

관망 수격현상 전산해석에서 경계조건의 영향

o박남식* · 김상현** · 유중권*** · 강주영****

1. 서론

관수로의 수격압 해석은 단일 관의 경우에 널리 수행되고 있다. 그러나 폐회로나 분기관들이 포함된 복잡한 관망에서는 적용된 사례가 많이 알려져 있지 않다. 관망에서는 압력파의 상호작용으로 인하여 수격현상이 매우 복잡해진다. 수리학적 요소 중 수격현상에 미치는 영향이 크면서 불확실성이 큰 것은 마찰계수와 경계조건이다. AWWA의 연구위원회(1974)는 수요분포와 변화가, Eggener와 Pokowski(1976)은 관의 마찰계수가 수격압 해석에 가장 큰 영향을 미친다고 주장했다. 본 연구에서는 수도권 광역상수도 1·2단계 관망을 이용하여 수격압 해석에 요구되는 경계조건의 불확실성의 영향을 분석하였다.

2. 수도권 광역상수도 1·2단계 관로시스템

수도권 광역상수도 1·2단계 관로는 팔당의 원수를 서울과 경기 지방의 각 정수장에 원수를 공급한다. 설계 유량은 1단계 1,200천 $m^3/일$ (13.9CMS), 2단계 1,400천 $m^3/일$ (16.2CMS)로 총 2,600천 $m^3/일$ (30CMS)이다. 각 단계의 정수장별 원수공급량은 1CMS 이하부터 10CMS 이상으로 다양하다(그림 1).

1단계 관로 시스템은 조압수조가 설치된 팔당과 부평정수장을 연결한다. 관로 시스템은 3개의 터널(직경 3.5m, 총연장 4.7km), 5조의 stand pipe(직경 2m), 그리고 총 구간 연장 61km 직경 0.8m-2.8m의 관로가 1, 2열로 구성되어 있다. 2단계 관로시스템은 팔당에서 취수된 원수를 안양의 비산정수장과 의왕정수장, 반월정수장, 그리고 수원외곽의 파장정수장에 공급하는데 총 연장 53km 직경 1.1m-2.8m의 관로가 1, 2열로 구성되어 있다. 3개의 터널은 1·2단계에서 공유되고 있다.

본 연구에서는 1단계 관로 중 팔당으로부터 김포가압장까지의 총 연장 44.7km(표 1), 2단계 관로 중 팔당으로부터 과천가압장까지 총 연장 34.5km(표 2)의 구간을 해석구간으로 설정하였다.

*동아대학교 토목공학과 조교수
**부산대학교 환경공학과 전임강사
***신우엔지니어링 이사
****시설안전기술공단 진단2본부 과장

1·2 단계는 별도의 관로로 구성되어 있지만 3개소의 터널과 잠실 근처에 설치된 밸브를 통해서 서로 연결된다. 그런데 이 연결 밸브는 평상시에는 폐쇄되어 있다. 따라서 1·2 단계 관로의 수격 현상은 터널을 통해서 상호작용을 일으킨다. 밸브 급폐쇄로 인한 수격압 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 1·2 단계 관로의 연결성이 고려된 관망을 구성하였다.

3. 수격압 전산해석

3.1 초기조건 - 정상류

밸브폐쇄 이전에 관로계의 흐름은 정상상태인 것으로 가정하였다. 정상상태 흐름에 대한 경계조건으로 조압수조(절점 1)에서는 수두(81.4m)를, 그외의 절점(절점 6, 7, 13, 15, 16, 17, 19, 20)에서는 유량을 지정하였다(그림 1).

일반적으로 관망 해석시 요구되는 입력자료들 중에서 불확실성이 가장 큰 자료가 관로의 마찰계수이다. 따라서 본 연구에서는 설계유량과 관측 수두를 이용하여 마찰계수를 시산적으로 산정하였다. 본 연구의 대상 관로는 상대적으로 단순하므로 반복적으로 마찰계수를 산정하였지만 더 복잡한 관망의 마찰계수는 체계적인 역산방법이 사용될 수 있다(박남식 등, 1998; Liggett and Chen, 1994; Boulous와 Wood, 1990; Bhave, 1989; Koelle, 1996).

