

유한요소법에 의한 신형 핵연료 하단고정체 주 후보모형의 해석

Stress Analysis for the Candidate of Lower End Fitting of Advanced LWR Fuel Using FEM

이 상순*, 문 연철*, 김 형구**

*한국기술교육대학교

충남 천안시 병천면 가진리 307번지

**한전원자력연료(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

신형 핵연료 하단고정체 주후보 모형에 대해 3차원 솔리드 모델러를 이용하여 기하모델링을 수행하였다. 다음에, 유한요소코드 MSC/NASTRAN을 이용하여 3차원 응력해석을 수행하였다. 해석된 응력해석 결과를 바탕으로 주후보모형에 대한 건전성 평가를 시도하였다.

Abstract

The geometric modeling has been conducted for the candidate of advanced LWR fuel using the three-dimensional solid modeler. Then the three-dimensional stress analysis using MSC/NASTRAN has been performed. The evaluation for the mechanical integrity of the candidate has been performed based on the stress distribution obtained from the finite element analysis.

1. 서 론

원자로내에 있는 하단고정체(Lower End Fitting)는 냉각수의 원활한 유동을 위한 유로구멍과 안내관, 계측관과의 체결을 위한 구멍이 뚫려있는 유로관 및 핵연료의 위치를 유지시키기 위한 다리등으로 구성되어 있다. 이러한 하단고정체는 냉각수를 재분배하고, 핵연료 집합체를 지지하며, 이물질의 여과하는 기능을 수행한다. 원자로내 핵연료 집합체 손상은 집합체내로 유입되는 이물질과 연료봉과의 부식마모에 의한 것이 대부분이므로,

집합체의 손상을 줄이기 위해서는 냉각수에 의해 하부 노심 지지판으로부터 유입되는 이 물질을 하단고정체에서 여과하고 포획할 수 있도록 설계해야 한다.

현재 국내에서는 냉각수의 재분배를 원활히 하고 집합체의 손상을 줄일 수 있는 하단 고정체에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.¹⁻³⁾ 하단 고정체는 유체역학적인 면에서 좋은 효율이 요구되는 물론이고, 핵연료 집합체의 무게를 안전하게 지지해야 하기 때문에, 설계과정에서 정확한 응력해석 결과가 요구되고 있다. 현재까지 국내의 원전 기술진에 의해 진행되어온 응력해석 과정에는, 복잡한 형상의 하단고정체의 기하모델링 과정에서 일반 상용유한요소 프로그램의 전처리기(pre-processor)에 전적으로 의존해 오고 있는데, 이러한 과정은 설계 기술자에게 많은 시간을 요구하고 오랜 경험과 숙달을 요구하는 단점을 지니고 있다. 또한, 하단 고정체의 유로구멍 주변에 나타나는 필렛이나 챔퍼부분을 모델링에 포함시키기 힘든 단점을 보이고 있다. 신형 핵연료 하단고정체에 대한 신뢰성 있는 응력해석 결과를 얻기 위해서는 응력해석은 가능한한 정확한 모델을 사용하여 수행되어야 한다고 판단된다.

본 연구에서는 먼저, 현재 개발 중인 신형 핵연료 하단고정체 주후보 모형에 대해서 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks⁴⁾를 이용하여 정확한 기하 모델링을 수행하였고, 상용 유한요소 프로그램인 MSC/NASTRAN⁵⁾을 이용하여 3차원 응력해석을 시도하였다. 해석된 결과를 바탕으로 주후보 모형에 대해 건전성 여부를 판단하였다.

2. 기하 모델링

본 연구에서는, 현재 개발 중인 하단고정체 주후보 모형에 대해 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks를 이용하여 기하 모델링을 수행하였다. 이러한 기하 모델링을 수행하는데는 2가지 목적을 지니고 있다. 첫째는, 기하 모델링을 통해서 기존 하단고정체 뿐만 아니라 후보 모형의 형상을 확인하고 제작에 필요한 도면을 쉽게 만들어 낼 수 있게 된다. 또한 응력해석이 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 프로그램의 전처리기로 옮겨서 유한요소 해석모형을 만들게 된다. 현재 사용되고 있는 대부분의 상용유한요소 코드들은 3차원 유한요소 해석 모형을 만들어 내는데 많은 시간과 숙달을 필요로 하고 있으며, 필렛이나 챔퍼와 같은 세밀한 부분들의 모델링은 쉽지 않거나 거의 불가능하다. 본 연구에서는 SolidWorks를 사용하여 해석모형에서 요구되는 필렛이나 챔퍼등을 쉽게 구현해 내었고, 이러한 정밀한 모형에 유한요소를 모델링하여 해석을 수행하는데 사용되고 있다.



