

배수관망내 수압부족시 절점수요량의 변화에 대한 기초적 고찰

A Basic Study for the Variation of Nodal Demands According to the Low Pressure in Water Distribution Systems

현인환* · 이상목 · 김영환 · 안용호

Hyun, In-Hwan · Lee, Sang-Mok · Kim, Young-Hwan · Ahn, Yong-Ho

단국대학교 토목환경공학과

(2002년 9월 1일 접수, 2002년 12월 4일 최종수정논문 채택)

Abstract

Pressure drop could happen in the water distribution systems due to pipe breaks or maintenance. The pressure drop causes the water service shutdown and nodal water demands should be reduced in some areas. The conventional analysis method of water distribution systems can not consider the change of nodal water demands caused by these pressure drops.

This study is to investigate the variation of nodal water demands according to the nodal water pressure and its effect on the analysis of water distribution systems. For these purpose, one real water service district was selected as a study area.

As a result, nodal water demand patterns according to the water pressure could be suggested. Also, we could confirm that the suggested new analysis method for the water distribution systems which considering water pressure drops could be more reliable than the conventional method.

Key words: water distribution system analysis, nodal demand, insufficient pressure

주제어: 배수관망해석, 절점수요량, 수압부족

1. 서론

배수관망에서는 관로의 파손과 노후관의 보수 및 교체 등으로 인하여 일부의 관로구간을 차단하게 되며, 이 때 하류 지역의 수압은 불가피하게 저하되게 된다. 이와 같이 수압이 평상시보다도 저하되면 단수가 되거나 출수 불량상태가 발생할 수 있

다. 따라서, 사고시나 배수관의 정비를 위하여 단수 등을 시행할 때에는 이러한 급수불량지역 또는 단수지역을 사전에 보다 정확하게 예측하여 이에 적절히 대응함으로써 급수서비스를 한층 더 강화시킬 수 있다.

일반적으로 사용되고 있는 배수관망해석법은 수압저하시에 발생하는 절점수요량의 변화를 고려하

*Corresponding author Tel: +82-2-709-2554, Fax: +82-2-794-9377, E-mail: ihhun@dankook.ac.kr (Hyun, I.H.)

지 않고 있다(현, 1987, 高桑, 1992, Male, 1990, Mays, 2000, Walski, 1984). 이 때문에 수압저하로 인하여 물이 공급되지 못하는 절점수요량까지 모두 공급되는 것으로 계산되어 과도한 급수불량지역 또는 단수지역을 예측할 가능성이 있다.

본 연구에서는 수압저하시 사용수량의 변화를 고려하는 경우의 배수관망해석결과의 차이를 고찰하고자 한다. 이를 위하여 A시 B급수구역을 연구대상 지역을 선정하여 수압저하에 따른 절점수요량의 감소 가능량을 조사하였으며, 이를 모델관망에 적용하여 기존 배수관망 해석법의 결과와 급수불량지역 및 단수구역 등의 차이에 대하여 비교·검토하였다.

2. 절점수두의 변화에 따른 사용수량의 변화

2.1. 절점수두와 사용수량과의 관계

수압저하로 일어나는 절점수요량의 감소는 급수 구역내에 부분적으로 물을 사용할 수 없는 수용가가 발생하기 때문이며, 수압이 저하됨으로 인하여 각 수용가 수도꼭지의 토출량의 자연적 감소에 의한 것이다(高桑, 1992).

