

## 낙동강 유역 내 하수처리구역의 비점 배출 부하량 분석 Analysis on Load of Non-point Source from Sewage Treatment Districts in Nakdong River

신 현 석\* / 김 미 은\*\* / 김 재 문\*\*\* / 장 종 경\*\*\*\*

Shin, Hyun Suk / Kim, Mi Eun / Kim, Jae Moon / Jang, Jong Kyung

### Abstract

The inflow of nonpoint pollution sources due to sustainable development and urbanization is gradually increasing and causes a diversity of water pollution. There are lots of difficulties to find a solution as the problems related to variation of hydrological and natural phenomenon. A differentiated method to estimate the nonpoint pollution sources has been proposed using rainfall and characteristics of urbanization and observed data from sewage treatment districts in the study. The types of nonpoint pollution sources on an assumption of combined sewer system have been classified as three types which are inflow of rainfall, bypass of sewage treatments, and combined sewer overflows from a river. Three types for estimation of nonpoint pollution sources applied more accurately to generate a amount of nonpoint pollution loads. This study is expecting a wide application for effective water resource management on TMDL (total maximum delivery load) unit watershed and sewage treatment districts

**Keywords** : nonpoint pollution source, combined sewer overflows, bypass, sewage treatment district, neural network

### 요 지

지속적인 개발과 도시화로 인하여 하천으로 유입되는 비점오염원의 비율 역시 점차 증가하는 추세이며 비점오염원이 수질악화에 미치는 영향은 점점 더 커지고 있다. 하천의 수질오염을 발생시키는 비점오염원 해결방안을 모색하고 있지만 도시화에 따른 수문현상변동 및 자연현상과 관련된 문제라 연구에 어려움이 많다. 본 연구에서는 기존의 총량원단위법과 달리 유역의 강우 및 도시화 특성과 처리장 운영자료를 활용하여 차별화된 비점오염원 산정 방법을 제시하였다. 하수처리장의 배수구역 내 관거시스템을 합류식으로 가정하여 강우 시 하수처리장의 배수구역별 비점 발생형태는 하수처리장 강우유입량, 하수처리장 우회유량(bypass) 및 하천 토구의 CSO의 3가지로 크게 구분하여 적용함으로써 오염부하량을 산정함으로써 오염총량 단위유역 및 하수처리구역의 관리를 위한 비교자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 비점오염원, 합류식하수도 월류수, 우회유량, 하수처리장, 인공신경망

\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: hsshin@pusan.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사 (e-mail: way8210@naver.com)

Doctor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 석사과정 (e-mail: ekzmans7@naver.com)

Master's Course, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*\*\* 교신저자, (주) 이메트릭스 (e-mail: jkcopyleft@nate.com, Tel: 82-31-345-6500)

Corresponding Author, E-MATRIX co.LTD

## 1. 서 론

최근 급격한 도시화와 지속적인 개발로 인하여 수질관리에 다양한 문제가 발생하고 있다. 이에 따라 비점오염원(Nonpoint Source Pollution, NPS)을 정량적으로 산정하고자 하는 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다. 다양한 변화로 발생하는 유역 내 비점오염원은 강우 및 유역의 수문특성과 연계되어 있어 정량적 산정 및 과학적 분석 등 오염원 관리에 어려움을 발생시킨다. 유역에서 발생하는 비점오염부하량은 일반적으로 지목별 원단위를 산정하거나 비점오염원 모형의 구축을 통하여 산정하여 왔다. 특히, 하수처리구역의 비점오염량 산정 연구에는 미국 환경부(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 우수관리모형인 SWMM(Storm Water Management Model) 등을 이용한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Seo (2001)는 도시유역 내 위치한 하천에서 발생하는 월류수인 CSO(Combined Sewer Overflow)와 오염물의 유출해석 연구를 위해 지역정보시스템인 GIS(Geographic Information System)와 SWMM 모형을 연계한 통합모형을 구축했고 이를 바탕으로 합류식 관거의 월류량과 오염물 배출부하량의 산정기법과 분석기법을 개발했다. Bae et al. (2003)은 도시유역에서 초기강우에 의한 비점오염원 부하량 산정에 관하여 경기도 마석 아파트단지 및 주변도로를 SWMM으로 구축하여 비점오염량 및 토지이용에 따른 토지이용가중원단위를 산정하였고, Chae et al. (2004)은 GIS를 이용하여 안양천 유역의 지역인자를 추출하였으며 추출된 인자들을 XP-SWMM(Storm Water Management Model for eXPert)에 적용하였다. 적용된 모형의 매개변수는 민감도 분석을 통해 유출에 민감한 유역인자들을 선정했고 선정된 인자들은 유전자 알고리즘인 GA(Genetic Algorithm)를 이용하여 자동보정 수행을 통해 투수유역의 표면저류량이 가장 큰 값을 보여줌을 검증하였다. 또한 Kim et al. (2002)은 보령담수호 유역을 SWMM으로 구축하고 유출량 및 오염부하량을 산정하여 월평균부하량을 통해 계절별 특성을 파악하고 유출량에 대한 민감도 분석결과로 유역의 저류깊이가 가장 민감함을 도출하였다. Hwang et al. (2011)은 서울시와 같은 대도시의 수환경 보전을 위해 비점오염원 처리대책수립을 장기유출모형과 관거의 상태 모의가 가능한 Discharge Load considering Sewer Settlement(DLSS) 모형을 개발하여 도시유역관리 수준에 따라 CSOs 배출부하량을 산정하였고 환경부에서 산정된 배출부하량과 비교한 결과 7~9월에 발생하는 편차를 제외하고는 오차가 크지 않다는 결과를 도출

한 바 있다. 국외에서 Santhi et al. (2001)은 점·비점오염원의 우려로 인해 미국 텍사스 스키캐강 북쪽 유역을 대상지역으로 선정하여 Best Management Practices(BMPs)를 정량화하기 위해 Soil & Water Assessment Tool(SWAT)을 이용한 모형을 구축하여 점·비점오염원 관리 및 제어에 유용한 도구임을 밝힌 바 있다. Christopher et al. (1997)은 수질오염총량관리제의 적용을 위해 도시화된 유역과 삼림유역에서의 유량과 유사량 비교를 유량 분산 매개변수(grid cell)와 Agricultural Nonpoint Source Runoff(AGNPS)의 값을 통해 모델링으로 산정된 식이 농업지역뿐만 아니라 도시 및 삼림유역에서도 적용 가능하며 추후에 비점오염원 유출 모델링은 다양한 강우의 변동성이 고려된 특정 오염물질도 씻겨 내려감을 추측했다. Zushi et al. (2008)은 Products Containing Perfluorinated Compounds(PFC)가 환경오염에 치명적임을 확인하고 스루미강을 대상유역으로 선정하여 강물과 하수처리장에서 발생하는 폐수를 수집한 뒤 분석을 통해 하천유량의 증가에 따라 PFC의 부하량이 증가하는 결과를 도출하였다. 또한 강우 시 발생하는 유출량이 하수처리장에서 배출되는 폐수보다 2.11배나 더 많은 PFC를 함유하고 있으며 이는 비점오염원에 기여하는 정도가 높음을 도출한 바 있다. 특히 원단위산정법은 비점오염원의 산정이 비교적 간편하며 적용이 용이하여 주로 사용되고 있으나 도출된 부하량이 유역 내 지역적으로 변동성이 커서 결과값의 적용성에 대한 논의와 함께 비점오염원의 정량적 산정 및 분석 기법에 관한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있다. 기존의 비점오염원 산정 및 분석에 관한 연구동향을 살펴보면 원단위법을 사용하거나 해당유역 내 모형을 구축함으로써 강우사상 및 유역특성을 고려할 수 있다. 하지만 분석하고자 하는 대상유역에 대한 유역분할 및 유역 내 특성 정보의 추출을 위하여 복잡한 모형 구축 과정에서의 노력과 상당 시간이 소요된다. 또한 도출된 결과에 대한 신뢰도 역시 변동폭이 크다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기상 및 수문자료와 하수처리장의 운영자료, 기존에 구축된 SWMM-온천천 모형(Shin et al., 2009)을 연계하여 오염부하량을 산정하였다. 낙동강 유역 내 하수처리구역 내 비점 배출 부하량을 산정하기 위하여 비점오염원 발생 형태를 하수처리장의 강우-유입량, 하수처리장의 우회유량(bypass), 하수처리구역의 CSO 유량을 구분하여 분석하였다. 낙동강 유역 내 오염총량 단위유역별 비점오염원에 대한 정량화 방안을 검토하였으며 간편하면서도 차별화된 오염부하량 산정방법을 통해 새로운 비점오염원 산정 방법을 제시하였다. 더 나아가 하수처리구역 관리를 위한 비교자료로 활

용하고자 한다.

