

원자로 냉각재 펌프의 과도 상태의 유동 및 열전달 해석 연구

허남건*, 김성원**, 유기풍***, 김승태****

Flow and Heat Transfer Analysis of Reactor Coolant Pump in Transient Conditions

N. Hur*, S. Kim**, K.-P. Yoo*** and S. T. Kim****

Key Words: RCP(원자로 냉각재 펌프), transient conditions(과도 상태), Heat transfer coefficient(열전달 계수)

ABSTRACT

The structural analysis of a reactor coolant pump(RCP) of a nuclear power plant is very important for the safety assessment of the plant. Accurate boundary conditions for the heat transfer coefficient are required for reliable thermal stress analysis of the pump casing, especially in transient operations of the pump since the coolant properties are largely dependent on operational conditions. In the present study, a 3D mixed flow type coolant pump was modeled from the RCP drawings and analyzed in the steady state and number of transient flow conditions by using a commercial code STAR-CD. From the result of the computation, it is seem that the average heat transfer coefficients for the cases considered are found to be the suggested values of the manufacturer, Westinghouse Energy System. The unevenness in local heat transfer coefficients, however, is found to be considerable so that the use of average heat transfer coefficients in all boundaries might not give reliable thermal stresses.

1. 서 론

에너지의 수요가 기하급수적으로 증가하고 있는 요즘 화석 에너지의 고갈은 인류의 생존과도 연관되어 있는 중요한 문제이다. 따라서 대체 에너지의 개발은 지금까지 많은 사람들에 의해서 연구되어 왔고 앞

으로도 계속 연구되어야 할 과제이다. 그러나 아직 원자력 에너지 이외의 대체 에너지는 그 실효성 및 경제성에서 많은 문제점을 내포하고 있어 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 따라서 현 단계에서는 화석 에너지를 대체할 에너지로 원자력 에너지가 많은 비중을 차지하고 있으며 실제 우리 나라에서도 전력 공급의 상당 부분을 원자력 에너지가 담당하고 있는 실정이다.

그러나 원자력 에너지는 안전성에서 방사선이라는 커다란 문제점을 가지고 있다. 과거 구 소련의 체르노빌 원자력 발전소 사고와 같이 원자력 발전소의 사고는 바로 대형 참사로 직결되어진다. 따라서 원자력 발

* 서강대학교 공과대학 기계공학과
** 서강대학교 대학원 기계공학과
*** 서강대학교 공과대학 화학공학과
**** 한전기공주식회사

전소의 안전성 확보는 그 무엇보다도 중요한 문제가 아닐 수 아닐 수 없다. 원자로 냉각재 계통은 다량의 방사성 물질을 포함하므로 이 지역의 방사선 준위는 매우 높아 정상 운전시 원자로 냉각재 펌프 주위의 선량은 약 10,000 mR/hr 에 이른다. 이러한 상황에서 원자로의 안전성을 확보하기 위한 원자로 냉각재 펌프의 평가에는 많은 어려움이 따름으로 원자로 냉각재 펌프 평가의 한 방법으로 컴퓨터를 이용한 구조 해석이 사용되고 있다. 이 구조 해석의 신뢰도를 높이기 위해서는 각종 경계 조건에 대한 보다 정확한 자료가 요구되며 그중 열 전달 계수는 중요한 경계 조건중의 하나이다. 따라서 신뢰성 높은 원자로 냉각재 펌프의 구조 해석을 위하여 정상 및 과도 상태하의 열 전달 계수의 정확한 예측은 그 중요성이 매우 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 정상 및 과도 상태에서의 고리 2, 3, 4 호기 원자로 냉각재 펌프 내의 유동을 해석하여 펌프 내면에서의 열전달 계수를 구하였으며 이 결과를 펌프의 건전성 평가를 위한 기본 자료로 제공하였다.

