하수관망 내 모니터링 지점 선정 기법

Method to Determinate Monitoring Points in Sewer Networks

이정호* · 전환돈** · 박무종***

Lee, Jung Ho · Jun, Hwan Don · Park, Moo Jong

Abstract

In order to manage a sewer system effectively, flow conditions such as flux, water quality, Infiltration and Inflow (I/I), Combined Sewer Overflows (CSOs), etc need to be monitored on a regular base. Therefore, in sewer networks, a monitoring is so important to prevent the river disaster. Monitoring all nodes of an entire sewer system is not necessary and cost-prohibitive. Water quality monitoring points that can represent a sewer system should be selected in a economical manner. There is no a standard for the selection of monitoring points and the quantitative analysis of the observed data has not been applied in sewer system. In this study, the entropy method was applied for a sewer network to evaluate and determine the optimal water quality monitoring points using genetic algorithm. The entropy method allows to analyze the observed data for the pattern and magnitude of temporal water quality change. Since water quality measurement usually accompanies with flow measurement, a set of installation locations of flowmeters was chosen as decision variables in this study.

Key words : Sewer networks, Water quality monitoring, Entropy, Genetic algorithm

요 지

하수관거시스템(sewer system)의 효율적인 관리를 위해서는 관거 내의 유량, 수질, 불명수 및 CSOs (Combined Sewer Overflows) 등에 대한 지속적인 모니터링이 필요하며, 따라서 하수관망에서의 모니터링은 하천 방재 측면에서 매우 중요한 요소이다. 그런데, 하나의 유역 하수관거시스템에서 모든 지점에 대한 모니터링은 예산의 제약으로 인하여 불가능하다. 따라서 모니터링 지점들은 주어진 예산 내에서 최대의 효율적인 자료의 획득이 가능한 지점들로서 선정되어야 한다. 그럼에도 불구하고 모니터링 지점의 선정에 대한 명확한 기준 및 선정된 모니터링 지점에서 획득된 자료에 대한 정량화된 평가 방법에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 수질 자료의 효율적인 모니터링을 위하여 하수관거시스템 내에서 수질 측정지점의 선정에 대하여 유전자알고리즘을 이용한 최적화 방법을 제시하였다. 제시된 수질측정지점 선정 모형은 엔트로피 방법을 이용하여 지점별 획득 자료에 대하여 정량적으로 평가하며, 수질측정지점의 선정에 따른 수집 자료에 대한 총 엔트로피의 최대화를 목적함수로 한다. 여기서 수집 자료들에 대한 엔트로피 평가는 자료의 변동 특성을 반영하며, 자료의 획득 가능한 범위를 의미한다. 이때 수질의 측정은 유량의 관측과 동일한 지점에서 이루어져야 하므로, 수질측정지점 선정에 대한 제약 조건은 주어진 예산에 따른 유량계 설치 가능 개수로서 이루어졌다.

핵심용어 : 하수관망, 수질모니터링, 엔트로피, 유전자알고리즘

1. 서 론

산업화로 인한 각종 오염물질의 지하수, 호소, 강, 바다 등으로의 유입량이 증가됨에 따라 수질오염문제의 심각성은 날로 더해지고 있다. 이것은 외수범람에 의한 하천방재 측면 이외의 환경적 재앙으로서의 하천방재에 관한 사항으로 이러한 현 시점에서 효과적 수질관리를 위하여 수질오염측정망을 구축하여 지속적으로 모니터링 하는 것이 중요하다. 70년대 부터 급격한 산업화로 인해 수질오염문제가 심각한 상황에

이른 우리나라에서도 그 중요성을 인식하여 수질관리와 장기적인 대책 수립을 위해 하천수, 상수원수, 호소수, 도시관류 등에 수질측정지점을 선정하여 운영하고 있다(환경부, 2000). 또한 최근에 들어서는 관거 내의 유량, 수질, 불명수 및 CSOs(Combined Sewer Overflows) 등에 대한 효율적인 관리를 위해서 하수관망 내에서의 지속적인 모니터링이 중요시 되고 있다. 특히, 불명수는 유량과 수질의 측정치를 통하여 간접적으로 산정되어지며, CSOs의 경우 강우 초기 하천으로의 월류수가 포함하고 있는 비점오염원으로부터의 오염 정도

*정회원 · 한밭대학교 토목공학과 전임강사 (E-mail : leejh@hanbat.ac.kr)

**정회원 · 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수

***정회원 · 한서대학교 토목공학과 교수 (교신저자)

를 파악하는 것이 중요한 만큼 유량과 수질의 모니터링은 하수관거의 유지관리 및 하천 환경오염 방제를 위하여 매우 중요하다. 하지만 아직까지 하수관망에서의 수질 모니터링 지점의 선정에 대한 정량화된 기준이 제시되지 않고 있으며, 본 연구는 이러한 측면에서 정량화된 하수관망 모니터링 지점 선정에 관한 새로운 기법을 제안하고자 한다.

