

## Development of the Non-revenue Water Analysis Equation through the Statistical Analysis of Main Parameter in Waterworks System in Incheon City

Hyoung Geun Jo<sup>#</sup>, Gye Woon Choi, Dong Woo Jang<sup>+</sup>

Department of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

### Abstract

In deciding priorities for waterworks maintenance, a scientific and systematic approach would be needed to examine and analyze the main parameters affecting the leakage, along with water demand quantity, water pressure, energy costs, and so forth. In this study, a statistical analysis was performed to estimate the physical parameters in waterworks maintenance with the highest correlation with the leakage. For this purpose, water distribution analysis was performed to assess the demand energy ratio. The formula of non-revenue water estimation consists of independent variables related with physical parameters for waterworks. Deterioration rate of pipes, demand energy ratio and water supply quantity at each demand point were used in a multiple regression equation for water distribution network analysis. If regional characteristics of distribution network and demand patterns are considered in developed formula, the estimated accuracy for calculating the non-revenue water rate will be improved.

**Key words:** water distribution network, non-revenue water, demand energy, multiple regression analysis

### 1. 서론

인천지역 내 수도공급은 서울 팔당댐을 취수원으로 하고 있으며 일원화된 관로시스템이 대부분을 이루고 있기 때문에 사고, 재난 등에 의한 관 파손사고발생이 쉽고, 소비자는 단수 등에 의한 피해를 입기 쉽다. 이러한 피해를 저감하기 위하여 관망에서의 수압관리, 관 노후도 평가 등은 관로 사고위험을 줄일 수 있고, 또한 누수량 저감에 따른 무수율의 감소로 연결된다. 상수도 공급시설은 국민의 생산 및 소비활동과 직결되는 필수

적인 요소로서, 산업화 및 도시화와 더불어 그동안 양적인 면에서 많은 성장을 거듭하여 왔다. 상수도통계 (Ministry of Environment, 2015)에 따르면, 2014년 12월 말 현재 우리나라 총인구 52,419천 명 중 98.6%인 51,712천 명이 상수도를 공급받고 있으며, 상수도 시설 용량은 1일 29,942천 톤으로, 1일 1인당 급수량은 335l로 조사되었다. 특히, 수돗물의 수송기능을 담당하는 수도관의 경우 총연장이 190,901km로써, 이 중에서 21년 이상 경과된 관이 54,767km(28.7%)를 차지하고 있으며, 유수율은 83.7%, 누수율은 11.1%로 집계되어 있다.

<sup>#</sup> The 1st author: Hyoung Geun Cho, Tel. +82-32-835-4760, e-mail, hkyft@naver.com

<sup>+</sup> Corresponding author: Dong Woo Jang, Tel. +82-32-835-4760, e-mail, nightray@paran.com

과거 수도시설의 양적인 팽창과 더불어 급수기능의 지속성 및 수질의 안정성 등에 대한 사회적인 요구수준은 높아지고 있으나 이를 뒷받침할 수 있는 수돗물 생산 및 공급체계에서의 발전은 미흡한 실정이었다(Ministry of Environment, 2002). 국내에 경우 지속적인 관망관리 사업과 수도관로의 평가 및 진단기법, 설계 및 운영기법, 유지관리 및 보수기법 등의 선진화가 이루어지고 있다.

상수도 관망해석은 정수장, 배수지, 가압장, 취수장, 송배수관로 등 상수관망을 구성하는 시설물의 용량 및 운영계획을 수립하는 데 있어 반드시 수행하여야 하는 절차의 하나이다. 특히, 장래의 안정적인 상수도 공급을 위하여 추정된 장래 수요량을 관망해석에 적용한 결과는 관련 실무자와 정책결정자에게 상수도 운영과 시설확충 계획 결정의 소중한 자료로 제공된다(Choi, *et al.*, 2006).

정수시설에서 처리된 수돗물을 사용자가 받아 사용하기까지는 상수관망(송수시설-배수본관-배수지관)이라는 수돗물의 수송체계를 거쳐야만 한다. 그중에서도 특히 배수관망을 구성하는 시설로는 송수관을 거쳐 배수지, 가압장, 그리고 배수본관, 배수지관, 급수관과 같은 시설 등이 존재한다.

수돗물 수송체계의 중추기능을 가진 배수관망은 급수의 안정을 위해서는 수량적으로 충분히 공급되어야 하고, 수압에 있어서는 최소잔류수압을 유지하여야 한다. 깨끗한 수질의 물 공급을 위해서는 배수관망내의 수질상황을 항상 분석할 수 있는 모니터링 감시체계를 구축하여야 하며, 수자원의 효율적인 이용과 상수도 사고의 예방 측면에서는 누수를 최소화할 수 있어야 한다.

기존 상수관로 관련 연구로는 최적 물 분배를 위한 관망해석, 신뢰도 향상, 관망 기술진단, 노후도 평가에 대한 연구가 우선시 되었다. 배수시설의 경우 합리적인 배치계획과 시간적으로 변동하는 수요량에 대하여 적절한 압력으로 연속적이면서 안정적인 공급이 요구된다(Jun, *et al.*, 2008). 상수관 파괴 같은 사고가 발생했을 경우, 용수 수요자에 대한 영향을 최소화할 수 있

는 안정성이 높은 시설을 목표로 구축되어야 한다. 상수관망을 해석하기 위한 연구로 물분배 시스템의 최적 개량계획 수립을 위한 의사결정시스템 구축(Kim, 2004; Goncalves, *et al.*, 2010), 관로 내 유향추적기법(Koo, 2006), 상수관망의 신뢰도를 향상하기 위해 관망의 내구성 향상과 구조개선(Surendran, *et al.*, 2005; Kim, *et al.*, 2007) 등의 연구가 활발히 진행되었다. 상수관망의 기술발전을 위해서는 수리, 수질모델링에 대한 종합평가기술이 필요하며(Park, 2008), 설계, 운영, 유지관리시스템을 위해 관망진단을 위한 지표, 항목, 조사방법 및 절차의 표준화가 중요하다(Woo, 2008).

