

일체형원자로 피동잔열제거계통의 복수기 전열면적 산정

Calculation of Heat Transfer Area of PRHRS Condenser in Integral Reactor

강연문, 김환열, 김주평, 지대영, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로인 SMART의 피동잔열제거계통은 설계기준사고시 원자로의 잔열을 제거한다. 피동잔열제거계통은 비상냉각탱크, 복수기, 보상탱크 및 연결배관으로 구성된다. 사고가 발생되면 이차계통으로 연결되는 급수 및 증기 배관이 차단되고 피동잔열제거계통이 정렬되어 잔열제거 운전이 시작된다. 이때 피동잔열제거계통의 루프내 유동은 이상 자연순환유동으로 증기발생기에서는 과열증기가 발생하며 복수기에서 과냉각액으로 상변환된다. 본 연구는 피동잔열제거계통의 운전시 증기발생기에서 발생하는 과열증기를 과냉각으로 변환시키는데 필요한 복수기 열전달면적을 산정한 것으로 급수온도, 복수기 튜브 길이 및 내경 등에 따른 영향을 평가하였다.

Abstract

Passive Residual Heat Removal System(PRHRS) of the integral reactor, SMART, has a function of removing the residual heat in the reactor in case of design basis accidents. It consists of a emergency cooldown tank, a condenser, a compensating tank, and the connecting pipings. When an accident occurs, the main feedwater and steam lines connected to the secondary system are isolated and the PRHRS gets into operation to remove the residual heat. During the operation, the superheated steam is formed at the exit of the steam generator and the subcooled water is formed at the exit of the condenser. Therefore a two phase natural circulation flow occurs in the loop of the PRHRS. This study presents the sizing calculations of the heat transfer area which is required to change the superheated steam into the subcooled water in the condenser. The effects of the feedwater temperature, the condenser tube length and inside diameter on the heat transfer area are evaluated.

1. 서론

한국원자력연구소에서 설계중인 일체형원자로는 비상 원자로 정지의 경우 노심의 잔열을

제거하기 위해 피동잔열제거계통을 사용한다. 피동잔열제거계통은 그림 1과 같이 증기발생기, 열교환기 및 비상냉각탱크, 보충수 탱크, 그리고 연결배관 등으로 구성되며 일차계통의 잔열이 증기발생기로 전달된 뒤 복수기를 통해 외부로 제거되도록 설계된다. 피동잔열제거계통은 단일고장을 고려하여 설계되며 총 4개의 계열로 구성된다. 이 중 2개의 계열만으로 노심의 잔열을 100% 제거할 수 있다.

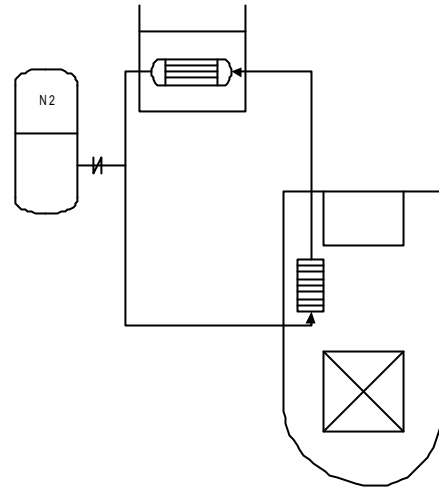


그림 1 PRHRS 개략도

피동잔열제거계통은 운전정지시 보충수탱크와 루프의 압력차, 그리고 증기발생기와 복수기의 급수 밀도차에 의한 피동력에 의해 작동된다. 피동잔열제거계통의 루프는 운전정지시 Plant Control Signal에 의해 주중기, 주급수 배관의 밸브가 자동으로 닫히고 피동잔열제거계통의 배관이 자동적으로 개방 정렬이 되면서 운전된다.

피동잔열제거계통은 이상유동 자연순환 Loop를 이루는데 과냉각액의 상태로 증기발생기로 유입되며 일차계통으로부터 전달되는 열에 의해 상변환을 일으키며 과열증기의 상태로 증기발생기 출구를 빠져나오게 된다. 증기발생기 출구를 빠져나온 과열증기는 복수기를 통해 다시 과냉각액으로 상변환되며 이때 일차계통의 열을 비상냉각탱크로 전달한다.

본 연구에서는 이차측의 주급수 상실상고시 원자로의 잔열을 제거하는 피동잔열제거계통의 복수기의 열전달 면적을 구하였다. 증기발생기와 복수기에서의 열전달계산을 위하여 단상 및 이상의 자연순환 열전달계수를 사용하였으며 복수기의 냉각튜브 구조에 따른 열전달 면적을 구하였다.