수질측정망에 관한 국내의 연구로는 오경두(1989)가 수질측정망 최적설계기법에 관하여 평가한 바 있으며, 한상욱(1988)이 수질측정망에 있어서 고려해야 할 요소에 대한 고찰한 바 있다. 최근의 국내 수질측정망에 관한 연구로는 권상우와 유철상(2001)이 엔트로피 방법을 이용하여 수질측정망을 평가한 연구가 있다. 박수영 등(2007)이 유전자 알고리즘을 이용한 수질측정망 설계에 관한 연구, 왕수균 등(2005)의 한강수계 수질측정망 개선을 위한 목적 지향 설계 방안에 관한 연구 등이 있다. 그러나 기존 수질측정망에 관한 연구들은 대체적으로 자연하천유역이나, 하수처리장의 수질측정에 관한 연구였으며, 하수관망 내에서의 모니터링에 관한 정량화된 선정 기준은 마련되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 하수관거 시스템에서의 관망 내 수질 측정 모니터링 지점의 선정에 있어서 정량화된 기준 수립을 위하여 엔트로피(entropy) 방법을 이용하였다. 엔트로피 방법의 변량 중 하나인 총 엔트로피는 선택되는 모든 지점에 대해 정보교환의 과정에서 총체적 정보의 양을 의미하고, 유역으로 보내지는 어떤 신호에 대한 불확실성의 감소정도를 의미한다. 따라서 기존의 엔트로피 연구들은 총 엔트로피가 최대가 되는 측정지점들의 조합을 찾고자 하는데 목적을 두었다. 방법론적으로 Al-Zahrani and Husain(1998)은 한계엔트로피가 큰 순서대로, 권상우와 유철상(2001)은 한 지점만 선택했을 때 총 엔트로피 값이 큰 순서대로 차례로 지점을 선택하여 전체지점에서 이와 같은 방법들로 지점을 선택했을 때의 총 엔트로피가 가장 큰 지점을 최대 엔트로피 지점으로 보았다. 그러나 이와 같은 기존의 방법들에 의해 선정된 지점은 한 지점에서의 엔트로피 값들만을 고려하여 선택된 조합이므로 전체 지점에서의 최대의 엔트로피를 갖는 조합을 간과할 수 있으므로 최대의 총 엔트로피를 보장하지 못한다. 따라서 최대의 총 엔트로피를 갖는 지점 선정에 있어서 최적탐색 방법이 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 위의 문제들과 관련하여 수질측정지점의 선정 시, 엔트로피 방법을 적용하여 하수관망 내 최적 수질측정지점의 선정에 대하여 정량적인 평가를 함과 동시에 예산제약으로 인하여 수질측정지점의 수가 제한 될 경우, 제한된 지점들에서 최대의 효율적인 자료수집이 가능한 최적화된 수질 측정지점을 선정할 수 있는 최적화 방법을 제안하였다.

2. 엔트로피 이론

Shannon and Weaver(1949)에 의해 개발된 정보이론(information theory)에서의 엔트로피는 어떤 신호가 가지고 있는 정보용량으로 정의되고 있다. 본 연구에서 정의하는 엔트로피는 이 정보이론에서의 정의를 따른다. 이 개념에 있어서, 정

보의 양과 더불어 중요한 것은 정보교환 과정이다. 신호가 보내짐으로써 정보교환이 이루어지고, 신호 자체가 가지고 있는 정보의 양이 많아서 그 자체가 갖고 있는 불확실성을 감소시킬 정도로 많아지면 불확실성의 감소 정도에 따른 간접적인 정보의 양을 측정할 수 있다. 즉, 엔트로피는 어떠한 체계 내에서 그 신호에 대한 정보를 수치로 나타내는 것이다. 따라서 엔트로피가 크다는 것은 그 지점에서의 불확실성의 감소정도가 크다는 말이고, 같은 유역 내에서 받아지는 동일 신호에 대해 정보의 양이 많이 있다는 것을 뜻한다.

