

리산기체공동모형에 의한 2상2차원수력 충격흐름의 수값모의연구

황성훈, 장대욱

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《현시대는 과학과 기술의 시대이며 사회주의경제건설의 성과는 높은 과학기술에 의하여 담보됩니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 305페이지)

물공급망을 비롯한 저수조-관-발브체계에서 하류발브의 급격한 닫김과 같은 운영 조작사고나 설비고장, 수요의 급격한 변동 등의 여러가지 원인으로 수력충격흐름이 발생하는데 이때 압력이 포화증기압아래까지 내려가면서 공동이 형성되게 된다.

공동의 형성과 파괴가 반복될 때 관에서 국부적으로 높은 압력이 조성되면서 관을 비롯한 계통설비들의 수명이 줄어들고 순간적인 파괴도 일어날수 있다.[3]

선행연구[1]에서는 공동을 고려하지 않은 순수액체에 대한 한가지 효과적인 2차원수력충격흐름모형을 제기하였다.

본문에서는 리산기체공동모형과 2차원수력충격흐름모형을 결합하여 새로운 2상2차원수력충격흐름모형을 제기하고 계산결과를 실험값과 비교하여 1차원모형에 비한 2차원모형의 모의정확도를 검증하였다.

1. 리산기체공동모형과 수력충격흐름모형의 결합

리산기체공동모형에서는 그림 1에서와 같이 적은 량의 공기가 매 그물점들에 집중되어있으며 두 그물점사이의 구역은 공기가 없는 순수한 액체로 가득차있다고 가정한다.

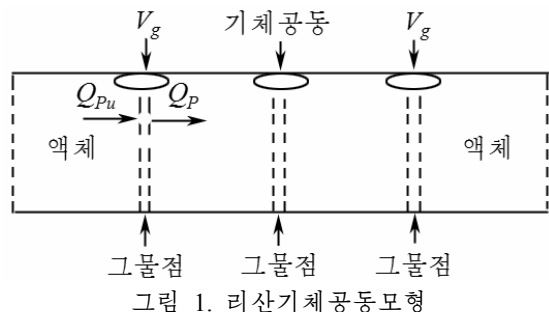
이때 수력충격방정식들은 순수액체구역에서만 성립된다.

한편 기체체적분률 α 는 기체의 체적 V_g 와 액체-기체혼합물의 체적 V_m 사이의 비로서 10^{-7} 정도로 아주 작다.[2]

압력이 변할 때 매개의 작은 기체체적이 완전기체법칙에 따라 팽창, 수축된다고 가정하면 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = M_g R_g T / (p_g V_m) \quad (1)$$

여기서 M_g 는 기체질량, R_g 는 기체상수, p_g 는 기포에서 기체의 압력, T 는 기체의 절대 온도, V_m 은 매 마디들에서의 혼합물체적이다.



V_m 이 상수라고 가정하면 기체의 체적 V_g 는 다음과 같다.

$$V_g = \alpha V_m = \frac{p_{g0} \alpha_0 V_m}{p_g} = \frac{C}{H - z - H_v} \quad (2)$$

여기서 α_0 은 표준대기압 p_{g0} 에서의 기체체적분률, $C = p_{g0} \alpha_0 V_m / (\rho g)$ 은 상수, H 는 압력수두, z 는 관중심선의 높이, $H_v = p_v / p_g - H_b$ 는 수두로 표시한 포화증기압이다. ρ 는 액체의 밀도, H_b 는 수두로 표시한 표준대기압, p_v 는 취급하는 온도에서 포화증기압이다.

매 그물점에서 기체체적에 대하여 연속방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dV_g}{dt} = Q - Q_u \quad (3)$$

여기서 Q 와 Q_u 는 각각 계산자름면의 하류와 상류에서 순수액체의 흐름량들이다.

교차그물을 리용하여 식 (3)을 적분하면 다음과 같이 표시된다.

$$V_{gi}^{n+1} = V_{gi}^{n+1} + [\psi(Q_i^{n+1} - Q_{ui}^{n+1}) + (1 - \psi)(Q_i^{n-1} - Q_{ui}^{n-1})] 2\Delta t \quad (4)$$

여기서 ψ ($0.5 \leq \psi \leq 1$) 는 무계결수이다.

