

엔트로피 이론을 이용한 상수관망의 최적 압력 계측 위치 결정

Determination of Optimal Pressure Monitoring Locations for Water Distribution Systems using Entropy Theory

정 건 희* / 장 동 일** / 유 도 근*** / 전 환 돈**** / 김 중 훈*****

Chung, Gunhui / Chang, Dong Eil / Yoo, Do Guen / Jun, Hwan Don / Kim, Joong Hoon

Abstract

Determination of optimal pressure monitoring location is essential to manage water distribution system efficiently and safely. In this study, entropy theory is applied to overcome defects of previous researches about determining the optimal sensor location. The previous studies required the calibration using historical data, therefore, it was difficult to apply the proposed method in the place where the enough data were not available. Also, most researches have focused on the locations to minimize cost and maximize accuracy of the model, which is not appropriate for the purpose of maintenance of the water distribution system. The proposed method in this study quantify the entropy which is defined as the amount of information calculated from the pressure change due to the variation of discharge. When abnormal condition is occurred in a node, the effect on the entire network is presented by the entropy, and the emitter is used to reproduce actual pressure change pattern in EPANET. The optimal location to install pressure sensors in water distribution system is the nodes having the maximum information from other nodes. The looped and branched networks are evaluated using the proposed model. As a result, entropy theory provides general guideline to select the locations to install pressure sensors and the results can be used to help decision makers.

keywords : Water Distribution System, Pressure Monitoring Locations, Entropy Theory

요 지

상수관망의 유지·관리를 위한 최적 압력 계측 위치 선정은 효율적인 상수관망 운영을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 최적 압력 계측 위치 결정에 기존 연구의 단점을 보완하기 위하여 정보이론인 엔트로피 이론을 사용하였다. 기존의 방법은 실측자료를 이용한 검·보정이 필요로 하기에 체계적인 관리가 미흡한 지역에서는 적용이 어려운 단점이 있다. 또한 대부분의 연구가 상수관망 모형의 정확도를 높이며 측정비용을 최소화하는 절점을 제안하였으며, 이는 상수관망 유지·관리를 위한 압력 계측기 위치 결정목적과는 다소 차이가 있다. 본 연구에서 제안된 방법은 특

* 고려대학교 방재과학기술연구센터 연구교수
Research Prof., Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Seoul, Korea

** (주)이산 수자원부 사원
Staff, Water Resources Dept., Isan, Co., LTD, Anyang, Gyeonggi, Korea

*** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 박사과정
Doctoral student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Seoul, Korea

**** 서울산업대학교 건설공학부 조교수
Assistant Prof., School of Civil Engineering., Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea

***** 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 교수
Corresponding Author, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Seoul, Korea (e-mail: jaykim@korea.ac.kr)

정 절점에서의 유량변화에 의한 다른 절점에서의 압력변화를 정보량인 엔트로피로 정의하여 객관적이고 정량화된 기준을 제시하였다. 절점에서 비정상상태가 발생했을 때 전체 상수관에 미치는 영향 정도를 정량화된 수치인 엔트로피로 나타내며, 또한 각 절점에서 실제적으로 변동하는 압력을 반영하고자 EPANET의 에미터(emitter) 기능을 사용하여 실제 압력변화 패턴을 파악하였다. 최적 압력계 설치 지점은 엔트로피 기준에 의해 전체 시스템으로부터 제공 받는 정보량이 가장 큰 절점을 우선으로 설치해야 한다고 제시하였으며, 제안된 모형을 branch형과 loop형 관망에 각각 적용하여 최적 압력 계측 위치를 선정하고 그 결과를 분석하였다. 분석 결과 현재 실무자의 경험적 판단에 의해 계측기를 설치·운영하고 있는 국내의 상수관망 시스템을 고려할 때, 엔트로피 이론을 통해 보다 객관적인 기준으로 상수관망에서의 압력계 설치 우선순위를 운영자에게 제시할 수 있을 것이며, 상수관망에 압력계를 설치하기 위한 효율적인 의사결정 기준으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 상수관망, 최적 압력 계측 위치, 엔트로피 이론

1. 서론

상수관망 건설의 주된 목적은 소비자에게 충분한 양질의 용수를 공급하는 데에 있으며, 현재 광역상수관망을 중심으로 상수관망 시스템의 효율적인 운영을 위해 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템과 같은 방안이 도입되어 운영되고 있다. SCADA 시스템의 핵심은 효율적이고 적절한 계측을 통해 관망시스템의 문제를 탐지하고 이에 대처하는 것이다. 현재 국내의 SCADA 시스템은 주로 광역 상수도 내의 수원지에서 정수장 또는 배수지까지의 도·송수관에 집중되어 운영되고 있으며, 배수지 이하 배수블록에 대한 효율적이고 체계적인 관망 관리 시스템은 건설되지 않은 실정이다. 현재 국내에 매설되어 사용하고 있는 상수도의 총연장은 138,478 km에 달하고 대부분의 관이 도시에 매설되어 있다(환경부, 2006). 그러나 이중 50%이상이 매설 된지 10년이 넘는 노후관으로 관 파괴나 누수 등으로 인한 갑작스러운 사고 발생의 위험이 매우 높다. 그러므로 최근 상수관망의 유지·관리에 대한 중요성이 증대되고 있고, 상수관의 파괴나 비정상상태를 빠르게 인지할 수 있는 유량 및 압력 계측기 설치에 대한 연구가 국내·외에서 활발히 이루어지고 있다. 소비자가 공급받고 있는 용수공급 서비스의 질을 직접적으로 조사하기 위해, 배수블록 내에도 계측기를 설치하여 운영하는 것은 전체 상수관망의 효율적인 유지·관리를 위하여 매우 이상적인 방법이지만, 유량이나 압력 계측기의 막대한 설치 및 유지·관리 비용과 계측기 유지관리의 어려움 등 실행에 많은 제약이 따른다. 그러므로 배수블록 내 상수관망의 효율적인 유지·관리를 위하여 상수관망의 운영 예산을 고려한 적절한 계측기 설치 규모를 제시할 수 있는 객관적인 시설기준이 필요하다.

