



엔트로피 이론과 유전자 알고리즘을 결합한 상수관망의 최적 압력 계측위치 결정 Determination of Optimal Pressure Monitoring Locations of Water Distribution Systems Using Entropy Theory and Genetic Algorithm

장동일¹ · 하금률¹ · 전환돈² · 강기훈^{1*}

Chang, Dong Eil¹ · Ha, Keum Ryul¹ · Jun, Hwan Don² · Kang, Ki Hoon^{1*}

1 대림산업(주) 기술개발원 2 서울과학기술대학교

(2011년 11월 4일 접수; 2011년 12월 26일 수정; 2011년 12월 29일 채택)

Abstract

The purpose of water distribution system is supplying water to users by maintaining appropriate pressure and water quality. For efficient monitoring of the water distribution system, determination of optimal locations for pressure monitoring is essential. In this study, entropy theory was applied to determine the optimal locations for pressure monitoring. The entropy which is defined as the amount of information was calculated from the pressure change due to the variation of demand reflected the abnormal conditions at nodes, and the emitter function (fire hydrant) was used to reproduce actual pressure change pattern in EPANET. The optimal combination of monitoring points for pressure detection was determined by selecting the nodes receiving maximum information from other nodes using genetic algorithm. The Ozger' s and a real network were evaluated using the proposed model.

From the results, it was found that the entropy theory can provide general guideline to select the locations of pressure sensors installation for optimal design and monitoring of the water distribution systems. During decision-making phase, optimal combination of monitoring points can be selected by comparing total amount of information at each point especially when there are some constraints of installation such as limitation of available budget.

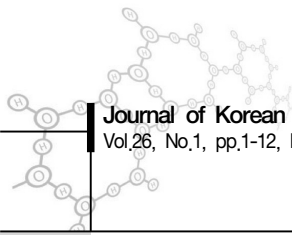
Keywords : Water distribution system, SCADA, Optimal monitoring location, Entropy theory, Genetic algorithm

주제어 : 상수관망, SCADA시스템, 최적계측위치, 엔트로피 이론, 유전자 알고리즘

1. 서론

상수관망은 펌프, 밸브, 탱크, 관로가 조합되어 복잡한 네트워크를 구성하고 있는 시스템으로 소비자에게 제한된 수질과 소비자가 요구로 하는 유량을 충분한 압력상태하에서 공급하는 목적을 가지고 있다. 현재 광역상수관망을 중심으로 상수관망

시스템의 효율적인 운영을 위해 상수관망을 중앙에서 감시, 제어, 측정하여 획득된 자료를 분석 처리하는 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템을 도입하여 운영하고 있지만 주로 광역 상수도 내의 수원지에서 정수장 또는 배수지까지의 도·송수관에 집중되어 운영되고



있어 배수지 이하 배수블록에 대한 효율적이고 체계적인 관리 운영은 미흡한 실정이다. 현재 국내에 매설되어 사용하고 있는 상수도의 총연장은 146,770km에 달하고 대부분의 관이 도시에 매설되어 있다(환경부, 2008). 그러나 이중 60%이상이 매설된지 10년이 넘었으며 25%이상이 20년이 넘는 노후관으로 급배수관이 상수도관망 부분에서 90%가 넘는 실정에서 관 파괴나 누수 등으로 인한 갑작스러운 사고 발생이 예상되고 있는 실정이다.

상수관망은 효율적인 운영을 위해 소비자에게 직접적인 영향을 미치는 배수분구 뿐만 아니라 전체 상수관망 모든 절점에 대해 모니터링을 실시하는 것이 가장 이상적인 방법이지만 많은 비용과 유지관리에 어려움이 있어 실행에 제약이 따른다. 그러므로 배수블록 내 상수관망의 효율적인 유지관리를 위하여 상수관망의 운영 예산을 고려한 적절한 계측기 설치 규모를 제시할 수 있는 객관적인 시설기준이 필요하다.

기존 연구로 Walski (1983)는 관 말단 및 기본수요량이 높은 절점, Yu et al. (1994) 및 Bush et al. (1998)는 실측자료를 검·보정할 때 정확도가 높은 절점을 최적 유량 및 압력 위치로 제안하였으며 Berry et al. (2005), Marco et al. (2005, 2006) 및 J. Xu et al. (2008)는 2001년 세계무역센터 테러 영향으로 상수관망 테러 위험에 노출될 수 있는 수요자를 최소화 시킬 수 있는 지점을 최적 모니터링 위치로 제안하였다. 선행 연구들은 실측자료를 이용한 검·보정이 수행되어야 하므로 체계적인 관리를 통한 실제 자료의 확보가 선행되지 않았던 지역에는 적용이 어렵다는 단점이 있으며 테러에 대비한 최적 계측 위치 선정 연구들은 가상의 공격 시나리오를 통해 오염물의 확산을 분석하는 연구로 실제적인 시스템 유지관리에 대한 실용성은 부족한 점이 있다. 국내에서는 상수관망의 기본데이터만을 이용하여 계측 위치를 결정하기 위한 방법이 조문수 (2007) 및 정건희 등 (2009)에 의해 제안되었다.