계산된 수두가 관측된 수두와 가까워지도록 관로시스템의 마찰손실계수를 반복적으로 산정하였다. 대부분의 관에서는 마찰계수가 0.0125-0.018의 범위인데 25번과 28번 관에서는 마찰계수가 각각 0.03과 0.045로 매우 높게 나타났다. 이 때 관측 수두와 계산 수두 사이의 편차는 0.4m 이내로 최대 상대오차는 0.7%이다. 이는 Walski(1986)가 제시한 기준 3%보다 훨씬 더 작은 수치로 본 연구에서 계산된 수두분포는 수격압 해석에 대한 초기조건으로는 충분한 정확도를 지닌 것으로 생각할 수 있다.

3.2 김포밸브 폐쇄로 인한 수격압

3.2.1 일정 유량 경계조건

수격압 해석을 위하여 김포 가압장의 밸브가 90, 180, 270, 360초에 걸쳐 폐쇄되는 경우를 고려하였다. 경계조건으로 김포가압장의 유량은 폐쇄시간 동안 선형적으로 감소되고 다른 수요 절점들에서는 유량이 그대로 유지되는 것으로 가정하였다.

표 3과 4에는 각 구간에서 발생하는 최대 및 최소압력과 발생위치를 제시하였다. 밸브를 90초에 걸쳐 폐쇄하는 경우 김포가압장의 최대 압력이 11kgf/cm^2 으로 상승하여 관로 혹은 부속물에 파손의 염려가 있는 것으로 나타났으나, 최소 압력은 0.7kgf/cm^2 로 상온의 포화증기압보다 높기 때문에 부압으로 인한 피해의 염려는 없는 것으로 나타났다. 그런데 흥미롭게도 2단계의 과천 가압장(절점 19)에서 최소압력이 -0.62kgf/cm^2 로 수주분리의 위험이 있는 것으로 나타났다. 이는 과천가압장의 관저표고(35.8m)가 김포가압장의 관저표고(22m)보다 높기 때문인 것으로 사료된다.

폐쇄시간이 180초 이상인 경우 최대압력은 10kgf/cm^2 이하, 최소압력도 1·2 단계 전 구간에서 양압으로 나타나 수격현상의 부작용의 가능성이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 김포가압장에서의 밸브 폐쇄시간은 최소한 180초 이상이 되어야 할 것으로 사료된다.

3.2.2 일정 수두 경계조건

3.2.1절에서는 김포 가압장외의 가압장이나 정수장의 밸브에서는 유량이 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 그러나 관로는 가압장이나 정수장에서 일정 규모의 착수정으로 연결되기 때문에 김포 가압장의 밸브폐쇄로 인한 관로내 압력의 변화는 유량의 변화를 야기한다. 따라서 유량이 일정하다는 경계조건은 엄밀한 의미에서는 성립될 수 없다.

착수정에서의 경계조건을 정확히 고려하려면 착수정의 규모가 필요하다. 상수도시설기준(건설부, 1992)에 의하면 착수정의 용량은 체류시간을 1.5분 이상으로 하고 수심을 3-5m 정도로 하는 것이 바람직하다고 규정되어있다. 그런데 본 연구에서는 착수정에 대한 구체적 자료가 파악되지 않아 착수정 수위는 모의실험 중에 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 과천 착수정의 수위는 51.2m, 북정은 38.7m를 지정하였다. 이외의 분기점이나 영등포 정수장에서는 일정 유량 조건을 사용하였다.

일정 수두 경계조건을 사용하였을 때 팔당-김포, 팔당-과천 구간의 최소 및 최대 압력을 표 5와 6에 제시하였다. 김포 가압장에서는 동일한 조건이 사용되었으므로 팔당-김포 구간의 최소 및 최대 압력은 표 3과 4의 결과와 비슷하다. 그러나 팔당-과천 구간의 경우 최소압력은 0.67kgf/cm^2 로 양압력을 유지하는 것으로 나타났다.

일정 유량 경계조건을 사용하면 관로의 상태에 관계없이 유출을 발생시키므로 관로 내의 압력이 급격히 감소한다. 그에 반하여 일정 수두 조건은 관로 내 압력이 감소하면 유출량의 감소 또는 역류를 허용하므로 관로 내 압력 감소 폭은 일정 수두 조건의 경우보다 훨씬 더 작다. 과천 가압장과 북정 정수장에서 일정 수두 경계조건을 사용하였을 때 관말에서 상당시간 역류가 발생하였으며 유량은 최고 70%까지 변화하였다(그림 2). 이는 관말에서 지정되는 경계조건이 관망내 흐름에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 단적으로 보여준다.