## 2. 연구대상지역

낙동강 유역의 유역면적은 23,790 km<sup>2</sup>로 남한 면적의 약 23.9%를 차지하고 있다. 이 유역의 위치는 낙동강수계를 중심으로 동경 127°29′~129°18′, 북위35°03′~37°13′ 사이에 위치하고 있으며 우리나라 제2의 하천유역이라고 불린다. 북쪽으로는 한강유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 접하고 있으며 동쪽으로는 태백산맥이 동해안 유역과 분수령을 형성하고 있다. Fig. 1은 연구대상지역인 낙동강 유역 내 61개 하수처리장의 명칭과 위치를 나타내었다.

## 3. 연구방법

### 3.1 Neural Network Model

신경망(Neural Network, NN)은 인간의 뇌를 모방하여 대규모로 각각의 세포를 연결시킨 네트워크 형태의 정보 처리구조로 인간의 뇌에 존재하는 신경 세포를 단순화 하여 수학적 모델링으로 구현한 것이다. 또한 비선형적인 구조를 보여주고 있는 값을 이용하여 어떤 결과를 예측하고자 할 때 사용된다. 인공지능망의 단위들은 다양하지만 일반적으로 신경단위들은 Fig. 2와 같은 병렬구조를 이루고 있다. 이 네트워크를 다층전방향 신경망이라고 하며 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되어 있다(Kim, 2012). 입력층에서 값을 입력하면 Fig. 2에 보이는 바와 같이 은닉층으로 연결되고 은닉층에서는 다시 출력층으로 연결되는 구조이다. Fig. 2에서 은닉층으로 가중된 입력값  $h_j$ 는 다

음 Eq. (1)로 나타낼 수 있다.

$$h_j = \sum_{i=1}^{N_I} w_{ij}X_i + \theta_j, j = 1, \dots, N_H \quad (1)$$

여기서,  $N_H$ 는 은닉층 절점수,  $\theta_j$ 는 은닉층 j번째 절점의 편차(bias)입력,  $w_{ij}$ 는 입력층 i번째의 절점과 은닉층 j번째의 절점사이의 가중치를 나타낸다.

입력층에서 입력한 값이 은닉층으로 전달되어 각 절점에서 Eq. (1)에 의해 합산되고, 합산된 자료들이 비선형적 변환이 이루어져 출력층으로 전달되어 Eq. (2)의 하이퍼볼릭탄젠트(hyperbolic tangent) 함수 또는 Eq. (3)의 시그모이드(sigmoid)함수를 사용하여 출력층으로 전달된다.

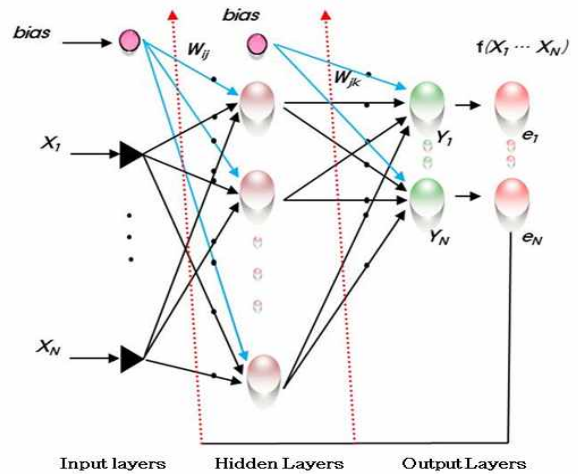


Fig. 2. Structure of Back Propagation Algorithm of Neural Network

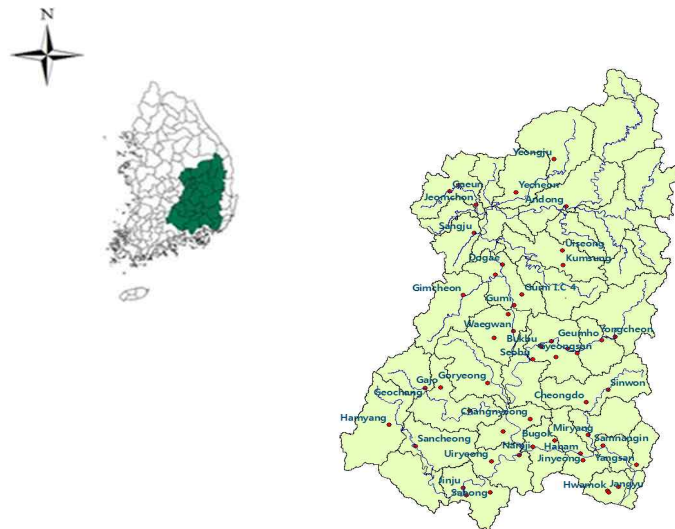


Fig. 1. Location of Wastewater Treatment Plants in Nakdong River

$$\text{Hyperbolic tangent: } f(u) = \frac{1 - \exp(-u)}{1 + \exp(-u)} \quad (2)$$

$$\text{Sigmoid function: } f(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \quad (3)$$

은닉층에서 가중치에 의해 변환된 자료들은 각 출력층으로 변환된 자료들을 전송하며, 출력층에서 선형 또는 비선형 함수에 의해 변환되는 출력값을 연속적으로 출력하여 얻은 값이 신경망을 사용한 목적이 된다. 출력층으로 가중된 입력은 Eq. (4)를 가지게 된다.

$$Y_k = \sum_{j=1}^{N_j} w_{jk} H_j + \theta_k, \quad k = 1, \dots, N_0 \quad (4)$$

여기서,  $N_0$ 는 출력층 절점수,  $\theta_k$ 는 출력층 k번째 절점의 편차입력,  $w_{jk}$ 는 은닉층 j번째 절점과 출력층 k번째 절점 사이의 가중치이다. 또한 출력층으로부터의 출력값  $Y_k$ 는 전달함수를 사용하여  $f(Y_k)$ 로 나타낼 수 있으며 이러한 비선형적인 역전파알고리즘의 특성을 본 연구에 적용하였다(Kim, 2013).

### 3.2 연구방법

낙동강 유역을 대상으로 하수처리구역내 비점오염의 정량적인 산정을 위하여 배수구역의 관거 시스템을 합류식

으로 가정하고 Table 1과 같이 강우 발생 시의 비점 발생 형태를 하수처리장의 강우유입량, 하수처리장의 우회유량(Bypass), 하수처리구역의 CSO 유량으로 구분하여 산정하였다.

하수처리장으로 유입하기 전 처리장 유입 전단에 위치한 토구에서 3Q를 차집하고, 3Q 외에 유량은 월류수(CSOs)로 가정하여 방류하천으로 1차 처리되며 토구에서 차집된 3Q는 하수처리장에서 1일에 처리할 수 있는 1Q(Rainfall Inflow)를 제외한 나머지 2Q가 우회유량(Bypass)으로 처리된다고 가정하였다. Fig. 3은 비점발생형태를 나타내었다. 비점발생형태는 총 3가지 형태로 구분하여 NPS 분석을 실시하였다. 하수처리장의 강우유입량, 우회유량, 배수구역 내 CSO 산정은 강수 시 관거시스템으로 유입하여 하수처리장으로 유입되는 양, 유입부에서 배제 배출되는 양, 차집관 연결부에서 하천으로 방류되는 양으로 각 NPS를 정량적으로 산정하고 분석을 실시하였다.

#### 3.2.1 하수처리장의 강우유입량과 우회유량

하수처리장의 강우유입량은 기상, 강우 등 수문/기상자료와 처리장 관측자료, 처리장 제원 등을 토대로 하수처리장 운영자료 분석을 실시하여 강우량이 3mm 이상 오지 않을 경우 우회유량이 발생하지 않는 조건을 적용하여 임계 강우량을 3mm로 적용하였고 처리장의 유입·방류

Table 1. Three Methods of NPS Estimation from Sewage Treatment Districts

Object	Three Methods of NPS Estimation
Nonpoint Pollutant Source	Bypass Discharge of Sewage Treatment Plants
	Drainage Area CSO Discharge of Sewage Treatment Plants
	Rainfall Inflow Rate of Sewage Treatment Plants

