

연구논문

2차원 수치모형을 이용한 수공구조물 설치에 따른 수리학적 흐름 영향 평가

최승용* · 남기영** · 한건연***

국립방재연구원 분석평가센터 책임연구원*, SK건설**

경북대학교 건축·토목공학부 교수***

(2011년 10월 13일 접수, 2011년 11월 11일 승인)

Assessment for Characteristics of Flow According to Installing Hydraulic Structures by 2-D Numerical Model

Choi, Seung Yong* · Nam, Ki Young** · Han, Kun Yeun***

National Disaster Management Institute, Seoul, 121-719, Korea*, SK E&C**

School of Architecture & Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea***

(Manuscript received 13 October 2011; accepted 11 November 2011)

Abstract

Frequently occurring flood and drought due to abnormal climate and global warming have increased the necessity of an effective water resources control and management of river flows. The various hydraulic structures are constructed in river as part of an effective water resources management. It is very important to analyse characteristics of flow according to installing hydraulic structures in this situations. The objective of this study is to investigate the hydraulic behaviors of flow considering affections of hydraulic structures using 2-D numerical model. To do this, both RMA-2 model and developed RAM2 model are used to analyse flow phenomena before and after installation of hydraulic structures in Nakdong river. As a result of, the water surface elevation at upstream regions increased about 22cm~66cm and the velocity around the structures sharply increased after installation of structures. The measures for the rise of water surface at upstream and local scour due to high velocity around the structures must be established when the structures is constructed.

Keywords : hydraulic structures, characteristics of flow, RMA-2 model, RAM2 model

1. 서론

최근의 기후변화는 강우강도의 증가로 인한 홍수의 빈도 및 홍수량의 증가로 인한 홍수 피해의 증가를 유발하고 있으며, 갈수기 및 평수기의 유량감소로 인한 수질의 악화와 부유사의 증가로 인한 피해가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 피해에 대한 대책으로는 기후변화를 유발하는 전 지구적인 온난화의 대책이 가장 선행되어야 하겠으며, 또한 이수 및 치수를 위한 정확한 하천해석을 통한 하천관리가 매우 중요한 실정이다.

우리나라의 경우 국토의 약 70%가 산지로 이루어진 급경사 지형이라서 하상의 평균 경사가 급하며 하상계수가 크게 나타나고 소하천에서의 돌발홍수가 빈발하게 일어나고 있다. 또한 강수가 빠르게 유출되고 유량의 변동폭이 크고 홍수 및 가뭄에 열악한 조건을 가지고 있다. 또한 우리나라의 연평균 강수량은 1,250mm로 세계 평균의 1.4배인 반면 계절별 강수량은 총강수의 2/3가 6~9월에 집중되어 있어 계절에 따른 집중현상이 뚜렷하고 지형 특성상 유역내 침투시간이 비교적 짧아서 지하수의 공급이 부족하여 효율적인 수자원의 관리가 어려운 실정이다.

이러한 이유로 효율적인 수자원 관리의 일환으로 댐, 저류지, 보 등과 같은 수공구조물이 하천내에 많이 설치되어 있으며 현재 4대강 살리기 사업에서도 16개의 보가 추가적으로 설치되고 있다. 현재 우리나라에서는 하천의 개수사업 및 교량, 제방, 보 등과 같은 수공구조물 설계시 계획 홍수위를 산정하는데 있어 실무에서는 1차원 모형인 HEC-RAS 모형이 널리 이용되고 있다. 그러나 HEC-RAS 모형과 같은 1차원 모형의 경우 모형의 한계로 인해 하폭의 확대, 축소, 만곡부 및 보 등과 같은 수공구조물 존재시 하천횡단면에 따른 수위 및 유속변화를 표현하는데 많은 어려움이 있으며, 이런 한계로 인해 1차원 모형만을 이용하여 하도 및 하천공간계획을 수립하기란 사실상 불가능하다. 따라서 효율적인 하천 및 수자원 관리를 위해서는 구조물 등의 영향을 효과적으로 파악할 수 있는 2차원 흐름해석

이 꼭 필요하다.

국외에서는 2차원 수치모형에 대한 많은 연구가 진행된 상태로 Akanbi와 Katopodes(1988)는 초기 마름 부분에 대한 홍수와 전달을 모의하기 위해서 이동격자 유한요소법을 개발하였다. 하천에서의 동역학적 흐름해석을 위한 2차원 유한요소법의 적용은 King과 Norton(1978), Norton(1980) 등이 유속항에 대하여서는 2차 보간함수를, 수심항에 대하여는 선형 보간함수를 사용한 수치모형을 개발하여 적용하였다. Berger(1993), Stocksill과 Berger(1994)는 각각 만곡부에서의 흐름해석과 댐 여수로 등과 같은 구조물 근처의 고속유속에서의 흐름해석을 위해서 Petrov-Galerkin 기법을 적용하였고, Alam과 Bhuiyan(1995)는 collocation기법에 의한 댐 파괴류 해석을 실시하였으며, Zienkiewicz 등(1996, 1999)은 유체이송에 대한 보다 효율적인 알고리즘으로서 CBS(Characteristic Based Split)에 대해서 연구하였다. Stocksill과 Berger(2000)는 수공구조물의 영향을 고려한 2차원 흐름해석을 실시하였고, Syme(2001)은 만곡부와 수공구조물에 대해 2차원 모형을 적용하여 모의를 수행하였다.

국내에서 유한요소법을 이용한 2차원 수치 모형에 관한 연구로는 윤태훈(1982)이 각각 항만내 토사 이동 예측과 단면 급확대에 의한 흐름영향을 분석하기 위해 적용하였고, 백중철 등(1996)은 자연섬 보존을 위한 수공구조물 설치에 따른 흐름 특성을 분석하였다. 한건연과 김상호(2000)는 2차원 이송-확산해석을 위한 유한요소모형을 개발하고 이를 낙동강 유역에 적용하여 해석한 바 있다. 김상호 등(2009)은 자연하천에서 마름/젖음을 처리를 위한 유한요소 기반의 격자재구성 기법을 개발하여 적용하였으며, 안경훈 등(2009)은 한강하구지역의 구조물 설치에 의한 수리 특성을 분석하였고, 여창건 등(2009)은 하도 육역화 방지를 위한 수공구조물에 대한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 효과적인 하도 및 하천 계획을 통한 수자원 관리를 위한 기초자료를 제공함은 물론,

하천내 보 설치에 따른 수리학적 흐름 영향을 분석하기 위해 연구대상인 낙동강 유역에 대해 2차원 수치모형을 이용하여 모의하고자 하였다. 본 연구에서 선정한 2차원 모형으로는 유한요소법에 기반을 둔 RMA-2 모형과 현재 국내에서 상용화를 목적으로 개발중에 있는 2차원 흐름 해석 모형인 RAM2 모형을 선정하여 모의를 수행하였으며 실측치와 비교하여 모형의 적용성을 검토하고자 하였다.

II. 기본 이론

1. RMA-2 모형

1) 지배방정식

본 연구에서 사용된 RMA-2 모형은 2차원 흐름 영역에서 자유수면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하고, Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한요소해를 계산하며, 정상류 뿐 만 아니라 부정류에서의 모의도 실행할 수 있다. RMA-2 모형은 비보존형의 2차원 질량 연속방정식과 2차원 Navier-Stokes의 힘-운동량 방정식을 난류영역을 고려하기 위하여 Reynolds 형태로 나타냈으며 수심평균치를 취하고, Coriolis항, 지류유입항, 바람 응력항을 포함한 후 양변에 를 곱하여 2차원으로 고려하면 연속방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

또한, 수심평균치를 취하고, Coriolis항, 지류유입항, 바람응력항을 포함한 후 양변에 를 곱하여 2차원으로 고려하면 X, Y방향 운동량방정식은 식 (2)~(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \rho \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{g}{C^2} u |V| + uq_s - \Omega v h \right) - h \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x}) \\ & - h \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y}) - W_x = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \right) \right)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{g}{C^2} v |V| + vq_s - \Omega u h \right) - h \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_{xy} \frac{\partial v}{\partial x}) \\ & - h \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y}) - W_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

2) 유한요소기법

RMA-2 모형은 가장 고전적이고 단순한 유한요소기법인 Bubnov-Galerkin 기법을 사용하였는데 이 기법에서 가중함수를 보간함수와 동일한 것으로 놓고 해석한다. 이 기법은 특성파의 전달 양상을 고려하지 않고 모의하므로 많은 경우에 해의 불안정성을 야기한다.

