

시스템 해석에 기초한 하수관망 오염 매커니즘과 관망 모니터링 및 이상진단

강은유 · 이승철 · 김민정 · 유수민 · 유창규[†]

경희대학교 환경공학과
449-701 경기도 용인시 기흥구 서천동
(2012년 6월 12일 접수, 2012년 8월 24일 채택)

Sewer Decontamination Mechanism and Pipe Network Monitoring and Fault Diagnosis of Water Network System Based on System Analysis

OnYu Kang, SeungChul Lee, MinJeong Kim, SuMin Yu and ChangKyo Yoo[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Center for Environmental Studies, College of Engineering, Kyung Hee University,
Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-701, Korea
(Received 12 June 2012; accepted 24 August 2012)

요 약

비점오염원은 세정에 의해 하수관 내로 유입되어 수계까지 흘러 수계의 오염부하를 가중시킬 뿐만 아니라, 관의 상태에 따라 누수 및 월류를 야기하여 오염을 일으킨다. 이에 따라 하수관거의 유지관리 및 환경오염 방지를 위한 관거 내 하수의 유량, 수질, 불명수 및 월류 등을 효율적으로 관리하기 위한 모니터링의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 하수관거의 경우, 지하에 설계되며 그 구조 및 연결이 복잡한 특성으로 인해 실제 하수관거에 대한 모니터링은 쉽지 않다. 본 연구에서는 시스템해석이론에 기초한 하수관망 오염제거 해석과 관망 모니터링 및 이상진단방법을 제시하였다. 먼저 하수관망 공정모사 프로그램인 Stormwater & Wastewater Management Model for expert (XP-SWMM)을 이용하여 관망 내의 오염물질의 거동패턴을 해석하였다. 둘째, 다변량 통계 모니터링을 이용하여 하수관망 내의 수질 모니터링 및 하수관망 유출을 탐지하는 관망 이상 진단을 수행하였다. 정적/동적 상태 시스템에 기초한 하수관망 오염 매커니즘 해석결과, 강우시 총질소와 총인 부하량이 비강우시보다 급격하게 증가함을 확인하였으며, 이는 수계의 오염부하를 가중시킬 것으로 판단된다. 이에 따라 하수관망 내 유출은 강우로 생긴 유량 및 유입오염물질의 농도 증가로 인한 관망이상으로 사료된다. 제안된 하수관망 모니터링 및 이상진단 기법은 도시 유역에서의 비점오염원 관리와 지속적인 모니터링에 있어 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract – Nonpoint source pollution causes leaks and overtopping, depending on the state of the sewer network as well as aggravates the pollution load of the aqueous water system as it is introduced into the sewer by wash-off. According, the need for efficient sewer monitoring system which can manage the sewage flowrate, water quality, inflow/infiltration and overflow has increased for sewer maintenance and the prevention of environmental pollution. However, the sewer monitoring is not easy since the sewer network is built in underground with the complex nature of its structure and connections. Sewer decontamination mechanism as well as pipe network monitoring and fault diagnosis of water network system on system analysis proposed in this study. First, the pollution removal pattern and behavior of contaminants in the sewer pipe network is analyzed by using sewer process simulation program, stormwater & wastewater management model for expert (XP-SWMM). Second, the sewer network fault diagnosis was performed using the multivariate statistical monitoring to monitor water quality in the sewer and detect the sewer leakage and burst. Sewer decontamination mechanism analysis with static and dynamic state system results showed that loads of total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP) during rainfall are greatly increased than non-rainfall, which will aggravate the pollution load of the water system. Accordingly, the sewer outflow in pipe network is analyzed due to the increased flow and inflow of pollutant concentration caused by rainfall. The proposed sewer network monitoring and fault diagnosis technique can be used effectively for the nonpoint source pollution management of the urban watershed as well as continuous monitoring system.

Key words: Rainfall-Runoff Model, Sewer Network, Pollution Removal Mechanism, Stormwater & Wastewater Management Model(SWMM), Non-point Pollutant Source

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ckyoo@khu.ac.kr or ChangKyo.Yoo@biomath.ugent.be

‡이 논문은 KAIST 박선원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

1. 서론

하수관망 내에는 하폐수뿐만 아니라 지표의 비점오염물질이 상당량 유입된다. 비점오염물질은 지표면 강우로 인한 오염물질의 세정 작용(wash-off)에 의해서 발생된다고 알려져 있지만, 아직까지 자세한 생성 매커니즘은 밝혀지지 않았다. 또한 비점오염물질은 일간, 계절간 배출량의 변화가 크므로 발생량에 대한 예측과 정량화가 어렵다. 이에 따라 비점오염원은 수계시스템에서의 주된 문제로 남아 있으며 이를 해결하기 위해 비점오염원의 저감에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다[1-2].

비점오염원은 지표면의 강우에 의해 하수관망으로 유입되며, 이를 통해 수계로 유입되어지는 것으로 알려져 있다. 그러나 우리나라 대부분의 하수관망의 경우, 연장이 길어 오접합, 노후, 폐색 등이 자주 발생하며 이로 인해 관거 내의 비점오염물질이 외부로 유출되어 지하수와 토양은 물론, 하천과 호수 등 수계의 오염을 가중시키는 것으로 보고되어 왔다[3-5]. 또한 하수관망에서 합류식 하수도 월류수(combined sewer overflows; CSOs)가 발생한 경우, 월류수에 포함된 비점오염물질 또한 수계의 부하를 가중시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 수계 시스템에 대한 비점오염물질의 저감을 위해서는 관거 내의 수질, 불명수 등에 대한 효율적인 관리가 수행되어야 한다. 최근 하수관망 내에서의 수질, 불명수에 대한 모니터링의 중요성이 증가하고 있으나, 지하에 시공되는 하수관망의 특성으로 인해 하수관망 내부 상태의 정확한 파악은 어렵다.

최근 하수관망의 상태와 관거 내 수질을 모니터링 하기 위해 육안 조사, CCTV 조사, 염료추적 조사, 음량 조사 등 하수 관망에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다[6-8]. Kim 등은 CSOs를 샘플링하여 성장과 유출농도를 분석하였으며[6], Gromaire 와 Guo 등은 하수관망의 유지관리를 위해 CCTV와 로봇을 통한 자동직접탐사, 센서를 이용한 Sewer Scanner and Evaluation Technology (SSET) 방법을 소개하였다[7,8]. 하지만 이러한 선행연구는 비용과 정확도 면에서 큰 문제를 가지고 있으며, 여러 환경적 제약이 따른다는 한계를 갖는다.

