한국에너지공학회지(1998), 제7권 제2호
Energy Engg. J(1998), Vol. 7, No. 2, pp. 202~208

증기방출배관의 급격과도현상에 대한 해석적 연구

조봉현 · 김환열 · 강형석 · 배윤영 · 이계복*
한국원자력연구소, *충북대학교

Analytical Study on the Discharge Transients of a Steam Discharging Pipe

Bong Hyun Cho, Hwan Yeol Kim, Hyung Seok Kang, Yoon Yoeng Bae and Kye Bock Lee*
Korea Atomic Energy Research Institute
**School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University*

요 약

원자력 발전소의 증기방출계통에는 상당수의 산업공정에서 보여지는 바와 같이 배관을 통해 응축성 기체를 침수 분사시켜 응축시키는 과정이 포함된다. 본 연구에서는 증기방출계통 파이프와 지지물의 설계에 사용되는 동적 하중을 계산하기 위하여 증기방출 과도현상에 대한 해석을 특성기법을 사용하여 수행하였다. 해석모델은 마찰이 존재하는 균일한 배관을 통해 증기가 수조로 방출되는 경우에 대하여, 증기유량 및 배관 내에 원래 존재하고 있는 공기와 물의 방출유량 등을 고려하였고 압력 및 열원, 밸브, 분지관 등을 포함하였다. 배관의 유동 특성과 동적 하중을 계통 압력, 배관 길이 및 침수 깊이의 변화에 따라 계산하였다. 계산 결과 공기와 물의 경계에서의 배관의 동적 하중, 배관 내의 물 제거 시간 및 물 이동 속도 등은 계통 압력뿐만 아니라 배관 길이 및 침수 깊이의 영향을 받는 것으로 확인되었다.

Abstract — As in the other industrial processes, a nuclear power plant involves a steam relieving process through which condensible steam is discharged and condensed in a subcooled pool. An analysis of steam discharge transients was carried out using the method of characteristics to determine the flow characteristics and dynamic loads of piping that are used for structural design of the piping and its supports. The analysis included not only the steam flow rate but also the flow rates of the air and water which originally exist in the pipe. The analytical model was developed for a uniform pipe with friction through which the flow was discharged into a suppression pool, including the combinations of system elements such as reservoir, valve and branching pipe lines. The piping flow characteristics and dynamic loads were calculated by varying system pressure, pipe length, and submergence depth. It was found that the dynamic load, water clearing time and water clearing velocity at the water/air interface were dependent not only on the system pressure and temperature but also on the pipe length and submergence depth.

1. 서 론

원자력 발전소의 증기 방출 계통은 안전 감압 밸브(safety depressurization valve: SDV) 또는 가압기 안전 밸브(pressurizer safety valve: PSV)를 작동시켜 고온 고압의 증기를 원자로 냉각재 계통으로부터 증기 수용 탱크로 방출 수용하는 안전 계통으로 증기공급계통(nuclear steam supply system: NSSS)과 이 계통을 연결하는 배관, 감압 밸브, 방출되는 증기를 응축시키는 수조, 그리고 밸브로부터 응축수조까지 연결되는 방출배관으로 구성된다. 이 계통이 작동하면 고압의 증기가 수조 내부로 방출되고 이 때 배관 및 수조 내에는 기체의

압축성 효과로 구조물에 큰 하중이 발생할 수 있다. 즉 밸브가 거의 순간적으로 열리면서 압력파가 발생하고 발생된 압력파의 전송 및 반송에 따라서 배관 내에서는 급격한 과도 유동 현상이 일어나며 유체는 쵸킹(choking) 및 음속 유동 현상이 일어나고 이로 인하여 배관 내의 압력은 급격한 증가 및 감소 등이 이루어지면서 배관에 큰 수력적 하중이 발생할 수 있다[1,2].

