

## 경수로 핵연료 열-구조 연계 해석을 위한 다차원 간극 열전도도 모델 개발

김효찬\*† · 양용식\* · 구양현\*

\* 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부

### Development of Multidimensional Gap Conductance Model for Thermo-Mechanical Simulation of Light Water Reactor Fuel

Hyo Chan Kim\*†, Yong Sik Yang\* and Yang Hyun Koo\*

\* LWR fuel technology division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received September 9, 2013 ; Revised December 5, 2013 ; Accepted December 5, 2013)

**Key Words:** Light Water Reactor Fuel(경수로 핵연료), Gap Conductance(간극 열전도도), Thermo-Mechanical Simulation(열-구조 연계해석), Finite Element Method(유한요소법)

**초록:** 경수로 핵연료가 원자로내에서 연소되는 동안 핵연료 펠릿에서부터 피복관까지 온도해석은 핵연료 안전 해석에 있어 중요한 요소이며, 경수로 핵연료 온도 해석을 하기 위해서는 간극 모델 개발이 필수적이다. 간극 열전도도는 특성상 간극 두께값에 의존적이게 되며 이러한 특성으로 인해 다차원 간극 열전도도 모델이 비선형적 거동을 보인다. 본 연구에서는 선형화된 다차원 간극 열전도도 모델 개발을 위해 가상 연결 간극 요소를 제안하였다. 제안된 간극 연결 요소에 간극 열전도도를 적용하기 위해 등가 열전달 계수를 정의하였다. 제안된 모듈을 평가하기 위해 상용코드 ANSYS APDL 을 이용하여 열-구조 연계 해석 모듈을 구현하였으며, 다양한 예제를 통해 정확성과 수렴성을 평가하였다.

**Abstract:** A light water reactor (LWR) fuel rod consists of zirconium alloy cladding tube and uranium dioxide pellets with a slight gap between them. The modeling of heat transfer across the gap between fuel pellets and the protective cladding is essential to understanding fuel behavior under irradiated conditions. Many researchers have been developing fuel performance codes based on finite element method (FE) to calculate temperature, stress and strain for multidimensional analysis. The gap conductance model for multi-dimension is difficult issue in terms of convergence and nonlinearity because gap conductance is function of gap thickness which depends on mechanical analysis at each iteration step. In this paper, virtual link gap element (VLG) has been proposed to resolve convergence issue and nonlinear characteristic of multidimensional gap conductance. In terms of calculation accuracy and convergence efficiency, the proposed VLG model has been evaluated for variable cases.

- 기호설명 -

h : 간극 열전도도  
 $h_s$  : 접촉 간극 열전도도  
 $h_r$  : 복사 간극 열전도도  
 $h_g$  : 가스 간극 열전도도  
 $\epsilon_c$  : 피복관 방사율  
 $\epsilon_f$  : 핵연료 방사율

$\lambda$  : 스테판-볼츠만 상수  
 $P_i$  : 접촉 압력  
H : Meyer 정도  
 $k_f$  : 핵연료 열전달 계수  
 $k_c$  : 피복관 열전달 계수  
 $\delta_f$  : 핵연료 표면 미세돌기 높이  
 $\delta_c$  : 피복관 표면 미세돌기 높이  
 $k_{gas}$  : 간극내 가스 열전도도  
d : 간극 두께  
 $d_{min}$  : 간극을 이루는 면의 표면 조도

† Corresponding Author, [hyochankim@kaeri.re.kr](mailto:hyochankim@kaeri.re.kr)

- $g_f$  : 핵연료 표면에서의 온도점프거리
- $g_c$  : 피복관 표면에서의 온도점프거리
- $k_{eqv}$  : VLG 요소 등가 열전달 계수
- $d_n$  : VLG 절점간의 반경 방향 거리
- $d_l$  : VLG 요소의 길이
- $\epsilon_{tolerance}$  : 온도 변화 비율 수렴 조건값
- $T_i^t$  :  $i$  절점에서  $t$  번째 계산시 온도값
- $T_i^{t-1}$  :  $i$  절점에서  $t-1$  번째 계산시 온도값

### 1. 서론

#### 1.1 경수로 핵연료

온실가스를 거의 방출하지 않으며, 단위 부피당 생산하는 에너지 밀도가 매우 높아 차세대 에너지원으로 각광을 받고 있는 원자력 에너지는 핵분열성 물질이 가벼운 2 개의 핵종으로 분열되면서 발생하는 질량 결손만큼 에너지로 변환되는 원리로 에너지를 발생한다. 하지만, 최근 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력 발전소에 대한 안전에 대한 재검토가 필요하다는 의견이 계속적으로 제시되고 있어, 규제 및 연구계에서는 기존의 원자력 발전소의 안전성을 향상시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.<sup>(1)</sup>

국내 전력 생산의 30% 이상을 담당하는 국내 원자력 발전소는 80% 이상이 경수로 원자로(Light Water Reactor) 형태로 건설되었다. 경수로 원자로는 내부에 핵분열이 발생하여 열에너지를 생산하는 핵연료(Fuel)가 장착되어 있으며, 그 구조는 Fig. 1 에서 보는 것과 구성되어 있다. 봉형태의 지르칼로이 합금 피복관(Cladding) 내부에 산화 우라늄 형태의 핵연료(Pellet)가 장전되어 있으며 내부는 불활성 물질이며 열전도도가 우수한 헬륨으로 22.5 bar 로 가압하게 된다.<sup>(2)</sup>

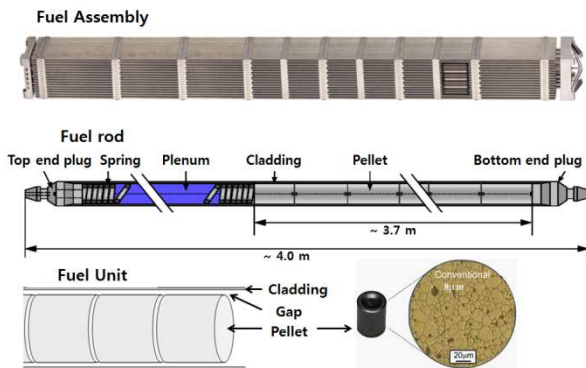


Fig. 1 Light Water Reactor Fuel assembly and components

핵연료봉은 핵분열을 수행하는 핵연료에서 방출되는 고방사성 물질을 외부와 차단시켜주어야 하며 핵분열에서 생산되는 열을 효율적으로 제거해 줘야 하는 기능을 수행해야 한다. 특히, 안전성 측면에서 원자력 발전의 다단계 방호체계중 2 차 방호벽인 피복관의 기계적 건전성은 매우 중요한 역할을 수행하게 된다. 따라서, 원자로 운전중 핵연료봉 기계적 건전성을 평가하기 위해서는 이를 해석적으로 평가하기 위한 해석 코드의 개발이 필요하게 되며, 이를 핵연료 성능 코드라 한다.

