

상수관망 압력기반 수리해석을 위한 모의 실험시설 기반 절점의 압력-유량 관계 분석 Experimental Analysis of Nodal Head-outflow Relationship Using a Model Water Supply Network for Pressure Driven Analysis of Water Distribution System

장동일 · 강기훈[†]
Dongeil Chang · Kihoon Kang[†]

대림산업(주) 기술개발원
Technology Research & Development Institute, Daelim Industrial Co. Ltd.

(2014년 1월 6일 접수, 2014년 5월 2일 수정, 2014년 6월 17일 채택)

Abstract : For the analysis of water supply network, demand-driven and pressure-driven analysis methods have been proposed. Of the two methods, demand-driven analysis (DDA) can only be used in a normal operation condition to evaluate hydraulic status of a pipe network. Under abnormal conditions, i.e., unexpected pipe destruction, or abnormal low pressure conditions, pressure-driven analysis (PDA) method should be used to estimate the suppliable flowrate at each node in a network. In order to carry out the pressure-driven analysis, head-outflow relationship (HOR), which estimates flowrate at a certain pressure at each node, should be first determined. Most previous studies empirically suggested that each node possesses its own characteristic head-outflow relationship, which, therefore, requires verification by using actual field data for proper application in PDA modeling. In this study, a model pipe network was constructed, and various operation scenarios of normal and abnormal conditions, which cannot be realized in real pipe networks, were established. Using the model network, data on pressure and flowrate at each node were obtained at each operation condition. Using the data obtained, previously proposed HOR equations were evaluated. In addition, head-outflow relationship at each node was analyzed especially under multiple pipe destruction events. By analyzing the experimental data obtained from the model network, it was found that flowrate reduction corresponding to a certain pressure drop (by pipe destruction at one or multiple points on the network) followed intrinsic head-outflow relationship of each node. By comparing the experimentally obtained head-outflow relationship with various HOR equations proposed by previous studies, the one proposed by Wagner et al. showed the best agreement with the exponential parameter, m of 3.0.

Key Words : Pressure Driven Analysis (PDA), Demand Driven Analysis (DDA), Head-Outflow Relationship (HOR), Water Distribution System

요약 : 상수관망의 수리학적 거동을 해석함에 있어 현재까지 제안된 일반적인 방법은 유량기반 수리해석(Demand Driven Analysis, DDA)과 압력기반 수리해석(Pressure Driven Analysis, PDA)이다. DDA는 상수관망이 정상적으로 운영되는 상태에서 수리해석 결과를 빠르게 제시할 수 있으며, PDA는 관파괴 및 관내 저압력 상태시 DDA 방법으로는 모의할 수 없는 각 절점의 실질적인 공급가능유량을 제시할 수 있다. PDA 수행에 있어 우선적으로 각 절점에서 특정 압력마다 공급가능유량을 산정할 수 있는 관계식(Head-Outflow Relationship, HOR)을 결정해야 한다. 기존 연구들에서는 상수관망을 구성하는 각 절점에서 HOR이 다르고 각 절점의 HOR 검증에 위해서는 현장데이터의 실측이 필요하다고 지적하였다. 또한 다중 관파괴 상황과 같이 수리학적 조건이 변경된 상태에서 각 절점의 HOR 특성을 파악하기 위해서는 모든 절점에 모니터링 시스템이 구축되어 있어야 하는 제약조건이 있다. 본 연구는 실제 상수관망 형태의 모의 상수관망을 제작하여 상수관망의 정상상태 및 현장에서 측정이 어려운 비정상상태 운영조건을 시나리오별로 구성하고 각 조건 하에서 절점들의 압력 및 유량을 실시간으로 확인하였다. 또한 측정된 실험결과와 기존 HOR 관계식을 비교·평가하여 최소 오차 결과를 보이는 HOR을 제시하였으며, 특정 절점에서 다중 관파괴 발생시 HOR 특성을 파악하였다. 이로부터 관파괴 위치가 다르거나 다중 관파괴가 발생하더라도 특정 절점의 압력(수두) 저하에 따른 공급가능유량의 축소 현상은 본래 대상 절점이 가지고 있는 지수함수 형태인 고유한 HOR을 따라 감소하는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 실험을 통해 측정된 압력-유량 관계와 기존 HOR 식들을 비교한 결과 최소 오차를 보이는 지수함수 형태의 Wagner 등¹⁾이 제안한 식을 최적의 HOR 관계식으로 제안하며, 해당 식의 지수 m 은 3.0으로 적용할 것을 제안한다.

주제어 : 압력기반 수리해석, 유량기반 수리해석, 압력-유량 관계식, 상수관망

1. 서론

실질적인 상수도 관리시스템 운영에 있어 안정적이고 효율적인 상수관망 운영은 소비자에게 용수공급 과정에 대한 신뢰와 서비스 만족을 제공할 뿐만 아니라 필수적인 사회 기반기술로 주목받기 시작하였다. 상수관망 운영에 있어 가

장 기본이 되는 것은 바로 상수관망의 수리해석이라 하겠다. 상수관망의 수리해석 방법은 크게 2가지로 분류될 수 있다. 첫째, 절점에서 필요로 하는 유량을 모두 만족시킨다는 전제 아래 절점간 수두를 계산하는 유량기반 수리해석(Demand Driven Analysis, DDA) 기법과, 둘째, 절점에서의 압력(수두)을 고려하여 실제 절점에서 공급 가능한 유량을 계산하는 압

[†] Corresponding author E-mail: khkang@daelim.co.kr Tel: 02-369-4230 Fax: 02-369-4100

력기반 수리해석(Pressure Driven Analysis, PDA) 기법으로 분류할 수 있다. DDA는 용수공급시스템이 정상운영 조건을 유지하는 경우 상수관망 해석에 문제가 없지만, 서비스 지역의 화재 발생 및 관거 파손 등으로 인해 불특정 수요량이 발생하는 경우 시스템 전반에 부압(minus pressure)이 발생하게 되어 정상적인 수리해석이 불가능해진다. 절점 용수수요가 고정된 DDA와는 다르게 PDA는 절점에서의 압력 조건에 따라 공급 가능한 유량을 계산하기 때문에 비정상 운영조건의 상수관망 해석시에 DDA를 기본으로 하는 모형들이 갖는 단점을 해결할 수 있다.

