

KAERI/RR-3051/2009

중수로연료용 다발용접 신기술 개발

Development of a New Bundle Welding Technology  
for CANDU Fuels

*KAERI*

한국원자력연구원

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009년도 “중수로연료용 다발용접 신기술 개발” 과제의 연구보고서로 제출합니다.

2010. 1.

과제책임자 : 김 수 성

참 여 자 : 이 도 연

구 대 서

# 요 약 문

## I. 제 목

중수로연료용 다발용접 신기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구는 중수로 핵연료 다발제조 신기술을 위한 용접공정 개발 및 용접부의 성능 향상이 필요하며, 원자로 내에서 핵연료 연소 시 다발 용접부의 안전성과 핵연료 성능 향상을 고려할 때 반드시 개발되어야 할 중요한 과제이다. 중수로 핵연료 다발용접은 외환봉 및 내환봉의 집합 형태로 피복관의 봉단마개와 접합판을 연결하고 맞나는 부분을 점용접으로 이루어지는 공정이다. 또한 중수로 핵연료 다발이 원자로 내에서 가동되는 동안 핵분열 물질의 누출 가능성이 가장 높은 부위가 봉단마개와 접합판 연결부분이기 때문에 건전한 용접은 핵연료의 안전성과 수명에 직결된다고 할 수 있다. 이와 같이 핵연료 조립 가공의 중요성으로 인하여 원자력 분야의 핵연료 가공관련 새로운 용접기술에 대하여 많은 연구가 수행되고 있으며, 앞으로도 이 분야의 지속적인 연구는 매우 필요하다 하겠다.

따라서 본 연구에서 중수로 다발용접의 신기술을 이용한 예비적 실험은 1차년도에서 수행되었고, 2차년도에서는 다발용접 시 돌기형 접합판을 이용한 적합한 용접변수를 선정하여 실제 크기인 모의 용접샘플을 제작하고 이에 따른 접합강도 및 용접변형의 특성을 조사 분석하는 것을 목적으로 한다.

### Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

#### 1. 중수로 다발제조의 공정기술 검토

- 연료 다발의 제조공정 조사
- 연료 다발의 품질검사에 관한 조사

#### 2. 돌기형 접합관을 이용한 용접조건 선정

- 모의 용접샘플 제작
- 용접변수 선정 검토
- 용접부의 금속학적 관찰 및 분석

#### 3. 모의 용접샘플을 이용한 강도시험 및 변형 조사

- 내환봉 및 외환봉의 토크강도 시험 및 분석
- 용접부의 waveness 측정 및 분석
- 용접샘플 제작 및 외관 검사

## IV. 연구개발결과

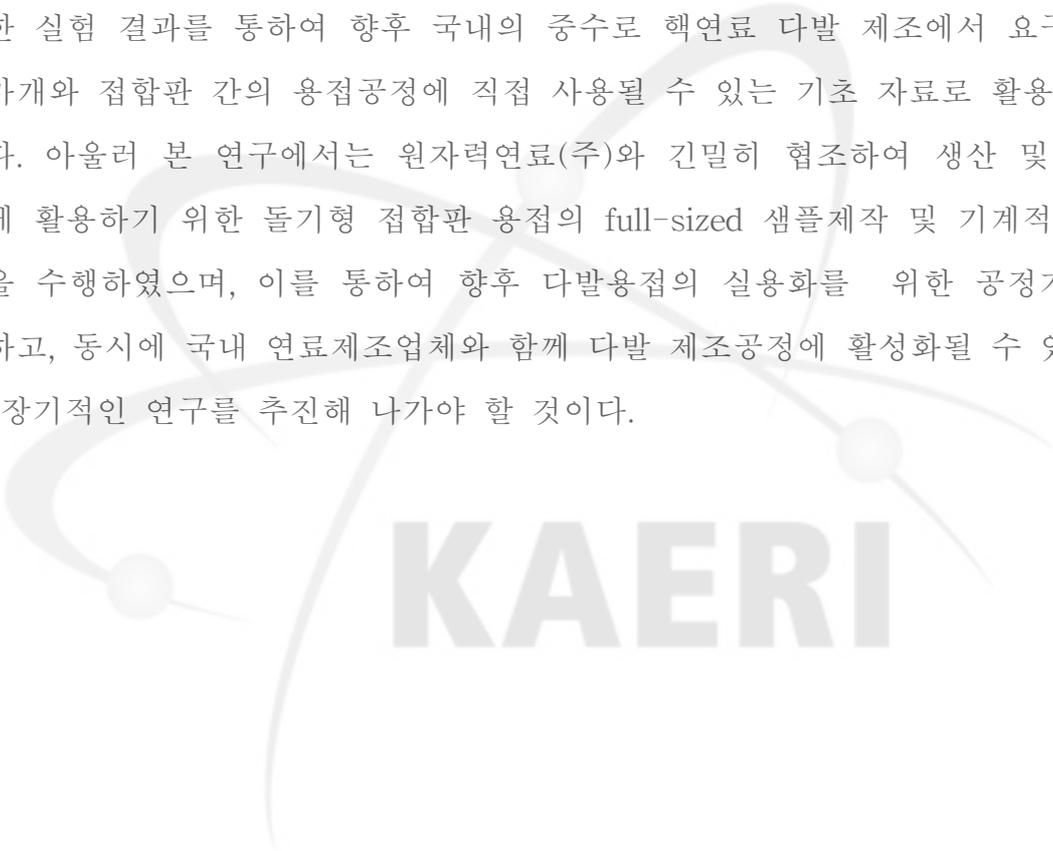
1. 본 2차년도 연구에서는 현재까지 보고된 국내외의 핵연료 다발용접에 대한 용접관련 논문 및 기술문헌을 통하여 종합적으로 검토 정리하였다. 이를 통하여 핵연료 다발의 봉단마개와 접합관 간에 대한 용접방법, 연료다발의 제작 공정 및 품질 검사에 대한 내용을 기술하였다.

2. 중수로 핵연료 다발을 위한 신기술의 돌기형 접합관을 이용하는 기본적인 용접공정 결과가 제시되었다. 그리고 이러한 공정기술을 바탕으로 하여 돌기형 형상의 full-sized 용접치구, 용접헤드 및 보조전극 등의 주요 부품이 자체적으로 설계 제작되었다.

3. 본 2차년도의 용접실험에서는 돌기형 접합관을 이용한 full-sized 용접샘플의 강도시험이 수행되었으며, 이에 따른 용접변수 별 토크 강도의 특성을 분석하였다. 또한 돌기형 접합관의 용접강도 변동성을 조사하기 위하여 기존의 평면형 접합관을 이용한 토크 강도와 비교하였다. 이때 돌기형 접합관의 강도시험 결과는 외환봉 및 내환봉을 이용한 허용 한계치 보다 높게 나타났으며, 용접부의 강도 변동성에서도 기존의 평면형 접합관을 이용한 토크 강도에 비해 비교적 낮은 폭으로 균일하게 유지함을 알 수 있었다.

## V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

본 연구에서는 중수로 핵연료 다발의 봉단마개와 접합관 간의 용접공정과 이에 따른 용접부의 강도 및 변형 특성 조사를 통하여 돌기형 접합관 용접의 기본적인 설계를 확립하고자 하였으며, 실제로 핵연료 다발의 모의 시편에 돌기형 접합관을 공급하여 다발용접기의 작업조건을 위한 기본 방향을 제시하였다. 또한 이러한 실험 결과를 통하여 향후 국내의 중수로 핵연료 다발 제조에서 요구되는 봉단마개와 접합관 간의 용접공정에 직접 사용될 수 있는 기초 자료로 활용될 예정이다. 아울러 본 연구에서는 원자력연료(주)와 긴밀히 협조하여 생산 및 조립 공정에 활용하기 위한 돌기형 접합관 용접의 full-sized 샘플제작 및 기계적 성능 시험을 수행하였으며, 이를 통하여 향후 다발용접의 실용화를 위한 공정기술을 확보하고, 동시에 국내 연료제조업체와 함께 다발 제조공정에 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 연구를 추진해 나가야 할 것이다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of two curved lines that sweep upwards and outwards, ending in small circles, resembling a molecular structure or a dynamic path. The entire logo is rendered in a light gray color.

KAERI

# SUMMARY

## I . Project Title

Development of a new bundle welding technology for CANDU fuels

## II. Objective and Importance of the Project

The new technology of welding process for fuel bundle of CANDU nuclear fuels 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 leakage of the fussion products is mostly apt to occur at the weldments of fuel bundles, and it is connected directly with the safty and life prediction of the nuclear reactor in operation.

The fuel bundles of CANDU nuclear fuels are welded by the electrical resistance method, connecting the endplates and endcaps with fuel rods. Therefore, the purpose of this study of the 2nd year is to select the proper welding parameters and to investigate the characteristics of the full-sized samples using the projection endplates and make some prototype samples for the endplate welding of CANDU nuclear fuels. This study will be also provide the fundamental data for the new design and fabrications of CANDU nuclear fuel bundles.

### III. Scope and Contents of Project

1. Review on the overall process technologies for the manufacturing of CANDU fuel bundles

- Investigation on the process manufacturing of fuel bundle assembling

- Investigation on the quality controls and improvements for fuel bundle assembling

2. Selection of the welding conditions using endplates of the projection type

- Fabrication of weld specimens

- Review on the selections of welding parameters

- Analysis on the metallography observation of weld nuggets

3. Investigation on the torque tests and deformation measurements using the full-sized weld samples

- Analysis on the torque tests of welds with inner/outer rods

- Analysis on the waveness measurements of welds with inner/outer rods

- Fabrication of weld samples and visual tests

#### IV. Result of Project

1. In this study of the 2nd year, the overall technologies for the bundle welding of CANDU nuclear fuels were reviewed. The welding process connecting the endplates and endcaps with fuel rods, the contents of process manufacturing and quality control were investigated.

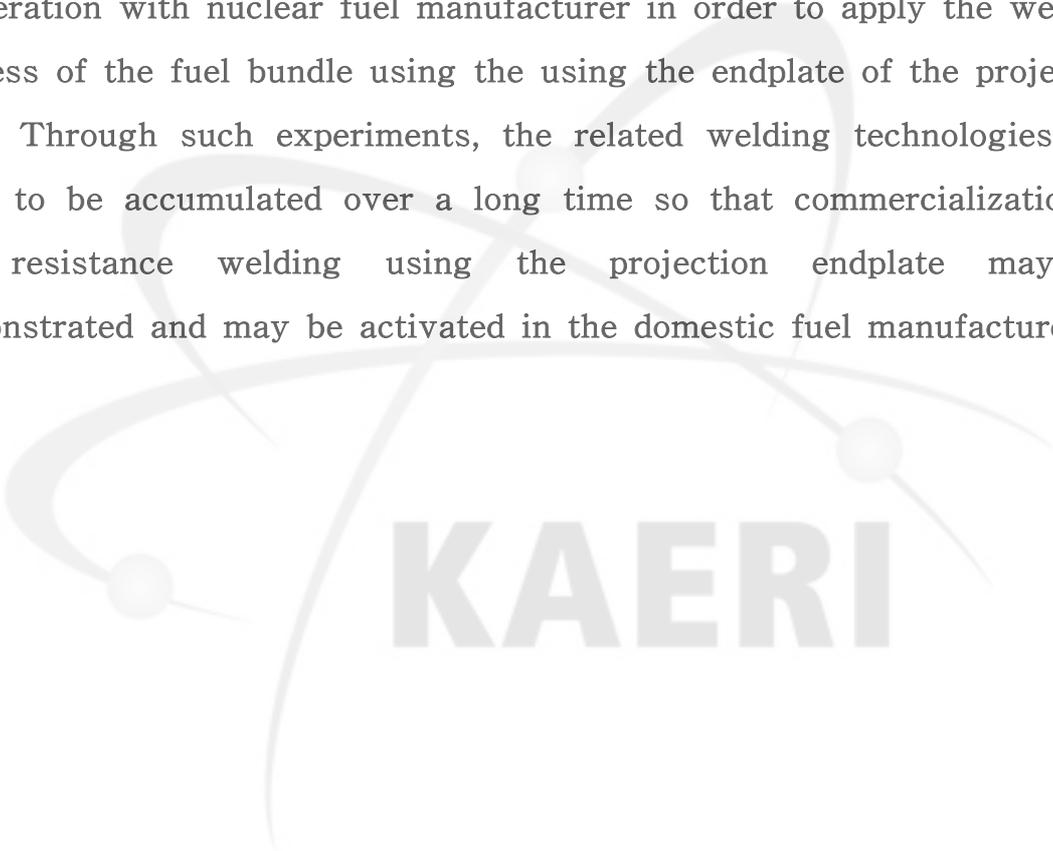
2. The proper welding process using the endplate of projection type of CANDU nuclear fuels was showed. Additionally, the results were obtained that this study was conducted to develop the full-sized welding fixtures, utilizing the main electrode part and the branch electrode part.

3. In the strength test of the full-sized welding samples using the endplate of the projection type, both the outer rods and the inner rods were found to have greater torque strengths than that of the production welded samples using the endplate of the plate type, and further to have a low fluctuation with the endplate of projection type.

#### V. Proposal for Applications

The results of this study are to be applied to the development of the bundle welding process using the endplate of the projection type that can be used in CANDU nuclear fuels. Also, the welding devices having a main weld head and the branch electrodes were independently developed by the domestic technology. And the welding characteristics

and the torque strengths on the joint geometries between the endplate and the endcap was investigated. For applying the results of this research and development, the results of the simulated welded specimens using the endplate of the projection type will be provided as fundamental data for the bundle assembling of CANDU nuclear fuel manufacturing. Further some experiments will be made in close cooperation with nuclear fuel manufacturer in order to apply the welding process of the fuel bundle using the using the endplate of the projection type. Through such experiments, the related welding technologies will have to be accumulated over a long time so that commercialization of the resistance welding using the projection endplate may be demonstrated and may be activated in the domestic fuel manufacture.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized, light gray graphic consisting of two curved lines that intersect to form a shape resembling a nuclear fuel bundle or a stylized 'K'. The word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font across the middle of this graphic.

KAERI

# CONTENTS

SUMMARY(Korean) .....	ii
SUMMARY(English) .....	vi
Chapter 1 Introduction .....	1
Chapter 2 Review on the Process Manufacturing of CANDU Fuel Bundles .....	4
Section 1 Investigations on Manufacturing Processes of Fuel Bundle Assembling .....	4
Section 2 Reviews on Quality Inspections for Fuel Bundle Assembling · .....	19
Chapter 3 Research Results .....	23
Section 1 Uniformity of Weld Strengths Using Weld Samples .....	23
1 Analysis on Torque Tests of Inner and Outer Fuel Rods .....	23
Section 2 Minimization of Heat Waviness Using Weld Samples .....	44
1 Analysis on Waviness Measurements Using Full-sized Specimens .....	44

Section 3 Fabrication of Weld Samples Using Full-sized Specimens ...	54
1 Design of Peripheral Controller and Working Procedure .....	54
2 Fabrication and Inspection of Welded Samples .....	66
Chapter 3 Research results .....	67
References .....	69



# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 중수로 다발제조의 공정 분석 .....	4
제 1 절 연료다발의 제조 공정 .....	4
제 2 절 연료다발의 품질 검사 .....	19
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 .....	23
제 1 절 다발용접의 접합강도 균일화 .....	23
1. 연료다발 내환봉 및 외환봉 강도시험 분석 .....	23
제 2 절 다발용접의 열변형 최소화 .....	44
1. 용접부의 열변형 측정 및 분석 .....	44
제 3 절 Full-sized 시편을 이용한 용접샘플 제작 .....	54
1. 주변 제어부 설계 및 작업절차서 .....	54
2. 연료다발 용접샘플 제작 및 검사 .....	67
제 4 장 결 론 .....	68
참고문헌 .....	70

## 표 목 차

표 2.1 연료다발의 부품 구성 .....	6
표 2.2 Power electrode의 교체주기 .....	15
표 2.3 Element 위치별 ground electrode type .....	16
표 2.4 외환봉 및 내환봉의 허용 토크강도 수치 .....	20
표 2.5 연료다발 샘플링의 품질검사 일람표 .....	22
표 3.1 용접전류 3600A에 따른 내환봉 토크치 일람표 .....	34
표 3.2 용접전류 3800A에 따른 내환봉 토크치 일람표 .....	35
표 3.3 용접전류 4000A에 따른 내환봉 토크치 일람표 .....	36
표 3.4 용접전류 3600A에 따른 외환봉 토크치 일람표 .....	37
표 3.5 용접전류 3800A에 따른 외환봉 토크치 일람표 .....	38
표 3.6 주용접전류 4000A에 따른 외환봉 토크치 일람표 .....	39
표 3.7 용접전류 3800A, 시간 2cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표 .....	40
표 3.8 용접전류 3800A, 시간 3cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표 .....	41
표 3.9 용용접전류 4000A, 시간 2cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표 .....	42
표 3.10 용접전류 4000A, 시간 3cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표 .....	43
표 3.11 용전류 3800A, 시간 2-3cycle에 따른 내환봉 waveness 측정값 일람표 .....	50
표 3.12 전류 3800A, 시간 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정값 일람표 .....	51
표 3.13 전류 4000A, 시간 2-3cycle에 따른 내환봉 waveness 측정값 일람표 .....	52
표 3.14 전류 4000A, 시간 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정값 일람표 .....	53
표 3.15 다발용접 자동공정 절차서 .....	54
표 3.16 다발용접 시편용 자동공정 절차서 .....	55
표 3.17 다발용접 공정제어(CTH200-415)를 이용한 수동용접 절차서 .....	55

## 그 립 목 차

그림 2.1 연료다발의 제조공정 흐름도.....	5
그림 2.2 조립된 fixture 및 연료다발.....	8
그림 2.3 외환봉의 재작업 fixture.....	8
그림 2.4 연료다발용 용접공정장치 개략도.....	9
그림 2.5 연료다발용 input elevator.....	10
그림 2.6 봉단접합관 일련번호 각인 시스템.....	11
그림 2.7 연료다발용 회전 테이블.....	12
그림 2.8 연료다발용 J-plate.....	13
그림 2.9 Diaphragm cylinder 및 welding gun.....	14
그림 2.10 Power 전극.....	15
그림 2.11 Ground bushing.....	17
그림 2.12 Weighing scale.....	17
그림 2.13 Vision system.....	18
그림 3.1 돌기형 접합관을 이용한 full sized 토크용접시편.....	23
그림 3.2 용접전류 3600A에 따른 내환봉에 따른 토크치 영향.....	24
그림 3.3 용접전류 3800A에 따른 내환봉 토크치 영향.....	25
그림 3.4 용접전류 4000A에 따른 내환봉 토크치 영향.....	26
그림 3.5 용접전류 3600A에 따른 외환봉 토크치 영향.....	27
그림 3.6 용접전류 3600A에 따른 외환봉 토크치 영향.....	28
그림 3.7 용접전류 4000A에 따른 외환봉 토크치 영향.....	29
그림 3.8 용접전류 3800A 2cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동.....	30
그림 3.9 용접전류 3800A 3cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동.....	31
그림 3.10 용접전류 4000A 2cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동.....	32
그림 3.11 용접전류 4000A 3cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동.....	33
그림 3.12 접합관용접의 waveness 허용기준.....	44
그림 3.13 내환봉 및 외환봉 형상.....	45
그림 3.14 다이얼게이지를 이용하는 waveness 측정.....	45
그림 3.15 용접전류 3800A 2-3cycle에 따른 내환봉 waveness 측정치 비교.....	46

그림 3.16 용접전류 3800A 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정치 비교	47
그림 3.17 용접전류 4000A 2-3cycle에 따른 내환봉 waveness 측정치 비교	48
그림 3.18 용접전류 4000A 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정치 비교	49
그림 3.19 원점복귀의 화면	56
그림 3.20 1단계 상면용접의 화면	57
그림 3.21 1단계 상면접합관의 공급화면	58
그림 3.22 1단계 용접준비의 화면	59
그림 3.23 2단계 상면용접의 화면	60
그림 3.24 2단계 용접준비의 화면	61
그림 3.25 1단계 배출작동의 화면	62
그림 3.26 1단계 하면용접의 화면	63
그림 3.27 1단계 하면접합관의 공급화면	63
그림 3.28 2단계 용접준비의 화면	64
그림 3.29 마지막 용접준비의 화면	65
그림 3.30 2단계 배출작동의 화면	66
그림 3.31 돌기형 접합관을 이용한 용접샘플	67

KAERI

# 제 1 장 서 론

본 연구는 중수로 핵연료 다발의 제조를 위한 봉단마개와 접합관의 용접방법을 위해서 기존의 지르칼로이-4 접합관 형상에 비해 돌기형을 이용한 접합관의 용접방법이 필요하며, 특히 원자로 내에서 핵연료 연소 시 접합부의 용접품질과 핵연료의 성능 향상을 고려할 때 반드시 선행되어야 할 사항이다. 핵연료 다발은 연소시 원자로 내의 인접 연료봉과 일정 간격으로 유지되면서, 연료봉에 냉각수가 흐르는 방향으로 조립하게 된다. 또한, 이것은 중수로 핵연료 다발이 원자로에서 가동되는 동안 손상이 잘 되는 부위가 접합관과 봉단마개의 용접부이기 때문에 건전한 용접은 핵연료의 안전성과 수명에 직결된다고 할 수 있겠다.

