

CFD 코드를 이용한 SMART 연구로 CEDM 냉각기 성능평가

Evaluation on the cooling capacity of the SMART-P CEDM cooler using CFD code

김영인, 서재광, 박천태, 이준, 윤주현, 지성균

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

일체형원자로 SMART 연구로의 제어봉구동장치(CEDM)에는 제어봉의 미세조절을 위해 볼베어링(ball screw bearing)이 사용된다. 볼베어링은 120℃ 이상에서 마찰계수가 급격히 증가하는 재질 특성이 있기 때문에 이 온도 이상에서는 CEDM의 기능적 건전성이 보장되지 못한다. 고온의 주변 구조물로부터 전달되는 열을 차단하기 위해 볼베어링 하단에는 CEDM 냉각기가 설치된다. 본 논문에서는 SMART 연구로 개념설계 단계에서 설정된 CEDM 냉각기가 정상 및 과도운전에서 CEDM 볼베어링의 온도요건을 만족하는지를 전산유체코드, Fluent를 이용하여 평가하였다. 해석 결과, 모든 운전조건에서 볼베어링 온도가 제한치를 초과하지 않았으며 충분한 설계여유도가 있음을 확인하였다.

Abstract

Ball screw bearings are used for the fine control of Control Rod Drive Mechanism (CEDM) for the SMART-P. Because the friction coefficient of the ball screw bearings suddenly increases at the limit temperature of 120℃, the surrounding temperature of the ball screw bearings should be less than the limit temperature for the functional integrity of the CEDM. The CEDM coolers are installed at the lower portion of the ball screw bearings to maintain the bearings' temperature less than the limit. In order to check the CEDM cooler satisfy the temperature limit of ball screw bearing at the possible operational conditions, the cooling capacity of the CEDM coolers, which was determined at the stage of 'conceptual design', is evaluated using the Computational Fluid Dynamics(CFD) code, Fluent. The analysis result shows that the current CEDM coolers satisfy the CEDM temperature limit of 120℃ for the all the operation modes of the SMART-P and there is a sufficient design margin for the CEDM coolers.

1. 서론

SMART 연구로는 방사오염물질의 생성량을 감소시키기 위해 봉산을 사용하지 않는

일체형원자로로서 제어봉구동장치(CEDM)에는 제어봉의 미세조절을 위해 볼베어링(Ball screw bearing)이 사용된다. 그러나 볼베어링(Ball screw bearing)은 온도에 취약한 성질이 있어 온도가 120℃ 이상이 되면 마찰계수가 급격히 증가하여 CEDM의 정상기능 수행이 저하된다.

그림 1에는 볼베어링의 온도변화에 따른 마찰계수변화를 지수함수로 나타내었다. 예비 조사한 바에 의하면 그림 1의 마찰계수의 급격한 변화는 볼베어링 재질의 고온 템퍼링 효과 발생에 기인하는 것으로 조사되고 있지만 고려되어야 할 요소들이 매우 많아 현재까지 정확한 원인이 파악되지 못하고 있다. 한원(연)에서는 SMART 연구로에 사용되는 볼베어링 재질에 대해서 온도변화에 따른 마찰마모율 변화에 대한 시험을 수행 중에 있으며, 시험 종료 시점에서 CEDM 볼베어링에 대한 온도요건 설정의 근거를 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 SMART 연구로의 CEDM 볼베어링의 최대 허용온도를 120℃로 가정하고 이에 대한 평가를 수행하였다.

SMART 연구로의 CEDM 냉각기는 냉각기 주변구조물로부터 유입 전달되는 열을 차단하여 CEDM 볼베어링을 건전한 상태로 유지하는 기능을 수행한다. CEDM 볼베어링의 온도는 원자로용기 헤드로부터의 전도와 볼베어링 하단 CEDM 안내관의 전도와 안내관 내측 유체의 자연대류 및 제어봉의 움직임에 기인한 유체의 입출입에 따른 대류에 의한 열전달에 영향을 받는다. 이러한 볼베어링의 온도에 영향을 주는 인자들에 대한 평가를 통하여 CEDM 냉각기의 개념설계가 완료되었다^[1,2,3]. 본 논문에서는 CEDM 냉각기를 3차원으로 모델링하고 상용코드인 Fluent 코드를 이용하여 전산열유체해석을 수행하여 CEDM 냉각기가 CEDM 볼베어링 온도요건을 만족시키는지 여부를 평가하였다.

