

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 10. 28.

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 최성욱

연구원 : 최성욱

협동연구기관명 : (주) 웹솔루스

협동연구책임자 : 오정환

보고서 요약서

과제고유번호	11기술혁신 C04	해 당 단 계 연구 기 간	2013. 05. 29. 2014. 09. 28.	단 계 구 분	3 / 3
연구사업명	건설교통기술촉진연구사업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발			
	단위과제명	하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발			
연구책임자	최성욱	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 41명 내부 : 41명 외부 : 0명	총연구비	정부 : 537,000천원 기업 : 179,200천원 계 : 716,200천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	연세대학교		참여기업명	(주) 웹솔루스	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
하천에서 물의 흐름은 난류이며 이를 3차원으로 모의하기 위해서는 적절한 유동모형이 필요함 국내 하천환경에서 유사이동량을 적절히 예측하기 위해 는 소류사 공식 및 부유사량 산정기법에 관한 다양한 검 정이 필요함 구미 선진국에서 개발된 유사이동 모형을 국내 하천에 직 접 적용하는 경우 지역적 특수성을 반영할 수 없음 기존에 개발된 2차원 모형의 경우 하천시설물 주변 정수 압 법칙이 성립되지 않는 구간에서 유동 및 하상변동의 정확한 예측이 불가함 그러므로 본 연구에서는 하도 형태를 고려하여 좌표가 변 환된 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식을 풀고 k-epsilon 모형을 사용하여 하천 유동을 3차원으로 해석 함 유사량 산정공식과 하상토 보존방정식을 사용해 유사량 및 하상변동량 예측가능한 통합모형 개발함 통합모형의 입력자료 처리, 3차원 격자생성, 통합모형에서 출력되는 자료 후처리기법을 개발하여 통합모형에 적용함 국내 하천에 적합한 유사량 산정기법 제시 및 검증함				보고서면수	158
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	유사이동, 하상변동, 하천형태학, 홍수재해, 기후변화			
	영 어	sediment transport, bed elevation change, river morphology flood disaster, climate change			

요 약 문

I. 제목

하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발

II. 연구개발과제 개요

현재 우리나라는 기후변화에 의한 돌발홍수 발생 주기가 변화하고 홍수량이 변화하여 하천의 홍수대응 능력이 제고되고 있다. 특히 4대강 사업 등 하천개발에 따른 영향을 평가하기 위해서는 단순한 1차원적 흐름뿐만 아니라 수리구조물 및 준설 등에 의한 흐름변동에 대해 좀 더 면밀한 흐름분석이 필요하다. 하천에서 물의 흐름은 난류이며 이를 3차원으로 모의하기 위해서는 적절한 유동모형이 필요하다. 또한 하천에서 하상변동을 모의하기 위해서는 유사량을 산정할 필요가 있으며, 국내 하천환경에서 유사량을 적절히 예측하기 위해서는 국내하천특성에 맞는 유사량 산정공식의 검정이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 하천에서 유사이동 및 하상변동을 모의할 수 있는 3차원 수치모형을 개발하고 국내 하천 특성에 적합한 유사량 산정공식을 제시하는 것이다. 또한 모형을 사용할 수 있는 사용자편의환경을 개발하여 통합모형을 구축하는 것에 목적이 있다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

하천에서 유사이동 및 하상변동을 모의하기 위하여 3년간 단계를 나누어 연구를 진행하였다. 1차년도의 연구내용으로는 다양한 난류해석 기법에 대하여 조사하고 시험모의를 수행하였으며 국내에 적합한 유사량 산정기법을 제시하고 적용하였다. 또한 3차원 계산격자 발생기법 기술을 조사하여 모형구축을 위한 준비를 수행하였다. 2차년도의 연구내용으로는 난류해석모형을 적용한 유동해석기법과 그 알고리즘을 제시하였고 1차년도에 제시한 유사량 산정기법을 실제 하천에 적용하여 적용성을 검증하였다. 또한 입력시스템을 설계하고 구축하여 이후 통합모형에 사용될 수 있도록 하였다. 3차년도의 연구내용으로는 유동모형이 하도형태에 맞춰 적용될 수 있도록 곡선좌표계로 이루어진 유동모형을 구축하고 유사량 및 하상변동을 모의 가능한 통합모형을 개발하였다. 개발한 모형을 실험 자료에 적용하여 흐름 및 난류량에 대해 검증하고 하상변동양상에 대해 분석하였다. 모형의 후처리 기법을 개발하고 2차년도의 입력자료 구축 시스템과 결합하여 통합프로그램을 개발하였다.

난류해석 기법을 조사한 결과 본 연구에서 활용하기에 가장 적합한 난류모형으로 $k-\epsilon$ 모형을 선정하였고 협폭 실험수로에 시험모의를 수행하였다. 그 결과 자유수면 근처에서 유속최대점이 하강하는 유속최대점 침강현상은 모의하지 못하나 그 외 흐름의 전반적인 양상은 잘 모의하며 특히 비선형 모형은 난류의 비등방성

에 의해 발생하는 이차류까지 잘 모의하는 것을 확인하였다. 특히 이차류에 의한 영향이 상대적으로 적은 광폭수로의 경우 표준 모형이 비선형 모형과 거의 유사한 결과를 나타낸 것을 확인하였다. 난류량의 경우 전반적으로 잘 모의하는 것을 확인하여 모형이 본 연구에 적합한 모형인 것으로 고려하였다. 유동모형의 경계조건으로 벽법칙을 사용하고 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 지배방정식의 압력항을 해결하였다.

하천형상 모의를 위해 유동모형에 곡선좌표계를 도입하였다. 곡선좌표계에서는 비엇갈림 격자를 이용하였으며 운동량보간법을 도입해 비엇갈림 격자의 계산진동을 감쇄시켰다. 유동모형을 통해 산정된 흐름정보로 유사량을 산정하였고 이를 하상토 보존방정식에 대입해 하상변동량을 산정하였다. 개발된 모형을 수로에 적용하여 흐름 및 난류량에 대하여 검증하고 특성을 분석하였다.

유사량 산정기법은 유동에 대하여 횡방향 유량분배법을 사용하였고 다양한 유사량 산정공식을 적용하여 비교해 본 결과 CL공식이 적합한 것을 확인하였다. 하상전단응력에 대하여 하상형상과 표면마찰에 의한 항을 분리시켜 표면마찰만이 유사이동에 영향을 끼치도록 고려하였다. 마지막으로 유사이동에 대하여 입자분포에 의한 영향을 고려하였다. 해외하천에 적용하여 유사량 산정공식을 검증하였고 이후 국내 하천에 적용하였다.

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구에서 최종적으로 개발한 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형을 흐름에 대하여 Rozovskii (1961)가 만곡수로에서 측정한 실험자료에 적용하였다. 곡률내측반경-폭 비가 각각 0.5와 2인 2가지 수로에 적용하여 모의결과와 실측자료를 비교하여 적용성을 확인하고 흐름 및 하상변동 특성에 대하여 분석하였다. 만곡이 시작되는 지점에서 만곡 내측이 확장되고 만곡 외측이 가로막혀 만곡 내측에서 유속이 빨라지나 만곡구간에서 발생하는 원심력에 의해 만곡이 끝나는 지점에서는 만곡 외측의 유속이 빨라지는 양상을 보인다. 여기에서 곡률내측반경-폭 비에 따라 원심력과 내측확장의 지배도가 달라지며 이에 따라 만곡구간에서 유속분포가 달라진다. 또한 난류량과 레이놀즈응력, 전단속도는 만곡 내측에서 크게 발생해 내측이 침식될 것으로 고려되었으나 이차류가 만곡내측으로 흐르게 되어 유사량 내측으로 퇴적되는 양상을 보이게 된다. 일련의 과정이 충분히 설명가능하며 실제 실험측정결과와 잘 맞는 것을 보아 충분히 활용 가능한 모형으로 검증되었다 할 수 있다.

본 연구에서 제시한 유사량 산정기법을 금강, 낙동강, 임진강에 적용하였다. CL공식에 의한 소류사량과 부유사량을 합하여 총유사량을 산정하였다. 유량 변화에 따른 유사량의 변화를 계산하여 실측치와 비교하였는데, 입자분포효과를 고려

하였을 때의 예측결과가 실측치에 매우 근사하게 접근하는 것으로 나타났다.

V. 연구목표 달성 및 효과

본 연구의 최종목표인 하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발에 대하여 제시한 성과목표들은 각 단계를 거쳐 종합적으로 목표치에 근접한 성과를 달성하였다. 양적 성과에 대하여 SCI급 학술지를 4건 게재하였고 현재 2건을 심사중이다. 국내 학술지는 4건 게재되어있고 해외 학술대회발표 6건, 국내 학술대회발표 23건을 수행하였다. 그 외 특허 1건이 출원되어 심사가 진행 중이고 S/W가 1건 등록되었으며 본 과제를 통해 수공학에 전문성을 가진 석사 5명이 배출되었다.

VI. 연구성과 활용계획

본 연구에서 개발한 3차원 수치모형을 이용한 하천에서의 흐름해석 결과는 하천에서의 난류가 고려된 정교한 3차원 흐름해석결과를 제공함으로써 하천의 안전성해석, 하상변동해석 등을 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하천에서 준설에 의한 유사량 및 하상변동영향, 사행수로 및 만곡부에서의 흐름특성 등을 해석할 수 있음으로써 강변저류지의 퇴사 관리 및 만곡구간에서 수리구조물 설치 설계에 참고자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

SUMMARY I. Title

Development of 3d model for numerical simulations of sediment transport and bed elevation change in rivers

II. Research Outline

Recently, the climate change induces flash floods and thus modifies the design floods, which necessitates the increase in flood protection measures. Specially, in order to estimate such large-scale water works as "four major river project," detailed hydraulic analysis is needed. That is, three-dimensional hydraulic analysis due to hydraulic installations and morphological change rather than conventional one-dimensional analysis is needed. The flow in the river is turbulent, and an appropriate flow model is required to simulate numerically such flow. To account for the morphological change, proper sediment transport equations which are suitable for the characteristics of the rivers in Korea, are necessary.

The objective of the present study is to develop three-dimensional numerical model that is capable of simulating flow, sediment, transport, and morphological change in the river, and to present sediment transport formula that can be used in rivers in Korea. In addition, the objective includes the development of the graphic user interface under which the numerical model can be run as a total system.

III. Research Processes and Results

For this research project, the study was carried out by three stages. The study at the first stage included the literature study for various computational methods for turbulent flows, test computations of the numerical model, presentation of sediment transport formulas and their application to rivers in Korea. Also, the techniques for three-dimensional grid generation were investigated for the development of the graphic user interface.

The study at the second stage contained the development of the algorithm for flow computation which includes the turbulence model and validation of the sediment transport formulas to rivers in Korea that were proposed at the first stage. For the development of the graphic user interface, the input system that can be used for the computer model was designed and built.

The study at the third stage included the development of the numerical

model for flow, sediment transport, and morphological change in the curvilinear coordinate system that is able to be applied to arbitrary-shaped natural rivers. The model was applied to experimental cases in the literature. The mean flow and turbulence statistics, and morphological changes were compared and discussed. The graphic user interface was presented by integrating the pre- and postprocessing algorithm and three-dimensional grid generating system.

Based on the literature study, both standar and non-linear $k-\varepsilon$ model were selected for the turbulence model for the flow model in the present study. The flow model was applied to a narrow rectangular open-channel. It was found that the numerical model simulates well the general feature of the flow but does not reproduce the velocity dip phenomenon. Furthermore, the non-linear $k-\varepsilon$ model appeared to reproduce the general pattern of the secondary currents generated by the non-isotropy of turbulence. For meandering channels, the standard $k-\varepsilon$ model was found to be good because the secondary currents are mainly due to the curvature of the channel, not due to the non-isotropy of turbulence. The law of the wall was used for the boundary condition, and the SIMPLE algorithm was used for the pressure term of the governing equations.

The governing equations in the curvilinear coordinate system were solved numerically that fit the shape of the natural rivers. Non-staggered grids were used, and the momentum interpolation technique was used to dampen numerical oscillations. Using the computed flow, the amount of sediment transport was calculated, and the results were now used to account for the morphological change. The model was applied to experimental cases, and the mean flow and turbulence statistics were compared and characteristics of such flows were presented.

For the sediment transport, the lateral distribution method was used to distribute the sediment discharge over the width. Two bedload formulas were tested, and Camenen and Larsons formula was found to predict properly. To compute the sediment transport, shear stress partitioning was performed to separate the skin friction from the total shear stress. Finally, the mixture effect was considered to compute the sediment load. The method was applied to foreign rivers in the literature and to rivers in Korea.

IV. Final Results and Application

The developed numerical model was applied to Rozovskii's (1961)

experiments using 180 degree bend. The model simulated the flow in the channel bend whose inner radius to width ratios are 0.5 and 2, and computed results are compared with measured data.