중수로 핵연료 다발을 위한 접합관 용접의 중요성으로 인하여 원자력 분야의 핵연료가공 관련 전기저항 용접기술이 세계적인 추세에서 볼 때 점차 연구가 증가되고 있으며<sup>[1]</sup>, 앞으로도 이러한 분야의 지속적인 기술개발은 매우 중요하다고 하겠다. 따라서 본 연구는 중수로 핵연료 다발의 봉단마개와 접합관을 위한 전기저항 용접설계에 필요한 기초자료가 제공되었고, 지르칼로이-4 피복관에 적절한 용접조건을 선정하여 실제의 핵연료 다발시편이 제작되어, 이에 따른 용접부의 특성이 분석되었다. 아울러 전기저항 용접기술은 산업체의 기반기술로서 응용분야가 넓을 뿐만 아니라 그 연관관계도 매우 높아서 곧바로 응용기술들을 개발할 수 있으므로 산업적 측면에서 파급효과가 클 것으로 기대된다.

따라서 본 연구원에서는 그동안 핵연료 부품을 이용한 용접공정 기술의 산업체의 접목을 위한 연구를 수행한 결과 즉, 핵연료 부품인 봉단마개와 접합관을 이용한 용접장비 설계<sup>[2]</sup>, 치공구 설계 개선, 그리고 원격용접 기술 등을 자체적으로 개발하여 괄목할만한 성과를 얻었으며, 현재 산업체 제조분야에서 유사한 중소기업체와 공동으로 이와 관련된 기술정보 제공 및 기술이전을 추진하고 있다. 국내의 핵연료 다발 제조의 기술수준은 원천적인 기초자료가 미흡하고, 거의 대부분 해외기술에 의해 의존하고 있는 실정이다. 한편, 최근 국내 전기 사용량이 점차적으로 증가함에 따라 관련 핵연료 공장에서는 핵연료 다발의 부품에 대한 용접기술에 대한 관심이 높아지고 있으나 막상 막대한 투자가 소요되는 초기 도입에 부담을 가지고 있으며, 그리고 도입후의 사후관리 등 여러 문제점이 대두됨에 따라 이에 대한 경험이 있는 연구가 필요할 것으로 본다.

중수로 핵연료 다발의 용접기술은 고도의 품질 성능이 요구되는 생산기술이라 할 수 있다. 다시 말하면, 각 부품 요소들의 적절한 조합을 통하여 요소 하나하나의 가치에 비하여 월등한 고부가가치를 창출하는 기반 기술을 뜻한다. 즉 기계 전자와 같은 요소기술 하나 하나의 값이나 적용 분야만의 전문 지식보다는 그 요소들이 종합적인 능력을 발휘할 때, 탁월한 부가가치가 발생되기 때문에 여러 기술을 유기적으로 결합시켜 줄 때 효율적인 품질관리가 가능해진다. 최근에 핵연료 관련 가공업체에서는 연료다발의 물량이 증대해지고 있고, 제품의 품질 요구가 높아짐에 따라 기존의 용접기술에도 큰 변화가 일고 있다. 그것은 종래의 구조방식에서 제품을 제조 형태만으로는 오늘날의 많은 물량과 품질향상에 능동적으로 대처할 수 없게 되었기 때문에 새로운 공정기법이 필요로 하는 방식이 현장에 도입되게 될 것이다. 따라서 본 연구는 중수로 핵연료 다발용 봉단마개와 접합판을 이용한 새로운 용접공정이 생산성을 향상시키고 원가 절감하여 업체의 경쟁력을 극대화하고 제품의 품질을 향상시키는데 있다.

중수로 핵연료 다발의 신기술을 이용하여 기술개발의 목표를 가장 효과적으로 달성하기 위한 연구는 현장에서 선정 도입단계, 설계단계, 제작 및 유지 관리단계에서의 최적화와 개발된 용접시편의 성능검사, 수정 보완을 거치면서 이루어져야 한다. 여기서 핵연료 다발의 용접기술은 우선적으로 지르칼로이-4 접합판의 용접이음 구조설계에서 돌기형 이음구조로 이끌어 내기 위한 단계로서 각 용접공정별 작업조건에서 나타날 수 있는 기술적 공정 개선 및 용접시편 품질의 효율성을 반드시 검토되어야 한다. 이러한 기술적 공정개선을 위해서는 먼저 핵연료 다발 용접의 기초실험 및 성능 평가시험 등의 개선을 통한 실용화의 기틀을 마련하고자 한다.

본 연구는 중수로 핵연료 다발의 용접기술 측면에서 아래와 같이 크게 3가지를 구분하여 새로운 용접공정의 추진방안을 제시하였으며, 핵연료 다발의 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접의 최적화하는 것을 목표로 하였다. 첫째는 현재 사용되고 있는 핵연료 부품인 접합판 이음구조를 위한 공정설계 개선이고, 둘째로는 지르칼로이-4 접합판 용접부의 접합강도의 균일화 개선 그리고 셋째로는 중수로 핵연료 다발의 접합판 용접품질 향상을 위한 열 변형 방지로 나열된다. 이와 함께 중수로 다발제조용 전기저항의 용접헤드 최적 설계 및 성능 결과를 제시하고, 현재 37 봉 핵연료 다발뿐만 아니라 43 봉 연료다발 시편에도 적절히 대응할 수 있으면서 활용이 쉽도록 공정설계가 이루어지며, 또한 새로운 용접공정 개발을 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 함으로서, 순수 국내 기술에 의한

핵연료다발의 용접공정을 개발하고자 하였다. 이에 따라 일반산업체의 정밀부품 제조기술의 국내 정착화와 새로운 용접공정에 의한 생산성 향상에도 크게 기여할 수 있을 뿐만 아니라 핵심기술의 국산화로 상품화 및 국외 수출 산업화의 기반을 마련하고자 한다.



## 제 2 장 중수로 다발제조의 공정 분석

### 제 1 절 연료다발의 제조 공정

#### 1. 개요

근래 산업의 경쟁력을 높이기 위해서는 공장의 생산 공정과 작업자의 일을 장치개발 및 제조공정을 어느 정도 효과적으로 개선할 것인가를 고려해야 한다. 일반적으로 제조공정을 개선하게 되면 분명히 이득을 얻을 수 있지만, 항상 그런 것은 아니다. 이것을 결정하는 요소는 생산하는 정밀 부품 및 제조 장비를 통한 경쟁력을 얻을 수 있는 것이다. 본 연구의 연료 다발의 제품은 월성 원전에서 상용하여 적절한 품질을 갖는 제품의 완성단계를 포함한 것이다. 또한, 새로운 모델에 대한 제품을 개발하고 품질이 우수하고 신뢰성을 얻음으로써 장기적인 성공을 거두는 것이다. 본 절에서는 중수로용 연료 다발의 제조 공정에 대해서 자세히 알아보고 국내 연료공장의 제품 성능을 비교 분석한 다음 품질 검사에 대한 기술 자료를 바탕으로 분석하였다.

#### 2. 연료다발의 제조공정 분석

##### 가. 중수로 다발의 구성 및 특성

중수로 연료 다발의 주요 재료는 지르칼로이-4 및  $UO_2$ 이며 지르칼로이-4 피복관, 간격체, 지지체, 봉단마개, 봉단 집합관, 흑연 도포층으로 구성되어 있으며  $UO_2$  소결체가 장전된 연료 집합체의 무게는 약 24kg 이고, 이중 90% 이상이  $UO_2$ 이다. 중수로 연료 다발의 특성은 아래와 같다.

- 고밀도의 천연  $UO_2$  소결체
- 두께가 얇은 피복관(Collapsible)
- 고도의 건전성을 갖는 봉단마개 용접
- $UO_2$  소결체와 지르칼로이-4 피복관 사이의 흑연도포
- 유도 경납땜된 간격체, 지지체
- 간단한 구조의 집합체

중수로 연료 다발은 그림 2.1의 제조공정 흐름에 의해 37개의 연료봉이 2개의 봉단 접합판(end plate)에 일정한 배열로 용접, 조립되어 있으며, 각 연료봉은 지르칼로이-4 피복관에 29-31개의 천연  $UO_2$  소결체 (Pellet)가 장진되어 그 양단이 지르칼로이-4 봉단마개(End capping)로 용접, 밀봉되어 있다.<sup>[3][4]</sup> 연료봉 사이의 간격은 연료봉 외면에 부착된 지르칼로이-4 간격체 (Spacer pad)에 의하여 일정하게 유지되며, 원자로에 연료 다발을 장진할 시 입력관 (Pressure tube)과 연료 다발 사이의 일정한 간격을 유지하도록 다발의 외환봉에 지르칼로이-4 지지체(Bearing pad)가 부착되어 있다. 또한 피복관 내부에는 얇은 흑연층이 도포되어 있으며, 이는 피복관과  $UO_2$  소결체의 Interaction을 감소시킨다.

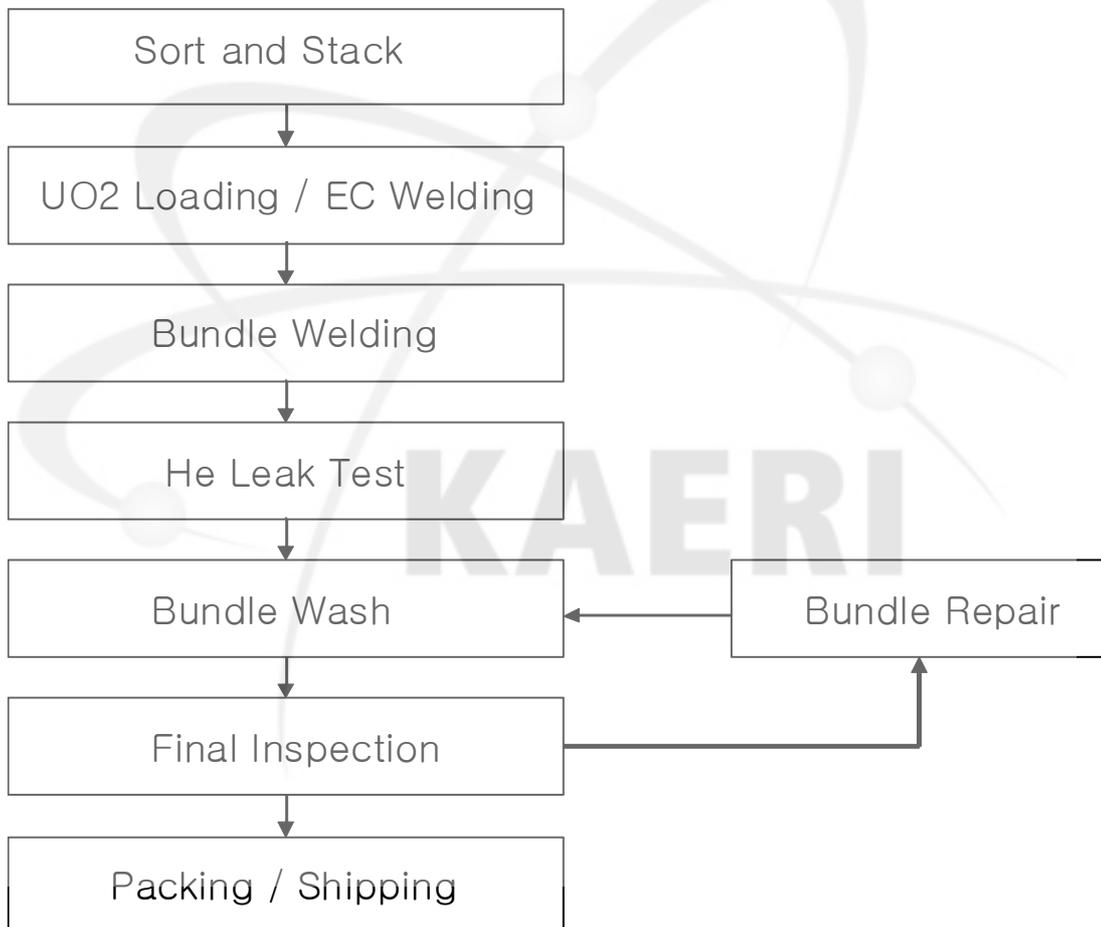


그림 2.1 연료다발의 제조공정 흐름도

나. 중수로 연료다발 제원 및 부품 구성

연료다발은 중수로용 전용 핵연료를 가지고 있으며, 길이 493mm의 연료봉들이 일정한 간격으로 배열되어 조립된 원통 다발형 집합체로, 중심봉 1개, 내환봉 6개, 중환봉 12개, 외환봉 18개의 연료봉과 이들의 양단을 지지해주는 2개의 봉단접합판으로 된다. 다음은 중수로 연료다발의 주요 제원과 표 2.1에서와 같이 부품 구성을 요약하였다.

- 외경:  $\varnothing$  102.49 Max.
- 길이: 495.30  $\pm$ 0.75
- 무게: 약 24kg

표 2.1 연료다발의 부품 구성

구 분	피복관 종류					1/Bundle
	W1	W2	W3	W4	W6	
Tube	1	6	12	6	12	37
Endplate	2					2
Bearing Pad	-	-	-	18	36	54
Spacer 0.8mm	6/6	5/30	6/72	6/36	3/36	180
Spacer 0.6mm	-	-	1/12	-	-	12
Endcap	2	12	24	12	24	74
Pellet	31/31	31/186	31/372	31/186	31/372	1147

다. 사용 장비

연료다발의 용접은 저항용접(resistance projection welding)을 이용하여 7 bundle carousel station 상의 조립치구에 가 조립된 연료봉들을 봉단접합판과 결합하여 CANDU6 연료다발을 생산해 내는 공정을 말하며,<sup>[5][6]</sup> 그리고 아래와 같은 기능을 수행하여 작업 시작 전, 후에 연료봉의 위치별 시편 샘플을 채취하여 용접강도를 측정하여 공정관리를 수행한다.

1) 용접기의 일반 모드

7 bundle carousel station 상에서 공급되고 가 조립된 연료봉의 정상적인 일반 모드로 아래와 같은 순서에 의해 용접공정이 진행된다.

① 소결체 장입 및 봉단마개 용접이 완료된 연료봉을 연료 집합체 가조립 작업대(7 bundle Carousal Station)상에서 각 종류(W1, W2, W3, W4, W6) 별로 37개의 연료봉을 그림 2.2의 집합체용 조립치구(bundle fixture)에 조립한다.

② 가 조립치구는 컨베이어를 통하여 봉단접합판을 이용하는 용접장치(bundle assembly welder)로 이송시킨다.

③ 컨베이어와 input elevator를 통해 이송된 가 조립치구는 bundle probe station에서 돌출된 연료봉의 유무를 센서를 통해 감시한다.

④ Barcode reader는 가 조립치구에 부착되어있는 barcode 정보를 vision system에 전송하고 연료다발의 일련번호를 부여한다. 이때 번호각인 시스템은 봉단접합판에 번호를 각인하여 상부 J-plate에 삽입한다.

⑤ 1차(상부) welding station에서 연료다발의 상부 봉단접합판을 이용하는 용접을 수행한다.

⑥ 1차 용접이 끝난 연료다발은 가 조립치구가 이탈되어 2차(하부) welding station에 대기하고, 번호각인 시스템은 하부 봉단접합판에 번호를 각인하여 하부 J-plate에 삽입한다.

⑦ 1차 용접된 연료다발은 2차(하부) welding station으로 이송되어 하부 연료다발 용접을 완료 한 후 weighing station에서 무게를 측정 후 vision system은 봉단접합판의 상. 하부 일련번호가 일치되는지 확인하고 연료다발의 번호와 무게 기록을 main server에 전송한다.

⑧ 무게 측정이 끝난 연료다발은 헬륨 누출시험의 inspection chamber station으로 이송하게 된다.

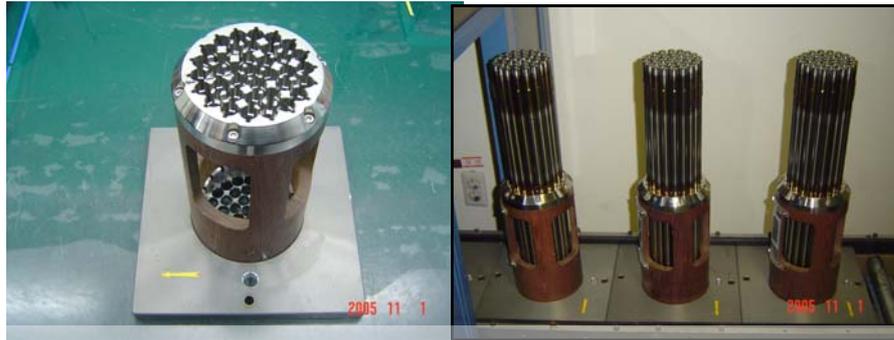


그림 2.2 조립된 fixture 및 연료다발

## 2) 재작업 모드

### ① 외환봉 교체 및 재작업 (그림 2.3 참조)

- 외환 연료봉에 발생한 불량 연료봉의 교체 작업에 적용.
- 연료다발 당 최대 8개 연료봉까지 교체 가능.
- 한번 교체한 연료봉을 재작업 할 경우에는 연료다발을 해체한 후 재작업을 해야 한다

### ② 연료다발 해체 및 재작업

- 교체될 외환 연료봉이 8개 이상이거나 내부 연료봉이 손상 되었을 경우의 연료다발을 해체하여 해당.
- 연료봉을 교체한 후 재조립 및 용접 작업을 해야 한다.
- 한번 해체하여 재작업을 한 집합체는 다시 재작업을 할 수 없다.

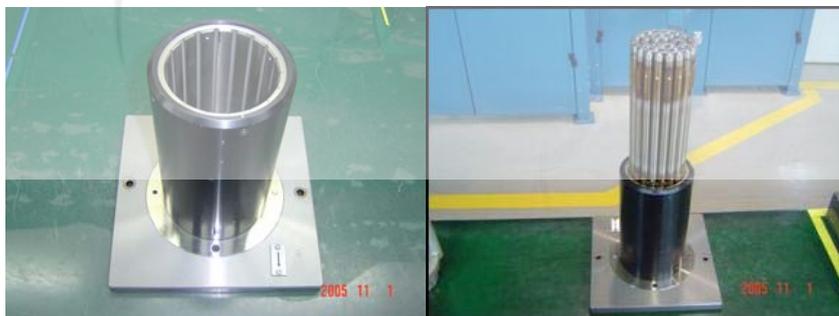


그림 2.3 외환봉의 재작업 fixture

다. 공정장비의 구성

그림 2.4에서와 같이 연료다발 용접에 사용하게 될 공정장비 각 부의 구성은 다음과 같다.

