

**네트워크 분석기법을 이용한
상수관망에서의 수질측정지점 선정기법 제안**
**Determination of Water Quality Sensor Locations
in Water Distribution Systems using Network Analysis**

유도근*, 정건희, 김종훈*****

Do Guen Yoo, Gunhui Chung, Joong Hoon Kim

.....
요 지

상수관망의 기능은 정수처리 된 양질의 물을 수용가에게 안전하게 공급하는 것이며, 이를 위해 상수관내에는 수용가에 충분한 양의 물을 공급할 수 있는 적정 유량과 압력이 유지되어야하고 최소기준치 이상의 잔류염소농도 유지 등의 적절한 수질을 만족시켜야한다. 하지만 상수관망은 상수관 파괴에 따른 오염물질 유입이나 테러와 같은 인위적인 오염물 주입 등의 갑작스런 사고에 의한 수질오염에 언제나 노출되어 있다. 이러한 수질오염사고 발생 시 신속한 대처를 위해서는 상수관망의 모든 절점에 수질측정 센서를 설치하는 것이 바람직하겠지만, 이는 경제적 측면과 센서의 유지·관리측면에서는 이상적이지 않다. 또한 발생 가능한 모든 상황에 대한 시뮬레이션 기반의 수질모델링을 통하여 적절한 수질오염 측정지점을 선정할 수도 있겠지만, 이는 상당한 시간과 계산능력을 요한다. 따라서 본 연구에서는 네트워크 분석기법 (Network Analysis)인 Betweenness Centrality와 수리해석 모형인 EPANET을 이용하여 상수관망의 수질오염측정지점 선정기법을 제안하였다. Betweenness Centrality는 네트워크를 구성하는 한 절점과 다른 한 절점을 연결시키는 특정 절점의 매개정도로 중심성을 측정하는 기법이다. Betweenness Centrality는 상수관망의 특정절점에 수질오염 사고가 발생하였을 때 오염원의 이동 가능한 경로의 수에 따라 그 값이 달라지며, 결과 값에 의하여 수질오염측정지점이 선정된다. 본 연구에 의한 결과는 상수관망이 복잡하여 시뮬레이션을 통한 분석이 어렵고 많은 시간과 계산능력이 요구 될 경우 대안기법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 상수관망, 네트워크 분석, Betweenness centrality, 수질측정지점, EPANET
.....

1. 서론

상수관망은 물을 공급하는 사회기반시설물로, 그 기능은 정수처리 된 양질의 물을 수용가에게 안전하게 공급하는 것이다. 이를 위해 상수관내에는 수용가에게 충분한 양의 물을 공급할 수 있는 적정 유량과 압력이 유지되어야 하며 최소기준치 이상의 잔류염소 농도 유지 등의 적절한 수질을 만족시켜야한다. 최근 테러 위협성의 증가로 인하여, 상수관 파괴에 따른 오염물질 유입이나 테러와 같은 인위적인 오염물 주입 등의 갑작스런 사고에 의한 수질오염에 언제나 노출되어 있는 상수관망의 유지관리기법에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. (Ami Preis et al(2008), Avi Ostfeld et al(2008) 등). 수질오염사고가 발생하였을 경우, 신속한 대처를 위해서는 상수관망의 모든 절점에 수질 측정 센서를 설치하여 관리하는 것이

* 정회원·고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 박사과정 ·E-mail: godqhr425@korea.ac.kr

** 정회원·고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수·E-mail: gunhui@korea.ac.kr

*** 정회원·교신저자 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 교수·E-mail: jaykim@korea.ac.kr

이상적이겠지만, 이는 경제적 측면과 센서의 유지·관리측면에서는 이상적이지 않다. 또한 발생가능한 모든 상황에 대한 시뮬레이션 기반의 수질모델링을 통하여 적절한 수질오염 측정지점을 선정할 수도 있다 (Krause et al. 2008). 하지만 수질측정 지점 선정의 경우 가능한 상황은 오염물의 주입지점, 농도, 주입시간 등에 따라서 기하급수적으로 커지므로 이는 상당한 시간과 계산능력을 요한다. 본 연구에서는 네트워크 분석기법 (Network Analysis)인 Betweenness centrality (사이 중앙성)과 수리해석모형인 EPANET을 이용하여 상수관망의 수질오염측정지점 선정기법을 제안하였다.