2. 유동 해석

2.1. 유동 해석 방법

원자로 냉각재 펌프내의 유동을 해석하기 위하여 영국 Imperial College 의 Gosman 교수의 연구 팀에

Table 1 Properties of water and initial condition for steady state

Temperature	565 K
Pressure	16 MPa
Density	741.4 Kg/m ³
Rotational speed of the impeller	1188 rpm
Inlet velocity	12.28 m/sec

의해 개발된 Computational Dynamics 사의 STAR-CD⁽¹⁾를 사용하였으며 회전하는 임펠러의 해석을 위해서 임펠러의 회전수를 주어 Multiple rotating frame을 이용하여 계산하였다. 과도 상태 해석시에 원자로 냉각재 펌프의 경계조건은 운전 조건⁽²⁾에 따라 계속 변화하게 되는데 이는 STAR-CD의 load step 기능과 ramp 경계조건을 이용하여 해석하였다. 원자로 냉각재 펌프 내부의 유동을 해석하기 위하여 생성한 계산 격자는 약 23 만개이며 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 1 은 계산 격자의 외부 모습이므로 아래쪽이 펌프의 입구이며 출구는 펌프의 측면에서 수평 방향으로 나가도록 구성되어있다. Fig. 2 에는 펌프 내부의 임펠러와 디퓨저 형상으로 가장 아래쪽의 가이드 베인을 따라서 시계 방향으로 가속된 물은 임펠러를 통과하여 압력을 받게 되며 임펠러를 통과한 유동은 디퓨저를 따라서 펌프 측면의 출구로 빠져나가도록 설계되어 있

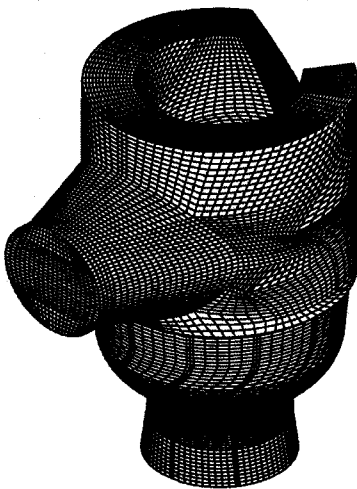


Fig. 1 Computational grids of casing of RCP

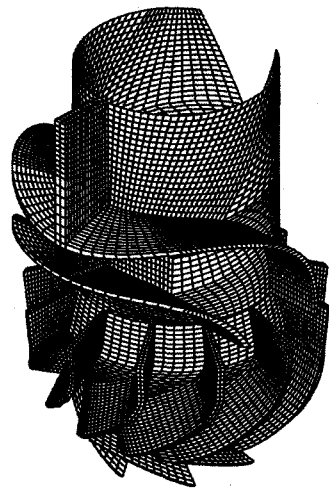


Fig. 2 Computational grids of impeller and diffuser

Table 2 Operation on transient conditions

Case	Operation
1-1	Heat up
1-2	Cool down
2	Reactor trip w/ cool down & SI
3	Inadvertent RCS depressurization
4-1	Excessive feedwater flow loop w/ failed valve
4-2	Excessive feedwater flow loop w/o failed valve
5	Turbine roll test

다. 유동 해석을 위하여 펌프 입구에는 입구 유량을 경계 조건으로 주었으며 난류 해석을 위하여 $k-\epsilon$ 2 방정식 난류 모델을 이용하였다.

본 연구에서는 원자로 냉각재 펌프내의 유동해석을 통하여 열전달 계수를 구하기 위해서 먼저 정상 상태 하에서의 계산을 수행하였다. 이때 각 상태량은 주어진 조건에서의 물의 상태량을 사용하였으며 정상 상태에서의 상태량 및 초기 조건을 Table 1에 나타내었다.

과도 상태의 계산은 주어진 과도 상태의 온도-압력 변화를 그에 대응하는 물의 압축 액체 데이터를 사용하여 온도-밀도 변화로 바꾸어 압축성 유체로 계산하였다. 유체 유동에서는 압력 차이가 중요하고 절대 압력은 유체의 상태량만을 결정할 뿐 유동 자체에는 직접적인 영향을 미치지 못한다. 따라서 온도-압력을 온도-밀도로 변환하여 사용하는 것은 타당한 결과를 도출할 수 있다. 여기서 밀도는 과도 상태의 시간 및 온도에 대응하는 압력 하에서 물의 압축액체 자료를 5 MPa의 단위로 구분하여 각 시간간격에 변화되는 경계 조건으로 주어 계산을 수행하였다. 과도 상태에 대한 유동 해석의 운전 조건을 table 2 에 나타내었다. Case 1 은 정상적인 운전에 해당하는 경우로 작동 초기와 작동 중단에 들어갈 때의 상황이 되며 case 2 ~5 는 이상 작동으로 각각의 case 에 따라 변화되는 온도와 밀도 조건을 경계값으로 주어 과도 상태의 유동 해석을 수행하였다.

