

일체형원자로 SMART에서 Heat-up에 의한 계통 압력과 가압기 영역별 온도분포 해석 및 설계인자 민감도 평가

A Study of System Pressure and Temperature Distributions in Pressurizer and Estimation of Sensitivities for Design Variables during Heat-up Period of Integral Reactor SMART

강현문, 이두정, 김주평, 김환열, 윤주현
한국원자력연구소 동력로기술개발팀
대전시 유성우계국 사서함 15호, 305-600

요약문

현재 한국원자력연구소에서 개발중인 일체형원자로인 SMART는 가압기를 원자로용기내에 위치시키며 자기가압방식을 사용하여 출력변동에 따른 계통 압력의 변화를 흡수한다. SMART의 가압기는 상용로에 비해 큰 기체 체적을 가지며 질소개스와 증기로 채워져 있다. 이때, 가압기 내부의 총 압력은 증기와 질소개스의 부분압의 합이며 온도에 따른 증기압의 변화가 질소개스의 압력변화에 비해 크므로 가압기 내부의 온도를 낮게 유지하여 계통압력의 급격한 변화를 방지한다. 그러나, SMART의 가압기가 원자로 용기내부에 존재하기 때문에 일차계통의 열이 가압기로 전달된다. 따라서, SMART의 가압기에는 일차계통에서 전달되는 열을 최소화하고 제거할 수 있는 단열재와 냉각기의 설치가 필요하다. 본 연구에서는 SMART의 heat-up시 계통압력과 가압기의 온도 변화를 해석하였으며 단열재와 냉각기의 크기 등이 계통압력과 가압기의 온도변화에 미치는 영향을 해석하였다.

Abstract

SMART, an integral reactor currently under development at KAERI, adopts an in-vessel pressurizer that maintains stable pressure by the principle of self-pressurization. The gas space of the pressurizer is filled with nitrogen and saturated steam. The volume of the pressurizer relative to the total system is large in comparison with those of the current commercial PWRs. The total pressure in the pressurizer is determined by the sum of partial pressures of the gases. Since the rate of change of pressure with temperature increases with temperature for steam, the temperature in the gas space needs to be kept low to prevent rapid pressure change. However, because the pressurizer is located inside the reactor vessel and surrounded by hot primary coolant, it receives heat continuously. Thus, it was necessary to design a cooling circuit to remove heat and a thermal insulator to minimize heat transfer for installation. In this study, changes in the system pressure and the pressurizer temperature during the heat-up period of SMART have been analyzed, and the effects of thermal insulator size and cooler capacity on the system pressure and temperature have been investigated.

Nomenclature

A	heat transfer area	C	concentration
c_p	heat capacity	h	heat transfer coefficient
h_{fs}	latent heat	k	thermal conductivity
m	mass	Nu	Nusselt number
P	pressure	Pr	Prandtl number
ϕ	heat transfer rate	ϕ_m	heat transfer with mass transfer
R	thermal resistance/universal gas constant Ra	Rayleigh number	
Re	Reynolds number	Sc	Schmidt number
St	Stanton number	T	temperature
t	time	U	overall heat transfer coefficient
V	volume	v	specific volume

Symbols and Greeks

β	thermal expansion coefficient	ν	kinematic viscosity
∞	bulk	d	thickness of plate

Subscript

a, ac	annular cavity	e, ec	end cavity
f	liquid water	g	gas
HX	pxr cooler	i	interface/intermediate cavity
ic	intermediate cavity	N_2	Nitrogen gas
w	water		

