누수량을 고려한 상수도 관망해석



김 경 필 | GS건설 기술연구소 선임연구원 kpkim01@gsconst.co.kr



구 자 용 | 서울시립대학교 환경공학부 정교수 jykoo@uos.ac.kr

1. 서 론

상수도 관망의 수압관리는 누수관리 방법 가운데 가장 비용대비 효과가 높은 방법이다. 누수관리를 위한 수압관리 방법이란 오리피스의 이론에서와 같이 관로의 균열부, 접합부, 연결부 등기존 누수부위에서의 누수량은 수압에 비례하여증가하고, 또 새로운 누수사고가 수압이 최대인야간최소유량시간대에 주로 발생(McKenzie, 2001, Thronton, 2008)하는 것에 주목하여, 수돗물 공급에 필요한 최소의 적정수압 범위에서관망을 유지·관리함으로서 기존 누수부위의 누수량과 새로운 누수사고의 발생확률을 최소화하는 것을 의미한다. 보통의 누수저감을 위한 수압관리는 상수도관망의 정확한 ① 수리상태의 분석

과, ② 수압관리를 통하여 예측되는 누수저감효 과의 분석. ③ 수용가에서의 안정적인 수압확보 가 가능한지에 대한 예측(Walski et al., 2006) 을 통해 합리적인 누수저감 계획을 수립 한 후. 수압관리 소블록 또는 PMA(Pressure Management Area) 구축을 통해 이루어지게 된다. 이때 합리적인 누수저감 계획의 수립에 필 수적인 것이 관망해석 모델이다. 누수를 고려한 관망해석 모델은 물수요량을 나타내는 기존 절점 유출 유량에 누수량을 추가로 고려한 수리해석. 절점별 누수량 배분을 통한 수압관리를 통한 누 수저감 효과의 예측. 누수 의심구간의 탐색. 관 파손시 수압저하로 인한 출수불량지역의 분석 등 다양한 목적으로 사용되고 있다. 누수량을 고려 한 관망해석에서 가장 중요한 것은 누수량을 어 떻게 각 절점에 어떻게 배분하고 또 수압에 비례 하는 누수량의 변화를 어떻게 고려할 것이냐의 문제라고 할 수 있다.

본 연구에서는 상수도 GIS로부터 누수량의 절점 배분을 위한 관계식을 결정하는 방법과 수압에 비례하는 누수량의 변화를 고려할 수 있는 관망해석 모델을 개발하고 그 적용 사례를 나타내고자 하였다. 개발 모델은 GGA(global gradient algorithm; Todini & Pilati, 1987)을 이용하여 Visual Basic 6.0 기반으로 개발하였으며, 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 미국

EPA 관망해석 모델인 EPANET의 입력파일 (*.inp)을 통해 관망해석에 필요한 자료를 입력 받을 수 있도록 하였다.

2. 상수도 관망의 수리해석 기법

상수도 관망해석 모델의 수리해석 기법은 절 점의 유출유량에 대한 가정으로부터 크게 DDA (Demand Driven Analysis)와 PDA(Pressure Driven Analysis)로 구분할 수 있다. DDA는 수용가 수요량이 시스템 전체의 수압에 상관없이 항상 만족한다는 가정에서 시작되는 방법으로 EPANET과 같이 국내에서 널리 사용되고 있는 관망해석프로그램의 수리해석 방법으로 사용되 고 있다. 반면. PDA 모델은 각 절점에서의 수요 량을 만족시키기 위한 필요수압이 확보되는 경우 에만 해당 절점에 할당된 수요량이 완전하게 공 급되며, 필요수압 이하인 경우에는 사전에 정의 된 절점의 수두와 유출유량 사이의 관계 즉 HOR(Head-Outflow Relation) 관계식에 의해 실제 공급이 가능한 수요량의 계산이 가능 한 모 델이다