그러므로 Walski(1983)는 상수관망의 압력 계측을 통한 효율적인 운영을 위해서는 관망의 말단부와 기본 수요량이 높은 지점에서 계측을 하여야 한다고 제시했으며, Yu *et al.*(1994)는 자료의 정확도가 높은 지점에 계측기를 설치하여야 한다고 제안하였다. 또한, 조도계수 측정을 위한 압력 측정 위치를 제안한 Bush *et al.*(1998) 및 부정류 자료를 기반으로 수두의 민감도를 이용하여 압력 측정 위치를 제안한 Vitkovsky *et al.*(2003) 등에 의해 상수도관망의 유량과 압력 측정 위치를 결정하기 위한 연구가 수행되었다. 그러나 이들의 선행 연구들은 실측자료를 이용한 검·보정이 수행되어야 하므로, 체계적인 관리를 통한 실제 자료의 확보가 선행되지 않았던 지역에는 적용이 어렵다는 단점이 있다. 또한 대부분의 연구가 상수관망 모형의 정확도를 높이는 동시에 측정비용을 최소화하기 위한 계측지점을 제안하여, 상수관망 효율적인 유지·관리를 위한 계측기 위치 결정과는 결과에 다소 차이가 있다. 국내에서는 상수관망의 기본데이터만을 이용하여 계측 위치를 결정하기 위한 방법이 조문수(2007)에 의해 제안되었으나, 모의조건에 한계가 있어 실질적인 유량변화를 반영하지 못하는 단점을 가지고 있었다. 실제로 상수도 시설기준 유지·관리편(1998)에 유량과 압력을 상수관망의 '주요지점'에서 측정하여야 한다고 제시하고 있지만, '주요지점'에 대한 정의와 기준이 명확히 제시되어 있지 않으므로, 국내의 실무자들의 경험적 판단에 의해 주로 소블럭 유입점에 계측기를 설치하고 있는 실정으로 계측기의 위치를 결정하기 위한 정량화된 기준에 대한 연구가 절실하다.

본 연구에서는 기본적인 상수관망의 자료와 정보이론인 엔트로피 방법을 이용하여 특정 배수분구 및 간략화된 광역상수관망의 운영 상태를 대표할 수 있는 압력 계측 지점을 제시할 수 있는 모형을 개발하였다. 개

발된 모형을 통하여 기존의 합리적인 기준을 제시하지 못했던 연구들이 가진 문제점들을 보완하고 정량화된 자료의 제시가 가능하였다.

2. 엔트로피 이론

엔트로피 방법은 수, 신호 또는 기호들로 구성된 통신신호를 분석하는 정보이론(information theory)에서 출처를 살펴볼 수 있다. 일반적으로 엔트로피는 무질서도 또는 불확실성의 척도라 알려져 있으나, 정보이론에서는 엔트로피를 특정 신호가 가지고 있는 정보용량으로 정의하고 있으며, 통계적인 해석이 가능한 모든 무작위 변량에 대해 엔트로피를 계산할 수 있고 어떤 정보에 대해 객관적으로 평가할 수 있는 기준으로 활용이 가능하다고 알려져 있다(Shannon *et al.*, 1949). 즉, 정보교환의 과정으로 신호가 보내질 때, 이 신호의 불확실성은 신호에 대한 정보가 많아지면 감소하게 되므로, 불확실성의 감소 정도로 신호에 대한 정보를 간접적으로 측정할 수 있다. 여기서 엔트로피 값은 정보를 측정하는 하나의 기준으로 항상 양의 값으로 계산되어지며, 모든 사상의 발생확률이 같을 때 엔트로피는 최대가 되며, 이에 반해 발생확률이 1로 가까워지면 엔트로피는 0의 값을 가지게 된다. 또한, 한 지점에서 발생시킨 정보가 다른 지점에 영향을 미칠 때, 영향을 받는 지점으로부터 얻은 정보로부터 영향을 주는 지점의 정보를 판단할 수 있다면, 영향을 주는 지점의 정보가 가지는 불확실성의 정도를 파악할 수 있고, 그 불확실성의 감소 정도로부터 영향을 받는 지점에 주는 정보전달량을 계산할 수 있다. 엔트로피 이론에서는 정보량을 정량화하기 위해 한계엔트로피(marginal entropy), 결합엔트로피(joint entropy), 조건 엔트로피(conditional entropy) 및 정보전달량(transmission)의 개념을 사용한다. 이산무작위변량 X 의 한계엔트로피 $H(X)$ 는 X 가 가지고 있는 정보량 또는 불확실성을 의미하며 Eq. (1)과 같이 정의된다(Shannon *et al.*(1949)). Eq. (1)에서 $P(x_n)$ 은 x_n 의 발생확률이며, 한계엔트로피의 개념은 연속무작위변량에 대해서도 적용이 가능하다. 연속무작위변량 X 가 확률밀도함수 $f(x)$ 를 따른다고 가정하고, X 의 범위를 Δx 의 간격으로 나누어 계산할 때, 연속무작위변량 X 의 한계 엔트로피 $H(X;\Delta x)$ 는 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$H(X) = \sum_{n=1}^N P(x_n) \ln P(x_n), n=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

$$H(X;\Delta x) \approx - \int_0^{\infty} f(x) \ln f(x) dx - \ln \Delta x \quad (2)$$

또한, 두 연속무작위 변수 X, Y 가 서로 독립일 때, 결합엔트로피는 각각의 엔트로피의 합인 Eq. (3)과 같다.