정보이론에서의 엔트로피는 한계엔트로피(marginal entropy), 조건부 엔트로피(conditional entropy), 정보전달(transinformation), 결합엔트로피(joint entropy) 등과 같은 4가지 변량을 정의하고 측정하여 이용하게 된다. 우선 한계엔트로피는 Shannon and Weaver(1949)에 의해 이산무작위변량 $X = \{x_n\}$ 의 확률 $p(x_n)$ 분포가 가지는 엔트로피 량으로 정의되었다. 한계엔트로피(marginal entropy) $H(X)$ 는 X 가 가지고 있는 불확실성 또는 정보용량을 의미하며 다음과 같이 전개된다.

$$H(X) = - \sum_{n=a}^b p(x_n) \ln p(x_n) \quad (1)$$

$$\sum_{n=a}^b p(x_n) = 1 \quad (2)$$

여기서 a , b 는 X 의 하한과 상한을 의미하고, $p(x_n)$ 은 x_n 의 발생확률이며, n 은 X 의 범위 구간의 개수이다.

주어진 두 변량 Y 와 X 의 조건부 엔트로피(conditional entropy) $H(X|Y)$ 는 Y 를 알고 있는 경우 X 에 남아있는 불확실성, 즉 Y 의 정보로 나타낼 수 없는 X 의 정보의 양을 나타내고, 이것은 또한 X 와 Y 사이의 정보전달과정 동안의 정보의 손실로 해석될 수 있는데(Yang and Burn, 1994) 이것은 음과 같다.

$$H(X|Y) = - \sum_{n=a}^b \sum_{m=a}^b p(x_n \cdot y_m) \ln p(x_n|y_m) \quad (3)$$

여기서, $p(x_n, y_m)$ 은 $X = \{x_n\}$ 과 $Y = \{y_m\}$ 의 결합 확률이고, $p(x_n|y_m)$ 는 주어진 Y 와 X 의 조건부 확률이다. n 과 m 은 각각 X 와 Y 의 범위 구간의 개수이다.

주어진 Y 에 의한 X 의 불확실성의 감소 또는 X 와 Y 사이의 정보전달(transinformation)은 다음의 식과 같이 정의된다.

$$T(X, Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (4)$$

M 개의 독립변수 $X(X_1, X_2, \dots, X_M)$ 의 변수를 가진 다변량의 경우, 이 변수들이 종속적 관계에 있다는 가정으로 Harmancioglu and Alpaslan(1992)는 결합엔트로피를 다음과 같이 나타내었다.

$$H(X_1, X_2, \dots, X_M; \Delta x_1, \dots, \Delta x_M) = H(X_1; \Delta x_1) + \sum_{m=2}^M H(X_m | X_1, \dots, X_{m-1}; \Delta x_1, \dots, \Delta x_{m-1}) \quad (5)$$

여기서, m 은 X 의 범위구간의 개수이다.

수문학적 시계열에 이러한 엔트로피 개념을 적용하기 위해 서는 연속 무작위 변수 X 가 확률밀도함수(PDF) $f(x)$ 를 따라야 한다. Amoroch and Espildora(1973)는 확률밀도함수 중 대수정규분포를 따르는 X 와 Y 에 대해 일정하게 고정된 간격 Δx 를 적용하여 한계엔트로피, 조건부 엔트로피, 정보전달을 유도하였다. Chapman(1986)는 변수의 범위에 비례하는 간격 $\Delta x/x$ 를 적용하여 한계엔트로피와, 조건부엔트로피를 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$H(X; \Delta x/x) = 0.5 \ln(2\pi e \sigma_z^2) - \ln(\Delta x/x) \quad (6)$$

$$H(X|Y; \Delta x/x) = 0.5 \ln[(2\pi e \sigma_z^2)(1 - p_{zw}^2)] - \ln(\Delta x/x) \quad (7)$$

여기서, σ_z 는 $z(= \ln x)$ 의 표준편차이고, p_{zw} 는 z 와 $w(= \ln y)$ 의 상관계수를 나타낸다.

위의 두 식을 식 (4)에 넣으면 정보전달은 다음과 같이 유도된다.