2. 지배방정식

CEDM 냉각기 주변의 전산열유체해석에는 원자로용기, CEDM 냉각기 유로 및 CEDM 안내관 유로 등의 고체부와 안내관 내측 유로 및 CEDM 냉각기 유로의 원자로냉각재계통 냉각재 및 CEDM 냉각기 냉각수로 구성된 유체부로 나누어 모델링된다. 고체부의 열전달 해석을 위해서는 다음과 같은 열전도 방정식이 사용된다.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0$$

원자로용기, CEDM 냉각기 유로 및 CEDM 안내관 유로 등의 고체부의 재질은 Stainless Steel로 가정하였으며 참고문헌[4]의 열전도도 값을 사용하였다.

CEDM 냉각기 내측 및 안내관 내측 유체부의 열유동을 계산에 사용되는 지배방정식으로는 질량, 운동량, 에너지 보존방정식 등이 채택되고, eddy viscosity를 결정하기 위

해서 난류모델이 채택된다. 본 논문에서는 편의상 I 방향에 한 방향에 대해서만 질량, 운동량, 에너지보존식을 나타낸다. 생성항이 없는 정상상태 유동대한 질량보존식을 I 방향에 대해서 나타내면 다음과 같다^[5].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

생성항이 없는 정상상태 유동대한 운동량보존식을 I 방향에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

여기서 p 는 정압, τ_{ij} 는 응력텐서, ρg_i 는 체력을 나타낸다. 응력텐서(stress tensor) τ_{ij} 는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$

여기서 μ 는 분자의 점성을 나타내고 오른쪽 두 번째 항은 체적팽창에 의한 효과를 나타낸다. 생성항이 없는 정상상태 유동대한 에너지보존식을 I 방향에 대해서 나타내면 다음과 같다

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j^{j'} + u_j(\tau_{ij})_{eff} \right)$$

여기서 k_{eff} 는 유효열전도도, J_j 은 구성 물질 j' 종의 확산 flux를 나타내며, 우변 괄호안의 세 항은 conduction, species diffusion, 및 viscous dissipation에 의한 열전달 효과를 나타낸다. $E = h - p/\rho + u_i^2/2$ 로 정의된다.

난류유동장은 일반적으로 알려진 바와 같이 불규칙적인 속도변화로 특징 된다. 난류유동장은 운동량, 에너지에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 난류모델에 대한 별도의 민감도 분석을 수행하지 않고, 일반적으로 비등방성 회전유동에 비교적 많이 사용되는 RNG standard $k-\epsilon$ model^[6,7,8,9]을 사용하였다.

3. 경계조건 및 해석 Case

그림 2에는 개념설계된 CEDM 냉각기의 기본도면 및 설치위치를 나타내었다. CEDM 냉각기의 주요 설계 특성은 CEDM 냉각기 12 개, 냉각기 유체 유속 1.1 m/sec, 냉각기 입구 최대온도 45 °C이며, CEDM의 정상 제어시 구동속도는 인출시 0.25 mm/sec, 삽입시 최대 2.0 mm/sec 이다. 그림에 나타난 12개의 CEDM 냉각기중 원자로용기로부터 가장 많은 열을 전달받는 CEDM은 고온부에 가장 가깝게 설치되어 있는, 원자로용기 헤드의 최외각에 위치한 CEDM들이다. 본 해석에서는 보수적으로 최외곽의 CEDM 냉각기를 해석대상으로 선정하였다.

CEDM 냉각기와 접해있는 경계는 원자로용기, 단열재, 가압기 등이 있다. 원자로용기 하단에는 가압기가 상단에는 단열재가 위치하며, 원자로용기는 고온의 원자로냉각재계통 냉각수와 접해 있다. 원자로용기는 원자로냉각재계통의 냉각수를 수용하고 있는 원자로용기 원통부 및 환형덮개와 가압기 및 중간공동을 수용하고 있는 중앙덮개로 구분된다. 원통부와 환형덮개의 재질은 열전도도가 좋은 carbon steel 이며 중앙덮개는 stainless steel이다.

최외곽 CEDM 냉각기는 중앙덮개 외곽으로부터 약 25 Cm 안쪽에 설치되며, 중앙덮개 외측은 고온의 원자로용기에 접해있으며 고온을 유지하며, 중앙덮개 내측은 CEDM 냉각기에 냉각된 저온을 유지한다. 즉 최외곽 CEDM 냉각기는 중앙덮개 외측의 고온부와 내측의 저온부가 경계 위치하므로 정확한 CEDM의 냉각용량을 평가하기 위해서는 좌우비대칭 온도분포를 경계조건으로 사용하여야 한다. 그러나 이러한 비대칭 효과를 고려하기 위해서는 원자로 상부공간의 전 영역을 모사해야 하므로 컴퓨터의 성능한계로 정확한 용량평가는 매우 어려운 실정이다. 또한 본 논문의 목적이 CEDM 냉각기의 정확한 용량평가가 아닌 볼베어링 온도요건의 만족여부를 평가하는 것이므로, 보수적인 가정을 도입하여 냉각기로부터 20 Cm 외곽 전체에 고온부가 위치한다고 가정하였다.

