

## EFDC-Hydro와 WASP7.2 를 이용한 금강하류의 수리-수질 연계 모델링

### Serial Use of Hydrodynamic and Water Quality Model of the Geum River using EFDC-Hydro and WASP7.2

서동일<sup>1\*</sup>, 서미진<sup>2</sup>, 구명서<sup>3</sup>, 우재균<sup>3</sup>

Dongil Seo · MiJin Seo · Myungseo Koo, Jaekyun Woo

1 충남대학교 환경공학과, 2 충남발전연구원, 3 (주)서영엔지니어링

(2008년 10월 8일 접수; 2008년 12월4일 1차수정; 2009년 1월 20일 2차수정; 2009년 1월 28일 채택)

#### Abstract

This study reports the serial use of a 3-D hydrodynamic model, EFDC-Hydro and a dynamic water quality model WASP7.2 that are maintained by USEPA. The 48 km section of the Geum River downstream between Daechung Dam and Gongju was selected as a sample study site. Topographical information was used to accurately represent morphology of the study site and boundary conditions were derived from governmental databases including WAMIS by Ministry of Land and Ocean and WEIS by Ministry of Environment. EFDC-Hydro was successfully calibrated for observed water level and WASP was calibrated using monthly observed water quality data obtained from the above sources. It was found that the current water quality target of BOD for the Geum River-H point could not be met on monthly basis though every other tributary of the area would meet its own water quality target as assigned in Korean TMDL. This study proposed the new target BOD water quality for the Gabcheon and Mihocheon as 4.3 and 3.6 mg/l, respectively so that the Geum River-H point can meet the target. When Sejong City is constructed, it is estimated that effluent discharge limit of BOD must be less than 4.5 mg/l to meet water quality of the point. This study shows that it is possible to carry out more precise modeling considering both water movement and water kinetics by using EFDC and WASP simultaneously.

**Key words:** EFDC-Hydro, WASP7.2, The Geum River, Sejong City, TMDL

**주제어:** EFDC-Hydro, WASP7.2, 금강, 세종시, 오염총량관리제

#### 1. 서론

우리나라 수질환경영향평가 보고서 또는 수질오염총량관리제의 계획 및 이행평가 보고서에서는 유역에서 유입되는 유입 오염물질량의 변화에 따른 하천내의 수질예측을 위해 정상상태 수질 모델인 QUAL2E (Brown and Barnwell,

1987) 를 가장 많이 사용하는 경향이다. 그러나 QUAL2E 는 탈질반응을 고려하지 않으며 식물성플랑크톤과 BOD의 관계가 연결되지 않으므로 인해 엽록소 농도가 중요하게 작용하는 낙동강 하구 등에서는 오차를 발생할 수 있는 가능성이 있다고 보고된 바 있다 (Park and Lee, 2002). 국립환경연구원에서는 QUAL2E 의 구조에 WASP5 (Ambrose 등,

\* Corresponding author Tel:+82-33-250-6241, Fax:+82-33-244-6239, E-mail:hyukjae68@hotmail.com(Kwon, H.J.)

1993)의 수질기작을 접목한 QUALKO2 (공동수와 정동일, 2007) 모델을 개발하여 수질오염총량제에 사용하고 있다. 또한 서동일과 이은형 (2003) 과 이은형과 서동일 (2003)은 수중보가 많고 잦은 건천화 현상이 발생하는 우리나라의 하천현실을 고려하여 수중보가 존재하는 지역에는 전통적인 완전혼합형 (Completely Mixed) 반응조 이론과 그리고 흐름이 있는 하천구간에는 관류 (Plug flow) 반응조 이론을 적용하는 CAP 수질 모델을 제안한 바 있다. 한편 서동일 등 (2008)은 QUAL2E 모델, QUAL2K 모델 그리고 CAP 모델들이 모두 물질수지에 기초한 모델들로서 CBOD, TN 및 TP 등을 모의하는 데에는 서로 유사한 예측 능력을 나타낸다고 보고한 바 있으며 간단한 모델을 사용하여서도 하천 수질 모델링이 가능하다는 것을 보인 바 있다. 한편, 수질 미국 환경부에서는 공식적으로 지원하던 하천 수질모델을 QUAL2E 에서 QUAL2K (Chapra et al, 2007)로 변경하였다. 그러나 정상상태의 모델들은 시간이 고정된 것으로 가정하는 모델로서 기상조건이나 오염부하의 유입조건이 지속적으로 변화하는 현실을 반영하거나 연중의 변화 경향을 파악하는 데에는 한계가 있다 (미국 환경부의 QUAL2K는 시간에 따른 수질변화를 모의할 수 있으나 수리학적으로는 정상상태를 가정한다). 이러한 제약조건을 극복하기 위해서는 수체내 유량 및 수질변화를 적절하게 반영할 수 있는 모델 사용의 필요성이 지속적으로 대두되어 왔다. 시간의 변화에 따른 수질을 모의하는 데에 가장 널리 사용되는 모델은 WASP (Ambrose et al, 1988, 1993, 1996) 모델이다. WASP 모델은 1980년대 후반부터 지속적으로 발전하여 2008년 현재 WASP7.3 (USEPA, 2008)이 발표되었으며 2009년에는 미국 오염총량관리제 (TMDL)를 지원하는 종합 프로그램인 BASINS 4 (<http://www.epa.gov/waterscience/BASINS/>)에 탑재되어 연동되는 WASP8이 출시될 예정으로 있다 (Ambrose, personal communication). 그러나 WASP은 자체에 수리학적 모듈이 존재하지는 하나 1차원적 흐름 또는 수리학적으로 단순한 경우에만 사용될 수 있는 한계가 있다 (서동일 등 2001, 이은형과 서동일 2002). 이러한 문제에 대하여 하천 및 호소 등을 흐름방향과 수직방향으로 구분한 2차원 수리-수질 모델인 CE-QUAL-W2 (Cole and Buchak, 1995)가 개발되어 널리 사용되고 있다. 그러나 이 모델은 고려하는 수질변수 중 유기물을 세분하여 고려되는 변수들이 일반적으로 측정되는 것이 아니므로 수질예측 보다는 저수지의 성층현상 또는 탁수현상의 해석 및 관리에 더욱 많이 사용되는 경향이다. 또한 위 모델은 하천의 폭 방향의 수질이 동일하다고 가정하고 있는 이유에서 하천 양측의 수질이 현저하게 차이가 나는 경우 사용될 수 없는 문제점이 있다. 한편 Park

