

## Zr-U 금속 핵연료봉 온도 평가 프로그램 개발

### Development of Program for Evaluating the Temperature of Zr-U Metallic Fuel Rod

천진식, 이병호, 구양현, 오제용, 임정식, 손동성

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

Zr-U 금속 핵연료봉 온도 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 코드는 유한요소 방법을 이용하여, 연료봉 모델의 일부는 ABAQUS 상용 코드용으로 앞서 개발된 사용자 서브프로그램을 공유한다. 비선형 과도 해석에 해당하는 Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램에서는 시간 단계를 증가시키면서 매 단계마다 반복 계산이 이루어지며, 유한요소 방정식의 해는 희소 행렬 방법을 이용하여 구한다. 프로그램의 검증 계산은 ABAQUS 코드를 사용하여 대칭성을 고려한 1/8 연료봉과 전체 연료봉 모델을 대상으로 정상상태 및 과도 해석 조건에 대하여 수행하였다. 1/8 연료봉 모델에 대한 정상 상태 해석의 검증 결과, 가상 선출력이 1000 W/cm 일 때 ABAQUS 코드 계산 결과와 최대 0.18%의 차이가 존재하였다. 과도 해석의 검증에서는 시간에 따른 연료봉 온도의 변화가 ABAQUS 코드 계산과 동일하였다. 연료봉의 열속 계산 결과도 ABAQUS 코드와 비교하였는데 전체 분포뿐만 아니라 표면 열속도 거의 동일하였다.

#### Abstract

A code for evaluating the temperature of Zr-U metallic rod has been developed. Finite element (FE) method is adopted for the developed code sharing the user subroutines which has been prepared for the ABAQUS commercial FE code. The developed program for the Zr-U metallic fuel rod corresponds to a nonlinear transient heat transfer problem, and uses a sparse matrix solver for FE equations during iterations at every time step. The verifications of the developed program were conducted using the ABAQUS code. Steady state and transient problems were analyzed for 1/8 rod model due to the symmetry of the fuel rod and full model. From the evaluation of temperature for the 1/8 rod model at steady state, maximal error of 0.18 % was present relative to the ABAQUS result. Analysis for the transient problem using the full rod model resulted in the same as the variation of centerline temperature from the ABAQUS code during a hypothetical power transient. The distribution of heat flux for the entire cross section and surface was almost identical for the two codes.

## 1. 서론

Zr-U 금속 핵연료는 지르코늄(Zr)과 농축도가 20% 이하인 우라늄(U)이 혼합된 이상(binary)의 금속 합금이다. 이 핵연료는 현재 상업용 원자로에서 사용되고 있는 산화물 핵연료와는 달리 핵분열에 의해 열을 발생하는 연료 심재(meat)가 금속이며, 또한 연료 심재와 피복재가 재료적으로 접합된 상태이므로 심재와 피복재 사이에 간극이 존재하지 않는 특징을 가진다. 이러한 특징 때문에 Zr-U 금속 핵연료는 동일한 출력 밀도에서 산화물 연료에 비해 연료 온도가 상대적으로 낮다. 연료봉의 단면은 Zr-U 연료심재에 Zr-1%Nb 피복재로 구성되어 있으며, 원형이 아닌 정방형의 네 모서리에 지지 역할과 냉각 성능을 향상시키는 핀(fin)이 부착된 형상이다. 이와 같이 Zr-U 금속 핵연료봉의 단면 형상이 단순하지 않으므로 온도 계산에 유한요소 방법을 채택하였다.

Zr-U 금속 핵연료봉은 심재와 피복재가 접합되어 간극이 존재하지 않을 뿐만 아니라 연료봉의 온도가 낮아 핵분열 기체 방출을 고려하지 않으므로, 축방향의 어떤 위치에서 형성된 온도 분포가 인접한 혹은 다른 위치의 온도 분포에 미치는 영향이 없다고 가정한다. 그러므로 Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 평가에서는 연료봉의 특정 단면에 대해서만 온도 분포를 계산한다. 비선형 과도 해석에 해당하는 Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램에서는 시간 단계를 증가시키면서 매 단계마다 반복 계산이 이루어지며, 유한요소 방정식의 해는 희소 행렬(sparse matrix) 방법을 이용하여 구한다. 프로그램은 Fortran90 고유의 기능을 충분히 활용하므로 Fortran77을 이용하는 방법에 비하여 전체적인 구조와 메모리 관리 측면에서 유리하다.