#### 1.2 핵연료 거동 해석

핵연료 거동 해석을 수행하기 위해서는 연소중 핵연료의 다양한 거동에 대한 현상이해와 수학적 모델링등 복잡한 다물리 해석 코드가 개발되어야 한다. 일반적으로 핵연료 봉의 피복관은 정상 상태 조건인 350℃ 온도와 150 bar 의 수압 조건에서 평균 3 년동안 기계적 건전성을 유지해야 한다. 이러한 피복관의 기계적 건전성에 대한 해석을 수행하기 위해서는 핵연료 및 피복관의 열해석 및 기계 구조적 연계 해석이 필수적이다. Fig. 2 에서는 원자로 정상 운전 상태에서의 핵연료 내부에서부터 피복관 외벽까지의 온도분포를 나타내고 있다. 반경 5 mm 에서 천이 운전이나 출력이 높은 봉에서는 핵연료 중심부와 피복관 외부 온도차이가 1000℃ 넘게 발생하게 된다. 이러한 급격한 온도 구배는 핵연료의 열응력이 발생하는 원인이 되며, 약간의 열해석 오차에 따라 열응력 계산 결과값에 큰 영향을 미치게 된다.

특히, 제작 초기부터 존재하는 핵연료와 피복관의 사이에 있는 간극에서는 급격한 온도 구배가 발생하여 열해석 결과를 결정하는 중요한 요소가 된다. 이러한 간극은 제작 초기에 약 85 μm 정도 존재하며 역할은 제작시 핵연료의 장입이 유리하

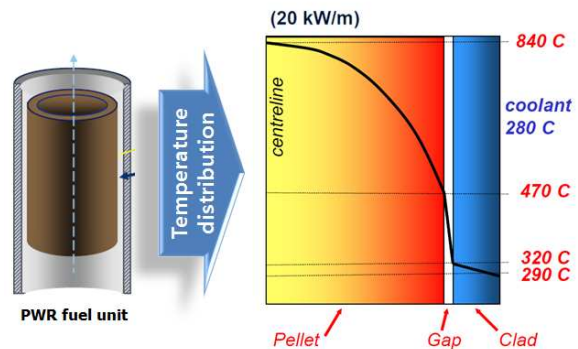


Fig. 2 Temperature distribution of fuel unit during normal operation

게 해주고 연소중에는 핵분열 방출 가스 공간 확보 및 핵연료의 팽윤시 공간을 확보하여 주는 역할을 수행한다.

간극에서의 열전도도는 간극의 두께, 간극의 온도, 간극에 존재하는 가스 성분, 간극 표면 조도 등 다양한 특성에 의해 결정된다.<sup>(3)</sup> 특히, 간극의 두께에 따라 민감하게 간극 열전도도가 변화하기 때문에 일반적으로 핵연료 성능 코드에서는 이를 해석하기 위해 열해석과 열변형을 고려하는 구조 해석을 반복적으로 계산하여 수렴되는 값을 찾는 형태로 구성한다.

이러한 간극 열전도도를 고려하는 핵연료 해석 코드는 원자력 선진국에서는 대부분 보유하고 있다. 가장 많이 알려지고 검증된 미국 NRC(Nuclear Regulatory Committee)에서는 개발한 FRAPCON-FRAPTRAN 코드 체계에서는 열해석을 1 차원 기반 FDM으로 해석하고 응력 해석시에만 2 차원의 FEM을 적용하여 열-응력 연계해석을 수행하였다.<sup>(4)</sup> 이러한 방식은 열해석에서는 1 차원으로 해석하기 때문에 다차원 간극 열전도 모델이 필요하지 않는다. 일본의 JAERI에서 보유하고 있는 FEXAXI-5 핵연료 성능 코드에서도 열해석은 1 차원 해석으로 수행하고, 그 온도 해석 결과를 바탕으로 2 차원 유한요소 응력해석을 수행한다.<sup>(5)</sup>

반면, 다차원 간극 열전도도 모델을 적용하여 개발되는 핵연료 코드는 다음과 같다. 프랑스 CEA에서 개발중인 ALCYONE 코드에서는 간극에서 마주보는 두 면에 등가 열전달 대류 계수(Equivalent heat convection coefficient)를 적용하는 간극 모델을 개발하였다.<sup>(6)</sup> INL(Idaho National Laboratory)에서 개발중인 BISON 코드체계에서는 비선형 열접촉 개념을 간극 모델에 적용하여 열-구조 완전 연계 간극 모델을 개발하였다.<sup>(7)</sup>

그러나, 앞서 개발된 다차원 간극 모델은 기존의 1 차원 모델에 비해 복잡성과 계산시간이 크게 증가하는 단점이 있다. 특히, 열변형에 따른 경계 조건의 변화로 열접촉 형태의 비선형문제로 접근할 경우 현상을 보다 정확하게 모사할 수 있으나, 3 차원 모델에서와 같이 절점의 개수 및 자유도가 크게 증가할 경우 계산 비용이 크게 증가하게 된다.

본 논문에서는 이러한 다차원 간극 모델의 효율적인 계산을 위해 경수로 핵연료 적합한 가정을 기반으로 빠르고 정확하게 간극 열전도도를 계산할 수 있는 가상 연결 간극 요소(Virtual Link Gap element; VLG)를 이용한 다차원 간극 모델을 제안

하고자 한다. VLG를 이용한 다차원 간극 모델은 선형적인 계산 방법 기반으로 하여 한번의 강성행렬 계산으로 온도 계산을 완료할 수 있는 장점이 있다. 또한, 반복 계산시 열변형에 의해 변형된 형상에서 가상 연결 간극 요소의 재구성을 통해 현상을 모사하였다. 본 논문에서는 제안된 다차원 간극 열전도도 모델의 구현하기 위해 상용 유한요소 툴인 ANSYS의 APDL(ANSYS Parametric Design Language)를 활용하였다. 간극 열전도도를 고려하는 열-구조 해석을 수행하기 위한 연계해석 루틴을 구성하였으며, 열변형후 온도 해석시 각 간극 요소의 두께에 따른 간극 열전도도를 계산하였다. 계산된 간극 열전도도 값은 가상 연결 간극 요소에 적용하기 위해 등가 열전달 계수를 정의하였다.

제안된 VLG 요소 모델을 평가하기 위해 열변형 전 열접촉 요소와의 온도 해석 결과와 비교하여 모델의 해석 정확성에 대한 타당성 평가를 수행하였다. 또한, VLG 요소 모델을 탑재한 열-구조 연계 해석을 반복적으로 수행하여 수렴된 온도와 변위값을 찾아냄으로써 제안된 모델의 수렴성에 대한 검증을 수행하였다. 또한, 제안된 모델의 수렴 조건에 대한 기준을 제안하였다.