(1995) 등은 3차원 수리동역학 모델인 EFDC (Hamrick, 1992)와 연동되는 HEM3D라는 수질 모델을 개발한 바 있다. 그러나 HEM3D 모델 또한 유기물간의 상관관계에 있어 CE-QUAL-W2와 유사한 형태로 구성되어 보정 및 검증자료가 충분하지 못한 편이며 실제로 적용된 사례가 많지 않은 편이다. 한편 미국 환경부에서는 EFDC의 기능 중 수리학적 계산 부분만 따로 분리하여 EFDC-Hydro (Tetra Tech, 2002)라고 명명하고 이를 WASP과 연계시키는 연구를 지속적으로 추진하여 왔으며 WASP7.2부터는 이러한 연계사용이 가능하게 되었다. 이 조합의 장점은 수리동역학적인 계산을 보다 정확하게 할 수 있는 동시에 기존에 사용하던 수질모델을 함께 사용할 수 있다는 것이다. 한편 서동일과 유하나 (2007)는 한강하류부에 3차원 수리 동역학 모델인 EFDC-Hydro 모델과 WASP7.2 모델을 연계 활용하여 수질모델을 실시하고 탄천과 중랑천이 유입되고 난 후의 한강의 좌안과 우안의 수질이 확연히 서로 다르다는 것을 발표한 바 있다.

본 연구에서는 EFDC-Hydro와 WASP7.2를 함께 적용한 결과를 보고하고자 한다. 연구 대상지역은 금강의 하류로서 세종시에서 발생하는 오염물질을 처리하기 위한 하수처리장의 방류수가 금강에 미칠 영향과 목표수질의 만족 여부에 대하여 시나리오를 작성하여 수질 예측을 실시하였다

## 2. 연구방법

### 2.1. 3차원 수리동역학 모델 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)

EFDC 모델은 하천, 하구, 호소 및 해역에 고루 적용할 수 있는 3차원 수리동역학 모델로서 Hamrick (1992)에 의해 개발되었다. EFDC는 Figure 2에 나타난 바와 같이 수리동역학, 수질, 부유사 및 독성물질 등 네 가지의 부프로그램으로 구성되어 있다. EFDC 내의 수질 부프로그램은 Park and Lee (1995)가 Chesapeake 만 모델 (Johnson et al., 1993)을 참고하여 개발한 HEM3D라는 모델이 사용되었다. 1990년대 초반에 개발된 이래 미국 동부의 Chesapeake 만, Florida의 St John's River 등 (Hamrick, 1994) 미국 전역에서 수백 여 곳의 수체에 적용된 바 있다. Hydrodynamics 프로그램에는 유속, 염료 (Dye), 수온, 염분, 근역혼합특성 (Near Field Plume) 및 수표면 부유물질 (Drifter)을 산정할 수 있는 부프로그램들이 있다. 미국 환경부는 EFDC를 WASP 모델이 필요로 하는 수리동역학 정보를 생성할 수 있는 적절한 프로그램으로 보고 2002년 WASP을 위한 3차원 유속 정보를 생성하는 EFDC-Hydro 프로그램을 발표하였다 (Tetra Tech,

