

연구로용 신형상 핵연료의 열전달 및 열응력 해석

Analysis of Heat Transfer and Thermal Stress on New shape of Hanaro Fuel

이윤상, 이주찬, 오석진, 김창규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로용 핵연료로 사용되는 U-Mo 분산 핵연료의 문제점인 U-Mo 입자와 Al과의 반응성 문제를 해결하기 위하여 신형상 U-Mo 핵연료를 개발하고 있다. 신형상 핵연료의 열전달 및 열응력을 해석하여 보고, 핵연료로 적절한 형상을 고려하여 보았다.

Abstract

The U-Mo dispersen nuclear fuel for research reactor has some problem, which is the reaction between U-Mo particles and Al Matrix. New style nuclear fuel development that can minimize the reaction between U-Mo particles and Al matrix was needed. In this paper, we calculated the heat transfer and thermal stress of the new style fuel and considered the most suitable shape.

I. 서론

연구로용 핵연료는 원자로에서 핵분열에 의해 다량의 열이 생성되며 우라늄 입자와 기지물질(Al) 또는 피복관재료(Al)과 확산 반응으로 반응 경계면에서 금속간 화합물이 생성되어 부피가 팽창하게 되며 이 때문에 피복층에서 failure가 발생하여 핵분열성 물질이 냉각수를 오염시키게 된다. 따라서 열을 효과적으로 제거할 수 있는 기하학적 구조를 갖는 핵연료를 설계하는 것이 중요한 목표가 되고 있다.

이 연구의 목적은 기존의 분산형핵연료 즉 Al 기지에 우라늄합금 분말을 섞어 만든 핵연료의 단점을 개선하기 위하여 Ring 형태의 우라늄합금을 제조하고, Ring 형태의 핵연료를 Al 피복관으로 싸는 형태로 제조하면 기존의 분산형 핵연료에서 발생하는 U-Mo합금과 Al의 반응 계면적을 줄일 수 있을 것으로 예측된다.(그림 1 참조) 또한 Tube 형태로 제작한 후 가운데로 냉각수를 흘려줄 수도 있다.(그림 2 참조)

U-Mo 합금과 Al은 350도 이상의 온도에서는 확산속도가 빠르므로 가능하면 계면의 온도를 350도보다 낮은 온도로 유지할 수 있도록 U-Mo Ring의 길이 및 두께를 선정하여야 한다. 따라서 이 연구에서는 길이 40 mm, 50 mm, 60 mm 두께 1 mm, 또는 0.5 mm의 gap을 가진 두께 0.665 mm의 Ring 형상에 대하여 2차원 해석을 통하여 온도 분포를 계산하여 보고, 적절한 크기의 Ring을 선택하고자 한다. 또한 핵연료의 온도에 따라 걸리는 응력 분포 및 변형 양상을 계산하여 보고 여러 개의 Ring을 사용한 핵연료 제조 시 문제점을 검토하고자 한다.

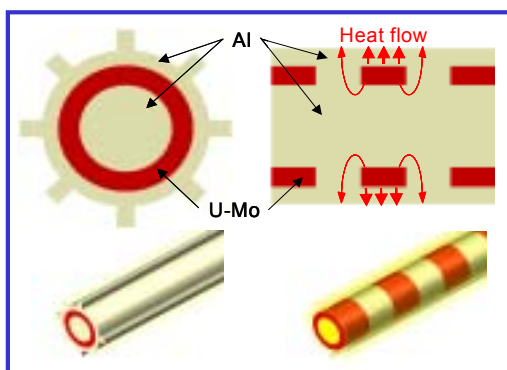


그림 1. Ring 형태의 핵연료 개념

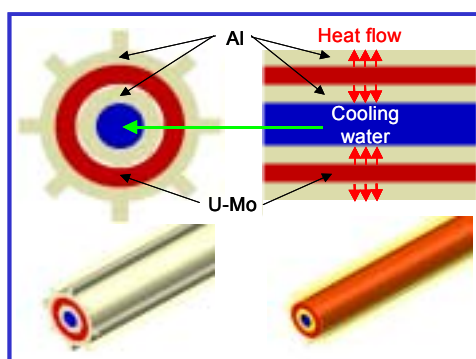


그림 2. Tube 형태의 핵연료 개념

II. 유한요소 모델

1. 핵연료봉의 온도 분포 지배 방정식

핵연료봉은 직경(약 7.87 mm)에 비해 길이(약 760 mm)가 매우 긴 원통이므로 반경 방향으로의 열전달에 비해 축방향으로의 열전달은 무시할 수 있다. 또한 열전달이 방위각 방향에 대해서 대칭이고 열전도도가 위치에 무관한 상수라고 가정하면 원통형 좌표계에서의 일반적인 열전달 지배 방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$k_f \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + q = \rho c \frac{dT}{dt}$$

