

# 낙동강 하구둑 주변의 수리특성 분석

## Analysis on Hydraulic Characteristics in Nakdong Estuary Barrage

신현호\*, 황만하\*\*, 강신욱\*\*\*, 이상진\*\*\*\*

Shin Uk Kang, Hyeon Ho Shin, Man Ha Hawng, Sang Jin Lee

### 요 지

하천과 바다가 만나는 하구는 자연적인 기능 뿐만 아니라 공학적인 측면에서도 매우 중요한 자원이다. 우리나라는 국토의 개발에 따른 용수 사용의 증가, 홍수재해대책 등으로 인해 한강을 제외한 4대강에 하구둑을 건설하였으며 강물과 바닷물을 인위적으로 차단하는 구조물이므로 하천의 생태적인 기능을 손상시키는 것은 불가피 하다. 하지만 이러한 단점에도 불구하고 하구둑이 건설되는 가장 큰 목적 중의 하나는 주변지역의 안정된 용수공급이다. 1987년에 완공된 낙동강 하구둑은 건설 이 후 약 20년 동안 안정된 용수공급과 효율적 운영으로 관리되어 왔지만 그동안 기상 및 수리·수문뿐만 아니라 환경적으로 크고 작은 변화가 있었다. 하천의 기수역인 하구에서 유체는 하구둑이라는 구조물이 존재하지 않을 때도 매우 복잡하게 거동한다. 하천의 유량, 지형학적 요소 그리고 조위의 상태 등 여러 가지 요인으로 인하여 비정상적으로 변화하며 이러한 하구에서 유체의 거동을 보다 더 정확하게 묘사하려면 흐름방향, 수심방향, 하폭방향의 3차원적인 해석이 필요하다. 하지만 하천과 바다를 밀도가 같은 하나의 상으로 가정하고 수행한 수문학적인 분석이나 1·2차원 수치 모형을 활용한 수리 분석 결과는 시간적·공간적으로 경제적이고 양호한 결과를 산출해낼 수 있다. 본 연구에서는 낙동강 하구둑의 수리특성을 분석하기 위하여 미국 기상청의 홍수추적모형인 FLDWAV 모형과 미수로국(WES)의 2차원 유한요소 모형인 RMA-2 모형을 활용하였으며 낙동강유역 주요 수위관측소의 실측자료를 토대로 매개변수 검정을 실시하였다. 분석결과 조위가 고려된 2차원 유속장을 구현하였으며 하구둑 유지 관리 개선에 기여코자 하였다.

**핵심용어 : 하구둑, FLDWAV모형, RMA-2모형, 완전개방**

### 1. 서론

하천의 감조부에서 유체는 하구둑이라는 구조물이 존재하지 않을 때도 매우 복잡하게 거동한다. 하천의 갈수기·평수기·홍수기 즉 담수의 유량마다 흐름의 특성이 다르고 하류는 연안이 근접해있기 때문에 조위에 따라 수위가 비정상적으로 변화한다. 또한 감조부의 지형학적인 요소에 의해서도 유체는 전혀 다른 양상을 띠기도 한다. 따라서 하구에서 보다 더 정확한 최종유출량을 계산하기 위해서는 흐름, 수심, 그리고 하폭방향의 3차원 해석이 필요하다. 하지만 하천과 바다를 밀도가 같은 하나의 상으로 가정하고 수행한 수문학적 분석이나 1·2차원 수치모의 결과들은 시간적·공간적으로 경제적이고 양호한 결과를 산출해낼 수 있다.

이러한 사실을 바탕으로 본 연구에서는 낙동강 유역의 주요 다목적댐의 유입·방류량으로 구성된 추정유량과 1·2차원 수리학적 수치모의 및 현장조사를 토대로 하구둑 수문운영 특성을 분석하고 방류량관리의 적정성을 검토하고자 한다. 다목적 댐은 안동, 임하, 합천, 남강, 운문, 밀양댐등 낙동강유역의 주요 다목적 댐이 포함되었으며 수치모의는 1차원 모형으로는 미국 기상청의 FLDWAV모형이 사용되었고, 하폭방향의 유속 분

