

저압 농용 관수로 시스템의 수격압 해석

Waterhammer Analysis for Low Head Irrigation Pipeline Systems

강 민 구* · 박 승 우** · 임 상 준*
Kang, Min Goo · Park, Seung Woo · Im, Sang Jun

Abstract

Irrigation pipeline systems have been recently adopted for irrigation purposes, which were thought to improve irrigation efficiencies. However, if hydraulic characteristics are not evaluated in designing, overpressure due to waterhammer may occur and result in serious problems. Therefore, in this study a model was formulated to simulate unsteady motion of water in a pipeline resulting from valve closure, the applicability of the model was tested with field data, and the results showed good agreement in maximum piezometric head. Also, simulated maximum piezometric head was compared with designed piezometric head computed by empirical method, and maximum piezometric head in a pipeline resulting from valve closure was simulated and analyzed with varying surge tank's position and diameter.

I. 서 론

근래에 들어 관수로 시스템이 농업용수 공급을 위한 용수로로 일부 채택되거나, 시범지구 사업으로 추진되고 있다. 이들 관수로 시스템은 기존의 개수로 시스템에 비하여 기능적으로 여러 가지 장점이 있으나, 수리해석을 통한 정확한 시스템의 분석이 진행되지 않을 경우, 밸브나 펌프의 급작스런 조작 등에 의해 과도한 압력이 발생하거나, 관내 부압의 발생으로 인해 관의 파괴와 같은 심각한 문제를 초래할 수 있다.

일반적으로 밸브의 급작스런 조작이나 펌프의 급가동, 정지시에 관내의 액체운동이 급격하게 변

화하여 액체의 압축현상이 발생하며 그에 따른 압력파가 빠른 속도로 상·하류로 전파되는데, 이를 수격현상이라 한다.^{2,3)} 이러한 수격현상은 물에 의한 부정류를 의미하며, 관로내의 유량이 급격히 변화하는 경우에 유속이 급변하여 부정류 흐름이 발생하여 생기는 것이 보통이다. 또한, 빈관을 급속도로 채우는 경우 단면이 변하는 곳에서 이동 유체의 압축과 팽창에 의해 압력파가 발생하여 부정류 흐름이 발생하기도 한다.^{7,10)}

수격압 해석을 위한 일반적인 해석적 방법은 알려져 있지 않으며, 컴퓨터를 이용한 수치해석법이 널리 이용되고 있다. 이들 수치해석법으로는 특성법, 유한차분법, 유한요소법 등이 있으며, 1차원

*서울대학교 대학원

키워드 : 농용 관수로, 수격압 해석, 조압수조

**서울대학교 농업생명과학대학

P지점의 값을 계산할 수 있으나, L, R지점의 값이 미지수이므로 기지점 L_e 와 R_e 의 값으로부터 선형 보간을 통해서 근사적으로 계산하였다. 또한, 거리 차분간격 Δs 와 시간 차분간격 Δt 는 고정되어 있는 것으로 간주하는 정규격자망을 사용하였다.

3. 경계조건

특성법에 의한 수격압 해석에서는 계산의 시작 점이나 끝점에서 1개의 방정식이 사용되기 때문에 경계조건이 필요하다. 농업용 관수로에서는 상류 경계조건으로 관로 유입부인 저수지나 개수로의 수위가 있으며, 하류경계조건으로 관로 말단 밸브의 유량이 있다.

가. 관로 유입부

Fig. 2와 같이 상류측 경계조건인 유입부 수위는 계산 시간 내에 일정하므로, 유입부 연결지점에서의 유량(Q_1)은 식 (5)와 같이 C⁺ 방정식을 이용하여 계산한다.

$$Q_1 = Q_2 + \left(\frac{gA}{a}\right)(H_{In} - H_2) - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_2 |Q_2| \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기서, H_{In} 는 유입부 수위이고, 아래첨자 1, 2는 유입부에 연결된 관의 절점번호를 나타낸다.