증기 방출 계통 설계에 있어서 고려해야 할 수력적 하중은 초기 물/공기 방출 하중과 응축 현상에 의한 압력 변동 하중으로 나눌 수 있다. 밸브 작동 순간 증기는 공기가 들어 있는 관속으로 방출되며 방출 증기에 의해 관속의 공기가 압축된다. 공기의 압축에 의하여 관속에 차 있는 물이 방출되면서 물 제트(water jet)를 형성하여 물이 방출될 때까지를 물 방출(water clearing)시기라 하고, 물 방출 시기가 끝나고 공기가 방출되기 시작하여 공기가 완전히 방출될 때까지를 공기방출(air clearing) 시기라 한다. 공기 압축과정에서 관 내 첨두 압력(peak pressure)이 발생하며 압축 공기가 방출하면서 압력 진동을 유발한다. 이러한 공기방출과정이 끝나면 이어서 증기 방출 및 응축이 일어난다.

밸브가 열릴 때에는 고압 유체가 바로 대기압 정도의 낮은 압력에 노출됨으로 인하여 쵸크 유동(choked flow)이라는 특이한 현상이 발생하게 된다. 쵸킹 현상은 방출관을 통한 방출 유량을 제한하게 되며 밸브 개방 시 발생하는 압력파의 전송 및 반송으로 배관에 부가되는 수력적 하중과 유동 특성 해석은 배관 설계를 위해 매우 중요하다. 그러나 이러한 유동 현상은 매우 복잡하므로 주로 실험에 의해 연구가 수행되어 왔다.

현재까지 수행된 증기 방출 실험은 주로 비등경수로형(boiling water reactor: BWR) 원자로에 대해 여러 가지 모델실험과 발전소 시험(in-plant test)이 수행되었고[3,4] 증기 방출에 의해 방출관에 미치는 수력 하중이 증기 방출 장치의 기하 형태, 원자로 운전 조건 등 여러 변수들에 크게 의존하는 것을 보여주고 있다.

현재 개발이 진행중인 국내의 차세대 원전(Korea Next Generation Reactor)은 가압 경수로(pressurized water reactor: PWR) 형태로 증기방출계통을 도입하려고 한다. 비록 증기 방출계통내의 물리적 메카니즘이 비등경수로와 가압경수로가 동일하다 할지라도 두 계통사이에는 계통 운전 압력, 온도, 각각의 방출 배관의 배치 및 안전/방출 밸브의 특성등 기본적인 차이가 존재한다. 이러한 차이점 때문에 비등경수로를 위해 개발된 방법론과 설계 자료를 가압경수로에 적용하기 위해서는 방법론에 대한 평가와 최적 설계점이 요구된다. 가압경수로 증기방출계통은 비등경수로형 원자로와 비교해 작동 압력, 유량, 온도 등 원자로내의 조건이 다르기 때문에 기존의 비등경수로형 원자로에 대해 개발된 증기방출계통을 그대로 적용할 수 없다. 즉 원자로내의 압력과 온도 조건이 증기 방출관의 유동 특성에 미치는 영향을 고려하여 최적 설계 점을 구해야 한다.

본 연구에서는 밸브 개방 시 증기 방출에 의해 물과 공기가 방출되면서 방출 배관에 미치는 수력적 하중에 대한 해석적 연구에 관심을 갖고 공기 방울 진동의 동적 해석 초기 조건으로 사용되는 물/공기 경계면의 압력과 속도를 구하였다. 이를 위해 방출 배관에서의 과도 상태 유동을 풀기 위해 수치 해석을 수행하였다. 편미분 방정식의 일반 해는 구하기 어려워서 특성 곡선 방법(method of characteristics)을 사용하여 편미분 방정식을 전미분 방정식의 형태로 변환하였다. 변환된 방정식은 유한 차분 방정식의 형태로 쉽게 적분할 수 있다.

본 연구에서는 개발 추진중인 가압경수로형 차세대 원자로의 증기 방출 계통의 분석을 위해 방출 배관의 유동 특성과 배관에 미치는 동 하중을 구하기 위한 해석을 수행하였다. 계통 압력과 온도, 배관 길이, 잠김 깊이(submergence depth) 등이 유동 특성과 배관에 동 하중에 미치는 영향을 분석하기 위한 민감도 해석을 수행하였으며 기존의 전형적인 비등경수로형 원자로 증기 방출 계통과 비교 분석하였다.