SMART 연구로의 가압기는 저온가압기로 가압기 상부에는 질소가스(질소가스 및 증기를 나타내며 이하 질소가스 또는 가스라 함)가, 하부에는 원자로냉각재계통의 냉각재가 위치한다. CEDM 냉각기 하단에 위치하는 가압기의 질소가스 및 냉각재의 온도는 가압기 냉각기에 의해 냉각되어 정상출력운전시 100°C이하가 유지되나, 가열운전 또는 냉각운전중에는 원자로냉각재계통의 냉각수 체적변화에 의한 팽창, 압축, 및 증기 분률 변화로 100°C이상으로 상승할 수 있다. 가압기 중앙공동의 평균온도는 특히 가열운전 모드와 같이 가스가 압축되어 압축열이 발생하고 있는 상황에서 180°C 이하가 유지된다^[10].

가압기의 상층부 질소가스는 고온의 원자로용기와 접해있어 가열되어 고온상태가 유지되며 가압기의 하단의 질소가스 및 냉각수는 가압기 냉각기에 의해 냉각되어 이보다

낮은 저온상태를 유지할 것으로 판단된다. 이러한 상태에서는 가압기 상층부와 하단부 사이의 자연대류는 원활히 이루어지지 않게 된다. 따라서 가압기 상층부는 고온의 질소가스가 정체되어 있는 상태로, 정체된 고온 질소가스에 의해 단열되고 있는 상태에 가까울 것으로 판단된다. 그러나 본 논문에서는 보수적으로 가압기 측 경계조건을 자연대류가 원활히 이루어지고 있는 300~180℃, 100 $W/(m^2 \cdot K)$ 으로 가정하여, 실제보다 과장된 가압기 상태에서 CEDM 냉각기가 블베어링 온도요건을 만족시키는지 여부를 평가하였다. 원자로용기의 상단은 단열재에 의해 단열처리 되므로 단열조건으로 설정하였다.

그림 3의 예는 격자에 대한 민감도 분석을 통해 선정된 해석격자를 나타내었다. 최외각 CEDM 냉각기에 대한 전산유체해석을 위해 그림 3과 같이 해석형상을 단순화하였다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 유체영역에는 세밀한 격자를 사용하고, 고체영역 외측에는 비교적 성긴 격자를 사용하였다. 유체영역 중 RNG $k-\epsilon$ 난류모델과 벽함수(wall function)을 사용한 CEDM 냉각기 유로의 벽면격자는 y^+ 를 기준으로 30~100를 기준으로 설정하였으며, 층류 유동 영역인 안내관 내측 유로는 격자민감도 분석을 통해 설정하였다. 격자는 약 1,738,500개의 노드로 구성된다.

표 2. 해석 Case 요약

Case	제어봉운전에 따른 유체평균		냉각기 하단 ³⁾		측면 온도 ⁴⁾ (℃)	CEDM 냉각기 ⁵⁾	
	속도 ¹⁾ (mm/sec)	온도 ²⁾ (℃)	가스온도 (℃)	열전달계수 (Watt/m ² k)		유속 (m/sec)	온도 (℃)
A	0.5	200	300	100	300	1.1	45
B	0.5	180	180	100	300	1.1	45
C	0.25	200	300	100	300	1.1	45
D	0.25	180	180	100	300	1.1	45

- 1) CEDM의 제어봉 삽입 및 인출에 따른 유체의 입출입을 고온의 유체가 유입되는 평균속도로 환산한 값임. 예) 0.25mm/sec 삽입인출반복 = 0.125 mm/sec로 고온유체 유입
- 2) 1)의 유입되는 유체온도를 보수적으로 가정한 값임
- 3) 가스와 원자로용기의 열전달계수 및 가스온도를 보수적으로 가정한 값임
- 4) 원자로용기의 온도를 보수적으로 가정한 값임
- 5) 냉각기 입구 유속은 정상적으로 공급되는 유속을, 온도는 보수적으로 기기냉각계통에서 공급하는 냉각수의 최대온도를 기준으로 함

본 논문에서는 경계조건을 보수적으로 설정하고 중앙공동 온도와 CEDM 냉각재 내측 안내관으로 유입되는 유체의 온도 및 속도를 변화시키며 해석을 수행하였다. 표 2의 Case A, C에서는 가압기 중앙공동온도를 보수적으로 가정하여 모사하였으며 Case B, D에서는 가압기 측의 온도를 실제현상에 근접하게 모사한 경우이다. 제어봉 삽입 및 인출에 따

라 안내관에서 유입되는 유체의 속도는 12.5~125%의 마진을 더하여 해석을 수행하였다.