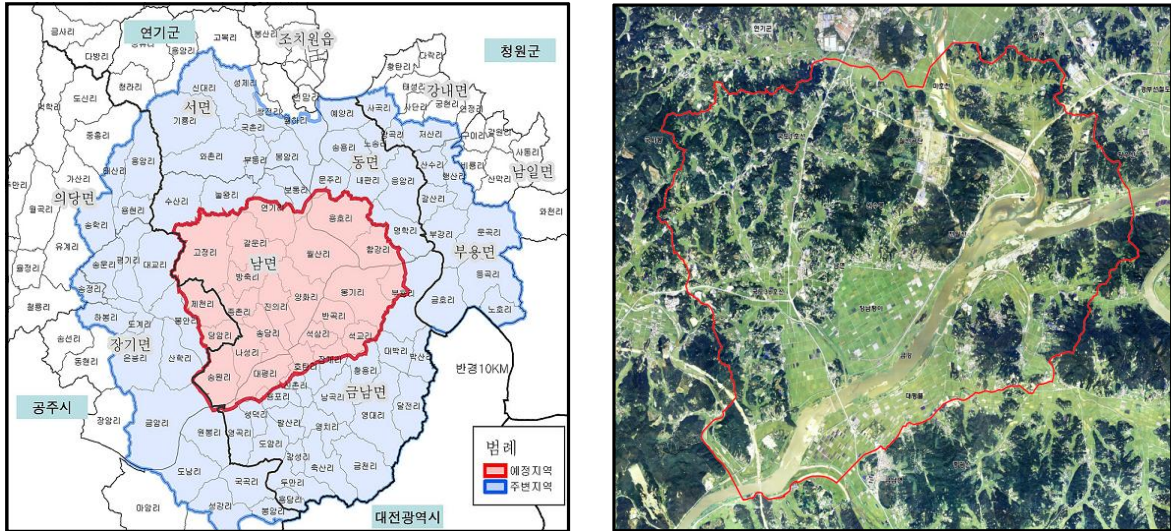


Fig. 1. Map and Satellite Image of the Study Area including The Geum River.

2002). 본 연구에서는 EFDC-Hydro 를 이용하여 유속정보를 생성하였다. EFDC 의 더욱 자세한 원리 및 사용 방법은 해당 매뉴얼을 참조하기 바란다 (USEPA, 2007).

## 2.2. WASP

WASP(Water Quality Analysis Simulation Program) 은 Di Toro (1983) 등에 의해서 처음으로 개발되었으며 1988년에는 WASP4 (Ambrose et al., 1988)로 발전하였고, 1993년 WASP5 (Ambrose et al., 1993)로 발전하여 2007년 현재까지 하천, 호수, 하천의 하구 및 해안에서 광범위하게 적용되어 왔다. 그러나 이 모델들은 DOS 를 기반으로 하는 프로그램이며 사용하기에 전문적인 숙련도가 요구되어 왔다. 컴퓨터 기술의 발전에 따라 2001년에는 기존의 DOS 환경의 WASP5를 Window 환경에서 사용할 수 있도록 한 WASP6 (Wool et al., 2001) 가 개발되었다. 그러나 WASP6는 한글운영체제에서는 실행이 되지 않는 문제점이 있어 우리나라의 사용자에게는 무용지물이었다. 2006년 미국 환경부는 한국의 운영체제에서도 사용할 수 있을 뿐 아니라 고려되는 수질변수의 수가 증가하였고, 3차원 수리동역학 프로그램인 EFDC-Hydro 프로그램과 연동해서 사용할 수 있도록 하는 등 기존의 프로그램을 대폭 수정한 WASP7 (USEPA 2008)을 발표하였다. WASP7 은 기존의 프로그램에 비하여 계산속도가 매우 빨라졌으며 2006년 개발된 이래 몇 차례 수정 보완되어 가장 최근의 버전인 WASP7.3 은 미국 환경부 홈페이지에서 다운받을 수 있다. WASP 모델은 우리나라에서도 서동일 등 (2001, 2007) 과 이은형과 서동일 (2002) 의 경우와 같이 다수의 저수지와 하천

에 적용된 바 있다.

## 2.3. 연구대상 지역

행정중심 복합도시(이하 세종시)의 건설 사업은 2007년 본격적인 공사가 시작되었으며 2030까지 시행될 예정으로 있다. 세종시가 건설되는 곳은 Figure 1 에 나타난 바와 같이 동서로는 충청남도 공주시와 충북의 청원군, 남북으로는 대전시와 충청남도의 조치원의 사이이며 행정구역으로는 충청남도 연기군에 위치한다. 세종시 입구 오른쪽에는 대청호 방류수와 대전 갑천의 영향을 포함하는 금강과 충북 및 청주권의 영향을 포함하는 미호천이 합류되고 합류된 금강은 세종시를 동쪽에서 서쪽 방향으로 관통하는 모양을 가지고 있다 (한국토지공사, 2007).

## 2.4 하천 모의를 위한 소구간의 구분

본 연구의 범위는 행복도시가 건설될 대청댐 하류 22km 부터 35km사이 구간을 포함한 대청댐 조절지 지점부터 공주의 정안천 유입 직전까지 총 48km로 하였다. 이로써 사업시행 후 행정중심 복합도시의 건설에 따라, 건설지역 전과 후의 유하거리별 금강의 수질변화를 예측하였다. 모의 구간은 Figure 2에 나타난 바와 같이 하천의 지형 및 지천 등을 고려하여 총 80개의 소구간으로 구분하였으며 하천의 수심방향 및 하폭방향은 완전하게 혼합되는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 금강 본류로 유입되는 지류는 갑천, 미호천, 용수천, 대교천 총 4곳을 고려하였다. 금강본류의 수위보정은 매포수위표, 금남수위표, 공주수위표를 이용하여 수행되었으며, 수질보정은 현도, 청원, 연기, 공주의 환경부 수질

