

# 수치해석 및 수질모델링을 활용한 농공단지 폐수처리시설 방류수의 수계영향성 분석 및 적정 모델의 선정방안 제시

## Analysis of Water System Impacts of Effluent from Agricultural and Industrial Complex Wastewater Treatment Facilities Using Numerical Analysis and Water Quality Modeling: A Method for Selecting an Appropriate Model

이 인 구<sup>1</sup> Lee, In-Koo

강 순 아<sup>2</sup> Kang, Soon-Ah

### Abstract

This study investigates the impact of aluminum and water pollutants present in the effluent from wastewater treatment plants associated with agricultural and industrial facilities in the Geumgang waterway. The average aluminum concentration in the effluent from these facilities ranged from 0.19-3.14 mg/L. The  $R^2$  values between the predicted and measured values at the confluence were 0.9237 and 0.9758, respectively, with an average aluminum concentration of 0.051 mg/L observed 10 km downstream. During the model calibration process, QUALKO2 outperformed QUAL2E, showing percent bias values of less than 11.9% and 18.9% for BOD and Chl-a, respectively. However, both models demonstrated similar performance in predicting T-N and T-P concentrations, as they both consider abiotic organic nitrogen and phosphorus. In conclusion, the impact of aluminum and water pollutants in the effluent from the Geumgang River agricultural and industrial complex wastewater treatment plant is relatively low. Nonetheless, for the safety of drinking water, continuous monitoring and proper maintenance of aluminum levels and water quality are essential.

### 요 지

본 연구에서는 농공단지 폐수처리장 배출수에 포함된 알루미늄 및 수질오염물질이 금강수계에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 그 결과, 농공단지 폐수처리장에서 배출되는 폐수 중 응집제 사용에 따른 알루미늄 농도는 평균 0.19~3.14mg/L로 분석되었다. 합류점에서의 예측값과 측정값의 상관계수는 각각 0.9237과 0.9758로 나타났으며, 하류 10km에서의 알루미늄 농도는 평균 0.051mg/L로 나타났다. 수질 모델링의 경우 먼저 모델 보정 과정을 통해 QUALKO2 및 QUAL2E 모델의 오차율이 20% 이내로 개선되어 모델의 신뢰성을 확인하였다. 특히, BOD 모의결과 QUALKO2 모델이 QUAL2E 모델에 비해 낮은 오차율을 보였으며 T-N 및 T-P 모의 결과 조류 호흡에 따른 비생물적 유기질소와 유기인을 고려하면

1 정회원, 호서대학교 벤처대학원 융합공학과 박사과정 학생, 호서대학교 보건산업연구소 연구원 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Convergence Technology, Graduate School of Venture, Hoseo Univ., Researcher, Institute of Health Industry, Hoseo Univ.)

2 비회원, 호서대학교 벤처대학원 융합공학과 교수, 호서대학교 보건산업연구소 소장 (Prof., Dept. of Convergence Technology, Graduate School of Venture, Hoseo Univ., Director, Institute of Health Industry, Hoseo Univ., T: +82-2-2059-2388, [sakang@hoseo.edu](mailto:sakang@hoseo.edu), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2025년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

QUAL2E 모델과 QUALKO2 모델의 차이는 크지 않았다. 요약하면, 농공단지 폐수처리장의 방류수에 포함된 알루미늄 및 수질오염물질의 영향은 상대적으로 낮은 것으로 나타났으며 식수의 안전성을 고려하여 알루미늄 및 수질에 대한 모니터링과 적절한 유지 관리가 필요할 것으로 사료된다.

**Keywords :** Aluminium-based coagulants, Geumgang River Basin, Water quality modeling

## 1. 서론

도시화, 산업화 및 인구의 증가 등에 따른 환경오염은 지속적으로 증가하여 미래세대의 심각한 위협요소로 간주된다. 환경오염의 형태로 대기, 수질 및 토양을 비롯한 폐기물 오염 등이 있으며 이중 수질오염은 인간의 생활과 생태계에 직접적이고 광범위한 영향을 미침으로써 적절한 방안의 수립은 국가적 입지에서 매우 중요하다(Choi, 2019). 우리나라는 수돗물 등 용수 공급의 대부분을 하천 및 호소에 의존하고 있으며 이에 따른 공공수역의 수질 관리 필요성이 증대된다. 이는 수계로 유입되는 수질의 정량화와 오염물질 누출 사고, 조류의 발생 및 용존산소 고갈 등과 관련한 사전 예방적 모니터링의 중요함을 시사하며 대표적 활용방법이 모델링이다(Ko, 2008a).

수계 내 조류는 부영양화를 일으키며 독소 및 불쾌한 냄새를 유발시키는 주요 인자이다. 이러한 조류의 생장에 요구되는 필수요소는 유기물질, 질소 및 인으로 요약되며 이중 인은 최소 제한인자이다. 따라서 정부는 공공처리시설을 대상으로 총인(T-P)에 대한 방류수수질기준을 강화하였고 개별 처리시설에서는 이를 준수하기 위하여 기존 2차처리 후단에 화학적 응집공정을 주로 하는 이른바 총인처리시설을 추가 적용하기에 이르렀다. 화학적 응집은 알루미늄계 응집제의 가수분해 생성물로 수중 인을 저감시키는 공정으로 인의 처리에 있어서 가장 적용성이 뛰어나다. 그러나 방류수 내에 잔류하는 알루미늄은 알츠하이머의 원인물질로 지목되고 있으며 현재 배출허용기준 및 방류수질기준에 설정되지 않아 기존 조류 생장의 지표항목과 더불어 관리가 필요한 항목이다.

수계관리를 위해 환경공학적인 측면에서 다양한 수질 모델이 활용되고 있으며 관련 정책의 수립 및 평가를 위한 활용성이 증가되고 있다. 모델링은 조사 하천유역의 장기적인 수질 변화에 다방면으로 활용된다. 하수처리장과 같은 점오염원 및 비점오염원이 존재하는 유역의 수질 환경 평가에도 유용하다. 또한 저영향개발 기법 등을 활용한 비점오염원 제거 예측 모델 등 하천의 수질변화

예측을 위한 시간적, 비용적 제한에 대하여 수질 모델링 기법의 활용으로 극복할 수 있다(Ahn et al., 2014).

일반적으로 사용되는 하천의 수질 모델은 미국 환경보호청에서 개발한 1차원 모델인 QUAL2E이다. 이 모델은 적용대상 수역을 크게 n개의 구간(Reach)으로 나누고 각 구간을 다시 소구간(Element)으로 나누어 시간별로 농도를 계산한다. 각 구간에서는 하천의 경사, 종단면적 및 마찰계수 등을 포함한 수리학적 또는 지형학적 특성과 BOD 분해율, 저층의 용출율 및 조류의 침강속도를 포함한 화학적 분해속도 등이 일정하다고 가정한다(Jeong et al., 2010). 또한, QUAL2E 모델은 사용자의 적절한 조합에 의하여 용존산소를 포함한 15가지 항목의 상호작용관계에 의하여 수질을 모의하도록 설계되어 있다. 다만, QUAL2E는 하천 유역의 조류 발생 및 사멸에 따른 유기물의 증가를 고려하지 못하여 정체수역이 많은 우리나라 하천의 특성을 제대로 반영하지 못한다는 단점이 있다(Gong and Jeong, 2007). 이러한 QUAL2E의 단점을 보완하기 위하여 QUALKO2 모델이 국립환경과학원으로부터 개발되었다. QUALKO2 모델은 실험실에서 측정하는 BOD와 유기성 질소 및 유기성 인을 그대로 입력하고 출력될 수 있도록 수정된 모델로서 QUAL2E 모델에 조류의 생산 및 사멸에 의한 내부생산 유기물 증가, Bottle BOD 반응 및 탈질화 반응 과정을 추가하여 국내 하천의 특성에 맞도록 개선된 모델이다.

수질모델링을 통한 예측 결과는 국가정책의 수립과 시행에 활용되며 경제와 산업에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있으므로 모델링 결과에 대한 신뢰도 제고는 매우 중요하다. 따라서 유역의 수질 변화를 적절히 재현하고 예측할 수 있도록 대상 지역의 특성을 고려한 모델의 선정이 필요하며 일반적으로 QUAL2E 및 QUALKO2 모델이 활용된다(Jo, 2020). QUALKO2 모델이 QUAL2E 모델보다 조류발생이 잦은 국내 하천유역에 대한 적용성이 넓고 좀 더 상세한 수리학적 반응을 모의하도록 개발되었다고는 하지만 모델의 검증과 신뢰도 향상에 대한 지속적인 연구는 필요하다 할 수 있다.

본 연구에서는 금강수계로 유입되는 정안천 유역의 유량 및 수질에 대한 기초자료와 실측 결과를 바탕으로 농공단지 폐수처리시설에 의한 수질 영향성을 확인하고자 하였으며 분석 대상 항목으로 Al(알루미늄), BOD, T-N, T-P, Chl-a 5가지 항목에 대해 선정하였다. Al의 경우 앞서 언급한 바와 마찬가지로 T-P의 수질기준 강화로 폐수처리장 등에서 사용되는  $Al_2(SO_4)_3$ 이나 PAC 등의 응집제가 방류수에 잔류하여 하천에 영향을 미칠 수 있어 하천 내 Al의 농도를 분석하고자 하였다. 또한, 하천의 유기물질에 의한 오염도를 나타내는 대표적인 수질 지표인 BOD를 분석하였고, T-N, T-P를 분석함으로써 폐수처리장 방류수의 영양염류 처리현황과 그에 따른 조류의 생물량을 평가하고자 Chl-a를 분석하였다. Al의 경우 하천 내에서의 거동과 농도 예측이 가능한 모델이 없어 폐수처리장 방류수의 직접적인 수질분석과 유량조사 등을 통해 금강수계 내 농도를 예측·검증하고자 하였으며 BOD,

T-N, T-P, Chl-a의 경우 일반적으로 수질 모델링에 많이 활용되고 있는 QUAL2E, QUALKO2 모델을 활용하여 수질 농도를 예측하고자 하였다.