## 2. 간극 열전도도 모델

### 2.1 Ross and Stoute 모델

일반적으로 간극 열전도도 모델은 Ross and Stoute 모델이 적합함이 알려져 있으며, 기존의 핵연료 성능 코드에서도 이러한 간극 모델을 1 차원으로 적용해왔다.

Ross and Stoute 간극 열전도도 모델은 식 (1)과 같이 간극에서의 열전달 형태를 3 가지로 분류하고 있으며, 이들의 총합을 간극에서 전달되는 열전도도로 정의하고 있다.  $h_s$  는 두면이 접촉시 물리적으로 전달되는 열전도도,  $h_r$  은 마주보는 두면의 복사에 의한 열전도도,  $h_g$  는 간극내부의 가스에 의한 열전도도이다.<sup>(8)</sup>

$$h = h_g + h_s + h_r \quad (1)$$

복사에 의한 열전도도  $h_r$  는 (2)와 같이 표현할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$h_r = \frac{4\lambda T^3}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_f} - 1} \quad (2)$$

복사에 의한 열전도도는 마주 보는 두면의 방사율에 대한 함수이며, 두 면의 방사율은 일반적으로

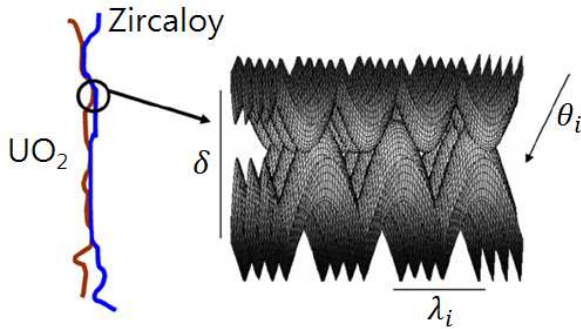


Fig. 3 Idealized scheme of two contact surfaces with different roughness

로 표면 온도에 관계됨이 알려져 있다. 또한, 식 (2)는 표면온도가 373-1000K 일 때 유효한 식이다.  $h_s$  은 양쪽의 두 면이 접촉하여 간극이 서로 닫혔을 때 적용하는 열전도도 값이며 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$h_s = 1.45 \left( \frac{P_i}{H} \right)^n \left( \frac{2k_f k_c}{k_f + k_c} \right) \frac{\sqrt{(\tan \theta_f)^2 + (\tan \theta_c)^2}}{\sqrt{\delta_f^2 + \delta_c^2}} \quad (3)$$

Fig. 3 에서 표현되는 것과 핵연료 및 피복관 면이 접촉하였을 시 표면 조도에 따라 두면은 물리적 접촉이 발생하는 부분과 그렇지 않은 공간으로 분류할 수 있다. 주요한 열전달은 물리적 접촉이 발생하여 기계적 변형이 발생하는 부분에서 이루어지며, 이러한 특징에 따라 접촉 압력, 표면 경도, 접촉면의 형상 등의 함수로 표현될 수 있다. 식 (3)에서는 두 면에서의 표면 조도( $\delta$ )와 표면에서의 크레이터들의 간격( $\lambda$ )을 이용하여 표면 돌기의 기울기값을 구한 후 접촉 열전도도 계산에 적용할 수 있다. 여기서,  $n$  값은 탄성 변형 또는 소성 변형에 따라 0.5 나 1.0 으로 두고 계산할 수 있다.

$h_g$  는 가스 간극 열전도도 값이며 간극내에 존재하는 가스의 분자 운동을 통해 전달되는 형태의 열전도도 값이다. 가스 간극 열전도도는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.  $d$  는 간극의 두께를 의미하며,  $d_{min}$  는 간극을 구성하는 두 면의 표면 조도값을 더한 값이고,  $g_f, g_c$  는 간극 두면에서의 온도 점프 거리를 의미한다. 온도 점프 거리는 간극 내부를 구성하고 있는 가스 성분 및 온도등에 의해 결정된다. 일반적으로 간극 사이의 온도분포는 Fig. 4 와 같이 표현할 수 있는데, 간극의 표면에서는 분자들의 운동에 의하여 비선형적인 온도 분포가 존재하나 간극 내부에서는 일반적인 전도 형태로 온도분포가 존재한다. 따라서, 식 (4)에서는 이

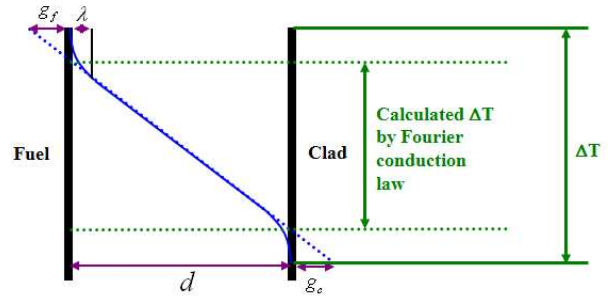


Fig. 4 Temperature gradient between fuel and cladding

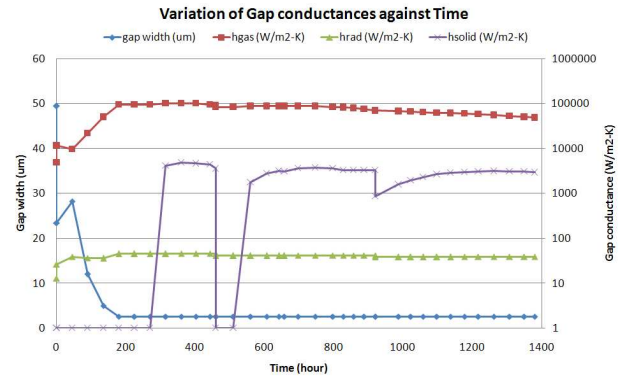


Fig. 5 Comparisons of  $h_{solid}$ ,  $h_{rad}$  and  $h_{gas}$  for normal operation

러한 비선형적인 간극 표면의 온도를 보상하기 위해 온도 점프 거리 개념을 도입하여 가스 간극 열전도도 관계식에 도입하여 적용하였다. 또한,  $k_{gas}$  는 간극 내부에 존재하는 가스의 열전달 계수값을 의미한다. 가스 간극 열전도에 비례하게 되며, 핵연료 거동에서는 연소에 따라 핵분열 가스의 방출에 의해 간극 내부의 가스 조성이 바뀌게 되어 연소도에 따라  $k_{gas}$  값이 크게 바뀌게 된다.<sup>(8)</sup>

$$h_g = \frac{k_{gas}}{d + d_{min} + g_f + g_c} \quad (4)$$

이러한 3 가지 형태의 간극 열전도도에서 두면이 접촉 이전에는  $h_r$  에 의한 복사에 의한 열전도와  $h_g$  에 의한 가스에 의한 열전도에 의해 열전달이 이루어진다. 접촉 후에는 앞서 두 가지 열전달 형태에서 접촉 응력에 따른  $h_s$  가 추가된다.