그러므로 RMA-2 모형에서는 Bubnov-Galerkin 기법의 안정성을 부여하기 위해서 대상영역을 사각형 및 삼각형 요소로 구분하고 유속에 대해서는 이차유속함수를, 수심에 대해서는 선형보간함수를 적용하는 혼합보간기법을 다음과 같이 적용하였다.

$$U = [N]\{u\}, V = [N]\{v\}, H = [M]\{h\} \quad (4)$$

여기서, U 와 V 는 각각 x, y 방향의 유속, H 는 수심, N 은 이차 보간함수, M 은 선형보간함수를 나타낸다.

Bubnov Galerkin 기법은 고차항을 포함하고 있으므로 차수를 줄이고 적절한 경계조건을 도입하면, 식 (5)~(7)과 같이 기술된다.

$$f_x = \int_A M^T \left[\rho \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} + \frac{g}{C^2} u |V| + uq_s \right) \right) \right. \quad (5)$$

$$\left. - \left(\Omega v h - W_x \right) \epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \epsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + N_x^T \left[\epsilon_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} - \rho g \frac{h^2}{2} \right] + N_y^T \left[\epsilon_{xx} h \frac{\partial u}{\partial y} \right] dA - \int N^T h \epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} S_x dS - \int N^T h \epsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} S_y dS$$

$$f_y = \int_A M^T \left[\rho \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial z_0}{\partial y} + \frac{g}{C^2} v |V| + vq_s \right) \right) \right. \quad (6)$$

$$\left. - \left(\Omega u h - W_y \right) \epsilon_{xx} \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \epsilon_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + N_x^T \left[\epsilon_{xy} h \frac{\partial v}{\partial x} \right] + N_y^T \left[\epsilon_{xx} h \frac{\partial v}{\partial y} - \rho g \frac{h^2}{2} \right] dA - \int N^T h \epsilon_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} S_x dS - \int N^T h \epsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} S_y dS$$

$$f_c = \int_A M^T \left[h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} - q_s \right] dA \quad (7)$$

2. RAM2 모형

1) 지배방정식

RAM2 모형에서는 2차원 천수방정식의 해를 구하기 위하여 RMA-2와는 다르게 보존형의 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였다. 지류유입에 대한 고려는 연속방정식에 포함하였고, 운동량방정식에서 바람으로 인한 응력과 Coriolis 가속도와 같은 항들은 포함하고 있지 않는데, 그 이유는 적용에 있어서 그러한 힘들에 의한 영향은 다른 항의 영향에 비하여 작게 나타나므로 생략하였으며, 이러한 항들은 대해서는 어떠한 항도 계산상의 어려움이 작기 때문에 이러한 항들이 요구될 경우 기본방정식에 쉽게 추가될 것으로 예상된다.

수심평균치를 취한 2차원 천수방정식은 자유수면을 가진 유체의 운동을 기술하는 3차원 Navier-Stokes 식을 수심방향으로 적분함으로써 유도될 수 있는데 이를 위해서는 연직방향의 가속도항은 무시하여 정수압 분포로 처리하는 가정이 필요하다. 이러한 가정하에 지배 방정식을 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + i = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + g \frac{\partial(h^2/2)}{\partial x} = gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + g \frac{\partial(h^2/2)}{\partial y} = gh(S_{oy} - S_{fy}) \quad (10)$$

여기에서 h 는 흐름 수심을 나타내고 u, v 는 x, y 방향으로의 유속을 나타낸다. 또한 S_{ox}, S_{oy} 는 x, y 방향으로의 바닥 경사 성분을 나타내고, S_{fx}, S_{fy} 는 x, y 방향으로의 수리학적 저항을 나타내며 i 는 침투능을 나타내고 g 는 중력 가속도 성분을 나타낸다. 만약 Manning 공식이 적용된다면 마찰 경사 성분은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{fx} = \frac{n^2 u(u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v(u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} \quad (11)$$

또한 $S_{ox} = -\frac{\partial z_0}{\partial x}$, $S_{oy} = -\frac{\partial z_0}{\partial y}$ 라고 쓸 수 있다.

2) 유한요소기법

유한요소기법에 있어 가중함수의 선택에 따라 Galerkin 기법은 다양하게 분류할 수 있게 된다. RMA-2 모형과 RAM2 모형의 차이점 중 가장 큰 것이 적용하는 유한요소기법인데 RAM2 모형에서는 형상함수와 동일한 가중함수를 선택하는 고전적인 Bubnov-Galerkin 기법을 사용하는 대신 특성의 전파양상을 고려하여 상향가중 매트릭스를 가지는 불연속 함수를 사용하는 SU/PG 기법을 적용하였다. 또한 고차요소에 대해서 RAM2 모형에서는 혼합보간기법이 아닌 요소의 차수와 동일한 형태의 보간함수를 적용하여 선형요소에 대하여 식 (12)와 같이 나타내었으며, 2차요소에 대하여 식 (13)과 같이 나타내었다.

$$U = [M]\{u\}, \quad V = [M]\{v\}, \quad h = [M]\{h\} \quad (12)$$

$$U = [N]\{u\}, \quad V = [N]\{v\}, \quad h = [N]\{h\} \quad (13)$$

여기서, U 와 V 는 각각 x, y 방향의 유속, h 는 수심, N 은 이차 보간함수, M 은 선형보간함수를 나타낸다. SU/PG 기법은 2차원의 경우 식(14)과 같은 형태의 가중 함수를 가진다.

$$W_i = N_i + \alpha \Delta x W_x + \frac{\partial N_i}{\partial x} + \alpha \Delta y W_y + \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad (14)$$

2차원의 x, y 방향 유체이송 매트릭스는 식(15)과 같다.

$$W_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^2 - U^2 & 2U & 0 \\ -UV & V & U \end{bmatrix}, \quad W_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -UV & V & U \\ c^2 - U^2 & 0 & 2V \end{bmatrix} \quad (15)$$

SU/PG 기법의 적용을 위한 연속 방정식과 운동량 방정식인 식은 시간항에 대해서 차분화시킨 식을 정리하면 식(16)~(18)과 같다.

$$E_1 = \alpha h^{\widehat{n+1}} - \beta + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \quad (16)$$

$$E_2 = \alpha p^{\widehat{n+1}} - \beta + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) \quad (17)$$

$$+ gh \frac{\partial z_0}{\partial x} + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}}$$

$$E_2 = \alpha p^{\widehat{m}+1} - \beta + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial y} + gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} \quad (18)$$

식에 필요한 미분항을 정리하면 식(19)~(20)과 같다.

$$E_2 = \alpha p^{\widehat{m}+1} - \beta + \frac{\partial p}{\partial x} 2u + \frac{\partial h}{\partial x} (gh - u^2) + \frac{\partial p}{\partial y} v + \frac{\partial q}{\partial y} u - \frac{\partial h}{\partial y} uv + gh \frac{\partial z_0}{\partial x} + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} \quad (19)$$

$$E_3 = \alpha q^{\widehat{m}+1} - \beta + \frac{\partial p}{\partial y} 2v + \frac{\partial h}{\partial y} (gh - v^2) + \frac{\partial p}{\partial x} v + \frac{\partial q}{\partial x} u - \frac{\partial h}{\partial x} uv + gh \frac{\partial z_0}{\partial y} + gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{7/3}} \quad (20)$$

연속 방정식과 방향의 운동량 방정식을 SU/PG 기법에 대해서 적용하면 식(21)과 같은 유한요소식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \alpha \Delta x [W_x] \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \alpha \Delta x [W_y] \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (21)$$

III. 모형의 검증

구조물 설치에 따른 흐름 특성을 살펴보기 전에 본 연구에서 모의를 위해 선정한 RMA-2 모형과

RAM2 모형을 실제유역에 대하여 수치모의를 수행하여 실측치와 비교함으로써 모형의 적용성을 검토하고자 하였다. 본 연구에서 수치모형의 검증을 위한 대상유역으로는 낙동강유역의 달성보 구간과 왜관지구 두 곳을 선정하였다.

