

공주대교 상·하류구간에 대한 흐름특성과 하상변동 모의

Flow Characteristics and Riverbed Changes Simulation for the Upstream and Downstream Sections of Gongju Bridge

신광섭* · 정상만** · 이주현*** · 송 범****

Shin, Kwang Seob · Jeong, Sang Man · Lee, Joo Heon · Song, Pum

Abstract

The flow characteristics and the aspects of riverbed changes were analyzed for the upstream and downstream sections of Gongju Bridge. The upstream and downstream had complex topography, and the sections had the confluence of tributaries and several structures. In order to simulate the flow characteristics of the target sections, 1D HEC-RAS and 2D RMA2 were applied. As a result, the longitudinal water level of the target sections matched the results of simulated 1D and 2D samples. Also, 2D SED2D were applied to predict riverbed changes. As a result of the simulation, quantitative analysis was able to be performed for longitudinal riverbed changes from the sections of sudden change, bridges, the confluence of tributaries, and bends. Also, the distribution of riverbed changes on the main sections was in close relation to flow velocity. As a result of evaluating the sensitivity of SED2D, the concentration of suspended sediment, the thickness of sand beds, and the size of sand grains affected riverbed changes sensitively. These results will be used to apply the models of riverbed changes in the future.

Key words : HEC-RAS, RMA2, SED2D, Riverbed changes, Sensitivity analysis

요 지

본 연구에서는 하천의 지형이 복잡하고 지류 합류부 및 여러 수리구조물이 위치한 공주대교 상·하류구간에 대하여 흐름특성과 하상변동 양상을 분석하였다. 대상구간의 흐름특성 모의를 위해 1차원 HEC-RAS와 2차원 RMA2를 적용하였으며, 모의 결과 대상구간의 종방향 수위는 1차원과 2차원 모형의 결과가 양호하게 일치하였다. 그리고 하상변동 예측을 위해 2차원 SED2D를 적용하였으며, 모의 결과 단면의 급변 구간과 교량구간, 지류 합류구간, 만곡부 구간 등 주요 단면에서 횡방향 하상변동의 정량적인 분석이 가능하였다. 또한, 주요 단면에서의 하상변동 분포는 유속과 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타났다. SED2D 모형의 민감도 분석을 실시한 결과 부유사 농도, 모래층의 두께, 이송가능한 모래크기는 하상변동에 민감한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 향후 하상변동 모형을 적용함에 있어 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : HEC-RAS, RMA2, SED2D, 하상변동, 민감도 분석

1. 서 론

하천구간 내의 흐름특성(flow characteristics)과 하상변동(riverbed changes)의 추정은 하천관리 연구 분야의 기본이며, 하천유역내 수리구조물의 설계 및 유지관리, 홍수터 관리, 하천개수 및 하도의 안정 그리고 저수지의 설계 및 운영 등 수자원 개발 및 관리를 위한 하천계획에 필요한 기본적인 요소 중에 하나이다. 따라서 하천구간 내의 흐름특성과 하상변동을 정확하게 분석하고 예측하는 일은 하천계획 및 관리면에서

매우 중요하다.

지금까지 하천관리의 일환으로 하천구간 내의 흐름특성과 하상변동을 분석하고 예측하는 일은 대부분 1차원 모형만을 적용하여 왔다. 1차원 모형을 적용한 흐름특성의 모의는 단면내의 횡방향 변화를 파악할 수 없는 한계가 있다. 그리고 하상변동의 모의는 하천 사행의 진행이나 유사의 횡방향 분포 등의 영향을 고려할 수 없으며, 또한 횡단면 전체가 균일하게 상승 또는 저하하는 것으로 가정하기 때문에 흐름이 급변하는 곳에 적합하지 않다. 따라서 하천에서 단면의 확대 및 축소 구간, 교량구간, 지류 합류구간 그리고 만곡부 구간

*공주대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (E-mail:ksshin@kongju.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

***정회원 · 중부대학교 공과대학 토목공학과 부교수

****정회원 · 대림산업(주) 상무보

에 대한 횡방향 흐름특성과 하상변동의 양상을 파악하기 위해서는 2차원 모형의 적용이 필요한 실정이다.

최근 효율적인 수자원 개발 및 관리를 위한 하천계획의 중요성이 대두되면서 하천구간 내의 흐름특성과 하상변동을 분석하고 예측하는 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다. 하천에서의 흐름특성과 하상변동 모의에 대한 국외 연구로서 Olsen 등(1998; 1999)은 Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식을 기초로 하여 2차원과 3차원 수치모형을 사용하여 흐름특성과 하상변동을 모의하고 실험실내의 물리실험을 통해 결과를 비교하였다. Jennifer 등(2006)은 미국 일리노이 주(Illinois State)의 Kankakee 및 Iroquois 강에서 실험실에서의 실험과 수심평균 동수역학적 모형을 적용하여 돌출 제방의 설치에 따른 흐름과 부유사 분포에 대한 연구를 수행하였다. 국내 연구로서 최민하 등(2002)은 포천천 유역을 대상으로 SMS의 RMA2와 SED2D를 이용하여 하천에서의 흐름특성과 장·단기하상변동을 모의하였으며, 홍성민 등(2004)은 경안천 하류구간을 대상으로 2차원 모형을 이용하여 하천의 흐름분석을 실시하였다. 김영복 등(2006)은 SMS 모형을 사용하여 댐하류부에서의 댐의 방류량에 따른 하상변동을 예측하였다.

지류 합류부 및 여러 수리구조물이 위치하고 지형이 복잡한 하천에서의 흐름특성과 하상변동을 예측하는 일은 기 수립된 하천정비기본계획 등 하천개수 사업의 타당성을 평가하는데 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 여러 수리구조물이 위치하는 공주대교 상·하류구간에 대하여 1차원 모형과 2차원 모형을 적용하여 100년 빈도 홍수량에 따른 하천 주요 단면에서의 수위와 유속 등 흐름특성을 모의하고 비교함으로써 2차원 모형의 적용성을 검토하고자 한다. 그리고 흐름특성의 모의 결과와 유사량 실측 자료를 바탕으로 2차원 모형을 적용하여 하상변동을 예측함으로써 대상구간의 하상변동 양상을 파악하고 주요 단면에서의 흐름특성과 연관성을 규명하여, 향후 효율적인 수자원 개발을 위한 하천 계획 및 관리 측면에서 활용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 모의 기법

2.1 SMS 모형의 소개

SMS(Surface water Modeling System ver8.1)는 미 육군 공병단의 수리실험국과 미 연방도로국이 연계하여 미국의 Brigham Young University의 EMRL(Environmental Modeling Research Laboratory) (2000)에서 개발된 1차원, 2차원 그리고 3차원 동수역학적 모형으로서 전처리, 분석과정, 후처리과정을 윈도우상에서 편리하게 운영할 수 있는 프로그램이다. 수리분석에 필요한 경계조건에서의 지형자료와 유한요소망, 유한차분격자는 SMS내에서 작성되어 저장되고, 이를 바탕으로 대상구간의 수리해석, 오염물이송, 유사이송을 분석할 수 있다. SMS는 GFGEN, RMA2, RMA4 그리고 SED2D 등 여러 부모형(associate model)으로 구성되며, 본 연구에서는 대상구간의 흐름특성과 하상변동을 분석하기 위하여 각각 RMA2와 SED2D를 사용하였다.

2.2 RMA2 모형

하천의 구간에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하는 RMA2 모형은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 수심방향으로 적분함으로써 유도된 2차원 천수방정식을 Galerkin의 가중잔차법(weighted residual method)에 의하여 하천의 흐름특성을 분석하는 유한요소 모형(finite element model)이다. 2차원 천수방정식의 지배방정식은 식 (1)의 연속방정식과 식 (2) 및 식 (3)의 운동량방정식으로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (3)$$

여기서, x, y 는 좌표축이며, t 는 시간(sec), g 는 중력가속도(m/sec^2), u, v 는 각각 x, y 방향의 수심 평균유속(m/sec), ρ 는 물의 밀도(kg/m^3), h 는 수심(m), a 는 하상표고(m), τ_x, τ_y 는 각각 x, y 방향으로 작용하는 마찰응력(N/m^2) 그리고 ϵ 는 확산계수($N \cdot sec/m^2$)이다.

2.3 SED2D 모형

SED2D 모형은 모래하상과 점토질하상에 대하여 하상변동과 부유사농도를 분석할 수 있는 모형으로 STUD-H라고 불리는 프로그램의 개정판이다. SED2D 모형은 자체적으로 수위와 유속을 계산할 수 없기 때문에 RMA2 모형에서 계산된 수위와 유속 값을 사용한다. 이 때 SED2D 모형에서 계산되는 하상의 침전이나 퇴적으로 인해 흐름에 막대한 영향을 미치지 않는다는 기본 가정이 주어져 있다. 만약, SED2D 모형에서 계산되는 하상의 변화가 흐름에 막대한 영향을 미친다면 SED2D 모형에서 생성된 새로운 지형자료를 이용하여 RMA2 모형에서 수위와 유속을 계산한 후 바로 이 RMA2 모형의 출력자료를 이용하여 SED2D 모형을 실행함으로써 하상변동을 계산하게 된다. SED2D 모형은 이송-확산 방정식을 이용하여 부유사농도와 하상변동을 모의하며, 이송-확산방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2 \quad (4)$$

여기서, t 는 시간(sec), C 는 농도(kg/m^3), u, v 는 각각 x, y 방향의 수심 평균유속(m/sec), x 는 주 흐름방향(m), y 는 x 방향과 직각인 방향(m), D_x 는 x 방향의 유효확산계수(m^2/sec), D_y 는 y 방향의 유효확산계수(m^2/sec), α_1 은 하상근원에 대한 계수($1/sec$) 그리고 α_2 는 하상근원의 평형농도($kg/m^3/sec$)이다.

3. 하천에서의 모형적용 및 결과분석

3.1 대상유역 및 구간

본 연구의 대상구간은 그림 1에서 보는 바와 같이 공주대교 상·하류구간인 청벽(마어구 수위표)에서 곰나루까지 약 11.08 km 구간으로 선정하였다. 대상구간 내에는 신공주대교, 공주대교, 금강대교 그리고 백제대교 등 총 4개의 교량이 위치하고 있다. 금강대교에는 공주수위관측소가 위치하며, 청벽하류 8.27 km 지점의 우안측에서는 지방2급 하천인 정안천이 합류하고 있다.

3.2 RMA2 모형의 적용

3.2.1 입력자료

(1) 지형자료

RMA2 모형을 실행하기 위한 대상구간의 지형자료는 “금강수계 하천정비기본계획(건설교통부, 대전지방국토관리청, 2002)”의 종·횡단면도와 1:5,000 수치지도를 가지고 CAD 작업을 통하여 구축하였으며, X축, Y축 그리고 Z축의 좌표로 구성된다.

(2) 경계조건

일반적으로 RMA2 모형에서 상류단은 유입유량을 경계조건으로 사용하고 하류단은 수위값을 경계조건으로 사용한다. 본 연구에서 상류단 경계조건은 “금강수계 하천정비기본계획(건설교통부, 대전지방국토관리청, 2002)”에 수록된 청벽 지점의 100년 빈도 홍수량인 11,600 m³/sec를 사용하였으며, 하류단 경계조건은 곰나루 지점의 100년 빈도 홍수위인 19.71 m를 사용하였다. 그리고 대상구간의 초기수위는 모형 실행을 위한 초기조건 부여의 어려움으로 인해 유량과 수위가 수렴할 수 있도록 유한요소망(finite element mesh)의 최고하상표고보다 높은 값을 사용하였으며, 전 단면에 걸쳐 경계조건과 동일한 값을 설정하였다. 지류인 정안천의 유입량은 “정안천 하천정비기본계획(충청남도, 1991)”에 수록된 금강 본류와의 합류점에서 80년 빈도 홍수량인 1,213 m³/sec를 사용하였으며, 중력

가속도는 9.8 m/sec², 수온은 20°C를 사용하였다.