$$H(X, Y; \Delta x, \Delta y) = H(X; \Delta x) + H(Y; \Delta y) \quad (3)$$

그러나, 두 연속무작위 변량 X, Y 가 추계학적으로 종속적이라면, 즉 무작위 변량 x_n 과 관계있는 y_m ($m=1,2,\dots,n$)이 존재할 경우, 상관관계에 의해 불확실성이 제거되어 두 연속무작위 변수 X, Y 에 대한 결합엔트로피는 Eq. (3)보다 작게 산정되어진다. 이러한 경우 두 연속무작위 변수 X, Y 의 결합엔트로피는 Eq. (4)와 같다. 이렇게 두 변수 사이의 종속관계로부터, y_m 을 알면 x_n 을 추정할 수 있고 x_n 이 가지고 있는 불확실성을 감소시킬 수 있다. 그러므로 변량 Y 가 주어졌을 때 변량 X 의 남아있는 불확실성을 Eq. (5)에 의해 산정할 수 있다.

$$H(X, Y; \Delta x, \Delta y) \approx \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \ln f(x, y) dx dy - \ln (\Delta x \Delta y) \quad (4)$$

$$H(X/Y; \Delta x) \approx - \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x, y) \ln f(x/y) dx dy - \ln \Delta x \quad (5)$$

마지막으로 정보전달량은 무작위 연속변수 X 와 Y 사이에 종속관계가 존재할 때, Y 가 주어짐으로 인해 감소되는 X 의 불확실성의 크기를 의미(Yang and Burn, 1994)하기도 하며, Eq. (6)에 의해 산정 할 수 있다.

$$T(X, Y) = H(X) - H(X/Y) \quad (6)$$

정규분포를 따르는 X, Y 에 대해 Mogheir(2004)는 한계엔트로피 및 정보전달량을 다음과 Eqs. (7)~(8)과 같이 계산하였다. γ_{xy} 는 표본 X 와 Y 의 상관계수를 의미한다.

$$H(X) = \ln(\sigma_x \sqrt{2\pi}) - \frac{1}{2} \ln e \quad (7)$$

$$T(X, Y) = -0.5 \ln(1 - \gamma_{xy}^2) \quad (8)$$

계산과정의 복잡성으로 인해 현재까지 엔트로피방법의 적용이 가능한 확률밀도함수는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포로 그 엔트로피 계산식이 이론적으로 유도되어 있으나, 그 외의 분포형은 복잡한 다차원 수치적분을 필요로 하기 때문에 적용이 제한되어 있다 (Yang and Burn, 1994).

엔트로피 개념은 이미 많은 분야에서 응용되고 있으며 특히 상수관망의 최적 설계 및 신뢰도, 여유도 산정 (Awumah, 1990, 1991; Tanyimboh and Templeman, 1993; Ang and Jowitt, 2005; Setiadi, 2005)에 적용되었으며, 수문분야에서는 하천 수질 측정망 설계 및 강우 관측소 평가(Casleton, 1980; Chapman, 1986; Kusmulyono, 1994; Yang and Burn, 1994; Zahrani, 1998; 권상우, 2001; Ozkul, 2002; 유철상, 2002)에 주로 이용되고 있다. 엔트로피 이론은 항상 그 시스템이 정상상태라고 가정하지 않으며, 선형관계 또는 비선형 관계성을 가정하지 않는다. 엔트로피 방법은 현재까지 관측된 자료에 근거하는 방법으로 측정망의 설계 목적보다는 이미 구성되어 있는 측정망을 평가하는데 장점이 있는 방법이다. 본 연구에서는 엔트로피 이론을 전체 상수관망에 대한 영향성이 가장 큰 절점을 찾는 것에 적용하였으며, 기존의 설치된 상수관망을 평가하는 목적으로 적용되었다. Tanyimboh and Templeman(1993)는 불완전한 유량 데이터 통해 상수관망 상에서 관거 유량의 가장 이상적인 수치를 계산하는 방법을 엔트로피 방법을 통해 설명하여 이를 관망 설계에 적용하였다. 이와 같은 연구는 기존의 설치된 상수관망의 효율적인 관리와 운영을 위한 본 연구와는 다소 차이가 있다. 또한 기존 연구에서는 각 절점의 용수 수요량에 따른 엔트로피는 쉽게 계산할 수 있었으나, 다른 절점의 유량이나 압력 변화에 따른 해당 절점에 대한 영향은 산정하기가 어려워 비정상상태 발생 시 상수관망 전체에 대한 영향을 광범위하게 평가하기에는 어려움이 있었다. 그러므로 본 연구에서는 상수관망 내 임의의 절점에 비정상상태 발생 시 해당 절점이 받는 영향을 정량화한 영향지수를 계산하여 엔트로피 산정에 활용함으로써 각 절점의 전체 시스템에 대한 영향을 판단할 수 있다. 계산된 결과는 예산과 같은 제약조건과 결합되어 압력계 우선 설치 절점의 위치와 개수를 제시할 수 있다.

3. 상수관망 최적 압력 계측 위치 결정을 위한 방법론

3.1 기본가정 및 모의조건

상수관망의 정상 상태는 수리학적 관점에서 물 사용을 원하는 모든 시점, 장소에서 불편함을 느끼지 못하는 압력과 유량으로 용수를 공급할 수 있는 상태로 정의된다. 본 연구에서는 배수지의 크기를 상수관망 내 모든 수요를 충족시키기에 충분하도록 크다고 가정하여, 관 파괴나 누수로 인한 절점의 압력변화만이 상수