2. 상수관망 수질측정지점 결정방법

2.1 Betweenness Centrality (사이 중앙성)

네트워크 분석기법 (Network Analysis)은 절점(node)과 라인(link)으로 이루어진 네트워크의 구조나 연결명 형태의 특징을 도출하고, 관계성으로 체계의 특징을 설명하거나 체계를 구성하는 단위의 행위를 설명하는 기법이다. 네트워크 분석기법은 네트워크 전체 구조에서 연결선이 중앙 집중화된 정도, 연결선의 조밀 정도, 연결선이 소수에 의해서 독점되고 있는 정도 등의 다양한 분석을 실시 할 수 있다. 이 중 프리만 (Freeman, 1979)은 한 절점의 중앙성을 측정하는 방법으로 Betweenness Centrality (사이 중앙성)을 제안하였다. 이 개념은 한 절점이 연결망 내의 다른 절점들 ‘사이에’ 위치하는 정도를 나타내는 것이다. 한 절점이 다른 절점들 사이의 최단거리를 연결하는 선, 즉 최단 경로 위에 위치하면 할수록 그 절점의 Betweenness Centrality (사이 중앙성)는 높아진다. 즉, Betweenness Centrality (사이 중앙성)는 다른 절점들 사이에서 연결 역할을 하는 정도를 측정한다. Freeman은 표준화된 사이 중앙성을 식(1)과 같이 나타내었다.

$$C_B(p_m) = \frac{\sum_i \sum_j \frac{g_{imj}}{g_{ij}}}{(N^2 - 3N + 2)/2} \quad (1)$$

g_{ij} 는 절점 i, j 를 연결하는 최단 경로의 수이고, g_{imj} 는 절점 m 이 절점 i, j 사이의 최단 경로 위에 위치하는 경우의 수이다. i 와 j 를 잇는 최단 경로가 여러 개이고 무차별하다면 어느 경로가 사용될지의 확률은 동일하므로 m 이 등장한 경로가 사용될 확률은 $\frac{1}{g_{ij}}$ 가 된다. 즉 최단 경로에 여러 번 등장할수록 m 이 등장한 통로가 사용될 확률은 증가한다. 분모는 지표표를 표준화하기 위하여 분자가 가질 수 있는 최대 값으로 나눈 것으로, 방사선 형태의 별형 연결망에서 가장 큰 값을 가지며 그 값은 ${}_{n-1}C_2$, 즉 $(N^2 - 3N + 2)/2$ 이다.

2.2 수질측정지점 결정

수질측정지점의 결정을 위하여, 본 연구에서는 수리학적인 흐름의 방향성을 결정하기 위하여 대표적인 상수관망 수리해석 프로그램인 EPANET을 사용하였으며, 이를 Betweenness Centrality를 결정하기 위하여 사용된 Visual Basic 6.0 프로그램과 연계하였다. 본 연구에 의한 수질측정지점 결정 방법의 순서는 다음과 같다.

Step 1. 네트워크의 시각화 및 인접행렬 구성

네트워크 분석을 위해서는 네트워크의 시각화와 인접행렬(adjacency matrix)의 구성이 되어야 한다. 인접행렬은 노드간의 연결된 정도를 나타내는 행렬로 Fig.1과 같은 네트워크가 구성되어 있다면, 인접행렬은 표 1.과 같이 나타낼 수 있다. 예를 들어 1번 노드는 2번과 3번 노드와 직접 연결되어 있으므로, 인접행렬의 (1, 2), (1, 3)의 값은 1이 된다.

