

# 공기탱크를 가진 관로체계에서 수력충격의 수값해석

장 대 욱

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 과학기술강국건설에 박차를 가하여 짧은 기간에 나라의 과학기술발전에서 새로운 비약을 이룩하며 과학으로 흥하는 시대를 열고 사회주의건설에서 혁명적전환을 가져와야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 38페이지)

수력충격은 물공급계통들에서 운영조작사고나 설비고장, 수요의 급격한 변동 등의 여러가지 원인에 의하여 발생하는 현상으로서 심한 경우에는 계통설비들을 파괴하고 정상적인 물공급에 지장을 준다. 그러므로 수력충격현상을 정확히 예측하는것은 관로망설계에서와 물공급망의 안전한 운영을 보장하는데서 중요한 문제로 나선다.

선행연구[1-5]에서는 특성선방법에 의하여 저수지-관-발브체계와 뿔프-발브-관체계, 관-공기탱크체계에서 발생하는 수력충격에 대하여 해석하였다.

본문에서는 특성선방법을 리용하여 뿔프-발브-공기탱크-저수지의 관로체계에서 발생하는 수력충격해석을 위한 한가지 1차원모형을 제기하고 계산결과를 통하여 관로체계에 대한 공기탱크설치의 타당성을 검증하였다.

## 1. 1차원수력충격흐름모형

수평으로 놓여있는 직경이 일정한 관로에서의 수력충격흐름의 해석을 위한 기본방정식들은  $\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ ,  $\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0$  과 같이 표시할수 있다.[1, 2] 여기서  $x$ 는 관의 길이,  $t$ 는 관을 통과하는 시간,  $Q=Q(x, t)$ 는 관에서의 흐름량,  $H=H(x, t)$ 는 수두로 표시한 압력,  $A$ 는 관의 가로자름면면적,  $D$ 는 관의 직경,  $a$ 는 압력파의 전파속도,  $g$ 는 중력가속도,  $f$ 는 마찰계수이다.

수력충격흐름의 기본방정식들은 쌍곡선형방정식이므로 특성선방법을 리용하여 상미분형식의 특성방정식들로 변환할수 있으며 특성선을 따라 이 특성방정식들을 적분하면 다음과 같은 도식을 얻는다.

$$H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_P |Q_A| = 0, \quad H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_P |Q_B| = 0$$

여기서  $B=a/gA$ ,  $R=f\Delta x/(2gDA^2)$  이다.

계산구역에서 점  $P$ 와  $A$ ,  $B$ 는 각각 그물점  $i, i-1, i+1$ 들에 대응되는 점들이므로 미지수  $H_i$ 와  $Q_i$ 를 구하기 위한 방정식들은 다음과 같다.

$$C^+ : H_i = C_P - B_P Q_i, \quad C^- : H_i = C_M - B_M Q_i$$

여기서  $C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1}$ ,  $B_P = B + R|Q_{i-1}|$ ,  $C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1}$ ,  $B_M = B + R|Q_{i+1}|$ 이다.

위의 식들을 결합하면  $H_i = (C_P B_M + C_M B_P)/(B_P + B_M)$ ,  $Q_i = (C_P - C_M)/(B_P + B_M)$ 이다.

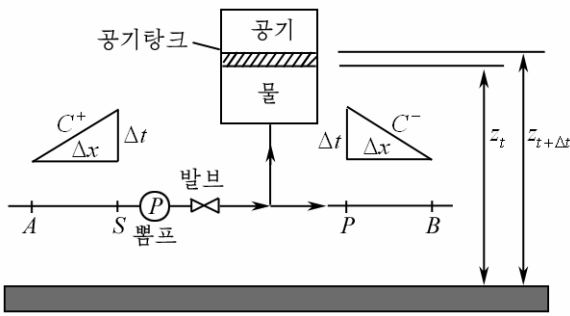


그림 1. 펌프-발브-공기탱크모형을 위한 경계조건

펌프-발브-공기탱크-저수지모형에 대한 경계조건은 공기탱크모형과 펌프-발브모형을 결합한 모형에 대한 경계조건이다.(그림 1)