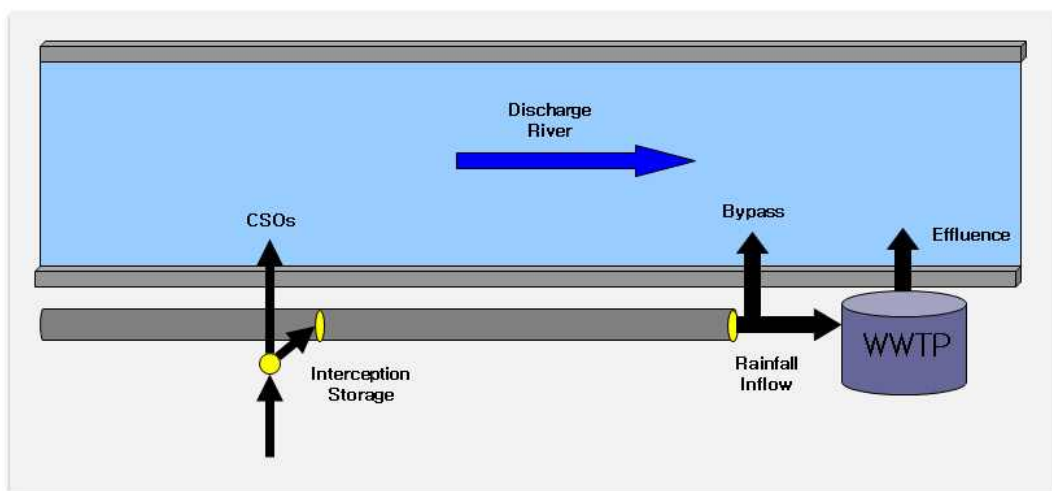


Fig. 3. Description of Estimation Methods in Three Types of NPS

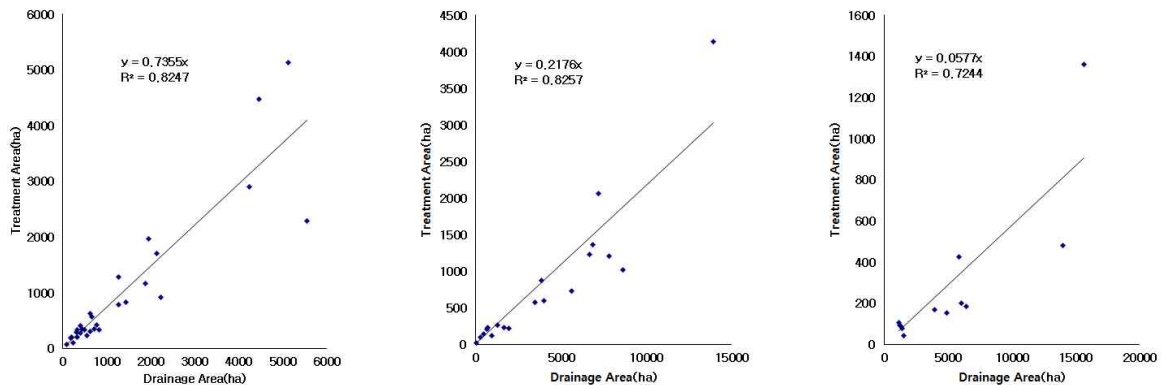
자료와 강우자료를 이용하여 건기 및 우기 자료를 분리하였다(NIER, 2010). 강우유입량의 오염부하량은 처리장의 관측자료를 활용하였다.

발생된 하수처리장의 우회유량은 각 처리장의 강우자료와 유입·방류자료를 확보하여 분석을 실시하였다. 우회유량은 건기평균유량에 유량변동부하율을 곱하여 시간최대유량으로 전환한 후 강우 지속기간 동안만 우회유량이 발생하는 것으로 가정하여 값을 산정하였고, 강우량이 3mm보다 크고 10mm보다 적은 경우는 시간최대유량만큼 방류되고, 10mm보다 큰 경우는 시간최대유량의 2배가 방류되는 것으로 가정하여 산정하였으며 우회유량 산정식은

**Table 2. Definition of Estimation of Bypass Discharge from Wastewater Treatment Plants**

Formula of Bypass Discharge	
$Q_{bypass}$	$= \alpha * 1.86 * Q_{dof} (m^3/day) / 86400 * T_{rain,fall} (hr) * 3600$
$C_{bypass}$	$= C_1$
$L_{bypass}$	$= Q_{bypass} * C_{bypass}$

$Q_{bypass}$ : Bypass Discharge of Treatment Plant,  $Q_{dof}$ : Dry Average Discharge of Treatment Plant,  $C_{bypass}$ : Concentration of Bypass Discharge,  $C_1$ : Inflow Concentration of Treatment Plant,  $L_{bypass}$ : Bypass Discharge Pollutant loads of Treatment Plant,  $T_{rain,fall}$ : Rainfall Duration, 1.86: Discharge Variation Rate of Change,  $\alpha$ : Bypass Discharge Ratio of Interception Capacity(1 or 2), (86400, 3600): Unit Conversion



**Fig. 4. Classification of Three Groups according to Ratio of Treatment Area by Watershed Area of Sewage Treatment Plants**

**Table 3. Ratio of Impervious Area from Representative Watershed and Area from Sewage Treatment Plant**

Representative Watershed		Sewage Treatment Plant	
Subwatershed	Ratio of Impervious Area (%)	Group	Ratio of Treatment/Watershed Area (%)
A	10	1	6
B	35	2	23
C	92	3	86

Table 2와 같다. 우회유량의 오염부하량은 우회유량에 우회유량 농도를 곱하여 산정하였다(NIER, 2010).

### 3.2.2 하수처리장 배수구역의 CSO 유량

하수처리장 배수구역의 CSO 유량은 낙동강유역 내에 위치한 각 하수처리장(2006년)의 배수구역 및 처리구역 자료를 수집하여 처리구역/배수구역 면적비를 산정하였다. 산정된 면적비를 토대로 그룹을 3그룹으로 분류하였다. 하수처리장의 배수구역 내 관거의 CSO를 산정하기 위하여 3개의 그룹으로 분류된 배수구역에 대한 처리구역의 면적비를 회귀식을 통하여 그룹화 하였다(Fig. 4).

면적비가 0.4보다 큰 경우 Group1로 분류하고 0.4보다 작고 0.1보다 큰 경우 Group2로 분류했으며 0.1보다 작은 경우 Group3으로 분류하였다. 각 그룹별로 Group1은 29개의 처리장, Group2는 19개의 처리장, Group3은 13개의 처리장으로 그룹화 하였고, 각 그룹별 대표 처리/배수 면적비를 선정하여 기존에 연구사례 중 검증된 SWMM-온천천 모형(Shin et al., 2009)의 각 소유역별 불투수면적비와 비교하여 면적비가 유사한 소유역을 선정하였다. 도시의 불투수면적비와 처리/배수구역 면적비는 도시화 정도가 증가 할수록 처리시설이 증가한다는 근거를 바탕으로 불투수면적비와 처리/배수구역 면적비는 유사하다고 가정하였다. Table 3은 각 그룹별 대표 소유역의 불투수 면

적비와 하수처리장의(처리/배수) 비 대표값을 분류한 것이다. 본 자료를 바탕으로 수문현상의 비선형적인 관계를 고려할 수 있는 신경망 기법 중 하나인 역전파 알고리즘을 적용하여 CSO 유량을 산정하였다.

신경망모형을 활용한 강우특성과 CSO발생특성 연계 방법은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되어진 역전파 알고리즘을 사용하며 입력층에는 2006년 기간의 일자료 강우량, 강우강도, 선행 무강우일수를 입력변수로 한다. 입력변수를 입력한 뒤 은닉층에서 비선형적인 관계를 수행하고 출력층에서 CSO발생 원단위를 산출하게 된다. 신경망 모형의 매개변수 최적화를 위해 CSO 유량자료를 2006년 데이터를 이용하였으며 오차함수는 RRMSE (Relative Root Mean Square Error)를 사용하여 0.1을 임계값으로 적용하였다. 최적화된 모형에 해당 처리장의 강우자료를 적용하면 강우사상별 유출체적과 BOD, TN, TP 오염부하

량 산정이 가능하다. Table 4는 구축된 신경망의 구조를 나타내고 있다. 역전파알고리즘 기반으로 강우량, 강우강도, 선행무강우일수를 입력성분으로 사용하였으며 이를 통해 CSO를 출력값이 되도록 구축하였다. Fig. 5는 신경망 모형 매개변수를 최적화 하는 과정을 알고리즘으로 나타낸 것이다.

