Journal of Environmental Science International
27(11); 1073~1081; November 2018

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2018.27.11.1073

ORIGINAL ARTICLE

경로도형 구축을 통한 하수처리장 질소 및 인 제거 영향인자 파악에 관한 연구

조영대 · 이슬아[1] · 김민수 · 김효수[2] · 최명원[2] · 김예진*

부산가톨릭대학교 환경공학과, [1]부산대학교 환경공학과, [2](주)엔바이론소프트

Study on the Effecting Factors for T-N and T-P Removal in Wastewater Treatment Plant using Path Model Approach

Yeongdae Cho, Seul-ah Lee[1], Minsoo Kim, Hyosoo Kim[2], Myungwon Choi[3], Yejin Kim*

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
[1]Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea
[2]Environsoft Co., Ltd., Yangsan 50565, Korea

Abstract

In this study, an operational data set was analysed by establishing a path model to figure out the actual cause-effect relationship of a wastewater treatment plant (WWTP); in particular, for the effluent concentrations of T-N and T-P. To develop the path models, data sets of operational records including effluent concentrations and operational factors were obtained from a field scale WWTP of 680,000 m^3 of treatment capacity. The models showed that the relationship networks with the correlation coefficients between variables for objective expressions indicated the strength of each relationship. The suggested path models were verified according to whether the analyzation results matched known theories well, but sophisticated minute theoric relationships could not be cropped out distinctly. This indicates that only a few paths with strong theoric casual relationships were represented as measured data due to the high non-linearity of the mechanism of the removal process in a biological wastewater treatment.

Key words : A_2O, Multivariate analysis, Path model, Wastewater Treatment Plant

1. 서 론

현재까지 하수처리장에서는 많은 양의 데이터들이 축적되어 왔다. 실제로 수집된 많은 양의 데이터들을 적절하게 전처리하여 사용한다면, 이러한 데이터들은 처리장 운영자들에게 공정의 상태를 이해하고 비정상적인 상태를 제거하기 위한 적절한 행동을 할 수 있도록 도와줄 수 있는 상당한 정보를 제공할 수 있다(Yoo et al,, 2006; Moon, 2011). 통계분석 기법을 활용하여 하수처리시설의 인과관계 구조를 탐구하고자 하는 연구 사례가 존재하나(Franz et al., 1996; Lee and Moon, 2005; Lee and Sun, 2007; Son et al., 2014), 대부분의 연구가 이변량 단순상관계수 분석이나 각 변수의 분포 특성을 탐구하는 데 그쳤을 뿐, 변수들 사이에 존재하는 다중적인

Received 14 August, 2018; **Revised** 4 September, 2018;
Accepted 1 October, 2018
***Corresponding author** : Yejin Kim, Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
Phone : +82-51-510-0621
E-mail : yjkim@cup.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인과관계는 탐구하지 않았다. 축적된 데이터들의 내부에 숨겨진 정보는 다변량 통계적 기법에 의하여 추론해낼 수 있는데, 대표적인 방법에는 회귀분석, 주성분 분석, 군집분석 및 판별분석 등이 많은 연구에서 활용되고 있다(Piovoso and Kosanovich, 1996; Raich and Cinar, 1996; Aguado et al., 2008; Alvarez et al, 2009, Moon et al., 2009; Dürrenmatt et al., 2012; Kim et al., 2016). 그러나 이러한 탐색적 통계분석 방법은 변수들 간의 분포형태를 탐구하는 것을 주된 목적으로 하므로 변수들 사이의 인과관계를 가시적인 객관적 수치로서 제공해주지는 못한다는 단점이 있다.

본 연구에 활용된 경로분석은 Sewall Wright(1889~1988)라는 유전학자에 의해 개발된 분석방법으로서 회귀분석이 발전된 형태이며, 회귀분석과 다르게 다수의 독립변수와 종속변수를 사용 가능하므로 각 변수 간 인과관계를 추론할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점을 이용하여 변수 간 총효과(total effect), 직접효과(direct effect), 변수 간에 다중적으로 존재하는 인과관계를 해석할 수 있는 간접효과(indirect effect)도 자연스럽게 측정 할 수 있다.