It was observed that, at the starting point of the bend, the flow accelerates along the inner side of the bend, however, the flow accelerates along the outer side of the bend after the bend. The flow acceleration along the inner side at the starting point is due to that the flow is obstructed by the outer side of the wall. On the contrary, the flow acceleration along the outer side after the bend is due to centrifugal force. The ratio of inner radius to width affects the location of the changing acceleration.

The computed bed shear stress showed higher values along the inner side of the bend, which is consistent with previous results by the two-dimensional models. However, the secondary currents, heading from the outer side to inner side near the bottom, contributes to sediment transport and morphological change. Thus, the inner side is deposited by sediment, and outer side is eroded in the mobile bed case.

The sediment transport model was applied to the Geum River, the Nakdong River, and Imjin River in Korea. The total sediment load was calculated by suspended load from Rousean model and bedload from Camenen and Larson's formula. The change of total sediment load with discharge was compared with measured data, and it was shown that the consideration of the mixture effect improved the prediction.

V. Research Achievement and Effect

The goal of this research project was accomplished. The numerical model that is capable of computing the flow and relevant morphological change in the river was developed together with the graphic user interface. A total number of four papers at SCI(E) level were already published, and two are under review. A total number of four papers were published in the domestic journals. The number of presentations in the international and domestic conferences are 4 and 23, respectively. A patent was submitted and is under review currently, and a software was registered through this research project. Five master students were educated and graduated with the fund supported through this research grant.

VI. Plan for Application of Research

The three-dimensional numerical model that is capable of computing the flow and morphological change in the river can provide a tool for detailed analysis for hydraulic engineering. The results by the model can be used for the stability study of the river and morphological change by the floods. In addition, the model can further be applied to the change of sediment transport by the river works and resulting morphological change and flow characteristics in the channel bend for the effective management of the river.

CONTENTS

Chapter 1. Research Outline

- Research Objective and Needs
- Definition, Range, Features of Research
- Research Trend

Chapter 2. Research Processes and Results

- Research Strategy and Methodology
- Research Processes
- Research Results and Methods for Verification

Chapter 3. Final Results and Application

- 3D Flow Computation and Prediction for Sediment Transport and Bed Change
- Method for Calculation of Sediment Load in Korea Rivers
- Development of Program for Post-Processing
- Development of Integrated Program
- A Range of Application and Limitation of 3D Model

Chapter 4. Research Achievement and Effect

- Research Achievement
- Analysis of Research Outcome for Technology
- Analysis of Research Outcome for Economy

Chapter 5. Plan for Application of Research

- Plan for Application
- Additional Research Need

References

목 차

제1장 연구개발과제 개요

- 연구개발의 목적 및 필요성
- 연구개발의 정의, 범위, 특징
- 관련분야의 국내외 기술개발 현황

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

- 연구수행 전략 및 방법론
- 연구수행과정 및 내용
- 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

- 3차원 유동해석과 유사량 및 하상변동 예측
- 국내 하천 환경에 적합한 유사량 산정기법
- 3차원 수리모형의 후처리 기법 및 프로그램 개발
- 통합모형 개발
- 3차원 수치모형의 적용범위 및 한계점

제4장 연구목표 달성 및 효과

- 연구개발 최종목표 달성도
- 연구개발 성과의 기술적 효과분석
- 연구개발 성과의 경제적 효과분석

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

- 연구성과 향후 활용방안
- 추가연구 필요성 등

참고문헌

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발 개요

- 하천에서 물의 흐름은 난류 (turbulent flow)이며 이를 3차원으로 모의하기 위해서는 적절한 유동모형이 필요함
- 국내 하천환경에서 유사이동량을 적절히 예측하기 위해서는 소류사 공식 및 부유사량 산정기법에 관한 다양한 검토가 필요함
- 구미 선진국에서 개발된 유사이동 모형을 국내 하천에 직접 적용하는 경우 지역적 특수성 (locality)을 반영할 수 없음
- 기존에 개발된 2차원 모형의 경우 하천시설물 주변 정수압 법칙이 성립되지 않는 구간에서 유동 및 하상변동의 정확한 예측이 불가함

2. 연구개발의 중요성

- 기후 변화에 의한 돌발홍수 발생 주기 변화 및 홍수량 증가에 따른 하천의 홍수대응 능력 제고
- 하천개발 사업 등에 의한 하천의 안정성 저하 사전 예측
- 생태계 복원을 위한 하천정비 사업에서 치수안전성 확보

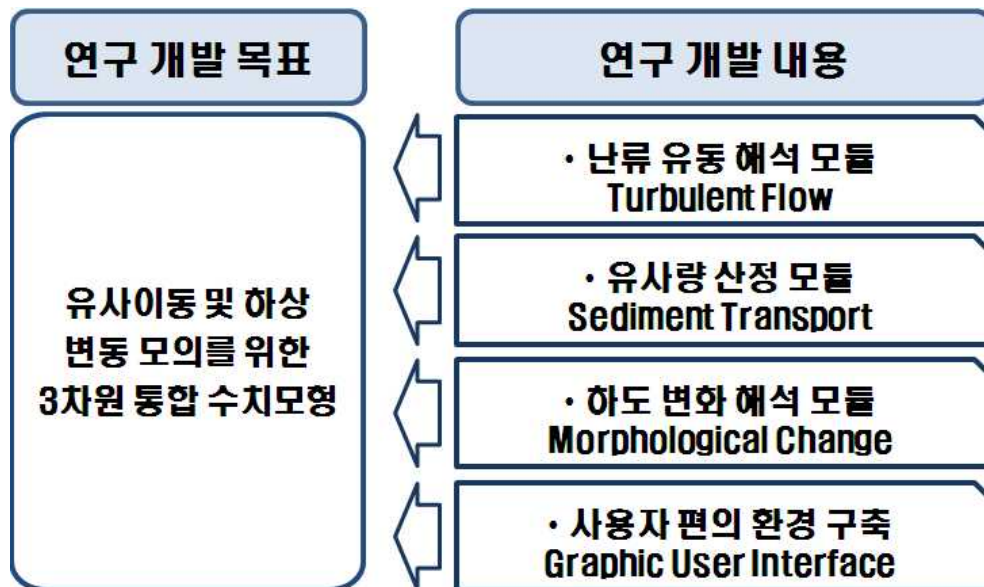
제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

1. 연구개발 최종 목표

- 하천에서 유사이동 및 하상변동을 모의할 수 있는 3차원 수치모형 개발
- 국내 하천 특성에 적합한 유사이동량 산정공식 제시
- 모형의 구동을 위한 사용자편의환경 (GUI) 개발

2. 최종목표의 성격 및 설정 근거

- 기존의 하천관리에는 1차원 및 2차원 수리해석 모형 사용
- 3차원 유동해석에 효율적인 난류 모형 알고리즘 제시
- 하도변화 모의를 위한 하상도보존방정식 해석 알고리즘 제시
- 유동과 하도변화 해석 알고리즘을 결합하여 통합 수치모형 구축
- 일반 사용자를 위한 사용자편의환경 개발 및 입출력 자료 DB화
- 실측자료를 이용하여 국내하천 특성에 적합한 유사량 공식 제시
- 선정된 공식을 홍수시 하도변화 모의를 위한 3차원 수치모형에 활용



연구개발 최종 목표

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술 및 산업 동향

가. 국내 기술 현황

(1) 2차원 수치모의

- 윤용남과 박무중 (1994)은 미국 교통성에서 개발한 2차원 유동해석 프로그램인 FESWMS 프로그램을 이용하여 한강의 감조구간에 적용하여 부정류 해석을 실시
- 한건연 (2000)은 하천에서 이송확산 방정식을 해석하는 유한요소 모형을 제시하고 이를 낙동강유역에 적용
- 한건연 등 (2005)은 유선을 따라 가중을 부여하는 SUPG 유한요소법에 근거한 하천 해석모형을 제시
- 김태범 등 (2006)은 2차원 천수방정식의 해석을 위하여 특성선법에 근거한 유한요소 알고리즘을 제시
- 서일원과 송창근 (2010)은 유한요소법을 이용하여 2차원 지표수 해석 모형을 제시. 만곡부를 포함하는 사행 수로를 포함한 다양한 흐름에 적용하여 모형 검증
- 정우창과 박영진 (2011)은 댐 붕괴파 모의를 위하여 유한체적법에 의한 수치모형을 제시하고 실제 댐 붕괴 사례에 적용

(2) 3차원 수치모의

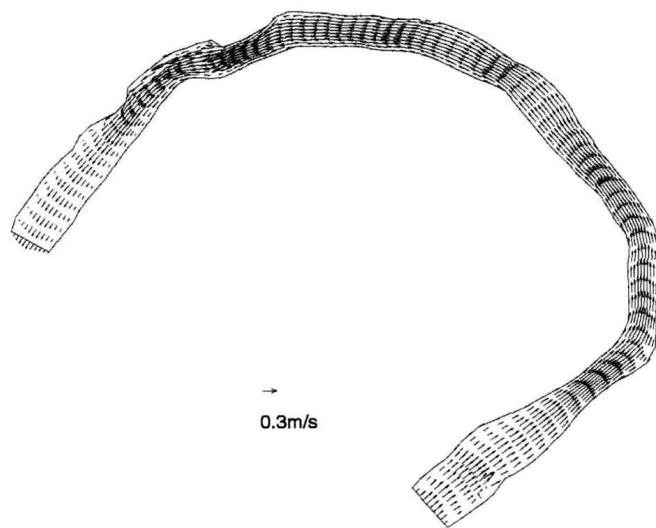
- 양원준과 최성욱 (2002)은 전산유체역학 3차원 상용코드인 FLOW3D를 이용하여 교각주위 국부세굴 현상을 수치모의
- 김대근과 황건 (2011)은 FLOW3D를 이용하여 댐 붕괴로 인해 발생하는 홍수와 전파에 관한 3차원 수치모의를 수행
- Lee 등 (2011)은 유한체적법에 근거한 3차원 유동해석 알고리즘을 제시하고 웅덩이가 있는 개수로 흐름에 적용. Lee 등은 난류 폐합을 위하여 k- ϵ 난류모형 이용

나. 국내 산업 동향

- 국내 하천 관련 실무에서 주로 미국에서 개발된 범용 2차원 해석 프로그램인 SMS 모형 (혹은 RMA 모형)과 미국 교통성의 FESWMS 모형이 주로 사용됨
- 교육과학기술부의 21세기 프론티어 사업의 지원으로 2차원 하천 해석 프로그램인 RAMS (River Analysis Modeling System) 개발. RAMS는 RAM2 (하천 유동해석 프로그램, 경북대 한건연 교수), RAM4 (하천오염물질 이송확산 모의 프로그램, 서울대 서일원 교수), RAM6 (연세대 최성욱 교수)로 구성

다. 국내 동향 분석

- 과거 국내 하천 실무에 주로 1차원 해석 모형인 HEC2 모형 사용됨. 근래에는 컴퓨터공학의 발달로 2차원 해석 보편화됨
- 최근 하천 관련 설계 업무에 국외에서 개발된 3차원 상용 프로그램이 많이 활용되고 있음. 국내의 3차원 수리해석 기술 확보 수준은 초보 단계임
- 모형의 개발 및 적용시 지역적 특수성이 고려되고 있지 않으며, 유사이동 메카니즘에 관한 이해가 부족함
- 국내 하천환경에 관한 지역적 특수성이 고려되고 모형의 적용성을 제고하기 위하여 국내 기술진에 의한 3차원 모형의 개발 및 적용이 필요함



2차원 모형에 의한 홍천강 하도 구간 수리해석 결과
(한건연 등, 2005)

2. 국외 기술 및 산업 동향

가. 국외 기술 현황

(1) 2차원 수치모의

- Jia와 Wang (1999)은 유한요소법을 이용하여 2차원 천수방정식을 해석하는 CCHE2D 모형을 개발하여 하천 만곡부에서의 하상변동을 모의
- Wu (2004)는 유한체적법에 근거하여 유동, 유사이동, 그리고 하천형태 변화를 모의할 수 있는 2차원 해석 알고리즘을 제시
- Duc 등 (2004)은 Wu (2004)의 2차원 모형에 만곡 흐름에서 이차류의 영향을 반영할 수 있는 기능을 추가
- Vasquez 등 (2008)은 River2D 모형에 이차류의 영향 및 횡방향 경사의 영향을 고