2.2 Reynolds Analogy

난류유동에서 운동량 전달과 열 전달의 물리적 과정은 매우 유사하다. 유동의 중심에 있는 유체로부터 벽 근처의 유체로 운동량을 전달하는 Eddy는 열도 함께 전달한다. Prandtl수가 1에 가까운 값을 갖는 유체에서는 운동량 전달에 대한 viscous sublayer 의 저항은 열 전달의 저항과 거의 같다.

높은 Re 수를 갖는 유동에서는 벽 근처에서 벽함수의 형태로 속도, 온도 등의 분포를 나타낼 수 있다. 벽함수에 따르면

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & , y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) & , y^+ > y_m^+ \end{cases} \quad (1)$$

여기서

$$u^+ = \frac{(u - u_w)}{u_\tau}$$

u : tangential fluid velocity

u_w : wall velocity

$$u_\tau : (\tau_w / \rho)^{1/2}$$

τ_w : wall shear stress

$$y^+ : \rho c_\mu^{1/4} k^{1/2} y / \mu$$

κ, E : 경험 상수

이고, y_m^+ 는 다음 식을 만족한다.

$$y_m^+ - \frac{1}{\kappa} \ln(Ey_m^+) = 0 \quad (2)$$

유동장 해석으로 얻은 결과로부터 유동에 의한 열 전달 특성을 예측하기 위하여 Reynolds Analogy에 의해 난류 운동에너지 강도로 열 전달율을 계산하였으며 다음과 같이 Jayatillaka⁽³⁾가 준 식을 사용하였다.

$$h = \frac{C_p C}{[(U^+ + P)\sigma_{\phi, i}]} \quad (3)$$

여기서

C_p : 정압 비열

$$C : \rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}$$

$$P \equiv 9.24 \left[\left(\frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_{\phi,t}} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[1 + 0.28 \exp \left(\frac{-0.007 \sigma_{\phi}}{\sigma_{\phi,t}} \right) \right]$$

$\sigma_{\phi,t}$: turbulent Prandtl number

3. 유동 해석 결과 및 고찰

정상상태와 7 가지 경우의 과도 상태에 대한 유동해석을 수행하였으며 정상 상태의 경우는 Indigo 2 (R10k CPU, RAM 256 MB)에서 약 8 시간 동안 730 번의 반복계산을 통하여 수렴하였다. 과도상태의 경우는 Origin 2000 (4xR10k CPU, RAM 2 GB)에서 2개의 CPU 를 이용하였다. Case 1 의 정상적이 작동의 경우에 해당하는 Heat up 과 Cool down의 경우는 총 166회의 time step에 대하여 2개의 CPU를 사용하여 각각 약 40 시간이 소요되었으며 그 외의 case 2 에서 5 까지의 경우는 이상 작동에 해당하는 경우로 time step 이 10~20회로 정상 작동에 비하여 짧기 때문에 약 3 시간에서 6 시간 정도가 소요되었다.