개발된 Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램의 검증은 ABAQUS 코드를 이용한 계산 결과를 참조해로 사용하여 이루어졌다. 검증에서는 대칭성을 고려한 1/8 연료봉 모델과 전체 연료봉 모델을 대상으로 정상상태 해석 및 과도 해석 조건에 대하여 온도와 열속을 계산하고 비교 평가하였다.

## 2. 이론 및 유한요소 정식화

Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램은 연료봉 단면에 대한 열전달 해석을 위한 2차원 과도 열전달 방정식으로부터 출발한다. 연료봉을 구성하는 심재와 피복재의 물성은 등방성이라고 가정한다. 연료봉 단면 영역을  $\Omega$ , 연료봉 표면을  $\Gamma$ 로 나타낸다.

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $T(x, y, t)$ 는 온도,  $q_x$ 와  $q_y$ 는 열속,  $Q$ 는 시간의 함수로 정의되는 열 발생률,  $\rho$ 와  $c$ 는 밀도와 비열을 나타낸다. 또한  $q_x$ 와  $q_y$ 는  $q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ 와  $q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}$ 이다. 열전도도  $k$ 는 온도와

연소도의 함수이다. 초기 조건과 경계 조건은 다음 식과 같다.

$$\text{초기조건 : } T(x, y, 0) = T_0(x, y) \quad (2)$$

$$\text{경계조건 : } \Gamma \text{에서 } q_s = h(T_s - T_f) \quad (3)$$

여기서  $T_0$ 는 초기 온도,  $q_s$ 는 표면에서의 열속 크기이다. 또한  $T_s$ 는 연료봉 표면 온도,  $T_f$ 는 유체 온도,  $h$ 는 대류 열전달계수로 연료봉 표면온도와 유체 온도의 함수이다. 이와 같은 재료 물성과 열전달계수의 비선형성으로 Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램은 비선형 과도 열전달(nonlinear transient heat transfer) 문제에 해당한다.

## 2-1. 유한요소 정식화

Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램에 사용된 요소는 요소당 4개의 절점을 가진 일차 사변형 등계수 (Bilinear quadrilateral isoparametric) 요소로 국한하였다. 각각의 요소에 대하여 온도와 온도 구배는 형상함수  $N_i$ 를 이용하여 내삽한다. 식 (1)-(3)에 Galerkin 법을 적용하여 유한요소 방정식을 구하면 아래 식과 같이 정리할 수 있다[1].

$$[C] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + [[K_c] + [K_h]] \{T\} = \{R_Q\} + \{R_h\} \quad (4)$$

여기서 각 항은 다음과 같이 정의된다.

- 요소 열용량(capacitance) 행렬

$$[C] = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \{N\} [N] d\Omega \quad (5)$$

- 전도와 관련된 요소 컨덕턴스(conductance) 행렬

$$[K_c] = \int_{\Omega^{(e)}} [B]^T [k] [B] d\Omega \quad (6)$$

- 연료봉 표면에서의 대류와 관련된 요소 컨덕턴스(conductance) 행렬

$$[K_h] = \int_{\Gamma^{(e)}} h \{N\} [N] d\Gamma \quad (7)$$

- 발열에 의한 절점 벡터

$$\{R_Q\} = \int_{\Omega^{(e)}} Q \{N\} d\Omega \quad (8)$$

- 표면 대류로 인한 절점 벡터

$$\{R_n\} = \int_{\Gamma^{(e)}} h T_f \{N\} d\Gamma \quad (9)$$

## 2-2. 비선형 과도 열전달 해법

Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산을 위하여 도출한 유한 요소 방정식은 비선형 연립 상미분 방정식에 해당한다. 이 식의 과도 해는 때 시간 증분에서 비선형성을 고려하기 위하여 반복 계산을 통하여 구한다. Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램에서는 음해(implicit) 방법으로 시간 적분을 수행하고[1], 반복 계산은 Newton-Rapson (N-R) 방법을 이용한다[2].

