

# 관망 내 역류방지밸브의 폐쇄시간 결정

## Proper Closing Time of Check-Valve in Water Distribution Network

○박 문형\* · 이봉국\*\* · 최성욱\* · 조원철\*

### 1. 서론

일반적으로 상수도 관로시스템은 저수지와 저수지의 용수를 양정하기 위한 펌프시설을 포함하고 있다. 펌프장에서 정전 등에 의하여 전원이 갑자기 차단되면 펌프를 돌리는 에너지는 펌프와 모터의 회전부가 가지고 있는 관성에너지만 존재하게 되며 펌프의 회전속도는 서서히 감소하게 된다. 펌프의 회전속도가 감소되면 펌프가 아직 정방향으로 회전하고 있더라도 일정시간 경과후 시스템내 용수의 위치수두차로 인하여 역류가 발생되며, 펌프를 통과하여 흐르게 되어 펌프시설에 손상을 입힐 수 있다. 관로시스템 내에 위치하는 펌프시설에는 펌프시설의 손상을 야기할 수 있는 흐름의 역류를 방지하기 위하여 역류방지밸브(check valve)를 설치하게 되며, 관로시스템의 안전을 확보하기 위해서는 적절한 역류방지밸브의 폐쇄시간을 결정하여야 한다. 역류방지밸브의 폐쇄시간 결정에 있어 펌프 시설의 보호만을 고려한다면, 역류방지밸브를 역류발생과 동시에 완전폐쇄하는 것이 바람직하다. 그러나 실제 밸브의 운용에 있어 밸브의 기계적인 특성과 관로 내 흐름의 물리적인 특성으로 인하여 밸브폐쇄에 있어 어느 정도의 시간이 소요된다. 폐쇄소요시간이 짧은 경우에는 밸브의 급폐쇄에 의하여 과도 수리현상(fluid transient)이 발생할 수 있으며, 밸브의 폐쇄소요시간이 지나치게 긴 경우 펌프 내에서는 역류가 오랜 시간 발생하여 펌프에 손상을 줄 수 있다. 따라서 펌프 보호와 관로내 과도현상을 고려하여 역류방지밸브의 적절한 폐쇄소요시간을 결정하여야 펌프 시설 및 관로의 안전을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 수도권 광역상수도 내에 위치한 18개 펌프장에 대하여 역류방지 밸브가 설치되지 않은 상태에서 펌프가 가동중단 된 경우에 대하여 수치모의를 수행하여 펌프에서의 회전수와 유량의 변화를 관찰하여 특징을 분석하였다. 그리고 펌프의 회전수와 관망의 주요지점의 압력변화를 관찰하여 적절한 역류방지 밸브의 폐쇄시간을 결정하였다.

### 2. 펌프 회전수의 변화 계산

펌프 회전수의 변화는 에너지 보존법칙으로부터 유도되는 식 (1)과 시간 변화에 따른 펌프의 토크변화에 관한 식으로부터 유도되는 식 (2)에 의하여 계산된다(Wylie와 Streeter, 1993).

$$C_P - C_M - vQ_R(B_P + B_M) + H_R(\alpha^2 + v^2)(A_0 + A_1x) - \frac{v|\Delta H_0}{t^2} = 0 \quad (1)$$

$$(\alpha^2 + v^2) \left[ B_0 + B_1 \left( \pi \tan^{-1} \frac{v}{\alpha} \right) \right] + \beta_0 - C_T(\alpha_0 - \alpha) = 0 \quad (2)$$

여기서  $C_P$ ,  $C_M$ ,  $B_P$ ,  $B_M$ 는 식 (1)의 기지값으로 아래첨자  $P$ 와  $M$ 은 각각 펌프 전후의 절점을

\* 연세대학교 대학원 토목공학과

\*\* (주)LG산전 중앙연구소 차장

나타내며,  $v(=Q/Q_R)$ 는 무차원 유량,  $\alpha(=N/N_R)$ 는 무차원 회전수,  $H_R$ 는 정격 양정수두,  $N_R$ 는 정격회전수,  $Q_R$ 는 정격유량  $A_0, A_1, B_0, B_1$ 는 펌프곡선을 차별화하는 과정에서 얻어지는 값,  $\tau$ 는 손실을 고려한 무차원 밸브의 개도,  $H_0$ 는 정상상태의 압력수두,  $\alpha_0$ 와  $\beta_0$  각각 초기 무차원 회전수와 무차원 유량이다. 식 (2)에서  $C_T$ 는 다음의 식 (3)으로 정의된다.

$$C_T = I \frac{N_R}{T_R} \frac{\pi}{30\Delta t} \quad (3)$$

여기서  $T_R$ 는 정격 토크,  $I$ 는 관성모멘트이다. 식 (1), (2)는 두 개의 미지수  $\alpha$ 와  $v$ 에 관한 비선형 연립방정식으로서 Newton-Raphson 방법과 같은 수치해석 기법을 이용하여 해를 구할 수 있다.

