

Zr-4 봉단마개와 접합판을 이용한  
저항용접 성능향상 기술지원

*KAERI*

2008. 10. 31.

한국원자력연구원

# 제 출 문

산 업 자 원 부 장 관 귀 하

본 보고서를 “Zr-4 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접 성능향상 기술지원”(지원기간 : 2007. 11. 1~2008. 10.31)과제의 기술지원 성과보고서로 제출합니다.

2008. 10. 31

지원기관 : 한국원자력연구원

(대표자)

양 명 승 (인)

지원기업 : 대덕시스템

(대표자)

조 대 식 (인)

지원책임자 : 김 수 성

## 기술지원성과 요약서

과제고유번호		연구기간	2007. 11. 1. ~ 2008. 10. 31.		
연구사업명	부품소재전문기업기술지원사업				
지원과제명	Zr-4 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접 성능향상 기술지원				
지원책임자	김수성	지원연구원수	총 : 1 명 내부 : 1 명 외부 :    명	총사업비	정부: 50,000 천원 기업: 50,000 천원 계: 100,000 천원
지원기관명	한국원자력연구원		소속부서명	재순환핵연료기술개발부	
참여기업	기업명 : 대덕시스템		기술책임자 : 고문섭		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	120
<p>본 기술지원은 중수로 핵연료 다발 제조의 효율적인 공정기술 개선과 품질관리 향상을 위한 기술적 검증이 시도되었다. 또한 핵연료 다발 제조를 위한 돌출형 접합판의 용접기술에 의한 효율적인 공정을 도출하고자 하였고, 중수로용 다발 제조에서 핵심공정인 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접 및 조립공정과 용접변수에 대한 최적화를 도모하고 실용화를 위한 전용용접기의 설계기술에 대한 기술자문, 현장 교육 그리고 현장 활용에서의 부수적인 공정에 대한 기술검토가 이루어졌다. 이에 의하여 중수로 핵연료 다발 제조의 공정 개선 및 전용 용접장치의 설계, 성능시험이 수행되었고, 또한 실시간 작업에 대처할 수 있고 운전 및 보수 유지가 쉬운 공정 개발이 구축되었으며, 향후 돌출형 접합판을 이용한 저항용접 공정을 위한 기틀이 마련되었다. 따라서 국내에서 유일한 봉단마개와 돌출형 접합판 간의 용접기술 및 자동화 공정의 상품화를 도모하기 위한 기반기술이 마련되었으며, 기존의 용접 방법보다 봉단마개와 접합판 간의 용접강도 및 변형 감소로 인한 품질 향상을 달성시킬 수 있었다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	저항용접, 접합판, 봉단마개, 다발, 핵연료			
	영어	RW(Resistance Welding), Endplate, Endcap, Bundle, Nuclear Fuel			

# 기술지원성과 요약문

## 1. 사업목표

1. Zr-4 접합판을 이용한 저항용접 최적화 확립
  - 봉단마개와 접합판 용접의 돌출형(projection type) 이음설계 선정
  - 돌출형 접합판을 이용한 용접변수 선정
2. Zr-4 접합판 용접부의 접합강도 균일화 및 용접결함 방지
  - 내환봉 및 외환봉별 토크강도 균일화
  - 용접변수에 따른 웨이브(wave) 발생 최소화 및 공정조건 도출
3. 핵연료 다발 전용용접기 설계 및 기술자문
  - 다발 제조용 저항용접헤드 설계
  - 다발 제조용 가지전극부 및 접합판 삽입부 설계
  - 전용용접기를 이용한 접합판 용접성능 평가

## 2. 기술지원내용 및 범위

1. Zr-4 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접기술 최적화
  - 봉단마개와 접합판의 기하학적 형상 설계 및 기술 검토
  - 봉단마개와 접합판의 용접이음 구조적 모델링 분석 및 평가
  - 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접실험 및 최적변수 도출
2. Zr-4 접합판 용접부의 기계적 강도 및 열변형 분석
  - 다발제품의 토크강도 시험 및 지그 설계, 제작
  - 용접변수에 따른 열변형 발생 최소화 방법 분석
  - 접합판 용접시 치수결함 검사 및 품질기준 마련
3. 핵연료 다발 전용용접기 설계 및 제작성 기술 검토
  - Full-size 다발용(37봉) 저항용접헤드 설계 및 모델링 분석
  - Full-size 다발용(37봉) 가지전극 및 접합판 삽입부 설계 및 모델링 분석
  - 전용 용접기를 이용한 접합판 용접샘플 성능 평가

## 3. 지원실적

지원항목	지원내용		비고
	기술지원前	기술지원後	
• Zr-4 봉단마개와 접합판 저항용접 기술 최적화	평면형 (plate type) 접합판 (W=0, H=0)	돌출형 (projection type) 접합판 (W=2.0, H=0.23)	불량감소/ 변형예방
• Zr-4 접합판 용접부 토크강도 및 열변형 분석	토크강도 (접합강도) 변동성(fluctuation) 증가	토크강도 (접합강도) 변동성(fluctuation) 감소	허용기준치 이상 포함
• 다발 전용용접기 설계 및 제작성 기술자문	GE Canada 수입된 Bundle 저항용접기	국내 독자 설계된 전용 저항용접기	설계자료 데이터구축

#### 4. 기술지원 성과 및 효과

##### 1) 해당기술 적용제품

- 적용제품명 : 월성원전용 PHWR Bundle 37봉 전 품목
- 모델명 : W1, W2, W3, W4, W5, W6

##### 2) 품질 및 가격

구분	경쟁 제품	해당기술 적용제품		비고
		지원전	지원후	
경쟁제품 대비 품질	W1, W2, W3, W4, W5, W6	Plate type Endplate	Projection type Endplate	(불량률 1% ↓ 예상)
경쟁제품 대비 가격	W1, W2, W3, W4, W5, W6	50억원/년	30억원/년	용접경비만 산출시 (보수용접 비용포함)

※ 객관화 된 DATA를 근거로 작성

##### 3) 원가절감 효과

구분	절감 금액	비고
원부자재 절감	1,000 백만원/년( 5 %)	10억/200억(공급가격)
인건비 절감	2,000 백만원/년( 10 %)	20억/200억(공급가격)
계	3,000 백만원/년( 15 %)	30억/200억(공급가격)

※ 공정개선 및 품질향상 등으로 인한 절감효과 반영

##### 4) 적용제품 시장전망(매출성과)

구분	당해연도 매출	차년도 예상매출	전년대비 증가비율	비고
내수	20,000 백만원/년	백만원/년	%	(자료 미공개)
수출	5,000 천달러/년	천달러/년	%	(자료 미공개)
계	25,000 백만원/년	백만원/년	%	

참고) 1. 적용제품 주요수출국 : 중수로 원자로 보유국 (인도, 루마니아)

2. 작성당시 환율기준 :

### 5) 수입대체효과

모델명	당해연도 수입액	차년도수입액	수입대체금액	비고
	천달러/년	천달러/년	천달러/년	
	천달러/년	천달러/년	천달러/년	
계	천달러/년	천달러/년	천달러/년	

### 6) 해당기술의 기술력 향상 효과

본 기술지원에서 응용되는 저항용접기술은 이미 1980년 후반에 먼저 캐나다에서 사용하여 현재까지 활발히 적용되고 있다. 최근 들어 용접기술의 연구개발을 통하여 최신 용접방법의 실현이 가능하게 되었고, 또한 일반 산업계에서는 돌기형 (projection type)을 이용한 저항용접이 자동차 부품이나 고부가가치의 정밀부품 생산에 이미 이용되고 있는 실정이나, 기존의 원자력분야에서는 평면형(plate type) 용접이음 구조로 설계된 저항용접이 계속 사용되고 있다. 이때 국내에서는 제작될 전용 용접기에 새로운 용접공법을 적용할 수 있는 시점에 와 있으며, 향후 신형 중수로 및 고속로 핵연료 집합체 제조에도 필수적인 핵심요소 기술로서 추진할 수 있다. 선진 여러 나라에서는 아직 새로운 용접공법의 연구가 활발하지 못하고 있는 상태이나 조만간에 곧 상품화를 위한 기술개발이 시작될 것으로 판단됨.

### 7) 기술적 파급효과

중수로 핵연료 다발의 핵심 구조부품으로 구성된 봉단마개와 돌출형 접합판 용접은 개선된 저항용접 공정을 확립하고 최적의 용접조건을 도출하게 된다. 확보된 용접기술은 국내의 월성형 원전연료의 다발제품에서 접합강도가 우수하고 용접 품질 면에서 건전한 용접을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 또한 향후 차세대 고속로 원자로의 핵연료 구조적 설계요건에 만족하는 고품질 및 고강도의 집합체 제품과 중수로용 신형 연료에 사용되는 집합체(43봉)의 시제품에도 바로 적용될 수 있음.

## 5. 적용기술 인증, 지적재산권 획득여부

### 1) 규격, 인증획득

인증명	품목	인증번호	승인기관	인증일자

## 2) 지적재산권

종 류	명칭	번호	발명자 (고안자)	권리자	실시권자	비고 (등록, 출원)
실용신안	듀픽 핵연료 다발 용접구조	2008- 0107088	김수성	한국원자력 연구원	한국원자력 연구원	(출원)

## 6. 세부지원실적

항 목	지원 건수	지 원 성 과
기술정보제공	건	
시제품제작	건	
양산화개발	건	
공정개선	건	
품질향상	건	
시험분석	건	
수출 및 해외바이어발굴	건	
교육훈련	건	
기술마케팅/경영자문	건	
정책자금알선	건	
논문게재 및 학술발표	건	
사업관리시스템	36 건	
지원실적업로드 회수	36 건	
참여기업 방문회수	36 건	
기 타	건	

## 7. 종합의견

본 기술지원에서는 중수로 핵연료 다발의 봉단마개와 접합판 간의저항용접기술과 이에 따른 용접부의 강도 및 변형 특성 조사를 통하여 돌출형 접합판 저항용접의 최적조건을 확립하고자 하였으며, 실제로 핵연료 다발의 시편에 돌출형 접합판을 공급하여 전용용접기의 작업조건을 위한 기본 방향을 제시하였다. 또한 이러한 실험 결과는 향후 국내의 중수로 핵연료 다발 제조에서 요구되는 봉단마개와 접합판 간의 다발용접에 직접 사용될 수 있는 공정기술의 기본 자료로 활용될 예정이다. 아울러 2009년도에는 국내 원전연료업체와 긴밀히 협조하여 생산 공정에 활용하기 위한 돌출형 접합판 용접의 샘플제작 및 성능시험을 수행해 나갈 예정이며, 이를 통하여 저항용접의 실용화를 실현하고, 동시에 국내 정밀가공업체에서 제반 용접 기술이 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 기술개발을 추진할 예정이다.

연구과제(세부과제) 성과

1. 과학기술 연구개발 성과

논문게재 성과

논문게재 세부사항								
(9) 게재 년도	(10) 논문명	(11) 저자			(12) 학술지명	(13) Vol. (No.)	(14) 국내외 구분	(15) SCI 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자				

2. 사업화 성과

특허 성과

출원된 특허의 경우

세부사항				
(9) 출원년도	(10) 특허명	(11) 출원인	(12) 출원국	(13) 출원번호
2008	듀피 핵연료 다발 용접구조	한국원자력 연구원	한국	2008-0107088

등록된 특허의 경우

특허 세부사항				
(9) 등록년도	(10) 특허명	(11) 등록인	(12) 등록국	(13) 등록번호



사업화 현황

사업화 세부사항								
(9)사업 화명	(10) 사업화 내용	(11) 사업화 업체 개요				(12) 기 매출액 (백만원)	(13) 당해연도 매출액 (백만원)	(14) 매출액 합계 (백만원)
		업체명	대표자	종업원수	사업화 형태			

고용창출 효과

고용창출 세부사항		
(9) 창업 (명)	(10) 사업체 확장 (명)	(11) 합계 (명)

□ 세부지원실적 증빙 내용

1. 참여기업 현장방문 : 36 건

NO.	일자	구체적 내용	증빙유무
1	2007. 11. 19	사업계획 목표 및 기술지원내용 설명	유
2	2007. 11. 27	접합관 기하학적 형상에 대한 시편준비 계획 수립 및 전용용접기 헤드부 설계검토	유
3	2007. 11. 30	돌기부 시편 설계관련 재검토 및 기술토의	유
4	2007. 12. 04	Endcap+Endplate 용접설계의 유의점 검토	유
5	2007. 12. 12	다발용접기 특성에 대해서 기술적 설명	유
6	2007. 12. 18	전용 다발용접기의 설계 및 기술적 토의	유
7	2008. 01. 08	기존 다발용접기 설계의 유의점 기술 검토	유
8	2008. 01. 18	다발용접기의 프레임 및 각 부품 기술검토	유
9	2008. 01. 25	전극 이송기기 부품에 대한 기술적 토의	유
10	2008. 02. 05	다발용접기의 용접위치 결정치구 기술검토	유
11	2008. 2. 15	다발용접기 이용한 집합체 조립용접 설명	유
12	2008. 2. 26	양산 중인 조립용접기에 대한 기술적 현황	유
13	2008. 03. 04	다발용접기의 장비 공구에 관한 기술 검토	유
14	2008. 03. 14	다발용접기 이용한 전극부품의 기술 검토	유
15	2008. 03. 21	다발용접기 이용한 용접실험에 대한 설명	유
16	2008. 04. 01	Endcap과 endplate를 이용한 용접실험에 대한 기술적 설명	유
17	2008. 04. 15	봉단 접합관 용접의 상세기술 내용 검토	유
18	2008. 04. 23	봉단마개와 접합관의 용접 단면사진 관찰	유
19	2008. 05. 14	봉단마개와 접합관을 이용한 용접성 설명	유
20	2008. 05. 20	다발용접기 이용한 접합관용접 모의실험	유
21	2008. 05. 26	다발용접기를 이용한 모의용접시편의 토크 강도에 대한 분석	유
22	2008. 06. 02	연료봉간의 접합강도 변동(fluctuation)설명	유
23	2008. 06. 13	다발용접기 이용한 용접치구의 개량 검토	유
24	2008. 06. 24	다발용접기 이용한 기존치구, 다발조립검토	유
25	2008. 07. 04	봉단접합관 용접강도 시험에 대한 설명	유
26	2008. 07. 15	봉단마개와 접합관을 이용한 용접강도 합부 판정 기준의 기술검토	유
27	2008. 07. 29	봉단마개와 접합관 이용한 용접공정 검토	유
28	2008. 08. 06	접합관 용접공정자격 인증시험 기술 설명	유
29	2008. 08. 19	다발용접기 이용한 시편 재현성시험 검토	유
30	2008. 08. 28	봉단마개와 접합관 용접의 품질관리 검토	유
31	2008. 09. 05	핵연료 다발의 재용접(repair welding)에 대한 기술적 설명	유
32	2008. 09. 17	돌출형 접합관을 이용한 다발용접의 품질 수준에 관한 기술 검토	유
33	2008. 09. 29	다발용접기의 전극 교체 및 set-up 조건에 대한 기술적 검토	유
34	2008. 10. 01	다발용접기를 이용한 전극뭉치 보수 유지에 대한 기술적 설명	유
35	2008. 10. 07	다발용접기를 이용한 weld gun 분해 및 조립에 관한 기술 검토	유
36	2008. 10. 10	전용용접기를 이용한 weld gun 분해 및 보수유지에 대한 검토	유

2. 기술정보제공 : 건

NO.	일자	구체적 내용	증빙유무

3. 시제품제작 : 건

NO.	일자	구체적 내용	증빙유무

4. 시험분석 : 건

NO.	일자	구체적 내용	증빙유무

## 5. 기술지원실적 업로드 : 36 건

NO.	일자	구체적 내용	증빙유무
1	2007. 11. 19	사업계획 목표 및 기술지원내용 설명	유
2	2007. 11. 27	접합판 기하학적 형상에 대한 시편준비 계획수립 및 전용용접기 헤드부 설계검토	유
3	2007. 11. 30	돌기부 시편 설계관련 재검토 및 기술토의	유
4	2007. 12. 04	Endcap+Endplate 용접설계의 유의점 검토	유
5	2007. 12. 12	다발용접기 특성에 대해서 기술적 설명	유
6	2007. 12. 18	전용 다발용접기의 설계 및 기술적 토의	유
7	2008. 01. 08	기존 다발용접기 설계의 유의점 기술 검토	유
8	2008. 01. 18	다발용접기의 프레임 및 각 부품 기술검토	유
9	2008. 01. 25	전극 이송기기 부품에 대한 기술적 토의	유
10	2008. 02. 05	다발용접기의 용접위치 결정치구 기술검토	유
11	2008. 2. 15	다발용접기 이용한 집합체 조립용접 설명	유
12	2008. 2. 26	양산 중인 조립용접기에 대한 기술적 현황	유
13	2008. 03. 04	다발용접기의 장비 공구에 관한 기술 검토	유
14	2008. 03. 14	다발용접기 이용한 전극부품의 기술 검토	유
15	2008. 03. 21	다발용접기 이용한 용접실험에 대한 설명	유
16	2008. 04. 01	Endcap과 endplate를 이용한 용접실험에 대한 기술적 설명	유
17	2008. 04. 15	봉단 접합판 용접의 상세기술 내용 검토	유
18	2008. 04. 23	봉단마개와 접합판의 용접 단면사진 관찰	유
19	2008. 05. 14	봉단마개와 접합판을 이용한 용접성 설명	유
20	2008. 05. 20	다발용접기 이용한 접합판용접 모의실험	유
21	2008. 05. 26	다발용접기를 이용한 모의용접시편의 토크 강도에 대한 분석	유
22	2008. 06. 02	연료봉간의 접합강도 변동(fluctuation)설명	유
23	2008. 06. 13	다발용접기 이용한 용접치구의 개량 검토	유
24	2008. 06. 24	다발용접기 이용한 기존치구, 다발조립검토	유
25	2008. 07. 04	봉단접합판 용접강도 시험에 대한 설명	유
26	2008. 07. 15	봉단마개와 접합판을 이용한 용접강도 합부 판정 기준의 기술검토	유
27	2008. 07. 29	봉단마개와 접합판 이용한 용접공정 검토	유
28	2008. 08. 06	접합판 용접공정자격 인증시험 기술 설명	유
29	2008. 08. 19	다발용접기 이용한 시편 재현성시험 검토	유
30	2008. 08. 28	봉단마개와 접합판 용접의 품질관리 검토	유
31	2008. 09. 05	핵연료 다발의 재용접(repair welding)에 대한 기술적 설명	유
32	2008. 09. 17	돌출형 접합판을 이용한 다발용접의 품질 수준에 관한 기술 검토	유
33	2008. 09. 29	다발용접기의 전극 교체 및 set-up 조건에 대한 기술적 검토	유
34	2008. 10. 01	다발용접기를 이용한 전극뭉치 보수 유지에 대한 기술적 설명	유
35	2008. 10. 07	다발용접기를 이용한 weld gun 분해 및 조립에 관한 기술 검토	유
36	2008. 10. 10	전용용접기를 이용한 weld gun 분해 및 보수유지에 대한 검토	유

# 목 차

제 1 장	지원사업의 개요 .....	16
제 1 절	기술지원 필요성 .....	16
제 2 절	기술지원 목표 .....	18
제 3 절	기술지원 내용 .....	20
제 2 장	중수로 핵연료 다발의 기술현황 .....	22
제 1 절	봉단마개와 집합관 용접 특성 및 구조 .....	22
제 2 절	봉단마개와 집합관 용접기술 분석 .....	27
제 3 장	봉단마개와 집합관 용접성능 분석 및 고찰 .....	40
제 1 절	봉단마개와 집합관 저항용접기술 최적화 .....	40
제 2 절	봉단마개와 집합관 용접강도 및 열변형 분석 .....	45
제 3 절	다발 전용용접기 설계 및 기술성 검토 .....	58
제 4 장	사업 목표달성 및 기여도 .....	65
제 1 절	기술지원의 목표달성 .....	65
제 1 절	기술지원의 기여도 .....	66
제 5 장	결론 및 활용계획 .....	68
제 6 장	참고문헌 .....	70
부    록	.....	71

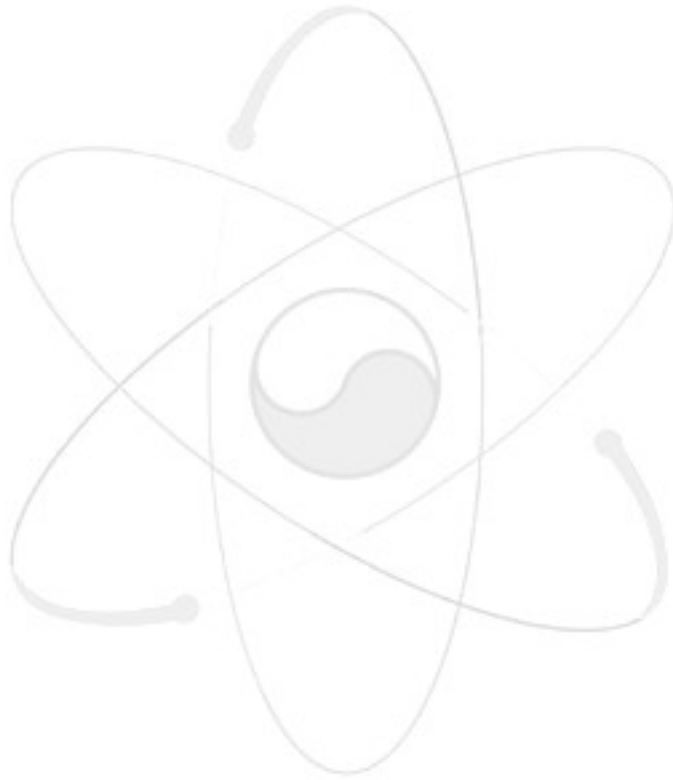
## 표 목 차

표 2.1	핵연료 다발의 주요 부품 구성 .....	24
표 2.2	핵연료 다발의 설계 요구조건 .....	25
표 2.3	중수로 핵연료 다발의 용접방법별 기술성 비교표 .....	30
표 2.4	핵연료 다발용접의 최적 공정조건 .....	36
표 2.5	핵연료 다발의 용접강도 공정관리 기준치 .....	39
표 3.1	용접전류(A), 주전극 압력(BAR) 및 용접시간(cycle)에 따른 변수조건 .....	42
표 3.2	용접전류 3600 A에 따른 토크 강도치 일람표 .....	52
표 3.3	용접전류 3800 A에 따른 토크 강도치 일람표 .....	53
표 3.4	용접전류 4000 A에 따른 토크 강도치 일람표 .....	54
표 3.5	다발제조용 전용용접기의 기술사양 .....	59
표 3.6	중수로 다발 제조의 설계사양 .....	60

## 그 림 목 차

그림 2.1	다발용접 제품의 형태 .....	23
그림 2.2	핵연료 다발의 핵심 구성요소 .....	24
그림 2.3	핵연료 다발의 제조공정 흐름도 .....	26
그림 2.4	핵연료 다발의 봉단마개와 접합판의 용접이음 구조 .....	31
그림 2.5	저항용접된 봉단마개와 접합판의 단면 사진예 (×50) .....	35
그림 2.6	중수로용 핵연료다발 용접장치 .....	36
그림 2.7	핵연료 다발의 저항용접기 입구 .....	37
그림 2.8	핵연료 다발의 샘플번호 새기기 .....	37
그림 2.9	핵연료 다발의 상단 접합판 용접 .....	38
그림 2.10	핵연료 다발의 하단 접합판 용접 .....	38
그림 3.1	중수로 다발 제조용 봉단마개 및 돌출형 접합판의 시편형상 .....	41
그림 3.2	돌출형 접합판을 이용한 토크시편 형상 .....	41
그림 3.3	돌출형 접합판을 이용한 용접시편의 외관관찰 .....	42
그림 3.4	용접전류(A) 별 접합판 용접시편의 단면관찰 .....	43
그림 3.5	주전극 압력(BAR) 별 접합판 용접시편의 단면관찰 .....	44
그림 3.6	돌출형 접합판을 이용한 토크시험용 용접치구 .....	45
그림 3.7	돌출형 접합판을 이용한 토크시험용 용접시편 모습 .....	46
그림 3.8	원전연료 제품의 내환봉별 토크 강도치 분포도 .....	47
그림 3.9	원전연료 제품의 외환봉별 토크 강도치 분포도 .....	48
그림 3.10	전류 3600A, 시간 2-3cycle별 12-16-31-37번의 토크 강도치 분포도 ...	49
그림 3.11	전류 3800A, 시간 2-3cycle별 12-16-31-37번의 토크 강도치 분포도 ...	50
그림 3.12	전류 4000A, 시간 2-3cycle별 12-16-31-37번의 토크 강도치 분포도 ...	51
그림 3.13	기존 다발 접합판과 돌출형 접합판의 용접변형 비교 .....	56
그림 3.14	용접전류 및 시간별 12-16-31-37번의 용접변형 측정 .....	57
그림 3.15	중수로 다발 전용용접기의 개념도 .....	58
그림 3.16	다발 전용용접기의 제작 개념도 .....	60
그림 3.17	다발 전용 용접헤드의 모델링 개념도 .....	61
그림 3.18	다발 전용용접기의 전극헤드 .....	63

그림 3.19 전용용접기의 전극헤드 부품 및 고정지그 ..... 63  
그림 3.20 전용용접기의 제어부 구성도 ..... 64





# 제 1 장 지원사업의 개요

## 제 1 절 기술지원 필요성

본 기술지원은 중수로 핵연료 다발의 제조를 위한 봉단마개와 접합관의 용접 방법을 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 과제이다. 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, 앞으로도 이러한 분야의 지속적인 기술개발은 매우 중요하다고 하겠다. 따라서 본 기술지원은 중수로 핵연료 다발의 봉단마개와 접합관을 위한 전기저항 용접설계에 필요한 기초자료를 제공하였고, 지르칼로이-4 피복관에 적절한 용접조건을 선정하여 실제의 핵연료 다발샘플이 제작되어, 이에 따른 용접부의 특성이 분석되었다. 아울러 전기저항 용접기술은 산업체의 기반기술로서 응용분야가 넓은 뿐만 아니라 그 연관관계도 매우 높아서 곧바로 응용기술들을 개발할 수 있으므로 산업적 측면에서 파급효과가 클 것으로 기대된다.

