

증기방출계통의 초기작동시 열유체적 특성

심 윤섭, 김 연식, 위 명환, 이기영, 이 준
한국원자력연구소

요 약

증기방출계통은 원자력 발전소의 안전을 위한 계통인데 이 계통의 작동 초기에 복잡한 열유체적 현상과 더불어 큰 유체적 진동하중이 구조물에 발생하게 됨으로 이 계통의 설계 개발을 위하여는 이러한 초기현상에 대한 정성적 및 정량적인 이해가 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 이러한 초기 현상을 해석할 수 있는 방법론을 개발하고 이를 이용하여 이 현상의 특성을 분석하였으며 종합적으로 유체적 진동 하중으로부터 구조물의 기계적 건전성을 확보하기 위한 이 계통의 설계 방향을 제시하였다.

1. 서론

원자력 발전소에 있는 증기방출계통은 발전소의 안전을 위하여 NSSS 의 유체를 급격히 방출하여 NSSS 를 급속 감압시키는 계통인데 구성은 NSSS 과 이 계통을 연결시키는 배관, 급속감압 밸브, 방출되는 증기가 수조에서 원활히 응축되도록 분사하는 증기분사기 및 분사된 증기를 수용하는 응축수조, 그리고 감압밸브로부터 응축수조까지 유체를 유도하는 배관으로 구성되어 있는 비교적 단순한 구조의 계통이다. 그러나 이 계통에는 계통작동의 급격성으로 여러가지 열유체적인 현상이 발생하게 된다. 그중 특히 작동 초기에는 발생하는 현상이 매우 복잡하며 또한 전 작동기간 중의 가장 큰 유체적 하중이 구조물에 발생하게 됨으로 이 계통의 설계개발을 위하여는 증기방출계통 작동초기의 현상에 대한 정성적 및 정량적인 이해의 선행이 필요하다. 증기분사기 상류의 밸브가 개방되면 먼저 배관 끝부분에 차있던 물이 방출되며 이 기간동안에 배관내에서는 급격한 압력의 변동으로 인한 압력파가 발생하며 압력파의 전송 및 반사의 작용으로 배관내의 압력이 급격히 상승하게 되며 이어서 밸브개방전에 배관을 채우고 있던 불응축성 기체가 물방출 기간동안 상승된 배관내의 고압을 배압 (back pressure) 으로 하여 방출되게 되며 수조에 방출된 불응축성 기체는 수조의 유체와 열·유체역학적 불평형으로 인하여 수조내에서 진동을 하게 되고 이 진동은 수조 구조물에 진동하중을 발생하게 된다. 이러한 공기 방출 과정이 끝나면 이어서 비교적 안정적인 증기 방출 및 응축의 작동단계로 들어가게 되는데 이러한 현상은 원자력 발전소에서, 특히 비등 가압수 원자로에서, 증기방출계통의 중요성으로 인하여 오랜 기간의 연구가 있었다. 그러나 이 계통의 설계/해석 방법론설정에 필요한 성격의 포괄적이며 구체적인 수준의 연구결과는 상업적인 이유로 공개가 되어있지 않아 이들 기법의 신뢰성, 성능 및 기법의 구체적인 내용 등에 대하여 알려져 있지 않다. 따라서 국내에서 이 계통에 대한 설계를 개발하기 위하여는 이 계통의 해석 방법론의 개발·확보가 필요하다. 이러한 필요성으로 본 연구는 증기 응축단계 이전 단계인 공기

방출 단계의 현상에 대한 해석 방법론의 개발 및 특성 분석을 수행하였으며 이 논문은 기 발표된 연구논문 [1,2] 의 후속 연구에 대한 결과이다.

