

# 원자로 신형핵연료 하단고정체 응력 해석

## Stress Analysis for Lower End Fitting of Advanced LWR Fuel

이 상순\*      문 연철\*\*      변 영주\*\*      김 형구\*\*\*

Lee, Sang-Soon, Moon, Youn-Chul, Byun, Young-Ju, Kim, Hyeong-Koo

---

### ABSTRACT

In this study, the geometric modeling has been conducted for 2 models of lower end fitting of advanced LWR fuel using three-dimensional solid modeler, SolidWorks. Then, the optimization and the three-dimensional stress analysis using the finite element method has been performed. The evaluation for the mechanical integrity of 2 models has been performed based on the stress distribution obtained from the finite element analysis.

---

### 1. 서론

신형 핵연료 하단고정체(Lower End Fitting)는 상단 고정체, 안내관, 계측관, 그리고 지지격자등과 함께 핵연료 집합체의 골격을 구성하고 있다. 하단고정체는 냉각수의 원활한 유동을 위한 유로구멍과 안내관, 계측관과의 체결을 위한 구멍이 뚫려있는 유로판 및 핵연료의 위치를 유지시키기 위한 다리등으로 구성되어 있다(그림 1). 이러한 하단 고정체는 집합체를 지지하고, 냉각수를 재분배하며, 이물질을 여과하는 기능을 한다. 노내 집합체 손상은 집합체내로 유입되는 이물질과 연료봉과의 부식마모에 의한 것이 대부분이므로, 집합체의 손상을 줄이기 위해서는 냉각수에 의해 하부 노심 지지판으로 부터 유입되는 이물질을 하단 고정체에서 여과 및 포획할 수 있도록 설계해야 한다.

국내에서는 집합체의 손상을 줄이고 냉각수의 재분배를 원활히 해낼 수 있는 하단 고정체에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔는데, 이러한 내용에 대한 자세한 설명은 참고 문헌<sup>(1,3)</sup>에 기술되어 있다. 하단고정체는 유체역학적인 면에서 좋은 효율이 요구되는 물론이고, 핵연료 집합체의 무게를 안전하게 지지해야하기 때문에, 설계과정에서 신뢰성 있는 응력해석 결과가 요구되고 있다. 현재까지 국내의 원전 기술진에 의해 진행되어온 응력해석 과정에는, 복잡한 하단고정체의 기하 모델링 과정에서 일반 상용코드의 전처리기에 전적으로 의존해 오고 있는데, 이러한 과정은 설계기술자에게 많은 시간을 요구하고 오랜 경험과 숙달을 요구 하는 단점을 지니고 있다. 또한 고정체의 미세한 부분에 나타나는 필렛이나 챔퍼부분

---

\* 정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수

\*\* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 학생

\*\*\* 공학박사, 한전 원자력 연료(주)

을 모델링에 포함시키지 못하는 단점을 보이고 있다. 핵연료 하단고정체에 대한 신뢰성 판단의 중요성을 고려할 때 응력해석은 가능한 정확한 모델을 바탕으로 이루어져야 한다고 판단된다.

본 연구에서는, 먼저 2개의 하단고정체 모델에 대해서 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks<sup>(4)</sup>를 이용하여 정확한 기하 모델링을 수행하였고, 기하모델에 대해서 Cosmos/Works<sup>(5)</sup>를 사용하여 유로구멍에 대한 최적화를 시도하였다. 최적화된 모델을 유한요소코드 MSC/NASTRAN<sup>(6)</sup>을 이용하여 응력해석을 시도하였다. 해석된 결과를 바탕으로 각 모델에 대한 건전성 여부를 판단하였다.