기존의 수질모델링에 관한 연구들은 단일 모델링 방법에 따른 하천의 수질을 예측 모의한 반면 본 연구에서는 수질 모델링에 널리 사용되는 QUAL2E, QUALKO2 두 모델에 대한 비교분석을 통해 농공단지 폐수처리장에서 발생하는 방류수 중 Al, BOD, T-N, T-P, Chl-a의 농도와 하천 유하거리에 따른 거동을 분석·예측하였으며 정상상태 수질모델인 두 모델의 수리학적 반응기작 차이에 의한 예측 신뢰도를 비교·평가하고자 하였다.

## 2. 연구방법

다음의 Fig. 1에 본 연구의 주요 흐름을 나타내었다. 먼저 폐수처리시설 방류수의 Al, BOD, T-N, T-P, Chl-a

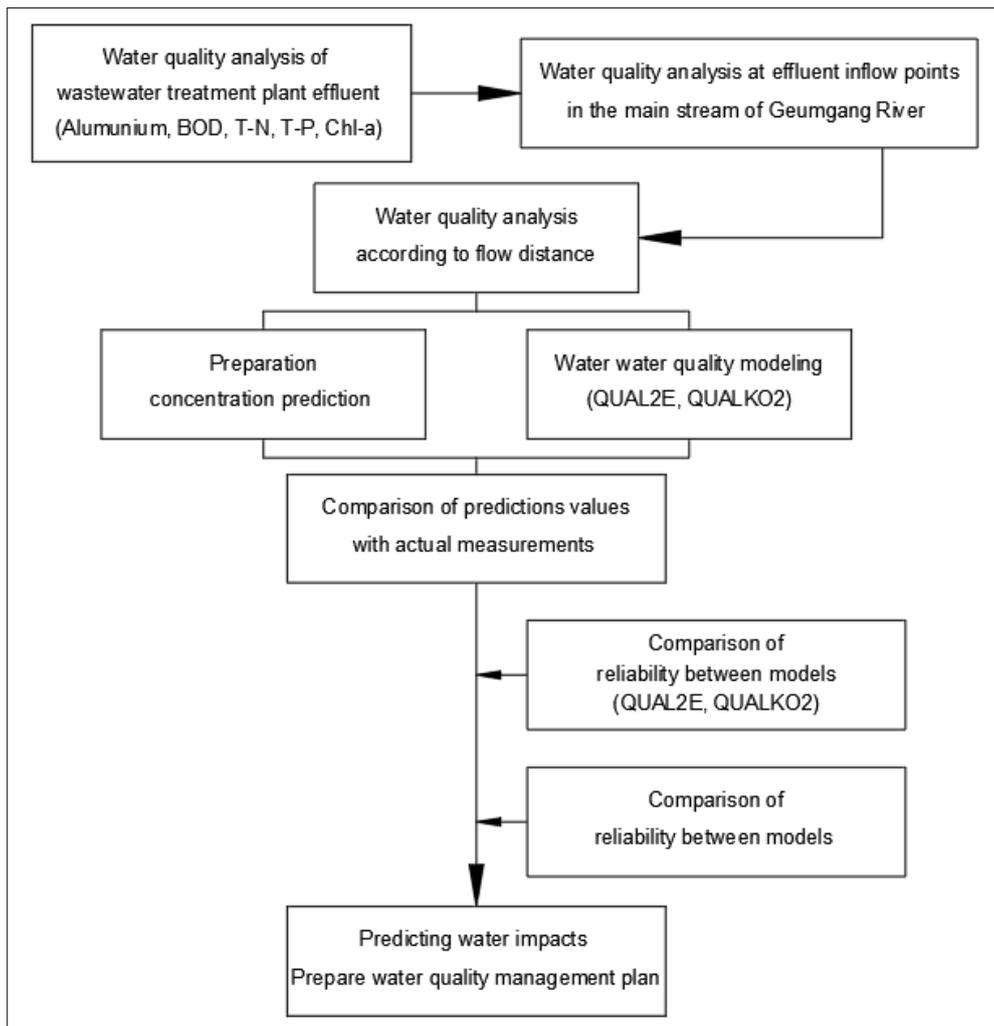


Fig. 1. Research flow chart

를 분석하여 알루미늄은 혼합농도 예측에 활용하고 BOD, T-N, T-P, Chl-a의 분석값은 모델 입력자료로 사용하였다. 또한, 각 방류수가 금강본류에 유입되는 지점의 수질 농도와 이후 금강 유하거리에 따른 수질을 일정 간격으로 분석하여 알루미늄의 경우 혼합농도에 따른 예측치 및 실측치의 값을 비교하고 BOD, T-N, T-P, Chl-a의 경우 QUAL2E, QUALKO2 모델링 결과에 따른 신뢰도를 비교·평가하고자 하였다.

## 2.1 조사 현장

본 연구의 조사 대상 현장은 충청남도 공주시 내 농공단지로 공주시에 위치하였다. A, B 농공단지의 경우 위치는 충청남도 공주시 사현리 일원으로 약 151,000m<sup>2</sup>의 면적에 1987년 12월 지정 공고되었다. C 농공단지의 경우 충청남도 공주시 남공주IC 인근에 위치하였으며 면적은 약 397,000m<sup>2</sup>으로 1990년 5월에 지정 공고되었다.

A, B 농공단지의 경우 플라스틱, 합성수지 등을 주로 생산하는 업체가 입주되었으며 C 농공단지의 경우 화학 약품을 생산하는 업체들이 입주되어 있어 각 농공단지의 폐수처리장에는 응집제를 사용하는 응집침전 설비가 운전 중에 있다.

A, B 농공단지의 경우 단지 내에서 발생하는 폐수를 처리하여 방류수 수질기준에 맞춰 정안천에 방류하고 있으며 정안천은 금강 본류에 합류된다. C 농공단지의 경우에도 인근 소하천에 처리수를 방류하며 소하천 또한 금강본류로 합류하게 된다.

## 2.2 알루미늄 오염부하 예측 및 검증

Fig. 3은 알루미늄의 오염부하 조사를 위한 조사 위치를 나타내었다. 앞선 서론에서 언급한 바와 마찬가지로 폐수처리시설 방류수에 포함된 알루미늄 농도의 예측과 관리를 위해 별도의 모델링 기법이 없는 알루미늄 거동

