수돗물 공급관로 내 수질문제 인지를 위한 계측기 위치결정

Determination of the Sensor Placement for Detection Water Quality Problems in Water Supply Systems

이찬욱* · 이용준** · 박지승*** · 유도근****

Lee, Chan Wook*, Lee, Yong Jun**, Park, Ji Seung***, and Yoo, Do Guen****

Abstract

The importance of water quality management in pipes has been recently highlighted through the "Red-water phenomenon" in the city of Incheon. This study proposed a methodology for determining the location of measuring instruments during abnormal water quality issues. The proposed method focuses on analyzing the sensitivity of the flow path through a pipe. Additionally, this flow sensitivity through the tube is analyzed by considering both normal and abnormal conditions. The sensitivity of a pipe is the rate at which the water-flow direction changes. Further, a tube with low sensitivity under normal conditions but high sensitivity under abnormal conditions is the pipe for which the instrument should be first installed. The results were analyzed by applying the proposed methodology to a conventional virtual network. It is expected that, in future, the proposed method for determining the location of water quality gauges could be a useful tool for determining the location of instruments during emergencies.

Key words : Direction of Flow, Sensitivity, Water Quality Deterioration, Location of Sensor

요 지

최근 인천광역시 적수사태로 관로 내 수질관리의 중요성이 대두되고 있다. 이러한 지속적인 수질문제의 발생은 물 공급시스템에 대한 사회적인 불신을 야기시킬 수 있다. 본 연구에서는 비정상상황 수질 문제인지를 위한 계측기 설치 위치 결정 방법론을 제안하였다. 제안된 방법은 관로별 유량의 민감도를 분석하는 것을 중심으로 수행된다. 따라서 정상 및 비정상 상황을 가정하여 관로별 민감도를 분석하였으며 관로의 민감도는 물의 흐름방향이 변화하는 비율을 의미한다. 최종적으로 정상상황에서의 민감도는 낮으나 비정상상황에서의 민감도가 높은 관로를 계측기가 우선적으로 설치되어야 하는 관로로 정의하였다. 제안된 방법론을 대표적인 가상관망에 적용하여 결과를 분석하였으며 본 연구에서 제안된 수질계측기 위치 결정 방법은 향후 비상시를 고려한 계측기 설치 위치 결정시 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 흐름방향, 민감도, 수질 악화, 계측기 설치 위치

1. 서 론

최근 인천광역시 및 서울특별시에 적수사태가 발생함에 따라 상수관망에서의 수질관리 중요성이 대두되고 있다.

상수관망에서의 지속적인 수질문제의 발생은 우리나라 물 관리 시스템의 사회적 불신과 더불어 수돗물 음용률의 저하로 이어질 수 있다. 수돗물홍보협의회에 따르면 우리나라 수돗물 음용률은 53.1%로 매년 감소하는 추세이며, 이와

*정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail: skyblue985@naver.com)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

**학생회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 학부연구생(E-mail: yjlee135@naver.com)

Research Student, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

***학생회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 학부연구생(E-mail: kho564@naver.com)

Research Student, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

****교신저자, 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 조교수(Tel: +82-31-229-8676, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: dgyoo411@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

같은 음용수의 저하는 직접적/간접적인 악영향으로 발전될 우려가 있다. 또한, 물 공급 시스템은 대규모 사회기반시설중의 하나로서 동시 다발적 수질문제가 발생할 경우 그 피해는 돈으로는 복구할 수 없는 재난을 야기할 수 있으므로, 상수관망은 안전 및 재난에 있어서 중요하게 관리되어야 하는 시설물이다.