2 피동잔열제거계통의 자연순환 해석 모델

피동잔열제거계통은 그림 1과 같이 증기발생기, 열교환기 및 비상냉각탱크, 보충수 탱크, 그리고 연결배관 등으로 구성된다. 증기발생기와 열교환기에서는 tube 안과 밖에서의 열전달과 압력강하 모델링이 필요하며 보충수 탱크 및 연결배관에 대해서는 압력강하만이 고려된다.

증기발생기의 shell side는 일차측과 접해있으며 자연대류에 의해 열전달이 발생하며 상변환은 발생하지 않는다. 따라서 일차측에서 증기발생기로 전달되는 열과 자연순환 유량 및 온도차는 다음과 같은 단상의 자연순환 관계식으로 표현된다[1].

$$m_w = \left[\frac{2b \dot{Q}_H g \Delta L}{\bar{C}_p R} \right]^{1/(3-n)} \quad (1)$$

$$n\dot{Q}_w = \left(\frac{2b\Delta T_H g\Delta L}{R} r_0^2 \right)^{1/(2-n)} \quad (2)$$

$$T_c = T_h - \Delta T_H \quad (3)$$

여기서 지수에 포함된 상수 n 은 유동 양식에 따라 결정되는 값으로 층류 유동에서는 1이며 난류 유동일때는 0.2의 값을 가진다.

본 계산에서는 원자로의 잔열과 hot leg 온도가 주어지므로 식 (1)을 사용하여 자연순환 유량을 구한 뒤 식 (2)와 (3)을 사용하여 cold leg의 온도를 구한다. 단 물성치가 cold leg의 온도에서의 값이므로 반복계산을 통해 hot leg의 온도를 만족시켜야 한다.

일차측에서 자연순환에 의해 제거되는 열은 증기발생기 tube 내의 물로 전달된다. 이때 증기발생기 내부의 물은 보충수 탱크에 적재되어 있던 것으로 그림 2와같이 증기발생기 입구에서는 과냉각액이며 출구에서는 과열증기로 변환된다.

일차측에서 전달된 열은 증기발생기 tube를 지나면서 과냉각액인 급수가 포화액, 포화증기, 과열증기의 순서로 상변환 되는데 사용된다. 따라서 에너지 보존에 의해 일차측에서 전달된 에너지는 이차측 급수의 상변환 단계에 사용된 열량의 합이 되므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c + \dot{Q}_s + \dot{Q}_v \quad (4)$$

여기서 \dot{Q}_h , \dot{Q}_c , \dot{Q}_s , \dot{Q}_v 는 각각 일차측에서 전달된 잔열, 과냉각액이 포화액에 도달되기 위해 필요한 열량, 포화액이 포화증기로 변환되기 위해 필요한 열량, 그리고 포화증기가 과열증기로 변환되는데 소모된 열량을 의미한다.

한편, 증기발생기의 총 전열면적은 위의 에너지 보존식에 나타난 각각의 항에 해당하는 열전달 면적의 합과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{sc} = A_c + A_s + A_v \quad (5)$$

그리고 각각의 열전달 면적은 각 단계에서 필요한 열량과 종합열전달계수 및 평균온도차를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$A_f = \frac{\dot{Q}_f}{U_f \Delta T_{m,f}} \quad (6-1)$$

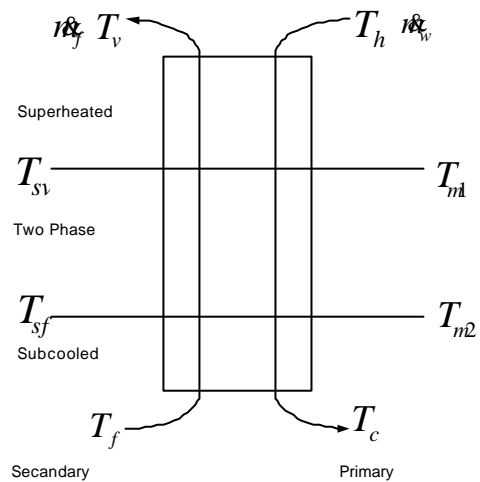


그림 2. 증기발생기 부분에서 일/이차측의 온도분포

$$A_{2j} = \frac{\mathcal{Q}_{2j}}{U_{2j} \Delta T_{m,2j}} \quad (6-2)$$

$$A_s = \frac{\mathcal{Q}_s}{U_s \Delta T_{m,v}} \quad (6-3)$$

여기서, 증기발생기 내부의 급수가 상변환하기 위해 필요한 열량은 일차측의 shell side에서 전달되어야 하므로 이차측의 유량과 온도, 일차측의 유량과 온도분포로부터 다음과 같은 상관관계를 만족해야한다.