4. 결과분석

원자로 정지신호가 발생하여 스프링에 의해 제어봉이 삽입되는 경우를 제외하면 SMART 연구로의 제어봉의 구동속도는 인출시 최대 0.25 mm/sec, 삽입시 최대 2 mm/sec이다. 본 논문에서는 CEDM이 최대속도로 삽입과 인출을 반복하고 있는 상황을 정상상태로 가정하여 모사한 것이다.

그림 4에는 표 2의 각 Case에 대하여 해석한 온도분포를 CEDM 냉각기의 중앙단면을 기준으로 나타내었다. Case A와 Case C는 가압기 중앙공동 온도를 300 °C로 보수적으로 가정하여 모사한 경우이며, Case B와 Case D는 가압기 중앙공동 온도를 운전중에 발생할 수 있는 최대치 180 °C로 모사한 경우이다. 제어봉의 삽입 및 인출에 따라 안내관으로 유입되는 유체의 평균속도는 발생 가능한 가장 빠른 경우에 대하여 Case A와 Case B는 약 12.5%의 마진을 더하고, Case C와 Case D는 약 125%의 마진을 더하여 해석한 경우이다.

그림 4(A)와 (B) 및 (C)와 (D)에서 안내관으로 유입되는 냉각수의 온도차와 중앙공동의 온도차는 안내관 내부의 온도분포에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다. 그러나 그림 4(A)와 (C) 및 (B)와 (D)에서 제어봉의 삽입 및 인출에 따라 CEDM 냉각기 내측 안내관으로 유입되는 유체의 유속변화는 안내관은 온도분포에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 평가되었다.

CEDM이 운전중에 원자로비상정지 신호가 발생하여 삽입되는 경우에 CEDM 냉각기 안내관의 유체가 저온상태를 유지하는 경우에는 볼베어링으로 유입되는 유체는 저온상태를 유지할 수 있으므로 SMART 연구로의 CEDM 냉각기 내측 안내관의 유체체적은 제어봉이 최상단에서 최하단까지 삽입될 때 볼베어링 주변으로 유입될 수 있는 유체체적의 약 2.5배를 수용할 수 있도록 설계하였다. 그림 4에서 Case A, B, C, D의 CEDM 냉각기 내측의 안내관 중앙의 최대온도는 각각 85, 80, 65, 60°C 내외로서 120°C이하를 유지하고 있어 이 상황에서 제어봉이 삽입되더라도 볼베어링으로 유입되는 유체는 120°C이하를 유지할 수 있다. 또한 본 논문에서 제어봉이 최대속도로 삽입 및 인출을 반복하고 있는 상황을 가정하여 해석한 경우이다. 이런 경우는 극히 발생하기 어려우며 실제 운전조건에서는 CEDM 내측 안내관으로 이보다 작은 평균 유속으로 유체가 유입될 것으로 판단되어 안내관의 유체는 상기 계산결과보다 낮은 온도를 유지할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 CEDM 냉각기에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 보수적인 가정을 도입하여 평가하였으며, 평가한 전 조건에서 CEDM 냉각기가 충분한 여유도를 갖고 볼베어링의 온도요건을 만족시키는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

SMART 연구로의 CEDM 냉각기 및 주변 구조물에 대하여 RNG $k-\epsilon$ 모델, 2차 상류도식, SIMPLE 알고리즘 등을 적용하고 비정렬격자를 사용한 3차원 전산열유체해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 본 논문에서는 CEDM 냉각기의 볼베어링 온도조건 만족여부를 평가하기 위해서 경계조건을 보수적으로 가정하고, 제어봉의 구동속도 및 가압기 중앙공동 온도 등의 경계조건을 변화시켜 평가하였다. 해석결과 가정한 전 조건에서 CEDM 냉각기가 충분한 여유도를 갖고 볼베어링의 온도 조건 120 °C를 만족시키는 것으로 평가되었다.
- 가압기 중앙공동의 온도는 CEDM 냉각기 내측 안내관 온도분포에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 평가되었다.
- CEDM 냉각기의 내측 안내관 온도분포는 제어봉 구동에 따라 CEDM 냉각기 내측 안내관으로 유입되는 유체의 유속에 민감한 것으로 평가되었다.
- 제어봉의 인출 및 삽입 평균속도가 0.5mm/sec로 움직이는 가상조건(정상 최대속도의 약 2.25배)에 대해서도 충분한 여유도를 갖고 볼베어링 온도조건을 만족하고 있다. 그러나 안내관으로 유입되는 유체의 유속변화는 상기한 바와 같이 안내관 온도분포에 매우 민감하므로 이 속도를 초과하여 운전되는 경우 비상정지시 볼베어링 온도조건을 만족하지 못할 가능성이 있으므로 주의를 요한다.
- 본 해석은 전산해석적 방법에 의한 것이므로 실제현상과 다소 차이를 보일 수 있으므로 실험을 통한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