따라서 본 연구에서는 비교적 환경적인 제약이 적은 시뮬레이션 방법을 이용하여 하수관망 내 비점오염물질에 대한 모델링 및 모니터링을 수행하고자 한다. 이를 위해, 소도시 유역모델을 수립하여 강우변동에 따른 하수의 유출특성을 판단하며 다변량 통계분석 방법을 적용하여 하수관망의 이상을 진단하고자 한다. 하수관망 공정모사 프로그램으로써는 관망 내 유량 및 수질을 모의할 수 있는 수학적 모델인 XP-SWMM (Stormwater & Wastewater Management Model for eXPert)을 이용하였다. 본 연구는 다음의 순서를 따라 진행되었다. 시범유역을 선정하고 유량과 수질데이터를 수집한다. 수집된 데이터를 바탕으로 SWMM을 통해 시범유역의 유출된 오염물질의 거동과 유량변화를 확인한다. 그 후 동적과 정적 시뮬레이션을 통해 하수관망 내 오염 부하량 및 오염물질 패턴을 조사하고, 주성분 분석(Principal component analysis; PCA)을 이용해 하수관망 내의 이상 상태를 진단하고자 한다.

2. 연구이론

2-1. 하수관거 시스템

하수도는 하수를 처리하기 위한 시설물로 도관과 부대시설을 말

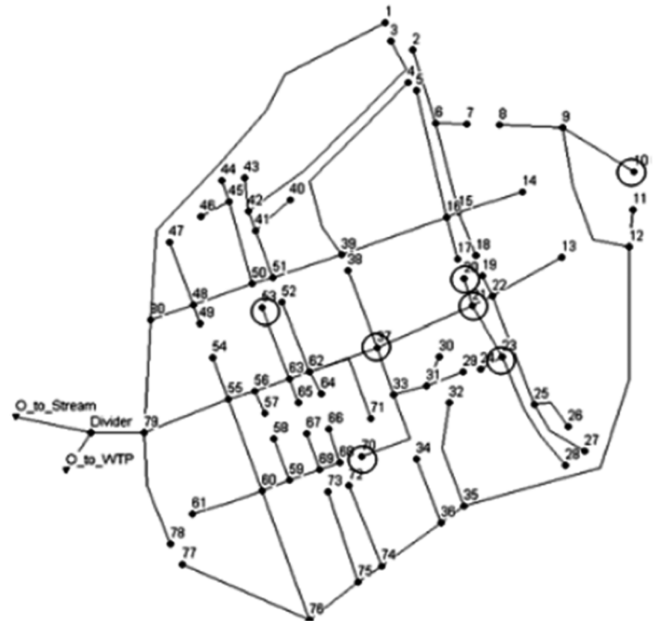


Fig. 1. The example of sewer network sectional view. (Lee et al., 2011).

하며, 하수관거 시스템은 하수를 유송시키는 기능을 맡는다. 하수관거 시스템은 배관이 주로 그물 상태로 배치되어 있어 하수관망 시스템이라고도 불리며, Fig. 1과 같은 형태를 가지고 있다. 하수관거는 시간이 흐를수록 여러 요인에 의해 관의 손상을 입어 지하수가 유입되거나, 하수가 관 외부로 유출될 뿐만 아니라 강도 높은 강우에 의해서 하수의 월류가 발생하기도 한다. 따라서 하수관거 주변 환경의 오염을 막기 위해 하수관 내의 수질변화 상태를 파악하고 하천수질 오염 방지를 위한 초기 강우 분석 및 하수관 상태의 점검이 필요하다.

2-2. SWMM을 이용한 유량 및 수질데이터 모사

SWMM은 하수 및 우수관망 해석 전용프로그램으로 도시 유역의 유출량 산정, 우수 관거 추적, 저수지 추적 등을 통하여 우수 관거와 저류지 설계 등과 같은 수량 부분과 관내의 오염 진행 같은 수질을 분석할 수 있다. 프로그램을 실행시키는 4개의 주된 블록을 가지고 있으며 각각 다른 기능을 수행하는데 Runoff 블록, Transport 블록, Extran 블록, Storage 블록으로 구성된다. Runoff 블록은 강우사상에 대해 배수유역에서의 유출현상과 수질변화를 모의하며, 지표면, 지표하 유출을 추적할 수 있고, Transport 블록은 Runoff 블록에서 연산된 결과를 가지고 하수 시스템 내의 유량과 오염물질, 하수시스템으로의 침투를 계산한다. Extran 블록은 동역학 방정식을 통해 개수로, 관수로 등에서의 흐름을 추적하며, Storage 블록은 유량과 수질에 대한 조절, 처리장치의 영향 및 비용의 평가 및 연산이 가능하다[10].

2-3. 집수관거 지표수 방정식

지표수 블록에서의 표면 기본 방정식은 비선형 저장방정식이므로써, 마찰경사가 분자의 경사면과 같다고 가정한 후, 운동 파동 방정식을 근사하여 나타낸다. Fig. 2은 지표수 흐름의 단면을 보여주는데, 하위 집수에서 수위와 유량은 연속성 방정식과 Manning의 연속 방정식 (1)과 (2)으로 나타난다[11,12].

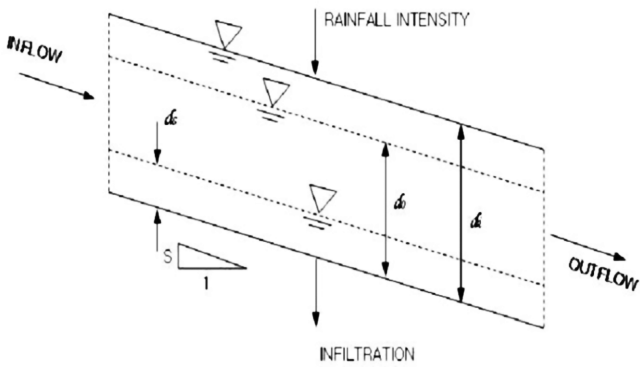


Fig. 2. Cross section of the flow of runoff.

$$\frac{dV}{dt} = A_s \frac{dd}{dt} = A_s i - Q \tag{1}$$

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

V 는 물의 체적(=Ad), d 는 수심(m), t 는 시간(s), A_s 는 수표면적, i 는 초과강우강도(m/s), Q 는 유출량(m^3/s), W 는 유역의 폭(m), n 은 Manning의 조도계수, d_p 는 지면 저류 깊이 (m), S 는 소유역의 경사(m/m)이다. 간단히 하기 위해 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 다음의 비선형저류방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = i - \frac{W}{A_s \cdot n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} = i + R \cdot (d - d_p)^{\frac{5}{3}} \tag{3}$$

$$R = -\frac{W \cdot S^{\frac{1}{2}}}{A_s \cdot n} \tag{4}$$

여기서 R 은 유역폭과 경사 및 조도계수 등으로 구성된 변수로서 유역의 특성에 따라 변화하는 유역특성인자이다.