1. 달성보 구간

1) 대상구간

본 연구의 대상유역은 4대강 살리기 사업이 진행 중인 달성보 신설구간이다. 전체 달성보 구간은 그림 1과 같이 대구광역시 달성구 구지면 수리리부터 대구광역시 달서구 파호동(좌안기준)까지 총 연장 38.02 km에 이르는 하천정비 및 다기능 보(달성보) 신설구간이다.

모의 구간은 화원 수위관측소부터 현풍 수위관측소까지 약 18km에 이르는 구간이다. 그림 2(a)는 적용 대상유역의 평면도를 나타내고 있으며 모의를 위한 2차원 격자의 구성을 위해 낙동강하천정비기본계획의 측량 자료와 GIS프로그램을 이용하여 입력자료의 구축을 위한 수치지도를 작성하여 그림 2(b)와 같은 2차원 유한요소망을 구성하였다.

2) 경계조건의 선정

검증을 위한 적용 사상으로 태풍 ‘에위니아’ 내습시의 홍수를 선정하였다. 태풍 에위니아는 7월 1일 오전 3시에 미국 괌 남서쪽 약 1,010km 부근 해



그림 1. 달성보 구간

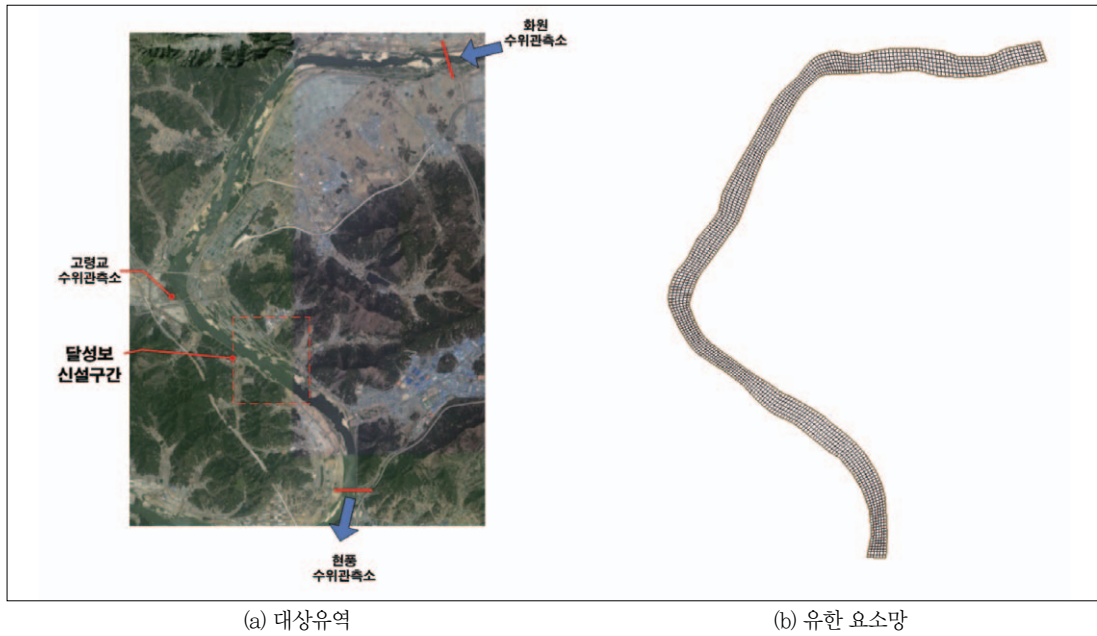


그림 2. 대상구역 및 유한요소망

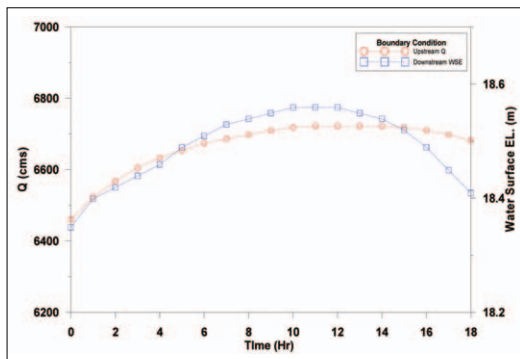


그림 3. 경계조건

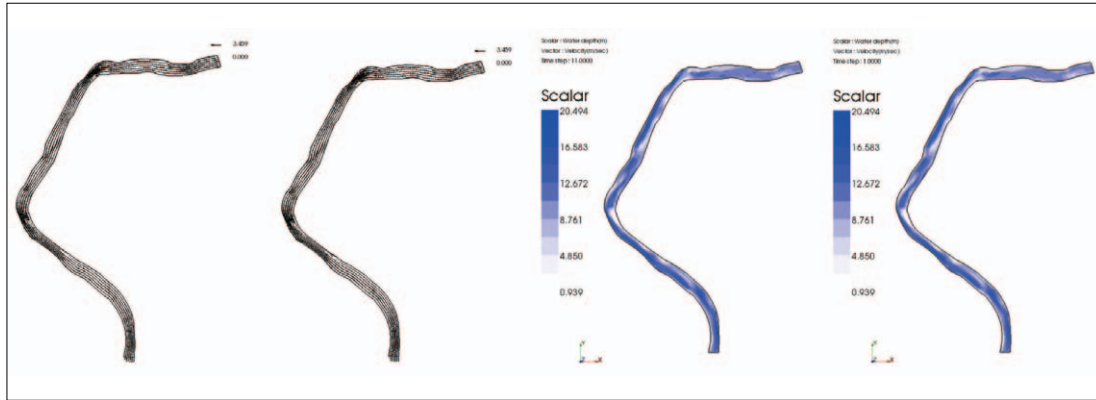
상에서 발생하였으며 태풍 상륙 전후로 장마와 집중호우가 동반되며 큰 피해가 발생했다. 2006년 7월 11일 04시에서 2006년 7월 11일 10시까지 18시간에 걸쳐 부정류모의를 실시하였으며 대상구간의 상·하류단 경계조건은 낙동강 홍수통제소에서 제공하는 실측수위를 이용하여 상류단 경계조건은 화원 수위관측소에서 측정된 실측수위 값을 수위유량 관계곡선식을 이용하여 산정된 유량을, 하류단 경계조건은 현동수위관측소의 실측수위 값을 이용하였다. 모의 수행 결과의 검증은 대상구간내의 고령교 수위관측소의 실측 수위를 이용하여 검증을 실

시하였다. 모의수행을 위한 계산시간 간격은 1시간, 총 모의 시간은 18시간으로 하였다. 본 수치모의에 사용된 경계조건은 그림 3과 같다.