환경 분야에 대한 경로분석 기법 적용은 수질에 관한 인식을 주제로 설문조사를 수행하여 수질 만족도에 영향을 미치는 인자를 분석한 사례와(Levêque and Burns, 2017), 유역 수질 모델링을 위한 베이지안 모델 구축의 기본으로 경로분석을 활용한 사례(Feng and Yi, 2018)를 들 수 있다. 이렇듯 환경을 주제로 한 사회적인 조사분석의 연구에서부터 수치적 모델링의 분야까지 다양하게 경로모델이 활용될 수 있으나, 하수처리시설의 인과관계 분석에 대해서는 연구사례를 쉽게 찾아볼 수 없다. 그 이유는 생물학적, 물리·화학적 하수처리의 이론적 지식이 이미 탄탄하게 구축되어 있기 때문일 것이다. 그러나 하수처리시설의 운영자료가 나날이 축적되어 의미 있는 통계적 분석이 가능해진 지금, 일반적으로 알려져 있는 이론이 측정된 자료들 중에도 통계적으로 유의하게 존재하는지를 알아보는 과정은 의미가 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 질소와 인을 처리할 수 있는 고도처리공정인 A_2O공정을 사용하고 있는 대한민국 D 시에 위치한 S 하수처리장을 연구 대상 하수처리장으로 선정하여 유출수 질소, 인과 관련된 내부 운전 변수들을 확인하고 그들 사이의 인과 방향과 그 정도를 파악하고자 하였다. 유출수의 질소 및 인 농도로 대상을 한정한 이유는, 일반 하수처리장에서의 탄소 제거가 비교적 안정적으로 높은 효율로 달성되는 데 반해 질소와 인의 경우는 탄소제거에 비해 그 영향인자가 다양하고 다중적인 메커니즘을 가지며, 유출수 수질 규제치를 만족할 수 있는지에 대해 운전자가 끊임없이 관심을 기울이기 때문이다. 유출수 질소와 인에 대한 경로도형과 잠재변수가 포함된 구조방정식 모형을 도출하여 경로 계수를 통해 영향 정도가 높은 경로를 확인하고 이론적 지식과 일치하는지에 대해 파악하고자 하였다. 변수들의 이론적인 지식에 기초한 영향관계를 데이터를 통해서 확인해봄으로써 좀 더 객관적으로 인과관계를 파악하고, 하수처리시설의 제거 이론이 실제적으로 누적된 자료에도 통계적 특성을 가지고 내재하고 있는지를 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 하수처리장 및 데이터구성

본 연구의 대상 하수처리장은 처리용량 680,000 m^3/day의 S 하수처리장으로 고도처리공정인 A_2O 공정을 채택하였다. 대상 하수처리장의 3년간(2005~2008) 수집된 일별 운전데이터를 수집하였다. 수집된 데이터의 변수는 기상관련 변수와 하수처리공정의 각 지점에서의 수질변수, 그리고 운전 변수들로 총 60가지가 수집되었다(Table 1). 수집된 데이터를 구조방정식 모형에 활용하기 전에, 결측치 제거 및 변수 선정의 데이터 전처리 과정을 수행하였다. 유입수와 유출수 수질변수의 경우 1일의 1개 값의 자료가 존재하였으나 반응조 내부에서 제거반응과 운전변수의 인과관계를 보기 위해 필수적으로 요구되는 반응조 내부에서 측정된 수질변수는 1일 1개 값이 존재하지 않아 다량의 결측치가 발생하여, 결측된 날의 데이터를 삭제한 결과 데이터 셋의 수가 334개로 감소하였다. 이 데이터들을 다시 SPSS ver 18.을 이용한 랜덤추출을 통하여 2개의 그룹으로 나누었고 1그룹은 모형 구축, 2그룹은 모형 검증을 위해 사용하였다.

2.2. 경로모델 구축

경로분석은 변수들 사이의 인과관계의 방향성을 모형화한 경로모델(Path Model)을 만들기 위한 것이다. 이는 이론적인 가설을 바탕으로 변수들 간의 직접적인 영향 또는 간접적인 영향을 화살표를 이용하여 그림으로 나타내어

Table 1. Variables of collected data

Items	Variables
Weather conditions	Air temperature(℃), Rainfall, Humidity
Inflow (mixture water)	Flow(m^3/d), Water temperature(℃), pH, BOD(mg/L), COD(mg/L), SS(mg/L), T-N(mg/L), T-P(mg/L)
Primary settling tank	Water temperature(℃), pH, BOD(mg/L), COD(mg/L), SS(mg/L), T-N(mg/L), T-P(mg/L), Alkalinity, S-BOD, HRT(hr)
Bioreactor	Flow(m^3/d), Water temperature(℃), pH, DO(mg/L), MLSS(mg/L), MLVSS(mg/L), SVI, Sludge return(m^3/d), Sludge return ratio(%), F/M ratio, BOD loading(Kg/m^3·d), SRT(d), A-SRT(d), Internal sludge return ratio(%), ORP(mV), PO_4-P(mg/L), NH_4-N(mg/L), NO_3-N(mg/L), Air flow(m^3/d), Reactor Volume(m^3), HRT(hr)
Final settling tank	Water temperature(℃), pH, BOD(mg/L), COD(mg/L), SS(mg/L), T-N(mg/L), T-P(mg/L), Alkalinity, HRT(hr)
Effluent	Flow(m^3/d), Water temperature(℃), pH, BOD(mg/L), COD(mg/L), SS(mg/L), T-N(mg/L), T-P(mg/L), Colon bacillus