관로 내 수질문제의 원인은 1) 노후화 등에 의한 관 부식, 2) 관로차폐 및 밸브조작, 3) 관말지점 잔류염소 부족으로 인한 수질저하, 4) 관내 미생물 발생 억제에 의한 수질악화, 5) 관로 오염으로 인한 오염 등 매우 다양하다. 또한, 관로 내 물의 흐름 방향이 변화함에 따라 퇴적되어 있던 이물질이 씻겨 흘러 내려가 탁도가 증가하여 수질문제가 발생하는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 수질문제의 빠른 인지 및 선제적 대응을 위해서는 적절한 위치 및 양의 계측기 설치가 필요하다. 최근 계측기 원가의 절감 및 기술의 발전으로 인해 상수도 시스템 내 계측기 설치개수가 과거보다 크게 확대되는 추세이지만 관로 및 유지관리 비용 증가 등의 문제에 따라 운영관리상 수질 측정이 필요한 주요지점으로 예상되는 지점에 계측기를 설치하게 되며 해당하는 위치의 계측된 자료만을 기반으로 관로 내 수질오염정도를 추정하고 관리하는 데에는 많은 제약이 있다. 이와 같은 제약조건을 만족하기 위하여 현재까지 다음과 같은 연구가 이루어져 왔다. Gueli (2006)은 물 공급 관로 내 수질오염의 조기 감지를 목표로 메타휴리스틱 접근법을 활용해 최적의 계측기 측정위치를 선정하는 방법론을 제안하였으며 Propato and Piller (2006)는 혼합정수프로그래밍(A Mixed-integer Programming, MIP)을 활용한 관로 내 수질오염 계측기 측정위치 선정 방안을 제시 및 정량화 하였다. 수질오염 계측기 뿐 만 아니라 Chung et al. (2009)은 엔트로피 이론을 활용하여 상수관망의 효율적 운영을 위한 최적의 압력 계측위치결정 방법을 제안하였다. Kessler et al. (1998)은 EPANET2 (Rossman, 2000) 수리해석을 통해 유량의 흐름방향 과 오염물질의 유입에 따른 각 절점의 오염여부를 매트릭스로 구성하여 최소한의 감시지점으로 관망의 수질문제를 탐지 할 수 있는 Pollution Matrix 방법을 적용하였다. 이 후, Ostfeld and Salomons (2006)는 Kessler et al. (1998)의 방법을 확장하여, Pollution Matrix 방법이 단일오염원을 가정한 것에 반해 다양한 오염물질의 유입을 임의로 가정하여 시나리오 행렬을 구성하는 RPM방법을 새롭게 제시하고, 최적화 기법중 하나인 유전알고리즘 (Genetic Algorithm)을 적용하여 최적의 지점을 선정하였다. 이 후 상수관망에서의 수질계측지점 선정에 관한 연구는 Krause et al. (2006), Watson et al. (2009), Xu et al. (2008, 2010), Tryby et al. (2010), Aral et al. (2010), Cozzolino et al. (2011), Koch and McKenna (2011) 등에 의하여 현재까지 활발히 이루어지고 있다. 서울특별시 상수도사업본부의 경우 아리수 수질자동감시시스템(Seoul Water Now, SWN)을 통하여 한강의 원수, 아리수의 생산 및 급수 과정에서 214개의 감시

지점을 선정하여 실시간으로 수질을 자동측정 및 감시하고 있다. 현재까지 진행된 수질계측지점 선정에 대한 연구는 방법 간 우열의 정도를 판단하기 어려우며, 계측기 설치의 목적에 따라 결과가 달라질 수 있는 특성을 갖고 있다.

본 연구에서는, 수질계측기 위치 결정을 위하여 관로 내 흐름방향의 민감도를 고려하였다. 여기서의 민감도란 관로 내 흐름방향 변화의 정도를 의미한다. 다음으로는 정상상황과 비정상상황 시나리오를 생성하고 관수로 수리해석 프로그램 중 하나인 EPANET2를 활용하여 시나리오별 관로의 민감도를 산정하였다. 결과적으로 정상 상황일 때는 민감하지 않았다가 비정상상황일 때 민감해지는 관로를 수질계측기 설치가 필요한 지점으로 정의하였다. 본 연구 방법을 두 가지의 가상관망에 적용하고 결과 분석을 수행하였다.