2-4. 하수관거 유출 방정식

관거 유출 또한 비선형 저류 방정식으로부터 계산된다. Manning 식이 각 적분 연산구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동이 준정상 상태로 근사 처리된다. 관거 유출에서 사용되는 저류량은 ΔV 는 Manning의 평균유속공식을 이용하여 식 (5)와 같이 구한다.

$$\Delta V = \Delta t(Q_i + Q_w + Q_{GW} - Q) \tag{5}$$

여기서 Q 는 유출량, Q_i 는 상류유입량, Q_w 는 측방유입량, Q_{GW} 는 지하수 유입량이다.

2-5. 집수관거에서의 오염 물질 부하 방정식

유역에서의 오염물 배출과정은 강우가 시작되기 이전의 오염물 축적과정과 강우의 개시에 따른 오염물 쓸림 과정으로 크게 구분하여 설명한다. 유역에서의 오염물 축적과정은 선행건기일수, 토지의 이용정도, 강우조건, 바람, 도로의 청소상태 등과 같이 자연적인 조건 및 인위적인 조건들에 의하여 영향을 받으나, 모든 현상을 반영할 수 있는 수학적인 모형으로 구성하기는 어려우므로 경험적 공식에 의해 세워진다. 오염물의 축적과정은 Table 1과 같이 3가지 형태의 식을

Table 1. Equations of pollutant buildup and washoff

	Equation
Build-up	$PSHED = QFACT(3) \times t_a^{QFACT(2)}$
	$PSHED \leq QFACT(1)$
	$PSHED = QFACT(1) \times (1 - e^{-QFACT(2)t_a})$
	$PSHED = \frac{QFACT(1 \times t_a)}{QFACT(3) + t_a}$
Wash-off	$-POFF(t_r) = -RCOE \times t_r^{WASHPO} \times PSHED$
	$POFF(t_r) = RCOE \times WELOW^{WASHPO}$

선택적으로 사용하여 계산할 수 있다[13]. Table 1에서 PSHED는 오염물의 축적량(kg), QFACT(1)은 오염물 축적 한계량(kg/km-curb 또는 kg/ha), QFACT(2)는 오염물 축적지수, QFACT(3)는 오염물 축적계수, 그리고 t_a 는 선행건기일수(day), t_r 는 강우시작 이후 시간, POFF는 시간 t_r 에서의 오염물 누적 쓸림량(kg), WASHPO는 오염물 쓸림지수, RCOEF는 오염물 쓸림계수, WELOW는 지표면 유출유량(m^3/s)이다.

2-6. 다변량 통계모니터링

다변량 통계모니터링 중 한 방법인 주성분 분석(Principal component analysis)은 상관관계가 높은 자료들을 선형변환을 통해 고차원 정보를 유지하면서 다차원적인 변수를 축소, 요약하는 통계적 방법이다 [14]. 주성분 분석은 데이터의 분포를 유지하고, 계산 부하를 감소시키며 노이즈를 제거함으로써 에러를 최소화시키는 효과를 가져올 수 있다[15]. 따라서 이는 다량의 데이터베이스에 기반하여 다변량 통계를 통한 모델링 및 모니터링에 적용되어 왔으며, 특히 환경분야에서는 공정의 분석, 감시 및 진단분야에 대해 다양하게 사용되어 왔다[16-18]. 원래의 변수들이 가지고 있는 변이를 설명할 수 있도록 선형결합을 통해 새로운 변수를 구하게 되며 이 새로운 변수인 주성분(Principal component)은 서로 독립적인 관계를 이룬다. 주성분 분석은 다음의 Eq. (6), (7)과 같이 자료의 공분산과 고유치, 고유벡터를 통해 이루어진다.

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T \tag{6}$$

$$Sv = \lambda v \tag{7}$$

여기서, S 는 공분산 행렬, n 은 데이터 개수, x 는 데이터 행렬, x_i 은 i 번째 데이터, \bar{x} 는 데이터 평균, λ 는 고유값, v 는 고유벡터이고 각각의 고유벡터가 주성분 축이 된다.

PCA를 이용한 모니터링은 Hotelling's T^2 차트를 통해 이루어진다. Hotelling's T^2 는 Shewhart의 \bar{X} 관리도를 다변량으로 확장한 것으로, Hotelling이 제안한 T^2 통계량을 사용하여 데이터를 관리하는 차트이다. T^2 통계량을 적용하기 위해 데이터들이 서로 독립이며 동일한 정규분포를 따른다고 가정한다. i 번째 관측데이터 벡터 x 의 T^2 통계량과 관리한계선은 다음의 식을 통해 구할 수 있다.

$$T^2 = (x - \bar{x})^T S^{-1} (x - \bar{x}) \tag{8}$$

$$\frac{n(n-d)}{(n^2-1)d} T^2 \sim F(d, n-d) \tag{9}$$

$$UCL = \frac{(n^2-1)d}{n(n-d)} F_{\alpha}(d, n-d) \tag{10}$$

여기서 $F_{\alpha}(d,n-d)$ 는 자유도 p , $(n-d)$ 를 갖는 F 분포의 $(1-\alpha)$ 분위수이다. 따라서 이 UCL 값을 초과할 때 데이터에서 이상상태를 감지할 수 있다.