려하여 하상토보존방정식을 해석하는 모듈을 추가

(2) 3차원 수치모의

- Van Rijn (1987)은 하천의 유동 해석을 위한 준3차원 모형을 제시. Van Rijn은 천수방정식을 수치해석하여 수심적분된 유속 분포를 구한 다음 유속의 log 법칙을 적용하여 3차원 흐름을 재현
- Shimizu 등 (1990)은 하천에서의 유동과 하상변동을 모의할 수 있는 3차원 모형을 개발하여 하천 만곡부 흐름에 적용
- Prinos (1993)는 하천에서 부유사의 거동을 모의하기 위하여 $k-\varepsilon$ 난류모형에 근거한 유동해석 모형과 부유사에 관한 수송방정식을 해석하는 알고리즘을 제시
- Wang과 Jia (1995)는 하천에서 유동, 유사이동, 그리고 하도형태 변화를 모의할 수 있는 3차원 모형을 개발
- Fang과 Wang (2000)은 곡선좌표계에 근거한 유동방정식을 해석하여 기존의 3차원 모형을 임의의 지형에 적용할 수 있도록 개선
- Ge와 Sotiropoulos (2007)은 곡선 가상경계법을 사용하여 3차원 모형을 임의의 지형에 적용하는 방법을 제시
- Lu와 Wang (2009)는 Fang과 Wang의 모형을 개선하여 비등방성 난류 영향 및 하상토의 분급현상을 고려할 수 있도록 개선하였고, 이 모형을 중국 Three Gorges Dam의 퇴적 문제에 적용

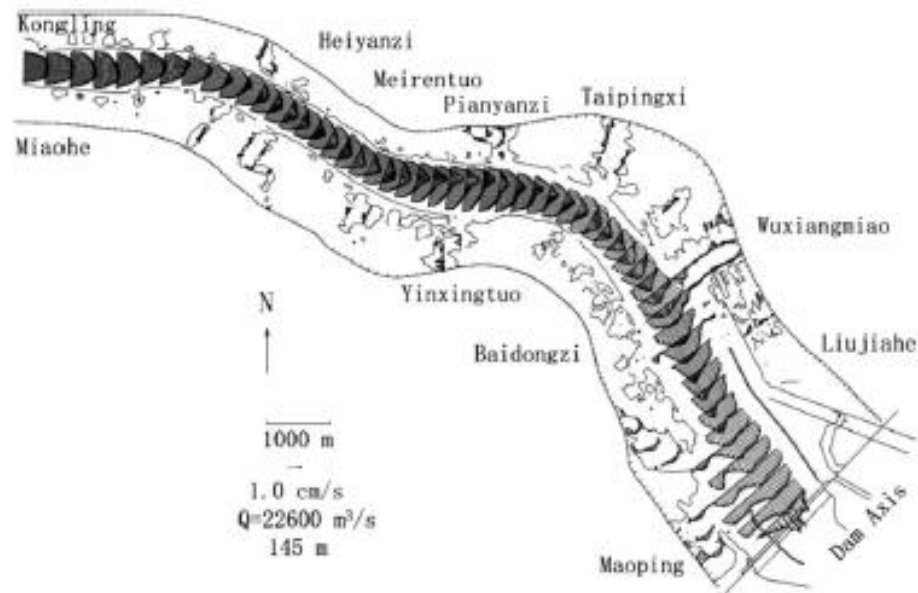
나. 국외 산업 동향

- 현재 하천 실무에 사용되고 있는 전산유체역학 상용 프로그램인 Flow3D, FLUENT, CFX, FIDAP 등은 국외 선진국에서 개발된 모형임
- 기존의 상용 프로그램은 대부분 내부흐름 (internal flow) 모의에 적합하게 개발되었으나 점차 개수로 흐름에도 적용될 수 있도록 개선되고 있으며 대학을 중심으로 하천의 3차원 유동을 모의할 수 있는 기초 연구가 활발히 진행되고 있음

다. 국외 동향 분석

- 종래 하천 실무에는 1차원 모형이 주로 사용되어 왔으나 근래 기술의 발달로 2차원 모형이 개발되어 많이 적용되고 있음
- 그러나 2차원 모형은 만곡부의 영향 등을 구현하는데 한계가 있으며, 유사의 거동 및 하천형태의 변화를 정확히 예측하기 위해서는 3차원 유동해석 필요함

- 국외 선진국에서는 홍수에 의한 3차원 하천형태학적인 변화 모의를 위한 전산유체 역학 모형을 개발하여 실무에 적용하고 있으나, 국내에서는 기술 개발 및 적용 경험 이 매우 부족한 상태임
- 3차원 하천형태학적인 변화 모의를 위한 고급 모형들은 계산비용이 매우 크기 때문에 실무에 적용하기 힘들



3차원 모형을 이용한 중국 Three Gorges Dam 부유사 퇴적문제 모의
(Lu 와 Wang, 2009)

3. 종합 결론

- 기후변화에 대처하고 4대강 사업 등 하천개발에 따른 영향을 최소화하기 위하여 안정적 하천관리를 위한 수리학적 틀 필요
- 국제적인 기술개발 동향에 따르면 하천관리에도 디테일한 3차원 모델링 도입 필요
- 3차원 하천모형과 같은 고급 응용기술의 개발은 국가기관의 지원으로 전문성을 확보한 학교기관의 주도하에 진행될 필요 있음

제4절 연구개발결과의 우수성 및 차별성

- 3차원 하천 모형은 기존의 1차원 및 2차원 모형에 비해 정교한 하천 모델링 가능
- 곡선좌표계를 이용하여 실제 하천형상 모의가능
- 유사이동에 따른 하천형태를 모의함으로써 고정상 하천이 아닌 이동상 하천 모의 가능
- RANS를 사용하여 적은 계산량으로 정교한 하천 모델링 가능
- 현장 실측자료에 근거한 국내 하천에서 유사이동량 산정기법을 제시

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구개발 추진전략
 - 가. 연구개발 추진체계

구 분	주관(위탁)연구기관	공동연구기관
1차년도 (2011.9 - 2012.5)	국내 하천환경을 고려한 난류모형 및 유사량 산정기법 제시	3차원 계산격자 발생기법 개발
2차년도 (2012.5 - 2013.5)	난류 유동 및 하도형태 산정 모형 제시	입력자료 구축시스템 최적화
3차년도 (2013.5 - 2014.9)	통합모형 제시 및 모형의 검증/적용	사용자편의환경 (GUI) 최적화 및 입출력 자료 DB화

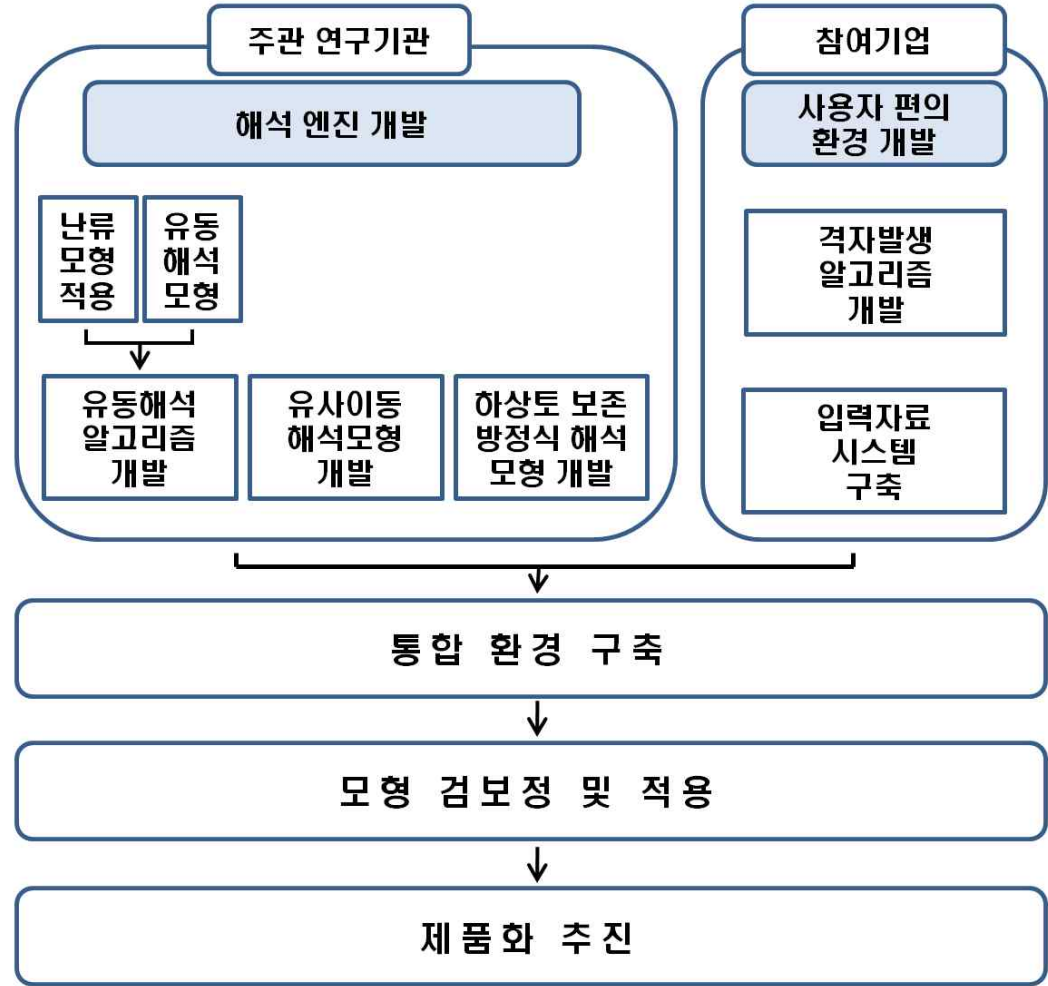
나. 연차별 세부 추진계획 및 방법

구분	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간	해당기관
1차 년도	■ 3차원 유동 해석을 위한 난류모형 조사 및 테스트	- 3차원 유동 모형 조사, 방정식 구성, 수치해석 기법 - 난류모형 테스트를 위한 실험 자료 구축 - 실험조건을 이용한 난류모형 테스트 수행	30	연세대
	■ 국내 하천 환경에 적합한 유사량 산정기법 제시	- 국내 주요 하천 유사량 자료 확보 - 유사량 공식과의 비교 연구를 통하여 국내하천환경에 적합한 공식 혹은 기법 제시	30	연세대
	■ 3차원 계산격자 발생 기법 개발	- 3차원 계산격자 발생기법 문헌조사 - 유동해석 수치기법에 적합한 계산격자 발생기법 선정 및 알고리즘 제시	40	웹솔루스
2차 년도	■ 국내 하천 환경에 적합한 유사량 산정기법 검증	- 유사량 산정 공식과 다양한 국내 하천 유사량 자료와의 비교 연구를 통하여 유사량 산정 기법의 적용성 검증	20	연세대
	■ 3차원 유동모형 구축	- 난류폐합 모형에 근거한 3차원 유동모형 구축	60	연세대
	■ 3차원 하도형태 산정 모형 구축	- 하상토보존방정식 해석기법 구축 - 질량보존 특성 검증	40	연세대
	■ 3차원 모의를 위한 입력 자료 구축 시스템 개발	- 3차원 계산격자 발생 모듈 구축 및 연계 - 전처리(계산격자 발생, 입력자료 구축) 시스템 시험 구동 - 입력자료 구축 시스템 설계 - 입력자료 구축 시스템 구축 및 테스트	60	웹솔루스
3차 년도	■ 3차원 유동모형 구축	- 난류폐합 모형에 근거한 3차원 유동모형 구축 - 유동모형 시험 구동	30	연세대
	■ 3차원 하도형태 산정 모형 구축	- 하상토보존방정식 해석기법 구축 - 질량보존 특성 검증 - 하도형태 산정 모형 시험 구동	30	연세대
	■ 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 통합 수치모형 구축	- 유동 모형과 하도형태 산정 모형의 통합 - 통합모형의 시험 구동	50	연세대
	■ 3차원 모의를 위한 입력 자료 구축 시스템 개발	- 입력자료 구축 시스템 설계 및 프로그래밍 - 입력자료 구축 시스템 최적화	50	웹솔루스
	■ 3차원 모의를 위한 실행 모듈 및 후처리 모듈 구축	- 실행 모듈 구축 및 연계 - 후처리 모듈 구축	35	웹솔루스
	■ 대상 국내하천의 선정	- 국내 주요 하천 수리특성 조사 - 국내 주요 하천 지형, 수리 및 유사량 자료 확보	50	연세대 웹솔루스
	■ 3차원 수치모형 검증 및 적용	- 하천 시설물 구간의 수리자료 등의 검정 및 검증을 위한 자료 확보 - 통합모형의 검정 및 검증 수행	40	연세대 웹솔루스
	■ 보고서 및 매뉴얼 작성	- 연구 보고서 작성 - 3차원 수치모형 매뉴얼 작성	30	연세대 웹솔루스

연구 수행 체계 및 업무 분담

주관 연구기관	• 해석엔진 개발 - 유동해석 알고리즘 개발 - 하도변형 계산 알고리즘 개발
참여기업 [협동연구기관]	• 사용자 편의 환경 구축 - 계산격자 발생시스템 - 입출력자료 DB화 • 개발기술 제품화 및 홍보

연구 개발 추진 전략



2. 연구 추진역량

가. 연구진의 인적 능력

○ 연구책임자 소개

- 주관 연구기관의 연구책임자 최성욱 교수는 1997년 연세대학교에 부임하여 2006년 이후 정교수로 재직 중
- 연구책임자의 전문분야는 환경유체동역학, 유사이동론, 난류 모델링, 전산유체역학

