

'98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

IRWST 배관내의 열수력적 현상 모델링

김상녕, 김용석, 고종현

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

한국의 차세대 원자로 (Korean Next Generation Reactor; KNGR)에 처음 적용되는 격납건물내에 설치된 재장전수조 (In-Containment Refueling Water Storage Tank; IRWST)는 기존 재장전수조의 기능외에 주입모드에서 재순환 모드를 전환생략, 일차계통으로 방출된 고온, 고압 냉각수의 응축 및 냉각, 격납용기 방사능 오염방지, 원자로 동공충수 등 여러 가지 추가 기능을 가진 한층 진보된 설계개념이다. 발전소 천이사고시 발생하는 Pipe Clearing, 응축진동 현상(Condensation Oscillations), Chugging 등의 열수력 현상들이 방출증기의 유동 및 가속도와 관련해 항력과 용력, 압력진동 등을 일으켜 IRWST 구조물에 영향을 미칠 수 있기 때문에 IRWST를 처음으로 시도하는 우리 나라로서는 이와 관련된 제반현상에 대한 심도 깊은 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 파도로 인한 가압기 안전밸브(Pressurizer Safety Valve) 또는 안전감압밸브(Safety Depressurization Valve) 작동시 IRWST로 방출되는 유체로 야기되는 하중 예측 모델을 기존의 BWR의 응축수조(Suppression Pool)에서 일어나는 각종 현상을 토대로 이론적으로 체계적으로 유도하여 이를 비교, 분석하였다.

I 서론

한국의 차세대 원자로(KNGR)에 처음 적용되는 설계개선 사항중의 하나는 격납건물 외부에 설치된 재장전수조(RWST)를 격납용기 내부에 설치한 내격납 재장전수조(IRWST)의 채택이다.

IRWST는 사고시 안전주입계통 및 격납건물 살수계통의 신뢰성을 증진시키며 가압기 안전 밸브(PSV) 또는 안전감압밸브(SDV) 작동시 방출유체를 수조내에서 저온수로 냉각, 응축시킴과 동시에 방출증기에 내포된 방사성 물질을 수조내에서 응축수로 포집, 처리하므로 격납건물 오염을 방지한다. 그러나 발전소 천이사고시 일차계통으로부터 가압기 안전밸브나 안전감압밸브를 통해 IRWST로 방출되는 고온, 고압의 증기량, 응축기의 형태, 운전형태등이 상이하므로 응축모델의 세밀한 부분 등에는 아직도 결함이 있으므로 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 모델개발에 필요한 IRWST의 증기응축 현상 및 그 현상 각각에 대한 모델의 열유체학적인 검토를 수행하였고 IRWST의 증기응축 현상을 파악하기 위하여 BWR

응축수조의 운전경험, 실험결과 및 IRWST의 설계개념, 기연구된 설계 문헌들을 참고하여 IRWST에서 일어나는 각종 열유체 현상들을 정밀분석하고 이들을 지배하는 주요변수를 파악하였다. 특히 응축현상은 방출 증기량과 수조의 수온에 따라 다양한 거동을 보이고 있으며 이와 관련된 다양한 이론 및 실험 모델이 파악되었다.

II 본 론

1. IRWST의 응축현상

IRWST의 응축모델을 개발하기 위해서는 IRWST에서 일어나는 여러 열수력 현상에 대한 많은 이해가 필요하다. 이러한 열수력현상을 증기방출시 일어나는 순서에 따라 아래와 같이 설명하였다.

1.1 Pipe Clearing (Water Clearing & Air Clearing)

가압기 안전밸브나 안전감압계통 작동시 방출되는 고압의 증기로 인해 배관내의 공기가 압축되고 이 압축된 공기가 IRWST에 부분적으로 잠겨있는 sparger 내부의 물을 가속시켜 제트(Jet) 형태로 IRWST내로 방출되는 현상이 Water Clearing이다. 이러한 제트류는 잠겨있는 구조물과 수조의 경계에 항력과 하중을 일으킨다. sparger내의 물이 IRWST내로 방출된 후 압축된 공기는 고압의 공기기포 형태로 IRWST로 방출된다. 이러한 현상을 Air Clearing이라고 한다. 이런 기포는 IRWST의 수면으로 상승하기 전까지 공기와 수조수의 압력차와 관성 등에 의해 수많은 압축과 팽창을 반복한다. 공기기포의 진동은 잠겨있는 구조물과 경계에 유체의 유동 및 이의 가속도와 관련된 항력과 응력을 일으킨다. 또한 수조에 증기나 공기가 주입되므로 sparger주위에 수조 수위가 높아지는 현상도 동반한다.[2]