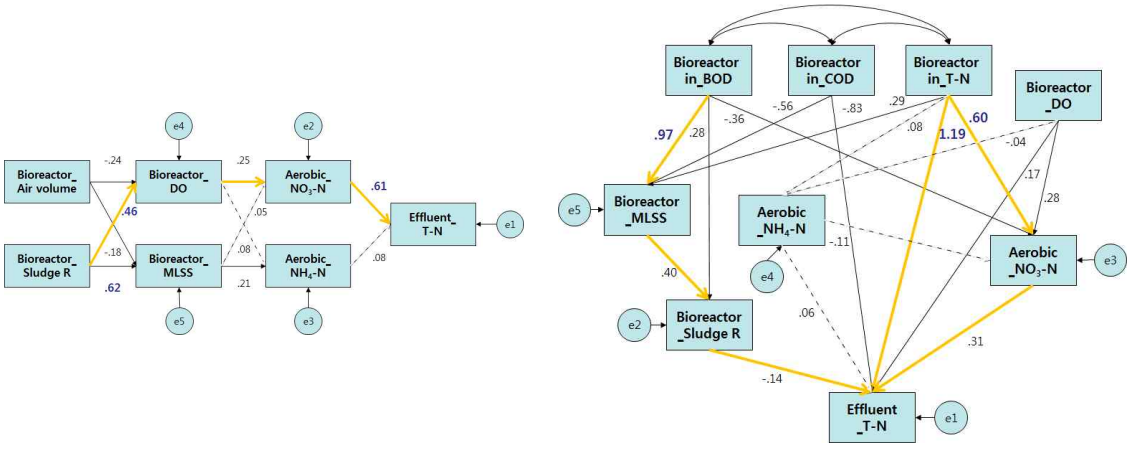
초기 모형을 만드는 단계와 그 모형에 측정된 데이터를 직접 대입하여 경로를 구성한 가설에 대한 타당성을 검증함으로써 모형의 적합도를 판단하는 단계로 이루어진다. 경로분석을 통해 인과관계 사이의 직접효과와 간접효과, 그리고 이 두 가지를 포함하는 총 효과까지 모두 확인할 수 있다. 경로분석을 통해서 두 변수 사이의 경로계수를 확인할 수 있는데 이 경로계수의 방향과 통계적 유의성에 따라 가설의 지지 여부가 결정된다. 특히 표준화 경로계수를 이용하여 모형 내에 존재하는 다양한 인과관계의 정도를 서로 비교할 수 있다. 다만 표준화 경로계수에 의미를 부여하기 위해 유의성 검정통계량을 살펴보아야 한다. 주로 사용하는 검정통계량은 C.R.(Critical Ratio) 값과 유의확률인 p-value로, C.R.값은 절대값이 1.96 이상, p-value는 0.05 보다 작아야 95% 신뢰수준에서 유의하다고 판단하게 된다(Shin, 2013). 본 연구에서는 IBM의 SPSS ver. 18에 포함된 AMOS 프로그램을 사용하여 경로분석을 수행하였다. 본 연구에서 목표하는 유출수 T-N과 T-P에 관한 각각의 경로분석을 수행함에 있어, 데이터 전처리 과정을 통해 도출된 변수 중에서 이론적 배경을 바탕으로 가장 기초가 되는 소수의 변수로 기초도형을 구성하고 그 도형의 적합도를 평가지수를 통해 확인(초기 경로모형 도출)하였다. 만약 기초도형이 "적합"에 해당하면 변수추가와 적합도 확인의 과정을 반복적으로 수행하며 모형을 확장하였고, 가장 타당한 변수들을 포함하고 모형의 적합도와 경로계수의 유의수준을 만족하는 도형을 최종적으로 도출(경로모형 수정)하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출수 T-N의 경로도형