\* 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 공동연구원 E-mail : hhshin@kwater.or.kr  
\*\* 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원 E-mail : mhhwang@kwater.or.kr  
\*\*\* 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 E-mail : sukang@kwater.or.kr  
\*\*\*\* 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 E-mail : sjlee@kwater.or.kr

포를 고려하기 위해 사용된 2차원 모형으로는 미수로국에서 개발된 RMA-2모형이 선정되었다. 적용기간은 과거 년도별 태풍이 동반된 중호우 홍수사상을 활용하였다. 하구둑에서 산정하고 있는 방류량을 수리수문학적인 분석을 통하여 검증한 연구는 국내에는 미흡한 실정이다. 추 등(2000)은 수자원 공사에서 개발한 Loopnet(Looped Network)모형과 미국기상청-NWS(National Weather Service)에서 개발된 FLDWAV모형을 수행하여 하구둑 상류지점의 실제측정을 토대로 수리학적으로 검증을 시도하였으며, 추태호(2002)는 유입부인 진동지점과 유출부인 하구둑에서 같은 시간대에 하구둑의 실제 운영상황에 맞추어 엔트로피 개념의 유량 측정방법을 도입하여 유량측정을 실시하고, 구포지점의 정확한 유입량을 위하여 구포지점의 변형된 수위-유량관계곡선식을 개발하여 제안하고 부정류 모형의 수행결과를 토대로 검증을 시도하였다. 그리고 NEDECO의 수리모형실험에 의하여 제시한 값과 실시간 유량측정결과로부터 산정된 값과 비교하여 새롭게 제안하지만 일반화하기에는 실험적용기간이 짧고 제안된 개선식도 실무활용성이 결여되는 것으로 나타났다. 보다 더 상세한 연구로 이 등(1998)은 낙동강 하류부의 감조구간에 대하여 실시간 홍수예보를 위한 수리학적 홍수추적모형의 적용성을 검토하였으며, 홍수시 감조구간내의 주요 홍수 예보지점에 대한 조위의 영향을 분석하였다.

## 2. 낙동강 하구둑 유입량방류량 분석

우리나라는 하상경사가 급하고 하상계수가 커서 강우량의 계절별 편차가 심하다. 그런 연유로 큰 하천의 상류에는 대부분 댐이 건설되어 이수와 치수 그리고 사회적인 기능까지 수행하고 있다. 본 과업에서는 낙동강 유역에 있는 다목적 댐의 유입량과 방류량 자료를 활용하고 비유량법을 적용하여 낙동강 하류에 있는 관측소인 진동 유입량과 최종 유출구인 낙동강 하구둑의 방류량을 산정했다. 낙동강 하류의 관측소 중 진동지점을 경계점으로 삼은 이유는 수문곡선의 분석결과 낙동강 하구의 조위의 영향이 밀양강 합류지점 후에 있는 삼랑진 지점까지 미치는 데다 그보다 상류에 있는 관측소 중에서 자료의 상태가 가장 양호한 지점이기 때문이다. 분석기간(2002.1~2007.12)동안 진동지점을 경계로 형성되는 낙동강 유역의 수문학적 유입량은 낙동강 홍수통제소에서 생산하는 수위-유량 관계곡선식에 의한 관측유량과 근사한 것으로 분석되었다. 아래의 그림은 2003년도 결과를 예시적으로 나타낸 것이다. 홍수기 수문곡선의 상승부에서 약간의 편차와 수문학적 유입량을 산정 시에는 도달시간 등이 고려되지 않았기에 수문 곡선 비교상에서 실제 유입량이 약간 지체된다는 것 이외에는 평·갈수기뿐만 아니라 홍수기에서도 수량적으로 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 이것으로 판단할 때 낙동강 주요 다목적댐의 유입 및 방류량자료를 활용하여 수문학적으로 추정된 하구둑 방류량의 모의 결과는 신뢰도가 있다고 판단된다.