상수관로 개량우선순위의 결정에 있어 관 파손이 전체 관망에 미치는 영향 분석(Park, *et al.*, 2011), 광역 상수도의 유지관리를 위하여 체계적인 교체 및 보수계획이 수립되었다(Park, 2014). 노후 상수도관의 개량사업이 지속적으로 시행되고 있지만 노후관 개량사업은 경험적 판단에 의존하는 노후관 평가 및 대안의 선정, 사고예방을 위한 대응적 차원의 개량 사업을 실시함으로 인해 경제적 손실은 물론 시스템의 유기적 기능 향상이 이루어지지 않고 있는 실정이다(Park, *et al.*, 2006). 수돗물 공급과정에서 발생하는 누수는 상수도 경영성 악화요인으로 작용하고 있으며 유수율 제고를 위한 관망정비사업은 노후수도관 평가기법을 활용한 노후수도관 갱생 및 교체 사업에 중점을 두고 있으나 급수공급에 소요되는 에너지가 누수에 미치는 영향에 대한 평가는 적용되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 상수관망정비사업의 우선순위에 대한 의사결정 시 누수에 영향을 미치는 인자를 조사·분석하여 수량, 수압, 수질 요소는 물론 시설개량비용, 에너지비용, 유지관리비용 등의 경제성요소를 고려한 과학적이고 체계적인 접근방법이 필요하다. 상수관망 내 누수에 영향을 주는 물리적, 운영적 요소를 파악하고, 이를 이용하여 누수해결을 위한 방법론을 제시하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 인천시 배수관망을 중심으로 상수도 관망에서 누수에 영향을 미치는 인자를 조사하고, 통계

분석을 통하여 가장 상관성이 높은 무수율 상관식을 도출하고자 하였다. 이를 위해 대상지역에 대한 시설현황 및 운영자료를 취득·분석하였다. 무수율 상관식 도출을 위하여 소블록에 관한 관로노후도, 배수관연장, 관경, 급수전수, 급수량, 누수발생 횟수, 용도지역, 관망구성 형태 등을 조사·분석하였으며 급수에너지비는 상수관망해석 프로그램인 EPANET을 활용하여 관망해석을 실시하여 산정하였다. 조사·분석된 자료와 관망해석 자료를 토대로 인자별 상관관계를 분석을 실시하고 통계분석 방법 중 본 자료의 특성에 가장 적합한 다중회귀분석을 통하여 무수율 상관식을 도출하였고, 실제 무수율과 비교·검토하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 상수관망 해석

무수율 상관식을 도출하기 위한 기초자료로 인천지역의 상수관망 해석결과를 이용하였고, 미국 환경청에서 개발한 EPANET 2.0 모델을 이용하였다. EPANET 모델은 관망해석에 있어 Gradient Algorithm을 사용하고 있고, 시간에 따른 관망내의 수리적 흐름을 해석하기 위해 확장기간 모의 기법을 적용하였다(Jang, 2013). EPANET 2.0 모델에서는 관로 내 흐름 해석을 위해 연속방정식과 에너지방정식을 계산하기 위해 혼합된 절점-폐합회로 방법(hybrid node-loop approach)을 도입하여 해를 구하였다. EPANET 모델에 적용되는 상수도 관망해석의 주요이론인 연속방정식 중 절점방정식과 에너지 손실량을 해석하기 위한 에너지방정식을 2장 1), 2)와 같이 기술하였다.

#### 1) 절점방정식

관망 내에서 각 관을 통하여 흐르는 유량을 미지수로 하고 관의 개수와 같은 수의 방정식을 세우는 방법으로 관로 내 절점에서 흐름의 연속성을 만족하기 위한 방정식이다. 이를 위해 관로를 통해 절점에 유입하는 유량과 관로를 통하여 다른 절점으로 유출되는 유량의 차이

가 절점에서 외부로의 유출량이나 유입량과 동일하다는 가정을 이용한다. 각 폐합관로마다 한 개의 에너지방정식과 절점에서의 연속방정식을 세우면 유량이 미지수이기 때문에 흐름에 대한 공식을 세울 수 있다(Jang, 2013).

$$\left(\sum Q_i\right)_{in} - \left(\sum Q_i\right)_{out} = D_i \quad (1)$$

여기에서,

$\left(\sum Q_i\right)_{in}$  = 관로를 통하여 절점  $i$ 로 유입되는 유량의 합

$\left(\sum Q_i\right)_{out}$  = 절점  $i$ 로부터 관로를 통하여 다른 절점으로 유출되는 유량의 합

$D_i$  = 절점  $i$ 에서 관로 외부로의 유출 또는 유입량

#### 2) 에너지방정식

관망시스템 내에서 가압시설과 같은 추가적인 에너지 공급이 없다면 에너지 손실의 합은 0이지만 펌프에 의한 에너지 공급이 있다면 에너지 손실의 합은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다(Jang, 2013).

$$\sum E_{h_L} = \sum E_p \quad (2)$$

여기에서,

$\sum E_{h_L}$  = 관망시스템 내 각각의 관로에서의 에너지 손실의 합

$\sum E_p$  = 관망시스템 내 펌프에 의한 총에너지 공급의 합

또한 배수지와 같이 유량을 공급하는 수두가 고정된 절점에 대한 에너지 관계는 식(3)과 같다(Jang, 2013).

$$\Delta E = \sum E_{h_L} - \sum E_p \quad (3)$$

여기에서,  $\Delta E$  = 고정수두 절점간의 수위차

손실수두는 유량과의 관계식으로 계산할 수 있으며 펌프에 의한 에너지 공급량 또한 유량과의 관계식으로 나타낼 수 있고 최종적으로 에너지방정식을 산출하여 관로 내 흐름 해석의 기본방정식으로 사용할 수 있다.

3) 급수에너지

관망에서의 에너지는 공급에너지와 물이 이동하면서 발생하는 동수두에 의한 비에너지(누수에너지), 급수에 필요한 최소수두에 의한 급수가능에너지로 구분할 수 있다. 또한, 동수두와 급수가능 수두의 차이에 의한 에너지가 누수에 유효한 영향을 미치는 과잉에너지가 된다.