3) 모의결과

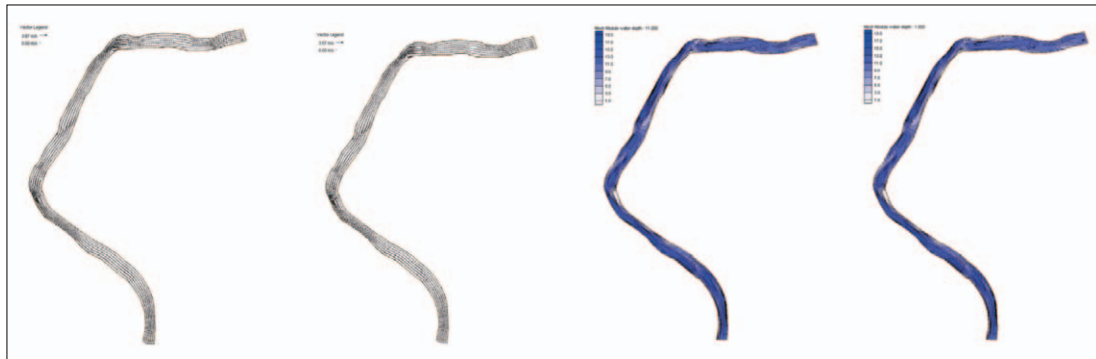
그림 4는 본 연구에서 개발된 RAM2 모형의 모의 시작 후 1시간과 1시간 후의 유속벡터도와 등수심도를 나타내고 있으며 그림 5는 동일한 구간에 대한 RMA-2 모형에 대한 모의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 두 모형의 결과가 전체적인 흐름양상에 있어서는 비슷하게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 하천의 만곡부나 좁아지는 부분에서 유속이 빠르게 나타나는 등 비교적 지형에 대하여 합리적으로 흐름 양상을 모의하는 것으로 판단된다.

개발 모형인 RAM2 모형과 RMA-2 모형을 좀더 자세하게 비교 검토하기 위하여 그림 6과 같이 고령교 수위관측소 지점의 실측수위와 두 모형의 모의 결과를 도시하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 모의 시간에 대해 RAM2 모형과 RMA-2 모형의 모의결과가 실측수위와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 두 모형간의 정확



(a) 유속벡터도(1시간) (b) 유속벡터도(11시간) (c) 등수심도(1시간) (d) 등수심도(11시간)

그림 4. 모의 결과(RAM2 모형)



(a) 유속벡터도(1시간) (b) 유속벡터도(11시간) (c) 등수심도(1시간) (d) 등수심도(11시간)

그림 5. 모의 결과(RMA-2 모형)

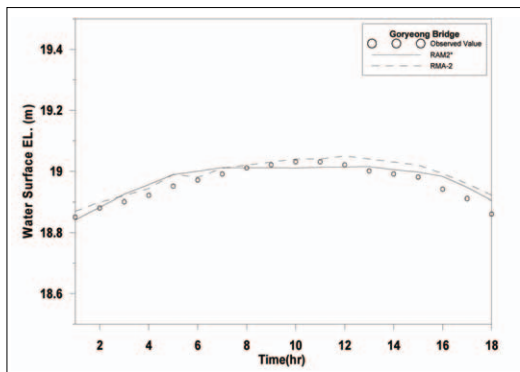


그림 6. 실측치와 RAM2/RMA-2 모형의 비교(고령교 지점)

도 차이를 육안으로 명확하게 판단하기는 어려우나 RAM2 모형이 RMA-2 모형보다 실측수위와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

두 모형의 정확도를 정량적으로 판단하기 위하여

다음과 같은 통계 오차를 산정하여 그 결과를 표 1에 나타내었다.

$$L_1\text{오차: } \|e\|_{L_1} = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{\psi_{\max}} \sum_{i=1}^m |e_{i,j}| \right) \quad (22)$$

$$L_2\text{오차: } \|e\|_{L_2} = \left[\frac{1}{m} \left(\frac{1}{\psi_{\max}^2} \sum_{i=1}^m |e_{i,j}|^2 \right) \right]^{1/2} \quad (23)$$

$$L_{\infty}\text{오차: } \|e\|_{L_{\infty}} = \frac{1}{\psi_{\max}} \max |e_{i,j}| \quad (24)$$

$$\text{평균제곱근 오차: } \|e\|_{RMS} = \left[\frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m |e_{i,j}|^2 \right) \right]^{1/2} \quad (25)$$

$$\text{평균오차: } \|e\|_{MS} = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m |e_{i,j}| \right) \quad (26)$$

여기서, e 는 근사치 ψ 와 정확치 $\hat{\psi}$ 의 차이($e_{i,j} = \psi_{i,j} - \hat{\psi}_{i,j}$), m 은 자료수, ψ_{\max} 는 ψ_i 의 최대값을 나타낸다.

표 1은 개발 모형인 RAM2 모형과 RMA-2 모형

표 1. 통계오차(고령교)

	L_1 error	L_2 error	L_∞ error	RMS error	Mean error
RAM2 모형	1.10×10^{-3}	1.30×10^{-3}	2.30×10^{-3}	2.11×10^{-2}	2.49×10^{-2}
RMA-2 모형	1.40×10^{-3}	1.70×10^{-3}	3.20×10^{-3}	2.71×10^{-2}	3.15×10^{-2}

의 모의 결과와 실측수위와의 오차를 나타내고 있는데 표에서 보는 바와 같이 RAM2 모형이 RMA-2 모형에 비해 모든 통계 오차에 대해서 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. RAM2 모형이 RMA-2 모형에 비해 L_1 오차의 경우 약 22%, L_2 오차의 경우 약 24%, L_∞ 오차의 경우 약 29%, 평균제곱근 오차의 경우 약 23%, 평균오차의 경우 약 21% 정도 작게 나타나고 있다. 이를 통해 RAM2 모형이 RMA-2 모형에 비해 모의 정확도가 우수한 것을 확인할 수 있었다.

2. 왜관지구

1) 대상구간 및 경계조건 선정

모형의 추가 검증용 위해 낙동강 살리기 사업으로 칠곡보가 신설되고 있는 왜관지구에 대하여 적용하였다. 대상구간은 왜관 수위관측소를 중심으로

상류로 약 3.6km지점부터 하류로 약 3.1km까지 약 6.7km의 구간을 선정하였고 그림 7(a)에 나타내었다. 대상구간 내 하도를 따라 좌우 외측부에 부분적으로 높은 지형을 형성하고 있어 자연적으로 하천 유량에 의한 마름/젖음 현상이 발생할 것으로 예상되어 개발모형인 RAM2 모형과 RMA-2 모형 적용성을 검토하기에 타당한 구간으로 판단된다. 본 모의에서는 앞선 모의와 달리 대상구간의 상·하류단 경계조건 선정용 위한 실측값이 존재하지 않기 때문에 신뢰할 수 있는 상·하류단 경계조건에 대한 자료를 조사하여 선정하는 것이 중요하다. 따라서 2차원 부정류 모의를 위한 상·하류단 경계조건 선정용 위해 낙동강 본류 구간의 구미대교 지점에서 성주대교 지점까지를 대상구간으로 동일한 사상인 태풍 '에위니아'에 대해서 HEC-RAS 모의를 수행하고 모의결과를 실측치와 검증함으로써 대상



그림 6. 대상유역 및 유한요소망

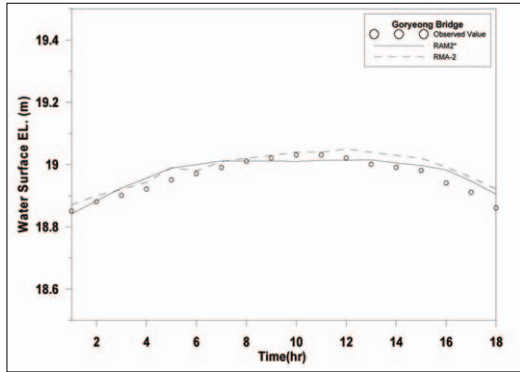


그림 7. 실측치와 HEC-RAS 결과와의 비교

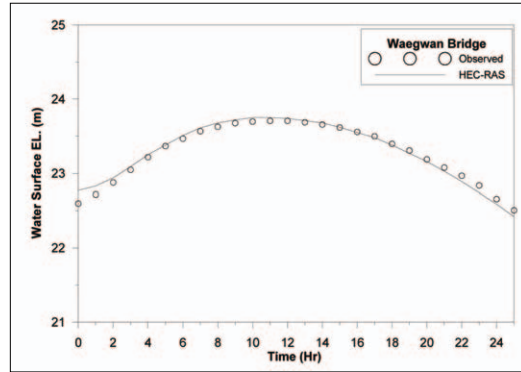


그림 8. 2차원 모형의 경계조건

구간에 대한 상·하류단 경계조건을 선정하였다. HEC-RAS 모의를 위해 상류단 경계조건은 낙동강 홍수통제소에서 제공하는 구미대교 지점의 실측수위자료를 입력자료로 선정하였고 하류단 경계조건은 이때의 성주대교 수위관측소의 실측수위를 사용하였다.

