

'96 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**CE형 원전연료 부품의 국산 시제품에 대한 구조강도 및 특성시험**

송기남, 서정민  
한국원자력연구소

**요 약**

영광 3,4호기용 원전연료에 사용되는 구조용 부품들 중에서 coil형 Holddown spring을 포함한 Upper end fitting assembly, Lower end fitting 등을 국내에서 제조할 수 있는 제조공정이 대우정밀(주)에서 개발되었다. 이 공정에서 제조한 시제품들에 대하여 기계/구조적인 설계 관점에서 요구되는 제조조건들의 만족 여부를 구조강도 및 특성시험을 통하여 검증하였다. 검증시험 결과 주조제품인 Holddown plate 및 Lower end fitting은 주조물에서 요구되는 제기준과 기계/구조적인 설계 관점에서의 구조적 강도요건을 만족하고 있었고 coil형 Holddown spring의 특성이 설계 요구범위내에 있음이 확인됨으로서 향후 생산될 원전연료에는 금번에 개발된 공정으로 제조될 부품들이 사용될 수 있으리라 전망된다.

**1. 개 요**

ABB-CE형 발전소인 영광 3,4호기에 장전되어 연소되고 있는 16x16형 원전연료들은 초기노심부터 KAERI와 ABB-CE사가 공동으로 설계하고 한국원전연료(주)에서 최종적으로 제조하여 생산한 원전연료들로서 그림 1과 같은 형상의 원전연료가 호기당 177개씩 장전되고 있다. 16x16형 CE형 원전연료는 그림 1에서 보듯이 독봉봉을 포함하여 236개의 연료봉들이 4개의 Outer guide tubes, 1개의 Center guide tube, 11개의 연료봉 지지용 지지격자, 그리고 Upper end fitting(UEF) assembly, Lower end fitting(LEF) 등으로 구성되어 있는데 외곽에 위치한 4개의 Outer guide tube와 지지격자, 그리고 UEF assembly, LEF 등이 원전연료집합체를 구조적으로 지지하는 골격체를 구성하고 있다.

그동안 원전연료를 구성하는 구조용 부품들은 전량 ABB-CE사로부터 수입하여 원전연료 조립(제조)에 사용하여 왔으나 부품을 외국에서 구매함으로써 발생하는 제 문제점, 예를들면 부품가격의 변동, 부품의 적기 공급에 어려움, 수입검사에서 불량률 발견하였을 경우에 적기에 처리하기 어려움등,에 능동적으로 대처할 필요성이 크게 대두되었다. 따라서 지난 1990/1991년경에 Siemens/KWU와 KAERI가 공동으로 설계하고 한국원전연료(주)에서 제조하여 Westinghouse형 발전소에 공급되던 KOFA연료의 구조용 부품을 국산화하였던<sup>1)</sup> 한국원전연료(주)는 지난 1995년 초에 CE형 원전연료의 여러 구조용 부품들 중에서 우선적으로 Holddown plate(HDP), Flow plate(FP), Guide posts 및 Holddown spring(HDS) 등으로 구성된 UEF assembly와 LEF을 국내에서 제조하기로 하고 영광 3,4호기용 원전연료 설계부서인 KAERI의 협조하에, 시제품 제조업체로 선정된 대우정밀(주)에서 시제품 제조공정을 개발하고 확립하는 Project를 수행하여 왔다.

금번에 대우정밀(주)에서 확립한 제조공정에서 제조된 CE형 원전연료의 구조용 부품 시제품들은 지난 1990/1991년에 국산화했던 KOFA형 원전연료 부품들과는 제조공정 및 제조방법이 상이하다. 즉 상.하단 고정체 부품등을 기계가공하고 용접하여 완제품을 생산하는 KOFA의 경우와는 다르게 CE형 원전연료에서는 HDP, FP 및 LEF 등을 주조공법으로 제조하며 HDS는 Inconel X-750 강선을 coiling하여 제조하고 있다. 따

라서 기존의 원전연료 부품 제조공법과는 다른 CE형 원전연료 구조부품을 국내에서 제조하여 원전연료 부품으로 사용하기 위해서는 개발된 제조공정에서 제조된 시제품들이 관련 제조시방 및 기계/구조적 설계요건에 부합되는지를 검증해야만 한다. 본 연구는 부품 제조공정을 자격인증하는 과정에 수행된 제 시험에 대하여 기술한 것이다.