윗 식에서 k_f : 핵연료 열전도도[W/m °C]

T : 온도 [°C]

q : 단위 체적당 열 발생률[W/m³]

ρ : 밀도 [g/m³]

c : 비열[J/g °C]

시간에 따른 온도 변화가 없는 정상 가동 조건에서는 우변이 0이 되므로 이 때는 열전달 방정식이 아래와 같이 바뀐다.

$$k_f \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + q = 0$$

2. 해석 모델 및 재료 상수값

하나로의 핵연료봉은 직경이 7.87 mm이고 길이가 760 mm이나, Tube 형태 또는 Ring 형태의 핵연료에 대한 열전달 해석은 축대칭으로, Al matrix 길이 5 mm에 대해 해석하여 보고, 반경 방향의 온도 분포를 조사하고자 한다. Tube 형태의 모형은 그림 3과 같고, Ring 형태는 그림 4 또는 5와 같은 모형을 대상으로 계산하였다. 그림 5는 핵연료 U-Mo의 길이를 6mm로 하여, 0.5 mm gap이 있는 경우와 없는 경우에 대해 계산하였다.

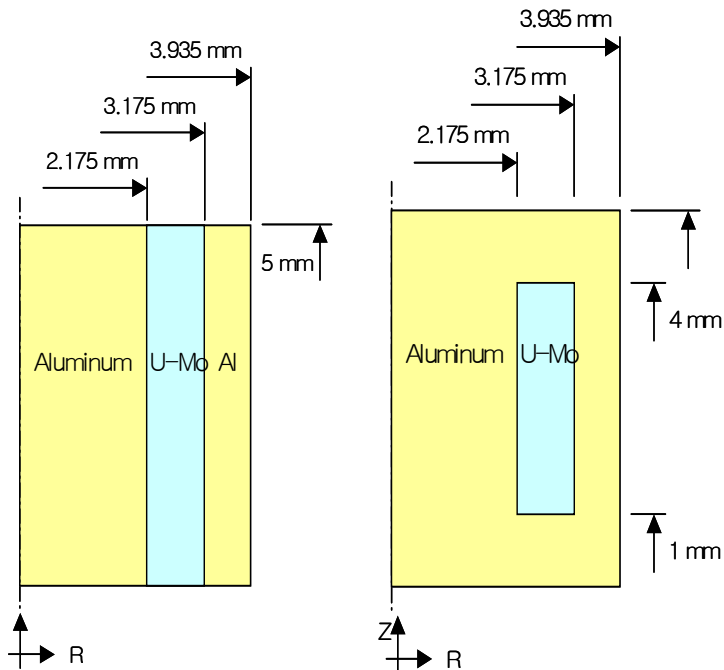


그림 3. Tube 핵연료 모형 그림 4. Ring 핵연료 모형

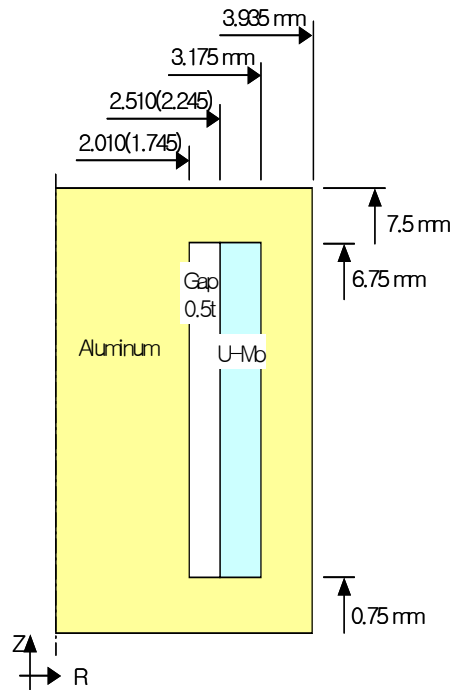


그림 5. Gap 이 있는 핵연료 모형

핵연료에서 발생하는 열은 원자로의 선출력으로 나타내며, 선출력은 중성자수를 조절하므로써 선출력을 조절할 수 있다. 연구로용 원자로의 선출력은 120 kW/m로서 이를 부피에 대한 열출력으로 환산하면 1.02×10^{10} W/m³가 된다.

(1번 모델에서는 길이 1 mm 당 120 W이므로 길이 5 mm에서는 600 W의 열이 발생한다. 부피에 대한 발생열을 계산하면 부피는 $\pi \times (r_2^2 - r_1^2) \times h_1 = 84.037 \text{ mm}^3$ $600/84.037 = 7.143 \text{ W/mm}^3 = 7.143 \times 10^9 \text{ W/M}^3$, 2번 모델에서는 $1.189 \times 10^{10} \text{ W/M}^3$, 3번 모델에서는 $1.02 \times 10^{10} \text{ W/M}^3$ 이 된다.)