2. 수질계측기 설치 우선지역 결정 절차

2.1 방법론

제안된 수질계측기 설치 우선지역 결정 절차는 Fig. 1과 같다. 먼저, 수질계측기 위치결정이 필요한 지역의 관망정보 (일일 수요량 및 절점 과 관로의 위치)를 획득한다. 두 번째로는 지진 등과 같은 관로 파손에 영향을 줄 수 있는 비정상상황 시나리오를 가정한다. 본 연구에서는 관로의 상태를 “Closed” 하는 것으로서 파괴된다고 가정하였다. 따라서 관로의 개수와 절점의 수요량 조합만큼의 시나리오 개수가 생성되게 된다. 예를 들어, 10개의 관로와 2가지 버전의 수요량이 존재한다면 각 관로를 Closed 상태로 변환함에 따라 총 10×2 개의 시나리오 생성된다. 세 번째로는 수리해석 프로그램인 EPANET2.0을 활용하여 각 생성된 시나리오별로 수리해석을 수행하고 수요량 대비 각 관로별 유량 변동성의 정도를 직접인접행렬(Directed Adjacency Matrix)로 표현한다. 다음으로는 구성된 모든 시나리오별 직접인접행렬을 합산하고 0과 1사이의 값으로 환산하여 혼합인접행렬을 구성한다. 이때의 환산식은 Eq. (1)과 같다.

$$FPS(i,j) = \frac{M(i,j)}{M(i,j) + M(j,i)} \quad (1)$$

$FPS(i,j)$ 는 i 절점부터 j 절점 방향으로의 흐름 비율 즉, 관로의 민감도를 의미하며 흐름이 한 방향으로 흐른다면 0에 가까운 단방향성관을, 흐름의 방향이 지속적으로 바뀐다면 1에 가까운 값을 갖는 양방향성 관을 의미하게 된다. $M(i,j)$ 는 절점 i 부터 절점 j 의 혼합인접행렬의 값을 의미하며 ij 는 절점의 번호를 의미한다. 마지막으로 $FPS(i,j)$ 는 절점과 절점사이의 민감도(비율)이므로 Eq. (2)를 활용하여 최종적인 관로의 유량변동비율을 구한다.

$$PS = 1 - |A_{ij} - A_{ji}| \quad (2)$$

여기서, PS = 관로의 민감도(유량 변동 비율)을 의미하며 $A_{i,j}$ = 관로 i로 부터 j 관로의 유량 비율을 $A_{j,i}$ = 관로 j로 부터 i관로의 유량 비율을 의미한다. 결과적으로 Fig. 2와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 그래프상의 Pipe 1은 정상시 민감하지만 비상시는 민감하지 않으며 Pipe 2는 모든 상황에서 민감하지 않은 관로를 의미한다. Pipe 3의 경우 모든 경우에서 민감한 관로로서 계측기가 우선적으로 설치되어야 하나 본 연구의 주제는 비상시의 계측기 위치 우선순위 결정이다. 따라서 본 연구에서는 정상일 때는 민감하지 않으나 비상시의 민감한 관로 즉, Pipe 4에 해당하는 지점내의 관로만을 고려하였으며 Utopian Approach (Xanthopoulos et al., 2000)방법을 통해 우선순위를 결정하였다. Utopian Approach는 거리기반 의사결정 기법으로서 정규화 되어있는 공간에 이상점(Utopian Approach)과의 거리를 통해 우선순위를 결정하는 방법이다. Fig. 1상의 4번관로 지점에 해당하는 구역에 대한 우선순위 결정을 위하여 (0,1)을 이상점으로 지정하였으며 거리가 최소가 되는 지점의 관로가 우선적으로 계측기가 설치되어야 할 것이다.

Fig. 1. Proposed Water Quality Measuring Device Location Selection Procedure

Fig. 2. Normal/Abnormal Flow Sensitivity Graph

3. 적용 및 결과

3.1 적용 관망

앞서 제시된 방법론을 Ozger (2003)에 의해 제시된 간단한 가상관망 Mays's Networks 와 EPANET2의 예제관망중 하나인 Net3에 적용 하였다. Mays's Networks는 2개의 수원에서 21개의 관로를 통해 13개의 절점에 3146CMH를 공급하고 있는 관망으로서 구성은 Fig. 3과 같다. Net3은 두 개의 수원과 92개의 절점 및 117개의 관로로 이루어져 있으며 구성은 Fig. 4와 같다.