2. 해석 방법론의 개발

가. 배관내의 급격과도 유동

본 연구에서 사용한 모형지배식은 참고문헌 [1] 에 기술된 지배식 중에서 에너지식을 배관과 유체간의 열전달 현상을 고려할 수 있도록 (1)식과 같이 에너지식을 개선시켰으며 나머지 지배식은 참고문헌 [1] 과 같으며 실제 전산 해석은 설정된 편미분방정식 지배식 체제는 특성곡선기법 (method of characteristics) 체제로 변환시켜서 이루어졌다. (1)식에서 hc 는 배관유체와 배관벽면간의 열전달 계수를 의미한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{f}{D} \frac{v^2 |v|}{2} - \frac{4h_c(T - T_{wall})}{\rho D} \quad (1)$$

나. 방출 기체 거동 및 벽면 압력 특성

1) 기체의 거동

수조내에 형성된 기포와 수조의 유체장 (field) 는 상호간의 열역학적 불평형으로 기포의 수축과 팽창의 반복 현상이 이루어지게 되는데 이러한 현상의 수학적 기술은 현상의 물리적인 특성으로부터 기포내의 기체를 이상 기체로 묘사하고 수조내 물에서의 유동현상은 전파 효과보다 bulk flow 효과 [3] 가 더 크므로 [2] bulk flow 로서 potential flow 유동장으로 이상화할 수 있다. 이 때의 수학적 관계식은 참고문헌 [2] 의 지배식 체제와 동일하며 그 형태는 다음과 같다.

$$P_b(t) - P_\infty = \rho_w \left[R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\frac{4}{3} \pi \frac{d}{dt} (R^3 \rho_b) = \dot{m}(t) \quad (3)$$

$$\frac{4}{3} \pi \frac{d}{dt} (R^3 u_b \rho_b) = \dot{m}(t) h_i(t) - 4\pi R^2 P_s \frac{dR}{dt} - 4\pi h R^2 (T_b - T_p) \quad (4)$$

$$p = \rho RT \quad (5)$$

이 식들에서 R 은 기포의 반경, U 는 내부에너지를 의미하며 하첨자 i 는 기포에의 유입, b 는 기포, P 는 수조내의 물, 그리고 S 는 표면에서의 값을 각각 의미한다.

이 식들에 필요한 초기조건은 이전 연구의 참고문헌 [2] 의 방법을 대폭 수정.개선한 방법으로서 기포형성과정을 추적.분석하여 나온 결과로부터 초기조건이 설정되도록 하여 해석모형에 기포형성과정의 physics 가 직접 반영되도록 하였다. 그림 2는 이러한 접근을 위하여 필요한 기포형성과정에 대한 이해를 위하여 수행한 간이 실험의 사진중 하나인데 방출된 기체로부터 형성되는 기포의 크기는 방출구멍의 크기에 비하여 현저하게 큰 것이 만들어진다는 점과 연속 방출시는 기포가 작은 것에서 부터 큰 것으로 다양하게 기포가 생성됨에 비하여 단속적인 방출시는 소수의 커다란 기포로 집약되는 경향이 있다는 것을 알 수 있었다. 이러한 관찰 및 기포형성과정의 기포의 변형 그리고 이에 따른 표면일 (surface work) 등 기포형성 과정에 중요한 현상들의 물리적인 특성을 고려하여 이들 중요현상을 모형화하였는데 이 과정에서 현상을 수식화하는 데에 따르는 복잡성 또는 해석의 불가능성을 다음과 같은 모형계수를 도입하여 해소하였다.

$$a_{psw} = \frac{\int_0^{R_0} 4\pi R^2 P dR}{P_0 \int_0^{R_0} 4\pi R^2 dR}, \quad a_{pv} = 1 + \frac{R_0 \frac{dV}{dt} \Big|_{t=t_0}}{\frac{3}{2} V_0^2} \quad (6)$$

$$a_v = 1 + \frac{\frac{R_0}{3} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dt} \Big|_{t=t_0} \right)}{\dot{m}_0 / \rho_0 A_0} \quad (7)$$

이들 모형 계수의 물리적인 의미는 a_{psw} 는 기포가 형성되는 과정중의 기포 압력 변화 정도를, a_{pv} 는 기포형성 과정중의 기포 표면 속도 변화 정도를, 그리고 a_v 는 기체 밀도의 시간적 변화율의 영향정도를 각각 나타내는 것으로서 이들의 값은 1에 가까운 값을 지니게 된다.