조문수 (2007)는 모의조건에 한계가 있어 실질적인 유량변화를 반영하지 못하는 단점을 가지고 있으며 정건희 등 (2009)은 엔트로피를 이용하여 압력계측 위치를 제안하였지만 각 절점의 개별적 정보전달량만을 고려하고 엔트로피로 평가된 개개 절점의 순위에 따라 최적 계측위치를 제안하였기에 각 절점의 유기적인 상관성을 반영 못한 단점을 가지고 있다. 실제 상수도 시설기준 배수시설편 (2011)에서는 유량과 압력을 상수관망 배수본관(블록)의 시점, 주요한 분기지점에서 측정하여야 한다고 제시하고 있지만, '배수본관(블록)의 시점'에 설치해야 하는 이유와 '주요한 분기지점'에 대한 정의와 기준이 명확히 제시되어 있지 않아 국내의 실무자들에게 혼란을 줄 여지를 남겨두었으며 대부분 경험적 판단에 의해 주로 소블럭 유입점에 계측기를 설치하고 있는 실정으로 계측기의 위치를 결정하기 위한 정량화된 기준에 대한 연구가 절실하다. 본 연구에서는 기본적인 상수관망의 자료, 정보이론인 엔트로피 이론을 이용하여 상수관망의 비정상상태에서 각 절점간 영향력을 정량화 하였으며 기존 연구처럼 개개의 절점들의 정보전달량만을 고려하여 압력계측 위치 우선순위를 제안한 것이 아니라 임의 선정된 각 절점의 유기적인 상관성까지 반영된 최대 정보량을 기준으로 최적 압력 계측 위치 조합을 결정할 수 있는 모형을 개발하였다. 최적의 모니터링 조합은 주어진 제약조건 내에서 다른 절점들로부터 최대의 정보량을 얻을 수 있는 위치들의 조합이며 전체 상수관망 중 내부 변화에 가장 민감한 절점에 압력계를 설치하여 관리함으로써 시스템에 대해 전반적인 신뢰도를 높일 수 있다.

본 연구에서는 대단위 상수관망의 각 절점의 유기적인 상관성을 해석하는 과정에서 비용 및 시간적인 문제 뿐만 아니라 총 절점 수에 의한 임의 조합 수가 지수함수적으로 증가하는 문제를 해결하기 위해 발견적 해석 방법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 본 모형에 적용하여 최대 정보량을

가지는 조합을 선정하였으며 이러한 시도는 최적 계측위치 조합을 결정 하는데 있어 대상관망의 크기 및 범위에 제약 받지 않고 기존 연구들 보다 합리적인 방법으로 최적 압력계측 위치 조합을 제안하였다고 판단된다.

2 적용 이론

2.1 엔트로피(Entropy) 이론

엔트로피(Entropy) 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 가능하다(Shannon, 1949). 정보교환의 과정으로 신호가 보내질 때, 이 신호의 불확실성은 신호에 대한 정보가 불확실성을 제거할 정도로 많아지면 감소하게 되고, 따라서 불확실성의 감소 정도로 신호에 대한 정보를 간접적으로 측정할 수 있다.

엔트로피 개념은 이미 많은 분야에서 응용되고 있으며 특히 상수관망의 최적 설계, 신뢰도, 여유도 및 상수관망 최적모니터링 위치 선정(Awumah (1990, 1991), Tanyimboh and Templeman (1993), Ang and Jowitt (2005), Setiadi (2005), 정건희 (2009))에 적용되었으며, 수문분야에서는 하천 수질 측정망 설계 및 강우 관측소 평가(Caselton (1980), Chapman (1986), Kusmulyono (1994), Yang and Burn (1994), Zahrani (1998), 권상우 (2001), Ozkul (2002), 유철상 (2002))에 주로 이용되고 있다. 엔트로피 방법은 현재까지 관측된 자료에 근거하는 방법으로 측정망의 설계 목적보다는 이미 구성되어 있는 측정망을 평가하는데 장점이 있는 방

법이다. 엔트로피 이론에서는 정보량을 정량화하기 위해 한계엔트로피(marginal entropy), 결합엔트로피(joint entropy), 조건엔트로피(conditional entropy) 및 정보전달량(transmission)의 개념을 사용한다.

엔트로피는 무작위변량의 형태에 상관없이 정의될 수 있는데 이산무작위변량의 경우 변량 X 의 한계엔트로피 $H(x)$ 는 변량 X 가 가지고 있는 정보량 또는 불확실성을 의미하며 식(1)과 같이 정의된다(Shannon, 1949). $H(x)$ 가 커질수록 다른 변량과 종속적인 관계시 영향을 미칠 수 있는 확률이 크다고 할 수 있다. 식 (1)에서 $P(x_n)$ 은 x_n 의 발생확률이다. 연속무작위변량의 경우 변량 x 가 확률밀도함수 $f(x)$ 를 따른다고 가정하고, x 의 범위를 Δx 의 간격으로 나누어 계산할 때, 변량 x 의 한계 엔트로피 $H(X; \Delta x)$ 는 식 (2)와 같이 정의된다.

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

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

만일 무작위변량 x_n 과 관계있는 y_m ($m=1,2,\dots,n$) 이 존재할 경우 y_m 으로부터 x_n 을 추정한다면 x_n 이 가지고 있는 불확실성을 감소시킬 수 있으며 이러한 원리에 의해 주어진 변량 Y 에 의해 무작위 변량 X 에 남아있는 불확실성을 식(3)과 같이 추정할 수 있다. 여기서, $H(X/Y)$ 는 Y 에 대한 X 의 조건 엔트로피로 X 와 Y 간 정보전달 사이에서 손실되는 정보량을 의미한다(Yang and Burn, 1994). 식(3)의 $P(x_n, y_m)$ 는 $X=\{x_n\}$ 과 $Y=\{y_m\}$ 의 결합확률, $P(x_n/y_m)$ 는 조건확률을 의미한다. 연속무작위변량의 경우 주어진 Y 에 대해서도 동일한 간격인 Δx 의 간격으로 나눌 수 있다면 Y 에 대한 X 의 조건엔트로피는 식(4)과 같다. Y 가 X 로부터 정보를 받는 관계일 경우 주어진 Y 에 의해서 X 가 가지고 있던 불확실성을 산정할 수 있으며 공유되는 정보를 X 로부터 Y 에게 전달되는 정보전달량으로 정의할 수 있다. 정보전달