Fig. 3. Application Networks (Mays's Networks (Ozger, 2003))

Fig. 4. Application Networks (Net3 Networks)

3.2 Mays's Networks 적용 결과

3.2.1 일반적인 수요량 시나리오

Mays's Networks의 일일 수요량 변동성을 시간단위로 고려하기 위해 첨두부하율을 활용하여 24개의 절점별 수요량 데이터(Table 1)를 생성하였다. ME (2008)는 국내의 경우 첨두부하율의 불확실성을 근거로 회귀모델 개발에 어려움

이 있어 01~05년 상수도 통계 자료를 토대로 침투부하율을 산정하여 Table 2와 같이 제시하였다.

Table 1. Peak Load Factor Per Water Population

Population using water (Ten thousand people)	0~1	1~2	2~5	5~10
Peak load rate	1.51	1.45	1.40	1.36

기본수요량 데이터를 통해 급수인구가 대략 2~5만명인 것을 예상할 수 있으며 해당하는 침투부하율 1.40을 활용하여 수요량의 초기값 기준 ± 0.05 의 침투부하율을 곱하고 24개의 절점별 수요량 데이터를 가정하여 하루(24시간)동안의 수요변동에 따른 시나리오를 생성하였다. 앞서 제시된 방법론에 따라 비상시의 경우는 관로를 한개씩 Closed 하였으며 정상 시나리오는 절점별 수요량만을 변경한 24개, 비상시 시나리오 24 $\times$ 21개 총 528개의 시나리오에 대한 수리해석을 수행하였다.

Table 2. Typical Demand Scenario

Scenrio Num	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	j8	j9	j10	j11	j12	j13
1	0	95.58	95.58	288.36	95.58	307.8	288.36	147.42	0	0	48.6	48.6	0
2	0	106.2	106.2	320.4	106.2	342	320.4	163.8	0	0	54	54	0
3	0	116.82	116.82	352.44	116.82	376.2	352.44	180.18	0	0	59.4	59.4	0
4	0	127.44	127.44	384.48	127.44	410.4	384.48	196.56	0	0	64.8	64.8	0
5	0	138.06	138.06	416.52	138.06	444.6	416.52	212.94	0	0	70.2	70.2	0
6	0	148.68	148.68	448.56	148.68	478.8	448.56	229.32	0	0	75.6	75.6	0
7	0	159.3	159.3	480.6	159.3	513	480.6	245.7	0	0	81	81	0
8	0	169.92	169.92	512.64	169.92	547.2	512.64	262.08	0	0	86.4	86.4	0
9	0	180.54	180.54	544.68	180.54	581.4	544.68	278.46	0	0	91.8	91.8	0
10	0	191.16	191.16	576.72	191.16	615.6	576.72	294.84	0	0	97.2	97.2	0
11	0	201.78	201.78	608.76	201.78	649.8	608.76	311.22	0	0	102.6	102.6	0
12 (initial value)	0	212.4	212.4	640.8	212.4	684	640.8	327.6	0	0	108	108	0
13	0	223.02	223.02	672.84	223.02	718.2	672.84	343.98	0	0	113.4	113.4	0
14	0	233.64	233.64	704.88	233.64	752.4	704.88	360.36	0	0	118.8	118.8	0
15	0	244.26	244.26	736.92	244.26	786.6	736.92	376.74	0	0	124.2	124.2	0
16	0	254.88	254.88	768.96	254.88	820.8	768.96	393.12	0	0	129.6	129.6	0
17	0	265.5	265.5	801	265.5	855	801	409.5	0	0	135	135	0
18	0	276.12	276.12	833.04	276.12	889.2	833.04	425.88	0	0	140.4	140.4	0
19	0	286.74	286.74	865.08	286.74	923.4	865.08	442.26	0	0	145.8	145.8	0
20	0	297.36	297.36	897.12	297.36	957.6	897.12	458.64	0	0	151.2	151.2	0
21	0	307.98	307.98	929.16	307.98	991.8	929.16	475.02	0	0	156.6	156.6	0
22	0	318.6	318.6	961.2	318.6	1026	961.2	491.4	0	0	162	162	0
23	0	329.22	329.22	993.24	329.22	1060.2	993.24	507.78	0	0	167.4	167.4	0
24	0	339.84	339.84	1025.28	339.84	1094.4	1025.28	524.16	0	0	172.8	172.8	0