정리하면, 고정된 절점유출량을 사용하는 DDA 모델은 관파손 사고, 화재와 같은 비상시의 일시적인 수압저하에 의한 출수불량의 정도와 수압에 비례하여 변화하는 누수량을 기존 모델의 수정이나 보완 없이 모의 할 수 없는 반면, PDA 모델은 수압조건에 따른 수리거동변화의 모의가 가능한 모델이라 할 수 있다. 그러나 PDA 모델은 아직까지 현장에서 많이 사용되고 있지 못한 실정이다. 그 이유는 최근에서야 상용 S/W들이 출시되었을 뿐만 아니라, 절점의 유출유량을 결정하는 HOR 관계식이 관망의 특성에 의존적임으로 일반화하기 어렵고 또 관계식을 결정을 위해 광범위한 현장조사 및 자료수집이 필요하기 때문이다.

EPANET의 수리해석 알고리즘으로 사용되고 있는 미지의 관로별 유량(QT)과 절점별 수두 (HT)와 배수지 또는 펌프와 같은 기지의 수두 값 (HOT)로 구성된 Gradient Method를 행렬 형태로 나타내면 \langle Eq $2.1\rangle$ 과 같다.

여기서

 n_p = 미지의 유량을 갖는 관로의 수, n_n = 미지의 수두를 갖는 절점의 수

 n_t = 관망 전체의 절점 ϕ , n_t - n_n = 고정절점 수두를 갖는 절점의 ϕ

 $Q^{T} = [Q_{1}, Q_{2}, \cdots, Qn_{p}] [1, n_{p}]$ 미지의 관로별 유량 $H^{T} = [H_{1}, H_{2}, \cdots, H_{n_{n}}] [1, n_{n}]$ 미지의 절점별 수두 $H_{0}^{T} = [H_{n_{n+1}}, H_{n_{n+1}}, \cdots, H_{n_{t}}] [1, n_{t} - n_{n}]$ 기지의 절점 별 수두

 $Q_0^T = (n_n \times 1)$ 크기의 관로 유출유량이 가정되 거나 혹은 기지 값인 관로유량

 $q_0 = (n_n \times 1)$ 크기의 기지의 절점별 수요량

3. 누수량을 고려한 관망해석 모델 개발

(1) PDA 관망해석 모델

PDA관망해석 모델은 Todini(2006), Wu 등 (2006), Giustolisi 등(2008)에서의 경우와 같이 GGA(Global Gradient Algorithm)를 수압에 따른 절점 유출량과 누수량변화를 동시에 모델링 할 수 있도록 〈Eq 3.1〉와 같이 수리해석 알고리즘을 구성하였다.

여기서 A_{22} 의 행렬은 수압에 따른 절점별 수요 량 (q_{av}) 과 절점별 누수량 (q_{Leak}) 의 합으로 구성된

 $(NN \times NN)$ 크기의 대각행렬로 $\langle \text{Eq } 3.2 \rangle$ 과 같다. 이때 A_{22} 를 고려하지 않으면 EPANET의 모델과 동일한 해석결과를 나타내게 된다.

$$A_{22}(i, j) = -(q_{avl} + q_{Leak})H^{(-1)} \langle \text{Eq 3.2} \rangle$$

본 연구 관망해석 모델의 흐름도는 그림 3.1과 같다

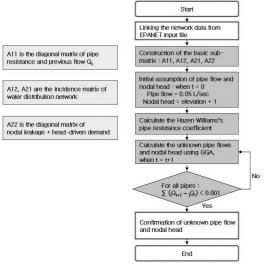


그림 3.1 누수량을 고려한 관망해석 모델의 흐름도

(2) 누수량을 고려한 HOR관계식 도출

정확한 관망해석을 위해서는 무엇보다도 각절점에 정확한 유량부하를 할당하는 것이 중요하다(Almandoz et al, 2005; 김윤환, 2004). 누수의 경우에는 최근 현장에서도 관망해석시 고려가 되기 시작하고 있는 실정이나 아직까지 그 방법에 대한 정립은 되어 있지 못한 상태이다. 예를 들어 Burrows(2003)는 EPANET Emitter를 활용한 연구에서 누수율이 10%이하인 소블록에 대해서는 각 절점에 고정된 누수량을 동일하게 배분하여도 크게 문제가 되지 않지만, 누수율이 10%를 초과하는 경우나 현장데이터의 분석결