$$\mathcal{Q}_f = \dot{m}_f (i_{sat,f} - i_f) = \dot{m}_w (i_{m1} - i_c) \quad (7-1)$$

$$\mathcal{Q}_{2j} = \dot{m}_f \cdot i_{fg} = \dot{m}_w (i_{m2} - i_{m1}) \quad (7-2)$$

$$\mathcal{Q}_s = \dot{m}_f (i_v - i_{sat,v}) = \dot{m}_w (i_h - i_{m2}) \quad (7-3)$$

증기발생기 출구의 과열증기가 갖는 에너지는 튜브 입구의 과냉각액이 갖는 에너지에 일차측으로부터 전달받은 에너지를 더한값이 된다. 따라서, 과열증기의 엔탈피는 과냉각액의 엔탈피, 일차측의 열전달량, 그리고 급수유량으로부터 아래식과 같이 계산할 수 있다. 한편, 과열증기의 온도는 증기발생기 튜브내의 압력과 엔탈피로부터 증기표를 사용하여 구할 수 있다.

$$i_v = i_f + \frac{\mathcal{Q}_H}{\dot{m}_f} \quad (8)$$

한편, 식 (6)에 사용된 평균온도차는 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta T_{m,f} = \frac{(T_{m1} - T_{sf}) - (T_c - T_f)}{\ln[(T_{m1} - T_{sf}) / (T_c - T_f)]} \quad (9-1)$$

$$\Delta T_{m,2j} = \frac{(T_{m2} - T_{sv}) - (T_{m1} - T_{sf})}{\ln[(T_{m2} - T_{sv}) / (T_{m1} - T_{sf})]} \quad (9-2)$$

$$\Delta T_{m,v} = \frac{(T_h - T_v) - (T_{m2} - T_{sv})}{\ln[(T_h - T_v) / (T_{m2} - T_{sv})]} \quad (9-3)$$

위의 식들에서 $T_{m1} = T_{m,c} = T_{m,h}$ 이다. 그리고, 위의 식들에 포함된 일차측 온도는 과열증기의 온도를 구하는 방법과 마찬가지로 식 (7)의 엔탈피로부터 증기표를 통해 결정된다.

한편, 종합열전달 계수는 shell side에서의 자연대류 열전달계수와 tube에서의 열전도, 그리고 tube 내부에서의 자연대류 열전달계수들로부터 결정된다. 본 계산에서 일차계통에서 증기발생기로 전달되는 열량을 평가하기 위해서 사용된 열전달계수는 단상의 자연대류 열전달계수와 비등 열전달계수이다. 그리고, 관류식 증기발생기의 나선형 구조에 의한 와류효과를

보정하기 위해 중배계수를 사용하였다. 아래의 식들은 본 계산에 사용된 열전달계수 상관식과 와류효과의 보정을 위한 중배계수를 나타낸다.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = 0.021(Gr \cdot Pr)^{0.4} \quad : \text{단상유동 자연대류 열전달계수} \quad (10-1)$$

$$h = 2.615D + 04 \quad : \text{비등 열전달계수} \quad (10-2)$$

$$z = 1.0 + 0.34 \frac{D_o}{D_c} \quad : \text{와류효과 보정을 위한 중배계수} \quad (10-3)$$

잔열제거계통의 복수기에서 비상냉각탱크로의 열전달은 증기발생기 부분에서의 열전달과 반대과정으로 진행된다. 즉 과열증기가 포화 증기, 포화액을 거쳐 과냉각액으로 상변환된다. 따라서, 증기발생기의 비등 열전달계수 대신 복수기튜브의 응축열전달계수를 사용하면 위에서 설명된 증기발생기부분의 열전달과 같은 순서로 복수기부분의 열전달을 계산할 수 있다. 그리고, 복수기튜브 내의 응축열전달계수는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$h = 0.5h_{fc} \left(\sqrt{1 + x_{in} \left(\frac{r_f}{r_g} - 1 \right)} + \sqrt{1 + x_{out} \left(\frac{r_f}{r_g} - 1 \right)} \right) \quad : \text{응축 열전달계수} \quad (10-4)$$

잔열제거계통의 증기발생기와 복수기 부분에서의 열전달 계산상의 차이점 및 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- ◆ 일차측과 접하는 증기발생기튜브 shell side의 온도분포는 자연순환에 의해 급수의 유동방향으로 점차 큰 값을 갖지만 복수기 튜브 외부의 온도분포는 비상냉각탱크의 온도로 일정한 값을 갖는다.