2. 해석 모형

Fig. 1은 본 해석에서 고려하는 증기방출계통의 모형

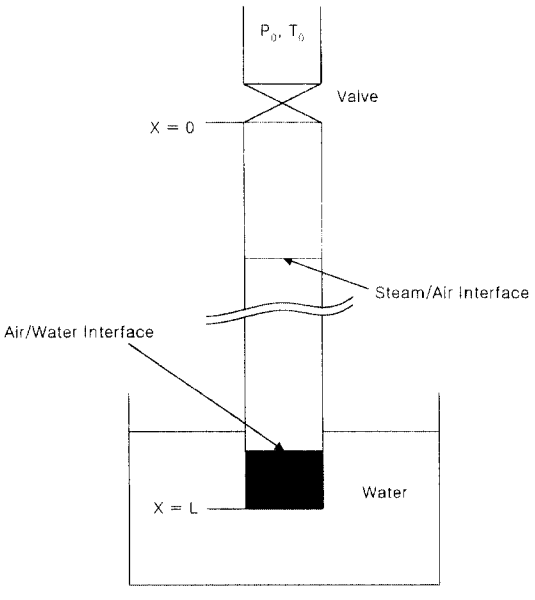

Fig. 1. Discharge piping model.

도이다.

마찰이 존재하는 증기 방출관에서 열유동 해석을 위해 일차원 과도유동에 대한 지배 방정식[7]을 사용하였고 압력, 속도, 밀도 등의 종속 변수는 두 개의 독립 변수 x, t의 함수로 표시된다.

질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식 그리고 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v\frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f}{D}\frac{v|v|}{2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial t} + v\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{1}{2}\frac{f}{D}v^2|v| \tag{3}$$

본 방정식 유도 과정에서 관의 직경은 일정하고, 중력 효과는 무시하였고, 벽면을 통한 열전달은 무시할 수 있다고 가정하였다.

증기와 공기를 이상 기체로 가정하면 엔탈피 h와 음속 a 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$h = \frac{k}{k-1}\frac{p}{\rho} = \frac{a^2}{k-1} \tag{4}$$

편미분 방정식 형태인 지배 방정식 (1)-(3)을 특성 곡선 기법을 이용하여 전미분 방정식으로 변환시키면 특성 곡선 C^+를 따라서는

$$\frac{dx}{dt} = v + a \tag{5}$$

$$dp + \frac{\rho a}{g_c}dv = \frac{f}{D}\frac{\rho}{2g_c}v|v|[(k-1)v - a]dt \tag{6}$$

특성 곡선 C^-를 따라서는

$$\frac{dx}{dt} = v - a \tag{7}$$

$$dp - \frac{\rho a}{g_c}dv = \frac{f}{D}\frac{\rho}{2g_c}v|v|[(k-1)v + a]dt \tag{8}$$

또한 실제 유체 입자를 따라서는

$$\frac{dx}{dt} = v \tag{9}$$

$$d\rho - \frac{g_c}{a^2}dp = -\frac{1}{2}\frac{f}{D}(k-1)\frac{\rho}{a^2}v^2|v|dt \tag{10}$$

을 만족한다.

물의 유동에 대해서는 비압축성 유체로 가정하면 C^+ 곡선을 따라서는

$$dp + \frac{\rho a}{g_c}dv = -\frac{f}{D}\frac{\rho}{2g_c}v|v|adt \tag{11}$$

C^- 곡선을 따라서는

$$dp - \frac{\rho a}{g_c}dv = \frac{f}{D}\frac{\rho}{2g_c}v|v|adt \tag{12}$$

을 만족한다.

3. 수치 해석

지배 방정식의 유동 변수들을 공간과 시간의 함수(x, t)로 풀기 위해 유한 차분 방법을 사용한 수치 해석 방법을 채택하였다. 방출 배관을 N개의 구간으로 나누었고 각 구간은 Δx의 길이를 갖는다. Δt는 일정하게 유지시켰다.