## 2. 기하 모델링

본 연구에서는, 2개의 모델에 대해 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks를 이용하여 기하 모델링을 수행하였다. 이러한 기하 모델링을 수행하는데는 2가지 목적을 지니고 있다. 첫째는, 기하 모델링을 통해서 기존 고정체 뿐만 아니라 후보 모델들의 형상을 확인하고 필요시

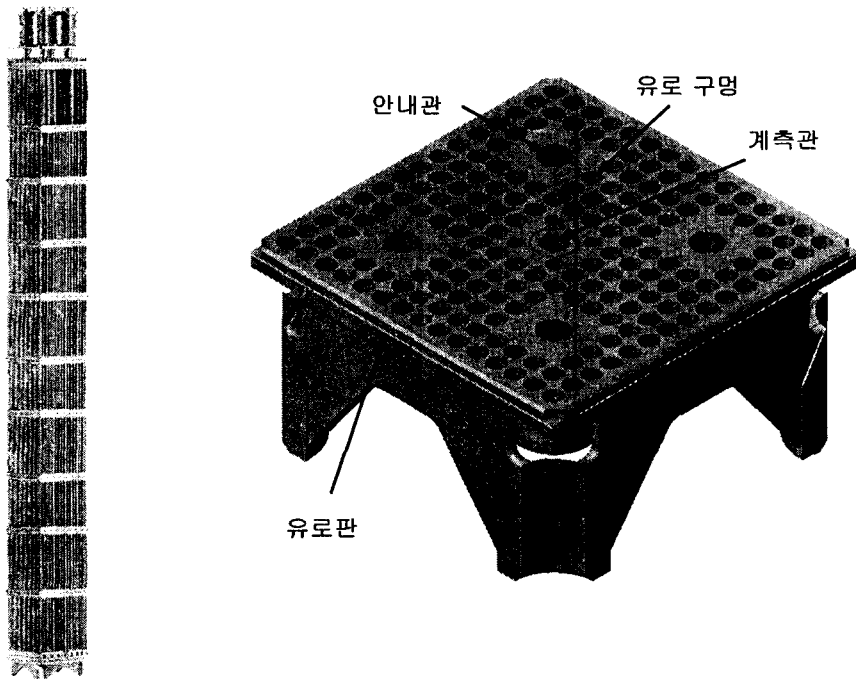


그림 1. 핵연료 집합체와 하단고정체

도면을 쉽게 만들어 낼 수 있게 된다. 또한 응력 해석이 수행된 후, 형상 최적화 과정을 통해 두께 변화나 단면적의 변화등이 발생하게 될 때 모형을 직접 제작하지 않고도 변화된 형상을 곧바로 확인할 수 있게 되며, 변화된 형상에 대한 도면을 쉽게 만들어 낼 수 있다. 둘째는, 3차원 솔리드 모델러로 만들어진 기하 모델링 결과를 상용유한요소 코드의 전처리기로 이동시켜서 유한요소 해석 모델을 만들게 된다. 현재 사용되고 있는 대부분의 상용 유한요소코드들은, 3차원 유한요소 해석모델을 만들어 내는데 많은 시간과 숙달을 필요로 하고 있으며, 필렛이나 챔퍼와 같은 세밀한 부분들의 모델링은 쉽지 않거나 거의 불가능하다. 본