그림 1. 기존의 하단고정체 기하 모델링



그림 2. 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있지 않은 상태의
하단고정체에 대한 기하 모델링

본 논문의 그림 1과 2는 기존 하단고정체와 하단고정체의 유로 구멍형상을 수정한 모델들에 대한 기하모델링을 나타내고 있다. 그림 1에 나타난 기존의 하단고정체 유로판의 유로구멍의 직경은 0.422 in. 이며 유로구멍 간의 간격은 0.506 in. 이고 유로판의 두께는 0.625 in. 이다. 계측관 구멍 주변에 있는 작은 유로구멍의 직경은 0.344 in. 이다. 그림 2에 나타난 주 후보모형의 하단고정체 유로판은 한 변의 길이가 0.4 in. 인 정사각형 유로구멍을 갖는데, 사각형의 모서리는 0.1 in. 의 라운드를 갖는다. 유로구멍 간의 간격은 0.506 in. 이고 유로판의 두께는 0.625 in. 이다. 계측관 구멍 주변에 있는 유로구멍은 정사각형이 아닌 원형이며, 이러한 유로구멍의 직경은 0.344 in. 이다. 그림 3은 사각유로구멍 사각분할형판과 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있는 하단고정체에 대한 기하 모델링 결과를 나타낸다.

