

SMART 제어봉 구동장치 안내관에서의 열 전달 해석 모델

Analytical Heat Transfer Model for the CEDM Guide Tube of SMART

지대영, 김주평, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

환형 수직관 내에서의 해석적 열전달 모델이 제시되었다. McEligot, Raithby, Morgan는 실험을 통하여 가는 수직관 주변에서의 자연대류 열전달 상관식을 유도하였다. 본 해석 모델은 일체형원자로 SMART의 가압기 내에 있는 제어봉 구동장치 안내관 주변의 열전달 해석을 위하여 사용될 수 있다. 제어봉구동장치 연장봉을 통하여 안내관 내부로 전달된 열량이 안내관 주변에서 가압기 내부로 자연대류에 의해서 방출되는 과정을 통하여 열 전달량과 온도 분포를 해석하였다.

Abstract

A heat transfer model for annular vertical tube is proposed. McEligot, Raithby, Morgan presented the correlations of natural convection for the slender vertical cylinder. The analytic model is applied to the heat transfer of SMART CEDM(Control Element Driving Mechanism) guide tube. The heat is transferred to the self controlled pressurizer from the primary coolant which is maintained high temperature, via vertical CEDM guide tube. The heat transfer rate and coolant temperature gradient in the guide tube are analyzed.

1. 서론

SMART의 가압기 내에는 제어봉구동장치 구동에 필요한 안내관이 지나게 된다. 이 안내관 내에는 제어봉구동장치 연장봉이 설치되며 안내관과 연장봉 사이의 간격에는 일차계통 냉각수가 차여 있게 된다. 안내관의 하단부는 310℃의 냉각수가 지나며 가압기 내부는 100℃이하로 유지되므로 안내관 내부에서는 이 온도 사이에서 온도분포가 형성될 것이다. 이 온도 분포에 따라 가압기로 전달되는 열 전달량을 알 수 있게 된다. 본 해석의 목적은 제어봉구동장치로부터 가압기로 전달되는 열 전달량을 산정하여 가압기의 성능평가를 하기 위한 것과, 제어봉구동장치의 구동을 위하여 안내관 내 구동체 주변의 냉각재 온도가 180℃ 이하의 요건을 만족하는지 확인하는 데에 있다. SMART 가압기는 자기 가압 방식을 사용하여 출력변동에 따른 계통 압력의 변화를 흡수하며 정상 출력 운전 시 저운을 유지하도록 설계되어 있으며 가압기 하부에 액상의 물과 상부에 질소가스가 채워져 있다. 제어봉구동장치 안내관은 스테인레스 강 재질의 수직관으로서 안내관의 외

부에서는 가압기로의 자연대류 열 전달이 발생하게 된다. 문헌에 의하면 수직관 주변의 자연대류 열전달계수를 구하기 위하여 많은 실험이 행하여 졌으며 적절한 상관식이 도출되었다. 연장봉을 통하여 안내관 내부로 전달된 열량이 안내관 주변에서 가압기 내부로 자연대류에 의해서 방출되는 과정을 통하여 열 전달량과 온도 분포를 계산하였다. 계산 결과 안내관 내부의 냉각재 내에서 축 방향의 온도 분포의 변화는 거의 존재하지 않음에 따라 안내관 내부의 유체에서 자연대류는 발생하지 않고 대부분의 열 전달이 전도에 의존됨을 알 수 있었다. 안내관 내에서의 냉각수는 정상상태 경우에 101℃, 제어봉구동장치 삽입 모드에 대해서 139℃를 초과하지 않으므로 제어봉구동장치의 운전 요건인 180℃이하를 만족시킨다.

2. 해석 모델

2.1 가정 및 조건

해석에서 입력변수로 사용된 정격운전시의 제어봉구동장치 주변의 주요 운전변수 및 기하학적 변수는 각각 표 1, 표2와 같다.