급수에너지는 비에너지(누수에너지)와 급수가능에너지 그리고 과잉에너지로 구분할 수 있다. 비에너지(누수에너지)는 동수두에서 지반고(관중심고) 차이에 의한 에너지로서 급수량과 잔류수두의 곱으로 계산되며 누수에 절대적인 영향을 미치는 에너지이다. 급수가능에너지는 급수에 필요한 최소잔류수두에 의한 에너지로서 식(4)로 계산되어진다. 급수에너지 산정 방법은 EPANET 관망해석 결과 값에서 급수량과 수두의 곱으로 산정한다.

$$E = \rho w g \times Q \times H = \gamma w \times Q \times H = 9.8QH \quad (4)$$

여기에서,

$E$  : 급수에너지( $kg \cdot m^2 \cdot sec^{-3} \times 10^3$ )

$\rho w$  : 물의 밀도( $1.0 \times 10^3 kg/m^3$ )

$g$  : 중력가속도( $9.8 m/sec^2$ )

$\gamma w$  : 물의단위중량( $9.8 \times 10^3 kg \cdot m^{-2} \cdot sec^{-2}$ )

$Q$  : 급수량( $m^3/sec$ )

$H$  : 수두( $m$ )

급수에너지( $E$ )를 1일 동안 전력량( $kWh$ )으로 환산하면 식 (5)와 같다.

$$E_d (kWh) = 2.7222 \times 10^{-3} \cdot Q \times H \quad (5)$$

여기에서,

$E_d$  : 1일간 급수에너지( $kWh$ )

$Q$  : 급수량( $m^3/일$ )

$H$  : 수두( $m$ )

따라서 1년 동안의 급수에너지는 식 (6)과 같이 산정할 수 있다.

$$E_y (kWh) = 0.9936 \cdot Q \times H \quad (6)$$

여기에서 최소잔류수두는 수도사업자의 급수조례에 의하여 직결급수의 건물 층수에 따라 다르며 2층까지

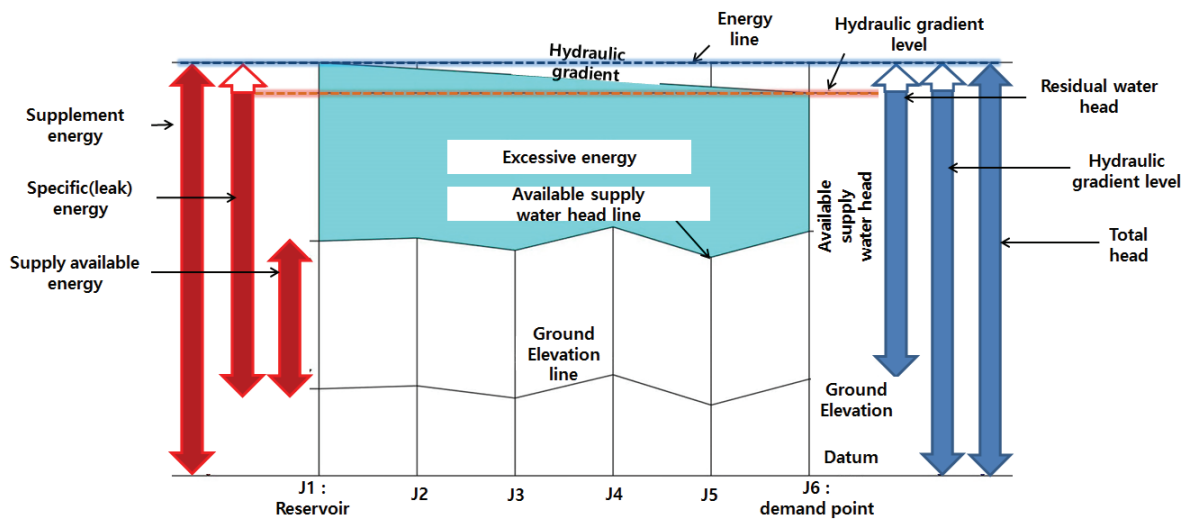


Figure 1. Water head and energy line in the pipe

직결급수 시 최소잔류수두는 15m, 5층까지 직결급수 시 25m를 적용하였다. 인천시 급수조례는 5층까지 직결급수 하는 것으로 규정되어 있어 최소잔류수두는 25m를 적용하였다.

과잉에너지는 비에너지(누수에너지)와 급수가능에너지의 차이로써 실제 누수에 유효한 영향을 미치는 에너지이다. <Figure 1>은 관로 내에서 발생하는 수두와 에너지를 보여주고 있다.

전체 공급에너지 중 급수지역에 발생하는 과잉에너지는 비에너지에서 급수가능에너지를 제외한 에너지로 정의할 수 있고, 이에 따라 에너지비(비에너지/급수가능에너지)를 산출할 수 있다.

## 2. 통계분석

관로 내 주요인자의 상호 연관성을 찾기 위해 통계분석을 수행하였다. 사용된 방법은 인자간의 함수관계를 밝히고, 검증하여 상수관망 해석 인자간의 상관도와 선정된 종속변수와 독립변수간의 관계를 해석하고자 하였으며, 이를 위해 상관분석과 다중회귀분석을 이용하였다.

### 1) 상관분석

상관분석은 두 인자간의 상관성 정도에 대한 객관적인 척도를 제공하기 위해 사용되며 변수 사이의 상관계수(correlation coefficient)를 구하여 상관성의 정도를 알아볼 수 있다. 상관계수는 식(6)과 같이 정의된다.

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

여기에서,  $\bar{x}, \bar{y}$  는 각각 x, y의 평균값

상관계수는 -1.0과 1.0 사이의 값으로 얻어지는데, 부호와 크기에 따라 다음과 같은 특징을 갖는다. 즉,  $r \approx 1.0$  이면 두 변수는 매우 강한 양의 상관성을 가지며  $r \approx -1.0$  이면 두 변수는 매우 강한 음의 상관성을 가지고,  $r \approx 0.0$  이면 두 변수는 매우 약한 상관성

을 가지고 있다는 것을 의미한다(Kang, et. al., 2013).