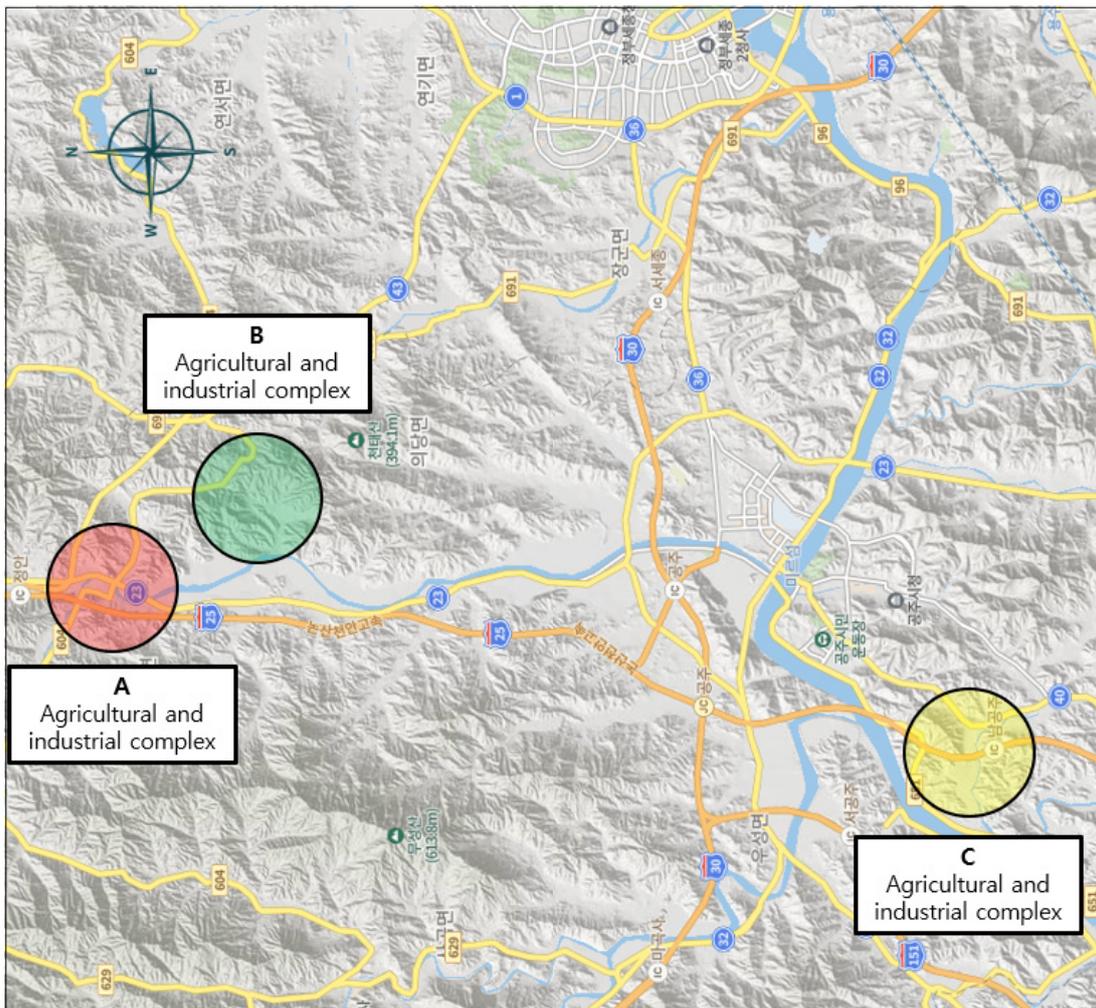


Fig. 2. Research and investigation sites

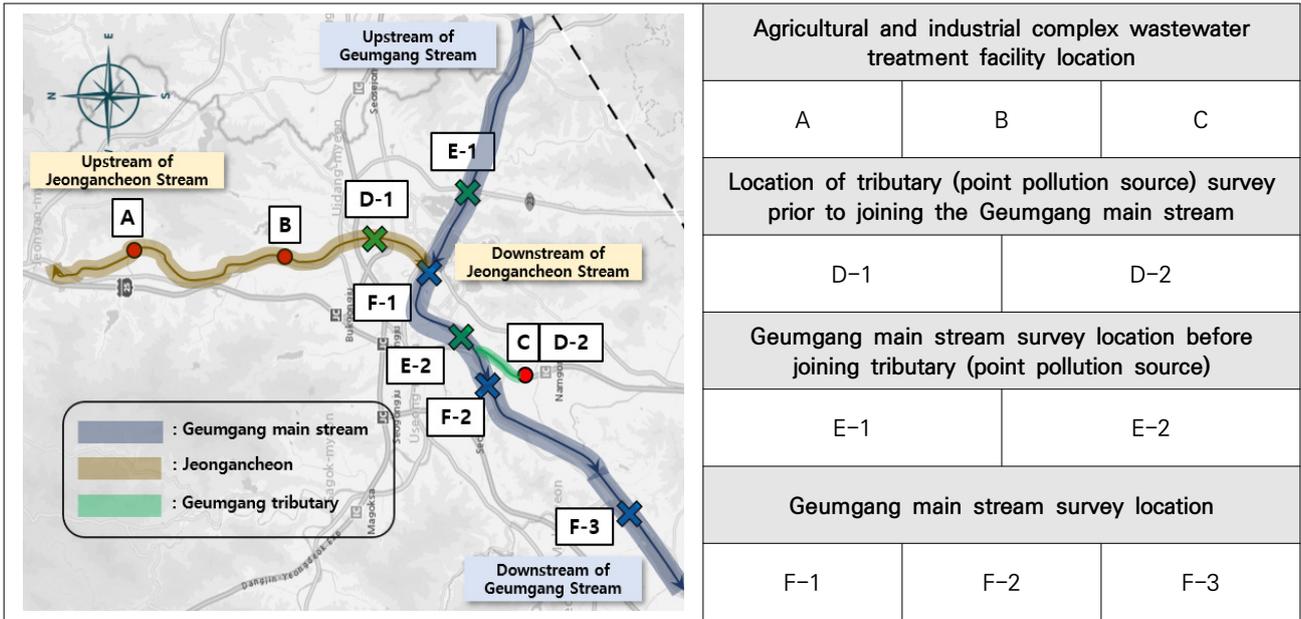


Fig. 3. Water quality survey point

과 농도를 직접 분석하였으며, 정안천 유역의 농공단지 폐수처리시설 2개소(A, B) 및 금강 본류 소하천 유역의 농공단지 1개소(C)가 대상시설로서 폐수처리시설 방류수가 유입되는 하천 지점부터 금강 본류의 유하거리에 따른 농도를 분석하여 금강 본류에 대한 폐수처리장 방류수 내 알루미늄의 영향을 분석하였다. 농공단지 폐수처리시설의 원수 및 방류수 수질을 분석하였으며, 방류수에 의한 금강수계 영향성을 예측하고 검증하기 위하여 금강지류 2개 지점(D-1, D-2)에서 시료 채취 및 수질분석을 실시하였다.

A, B 농공단지 폐수처리시설에 대한 영향조사는 해당 농공단지 폐수처리시설의 방류수가 포함된 정안천 말단 지점과 정안천 합류 이전 금강 본류 상류에서 유량과 알루미늄 농도를 분석하였고 이후 본류에 대한 혼합농도 예측 및 실측 결과와 비교·분석하였다. C 농공단지 폐수처리시설에 대하여는 해당 시설의 방류수가 포함된 소하천 말단 지점과 소하천 합류 이전 금강 본류의 유량 및 알루미늄 농도를 분석하고 혼합농도를 적용하여 예측 및 검증하였다. 이후 금강 본류 합류점 하류 지점에서 알루미늄 농도를 분석함으로써 농공단지 폐수처리시설의 방류수가 금강 본류에 미치는 영향을 모의하였다. 현지 조사는 2022년 1월부터 2023년 8월까지 월 1회 진행하였다.

$$C_m = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

$C_m$  : 혼합농도

$C_1$  : 채수지점 1 농도       $Q_1$  : 채수지점 1 유량

$C_2$  : 채수지점 2 농도       $Q_2$  : 채수지점 2 유량

### 2.3 모델의 수리학적 반응 및 계산

QUAL2E 모델의 경우 현재까지 많이 이용되고 있는 대표적인 수질모델이며, 하천 수질 변화 기작에서 중요한 역할을 하는 유기질소 변화 과정과 조류 성장에서 영양물질로 암모니아 흡수를 추가하고 총인을 유기인과 용존 무기인으로 분리할 수 있는 모델이다. 하지만 조류의 영향이 큰 우리나라 하천의 경우 QUAL2E는 한계를 가지고 있어 QUALKO2 모델이 개발되었는데, QUALKO2 모델은 QUAL2E 모델에 부유성 조류의 사멸로 인한 유기물의 내부증가, 탈질화 반응 및 부착식물의 광합성·호흡 과정을 추가한 것이다(Ko, 2008b). 또한 QUAL2E 모델에서 BOD는 CBOD로 입력되고 모의되므로 Bottle BOD의 개념(조류기원성 또는 질산화에 의한 산소소모량, 비생물성 CBOD 등)이 결여되어 있어, 이러한 문제점을 보완하고 조류의 생산 및 사멸에 의한 내부생산 유기물 증가와 탈질화 반응 과정을 추가한 QUALKO2 모델이 개발되었다. 일반적으로 부영양화된 하천의 수계에서는 조류의 생산과 사멸이 유기물의 거동에 가장 큰 부분을 차지하고 있음에도 불구하고 QUAL2E의 연산에서는 이와 같은 조류의 거동과 관계가 없는 것으로 구성되어있어

영양염류의 증가에 의한 조류가 발생하여도 BOD의 예측결과에 영향을 미치지 않는다. 이는 QUAL2E가 용존 산소 모의를 위해 조류의 광합성을 다루고 있으나 질소와 조류의 농도가 매우 낮아 유기물질과 용존산소가 외부에서 유입되는 즉 비생물성 CBOD에 의하여 좌우되는 수체에 한해서만 적용이 가능한 것이다. 그러나 부영양화가 발생하는 국내 하천에서는 ABOD와 NBOD 값이 어느 정도 나타나기 때문에 기존 QUAL2E의 적용은 매우 제약적이라 할 수 있다.

반면, QUALKO2는 이와 같은 조류의 발생과 사멸에 대한 메커니즘이 포함되어 모의 시 유기물의 증가를 반영하도록 구성되었으며 BOD의 반응기작 및 조류활동에 의한 유기물질 증가와 탈질화 반응 등 하천의 정체수역에서 나타나는 생물학적 반응을 반영하였다. 또한, QUAL2E 모형에서 제한된 오염원의 수, 하천 구간의 수 및 계산요소 등이 확장되어 대형 하천이나 지류가 많은 하천에도 적용이 가능하다. 다음 Table 1에 QUAL2E 및 QUALKO2 모형의 차이점을 나타내었으며 Fig. 4에 QUAL2E 및 QUALKO2 모형의 반응기작을 나타내었다.

## 2.4 수계 설정 및 모형 입력자료

QUAL2E와 QUALKO2를 이용한 금강수계 및 이에 유입되는 지천인 농공단지 정안천 수계의 수질모델링을 위한 소구간 및 요소(element)를 다음 Fig. 5와 같이 구분하였다. BOD, TN, TP 및 Chl-a 항목에 대한 모델은 금강 본류 이전 하천 유입지점을 시점으로 하여 A, B 농공단지 폐수처리시설의 방류수가 포함된 정안천 합류부 이후 C 농공단지 폐수처리시설 하류 지천이 유입되기 전까지 총 55km의 구간에 대하여 5개의 소구간과 각각의 소구간을 1.0km로 구분하여 총 55개소로 구성하였다.

대상수계에 대한 수질모델링을 위하여 유입 유량 및 경계 수질농도 등 기초자료는 정안천 하천기본계획 전략 환경영향평가를 활용하였다. 모형의 보정을 위한 측정 자료는 구간별 채수 위치를 선정하여 실측치를 반영하고 수질농도는 실제 채수 및 측정이 이루어진 지점의 평균 농도를 적용하여 오차율을 나타내었다. 그 외 실시간 모니터링 자료(Ministry of Environment, 2023)가 있는 경우 해당 자료를 활용하였다.

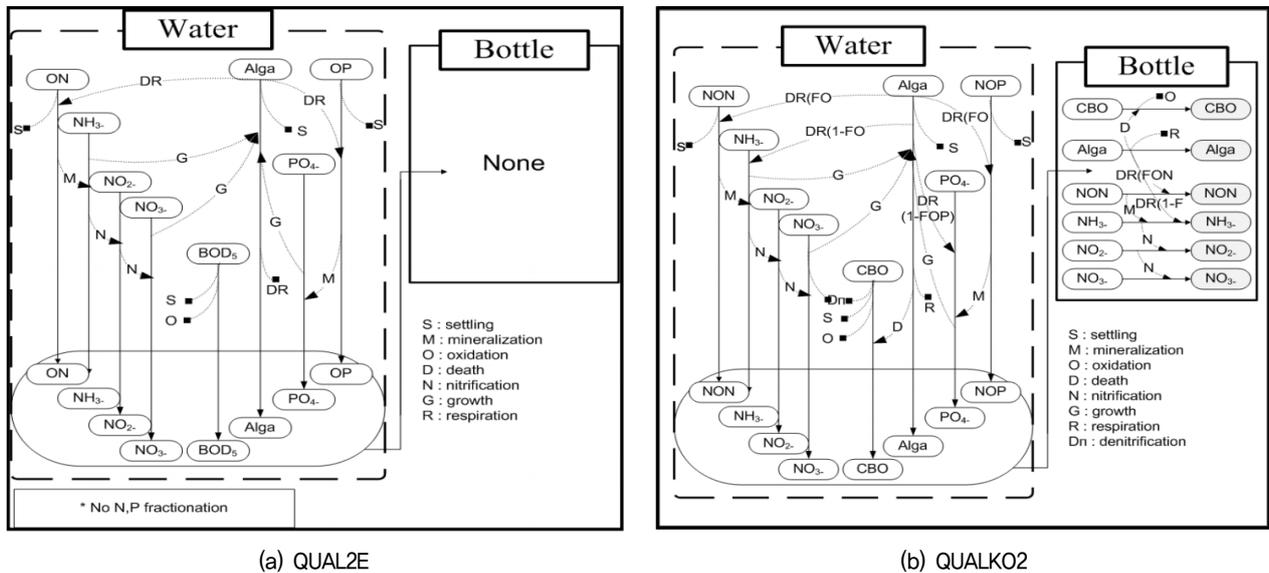


Fig. 4. Basic structure of QUAL2E(a) and QUALKO2(b) model

Table 1. QUAL2E and QUALKO2 differences and characteristics

Description	QUAL2E	QUALKO2
Biological and abiotic existence forms of phosphorus and nitrogen	Separation	Not separated
Death of algae, respiration	Separation	Not separated
Increase in organic matter in water due to algae production	Include	Not included
Denitrification reaction	Include	Not included
Maximum number of river sections	100	50
Maximum point pollution source	500	50