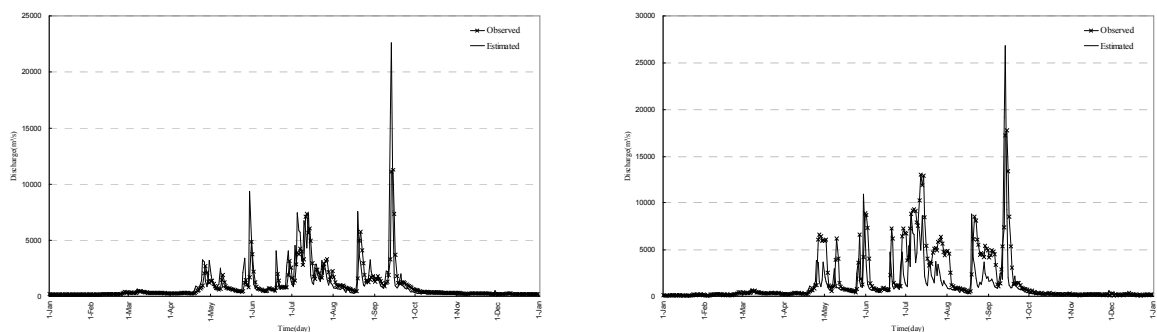


그림 1 진동지점 및 하구둑 지점에서의 수문학적 추정 유입량 비교(2003년 매미)

## 3. 수치모형을 활용한 낙동강 하구둑 방류량 분석

### 3.1 FLDWAV 모형의 개요 및 적용

FLDWAV 모형은 이전의 부정류 계산모형인 DWOPER 모형과 댐 파괴 모의 모형인 DAMBRK 모형을 결합하고 몇 가지 새로운 기능을 추가하여 미국 기상청(NWS)에 의하여 개발된 다양한 기능을 갖춘 수지형 하천수계에 대한 종합적인 1차원 부정류 계산모형이다. 모형의 지배방정식은 사용자가 지정한 시간에 따라 변하는 댐 파괴 조건 하에서 댐, 교량/둑과 같은 구조물을 통과하는 급변류를 묘사하는 내부 경계조건이 결합된 부정류에 대한 일차원 Saint-venant 방정식이다. 또한 상류단과 하류단에 적절한 외부 경계조건을 사용한다. 지배방정식의 해는 비선형의 가중 4점 음해유한차분법을 사용하여 구한다. 상류, 사류 또는 시간적, 공간적으로 두 가지 흐름 상태가 결합된 혼합류에 대한 계산이 모두 가능하다. 뉴턴유체 또는 비뉴턴유체 흐름을 모두 다룰 수 있으며, 추적대상 홍수 수문곡선은 시계열 입력자료로서 사용자가 직접 지정할 수도 있고 사용자가 지정한 댐 파괴 매개변수들로부터 모형에 의하여 생성될 수도 있다. 흐름을 조절할 능력이 있고 홍수에 의하여 파괴될 수 있는 하류 댐의 존재, 교량/제방에 의한 단면 수축, 지류 유입, 하천 사행, 하류 하천 또는 지류를 따라 위치한 제방 및 조석의 영향 등이 홍수가 하류로 전파됨에 따라 모두 적절히 고려된다. 또한 FLDWAV 모형은 사용자가 지정한 상류 수문곡선을 사용하여 토석류나 강우/융설에 의한 홍수를 추적하는데 사용될 수 있다.

본 연구에서는 하구둑 방류량의 1차원적 특성을 파악하기 위해서 위의 1차원 홍수추적 부정류모형인 FLDWAV를 사용하였으며, 대상기간은 2002년부터 2007년까지의 총 6개의 홍수기를 대상기간으로 삼았다. 그 중 최근의 사상인 2006년 태풍 예위니아를 선정하였다. 상류의 경계는 적포교 수위관측소이며 하류의 경계는 하구둑 하류에 위치하고 있는 명지 수위관측소를 선정하였다. 실제 발생한 과거 홍수사상을 이용하여 모형을 수행하기 위해서 과거사상을 적용하였으며 상류의 경계부터 하류까지 지류의 유입은 한국수자원공사 물관리 센터에서 개발된 댐군 홍수조절 연계운영 모형(COSFIM)으로 산정하였다. 실제 과거 홍수사상을 모의하기 위해서는 각 지류별로 수위관측소의 실측수위를 바탕으로 유량을 산정하여 대상기간에 적용을 해야 하지만 낙동강 유역의 수위관측소의 부재와 각 지류의 하천단면 등의 자료가 부족하여 모형으로 값을 산출해내었다. 본 과업에서는 구간 내에 있는 수위관측소 중에서 진동과 삼랑진에서 검정을 수행하였으며 아래의 그림 2과 같다.