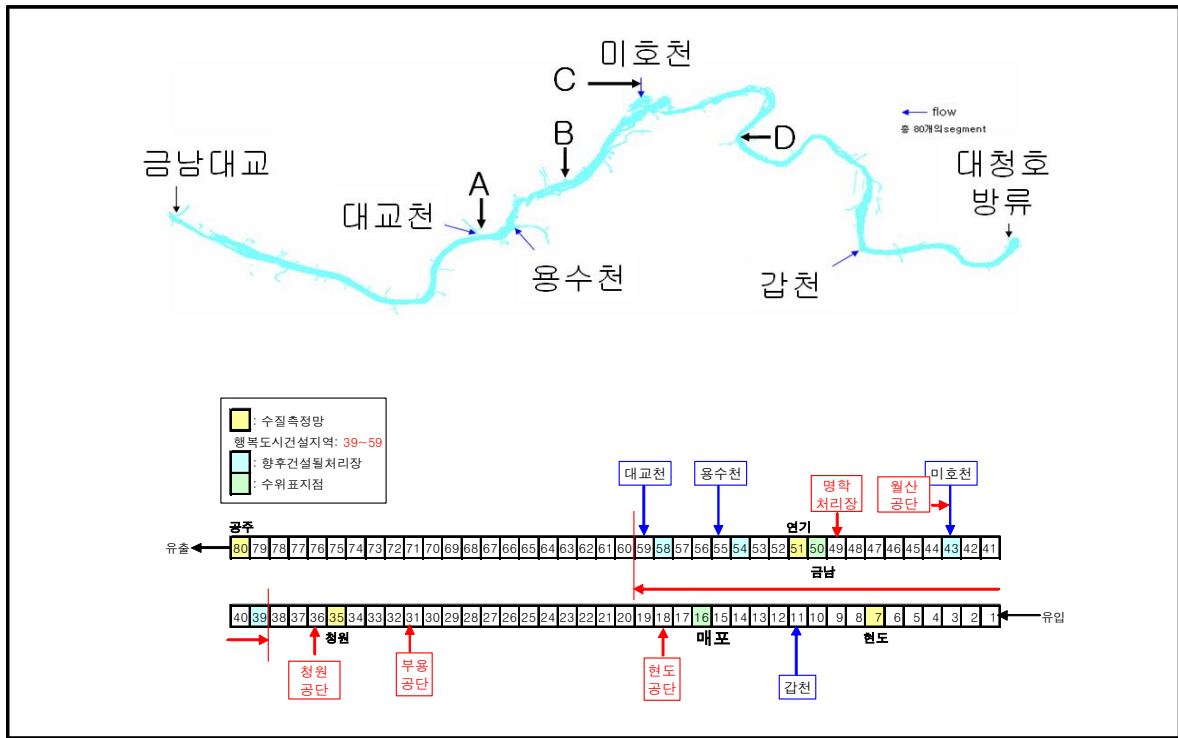


Fig. 2. Map of the Study Site and Major Boundary Conditions Considered in for EFDC-Hydro Model and WASP7.2 model

측정망 자료를 이용하여 수행되었다.

## 2.5 입력자료의 구성

### 오염부하 현황

모델링에 고려된 폐수종말처리시설은 현도공단과 청원부용공단이며, 환경기초시설은 금강으로 방류되는 명학 마을하수처리시설과 송담 마을하수처리시설, 미호천으로 방류되는 연기 마을하수처리시설과 월산공단 폐수종말처리시설을 고려하였다. Figure 3에 나타난 바와 같이 현도공단, 청원부용공단, 명학-송담 마을하수처리시설의 경우 방류지점은 각각 18, 31, 36, 49 소구간으로 유입되는 것으로 보았다. 미호천으로 방류되는 시설들은 미호천과 유량 가중 평균된 농도가 금강으로 방류된다고 보았다. 이들의 방류량 및 방류농도는 충청남도 (2004) 의 자료를 이용하였다.

### 유량자료

유량자료는 금강분류의 경우 대청댐 조절지의 일별 방류유량을 사용하였고 지류(갑천, 미호천, 용수천, 대교천)의 경우는 용담댐의 영향을 배제하기 위해 용담댐이 존재하지 않던 1991년부터 2000년까지의 대청댐 10년 평균 유량자료를 이용하여 유역면적비로 배분하여 산정하였다 (건설교통부 1999, 2002). 각 지류는 월별 유량으로 사용하였으며

갑천은 유역면적비로 산정한 유량에 대전하수종말처리장의 유량과 대전 3·4공단으로부터 배출되는 유량을 합하여 총 유량으로 하였고, 미호천도 마찬가지로 유역면적비로 산정한 유량에 청주하수종말처리장과 청주 1·2공단으로부터 배출되는 유량을 합하여 미호천의 총 유량으로 보았다. 수리 및 수질 모의에 필요한 기상 자료는 청주 기상청의 2005년 월별 자료를 사용하였다 (기상청, 2008).

