

다차원 모형을 이용한 하천흐름 연계모의

안정민* · 허영택** · 류시완***

Ahn, Jung Min*, Hur, Young Teck**, Lyu, Siwan***

Coupling Simulation with Multi-dimensional Models for River Flow

ABSTRACT : It is essential to understand the hydraulic characteristics of rivers for increasing flood-control capacity and operating hydraulic structures efficiently. Multi-dimensional models can be the proper measures to obtain the detailed information on the hydraulic characteristics of rivers. But huge amount of data and time-consuming work have been the obstacle for applying multi-dimensional models. In this study, simulation technique with multi-dimensional model(EFDC), coupled with COSFIM and FLDWAV, has been developed and applied to the real river system for verification. Developed technique can offers spatial and grid unit information as well as line and section unit information from 1-D modeling. It is considered that the coupling simulation technique can provide useful hydraulic information for river management and treatment.

Key words : Multi-dimensional Model, EFDC, COSFIM, FLDWAV, Coupling Simulation

초 록 : 수리구조물의 효과적 운영과 홍수기 피해저감을 위해서는 하천수리특성에 대한 적절한 이해가 필수적이며, 다차원모형의 적용을 통해 그 목적을 달성할 수 있다. 그러나 다차원모형 적용은 방대한 자료와 많은 분석시간을 요구하여 실무적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 유역유출모형 및 1차원 수리모형과 다차원모형의 연계모의 기법을 제안하고 실제 하천에 대한 적용성을 검증하고자 하였다. 다차원 수리모형으로 EFDC를 이용하였으며, 모의를 위한 경계조건 결정을 위한 유역유출모형과 1차원수리모형으로 COSFIM과 FLDWAV를 이용하였다. 다차원모형의 연계적용기법을 통하여 기존의 선단위·지점단위 정보 뿐 아니라 공간·격자단위 정보를 제공할 수 있어 하천에서의 물리적 현상을 고려한 공간적 수리특성을 반영한 하천관리가 가능할 것이다.

검색어 : 다차원모형, EFDC, FLDWAV, COSFIM, 연계모의

1. 서 론

홍수로부터 국민의 생명과 재산을 보호하기 위해 하천의 수리특성분석에 관한 많은 국내외 연구가 수행되고 있다. 하천의 수리적 특성 분석방법에는 수문학적 방법과 수리학적 방법이 있으며, 통상 둘을 병행하여 수리특성을 분석하고 있다. 그러나 수문학적 홍수추적방법은 물리적인 방법이라기보다는 개념적인 방법이기 때문에 과거에 누적된 홍수자료로부터 필요한 정보를 통계적 방법으로 구하게 되므로 기왕 홍수사상에 대한 충분한 자료가 제공되지 않는다면 분석결과의 신뢰도가 저하되는 문제점이 있다. 특히 수문학적 방법 기반의 분석모형은 관측 수위표에서의 수위-유량관계곡선을 이용하여 흐름을 예측하기 때문에 수위관측소

* 정희원 · 창원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (ahnjm80@gmail.com)

** 정희원 · 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원 (korcivil@hanmail.net)

*** 정희원 · 창원대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Associate professor, Changwon National University · siwan@changwon.ac.kr)

Received March 7 2012, Revised April 23 2012, Accepted November 20 2012

이외의 지점에서는 수위 예측이 곤란하게 되며 대상구간 전체에서 발생하는 수리학적 특성을 제시할 필요가 있는 치수계획을 수립하는데 한계가 있을 수 있다.

우리나라는 제방축조 위주의 치수대책으로 인하여 치수 위험도가 증가하고 있고 이에 대한 대응책으로 준설에 의한 홍수방어 능력 증대를 제한하고 있다(국토해양부, 2009b). 4대강 살리기 사업은 이러한 치수능력 증대사업의 일환으로, 홍수피해를 방지하고 홍수위를 저감시키기 위해 하도준설을 실시하고 있다. 그러나 대규모 하천공사 시행과 더불어 홍수기 하천의 흐름을 방해할 수 있는 가물막이와 같은 수리시설물 설치의 공사기간 중 홍수재해 위험성을 증가시키고 준설에 따른 급격한 하천단면 변화는 기존의 수위-유량 관계곡선식의 신뢰도를 저하시켰다. 이러한 급격한 변화에 따른 예측 불가능한 피해를 최소화하기 위해서는 하천에서의 흐름특성에 대한 정확한 조사 및 분석이 필수적이고 발생할 수 있는 재난에 선제적으로 대응하기 위해서는 공간단위 수리특성분석이 필요하다.

하천의 수리특성 분석에 관한 연구로 국외의 경우, 수치모델링을 활용한 홍수 예측 및 복구 대책에 관한 연구가 주를 이루며 대표적으로 Alam(2003)은 Dhaka 도시를 대상으로 실시간 홍수 예측을 수행할 수 있도록 2차원 수치모형을 구축하여 적용하였고 Haile(2005)는 고해상도 DEM을 이용하여 통합된 수리모형을 구축하여 홍수에 적용하였다. 국내의 경우, 이정규 등(2005)이 FLDWAV(FLOODWAVE) 모형을 이용하여 팔당댐에서 전류구간까지 한강하류부에 대해 하천구간별 최적조도계수산정을 수행하였으며, 한건연(2007)은 댐붕괴 홍수해석을 위한 수리학적 추적을 수행하였고, 이상진 등(2010)은 1차원 부정류 모형인 FLDWAV 모형을 이용하여 낙동강 하류의 홍수 특성을 분석한 바 있다. 김양수(2010)는 기존의 수문학적 모형은 하천구조물에 의한 배수영향 등을 고려하지 못하기 때문에 수리해석 모형의 병행 구축이 불가피하다고 하였으며 이를 보완하기 위해 1차원 수리해석 모형인 FLDWAV를 채택하여 홍수예보시스템에 적용하여 원활한 홍수예보가 될 수 있도록 추진의 필요성을 언급하였다. K-water는 급격한 하천단면의 변화로 기존의 수위-유량 관계식의 신뢰도가 저하되었을 경우, 추가적으로 FLDWAV 모형을 COSFIM(Coordinated Operation System for Flood control In Multi-reservoirs) 모형과 연계하여 수위예측을 수행할 수 있도록 시스템을 개선하였다(한국수자원공사, 2006; 한국수자원공사, 2008; 한국수자원공사, 2009). 특히 다차원모형을 이용한 연구로 허영택과 박진혁(2009)은 낙동강에 대하여 EFDC 모형을 활용한 수리해석 적용성을 평가하였고 서동일 등(2009)은 저수지 구간 수질모의를 위해 EFDC와 WASP(Water Quality Analysis Program) 모형을 연계하는

연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존 유역유출모형 및 1차원 수리모형과 다차원모형의 연계기법을 적용하고 시스템화하여 하천내 주요 관심구간을 중심으로 다차원 수리분석을 수행할 수 있는 방안에 대해 연구하였다. 각 모형은 장·단점을 가지고 있기 때문에 각 상황에 맞는 의사결정을 위해 선택적으로 모형을 활용할 수 있을 것이며 기존의 1차원 수리, 수문 모형으로 제공받던 선단위·지점단위 정보 뿐 아니라 추가적으로 공간·격자단위 정보를 제공받을 수 있는 다차원 모의를 수행함으로써 하천에서의 물리적 현상을 적절히 고려한 공간적 수리특성을 반영한 하천관리가 가능할 것이다. 시범적으로 한강수계에 위치해 있는 이포보를 대상으로 연계기법을 적용하고 시스템화 하여 2010년의 홍수사상 중 수리적인 변화가 가장 큰 강우사상을 선별하여 수리분석을 수행하였다.