2) 수조내 압력 전파

수조내에 형성된 기포의 진동은 수조내 압력장에 영향을 주어 과도적 압력장이 형성되고 기포의 압력 섭동이 전지역에 전파되게 된다. 이 때의 전파는 압력섭동원이 수조내에 여러개 존재함으로써 인하여 실제의 현상은 상당히 복잡하게 이루어지는 데 본 연구의 주제가 실제 발전소에 적용될 해석 방법론을 개발하기 위함임을 고려하여 현실적인 접근을 수행하고 이 접근의 단순화로 인한 오차는 모형상의 보수적인 인자로 처리한다. 현실적인 접근방법으로서 수조의 유동장을 구형 source 가 존재하는 potential flow 장으로 간주하였는데 이 때의 벽면 압력의 변화는 다음 식으로 기술된다.

$$P(r, t) - P_\infty = \rho \sum_{i=1}^n \left[\frac{R_i}{r_i} \left[\frac{2}{\rho} (P_{bi} - P_\infty) + \left(\frac{dR_i}{dt} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{2}{r_i^5} R_i^3 \cdot \left\{ (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 \right\} \right\} \right] - \sum_{j=i+1}^n R_i^2 R_j^2 \frac{dR_i}{dt} \frac{dR_j}{dt} \frac{1}{r_i^3} \frac{1}{r_j^3} \cdot \left\{ (y - Y_i)(y - Y_j) + (z - Z_i)(z - Z_j) \right\} \right] \quad (8)$$

이 식에서 n 은 기포의 수 또는 구형 source 의 갯수, R 은 기포의 반경, r 은 기포와 벽면의 한점간의 거리, x, y, z 는 벽면 점의 좌표, 그리고 X, Y, Z 는 소스(기포)의 좌표이며 하첨자 i 는 소스의 순번을 의미한다.

다. 전산 해석 code 체제 : DYN-BUBBLE4 의 개발

이상과 같은 수학적 모형을 구현한 해석코드 체제로서 방출배관 특성을 분석하는 전산 코드 DYN 을, 그리고 기포 특성 및 수조내 압력 전파 특성을 분석하는 전산코드 BUBBLE4 를 개발하였다. DYN 의 해석결과는 BUBBLE4 해석의 경계조건이 된다. BUBBLE4 의 개발에서는, 압력이 최대가 되는 시점에서는 압력 변화가 급격히 이루어지는 데에 비하여 반대로 압력이 최소가 되는 시점에서는 압력 변화가 극히 완만하기 때문에 적정 해석 분해능의 확보 및 계산시간 사용의 최적화를 이루기 위하여 시간 적분의 시간폭 (time step size) 을 시간폭 동안내의 기포압력 변화 크기가 수조압력의 일정비율안에 들 수 있도록 자동조절논리를 사용하였다.

본 연구에서 설정한 해석 모형에 나타나는 모형 상수는 모형상수가 물리적으로 변화 가능한 값의 범위폭에 대한 결과의 변화 정도에 대한 평가를 통한 모형계수 값의 타당성 평가 방법 또는 설정된 모형계수 값에 따른 계산의 결과로부터 역계산을 통하여 모형계수값의 타당성을 확인하는 방법등을 이용하여 적절한 모형계수의 값을 설정하였다. 그림 2는 이러한 작업결과 중의 하나로서 모형계수 a_{psw} 대한 평가인데 $\pm 50\%$ 정도의 차이가 결과에 미치는 영향이 미미함을 보여주고 있

다.