### 2) 다중회귀분석

상관성이 높은 변수들 사이에 존재하는 어떤 관계를 구체적으로 규명하거나 어느 변수의 값을 예측하기 위하여 회귀분석(regression analysis)을 이용한다. 회귀모형에 포함된 독립변수가 한 개인 것을 단순회귀분석이라고 하고, 한 개의 독립변수가 종속변수를 충분히 설명하지 못하는 경우가 많은데 복수의 독립변수를 회귀모형에 도입해야 할 경우 다중회귀분석을 이용한다(Kang, et. al., 2013).

다중 회귀 분석은 변수 간의 인과 관계를 통계적 방법에 의해 추정하는 회귀 분석의 일종이다. 회귀 분석에는 원인이 되는 독립 변수와 결과가 되는 종속 변수가 존재하는데, 이때 종속 변수는 하나이고 독립 변수가 2개 이상인 회귀 모델에 대한 분석을 수행하는 방법이 다중 회귀 분석이다.

독립변수  $x (\geq 2)$ 가 포함된 다중선형회귀 모형은 식(7)과 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (7)$$

여기에서,  $x$ : 독립변수,  $y$ : 종속변수,  $\beta$ : 회귀계수,  $\beta_0$ :  $y$ 절편,  $\beta_0 \sim \beta_k$ : 독립변수의 기울기

다중회귀식을 추정하기 위한 방법으로 독립변수를 모두 포함하여 분석하는 동시입력(Enter) 방법과 지정한 변수들을 한 번에 탈락시키고 상수항으로만 이루어진 모형을 만드는 제거(Elimination) 방법, 모든 변수를 입력 후 제거 기준에 따라 한 번에 하나씩 제거하는 후진(Backward) 방법, 변수 진입 기준에 따라 하나씩 진입시키는 전진(Forward) 방법, 각 단계마다 변수들의 진입과 탈락을 결정하는 단계별(Stepwise) 방법이 있다. 이러한 변수 선택을 위한 판정을 위해서는 결정계수, 잔차제곱 평균, 총평균 제곱 오차, 예측 제곱합 등의 기준이 사용된다(Gwak, 2013).

### III. 대상지역의 상수도현황 및 자료수집

본 연구를 위한 대상지역은 인천시 행정구역 중 강화군과 옹진군을 제외한 시 급수지역을 설정하였다. 자료 조사는 본 연구에 필요한 사항으로 지역현황, 상수도시설 및 운영현황, 2015년에 수립한 인천수도정비기본계획의 급수지표를 조사하였다. 또한 배수관망해석을 위한 자료구축과 관망해석 모의를 통하여 상수관망 주요 인자에 대한 정보를 수집하였다.

#### 1. 대상지역의 상수도 현황

인천의 총인구는 2,851,491명이고, 급수보급율은 98.3%이다(Waterworks Headquarters Incheon Metropolitan City, 2015). 1인 1일 급수량은 343Lpcd이고, 급수구역은 현황은 9개의 정수 및 급수권역으로 구분되어 있다.

인천광역시 내 배수지는 총 24개소로 유인배수지는 1개소, 무인배수지는 23개소이다(2011년 말 기준). 가압시설의 경우 1940년 부평 가압펌프장 설치를 시작으로 1990년대 초와 중기에는 50여개소의 무인가압장이 설치되었고, 2011년 현재 도화3가압장 폐쇄로 무인 68개소가 운영되고 있다. 상수관의 경우 도수관로 91km, 송수관로 273km, 배수관로 3,634km, 급수관로 1,925km가 매설되어 있다.

인천광역시는 전 급수지역을 정수장에서 직접 공급하지 않고 단위 배수지를 통하여 각각의 분담급수구역으로 세분화하여 간접 배수하는 블록시스템(block system) 송·배수방식으로 운영하고 있으며, 단위배수지 급수구역도 다수의 소급수구역으로 분할하는 구역

개량 사업을 진행 중에 있다. 인천광역시의 블록시스템은 정수장권역의 6개 대블록, 배수지권역의 32개 중블록, 각 배수지권역의 367개 소블록으로 구성되어 있다(Waterworks Headquarters Incheon Metropolitan City, 2015).

#### 2. 상수관망 해석자료

인천시 상수관망 해석자료는 인천시 상수도사업본부에서 2015년 수립한 상수관망 기술진단 자료를 활용하였다. 관망해석에 필요한 관망구축은 인천시 상수도 GIS에서 관경, 연장, 제수변, 소블록 유량계, 지반고 등의 자료를 취득하였으며, 급수량 및 배수지 수리조건 자료는 인천수도정비기본계획 자료를 활용하였다.

관망해석은 각 배수권역별로 모의하였으며 관망해석결과를 통하여 소유역 별 급수에너지비(누수에너지/필요에너지)를 산출하였다. 각 소유역별 배수관연장, 평균관경, 급수전수, 공급량 등의 자료가 모델구축에 이용되었다.

### IV. 상수관망 주요인자의 통계분석

2015년 수립한 인천시 상수도 관망기술진단 결과를 분석한 결과 소블록의 무수율(누수율+계량기 불감수량 등)이 관로 노후도에 지대한 영향을 미치는 인자로 나타났다(Waterworks Headquarters Incheon Metropolitan City, 2015).

본 연구에서는 상기의 결과를 토대로 상수관망에서 무수율에 영향을 끼칠 가능성이 있는 물리적인 요소와

Table 1. Water distribution network blocked system in Incheon Metropolitan City

Large block	Middle block	Small block
GongChon (1)	• Incheon International Airport, Geomamg, Yeonhui, Ganghwa, Seongnam, Gajwa, Etc. (16)	(96)
NamDong (1)	• Manwol Mt, Subong Mt, Jangsu, Songhyeun (4)	(87)
BuPyung (1)	• Chunma Mt, Wonjeok Mt, Heemang stream (3)	(79)
SuSan (1)	• Ohbong Mt, Yeonsu, Songdo, Hagik, Dohwa, Munhak, Seochang (7)	(101)
Yeongheung (1)	• Yeongheung (1)	(2)
NoOn (1)	• NoOn (1)	(2)
Total : 6	Total : 32	Total : 367

※ Source: Waterworks Headquarters Incheon Metropolitan City(2015)

운영적인 요소를 조사하였다. 무수율에 영향을 미칠 가능성이 있는 인자로서 관로노후도, 배수관연장, 평균관경, 급수전수, 급수량, 누수발생 횟수, 용도지역, 관망구성 형태와 잔류수압에 따른 에너지 영향인자를 선정하였다.

