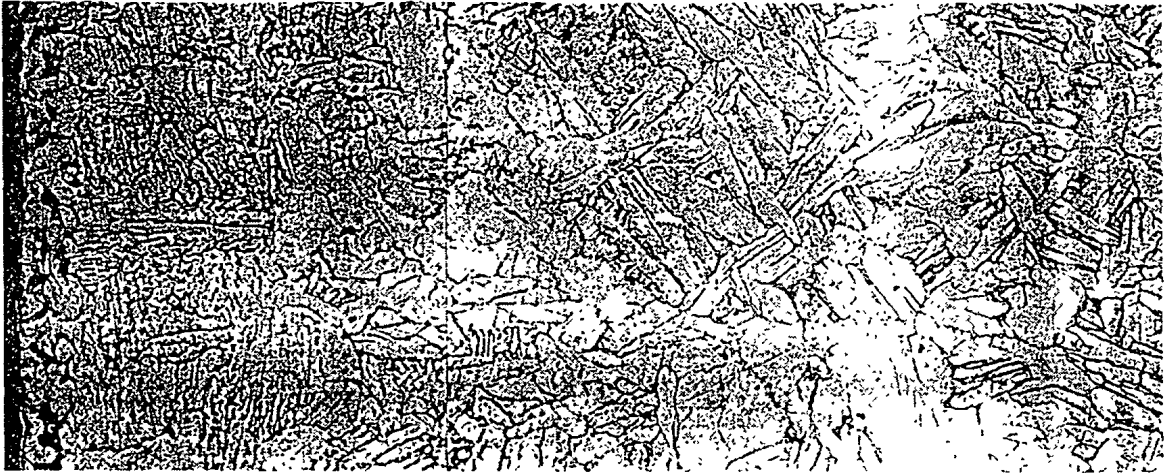


그림 2.3.2 Zr-Be 브레이징된 미세조직



Region I Region II Region III Region IV

그림 2.3.3 영역별 Be-brazed 시편의 미세조직 단면
(Region I, Region II, Region III)

그림 2.3.4와 그림 3.3.5는 as-received 모재, Be이 증착되지 않고 브레이징 온도에서 열처리된 시편과 Be 증착후 브레이징 된 3가지 시편을 시간 및 온도를 변화시켜 부식한후 중량을 측정하여 내식성을 비교하여 보여주고 있다. 동일한 시험조건에서 Be 브레이징된 시편의 무게 증가율이 가장 컸고 다음이 as-received 와 브레이징 온도로 열처리된 시편의 순으로 나타내고 있다. 그림 2.3.4에서와 같이 부식시간 증가에 따라 세 조건외 시편에서의 무게는 거의 일정하게 증가하고 있으나, 그림 2.3.5에서는 350℃ 이상에서 무게가 급격하게 증가하였으며, 400℃ 이상에서는 완만하게 증가하고 있었다.

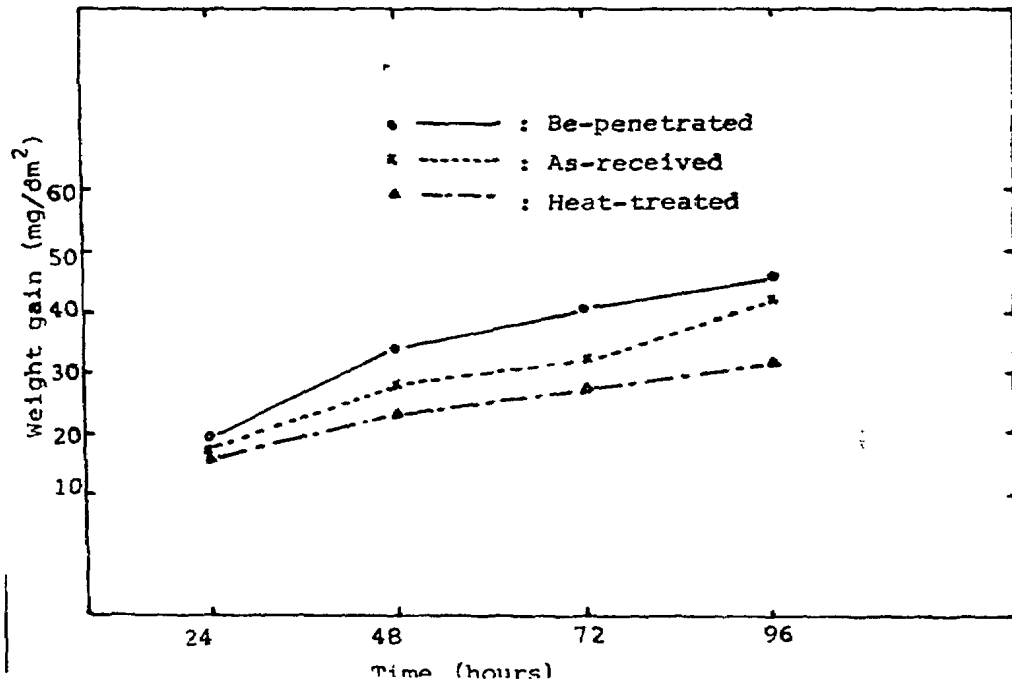


그림 2.3.4 350°C, 부식시간에 따른 weight gain

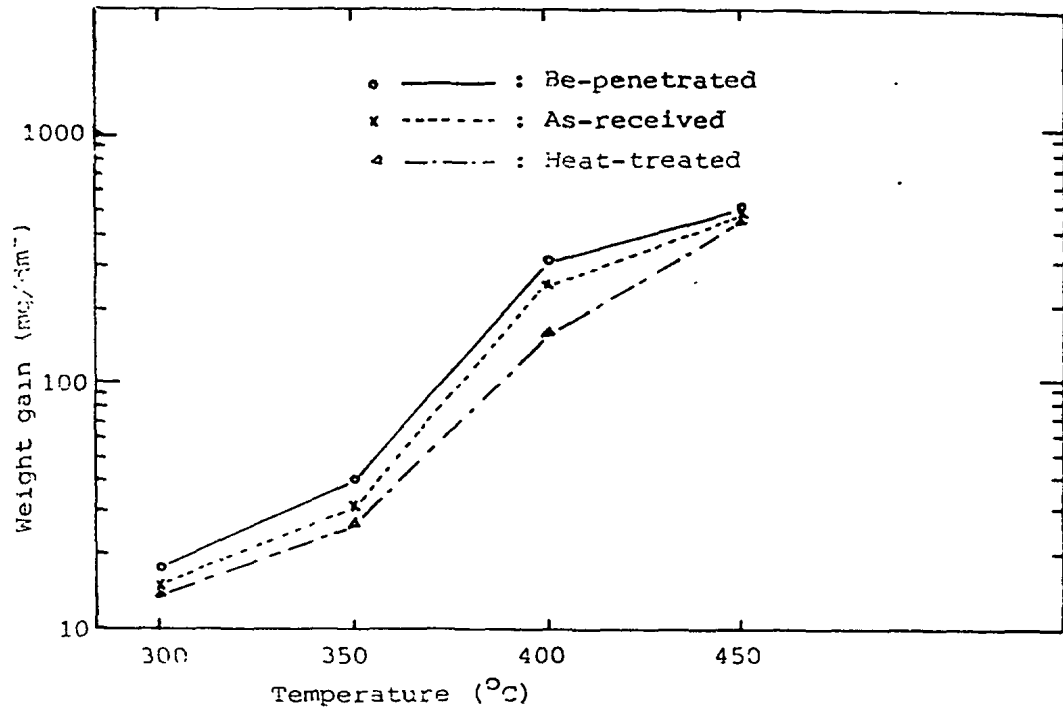


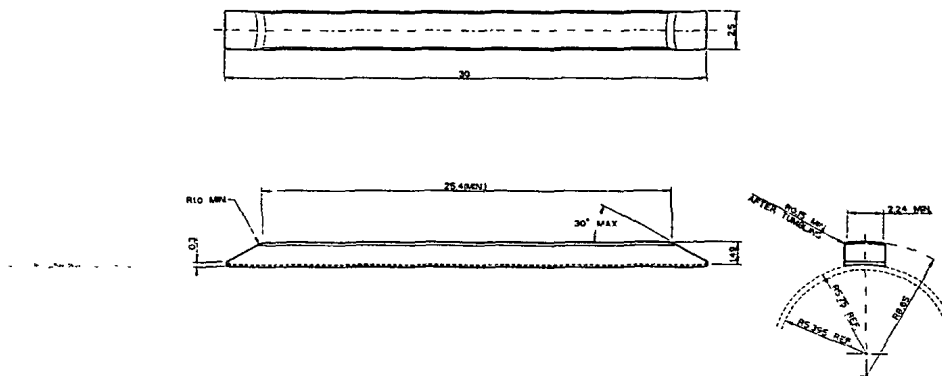
그림 2.3.5 72 Hr, 부식온도에 따른 weight gain

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

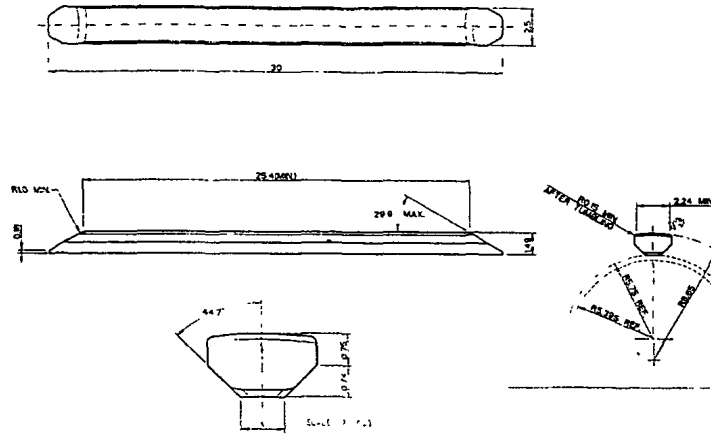
제 1 절 지지체 레이저용접의 샘플 분석

1. 샘플 및 실험방법

본 실험에 사용된 샘플은 그림 3.1.1과 같이 지지체구조 A(사각형)와 B(췌기형) 형태인 지르칼로이-4 지지체 2.3mm x 30mm, 두께 0.4mm와 외경 13.08mm 인 피복관으로 준비되었다. 지르칼로이-4 지지체에 존재하는 이물질을 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 60℃로 건조시켰다. 이때 그림 3.1.2 및 3.1.3에서 나타난 바와 같이 레이저용접시 지지체의 용접변형 억제 및 산화방지를 위해서 특수하게 설계된 holding fixture와 용접챔버를 사용하였다.