3. 연구방법

3-1. 가상사례연구

본 연구에서는 SWMM을 이용하여 가상유역에 대해 하수관망의 오염패턴 해석 및 관망 이상진단을 수행하였다. Fig. 4의 가상유역은 10개의 노드와 9개의 링크, 2개의 유입구와 1개의 유출구로 이루어진 네트워크로 유역면적이 총 10 ha, 모니터링 가능한 지점은 10개이다. 강우에 따른 수질 변동을 모의하기 위해, 80년 빈도의 100분 데이터를 사용하였으며, 평상시 유입구에서의 유입수 농도는 Table 4와 같다.

3-2. 하수관망의 오염패턴 해석 및 관망 이상진단

하수관망 내 비점오염원에 대한 오염패턴 모니터링 및 관망 유출에

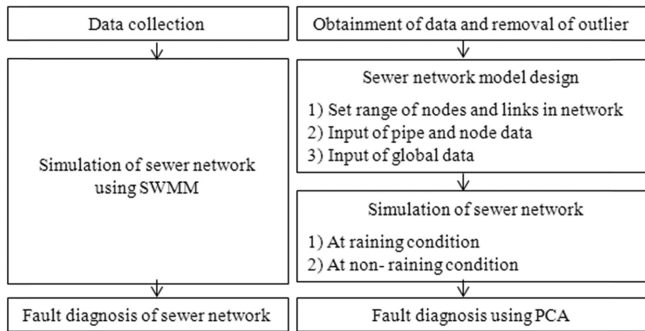


Fig. 3. The proposed scheme of this study.

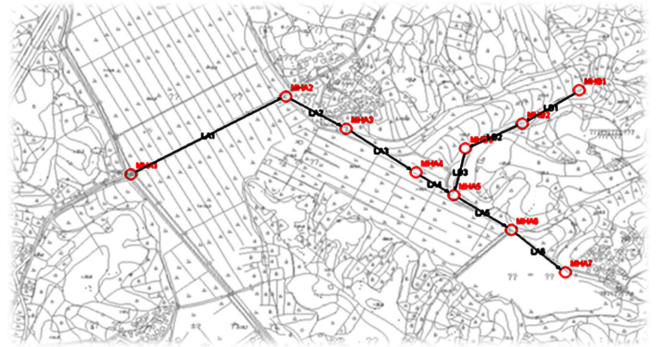


Fig. 4. The sectional view of sewer network at an imaginary basin.

대한 이상진단은 Fig. 3의 연구순서를 따라 진행되었다. 본 연구는 Fig. 3과 같이 1) 대상지역에 대한 소유역 자료 수집, 2) SWMM을 이용한 모델링 및 하수관망 내 비점오염원의 물질의 거동패턴 및 유출농도 모사, 3) PCA 분석을 통한 하수관망의 이상진단, 3단계로 나뉘어 수행되었다.

자료가 수집된 후, 하수관망 모델을 설계하는 과정은 1) 노드 및 링크 범위 선정, 2) 관망 설계 데이터 입력, 3) 글로벌 데이터 입력의 3단계로 나뉘어진다. 본 연구에서는 대상지역과 동일하게 10개의 노드, 9개의 링크를 사용하여 하수관망 모델을 설계하였으며, 모식도는 Fig. 4와 같다.

Table 2와 3은 각각의 노드와 링크에 대한 관망 설계 데이터를 나타낸다. 관망 설계 데이터는 하수관망의 관망의 관저고와 지반고, 관의 직경, 길이, 조도 등 관의 물리적, 위치적 특징을 나타내는 데이터를 의미한다. 각 노드의 이름은 MHA No. 혹은 MHB No.로 이루어지는데(예; MHA5, MHB2), 노드와 연결된 유입구의 위치에 따라, MHA와 MHB로 나뉘어진다.

Table 2. Specific data for designing individual nodes

Node	Sub catchment	Ground elevation (m)	Invert elevation (m)	Impermeability (%)	Concentration factor(min)
MHA1	1	138.2	124.6	50	10
MHA2	1	135.1	122.5	50	10
MHA3	1	143.0	121.3	50	10
MHA4	1	133.6	118.4	50	10
MHA5	1	132.0	118.2	50	10
MHA6	1	129.0	118.0	50	10
MHA7	1	125.8	114.5	50	10
MHB1	1	137.2	128.2	50	10
MHB2	1	135.7	124.9	50	10
MHB3	1	133.0	123.1	50	10

Table 3. Specific data for designing individual links

Conduit	Upstream Invert elevation (m)	Diameter (m)	Downstream Invert elevation (m)	Length (m)	Rough-ness	Shape
LA1	124.60	1.20	122.50	200	0.014	Circular
LA2	122.50	1.35	121.34	220	0.015	Circular
LA3	121.34	1.50	118.40	152	0.018	Circular
LA4	118.40	1.80	118.20	150	0.015	Circular
LA5	118.20	3.00	118.00	91	0.035	Circular
LA6	118.00	3.00	114.50	137	0.034	Circular
LB1	128.20	1.35	124.90	155	0.015	Circular
LB2	124.90	1.35	123.10	106	0.015	Circular
LB3	123.10	1.60	118.20	145	0.015	Circular

Table 4. The influent average concentration of pollutants

Unit (mg/L)	Pollutants
BOD	30
COD	50
TN	5
TP	0.5

하수관망 모델링을 위해서는 강우데이터, 토지이용 데이터, 강우 및 wash-off에 의해 하수관망으로 유입되는 오염물질 농도 등 다양한 글로벌 데이터가 필요하다. 본 연구에서 토지이용 데이터는 각 노드 주변구역의 주거지, 상업지, 나대지의 분포도를 퍼센트 방식으로 구별하였으며, wash-off는 유량 가중 평균 농도방식(event mean concentration; EMC)을 이용하였다. 또한 투수구역에서의 침투를 고려하기 위해 식 (11)의 Horton 침투능 방정식을 사용하였다.

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \tag{11}$$

여기서 f_p 는 임의시간 t (hr)에 대한 침투능을, f_0 는 초기 침투능을, f_c 는 중기침투능을, k 는 토양의 종류와 식생피복에 대한 상수를 의미한다.

하수관망의 공정모사는 정적 상태와 동적 상태로 나뉘어 수행되었다. 본 연구에서 정적상태는 비강우를, 동적 상태는 강우를 의미하며, 강우사상을 모의하기 위해 80년 빈도의 100분 데이터를 이용하였다. 따라서 본 연구의 두 번째 단계에서는 강우 여부에 따라 하수

관망을 공정모사하며, 이를 통해 시간에 따른 각 노드와 링크에서의 비점오염물질 패턴 및 부하량을 산출하였다.