열전도도는 U-Mo는 15 W/m-K, Al은 220 W/m-K 로 주었고, 경계조건으로는 원자로의 냉각수에 의한 대류 열전달 계수를 65,000 W/m²-K 그리고 냉각수 온도는 40 °C로 주었다. 해석 모델은 2-D 축대칭 모델을 사용하였다. Mesh의 크기는 가로 20 세로 38개로 총 760개의 4변형요소로 나누었다.

III. 결과 및 고찰

1. tube 형태의 핵연료의 온도 분포

Al matrix 중심 부위의 온도는 345 °C로 올라가고, 두께 1 mm 길이 5 mm의 U-Mo 안쪽은 345 °C 바깥쪽은 142 °C 그리고 Al 피복부위 즉 냉각수와 접촉하는 부위의 온도는 115 °C가 되었다. 따라서 Al과 U-Mo와 접촉하는 부위의 온도가 345 °C이면 반응이 심하게 일어날 것으로 판단되므로 Tube 형태의 핵연료는 적합하지 않다.

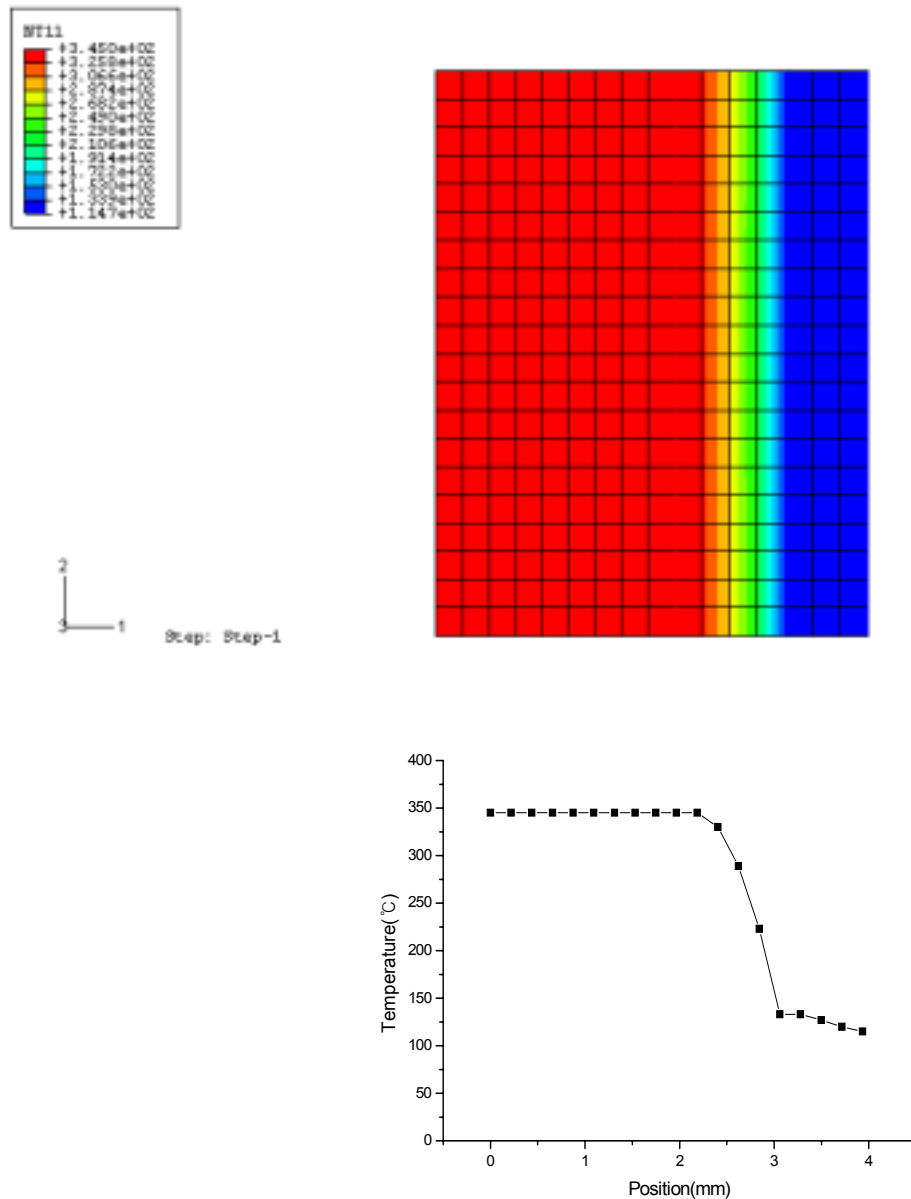


그림 6. tube 형태의 핵연료의 온도 분포

2. U-Mo 길이 3mm의 Ring 형태의 핵연료 모형 온도 분포