(A: 사각형 지지체 샘플)



(B: 썬기형 지지체 샘플)

그림 3.1.1 지지체 및 피복관 용접샘플의 형상

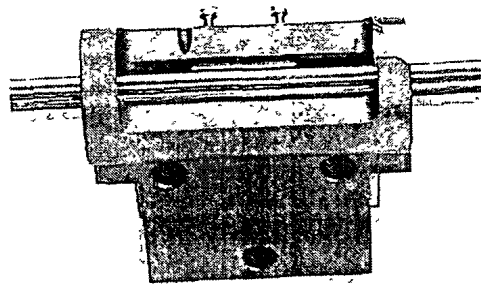


그림 3.1.2 지지체부착을 위한 정밀 용접치구

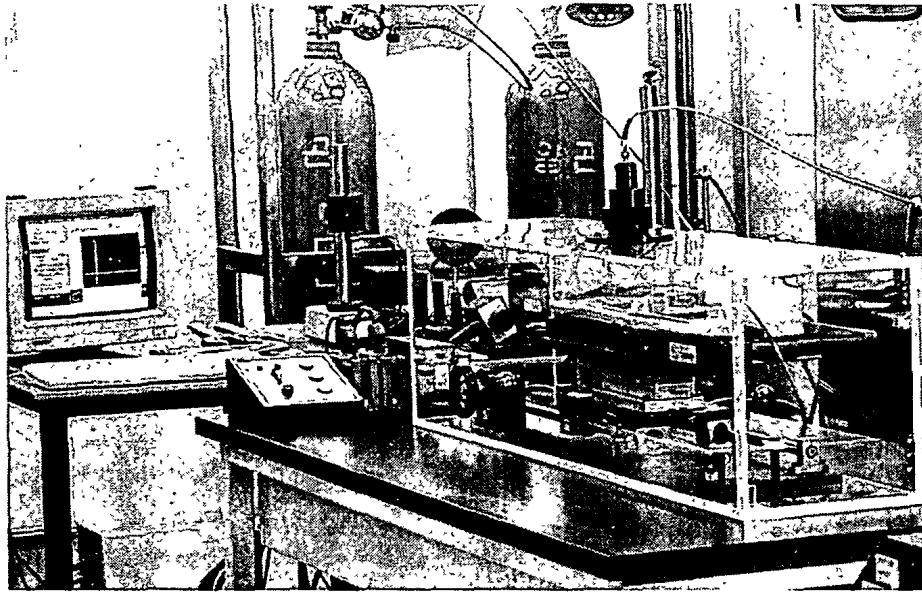
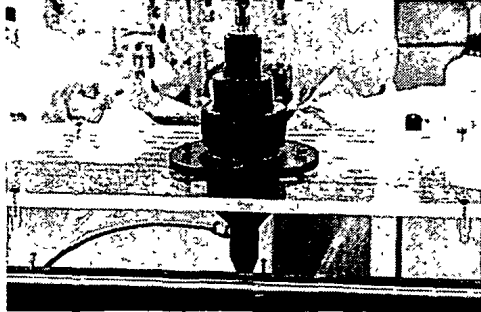


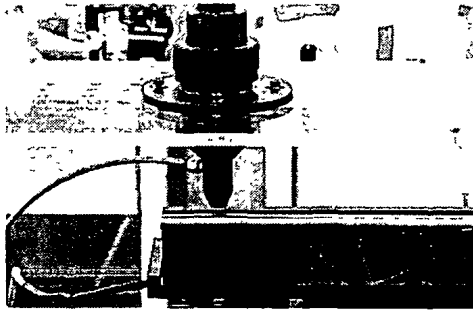
그림 3.1.3 지지체부착을 위한 용접챔버

그림 3.1.3의 챔버장치에서 지지체용접샘플의 실험을 위하여 원격 레이저전송이 가능한 용접노즐을 이용하였다. 레이저를 효율적으로 이용하여 가능한 용접폭과 용입이 적절하게 용접되기 위해서는 높은 파워밀도를 갖도록 레이저를 집속시켜야 하고, 용접중에 집광렌즈의 흡제거 및 시험편의 산화방지를 위한 보호가스 고순도 헬륨의 사용이 필요하다. 이러한 미세용접의 요구조건을 만족하도록 용접노즐을 제작하여 사용하였다.

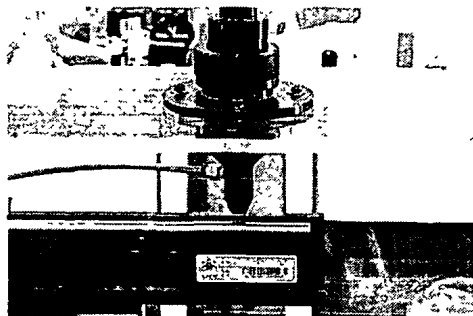
지지체샘플의 용접실험시 광학출구커플러에 연결된 용접노즐은 레이저절단 보다는 가스압력이 낮으며, 이때 사용되는 보호가스도 용접부의 산화를 방지하기 위한 것으로 용융면을 채울 수 있도록 충분한 부피로 확산되는 것이 필요하다. 이러한 보호가스의 역할은 레이저용접시 플라즈마 형성에 높은 에너지를 요하는 헬륨이 레이저와 재료의 상호관계에 유리한 잇점을 가지고 있다. 그림 3.1.4에서 볼 수 있듯이 실제로 중수로용 핵연료봉 지지체부착을 위한 샘플제작시 레이저용접 공정순서를 보여주고 있다.



①



②



③

그림 3.1.4 지지체부착을 위한 용접공정 순서

2. 용접제어장치 설계 및 보완

지지체를 연료봉의 표면에 용접하기 위해서는 정밀한 기계 및 제어장치가 필요하다. 용접부의 폭이 1mm 이하이기 때문에 정밀한 제어를 하지 않으면 요구되는 용접특성을 만족할 수 없다.

레이저용접 제어장치는 3개의 단축 이송 테이블과 1개의 회전축, 4개의 드라이버 및 PC 장착 콘트롤러, 그리고 제어용 컴퓨터로 구성된다. 레이저용접 제어장치는 그림 3.1.5와 같다. 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.

드라이버는 Parker의 OEM750X 모델이다. Parker의 OEM 모델은 가격대 성능이 우수하고 지지체를 용접하기 위한 직선운동 및 회전운동 제어 프로그래밍이 용이하다. 표 3.1.1은 드라이버의 사양을 보여준다. 제어용 컴퓨터로는 콘트롤러를 장착할 수 있는 데스크탑 PC를 사용하였다. 제어용 컴퓨터와 콘트롤러는 PC 버스로 연결되며 콘트롤러와 드라이버는 전용선으로 연결된다. 제어용컴퓨터에서 작성된 제어프로그램은 드라이버에 다운로드된 후에 실행된다. 제어프로그램은 조이스틱 단자를 이용하여 임의 위치로 용접부를 이동시킬 수 있는 기능을 갖추고 있으며 용접 파라메타가 선정된 후에는 파라메타를 설정하여 자동으로 용접을 수행할 수 있는 기능을 포함하고 있다.

지지체를 용접하기 위한 제어 프로그램은 다음 표 3.1.2와 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. 특히 용접 위치를 입체적으로 선정하여 지지체의 전반부 및 후반부의 곡선부를 하나의 공정으로 처리할 수 있도록 프로그래밍하였다.

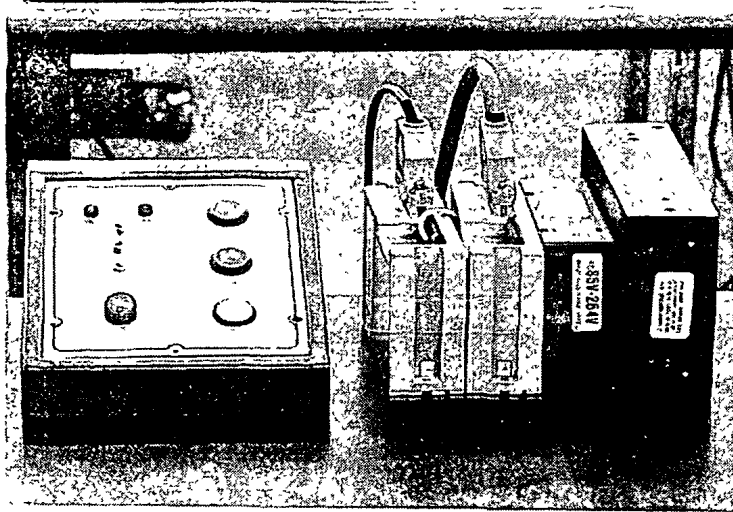


그림 3.1.5 지지체 레이저용접 제어장치

표 3.1.1 OEM750 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

표 3.1.2 지지체용접용 제어프로그램

```

, PROGRAM NAME - LASER WELDING FOR BEARING PAD
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)

INSELP2,50        ;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 3.1.2 지지체용접용 제어프로그램(계속)

```

DEL MAINP                ,INPUT SCANING 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

DEL ZDOWN             ,Z-AXIS DOWN JOGGING
DEF ZDOWN
JOG0010 : INFNC4-3J
END

```

표 3.1.2 지지체용접용 제어프로그램(계속)

```

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 HOMP                ;HOMMING PROGRAM ALL AXIS
DEF HOMP
HOME111
END

DEL ERR
DEF ERR
GOTO MAINP
END

DEL CWELD6
DEF CWELD6

A50,50,50
AD50,50,50
V,0.8                 ,0.8rps*5mm/r=4mm/s
D,+40000              ;5mm*40000/25000=8mm
V0.4,0.4,0.4         ;2mm/s
D,+5000,-5000        ;1mm
OUTX1
GO0110
D+3750,+3750,-3750   ;0 75mm
GO1110
D+6500                ;1 3mm
GO1000
D+3750,-3750,+3750
GO1110
D,-5000,+5000
GO0110
OUTX0
D,-40000
D-14000
GO1000