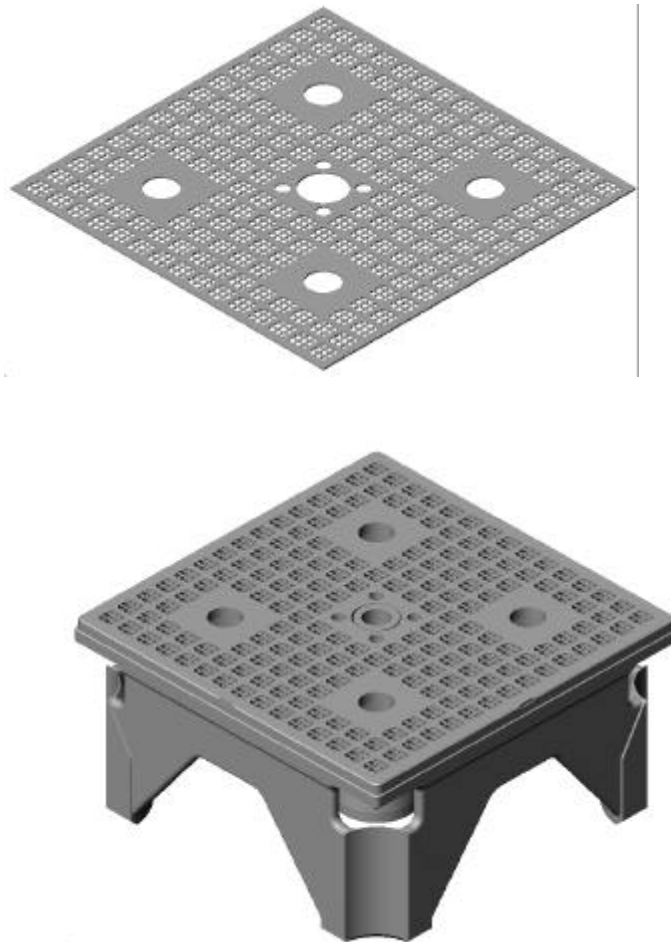
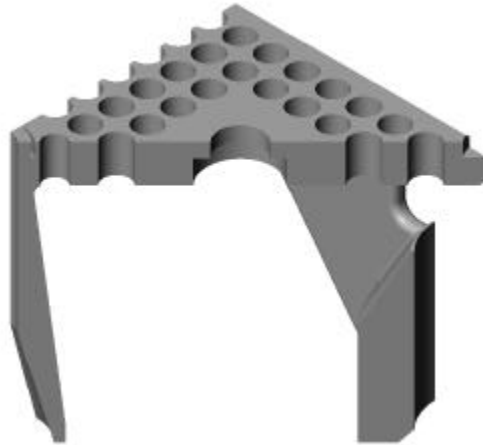
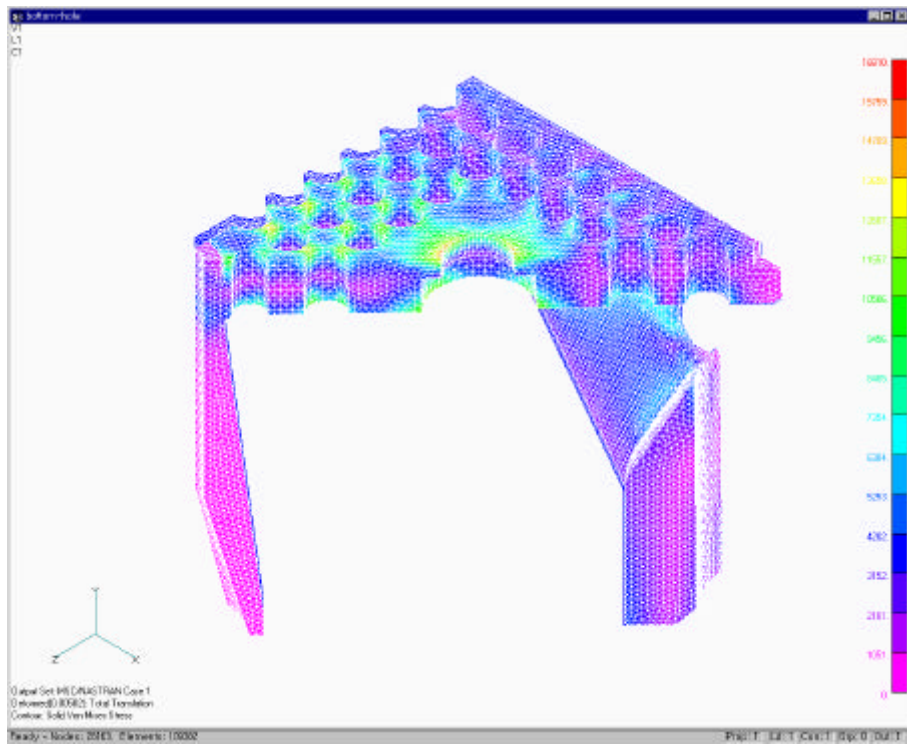


그림 3. 사각유로구멍 사각분할형판과 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있는 하단고정체에 대한 기하 모델링

3. 유한요소 모델링 및 응력해석



(a)



(b)