1. 주요인자의 선정 및 특성

본 연구를 위해 사용된 인자 중 누수와 직접적인 관계인자를 선정하기 위해 누수율지표를 산정하기 위한 방법 중 하나로 무수율(%)과의 상관관계를 도출하고자 하였다. 무수율은 누수량과 종정감액수량을 포함하는 양으로 이를 산정하기 위해 유수율을 적용해야 하는데 유수율은 정수장에서 생산하여 공급하는 생산량과 수용가의 계량기에 적산되어 요금을 받는 총 수도물량과의 비율을 말하며, 그 차이는 손실된 물량으로 누수와 계량기 불감수량으로 산정할 수 있다(Waterworks Headquarters Incheon Metropolitan City, 2015).

1) 정량적 평가 인자

정량적 평가 인자의 전반적인 경향을 파악하기 위하

여 인자별 데이터를 6개의 등분포로 분류하고, 군집자료를 추출하였다. <Table 2>는 무수율, 관로노후도, 에너지비 등 상수관망을 구성하는 6개의 정량적 평가인자로써 6개 군집평균값이다.

무수율을 종속변수로 하여 6개의 독립변수에 의한 영향을 비교한 결과 무수율은 관로노후도와 에너지비와 상호 유기적 상관성이 높은 것으로 나타났고 배수관연장, 평균관경, 급수전수, 일평균 급수량은 상관성이 미미한 것으로 분석되었다.

2) 정성적인 평가 인자

정성적인 평가인자는 통계적 분석 시 정량적인 인자와의 상관관계를 분석하기 곤란한 인자로서 용도지역과 관망구성 형태이다. <Table 3>은 용도지역별 무수율, 관로노후도, 에너지비를 나타내고 있다.

용도지역별 무수율은 구시가지단독주택지역, 구시가지구입무지구, 구시가지복합지역이 높고, 신규개발지역, 구시가지공동주택지구가 낮은 것으로 나타났다. 관로노후도 또한, 유사한 경향을 보인다.

Table 2. Clustered parameter data of quantitative evaluation

Non-revenue water ration (%)	Deteriorated pipe (%)	Demand energy ratio	Pipe length (km)	Pipe diameter (mm)	No. of demand points	Daily averaged supply quantity (m <sup>3</sup> /day)
3.4	3.7	1.47	8.5	171.2	587	4.9
9.6	6.9	1.45	8.7	164.0	692	4.3
13.9	9.7	1.57	9.2	166.4	720	3.7
20.1	16.1	1.68	8.0	153.4	908	2.5
27.1	14.3	1.49	7.7	163.9	1,049	2.2
43.8	17.7	1.64	10.6	153.3	886	2.6

Table 3. Regional characteristics of parameter

Area	Non-revenue water rate (%)	Deteriorated pipe (%)	Demand energy ratio
Old apartment area	10.54	6.87	2.07
Old apartment/detached house	13.98	12.60	1.52
Old industrial area	15.99	9.53	1.49
Old industrial/apartment/detached house/business area	20.32	9.31	1.70
Old detached house	27.09	14.67	1.46
Old business area	18.88	14.13	1.69
Old business/apartment/detached house	15.76	9.58	1.46
New development(apartment/business)	9.19	0.10	1.31
New development apartment/Old apartment, detached house	15.05	10.60	1.54

2. 인자별 상관관계 분석

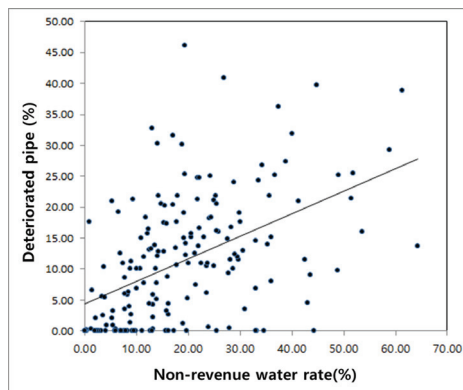
인자별 상관관계를 분석하기 위한 소블록 현황자료는 2015년에 수립한 인천시 상수관망기술진단 자료 중 관로노후도, 배수관연장, 급수전수, 급수량, 누수발생횟수, 관망구성 형태에 대한 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 용도지역의 구분, 평균관경, 급수전당배관연장, 급수전당급수량, 에너지비를 산출하였다. 상수관

만 해석인자의 상관관계를 분석하기 위하여 인천시 전체 367개의 소블록 데이터를 수집하고, EPANET 관망 해석결과를 통해 각 인자별로 데이터를 구축하였다. 누수량 산정을 위한 각 인자별 상관관계를 분석하고, 무수율과의 다중회귀분석을 통해 최종적으로 무수율 산출 방정식을 도출하였다.