관망 내 비정상상태를 유발하는 요인이라고 가정하였다. 모형의 구축과 상수관망의 해석을 위해 EPANET의 DDA(Demand Driven Analysis) 모형을 이용하였다. DDA 모형은 모든 절점에서의 수요량은 항상 만족된다는 가정을 바탕으로 절점의 압력을 계산한다. 그러므로 경우에 따라 부압이나 매우 낮은 절점압력을 결과로 산정한다. 즉, 실제 압력이 허용최저압력이거나 되면 용수 공급이 원활하지 않거나, 부압이 발생하였을 경우 실제 용수공급이 전혀 이루어지지 못하는데도 불구하고, 관망 내 유량이 풍부하면 용수수요량을 모두 만족시킨다는 가정하에 계산을 수행하는 것이다. 그러므로 DDA 모형은 비정상상태 시 유량 변화에 대한 각 지점의 압력변화의 실질적인 변동 추이를 모의할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 특정 절점의 유량 변화에 따른 영향 절점들의 실질적인 압력변화 양상을 모의하고, 실제 압력에 따라 공급되는 유량을 적용하기 위하여 절점압력에 따라 공급량이 결정되는 EPANET의 에미터(emitter) 기능을 용수공급이 이루어지는 절점에 사용하였다. 에미터는 대기중으로 유량을 오리피스 노즐을 통해 분출하는 장치로 상수관망에서는 화재 시 소방용수나 건물의 스프링클러를 통해 유출되는 유량 산정 및 상수관망의 누수 및 파괴로 인한 누출수를 산정하는데 사용되고 있다.

3.2 최적 압력 계측 위치 결정 절차

최적 압력 계측 위치 결정 절차는 Fig. 1과 같이 요약할 수 있으며 그에 대한 상세 절차는 다음과 같다.

(1) 절점에 기본 수요량 값 입력 및 압력 산정

관망의 각 절점에 대해 기본 자료인 관경, 관 길이, 절점의 표고, 기본 수요량, 가정된 관 마찰계수를 입력하고 EPANET을 수행하여 각 절점의 해당 기본 수요량을 만족하는 압력을 산정한다.

(2) 에미터(emitter) 계수 산정

유량 변화에 대한 각 지점의 압력변화의 실질적인 변동 추이를 파악하기 위해 절점압력에 따라 공급량이 결정되는 EPANET의 에미터(emitter) 기능을 사용하기 위하여 에미터 계수를 산정한다. 에미터 계수 C 는 Eq. (9)와 같이 정상상태에서 각 절점의 유량(q)과 압력(P)으로 산정되며, 압력지수 γ 는 0.5를 적용하였다.

$$C = P^\gamma \div q \quad (9)$$

(3) 정규분포형을 따르는 기본 수요량 발생

이정훈 등(1994)은 시간별 급수량의 변화는 정규분포형을 따른다고 제시하였다. 이에 본 연구에서는 시스템

의 비정상적인 운영상태로부터 발생 될 수 있는 갑작스러운 유량변화를 모의하기 위해 각 절점의 기본수요량(Base Demand, 1시간 평균 급수량)을 평균으로 하고, Eq. (10)으로 구한 분산을 가지는 정규분포를 구성한 뒤 난수를 발생시킨다. 해당 절점에서 발생할 수 있는 수요량(Demand)의 범위는 Fig. 2에서 Normal과 Emergency 구간 이다. Eq. (10)에서 부하율은 이경훈 등(1994)에서 제시한 시간별 부하율 중 한 절점에서 발생할 수 있는 모든 유량 값을 표현하기 위해 최대값을 이용하였으며, 다음 Eq. (11)과 같다.

$$S_D = PF \times Base\ Demad(i) \div z \quad (10)$$

여기서, S_D = 각 절점의 표준편차

PF = 0.908(부하율; Peak Factor)

i = Node (i = 1, 2, 3 , ... , N)

Base Demand(i) = 각 절점의 한 시간 평균 급수량

z = 95%의 신뢰도를 갖는 확률변수

$$PF = (\text{최대급수량} - \text{평균급수량}) / \text{평균급수량} \quad (11)$$

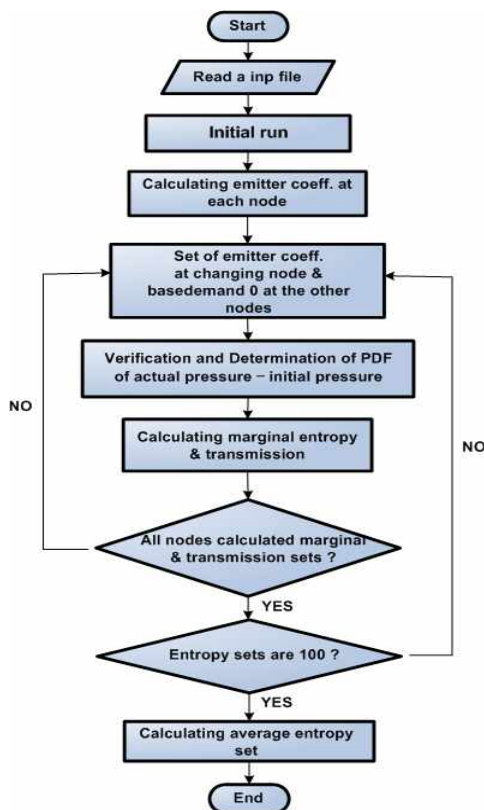


Fig. 1. Flow Chart

Fig. 2에서 평상시 구간(Normal)은 신뢰도 95%에 해당하는 절점의 수요량을 의미하며, 절점에서의 수요량의 변화는 대부분 이 범위에서 발생한다. 비상시 구간

(Emergency)는관이 파괴되었거나 화재로 인한 소방용수 등의 사용으로 발생할 수 있는 구간이다. 마지막으로 물리적 의미가 없는 구간(Non-physical)은 수요량이 0에 가깝거나 0보다 작은 구간으로 실제 발생가능성이 매우 낮으므로 난수발생 시 Non-physical 구간에 대한 발생 확률은 제외하였다. 기본수요량이 많은 지점일수록 수요량의 변화폭 커지는데, 이는 기본수요량이 많은 지점은 수용가의 수가 많이 포함되어 있거나 많은 양의 용수를 사용하는 수용가가 존재함을 나타내며 용수수요량의 불확실성이 높음을 의미한다. 절점의 용수수요량 변화는 해당 절점에서의 압력에 영향을 미치고, 전체 상수관망 내 다른 절점들의 압력에도 영향을 준다.