지배 방정식의 유한 차분 근사식은 다음과 같다[7].

$$p_P - p_R + \frac{\rho_R a_R}{g_c}(v_P - v_R) = \frac{f_R}{D}\frac{\rho_R}{2g_c}v_R|v_R| \cdot [(k-1)v_R - a_R] \cdot \Delta t \tag{13}$$

$$p_P - p_S - \frac{\rho_S a_S}{g_c}(v_P - v_S) = \frac{f_S}{D}\frac{\rho_S}{2g_c}v_S|v_S| \cdot [(k-1)v_S + a_S] \cdot \Delta t \tag{14}$$

$$\rho_P - \rho_Q - \frac{g_c}{a_Q^2}(p_P - p_Q) = -\frac{1}{2}\frac{f_Q}{D}(k-1)\frac{\rho_Q}{a_Q^2}v_Q^2|v_Q| \cdot \Delta t \tag{15}$$

여기서 R, S, Q는 Fig. 2에 나타낸 점들이며 특성 곡선이 격자점 사이에 존재할 경우는 두 격자점 값에서

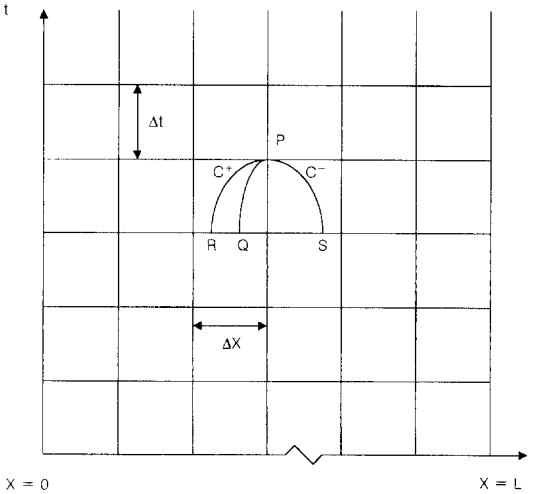

Fig. 2. Characteristic lines in the X-t plane.

선형 보간법을 사용하여 계산을 수행한다.

초기 조건인 시간 t=0 때 배관내의 모든 유체는 정지해 있으며 압력은 대기압이며 방출배관은 물속에 일정 깊이만큼 잠겨 있다. 배관입구인 밸브에서의 경계 조건은 방출 증기 유량으로 나타낼 수 있다[7].

$$\dot{m} = A\rho_e v_e \tag{16}$$

밸브 입, 출구에서의 에너지 보존을 고려하면

$$h_o = h_e + \frac{v_e^2}{2g} \tag{17}$$

이상기체 관계식을 이용하면

$$\frac{v_e^2}{2g} = \frac{k}{k-1}\left(\frac{p_o}{\rho_o}\right) - \frac{k}{k-1}\frac{A}{\dot{m}} v_e p_e \tag{18}$$

로 나타낼 수 있다.

만약 (p_e/p_o)가 임계비 이하면 밸브에서 쵸킹이 일어나며 임계비보다 크면 밸브를 통한 유동은 아음속 유동이 된다.

임계비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{p_e}{p_{o_{crit}}} = \left[\frac{2}{k+1}\right]^{\frac{k}{k-1}} \tag{19}$$

쵸킹시 유량은

$$\dot{m} = c_f A_t \frac{p_o}{\sqrt{T_o}} \cdot \sqrt{\frac{g_c k}{R_g}} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-\frac{k+1}{2(k-1)}} \tag{20}$$

아음속 유량은

$$\dot{m} = c_f A_t \frac{p_o}{\sqrt{R_g T_o}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \cdot \left[\left(\frac{p_e}{p_o}\right)^{\frac{1}{k}} - \left(\frac{p_e}{p_o}\right)^{\frac{k+1}{2k}}\right] \tag{21}$$

배관 끝 부분인 출구에서의 경계 조건은 방출 배관 출구 유동 저항이 ζ 일 경우에 다음과 같다[8].

$$p_u - p_e = \zeta\rho\frac{v^2}{2g_c} \tag{22}$$

여기에서 p_u와 p_d는 각각 배관 전단과 후단에서의 압력을 나타낸다.