량은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H(X/Y) \simeq - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N P(x_n, y_m) \ln P(x_n/y_m) \quad (3)$$

$$H(X/Y; \Delta x) \simeq - \int_0^\infty \int_0^\infty f(x, y) \ln f(x/y) dx dy - \ln \Delta x \quad (4)$$

$$T(X, Y) = H(X) - H(X/Y) \quad (5)$$

계산과정의 복잡성으로 인해 현재까지 엔트로피 방법의 적용이 가능한 확률밀도함수는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포로 각각의 엔트로피 계산식이 이론적으로 유도되어 있으나, 그 외의 분포형은 복잡한 다차원 수치적분을 필요로 하기 때문에 적용이 제한되어 있다(Yang and Burn, 1994). 정규분포를 따르는 X, Y에 대해 Y. Mogheir (2004)는 한계엔트로피 및 정보전달량을 다음과 식(6)~식(7)과 같이 계산하였다.

$$H(X) = \ln(\sigma_x \sqrt{2\pi}) + \frac{1}{2} \ln e \quad (6)$$

$$T(X, Y) = -0.5 \ln(1 - \gamma_{xy}^2) \quad (7)$$

여기서, σ_x 는 x의 표준편차이며, 식(8)의 γ_{zw} 는 x와 y의 상관계수를 의미한다. γ_{xy} 는 표본 x와 y의 상관계수를 의미한다. 대수정규분포를 따르는 X, Y에 대해 Chapman (1986)는 일정하게 고정된 간격 Δx 대신 변수에 범위에 비례하는 간격 $\Delta x/x$ 를 적용시켜 한계엔트로피, 정보전달량을 식(8)~식(9)과 같이 정의하였다.

$$H(X) = 0.5 \ln(2\pi e \sigma_z^2) - \ln(\Delta x/x) \quad (8)$$

$$T(X, Y) = -0.5 \ln(1 - \rho_{xy}^2) \quad (9)$$

여기서, σ_z 는 $z(=\ln x)$ 의 표준편차이며, 식(9)의 ρ_{zw} 는 z 와 $w(=\ln y)$ 의 상관계수를 의미한다. ρ_{xy} 는 표본 z 와 w 의 상관계수를 의미한다. 본 연구에서는 특정 절점 k에서 자체 유량변화에 따른 압력변화로부터 얻은 통계 결과를 이용하여 한계엔트로피로,

다른 여러 절점들에서 유량변화 발생 시 k 절점에 미치는 압력변화를 상관관계를 통해 정보전달량로 정량화하였으며 한계엔트로피와 정보전달량의 합을 총 엔트로피로 정의하였다.

$$Total Entropy(k) = H(k) + \sum_{i=1}^n (T_i, T_k), i \neq k \quad (10)$$

2.2 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

최적화 방법 중 발견적(heuristic) 방법으로는 SA(Simulated Annealing), TA(Taboo Search), 화음 탐색법(Harmony Search), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 등이 폭넓게 사용되고 있다. 다윈의 적자생존의 원리에 기반한 유전자 알고리즘은 Holland (1975)에 의하여 개발되었으며 Goldberg (1990) 등에 의하여 다양한 최적화 문제에 대해 적용되었다. 최적화 문제의 해결을 위하여 채택된 유전자 알고리즘은 자연계에 있는 생물의 진화과정에 있어서 개체군(population) 중에서 환경에 대한 적합도(fitness)가 높은 개체가 높은 확률로 살아남고 순위가 높은 개체군을 선택(selection)하여 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)를 진행함으로써 다음 세대의 개체군을 형성하는 알고리즘을 인공적으로 모델링한 것이다. 일반적인 유전자 알고리즘의 흐름도는 Fig.1과 같으며 조건에 따라 다양하게 적용될 수 있는 장점을 가지고 있다.



Fig.1 Genetic algorithm flow chart

3. 엔트로피 이론을 이용한 상수관망 내 절점별 영향지수 정량화

전체적인 상수관망 내 절점별 영향지수 정량화 방법은 Fig.2에 제시되었다. Fig.2은 상수관망의 각 절점에서 유량변화를 통해 비정상상태를 발생시켜 압력의 변화를 받는 절점(영향절점)들의 압력변화 폭을 기준으로 엔트로피를 산정하고 압력계 설치 개수에 따라 임의의 절점 조합을 구성하여 최대정보량을 가지는 절점들의 조합을 유전자 알고리즘을 통해 발견해 내는 과정을 그림으로 모식화한 것이다.

3.1 기본가정 및 모의조건

상수관망의 정상 상태는 소비자가 요구로 하는 용수수요량을 제약조건 없이 공급할 수 있는 상태를 의미하여 이러한 상태를 해석하기 위해서는 각 절점의 기본수요량이 항상 만족된다는 가정이 필요하다. 상수관망의 정상운영 상태를 해석하기 위해서 본 연구는 EPANET의 DDA(Demand Driven Analysis) 모형을 이용하였다. 하지만, 기본 제약조건에 의해서 경우에 따라 부압이나 매우 낮은 절점압력을 결과로 산정한다. 즉, 실제 압력이 허용최저압력 이하가 되면 용수공급이 원활하지 않거나, 부압이 발생하였을 경우 실제 용수공급이 전혀 이루어지지 못하는데도 불구하고, 관망 내 유량이 풍부하면 용수수요량을 모두 만족시킨다는 가정하에 계산을 수행하기 때문에 압력변화의 실질적인 변동 추이를 모의하는데 한계점을 가지고 있다. 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 Emitter를 용수공급이 이루어지는 절점(Demand Node)에 사용하였다. Emitter는 완전한 PDA (Pressur Driven Analysis)는 아니지만 기존 DDA에 비해서 용수공급의 변화

에 대한 가능수요량을 간접적으로 결정해 줄 수 있기 때문에 본 연구에서 도입하였다. 현재 PDA는 WaterGems등에서 도입이 되어 활용이 될 수 있으나 최적화나 변화되는 수요량을 모의하는 것과 같이 매우 많은 횟수의 상수관망 모의에는 도입이 곤란하여 EPANET의 Emitter 기능을 EPANET DLL을 이용하여 많은 횟수의 상수관망 모의를 빠른 시간에 실시할 수 있기 때문에 본 연구에서 활용하였다.