2. 공간단위 수리특성 분석을 위한 수치모형간 연계

2.1 대상 지역 현황 및 검토사상 선정

대상유역은 한강수계 중 남한강 일대로서 대상지역 현황은 Fig. 1과 같다. 이포수위관측소는 No. 76지점이며 이포대교는 No. 77 지점이다. 연구 대상구간은 남한강의 상류 양화천 합류점에서 하류 용담천 합류점까지이며 구간거리는 약 11km 이다. 대상구간 내에는 이포수위관측소와 이포대교가 위치하고 있으며 이포대교 하류 약 370m 지점에 이포보가 건설되었다. 본 구간으로 유입되는 지류는 양화천, 복화천, 금사천, 용담천, 향리천이 있다. 각 지류가 유입되는 하천정비기본계획(국토해

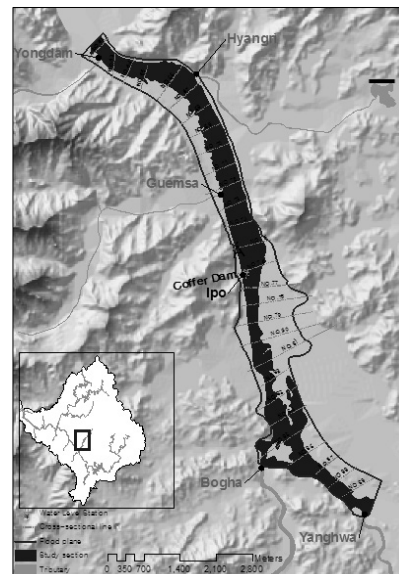


Fig. 1. Study area

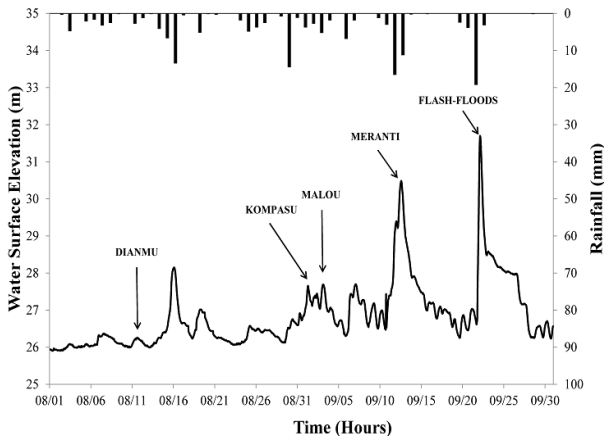


Fig. 2. Rainfall and water level observed from Ipo gauging station in 2010

양부, 2009a)상의 단면 번호는 양화천 No. 89, 복화천 No. 84, 금사천 No. 72, 용담천 No. 63, 향리천 No. 66 이며 향리천, 용담천, 금사천의 유역면적은 각각 16km², 24.8km² 그리고 48.7km²이다(건설교통부, 1995a; 건설교통부, 1995b). 분석기간은 2010년 8월~9월 강우사상 중 하천의 수리적인 변화가 큰 기간을 대상으로 하였으며, 모형 구축을 위해 해당 기간 중 이포보 일대의 계획단면 및 가물막이 수리구조물, 특히 가물막이 시설에 대한 건설 현황을 수집하였다. 또한 가물막이 시설의 공정진행 조사 결과, 2010년도 홍수기에 1차 우안 가물막이는 철거되었지만 좌안의 가물막이는 존치하고 있었으며, 존치 가물막이의 정고는 EL. 32.5m로 조사되었다(국토해양부, 2009c). 따라서 다차원 모형 구축 시 이포보의 공정현황에 따라 좌안의 가물막이는 존치, 우안의 가물막이는 제거 하였으며 하상단면은 2009년 하천정비기본계획의 단면을 적용하였다. 공간단위 수리특성 분석을 위한 강우사상 선별은 이포보의 공정률(국토해양부, 2009c)을 고려하였으며, 연구대상지역의 2010년 8월-9월 중 강우사상에 따른 이포수위관측소 지점의 수위는 Fig. 2와 같다. 2010년 강우사상은 기후변화 등의 영향으로 국지적 집중호우가 빈발했으며 전체적인 강우일수는 감소하였으나 강우량이 80mm 이상인 강우일수는 증가하는 양상을 보였다. 2010년에는 총 12개의 태풍이 발생하였으며 분석기간 중에는 덴무, 곤파스, 말로, 프란티 등 4개의 태풍이 발생하였고, 9월 20~23일 기습폭우가 발생하였다. 강우 사상별 유출량은 기습폭우가 가장 컸으며(EL. 31.7m) 덴무가 가장 작은 것(EL. 26.2m)으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 수리적인 특성의 변화가 가장 컸던 9월 20일~23일의 기습폭우를 대상으로 수리분석을 수행하였다.

2.2 수리분석 수행을 위한 수치모형간 연계방안

국내외의 많은 연구자들은 수치모형간 연계기법을 활용하여 단일 모형 활용에 따른 단점을 보완하고 다차원 공간단위 수리분석을 위해 요구되는 입력 자료의 양을 줄이고 연산시간을 단축하기 위해 노력하고 있다. Syme 등(2004)은 1차원 및 2차원 수리모형을 이용하여 도시지역 홍수사상을 해석하였으며 Xing 과 Dehui(2006)은 1차원 및 2차원 수치모형을 통합하여 홍수사상에 대한 수리특성을 분석하였고 Gilles(2010)은 미국의 CORALVILLE 댐에 대하여 HEC-ResSim모형으로 홍수기 저수지 운영을 수행하여 산정된 방류량을 HEC-RAS, MIKE11, MIKE21에 적용해서 1차원 및 2차원 하도추적을 수행하였다. 김강모(2004)는 HEC-RAS와 Qual2E모형을 연계하여 낙동강에서의 유량과 수질 연계 예측 시스템을 개발하였으며 강형식 등(2011)은 낙동강의 본류 흐름 예측을 위해 유역 모형인 SWAT(Soil Water Assessment Tool)모형과 하천 모형인 EFDC모형을 연계하였다. 안정민과 류시완(2012)은 다차원수리모형을 연계 가능한 GUI 시스템을 개발하여 낙동강 수계에 적용한 바 있다. 다차원 모형은 1차원 모형에 비해 지형구축을 위해 많은 시간과 자료가 필요하며, 특히 다차원 수리 분석을 위해서는 조밀한 격자가 필요하지만(안정민과 박인혁, 2012), 이 경우 모형 분석에 많은 시간이 걸리게 된다. 이러한 점을 보완하기 위해 안정민 등(2012)은 수리동역학적 모의를 위한 적정 격자해상도 산정방법에 대해 제안한 바 있고 본 연구에서는 추가적으로 유역유출모형, 1차원 수리모형, 다차원수리모형간 연계를 통해 연구대상지역의 수리분석을 시행하였다. EFDC는 sigma layer를 1개로 설정하면 2차원모의가 가능하고 sigma layer 개수를 증가시키면 3차원모의가 가능하도록 설계되어 있다. Gong and Shen(2011)은 EFDC 모형의 sigma layer 민감도를 분석한 결과 염수침입해석을 위한 sigma layer 개수로 15개를 채택한 바 있다. 일반적으로 2차원모형에 비해 3차원 모형은 효율성이 낮은 것으로 평가되고 있지만 EFDC모형의 코드는 공개되어 자유롭게 수정이 가능하고 향후 유사, 수질 해석을 위한 모듈도 포함하고 있기 때문에 본 연구에서는 다차원 수리모형으로 EFDC를 채택하였다. 본 연구에서 제안한 연계기법은 모형의 구축시간 및 구동시간을 단축시킬 수 있다는 장점 외에 유역유출모형에 의한 유출량 예측결과를 바탕으로 하도구간의 공간적인 수리특성을 예측할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 3과 같이 연계모의를 위해 이포보의 상·하류 10 km를 선택하여 EFDC 모형을 구축하였으며, 관측 자료가 없는 대상구간 내 지류 유입량 예측을 위해 COSFIM을 구축한 후, 지류 유입량이 고려된 남한강 본류의 1차원 하도추적을 통해 대상구간의 상·하류 경계조건 설정을 위하여 FLDWAV를 구축하여