3. 특성 분석 결과

이상과 같은 작업을 통하여 설정한 분석 체제를 이용하여 증기방출계통의 작동 초기시의 현상 특성을 분석하였는데 여기서는 이 분석의 결과 중 일부 대표적인 것을 보인다. 좀더 자세한 사항은 별도의 상세 보고서 [4] 에 기술되어 있다.

그림 3은 방출배관에서 유체와 배관과의 열전달 여부가 미치는 영향을 보이는 것인데 배관으로의 열전달로 인하여 유체의 에너지가 감소하여 배관 출구의 압력이 감소하고 있는데 이는 궁극적으로 수조내 구조물에 걸리는 하중을 완화시키게 된다,

그림 4 및 그림 5는 증기분사기의 잠김 깊이가 배관에서의 공기방출 특성에 미치는 영향을 보이고 있는데 이들로부터 분사기가 깊이 잠길수록 더 높은 온도의 공기가 더 짧아지는 공기소거 시간 동안 방출되는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 뒤에 설명되는 기포거동 특성과 더불어 수조내 구조물에 걸리는 수력적 진동 하중을 증가시키게 한다

그림 6은 본 분석 기준 조건 경우의 기포내부 압력과 수조 벽면 한점의 압력 변화 특성을 보인 것인데 벽면의 점은 분사기로부터 2m 떨어진 지점이다. 기포의 진폭에 비하여 벽면의 진폭이 훨씬 작는데 이는 기포 압력이 수조내에서 전파되어 가는 과정 중의 감쇄현상 때문이며 주기가 동일한 것은 기포와 벽간의 거리가 물속 음속 (압력 변동 신호의 전파속도) 과 압력 섭동 시간에 의해 결정지어지는 대표적인 특성 길이에 비하여 훨씬 작아 bulk flow 특성이 주목성이 되기 때문이다. 이 그림의 조건시 기포 압력의 진동 주주파수는 7Hz 인데 주진동성분의 진폭이 이차 주파수의 진폭성분의 진폭의 4배 정도로 주진동모드의 영향이 압도적이었다.

그림 8은 방출되는 공기의 총량은 일정하되 공기가 방출되는 시간 (공기 소거시간) 이 변할 경우의 분석인데 압력 진동의 진폭 및 주기 뿐 아니라 압력 진동 파형 자체도 변하는 것과 또한 소거시간이 짧을 수록 압력이 양의 최대가 되는 시점에 압력이 매우 급격히 변하는 것을 알 수 있다.

기포압력 및 수조의 압력장은 진동하는 기포의 크기에 크게 좌우되며 따라서 공기방출조건이 동일할 경우에는 방출되는 공기로부터 몇개의 영향력 있는 기포가 형성되느냐에 따라 압력 진동의 특성이 크게 변하게 된다. 그림 9는 이러한 영향을 분석한 것인데 수평축 Nb 는 방출되는 총 공기중 영향력 있는 기포의 각각에 수용된 공기의 정도의 역수를 표시한다. 즉 Nb=4 이면 방출되는 공기중 1/Nb=1/4 이 영향력 있는 여러기포중의 한개의 형성에 기여하는 경우를 의미하는 것으로서 이 값은 분사기의 갯수, 분사기 당 형성되는 큰 기포수, 큰 기포로 발달하지 않고 작은 기포의 군으로 머무르는 공기의 누설 비율에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 이값의 기준치를 6으로 설정하였는데 이는 대상 증기분사기의 형상으로부터 큰 기포가 4 개 생길 가능성이 가장 클 것이라 판단 것과 공기의 누설 비율에 대한 예상 추정치를 고려한 값이다.