5. 결론 및 향후 연구과제

수도권 광역상수도 1·2단계 관망에서 밸브폐쇄로 인한 수격현상을 특성곡선 방법으로 해석하였다. 해석결과 김포가압장의 밸브폐쇄로 인한 최대 압력은 김포밸브에서 발생하지만 최소압력은 과천가압장에서 발생하는 것으로 나타났다.

모의실험에 요구되는 경계조건의 불확실성 영향 분석을 위하여 폐쇄밸브 이외의 경계절점에서 일정유량조건과 일정수두조건의 영향을 분석하였다. 그 결과 일정 유량이 지정될 때 수격현상이 더욱 심화되는 것으로 나타났다. 실제 현상은 착수정의 규모가 일반적으로 그다지 크지 않기 때문에 착수정의 수두는 시간에 따라 변할 것으로 예상된다. 더욱이 상당시간 역류가 발생하는 것으로 나

타났기 때문에 착수정의 규모가 작으면 공기가 유입되는 등의 문제도 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 벨브폐쇄로 인한 관망의 수격현상을 더욱 정확하게 모의하려면 경계조건을 현장 여건에 부합되도록 적용해야할 것이다.

참고문헌

1. 건설부(1992). 상수도 시설기준.
2. 박남식, 김상현, 김문구, 노진식(1998). "역산기법을 이용한 관망의 검증," 98년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 535-549.
3. Bhave, P.R.(1988). "Calibrating Water Distribution Network Modes," Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 120-136.
4. Boulous, P.F. and D.J. Wood(1990). "Explict Calculation of Pipe-Network Parameters," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 11, pp. 1329-1344.
5. Eggener, C.L., and L.B. Polkowski(1976). "Network Models and the Impact of Modelling Assumptions." J. of AWWA, Vol. 68, No. 4, pp. 189-196.
6. Koelle, E., E. Luvizotto Jr., and J.G.P. Andrade(1996). "Leak detection and Monitoring in Hydraulic Networks," Hydraulic Engineering Software VI, pp 153-162.
7. Liggett, J.A. and L.C. Chen(1994). "Inverse Transient Analysis in Pipe Networks," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 8, pp. 935-955.
8. Research Committee(1974). "Water Distribution Research and Applied Development Needs." Journal of AWWA, Vol. 69, No. 7, pp. 510-514.
9. Walksi, T.M.(1986). "Case Study: Pipe Network Calibration Issues," Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 112, No. 2, 238-249.

표 1. 1 단계 관로계

구간 번호	구간연장 m	관경 m	관두께 mm	열수 개	유량 10 ⁶ CMD(CMS)	비고 10 ⁶ CMD(CMS)
1	3,320	3.5	-	1	1,200(13.889)	Tunnel 1, 1 stand pipe
2,3	1,123	2.2	16	2	"	
6	710	3.5	-	1	"	Tunnel 2, 2 stand pipes
7,8	2,495	2.2	16	2	"	
11	680	3.5	-	1	"	Tunnel 3, 2 stand pipes
13	8,000	2.2	16	2	1,200(13.889)	북정 분기, 50(0.579)
14	10,480	2.2	16	2	1,150(13.310)	
15	180	2.8	22	1	"	
16,17	1,580	2.2	16	2	"	
18	2,540	2.8	22	1	"	노량진 분기, 227(2.627)
19	980	2.6	22	1	923(10.683)	
21	5,480	1.8	13	2	"	선유 분기, 200(2.315)
22	520	1.8	13	2	723(8.368)	영등포 분기, 240(2.778)
23	6,580	2.0	14	1	483(5.590)	김포가압장
24	780	1.5	11	1	240(2.778)	영등포 정수장
25	8,090	0.8	6	1	50(0.579)	북정 정수장

표 2. 2 단계 관로계

관 번호	구간연장 m	관경 m	관두께 mm	열수 개	유량 10 ⁶ CMD(CMS)	비고 10 ⁶ CMD(CMS)
1	3,320	3.5	-	1	1,400(16.204)	Tunnel 1, 1 stand pipe
4.5	1,123	2.4	18	2	"	
6	710	3.5	-	1	"	Tunnel 2, 2 stand pipes
9,10	2,495	2.4	18	2	"	
11	680	3.5	-	1	"	
26	7,602	2.0	18	1	430(4.977)	Tunnel 3, 2 stand pipes 광암 분기, 970(11.227)
27	16,575	2.0	14	1	380(4.398)	
28	6,000	0.8	6	1	50(0.579)	과천 가압장 북정 정수장