Fig. 5 는 핵연료 해석 코드를 이용하여 실제 핵연료 연소 시간에 따라 간극 두께 변화와 이에 따른 앞서 언급한 세가지 형태의 간극 열전도도 변화 및 값의 차이를 보여 주고 있다. 전체적으로 가스 간극 열전도( $h_g$ ) 값이 복사 열전도( $h_r$ )에 비해서는  $10^4$  이상 크며, 접촉 열전도( $h_s$ )에 비해서도  $10^2$  정도 크게 되어 간극 열전도에서 주요한 열전도 방식임을 확인할 수 있다. 접촉 열전도의 거동

에서는 간극이 접촉하기 전에는 그 값이 존재하지 않으며, 접촉시에도 접촉 응력이 '0'이 되는 soft contact 시에는 그 값이 존재하지 않음을 알 수 있다. 가스 간극 열전도는 접촉전에는 간극 두께에 따른 함수 형태로 거동하며, 접촉후에는 간극 두께는 변화하지 않으나 간극 가스 조성이 바뀔에 따라 그 값이 변화함을 알 수 있다.

따라서, 다차원 간극 모델 구현시 주요한 간극 전달 형태인 가스 간극 열전도 모델에 대한 적용이 주요하게 되어야 함을 확인할 수 있다.

### 2.2 가상 연결 간극 요소를 이용한 다차원 간극 모델 개발

기존의 핵연료에서의 온도 해석은 1 차원적으로 수행되었으며, Ross and Stoute 모델은 이를 적용하기에 적합하였다. 하지만, Fig. 6 과 같이 핵연료를 다차원으로 열 해석을 수행하기 위해서는 다차원 간극 모델 개발이 필수적이다. 2.1 절에서 논의된 내용을 기반으로 간극에서의 열전달은 주요하게 가스 간극 열전달 형태임을 확인하였으며, 본 연구에서는 이에 대한 다차원 간극 모델을 개발하고자 한다.

그러나, 간극 모델은 식 (4)에서 보여주는 것과 같이 간극의 두께에 따른 함수이며, 이를 다차원 모델로 확장하고자 할 때는 식 (5)와 같이 간극의 두께가 간극 위치에 따른 함수로 구성되어 그 복잡성이 증가하게 된다. 또한, 간극 모델 자체의 특성으로 간극 두께는 열변형에 의한 구조해석으로부터 계산된 변위값으로 계산될 수 있기 때문에 열해석과 구조해석을 반복적으로 수행하여 수렴되는 값을 찾아야 하는 형태로 계산이 수행되어야 한다.

$$h_{g,\theta,z} = \frac{k_{gas}}{f(\theta,z) + d_{min} + g_f + g_c} \quad (5)$$

이러한 위치에 따라 다르게 되는 다차원 간극 열전도 모델을 개발하기 위해서는 일반적으로 확장된 열접촉 모델을 적용하여 구현하는 방법이

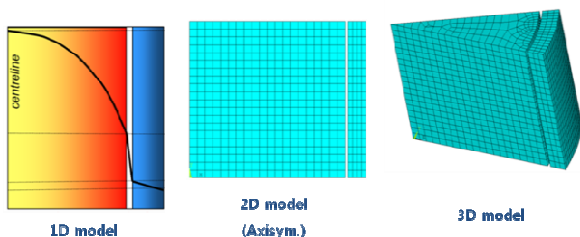


Fig. 6 Concept of Multidimensional gap conductance

있다.<sup>(7)</sup> 그러나, 이러한 방법은 실제 현상에 근접하게 묘사하는 방법이나, 비선형 방법으로 해석 시간이 오래 걸리게 되고, 핵연료 해석과 같이 다물리, 다차원 해석 형태에는 적합하지 않으며, 효율성도 크게 떨어진다.

따라서, 본 논문에서는 간극 모델 특성을 모두 반영하고 해석 효율성을 높이기 위해 선형 해석 방법을 적용하여 다차원 간극 모델을 개발하였다. 간극에서의 열전달을 수행하는 가상 연결 간극 요소를 자동으로 생성하고 이들 요소는 간극모델의 모든 특성을 구현하도록 하였다.

개념적으로 VLG 요소는 Fig. 7 과 같이 생성된다. 간극을 구성하는 핵연료 표면과 피복관 내부 절점을 연결하여 간극 열전달이 진행될 수 있도록 구성하여 주는 것이다. 이러한 VLG 요소 생성은 매번 반복 계산에서 열변형에 의해 그 형상이 바뀌게 되므로 바뀐 형상에서 매번 재생성 해주어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 바뀐 형상에서 VLG 요소를 재생성 하기 위해 자동으로 핵연료 표면에서 최단거리 탐색을 수행하며, 최단거리에 존재하는 피복관 내부의 절점을 연결하도록 한다. 그리고, 생성된 VLG 요소에서 간극 두께에 따른 가스 간극 열전도도 값을 적용하기 위해 식 (6), (7)과 같이 두께에 따른 연결 요소의 간극 등가 열전달 계수를 정의하였다.

$$q''_i = h_{g,i}(T_{pellet,i} - T_{cladding,i}) = \frac{k_{eqv,i}}{d_{l,i}}(T_{pellet,i} - T_{cladding,i}) \quad (6)$$

식 (6)과 같이 열-구조 연계해석의 i 번째 반복 해석 단계에서의 VLG 요소를 통해 전달되는 열속값은 원래의 간극 열전도도 형태인  $h_{g,i}$  로 표현할 수 있다. 이를 VLG 요소를 통한 열전달계수에

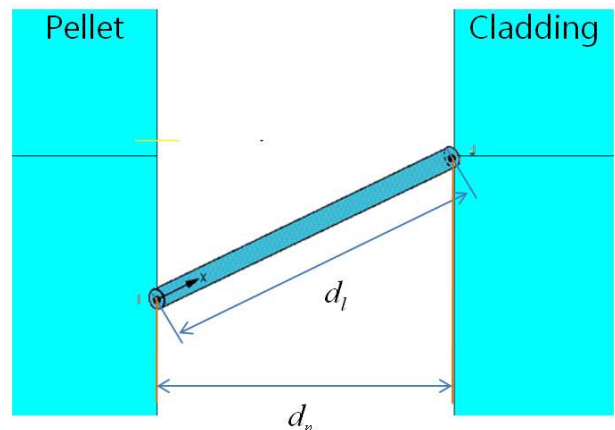


Fig. 7 Description of virtual gap element



적용하기 위해 등가 열전달 계수( $k_{eqv,i}$ )를 식 (7) 과 같이 정의한다. 이 때, 간극의 두께는 VLG 에 연결된 절점간의 반경 방향 거리( $d_{l,i}$ )이며 등가 열전달 계수로 전환하여 주기 위해 사용되는 값은 VLG 요소의 길이에 해당하는  $d_{l,i}$ 로 표현할 수 있다.<sup>(10,11)</sup>

$$k_{eqv,i} = \frac{k_{gas}}{d_{n,i} + d_{min} + g_f + g_c} d_{l,i} \quad (7)$$

본 논문에서 제시하고 있는 가상 연결 간극 요소를 이용한 다차원 간극 모델에서의 가정은 다음과 같다.