## 2-3. 수렴 및 자동 시간 적분

N-R 알고리즘은 수렴 조건이 충족될 때까지 반복 계산한다. 수렴 조건은 N-R 방법에 의한 반복계산 중의 잔여 벡터 및 온도 증분에 근거한 기준을 사용하였다[3]. 음해 방법에서 통상적으로 사용되는 자동 시간 적분 알고리즘이 Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램에서도 적용되었다. 먼저 이전 시간의 온도와 현재의 온도 증분을 비교하는 인자  $R_T$  를 정의한다.

$$R_T = \frac{\|\mathbf{T}_n - \mathbf{T}_{n-1}\|}{\|\mathbf{T}_{n-1}\|} \quad (10)$$

$R_T$  의 크기에 따라 시간 증분이 다음과 같이 자동으로 조절된다.

$$\begin{aligned} \Delta t_{n+1} &= 0.5\Delta t_n \text{ for } R_T > 0.1 \\ \Delta t_{n+1} &= \Delta t_n \text{ for } 0.1\gamma < R_T \leq 0.1 \\ \Delta t_{n+1} &= 2\Delta t_n \text{ for } R_T \leq 0.1\gamma \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $\gamma$ 는 시간 증분 조절 인자로 0.5 를 사용하였다. 또한 시간 증분의 초기값, 최소값, 최대값을 설정할 수 있다. 만약 N-R 알고리즘이 10 번 동안 수렴하지 않으면 시간 증분을 이전 값의 25%로 재설정하여 다시 계산한다.

## 3. 조립 절차 및 선형 연립 방정식 해법

온도를 계산하기 위해서는 요소의 강성 행렬을 모든 요소에 대하여 조립하는 절차가 필요하다. 강성 행렬의 원소는 대각선 원소 주위를 제외하고는 대부분 영이므로, Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램도 희소 행렬 방법을 사용하였다. 여기서는 일반적으로 널리 사용되는 압축행 저장 방식 (Compressed Row Storage, CRS)을 사용하였다[4]. 전체 강성행렬이 비대칭 행렬이지만 비대칭 행렬도 완전한 행렬을 대칭적으로 구조화된 (symmetrically structured) 행렬로 나타낼 수 있으므로 CRS 방식을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 절점 연결성 (node connectivity)

을 이용하여 강성 행렬이 어떤 형태를 가질 것인지를 분석하여 요소 강성 행렬을 희소 강성 행렬 방식으로 조립하는 방법을 고안하였다.

Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램은 직접 해법 중에서 삼각행렬분해법을 이용한다 [5]. 희소행렬의 삼각행렬분해법은 정확하고, 신뢰성이 높으며, 강건(robust)하여 특히 비대칭 행렬 계산에 유용하다. 또한 이차원 문제까지는 속도와 메모리 측면에서 반복법에 비하여 경쟁할 만 하다[6].

Zr-U 금속 핵연료봉 온도 계산 프로그램의 PC 버전은 Compaq 사의 Digital Fortran 6.6 을 컴파일러로 사용한다. Digital Fortran 은 CXML(Compaq Extended Math Library)을 제공하며, 이중에 연립방정식의 삼각행렬분해법에 해당하는 DSS (Direct Sparse Solver)가 있다[5]. DSS 를 이용하여 연립방정식의 해를 구하는 절차는 크게 행렬이 대칭행렬인지 또는 대칭적으로 구조화된 행렬인지를 정의하는 부분, 순열행렬을 구하는 부분, 삼각행렬로 분해하는 부분, 해를 구하는 부분, 행렬 구조를 메모리에서 지우는 부분으로 나누어져 있다. 이중에서 유한요소 프로그램을 작성할 때 행렬 구조를 정의하는 부분, 순열행렬을 구하는 부분은 강성행렬의 구조가 바뀌지 않는 한 프로그램의 맨 처음에 한번만 정의하면 된다. 또한 프로그램이 끝날 때 행렬 구조를 지우는 부분을 한번만 실행하면 된다. 유한요소 프로그램에서는 매 반복 계산시마다 강성행렬의 값이 바뀌므로 삼각행렬 분해와 해 찾는 단계가 필요하다.

#### 4. 연료봉 모델

금속 연료는 열전도도가 높아 산화물 연료에 비하여 열적 여유도와 용융 출력이 높으므로 핵 연료의 고출력 운전 능력을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. Zr-U 금속 연료는 러시아의 주도 하에 실용화되어 연구로 등에서 사용되어 왔다. 그림 1에 연료봉의 형상과 단면이 제시되어 있다. 연료봉은 Zr-U 심재를 Zr-1%Nb 캔에 넣어 동심 압출하여 제조한다. 압출후 연료봉은 파배기 형태로 꼬인 형상이다.