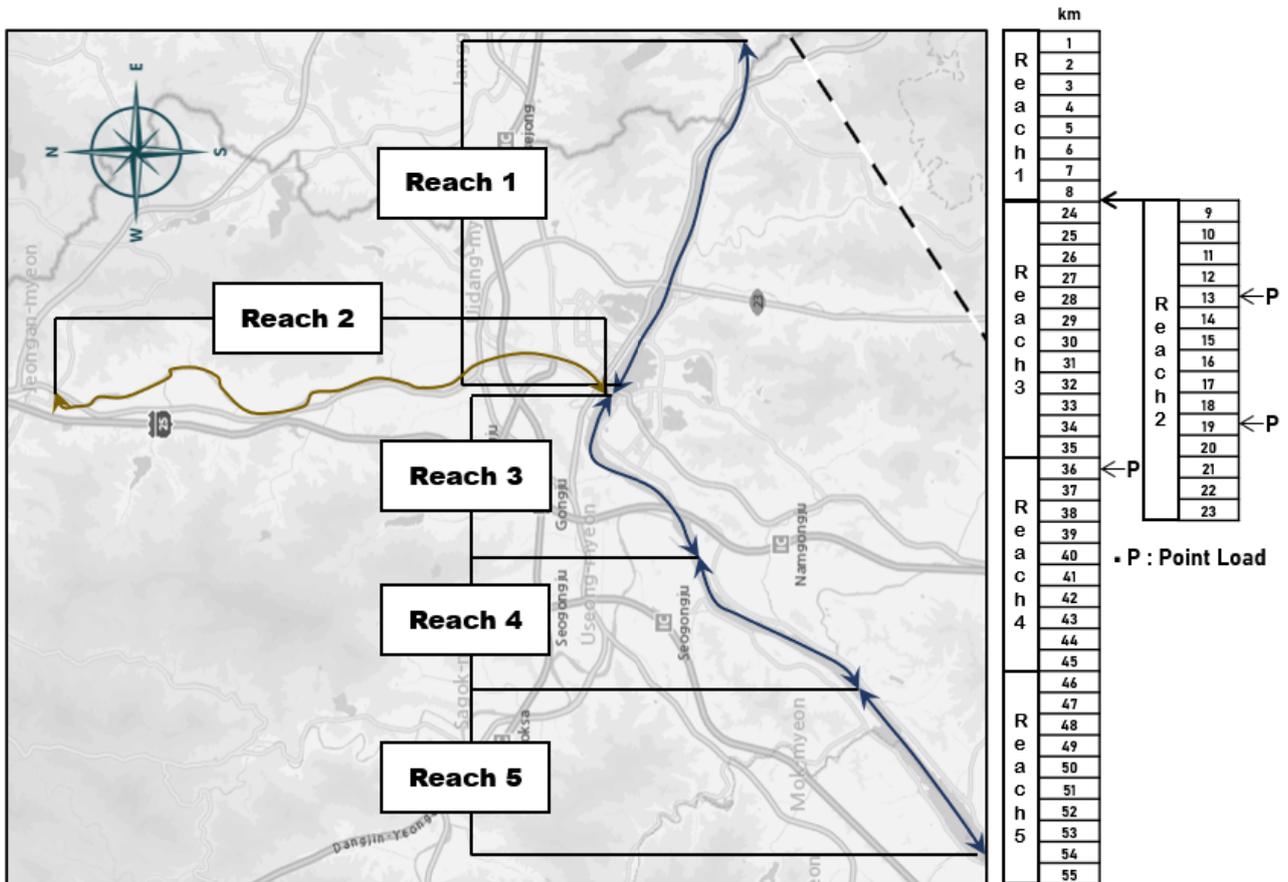


Fig. 5. System segmentation with locations of pollution sources along the GeunRiver and Jeong-ahnchun

Table 2. Main input parameters for the simulation

Description	Input data	Description	Input data
5D-CBOD CONV (KBOD)	0.09	P CONTENT OF ALGAE	0.006
COD/CBOD RATIO (RCOD1,2)	0.7	DEATH RATIO OF ALGAL DECAY	0.2
DISCOEF. OPTION (DISOPT)	1 (Liu diffusion type application)	ORGANIC RATIO OF RECYCLED N,P	0.5
CBOD/TOC RATIO (RTOC)	2.67	DENITRIFICATION RATE (1/DAY)	0.09
0.1N CONTENT OF ALGAE	0.06	DO CONSTANT FOR DENITRI. (mg/L)	0.1

또한, QUAL2E와 QUALKO2 의 모델링 매개변수는 기존의 문헌(Cole and Wells, 2004)에서 제시된 기초 값을 활용하여 수행하였다. 주요 모의 입력자료 및 값을 Table 2와 같이 나타내었다.

## 2.5 모델의 보정

모델의 보정은 실측값을 오차가 없는 기준치로 가정하고 모의 값에 영향을 주는 수질 반응계수를 조정하여 오차를 최소화시키는 단계로서 대상 하천 구간에서 모델의 정확도를 높이기 위한 과정이다. 일반적으로 모의 대상 수계의 수질항목에 관련된 매개변수는 실험실 내 실

측 분석을 통하여 적정 값을 도출하는 것이 합리적이다. 하지만 모의 대상 범위가 매우 넓은 경우 현장 채수와 실험에 사용되는 시간적, 경제적 비용이 많이 소요되는 어려움이 뒤따른다(Choi, 2008).

본 연구는 금강수계 전체가 아닌 공주지역 농공단지의 방류수가 인근 금강수계 수질에 미치는 영향을 파악하고자 하였으며, 모의 대상 수계의 길이가 55km로 채수 및 실험에 제약이 많지 않아 실측값을 활용하고 일반적으로 활용되는 모의 결과의 편차가 최소가 될 때까지 반복하여 계산하는 시행착오법을 선정하여 BOD에 대한 보정을 수행하였다.

수계오염총량관리기술지침에 의하면 보정 시 사용한

반응계수의 조건에서 독립된 다른 실측변수를 입력하여 모델의 적용성을 검증한 결과 실측 수질에 대한 모의 치의 오차범위는 20% 이내가 되어야 한다고 명시되어 있으며 본 연구에서도 이를 적용하였다(National Institute of Environmental Research, 2022).

### 3. 연구결과

#### 3.1 알루미늄 오염부하 예측 및 검증결과

##### 3.1.1 농공단지 폐수처리시설 유입수 및 유출수 분석 결과

일반적으로 공공 폐수처리시설 방류수 내 알루미늄(알루미늄)은 후단 처리공정인 총인처리시설의 응집제 사용에 기인하며, 응집제의 사용량 증가 또는 적절한 반응이 되지 않았을 때 증가 된다. 정안천 및 금강 지류 소하천 인근에 설치되어 가동 중인 농공단지 폐수처리시설 3개소에 대한 유입수 및 유출수의 알루미늄 농도 분석 결과를 Table 3과 같이 나타내었다.

2022년 1월부터 2023년 8월까지 A 농공단지 폐수처리시설 유입수 내 알루미늄의 평균농도(±표준편차)는 4.05±

4.62mg/L, 유출수는 0.19±0.22mg/L로 분석되었다. B 농공단지 폐수처리시설 또한 A 농공단지 폐수처리시설과 유사한 정도로 유입수 평균은 3.77±3.29mg/L, 유출수 평균은 0.38±0.30mg/L이다. C 농공단지 폐수처리시설의 경우 상대적으로 높은 알루미늄 농도를 나타내었다. 유입수는 평균 11.53±14.71mg/L, 유출수의 경우 3.14±1.51mg/L의 농도를 나타내었다. 2022년 3월에서 6월까지의 평균 38.98mg/L의 고농도의 유입수가 확인되었으며 유입 최고농도는 43.4mg/L로 확인되었다. 유입수의 높은 농도로 인하여 유출수 농도 또한 A, B 공공처리시설과 비교하였을 때 높은 것으로 분석되었다. 다만 C 농공단지 폐수처리시설의 경우 유입수에서 낮은 농도의 알루미늄이 확인되고 처리효율이 높지 않았으며 조사기간 중 유입수보다 유출수 내 알루미늄 농도가 더 높은 경우를 6회 확인하였다. 이는 C 농공단지 폐수처리시설로 유입되는 유입수 중 T-P의 높은 부하변동으로 적정량의 응집제 사용이 이루어지지 않은 것으로 판단되며 이를 바탕으로 해석해보면 총인처리시설에서 적정량의 응집제 사용과 폐수처리시설로 유입되는 유입수의 T-P 농도 관리가 필요한 것임을 알 수 있었다.