1.2 증기응축(Steam Condensation)

Air Clearing후 sparger를 통해 방출된 증기가 액상으로 상변환을 일으키면서 저온의 냉각수에 열을 전달하는 응축현상이 발생한다. 수조수 온도가 포화온도보다 충분히 낮고 방출량이 일정 수준이하로 떨어지지 않으면 방출관 끝부분의 증기와 수조수의 경계면은 비교적 안정상태로 정지해 있다. 그러나 증기방출 시간이 길어져 응축 잠열로 수조수의 온도가 포화온도에 접근하면 증기와 수조수의 경계면에서 응축률은 감소하고 어떤 경계점을 지나면 불안정 응축이 된다. 이 때는 공기가 Air Clearing시 수조에서 진동하듯이 증기기포가 진동하면서 응축, 소멸한다. 한편 응축현상은 방출유량에 따라서도 변화하는 것으로 알려져 있으며 수조의 온도와 유량에 따른 응축형태와 이들의 영역도는 그림 1과 2에 나타나 있다.[3][10] 초기에는 증기 방출율이 매우 높고 수조수 온도가 높지 않아 준안정 응축 모드(Quasi-Steady Condensation)를 형성한다.[1] 증기방출율이 점점

떨어지면 방출관에서의 증기와 수조수의 경계면이 마치 흔들리는 촛불처럼 진동하는 응축진동 모드(Condensation Oscillations)를 형성하게 된다. 이 모드는 계속되는 증기방출에 의해 수조수의 온도가 93.3°C(200°F)이상이면 IRWST 구조물에 심각한 열수력 하중을 일으킨다. 증기의 방출율은 초기에는 매우 높으나 방출시간이 길어질수록 수조수의 응축으로 인한 잠열과 고온의 방출수에 의한 열로 인해 수조수의 온도는 올라간다. 증기의 질량유속에 따라 수조수의 온도 45°C~70°C 이상, 증기의 질량유속에 관계없이 93°C이하에서는 과도영역(Transition Region)에 속하게 된다. 수조수의 온도가 93°C이상이면 불완전 응축모드(Incomplete Condensation)를 형성한다. 이 모드에서는 응축과정이 불완전하며 이로 인해 수조경계에 작용하는 심각한 압력진동을 일으킨다.

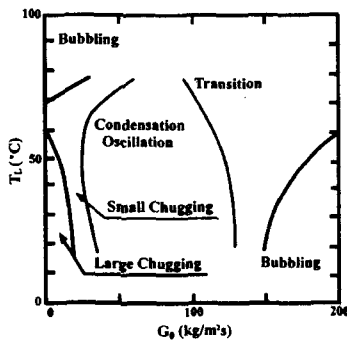


그림 1. 응축영역도 (1)

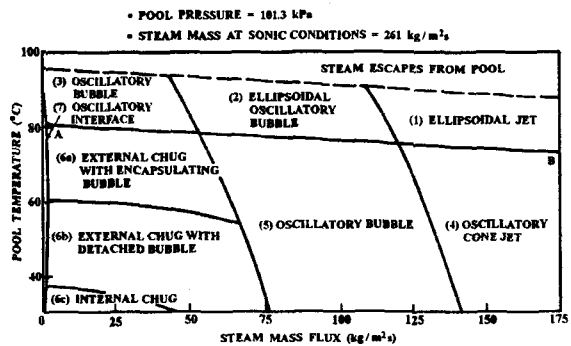


그림 2. 응축영역도 (2)