표 1. 정격운전시의 주요 운전변수

원자로 정격출력	330 MWt
일차측 정상운전 압력	15 MPa
정상출력운전시의 냉각재 온도, 노심출구/노심입구	310/270 °C
가압기 내에서의 냉각수 및 가스의 온도	≤100 °C
제어봉구동장치 구동속도(정상운전/Prescram/Scram)	12/30/50 mm/s

표 2. 제어봉구동장치의 주변의 주요 기하학적 변수

제어봉구동장치 안내관의 외경	51/95 mm
제어봉구동장치 안내관의 내경	47/89 mm
제어봉구동장치 연장봉의 외경	40 mm
안내관 냉각재 두께(제어봉구동장치 안내관 내경과 연장봉 사이)	3.5 mm
외경, Ø51 안내관의 길이	2647 mm
가압기의 내부 높이	4112 mm

2.2 해석 방법

2.2.1 열 전달 경로

안내관 하부의 고온의 일차냉각수 열량이 안내관 내로 전달되는 경로는 제어봉구동장치의 연장봉이 정지 시에 스테인레스 강 재질의 연장봉을 통한 전도, 안내관 냉각재로의 전도, 안내관 냉각재 내에서의 대류로 나뉘어질 수 있다. 여기서 안내관 냉각재로의 전도는 물의 열전도율이 스테인레스 강에 비하여 1/20 이하이므로 무시하기로 한다. 또한 안내관 냉각재 내에서 자연대류의 존재 여부는 축 방향의 온도 분포 경향에 따라 결정되어지므로 이것은 해석 과정에서 상세히 다루고자 한다. 일단 안내관의 내부로 전달된 열량은 안내관 냉각재와 안내관 두께를 통하여 안내관 외벽으

로 전도되며, 여기서 다시 자연대류에 의해서 가압기 내의 유체로 전달되게 된다. 한편 제어봉구동장치가 원자로 내로 삽입될 때 제어봉구동장치 상부에서 냉각재의 체적 변화가 생김에 따라 일차계통 냉각수가 제어봉구동장치 안내관의 냉각재를 통하여 유입되게 된다. 이와 같은 열 전달 경로를 모델로 하여 제어봉구동장치가 정지하고 있는 경우 및 삽입되는 경우에 대해서 아래와 같이 정량적 해석을 하고자한다.

2.2.2 제어봉구동장치 연장봉의 정지 시 열 전달 및 온도분포

2.2.2.1 연장봉을 통하여 전도되는 열 전달

연장봉을 무한한 길이의 핀으로 가정하면 봉에서 안내관 냉각재로 열이 전달될 때의 온도분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[65].

$$d^2T_r/dx^2 - m^2(T_r - T_g) = 0$$

여기서, $m^2 = k_g \cdot P / t_g \cdot k_r \cdot A$

T_r = 연장봉의 표면온도

T_g = 안내관 냉각재의 중심온도

$\theta = T_r - T_g$ 로 놓으면,

$$d^2\theta/dx^2 - m^2\theta + d^2T_g/dx^2 = 0$$

여기서 안내관 냉각재의 온도, T_g 는 x 에 대한 변화가 작을 것으로 예상되어

$$d^2T_g/dx^2 \approx 0 \text{ 로 가정한다.}$$

본 가정에 대한 타당성은 계산 결과에서 다시 다루도록 한다.

따라서 위 식의 해는 다음과 같다^[66].

$$\theta = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx}$$

여기서, C_1, C_2 = 임의의 상수.

경계 조건, (1) $x = 0$ 일 때, $\theta = \theta_0 (= T_0 - T_g)$

(2) $x = \infty$ 일 때, $\theta = 0$

여기서, T_0 = 노심에서 나온 일차계통 냉각수의 온도(310℃)

$$(T_r - T_g) / (T_0 - T_g) = e^{-mx} \dots \dots \dots (1)$$

$$0 \leq x \leq 2.693 \quad \rightarrow \quad t_g = 3.5 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$2.693 < x \leq 4.112 \quad \rightarrow \quad t_g = 24.5 \times 10^{-3} \text{m}$$

연장봉(SUS 304 재질)의 열전도율, $k_r = 16.3 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$

주변길이, $P = 0.1257 \text{ m}$, 단면적, $A = 1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