과 수압에 따른 수요량의 변화가 큰 것으로 나타 난 지역에 대해서는 각 절점에 일률적인 누수량 을 배분하여 관망해석을 수행하는 것이 타당하지 못하다고 언급하고 있다.

① 절점별 수압-누수량의 관계식

많은 연구자들에 의해서 수압과 누수량의 관계식은 오리피스공식에 기초를 두고 다양한 누수량의 영향인자들 중 상관성이 높은 인자들을 고려하여 배출계수 또는 지수제곱의 값을 변경하는형태의 관계식들이 보고되고 있다. 본 연구에서도 〈Eq 3.22〉과 같이 오리피스 유출유량 산정공식에 기초하여와 수압과 누수량의 관계식을 구성하였으며, 각 누수량을 절점에 배분하기 위하여 이전 연구(김경필, 2009)의 누수량과 누수관리 성능지표들 간의 상관분석을 통해 도출된 급수분기점의 수와 관로의 연장에 비례하여 누수량이 배분될 수 있도록〈Eq 3.3〉과〈Eq 3.4〉의 2가지 형태로 관계식으로 설정하였다.

Leakage
$$_{(t)i} = TC^{-1} \times NC_i \times (H_i - Z_i)^{N1} \langle \text{Eq 3.3} \rangle$$

$$\begin{split} & \textit{Leakage}_{(t)i} = & \langle \text{Eq 3.4} \rangle \\ & \textit{TL}^{-1} \times \sum_{i=1}^{NJ} (\frac{L_{ij}}{2} \times (\frac{(H_i - Z_i) + (H_j - Z_j)}{2})^{N1}) \end{split}$$

여기서 $Leakage_{(t)i}$ 는 시간 t일 때 절점 i에서 의 누수량, TC는 배수구역 전체의 총 급수전수, TL은 배수구역 전체의 총 관로연장, NJ는 절점 i에 관로로 연결된 절점의 수, NC_i 는 절점 i에 포 함된 급수분기점의 수, L_i 는 절점 i의 가를 연결하는 관로의 연장(m), H_i 는 절점 i에서의 수두(m), Z_i 는 절점 i에서의 지반고(m), N1는 수압의 지수 제곱수를 나타낸다.

수압의 지수제곱수 *N*1은 배수구역 산정하기 위하여 〈Eq 3.5〉을 이용하였다. 이때 절점별 누 수량 할당을 위한 급수전의 수와 관로의 연장의

합은 1이 됨으로 N1의 산정에서는 고려되지 않 는다.

$$L_{day} = L_1 + L_2 + \dots + L_{24}$$
 (Eq 3.5)
= $\sum_{t=1}^{24} ((P_t/P_0)^{N_1} \times L_0)$

여기서. L_t 는 시간 t에서의 배 \cdot 급수관망에서 의 손실량을 나타내며, P.는 관망해석을 통하여 산정된 시간 t일 때의 배수구역 평균수압이다. L_{dav} 는 대상지역의 일평균 실손실량을 의미하며, Lo와 Po는 야간최소유량 시의 실손실량과 배수 을 다음 그림 4.1에 나타낸 A소블록을 대상으로 구역의 평균수압을 의미한다.