○ 연구책임자 논문 실적

- Journal of Hydraulic Research (IAHR)와 Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)을 포함한 SCI급 국제전문학술지에 약 30편의 논문 게재
- 대한토목학회논문집과 한국수자원학회논문집 등을 포함하여 국내전문학술지에는 약 50여 편의 논문 출판
- 해외학술대회 논문발표 76건과 국내학술대회 논문발표 100여건

○ 연구책임자 연구개발 실적

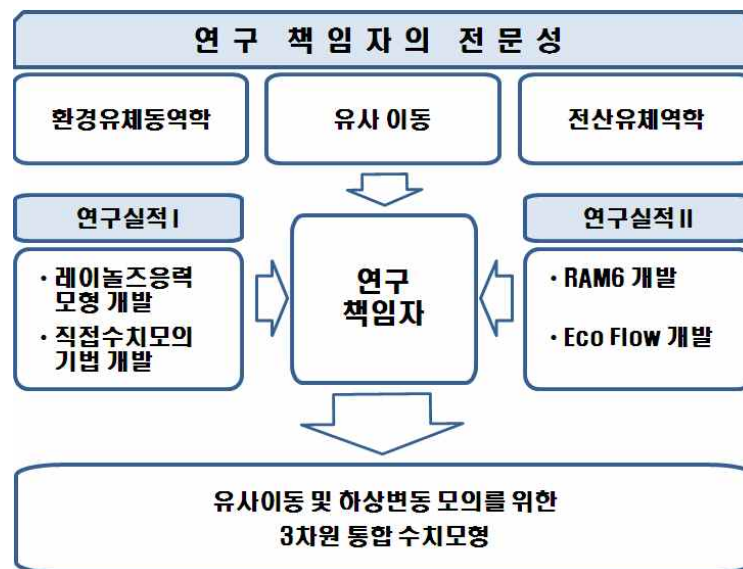
- 하천에서 난류 유동을 직접모의하는 기법 (Direct Numerical Simulations: DNS)에 의한 알고리즘을 개발 (Joung등, 2007; Joung과 Choi, 2008; Joung과 Choi, 2010)
- 난류 유동 계산에 가장 정확도와 난이도가 높은 레이놀즈 응력모형 (Reynolds stress model) 알고리즘을 제시 (Choi와 Kang, 2004; Choi와 Kang, 2006; Kang과 Choi, 2006; Kang과 Choi, 2006)
- 연구책임자의 연구개발 실적은 본 과제의 핵심 부분인 난류 유동계산 알고리즘 개발에 적극 활용될 것으로 기대됨

○ 연구책임자 과제수행 실적

- 연구책임자는 교육과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업 (수자원의 지속적 확보기술개발 사업)의 지원으로 2차원 부정류 조건에서 하도형태의 변화를 모의할 수 있는 RAM6 모형 개발
- 이는 이동상 하천에서 유동 뿐만 아니라 유사이동에 따른 하천 단면의 변화를 모의할 수 있는 컴퓨터 프로그램으로 해외의 범용 프로그램이 없는 상황에서 국내 최초의 개발이라는 데 의의를 둘 수 있음
- RAM6 모형의 개발을 통해 다수의 논문 출판과 2건의 특허 등록
- 국토해양부 건설기술혁신 사업 (자연과 함께하는 하천복원 기술개발) 지원으로 자연형 하도 특성인 만곡, 식생, 그리고 복원시설물 등을 반영할 수 있는 2차원 유동해석 프로그램인 EcoFlow 개발
- 연구책임자의 프로그램 개발 경험은 본 과제에서 궁극적으로 제시하고자 하는 유사이동 및 하상변동 모의를 위한 3차원 프로그램 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 전망

○ 연구책임자 해외 활동 실적

- 현재 연구책임자는 미국 University of Minnesota의 Saint Anthony Falls Laboratory와 일본 히로시마 대학 (廣島대학)의 겸임교수로 재직
- 미국토목학회 (ASCE)가 발행하는 Journal of Hydraulic Engineering의 부편집인 (Associate Editor)으로 활동
- 유관 SCI급 학술지인 Journal of Hydro-Environment Research (IAHR-APD), Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 그리고 KSCE Journal of Civil Engineering의 부편집인 혹은 Editorial Board Member로 활동
- 국내에서는 대한토목학회 국문논문집 편집위원회 총괄간사로 활동



○ 연구원 인적 구성

- 주관 연구기관인 연세대학교 환경유체동역학 연구실은 전산유체역학 분야에 경험이 많은 박사과정 3인과 석사과정 6인이 연구개발과 학업에 정진하고 있음
- 참여기업 (협동연구기관)의 연구책임자인 오정환 팀장은 수리·수문분야 전문가로 유관 프로젝트에서 클라이언트의 요구사항에 맞춰 방향을 제시하고 품질관리를 하는 역할을 맡고 있음. 그의 대표적인 과업으로 하천유량관리시스템, 3차원 수리·수질모형 운영시스템 등이 있음
- 참여기업 SI본부 부서장 안현순 이사는 Volume Rendering에 관한 전문가로 96년이 후 SW산업계에 진출하여 SW제품과 서비스의 개발 및 프로젝트 관리를 수행. 2000년부터 2002년까지 미국 및 일본 SW개발프로젝트를 지휘. 본사에서 시스템통합본부의 부서장으로 다수 프로젝트에 대한 책임을 맡고 있음
- 또한, 참여기업은 수리·수문분야에 전문지식을 확보한 다수의 연구진을 보유하고 있으며 현재까지 수행한 다양한 과업들과 기술력을 바탕으로 본 연구개발에 매우 적합하다고 할 수 있음

나. 연구기기 · 장비 · 시설 구축 수준

○ 주관 연구기관 연구기기 및 장비

- 주관 연구기관인 연세대학교 환경유체동역학 연구실은 다양한 계산용 컴퓨터 및 수리실험 관련 장비 및 시설을 확보하고 있음
- 실험 연구는 수치모형 개발에 있어 검보정 및 검증 자료를 제공하므로 매우 중요함
- 다음은 주관 연구기관이 보유하고 있는 주요 실험 장비 목록임

개수로 실험장비 (2)		
	제원: 폭 0.5 m, 길이 12 m, 높이 0.5 m	
난류유동 계측장비 (2)		
	제원: 폭 0.9 m, 길이 11 m, 높이 0.6 m	
컴퓨터 (6)	LDV 레이저도플러유속계	300 mW Ar-Ion 레이저 발생장치, Fiber Flow FVA N40 자료 처리용 프로세서, 광학 탐침 Optical Probe
	ADV 음파도플러유속계	측정속도 25 Hz
	계산용 컴퓨터 1 (3대)	Intel Core 2 Duo CPU 2.93 GHz, 2.00 GB
	계산용컴퓨터 2 (2대)	Intel Core i5 CPU 2.80 GHz, 4.00 GB
	계산용컴퓨터 3 (1대)	Intel Core 2 Quad CPU 2.50 GHz, 3.00 GB

○ 참여기업 연구기기 및 장비 - 참여기업인 (주)웹솔루스는 사용자편의환경 및 입력자료구축시스템의 개발에 필요한 다음과 같은 장비 보유

분류	제품명	주요기능	적용대상업무	운용환경	제조회사
분석 설계 도구	Toad Data Modeler	분석/설계	• 계획수립 • 분석 • 설계	• Windows 환경	TOAD
개발 도구	ArcGIS Engin Developer Kit	GIS	• 개발 • 테스트	• Windows 환경	ESRI
	Visual Studio .NET 2008	개발	• 개발	• Windows 환경	MS
	ORACLE 10G	개발	• 개발	• Windows 환경	SUN
	TeeChart	개발	• .개발 차트	• Windows 환경	Steema Software
프로 젝트 관리 도구	OpenProj	프로젝트 관리	• 프로젝트 • 전 과정 관리	• Windows 환경	Serena

제2절 연구수행과정 및 내용

1. 3차원 유동해석을 위한 난류모형

가. 3차원 유동방정식

○ 3차원 유동해석을 위한 난류모형

일반적으로 공학적인 문제 해결에서 흐름에 대한 성분은 시간평균값을 활용하게 되므로 이를 얻기 위한 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = F_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1.2)$$

위의 식은 각각 연속방정식과 운동량방정식을 나타낸다. 식(1.1)과 식(1.2)에서 ρ 는 물의 밀도, u_i 는 x_i 방향의 유속 성분, F_i 는 x_i 방향의 외력, 그리고 τ_{ij} 는 응력텐서이다. 여기서 순간속도 u_i 은 시간평균속도 $\bar{u}_i$ 와 진동속도 u'_i 로 나누어진다.

식(1.2)에서 응력텐서는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \delta_{ij} + \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \quad (1.3)$$

여기서 ν 는 유체의 동점성계수이고 $\bar{p}$ 는 시간평균된 압력, δ_{ij} 는 Kronecker delta, $-\overline{u'_i u'_j}$ 는 레이놀즈 응력이다.

나. 난류모형

식(1.3)에서 레이놀즈 응력은 유동을 시간평균하면서 생성된 추가응력으로 Boussinesq 와점성 개념을 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (1.4)$$

와 ν_t 는 와점성 계수, k 는 난류운동에너지이다. 위에서 와점성 계수 ν_t 는 포물선 모형, 혼합거리 모형, 표준 $k-\varepsilon$ 모형, 비선형 $k-\varepsilon$ 모형 등을 이용하여 구할 수 있다.

(1) 포물선 모형

유속분포를 Log 함수로 가정하여 와점성 계수를 구하면 다음과 같은 포물선 형태의 분포를 얻는다.

$$\nu_t = \kappa U_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (1.5)$$

여기서 κ = von Karman 상수이고 U_* = 전단속도이다.

(2) 혼합거리 모형

혼합거리 모형은 난류의 특성길이를 혼합거리 (l_m)와 특성속도로 속도경사 ($\partial u/\partial z$)와 혼합거리의 곱을 사용한다. 따라서 와점성 계수는 다음과 같다.

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (1.6)$$

위에서 혼합거리로 경계층 흐름에 대해서는 $l_m = \kappa z$ 그리고 개수로 흐름에 대해서는 $l_m = \kappa z \sqrt{1-z/h}$ 를 사용한다.

통상적으로 혼합거리 모형은 난류가 국부적인 평형상태인 경우 적용한다. 특히, 혼합거리를 경험적으로 기술할 수 있는 단순 전단류 계산에 많이 사용된다. 급변류나 재순환 흐름 (recirculation), 그리고 복잡한 영역에서의 흐름에는 적용하기 어렵다.

(3) 표준 $k-\varepsilon$ 모형

복잡한 흐름의 경우에 난류의 특성길이를 지정하는 것이 어려우므로 앞서 제시된 혼합거리 모형 등은 많은 한계를 보인다. 이를 극복하기 위해 미분방정식을 해석해서 난류의 특성길이를 구하는데, 대표적인 것이 $k-\varepsilon$ 모형으로 와점성 계수는 다음 Prandtl-Kolmogorov 식으로부터 산정한다.

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

여기서 c_μ 는 상수이고 ε 은 난류운동에너지의 소산률이며 다음 식으로 정의된다.

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (1.8)$$

와점성 계수 식(1.7)에서 난류운동에너지 (k)와 난류운동에너지 소산률 (ε)은 각각 다음 식을 해석하여 구한다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (1.10)$$

여기서 σ_k , σ_ε , $c_{\varepsilon 1}$, 그리고 $c_{\varepsilon 2}$ 는 모형 상수이다. 표 1.1에는 다양한 $k-\varepsilon$ 모형의 모형상

수를 제시하였다. 특히, Launder과 Spalding (1974)이 제시한 모형상수를 표준 $k-\varepsilon$ 모형이라고 부르며 널리 사용되고 있다. 그러나 표준 $k-\varepsilon$ 모형은 비대칭 제트에 의한 확산 현상을 과대 산정하며 backward facing step에서 재부착 길이를 과소 산정하는 것으로 보고되고 있다.

표 1.1 $k-\varepsilon$ 난류모형의 모형상수

	c_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
표준 모형	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3
비평형 모형	0.09	$1.15 + 0.25 P_k / \varepsilon$	1.90	0.8927	1.15
RNG 모형	0.085	$1.42 - \eta(1 - \eta/\eta_0)(1 + \beta\eta^3)$	1.68	0.7179	0.7179

(4) 비선형 $k-\varepsilon$ 모형

표준 $k-\varepsilon$ 모형은 특성속도와 특성길이를 모두 미분방정식 (수송방정식)의 해석결과로부터 구하므로 난류의 생성, 소멸, 이송, 확산을 모두 고려할 수 있다. 그러나 이 모형은 와점성 개념을 사용하고 있고 레이놀즈 응력을 국부평형상태로부터 구하며 등방성을 가정하고 있기 때문에 유선에 따른 레이놀즈 응력의 변화율이 큰 경우나 이방성이 강한 경우에는 적용이 제한된다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 레이놀즈응력에 관한 보다 일반화된 관계식이 제시되었는데, 대표적인 것인 Speziale (1987), Nisizima와 Yoshizawa (1987) 그리고 Rubinstein과 Barton (1990)이 제시한 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이다.