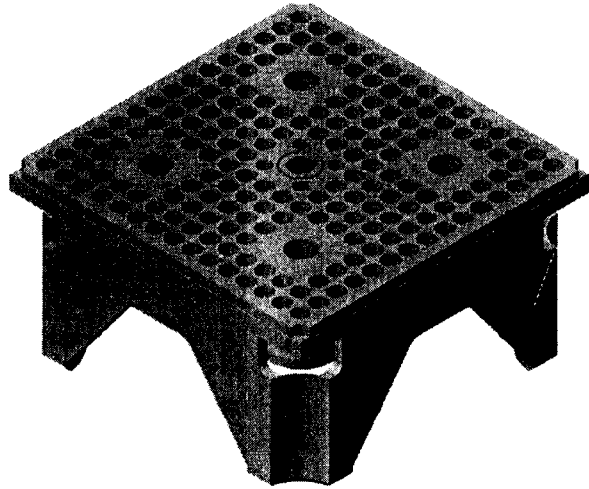


그림 2. 하단고정체A에 대한 기하 모델링

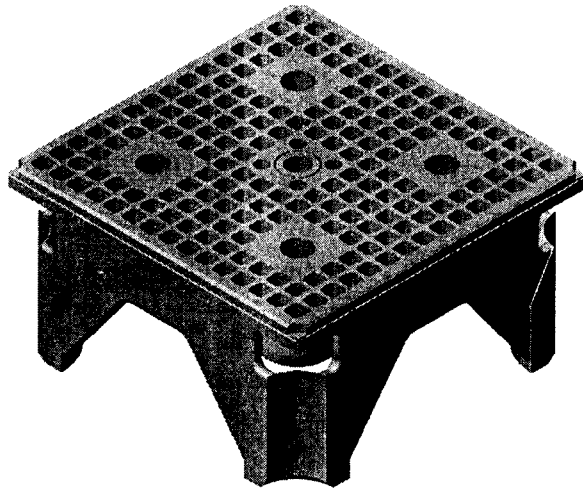
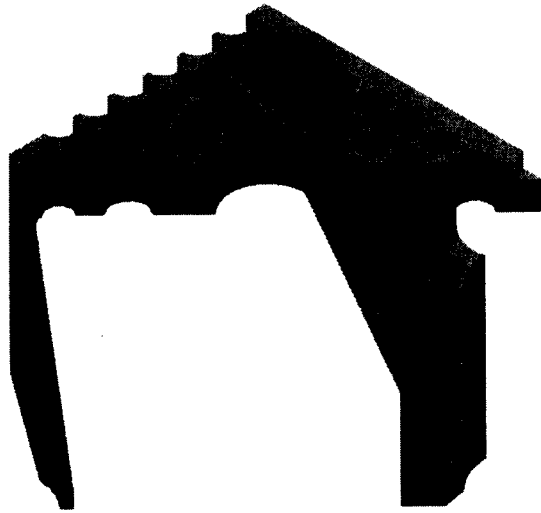
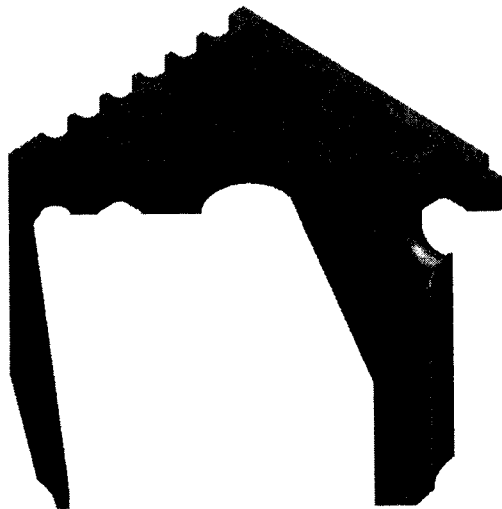


그림 3. 하단고정체B에 대한 기하 모델링

연구에서는, SolidWorks를 사용하여 해석 모델에서 요구되는 필렛이나 챔퍼등을 쉽게 구현해 내었고, 이러한 정밀한 모델에 유한요소를 모델링하여 해석을 수행하는데 사용되고 있다. 그림 2는 하단고정체A에 대한 기하 모델링 결과를 보여주고 있으며, 그림 3은 하단고정체 B에 대한 기하모델링 결과를 나타내고 있다. 하단고정체 A는 유로 구멍이 원형이며, 하단고정체 B는 유로구멍이 사각형 형상이다.



(a)



(b)