그림 7은 모의 구간내 존재하는 왜관수위관측소 지점의 실측수위와 HEC-RAS 모의 결과를 도시한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 모의결과와 실측수위가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

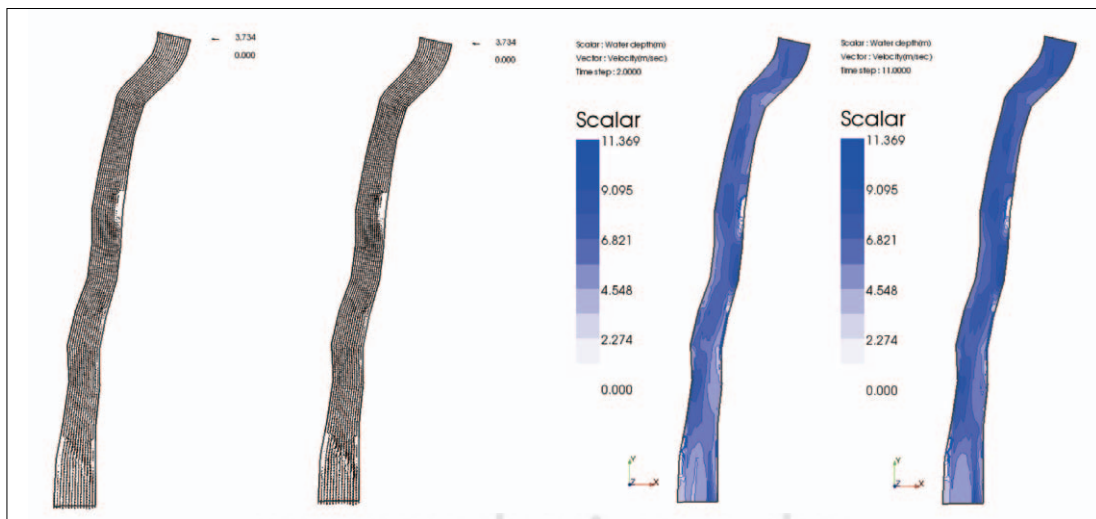
2차원 모의를 위해 사용된 노드 수는 3,075개, 요소 수는 2,856개, 경계 절점의 수는 436개였으

며, 계산 시간 간격은 1시간, 총 모의시간은 25시간으로 하였다. 그림 8과 같이 HEC-RAS 모의를 통해 계산된 결과를 RAM2 모형의 상·하류단 경계조건으로 사용하였으며 앞선 모의와 마찬가지로 기존 모형과의 비교를 위해 동일한 경계조건하에서 RMA-2 모형을 추가적으로 모의하였다.

2) 모의결과

그림 9와 그림 10은 RAM2 모형과 RMA-2 모형의 모의 시작 후 2시간과 11시간 후에서의 유속 벡터도와 등수심도를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 RAM2 모형의 경우 하도



(a) 유속벡터도(1시간) (b) 유속벡터도(11시간) (c) 등수심도(1시간) (d) 등수심도(11시간)

그림 9. 모의 결과(RAM2 모형)

IV. 수공구조물의 설치에 따른 하천 흐름해석

본 연구에서는 하천 횡단구조물 중 보에 대한 수공구조물에 대하여 설치 전·후의 하천흐름 특성을 파악함으로써 보가 하천에 미치는 영향을 분석하고자 앞서 검증된 RAM2 모형을 이용하였다.

1. 대상유역

본 연구 대상 수공구조물은 낙동강에 용수를 확보하기 위한 방안으로 계획된 구조물로 낙동강하천 정비계획의 측점 No. 174,450~No. 174,460 구간에 위치하고 있으며 대상구간은 상류단은 No.181이고, 하류단은 No.166으로 약 7.8km의 구간으로 선정하였다. 대상 구간내의 전체 하도 및 주요시설물에 대한 하천흐름을 정확하게 재현하기 위해서 2차

원 요소망을 낙동강 하천정비계획의 측량자료와 GIS 프로그램을 이용하여 조밀하게 구성하고, 안정적인 해를 구하기 위해서 삼각망과 사각망을 혼합하여 구성하였다.

그림 12는 보 설치 전·후의 계산 요소망을 나타낸 것이다. 모의에 사용된 노드의 수는 보 설치 전 4,389개, 보 설치 후 5,517개가 사용되었으며, 요소 수는 보 설치 전 4,160개, 보 설치 후 5,896개가 사용되었다. 경계노드의 수는 각 456개, 638개가 사용되었다.

본 연구에서는 보 설치 전·후의 하천흐름의 양상을 연구하기 위하여 대상구간에 대하여 50년 빈도, 100년 빈도, 200년 빈도, 500년 빈도의 다양한 계획홍수사상에 대하여 모의를 실시하고 결과를 분석하였다.

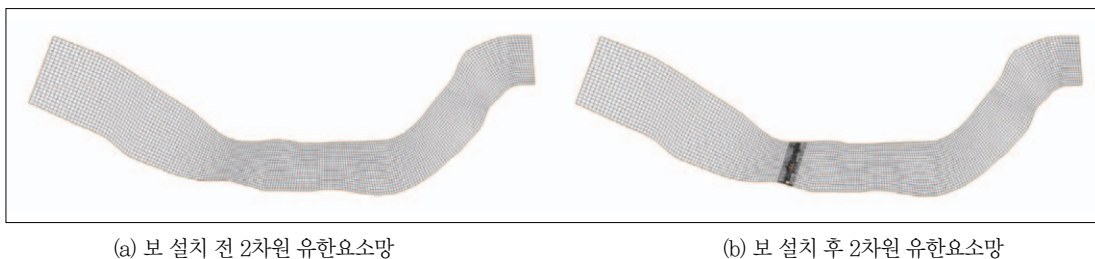


그림 12. 보 설치 전·후의 2차원 유한요소망

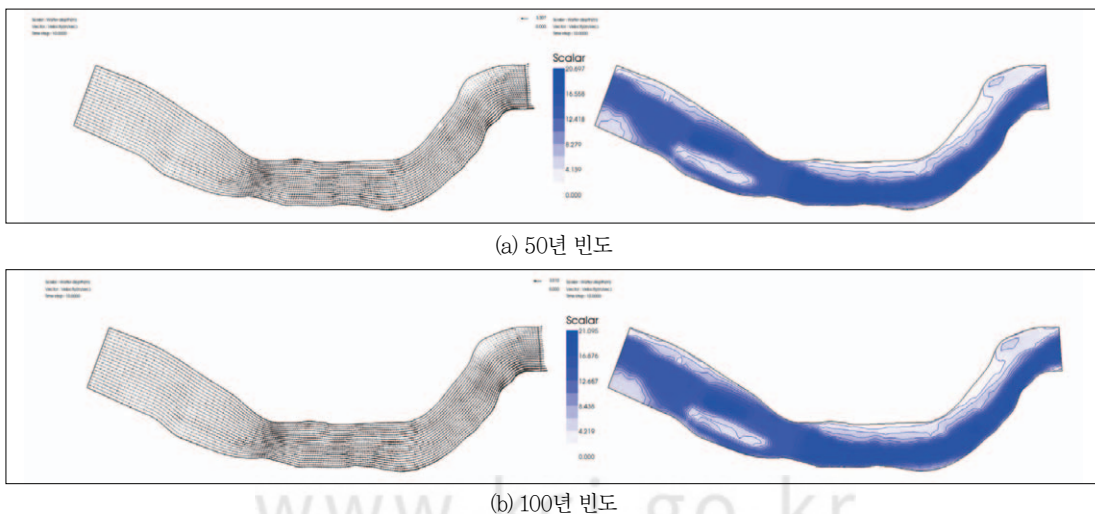
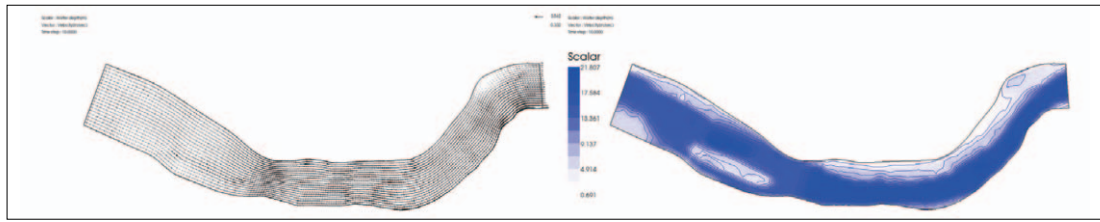
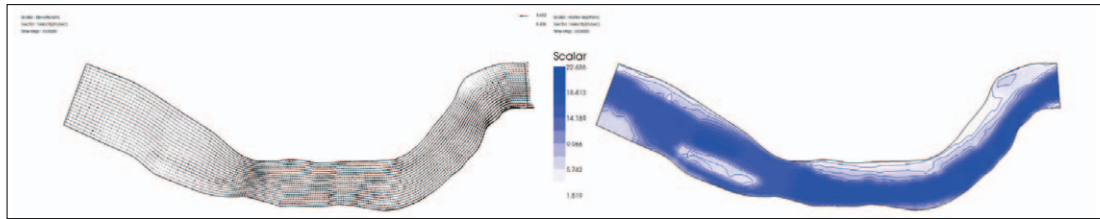