분사기계통 작동초기에 발생하는 유체적 하중으로부터 수조 및 증기분사기 구조물의 기계적 건전성을 확보하기 위하여는 진동압력의 크기 및 주기에 대한 적절한 제어가 필요하다. 본 분석 결과로부터 파악되는 적절한 제어를 위한 주요 계통 인자의 선계 방향은 다음과 같다. 즉, 1) 배관내의 비음축 개스 공간의 최소화, 2) 증기방출밸브 개방 속도의 감소, 3) 분사기 갯수의 증가 및 분사기당 발생 기포수가 커지는 분사기의 상세 설계, 그리고 4) 분사기의 수조내 잠김 정도를 가급적 얇게 한다. 이상의 설계 방향은 압력진폭자체를 감소시켜 일차적으로 구조물에 걸리는 하중

을 감소시키는 방향이다. 여기에 구조물의 고유진동수 제어 부적절 등으로 수조내 기포 진동의 진동수를 제어하여야 할 경우는 비록 진폭과 주기가 일정한 방향의 상관성을 갖기는 하지만 그 상관성이 영향 인자별로 다름을 이용한다. 여기에 제시된 설계 방향은 설계기본 방향으로서의 의미를 지니며 최종 설계를 위하여는 증기분사기 자체의 다른 요건 및 타 기능과의 연계적 요건등으로 결국은 설계인자/요건간의 최적화가 필요하고 이를 위하여는 본 연구의 방법론과 같은 구체적인 분석 방법론이 필요할 것으로 예측된다.

4. 결 론

증기방출 계통의 기하형태적 설계인자 및 증기분사기의 기포형성갯수 특성자료 (실험측정 필요)의 입력으로부터 증기방출계통의 유체적 하중의 특성을 정성적 및 정량적으로 분석할 수 있는 방법론의 기본 체제를 개발하였고 개발된 방법론을 이용하여 작동 초기시의 하중 특성을 분석하였으며 이를 통하여 하중제어 관점의 설계방향을 제시하였다.

[후기]

이 주제 연구의 초기에 EBASCO의 신중성박사님 및 GE의 F.Moody 박사님으로부터의 기술적 지원은 증기방출계통에 대하여 전혀 이해가 없었던 본 주제의 연구 수행자에게 큰 도움이 되었으며 이분들에게 감사를 드린다.

[참고 문헌]

1. 김연식의 2인, 증기방출배관계의 수력적 특성, 한국원자력학회, '93 춘계학술발표회 논문집, pp. 95-100, 1993
2. 심윤섭의 7인, 증기방출계통의 열수력적특성 연구, KAERI/RR-1303/93, 한국원자력연구소
3. F. Moody, Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics, John Wiley & Sons, 1990
4. 심윤섭의 4인, 증기방출계통의 열수력적 특성연구: 최종보고서, KAERI/RR-1404/94, 한국원자력 연구소, 1994