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

3. 모니터링 지점 선정 기법

본 연구에서는 하수관망에서의 수질측정망을 선정함에 있어, 엔트로피 방법을 적용하여 선택된 지점들의 조합에 따른 수질측정망이 하수관거시스템의 수질변동 특성을 가장 잘 반영하는 최적의 조합을 찾고자 하였다. 즉, 최대의 총 엔트로피를 갖는 지점이자 시스템 내의 수질의 변동성에 대한 최대의 정보를 얻을 수 있는 지점들의 조합을 찾는 것이다. 따라서 본 연구에서의 수질 모니터링 지점 선정에 위한 최적화의 목적함수는 Husain(1989)와 Al-Zahrani and Husain(1998)에 의하여 정의된 선정 지점들에 대한 총 엔트로피를 최대화하는 것으로서 다음의 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} MAXI_{Total}(X_1, X_2, \dots, X_m; X_i, X_j, \dots, X_k) &= MAXI_{Total} \\ &= MAX[H(X_i) + H(X_j) + \dots + H(X_k) + \sum_{x=1}^{m-k} \sum_{y=1}^k T(X_x, X_y)], \quad x \neq y \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, m 은 유역의 지점의 총 개수이고, k 는 총 m 개의 선택 가능한 지점 중에 선택된 지점의 총 개수이다. k 개의 선택된 지점($i, j, \dots, k$)은 선택된 지점의 총 엔트로피인 $I_{Total}(X_1, X_2, \dots, X_m; X_i, X_j, \dots, X_k)$ 을 최대화시키는 조합이다. $H(X_i) + H(X_j) + \dots + H(X_k)$ 는 수질측정지점으로 선택된 지점들의 한계엔트로피의 합이고, $\sum_{x=1}^{m-k} \sum_{y=1}^k T(X_x, X_y)$ 는 선택된 지점과 선택되지 않은 지점 사이의 정보전달의 합 또는 수질측정망 선택지점의 정보로 얻을 수 있는 선택되지 않은 지점의 정보의 양이라 할 수 있다. 또한 제약조건은 모든 엔트로피는 양의 값을 갖는다는 것이다.

총 엔트로피가 최대가 되는 최적조합을 탐색하기 위한 모형

하수관망 내 모니터링 지점 선정 기법

으로 본 연구에서는 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 선택하였다. 수질 모니터링 지점들의 선정에 위한 수질평가 항목은 BOD(Biochemical Oxygen Demand)와 TSS(Total Suspended Solids)를 최초 선택하였지만, 기존의 모니터링 지점 선정 방법은 한계엔트로피 또는 총 엔트로피 값의 순서대로 지점을 선정하고 있으며, 최적 조합에 따른 모니터링 지점의 선정에 있어서 BOD 항목은 방법별 차이가 모호하였다. 따라서 본 연구에서는 방법별 차이가 분명히 나타나는 TSS를 평가항목으로 선정하였다. 정보량의 척도가 되는 TSS의 산정은 SWMM(Storm Water Management Model) 내부에 설정되어 있는 오염물 축적식 및 오염물 쓸림 식 중에서 Tshirintzis and Hamid(1988)이 제안한 방법을 사용하였으며 각각은 다음의 식 (10) 및 식 (11)과 같다.

$$L_t = QFACT(3) \times DD^{QFACT(2)} \quad (10)$$

$$M_t = RCOEF \times Q_t^{WASHPO} \quad (11)$$

여기서 L_t 는 시간 t 에서의 오염물의 축적량(kg/ha), DD 는 선행무강우일수(days), $QFACT(2)$ 는 축적(build-up)매개변수의 상관계수, $QFACT(3)$ 은 축적(build-up)매개변수의 상관계수이다. 또한 M_t 는 시간 t 에서 유출되는 오염 부하(kg/sec), Q_t 는 유출률(m³/sec), $WASHPO$ 은 쓸림(wash-off)매개변수의 상관계수, $RCOEF$ 은 쓸림(wash-off)매개변수의 상관계수이다.

4. 적용 및 결과

4.1 대상유역

본 연구에서는 가상유역에 대하여 Al-Zahrani and Husain(1998)의 한계엔트로피의 순서에 따른 조합, 권상우와 유철상(2001)의 한 지점만 선택했을 때 총 엔트로피의 순서에 따른 조합과 본 연구에서 제안한 최적조합 방법에 따른 결과를 비교 분석하였다. 또한 실제유역에서의 하수관거 시스템에 대하여 예산 제약시 최대의 수질측정 정보 획득이 가능한 최적

그림 1. 가상유역 하수관망도

그림 2. 하계배수분구 하수관망도

수질측정 지점의 조합을 유전자알고리즘을 이용하여 선정하였다.