수도꼭지에서 토출되는 수량은 수압의 함수이다. 일반적으로 오리피스공식에 따른다고 알려지고 있으며, 高桑(1992)은 이러한 가정 하에 수압저하시의 배수관망해석법을 제시하기도 하였다.

$$Q = CA\sqrt{2gh} \quad (1)$$

여기서, Q: 오리피스의 유출량

C: 유량계수

A: 단면적

g: 중력가속도

h: 압력수두

$$RH_i \geq ZH_i \text{ 일 때, } P_{ir} = P_{if} \quad (2)$$

$$RH_i < ZH_i \text{ 일 때, } P_{ir} = P_{if} \times \sqrt{\frac{(RH_i - Z_i)}{(ZH_i - Z_i)}} \quad (3)$$

여기서, RH_i : 절점 I에서의 잔수두

ZH_i : 절점 I에서의 최소허용 잔수두(일반적으로 15-20m)

P_{ir} : 보정된 절점유출수량

P_{if} : 초기에 할당된 절점유출수량

Z_i : 지상에서 수용가 수도꼭지까지의 높이

그러나, 배수관망내에서 실제의 경우 절점에서 유출되는 수량은 수압만이 아니라, 각 수용가에서 동시에 수도꼭지를 개방하는 경우의 수가 중요한 인자가 된다. 통상적인 해석의 경우, 실제 순간적으로 변하는 동적인 상태를 해석하는 것이 아니라 일정시간 steady state 상태를 가정하여 해석하게 되므로 예측이나 설계를 위하여 배수관망을 해석할 경우에는 절점에서의 유출수량이 항상 오리피스공식에 따른다고 할 수가 없다. 또한, 골격화된 배수관망의 경우, 하나의 절점에서 공급되는 수용가는 대단히 많으며, 이들 수용가의 지반고, 지하 및 옥상 저수조의 유무, 수도꼭지의 개방상태 등은 각기 다를 수밖에 없다. 따라서, 배수관망의 해석시에 이들 인자를 전부 정량적으로 정확히 산출한다는 것은 대단히 어려운 문제이다.

Fig. 1은 배수관과 수용가의 수압에 관한 모식도이다. 상수를 원활히 공급할 수 있는 절점수두는 절점에서 수용가의 수도꼭지에 이르는 손실수두, 수도꼭지의 지반고차 그리고 수도꼭지에서의 필요수두에 의해 결정된다.

Case I는 수용가 직전의 관로수압이 0 이하인 경우이며, 모든 수용가의 급수가 불가능하다. Case II는 관로수압이 C, D, E건물에 공급 가능한 경우이며, 급수관의 연장 및 상태에 따라서 각 건물의 층별 직결 급수가 가능 여부가 결정된다. 또한, 지하저수조가 있는 건물의 경우 지하저수조에서 자가 펌

Fig. 1. 절점 급수구역 모식도.

프를 사용함으로써 모든 층에서 물을 사용할 수도 있으며, 같은 1층 건물인 경우에도 건물의 지반고가 높거나 급수관에서 손실수두가 너무 높은 경우에는 불충분한 수압으로 물을 공급받지 못할 수 있다. Case III에서는 건물 A를 제외한 모든 건물에서 물을 공급받을 수 있으며, Case IV는 절점 i의 모든 구역에 급수할 수 있는 수압을 유지하는 경우로 급수가가능여부는 건물 A의 위치에서의 층수에 따라 달라진다.

2.2. 절점수압 부족이 관망해석에 미치는 영향

기존의 배수관망해석법을 이용하여 단수구역을 설정할 경우 수압부족시의 절점수요량 감소를 고려할 수 없으므로 실제로 공급되지 않는 절점과 부분적으로 공급되는 절점까지 모든 절점에서 설정된 절점수요량이 유출되는 것으로 설정된다. 그러므로, 흐름상태가 실제와 달리 정확하지 않을 수 있으며, 급수불량 및 단수면적도 상당히 커지게 되는 문제점이 있다. 배수관망에서 수압이 저하되면 각 절점에서의 절점수요량은 수압저하로 인한 급수불량이 수용가의 발생으로 그만큼 감소한다. 이에 따라 총 수요량이 감소하면 관망내의 대부분의 관로에서 손실수두가 감소하게 되며, 이로 인하여 절점수두는 다시 상승하게 된다.