- 1) Input Elevator
- 2) Bundle Probe Station
- 3) 봉단접합관 번호각인 시스템
- 4) Welding Station
- 5) Vision System
- 6) Weighing Station
- 7) System Control
- 8) MEDAR Welder

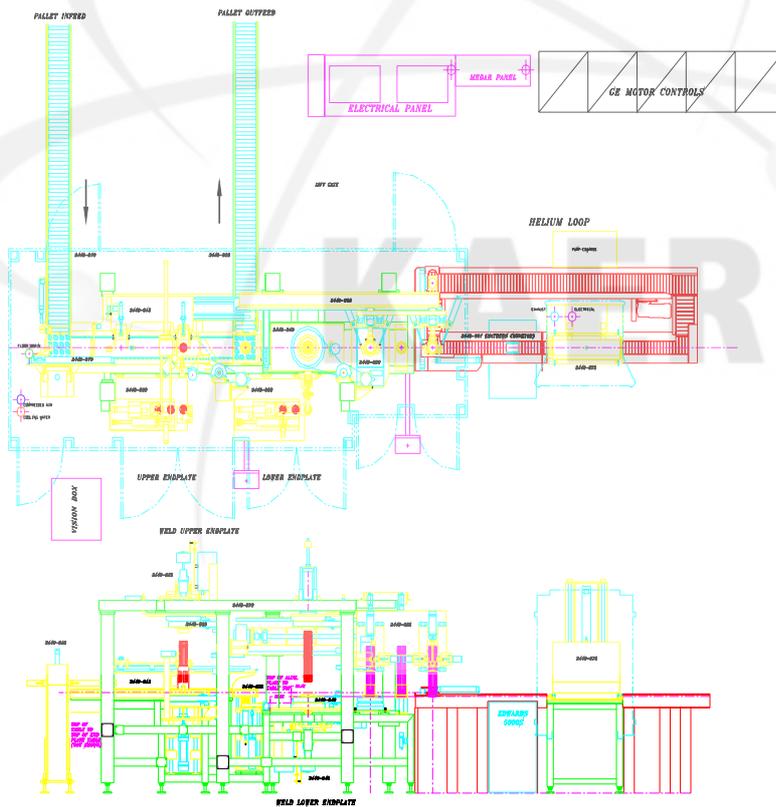


그림 2.4 연료다발용 용접공정장치 개략도

### 1) Input elevator

그림 2.5에서와 같이 7 bundle carrousel station에서 공급된 bundle assembly fixture는 conveyor를 타고 bundle assembly welding 공정으로 이송되며 input elevator상에 이르게 되면 cylinder에 의해 input elevator가 상승하여 bundle probe station (bundle holding station)으로 bundle assembly fixture를 공급하는데 사용된다.

### 2) Bundle probe station

Bundle assembly fixture에 가 조립되어 있는 element들의 정렬 상태 및 welding station 상에서의 J-plate 와 element 상부와의 gap이 적정하게 유지되고 있는가를 점검하며, 정렬된 연료봉 용접부에 압축공기를 불어 넣어 이물질 제거 단일용접 자국 발생을 미연에 방지하여 용접품질을 향상시키고자 함.

### 3) 봉단접합판 번호각인 시스템

생산되는 중수로 연료다발은 그림 2.6과 같이 제조이력에 대한 관리를 위하여 연료다발에 일련번호를 부여 한다. 이때 일련 번호는 7자리로 구성하며 앞의 두 자리는 생산 년도를 나타내고 나머지 5자리는 일련 번호로 구성되며 번호각인 높이는 2.5mm를 초과하지 않아야 하고 각인 깊이는 재료 두께의 10%를 초과해서는 안된다. 상 하단 한쪽면 또는 양쪽면 모두에 잘못된 번호가 각인되었을 경우 잘못된 번호를 지운 후 수동으로 바른 번호를 각인한다. 이때 wetzel dot mechanical marker가 EDP system에 의해 부여된 해당 bundle No.를 적재된 봉단접합판 magazine에서 인출하여 상 하단 end plate에 각인하고, gripper는 각인된 봉단접합판을 J-plate에 공급한다.



그림 2.5 연료다발용 input elevator

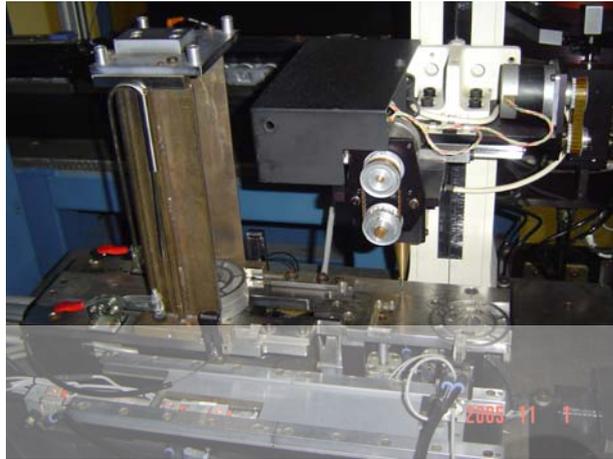


그림 2.6 봉단접합판 일련번호 각인 시스템

#### 4) Welding station

First welding station에서는 가조립된 연료봉과 봉단접합판과의 상부면(기준면)과 하부면을 용접하는 곳으로 각각 2축(회전축, 직선운동축)의 서보모터를 이용하여 위치를 제어하며 연료봉의 위치 고정은 J-plate를 사용하며, 용접 시 조립 fixture가 air cylinder에 의해 상승하여 J-plate에 고정되며 weld gun을 이용하여 37 point의 연료봉 용접을 수행한다.

##### 가) 용접조건

봉단접합판의 형상과 element가 접촉되는 부분의 둥 web의 형상에 따라 다르며, MEDAR welder에 내장되어 있는 program에 따라 각 element별 welding parameter로 자동으로 조절된다. 각 element별 end plate와의 welding은 J-plate내에서 power electrode를 통해 이루어지며 이때 ground electrode가 endcap 양쪽에 균일하게 접촉함으로써 전류 loop를 형성하여 준다.

##### 나) 주요 구성

- 회전 Table
- Diaphragm Cylinder
- J-Plate

- Weld Gun
- Ground Striker
- Air Spring
- Power 전극
- Ground Bushing

① 회전 테이블

그림 2.7에서와 같이 First welding station과 second welding station의 element 위치를 찾는데 사용되는 Index이며 WeldGun이 장착된 직선 축과 서보 모터와 회전축 서보모터 제어를 통해 연료봉의 용접 위치를 제어 한다. 즉, ground electrode와 J-plate가 장착되어 있는 table은 serve motor에 의해 원주방향 (X- $\theta$  system)으로 운동하며, power electrode가 장착되어 있는 weld head (welding gun)은 또 다른 servo motor에 의해 축방향으로 직선운동을 하면서 welding될 element의 위치를 찾는다.

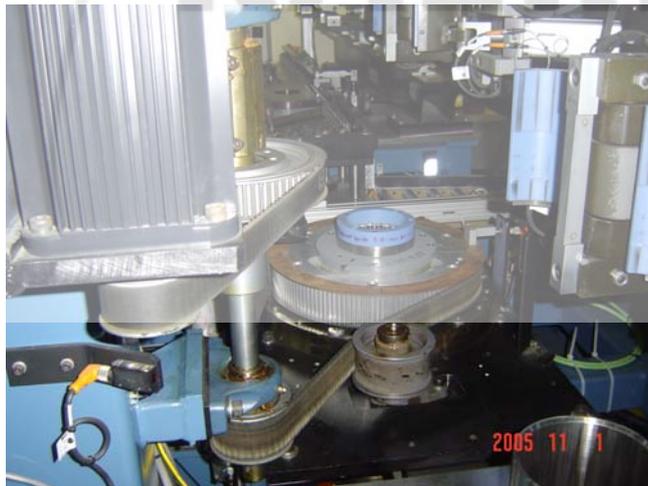


그림 2.7 연료다발용 회전 테이블

## ② J-plate

그림 2.8과 같이 중수로 집합체의 최종 외형과 집합체의 치수 품질요건을 결정하는 용접치구로 상, 하부 2개로 구성되어 있으며 재질은 두랄루민 계열 (Al-7075 T6)에 절연을 위해 표면에 anodizing 처리를 하고 ground bushing과 조립되어 구성되어 있다.



그림 2.8 연료다발용 J-plate

## ③ Weld Gun

그림 2.9에서와 같이 1, 2차 welding station에서 가 조립된 연료봉과 봉단 접합 판을 용접하는 장치로 서보 모터의 직선운동 축에 고정되어 있으며 diaphragm cylinder의 하단에 장치되어 상, 하 직선운동을 하며 weld gun에는 air spring, ground striker, power 전극 등으로 구성되어 있고 가 조립 fixture의 연료 봉이 J-plate에 insert 되며 2축의 서보 모터 위치제어에 의해 봉단접합판 용접을 수행한다. 이때 welding gun은 매년 overhaul하여 seal element를 교체해주고 bearing의 상태를 점검해야 한다

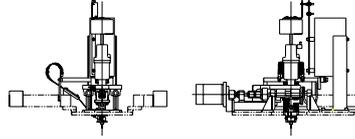


그림 2.9 Diaphragm cylinder 및 welding gun

#### ④ Ground Striker

Weld gun의 하단에 부착되어 weld gun과 diaphragm cylinder의 직선운동에 의해 air spring 의해 동작되며 중심축은 power 전극을 고정하여 봉단접합판에 접촉되고, air spring이 내장된 ground striker는 ground bushing, 봉단마개와 통전되어 용접을 수행한다. 그리고 ground striker의 하단에 돌출된 면이 ground bushing과 통전하여 용접이 수행되므로 접촉면에 이물질 제거하며, 항상 평면을 유지하여야 한다.

#### ⑤ Air Spring

Ground striker 안에 내장되어 main cylinder에 가해진 force를 power electrode와 ground electrode로 균일하게 분배하는 역할을 수행한다. Air cylinder의 cylinder와 piston 사이의 기밀 유지를 위해 사용하는 O-ring은 시간이 지남에 따라 마모되며, 특히 lubricant에 의해 손상될 수 있다. 그리고 O-ring의 손상에 의해 cylinder와 piston이 손상이 되면 power 전극과 ground 전극의 압력 불균형으로 용접품질을 저하시킬 수도 있다.

Air cylinder의 design은 stroke가 air cylinder 직경에 비해 매우 적으므로 piston이 바르지 않을 경우 cylinder와 binding을 일으켜 main cylinder에 의해 가해지는 force가 power electrode와 ground electrode로 균등히 분배되지 않는다. 그러므로 electrode 교체 시마다 air cylinder의 smooth한 작동 여부를 점검해야 한다.

⑥ Power 전극

End plate와 접촉하는 main electrode로 weld current는 power electrode를 통해 end plate와 end cap으로 전달되며, 이때 end plate의 아래면과 end cap 표면 사이에 nugget가 형성된다. Power electrode와 end plate의 직각도는 용접 품질과 전극의 수명에 영향을 주며 electrode tip내부로 cooling water를 공급하여 열 충격에 의한 전극의 수명을 연장시킨다. 표 2.2는 power electrode의 교체주기를 보여 준다.

그림 2.10의 power electrode는 용접면을 재가공하여 사용할 수 있으며 re-machining시 weld gun에 연결되는 부분이 편평하게 가공되어야 하며 end plate와 접촉하는 부분도 end plate 와 수직을 이루도록 하여야 한다.

표 2.2 Power electrode의 교체주기

Recommended Number of Bundles Welded Between Electrode Changes		
Fuel Type	Station #2 (1st end)	Station #4 (2nd End)
Bruce	300	300
Pickering	680	680
600MW	300	300
Hydro Quebce	600	600



그림 2.10 Power 전극

⑦ Ground Bushing

End cap과 접촉하는 electrode를 그림 2.11에서와 같이 ‘ground electrode 또는 ground bushing’이라고 하며 ground electrode는 J-plate hole과 절연을 유지하여야 하며, end plate와 직접 접촉을 허용하지 않으며 end cap과 접촉해야만 한다.

봉단마개와 접촉되는 전극으로 용접 중 ground electrode에 가해지는 힘은 실제 용접 force로 이용되지는 않지만 end cap과 균일하게 접촉하게 하여 용접을 위한 전류회로를 형성하게 하여 용접을 수행하며, 용접 중 ground electrode와 다른 부분의 접촉으로 인한 arc, burn, spitting등은 허용하지 않는다. Ground electrode는 37개 element의 각 Position에 해당하는 위치에 장착되며 position별 electrode의 형상은 element가 end plate에 결합되는 곳의 end plate 형상에 따라 다르며, 6 종류의 37개 electrode가 장착된다.

Ground electrode는 장기간 사용으로 인한 변형이나 마모때문에 주기적으로 Re-machining해 주어야 한다. Re-machining 시 end cap과 접촉하는 면의 taper를 정확히 가공되어야 한다. 이때 Ground striker와 닿는 부분은 평면을 유지 하여야 하며, 37개 Ground electrode의 길이는 모두 같아야 한다. 다음은 element 위치별 ground electrode type을 표 2.3과 같이 나타내고 있다.

표 2.3 Element 위치별 ground electrode type

Element 위치	Element type	Element 수 량	Element / End plate 결합형태	Ground electrode 종류
Element	W1	1	Center 1 Center	Type 1
Inner element	W2	6	3 Inner ring intern web	Type 2
			3 Inner ring	Type 3
Intermediate element	W3	12	3 Intern ring outer web	Type 4
			3 Intern ring	Type 3
			6 Intern ring outer web	Type 5
Outer element	W4	12	12 Outer ring	Type 3
	W5	6	6 Outer ring web	Type 6



그림 2.11 Ground bushing

#### 5) Weighing station

완성된 Bundle의 전체 무게 계량에 사용되며, 그림 2.12에서와 같이 second end welding station에서 gripper에 의해 weighing station으로 이동되어 Setra system사의 70 CP weigh scale이 bundle 무게를 측정한다. 이때 측정 data는 vision system controller로 보내져 formatting 된다. 이 측정 data와 vision system에 의해 읽혀진 연료다발의 이력이 EDP system으로 전송하게 된다.



그림 2.12 Weighing scale

#### 6) Vision system

연료봉 조립 fixture의 barcode는 이전까지 수행한 앞 공정의 제조 이력을 가지고 있으며, 이를 바탕으로 조립된 7 bundle에 연료다발의 일련번호를 부여하여 봉단접합판에 번호를 각인하며, 그림 2.13에서와 같이 용접된 연료다발 상. 하 면의 일련번호 일치 여부 확인, 무게 계량된 다발의 번호를 읽어 barcode 라벨을 생성시키며 이력을 전산 시스템에 전송하고 data값이 다를 경우 welder는 가동 중지된다.



그림 2.13 Vision system

#### 7) System control

용접 장비의 전체적인 sequence control을 하며, J-plate의 용접될 위치의 선정도 PLC에 의해 이루어진다. 또한 용접될 element의 위치 선정 및 용접을 위한 제반 준비가 갖추어 지면 PLC는weld controller에 용접될 element의 위치선정(즉, weld controller 내에서 weld sequence 선정에 필요) 및 용접 준비가 완료임을 통보한다.

Weld controller는 해당 weld sequence를 선정하여 용접 전류를 흘리고, 용접이 완료 되었음을 PLC와 통신한다. 다른 element들에 대해서도 위의 순서를 반복하여 차례로 용접해 나간다.

## 제 2 절 연료다발의 품질 검사

### 1. 개요

본 절차서는 월성형 연료다발의 용접공정에 사용되는 재료, 제조방법 및 품질표준을 아래와 같이 기술하고자.

### 2. 참고 문서 (reference documents)

- TS-P70 월성로용 연료봉 제품 사양서
- WP-80 월성로용 연료다발 제품 사양서
- WP-70 봉단마개 용접 공정시방서
- W-800-M10 연료다발 제조도면
- W501-M10 봉단접합판 제조도면

### 3. 재료 (materials)

연료다발 조립에 사용되는 봉단마개, 봉단접합판 및 연료봉은 W501-M10 및 WP-70에 의하여 제조된 것이어야 한다.

### 4. 제조방법

연료다발은 제조도면(W800-M10) 및 작업지침서(QI-804-1)에 명시된 대로 봉단접합판과 연료봉과의 저항용접에 의해 조립된다. 용접작업은 연료봉 및 봉단접합판의 산화방지를 위하여 불활성가스 He 분위기 상태에서 수행되어야 한다. 그리고 용접 sequence는 용접타이머의 조정에 의해 일정한 상태로 유지되며, 용접강도에 대한 공정관리는 전류, 용접시간 및 압력 감시하에 의해서 이루어진다. 마지막으로 조립된 연료다발은 봉단접합판의 외부 표면에 각인된 다발 일련번호로 각각 구분된다.

### 5. 공정자격승인 (process qualification)

제조방법 또는 공정변수에 중요한 변화가 있을 경우, 변경된 저항용접 공정에 대한 자격승인이 이루어져야 한다. 작업 및 용접공정 조건이 확립된 후 자격승인시험이 아래와 같이 수행된다. 먼저 37개의 공정관리용(PM) 시편을 용접한 다음, 연료다발 1개를 용접하고 다시 37개의 공정관리용 시편을 용접한다. 자격승인 시의 요구사항은 아래와 같다.

- 용접된 연료다발에 대한 치수검사
- 육안검사
- 연료다발 및 공정관리용 시편에 대한 토크강도 측정

치수검사 및 육안검사의 결과들이 규격을 만족하고, 최소의 토크강도가 95%의 신뢰도로 합격되면 연료다발의 저항용접 공정에 대한 자격이 승인된 것으로 간주된다.

## 6. 공정관리

연료다발의 용접공정은 공정자격 승인시험의 과정에서 결정된 공정관리용 시편과 연료다발의 상호관계를 이용하여 토크강도에 대해 확립된 작업조건의 한계에 의거하여 관리되어진다. 최소의 토크강도를 확신할 수 없는 경우에는 연료봉과 봉단접합판의 1회 재용접도 가능하다.

## 7. 품질표준

### 7.1 토크강도

연료다발의 봉단접합판과 연료봉단 마개와의 용접부위 강도는 표 2.4의 수치를 초과하여야 한다.

표 2.4 외환봉 및 내환봉의 허용 토크강도 수치

외환봉	내환봉 및 기타 연료봉
6.8Nm	4.5Nm

### 7.2 용접부위의 외관상태

연료다발의 용접부위의 외관상태에 대하여 아래와 같은 용접표준을 적용하게 된다.

- 봉단마개 표면에 발생한 0.25mm 깊이까지의 용접자국 또는 기타 흠집
- 용접 스플레터(splatter) 혹은 스파터(spatter) : 연료봉이나 봉단접합판에 튀겨 부착된 작은 지르칼로이 분말 덩어리
- 봉단접합판 또는 봉단마개 용접부위나 그 부근에 발생한 산화상태 (청색으로 변색된 것)

- 봉단마개에 한쪽 전극만 접촉된 상태에서 용접된 것
- 봉단접합관 또는 봉단마개의 용접자극에 발생된 심한 변색(discoloring)
- 봉단접합관 표면에 발생된 두께 5% 초과 깊이의 표면결함

이상과 같은 것들이 발생되면 이러한 공정조사 및 시정조치의 원인이 되며 또한 합격 판정은 승인된 외관상태의 표준에 의거한다.

### 7.3 연료다발 치수

연료다발 도면 W80-M10 및 7.6 항의 샘플링 계획에 따라 치수검사를 실시해야 한다.

### 7.4 청결상태

연료다발 표면에는 그리스, 오일, 먼지 및 기타 오염물질이 없어야 되며, 제품 상태는 고품질의 연료제조에 적합한 수준으로 유지되어야 한다. 연료다발의 표면은 스와빙(swabbing) 방법으로 우라늄 오염상태가 검사되어야 하며 연료다발의 평균 오염상태는  $2.8 \times 10^{-8}$  gramNU/cm<sup>2</sup> 를 초과하지 않아야 한다. 또한 연료다발 표면의 우라늄 오염검사는 검사 계획에 준하여 실시한다.

### 7.5 연료다발의 기타사항

연료다발에 대하여 제공하는 모든 사항은 아래와 같이 기록 및 유지해야 한다.

- 연료다발의 일련 번호 및 모델 번호
- 연료다발에 사용한 피복관, 봉단마개, 이산화우라늄, 지지체, 간격체 및 봉단접합관 등의 재료 롯트 번호
- $\pm 10g$  의 정밀도로 측정된 각 연료다발의 무게 및 이산화우라늄 무게 (kg 으로 표시된다)
- 연료다발의 제조 완료일자

### 7.6 샘플링 시험

완성된 연료다발에 대한 샘플링은 아래의 표 2.5와 같으며, 제품의 품질여부에 따라 변경될 수 있다.

표 2.5 연료다발 샘플링의 품질검사 일람표

1) 용접강도	1 PM (내환 및 외환에 대한 3개 이상/shift)
2) 연료다발 직경	100%
3) 연료다발 길이	1/shift
4) 봉단각도 ( $\alpha$ )	100%*
5) 봉단모서리의 폭	1/shift
6) 봉단마개 높이	1/shift
7) 봉단접합판 높이	100%*
8) 지지체의 축방향 위치	100%
9) 간격체의 세로 교차폭	100%*
10) 간격체의 가로 교차폭	100%*
11) 연료공간 간격	1/shift
12) 연료봉의 처짐	1/shift
13) 연료봉의 길이 변화	100%*
14) 봉단부 용접상태	100%
15) 봉단접합판의 용접방향	100%
16) 결함검사	100%
17) 굴곡검사	100%*
18) 봉단접합판의 직각도	1/shift
19) 봉단접합판의 국부과형	1/shift
20) 지지체 및 간격체의 중심위치	1/shift
21) 지지체의 원주방향 위치	용접지그 검사
22) 봉단접합판의 용접강도	용접지그 검사

\* 다발제조 공정의 안정화상태에 따라 1/shift 이상의 샘플링 검사도 가능하다.