Speziale (1987)는 레이놀즈 응력을 평균 유속경사로 표현하여 평면수로 흐름에 대한 모형을 제시하였다. Nisizima와 Yoshizawa (1987)는 통계적 방법을 사용하여 모형상수를 제시하였고, Rubinstein과 Barton (1990)은 Yakhot-Orszag renormalization group을 이용하여 모형을 제시하였다. 이들이 제시한 모형의 일반식은 다음과 같다.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \frac{1}{3} \left(\sum C_{mn} \frac{k^3}{\varepsilon^2} S_{mn} \right) - \sum_{m=1}^3 C_{mn} \frac{k^3}{\varepsilon^2} S_{mn} \quad (1.11)$$

여기서 S_{1ij} 와 S_{2ij} , S_{3ij} 는 각각 다음과 같다.

$$S_{1ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}$$

$$S_{2ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_i}$$

$$S_{3ij} = \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j}$$

표 1.2에는 Speziale (1987), Nisizima와 Yoshizawa (1987) 그리고 Rubinstein과 Barton (1990)이 제시한 비선형 $k-\varepsilon$ 모형의 모형상수를 제시하였다.

표 1.2 비선형 $k-\varepsilon$ 난류모형의 모형상수

	$C_{\tau 1}$	$C_{\tau 2}$	$C_{\tau 3}$
Speziale (1987)	0.041	0.014	-0.014
Nisizima와 Yoshizawa (1987)	0.057	-0.167	-0.0067
Rubinstein과 Barton (1990)	0.034	0.104	-0.014

(5) 기타 난류모형

기타 난류모형으로 레이놀즈응력 모형이 있다. 레이놀즈응력 모형은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로부터 레이놀즈응력에 관한 수송방정식을 유도해 이를 직접 해석하는 방법으로 가장 정확한 난류모형으로 알려져 있다. 그러나 해석해야 하는 방정식의 수가 많고 앞서 언급된 난류 모형보다는 개수로 흐름에 적용된 경험적 계수가 적다는 단점이 있다.

다. 3차원 유동모형 구축

- 3차원 유동모형을 구축하기 위하여 유한차분법 (Finite Volume Method)를 사용하여 유동모형의 편미분방정식을 해석하였고 하천의 벽과 자유수면에 대한 경계조건을 설정하고 계산알고리즘을 구축하였다.

(1) 경계조건

- 하천 흐름에 대하여 고려할 수 있는 경계조건은 벽, 자유수면, 유입부, 그리고 유출부가 있다.

(가) 벽

no-slip조건을 이용하여 벽이 있는 셀에서 벽에 수직방향 유속은 0으로 하고 벽에 평행한 방향 유속성분과 스칼라값들을 log-law를 이용하여 구하도록 한다.

벽에서부터 Δy 만큼 떨어져있는 위치에서 다음 식을 평가하여 난류운동에서 벽 경계 조건들의 수행을 시작한다.

$$y^+ = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1.12)$$

만일 $y^+ \leq 11.63$ 이면 벽 인근의 유동은 층류로 간주한다. 반면 $y^+ > 11.63$ 이면 유동은 난류이고 wall function을 사용하여 계산한다. 실제 하천에서 흐름모의를 할 경우 대부분 $y^+ > 11.63$ 일 것이므로 이 때 벽과 상관관계식은 각각 다음과 같다.

표 1.3 벽면 근처에서 지배방정식의 벽면 상관관계식

구분	관계식
x방향 운동량방정식	벽 전단응력: $\tau_w = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} u}{u^+}$
난류운동에너지 수송방정식	단위체적당 난류운동에너지 소스: $\frac{(\tau_w u - \rho C_\mu^{3/4} k^{3/2} u^+) \Delta V}{\Delta y}$
난류운동에너지 소산률 수송방정식	특정 값 설정: $\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa \Delta y}$

(나) 자유수면

자유수면에서 자유수면에 수직방향 유속은 0이 되도록 하고 자유수면에서 자유수면에 평행한 방향의 유속 및 난류운동에너지의 변동경사가 0인 대칭조건을 이용한다. 난류운동에너지의 소산률은 Hossain과 Rodi (1980)가 제시한 자유수면 경험식을 이용한다.

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa \alpha H} \quad (1.13)$$

여기서 κ 는 von Karman 수 (=0.41)이고 α 는 모형상수로 0.7이다.

(다) 유입부, 유출부

유입부 및 유출부는 지형 경계조건이 변하지 않을 경우 완전 발달된 상태에 도달해있을 것으로 가정하고 유입부의 유입방향, 유출부의 유출방향에 대한 모든 변수들의 변화량이 0이라고 설정한다 (압력 제외). 실제 하천에 적용할 경우 유출부에서 수위를 경계조건으로 받아 전 단면의 수심을 정하고 유입부는 정해진 유량이 입력되어 상류에서 등류로 가정해 유속 및 각종 난류량을 저장하도록 한다.

(2) 난류모형 지배방정식 계산알고리즘 구축

(가) 엇갈린 격자

엇갈린 격자는 $\bar{p}$, k , ε , ν_t 등과 같은 스칼라 값은 체적 중앙의 위치에 저장을 시키고 $\bar{u}_i$ 와 같은 벡터 값은 각 벡터의 방향이 수직방향인 체적의 면에 저장을 시키도록 한다. 이것은 그러나 계산이 복잡해지는 문제가 발생하지만 지배방정식을 이산화했을 때 발생하는 압력과 유속과의 미분에서 발생하는 오차를 줄일 수 있는 효과가 있다. 웹슬루스에서 입력되는 격자정보는 엇갈린 격자에 맞춰 제작되었다.

(나) 계산 알고리즘

본 연구에서는 압력항을 풀기 위하여 이산화된 운동량방정식을 연속방정식에 대입하여 압력 수정항을 계산하는 SIMPLE 알고리즘 (Patankar와 Spalding, 1972)을 도입하여 유동모형을 구축하였다.

모형 알고리즘

• SIMPLE 알고리즘

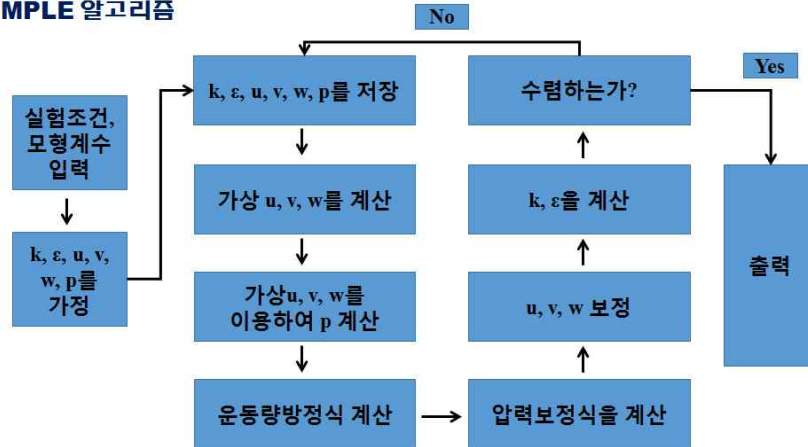


그림 1.1 SIMPLE 알고리즘

(3) 난류모형 지배방정식 계산기법 구축

(가) 개요

1차원 이송-확산 방정식의 일반적인 형식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx}(\rho u \phi) = \frac{d}{dx} \left(\Gamma_t \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (1.14)$$

여기서 Γ_t 는 확산계수이다. 유한체적법을 사용하여 관심있는 한 셀의 중앙점 P 에서 검사체적 ΔV 에 걸쳐 식 (1.14)과 같이 적분할 수 있다.

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx}(\rho u \phi) d\Delta V = \int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left(\Gamma_t \frac{d\phi}{dx} \right) d\Delta V \quad (1.15)$$

식 1.15는 가우스 바란정리에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left(\Gamma_t A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma_t A \frac{d\phi}{dx} \right)_w \quad (1.16)$$

여기서 e 와 w 는 중앙점이 P 인 셀에서 x 방향을 수직으로 하는 양쪽 면이 존재하는 위치이다. 식(1.16)에서 편의상 체적의 면에서 단위면적당 이송 질량 흐름률과 확산 질량 흐름률을 각각 F 와 D 로 표현하도록 한다.

$$F = \rho u A, \quad D = \frac{\Gamma_t}{\delta x} A \quad (1.17)$$

이를 이용하여 식(1.16)을 다시 풀이하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (1.18)$$

여기서 E 와 W 는 각각 중앙점이 P 인 셀의 x 방향으로 이웃한 셀들의 중앙점들이다. 셀의 면 e 와 w 위치의 값에 대한 근사치를 구하기 위해서는 여러 가지 차분기법이 존재한다.

본 연구에서는 3차원 이송-확산 방정식 (운동량방정식, k , ε 수송방정식)을 유한체적법으로 풀기 위한 차분기법으로 중앙차분기법 (the central differencing scheme), 상류차분기법 (the upwind differencing scheme), 혼합차분기법 (the hybrid differencing scheme), 멱승기법 (the power-law scheme), QUICK 기법 (the QUICK scheme)을 도입하였다.

① 중앙차분기법

중앙차분기법 (the central differencing scheme)은 등간격 격자에서 셀면 수치들은 다음과 같은 방법으로 근사하여 계산한다.

$$\phi_e = (\phi_P + \phi_E)/2 \quad (1.19)$$

$$\phi_w = (\phi_P + \phi_W)/2 \quad (1.20)$$

위의 식을 식(1.18)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{F_e}{2}(\phi_P + \phi_E) - \frac{F_w}{2}(\phi_W + \phi_P) = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (1.21)$$

이것은 다음과 같이 정리할 수 있게 된다.

$$\left\{ \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right) + \left(D_e - \frac{F_e}{2} \right) + (F_e - F_w) \right\} \phi_P = \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right) \phi_W + \left(D_e + \frac{F_e}{2} \right) \phi_E \quad (1.22)$$

계수 a_W , a_E , 그리고 a_P 를 정의하여 이산화된 이송-확산 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E \quad (1.23)$$

여기서 계수 a_W , a_E , 그리고 a_P 는 각각 다음과 같다.

표 1.4 이산화된 방정식의 계수 (중앙차분기법)

a_W	a_E	a_P
$D_w + \frac{F_w}{2}$	$D_e - \frac{F_e}{2}$	$a_W + a_E + (F_e - F_w)$

② 상류차분기법

상류차분기법 (the upwind differencing scheme)은 등간격 격자에서 $F_w > 0$, $F_e > 0$ 일 때 셀면 수치들은 다음과 같은 방법으로 근사하여 계산한다.

$$\phi_e = \phi_P \quad (1.24)$$

$$\phi_w = \phi_W \quad (1.25)$$

위의 식을 식(1.18)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$F_e \phi_P - F_w \phi_W = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (1.26)$$

이것은 다음과 같이 정리할 수 있게 된다.

$$\{(D_w + F_w) + D_e + (F_e - F_w)\} \phi_P = (D_w + F_w) \phi_W + D_e \phi_E \quad (1.27)$$

계수 a_W , a_E , 그리고 a_P 를 정의하여 이산화된 이송-확산 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E \quad (1.28)$$

여기서 계수 a_W , a_E , 그리고 a_P 는 각각 다음과 같다.

표 1.5 이산화된 방정식의 계수 (상류차분기법)

	a_W	a_E	a_P
$F_w > 0, F_e > 0$	$D_e + F_e$	D_e	$a_W + a_E + (F_e - F_w)$
$F_w < 0, F_e < 0$	D_e	$D_e - F_e$	

이것을 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

표 1.6 재정리된 이산화된 방정식의 계수

a_W	a_E
$D_w + \max(F_w, 0)$	$D_e + \max(-F_e, 0)$

③ 혼합차분기법

중앙차분기법은 2차 정확도를 가지고 있으나 피클렛 수 ($Pe = F/D$)의 크기가 2 이내일 때만 적용이 가능한 제한이 있다. 반면 상류차분기법의 경우 1차 정확도를 가지고 있으나 이송항의 힘이 강한 흐름일 경우에 알맞기 때문에 피클렛 수가 큰 경우에 적용하는 것이 좋다. Spalding (1972)이 제시한 혼합차분기법 (the hybrid differencing scheme)은 두 기법의 장점만을 끌어온 기법으로 피클렛 수의 절대 크기가 2 이하일 때는 중앙차분기법으로, 2 이상일 때는 상류차분기법으로 작동하는 기법이다. 이렇게 될 경우 모든 계수 a_W , a_E 가 양수값을 가질 수 있기 때문에 대부분의 흐름에서 적용가능하게 된다. 이를 적용하여 식 (1.18)에 적용 후 이산화된 이송-확산 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E \quad (1.29)$$

여기서 계수 a_W , a_E , 그리고 a_P 는 각각 다음과 같다.