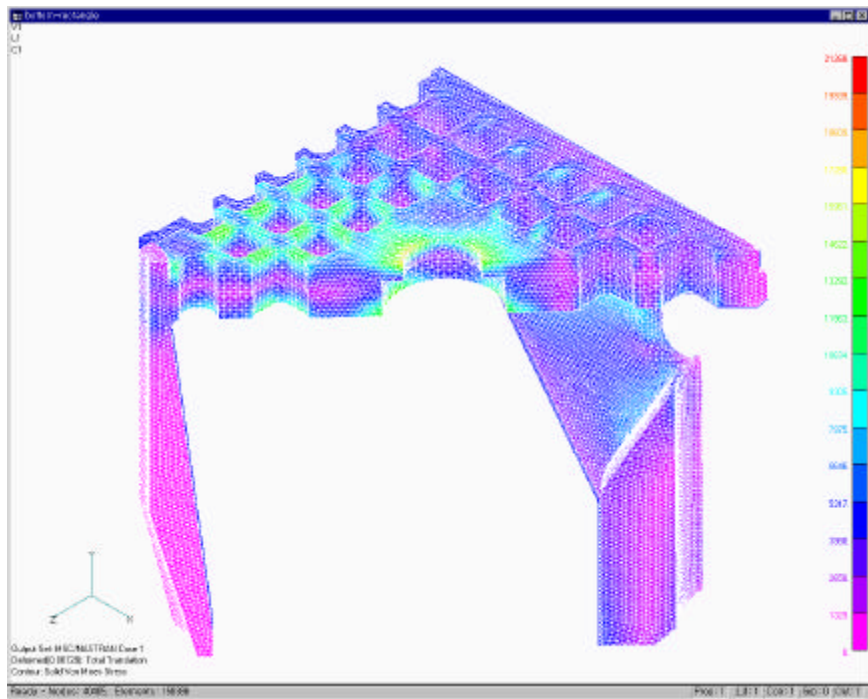
그림 4. 기존의 하단고정체에 대한 응력해석 결과

2장에서 설명된 기하모델들을 상용유한요소 코드인 MSC/NASTRAN의 전처리기로 이동시켜 유한요소 모델링과 해석을 수행하였다. 그림 4는 기존의 하단고정체에 대한 유한요소 모델링과 해석결과를 나타내고 있다. 해석은 기하학적 대칭성을 고려하여 1/8형상에 대해 시도하였고, 각 분할면에 대해서는 대칭조건을 부여하였다. 하단 고정체에 작용하는 하중에 대해 안내관 연결부위에 하단 고정체 설계하중인 5,000 lb크기를 갖는 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)는 해석에 사용된 기하 형상을 나타내고, 그림 3(b)는 응력분포를 나타내고 있다. 그림 3(b)에 나타난 해석결과에 의하면, 최대 응력은 16,810 psi로 항복강도의 약 56 %이므로 설계기준을 만족하고 있다.

다음에는, 주후보 모델에 대한 응력 해석을 시도하였다. 앞에서 설명한 기하 모델들을 MSC/NASTRAN의 전처리기로 이동시켜 유한요소 모델링을 수행하였다. 해석은 기하학적 대칭성을 고려하여 1/8형상에 대해 해석을 시도하였고, 각 분할면에 대해서는 대칭조건을 부여하였다. 기존의 하단 고정체의 경우와 동일하게, 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. 모델들의 재질로는 304 스테인레스 스틸을 가정하였는데, 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 5 (a)와 6(a)는 해석에 사용된 기하형상을 나타내고, 그림 5(b)와 6(b)는 해석결과를 나타낸다. 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있지 않은 상태의 하단고정체에 대한 응력해석 결과에서 나타나는 최대 응력은 약 22,000 psi로 항복강도의 약 73 %이므로 설계기준을 만족하고 있다. 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있는 상태의 하단고정체(주후보모델)에 대한 응력해석 결과에서 나타나는 최대 응력은 23,000 psi로 항복강도의 약 77 %에 해당하는 값이다. 또한 최대 응력이 발생하는 위치도 하단고정체 유로판과 지지다리 사이에서 발생하고 있어서 구조적으로 안정되어 있다고 볼 수 있다.

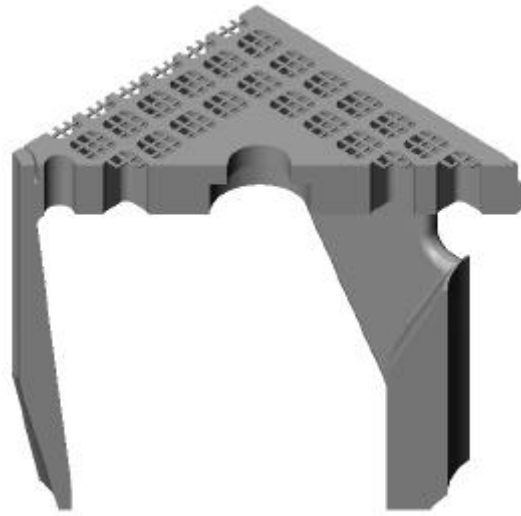


(a)