## 2. 시제품 제조공정

### 1) HDP,FP,LEF 제조공정

HDP,FP,LEF등은 주조공법(Casting)으로 제조되고 있는데 이들 부품들에 대한 주요 제조공정도는 다음과 같다.

WAXING → COATING → CASTING → CUTTING → INSPECTIONS  
 → HEAT TREATMENT → FINAL INSPECTION

### 2) HDS

강선재를 coiling 하여 제조하는 HDS의 주요 제조공정은 다음과 같다.

COILING → MACHING → HEAT TREATMENT → INSPECTIONS

## 3. 부품들에 대한 기계설계적 요구사항

### 1) Casting 제품

CF-8 Casting 제품에 대한 화학적 조성 요구치<sup>2)</sup>와 Delta-ferrite요구치<sup>3)</sup> 그리고 인장시험 요구치<sup>4)</sup>는 표 1과 같고 기계/구조적 설계 관점에서 요구되는 부품의 설계하중과 설계기준<sup>5)</sup>들은 표 2와 같다.

표 1. CF-8 Casting 제품의 화학적 조성, Delta-ferrite양 및 인장시험 요구치

시험의 종류	Items	기준
Chemical composition	C	Max. 0.08 %
	Mn	Max. 1.50 %
	Si	Max. 2.00 %
	P	Max. 0.04 %
	S	Max. 0.04 %
	Cr	18.0 - 21.0 %
	Ni	8.0 - 11.0 %
	N	Not specified
Delta-ferrite		5 - 30%
인장시험	인장강도	≥ 70.0 ksi
	항복강도	≥ 30.0 ksi
	연신율	≥ 35 %

표 2. 주조제품의 설계하중 및 응력 설계기준

	설계하중	응력범주	설계기준
Holddown plate(HDP)	5000 lbf	$P_m$	$\leq S_m$
Lower end fitting(LEF)	5000 lbf	$P_m + P_b$	$\leq F_s S_m$

$P_m$  : Primary membrane stress intensity

$P_b$  : Primary bending stress intensity

$F_s$  : Shape factor

$S_m$  : Design stress intensity value as defined in ASME Boiler and Pressure Vessel code, section III

#### 2) Coiling 제품

Inconel X-750 강선으로 coiling하여 제조되는 HDS에서 선재의 인장시험 요구치<sup>6)</sup>와 기계 구조적 설계 관점에서 요구되는 HDS의 특성치들은 표 3과 같다

표 3. Coil형 HDS의 특성 요구치

특 성 치	특성 요구치
인장강도	$\geq 200$ ksi
Holddown spring의 탄성강성도	142.53 - 164.23 lbf/in

### 4. 구조강도 시험 및 특성시험

Casting제품에 대한 표 1의 요구치들은 주조물 시편에 대한 분석 및 시험을 통해 모두 만족하고 있음이 확인되었다. 또한 주조공법으로 제조한 HDS와 LEF이 기계/구조적 설계 관점에서 요구되는 제 요건의 만족 여부를 검증하고 coiling된 HDS의 특성이 설계요구 사항에 부합되는 지를 검증하기 위한 시험을 수행하여야 한다.

#### 1) 시험장치에 대한 설명

##### ① HDP 및 LEF

원전연료의 수송 및 취급시의 설계하중인 5000 lbf을 HDP 및 LEF의 구조 설계시에 고려하고 있으며 이러한 하중하에서 HDP 및 LEF의 거동을 알아보기 위해 그림 2, 3과같이 HDP 및 LEF시제품을 하중시험기에 설치하여 구조강도 시험을 수행하였는데 설계하중하에서 HDP 및 LEF에서의 응력을 측정하기 위해 HDP 및 LEF의 상/하면에 10개의 Strain gauge를 부착하였다.

##### ② HDS

Coil형 HDS의 특성시험으로는 정적 특성시험과 피로시험을 수행하였는데 그림 4와 같이 HDS 시제품을 시험기에 설치하여 시험을 수행하였다. 정적 특성시험에서는 10개의 HDS시제품에 대하여 solid contact 직 전까지 스프링을 변형시키며 시험을 수행하였고 피로시험은 정상상태 노심운전 조건하에서 HDS이 변형할 수 있는 변위 범위를 보수적으로 결정하여 1 Hz 주기로 피로시험을 수행하였다<sup>7)</sup>.