- ◆ 증기발생기부분은 주어진 열전달면적에 해당하는 열전달량을 계산하는 것이 목적인 반면 복수기부분은 주어진 열량을 제거하기 위해 필요한 열전달면적을 구하는 것이 목적이다.

- ◆ 증기발생기의 경우 과열증기가 형성되면 shell side의 온도가 높으므로 상변환이 발생하지 않는다. 그러나, 복수기 튜브내에 과열증기가 유입되는 경우 복수기 외부의 온도가 낮으므로 복수기 튜브 안쪽면의 온도가 포화온도 이하로 낮아져 bulk는 과열증기상태를 유지하면서도 응축이 발생할 수 있다.

3. 피동잔열제거계통의 자연순환 해석 절차

본 계산은 일차계통에서 생성되는 원자로의 잔열출력, 그리고 증기발생기의 입구 온도를 설정하고 이때 발생하는 과열증기를 모두 과냉각액으로 응축할 수 있는 복수기의 면적과 이에 해당하는 자연순환 유량을 만족할 수 있는 허용 압력강하를 계산하였다.

피동잔열제거계통의 자연순환 열전달 및 유량을 평가하기 위해서는 먼저 원자로의 잔열과 일차측의 geometry 값을 사용한 자연순환해석을 통해 일차측의 온도분포를 구하여야 한다. 일차측의 온도분포를 구한 후 증기발생기로 유입되는 급수량을 가정하고 일차측의 잔열

전달에 의해 생성되는 과열증기의 최종온도 및 포화온도를 계산하여 증기발생기 부분에서의 LMTD를 구한다.

다음으로 가정한 급수유량과 일차측의 자연순환해석을 통해 구한 유량으로부터 식 (7)을 사용하여 급수의 변환 단계별로 소모되는 열량을 구한다. 그리고 식 (6)을 사용하여 각 단계마다 필요한 열전달 면적을 계산하고 이를 합하여 증기발생기의 실제 열전달면적과 비교한다. 만일 $A_{SG} > A_f + A_y + A_s$ 이면 가정했던 급수유량을 감소시킴으로써 열전달이 적은 과열증기영역의 열전달면적 비율을 높이고, 반대로 $A_{SG} < A_f + A_y + A_s$ 이면 급수유량을 증가시켜 열전달이 큰 비등열전달 영역의 비율을 크게 하여 $A_{SG} = A_f + A_y + A_s$ 를 만족하도록 한다. 이때, 각각의 열전달면적은 모두 0이상이 되어야 하며 SG 출구의 증기는 과열증기가 되어야 한다.

급수유량을 조절하여 열전달면적이 일치되면 생성된 과열증기와 유량으로부터 식 (11)을 사용하여 부력과 압력강하의 크기를 비교한다. 만일 압력강하가 부력보다 크면 자연순환유동이 발생하지 않으므로 SG와 복수기의 높이 차를 증가시켜야 하며 부력이 압력강하보다 크면 그 차이가 복수기와 연결배관의 설계 및 제작시 허용되는 압력강하의 크기가 된다.

복수기의 열전달면적은 비등열전달계수 대신에 응축열전달계수를 사용하고 식 (6)을 사용하여 각 단계별로 열전달면적을 산출한다. 계산된 열전달 면적을 복수기 냉각튜브의 내/외경과 길이를 사용하여 필요한 튜브의 개수가 산정된다. 한편, 복수기에서의 열전달을 계산하기 위해서는 냉각튜브의 열전달계수가 필요하다. 그런데 냉각튜브에서의 열전달계수는 튜브내의 유량과 관계되고 유량은 냉각재의 튜브수에 따라 달라진다. 따라서 복수기의 열전달 면적을 산정하기 위해서는 먼저 튜브수가 결정 되어야한다. 따라서, 먼저 복수기의 튜브수를 가정하고 복수기 튜브의 열전달계수를 구하며 이로부터 필요한 열전달면적을 구한다. 이렇게 구해진 열전달면적은 가정한 튜브수로부터 계산되는 튜브 면적과 비교하며 두 값이 같아 질때까지 반복계산을 수행한다.