Al matrix 중심 부위의 온도는 192 °C로 올라가고, 두께 1 mm 길이 3 mm의 U-Mo와 Al이 접촉하고 있는 안쪽의 온도는 218 °C로 올라가고, 바깥쪽은 144 °C 그리고 Al 피복부위 즉 냉각수와 접촉하는 부위의 온도는 115 °C가 되었다. 그리고 U-Mo 중심부위의 최고 온도는 약 269 °C로, Ring 형태의 핵연료가 적절할 것으로 판단된다.

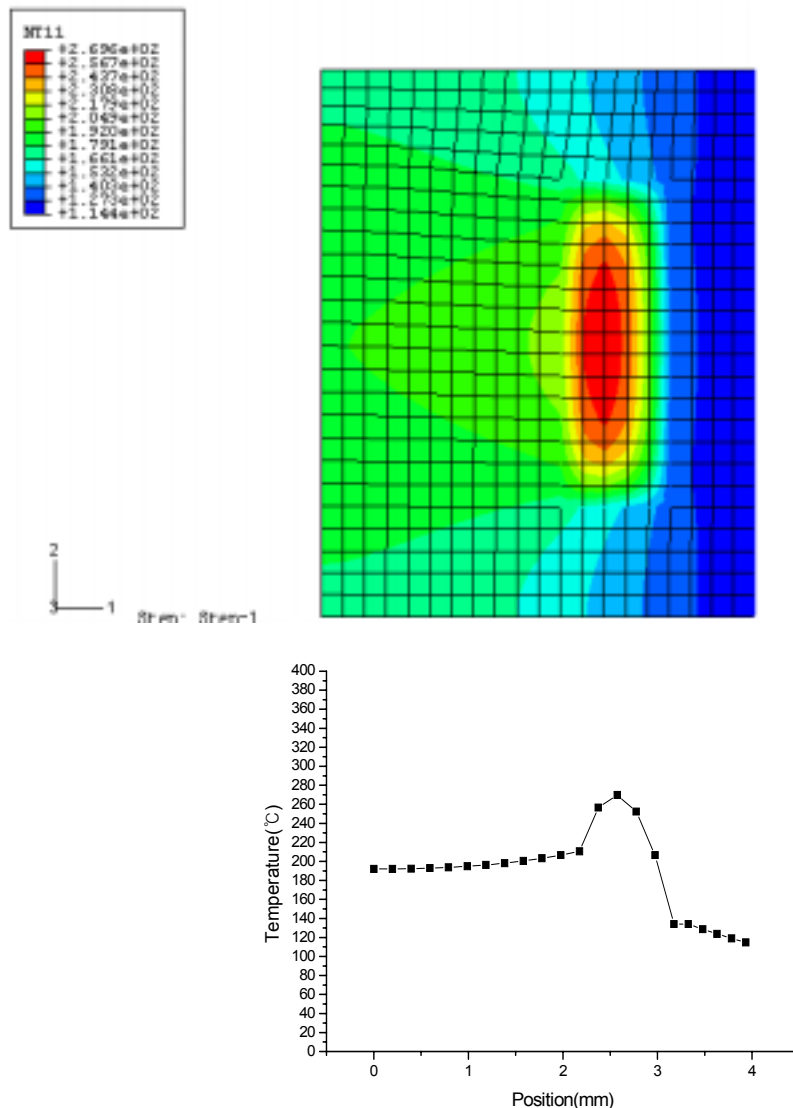


그림 7. Ring 핵연료 모형의 온도 분포

3. 길이 6mm Ring 핵연료 모형의 온도 분포

U-Mo 핵연료를 위에서 계산한 3 mm 보다 길이를 길게 6 mm로 하였을 때의 온도 분포를 계산하여 보았다. Al matrix 중심 부위의 온도는 324 °C로 올라가고, 두께 1.165 mm 길이 6 mm의 U-Mo와 Al이 접촉하고 있는 안쪽의 온도는 340 °C로 올라가고, 바깥쪽은 155 °C 그리고 Al 피복부위 즉 냉각수와 접촉하는 부위의 온도는 132 °C가 되었다. 그리고 U-Mo 중심부위의 최고 온도는 약 372 °C로, 길이 3 mm의 Ring에서 6 mm로 늘릴 경우 접촉 계면의 온도가 높게 올라가서 이 형태의 핵연료는 부적절할 것으로 판단된다.