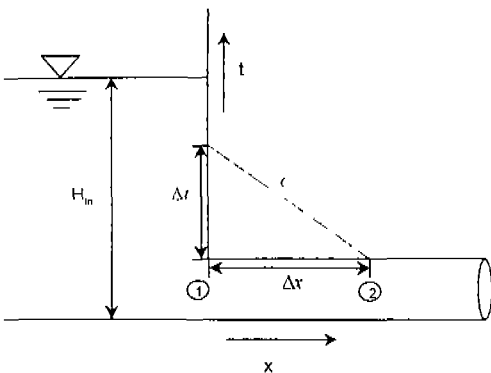


Fig. 2. Characteristic grid for an inlet

나. 관로 말단 밸브

관로 말단에 위치한 밸브조작에 의해서 부정류 흐름이 발생할 때, 하류의 경계조건으로서 임의 시간에 밸브를 통과하는 유량(Q_{n+1})은 식 (6)과 같다.

$$Q_{n+1} = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \tau \sqrt{H_{n+1}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

여기서, Q_0 는 정상류 상태의 유량(m^3/s), H_0 는 정상류 상태의 위압수두(m), H_{n+1} 는 임의 시간의 위압수두(m)이며, τ 는 시간에 따른 밸브의 유효 단면적비를 나타내는 값으로, 식 (7)과 같다.

$$\tau = \frac{C_d A_g}{(C_d A_g)_0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

여기서, C_d =유량계수, A_g =밸브의 개구부 단면적(m^2)이며, 아래첨자 0는 밸브가 완전히 개방된 상태를 나타낸다.

따라서, 밸브가 위치한 관로 말단의 위압수두(H)와 유량(Q)은 식 (7)과 계산지점의 C⁺ 방정식을 사용하여 계산한다.

4. 침사조 수위 계산

침사조의 경계조건은 Fig. 3과 같이 침사조에 연결된 단면 i의 C⁺ 방정식과 단면 i+1의 C⁻ 방정식, 단면 i, i+1, 침사조의 연속방정식과 침사조의 수위를 음해법으로 나타낸 식 (8)의 연립방정식을 이용하여 계산한다.

$$H_{i,n+1}^{+1} = H_{i+1,n+1}^{+1} = H_d - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{A_d} (Q_d^{+1} + Q_d^-) \quad \dots\dots\dots(8)$$

여기서, $H_{i,n+1}^{+1}$ 은 침사조 상류측 연결부의 위압수두(m), $H_{i+1,n+1}^{+1}$ 은 침사조 하류측 연결부의 위압수두(m), H_d 는 침사조의 수위(m), Q_d 는 침사조에서 관으로의 유입량(m^3/s), A_d 는 침사조의 단면적(m^2)이며, 위첨자 j, j+1은 계산시간을 나타낸다.

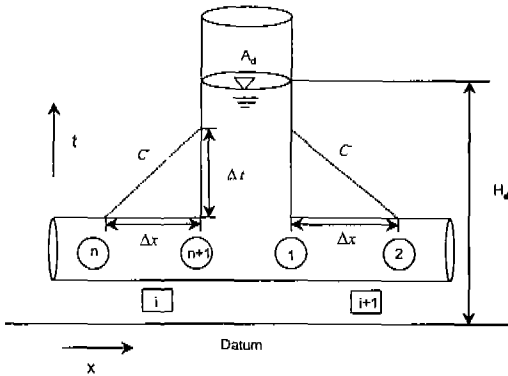


Fig. 3. Characteristic grid for a detritus tank

5. 안정조건

관수로 시스템의 부정류 해석을 위한 특성방정식은 양해법으로 구성되어 있기 때문에 해의 안정조건을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 시간간격에 대한 조건으로 식 (9)와 같은 Courant-Friedrich-Lewy(CFL) 안정조건을 이용하였다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|a+V|} \dots\dots\dots(9)$$

여기서, Δt 는 계산 시간간격(s), Δx 는 격자간격(m), a 는 압력과 전달속도(m/s), V 는 유속(m/s)이다.

6. 계산순서

관수로 시스템의 수격압 해석을 위한 계산모형의 입력자료는 관수로 시스템의 상·하류 경계조건자료, 계산시간 간격, 계산종료시간 등의 계산조건자료, 밸브 조작 특성에 대한 자료, 그리고, 관경, 관의 길이, 마찰손실계수, 압력과 전달속도, 관경사 등의 관로제원 자료로 구분할 수 있다. 계산모형은 이들 입력자료로부터 관수로 시스템의 특성을 파악한 후, 각 절점의 정상상태 유량과 수두를 계산하여 초기조건으로 사용하고, 밸브조작에 의해 발생하는 부정류의 유량과 수두의 변화를 시간간격에 따라 계산 종료시까지 계산한다.