본 연구의 마지막 단계에서는 하수관망 공정모사 결과에 대한 PCA 분석을 수행하며, 이를 통해 하수관망 내 비점오염물질간의 상관성 분석 및 관망 내 이상을 진단하였다. 일반적으로 PCA 분석에서는 이상치를 진단하기 위해 Hotelling T² 차트를 이용하는데, 해당 데이터가 T² 한계를 초과하는 경우 이상치로 간주된다. 따라서, 본 연구에서는 하수관망 내 각 지점에 대한 Hotelling T² 차트를 이용하여 월류, 누수 등의 하수관망 이상 발생여부와 그 위치를 각각 모니터링 하였다.

4. 연구결과 및 고찰

Fig. 5는 하수관망 공정모사 프로그램인 SWMM을 통해 설계된 가상 구역 하수관망의 layout이다. 비점오염물질의 유입구는 MHA1과 MHB1이며, 유출은 MHA7에서 일어나는 것으로 설계되었다. Fig. 6는 하수관망을 강우시(동적 상태)에 모사한 경우 노드MHA1에서의 6시간 동안의 오염물질 농도 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 10개의 노드와 9개의 링크 중 노드MHA1(Fig. 6), MHA4(Fig. 7), MHA7(Fig. 8)에 대한 결과만을 나타내었다. 각 노드에서 유량과 수질의 변화는 비슷한 패턴을 보였다. 유량의 경우, 노드MHA1는 공정모사 3시간 이후 부분적인 피크를 나타냈다. 첫 번째 피크는 강우 사상에 의해 유입되는 유량과 오염물질의 증가 때문으로 사료된다.

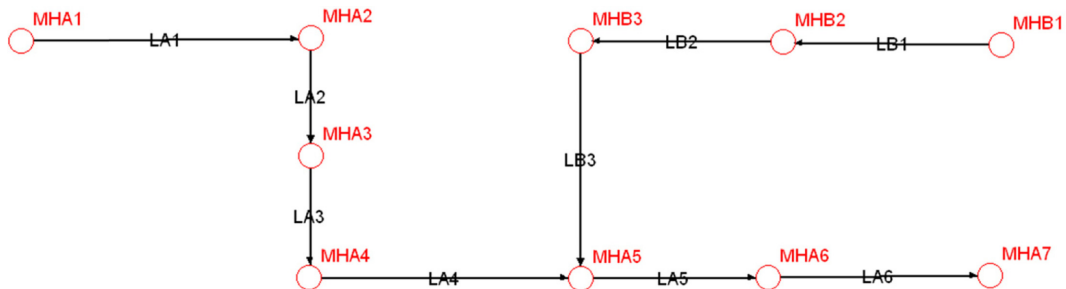


Fig. 5. Layout of a sewage network designed using SWMM program.

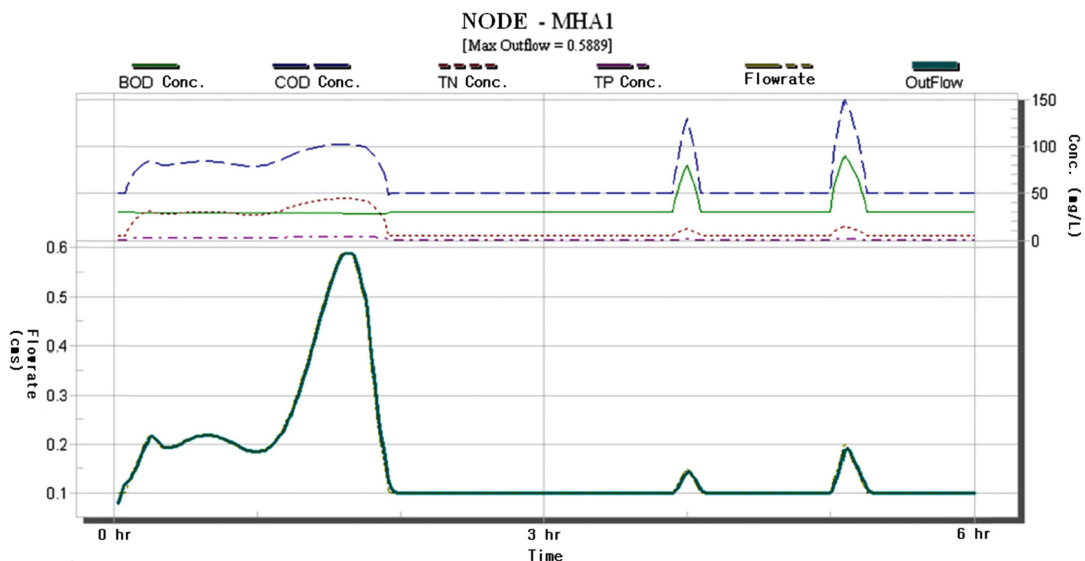


Fig. 6. Variations in flowrate and quality of sewage in node MHA1.

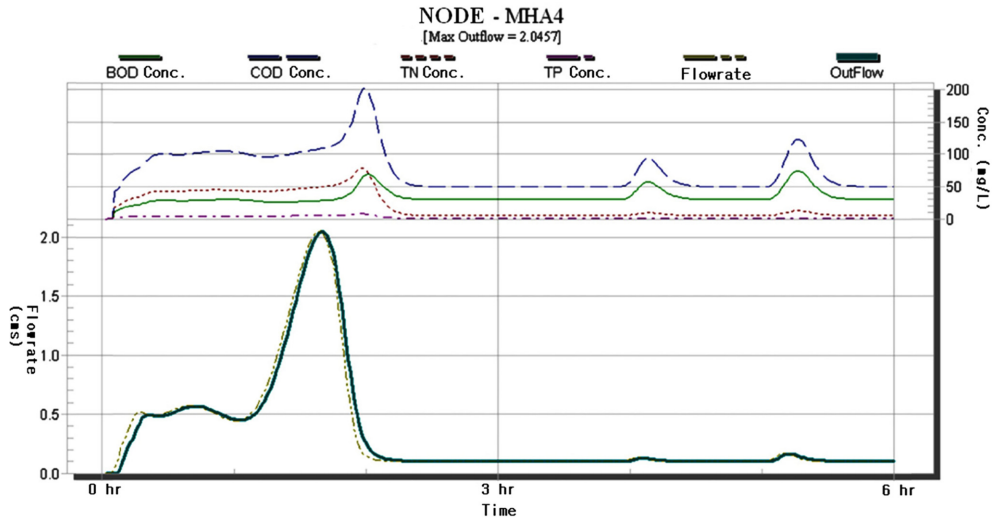


Fig. 7. Variations in flowrate and quality of sewage in node MHA4.