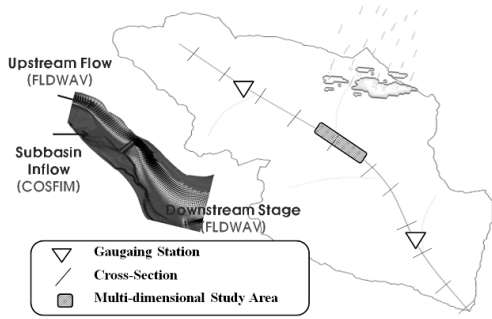


Fig. 3. Coupling scheme of models

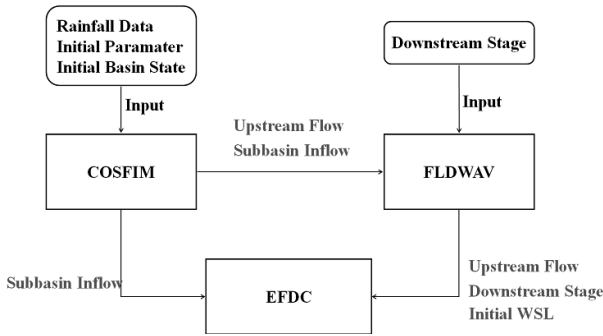


Fig. 4. Coupling simulation flowchart

각 모형을 연계하였다. Fig. 4는 연계모의 시 각 모형간 입출력자료의 흐름을 나타내며, 모형 간 자료 교환은 그림과 같이 3단계를 거친다. 1) 강우 유출해석에 의한 유역 유출량 및 지류유입량 산출, 2) 지류 유입량을 고려한 남한강 본류의 1차원 하도추적, 3) 1차원 하도추적 결과를 경계조건으로 설정한 다차원수리특성 분석과 같다.

2.3 다차원 모형구축 및 시나리오 설정

다차원 수치모형을 수행하기 위해서는 실제 지형에 대한 정확한 3차원 지형정보가 필수적이며, 특히 하천과 같이 주수로와 홍수터에 의한 급격한 지형변화와 하천 내 수리구조물에 의한 유수의 간섭은 하천의 수리적 특성에 많은 영향을 미치기 때문에 이러한 특징들을 종합적으로 고려하여 지형정보를 구축해야만 한다(안정민과 박인혁, 2012). 본 연구에서는 하도 내 지형변화와 수리구조물 등의 다양한 요소들이 고려된 고품질의 지형자료를 생산하기 위해 등수심선을 활용하여 3차원 정밀지형을 구축하였다. EFDC 모의를 위한 평면 격자 생성은 QMESH(허영택, 2010)를 활용하였으며 3차원 지형은 선형보간을 통해 산출하였다. Table 1은 대상지역의 EFDC 모형구축 결과를 나타내며, 총 격자수는 8,010개, 격자간격은 가로 24.7m X 세로간격 44.2m로 설정하였고 연직층은 5개 층으로

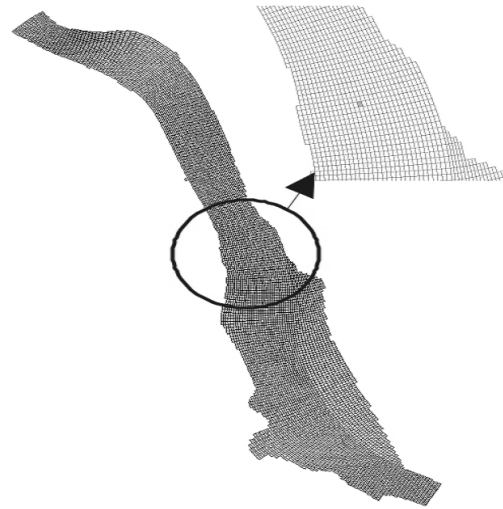


Fig. 5. Orthogonal grid

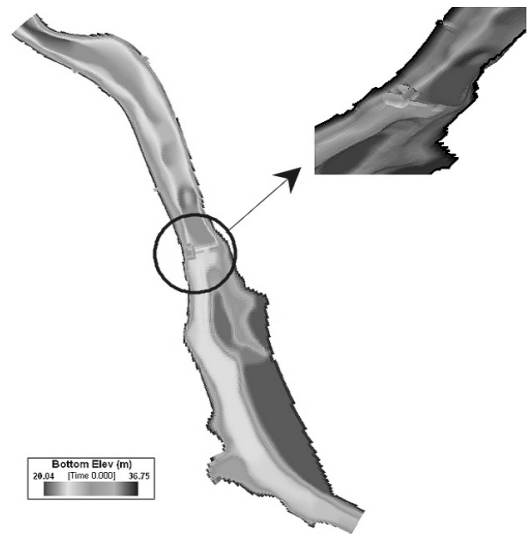


Fig. 6. Terrain of study area

Table 1. Specific data of EFDC constructed in the study area

Contents	Results of constructed Model
Number of horizontal grid	8,010 (longitudinal direction : 244, transection direction: 81)
Grid length(m)	24.7×44.2
Vertical grid(m)	depth of water×0.2

Table 2. The set of simulated scenarios

Case	Details of the case
Case 1	Optimal water level conditions calculated by FLDWAV
Case 2	Optimal discharge conditions calculated by FLDWAV
Case 3	Combination of case 1(water level) and case 2(discharge)

각 격자별 수심 × 0.2m로 설정하였다. Fig. 5는 연구대상지역의 격자망을 나타내며, Fig. 6은 3차원 정밀지형도를 나타낸다.