3.2.2 평상/비상시 직접인접행렬 구성 결과

앞서 제시된 방법론에 따라 수행된 528가지(정상 24가지, 비상 528가지의 시나리오) 따른 수리해석 결과를 토대로 평상/비상시에 따른 직접인접행렬을 구성한 결과 Table 3과 같다. 모든 값이 0 또는 1이 되며 Table 3은 시나리오 12번에 해당하는 정상상황에서의 직접인접행렬이다.

3.2.3 평상/비상시 최종 혼합인접행렬 구성 결과

생성된 528개의 시나리오별 산정된 직접인접행렬을 방법론과 같이 모두 합산하여 하나의 행렬로 환산하여 얻은 최종 혼합인접행렬의 결과는 Tables 4~5와 같다. Table 4의 경우 정상시를, Table 5의 경우 비상시의 최종 혼합인접행렬의 결과를 의미한다.

3.2.4 평상/비상시 관로별 유량 민감도 결과

생성된 혼합인접행렬을 Eq. (2)를 활용하여 관로의 민감도(유량변동비율)를 산정한 결과를 Table 6과 Fig. 5에 제시하였다. 제안된 방법론을 적용한 결과 10번 관로가 비정상시

Table 3. Direct Adjacent Matrix (Example of Senario 9)

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

Table 4. Mixed Adjacent Matrix in Normal Situation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0.8	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0.2	0	0.7	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0.3	0	0.5	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0.5	0	0.7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0.6	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0.2	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0.9	0	0
11	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	1	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

Table 5. Mixed Adjacent Matrix in Abnormal Situation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	R1	R2
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0.9	0	0	0	0.9	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0.1	0	0.85	0	0	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0.15	0	0.7	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0.3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	10	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0.1	0.05	0	0	0.9	0	0.85	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0.6	0	0	0	0.17	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0	0.1	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	1	0	0	0	0
11	0	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	0.9	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0.985	0	0.78	0	0	0	0	0	0	0

0.54, 정상시 0.2였으며 (1,0)과의 거리 0.5의 결과를 얻었으며, Fig. 4에서 역시 10번 관로가 정상일 때는 유향의 민감도가 낮은 값을 갖고 비상시 민감도가 높아 유향이 변할 확률이 높아진 것을 확인할 수 있다. 따라서 Mays's Networks에서는 10번 관로에 비상시를 대비한 계측기가 우선적으로 설치되어야 하는 것으로 나타났으며 Fig. 6상의 동그라미 부분에 해당하는 관로이다.

Table 6. Flow Sensitivity Result by Normal/Abnormal Pipe

Pipe Num	Abormal situation (X-axis)	Normal situation (Y-axis)	Distance from (1,0)
10	0.54	0.2	0.50
20	0.5	0.5	0.71
4	0.3	0.2	0.73
14	0.3	0.2	0.73
3	0.2	0	0.80
7	0.19	0	0.81
13	0.12	0	0.88
2	0.1	0	0.90
8	0.1	0	0.90
16	0.12	0.2	0.90
21	0.08	0.08	0.92
1	0	0	1.00
6	0	0	1.00
9	0.2	0.6	1.00
11	0	0	1.00
12	0	0	1.00
15	0	0	1.00
17	0	0	1.00
19	0	0	1.00

Fig. 5. Normal/Emergency Flow Sensitivity Graph (Mays's Networks)

Fig. 6. Location of Installation of Sensitivity Result Instrument for Flow Direction

3.3 Net3 적용 결과

3.3.1 수량량 시나리오(Net3)