PDA 해석에 있어 가장 핵심이라 할 수 있는 부분은 절점의 압력(수두)에 따른 공급가능유량을 산정하는 압력-유량 관계(Head-Outflow Relationship, HOR)를 결정하는 것이다. 지금까지 소개된 HOR 관련 연구는 소비자가 요구하는 유량을 충족시킬 수 있는 압력을 설정하여 공급 가능, 불완전 공급, 공급 불가능 등의 세 가지 상태로 구분하고 해당 구간의 압력 대비 공급가능유량을 다양한 형태의 함수식으로 제안하는 형태로 진행되어왔다.¹⁻⁸⁾ 하지만 대부분의 HOR 관계식은 실제 데이터를 통한 검증결과가 부족할 뿐만 아니라 같은 절점에서 비정상 운영상태를 유발하는 관과파 발생위치가 다른 경우와 같이 수리학적 조건이 변할 경우 HOR 특성의 변화 여부에 대한 연구는 수행되지 않았다. 기본적으로 갑작스러운 압력변화를 측정할 수 있는 실시간 상수관망 감시시스템(압력계, 유량계 설치)을 관리대상 블록에 설치해야 하는 부담이 있으며, 이동식 계측장비를 이용하여 간헐적으로 측정할 경우에는 관과파와 같은 비정상상태 발생시 급격한 압력저하에 따른 공급가능유량 변화 상태를 실시간으로 감시할 수 없다.

근래에 들어 효율적인 상수관망 운영을 위해 측정 장비의 개발과 지능형 상수도 통합관리시스템 구축이 실현됨에 따라 일부 대상지역에서 실측을 통한 HOR식의 비교·평가가 이루어지고 있다. 최근 Shirzad and Tabesh⁹⁾는 총 6종류의 HOR 관계식을 실측지역을 대상으로 실측데이터를 활용하여 각각의 HOR 관계식의 적합도를 평가하였으며, 이로부터 오리피스 형태의 관계식과 Wagner 등¹⁾의 HOR 관계식이 실측 데이터와 가장 잘 부합됨을 확인하였다. 하지만 해당 데이터는 실측에 의해 측정된 결과이지만 배수지의 수위 저하에 따른 수도전에서의 토출 유량을 측정함으로써 단순 오리피스 유출 실험과 유사하다는 한계점을 가지고 있다. 2000년 이후 국내에서도 PDA에 필요한 HOR 관련 연구가 진행되고 있다. 이¹⁰⁾는 HOR 특성을 분석하기 위해 직접급수 지역내에 위치한 건물의 각 층수에 해당하는 수두와 층별 용수 사용 비율을 이용한 HOR 관계식을 제시하였고, 백¹¹⁾은 최적화 기법중 하나인 Harmony Search Algorithm과 기존 문헌에서 제시된 HOR 관계식을 적용하여 각 절점의 가정된 수두와 DDA 분석을 통해 계산된 수두가 같을 때의 유량을 실제 공급가능유량으로 규정하는 PDA 연구를 수행하였다. 이¹²⁾는 EPANET 기반의 Global Gradient Algorithm이 적용된 PDA 모형 개발에 Wagner 등¹⁾이 제안한 오리피

스 유출 형태의 가정식을 채택하였다.

본 연구에서는 기 제안된 HOR 관계식들을 보완하기 위해 실제 상수관망 형태의 모의 상수관망을 제작하여 현실에서 실현 불가능한 상수관망의 정상상태 및 비정상상태 운영조건을 시나리오별로 구성하고 각 조건 하에서 절점들의 압력 및 유량을 실시간으로 확인하였다. 또한 실험 결과를 바탕으로 적용 가능한 기존 가정식들을 비교·분석 하였으며, 매개변수가 보완된 최적의 HOR 관계식을 제안하였다. 본 연구는 Loop 형태의 실제 상수관망 특성이 반영된 HOR 관련 연구로, 향후 상수관망의 PDA 수행에 있어 HOR 관계식의 채택 및 해석 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 방법

2.1. 이론적 고찰

HOR 관계식은 PDA 수행을 위해 개발된 여러 모형들에서 각 절점에서의 공급가능유량을 결정하기 위해 채택한 대표적인 방법으로써 어떤 HOR을 결정하는가에 따라 PDA 해석 결과가 달라질 수 있다. 기존 문헌들에서는 일반적으로 HOR을 크게 3개의 구간으로 구분지어 정립하였다. 첫째 구간은 절점의 수두 H_j^{avl} 가 절점에서 용수를 공급하기 위한 절점 최소수두 H_j^{min} 보다 작은 경우이며 이때 절점의 공급가능유량 q_j^{avl} 은 0으로 가정하였다. 둘째 구간은 절점의 수두 H_j^{avl} 가 H_j^{min} 보다 크지만 절점에서 공급해야 할 필요공급량 q_j^{req} 을 만족시킬 수 있는 충족수두인 H_j^{des} 보다 작은 경우이며, 이때 절점의 공급가능유량 q_j^{avl} 은 필요한 용수량의 일부만 공급 가능한 것으로 가정하였다. 셋째 구간은 절점의 수두 H_j^{avl} 가 H_j^{des} 보다 큰 경우로 이 때 절점에서의 공급가능유량은 필요 공급량 q_j^{req} 을 모두 만족시키는 것으로 가정하였다. Table 1은 기존 문헌들에서 제시된 절점의 수두 조건에 따른 HOR 관계식을 정리한 것으로, 절점의 압력에 따른 유량조건을 ‘공급 가능(adequate flow)’과 ‘공급 불가능(no flow)’ 조건으로 이분하여 제시된 HOR 관계식은 실제 절점에서의 공급유량을 현실적으로 반영하는데 한계가 있는 것으로 판단하여 제외하였다.