3.1.1. 초기 경로모형

초기 경로모형(Fig. 1.(a))은 유출수 T-N을 포함하여 총 7개의 변수로 구성되었는데, 이는 생물반응조 공기량(Bioreactor_Air volume), 생물반응조 반송율(Bioreactor_Sludge R), 생물반응조 DO (Bioreactor_DO), 생물반응조 MLSS (Bioreactor_MLSS), 호기조 NO_3-N (Aerobic_NO_3-N)와 NH_4-N 농도(Aerobic_NH_4-N), 유출수 T-N 농도(Effluent_T-N)이다. 이는 유출수 호기조의 NO_3-N 농도와 호기조의 NH_4-N의 농도가 유출수 T-N에 직접적인 영향을 미친다는 이론적 지식에서 출발한 것이다. 이론적 경로모형을 수립한 후 가장 좋은 적합도 지수를 나타내는 모형을 획득하기 위해 변수를 추가 혹은 제거하며 적합도 지수를 확인하는 반복적 작업을 수행하였다. 수립된 초기 경로모형의 타당성 및 적합성을 확인해 본 결과, Q값=2.303, GFI=0.991, AGFI=0.945, CFI=0.983, RMSEA=0.089로 나타났고 이는 RMSEA를 제외하고는 모두 적합의 범위에



(a) Initial model (b) Modified model

Fig. 1. Path model about T-N.

속하였다. 각각의 경로가 가지는 방향성과 유의성의 결과로서, Table 3에 각 경로의 표준화 경로계수값과 그의 p-value를 나타내었다. 각각의 경로에 대한 표준화 계수값의 유의성을 검정해본 결과($p<0.05$), 생물반응조의 MLSS가 호기조의 NO_3-N 농도와 NH_4-N 농도에 영향을 주는 경로계수 값 그리고 호기조 NH_4-N이 유출수 T-N으로 가는 경로계수 값이 95% 신뢰수준에서 유의하지 않다고 판별되었다. 이러한 경로를 제외하고 유의한 경로계수를 비교해보았을 때, 상대적으로 영향 정도가 높은 경로는 3가지로 요약된다. 먼저 생물반응조의 반송율과 생물반응조의 MLSS 농도의 관계가 다른 관계들보다 큰 연관성을 가지고 있었다. 다음으로 호기조 NO_3-N 농도와 유출수 T-N 농도의 인과관계 그리고 생물반응조 반송율과 생물반응조 DO 농도와의 관계가 상대적으로 높은 연관성을 가진다는 결과가 나타났다. 본 모형에서 도출된 표준화 경로계수 값에 기초하여 상대적으로 유출수 T-N에 영향을 크게 미치는 경로를 선정해 본다면, 생물반응조 반송율이 반응조 DO 농도에 영향을 미치고 이것이 호기조 NO_3-N에 영향을 미쳐 최종적으로 유출수 T-N 농도에 영향을 주게 되는 경로라고 사료된다.

이렇게 도출된 경로도형을 검증하기 위해 2그룹으로 나누었던 데이터 중 모형 구축을 위해 사용한 그룹을 제외하고 남은 그룹의 데이터를 사용하였다. 검증은 경로도형 도출 과정과 마찬가지로 AMOS 프로그램으로 수행되었는데, 도출된 모형에 결합하는 데이터 파일만 바꾸어서 프로그램을 실행시켜 나온 적합도 결과를 기반으로 판단하였다. 적합도 평가 결과, Q값=1.373, GFI=0.976, AGFI=0.938, RMSEA=0.047, CFI=0.979로 나타나

Table 2. Results of Goodness-of-fit criterion about T-N path model (Initial model)

Classification	Goodness-of-fit criterion	Model development		Model valiation	
		Result	fitness or not	Result	fitness or not
Q value	below 3	2.303	Fitness	1.373	Fitness
GFI	above 0.9	0.991	Fitness	0.976	Fitness
AGFI	above 0.85 (above 0.8)	0.945	Fitness	0.938	Fitness
RMSEA	below 0.05 (below 1.0)	0.089	Not (Fitness)	0.047	Fitness
CFI	above 0.9	0.983	Fitness	0.979	Fitness

Table 3. Results of path coefficient about T-N path model (Initial model)

Classification			Standardized regression weights	p-value
Bioreactor_DO	←	Bioreactor_Air volume	-0.24	0.001
Bioreactor_MLSS	←	Bioreactor_Air volume	0.62	0.000
Bioreactor_DO	←	Bioreactor_Sludge R	0.46	0.000
Bioreactor_MLSS	←	Bioreactor_Sludge R	-0.18	0.015
Aerobic_NO_3-N	←	Bioreactor_DO	0.25	0.001
Aerobic_NH_4-N	←	Bioreactor_DO	0.21	0.006
Aerobic_NO_3-N	←	Bioreactor_MLSS	-0.05	0.553
Aerobic_NH_4-N	←	Bioreactor_MLSS	0.08	0.315
Effluent T-N	←	Aerobic_NO_3-N	0.61	0.000
Effluent T-N	←	Aerobic_NH_4-N	0.08	0.188

(Table 2) 모형이 적합함을 의미하였다.