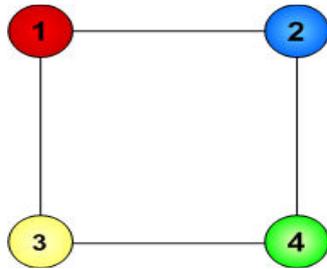


Fig 1. Sample Network

표 1. 인접행렬의 구성

노드	1	2	3	4
1	0	1	1	0
2	1	0	0	1
3	1	0	0	1
4	0	1	1	0

Step 2. 수리해석 모형의 수행 및 Directed Adjacency Matrix의 구성

Step 1.에서 구성한 인접행렬은 양방향 네트워크로 노드간의 방향성이 설정되지 않았으므로, 실제적인 유량의 흐름을 표현하는 행렬을 구성하기 위해 EPANET을 수행한 후 인접행렬을 다시 구성한다. 즉, 분석할 상수관망에 대하여 EPANET 모형을 이용하여 수리해석을 실시하고, 기준 수요량에 대한 수리해석 결과 나타나는 상수관로의 유량 방향에 따라 Direct Adjacency Matrix를 구성한다.

Step 3. 절점별 수요량의 랜덤 발생 및 Mixed Adjacency Matrix의 재구성

절점의 기본 수요량의 분석 뿐 만 아니라, 절점 수요량의 가변성을 고려하기 위하여 각 절점 별로 식 (2)와 같은 평균과 분산을 따르는 정규분포 형 수요량을 100번 무작위하게 발생시킨다.

$$\begin{aligned} Avg(i) &= Basedemand(i) \\ S_D &= PF \times Basedemad(i) \div z \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, S_D = 각 절점의 분산

$PF = 0.908$ (부하율; PeakFactor)

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

$Basedemand(i)$ = 각 절점의 한 시간 평균 급수량

$z = 95\%$ 의 신뢰도를 갖는 확률변수

본 Step의 목적은 단방향으로만 고려되었던 인접행렬을 수요량의 변동에 따라 유량의 방향성이 민감하게 변하는 관의 방향성을 양방향으로 고려하고, 유량의 방향성이 민감하지 않은 관의 방향성을 단방향으로 고정시키기 위함이다. 따라서 100번 무작위 발생된 수요량에 따른 EPANET을 실행하고 각 각의 수요량의 경우에 따른 상수관로의 유량 방향을 구하여 각각의 Direct Adjacency Matrix를 산정하고, 구해진 100개의 Direct Adjacency Matrix를 모두 합한다. 합해진 행렬에서 (i, j) 와 (j, i) 의 값의 합은 100이 된다. 관로별 방향을 결정하기 위하여 총 100번 중 90개 이상 한 방향으로 유량의 흐름이 결정되는 관로는 단방향으로 고려를 하고, 나머지 관들은 양방향으로 고려하여 최종 Mixed Adjacency Matrix를 구성한다.

Step 4. 절점 간 최단경로 결정 및 Betweenness Centrality 산정

구해진 Mixed Adjacency Matrix에 의해 모든 두 절점 간 최단경로를 산정하고 최단경로 내에 있는 절점을 구한다. 본 연구에서는 절점별 Betweenness Centrality는 모든 두 절점 간 최단경로 내에 있는 해당절점의 수로 나타내었으며 그 결과를 모든 두 절점 간 최단경로의 수로 나누어 정규화 하였다.

Step 5. 최종 수질측정 지점 선정

구해진 절점별 Betweenness Centrality를 내림차순으로 정리하고 그 순서가 바로 최종 수질 측정 지점의 우선순위가 된다.

3. 적용 및 결과

3.1 Mays' Network

본 제안된 방법을 가상관망인 Mays' Network에 적용하였다. Mays' Network는 2개의 수원과, 13개의 node, 그리고 21개의 pipe로 이루어져 있다. Mays' Network의 구성은 Fig.2와 같으며, 기본수요량에 대한 Directed Adjacency Matrix를 구하면 표 2.와 같으며, 100개의 절점별 수요량 발생의 결과로 구해진 최종 Mixed Adjacency Matrix는 표 3.과 같다. 표 2.와 표 3.의 행렬을 기반으로 각 절점의 Betweenness Centrality를 구한 결과는 표 4.와 같다.