## 제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

### 제 1 절 다발용접의 접합강도 균일화

#### 1. 연료다발 내환봉 및 외환봉 강도시험 분석

1차 년도는 돌기형 접합판을 이용한 예비실험을 위해 내환봉(연료봉번호: 12, 16번) 및 외환봉(연료봉번호: 31, 37번)의 토크시험을 수행하였으나, 2차 년도에서는 full-sized(연료봉 No.=1-37번) 고정치구가 준비됨에 따라 연료봉번호 1번에서 37번의 용접실험 후 세 번의 토크값을 평균하여 실험 결과를 분석하였음. 그리고 돌기형 접합판을 이용한 full-sized 용접샘플은 여러 차례에 걸친 예비실험과 실제 양산 중인 다발제품에 사용되는 작업공정 조건을 참조하여 용접조건을 선정하였다. 그림 3.1은 돌기형 접합판을 이용한 토크시험용 full sized 용접된 시편을 보여주고 있으며, 용접실험 후 외관검사는 대체로 양호한 상태로 나타났다.



(상단 접합판 토크용접시편)

(하단 접합판 토크용접시편)

그림 3.1 돌기형 접합판을 이용한 full sized 토크용접시편

그림 3.2, 그림 3.3 및 그림 3.4는 용접전류 별 (3600A, 3800A, 4000A)에서 용접시간에 따른 내환봉의 토크치에 대한 영향을 조사한 것이고, 그림 3.5, 그림 3.6 및 그림 3.7은 용접전류 별 (3600A, 3800A, 4000A)에서 용접시간에 따른 외환봉의 토크치에 대한 영향을 비교 조사하여 나타낸 것이다. 여기서 용접전류별 시간에 따른 내환봉 및 외환봉의 토크치는 적용기준치(내환봉: 4.5Nm, 외환봉: 6.8Nm)보다 훨씬 높게 나타났으며 강도 분포도는 대체로 8 Nm에서 12 Nm 사이에서 균일하게 보여주었다. 그리고 전년도 예비시험에서와 같이 용접전류가 높을수록 토크치도 역시 증가하는 것으로 나타내고 있었다. 따라서 그림 3.8, 그림 3.9, 그림 3.10 및 그림 3.11에서 보여주듯이 full sized 용접시편의 전체에 대한 37봉 연료봉의 시험 결과에는 접합강도의 변동성(fluctuation) 면에서 볼 때 기존의 공정 모의시편과 비교해서 낮은 변동성의 분포(기준치 1로 간주하여 0.5범위에서 분포)를 나타내고 있었다. 표 3.1, 표 3.2, 표 3.3, 표 3.4, 표 3.5, 표 3.6, 표 3.7, 표 3.8, 표 3.9 및 표 3.10은 각각의 용접실험 data를 정리한 일람표이다.