N1값은 배수구역의 평균수압에 의하여 산정 되기 때문에 누수량이 절점유량부하로서 고려되 면. 절점의 수압이 변하게 되며 따라서 N1값도 변하게 된다. 따라서 초기의 M1값을 누수량이 고 려되지 않은 상태에서의 관망해석에 의해 산정된 배수구역의 평균 수압에 대하여 산정하고. 산정 된 N1값에 의하여 계산된 누수량을 절점수요량 에 더한 후 관망해석을 재실시하고 또 이때의 새 로운 수압에 대한 M값을 재산정하는 반복과정 을 통해 수압의 반복오차가 ().001(m)이하가 될 때까지 반복하여 산정하였다.

② 절점별 수압-유출량의 관계식

본 연구는 수압에 따른 누수량의 변화를 모의 하기 위한 것이긴 하나 PDA 관망해석 모델을 위 하여 절점별 수압-유출량의 관계식도 함께 고려 하였다. 관계식으로는 절점의 수압이 지반고보다 높은 경우 수돗물을 사용할 수 있게 설정한 Aoki(1988)의 "Head-Driven" 공식을 이용하 였다.

$$Z_i \leq H_i \leq H_i^{des}$$
 일 경우
$$Q_i^{avl} = Q_i^{req} (\frac{H_i^{avl} - Z_i}{H_i^{des} - Z_i})^{1/2}$$
 (Eq 3.6)

여기서. H_i 는 절점 i에서의 수두. H_i^{des} 는 설계 수요량을 충족시키기 위한 최소요구수두. Q^{avl}는 절점 i에서의 이용 가능한 절점유출량, Qireq는 절 $\langle \text{Eq } 3.5 \rangle$ 점 i에서의 요구되는 설계 절점유출량, Z_i : 절점 i에서의 지반고를 나타낸다.

4. 누수를 고려한 관망해석 모델의 적용 사례

그림 3.1과 같은 순서로 개발된 관망해석 모델 적용성을 검토하였다. A소블록은 급수전수 811 전의 단독주택과 빌라로 구성된 주거지역으로 평 균 유수율 74%를 나타내는 지역으로 지반고가





그림 4.1 소블록 A의 위성사진과 지반고 분포도

37.4m인 유입지점에서 평균 7.05kgf/c㎡의 유입 수압으로 급수가 이루어지고 있다. 소블록내 급 수전의 지반고 분포는 $28m\sim63m$ 로 그 최대 차 이가 35m를 나타내는 지역이다.

A소블록의 야간최소유량시의 실손실량은 28.78㎡/hr, 일일 실손실량은 598.7㎡/day로 수압과 관계식은 급수전수와 관로연장에 대하여 각각〈Eq 4.1〉,〈Eq 4.2〉로 산정되었으며 절점 21에서의 해석결과는 그림 4.2와 같다.

Leakage
$$_{(t)i}(m^3/hr) = \langle \text{Eq 4.1} \rangle$$

 $3.074 \times 10^{-4} \times NC_i \times (H_i - Z_i)^{1.1583}$

$$Leakage_{(t)i}(m^{3}/hr) = 3.414 \times 10^{-5} \quad \langle \text{Eq 4.2} \rangle$$
$$\times \sum_{j=1}^{NJ} \left(\frac{L_{ij}}{2} \times \left(\frac{(H_{i} - Z_{i}) + (H_{j} - Z_{j})}{2} \right)^{1.1617} \right)$$

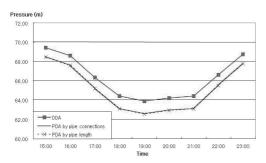


그림 4.2 2 절점 21에서의 DDA와 PDA모델의 비교

그림 4.2에서 알 수 있듯이 PDA모델의 해석 결과는 각 절점의 유량부하가 배당된 누수량만큼 증가되어 있는 상태이기 때문에 DDA의 해석결 과보다 각 절점의 수압이 낮게 나타나게 된다. 절점 21에서의 실측 수압은 15:00시에 68.2m, 23:00시에 68m로 DDA의 해석결과보다 PDA의 해석결과가 더 실제에 가까움도 확인할 수 있었다. 또, 두 PDA 모델의 경우 급수분기점의 수와 관로의 연장을 고려하여 수압을 배분한 두 모델의 비교에서는 거의 유사한 결과를 나타내었