III. 수격압 해석 프로그램의 적용

1. 대상지구

관수로 수격압 해석 프로그램의 적용성을 검토하기 위해서 논산 농지개발조합 관할의 왕암 관수로 사업지구를 선정하였다. 왕암지구의 용수조직은 개수로 용수간선과 관수로 용수지거로 구성된 혼합수로의 형식을 취하고 있다. 관수로인 용수지거는 Fig. 4와 같이 개수로 용수간선에 유입부가 연결되어 있고, 유입부 하단부에 침사조가 설치되어 있으며, 용수지거 중간부에 제수 밸브와 관로 말단에 게이트형의 유말공 밸브가 설치되어 있다. 또한, 공기의 출입이 가능하도록 제수 밸브와 유말공 밸브의 직하단부에 공기변이 설치되어 있다.

왕암지구 용수지거의 주관은 직경 250mm 철판매입 파형관을 사용하고 있으며, 침사조는 직경 800mm 철판매입 파형관을 사용하고 있다. Fig. 4에는 용수지거의 종단면도를 함께 표시하였으며, 용수지거의 전체 길이는 480m이고, 평균경사는 0.025이었다.

유말공 밸브의 폐쇄에 따른 압력 변화를 측정하기 위하여 아날로그식 압력계를 유말공 밸브에서 80m 상부에 위치한 급수밸브에 설치하였으며, 유말공 밸브를 30초 동안 수동으로 폐쇄하여 압력과

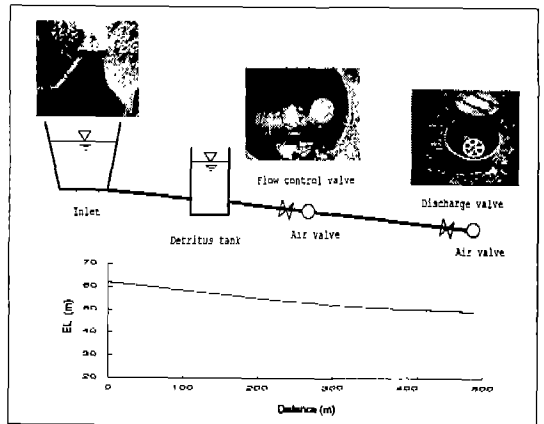


Fig. 4. Schematic diagram of Wangam district's pipeline system

의 전달에 따른 압력의 변화를 기록하였으며, 동일한 조건으로 3회 반복 실험하였다. 정상상태의 관내 유량은 제수 밸브상단에 도플러식 유량계(portable doppler flowmeter)를 설치하여 측정하였으며, 이때의 유량은 $0.151\text{m}^3/\text{s}$ 이었다.

2. 모형의 적용

왕암지구 용수지거는 10m 동간격으로 총 48개의 절점으로 구분하여 수두변화를 계산하였다. 용수지거 유입부의 수위는 계산시간 동안 일정하게 유지하였으며 이를 상류경계조건으로 이용하였다.

관로의 여러 제원 중에서 압력과 전달속도는 정확하게 알 수 없으며, 관의 지지상태, 관의 재질, 액체의 상태에 따라 달라진다. 특히, 액체 중에 공기가 녹아 있을 경우에는 압력과 전달속도는 현저하게 작아지게 되며,^{2,11,12)} 수격작용에 의해 관내의 압력이 감소되는 경우에는 물속에 녹아있던 공기가 방출되어 물속에 널리 분포하게 되면 압력과 전달속도가 작아지게 된다.²⁾ 본 연구에서는 압력과 전달속도를 변화시키면서 계산된 모의결과와 실측자료의 eye-fitting에 의해 압력과 전달속도를 100m/s 로 하였으며, 대상지구의 관수로에는 제수 밸브와 유말공 밸브에 공기변이 위치하고 있어 공기의 유입이 가능하므로 압력과 전달속도가 작은 값을 나타내는 것으로 사료된다.