따라서 한국원자력연구원에서는 그동안 핵연료 부품을 이용한 저항용접 공정 기술의 산업체의 접목을 위한 연구를 수행한 결과 즉, 핵연료 부품인 봉단마개와 접합관을 이용한 용접장비 설계, 치공구 설계 개선, 그리고 저항용접 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 기초기술이 미흡하고, 거의 대부분 해외기술에 의해 의존하고 있는 실정이다. 한편, 최근 국내 전기 사용량이 점차적으로 증가함에 따라 관련 핵연료 가공업체에서는 핵연료 다발의 부품에 대한 용

접기술에 대한 관심이 높아지고 있으나 막상 업체의 막대한 투자가 소요되는 초기 도입에 부담을 가지고 있으며, 그리고 도입후의 사후관리 등 여러 문제점이 대두됨에 따라 이에 대한 경험이 풍부한 전문기관의 기술지원이 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 말한다. 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 가능해 진다. 최근에 핵연료 관련 가공 업체에서는 핵연료 다발의 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 용접기법이 필요로 하는 방식이 현장에 도입되게 될 것이다. 따라서 본 기술지원은 중수로 핵연료 다발용 봉단마개와 접합판을 이용한 새로운 용접공정이 생산성을 향상시키고 원가 절감하여 업체의 경쟁력을 극대화하고 제품의 품질을 향상시키는데 있다.

## 제 2 절 기술지원 목표

중수로 핵연료 다발의 용접기술을 이용하여 기술지원의 목표를 가장 효과적으로 달성하기 위한 제조는 현장에서 선정 도입단계, 설계단계, 제작 및 유지 관리단계에서의 최적화와 개발된 용접시편의 성능검사, 수정 보완을 거치면서 이루어져야 한다. 여기서 핵연료 다발의 용접기술은 현재 지르칼로이-4 접합관의 용접이음 구조설계에서 돌출형 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 최적 공정선정과 기초실험 및 성능 평가시험, 보수 유지 등의 기술을 통한 현장 적용 및 실용화의 기틀이 마련되어야 한다.

본 기술지원은 중수로 핵연료 다발의 용접기술 측면에서 아래와 같이 크게 3가지를 구분하여 새로운 용접공정의 추진방안을 제시하였으며, 핵연료 다발의 봉단마개와 접합관을 이용한 저항용접의 최적화하는 것을 목표로 하였다. 첫째는 현재 사용되고 있는 핵연료 부품인 접합관 이음구조를 위한 공정설계 개선이고, 둘째로는 지르칼로이-4 접합관 용접부의 접합강도의 균일화 개선 그리고 셋째로는 중수로 핵연료 다발의 접합관 용접품질 향상을 위한 용접결함 방지로 나열된다. 이와 함께 중수로 다발제조용 전기저항의 용접헤드 최적 설계 및 성능 결과를 제시하고, 현재 37 봉 핵연료 다발뿐만 아니라 43 봉 핵연료 다발 제품에도 적절히 대응할 수 있으면서 유지 관리가 쉽도록 공정설계가 이루어지며, 또한 새로운 용접공정 개발을 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 함으로서, 순수 국내 기술에 의한 핵연료다발의 용접공정을 개발하고자 하였고, 이에 따라서 정밀부품 제조기술의 국내 정착화와 자동화 기술에 의한 생산성 향상에도 크게 기여할 수 있을 뿐만 아니라 핵심기술의 국산화로 상품화 및 국외 수출 산업화의 기반을 마련하고자 하였다. 본 기술지원 최종 목표 및 성격은 다음과 같이 요약된다.

1. 지르칼로이-4 접합관을 이용한 저항용접 최적화 확립
  - 봉단마개와 접합관 용접이음의 돌기형(projection type) 설계 선정
  - 돌기형 접합관을 이용한 용접변수 선정
2. 지르칼로이-4 접합관 용접부의 접합강도 균일화 및 용접결함 방지

- 내환봉 및 외환봉별 토크강도 균일화 및 지그시편 제작
- 용접변수에 따른 웨이브(wave) 발생 최소화 및 공정조건 도출
- 봉단마개와 접합판을 이용한 용접결함 방지책 및 품질기준 마련

### 3. 핵연료 다발제조용 용접헤드 설계 및 용접성능 시험

- 다발용 저항용접헤드 설계, 제작
- 다발용 가지전극부 및 접합판 삽입부 설계, 제작
- 다발 용접시스템을 이용한 접합판 용접성능 평가

### 4. 기술지원의 성격

◦ 기 수행된 원자력 중장기사업인 “건식공정 핵연료 및 품질관리 기술개발” 및 “건식공정 핵연료 원격제조기술개발”을 통하여 연료다발을 위해 핫셀 저항용접기를 이용한 용접특성 실험을 수행하였으며, 실제로 방사선구역에서 적용할 수 있는 원격용접장치를 설계하였다. 본 선행 과제에서 수행된 핵심 부문인 다발용접을 위한 용접치구, 저항용접 헤드 및 용접제어기술을 개발하였으며, 연료봉과 접합판과의 원격용접의 성능을 위해 접합강도 및 용접품질을 향상시켰다. 또한 원자력분야에서 사용되고 있는 지르코늄 합금, 인코넬 및 FMS(Ferrite-Martensite Steel) 등에서 고부가가치 금속재료의 용접에도 활용할 수 있다.

◦ 본 기술지원은 정밀화와 고기능화가 요구되는 고성능 다발제품을 제조하는 기술로서, 열 집중성이 우수한 돌기형 접합판을 이용하는 저항용접이 필수적으로 요구된다. 향후 참여기업에서는 핵연료 부품을 이용한 신형 다발제품을 출시할 예정에 있으며, 이에 따른 고품질의 저항용접기를 자체적으로 설계, 제작하여 외화 절감을 기하려고 한다.

### 제 3 절 기술지원 내용

국내 기존 연료다발의 접합판 용접은 외국에서 들어온 용접기술을 이용해서 봉단마개와 접합판 간의 보편화된 spot 용접이 수행되고 있다. 현재 연료다발 용접 후 거의 15년이 지난 장시간으로 노후 된 수입용접기에 의해서 접합강도의 불균일성, 접합판 상단의 열 변형으로 인한 치수결함 발생 등으로 품질 면에서 큰 영향을 주고 있는 실정임. 이에 따라 고가의 수입용접기 대신에 자체적으로 설계할 국산용접기를 이용하여 원전용 다발 제품에 바로 활용할 수 있으며, 축적된 돌기형 저항용접에 대한 database화를 구축하여 여러 산업분야에 활용토록 한다.

본 기술지원에서 응용되는 저항용접은 이미 1980년 후반에 먼저 캐나다에서 연구하여 현재까지 활발히 적용되고 있다. 최근 들어 용접기술의 연구개발을 통하여 최신 용접방법의 실현이 가능하게 되었고, 또한 일반 산업계에서는 돌기형 (projection type)을 이용한 저항용접이 자동차 부품이나 고부가가치의 정밀부품 생산에 이미 이용되고 있는 실정이나, 기존의 원자력분야에서는 평면형(plate type) 용접이음 구조로 설계된 저항용접이 계속 사용되고 있다. 이때 국내에서는 제작될 전용 용접기에 새로운 용접공법을 적용할 수 있는 시점에 와 있으며, 향후 신형 중수로 및 고속로 핵연료 집합체 제조에도 필수적인 핵심요소 기술로서 추진할 수 있다. 선진 여러 나라에서는 아직 새로운 용접공법의 연구가 활발하지 못하고 있는 상태이나 조만간에 곧 상품화를 위한 기술개발이 시작될 것으로 판단된다.

본 기술지원은 원전연료업체에서 생산되고 있는 중수로 핵연료 다발의 전 품목 (월성원전용 37 봉 : W1, W2, W3, W4, W5, W6)을 대상으로 지르칼로이-4 봉단마개와 접합판을 이용한 용접기술의 개선 및 용접성능 향상을 개발하기 위하여 수행되었으며, 이에 따른 지원내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 지르칼로이-4 접합판을 이용한 저항용접조건 공정 개선
  - 가. 봉단마개와 접합판 용접이음의 돌기형상 설계 및 최적조건 선정
  - 나. 돌기형 접합판을 이용한 저항용접변수 최적조건 선정
  
2. 지르칼로이-4 접합판 저항용접부의 접합강도 균일화 및 용접결함 방지
  - 가. 다발 내환봉 및 외환봉별 토크강도 시편 설계 및 시험 분석

나. 다발 토크강도 균일성 조사 및 지그설계 및 제작

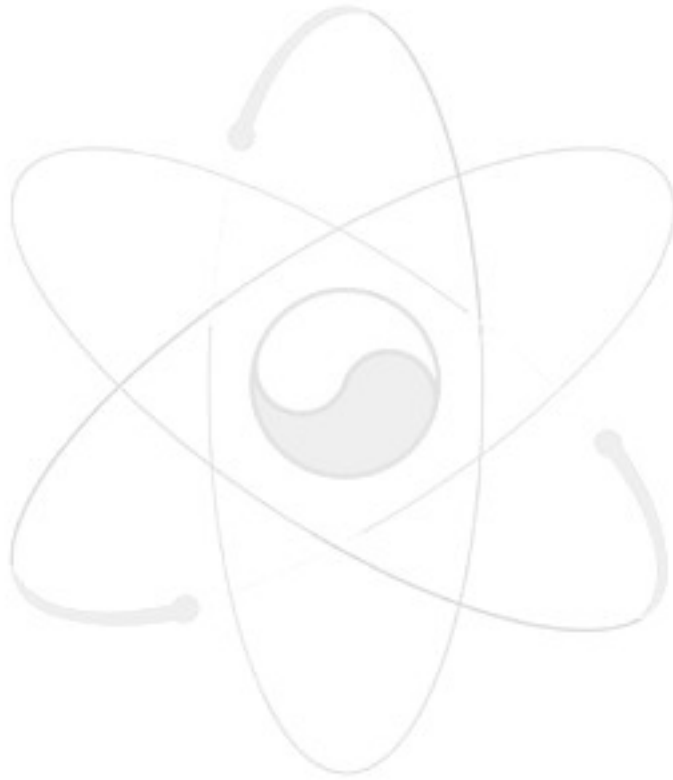
다. 용접 열량에 따른 웨이브(wave) 발생 최소화 공정조건 도출

3. 중수로용 연료다발 용접헤드 설계 및 용접성능 시험

가. 다발용 저항용접헤드 설계 및 제작

나. 다발용 가지전극부 및 접합판 삼입부 설계 및 성능시험

다. 다발 용접시스템을 이용한 저항용접 성능시험



## 제 2 장 중수로 핵연료다발의 기술현황

### 제 1 절 봉단마개와 접합판 용접 특성 및 구조

#### 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 기술지원의 핵연료 다발의 제품은 월성 원전에서 사용하여 적절한 품질을 갖는 제품의 완성단계를 포함한 것이다. 또한, 새로운 모델에 대한 제품을 개발하고 품질이 우수하고 좋은 평판을 얻음으로써 장기적인 성공을 거두는 것이다. 본 절에서는 중수로용 핵연료 다발에 사용되는 핵심 부품에 대해서 자세히 알아보고 국내 연료공장의 공정기술 및 품질 성능을 비교 분석한 다음 현장 작업에 맞는 전용 핵연료 다발 용접공정과 장치를 검토하였다.

#### 2. 다발 용접공정 분석

중수로 핵연료 다발은 월성형 원전에 사용되는 제품의 형태를 기준으로 하며, 그 외형적인 특징은 동일하나 핵적 특성 및 성능면에서 다소 차이가 있으며, 핵연료 다발은 그림 2.1에서와 같이 중수로용 전용 핵연료를 가지고 있으며<sup>[1]</sup>, 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. 또한 구성 재료에 있어서도 피복관은 지르칼로이-4를 사용하며, 핵연료 재료는 천연  $UO_2$  을 사용하며, 핵연료 다발의 무게는 약 24kg이며 나머지가 지르칼로이-4 연료봉, 봉단마개와 접합판이다. 핵연료 다발의 주요 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 천연  $UO_2$  소결체
- 37 봉 이상의 연료봉으로 구성된 집합물

- 두께가 얇은 피복관
- 고도의 건전성을 갖는 봉단접합 용접물
- 소결체와 지르칼로이-4 피복관 사이의 흑연도포층
- 유도 경납땜으로 접합한 간격체 및 지지체
- 연료봉과 접합관간의 용접강도

위와 같은 특징을 갖는 핵연료 다발의 주요 사양은 표 2.1과 같으며 이는 37개의 연료봉이 2개의 접합관에 일정한 배열로 조립, 용접되어 있으며 각 연료봉은 지르칼로이-4 피복관에 천연  $UO_2$  소결체가 장전되어 그 양단이 봉단마개로 밀봉되어 있다.<sup>[2][3]</sup> 연료봉 사이의 간격은 연료봉 외면에 부착된 간격체에 의하여 일정하게 유지되며, 원자로에 핵연료 다발을 장전할 때 압력관과 핵연료 다발 간에 일정한 간격을 유지하도록 다발의 외환봉에 지지체가 부착되어 있다. 또한 지르칼로이-4 피복관 내부에는 얇은 흑연층이 도포되어 있으며 이는 피복관과 천연  $UO_2$  소결체 간의 interaction을 감소시킨다. 핵연료 다발의 조립은 이들 연료봉의 양단과 봉단접합관간의 점용접에 의해 이루어지며, 이때 접합은 전기저항을 이용한 용접방법이 이용되고 있다.<sup>[4]</sup> 그리고 조립된 다발 구조물에 대한 품질특성으로서 연료봉의 봉단과 접합관간의 비틀림 강도와 함께 연료봉과 접합관 간의 형상구조에 대한 엄격한 치수기준이 적용되고 있다. 여기서 핵연료 다발의 구성부품의 요구조건을 요약해서 나열하면 표 2.2에서와 같다.

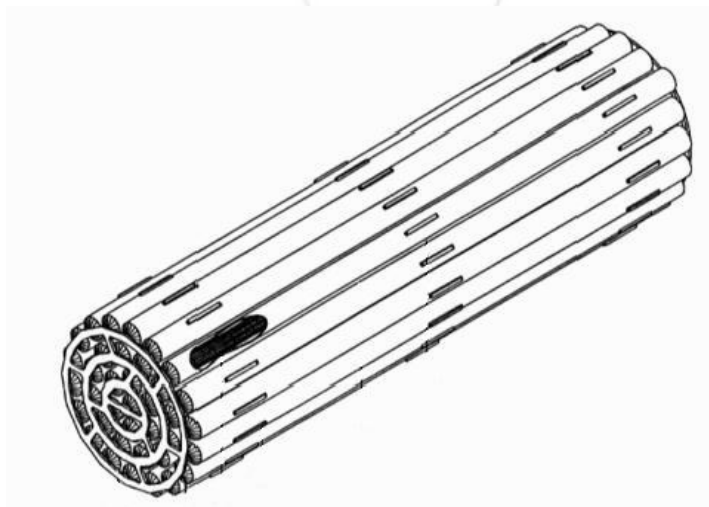


그림 2.1 다발용접 제품의 형태



표 2.1 핵연료 다발의 주요 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

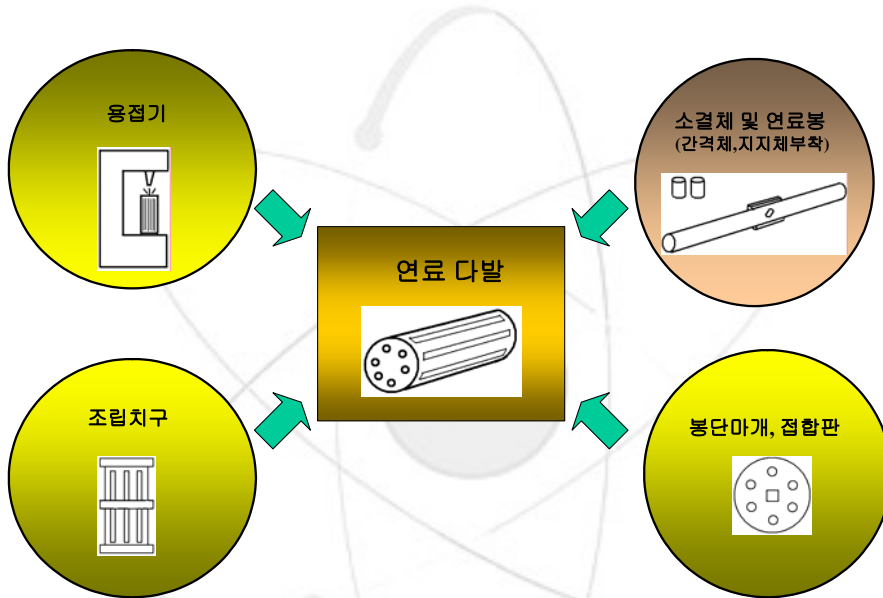


그림 2.2 핵연료 다발의 핵심 구성요소

### 3. 다발 용접의 제조공정 기술

완성된 연료봉을 이용하여 일정규격의 핵연료 다발의 형태로 제조하기 위하여 그림 2.2에서와 같이 핵심 구성요소가 요구된다. 이러한 구성품은 소결체 및 연료봉, 용접기, 봉단접합판 및 용접치구를 들 수 있다. 각 구성에 대한 상세요소는 봉단접합판 용접을 위한 전원 공급장치, 용접순서를 제어하는 microprocessor controller, 다발조립 형태로 구성된 후 용접위치까지 원격으로 이송해주는 transfer system, 완성된 연료봉을 다발 내에 정위치 되도록 하고 또한 다발 형태로 구성되도록 해주는 조립치구, 접합판을 setting 하고 용접할 수 있게 해주는 노즐 가이드

부 그리고 용접시 산화를 방지하기 위해 불활성가스를 공급하는 보조가스 공급장치로 구분된다.

표 2.2 핵연료 다발의 설계 요구조건

구분	요구 항목	비고
소결체	밀도	
	미세조직	
	화학적 조성	
	치수	
	표면조도	
연료봉 (봉단마개포함)	피복재 두께, 건전성	
	열영향부 결정입자구조	
	흑연도포, 두께, 접착력	
	소결체와 직경방향간격	
	봉단마개 두께	
	봉단용접 계면, 강도	
	지지체 평행도	
	중간지지체 축방향위치	
	지지체 원주방향위치	
	지지체, 간격체 치수	
	지지체, 간격체 치수	
접합판	접합판 두께	
	빋살 폭 및 위치	
	표면조건	
다발체	직경, 길이	
	양단형상, 지지체 축방향위치	
	간격체 교차폭	
	압력관과의 간격	
	연료봉간의 간격	
	접합판수직도 국부과형	
	연료봉의 길이 변화	
	봉단접합판의 용접강도	

핵연료 다발의 제조공정은 수십개의 연료봉들을 특수 설계된 조립치구에 일정한 배열로 조립하여 그 양단을 연료봉의 봉단마개와 접합판에 용접하는 것이다. 이때 집합 용접공정에는 일반적으로 전기저항, TIG, 레이저 및 전자빔 방법 등이 사용될 수 있으나 핵연료 다발의 접합판의 형상구조에서 볼 때 용접품질이 우수한 전기저항 방법이 가장 유리할 것으로 판단된다. 또한 핵연료 다발의 제조공정이 자동화 공정으로 이루어지기 때문에 이에 따른 장치취급의 제어 및 자동화기술 개발이 필요하며, 그림 2.3에서와 같이 연료봉의 치수검사 및 용접부위검사 등을 마친 후 연료봉을 특수 설계된 조립치구에 삽입한 후 접합판과 봉단마개 간의 점용접방식에 의하여 핵연료 다발을 제조한다. 핵연료 다발 제조에 있어서 가장 어려운 작업으로

예상되는 연료봉 용접은 완전한 시야가 확보되지 않은 상태에서 원격으로 연료봉들을 제 위치에, 제 방향을 찾아 조립치구에 setting해야 하기 때문에 이에 대한 기술 개발이 필요할 것이다.

지르칼로이-4 피복관은 cold zone에서 간격체 및 지지체를 진공 brazing을 수행하여 부착하고 피복관 내부를 흑연으로 도포한 후에 한쪽의 끝단부를 우선 봉단마개 용접을 수행하여 핫셀로 이송하여 소결체 장전 및 마지막 한쪽의 봉단마개 용접을 수행한다. 연료봉 용접이 끝난 후 연료봉의 He 누출검사, 치수검사 및 용접부위 육안검사 등을 마친후 연료봉을 투수하게 제조된 fixture에 삽입한 후 지르칼로이-4 접합판과 봉단마개 간의 점용접 방식에 의하여 핵연료 다발을 제조하게 된다.

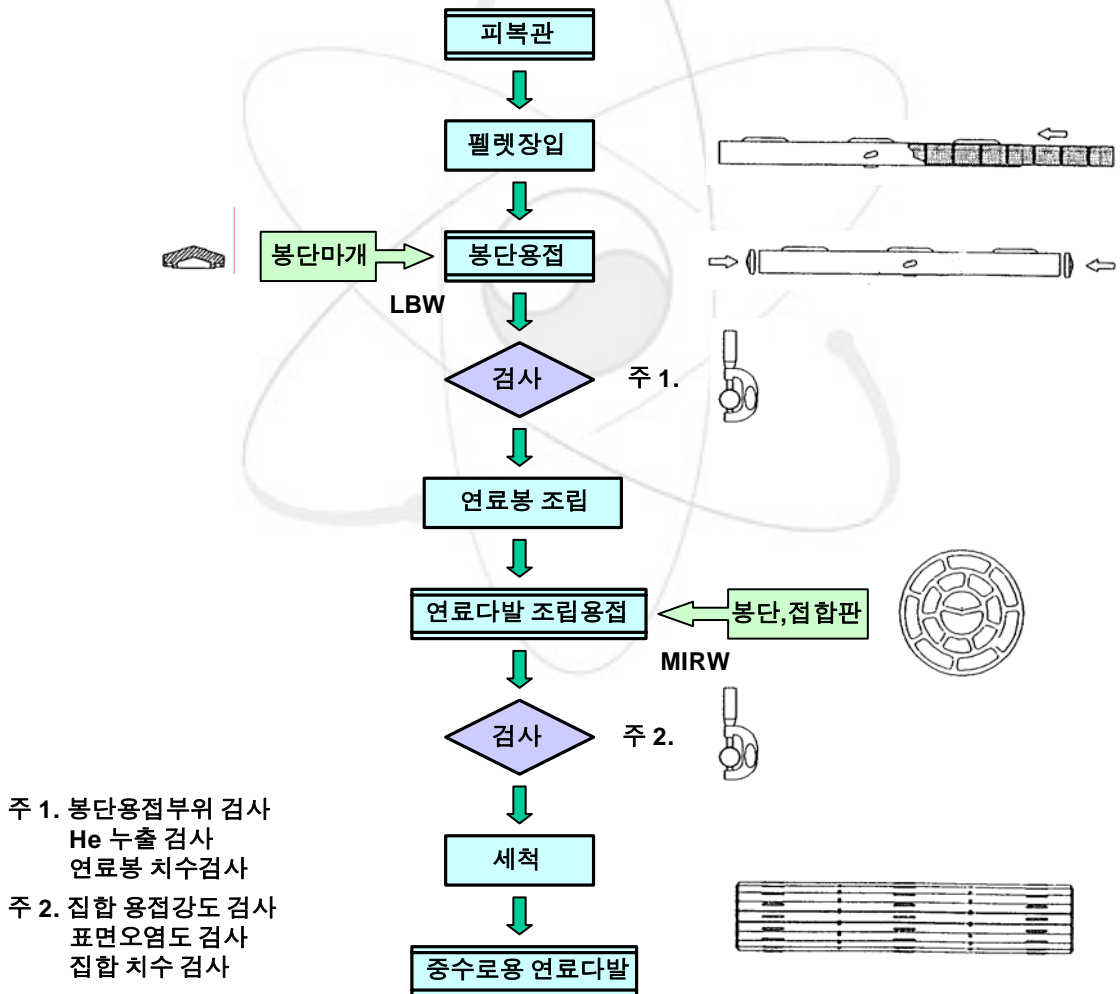


그림 2.3 핵연료 다발의 제조공정 흐름도

## 제 2 절 봉단마개와 접합판의 용접기술 분석

### 1. 개요

월성형 중수로 핵연료 다발은 37개의 연료봉 즉, 중심봉 1개, 내환봉 6개, 중환봉 12개, 외환봉 18개로 설계규격에 의하여 일정하게 배열된 구조로 되어있다. 핵연료 다발의 제조공정은 37개의 연료봉들을 특수 설계된 조립치구에 일정한 배열로 조립하여 그 양단을 지르칼로이-4 접합판에 용접하는 것이다. 핵연료 다발의 용접공정은 일반적으로 전기저항, TIG, 레이저 및 전자빔 방법 등이 사용될 수 있으나 핵연료 다발의 접합판 형상이 복잡하여 저항용접의 방법으로 적용하는 것이 일반적인 사항이다. 그리고 핵연료 다발의 제조공정에는 지르칼로이-4 피복관을 이용한 봉단마개 용접, 지지체, 간격체의 브레이징이 포함된다. 또한 지르칼로이-4 접합판의 용접방법은 용융, 고상 및 확산 접합법으로 크게 나눌 수 있다. 현재 용융방식으로는 TIG, MIG, 플라즈마 아크용접(PAW), 전자빔 용접(EBW) 및 레이저 용접(LBW) 등이 있으나 이중 산업체에서 가장 널리 사용되며 기타 용접법은 특정 목적에 국한되어 사용되고 있다. 고상 용접법은 저항 업셋버트용접, 자력저항 업셋버트용접, 마찰용접 등이 포함된다. 확산 접합법은 고상 접합법으로 분류가 가능하지만, 최근 각광을 받고 있는 새로운 접합법인 액상 확산접합과 구별될 수 있다. 여기서는 중요한 용융 및 고상 용접법에 의한 기본적인 용접기술에 대하여 살펴본다.