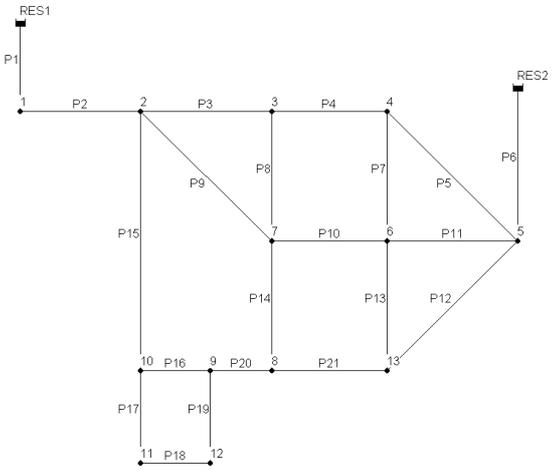


Fig. 2 Mays' Network

결과를 살펴보면, 두 가지 경우 1, 2 순위가 2번과 1번, 2번과 7번 절점으로 결정이 되었는데, 이는 수원 1이 전체 관망에 끼치는 영향이 커 수원 1에

표 2. Directed Adjacency Matrix of Mays' Network

No de	1	2	3	4	7	6	5	13	8	9	10	11	12	R1	R2
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

표 3. Final Mixed Adjacency Matrix of Mays' Network

No de	1	2	3	4	7	6	5	13	8	9	10	11	12	R1	R2
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

서부터 멀리 떨어져 있는 절점들에도 유량의 흐름이 이어지기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 Mays' Network의 경우 관망의 형태가 Loop형으로 흐름의 방향이 여러 가지로 나타날 수 있어 Loop형을 가지는 중간 부분의 절점들이 비슷한 사이 중앙성을 가지는 것으로 나타났다.

표 4. Results of Proposed Method

Initial Demand Based Directed Adjacency Matrix			Final Mixed Adjacency Matrix Based Result		
Node ID	Betweenness Centrality	Normalized B,C	Node ID	Betweenness Centrality	Normalized B,C
2	18	30.51	2	22	20.37
1	10	16.95	7	13	12.04
10	9	15.25	1	12	11.11
7	7	11.86	5	11	10.19
5	4	6.78	4	10	9.26
3	3	5.08	3	9	8.33
11	3	5.08	10	9	8.33
9	2	3.39	6	5	4.63
13	2	3.39	8	4	3.70
4	1	1.69	9	4	3.70
-	-	-	11	4	3.70
-	-	-	13	3	2.78
-	-	-	12	2	1.85
	59	100.00		108	100.00

4. 결 론

본 연구에서는 상수관망의 수질측정지점 선정을 위하여 기존의 시뮬레이션 기반의 방법이 가진 단점을 보완하기 위한 네트워크 분석 기반의 Betweenness Centrality (사이 중앙성)와 수리해석 모형인 EPANET을 결합한 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 가상관망인 Mays's Network에 적용하였으며, 그 결과를 분석하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션 기반의 모델의 복잡성과 상당한 시간의 소요를 줄일 수 있다. 추후, 제안된 방법의 적절성을 판단하기 위해서는 시뮬레이션 기반 모델의 결과와 비교하여 상수관망 수질측정지점의 비교가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그리고 상수관망의 형태와 수요량의 분포특성에 따라서 그 결과가 어떻게 달라지는지에 대한 민감도 분석이 수행되어야 할 것이다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ami Preis and Avi Ostfeld (2009). "Multiobjective Contaminant Sensor Network Design for Water Distribution Systems", *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, Vol 134, No. 4, pp. 366~377.
2. Avi Ostfeld et al. (2008). "The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN) : A Design Challenge for Engineers and Algorithms", *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, Vol 134, No. 6, pp. 556~568.