3. 절점수압의 변화에 따른 사용수량 비율 조사

수압저하를 고려한 관망해석법을 적용하기 위해서는 수압에 따른 절점수요량의 감소경향이 파악되어야 한다. 이와 같은 경향을 파악하기 위해서는 층별 사용수량비율, 저수조 유무, 옥상 물탱크 유무, 부분 직결 급수 등의 급수형태와 각 수용가의 지반고 및 토출수압 등의 지역적 특성에 대한 조사가 선행되어야 한다.

3.1. 조사 대상지역의 선정

본 연구에서는 수압저하시 절점수요량 감소경향을 파악하기 위하여 A시 B배수구역의 342개의 급수전과 228개의 건물이 있는 일반적인 주거지역을 조사대상지역으로 선정하였다. 본 대상지역은 도로변에 식당, 목욕탕 등 상가건물을 일부 포함하고 있

으며, 대부분은 반지하를 포함한 2-3층 정도의 전형적인 주거지역이다. 건물 당 계량기의 수는 일반 주택의 경우 대부분 1개였으며, 다세대주택 및 빌라의 경우 최대 16개의 계량기가 있는 건물도 조사되었다. 또한, 옥상 물탱크가 설치된 곳이 일부 있었으며, 지하 저수조는 4층 이상의 건물에서 소수가 설치되어 있었다.

3.2. 대상지역의 층별 사용수량 조사

층별 사용량을 정확히 조사하기 위해서는 각 층에 계량기가 설치되어야 한다. 그러나, 본 대상지역에서는 층별로 계량기가 설치되어 있지 않아 층별 건물의 사용형태와 거주자에 대한 방문조사를 통하여 층별 사용량을 배분하였다.

조사된 결과는 다음과 같은 기준 하에 층별로 배분하였다.

① 옥상탱크가 있고 지하저류조가 없는 경우는 옥상탱크가 있는 곳까지 모든 사용수량이 급수되어야 하므로 옥상급수탱크가 있는 층에 전사용수량을 배분하였다.

② 지하저수조가 설치되어 있어 일단 지하저수조에 저장된 다음 상부층으로 가압급수되는 경우에는 지하층에 모든 사용수량을 배분하였다.

③ 옥상 급수탱크가 있는 4층 이상의 건물에는 모두 지하 저류조가 있는 것으로 고려하였다.

④ 계량기가 1개이고 층별 거주인구, 사용목적 등의 차이에 대한 조사가 불가능한 건물에 대해서는 부득이 각 층별로 균등하게 배분하였다.

조사된 자료를 바탕으로 본 조사대상지역의 층별 사용수량 비율을 결정하였으며, 그 결과는 다음의 Fig. 2와 같다.

3.3. 수압에 따른 절점수요량의 변화

수압에 따른 절점수요량의 변화를 조사하기 위해서는 우선 수압에 따른 각 급수전의 물사용 가능여부를 결정하는 기준이 되는 최소 허용토출수압이 결정되어야 한다. 최소 허용토출수압은 수요자가 물이용에 큰 불편이 없이 최소한의 급수를 받을 수 있는 수압을 의미한다. 한국산업규격 'KS B 2331'에는 '사용압력 0.74MPa(7.5kgf/cm²)인 급수 및 급탕용에 사용하는 수도꼭지에 대하여 규정한다.' 라고 명

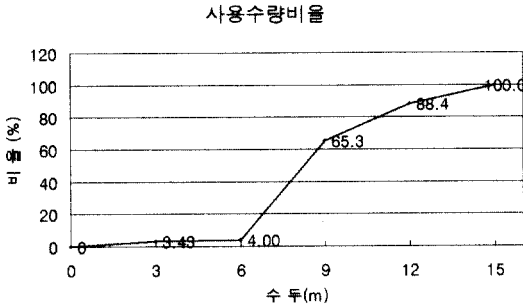


Fig. 2. 조사지역의 층별 사용수량 비율(%)