표 1.7 이산화된 방정식의 계수 (혼합차분기법)

a_W	a_E	a_P
$\max\left\{F_w, \left(D_w + \frac{F_w}{2}\right), 0\right\}$	$\max\left\{-F_e, \left(D_e - \frac{F_e}{2}\right), 0\right\}$	$a_W + a_E + (F_e - F_w)$

④ 멱승기법

Patankar (1980)이 제시한 멱승기법 (power-law scheme)은 혼합차분기법에 비해 좀더 정확한 근사치를 얻을 수 있다고 한다. 이산화된 이송-확산 방정식을 표현했을 때 계수들은 다음과 같다.

표 1.8 이산화된 방정식의 계수 (멱승기법)

a_W	$D_w \max\{0, (1 - 0.1 Pe_w ^5)\} + \max(F_w, 0)$
a_E	$D_e \max\{0, (1 - 0.1 Pe_e ^5)\} + \max(-F_e, 0)$
a_P	$a_W + a_E + (F_e - F_w)$

⑤ QUICK 기법

Leonard (1979)가 제시한 QUICK (quadratic upstream interpolation for convective kinetics) 기법은 세 점을 이용하여 계산하는 고차항 차분기법이다. 등간격 격자에서 $F_w > 0$, $F_e > 0$ 일 때 셀면 수치들은 다음과 같은 방법으로 근사하여 계산한다.

$$\phi_w = \frac{6}{8}\phi_W + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{WW} \quad (1.30)$$

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_{PW} \quad (1.31)$$

이를 적용하여 식 (1.18)에 적용 후 이산화된 이송-확산 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_{WW} \phi_{WW} + a_{EE} \phi_{EE} \quad (1.32)$$

여기서 계수 a_W , a_E , a_P , a_{WW} , 그리고 a_{EE} 는 각각 다음과 같다.

표 1.9 이산화된 방정식의 계수 (QUICK 기법)

a_W	a_E	a_{WW}	a_{EE}
$D_w + \frac{6}{8}\alpha_w F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e$ $+ \frac{3}{8}(1-\alpha_w)F_w$	$D_e - \frac{6}{8}(1-\alpha_e)F_e$ $- \frac{3}{8}\alpha_e F_e - \frac{1}{8}(1-\alpha_w)F_w$	$-\frac{1}{8}\alpha_w F_w$	$\frac{1}{8}(1-\alpha_e)F_w$

여기서 $F_w > 0$ 일 때 $\alpha_w = 1$, $F_w < 0$ 일 때 $\alpha_w = 0$, $F_e > 0$ 일 때 $\alpha_e = 1$, $F_e < 0$ 일 때 $\alpha_e = 0$ 이다.

2. 국내하천에 적용 가능한 유사량 산정기법개요

우리나라 하천에서 유사이동은 평수기에는 유사 농도가 낮으며 대부분 홍수기에 부유사 형태로 발생하는 것으로 알려져 있다. 최근 4대강 사업으로 하도의 모양이 크게 변하였으며 이로 인하여 하천에서 유동 및 유사이동 양상이 심각하게 변화할 것으로 전망되고 있다. 또한 전지구적인 기후변화 현상으로 국지적인 돌발홍수의 발생빈도가 증가하였으며 이로 인한 하천 유량과 유사량이 크게 증가할 것으로 예측된다.

기존 Parker (2004)가 제시한 하천 유사량 산정기법은 1차원적인 방법으로 하도의 폭이 수심에 비해 매우 넓은 하천에 적합하다. 그러나 횡방향으로 수심의 변화가 크거나 유심부가 잘 발달한 하도에서는 유량 분배에 따른 유속의 증가로 국부적인 소류력이 평균값의 여러 배에 해당하여 1차원적인 접근방법이 많은 오차를 발생시킬 수 있다.

국내하천에 적합한 유사량 산정기법 제시와 본 과제와의 연관성은 다음과 같다.

- 하천에서 3차원 유동에 따른 유사이동을 모의하기 위해 소류사 공식 및 부유사 연행 함수 등이 필요한 바 본 연구를 통해 국내 하천에 적합한 유사량 산정기법을 제시하기 위하여 유사량 공식 및 연행 함수를 시험하고 적용성을 검토하였다.
- 제시된 유사량 산정기법을 이용하여 유사량 자료의 실측치가 없는 하천 구간에서 3차원 수치모의 결과와 비교할 수 있다.
- 제시된 유사량 산정기법을 이용하여 3차원 유동 및 하상변동 수치모의시 상류단 유사량 유입 조건 (경계조건) 적용이 가능하다.

본 과제와는 별도로 하도형상, 경사, 하상재료 등의 정보와 유량 조건을 이용하여 부유사 및 소류사량을 예측하여 이를 하천 관리에 활용할 수 있다.

본 연구에서는 국내하천에 적합한 유사량 산정기법을 제시하였다. 하천에서 등류상태의 유동을 계산하기 위해서 유량 횡분배법을 이용하였다. 기존의 1차원적인 방법에 비해 유심부가 발달된 하도에서 초과 전단응력에 의한 유사이동을 보다 정확히 모의할 것으로 기대된다. 하상전단응력에서 하상형상에 의한 성분을 배제시키고 유사이동에 기여하는 성분을 추출하기 위하여 Einstein 분할법을 적용하였다. 유동모형에 의한 수심평균유속과 국부 전단응력을 이용하여 횡방향 지점에서 소류사 및 부유사량을 산정 한 후 이를 합하여 총유사량을 계산하였다. 소류사 산정공식으로는 Meyer-Peter and Muller 공식, Ashida and Michiue 공식, Camenen and Larsons 공식, 그리고 수정 Meyer-Peter and Muller 공식을 시험 적용하여 각각 공식의 특성을 파악하고 국내 하천에 적용하였다. 부유사량 산정을 위해서 Rouse 분포를 가정하였으며 평형 부유상태에서 바닥 부근의 유사농도 산정을 위해 Wright와 Parker (2004)가 제시한 연행함수를 사용하였다.

이상의 알고리즘으로 구성된 유사량 산정기법을 슬로바키아의 다뉴브강 및 국내 남한강에 적용하였다. 슬로바키아의 다뉴브강은 자갈하천으로 디테일한 소류사 측정 자료가 있어 제시된 기법의 소류사 이동 검증에 활용될 수 있다. 그리고 남한강은 모래하천으로

부유사랑과 소류사랑을 분리하여 산정한 후 총유사랑을 예측하였다. 유사랑 산정기법에 의한 예측 결과를 실측치와 비교하였다.

가. 유사랑 산정기법

(1) 유동모형

Shiono와 Knight (1990)는 등류 상태 개수로 흐름에 대해 레이놀즈 방정식을 수심적분하여 다음 식을 제시하였다.

$$\rho g H S_0 + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho H \overline{\epsilon_{yx}} \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \tau_b = \Gamma \quad (2.1)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, H 는 수심, S_0 는 하상경사 (= 수면경사 = 에너지선 경사), $\overline{\epsilon}$ 은 수심 적분한 난류점성계수, U 는 수심 적분한 유속, τ_b 는 하상전단응력, 그리고 Γ 는 이차류의 영향을 나타내는 항이다.

위의 식에서 하상전단응력을 Darcy-Weisbach의 마찰계수 f 를 이용해서 표현하면 하상전단응력과 난류점성계수는 각각 다음과 같다.

$$\tau_b = \frac{\rho f U^2}{8} \quad (2.2)$$

$$\overline{\epsilon_{yx}} = \lambda U_* H = \lambda H \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} U \quad (2.3)$$

여기서 λ 는 무차원 와점성계수, U_* 는 전단속도이다. 또한, 이차류에 의한 항 Γ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^H \rho \overline{u'v'} dz \right) \quad (2.4)$$

여기서 $\overline{u}$ 와 $\overline{v}$ 는 각각 시간평균된 종방향 및 횡방향 유속을 나타낸다.

(2) 하상형상에 의한 영향 분리

일반적으로 유수에 작용하는 하상 전단응력은 하상형상에 의한 형상항력 (form drag)과 하상 입자에 의한 표면마찰 (skin friction)의 합이다. 형상항력은 하상형상에서 발생하는 유선의 박리와 재순환에 의한 부압에 기인하며 재부착과 관련이 있다. 표면마찰 저항은 토립자의 모양, 크기, 바닥면에서의 배열 등에 의해 영향을 받는다.

하상 전단응력 중에 유사이동에 기여하는 성분은 표면마찰이다. 전체 하상 전단응력에서 표면마찰에 의한 성분만을 구하는 것은 Einstein 분할법을 이용하여 계산할 수 있으며, 이 방법은 하상형상의 크기에 관한 정보없이도 표면마찰 저항을 직접 계산한다는 특징이 있다. 수리학적으로 거친 하상에 적용할 수 있는 log 법칙을 적분하면 다음과 같은 Keulegan 공식을 얻을 수 있다.

$$C_f = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(11 \frac{H_s}{k_s} \right) \right]^{-2} \quad (2.5)$$

Keulegan 공식으로부터 표면마찰이 부담하는 수심 (H_s)에 대해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$H_s = \frac{U^2}{gS} \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(11 \frac{H_s}{k_s} \right) \right]^{-2} \quad (2.6)$$

여기서 k_s 는 입자에 의한 조도높이, U 는 수심 평균한 유속, g 는 중력가속도, S 는 하상경사, κ 는 von Karman 상수이다. 조도높이를 산정하기 위해 관계식 $k_s = n_k D_s$ 을 이용하는데, 이때 n_k 의 범위는 2.0에서 3.5사이이다. 본 연구에서 Danube 강 의 소류사 예측의 경우 $k_s = 2.0 D_{90}$ 을 사용하였으며 (Camenen등, 2011), 국내하천에 대해서는 $k_s = 2.5 D_{50}$ 을 사용하였다. 초기 H_s 를 가정한 후 위의 식을 통해 반복법으로 표면마찰이 부담하는 수심을 계산하면 표면마찰에 의한 저항력을 구할 수 있다.

(3) 소류사량 산정기법

하천에서 유사이동은 소류사와 부유사 형태로 발생하며, 이를 합한 것이 총유사량이 된다. 소류사란 활성층 (active layer) 에서 구르거나 (rolling) 미끄러지며 (sliding) 튕겨가는 (도약: saltating) 과정을 통해 하류로 이동하는 하상토를 말하며 소류사량 q_b 는 단위 폭 당 유사입자의 체적흐름률로 정의된다.

소류사량에 대한 무차원 수인 Einstein 소류사 수 (Einstein bedload number)는 다음과 같이 정의된다.

$$q_b^* = \frac{q_b}{\sqrt{RgD}D} \quad (2.7)$$

1948년에 제시된 Meyer-Peter and Muller (MPM) 공식은 하상형상이 없는 하도에서의 소류사 공식으로 전형적인 다음 식(2.8)의 형태를 갖는다.

$$q_b^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}, \quad \tau_c^* = 0.047 \quad (2.8)$$

위의 식에 의하면 Shields 수가 0.047 이하인 경우에는 소류사가 발생하지 않는다. 최근 Wong (2003)은 자료를 다시 분석하여 다음과 같이 수정된 공식을 제시하였다.

$$q_b^* = 4.93(\tau^* - \tau_c^*)^{1.6}, \quad \tau_c^* = 0.047 \quad (2.9a)$$

혹은

$$q_b^* = 3.97(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}, \quad \tau_c^* = 0.0495 \quad (2.9b)$$

전자는 τ_c^* 의 값을 고정한 경우이고 후자는 공식의 지수를 3/2로 고정한 경우이다.

널리 사용되고 있는 MPM 공식을 포함하여 다양한 소류사 공식이 제시되었으며 다음과 같다.

(1) Ashida & Michiue (1972) 공식

$$q_b^* = 17(\tau^* - \tau_c^*)(\sqrt{\tau^*} - \sqrt{\tau_c^*}), \quad \tau_c^* = 0.05 \quad (2.10)$$

(2) Fernandez Luque & van Be다 (1976) 공식

$$q_b^* = 5.7(\tau^* - \tau_c^*)^{1.5}, \quad \tau_c^* = 0.037 - 0.0455 \quad (2.11)$$

(3) Parker (1979) fit to Einstein (1950) 공식

$$q_b^* = 11.2(\tau^*)^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_c^*}{\tau^*} \right)^{4.5}, \quad \tau_c^* = 0.03 \quad (2.12)$$

(4) Camenen and Larson (2005) 공식

$$q_b^* = 12(\tau^*)^{1.5} \exp\left(-4.5 \frac{\tau_c^*}{\tau^*}\right), \quad \tau_c^* = 0.055 \quad (2.13)$$

τ^* 는 Shields 수로 표면마찰에 의한 저항력을 나타내며 표면마찰에 의한 수심을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g R D} = \frac{\rho C_f U^2}{\rho g R D} \quad (2.14)$$

여기서 R은 입자의 수중단위중량, C_f 는 마찰계수로 Keulegan 공식으로부터 얻어진다.