물/공기 경계면과 증기/공기 경계면은 배관 단면 내에서 항상 균일하게 유지되고 움직이며 두 물질 사이를 격리시킨다고 가정한다. 초기에 물은 방출배관 출구부터 어느 거리까지 차 있다. Δx의 크기에 따라 공기/물 경계면은 두 개의 절점(node) 사이에 존재한다. 이 경계면의 상류(upstream) 절점을 N_1, N_1으로부터 경계면까지의 거리를 x_L로 정의한다. 밸브가 열리면 증기가 방출되고 공기가 압축되므로 공기/물 경계면은 움직이게 된다. 경계면에서의 유동 조건은 두 절점 N_1, N_2의 전 시간 단계에서의 유동 조건을 사용하면 구할 수 있다. 또한 절점 N_1, N_2의 유동 조건은 전 시간 단계의 경계면 유동 조건을 사용하여 구할 수 있다. 즉 $t+\Delta t$에서 절점 N_1의 유동 조건을 계산하기 위해 먼저 시간 t에서의 절점 N_1과 공기/물 경계면의 유동 조건을 사용한다. 다음은 시간 $t+\Delta t$에서의 공기/물 경계면 조건, Fig. 3의 점 K, 을 사용한다. 즉 시간 t에서 거리 x_L과 경계면 속도 v_L이 주어지면 x_K는 다음 식에서 구할 수 있다.

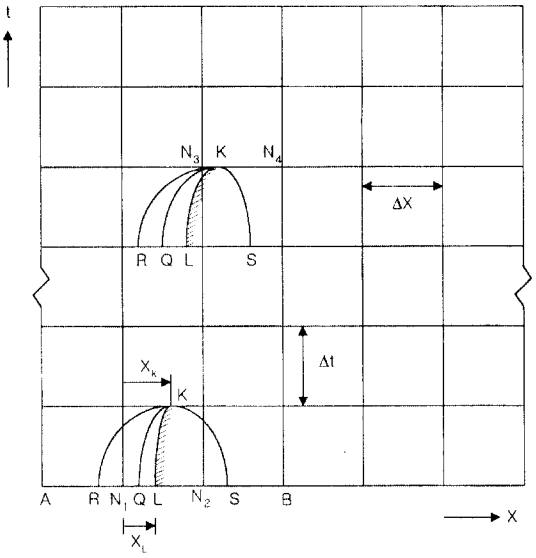

Fig. 3. Air/water interface movement on the X-t grid.

$$x_K = x_L + (v_L \cdot \Delta t) \tag{22}$$

점 R, Q, S에서의 유동 조건은 내삽(interpolation)을 사용해서 구할 수 있다. 점 K에서의 속도는 방정식 (13), (14)를 사용하여 구한다. 물/공기 경계면의 위치를 더 정확하게 구하기 위해 초기에 가정한 v_L과 계산한 v_K의 평균값을 사용하여 반복 계산을 수행한다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서 사용된 전산해석 프로그램의 검증을 위해 비등경수로형 원자로에서 방출밸브 작동 실험 시 측정된 압력 값[7]과 비교하였다. 실험에서 압력계는 물 표면으로부터 0.305 m 만큼 떨어져 있다. Fig. 4는 실험치와 해석 결과를 나타내는데 전체적인 압력변화 경향이 일치하는 것을 보여준다. 물/공기 소거시의 최대 압력

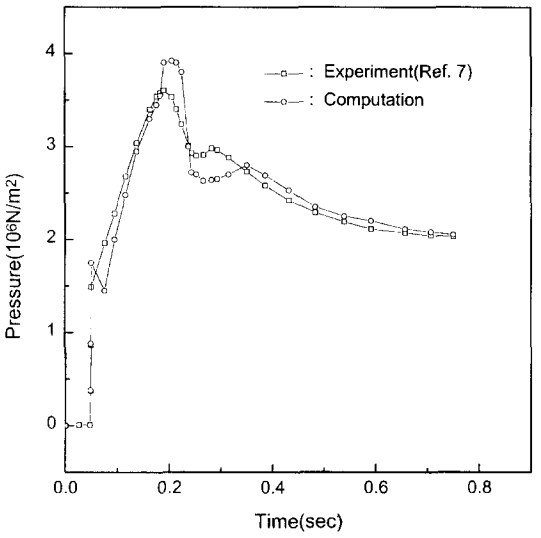

Fig. 4. Comparison between computed and experimental results.