3.2 최적 압력계측 위치 결정을 위한 정량화 절차

(1) 절점별 기본수요량 값 입력 및 압력 산정

관망의 기본 자료인 각 절점별 기본 수요량과 표고, 관경, 관 길이, 마찰계수를 입력하고 EPANET DDA모형 해석을 통해 각 절점의 기본수요량을 만족시키는 기본 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 사용하였다. 에미터 계수 C 는 식(11)와 같이 정상 상태에서 각 절점의 유량(q)과 압력(P)으로 산정되며, 압력지수 γ 는 오리피스 식의 0.5를 적용하였다.

$$C = P^\gamma \div q \quad (11)$$

(3) 정규분포형을 따르는 기본수요량 발생

본 연구에서는 시스템의 각 수요절점의 유량 변동, 비정상적인 운영상태 발생 및 화재용수 등과 같은 다양한 유량변화를 모의하기 위해 첨두부하율을 고려하였으며 첨두부하율은 관망의 급수인구에 따라 결정되었다. 각 절점의 기본수요량(Base Demand, 1시간 평균급수량)을 평균으로 하고, 식(13)으로 구한 표준편차를 가지는 정규분포를 구성한 뒤 발생된 난수에 첨두부하율을 곱하여 Peak Demand를 식(12)과 같이 산정한 후 이 결과를 다시 각 절점의 기본수요량으로 입력하였다. Goulter and Bouchart (1990), 이경훈 (1994), Xu and Goulter (1998,

1999)는 시간별 급수변화량은 정규분포를 따른다고 제시하였으며 해당 절점에서 발생할 수 있는 수요량의 범위는 Fig. 3에서 Normal과 Emergency 구간이다. 식(12)에서 부하율은 상수도 수요량 예측 업무편람(환경부, 2008)에서 제시한 급수인구에 따른 첨두부하율로 사용하였으며 첨두부하율은 Table. 1에 나타내었다.

Table.1 Peak factor

Water supply population (10 ⁴ person)	0~1	1~2	2~5	5~10	10~25	25~50	50~100	over 100
Peak factor	1.51	1.45	1.40	1.36	1.31	1.27	1.23	1.19

$$Peak\ Demand = Peak\ Factor \times Base\ Demad(i) \quad (12)$$

$$S_D = (PeakFactor - 1) \times Base\ Demad(i) \div z \quad (13)$$

여기서, S_D = 각 절점의 표준편차

PF = Peak Factor

i = Node ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

Base Demand(i) = 각 절점의 한 시간 평균 급수량

z = 95%의 신뢰도를 갖는 확률변수

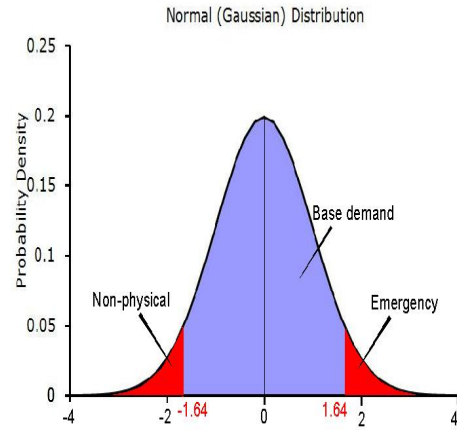


Fig.3 Demand distribution curve

(4) 절점들의 수요량 변화에 따른 영향절점들의 압력 변화 폭 산정

유량의 변화를 줄 절점 i 에 정규분포를 따르는 100개의 수요량을 발생시킨 후 Visual Basic과 EPANET DLL을 사용하여 발생된 수요량을 해당 절점에 입력하며 프로그램을 반복 수행한다. 이 때 발생된 수요량을 만족하는 압력과 i 절점의 기본수요량을 만족하는 압력과의 차로 산정된 100개의 압력변화 폭에 대해 확률밀도함수를 산정한다. i 절점의 수요량 변화에 따른 각 절점마다의 변화 압력 폭을 i 절점의 수요량 변화가 발생하기 전 정상상태 일 때의 각 절점의 기본수요량을 만족시키는 압력과 i 절점의 수요량 변화의 따른 각 절점의 압력의 차로 산정한다. 이 때 i 절점으로부터 영향을 받는 절점들에 기본 수요량은 0로 입력하고 에미터를 설치하여 실제 압력 변화폭을 확인한다. i 절점의 100개의 수요량으로 산정된 각 절점의 압력변화 폭에 대한 확률밀도함수를 구성한다. 위의 과정을 기본수요량이 주어진 모든 절점에 대하여 반복 수행한다. Fig. 4는 상수관망의 초기 상태를 나타낸 것이다