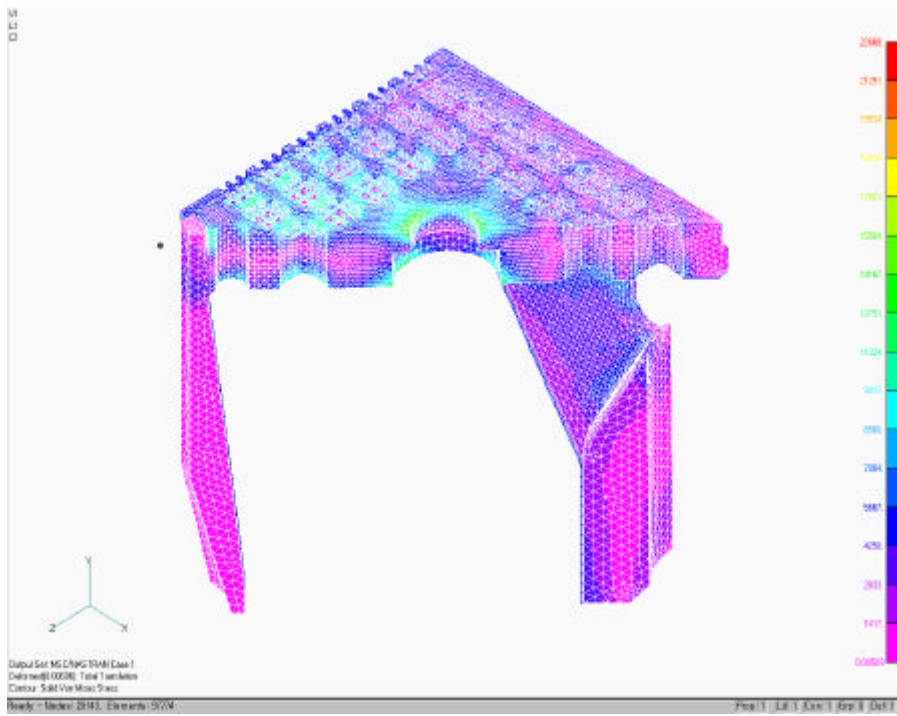


(b)

그림 5. 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있지 않은 상태의 하단고정체에 대한 응력해석 결과



(a)



(b)

그림 6. 사각유로구멍 사각분할형관이 설치되어 있는 상태의 하단고정체에 대한 응력해석

4. 결 론

신형 핵연료 하단고정체 개발과정에서 도출된 후보모델에 대한 3차원 응력해석을 수행하기 위하여, 기존 하단고정체와 주후보 모델에 대해 3차원 솔리드 모델러인 SolidWorks를 사용하여 기하모델을 생성하였다. 이러한 기하 모델링은 후보모델의 형상을 확인하고 필요시 도면을 쉽게 만들어 낼 수 있게 한다. 또한 응력 해석이 수행된 후, 형상 최적화 과정을 통해 두께 변화나 단면적의 변화등이 발생하게 될 때 모델을 직접 제작하지 않고도 변경된 형상을 곧바로 확인할 수 있게 되며, 변경된 형상에 대한 도면을 쉽게 만들어 낼 수 있어서, 전체적인 연구 개발과정에 효율성을 증대시키고, 비용절감 효과를 가져오는 환경을 제공하게 된다.

생성된 기하모델링 결과를 상용유한요소 코드의 전처리기로 옮겨서 응력해석을 수행하였다. 해석한 결과에 의하면, 기존의 하단고정체는 최대 응력이 항복강도의 56 %로서 설계기준을 만족하고 있다. 사각유로구멍 사각분할형판이 설치되어 있는 상태의 하단고정체(주후보모델)에 대한 해석결과에 의하면, 최대 응력은 항복강도의 약 77 %로 설계기준에 적합하다고 판단된다. 최대 응력이 발생하는 위치도 하단고정체 유로판과 지지 다리 사이에서 발생하고 있어서 구조적으로 안정되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 주후보 모델은 기존의 하단고정체와 같이 구조적으로 안정되면서, 유로판의 유로면적을 더욱 크게 확보한 형상을 지니고 있으며, 이물질 여과 및 포획의 효율성을 증대시키고 있어서 기존의 하단고정체를 개선한 모델이라고 판단할 수 있다. 이러한 해석 결과의 확실한 입증을 위해서는 기계적 실험이 요구된다고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 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. 이 상순외 3, 상 · 하단 고정체 후보모형 모델링 및 응력해석, 과학기술부, 2001.
3. 최 준형외 5, 신형 하단고정체 후보모형 성능 평가 보고서, 한전 원자력 연료(주), 2001.
4. SolidWorks 2000, User's Manual, SolidWorks Co., 2000.
5. MSC/NASTRAN for Windows, User's Manuals, Ver. 4.5, MSC, 2000.