

## 한국 경수로 핵연료용 이물질 여과 하단고정체 개발

### Development of Debris Filtering Bottom Nozzle for Korean LWR Fuel

김정하, 이진석, 김홍주, 엄경보, 김형구

한전원자력연료(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 연구를 통해서 연료봉 파손의 주 원인이 되는 금속성 이물질이 핵연료집합체내로 유입되는 것을 억제하여 핵연료의 노내 건전성을 향상시킬 수 있는 이물질 여과 하단고정체를 개발하였다. 이를 위해, 현재 한국표준형 핵연료집합체에 적용할 수 있도록 이물질 여과 성능 외에도 압력강하 특성과 다른 집합체 부품과의 양립성 및 제조성을 고려하여 유로관의 형상이 다른 9가지의 후보모형을 제안하였고 이들 각각에 대해 구조적 강도, 이물질여과 성능 및 수력적 압력손실 등을 평가하였다.

이 계산결과를 토대로 최적모형을 제안하였으며 제안된 최적모형은 이물질 여과 성능, 구조적 건전성 및 압력손실과 같은 성능요건에 있어서 기존 하단고정체에 비해 매우 우수한 결과를 보였다.

#### Abstract

In this study, the debris filtering bottom nozzle which prevents metallic debris from entering into fuel assembly was developed. In order to apply the developed bottom nozzle to the fuel assembly for Korean Standard Nuclear Plant(KSNP), 9 types of bottom nozzle which have compatibility with other fuel assembly components, manufacturability in addition to debris filtering capability were proposed and evaluated for structural integrity, debris filtering capability and hydraulic pressure loss point of view.

Based on the analysis results, optimum bottom nozzle has been selected. The selected bottom nozzle has showed superior performance for the functional requirements such as debris filtering capability, structural integrity and less pressure drop compared with the conventional bottom nozzle for KSNP.

#### 1. 서론

가압 경수로에서 발생하고 있는 핵연료 손상 원인 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것이 이물질(Debris)에 의한 연료봉의 프레팅 마모(Fretting Wear)로 보고되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 이물질은 원자력 발전소 보수기간에 발생되어 냉각수 내로 유입된 금속 Chip, 용

접 Spatter, Wire 조각 같은 것들로서 대부분은 최하부 지지격자와 연료봉 사이에 끼어서 냉각수 유동에 의해 연료봉에 프레팅 마모를 일으킨다 [2],[3].

따라서, 핵연료집합체의 하단고정체 개발에서 핵연료집합체 하부를 통과하는 이물질의 양을 최소화하여 이물질에 의한 연료봉의 마모 손상을 방지하기 위한 이물질 여과장치 개발이 주요 연구분야를 차지하고 있으며 이물질 여과 성능은 향상시키되 압력강하는 최소화하기 위해 노력하고 있다. 웨스팅하우스(Westinghouse)를 비롯한 외국의 핵연료회사들은 독특한 이물질 여과 방식을 개발하여 이물질에 의한 연료봉 손상을 방지하기 위한 노력을 경주하고 있다.

본 연구에서는 외국회사의 하단고정체와 다른 9가지 종류의 후보모형을 제안하고 이들 모형에 대해 이물질 여과성능, 압력강하 정도, 구조적 강도 등에 대해 시험과 유한요소해석을 이용하여 평가를 수행하여 한국표준형 핵연료집합체에 적용할 수 있는 후보 모형을 선정하였다.

## 2. 하단고정체 후보모형 제안

하단고정체는 냉각재를 안내하는 유로판과 원자로 노심지지판에 핵연료를 안착시켜주는 다리로 구성된 핵연료 구조부품으로써 수직방향의 외부하중으로부터 핵연료봉을 보호하고, 핵연료로 유입되는 이물질을 여과 및 포획하여 연료인출시 잠재적인 연료 손상의 원인이 되는 이물질을 노심에서 제거하는 기능을 갖는다.