연장봉으로 전달되는 총 열량은 다음과 같이 표시할 수 있다^[65].

$$q = (h_g \cdot P \cdot k_r \cdot A)^{1/2} \cdot (T_0 - T_g) \\ = \{(k_g / t_g) \cdot P \cdot k_r \cdot A\}^{1/2} \cdot (T_0 - T_g) \dots \dots \dots (2)$$

2.2.2.2 안내관의 두께를 통하여 전도되는 열 전달

안내관 내부에서 외부로의 열 전달은 안내관의 두께를 통한 열전도에 의해서 나타나며 원형 안내관에 대한 열 전달량은 다음과 같다^[65].

$$q = - k_t A_r dT/dr$$

$$q = - 2 \pi k_t r L dT/dr$$

경계조건, (1) $r = r_i$ 일 때, $T = T_i$

(2) $r = r_o$ 일 때, $T = T_w$

$$q = 2\pi k_t L (T_i - T_w) / \{\ln(D_o/D_i)\} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, k_t = 안내관의 열전도율

L = 안내관의 길이

T_i (T_w) = 안내관의 내부(외부) 온도

D_i (D_o) = 안내관의 내경(외경)

2.2.2.3 안내관 외부에서의 자연대류 열 전달

제어봉구동장치 안내관 외벽으로 전달된 열량은 가압기 내부의 100℃의 유체인 물과 질소 가스 영역으로 자연대류에 의해서 전달된다. 문헌에 의하면 가는 수직관의 외부에서 자연대류에 의하여 주변으로 열이 전달되는 경우에 대하여 많은 실험이 행하여 졌다. 대표적으로 McEligot, Raithby, Morgan은 각각 다음과 같은 상관식을 제시하였다^{[5.1][5.2]}.

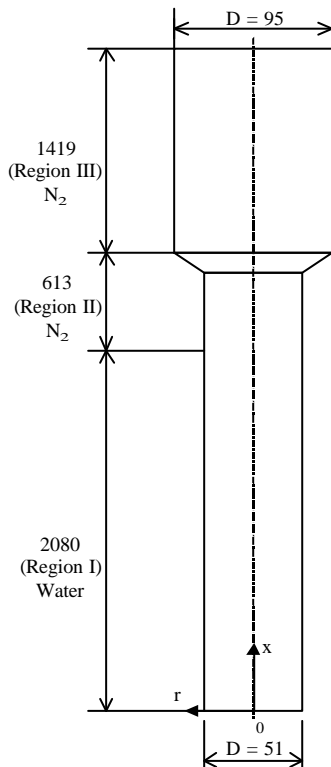
$$\text{McEligot Correlation : } Nu_D (T_w/T_\infty)^{0.14} = 0.15 Ra_D^{1/3} \dots \dots \dots (4)_{Mc}$$

$$\text{Raithby Correlation : } Nu_D = 1.8 [\ln\{1 + (17.48/Ra_D^{1/3})\}]^{-1} \dots \dots \dots (4)_{Ra}$$

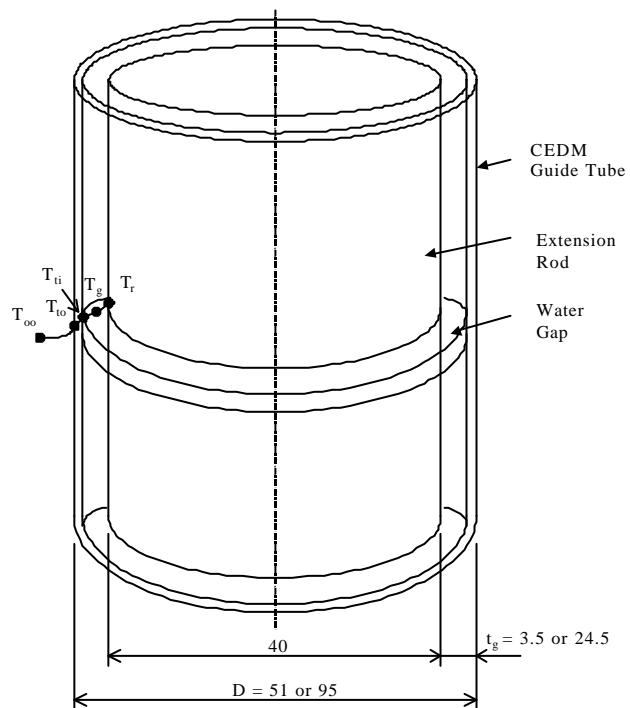
$$\text{Morgan Correlation : } Nu_D = 0.148 Ra_D^{1/3} \dots \dots \dots (4)_{Mo}$$

