

'96 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

영광 3,4 호기용 하단고정체에 대한 유한요소 응력해석

이진석 • 송기남 • 서정민

한국원자력연구소

요 약

핵연료집합체의 하단고정체는 상단고정체와 안내관을 통해 전달되는 하중들로부터 연료봉을 보호하는 주요부품이다. 하단고정체의 구조적 건전성을 유한요소법으로 평가하기 위해 상용프로그램인 PATRAN 과 ANSYS 5.1 을 사용하였다. 하단고정체의 3 차원 global 모델에 대한 응력해석을 수행하였으며 응력집중이 일어나는 유로구멍사이의 ligament 부분에 대해 submodeling 기법을 이용하여 해석의 정확도를 높였다. 본 연구에서 수행한 응력해석결과를 하단고정체 구조강도 시험에서 얻은 시험결과와 비교함으로써 응력해석모델에 대한 신뢰성과 보수성을 확인하였고 영광 3&4 호기의 핵연료집합체에 부착된 하단고정체가 설계하중에 대해 충분한 건전성을 유지하고 있음을 증명하였다.

1. 서 론

핵연료집합체의 하단고정체(Lower End Fitting ; LEF)는 핵연료집합체 최하단에 부착된 구조물로서 많은 유로구멍이 뚫려 있는 유로판(flow plate)과 유로판 네 모서리에 leg 가 있으며 유로판 중앙에는 노심 계측기가 삽입될 수 있도록 center nozzle 이 부착된 stainless steel 의 주조제품이다. 구조적으로는 핵연료집합체의 상단고정체(Upper End Fitting ; UEF)와 안내관을 통해 전달되는 축 방향의 가동 및 비가동 설계하중을 지지하고 이들 하중들로부터 연료봉을 보호할 뿐만 아니라 열수력적으로는 하부 노심판으로부터 유입된 냉각수를 연료봉 사이의 유로수로로 흐를 수 있도록 분배하는 기능을 갖고 있다. CE 형 발전소인 영광 3&4 호기에 사용되고 있는 핵연료집합체에는 그림 1 과 같은 LEF 이 장착되어 있는데 두께 0.625inch 의 유로판과 유로판 네 모서리의 leg, 그리고 유로판 중앙에 center nozzle 로 구성되어 있다. 이러한 LEF 에 축 방향 하중이 작용할 때 하중은 4 개의 안내관과 유로판 네 모서리의 leg 를 통해 유로판에 전달된다.

LEF 은 많은 유로구멍을 포함하고 있는 구조물이어서 LEF 의 구조강도를 해석적으로 평가하는데 어려움이 있기 때문에 주로 구조강도 시험[1-3]을 통하여 LEF 의 구조적 건전성을 평가하여 왔다. 그러나 근래에 대용량의 computer 가 출현하고 유한요소 해석법과 같은 응력해석 방법 및 이를

이용한 상업용 code가 개발되어 LEF와 같은 구조물도 수치적인 방법으로 신뢰성 있게 구조강도를 평가[4,5]하고 있는 추세이다.

본 연구는 영광 3&4 호기의 핵연료집합체에 부착된 LEF의 구조적 강도를 수치적인 방법으로 평가하기 위해 상업용 유한요소 프로그램인 PATRAN과 ANSYS 5.1을 사용하여 LEF에 대한 응력해석을 수행하였고 CE형 핵연료 주요부품을 국산화 하는 중에 수행한 LEF구조강도 시험결과와 비교하여 LEF응력해석 모델의 정확성을 검증하였다.

2. 하단고정체의 설계

하단고정체가 과다하게 변형되거나 파손될 경우 위로 연결되어있는 안내관에 변형 또는 핵연료집합체에서 이탈을 초래하게 하여 노심내에서 제어봉의 삽입을 원활히 안내할 수 없어서 원자로 운전정지 및 연료봉의 냉각가능한 수로 확보를 보장할 수 없다. 따라서 하단고정체는 모든 설계하중 하에서 관련 설계기준을 만족하도록 설계되어야 한다.

하단고정체의 가장 큰 설계하중으로는 핵연료집합체 운송 및 취급시에 작용할 수 있는 축 방향 수직하중으로 5000lb의 설계하중이 적용되고 있다. 응력해석모델에서는 축 방향 하중이 4개의 안내관(guide tube)에 균일하게 작용하며 안내관과 하단고정체 유로판의 접촉부분에 분포하중으로 작용하는 것으로 가정하였다. 하단고정체의 재료는 cast 304 stainless steel이 사용되고 있는데 이 재료는 하단고정체의 강도에 적합하며 부식에 잘 견디는 특성을 갖고 있어 현재 운전중인 CE형 원자로의 부품으로 많이 사용되고 있다. 유한요소 해석에서는 상온에서의 탄성계수(28.3×10^6 psi) 및 포와송비(0.3)를 사용하였다.