그림 13. 보 설치 전 유속벡터도와 등수심도

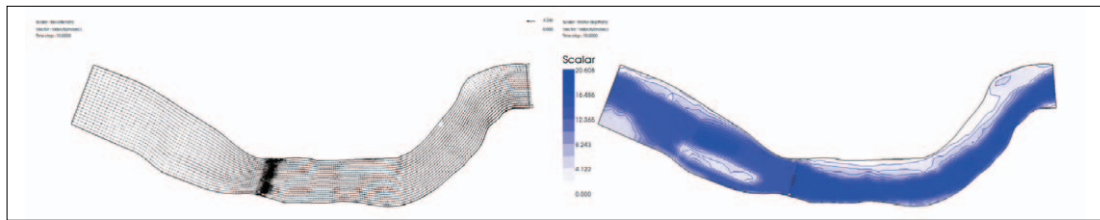


(c) 200년 빈도

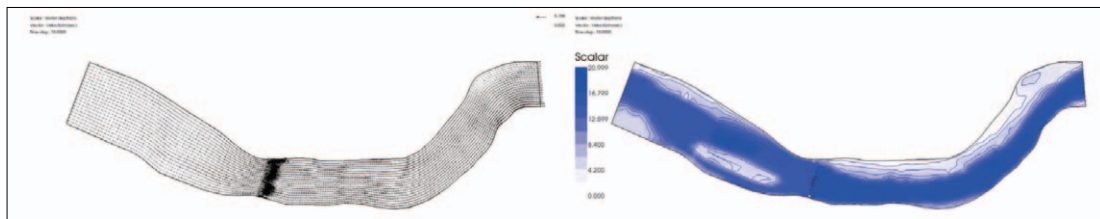


(d) 500년 빈도

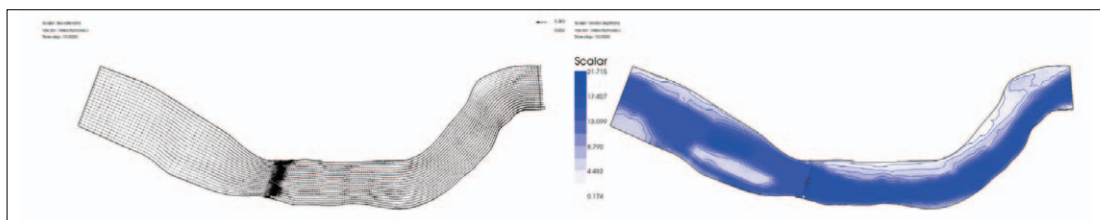
그림 13. 계속



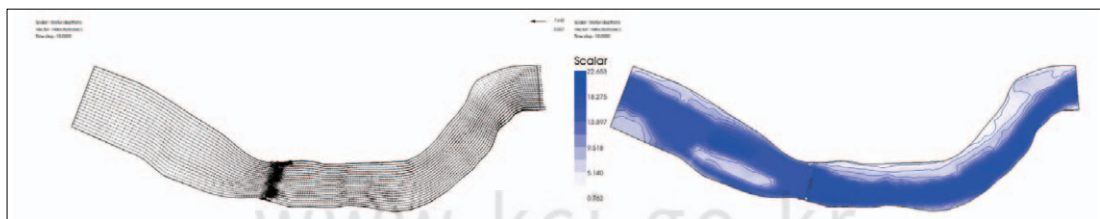
(a) 50년 빈도



(b) 100년 빈도



(c) 200년 빈도



(d) 500년 빈도

그림 14. 보 설치 후 유속벡터도와 등수심도

2. 모의결과

그림 13은 보 설치전 RAM2 모형의 50년 빈도, 100년 빈도, 200년 빈도, 500년 빈도 홍수량에 대한 모의 결과 중 유속벡터도와 등수심도를 나타낸 것이다. 전체적인 흐름양상을 보면 단면이 좁아지는 부분에서 유속이 빠르게 나타나고 있으며 만곡부에서도 내외측의 유속이 다르게 나타나는 등 모의결과가 합리적으로 재현됨을 확인할 수 있다.

그림 14는 보 설치후 RAM2 모형의 50년 빈도, 100년 빈도, 200년 빈도, 500년 빈도 홍수량에 대한 모의 결과 중 유속벡터도와 등수심도를 나타낸 것이다. 전체적인 흐름양상을 보면 보 주변에서 유속이 상당히 빠르게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으나 보 설치 후의 수위의 변화를 그림을 통해 확

인하기에는 미흡하다.

설치에 따른 수위의 변화를 좀 더 명확하게 알아보기 위해 그림 15와 같이 각 빈도별 홍수량에 대한 수위를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 보를 중심으로 상류가 하류에 비해 수위가 높은 것을 확인할 수 있으며 보 설치구간에서 수위가 급변하는 것을 알 수 있다. 보 주변에서의 수위변화를 자세히 알아보기 위해 그림 16과 같이 나타내었고 그림을 통해 보 구조물의 전면부에서 구조물의 영향으로 수위가 증가하는 것을 알 수 있고 후면부에서는 후류 등의 효과로 수위가 감소하는 것을 알 수 있다.

보 설치 전·후의 단면별 수위와 유속을 표 3과 4에 나타내었다. 표 3에서 확인할 수 있듯이 보의 설치로 인하여 홍수위의 영향이 대상구간의 상류부