3.1 유동 해석 결과

3.1.1 정상 상태

정상 상태에 대한 유동 해석 결과 Fig. 3, 4 와 Fig. 5 와 같은 속도 벡터도, 등압력선도와 열전달 계수 분포도를 얻을 수 있었다. 계산 결과 열전달 계수는 펌프의 여러 위치의 국소적인 유동 상태에 따라 최소 14906 W/m^2K , 최대 142950 W/m^2K 와 평균 55878 W/m^2K 의 결과를 얻었으며 그 값의 차이가 위치에 따라 많은 차이가 나기 때문에 구조해석시에 평균 열전달 계수를 이용하여 해석하는 것은 바람직하지 않을

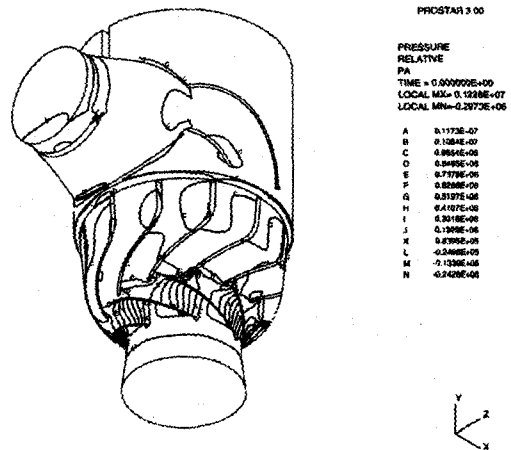


Fig. 4 Pressure contour plot (Steady state)

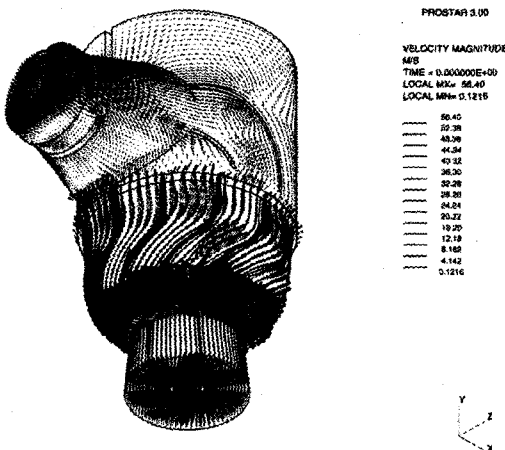


Fig. 3 Velocity vector plot (Steady state)

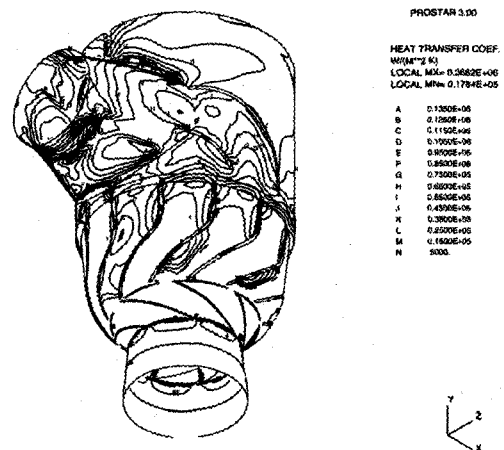


Fig. 5 Heat transfer coeff. contour plot (Steady state)

것으로 판단된다.

3.1.2 과도 상태

과도 상태는 table 2 에 나타난 것과 같이 Heat up, Cool down, Reactor trip with cool down & SI, Inadvertent RCS depressurization, Excessive feedwater flow (loop with failed valve) Excessive feedwater flow (loop without failed valve), Turbine roll test 등 총 7가지의 운전 조건에 대하여 계산하였다. Heat up 은 원자로의 가동 초기에 가열된 냉각재가 순환하기 시작하는 과정이며, Cool down 은 원자로의 가동을 중지시키면서 식은 냉각재가 순환하는 조건이며 두 경우는 정상적인 가동 조건이다. Reactor trip with cool down & SI 는 원자로의 가동이 비정상적으로 잠시 중단되었다고 가동되는 조건이며, Inadvertent RCS depressurization 은 원자로가 비정상적인 감압되는 경우이다. Excessive feedwater flow 의 경우는 원자로 냉각장치에 과도하게 냉각재가 유입된 경우로 각각 밸브가 고장난 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 유동 해석을 수행하였으며 Turbine roll test 는 원자로의 발전 터빈을 시험하는 경우이다.