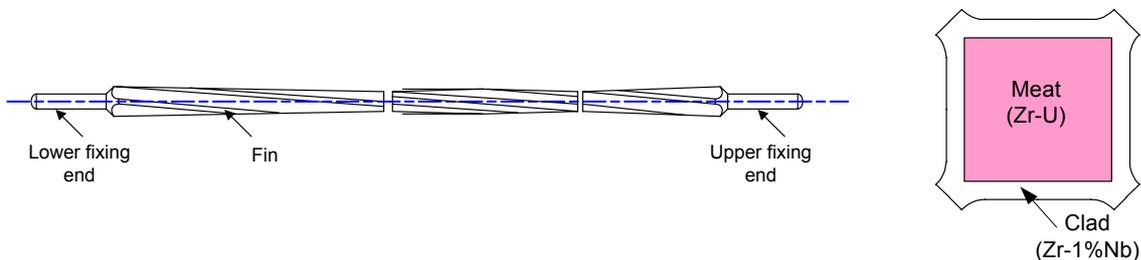


그림 1. Schematic diagram and cross section of Zr-U fuel rod.

#### 4-1. 연료심 및 피복재 열적 물성

Zr-U 연료를 연구로 등에서 사용하여 온 러시아의 연구 자료 중 공개된 자료가 매우 드물다. 1950년대 미국에서 수행한 연구 결과[7]에 Zr-U 연료심의 미세구조, 기계적 강도, 물리적 성질 등이 일부 정리되어 있다. 열전도도의 경우, 조사되지 않은 Zr-U 합금에 대한 값이 온도의 함수로 보고되었다[8]. 조사가 진행됨에 따라 Zr-U 심재에 생성되는 핵분열생성물로 인하여 열전도도가 감소한다. 본 해석에는 연소도에 따른 열전도도의 감소를 고려하므로, 열전도도는 온도와 연소도의 함수이다. 또한 심재의 비열과 밀도는 참고문헌[7]을 참조하였다. Zr-1%Nb의 열적 기계적 성질은 참고문헌[9-10]에 자세히 기술되어 있다. 또한 피복재의 비열과 밀도는 참고문헌[9]을 참조하였다. 재료 물성의 온도 또는 연소도 의존성은 구분적 선형(piecewise linear) 관계에 의하여 나타내었다.

#### 4-2. 대류 열전달 모델

계산에 사용된 대류 열전달 모델에서 열전달 계수는 연료봉 온도와 표면 열속에 대하여 비선형적 함수 관계에 있다. 열전달 모델은 과냉(Subcooled) 상태 열전달과 비등 열전달을 고려한다. 과냉 상태 열전달이 발생할 때, 열전달 계수는 Dittus-Boelter 식과 매우 유사한 식으로 계산된다. Bulk 비등 영역에서 열전달 계수는 Jens-Lottes 식과 유사한 식으로 주어진다. 또한 국부 비등 영역에서의 열전달 관계식은 이 두 식의 조합으로 정의된다. 현재의 대류 열전달 모델은 막비등 영역의 열전달은 고려하지 않는다.

#### 4-3. 유한요소 및 초기 시간 증분

Zr-U 금속 핵연료봉의 온도 계산 프로그램에서 사용한 유한 요소 격자가 그림 2에 제시되어 있다. 연료봉 형상의 대칭성때문에 1/8 만을 모델링하였지만, 심재 단면의 이차원적 출력 분포를 모델링하려면 전체 연료봉 모델이 필요하다.

열전달 문제와 같이 과도 확산 문제에 대한 이산 근사 해석의 중요한 사안 중의 하나가 시간 증분의 초기값을 어떻게 선정하는 가이다. 적절한 초기값의 선정은 일차원 열전도 문제의 해를 Biot 수와 Fourier 수로 표현된 결과를 이용하여 대략 정할 수 있다[11-12]. 그림 2의 유한 요소 격자로부터 허용 가능한 초기 시간 증분의 최소값을 구하면  $1.7 \times 10^{-3}$  sec 이다.