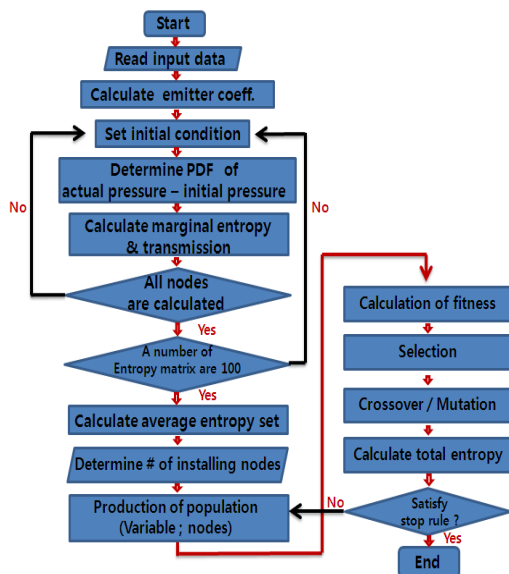


Fig.2 Flow chart

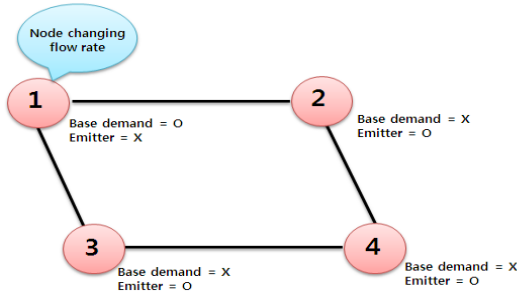


Fig.4 Initial Status of Nodes for Demand Change

(5) 영향지수행렬 산정

영향지수행렬은 임의의 절점 i 에서 비정상상태 발생 시 유량 변화에 따른 모든 절점의 압력변화량 나타낸다. 예를 들어 식(14)에 나타나 있는 2행 1열의 요소는 i 절점의 유량변화가 있기 전 1번 절점의 기본수요량을 만족시키는 압력과 i 절점의 유량 변화 발생 시 두 번째 임의 수요량에 의해 발생하는 1번 절점의 압력간의 변화폭을 의미한다.

$$\begin{pmatrix} \Delta p_{1,1} & \Delta P_{i,1} & \dots & \Delta p_{j,1} & \dots & \Delta p_{n,1} \\ \Delta p_{1,2} & \Delta P_{i,2} & \dots & \Delta p_{j,2} & \dots & \Delta p_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta p_{1,n} & \Delta P_{i,n} & \dots & \Delta p_{j,n} & \dots & \Delta p_{n,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta p_{1,m} & \Delta P_{i,m} & \dots & \Delta p_{j,m} & \dots & \Delta p_{n,m} \end{pmatrix} \quad (14)$$

여기서, $\Delta P_{i,m}$ = 유량변화가 발생한 i 절점의 기본압력과 변화압력의 차
(기본수요량을 입력하고 에미터를 설치하지 않은 절점)
 $\Delta p_{j,m}$ = i 절점 모의 발생 수요량에 의한 j 절점의 기본압력과 변화압력의 차
(기본수요량을 0입력하고 에미터를 설치한 절점)

(6) 영향변화행렬에 대한 확률분포형 검증 대상 상수관망에 엔트로피 방법을 적용하기 위해

서는 유량변화에 대한 영향절점의 압력변화 차의 분포에 가장 가까운 확률밀도함수를 결정해야한다. 엔트로피 방법이 사용 가능한 확률밀도함수는 한계가 있어 적용이 가능한 확률밀도함수는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 등으로 제한되어 있다. 본 연구는 유량변화에 대한 영향절점의 압력변화폭에 대해 최적분포형을 선정하고 χ^2 검정법, Kolmogorov-Smirnov 및 PPCC 검정법을 통해 적정성을 검증하여 해당 최적분포형에 적합한 엔트로피 식을 적용하였다. 적합도 평가 결과로 본 연구의 대상관망에서 유량변화에 대한 영향절점의 압력변화폭의 분포가 정규분포 및 대수정규분포를 만족하는 것으로 확인되었다.

(7) 최적 조합 결정을 위한 엔트로피 계산과 유전자 알고리즘 적용

상수관망 내 존재하는 모니터링 위치 조합의 최적화는 모니터링 위치간의 중복되는 정보가 최소화 되도록 해야 하며 반대로 상수관망 시스템의 정보를 최대로 획득해야 한다. 즉 최적의 모니터링 조합은 주어진 제약조건 내에서 다른 절점들로부터 최대의 정보량을 얻을 수 있는 위치들의 조합이며 전체 상수관망 중 내부 변화에 가장 민감한 절점에 압력계를 설치하여 관리함으로써 시스템에 대해 전반적인 신뢰도를 높일 수 있다. 최적화 목적함수는 절점들의 조합에 따른 총 정보량으로 식(15)과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} & MAX \sum_{i=1}^m T(X_i, X_j, \dots, X_p) \\ & = MAX \left[H(X_k) + \dots + H(X_p) + \sum_{i=1}^{m-p} \sum_{j=k}^p T(X_i, X_j) \right], i \neq j \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, m 은 상수관망의 절점 수이며, p 는 설치할 절점의 수를 의미한다. $H(X_k) + \dots + H(X_p)$ 는 선택된 모니터링 위치 절점 각각의 한계 엔트로피를 합친 것이며, $\sum_{i=1}^{m-p} \sum_{j=k}^p T(X_i, X_j)$ 는 선택되지 않은 절점이 선택된 절점들에게 주는 정보전달량의 합을 의미한다

다. 일반적으로 선택된 절점의 수가 많을수록 얻을 수 있는 정보량은 증가하나, 일정 수를 초과하면 추가되는 절점 고유의 정보량보다 절점들 간의 중복되는 정보량이 많기 때문에 얻을 수 있는 총 정보량은 증가하지 않는다. 따라서 압력계를 설치할 수 있는 최대 개수는 정보를 최대로 얻을 수 있는 절점들의 조합이라 할 수 있다.