다. 이것은 B블록의 절점 당 관로연장과 절점 당 급수분기점의 수가 거의 유사함을 의미하며 또한 관로의 연장과 급수분기점의 수는 비례하는 것을 나타내는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 상수도관망에 있어 누수. 출수 불량 등 관망의 수리적 특성과 직접적인 관련이 있는 유지관리 활동에 필요한 관망해석 모델의 개발에 대한 연구를 소개하였다. 본 관망해석 모 델은 그 동안 고려되지 않던 누수량에 관한 HOR관계식을 산정하여 현재 상황을 조금 더 실 제와 유사하게 모의하기 위한 것 이었다. 누수량 은 다양한 인자에 의해서 영향을 받게 될 뿐만 아니라 실제 누수량이 각 절점에서 얼마나 발생 하는지 측정하는 것이 사실상 불가능함으로 본 연구결과가 각 절점의 실제 누수발생현황과 누수 량을 정확히 나타낸다고는 할 수 없다. 하지만 그간의 관망해석에서 실측값과 DDA모델의 해석 결과의 보정을 위하여 조도계수를 보정해왔던 것 에 비추어볼 때 관망해석 모델의 오차 워인이 측 정할 수 없는 조도계수 뿐만 아니라 누수량의 영 향도 있었음을 알 수가 있으며, 또한 누수저감대 책의 일환으로 수압관리를 하는 경우에 있어 수 압변화에 따른 각 절점의 수요량 및 누수량의 변 화를 개략적으로 모의할 수 있어 누수저감효과를 정량화 할 수 있는 방법이기도 하였다.

2011년 전국평균 누수율이 10.4%(환경부, 2012)이고 대부분이 배·급수관에서의 누수로 인해 발생하고 있음을 생각할 때 국내에서의 기존관망에 대한 관망해석을 하는 경우에는 누수량을 고려하는 것이 바람직하다고 생각되며, 누수량의 합리적인 배분 방법에 대한 추가적인 연구들이 필요하다고 할 수 있겠다.

감사의 글

본 연구는 환경부 "차세대 EI사업(코드번호: GT-02-G-1)"으로 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다. €

참고문헌

- 1. Burrows et al., (2003), "Introduction of a fully dynamic representation of leakage into network modelling studies using EPANET", the international conference on computing and control for the water industry, London, UK.
- 2. Ezio Todini, (2006), "Towards realistic extended period simulations(EPS) in looped pipe network", 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, August 27–30
- 3. Javier Almandoz et al., (2005), "Leakage assessment through water distribution network simulation", ASCE, November/December 458-466
- 4. Julian Thornton et al., (2008), "Water Loss Control Manual Second Edition", MacGrow Hill.
- 5. Orazio Giustolisi et al., (2008), "Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution networks", J. Hydraulic Eng., ASCE, 134(5), pp. 626-635.
- Ronnie McKenzie, (2001), "Presmac (Pressure Management Program)", South African Water Research Commission, WRC Report No TT 152/01.
- 7. Thomas Walski et al., (2006), "Modeling leakage reduction through pressure control", Journal AWWA Vol. 98 Num. 4, 147~155 pp.
- 8. Zheng Yi Wu, Thomas Walski, (2006), "Pressure Dependent Hydraulic Modeling for Water Distribution Systems under Abnormal Conditions", IWA World Water Congress, Beijing, 2006.
- 9. 김경필, (2009), "상수도 관망의 누수량 최적관리 모델의 개발과 적용성 평가", 서울시립대학교 박사학위논문.
- 10. 김윤환, (2003), "배수 관망 해석시 누수량 산정 및 누수 제어에 관한 연구", 서울시립대학교 석사학위논문.