Net3관망은 총 5가지 일정한 패턴의 수량량 변동 데이터가 있다. 이는 EPANET의 Extended Period Simulation (EPS) 모의를 위한 데이터로서 수량량 변동성을 일정한 패턴으로 가정하고 수리해석을 수행하기 위한 자료이다. 따라서 본 연구에서는 Mays's Networks와 같이 수량량데이터를 생성할 필요 없이 해당 데이터를 사용하였다. 향후 실제지역에 적용할 경우 일일변동 수량량 데이터가 있다면 가정할 필요가 없다고 판단된다. NET3의 경우 관망의 구성이 Mays's Networks와는 다르게 비교적 복잡하여 추가적으로 고려할 사항이 있다. 일부 관로가 단협에 따라 구역 전체가 물 공급을 받지 못하는 상황이 발생할 수 있으므로 Net3관망에서는 모든 관과 피 시나리오에 대해 차폐에 따라 절점에 물 공급이 불가능한 상황에 있어서는 해당 절점의 요구수량을 “0”으로 수정하여 수리해석을 수행하였다.

3.3.2 평상/비상시 관로별 유향 민감도 결과(Net3)

Net3은 두 개의 수원과 92개의 절점 및 117개의 관로로 이루어져 있다. 따라서 24개의 정상시나리오와 117×24 개의 비상시나리오 즉, 총 2,832가지의 생성된 시나리오에 본 방법론을 적용하여 Table 7과 Figs. 7, 8의 결과를 얻어 내었다. Fig. 7을 통해 십자가 오른쪽 아래부분에 해당(비상시 유향의 민감도가 커지는 관로)하는 관로는 총 7개로 결정되었다. Table 7에는 정량적인 결과를 제시하였다. (1,0)과의 거리가 0.7 이하인 부분을 계측기 우선설치 지점으로 결정하였으며 이렇게 가정할 경우 11개의 관로가 선택되었다. 1순위는 P285로 결정 되었으며 Fig. 8과 같은 위치에 설치가 우선적으로 되어야 할 것이다. 여기서 주목할 점은 Net3

관망의 오른쪽 아래부분(관말)에 유향의 민감도가 높은 관이 밀집되어 있다는 점이다. 이는 탱크가 주변에 설치되어있어 일일 수요량의 변동에 따른 결과로 판단된다. 본 연구에서는 Fig. 7상의 민감도 구분을 (0.5, 0.5)로 수행하였다. 따라서 P269같은 경우 계측기 설치 범위 내에 속하지 못하는 결과가 나오게 된다. 그러나 P269역시 정상시 유향의 민감도가 낮다가 비상시 급격히 증가하는 관로임을 부정할 수는 없다. 따라서 계측기 설치의 목적에 따라 적절한 가중치를 적용하여 본 방법론을 적용한다면 보다 합리적인 계측기 설치 지점의 선택이 될 것으로 판단된다.

Table 7. Flow Sensitivity Result by Normal/Abnormal Pipe (Net3)

Pipe Num	Abormal situation (X-axis)	Normal situation (Y-axis)	Distance from (1,0)
285	0.64	0.42	0.55
281	0.63	0.42	0.56
283	0.62	0.42	0.56
275	0.62	0.42	0.57
287	0.70	0.5	0.58
273	0.52	0.33	0.58
239	0.67	0.50	0.60
199	0.47	0.33	0.63
269	0.34	0.08	0.67
115	0.48	0.42	0.67
113	0.44	0.42	0.70
235	0.29	0.00	0.71
261	0.27	0.00	0.73

Fig. 7. Normal/Emergency Flow Sensitivity Graph (Net3 Networks)

Fig. 8. Location of Installation of Sensitivity Result Instrument for Flow Direction

4. 결 론

본 연구에서는 관로 내 유향의 변동이 심한 부분을 민감하다고 판단하였으며 정상적인 상황에서 유향의 변동이 없다가 비정상상황(관로의 파괴)에 따라 관로 내 유향 변동이 심해지는 관로에 우선적으로 수질계측기를 설치하는 방법론을 제안하였다. 제안된 방법론의 적용 및 결과를 도출하기 위하여 대표적인 가상관망인 Mays's Network와 Net3 관망에서 절점의 수요량 및 비정상상황을 가정하여 적용하였다. Net3 적용 결과 정상 및 비정상상황 두 경우 모두 민감한 관이 다수 존재하며 비정상인 경우에만 민감도가 큰 관로는 총 7개로 선택되었다.