Fig. 5 는 과도 상태의 유동 해석을 위한 온도와 밀도의 경계 조건과 유동 해석 결과인 열전달계수 값을 나타낸 것이다. 열전달계수 그림에서 전체 평균열전달계수는 계산 영역 전체의 평균이며 평균열전달계수는 임펠러와 디퓨저가 있는 부분을 제외한 평균이다. 임펠러와 디퓨저가 있는 부분에서는 펌프 케이싱 안쪽면과 유동 영역 사이에 슈라우드로 분리되어 있기 때문에 평균열전달계수를 구할 때는 이 부분을 제외하였다.

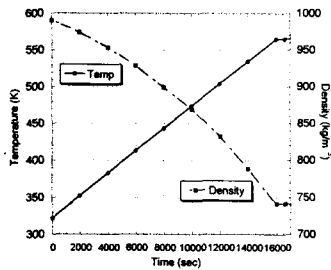
3.3. 계산 결과에 따른 열전달 계수 분석

대류 열전달의 Nusselt 수는 다음과 같이 Re 수와 Pr 수의 함수로 나타낼 수 있다.

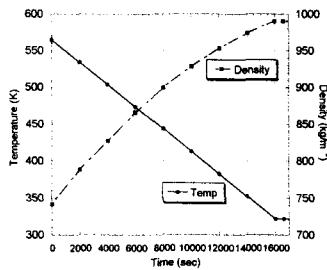
$$Nu = f(Re, Pr) \quad (4)$$

여기서

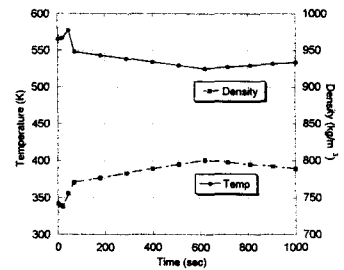
$$Nu = \frac{hL}{k}, Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}, Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$$



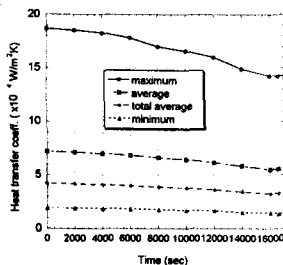
case 1-1 Temperature-Density



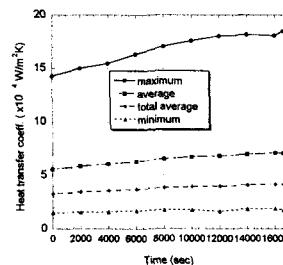
case 1-2 Temperature-Density



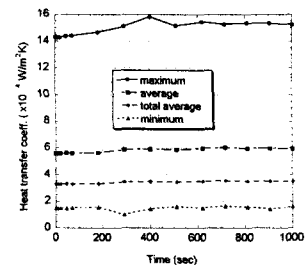
case 2 Temperature-Density



case 1-1 Heat transfer coefficient



case 1-2 Heat transfer coefficient



case 2 Heat transfer coefficient

Fig. 6 (a) Temperature, density and heat transfer coefficient for various operation conditions

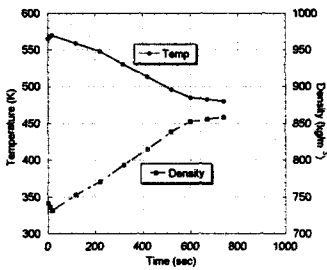
여기서 볼 수 있듯이 온도의 변화에 따른 밀도의 변화는 대류 열전달 계수에 비례하는 것을 알 수 있다. 즉 온도가 내려가서 밀도가 증가하면 그에 따라서 대류 열 전달 계수도 증가하는 데 본 연구의 결과도 온도의 변화에 따라서 밀도가 변화하고 밀도의 증감에 대응하여 열 전달 계수도 같은 방향으로 증감하는 것을 볼 수가 있었다.

또한 임펠러 주위에서의 열전달 계수가 주위에 비하여 높은 것은 그곳에서의 속도가 상대적으로 높기 때문이다. 또한 임펠러 및 디퓨저는 같은 형상이 반복되어있으나 그 위의 터닝 배인 부위는 출구 세로 방향을 중심으로 대칭의 형상을 띄고 있다. 따라서 각 디퓨저 부위마다 열전달 계수가 주기적으로 반복되거나 대칭이 아닌 것을 볼 수 있다.