### 3. 적용

본 연구의 대상인 수도권 광역상수도망은 5단계로 나뉘어 건설되었으며, 전체 관로상에 총 18개 펌프장이 위치하고 있다. 그림 1은 수도권 광역상수도망의 개략도를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 수도권 광역상수도망에 위치한 18개 펌프장에 대하여 식 (1), (2)의 수치해석 알고리즘을 가지고 있는 LIQT를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 펌프의 가동중단에 따른 펌프 내의 흐름과 회전수를 모의하기 위해서는 펌프의 특성값들(정격 유량, 정격회전수, 정격양정고, 정격토크)에 대한 자료가 입력되어야 한다. 수도권 광역상수도망에 설치된 펌프들의 특성값은 표 1과 같다(한국수자원공사, 1993). 표 1에서 정격토크를 제외한 값들은 실측에 의한 값들이며, 정격토크는 다음 식 (4)와 같은 경험식으로부터 계산된  $WR^2$ 을 이용하여 산정하였다(Stoner Associate Inc., 1990).

$$WR^2 = 3550 \left( \frac{HP}{N_R} \right)^{1.435} \quad (4)$$

여기서  $HP$ 는 펌프의 출력이다.

표 1에 제시된 자료를 바탕으로 18개 펌프장에 대하여 펌프의 회전수와 유량의 변화를 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과 펌프의 회전수와 유량의 변화를 크게 4가지 형태로 분류할 수 있었다. Type I은 흐름의 역류 발생 후 펌프의 역회전이 늦게 발생하는 경우, Type II는 흐름의 역류 발생 후 펌프의 역회전이 빨리 발생하는 경우, Type III는 펌프의 역회전이 발생하지 않는 경우, 그리고 Type IV는 펌프 회전수와 유량이 주기적으로 진동하는 현상을 나타내는 경우로 분류하였다.

각 형태별 대표적인 수치모의 결과는 그림 2-5와 같다. 그림 2는 펌프1의 수치모의 결과로서 Type I의 결과를 나타내었다. 그림 2에서 흐름의 역류는 펌프의 가동중단 후 약 3초 경과 후에 발생하였으며, 이 때의 펌프 무차원 회전수는  $\alpha = 0.75$ 이었다. 이러한 경향은 펌프 2에서도 나타났다. Type I은 흐름의 역류 발생 후 펌프의 역회전이 비교적 오랜 후에 발생하는 형태인데, 이러한 현상은 펌프 회전수의 변화가 흐름의 변화에 대하여 상대적으로 민감하지 않기 때문인 것으로 보인다.

그림 3은 펌프3의 수치모의 결과로서 Type II로 분류할 수 있다. 그림 3에서 펌프의 역회전이 흐름의 역류 발생 후 상당히 짧은 시간에 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 무차원 회전수  $\alpha = 0.48$ 로서 그림 2의  $\alpha = 0.75$ 보다 작기 때문인 것으로 보인다. 그림 3과 같은 결과가 대부분의 펌프에서 발생하였다.

그림 4는 펌프6의 수치모의 결과로서 역류가 약 60초에서 발생하여 상당히 늦게 발생하였으며, 모의를 100초까지 수행하였으나 펌프의 역회전이 발생하지 않았다. 펌프6은 Type III로 분류할 수 있다. 이러한 현상은 펌프 7에서도 발생하였으며, 펌프 9의 경우 펌프의 역회전은 물론이고 흐름

의 역류 역시 발생하지 않았다. 이것은 펌프의 토크가 필요이상으로 크게 산정되었기 때문인 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서 적용된 토크는 실제 값이 아닌 경험식에 근거한 값이므로 정확한 값의 실측이 필요할 것으로 보인다.

그림 4는 펌프8의 수치모의 결과로서 회전수와 유량이 주기적으로 진동하는 형상을 나타내어 TypeⅣ로 분류할 수 있었다. 펌프 10, 12, 15, 17 역시 이와 비슷한 양상을 나타내었다. 이상의 결과를 정리하면 표 2와 같다.