EFDC 모의를 위한 시나리오의 설정은 대상구간 상·하류 경계조건의 기준항목(유량, 수위)에 따라 세 가지로 구분하였다 (Table 2). Table 2에 제시되어 있는 바와 같이 FLDWAV 모형 매개변수 보정 시 관측값과 수위의 오차가 최소가 되는 경우를 Case 1로, 유량의 오차가 최소가 되는 경우를 Case 2로, Case 1과 Case 2의 조건을 조합한 경우를 Case 3으로 분류하였다.

2.4 다차원 모형의 경계조건 설정

다차원 모형의 경계조건 산출을 위해 한강수계를 대상으로 한국수자원공사(2006)에서 개발한 COSFIM과 FLDWAV를 이용하였다. 모형의 검·보정은 한국수자원공사(2006)에서 기 수행되었으며 이포수위관측소의 기존 수위-유량관계곡선식은 4대강살리기 사업으로 인해 교란이 발생하여 모형을 수행하기 위한 정확한 자료를 제공하기 힘들 것으로 판단되지만 본 연구에서는 정답으로 가정하였다. Fig. 7에서의 모식도와 같이 구축된 COSFIM은 모의기간동안 발생한 강우량 자료를 바탕으로 유량을 산정하며 산정된 유량을 바탕으로 FLDWAV모형을 수행하였다. COSFIM 모의 시 대상기간 동안의 기저유량은 500m³/sec로 하였고 시행착오법에 의한 매개변수 조정을 통해 이포수위표지점의 관측수위와 보정을 수행하였다. COSFIM 구동을 위한 초기조건은 Table 3과 같으며 시행착오법에 의해 산출된 소유역 및 하도구간별 최적 매개변수는 Table 4와 같다. 1차원 하도 추적 시, 시계열 강우, 수위, 유량과 같은 상류경계조건은 수리모형의 안정화를 위해 상류에서 유입되는 최소유량을 60 m³/sec로 적용하였으며 최소유량 이하의 유량은 최소유량으로

대체하였다. FLDWAV의 매개변수 검·보정은 COSFIM과 같이 이포수위표의 관측수위를 기준으로 수행하였다. 최심하상고는 원단면의 최심하상고를 적용하였으며 조도계수는 시산법으로 Table 5와 같이 유량 규모에 따라 각 CASE별로 산출하였다. 각 모형에 의한 각 CASE별 모의 결과는 EFDC 모형의 경계조건으로 활용하였으며 상류유량은 FLDWAV 단면 139번 유량과 양화천 지류를 합한 값을, 복화천은 COSFIM의 하도 C38번 유량을, 금사천, 용담천, 향리천은 COSFIM의

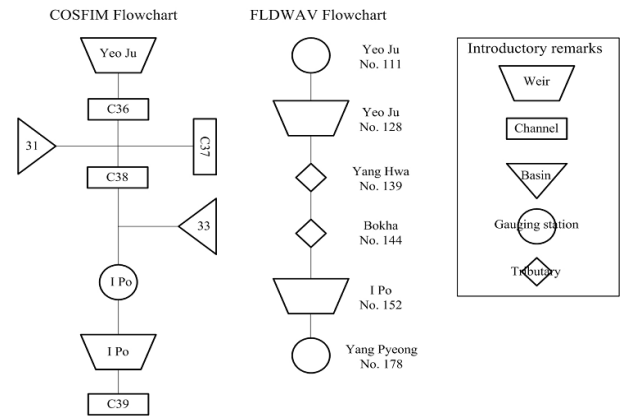


Fig. 7. Schematic diagram of COSFIM and FLDWAV

Table 3. Simulation condition of COSFIM

Contents	submerged bridge	downstream of Dam(Paldang)
Analysis period	2010.09.20 16:00 ~ 2010.09.23 16:00	
Measured rainfall	101.9mm/10day	100.2mm/10day
Baseflow	500m ³ /sec (IPO gauging station)	
Time step	60 minutes	

Table 4. Results of parameter calibrated in COSFIM

Basin	K	P	TI	F1	Rsa	Channel	K'	P'	TI'
31	18.38	0.722	1.329	0.5	20	38	12.216	0.57	0.165
32	19.26	0.694	1.636	0.5	20	39	15.728	0.57	0.274
33	23.48	0.589	0.294	0.5	20	40	28.462	0.57	0.654

* K : storage constant, P : storage index, TI : lag time(hr), F1 : coefficient of initial runoff, Rsa : saturation infiltration capacity(mm), K' : channel storage constant, P' : channel storage index, TI' : channel lag time(hr)

Table 5. Input condition of roughness in FLDWAV

Group	1	2	3	4	5	6
Discharge (m ³ /sec)	0	500	1,000	2,500	5,000	10,000
CASE 1	0.130	0.060	0.045	0.032	0.028	0.025
CASE 2	0.130	0.060	0.045	0.040	0.035	0.032
CASE 3	0.130	0.060	0.045	0.032	0.035	0.032

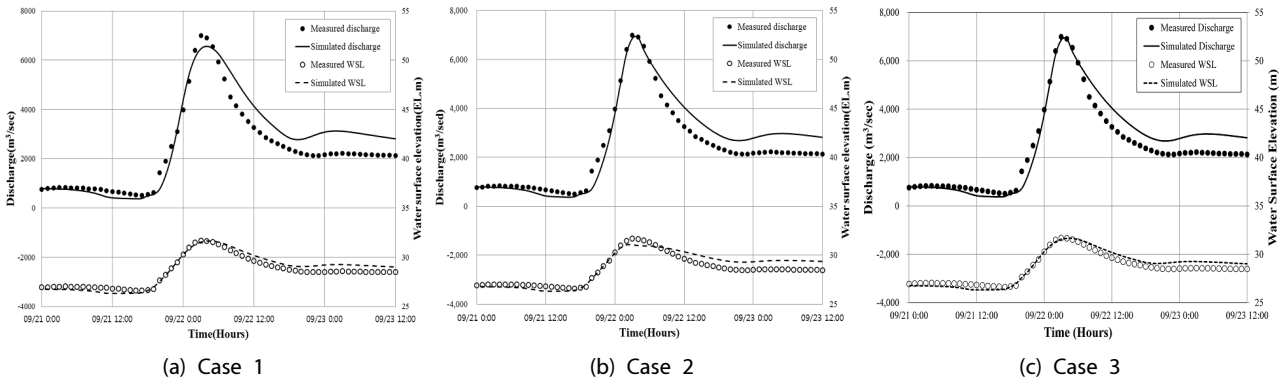


Fig. 8. Results derived in accordance with the boundary conditions

소유역 31번과 소유역 33 유량을 활용하여 지천별 면적비로 배분하였고, 하류수위 조건은 FLDWAV 단면 167번을 적용하였다. 각 CASE에 의해 산출된 이포수위관측소 지점의 유량과 수위 그래프는 Fig. 8과 같다.