(3) 난류환산계수

난류환산계수(turbulent exchange coefficient) ϵ 는 와점성(eddy viscosity) 계수라고도 하며, 대상 하천구간에서의 적절한 난류환산계수를 선정하는 것은 모형을 검증하는데 있어서 중요한 요소 중에 하나이다. 본 연구에서는 대상구간에 알맞은 난류환산계수를 산정하기 위하여 RMA2 모형에 난류환산계수 값을 1,500 N·sec/m², 2,000 N·sec/m², 3,000 N·sec/m² 그리고 4,000 N·sec/m²을 각각 적용하여 계산된 수위와 100년 빈도 홍수위를 비교하였다. 비교 결과 결정계수 R²가 0.98로서 가장 높게 나타난 1,500N·sec/m²을 대상구간의 난류환산계수 값으로 채택하였다. 그림 2는 난류환산계수의 값에 따라 RMA2 모형에서 계산된 수위와 100년 빈도 홍수위를 비교한 그래프를 나타낸다.

(4) 조도계수

대상구간의 흐름특성을 모의하기 위한 1차원 HEC-RAS와 2차원 RMA2에서 사용된 조도계수는 “금강수계 하천정비기본계획(건설교통부, 대전지방국토관리청, 2002)”을 이용하여 0.027로 결정하였으며, 이 값을 모형에 적용하였다.

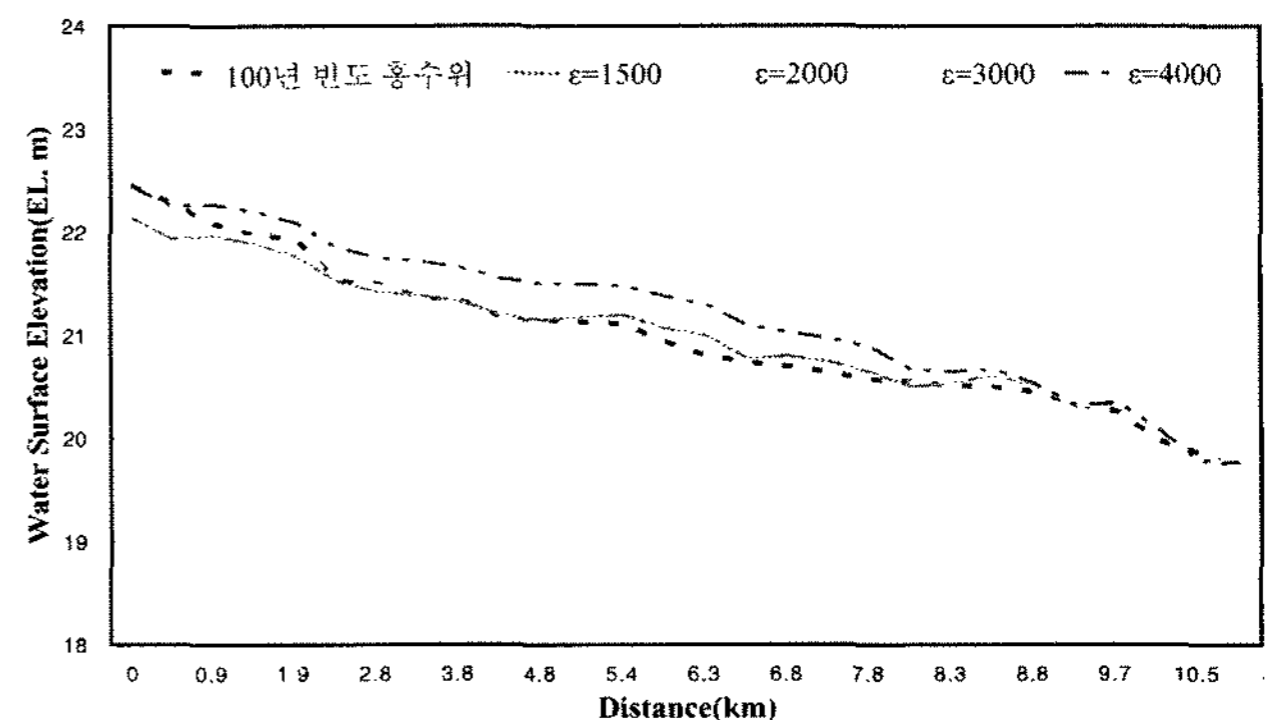


그림 2. 난류환산계수에 따른 홍수위 비교

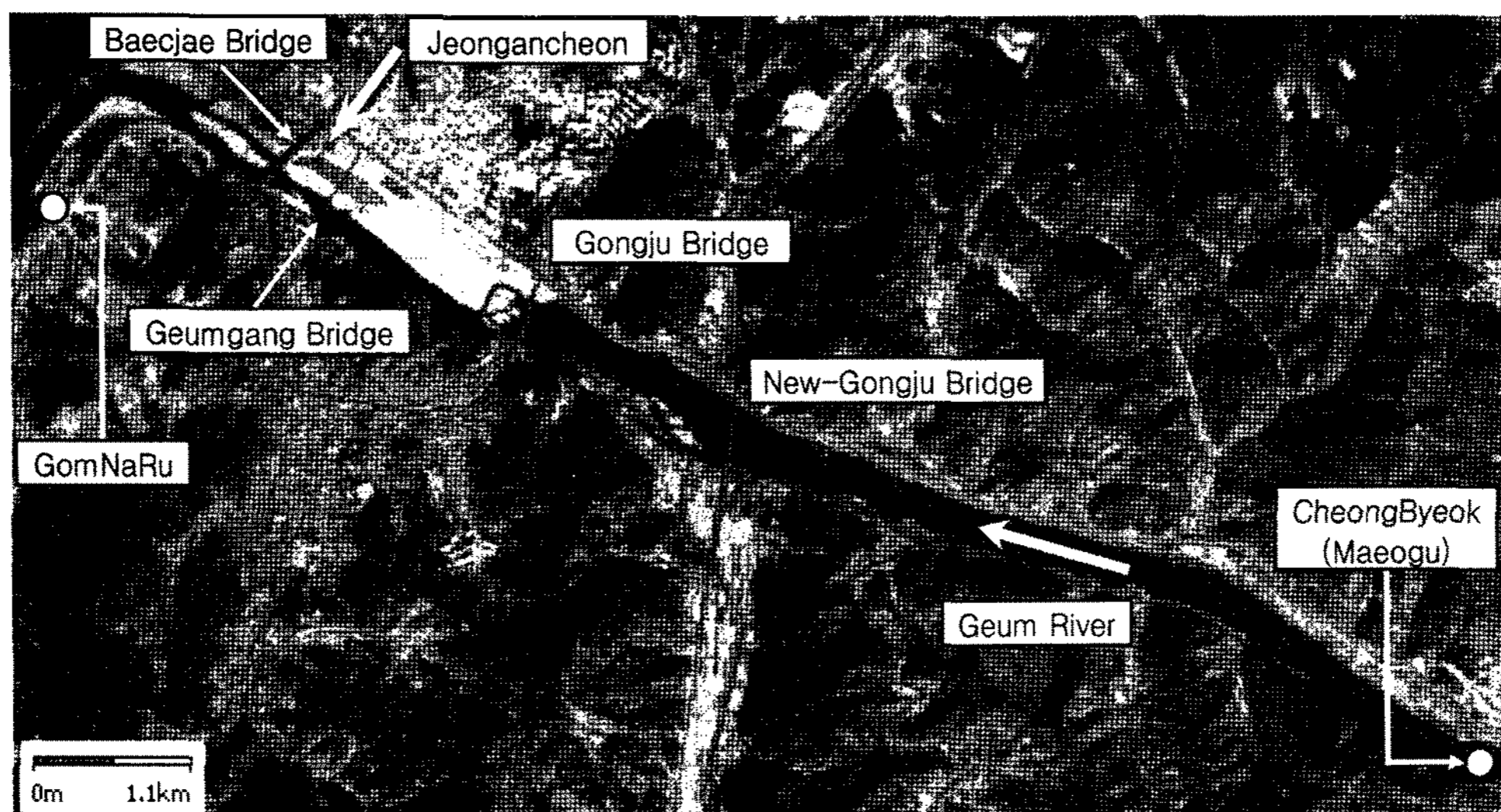


그림 1. 대상구간

3.2.2 유한요소망(finite element mesh)

2차원 유한요소 해석을 수행하는데 있어 유한요소망(finite element mesh)을 구축하는 과정은 매우 중요하다. 유한요소망은 여러 개의 절점(node)과 요소망(element)을 연결하여 구축되어진다. 본 연구에서 대부분의 요소망은 사각형 요소로 구축하였으며, 삼각형 요소는 교량지점을 제외하곤 최소화 하였다. 전체구간은 총 9,834개의 절점과 총 3,631개의 요소망으로 구성되어지며, 교량이 위치한 지점에서는 보다 세밀한 흐름분석을 위하여 조밀한 요소망을 구축하였다. 그림 3은 대상구간의 유한요소망을 나타낸다.

3.2.3 흐름특성 모의 결과분석

대상구간의 100년 빈도 홍수량에 따른 흐름특성을 모의하기 위하여 유한요소망을 구축한 후 RMA2 모형을 이용하여 2차원 수치분석을 실시하였다. 상류단 경계조건은 100년 빈도 홍수량이 12시간동안 일정하게 흐른 상태로 설정하였으며, 모의 시간을 12시간으로 결정한 이유는 이번 연구가 실측된 유입량에 의한 수행이 아니고 100년 빈도 홍수량으로 모의 조건을 설정하였기 때문에 결과 값이 수렴하는데 문제가 없다고 판단되었기 때문이다. 그리고 모의 시간간격은 0.5시간으로 설정하였으며, 각 모의 시간마다 4회의 반복연산을 통해 하천구간 내의 유속과 수위, 수심을 모의하였다.

본 연구에서는 대상구간에 대하여 100년 빈도 홍수량에 따른 홍수위를 1차원 HEC-RAS 모형과 2차원 RMA2 모형으로 각각 모의하여 비교하였다. 비교 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 전반적으로 근접하게 모의되었다. 그림 5는 RMA2에서 계산된 대상구간의 종방향 유속분포를 나타내며, 유속이 최대로 발생한 단면은 청벽 하류 10.46 km 지점의 단면, 최소로 발생한 단면은 청벽 하류 5.38 km 지점의 단면과 8.27 km 지점의 단면으로 나타났다. 그림 6 대상구간의 유속 분포도를 보면 0.2 m/sec~4.7 m/sec의 분포를 나타내는데 분포 범위가 넓은 것은 단면 폭의 변화, 교량, 지류하천의 유입 그리고 만곡부 등의 영향 때문이라고 판단된다.

그림 7은 공주수위관측소가 위치한 금강대교 단면에서의 유속 분포도를 보여주며, 교량의 교각과 교각 사이에서 빠른 유속이 발생함을 알 수 있는데, 이는 교각으로 인한 통수단면적의 감소에 의한 것이라고 판단된다. 그림 8은 정안천이