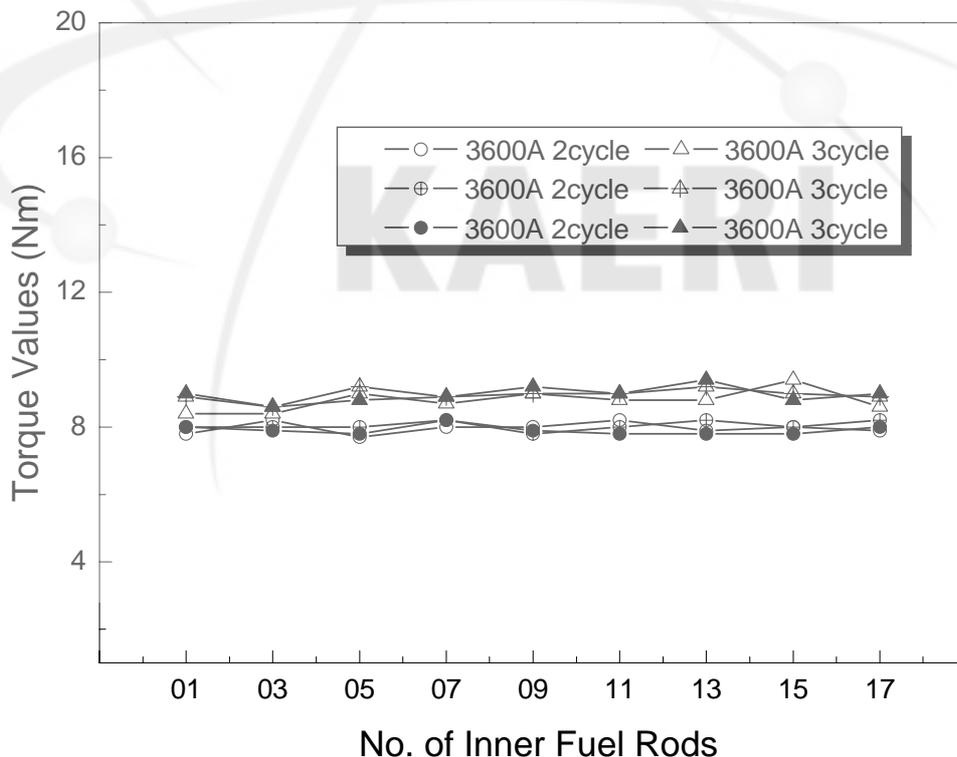


그림 3.2 용접전류 3600A에 따른 내환봉에 따른 토크치 영향

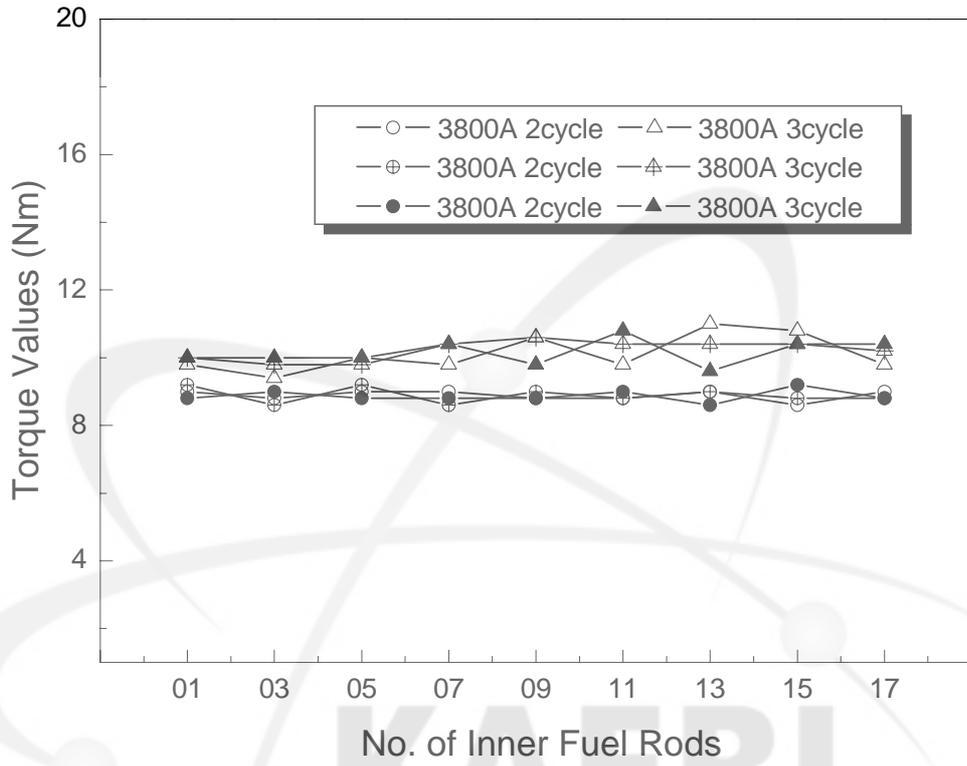


그림 3.3 용접전류 3800A에 따른 내환봉 토크치 영향

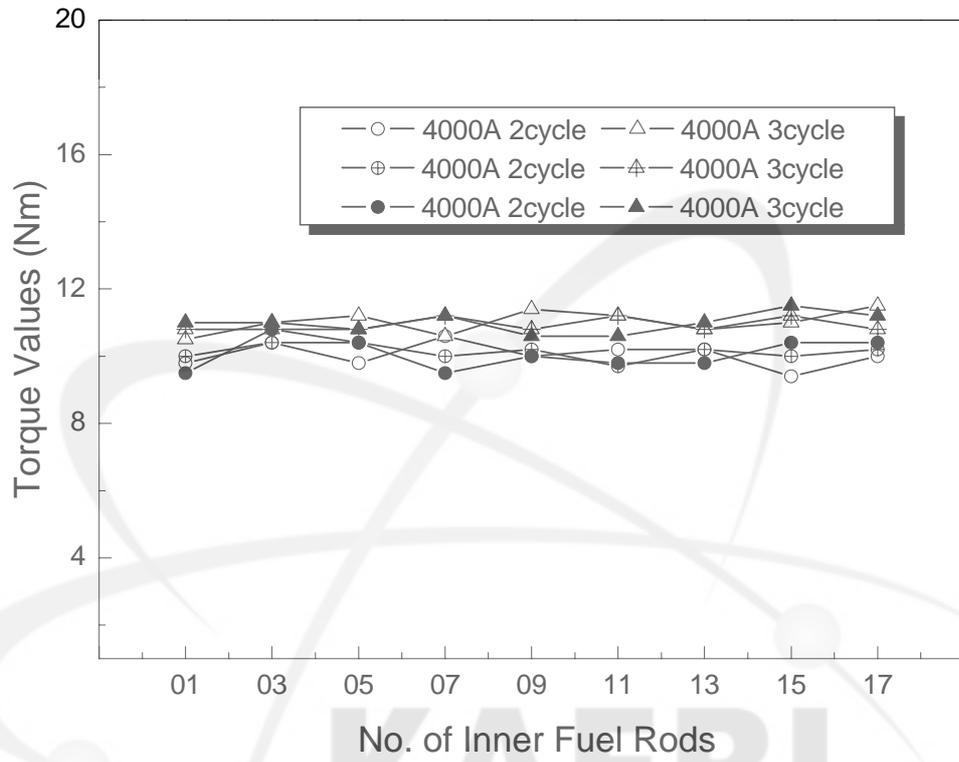


그림 3.4 용접전류 4000A에 따른 내환봉 토크치 영향

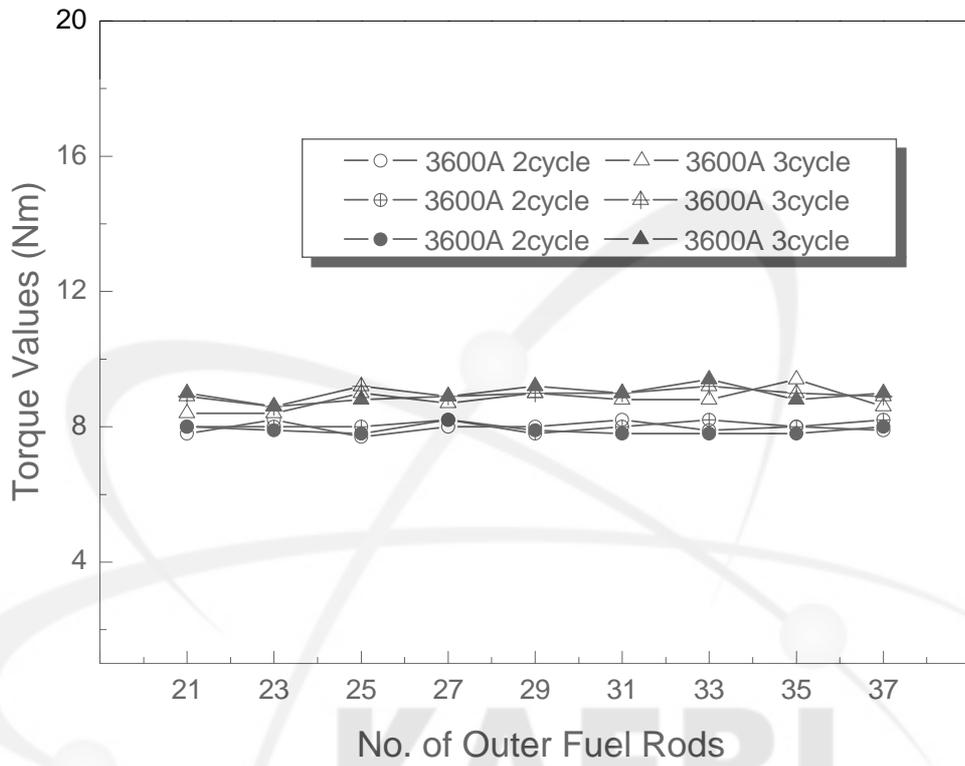


그림 3.5 용접전류 3600A에 따른 외환봉 토크치 영향

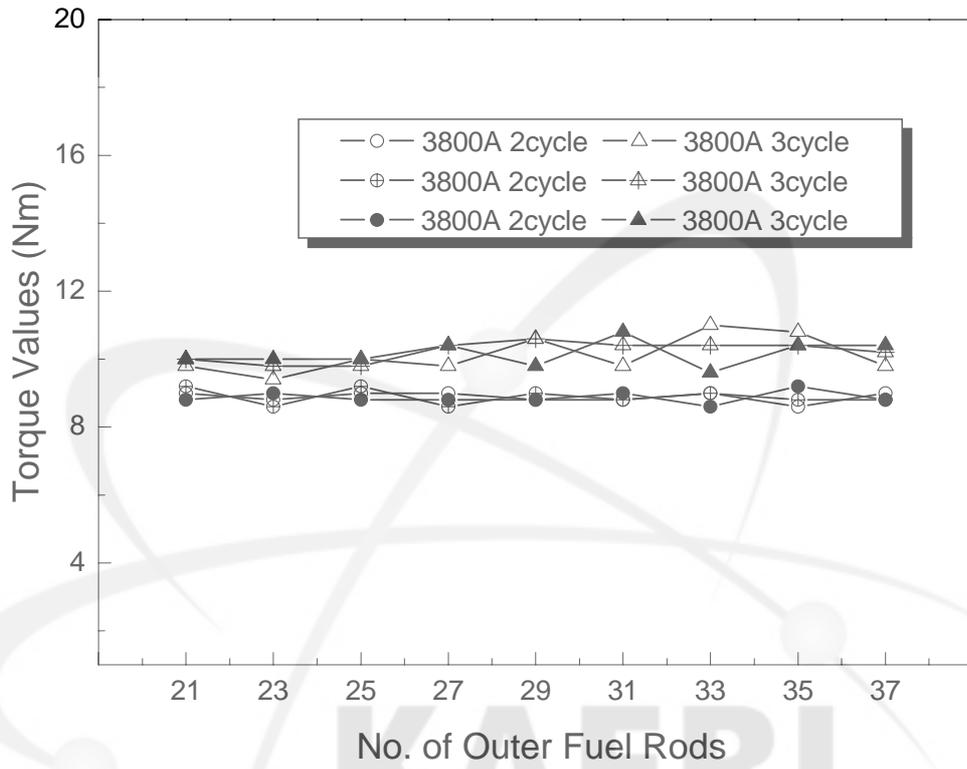


그림 3.6 용접전류 3600A에 따른 외환봉 토크치 영향

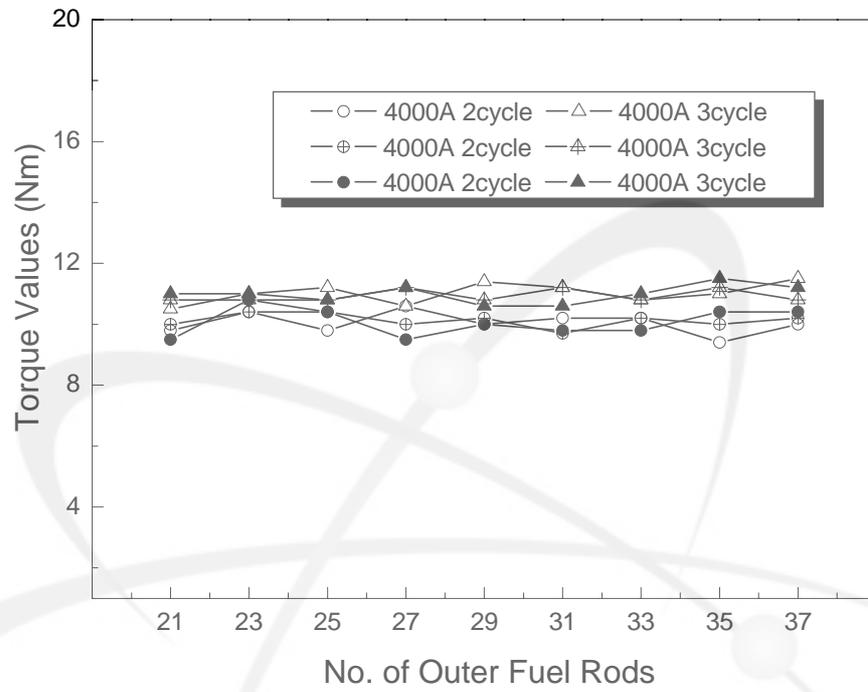


그림 3.7 용접전류 4000A에 따른 외환봉 토크치 영향

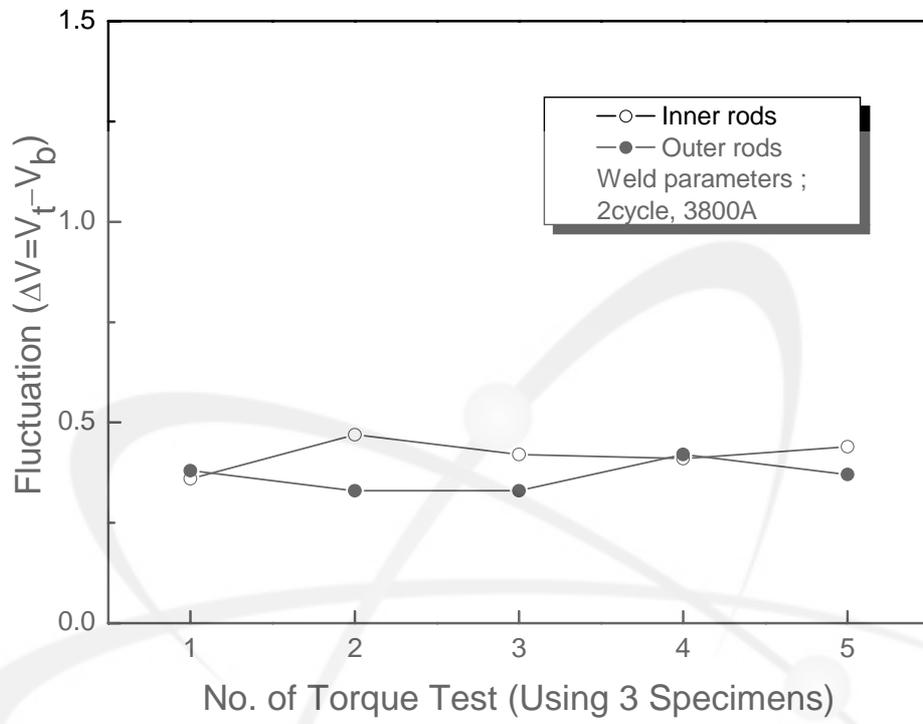


그림 3.8 용접전류 3800A 2cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동

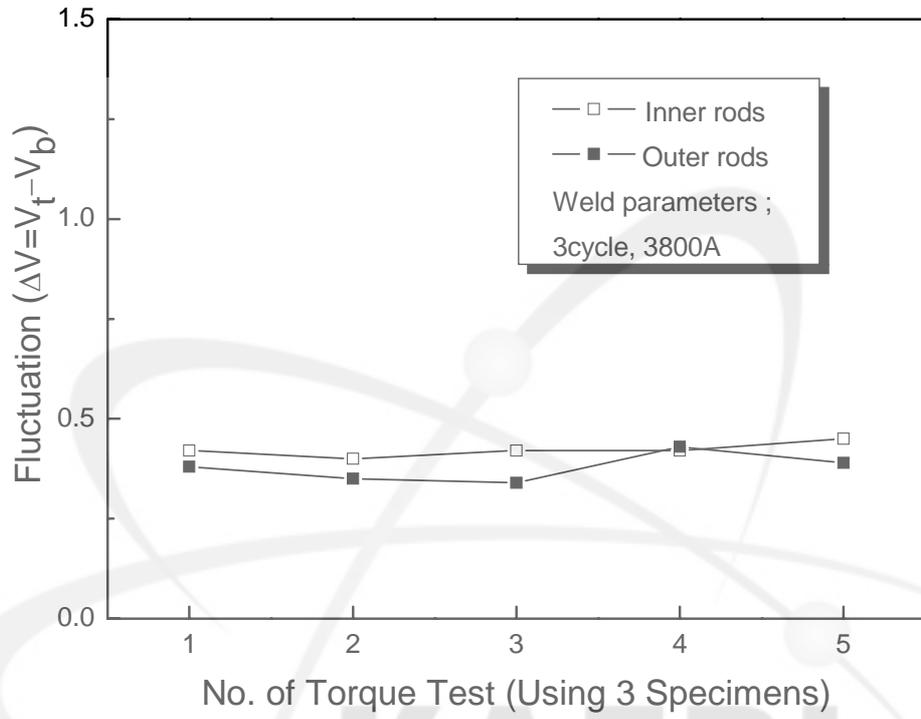


그림 3.9 용접전류 3800A 3cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동

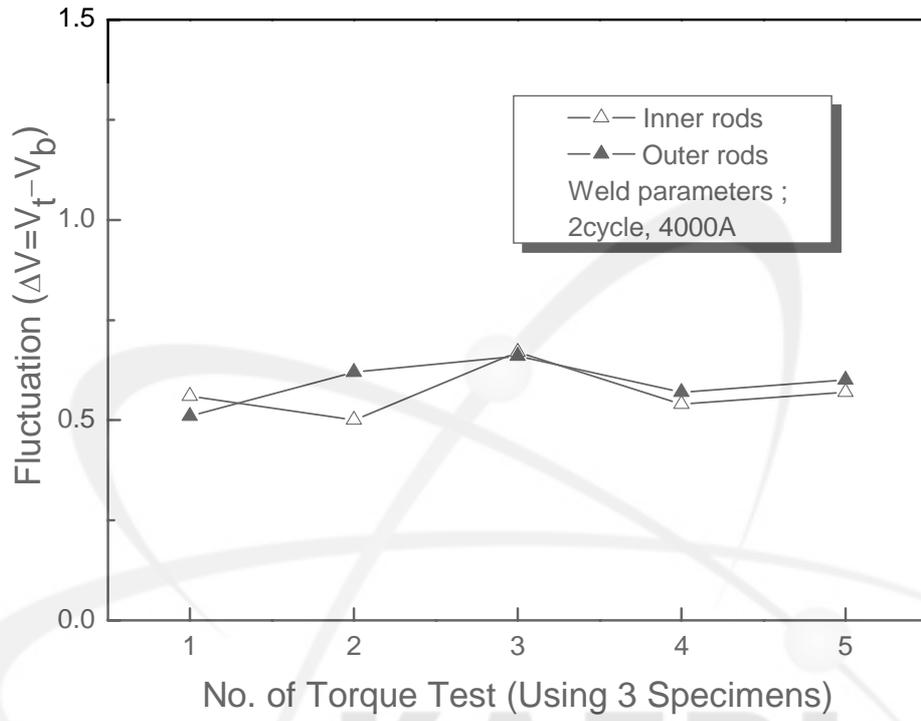


그림 3.10 용접전류 4000A 2cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동

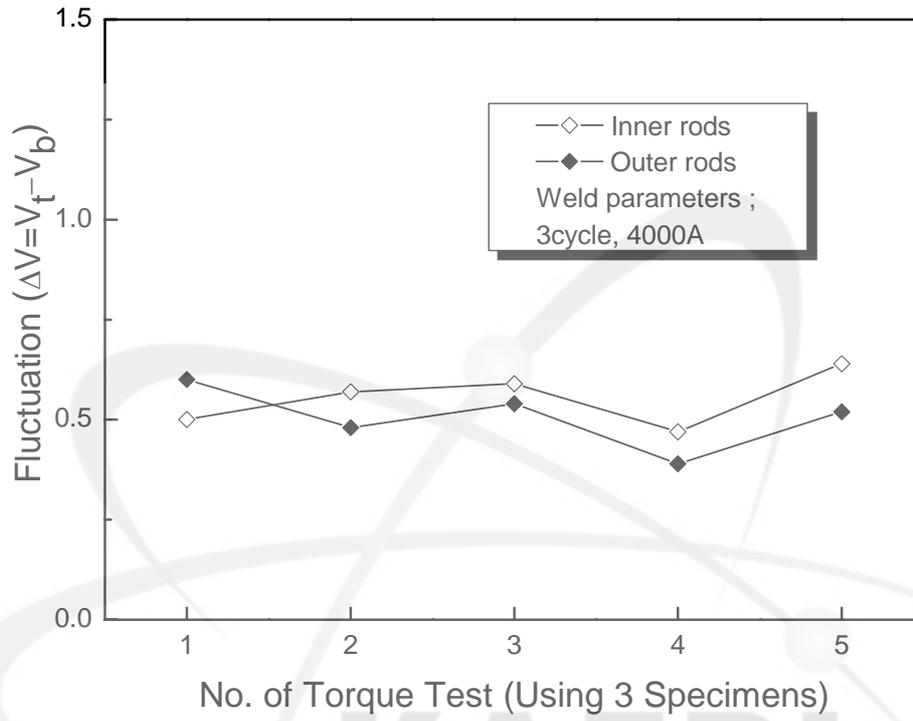


그림 3.11 용접전류 4000A 3cycle 에 따른 내환봉 및 외환봉 토크치 변동

표 3.1 용접전류 3600A에 따른 내환봉 토크치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	토크치 (Nm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
I2-01(a/b/c)	2	7.8	8.0	8.0	-전류 3600A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
I2-03(a/b/c)		8.2	8.0	7.9	
I2-05(a/b/c)		7.7	8.0	7.8	
I2-07(a/b/c)		8.0	8.2	8.2	
I2-09(a/b/c)		8.0	7.8	7.9	
I2-11(a/b/c)		8.2	8.0	7.8	
I2-13(a/b/c)		7.9	8.2	7.8	
I2-15(a/b/c)		8.0	8.0	7.8	
I2-17(a/b/c)		7.9	8.2	8.0	
I3-01(a/b/c)		3	8.4	8.9	
I3-03(a/b/c)	8.4		8.6	8.6	
I3-05(a/b/c)	9.0		9.2	8.8	
I3-07(a/b/c)	8.7		8.9	8.9	
I3-09(a/b/c)	9.0		9.0	9.2	
I3-11(a/b/c)	8.8		9.0	9.0	
I3-13(a/b/c)	8.8		9.2	9.4	
I3-15(a/b/c)	9.4		9.0	8.8	
I3-17(a/b/c)	8.6		8.9	9.0	

표 3.2 용접전류 3800A에 따른 내환봉 토크치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	토크치 (Nm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
I2-01(a/b/c)	2	9.0	9.2	8.8	-전류 3800A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
I2-03(a/b/c)		8.8	8.6	9.0	
I2-05(a/b/c)		9.0	9.2	8.8	
I2-07(a/b/c)		9.0	8.6	8.8	
I2-09(a/b/c)		8.8	9.0	8.8	
I2-11(a/b/c)		8.8	8.8	9.0	
I2-13(a/b/c)		9.0	9.0	8.6	
I2-15(a/b/c)		8.6	8.8	9.2	
I2-17(a/b/c)		9.0	8.8	8.8	
I3-01(a/b/c)		3	9.8	10.0	
I3-03(a/b/c)	9.4		9.8	10.0	
I3-05(a/b/c)	10.0		9.8	10.0	
I3-07(a/b/c)	9.8		10.4	10.4	
I3-09(a/b/c)	10.6		10.6	9.8	
I3-11(a/b/c)	9.8		10.4	10.8	
I3-13(a/b/c)	11.0		10.4	9.6	
I3-15(a/b/c)	10.8		10.4	10.4	
I3-17(a/b/c)	9.8		10.2	10.4	

표 3.3 용접전류 4000A에 따른 내환봉 토크치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	토크치 (Nm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
I2-01(a/b/c)	2	9.8	10.0	9.5	-전류 4000A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
I2-03(a/b/c)		10.4	10.4	10.8	
I2-05(a/b/c)		9.8	10.4	10.4	
I2-07(a/b/c)		10.6	10.0	9.5	
I2-09(a/b/c)		10.0	10.2	10.0	
I2-11(a/b/c)		10.2	9.7	9.8	
I2-13(a/b/c)		10.2	10.2	9.8	
I2-15(a/b/c)		9.4	10.0	10.4	
I2-17(a/b/c)		10.0	10.2	10.4	
I3-01(a/b/c)		3	10.5	10.8	
I3-03(a/b/c)	11.0		10.8	11.0	
I3-05(a/b/c)	11.2		10.8	10.8	
I3-07(a/b/c)	10.6		11.2	11.2	
I3-09(a/b/c)	11.4		10.8	10.6	
I3-11(a/b/c)	11.2		11.2	10.6	
I3-13(a/b/c)	10.8		10.8	11.0	
I3-15(a/b/c)	11.0		11.2	11.5	
I3-17(a/b/c)	11.5		10.8	11.2	

표 3.4 용접전류 3600A에 따른 외환봉 토크치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	토크치 (Nm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
O2-21(a/b/c)	2	7.8	8.0	8.0	-전류 3600A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
O2-23(a/b/c)		8.2	8.0	7.9	
O2-25(a/b/c)		7.7	8.0	7.8	
O2-27(a/b/c)		8.0	8.2	8.2	
O2-29(a/b/c)		8.0	7.8	7.9	
O2-31(a/b/c)		8.2	8.0	7.8	
O2-33(a/b/c)		7.9	8.2	7.8	
O2-35(a/b/c)		8.0	8.0	7.8	
O2-37(a/b/c)		7.9	8.2	8.0	
O3-21(a/b/c)		3	8.4	8.9	
O3-23(a/b/c)	8.4		8.6	8.6	
O3-25(a/b/c)	9.0		9.2	8.8	
O3-27(a/b/c)	8.7		8.9	8.9	
O3-29(a/b/c)	9.0		9.0	9.2	
O3-31(a/b/c)	8.8		9.0	9.0	
O3-33(a/b/c)	8.8		9.2	9.4	
O3-35(a/b/c)	9.4		9.0	8.8	
O3-37(a/b/c)	8.6		8.9	9.0	

표 3.5 용접전류 3800A에 따른 외환봉 토크치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	토크치 (Nm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
O2-21(a/b/c)	2	9.0	9.2	8.8	-전류 3800A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
O2-23(a/b/c)		8.8	8.6	9.0	
O2-25(a/b/c)		9.0	9.2	8.8	
O2-27(a/b/c)		9.0	8.6	8.8	
O2-29(a/b/c)		8.8	9.0	8.8	
O2-31(a/b/c)		8.8	8.8	9.0	
O2-33(a/b/c)		9.0	9.0	8.6	
O2-35(a/b/c)		8.6	8.8	9.2	
O2-37(a/b/c)		9.0	8.8	8.8	
O3-21(a/b/c)		3	9.8	10.0	
O3-23(a/b/c)	9.4		9.8	10.0	
O3-25(a/b/c)	10.0		9.8	10.0	
O3-27(a/b/c)	9.8		10.4	10.4	
O3-29(a/b/c)	10.6		10.6	9.8	
O3-31(a/b/c)	9.8		10.4	10.8	
O3-33(a/b/c)	11.0		10.4	9.6	
O3-35(a/b/c)	10.8		10.4	10.4	
O3-37(a/b/c)	9.8		10.2	10.4	

표 3.6 용접전류 4000A에 따른 외환봉 토크치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	토크치 (Nm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
O2-21(a/b/c)	2	9.8	10.0	9.5	-전류 4000A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
O2-23(a/b/c)		10.4	10.4	10.8	
O2-25(a/b/c)		9.8	10.4	10.4	
O2-27(a/b/c)		10.6	10.0	9.5	
O2-29(a/b/c)		10.0	10.2	10.0	
O2-31(a/b/c)		10.2	9.7	9.8	
O2-33(a/b/c)		10.2	10.2	9.8	
O2-35(a/b/c)		9.4	10.0	10.4	
O2-37(a/b/c)		10.0	10.2	10.4	
O3-21(a/b/c)		3	10.5	10.8	
O3-23(a/b/c)	11.0		10.8	11.0	
O3-25(a/b/c)	11.2		10.8	10.8	
O3-27(a/b/c)	10.6		11.2	11.2	
O3-29(a/b/c)	11.4		10.8	10.6	
O3-31(a/b/c)	11.2		11.2	10.6	
O3-33(a/b/c)	10.8		10.8	11.0	
O3-35(a/b/c)	11.0		11.2	11.5	
O3-37(a/b/c)	11.5		10.8	11.2	

표 3.7 용접전류 3800A, 시간 2cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표

토크 변동량 ( $\Delta V = V_t - V_b$ )	반복수(N)					용접변수
	1	2	3	4	5	
I2-01(a/b/c)	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	-용접시간 2cycle -전류 3800A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar -1회 시 3개 용접 시편 사용
I2-03(a/b/c)	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	
I2-05(a/b/c)	0.4	0.4	0.3	0.4	0.7	
I2-07(a/b/c)	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	
I2-09(a/b/c)	0.2	0.6	0.5	0.3	0.4	
I2-11(a/b/c)	0.2	0.6	0.4	0.4	0.4	
I2-13(a/b/c)	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	
I2-15(a/b/c)	0.6	0.5	0.4	0.6	0.6	
I2-17(a/b/c)	0.2	0.7	0.6	0.4	0.4	
평균치	0.36	0.47	0.42	0.41	0.44	
O2-21(a/b/c)	0.4	0.4	0	0.4	0.6	
O2-23(a/b/c)	0.4	0.2	0.4	0.6	0.4	
O2-25(a/b/c)	0.4	0.4	0.4	0.6	0	
O2-27(a/b/c)	0.4	0.4	0.2	0	0	
O2-29(a/b/c)	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	
O2-31(a/b/c)	0.2	0.2	0.6	0.4	0.4	
O2-33(a/b/c)	0.4	0.4	0.2	0.4	0.6	
O2-35(a/b/c)	0.6	0.2	0.4	0.6	0.4	
O2-37(a/b/c)	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	
평균치	0.38	0.33	0.33	0.42	0.37	

표 3.8 용접전류 3800A, 시간 3cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표

토크 변동량 ( $\Delta V = V_t - V_b$ )	반복수(N)					용접변수
	1	2	3	4	5	
I3-01(a/b/c)	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	-용접시간 3cycle -전류 3800A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar -1회 시 3개 용접 시편 사용
I3-03(a/b/c)	0.5	0.2	0.5	0.4	0.4	
I3-05(a/b/c)	0.3	0	0.3	0.4	0.5	
I3-07(a/b/c)	0.4	0.4	0.2	0.4	0.5	
I3-09(a/b/c)	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	
I3-11(a/b/c)	0.3	0.5	0.4	0.4	0.6	
I3-13(a/b/c)	0.4	0.4	0.5	0.6	0.3	
I3-15(a/b/c)	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	
I3-17(a/b/c)	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	
평균치	0.42	0.40	0.42	0.42	0.45	
O3-21(a/b/c)	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	
O3-23(a/b/c)	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	
O3-25(a/b/c)	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2	
O3-27(a/b/c)	0.4	0.5	0.5	0.4	0.2	
O3-29(a/b/c)	0.5	0.6	0.5	0.4	0.3	
O3-31(a/b/c)	0.4	0.2	0.4	0.6	0.4	
O3-33(a/b/c)	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	
O3-35(a/b/c)	0.5	0.2	0	0.6	0.3	
O3-37(a/b/c)	0.4	0.4	0.4	0.2	0.5	
평균치	0.38	0.35	0.34	0.43	0.39	

표 3.9 용접전류 4000A, 시간 2cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표

토크 변동량 ( $\Delta V=V_t-V_b$ )	반복수(N)					용접변수
	1	2	3	4	5	
I2-01(a/b/c)	0.5	0.4	0.8	0.4	0.5	-용접시간 2cycle -전류 4000A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar -1회 시 3개 용접 시편 사용
I2-03(a/b/c)	0.4	0.8	0.5	0.4	0.4	
I2-05(a/b/c)	0.6	0.7	0.9	0.5	0.8	
I2-07(a/b/c)	1.1	0	1.2	0.8	0.6	
I2-09(a/b/c)	0.2	0.6	0.5	0.6	0.4	
I2-11(a/b/c)	0.5	0.6	0.6	0.4	0.4	
I2-13(a/b/c)	0.4	0.4	0.6	0.8	1.0	
I2-15(a/b/c)	1.0	0.7	0.4	0.6	0.6	
I2-17(a/b/c)	0.4	0.7	0.6	0.4	0.4	
평균치	0.56	0.50	0.67	0.54	0.57	
O2-21(a/b/c)	0.5	0.2	0.8	0.8	0.6	
O2-23(a/b/c)	0.2	0.4	0.6	0.6	0.8	
O2-25(a/b/c)	0.4	0.8	1.0	0.6	0.6	
O2-27(a/b/c)	0.5	0.6	0.4	0.2	1.0	
O2-29(a/b/c)	0.6	0.8	0.8	0.4	0.5	
O2-31(a/b/c)	0.4	0.2	0.8	0.5	0.2	
O2-33(a/b/c)	0.8	1.2	1.0	0.6	0.6	
O2-35(a/b/c)	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	
O2-37(a/b/c)	0.4	1.0	0.6	0.6	0.7	
평균치	0.51	0.62	0.66	0.57	0.60	

표 3.10 용접전류 4000A, 시간 3cycle에 따른 내/외환봉 토크 변동량 일람표

토크 변동량 ( $\Delta V=V_t-V_b$ )	반복수(N)					용접변수
	1	2	3	4	5	
I3-01(a/b/c)	0.5	0.5	0.2	0.5	0.8	-용접시간 3cycle -전류 4000A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar -1회 시 3개 용접 시편 사용
I3-03(a/b/c)	0.2	0.8	0.8	0.3	1.0	
I3-05(a/b/c)	0.4	0.8	0.3	0.5	0.7	
I3-07(a/b/c)	0.6	0.4	0.5	0.5	0.4	
I3-09(a/b/c)	0.8	0.4	0.5	0.4	0.6	
I3-11(a/b/c)	0.6	0.6	0.7	0.6	0.2	
I3-13(a/b/c)	0.2	0.4	1.0	0.6	1.0	
I3-15(a/b/c)	0.5	0.4	0.9	0.4	0.6	
I3-17(a/b/c)	0.7	0.8	0.4	0.4	0.5	
평균치	0.50	0.57	0.59	0.47	0.64	
O3-21(a/b/c)	0.8	0.6	0.6	0.2	0.6	
O3-23(a/b/c)	0.5	0.4	0.6	0.5	0.2	
O3-25(a/b/c)	1.2	0.6	0.4	0.4	0.8	
O3-27(a/b/c)	0.3	0.5	0.8	0.2	0.4	
O3-29(a/b/c)	0.5	0.8	0.5	0.5	0.4	
O3-31(a/b/c)	0.3	0.2	0.8	0.2	1.0	
O3-33(a/b/c)	0.5	0.5	0.5	0.8	0.4	
O3-35(a/b/c)	0.7	0.5	0.4	0.2	0.2	
O3-37(a/b/c)	0.6	0.2	0.3	0.5	0.7	
평균치	0.60	0.48	0.54	0.39	0.52	

## 제 2 절 다발용접의 열변형 최소화

### 1. 용접부의 열변형 측정 및 분석

1차 년도는 돌기형 접합판을 이용한 용접변형 측정실험에서 내환봉(연료봉 번호: 12, 16번) 및 외환봉(연료봉번호: 31, 37번)의 용접시편이 사용되어 수행되었고, 2차 년도에서는 full-sized 고정치구를 이용한 용접샘플에서 연료봉 번호 1번에서 2번까지 그리고 2번에서 3번까지 계속적으로 84번의 다이얼게이지 측정으로 세 번의 측정치를 평균하여 실험 결과를 분석하였다. 그림 3.12는 접합판용접부의 waveness 허용기준이며, 그림 3.13은 실제로 사용되었던 내환봉 및 외환봉 형상의 연료봉 번호(내환봉 No. 1-19, 외환봉 No. 20-37)를 나타내고 있다. 그리고 그림 3.14는 다이얼게이지를 이용하는 waveness 측정방법을 보여준다.