END

```

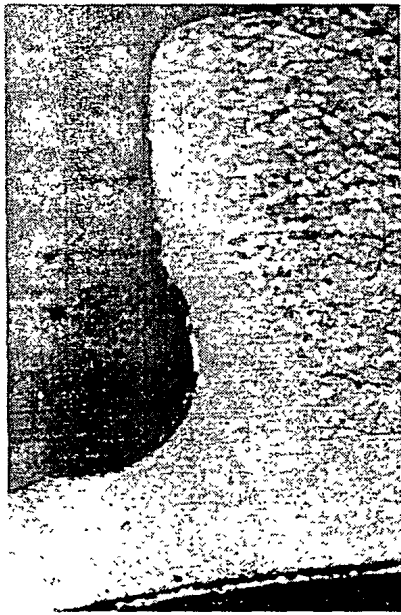
3. 지지체용접부의 특성 조사

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 3.1.1에서와 같이 지지체구조 A와 B를 사용하여 레이저용접할 경우, 1차년도 연구결과에서 제시했듯이 출력에 따라서 열변형의 차이는 있으나 용접부에 대한 용입비(aspect ratio)에서는 대체로 0.3 정도에서 얻을 수가 있었으며, 특히 원자력분야의 핵연료성능 향상 및 열전도를 증가하기 위해서는 펠렛 이음구조를 가지는 경우에서 볼 때 피복관과 지지체에서 만나는 면적을 가능하면 모두 용융될 수 있는 구조형태가 이루어지면 매우 이상적이다.

그림 3.1.6은 레이저를 이용하여 양방향으로 레이저를 조사시켰을 때 지지체샘플의 A와 B 구조를 사용하여 절단된 용접단면을 보여주고 있으며, 특히 B 구조인 경우 레이저가 안쪽으로 들어가서 용융된 모습을 보여주고 있다. 그림 3.1.7은 지지체구조 B의 경우 레이저용접될 때 지지체와 피복관에서 맞나는 root face 길이를 조사하였고, 또한 root face 길이에 따른 용입의 영향을 분석하였다. 이 경우 레이저출력이 증가함에 따라 root face 길

이는 감소하고 또한 용입은 증가됨을 알 수 있었다. 여기서 B 구조의 지지체용접을 최적화하기 위해서는 그림 3.1.7과 같이 레이저출력 80W에서 100W 범위로 root face 길이가 0.8mm 이며, 용입은 0.3mm에서 얻었다.



(A type)



(B type)

그림 3.1.6 레이저를 이용한 지지체용접단면 (×50)

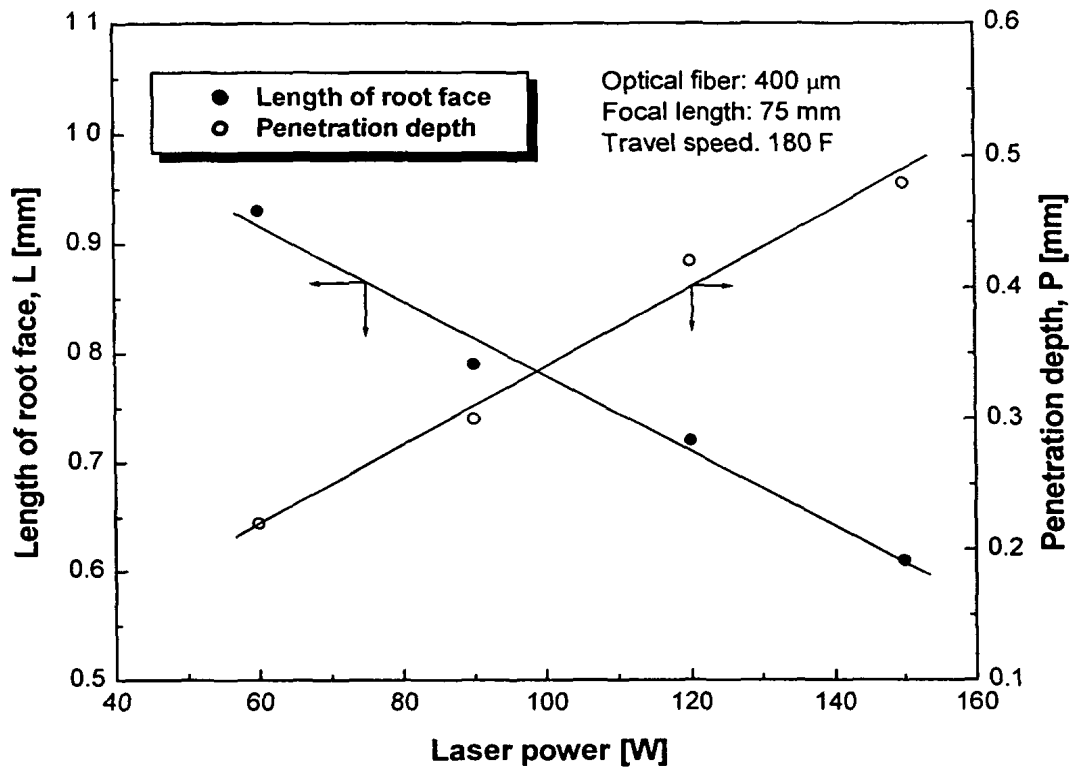
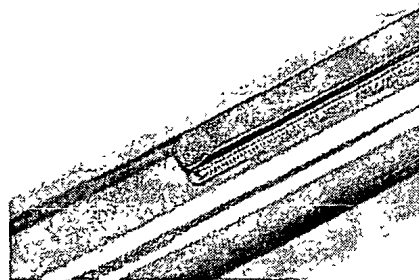
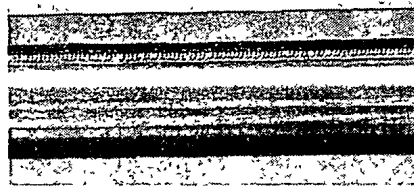
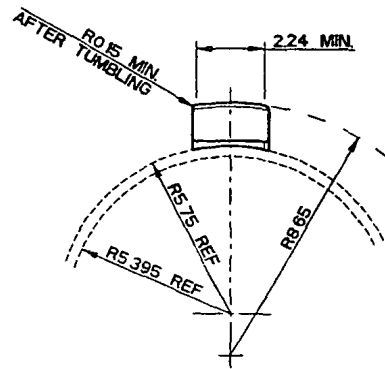


그림 3.1.7 지지체구조 B의 출력별 root face 길이 및 용입의 영향

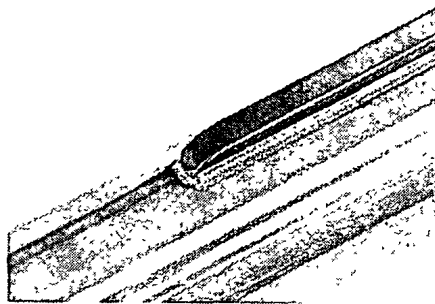
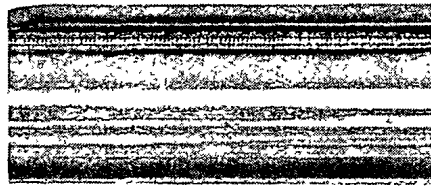
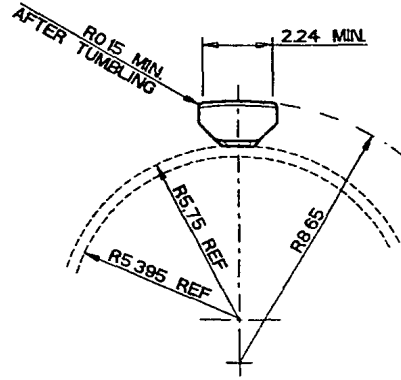
그림 3.1.8은 광섬유 400um을 이용한 지르칼로이-4 지지체구조 A와 B 별로 용접샘플의 외관상태를 보여주기 위한 것이다. 여기서 펄스폭을 2.5ms, 평균출력을 80W로 하였을 때, 비드폭은 0.9mm 이상으로 나타났으며 용입비(aspect ratio)는 대체로 0.3으로 나타났다. 그림 3.1.9에서와 같이 지르칼로이-4 지지체의 부분용접과 들레용접의 외관상태를 보여주고 있다. 이때 적합한 용접조건은 용접속도 280mm/min. 평균출력 80W, 펄스당에너지는 8J 이다.

그림 3.1.8에서 볼 수 있듯이 레이저를 45° 방향으로 조사시킬 때 얻은 용접으로 대체로 만족하나 지지체구조 A인 경우 만나는 root부에서 약간의 용입부족이 나타날 수 있다. 이러한 용입부족을 일으키지 않기 위해서는 가능한 피복관과 지지체의 간격을 작게 해야 하며, 이에 따른 그림 3.1.2와 같은 고정치구의 설계가 필요하게 된다. 또한 지지체구조 B인 경우, 접합강도 면에서 볼 때 부분적으로 용접될 경우보다 용접되는 면적이 줄어들기 때문에 그만큼 열변형이 감소되며, 또한 부식특성에서도 유리한 점을 가지게 된다.

일반적으로 핵연료제조에서 피복관과 지지체의 용접이 끝난 후에 핵연료 소결체를 장입하는 것이 더 나은 방법으로 알려져 있다. 그 이유는 이산화우라늄(UO₂)을 다루어야 하는 시간을 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 0.05에서 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.



(A: 사각형 지지체)



(B: 빼기형 지지체)

그림 3.1.8 레이저를 이용한 지지체용접 샘플의 외관형상 (×8)

레이저용접 작업시 필요한 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 지지체시편의 gap이 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 지지체시편의 gap 상태 등을 들 수 있으나, 여기서는 핵연료봉의 지지체와 피복관의 gap 정도에 따른 용입 형상이 어떻게 변하는지 알아 보았으며, 아울러 용접후에 발생하는 지지체와 피복관의 열변형으로 인한 치수상태를 알아 보았다.

그림 3.1.9는 레이저출력 60W, 80W로 일정하게 하고 지지체와 피복관의 gap 상태를 0.05mm 간격으로 변화시킬 때 용접되는 깊이를 조사한 것이다. 본 실험에서 초점의 위치는 시편표면에서 아래방향으로 1mm 정도로 이동하여 실험을 수행하였다. 그림 3.1.9에서 알 수 있듯이 gap이 작을수록 용입이 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 3.1.10은 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 3.1.10에서와 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 용접공정의 이송속도는 분당 280mm으로 하였다.

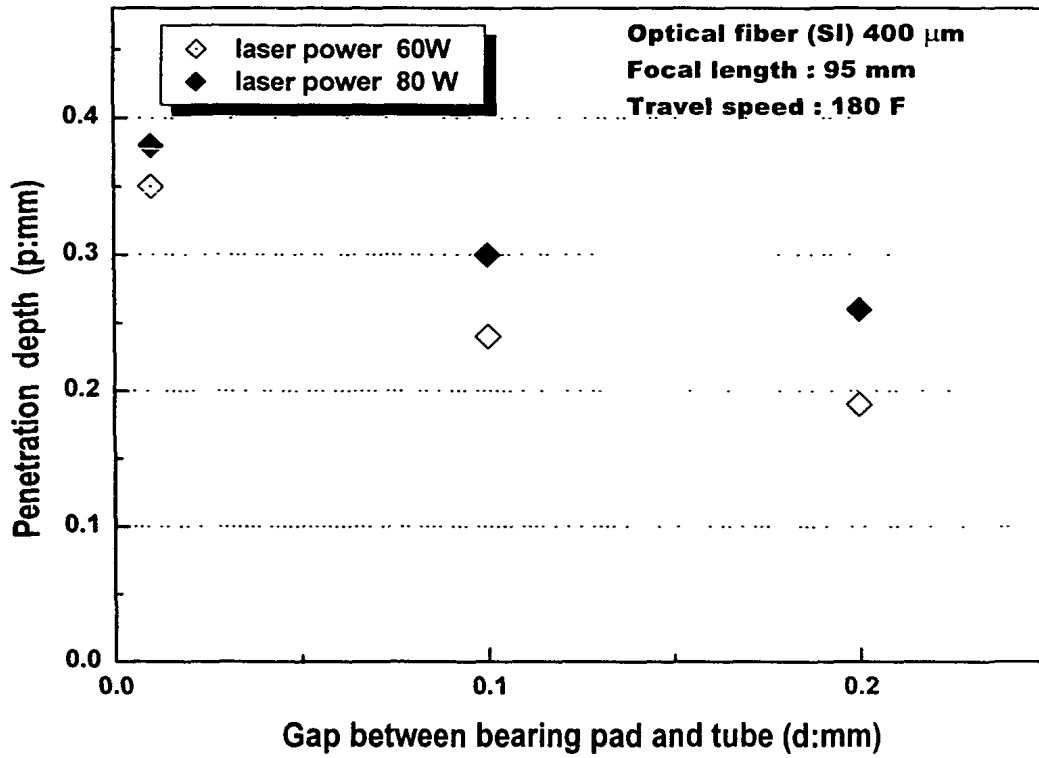


그림 3.1.9 지지체시편의 gap에 따른 용입 비교

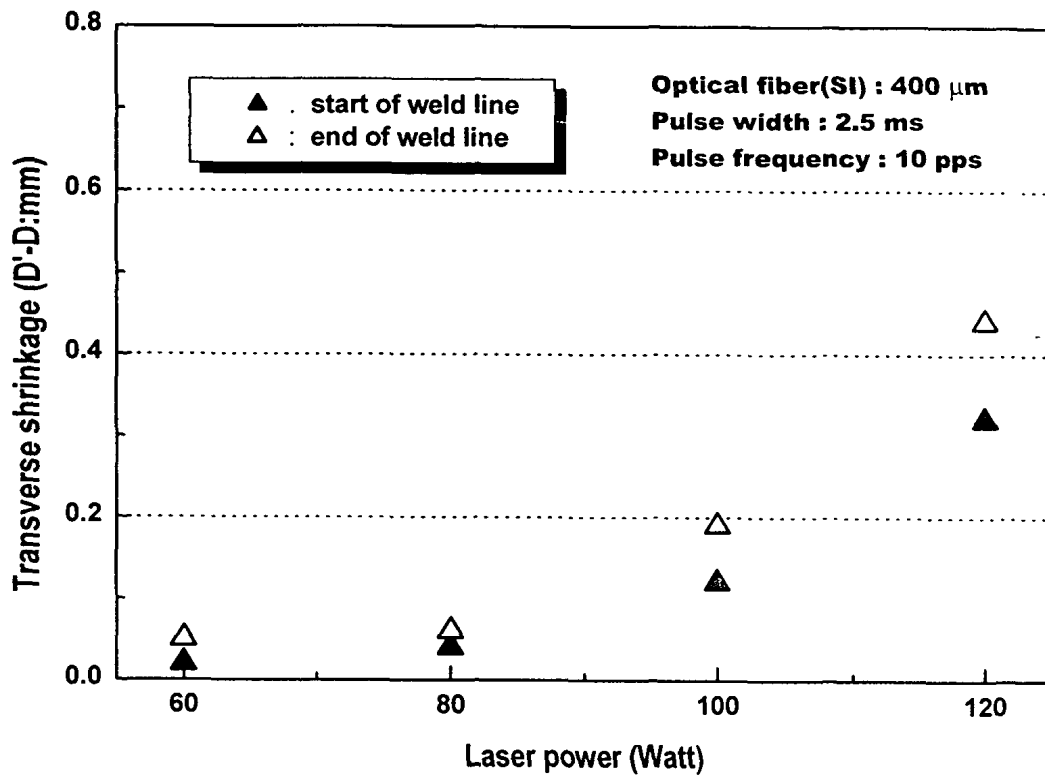


그림 3.1.10 레이저출력에 따른 열변형 비교

제 2 절 지지체용접부의 성능시험