- (1) VLG 요소에 연결된 절점 이외의 간극내에 마주보는 인접요소간의 열전달은 이루어지지 않는다.
- (2) VLG 요소에서의 간극의 거리는 반경 벡터 방향으로의 거리로 결정한다.

일반적인 경우 간극내부에서의 열전달 현상에서는 최단 거리에 절점간에 가장 주요한 열전달이 발생하나, 최단 절점 이외의 절점에서도 상호간 열전달이 발생하게 된다. 그러나, 핵연료에서의 열전달의 경우에는 다차원 모델의 경우에서도 반경 방향의 열유속값이 축 방향 및 원주 방향의 열유속값에 비해 매우 크게 되어 반경방향으로 최단 거리요소와의 열유속이 다른 요소와의 열유속에 비해 매우 크므로 VLG 요소의 가정 (1)은 타당함을 알 수 있다. 또한, 간극 열전도도 계수 특성상 거리가 멀어질 경우 급격하게 그 값이 약해지므로 최단 거리 절점 이외의 열전달 양은 무시할 수 있다. 가정 (2)의 경우도 일반적인 간극에서의 열전달에는 적용하기에 부적합하지만, 경수로 핵연료 거동 특성상, 반경 방향으로의 열유속이 축 방향 및 원주 방향의 열유속에 비해 매우 크게 되므로 무시할 수 있으며, 간극 열전도도의 값을 결정하는 간극 두께는 반경 방향으로의 두께로 결정함이 타당함을 알 수 있다.

본 논문에서는 일반성은 다소 떨어지지만, 경수로 핵연료 열유속 거동에 적합한 가정들을 수립하여 다차원 간극 모델의 비선형성을 선형적으로 가정할 수 있게 되어 효율적인 다차원 간극 모델을 수립할 수 있었다.

2.3 APDL 을 이용한 다차원 간극 모델 적용

2.2 절에서 제안된 가상 연결 간극 요소를 이용한 간극 모델을 적용하기 위해 상용코드 ANSYS 13.0 의 APDL (ANSYS Parametric Design Language)

을 이용하여 열-구조 연계해석 모듈을 구성하였고, 제안된 간극 열전달 모델을 적용하였다.<sup>(12)</sup>

간극 모델을 구현하기 위해서는 핵연료에서의 열발생에 따른 열전달 해석의 수행이 필요하며, 온도 해석 결과를 바탕으로 재료의 열변형 및 구조적 응력 해석을 수행한다. 이후 열변형된 형상에서의 간극 열전도도 값을 계산하여 온도해석을 수행해야 한다.

변형된 형상에서의 간극 열전도도를 고려한 온도 해석 결과를 바탕으로 다시 구조해석을 수행하는 형태로 열해석과 구조해석을 반복적으로 수행하여 이들 값이 수렴되는 조건을 찾는 것이 필요하다. 이러한 반복 계산 모듈은 Fig. 8 과 같이 구성하였다. 초기 주어진 핵연료의 열생성 조건과 경계 조건을 주어 열 해석을 수행한다. 이후 열-구조 반복 해석 루프에 들어가게 되며, i-1 번째 온도계산 결과를 바탕으로 i 번째 열응력해석을 수행하여, 열변형 및 응력 조건에 따른 변형값을 계산한다. 열변형된 i 번째 형상에서 i 번째 온도를 다시 하기 위해 기존 VLG 요소를 제거하고 최단 거리에 있는 절점들을 탐색하여 VLG 요소를 재구성한다. 재구성된 VLG 요소의 양끝 절점 정보와 요소의 길이를 계산하여 각 요소에 등가 열전달 계수를 계산한다. 계산된 등가 열전달 계수는 i 번째 열해석을 위해 각 VLG 요소의 물성으로 적용하여 온도 계산을 완료한다. 이러한

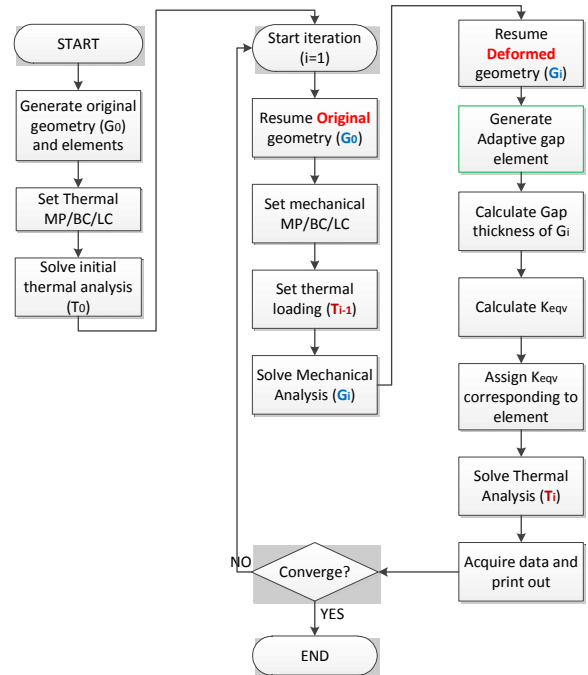


Fig. 8 Flowchart of thermo-mechanical model using VLG model

과정을 반복적으로 수행함으로써 온도 분포 및 변위 조건을 모두 만족하는 계산 결과를 최종적으로 얻을 수 있게 된다.

### 3. 결과 및 논의

2장에서 구성하였던 다차원 간극 열전도도 모델인 VLG 요소의 정확성 및 수렴성을 평가하여 모델의 타당성을 검증하고자 한다. 제안된 VLG 모델은 축대칭 2차원 요소를 기반으로 하여 구현하였다.