1. 서론

현재 한국 원자력연구소에서는 전력생산과 담수화를 목적으로 중소형 일체형 원자로인 SMART(**S**ystem-integrated **M**odular **A**dvanced **R**ea**T**or)를 개발하고 있다. SMART에서 사용되는 가압기는 3개의 영역으로 구성되며 자기 가압방식을 사용하여 출력변동에 따른 계통 압력의 변화를 흡수한다. 자기가압방식은 큰 개스의 체적을 이용하여 출력변화에 의한 냉각제 체적팽창으로 발생하는 계통압력의 변화를 흡수하는 것으로 중기압의 변화가 작은 저온 상태에서 효율적으로 운전된다. 그러나, 가압기가 원자로용기 내부에 위치하기 때문에 별도의 냉각 설비가 없다면 원자로 냉각제로부터 전달되는 열로 인해 가압기 내부의 유체 온도는 노심 출구의 냉각제 온도와 같게 될 것이다. 따라서, 노심을 통과한 일차계통 냉각제와 가압기 내부에 존재하는 유체들 간의 열전달을 최소화하고 전달된 열을 제거하기 위한 방법으로 가압기를 둘러싸는 습식 단열재와 냉각기를 설치한다. 현재 설계하고 있는 SMART의 정상운전 조건에서 가압기 내부의 유체 온도는 가압기 냉각기가 설치된 intermediate cavity

의 물은 70℃, 그리고 end cavity의 물은 74℃를 유지하고자 한다. 이러한 설계값이 결정된 이유는 15MPa에서 용존 질소의 양이 최소가 되는 물의 온도가 70~80℃이기 때문이며 용존 질소가 정상운전 및 사고시 노심의 열전달에 최소한의 영향을 주도록 하기 위한 것이다.

SMART 원자로의 초기상태에서 계통 압력과 온도는 6.5MPa, 20℃이며 출력운전을 하기 위해서는 일차계통 냉각재의 압력과 평균 온도를 15MPa, 290℃로 증가시켜야 한다. 원자로의 압력과 냉각재 온도를 정상출력운전 조건으로 변환시키는 과정을 heat-up이라 하며, 일차냉각재 평균 온도의 증가율이 시간당 100℃이하 그리고 정격출력의 0.1~5%/min이내의 출력 증가율을 동시에 만족해야 한다.

원자로의 초기상태에서 원자로심의 열출력 운전이 시작되면 냉각재의 온도가 증가하여 그 체적이 증가하게 되며 증가된 냉각재의 체적이 가압기의 공간을 채운다. 이때, 가압기의 개스체적이 냉각재의 팽창된 체적만큼 감소하고 노심의 열이 개스로 전달되어 계통압력이 증가하게 된다. 개스영역의 온도상승은 원자로용기내의 냉각재에서 가압기의 구조물을 통해 전달되는 열과 냉각재의 표면에서 기화 및 응축에 의해 전달되는 중기, 그리고 가압기 냉각기에 의한 열전달에 의해 발생한다. 따라서, SMART의 Heat-up과정에서의 계통압력과 가압기 온도분포의 변화를 해석하기 위해서는 단열재와 냉각기 등의 여러 설계변수들에 대한 종합적인 검토가 필요하다.

본 해석에서는 SMART의 heat-up에 의한 냉각재의 체적 증가와 개스로의 열전달을 고려하여 heat-up에 의한 가압기의 압력과 온도변화를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하고 이를 이용하여 SMART의 정상 운전 조건을 만족할 수 있도록 습식단열재의 크기와 냉각기의 크기, 그리고 개스 실린더의 체적 등이 계통압력과 온도에 미치는 영향을 조사하였다.

2. Heat-up 해석 코드의 개발

원자로의 초기상태에서 계통 압력과 온도는 6.5MPa, 20℃이며 원자로심의 냉각재는 원자로용기 상단에 위치한 MCP의 출입구까지 채워져 있다. 그리고, 원자로용기 상부의 나머지 공간은 질소 개스로 채워진다. SMART의 정상 출력 운전은 일차계통 냉각재의 압력과 평균 온도가 15MPa, 290℃에서 이루어진다. 원자로의 초기상태에서 정상운전상태로 전이하는 과정에서 냉각재의 온도가 상승하면서 팽창된 냉각재의 체적과 열전달로 인해 개스의 체적이 감소하고 온도가 증가하여 계통 압력과 온도가 상승한다. 이러한 과정을 heat-up이라 한다. SMART의 경우 heat-up은 100℃/hr 이하의 냉각재 온도 증가율과 정격출력의 0.1~5%/min이내의 출력 증가율을 동시에 만족해야 한다.