관로의 마찰손실계수(f)는 식 (2)의 운동량 방정식의 유도에 정상류에 사용되는 Darcy-Weisbach 식이 이용되었으므로, 정상류 상태에서 측정된 유량과 동수압을 이용하여 역산에 의해서 계산할 수 있으며, 대상지구의 자료를 사용하여 계산된 마찰손실계수는 0.0135이었다.

밸브개폐에 따른 밸브의 유효단면적비(τ)는 게이트 밸브의 완전개방시의 밸브손실계수에 대한 밸브 폐쇄로 인한 밸브손실계수의 비를 이용하였다.¹¹⁾

Fig. 5는 실측치와 모의치를 도식적으로 나타낸 결과이며, 실측치와 모의치가 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 실측치의 최대수두는 27.0m

이고, 모의치의 최대수두는 28.5m 로 실측치와 모의치가 큰 차이를 나타내지 않으나, 실측치가 모의치 보다 빠르게 정상상태로 회복되고 있다. 최소수두의 변화도 실측치와 모의치가 큰 차이가 없으나 밸브 폐쇄 직후의 최소수두의 경우는 실측치가 모의치 보다 6.4m 큰 결과를 나타냈다. 이는 제수 밸브와 유말공 밸브에 공기변이 설치되어 있어 공기의 출입이 가능하므로, 밸브 폐쇄직후 관내 압력이 최대수두로 상승한 후에 최소수두로 급격하게 떨어지지 않고 정상상태로 회복되기 때문으로 판단된다. 또한, 이러한 결과는 관수로 시스템에 공기변을 설치함으로써, 관내 부압(-)이 발생하는 것을 방지할 수 있음을 보여주고 있다.

Table 1은 압력파의 전파에 따른 관내 압력의 변화를 진동으로 보고, 각 주기의 최대수두와 최소수두 평균값을 실측치와 모의치로 구분하여 비교한 결과이며, Fig. 6은 Table 2의 내용을 1:1 곡선으로 나타낸 것이다. 각 주기의 최대수두는 실측치 보다 모의치가 다소 큰 결과를 나타냈으며, 각 주기의 최소수두는 모의치가 실측치 보다 작은 결과를 나타냈다.

Fig. 7은 유말공 밸브의 폐쇄에 따른 침사조의 수위의 변화를 모의한 결과로서 모의 기간 중 정상상태의 수면고는 12.39m 이었고, 최대수면고는 13.65m 이었고, 최소 수면고는 11.61m 이었다.

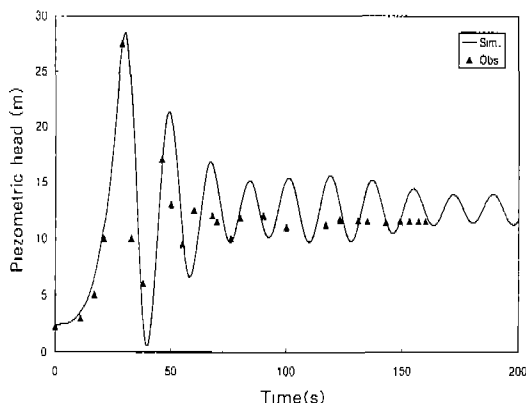


Fig. 5. Comparison of observed and simulated piezometric heads at the measured position

Table 1. Simulated and observed piezometric heads at each period

Period	Maximum piezometric head(m)			Minimum piezometric head(m)		
	Simulated	Observed	Relative error(%)	Simulated	Observed	Relative error(%)
1	28.50	27.00	5.6	2.20	2.20	0.00
2	21.23	18.00	17.9	0.60	7.00	-91.4
3	16.70	14.00	19.3	6.69	8.50	-21.3
4	15.04	13.00	15.7	9.75	10.00	-2.5
5	15.30	12.50	22.4	10.22	11.50	-11.1