1. 미세경도 및 파열시험

지르칼로이-4 지지체용접부의 미세경도 시험은 미세조직 관찰에 사용되었던 시편을 하중 100g의 비커스방법인 미세경도기(microhardness tester)를 사용하였고, 그림 3.2.1에서 나타내듯이 시편의 표면에서 0.2mm 아래로 위치한 지점에서 용접부의 중심선부터 모재까지 연속적으로 0.2mm 간격으로 측정되었다. 이때 용접부의 크기가 매우 작기 때문에 각각 3 개의 시험편에서 경도치를 측정하여 그 평균값으로 취하였다. 또한 지지체용접샘플의 파열시험은 연료봉을 하단플러그를 막은후 55Mpa 까지 가압하였으며, 시험장치의 저장에너지가 175J 이하 인지 확인한 후 시험편을 인장시험기의 가압장치에 설치하여 수행되었다. 여기서 피복관의 탄성변형중 가압속도가 0.23 MPa/sec \pm 0.02 MPa/sec로 되도록 인장시험기를 조정하여 파열될 때까지 같은 속도를 유지한 후 파열시험의 최대유체압력이 기록하게 된다. 이때 최대파열강도 및 연신율은 시험편을 제거하여 최대 부풀음(bulge)이 일어난 곳에서 파열된 가장자리사이 피복관표면의 원주길이를 측정하여 비교하였다. 여기서 최대파열강도(UBS)는 다음의 식에서 계산되었다.

$$UBS = \frac{P \cdot D_i}{2T_{min}} \quad (1)$$

여기서, P: 최대유체압력 D_i : 피복관의 평균내경 T_{min} : 최소 피복관두께
또한, 최대파열연신율(UBE)은 다음식에 의해 계산되었다.

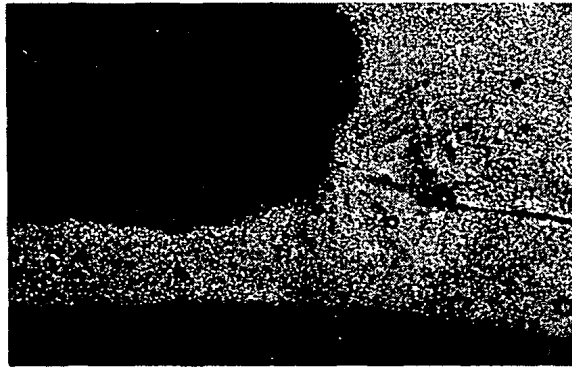
$$UBE = \left(\frac{C_f}{\pi D_o} - 1 \right) \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, C_f : 최종피복관의 외부원주길이

D_o : 최초피복관의 평균외부직경

이러한 지지체용접의 파열시험은 레이저용접부에서 파괴가 발생되지 않으면 건전한 용접으로 평가된다.

그림 3.2.2는 레이저를 이용한 지지체구조 A 와 B 그리고 브레이징으로 된 각각의 부위별 측정치를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 3.2.2에서와 같이 지지체용접부의 경도는 모재, 열영향부 그리고 용융부 순으로 다수점에서 측정하여 그 범위를 산출하였다. 그 결과 레이저를 이용한 지지체구조 A와 B에서 경도분포는 모재가 180에서 200 범위의 분포를 보이며, 용융부에서는 250에서 290 범위내에 나타내며, 또한 열영향부에서는 200에서 240 정도의 분포를 보이고 있었다. 반면에 브레이징을 이용한 접합부의 미세경도에서는 대체적으로 레이저용접부의 경도치보다 접합부에서 30에서 40 정도로 높게 나타냈다.



[laser welding]



[brazing]

그림 3.2.1 레이저 및 브레이징을 이용한 미세경도부 위치

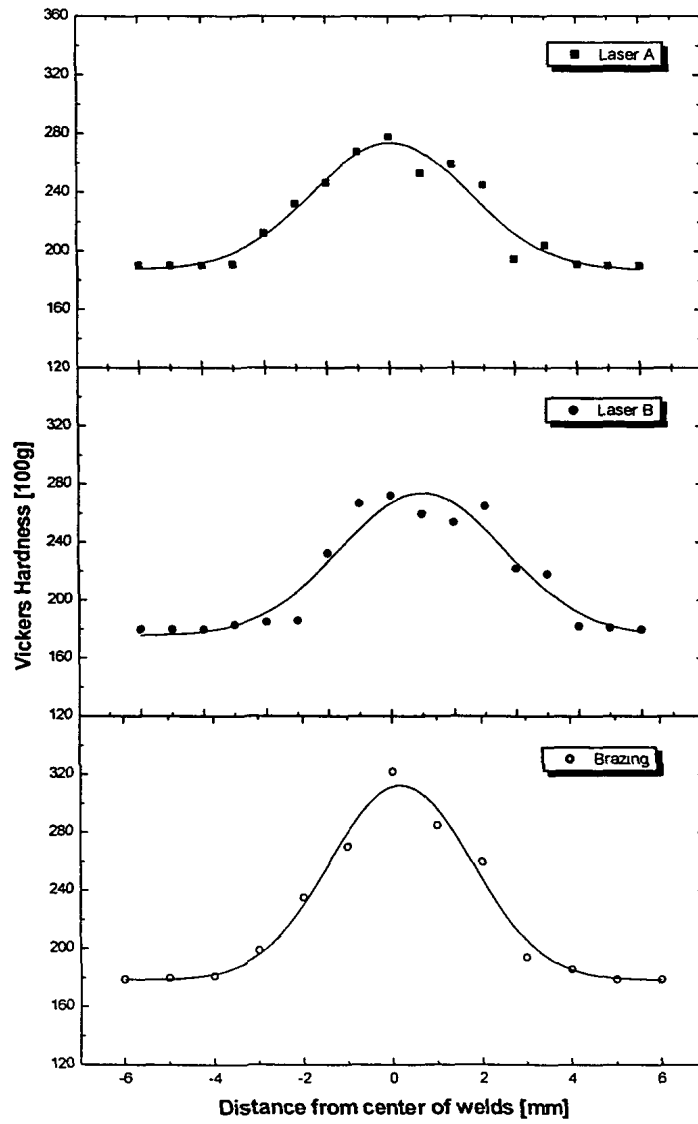


그림 3.2.2 레이저 및 브레이징을 이용한 미세경도치 비교

지지체 용접샘플의 파열시험에서 파열거동을 살펴 보면 표 3.2.1에서와 같이 상온에서 파열시험후 각각의 시험편의 최대파열강도 및 최대파열연신율이 비교 조사되었으며, 최대파열연신율의 평균치는 36%으로 나타났다. 이때 사용된 용접샘플은 지지체구조 A와 부분용접된 것이다. 그림 3.2.3은 파열시험후의 파열된 지지체 용접샘플의 모양을 보여주고 있다.

표 3.2.1 지지체용접 샘플의 파열시험 결과

Specimen No.	Dimensions	UBS (MPa)	UBE(%)
1(A-P)	13.08(O.D) x 12.24(L.D) x 150mm	556	38.6
2(A-P)		548	37.2
3(A-P)		544	36.7
4(A-P)		563	39.2
5(A-P)		542	36.0
6(A-P)		534	35.8

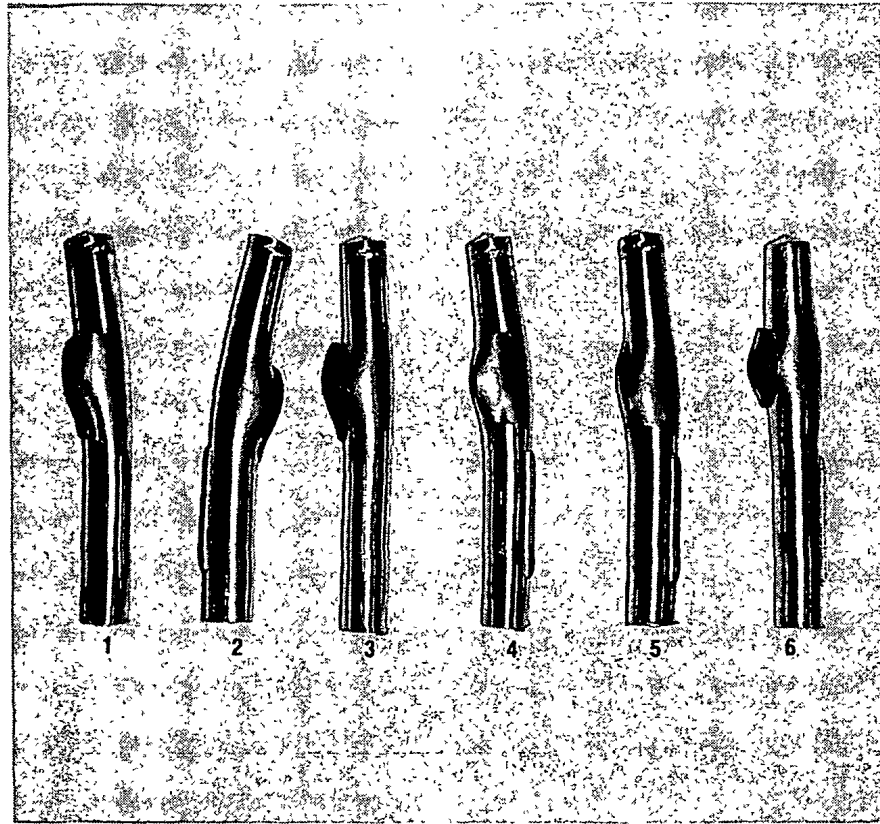


그림 3.2.3 파열시험후 파열된 지지체 용접샘플

2. 고온 부식시험

ASTM G2-88에 따라, 부식시험을 위하여, 지지체용접부가 시편의 중앙에 위치하게 diamond cutter를 이용하여 길이 70mm로 절단한 후 acetone으로 세척하였다. 이렇게 준비된 시편을 autoclave 내에 증류수 220ml와 함께 넣고 온도와 압력을 증가시켜, steam(400℃, 1500psi)분위기를 만들어 주었다. 그런 다음 7, 20, 35일 경과후의 시편에 대해 표 3.2.2와 같이 먼저 용접시편의 색깔 변화에 따른 영향을 조사하였다. 차후에는 시편별로 micro-balance를 이용한 Weight gain 측정 및 SEM을 이용하여 산화막 형태를 관찰할 예정이다. 그림 3.2.4는 부식시험에 사용된 autoclave 장치를 나타내었다.

그림 3.2.5는 autoclave 내에서 각각 7, 35일이 지난 시편의 용접부를 광학현미경으로 8배 확대하여 관찰한 결과 열영향부의 부식층 형성에 있어서는 모재와 다른 특이점을 발견할 수 없었으나 시간이 지남에 따라 피복관의 색깔이 변화되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 부식시간에 따른 시편들의 색깔변화는 처음 7일의 경우 짙은 회색으로 변한 후 시간이 지나면서 옅은 회색으로 바뀌어 갔다.

표 3.2.2 지지체용접 샘플의 부식시험 조건

Type	Specimen No.	Laser power(W)	Quan't (EA)	Remarks	
A	1-1(P) 1-2(A) 1-3(A)	80	3	<ul style="list-style-type: none"> ● 400 ℃, 1500psi ● Steam condition ● Interval: 7/ 20/ 30 days P: partial welds A: All rounded welds	