그림 1의 가상유역은 유역면적이 28.7 ha이고, 모니터링 가능 지점으로 13개의 맨홀 지점들이 존재한다. 또한 실제유역은 서울시 노원구에 위치한 하계유역으로 그림 2와 같으며

유역면적은 161 ha로 80개의 모니터링 가능 지점들이 존재한다. SWMM을 이용하여 수질 변동성을 모의하기 위하여 두 지역 모두 2002년부터 2008년까지 수집된 우이관측소의 강우자료를 이용하였다. SWMM을 실행하여 수질 변동성을 모의하였으며, 각 지점의 대표 TSS는 결과 값의 평균값을 이용하였다.

4.2 가상유역에 대한 적용 결과

엔트로피의 한계엔트로피와 정보전달을 이용하여 아래의 표 1과 같이 정보행렬을 만들었다. 표 2는 한계엔트로피 및 한 지점만 선택했을 때 총 엔트로피에 따른 지점 별 순위를 나타낸다. 다음의 표 3은 각 방법별 순위에 따라서 총 엔트로피를 산정한 결과를 나타낸다.

적용 결과 그림 3에서와 같이 세 가지 방법 모두 선택한 지점의 수를 늘릴수록, 총 엔트로피의 값이 커지는 경향을 보이다가 어느 지점 이후부터는 감소하는 경향을 보였다. 여기서 optimal method는 최적화 방법, Current method 1은 한계엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 지점을 결합하는 방법, Current method 2는 각 지점의 총 엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 지점을 결합하는 방법을 나타낸다. 최대 총 엔트로피 값을 비교했을 때 최적화 방법을 이용한 결과의 최대 총 엔트로피 값이 가장 크게 나옴을 확인 할 수 있었고,

표 1. 가상유역의 13개 지점에 대한 정보행렬

(TSS)	정 보 행 렬												
	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9	J-10	J-11	J-12	J-13
J-1	4.243	0.953	1.151	1.195	1.343	1.222	0.517	0.869	0.839	0.902	0.377	0.402	0.246
J-2	0.953	3.767	0.713	0.738	0.914	1.170	0.463	0.653	0.639	1.006	0.411	0.306	0.221
J-3	1.151	0.713	4.334	1.355	1.168	0.957	0.405	0.843	0.799	0.657	0.286	0.370	0.191
J-4	1.195	0.738	1.355	4.310	1.214	0.993	0.429	0.863	0.822	0.696	0.302	0.384	0.203
J-5	1.343	0.914	1.168	1.214	4.197	1.198	0.546	0.901	0.875	0.903	0.366	0.411	0.249
J-6	1.222	1.170	0.957	0.993	1.198	3.845	0.559	0.873	0.849	1.018	0.395	0.388	0.251
J-7	0.517	0.463	0.405	0.429	0.546	0.559	3.448	0.639	0.701	0.666	0.369	0.577	0.509
J-8	0.869	0.653	0.843	0.863	0.901	0.873	0.639	2.995	1.321	0.702	0.295	0.534	0.263
J-9	0.839	0.639	0.799	0.822	0.875	0.849	0.701	1.321	2.992	0.730	0.312	0.575	0.290
J-10	0.902	1.006	0.657	0.696	0.903	1.018	0.666	0.702	0.730	3.593	0.496	0.405	0.311
J-11	0.377	0.411	0.286	0.302	0.366	0.395	0.369	0.295	0.312	0.496	3.648	0.620	0.752
J-12	0.402	0.306	0.370	0.384	0.411	0.388	0.577	0.534	0.575	0.405	0.620	2.837	0.842
J-13	0.246	0.221	0.191	0.203	0.249	0.251	0.509	0.263	0.290	0.311	0.752	0.842	3.476
지점 별 총엔트로피	14.258	11.953	13.228	13.506	14.286	13.720	9.828	11.751	11.744	12.086	8.629	8.651	7.804

표 2. 한계엔트로피 및 한 지점만 선택했을 때 총 엔트로피에 따른 지점 별 순위

	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9	J-10	J-11	J-12	J-13
한계 엔트로피	4.243	3.767	4.334	4.310	4.197	3.845	3.448	2.995	2.992	3.593	3.648	2.837	3.476
지점 별 총엔트로피	14.258	11.953	13.228	13.506	14.286	13.720	9.828	11.751	11.744	12.086	8.629	8.651	7.804
한계엔트로피 순위	3	6	1	2	4	5	10	11	12	8	7	13	9
총엔트로피 순위	2	7	5	4	1	3	10	8	9	6	12	11	13