일반적으로 수평난류점성계수와 수평 난류확산계수는 같다고 보고 계산 격자크기가 작아질수록, 유속경사가 작을수록 수평 난류점성계수가 감소하며 격자가 충분히 작은 경우는 무시될 수 있다(Oey et al, 1985a,b). Billy Chinook 호수에 대한 성층현상 연구에서는 난류점성계수 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 적용한 바 있다(Yang Z, 1999). EFDC의 매개변수는 기존 연구자료 및 격자의 크기를 고려하여 난류점성계수를 $0 \sim 1 \text{ m}^2/\text{sec}$ 사이에서 $0.0 \text{ m}^2/\text{sec}$, $1.0 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{sec}$, $1.0 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 값을 모의 적용하여 민감도분석을 통해 적정값을 산정하였다. EFDC에서 조도높이 Z_0 를 실측 하는 것은 매우 어렵기 때문에 시산법으로 결정하였으며, 초기 값은 0.02 m 로 설정하였다. Tetra Tech(2010)에서는 Hanalei Bay 지역에 EFDC를 구축하기 위해 조도높이를 0.01 m 를 적용하였으며, Yang Z(1999)은 Billy Chinook 호수에 대한 성층현상 연구에서는 조도높이를 0.005 m 를 적용한 바 있다. 본 연구에서는 초기수위는 선형으로 보간하였으며 난류모형은 Smagorinski(Smagorinsky, 1963) 방법, von Karman 상수는 0.4 , 최소수심은 0.01 m , 벽거칠기는 0.002 , 조도높이는 0.010 m , 와점성계수는 $0.001 \text{ m}^2/\text{sec}$, wet/dry 조건은 dry depth는 0.1 m , dry step는 16 , wet depth는 0.12 m 를 적용하였다.

3. 모의 결과 및 검토

본 연계기법의 적용성 검토를 위해 기왕의 홍수사상에 대한 분석을 수행하고 재현성의 평가는 정량적 통계기법에 근거하였다. 재현성 평가를 위해 선정한 정량적 통계기법은 일반적으로 사용되는 평균오차(Average Error, AE), 상대오차(Relative

Error, RE), 평균절대오차(Average absolute Error, AAE), 평균제곱근오차(Root mean square error, RMSE) 외에 통계적 추론의 객관성 확보를 위하여 상대평균제곱근오차(Relative-root mean square error, RRMSE)와 Nash-sutcliffe 효율계수(Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSEC), Theil의 불균등계수(Theil inequality coefficient, TIC)를 분석하였다. 상대평균제곱근오차와 Theil의 불균등계수는 무차원의 값으로 0에 근접할수록 정확성이 높은 것을 의미하며 이와는 반대로 Nash-sutcliffe 효율계수는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이고, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있다. 또한, 0보다 작으면 모형의 추정결과가 나빠거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미한다. 각 방법은 관측 시계열 자료와 각 모형별 계산결과를 이용하였으며 각 방법별 산출식은 (9)~(11)과 같다. 또한, 총적하천의 하상과 제방은 흐름에 의해 쉽게 침식되는 사립자들로 구성되어 있어 흐름 상태에 따라 하상과 제방을 구성하는 사립자들이 움직이기 시작한다. 한계조건의 해석에는 한계소류력이 있으며 한계소류력은 하상을 쓸어 내리는 소류력이 하상 재료의 운동에 관련되어 있다고 보는 것으로 Shields(1936)에 의해 처음 제안되었다. Table 6은 Shield에 의해 제안된 파라미터와 한계전단응력에 의한 유사 이송의 한계조건을 하상재료에 따라 분류한 것이다. 이 분류표를 이용해서 모의결과와 비교·분석하였다.

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - X_i)}{N}; RE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - X_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100; AAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - X_i|}{N} \quad (1)$$

Table 6. Critical shear stress under the bed material and parameter of Shields(Shields, 1936)

Particle size classification	Particle size, D_s (mm)	Shield's parameter	Critical shear stress, τ_{cr} (N/m^2)
very large boulders	>2,048	0.054	1,789.0
large boulders	1,024-2,048	0.054	895.0
medium boulders	512-1,024	0.054	447.0
small boulders	256-512	0.054	224.0
large cobbles	128-256	0.054	112.0
small cobbles	64-128	0.052	54.0
very coarse gravels	32-64	0.050	26.1
coarse gravels	16-32	0.047	12.1
medium gravels	8-16	0.044	5.64
fine gravels	4-8	0.042	2.72
very fine gravels	2-4	0.039	1.26
very coarse sands	1-2	0.029	0.48
coarse sands	0.5-1.0	0.033	0.27
medium sands	0.25-0.5	0.048	0.19
fine sands	0.125-0.25	0.072	0.15
very fine sands	0.0625-0.125	0.109	0.11
coarse silt	0.0313-0.0625	0.165	0.084
medium silt	0.0156-0.0313	0.250	0.063

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - X_i)^2};$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (2)$$

$$NSEC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_M)^2};$$

$$TIC = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2}} \quad (3)$$

여기서, O_i 는 관측수위, X_i 는 계산수위, N 은 데이터 개수, O_M 는 관측평균값이다.

3.1 다차원 모형의 시나리오별 재현성 평가

다차원모형의 경계조건에 따라 설정된 시나리오별 재현성 평가 및 모형별 이포수위표 지점에 대한 재현성 평가결과는

Fig. 9~10과 같다. Fig. 9는 시나리오별 EFDC 모형의 계산 결과를 도시한 것으로 경계조건에 따라 결과가 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 CASE 3(EFDC_3)과 같이 수위와 유량 모두 일정 수준이상의 정확도가 확보될 경우, EFDC 모형의 계산 결과의 재현성이 향상되는 것으로 나타났다. Fig. 10은 COSFIM, FLDWAV, EFDC 모형의 결과와 관측 값을 도시한 것으로, 초기 저수위시 FLDWAV의 모의 결과와 EFDC 모형의 모의 결과의 수위 추세가 유사하게 나타났다. 이는 FLDWAV의 상류단 유입유량과 수위결과를 EFDC 모형의 경계조건으로 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. 한편 초기 저수위 이후 유입유량이 늘어나면서 고수위가 형성되면 COSFIM은 관측 침투 수위보다 모의 침투 수위가 높게 나타났고, FLDWAV는 관측 침투 수위 보다 낮게 모의 침투 수위가 도출되었다. 이에 반해 EFDC 모형은 침투 수위의 재현오차가 가장 작으며 관측값이 아닌 COSFIM과 FLDWAV를 통해 산출된 수문자료를 경계조건으로 활용했음에도 불구하고 전반적으로 수리학적 해석에 대한 재현성이 높은 것으로 나타났다. EFDC 모형에 입력되는 경계조건의 정확성에 따라 결과가 상이하게 나타날 것이기 때문에 EFDC 모형의 정확성은 COSFIM과 FLDWAV 모형의 모의 결과의 정확성에 비례할 것으로 판단된다. 따라서 과거 관측 자료가 충분하지 않거나 하상변동에 의한 관측자료를 신뢰할 수 없을 경우, 적절한 수준의 재현성을 확보한 유역유출

모형과 1차원 수리학적 모형을 연계한다면 하천의 공간단위 수리특성분석이 가능할 것으로 판단된다.