## 2) 시험결과

### ① HDP 및 LEF

5000 lbf의 설계하중을 작용하여 측정된 HDP 및 LEF에서의 최대응력은 각각  $15.67 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $6.953 \text{ kgf/mm}^2$ 로서  $P_m+P_b$  응력범위의 설계기준치에 약 72.3 % , 33.0 % 정도였다.

### ② HDS

HDS의 정적 특성시험 결과 시제품들의 탄성강성도들은  $24.96 - 28.76 \text{ kgf/mm}$ 로서 설계요구 범위내에 있었고 피로시험 결과 10270 cycle 까지 이르는 동안에도 피로에 의한 손상징후는 발견되지 않았다.

## 5. 결 론

그동안 전량 수입에 의존하여 오던 영광 3,4호기용 원전연료의 구조용 부품들을 국내에서 생산/공급하기 위해 이들 부품들에 대한 제조공정을 국내업체에서 개발하였고 생산된 시제품들이 제조시방 및 기계/구조적인 설계 관점에서 요구되는 제 조건과 부합되는지를 평가하기 위하여 화학조성 시험, 인장시험 그리고 부품들에 대한 구조적 강도시험 및 특성시험을 수행하였다. 금번에 제조된 시제품들은 화학조성 시험 및 인장시험 결과가 제 기준을 만족하였고 HDP 및 LEF에 대한 구조강도 시험 결과 두 제품 모두 설계하중하에서 응력 설계기준들을 만족하고 있었으며 HDS 시제품들은 기계/구조적인 설계 관점에서 요구되는 제 특성을 만족하고 있어서 금번에 개발된 부품제조공정에서 생산될 부품들이 향후 생산되는 원전연료에 사용 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 한국원전연료(주)의 CE형 원전연료 부품 국산화 사업에 참여하여 얻은 결과이며 시제품 생산 및 시험에 협조한 대우정밀(주), 정산기계(주), 대원강업(주)에 감사를 표합니다.

## References

- 1 손동성 외 12인, "핵연료 부품 기술 개발", KAERI/RR-1026/90.
2. ASTM Designation:A744/A744M-88a, "Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for Severe Service", Table 2.
3. ASTM Designation:A800/A800M-84, "Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy".
4. ASTM Designation:A744/A744M-88a, "Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for Severe Service", Table 3.
5. H.N.Rhee, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual, Younggwang units 3&4 initial core", Chapter 6&7, April 1989, KAERI/CE Inc.
6. AMS 5699E-89, "Nickel Alloy, Corrosion and Heat Resistant, Wire 72Ni - 15.5Cr - 0.95Cb-2.5Ti - 0.70Al - 7.0Fe Spring Temper, Precipitation Hardenable".
7. ASTM Designation:A466-82, "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials".

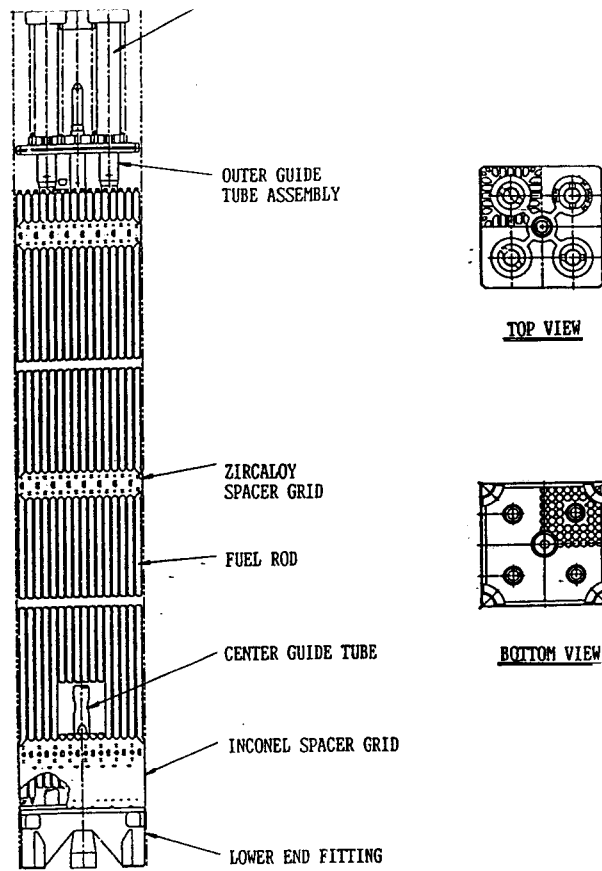


Fig.1 CE Type Fuel Assembly(16x16 Type)