절점의 공급가능유량을 산정하기 위해서는 절점 필요공급량 q_j^{req} , 절점의 수두 H_j^{avl} , 절점의 최소수두 H_j^{min} , 절점의 충족수두 H_j^{des} 를 우선적으로 결정해야 한다. 대부분의 연구에서 절점의 최소수두는 절점이 가지는 지형적 조건인 표고를 적용하였으며, 이러한 설정은 현실적으로 타당하리라 판단된다. 하지만 절점의 충족수두 H_j^{des} 의 결정은 간단치 않다. 충족수두 H_j^{des} 에 관한 기존 연구로 Gupta and Brave⁶⁾는 절점 표고에 절점간 각 관로별 손실수두를 보정하여 충족수두를 제시하였으며, Chandapillai⁴⁾는 각 절점에서 실측된 수두와 유량에 의해 결정되는 계수 R_j 와 m 을 적용하여 충족

Table 1. Head-outflow relationships proposed in previous studies

Reference	Available outflow discharge to nodal pressure
Lee (2003) ¹⁰⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = q_j^{req} (a_j X + b_j), \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$
Germanopolous (1985) ²⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = q_j^{req} \left[1 - b_j \exp\left(-c_j \left(\frac{H_j^{avbl} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)\right) \right], \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$
Reddy and Elango (1989, 1991) ³⁾	$q_j^{avbl} = s_j (H_j^{avbl} - H_j^{min})^{0.5}$ $H_j^{avbl} = H_j^{min} + c_j (q_j^{avbl})^2$
Fujiwara and Ganshraj (1993) ⁵⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = q_j^{req} \frac{\int_{H_j^{min}}^{H_j^{avbl}} (H_j^{avbl} - H_j^{min})(H_j^{des} - H_j^{avbl}) dh}{\int_{H_j^{min}}^{H_j^{des}} (H_j^{avbl} - H_j^{min})(H_j^{des} - H_j^{avbl}) dh}, \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$
Gupta and Brave (1996) ⁶⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = q_j^{req} \left[1 - 10^{-c_j \left(\frac{H_j^{avbl} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)} \right], \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$
Takakuwa (1992) ⁷⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = CA \sqrt{2g(H_j^{avbl} - H_j^{min})}, \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$
Wagner et al. (1988) ¹⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = q_j^{req} \left(\frac{H_j^{avbl} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$
Tanyimboh and Templeman (2010) ⁸⁾	$q_j^{avbl} = q_j^{req}, \quad H_j^{avbl} \geq H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = q_j^{req} \frac{\exp(\alpha_j + \beta_j H_j^{avbl})}{1 + \exp(\alpha_j + \beta_j H_j^{avbl})}, \quad H_j^{min} < H_j^{avbl} < H_j^{des}$ $q_j^{avbl} = 0, \quad H_j^{avbl} \leq H_j^{min}$ $\alpha_j = \frac{-4.595 H_j^{des} - 6.907 H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}$ $\beta_j = \frac{11.502}{H_j^{des} - H_j^{min}}$

수두를 아래 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$H_j^{des} = H_j^{min} + R_j (q_j^{avbl})^m \tag{1}$$

충족수두 H_j^{des} 에 대한 적용기준은 연구마다 다르지만 본 연구에서는 소비자가 필요로 하는 용수가 충분히 공급될 수 있도록 보장되어야 하는 배수관의 최소 동수압과 절점의 표고(절점의 최소수두 H_j^{min})를 더한 값을 충족수두 H_j^{des} 로 정의하였다. 영국의 경우 주거지역은 24.6 m를 확보하여야 하며 현재 국내 상수도시설기준¹³⁾에서는 배수관의 최소동수압은 15.4 m, 도로변의 3층 건물의 경우는 최소 29.5 m

의 수두를 확보하도록 규정하고 있다. 해당 압력은 일반 다세대 주택의 3~4층 세대에서 필요한 수요량을 만족시킬 수 있는 압력들이다. 본 연구에서는 국내 상수도시설 기준에서 제안한 배수관의 최소동수압인 15.4 m를 절점에서 확보해야 할 최소 압력기준으로 판단하였으며 최소 압력기준에 각 절점의 표고를 더한 수두를 충족수두 H_j^{des} 로 정의하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

기존 PDA와 관련된 연구에서는 절점의 충족수두 결정시 모든 절점의 실제 충족수두를 반영할 수 없기 때문에 분석의 편의성을 위해 하나의 최소 압력기준을 채택하여 적용하였으며, 각 절점의 HOR식 또한 실무자의 판단에 따라 동일

한 하나의 HOR식을 적용해 왔다. 그러나 이는 PDA 해석 결과의 신뢰성에 대한 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 실제 상수관망의 모든 절점에서 HOR 관계식을 정립하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 실제 상수관망과 유사한 형태의 모의 상수관망을 구축하여 실험을 수행하였으며, 압력 변화에 따른 각 절점에서의 유량을 실측함으로써 기존에 제안된 다양한 HOR 관계식들에 대한 적합도 평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 PDA 분석의 신뢰도를 개선하는데 활용될 수 있도록 하였다.