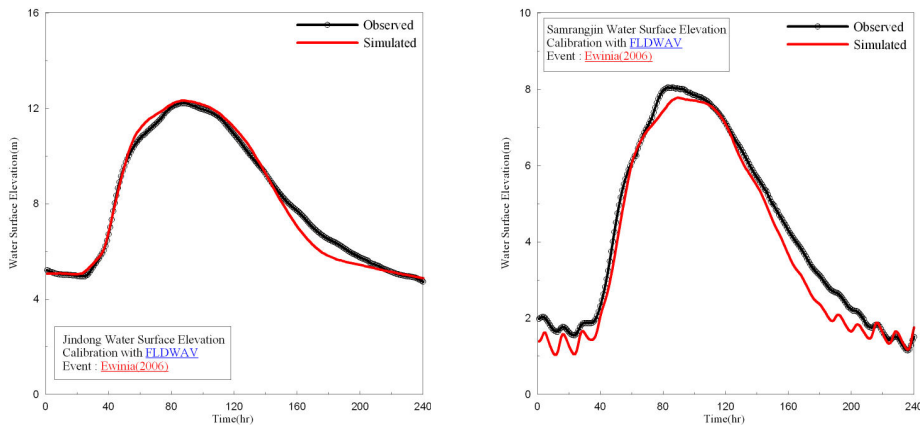


그림 2 진동, 삼랑진 수위관측소의 검증

그림에서 나타난 바와 같이 모형은 대체적으로 수문곡선이 하강하는 부분에서 약간의 오차를 제외하고는 실측치와 거의 일치하는 경향을 보인다. 그리고 삼랑진의 경우에는 저유량일 때 조석의 영향을 받는 구간과 상승과 하강이 대체적으로 경향을 잘 따라간다. 앞서 언급했듯이 조석의 영향을 받는 하구에서는 하천의 흐름방향, 하폭방향 그리고 수심방향의 3차원적인 거동이 일어나므로 정확하게 담수의 유량을 산정하기가 쉽지가 않다. 하지만 흐름방향의 홍수추적 모형의 결과는 대체적으로 실측치를 잘 따라가고 있다. 낙동강 하류 주요 수위 관측소의 수위 검정 결과를 토대로 할 때 FLDWAV 모형을 통한 결과값은 합리적인 결과를 나타내고 있다.

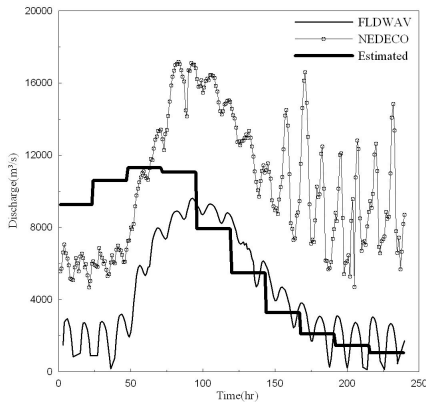


그림 3 방류량의 비교(2006)

그림 4는 모형의 수행결과와 수문학적 추정유입량, 그리고 하구둑에서 산정하고 있는 방류량을 나타낸 그래프이다. 대체적으로 수문방류량이 수치 모의를 통해 계산된 방류량보다 약 3000m<sup>3</sup>/s~8000m<sup>3</sup>/s 큰 것으로 분석되었다. 홍수 하강시 수문방류량은 일반적인 자연하천의 하강 곡선을 나타내지 않고 있다. 이것은 침두이 후 담수의 유량이 줄어들지만 조위에 의한 영향 때문에 수위가 지속되고 수위를 주요 매개변수로 산정되는 수문방류량 공식에 그 수위가 직접 반영되기 때문에 방류량 값이 크게 산정된 것으로 사료된다. 침두 이 후 조위영향으로 수위는 상승 또는 유지될 수 있지만 그것이 반드시 실제 방류량이 많아지는 것은 아니다. 따라서 낙동강 하구와 같은 조위영향을 직접 받는 특이한 천이구역에서는 수위-조위를 연계한 수문 방류량 산정 또는 정확한 유속측정 방안이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 2차원 모형의 개요와 적용