3.1.2 경로모형 수정

유출수 T-N 농도와 운전 인자간의 인과관계 파악을 위해 도출한 두 번째 경로도형은 Fig. 1.(b)에 나타내었다. 본 모형은 초기 경로모형에 생물반응조로 들어가는 유입수의 농도 변수를 추가하여 도출하고자 하였다. 적합한 모형을 찾아가는 과정에서, 생물반응조로 유입되는 BOD, COD, T-N 농도(Bioreactor in_BOD, Bioreactor in_COD, Bioreactor in_T-N)가 추가된 반면, 생물반응조의 공기량(Bioreactor_Air volume) 변수는 삭제되었다. 본 경로도형의 적합도는 Table 4에 정리하였는데, 모든 기준에 대해 적합하다는 결과가 나타났다. 따라서 이 경로도형은 유출수 T-N과 관련 변수들의 인과관계를 나타내기에 알맞은 모형으로 사료된다.

유출수 T-N에 관하여 도출된 최종 경로모형의 표준화 경로계수 값과 p-value를 Table 5에 나타내었다. 유의수준 검정통계량인 p-value가 0.05보다 큰 값을 가지는 경로가 4가지 존재하는데, 이들은 생물반응조 유입수 T-N에서 호기조 NH_4-N로의 경로, 생물반응조 DO에서 호기조 NH_4-N로의 경로, 호기조 NH_4-N에서 호기조 NO_3-N로의 경로, 호기조 NH_4-N에서 유출수 T-N로의 경로이다. 이들의 경로를 제외하고 나머지 경로들의 관계를 보았을 때 상대적으로 인과관계 정도가 높은 경로는 3가지로 요약되었다. 생물반응조 유입수 BOD 농도와 생물반응조 MLSS 농도의 관계, 반응조로 유입되는 T-N 농도와 유출수 T-N 농도 사이의 관계, 생물반응조 유입수 T-N농도와 호기조의 NO_3-N 농도의 관계가 높은 연관성을 지닌다는 결과가 도출되었다.

본 경로도형에서 유출수 T-N 농도와 관련 인자들과의 관계를 가장 잘 묘사하고 있는 경로는 2가지 경로로 판단된다. 그 중 첫 번째는 생물반응조 유입수 BOD 농도가 반응조 MLSS에 영향을 주고 이는 또 생물반응조 반송율의

Table 4. Results of Goodness-of-fit criterion about T-N path model (Modified model)

Classification	Goodness-of-fit criterion	Model development		Model valiation	
		Result	fitness or not	Result	fitness or not
Q value	below 3	1.652	Fitness	2.111	Fitness
GFI	above 0.9	0.967	Fitness	0.958	Fitness
AGFI	above 0.85 (above 0.8)	0.907	Fitness	0.881	Fitness
RMSEA	below 0.05 (below 1.0)	0.063	Not (Fitness)	0.082	Not (Fitness)
CFI	above 0.9	0.989	Fitness	0.980	Fitness

Table 5. Results of path coefficient about T-N path model (Modified model)

Classification			Standardized regression weights	p-value
Bioreactor_MLSS	←	Bioreactor in_BOD	0.97	0.000
Bioreactor_Sludge R	←	Bioreactor in_BOD	0.28	0.000
Aerobic_NO_3-N	←	Bioreactor in_BOD	0.36	0.000
Bioreactor_MLSS	←	Bioreactor in_COD	-0.56	0.000
Effluent T-N	←	Bioreactor in_COD	-0.83	0.000
Bioreactor_MLSS	←	Bioreactor in_T-N	0.29	0.003
Aerobic_NH_4-N	←	Bioreactor in_T-N	0.08	0.303
Effluent T-N	←	Bioreactor in_T-N	1.19	0.000
Aerobic_NO_3-N	←	Bioreactor in_T-N	0.60	0.000
Aerobic_NH_4-N	←	Bioreactor_DO	-0.04	0.567
Aerobic_NO_3-N	←	Bioreactor_DO	0.28	0.000
Effluent T-N	←	Bioreactor_DO	0.17	0.000
Bioreactor_Sludge R	←	Bioreactor_MLSS	0.40	0.000
Effluent T-N	←	Bioreactor_Sludge R	-0.14	0.000
Aerobic_NO_3-N	←	Aerobic_NH_4-N	-0.11	0.093
Effluent T-N	←	Aerobic_NH_4-N	0.06	0.124
Effluent T-N	←	Aerobic_NO_3-N	0.31	0.000

변화로 이어지고 최종적으로 유출수 T-N 농도에 도달하는 경로이다. 다른 한 가지 경로는 생물반응조 유입수 T-N 농도가 호기조의 NO_3-N 농도의 변화를 일으키고 이는 최종적으로 유출수 T-N 농도에 영향을 미치게 된다는 경로이다.