2.2. 실험 장치 구성

본 실험을 위해서는 적절한 관망을 선택하는 것이 중요하다. 복잡한 관망의 경우 실험을 수행하기 위한 많은 시간과 비용이 요구되며, 무엇보다도 특정 절점의 비정상상태 모의 시 여러 절점간의 상관관계를 규명하는데 있어 해석상의 어려움이 있을 수 있다. 반면, 단순 수지형 관망은 실험 조건에 따른 절점간 상관관계가 거의 1과 -1에 가까워지는 경향이 있어 실제 상수관망의 절점간 상호 보완적 유량 유입 및 배분 상황을 모사하는데 한계가 있으며, HOR 관계식을 유도함에 있어서도 유량과 압력의 관계가 선형적으로 거동하여 실제 상수관망의 특성을 반영하는데 한계가 있다.

본 연구에서 사용된 모의 상수관망은 하나의 배수지를 가지며, 13개 절점과 20개의 관으로 구성된 Ozger¹⁶⁾의 가상 관망을 일부 변형하여 구성하였으며, 모식도는 Fig. 1과 같다. 실제 배수관에서의 최소 동수압을 실험 관망을 통해 구현하기 위해 압력을 제어할 수 있도록 인버터 펌프를 설치하였고, 관 연결부에 압력과 유량을 측정할 수 있는 계측기를 설치하여 계측된 자료는 자동으로 송신되어 기록될 수 있

도록 하였다. 관 마찰로 인한 손실수두를 최소화하기 위해 Hazen-Williams 마찰계수 기준으로 130~140 사이의 매끄러운 2인치 크기의 PVC관을 사용하였다. 절점의 표고는 Node 1을 기준으로 Ground level로 부여하였으며, 모든 절점의 표고를 실제 상수관망의 형태를 모사할 수 있도록 각각 다르게 설정하였다. 또한 13개의 절점 중 9개의 절점에 수요량을 발생시킬 수 있도록 밸브를 설치하여 수요량을 제어하였다. 각 절점의 기본수요량과 세부 제원을 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Data on the model pipe network used in this study

Nodes	Required demand (liter/min)	Elevation (GL,m)	Pipes	Length (m)	Diameter (mm)
N1	0	0.00	P1	2.00	50
N2	133	0.30	P2	2.00	50
N3	133	0.10	P3	3.00	50
N4	83	0.30	P4	3.00	50
N5	83	0.10	P5	6.50	50
N6	100	0.30	P6	4.00	50
N7	66	0.20	P7	4.00	50
N8	66	0.30	P8	5.00	50
N9	0	0.30	P9	3.00	50
N10	0	0.40	P10	5.00	50
N11	100	0.70	P11	6.50	50
N12	50	0.80	P12	4.00	50
N13	0	0.40	P13	4.00	50
			P14	8.00	50
			P15	2.00	50
			P16	4.00	50
			P17	2.00	50
			P18	4.00	50
			P19	1.00	50
			P20	3.00	50

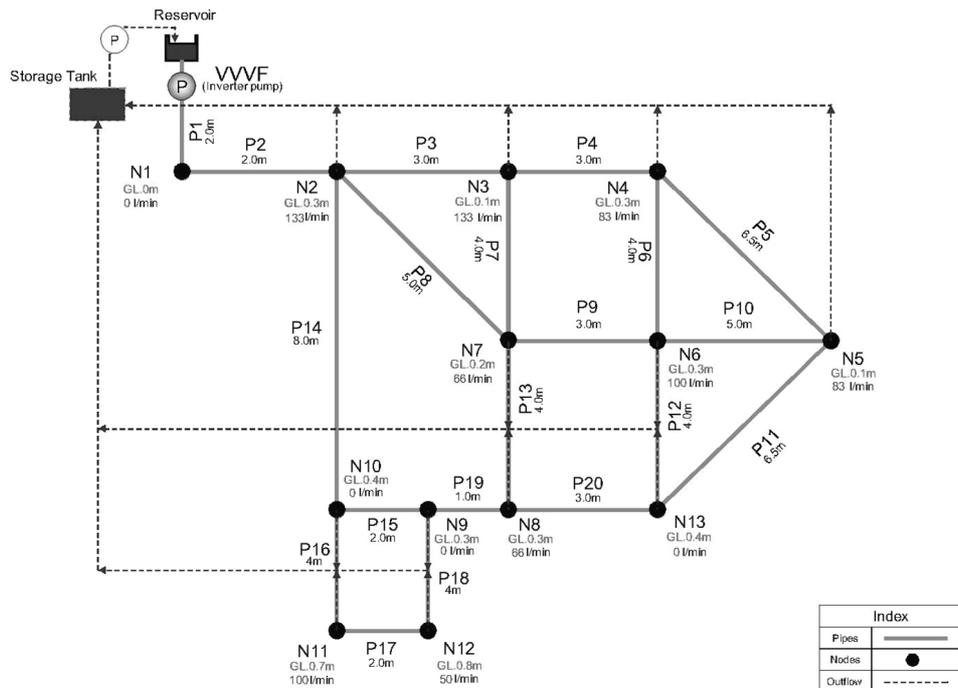


Fig. 1. Layout of the model pipe network constructed for this study.