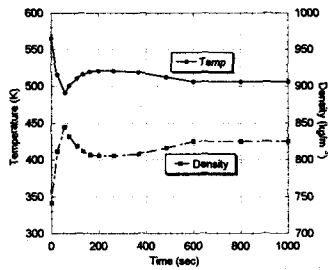
Heat Up 과 Cool down 의 경우에는 Heat Up 의 최종 상태와 Cool down 되기 직전의 정상 상태와 Cool down 의 최종 상태와 Heat Up 되기 직전의 정상 상태가 서로 같은 조건을 가지고있는 데 계산 결과 과도 상태의 마지막 결과 값이 조건이 같은 정상 상태의 결과 값에 접근하는 것을 볼 수 있다(Fig. 6 참조).

전체적으로 온도가 감소하면서 밀도가 증가하고

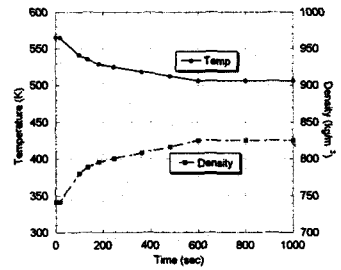
그에 따라 열전달 계수도 증가하리라는 예측과 계산 결과는 정성적으로 일치를 보이고 있다. 그러나 웨스팅하우스⁽⁴⁾의 원자로 냉각재 펌프 구조 해석 보고서에 의하면 원자로 냉각재 펌프 내면의 열전달 계수를 약 $34,000 W/m^2K$ 로 가정하여 구조 해석을 하였다. 본 연구에서 예측한 값은 임펠러 및 디퓨저 부위를 제외한 경우 $56,000 \sim 72,000 W/m^2K$ 로 웨스팅하우스의 보고서보다 약 1.6 ~ 2.1 배 크게 예측되었다. 그 이유는 첫째, 원자로 냉각재 펌프 케이싱 내면과 직접 접하고 있지 않은 임펠러와 디퓨저 부위는 열전달 계수의 평균을 계산할 때 제외하였기 때문으로 판단된다. 임펠러와 디퓨저 부위의 케이싱 내면은 강재 대류보다 열 전달량이 약 1/10 ~ 1/100 작은 자연 대류에 의해서 열 전달이 이루어지고 있다. 둘째, 본 연구에서는 밀도의 변화에 따른 속도 및 임펠러의 회전 속도를 고려하지 않고 일정한 값으로 간주하고 계산하였다. 따라서, 밀도의 증가에 따라 속도가 감소하고, 임펠러의 회전 속도 역시 감소하는 효과를 계산 과정에 모사 해주지 못하였다. 밀도의 증가에 의해서 열전달 계수는 증가하지만, 반면 속도가 감소하면 열전달 계수는 감소하게 된다.



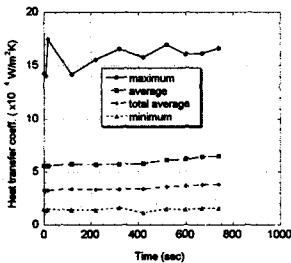
case 3 Temperature-Density



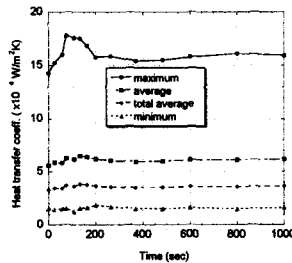
case 4-1 Temperature-Density



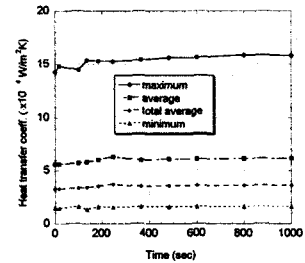
case 4-2 Temperature-Density



case 3 Heat transfer coefficient



case 4-1 Heat transfer coefficient



case 4-2 Heat transfer coefficient

Fig. 6 (b) Temperature, density and heat transfer coefficient for various operation conditions

원자로 냉각재 펌프 케이싱의 임펠러 및 디퓨저 부위의 열전달 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_n} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_f} \quad (5)$$