## 3. 연구결과

### 3.1. EFDC 및 WASP 을 이용한 수위 및 수질보정 (2005년)

EFDC-Hydro 모델의 구동에는 EFDC.inp 라 불리는 주 입력자료 파일과 유량, 수온, 기온 및 바람 등에 대한 경계조건 파일군이 대청호 방류자료 및 기상청 자료를 이용하여 작성되었다. 수리학적 예측 결과는 실측수위를 이용하여 보정하였다. Fig. 3은 EFDC-Hydro 를 이용하여 본 계산 결과가 매향, 금남, 공주 지점의 실측수위를 잘 반영하는 것을 나타내고 있다. 수리학적인 계산 결과가 성공적으로 보정된 것을 확인한 후 \*.hyd 라는 확장자를 가진 계산 결과를 WASP 프로그램의 사용자 편의시스템에 연계하여 수질을 모의에 사용하였다. 수질 모의는 BOD, TN 및 TP 등 주요

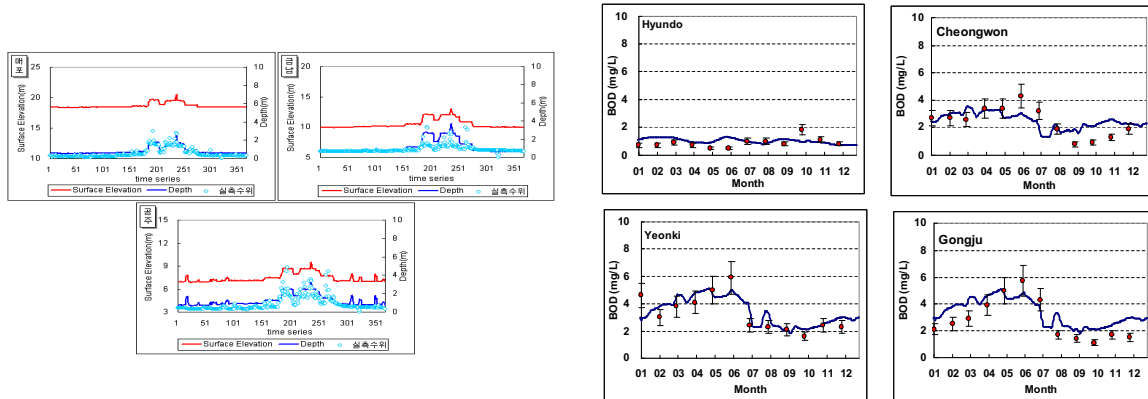


Fig. 3. Water Surface Elevation Calibration in the Study Area Fig. 4. BOD Calibration Results Using WASP at Major Stations in the Study Site

Table. 1 Calibrated Reaction Coefficients of CBOD for WASP7.2 in this Study

Constants	Value
BOD Decay Rate Constant @20 °C (per day)	0.02
BOD Half Saturation Oxygen Limit (mg O/L)	0.5

Table. 2 The Target Water Quality of the Study Area

구분	Target Water Quality, BOD (mg/L)
The Geum River	Border Between Cheongwon and Yeonki Geum River G; 2.40
	Border Between Yeonki and Gongju Geum River H; 2.90
Gabcheon	Before Entering to the Geum River, Bulmu Bridge; 5.90
Mihocheon	Before Entering to the Geum River, Wolsan Bridge; 4.40
Yongsucheon	Before Entering to the Geum River; 1.77
Daegyocheon	Before Entering to the Geum River; 1.98

수질변수에 대하여 전체적으로 실시되었으나 본 연구에서는 오염총량관리제의 대상 물질인 BOD의 모의결과에 국한하여 토론하기로 한다. 수질 모의시 지천의 유입부하 등의 경계조건은 갑천과 미호천 등의 유입지천에 대한 환경부 수질 측정망 자료를 이용하였다. WASP 모델은 현도, 청원, 연기, 공주지점의 환경부 수질 측정망 자료를 이용하여 보정되었다. 각 지점에 대한 CBOD의 보정 결과는 Figure 4에 나타난 바와 같으며 수질보정에 사용된 BOD 관련 주요 매개변수는 Bowie 등 (2005)이 제안한 값을 중심으로 시행착오적으로 결정되었으며 Table 1에 나타난 바와 같다.

### 3.2. 2030년 금강 목표수질 달성 조건 분석

Table 2는 연구대상지역의 분류 및 지천 주요지점에서 대하여 총량관리제에서 설정한 목표수질을 나타낸다(대전광역시, 2005; 충청남도, 2004). Figure 5는 세종시의 건설과 무관한 상태에서 2005년과 2030년의 유하거리별 목표

수질 달성여부를 나타내고 있다. 2005년의 경우 1월부터 6월까지의 목표수질을 달성하지 못하는 것으로 나타났다. 한편 2030년의 경우는 주요지류들이 목표수질을 만족하는 것으로 가정하였으므로 2005년에 비하여 1월부터 6월 사이 BOD 농도가 개선된 경향을 나타내고 있다. 그러나 7월부터 12월의 경우는 실측자료를 사용한 2005년의 BOD 농도가 작게 나타나는 경향을 보여주고 있다. 이는 2030년의 경우 지천의 수질농도가 목표수질로 고정되어 있기 때문에 발생하는 현상이다. 한편, 2030년의 경우에서 금강 본류의 목표수질은 주요 지천이 목표수질을 달성한다고 하여도 2월과 6월 사이 그리고 10월과 11월 사이에는 달성되지 못하는 것으로 나타났다.