제어봉구동장치 안내관 외부에서의 자연대류 열전달계수를 구하기 위해서 다음과 같이 세 영역으로 나누어서 고려하였다(그림 1 참조).

- 안내관 외경, $\phi 51$ mm의 Water Region (Region I)
- 안내관 외경, $\phi 51$ mm의 N₂ Gas Region (Region II)
- 안내관 외경, $\phi 95$ mm의 N₂ Gas Region (Region III)



(단위 : mm)



(단위 : mm)

그림 1. 제어봉구동장치 안내관 및 자연대류 영역

그림 2. 안내관 내부 및 주변의 온도

각 영역에서 가압기 내부의 유체의 물성치와 안내관의 제원은 다음과 같다.

Region I

$$\begin{aligned}
 T_{\infty} &= 100 \text{ }^{\circ}\text{C}, & \rho &= 958.3 \text{ kg/m}^3, & \beta &= 2.68 \times 10^{-3} / \text{K}, \\
 C_p &= 4184 \text{ J/kg} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}, & \mu &= 2.85 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}, & k_{\infty} &= 0.6905 \text{ W/m} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 Pr &= 1.73, & D &= 0.051 \text{ m}, & L &= 2.08 \text{ m}, & A_s &= 0.3333 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Region II

$$\begin{aligned}
 T_{\infty} &= 100 \text{ }^{\circ}\text{C}, & \rho &= 0.9259 \text{ kg/m}^3, & \beta &= 2.68 \times 10^{-3} / \text{K}, \\
 C_p &= 1044.6 \text{ J/kg} \cdot \text{K}, & \mu &= 2.095 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}, & k_{\infty} &= 0.03142 \text{ W/m} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 Pr &= 0.697, & D &= 0.051 \text{ m}, & L &= 0.613 \text{ m}, & A_s &= 0.0982 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Region III

$$\begin{aligned}
 T_{\infty} &= 100 \text{ }^{\circ}\text{C}, & \rho &= 0.9259 \text{ kg/m}^3, & \beta &= 2.68 \times 10^{-3} / \text{K}, \\
 C_p &= 1044.6 \text{ J/kg} \cdot \text{K}, & \mu &= 2.095 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}, & k_{\infty} &= 0.03142 \text{ W/m} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 Pr &= 0.697, & D &= 0.095 \text{ m}, & L &= 1.419 \text{ m}, & A_s &= 0.4235 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

정의에 의하면 Rayleigh Number는 다음과 같다.

$$Ra_D = Pr \cdot \rho^2 g \beta D^3 (T_{\text{top}} - T_{\infty}) / \mu^2 \dots \dots \dots (5)$$

Nusselt Number, $Nu_D = h_{\infty} \cdot D / k_{\infty}$ 에서 대류열전달 계수,

$$h_{\infty} = Nu_D \cdot k_{\infty} / D \dots \dots \dots (6)$$

안내관 외벽으로부터 가압기로의 대류 열전달량,

$$q = h_{\infty} \cdot A_s \cdot (T_{\text{top}} - T_{\infty}) \dots \dots \dots (7)$$

2.2.2.4 열전달 평형

연장봉에서의 온도분포는 식(1)에서

$$\begin{aligned}
 (T_r - T_g) / (T_c - T_g) &= e^{-mx} \\
 0 \leq x \leq 2.693 &\rightarrow m_1 = \{0.6905 \cdot 0.1257 / (3.5 \times 10^{-3}) \cdot 16.3 \cdot (1.26 \times 10^{-3})\}^{1/2} \\
 &= 34.75 \\
 2.693 < x \leq 4.112 &\rightarrow m_2 = \{0.6905 \cdot 0.1257 / (24.5 \times 10^{-3}) \cdot 16.3 \cdot (1.26 \times 10^{-3})\}^{1/2} \\
 &= 13.13
 \end{aligned}$$