이 경우에 펌프의 수두와 회전모멘트방정식은 다음과 같다.[1, 2]

$$F_1 = H_R(\beta^2 + v^2)[A_0 + A_1(\pi + \tan^{-1}(v/\beta))] + C_P - C_M - (B_P + B_M)Q_R v + B_M Q_{\text{orf}}^{t+\Delta t} - \Delta H_0 v |v|/\tau_v^2 = 0$$

$$F_2 = (\beta^2 + v^2)[B_0 + B_1(\pi + \tan^{-1}(v/\beta))] + m_0 - WR_g^2/g \cdot N_R/T_R \cdot \pi(\beta_0 - \beta)/(15\Delta t) = 0$$

$$F_3 = [C_M + B_M(Q_R v - Q_{\text{orf}}^{t+\Delta t}) + H_b - z^{t+\Delta t} - C_{\text{orf}} Q_{\text{orf}}^{t+\Delta t} |Q_{\text{orf}}^{t+\Delta t}| \{V_{\text{gas}}^t - A(z^{t+\Delta t} - z^t)\}^{1.2} - C = 0$$

이 식은 공기탱크안의 기체에 대한 폴리트로프관계를 표시한다. 위의 식들에서 미지량들로서  $\beta$ 와  $v$ ,  $Q_{\text{orf}}$ 인데 이 량들은 뉴턴반복법에 의하여 구할수 있다.

## 2. 계산결과 및 분석

앞에서 제기한 계산도식에 기초하여 펌프-발브-공기탱크-저수지로 구성된 관로체계에서 펌프의 제동에 의하여 발생하는 수력충격흐름의 수값모의를 진행하고 그 결과를 제시하였다.

수값계산을 위한 관로체계는 그림 2와 같다.

계산에 리용된 기하학적파라미터들과 특성량들을 보면 물공급저수지높이  $H=105\text{m}$ , 관의 내경  $D=0.7\text{m}$ , 관의 길이  $L=4\,480\text{m}$ , 관의 마찰계수  $f=0.022$ , 물의 밀도  $\rho=999.21\text{kg/m}^3$ , 운동학적점성계수  $\nu=1.140 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ , 물속에서의 전파속도  $a=1100\text{m/s}$ , 중력가속도  $g=9.807\text{m/s}^2$ , 발브손실계수  $C_k=1.4$ 이다.

한편 공기탱크의 기하학적크기들을 보면 탱크의 직경  $D_c=1.626\text{m}$ , 탱크의 높이  $H_{\text{tank}}=5\text{m}$ (그중 탱크에서 초기 물높이  $z_w=2\text{m}$ , 공기부분높이  $z_g=3\text{m}$ ), 탱크에서 열린 부분의 직경  $D_{\text{orf}}=0.187\text{m}$ , 표준조건에서 대기압  $H_{\text{atm}}=10\text{m}$ , 팽기트로프지수  $\gamma=1.2$ 이다.

계산에 리용된 펌프의 대표적인 특성값들은 표와 같다.

계산을 위하여 관의 길이를  $N=40$ 으로 분할하고 계산시간을  $t_m=150\text{s}$ 로 정하였다.

펌프의 양정특성과 모멘트특성은 표와 같으며 펌프-발브-저수지의 관로체계에 공기탱크가 있는 경우와 없는 경우 발브위치에서 압력수두의 변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 수력충격이 발생하는 경우에 발브위치에서 압력수두는 정격압력수두의 근방에서 주기적으로 변하며 시간이 지남에 따라 그 크기가 점차 감소한다. 이때 최대압력수두는 약 165m로서 정격수두보다 약 50m나 더 증가한것으로 된다.

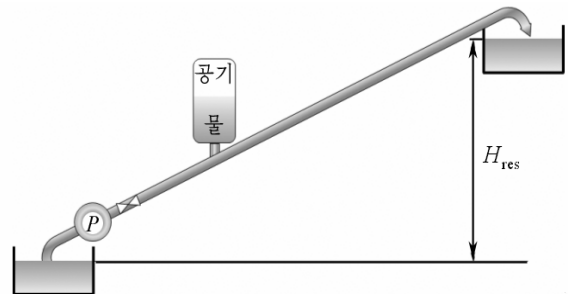


그림 2. 펌프-발브-공기탱크-저수지관로체계

표. 펌프의 특성자료	
특성량	특성값
정격흐름량 $Q_R$	$0.45\text{m}^3/\text{s}$
정격양정 $H_R$	114m
정격회전수 $N_R$	970
정격회전모멘트 $T_R$	$6\,350\text{N}\cdot\text{m}$
회전부분의 관성모멘트 $WR$	$6\,000\text{kg}\cdot\text{m}^2$
효율	0.84

