

경수원자로로심의 열-수력학적특성량결정

전성제, 김경일

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《...원자력부문의 과학자들이 원자력에 대한 연구사업을 더 적극적으로 하도록 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제60권 352페이지)

원자로설계 및 사고분석에 리용하고있는 코드들을 원자로모의코드(POLCA, SIMULATE), 원자로운동학코드(PARCS), 열수력학계통코드(RELAP5, TRAC), 열수력연료분석코드(COBRA, VIPRE), 사고분석코드(SCDAP/RELAP5, RETRAN)로 분류한다. 여기서 원자로모의코드는 거시자름면적모듈, 중성자출력분포모듈, 열, 류체력학모듈, 조종모듈, 경제모듈들로 구성되어 있으며 이것들은 서로 밀접한 연관속에서 결합되어 리용된다. 현재 중성자출력분포모듈들은 비교적 많이 연구되었으나 열, 류체력학모듈과 관련한 코드들은 소개되어있지 않다.

우리는 원자로의 랭매로 리용되는 물의 열물성계산프로그램[2]이 개발된데 기초하여 원자로모의코드의 입력자료로 되는 열-수력학적특성량들을 결정하는 방법에 대하여 연구하였다.

1. 계 산 방 법

원자로모의코드에서는 지금까지 잘 연구된 중성자출력분포계산모듈(확산리론, 수송리론)과 어느 정도 단순한 열, 류체력학계산모듈을 결합한다. 열-수력학계산모듈에서는 중성자출력분포계산모듈로부터 얻어지는 결과들과 로심의 기하학적 및 류체력학적자료를 입력자료로 하여 원자로로심에서 랭매의 온도 및 밀도 그리고 연료요소(연료심, 표피, 접촉층)의 온도분포가 계산되며 이 결과들은 다시 거시자름면적모듈을 거쳐 중성자출력분포모듈로 이어지는데 이 과정이 수렴기준에 도달할 때까지 반복된다.

1개 연료요소(혹은 그 이상)를 단위로 하는 단일관로들로 구성되어있는 로심에서의 출력분포가 로심확산계산의 결과로 얻어졌다고 하자.

우선 랭매통로를 따라 옷방향으로 흐르는 랭매온도를 계산한다. 통로의 미소길이 dz 에서 랭매가 얻는 열에너지는 연료에서 발생하여 통로에 전달되는 에너지와 같다. 단상랭매로 가정하면 모든 열은 랭매의 상변화에 쓰이지 않고 온도변화에 소모되는데 엔탈피 h 를 리용하면 에너지평형방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$Gdh = q(z)dz \quad (1)$$

여기서 G 는 질량류속(kg/s), $q(z)$ 는 선열속(W/m)이다.

어떤 통로구간에서 식 (1)을 계차식으로 표시하면 다음식이 얻어진다.

$$G(h_{i+1} - h_i) = \int_{z_i}^{z_{i+1}} q(z)dz = \left(\frac{q_i + q_{i+1}}{2} \right) \cdot \Delta z_i \quad (2)$$

그리하여 z_{i+1} 점의 엔탈피 h_{i+1} 은 다음과 같이 표시된다.

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta z_i}{2G} \cdot (q_i + q_{i+2}) \quad (3)$$

다음으로 이 구간에서의 압력손실은 마찰압력손실 $\Delta P_{f,i}$, 국부압력손실 $\Delta P_{loc,i}$ 그리고 자리압력손실 $\Delta P_{z,i}$ 들의 합으로 표시된다. 즉

$$P_{i+1} = P_i - \Delta P_{f,i} - \Delta P_{loc,i} - \Delta P_{z,i} \quad (4)$$

$$\Delta P_{f,i} = \frac{f(Re_i)\Delta Z_i}{D_h} \cdot \frac{G_i^2}{2\rho A^2}$$

$$\Delta P_{loc,i} = \sum_i K_i \cdot \frac{G_i^2}{2\rho A^2}$$

$$\Delta P_{z,i} = \rho g \cdot \Delta Z_i$$

여기서 A 는 통로흐름면적(m^2), $f(Re_i)$ 는 마찰계수, ΔZ_i 는 i 번째 통로길이(m), D_h 는 수력학적 등가직경(m), K_i 는 국부손실계수, ρ_i 는 랭매의 밀도(kg/m^3)이다.

식 (3)과 (4)를 리용하여 로심입구의 $i+1$ 번째 요소구간에서의 엔탈피 h_{i+1} 과 압력 P_{i+1} 을 구하면 물의 열력학적특성량표로부터 이 구간에서의 온도 T_{i+1} 을 결정할수 있다. 그러나 계산상편의를 위하여 엔탈피와 압력을 함수로 하여 온도를 결정하는 다음의 근사식[3]에 기초한 부분프로그램을 작성하여 리용한다.