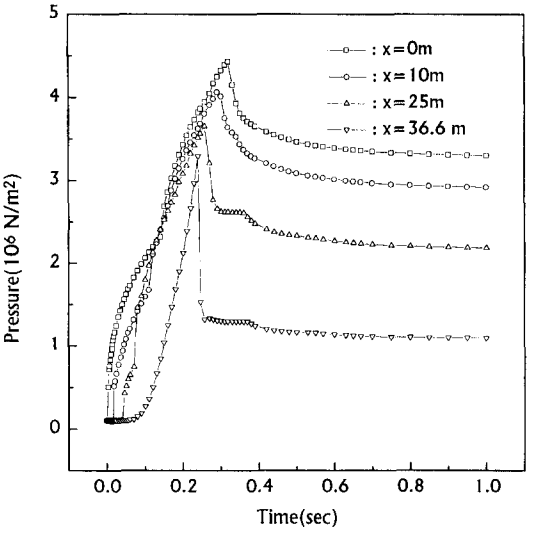

Fig. 5. Pressure variation with time.

값과 국부적인 차이는 밸브의 작동특성, 배관 마찰계수 등의 가정 및 입력 값 차이에 의한 것으로 판단된다.

증기방출배관에 대한 해석은 가압기에 포화증기가 차 있으며 밸브 후단과 물이 잠긴 부분까지의 배관 내에는 공기가 차 있는 것으로 가정하였다. 초기조건으로 t = 0 일 때 배관내의 유체는 정지해 있으며 압력은 대기압이고 배관은 물 속에 일정 깊이만큼 잠겨있는 상태에서 가압기와 배관을 차단하고 있는 방출밸브가 순간적으로 열린다.

배관 전체 길이가 36.6 m, 잠김 깊이 5 m, 수조 압력이 0.1 MPa로 유지되는 비등경수로의 경우에 대한 유동 특성을 나타내는 해석 결과를 Figs. 5, 6에 나타냈다.

Fig. 5는 방출밸브의 후단 특정 4지점에서 시간에 따른 배관 내부의 압력 변화를 표시한 것으로 각 지점에서 공히 초기 0.4초까지는 급격한 변화를 보인다. 이는 밸브를 개방함으로써 발생되는 압력파의 영향으로 인한 것이다. 밸브가 열리면 공기의 압력이 증가하여 공기 속도가 증가하며 이러한 변화가 관내로 전파된다. 압력파가 물 표면에 도달하면 공기 속도는 감소하고 압력파가 밸브 쪽으로 반송되며 동시에 물이 이동하게 된다. Fig. 5에서 밸브 개방 시 발생한 압력파는 t=0.06초 근처에서 물 표면에 도착하여 그 지점에서 압력이 증가하기 시작하지만 경계면에서 반사되어 반송파가 발생하므로 배관 내의 압력 증가가 둔화되는 것을 보여주고 t=0.15초 근처에서 압력파가 밸브에 도달하여 다시 상류에서 하류로 전송되므로 압력이 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 압력파의 전송 및 반송에 의해 압력 변화가 일어나고 t=0.246초 근방에서 물 방출이 완료된 후로는 압력이 거의 일정한 상태로 유지되면서 유동은 정상 상태를 향하여 단순 변화를 하게 된다. Fig. 6는 속도 변화를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 압력과 마찬가지로 압력파의 영향으로 급격한 변화를 보여준다. 물 방출이 완료될 때까지의 과도 유동특성은 수조 물에 동적 하중을 야기 시키는데 이러한 하중도 압력파와 물의 가속에 의해 영향을 받는다. 그림에서 보여지는 바와 같이 물의 가속으로 인한 효과로 물 방출이 완료될 때 가장 큰 속도를 나타낸다. 정방향 압력파는 음속에 유체 속도가