CSO유량의 오염부하량산정은 기존에 검증된 SWMM-온천천 모형에서 2006년에 모니터링 된 15개 강우사상과 유량 및 수질자료를 이용하여 산정하였다(Shin et al., 2009). SWMM-온천천 모형은 부산시 금정구에 위치한 온천천 유역을 42개의 소유역으로 분할하여 2006년에 관측된 기상/수문 및 수질자료를 적용하여 검보정을 실시하였으며 이 결과를 바탕으로 앞에서 분류한 낙동강 배수구역내 그룹과 SWMM-온천천 모형과 연계하여 CSO 유량의 오염부하량을 산정하였다. Table 5는 낙동강 배수구역내 그룹

Table 4. Structure of Neural Network Model

Structure of NN Model	
Input Variable	Rainfall, Rainfall Intensity, Antecedent Dry Day
Layer	3 layers
NN	Back Propagation Algorithm
Output	CSO
Threshold Function	Sigmoid Function

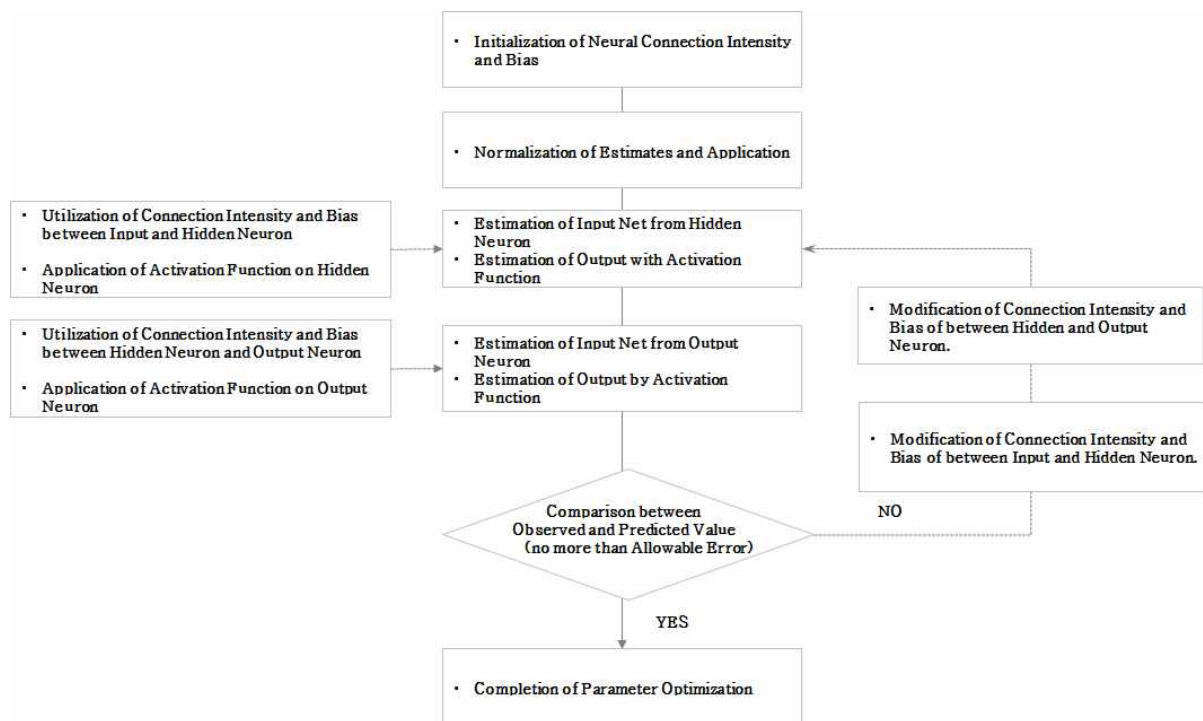
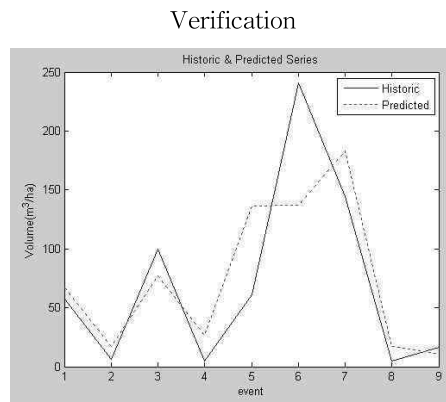
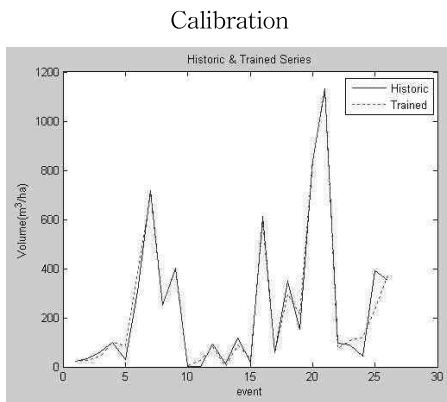
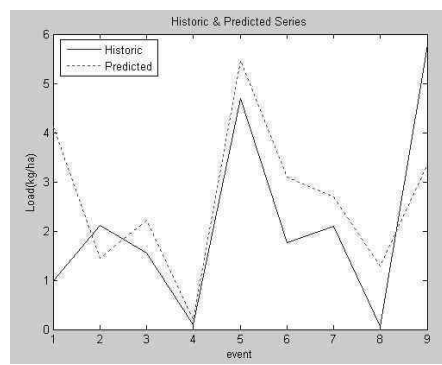
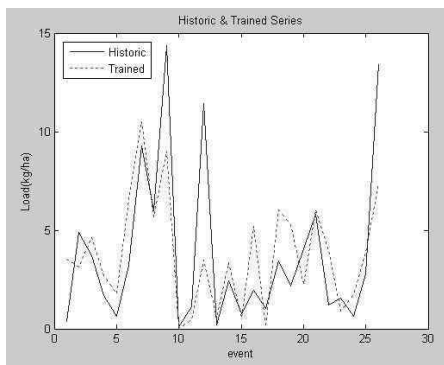


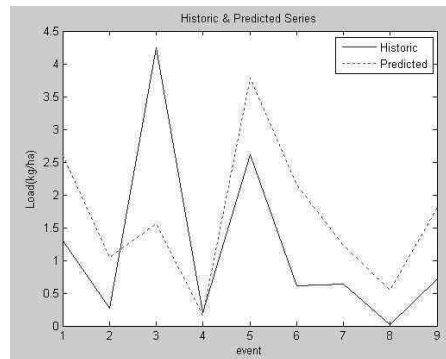
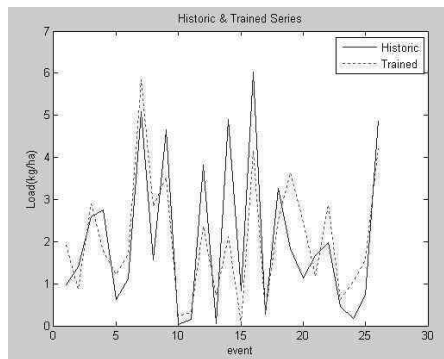
Fig. 5. Process of Parameter Optimization with Neural Network Model



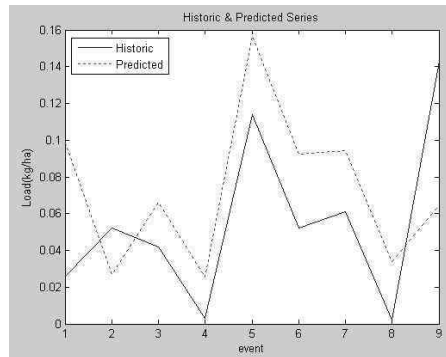
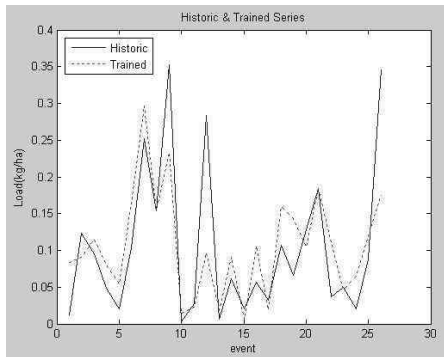
(a) Discharge



(b) BOD



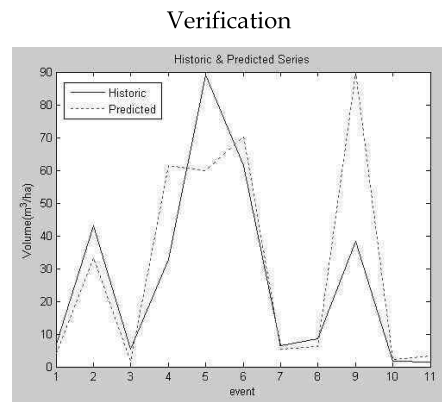
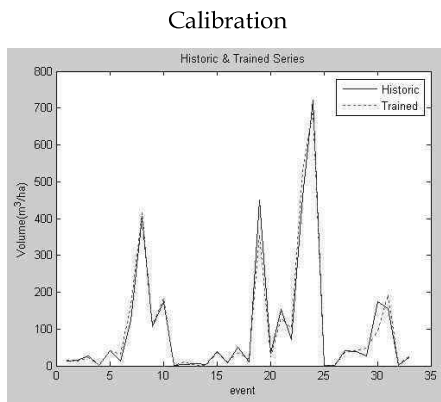
(c) TN



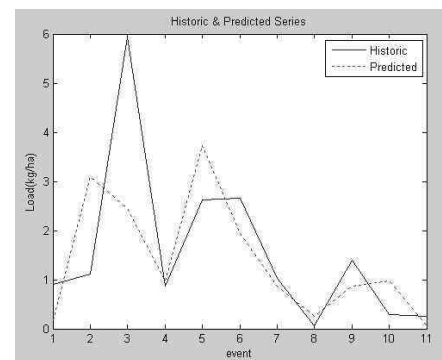
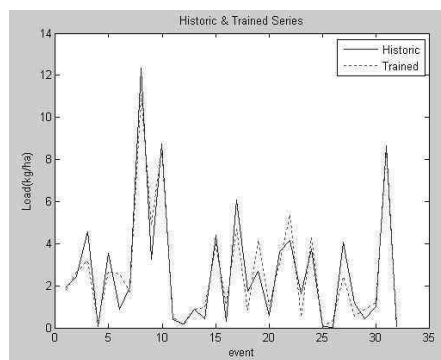
(d) TP