따라서 온도 분포는

$$\begin{aligned}
 (T_{r1} - T_g) / (310 - T_g) &= e^{-34.75x} \quad @ \quad 0 \leq x \leq 2.693 \\
 (T_{r2} - T_g) / (310 - T_g) &= e^{-13.13x} \quad @ \quad 2.693 < x \leq 4.112
 \end{aligned}$$

위 온도 분포 결과에서 알 수 있듯이 연장봉 표면의 온도는 $x = 0$ 에서 $T_r = 310^{\circ}\text{C}$ 를 경계로 하여 지수함수의 비율로 감소함에 따라 $x = 0.2\text{m}$ 에서 T_r 의 온도는 T_g 의 온도와 비교할 때 단지 2%의 차이를 나타내며 나머지 구간에 대하여 T_r 의 온도는 거의 변화하지 않는 경향을 갖게 된다. 이것은 안내관 냉각재에서의 온도 분포도 같은 경향을 갖게 되며 $x = 0.2\text{m}$ 이상의 구간에서 Water 간격에서의 온도는 균일하게 분포됨을 의미하게 된다. 따라서 간격 내에서의 자연대류 열 전달은 존재하지 않게 된다. 고온의 일차냉각수(310°C)로부터 연장봉로 전도되는 열 전달량은 가압기 내부의 세 영역을 통하여 자연대류에 의해서 전달되는 총 열량과 같으므로,

$$q(\text{conduction}) = q(\text{convection})_I + q(\text{convection})_{II} + q(\text{convection})_{III}$$

식(2)에서 연장봉로 전도되는 열 전달량은,

$$\begin{aligned} q &= \{(k_g/t_g) * P * k_r * A\}^{1/2} * (T_o - T_g) \\ &= \{(0.6905/3.5 \times 10^{-3}) * 0.1257 * 16.3 * 1.26 \times 10^{-3}\}^{1/2} * (310 - T_g) \\ &= 0.7137 * (310 - T_g) \end{aligned}$$

식(5)에서 Rayleigh Number,

$$\begin{aligned} Ra_D &= Pr * \rho^2 g \beta D^3 (T_w - T_\infty) / \mu^2 \\ &= 1.73 * (958.3)^2 * 9.81 * (2.68 \times 10^{-3}) * (0.051)^3 * (T_w - 100) / (2.85 \times 10^{-3})^2 \end{aligned}$$

식(4)에서 Nusselt Number를 구하면 앞의 세 상관식에 따라 그 값의 크기는 McEligot, Raithby, Morgan 상관식의 순으로 된다($Num_c = 50.5$, $Nu_{Ra} = 48.2$, $Nu_{Mo} = 34.0$). 계산의 보수성을 위하여 McEligot 상관식을 사용하여 계산하였다. 식(6)에서 구하여지는 대류 열전달계수를 이용하여 식(7)로 부터 안내관 외벽의 세 영역에 대한 대류 열 전달량을 구할 수 있는 식을 얻게 된다. 이제 식(2), (3), (7)의 열 전달 식으로 부터 반복계산법으로 전달 열량 및 각 부분에서의 온도를 구할 수 있게 된다.

2.2.3 제어봉구동장치 삽입 시의 온도 변화

2.2.3.1 제어봉구동장치 삽입 시의 안내관 냉각재 체적 변화

제어봉구동장치가 원자로로 삽입되는 경우에 연장봉의 삽입되는 체적에 해당하는 일차계통의 냉각수가 안내관 간격을 통하여 제어봉구동장치 안내관의 상부로 유입되게 된다. 일차계통의 냉각수는 고온(310℃) 상태이므로 안내관 내부의 냉각재 온도를 증가시키게 된다. 본 절에서는 제어봉구동장치가 삽입되는 운전 모드에 대해서 안내관 내부의 냉각재 온도 변화를 계산하고자 한다. 냉각재의 초기 및 삽입 후의 체적은 다음과 같이 계산된다(그림 3 참조).