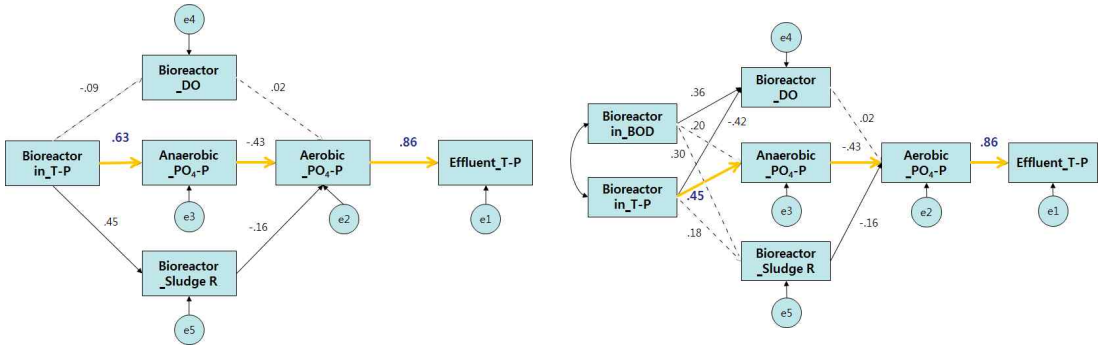
랜덤추출되어 마련된 검증을 위한 데이터셋을 활용하여 도출된 모형의 검증을 수행한 결과, Q값=2.111, GFI=0.958, AGFI=0.881, RMSEA=0.082, CFI=0.980으로, 모두 적합도 기준을 만족하므로 본 모형은 유출수 T-N 농도와 관련 운영 인자사이의 인과관계를 파악하는데 적합하다고 사료된다.

3.2 유출수 T-P의 경로도형

3.2.1 초기 경로모형

유출수 T-P에 관하여 도출된 초기 경로도형(Fig. 2.(a))에는 유출수 T-P 농도에 영향을 미치는 5가지 관련 변수가 포함되었다. 포함된 변수로는 생물반응조 유입수 T-P(Bioreactor in_T-P), 생물반응조 DO (Bioreactor _DO), 혐기조 PO_4-P (Anaerobic PO_4-P), 생물반응조 반송율(Bioreactor_Sludge R), 호기조 PO_4-P (Aerobic PO_4-P)이다. 본 모형의 적합도는 Table 5에 정리하였다. 적합도 판별 결과 모두 적합하였고 모형의 표준화 경로계수 값과 그 유의수준을 검정하기 위한 p-value를 Table 6에 정리하였다. 유의성 검정결과, 2가지 경로가 유의수준을 벗어났는데 이는 생물반응조 유입수 T-P에서 생물반응조 DO로의 경로와 생물반응조 DO에서 호기조 PO_4-P로의 경로이다. 이 경로를 제외하고 본 경로도형에서 상대적으로 높은 계수 값을 보이는 경로는 2가지로 요약된다. 호기조의 PO_4-P 농도와 유출수 T-P 농도와의 관계, 생물반응조로 유입되는 T-P 농도와 혐기조의 PO_4-P 농도와의 관계가 높은 연관성을 지닌다는 결과가 도출되었다. 최종적으로 본 경로도형에서 경로계수 값이 유의하고 중요한 의미를 가지는 경로는 생물반응조 유입수 T-P에서 혐기조 PO_4-P을 지나 호기조 PO_4-P에 영향을 주고 끝으로 유출수 T-P 농도에 영향을 미치는 경로라고 분석되어, 이론적 지식에 걸맞는 인과관계가 입증되었다.

본 모형을 검증해본 결과, Q값=1.659, GFI=0.974, AGFI=0.931, RMSEA=0.063, CFI=0.981로 나타났다. 적합도 기준을 모두 만족하므로 본 모형은 T-P와 관련



(a) Initial model (b) Modified model

Fig. 2. Path model about T-P.