Fig. 6. Calibration and Verification of Group1

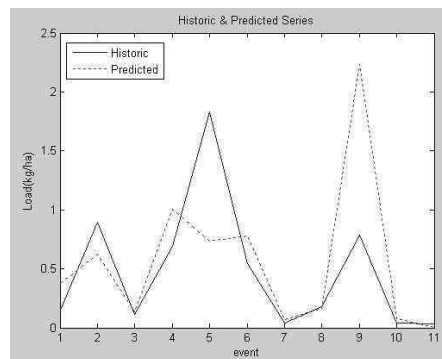
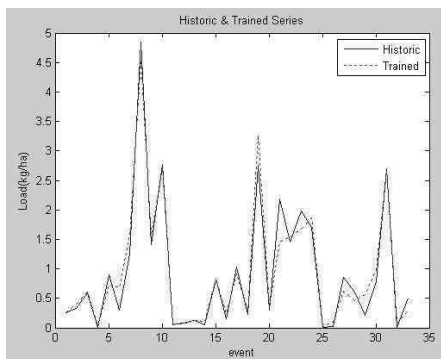




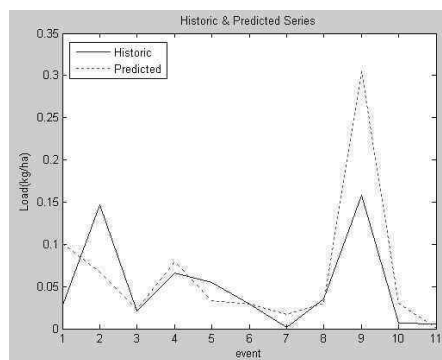
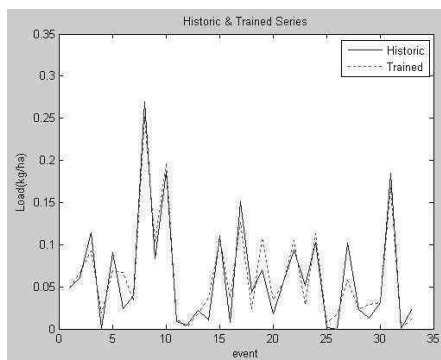
(a) Discharge



(b) BOD



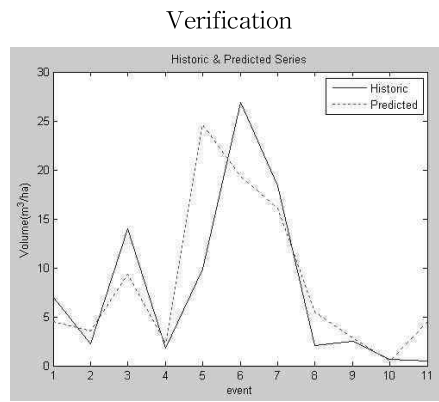
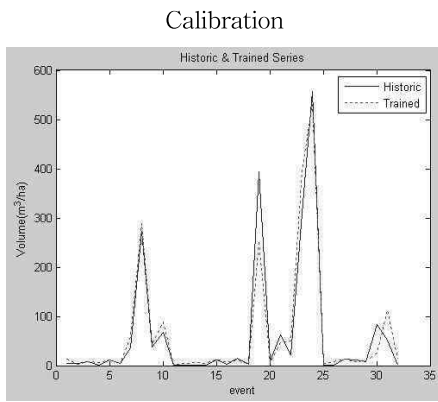
(c) TN



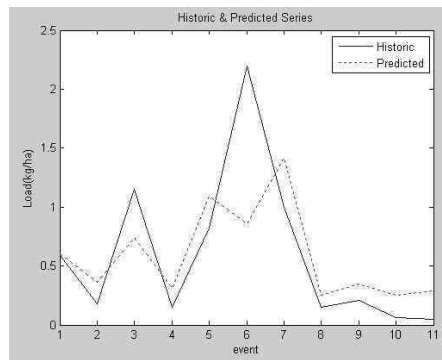
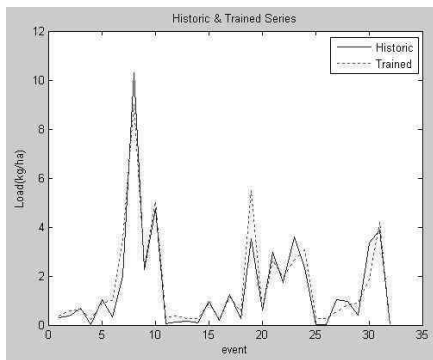
(d) TP

Fig. 7. Calibration and Verification of Group2

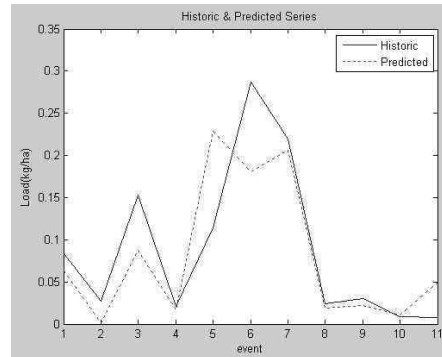
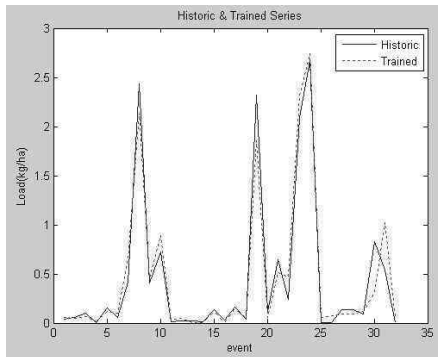




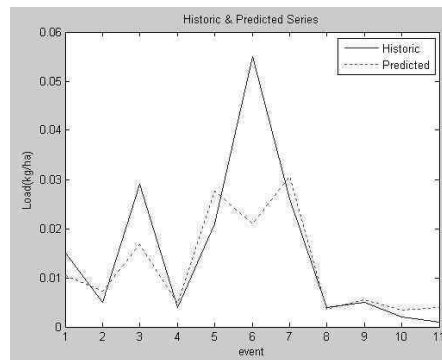
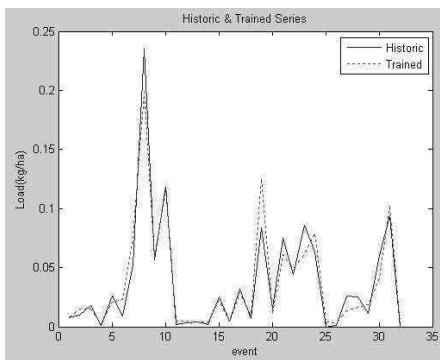
(a) Discharge



(b) BOD



(c) TN



(d) TP

Fig. 8. Calibration and Verification of Group3

Table 5. Property of Typical Subwatershed Connected with SWMM-Oncheon Model

Placement	Area (ha)	CSO (m <sup>3</sup> /yr)	BOD (kg/yr)	TN (kg/yr)	TP (kg/yr)
A	139.6	294,239	7,991.4	2,199.8	193.8
B	165.5	609,271	18,134.1	6,056.1	431.6
C	173.3	1,213,679	25,164.0	11,615.8	668.4

과 연계된 온천천 유역 지점들의 CSO 유량의 오염부하량을 나타낸 것이다.

#### 4. 결과 및 분석

낙동강유역 내 배수구역 관거시스템을 합류식으로 가정하고 비점 발생형태를 하수처리장의 강우 유입량, 하수처리장의 우회유량, 하수처리구역의 CSO 유량 3가지로 구분지어 비점오염원을 정량적으로 산정하였다. 유입·방류자료, 강우자료 및 낙동강유역 내 하수처리장에서 확보된 유입 및 방류농도 자료를 활용하여 낙동강유역 내 처리장에서 각 비점오염원별 발생형태에 따라 오염부하량을 산정하였다(Table 6). 이 중 낙동강 본류지역을 대상으로 분석한 결과, 낙본E에 위치한 구미처리장은 낙동강 본류에서 발생한 전체 오염부하량 중 BOD, TN, TP가 각각 41.26%, 39.81%, 39.03%로 가장 많은 오염부하량이 산정되었다. 이는 구미지역에 공장단지가 많아 오폐수로 인한 오염부하량으로 추측되며 이는 구미지역의 도시화로 인한 불투수면적의 증가 정도를 의미한다. 이와 대조적으로 성주처리장에서는 BOD, TN, TP가 각각 0.10%, 0.1%, 0.10%로 가장 적은 오염부하량이 산정되었다. Fig. 9는 낙동강 본류지역에서 발생한 오염부하량 중 각 처리장별로 차지하는 비율을 산정한 결과를 나타낸 것이다.