표 3. 선정 수에 따른 최대 총 엔트로피 값과 선정지점

선택된 지점수	선택된 지점	MAX I_{Total}	선택된 지점수	선택된 지점	MAX I_{Total}	선택된 지점수	선택된 지점	MAX I_{Total}
1	5	14.286	1	3	13.228	1	5	14.286
2	1,5	25.858	2	3,4	24.024	2	1,5	25.858
3	1,5,6	34.737	3	1,3,4	33.591	3	1,5,6	34.737
4	1,4,5,6	41.630	4	1,3,4,5	40.426	4	1,4,5,6	41.630
5	1,3,5,10,13	47.419	5	1,3,4,5,6	45.405	5	1,3,4,5,6	45.405
6	1,3,5,6,7,11	52.231	6	1,2,3,4,5,6	48.382	6	1,3,4,5,6,10	49.137
7	1,2,3,5,9,11,13	55.714	7	1,2,3,4,5,6,11	52.739	7	1,2,3,4,5,6,10	50.103
8	1,2,3,4,7,9,11,13	58.573	8	1,2,3,4,5,6,10,11	53.467	8	1,2,3,4,5,6,8,10	53.467
9	1,2,3,4,7,8,10,11,13	59.749	9	1,2,3,4,5,6,10,11,13	56.422	9	1,2,3,4,5,6,8,9,10	48.442
10	1,2,3,4,7,8,10,11,12,13	59.521	10	1,2,3,4,5,6,7,10,11,13	57.323	10	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	48.420
11	1,2,3,4,5,7,8,10,11,12,13	57.776	11	1,2,3,4,5,6,7,8,10,11,13	55.272	11	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12	48.366
12	1,2,3,4,5,7,8,9,10,11,12,13	53.714	12	1,2,3,4,1,5,6,7,8,9,10,11,13	50.662	12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	48.536
13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	47.684	13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	47.684	13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	47.684

(a) Optimal method

(b) Current method 1

(c) Current method 2

그림 3. 지점 조합에 따른 총 엔트로피

그 때에 선택된 지점의 수는 9개의 지점이다. 하수관거시스템 내에 수질 측정망을 설치함에 있어 적은 개수의 지점으로 관망에 대한 전체적인 수질의 특성을 가장 잘 파악하기 위해 엔트로피 이론을 이용하여 적용하는 것이므로, 가장 효과적인 수질측정지점 선정은 적은 개수의 지점의 선택으로 최대의 총 엔트로피를 얻는 지점이다. 그런데, 한계엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 엔트로피를 산정한 경우, 최적화 방법과 비교하였을 때 선택된 지점의 수가 더 많고, 총 엔트로피의 값은 더 작음을 확인할 수 있었다. 그렇기 때문에 최적화 방법을 사용한 경우가 한계엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 엔트로피를 산정한 방법보다 더 효과적으로 수질측정지점을 선정할 수 있을 것이다. 또한 각 지점의 총 엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 엔트로피를 산정한 방법의 결과를 보면, 최대 총 엔트로피 값을 갖는 지점의 수가 8개 지점으로, 최적화 방법을 이용했을 경우보다 더 적은 지점이 선정됨을 알 수 있었다. 그러나 최대 총 엔트로피 값은 꽤 많은 차이가 나기 때문에 비용대비 효율로 봤을 때 최적화 방법을 사용하는 것이 더 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다. 각 방법별 지점의 수 및 조합별 총 엔트로피 값을 정리하면 표 3과 같다.

4.3 실제 유역에 대한 적용 결과

본 연구에서는 실제 유역에 대한 적용 기법을 수립하기 위하여 그림 2의 실제유역에서의 80개 맨홀 지점에 대한 정보 행렬을 다음의 표 4와 같이 산정하였다.

위의 가상유역의 결과로부터 기존의 두 가지 방법과 비교하였을 때 최적화 방법을 사용하여 수질측정 지점을 선정하는 것이 비용대비 효율로 봤을 때 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 이를 검증하기 위해 실제유역에서 각 방법의 최대 총 엔트로피 값과 그 값을 갖는 지점과 그때의 수를 정리하면 표 5와 같다. 그 결과 최적화 방법과 한계엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 엔트로피를 산정한 방법을 비교했을 때, 선택 지점의 수가 더 많고, 총 엔트로피 값도 작기 때문에 최적화 방법이 더 나은 결과 값을 보여준다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최적화 방법과 각 지점의 총 엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 엔트로피를 산정한 방법을 비교했을 때, 선택된 지점의 수는 적지만, 그때의 총 엔트로피 값이 최적화 방법에 비해 작기 때문에 총 엔트로피의 최대값을 구하는 방법을 제시하고자하는 목적에 더 적합한 방법은 최적화 방법이다.