여기서

- h : Casing 면에서의 열전달 계수
- h_n : Casing 면과 가이드 사이의 자연 대류 열전달 계수
- h_f : 임펠러 및 디퓨저 부위의 강제 대류 열전달 계수
- Δx : Casing 면과 가이드사이의 거리
- k : 가이드의 열 전도 계수

위의 식에서, 자연 대류 열전달 계수는 강제 대류 열전달 계수의 약 1/100 이고 Δx 는 약 0.03m k 는 금속의 경우 약 15 ~ 70 W/mK 의 값을 갖는다. 이 값들을 대입하면 임펠러 및 디퓨저 부위의 열전달 계수는 무시할 수 있을 만큼 작은 값을 나타낸다. 이 값을 고려하여 케이싱의 열전달 계수 평균을 전체 열전달 계수로 나타내었다(Fig. 6 참조).

이 경우에는 정상 상태에서 열전달 계수를 약 33,000 W/m^2K 로 예측하였는데 이는 웨스팅하우스의 보고서에서 가정한 열전달 계수와 거의 같은 값이다.

본 연구에 의하면 원자로 냉각재 펌프 케이싱 면의 열 전달 계수는 임펠러 및 디퓨저 부위와 그 외의 부위에서 매우 커다란 차이를 나타내고 있다. 즉 임펠러 및 디퓨저를 제외한 부위의 케이싱 면은 약 56,000 ~ 72,000 W/m^2K 의 높은 값을 형성하고 있는 데 반하여 임펠러 및 디퓨저 부위의 케이싱 면은 거의 무시될 수 있을 정도의 낮은 값을 나타내고 있다.

본 연구 결과 평균 열전달 계수 값은 약 56,000 ~ 72,000 W/m^2K 을 나타냈으며 웨스팅하우스의 보고서에서 적용한 열전달 계수 값은 약 34,000 W/m^2K 이다. 이와 같은 차이는 앞 절에서 설명한 임펠러와 디퓨저 부위와 원자로 냉각재 펌프 케이싱 내면 사이의 자연 대류 열전달과 밀도 변화에 따른 냉각재의 속도 변화

를 고려하지 않아서 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 임펠러와 디퓨저 부위를 고려한 전체 평균 열전달 계수는 정상 상태의 경우 약 33,000 W/m^2K 로 웨스팅하우스의 보고서와 거의 같은 값을 보였으며 과도 상태의 경우는 약 33,000 ~ 42,000 W/m^2K 의 값을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고리 2, 3, 4호기 원자로 냉각재 펌프 케이싱의 건전성 평가를 위한 기본 자료를 제공하기 위하여 STAR-CD를 이용하여 정상 상태 및 과도 상태에 대한 유동해석을 수행하였으며 그 결과 열전달 계수를 구하였다. 유동 해석 결과를 비교할 만한 실험 값이 없어 정량적인 비교는 할 수 없었지만 밀도의 증가에 따른 열 전달 계수의 증가를 통하여 정성적인 경향을 파악할 수 있었으며 본 연구에서 유동해석을 통하여 얻은 평균 열전달 계수의 값이 웨스팅하우스의 구조 해석에 이용된 열전달 계수 값 34,000 W/m^2K 과 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 원자로 냉각재 펌프 케이싱의 건전성 평가를 위한 구조 해석의 기본 자료로 본 연구의 결과 값을 사용하면 신뢰도 높은 구조 해석결과를 얻을 수 있다.

5. 참고 문헌

- (1) STAR-CD Version 3.0 manual, 1996, Computational Dynamics.
- (2) 원자로 냉각재 펌프 정비, 1996, 한전기공주식회사.
- (3) Jayatilaka, C. L. V., 1969, "The Influence of Prandtl Number and Surface Roughness on the Resistance of the Laminar Sublayer to Momentum and Heat Transfer," Prog. Heat & Mass Transfer, Vol. 1, p. 197.
- (4) Bamford, W. H., Yang, C. Y., Hsu, K. R. and Petsche, J. F., 1997, Stressed for Use in Flaw Evaluation for Kori Units 2, 3, and 4 Reactor Coolant Pump Casing Welds, Westinghouse Energy Systems.