본 연구에서는 목적함수인 최대 정보량을 가지는 모니터링 조합을 선정하기 위해 우선 찾고자 하는 모니터링 개수별 절점 gene을 형성하고 적합도 검사를 한 후 일점 법에 의해 교배를 실시하였다. 기존에 생성되어 교배된 세대에 돌연변이를 발생시켜 보다 나은 성질을 가진 세대가 출현할 수 있도록 모형을 만들었다. 본 연구에서 사용된 유전자 알고리즘은 절점들로 구성된 4개의 gene에 대하여 룰렛 휠 방법으로 적합도를 평가하였으며 교배확률은 60%, 돌연변이 발생확률은 1%로 적용되었다. 유전자 알고리즘은 확률론적 모형으로 지역 해에 빠질 수 있는 위험성을 가질 수 있다. 그러므로 본 연구는 모형 종료 조건(stop rule)을 최적해 선택의 과정을 반복적으로 수행하며 하나의 세대에 대한 최소값이 일정한 세대 진행에도 불구하고 값이 개선되어지지 않는 경우를 모형의 종료 조건(stop-rule)으로 채택하였다. 본 연구에서는 50,000회의 세대 진행을 그 기준으로 하였다.

4. 적용 및 결과

본 연구에서 제안한 기법을 Ozger의 가상관망과 국내 A시 B배수분구 상수관망에 적용하여 최적의 압력계 위치 조합을 산정해 보았다. Fig.3의 Ozger의 가상관망은 절점 13개, 관 21개, 저수지 1개 구성되어 있으며 간략화된 배수분구 형상을 가지는 관망이라 하겠다. 국내 A시에 위치한 B배수분구는 소블록 단위 배수분구로서 절점 61개, 관 89개, 저수지 1개로 구성되어 있으며 전형적인 루프형의 특

성을 가지는 관망으로 기본수요량이 적은 주거지역의 상수관망을 대표할 수 있는 관망이라 사료된다.

모의 발생된 절점별 기본수요량에 대한 상수관망 내 압력변화량을 영향지수행렬을 이용하여 산정하였고 적정 확률분포형을 결정하기 위해 Table.2와 같이 적합도 검정을 실시하였다. 두 상수관망 모두 정규분포 및 대수정규분포에 적합함을 확인하였지만 비정상상태에서 유량변화를 Emergency 상태까지 고려하였기 때문에 극치값에 대해 잘 표현할 수 있는 대수정규분포형을 최적분포형으로 선정하는 것에 대해 무방하다고 판단된다.

Table.2 Verification of PDF for Pressure Influence Matrix

Node	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

4.1 Sample Network

모형을 실제 관망에 적용하기 앞서, 간단한 구조를 가지는 임의 가상 관망에 적용하여 모형의 적용성을 평가해 보았다. 여기에 사용된 관망은 Ozger (2003)가 PDA(pressure-driven Analysis) 모형을 평가하기 위해 사용한 관망으로 각 절점의 기본수요량이 크고 구조가 간단하여 모형의 적용성을 평가하는데 매우 편리한 장점을 가지고 있는 관망이다. 또한 절점에서 비정상상태가 발생하였을 시 인접 절점에 영향력이 직접적으로 전달되는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징은 상관계수에 영향을 미치게 되며 상관계수가 1 또는 -1에 가까운 값을 가지게 된다. 상관계수가 1과 -1에 가까울수록 각 절점들이 유량변화 발생 절점에 대해 직접적인 영향을 받는다고 판단할 수 있으며 절점 사이에 손실되는 정보

량이 적다고 해석할 수 있다.

각 절점 사이의 정보전달량 합이 차이가 적고, 절점의 개수가 많아 질 경우 압력계 개수 제한에 따른 총 정보량이 조합을 결정하기 어렵기에 유전자 알고리즘을 이용하여 실무자에게 정량화된 결과로 최적 조합을 제시하는 것이 바람직하다. Table.3은 압력계 설치 개수별 최적위치 조합 산정결과이며 Fig.5는 압력계를 5개 설치할 경우 채택된 최적 모니터링 위치 조합이다.

Table.3 Optimal combination according to numbers of the installed pressure sensors of Sample network

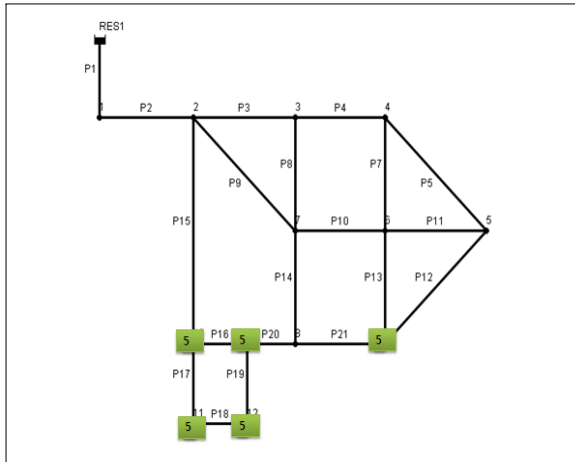


Fig.5 Sample network by Ozger

Combination	Nodes	Total information
1	12	53.094
2	11, 12	105.565
3	9, 11, 12	151.541
4	9, 10, 11, 12	197.704
5	9, 10, 11, 12, 13	238.405

4.2 A시 B배수관망

A시 B배수관망은 전형적인 loop형 관망으로 일반적인 급·배수구역의 형상을 대변하는 관망이라 할 수 있다. 해당 관망은 기본수요량이 대체적으로 작고 각 절점과 거리가 짧아 손실수두가 작게 발생하며 모형을 통해 최적 압력 계측 위치를 확인한

결과 기존의 결과와 다른 관 말단 및 중심부의 절점에서 최적 계측 위치가 선정되었다. 수지형에 비해 loop형 관망이 상대적으로 작은 상관계수를 보였으며 유량변화에 대한 절점들 간의 정보전달량보다 각 절점이 가지는 정보량인 한계엔트로피에 민감한 것으로 나타나 배수블럭으로 유량이 유입되는 절점 근처가 아닌 다른 특정 절점이 보다 큰 정보량을 가질 수 있음을 확인할 수 있었다. Table.4은 압력계 설치 개수별 최적 위치 조합 산정결과이며 Fig.6는 압력계를 5개 설치할 경우 채택된 최적 모니터링 위치 조합이다.