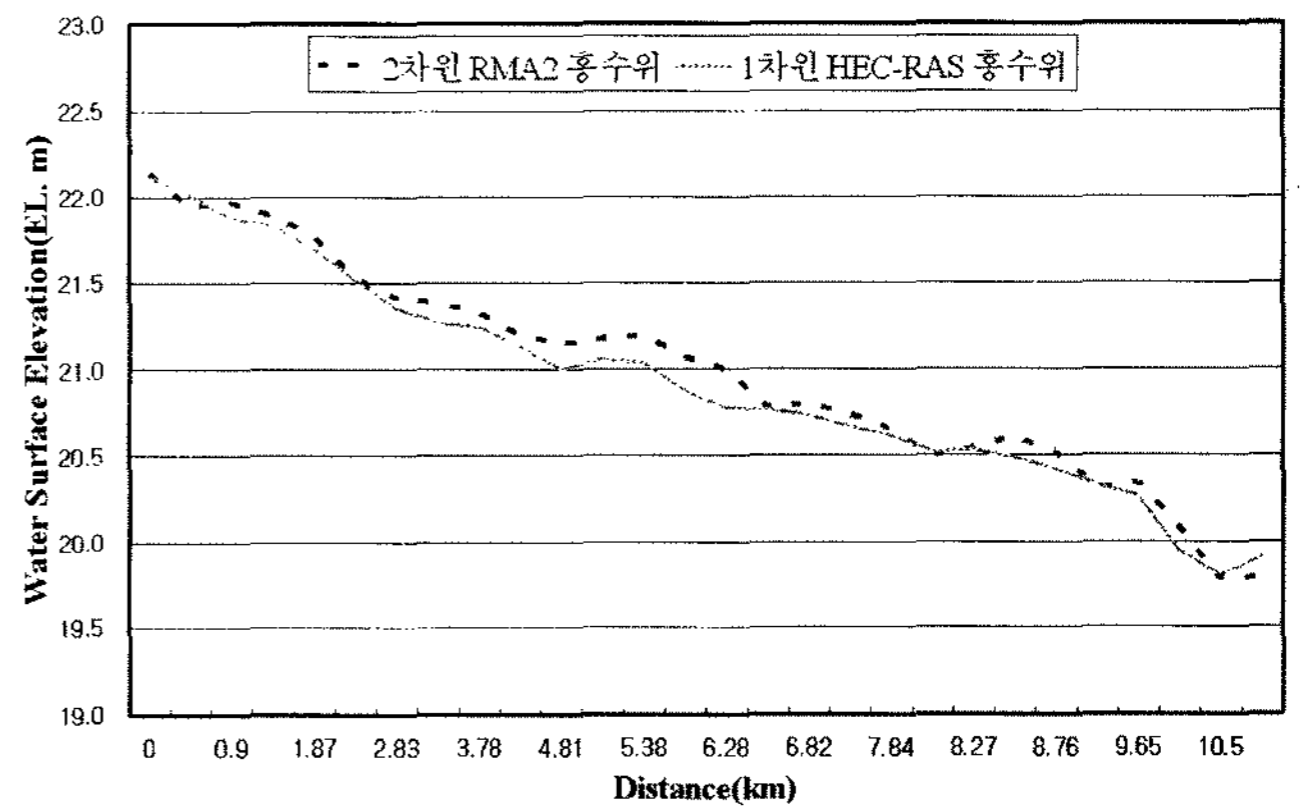


그림 4. 1차원과 2차원 모형의 홍수위 비교

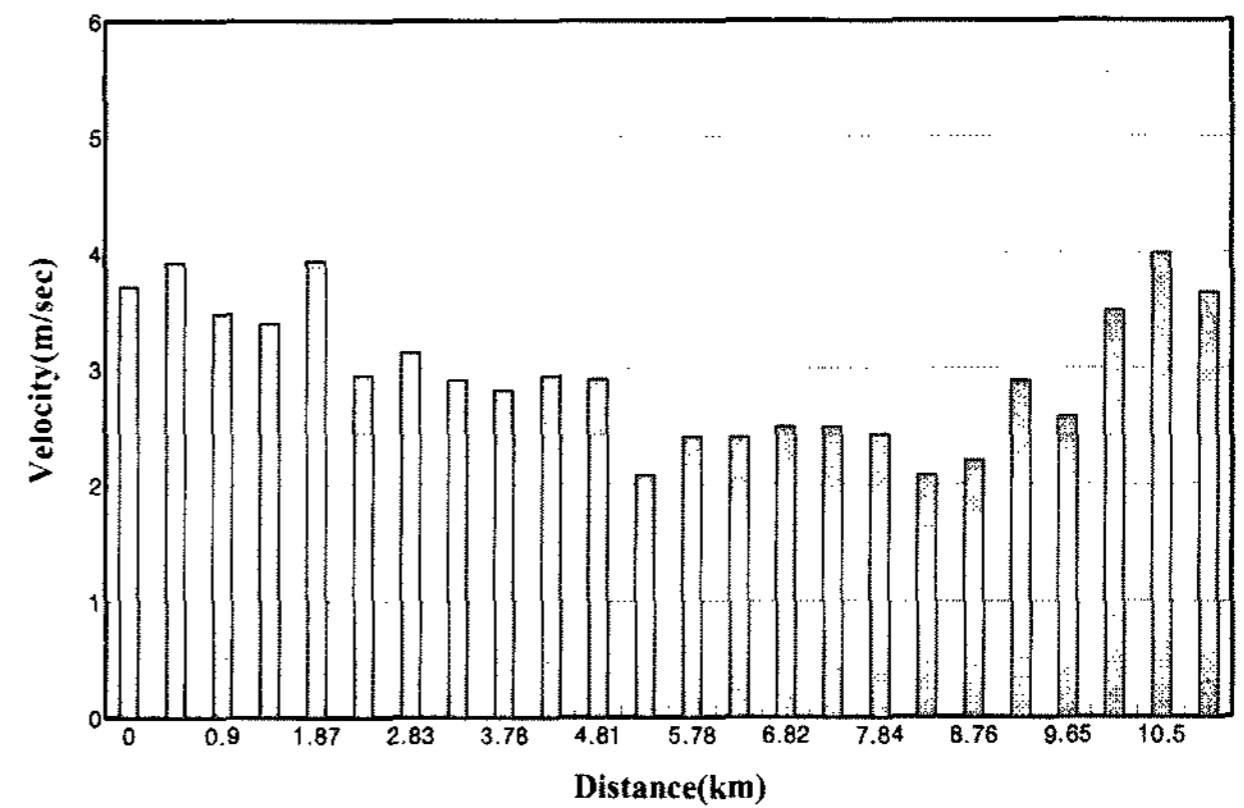


그림 5. 대상구간의 종방향 유속 분포

합류하는 지점에서의 유속 벡터도를 보여주고 있으며, 정안천 80년 빈도 홍수량의 유입으로 인해 유속이 감소하고 정안천의 좌안측에 흐름의 역행이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 대상구간에서 만곡부에 해당되는 단면에서의 횡방향에 따른 수위와 유속의 변화를 보여주는 그래프이다. 1차원 HEC-RAS 모형에서는 동일한 단면에서 수위와 유속의 변화가 없고 일정하지만 2차원 RMA2 모형에서는 내측보다 외측에서 수위가 높게 나타났으며, 수위의 증가로 유속은 감소한 것으로 나타났다. 이에 반해 내측은 외측보다 수위가 낮게 나타났으며, 유속은 증가한 것으로 나타났다. 이