#### 3.1 정확성 검증

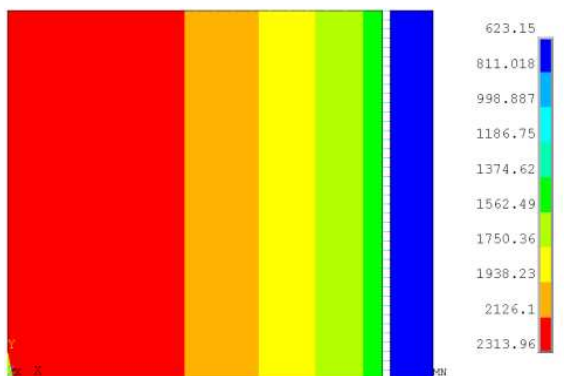
제안된 VLG 모델의 온도 해석의 정확성을 검증하기 위해서는 ANSYS 내부에 구현되어 있는 열 접촉 모델(Thermal Contact Coefficient, TCC)을 활용하여 검증하였다. TCC 모델은 열변형전 간극 내부가 모두 동일한 간극 열전도도값을 가질 때 이론적으로 정확한 값을 계산할 수 있는 모델이지만, 열변형 후에는 적용할 수 없는 모델이다. 따라서, 열변형 되기 전의 모델에 VLG 모델과 TCC

모델을 모두 적용하여 동일한 조건에서 해석을 수행하여 그 값을 비교함으로써 VLG 모델의 정확성을 검증할 수 있다.

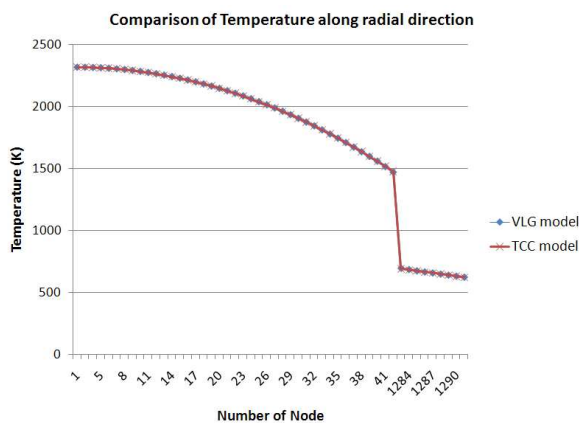
검증을 위해 사용된 요소는 2차 요소인 8개의 절점을 가진 요소와 1차 요소인 4개의 절점을 가진 요소를 이용하였다. 사용된 물성값으로는 온도에 무관한 물성값을 적용하였으며, 핵연료의 열전도도는  $5.87 \text{ mW/mm} \cdot \text{K}$  이며, 피복관의 열전도도는  $15.29 \text{ mW/mm} \cdot \text{K}$  을 사용하였다. 적용된 핵연료의 열팽창 계수는  $8.295 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  이며, 피복관의 열팽창 계수는  $6.721 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  이다. 핵연료의 탄성계수는  $191.355 \text{ GPa}$  이며, 피복관의 탄성계수는  $84.474 \text{ GPa}$  로 입력하였다.

열해석을 위한 하중 조건으로는 실제 원자로와 유사하게 핵연료 발열 조건으로  $789.056 \text{ mW/mm}^3$  이며, 경계 조건으로는 단순화를 위해 피복관 외벽이  $623.15 \text{ K}$  로 등온 조건으로 해석을 수행하였다. 그 외 모든 면에 대해서는 단열 조건으로 1차 열해석 결과를 유도하고자 하였다.

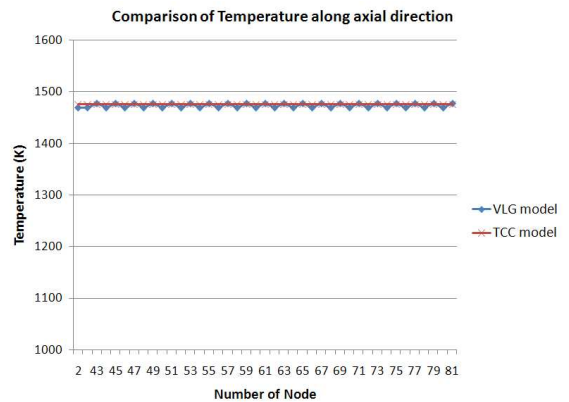
Fig. 9(a)는 VLG 모델을 적용하였을 때 온도 분



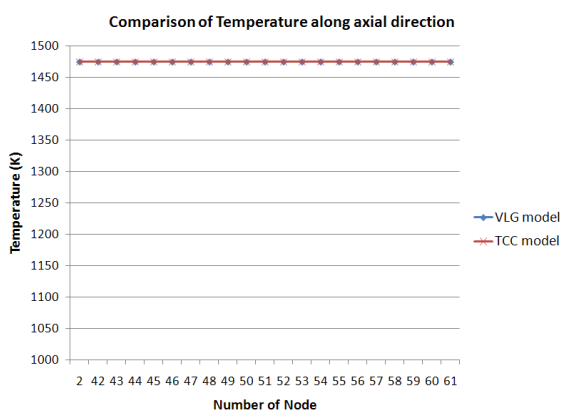
(a) Temperature distribution analyzed by VLG model



(b) Comparison of Temperature simulated by TCC model and VLG model



(a) Comparison of 8 node element results



(b) Comparison of 4 node element results

Fig. 9 Verification of VLG model in terms of accuracy

Fig. 10 Discrepancy of temperature results according to element type

포를 나타내고 있다. 2 차원 해석 요소를 이용하여 1 차 해석 결과가 나타났으며 간극 연결 요소에서 열전달이 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 반경 방향으로의 온도 해석 결과를 비교하고 있다. TCC 모델 및 VLG 모델의 값의 차이는 무시할 만한 수준이며 이를 통해 반경 방향으로의 온도 해석 값은 정확하다고 볼 수 있다.

정확성 검증을 위해 간극 내부에서의 Z 방향으로 온도 검증을 TCC 모델과 비교를 통해 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 10 과 같다. Fig. 10(a)의 결과는 8 개의 절점을 가지는 2 차 요소를 이용한 결과이며 (b)는 4 개의 절점을 가지는 1 차 요소를 이용한 결과이다. 8 개의 절점을 가지는 요소에서는 Z 방향의 온도 불연속성이 무시할 수 없는 수준, 최대 온도 차이가 6.6 K 발생하게 된다. 반면, 4 개의 절점을 가지는 요소의 경우에는 Z 방향으로의 온도 불연속성이 존재하지 않게 되어 TCC 모델 결과와 일치하게 된다.

이러한 원인은 링크 요소 특성상 1 차 요소는 가운데 절점이 존재하지 않기 때문에 절점간의 가중치가 없는 반면 2 차 요소는 가운데 절점에 의한 가중치가 발생하게 된다. 따라서, VLG 모델을 적용하기 위해서는 해석 모듈의 요소를 4 절점 요소를 사용해야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.