Table.4 Optimal combination according to numbers of the installed pressure sensors of B block in A city



Fig.6 WDS of B district in A city

Combination	Nodes	Total information
1	690	416.234
2	678, 690	821.545
3	678, 682, 690	1214.131
4	678, 690, 722, 730	1586.630
5	672, 678, 681, 690, 700	1958.578

4.3 최대 압력계 설치 가능 조합 산정

두 대상관망으로 최대의 정보량을 얻을 수 있는 압력계 설치 조합을 산정해 보았다. 두 대상관망에서 선택된 절점의 수가 많아질수록 얻을 수 있는

정보량이 증가하다 감소하는 경향을 보임을 Fig.7~Fig.8을 통해 확인 할 수 있었다. Fig.7의 Sample network의 경우 최대 정보량을 얻을 수 있는 압력계 조합 개수는 8개, Fig.8의 A시 B배수관망은 32개로 나타났으며 최대정보량을 얻을 수 있는 절점 개수 이상 압력계 설치 시 절점간 중복되는 정보량에 의해 결국 총 정보량이 줄어들어 압력계 설치 효율 측면에서 불리한 결과를 가져오는 것으로 나타났다.

일반적인 급배수관망 유지관리에 있어서 총 정보량이 가장 큰 절점들의 조합에 압력계를 모두 설치하는 것은 비현실적이므로 주어진 조건에 따라 적절한 압력계 설치 개수를 조정할 필요는 있다. 이러한 제약조건에 따라 압력계를 급배수관망에 설치할 경우 설치 위치별 절점들의 유기적 상관성이 고려된 절점의 조합이 중요하다.

정보전달량의 크기 순위대로 최적 모니터링 절점을 제안한 기존 연구(정건희 등, 2009) 방식과 각 절점의 유기적인 상관관계까지 고려된 본 연구의 최적 조합 절점이 다를 수 있음을 확인하기 위해 총 엔트로피를 기준으로 sample network에 적용하여 최적 압력 계측 위치를 Table.5에 제시하였다. 본 모형이 기존 연구 보다 총 정보량이 큰 최적 압력 계측 조합을 제시할 수 있는 장점을 가지고 있다는 것을 Table.5를 통해 입증하였다.

Table.5 Comparison of the installed optimal pressure sensors combination based on total information

Rank / Combination	Node	Total Entropy	Chung(2009) ㉠		This study ㉡		Remarks (㉡-㉠)
			Nodes of combination	Total information	Nodes of combination	Total information	
1	12	53,094	12	53,094	12	53,094	0
2	11	52,671	11, 12	105,565	11, 12	105,565	0
3	8	46,904	8, 11, 12	138,866	9, 11, 12	151,541	12,675
4	10	46,337	8, 10, 11, 12	178,363	9, 10, 11, 12	197,704	19,341
5	9	46,139	8, 9, 10, 11, 12	217,672	9, 10, 11, 12, 13	238,405	20,733

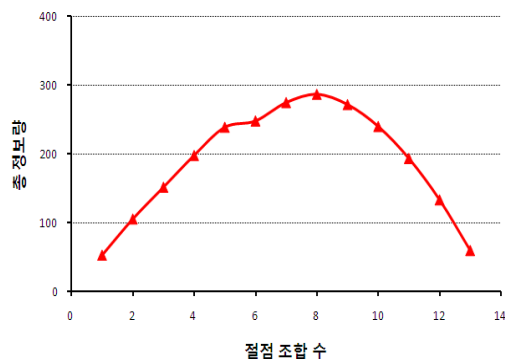


Fig.7 Total information curve of sample network by Ozger

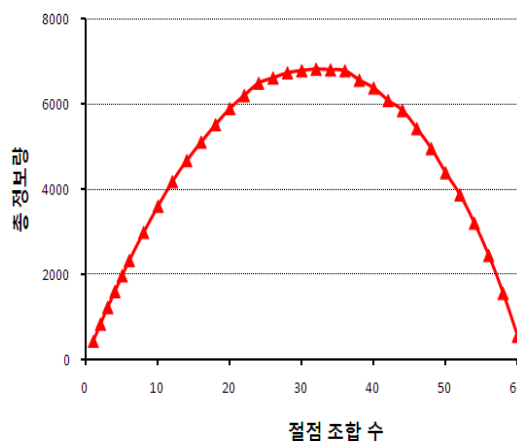
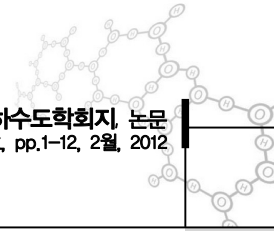


Fig.8 Total information curve of WDS of B district in A

5. 결론

본 연구에서는 기본적인 상수관망의 자료, 정보이론인 엔트로피 이론을 이용하여 상수관망의 비정상상태에서 각 절점간 영향력을 정량화 하였으며 최적 압력계측 위치 선정 과정에서 임의 선정된 각 절점의 유기적인 상관성까지 반영된 최대 정보량을 기준으로 최적 압력 계측 위치 조합 제안하였다. 또한, 최적의 조합을 찾는 과정에서 경우의 수가 증가함에 따라 발견적 해석 방법인 유전자 알고리즘을 최대 정보량을 갖는 해를 찾는 과정의 알고리즘으로 적용하여 최적의 조합을 선정하였으며 대단위의 상수관망에서 최적의 압력 계측 위치를 선정