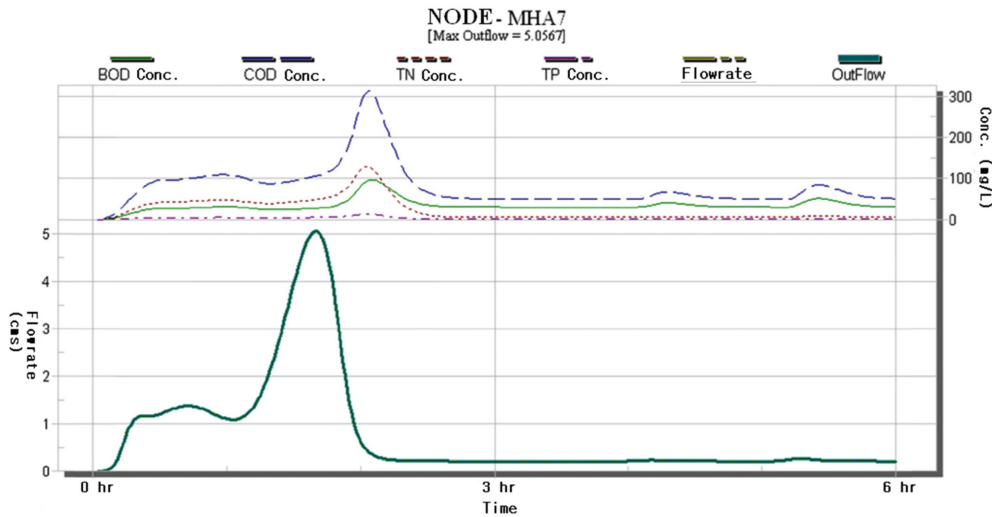


Fig. 8. Variations in flowrate and quality of sewage in node MHA7.

그러나 두, 세 번째 피크의 경우, 유량의 증가에 비해 오염물질의 증가 기울기가 매우 가파른 것을 보아 이는 유량의 증가에 의한 것이 아니며, 고농도 오염물질의 유입 때문으로 사료된다. 또한, 하수가 노드 MHA1, 4,7로 흘러갈수록 오염물질 농도가 전체적으로 증가하는 모습을 보이는데, 이는 각 노드에서 유입되는 오염물질이 합쳐지기 때문인 것으로 사료된다.

Table 5는 강우 여부에 따른 하수관망의 유량 변화를 나타낸다. 비강우시에는 유입구(노드 MHA1, MHB1)를 통해서만 하수가 유입되는 반면, 강우시에는 유입구뿐만 아니라, 각 노드를 통해 빗물이 하수관망 내로 유입된다. 따라서 강우시 하수관망에서 유출된 하수의 양은 비강우시에 비해 월등히 증가하며 이는 강우시 하수관망으로부터

터 월류나 홍수가 발생할 수 있음을 의미한다. 하수관망의 경우 유입유량과 유출유량이 같지않다는 특징을 가지므로 본 연구에서는 하수관망내의 변화를 감지하기 위해 유입유량과 유출유량의 차이, continuity error를 사용하였다. 비강우시(정적 상태)에는 continuity error가 양의 값을 가짐으로써, 유출유량에 비해 유입유량이 많음을 알 수 있었다. 이는 비강우시 하수관망 내에 더 많은 하수가 잔류함을 의미한다. 반면, 강우시(동적 상태)에는 continuity error가 음의 값을 나타냈는데 이는 유입유량보다 유출유량이 더 많음을 의미한다. 이에 따라 하수관망 내에 잔류하던 유량 일부가 비강우시에 비해 더 많이 유출될 수 있으며 수계에 오염부하를 가중시킬 것으로 사료된다.

Table 6은 강우여부에 따른 하수관망 내 비점오염물질의 부하량 변화를 나타낸다. 강우시에는 대상구역에서 wash-off를 통해 발생된 비점오염물질이 각 노드를 통해 유입되므로 비강우시에 비해 월등히 많은 오염부하를 보였다. 특히, 비강우시 하수관망으로 유입되는 BOD의 부하는 TN보다 높지만, 강우시 하수관망으로 유입되는 BOD의 부하는 TN보다 낮음을 볼 수 있다. 이는 유입구를 통해 하수관망에 유입되는 BOD는 TN의 양보다 많으나, wash-off로 인해

Table 5. Inflow and outflow volume of sewage network in raining and non-raining simulation

	Inflow (m ³)	Outflow (m ³)	Continuity error (m ³)
Non-raining (Steady state)	4,320	4,311.89	8.11 (0.1878%)
Raining (Dynamic)	16,455.79	16,462.79	-7.00 (0.0426%)

Table 6. Pollutant loading of sewage network in raining and non-raining simulation

		Influent loading (kg/s)	Output loading (kg/s)	Remaining loading
Non-raining (Steady state)	BOD	129.60	120.91	5.82
	COD	216.00	201.51	9.69
	TN	21.60	20.15	0.97
	TP	2.16	2.02	0.10
Raining (Dynamic)	BOD	473.99	447.80	5.99
	COD	1590.21	1488.61	9.99
	TN	663.06	616.65	1.00
	TP	65.26	60.68	0.10

하수관망에 유입된 양은 BOD보다 TN이 더 많음을 알 수 있다. BOD, COD, TN, TP의 오염부하는 강우시 비강우에 비해 각각 3.66, 7.36, 30.7, 30.2배 증가하였다. 따라서 TN, TP는 BOD, COD에 비해 wash-off에 의해 더 많이 유입되어짐을 알 수 있다. 하수관망 내에 잔류하는 비점오염물질의 양은 강우시와 비강우시일 때 차이를 나타내지 않았는데 이는 빗물에 의해 하수관망 내 오염물질이 희석, 정화되었기 때문으로 사료된다. 또한 잔류하는 오염물질과 유출되는 오염물질의 합보다 유입된 오염물질의 부하가 높음을 관찰할 수 있어 하수관망 내 월류, 희석, 또는 누수가 있음을 추측할 수 있다.