1.3 Chugging

밸브가 닫히는 증기방출이 끝날 때 주로 일어나는 Chugging 현상은 배관내의 낮은 증기 질량 유량과 낮은 수조수 온도에서 일어난다. 우선 낮은 유량과 큰 온도차(포화온도와 수조 온도차)로 인해 증기응축기 구멍 근처의 증기와 물의 경계면에서 응축이 활발히 일어나 공급된 증기량 보다 더 많은 응축이 일어나면 증기-물 경계면이 응축기 안으로 들어가고 물의 관성과 배관내부의 음압으로 격렬한 증기응축이 일어난다. 이로 인해 더욱 음의 압력이 걸리고 배출관내로 물을 빨아들인다. 얼마 후 이러한 과정에서 물과 증기의 경계면 근처의 물 쪽에 포화 온도에 해당하는 온도 경계층이 형성되어 증기응축은 멈춘다. 이후 들어간 물은 가속을 멈추며 압력을 회복하지만 밀려 들어간 물의 관성에 의해 관 내부는 더욱 압축되어 이전 압력 이상으로 압력이 상승한다. 이후 공급된 증기에 의해 관내의 압력은 더욱 상승하며 이 압력에 의해서 밀려들어온 물은 다시 수조수 쪽으로 밀려난다. 증기와 물의 경계면이 응축기 구멍밖에 까지 도달하면 포화온도 근방의 열경계층은 깨어지고 다시 저온의 냉각수에 의해 경계면에서 심한 응축이 일어나면서 처음 상태로 돌아간다. 이러한 반복 과정을 거치면서 불규칙적이고 격렬한 음향파가 형성되고 잠겨있는 구조물과 경계에 항력을 가한다.[4][5]

2. 모델

2.1 Pipe Clearing Model (Water Clearing & Air Clearing)

앞 절에서 설명했던 Pipe Clearing을 그림 3과 같이 검사체적을 잡아 질량, 운동량, 에너지 방정식을 세워 이론모델을 구축하였다. 이론 모델 해석에 앞서 모델 해석의 편의성이나 현실성을 고려하여 많은 가정들이 도입되었다.

1) 가정

- ① 공기와 물은 이상기체로 배관 내에서 별개의 분리된 물질로 취급.
- ② 물은 비압축성 유체이고 유동은 일차원이라고 가정함.
- ③ 배관 내에서 열전달은 매우 미미할 것으로 예상되므로 단열유동이라고 가정함.
- ④ 물의 마찰계수는 무시하고 증기와 공기의 마찰은 정상상태로 가정.
- ⑤ 물의 가속항, 즉, Added Mass 고려.
- ⑥ 밸브 개폐시 모델의 편의성을 위해 단순히 열리는 시간동안 시간에 따라 선형적으로 증가한다고 가정.

2) 지배방정식

그림 3과 같이 sparger의 검사체적을 잡아 지배방정식을 구한다.

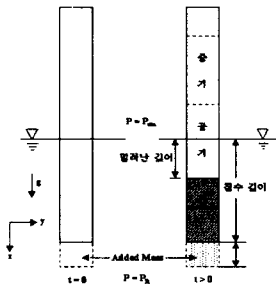


그림 3. Pipe Clearing에 대한 제어체적

$$\textcircled{1} \text{ 질량보존방정식 : } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

$$\textcircled{2} \text{ 운동 방정식 : } \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{f}{D} \frac{1}{2} V|V| = 0$$

③ 에너지 방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial z} \right) - \frac{f}{D} \frac{1}{2} V|V| = 0$$

$$\textcircled{4} \text{ 상태 방정식 : } h = \left(\frac{k}{k-1} \right) \frac{P}{\rho}$$

⑤ 물에 대한 지배 방정식

$$(L_{\text{sub}} - Z_L) V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = V_L^2 = \frac{1}{\rho} [P(t) - P_R]$$

2.2 진동응축 모델

진동응축은 배출관 출구에 붙어 있는 증기기포의 성장과 쇠퇴에 의해 기술한다. 이런 진동응축 모델은 크게 증기를 원통형으로 보는 원통형 증기기포 모델, 구형으로 보는 구형 증기기포 모델 그리고 반구형으로 보는 반구형 증기기포 모델 세 가지로 나누어 볼 수가 있다.[6]