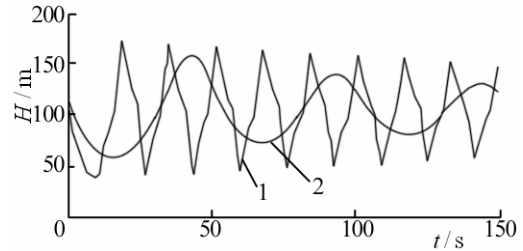


그림 3. 관의 입구에서 압력수두의 비교  
1-탱크가 없는 경우, 2-탱크가 있는 경우

공기탱크가 없는 경우에 압력수두증가량은 탱크가 있는 경우에 비하여 약 15~20m 더 증가한다. 또한 그 변화주기도 탱크가 있는 경우에 비하여 더 짧다는것을 알수 있다. 그러므로 관로설계에서 이 증가압력범위를 극복할수 있도록 관의 크기와 관재료를 잘 선정하여야 한다. 그러나 공기탱크를 설치한 경우에 탱크는 수력충격크기의 절대증가량의 약 25~30%를 감소시키는 작용을 하는것으로 된다.

관로체계에 공기탱크가 있는 경우와 없는 경우 관의 출구에서 흐름량의 변화는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이 공기탱크가 없는 경우에 흐름량변화는 탱크가 있는 경우에 비하여 약간 작으며 그 변화주기도 더 짧다는것을 알수 있다. 공기탱크가 있는 경우에 흐름량의 절대증가량은 탱크안의 물의 관로의 공급과 관안의 물이 탱크로 흘러드는것으로 하여 생긴것이다. 이것이 발생하는 수력충격의 크기를 감소시키는 작용을 한다고 볼수 있다.

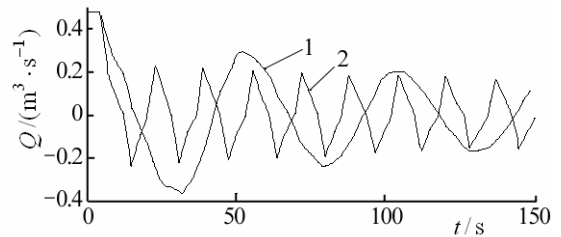


그림 4. 관의 출구에서 흐름량의 비교  
1, 2는 그림 3과 같음

수력충격이 발생할 때 탱크안에서 물높이변화와 공기압력변화는 각각 그림 5, 6과 같다.

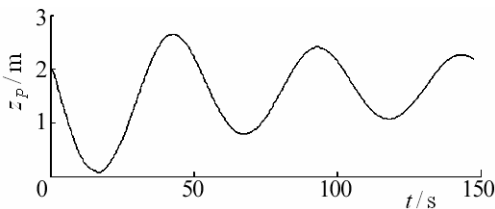


그림 5. 탱크에서 물높이변화

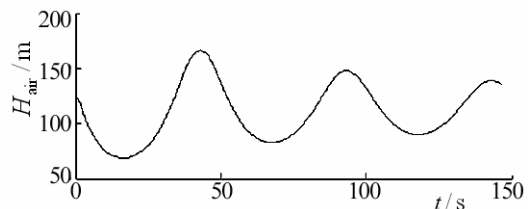


그림 6. 탱크안의 공기압력변화

그림 5로부터 수위변화는 관출구에서 흐름량변화와 일정한 관계를 가진다는것을 직관적으로 알수 있다. 또한 탱크에서 공기의 압력변화는 그안의 공기체적부분의 변화와 밀접한 관계를 가진다는것을 알수 있다.

## 맺 는 말

계산결과는 펌프-발브-저수지의 관로체계에서 일정한 크기의 공기탱크가 있는 경우와 없는 경우 수력충격의 크기에서 많은 차이가 있다는것을 명백히 보여준다.

그러므로 관로체계에 공기탱크를 설치하면 여러가지 원인에 의하여 발생하는 수력충격의 크기를 얼마든지 감소시켜 관로체계와 설비들을 보호하고 물공급을 보다 안전하게 할수 있다는것을 보여준다.

## 참 고 문 헌

- [1] E. B. Wylie et al.; Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, 2~44, 1993.
- [2] M. H. Chaudhry; Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, 34~56, 2014.
- [3] G. Pezzinga; Journal of Hydraulic Engineering, 126, 10, 778, 2000.
- [4] M. Zhao et al.; Journal of Hydraulic Engineering, 130, 4, 341, 2004.
- [5] Y. F. Geng et al.; Journal of Hydrodynamics, 17, 5, 621, 2005.

주체106(2017)년 7월 5일 원고접수

## **Numerical Analysis of Water Hammer Flow in Pipeline Systems with an Air Vessel**

*Jang Tae Uk*

This paper proposes a numerical scheme for analysis of water hammer flows in pipeline systems. The proposed scheme was used to analyze water hammer problems caused by a pump abrupt shutdown in a pumping system with an air vessel. The results show that the data obtained by the proposed scheme were different to those obtained in a pumping system without an air vessel.

Key word: water hammer flow