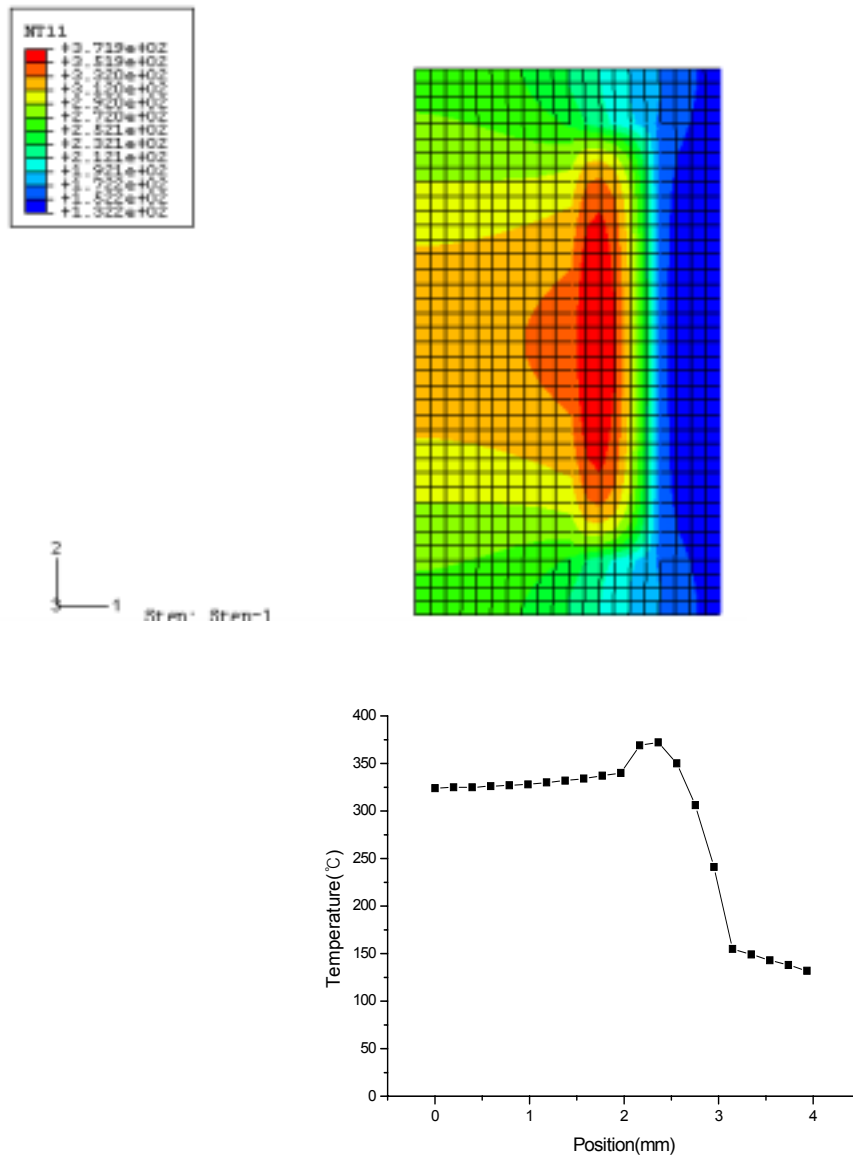


그림 8. 길이 6 mm Ring 핵연료 모형의 온도 분포

4. Gap이 있는 길이 6 mm Ring 핵연료 모형의 온도 분포

1) U-Mo의 길이가 6 mm이고 Gap이 없을 경우에는 계면의 온도가 너무 올라가서 반응이 일어나므로, U-Mo 핵연료 안 쪽에 0.5 mm의 gap을 주고 또한 U-Mo 두께를 1 mm로 한 경우의 온도를 계산하여 보았다. Al matrix 중심 부위의 온도는 150°C 이고, 두께 1 mm 길이 6 mm의 U-Mo와 Al이 접촉하지 않은 부분 즉 gap

과 접촉하고 있는 부위의 온도는 454 °C로 올라가고, U-Mo와 Al이 접촉하는 바깥쪽은 158 °C 그리고 Al 피복부위 즉 냉각수와 접촉하는 부위의 온도는 133 °C가 되었다. 따라서 앞에서 계산한 Gap이 없는 경우 계면의 온도가 340 °C가 될 경우와 비교하여 보면 gap을 줌으로서 이러한 반응을 막을 수 있으며 U-Mo와 Al이 접촉하는 부위는 150 °C밖에 안되므로, 안정하게 사용할 수 있다.