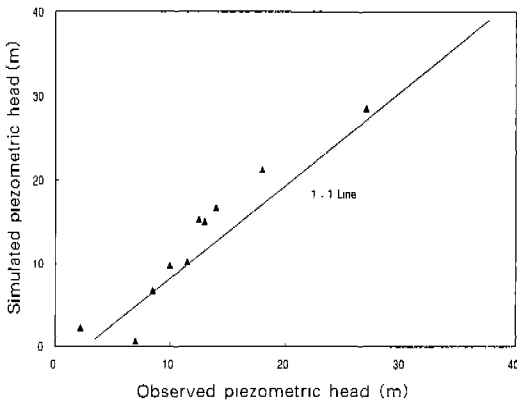


Fig. 6. Comparison of simulated and observed piezometric heads at each period

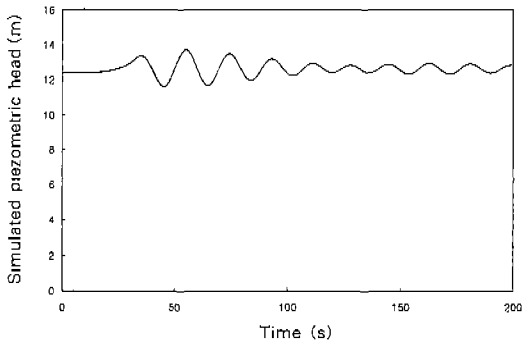


Fig. 7. Simulated fluctuation of piezometric heads at detritus tank resulting from the downstream end of pipe's valve closure

3. 모형의 응용

관수로 시스템의 수격압 추정은 설계시 관수로

의 내압강도의 계산이나, 조정장치의 계획시 필요할 뿐만 아니라, 관로망의 조작에서 여러 가지 수리단위의 개폐조건에 따른 압력의 변화를 추정하고, 펌프나 밸브 등의 제어방식 및 관리 방식에 따른 관수로 시스템의 송·배수 기능을 평가하여, 적절한 물관리 계획을 수립하기 위하여 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 관수로 시스템의 설계시 적용되는 수격압 계산법인 경험법에 의한 결과와 수치모형에 의한 결과를 비교하고, 과도한 수격압 방지를 위한 방안으로 조압수조의 설치를 고려할 때 수두의 변화에 대한 영향을 고찰하였다.

가. 경험법과 수치해법의 비교

관수로 시스템의 설계시 적용되는 수격압 계산 방법 중 경험법에 의한 방법은 관수로의 형식에 따라 개방식 관수로와 폐쇄식 및 반폐쇄식 관수로로 구분하여 적용된다.¹⁾

Fig. 8은 대상지구의 관로 유입부로부터 관로말단까지 각 지점에서 정수압, 경험법에 의한 설계 압력, 수치모형에 의한 최대압력을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 유입부로부터 거리가 멀어짐에 따라 정수압이 크게 나타나는 것은 관로경사 때문이며, 정수시에 에너지선은 각 지점에서 일정하게 나타나고 있다. 왕암지구의 용수지거는 관수로 형식상 관로~수조~관로 형식의 반폐쇄식 관수로이고, 말단 밸브가 위치한 지점의 정수압이 1.31kgf/cm^2 이며, 경험법에서는 정수압이 3.50kgf/cm^2 미만인 반폐쇄식 관수로의 수격압은 정수압의 100%를 적용하므로,¹⁾ 경험법에 의한 밸브 지점의

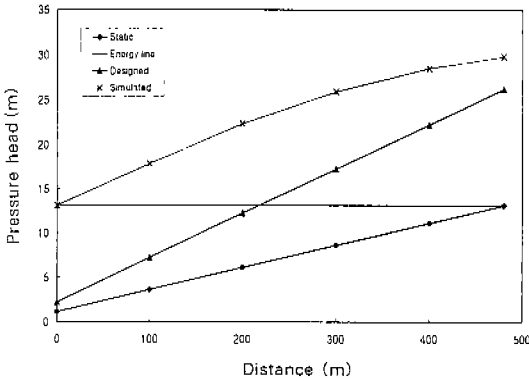


Fig. 8. Comparison of static, designed and simulated pressure head at each point

수격압은 정수압의 100%인 1.31kgf/cm²이다. 따라서, 관로 말단에서 설계압력은 정수압과 수격압의 합인 2.62kgf/cm²이며, 이는 수치해법에 의해 계산된 결과인 2.98kgf/cm² 보다 0.36kgf/cm² 작은 값이다. 따라서, 수치해법에 의해 계산된 최대압력이 경험법을 이용하여 계산한 설계압력 보다 큰 값을 나타내고 있으며, 이와 같이 수치해법에 의해 계산된 수격압이 경험법에 의한 수격압 보다 클 경우에는 경험법으로 결정된 수격압을 재검토해야 한다.¹⁾

나. 과도압력 발생방지

대상지구에서 과도한 수격압 발생의 방지를 위한 구조적 대책으로 조압수조 설치를 고려할 때, 조압수조의 위치, 크기에 따른 최대수두의 변화를 모의하여 각각의 영향을 고찰하였다. 수치모형의 구동을 위한 관로의 제원은 대상지구의 제원을 이용하였고, 관로 말단에 위치한 밸브 조작으로 인한 수격압을 모의하였다.