SMART의 heat-up에 의한 가압기의 압력과 온도의 해석을 위해서는 냉각재의 체적 팽창과 가압기 내부의 개스로 전달되는 중기의 양과 에너지에 대한 평가가 필요하다. 냉각재의 체적 팽창은 시간에 따라 변화하는 계통 압력과 냉각재 온도에 의해 예측 할 수 있으며, 개스로 전달되는 에너지와 중기의 양은 에너지 밸런스 방정식을 구성하여 예측할 수 있다. 따라서, SMART의 heat-up에 의한 가압기의 압력과 온도 해석을 위해 개발한 코드에는 냉각재의 체적 팽창을 평가하고 중기와 에너지의 전달을 평가할 수 있도록 열전달과 물질전달에 대한 각종 상관식들이 포함되어야 한다.

냉각재의 체적 팽창은 heat-up의 진행속도에 의해 결정된다. SMART의 원자로 초기상태에서 냉각재의 온도가 20℃이므로 시간 t에서 원자로심 냉각재의 평균 온도는 아래와 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T(t) &= 20 + t/36 & \text{for } t \leq 9720 \text{ sec} \\ T(t) &= 290 & \text{for } t > 9720 \text{ sec} \end{aligned} \quad (1)$$

원자로내의 냉각재 체적은 압력과 온도에 의해 결정되므로 m_c 를 원자로 용기내의 냉각재 질량

이러 하면 냉각재의 체적은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_w(t) = m_w v_f(P, T) \quad (2)$$

주어진 시간동안에 팽창된 냉각재의 체적은 $\Delta V_w(t) = V_w(t) - V_w(0)$ 이다. 여기서, 원자로의 냉각재는 체적이 팽창함에 따라 annular cavity, intermediate cavity, 그리고 end cavity로 순차적으로 이동한다. 이때, 냉각재의 이동은 cavity간에 연결된 serge line을 통해 이루어진다. Intermediate cavity와 end cavity 내에 존재하는 냉각재의 질량을 각각 m_{wi} , m_{we} 이라 하고 intermediate cavity, end cavity의 체적을 V_i , V_e , 그리고 annular cavity를 채우고 있는 냉각재의 체적을 V_p 라 하면 heat-up에 의해 팽창되는 체적과 질량은 다음과 같다.

$$\Delta V = (m_w - m_{wi} - m_{we})v_f(P, T) - V_p \quad (3)$$

$$\Delta m_w = \Delta V v_f(P, T) \quad (4)$$

따라서, 냉각재의 이동에 의해 가압기의 각 영역간에 이동하는 에너지는 다음과 같다.

$$\phi_w = \Delta m_w c_p (T_w + 273.15) \quad (5)$$

한편, 가압기의 각 공동에 냉각재 또는 개스가 채워지면 공동간의 온도차와 냉각재의 이동 등으로 인해 열전달이 발생한다. 이때, 가압기의 각 영역에 적용되는 열전달 관계식은 다음과 같이 열전달 계수와 열교환이 발생하는 영역간의 온도차 그리고 열전달 면적의 곱으로 표현될 수 있다.

$$\phi_{ab} = U(T_a - T_b)A \quad (6)$$

여기서, U는 종합열전달계수, T는 온도, A는 열전달 면적을 나타내며 첨자는 영역을 구분한 것이다. 종합열전달계수는 두 영역에 존재하는 모든 열저항을 고려한 것으로 총열저항의 역수이며 총열저항은 가압기 공동내부의 유체가 가지는 열저항($1/h$), 습식 단열재(R_{wi})와 철재구조물(R_p)의 열저항의 합으로 다음 식과 같다.

$$R_t = \frac{1}{h_A} + R_{wi} + R_p + \frac{1}{h_B} \quad (7)$$

총열저항의 계산에 사용되는 열전달계수는 유동의 driving force와 열전달 구조물의 기하학적인 형태에 의해 표 1과 같이 결정된다. 그리고 철재구조물의 열저항은 금속의 두께와 열전도계수에 의해 구할 수 있으며, 습식 단열재의 열저항은 RDIFE 연구진에 의해 제안된 다음식을 사용하여 구할 수 있다.

$$R_{wi} = \frac{75}{k_f} \left(\frac{G}{\Delta T} \right)^2 \left(\frac{1}{k} \right)^{1/3} n^{4/3} \quad (8)$$

가압기의 각 영역의 냉각재양과 열의 출입량을 각각 m_w , ΔQ_w 라 하면 가압기의 각 영역 냉각재 온도는 다음과 같이 결정된다.

$$T_w^n = T_w^{n-1} + \Delta Q_w / m_w c_p \quad (9)$$

여기서, 위첨자 n은 time step의 순서를 나타내는 것으로 n은 현재 시간을, 그리고 n-1은 이전 시간을 의미한다.