그림 1 : 물속에 분사된 비응축성기체의 기포형성 및 거동

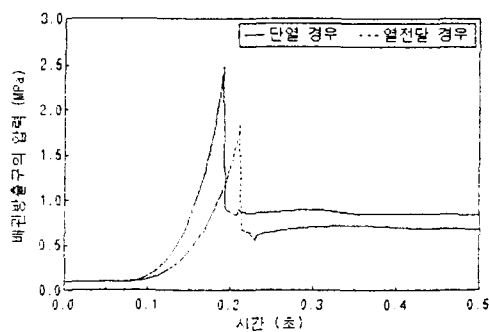


그림 2 배관열전달 고려가 배관유동 해석에 미치는 영향

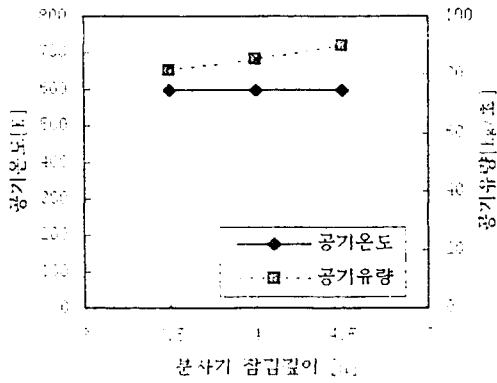


그림 3 분사기잠김 길이가 방출공기조건에 미치는 영향

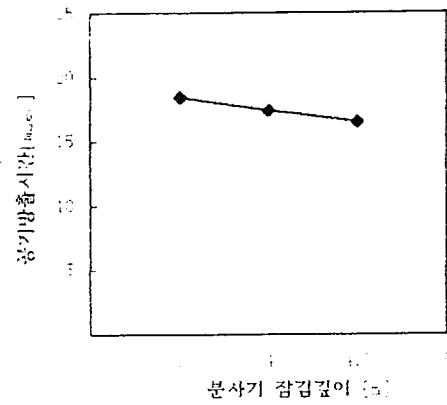


그림 4 분사기잠김길이가 공기 방출시간에 미치는 영향

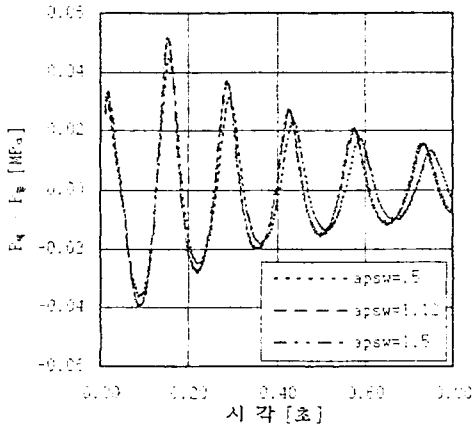


그림 5 기포표면 일의 모형계수 영향

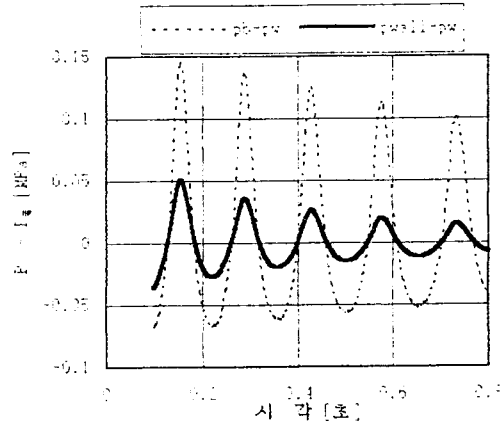


그림 6 기준조건에서의 기포압력과 벽면 압력의 변화특성

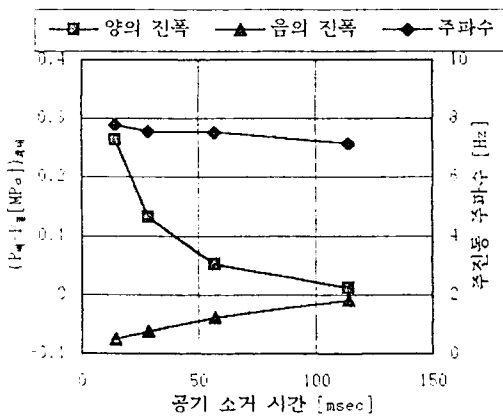


그림 7 공기소거 시간이 벽면압력 진동에 미치는 영향

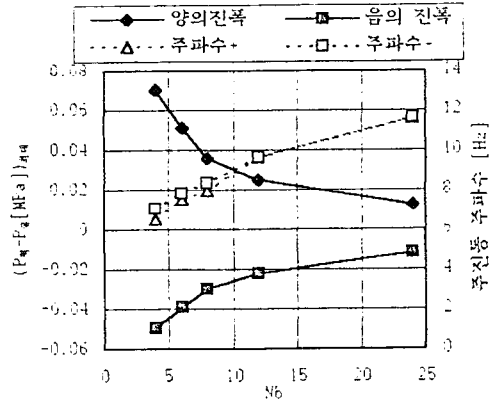


그림 8 %의 변화에 따른 주진동 주파수와 진폭의 변화