표 3. 밸브 폐쇄시 팔당-김포 구간의 최소/최대 수격압(kgf/cm²) - 일정 유량 조건

	정상상태	밸브폐쇄시간(초)			
		90	180	270	360
최소압력 (절점번호)	0.82 (15)	0.70 (15)	0.82 (15)	0.82 (15)	0.82 (15)
최대압력 (절점번호)	4.74 (7)	11.71 (15)	7.27 (14)	7.31 (14)	6.73 (12)

표 4. 밸브 폐쇄시 팔당-과천 구간의 최소/최대 수격압(kgf/cm²) - 일정 유량 조건

	정상상태	밸브폐쇄시간(초)			
		90	180	270	360
최소압력 (절점번호)	1.24 (6)	-0.62 (19)	1.14 (19)	1.20 (6)	1.20 (6)
최대압력 (절점번호)	4.90 (18)	6.74 (18)	5.79 (18)	5.62 (18)	5.48 (18)

표 5. 밸브 폐쇄시 팔당-김포 구간의 최소/최대 수격압(kgf/cm²) - 일정 수두 조건

	정상상태	밸브폐쇄시간(초)			
		90	180	270	360
최소압력 (절점번호)	0.82 (15)	0.67 (6)	0.82 (15)	0.82 (15)	0.82 (15)
최대압력 (절점번호)	4.74 (7)	11.56 (15)	7.10 (12)	7.08 (14)	6.671(12)

표 6. 밸브 폐쇄시 팔당-과천 구간의 최소/최대 수격압(kgf/cm²) - 일정 수두 조건

	정상상태	밸브폐쇄시간(초)			
		90	180	270	360
최소압력 (절점번호)	1.24 (6)	0.67 (6)	1.20 (6)	1.20 (6)	1.20 (6)
최대압력 (절점번호)	4.90 (18)	5.84 (18)	5.36 (18)	5.28 (18)	5.23 (18)

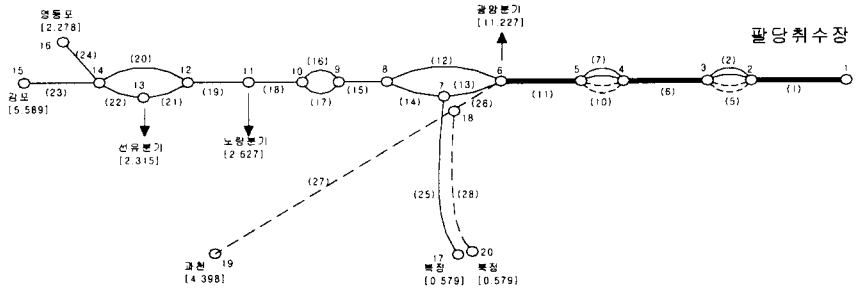


그림 1. 수도권 광역상수도 1·2단계 관망

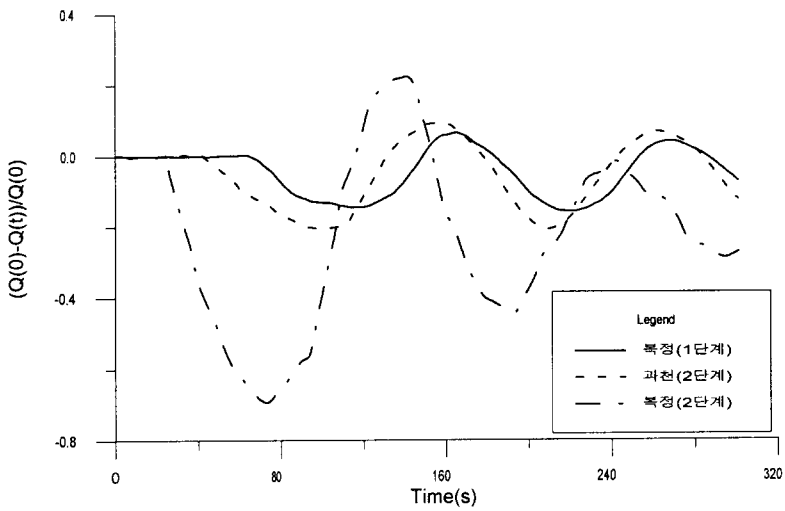


그림 2. 일정 수두 경계조건 사용시 과천가압장(절점 19)과 복정정수장(절점 17,20)의 유량변화