2.3. 실험 절차

본 실험은 각 절점에서 수두 조건에 따른 공급가능유량의 특성을 분석하기 위한 것으로 배수지 기능을 감당할 수 있는 압력 및 유량제어가 가능한 펌프와 실제 배수관망 형태의 모의 상수관망을 제작하여 실험에 사용하였다. 본 실험을 위해 4.5 kg/cm²까지 제어가 가능한 인버터 펌프를 실험 관망 인입부에 설치하였으며, 압력조건을 달리하면서 각 절점에 설치된 압력계 및 유량계를 통해 손실수두가 반영된 절점들에서의 압력과 토출되는 공급가능 유량을 확인하였다. 이 때 각 절점에서 실시간 측정되는 데이터는 중앙 PLC 판넬에 설치된 저장장치에 우선방식으로 전송되어 실시간 데이터가 3초 간격으로 저장되도록 설정하였다. 실험절차는 아래와 같다.

- ① 대상절점(target node, TN)을 설정한다.
- ② 인버터 펌프의 토출 압력이 모의 상수관망 내 절점들에서 측정되는 압력이 최소 압력수두 15.4 m 이상이 될 수 있도록 순차적으로 증가시켜 TN의 HOR을 산정한다. 이 때 선정된 TN의 밸브만 개방하고 나머지 절점들의 밸브는 폐쇄한다. 시나리오는 Table 3과 같다.
- ③ 관파괴 상황과 같은 상수관망의 비정상상태를 모의하기 위해 관파괴 모의 절점(node for single pipe failure simulation, NSPF)의 밸브를 열어 유출이 발생하게 한다.
- ④ 이러한 비정상상태 발생 상태에서 TN의 새로운 HOR을 산정한다.
- ⑤ NSPF를 닫은 후, 새로운 관파괴 모의 절점의 밸브를 열어 새로운 관파괴 상황을 모의한다.
- ⑥ 단일 관파괴 모의 과정을 3~4회 반복 수행하고 지진과 같은 자연재해를 모의하기 위해 다중 관파괴 모의를 수행한다. 이 때 다중 관파괴 모의를 위한 절점(node for multi pipe failure simulation, NMPF)은 단일 관파괴 모의를 위해 선택한 절점으로 구성하였으며, 선택된 절점들의 밸브를 동시에 개방한다. 해당 시나리오는 Table 4와 같다.
- ⑦ 새로운 TN을 선정한다(N1에서 N9까지 모두 수행한다).

Table 3. Scenarios of normal operation conditions

Scenario	Node									
	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N11	N12	
1	open	close								
2	close	open	close							
3	close	close	open	close	close	close	close	close	close	
4	close	close	close	open	close	close	close	close	close	
5	close	close	close	close	open	close	close	close	close	
6	close	close	close	close	close	open	close	close	close	
7	close	close	close	close	close	close	open	close	close	
8	close	open	close							
9	close	open								

Table 4. Scenarios of abnormal operation conditions

Scenario	Target node	Nodes for single pipe failure simulation (NSPF)	Nodes for multi pipe failure simulation (NMPF)
		1	N2
2	N3	N6, N7	N6, N7
3	N4	N1, N7	N1, N7
4	N5	N3, N8	N3, N8
5	N6	N1, N7	N1, N7
6	N7	N2, N5	N2, N5
7	N8	N1, N3	N1, N3
8	N11	N6, N7	N6, N7
9	N12	N2, N5	N2, N5

상수관망에서 비정상상태가 발생함은 매설된 관로의 갑작스러운 파괴 또는 누수량의 증가로 인해 현저한 압력저하 현상이 발생했음을 의미한다. 이러한 상황을 실험을 통해 모의하기 위해서는 관 파괴가 발생했다고 가정한 관로와 연결된 절점에 정상상태에서 기대하기 어려운 수요량을 발생시킴으로서 파괴 조건을 모의할 수 있다.

본 실험에서는 Table 4에 제시한 조건과 같이 압력에 따른 공급가능유량을 실시간으로 측정할 대상절점, TN을 우선적으로 설정하고 단일 관파괴가 발생했다고 가정한 관로와 연결된 절점을 무작위로 2개 선정하였다. 무작위로 선정된 절점의 각 밸브를 순차적으로 개방하여 기대되지 않는 수요량을 발생시켜 실제 상수관망에서의 관파괴 현상을 모의하였다. 이러한 과정을 Table 4와 같이 대상 절점별로 수행하였으며, 이 때 대상 절점의 압력 변화에 따른 유량을 측정하였다.

다중 관파괴 실험은 단일 관파괴 실험시 선정된 무작위 절점들의 밸브를 동시에 개방함으로써 수행하였다. 각 실험 조건은 관파괴가 발생한 관로들이 동일한 경우라도 단일 관파괴 조건과 다중 관파괴 조건에 의해 도출된 대상 절점의 HOR 관계식은 다를 것이라는 가정에 의해 설정된 것이다.