4. 피동잔열제거계통 복수기 전열면적 계산

본 연구에서는 일체형원자로 피동잔열제거계통 복수기 전열면적을 계산하였다. 표 1은 본 연구에서 사용된 피동잔열제거계통의 입력자료를 나타낸다. 피동잔열제거

표 1 주요 입력자료

변수	값
피동잔열제거계통 1계 열당 제거열량, MW	4.95
일차측 압력, MPa	14.7
일차측 고온부 온도, °C	310
피동잔열제거계통 압력, MPa	3.5
비상냉각탱크 온도, °C	30
증기발생기 중심과 복수기 중심의 높이차, m	4
복수기 튜브 내경/외경, m	0.015/0.018, 0.013/0.018
복수기 튜브 길이, m	2, 3, 4, 5
증기발생기 급수 온도, °C	100, 142.5

계통의 총 제거열량은 정격출력인 330Mw의 3%인 9.9MW이며 이를 2개의 계열을 사용해 제거한다. 따라서 1개의 계열당 설계용량은 4.95Mw이다. 그리고, 비상 냉각탱크의 온도는 30℃로 유지된다고 가정하였다. 한편, 피동잔열제거계통의 증기발생기 급수온도는 증기발생기의 입구에서 비등에 의한 과도한 압력강하가 발생하지 않도록 충분한 과냉각도를 유지할 필요가 있으므로 포화온도보다 100℃이상 낮은 142.5℃와 100℃의 2가지 경우를 적용하였다.

그림 3은 0.013m의 튜브 내경일경우에 대해 복수기의 튜브 길이 및 급수온도 변화에 따른 전열면적을 계산한 결과이다. 급수온도가 142.5℃와 100℃인 두 가지 경우 모두 튜브의 길이가 증가함에 따라 복수기의 필요 열전달면적이 감소하는 것을 보여준다. 튜브의 길이가 증가하면 일정한 열전달면적을 확보하기 위해 필요한 튜브의 수가 감소하므로 한 개의 튜브당 흐르는 급수량이 증가하게 되며 이로 인해 열전달계수가 증가한다. 따라서 복수기의 필요 열전달 면적은 감소하

게 되는 것이다. 따라서, 복수기의 열전달면적을 감소시키기 위해서는 가능한 튜브의 길이를 증가시키는 것이 유리하다. 하지만, 복수기 튜브의 길이를 증가시키는 경우에는 튜브내에서의 압력강하가 커지므로 충분한 유량이 형성되지 않을 수 있다. 따라서 복수기의 튜브 길이는 사용가능한 공간적 제약 및 압력강하

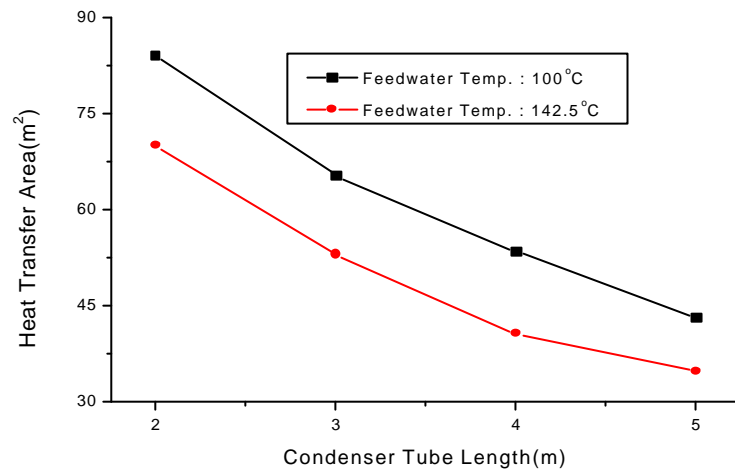


그림 3 복수기 튜브 길이 및 급수온도 변화에 따른 전열면적(복수기 튜브 내경 : 0.013 m)