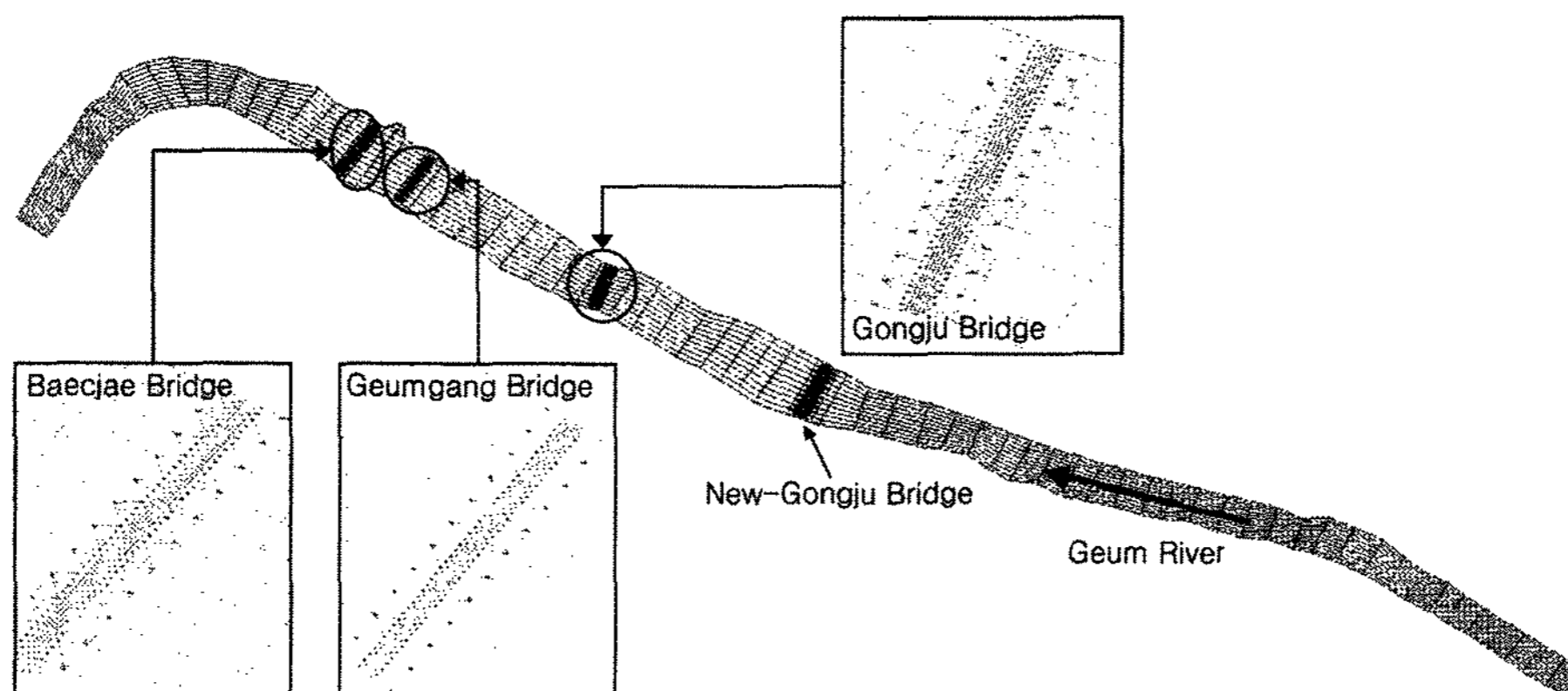


그림 3. 대상구간의 유한요소망

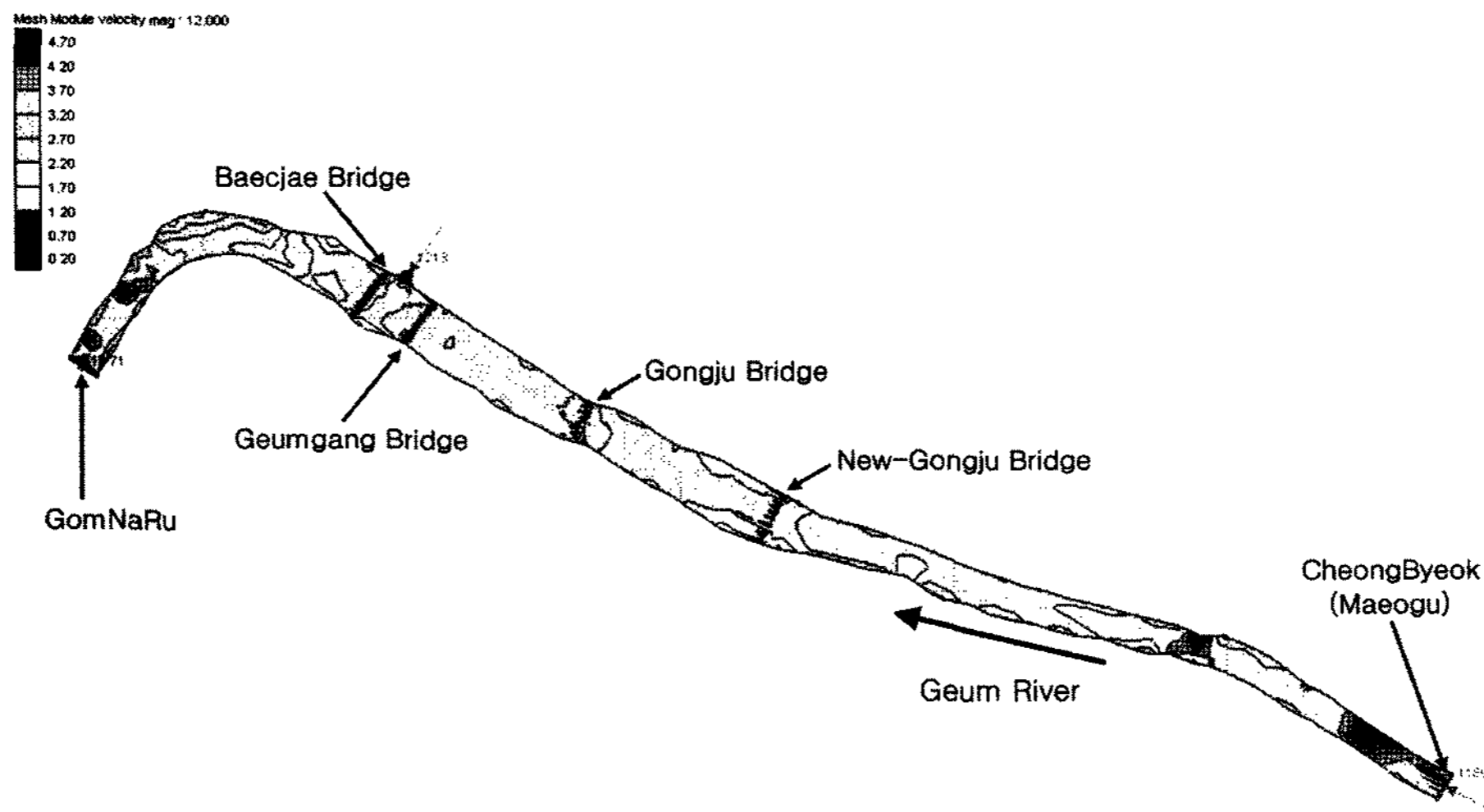


그림 6. 유속 분포도

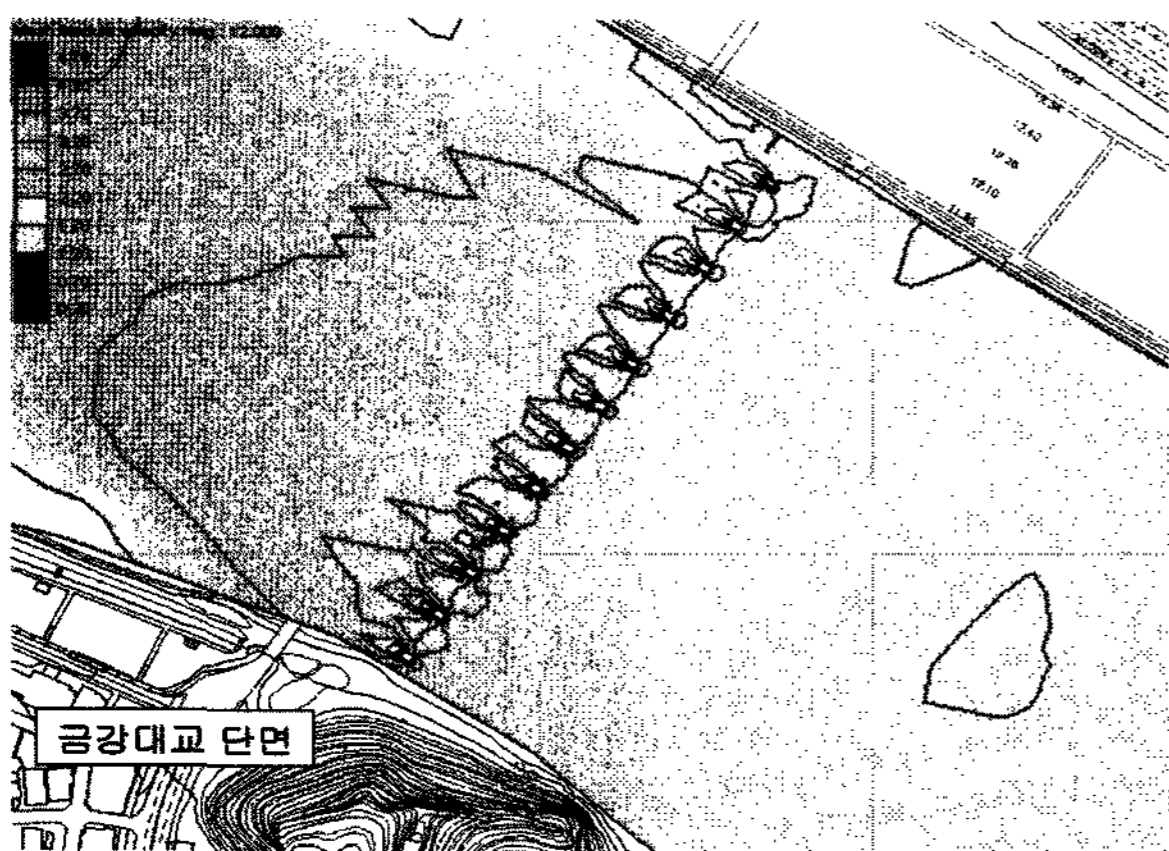


그림 7. 유속 분포도(금강대교 단면)

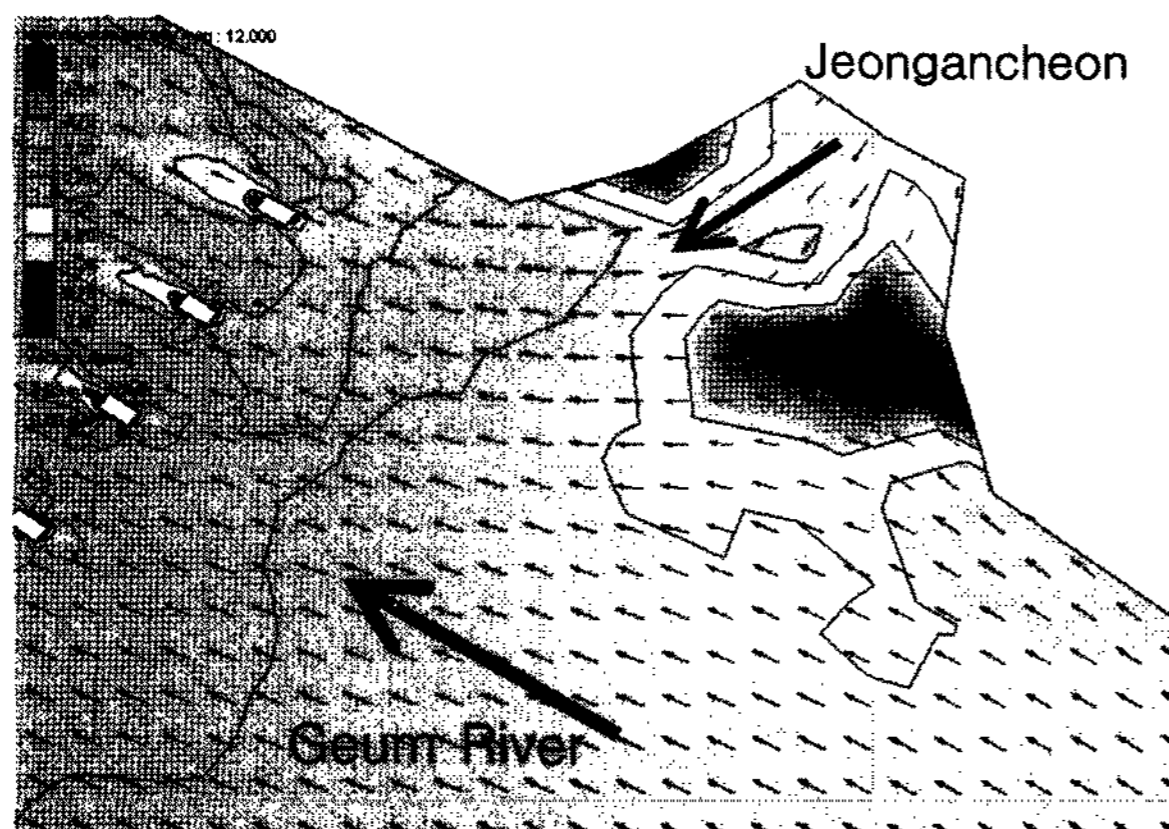


그림 8. 유속 벡터도(정안천 합류지점)

는 종방향 흐름에 의한 원심력의 작용으로 외측제방 근처에서 수면이 상승하고 수심방향의 깊이에 따라 유속의 차이가 발생하였기 때문이라고 판단된다.

3.3 SED2D 모형의 적용

3.3.1 입력자료

(1) 부유사 농도

2차원 하상변동 모형인 SED2D 모형의 상류단 경계조건인

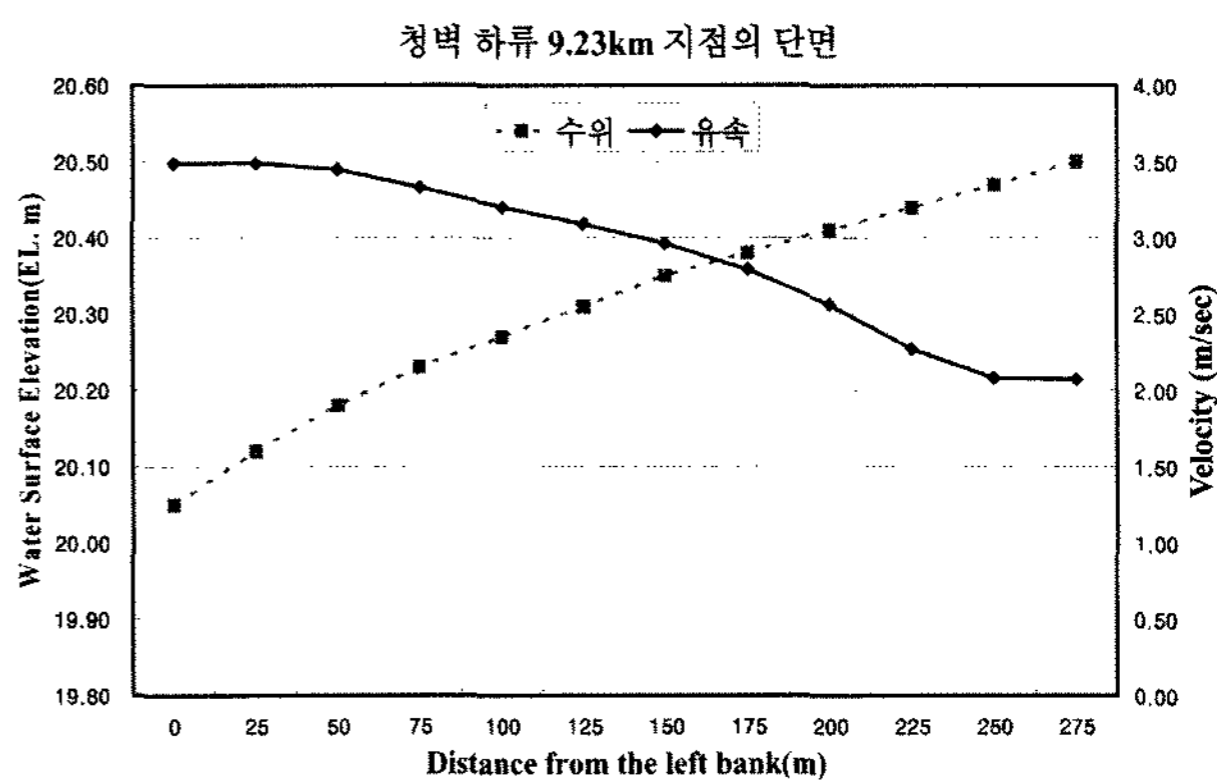


그림 9. 만곡부의 유속과 수위 비교 (청벽 하류 9.23km 지점의 단면)

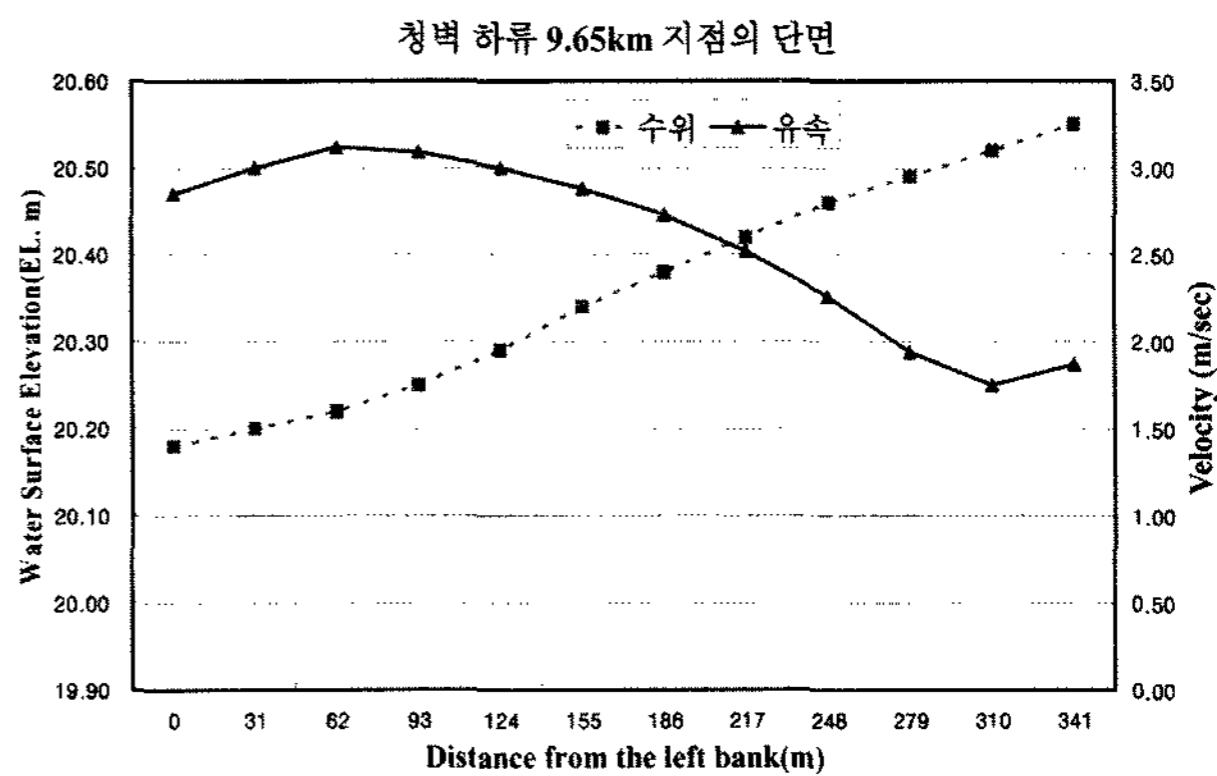


그림 10. 만곡부의 유속과 수위 비교(청벽 하류 9.65km 지점의 단면)