### 5. 프로그램의 검증

개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 몇 가지 조건에 대하여 온도와 열속을 계산하였다. 계산 결과와 비교하기 위하여 ABAQUS 코드를 이용하여 구한 값을 참조해로 사용하였다. 먼저 1/8 연료봉 모델의 경우는 정상 상태의 다양한 조건에서 ABAQUS 코드 참조 계산 결

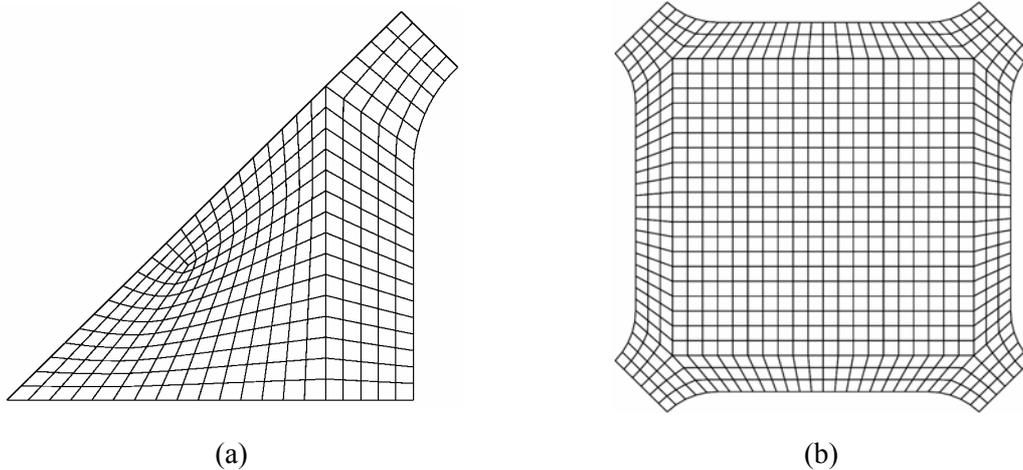


그림 2. Finite element mesh for Zr-U fuel rod.

(a) 1/8 model, (b) full model

과와 비교한다. 전체 연료봉 모델의 계산 결과는 과도 상태 조건에서 1/8 연료봉 모델의 결과와 비교한다.

### 5-1. 1/8 연료봉 모델 온도 계산

#### (1) 연료봉 선출력만을 변화시키는 경우 ; case 1

100 W/cm ~ 1000 W/cm 의 범위에서 선정한 6 개 선출력 조건에 대하여 온도를 계산하였다. 계산에 사용된 연소도와 냉각수 조건은 다음과 같다.

- 연소도 : 0 g/cc
- 냉각수 온도 : 300 °C
- 냉각수 압력 : 13 MPa
- 과냉 열전달계수 : 20 W/m<sup>2</sup>-K

ABAQUS 코드와 비교하였을 때 계산 결과의 차이가 미미하였다. 두 값의 차이가 가장 뚜렷한 연료봉 중심에서 선출력이 1000 W/cm 일 때 0.18 %의 최대 차이를 나타내었다.

#### (2) 연료봉 선출력은 일정하데 연소도가 증가하는 경우 ; case 2

Case 1 과 냉각수 조건과 열전달계수는 동일하지만 선출력이 200 W/cm 로 일정하며, 심재의 연소도를 0 g/cc 에서 0.75 g/cc 까지 변화시킬 때 온도를 계산하였다. ABAQUS 코드와 비교하였을 때 전체적으로 두 값의 차이가 매우 적었다. 연료봉 중심에서 연소도가 0.3 g/cc 일 때 0.14 %의 최대 차이를 나타내었다.

## 5-2. 전체 연료봉 모델 온도 계산

### (1) 1/8 연료봉과 전체 연료봉 결과 비교 ; case 3

정상 상태 온도 계산을 수행한 Case 1 과 동일한 연소도 및 유체 조건에서 그림 3과 같이 선출력이 변화하는 과도 상태에 대하여 온도를 계산하였다. 그림과 같이 10 초 동안 선출력이 영출력에서 1000 W/cm 까지 증가한 후 계속 유지되는 경우이다. 중심 온도를 비교하였을 때, 1/8 연료봉 모델과 전체 연료봉 모델의 결과가 동일함을 그림 3에서 볼 수 있다.