일반적으로 국내하천에서 소류사는 총 유사량의 10~15%를 차지하며 총 유사량에 대한 정확한 예측을 위해서는 소류사량 공식 선정이 중요하다. 이를 위해 국내하천에서 소류사량 측정을 시행하여 유사량 예측의 정확도 제고가 필요하다. 그림 2.1은 전단응력에 따른 소류사량을 보여주는 것으로 여러 소류사량 산정공식에 대해 나타내었다. 일반적으로 AM 공식이 가장 크게 산정하며, CL 공식과 MPM이 중간, 그리고 MMPM이 가장 낮게 산정한다. 그림 2.2는 국내하천과 유사한 조건의 임의 단면에서의 소류사량 선정 공식에 따른 소류사량을 도시한 것으로, $H = 6m$, $H_s = 2m$, $S = 0.0002$, $D_{50} = 0.5mm$, $\tau^* = 0.48$ 일 때의 값이다.

MMPM은 MPM 및 CL 방법에 의한 소류사량의 약 55%를 산정했고, AM은 MPM 및

CL 방법에 의한 소류사량의 약 145%를 산정하였다. MPM과 CL은 서로 유사하게 예측하였으나 CL 공식은 한계전단응력 이하에서도 소류사량을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 국내하천 적용 시 CL공식을 통해 소류사량을 계산하였다.

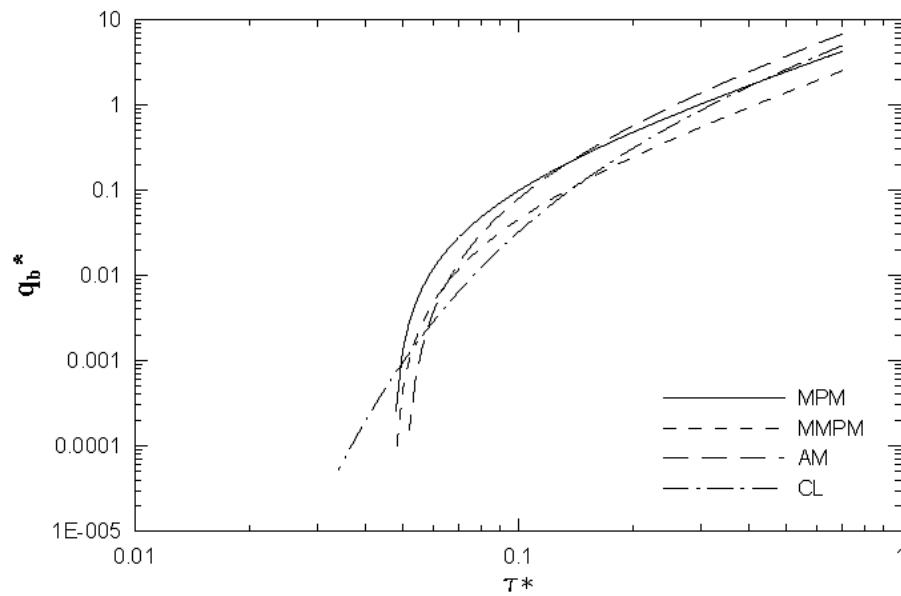


그림 2.1 전단응력에 따른 소류사량 산정공식 비교

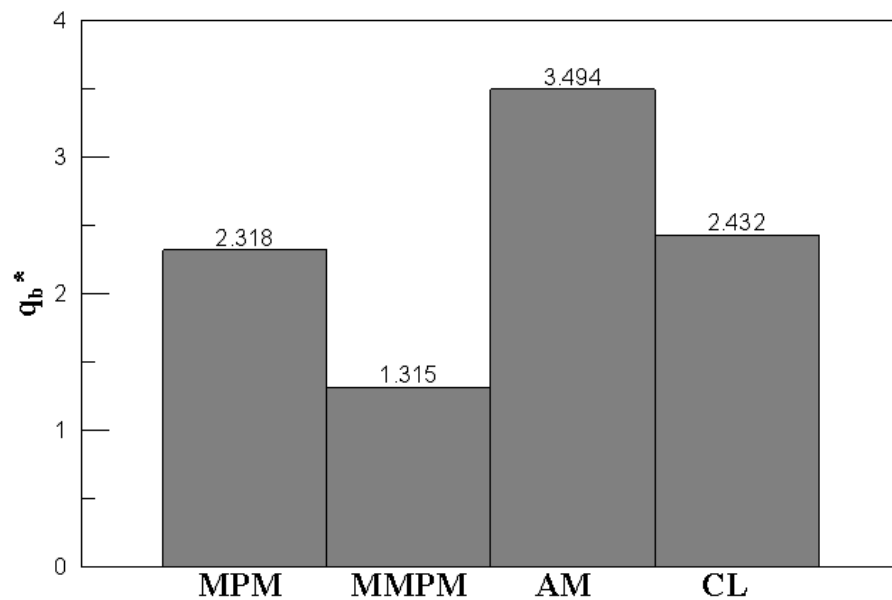


그림 2.2 $\tau^* = 0.48$ 에서의 소류사량 산정 공식별 Einstein bedload number

(4) 부유사량 산정기법

하천에서 단위 폭 당 부유사량은 다음과 같다.

$$q_s = \int_0^h \bar{u} \bar{c} dz \simeq \int_\delta^h \bar{u} \bar{c} dz \quad (2.15)$$

여기서 $\bar{u}$ 는 수심 평균한 유속, $\bar{c}$ 는 부유사농도이다. 등류 조건에서 부유사 농도분포가 평형상태인 경우 ($\partial/\partial y = \partial/\partial z = 0$ 이고 $v = w = 0$), 농도분포는 다음 식을 해석하여 구할 수 있다.

$$-v_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (D_{tz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}) \quad (2.16)$$

위의 식을 적분하면

$$v_s \bar{c} + D_{tz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \text{constant} \quad (2.17)$$

여기서 식 (2.17)의 좌변은 유사의 이송 및 확산에 의한 흐름률을 의미한다. 수면에서의 순 흐름률 (net flux)은 영이므로 식 (2.17)의 상수는 영이 된다. 위의 식을 적분하기 위해서는 와-확산계수가 필요하며, 와-점성계수 (ν_t)와 와-확산계수 (D_t)의 비로 정의되는 Prandtl-Schmidt 수 ($\sigma_t = \nu_t/D_t$)가 1이라고 가정하면 와-점성계수를 와-확산계수로 대체하여 사용할 수 있다. Prandtl-Schmidt 수를 1로 가정하는 것은 난류가 운동량을 확산시키는 속도와 부유사를 확산시키는 속도가 동일하다고 가정하는 것이다. 유속분포에 대한 대수법칙으로부터 유도되는 와-점성계수는 다음과 같다.

$$\nu_t = \kappa u_* z (1 - \frac{z}{H}) \quad (2.18)$$

여기서 κ 는 von Karman 상수 (=0.41) 이다. 식 (2.18)의 결과를 식 (2.17)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 상미분 방정식을 얻는다.

$$\kappa u_* z (1 - \frac{z}{H}) \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + v_s \bar{c} \quad (2.19)$$

위의 식은 Rouse (1939)에 의해 처음으로 해석되었으며 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\bar{c}}{c_b} = \left[\frac{(1-\zeta)/\zeta}{(1-\zeta_b)/\zeta_b} \right]^Z \quad (2.20)$$

여기서 $Z(= \nu_s/(\kappa u_*))$ 는 Rouse 상수이고, b 는 바닥 부근 한 점의 높이, $\bar{c}_b = E, \zeta = z/H$, 그리고 $\zeta_b = b/H$ 이다. $\bar{c}_b$ 는 바닥부근에서의 부유사 농도이며 평형상태 (equilibrium suspension)에서는 연행률 E (entrainment rate)과 동일하다. 위의 식에서 $z=b$ 는 바닥 근처의 한 점을 의미하는데, 이는 바닥면 ($z=0$)까지 위의 식들이 성립하지 않기 때문이다.

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(30 \frac{z}{k_c}) \quad (2.21)$$

식 (2.21)에 의하면 유속이 영이 되는 지점은 $z=0$ 가 아닌 $z=k_c/30$ 이다. 바닥면 ($z=0$)에서 유속은 $-\infty$ 의 값을 가지므로, 부유사 농도 및 연행률 E 도 $z=0$ 에서 계산될 수 없다. 위의 식에서 주의할 것은, k_c 는 복합 유효조도높이 (composite effective roughness height)로 하상형상의 영향을 포함한다는 점이다. 즉, 하상형상이 없을 때는 $k_c = k_s = n_k D_s$ 이지만, 하상형상이 있을 때는 입자에 의한 표면마찰에 하상형상에 의한 영향이 추가 되어야 한다. 그림 2.3에 위의 식 (2.20)에 의한 부유사 농도분포를 도시하였다. Rouse 수가 감소할수록 부유사 농도분포가 z -방향으로 균일해 짐을 알 수 있다. 여기서 Rouse 수가 감소한다는 것은 (침강속도로 정규화된) 전단속도가 증가하거나 입자의 크기가 감소하는 것을 의미한다.

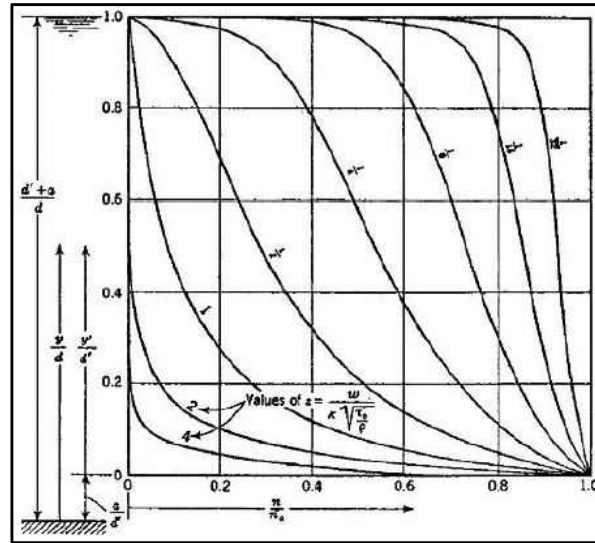


그림 2.3 Rouse 분포에 의한 부유사 농도분포

Gracia와 Parker (1991)는 기존의 연행률과 비교하여 일반화된 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$E = \frac{AZ_u^5}{1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5} \quad (2.22)$$

여기서

$$Z_u = \frac{u_*}{v_s} Re_p^{0.6} \quad \text{with } A = 1.3 \times 10^{-7} \quad (2.23)$$

이후 Wright와 Parker (2004)는 위의 식이 실험실 수로나 중소규모의 모래하천에서 연행률을 잘 예측하지만, 큰 하천이나 경사가 작은 경우에는 문제가 있는 것을 지적하고

유사변수와 A 를 다음과 같이 수정하였다.

$$Z_u = \frac{u_*}{v_s} Re_p^{0.6} S^{0.07} \quad \text{with } A = 5.7 \times 10^{-7} \quad (2.24)$$

부유사 산정시 연행함수는 Wright와 Parker (2004) 공식을 이용하는 방법을 채택하였다. 그리고 소류사량과 부유사량의 계산 값을 합하여 총유사량을 산정하였다. 부유사량 산정 공식은 다음 식 (2.25)와 같다.

$$q_s = \frac{u_* EH}{\kappa} I \quad (2.25)$$

여기서 $\kappa = 0.41$, H 는 수심이며, u_* , E , I 는 아래와 같다.

$$u_* = \sqrt{gHS} \quad (2.26)$$

$$E = \frac{5.7 \times 10^{-7} Z_u^5}{1 + \frac{5.7 \times 10^{-7}}{0.3} Z_u^5}, \quad Z_u = \frac{u_*}{v_s} Re_p^{0.6} S^{0.07} \quad (2.27)$$

$$I = \int_{\delta}^1 \left[\frac{(1-\delta)/\delta}{(1-\delta_b)/\delta_b} \right]^{\frac{v_s}{\kappa u_*}} \ln \left(30 \frac{H}{k_c} \delta \right) d\delta \quad (2.28)$$

$$Re_p = \frac{\sqrt{gRD_{50}} D_{50}}{\nu} \quad (2.29)$$

$$k_c = n_k D_s \quad (2.30)$$

여기서 u_* 는 하상 전단속도, v_s 는 유사의 침강속도, ν 는 동점성 계수, D_s 은 유사의 입경, k_c 는 조도높이이다.