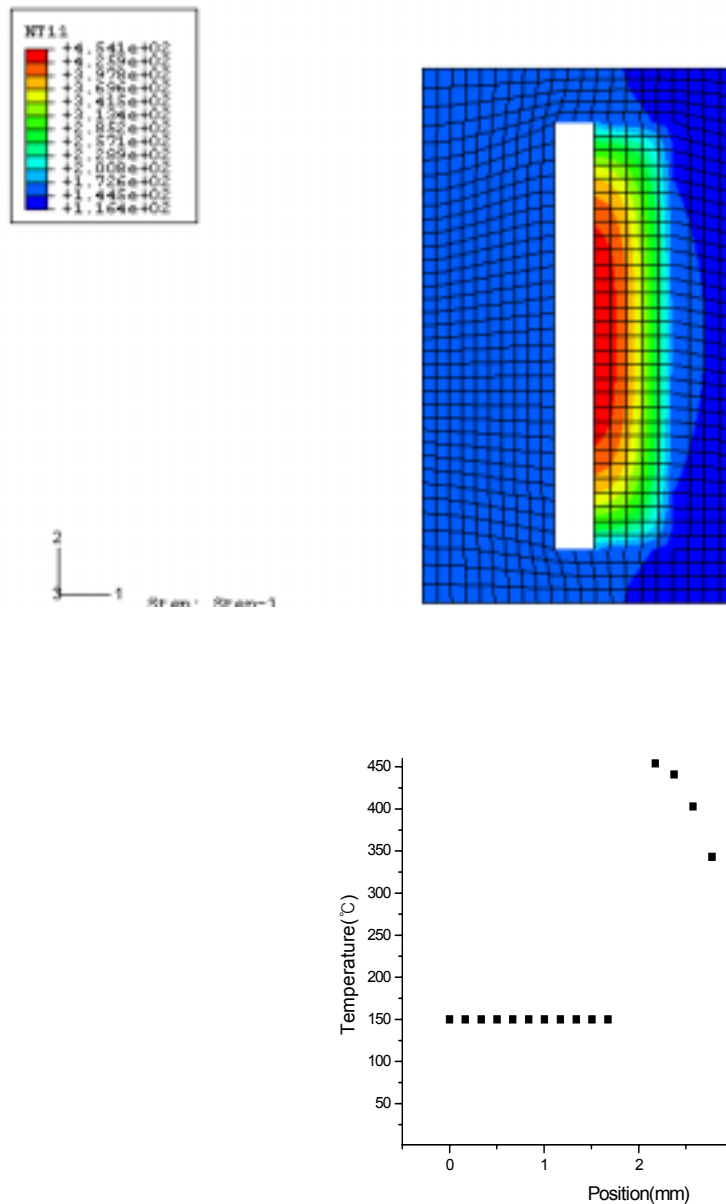


그림 9. Gap이 있고, U-Mo 두께 1 mm인 Ring 핵연료 모형의 온도 분포

2) 그러나 U-Mo 두께 1 mm인 위의 계산 결과 U-Mo의 안쪽 온도가 454 °C까지 올라가므로, 더 안정적인 모형을 찾기 위해, Mo 핵연료 안 쪽에 0.5 mm의 gap을 주고 또한 U-Mo 두께를 0.66 mm로 얇게 한 경우의 온도를 계산하여 보았다. Al matrix 중심 부위의 온도는 108 °C이고, U-Mo와 Al이 접촉하지 않은 부분 즉 gap과 접촉하고 있는 부위의 온도는 262 °C로 올라가고, U-Mo와 Al이 접촉하는 바깥쪽은 134 °C 그리고 Al 피복부위 즉 냉각수와 접촉하는 부위의 온도는 107 °C가 되었다. 따라서 gap을 주고, U-Mo의 두께를 얇게 하면 U-Mo와 Al의 반응을 막을 수 있으므로, 가장 안정하게 사용할 수 있다.