가스영역의 압력과 온도는 열 및 중기의 교환량에 따른 에너지와 중기량의 변화량으로부터 중기표를 이용하여 구한다. 중기의 압력과 온도를 알면 건도를 비롯하여 비체적, 엔트로피, 엔탈피 또는 내부에너지 등의 열역학적 값들을 구할 수 있다. 그리고, 완전 개스의 경우에도 기체 상태 방정식 등

을 사용하여 개스의 열역학적 값들을 결정할 수 있다. 따라서, 증기와 개스가 혼합되어 있을 경우에도, 시스템의 압력과 온도를 안다면 필요한 열역학적 변수들을 계산 할 수 있다.

가압기 내부의 개스 영역은 증기와 질소 개스 두 성분으로 채워져 있다. 따라서, 개스영역의 질량과 에너지는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$m_v = V_g / v_v \text{ and } m_{N_2} = const \quad (10)$$

$$U_g = m_v u_v(T_g, v_v) + m_{N_2} c_v(T_g + 273.15) \quad (11)$$

그리고, 개스영역의 압력은 증기와 질소 개스의 부분압을 합하여 결정된다. 따라서, 개스 영역의 압력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = P_v(T_g, v_v) + \frac{m_{N_2} R(T_g + 273.15)}{V_g} \quad (12)$$

그런데, 식 (10)~(12)는 모두 개스 영역의 온도 T_g 에 의존하는 값이다. 그런데, T_g 는 열과 증기의 전달에 의해 변화는 것으로 계산을 통해 구하고자 하는 값이다. 본 계산에서는 계통내의 총 에너지와 질량이 각 성분의 합과 같아지는 값을 T_g 로 결정하였다.

한편, 개스 영역내 증기의 양은 냉각재 푸울 표면과 원자로 용기의 상부 관, 그리고 가압기 냉각기의 표면에서 발생하는 기화 또는 응축량은 열전달과 물질전달의 상사성을 적용하여 구하였으며 다음 식을 사용하였다.

$$h_m = \frac{h_c}{c_{pg} M_g} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{1/3} k \quad (13)$$

여기서, h_c 는 대류 열전달 계수를 그리고 M_g 는 개스의 분자량을 나타낸다.

3. SMART Heat-up 에 의한 계통 압력 및 가압기 영역별 온도 해석

그림 1은 Heat-up이 진행됨에 따라 계통 압력이 변하는 추이를 나타낸 것이다. 계통압력의 변화는 초기에 급격히 증가하다가 20000초경부터 증가율이 급격히 둔화되어 60000초경에 이르러 거의 일정한 압력을 유지한다. 초기에는 냉각재의 체적 팽창에 의한 개스 체적이 감소하고 냉각재로부터 전달된 증기와 에너지로 인해 개스영역의 체적감소와 온도증가가 함께 발생하므로 급격한 압력상승이 발생한다. 일단 냉각재의 체적팽창이 끝나면 단열재를 통과해 가압기의 intermediate cavity와 end cavity로 전달되는 열에 의해 개스영역의 온도가 계속 상승하여 계통 압력은 지속적으로 증가한다. 그러나, 가압기의 cavity 온도가 증가하면서 일차계통과 cavity간의 온도차가 감소하고 intermediate cavity에 설치된 냉각기의 열제거량이 증가하므로 계통압력과 온도가 일정한 상태에 도달하는 것이다. 그림 2는 가압기 각 영역의 온도 분포를 나타낸 것으로 일차계통의 온도가 가장 높고, intermediate cavity의 온도가 가장 낮은 값을 가진다. 이로부터 일차계통에서 end cavity로 전달된 열이 Intermediate cavity로 전달되고 최종적으로 냉각기에 의해 열이 제거됨을 알 수 있다.