3.2 수렴성 검증 및 수렴조건 정의

2.3 절에서 설명한 것처럼 제안된 간극 열전도도 모델을 적용하여 열-구조 연계해석을 수행하고, 반복 해석을 통해 온도와 변형량이 수렴되는 값을 찾아야 한다. 그러나, Fig. 11 에서 보는 것과 같이 가스 간극 열전도도 값의 특성상 간극의 두께가 간극 특성값 이하가 될 경우 두께의 변화에 가스 간극 열전도도 값이 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다. 이러한 두께에 따른 간극 열전도도의 민감성은 계산값을 수렴하는데 어려운 요소로 작용한다.

수렴성 분석을 위해 열-구조 연계 해석을 수

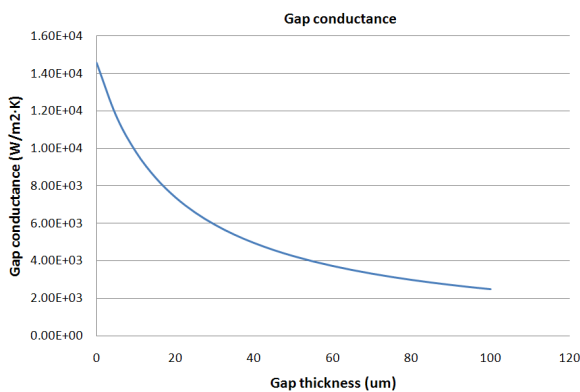
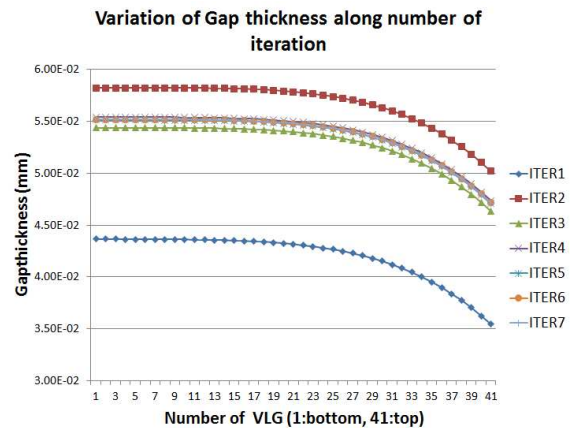


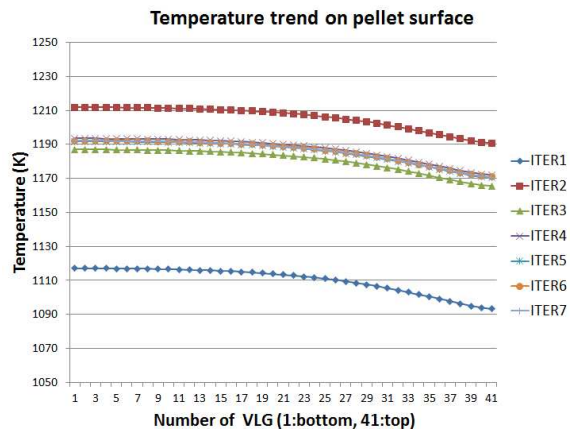
Fig. 11 Gas gap conductance through gap thickness

행하였으며, 수렴 조건은 셋업되지 않은 상태에서 충분한 반복 계산을 수행하였다. 3.1 절에서 검증된 결과를 토대로 하여 축방향으로의 온도 불균일성이 없는 4 절점 요소를 이용하여 열해석을 수행하였으며, 응력 해석 또한 4 절점 요소를 이용하였다.

7 회의 반복 계산 수행 결과 간극의 두께 변화와 핵연료 표면에서의 온도 결과가 Fig. 12 과 같다. Fig. 12(a)에서는 반복 계산에 따른 간극 두께의 변화를 보여주고 있으며 중심온도가 더 높은 등방성 열 팽창현상에 의해 대칭 조건으로 축방향으로 고정되어 있는 핵연료 하단부보다 상단부가 반경 방향으로 더 큰 열변위가 발생하여 상단부 간극 두께가 얇게 형성된다. 반복계산 1 회(ITER1)에서는 열변형이 고려되지 않은 초기 간극 조건이기 때문에 간극 열전도도가 낮은 상태이다. 따라서, 핵연료의 온도가 높게 해석되며, 높은 핵연료는 많은 열변형을 가져와 간극의 두께가 가장 얇게 형성된다. 그러나, ITER2 과도한 열변형에 의해 간극두께가 얇아지고, 식 (5)에 따라 간극 열전도도가 상승하여 핵연료 표면의 온도가 다시금 떨어지



(a) Variation of gap thickness



(b) Variation of pellet temperature

Fig. 12 Convergence trend of VLG model



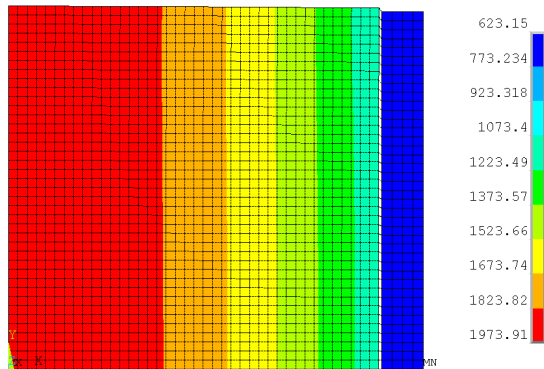


Fig. 13 Thermal analysis result of the deformed geometry using VLG model

게 된다. 낮아진 온도에 의해 다시 열변형률 값이 낮게 되어 다음 계산에서는 간극의 두께가 다시 두꺼워지게 된다. 이러한 형태로 열해석과 응력해석이 간극 열전도도 값에 따라 반복적으로 계산이 수행된다.

Fig. 12(a)를 통해 알 수 있듯이, 초기 계산(ITER1) 시 피복관과 핵연료의 높은 열변형률에 의해 간극의 두께가 최소화 되며 반복 계산 횟수가 증가할수록 열변형률에 의한 간극 두께의 변화량이 점차 줄어들어, 수렴에 이르게 됨을 알 수 있다.

이러한 특성은 Fig. 12(b)의 핵연료 표면 온도의 변화를 통해서도 알 수 있다. 간극의 두께가 얇은 반복 계산 1 회에서는 표면 온도가 낮게 계산되었다가, 간극의 두께가 두꺼워져 간극 열전도도가 낮아지는 반복 계산 2 회시에는 높게 계산된다. 이러한 온도 값의 변화량은 반복 계산이 진행됨에 따라 점차 줄어들어 수렴에 이르게 됨을 알 수 있다.

Fig. 13 은 열변형된 형상에서 두께에 따른 간극 열전도도를 고려하여 온도 분포를 계산한 결과이다. Fig. 12 에서 분석된 것처럼 간극이 얇은 상단부에서의 표면 온도 및 핵연료 내부 온도 분포가 하단부에 비해 낮게 형성됨을 확인할 수 있다.