또한 기존의 관측자료인 낙동강유역 내 처리장별 하루 평균 오염부하량을 바탕으로 본 연구에서 산정된 우회유량 오염부하량과 CSO 유량에 의한 오염부하량의 하천으로의 방류에 의한 영향분석을 실시하였다. Table 7은 낙동강수계관리위원회에서 2005년에 산정한 단위유역별 오염부하량 산정자료와 오염배출량을 나타낸 것이다. 각 처리장별로 일 오염배출량과 비점배출 기여율을 산정한 결과는 Table 8과 같다. 방류하천의 비점배출 기여율의 산정결과는 거창처리장에서 BOD, TN, TP가 각각 76.9%, 31.3%, 39.3%로 가장 높은 기여율을 나타냈고 이와 반대로 가장 낮은 기여율은 BOD, TN, TP가 각각 0.4%, 0.4%, 0.2%인 하남처리장이었다. 이러한 결과는 각 배수구역내에 위치한 하수처리장에서 방출하는 오염부하량의 비율을

보여주며 기여율이 높은 거창처리장이 위치되어 있는 배수구역에는 하수처리장을 통해 배출되는 오염부하량이 많음을 확인할 수 있으며 기여율이 낮은 하남처리장은 하수처리장에서 배출되는 오염부하량보다 출산폐수처리시설, 분뇨처리시설, 농단처리시설 등의 다른 시설에서 배출되는 오염부하량이 더 많다는 것을 보여준다. 이러한 결과를 바탕으로 낙동강유역 내 처리장의 전체 오염배출량은 BOD, TN, TP가 각각 264,301 kg, 155,513 kg, 15,146 kg으로 산정되었으며, 산정된 결과를 바탕으로 낙동강유역 내 전체 오염발생량에 미치는 하수처리장의 기여율을 산정한 결과 15.2%, 45.7%, 18.5%로 오염배출량 TN이 상대적으로 BOD 및 TP 보다 양호하게 처리되고 있음을 보여주고 있다. 또한 이렇게 산정된 처리장 내 전체 오염배출량은 각 하수처리장의 운영자료 및 처리구역/배수구역 면적비율 기반으로 연평균 오염부하량을 정량적으로 산정하였다.

그 결과 BOD 평균값이 280.8 kg/ha/yr, TN 평균값이 97.3 kg/ha/yr, TP 평균값이 7.1 kg/ha/yr로 산정되었으며 본 연구결과는 기존에 팔당상수원 비점오염원 최적관리사업의 결과와 낙동강수계 비점오염 관리방안마련사업 때 산정된 BOD, TN, TP 값 사이에 위치하고 있어 기존의 연구결과의 범위 내에 있음을 알 수 있다. 비점오염원 산정 기법으로 도출된 MOE (2000) 및 MOE (2003) 보고서상의 결과와 하수처리구역 단위를 고려하여 새롭게 도출된 연구결과를 Table 9에 비교하여 제시하였다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 낙동강유역 내 처리장의 유입·방류자료와 강우자료를 활용하여 기존에 오염부하량 산정방법이 아닌 새로운 산정방법을 제시하였다. 비점 발생형태는 하수처리장의 강우유입량, 우회유량, CSO유량 3가지로 구분지어 오염부하량을 산정하였으며 오염부하량 산정결과 낙동강 본류 기준으로 그룹 1인 구미지역에서 가장 많은 오염부하량이 발생하였다. 이는 구미지역에 공장단지가 많고 도시화정도가 다른 처리장들에 비해 높아 폐오수로 인한 오염부하량이 많기 때문이라고 예측되어 진다. 그와 반대로 가장 낮은 오염부하량은 그룹 3인 성주처리장에서

Table 6. Pollutant Loads Estimated from Each Sewage Treatment District

Unit Watershed	Treatment Plant	Area(ha)		Group Type	Pollution Load(kg/day)											
		Drainage Area	Treatment Area		Rainfall			Inflow Rate			BYPASS			CSO		
					BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
NB-C	Andong	1433.2	831.4	1	512.7	73.7	18.4	1178.9	296.8	29.1	600.9	351.6	16.5			
Naeseong-A	Yeongju	5565.0	2285.0	1	1599.9	111.3	38.1	613.1	217.4	20.8	3070.6	787.2	77.7			
Naeseong-B	Yecheon	437.1	348.0	1	4.9	0.5	0.1	28.6	4.5	0.9	156.0	106.7	4.2			
Yeong-A	Jeomchon	3866.0	876.5	2	353.0	25.8	6.7	254.2	64.1	4.6	2041.9	493.9	43.1			
	Maseong	504.3	333.4	1	37.9	2.0	0.4	20.2	3.8	0.3	179.8	123.0	4.9			
	Gaeun	1328.9	87.5	3	11.7	0.6	0.1	1.7	0.4	0.0	198.4	58.6	4.9			
Byeongseong-A	Sangju	3507.0	576.0	2	1334.2	90.4	18.9	263.3	52.6	8.0	1435.4	316.6	38.9			
Wi-B	Uiseong	629.4	301.0	1	614.5	42.7	12.8	118.1	35.1	3.4	329.7	222.5	8.1			
	Kumsung	1680.1	225.8	2	71.0	6.3	1.6	20.8	5.0	0.5	1221.0	256.5	28.5			
NB-E	Gumi Industrial Complex. 4	1893.0	1170.6	1	103.2	8.0	7.0	240.1	168.8	5.6	602.7	517.1	16.1			
	Seonsan	1279.9	780.0	1	26.6	3.6	0.9	30.4	7.5	0.6	415.5	326.0	11.1			
	Dogae	6101.0	200.0	3	2.9	0.2	0.1	2.8	0.8	0.1	708.2	240.4	17.6			
	Gumi	4245.8	2907.0	1	2802.5	370.9	77.4	5905.3	1294.5	120.1	1961.2	1388.2	50.4			
NB-F	Yakmok	781.6	426.0	1	413.4	29.0	4.5	147.8	23.4	1.3	361.0	255.5	9.3			
	Seongju	4918.0	153.9	3	24.1	1.1	0.9	15.4	12.0	1.7	502.1	134.7	12.3			
	Waegwan	405.9	405.9	1	248.9	22.8	3.4	120.3	18.0	1.0	165.1	93.3	3.4			
Gam-A	Gimcheon	6893.0	1367.0	2	3099.1	489.7	102.0	882.6	189.8	18.3	2362.1	530.6	61.8			
Geumho-A	Yeongcheon	667.5	569.0	1	367.3	29.3	10.2	258.7	91.8	11.1	262.1	160.0	6.2			
Geumho-B	Geumho	1319.0	264.9	2	150.9	6.2	3.8	15.8	9.4	0.5	658.3	133.5	14.2			
Geumho-C	Gyeongsan	626.0	626.0	1	878.0	117.8	23.2	617.2	114.7	17.3	282.6	174.0	6.9			
	Jisan	205.1	205.1	1	250.1	38.0	8.3	555.5	123.9	15.4	92.6	57.0	2.3			
	Dalseocheon	1964.0	1964.0	1	4462.0	500.5	148.7	1991.2	613.5	60.2	886.8	545.9	21.7			
	Bukbu	1281.0	1281.0	1	5572.7	982.6	239.8	2996.1	691.4	76.1	578.4	356.1	14.1			
	Seobu	4473.0	4473.0	1	7532.1	2095.1	376.9	11498.0	2071.2	247.5	2155.7	1459.7	51.7			
	Sincheon	5130.8	5130.8	1	15230.0	3692.5	454.9	13420.4	1758.8	297.9	2316.6	1426.2	56.6			
Hoe-A	Goryeong	337.0	337.0	1	130.6	12.2	3.3	286.2	79.6	8.9	122.1	86.4	3.0			
Hwang-A	Goryeong	6473.0	183.5	3	75.4	4.3	1.9	30.8	13.6	1.7	881.6	259.9	22.6			
Hwang-B	Geochang	5659.0	727.0	2	483.9	42.7	12.0	307.5	86.1	8.8	2731.5	747.7	87.6			
	Hapcheon	493.0	140.6	2	239.2	14.7	4.1	40.3	11.0	1.1	219.2	68.6	5.2			
NB-H	Gajo	5879.0	425.0	3	67.2	1.3	0.3	8.3	2.0	0.3	1143.9	372.6	28.3			
	Changnyeong	1963.0	220.8	2	153.3	6.6	2.5	22.4	9.0	0.8	720.3	186.0	17.1			
Nam-A	Burim	3988.0	167.1	3	29.1	1.0	0.4	4.6	1.8	0.3	834.0	258.2	22.8			
Nam-B	Hamyang	192.2	192.2	1	283.4	19.5	6.6	47.2	16.6	1.0	54.3	43.1	1.8			
Nam-D	Sancheong	1268.7	95.1	3	94.9	7.7	1.8	26.1	5.8	0.5	185.9	65.0	4.5			
	Sabong	315.0	93.7	2	23.4	3.3	0.5	13.5	2.2	0.3	131.4	34.7	3.8			
	Munsan	1146.0	104.4	3	50.8	6.9	1.2	38.7	7.9	1.0	258.2	65.4	5.9			
Nam-E	Jinju	2136.0	1702.2	1	2184.9	193.1	50.9	1642.7	457.4	61.8	1107.1	622.1	32.3			
	Daesan	1540.0	40.6	3	10.4	0.5	0.2	1.9	0.8	0.1	275.9	76.8	6.4			
NB-I	Uiryong	15683.6	1360.0	3	129.1	8.5	3.8	30.1	13.7	1.3	528.1	112.1	12.6			
NB-J	Bugok	745.0	225.0	2	306.0	8.1	2.6	17.6	5.5	0.6	604.1	122.1	13.3			
	Namji	943.0	119.0	2	116.3	9.4	3.7	41.5	15.0	1.3	124.9	76.6	2.9			
NB-K	Hanam	317.0	287.0	1	133.9	6.8	2.1	13.0	4.3	0.5	29.1	18.4	0.6			
	Jinyeong	88.0	78.7	1	532.2	50.4	16.6	69.8	23.5	2.3	236.8	149.8	5.3			
Miryang-A	Sinwon	717.0	348.0	1	10.5	0.8	0.2	4.7	0.8	0.1	30.5	7.3	0.6			
	Cheongdo	66.0	23.0	2	95.2	11.7	1.7	123.6	18.9	2.0	1836.7	687.7	44.8			
Miryang-B	Miryang	13994.3	480.3	3	413.8	20.4	7.2	243.2	85.4	8.2	1933.2	472.3	51.4			
NB-L	Samnangin	3997.0	591.0	2	84.9	2.9	1.0	9.5	3.0	0.3	100.3	77.0	2.6			
NB-M	Yangsan	247.6	106.4	1	774.1	82.5	19.2	778.6	190.5	18.7	1128.6	775.5	32.7			
NB-N	Jangyu	2228.4	918.0	1	1275.8	199.9	47.1	902.3	208.0	26.1	3878.7	941.5	92.1			
	Gangdong	7188.0	2059.0	2	283.5	36.1	5.4	77.1	11.3	1.7	4226.3	1025.9	100.3			
	Hwamok	7832.0	1201.0	2	1978.3	243.1	64.9	802.3	215.0	24.8	2231.3	541.6	53.0			