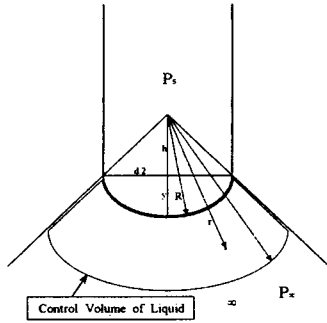


그림 4 반구형 증기기로 모델의 검사체적

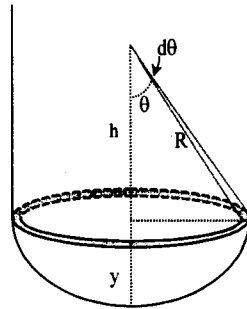


그림 5 반구형 증기기로 모델의 증기 표면적

이 증에서 반구형 증기기로 모델은 배출관 출구에 붙어 있는 증기기로를 구형의 일부분이라고 가정한다. 이 모델은 물의 운동방정식을 유도하기는 어렵지만 가장 현실적인 모델이다.

(그림 4, 그림 5 참조)

표 1 응축진동의 각 모델에 대한 관계식(Nariai, Aya)

현상	모델	지배방정식	보조식
응축진동	원통형 증기기로	$\frac{d^3 \delta z}{dt^3} + \frac{h}{L} \left(\frac{\partial T_s}{\partial \rho_s} \right) \left(\frac{1}{z_0} + \frac{d}{L} \right) \frac{d^2 \delta z}{dt^2} + \frac{\rho_s}{\rho_L z_0 l_m} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right) \frac{d \delta z}{dt} + \frac{4h \Delta T_0}{L d \rho_L z_0 l_m} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right) \delta z = 0$	$f \cdot d_v = 1.34 j_s \left(\frac{C_{PL} \Delta T}{L} \right)^{1.4}$ $h = 66.4 G_0^{0.9} \Delta T_0$
	구형 증기기로	$\frac{d^3 \alpha}{dt^3} + \frac{12}{d} \left(\frac{h}{L} \right)^{3/2} \left(\frac{\Delta T_0}{G_0} \right)^{1/2} \left(\frac{\partial T_s}{\partial \rho_s} \right) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{48 \rho_s h \Delta T_0}{d^2 \rho_L L G_0} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right) \frac{d \alpha}{dt} + \frac{384}{d^3 \rho_L G_0^{5/2}} \left(\frac{h \Delta T_0}{L} \right)^{5/2} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_s} \right) \alpha = 0$	
	반구형 증기기로	$\left[3y^4 + 5 \left(\frac{d}{2} \right)^4 \right] \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + 2y \left[y^4 - \left(\frac{d}{2} \right)^4 \right] \frac{d^2 y}{dt^2} = 8y^2 \frac{(P_s - P_\infty)}{\rho_L} \left[y^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]$	

2.3 Chugging 모델

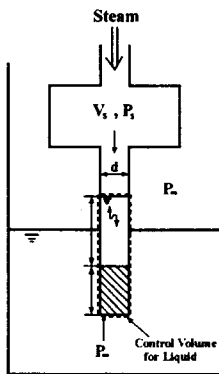


그림 6 Chugging 모델의 검사체적

증기와 물의 경계면이 배출구 밖으로까지 밀려 나왔을 때 저온수에 의해 강력한 응축이 일어나고 배출관 내의 압력이 급격히 떨어진다. 이러한 음의 압력으로 인해 증기와 물의 경계면이 배출관 안으로 빨리 들어가게 되므로 경계면이 배출관내에 머무는 동안 물쪽의 열적경계층은 이미 완전히 발달되기 때문에 증기의 응축은 무시될 수 있다.

Chugging 모델에 대한 관계식은 아래의 표 2에 나타나 있다.[8][9]

(그림 6 참조)

표 2 여러 가지 Chugging 모델에 대한 관계식

현상	모델	Governing Equation	
	Author		
Chugging	분석적인 모델	$\frac{d^3 z}{dt^3} = \omega_C^2 \frac{dz}{dt} + D = 0$	$h = 6.5 \rho_L C_{PL} u_s^{0.6} \left(\frac{\nu_L}{d} \right)^{0.4}$
	H. Nariai & I. Aya		
	분석적인 모델	$u_s - u_L = G_{con} / \left(\rho_s n \frac{\pi}{4} d^2 v \right)$	
	H. Nariai, I. Aya & M. Kobayashi		
	Vent Drywell	$\frac{\partial u}{\partial t} - u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\kappa}{2d} u = \frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \frac{\partial u}{\partial t} - u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_s C_s^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$	
	M. Utamura, K. Moriya & H. Uozumi		
	Pool Structure	$\left(\nabla^2 - \frac{1}{C^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x} \right) P = 0 \quad \rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$	
M. Utamura, K. Moriya & H. Uozumi			
	M. Okazaki	$W_c (h_G - h_L) = \alpha A_G (T_G - T_L)$	