정도를 고려하여 결정되어야 한다. 그리고, 급수의 온도가 142.5℃인 경우 필요한 열전달면적이 100℃인 경우보다 적게 계산되었다. 급수의 온도가 낮은 경우에 복수기의 필요 열전달면적이 증가하는 이유는 증기발생기에서의 열전달 특성과 복수기 튜브에서의 열전달 특성에 기인한다. 일체형 원자로의 관류형 증기발생기의 경우 피동잔열제거계통의 운전과 같은 저유량운전 시에는 충분히 큰 열전달면적으로 인해 일차측의 고온부 온도에 매우 가까운 정도의 과열증기가 형성된다. 따라서, 저유량 운전시 출구의 과열증기 온도는 다소의 유량차이와 상관없이 일정한 값을 갖게 된다. 따라서, 열평형을 만족하기 위해 유량이 감소하게 되며 열전달 효과가 큰 비등 및 응축 열전달 영역은 감소하고 열전달계수가 작은 과열증기 영역이 증가하여 복수기의 필요 열전달 면적이 증가하게 되는 것이다. 한편, 급수의 온도가 감소하면 복수기의 튜브와 비상냉각탱크의 평균 온도차가 감소하며 이 또한 복수기의 필요 열전달면적을 증가시키는 요인이 된다.

그림 4는 증기발생기 입구의 급수온도가 100°C일 때 복수기 튜브의 내경이 다른 경우에 대해 필요 열전달 면적을 계산한 결과이다. 복수기의 내경이 내경이 작은 경우가 큰 경우보다 작은 열전달 면적을 요구하는 것으로 나타났다. 복수기의 튜브 외경이 같으므로 복수기의 튜브 내경이 작다는 것은 구조물의 두께가 크다는

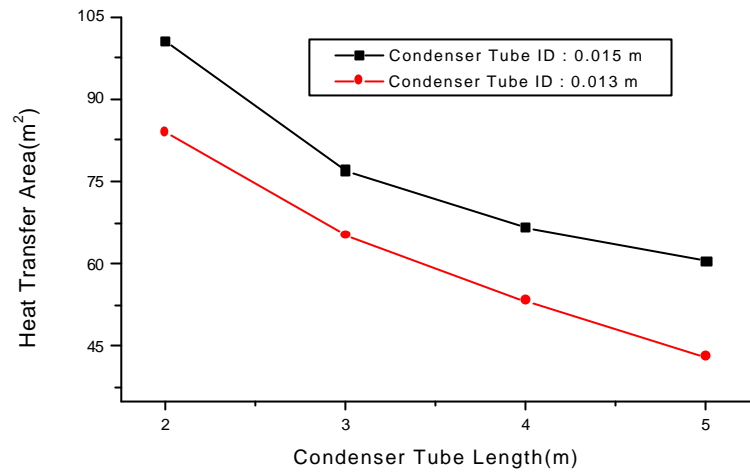


그림 4 복수기 튜브 길이 및 튜브 내경 변화에 따른 전열 면적(급수온도 : 100 °C)

것을 의미하며 이는 열전달 성능을 감소시키는 요인이 된다. 그러나 내경의 감소는 튜브의 단면적을 감소시켜 튜브내의 급수가 가지는 열전달 계수를 증가시키는 요인이 된다. 따라서, 튜브의 외경이 같은 경우 내경의 변화에 따른 필요 열전달 면적의 크기는 튜브 내부의 열전달계수 크기 변화와 튜브의 열전도 크기 변화 정도에 의해 결정된다. 본 연구의 계산결과에 의하면 튜브의 내경이 감소하는 경우 튜브내부의 열전달계수 증가효과가 더욱 크게 나타났다.

5. 결론

설계기준사고시 원자로의 잔열을 제거하기 위해 사용되는 일체형원자로 피동잔열제거계통의 루프에는 이상 자연대류 유동이 형성된다. 피동잔열제거계통 복수기 전열면적을 산정하는 프로그램을 개발하여 급수온도, 복수기 튜브 길이 및 내경 변화에 따른 복수기 전열면적 크기를 산정하였다. 동일한 복수기 튜브 형상에 대하여 급수온도가 증가할수록 대수평균 온도차가 커지므로 요구되는 전열면적은 감소하였다. 동일한 급수온도에 대하여 복수기 튜브 길이가 길수록 튜브 내경이 작아질수록 열전달계수가 커지므로 요구되는 전열면적은 감소하였다. 여기서 산정된 전열면적은 정상상태에서 산정된 것으로 사고시 충분한 잔열을 제거하고 사고를 완화시킬 수 있는지에 대한 천이해석이 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 서재광, "일체형 원자로에 장착되는 증기 발생기 및 가압기의 정상상태 성능분석 프로그램 개발", 한국 원자력 연구소, 1997
2. J.P.Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill, 1996
3. F.M.White, "Heat Transfer", Addison Wesley, 1989
4. 이두정, 관류형 증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석 프로그램 개발, 한국원자력연구소, 1995