그물점 i 에서 $n+1$ 시각에 기체의 체적 V_g 를 구하기 위한 위의 식에서 흐름량 Q_u 와 Q 는 순수액체에 대한 수력충격기본방정식들로부터 결정되며 특성선방법을 리용하면 다음과 같이 리산화된다.

$$Q_{ui}^{n+1} = \frac{C_P - H_i^{n+1}}{B} - \varepsilon \pi D \Delta t \frac{\tau_{wi}^{n+1}}{\rho} \quad (5)$$

$$Q_i^{n+1} = \frac{H_i^{n+1} - C_M}{B} - \varepsilon \pi D \Delta t \frac{\tau_{wi}^{n+1}}{\rho} \quad (6)$$

여기서 $C_P = H_{i-1}^n + B Q_{i-1}^n - (1 - \varepsilon) \pi D \Delta t \frac{\tau_{wi-1}^n}{\rho}$, $C_M = H_{i+1}^n - B Q_{i+1}^n + (1 - \varepsilon) \pi D \Delta t \frac{\tau_{wi+1}^n}{\rho}$, $B = \frac{a}{gA}$.

식 (5), (6)에서 τ_w 의 물리적모형화에 따라 1차원 및 2차원모형으로 나누어지는데 제기한 2차원모형에서는 τ_w 를 2차원특성방정식으로부터 얻어지는 음적도식을 풀어서 구한 반경방향속도구배에 의하여 계산한다. 그 음적도식은 아래와 같다.[1]

$$\varepsilon C_{u1j} u_{i,j-1}^{n+1} - (a/g + \varepsilon C_{u2j}) u_{i,j}^{n+1} + \varepsilon C_{u3j} u_{i,j+1}^{n+1} = 0.5(K_{ni,j} - K_{pi,j}) \quad (7)$$

다른 한편 식 (2)는 그물점 i 에서 매 시간걸음에 따라 다음과 같이 표시된다.

$$V_{gi}^{n+1} = C / (H_i^{n+1} - z_i - H_v) \quad (8)$$

식 (5)–(8)을 식 (4)에 대입하면 결과식은

$$(H_i^{n+1} - z_i - H_v)^2 + 2B_1(H_i^{n+1} - z_i - H_v) - B_0 = 0 \quad (9)$$

이다. 여기서 결수들은 다음과 같다.

$$B_1 = -(C_P + C_M) / 4 + (z_i + H_v) + B B_v / 4$$

$$B_v = [0.5 V_{gi}^{n-1} \Delta t + (1 - \psi)(Q_i^{n-1} - Q_{ui}^{n-1})] / \psi, \quad B_0 = C B / (4 \Delta t \psi)$$

방정식 (9)의 풀이로서 구해지는 압력수두는 다음과 같다.

$$H_i^{n+1} = z_i + H_v - (B_1 + \sqrt{B_1^2 + B_0}) \quad (B_1 < 0), \quad H_i^{n+1} = z_i + H_v - (B_1 - \sqrt{B_1^2 + B_0}) \quad (B_1 > 0) \quad (10)$$

이와 같이 식 (4)–(7), (10)들은 리산기체공동모형과 2차원수력충격흐름모형을 결합하여 새롭게 제기한 2상2차원수력충격흐름모형의 기본관계식들이다.

2. 계 산 실 례

리산기체공동모형과 1차원 및 2차원수력충격흐름모형들을 각각 결합하여 저수조—관—발브체계에서 하류발브의 급격한 닫김으로 인하여 발생하는 비정상과정을 수값모의하고 그 결과들을 선행연구[2]의 실험결과와 비교하였다.

계산에 리용된 대상의 기하학적파라미터들과 특성량들은 다음과 같다.

관의 길이는 37.23m, 관의 내경은 22.1mm, 관에서 액체(물)의 초기평균속도는 $v_0 = 0.3\text{m/s}$, 관의 경사도는 3.2° , 파속도는 1319m/s, 물의 밀도는 1000kg/m^3 , 물의 운동학적점성계수는 $\nu = 1.14 \times 10^{-6}$, 상류압력수두는 22.0m, 표준조건에서 기체체적분률 α 는 10^{-7} , 수두로 표시한 포화증기압은 -9.8m , 무계결수 Ψ 는 1.0, 발브조작시간은 9ms, 축방향그물분할수 N_x 는 32, 반경방향그물분할수 N_r 는 90, 무계결수 ε 과 θ 는 1이다.

1차원모형과 2차원모형을 각각 리용하여 계산한 발브위치에서와 관의 중간위치에서 시간에 따르는 압력수두의 변화는 그림 2와 같다.