3. 실험 결과

3.1. 대상 절점(TN)별 HOR 분석

시나리오별 각 TN에 대한 HOR 관계곡선 실험결과를 아래 Fig. 2에 제시하였다. 수두가 증가함에 따라 모든 TN에서의 공급가능유량은 지수 함수의 형태를 보이며 비선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 특성은 절점에서 공급가능유량이 압력(수두) 조건에 따라 공급가능 또는 공급불가능 두 가지로 정의할 수 없음을 보여주는 결과이다. 또한 이론적 고찰에서 각 절점에서의 HOR 관계식이 다름을 언급한 것처럼 본 실험을 통해 도출된 TN의 압력-유량 관계가 다름을 확인할 수 있다. 그러나 압력에 따른 유량 변화의 특성 경향은 유사한 것으로 나타났다. 따라서

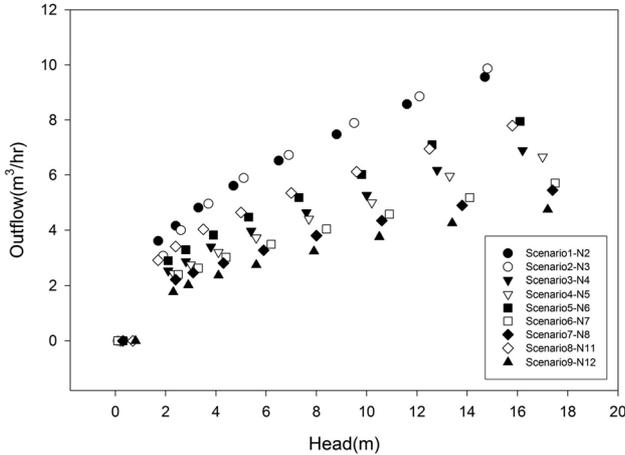


Fig. 2. Head-outflow relationships experimentally obtained at each node under normal operation conditions.

모의 상수관망 실험을 통해 획득한 압력-유량 관계 특성과 유사한 경향을 보이는 기존 HOR 관계식을 비교·평가하여 PDA 분석시 각 절점의 HOR 관계식으로 적용함으로써 보다 정확한 PDA 모의가 가능할 것으로 판단된다. 또한 Fig. 3에 제시된 결과와 같이 비정상상태가 외부 여러 요인에 의해 발생했을 경우 압력(수두) 저하에 의한 공급가능유량의 축소 현상은 본래 TN이 가지고 있는 고유한 압력-유량 관계를 따라 변화한다고 판단할 수 있으며, 관파괴 위치가 다르거나 다수의 위치 파괴가 발생하더라도 특정 절점의 압력(수두) 저하에 의한 공급가능유량의 축소 현상은 본래 대상

절점이 가지고 있는 고유한 HOR을 따라 변화하는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 모든 절점에서도 동일하게 확인되었다. 다중 관파괴 상황을 모사하여 획득한 본 실험 결과는 향후 다중 관파괴가 발생 가능한 지진과 같은 비정상상태 발생시 공급 지역의 수리해석을 통한 피해 및 영향 정도를 분석할 수 있는 기초적인 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 2에 제시된 압력(수두) 변화에 의한 각 TN의 공급가능유량 변화 결과는 절점에서의 필요 공급량 q_j^{req} 과 이를 만족시킬 수 있는 총족수두 H_j^{des} 설정에 의해 다르게 유도될 수 있다. 본 연구에서 Table 2에 제시한 각 절점의 기본 수요량을 필요 공급량 q_j^{req} 으로 정의하였으며, 총족수두 H_j^{des} 로는 국내 주거지역의 최소동수압 기준인 15.4 m를 동일하게 적용하여 실험을 통해 도출된 결과를 바탕으로 기존 연구에서 제시된 HOR 관계식에 대한 적합도를 평가하였다.

3.2. 기존 HOR 관계식 적합도 평가

본 연구에서는 기존 연구들로부터 제안된 HOR 관계식중 그 형태가 현저히 다른 4개의 HOR 관계식을 채택하여 실험을 통해 획득된 TN 중 N2의 HOR 결과와 비교하였다. 기존 HOR 관계식중 Wagner 등¹⁾의 식이 실험 결과와 가장 유사한 결과를 보임을 Fig. 4로부터 확인할 수 있으며, 다음 식 (2)의 Mean Absolute Error (MAE) 오차 산정식을 이용하여 산출된 각 HOR 관계식의 MAE를 Table 5에 제시하였다.