그림 3.15 및 그림 3.16은 용접전류 3800A, 주전극 압력 4.0BAR, 용접시간 2-3cycle 로 일정하게 하고 full sized 고정치구를 사용하여 내환봉 및 외환봉의 용접시편을 다이얼게이지로 측정하여 변형을 조사하였다. 그림 3.15 및 그림 3.16에서 알 수 있듯이 기존 다발 제품의 품질기준치인 TIR. 0.56mm 보다 작은 측정치인 0.4mm 이하에서 볼 수 있었다. 그림 3.17 및 그림 3.18은 용접전류 4000A, 주전극 압력 4.0BAR, 용접시간 2-3cycle 로 일정하게 하여 내환봉 및 외환봉의 용접변형을 비교 조사하였다. 이 경우에서도 다발의 품질기준인 TIR. 0.56mm 보다 작은 측정치에서 나타내고 있었다. 이때 연료봉 간의 측정방법은 연료봉 순서(1,2→2,3→3,4...→36,37)에 따라 84번의 probe 이동과 매번마다 3번 측정하고 평균치로 하였다. 표 3.11, 표 3.12, 표 3.13 및 표 3.14는 각각의 용접실험 data를 정리한 일람표이다.

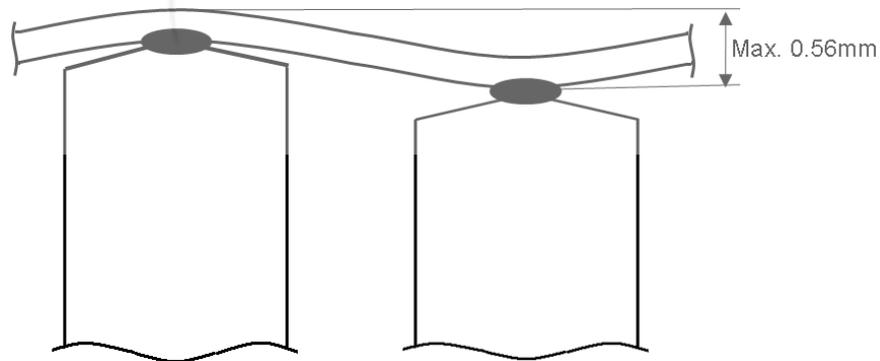


그림 3.12 접합판용접의 waveness 허용기준

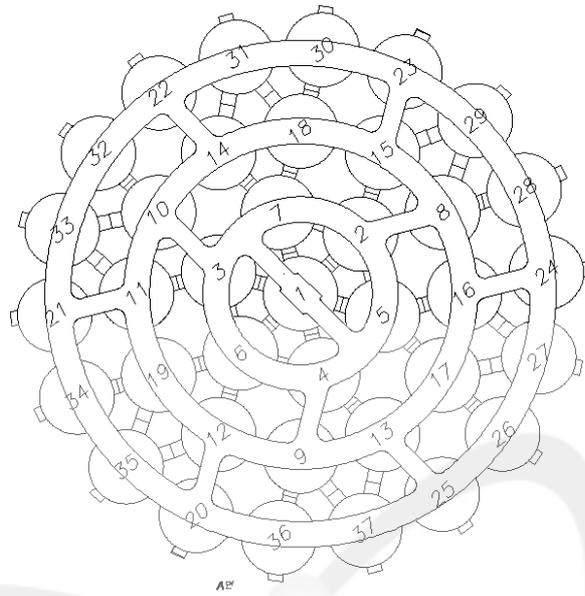


그림 3.13 내환봉 및 외환봉 형상  
(내환봉 No. 1-19, 외환봉 No. 20-37)



그림 3.14 다이얼게이지를 이용하는 waveness 측정

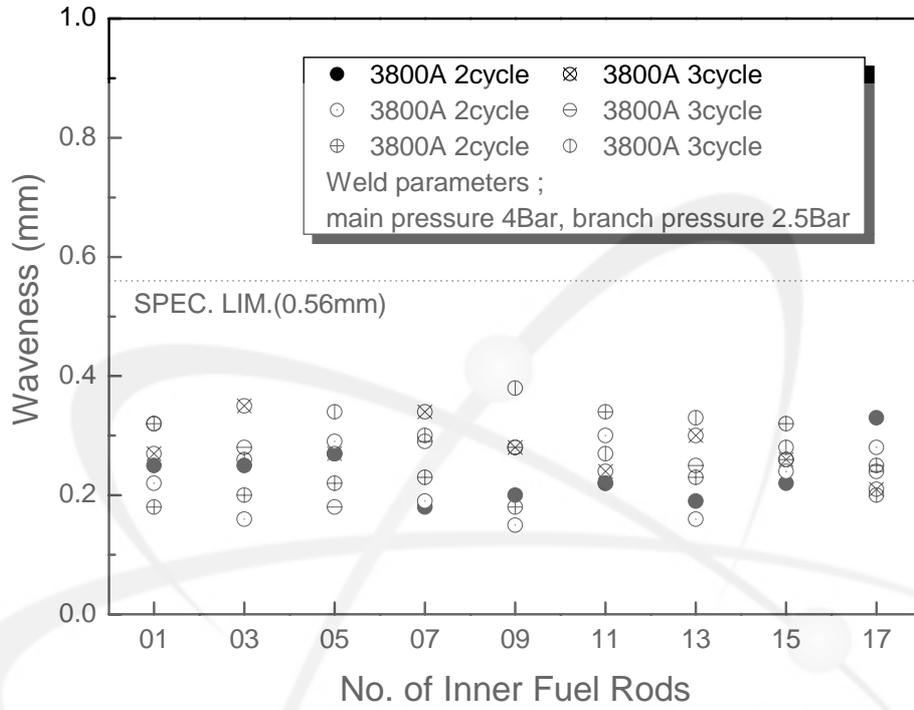


그림 3.15 용접전류 3800A 2-3cycle에 따른 내환봉 waviness 측정치 비교

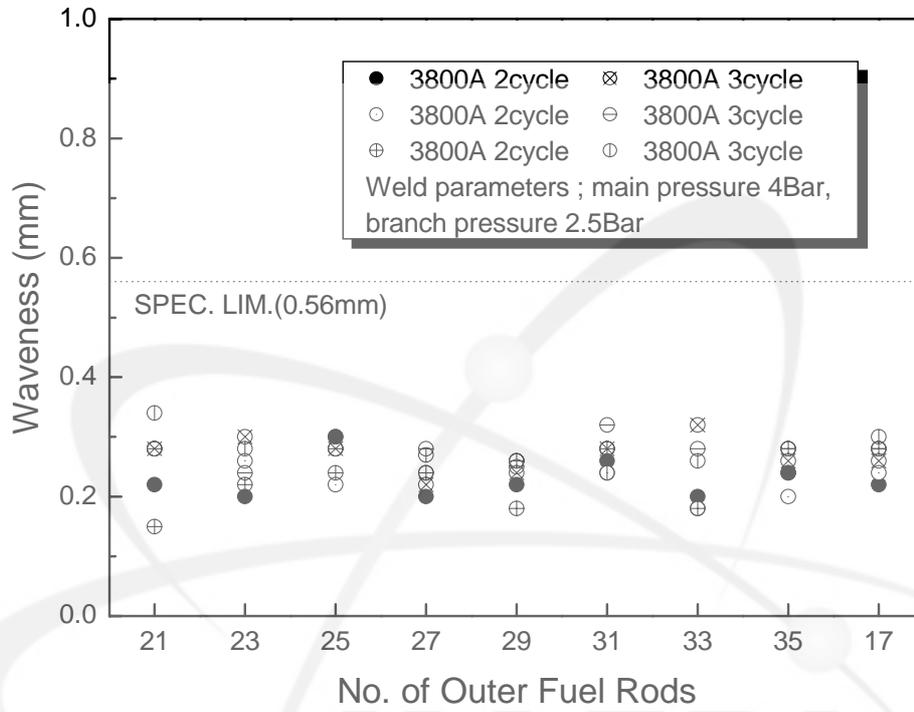


그림 3.16 용접전류 3800A 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정치 비교

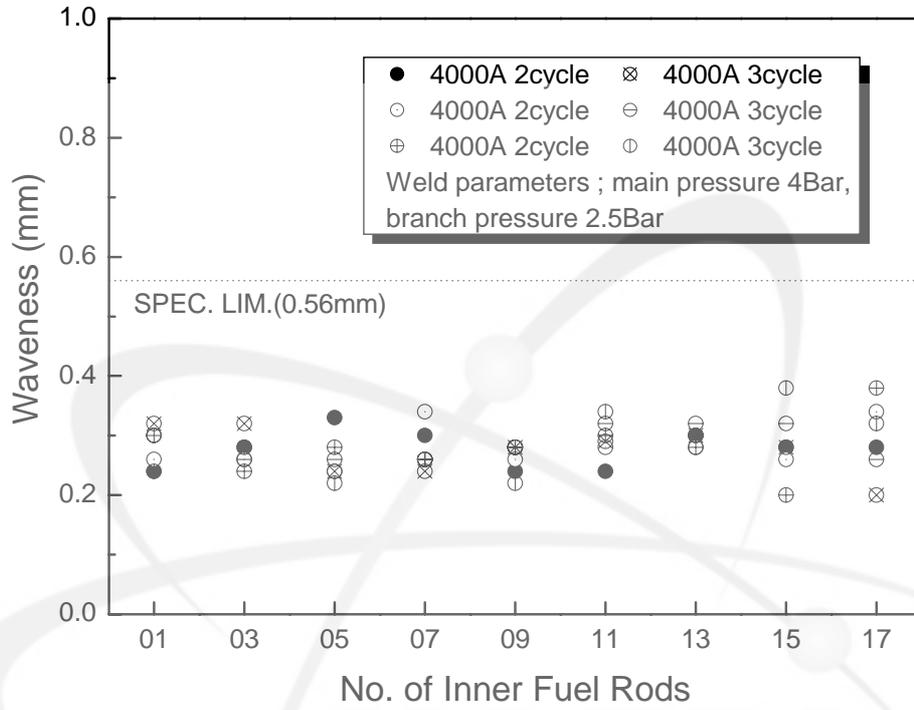


그림 3.17 용접전류 4000A 2-3cycle에 따른 내환봉 waviness 측정치 비교

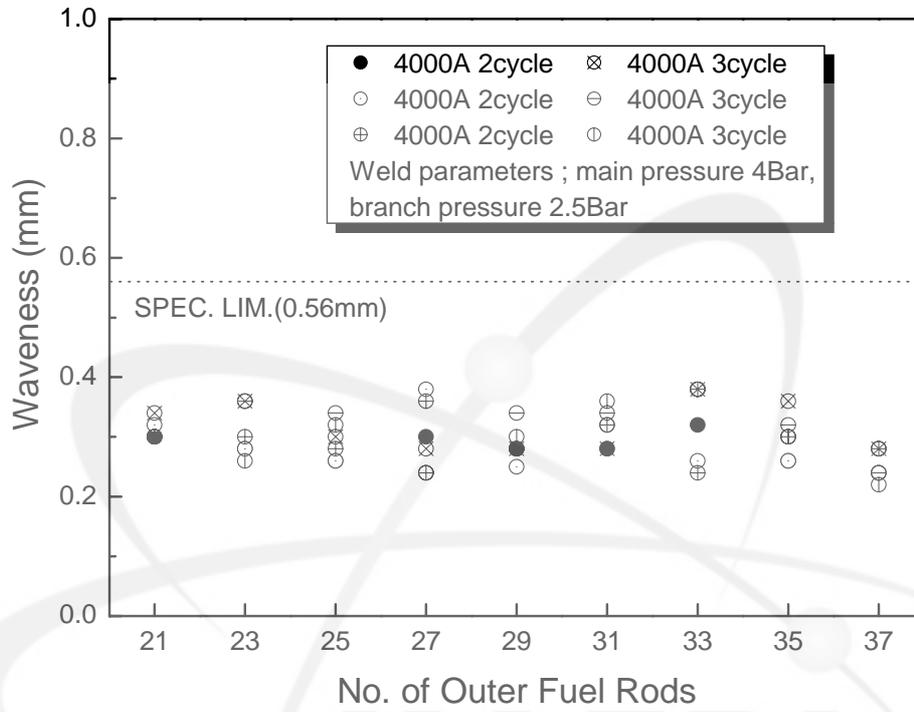


그림 3.18 용접전류 4000A 2-3cycle에 따른 외환봉 waviness 측정치 비교

표 3.11 전류 3800A, 시간 2-3cycle에 따른 내환봉 waveness 측정값 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	Waveness 측정값 (mm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
I2-01(a/b/c)	2	0.25	0.22	0.18	-전류 3800A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
I2-03(a/b/c)		0.25	0.16	0.20	
I2-05(a/b/c)		0.27	0.29	0.22	
I2-07(a/b/c)		0.18	0.19	0.23	
I2-09(a/b/c)		0.20	0.15	0.18	
I2-11(a/b/c)		0.22	0.30	0.34	
I2-13(a/b/c)		0.19	0.16	0.23	
I2-15(a/b/c)		0.22	0.24	0.32	
I2-17(a/b/c)		0.33	0.28	0.25	
I3-01(a/b/c)		3	0.27	0.32	
I3-03(a/b/c)	0.35		0.28	0.26	
I3-05(a/b/c)	0.27		0.18	0.34	
I3-07(a/b/c)	0.34		0.29	0.30	
I3-09(a/b/c)	0.28		0.28	0.38	
I3-11(a/b/c)	0.24		0.22	0.27	
I3-13(a/b/c)	0.30		0.25	0.33	
I3-15(a/b/c)	0.26		0.26	0.28	
I3-17(a/b/c)	0.21		0.24	0.20	

표 3.12 전류 3800A, 시간 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정값 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	Waveness 측정값 (mm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
O2-21(a/b/c)	2	0.22	0.28	0.15	-전류 3800A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
O2-23(a/b/c)		0.20	0.26	0.22	
O2-25(a/b/c)		0.30	0.22	0.24	
O2-27(a/b/c)		0.20	0.24	0.24	
O2-29(a/b/c)		0.22	0.25	0.18	
O2-31(a/b/c)		0.26	0.24	0.28	
O2-33(a/b/c)		0.20	0.18	0.18	
O2-35(a/b/c)		0.24	0.20	0.28	
O2-37(a/b/c)		0.22	0.24	0.28	
O3-21(a/b/c)		3	0.28	0.28	
O3-23(a/b/c)	0.30		0.24	0.28	
O3-25(a/b/c)	0.28		0.28	0.30	
O3-27(a/b/c)	0.22		0.28	0.27	
O3-29(a/b/c)	0.24		0.26	0.26	
O3-31(a/b/c)	0.28		0.32	0.24	
O3-33(a/b/c)	0.32		0.28	0.26	
O3-35(a/b/c)	0.26		0.28	0.24	
O3-37(a/b/c)	0.26		0.28	0.30	

표 3.13 전류 4000A, 시간 2-3cycle에 따른 내환봉 waveness 측정값 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	Waveness 측정값 (mm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
I2-01(a/b/c)	2	0.24	0.26	0.24	-전류 4000A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
I2-03(a/b/c)		0.28	0.26	0.24	
I2-05(a/b/c)		0.33	0.24	0.28	
I2-07(a/b/c)		0.30	0.34	0.26	
I2-09(a/b/c)		0.24	0.26	0.28	
I2-11(a/b/c)		0.24	0.28	0.30	
I2-13(a/b/c)		0.30	0.28	0.28	
I2-15(a/b/c)		0.28	0.26	0.20	
I2-17(a/b/c)		0.28	0.34	0.38	
I3-01(a/b/c)		3	0.32	0.30	
I3-03(a/b/c)	0.32		0.26	0.28	
I3-05(a/b/c)	0.24		0.26	0.22	
I3-07(a/b/c)	0.24		0.26	0.26	
I3-09(a/b/c)	0.28		0.28	0.22	
I3-11(a/b/c)	0.29		0.32	0.34	
I3-13(a/b/c)	0.30		0.32	0.30	
I3-15(a/b/c)	0.28		0.32	0.38	
I3-17(a/b/c)	0.20		0.26	0.32	

표 3.14 전류 4000A, 시간 2-3cycle에 따른 외환봉 waveness 측정값 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	Waveness 측정값 (mm)			용접변수
		1st	2nd	3rd	
O2-21(a/b/c)	2	0.30	0.32	0.30	-전류 4000A -주전극 압력 4Bar -가지전극 압력 2.5Bar
O2-23(a/b/c)		0.28	0.28	0.30	
O2-25(a/b/c)		0.26	0.26	0.28	
O2-27(a/b/c)		0.30	0.38	0.36	
O2-29(a/b/c)		0.28	0.25	0.28	
O2-31(a/b/c)		0.28	0.32	0.32	
O2-33(a/b/c)		0.32	0.26	0.24	
O2-35(a/b/c)		0.26	0.26	0.30	
O2-37(a/b/c)		0.24	0.24	0.28	
O3-21(a/b/c)		3	0.34	0.30	
O3-23(a/b/c)	0.36		0.36	0.26	
O3-25(a/b/c)	0.30		0.34	0.32	
O3-27(a/b/c)	0.28		0.24	0.24	
O3-29(a/b/c)	0.28		0.34	0.30	
O3-31(a/b/c)	0.28		0.34	0.36	
O3-33(a/b/c)	0.38		0.38	0.38	
O3-35(a/b/c)	0.36		0.32	0.30	
O3-37(a/b/c)	0.28		0.24	0.22	

### 제 3 절 Full-sized 시편을 이용한 용접샘플 제작

#### 1. 주변 제어부 설계 및 작업절차서

돌기형 접합판을 이용하는 다발용접절차는 작업공정 순서에 따라 용접되는 과정을 확인하면서 수행하였고, 본 다발장치는 연료봉 1 번부터 37 번까지 순서에 따라 자동적으로 동작되도록 하였으며, 용접 도중에 실시간 접합판 용접을 확인할 수 있었고, 다음 번호로 이동작업이 가능하도록 설정되었으며, 만약 수동으로 용접한 후 조립치구에서 용접 완료된 연료다발을 분리 및 이탈하는 공정까지 포함된다. 표 3.15, 표 3.16 및 표 3.17은 각각의 작업순서에 따른 공정절차를 요약해서 나열한 것이다.