(1) 조압수조 위치에 따른 최대수두 변화

관로상에서 조압수조의 위치에 따른 최대수두의 변화를 모의하기 위하여, 조압수조의 크기는 시설된 침사조의 크기와 동일하게 처리하고, 조압수조의 위치는 관로 말단 밸브로부터 조압수조까지의 거리를 50m씩 증가시키면서 수두의 변화를 모의하였다.

Table 2는 관로 말단에 설치된 밸브로부터 조압수조 위치까지의 거리에 따른 최대 수두를 모의한 결과이며, Fig. 9는 이를 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 9와 같이 밸브와 조압수조간의 거리가 증가함에 따라 최대수두가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 가장 작은 최대수두를 보인 경우는 조압수조의 위치가 밸브지점에 가장 가까운 지점에 설치했을 때로 최대수두가 14.41m이었으며, 밸브로부터 조압수조까지의 거리가 480m인 것은 조압수조가 설치되지 않은 경우를 나타내며, 이 때의 최대수두는 29.47m이었다.

(2) 조압수조 직경에 따른 최대수두 변화

조압수조의 규모에 따른 최대수두의 변화를 모의하기 위하여, 조압수조의 직경을 시설된 침사조 직경의 ±25%크기로 변화시키면서 밸브조작에 따른 수두의 변화를 모의하였다. 조압수조의 위치

Table 2. Maximum piezometric head to distance from valve to surge tank

Distance (m)	Maximum piezometric head (m)	Distance (m)	Maximum piezometric head (m)
50	14.41	300	19.46
100	14.42	350	22.91
150	14.48	400	26.17
200	15.23	450	29.02
250	16.94	480	29.94

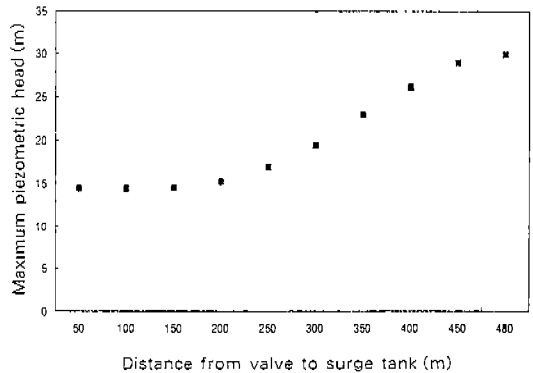


Fig. 9. Maximum piezometric heads to surge tank position

는 관로의 증앙을 선정하였으며, 다른 제원은 대상지구와 동일하게 처리하였다.

Table 3은 조압수조의 직경에 따른 최대수두의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 10은 이를 도식적으로 나타낸 것이다. 가장 큰 최대수두를 나타낸 경우는 직경이 0.20m일 때이었으며, 이때의 최대수두는 24.41m이었다. 가장 작은 최대수두를 나타낸 경우는 직경이 1.60m일 때이었으며, 이때의 최대수두는 14.09m이었다. 또한, Fig. 10과 같이 조압수조의 직경이 1.20m 까지는 최대수두가 급격하게 감소하나, 이상에서는 최대수두가 완만한 감소를 보였다.

Table 3. Maximum piezometric head to diameter of surge tank

Diameter (m)	Maximum piezometric head (m)	Diameter (m)	Maximum piezometric head (m)
0.20	24.41	1.00	15.23
0.40	21.45	1.20	14.41
0.60	18.46	1.40	14.22
0.80	16.56	1.60	14.09

