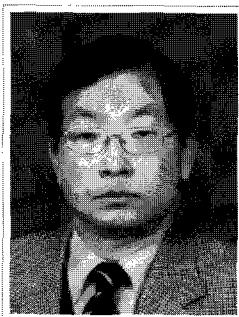




## 연료봉 2백만개 생산 돌파 - 쉼 없는 공정 개선과 기술 개발의 개가 -

김 풍 오

한전원자력연료(주) 생산본부장



### 개요

국내 원자력발전소에서 사용하고 있는 핵연료를 전량 공급하고 있는 한전원자력연료(주)에서 1989년 1월 고리 2호기 연료를 생산한 이후로 1999년 2월 백만개 연료봉의 생산을 거쳐 2005년 2월 21일 연료봉 2백만개의 생산을 돌파하게 되었다.

연료봉 2백만개의 생산은 집합체로서는 웨스팅하우스형 5,028다발, 한국표준형은 3,149다발로서 총 8,177 다발에 해당되며, 이에 소요된 소결체 수량은 약 7억 5천만 개로서 우리나라 1천만 가구가 약 50년간 사용할 수 있는 전력을 생산하는 양이다.

연료봉 2백만개는 총연장 길이로 8,000km에 달하며, 이는 서울, 부산간을 9번 이상 왕복할 수 있는 거리에 해당된다.

국내에서 사용되고 있는 핵연료 유형은 웨스팅하우스형과 한국표준형 연료의 2가지로 대표되는데, 웨스팅하우스형은 고리 1호기용인  $14 \times 14$ 형과 고리 2호기용인  $16 \times 16$ 형, 그리고 고리 3·4, 영광 1·2, 울진 1·2호기용인  $17 \times 17$ 형으로 분류되며, 한국표준형 발전소(KSNP)에서 사용되는 핵연료는 스

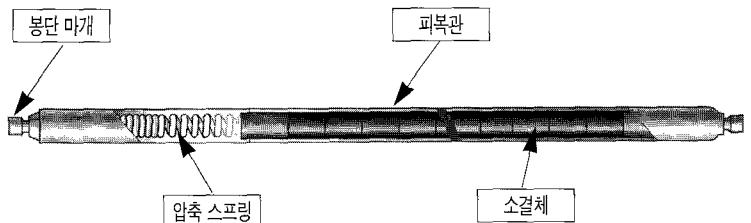
탠다드형과 이물질 여과 기능을 추가한 Guardian형의 두 가지가 있다.

웨스팅하우스형에는 초창기의 Siemens와 한국원자력연구소가 공동 설계한 핵연료 이후 개량 핵연료로서 Vantage 5H, 그리고 최근의 RFA(Robust Fuel Assembly) 핵연료가 포함되어 있다.

여기에 한국표준형 발전소에 들어갈 개량 핵연료 PLUS7과 웨스팅하우스형 ACE7 핵연료의 시범 집합체도 만들었기 때문에 200만 개 연료봉 중에는 모두 아홉 종류가 있는 셈이다.

### 연료봉의 구조 및 특성

연료봉은 <그림 1>에서와 같이 4m 정도 되는 지르칼로이 피복관에 길이 1cm 정도의 우라늄 소결체



〈그림 1〉 연료봉 구조

가 370여개가 들어가고 압축 스프링을 장입한 다음 피복관 양쪽에 봉단 마개를 용접하여 만든다.

여기 원자로내의 냉각수 압력을 견디기 위해 약 20bar 정도 압력의 헬륨 가스를 주입한다.

17×17 핵연료 집합체인 경우에 이같은 연료봉이 264개 들어간다.

핵연료봉은 원자력발전소의 안전성에 아주 중요한 역할을 한다.

원자력발전소에서는 방사성 물질을 여러 겹의 차폐벽으로 둘러싸여 하여 최악의 사고가 발생하여 핵연료가 용융된다 하더라도 외부 환경에 누출되지 않도록 다중 방호벽이 설치되어 있다.

그 다중 방호벽은 제1방호벽이 핵연료봉의 피복관, 제2방호벽이 원자로 압력 용기, 제3방호벽이 차폐 콘크리트, 제4방호벽이 격납 용기, 제5방호벽이 격납 건물이다.

핵연료봉을 구성하는 피복관이 제1차 방어선 역할을 하기 때문에 연료봉이 원자력발전소 안전성의 첨병 역할을 하고 있는 것이다.

원자력발전소에서 방사성 물질의 대부분은 핵분열 생성물이나 악티나이드(Actinide)로서 핵연료봉내에 존재하기 때문에 연료봉의 손상만 되지 않으면 외부로 방사성 물질이 나갈 수 없는 것이다.

우리 회사에서 연료봉 제조 및 품질에 역점을 두고 있는 이유가 여기

에 있다.