따라서 2030년의 경우 갑천과 미호천의 추가적인 수질개선이 없는 금강의 수질목표 달성이 어려울 것으로 예상된다. 본 연구에서 시행착오적으로 결정된 결과, 갑천의 목표수질을 5.9 mg/L에서 4.3 mg/L로 미호천의 목표수질을

4.4 mg/L에서 3.6 mg/L로 각각 개선시키는 경우 연중 금강의 목표수질은 달성되는 것으로 산정되었다.

4 곳의 하수처리장이 건설될 예정이다. A, B, D 처리장의 경우 금강으로 직접 방류되며 C 처리장의 경우 미호천으로

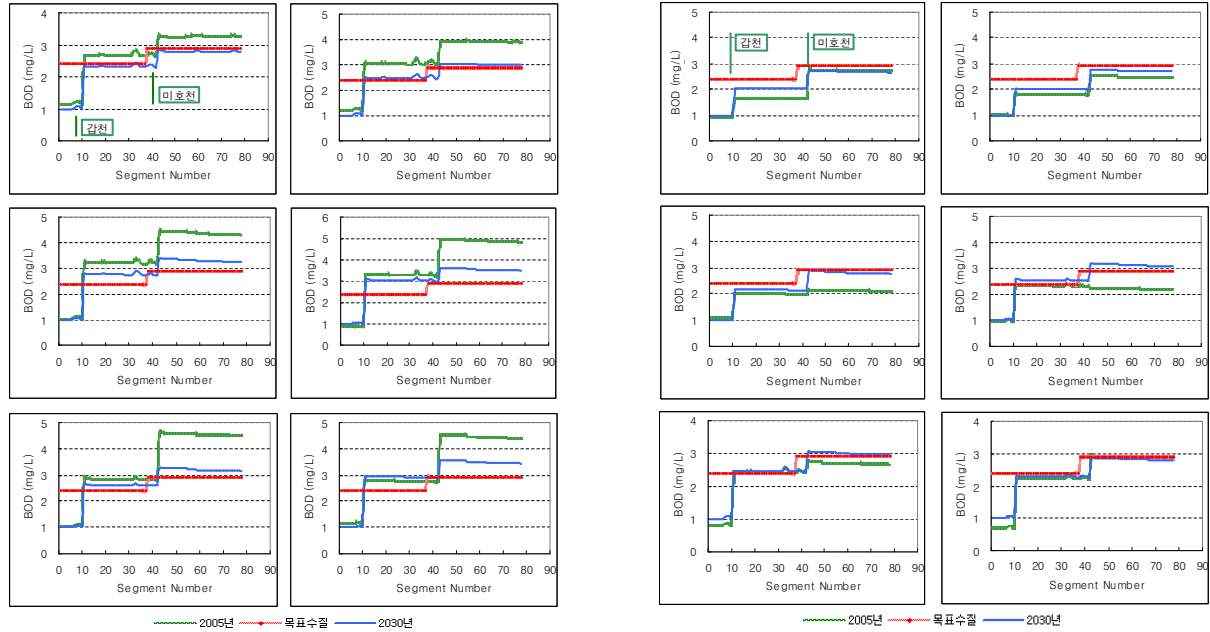


Fig. 5. Comparison of BOD in 2005 and 2030 before the Construction of Sejong City (each segment length are approximately 0.5 km)