이와 같은 결과를 바탕으로 최적화 알고리즘을 이용하였을 때, 최대 총 엔트로피의 값이 보장된다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 위의 표 5의 최적화 방법에 의해 선정된 모든 지점에 수질측정망을 설치하면 하수관거시스템 내의 수질변동 특성을 가장 잘 모니터링 할 수 있겠지만, 실제 적용에 있어서 예산의 제약이 있기 때문에 사실상으로 이 지점들에 모두 설치하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 실제 유역에서 예산의 제약을 두어 수질 모니터링 지점의 수가 제한되었을 경우를 가정하여 최적화 알고리즘을 통해 최적의 수질측정지점을 선정 해 보았다.

실제유역의 경우 일반적인 하수관거정비사업을 토대로 계측기기의 설치에 대한 예산상의 제약이 주었겠다고 가정하여 해당 유역의 경우 최대 선정 가능한 모니터링 지점을 7개로 가정하였다. 이것은 최대의 엔트로피를 위한 총 41개 모니터링 지점들에 대하여 관측망을 설치하는 것은 실제 사업 시행

표 4. 하계 배수분구 80개 지점에 대한 정보행렬

	정 보 행 렬								
	1	2	3	4	.....	77	78	79	80
1	2.180	1.021	0.882	1.026	.....	1.074	0.544	1.040	1.051
2	1.021	2.970	0.937	1.163	.....	1.043	0.605	1.159	1.112
3	0.882	0.937	3.332	0.925	.....	0.984	0.910	0.957	0.992
4	1.026	1.163	0.925	2.977	.....	1.045	0.592	1.159	1.113
.	.	.	.	.		.	.	.	.
.	.	.	.	.		.	.	.	.
77	1.074	1.043	0.984	1.045	.....	2.942	0.617	1.077	1.137
78	0.544	0.605	0.910	0.592	.....	0.617	3.703	0.614	0.629
79	1.040	1.159	0.957	1.159	.....	1.077	0.614	3.201	1.133
80	1.051	1.112	0.992	1.113	.....	1.137	0.629	1.133	3.137
한계엔트로피	2.180	2.970	3.332	2.977		2.942	3.703	3.201	3.137
지점 별 총엔트로피	79.324	83.475	82.041	83.258	.....	86.554	57.584	85.339	87.525

표 5. 방법별 최대 총엔트로피 지점 조합

	Optimal method	Current method 1	Current method 2
선택된 junction	3,6,9,10,11,13,15,16,17,18,19,20,22, 23,24,27,28,30,32,33,36,37,38,39,41, 43,44,46,48,52,53,54,55,60,61,69, 71,72,73,79,80	3,6,7,9,10,11,12,13,14,16,17,18,19,2 0,21,22,23,25,27,30,31,32,33,34,35, 37,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56, 57,62,64,70,78,79,	1,3,10,11,20,21,23,26,28,29,30,32, 33,34,35,36,37,39,40,41,42,43,44,45, 49,52,53,57,58,59,60,61,62,64,65,66, 70,73,74,80,
선택된 junction수	41	43	39
최대 총 엔트로피	1765.465	1750.734	1726.845

표 6. 7개의 지점 선정 시 수질측정망의 조합

	Optimal method	Current method 1	Current method 2
선택된 junction	10,20,21,23,31,53,70	6,12,14,19,47,54,55	10,20,21,23,37,53,70
총 엔트로피	571.302	384.807	571.199

시 불가능하므로 본 연구에서는 예산상의 제약이 있다고 가정하여 모니터링 지점 수를 임의로 제한 것이다. 따라서 본 연구에서는 사업 시행 시 제한된 모니터링 지점 수에 대하여 최대의 엔트로피가 산정되는 최적의 지점 조합을 선정하게 된다. 다음의 표 6은 수질 자료의 수집에 따른 총 엔트로피가 최대가 되는 7개의 측정 지점에 대한 최적 조합을 산정한 결과를 나타낸다. 따라서 최적화 방법을 통해 선정된 지점들에서 최대의 총 엔트로피가 획득되기 때문에 이를 통한 수질측정지점의 최적결합은 수질 자료의 변동성을 가장 효과적으로 수집할 수 있는 지점의 결합이다.