	2-1(P) 2-2(A) 2-3(A)	120	3		
	3-1(P) 3-2(A) 3-3(A)	160	3		
	B	4-1(A) 4-2(P)	80		2
		5-1(A) 5-2(P)	120		2
		6-1(A) 6-2(P)	160		2

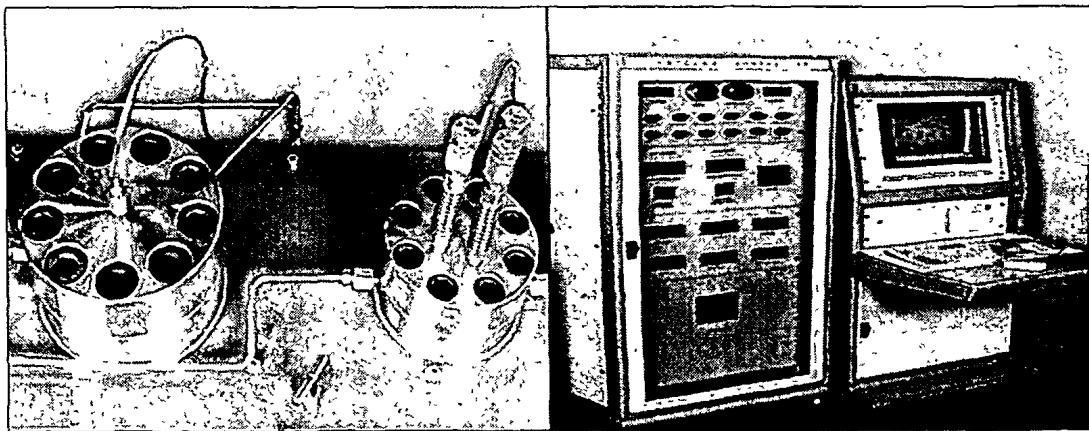


그림 3.2.4 지르칼로이-4 부식시험 장치

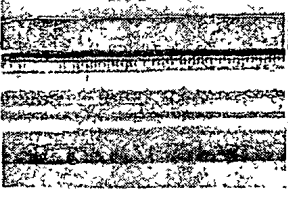

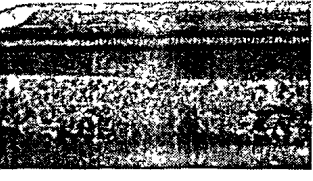
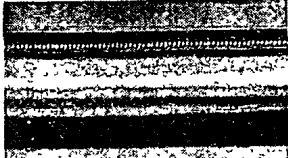
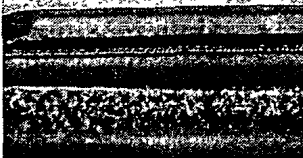
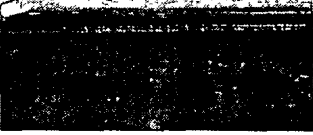
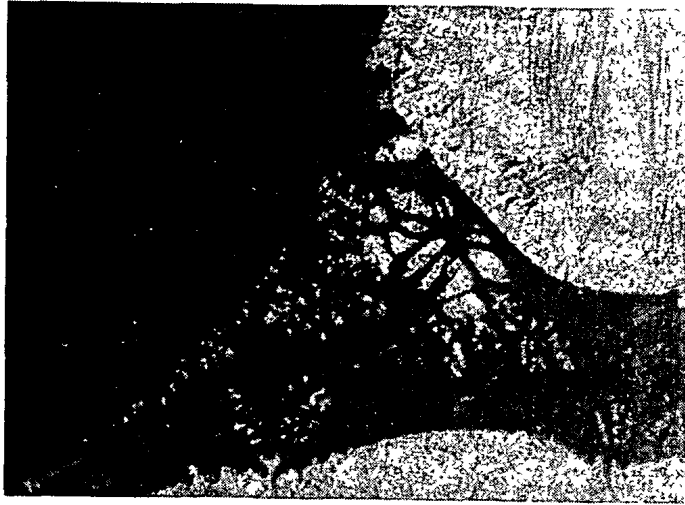
A (P)	120W			
		0 day after	7 days after	20 days after
B (P)	120W			
		0 day after	7 days after	20 days after

그림 3.2.5 부식시간에 따른 용접시편의 색깔 변화

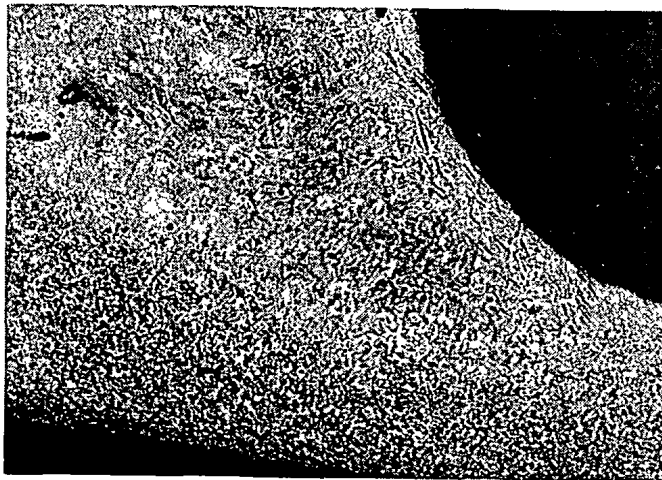
3. 미세조직 시험

지지체용접의 브레이징과 레이저를 이용한 Zircaloy-4 용접부의 금속 조직을 기초로 하여 분석해 보기로 한다. 그림 3.2.6은 브레이징 및 레이저 용융부의 마이크로조직이 나타낸 바와같이 Zircaloy-4 피복관과 지지체사이에서 접합계면을 포함한 용접부의 미세조직 변화를 모재, HAZ, 그리고 용접 금속 순으로 관찰되었다. 그림 3.2.6 (a) 에서와 같이 $Zr+Be$ 공정반응을 이용한 브레이징부위는 전형적인 공정상 응고조직인 수지상정(dendrite)이 브레이징 전체영역에서 발생하였다. 이때 수지상정의 일부는 모재에서 브레이징부로 형성하여 성장하였고, 나머지는 브레이징부의 중앙에서 생성하였다. 또한 브레이징부의 인접 모재부는 브레이징 가열사이클(95℃에서 20초 가열 후 냉각)에 의해 생성된 미세조직으로 Widmanstätten으로 크게 두가지로 나타났다. 하나는 그림 3.2.6 (a)와 같이 α -Zr plate가 서로 연결되어 basketweave 형태의 미세조직을 보여주고 있다. 다른 하나는 α -plate들이 서로 평행한 플레이트(parallel plate) 조직이 생성되었다.

그림 3.2.6 (b)는 레이저용접부의 특성인 아주 짧은 용접시간에 고입열의 용접공정으로 용융부가 작고 용접부의 냉각속도가 아주 빠르므로 용융부에서는 렌즈모양(lenticular)의 martensitic α' plate가 생성되었다. 그리고 지르칼로이-4 피복관과 용접금속사이의 경계로 표시된 미세조직은 대부분 α 결정립이 변형되고 $\alpha + \beta$ 상 영역으로 가열된 후 결정립이 성장되어서 모양과 크기가 불규칙적으로 나타내고 있었다.



[a: brazing]



[b: laser welding]

그림 3.2.6 브레이징 및 레이저를 이용한 지지체 접합단면 ($\times 50$)

제 3 절 지지체 용접부의 검사

1. 용접검사 시스템 구성

지지체는 중수로 핵연료봉 표면에 부착되어 핵연료 집합체와 압력관 사이의 간격을 유지하여 냉각수의 흐름을 원활하게 유지하고, 냉각수의 흐름으로 인한 피복관의 진동시 피복관 손상을 방지한다. 기존의 중수로 핵연료봉 제조시 지지체는 브레이징 방법으로 접합된다. 브레이징 방법은 독성이 강한 베릴륨을 사용할 뿐만 아니라 공정이 복잡하여 이에 대한 해결 방법으로 레이저 용접방법에 대한 적용 연구가 수행되고 있으며 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하기 위해 X-선 검사방법을 적용하였다.

일반적으로 지지체 용접부의 건전성을 검사하기 위하여 금속학적 조직시험, 기계적 시험과 같은 파괴검사가 수행되지만 본 연구에서는 용접 비이드 폭이 2~3 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하고 지지체 용접부의 건전성을 확인하기 위해 핵연료봉 봉단마개 용접부 검사에 활용된 바 있는 마이크로포커스 X-선 투과시험을 적용하였다[15]. 지지체 용접부에 대한 마이크로포커스 X-선 투과시험을 위해 마이크로포커스 X-선 발생장치, 고분해능 image intensifier와 비디오 카메라, DUPIC 핵연료봉 회전장치 및 영상처리장치로 구성된 X-선 투과시험장치를 개발하였으며 개발된 시스템을 이용하여, Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 결함을 검사하였다. 용접부에 존재하는 결함을 세밀하게 검사하기 위하여 영상처리방법을 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 콘트라스트가 개선된 X-선 영상을 획득하였으며 개선된 영상을 이용하여 지지체 용접부에 존재하는 결함을 검출하였다. 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 결함 검사에 마이크로포커스 X-선 검사기술을 적용함으로써 중수로용 핵연료봉 지지체 접합 및 검사 공정을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