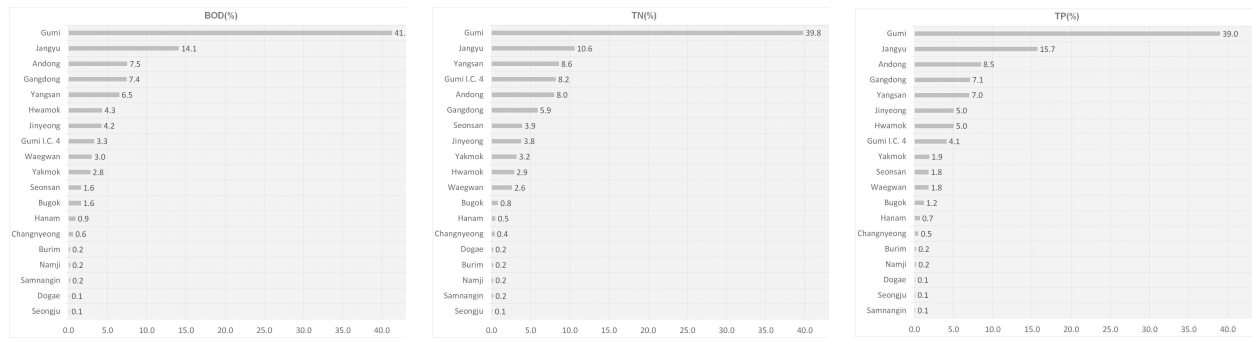


Fig. 9. Ratio of Pollutant Loads from Main Stream in Nakdong River

Table 7. Pollutant loads of Unit Watershed in Nakdong River Basin

Unit Watershed	Total Pollutant of Drainage Area			Pollutant Emissions of Drainage Area		
	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
NB-C	35092	10720	2401	10123	6209	524
Naeseong-A	51676	13964	3405	14375	8275	762
Naeseong-B	29299	8412	2009	8496	4653	422
Yeong-A	20838	6428	1351	6201	4075	363
Byeongseong-A	22780	6634	1586	7684	4190	430
Wi-B	27643	8104	1983	7953	4560	416
NB-E	203188	27448	4498	15022	8834	694
NB-F	81701	12276	2790	10570	6132	654
Gam-A	52812	11778	2644	12431	7229	685
Geumho-A	36944	10955	2716	9848	6153	581
Geumho-B	373674	26917	16391	12931	7112	704
Geumho-C	254238	46078	7178	26477	16670	1960
Hoe-A	38215	11206	3416	8931	5259	543
Hwang-A	17598	5191	1221	3953	2667	245
Hwang-B	28297	8619	2089	7651	4532	414
NB-H	26314	7362	1854	6087	3762	350
Nam-A	33321	10405	2554	8664	5668	524
Nam-B	19817	6391	1492	7246	4023	392
Nam-D	45967	12287	2269	11431	7727	636
Nam-E	34710	9230	2395	8506	5232	709
NB-I	75994	13046	2056	7944	4485	442
NB-J	56644	15241	4656	11726	5913	634
Miryaing-A	24039	7912	1772	7303	4408	401
Miryaing-B	19731	5931	1182	5812	3865	337
NB-K	16683	4726	1467	3582	2011	204
NB-L	53790	20693	2312	8603	5679	460
NB-N	48906	11810	2017	14751	6190	660

산정되었다. 그룹1의 경우 투수가 잘되는 지역이었고 그룹3은 불투수지역인데 처리장에서 처리되는 오염부하량 결과를 통해서 각 그룹별 투수·불투수지역의 구분이 가능

하였다. 오염부하량 산정결과로 오염부하량의 방류하천 영향분석을 실시하여 낙동강유역 배수구역 내에 위치한 하수처리장의 오염부하량 처리비용을 산정하였다. 거창처