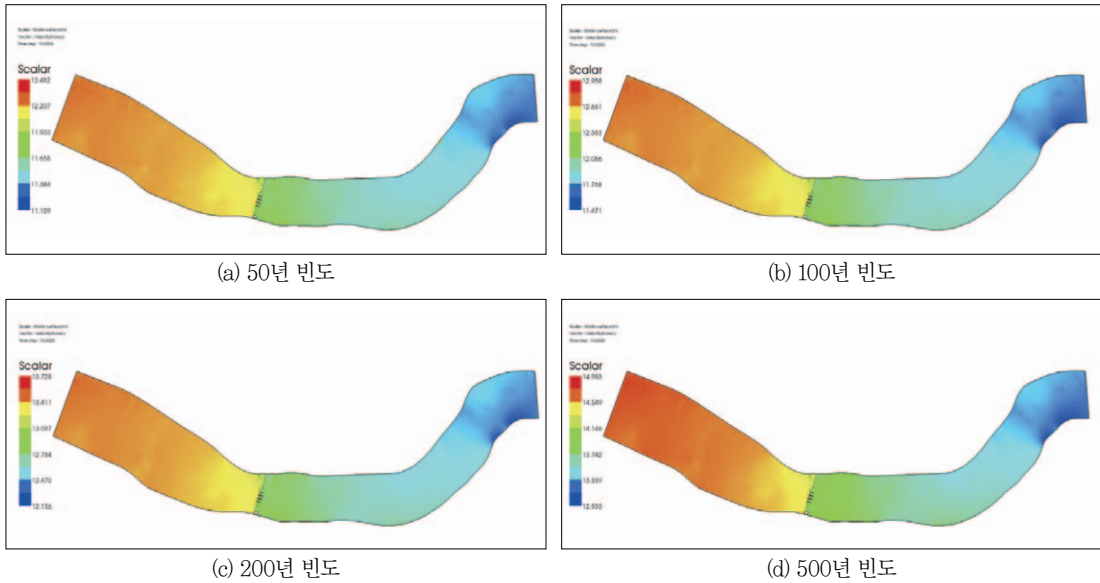


그림 15. 보 설치 후 수위

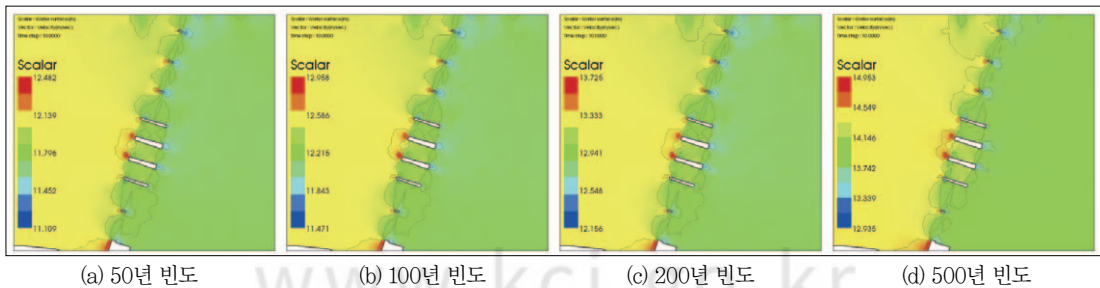


그림 16. 보 설치 후 보주변 수위

표 3. 각 홍수사상에 대한 보 설치 전·후 단면별 수위(m)

Station No.	50yr		100yr		200yr		500yr	
	설치전	설치후	설치전	설치후	설치전	설치후	설치전	설치후
No.181	12.10	12.32	12.55	12.78	13.27	13.52	14.11	14.77
No.180	12.08	12.30	12.52	12.76	13.23	13.52	14.07	14.74
No.179	12.04	12.28	12.48	12.75	13.20	13.50	14.05	14.72
No.178	12.03	12.27	12.47	12.74	13.19	13.49	14.03	14.70
No.177	11.98	12.24	12.40	12.70	13.13	13.45	13.97	14.65
No.176	11.90	12.18	12.31	12.63	13.30	13.38	13.87	14.54
No.175	11.84	12.07	12.24	12.50	12.96	13.35	13.80	14.40
weir		11.70		12.24		12.80		13.92
No.174+4		11.65		12.10		12.77		13.80
No.174	11.81	11.66	12.23	12.06	12.94	12.77	13.79	13.81
No.173	11.76	11.61	12.18	12.01	12.87	12.72	13.71	13.76
No.172	11.66	11.54	12.06	11.93	12.77	12.65	13.60	13.62
No.171	11.64	11.53	12.04	11.93	12.75	12.64	13.58	13.60
No.170	11.58	11.53	11.98	11.89	12.71	12.60	13.52	13.58
No.169	11.52	11.49	11.91	11.84	12.65	12.56	13.45	13.48
No.168	11.35	11.45	11.73	11.69	12.44	12.42	13.26	13.24
No.167	11.32	11.33	11.66	11.66	12.37	12.36	13.19	13.19
No.166	11.30	11.30	11.66	11.66	12.37	12.37	13.19	13.19
No.165	11.29	11.29	11.66	11.66	12.37	12.37	13.19	13.19

표 4. 각 홍수사상에 대한 보 설치 전·후 단면별 유속(m/s)

Station No.	50yr		100yr		200yr		500yr	
	설치전	설치후	설치전	설치후	설치전	설치후	설치전	설치후
No.181	1.66	1.66	1.74	1.73	1.77	1.82	1.81	1.80
No.180	1.79	1.70	1.87	1.78	1.89	1.85	1.93	1.84
No.179	1.64	1.60	1.71	1.67	1.74	1.74	1.78	1.74
No.178	1.60	1.59	1.68	1.66	1.71	1.74	1.76	1.74
No.177	1.73	1.77	1.81	1.86	1.85	1.96	1.91	1.96
No.176	2.13	2.11	2.24	2.21	2.29	2.32	2.37	2.34
No.175	2.08	2.26	2.21	2.40	2.28	2.60	2.39	2.58
weir		4.49		4.67		4.93		4.98
No.174+4		1.84		2.01		2.12		2.14
No.174	1.94	1.98	2.06	2.10	2.12	2.25	2.21	2.25
No.173	2.22	2.23	2.36	2.36	2.43	2.53	2.53	2.54
No.172	2.01	2.40	2.15	2.54	2.24	2.65	2.36	2.69
No.171	2.32	2.29	2.44	2.41	2.48	2.45	2.55	2.52
No.170	2.14	2.03	2.27	2.10	2.34	2.31	2.43	2.33
No.169	2.18	2.30	2.33	2.44	2.40	2.58	2.51	2.61
No.168	2.91	2.57	3.08	2.73	3.15	2.87	3.24	2.92
No.167	2.80	2.79	2.96	2.70	3.02	2.55	3.11	2.85
No.166	2.53	2.59	2.67	2.74	2.69	2.79	2.76	2.86
No.165	2.59	2.50	2.74	2.66	2.78	2.72	2.86	2.80