각 모형별 시나리오별 이포보 수위관측소 지점의 통계적 재현성 검토결과는 Table 7과 같다. COSFIM 모의결과는 수위 유량곡선식의 오차 및 하천만곡부의 수리특성을 제대로 반영하지 못해 첨두 수위 및 유출량 감소부근의 수위가 과다하게

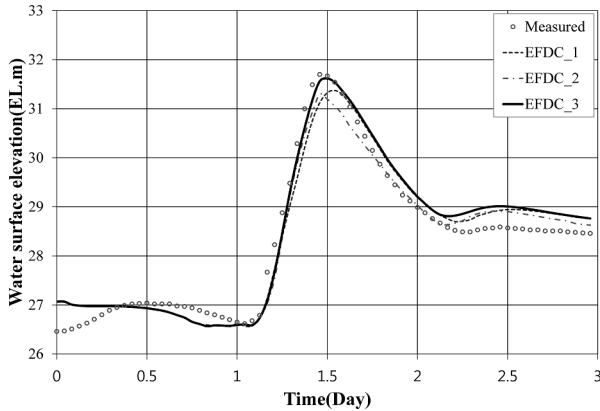


Fig. 9. Results simulated by EFDC

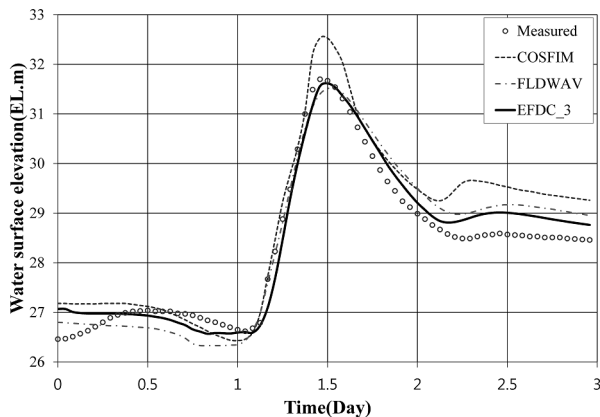


Fig. 10. Comparison of results for models

산출되어 오차량이 증가한 것으로 판단되며, FLDWAV의 경우, 첨두 수위는 실측값과 유사하게 모의되었지만 유량 감소부근의 수위가 과다 산정되어 오차량이 증가한 것으로 판단된다. Case 3(EFDC_3)을 경계조건으로 설정한 EFDC 모형의 수위에 대한 오차는 RMSE 0.287m, NSEC 0.962, TIC 0.00505 등으로 나타났기 때문에 본 연구에서 제안한 연계기법으로 수리분석을 수행할 경우, 기존의 선단위 수리분석에서 공간단위 수리분석으로 분석영역을 확장할 수 있을 것으로 판단되며 EFDC 내부에 탑재되어 있는 유사수질 모듈을 활용하여 4대강 살리기 사업 후 하천관리를 위한 다양한 해석분야에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 안정민 등(2011)은 4대강 수계 16개 다기능보 상·하류 10km 구간에 대해 다기능보 건설 전·후로 구분하여 EFDC를 구축하였기 때문에 본 연구에서 제안한 연계 기법을 이용하여 기 구축된 모형에 적용한다면 기상에서 예측되는 강우량에 따른 다기능보 주변 구간의 유량 및 수위 값을 예측 할 수 있기 때문에 다양한 의사결정을 위한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2. 공간단위 수리특성 분석 결과

다차원 모형을 이용한 이포보 부근의 수리특성분석은 유속, 수위, 전단응력을 대상으로 검토하였다. Fig. 11은 첨두 유량 시점의 EFDC 모형에 의해 계산된 공간적 수리특성결과를 도시한 것이며 Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 평면 유속분포와 수위분포를 도시한 것이다. Fig. 11(a)와 같이 가물막이 우측에서 흐름이 급변하여 하도 내 중앙에서 가장 빠른 유속이 발생하는 것을 알 수 있고 Fig. 11(b)와 같이 평면적으로 편수위가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 12에서 수치적으로 확인할 수 있다. 하도 좌안에 위치해 있는 가물막이로 부터 우안으로 갈수록 수위는 상승하며 최대 0.5 m의 수위차이가 발생하였다. 김태범과 최성욱(2009)은 이러한 편수위에 의한 수면상승은 횡방향 압력의 불균형과 이차류를 발생시키며 유속의 연직방향 분포도 일정하지 않게 만든다고 하였다. 김연수 등(2010)은

Table 7. The review of reproducibility for models

Statistics method	COSFIM	FLDWAV	EFDC_1	EFDC_2	EFDC_3
Average Error(m)	0.448	0.134	0.05	-0.018	0.085
Relative Error(m)	1.782	1.782	0.971	0.837	0.886
Average Absolute Error(m)	0.505	0.379	0.275	0.237	0.251
RMSE(m)	0.606	0.419	0.322	0.291	0.287
RRMSE	2.137	1.478	1.136	1.028	1.014
Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient(m)	0.833	0.920	0.953	0.961	0.962
Theil Inequality Coefficient	0.01058	0.00736	0.00567	0.00513	0.00505