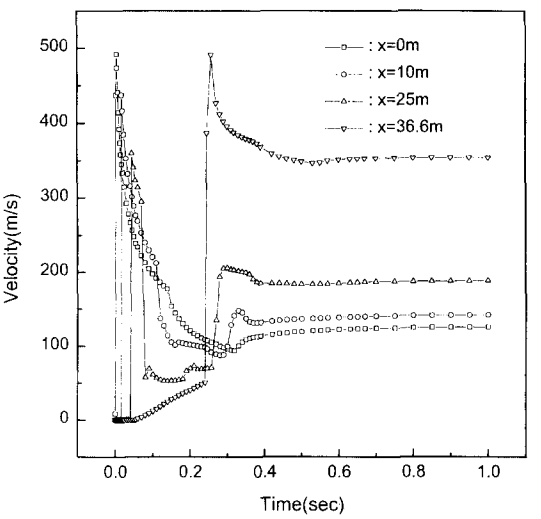

Fig. 6. Velocity variation with time.

더해져서 전파되기 때문에 그 속력이 매우 크며 역방향 압력파는 음속에 유체 속도가 빼져서 전파되기 때문에 비교적 속도가 작아서 압력파의 전파 시간이 더 걸리는 경향을 보인다. 하류지점의 속도가 상류지점의 속도보다 큰 것은 압력이 감소하여 증기가 팽창하기 때문이다.

가압경수로의 증기방출계통은 비등경수로와 비교해 원자로 운전조건이 다르고 방출배관 길이 등 기하 형태도 다르기 때문에 비등경수로에 대해 개발된 설계 특성을 적용하기 위해서는 원자로 운전조건, 기하 형태에 대한 민감도 분석이 요구된다. 본 연구에서 가압경수로와 비등경수로의 비교를 위해 사용한 주요 입력 자료는 Table 1과 같다.

Fig. 7은 가압경수로와 비등경수로에서 물 잠김 깊이에 따른 물 방출시간과 물 방출이 완료되었을 때의 물/공기 경계면의 압력, 속도를 나타낸다. 각 경우 모두 잠김 깊이가 증가함에 따라 압력, 속도가 커지고 물 방출 시간이 길어진다. 물/공기 경계면의 압력, 온도와 물 방출시간은 방출배관 설계 시 매우 중요한 변수들이다. 따라서 본 해석을 통해 방출배관 설계 시 최적 설계 점에 해당하는 물 잠김 깊이에 대한 압력 크기와 경향을 예

Table 1. Input data for transient analysis.

	가압경수로 (PWR)	비등경수로 (BWR)
reactor pressure, N/m^2	1.72×10^7	7.93×10^6
pipe length, m	48.7	36.6
pipe submerged depth, m	3.5-7	3.5-7

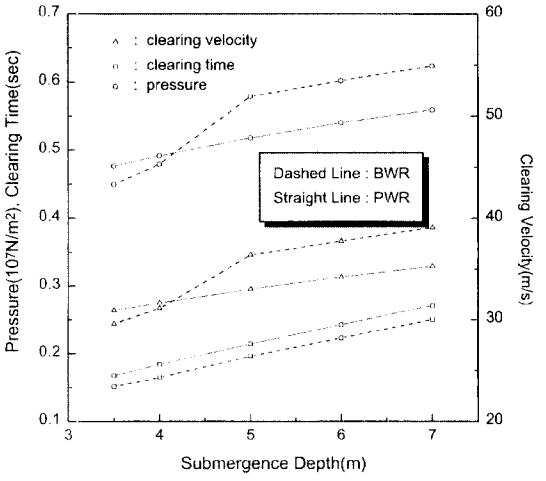

Fig. 7. Dependence of ari/water interface conditions on submergence.

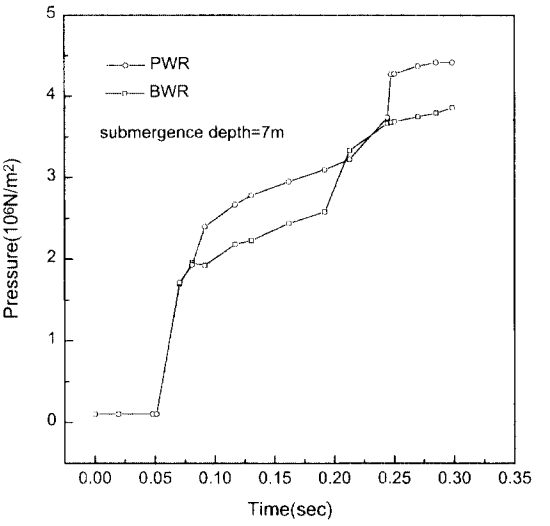

Fig. 8. Pressure distribution at the water/air interface.