표 3.15 다발용접 자동공정 절차서

순서 번호	세부 내용
1	주전원 ON → 보조전원 ON → Touch Panel 내부전원 ON → 용접기 외부전원 ON
2	원점복귀 clip, 공압 5 bar 확인
3	X 원점 clip 후 blue color 확인, Y 원점 clip 후 blue color 확인
4	처음 clip, 상면용접 clip
5	endplate 공급 clip, 전진, 상승, 고정, 하강, 후진
6	1차 지그 공급, 고정, 지그리프 조립완료, stopper 1 인쪽 위치, A면 지그중앙 위치
7	이전 clip, 상면용접, 용접준비, 지그고정, 테이블상승, 상승, 이전
8	자동선택 클립(이상시 정지), 1봉부터 19번봉까지 자동 용접 수행, 용접후 수동선택 후 리셋
9	reset clip, 원점, 번호이동 clip
10	용접준비, 하강, 하강, 해제, 이전, stopper1 뒤쪽쪽, stopper2 인쪽, A면 지그 배출위치
11	배출, 지그고정, 지그분리상승 클리퍼 닫힘 상승 A면 지그 제거
12	회전 B면 지그 공급 하강 클리퍼 열림 지그 하강 해제 B면 지그 입구쪽 대기
13	상승 역회전 하강 이전 처음
14	하면용접-공급 B면 접합판 adapting-전진 상승 고정 하강 후진
15	stopper1 인쪽 B면 지그 중앙 위치 이전 용접준비
16	지그고정 테이블상승 상승 이전
17	자동선택 클립(이상시 정지), 19봉부터 37번봉까지 자동 용접 수행 용접후, 수동선택 후 리셋
18	리셋 → 원점 → 번호이동 → 용접준비 → 하강 → 하강 → 해제 → 이전 → 초기상태 (Jig Exchanger B가 중앙 위치) 확인 Touch Screen 전원 OFF - 용접 컨트롤러 전원은 OFF → 보조전원 OFF → 주전원 OFF

표 3.16 다발용접 시편용 자동공정 절차서

순서 번호	세부 내용
1	주전원 ON → 보조전원 ON → Touch Panel 내부전원 ON → 용접기 외부전원 ON
2	원점복귀 Clip, 공압 5 bar 확인
3	X 원점 Clip 후 Blue Color 확인, Y 원점 Clip 후 Blue Color 확인
4	처음 Clip, 상면용접 Clip
5	Endplate 공급 Clip → 전진 → 상승 → 고정 → 하강 → 후진
6	1차 지그 공급 → 고정 → 지그조립 → 조립완료, Stopper 1 안쪽위치 → 용접 시편 지그중앙위치 → 이전 Clip → 상면 용접 → 용접준비
7	지그고정 → 상승 → 이전
8	(1, 2, 3, ..., 18) 1 Push, 번호이동 * 자동선택 클립 (이상시 정지), 용접후 수동선택 후 리셋
9	헤드하강 Clip (주전극압 게이지 내렸다가 다시 올라며 조정 합, 보조전극은 항상 조정가능함)
10	용접모드1: 내환봉 19개 용접시, 용접모드 2: 외환봉 18개 용접시,
11	용접모드 1은 약 3초간 Push, 헤드상승
12	19, 21, ..., 37도 동일절차로 수행
13	용접사면지그 밖으로 이동
14	리셋 → 원점 → 번호이동 → 용접준비 → 하강 → 하강 → 해제 → 이전 → 초기상태 (Jig Exchanger B가 중앙위치) 확인 → Touch Screen 전원 OFF - 용접컨트롤러 전원은 OFF → 보조전원 OFF → 주전원 OFF

표 3.17 다발용접 공정 제어(CTH200-415)를 이용한 수동용접 절차서

설정 값	세부 내용
1	주전원 ON → 보조전원 ON → 저항용접 모니터(RWM-10)을 저항용접 제어장치 왼쪽 연결부에 접속함
2	Y0: 0 Cycle로 설정
3	Y1: 30 Cycle로 설정 (Squeeze time)
4	Y2: 0 Cycle로 설정
5	Y3: 0 Cycle로 설정
6	Y4: 0 Cycle로 설정 (통전 시간)
7	Y5: 2.0KA로 설정 (Weld current)
8	Y6: 20%로 설정
9	Y7: 0 로 설정
10	Y8: 0 로 설정
11	Y9: 2 Cycle로 설정 (통전 시간)
12	Y10: 3.0KA로 설정 (Weld current)
13	Y11: 30%로 설정
14	Y12: 3 Cycle로 설정 (유지 시간)
15	Y13: 0 Cycle로 설정 (용접 완료 지연)
16	Y14: 10 Cycle로 설정
17	Y15: 1 Time로 설정
18	Y20: 45로 설정

다발용접의 구동 제어부를 이용한 지르칼로이-4 접합판 용접공정 작업절차서를 아래와 같이 나열하였다.

(가) 초기공정 점검

- 전원을 켜고 컨트롤박스안의 전원차단기를 ON에 위치시킴. 터치 패널에 메인 화면(그림 3.19)이 들어오며, 스크린 오른쪽 옆에 전원 스위치를 눌러 전원을 공급한다.

- 장치 주변에 이물질제거, 접합판 공급치구 장치밖에 위치 배열, 조립치구 고정베이스 위치, 고정핀 해제, 상면 치구판의 위치를 확인한다.

- 초기상태를 점검 한 후 5 bar 내지 6 bar에 공압게이지에 맞춘다.

(나) 용접공정을 위한 원점복귀

**원점복귀** 버튼을 누른다. (원점복귀를 하지 아니하고 X, Y의 바탕이 붉은색이면 상면용접, 하면용접 버튼은 클릭 되지 않음)

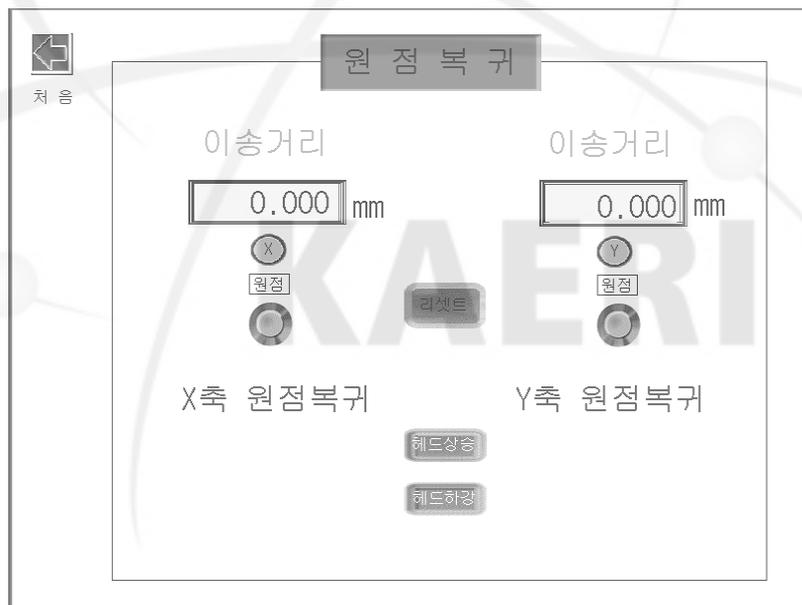


그림 3.19 원점복귀의 화면

- 그림 3.20에서 X축 원점복귀 **원점**, Y축 원점복귀 **원점** 버튼을 순차적으로 누르면 이송거리의 디지털 숫자 판이 변하면서 전극의 원점을 맞춘다. (이송거리의

디지털판이 0.000이 되었을 때, (X), (Y) 바탕이 붉은색에서 파란색으로 변한다.)

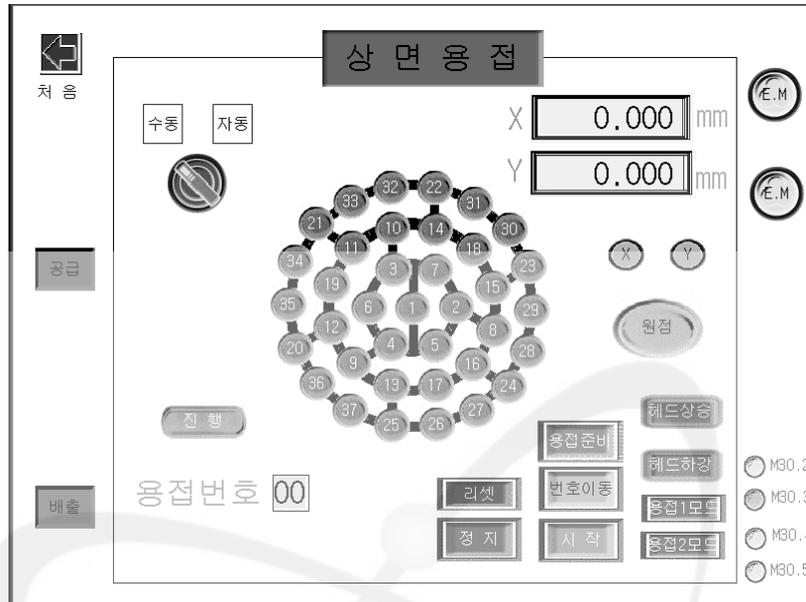


그림 3.20 1단계 상면용접의 화면

(다) 상면용접 이행

- 원점복귀화면에서  - 메인화면복귀 -  클릭 - 그림 3.21 과 같은 상면용접 화면으로 이동한다.

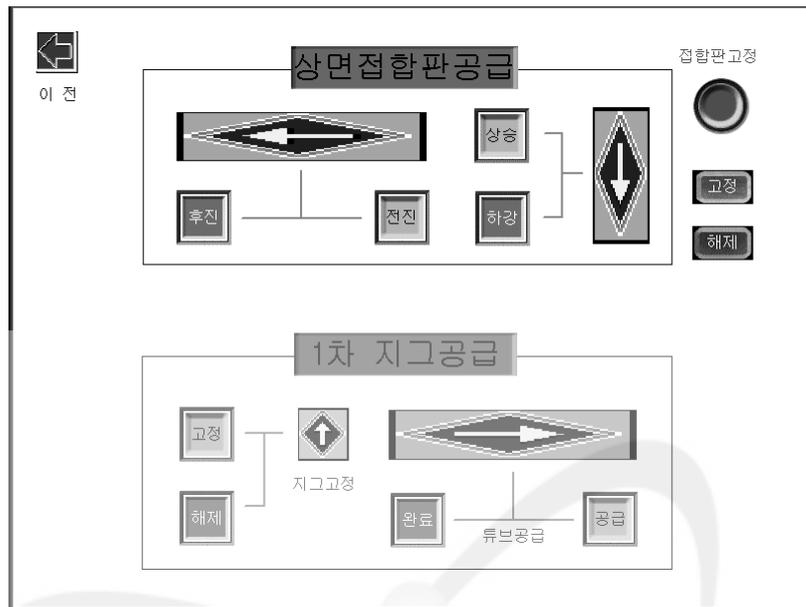


그림 3.21 1단계 상면접합판의 공급화면

- 그림 3.22의 상면 접합판 공급인 경우  클릭한다.
- 상면 접합판을 접합판 공급 안쪽위치에 올려놓는다.
- 1차 지그공급의  (지그고정)- (튜브공급) 클릭한다.
-  (튜브공급)- (지그고정) 클릭한다.
- 상면 접합판 공급인 경우 그림 3.22의 상면 접합판을 지그에 올려놓는다.
- 상면 접합판의 “전진”-“상승”-“고정”-“해제”-“하강”-“후진” 클릭한다. 이때 앞 공정이 끝나기 전에 다음 버튼을 클릭하지 않도록 주의한다.
- 용접준비 경우,  클릭-상면접합판 공급화면의  클릭한다.

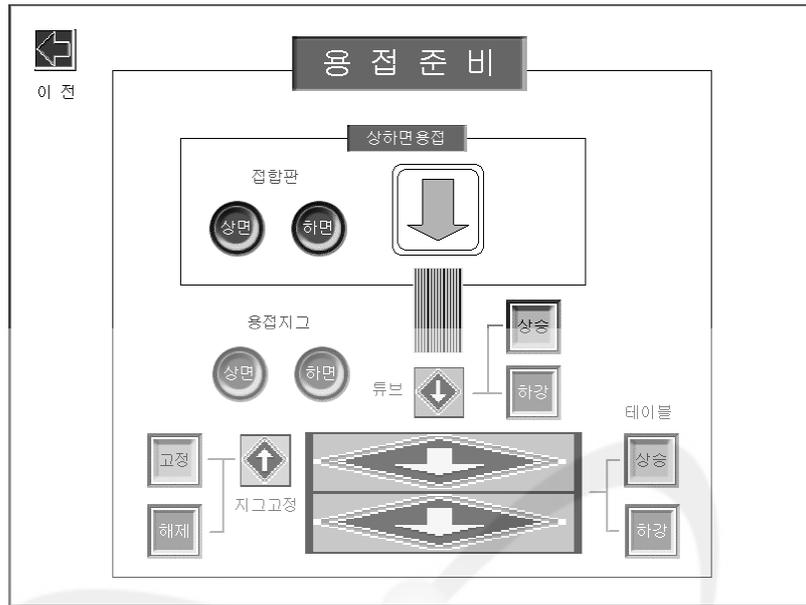


그림 3.22 1단계 용접준비의 화면

- 시스템 중앙에 있는 레버를 앞으로 밀어 stopper 위치에 놓고 조립된 조립 치구를 시스템 중앙베이스로 밀어 넣는다.
- 그림 3.23과 같은 용접준비의 화면에서 “고정”(지그고정)-“상승”(테이블)-“상승”(류브)버튼 순으로 클릭하여 용접준비를 마친다.
-  클릭 하여 상면용접의 화면으로 이동한다.

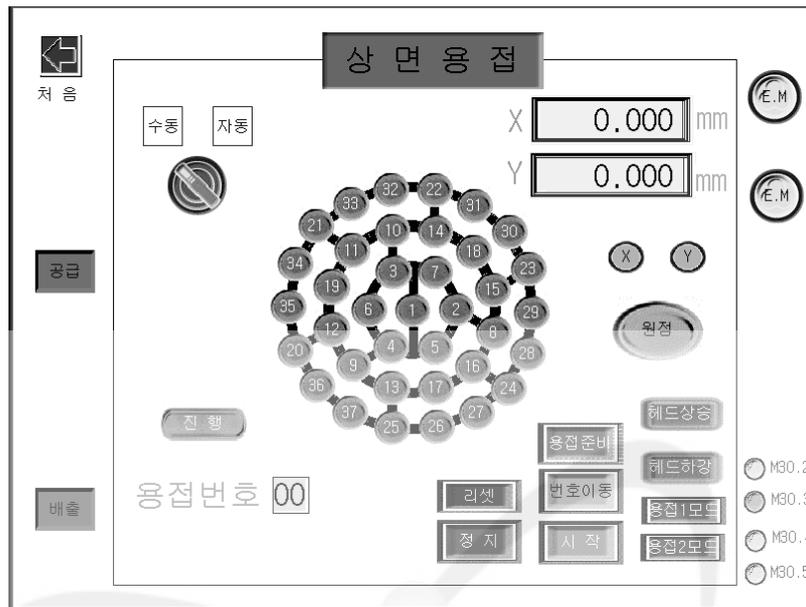


그림 3.23 2단계 상면용접의 화면

- 상면 접합판 용접인 경우, **원점** 버튼 녹색, **X** **Y** 바탕 청색 표시 확인한다.
- 그림 3.24에서 접합판 상면의 1번을 클릭, 용접번호 01로 변하는가 확인 후 번호이동 클릭 한다.
- X, Y 좌표와 시스템의 X, Y 스테이지가 움직이는 걸 확인한다.
- X-Y 좌표와 스테이지가 멈추는 것을 확인한다.
- “헤드하강”버튼클릭, jigging plate의 1번에 전극이 맞게 삽입된 것을 확인한다.
- “시작” 버튼 클릭 하여 용접 실시한다.
- “헤드상승”버튼 클릭하여 01번 연료봉을 접합판에 용접 이행한다.
- 2번 이후의 용접은 01번과 동일하며 37번까지 순차적으로 용접 이행한다.
- 37봉 용접을 마친 것을 확인한 후 **원점** 버튼클릭-번호이동-**원점** 녹색 표시 확인한 후 “용접준비”버튼 클릭한다.

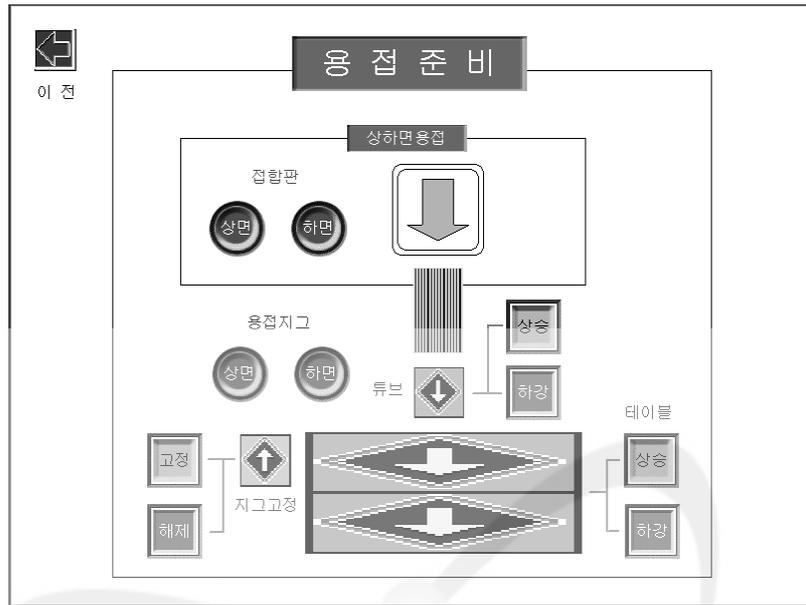


그림 3.24 2단계 용접준비의 화면

- 그림 3.25에서 “하강”(튜브)-“하강”(테이블)-“해제”(지그고정)를 순차적으로 클릭한 후  버튼 클릭-상면용접의 화면으로 이동한다.
- 다발회전 시 안전한 회전반경 확보를 위하여 배출버튼 클릭하여 jigging plate가 상면 용접 위치로 이동하도록 한다.

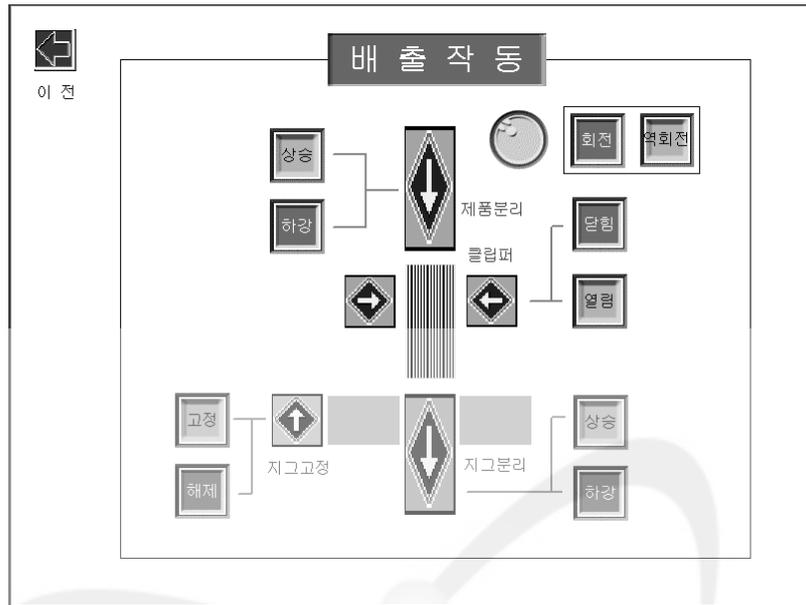


그림 3.25 1단계 배출작동의 화면

- 시스템 중앙에 있는 레버를 당겨 해제시키고 회전장치 앞에 있는 스톱퍼 레버를 당긴 후 연료 지그를 회전장치 앞으로 이동한다.

- 그림 3.26에서 배출 작동화면의 고정(지그고정)-상승(지그분리) 버튼 클릭한다.

(라) 하면용접 이행

- 하면지그 교체한 후, 조립치구를 상승하여 고정되어 있는 다발 밑에 위치시킨다.

- 고정버튼을 클릭하여 지그를 고정하면서 하면지그를 고정한다. 이때 고정핀이 하면 지그관의 핀홀에 맞는지 확인한다.

- 회전버튼 클릭 하여 상승하여 고정되어 있는 다발을 회전시킨다.

- 180° 회전 후 하강버튼을 클릭하여 상면용접된 다발을 하면지그에 삽입시킨다.

- 하면 접합판 공급 후, 교체된 하면지그를 시스템 중앙에 위치한다.

- 배출 작동화면의  버튼클릭-상면용접화면의  버튼클릭-메인화면으로 이동-“하면용접” 버튼 클릭하여, 그림 3.27과 같은 하면용접의 화면으로 이동한다.

- 그림 3.27의 “공급”버튼 클릭하여 하면 접합판의 공급화면으로 이동한다.