$$\left. \begin{aligned} T = T(p, h) &= \sum_{i=0}^{i=1} \sum_{j=0}^{j=3} CT1_{i,j} p^i h^j & p < p_{crit}, h \leq H_f(p) & \text{(액체구역)} \\ T = T(p, h) &= \sum_{i=0}^{i=4} \sum_{j=0}^{j=4} CT2_{i,j} p^i h^j & p \geq p_{crit}, h \leq H_f(p_{crit}) = h_{crit} & \text{(림계구역)} \\ T = T(p, h) &= \sum_{i=0}^{i=4} \sum_{j=0}^{j=4} CT3_{i,j} p^i h^j & p < p_{crit}, h \geq H_g(p) & \text{(증기구역)} \\ T = T(p, h) &= \sum_{i=0}^{i=4} \sum_{j=0}^{j=4} CT4_{i,j} p^i h^j & p \geq p_{crit}, h > H_g(p_{crit}) = h_{crit} & \text{(림계구역)} \end{aligned} \right\}$$

여기서 계수 $CT1_{i,j}$ 는 선행연구[3]에 지적되어있으며 p_{crit} 는 림계압력 23.184MPa, h_{crit} 는 림계 엔탈피 $2.1 \cdot 10^6 J/kg$ 이다.

다음단계에서는 이 구간에서의 랭매의 밀도 $\rho_{i+1}(T_{i+1}, P_{i+1})$, 운동학적점도 $\mu_{i+1}(T_{i+1}, P_{i+1})$, 프란틀수 $Pr_{i+1}(T_{i+1}, P_{i+1})$, 열용량 $C_{p_{i+1}}(T_{i+1}, P_{i+1})$ 과 같은 열력학적특성량들을 물의 열물성 계산부분프로그램[2]을 리용하여 계산한다.

다음으로 요소구간의 연료요소(연료심, 표피, 접촉층)들의 온도를 결정한다.[1] 이 과정을 로심입구요소로부터 출구으로 순차적으로 반복하여 계산하면 로심전체구역들에서의 랭매 및 연료요소들의 열, 류체력학적특성량들이 결정되며 이 결과는 거시자름면적모듈의 입력자료로 리용된다.

2. 열-수력학적특성량결정

우리는 위에서 논의한 방법에 기초하여 열출력이 30MW인 난방용침수식원자로의 출력분포를 로심확산계산코드 CITATION을 리용하여 계산하고 그것을 입력자료로 하여 전체 로심에서의 랭매의 온도 및 밀도 그리고 연료요소재료들의 온도를 결정하였다. 계산에 리용한 1개 연료집합체의 특성량들은 표 1과 같다.

표 1. 연료집합체의 특성량

특성량	특성값	특성량	특성값
집합체형태	정방형	접촉층두께/cm	0.01
집합체변길이/cm	10.72	표피두께/cm	0.068 5
연료간극/cm	1.34	열매입구평균온도/°C	80
연료봉수/개	60	열매출구평균온도/°C	110
연료심반경/cm	0.421 5	로심입구압력/MPa	0.3

로심확산계산으로부터 얻어지는 출력분포와 표 1의 자료에 기초한 부분프로그램들과 선행연구[1]에서 리용한 식들에 기초하여 전체 로심에서의 열-수력학적특성량들을 결정하였다. 로심출구에서 랭매의 온도분포를 계산한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 로심출구에서 랭매의 온도(K)분포

$X \backslash Y$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	395.36	394.74	393.32	391.32	389.00	386.22	383.07	379.62	375.98
2	394.74	392.96	392.70	390.79	388.56	385.70	382.49	379.06	375.41
3	393.32	392.71	391.37	389.68	386.59	384.63	381.35	378.00	374.41
4	391.33	390.79	389.69	387.92	385.65	382.87	379.70	376.41	372.31
5	389.01	388.58	386.59	385.65	383.26	380.63	377.61	374.28	370.64
6	386.24	385.72	384.64	382.87	380.61	378.00	375.06		
7	383.11	382.52	381.37	379.70	377.56	374.99	372.08		
8	379.67	379.10	378.04	376.44	374.25				
9	376.04	375.47	374.47	372.38	370.73				

표 2에서 보는바와 같이 주어진 로심조건에서 통로에 따르는 열매의 입구류량이 균일하고 가로혼합효과를 무시한 단일통로모형에 의한 경우에도 출구에서의 랭매온도는 포화점에 도달하지 않으며 최대출력구역에서의 연료심온도는 1 000K이하이므로 원자로심은 열-수력학적으로 안정하다.

맺는 말

로심확산계산결과에 얻어진 출력분포로부터 로심의 수력학적통로들에서 온도 및 밀도 그리고 연료요소(연료심, 표피, 접촉층)의 온도분포를 랭매의 열력학적표를 리용하지 않고 부분프로그램들을 리용하여 결정하였다.

주어진 조건에서 원자로심은 핵적 및 열-수력학적으로 안정하다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 58, 8, 88, 주체101(2012).
- [2] 김일성종합대학학보(자연과학), 60, 4, 68, 주체103(2014).
- [3] Lance Agee et al.; EPRI NP-1850, 3, 7, 1983.

주체106(2017)년 3월 5일 원고접수

**The Determination of the Thermal-Hydraulic Characteristics
in the Light Water Reactor Core**

Jon Song Je, Kim Kyong Il

We described the method for determination of the thermal-hydraulic characteristics which was data-in of the reactor simulation codes by using the thermo-physical properties calculation program of water.

The reactor has the nuclear and thermal-hydraulic safety because the temperature of the coolant on the exit of the core is not approached at the saturation point and the maximum temperature of the fuel is under 1 000K in the given condition.

Key words: thermal-hydraulic core design, reactor simulation code