그림 3은 Intermediate cavity에서의 열출입양을 나타내는 것으로 고온의 원자로 냉각재로부터 습식 단열재를 통과해 Intermediate cavity로 전달되는 열과 냉각기에 의한 열제거량이 균형을 이루며 나머지 항들은 이들 두 값에 비해 매우 작은 값을 가짐을 보여준다. 따라서, 가압기의 열평형이 이루어지는 조건은 냉각기의 성능과 일차계통의 열을 차단하는 습식단열재의 크기에 의존할 것임을 알 수 있다. 그림 4는 end cavity의 냉각재 푸울에서 발생하는 열전달량을 나타낸 것이다. End cavity에서의

열교환은 가압기 하부의 일차계통 냉각재에서 습식단열재를 통해 전달되는 열과 Intermediate cavity로 전달되는 열이 비슷한 크기로 균형을 이룸을 보여준다. 따라서, 가압기의 냉각재 푸울 온도를 낮게 유지하려면 일차계통에서 전달되는 열을 효과적으로 차단하고 Intermediate cavity의 온도를 낮게 유지하는 것이 필요함을 알 수 있다.

4. 가압기 설계변수의 민감도 계산

표 2는 가압기의 Heat-up 결과에 영향을 줄 수 있는 여러 변수들의 값으로 이루어진 민감도 계산 입력 및 결과를 요약한 것이다. 표 2에서 민감도는 계통압력, 가스 온도, intermediate cavity와 end cavity의 냉각재 온도에 대한 영향을 순서대로 표현한 것이다. 임의의 설계변수를 q 라하고, 압력, 온도 등을 f 로 표현하면 민감도, z 는 다음과 같이 정의된다.

$$z = \frac{df / f_{normal}}{dq / q_{normal}} \quad (14)$$

표 2의 민감도에서 음의 부호는 설계변수를 q 가 증가하면 f 가 감소한다는 것을 의미하며 절대값이 클수록 f 의 q 에 대한 의존성이 크다는 것을 의미한다. 민감도 계산결과에 의하면 계통압력과 가압기 각 영역의 온도에 모두 큰 영향을 미치는 변수는 습식단열재의 크기와 냉각기의 열전달 면적인 것으로 나타났으며 냉각기의 냉각수 유량은 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

5. 결론

현재 한국원자력연구소에서 설계하고 있는 SMART의 가압기는 원자로용기내에 내장되어 있으며 저온을 유지하기 위하여 습식단열재와 냉각기를 설치하고 있다. 본 연구에서는 Heat-up시 계통압력과 가압기 각 공동의 영역별 온도 분포를 계산하고 습식단열재와 냉각기의 크기를 비롯한 여러 설계인자에 대한 민감도 계산을 수행하였다. Heat-up 계산 및 민감도 계산의 결과로부터 습식단열재와 냉각기의 열전달 면적이 가압기의 온도분포 및 계통압력에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 서재광, "일체형 원자로에 장착되는 중기 발생기 및 가압기의 정상상태 성능분석 프로그램 개발", 한국 원자력 연구소, 1997
2. "SMART 개념 설계를 위한 안전 및 성능해석 설계자료 송부", SMART-FS-980-01"
3. J.P.Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill, 1996
4. F.M.White, "Heat Transfer", Addison Wesley, 1989
5. J.G.Collier, "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill, 1972
6. D.W.Hagroves, et al., "CONTEMPT-LT/028NUREG/CR-0255, 1979

