

# 대도시 급·배수관망의 준부정류 해석

## A Analysis of Semi-Unsteady Flow for Water Distribution Pipe Network in Large Cities

오창주<sup>\*</sup>, 이경훈<sup>\*\*</sup>, 임상주<sup>\*\*\*</sup>, 김태경<sup>\*\*\*\*</sup>

Chang Ju Oh, Kyoung Hoon Rhee, Sang Ju Yim, Tae Kyoung Kim

### 1. 서 론

수도는 생활·공공·생산 활동에 필요한 양과 질의 물을 관로를 통하여 유압(有壓)으로 연속적으로 공급하는 시설로서 음용수를 위생적으로 안전하게 충분히 공급하고 산업시설에서 요구되는 수질의 용수를 적절히 공급하는데 목적이 있다. 그러나 우리나라의 많은 대도시들의 경우에서처럼 도시가 성장함에 따라 급수구역이 광범위해지고 상수도 시설이 거대해 지면 복잡한 배수시설을 가지게 되어 상수도 시설을 효율적으로 유지관리 하기가 매우 어렵게 되므로 운영관리상 많은 문제점이 발생하게 된다. 이러한 문제점에 보다 더 효과적으로 대처하기 위해서는 가장 기본적으로 현재의 상수도 시설에 대한 수리상태를 파악하여야 하는데, 관망이 매우 복잡한 대도시의 경우, 실제와 가까운 해석 결과가 나오기 위해서는 시간별로 변화하는 수돗물 사용량의 변화를 반영하여야 한다. 그러나 기존의 관망해석은 주로 주간의 최대 급수시와 야간의 최소 급수시에 대한 정상류해석을 실시한 관계로 각 시간대에서의 수리적 상태를 정밀하게 파악하기가 어려운 점이 있었다.

본 연구에서는 대도시 상수도시설의 효율적 운영 및 확장에 기본이 되는 급배수관망의 수리상태를 보다 정밀하게 파악하는 과학적이고 체계적인 방법을 제시하고, 대상지역인 광주광역시 및 이와 유사한 시설규모를 가진 대도시 상수도시설에 대한 보다 효율적인 운영을 도모할 목적으로 준부정류 해석을 실시하였다. 관망해석에 필요한 입력자료는 실제 운영되고 있는 광주광역시의 상수도 급배수관망 시설을 대상으로 산출하였으며, 관망해석 프로그램인 Pipenet98을 이용하여 2시간 간격으로 시뮬레이션을 실시하였다.

### 2. 대상지역의 상수도 시설현황 및 급수현황

광주광역시 상수도 시설은 1920년 5월 제 1수원지를 건설해 1일 800m<sup>3</sup>의 수돗물생산·공급을 시작으로 상수도 사업의 활발한 추진 및 1970년대 이후 지속적인 경제성장과 더불어 국민들의 생활수준 향상과 인구증가, 도시화 및 공업화 등으로 급수량의 수요가 급격히 증가함에 따라 시설을 확장하여 1999년 12말 현재 5개구에 총 인구는 약 137만명, 급수인구는 약 130만명, 시설용량은 83만톤/day, 급수량은 40만톤/day, 보급률은 95.1%, 1인당 급수량은 309ℓ/day이다.

### 3. 이론적 고찰

#### 3.1 관로시스템 및 관망해석의 개요

수리학적으로 관수로는 관의 단면형상에 관계없이 물의 흐름이 단면 내에 완전히 충전하여 있을 때 자유

\* 정회원 · 전남과학대학 지리정보·토목과 전임강사 · cjoh21@hanmail.net

\*\* 정회원 · 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수 · khrhee@chonnam.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 전남과학대학 지리정보·토목과 전임강사 · yimsangju@hanmail.net

\*\*\*\* 정회원 · 전남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료 · ktk2028@hanmail.net

수면을 갖지 않는 흐름을 말한다. 따라서 내벽 전체를 통하여 대기압외의 또 다른 압력을 받게 되며 관로, 사이폰, 압력터널 등의 흐름이 여기에 속한다. 만일 관내를 충전하지 않을 때는 이것을 별도로 개수로로 취급하게 된다. 만약 관수로에서 개수로의 부분이 발생될 경우 유속은 감소, 유량이 증가하면서 관내가 충전하게 되며 관정고를 절점의 입력자료로 사용시에는 관경과 비교하여 개수로 여부를 판단해 주어야 할 것이다. 관로시스템에서 대부분의 흐름문제는 시간에 따라 흐름의 특성이 변화하지 않는 정상류의 조건으로 해석하며, 물의 압축성 또한 무시할 수 있다. 그러나 수 충격 현상 같은 관내의 흐름이 하나의 정상류 상태에서 다른 정상류 상태로 아주 짧은 시간동안에 변화하는 과도수리현상이 발생할 경우에는 부정류 흐름해석기법이 사용되어야 한다. 본 논문에서 준부정류 해석을 위하여 사용한 프로그램은 광주광역시 현대화 사업에 적용된 바 있는 PipeNet98 모형을 사용하였다. PipeNet98모형은 정류해석, 관경최적화, 준부정류 해석 이외에도 밸브의 개폐도를 반영할 수 있다.