본 연구에서 개발한 이물질 여과 및 포획 관련 후보모형들은 각각 특색을 달리하나, 기존의 하단고정체 유로구멍 배열에서 유로구멍을 세분하여 통과할 수 있는 이물질의 크기를 줄이는 것이 기본적인 개념으로, 일부는 이물질을 포획하는 기능을 가지도록 설계하였다. 또한, 핵연료집합체의 하부에 위치하는 하단고정체에 이물질여과체가 장착되어도 과도한 압력강하가 발생되지 않도록 유로구멍의 형상변경도 고려하였다.

이상과 같은 사항을 고려하여 5x5 배열을 기본으로 하는 9종의 후보 모형

(DF2~DF10) 과 기존 하단고정체 모형(DF1)을 제작하였으며 이들 후보 모형의 형상은 Fig. 1과 같다. DF8 및 DF10을 제외한 후보모형은 기존과 동일한 두께를 갖는 유로관에 이물질 여과용 판 또는 여과체 등을 추가하는 형태의 후보모형이며, DF8과 DF10은 이물질 여과기능 및 하중 지지 기능을 동시에 수행하는 하단고정체 모형이다.

### 3. 수력적 시험

5x5 배열을 기본으로 하는 9종의 후보 모형과 기존 하단고정체 모형에 대해 모의 집합체, 배관 및 펌프 등으로 구성된 수력시험장치에서 이물질 여과성능, 압력강하 성능 등을 비교 시험하였으며 수력시험장치의 사진은 Fig. 2와 같다. 수력시험 장치는 탱크내에 물을 채운후 펌프를 이용하여 배관을 통해 하단고정체 모형과 모형 핵연료집합체가 장착되어 있는 부분을 물이 약 2m/sec의 속도로 지나 다시 탱크로 순환하도록 구성되어 있다. 배관의 중간 부분에 이물질 시편 투입을 위한 개폐장치가 있으며 하단고정체 모형과 모형 핵연료집합체가 장착되어 있는 부분에는 압력 측정용 계측기가 장착되어 있다. 하단고정체 후보모형은 모의집합체 밑에 위치하여 볼트 및 너트로 고정되고 고무 패킹으로 밀봉이 가능하면서도 착탈이 가능한 시편 장착부에 고정되며 하단고정체 후보모형별로 시편 장착부에 교체, 장착하여 시험을 수행하였다.

#### 1) 이물질 여과시험

이물질 여과시험은 하단고정체 후보모형의 이물질 여과성능을 측정하기 위한 시험으로 이를 위해 Fig. 3 과 같은 5종류의 이물질 시편을 각 5개씩 제작하였다. 시험에 사용된 이물질은 발전소 보수기간 중 발생할 수 있는 금속성 Chip 및 Wire 조각 등 다양한 형태의 금속성 이물질을 모사하기 위해 굵기와 길이가 다른 2종류의 스프링 시편과 3종류의 Wire 시편으로 이루어져 있다. 이물질 여과시험은 제작된 이들 이물질을 수력시험장치의 이물질 투입구에 투여한 후 펌프의 힘으로 물과 함께 모의집합체 및 하

단고정체 모형 장착부를 지나 일정 시간 순환시키며 모의 핵연료집합체를 통과한 이물질 시편은 탱크 상부에 설치된 금속 그물망인 이물질 회수부에 걸리도록 되어 있어 하단고정체 시편을 통과한 이물질 시편은 다시 순환할 수 없도록 되어 있다. 이물질 여과 효율은 펌프의 작동을 멈춘 뒤 이물질의 수량을 확인하여 하단고정체에 걸려 통과하지 못한 이물질 시편 수량을 투입된 이물질 시편 수량으로 나누어 계산하였다.