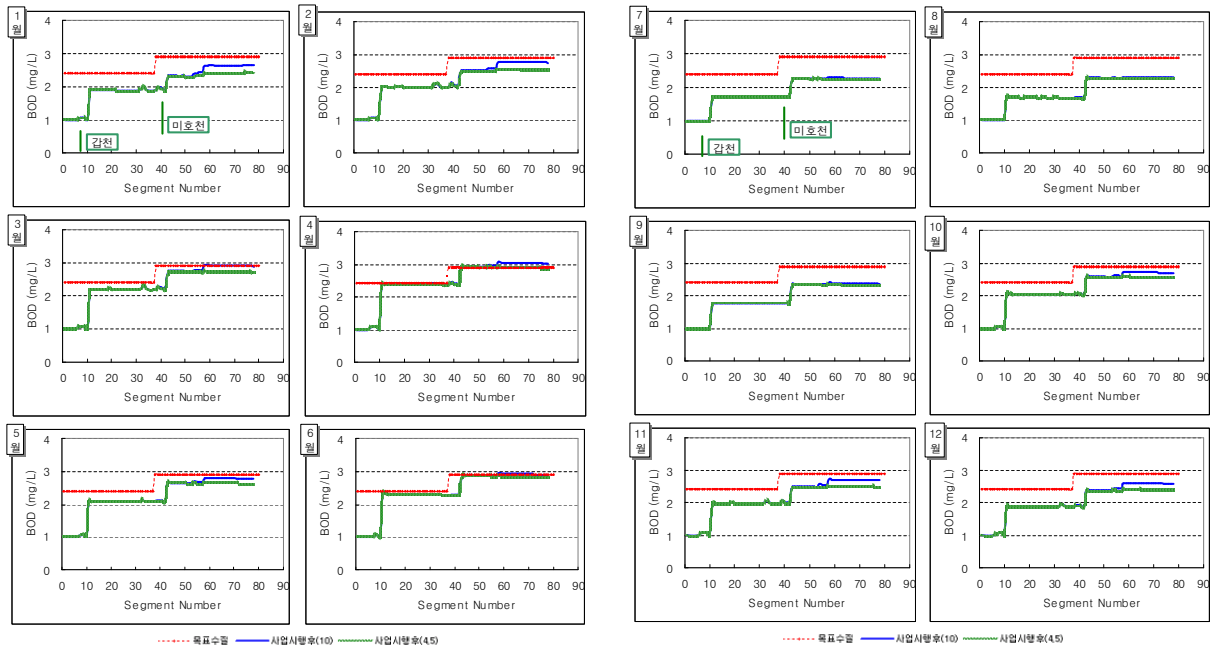


Fig. 6. BOD Modeling Results for 2030 with WWTP and Modified Target Water Quality of Gabcheon to 4.3 mg/L and Mihochon to 3.6 mg/L.

3.3. 2030년 세종시 하수처리장 건설 후의 수질예측  
세종시의 건설에 따라 Figure 2 에 나타난 바와 같이 총

방류되어 금강으로 유입될 예정이다. 처리장의 방류량은 각  
각 1.424, 0.579, 0.370 및 0.231 m<sup>3</sup>/sec 로 예정되어 있  
으며 BOD 방류수 농도는 처리장의 배출허용기준인 10 mg/L

로 가정하였다. 하수처리장 방류수는 Figure 2 의 아래에 나타난 바와 같이 소구간 23 번(A), 27번(B), 38번(C) 및 42(D) 번으로 유입되는 것으로 계획되어 있으며 이는 대청호 방류지점으로부터 각각 34 km, 30 km, 26 km 및 21 km 떨어진 지점에 해당된다.

앞서 세종시의 건설 전의 조건에 대하여 수질예측을 실시한 바와 같이 오염총량관리제에서 금강의 금남대교(금본 H) 지점에 대하여 설정된 BOD 목표수질을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 갑천과 미호천의 수정된 목표수질을 시행착오적으로 산정하였으며 갑천과 미호천의 수질이 각각 4.4 mg/L 와 3.6 mg/L 로 감소되는 경우 금본 H의 목표수질이 만족되는 것으로 나타났다. 이 조건을 이용하여 예측한 결과는 Figure 6 에 나타난 바와 같다. 그러나 Figure 6에 나타난 바와 같이 하수처리장의 방류수 BOD 농도를 10 mg/L로 고정하는 경우 3월, 4월 및 6월에 금강의 목표수질을 또한 달성하지 못하는 것으로 나타났으며 연중 내내 목표수질을 달성하기 위해서는 처리장 방류수 농도를 4.5 mg/L까지 감소시켜야 하는 것으로 산정되었다. 본 연구에서 제시하는 수치는 수질기준을 초과하는 해당 월에 대하여 토론하였으나 우리나라의 수질오염총량관리제에서 이행평가를 시행하는 데 있어서 목표수질은 년평균을 기준으로 하므로 실제로 이행평가상의 문제는 발생하지 않는다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 금강 수계 중 금강 하류의 대청호 조절지에서 정안천 유입 전까지 약 48km를 대상구역으로 정하여 국토해양부 및 환경부 등의 실측자료를 이용하여 수리동역학 모델인 EFDC-Hydro와 동적상태 수질모델인 WASP7.2를 연계하여 적용하였다. 본 연구는 3차원 수리동역학 모델과 수질모델을 동시에 적용한 효시적인 연구로 그 의의가 크다고 판단된다. 본 연구의 시범적용을 위해 금강 하류 지역을 연구대상지역으로 선정하였으며, 충청남도 연기군 금남교 지점인 금본 H에서 수질오염총량제에서 결정된 BOD 목표수질 2.9 mg/L 를 달성할 수 있는 조건을 시행착오적으로 산정하여 보았다. 수질모델의 모의결과를 비교하여 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 2005년 국토해양부의 수위 자료 및 환경부의 수질측정망 자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 대청댐 하류를 기점으로 유하거리별로 본 사업시행전의 수질을 2010년 이후 금강의 목표수질과 비교했을 때 1월부터 6월까지 금강 본류(금본 H)의 목표수질인 2.9 mg/L를 달성하지 못하는

것으로 나타났다.

(2) 2030년 각 지천이 목표수질을 만족하고 세종시가 건설되지 않은 경우, 금강의 BOD 목표수질은 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11월 등 7개월에 걸쳐 달성되지 못하는 것으로 나타났다. 금본 H 지점에 대하여 전 기간에 걸쳐 수질목표를 달성할 수 있기 위하여 시행착오적으로 산정한 갑천과 미호천의 목표수질은 각각 4.3 mg/L 와 3.6 mg/L 로 산정되었다.