3. 유한요소 응력해석

3.1 Global 모델

하단고정체는 그림 1에서 보듯이 수평 및 수직 두 축에 대해 대칭으로 배치되어 있으며 4개의 안내관에 작용하는 하중 또한 대칭을 이루고 있기 때문에 응력해석 모델에서는 그림 2와 같이 1/8 section만을 해석대상으로 취하였다.

그림 3은 global 모델에 대한 해석결과로서 하중에 의해 변형된 모습을 보여주고 있다. 그림에서 점선과 실선은 각각 변형전과 변형후 하단고정체의 형상을 나타낸 것인데 안내관과 유로판의 접촉부분에 작용하는 하중에 의해 유로판의 뒷부분에 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 하단고정체의 유한요소모델에서 사용된 요소의 크기가 적절한지를 검토하기 위해 ANSYS 5.1에서 제공한 모듈을 사용하였다. ANSYS에서는 Zienkiewicz와 Zhu[6]가 제안한 Error Estimation 방법을 사용하고 있는데 탄성해석에서 식(1) 같이 "Energy Norm"을 정의하고 있다.

$$\|e\| = \left[\int (\Delta\sigma)^T D^{-1} (\Delta\sigma) d(vol) \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 vol = Element Volume
 D = Elasticity Matrix

구성된 모델의 SEPC(Structural Percentage Error in Energy Norm)값은 leg 부위를 제외한 나머지 부분에서 10%이하로 나타나 submodel 해석을 위한 범위 해를 얻기에 적당하다고 판단된다. Leg 부분에서 값이 비교적 크게 나타났것은 그림 2에서와 같이 leg 부분의 요소가 크기 때문이다. 그러나 응력집중이 일어나는 유로판에 미치는 영향이 작으므로 leg 부분에서는 요소를 더 세분화할 필요는 없다고 판단된다. 그림 4는 해석결과 유로판 윗면에서 응력강도의 분포를 보여주고 있다. 유로구멍사이에 응력강도값이 비교적 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 Submodel

하단고정체의 응력해석에서 관심이 되고 있는 부분은 유로구멍사이의 ligament로서 일반적으로 응력값이 크게 나타나고 있다. 그림 5는 그림 4에서 응력값이 크게 나타나는 영역 S에 대한 submodel을 보여주고 있다. Submodel은 9184개의 절점과 6780개의 요소로 구성되었으며 두께방향으로 6개층의 요소를 사용하였다. Global 모델에 대한 해석을 수행한 뒤 ANSYS의 cut boundary interpolation-convert 기능을 이용하여 경계부분 절점의 변위값을 submodel의 경계조건으로 하였다. 그림 6은 하단고정체의 구조강도 시험에서 strain gauge가 부착된 위치를 나타내고 있다. Strain gauge가 부착된 위치에서 응력분포를 얻기위해 submodel에 대한 응력해석을 수행하였다.

그림 6에서 영역 A는 구조강도 시험에서 strain gauge #1이 부착된 위치로서 빗금친 부분은 해석 모델에서 strain gauge 크기에 해당하는 요소를 나타내고 있다. 그림 7은 영역 A에 대한 해석결과로서 응력강도 분포를 나타내고 있으며 ligament에서 최대 응력강도 값이 나타나고 있다. 영역 A에서 σ_z 는 응력강도와 비슷한 분포를 보이고 있어 응력강도에 기여하는 응력의 주성분은 σ_z 임을 알 수 있다. Strain gauge #2와 #3이 부착된 위치에 대한 응력해석 결과도 영역 A와 같은 경향을 나타내고 있으며 σ_z 가 응력의 주성분으로 응력강도와 비슷한 분포를 보이고 있다.

그림 6에서 영역 D는 구조강도 시험에서 strain gauge #4가 부착된 위치로서 빗금친 부분은 해석 모델에서 strain gauge 크기에 해당하는 요소를 나타내고 있다. 그림 8은 영역 D에 대한 해석결과로서 응력강도 분포를 나타내고 있으며 ligament에서 최대 응력강도 값이 나타나고 있다. 영역 D에서 σ_z 는 응력강도와 비슷한 분포를 보이고 있어 응력강도에 기여하는 응력의 주성분은 σ_z 임을 알 수 있다.