Reference

1. SMART 연구로 원자로용기 설계도면, 2003
2. SMART 연구로 CEDM 냉각기 설계도면, 2003
3. 김영인 외, SMART 연구로 제어봉구동장치 냉각기 성능평가, KAERI/TR-2633/2003.
4. A. Bejan, "Convective Heat Transfer", Second Edition", Wiley, 1995
5. FLUENT user guide, 1998. 6.
6. V. Yakhot and S. A. Orszag, "Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory", Journal of Scientific Computing, 1(1), 3-51, 1986
7. V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski and C. G. Speziale, "Developments of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", Physics of Fluids A, 4(7), 1510-1520, 1992
8. S. A. Orszag, V. Yakhot, W. S. Flannery and F. Boysan, "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations", Near Wall Turbulent Flows, 1993
9. S. F. Lien and M. A. Leschziner, "Assesment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure", Computers and Fluids, 23(8):983-1004, 1994

10. 서재광 외, SMART 연구로 다공동 저온 가스압기 열수력 성능해석코드 PZRTR 개발, KAERI/TR-2632/2003

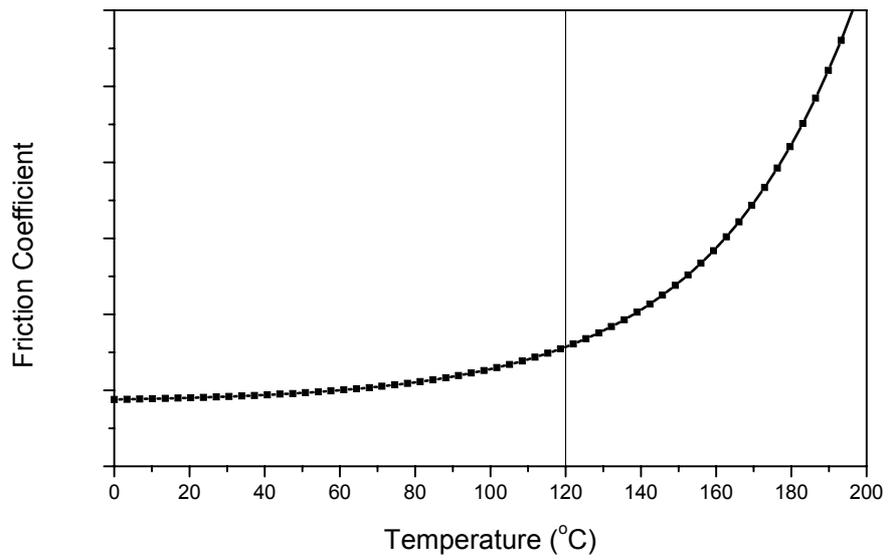


그림 1. 온도변화에 따른 볼베어링 마찰계수변화

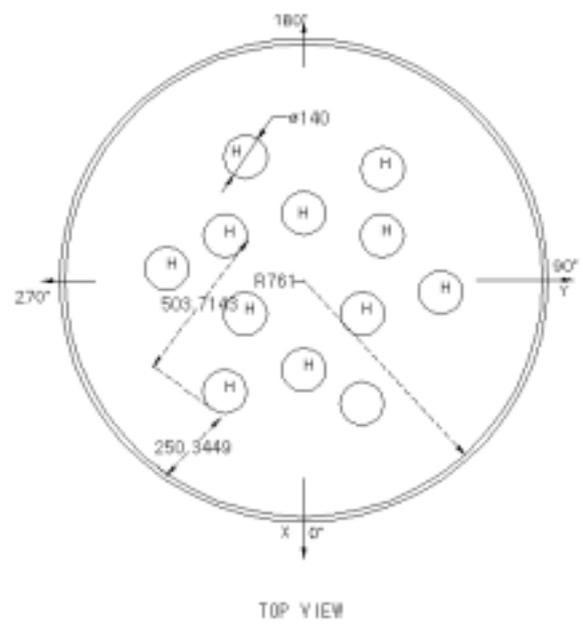
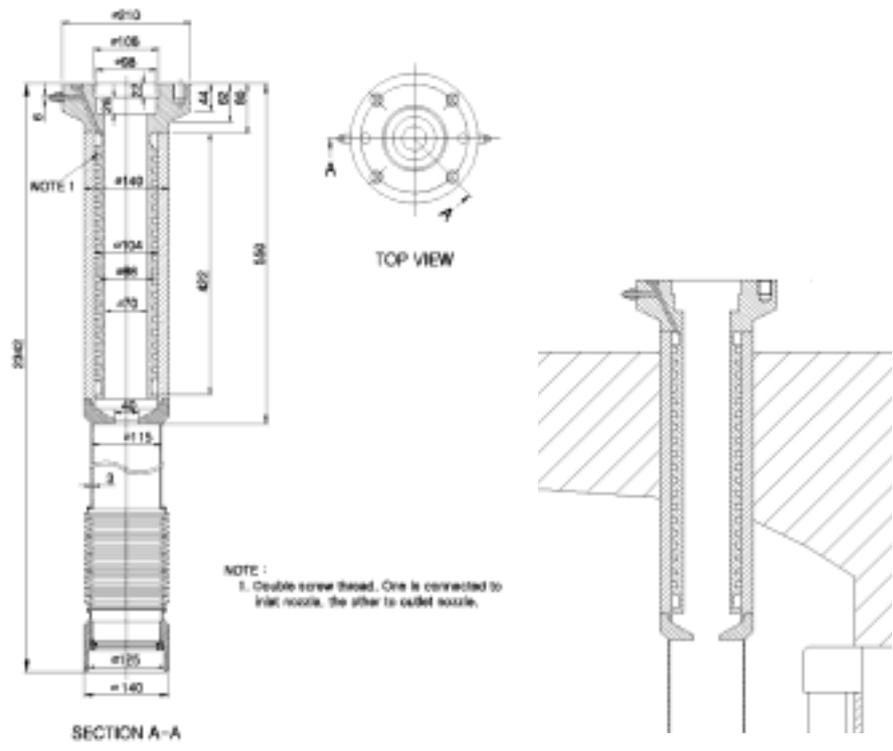
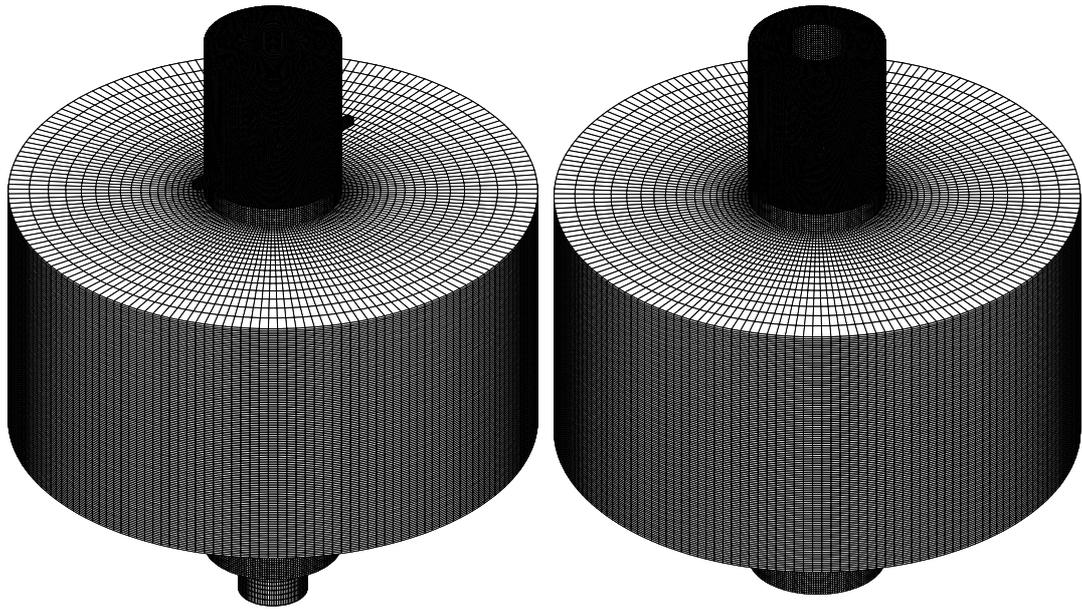
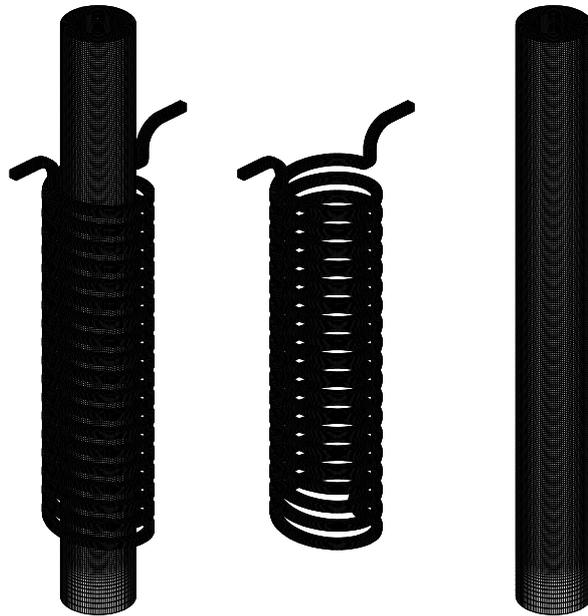