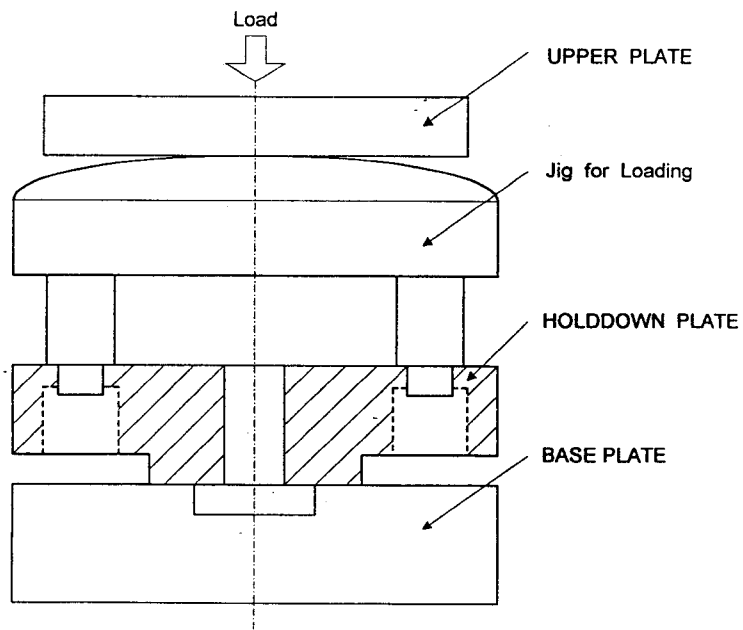
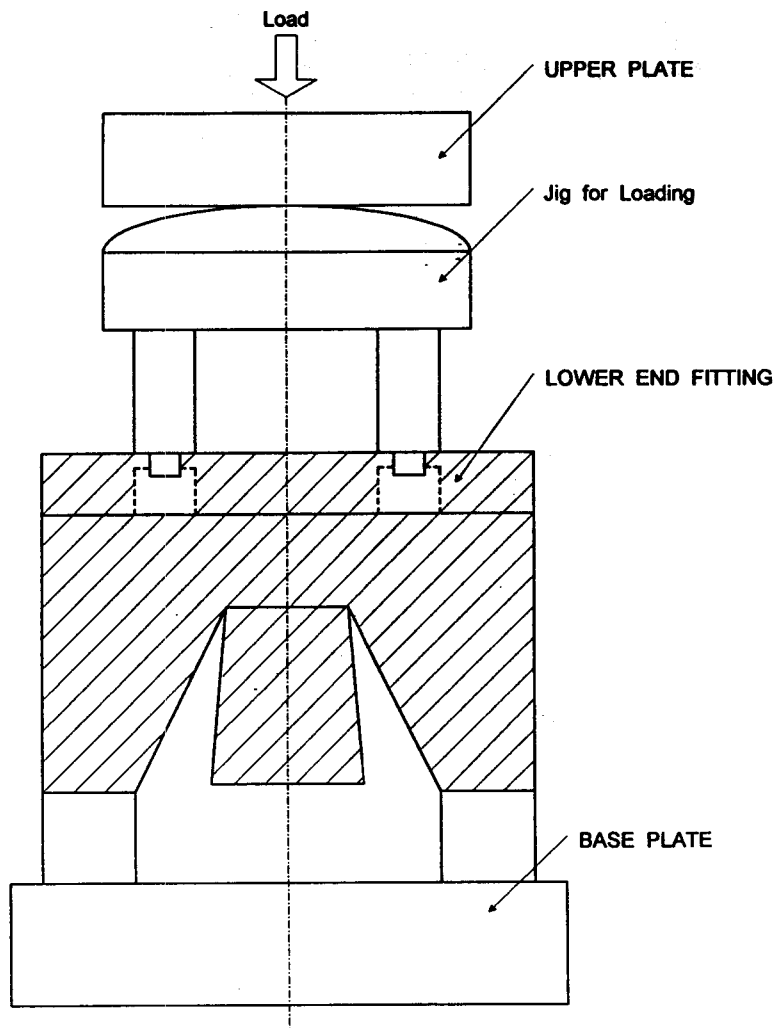


Fig.2 Structural strength test of Holddown plate



**Fig.3 Structural strength test of Lower end fitting**