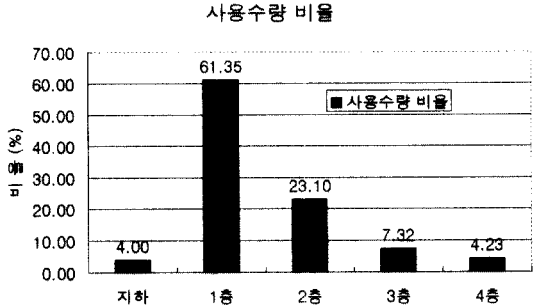


Fig. 3. 조사지역의 절점수도에 따른 사용수량 관계(%)

시되어 있으나 최소 토출수압에 대해서는 언급하지 않고 있다. 본 연구에서는 수도꼭지, 샤워기 및 순간온수기와 급탕기기 생산업체를 대상으로 최소 허용 토출수압에 대하여 조사한 결과, 시험을 통한 결과나 정확하고 합리적인 기준은 없었으나 대부분의 업체들에서 통상 0.5kgf/cm²가 넘을 경우 각종 급수기기를 큰 불편 없이 사용이 가능하다는 답변을 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 해석법의 적용 및 분석을 위하여 0.5kgf/cm²를 수용가의 적정 물사용을 위한 최저 토출수압 가정치로 결정하여 이를 분석에 적용하였다.

배수관 절점에서 수용가의 수도꼭지에 이르기까지는 급수관내면의 상태, 급수관의 길이, 단면축소 및 곡관부 등의 상태에 따라 손실수두가 발생된다. 특히, 급수관 및 옥내배관에 의한 수두손실은 건물내의 배관상황에 따라 크게 다를 수 있다. 이와 같은 급수관과 옥내배관에 의한 손실수두와 가옥 또는 건물의 1층의 바닥높이가 절점지반고 보다 다소 높은 경우를 고려하여 일괄적으로 2m의 수두손실이 발생하는 것으로 가정하였다. 그러나, 이는 본 해석법의 분석을 위한 가정값이며 앞에서 언급한 각종 상황에 따라 달라지므로 적정값에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다. 한편, 급수관과 옥내배관의 급수관 및 옥내배관에 의한 손실수두를 1m 정도를 가감하여 별도로 분석을 하였으나, 결과에 큰 영향을 미치지 않았다.

앞에서 결정한 수두손실 2m에 샤워기 설치위치를 고려하여 2m를 더 추가적으로 고려하였으며, 여기에 각종 급수기기의 최저허용 토출수두 5m를 포함하여 최종적으로 1층을 공급하기 위한 최소동수

압은 총 9m로 가정하여 이를 분석에 적용하였다.

건물의 각 층고는 3m로 가정하였으며, 2층의 최저허용토출수두를 12m, 3층의 경우 15m로 결정하였다. 또한, 지하저수조는 옥내배관을 통과하지 않기 때문에 3m 정도이면 공급이 가능한 것으로 가정하였다. 이를 적용하여 절점수두 감소에 따른 절점수요량의 감소량을 산출하였으며, 기준수두가 15m일 때 100%, 12m일 때 88.45%, 그리고 9m일 때 65.35%, 6m일 때 4%, 3m일 때 3.43%로 산정되었다. 모델관망에 적용함에 있어서는 기준수두를 15m로 하고, 직압에 의한 공급가능 층수를 3층으로 제한하였다. 이와 같이 결정된 층별 필요수두에 조사된 층별사용수량 비율을 적용하여 다음의 Fig. 3과 같은 수두별 사용수량 비율을 산출하였다.

본 연구에서는 이상과 같은 조사대상지역의 층별 물사용량 비율을 바탕으로 다음과 같은 수압구간별로 선형함수식을 구성하였다.