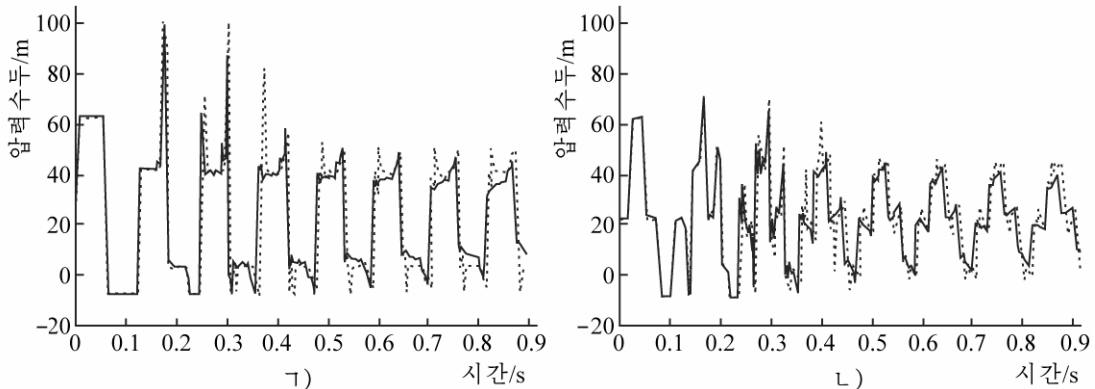


그림 2. 1차원모형과 2차원모형을 리용한 계산결과의 비교

ㄱ) 발브위치에서, ㄴ) 관의 중간위치에서

점선: 1차원모형을 리용한 계산결과, 실선: 2차원모형을 리용한 계산결과

그림 2에서 보는바와 같이 발브의 급격한 닫김이 수력충격흐름을 발생시키며 발브위치와 관의 중간위치에서 공동이 형성되었다가 그것이 파괴되면서 압력수두가 최대값에 도달한다는것을 알수 있다.

발브위치에서의 계산실험에 의하면 1차원모형과 2차원모형의 경우 둘 다 첫 공동이 0.065 3s에 형성되었다가 0.128 8s에 파괴되었다. 즉 첫 공동이 형성되어 파괴될 때까지의 지속시간은 0.063 5s이다.

선행연구[2]에 제시된 실험결과에서는 첫 공동이 0.066 2s에 형성되었다가 0.129 8s에 파괴되었다. 그러므로 첫 공동의 지속시간은 0.063 6s이다.

이와 같이 두 모형의 계산값과 실험값과의 비교는 1차원모형과 2차원모형에 의하여 계산된 발브위치에서의 첫 공동의 형성과 파괴, 지속시간이 실험값에 아주 가깝다는것을 보여준다.

한편 1차원모형과 2차원모형의 경우 둘 다 공동이 파괴될 때 도달하는 최대압력수두를 비교적 정확히 평가하였다. 이 최대압력수두는 흐름속도변화에 의한 유압스프링압력상승을 훨씬 평가하였다. 계산실험에 의하면 1차원모형에 의하여 얻어진 최대압력수두는 101.5m이고 2차원모형에 의하여 얻어진 최대압력수두는 98.6m로서 2차원모형에 의하여 얻어진 값이 3%정도의 오차를 가지고 실험값 95.6m에 더 가깝다는것을 알수 있다.

이와 같이 계산값과 실험값과의 비교는 새롭게 제기한 모형이 수력충격흐름때에 관에서 공동이 형성되고 파괴되는 현상을 정확히 모의하며 2차원모형이 1차원모형에 비하여 더 높은 모의정확도를 가진다는것을 보여준다.

맺는 말

리산기체공동모형과 2차원수력충격흐름모형을 결합하여 새롭게 제기한 모형은 실험값과 3%정도의 오차를 가지고 공동의 형성과 파괴, 그것으로 인한 압력상승을 정확히 모의한다.

참고 문헌

- [1] 장대욱 등; 기계공학, 2, 4, 주제105(2016).
- [2] A. Bergant et al.; Journal of Hydraulic Engineering, 125, 8, 839, 1999.
- [3] K. S. Sumam et al.; Int. J. Numer. Meth. Fluids, 63, 564, 2010.

주제105(2016)년 6월 5일 원고접수

Numerical Simulation Study of Two-Phase Two-Dimension Hydraulic Shock Flows by Discrete Gas Cavity Model

Hwang Song Hun, Jang Tae Uk

A two-dimensional numerical model of two-phase hydraulic shock flows in pipe using the discrete gas cavity model (DGCM) is proposed in this paper.

The comparisons with the 1D model show that the maximum pressure heads calculated by the proposed model are closer to the experimental results than those by the 1D model.

Key words: hydraulic shock, discrete gas cavity model