Table 3. Measured aluminium concentrations in the influent and effluent of the wastewater treatment plants

Description	Plant A		Plant B		Plant C	
	influent (mg/L)	effluent (mg/L)	influent (mg/L)	effluent (mg/L)	influent (mg/L)	effluent (mg/L)
22. 1	11.06	1.05	1.95	0.10	6.83	4.20
22. 2	11.34	0.21	0.81	0.19	1.69	2.82
22. 3	13.40	0.35	3.86	0.24	36.45	3.63
22. 4	11.14	0.26	1.33	0.17	37.00	4.10
22. 5	7.15	0.28	4.60	0.16	39.05	3.66
22. 6	8.12	0.10	5.57	0.33	43.40	4.17
22. 7	0.86	0.01	4.02	0.29	2.14	6.70
22. 8	0.09	0.00	4.97	0.47	7.52	5.36
22. 9	0.36	0.05	6.27	0.24	2.26	4.67
22. 10	0.20	0.08	1.35	0.28	4.99	2.38
22. 11	1.58	0.13	1.60	0.25	16.92	2.03
22. 12	0.33	0.27	3.24	0.48	11.84	2.65
23. 1	1.00	0.14	0.33	0.21	7.88	2.08
23. 2	0.34	0.24	3.66	0.94	4.65	3.90
23. 3	1.18	0.08	5.89	0.61	1.02	2.10
23. 4	0.20	0.17	2.06	0.44	1.19	3.43
23. 5	0.47	0.15	14.92	0.05	1.09	1.32
23. 6	3.29	0.06	6.56	0.29	1.53	1.34
23. 7	2.87	0.08	0.63	1.30	1.53	1.26
23. 8	6.06	0.09	1.73	0.49	1.52	0.98
Average	4.05±4.62	0.19±0.22	3.77±3.29	0.38±0.30	11.53±14.71	3.14±1.51

### 3.1.2 금강분류 혼합농도 예측 및 검증결과

Fig. 3에서와 같이 농공단지 폐수처리시설 방류수가 포함된 각각의 지류 말단인 D-1, D-2 지점과 지류가 합류되기 이전 금강 본류 E-1, E-2 지점에서 각각의 유량과 알루미늄 농도를 분석한 후 지류 합류 직후 F-1, F-2 지점에서 혼합농도를 예측하고 실제 분석한 결과와 비교·검증하였다. 또한 F-3 지점에서의 알루미늄 농도를 모니터링하여 농공단지 폐수처리시설 방류수가 금강분류에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고자 하였다.

D-1 지점은 조사기간 중 평균  $0.39 \pm 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 나타냈으며 알루미늄 농도는 평균  $0.45 \pm 0.09 \text{ mg/L}$ 로 조사되었다. 정안천의 금강분류 합류 이전 E-1 지점의 경우 평균  $1.44 \pm 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량과 평균  $0.02 \pm 0.01 \text{ mg/L}$ 의 알루미늄 농도가 확인되었다. 이에 따른 알루미늄의 혼합농도를 산출한 결과, 각 지류 및 본류 합류지점인 F-1 지점의 알루미늄 농도는 평균  $0.11 \pm 0.03 \text{ mg/L}$ 로 도출되었다.

D-2 지점은 조사기간 평균  $0.22 \pm 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 나타냈으며 알루미늄 농도는 평균  $1.99 \pm 1.02 \text{ mg/L}$ 이다. D-2 지점의 경우 알루미늄 농도가 다소 높은 C 농공단지 폐수처리시설의 방류수가 포함되어 D-1 지점에 비해

알루미늄 농도가 높은 것으로 판단된다.

정안천의 금강분류 합류 이전 E-1 지점은 조사기간 평균  $1.42 \pm 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 나타냈으며 알루미늄의 평균 농도는  $0.02 \pm 0.01 \text{ mg/L}$ 로 조사되었다. 이에 따른 혼합농도를 산출한 결과 각 지류 및 본류 합류지점인 F-2 지점에서 평균  $0.28 \pm 0.13 \text{ mg/L}$ 로 산출되었다.

각 지점에서 혼합농도 산출 공식을 활용하여 예측한 결과 정안천 합류구간인 F-1 지점에서는 낮은 알루미늄 농도를 나타내는 정안천 수질에 의하여 E-1 지점에서 측정한 배경농도와 비교하여 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 높은 알루미늄 농도를 갖는 C 농공단지 폐수처리시설 방류수가 포함된 소하천 합류 지점인 F-2 지점의 경우 F-1 지점의 알루미늄 농도 대비 2배 이상 높을 것으로 예상된다. 또한 지류(점오염원)합류 이전 금강 본류인 E-2 지점의 알루미늄 농도와 비교하면 10배 이상 높게 나타날 것으로 판단되며, 지점 별 유량 및 알루미늄 분석결과를 Table 4와 같이 나타내었다.

### 3.1.3 예측치 검증 결과

알루미늄은 신경에 독성으로 작용하는 물질로서 과다

Table 4. Mixing concentration prediction result

Date.	D-1		E-1		F-1	D-2		E-2		F-2
	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Al Conc. (mg/L)	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Al Conc. (mg/L)	Al Conc. (mg/L)	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Al Conc. (mg/L)	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Al Conc. (mg/L)	Al Conc. (mg/L)
22.1	0.282	0.32	1.494	0.03	<b>0.08</b>	0.171	3.28	1.503	0.02	<b>0.35</b>
22.2	0.414	0.45	1.527	0.01	<b>0.10</b>	0.283	2.20	1.419	0.03	<b>0.39</b>
22.3	0.445	0.46	1.339	0.04	<b>0.14</b>	0.200	2.83	1.351	0.02	<b>0.38</b>
22.4	0.329	0.51	1.333	0.02	<b>0.12</b>	0.222	1.44	1.379	0.03	<b>0.22</b>
22.5	0.469	0.51	1.505	0.02	<b>0.14</b>	0.204	2.78	1.492	0.02	<b>0.36</b>
22.6	0.460	0.39	1.475	0.02	<b>0.11</b>	0.219	3.17	1.465	0.02	<b>0.43</b>
22.7	0.310	0.42	1.499	0.02	<b>0.09</b>	0.219	4.19	1.436	0.02	<b>0.57</b>
22.8	0.490	0.48	1.349	0.01	<b>0.14</b>	0.183	2.75	1.404	0.03	<b>0.34</b>
22.9	0.414	0.43	1.505	0.02	<b>0.11</b>	0.204	0.78	1.424	0.03	<b>0.12</b>
22.10	0.475	0.50	1.452	0.01	<b>0.13</b>	0.272	1.11	1.359	0.02	<b>0.20</b>
22.11	0.349	0.53	1.467	0.03	<b>0.12</b>	0.252	0.97	1.339	0.02	<b>0.17</b>
22.12	0.491	0.51	1.349	0.03	<b>0.16</b>	0.158	1.96	1.456	0.03	<b>0.22</b>
23.1	0.480	0.44	1.332	0.03	<b>0.14</b>	0.240	1.54	1.330	0.03	<b>0.26</b>
23.2	0.336	0.51	1.530	0.01	<b>0.10</b>	0.152	2.93	1.327	0.02	<b>0.31</b>
23.3	0.376	0.39	1.473	0.03	<b>0.10</b>	0.285	1.57	1.397	0.02	<b>0.28</b>
23.4	0.298	0.52	1.377	0.01	<b>0.10</b>	0.254	2.57	1.486	0.02	<b>0.39</b>
23.5	0.396	0.50	1.406	0.02	<b>0.12</b>	0.156	0.99	1.444	0.02	<b>0.12</b>
23.6	0.361	0.49	1.466	0.02	<b>0.11</b>	0.254	1.01	1.469	0.02	<b>0.17</b>
23.7	0.380	0.46	1.468	0.01	<b>0.11</b>	0.182	0.95	1.509	0.02	<b>0.12</b>
23.8	0.320	0.15	1.417	0.01	<b>0.04</b>	0.244	0.73	1.451	0.02	<b>0.12</b>
평균	$0.39 \pm 0.07$	$0.45 \pm 0.09$	$1.44 \pm 0.07$	$0.02 \pm 0.01$	$0.11 \pm 0.03$	$0.22 \pm 0.04$	$1.99 \pm 1.02$	$1.42 \pm 0.06$	$0.02 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.13$

섭취할 경우 알츠하이머(치매), 경련, 뇌질환 및 고등동물의 신경성 섬유변형을 일으킨다고 보고되었다(WHO, 1984). 이에 따라 WHO는 알루미늄 허용치를 0.2mg/L 이하, 미국은 제2종 음용수 기준 0.1mg/L 이하로 권장하고 있다. 우리나라도 마찬가지로 먹는물 수질기준에 알루미늄 농도가 0.2mg/L 이하로 설정되어 있다.

금강수계로 유입되는 농공단지 폐수처리시설 방류수 내 알루미늄이 금강수계 수질에 미치는 영향을 확인하기 위하여 앞서 분석한 각 점오염원 합류지점의 예측 농도와 실측 농도를 비교하였다. 또한, 전체 점오염원의 합류 이후 하류 유하거리 약 10km에서 알루미늄에 대한 농도 측정으로 자정상태를 확인하였다. F-1 지점에서 알루미늄의 실측 농도 대비 예측 농도의 상관성에 대한 신뢰도를 나타내는 결정계수가 0.9237로 매우 높은 수치였으며, F-2 지점의 경우에도 이와 같은 결정계수 값이 0.9758로 높은 신뢰도를 나타내었다. 이는 합류 및 합류이전 지점의 측정 유량과 알루미늄 농도의 분석값이 일관된 방법으로 적절하게 진행되었음을 알 수 있다(Fig. 6).

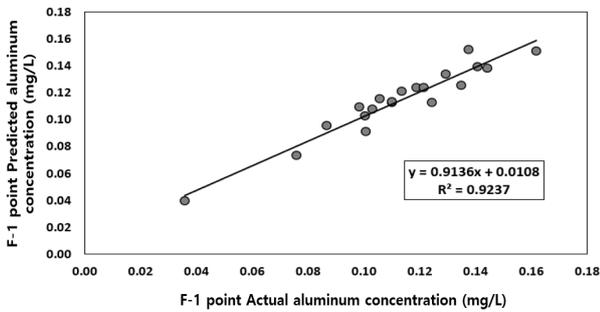
하류 유하거리 10km의 F-3지점에서 알루미늄 농도는 Table 5에 나타난 바와 같이 평균 0.051mg/L로서 국내 먹는물 수질기준인 0.2mg/L와 비교해서도 상당히 낮은 수치이다. 따라서 농공단지 폐수처리시설의 방류수 내

알루미늄의 금강수계에 대한 영향성은 크지 않은 것으로 판단할 수 있다. 다만, 각 농공단지 폐수처리시설 방류수 내 알루미늄 농도가 0.2mg/L 보다 높은 점을 고려한다면 방류수 내 알루미늄 항목에 대한 적절한 수질관리방안의 제시가 필요할 것으로 사료된다.