그림 6에서 영역 F는 구조강도 시험에서 strain gauge #6이 부착된 위치로서 빗금친 부분은 해석 모델에서 strain gauge 크기에 해당하는 요소를 나타내고 있다. 그림 9는 영역 F에 대한 해석결과로서 응력강도 분포를 나타내고 있으며 ligament에서 최대 응력강도 값이 나타나고 있다. 영역 F에서 σ_x 는 응력강도와 비슷한 분포를 보이고 있어 응력강도에 기여하는 응력의 주성분은 σ_x 임을 알 수 있다.

Strain gauge #7과 #8이 부착된 위치에 대한 응력해석 결과도 영역 F와 같은 경향을 나타내고 있으며 σ_x 가 응력의 주성분으로 응력강도와 비슷한 분포를 보이고 있다.

3.3 하단고정체 구조강도 시험결과와 비교

그림 6과 같은 위치에 strain gauge를 부착하여 하단고정체의 구조강도 시험[2]을 수행하였으며 시험 결과를 3.2 절의 응력해석 결과와 비교한 것이 표 1에 제시되어 있다.

표 1에서 보듯이 최대응력이 측정된 strain gauge 6번에서 해석결과는 시험결과 보다 약 17%크게 예측하고 있으며 strain gauge 1번과 2번을 제외하고는 시험결과보다 약 9~29% 크게 예측하고 있다.

strain gauge #4, 7, 8 위치에서 해석결과($\bar{\sigma}_i$)가 시험결과 보다 28~29% 큰 이유는 유한요소 해석모델에서 가정한 안내관 부위의 하중조건이 구조강도 시험모델에서의 하중조건과 상이하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한 strain gauge #4, 7, 8에서 응력해석 결과($\bar{\sigma}_i$)와 시험결과가 크게 차이나는 것은 원래 이 부위에서의 응력이 상대적으로 크기 때문에 발생하는 문제로 사료된다.

4. 결 론

하단고정체의 구조강도 해석을 위해 global 모델 및 submodel에 대한 응력해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Submodel 해석방법은 하단고정체와 같은 구조물의 해석 및 건전성평가에 유용하게 이용될 수 있다.
2. Submodel 해석에서 얻은 평균응력은 하단고정체 구조강도 시험에서 얻은 응력측정치 보다 약간 크게 예측하고 있어 하단고정체 구조해석에 이용한 본 연구의 모델 및 해석 방법은 보수성을 갖고 있다.
3. 구조해석으로부터 얻은 최대응력이 설계기준인 $3S_m$ (59770 psi)보다 훨씬 낮기 때문에 본 연구의 대상인 하단고정체는 구조적 건전성이 유지되는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. L. Gesinski, "Mechanical test and evaluation of the 17x17 fuel assembly," WCAP 8286, June 1974.
2. 송기남외 2인, "CE형 원전연료 부품국산화 제조공정 자격인증," KAERI/TR-607/96.
3. 한대준, 김대환, 김성수, "핵연료 상단고정체 시제품 구조 강도시험평가에 대한 용역보고서," 1991. 8, 원자로재료연구실, 원자력안전연구부.
4. 임정식, 이재경, "하단고정체 유로판의 두께 최적화," KAERI/TR-518/95.
5. 송기남외 3인, "TIG 용접으로 제조된 17x17형 상단고정체의 구조강도해석," KAERI/TR-212/91.
6. O. C. Zienkiewicz, J. Z. Zhu, "A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis," Int. j. numer. methods eng., vol. 24, 337-357(1987).

표 1. 응력해석 결과와 구조강도시험 결과의 비교

Strain Gauge 위치	응 력, psi		Difference, %
	해석결과	시험결과	
1	-8292	-8471	-2
2	-7507	-7697	-2
3	-6062	-5094	19
4	-8482	-6612	28
5	-2742	-2518	9
6	-11657	-9933	17
7	-10258	-7942	29
8	-11213	-8782	28