### 2. 용접기술별 특성 비교

#### 가. TIG 용접

TIG용접은 일반적으로 지르칼로이-4의 판재 및 배관을 불활성 분위기 또는 챔버를 사용하여 용접하고 있다. 특히 연료봉 제조 시 이산화 우라늄 소결체를 피복관에 장입한 후 봉단마개로 삽입하고 챔버 내부를 불활성 가스분위기로 유지하면서 연료봉을 원주방향으로 회전시키면서 양단이 용접된다. 여기서 불활성 가스는 He를 주로 사용하며 TIG토치를 고정시키고 연료봉을 원주방향으로 회전하면서 용접한다. 핵연료 피복관의 TIG용접시 내부에 장전된 이산화 우라늄소결체가 용접 열에 의해 빠르고 높은 온도의 가열에 의한 열 충격으로 파손될 위험이 있기 때문에

기타의 용접법의 연구가 많이 수행되고 있다.

지르칼로이-4 용접부의 건전성은 용접표면 외관의 변색정도에 따라 판단될 수 있다. 가장 이상적인 불활성 가스실드 효과는 물론 고진공 중에서 용접하는 것으로 지르칼로이-4 용접금속의 색깔은 금속광택인 은백색을 띄고 있다. 실제적으로는 붉은 청색이나 청색까지도 양호한 용접으로 간주될 수 있다. 그러나 지르칼로이-4 용접의 건전성은 변색 정도에 따라 다르므로 주의가 필요하다. 또한 용접챔버 내부에 고순도 Ar가스를 공급하고 산소, 질소 및 공기 등을 동시에 불어 넣어 주면서 TIG 용접을 하면 지르칼로이-4는 산소농도 5,000ppm 이상이 되어 비드표면이 회색으로 나타나기도 한다.

#### 나. 레이저 용접

최근에 고출력 레이저의 급속한 개발로 그 응용에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 원자력분야에 레이저가 일부 제한적으로 사용되고 있지만 그 가능성은 아주 높은 편이다. 레이저빔을 이용한 표면개질로 내식성을 향상시키기 위한 연구가 많이 진행중에 있다. 특히 핵연료 피복재나 집합체의 접합관인 지르칼로이-4 용접 시 고출력 레이저를 사용한다면 다른 용접법과 비교하여 다음과 같은 장점이 예상된다.

- 1) 고에너지 밀도인 집중된 빔은 아크용접과 비교하여 용접속도가 아주 빠르며 용접 후 열영향부가 좁고 열 변형이 감소된다.
- 2) 레이저는 먼거리로 광섬유를 이용하여 전송될 수 있고 또한 방사선구역인 핫셀, 글로브 박스 또는 챔버를 이용하여 불활성 가스 분위기에서 용접할 수 있다.
- 3) 용접공정의 자동화가 용이하므로 대량생산이 가능하며, 공정이 단순하므로 숙련된 용접자가 필요치 않으며 전극, 콜릿 등의 사용이 필요 없다.
- 4) 레이저를 이용한 용접부는 텅스텐 또는 기타 원소에 의해 오염되지 않는다.
- 5) 용접 중에 국부적으로 보호가스를 사용할 수 있으며, 불활성 가스 챔버를 이용한 TIG용접만큼의 용접성능을 얻을 수 있다.
- 6) 고속도용접이기 때문에 생산성을 증가시킬 수 있으며, 아울러 타 용접에 비하여 기계적 성질 및 내식성이 우수하다.

#### 다. 전자빔 용접

전자빔 용접은 고진공 챔버 내에서 용접할 수 있기 때문에 지르칼로이-4 용접 시 불순 가스 흡수 방지의 관점에서는 최적이라 생각된다. 그러나 피용접물의 형상 크기가 제한되거나 챔버 내에 진공을 사용하는 것이 단점이다. 지르칼로이-4의 전자빔 용접의 한 예가 원자로용 핵연료채널에서 사용된 적이 있다. 이 지르칼로이-4의 용접조직에서 볼 때 TIG용접과 같이 침상  $\alpha$  조직이지만 냉각효과에 의해  $\alpha$  입자의 미세한 조직이 된다. 이러한 경우 지르칼로이-4에 첨가된 합금원소가 진공중에서 증발되는 효과를 고려하여 용접재료를 사용할 필요가 있을 것으로 본다.

#### 라. 전기저항용접

중수로용 핵연료는 연료봉의 숫자가 37개로 다발 제조시 연료봉의 배열이 같기 때문에 기존의 다발 제조장비와 용접치구를 이용해서 제조될 수 있도록 새로운 다발 제조장비와 용접치구 개발이 요구된다. 이러한 요구에 따라 중수로 핵연료는 물론 조사시험용 핵연료까지 제조가 가능한 다발 용접기의 설계 제작이 필요하다. 이 용접기는 전극 위치제어, 용접파라메타, 조립지그 이송 등을 micro stepping 모터를 조합하여 제어 가능하게 설계하여 다양한 용접 program을 활용할 수 있게 한다. 또한 저항용접기의 전원장치가 High Frequency Inverter Type을 사용하여 용접기의 경량화가 가능하여 작업공간을 효율적으로 사용할 수 있고, 용접전류가 안정되고 용접 시 발생하는 압흔(누른 흔적) 및 소초(열에 그을림) 등의 결함발생도 줄어들 수 있으며, 열효율이 높기 때문에 열 cycle time이 줄어들어 품질이 향상되는 등의 여러 장점을 가지게 된다. 이 보고서는 다발 용접기의 원리 및 특성 그리고 실제 원격 제조를 위한 구비사항들을 기술하였다. 저항용접기의 특성을 살펴보기 전에 연료집합체 제조의 용접방법인 전기저항용접에 대해 기술하였다. 전기저항용접은 피용접물의 저항 열을 이용하여 열을 발생하게 하고 또 가압시키는 방법으로 다른 용접법에 비해 가압효과에 의한 용접후의 금속조직이 양호하고 변형과 잔류응력이 적다. 또한 용접온도가 비교적 낮고 가열의 영향이 접합부에 국한되는 장점이 있다. 그러나 저항 열에만 의존하므로 큰 전류를 공급해야 할 필요가 있어서 용접기의 용량이 크게 만들어진다.

핵연료 다발의 봉단마개와 접합관을 이용한 용접방안으로는 다음의 응용 및

고상 방식을 들 수 있다. 이중 TIG용접은 가장 단순하면서 비용 면에서 저렴하나 용접부의 품질 신뢰성이 여타 용접방법에 비해 우려되고 있으며, 특히 용접 후 HAZ가 넓고 다량의 열 변형으로 접합관 용접에 주의가 필요하다. 현재 양산 중으로 중수로 지르칼로이-4 접합관을 이용한 저항용접은 생산성이 높고 용접품질도 우수하나, 새로운 형상의 접합관을 활용하기 위해서는 용접기의 개발이 필요하며, 또한 장치의 복잡성과 용접품질의 예민함에 따라 전용용접기의 유지, 보수상의 어려움이 있을 것으로 예상된다. 이 외에도 레이저용접, 전자빔 용접 등의 응용도 가능하나 광섬유전송 및 진공챔버 설치 등의 많은 기술개발이 필요하게 된다. 따라서 현재로서는 저항용접에 의한 접합관 용접이 고려되고 있으며 이에 대한 기술분석이 수행되어 왔다. 표 2.3은 핵연료 다발 제조를 위한 용접방법별 기술성 비교를 요약해서 나타내고 있다.

표 2.3 중수로 핵연료 다발의 용접방법별 기술성 비교표

구분	장치내구성	감시제어성	접합구조성	용접성	비고
TIG용접	●	●	▲	●	
저항용접	●	●	◎	◎	
레이저용접	●	●	▲	●	
전자빔용접	▲	●	▲	●	
◎ :우수 ● :보통 ▲ :나쁨					

### 3. 봉단마개와 접합관을 이용한 저항용접기술

#### 가. 저항용접의 원리

금속재료는 그 자체의 재질과 치수로서 정해지는 전기저항을 가지고 있다. 따라서 금속재료에 전류를 통하게 하면 다음과 같은 열에너지 Q [cal]를 발생하게 된다.

$$Q = 0.24 i^2RT$$

단, I : 전류 (A), R : 전기저항 (Ω), T : 시간 (sec)

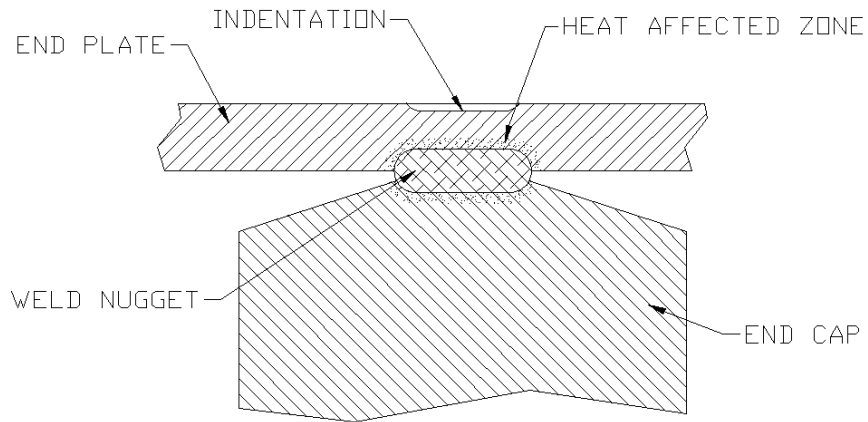


그림 2.4 핵연료 다발의 봉단마개와 접합판의 용접이음 구조

그림 2.4에서 보는 바와 같이 먼저 접합하려는 금속면을 접촉시키고 그 면에 수직으로 적당한 기계적 압력을 가한다. 여기서 접촉면을 통하여 큰 전류가 통하게 되면 접촉저항에 의하여 접촉면 부근의 온도는 급격히 상승하게 되고 이때 접촉부근은 연화하면서 가압력에 의하여 접촉부가 변형하게 되어 접촉저항이 감소하게 된다. 최초의 온도상승에 의해 이 부분이 금속저항은 증가하므로 그 후의 발열비율도 크고 모재내의 발열에도 영향을 주며 용융 혹은 반용융 상태의 용접온도에 달하게 된다. 이때 유압이나 공기압을 이용하여 작용하는 압력에 의하여 양금속체는 밀착하게 된다. 전류 정지 후에는 이 부분이 고상상태로 용접이 완료된다. 통전시간은 1/100초 정도로 짧은 시간으로부터 수초 이상의 경우도 있다.

#### 나. 용접인자

용접결과에 영향을 줄 수 있는 인자는 많으나, 중요한 것으로는 용접전류, 통전시간, 전류파형, 가압력, 전극형상, 피용접재의 표면상태 등을 들 수 있다. 저항용접은 그 용접현상이 금속이 접촉한 내부에서 일어나고 짧은 시간에서 용접이 완료되므로 용접중에 제어는 불가능하고 모든 인자의 영향을 처음부터 고려하고 검토한 후 적정 용접조건을 선정하여 용접하여야 한다. 인자의 수가 많기 때문에 적정조건



의 선정은 쉽지는 않으나 인자에 따라서는 일정하게 설정하고 실험 또는 이론적인 고찰을 통하여 적합조건을 모색해야 한다. 다음은 전기저항용접에서 들 수 있는 각각의 인자에 대해서 설명하였다.

#### 1) 용접전류

용접전류는 매우 중요한 인자중의 하나다. 전류치가 적으면 용접부 용착이 일어나지 않으며 어느 값 이상이면 용착이 일어나면서 이때 접합강도도 증가하게 된다. 그러나 과도한 전류가 흐르면 과열이 일어나며 용접부의 변형이 크게 되고 표면이 더러워져 용융금속이 불려나와 단면에 기공이 남게 되어 금속조직과 접합강도가 저하하게 된다.

#### 2) 통전시간

총 발열량은 같아도 통전시간이 변하면 용접부에 도달하는 최고온도는 다르게 되고 용접품질에도 차이가 난다. 통전시간이 지나치게 짧은 경우 가열이 좁은 국부에서 한정되고 충분한 접합강도를 갖는 용접이 될 수 없게 된다. 한편 통전시간을 필요 없이 길게 하면 열손실을 크게 할 뿐만 아니라 필요 없는 곳에 가열하게 되어 열영향부를 넓히게 되고 압력을 가한 자국이 크게 되며 용융부는 일정한 값 이상으로 커지지도 않게 된다. 또한 통전 중에도 용융부의 응고가 시작되어 용접너깃에 응고조직과 접합부의 기계적 성질이 나빠진다.

#### 3) 전류파형

전기저항용접에서는 발열과 가압력이 시간적으로 잘 연관되어 움직여져야 하므로 용접중의 각 순간 온도분포가 적절하게 이루어져야 한다. 피용접물의 재질, 치수에 상관없이 일정한 전류를 일정시간에 흐르게 하면 접촉부의 발열에 대하여 가압이 늦어지고 국부적인 과열을 일으켜 용접결과를 나쁘게 할 수 있다. 또한 전류를 급히 정지시키면 용접부가 급냉 되어 균열이나 재료가 경화되는 경향이 나타날 수가 있다. 이에 대한 방법으로는 주용접 전류의 전후에 소전류를 흐르게 하여 예열 또는 후열을 가할 필요가 있다.

#### 4) 가압력

가압력은 용접전후에 걸쳐서 일정하게 유지할 경우도 있고 통전 중반에 큰 압력을 가해 단압을 가할 때도 있고 또한 통전 전에 강한 예압을 하고 통전 시에는 감압시켜 놓고 통전 후에 다시 강한 단압을 가하는 경우도 있다. 전자는 접촉부의 저항을 감소시켜 그 값을 조정하고 용접중 접촉면적을 증대시키고 국부과열이 일어남을 방지하여 용접결과를 균일하게 하는 작용이고 후자는 용접부에 단압효과를 주어 다공질이라든지 내부균열이 발생하는 것을 방지해 준다.

#### 5) 피용접물의 표면상태

금속재료의 표면은 완전한 평면이 아니고 피막이나 흡착물 혹은 이물질이 덮여져 있기 때문에 용접결과는 표면 상태에 따라서 크게 좌우될 수 있다. 양호한 점용접을 하기 위해서는 표면에 기름, 먼지 등의 이물질을 완전히 제거해야 하고, 기타 화학적 혹은 기계적 방법으로도 사용될 수 있다. 저항용접은 용접할 재료의 비저항과 용접시 접촉면에서 전기저항에 의해 발생하는 열에 의해 용접부가 가열되고 이어 가압력에 의해 수행된다. 지르칼로이-4가 저항용접이 될 수 있는 것은 전기저항이 20℃에서  $74 \times 10^6 \text{ ohm-cm}$ 로서 탄소강의 5배나 된다. 현재 핵연료 연료봉 및 집합체에 사용되는 용접법으로는 저항 엷셋버트 및 자력저항 용접법이 있다. 이들의 차이는 크게는 가압력을 작용하는 방법이다. 저항 엷셋버트 용접은 공압 또는 유압으로 가압력을 작용하나 자력저항용접은 용접부의 형성을 위해 정밀하게 제어된 힘을 전자석을 이용하는 방법으로 종래의 저항 엷셋 맞대기용접과는 다르다. 용접전류와 시간이 정밀하게 제어됨과 동시에 용접 시 가압력 제어도 우수하기 때문에 1/120 ~ 1/60초의 범위에서 아주 짧은 시간에 용접된다. 이들의 저항용접은 용접시 모재가 용융되지 않기 때문에 결정립 성장이 최소화될 수 있고, 또한 용접부에 고용점 또는 산화반응이 강한 금속들에 의한 오염이 최소화되기 때문에 용접부의 내식성 및 내균열성에서 우수한 것으로 나타내고 있다. 그리고 다음은 전기저항 용접시스템의 주요 구성에 대한 기능에 대해서 나열하였다.

#### 1) 용접타이머(welding timer)

용접타이머는 전기저항방법의 기본 사이클인 squeeze time, welding time, holding time 으로 제어해 주며, 용접순서별로 전류를 setting하여 일정한 전류가 흐르도록 해준다.

## 2) 용접위치 결정기구

핵연료 다발 조립에 요구되는 용접위치는 37개로서 각각의 위치마다 전극봉치의 전후 좌우 운동 및 집합체의 회전운동으로 조합된다. 전극봉치의 운동은 공압실린더, stopper의 조합으로 구성되며 집합체의 회전운동은 공압으로 작동되는 rotary index table로 사용된다.

## 3) 핵연료 다발의 장, 탈착 및 회전

핵연료 다발은 양면이 용접되어야 하므로 1차 용접을 위한 준비, 2차 용접을 위한 준비 및 회전 등을 수행할 수 있는 기능이 요구된다. 이것은 공압 실린더에 의한 집합체의 위치이동 및 승강기구로 구성된다.

## 4) 전극 회전기구

핵연료 다발의 봉단마개와 집합판 간의 저항 용접은 전극과 집합판의 간섭을 피하기 위하여 용접위치에 따라 전극을 회전시켜 주는 기능이 요구되며 이는 공압 실린더, stopper 및 특수 베어링의 조합으로 작동된다.

## 5) 용접순서 제어장치

PC(programmable controller)를 사용하여 전체적인 용접순서, 용접위치별 파라미터 및 변경 등을 자동으로 작동하도록 해준다.

핵연료 다발 및 피복관으로 가장 많이 사용되고 있는 재료는 지르칼로이-4 이다. 이 재료를 핵연료분야에서 사용하기 위해서는 먼저 선결해야 될 문제가 용접기술이기 때문에 이것은 용융용접과 고상용접이 있으나, 중수로핵연료 다발에 사용되는 집합판의 경우 두께가 약 1.65mm로 봉단마개와 부착해야 되기 때문에 용접 시에는 봉단마개와 집합판 간의 용접강도가 충분히 얻어져야 한다. 그러나 용융 용접 시에는 기공, 용입 불량, 언더컷 등의 결함이 발생할 가능성이 많으나 고상용접인 저항용접 용접이 이용되면 용입 불량이나 표면결함 등은 많이 줄어들 수 있다. 여기서 핵연료 다발의 집합판 용접에서는 원자로 내에서 연소될 때 연료봉이 떨어져 나가지 않도록 견전한 용접이 얻어져야 하므로 이러한 용도로 사용될 수 있는 용접방식이 널리 사용되고 있는 자력저항용접(MFRW)이나 다중임펄스저항용접(MIRW)

을 들 수가 있다.<sup>[5]</sup>

그 중에 다중임펄스 저항용접의 경우, 용접되는 순서는 자력저항용접과 같으나 일정한 압축력이 가해진다는 점과 용접전류가 통전하는 형태가 다르다. 다중임펄스 저항용접의 예열 사이클 (preheat cycle) 8개와 주가열 사이클 (mainheat cycle) 4개로 구성된다. 그리고 주가열 사이클의 전류가 통전될 때 봉단마개와 접합판이 접촉되는 부위가 균일한 최고온도로 가열된 상태에서 소성변형이 일어나도록 냉각시간이 추가적으로 구성되어 있다.

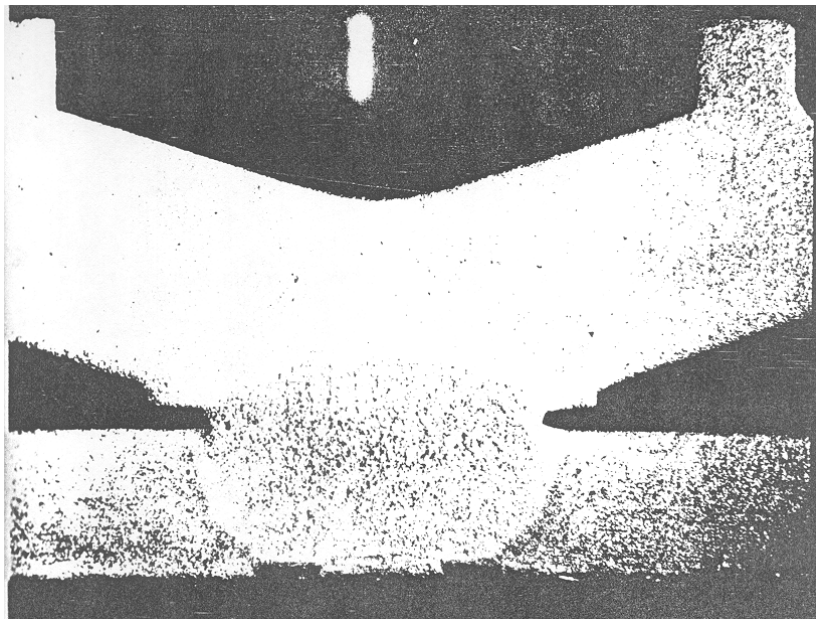


그림 2.5 저항용접된 봉단마개와 접합판의 단면 사진 예 (×50)

그림 2.5는 연료봉 봉단마개와 접합판 간의 저항용접에 의한 전형적인 용접단면을 금속학적 현미경에 의해 나타내고 있으며, 용접사이클이 진행되는 단계별로 저항용접에 의한 용접너깃(weld nugget)의 형성과정을 보여주고 있다. 이때 핵연료 다발의 봉단 접합판 용접의 최적 공정조건은 표 2.4에서 나타내고 있다. 표 2.4에서 각 용접모드별 설정된 용접전류와 가압력의 설정범위는 접합판 용접의 안전성을 유지하면서 토크 강도와 핵연료 다발의 제반 치수규격을 만족시키는 범위로서, 각 모드별 압력조건에 따른 용접전류는 용접과열(weld expulsion), 스패터(spatter), 과

도한 전극자국(electrode indentation) 등의 불안정한 용접결함이 발생되지 않는 범위 내에서 용접전류를 선정해야 된다. 실제 용접공정에서는 용접안전성이 유지되는 범위 내에서 최대의 전류밀도에 해당되는 용접전류와 압력조건을 설정하는 것이 효과적이라 할 수 있다.

표 2.4 핵연료 다발용접의 최적 공정조건

Operation mode	Weld current (amp.)	Weld pressure (bars)	Time (cycle)			
			Squeeze	Weld	Hold	Off
Mode 1	3400±200	3.5 ± 0.2	60-100	12±2	10±2	10±2
Mode 2	3400±200	3.8 ± 0.2	60-100	14±2	10±2	10±2
Mode 3	4000±200	4.3 ± 0.2	60-100	12±2	10±2	10±2
Mode 4	4000±200	4.8 ± 0.2	60-100	12±2	10±2	10±2

그림 2.6은 현재 원전연료업체에서 양산중인 중수로용 핵연료 다발제조를 위한 저항용접장치를 보여주고 있다.<sup>[6]</sup> 이때 중수로용 핵연료다발 제조공정이 각각 그림 2.7, 그림 2.8, 그림 2.9 및 그림 2.10의 순서에 따라 수행되고 있다.