표 1 Geometry와 Driving Potential 에 따른 열전달계수 구분

번호	열전달계수	Geometry	Driving Potential	기타
1	$Nu_x = 0.332Pr^{1/3} Re_x^{1/2}$	Vertical plate	Forced	laminar
2	$St_x Pr^{2/3} = 0.0296 Re_x^{-0.2}$	Vertical plate	Forced	turbulent
3	$Nu_d = 0.023Pr^{0.4} Re_d^{0.8}$	Tube inside	Forced	Heated fluid
4	$Nu_L = 0.625 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + 0.492/Pr]^{1/4}} \left[\frac{Ra_L}{Pr} \right]^{1/4}$	Vertical plate	Natural	
5	$Nu_L = 0.16Ra^{1/3}$	Horizontal plate	Natural	
6	$Nu_L = 0.60 + 0.387 \left[\frac{Ra}{1 + 0.59/Pr} \right]^{1/4} \left[\frac{Ra}{Pr} \right]^{1/4}$	Horizontal tube outside	Natural	

표 2 SMART 저온 가압기의 설계변수 민감도 평가

	가압기 냉각기			습식 단열재 수	가스 실린더 체적	원자로 용기 상부온도	계통 압력	가스 온도	Int. Cavity 온도	End cavity 온도	민감도
	유량	온도	tube 길이								
1	3.5	45	25	20	10.0	50.0	15.45	121.0	126.8	147.5	Base Case
2	3.0	45	25	20	10.0	50.0	15.46	121.1	127.0	147.6	-0.005/ -0.006/
3	4.0	45	25	20	10.0	50.0	15.44	120.9	126.7	147.4	-0.008/ -0.005
4	3.5	40	25	20	10.0	50.0	15.36	119.1	124.3	145.6	.05/ .11/
5	3.5	50	25	20	10.0	50.0	15.54	123.0	129.4	149.5	.14/ .09
6	3.5	45	20	20	10.0	50.0	15.80	127.8	135.8	154.4	-0.099/ -0.25/
7	3.5	45	30	20	10.0	50.0	15.19	115.9	119.9	142.3	-0.31/ -0.21
8	3.5	45	25	15	10.0	50.0	15.99	132.7	141.0	162.4	-0.12/ -0.34/
9	3.5	45	25	25	10.0	50.0	15.06	112.4	116.5	136.3	-0.39/ -0.35
10	3.5	45	25	20	7.5	50.0	16.55	121.5	126.8	146.3	-0.25/ -0.01/
11	3.5	45	25	20	12.5	50.0	14.62	120.7	126.8	146.3	.00/ -0.04
12	3.5	45	25	20	10.0	75.	15.65	125.5	127.1	147.8	.05/ .07/
13	3.5	45	25	20	10.0	100.	15.89	130.5	127.4	148.2	.005/ .005