## 2) 압력강하량 측정시험

압력강하량 측정시험은 하단고정체 후보모형으로 인한 압력강하량을 측정하기 위한 시험으로 펌프의 힘으로 물을 모의집합체 및 하단고정체 모형 장착부를 지나 순환시키며 모의집합체와 함께 고정된 하단고정체 모형의 상, 하부 간의 압력을 계측 센서를 이용, 수집하여 그 차이를 측정하므로써 하단고정체 후보모형의 압력강하량을 측정하는 시험이다.

## 4. 기계적 강도 평가

이러한 하단 고정체는 냉각수를 재분배하며 이물질을 여과하는 기능 외에도 집합체의 하중을 지지하는 기능을 한다.

본 연구에서는 9가지 하단고정체 후보모형에 대해 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks<sup>[4]</sup>를 이용하여 기하 모델링을 수행하였다. 그리고, 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN<sup>[5]</sup>을 이용하여 응력해석을 수행하였다. 응력해석시 경계조건으로는 하단고정체 설계하중인 5000 lbs의 하중이 4개의 안내관에 각각 1250 lbs 씩 작용하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였으며 해석은 하단고정체의 대칭성을 고려하여 1/8 모델에 대해서 평가를 수행하였다.

## 5. 하단고정체 후보모형 평가 결과

### 1) 이물질 여과시험

하단고정체 각 시편에 대한 이물질 여과효율은 Fig. 4에 보인 바와 같으며 시험 결과 이물질 여과성능은 후보모형 9종 모두 기존 하단고정체 모형(DF1)에 비해 우수하였으며 그 중에서도 DF9과 DF10이 가장 우수한 것으로 나타났다.

### 2) 압력강하량 측정시험

하단고정체 각 시편에 대한 압력강하량은 Fig. 5에 보인 바와 같으며 시험 결과 압력 강하량은 후보모형 9종 모두 기존 하단고정체 모형(DF1)에 비해 큰 압력강하량을 갖는 것으로 나타났으며 기존 하단고정체 모형의 하단고정체 유로관 형상이 가장 단순하며 유로면적이 크기 때문인 것으로 판단된다. 9개의 후보 모형중에서 DF9의 압력 강하량이 가장 작았으며 DF7의 압력 강하량은 비교적 크게 나타났다.

### 3) 기계적 강도 평가

제안된 후보 모형중 DF8 과 DF10을 제외한 하단고정체 후보모형의 경우 기존과 동일한 두께를 갖는 유로관에 이물질 여과용 판 또는 여과체 등을 추가하는 후보모형이므로 기존 하단고정체의 강도와 동일하거나 우수한 것으로 평가되었으며 계란관 형상의 DF8에 대한 해석결과, 최대응력이 모두 항복응력 이하의 값을 나타내고 있으나, 현재의 형상으로는 두께나 판 높이 등의 변화를 시도해 보는 게 바람직할 것으로 평가되었다. 경사관 형상인 DF10의 경우, 주어진 하중 조건에서 매우 큰 처짐이 발생하여 경사관사이의 접촉이 발생할 수도 있는 것으로 평가되어 구조적으로 보장되지 않고서는 사용하기 힘든 것으로 평가되었다.

## 6. 결론

이물질로 인한 연료봉의 파손을 방지하여 국산 핵연료집합체의 노내 건전성을 향상 시키기 위해 이물질 여과 하단고정체를 제안하였으며 각 하단고정체 후보 모형에 대한 이물질 여과성능시험 및 압력강하량 측정시험으로 이루어진 수력적 시험과 기계적 강도 평가 결과를 토대로 제안된 총 9개의 후보 모형 중에서 강도 기준을 만족하고, 압력강하량은 과도하지 않은 후보모형중에서 DF 9의 이물질 여과 성능 및 압력강하량 측면에서 우수한 것으로 나타났으며 따라서 개발된 하단고정체 후보모형을 한국표준형 핵연료집합체의 주후보 모형으로 선정하였다. 선정된 이물질 여과 하단고정체를 이용할 경우 이물질로 인한 핵연료집합체 연료봉의 프레팅 마모 가능성을 현저히 낮추어 기존 핵연료 집합체의 노내 건전성의 향상을 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

## Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 경수로형 신형 핵연료 개발과제의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] “The impact of Metallic Debris on Fuel Rod Performance”, Westinghouse, 1985.
- [2] “이물질 여과 핵연료 개발에 관한 연구”, 기술현황분석보고서, KAERI/AR-306/89, 한국원자력연구소, 1989.
- [3] H. Knaab, H. Stehle, R. von Jan, “Survey of LWR Fuel Performance”, KWU, 1985.
- [4] Solidworks 2000, User’s Manual, SolidWorks Co., 2000.
- [5] MSC/NASTRAN for Windows, User’s Manual Ver. 4.5, MSC, 2000.

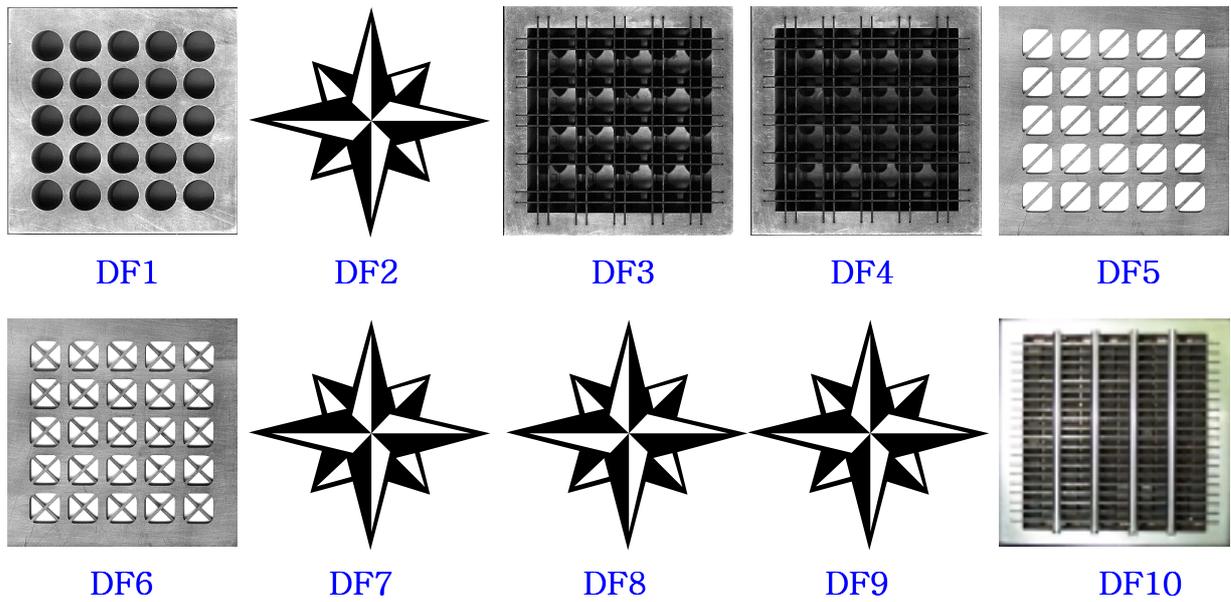


Fig. 1 Current Bottom Nozzle(DF1) & 9 types of Proposed Bottom Nozzle