그림 4. 하단고정체 1/8형상

### 3. 유한 요소 모델링 및 유로구멍 최적화

앞에서 설명한 기하 모델을 최적화 하기위해서, 먼저 Cosmos/Works로 이동시켜 유한요소 모델링 및 최적화를 수행하였다. 최적화 과정에서 해석은 기하학적 대칭성을 고려하여 1/8형상에 대해 해석을 시도하였고, 각 분할면에 대해서는 대칭조건을 부여하였다. 하단 고정체에 작용하는 하중에 대해 안내관 연결부위에 하단고정체 설계하중인 5,000 lb의 분포하중을 가정하였으며, 4개의 안내관이 하단고정체에 연결되어 있으므로 각 안내관에 1,250 lb의 하중을 고려하여 해석을 수행하였다. 하단고정체의 재질로는 304 스테인레스 스틸이 사용되고 있는데, 탄성계수와 프와송 비는 각각  $E=28.3 \times 10^6 \text{ psi}$  와  $\nu=0.3$ 이고, 항복강도는  $\sigma_y=30,000 \text{ psi}$  이다. 그림 4 (a)와 4(b)는 해석에 사용된 기하 형상을 나타내고 있다. 최적화에서는, 허용되는 응력조건에서 하단고정체 유로구멍의 치수를 최대화 하기 위해서, 구속 조건을 허용 응력의 크기로 설정하고 설계 변수를 각 하단 고정체의 유로 구멍 치수로 정한 후 목적 함수를 하단 고정체의 체적으로 선택하여 최소가 되도록 하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } V(x) \\
 & \text{subject to } \sigma_e(x) < \alpha \sigma_y \\
 & \quad (0 < \alpha < 1) \\
 & \text{bounded to } a \leq x \leq b
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서,  $x$ 는 설계변수로서 유로 구멍의 치수(원형인 경우는 직경, 정사각형인 경우는 한 변의 길이)를 나타내고,  $V$ 는 목적함수로서 하단 고정체의 체적을 가리키며,  $\sigma_e$ 는 하단고정체에 발생하는 von Mises 응력의 최대 값을 나타낸다. 유로 구멍을 제외한 다른 부분의 치수는 고정시켰다. 최적화 과정을 통해서 얻어진 결과에 의하면, 하단고정체A 유로판의 유로구멍의 직경은 약 0.42 in.이며 유로구멍 간의 간격은 0.51 in.이고 유로판의 두께는 0.625 in. 이다. 계측관 구멍 주변에 있는 작은 유로구멍의 직경은 0.35 in.이다. 하단고정체B의 유로판은 한 변의 길이가 0.4 in.인 정사각형 유로구멍을 갖는데, 사각형의 모서리는 0.1 in.의 라운드를 갖는다. 유로구멍 간의 간격은 0.51 in.이고 유로판의 두께는 0.625 in. 이다. 계측관 구멍 주변에 있는 유로구멍은 정사각형이 아닌 원형이며, 이러한 유로구멍의 직경은 0.35 in.이다.

유로구멍에 대한 치수가 정해진 기하모델들을 MSC/NASTRAN으로 이동시켜 정밀한 응력해석을 시도하였다. 해석 결과가 그림 5와 6에 나타나 있다. 그림 5에 나타난 하단 고정체 A에 대한 해석 결과에 의하면, 최대 응력은 16,810 psi로 항복 강도의 약 56 %이므로 설계 기준을 만족하고 있다. 그림 6에 나타난 하단고정체B에 대한 해석결과에 의하면, 최대 응력은 19,240 psi로 항복강도의 약 64 %에 해당하는 값이다. 발생된 최대 응력은 하단고정체 A에 비해서 조금 높지만, 하단고정체A와 같이 구조적으로 안정되면서, 유로판의 유로면적을 더욱 크게 확보한 형상을 지니고 있어서 하단고정체A를 개선한 모델이라고 판단할 수 있다.