함에 있어 본 모형을 적용함으로써 조합 결정에 필요한 시간을 줄일 수 있으며 기존 연구들 보다 합리적인 방법으로 최적 압력계측 위치 조합을 제안하였다고 판단된다. 본 모형의 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Ozger의 가상관망에 본 모형을 적용한 결과 엔트로피 기준이 제시한 관망에서 정보량을 가장 많이 받는 절점은 주로 관망 말단부에서 나타났으며 이 절점들은 상수관망 운영에 있어 중요한 절점으로 관의 상태를 파악할 수 있는 압력계를 설치하여 지속적인 계측이 이루어져야 할 절점이라 판단하였다. 이러한 결과는 Walski (1983)가 제안한 결과와 일치하며 관망의 상태를 가장 잘 파악할 수 있는 부근이라는 사실을 다시 한 번 입증하였다.

(2) 전형적인 배수구역의 특징을 가지는 A시 B배수구역 상수관망은 엔트로피 이론을 적용시켜 얻은 결과를 가지고 판단할 때 관말단부 외에 관망 중심부에서도 상수관망의 상태를 파악할 수 있는 절점이 존재할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었으며 이러한 사실은 상수관망을 평가할 때 객관적인 기준을 통해 최적 모니터링 위치를 선정해야 된다는 것을 뒷받침하고 있다.

최적의 압력계 설치 조합은 엔트로피 기준에 의해 전체 시스템으로부터 제공받는 총 정보량이 가장 큰 절점들로 우선으로 설치해야 하며, 특히 설치 예산문제와 같은 초기 제약조건이 존재할 시 본 연구에서 제안한 모형이 보다 객관적인 기준으로 상수관망에서 계측기 우선 설치 순위를 운영자에게 제시할 수 있을 것이며, 상수관망에 압력계를 설치하기 위한 효율적인 의사결정 기준으로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 건설기술혁신사업 “수직형 정수처리시설이 도입된 분산형 용수공급시스템

구축” 연구단(전문기관 : 한국건설교통기술평가원)의 지원을 받아 연구 되었습니다.

참고문헌

권상우, 유철상 (2001) 엔트로피 방법을 이용한 수질측정망의 평가, 대한토목학회논문집, 21(5B), pp.501-509.

유철상, 정광식 (2002) 엔트로피 방법을 이용한 강우관측망 평가, 대한토목학회논문집, 22(4B), pp.447-457.

이경훈, 이삼노, 문병석 (1994) 1일 상수도 급수량의 변화와 확률분산 모형에 관한 연구, 한국수자원학회 학술발표회논문집, pp.405-409.

정건희, 장동일, 유도근, 전환돈, 김중훈 (2009) 엔트로피 이론을 이용한 상수관망의 최적 압력계측 위치 결정, 한국수자원학회논문집, 42(7), pp.537-546

조문수 (2007) u-city 구축을 위한 발전된 상수관망 운영시스템 개발, 석사학위논문, 고려대학교.

환경부 (2008) 상수도통계 (2008).

환경부 (2008) 상수도 수요량 예측 업무편람 (2008).

환경부 (2010) 상수도시설기준 배수시설편

A. Kusmulyono and I. Goulter (1994) Entropy principles in the prediction of water quality values at discontinued monitoring stations, Stochastic Hydrology and Hydraulic, 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, 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., 124(6), pp.334-344.

Caselton, W.F. and Husain, T. (1980) Hydrologic networks: Information transmission, J. of Water Resour. Plan. Manage., 106, pp.503-529.

Chapman, T.G. (1986) Entropy as a measurement of hydrologic data uncertainty and model performance, J. of Hydrology, 85, pp.307-324.

Goldberg, D.E. (1990) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, M.A.

Goulter, I. and Bouchart, F. (1990) Reliability-constrained pipe network model, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(2), pp.211-229.

- Holland, J.H. (1975) Adaption in Natural and Artificial Systems. Univ. MI Press.
- Jonathan W. Berry etc. (2005) Sensor Placement in municipal water networks, *J. of Water Resour. Plan. Manage.*, 131(3), pp.237~243.
- J. Xu etc. (2008) Identify sets of key nodes for placing sensors in dynamic water distribution networks, *J. of Water Resour. Plan. Manage.*, 134(4), pp.378~385.
- 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, 4(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*, 117(5), pp.595-614.
- Marco Propato, O. Piller and J. Uber (2005) A sensor location model to detect contaminations in water distribution networks, In *Proc. World Water and Environmental Resources Congress*. ASCE, 2005.
- Marco Propato (2006) Contamination warning in water networks: General mixed-integer linear models for sensor location design, *J. of Water Resour. Plan. Manage.*, 132(4), pp.225~233.
- Ozkul, S., Harmancioglu, N.B., and Singh, V.P. (2000) Entropy-based assessment of water quality monitoring networks, *J. of Hydraulic Engineering*, 5(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.*, 44, pp.383-396.
- Walski, T.M. (1983) Technique for Calibrating Network Model, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 109(4), pp.360-372.
- W.K. Ang and P.W. Jowitt (2005) Some new insights on informational entropy for water distribution networks, *Engineering Optimizatio*, 37(3), pp.277-289.
- Xu, C. and Goulter, I. (1998) Probabilistic model for water distribution reliability, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(4), pp.218-228.
- Xu, C. and Goulter, I. (1999) Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(6), pp.352-362.
- Yang, Y. and Burn, D.H (1994) An entropy approach to data collection network design, *J. of Hydrology*, 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*, 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*, 36, pp.780-788.
- Yu, G., and Powell, R.S. (1994) Optimal design of meter placement in water distribution systems, *Int. J. Syst. Sci.*, 25(12), pp.2155-2166.