식 (2)로부터,

$$0 < RH_i < ZH_i \text{ 일 때, } P_{ir} = P_{if} \times (a_k X + b_k) \quad (4)$$

여기서, k: 선형함수의 절점수두에 따른 단계별 구분번호

a, b: 상수

본 연구에서는 k=1, ... 4

$$RH_i \leq 0 \text{ 일 때, } P_{ir} = 0 \quad (5)$$

4. 모델관망에의 적용 및 분석

수압저하를 고려한 경우의 영향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 모델 배수관망을 구성하였다. 본 모델관망은 A시 D배수구역의 실제관망을 본 연구에 적용하기 쉽도록 간략화한 것이다. 배수관망은 총절점수 29개, 총관로수 42개로 구성하였다.

이 관망을 대상으로 1개의 관로가 결손되었을 경우 수압저하를 고려한 배수관망 해석법과 일반적인 배수관망 해석법간의 해석결과를 비교·분석하였다. 수압저하를 고려한 해석에서는 배수관망의 최적설계법(현, 1987)을 기초로 단국대학교 환경연구소에서 개발한 '수압저하를 고려한 배수관망해석 프로그램'을 사용하였다.

Table 1은 5번 관로가 결손 되었을 경우, 두 해석법에 따른 관망해석결과이다. 정상시 총 0.899m³/sec이 유출되었던 것이 수압저하를 고려한 해석법에서는 34.8%가 감소한 0.667m³/sec이 유출되는 것으로 해석되었다. 절점별로 해석결과를 살펴보면, 일반 배수관망해석법에서는 22개의 절점이 기준수두 15m에 미달하는 것으로 나타났으며, 이중 5개의 절점이 출수불량 그리고 17개 절점이 출수불가 절점으로 판정되었다. 이에 비하여, 수압저하를 고려한 해석법의 결과에서는 급수가 전면적으로 불가능한 절점은 1개 절점으로 산정되었으며, 기준수두 15m에 미달하는 절점은 총 14개 절점이었다. 그러나, 일반 배수관망해석법의 결과와는 달리 이들 14개의 출수불량 절점 중 6개의 절점은 수두가 12m 이상이거나 또는 기준수두 15m에 근소한 차이로 미달하는 정도의 수두를 나타내고 있어 실제적으로 출수불량이 심각한 절점은 8개인 것으로 산정되었다. 따라서, 두 해석법간의 출수불량지역 및 단수구역의 판정에 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한, 12번 관로가 결손되었을 경우, 일반적인 해석법에서는 0에서 15m의 잔류수두를 갖는 절점이 12개, 0m 이하의 잔류수두를 갖는 절점이 6개가 발생하였다. 그러나 수압저하에 의한 절점수요량의 변화를 고려한 해석법에서는 0에서 15m의 잔류수두를 갖는 절점이 11개, 0m 이하의 잔류수두를 갖는 절점은 없었다. 유출수량으로는 수압저하에 의

Table 1. 5번 관로 결손시 관망해석 결과(A배수구역)

절점 번호	일반 배수관망 해석법		수압부족을 고려한 해석법			
	절점 수요량 (m ³ /s)	잔류 수두 (m)	절점 수요량 (m ³ /s)	잔류 수두 (m)	절점 수요량 차이 (m ³ /s)	절점 수요량 변화율 (%)
	1	-	-	-	-	-
2	0	3.00	0	3.00	0	0.00
3	0	7.22	0	7.55	0	0.00
4	0	63.44	0	64.12	0	0.00
5	0.067	-186.33	0	-2.34	0.067	100.00
6	0.042	-12.69	0.042	23.86	0	0.00
7	0.074	6.184	0.074	21.62	0	0.00
8	0.082	-176.59	0.025	7.32	0.057	69.51
9	0.043	-4.04	0.043	15.68	0	0.00
10	0.052	-11.25	0.051	14.52	0.001	1.92
11	0.013	-167.16	0.013	15.17	0	0.00
12	0.021	-158.30	0.021	23.93	0	0.00
13	0.03	-179.14	0.001	3.09	0.029	96.67
14	0.038	-178.65	0.001	3.44	0.037	97.37
15	0.044	-14.65	0.040	12.44	0.004	9.09
16	0.025	-6.11	0.023	13.41	0.002	8.00
17	0.032	-167.93	0.024	10.34	0.008	25.00
18	0.029	-148.03	0.005	6.57	0.024	82.76
19	0.033	24.22	0.033	34.46	0	0.00
20	0.038	15.54	0.038	28.49	0	0.00
21	0.036	18.11	0.036	32.35	0	0.00
22	0.034	1.10	0.034	17.69	0	0.00
23	0.029	-2.28	0.027	13.65	0.002	6.90
24	0.035	-2.47	0.035	14.87	0	0.00
25	0.042	2.79	0.042	17.31	0	0.00
26	0.033	-2.63	0.032	14.18	0.001	3.03
27	0.027	-0.03	0.027	15.10	0	0.00
28	0	35.02	0	38.28	0	0.00
29	0	28.83	0	34.27	0	0.00
계	0.899		0.667		0.232	34.78