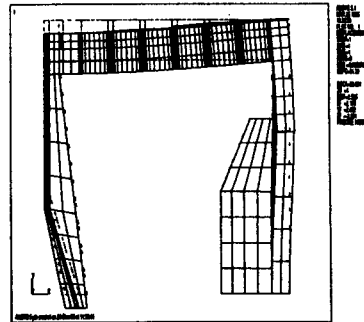


그림 3. Global 모델의 해석결과 변형된 모습

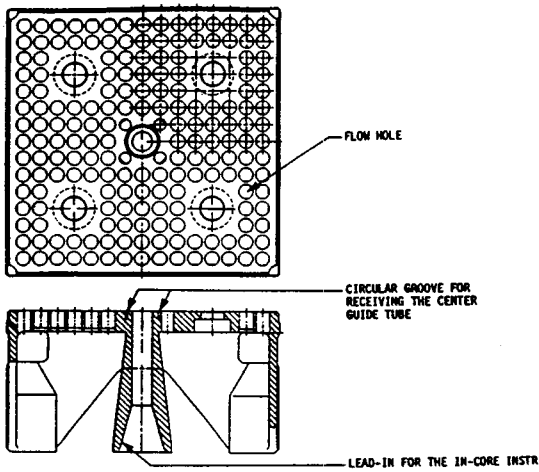


그림 1. 하단고정체 구조

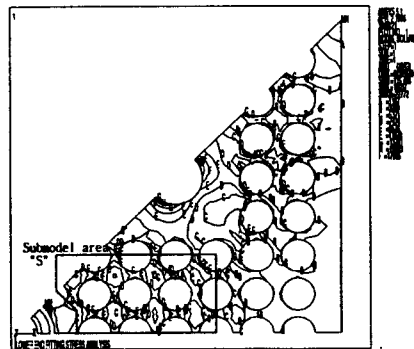


그림 4. 하단고정체 유로판의 응력강도 분포

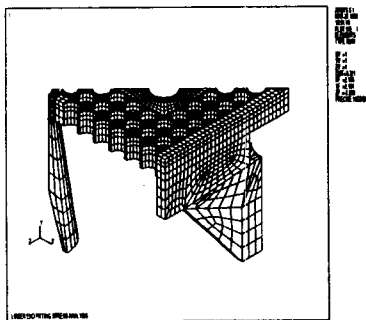


그림 2. 하단고정체 유한요소 Global 모델

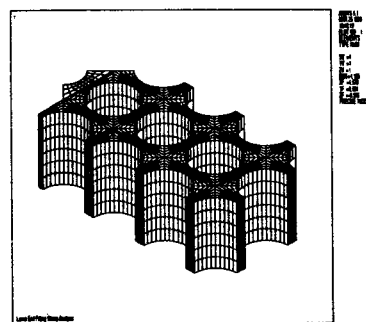


그림 5. 하단고정체 유한요소 Submodel

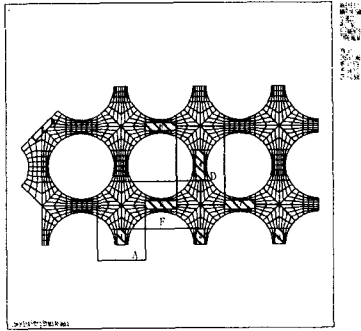


그림 6. Submodel 에서 Strain Gauge 위치

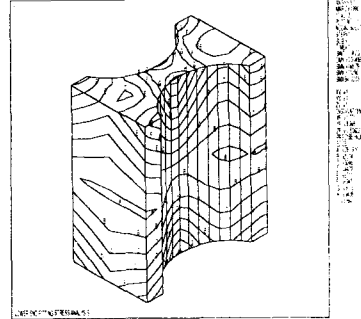


그림 8. 영역 D에서 응력강도(Stress Intensity) 분포

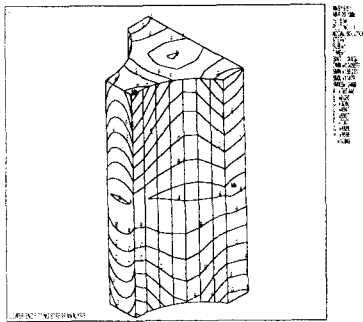


그림 7. 영역 A에서 응력강도(Stress Intensity) 분포

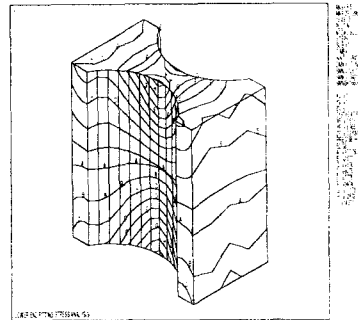


그림 9. 영역 F에서 응력강도(Stress Intensity) 분포