제안된 수질계측기 설치위치 결정 방법론을 통해 수돗물 공급관로 내 수질문제 인지를 위한 가이드라인 및 대응방안 수립의 기초자료로 활용되어질 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 비교적 간단한 방법 및 과정으로 유향의 변동 민감도를 파악할 수 있으며 어렵지 않게 계측기의 위치를 상대적으로 쉽게 정할 수 있다는 점에서 활용 가능성이 충분한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Fig 7과 같이 관로에 대한 가중치를 1로 적용하여 (0.5, 0.5)를 기준으로 관로에 대한 민감도의 정의를 구분하였다. 그러나 관로의 상태, 위치 등의 중요도를 산정하여 가중치를 적합한 관로별 가중치를 부여하여 기준을 설정한다면 목적에 부합하는 계측기 설치 위치 선정 방법이 될 것으로 예상되어진다.

향후 방법론을 제안한 것과 더불어 실제지역에 적용과 동시에 설치위치, 체류시간 등에 대한 추가 연구가 수행되어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공분야기초연구사업(생애초연구사업)의 성과이며, 이에 감사드립니다(NRF-2018R1C1B5046400).

References

- Aral, M.M., Guan, J., and Maslia, M.L. (2010). Optimal design of sensor placement in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 136, No. 1, pp. 5-18.
- Chung, G., Jang, D.E., Yoo, D.G., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2009). Determination of optimal pressure monitoring locations for water distribution systems using entropy theory. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 7, pp. 537-546.
- Cozzolino, L., Della Morte, R., Palumbo, A., and Pianese, D. (2011). Stochastic approaches for sensors placement against intentional contaminations in water distribution systems. *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 75-98.
- Gueli, R. (2006). Predator - Prey model for discrete sensor placement. *Proceedings of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati, OH, USA.
- Kessler, A., Ostfeld, A., and Sinai, G. (1998). Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 124, No. 4, pp. 192-198.
- Koch, M.W., and McKenna, S.A. (2011). Distributed sensor fusion in water quality event detection. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 137, No. 1, pp. 10-19.
- Krause, A., Leskovec, J., Isovitsch, S., Xu, J., Guestrin, C., VanBriesen, J., et al. (2006). Optimizing sensor placements in water distribution systems using submodular function maximization. *Proceedings of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati, OH, USA.
- Ministry of Environment (ME). (2008). *Manual of water demand prediction work (상수도 수요량 예측 업무 편람)*.
- Ostfeld, A., and Salomons, E. (2006). Sensor network design proposal for the battle of the water sensor networks (BWSN). *Proceedings of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati, OH, USA.
- Ozger, S.S. (2003). *A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution network*. Ph.D. dissertation, Arizona State University, Tempe, AZ, USA.
- Propato, M., and Piller, O. (2006). Battle of the water sensor networks. *Proceedings of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati, OH, USA.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET2 user's manual*. EPA/600/R-00/057, US EPA.
- Tryby, M.E., Propato, M., and Ranjithan, S.R. (2010). Monitoring design for source identification in water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 136, No. 6, pp. 637-646.
- Watson, J.P., Murray, R., and Hart, W.E. (2009). Formulation and optimization of robust sensor placement problems for drinking water contamination warning systems. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 330-339.
- Xanthopoulos, Z., Melachrinoudis, E., and Solomon, M.M. (2000). Interactive multiobjective group decision making with interval parameters. *Management Science*, Vol. 46, No. 12, pp. 1585-1601.
- Xu, J., Fischbeck, P.S., Small, M.J., VanBriesen, J.M., and Casman, E. (2008). Identifying sets of key nodes for placing sensors in dynamic water distribution networks. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 134, No. 4, pp. 378-385.
- Xu, J., Johnson, M.P., Fischbeck, P.S., Small, M.J., and VanBriesen, J.M. (2010). Robust placement of sensors in dynamic water distribution systems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 202, pp. 707-716.

Received	September 4, 2019
Revised	September 23, 2019
Accepted	October 2, 2019