주) 이탤릭체 항목들은 기준수두 15m 이하인 절점

해 전체 절점수요량의 88.6%만이 유출되는 것으로 나타났다. 이들 11개의 출수불량 절점중에서도 5개의 절점은 기준 수두에는 미달하지만 12m 내지 14m의 상당히 양호한 수두를 나타내며 원래 할당된 유출수량의 약90%이상을 공급할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 5. 12번 관로결손시 배수관망 해석결과.

5. 결론

수압저하를 고려한 관망해석법은 단수구역 및 출수 불량지역의 보다 정확한 예측을 위하여 사용될 수 있으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 선정된 대상지역의 경우 각 절점의 잔류수두가 3m일 때 3.4%, 6m일 때 4%, 9m일 때 65.3%, 12m일 때 88.4%의 수요량이 공급 가능한 것으로 조사되었다.

2) 모델 배수구역의 5번 관로결손시 일반 배수관망해석법에 의한 결과에서는 급수가 불가능한 절점이 17개로 전체의 58.6%에 달했고 적정수두 15m 이하의 수두를 나타내는 절점은 총 22개로 전체의 75.9%를 차지하였다. 그러나, 수압저하를 고려한 배수관망해석법에서는 대상지역의 수압에 따른 절점수요량 변화경향을 적용함으로써 총 절점수요량의 34.8%가 감소되었으며, 1개의 절점만이 0m이하의 수두를 나타내었다. 또한, 15m 이하 수두의 절점은 14개였으며, 이중 6개의 절점은 12m 이상이거나 15m에 가까운 수두를 나타내고 있어 일반 배수관망해석법에 의한 결과와 상당한 차이를 보였다. 따라서, 관로결손시 단수지역과 출수불량지역 예측을 위하여 일반해석법을 사용할 경우 과다하게 예

측될 가능성이 있다는 것을 알 수 있었으며, 이에 비하여 수압저하를 고려한 배수관망해석법은 보다 실제적인 예측이 가능함을 알 수 있었다.

3) 수압과 절점수요량의 관계는 옥내 지하저수조의 유무, 각 건물의 층별 물사용비율 등에 밀접한 관계가 있기 때문에 급수구역별로 다를 수 있다. 따라서, 수압저하시의 영향을 보다 정확히 예측하기 위해서는 급수구역의 물사용 형태별로 공급수압과 사용수량과의 관계에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

- 한국표준협회 (1999) 한국산업규격, 한국표준협회.
- 현인환 (1987) 배수관망의 최적설계법에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
- 高桑哲男 (1978) 配水管網の解析と設計, 森林出版.
- 高桑哲男 (1992) 配水管網解析の基礎と應用, 水道管路技術センター.
- Male, J.W. and Walski, T.M. (1990) Water Distribution Systems, Lewis Publishers.
- Mays, L.W. (2000) Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill.
- Walski, T.M. (1984) Analysis of Water Distribution Systems, Van Nostrand Reinhold Company.