그림 2. CEDM 노즐기 도면



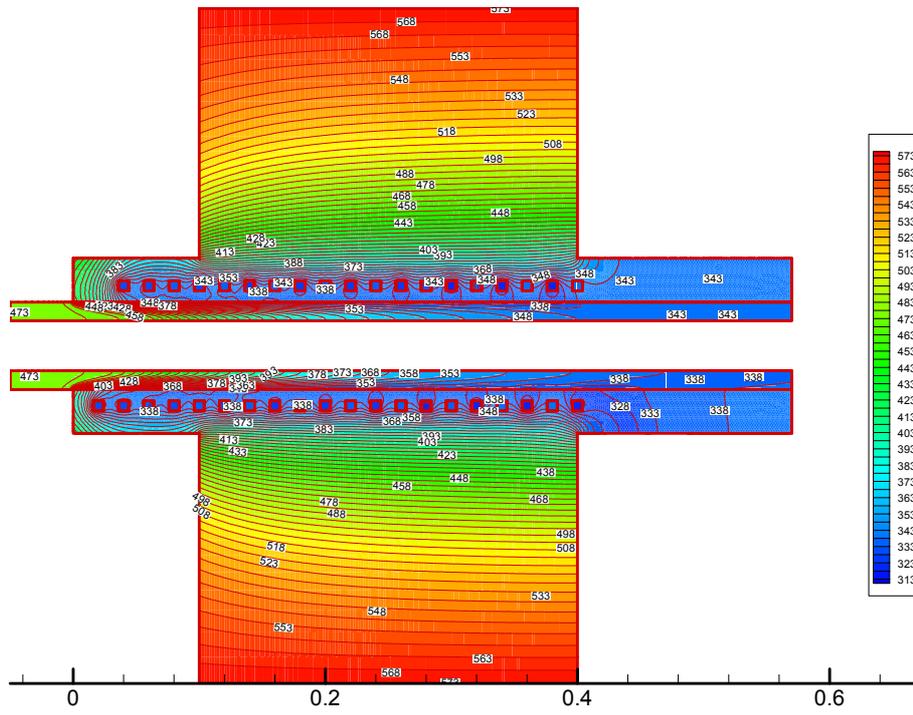
(A) 고체 및 유체

(B) 고체

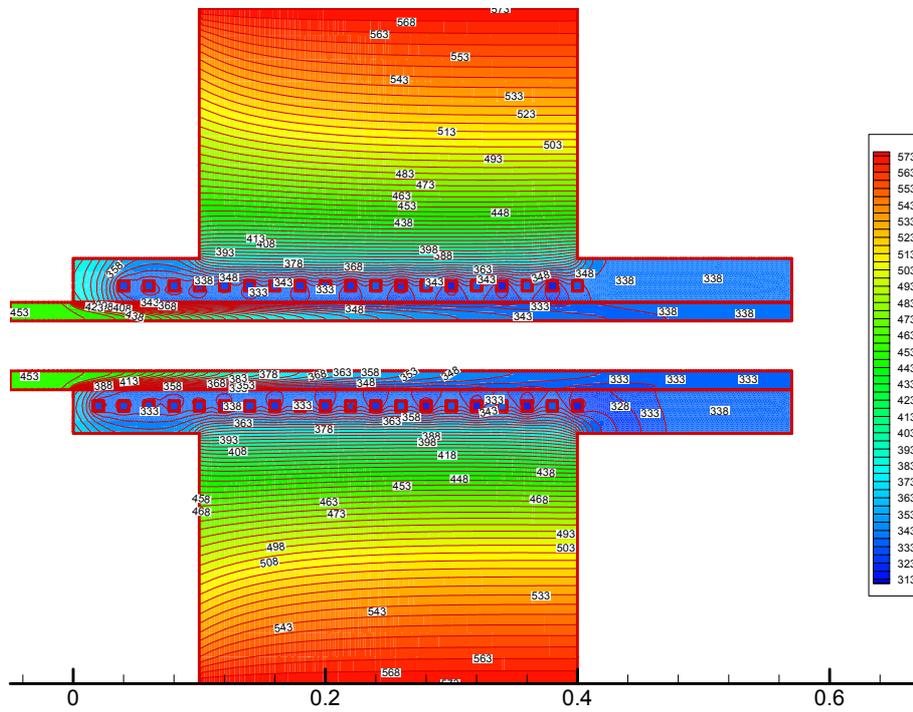


(C) 유체

그림 4. 3차원격자