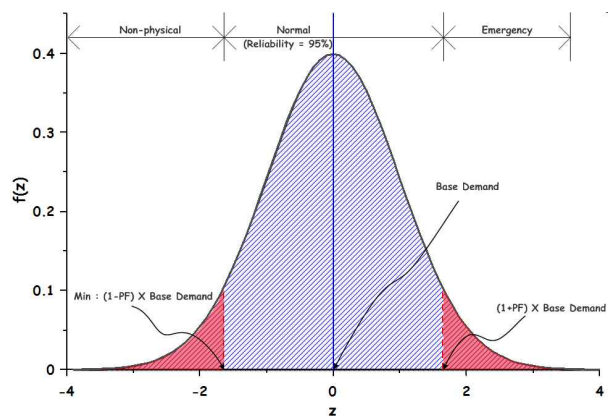


Fig. 2. Demand Distribution Curve

(4) 절점들의 수요량 변화에 따른 영향 절점들의 압력변화 폭 산정

임의의 i 절점에 대하여 정규분포를 따르는 100개의 무작위 수요량을 발생시킨 후 Visual Basic과 EPANET DLL을 사용하여 각각의 수요량을 i 절점에 입력하여 프로그램을 반복 수행한다. 이 때 100개의 모의 발생된 수요량에 대한 각 절점의 압력과 기본수요량에 대한 모든 절점의 압력의 차로 100개의 압력변화 폭을 계산하고 그 확률밀도 함수를 계산한다. 이 때 실제 압력변화를 관찰하기 위해 i 절점으로부터 영향을 받는 절점들에 기본 수요량은 0으로 입력하고 에미터를 설치하여 변화된 유량에 따른 압력 변화폭을 확인한다. 위의 과정을 기본수요량이 주어진 모든 절점에 대하여 반복 수행한다.

(5) 영향지수행렬 산정

영향지수행렬은 임의의 절점 i 의 유량 변화에 따른 모든 절점의 압력변화량, 즉 기본수요량의 변화에 의한 다른 절점의 압력변화폭을 나타낸다. 예를 들어 1번 절점의 기본수요량이 변화되었을 때, Eq. (12) 나타나 있는 1행 2열의 요소는 1번 절점의 임의의 수요량 변화에

의해 발생하는 2번 절점의 압력변화폭이다.

$$\begin{pmatrix} \Delta p_{1,1} & \Delta p_{2,1} & \cdots & \Delta p_{j,1} & \cdots & \Delta p_{n,1} \\ \Delta p_{1,2} & \Delta p_{2,2} & \cdots & \Delta p_{j,2} & \cdots & \Delta p_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta p_{1,i} & \Delta p_{2,i} & \cdots & \Delta p_{j,i} & \cdots & \Delta p_{n,i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta p_{1,m} & \Delta p_{2,m} & \cdots & \Delta p_{j,m} & \cdots & \Delta p_{n,m} \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서, i = 모의 발생 수요량 ($i = 1, 2, 3, \dots, m$)

j = 절점 ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)

$\Delta p_{j,i}$ = 모의 발생 수요량에 의한 j 절점의 기본압력과 변화압력의 차

(6) 엔트로피 계산

상수관망 내 절점의 용수수요량은 정확한 예측이 불가능하므로 불확실성을 가진다. 각 절점의 압력 또한 용수수요량의 영향을 가지므로 불확실성을 가진다고 하겠다. 그러므로 본 연구에서는 상수관망 내 절점의 유량과 압력을 무작위변수로 정의하고, 그 불확실성의 정도를 엔트로피를 이용하여 계산하였다. 그러나 절점의 압력은 유량에 의해 영향을 받으므로 절점 압력에 대한 엔트로피는 단순히 한계엔트로피만을 이용하여 예측하는 것은 부정확하다. 즉, 절점의 압력에 대한 엔트로피는 다른 절점의 유량이나 압력의 상태를 알면 그 불확실성을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 상수관망 내 존재하는 모든 절점의 유량변화를 알고 있을 때, 감소되는 임의의 절점 k 에 대한 불확실성 감소량을 Receiving 엔트로피(RE)로 정의하고 Eq. (8) 및 Eq. (13)을 이용하여 계산하였고, 임의의 절점 k 의 유량변화량을 알고 있을 때, 상수관망 내 절점 k 를 제외한 다른 모든 절점의 불확실성 감소량을 Giving 엔트로피(GE)로 정의하여 Eq. (8) 및 Eq. (14)로 계산하였다.

$$RE_k = \sum_{j=1}^m T(X_k, Y_j) \quad (13)$$

$$GE_k = \sum_{i=1}^m T(X_i, Y_k) \quad (14)$$

Eq. (13) 및 (14)에서 m 은 현재 시스템 내 절점의 총 개수이며, $T(X_k, Y_j)$ 는 절점 j 의 유량변화를 알고 있을 때, 감소되는 절점 k 의 불확실성이다. 그러므로 최종목적은 상수관망 내 불확실성을 최소화 할 수 있는 절점에 계측기를 설치하여 보다 효율적으로 비정상적인 운영상태를 계측하는 것이고, Eq. (13) 및 (14)에 의해 산정되는 정보전달량인 GE_k 및 RE_k 값이 높은 지점이 바로 최적의 압력 계측 위치이다.

산정된 GE 값이 크다는 것은 다른 절점에 주는 정보량 혹은 다른 절점에 전달되는 정보량이 가장 크다는 것을 의미하여 전체 상수관망에서 구조적인 문제에 대한 피해 영역이 가장 큰 절점으로 시스템 유지관리 측면에서 관의 상태를 파악할 수 있는 Smart-pipe 등을 설치하여 항상 관리해야 할 필요성이 있는 지점이다. 반면 RE가 큰 절점은 다른 절점의 변화에 민감한 절점으로 상수관망의 이상 거동에 대해 인지할 수 있는 압력 센서를 설치하여 시스템의 안정적 운영을 위한 정보를 제공해야 하는 절점이라 할 수 있다. 즉 이러한 절점에 압력계를 설치하여야함을 의미한다.