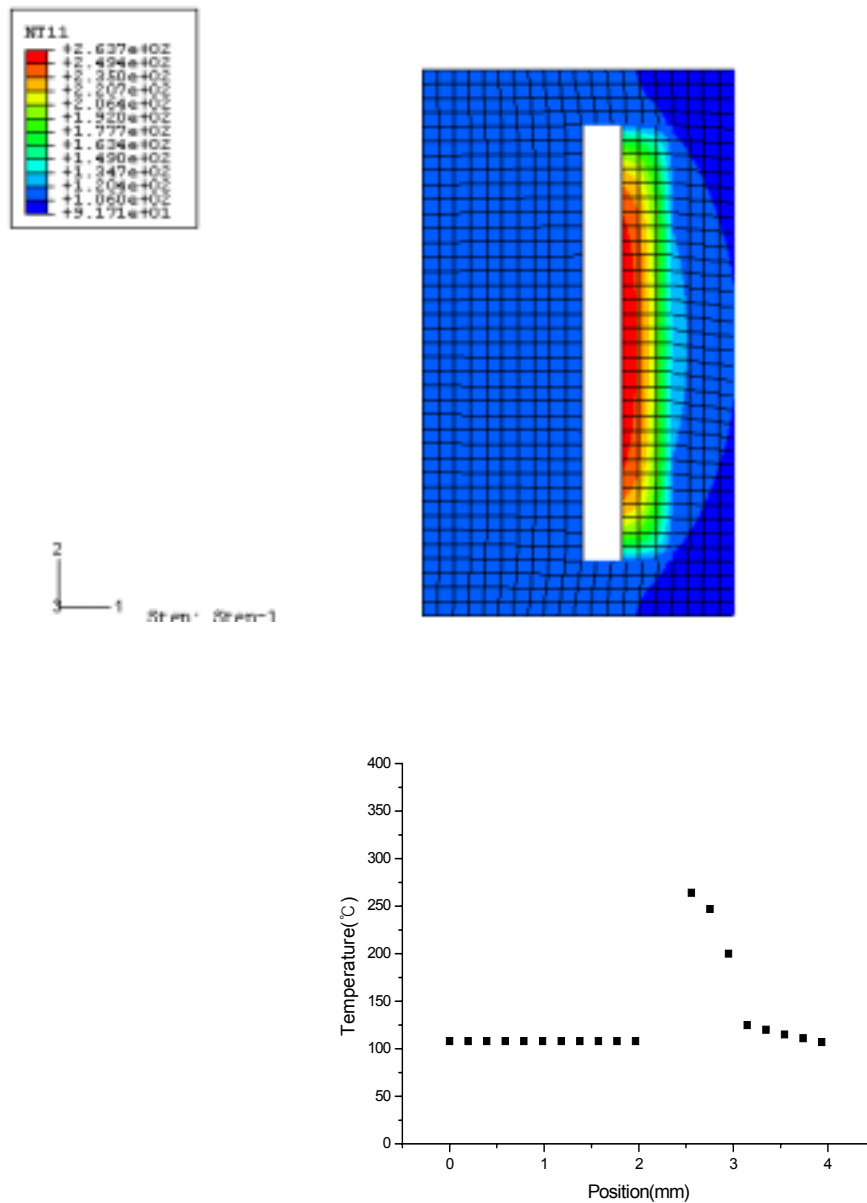


그림 10. Gap이 있고, U-Mo 두께 0.66 mm인 Ring 핵연료 모형의 온도 분포

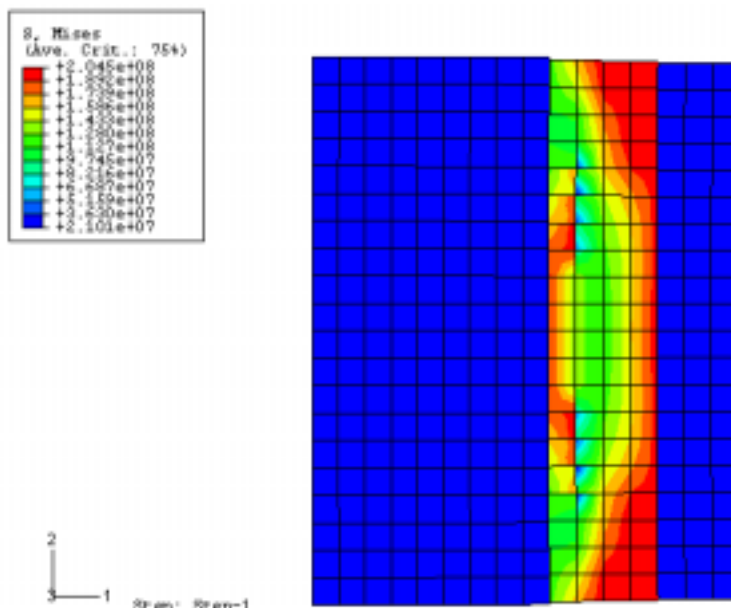
5. 열응력 계산

핵연료는 핵연료와 피복관의 계면 반응에 의해 부피가 팽창하면서 failure가 발생하거나, 핵연료에서 발생하는 열에 의해 열응력이 발생 이 때문에 핵연료봉에 변형이 생겨 failure가 발생할 수 있다. 따라서 ABAQUS의 Step에서 Coupled temp-displacement로 설정하여 위에서 선택한 핵연료모형에 대해 열해석과 동시에 열응력을 계산하도록 하였다.