Type I-Ⅳ 중 역회전이 발생하지 않는 TypeⅢ를 제외한 나머지 펌프들에 대하여 역류방지밸브의 폐쇄소요시간을 역류발생 후 역회전이 발생하는 시간의 전후로 변화시키며 수치모의를 수행하여 펌프의 회전수와 펌프장 출구점에서의 위압수두의 변화를 모의하였다. Type I의 수치모의 결과는 그림 6, 7과 같다. 그림 6, 7에서 펌프의 회전수와 관로내의 위압수두의 변화가 심하게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. TypeⅡ의 수치모의 결과는 그림 8, 9와 같다. TypeⅡ의 경우 펌프의 회전수와 관로내 압력의 변화가 밸브의 폐쇄시 소요되는 시간에 대하여 민감하게 반응하였다. 이것은 Type I과는 달리 펌프의 토크가 빨리 변화하기 때문인 것으로 보인다. TypeⅣ의 결과는 그림 10, 11과 같다. 밸브의 폐쇄시간을 18초로 설정한 경우를 제외하고 큰 진동이 발생하였다. 이러한 현상은 관로내의 압력의 과도현상을 적절하게 제어하지 못하여 과도류가 펌프에 영향을 미치기 때문인 것으로 보인다. TypeⅣ와 같은 결과가 나타나는 관로에 대해서는 압력의 과도현상의 제어에 주의가 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수치모의를 통하여 펌프의 가동중단에 따른 펌프시설 내부의 흐름과 펌프의 회전수의 변화특성을 분석하였다. 펌프시설 내부의 흐름은 관로 최고점과 펌프시설의 위치에너지 차이와 펌프의 관성에너지의 관계에 의해서 계산되어 진다. 따라서 펌프시설을 보호하기 위한 역류방지 밸브의 폐쇄소요시간의 결정은 관로의 지형학적인 면과 펌프의 기계적인 면을 고려하여 결정되어야 할 것이다.

본 연구를 통하여 펌프의 가동중단시 펌프의 반응 특성을 4가지 경우로 분류할 수 있었다. Type I의 경우 역류방지밸브의 폐쇄시간에 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며, TypeⅡ, Ⅳ의 순으로 폐쇄시간에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 특히 TypeⅡ와 TypeⅣ의 경우에는 역류방지밸브의 설치시 세심한 경우 주의가 필요할 것으로 보인다. TypeⅢ의 경우, 수치모의 결과 역류방지 밸브를 설치할 필요가 없는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 적용한  $WR^2$ 은 경험식을 통하여 산정된 값이므로 향후 정확한  $WR^2$ 의 값이 결정된 후 수치모의를 수행하여야 할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 (주)LG산전이 지원한 연구성과 중 일부로서, 본 연구를 지원해 준 (주)LG산전에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 한국수자원공사 (1993). 펌프특성곡선편람, 한국수자원공사.
- Stoner Associate Inc. (1990). *User's Guide for LIQT-386 version 6.0*, Stoner Associate Inc., Carlisle, PA.
- Wylie, E.B. and Streeter, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

표 1. 대상 관망에 설치된 펌프의 특성값

펌프	정격유량 ( $Q_{R_i}$ cms)	정격양정고 ( $H_{R_i}$ m)	정격회전수 ( $N_{R_i}$ rpm)	정격토크 ( $T_{R_i}$ kN·m)	관로최고점 표고 (m)
1	2.3	70.0	711	24,467	62.5
2	3.2	80.5	600	44,462	83.2
3	3.6	80.5	588	50,955	83.2
4	3.8	80.0	592	52,673	76.4
5	1.2	26.0	900	3,852	38.8
6	0.5	75.0	1,200	3,810	64.0
7	1.2	64.0	1,200	7,227	63.8
8	1.4	30.5	600	7,090	56.3
9	1.8	30.5	591	9,731	56.3
10	0.4	67.0	1,200	2,297	90.2
11	0.4	67.0	1,750	1,604	89.2
12	1.0	66.0	720	9,286	90.5
13	1.0	66.0	725	10,507	90.9
14	2.6	38.0	593	18,043	79.5
15	1.4	81.0	710	17,932	127.9
16	0.9	80.0	900	8,986	73.2
17	1.7	62.0	885	13,354	147.5
18	0.6	75.0	1,200	4,364	88.2