### 3.2 관망해석의 이론

그 동안 많은 관망해석 프로그램은 어느 고정된 시간에 유입량과 절점에서의 유출량이 주어진 상태에서 각 관로내에 흐르는 유량을 모의하여 왔었다. 그러나, 실제로 관망은 어느 고정된 상태에서 운영되는 것이 아니라 매 시간마다 그 상태가 변화하게 된다. 즉, 절점에서의 유입량이 되는 취수량이나 절점에서의 유출량이 되는 소비량은 일정한 값을 유지하지 못하고 시간에 따라 수요가 변화된다. 또한, 관망의 중간마다 설치되어 있는 배수지의 경우도 배수지 유입량과 배수지로부터의 유출량에 따라 그 수위가 변화하게 되고 시간 변화, 절점 압력변화, 탱크수위변화에 따라 펌프도 통제되어야 한다. 뿐만 아니라, 화재가 났을 때 소화용수가 갑자기 필요할 때 전체적으로 관로에 끼치는 영향과 관이 파괴되어 물을 중단할 때의 영향 등을 고려하여야 한다. 이와 같이 시간에 따른 수요량의 변화와 배수지 혹은 저장탱크의 유출량 변화, 탱크수위, 시간, 절점압력에 따른 펌프통제, 관이 파괴되었을 때 일시적인 물의 공급 중단, 화재시 소화용수 등을 고려하여 시간에 따른 관로내 유량변화와 탱크수위변화, 절점에서의 압력변화 등을 모의하는 기능을 확장기간모의(Extended Period Simulation)라 한다. 본 연구에서 적용된 준부정류 해석(확장기간모의방법)은 준정류 해석(Queasi-Steady Analysis)으로써 다루고 있다. 일반적인 관망해석은 절점에서의 평균유출량을 통해 시간에 따라 변하지 않는 정류상태의 흐름을 해석한 것이다. 준부정류 해석도 사실 정류해석과 똑같은 방법으로 해석하게 되는데, 다만, 준정류 해석은 어떤 특정한 짧은 시간간격에서의 유량을 정류상태의 흐름으로 보고 시간간격에 따라 해석한 것이다. 실제로는 정류상태의 흐름을 해석한 것이지만 시간 변화에 따라 유량의 변화로 해석했기 때문에 수요량의 변화와 배수지 혹은 저장탱크의 유출량 변화, 수위변화에 따라 관로내 유량이 변화하는 것을 모의한 것과 같게 된다. 이를 준부정류 해석이라 하고 확장기간모의 해석이라고도 한다. 이에 대한 기본적인 식은 다음과 같다.

$$q\Delta t = A_{\text{tank}} \times \Delta z \quad (3.1)$$

여기서,  $q$  = 탱크안의 유량,  $\Delta t$  = 시간단계,  $A_{\text{tank}}$  = 탱크의 수평면적  
 $\Delta z$  = 시간단계의 끝에서 적용되는 탱크의 수위변화

### 4. 급배수관망 및 입력자료

광주광역시 상수도 사업본부에서 실제 사용하고 있는 1:5,000의 광주광역시 상수 관망도와 1:25,000의 광주광역시 지형도를 이용하여 관망해석을 실시하였고, PipeNet98 모형을 이용하기 위해 배수관망의 절점과 관로를 새로 구성하였다. 본 연구에서 구성한 관로의 총 수는 766개이며, 절점의 총 수는 625개이다. 1일 평균 급수량은 그림 4.1~4.3에서와 같이 각 절점에 면적비례로 배분하여 절점수요량을 다음과 같은 방법으로 수요량을 산출하였으며, 광주광역시 배수관망을 관로 매설년도 별로 구역을 나누고 해당 관로에 적용할 C계수

를 표 4.1에 나타내었으며, 광주광역시의 1일 급수량에 대한 시간별 급수량 비율은 표 4.2와 같이 나타나며 본 연구에서는 관망해석시 이와 같은 시간별 급수량을 고려하여 사용량에 반영하였다..

○ 수요수량에 의한 절점에서의 배분방법(절점이 동내(洞内)에 있는 경우)

- ①의 절점수량 =  $Q_A \times 0.5$                       ②의 절점수량 =  $Q_A \times 0.5$
- ③의 절점수량 =  $Q_B \times 0.25$                     ④의 절점수량 =  $Q_B \times 0.25$
- ⑤의 절점수량 =  $Q_B \times 0.5$                     여기서,  $Q_n$ : n동 수요량

○ 절점이 동내에 없는 경우

절점이 동내에 없는 경우에는 가장 가까운 절점에 면적배분하여 각 절점의 수요량으로 계산하였다.