하수관망 내 오염물질간의 상관관계를 규명하며 하수관망의 이상을 진단하기 위해 PCA 분석을 수행하였다. PCA의 분석변수로는 SWMM 시뮬레이션을 통해 도출된 노드MHA1, MHA4, MHA7에서의 오염부하량을 사용하였다. Fig. 8과 9는 노드MHA1, MHA4, MHA7에서의 PCA 분석 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 PCA 결과로써 loading plot과 Hotelling T² 차트를 이용하였다. Loading plot은

변수간의 상관성을 나타내는 그래프로써 근접한 위치에 있는 변수일 수록 상관성이 높음을 의미한다. 노드MHA1의 경우, 유입유량, 유출유량, TN, TP는 밀접한 관계를 가지며, BOD와 COD는 다른 변수들에 독립적인 것으로 판단된다. SWMM 모사를 통해 강우시의 TN, TP 부하량은 wash-off의 영향을 많이 받는 것을 확인하였는데, 본 loading plot은 이러한 사실과 일치하는 결과를 나타내었다. 노드MHA4의 경우, 노드MHA1와 달리, 1)유입유량과 유출유량, 2) TN과 TP가 각각 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다. 노드MHA7에서는 노드MHA4와 동일한 결과를 보였는데, 이는 하수가 하수관망 내에서 흘러가면서 다른 노드에서 유입되는 하수와 혼합 또는 희석되어 유입, 유출 유량과 비점오염물질간의 상관도가 낮아졌을 것으로 사료된다.

Fig. 9, 10은 이상치를 진단하기 위해 사용되는 Hotelling T² 차트로써, 특정샘플의 T² 값이 신뢰한계선을 초과하면 해당 샘플은 이상치로 간주된다. Fig. 10(a)는 노드MHA1에 대한 Hotelling T² 차트

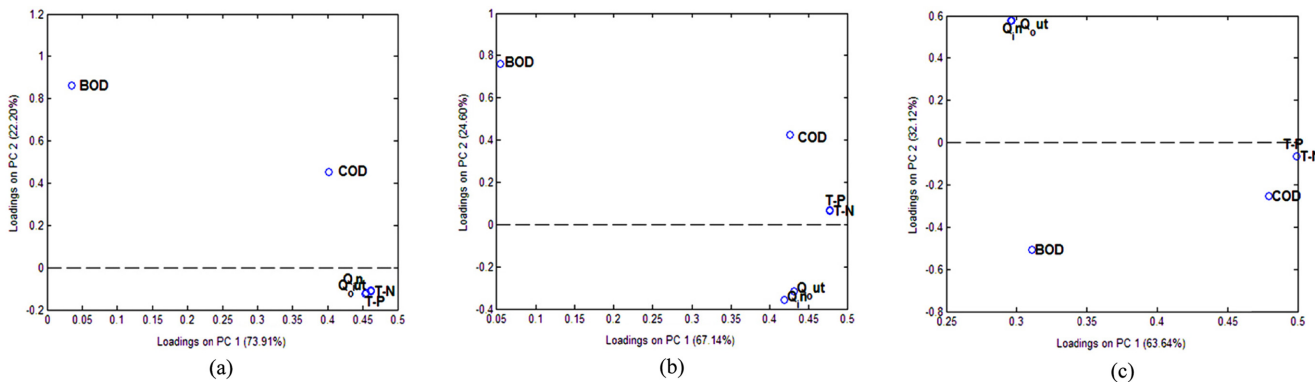


Fig. 9. Loading plots of PCA at Node. (a) MHA1, (b) MHA4 and (c) MHA7.

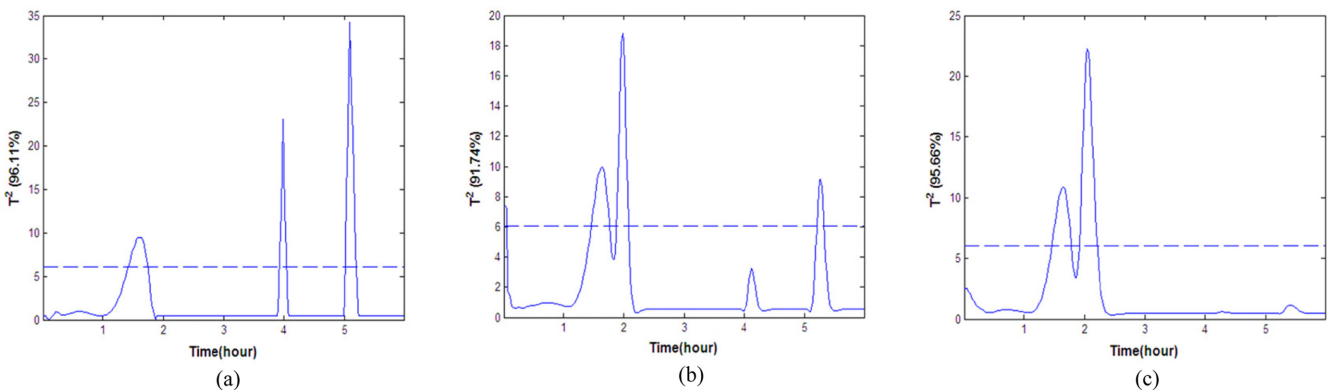


Fig. 10. Hotelling's T² charts of PCA at Node. (a) MHA1, (b) MHA4 and (c) MHA7.