표 2. 펌프의 가동중단에 따른 흐름 및 펌프의 회전수 변화 특성

분류	펌프	역류발생시간 (sec)	역류발생시의 $\alpha$	역회전발생시간 (sec)
Type I	1	2.80	0.75	18.05
	2	1.55	0.87	16.60
Type II	3	2.50	0.48	5.30
	4	3.30	0.39	6.30
	5	8.80	0.34	17.10
	11	18.50	0.28	35.70
	13	4.60	0.58	11.45
	14	48.50	0.05	58.70
	16	2.30	0.39	4.40
	18	1.80	0.51	3.90
Type III	6	63.85	0.09	-
	7	65.90	0.11	-
	9	-	-	-
Type IV	8	18.80	0.26	30.50
	10	29.75	0.18	41.35
	12	4.65	0.56	11.50
	15	5.47	0.24	9.10
	17	44.65	0.05	60.15

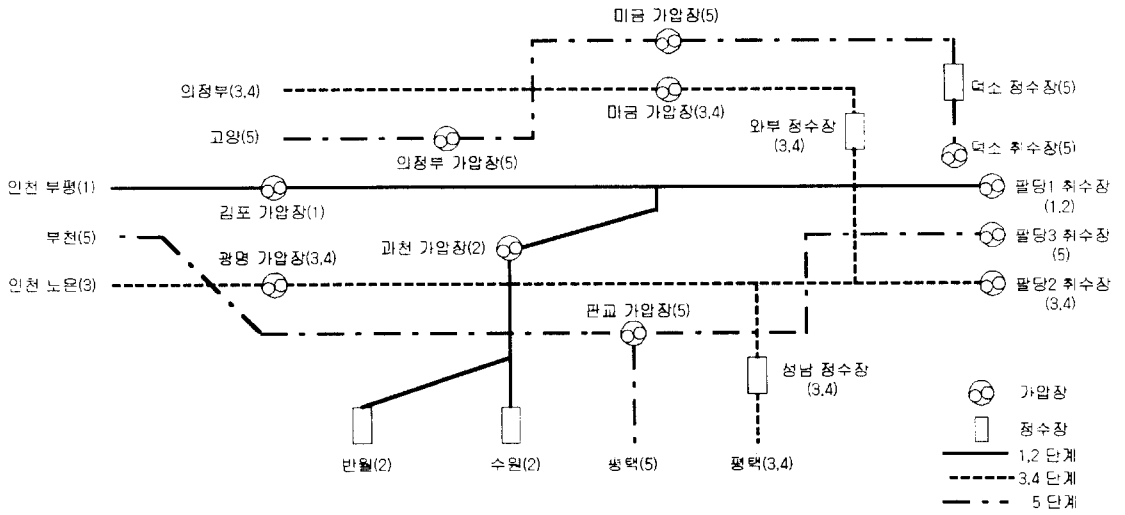


그림 1. 연구대상 관망의 개요도

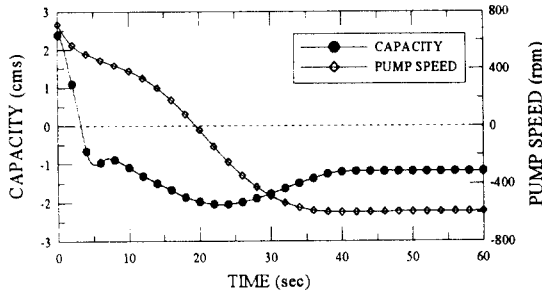


그림 2. 역류방지밸브가 없는 경우의 유량과 회전수 (펌프1)

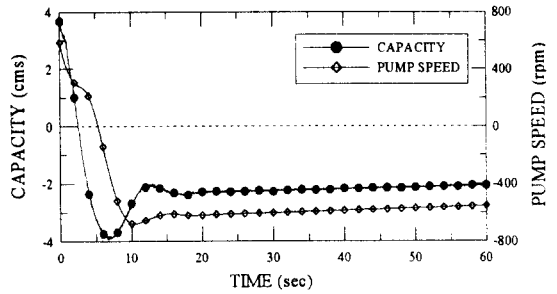


그림 3. 역류방지밸브가 없는 경우의 유량과 회전수 (펌프3)

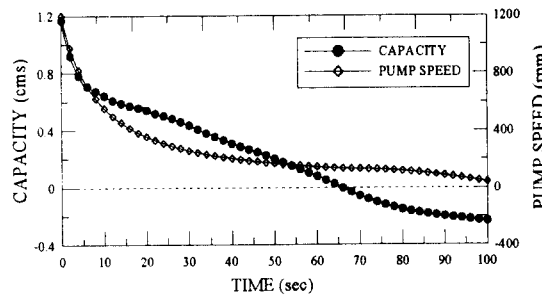


그림 4. 역류방지밸브가 없는 경우의 유량과 회전수 (펌프6)