덧살을 가공하여 제거한다.

이러한 RPW 용접 공정은 전기 저항에 의해 용접 부위가 용융되며 전 조직의 확산에 의해 용접되기 때문에 용접 부위에 가공 혹은 크래프 같은 결함이 생기지 않아 TIG 용접에서와 같이 초음파 검사 또는 X-ray 검사 등이 필요없는 기술성이 아주 우수한 용접 방법이다.

연료봉 제조 공정의 첫 단계는 피복관 제조사로부터 공급된 피복관을 내부 세척하고 피복관 양단을 지정된 길이로 절단하고 하부 봉단 마개가 RPW 용접 방법으로 용접된다.

용접성에 대한 파괴 검사는 공정 시편을 제작하여 파열 시험 및 용접 부위 조직 검사를 통해 품질을 확인한다.

하부 봉단 마개가 용접된 피복관은 소결체를 지정된 길이로 적재한 후 소결체에 있을 수 있는 수분을 제거하기 위해 약 150°C에서 건조 과정을 거친다.

건조된 소결체와 하부 봉단 마개가 용접된 피복관을 소결체 장입 장치로 공급하여 피복관에 소결체가

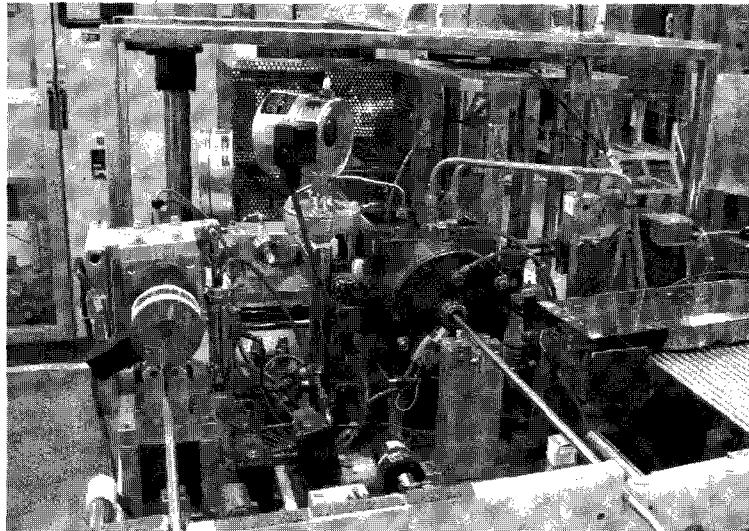
### 연료봉 제조 공정

연료봉은 지르코늄 합금 피복관 내에 소결체 약 370개가 장입되며, 양 끝단에 봉단 마개가 용접 조립되고, 내부에는 소결체를 축방향으로 고정하는 압축 스프링으로 구성되어 있다.

연료봉의 제조 공정은 봉단 마개 용접 기술이 가장 중요한 핵심 기술로서, 공정 중 파괴 및 비파괴 검사를 통해 연료봉의 용접성을 100% 검사하고 있다.

용접 공정은 가공 회사마다 각자 특성에 맞게 개발하여 사용하고 있는데, 웨스팅하우스의 경우 TIG (Tungsten Inert Gas) 용접, ABB-CE는 자력 저항 용접, 그 외에 EBW(Electron Beam Welding) 용접을 사용하는 가공 회사도 있다.

우리 회사는 전기 저항 용접(Resistance Pressure Welding)을 사용하는데, 용접 후 용접 공정 특성상 불가피하게 발생되는 용접



〈그림 2〉 연료봉 용접 장비

자동 장입된 후 장입 길이를 확인하고 압축 스프링을 삽입한다.

소결체가 장입된 피복관은 상부 봉단 마개 용접 공정으로 이송되어 상부 봉단 마개가 자동으로 용접된다.

상부 봉단 마개의 용접 공정은 기본적인 시스템은 하부 봉단 마개 공정과 동일하지만 연료봉내에 헬륨 가스를 충전시키는 작업이 용접 공정과 동시에 이루어지게 되어 있다.

여기서 특기할 만한 것은 소결체를 피복관에 장입하는 공정을 새로 개발하여 사용하고 있는데, 우리 회사에서는 이에 대한 특허(특허 제 0275034호)도 출원하여 등록받은 것이다.

이 장입하는 기술은 처음에 독일 Siemens에서 도입한 것인데, 그 공정이 복잡하여 고장도 자주 발생

하는 것을 새로운 공정으로 대체하여 원가 절감과 생산성을 대폭 향상시켰다.

용접이 모두 끝난 연료봉은 연료봉 탐상기인 Rod Scanner로 소결체의 높이도 확인, 소결체 정상 위치 확인, 압축 스프링 상태의 확인 등 최종적인 비파괴 검사를 한다.