(3) 2030년 행정중심 복합도시가 건설되었을 경우를 고려하여 모의한 결과 처리장의 BOD 최대 배출 허용기준 농도인 10 mg/L로 배출하는 경우 금강의 목표수질을 만족시키지 못하며 처리장 방류수의 BOD 농도를 4.5 mg/L로 감소하여 배출하는 경우 전 기간에 걸쳐 금강의 수질을 만족시키는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 갑천과 미호천의 적정 목표수질을 산정하는 과정에서 연구자의 판단에 의한 것이므로 실질적으로 개정을 위하여는 추후 보완 연구가 필요하다. 또한 대청댐의 방류조건 및 지천의 유입조건을 산정하는 데 있어서 대부분 월 1회 측정된 자료가 사용되었으므로 진정한 의미에서 연중 매일 예측을 실시하는 데에는 한계가 있다. 추후 지속적인 연구 및 자료보완이 이루어지는 경우 본 연구에 사용된 방법은 우리나라 여타 하천에도 3차원적인 수리-수질 연계 분석에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부 (1999) **금강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서**, 대전지방국토관리청 .
2. 건설교통부 (2002) **금강 수계 하천정비기본계획 보고서**, 대전지방국토관리청 .
3. 공동수, 정동일 (2007), **QUALKO2 설명자료**, 국립환경과학원.
4. 국토해양부 (2008) 국가 수자원 관리 종합 정보 홈페이지 <http://www.wamis.go.kr>
5. 기상청 (2008) 홈페이지 <http://www.kma.go.kr>
6. 대전광역시, 금강 수계관리 위원회 (2005) **대전광역시 금강 오염총량 관리 기본 계획**.
7. 서동일, 윤종욱, 이재운 (2008), QUAL2E, Q2K 및 CAP 모델을 이용한 금강 하류 하천구간 정상상태 수질모델링 결과 비교 분석, **상하수도학회지**, 22(1), 121-129.
8. 서동일, 최재훈, 이은형, 이혜근 (2001), EUTRO5를 이용한 시화호 수질 모델 보정 및 검증, **대한환경공학회지**,

- 23(1), 131-139.
9. 서동일, 이은형 (2003), 불연속적으로 흐르는 소하천을 위한 CAP 수질모델의 개발, *상하수도학회지*, 17(3), pp.372-377.
  10. 이은형, 서동일 (2003) 현장 및 실험실의 실측을 이용한 CAP 수질 모델의 매개변수 산정, *상하수도학회지*, 17(3), pp.444-450.
  11. 이은형, 서동일 (2002) 용담댐의 영향분석을 위한 금강의 수질 모델링, *한국수자원학회 논문집*, 35(5), pp. 525-539.
  12. 서동일, 유하나 (2007) EFDC-Hydro 와 WASP7.2 을 이용한 QUAL2E 모델의 오차 원인 분석 - 한강하류부의 적용 사례를 중심으로, *대한상하수도학회 추계학술 발표회 초록집*.
  13. 충청남도 (2004) *충청남도 금강 오염 총량관리 기본 계획*.
  14. 한국토지공사 (2007) *행정중심 복합도시 환경영향평가 보고서*.
  15. 환경부 (2008) 물환경정보시스템 홈페이지 <http://water.nier.go.kr/weis>
  16. Ambrose, R. B., et al. (1988) *WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model - Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide*, USEPA, Athens, GA EPA/600/3-87-039
  17. Ambrose, R. B., Wool, T. A., and Martin, J L. (1993) *The Water Quality Analysis Simulation Program*, WASP5 User's Manual, USEPA.
  18. Bowie, G. L., Mills, W. B., Porcella, D. B., Campbell, C. L., Pagenkopf, J. R., Rupp, G. L., Johnson, K. M., Chan, P. W. H., Gherini, S. A. and Chamberlin, C. E., (1985) *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, 2nd Ed.* USEPA, EPA/600/3-85/040.
  19. Brown, L. C. and Barnwell, T. O. (1987) *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*. EPA/600/3-87/007.
  20. Chapra, S. C., Pelletier, G. J. and Tao, Hua (2007) *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality* (Version 2.07): Documentation and Users Manual.
  21. Cole, T. M. and Buchak, E. M. (1995) *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model*, Version 2.0: Users Manual, Instruction Report EL-95-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
  22. Hamrick, J. M. (1992) *A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects*, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report 317, 63p.
  23. Hamrick, J. M. (1994) *Linking Hydrodynamic and Biogeochemical Transport Models for Estuarine and Coastal Waters*. Estuarine and Coastal modeling, Proceeding of the 3rd International Conference, M. L. Spaulding et al, Eds., American Society of Civil Engineers, New York, 591-608.
  24. Johnson, B. H., K. W. Kim, R. E. Heath, B. B. Hsieh and H. L. Butler (1993) Validation of Three Dimensional Hydrodynamic Model of Chesapeake Bay, *J. of Hydraulic Engineering*, 119, 2-20.
  25. Park, K., A. Y. Kuo, J. Shen and J. M. Hamrick (1995) *A Three-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM-3D): Description of Water Quality and Sediment Process Submodels*, Special Report, Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary.
  26. Park, S. S., Lee, Y. S., (2002) A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modeling*, 152(1):65-75.
  27. Tetra Tech, Inc., (2002) *Hydrodynamic and transport extension to the EFDC model*. A report to the U. S. Environmental Protection Agency, Fairfax, VA.
  28. USEPA (2008) WASP 홈페이지 <http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html>
  29. USEPA (2007) *The Environmental Fluid Dynamics Code User Manual US EPA Version 1.01*.
  30. Wool, T. A., Ambrose, R. B., Martin, J L. and Comer, E. A. (2001) *The Water Quality Analysis Simulation Program*, WASP6 User's Manual, USEPA.