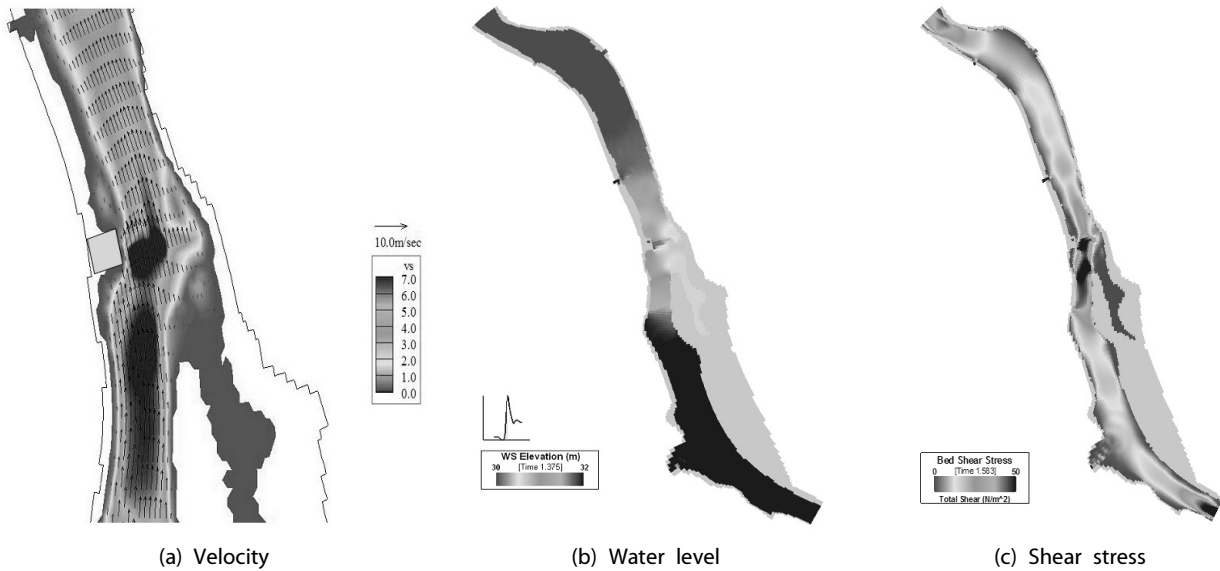


Fig. 11. Two-dimensional analysis of the results calculated by the EFDC

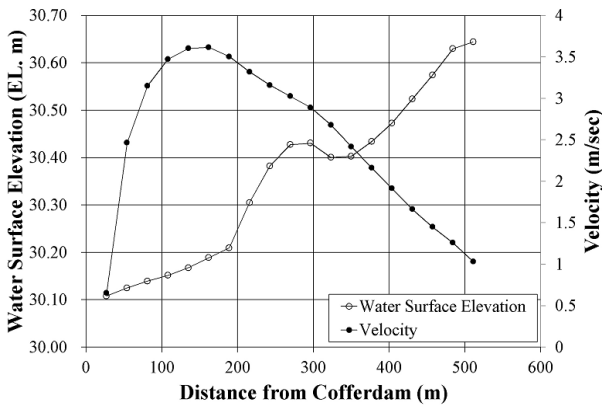


Fig. 12. Water level and velocity of Ipo construction site

편수위를 정확히 예측하는 것은 힘들지만 하천관련 각종 계획을 수립하고, 홍수로 인한 피해를 예측하기 위해서는 보다 근사한 결과 값을 제시할 수 있는 모형에 대한 연구가 필수적이라고 한 바 있다. 또한, 2009년 개정된 하천설계기준에는 하도계획시 편수위에 의한 영향을 검토해야 한다고 명시되어 있다(한국수자원학회, 2009). 이처럼 편수위에 대한 예측 및 분석이 중요해지고 있으며 많은 연구자들에 의해 연구되고 있기 때문에 본 연구기법으로 구축된 수치모형간 연계 시스템은 향후 다기능보의 효율적인 운영을 위한 의사결정자에게 편수위 뿐만 아니라 다양한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 12에 도시된 하도내 횡방향 유속의 경우에도 Fig. 11(a)에서 도시된 평면유속분포 그림에서 확인한 바와 같으며 최대 2.9 m/sec의 유속차가 발생하였다. EFDC 모형은 다음과 같은

유속을 토대로 Fig. 11(c)와 같이 하상 전단응력을 도출해주며 유사해석 및 하상변동 예측을 수행할 수 있다. Shields(1936)가 제안한 Shield 도표를 활용한다면 파라미터와 한계전단응력에 의한 유사 이송의 한계조건을 토대로 하상재료의 쓸림 현상을 간단하게 예측할 수 있다. Fig. 11(c)와 같이 가물막이 우측단면에서 발생하는 최대 전단응력은 약 50N/m²로 계산되었다. Shields 도표로 분석해보면 10~20cm 이하의 직경을 가지는 입자들은 침식되어 흐름에 연행될 것으로 판단되고 이에 하상바닥의 대부분이 자갈로 산포될 것으로 예측된다. 또한, 상·하류 구간은 홍수기를 제외한 평상시 전단응력이 약 1N/m²로 계산되어 모래가 퇴적될 것이기 때문에 직경 0.2cm 정도의 모래층 하상으로 구성될 것으로 예측된다. 향후, 대상구간의 실측된 하상재료를 확보하게 된다면 하상 분급과 장갑화에 의한 유사 이송과 마찰도 고려할 수 있기 때문에 물리적으로 발생할 수 있는 다양한 상황에 대해 분석할 수 있을 것으로 사료 된다. 또한, 우리나라 대부분의 하천은 충적하천으로서 하상과 제방은 흐름에 의해 쉽게 침식되는 사립자들로 구성되어 있기 때문에 향후 다기능보가 건설되어 운영되면 유사 차단되고 하상안정화를 위해 하천적응 및 하상변동이 발생할 것으로 판단된다. 기존의 COSFIM과 FLDWAV는 점단위 및 축선 단위 수리해석에 국한된 모형으로 본 연구에서 개발된 연계기법으로 다차원 공간단위 수리분석을 수행한다면 다기능보 운영에 필요한 다양한 수치분석결과를 공간적으로 제공할 것이며 특히, 기상관련 수치모형에서 예측된 강우량 자료를 활용하여 수문모형에 적용된다면 댐 운영 및 다기능보 운영 시나리오에 따른 다양한 수치 예측결과를 제공할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 K-water에서 기구축하여 연계 운영 중인 유역 유출모형(COSFIM), 1차원 수리모형(FLDWAV)과 다차원 공간단위 수리분석 모형(EFDC)이 연계될 수 있는 시스템을 개발하고 2010년 기습폭우 사상을 대상으로 다차원 공간단위 수리특성을 분석하였다. COSFIM과 FLDWAV에서 계산된 결과를 활용하여 경계조건을 구성하고 경계조건별 시나리오를 설정하여 개발된 연계기법의 적용성을 분석하였다.

- (1) 정량적 통계기법인 AE, RE, AAE, RMSE, RRMSE, NSCE, TIC 등을 검토한 결과, EFDC모형의 경계조건으로 관측 값이 아닌 COSFIM과 FLDWAV의 모의 결과를 활용하였음에도 전반적으로 EFDC모형의 재현성이 높은 것으로 나타났기 때문에 본 연구에서 제안한 연계시스템으로 수리분석을 수행할 경우, 기존의 선단위 수리분석에서 공간단위 수리분석으로 분석영역을 확장할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) EFDC 모형에 입력되는 경계조건의 정확성에 따라 결과가 상이하게 나타날 것이기 때문에 EFDC 모형의 재현성은 COSFIM과 FLDWAV의 재현성에 비례할 것으로 판단된다. 따라서, 신뢰성 높은 수치예측 결과를 얻기 위해서는 COSFIM과 FLDWAV의 매개변수 조정을 통해 최적의 경계조건을 산출해야 할 것으로 판단된다.
- (3) 격자기반 다차원모형을 통한 수리분석을 위해서는 많은 시간이 소요되지만 본 연구에서 제시한 기존 구축된 홍수분석 모형과 연계하는 기법을 통해 재난에 대한 선제적 예측 및 의사결정이 가능해졌으며 개발된 시스템은 향후 다기능 보 운영을 위한 다차원 공간단위 수리분석 및 홍수분석을 위해 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 대규모 토목공사 등으로 변화된 하천환경의 정량적 분석을 위한 수리, 수질, 유사, 편수위, 친수공간 안정성 검토 등 물관리 업무에 적용될 수 있을 것이며 다양한 수리해석 연구에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2012 R1A1A2007807).