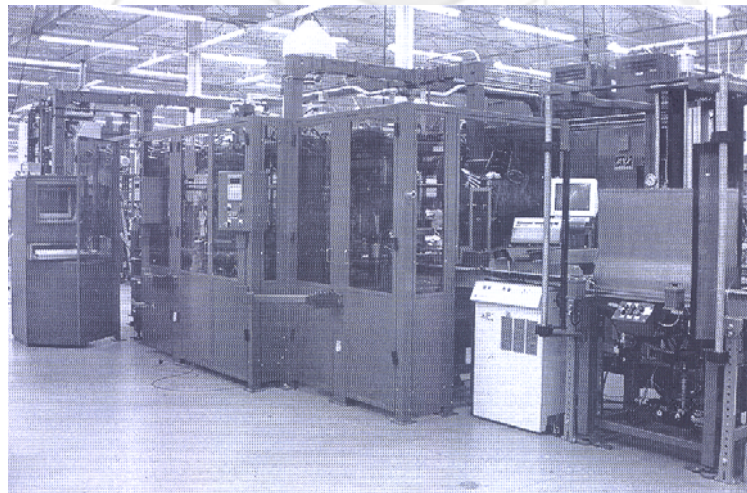


그림 2.6 중수로용 핵연료다발 용접장치

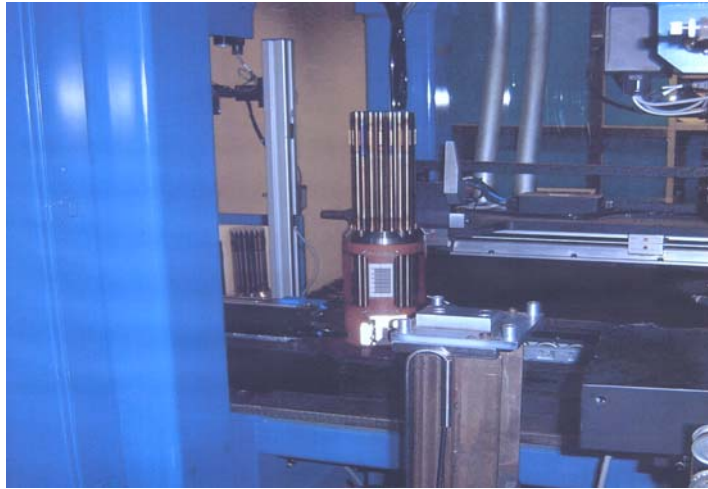


그림 2.7 핵연료 다발의 저항용접기 입구

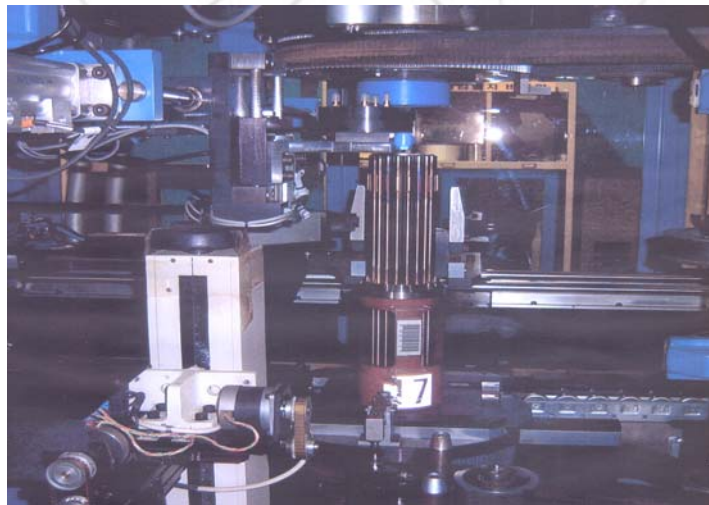


그림 2.8 핵연료 다발의 샘플번호 새기기

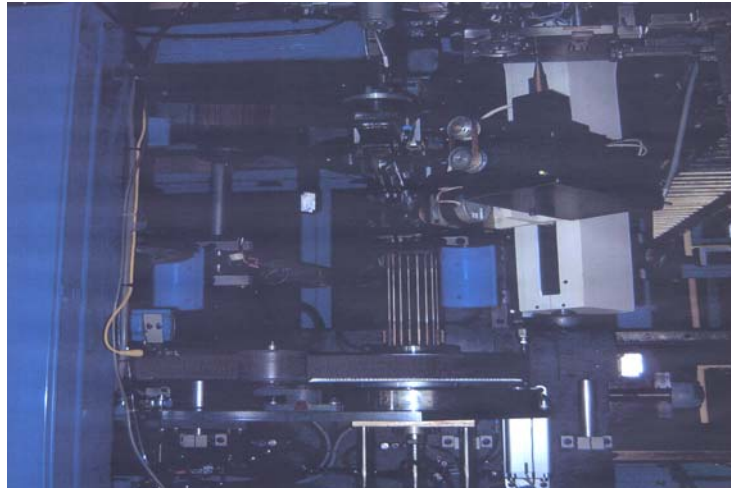


그림 2.9 핵연료 다발의 상단 집합판 용접

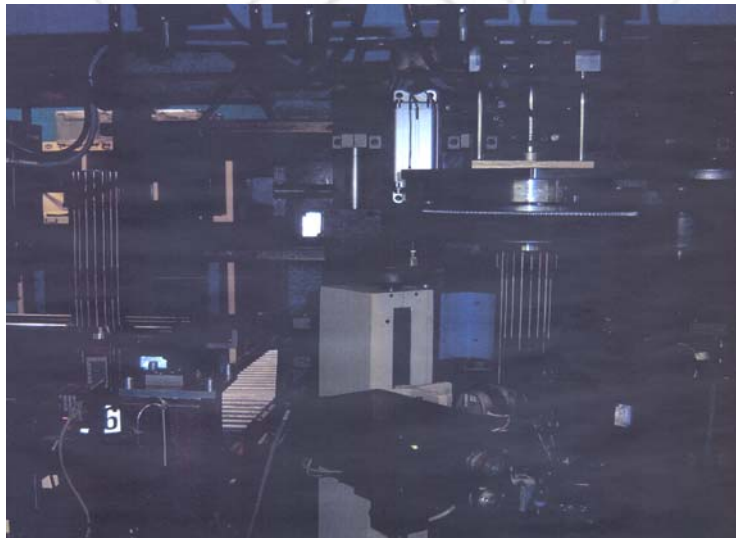


그림 2.10 핵연료 다발의 하단 집합판 용접

현재 중수로에서 전용 용접기 및 조립치구에 의해 제조된 핵연료 다발은 봉단 마개와 접합판 간의 토크강도와 다발제품의 제반 치수규격을 만족시키고 있다. 이때 공정모의용 용접시편과 다발의 접합판 용접시편에 대한 접합강도 시험결과 및 공정관리 기준치가 표 2.5에 나타나 있다.<sup>[5]</sup> 아울러 핵연료 다발 조립공정의 자격승인시험 결과 실제로 공정가동에서 나타난 용접 토크강도(weld torque strength)와 다발의 치수품질(dimensional quality) 특성들이 포함되고 있다.

표 2.5 핵연료 다발의 용접강도 공정관리 기준치

Specimens	Outer Fuel Rods		Inner Fuel Rod	
	Top Parts	Bottom Parts	Top Parts	Bottom Parts
Min. Acceptable Strength (Nm)	9.6	8.5	6.9	6.2



## 제 3 장 봉단마개와 접합판 용접성능 분석 및 고찰

### 제 1 절 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접기술 최적화

#### 1. 개요

앞 절에서는 중수로 핵연료 다발 제조를 위한 전초적인 단계로서 봉단마개와 접합판을 이용한 용접기술 개발을 위하여 다발 집합에 대한 개념 및 제조 기술성을 조사하였고, 중수로 다발 용접을 위한 기본개념 확립을 위해 봉단마개와 접합판의 주요 특성 및 구조에 관하여 기술하였다. 본 절에서는 중수로 핵연료 다발의 핵심 구조인 봉단마개와 접합판을 이용한 용접실험 및 강도시험을 수행하였고, 실제로 양산중인 중수로 다발의 봉단접합판 용접시편과 비교 조사하였고, 향후 중수로 핵연료 제조를 위한 돌출형 구조를 가지는 접합판을 이용한 용접공정 및 전용 용접기 개발에 기초가 될 것이다.

#### 2. Zr-4 접합판의 용접시편 및 용접변수 선정

중수로 다발의 봉단마개와 접합판을 이용한 용접공정은 연료봉들을 일정한 배열로 조립하여 그 양단을 저항 용접하는 것이다. 본 실험에서 핵연료 다발의 돌출형 접합판 용접성능은 그림 3.1과 같이 봉단마개와 접합판을 이용하여 연료봉 장전, 다발 조립, 접합판 삽입 및 상하단 용접이 마친 후 접합판 용접의 외관검사, 토크시험 및 용접부의 조직검사가 수행되어진다. 그림 3.2는 토크시험용 용접시편을 보여주며, 표 3.1은 최적의 용접조건을 나타내며, 이때 용접조건별 각각 토크시편용 접합판 4개를 사용하였으며, 각 접합판은 4개의 spot 용접 포인트를 사용하여 내환봉의 위치 12번, 16번 및 외환봉의 위치 31번, 37번의 spot 용접 순으로 수행하였다. 그리고 토크시편이 용접된 후 외관 상태는 그림 3.3과 같이 나타났으며, 대체로 양호한 용접비드와 용접변형의 결과를 얻었다. 또한 양산중인 실제의 용접샘플과 외관 형태를 같이 비교해 보았다. 그림 3.4 및 그림 3.5는 용접조건별로 돌출형 접합판을 이용한 용접부의 nugget 단면을 보여 주고 있다. 여기서 그림 3.4에서와 같이 용접전류 3800A, 용접시간 3 cycle에서 적절한 용융금속을 볼 수가 있었으며, 그림 3.5는 주전극 압력별 차이 없이 대체로 비슷한 용접단면을 보여주고 있다.

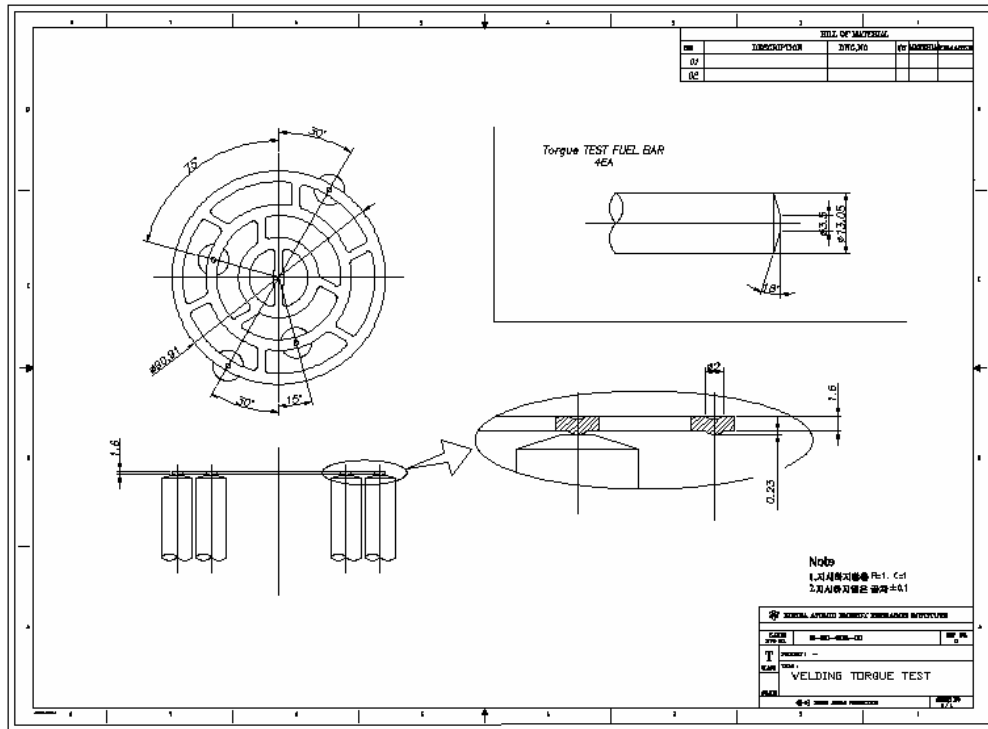


그림 3.1 중수로 다발 제조용 봉단마개 및 돌출형 접합판의 시편형상



그림 3.2 돌출형 접합판을 이용한 토크시편 형상

표 3.1 용접전류(A), 주전극 압력(BAR) 및 용접시간(cycle)에 따른 변수조건

시편번호		전류 (A)	주전극 압력 (BAR )	가지전극 압력(BAR)
# A01	torque	3600	4.0	2.5
# A02	torque	3800		
# A03	torque	4000		
# A04	torque			
# A05	torque	4200		

시편번호		전류(A)	주전극 압력 (BAR)	가지전극 압력(BAR)
# MP01	torque	3800	3.5	2.5
# MP02	torque		4.0	
# MP03	torque		4.5	
# MP04	torque		5.0	
# MP05	torque		5.5	

시편번호	용접시간 (Cycle)	전류(A)	주전극 압력(BAR)
# MT01	2	3800	4.0
# MT02	3		



(정면도)



(측면도)

그림 3.3 돌출형 접합판을 이용한 용접시편의 외관관찰


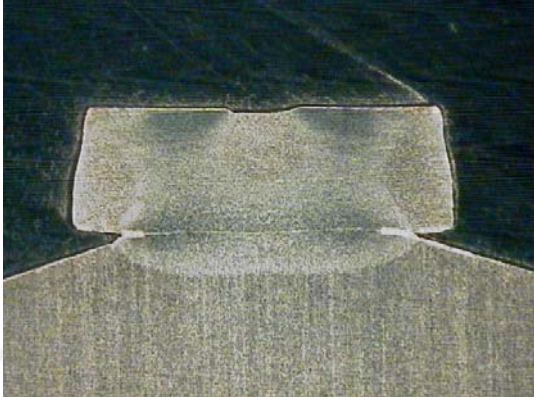
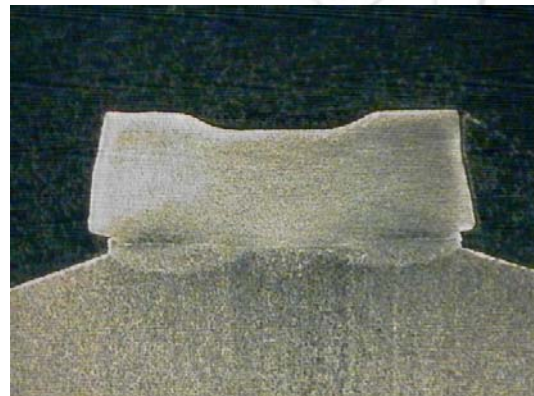

	
<p>3600A, 3 cycle (×50)</p>	<p>3800A, 3 cycle (×50)</p>
	
<p>4000A, 3 cycle (×50)</p>	<p>4200A, 3 cycle (×50)</p>

그림 3.4 용접전류(A) 별 접합판 용접시편의 단면관찰



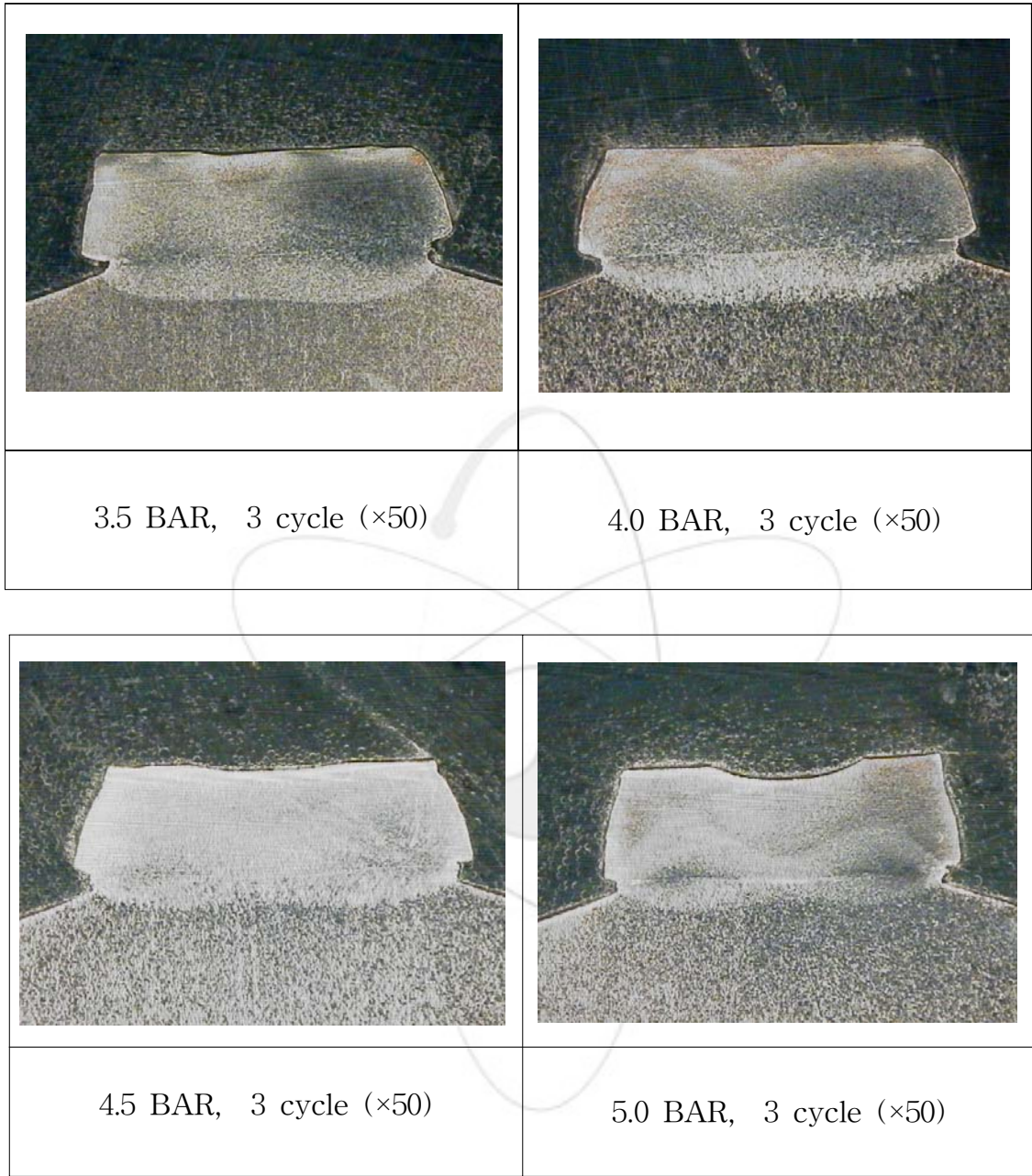


그림 3.5 주전극 압력(BAR) 별 접합판 용접시편의 단면관찰

## 제 2 절 봉단마개와 접합판 이용한 용접강도 및 열변형 분석

### 1. Zr-4 접합판을 이용한 용접강도 시험

중수로 다발의 전용 저항용접기를 이용한 봉단마개와 접합판 간의 용접성능은 먼저 다발의 모든 치수가 설계 규격 내에 있어야 하고, 다발의 상단용접이 모두 허용강도(외환봉= < 9.6 Nm, 내환봉= < 6.9 Nm) 그리고 하단용접이 모두 허용강도(외환봉= < 8.5 Nm, 내환봉= < 6.2 Nm)를 만족시키고, 상하단 연료봉 각각의 토크강도가 95% 이상의 신뢰도로 만족시키는 것이다. 또한 동일한 용접품질, 재현성 및 신뢰도를 위하여 그림 3.2 및 그림 3.6에서와 같이 내환봉 (연료봉번호 : 12, 16번) 및 외환봉 (연료봉번호 : 31, 37번)의 용접치구에 의해 구하고 이를 네 번의 토크값을 평균하여 실제로 실험 결과에 적용하기로 하였다. 그리고 돌출형 접합판을 이용한 저항용접 실험은 여러 차례에 걸친 예비실험과 실제 양산중인 제품 모델의 다발용접에 사용되는 작업 변수의 값을 참조하여 용접조건을 선정하였다. 그림 3.7은 돌출형 접합판을 이용한 토크시험 용접시편을 보여주고 있으며, 외관검사에서는 대체로 양호한 모습으로 나타났다.

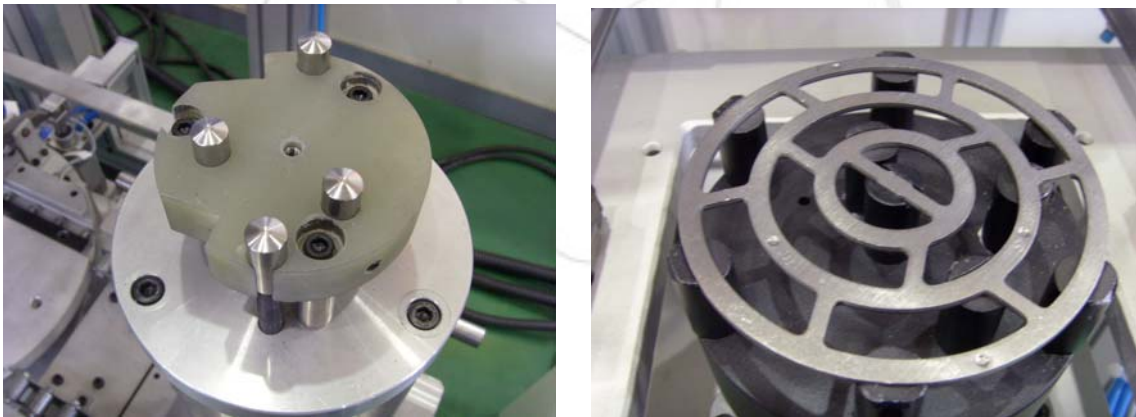


그림 3.6 돌출형 접합판을 이용한 토크시험용 용접치구

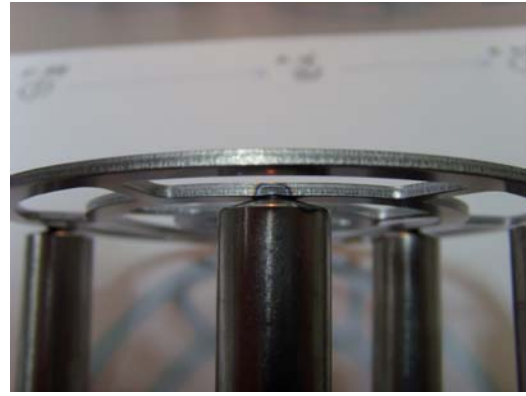


그림 3.7 돌출형 접합판을 이용한 토크시험용 용접시편 모습

그림 3.8 및 그림 3.9는 현재 원전연료 공장에서 핵연료 다발의 저항용접기 및 조립치구에 의해 제조된 집합체의 봉단마개와 접합판 간 토크 강도치를 보여주고 있다. 이때 공정모의용 용접시편과 집합체 용접시편에 대한 접합강도 시험결과 및 공정관리 한계값에 의해 평가된다. 핵연료 다발 조립공정의 자격승인시험 결과 실제로 공정가동에서 나타난 용접강도와 집합체 치수품질의 특성들을 분석할 수 있다. 그림 3.8 및 그림 3.9에서와 같이 1차 및 2차 공정모의용 용접시편과 집합체 용접시편 중 내환봉 및 외환봉의 토크강도 분포도에서 대체로 큰 폭의 범위로 나타내고 있다. 한편, 시편구분에 따라 공정모의용 연료봉들의 용접강도는  $UO_2$  소결체가 장전된 공정용 연료봉과 비교해서 서로 비슷한 용접강도를 보여주고 있다. 그림 3.10, 그림 3.11 및 그림 3.12는 용접전류 별 (3600A, 3800A, 4000A)에서 용접시간에 의한 내환봉 및 외환봉의 토크 강도치를 나타낸 것으로 8 Nm에서 12 Nm 사이에서 대체로 균일하게 보여주었다. 그리고 용접전류가 증가할수록 대체로 용접강도는 높은 것으로 나타내고 있다. 여기서 그림 3.10, 그림 3.11 및 그림 3.12에서 보여주듯이 핵연료 다발의 전체에 대한 연료봉의 시험 결과에는 미흡하지만 내환봉 및 외환봉의 시편에서 용접강도의 변동성 (fluctuation) 면에서 볼 때 현재 생산 중인 공정 모의시편과 비교해서 매우 낮은 변동의 분포를 보여주고 있다. 그리고 추가적으로 새로 제작된 전용용접기를 사용하여 용접전류, 주전극 압력, 가지전극 압력 및 용접시간에 따른 변수조건에 의하여 적절한 용접조건을 선정하였다. 돌출형 접합판 용접을 위한 용접전류 별 내환봉-접합판 간의 토크 및 외환봉-접합판 간의 토크 강도치의 일람표는 표 3.2, 표 3.3 및 표 3.4에서와 같다.