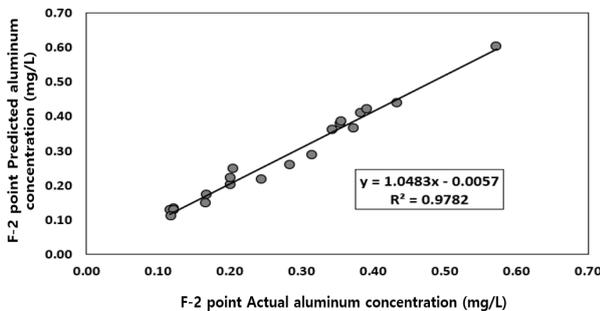
### 3.2 모델의 보정결과

QUALKO2 및 QUAL2E 모델의 BOD 농도에 대한 모델링 수행 결과와 실측값의 비교 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 실측값은 대상 수계에 대한 외부요인 및 실험 오차 등을 고려한 부하 변동성을 나타내고자 10% 상하 오차막대(Error bar)를 추가하였다. QUALKO2 및 QUAL2E 모델의 보정결과 각 모델 모의 결과 치 대비 실측치는 지점별 편차가 모두 20% 이내로 보정되었으며 관련 내용을 Table 6에 나타내었다.

각 모델의 평균오차율은 QUALKO2 모델이 11.8%, QUAL2E 모델은 13.6%로 나타났다. 모의 값의 평균 대비 대략적인 정확도 비교를 위한 평균제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error) 계산 결과, QUALKO2 모델이 0.367, QUAL2E 모델이 0.413으로 두 모델 간의 큰 차이는 거의 없었지만 QUALKO2 모델의 신뢰도가 조



(a) F-1

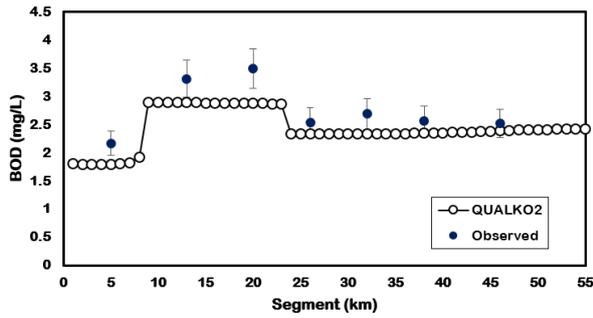


(b) F-2

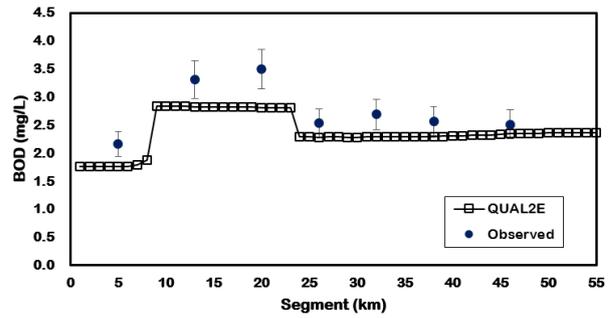
Fig. 6. Actual values compared to predicted values at point F-1 (a) and point F-2 (b)

Table 5. Aluminum concentration at point F-3

Aluminum concentration at point F-3 (mg/L)	
0.02	
0.10	
0.01	
0.11	
0.09	
0.13	
0.01	
0.01	
0.06	
0.10	
0.09	
0.01	
0.01	
0.01	
0.01	
0.10	
0.01	
0.01	
0.02	
Average : 0.051	



(a) QUALKO2



(b) QUAL2E

Fig. 7. Calibration of BOD by QUALKO2(a) and QUAL2E(b)

Table 6. Main simulation input data

BOD (mg/L)			Percent bias (%)		Error square		RMSE	
QUALKO2	QUAL2E	Observed	QUALKO2	QUAL2E	QUALKO2	QUAL2E	QUALKO2	QUAL2E
1.795	1.759	2.165	17.1	18.8	0.137	0.165	0.367	0.413
2.887	2.829	3.312	12.8	14.6	0.181	0.234		
2.873	2.816	3.499	17.9	19.5	0.392	0.467		
2.333	2.286	2.540	8.1	10.0	0.043	0.065		
2.336	2.289	2.689	13.1	14.9	0.125	0.160		
2.346	2.299	2.571	8.8	10.6	0.051	0.074		
2.393	2.345	2.516	4.9	6.8	0.015	0.029		

급 더 높다고 볼 수 있다. 이는 금강분류보다 높은 T-N, T-P를 나타내는 A 농공단지 방류수에 의한 조류농도가 증가하여, QUAL2E에서 연산하지 못하는 조류 거동이 포함된 것으로 사료된다.

### 3.3 수질모의 결과

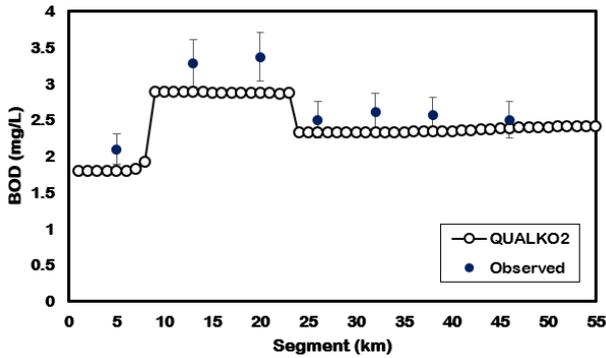
앞서 제시한 두 모델의 보정을 통하여 연구 대상 수계에 대한 BOD, T-N, T-P 항목의 모델링을 수행하였으며 별도 실측을 추가로 진행하여 모델을 검증하고자 하였다. 모델링에 대한 결과는 농공단지 폐수처리시설 방류수 유입을 고려한 모델의 해석과 QUALKO2와 QUAL2E 두 모델에 대한 상관성 및 실측치와의 오차율을 분석하였으며 모의 구간은 Table 7과 같이 나타내었다.

#### 3.3.1 BOD

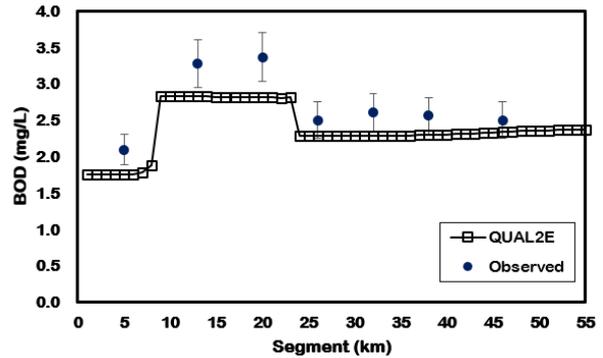
BOD(유기물질)에 대한 QUALKO2 및 QUAL2E 모의 결과를 다음의 Fig. 8에 나타내었다. 실측치에 대한 두 모델의 평균 오차율은 QUALKO2가 10.14%, QUAL2E는 11.9%로 보정 단계에서보다 더욱 낮은 오차율을 나타내었으며 두 모델 간의 오차율 차이 또한 낮아진 결과를 확인하였다. BOD에 대한 두 모델의 결정계수도 0.9993으로 0.99 이상의 값을 확인하였으며 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 RMSE 값의 경우도 QUALKO2 모델이 0.305, QUAL2E 모델이 0.351로 모델의 정확도가 개선된 결과를 나타내었다. RMSE 값의 경우 제공 오차 평균의 제공 근으로서 낮을수록 정밀도가 높다고 판단하며 정량적으로 얼마만큼의 수치차이가 있을 때 더 정확하다고 판단하진 않지만, 통계적 데이터의 신뢰성을 평가할 때 참고할 수 있는 값으로 활용한다. Fig. 9 및 Table 8에 두

Table 7. Target water system simulation section

Reach	Element (km)	Description
Reach 1	1 - 8	Geumgang main stream (before joining Miho Stream and Jeongan Stream)
Reach 2	9 - 23	Jeongancheon tributary (point pollution source from A, B Plant)
Reach 3	24 - 35	Geumgang Main Stream (after joining Jeongan Stream)
Reach 4	35 - 45	Geumgang Main Stream (C Plant Point Pollution Source Relocation)
Reach 5	46 - 55	Geumgang Main Stream (after C Plant point pollution source)



(a) QUALKO2



(b) QUAL2E

Fig. 8. Simulation of BOD by QUALKO2(a) and QUAL2E(b)

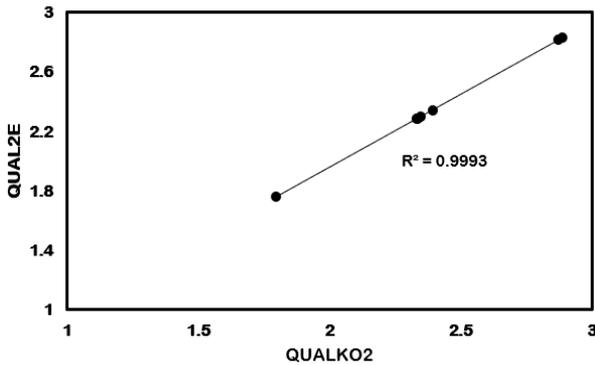


Fig. 9. Correlation coefficients of QUALKO2 and QUAL2E for BOD simulation results

Table 8. Percent bias and RMSE for BOD simulation results

Percent bias (%)		RMSE	
QUALKO2	QUAL2E	QUALKO2	QUAL2E
14.4	16.2	0.305	0.351
12.0	13.7		
14.7	16.4		
6.7	8.6		
10.3	12.1		
8.5	10.3		
4.3	6.2		

모델에 대한 결정계수와 오차율을 정리하여 나타내었다.

금강본류에 2개의 점오염원(A, B)이 위치한 정안천 합류 이후 모의 값과 실측값의 변화를 살펴보면 QUALKO2와 QUAL2E의 모의 값이 실측값 대비 각각 1.29배 및 1.31배 이었으며, C 농공단지 공공폐수처리시설 방류수의 유입 전후는 각각 1.03, 1.04배로 나타났다.

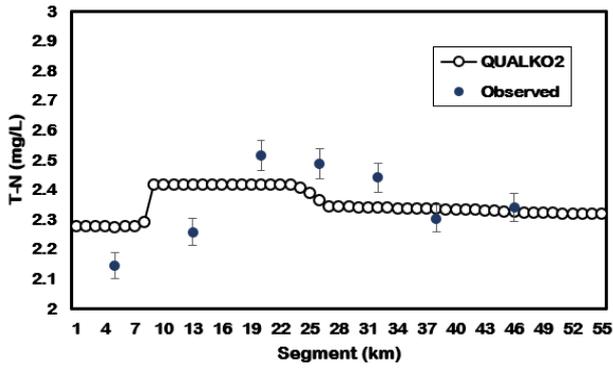
정안천의 경우 금강본류 유입 시 약간의 오염부하는 증가되지만 크지 않은 영향으로 판단되며 C 농공단지 공공폐수처리시설의 경우 방류되는 오염부하와 유량이 적어 금강본류의 전반적인 수질 영향이 미미한 것으로 확인되었다.