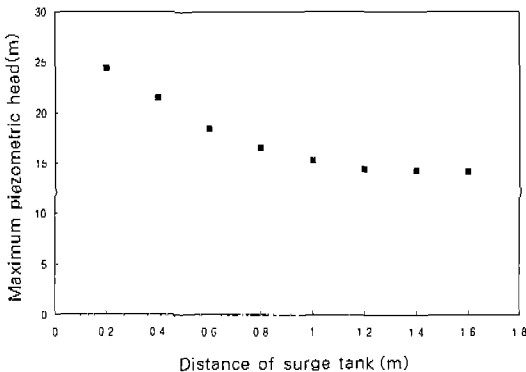


Fig. 10. Maximum piezometric head to diameter of surge tank

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 관수로 시스템의 비정상류 흐름

해석을 위한 기본 방정식을 구성하고, 농업용 관수로 시스템의 경계조건을 고려한 수격압 해석 수치모형을 개발하였으며, 관수로 설치 지구에 적용하여 모형의 적용성을 검토하였다. 또한, 경험법에 의한 설계수두와 수치모형에 의한 결과를 비교해서 과도압력의 발생여부를 파악하고, 과도한 수격압 방지를 위해 조압수조를 설치할 때 조압수조의 위치, 직경의 변화에 따른 최대수두의 변화를 모의하여 고찰하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 관수로 시스템의 비정상류 흐름의 수치해석을 위하여 기본방정식을 구성하고, 특성법을 적용하여 지배방정식을 차별화하였으며, 이로부터 농업용 관수로 시스템의 구성 특성에 따른 경계조건을 고려하여 수격압 해석 수치모형을 개발하였다.

2. 개발된 프로그램의 현장 적용성을 검토하기 위하여, 논산 농기계량조합 관할의 왕안지구 용수지구에 적용하여 유말공밸브의 폐쇄에 따른 부정류 흐름을 모의하고, 실제 측정한 값과 비교한 결과, 실측치의 최대수두는 27.0m이었으며, 모의치의 최대수두는 28.5m로 유사한 결과를 보였으며, 최소압력수두의 경우에는 모의치 보다 실측치가 큰 결과를 나타냈다.

3. 경험법에 의한 설계수두와 수치 모형에 의한 결과를 비교한 결과, 대상지구의 경우에는 수치모형에 의한 결과가 경험법에 의해 계산된 설계수두 보다 큰 결과를 나타냈다.

4. 관로상에 설치된 조압수조의 수격압 감소 효과를 고찰하기 위하여 조압수조의 위치, 직경에 따른 최대수두의 변화를 모의한 결과, 조압수조가 밸브 지점에 근접해서 설치되거나, 조압수조의 직경이 클 경우에 최대수두의 감소를 나타냈다.

본 연구는 1994년도 농림부 현장애로기술개발사업에 의하여 수행된 연구결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. 농업진흥공사, 1989, 농업용 관수로 설계 시공

- 지침, 안양.
2. 우효섭, 1989, 수격작용(Ⅰ), 한국수문학회지, 22(3), pp. 268-272.
 3. 우효섭, 1989, 수격작용(Ⅱ), 한국수문학회지, 22(4), pp. 380-387.
 4. 우효섭, 1990, 수격작용(Ⅲ), 한국수문학회지, 23(1), pp. 50-59.
 5. 우효섭, 이삼희, 1989, 빈관의 급속한 채움에 의한 급축소 부분에서의 수격작용, 한국수문학회지, 22(4), pp. 435-440.
 6. Azoury P. H., M. Baasiri M. and H. Najm, 1988, On the optimum utilization of water hammer, Proc. Instn Mech. Engrs, 202(4), pp. 249-256.
 7. Elansary A. S., W. Silva and M. H. Chaudhry, 1994, Numerical and experimental investigation of transient pipe flow, Journal of Hydraulic Research, 32, pp. 689-706.
 8. Goldberg D. E. and C. L. Karr, 1987, Quick Stroking : Design of optimal valve motions, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 113(6), pp. 780-795.
 9. Goldberg D. E. and E. B. Wylie, 1983, Characteristics method using time-line interpolations, Journal of Hydraulic Engineering, 109(5), pp. 670-683.
 10. Liou C. P. and W. A. Hunt, 1996, Filling of pipelines with undulating elevation profile, Journal of Hydraulic Engineering, 122(10), pp. 534-539.
 11. Watters G. Z., 1984, Analysis and control of unsteady flow in pipelines, Butterworth Publishers.
 12. Wylie E. B. and V. L. Streeter, 1993, Fluid transients in systems, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.