초기 체적

안내관의 체적(V_G) :

$$(\pi/4) * (35^2 * 93 + 80^2 * 5107 + 47^2 * 2693) = 30,432,264 \text{ mm}^3$$

연장봉의 체적(V_E) :

$$(\pi/4) * (18^2 * 2983 + 40^2 * 4861) = 6,867,594 \text{ mm}^3$$

보수적인 계산을 위하여 안내관 내부의 제어봉구동장치 구조물의 체적을 ($V_G - V_E$)의 50%로 고려하면 냉각재의 초기체적은 다음과 같다.

$$0.5 * (30,432,264 - 6,867,594) = 11,782,335 \text{ mm}^3$$

삽입 시 체적 변화

제어봉구동장치 삽입 시의 유입되는 냉각수 체적 :

$$(\pi/4) * 40^2 * 2000 = 2,513,274 \text{ mm}^3$$

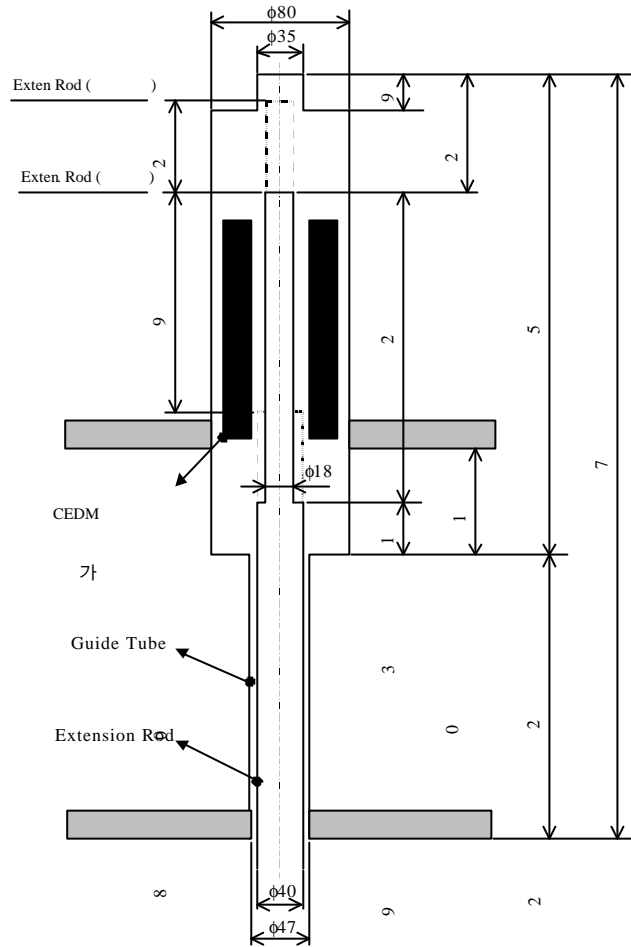


그림 3. 제어봉구동장치 삽입 시 안내관 냉각재 체적 변화

2.2.3.2 제어봉구동장치 삽입 시의 안내관 냉각재 온도 변화

제어봉구동장치 삽입에 따라 유입되는 일차계통 냉각수에 의해서 안내관 내부의 냉각재 온도는 상승하게 되며 이때의 열 평형식은 다음과 같다.