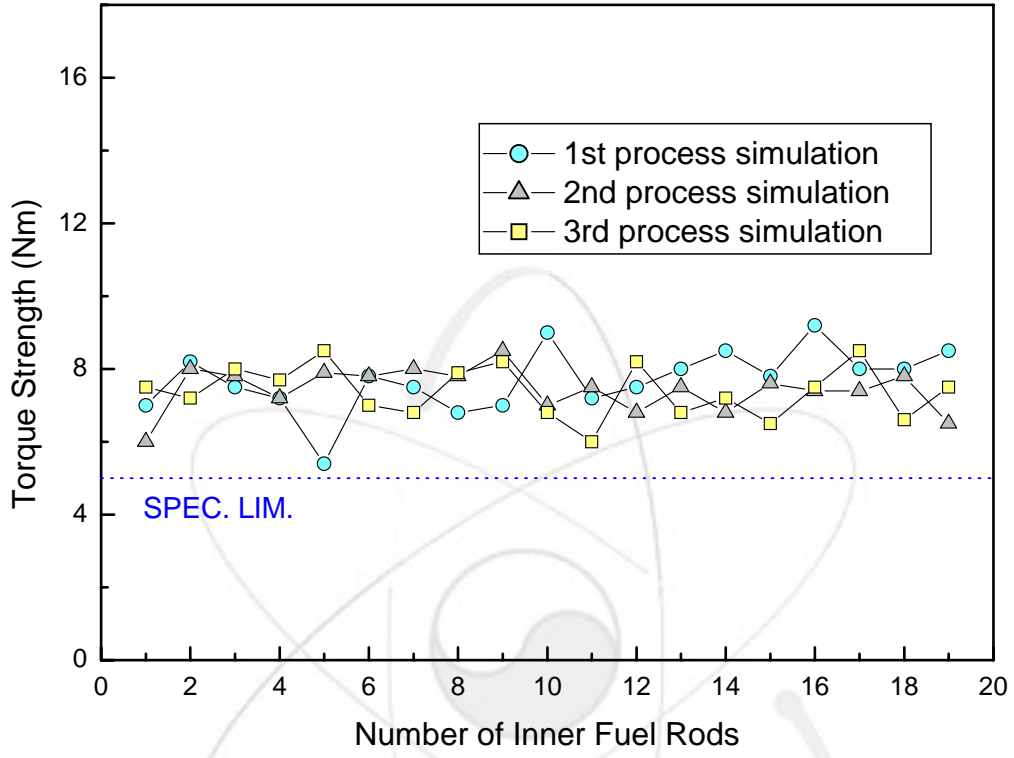


그림 3.8 원전연료 제품의 내환봉별 토크 강도치 분포도



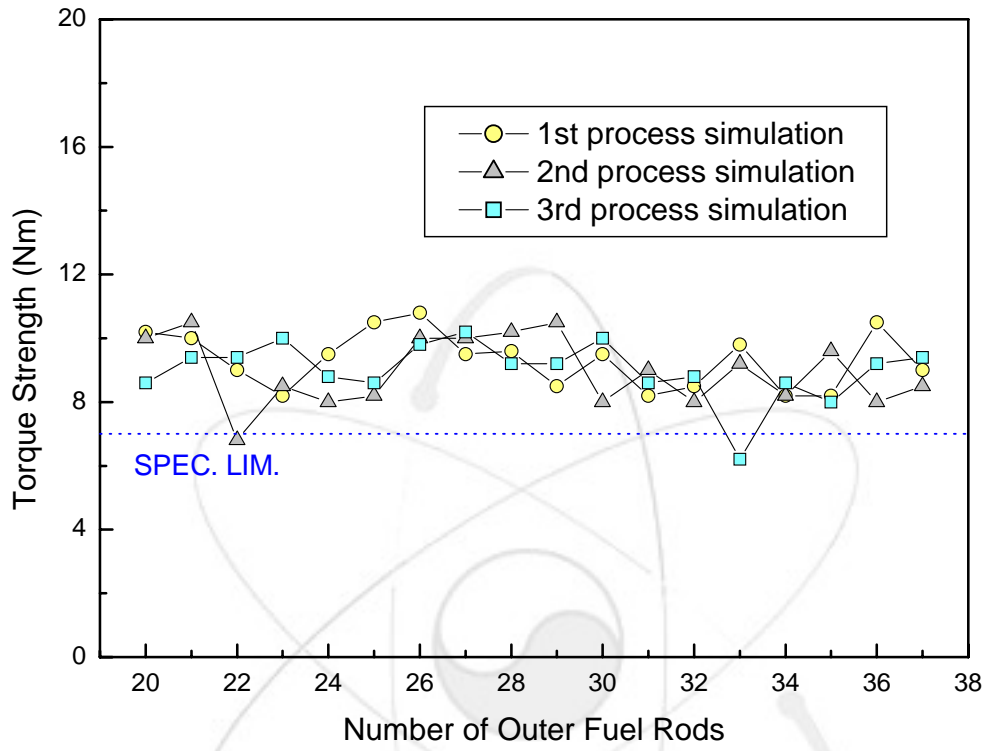


그림 3.9 원전연료 제품의 외환봉별 토크 강도치 분포도

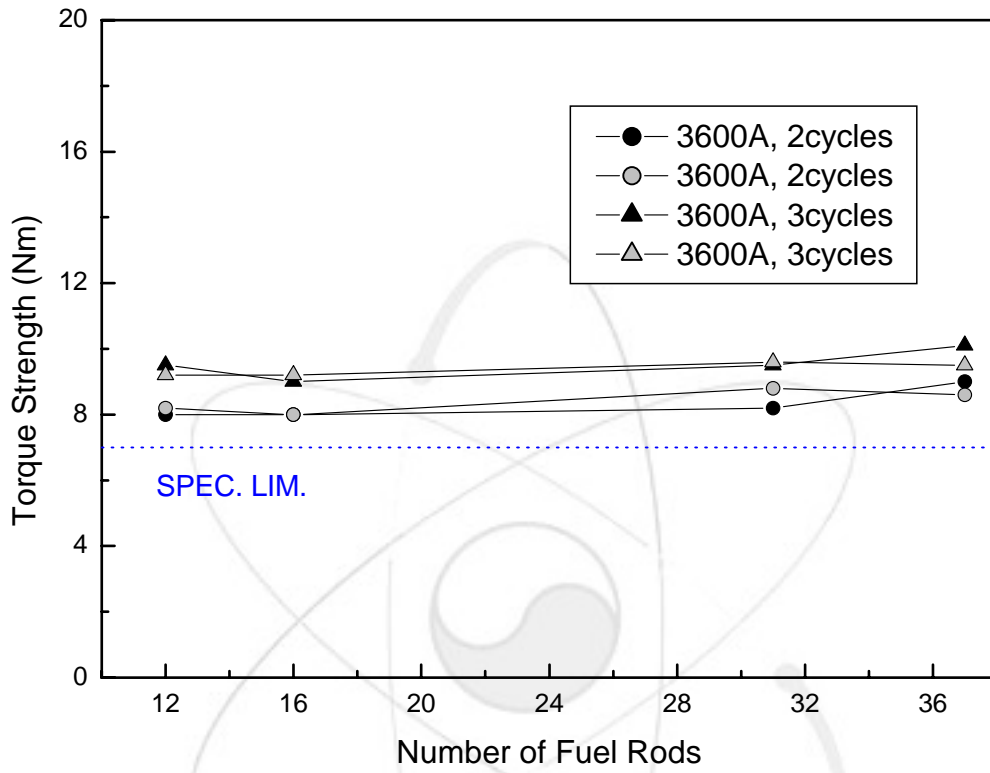


그림 3.10 전류 3600A, 시간 2-3 cycle 별 12-16-31-37 번의 토크 강도치 분포도

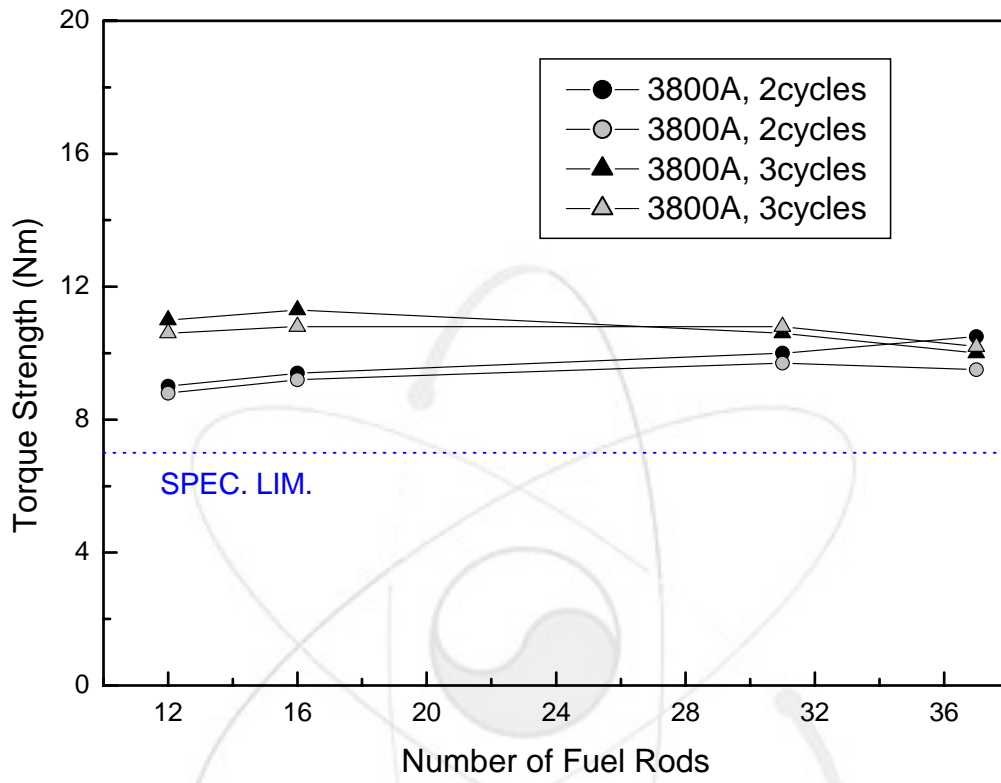


그림 3.11 전류 3800A, 시간 2-3 cycle 별 12-16-31-37 번의 토크 강도치 분포도

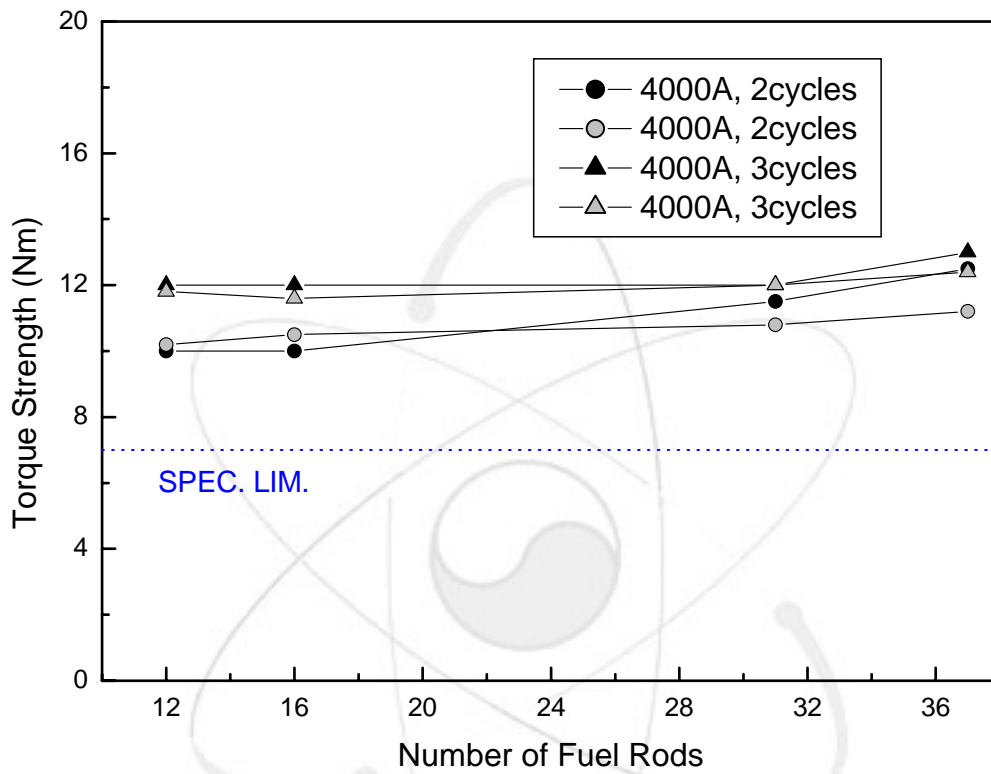


그림 3.12 전류 4000A, 시간 2-3 cycle 별 12-16-31-37 번의 토크 강도치 분포도

표 3.2 용접전류 3600A에 따른 토크 강도치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	내환토크(N · m)	외환토크(N · m)
A-12	2	8.0	
A-16		8.0	
A-31			8.2
A-37			9.0
B-12	2	8.2	
B-16		8.0	
B-31			8.8
B-37			8.6
C-12	3	9.5	
C-16		9	
C-31			9.5
C-37			10.1
D-12	3	9.2	
D-16		9.2	
D-31			9.6
D-37			9.5

표 3.3 용접전류 3800A에 따른 토크 강도치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	내환토크(N · m)	외환토크(N · m)
E-12	2	9.0	
E-16		9.4	
E-31			10.0
E-37			10.5
F-12	2	8.8	
F-16		9.2	
F-31			9.7
F-37			9.5
G-12	3	11.0	
G-16		11.3	
G-31			10.6
G-37			10.0
H-12	3	10.6	
H-16		10.8	
H-31			10.8
H-37			10.2

표 3.5 용접전류 4000A에 따른 토크 강도치 일람표

시편번호	용접시간(cycle)	내환토크(N · m)	외환토크(N · m)
I-12	2	10.0	
I-16		10.0	
I-31			11.5
I-37			12.5
J-12	2	10.2	
J-16		10.5	
J-31			10.8
J-37			11.2
K-12	3	12.0	
K-16		12.0	
K-31			12.0
K-37			13.0
L-12	3	11.8	
L-16		11.6	
L-31			12.0
L-37			12.4

## 2. Zr-4 접합판을 이용한 용접변형 시험

중수로 다발의 봉단마개와 접합판을 이용한 저항용접에서의 기하학적 구조 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다. 일반적으로 재료의 열전달이 높은 것일수록 큰 의미를 갖게 된다. 일반적으로 전기 저항용접은 용융 중에 응고가 일어나면서 제살 붙이기 용접이 수행된다. 여기서 저항용접에 있어서 응고형태가 한 방향으로 일어나게 한다면 용접하기가 매우 용이해지며, 전기아크용접에서 용가재를 사용하는 용융방법보다 용접금속내의 용융흐름을 쉽게 일어나게 해 준다. 저항용접 중에서 짧은 열 사이클로 인하여 균일한 온도분포를 이루어져야 하며, 저항열의 에너지공급과 용융되는 부피가 서로 일정하게 될 때 최적의 용접이 이루어지게 될 것이다.

봉단마개와 접합판 간의 저항용접은 특별히 열 변형에 민감한 기하학적 구조를 가지게 된다. 이러한 용접부의 변형은 대체로 열 용량이 클 경우 자주 발생하게 되며, 열 용량이 작을 경우 즉 용접된 단면적이 작아져서 열 변형은 방지할 수 있으나 봉단마개와 접합판 간의 계면(interface) 이 분리되어 접합판 용접에 적합하지 못하다. 여기서 핵연료 다발의 봉단마개와 접합판의 이음구조를 이루는 용접시편은 그림 3.13에서와 같이 기존의 다발 제품과 비교하면 열 용량에 따라서 열변형의 차이는 있으나 돌출부의 이음구조를 가지는 열 변형의 최소화를 위해서는 대체로 용접전류 3800A, 주전극의 압력 4.0BAR, 용접시간 3cycle 정도에서 양호한 측정 결과를 얻을 수가 있었으며, 특히 핵연료 제품성능의 향상 및 열 변형을 감소하기 위해서는 기존의 용접구조에서 돌출형 용접구조를 가지는 접합판 용접시편에서 가능해질 수 있으며, 이때 다발 제품의 공정단계에서 바로 실용화될 수 있는 구조설계가 고려되어야 한다. 그림 3.14는 용접전류 3800A, 주전극 압력 4.0BAR, 용접시간 3cycle 로 일정하게 하고 토크시험용 용접치구를 사용하여 내환봉 (연료봉 번호: 12, 16)과 외환봉 (연료봉 번호: 31, 37)의 용접시편을 height 게이지로 측정하여 접합판의 위에서 아래의 변형정도를 측정하였다. 그림 3.14에서 알 수 있듯이 다발 제품의 품질기준치인 0.56mm 보다 현저하게 작은 측정치로 나타내고 있다. 또한 내환봉 2개와 외환봉 2개를 가지는 봉단마개와 접합판 간의 간격은 다소 차이는 있지만 돌출형 접합판의 구조상에서 거의 밀착시킨 상태로 용접을 수행할 수 있었으며, 향후 시제품 용접제작 시 full size 형태의 구조를 가지는 37봉 다발 용접으로 수행하면 현재보다 더 유리할 것으로 판단된다. 여기서 열변형의 측정방법은 접합판의 아래 부분과 윗부분에서 height 게이지로 다섯 번 측정하고 평균치로 하였다.





(기존 원전연료 다발의 집합판 용접시편)



(다발 돌출형의 집합판 용접시편)

그림 3.13 기존 다발 집합판과 돌출형 집합판의 용접변형 비교

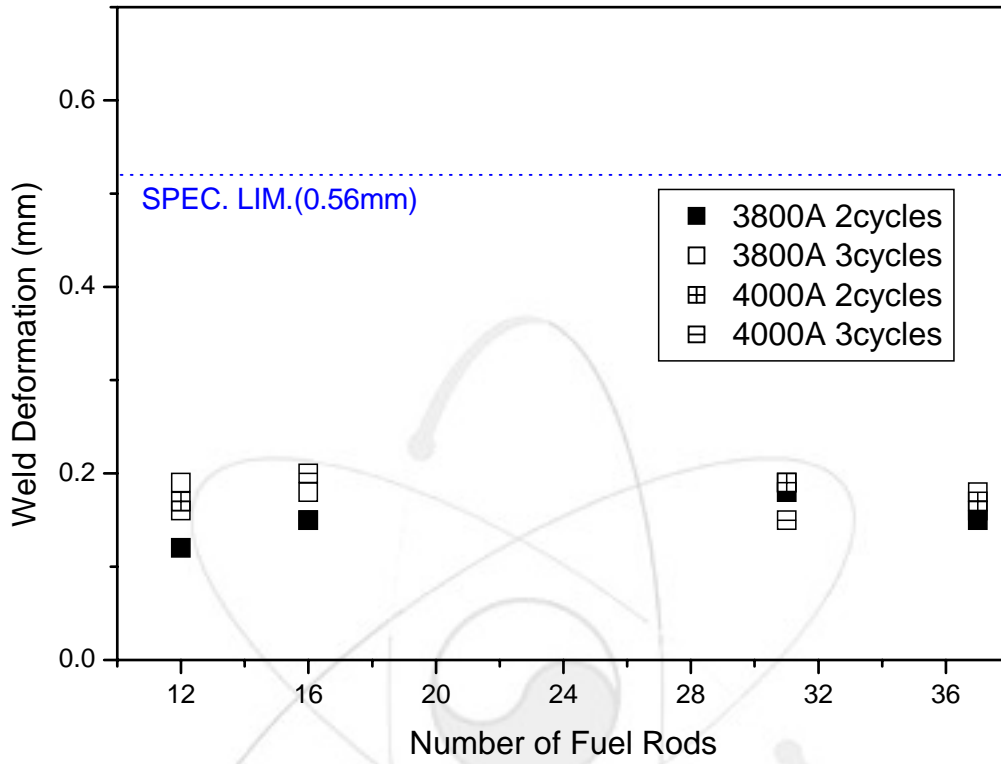


그림 3.14 용접전류 및 시간 별 12-16-31-37 번의 용접변형 측정

### 제 3 절 다발 전용용접기 설계 및 기술성 검토

#### 1. 다발 전용용접기 설계 및 제작성 분석

중수로 핵연료 다발 제조용 용접공정의 개념은 그림 3.15에서와 같이 ①의 봉단마개 용접된 연료봉을 조립치구에 고정하고 ②의 air cylinder를 이용한 조립치구를 A면 용접헤드부로 이송하고 ③의 연료봉이 장착된 조립치구 상단에 접합판을 원격 고정 후 상단용접이 이루어지고 ④의 B면 용접헤드로 이송하여 마지막 공정인 하단용접이 이루어진다. 이와 같이 용접공정이 이루어지기 때문에 기존의 제조 장비에 비하여 간결하게 설계되었다.

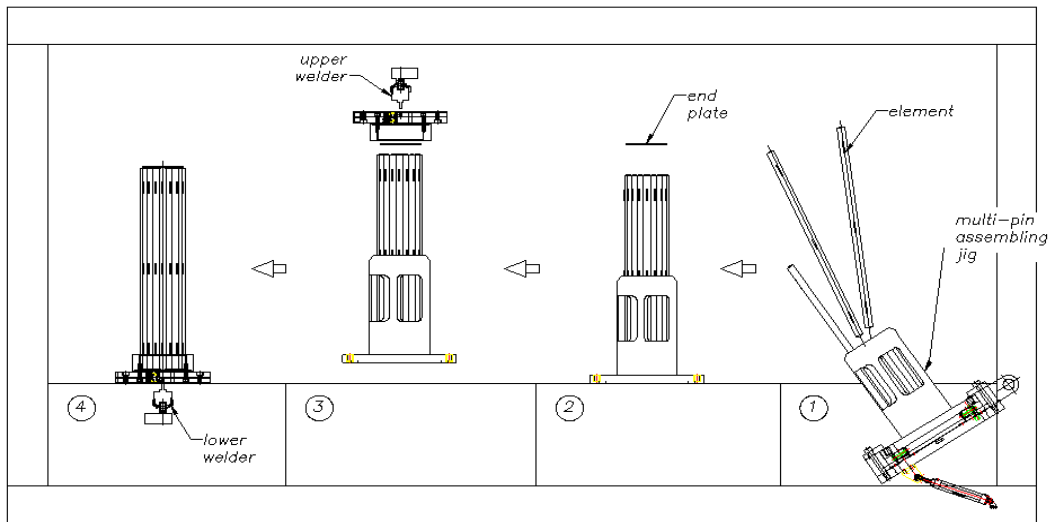


그림 3.15 중수로 다발 용접공정의 개념도

본 기술지원에서 기술 검토된 전용 용접기는 봉단마개와 돌출형 접합판 용접을 이용하는데 사용된다. 본 용접기는 표 3.5의 기술사양 및 표 3.6의 다발 설계조건을 만족시켜야 하며, 돌출형 접합판 용도로 취급이 용이하도록 특수구조를 가진 설계가 필요하다. 그림 3.16에서와 같이 봉단마개 및 접합판을 용접된 연료봉을 이용하여 일정규격의 다발 형태로 제조하기 위해서 용접시스템을 개념 설계하였다.

본 전용용접기의 주요 구성은 저항용접을 이용한 전원공급 장치, 용접헤드장치, 제어장치 및 돌출형 접합판 이송을 위한 조립장치 등을 들 수 있으며, 각 구성에 대한 상세 요소는 접합판 용접용 전극부, 다발제품의 용접순서를 제어하는 index controller, 다발의 조립형태로 구성된 후 용접위치까지 원격으로 이송해주는 transfer system, 완성된 연료봉을 다발 내의 정위치가 되도록 하고 또한 핵연료 다발 형태로 구성해주는 조립치구, 돌출형 접합판을 setting 해주는 이송치구 그리고 저항용접 시 산화를 방지하기 위한 Ar가스를 공급해 주는 보조가스부이다.

표 3.5 다발제조용 전용용접기의 기술사양

장치 제원	846(W)x1273(L)x1600(H) [mm]			
용접 방식	저항용접, 회전/직선 구동, 상하 공압 서보모터, PLC 프로그램 controller			
용접 사이클	Squeeze Cycle: 30 Hold Cycle: 30 Weld Cycle: 2			
공정 이동방식	단계적 수동 병렬 이동			
사용 전원	회전	최대토크(Nm)		1.88
		Voltage Constant(Volts/rad/s)		14.66
		Torque Constant(Nm/ Amp DC)		0.139
		Max Bus Voltage(Volts DC)		340
	직선	연속특성	정격출력(W)	400
			정격토크(Nm)	1.3
		전원설비용량(Kv A)		2.9
		정격전류(A)		2.3
		최대전류(A)		6.9
		속도 위치 검출기: Encoder, Servo Motor 1회전당 분해능:131072P/rev		
	용접헤드 압력	64 / 72 PSI		
	Diaphragm P	64 / 72 PSI		
용접접촉 압력	50 PSI			
사용 공압	6-7 (bar)			

표 3.6 중수로 다발 제조의 설계사양

Multi-pin Specifications	
○ No of pins	3 to 37
○ Length	495.30 ± 0.75mm
○ Multi-pin dia.	102.50 mm max.
○ O.D. of pin	13.08 ± 0.03 mm
○ I.D. of pin	12.24 ± 0.03 mm
○ Cladding tube	
-material	Zircaloy-4
-thickness	0.38mm min.
○ Endplate	
-diameter	91.1 ± 0.20 mm
-thickness	1.65 ± 0.05 mm

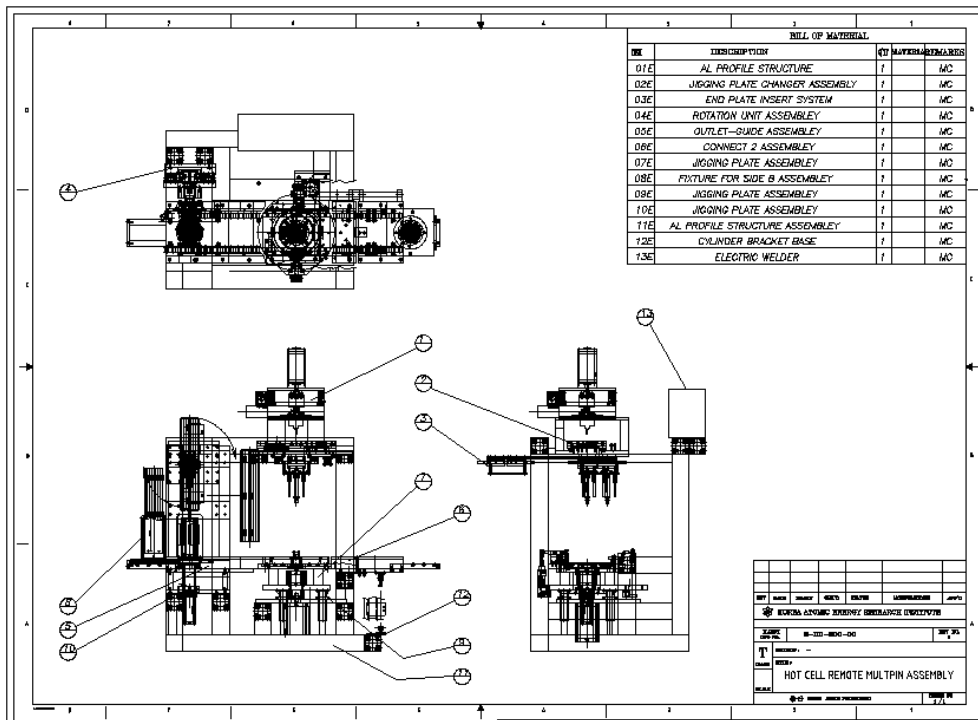


그림 3.16 다발 전용용접기의 제작 개념도

다발 전용용접기의 모델링 설계는 EDS사의 SOLIDEDGE V17을 이용하여 3차원 형상화 작업을 진행하였으며, 그림 3.17에서와 같이 저항용접기의 용접헤드의 3차원 형상을 구성하여 장치의 구조 형상, 전체적인 무게, 무게중심, 등 일반적인 사항을 사전 검증하고 동역학 분석을 통하여 운전 형태와 작업성 분석 및 공정순서에 따른 요소와 상황 분석을 검토할 수 있게 하였다. 실제로 다발용접의 과정을 상세하게 모의동작을 하여 여러 가지 공정순의 조작, 운전 동작 등을 보여 준다.