를 보여준다. Hotelling T^2 값은 유입유량 및 오염물질 부하를 포괄하는 하나의 값으로 나타난다. 노드MHA1의 경우, 3구간(1시간 40분, 4시간, 5시간)에서 신뢰한계선을 초과하였다. 이 세 구간 중 1시간 40분 부근에서는 100분 동안 발생했던 강우사상에 의한 유량의 증가와 wash-off로 인한 오염물질의 유입에 의한 것이나, 나머지 두 구간은 강우사상과는 관련이 없는 하수관망 내 이상치임을 의미한다. 유량 증가에 비해 급격한 오염물질의 증가폭이 발생함에 따라 나머지 두 이상치는 원래의 하수를 통해 유입되는 오염물질보다 더 높은 농도의 오염물질 유입에 따른 것으로 사료된다. 노드MHA4의 경우, 1시간 40분, 2시간, 5시간 부근에서 이상치가 발생하였는데, 이는 노드MHA1에서와 동일한 결과이다. 노드MHA7의 경우, 노드MHA1, MHA4와는 달리 5시간 부근에서의 이상치가 발견되지 않음을 볼 수 있다. 이는 노드MHA1과 4에서 발생했던 세 번째 이상치가 다른 노드를 통해 유입된 하수와 혼합 및 희석되어, 유출구로 흘러갈수록 이상치의 영향이 상쇄되었을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 하수관망 내의 비점오염물질의 제거 패턴 해석과 하수관망의 이상진단을 위한 방법론을 제시하였다. SWMM을 통해 하수관망을 모사함으로써, 강우시와 비강우시 도시구역에서의 유입, 유출되는 오염물질의 양을 산정하고 해석하였다. 모사된 결과를 바탕으로 다변량 통계기법인 주성분 분석을 사용하여 오염물질과 유입, 유출유량의 상관관계를 규명하였으며, 모니터링 차트를 통해 관망 내 이상진단을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 방법론을 통해 강우시와 비강우시 하수관망 내의 오염물질의 거동을 모사할 수 있었으며, 특히, 강우시 wash-off에 의해 TN과 TP의 오염부하량이 급격하게 증가하여 수계로 들어가는 TN과 TP의 오염부하가 가증될 것으로 예상된다. 또한 직접 탐사 없이 지하에 위치한 하수관망 내의 이상을 진단할 수 있어 모니터링 비용의 절감을 가져올 것이라 예상된다. 하지만 본 연구에서는 가상사례가 적용되었고 실제 네트워크로의 적용 및 검증이 아직 이루어지지 않았다. 한편, 실제 네트워크에 비해 간단한 네트워크에 적용되었기 때문에 복잡한 네트워크에 적용할 경우, 본 연구에서 감지하지 못한 새로운 문제가 발생할 수 있다. 따라서 추후 연구에서는 실제 유역의 네트워크 데이터를 이용하여 검증이 이루어질 것이며, 규모가 크고 복잡한 네트워크에 맞는 연구의 확장이 필요하다. 결론적으로 본 연구는 하수관망에 통계학적 방법을 이용한 모니터링을 적용한 연구로써, 추후 넓은 범용성을 가진 연구를 위한 기초연구가 될 것으로 예상된다.

감 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2012-001400과 No. 2012-0000609).

참고문헌

1. Chang, M., McBroom, M. W. and Beasley, R. S., "Roofing as a Source of Nonpoint Water Pollution," *J. Environ. Manage.*, **73**(4), 307-315(2004).
2. Santhi C., Srinivasan R., Arnold J.G., Williams J.R., "A Modeling

- Approach to Evaluate the Impacts of Water Quality Management Plans Implemented in a Watershed in Texas," *Environ. Modell. Softw.*, **21**(8), 1141-1157(2006).
3. Park, M. G., Ahn, W. S., Kim, D. S. and Oh, J. M., "Quantitative/Qualitative Analysis of Infiltration/Inflow and Exfiltration on Sewer Pipe," Daewoo Construction Technology Report 1, **27**, 98-107(2005).
 4. Kim, Y. S., "Prediction of Water Quality Improvement Effect in Han River with Sewer Rehabilitation," *Chungju university*, Master thesis(2005).
 5. Shinheung Concrete, "Standardization of the Concrete Sewage Pipeline System with the Water tightness and Corrosion Resistance for Field Applicability," *Korean Ministry of Environment* (2007).
 6. Kim, N. I., Mary, F. P., Greg, M. and Jim, C., "Sampling and Modeling Approaches to Assess Water Quality Impacts of Combined Sewer Overflows The Importance of a Watershed Perspective," *J. Great Lakes Res.*, **31**, 105-115(2005).
 7. Gromaire, M. C., Garnaud, S., Saad, M. and Chebbo, G., "Contribution of Different Sources to the Pollution of Wet Weather Flows in Combined Sewers," *Wat. Res.*, **35**(2), 521-533(2001).
 8. Guo, W., Soibelman, L. and Garrett, J. H., "Automated Defect Detection for Sewer Pipeline Inspection and Condition Assessment," *Automation in Construction*, **18**, 587-596(2009).
 9. Lee, J. H., Jun, H. D. and Park, M. J., "Method to Determinate Monitoring Points in Sewer Networks," *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **11**(3), 229-235(2011).
 10. Jung, J. U., "Application of Urban Flood Model in the Area of Fan-Typed Sewer Network," *Kangwon University*, Master thesis, 1-63(2011).
 11. Kim, J. H., "The Study on SWMM Model for Analysis of Urban Rainfall-runoff," *Kyonggi University*, Master thesis, **139**(1-2), 23-32(1994).
 12. Park, S. Y., Lee, K. W., Park, I. H. and Ha, S. R., "Effect of the Aggregation Level of Surface Runoff Fields and Sewer Network for a SWMM Simulation," *Desalination*, **226**(1-3), 328-337(2008).
 13. Lee, J. Y., Jang, S. H. and Park, J. S., "Application of SWMM for Management of the Non-point Source in Urban Area-Case Study on the Pohang City," *J. Environ. Health Sci.*, **21**(8), 1141-1157(2008).
 14. Kim, D. U., "Feature Extraction and Classification of Birdsong Using Kernel Principal Component Analysis and Support Vector Machine," *Kyungpook National University*, Master thesis (2010).
 15. Lee, M. R., "A Study on Deterioration Evaluation Model of Water Main using Integrated PCA and ANN," *University of Seoul*, Master thesis, 1-144(2010).
 16. Kim, Y. S., Kim, M. J., Lim, J. J., Kim, J. T. and Yoo, C. K., "Predictive Monitoring and Diagnosis of Periodic Air Pollution in a Subway Station," *J. Hazard. Mater.* **183**(1-3), 448-459(2010).
 17. Lee, Y. H., Cho, H. W. and Han, C., "Real-time Monitoring and Diagnosis for Batch Processes Using Local Models by Time Intervals," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **37**(3), 402-410(1999).
 18. Woo, K. S., Lee, C. J., Han, K. H., Ko, J. W. and Yoon, E. S., "Fault Detection & SPC of Batch Process using Multi-way Regression Method," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **45**(1), 32-38(2007).