초기안내관 체적으로 전달되는 열량

= 안내관으로 유입되는 일차계통 냉각수가 전달하는 열량

$$C_{p_s} \cdot \rho_s \cdot V_s \cdot (T - T_i) = \dot{C}_{p_p} \cdot \rho_p \cdot V_p \cdot (T_p - T)$$

여기서, C_{p_s} , ρ_s , V_s , T_i : 안내관 냉각재의 초기 비열, 밀도, 체적 및 온도

C_{p_p} , ρ_p , V_p , T_p : 일차계통에서 유입되는 냉각수의 비열, 밀도, 체적 및 온도

$$4,218 \cdot 958 \cdot 11,782,335 \times 10^{-9} \cdot (T - 101) = 6,143 \cdot 691 \cdot 2,513,274 \times 10^{-9} \cdot (310 - T)$$

$$\therefore T = 139^\circ\text{C}$$

제어봉구동장치가 원자로로 삽입되는 운전 모드에 대해서 일차냉각계통의 냉각수가 안내관으로 유입되어 안내관 내의 냉각재의 온도는 139℃까지 증가하게 된다. 이 온도에 도달 후 냉각재는 가압기 및 제어봉구동장치 외부를 통하여 열 전달이 일어남에 따라 다시 101℃까지 냉각되게 될 것이다. 위 계산 과정을 통하여 알 수 있듯이 제어봉구동장치 내부 냉각재의 최고 온도는 139℃를 초과하지 않음에 따라 제어봉구동장치의 최대 허용 운전 온도인 180℃에는 크게 미치지 못하게 된다.

2.3 계산 결과

2.3.1 제어봉구동장치 정지모드/삽입모드에 대한 열전달량 및 온도 계산 결과

앞 절의 방법을 통하여 얻어진 계산 결과는 표 3, 그림 4, 5와 같이 정리할 수 있다.

표 3. 열전달량 및 열전달계수 계산 결과

계산 변수			계산 결과		
			영역 I	영역 II	영역 III
제어봉 구동장치 정지시	무차원 수	Rayleigh Number	3.4×10^7	2.4×10^6	1.6×10^4
		Nusselt Number	50.5	2.09	3.78
	대류 열전달 계수		683.8 W/m ² ·°C	1.29 W/m ² ·°C	1.25 W/m ² ·°C
	대류 열전달량		153.0 W	0.06 W	0.26 W
	총 열전달량		153.32 W		
제어봉 구동장치 삽입시	안내관 냉각재의 최대온도		139 °C		

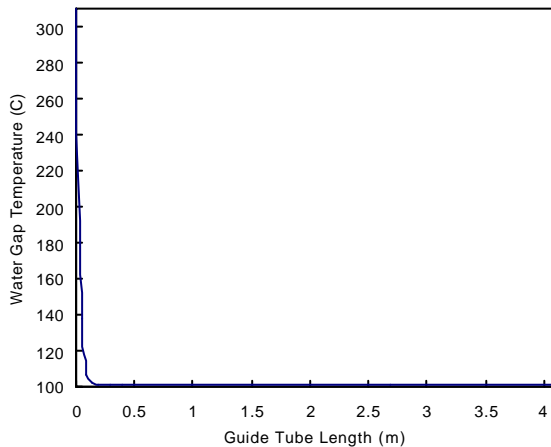


그림 4. 안내관 냉각재에서 축 방향의 온도 분포

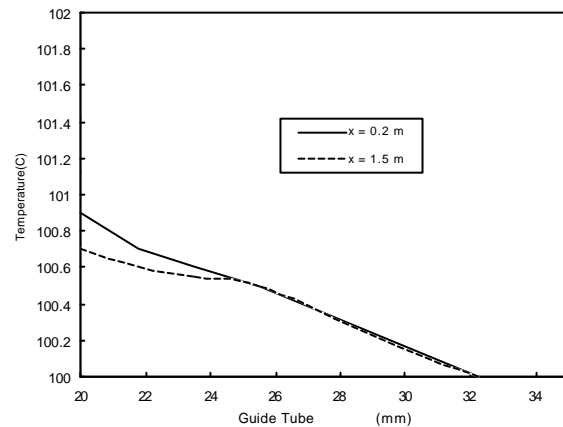


그림 5. 안내관 반경 방향의 온도 분포

3.3.2 제어봉구동장치 안내관 냉각재 온도에 대한 고찰

앞의 3.2.2.1절에서 연장봉을 통하여 전도되는 열 전달 방정식을 유도하는 과정에서 Water 간격의 온도, T_w 의 x 에 대한 이차도함수를 다음과 같이 가정하였다.

$$d^2T_w/dx^2 \approx 0$$

이제 그림 4의 계산 결과에서 알 수 있듯이 안내관 냉각재의 온도는 $x = 0.2$ m 이상의 구역에서 거의 변화하지 않고 있다. 이것은 안내관 냉각재가 안내관의 입구에서 만 온도 변화를 보일 뿐 거의 전 영역에 걸쳐 균일한 온도 분포를 나타내고 있음을 의미한다. 따라서 안내관 냉각재 온도의 x 에 대한 이차도함수를 영으로 가정하는 것은 전체적인 계산 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것이다.