4. 적용 및 결과

본 연구에서 제안한 기법을 미국 코네티컷주에 위치한 Cherry Hill network 및 국내 A시 B배수분구 상수관망에 적용하여 최적의 압력계 위치를 산정하였다. 적용된 두 상수관망의 형태는 Figs. 3~4와 같다. Cherry Hill network는 대표적인 branch형 관망으로, 88개의 절점과 104개의 관, 94개의 밸브 그리고 1개의 수원(절점 7에 위치한 펌프와 배수지)로 구성되어 있으며 관경의 분포는 12, 8, 6 inch 관으로 구성되어 있고 총연장은 20,784 m(68,192 ft)이다. 국내 A시 B배수분구 상수관망은 전형적인 loop형 관망으로, 절점 89개, 관 138개, 저수지 1개로 구성되어 있다.

모의 발생된 절점의 용수사용량에 대한 상수관망 내 압력변화량을 영향지수행렬을 이용하여 산정하였고, 그 압력변화량의 분포형을 결정하기 위해 적합도 검정을 실시하였다. 사용된 분포형은 정규분포(NOR), Gamma 분포(GAM2), Generalized Extreme Value 분포(GEV), Gumbel 분포(GUM), Log-Normal 분포(LN2, LN3)이다. 적합도 검정기법은 Chi-Square(χ^2) 검정, Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정, Probability Plot Correlation Coefficient(PPCC) 검정을 사용하였다. 검정의 결과는 Table 1과 같으며, 두 대상 상수관망 모두 정규분포 및 대수정규분포에 적합함을 확인하였다. 그러므로 절점의 압력변화량 역시 정규분포를 따른다고 가정하였다. 이는 유량변화에 대한 압력변화 폭이 극치 값을 가지는 경우가 적고 정규분포를 따르는 유량분포에 의해 발생한 압력변화를 모의한 것이므로 타당하다.

4.1 Cherry Hill network

Cherry Hill network의 특성은 전체적인 수지형 관망의 형태를 가지고 있지만 각 절점의 기본 수요량이 작은 것이 특징이며 서로 유사한 크기의 기본 수요량을

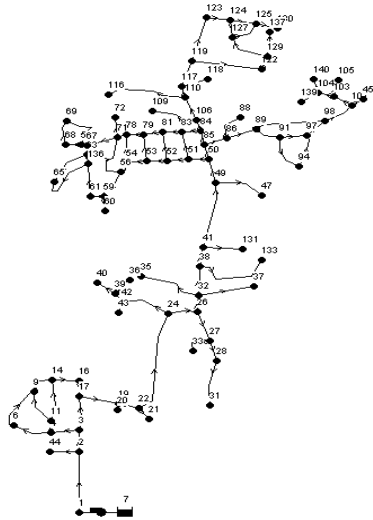


Fig. 3. Cherry Hill Network

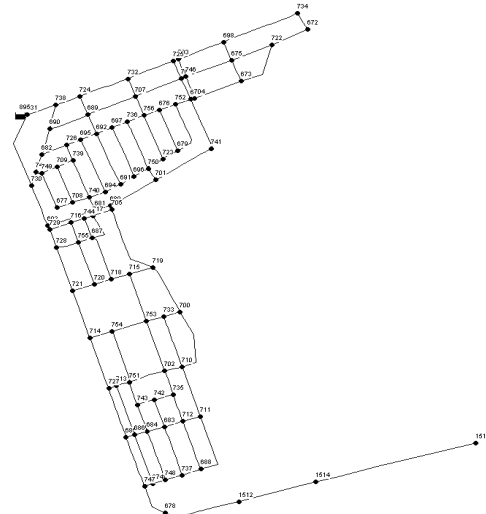


Fig. 4. B Water Distribution Network of A City

Table 1. Verification of PDF for Pressure Influence Matrix

Node No.	Method	Probability distribution type					
		NOR	GAM2	GEV	GUM	LN2	LN3
1	χ^2	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	N.G
	K-S	O.K.	N.G	O.K.	O.K.	O.K.	N.G
	PPCC	O.K.	N.G	N.G	N.G	O.K.	N.G
2	χ^2	O.K.	N.G	N.G	O.K.	O.K.	N.G
	K-S	O.K.	N.G	O.K.	O.K.	O.K.	N.G
	PPCC	O.K.	N.G	O.K.	O.K.	O.K.	N.G
3	χ^2	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	N.G
	K-S	O.K.	N.G	O.K.	O.K.	O.K.	N.G
	PPCC	O.K.	N.G	O.K.	N.G	O.K.	N.G

가지고 있다. 유량변화에 대한 압력변화를 엔트로피로 정의한 본 연구의 특성 상 기본수요량의 크기가 유사한 절점은 엔트로피 크기와 연관된다. 절점마다 기본 수요량의 차이가 적은 Cherry Hill network은 각 절점 사이의 총 엔트로피 값의 차이가 적기 때문에 우열에 따라 관의 상태를 파악할 수 있는 Smart-pipe 및 압력계 설치 우선순위를 제시하기에 어려운 점이 있다. 그러므로 센서의 설치 개수에 따라 그 후보 설치 위치를 엔트로

피로 평가하여 실무자에게 제시하는 것이 바람직하다. 엔트로피 값이 높은 상위 5개의 절점의 산정결과를 Table 2에 나타나 있다.