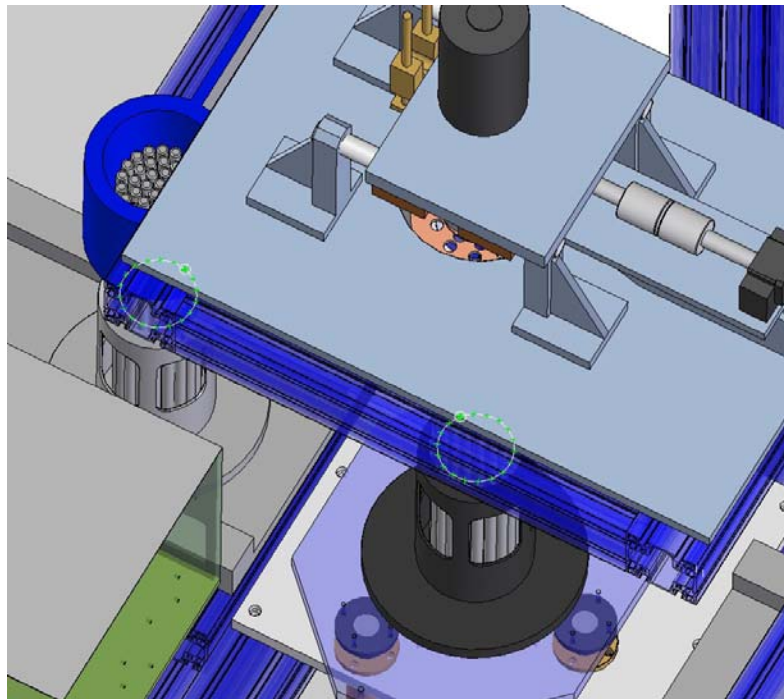


그림 3.17 다발 전용 용접헤드의 모델링 개념도

## 2. 다발 전용용접기의 제작 기술성 분석

먼저 다발제품의 용접기술 방안은 일반적인 용융 및 고상 방식을 들 수 있으며, 이중 용융방식인 TIG용접은 가장 단순하면서 비용 면에서 저렴하나 용접품질 면에서 다소 우려가 되고 있으며, 특히 용접 후 HAZ가 넓고 다량의 열 변형으로 접합판 용접에 주의가 필요하다. 현재 원전연료 공장에서 양산 중인 중수로 다발 제조용으로 사용되는 저항용접은 생산성이 높고 용접품질도 우수하나, 새로운 개념

의 돌출형 접합판에 활용하기 위해서는 전용용접기의 개발이 필수적이다. 또한 다발 제조장치의 복잡성과 용접품질의 예민함에 따라 전용장비의 유지, 보수 상 기술적 문제 등의 어려움이 있을 것으로 판단된다. 이외에도 레이저, 전자빔 용접의 응용도 가능하나 작업장 시설 내에 광섬유 전송 및 진공 챔버의 설치 등의 많은 투자 설치비가 필요로 하게 된다. 따라서 다발 제조를 위한 적합 용접기술은 전기저항에 의한 접합판 용접이 적절하며, 이에 대한 전용용접기의 설계 및 제작성이 검토되었다. 또한 다발의 제조공정은 봉단마개 용접된 연료봉들을 조립치구에 일정한 배열로 조립하여 그 양단을 접합판에 용접하는 것이다. 그리고 다발용접의 조립공정은 장치취급의 간결 및 자동조립이 고려된 기술이 필요할 것이며, 연료봉의 조립치구 장전, 다발 이송, index 고정 및 상단 저항용접 등이 마친 후 다발의 치수검사 및 용접부위 검사가 수행된다.

### 3. 다발 전용용접기의 전극헤드 기술 분석

다발 전용용접기의 상단 용접헤드는 그림 3.18과 같이 cast iron을 사용한 주물구조로 구성되어 servo motor, turn table 및 돌출형 접합판의 고정지그 등의 하중을 견딜 수 있도록 frame base 설계가 이루어졌다. 용접작업 시 용접감시를 용이하게 하기 위해 base frame 및 상판은 하나의 기둥에 의해 고정되어 있으며 기둥 주위에 조립치구가 air cylinder에 의해 이송되도록 하였다. 또한 frame base는 두 개의 work position으로 구분되어 설계되었으며, 이것은 병렬식으로 용접 작업할 수 있도록 다발의 A면 (상단용접) 및 B면 (하단용접)을 각각 용접할 수 있는 구조로 설계가 이루어졌다.

그림 3.19는 전용용접기의 상단용접에 사용되는 저항용접 전극부와 접합판 고정지그의 부품도이다. 용접헤드의 이송은 X, Y, Z축 방향 및 회전운동을 동시에 수행할 수 있게 설계되며, X, Z축 방향의 이송은 liner motion guide 및 ball screw를 사용하여 servo motor로 구동되도록 하였다. 또한 Z방향의 이송은 diaphragm cylinder를 사용하여 구동 저항을 최소화하여 저항용접 시 가압력이 유지될 수 있도록 하였다. 봉단마개와 접합판 용접 시 봉단마개와 접촉되는 가지전극 (2 point contact electrode)은 접합판과 접촉을 피하기 위하여 회전이 요구되며 전극 회전은 전극의 접합판 상단위치에 따라 servo motor에 의해 ball screw 구동으로 수행하도록 하였다. 전용용접기의 전극헤드는 봉단마개의 경사면과 가지전극이 편심상황에

서도 그 용접 point가 항상 접촉하여 일정한 압력을 유지할 수 있도록 전극부의 가지방향으로 편심에 따라 기울기가 자동 조절될 수 있도록 설계되었다.

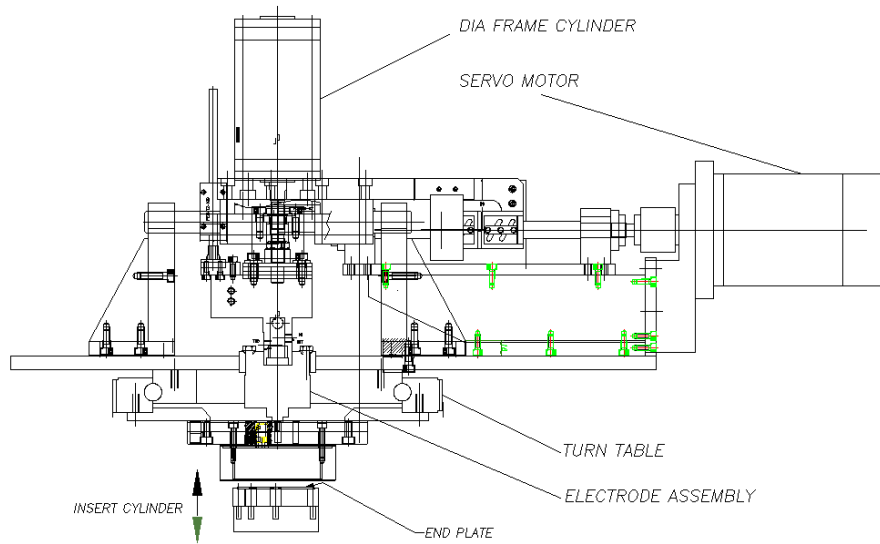


그림 3.18 다발 전용용접기의 전극헤드



그림 3.19 전용용접기의 전극헤드 부품 및 고정지그



#### 4. 다발 전용용접기의 용접공정 제어기술 분석

다발 제조를 위한 용접공정은 sequence 프로그램과 process 프로그램에서 결정하는 기본 변수가 필요하게 된다. 용접대상물이 접합판 용접부까지 이송되고 용접되며 다시 원위치에서 반복적으로 위치변경이 필요로 하는 자동시스템일 경우, 모든 동작은 sequence 의 프로그램으로 입력되어야 한다. 그림 3.20은 다발 용접의 제어장치 기본 구성도이다. 본체를 구동시키기 위해서 CNC 및 자동화 라인을 위한 기기는 주변부와 라인을 관리하는 main PC와의 링크를 위해서 PLC를 사용하게 된다. 다발 전용용접기는 2 개의 AC servo motor를 사용하는 세가지 축 (X, Z, C axis)으로 구성되며, X축과 Z축은 각각 용접헤드를 수평 및 수직 방향으로 2차원 이송을 하면서 용접상태를 결정하는 중요한 요소의 하나인 전극간의 거리를 일정하게 유지시키는 역할을 한다. C축은 접합판이 고정된 지그판을 회전 이송시킨다. 먼저 X, Z축의 이송에 의해 용접헤드가 사전에 설정된 프로그램된 위치로 이송되고 회전축인 C 축을 회전시키면서 37개의 용접 point를 용접순서에 따라 용접이 이루어진다. 또한 그림 3.20의 console부는 PMC 프로그램에 의하여 sequence 프로그램을 실행하며 전반적인 시스템 운영을 맡게 되며, 이때 PMC board는 CNC 내부 및 주변기기를 연결하는 매개체이며 입/출력 장치를 통하여 CNC와 주변장치의 상태를 감시하고 제어한다. Memory board에는 용접프로그램, PMC 프로그램, parameter 등이 저장되며, touch screen는 CNC와 관련된 다양한 기능 스위치 및 screen display로 이루어져 있으며, screen display는 실행중인 프로그램, 각종 parameter, weld cycles, 시스템 상태 및 알람 메시지를 표시하며, 작업자는 touch S/W를 이용하여 용접프로그램의 작성, 실시간 용접상태 감시, 용접순서 확인 및 parameter (전류, 전압 및 공압) 조작 등의 작업을 할 수 있다.

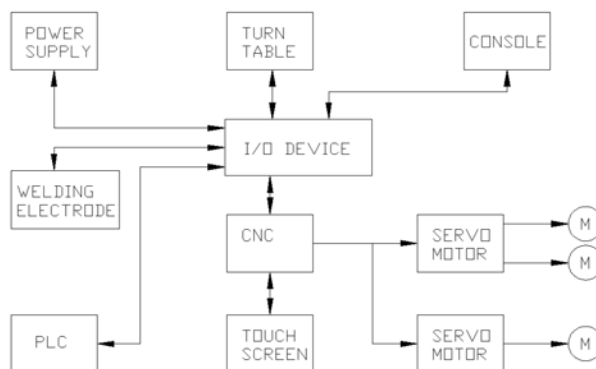


그림 3.20 전용용접기의 제어부 구성도

## 제 4 장 사업 목표달성 및 기여도

### 제 1 절 기술지원 의 목표 달성

국내 기존 핵연료 다발의 접합관 용접은 외국에서 들어온 용접기술을 이용해서 봉단마개와 접합관 간의 보편화된 spot용접이 수행되고 있다. 현재 핵연료 다발 용접 후 거의 15년이 지난 장시간으로 노후 된 수입용접기에 의해서 접합강도의 불균일성, 접합관 상단의 열 변형으로 인한 치수결함 발생 등으로 품질 면에서 큰 영향을 주고 있는 실정이다. 이에 따라 고가의 수입용접기 대신에 자체적으로 설계할 국산용접기를 이용하여 원전용 다발 제품에 바로 활용할 수 있으며, 축적된 돌기형 저항용접에 대한 database화를 구축하여 여러 산업분야에 활용토록 함에 있다.

본 기술지원에서 응용되는 저항용접은 이미 1980년 후반에 먼저 캐나다에서 연구하여 현재까지 활발히 적용되고 있다. 최근 들어 용접기술의 연구개발을 통하여 최신 용접방법의 실현이 가능하게 되었고, 또한 일반 산업계에서는 돌기형(projection type)을 이용한 저항용접이 자동차 부품이나 고부가가치의 정밀부품 생산에 이미 이용되고 있는 실정이나, 기존의 원자력분야에서는 평면형(plate type) 용접이음 구조로 설계된 저항용접이 계속 사용되고 있다. 이때 국내에서는 제작될 전용 용접기에 새로운 용접공법을 적용할 수 있는 시점에 와 있으며, 향후 신형 중수로 및 고속로 핵연료 집합체 제조에도 필수적인 핵심요소 기술로서 추진할 수 있다. 선진 여러 나라에서는 아직 새로운 용접공법의 연구가 활발하지 못하고 있는 상태이나 조만간에 곧 상품화를 위한 기술개발이 시작될 것으로 판단된다.

본 기술지원의 목표 달성을 위해서 기존 원자력 중장기사업에서 기 개발된 핵연료 다발 설계기술, 원격용접, 구동 제어기술 및 지르칼로이-4 용접 등의 봉단마개와 접합관을 이용한 핵연료 다발을 최대한 활용하여 최적의 용접조건을 개량하여 추진하였다. 또한 핵연료 다발제조에서 신개념의 돌기형 접합관을 이용한 저항용접에서 봉단마개와 접합관 간의 용접실험을 수행하였고, 용접부위의 접합강도(토크강도) 비교 및 금속학적 특성을 분석하고, 이에 대한 실험결과를 토대로 최적의 용접변수를 도출하면서 data-base화 하였다. 그동안 지르칼로이-4 봉단마개와 접합관 간의 저항용접에 대한 연구는 기존의 선진국에서 개발된 선행기술을 분석하면서 관

런 적용기술을 습득하고, 또한 기술 문헌조사를 통한 외국기술 현황을 파악하였고 적극적으로 활용하였다.

향후 돌기형 접합판을 이용한 저항용접을 확립한 후, 원전연료업체와 공동 참여하여 용접이음 설계가 고려된 핵연료 다발설계를 선정할 예정이며, 관련부서의 기계적 성능시험은 공동장비를 활용할 것이며, 아울러 전용용접기 설계, 제작이 완료되면 기술특허 출원을 실시할 예정이다. 본 기술지원의 참여기업에서는 신형 핵연료 다발의 전용용접기 및 돌기형 저항용접기술이 완성되면, 먼저 원전연료업체와의 공동실험, 기술성 분석, 핵연료 설계 반영 및 시제품 제작을 통하여 상품화 및 실용화를 추진할 예정이다.

## 제 2 절 기술지원의 기여도

본 기술지원의 경제적인 효과에서 볼 때 국내 중수로 핵연료 다발의 공급가격은 연간 200억 원 정도이며, 이중에 용접과 관련된 비용은 약 50억 원 정도에 이른다. 현재 캐나다 방식의 다발 용접할 경우 구조적 성능요건을 맞추는 데 한계가 있으며 동일한 다발용접의 이음형상에 대하여 용접방법을 변경하여 개선할 경우 구조적 성능요건을 용이하게 맞춤으로 인하여 봉단마개와 접합판 간의 형상설계에 더 큰 여유를 가질 수 있다. 또한 돌기형 저항용접 방법을 본 기술지원에서 제안하는 방법으로 개선하여 생산 경비를 줄일 경우 연료다발 제조비를 낮추고 연료 안전성 및 성능을 향상시킴으로서 궁극적으로 원자력 발전단가를 낮출 수 있어서 국민에게 혜택을 돌아가게 할 수 있을 것으로 본다.

본 기술지원의 산업적인 효과에서 볼 때 향후 국내 원전의 신형 핵연료 및 고연소도 연료 개발에도 중수로 핵연료 다발의 생산 공장에서 제조공정의 자동화에 의한 생산성 향상과 고성능 제품에 첨단 용접기술이 요구되고 있는 실정이며, 현재 관련기술의 신속한 국산화에 의한 가격 절감을 통하여 개량된 저항용접의 활성화를 기대할 수 있으며, 또한 국내 정밀산업의 고부가가치 제품에서 수입대체 효과 및 수출 확대를 기할 수 있을 것으로 전망된다. 또한 중수로용 핵심 구조부품으로 구성된 다발제품은 봉단마개와 접합판을 이용한 조립, 용접하여 개선된 저항용접 공

정을 확립하고 최적의 용접조건을 도출하게 된다. 확보된 기술은 국내의 중수로 연료 다발제품에서 접합강도가 우수하고 용접 품질 면에서 건전한 용접을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 또한 상용 원전의 핵연료 구조적 설계요건에 만족하는 고품질 및 고강도의 다발제품과 향후 신형 연료에 사용되는 중수로용 집합체의 시제품에도 바로 적용될 수 있다. 국내 고유의 국제경쟁력 있는 핵연료 다발 개발을 위해서는 산학연의 기능적 역할 분담과 유기적인 연계가 필수적이며, 국제경쟁력 있는 고유모델의 다발제품에 대한 요소기반 기술 확립과 기술 검증을 통한 실험결과의 사용을 산업체가 주도하여 고품질의 연료다발을 개발함으로써 관련 전문기관과 산업체간의 총체적인 연계수행을 통하여 중복적인 투자를 줄이고 빠른 시일 내에 우리나라에서 개발한 연료다발을 상품화하여 국가경쟁력을 확보할 수 있는 잠재력을 키울 수 있게 된다.



## 제 5 장 결론 및 활용계획

본 기술지원에서는 중수로 핵연료 다발 제조의 효율적인 공정기술 개선과 품질관리 향상을 위한 기술적 검증이 시도되었다. 또한 돌출형 접합관의 용접기술에 의한 효율적인 공정을 도출하고자 하였고, 핵연료 다발 제조에서 핵심공정인 봉단마개와 접합을 이용한 저항용접 및 조립공정과 용접변수에 대한 최적화를 도모하고 실용화를 위한 전용용접기의 설계기술에 대한 기술자문, 현장 교육 그리고 현장 활용에서의 부수적인 공정에 대한 기술검토가 이루어졌다. 이에 의하여 중수로 핵연료 다발 제조의 공정 개선 및 전용 용접장치의 설계, 성능시험이 수행되었고, 또한 실시간 작업에 대처할 수 있고 운전 및 보수 유지가 쉬운 공정 개발이 구축되었으며, 향후 돌출형 접합관을 이용한 저항용접 공정을 위한 기틀이 마련되었다. 따라서 국내에서 유일한 봉단마개와 접합관 간의 용접기술 및 자동화 공정의 상품화를 도모하기 위한 기반기술이 마련되었으며, 기존의 제조 방법보다 봉단마개와 접합관 간의 용접강도 및 변형 감소로 인한 품질 향상을 달성시킬 수 있었다. 본 기술지원에서는 중수로 핵연료 다발을 위한 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 품질관리의 문제점을 검토하여 이들 작업조건에 대한 여러 가지 용접변수에 미치는 특성을 조사하였다.

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

셋째로 돌출형 접합판을 이용한 저항용접의 강도시험을 수행하였으며, 이에 따른 용접변수 조건별 토크강도의 특성을 분석하였으며, 또한 돌출형 접합판의 용접강도 변동성(fluctuation)을 조사하기 위하여 기존의 평면형 접합판을 이용한 토크치와 비교하였다. 이때 돌출형 접합판의 강도시험 결과는 외환봉 및 내환봉을 이용한 허용 한계치(상단 외:9.6Nm/내:6.9Nm, 하단 외:8.5Nm/내:6.2Nm)보다 대체로 높게 나타났고, 용접강도의 변동성에서도 기존의 평면형 접합판을 이용한 토크치에 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 돌출형 접합판을 이용한 지르칼로이-4 용접은 기존의 평면형 접합판을 이용한 용접금속만큼의 금속학적 성질과 좋은 용접특성으로 나타내고 있었다.

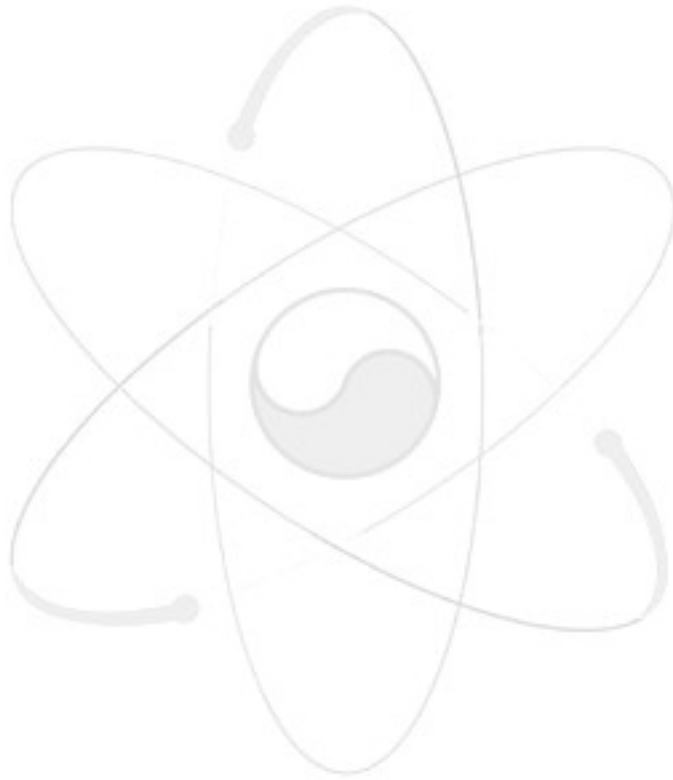
결론적으로 본 기술지원에서는 중수로 핵연료 다발의 봉단마개와 접합판 간의 저항용접기술과 이에 따른 용접부의 강도 및 변형 특성 조사를 통하여 돌출형 접합판 저항용접의 최적조건을 확립하고자 하였으며, 실제로 핵연료 다발의 시편에 돌출형 접합판을 공급하여 전용용접기의 작업조건을 위한 기본 방향을 제시하였다. 또한 이러한 실험 결과는 향후 국내의 중수로 핵연료 다발 제조에서 요구되는 봉단마개와 접합판 간의 다발용접에 직접 사용될 수 있는 공정기술의 기본 자료로 활용될 예정이다. 아울러 2009년도에는 원전연료업체와 긴밀히 협조하여 생산 공정에 활용하기 위한 돌출형 접합판 용접의 샘플제작 및 성능시험을 수행해 나갈 예정이며, 이를 통하여 저항용접의 실용화를 실현하고, 동시에 국내 정밀가공업체에서 제반 용접기술이 활성화될 수 있도록 보다 장기적인 기술개발을 추진할 예정이다.