Table 6. Results of Goodness-of-fit criterion about T-P path model (Initial model)

Classification	Goodness-of-fit criterion	Model development		Model valiation	
		Result	Fitness or not	Result	Fitness or not
Q value	below 3	1.263	Fitness	1.659	Fitness
GFI	above 0.9	0.981	Fitness	0.974	Fitness
AGFI	above 0.85 (above 0.8)	0.949	Fitness	0.931	Fitness
RMSEA	below 0.05 (below 1.0)	0.040	Fitness	0.063	Not (Fitness)
CFI	above 0.9	0.995	Fitness	0.981	Fitness

변수들 사이의 인과관계를 파악하는데 알맞은 모형이라고 사료된다.

3.2.2 경로모형 수정

유출수 T-P에 대한 최종 경로도형을 Fig. 2.(b)에 나타내었다. 이는 초기 경로모형에 생물반응조로 유입되는 BOD 농도(Bioreactor_in_BOD)가 추가된 모형으로 적합도는 Table 5에 나타나 있듯이 모두 만족하는 수준을 나타내었고 모형의 표준화 경로계수 결과 값은 Table 7에 나타내었다. 유의성 검정결과 4개의 경로계수 값이 유의수준을 벗어나 신뢰할 수 없다는 결과가 도출되었다. 제외된 경로는 유입수 BOD에서 혐기조 PO_4-P로의 경로, 유입수 BOD에서 생물반응조 반송율로의 경로, 유입수 T-P에서 생물반응조 반송율의 경로, 생물반응조 DO와 호기조 PO_4-P와의 경로이다. 이를 제외하고 인과

Table 7. Results of path coefficient about T-P path model (Initial model)

Classification			Standardized regression weights	p-value
Bioreactor_DO	←	Bioreactor in_T-P	-0.09	0.261
Anaerobic_PO_4-P	←	Bioreactor in_T-P	0.63	0.000
Bioreactor_Sludge R	←	Bioreactor in_T-P	0.45	0.000
Aerobic_PO_4-P	←	Bioreactor_DO	0.02	0.783
Aerobic_PO_4-P	←	Anaerobic_PO_4-P	-0.43	0.000
Aerobic_PO_4-P	←	Bioreactor_Sludge R	-0.16	0.020
Effluent T-P	←	Aerobic_PO_4-P	0.86	0.000

Table 8. Results of Goodness-of-fit criterion about T-P path model (Modified model)

Classification	Goodness-of-fit criterion	Model development		Model valiation	
		Result	Fitness or not	Result	Fitness or not
Q value	below 3	1.902	Fitness	1.949	Fitness
GFI	above 0.9	0.969	Fitness	0.967	Fitness
AGFI	above 0.85 (above 0.8)	0.913	Fitness	0.908	Fitness
RMSEA	below 0.05 (below 1.0)	0.074	Fitness	0.076	Not (Fitness)
CFI	above 0.9	0.987	Fitness	0.982	Fitness

Table 9. Results of path coefficient about T-P path model (Modified model)

Classification			Standardized regression weights	p-value
Bioreactor_DO	←	Bioreactor in_BOD	0.36	0.044
Anaerobic_PO_4-P	←	Bioreactor in_BOD	0.20	0.174
Bioreactor_Sludge R	←	Bioreactor in_BOD	0.30	0.071
Bioreactor_DO	←	Bioreactor in_T-P	-0.42	0.021
Anaerobic_PO_4-P	←	Bioreactor in_T-P	0.45	0.001
Bioreactor_Sludge R	←	Bioreactor in_T-P	0.18	0.269
Aerobic_PO_4-P	←	Bioreactor_DO	0.02	0.783
Aerobic_PO_4-P	←	Anaerobic_PO_4-P	-0.43	0.003
Aerobic_PO_4-P	←	Bioreactor_Sludge R	-0.16	0.017
Effluent_T-P	←	Aerobic_PO_4-P	0.86	0.001

정도가 높은 경로는 2가지로 요약할 수 있는데, 생물반응조 유입수 T-P 농도에서 혐기조 PO_4-P로의 경로와 호기조 PO_4-P에서 유출수 T-P로의 경로이다. 이는 T-P의 초기 경로모형에서의 결과와 일치하는 것이었다. 따라서 본 모형에서도 생물반응조 유입수 T-P에서 혐기조 PO_4-P와 호기조 PO_4-P를 지나 유출수 T-P로 영향을 미치는 경로가 유의하다고 사료된다. 검증결과, Q값 =1.949, GFI=0.967, AGFI=0.908, RMSEA=0.076, CFI=0.982로 나타났으며 이는 모두 적합하다고 판별되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고도처리공정으로 운영되고 있는 하수처리장을 대상으로 유출수 질소, 인과 관련된 농도 및 운전인자들의 영향 관계를 확인해보기 위해 경로분석을 수행하였다. 경로도형은 이론적인 지식에 근거하여 기초모형을 만들고 그 모형에 변수들을 추가하며 적합도를 확인하면서 모형을 확장하고 최적의 모형을 도출하였다. 경로분석을 수행한 결과, 유출수 T-N에 관해서는 생물반응조 유입수 BOD 농도가 반응조 MLSS에 영향을 주고 이는 생물반응조 반송율의 변화로 이어지며 최종적으로 유출수 T-N 농도에 영향을 준다는 경로와, 생물반응조 유입수 T-N 농도가 호기조의 NO_3-N 농도의 변화를 일으키고 이는 최종적으로 유출수 T-N 농도에 영향을 미치게 된다는 경로만이 유의하였다. 유출수 T-P에 관하여는, 생물반응조 유입수 T-P 농도에서 혐기조 PO_4-P로의 경로와 호기조 PO_4-P에서 유출수 T-P로의 경로만이 유의하였다.