개발된 중수로 핵연료봉 지지체 용접부 X-선 검사시스템은 그림 3.3.1의 구성도에서 볼 수 있는 바와 같이 마이크로포커스 X-선 발생장치, X-선 image intensifier, 비디오 카메라 및 모니터, 핵연료봉 회전장치 및 영상처리장치로 구성되었다. 그림 3.3.2의 마이크로포커스 X-선 발생장치는 FEINFOCUS의 FXE160.23K 모델로서, 20~160 kV의 관전압과 최대 1 mA의 관전류, 그리고 약 10 μm 이하의 최소 초점 크기를 갖는다. X-선 image intensifier는 X-선 영상을 광학영상으로 변환시켜주는 장치로 X-선 검출면의 직경은 220 mm이고 분해능은 40~60 lines/cm이다. 변환된 광학영상은 비디오 카메라를 통해 CRT 모니터에 디스플레이되거나 영상처리 장치에 전송되어 처리된다. X-선 영상은 일반적으로 많은 랜덤노이즈를 포함하고 있으며 밝기 분포가 고르지 못하기 때문에 미세 결함의 검출을 용이하게 하기 위하여 영상처리방법에 의해 개선될 필요가 있다. 영상처리장치에서는 512x512x8 비트의 분해능을 가진 영상처리보드를 통해 X-선 영상을 획득하며, 획득된 X-선 영상은 average와 histogram equalization 영상처리를 통해 랜덤노이즈가 감소되고 콘트라스트가 개선되며 개선된 영상은 정밀한 결함검사에 이용된다. 연료봉 회전장치는 임의의 각도에서 지지체 용접부 검사가 가능하도록 연료봉을 회전시킬 수 있다.

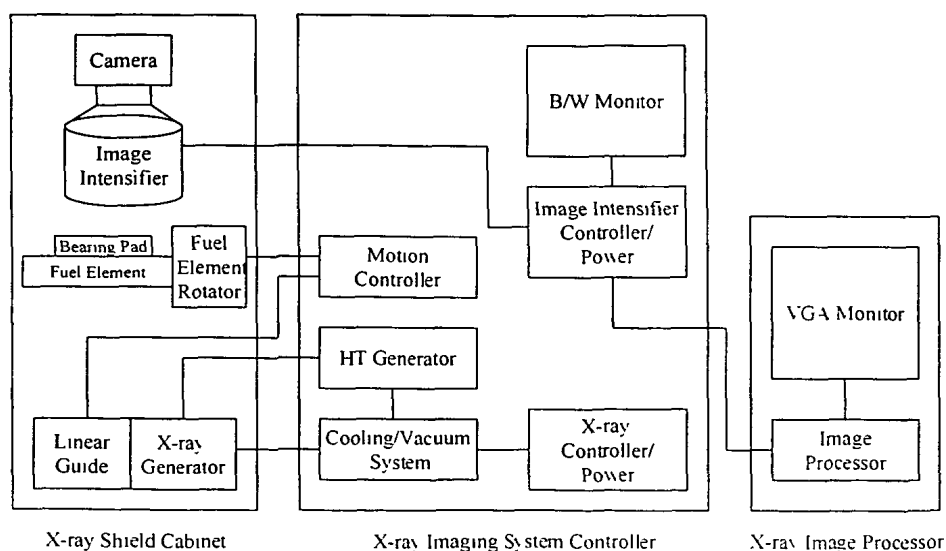


그림 3.3.1 지지체용접용 X-선 검사시스템 구성도

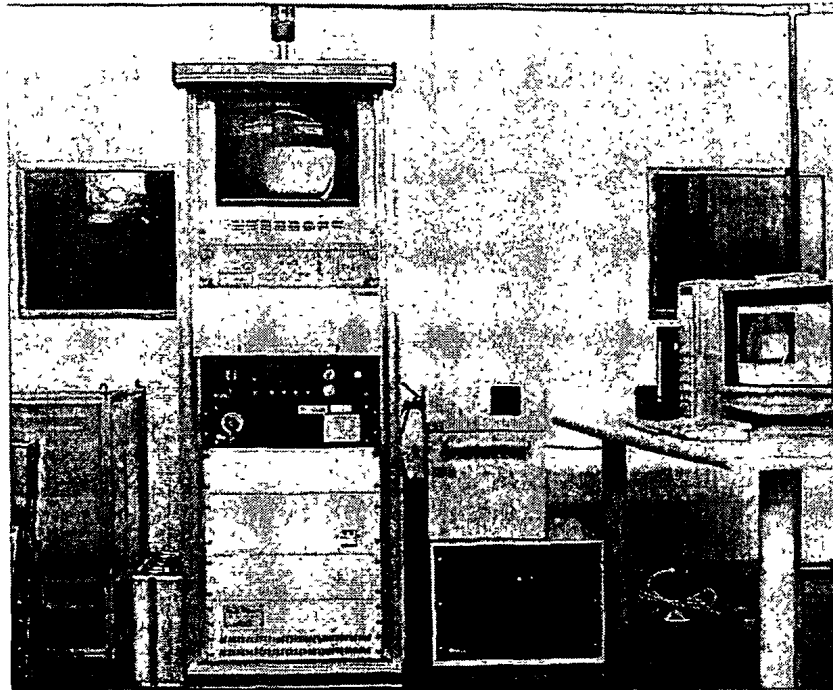


그림 3.3.2 지지체 용접용 X-선 검사시스템

2. 지지체용접부의 검사 분석

중수로 핵연료봉의 표면에 접합된 지지체는 그림 3.3.3과 같이 집합체 제조시 집합체의 표면에 노출되도록 조립된다. 집합체를 제조하기 전에 핵연료봉이 완성되며 지지체 용접공정은 피복관에 핵연료 소결체를 장전하기 전에 수행된다. 지지체의 재질은 피복관과 같은 Zircaloy-4 재질로 제조된다. 평균출력 500 W, 파장 1.06 μm 의 펄스형 Nd:YAG 레이저시스템과 코아직경 600 μm 및 800 μm , 길이 20 m의 스텝 인덱스형 광섬유로 구성된 레이저빔전송장치 및 헬륨분위기의 용접챔버를 이용하여 지지체를 용접하였다. 그림 3.3.4는 Nd:YAG 레이저에 의해 연료봉 표면에 용접된 지지체 외관을 보여준다.

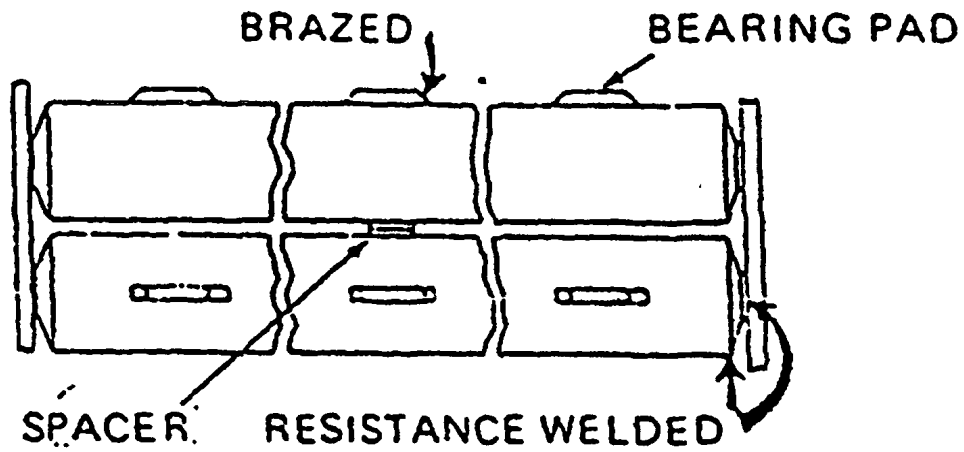


그림 3.3.3 중수로용 핵연료 집합체의 모형도

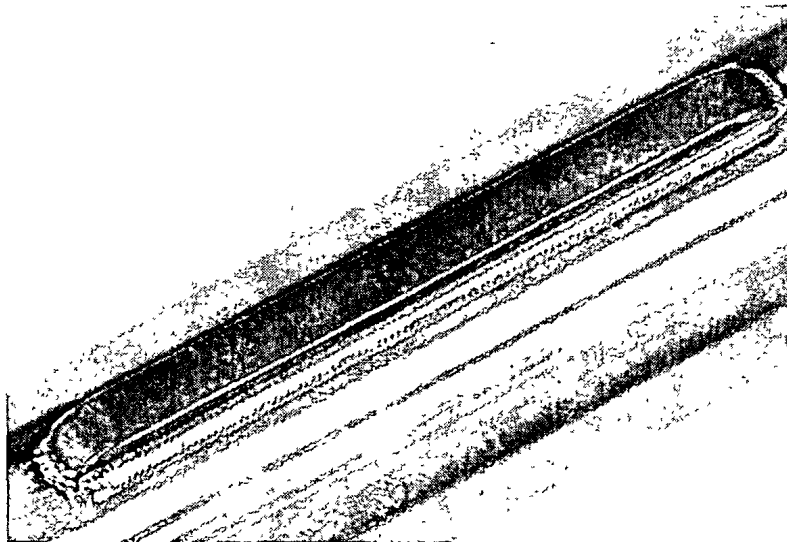


그림 3.3.4 레이저를 이용한 Zircaloy-4 지지체용접 샘플

X-선 투과 두께는 약 0.4~3 mm이다. 검출 가능한 결함의 크기는 투과 두께의 약 1% 정도이므로, X-선 검사로 검출가능한 결함의 크기는 각각 6~30 μm 정도이다. 결함의 크기를 확인하기 위해 직경 50 μm 의 동선을 용접 표면에 부착하였다. X-선 검사를 위해 검사용 챔버에 삽입된 연료봉은 연료봉 회전장치에 의해 360도 이상 회전되며 X-선 투과 영상은 고해상도 모니터에 디스플레이되어 실시간으로 검사된다. X-선 투과 영상은 부분적으로 영상처리장치의 영상처리보드에 의해 획득된 후 컴퓨터 하드디스크에 정지영상 형태로 저장되며 영상처리기술에 의해 처리되어 세밀한 검사에 이용된다. 그림 3.3.5는 지지체 용접부를 정밀하게 검사하기 위한 기하학적 배치를 보여준다. X-선 발생장치와 연료봉 사이의 거리는 20 mm, X-선 발생장치와 스크린 사이의 거리는 450 mm로 조절되었으며 이 때의 배율은 약 22.5이다. 관전압과 관전류는 최적의 X-선 영상을 얻기 위하여 각각 140~150 kV, 30 μA 범위에서 조정되었다. 그림 3.3.6은 타겟의 종류에 따른 X-선 발생장치의 초점 크기 특성을 보여준다. X-선 발생장치의 타겟 재질은 텅스텐이며, 용접부의 검사조건에서 X-선 출력은 최대 4.5 W이다. 이러한 검사 조건에서 X-선 발생장치의 초점크기는 10 μm 이하로 유지된다

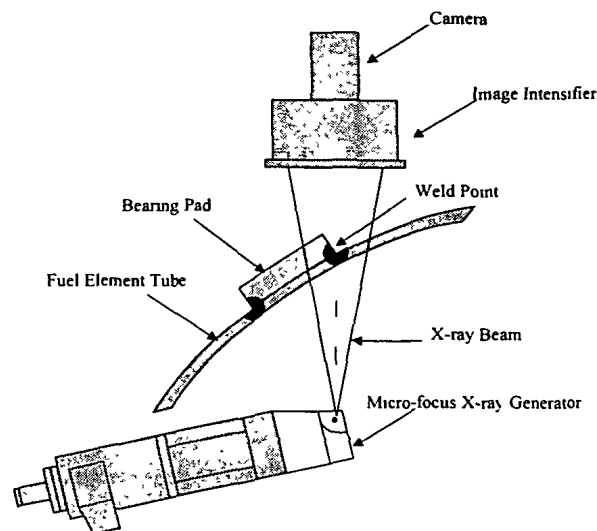


그림 3.3.5 지지체용접부의 정밀검사를 위한 기하학적 배치

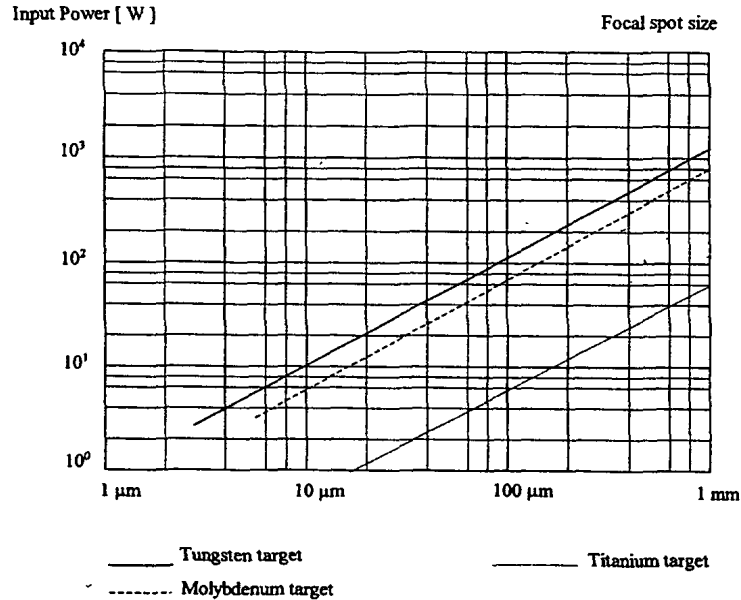


그림 3.3.6 X-선 발생장치의 초점크기

지지체 용접부의 X-선 영상은 그림 3.3.7과 같다. 그림 3.3.7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 원래의 X-선 영상은 많은 랜덤노이즈를 포함하고 있어 결함을 검출하기가 용이하지 않다. 그러나 average와 histogram equalization 영상처리를 통해 개선된 영상을 얻을 수 있으며 이를 통해 결함을 용이하게 검출할 수 있다. Average는 정지영상에 대해 시간상에 M 개 영상을 획득한 후 각각의 위치에 대해 평균을 구하는 영상처리기법으로 이 기법을 적용할 경우에 본래의 신호는 변화가 없으나 랜덤노이즈 신호는 상쇄효과에 의해 크기가 $1/\sqrt{M}$ 로 감소된다[16]. 그림 3.3.7(c)는 average 영상처리기법이 적용된 용접부 영상을 보여준다. Histogram equalization은 영상의 밝기 분포를 효과적으로 확대시킴으로써 영상의 콘트라스트를 개선시켜 영상의 선명도를 증가시킨다[17]. 일반적인 영상 뿐만 아니라 특히 X-선 영상은 콘트라스트가 낮아 일정한 밝기 영역에 데이터가 집중해 있는 현상을 볼 수 있다. Histogram equalization은 데이터가 집중해 있는 밝기