GE가 가장 큰 절점은 6번 절점이며, 68, 63, 79 및 61번 절점의 순서로 절점의 유량변화가 관망에 포함된 전체 절점에 영향을 많이 주고 있는 것으로 나타났으며 시스템 유지관리 측면에서 관의 상태를 파악할 수 있는 Smart-pipe 등을 설치하여 항상 관리하는 것이 바람직

Table 2. Entropy Estimation Results for Cherry Hill Network

Giving Entropy			Receiving Entropy		
Rank	Node	Entropy	Rank	Node	Entropy
1	6	284.62	1	28	267.17
2	68	280.13	2	38	267.17
3	63	280.12	3	32	267.17
4	79	280.12	4	67	267.13
5	61	280.12	5	1	264.01

Table 3. Entropy Estimation Results for B WDN in A City

Giving Entropy			Receiving Entropy		
Rank	Node	Entropy	Rank	Node	Entropy
1	674	279.07	1	1513	275.73
2	686	279.05	2	1514	275.73
3	685	279.04	3	1512	273.33
4	690	279.03	4	678	272.90
5	689	279.03	5	673	272.89

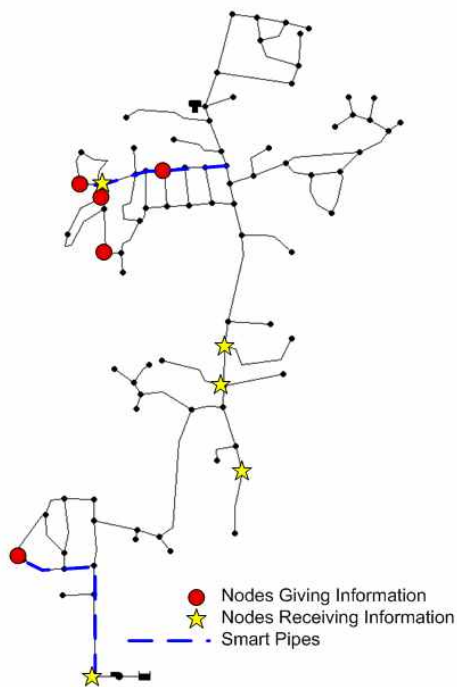


Fig. 5. Result of Cherry Hill Network

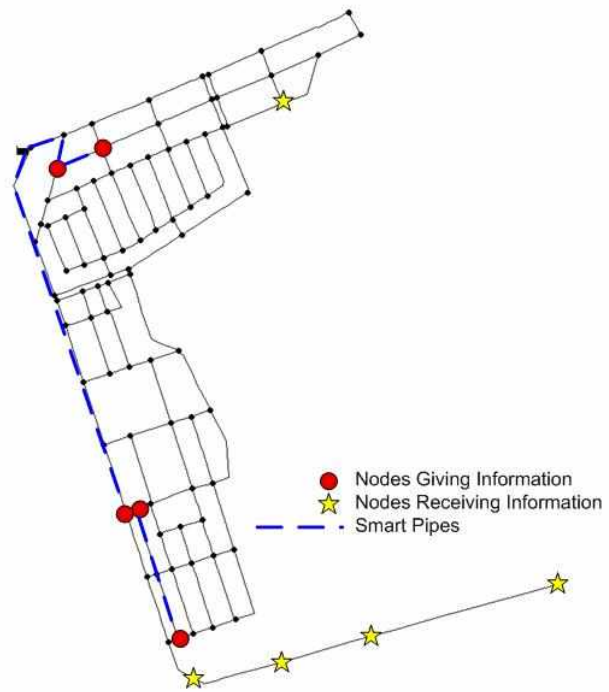


Fig. 6. Result of B WDN in A City

하다. 엔트로피 차가 적은 상수관망에서 설치할 압력 센서의 개수가 한정되어 있는 경우에 그 차가 미소하다면 최적 압력 계측 위치로 Walski(1983)가 제안한 높은 수요량을 갖는 지점과 간략화 된 관망의 말단부 지점을 압력계 설치 우선 순위로 결정하는 것이 보다 객관적인 판단이 될 것이다. 한계 엔트로피는 절점의 기본수요량의 평균과 표준편차로 계산되어진다. Smart pipe 설치 우선 순위를 제시함에 있어 큰 한계 엔트로피를 가지는 절점을 우선적으로 선정하는 것이 좀 더 합리적으로 판단된다. 최종적으로 Smart-pipe 및 압력계 최적 설치 위치 분포를 나타내면 Fig. 5와 같다.

4.2 A시 B배수분구 상수관망

엔트로피 산정 결과 본 상수관망은 주입점 부근의 절점들의 유량변화가 관망에 포함된 전체 절점에 영향을 많이 주고 있는 것으로 나타났다. 본 모형은 관망 전

체에 탱크가 설치되어 있지 않기 때문에 각 절점들의 유량 공급체계가 흐름 방향 상부에 위치한 절점들의 영향에 민감한 반응을 보였다. 절점 1513는 이러한 민감성을 대변한 결과라 판단되며 절점 674는 본 상수관망에서 구조적으로 가장 중요한 절점이라 인지할 수 있다. 엔트로피 값이 높은 상위 5개의 절점의 산정결과는 Table 3에 나타나 있다. 최종적으로 Smart-pipe 및 압력계 최적 설치 위치 분포를 나타내면 Fig. 6과 같다.

5. 결 론

최적의 계측위치 선정은 효율적인 상수관망 운영을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 기존 연구의 단점을 보완하기 위해 정보이론인 엔트로피 방법을 이용하여 계측기의 위치 결정을 위한 방안을 제시하였고 대상관망에 적용하여 적용성을 검토하였다. 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

1) branch형 관망의 특성이 잘 반영된 Cherry Hill network에 본 모형을 적용한 결과 엔트로피 기준이 제시한 정보량이 많은 절점은 주로 주입점 부근 및 주요 유량 분배 절점에서 나타났으며 이 절점들은 상수관망 운영에 있어 중요한 절점으로 관의 상태를 파악할 수 있는 압력계를 설치하여 지속적인 계측이 이루어져야 할 절점이라 판단하였다. 이러한 결과는 기존 실무자들이 판단한 기준과 다르지 않은 결과로 상수관망에서 중요하게 관리되어야 할 절점은 주입점 부근이라는 사실을 다시 한 번 입증하였다.