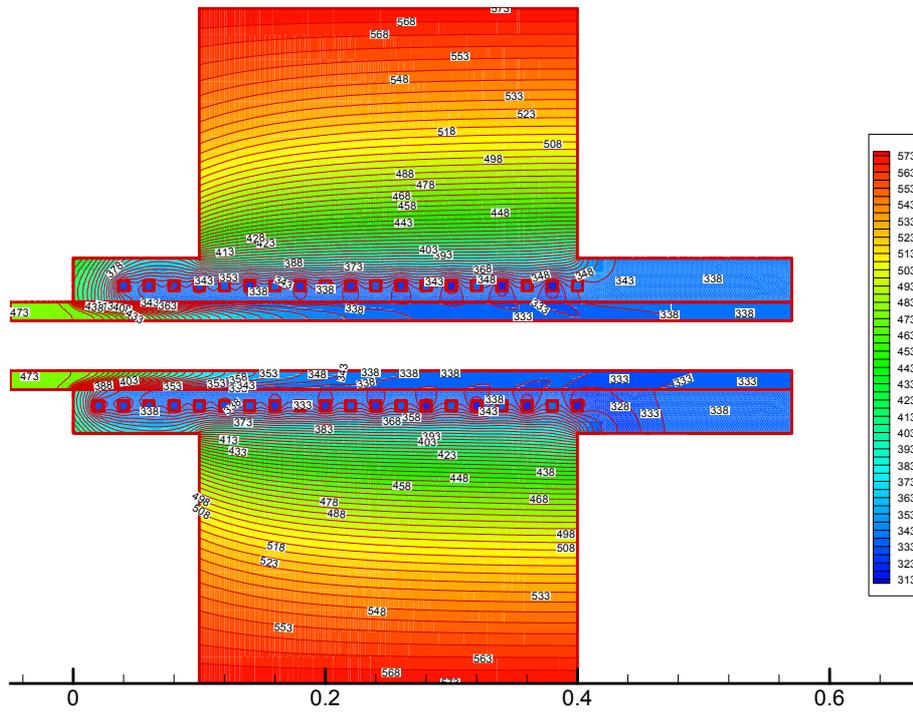


(A) Case A

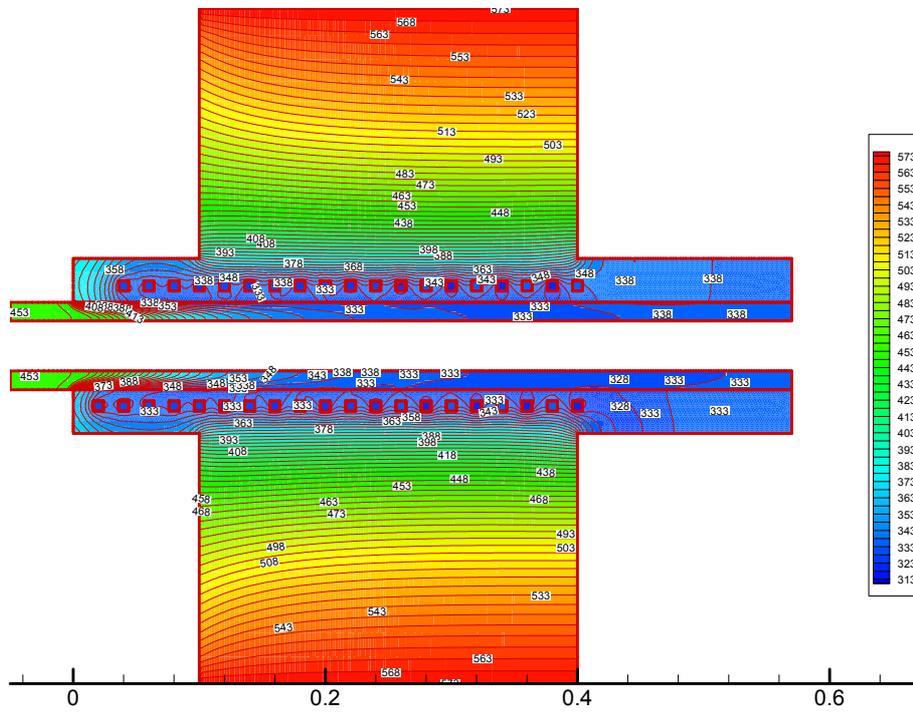


(B) Case B

그림 4. 온도분포(1/2)



(C) Case C



(D) Case D

그림 4. 온도분포(2/2)