## 제 6 장 참고문헌

- [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, Welding 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)

## 부 록

1. 기술자문 일지 ..... 72
2. 봉단접합판 돌출시험 기록서 ..... 108
3. 봉단접합판 변형시험 기록서 ..... 113





# 기술 지원 방문 일지

2007 年 11月 19日 (月)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 사업계획 목표 설명

1. Zr-4 endcap과 endplate을 이용한 저항용접의 최적화 확립
2. Zr-4 endplate 용접부의 접합강도 균일화 및 용접결함 방지
3. 중수로용 다발제조용 저항용접헤드 기본설계 및 성능시험

## □ 기술지원내용 설명

- Zr-4 endcap과 endplate 용접이음의 돌기형상 설계 및 최적조건 선정
- 다발 내환봉 및 외환봉별 토크강도 시편 설계 및 시험 분석
- 다발용 저항용접헤드 설계 및 제작

## □ 기술지원관련 기술협의 및 자료 제공

1. Endplate 기하학적 형상 설계 및 제작관련 전문업체와 기술협의 예정
2. Metals Handbook 9th edition의 projection welding 자료수집 및 제공
3. 용접헤드부 제작관련 base part별 설계사양 검토 및 구매 검토 예정

연구 책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

다발제조 관련 담당 작업자에게 사업진행에 대하여 설명하였고  
중수로 다발제조공정 관련 현장의 기술적 문제점 등을 제시하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2007 年 11月 27日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ Endplate 기하학적 형상에 대한 시편준비 계획 수립

- 1단계 : 12월중 추진 (CNC 펀칭가공 전문업체 방문 및 제작기술 협의)
- 2단계 : 2월중 추진 (CNC 펀칭을 이용한 endplate 시편제작 실시)
- 3단계 : 3월중 추진 (저항용접 이용한 기초실험 및 형상별 시편 분석)

□ 다발용접용 전용용접헤드부 설계관련 기술협의 검토

1. 용접전극 part 자료수집 예정(전문용접기회사의 기술자료 조사 예정)
2. 전용 용접헤드부의 개념 파악 및 제작성 기술검토
3. 돌기부 형상의 endplate 용접설계 관련 기술검토

□ 중수로 다발제조관련 기술협의 및 자료 제공

1. KNFC의 수입용접기 특성파악 및 설계도면 관련 기술 토의
2. 돌기부(projection) 시편을 이용한 용접실험에서의 기술적 문제점 토의
3. 전용 용접헤드부의 기술사양 검토 및 관련 maker 자료제공

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

돌기부 용접시편을 위한 기술적 특성 및 현장에서의 문제점을 상세 내용별로 파악하여 담당자들에게 설명하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2007 年 11月 30日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 돌기부 용접시편 설계관련 재검토 및 기술토의

1. Projection별 형상 기술검토 (Pro-E 작성된 도면 참조)
  - Dimple type : 두께 1.56mm, 펀칭 직경 3mm, 펀칭깊이 0.52mm
  - Concave type : 두께 1.56mm, 펀칭 직경 3mm, 펀칭깊이 0.52mm
  - Nail type : 두께 1.56mm, 펀칭 직경 3mm, 펀칭깊이 0.52mm
2. CNC 펀칭가공을 위한 punching die 설계관련 기술적 검토
  - Endplate 형상에서 width 5mm 내의 설계 가능여부 확인
  - 용접시편의 정확한 용접위치(37봉 이용시)에 가공 가능한지 확인 필요

□ 전용 다발용접헤드부의 제작관련 기술협의 및 자료 제공

1. Be-Cu 용접전극과 텅스텐 합금 전극 사용에서의 기술적 차이점 검토
2. KNFC 용접기관련 설계도면, welding manual 검토 및 기술자료 제공

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

현장의 다발용접기 관련 현재의 기술적 애로사항 및 다발용접부의 접합강도에 대해서 설명하였고 기술 토의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2007 年 12月 4日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ Endcap + Endplate 용접설계의 유의점에 관한 검토내용

1. Endcap + Endplate의 기하학적 형상 설계 검토
2. Endcap + Endplate의 용접이음 구조적 모델링 분석
3. 미세 편칭을 최대한 효과적으로 가공방법(유압식 CNC장치) 모색

□ Projection 용접의 기술적 분석

- 돌기형상별로 endplate의 돌기부를 편칭 가공함
- 평탄한 전극의 사이에 물려 전류를 흘려 보내서 nugget 용접금속을 얻음
- 표면의 요철부가 없고, 용접위치가 항상 일정하게 제어가 될 수 있게 함
- 돌기부에 대한 용접열의 집중성이 높이게 함

□ 전용 다발용접헤드의 구성 설명 및 기술적 토의

1. 저항용접기의 기본적인 용접조건 (가압력, 전류, 통전시간)
2. 용접전극 ; 열전도도, 전기전도도 및 내마모성이 우수한 것이 필요.
3. 전극의 재질 ; 동합금(BeCu), Cu-1/2%Cr), W-alloy

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접헤드의 구성에 대하여 설명하였고  
endplate 용접에 관한 현장의 기술적 문제 등을 제시하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2007 年 12月 12日(水)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 다발용접기 특성에 대해서 기술적 설명

- 저전압, 고전류를 공급하는 변압기(transformer)의 역할
- 작업속도가 빠르고 대량생산에 강한 장점을 가지고 있는 장점
- 용접부의 특징은 HAZ 폭이 좁고, Zr-4 용접인 경우 가압 및 통전제어에 의해 용접과정 수행. 단, 용접검사에서 비파괴 검사방법이 없음.

## □ 중수로 다발용접에 관한 기술적 토의

1. 월성형 연료집합체 : 37봉 (중심봉 1개, 내환봉 6개, 중환봉 12개, 외환봉 18개) 설계규격에 의하여 일정하게 배열된 구조임
2. 연료집합체 용접공정은 37개의 연료봉을 특수 설계된 조립치구에 의해 일정한 배열로 조립하여 그 양단(상단 및 하단)을 endplate에 용접함
3. 용접형상이 복잡하여 전극의 위치결정 및 위치별 용접조건에 적절한 제어가 곤란하여 양산 공정의 적용시 공정관리가 용이하지 않음
4. 용접품질의 안정화 및 생산성 확보를 위하여 전극의 위치 결정 및 위치별 용접조건에 적정제어가 가능한 다발용접기의 제작이 불가피함

연구 책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기의 설계를 위한 전반적인 기술적 기능, 설계조건 등을 상세하게 숙지하여 생산직 담당자들에게 설명하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2007 年 12月 18日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 전용 다발용접기의 설계 및 기술적 토의

1. Welding timer

- 기본 사이클 : squeeze time, welding time, holding time
- 용접위치별 용접전류를 setting 하여 일정한 전류를 흐르게 하는 설계

2. Welding assembly fixture

- 집합체 용접에 요구되는 용접위치는 37개로서, 위치결정은 전극봉치의 전후, 좌우 운동 및 집합체의 회전운동으로 조합되는 치구
- 전극봉치의 운동은 공압 실린더, LM guider 및 stopper의 조합으로 구성되며, 회전운동은 공압의 rotary index table로 수행되어야 함

3. Assembly rotation 기술적 검토

- 집합체는 양면이 용접되어야 하며, 1차 용접을 위한 준비 및 2차 용접을 위한 준비, 회전을 수행할 수 있는 기능이 요구됨
- 공압 실린더에 의한 집합체의 위치이동 및 집합체 승강기구로 작동됨

□ 전용 다발용접헤드관련 기술협의 및 자료 제공

1. 용접전극관련 재질 검토 및 자료수집 진행중 (전문기업체 방문 예정)
2. CE 캐나다의 다발용접관련 기술자료 제공 및 기술사양 검토

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 작업자에게 다발용접의 설계에 대하여 설명하였으며, 이에 따른 현재의 다발용접에 대한 기술적 문제 등을 제시하면서 토의하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008 年 1月 8日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 기존 다발용접기 설계의 유의점에 관한 검토내용

1. 용접지그 본체에 연료봉을 고정
2. 용접지그 본체를 Zr-4 endplate를 조립
3. Air cylinder 를 이용하여 용접헤드로 이송, 용접 수행.

□ 신규 다발용접기 설계의 유의점에 관한 기술적 분석

- Stepping motor를 이용하여 한 방향으로 회전하도록 설계
- 준비작업 공간에서 용접지그 본체에 연료봉을 고정한 다음,
- 지그본체에 Zr-4 endplate를 조립한 뒤 상단 및 하단 용접헤드로 이송
- 상단 용접이 완료된 다발의 하단 용접은 맞은편 용접헤드에서 용접수행.

□ 전용 다발용접기에 대한 기술적 토의

1. 회전식 작업이 가능함.
2. 기존 CANDU 용 용접기보다 효율적임.
3. 시간당 20 - 24 다발(bundle)의 제조가 가능함.

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 신규 다발용접기에 대하여 설명하였고  
다발용접기 설계에 관한 현장의 기술적 문제점 등을 제시하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 1月 18日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기의 프레임 및 기계부품에 대해서 기술적 설명

- 다발용접기의 base 및 상부 전극헤드 고정부  
: Cast iron 을 사용한 주물구조로 설계
- 용접헤드, 지그본체 및 hoist 등의 기구부품의 하중을 견딜 수 있음.
- 용접 시 접근 및 작업 감시를 용이하게 하기 위해 base와 상단부분은 하나의 column 에 의해 고정되어 있음.

또한 column 주위에 assembly jig 이송장치가 설치되도록 설계됨.

□ Base 부품에 관한 기술적 설명

1. Base 는 4개의 재가 position으로 구성됨.  
대각선 위치에서 상단 및 하단을 동시에 용접할 수 있도록 구조 설계.
2. 나머지 대각선 위치에서는 용접준비 작업을 수행하도록 설계되었음.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기의 프레임에 대한 전반적인 기능, 설계 조건 등을 상세하게 설명하여 생산직 담당자들에게 숙지시켰음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장



# 기술지원방문일지

2008 年 1月 25日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 전극 이송기기 부품에 대한 기술적 토의

1. 전극 이송장치는 X, Y, Z 방향 및 회전운동을 동시에 수행하도록 설계.
  - X-Y 방향 이송 : Linear motion guider 및 ball screw를 사용 servo motor로 구동하도록 설계
  - Z 방향 이송 : Diaphragm cylinder를 사용하여 구동저항을 최소화, 순간적인 용접 squeeze 에도 가압력이 유지되도록 설계.
2. Endplate와 endcap이 접촉되는 가지전극(2 point contact electrode)
  - Zr-4 접합판과의 접촉을 피하기 위하여 회전이 요구됨.  
전극 회전은 전극의 접합판 위에 따라 servo motor 에 의해 ball screw 구동으로 수행하도록 설계됨.
3. Welding head의 기술적 검토
  - Welding head는 봉단마개의 경사면과 가지전극이 편심 상황에서도 만나는 점이 항상 일정한 압력을 유지하도록 전극의 가지방향으로 편심량에 따라 기울기가 자동 조정될 수 있도록 설계되었음.

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기의 전극이송 시스템에 대하여 설명하였으며, 이에 따른 다발용접에 대한 기술적 문제 등을 제시하면서 토의하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 2月 5日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기의 용접위치 결정치구에 관한 기술 검토내용

1. 집합체 endplate 용접에 요구되는 용접위치는 37개로서  
이에 대한 위치 결정은 전극봉치의 전후, 좌우 운동 및 집합체의 회전운동으로 조합되게 설계.
2. 전극봉치의 운동은 공압실린더, LM guider 및 stopper의 조합으로  
구성되며, 집합체의 회전운동은 공압으로 rotary index table로 수행.

□ 다발용접기의 다발시편 장입, 탈착 및 회전에 관한 기술 분석

1. 다발시편은 양면이 용접되어야 하므로 1차 용접을 위한 준비 단계.
2. 또한 2차 용접을 위한 준비 및 회전을 수행할 수 있는 기능이 요구됨.
3. 이 기능은 공압실린더에 의한 용접시편의 위치이동과 승강기구로 구성.

□ 다발용접기의 전극 회전기구에 대한 기술 분석

1. 다발용접시 전극과 봉단접합판의 간섭을 피하기 위하여 용접위치에  
따라 전극을 회전시켜 주는 기능이 요구되며, 이것은 공압실린더,  
stopper 및 특수 베어링의 조합으로 설계되어야 함.
2. Sequence 제어기는 PC(programmable controller)를 사용하여 전체적인  
용접순서 및 용접위치별 변수 조건을 자동으로 수행하도록 설계됨.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접기의 용접위치 결정에 대하여 설명하였고  
다발용접기의 설계관련 현장의 기술적 문제점 등을 제시하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008 年 2月 15日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 집합체 조립용접에 대한 기술적 설명

- 월성형 연료집합체는 약 493mm 의 연료봉들이 일정한 간격으로 배열되어 조립된 원통형 구조물(cylindrical bundle structure) 로서,
- 중심봉 1 ea, 내환봉 6 ea, 중환봉 12 ea, 외환봉 18 ea 의 총 37개
- 양단을 지지하고 있는 2개의 봉단 접합판(end-plate)인 upper end-plate, bottom end-plate 으로 구성되어 있음.

□ 다발 조립용접방법 및 품질검사에 관한 기술적 설명

1. 집합체의 조립은 연료봉의 양단 및 봉단 접합판과의 국부적인 용접 즉, spot welding에 의해 수행되며, 접합방식은 전기저항을 이용한 용접방법.
2. 조립된 집합체 구조물에 대한 품질 특성은 봉단과 접합판과의 토크강도(torque strength)와 함께 연료봉 및 접합판 형상에 대한 엄격한 치수기준에 의해 적용됨.

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기의 집합체 조립의 용접방법 및 품질 특성에 대해서 상세하게 설명하여 생산직 담당자들에게 숙지시켰음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008年 2月 26日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 현재 양산중에 있는 핵연료 조립용접기에 대한 기술적 현황

1. 기존의 양산용 조립장비 현황

- 자동저항용접기(automatic resistance welder)  
기존의 용접접합부 설계 형상에 대한 공정 파라메타(process parameter) 실험적 분석을 통하여 최적조건의 변수를 설정하고,
- 최적변수에 의한 검증시험(verification test)에 의한 공정자격 승인시험(process qualification test)을 수행, 그 실험결과를 바탕으로 연료 집합체 조립용접공정의 관리 조건, 기기작동 및 작업지침 등이 확립되고 있음.

2. 공정 파라메타 실험 및 검증기술의 분석

- 저항용접에 의한 집합체 조립용접 공정의 주요변수는 전류, 용접사이클, 전극압력 및 재료의 표면조건 등이다.
- 집합체에서 37개의 연료봉은 집합체내 위치에 따라 다른 곡부 형상의 접합판에 용접되고, 이들은 1개씩 순차적으로 접합되기 때문에 연료봉의 위치 및 용접순서에 의해 다른 파라메타의 조합이 필요함.

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 기존의 양산용 다발용접기의 현황에 대하여 설명하였으며, 이에 따른 조립용접에 대한 기술적 문의 등을 제시하면서 토의하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 3月 4日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 다발용접기의 장비 및 공구에 관한 기술 검토

1. 기존의 제작된 저항용접기, 용접지그 및 전극 등을 사용하여 용접가동 프로그램모드(program mode of welding operation)의 설정을 위한 예비실험과 주요 공정 파라메타의 기술 분석 및 최적조건 설정을 위한 예비실험을 수행할 예정.

## □ 다발용접기의 장비 및 공구의 사양 기술 분석

1. 자동식 저항용접기 : 장비번호 #11-1
2. 용접지그 : 37봉 JAO-W800-8
3. 전극 : EA4-W800-110

## □ 다발용접기의 전기적 용접기능에 대한 기술 분석

1. 저항용접기는 정지식 점용접기(stationary spot welder)로서, 최대 4개의 용접 프로그램 mode의 수행기능을 가지고 있음. Thyristor 출력제어 방식에 의한 정전류 제어(constant current control). 및 정전압 제어(constant voltage control) 기능이 선택적으로 가동. 이것은 최대 2단 통전(two-stage current firing) 기능을 가지고 있음.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접기의 전기적 기능에 대하여 설명하였고 다발용접기관련 용접작업의 기술적 문제점 등을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008 年 3月 14日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 전극부품에 대한 기술 검토

- 전극은 봉단 접합판에 접촉되는 상부 전극(upper electrode)와 봉단마개에 접촉되는 가지전극부(lower electrode)로 구성됨.
- 전극의 재료는 현재 전량 캐나다에서 구입되고 있으며, 사양은 모두 Cu-Be 합금으로서 RWMA(Resistance Welder Manufactures Association) group A calss III 에 해당됨.

□ 다발용접의 실험방법에 관한 기술적 설명

1. 연료다발의 조립용접시 연료봉의 위치, 접합되는 봉단 접합판의 단면과 형상, 연료봉의 용접순서에 따른 용접기의 프로그램 모드와 설정된 프로그램 모드별 용접파라메타의 사용 및 관리범위를 설정하기 예비실험을 수행하였음. 실험 data에서 선정된 최적 용접파라메타들은 이후에 수행될 용접시편을 이용한 실험자료로서 이용될 예정임.

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기의 주요 전극부품 및 기본적인 용접실험에 대해서 상세하게 설명하여 생산직 담당자들에게 숙지시켰음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008年 3月 21日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 용접실험에 대한 기술적 설명

1. 실험에 사용된 연료봉은 3 종류로 구분됨.
  - 봉단마개가 용접된 길이 80-100mm 의 공정모의용 (process simulation)연료봉과 연료소결체가 장전되지 않은 유사 연료봉(dummy fuel rods)과 실제로 공정용 연료봉(prototype fuel rods)이 준비됨.
  - 연료봉 및 봉단 접합판의 치수는 월성형 연료의 작업공정도에서 참고하였으며, 참고도면은 OS-4500, 4700에 각각 나타내고 있음.
2. 용접실험에서 주요 파라메타의 최적조건 설정을 위한 실험 절차는,
  - 전극 압력 예비설정
  - 용접전류(주전류) 예비설정
  - 용접 및 유지시간(holding time) 확인
  - 전극 압력 확인
  - 용접전류 및 보조전류 확인

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기를 이용한 용접실험에 대해 설명하였으며, 이에 따른 조립용접에 대한 기술적 문의 등을 제시하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 4月 1日 (月)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ Endcap과 endplate를 이용한 용접실험에 대한 기술적 설명

1. 현재 핵연료다발의 조립용접에 대한 견해

- 연료봉 양단과 봉단 접합판의 국부적인 접합 이음구조를 가지는 점에서 점용접(spot welding)으로 분류됨.
- 봉단마개의 접합단면 형상을 고려하면 돌출형 용접(projection welding)의 일종으로도 분류될 수 있음.

2. 봉단 접합판용접(endplate welding)의 기본원리에 대해서,

- 연료봉과 봉단 접합판은 용접지그에 의해 고정
- 용접사이클이 시작되면 공압실린더의 작동에 의해 작동됨.
- 하부전극은 봉단마개의 양쪽 경사면에 접촉되도록 설계
- 상부전극은 접합판 국부표면에 차례로 접촉되도록 설계
- 전극에 전달되는 압력은 실린더 피스톤의 작동 스트로크와 용접헤드 스프링의 압축변위에 의해 결정됨.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접 조립에 대한 기본적 원리에 대해 설명하였으며, 이에 따른 조립용접에 대한 기술적 문의 등을 제시하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장



# 기술 지원 방문 일지

2008 年 4月 15日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 봉단 접합판 용접(endplate welding)의 상세기술 내용 검토

- 서로 다른 두께 피복관을 이용해서 저항용접에 의해 접합하고자 할 때, 접합되는 재료의 유효두께 비율(effective thickness ratio)과 발생열의 국부 집중 및 균형(heat localization & balance)을 고려되어야 함.
- 전극의 재질과 접촉면적이 결정되면 연료봉단과 접합판의 설계형상 및 접합부의 품질요구 조건을 고려해야 함. 이때 봉단마개 용접 프로세스의 일정량을 응용시켜 봉단접합판 재료내의 용접침투(weld penetration), 열적변형 (thermal distortion), 전극 자국(electrode indentation) 등을 최소한으로 유지하면서 필요한 접합강도를 얻는 것이 필요함.

연구 책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

봉단마개와 접합판을 이용한 용접의 상세 기술내용에 대해서 설명하여 담당자(부품설계담당) 및 생산과장에게 숙지시켰음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 4月 23日(水)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 봉단마개와 접합판의 용접에 의한 단면사진 관찰 및 기술 검토

1. 용접사이클(weld cycle)이 진행되는 단계별로 봉단마개 프로젝션의 변형상태 및 용접너겟(weld nugget)의 형성과정을 관찰하였음.  
이때 용접변수로서, 각 모드별로 설정된 용접전류 및 압력의 설정범위는 용접실험의 결과에서 용접의 안정성(weld stability)을 유지하면서 토크강도와 다발의 제반 치수규격을 만족시키는 범위에서 설정됨.

□ 지르칼로이-4 접합판 용접의 품질관리에 대한 기술 분석

1. 각 모드별로 용접압력 조건에 따른 전류값은 용접과열(weld expulsion), 스파터(spatter), 과도한 전극자국(electrode indentation) 등의 불안정한 용접결함이 발생되지 않은 최대의 전류밀도에 해당되는 값을 설계해야 함.
2. 실제의 용접공정에서는 용접안정성이 유지되는 범위 내에서 최대의 전류밀도에 해당되는 용접전류와 압력의 조합을 설정하는 것이 효과적임.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 접합판용접의 단면조직 관찰 및 미세조직을 설명하였고 용접결함에 대한 질문을 통하여 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 5月 14日(水)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 봉단마개와 접합판을 이용한 용접성(weldability)의 기술적 설명

- 저항용접시 텅스텐 전극과 재료표면 또는 접합되는 재료간의 접촉저항 (contact resistance)과 함께 저항열 발생속도를 좌우하는 전류밀도 (current density)의 범위내에서 선정되어야 함.
  - 실제의 용접공정에서는 용접안정성이 유지되는 범위내에서 최대의 전류밀도에 해당되는 용접전류와 압력의 조합을 설정하는 것이 효과적임.
- 신규로 제작된 다발용접 제품을 위해서 필요한 사항은,
  - 저항용접기
  - 연료봉 조립지그
  - BeCu/W-alloy 전극봉
  - 제작 시방서
  - 품질관리지침에 의거 용접자격승인시험을 수행.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기를 이용한 시편의 용접성에 대해 설명하였으며, 이에 따른 상세한 기술적 문의 등을 제시 및 토의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 5月 20日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 접합판용접 모의실험에 대한 기술 검토

- 용접파라메타의 실험결과에서 설정된 변수를 이용하여  
접합판 모의시편(simulation specimens)과 연료봉시편을 제조하여  
관련 지침서에 따라 용접강도시험 및 치수검사를 수행.
- 저항용접기 및 용접치구에 의해 용접된 다발은 연료봉단과  
봉단 접합판과의 토크강도와 제반의 치수 규격을 만족시키고 있었음.

□ 다발용접의 접합강도에 관한 기술적 설명

1. 용접모의용 시편과 다발의 치구에 의한 용접시편에 대한 접합강도  
시편결과로부터 공정감시(process monitor)용으로 제작되는 시편의  
접합강도의 관리한계를 결정해야 함.
2. 모의용 용접실험에서 나온 결과는 실제의 공정가동에서 제시한 토크  
강도(torque strength)와 다발 치수품질(dimensional quality) 특성에  
대해서 분석하였음.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기를 이용한 지르칼로이-4 접합판용접의 모의실험에 대해서  
상세하게 설명하여 생산직 담당자들과 토의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008年 5月 26日(月)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기을 이용한 모의용접시편의 토크강도에 대한 분석

- 1차 및 2차 모의용접실험에서 다발용접 시편중에 외환연료봉 (outer-ring fuel rods) 의 토크강도(N.M)가 나타내고 있음.  
외환연료봉에 대한 공정규격(process spec.)에 의거해 95% 신뢰도의 접합강도 하한치를 나타내고 있음.

□ 다발용접시편의 접합강도 측정 방법

1. 공정모의용 연료봉들의 접합강도는 UO<sub>2</sub> 소결체가 장전된 공정용 연료봉들에 비해 다소 높은 강도를 보여줌.
2. 시편에 나타난 종류별 토크강도의 평균치(X)와 표준편차(S)는  
1차 모의시편 X=9.75 N.M, S=0.73, 다발시편 X=8.72 N.M S=0.73  
2차 모의시편 X=9.66 N.M, S=0.67, 다발시편 X=8.72 N.M S=0.67
3. 연료봉의 중간, 내환 및 외환 범위의 접합강도를 나타내고 있음.

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접의 용접시편을 이용한 토크강도에 대하여 설명하였고 다발용접시편의 접합강도 측정법에 대해서 논의하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 6月 2日(月)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 연료봉들 간의 접합강도 차이(fluctuation)에 대한 기술적 설명

1. 각각의 연료봉들에 대한 접합강도의 차이는 크게 2가지로 구분,
  - 연료봉의 위치에 따라 상이한 봉단접합판의 형상, 압력전달 조건, 용접순서 등에 기인함.
  - 공정모의용 시편과 다발 용접시편간의 토크강도의 차이는 용접압력에 대한 연료봉의 강성도(rigidity) 및 열확산(heat dissipation)량의 차이에서 기인된 것으로 판단됨.
2. 모의 용접실험에서 주요 파라메타의 설정시 유의 조건은 다음과 같음,
  - 전극 압력 설정
  - 용접전류(주전류) 설정
  - 용접 및 유지시간(holding time) 확인
  - 전극 압력 확인
  - 용접전류 및 보조전류 확인

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기를 이용한 토크강도 차이에 대해 설명하였으며, 이에 따른 다발용접 시 유의해야 될 용접변수 들을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 6月 13日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 용접치구의 개량에 관한 기술 검토

- 다발은 37개의 연료봉이 규정된 일정한 형태로 배열하여 그 양단을 봉단접합관에 용접함으로서 제조된다. 이때 연료봉들을 일정한 형태로 정렬하고 양단에 봉단접합관을 일정한 위치에 용접하기 위해서는 특수하게 설계된 용접치구(welding jig)를 사용해야 함.
- 현재 사용되고 있는 치구는 정확한 형태로 연료봉을 정렬하여 용접할 수 있으나, 치구 자체의 조립 및 해체에 많은 작업시간이 소요됨.
- 비생산시간(non-productive time)이 많은 제조방법으로는 공정의 활용성이 어렵기 때문에 조립 및 해체가 용이한 용접치구를 새로이 설계할 필요가 있음.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기를 이용한 특수 용접치구에 대해서 기술 검토하였으며, 설계담당자 및 생산직 과장들과 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 6月 24日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 종래의 치구 및 다발조립에 대한 기술 검토

1. 종래의 용접치구에 의한 작업은 다음과 같이 수행.