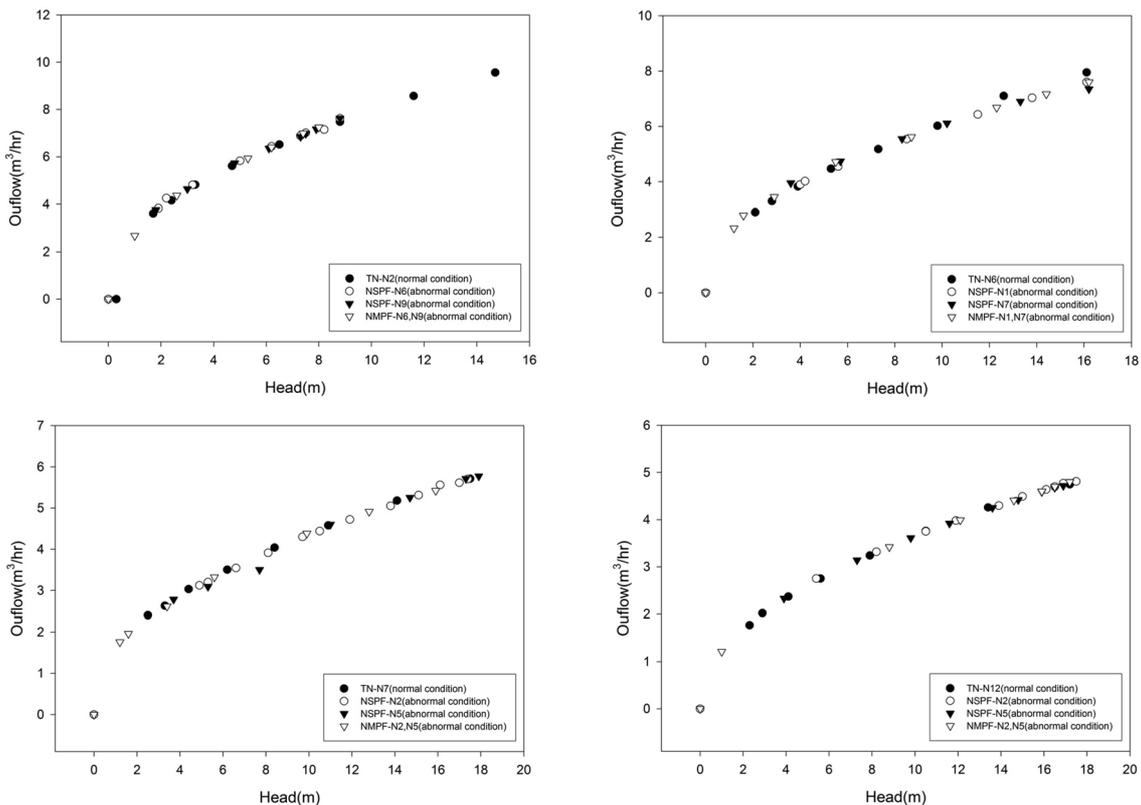


Fig. 3. Head-outflow relationships experimentally obtained at each node under abnormal operation conditions.

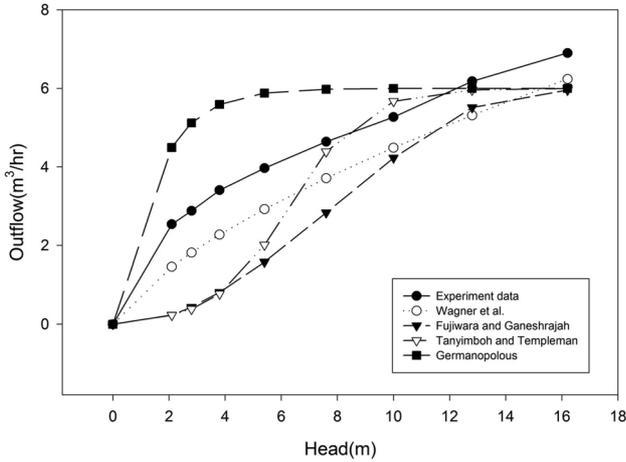


Fig. 4. Comparison of the experimental data with various HORs previously proposed (calculated with design pressure of 15.4 m).

Table 5. Mean average error (MAE) of various head-outflow relationships to experimental data

Head-outflow relationships	Wagner et al. ^{a)}	Fujiwara and Ganeshraiah	Tanyimboh and Templeman	Germanopolous
MAE	0,676	1,656	1,184	1,271

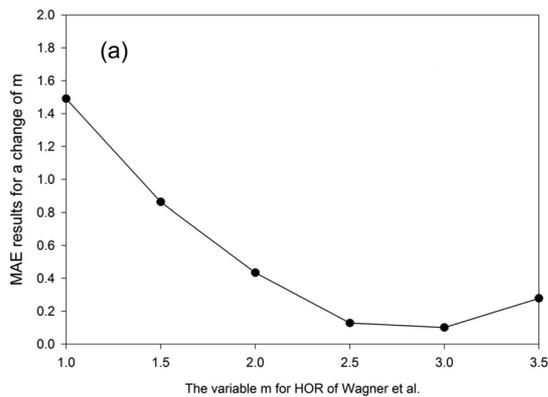
^{a)} calculated with *m* value of 1.5

$$MAE = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I |Q_{obs_i} - Q_{cal_i}| \quad (2)$$

여기서 *I*는 자료의 개수, Q_{obs_i} 는 실험을 통해 산정된 공급가능 유량, Q_{cal_i} 는 HOR에 의해 계산된 공급가능 유량이다.

일부 HOR 관계식은 최소압력기준으로 설정한 15.4 m 이하의 구간에서 유의할 만한 수준의 오차가 발생하고 있어 압력 저하시 실제 공급가능유량을 모의할 수 있는 PDA 분석의 적용성에 제한이 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5는 Wagner 등¹⁾의 HOR 관계식에서 사용하고 있는 매개변수 *m*값에 따른 압력-유량 관계를 실험 결과와 함께 나타낸 것으로서, *m*이 3.0일 때 실험 결과와 가장 잘 일치함을 보여주고 있다. 이는 Gupta 및 Brave⁶⁾에 의해 수행된



Simple Serial Network를 통한 Wagner 등¹⁾의 HOR 관계식 매개변수 평가에서 제시된 *m*값의 적정범위인 1.0~2.0과 차이를 보여주는 결과이다. 이는 대상 관망의 형태와 조건에 의해 발생한 결과라 판단할 수 있으며, 실제 상수관망과 유사한 형태를 가진 모의 상수관망을 통해 획득된 금회 연구 결과가 좀 더 현실에 가까운 결과를 제시하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 상수도 관리시스템 운영에 있어 발생 가능한 관파괴 및 누수와 같은 갑작스러운 압력 저하에 따른 공급가능유량 변동 현상을 모의 상수관망을 통해 재연하였으며, 압력기반 수리해석(PDA)에서 압력(수두)에 따른 공급가능유량을 결정하는 기존 압력-유량 관계식(HOR)을 실험 결과와 비교·평가하여 적용 가능한 최적의 HOR을 제안하였다. 또한 특정 절점에서 관파괴 발생위치가 다르거나 다양한 위치에서 발생하는 경우와 같이 수리학적인 조건이 변할 경우에 대한 HOR 특성을 파악하였으며, 세부 결과는 아래와 같다.