하천 수계는 물론 농공단지 폐수처리시설 방류수에도 질산화 미생물이 존재하며 Lab scale 규모에서 측정하는 BOD 값에도 일부 질산화에 의한 산소소모량이 포함된다. QUALKO2 모델이 기존 QUAL2E 모델과 다른 점은 수계의 영양염류에 의한 부영양화 과정에서 발생하는 조류의 발생과 사멸 그리고 이에 따른 질산화 과정의 영향을 반영할 수 있다는 것이다. 반면 QUAL2E의 BOD 반응 기작은 수체에 algal BODs 또는 질산화에 따른 NBOD

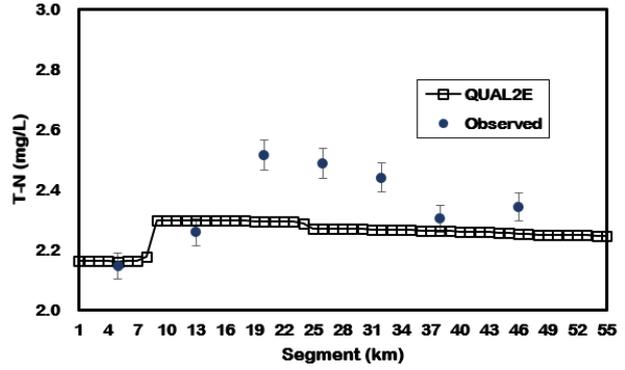
가 포함되지 않은 탄소성 BOD만 인식하고 모의 하게 된다(Han et al., 2009). 이러한 QUAL2E 모델의 특성에 의해 QUALKO2 모델에 비해 BOD 모의 값의 오차가 발생하는 것으로 판단되며 QUALKO2의 경우 조류의 사멸과 호흡을 분리하여 연산하고 조류 발생에 따른 유기물질 증가를 고려하는 한편, 실측치에 대해 실험실에서 분석을 감안한 Bottle BOD까지 연산하기 때문에 부영양화 현상과 조류의 영향성을 고려한 하천 특성과 실정을 감안하여 적정한 모델을 선정할 필요가 있는 것이다.

### 3.3.2 T-N, T-P

T-N(총질소), T-P(총인)에 대한 QUALKO2와 QUAL2E 모델에 의한 모의 결과를 Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다. 실측치에 대한 두 모델의 평균 오차율은 QUALKO2가 T-N 4.028%, T-P 8.379%, QUAL2E는 T-N 4.64%, T-P 8.519%로 나타났다. Fig. 12, Fig. 13에 나타난 바와 같이 T-N과 T-P에 대한 결정계수는 각각 0.9864, 0.9851로 유의미한 값을 확인하였으며 RMSE 값에 대하여는 QUALKO2가 T-N 0.106, T-P 0.029, QUAL2E 모델은 T-N 0.139, T-P 0.02로 나타나 모델의 정확도가 높았다

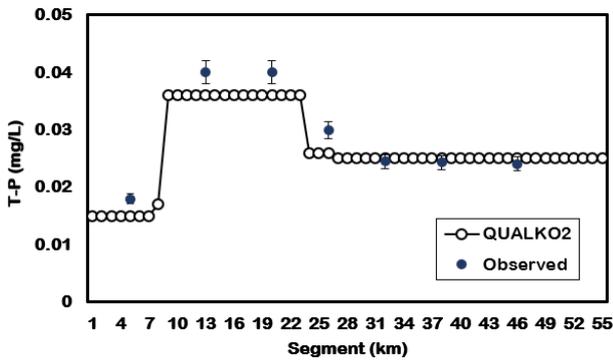


(a) QUALKO2

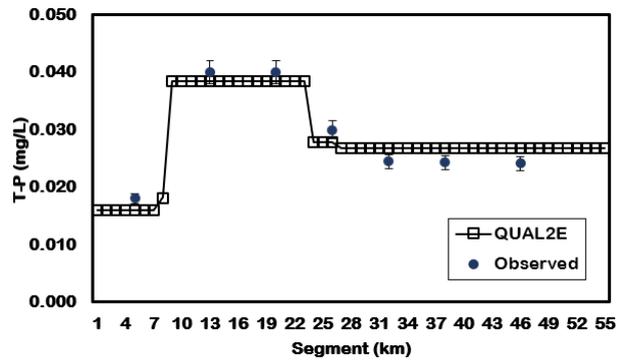


(b) QUAL2E

Fig. 10. Simulation of T-N by QUALKO2(a) and QUAL2E(b)



(a) QUALKO2



(b) QUAL2E

Fig. 11. Simulation of T-P by QUALKO2(a) and QUAL2E(b)

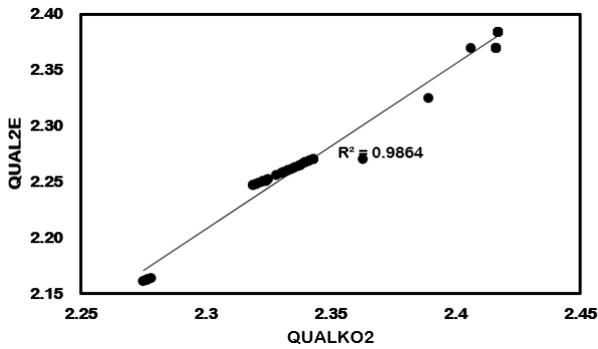


Fig. 12. Correlation coefficients of QUALKO2 and QUAL2E for T-N simulation results

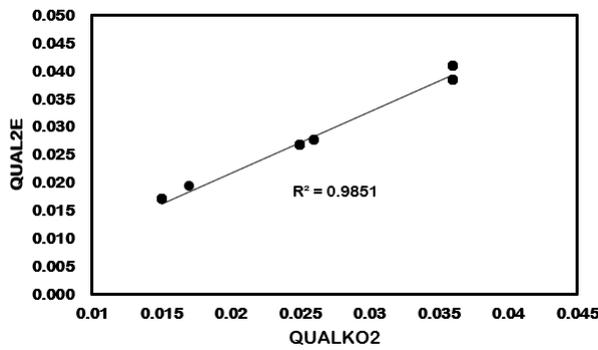


Fig. 13. Correlation coefficients of QUALKO2 and QUAL2E for T-P simulation results

Table 9. Percent bias and RMSE for T-N simulation results

Percent bias (%)		RMSE	
QUALKO2	QUAL2E	QUALKO2	QUAL2E
0.017	0.000	0.106	0.139
0.025	0.001		
0.010	0.048		
0.015	0.047		
0.010	0.030		
0.001	0.002		
0.000	0.008		

Table 10. Percent bias and RMSE for T-P simulation results

Percent bias (%)		RMSE	
QUALKO2	QUAL2E	QUALKO2	QUAL2E
9.0E-06	3.9E-06	0.029	0.022
1.6E-05	2.4E-06		
1.6E-05	2.4E-06		
1.6E-05	5.2E-06		
2.5E-07	4.6E-06		
4.9E-07	5.5E-06		
8.1E-07	6.5E-06		

(Table 9, Table 10).

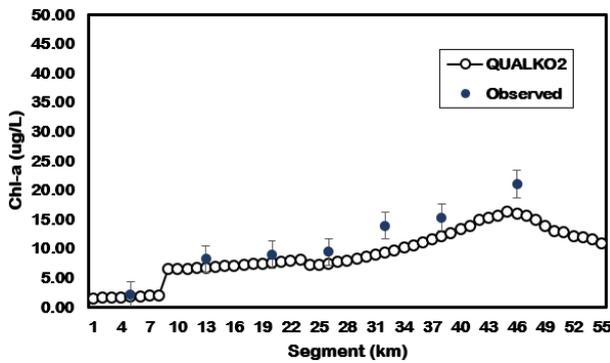
T-N, T-P의 모의 결과 QUALKO2 모델이 실측한 결과와 좀 더 유사한 값으로 나타났다. 이는 QUAL2E 모델의 경우 조류의 호흡을 통한 수계의 비생물성 유기질소와 유기인이 증가하기 때문에 질소와 인의 농도가 높게 예측된 것으로 판단된다. 또한, QUAL2E 모델은 출력문에서 역시 조류의 질소와 인을 고려하지 않기 때문에 출력값의 질소와 인은 실제의 총질소와 총인에 비해 낮은 결과를 보이게 된다. 따라서 QUAL2E에서는 출력값의 질소와 인의 농도에 조류의 질소와 인을 더해야 실험실에서 측정된 총질소와 총인의 값과 비교할 수 있을 것으로 판단된다.

수계의 길이도 모의 결과에 영향을 미칠 수 있으며 정안천의 모의 시작점인 A 농공단지 공공폐수처리시설 방류지점부터 금강본류 합류 지점까지의 유로연장이 약 15km이며, 금강본류 또한 모의 시작점부터 C 농공단지 공공폐수처리시설 방류수 유입 후 약 10km까지 유로연장이 짧아 유기물질과 조류의 생성 및 사멸에 따른 내생 부하 등에 차이가 발생된다.