부유사 농도는 “금강유역조사(건설교통부, 한국수자원공사, 2006)”에 수록된 공주지점에서의 유사량 실측 자료를 이용하여 산정하였다. 부유사 농도 실측 자료를 바탕으로 유량과 부유사 농도의 상관관계를 도출하였으며, 회귀분석 결과는 그림 11과 같다. 유량과 부유사 농도의 상관방정식을 이용하여 100년 빈도 홍수량에 따른 부유사 농도가 2.384g/l로 결정되었으며, 이 값을 상류단 경계조건으로 사용하였다.

(2) 대표 입경(d_{50})

대표 입경(d_{50})은 부유사 농도와 함께 하상변동을 모의함에

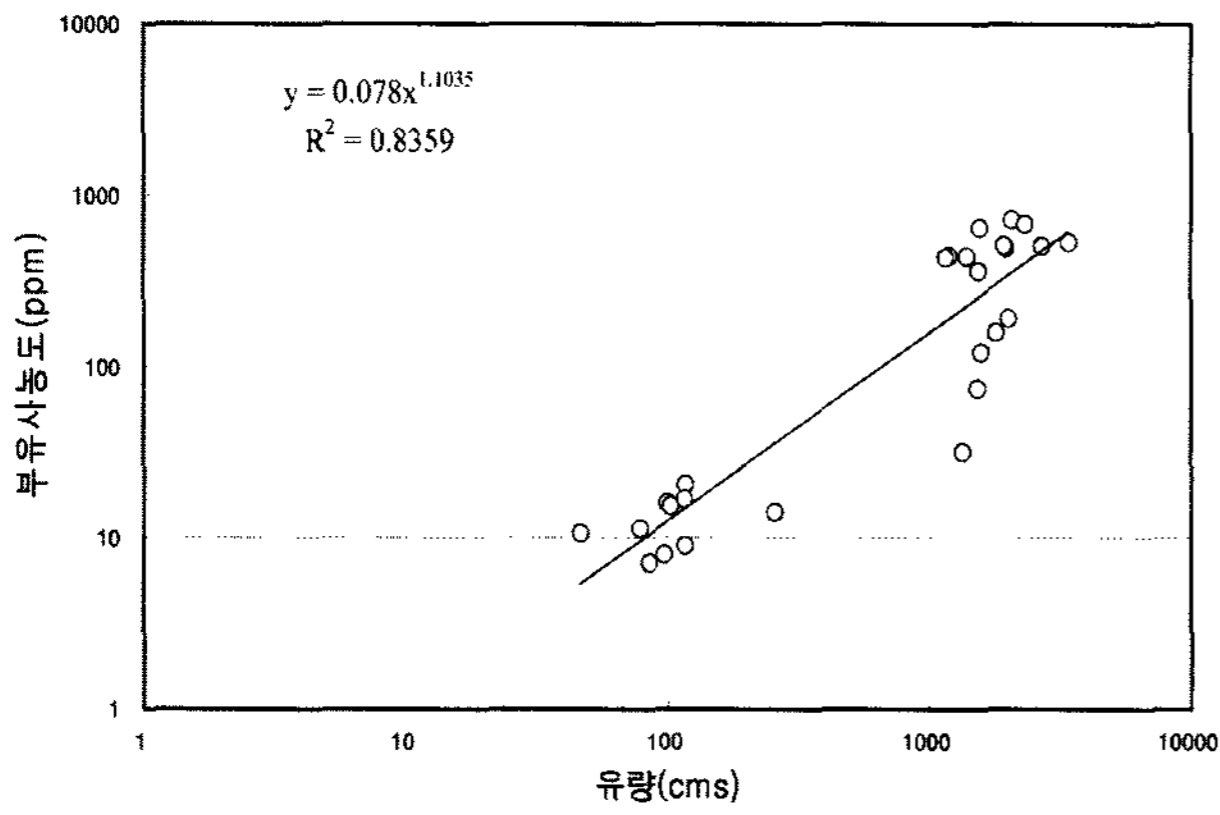


그림 11. 유량과 부유사농도의 회귀곡선

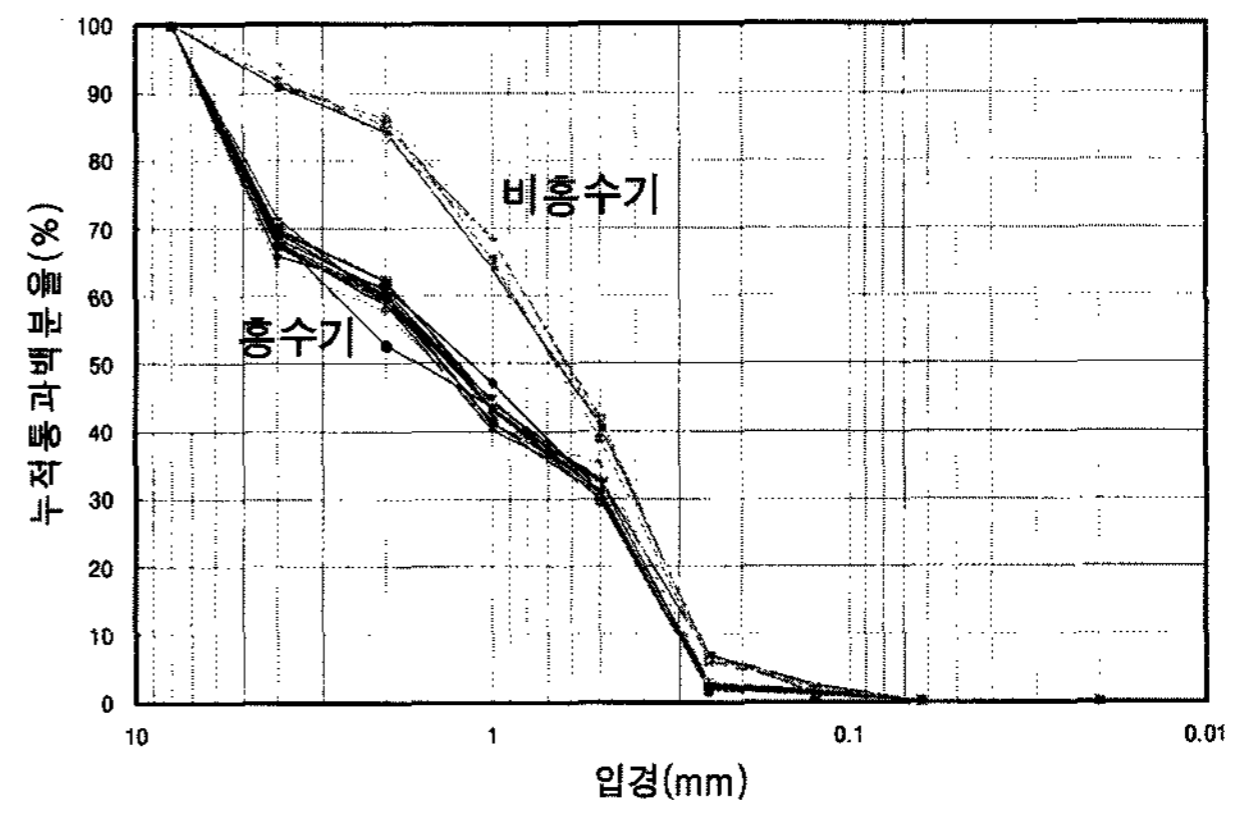


그림 12. 하상토 입도 분포(공주 지점)

있어 중요한 입력 자료로서, 본 연구에서 대표 입경(d_{50})은 “금강유역조사(건설교통부, 한국수자원공사, 2006)”에 수록된 공주지점에서의 하상토 입도분포를 이용하여 산정하였다. 그림 12를 보면 입도분포가 홍수기와 비홍수기로 구분되어 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 홍수기 일 때의 하상변동을 모의하고자 하므로 홍수기일 때의 대표 입경(d_{50}) 1.4 mm를 입력 자료로 사용하였다.

(3) 유사확산계수

유사확산계수는 SED2D 모형의 사용자 지침서에 수록된 표 1의 값을 바탕으로 결정하였다. 본 연구에서는 대상구간의 유속과 하천의 크기를 고려하여 100 m²/sec를 사용하였다.

(4) 침강속도

침강속도는 식 (5)의 Gibbs의 경험식을 사용하여 계산된 0.2013 m/sec를 사용하였다.

$$\omega = \frac{-6\mu + \sqrt{2/3\gamma(\rho_s - \rho)D^2 D_g + 36\mu^2}}{\rho D_g} \quad (5)$$

여기서, D_g (cm)는 $0.02322 + 0.1488D$ 이며, ω 는 침강속도(m/sec), D_s 는 입자의 직경(cm), ρ 는 밀도(g/cm³), μ 는 점성계수(g/m·sec)이다.

(5) 이송가능한 모래크기 및 모래층의 두께

이송가능한 모래크기는 “금강유역조사(건설교통부, 한국수자원공사, 2006)”에 수록되어 있는 공주지점의 하상토 입도분포를 참조하여 0.25 mm를 사용하였으며, 모래층의 두께는 “금강 하상변동조사(충청남도, 2000)”에 수록된 내용을 바탕으로 1.0 m를 사용하였다. 그리고 하상 전단응력 공식은 Manning의 전단응력 공식을 사용하였다.

(6) 그 밖의 입력 자료

SED2D 모형의 그 외의 입력 자료 중에서 하상변동에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 자료로 판단된 다음의 자료들은 사용자 지침서에서 권장하는 값을 사용하였다. 비중은 2.65를 사용하였으며, Crank-Nicholson θ 값은 0.67, 모래하상의 골재형상계수는 0.67, 특성퇴적길이요소와 특성침식길이요소는 각각 1과 10을 사용하였다.

3.3.2 하상변동 모의 결과분석

SMS 모형은 RMA2 모형을 실행시킨 후 이의 출력파일을 이용하여 SED2D 모형을 실행하게 된다. 따라서 RMA2 모형의 수리 동력학적 출력자료와 구축된 유한요소망의 지형데이터를 가지고 12시간 동안 0.5시간 간격으로 SED2D 모형을 실행하여 100년 빈도 홍수량에 따른 대상구간의 하상변동을 모의하였다.

그림 13 대상구간의 하상변동 분포도를 보면 대체적으로 0.36 m ~ -0.90 m의 범위에서 하상이 변동했음을 알 수 있다. 대상구간의 대부분의 구간에서 주로 퇴적이 발생하였으며, 하류부에 침식이 발생한 것을 알 수 있다. 하류부에 많은 침식이 발생한 이유는 하폭의 축소로 인한 통수단면적의 감소와 흐름이 만곡부를 통과하면서 빠른 유속이 발생하였기 때문이라고 판단된다. 그림 14는 대상구간의 종방향 하상변동 분포를 나타내며, 퇴적이 최대 발생한 단면은 청벽 하류 2.33 km 지점의 단면, 침식이 최대 발생한 단면은 청벽 하류 10.16 km 지점의 단면으로 나타났다.