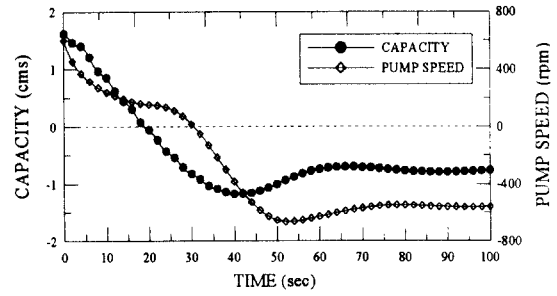


그림 5. 역류방지밸브가 없는 경우의 유량과 회전수 (펌프8)

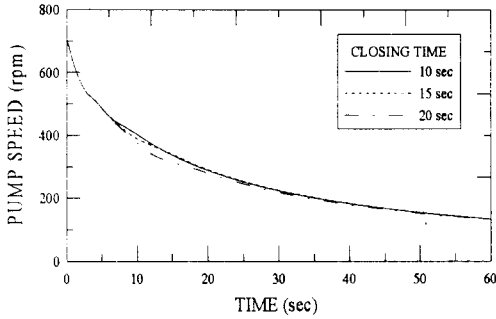


그림 6. 역류방지밸브의 폐쇄시간에 따른 회전수의 변화 (펌프1)

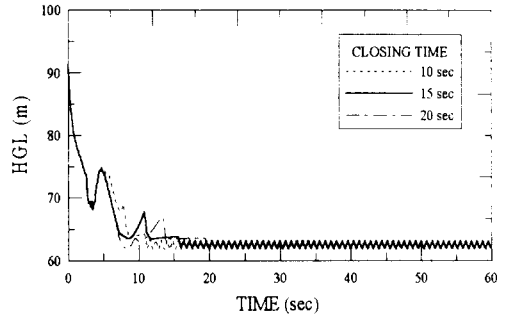


그림 7. 역류방지밸브의 폐쇄시간에 따른 위압수두의 변화 (펌프1)

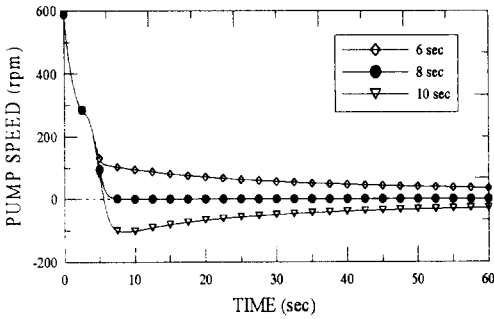


그림 8. 역류방지밸브의 폐쇄시간에 따른 회전수의 변화 (펌프6)

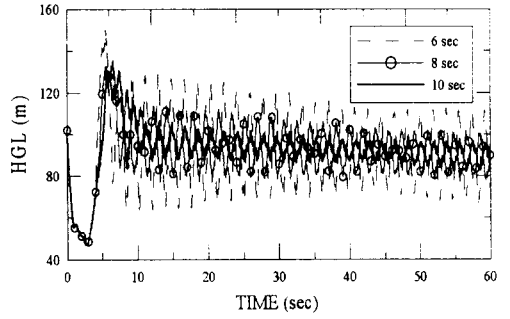


그림 9. 역류방지밸브의 폐쇄시간에 따른 위압수두의 변화 (펌프6)

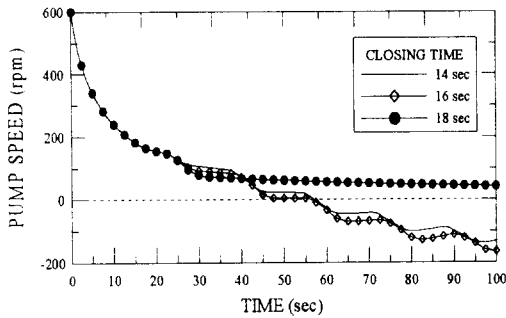


그림 10. 역류방지밸브의 폐쇄시간에 따른 회전수의 변화 (펌프8)

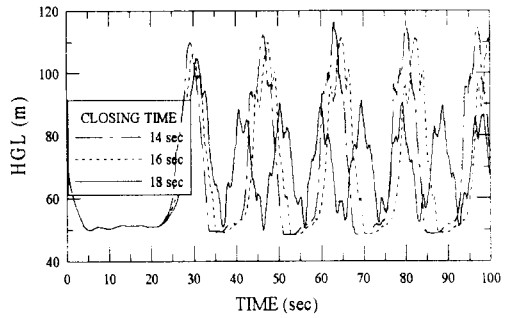


그림 11. 역류방지밸브의 폐쇄시간에 따른 위압수두의 변화 (펌프8)