Table 8. Contribution of NPS of STP to Receiving Stream

Unit Watershed	Pollutant Emissions of Drainage Area			Treatment Plant	Pollutant Emissions of Discharge and Contribution ratio					
	BOD	TN	TP		BOD	Contribution ratio(%)	TN	Contribution ratio(%)	TP	Contribution ratio(%)
NB-C	10,123	6,209	524	Andong	1779.8	17.6	648.4	10.4	45.6	8.7
Naeseong-A	14,375	8,275	762	Yeongju	3692.0	25.7	2127.1	25.7	101.4	13.3
Naeseong-B	8,496	4,653	422	Yecheon	184.6	2.2	111.2	2.4	5.1	1.2
Yeong-A	6,201	4075	363	Jeomchon	2296.0	37.0	557.9	13.7	47.7	13.1
				Maseong	200.1	3.2	126.7	3.1	5.1	1.4
				Gaeun	200.1	3.2	59.0	1.4	5.0	1.4
Byeongseong-A	7684	4190	430	Sangju	1698.7	22.1	369.2	8.8	46.9	10.9
Wi-B	7953	4560	416	Uiseong	447.8	5.6	257.6	5.6	11.5	2.8
				Kumsung	1241.8	15.6	261.5	5.7	29.0	7.0
NB-E	15022	8834	694	Gumi Industrial Complex. 4	842.8	5.6	685.9	7.8	21.6	3.1
				Seonsan	445.9	3.0	333.5	3.8	11.7	1.7
				Dogae	711.0	4.7	241.1	2.7	17.7	2.5
NB-F	10570	6132	654	Gumi	7866.5	52.4	2682.6	30.4	170.4	24.6
				Yakmok	508.8	4.8	278.9	4.5	10.5	1.6
				Seongju	517.5	4.9	146.7	2.4	14.0	2.1
Gam-A	12431	7229	685	Waegwan	285.4	2.7	111.3	1.8	4.4	0.7
				Gimcheon	3244.7	26.1	720.4	10.0	80.1	11.7
Geumho-A	9848	6153	581	Yeongcheon	520.8	5.3	251.7	4.1	17.3	3.0
Geumho-B	12931	7112	704	Geumho	674.0	5.2	142.9	2.0	14.7	2.1
Geumho-C	26477	16670	1960	Gyeongsan	899.9	3.4	288.7	1.7	24.2	1.2
				Jisan	648.1	2.4	180.9	1.1	17.6	0.9
				Dalseocheon	2878.0	10.9	1159.4	7.0	81.8	4.2
				Bukbu	3574.5	13.5	1047.5	6.3	90.2	4.6
				Seobu	13653.7	51.6	3530.9	21.2	299.2	15.3
				Sincheon	15737.0	59.4	3185.0	19.1	354.6	18.1
Hoe-A	8931	5259	543	Ansimg	408.2	1.5	166.0	1.0	11.9	0.6
Goryeong	912.4	10.2	273.5	5.2	24.2	4.5				
Hwang-A	3953	2667	245	Geochang	3039.1	76.9	833.8	31.3	96.4	39.3
Hwang-B	7651	4532	414	Hapcheon	259.5	3.4	79.6	1.8	6.3	1.5
				Gajo	1152.2	15.1	374.6	8.3	28.6	6.9
NB-H	6087	3762	350	Changnyeong	742.7	12.2	195.0	5.2	18.0	5.1
				Burim	838.6	13.8	259.9	6.9	23.1	6.6
Nam-A	8664	5668	524	Hamyang	101.5	1.2	59.7	1.1	2.8	0.5
Nam-B	7246	4023	392	Sancheong	212.0	2.9	70.8	1.8	5.0	1.3
Nam-D	11431	7727	636	Sabong	144.9	1.3	36.9	0.5	4.1	0.6
				Munsan	296.9	2.6	73.3	0.9	6.9	1.1
				Jinju	2749.8	24.1	1079.5	14.0	94.2	14.8
Nam-E	8506	5232	709	Daesan	277.8	3.3	77.5	1.5	6.5	0.9
				Uiryong	558.2	6.6	125.8	2.4	13.9	2.0
				Bugok	621.7	7.8	127.6	2.8	13.9	3.1
NB-I	7944	4485	442	Namji	166.4	2.1	91.6	2.0	4.2	1.0
				Hanam	42.1	0.4	22.7	0.4	1.1	0.2
NB-J	11726	5913	634	Jinyeong	306.7	2.6	173.2	2.9	7.6	1.2
				Sinwon	35.1	0.5	8.2	0.2	0.7	0.2
Miryang-A	7303	4408	401	Cheongdo	1960.3	26.8	706.6	16.0	46.8	11.7
				Miryang	2176.4	37.4	557.8	14.4	59.5	17.7
Miryang-B	5812	3865	337	Samnangin	109.8	3.1	80.0	4.0	2.9	1.4
NB-K	3582	2011	204	Yangsan	1907.2	22.2	966.0	17.0	51.4	11.2
NB-L	8603	5679	460	Jangyu	4781.1	32.4	1149.5	18.6	118.2	17.9
NB-N	14751	6190	660	Gangdong	4303.4	29.2	1037.1	16.8	102.0	15.4
				Hwamok	3033.6	20.6	756.6	12.2	77.8	11.8

**Table 9. Comparison of the Results between Existing Studies and the Study**

Organization	BOD (kg/ha/yr)	TN (kg/ha/yr)	TP (kg/ha/yr)
Report for Optimum Management and General Planning of Paldang Water Source Nonpoint Source(2000)	370.9	121.1	3.4
Report for Management of Nakdong River Non-point Source(2003)	139.8	237.9	7.9
Result of the Study	280.8	97.3	7.1

리장에서 가장 많은 기여율을 보여줬고 하남처리장에서는 가장 낮은 기여율을 나타내었다. 기여율이 높은 거창처리장은 이를 포함하고 있는 배수구역내에서 축산폐수처리시설, 분뇨처리시설, 농단처리시설 등 다른 시설에서 배출되는 오염부하량 처리량보다 더 많은 오염부하량을 처리하고 있으며, 이와 반대로 하남처리장은 오염부하량보다 다른 처리시설에서 처리하는 오염부하량이 더 많다는 결론이다. 이러한 결과를 바탕으로 낙동강유역 내 처리장 총 오염배출량을 산정하여 각 하수처리장의 운영자료 및 처리구역/배수구역 면적비율 기반으로 연평균 오염부하량을 산정하였으며, 본 연구에서 개발된 오염부하량 산정 방법을 기존의 연구결과와 비교한 결과 BOD, TN, TP 값은 기존의 연구결과와 유사한 결과가 도출되었다.

본 논문에서는 기존의 원단위를 이용한 비점오염량 산정방법과 달리 강우특성과 유역의 도시화 정도를 고려한 차별화된 CSO 산정 및 해당 하수처리장 운영자료 기반의 강우유입량과 우회유량 산정을 통해 처리장 및 대상유역의 현황을 고려한 하수처리구역의 비점오염 발생량에 대한 산정 방법을 제시하였다. 비점오염원을 우회유량, CSO 유량, 강우유입량 3가지로 구분하여 낙동강유역의 강우 및 도시화 특성과 하수처리장 운영자료를 통해 오염부하량을 산정하였다. 강우유입량은 수문/기상자료와 처리장 관측자료 등을 토대로 하수처리장 운영자료 분석을 실행했고 우회유량은 강우량이 3mm보다 크고 10mm보다 적은 경우는 시간최대유량만큼 방류되고 10mm보다 큰 경우는 시간최대유량의 2배가 방류되는 것으로 가정하여 산정하였다. CSO 유량은 처리구역/배수구역 면적비를 통해 3개의 그룹으로 구분하고 기 구축된 검증된 SWMM-온천천 모형의 각 소유역별 불투수면적비와 비교하여 유사한 유역을 각 그룹의 대표유역으로 선정하여 비선형적인 관계가 고려되는 신경망모형을 이용하여 산정하였다. 이러한 새로운 방법은 앞으로의 비점오염원 관리 연구에 한발 더 앞서나가는 시발점이 될 수 있을 것이며 또한 하수처리장별 하수처리구역 내 발생비점에 대한 기여율 및 단위 유역 배출량에 대한 하수처리구역 비점오염의 차지비율

을 산정함으로써 오염총량 단위유역 및 하수처리구역의 관리를 위한 비교자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원에서 주관하는 차세대에코 이노베이션기술개발사업의 일원인 통합 비점 유출 모형 개발 및 실용화연구의 지원으로 수행되었습니다.

### References

Bae, S.B. (2003). Analysis of the Non-Point Pollutant Loads by Initial Rainfall In the Urban Drainage, a Master's Thesis, Kyonggi University.

Chae, J.Y. (2004). Study of Runoff Management Scheme in Urbanization Area Using XP-SWMM, a Master's Thesis, Paichai University.

Christopher W. Corbett, Matthew Wahl, Dwayne, E. Porter, Don Edwards, Claudia Moise (1997). Nonpoint source runoff modeling A comparison of a forested watershed and an urban watershed on the South Carolina coast.

Hwang, S.H. (2011). A Study on Discharge Load Change of Nonpoint Pollution Source by Watershed Management Using Long Term Runoff Model of Urban Area, a Master's Thesis, University of Seoul.

Ji, U., Hwang, M.H., Yeo, W.K., Lim, K.S. (2012). "Risk Assessment and Potentiality Analysis of Soil Loss at the Nakdong River Watershed Using the Land Use Map, Revised Universal Soil Loss Equation, and Landslide Risk Map." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol, 45, No. 6, pp. 617-629.

Kim, C.H. (2002). Estimation of Non-point Pollutant Load using SWMM in Boryeong Watershed, a Master's Thesis, Konkuk University.

- Kim, M.E. (2013). "Study on Establishing Algal Bloom Forecasting Models Using the Artificial Neural Network." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 7, pp. 697-706.
- Ministry of Environment (2000). Report for Optimum Management and General Planning of Paldang Water Source Nonpoint Source.
- Ministry of Environment (2003). Report for Management of Nakdong River Nonpoint Source.
- National Institute of Environmental Research (2005). Comprehensive Plan for Total Pollutant Management in Nakdong River Basin.
- National Institute of Environmental Research (2010). A Study on the Contribution of Non-point Source in Waste Water Treatment Plant in Urban Area.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Hauck, L.M., Dugas, W.A. (2001). Application of a Watershed Model to Evaluate Management Effects on Point and Non-point Source Pollution.
- Seo, B.C. (2001). Analysis of Urban Runoff Characteristics Using PCSWMM and GIS, a Master's Thesis, Pusan National University.
- Shin, H.S. (2009). "The NPS Analysis and CSO Management Based on SWMM for Oncheon Basin." *Journal of Korean Society on Watre Quality*, Vol. 25, No. 2, pp. 268-280.
- Zushi, Y. (2008). "Existence of Nonpoint Source of Per-fluorinated Compounds and Their Loads in the Tsurumi River Basin." *Japan. Journal of Chemosphere*, Vol. 71, No. 8, pp. 1566-1573.

paper number : 15-039

Received : 24 April 2015

Revised : 25 June 2015 / 8 July 2015

Accepted : 8 July 2015