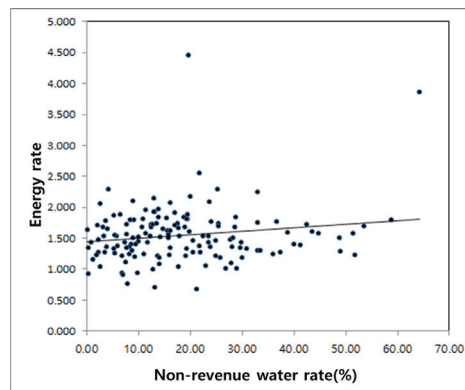
전체 367개의 소블록 중 미구축블록, 블록해제운영

Table 4. Correlation analysis of waterworks main parameter

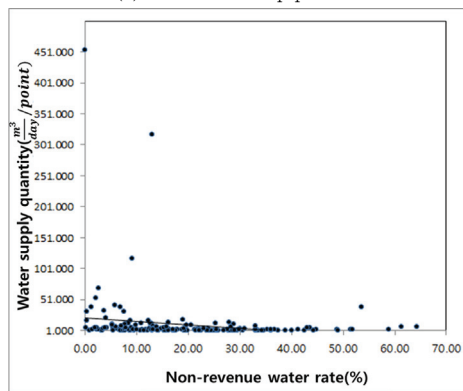
Classification	Non-revenue water rate(%)	Pipe length	Pipe diameter	No. of demand point	Pipe length/demand point	Water quantity/demand point	Water supply quantity	Deteriorated pipe rate	Demand energy rate	No. of leakage accidents
Non-revenue water rate(%)	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pipe length	0.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
Pipe diameter	-0.11	0.09	1.00	-	-	-	-	-	-	-
No. of demand point	0.17	0.40	0.06	1.00	-	-	-	-	-	-
Pipe length/demand point	-0.18	0.06	0.19	-0.29	1.00	-	-	-	-	-
Water quantity/demand point	-0.13	-0.10	0.31	-0.25	0.36	1.00	-	-	-	-
Water supply quantity	-0.03	0.71	0.32	0.33	-0.09	0.12	1.00	-	-	-
Deteriorated pipe rate	0.50	-0.06	0.05	0.25	-0.18	0.06	0.01	1.00	-	-
Demand energy rate	0.16	-0.19	0.09	-0.05	-0.13	0.03	-0.05	0.05	1.00	-
No. of leakage accidents	0.36	-0.13	0.00	0.37	-0.26	-0.11	-0.05	0.50	0.14	1.00



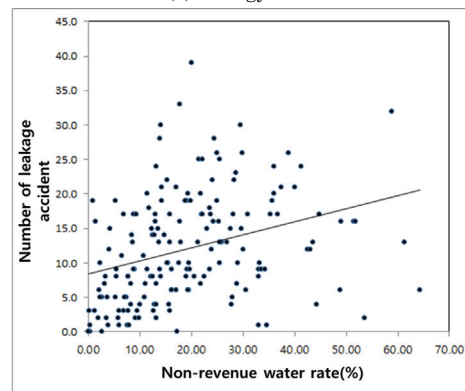
(a) Deteriorated pipe rate



(b) Energy rate



(c) Water supply quantity per demand point



(d) No. of leakage accidents

Figure 2. Single correlation analysis of main parameter

블록, 비정상운영블록, 가압장 블록을 제외한 총 145개의 소블럭 데이터를 이용하여 상관관계를 분석하였다. 무수율과 각 상수관망 인자별 상관도를 분석하기 위해 <Figure 2>와 같이 상관분석 그래프를 도시하였다. x축은 무수율이고, y축은 각 비교인자를 삽입하였다. 상수관망 주요해석 인자 중 누수량산정을 위해 무수율을 종속변수로 하여 각 인자별 비교를 하였다. <Table 4>는 각 인자별 상관분석결과이다. 무수율과 상관도가 높은 인자로 관로노후도와 누수발생횟수가 있다. 급수전수와 에너지비도 양의 상관관계를 보이고 있으나 Pearson 상관계수가 0.5 이하의 값을 나타내며 다소 상관도가 낮은 것으로 나타났다. 10개의 인자 중 가장 상관도가 높은 것으로는 배수관 연장과 공급량으로 Pearson 상관계수는 0.71로 나타났다. 상관분석결과 관로노후도를 제외하고, Pearson 상관계수가 0.5 이하로 나타나 무수율과 각 인자별 상관도가 높지 않음을 알 수 있었으며 무수율과 양의 상관계수를 나타내는 것으로는 급수전수, 관로노후도, 에너지비, 누수발생횟수가 있었고, 음의 상관계수를 나타내는 것으로는 소블럭별 평균관경, 급수전당 배관연장, 급수전당 공급량, 공급량으로 나타났다.

3. 다중회귀분석을 통한 무수율 상관관계식 산정  
 상수관망 해석인자의 상관관계를 분석하기 위하여 인천시 전체 367개의 소블럭 데이터를 수집하고, EPANET 관망해석결과를 통해 각 인자별로 데이터를 구축하였다. 다중회귀분석 수행을 위해 전체 소블럭 데이터 중 결측치를 제거하고, 무수율을 종속변수로 하여 급수전수, 배관연장, 급수전당공급량, 누수발생, 관로노후도, 에너지비를 회귀모형의 독립변수로 선택하였다. 단계적 선택법으로 각 변수들을 적용하여 다중회귀를 분석한 결과 관로노

후도(%), 급수전당 공급량(m<sup>3</sup>/일/전), 에너지비가 가장 상관도가 높은 것으로 선택되었다.

이에 따라 무수율을 종속변수로 하고, 3개의 주요인자를 독립변수로 하는 다중회귀식을 산정하였다. 사용된 단계적 선택법은 모형에 설명변수를 하나씩 추가하면서 모형 내의 설명변수들 중 추가되는 설명변수로 인하여 유의하지 않게 되는 것을 제거시키는 과정을 반복적으로 시행하고, 전진선택법과 후진제거법을 교대로 수행하면서 가장 최적의 모형을 선택하는 방법이다.

<Table 5>는 상수관망 다중회귀분석 결과로 독립변수인 급수전당공급량, 관로노후도, 에너지비의 t 통계량이 ±1.96 이상을 P값이 0.05 이하를 나타내고 있기 때문에 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다.

<Table 5>의 다중회귀분석결과를 통하여 무수율(%)은 식(8)과 같이 정의될 수 있다. 무수율에 영향을 주는 인자로 관로노후도는 0.663, 에너지비는 4.310, 급수전당 공급량은 0.068 계수가 결정되었다. 인천시의 소블럭 별 평균 관로노후도는 대략 10%를 조금 초과하는 것으로 나타나고 있는데 관로 노후도가 100%의 노후도를 가질 경우 무수율이 60% 이상 발생할 수 있을 것으로 예측되었다. 인천시 소블럭의 급수에너지비가 지반이 높은 곳을 제외하고, 1~2 사이로 형성됨에 따라 에너지비에 따라 10% 이내로 무수율이 증가되는 경향이 있는 것으로 나타났다. 아파트 지역, 인구밀집지역 등과 같이급수전당 공급량이 높을 경우 무수율이 낮아져 누수가 저감되는 것으로 예측되었다.

$$\begin{aligned} \text{무수율}(\%) = & 4.684 & (8) \\ & + 0.663 \times \text{관로노후도}(\%) \\ & + 4.310 \times \text{에너지비} \\ & - 0.069 \times \text{급수전당공급량}(m^3/\text{전}/\text{일}) \end{aligned}$$

Table 5. Multiple regression analysis of waterworks main parameter

	Coefficient	Standard error	t statistic	P-value
Non-revenue water rate(%)	4.684	3.397	1.379	0.170
Water supply quantity/demand junction	-0.069	0.032	-2.183	0.031
Deteriorated pipe rate(%)	0.663	0.091	7.245	2.58E-11
Demand energy rate	4.310	2.036	2.117	0.036

〈Figure 3〉은 실측 무수율과 다중회귀식에 의해 산정된 무수율과의 산점도로써 Pearson 상관계수 분석결과 0.55 값이 산출되어 양적선형관계가 있는 것으로 나타났다. 지역특성, 관망구성에 따라 군집분석을 통해 산출된 무수율공식을 검증하고, 적용성을 평가하여 보다 신뢰성을 갖는 것이 요구된다.