본 연구를 통하여, 이론적으로 알려진 복잡한 인과관계는 사실상 데이터로는 뚜렷이 드러나지 않으며, 소수의 강한 이론적 인과관계를 가지는 경로만이 측정된

데이터로서 드러난다는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 단순한 이변량 상관계수로는 확인될 수 없는 것이다. 이는 생물학적 처리공정이 가지는 변수간의 복잡한 상호관계가 가지는 불확실성이 데이터에 내재되기 때문이라고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 "미래유망 녹색환경기술산업화 촉진사업 (Project no. 201700193001)에 의해 지원받았습니다.

REFERENCES

Aguado, D., Rogen, C, 2008, Multivariate statistical monitoring of continuous wastewater treatment plants, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 21, 1080-1091.

Alvarez, D. G., Fuente, M. J., Vega, P., Sainz, G., 2009, Fault detection and diagnosis using multivariate statistical techniques in a wastewater treatment plant, *Proceedings of* 7th IFAC International Symposium on Advanced Control of Chemical Process.

Dürrenmatt, D. J., Gujer, W., 2012, Environmental Modelling & Software, 30, 47-56.

Feng, H., Yi, Z., 2018, Joint analysis of input and parametric uncertainties in watershed water quality modeling: A formal Bayesian approach, Advances in Water Resources, 116, 77-94.

Franz, A., Nowak, O., Kroiss, H., 1996, Modeling WWTP treatment efficiency and relationship to receiving water quality, Wat. Sci. Technol., 33(12), 47-55.

Kim, M., Kim, Y., Kim, H., Piao, W., Kim, C., 2016, Operator decision support system for integrated wastewater management including wastewater treatment plants and receiving water bodies, Environmental Science and Pollution Research, 23(11), 10785-10798.

Lee, C. H., Moon, K. S., 2005, Statistical analysis of operating parameters on advanced wastewater treatment plant, J of Environmental Sciences, 14(2), 251-258.

Lee, D. J., Sun, S. W., 2007, Performance evaluation of WWTP based on reliability concept, J of KSEE, 29(3), 348-356.

Levêque, J. G., Burns, R. C., 2017, A Structural Equation Modeling approach to water quality perceptions, J of Env Manage, 197(15), 440-447.

Moon, T. S., Kim, Y. J., Kim, J. R., Cha, J. H., Kim, D. H., Kim, C. W., 2009, Identification of process operating state with operational map in municipal wastewater treatment plant, Journal of Environmental Management, 90, 772-778.

Moon, T. S., 2011, Development of decision support system for the operator of sewage treatment plant by the diagnosis of process operating state and the inference of reasons, Ph. D. Thesis, Pusan National University.

Piovoso, M. J., Kosanovich, K. A., 1996, The use of multivariate statistics in process control, in: W.S. Levine(Ed.), The Control Handbook, CRC Press, Boca Raton, FL, 561-573.

Raich, A., Cinar, A., 1996, Statistical process monitoring and disturbance diagnosis in multivariable continuous processes, AIchE Journal, 42(4), 995-1009.

Shin, G. K., 2013, Structural Equation Modeling (SEM) with SPSS/AMOS 20., Chungram.

Yeom, I. T., Chung, H. M., Yu, S. J., Kim, W. K., Kwon, O. S., Ahn, T. U., Son, D. H., Choi, I. C., 2014, A Study on the evaluation for operations of public sewage treatment plants uisng statistics technique, J of Korean Society on Water Environment, 30(5), 524-531.

Yoo, C. K., Vanrolleghem, P. A., Lee, I. B., 2006, Fault detection, monitoring and diagnosis of sequencing batch reactor for integrated wastewater treatment management system, Korean Society of Environmental Engineers, 11(2), 1-14.