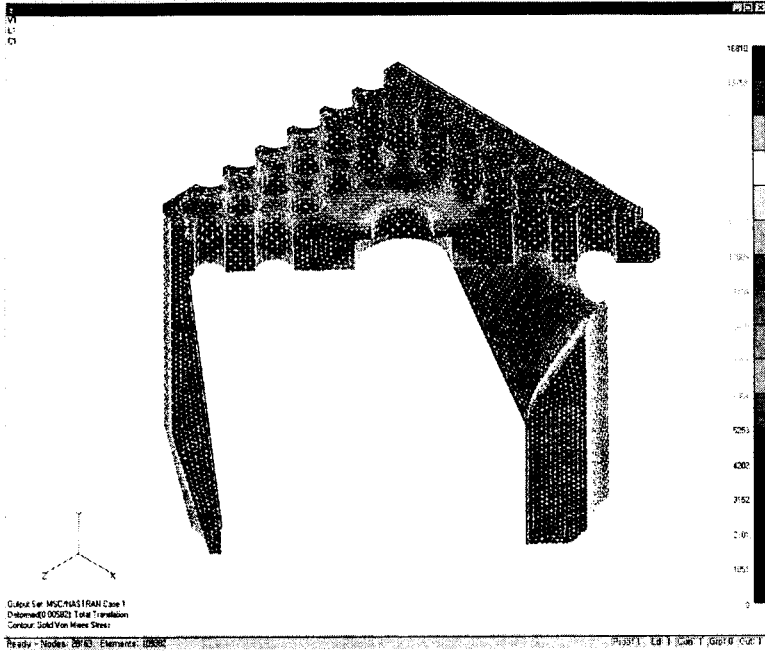


그림 5. 유로구멍이 최적화된 하단고정체A의 응력분포

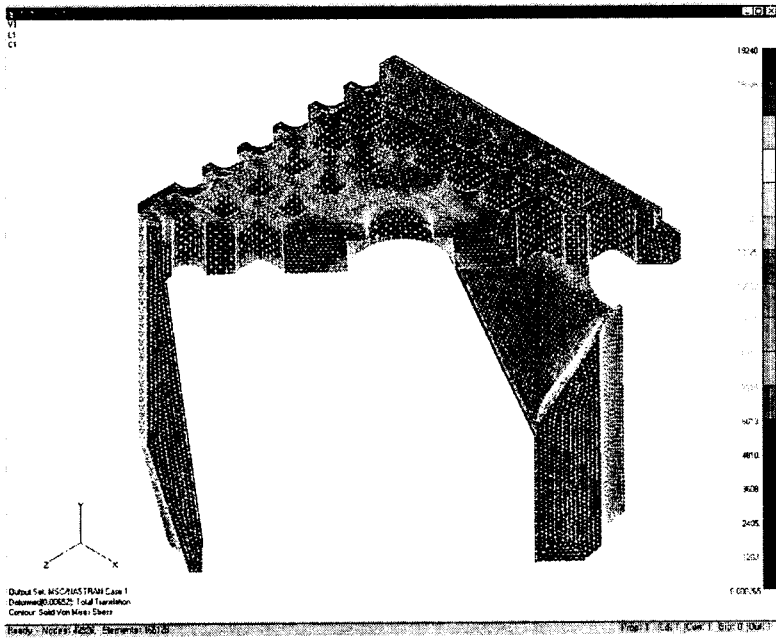


그림 6. 유로구멍이 최적화된 하단고정체B의 응력분포

## 4. 결 론

본 연구에서는, 신형 핵연료 하단고정체 개발과정에서 도출된 후보모델에 대한 3차원 응력해석을 수행하기 위하여, 하단고정체A와 하단고정체B에 대해 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks를 사용하여 기하모델을 생성하였다. 이러한 기하 모델링 방법은 상용유한요소의 전처리기를 이용한 모델링 방법에 비해 작업에 소요되는 시간이 훨씬 적고, 보다 정교한 모델 생성이 가능하여 전체적인 연구 개발과정에 효율성을 증대시키고, 비용절감 효과를 가져오는 환경을 제공하게 된다. 생성된 기하모델링 결과를 스텝파일로 저장한 후 상용유한요소 코드의 전처리기로 옮겨서 최적화와 응력해석을 수행하였다. Cosmos/Works를 이용하여 하단고정체A의 원형 유로구멍과 하단고정체B의 정사각형 유로구멍의 최적화된 크기를 구한 후, 해석 모델을 MSC/NASTRAN으로 옮겨서 정교한 응력해석을 수행한 결과에 의하면, 하단고정체A는 최대 응력이 항복강도의 56 %로서 설계기준을 만족하고 있다. 하단고정체B에 대한 해석결과에 의하면, 최대 응력은 항복강도의 약 64 %로 설계기준에 적합하다고 판단된다. 또한 최대 응력이 발생하는 위치도 하단고정체 유로판과 지지 다리 사이에서 발생하고 있어서 구조적으로 안정되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 하단고정체B는 하단고정체A와 같이 구조적으로 안정되면서, 유로판의 유로면적을 약 8 % 크게 확보한 형상을 지니고 있어서 하단고정체A를 개선한 모델이라고 판단할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력증장기 과제인 경수로형 신형 핵연료 기술개발과제에 의해서 수행되었으며, 관계자 제위께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김 규태외 14, 경수로형 신형 핵연료 개발, 한전 원자력 연료(주), 2000.
2. 김 규태, 한국표준원전용 개량핵연료 개발, 한전원자력 연료(주), 2002.
3. 이 상순외 3, 상 · 하단 고정체 후보모형 3차원 모델링 및 응력해석, 한전원자력연료(주), 2001.
4. SolidWorks 2000, User's Manual, SolidWorks Co., 2000.
5. Cosmos/Works, Ver.6.0, User's Guide, SRAC, 2000.
6. MSC/NASTRAN for Windows, User's Manuals, Ver. 4.5, MSC, 2000.