이러한 반복 계산 결과를 바탕으로 다차원 간극 열전도도의 수렴 조건을 도출할 수 있다. 온도와 간극의 두께는 그 거동이 유사하나, Fig. 11 에서 표현된 것처럼 간극의 미세한 변화에 간극 열전도도가 급격하게 변화하는 구간이 존재한다. 따라서, 계산 수렴 조건으로 선정하기 위한 변수로는 간극에서의 온도임을 알 수 있다. 이러한 간극 표면에서의 온도를 이용하여 (8)과 같이 다차원 간극 열전도도 수렴 조건을 제안하였다.

$$\varepsilon_{tolerance} \geq \left| \frac{T_i^t - T_i^{t-1}}{\min(T_i^t)} \right| \quad (8)$$

t 회 반복 계산에서 간극에 존재하는 절점들에서 최소의 온도를 가지는 값으로 각 절점에서 t 회 온도와 t-1 회 온도의 차이를 나누어 절대값을 산출하고, 그러한 절대값이 미리 설정된  $\varepsilon_{tolerance}$  보다 모두 작아야 하는 조건으로 선정한다.

이러한 수렴 조건을 통해 보수적으로 간극 열전도도 해석시 온도 및 열 변위 결과가 모두 수렴하는 값을 찾을 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 경수로 핵연료의 거동해석에 필수적인 간극 열전도도 모델을 다차원으로 적용하기 위하여 가상 연결 간극(VLG) 요소를 제안하였으며, 제안된 모델의 평가를 위해 상용 유한요소 코드인 ANSYS 의 APDL 을 활용하여 열-구조 해석 모듈과 VLG 요소를 구현하였다. 기존의 간극 모델은 1 차원 기반의 Ross and Stoute 모델이 검증되어 널리 적용해왔으나, 다차원으로 적용하기에는 어려움이 많았다. 최근 다차원 핵연료 성능 코드 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 여기에 필수적인 다차원 간극 열전도도 모델 개발이 진행되고 있다. 하지만, 간극 열전달 현상을 그대로 모사하는 일반적인 열접촉 방법론은 고비용의 계산 특성 때문에 다물리, 다차원 핵연료 해석에 적합하지 않다.

(1) 본 논문에서는 효율적인 다차원 간극 열전도도 계산을 수행하기 위해 선형 모델 기반이면서도 정확한 계산을 수행할 수 있는 가상 연결 간극 요소를 제안하였다.

(2) 가상 연결 간극 요소는 열 변형된 형상에서 간극 내부에 열전달을 위해 가상의 연결 요소를 자동으로 생성하여 간극 열해석을 하는 방법이다. 가상 연결 간극 요소에 간극 거리에 따른 간극 열전도도 특성을 부여하기 위해 본 논문에서는 등가 열전달 계수를 정의하였다.

(3) 제안된 VLG 요소 간극 모델을 평가하기 위해 ANSYS 의 APDL 을 이용하여 열-구조 연계 해석 모듈을 구성하였으며, 이때 간극 열전도도를 계산하기 위해 VLG 요소 모델을 적용하였다.

(4) 제안된 모델의 계산의 정확성을 검증하기 위해 열 변형전 열 접촉 모델과 온도 해석 결과를 비교하였으며, 비교 결과 모든 절점에서의 오차가 수치적 오차 범위내에서 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, 정확성 검증을 통해 이웃된 절점간의 온도 불균일성을 제거하기 위해서 4 절점 요소인 1

차 요소를 적용해야 함을 알 수 있었다.

(5) 제안된 모델의 수렴 특성을 분석하기 위해 구성된 열-구조 연계 해석을 반복적으로 수행하고 VLG 요소를 적용함으로써 수렴 거동을 분석하였다. 수렴특성 분석 결과 반복 계산 초기에는 온도 및 열변위 변화량이 매우 급격하였으나, 반복 계산 횟수가 증가함에 따라 이러한 변화량이 줄어들어 수렴된 계산결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

(6) 반복 계산 수행시 간극의 모든 절점에서의 온도의 차이를 현재 단계와 이전 단계를 모두 비교하여 그 차이에 대한 비율을 수렴 조건을 선정하였다. 이러한 두가지 검증을 통해 제안된 가상 연결 간극 요소를 이용한 다차원 간극 모델의 타당성을 입증할 수 있었다.

향후에는 3 차원에서도 VLG 요소를 적용하여 타당성을 평가하고 최종적으로는 In-house 코드 시스템에 제안된 모델을 도입하고 실제 핵연료 실험 데이터와 비교하여 평가하고자 한다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(핵연료 연소성능 평가기술개발, No. 2012M2A8A5025823)

## 참고문헌

(1) Lamarsh, J.R. and Baratta, A.J., 2012, *Introduction to Nuclear Engineering*, Third edition, Prentice-Hall, Inc.

- (2) Kim, S.H., 2010, *Incore Fuel Management*, Hyungseul
- (3) Ross, A.M. and Stoute, R.L., 1962, *Heat transfer coefficient between UO<sub>2</sub> and Zircaloy-2*, ACEL-1552.
- (4) Knuutila, A., 2006, *Improvements on FRAPCON3/FRAPTRAN Mechanical Modeling*, VTT-R-11337-06, VTT.
- (5) Suzuki, M., 2000, *Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V*, JAERI-DATA/Code 2000-030.
- (6) Konings, J.M., 2012, *Comprehensive Nuclear Materials*, Elsevier, Waltham, pp. 682~691.
- (7) Hansen, G., 2011, "A Jacobian-Free Newton Krylov Method for Mortar-Discretized Thermomechanical Contact Problems," *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, pp. 6546~6562.
- (8) Ainscough, J.B., 1982, *Gap Conductance in Zircaloy-Clad LWR Fuel Rods*, OECD-NEA, CSNI Report No. 72.
- (9) Soba, A. and Denis, A., 2008, "Simulation with DIONISIO 1.0 of Thermal and Mechanical Pellet-Cladding Interaction in Nuclear Fuel Rods," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 374, pp. 32~43.
- (10) Kim, H.C., Yang, Y.S. and Koo, Y.H., 2013, "Development of FE-Based Gap Conductance Model Using Adaptive Link Element," *Proceeding of KSME for CAE and Applied Mechanics*, Pusan, Korea, pp. 303~304.
- (11) Kim, H.C., Yang, Y.S., Kim, D.H., Bang, J.G., Kim, S.K. and Koo, Y.H., 2012, "Study of Gap Conductance Model for Thermo-Mechanical Fully Coupled Finite Element Model," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Korea.
- (12) ANSYS R&D Inc., "ANSYS Manuals," 2010.