측할 수 있다.

Fig. 8은 물/공기 경계면의 시간에 따른 압력 변화를 보여준다. 비록 경수로가 계통 압력이 높지만 배관 길이의 차이에 의해 압력파가 전송되거나 반송되는 시간의 차이로 물/공기 경계면의 압력 크기가 바뀔 수 있다. 즉 비등경수로의 경우 배관 길이가 가압경수로에 비해 짧으므로 압력파의 전송 및 반송 시간이 짧아 압력 변화가 더욱 빨리 일어나 국부적으로 압력 크기가 더 커질 수 있다. 따라서 설계 시 배관 길이와 계통 압력, 온도에 따른 방출 배관내의 압력 변화를 고려하여야 한다.

5. 결 론

증기 방출 배관의 급격 과도유동 현상에서 발생하는 물/공기의 방출 하중 평가를 위해 특성 기법을 사용한 해석적 방법을 사용하였다. 본 연구를 통해 방출 배관에서의 급격과도 유동특성(압력, 속도, 밀도 등) 및 물과 공기 방출시간을 파악할 수 있었다. 물 방출 시 방출배관에 걸리는 최대 하중은 압력 반송파가 주 요인임을 확인하였다. 따라서 방출 배관내의 동적 하중은 압력 반송파에 영향을 미치는 계통 압력, 온도, 잠김 깊이, 배관 배치 및 길이 등에 좌우된다. 국내에서 추진중인 차세대 원자로에 사용되는 가압경수로형 증기 방출 계통은 기존의 비등경수로형 원자로와 비교해 계통 압력, 온도와 배관 구조 및 길이 등이 다르므로 비등경수로형 증기 방출 계통과는 압력 반송파의 차이로 인해 다른 동적 하중 특성을 나타낸다.

사용기호

A : 유동 단면적
a : 음속
C^+, C^- : 유동 특성 곡선
c_p, c_v : 정압, 정적 비열
D : 관 직경
f : 마찰 계수
h : 엔탈피
k : 비열 비
$\dot{m}$: 방출 증기유량
p : 압력
R_g : 가스 상수
t : 시간
v : 속도
ρ : 밀도
ζ : 출구 유동저항

참고문헌

1. Wylie, E.B., Streeter, V.L. and Suo, L.: *Fluid Transients in Systems*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 80-93 (1993).
2. Boure, J.A., Fritte, A.A., Giot, M.M. and Reocreux, M.L.: "Highlight of Two-Phase Critical Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 3, pp. 1-22 (1976).
3. Su, T.M.: "Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments," *NUREG-0783*, USNRC (1981).
4. Su, T.M.: "Safety/Relief Valve Quencher Loads: Evaluation for BWR Mark II and Mark III Containment," *NUREG-0802*, USNRC (1982).
5. Sonin, A.A.: "Scaling Laws for Small-Scale Modeling of Steam Relief into Water Pools," *Nucl. Engrg. Des.*, Vol. 65, pp. 17-21 (1981).
6. Chun, J.H. and Sonin, A.A.: "Small-Scale Simulation of Vapor Discharges into Subcooled Liquid Pools," *Nucl. Engrg. Des.*, Vol. 85, pp. 353-362 (1985).
7. Safat, H.H.: "Analysis of the Safety Relief Valve Discharge Transients of a Boiling Water Reactor," *2nd International Conference on Pressure Surges*, pp. E1.1-E1.17 (1976).
8. Moody, F.J.: "Time-Dependent Pipe Forces Caused by Blowdown and Flow Stoppage," *Trans. ASME J. Fluids Engrg.*, Vol. 95, pp. 422-428 (1973).
9. 심윤섭 외 7인: 증기분사기의 수력적 특성 연구, *KAERI/RR-1303/93*, 한국원 자력연구소 (1993).
10. Idelchik, I.E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*, Hemisphere Pub. Co. (1986).