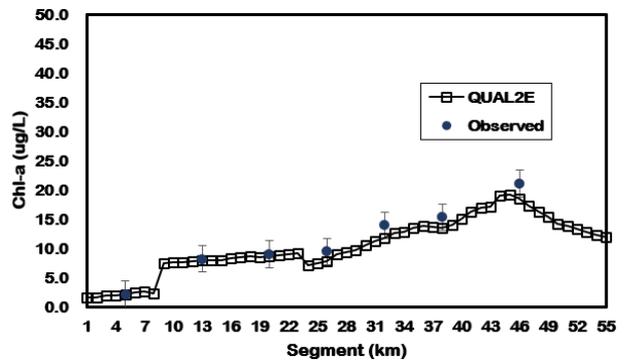
### 3.3.3 Chl-a

Chl-a에 대한 QUALKO2와 QUAL2E 모델에 의한 모의 결과는 Fig. 14와 같이 나타내었다. 실측치에 대한 두 모델의 평균 오차율은 QUALKO2가 18.9%, QUAL2E가 21.2%로 나타났다. 결정계수는 각 0.9241로 다른 모의 결과에 비해 다소 낮은 값을 나타내었으며(Fig. 14) RMSE 값의 경우 QUALKO2 모델이 2.76, QUAL2E 모델이 3.03이었다(Table 11). 모델의 상관성이 BOD, T-N 및 T-P 항목에 비해 다소 낮은 것은 조류의 내생호흡을 고려한 QUAL2E에 비해 조류의 생장과 사멸을 고려하는 QUALKO2의 모의 특성 차이와 QUALKO2 모델이 QUAL2E에 비해 조류 농도에 대한 모의과정과 입력값이 더욱 구체화 되어 있는 점의 차이로 판단되며, Chl-a 모의 결과에 두 모델 간의 상관관계 및 실측치에 대한 오차율을 Fig. 15 및 Table 11과 같이 나타내었다.

초기 정안천 합류 이전까지 금강본류에서의 실측값과 정안천 내 점오염원 유입에 따른 정안천 내 Chl-a 농도는 모의 결과와 큰 차이가 없었지만, 정안천 합류 이후 금강 본류에서부터 모의 종료 지점까지의 오차율은 큰 폭을 나타내었다. 이는 모의 기간 내 대상수계에서 발생



(a) QUALKO2



(b) QUAL2E

Fig. 14. Simulation of Chl-a by QUALKO2(a) and QUAL2E(b)

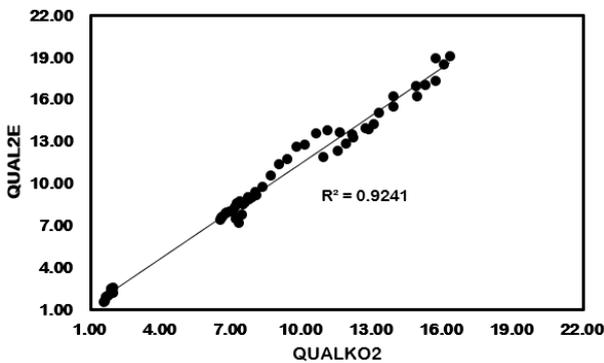


Fig. 15. Correlation coefficients of QUALKO2 and QUAL2E for Chl-a simulation results

Table 11. Percent bias and RMSE for BOD simulation results

Percent bias (%)		RMSE	
QUALKO2	QUAL2E	QUALKO2	QUAL2E
0.09	0.12	2.76	3.03
1.61	2.09		
1.42	1.98		
3.28	4.10		
18.58	20.98		
7.90	10.15		
20.34	25.06		

한 외부 환경요인(조류의 과다번식 등)을 모의 결과에 반영하지 못한 결과로 해석할 수 있으며 조류의 성장대사에 따른 변수와 일부 모델링에서 반영 불가능한 조류의 성장 과정 등에 의한 차이로 사료된다.

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 공주시 내 농공단지 방류수가 정안천 및 금강분류에 대한 영향을 평가하고자 실측 결과를 바탕으로 계산수식과 모델링을 통하여 예측하였으며, 연구에 활용한 QUALKO2와 QUAL2E 모델 간의 상관성을 분석하여 수계 특성을 고려한 적절한 두 모델의 특성을 파악하고자 하였다.

- (1) 조사 대상 유역 내 농공단지 폐수처리시설 유입수와 유출수 알루미늄 농도 분석결과 C 농공단지 폐수처리시설에서 다소 불안정한 알루미늄 농도를 나타내었으나, 방류수의 금강수계 유입 이후 유하거리 별 알루미늄 농도가 확연히 낮아지고 하류 10km 지점에서는 0.051mg/L로서 먹는물 수질기준과 비교하여 안전한 수준을 나타내었다. 조사지점에 대한 알루미늄 예측 농도와 실측값에 대한 높은 신뢰도로서 농공단지 폐수처리시설의 적정 운영 및 모니터링 유지 시 공공수역의 수질악화를 예방할 수 있다.
- (2) BOD에 대하여 모의 결과의 편차가 최소가 될 때까지 반복 계산하는 시행착오법을 적용하였으며 실측값에 대한 QUALKO2와 QUAL2E 두 모델의 모의 결과 오차율이 각각 11.8% 및 13.6%로 20% 이내를 보정하는 한편, 정확도 비교를 위한 RMSE 결과 값을 0.305 및 0.351으로 도출하여 모델의 신뢰성을 확보하였다. 모의 결과, 두 개의 점오염원인 A, B 농공단지 공공폐수처리시설을 포함한 정안천의 금강분류 유입 시 금강분류에 미치는 영향은 미미하였으며 C 농공단지 공공폐수처리시설 방류수 또한 금강분류에 영향이 크지 않은 것을 확인되었다. QUALKO2와 QUAL2E 모델 중에서 조류의 성장과 사멸 및 호흡을 BOD 모의 값에 연산하는 QUALKO2 모델이 그렇지 않은 QUAL2E 모델과 비교하여 실측치에 대한 오차율이 적은 것을 확인하였으며 향후 모델을 활용한 BOD 모의 시 부영양화 및 조류 발생 특성을 고려한 QUALKO2 모델의 적용 필요성이 검토되어야 한다.

- (3) T-N, T-P 모의 결과, QUAL2E 모델의 경우 조류의 호흡에 따른 비생물성 유기질소와 유기인을 연산하기 때문에 QUALKO2에 비해 조금 더 높은 농도의 값을 출력하였으나, 두 모델 간의 차이는 크지 않았다. 이는 모의 대상 수계의 유로 연장이 길지 않아 조류의 생성과 사멸에 따른 내생부하가 적은 결과로 보여지며, 앞선 BOD 모의 결과에 대한 근거로서 대상 수계 내 오염원의 금강분류 영향이 적기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) Chl-a 모의 결과, 두 모델에 대한 모의 결과와 실측치가 BOD, T-N 및 T-P 결과에 비해 높은 오차율을 나타내었으며 조류의 내생호흡률만을 고려하는 QUAL2E 모델이 QUALKO2 모델에 비해 오차율이 높은 것으로 나타났다. 오차율에 대하여는 모의 기간 동안 수계 내 발생된 조류 등의 외부요인이 원인으로 판단되며 모의 연산에 반영이 어려운 조류 중에 의한 성장 대사가 변수로 작용한 것으로 보여진다.

종합적으로 공주지역 농공단지의 공공폐수처리시설 방류수 내 현재 방류수수질기준이 설정되지 않았으나 알츠하이머의 원인물질로서 먹는물수질기준에 포함된 알루미늄에 대하여 공공수역에 미치는 영향을 실측한 결과 대비 예측·평가하였다는 것으로 의의가 있으며, 그 결과 공공수역에 영향을 크게 미칠 만큼은 아니었으나 현 수준 유지를 위한 꾸준한 관리와 모니터링이 필요함을 확인할 수 있었다. 아울러 농공단지 공공폐수처리시설 방류수 및 금강분류를 대상으로 QUAL2E 및 QUALKO2 모델을 활용한 시뮬레이션 수행으로 실측 결과와의 연관성을 찾고 수질을 예측하는데 있어서 QUALKO2 모델의 신뢰성이 높았으며 적절한 모델 선정에 위한 참고자료로서 충분한 가치가 있을 것으로 사료된다. 하지만 본 연구 조사지역 외에서 폐수처리 방류수를 금강분류에 유입하는 경우 등 수계의 오염부하 변동요소가 있을 수 있으므로 향후 세부적인 조사를 통해 좀 더 구체적이고 체계적인 수질관리 방안을 수립할 필요가 있다고 사료된다.

#### 참고문헌 (References)

1. Ahn, J. Y., Lee, D. S., Han, S. I., Jeong, Y. W., and Choi, H. S. (2014), "A Prediction Model for Removal of Non-point Source Pollutant Considering Clogging Effect of Sand Filter Layers for Rainwater Recycling", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.6, pp.23-39.

2. Choi, J. G. (2008), "Comparative Evaluation of Qual2e and Qual-nier Models for Water Quality Prediction in Eutrophic River", *J. of Korean Society on Water Quality*, Vol.24, No.1, pp.54-62.
3. Choi, J. H. (2019), *Water Quality Prediction and Management Planning for the Lake Saggyo by Modeling Techniques*, Doctoral Dissertation, Hanseo University, pp.1-2.
4. Cole, T. M. and Wells, S. A. (2004), CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, *Version 3.2 User Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, pp.126-134.
5. Gong, D. S. and Jeong, D. I. (2007), *Qualko2 Explanatory Material*, National Institute of Environmental Research, pp.3-6.
6. Han, G. Y., Choi, H. G., Kwon, N. Y., and Lim, J. T. (2009), "Monte Carlo Simulation Using QUALKO2 Model for Water Quality Reliability Analysis", *J. of Korea Water Resources Association*. pp.2058-2062.
7. Jeong, P. J., Hyun, M. H., and Jeong, J. P. (2010), "Water Quality Prediction of the Mankyung Water Shed According to Construction of New Sewage Treatment Facilities", *J. of Korean Society of Water Environment*, Vol.26, No.2, pp.200-207.
8. Jo, S. J. (2020), *HSPF-EFDC-WASP Linked Modeling for Water Quality Management of Gyeongin ara Waterway*, Doctoral Dissertation, Konkuk University, City, Country, pp.53-60.
9. Ko, I. H. (2008a), "Technology Development Trends to Monitor and Predict Future activities", *Water for Future*, Vol.41, No.7, pp.18-24.
10. Ko, J. H. (2008b), *Research on QUALKO and QUAL2E Water Quality Modeling of Yeongsan River Water System*, Master's Thesis, Chonnam National University, pp.4-5.
11. Ministry of Environment (2023), *Geumgang River Maintenance Basic Plan*.
12. National Institute of Environmental Research (2022), *Total Pollution Control Technical Guidelines*, pp.91-94.
13. WHO (1984), *Guideline for Drinking Water Quality*.

Received : September 25<sup>th</sup>, 2024

Revised : October 14<sup>th</sup>, 2024

Accepted : October 14<sup>th</sup>, 2024