대상구간의 주요 단면에 대하여 보다 세밀하게 살펴보면 청벽 하류 2.33 km 지점의 단면은 이전의 단면보다 하폭이 증가되는 단면으로 단면 확대에 의한 유속의 감소로 퇴적되는 경향이 나타났다. 이에 반해 청벽 하류 각각 0.45 km, 1.87 km, 10.08 km 지점의 단면은 이전의 단면보다 하폭이 감소되는 단면으로 단면 축소에 의하여 유속이 증가하게 되

표 1. 유사확산계수(EMRL, 2000)

Typical Location	Current Speed (m/sec)	Typical Element Size (km)	Dispersion Coefficient(m ² /sec)
Medium-size river	1.0 ~ 1.5	0.1 ~ 0.5	100
Open bay	0.5 ~ 1.0	0.75	100
Tidal river	0.2 ~ 1.0	0.1 ~ 0.3	5 ~ 10

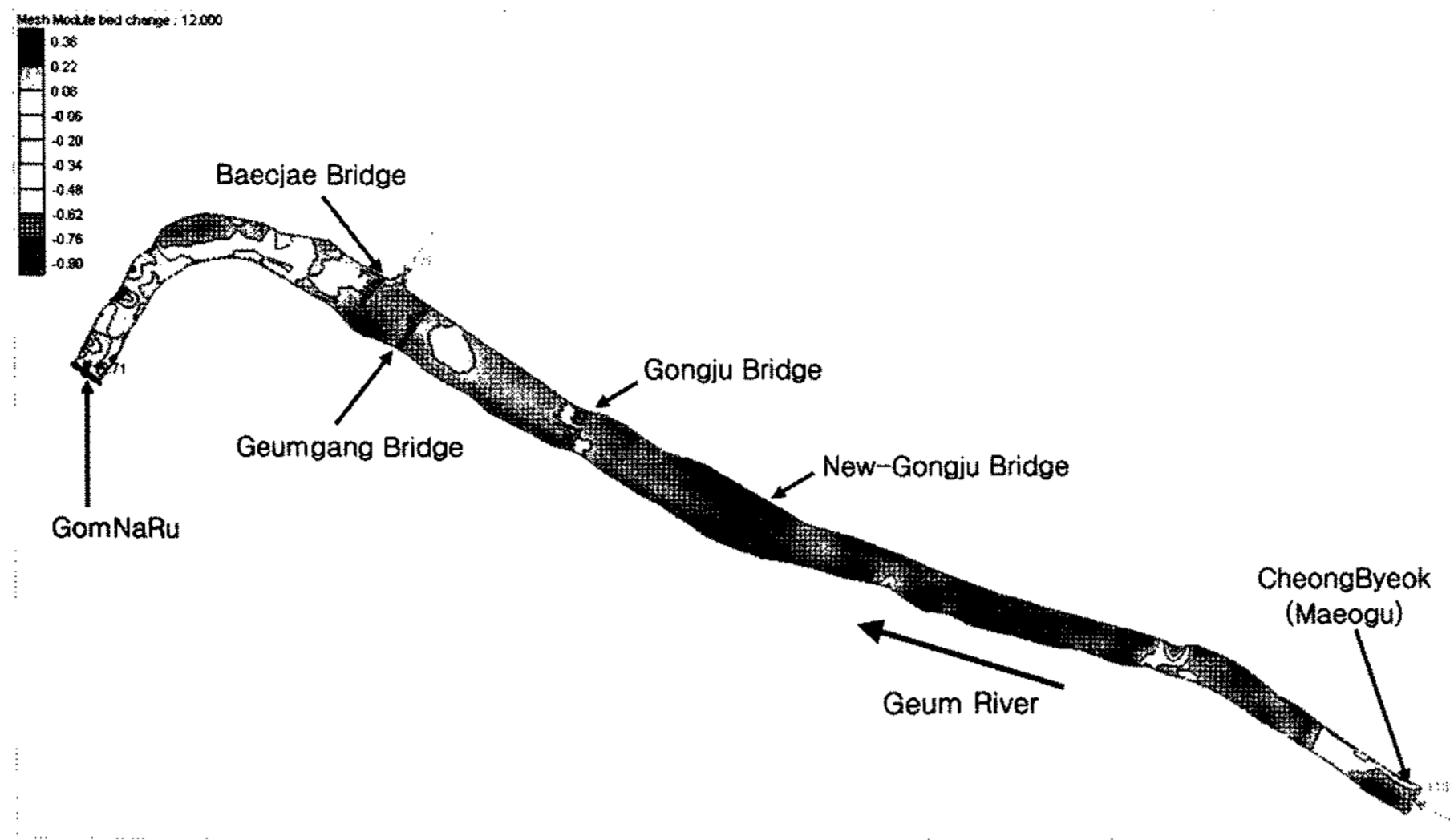


그림 13. 대상구간의 하상변동 분포도

고 이로 인해 침식되는 경향이 나타났다. 그림 15는 청벽 하류 2.33 km 지점의 단면에서 횡방향 유속과 하상변동을 비교한 그래프이며, 그림 16과 그림 17은 청벽 하류 각각 0.45km, 1.87km 지점의 단면에서 횡방향 유속과 하상변동을 비교한 그래프이다. 단면 축소구간과 확대구간에서 유속과 하상변동의 관계를 통해 유속이 빠른 곳에서는 침식, 유속이 느린 곳에서는 퇴적의 경향이 강해진 것으로 나타났다.

그림 18은 금강대교 단면에서의 하상변동 분포도를 보여주

며, 교량의 교각과 교각 사이에서 빠른 유속으로 인하여 침식하는 경향이 나타났다. 그림 19는 정안천이 합류하는 지점에서의 하상변동 분포도를 보여주고 있으며, 정안천의 유입유량으로 인한 유속의 감소로 정안천의 좌안측에 퇴적이 발생한 것을 알 수 있다.

그림 20과 그림 21은 각각 대상구간에서 만족부에 해당되는 단면에서의 횡방향에 따른 유속과 하상변동의 변화를 보여주는 그래프이며, 유속이 높게 나타난 내측에서는 하상이

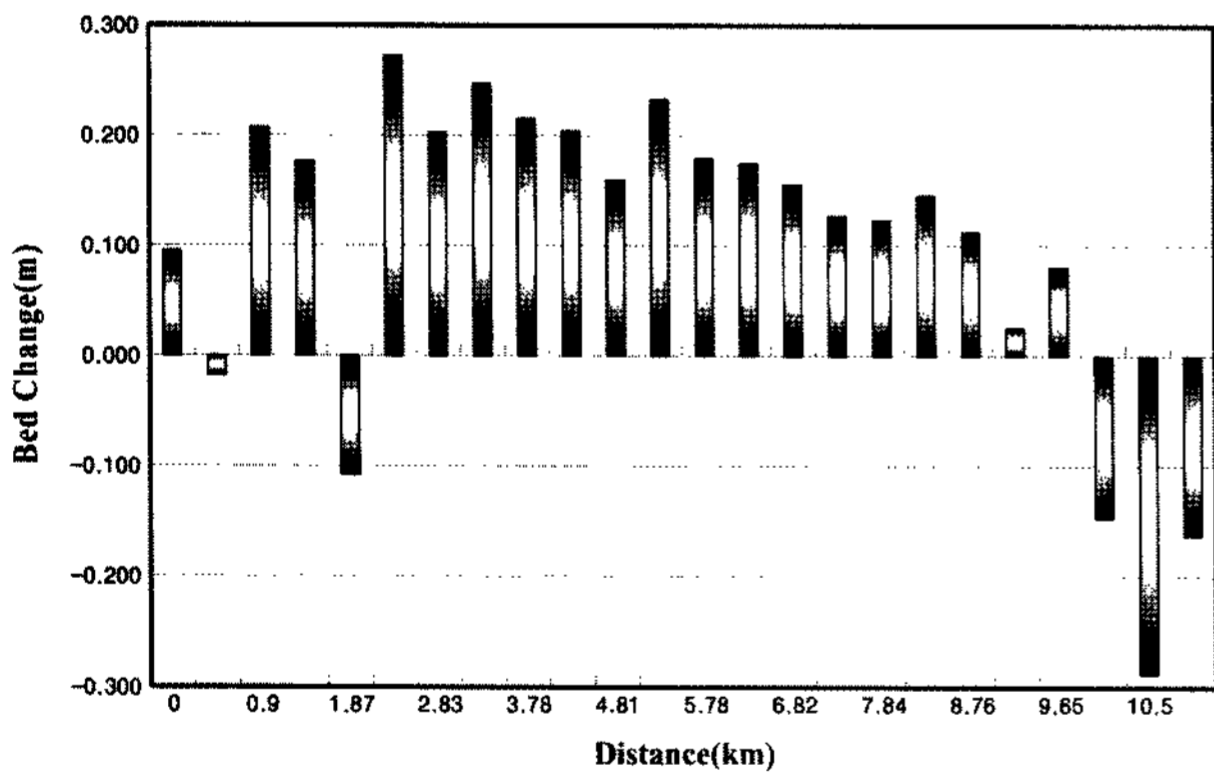


그림 14. 대상구간의 종방향 하상변동 분포

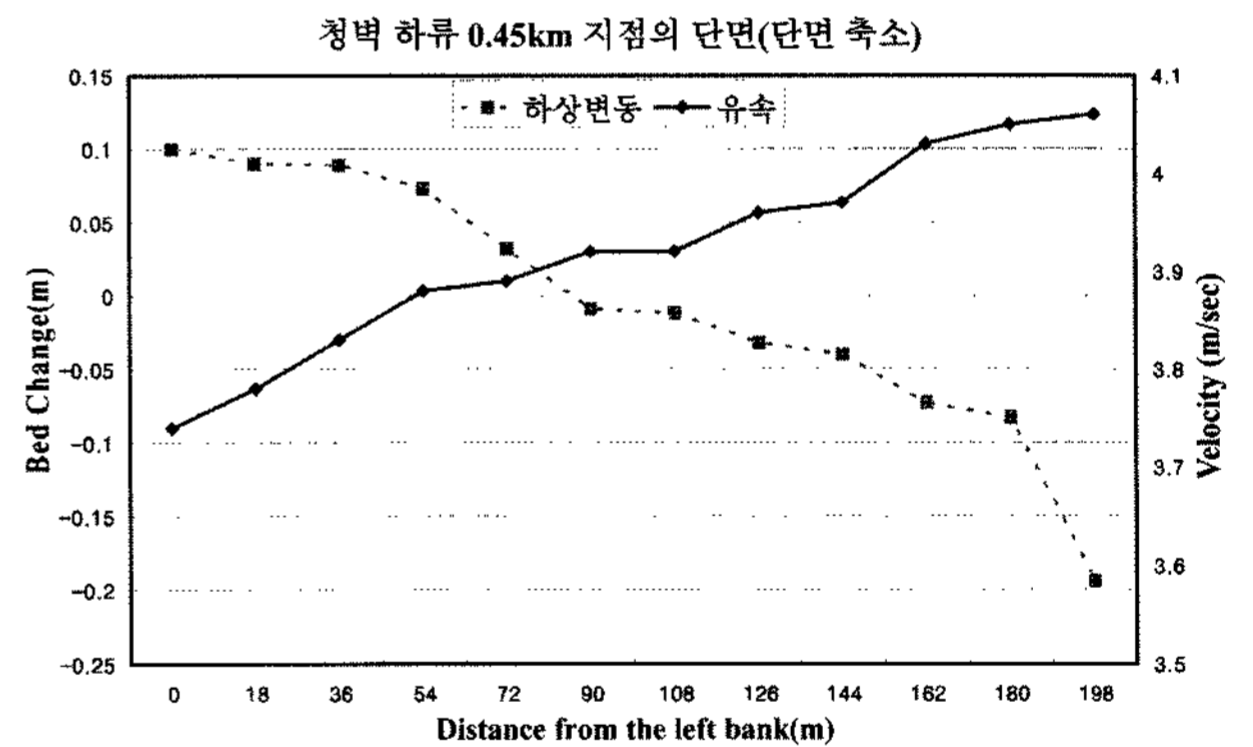


그림 16. 횡방향 유속과 하상변동 비교 (청벽 하류 0.45 km 지점의 단면)