View of Test Machine



Dummy Fuel & Bottom Nozzle Fixture Section

Fig. 2 Hydraulic Testing Machine

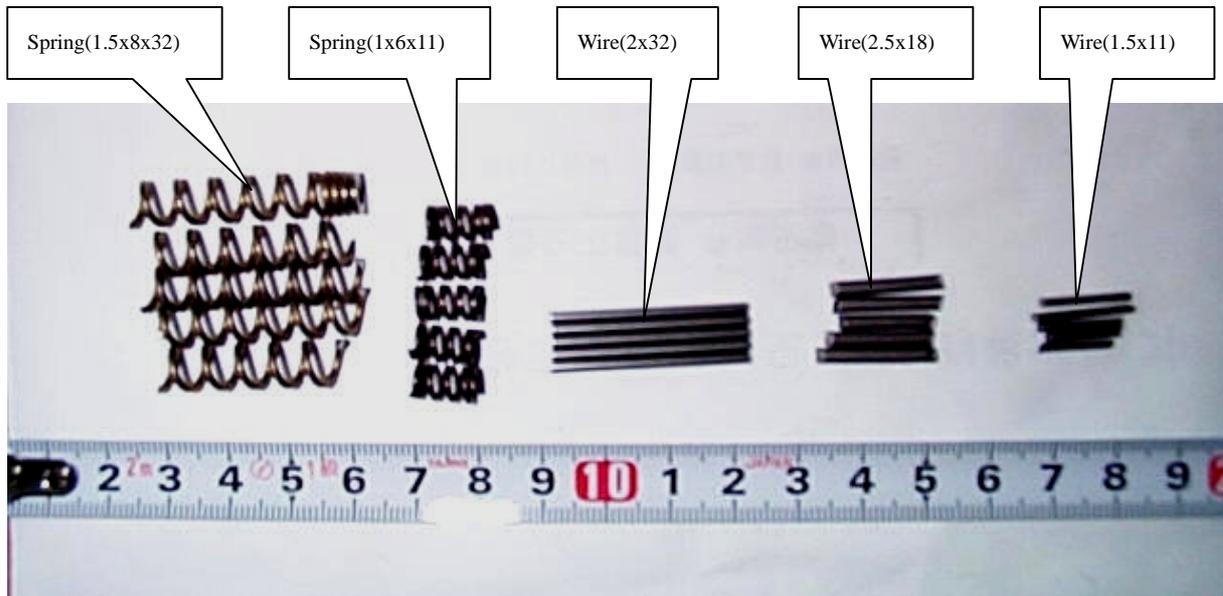


Fig. 3 Artificial Debris

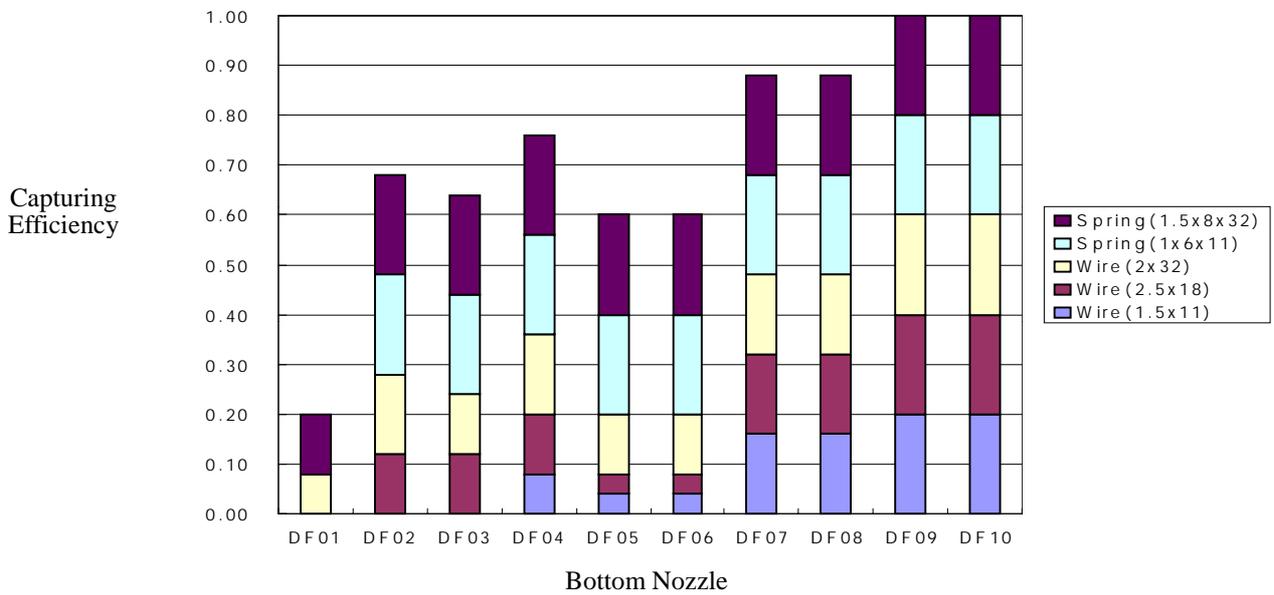


Fig. 4 하단고정체 후보모형별 이물질 여과 효율

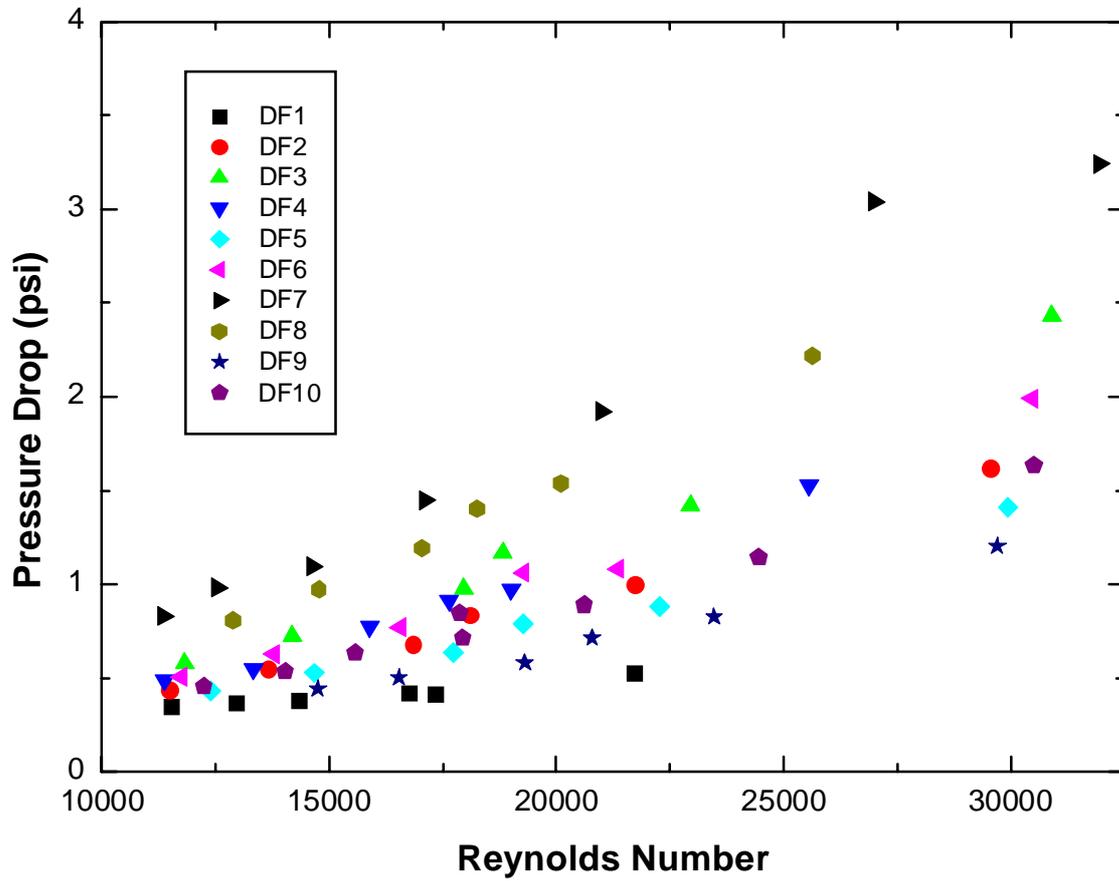


Fig. 5 하단고정체 후보모형별 압력강하량 시험 결과