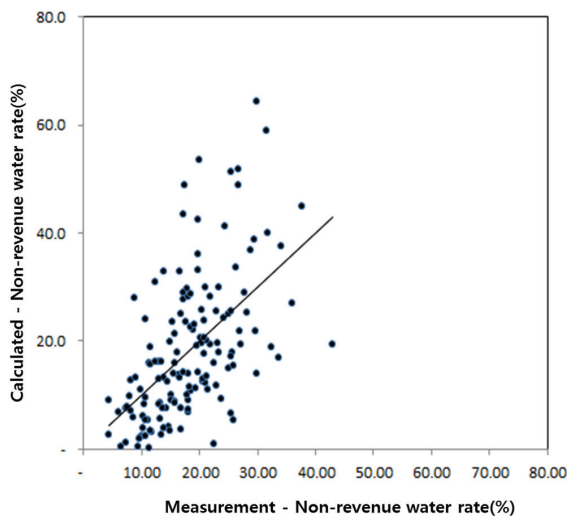


Figure 3. Comparison of the calculated and measurement value

## V. 결론

본 연구에서는 인천시 배수관망을 중심으로 상수관망 누수(무수율)에 영향을 미치는 인자를 조사하고, 상관분석과 다중회귀분석을 통하여 가장 상관성이 높은 인자를 결정하고, 무수율 상관식을 도출하였다. 통계분석을 위하여 소블럭 단위의 물리적, 운영적 인자 데이터를 구축하였고, EPANET 해석프로그램을 통하여 에너지비를 산출하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 상수관망 내 관로노후도, 급수에너지비, 급수전당 공급량을 독립변수로 하는 무수율 다중회귀식을 도출하였다. 산정된 공식은 지역적 특성, 관망배치, 수요패턴 등의 추가적인 분류를 통해 군집분석이 수행될 경우 신뢰성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 상수관망 주요인자 별 단일상관분석결과 누수(무수율)와 직접적으로 상관도를 갖는 인자는 관로노후

도로 선정되었으며 상관도가 0.5로 나타났다. 상수관망의 누수분석은 다양한 물리적 인자와 운영적인자의 복합적인 기작으로 이루어지기 때문에 분석 시 단일 인자를 이용하여 누수량을 유추하는 방법은 지양해야 할 것으로 판단된다.

셋째, 선정된 무수율 다중회귀식에 가장 영향을 주는 인자는 관로노후도, 급수에너지비, 급수전당 공급량 순으로 나타났으며 관로노후도를 관리함에 따라 무수율이 60% 이상 감소할 수 있는 것으로 예측되었다. 관로노후도는 각 지자체별로 기준이 상이하기 때문에 인천시는 개발공식의 적용이 가능하나 타 시·도 지역에 적용될 경우 관로의 노후도를 고려한 새로운 공식이 적용되어야 할 것으로 사료된다.

향후 인천시 상수관망의 블록시스템 구축, 유수율 제고 사업, 상수관망진단사업 등을 위한 기본 상수관망 해석, 급·배수시설의 최적운전을 위한 개선방향 수립에 활용될 수 있을 것으로 보이며 추후 관 노후도, 급수에너지 산정모델 개발을 통하여 체계적인 누수분석이 가능한 모델을 개발하여 적용된다면 인천시, 상수도사업본부에서 관망 운영 시 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었음.

## References

- Choi, Gye Woon, Yeon Gyu Jang, and Seong Woo Lee. 2006. Effect of Estimation Method of Demand Water on the Analysis of Water Distribution System. *Korea Water Resources Association Conference*. 1425-1430.
- Gwak, Jae Min. 2013. *Research and Statistical Analysis*. Informa.
- Gonalves, F. V., Ramos, H. M. and Reis, L. F. 2010. Hybrid Energy System Evaluation in Water Supply System Energy Production: Neural Network Approach. *International Journal*