## 5-3. 열속 계산

Zr-U 금속 핵연료봉 온도 계산 프로그램의 열속 계산 절차를 검증하기 위하여 ABAQUS 코드 계산 결과와 비교하였다. 유한 요소 방정식의 적분을 Gauss 방법을 이용하므로 열속은 요소의 Gauss 점에서만 계산된다. 이 Gauss 점의 열속을 절점으로 외삽한다[13]. case 3 의 경우에서 출력이 정상 상태에 도달하였을 때 열속 크기 분포를 그림 4에 나타내었다. 열속 분포의 표시는 MayaVi[14]를 사용하였다.

그림 5에 연료봉 표면 열속을 직접적으로 비교한 그림과 이를 비교한 표면 영역을 나타내었다. 이 영역은 연료봉 중심을 원점으로 할 때  $(0,0)$  부터  $(3.5/\sqrt{2}, 3.5/\sqrt{2})$  까지 해당한다. 그림으로부터 FE 프로그램으로 구한 1/8 모델과 전체 모델의 표면 열속과, ABAQUS 코드로 얻은 전체 모델의 표면 열속은 거의 같음을 볼 수 있다.

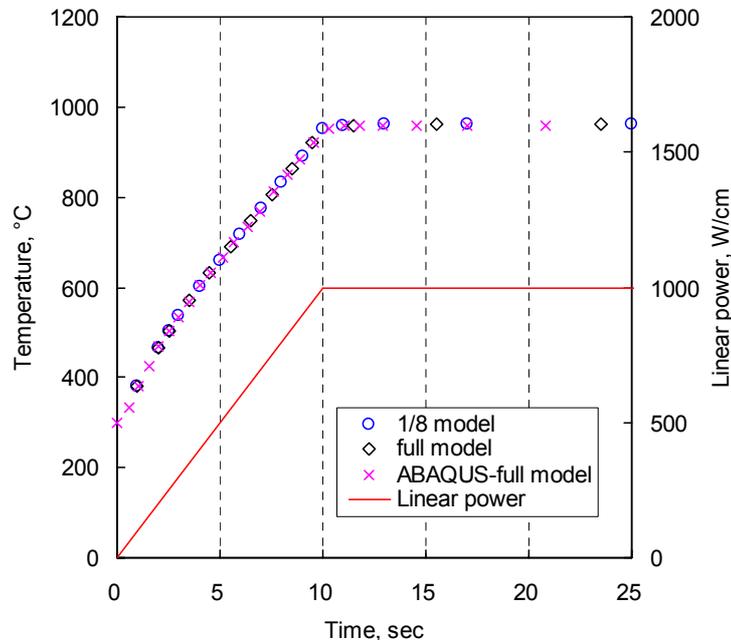


그림 3. Variation of centerline temperature during a hypothetical power transient.

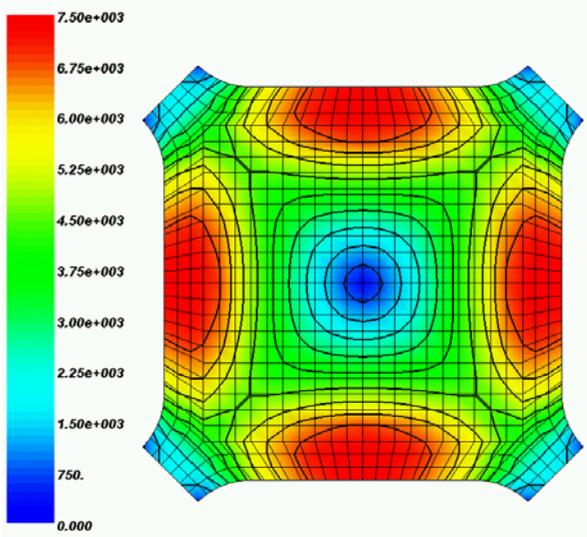


그림 4. Contour of the magnitude of heat flux obtained by FE program.