이 연료봉 탐상기는 칼리 포니움 및 세시움 소스를 사용하여 중성자 여기 방법으로 비파괴 검사를 하는 기기인데, 값이 약 30억원되는 우리 회사 품질 관리 기기 중 가장 비싼 것이다.

#### 연료봉 용접 공정 개발의 발자취

연료봉 제조 공정의 핵심인 용접 공정은 봉단 마개의 형상과 재질에 따라 전류의 크기, 압축력, 용접 시

간 등과 같은 용접 변수가 정확히 결정되어야 하기 때문에 그 조건을 잡는 것이 여간 어렵지 않다.

핵연료 국산화의 첫 대상인 고리 2호기 생산(1989) 이후로 다양한 봉단 마개 형상과 연료봉 설계의 변화에 맞추어 외국사의 도움없이 자체적으로 개선하고 개발함으로써 연료봉 용접에 대한 다양한 기술 축적을 하였다.

지금까지 용접한 봉단 마개의 종류는 앞서 설명한 연료봉의 종류와 같은 아홉 가지이며, 〈그림 3〉에 주요 봉단 마개의 유형을 표시하였다.

#### 한국 표준형 원자로용 연료봉

KSNP형 핵연료 국산화에는 전체적으로 상당한 어려움이 있었다. 당시 우리 회사는 독일 Siemens의 제조 기술로 웨스팅하우스형 핵연료를 생산하였는데, ABB-CE는 우리와는 핵연료 제조 방법이 조금씩 달랐고 설계 기준 및 검사 기준도 우리의 적용 기준과 달랐다.

ABB-CE는 자력 저항 용접을 사용하였고, 우리 회사는 압력 저항 용접을 사용하였으며, 용접 견전성을 확인하는 방법도 그들은 조직시험 (Metallography) 방법으로 접합률을 85% 이상으로 하였고, 우리는 파열 시험(Burst Test)으로 하고 있었다.

우리 회사는 ABB-CE에게 우리

의 기술 기준인 파열 시험으로 용접 전전성을 확인하자고 하였으나 그들은 원자로의 최종 안전성을 한전에 개런티해야 되기 때문에 안된다고 하였다.

또한 그들은 우리 회사와 기술 이전에 관한 어떤 계약도 없었기 때문에 금속 조직 시험에 관련된 정보뿐만 아니라 QC 실험실도 보여 줄 수 없다고 강경하게 나왔다.

당시 ABB-CE의 핵연료 담당 사장은 1993년 5월 한전에 편지를 써서 한전원자력연료(주)는 용접 문제 등을 해결하지 못하여 영광 3·4호기 안전성에 문제가 될 것이므로 초기 노심 연료는 ABB-CE가 제작해야 될 것 같다고 공식적으로 문제를 제기하기도 했었다.

이러한 어려움을 무릅쓰고 우리 회사는 한국원자력연구소와 공동으로 노력하여 2년여 이상에 걸쳐서 봉단 마개 용접 문제를 해결하는 데 성공하였다.

이때 얻은 가장 큰 교훈은 설계와 제조 인터페이스 문제가 얼마나 중요한가였고, 프로젝트의 성공에는 관련된 사람들의 팀 워크가 성공의 열쇠라는 것이었다.

### Guardian 연료봉

한국표준형연료는 집합체 하부 지지 격자와 하부 봉단 마개에 이를 질 여과 기능이 있는 Guardian 연

WH14	KSNP STD
WH16 STD	16 ACE7
WH17 V5H	17 ACE7/RFA
KSNP GUARDIAN	PLUS7

〈그림 3〉봉단 마개 유형

료로 개선됨에 따라 이의 제조 공정 개발이 필요하였다.

이 연료의 봉단 마개는 기존 것과는 판이하게 다른, 길이가 기존의 약 15mm에서 약 58mm로 길어짐에 따라 그 당시 사용되고 있는 용접 공정으로는 용접이 불가능하였다는 점이다.

본 공정을 개발하기 위해 양산에 사용되고 있는 용접기를 활용할 수 없어 연구 개발 과제로 선정하여 용접 공정 개발용 Prototype 용접기를 제작하였다.

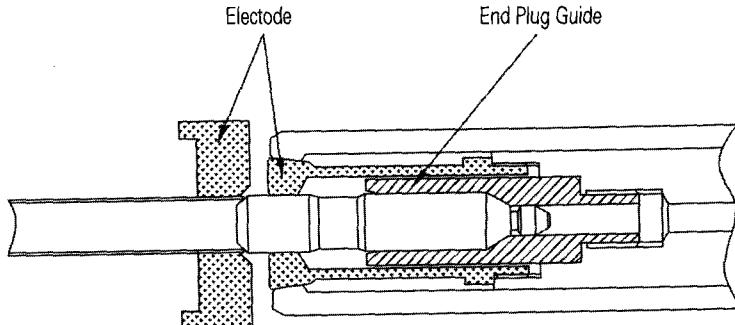
그 당시의 연료봉 용접 방식인 봉단 마개 전체에 전류를 흘려 용접 부위에 전기 저항을 유도하는 방식은 봉단 마개의 길이가 약 4배 길어진 본 유형의 봉단 마개에는 용접 부위까지 전류를 공급하는 데 손실

이 너무 커서 용접이 불가능하여, 용접 부위 가까운 위치에 용접 전극을 설치할 수 있도록 〈그림 4〉와 같이 용접 전극을 특수하게 설계 제작하였다.