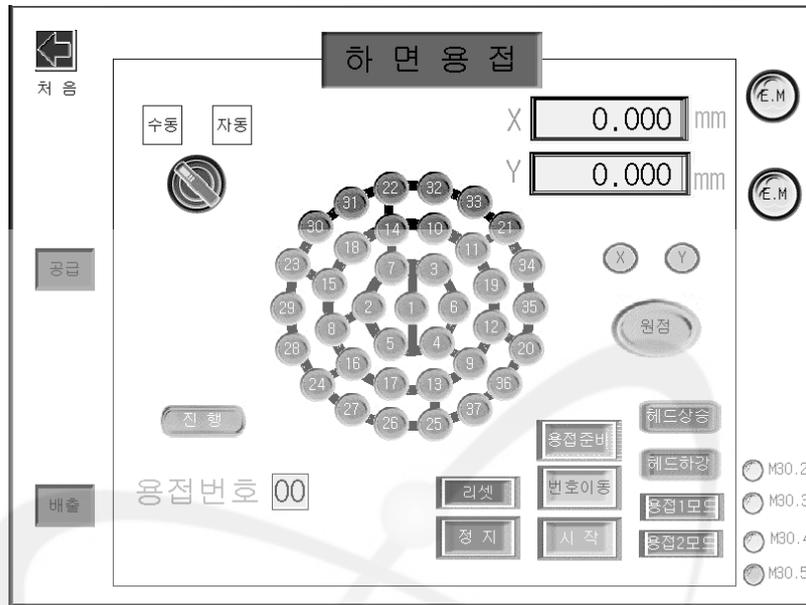


그림 3.26 1단계 하면용접의 화면

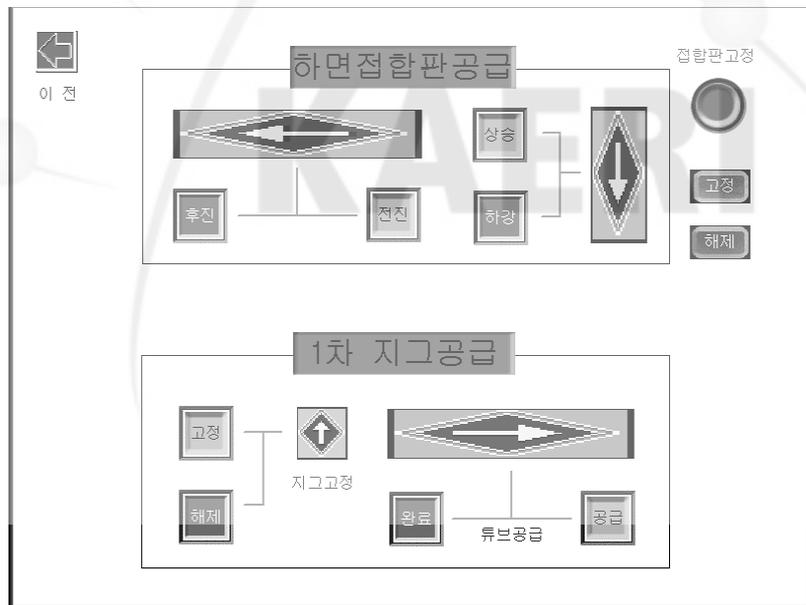


그림 3.27 1단계 하면접합판의 공급화면

- 그림 3.27과 같은 하면 접합판을 접합판 치구에 올려놓는다.
- 그림 3.28에서 “전진”-“상승”-“고정”클릭하여 하면 접합판을 공급한다.
- “해제”-“하강”-“후진”클릭하며  버튼 클릭한다.
- 용접준비인 경우, “용접준비”버튼 클릭한다.

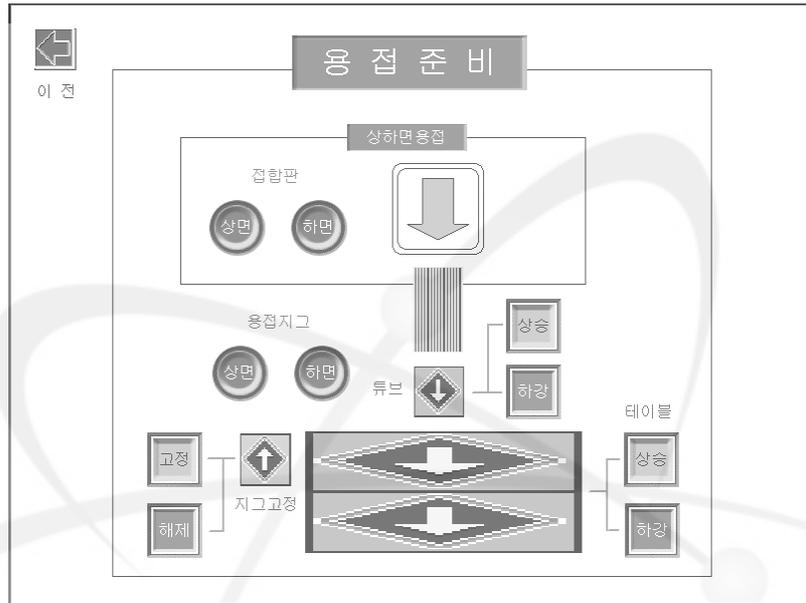


그림 3.28 2단계 용접준비의 화면

- 시스템 중앙에 있는 레버를 앞으로 밀어 stopper위치에 놓고 조립된 하면서 치구를 시스템 중앙에 위치시킨다.
- 그림 3.29에서 용접준비 화면의 “고정”(지그고정)-“상승”(테이블)-“상승”(튜브)버튼을 순차적으로 클릭하여 용접준비를 마침을 확인하면서  클릭하여 하면용접의 화면으로 이동한다.

- 하면용접 시  버튼 녹색,   바탕 청색표시를 확인한다.
- 접합판 상면모양의 1번을 클릭, 용접번호 01로 변하는가 확인 후 “번호이동” 클릭한다.
- X-Y 좌표와 장치의 X, Y 스테이지가 움직이는 걸 확인한다.
- X-Y 좌표와 스테이지가 멈추는 것을 확인하고 “헤드하강” 버튼 클릭하여

jigging plate의 01번에 전극이 맞게 삽입된 것을 확인한다.

- 시작 버튼 클릭하여 용접을 이행한다.
- “헤드상승”버튼 클릭하여 01번 연료봉을 접합관에 용접을 이행한다.
- 02번 이후의 용접은 01번과 동일하며 37번까지 용접을 이행한다.
- 파워 전원을 내리는 것은 방지하며, 밸브가 작동하지 않으므로 기계적인 오류가 발생 우려가 있기 때문에 비상시에는 컨트롤박스의 비상버튼을 눌러 정지시킨다.

- 37번 용접을 마친 것을 확인한 후  버튼클릭-번호이동-  녹색 표시된 것을 확인한 후 “용접준비”버튼 클릭한다.

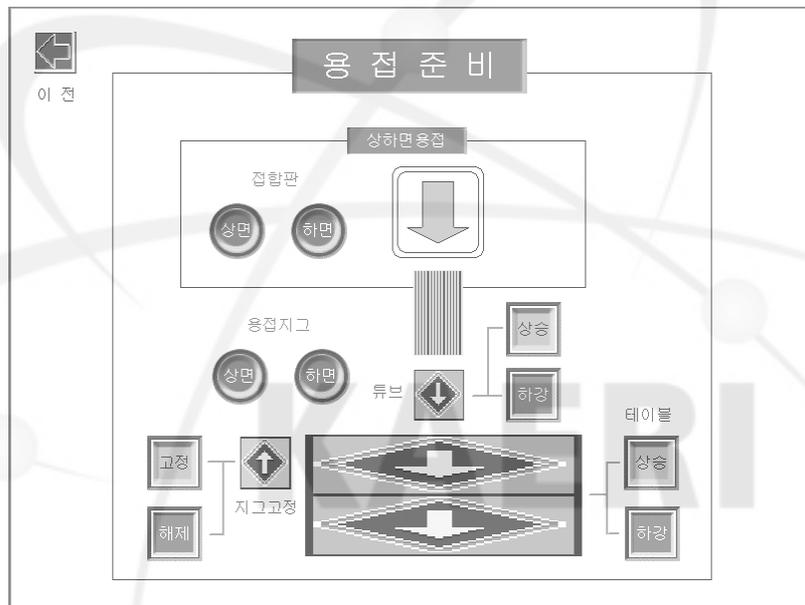


그림 3.29 마지막 용접준비의 화면

- 그림 3.30에서 “하강”(튜브)-“하강”(테이블)-“해제”(지그고정)를 순차적으로 클릭한 후  버튼클릭-상면용접 화면으로 이동한다.
- “배출”버튼 클릭하여 jigging plate가 하면용접 위치로 이동한다.

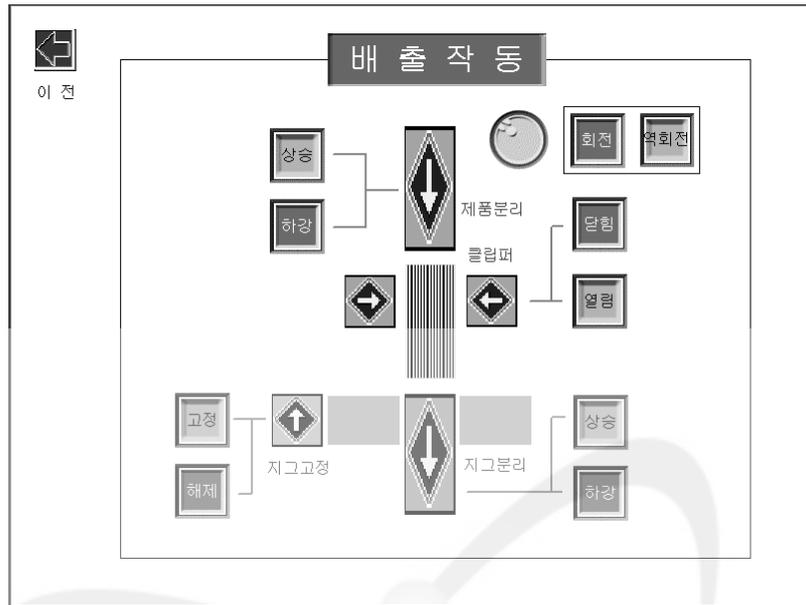


그림 3.30. 2단계 배출작동의 화면

- 시스템 중앙에 있는 레버를 당겨 해제시키고 회전장치 앞의 스톱퍼 레버를 당긴 후 하면치구를 회전위치 앞으로 이동시킨다.
- 그림 3.30에서 배출 작동화면의 “고정”(지그고정)-“상승”(지그분리)버튼 클릭한다.
- “달힘” 버튼을 클릭하고 “상승”버튼을 클릭하여 하면용접이 완성된 다발을 하면치구로부터 분리하여 보관함에 별도로 보관한다.

## 2. 연료다발 용접샘플 제작 및 검사

돌기형 접합판을 이용한 중수로 다발용접의 활용 가능성을 제시하기 위하여 최적 용접조건, 제어시스템 및 full sized 용접치구를 사용하여 기존 다발제품과 동일한 용접샘플의 제작을 수행하였다. 그림 3.31는 돌기형 접합판을 이용하여 제작된 상단 및 하단의 용접샘플을 보여주고 있으며, 본 샘플제작에 대한 주요 수행내용을 요약하면 다음과 같다.

가) 돌기형 접합판 용접을 위한 모의시편과 헤드부를 설계하고 제작하였고, full sized로 용접된 샘플을 토크 시험하여 접합강도의 우수성을 확인하였으며 그 결과를 용접전류, 주전극 압력, 가지전극 압력 및 시간에 반영하여 적합조건을 선정하였다.

나) 돌기형 접합판을 이용하는 연료다발의 적합 용접조건은 전류 3800A, 주전극 압력 4 bar, 가지전극 압력 2.5 bar 및 시간 3 cycles 이었으며, 용접샘플의 봉단마개와 접합판 간의 waveness 측정시험을 수행하여 변형 정도가 작았음을 확인하였다. 아울러 37봉 full sized로 구성된 상·하면 접합판 용접을 수행하여 대체로 양호한 용접너겟(weld nugget)을 가진 연료다발 샘플로 나타났다.

다) 돌기형 접합판을 이용한 37봉 연료다발의 용접가능성이 확인되었고, 향후 이러한 용접의 신기술을 바탕으로 국내 연료공장과 긴밀히 협조하여 제조공정에 활용하기 위한 시제품 제작 및 성능시험을 수행해 나갈 예정이며, 동시에 국내 정밀가공업체에서 저항용접기술이 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 기술개발이 필요할 것으로 판단된다.



(상단 접합판 용접샘플)

(하단 접합판 용접샘플)

그림 3.31 돌기형 접합판을 이용한 용접샘플

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 중수로 연료다발 제조의 효율적인 용접공정 개선과 품질 향상을 위한 기술적 검증이 시도되었다. 또한 돌기형 접합관의 용접기술을 이용한 효율적인 공정을 도출하고자 하였고, 핵연료 다발 제조에서 핵심공정인 봉단마개와 접합관을 이용한 저항용접 및 조립공정과 용접변수에 대한 최적화를 도모하고 실용화를 위한 전용용접기의 설계기술 및 기계적 특성 분석에 대한 기술검토가 이루어졌다. 이에 따라 중수로 연료다발 제조의 용접 최적화 및 전용 용접헤드의 설계가 수행되었고, 향후 돌기형 접합관을 이용한 저항용접 공정을 위한 기틀이 마련되었다. 따라서 국내에서 유일한 봉단마개와 접합관 간의 용접공정 및 자동화 공정의 상품화를 도모하기 위한 기반기술이 마련되었으며, 기존의 제조방법보다 봉단마개와 접합관 간의 용접강도 및 변형 감소로 인한 품질 향상을 달성시킬 수 있었다. 본 연구에서는 중수로 연료다발을 위한 기본적인 용접실험 및 성능검사의 결과를 아래와 같이 제시하고자 한다.

첫째로 현재까지 보고된 국내외의 핵연료 다발용접에 대한 용접관련 논문 및 기술문헌을 통하여 종합적으로 검토 정리하였다. 이를 통하여 핵연료 다발의 봉단마개와 접합관 간에 대한 용접방법, 지르칼로이-4 용접부에 대한 기계적 시험 및 야금학적 내용을 조사하였다. 그리고 국내의 핵연료 다발을 위한 저항용접 공정 및 품질의 문제점을 검토하여 이들 작업조건에 대한 여러 가지 용접변수에 미치는 특성을 조사하였다.

둘째로 중수로 핵연료 다발을 위한 신기술의 돌기형 접합관 저항 용접기술이 개발되었다. 이러한 공정기술을 바탕으로 하여 돌기형 형상시편의 제작용 치구, W-Cu 전극을 이용하는 용접헤드, Be-Cu 보조전극부 등의 주변기기가 자체적으로 개발되었다. 돌기형 접합관을 이용한 지르칼로이-4 봉단마개와 접합관 간의 적합용접을 얻기 위해서는 용접전류 3800 A, 주전극 압력 4.0 BAR 그리고 용접시간 3 cycle 이 되어야 하며, 이때 보조전극 압력 2.5 BAR를 넘지 말아야 한다.

셋째로 돌기형 접합관을 이용한 저항용접의 강도시험을 수행하였으며, 이에 따른 용접변수 별 토크강도의 특성을 분석하였으며, 또한 돌기형 접합관의 용접강도 변동성을 조사하기 위하여 기존의 평면형 접합관을 이용한 토크강도와 비교하였다. 이때 돌기형 접합관의 강도시험 결과는 외환봉 및 내환봉을 이용한 허용 한계치(상단 외환봉 : 9.6 Nm / 내환봉 : 6.9 Nm, 하단 외환봉 : 8.5 Nm /내

환봉 : 6.2 Nm)보다 대체로 높게 나타났고, 토크강도의 변동성에서도 기존의 평면형 접합판을 이용한 토크강도에 비해 낮은 폭으로 균일하게 유지함을 알 수 있었으며, 이것은 기계적 강도 측면에서 볼 때 매우 우수한 것으로 판단된다. 지르칼로이-4 접합판 용접부의 야금학적 관찰에 의하면 용접부의 미세조직에서는 바스켓 모양의 martensitic  $\alpha'$ 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났으며, 용접금속의 중앙부에서는 전형적인 공정상 응고조직인 수지상정(dendrite)이 접합부의 전체영역에서 생성되었다. 아울러 돌기형 접합판을 이용한 지르칼로이-4 용접은 기존의 평면형 접합판을 이용한 용접금속만큼의 금속학적 성질과 좋은 용접특성으로 나타내고 있었다.

결론적으로 본 연구에서는 중수로 연료다발의 봉단마개와 접합판 간의 용접공정과 이에 따른 용접부의 토크강도 및 변형 특성 조사를 통하여 다발용접의 최적조건을 확립하고자 하였으며, 실제로 연료다발의 시편에 돌기형 접합판을 공급하여 전용용접기의 작업조건을 위한 기본 방향을 제시하였다. 또한 이러한 실험 결과는 향후 국내의 중수로 연료다발 제조에서 요구되는 봉단마개와 접합판 간의 다발용접에 직접 사용될 수 있는 공정기술의 기본 자료로 활용될 예정이다. 아울러 2 차년도 연구에서는 원자력연료(주)와 긴밀히 협조하여 생산 공정에 활용하기 위한 돌기형 접합판 용접의 샘플제작 및 성능시험을 수행해 나갈 예정이며, 이를 통하여 다발용접의 실용화를 실현하고, 동시에 국내 정밀가공업체에서 제반 용접공정에 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 기술개발을 추진해 나갈 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Trunt P.T., CANDU Fuel Performance : Power Reactor Experience,  
AECL-MISE-250-3 rev.1 (1983)
- [2] 이정원 외 : 중수로 핵연료 봉단마개의 저항업셋 용접을 위한 용접변수,  
대한용접학회지, 제7권, 제2호, pp. 61-68. (1989)
- [3] Vagi, J. J, Koppenhofer R. L, and Martine P. C. : Methods for End Capping  
Zirconium Clad Reactor Fuel Pins, Welding J., Feb. pp. 78-84. (1959)
- [4] Kanne W. R. : Solid-state Resistance Welding of Cylinders and Spheres,  
Weling J., May, pp. 33-38. (1986)
- [5] 박철주 외 : 저항업셋 용접법을 이용한 Zr-4 End Cap 용접부의 특성에 관한  
연구, 대한용접학회지 제10권, 제4호, pp. 241-247. (1992)
- [6] GE Canada Nuclear Products : Bundle Assembly Welder Manual,  
KNFC Equipment Data Book, April, (1995)



KAERI

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식							
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/RR-3051/2009							
제목 / 부제		중수로연료용 다발용접 신기술 개발					
연구책임자 및 부서명		김수성 (재순환핵연료기술개발부)					
연구자 및 부서명		이도연 (재순환핵연료기술개발부) 구대서 (핵주기공정기술개발부)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010. 1		
페이지	70 p.	도표	있음( O ), 없음( )	크기	26 Cm.		
참고사항							
공개여부	공개( O ), 비공개( )		보고서종류	연구보고서			
비밀여부	대외비 ( ), — 급비밀						
연구위탁기관				계약 번호			
초록 (15-20줄 내외)		<p>본 연구는 중수로 연료다발 제조의 신기술을 위한 용접공정 개발 및 용접부의 성능 향상이 필요하며, 원자로 내에서 핵연료 연소 시 다발 용접부의 안전성과 핵연료 성능 향상을 고려할 때 반드시 개발되어야 할 중요한 사항이다. 중수로연료용 다발용접은 외환봉 및 내환봉의 집합 형태로 피복관의 봉단마개와 접합판을 연결하고 맞나는 부분을 점용접으로 이루어지는 공정이다. 또한 중수로 연료다발이 원자로 내에서 가동되는 동안 핵분열 물질의 누출 가능성이 가장 높은 부위가 봉단마개와 접합판 연결 부분이기 때문에 건전한 용접은 핵연료의 안전성과 수명에 직결된다고 할 수 있다. 이와 같이 핵연료 조립 가공의 중요성으로 인하여 원자력 분야의 핵연료 가공관련 새로운 용접기술에 대하여 많은 연구가 수행되고 있으며, 앞으로도 이 분야의 지속적인 연구는 매우 필요하다 하겠다.</p> <p>따라서 본 연구는 중수로 다발용접의 신기술을 이용한 용접공정에 필요한 기본 자료를 제공하며, 다발용접 시 돌기형 접합판을 이용한 적합 용접변수를 선정하여 실제 모델인 full-sized 용접샘플을 제작하고 이에 따른 토크강도 및 열 변형의 특성을 조사 분석하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		중수로, 연료다발, 저항용접, 접합판, 봉단마개, 지르칼로이-4					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No	
KAERI/RR-3051/2009					
Title / Subtitle		Development of a New Bundle Welding Technology for CANDU Fuels			
Project Manager and Department		Soo-Sung Kim (Recycled Nuclear Fuel Development Dep't)			
Researcher and Department		D.Y. Lee (Recycled Nuclear Fuel Development Dep't) D.S. Goo(Fuel Cycle Process Development Dep't)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010. 1
Page	70 p.	Ill. & Tab.	Yes( O ), No ( )	Size	26 Cm.
Note					
Open	Open( O ), Closed( )		Report Type	Research Report	
Classified	Restricted( ), ___Class Document				
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)		<p>The new technology of welding process for fuel bundle of CANDU nuclear fuels 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 leakage of the fussion products is mostly apt to occur at the weldments of fuel bundles, and it is connected directly with the safty and life prediction of the nuclear reactor in operation.</p> <p>The fuel bundles of CANDU nuclear fuels are welded by the electrical resistance method, connecting the endplates and endcaps with fuel rods. Therefore, the purpose of this study is to select the proper configuration of endplate and to investigate the characteristics of the welded specimens using the projection endplates and make some full-sized weld samples for the endplate welding of CANDU nuclear fuels. This study will be also provide the fundamental data for the new design and fabrications of CANDU nuclear fuel bundles.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		CANDU, Fuel Bundle, Resistance Welding, Endplate, Endcap, Zircaloy-4			