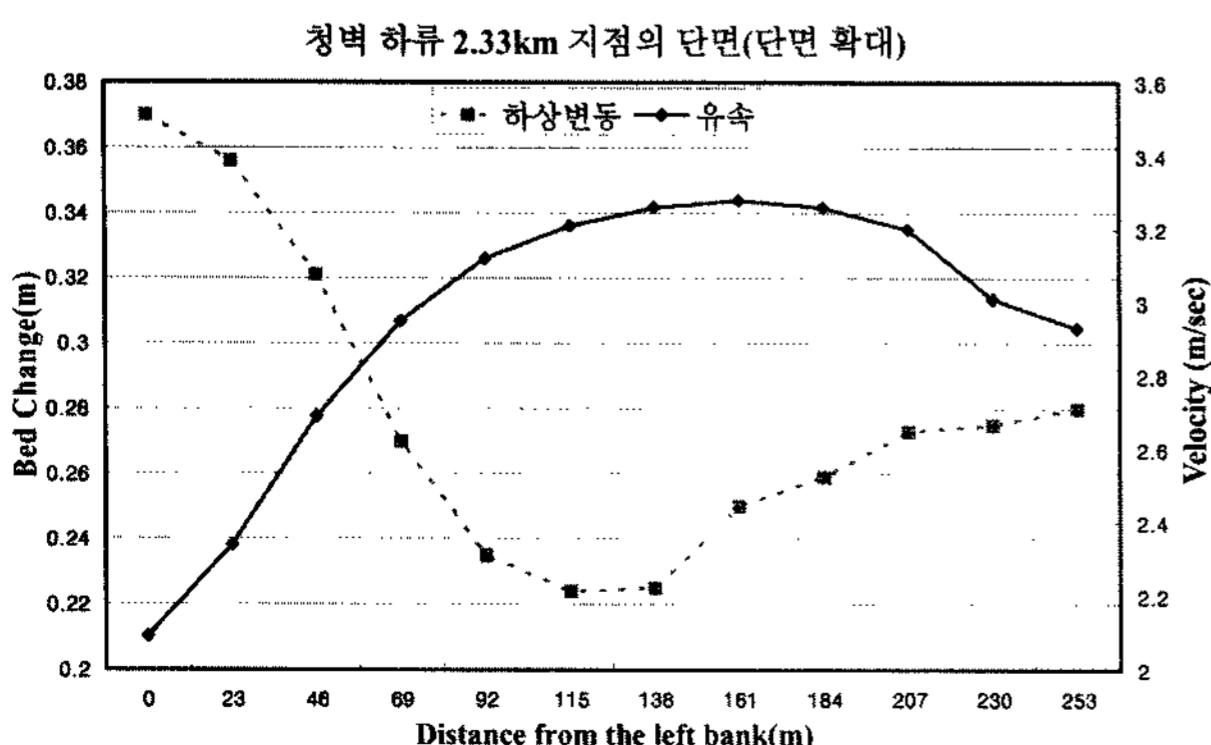


그림 15. 횡방향 유속과 하상변동 비교(청벽 하류 2.33 km 지점의 단면)

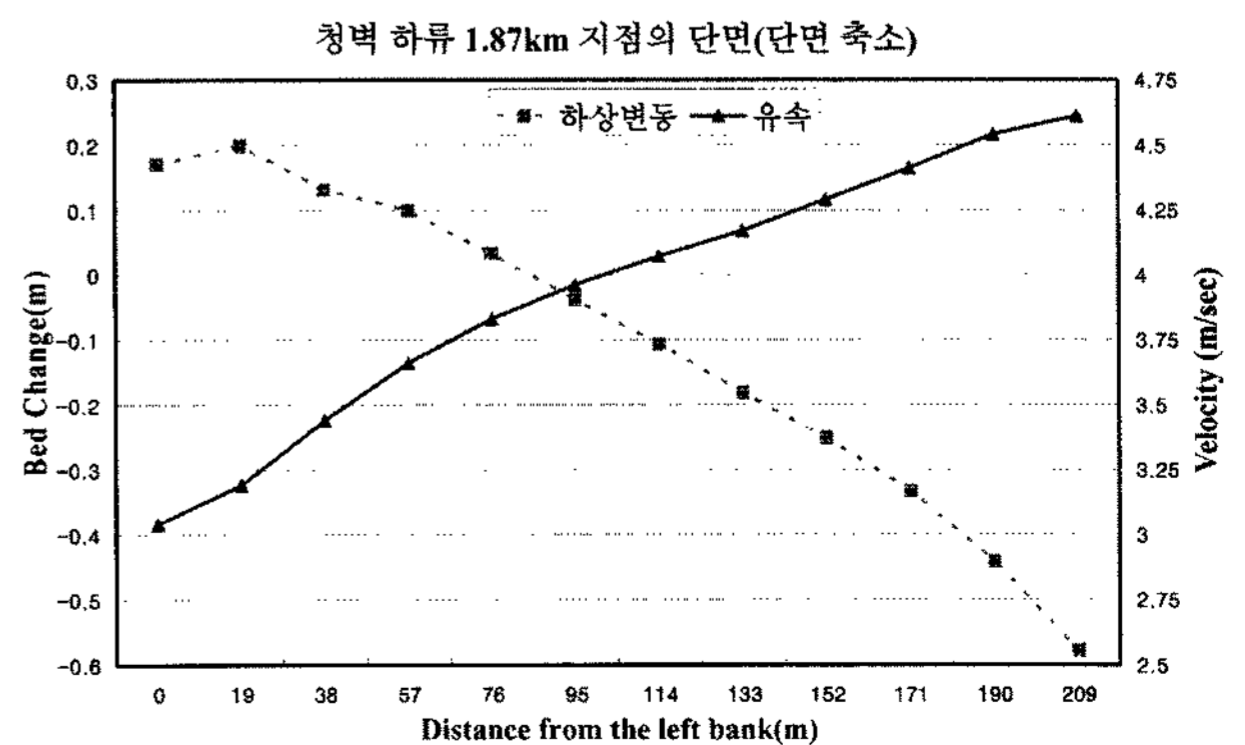


그림 17. 횡방향 유속과 하상변동 비교(청벽 하류 1.87 km 지점의 단면)

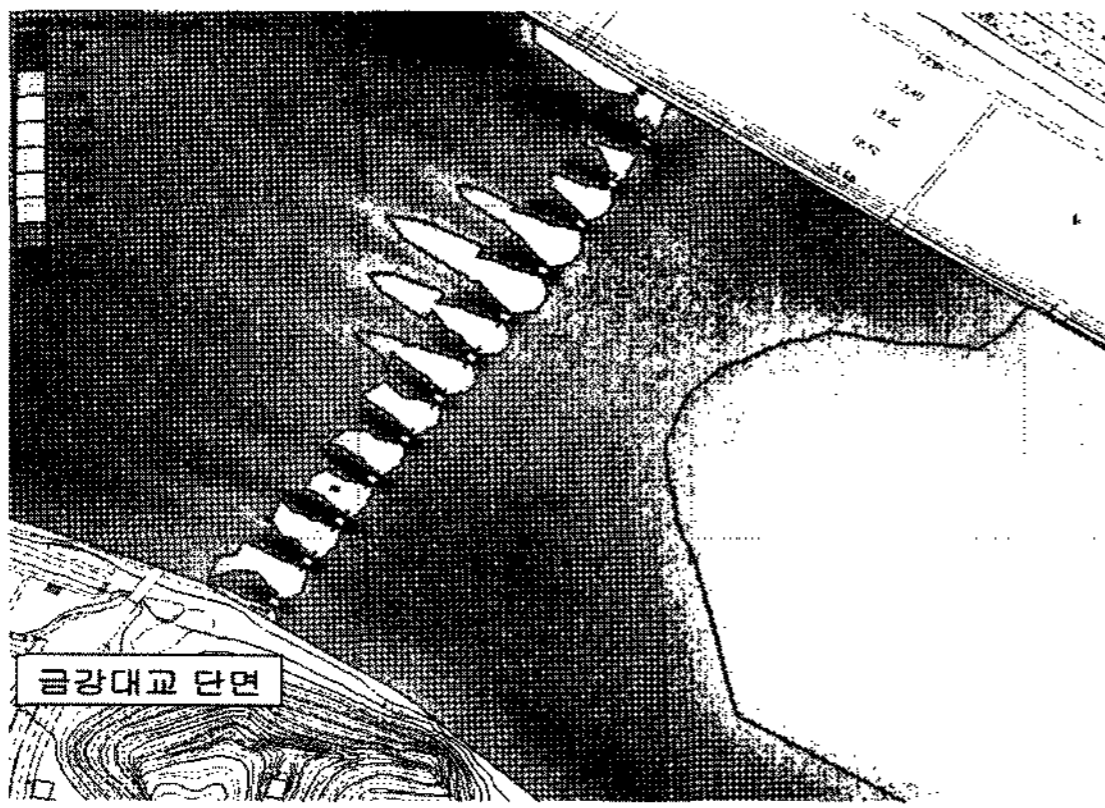


그림 18. 하상변동 분포도(금강대교 단면)

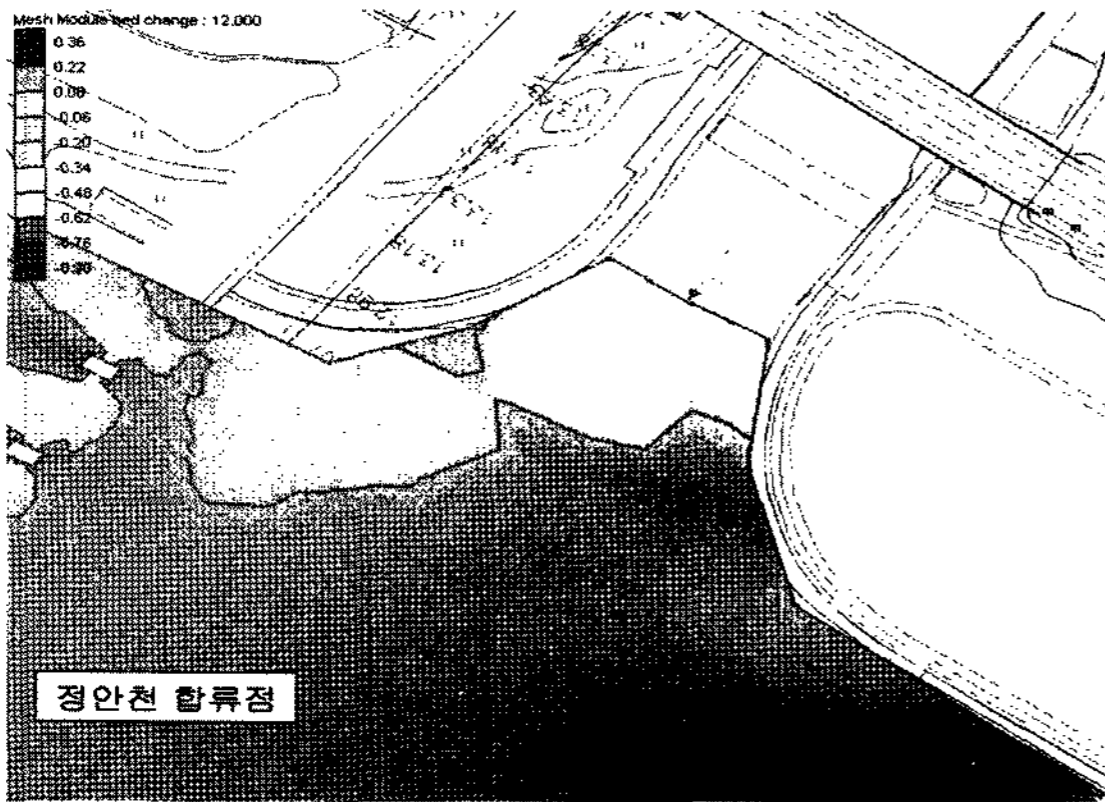


그림 19. 하상변동 분포도(정안천 합류점)