하부 봉단 마개이므로 정밀 가공이 필요한데 봉단 마개 용접 후 동심도가 좋지 않아 가공을 위한 가공물 회전시 진동이 심하여 가공이 불가능하였다.

따라서 봉단 마개의 동심도를 최대한 정밀하게 나올 수 있도록 용접 장치의 전극 및 관련 치공구를 개선하고 가공 공정에서 봉단 마개 끝을 지지할 수 있는 장치를 개발한 결과, Guardian 연료의 봉단 마개 용접 공정 및 가공공정을 성공적으로 개발하였다.

Guardian 연료봉 용접 공정 개



〈그림 4〉 Guardian 용접 전극

발 프로젝트는 Prototype 용접기 개발 및 용접/가공 공정 개발, 양산 장비 적용에 3년이란 긴 세월이 소요되는 등 어려움이 많았지만, 봉단 마개 용접 공정의 기술력이 획기적으로 향상되는 계기가 되었다.

본 용접 공정 개발로 웨스팅하우스형 RFA 연료, 개량 연료인 PLUS7, ACE7에 사용되는 Long End Plug 설계의 제조 공정 적용이 큰 어려움 없이 이루어질 수 있는 기술적 바탕이 되었다.

#### 개량 핵연료 연료봉

개량 핵연료는 웨스팅하우스형 핵연료로서 세계 최고 수준의 성능과 경제성을 갖고 있는 RFA 연료, 그리고 국가 연구 과제로 우리 회사가 자체 개발한 PLUS7 연료와 ACE7의 세 가지 연료를 의미한다.

RFA형 연료의 경우 웨스팅하우스에서 봉단 마개 형상이 TIG 용접에 맞게 설계된 것이기 때문에 우리

회사의 압력 저항 용접에 맞는 봉단 마개를 설계하였다.

이 봉단 마개는 Guardian형보다는 길이가 짧지만 기존 유형의 그것보다는 길이가 길어서 이에 맞는 용접 공정 개발을 하였다.

PLUS7과 ACE7 연료에 사용되는 봉단 마개는 Guardian형처럼 길이가 충분히 길지 않아 용접 부위 가까운 곳에 용접 전극을 설치하기가 불가능하였고, 봉단 마개 전체에 전류를 공급하는 방식을 그대로 사용하면 전력 손실이 커 용접성에 심각한 악영향을 끼치므로 용접 공정 개발에 새로운 방식으로 접근하게 되었다.

전력 손실을 줄이기 위해 용접 후 가공하게 되어 있는 봉단 마개 챔퍼 부위를 미리 가공하여 챔퍼 끝 부위에 용접 전극을 밀착시켜 용접 전류의 공급 거리를 최소화하는 방법으로 시도한 결과 고품질의 용접성을 얻을 수 있게 되었다.

따라서 본 용접 공정의 적용을 위

해 봉단 마개의 챔퍼 부위를 미리 가공하여 용접할 수 있도록 설계를 변경함으로서 본 유형의 연료봉 봉단 마개 용접 공정의 개발도 성공적으로 완성하였다.

#### 맺음말

한전원자력연료(주)의 연료봉 2백 만개 생산은 그 수적인 면에서 뿐만 아니라, 앞에서 설명한 바와 같이 관련된 공정 개선과 기술 개발로 이루어졌다는 것을 내포하고 있기 때문에 그 상징성이 갖는 의미는 크다 하겠다.

이러한 기술 개발로 기반을 닦았기 때문에 정밀 기술을 요하는 구조 부품을 미국 등에 수출을 할 수 있게 된 것이다.

한전원자력연료(주)의 숙원 사업은 자체적으로 원천 기술을 보유하여 핵연료 집합체를 외국에 제작 조건 없이 수출을 하는 것이다.

이러한 원천 기술을 갖고 있는 고성능의 체세대 핵연료 개발을 위하여 전사적으로 「그린비전 2015 사업」을 추진하고 있는데, 여기에도 지금까지 축적된 제조 기술을 더욱 향상시켜 적용시킬 예정이다.

이번의 연료봉 2백만개의 생산은 한전원자력연료(주)가 세계 일류 회사가 되기 위한 밑거름이 되고, 하나님의 초석이 될 것이다. ☺