최근 들어 하천의 2차원 흐름해석에는 SMS(Surface-water Modeling System)통합모형이 상용화되어 있으며 TABS-MD라는 프로그램으로 사용자가 이용하기 편리하게 GUI를 제어한다. 하천의 하구부 해석에는 일반적으로 통합모형에 내장되어 있는 RMA-2와 HIVEL-2D 모형이 사용된다. 본 과업에서는 RMA-2 모형이 사용되었다. RMA-2모형은 2차원 수심적분 자유수면 유한요소 프로그램으로 미육군공병단(USCE)에서 처음으로 개발되었으며, 현재 WES(Waterway Experimental Station)에 의해서 지속적으로 수정·보완되어지고 있다. RMA-2 모형은 하중도를 포함한 하천수로구간의 흐름, 본류와 지류의 합류부, 유수단면의 확대 및 축소를 포함한 하천구간의 흐름, 만곡수로등 하천의 수리 동역학적 계산에 널리 이용되고 있다. 모형의 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes방정식을 수심 적분한 2차원 천수방정식(2-Dimensional Shallow Water Equation)이다. 2차원 천수방정식은 연속방정식과 x와 y방향의 운동량 방정식으로 구성된다. 지배방정식은 아래의 수식과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_o}{\partial x} \right) + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_o}{\partial y} \right) + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (3)$$

여기서  $x$ ,  $y$ 는 흐름방향, 흐름에 직교한 방향의 좌표(또는 거리),  $u$ ,  $v$ 는  $x$ 와  $y$ 방향 유속,  $h$ 는 수심,  $a_o$ 는 하상표고,  $\epsilon$ 은 와점성계수(eddy viscosity),  $C$ 는 Chezy계수이다. RMA-2 모형의 계산은 전형적인 Galerkin 가중잔차법을 채택하고 있으며 완전음해법(fully implicit method)에 의해 형성된 행렬을 Newton-Raphson법으로 해석하므로 비선형 해석에 있어서 정확한 해를 제공한다. 이 때 프로그램에서 행렬의 해는 front-type 해법이 사용되며 이 모형은 상류(subcritical flow)에만 적용이 가능하다. RMA-2 모형을 사용하여 홍수기를 모의하기 위해서는 하천의 부정류에 대한 이해와 경계조건, 그리고 젖음/마름기법에 대한 이해가 필수적이다. 다시 말하면 평면 2차원으로 측방향 경계를 구성하여 격자를 생성시키며 진행할 때

수문곡선의 시작부분에서 물이 흐르지 않던 지역이 수문곡선의 상승부와 첨두치를 지나 특정 하강부까지는 물이 흐르는 홍수터로 변할 수 있기 때문이다. 여기서 RMA-2 모형은 범람과정의 운동성에 관한 가정을 하게 된다. 만약 홍수기시 주수로 유체의 흐름에 의한 거동보다 배수구에 의한 물의 회귀와 이송의 영향이 큰 흐름이라면 이 모형은 적합지 않은 모형이 될 것이다. 하지만 본 연구에서 진행되는 사상은 분류와 지류의 물의 이송으로서 범람과정이 발생하므로 적합한 모의 수행이라고 판단할 수 있다. 범람과정의 운동성에 관한 모의를 일반적으로 RMA-2모형에서는 MP 기법과 요소제거 기법을 통하여 경계조건을 처리한다. 모의 시간은 총 150시간으로 와점성계수를 매개변수로 하여 검증을 실시하였다. 분석결과 하구둑이 완전개방하고 하천의 유량이 하구둑을 통과하면서 조위에 의해 유량이 진동하는 모습을 관찰할 수 있었다. 구조물의 하류방향 후미쪽에 사수역이 발생했으며 그 영역 안에서 후류가 발생해 유체가 회전하는 현상을 관찰할 수 있다. 하구둑 접근유로라고 할 수 있는 상류 2~3km부근에는 하도의 축소로 인하여 최대유속이 관찰되었다. 자연하천의 경우 통상적으로 홍수위 상승시에 유량이 많아지는 만큼 하강시에는 유속이 줄어들지만 하구의 경우 조위영향이 유속인자에 직접적인 영향을 끼치고 있다. 이것은 1차원 모의 결과에서 분석되었듯이 조위영향으로 수위는 상승 또는 유지될 수 있지만 그것이 반드시 방류량이 많아지는 것은 아니라는 결과를 뒷받침하고 있다.

