경수로 핵연료 성능코드 적용을 위한 비선형 유한 요소 모듈 개발

Development of FE module for application of PWR fuel performance code

***#김효찬 [1], 양용식 [1], 김대호 [1], 방제건 [1], 김선기 [1], 김재용 [1], 구양현 [1], 권영두 [2]**

*#H. C. Kim[1](hyochankim@kaeri.re.kr), Y. S. Yang[1], D. H. Kim[1], J. G. Bang[1], S.K. Kim[1], J. Y. Kim[1], Y. H. Koo[1] , Y. D. Kwon[2]

[1] 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부, [2] 경북대학교 기계공학과

Key words : Nonlinear Finite Element, Effective-Stress-Function Algorithm, Performance code of nuclear fuel

1. 서론

원자력 발전은 경제적이고 온실가스를 배출하지 않는 친환경 에너지로써 각광을 받아 왔으나, 최근 후쿠시마 원전 사고 이후로 안전성이 크게 대두되면서 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 국내는 원자력 발전소 중 가압형 경수로가 80% 이상을 차지하여 주된 발전형태로 운영되고 있다. 가압형 경수로에서 핵분열이 발생하는 노심에는 약 7 만여 개 이상의 핵연료봉이 장전되어 있으며 정상 운전시 냉각수 압력이 150 기압이며 냉각수 온도는 350 ℃ 를 유지하고 있다. 그리고, 장전된 핵연료는 18 개월동안 3 주기를 기계적•화학적 건전성을 해치지 않고 연소가 진행되어야 한다. 일반적인 경수로 핵연료 봉의 구조는 원통형으로 지르코늄 합금 피복재 내부에 UO_2 로 구성되어 있는 핵연료(Pellet)로 구성되어 있으며 두 재질 사이에는 약간의 간극이 존재하며 간극에는 열전도도가 우수한 헬륨으로 가압되어 있다. 핵연료가 연소되는 동안 방사능 물질의 2 차 차단 역할을 하는 피복관의 건전성은 매우 중요하며 새로운 핵연료 설계시 실험 및 해석적인 방법으로 거동평가가 필수적이다. 해석적인 방법으로 핵연료 거동을 평가하기 위해 개발되는 코드를 핵연료 성능 코드라 하며, 전 세계적으로 이에 대한 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 피복관의 기계적 거동에 대한 정밀 해석을 수행하기 위해 최근 기계 해석에 널리 쓰이고 있는 유한 요소 기법이 도입되고 있다. 하지만, 핵연료 성능 코드에 적용되는 유한요소 해석 코드는 비선형적인 현상 (소성/크립/팽윤) 등을 동시에 해석해야 하며, 다른 모델과 같이 해석되어야 하기 때문에 해석 모듈의 수렴성 및 정확성이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 핵연료 성능 코드에서 정확한 응력 및 변형률 해석을 위해 비선형 유한요소 해석 모듈을 개발하고 이에 대한 검증을 수행하고자 한다. 또한, 비선형 유한요소 해석의 수렴성 및 정확성 향상을 위해 Effective-Stress-function (ESF) 알고리즘을 적용하여 비선형 유한요소 해석 계산을 수행하였다.

2. Effective-Stress-Function 알고리즘

일반적으로 유한요소 해석에서 비선형 계산을 수행하기 위해서는 미소 변위 및 응력 증분법을 통해 많은 반복 계산으로 수렴값을 찾는다. 특히, 핵연료 거동의 경우에는 열변형, 크립 변형, 탄소성 변형등 복합적인 거동이 서로 영향을 미치며 거동하기 때문에 일반적인 증분법은 적합하지 않다. 본 연구에서는 복합적인 열/탄소성/크립 계산을 하나의 변수로 수렴 시킬 수 있는 Effective-Stress-Function (ESF) 알고리즘을 도입하여 비선형 FE 모듈을 구현하였다. ESF 함수는 크립 변형과 소성