- of Energy and Environment*. 1(1): 21-30.
- Jang, Yeon Gyu. 2013. Demand Patterns Optimization of Water Storage Facilities for Saving Energy Costs in Water Distribution Systems. Ph. D. Dissertation. Incheon National University.
- Jun, Hwan Don, Mu Jong Park, Jung Hoon Kim, and Hwan Gu Lee. 2008. Development of a Method to Reduce Damages by Pipe Failures. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 8(6): 31-36.
- Kang, Myeong Wook, Kang Kyun Kim, Bu Yong Kim, Yang Jin Kim, Young Won Kim, In Kwon Yeo, Ui Yong Lee, and Seon Yeong Hwang. 2013. *Introduction to Statistics*. Freedom Academy.
- Kim, Seok Hyeon, Hwan Don Jun, Cheon Woo Baek, and Jung Hoon Kim. 2007. Research for Improvement of Water Distribution System Reliability. *KSCE 2007 Conference & Civil Expo*. 1397-1400.
- Kim, Seok Woo. 2004. Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Divided by Small Division. Master's thesis. Korea University.
- Koo, Du Jin. 2006. Management of Water Distribution Pipe Networks Using BFS Algorithms. Master's thesis. Chonnam National University.
- Ministry of Environment. 2002. *Aging Water Pipes Assessment and Management Manual*.
- Ministry of Environment. 2015. *Waterworks Statistics*.
- Park, Han Yeong. 2008. Suggestions for Scientific Management of Pipe Network. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 56(2): 77-82.
- Park, In Chan, Ki Won Kwon, Won Chul Cho, and Kwan Hui Cho. 2006. Study on the Decision Priority of Rehabilitation for Water Distribution Network Based on Prediction of Pipe Deterioration. *Korea Water Resources Association Conference*. 1391-1394.
- Park, Su Wan, Tae Young Kim, Ki Young Lim, and Hwan Don Jun. 2011. Fuzzy Techniques to Establish Improvement Priorities of Water Pipes. *Journal of Korea Water Resources Association*. 44(11): 903-913.
- Park, Yeong Sik. 2014. A Study on Long Term Replacement and Maintenance Plan for Multi-region Water Pipelines Considering Economics. Master's thesis. Seoul National University.
- Surendran, S., Tanyimboh, T. T. and Tabeshb, M. 2005. Peaking Demand Factor-based Reliability Analysis of Water Distribution Systems. *Advances in Engineering Software*. 36: 789-796.
- Waterworks Headquarters Incheon Metropolitan City. 2015. *Technical Diagnostics Report for Re-establish Basic Plan of Waterworks Maintenance in Incheon Water Distribution Network*.
- Woo, Hyeong Min. 2008. Development Plans for Distribution Network Improvement in Waterworks System. *Water for Future*. Korea Water Resources Association. 41(11): 16-23.
- Korean References Translated from the English*
- 강명욱, 김강균, 김부용, 김양진, 김영원, 여인권, 이의용, 황선영. 2013. 통계학 입문. 자유아카데미.
- 곽재민. 2013. 리서치와 통계분석. 인포마.
- 구두진. 2006. BFS알고리즘을 이용한 상수도 배·급수 관망관리. 전남대학교 석사학위논문.
- 김석우. 2004. 상수관망의 최적 개량 의사결정 시스템의 개발-구역별 우선순위 결정. 고려대학교 석사학위논문.
- 김석현, 전환돈, 백천우, 김중훈. 2007. 상수관망의 신뢰도 향상 방안에 관한 연구. 대한토목학회 학술대회. 1397-1400.
- 박수완, 김태영, 임기영, 전환돈. 2011. 상수관로 개량 우선순위 수립을 위한 퍼지 기법. 한국수자원학회논문집. 44(11): 903-913.
- 박영식. 2014. 경제성을 고려한 광역상수도 관로의 장기 교체 및 보수계획에 관한 연구. 서울시립대학교 환경공학과 석사학위논문.
- 박인찬, 권기원, 조원철, 조관희. 2006. 상수관로 노후도 평가를 통한 개량 우선순위 결정에 관한 연구. 한국수자원학회 학술발표회 논문집. 1391-1394.
- 박한영. 2008. 과학적 상수도관망 관리를 위한 제언. 대한토목학회지. 56(2): 77-82.
- 우형민. 2008. 상수도 배·급수 관망개선을 위한 기술개발 방안. 물과 미래. 한국수자원학회. 41(11): 16-23.
- 인천광역시상수도사업본부. 2015. 인천 수도정비 기본계획 재수립 상수도관망기술진단 보고서.
- 장연규. 2013. 배·급수 계통의 에너지 비용 저감을 위한 저수지 수요패턴 최적화. 인천대학교 박사학위논문.

전환돈, 박무종, 김중훈, 이환구. 2008. 상수관 파괴에 의한  
피해 경감기법의 개발. 한국방재학회논문집. 8(6): 31-36.  
최계운, 장연규, 이승우. 2006. 배수관망해석에 수요량 적용방법  
이 미치는 영향. 한국수자원학회학술발표회. 1425-1430.

환경부. 2002. 노후수도관 평가 및 관리매뉴얼.  
환경부. 2015. 상수도통계.

---

Received: Oct. 14, 2016 / Revised: Nov. 4, 2016 / Accepted: Nov. 14, 2016

## 인천시 상수관망 주요인자의 통계 분석을 통한 무수율 산정 공식개발

**국문초록** 상수관망정비사업의 우선순위에 대한 의사결정시 누수에 영향을 미치는 인자를 조사·분석하여 수량, 수압, 수질 요소는 물론 시설개량비용, 에너지비용, 유지관리비용 등의 경제성요소를 고려한 과학적이고 체계적인 접근방법이 필요하다. 본 연구에서는 인천시 배수관망을 중심으로 상수도관망에서 누수에 영향을 미치는 인자를 조사하고, 가장 상관성이 높은 인자를 산정하기 위하여 통계분석을 수행하였다. 이를 위해 소블록 별 관로노후도, 배수관연장, 관경, 급수전수, 급수량, 누수발생 횟수, 용도지역, 관망구성 형태 등을 조사·분석하였으며 급수에너지 개념을 도입하고, 상수관망 해석결과를 활용하여 에너지 비를 산출하였다. 상수관망 해석을 위한 물리적, 운영적인자를 선정하여 무수율을 종속변수로 하고, 상수관망 내 관로노후도, 급수에너지비, 급수전당 공급량을 독립변수로 하는 무수율 다중회귀식을 도출하였다. 향후 지역적인 상수관망의 특성과 수요패턴을 고려하여 무수율 공식을 산출한다면 정확도를 향상하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

주제어 : 상수관망, 무수율, 급수에너지, 다중회귀분석

- 
- Profiles**
- Hyoung Geun Jo** : He received his Master degree from Incheon National University, Korea in 2007. He is a Ph.D. course of the Department of Civil & Environmental Engineering at Incheon National University. His interesting subject and area of research are water distribution system and waterworks management(hkyft@naver.com).
- Gye Woon Choi** : He received his Ph.D. degree from Colorado State University, United States of America in 1991. He is a professor of the Department of Civil & Environmental Engineering at Incheon National University, in which he has taught since 1996. His interesting subject and area of research are water resources, hydraulics, hydrology and environmental engineering(gyewoon@inu.ac.kr).
- Dong Woo Jang** : He received his Master degree from Incheon National University, Korea in 2011. He is a Ph.D. course of the Department of Civil & Environmental Engineering at Incheon National University. His interesting subject and area of research are hydraulics, hydrology and water distribution system(nightray@paran.com).