- 두개의 지지축에 bottom grid 및 middle grid를 nut로 고정시키고 연료봉을 장진한 후 상단 upper grid 및 support ring을 조립한다.
- Upper grid 장진되어 있는 봉단접합판과 연료봉단을 모두 용접한 후 upper grid 및 support ring을 제거하고 그 위치에 bottom support를 조립하게 되어 있음.
- 용접치구를 180° 회전시킨 후 bottom grid 및 middle grid를 제거하고 , middle grid 위치에는 support ring을, bottom grid 위치에는 하단 upper grid를 조립함.
- 하단 upper grid에 장진되어 있는 봉단접합판과 연료봉단을 모두 용접하고 하단 upper grid를 제거한 후 완성된 다발을 제조하게 됨.
- 이상과 같이 용접치구의 조립, 해체 과정에서 upper grid의 해체가 어려우며 이는 용접작업에 의하여 봉단접합판 및 봉단연료의 용접부위가 변형되기 때문임.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접기를 이용한 특수 용접치구에 대하여 설명하였고 이에 대한 용접치구사용 시 기술적 문제점 등을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장



# 기술지원방문일지

2008 年 7月 4日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 봉단접합관 용접강도 시험에 대한 기술적 설명

1. 봉단마개와 접합관 사이의 용접시편의 토크 강도 시험방법 및 절차

- 적용 문서

- 37봉 연료봉 Bundle 설계 도면

- Fuel Bundle Assembly 제조도면

- 봉단접합관 용접 공정시방서

- End Support Weld Sample 도면

- 봉단접합관 용접 공정자격인증시험 보고서

- 용접강도 검사기록서

- 용접시편은 봉단접합관의 용접헤드마다 실험용 시편 4개(외환 2개 내환 2개) 제작.

2. 용접강도 시험 절차

- 용접부위 중심으로 접합관 길이가 약 1cm 절단.

- 시편을 고정 치구에 물리고 Zero-pointer 에 맞춘다.

- S/W 누르면 Air Cylinder 작동하여 용접부위를 파괴 - 토크강도 기록

- 토크 시험치 결과가 불만족일때 장비 조정후 재 토크강도 시험 수행

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기 이용한 토크강도의 시험 방법 및 절차에 대해 설명하였으며, 이에 따른 용접강도 시험의 유의점에 관해서 논의하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008 年 7月 15日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 봉단마개와 접합판을 이용한 용접강도 합부 판정 기준의 기술검토

- 다발에서의 상단 연료봉에 대한 토크 강도치의 합격기준은 외환봉인 경우 9.6 Nm 이상, 내환봉은 8.5 Nm 이상이면 양호함.
- 용접시편을 사용하여 토크 강도시험을 할 경우는 공정자격 인증시험시 설정된 용접강도의 기준은 대략 9 Nm 이상을 적용한다.
- 만약 공정자격 인증시험 시 설정된 용접강도의 최소허용치 이상이면 합격으로 처리하고, 최소 허용치 미만일 때 불합격으로 함.  
(가장 최근의 용접강도 검사이후 제조된 연료다발을 격리하여 부적합 제품의 처리절차에 따라 처리함.)

\* 계산식 : 용접강도 토크한계치(W) =  $D + C + 3e + A - 3f$

(A=Specification Min. D=Mean of test bar torques, e=Std. deviation of bundle torques f=Std. deviation of test bar torques)

연구책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

봉단마개와 접합판을 이용한 용접강도의 판정기준에 대해서 기술 검토하였 으  
며, 설계담당자 및 생산직 과장들과 논의하였음.

성명(서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008 年 7月 29日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 종합적으로 봉단마개와 접합판 이용한 용접공정에 대한 기술 검토

1. 제조요건 및 품질요건을 기술 참고 문서

- 월성형 연료봉 제작도면

- 37봉 Fuel Bundle 및 부적합 제품 관리

- End Support 및 기타 부품

2. 제조공정 기술

- 소결체 장입 및 봉단마개용접이 완료된 연료봉을 집합체 조립작업대 설치, 이 공정은 상부 접합판 번호 각인 및 용접, 가조립 치구 제거 또한 하부 접합판 번호 각인 및 용접, 무게 측정 순으로 자동 진행됨.

- 용접 완료되면, 집합체는 He leak test을 거쳐 세척 장비로 이송되고 최종검사(Final Inspection) 이송됨.

- 용접은 저항용접으로 사용, 전극과 봉단마개의 정렬, 전류, 가압력 부품의 청결 등이 용접품질에 영향을 미칠 수 있음.

(모든 제품은 청결 상태 확인, 취급시 면장갑이나 공구를 사용.)

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접기를 이용한 종합적인 용접공정에 대하여 설명하였고 이에 대한 다발제조시 기술적 문제점 등을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 8月 6日(水)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 접합관 용접공정자격 인증시험에 관한 기술적 설명

### 1. Sample size에 대한 구분

- 공정관리 토크 한계치 설정시험용 시편
  - 1) 공정관리용 시험 Bar 120개
  - 2) 공정관리용 집합체 1 bundle
- 재현성 시험
  - 1) 검사용 집합체 6 bundle
- 재작업 인증시험 (외환봉 교체와 해체 작업이 포함)
  - 1) 집합체/ 교체용 연료봉 1bundle/8개
  - 2) 해체 작업용 집합체/ 봉단집합판 1bundle/2개

### 2. Monitoring 용접강도 한계치 설정시험용 시편

- 각 용접헤드마다 외부 15개, 내부 15개 총 30개의 시험 bar 용접후 토크시험치 측정 및 검사서에 기록.
- 자동모드로 집합체 1개를 제조후, 해체하여 각 연료봉 양단의 토크치 측정 및 검사서에 기록.
- 각 용접헤드마다 외부, 내부 연료봉에 대한 process control 토크 한계치를 설정.

연구 책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기를 이용한 접합관 용접자격 인증시험에 대해 설명하였으며, 이에 따른 보완점 및 궁금한 내용에 관하여 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술지원방문일지

2008年 8月 19日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 다발용접기를 이용한 용접시편 재현성 시험에 관한 기술 검토

- 다발용접시편을 이용하여, process control 토크 한계치 설정 시험시 확립된 작업변수를 적용하여 토크 시험용 Bar를 용접후 토크값을 측정하여 토크가 한계치 이상을 만족할 때까지 변수(Heat %) 조정.
- 제작업 인증시험 절차에 대해서 아래의 크게 2가지로 구분됨.
  - 외곽 연료봉 교체작업  
정상적으로 제조된 집합체 1 bundle에서 교체할 연료봉을 떼 후 교체 연료봉으로 교체, 용접함. 다음은 교체된 연료봉을 이용한 토크시험 수행.
  - 해체작업  
정상적으로 제조된 집합체 1 bundle을 해체하여 연료봉을 재가공후 용접하여 다시 집합체를 해체하여 토크시험을 수행.
- 합격기준은 다음과 같음.
  - 재현성시험을 이용한 외곽 연료봉 교체작업  
용접강도 : 8.5 Nm 이상 및 치수검사의 합격기준 참조
  - 재현성시험을 이용한 해체작업  
용접강도 : 8.5 Nm 이상(외환봉), 6.2 Nm 이상(내환봉)  
및 치수검사의 합격기준 참조

연구책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

다발용접기를 이용한 용접시편 재현성 인증시험의 용접시편에 대해서 기술 검토하였으며, 설계담당자 및 생산직 과장들과 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 기술 지원 방문 일지

2008 年 8月 28日(木)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 봉단마개와 접합관 용접의 품질관리에 대한 기술 검토

### 1. 검사 항목

- 봉단 접합관 : 100% 육안 검사
- 집합체 내부 : 100% 육안 검사
- 각 연료봉 표면 : 100% 육안 검사
- 각 연료봉 끝단(봉단마개 및 피복관) : 100% 육안 검사
- 각 연료봉의 부착물 : 100% 육안 검사
- 집합체 진직도 및 최대 직경 : 100% 육안 검사
- 간격체 축방향 위치 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조
- 내부 연료봉 간격 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조
- 집합체 양단에서의 지지체 축방향 위치 : 1/40 집합체 및 도면참조
- 연료봉 길이변화 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조(장비 조정후 검사)
- 봉단접합관 표면 기복 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조
- 집합체 양단부분의 형상
- 1) 끝단 직각도 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조(장비 조정후 1st 검사)
- 2) 집합체 길이 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조(장비 조정후 1st 검사)
- 3) 연료봉 처짐(Droop) : 1/40 집합체 및 제조도면 참조
- 4) 봉단마개/지지체 반경거리 : 1/40 집합체 및 제조도면 참조
- 5) 봉단마개/접합관 사이의 최소 축방향 거리 : 1/40 집합체 및 도면
- 6) 봉단마개/접합관 사이의 최대 축방향 거리 : 1/40 집합체 및 도면
- 용접 강도 : 용접헤드마다 외내부 2개/전극교체시 매일(장비조정)
- He leak test : 100%
- 표면 오염 : 1/1000 집합체

연구 책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

여 생산직 담당자들에게 다발용접기를 이용한 접합관용접의 품질관리에 대하여 설명하였고, 이에 대한 사례를 비교하여 기술적 문제점을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 지 원 업 무 일 지

2008 年 9月 5日 (金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 핵연료 다발의 재용접(repair welding)에 대한 기술적 설명

1. 외환연료봉 교체인 경우,

- 최대 8개 연료봉까지 교체 가능하며 인접된 외환 연료봉의 경우, 2개 까지 교체 가능.
- 한번 교체한 연료봉 재작업일 경우, 다발을 해체한 후 재작업을 수행. 단, 외환 연료봉 교체후 교체하지 않았던 다른 외환봉에 손상이 발생될 경우 다시 외환 연료봉 교체작업을 수행해도 됨.

2. 핵연료 다발의 해체

- 교체될 외환 연료봉이 8개 이상이거나 내부 연료봉이 손상되었을 경우에만 수행 가능.
- 다발의 청결 상태 확인 : 다발 표면의 오염상태는  $2.8 \times 10^{-8} \text{ gramU/cm}^2$  을 초과하지 않아야 하며 관련 절차서에 따라 시험을 실시해야 함.
- 용접중인 모든 구성품이나 완성된 다발은 오물, 먼지, 기름이나 화학물질에 오염되지 않아야 한다.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접의 재작업에 대해 설명하였으며, 이에 따른 핵연료 다발의 재용접시 유의해야 될 작업조건들을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 지 원 업 무 일 지

2008 年 9月 17日(水)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 돌출형 접합판을 이용한 다발용접의 품질수준에 관한 기술 검토

- 봉단접합판과 연료봉과의 용접부위 토크강도는 다음의 수치 이상 확인.
  - 외환봉 : 9.6Nm, 나머지 연료봉 : 8.5Nm 이상
  - 공정관리용 토크시험 Bar : 공정관리 토크 한계치 확인.
- 핵연료 다발이 ring 게이지 를 통과하지 않을 때는 Hinged ring 게이지로 조인 후 다발이 통과하면 최대직경은 합격하는 것으로 판정.
- 핵연료 다발이 치수검사 항목에서 불합격 시 해당 다발 전후 10개의 집합체를 불합격된 품질 특성에 대해 추가적으로 검사한다.
- 용접부위의 외관 상태
  - 다발의 동일 끝 단면에서 연속적으로 2개 이상 용접 split 또는 Single Ground 가 발생 경우 작업을 중단시키고 품질절차에 따라 조치시행.
  - 봉단접합판의 결함 깊이는 재료두께의 5% 미만이어야 함.

연구 책임자 : 김 수 성 (인)

기업이 실행한 내용 :

돌출형 접합판을 이용한 다발용접의 품질수준 및 외관 상태에 대해서 기술 검토하였으며, 설계담당자 및 생산직 과장들과 논의하였음.

성 명 (서명) : 고 문 섭 (인)

직 책 : 부 장



# 지 원 업 무 일 지

2008 年 9月 29日(月)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기의 전극 교체 및 set-up 조건에 대한 기술적 검토

1. Power Electrode 재가공 및 교체

- 2개 이상의 용접 split 가 연속적으로 발생하거나 다발 상태가 봉단 접합판과 지지체 사이의 거리가 96.9mm 이상일 경우 Power 전극을 재가공 한다.
- 단, Power Electrode 의 길이가 104.14 미만일 경우에는 새 것으로 교환한다.
- Jigging Plate에서 3개의 스크류를 빼낸다.
- Jigging Plate 와 Ground Bushing 상태를 검사한다.
- 냉각수 밸브 2개를 잠근다.
- 에어가 공급된 상태에서 Power Electrode 돌출량을 조정한다.

Power Electrode 돌출량 = Ground Bushing 길이 - (4.6±0.13mm)

연구 책임자 : 김 수 성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접기를 이용한 W-Cu 전극 교체에 대하여 설명하였고 이에 대한 전극 사용시 보수 유지의 지침 등을 논의하였음.

성 명 (서명) : 고 문 섭 (인)

직 책 : 부 장

# 지 원 업 무 일 지

2008 年 10月 1日 (水)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 다발용접기를 이용한 전극몽치 보수 유지에 대한 기술적 설명

1. W-Cu 전극헤드 Vertical Clearance 조정

- Back Up Plate, Index Plate, Weld Gun 이송테이블을 조정한 후 Vertical Clearance 를 확인 및 조정해야 함.
- 상단 용접헤드 : Jigging Plate 내 봉단접합판을 넣은 후 봉단접합판과 Back up plate 간의 거리를 확인해야 함.
- 하단 용접헤드 : Jigging Plate 내 다발 장착면과 Back Up Plate 간 거리를 확인.

2. Vertical Clearance 측정 후 정해진 범위안에서 들어오는지 확인하고 만약 벗어나면 Back Up Plate cylinder Rod의 Locking Nut 를 돌려 범위내에 들어오도록 조정해야 됨.

- 상단 용접헤드 : 493.27 - 493.65 mm
- 하단 용접헤드 : 494.67 - 494.97 mm

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

작업 담당자에게 다발용접기를 이용한 전극몽치 보수 유지에 대해 설명하였으며, 이에 따른 보수 유지의 절차 등을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 지 원 업 무 일 지

2008 年 10月 7日(火)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

## □ 다발용접기를 이용한 Weld Gun 분해 및 조립에 관한 기술 검토

- Weld Gun 분해에 앞서 정상적인 Shut Down 절차로서, 4개의 토크 샘플(외환봉 2개, 내환봉 2개)의 용접강도를 측정하고 용접헤드의 압력 및 Heat % 를 기록한다.
- 전극 Holder 와 Weld Gun Housing 하부 사이의 간극을 측정한다.  
간극은 8mm 임. 만약 8mm 를 벗어날 경우 아래 절차에 따라 조정.
  - 공압 라인을 차단, Diaphragm Cover 제거하고 Pad, Shaft 끝의 손상여부를 검사한다.
  - Diaphragm Pad 의 Stem과 Weld Gun Housing 내부면과의 간극은 0.25mm 이상이어야 함.
  - Lever Cam의 Set Screw 를 풀고, Lever Cam 을 돌려 전극 Holder 와 Weld Gun Housing 사이의 간극이 9.6mm - 11.1mm 가 될 때까지 조정한다.

연구 책임자 : 김수성 (인)

## 기업이 실행한 내용 :

전용 다발용접기 이용한 Weld Gun 분해, 조립에 대해서 기술 검토하였으며, 설계담당자 및 생산직 과장들과 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

# 지 원 업 무 일 지

2008 年 10月 10日(金)

업무 내용 : (대덕시스템 품질관리실 회의실)

□ 전용용접기를 이용한 Weld Gun 분해 및 보수유지에 대한 검토

1. Lever Cam 상부와 Diaphragm Pad 장착 부위와의 간격을 측정한다
  - 이들 사이의 간극은 6.3mm - 8mm 이다. 만약 이 범위를 넘으면 Diaphragm Cover Plate 를 교체한 후 Cap Screw 를 살짝 조인다.
  - Diaphragm 의 볼트 구멍은 Diaphragm 이 자유롭게 움직일 수 있도록 해당 볼트 치수보다 조금 커야 한다.
  - 지지대를 빼낸 다음, 공압 라인을 켜고 Diaphragm Cover Plate 의 Cap Screw 를 단단히 조인다.
  - 용접 시작 신호용 Proximity S/W 위치를 아래의 절차에 따라 조정.
    - 1) S/W 위치를 조정한 후 용접이 되지 않도록 Medar Welder Controller 의 S/W 를 No Weld 위치에 놓는다.
    - 2) 핵연료 다발을 Weld Gun에 넣고 수동으로 용접하면서 Proximity S/W 가 Trip 될 때까지 위치를 조정한다.

연구 책임자 : 김수성 (인)

기업이 실행한 내용 :

생산직 담당자들에게 다발용접기를 이용한 Weld Gun 분해 및 보수유지에 대하여 설명하였고 이에 대한 Weld Gun 분해 시 기술적 문제점 등을 논의하였음.

성명 (서명) : 고문섭 (인)

직책 : 부장

## 봉단접합판 돌출 시험 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)				
검사일자 :			품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 돌출부위 (단위;mm)			검사장비 : 다이얼 게이지 (10188/09)	
1번 시제품	0.07	0.05	0.12	평균  0.08
	0.12	0.08	0.09	
	0.08	0.1	0.07	
2번 시제품	0.2	0.18	0.2	평균  0.17
	0.16	0.14	0.23	
	0.14	0.16	0.15	
3번 시제품	0.23	0.27	0.3	평균  0.27
	0.34	0.29	0.26	
	0.3	0.27	0.25	

대덕시스템

## 봉단접합판 돌출 시험 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)				
검사일자 :		품명 : 1.6T End support strip		
측정 부위 : 돌출부위 (단위;mm)		검사장비 : 다이얼 게이지 (10188/09)		
1번 시제품	0.05	0.1	0.04	평균  0.08
	0.08	0.11	0.15	
	0.12	0.05	0.1	
2번 시제품	0.19	0.2	0.17	평균  0.19
	0.16	0.19	0.26	
	0.23	0.16	0.18	
3번 시제품	0.24	0.27	0.25	평균  0.27
	0.3	0.26	0.32	
	0.27	0.2	0.35	

대덕시스템

## 봉단접합판 돌출 시험 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)				
검사일자 :			품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 돌출부위 (단위:mm)			검사장비 : 다이얼 게이지 (10188/09)	
1번 시제품	0.12	0.15	0.1	평균  0.09
	0.18	0.06	0.14	
	0.09	0.11	0.07	
2번 시제품	0.24	0.2	0.22	평균  0.18
	0.15	0.2	0.16	
	0.12	0.19	0.18	
3번 시제품	0.2	0.19	0.28	평균  0.25
	0.3	0.24	0.22	
	0.25	0.31	0.26	

대덕시스템

## 봉단접합판 돌출 시험 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)				
검사일자 :			품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 돌출부위 (단위:mm)			검사장비 : 다이얼 게이지 (10188/09)	
1번 시제품	0.08	0.05	0.09	평균  0.08
	0.04	0.1	0.06	
	0.06	0.11	0.1	
2번 시제품	0.18	0.16	0.19	평균  0.19
	0.2	0.23	0.2	
	0.17	0.15	0.23	
3번 시제품	0.22	0.26	0.3	평균  0.25
	0.33	0.2	0.28	
	0.21	0.27	0.2	

대덕시스템



## 봉단접합판 돌출 시험 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)				
검사일자 :			품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 돌출부위 (단위;mm)			검사장비 : 다이얼 게이지 (10188/09)	
1번 시제품	0.11	0.15	0.13	평균  0.1
	0.06	0.1	0.07	
	0.08	0.15	0.12	
2번 시제품	0.16	0.25	0.27	평균  0.2
	0.15	0.16	0.2	
	0.2	0.18	0.23	
3번 시제품	0.27	0.33	0.31	평균  0.27
	0.26	0.28	0.27	
	0.3	0.25	0.22	

대덕시스템

## 봉단접합판 변형 측정 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)		
검사일자 :	품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 변형돌출부위 (단위:mm)	검사장비	다이얼 게이지 (10188/09)
		profile projector (1-0324/06)
0.15	0.23	0.22
0.18	0.2	0.21
0.19	0.15	0.24
0.16	0.18	0.22
<p>평균 : 0.19</p>		

대덕시스템

## 봉단접합판 변형 측정 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)		
검사일자 :	품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 변형돌출부위 (단위;mm)	검사장 비	다이얼 게이지 (10188/09)
		profile projector (1-0324/06)
0.2	0.22	0.18
0.18	0.19	0.2
0.21	0.16	0.16
0.17	0.23	0.15
평균 : 0.18		

대덕시스템

## 봉단접합판 변형 측정 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)		
검사일자 :	품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 변형돌출부위 (단위:mm)	검사장 비	다이얼 게이지 (10188/09)
		profile projector (1-0324/06)
0.18	0.22	0.19
0.16	0.18	0.2
0.24	0.26	0.22
0.19	0.17	0.16
평균 : 0.19		

대덕시스템

## 봉단접합판 변형 측정 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)		
검사일자 :	품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 변형돌출부위 (단위:mm)	검사장 비	다이얼 게이지 (10188/09)
		profile projector (1-0324/06)
0.25	0.18	0.22
0.22	0.19	0.18
0.16	0.2	0.17
0.21	0.16	0.2
평균 : 0.19		

대덕시스템

## 봉단접합판 변형 측정 기록서

검사결과 (ACTUAL DIMENSIONS)		
검사일자 :	품명 : 1.6T End support strip	
측정 부위 : 변형돌출부위 (단위:mm)	검사장 비	다이얼 게이지 (10188/09)
		profile projector (1-0324/06)
0.15	0.15	0.17
0.16	0.2	0.16
0.17	0.2	0.12
0.18	0.22	0.14
평균 : 0.17		

대덕시스템

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
<b>수행기관보고서번호</b>	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드		
KAERI/TR-3635/2008					
제목/부제	Zr-4 봉단마개와 접합관을 이용한 저항용접 성능향상 기술지원				
연구책임자 및 부서명	김수성, 재순환핵연료기술개발부				
연구자 및 부서명					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년도	2008. 11.
페이지	120 p.	도표	있음( V ), 없음( )	크기	26 Cm.
참고사항	원자력 자체연구개발사업				
비밀여부	공개(O), 대외비( ),	급비밀	보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (300단어내외)	<p>본 기술지원은 중수로 핵연료 다발 제조의 효율적인 공정기술 개선과 품질관리 향상을 위한 기술적 검증이 시도되었다. 또한 핵연료 다발 제조를 위한 돌출형 접합관의 용접기술에 의한 효율적인 공정을 도출하고자 하였고, 중수로용 다발 제조에서 핵심 공정인 봉단마개와 접합관을 이용한 저항용접 및 조립공정과 용접변수에 대한 최적화를 도모하고 실용화를 위한 전용용접기의 설계기술에 대한 기술자문, 현장 교육 그리고 현장 활용에서의 부수적인 공정에 대한 기술검토가 이루어졌다. 이에 의하여 중수로 핵연료 다발 제조의 공정 개선 및 전용 용접장치의 설계, 성능시험이 수행되었고, 또한 실시간 작업에 대처할 수 있고 운전 및 보수 유지가 쉬운 공정 개발이 구축되었으며, 향후 돌출형 접합관을 이용한 저항용접 공정을 위한 기틀이 마련되었다. 따라서 국내에서 유일한 봉단마개와 돌출형 접합관 간의 용접기술 및 자동화 공정의 상품화를 도모하기 위한 기반기술이 마련되었으며, 기존의 용접 방법보다 봉단마개와 접합관 간의 용접강도 및 변형 감소로 인한 품질 향상을 달성시킬 수 있었다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	저항용접, 접합관, 봉단마개, 다발, 핵연료				

Bibliographic Information Sheet					
<b>Performing Org. Report No.</b>		<b>Sponsoring Org. Report No.</b>		<b>Standard Report No.</b>	
KAREI/TR-3635/2008					
<b>Title/Subtitle</b>		Technology Support of Performance Improvement for Resistance Welding Using Endcap and Endplate			
<b>Project Manager and Dept.</b>		Kim, Soo Sung (Recycled Fuel Technology Development Dep't)			
<b>Researcher and Dept.</b>					
<b>Pub. place</b>	Taejon	<b>Pub. Org.</b>	KAERI	<b>Pub. Date</b>	2008. 11.
<b>Page</b>	120 p	<b>Fig. &amp; Tab</b>	Y ( 0 ), N ( )	<b>Size</b>	26 Cm.
<b>Note</b>	'07 Parts & Materials Integrated Technology Support Project				
<b>Classified</b>	Open( 0 ), Outside( ), Class ( )		<b>Report Type</b>	Technical Report	
<b>Sponsoring Org</b>			<b>Contract No.</b>		
<b>Abstract ( 300 words )</b>					
<p>The proper welding joint for Zircaloy-4 endplate of PHWR and DUPIC fuel bundle assembly is considered important in respect to the soundness of weldment and the improvement of the performance of nuclear fuel bundle during the operation in reactor. The Zircaloy-4 endplate of PHWR and DUPIC fuel bundles are welded by the projection joint type, connecting the endcaps of fuel elements. Therefore, the purpose of this projection joint is to improve the welding quality of torque strength and welding deformation and to apply the commercial productions for the endplate welding of PHWR and DUPIC nuclear fuel bundle assembly.</p>					
<b>Subject Keywords (about 10 words)</b>					
RW(Resistance Welding), Endplate, Endcap, Bundle, Nuclear Fuel					