영역을 확장시키고 그에 따라 데이터가 집중되지 않는 영역은 축소시켜 전체적인 밝기 영역은 변화하지 않지만 데이터를 전체 밝기 영역으로 분산시킬 수 있다. 이를 통해 콘트라스트가 개선되어 선명한 영상을 획득할 수 있다. 그림 3.3.7(b)는 histogram equalization 기법에 의해 콘트라스트가 개선된 영상을 보여준다. Average와 histogram equalization 기법을 연속적으로 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 선명도가 증가한 영상을 그림 3.3.7(d)와 같이 얻을 수 있다.

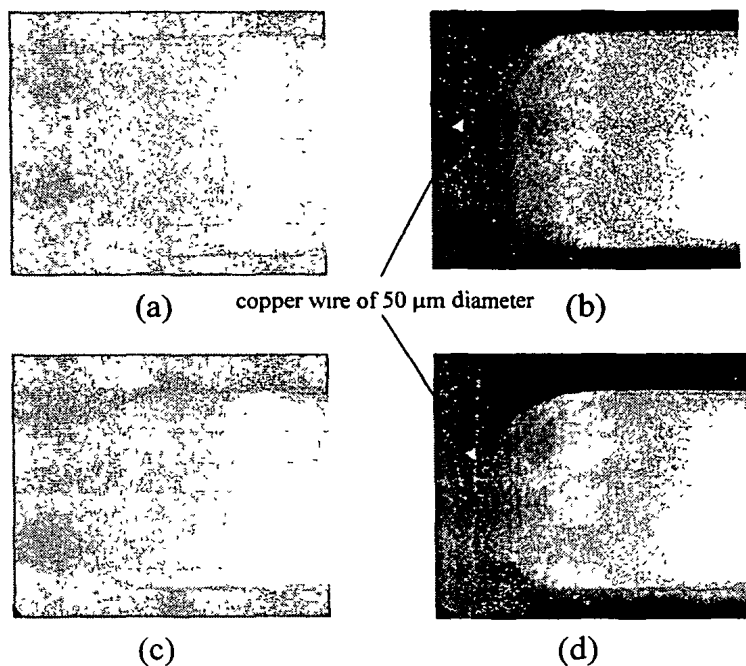


그림 3.3.7 X-선 영상 (a) 원영상 (b) Histogram equalized image
(c) Averaged image (d) Averaged and histogram equalized image

초점이 유지되고 균일한 밝기 분포를 가진 최적 영상을 얻기 위하여 관전압과 관전류는 각각 150 kV, 50 μA 로 조절하여 지지체 용접부 투시 영상은 획득하였다. 각각의 지지체 용접부에 대해 연료봉을 길이 방향으로 이동시키면서 용접부를 검사하다. 확대율이 높기 때문에 하나의 영상에 용접부가 모두 표현되지 못하며 부분적으로 표현된다. 실험결과의 영상은 양쪽 끝단

부와 중심부에 대한 영상을 나타내고 있다. 정밀한 결함 검사를 위해 획득된 영상을 average 처리하여 노이즈를 제거하였고 밝기 분포를 30% 정도 어둡게 조절한 후에 histogram equalization 처리하여 선명한 영상을 획득하였다. 결과 영상은 그림 3.3.8과 그림 3.3.9에 나타내었다. 영상의 좌측부에 존재하는 흰색의 수직선은 직경 50 μm 의 IQI 동선에 의한 것으로 결함의 크기 추정에 사용된다. 실험결과 중심부의 직선 용접부에서는 결함이 검출되지 않았으나 양 끝단의 모서리 부분에서 기공이 일부 검출되었다. 이는 용접 장치의 기하학적 구조의 미비로 용접부와 용접 팁 사이의 각도 및 거리가 맞지 않고 지지체의 용접면이 피복관 표면과 밀착되지 않아 발생한 것으로 사료된다. 따라서 레이저 용접용 지지체는 피복관 표면의 곡면과 밀접한 구조를 갖도록 설계하는 것이 요구된다.

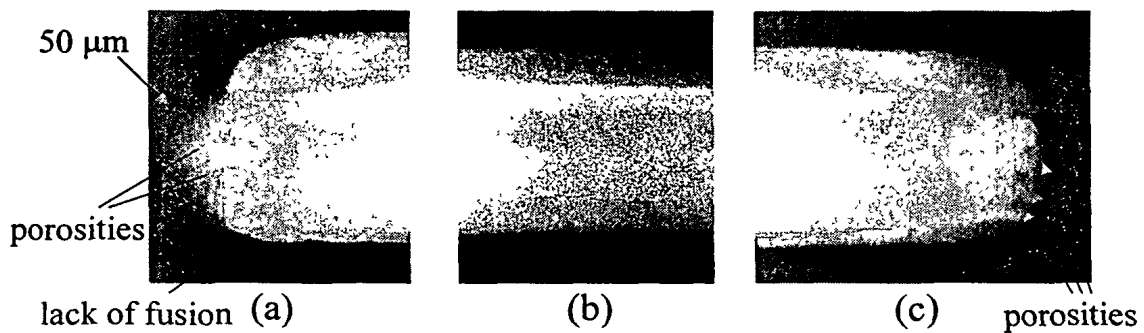


그림 3.3.8 지지체1의 레이저용접부 검사

(a) 전단부, (b) 중앙부, (c) 후단부

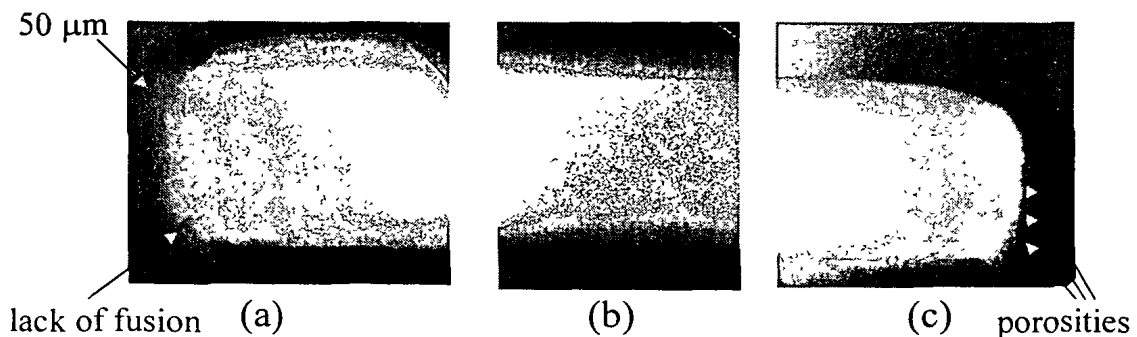


그림 3.3.9 지지체2의 레이저용접부 검사

(a) 전단부, (b) 중앙부, (c) 후단부

중수로 핵연료봉 지지체 레이저용접부의 건전성을 비파괴적으로 검사하기 위하여 미세초점 X-선 투과시험 방법을 적용하였다. 2~3 mm 폭의 지지체 용접부를 세밀하게 검사하고 미세 결함을 검출하기 위해 10 μm 초점크기의 마이크로포커스 X-선 검사시스템을 개발하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 재질의 중수로 핵연료봉 지지체 용접부를 검사하였다. 실험 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 사용된 연료봉에 대한 X-선 투과 두께는 0.4~3 mm이며 X-선 검사로 검출가능한 결함의 최소 크기는 4~30 μm 정도이다.

- 지지체 용접부를 X-선 투과 영상을 이용하여 실시간으로 검사할 수 있으며, 또한 오프라인 방식으로 영상처리장치에서 average와 histogram equalization 기법을 연속적으로 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 선명도가 증가한 영상을 통해 정밀한 검사를 수행할 수 있다.

- 최적의 X-선 투과 영상을 얻기 위하여 관전압과 관전류는 각각 140~150 kV, 30 μA 범위에서 조절되었으며 X-선 발생장치의 초점 크기는 10 μm 이하가 유지되도록 하였다.

- X-선 투과시험 결과 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 직선부에서는 결함이 검출되지 않았으나 모서리 부분에서 기공이 일부 검출되었다.

- 마이크로포커스 X-선 검사기술을 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부 뿐만 아니라 간격체의 결함 검사에도 적용함으로써 중수로용 핵연료봉 지지체 및 간격체에 대한 접합 공정과 검사 공정을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

제 4 장 결 론

본 연구는 초정밀 레이저용접기를 이용하여 중수로형 핵연료봉의 부착물에 대한 지지체와 피복관의 용접실증을 조사하기 위하여 초정밀 레이저 용접실험을 수행하였다. 이에 따른 핵연료봉의 지지체부착물을 위한 샘플제작의 용접결과를 아래와 같이 제시하고자 한다.

첫째로 현재까지 보고된 국외의 지지체부착물에 대한 용접관련 논문 및 기술문헌을 통하여 종합적으로 검토 정리하였다. 이를 통하여 핵연료봉의 부착물에 대한 용접방법, 지지체용접부에 대한 기계적 시험 및 야금학적 단면을 관찰하였다. 그리고 국내의 지지체부착을 위한 브레이징공정 및 용접공정의 문제점을 검토하여 이들 작업조건에 대한 여러 가지 용접변수에 미치는 영향을 조사하였다.

둘째로 중수로 핵연료봉 지지체 및 간격체 부착을 위한 레이저시스템이 개발되었다. 이러한 시스템을 바탕으로 하여 Nd:YAG 레이저를 이용하는 코어직경 400 um의 광섬유 전송장치, 용접노즐부, 용접감시부 및 제어부 등의 주변기기가 자체적으로 개발되었다. 초정밀 레이저를 이용한 지르칼로이-4 지지체용접의 적정용입과 비이드를 얻기 위해서는 평균출력 80 W, 펄스폭 2.5 ms, 반복율 10pps, 펄스에너지는 8J이 되어야 하며, 이때 용접속도는 280mm/min.을 넘지 말아야 한다.