- ⑥의 절점수량 =  $Q_C + Q_E$                       ⑦의 절점수량 =  $Q_D \times 1/3 + Q_F \times 1/3$
- ⑧의 절점수량 =  $Q_D \times 2/3 + Q_F \times 2/3$

○ 절점이 동 경계에 있는 경우

- ⑨의 절점수량 =  $Q_G \times 1/4$                       ⑩의 절점수량 =  $Q_G \times 1/4$
- ⑪의 절점수량 =  $Q_G \times 1/2$                     ⑫의 절점수량 =  $Q_H \times 1/6$
- ⑬의 절점수량 =  $Q_H \times 1/3$                     ⑭의 절점수량 =  $Q_H \times 1/6$
- ⑮의 절점수량 =  $Q_H \times 1/3$

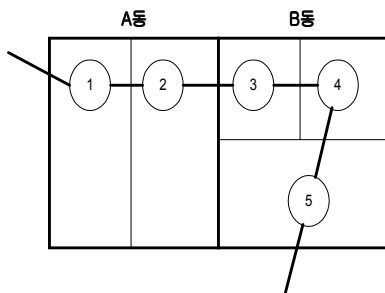


그림 4.1 절점이 동내에 있는 경우

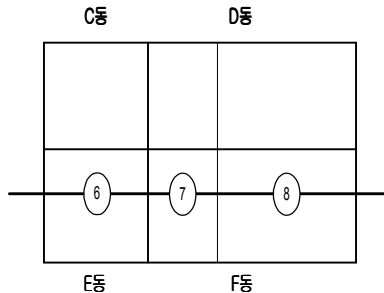


그림 4.2 절점이 동내에 없는 경우

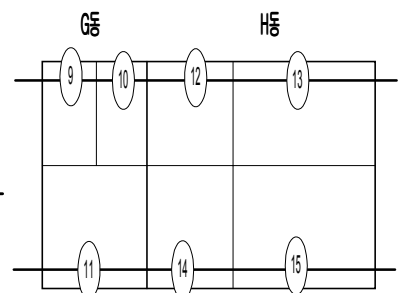


그림 4.3 절점이 동 경계에 있는 경우

표 4.1 관로 매설년도별 구역 및 적용 C 계수

관로 매설년도	구역명	적용 C 계수
1995 ~ 1999	남면정수장 일대, 첨단지구, 일곡지구 일대	130
1990 ~ 1994	본촌배수지 일대(본촌동), 동운배수지 일대, 북구 문흥동·우산동 일대, 서구 화정동·상무지구 일대, 각화정수장 및 산수배수지 일대, 덕남정수장 및 송하배수지 일대, 월산 제2배수지 일대, 지원 및 용연 정수장 일대	120
1985 ~ 1989	송정정수장 일대, 월산 제1배수지 일대, 동구 학동 일대	110

표 4.2 상수도사용량의 시간적 변화

1일급수량에 대한 시간별 급수량의 비			
시간대	(%)	시간대	(%)
06 - 08	8.285	18 - 20	9.373
08 - 10	10.583	20 - 22	8.859
10 - 12	10.716	22 - 24	7.664
12 - 14	9.96	24 - 02	5.712
14 - 16	9.343	02 - 04	4.806
16 - 18	9.082	04 - 06	5.395

## 5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 구성된 관망에 대하여 산출된 절점고, 관연장 Hazen-Williams계수, 절점유출량, 시간별 급수량, C계수 등 입력 자료를 관망해석 프로그램인 PipeNet98에 적용하여 준부정류해석을 실시하였다. 그 결과, 전체 절점 625개에 대한 수압변화를 살펴보면, 시간별 평균수압의 변화는 그림 5.2와 같이 수돗물 사용량

이 가장 적은 2시에서 4시 사이에  $4.61 \text{ kg/cm}^2$ 로 가장 높게 나타났고, 사용량이 가장 많은 10시와 12시 사이에  $3.94 \text{ kg/cm}^2$ 로 가장 낮게 나타났다. 또한, 전체 평균수압에 대한 비율은 시간별 평균수압 변화와 유사한 형태를 나타내었으며, 가장 큰 시간대는 전체 평균수압에 비하여 109%, 가장 낮은 시간대는 93%로 나타났다. 한편, 시간대별 평균 압력이 표 5.1에서와 같이 80~90%절점이 10시 이 후 야간에  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  이상 증가했고, 주간시간대에는 70~80%의 절점이  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 이하로 감소한 것으로 나타났다.  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  증감의 경우에 있어서는  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 의 경우보다는 약간 적으나 대체적으로 비슷한 분포를 보이고 있어 대부분의 주야간 압력차는  $\pm 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 의 변화를 보이는 것으로 판단된다.