III 결론

IRWST의 응축 모델을 위하여 그간 연구되어온 문헌, 운전경험 및 실험결과를 바탕으로 기존 응축모델에 대해 분석하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 차세대 원전에 도입된 IRWST에 대한 이해와 검토를 바탕으로 안전감압계통의 작동시 발생하는 주요 열수력 현상, 즉 Water Clearing, Air Clearing, 응축진동, Chugging 현상들을 파악하였다. 또한 이들 현상에 대한 기존의 모델(Hideki Nariai, Izuo Aya)들을 토대로 여러 증기응축 모델들에 대해 상세히 유도하고 Chugging 현상에 대해서도 해석적인 모델을 제시하였다.

(2) IRWST에서 일어나는 응축현상은 증기의 질량유속(mass flux)과 수조의 수온(ΔT_{sub})에 따라 결정된다. 이러한 응축현상도를 수조온도, 질량속의 함수로 제시하였다.

IV 향후 연구 과제

이러한 연구 성과 외에도 IRWST의 성공적인 도입을 위해 몇 가지 추가 연구가 필요하다.

(1) 안전감압계통의 작동시 초기 하중인 Water Clearing과 Air Clearing의 하중이 수조에 미치는 영향 분석과 응축현상 관련 하중이 구조물 및 원자로 계통에 미치는 영향의 체계적인 계산이 필요하다.

(2) 수조의 온도와 증기의 질량속에 따른 응축현상의 체계적인 연구와 신뢰성 있는 응축현상도가 필요하며 응축이론의 열전달계수, Virtual Mass, 반구형 모델인 경우 반구의 높이에 대한 상관

식이 필요하다.

(3) KNGR의 IRWST는 I-type의 sparger를 사용하므로 구멍에서의 Drag Damping에 대한 고려가 필요하다.

참고문헌

- [1] 박구원, 이세원, 고희진, 장영식, "IRWST Hydrodynamic Loads in KNGR", KOPEC
- [2] Harry Good, Michael Lewis, James Fitch, Richard Mattson, "Analytically Predicted Versus Measured Response of a Free-Standing Steel Containment Vessel Subjected to Safety-Relief Valve Discharge Loads", Nuclear Engineering and Design 102, 1987
- [3] RT Lahey, Jr. , FJ Moody, "The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor" , ANS, Chapter 11
- [4] Izuo Aya, Hideki Nariai, "Evaluation of Heat-Transfer Coefficient at Direct-Contact Condensation of Cold Water and Steam", Nuclear Engineering and Design 131, 1991
- [5] Izuo Aya, Hideki Nariai, and Michiyuki Kobayashi, "Pressure and Fluid Oscillation in Vent System due to Steam Condensation(I).", Journal of Nuclear Science and Technology, 17, 1990
- [6] Izuo Aya, Hideki Nariai, "Oscillation Frequencies at Condensation Oscillation during Steam Condensation in Subcooled Water", JSME International Journal Series II Vol. 31, No.3, 1988
- [7] Izuo Aya, Michiyuki Kobayashi, "Pressure and Fluid Oscillation in Vent System due to Steam Condensation (II).", Journal of Nuclear Science and Technology, 20, 1983
- [8] Motoaki Okazaki, "Analysis for Pressure Oscillation Phenomena Induced by Steam Condensation in Containment with Pressure Suppression System,(I)", Nuclear Science and Technology, Jan. 1979.
- [9] Motoaki Utamura, Kumiaki Moriya, Hiroto Uozumi, "Numerical Analysis on Pressure Propagation in Pressure Suppression System Due to Steam Bubble Collapse" , Journal of Nuclear Science and Technology 21[4], April 1986
- [10] C.K. Chan, C.K.B. Lee, "A Regime Map for Direct Contact Condensation" , International Journal Multiphase Flow, Vol. 8, No. 1 , 1982