1) 특정 절점에서의 공급가능유량은 압력(수두) 조건에 따라 공급가능 또는 공급불가능 두 가지 조건으로 정의할 수 없으며, 상수관망의 관파괴 및 누수 등과 같은 비정상적 압력 저하가 발생했을 경우 압력(수두) 저하에 따른 공급가능 유량의 축소 현상은 본래 절점이 가지고 있는 고유한 HOR을 따라 변화함을 실험 결과로부터 확인할 수 있었다.

2) 실제 상수관망의 모든 절점에서 각각의 HOR 관계식을 정립하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 실제 상수관망과 유사한 형태와 조건이 반영된 본 모의 상수관망 실험을 통해 Wagner 등¹⁾이 제안한 HOR 관계식이 실측된 압력-유량 관계를 가장 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 충족수두가 높거나 또는 낮은 특수한 지역을 대상으로 PDA 수행시 충족수두는 해당 여건에 맞게 설정하되 본 실험을 통해 제안된 Wagner 등¹⁾의 HOR 관계식을 사용함으

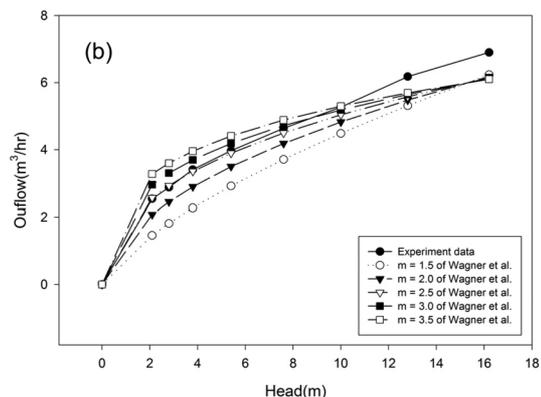


Fig. 5. (a) Mean average errors (MAE) of Wagner et al.'s HOR at various *m* values, and (b) its corresponding HOR curves.

로 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결론은 PDA 분석시 각 절점의 HOR을 다르게 적용해야 한다는 지적에 대해 해결책을 제시하는 것이라 할 수 있으며, 이로부터 해석 과정의 편의성 또한 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

3) 본 실험을 통해 추천된 Wagner 등¹⁾식의 총족수두 H_j^{des} 로 본 연구에서는 일반 다세대 주택의 3~4층 세대에서 필요한 수요량을 만족시킬 수 있을 것으로 판단되고 국내 상수도시설 기준에서 제안한 배수관의 최소동수압인 15.4 m에 각 절점의 표고(절점의 최소수두 H_j^{min})를 더한 수두를 제안하며, 실험을 통해 획득한 결과와 최소 오차를 가지는 매개변수 m 으로 PDA 수행시 3.0을 적용할 것을 추천한다.

본 연구의 결과는 지진, 화재 등과 같은 관거 내 비정상적 상황 발생시 상수관망의 운영 상태를 좀 더 정확히 분석할 수 있는 PDA 수행에 있어 적절한 HOR 관계식의 채택 및 이를 통한 해석 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 환경부 “차세대 에코노베이션사업(글로벌발달환경기술개발사업)”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다(GT-SWS-11-02-007-5).

KSEE

Reference

1. Wagner, J. M., Shamir, U. and Marks, D. H., “Water distribution reliability: simulation methods,” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **114**(3), 276~294(1988).
2. Germanopoulos, G., “A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models,” *Civil Eng. System*, **2**(3), 171~179 (1985).
3. Reddy, L. S. and Ellango, K., “Analysis of water distribution networks with head dependent outlets,” *Civil Eng. System*, **6**(3), 102~110(1989).
4. Chandapillai, J., “Realistic simulation of water distribution,” *J. Trans. Eng.*, **117**(2), 258~263(1991).
5. Fujiwara, O. and Ganesharajah, T., “Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks,” *Water Resour. Res.*, **29**(8), 2917~2924(1993).
6. Gupta, R. and Brave, P. R., “Comparison of methods for predicting deficient network performance,” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **122**(3), 214~217(1996).
7. Udo, A. and Ozawa, T., “Steady-state flow analysis of pipe networks considering reduction of flow in the case of low water pressures,” *Water software systems: theory and applications*, 1, Research Studies Press, Taunton, pp. 73~182(2001).
8. Tanyimboh, T. T. and Templeman, A. B., “Seamless pressure deficient water distribution system model,” *J. Water Manage. ICE*, **163**(8), 389~396(2010).
9. Shirzad, S. and Tabesh, M., “Study of Pressure-Discharge Relations in Water Distribution Networks Using Field Measurements,” IWA World water congress and exhibition, Busan, Manuscript 8328(2012).
10. Lee, S. M. and Hyun, I. H., “Analysis of water distribution networks considering correlation between pressure and water demand under low pressure conditions,” *J. Kor. Soc. Water Wastewater*, **17**(6), 880~886(2003).
11. Baek, C. W., Jun, H. D. and Kim, J. H., “Development of HSPDA model for water distribution system under abnormal operating condition,” *J. Kor. Soc. Civ. Eng.*, **27**(5), 475~488 (2007).
12. Lee, H. M., Yoo, D. G., Kim, D. Y., Kim, J. H., “Development and Application of Pressure Driven Analysis Model based on EPANET,” *J. Kor. Soc. Hazard Mitigat.*, **13**(4), 121~129(2013).
13. Ministry of Environment, Water supply facility standard management and maintenance, Korea(2010).
14. Chin, D. A., “Water resources engineering,” Prentice hall, Upper saddle river, New Jersey, USA.
15. Mays, L. W. and Tung, Y. K., *Hydrosystems engineering and management*, McGraw-Hill.
16. Ozger, S. S., “A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution network,” PH.D. Dissertation, Department of civil and environmental engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona, USA(2003).