Elastic Constant는 Young's Modulus 1.758Gpa, Poission's Ratio 0.20로 주었고, 열팽창계수는 2×10^{-5} , Plastic Constant로는 Yield stress 190 Mpa Plastic strain 0, Ultimate Tensile stress 385 Mpa Plastic strain 0.04로 주었다.

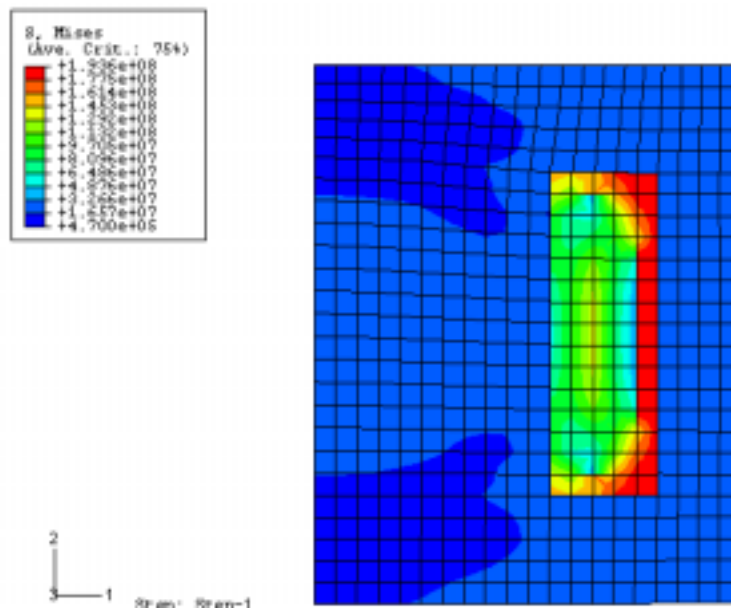
1) Tube 형태의 핵연료의 열응력 분포

Tube 형태의 핵연료는 심재 안쪽이 온도가 높으므로 Al 기지는 늘어나고 U-Mo의 외측에 항복응력 이상의 응력이 걸려 변형되는 양상을 보인다.



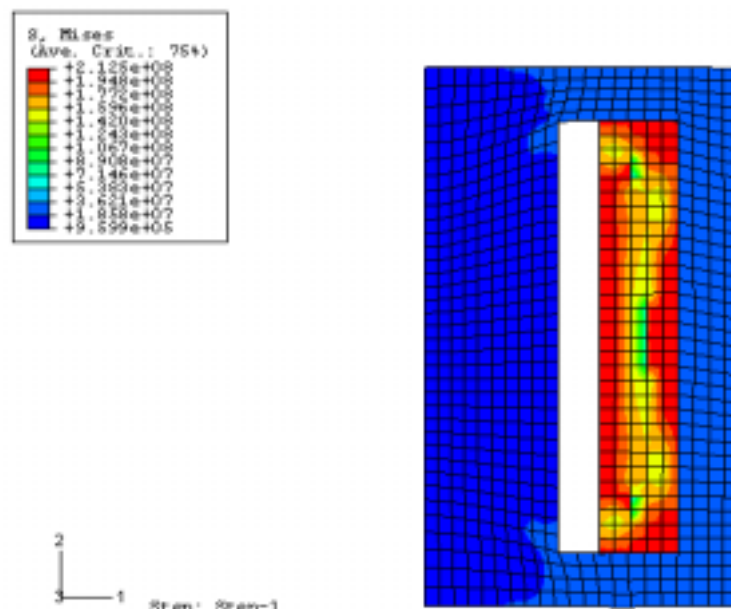
2) U-Mo 길이 3mm의 Ring 형태의 핵연료 응력분포

위의 Tube 형태 보다 응력이 적게 걸리고, 변형량도 적게 나타났다.



3) Gap이 있는 U-Mo 6 mm의 Ring 형태의 핵연료 응력 분포

U-Mo 부위의 온도가 높아서 핵연료 부위에 높은 응력이 걸리고 상대적으로 Al Matrix는 온도가 낮아 밖에서 안쪽으로 휘는 양상을 보인다.



IV. 결론

분산핵연료 즉 분말을 Al matrix에 분산시키는 핵연료는 Al과 U-Mo와의 반응이 심해 U-Mo를 Ring 형태로 구조하여 사용하기 위한 열 및 응력 해석을 수행하여 보았다.

Tube 형태는 U-Mo와 Al의 계면 온도가 345 °C로 부적절 하였으며, Ring 형태는 3 mm인 경우는 안전하였고, 6 mm인 경우는 gap을 주면 U-Mo 안 쪽의 높은 온도를 Al과 떨어트리므로써 계면의 반응을 막을 수는 있으나, 응력 계산 결과 핵연료봉이 안쪽으로 휘는 열 변형이 생길 수 있음을 관찰하였다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.