5. 결 론

본 연구는 엔트로피 방법을 이용하여 하수관망 내 수질변동 특성을 가장 잘 반영하는 모니터링 지점 선정에 있어서 정량화된 하나의 방법론을 수립하였다. 엔트로피 방법을 이용한 모니터링 지점 선정에 있어서 기존의 두 가지 방법, 즉 한계엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 산정하는 방법과 각 지점 별 총 엔트로피가 큰 순서대로 순차적으로 결합하여 산정하는 방법에 대하여 본 연구에서는 최적해의 탐색을 통한 최대 효율의 모니터링 지점 조합을 선정할 수

있는 방법을 제시하였다. 이를 통하여 최대 총엔트로피 값과 그때의 산정된 지점의 수를 통해 비용대비 효율로 고려하였을 때 최적해 탐색모형이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이를 통해 우수관망 내 수질측정 지점을 선정할 수 있는 정량화된 평가기준을 제시하였다. 또한 예산제약으로 인하여 수질측정지점의 수에 제한이 있을 경우에, 제한된 지점들에서 최대의 효율적인 자료 수집이 가능한 최적화된 수질 측정망을 선정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 따라서 본 연구는 도시유역에서의 지속적인 하수관거시스템 관리 및 모니터링에 있어서 보다 효율적인 시스템 구축을 위하여 활용될 수 있을 것이다.

다만, 본 연구 수질측정 항목이 제한적으로 고려되었으므로, 다양한 수질항목에 대한 종합적인 고려가 향후 연구되어야 하며 또한 유량과 수질에 대한 고려 또한 계속 연구되어야 할 사항이다. 특히, 하수관거를 통한 방류수 수질기준 항목인 BOD, SS, TN, TP, 총대장균 등의 다양한 항목들에 대하여 선정 지점들이 각기 다른 양상으로 나타날 경우 이것들을 통합하여 고려할 수 있는 지점 선정의 기준에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20100026519).

참고문헌

- 권상우, 유철상 (2001) 엔트로피 방법을 이용한 수질측정망의 평가, **대한토목학회 논문집**, 제21권, 제5-B호, pp. 501-509.
- 박수영, 왕수균, 최정현, 박석순 (2007) 유전자 알고리즘을 이용한 낙동강 유역의 수질 측정망 설계에 관한 연구, **한국물환경학회지**, 제23권, 제5호, pp. 697-704.
- 오경두 (1989), 수질측정망 최적설계기법에 관하여-미워싱턴주의 수질측정망 설계기법을 중심으로, **한국수문학회지**, 제22권, 제4호, pp. 354-361.
- 왕수균, 나은혜, 박석순 (2005), 한강수계 수질측정망 개선을 위한 목적 지향 설계 방안에 관한 연구, **대한환경공학회지**, 제27권, 제5호, pp. 453-460.
- 한상욱, Paul H M Guo (1988) 수질측정망에 있어서 고려하여야 할 요소에 대한 고찰, **한국물환경학회지**, 제4권, 제1호, pp. 37-44.
- 환경부 (2000) **수질측정망 운영계획**, 환경부.
- Al-Zahrani, M. and Husain, T. (1998) An algorithm for designing a precipitation network in the south-western region of Saudi Ara-

- bia, *Journal of Hydrology*, Vol. 205, Issues. 3-4, pp. 205-216.
- Amorcho, J. and Espildora, B. (1973) Entropy in the assessment of uncertainty in hydrologic systems and models, *Water Resources Research*, Vol. 9, Issue. 6, pp. 1511-1522.
- Chapman, T.G. (1986) Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance, *Journal of Hydrology JHYDA7*, Vol. 86, No. 1/2, pp. 111-126.
- Harmancioglu, N.B. and Alpaslan, N. (1992) Water quality monitoring network design: A problem of multi objective decision making, *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, No. 1, pp. 179-192.
- Husain, T. (1989) Hydrologic uncertainty measure and network design, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 25, Issue. 3, pp. 527-534.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1949) The mathematical theory of communication, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 5, Issue. 1, pp. 3-55.
- Tsihrintzis, V.A. and Humid, R. (1988) Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM, *Hydrological Processes*, Vol.12, pp. 311-329.
- Yang, Y. and Burn, D.H. (1994) An entropy approach to data collection network design, *Journal of hydrology*, Vol. 157, No. 1-4, pp. 307-324.

◎ 논문접수일 : 11년 02월 17일
◎ 심사의뢰일 : 11년 03월 02일
◎ 심사완료일 : 11년 04월 26일