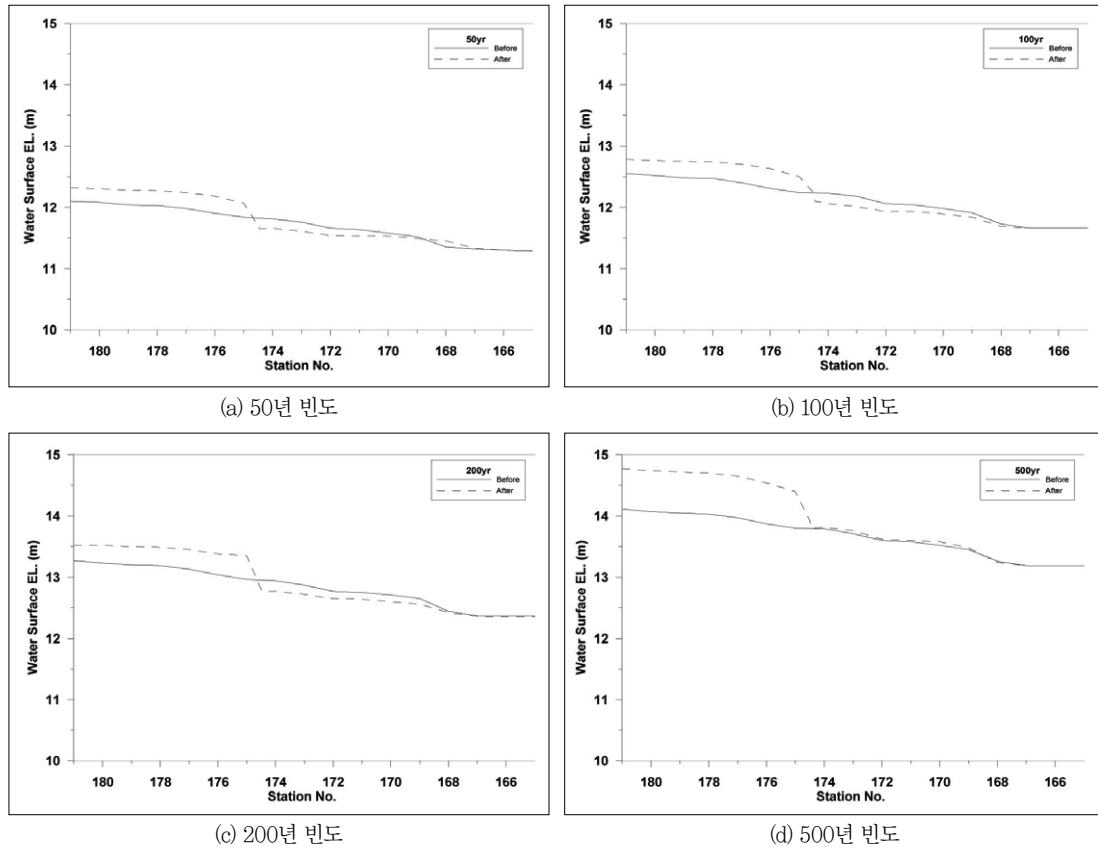


그림 17. 보 설치에 따른 하천수위형상

전체에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 보를 설치하기 전에는 하천의 수위가 서서히 하류단으로 갈수록 하강하는 것을 확인할 수 있지만, 보 설치에 따른 영향으로 하천 상류부인 No. 181에서의 수위가 50년 빈도 홍수 사상에서는 0.22m가 상승하였고, 100년 빈도에서는 0.23m, 200년 빈도에서는 0.25m, 500년 빈도에서는 0.66m의 수위가 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 보 설치에 따른 보 상류부에서의 홍수위에 대한 안정성 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 보 하류의 경우에는 200년 빈도까지는 약 700m 구간까지는 보의 영향으로 인해 보 설치 후 수위가 다소 감소하는 것을 알 수 있고 500년 빈도의 경우에는 설치 후의 수위가 약간 증가하고 있으나 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이를 통해 보 설치에 따른 하류부 수위에 대한 안정성 등의 문제는 없는 것으로 판단된다.

표 4에서 보는 바와 같이 유속의 경우에는 보의 설치로 인하여 상류부에서 전체적으로 유속이 조금 감소한 것을 알 수 있고 하류부에서도 유속이 다소 감소한 것을 확인할 수 있다. 다만 보와 가까운 단면에서의 접근유속은 보 설치 후에 다소 증가하고 있음을 알 수 있고 보 설치 지점의 웨어부와 보 구조물 주변에서는 보 설치 후에 유속이 2배 정도 증가하는 등의 고유속이 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 보 구조물 부근에서 고유속 발생으로 인한 수공구조물 하부에 국부적인 세굴과 퇴적이 발생할 것으로 판단된다. 그림 17은 보 설치 전·후의 대상구간의 수위를 나타낸 것으로 표 3의 결과와 동일하게 보의 설치로 인하여 홍수위의 영향이 대상구간의 상류부 전체에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 보를 설치하기 전에는 하천의 수위가 서서히 하류단으로 갈수록 하강하는 것을 확인할 수 있

지만, 보 설치에 따른 영향으로 하천 상류에서는 수위가 상승하고, 보 하류의 경우에는 보 설치 후 수위가 다소 감소하거나 약간 증가하고 있으나 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 개발 모형인 RAM2 모형을 낙동강유역의 왜관지구와 달성보 구간에 적용하고 그 결과를 실측치 및 RMA-2 모형과의 비교·검토를 통하여 모형의 적용성을 입증하였으며, 검증 모형을 이용하여 수공구조물의 설치에 따른 하천흐름의 수리학적 변화를 분석하였다. 본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 RAM2 모형의 실제하천에 대한 적용성을 검증하기 위하여 달성보 구간과 왜관지구에 적용하고 모의 결과를 기존의 범용 흐름모형인 RMA-2 모형의 결과 및 실측치 등과 비교를 통하여 적용성을 입증하였다. 모의 결과 RAM2 모형이 RMA-2 모형에 비해 실측수위와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 실제 하천에 대한 적용성을 검증한 RAM2 모형을 이용하여 수공구조물의 설치에 따른 하천흐름의 수리학적 변화를 검토하기 위하여 낙동강 유역의 보 설치 전·후의 2차원 유한 요소망을 구성하고 50년 빈도, 100년 빈도, 200년 빈도, 500년 빈도 홍수사상에 대하여 모의를 실시하였다.

(3) 대상구간의 보 설치 전에는 수위가 하류단으로 갈수록 서서히 낮아졌으나, 보 설치 후 구조물의 영향으로 인해 상류단 수위가 22cm~66cm 상승한 것을 확인할 수 있었고 이를 통해 보 설치시 상류부 수위 상승으로 인한 안정성 검토가 필요할 것으로 판단된다. 유속의 경우에는 보 설치 후 구조물의 상·하류 구간에서 유속이 다소 감소하였으나 보 설치 지점의 웨어부와 구조물 주변에서 고유속이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 수공구조물 하부에서의 국부적인 세굴이나 퇴적이 발생할 수 있을 것으로 판단되며 보 설치시 이에 대한 검토

가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 수자원의 지속적인 확보기술개발사업단에서 위탁 시행한 21세기 프론티어 연구개발사업중 “RAM2 모형의 확장개발 및 상용화”(과제번호2-3-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김상호, 최승용, 오현욱, 한건연, 2009, 자연하천에서 마름/젓음 처리를 위한 격자재구성 기법의 개발 (I): 모형의 적용 및 비교·검토, 한국수자원학회논문집, 42(11), 973-988
- 백중철, 허준행, 조원철, 이원환, 1996, 자연섬 보존을 위한 수공구조물 설치에 따른 수리학적 영향분석 II-이동상 수리모형 실험을 중심으로-, 1996년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 173-176.
- 안경훈, 최계운, 조형근, 조상욱, 2009, 한강하구지역의 구조물 설치에 의한 수리학적 영향, 2009년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, 858-862.
- 여창진, 임장혁, 이승오, 송재우, 2009, 하도 육역화 방지를 위한 수공구조물에 대한 연구, 2009년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, 718-722.
- 윤태훈, 1982, 유한요소법에 의한 항만에서의 토사 이동 추정모형, 대한토목학회논문집, 2(2), 847-857.
- 한건연, 김상호(2000) Petrov-Galerkin 기법에 의한 하천에서의 이송-확산 해석, 대한토목학회 논문집, 20(2-B), 45-53.
- Akanbi, A.A. and Katopodes, N.D., 1988, Model for flood propagation on initially dry land, Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, 16, 489-505.

- Alam, M.M. and Bhuiyan, M.A., 1995, Collocation finite element simulation of dam-break flows, *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, 121(2), 118-128.
- Berger, R.C., 1993, A Finite Element Scheme Shock Capturing, Technical Report HL-93-12
- King, I.P. and Norton, W.R., 1978, Recent application of RMA's finite element models for two-dimensional hydrodynamics and water quality. *Finite Elements in Water Resources* Pentech Press, 81-99.
- Norton, W.R., 1980, EBMUD Hydrodynamic and water quality models for San Francisco bay, *Resources Management Associates*, 1-260.
- Stockstill, R.L. and Berger, R.C., 2000, Simulation of flow in hydraulic structures using ADH, ERDC/CHL CHETN-IX-4, 1-7.
- Stockstill, R.L. and Berger, R.C., 1994, A Two-Dimensional Flow Model for High-Velocity Channels, Technical Report REMR-HY-12
- Syme, W.J., 2001, Modeling of bends and hydraulic structures in a two-dimensional scheme, *Proc. of Conference on Hydraulics in Civil Engineering.*, Australia, 2-13.
- Zienkiewicz, O.C. and Codina, R., 1996, A general algorithm for compressible and incompressible flow-Part I. The split, characteristic based scheme, *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, 20, 869-885.
- Zienkiewicz, O.C., Nithiarasu, P., Codina, R., and Vazquez, M., 1999, The characteristic based split procedure: An efficient and accurate algorithm for fluid problems, *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, 31, 359-392.

최종원고채택 11. 11. 16