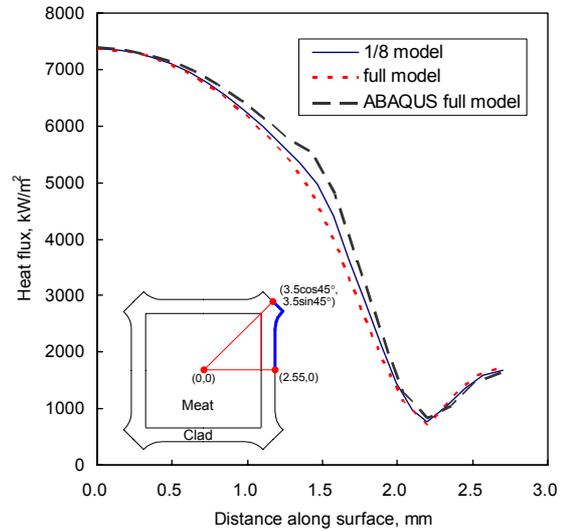


그림 5. Comparison of the magnitude of surface heat flux between ABAQUS and FE program.

## 6. 결론

Zr-U 금속 핵연료봉의 온도와 열속을 평가하는 프로그램을 개발하였다. 온도 평가 프로그램은 유한요소 방법을 이용하여 비선형 과도 열전달 문제의 해를 얻는다. 개발된 프로그램은 기존의 성능 해석에 활용되어 왔던 ABAQUS 코드의 기능을 충실히 제공하며 사용자 부프로그램을 그대로 이용할 수 있다. 프로그램의 검증 계산은 ABAQUS 코드를 사용하여 1/8 연료봉과 전체 연료봉 모델을 대상으로 정상상태 및 과도 해석 조건에 대하여 수행하였다.

- 정상 상태의 검증은 1/8 연료봉 모델을 대상으로 연료봉 선출력만을 변화시키는 경우와 선출력은 일정한데 연소도를 증가시키는 경우에 대하여 이루어졌다. 가상 선출력이 1000 W/cm 일 때 ABAQUS 코드 계산 결과와 각각 최대 0.18%와 0.14%의 차이가 존재하였다.
- 과도 해석의 검증은 1/8 및 전체 연료봉 모델을 대상으로 이루어졌다. 시간에 따른 연료봉 온도의 변화는 ABAQUS 코드 계산과 동일하였다.
- Zr-U 금속 핵연료봉 온도 평가 프로그램으로 연료봉의 열속 계산 결과를 ABAQUS 코드와 비교하였을 때 전체 분포뿐만 아니라 표면 열속도 거의 동일함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. K.H. Huebner, D.L. Dewhurst, D.E. Smith, T.G. Byrom , The Finite Element Method for Engineers, 4th Edition, Wiley, August 2001.
2. J.F. Lyness, D.R. J. Owen, O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Analysis of Engineering Systems Governed by a Non-Linear Quasi-Harmonic Equation, Computers and Structures, Vol. 5, pp.65-79. 1975.
3. T. Belytschko, W.K. Liu, and B. Moran, Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Wiley, 2000.
4. R. Barrett and M. Berry and T. F. Chan and J. Demmel and J. Donato and J. Dongarra and V. Eijkhout and R. Pozo and C. Romine and H. Van der Vorst, Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods, 2nd Edition, SIAM, Philadelphia , 1994.
5. Compaq Extended Math Library, Reference Guide, January 2001.
6. M.T. Heath, Scientific Computing: An Introductory Survey, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 2002.
7. A.A. Bauer, An Evaluation of the Properties and Behavior of Zirconium-Uranium Alloys, BMI-1350, 1959.
8. Y. Takahashi et. al, Thermodynamical Properties of Uranium-Zirconium Alloys, Journal of Nuclear Materials, Vol. 154, p. 141-144, 1988.
9. E.Yu. Rivkin, B.S Rodchenkov., V.M. Filatov, Strength of Zirconium Alloys, Energoatomizdat, Moscow, 1974.
10. A.S. Zaimovskyi, A.B. Nikulina, N.G. Reshetnikov, Zirconium Alloys in Atomic Energetics, Moscow, Energoanomizdat, 1994.
11. F. Damjanic and D.R.J. Owen, Practical Consideration for Thermal Transient Finite Element Analysis Using Isoparametric Elements, Nuclear Engineering and Design, Vol. 69, pp. 109-126, 1982.
12. ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.3, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., 2002.
13. R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 3rd Ed., Wiley, 1989.
14. P. Ramachandran. MayaVi: A Free Tool for CFD Ddata Visualization, 4th Annual CFD Symposium, Aeronautical Society of India, August, 2001.