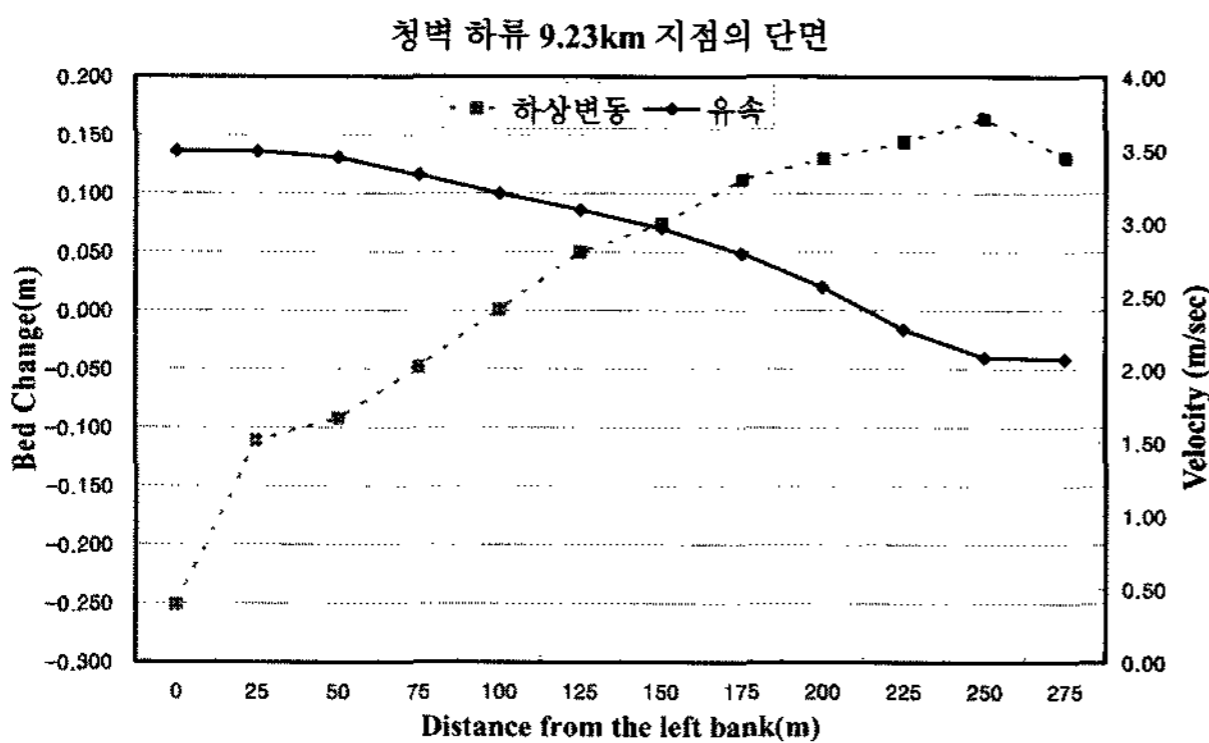


그림 20. 만곡부의 유속과 하상변동 비교(청벽 하류 9.23km 지점의 단면)

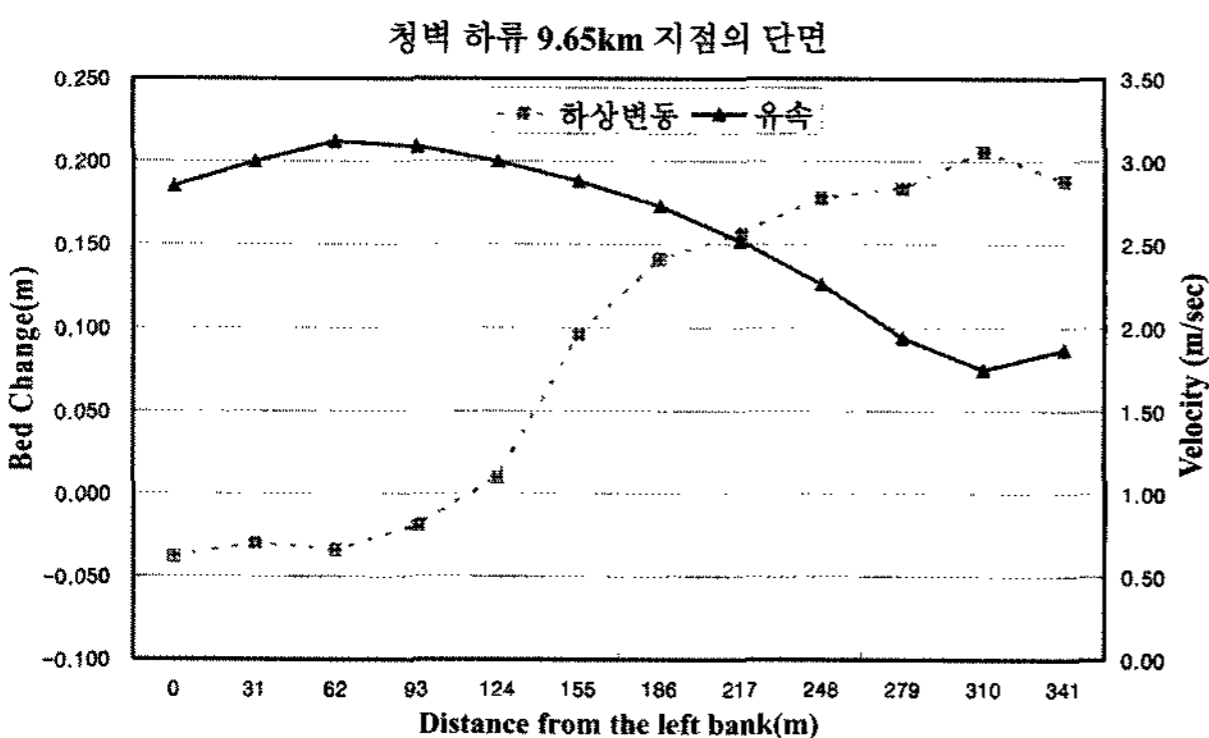


그림 21. 만곡부의 유속과 하상변동 비교(청벽 하류 9.65km 지점의 단면)

침식되는 경향이 나타났으며, 이에 반해 내측보다 유속이 낮게 나타난 외측에서는 하상이 퇴적되는 경향이 나타났다. 대상구간의 주요 단면에서 하상변동 분포는 흐름분석 모형인 RMA2에서 계산된 유속과 비교해 본 결과 전반적으로 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타났다.

3.4 매개변수의 민감도 분석

본 연구에서는 2차원 하상변동 모형인 SED2D 모형에서 어떠한 입력 자료가 하상변동에 민감한 영향을 미치는 지를 알아보기 위하여 주요 매개변수의 변화에 따른 민감도 분석을 실시하였다. 하상변동에 큰 영향을 미치는 매개변수로는 유사확산계수, 부유사 농도, 침강속도, 대표 입경, 모래층의 두께 그리고 이송가능한 모래크기 등으로 판단되며, 이들의 값을 일정비율씩 증가 또는 감소(50%~50%)시켜 가면서 대상구간에 대하여 모의를 수행하였다. 표 2는 SED2D 모형에서 매개변수 값의 변화에 따른 하상변동 분포를 나타내며, 6개의 매개변수 중 부유사 농도, 모래층의 두께, 이송가능한 모래크기의 변화에 따라 하상변동 분포 결과에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 반면에 유사확산계수, 침강속도, 대표 입경의 변화는 하상변동 분포 결과에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 금강의 중류에 해당되는 공주대교 상·하류 구간에 대하여 100년 빈도 홍수량에 따른 하천에서의 흐름특성과 하상변동을 모의하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 흐름특성 모의 결과 1차원 HEC-RAS와 2차원 RMA2에서 계산된 대상구간의 종방향 수위는 전반적으로 근접하게 모의되었으며, 2차원 모형을 적용한 결과 기존의 1차원 모형으로 모의할 수 없었던 단면의 확대 및 축소구간, 교량구간, 지류 합류구간 그리고 만곡부 구간에서의 횡방향 유속 및 수위의 변화를 모의할 수 있었다. 흐름이 급변하는 하도구간의 경우 좌안과 우안, 유심부에서의 유속과 수위는 큰 차이를 보이므로 각종 하천 개수사업에서의 홍수위 산정과 이미 시행된 개수사업의 타당성과 적정성을 정확하게 평가하기 위해서는 1차원 모형과 더불어 2차원 모형을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.
- (2) SED2D 모형을 이용하여 100년 빈도 홍수량에 따른 하상변동을 모의한 결과 대상구간의 종방향 하상변동뿐만 아니라 주요 단면에서의 횡방향 하상변동까지도 모의할 수 있었다. 대상구간의 하상변동 분포는 0.36 m~-0.90 m의 범위를 보였으며, 대부분의 구간은 주로 퇴적이 발생하였고 하류부에 많은 침식이 발생하였다. 하폭이 증가되는 단면은 단면 확대에 의한 유속의 감소로 퇴적되는 경향이 나타났으며, 이에 반해 하폭이 감소되는 단면은 단면 축소에 의하여 유속이 증가하게 되고 이로 인해 침식되는 경향이 나타났다 그리고 교량구간, 지류 합류구간, 만곡부 구간 등 대상구간의 주요 단면에서 하상변동 분포

표 2. 민감도 분석 결과

변화폭 (%)	유사확산계수	부유사 농도	침강속도	대표 입경	모래층의 두께	이송가능한 모래크기
	매개변수의 변화에 따른 하상변동 분포 (m)					
50	-0.90~0.36	-0.85~0.58	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-1.00~0.44	-0.39~0.42
40	-0.90~0.36	-0.88~0.47	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-1.00~0.44	-0.42~0.39
30	-0.90~0.36	-0.88~0.45	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-1.00~0.44	-0.50~0.40
20	-0.90~0.36	-0.90~0.45	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.97~0.38	-0.60~0.30
10	-0.90~0.36	-0.90~0.40	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.95~0.35	-0.89~0.37
기준	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.90~0.36
-10	-0.90~0.36	-0.90~0.31	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.96~0.39
-20	-0.90~0.36	-0.92~0.29	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.90~0.35	-0.95~0.40
-30	-0.90~0.36	-0.95~0.27	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.80~0.35	-1.03~0.59
-40	-0.90~0.36	-0.97~0.27	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.75~0.30	-1.00~0.80
-50	-0.90~0.36	-0.97~0.22	-0.90~0.36	-0.90~0.36	-0.75~0.30	-1.05~0.92

는 흐름분석 모형인 RMA2에서 계산된 유속과 비교해 본 결과 전반적으로 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타났다.

(3) 2차원 하상변동 모형인 SED2D 모형의 주요 매개변수의 변화에 따른 민감도 분석을 실시한 결과 부유사 농도, 모래층의 두께, 이송가능한 모래크기는 하상변동 분포 결과에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하상변동에 민감한 영향을 미치는 3가지 매개변수는 대상구간의 특성에 따라 다르게 나타나므로 모형의 입력 자료를 구축함에 있어 실측 자료를 바탕으로 구축하는 것이 보다 정확한 결과를 모의할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구의 민감도 분석 결과는 향후 하상변동 모형을 적용함에 있어 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

건설교통부, 대전지방국토관리청 (2002) 금강수계 하천정비기본계획.
 건설교통부, 한국수자원공사 (2006) 금강유역조사.
 김영복, 정승권, 심순보 (2006) 용담댐 방류에 따른 하상변동 예측. 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제6권, 제1호, pp. 69-81.
 충청남도 (1991) 정안천 하천정비기본계획.
 충청남도 (2000) 금강 하상변동조사.

최민하, 안재현, 윤용남 (2002) 2차원 모형을 적용한 장·단기의 하상변동 분석. 한국수자원학회 2002년 학술발표회 논문집(II), 한국수자원학회, pp. 817-822.
 홍성민, 정인균, 이준우, 김성준 (2004) SMS를 이용한 경안천 하류구간의 하천흐름 분석. 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제7권, 제1호.
 Environmental Modeling Research Laboratory (2000) SMS(Surface-Water Modeling System) SED-2D-WES version 4.3 User's Manual. Brigham Young University.
 Jennifer, G. Duan. and S. K. Nanda. (2006) Two-dimensional depth-averaged model simulation of suspended sediment concentration distribution in a groyne field. *Journal of Hydrology*, Vol. 327, pp. 426-437.
 Olsen, N. R. B. and Kjellesvig, H. M. (1998) Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 579-590.
 Olsen, N. R. B. and Kjellesvig, H. M. (1999) Three-dimensional numerical modeling of bed changes in a Sand trap. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 189-198.

© 논문접수일 : 2007년 12월 17일
 © 심사의뢰일 : 2007년 12월 20일
 © 심사완료일 : 2008년 01월 21일