셋째로 지르칼로이-4 지지체부착을 위한 레이저용접샘플의 제작을 수행하였으며, 이에 따른 지르칼로이-4 지지체용접의 적합조건과 용접부의 특성을 분석하였다. 또한 핵연료성능 향상을 위한 지지체 구조형상에 따른 레이저용접에서는 지지체샘플 A의 사각형보다 지지체샘플 B의 썸기형 용접이 유리할 것으로 판단되었다. 지르칼로이-4 지지체용접부의 야금학적 관찰에 의하면 용접부의 미세조직에서는 렌즈모양의 martensitic α' 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났으며, 브레이징부에서는 전형적인 공정상 응고조직인 수지상정(dendrite)이 접합부의 전체영역에서 생성되

었다. 아울러 레이저를 이용한 지르칼로이-4 지지체용접은 기존 브레이징만큼의 기계적 성질과 좋은 용접특성으로 나타내고 있었다.

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 향후 국내의 중수로용 핵연료가공에서 요구되는 지지체 및 간격체 부착에서 사용될 수 있는 레이저용접공정의 기본자료로 활용될 예정이다. 아울러 2002년도에는 한국원전연료주식회사와 긴밀히 협조하여 생산공정에 활용하기 위한 레이저용접의 샘플제작을 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] B. Lustman : Zirconium Technology- Twenty Years of Evolution, ASTM STP681, (1979), pp.5-18
- [7] L. Lunde and K. Videm : Effect of Material and Environmental Variables on Localized Corrosion of Zr Alloys, ASTM STP 681, pp.40-59
- [8] J. J. Vagi and D. C. Martin : Methods for End Capping Zr-Clad Reactor Pins, Welding J., Feb. (1959), pp.78-84
- [9] V. Ram, G. Kohn and A. Stern : CO₂ Laser Beam Weldability of Zr-2, Welding J., May, (1986), pp.33-37
- [10] S. G. McDonald and G. P. Sabol : Mechanism of Accelerated Corrosion in Zr-4 Laser and Electron Beam welds, ASTM STP 754, (1982), pp.412-429
- [11] R. A. Holt : The Beta to Alpha Phase Transformation in Zr-4, J. of Nuclear Materials, 35 (1970), pp.322-334

- [12] T. Woo and K. Tangri, Journal of Nuclear Materials 79, (1979)
pp.82
- [13] J. A. Greenwood, British Welding Journal, August, (1961),
pp.316
- [14] 한필순 등 : 핵연료공학, 동신사, (1986)
- [15] 양명승 등 : Development of DUPIC fuel fabrication and
inspection equipment, KAERI/TR-1319/99, 한국원자력연구소,
(1999), pp.72-75
- [16] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods : Digital image
processing, Addison Wesley, (1992), pp.187-189
- [17] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods : Digital image
processing, Addison Wesley, (1992), pp.173-178

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드
KAERI/RR-2163/2001			
제목/부제	핵연료 가공용 초정밀 레이저 용접기술 개발		
연구책임자 및 부서명	김 수 성, DUPIC 핵연료개발팀		
연구자 및 부서명	양명승, 김웅기, 이도연 (DUPIC 핵연료개발팀)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	p.	도표	있음(V), 없음()
발행년도	2002. 1		
크기	26 Cm.		
참고사항	'00년도 기관 고유 사업		
비밀여부	공개(O), 대외비(), 급비밀	보고서종류	연구보고서
연구위탁기관		계약번호	
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 용접샘플이 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-2163/2001					
Title/Subtitle	Study on the High-precision Laser Welding Technology of Nuclear Fuel Elements Processing				
Project Manager and Dept.		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	2002. 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, Zircalov-4					

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력기관고유사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가 과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니됩니다.