References

- Ahn, Jung Min, Hur, Young Teck, Kong, Jeong Taek, Kang, Shin Uk, Kim, Hyeon Sik (2011) Development and Application of Multi-dimensional Hydrodynamics Analysis System around Weir. *Proceedings of 2007 Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 1920-1923(In Korean).
- Ahn, Jung Min, Lyu, Siwan (2012) Development of GUI System for Coupling of Multi-Dimensional Hydraulic Models. *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 14, No. 3, pp. 353-363(In Korean).
- Ahn, Jung Min, Park, In Hyeok (2012) An Assessment on the Hydraulic Characteristics of a Multi-dimensional Model in Response to Measurement Resolution and Spatial Interpolation Methods. *Journal of The Korean Society for GeoSpatial Information System*, Vol. 20, No. 1, pp. 43-51(In Korean).
- Ahn, Jung Min, Park, In Hyeok, Lyu, Siwan, Hur, Young Teck (2012) Evaluation of Optimal Grid Resolution for Hydrodynamic Proper Simulation. *Journal of The Korean Society for GeoSpatial Information System*, Vol. 20, No. 1, pp. 109-116(In Korean).
- Alam, J.Md. (2003) *Two-dimensional urban flood modeling for real time flood forecasting for Dhaka City*. Bangladesh. AIT Thesis no. WM-02-06. Asian Institute of Technology, Thailand.
- B. de Saint Venant (1871) Th'eorie du mouvement non-permanent des eaux avec application aux crues des rivieres at 'a l'introduction des mar'ees dans leur lit. *Acad. Sci. Comptes Rendus Paris*, Vol. 73, pp. 147-154.
- Blumberg, A. F., Mellor, G. L. (1987) A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. *Coastal and Estuarine Science*, American Geophysical Union, Vol. 4, pp. 1-19.
- Gilles, Daniel William (2010) *Application of numerical models for improvement of flood preparedness*. Thesis, University of Iowa.
- Haile, A.T. (2005) *Integrating Hydraulic Models and High Resolution DEM (Lidar) for Flood Modeling*. Masters Thesis, International Institute for Geo-Information and Earth Observation, Netherland.
- 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, Vol. 317, pp. 63.
- Han, Kun Yeun, Kim, Keuk Soo, Park, Hong Sung, Park, Jong Keun (2007) Selection of Hydraulic Routing Technique for Dam-Break Flood Analysis. *Proceedings of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, pp. 1327-1331 (In Korean).
- Hur, Young Teck, Park, Jin Hyeog (2009) Assessment of EFDC Model for Hydrodynamic Analysis in the Nakdong River. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No 4, pp. 309-317(In Korean).
- Hur, Young Teck, Ryoo, Kyong Sik, Cha, Kee Uk (2010) 이동경계 조건을 고려한 직교곡선격자 생성 기법 소개(Introduction of the orthogonal curves grid generation technique considering moving boundary conditions). *Proceedings of 2010 Korean Society of*

- Civil Engineers*. Korean Society of Civil Engineers, pp. 2654(In Korean).
- Kang, Hyeongsik, Jang, Jae Ho, Ahn, Jong Ho, Kim, Ik-Jae (2011) Numerical Estimations of Nakdong River Flows Through Linking of Watershed and River Flow Models. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 7, pp. 577-590(In Korean).
- Kim, Kang Mo (2004) *Development of water quality analysis system incorporated to hydraulic model in Nakdong River*. Master's degree thesis, Kyungpook National University(In Korean).
- Kim, Tae Beom, Choi, Sung-Uk (2009) Simulation of Flow Characteristics in a Kinoshita Meandering Channel Using the Depth-integrated 2D Numerical Model. *Proceedings of 2007 Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 691-694(In Korean).
- Kim, Yang-Su (2010) 4대강살리기 사업 공사중 홍수예측방안 - 하도 및 하천시설물 관리-(Plan of flood forecasting during four Major Rivers Restoration - management of channel and river facilities. four Major Rivers Restoration 2nd conference. 물과미래(water and the future), Korea Water Resources Association, Vol. 43, No. 2, pp. 14-17(In Korean).
- Kim, Yon Soo, Jang, Chang-Lae, Lee, Gi Ha, Jung, Kwan Sue (2010) Investigation of Flow Characteristics of Sharply Curved Channels by Using CCHE2D Model. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 125-133(In Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2006) 한강수계 댐군 홍수 조절 연계운영시스템 모형개발 및 의사결정지원 시스템 구축 (Development of coupling operation system and decision support for flood control in the Han river basin)(In Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2008) 낙동강수계 댐군 홍수 조절 연계운영시스템 모형개발 및 의사결정지원 시스템 구축 (Development of coupling operation system and decision support for flood control in the Nakdong river basin)(In Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2009) 금강 및 섬진강수계 댐군 홍수조절 연계운영시스템 모형개발 및 의사결정지원 시스템 구축(Development of coupling operation system and decision support for flood control in the Geum and Seomjin river basin)(In Korean).
- Korea Water Resources Association (2009) 하천설계기준 해설 (Commentary of rivers design standard)(In Korean).
- Lee, Jung Kyu, Jung, Hye Young, Jang, Hong Jun (2005) Forecasting of water level rising time due to Paldang Dam Discharge. *Proceedings of 2005 Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2648-2651(In Korean).
- Lee, Sang Jin, Shin, Hyun Ho, Kim, Joo Cheol, Hwang, Man ha (2010) Flood Characteristics at Nakdong Estuary with 1 Dimensional Unsteady Model. *Journal of The Korean Environmental Sciences Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 149-155(In Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (1995a) 금사천 수계하천정비기본계획(The basic plan of stream-improvement for Geumsa stream)(In Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (1995b) 용담천 수계하천정비기본계획(The basic plan of stream-improvement for Yongdam stream)(In Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009a) 남한강 하천정비기본계획(The basic plan of stream-improvement for Namhan river)(In Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009b) 4대강 살리기 마스터 플랜(Master Plan of the Four Major Rivers Restoration Project)(In Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009c) 한강 살리기 3공구 사업 실시설계보고서(The detail design of development of residential sites for Han river 3 district)(In Korean).
- Oey, L. Y., Mellor, G. L., Hires, R. I. (1985a) A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. I: Description of the model and model simulations. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, pp. 1676-1692.
- Oey, L. Y., Mellor, G. L., Hires, R. I. (1985b) A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. III: salt flux analyses. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 15, pp. 1711-1720.
- Seo, Dong Il, Seo, Mi Jin, Koo, Myung Seo, Woo, Jae Kyun (2009) Serial Use of Hydrodynamic and Water Quality Model of the Geum River using EFDC-Hydro and WASP7.2. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 23, No. 1, pp. 15-22(In Korean).
- Shields, A. (1936) Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Vol. 26, pp. 5-24.
- Shin, Cheol Kyun, Cho, Hyo Seob, Jung, Kwan Sue, Kim, Jae Han (2004) Grid Based Rainfall-Runoff Modeling Using Storage Function Method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 11, pp. 969-978(In Korean).
- Shin, Cheol Kyun, Yoo, Yang Soo, Lee, Hyeon Lo (2003) KOWACO 홍수분석모형 개발 보고서(Development of analysis models for flood control, Korea Water Resources Corporation)(In Korean).
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review* Vol. 91, pp. 99-164.
- Syme, W.J., Pinnell, M.G., Wicks, J.M. (2004) Modeling Flood Inundation of Urban Areas in the UK Using 2D/1D Hydraulic Models. In *8th Natinal Conference on Hydraulics in Water Engineering*, Australia.
- Tetra Tech (2010) Phase 2 EFDC Model Development and Application for Hanalei Bay, Appendix 1.
- Wenping Gong, Jian Shen (2011) The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China. *Continental Shelf Research*, Vol. 31, pp. 769-788.
- Xing, F., Dehui, S. (2006) An Integrated One-Dimensional and Two-Dimensional Urban Stormwater Flood Simulation Model. In *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 713-724.
- Yang, Z., ASCE, A. M., Khangaonkar, T., ASCE, M., DeGasperi, C., and Marshall, K. (1999). Three-Dimensional Modeling of Temperature Stratification and Density-Driven Circulation in Lake Billy Chinook, Oregon. *American Society of Civil Engineers, Estuarine and Coastal Modeling*, pp. 411-425.