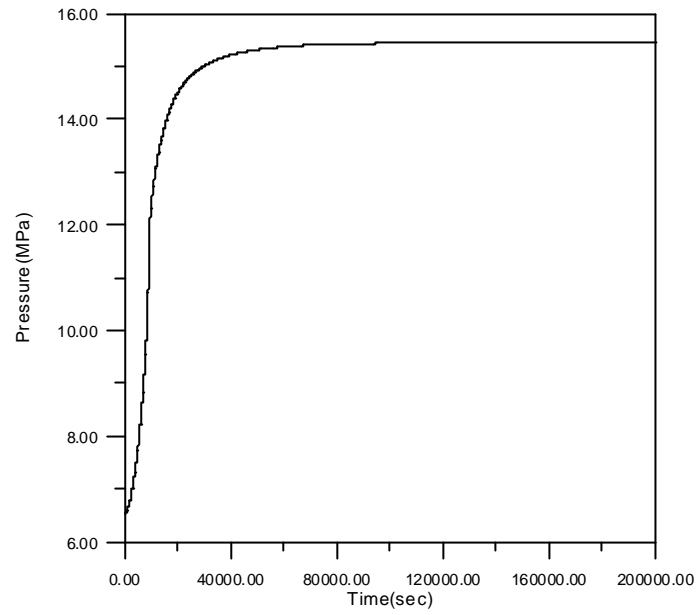


그림 1 Heatup에 의한 SMART 계통 압력 변화

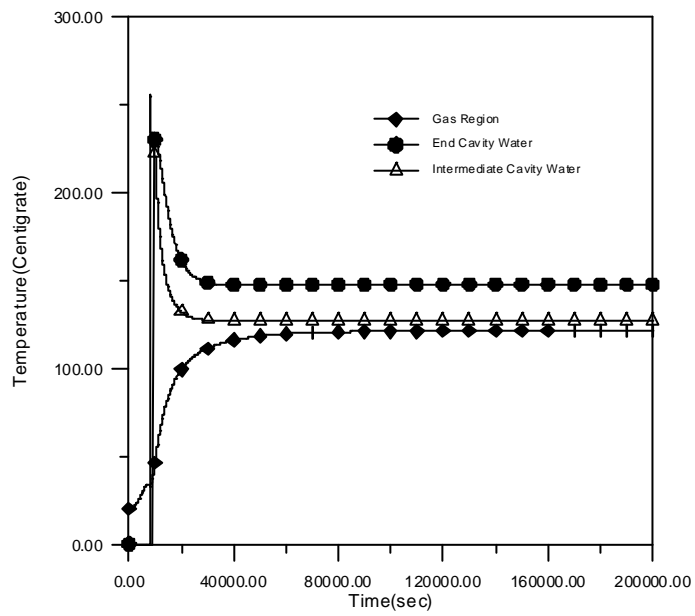


그림 2 Heatup에 의한 가압기의 영역별 온도 변화

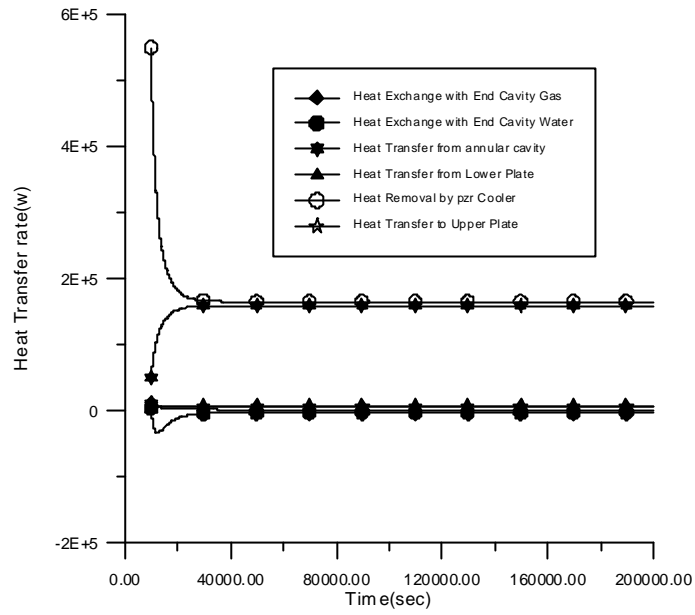


그림 3 가압기 Intermediate Cavity에서의 열전달 비교

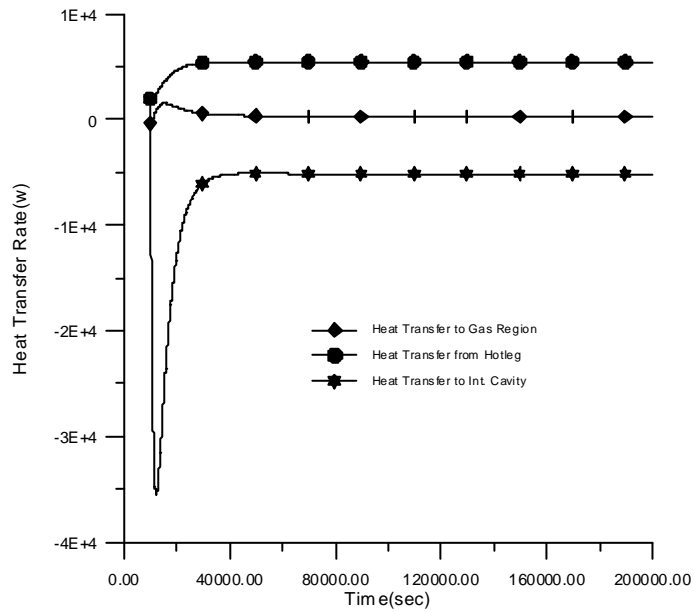


그림 4 가압기 End Cavity Water 주울의 열전달비교