한편, 평균에 대한 시간별 급수량 비율 및 수압비율은 급수량 비율 보다 수압비율이 보다 완만하게 변화하고 있는 것으로 나타나 있다. 따라서, 급수량 변화에 비하여 수압변화가 보다 더 적게 변화하는 것으로 판단된다. 시간대별 압력분포를 보면, 표 5.2에서와 같이 모든 시간대에서  $4 \text{ kg/cm}^2$ 이상의 비교적 높은 압력이 발생하였으며, 그 범위는 54~70%로 나타났고,  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ 이하의 빈압 발생에 대해서는 6~8%범위에 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 어느 시간대에서든 고압과 빈압이 발생하고 시간대별로 절점의 비율이 달라지는 것을 나타내므로 누수지역과 출수불량지역도 시간대별로 변화할 것으로 판단된다.

표 5.1 시간별 수압변화 절점 수

수압편차 시간	+0.5 $\text{kg/cm}^2$	-0.5 $\text{kg/cm}^2$	+1.0 $\text{kg/cm}^2$	-1.0 $\text{kg/cm}^2$
6-8	454	0	0	13
8-10	0	581	0	566
10-12	0	581	0	566
12-14	0	569	0	555
14-16	0	559	0	548
16-18	0	554	0	542
18-20	0	554	0	548
20-22	3	543	0	446
22-24	566	0	0	0
24-02	584	0	559	0
02-04	594	0	557	0
04-06	564	0	559	0

표 5.2 시간대별 압력분포

압력변화 시간대	$4 \text{ kg/cm}^2$ 이상		$1.5 \text{ kg/cm}^2$ 이하	
	개소수	백분율(%)	개소수	백분율(%)
6-8	385	61.6	45	7.2
8-10	342	54.72	49	7.84
10-12	338	54.08	49	7.84
12-14	357	57.12	44	7.04
14-16	374	59.84	43	6.88
16-18	376	60.16	43	6.88
18-20	371	59.36	43	6.88
20-22	377	60.32	42	6.72
22-24	391	62.56	40	6.4
24-02	428	68.48	36	5.76
02-04	435	69.6	36	5.76
04-06	433	69.28	36	5.76

## 6. 결 론

본 연구에서는 상수도 급·배수 관로시설의 효율적인 운영을 도모할 목적으로 대도시의 실제 관망 및 시간별 급수량을 대상으로 준부정류 해석을 한 결과, 시간별 평균수압의 변화는 시간별 급수량 비율에 반비례하는 형태로 유사한 변화형태를 보이는 것으로 나타났다. 이는 시간별 급수량을 각 절점유출량에 동일하게 적용했기 때문이다. 만일 각 지역별 시간별 급수량을 적용하면 다소간의 차이가 있을 것으로 판단되며, 시간별 급수량의 편차가 심한 중소도시의 경우에는 대도시보다 수압의 편차도 많아질 것으로 예상된다. 따라서 중소도시에 대한 준부정류 해석을 실시할 경우, 보다 정밀한 결과를 얻기 위해서는 각 지역별 시간별 급수량을 적용해야 할 것으로 판단된다. 또한, 전체 평균수압에 대한 비율은 시간별 평균수압 변화와 유사한 형태를 나타내었으며, 전체 평균수압에 비하여  $\pm 16\%$ 범위 내에서 변화하는 것으로 나타났다. 또한, 시간대별 평균 압력의 변화는 주간과 야간으로 증감이 뚜렷하며, 전체적으로  $\pm 1.0 \text{ kg/cm}^2$  증감으로 나타났다. 만일, 전체적인 수압이 적정범위에 있지 않고 낮거나 높은 쪽으로 치중되어 있으면, 출수불량 또는 누수에 우려할 만한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 한편, 시간대별 압력분포는 평균 약 60%정도 비교적 높은 압력이 발생하고

있으나, 빈압의 경우도 모든 시간대에서 다소간 나타나고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 상수도 관로시설 운영에 있어, 보다 효과적인 관로시설 운영을 위해서는 급수량의 사용량이 최대인 경우와 최소인 경우에 대한 정상류해석 보다 전체시간대에 대한 준부정류 해석을 실시하면 보다 효과적일 것으로 판단된다.

## 7. 참고문헌

- 1) Massimo Greeo and Giuseppe Del Giudice, "New Approach to Water Distribution Network Calibration", Jour. of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 8, pp. 849~854, 1999.
- 2) 오창주, "그래프 이론을 이용한 차단밸브의 최적 선정기법 연구", 전남대학교, 2000.