2) loop형 관망의 특성이 잘 반영된 A시 B배수구역 상수관망은 엔트로피 이론을 적용시켜 얻은 결과를 가지고 판단할 때 branch형 관망에서 입증한 주입점 부근이 상수관망 운영에 있어 중요한 절점이라는 결과를 제시하지 않았다. 이러한 사실은 loop형 관망은 수지형 관망보다 상수관망 전체의 유기적인 관계가 커 주입점 이 외에 절점이 큰 정보량을 가질 수 있는 가능성을 보여주고 있다고 할 수 있다. loop형 관망은 각 절점과 거리가 짧고 손실수두가 작게 발생한다. 이러한 사실에 기초했을 때 loop형 관망은 각 절점의 유량분배가 원활 하며 절점의 유량변화에 둔감한 반응하는 것으로 판단할 수 있다.

최적의 압력계 설치 지점은 엔트로피 기준에 의해 전체 시스템으로부터 제공받는 정보량이 가장 큰 절점을 우선으로 설치해야 하며, 특히 현재 실무자의 경험적 판단에 의해 계측기를 설치 운영되고 있는 국내의 상수관망 시스템을 고려할 때, 엔트로피 이론을 통해 보다 객관적인 기준으로 상수관망에서 계측기 우선 설치 순위를 운영자에게 제시할 수 있을 것이며, 상수관망에 압력계를 설치하기 위한 효율적인 의사결정 기준으로 활용이 가능한 것으로 판단된다. 또한 전체적인 시스템 특정 노드에서 비정상 상태가 발생할 경우 가장 먼저 변화를 감지 할 수 있는 절점이며 시스템의 비정상 운영에 대해 모든 정보가 중첩되어지는 절점으로 상대적으로 다른 절점보다 정보를 획득하는데 안정성을 가짐으로 시스템 유지관리 목적에서 이 절점들에 압력계를 설치한다면, 시스템 운영 면에서 에러를 최소화할 수 있으며 시스템의 구조적 및 비구조적 파괴에 대해 상대적으로 쉽게 감지하여 엔지니어에게 빠르게 인지시킬 수 있는 장점을 가진다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구(ECORIVER21)(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

참고 문헌

- 권상우, 유철상 (2001). “엔트로피 방법을 이용한 수질 측정망의 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제5B호, pp. 501-509.
- 유철상, 정광식 (2002). “엔트로피 방법을 이용한 강우 관측망 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제4B호, pp. 447-457.
- 이경훈, 이삼노, 문병석 (1994). “1일 상수도 급수량의 변화와 확률분산 모형에 관한 연구.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 405-409.
- 조문수 (2007). **u-city 구축을 위한 발전된 상수관망 운영시스템의 개발**. 석사학위논문, 고려대학교.
- 환경부 (1998). **상수도시설기준 유지관리편**.
- 환경부 (2006). **상수도통계 2006**.
- A. Kusumulyono and I. Goulter (1994). “Entropy principles in the prediction of water quality values at discontinued monitoring stations.” *Stochastic Hydrology and Hydraulic*, Vol. 8, pp. 301-317.
- Al-Zahrani, M. and Husain, T. (1998). “An algorithm for designing a precipitation network in the south-western region of Saudi Arabia.” *J. of Hydrology*, Vol. 205, pp. 205-216.
- Bush, C.A and Uber, J.G. (1998). “Sampling design method for water distribution model Calibration.” *J. Water Resour. Plan. Manage.*, Vol. 124, No. 6, pp. 334-344.
- Caselton, W.F. and Husain, T. (1980). “Hydrologic networks: Information transmission.” *J. of Water Resour. Plan. Manage.*, Vol. 106, pp. 503-529.
- Chapman, T.G. (1986). “Entropy as a measurement of hydrologic data uncertainty and model performance.” *J. of Hydrology*, Vol. 85, pp. 307-324.
- John P. Vitkovsky, James A. Liggett, Angus R. Simpson and Martin F. Lambert (2003). “Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks.” *J. of Water Resour. Plan. Manage.*, Vol. 129, pp. 480-492.
- K. Awumah, I. Goulter and S. K. Bhatt (1990).

- “Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Springer Berlin / Heidelberg*, Vol. 4, No. 4, pp. 309-320.
- Kofi Awumah, Ian Goulter, and Suresh K. Bhatt (1991). “Entropy-Based Redundancy Measures in Water-Distribution Networks.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 595-614.
- Ozkul, S., Harmancioglu, N.B., and Singh, V.P. (2000). “Entropy-based assessment of water quality monitoring networks.” *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 90-100.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1949). “The mathematical theory of communication.” The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, USA.
- Tanyimboh, T.T. and Templeman, A.B. (1993). “Calculating Maximum Entropy flows in network.” *J. of Optimal Res. Soc.*, Vol. 44, pp. 383-396.
- Walski, T.M. (1983). “Technique for Calibrating Network Model.” *J. Water Resour. Plan. Manage.*, Vol. 109, No. 4, pp. 360-372.
- W.K. Ang and P.W. Jowitt (2005). “Some new insights on informational entropy for water distribution networks.” *Engineering Optimizatio*, Vol. 37, No. 3, pp. 277-289.
- Yang, Y. and Burn, D.H (1994). “An entropy approach to data collection network design.” *J. of Hydrology*, Vol. 157, pp. 307-324.
- Y. Mogheir, J. L. M. P. de Lima, V. P. Singh (2004). “Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. Synthetic data.” *Hydrological Processes*. Vol. 18, pp. 2165-2179.
- Y. Setiadi, T.T. Tanyimboh, A.B. Templeman (2005). “Modeling errors, entropy and the hydraulic reliability of water distribution systems.” *Advances in Engineering Software*, Vol. 36, pp. 780-788.
- Yu, G., and Powell, R.S. (1994). “Optimal design of meter placement in water distribution systems.” *Int. J. Syst. Sci.*, Vol. 25, No. 12, pp. 2155-2166.

(논문번호:09-047/접수:2009.04.16/심사완료:2009.06.09)