변형을 유한응력을 함수로 하여 연결 시켜 이를 수렴하는 ESF 를 식 (1)과 같이 정의하였다. 단, 항복 함수는 Von Mises 항복조건과 Isotropic hardening rule 적용하였으며, Creep 함수는 Power 함수를 적용하였다.

$$f(^{t+\Delta t}\bar{\sigma}) = a^2(^{t+\Delta t}\bar{\sigma})^2 + b^{\tau}\gamma - c^{2\tau}\gamma^2 - d^2 \quad \text{식 (1)}$$

여기서, b,c,d 는 입력 변수에 의해 결정되어지며, 유효응력과는 무관하며, a 변수는 유효응력과 관계 있는 변수이다.

3. 비선형 유한요소 검증

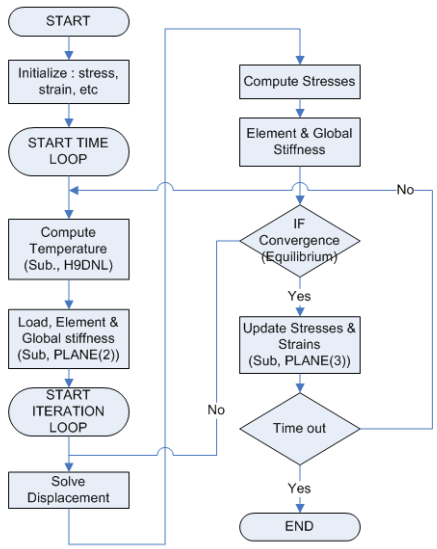

Fig. 1 Flowchart of the developed FE module

ESF 알고리즘을 적용하여 개발한 비선형 유한요소 모듈은 그림 1 과 같다. 개발된 모듈을 검증하기 위해 열해석/탄성 해석/탄소성 해석/열탄소성 해석등 다양한 경우에 대해 검증을 수행하였다. 검증 방법은 동일한 해석 조건을 상용 FE Tool 인 ANSYS 13.0 과 개발 모듈인 FE 모듈에 적용하여 해석 결과를 비교하였다. 그림 2 는 열탄소성 해석에서 각 절점에서의 변위값을 비교한 결과이다.

비교 결과값은 수치 오차 범위 내에 존재하며 이러한 결과를 통해 개발된 FE 모듈은 그 타당성을 검증할 수 있었다.

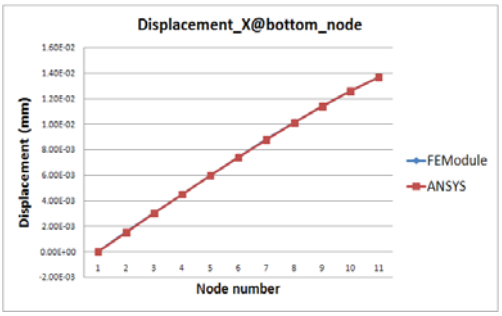

Fig. 2 Comparison of displacements at each node

4. 결론

본 연구에서는 경수로 핵연료 거동을 해석하기 위한 성능 코드 모듈용 비선형 유한요소 해석 모듈 개발을 완료하였다. 모듈 검증을 위해 ANSYS 를 활용하여 결과를 비교하였으며, 검증 결과 매우 잘 일치하여 개발된 모듈의 타당성을 입증하였다.

후기

본 연구는 교육과학기술부에 원자력 연구개발 사업의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

1. Kojic, M., Bathe, K.J., “The ‘Effective-Stress-Function’ Algorithm For Thermo-Elasto-Plasticity and Creep,” International Journal For Numerical Methods In Engineering, **24**, 1509-1532, 1987.
2. ANSYS R&D Inc., ANSYS manuals, 2010.
3. Kim, H.C., Yang, Y.S., Kim, J.Y., Kwon, Y.D. and Koo, Y.H., “Development of 2D Finite Element Module to Evaluate Cladding Mechanical Behavior during Off-normal Condition,” Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, 255-256, 2011.