3. 결론 및 고찰

제어봉구동장치 정지 시에는 일차계통 냉각수에 의해서 제어봉구동장치 안내관 내부로 전달된 열량이 안내관의 외벽을 통하여 가압기 내부의 유체로 전달되는 과정을 통하여 각 부분에서의 온도 분포 및 가압기의 물, 가스 영역에서의 자연대류 전달 열량을 구할 수 있었다. 연장봉과 안내관 사이의 안내관 냉각재에서의 축 방향의 온도 분포는 $x = 0.2$ m 이상에서는 균일하게 나타남에 따라서 간격에서의 자연대류에 의한 열 전달은 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 열 전달의 경로는 스테인레스 강 재질의 연장봉을 통하여 안내관 내부로 전도에 의해서 유입된 열량이 안내관 내부에서의 반경 방향으로 이루어지는 온도 구배를 통하여 안내관의 외벽으로 전도에 의해서 유출하게 된다. 안내관의 외벽에서는 저온 가압기의 유체 층(액상의 물과 질소가스)으로 자연대류 열 전달로 이동하게 된다. 이때 전달된 열량은 153.32 W가 되며 안내관 냉각재에서의 온도는 $x = 0.2$ m 이상의 모든 영역에서 101℃를 초과하지 않았다. 이것은 제어봉구동장치의 최대 허용 운전 온도인 180℃에 훨씬 미치지 못하는 값이다. 한편 제어봉구동장치가 원자로에 삽입 시에는 연장봉의 삽입 체적에 해당되는 일차냉각계통의 냉각수가 안내관 내부로 유입됨에 따라 안내관 내부의 냉각재 온도를 상승시킨다. 그러나 이 경우에 냉각재의 온도는 139℃에 도달 후 정상 상태의 온도 조건으로 냉각되므로 제어봉구동장치의 운전 요건을 만족시키게 된다.

후기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] D. M. McEligot, et. al., "Natural Convection between a Vertical Cylinder and a Surrounding Array", International Topical Meeting on Nuclear reactor thermal Hydraulics, Salt Lake City, Utah, 21-24 September 1992.
- [2] Raithby and Hollands, Natural Convection, Handbook of Heat Transfer Fundamentals, 2nd Ed., New York: McGraw-Hill, 6-1 to 6-94, 1985.
- [3] D. L. Siebers, et. al., "Experimental, Variable Properties Natural Convection from a Large, Vertical, Flat Surface", J. of Heat Transfer, 107, 124-132, 1985.
- [4] H. R. Nagendra, et. al., "Free Convection Heat Transfer from Vertical Cylinders and Wires", Chemical Engineering Science, Vol. 24, pp. 1491-1495, 1969.
- [5] J. P. Holman, Heat Transfer, 4th Edition, McGraw-Hill, 1976.
- [6] A. J. M. Spencer, Engineering Mathematics, Vol 1, ELBS, 1978.
- [7] R. H. Sabersky, Fluid Flow, 2nd Edition, Macmillan, 1971.
- [8] 신형원자로 기술개발, KAERI/RR-1883/98, 1998.
- [9] 강연문, "SMART의 Heatup시 자기가압기의 영역별 온도 및 계통압력 변화 해석과 습식 단열재 및 냉각기 크기 계산" KAERI/TR-1253/99, 1999.
- [10] 강연문, "SMART 자기가압기 Intermediate Cavity의 온도 성층화 현상을 고려한 계통압력 및 영역별 온도 해석" KAERI/TR-1254/99, 1999.