그림 4 격자망 및 지형도

영역 안에서 후류가 발생해 유체가 회전하는 현상을 관찰할 수 있다. 하구둑 접근유로라고 할 수 있는 상류 2~3km부근에는 하도의 축소로 인하여 최대유속이 관찰되었다. 자연하천의 경우 통상적으로 홍수위 상승시에 유량이 많아지는 만큼 하강시에는 유속이 줄어들지만 하구의 경우 조위영향이 유속인자에 직접적인 영향을 끼치고 있다. 이것은 1차원 모의 결과에서 분석되었듯이 조위영향으로 수위는 상승 또는 유지될 수 있지만 그것이 반드시 방류량이 많아지는 것은 아니라는 결과를 뒷받침하고 있다.

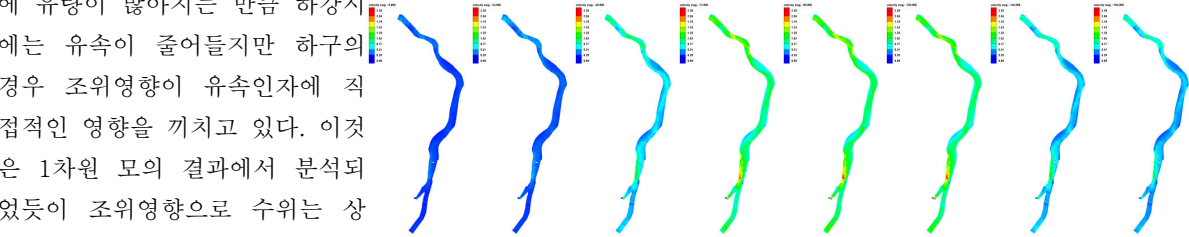


그림 5 모의 구간 2차원 유속장 분포

#### 4. 결론

본 연구의 주요 연구내용에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다. 주요 다목적댐의 유입량 및 방류량 자료를 활용하여 비유량법을 적용하여 낙동강 주요 하류부 수위관측소인 진동지점과 최종 유출구인 낙동강 하구둑의 수문학적 추정 유입량을 산정하였다. 산정된 유입량은 실측된 결과와 비교·분석함으로써 수문학적으로 산정된 결과들에 대한 적정성을 판단하는 기준으로 활용하였다. 1차원 부정류 수치모형을 활용하여 낙동강 하류부 모의를 수행하였다. 모형은 미국기상청의 FLDWAV모형이 사용되었으며 총 6개의 홍수사상에 대하여 실측자료를 중심으로 경계조건을 구성하고 결과값에 대해서 운동량방정식의 마찰항에 포함되어 있는 조도계수를 이용하여 검증을 실시하였다. 그 결과 수문방류량은 수치모의의 방류량에 사상별로 3000~8000m<sup>3</sup>/s정도 크게 산정하고 있었다. 2차원 유한요소 모형을 이용하여 하구둑 주변의 유속장을 구현하였다. 모의 결과 하구둑 지점의 유속은 조위의 영향에 의해 진동하는 패턴을 나타내었다. 그리고 조위의 영향으로 수위는 상승 또는 유지될 수 있지만 그것이 반드시 방류량이 많아지는 것은 아닌 것을 알 수 있으며 하도의 축소로 인하여 하구둑 상류 2~3km 부근에서 최대의 유속이 관찰되었다.

#### 참 고 문 헌

1. 낙동강 하구둑 운영관리 매뉴얼(2004, 한국수자원공사)
2. 하구둑 조위를 고려한 낙동강 하류부 수리학적 하도추적 모형 연구(한국수자원공사, 2004)
3. 추태호, 김현식, 김만식, 김철구, 감조하천에서의 수위-유량관계곡선식에 관한 연구, *한국수자원학회 2000년도 학술발표회 논문집*, pp. 535-540 (2000).

4. Chow, *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, Singapore, pp. 70-74 (1986).
5. Godin, G., Modification of river tides by the discharge, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.* **3**(2), pp. 257-275 (1985).