(5) 입도분포 효과

(가) 소류사

입도분포를 고려하기 위해 소류사를 크기에 따라 범위로 나누어서 계산할 수 있는데, 각 입자의 초기거동을 구분하기 위해 한계 전단응력을 각 입자에 따라 다르게 적용되어야 한다. 모래 (혹은 세립토)는 자갈 (혹은 조립토) 아래 위치하여 유수에 의해 작용하는 전단력이 감소하며, 반대로 자갈은 유수에 직접 노출되어 전단력이 증가한다. 이를 반영하기 위해 차폐효과 계수를 사용하는데 Ferguson등 (1989)과 Wilcock과 Crowe (2003)은 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\tau_{c,j} = \tau_c \left(\frac{d_j}{d_{50}} \right)^b \quad (2.32)$$

여기서 $0 < b \leq 1$ 이며 Ferguson등 (1989)는 $b = b_{Fer} = 0.12$ 를 제시하였고 Wilcock과 Crowe (2003)은 $b = b_{wc} = 0.67/[1 + \exp(1.5 - d_j/d_{50})]$ 를 제시하였다.

(나) 부유사

Garcia와 Parker (1991)은 각 입도분포 범위에 적용할 수 있는 분포형 유사에 대한 관계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$E_{ui} = \frac{F_i}{F_i} = \frac{AZ_{ui}^5}{1 + \frac{A}{0.3}Z_{ui}^5} \quad (2.33)$$

$$Z_{ui} = \lambda_m \frac{u_{*s}}{v_{si}} Re_{pi}^{0.6} \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^{0.2} \quad \text{with } A = 1.3 \times 10^{-7} \quad (2.34)$$

$$Re_{pi} = \frac{\sqrt{Rg d_i} d_i}{\nu} \quad (2.35)$$

$$\lambda_m = 1 - 0.298\sigma \quad (2.36)$$

여기서 i 는 입도분포에서 각 범위를 대표하는 입자를 나타내며 F_i 는 입자의 비율, σ 는 표준편차이다.

$$\sigma^2 = \sum (\phi_i - \bar{\phi})^2 p_i \quad (2.37)$$

$$\phi = -\log_2(D_i) = -\frac{\ln(D_i)}{\ln(2)} \quad (2.38)$$

$$\bar{\phi} = \sum \phi_i p_i \quad (2.39)$$

위의 방법은 경사가 작거나 중간인 모래하천에 비교적 정확하지만 경사가 큰 모래하천 흐름에서는 연행률 (entrainment rate)이 과다 산정되는 경향이 있다. 이를 위해 Wright와 Parker (2004)는 수정된 관계식을 제시하였다. E_i 를 포함한 다른 식은 동일하나 Z_{ui} 를 식 (2.40)와 같이 제시하였다.

$$Z_{ui} = \lambda_m \left(\frac{u_*}{v_{si}} Re_{pi}^{0.6} \right) S^{0.08} \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^b \quad \text{with } A = 7.8 \times 10^{-7} \quad (2.40)$$

$$b = \begin{cases} 0.2 & \text{for } \frac{D_i}{D_{50}} \leq 1 \\ 0.7 & \text{for } \frac{D_i}{D_{50}} < 1 \end{cases} \quad (2.41)$$

Wright와 Parker (2003)에 제시된 b (차폐효과 계수)는 평균입자를 기준으로 세립토는 조립토에 의해 연행률 (entrainment rate)이 감소하고 조립토는 세립토로 인해 연행률이 증가하는 현상을 적용 할 수 있다.

3. 3차원 하도형태 산정모형 구축기본 유동모형 하도형태의 문제와 해결방안

본 연구의 최종목표는 하천에서 유동을 해석하고 유사량과 하상변동을 예측하는 모형을 개발하는 것 이므로 개발한 유동모형이 실제 하천형상을 모의할 수 있어야 한다. 그러나 그림 2.1과 같이 실제 하도의 형상이 가. 에서 제시한 유동모형의 직교좌표계 계산격자의 경계면에 맞지 않기 때문에 유한체적법을 사용하여 가우스 발산정리를 사용할 경우 잘못된 면적을 산정하여 큰 오차를 발생시킨다. 따라서 직교좌표계가 아닌 형태로 유동모형을 수정하여 하도형태 산정모형을 구축할 필요가 있다.

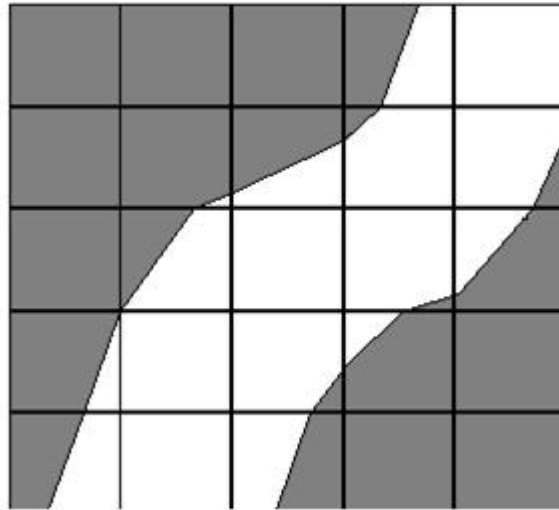


그림 3.1 실제 하도형상과 계산격자

하도형태 산정모형을 구축하는 방법으로는 격자를 하도형태에 맞추는 방법이나 격자를 변형시키지 않고 경계면에 특수한 기법을 사용하는 방법이 있다.

(1) 격자를 하도형태에 맞추는 방법

이 방법은 계산격자를 계산대상의 형태에 맞추는 방법이다. 일반적으로 격자를 하도형태에 맞추는 방법으로는 비정렬 격자계 (unstructured grid system)를 사용하는 방법이나 곡선좌표계 (curvilinear coordinate system)을 사용하는 것이 일반적이다. 비정렬 격자계는 특정되지 않은 다각형 격자가 불규칙적으로 배치된 격자계로 어떤 형태든 거의 본 모습에 가깝게 묘사할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 격자계는 불규칙성에 의해 계산에서 사용될 행렬생성이 난해해지고 많은 격자가 사용되어 많고 복잡한 계산을 요구하는 문제점이 있다. 곡선좌표계는 직교되지 않은 계산영역에 대하여 그림 2.2처럼 직교좌표계의 x, y, z 를 다른 좌표계로 변형시켜 직교된 계산영역으로 변환시키는 방법이다. 미분방정식을 곡선좌표계에서 계산하기 위해서는 연쇄법칙 (chain rule)을 사용하여 식을 수정할 필요가 있다.

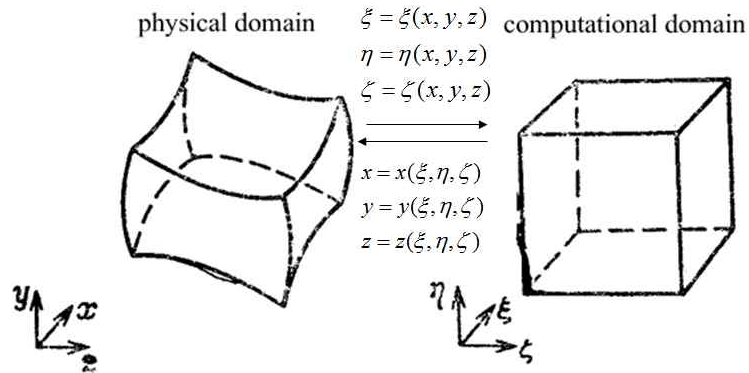


그림 3.2 직교좌표계와 곡선좌표계 변환

(2) 경계면을 특수처리하는 방법

이 방법은 계산격자는 그대로 유지하면서 계산영역의 경계면이 있는 부분에 대하여 특수한 처리를 하는 방법이다. 대표적으로 FAVOR (Fractional Area/Volume Representation) 기법이나 가상경계기법 (Immersed Boundary Method)이 있다. FAVOR 기법의 경우 경계면에서 유체가 존재하지 않는 영역을 정의하여 해당 격자의 체적과 6면 각각의 면적을 계산하는 방법으로 계단형 격자보다 좀 더 오차를 줄일 수는 있으나 경사진 벽면의 존재에 의한 흐름변화에 대해 고려가 부족하기 때문에 큰 효과를 기대할 수 없다. 가상경계기법은 1972년 C. S. Peskin이 처음 개발한 방법으로 유체와 구조물의 상호작용에 대하여 모의하면서 처음으로 제시한 방법으로 특이한 형상을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 경계면이 이동하는 효과도 고려할 수 있는 장점이 있다. 가상경계기법으로 유동모형을 계산하기 위해서는 경계면 근처의 계산영역을 그림 2.3과 같이 fluid point, forcing point, pseudo-fluid point로 나누어야 한다. 그리고 일반 계산행렬을 이용하여 fluid point들에서 계산된 유속과 no-slip 조건을 사용하여 벽면과 forcing point와의 거리에 의해 반대방향 유속으로 설정되어있는 pseudo-fluid point를 보간하여 forcing point의 유속을 산정하게 된다. 이 기법은 많은 연구자들의 연구를 통해 벽의 법선벡터를 추적하여 벽의 위치와 경사 등을 고려할 수 있게 발전되었기 때문에 FAVOR보다 좀 더 정확한 해를 구할 수 있다. 위 방법들은 직교좌표계를 사용하기 때문에 계산행렬이 보존되며 연쇄법칙에 의한 계산항의 증가를 피할 수가 있어 큰 경제성을 가져오나 벽면의 no-slip조건으로 유도되는 pseudo-fluid point의 값이 난류 흐름에서는 부정확한 해를 가져올 수 있어 이를 보완하기 위해 많은 격자를 사용해야 하므로 더 비경제적이 되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 최근 난류에서 적용 가능한 가상경계기법이 개발되고 있다.

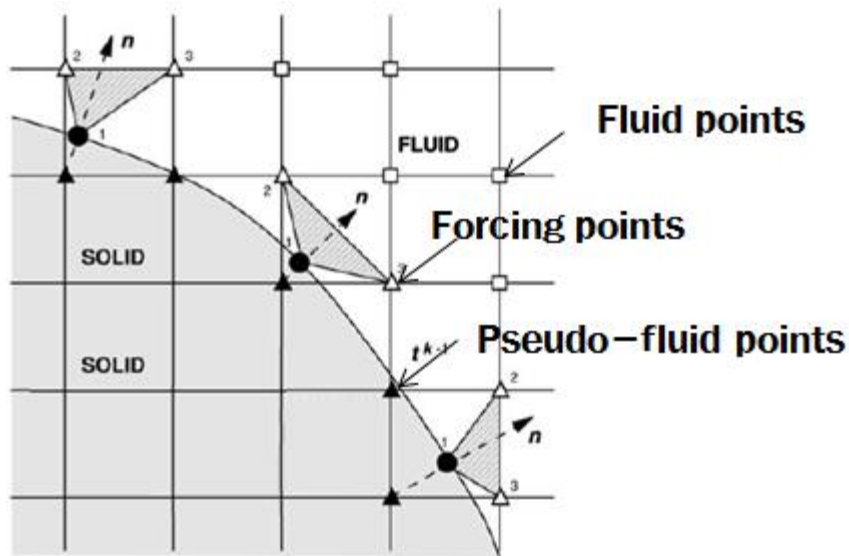


그림 3.3 가상경계기법 계산격자구분

(3) 하도형태 산정모형 선정

본 연구에서 활용하기 위한 하도형태 산정모형을 선정하기 위하여 각 기법을 하도형태 산정모형으로 선정할 경우의 장단점을 비교분석하여 표 2.1에 제시하였다. 일반적으로 하도형태로 일직선 혹은 만곡형태를 가지고 복잡하지 않은 사다리꼴 형태의 단면을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 하도형태 산정모형으로 곡선좌표계를 선정하였다.

표 2.1 각 기법의 하도형태 산정모형으로서 장점 및 단점

구분	비정렬 격자계	곡선좌표계	가상경계기법
장점	복잡한 형상 재현 가능	간편한 경계면 설정 계산행렬 보존됨	좌표변환 필요없음
단점	비경제적	복잡한 형상을 모의할 경우 격자 수 급증	법선벡터 위치설정 문제 불필요 격자 많아짐 조도 적용문제

가. 3차원 하도형태가 고려된 유동모형 적용

(1) 지배방정식

기존 직교좌표계에서 곡선좌표계로 계산영역을 변환하기 위해서는 연쇄법칙을 사용하여 계산좌표계를 변형시켜야 한다. 직교좌표계의 좌표 x_i ($i=1,2,3$)과 곡선좌표계의 좌표 η_j ($j=1,2,3$)과 관계에 대하여 $\frac{\partial x_i}{\partial \eta_j} \equiv \alpha_{ij}$ 로 정의할 경우 각 좌표의 미분관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{bmatrix} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \eta_1} \\ \frac{\partial}{\partial \eta_2} \\ \frac{\partial}{\partial \eta_3} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

여기서 β_{ij} 는 격자계수로 다음과 같다.

$$\beta_{ij} = \alpha_{i-1j-1}\alpha_{i+1j+1} - \alpha_{i-1j+1}\alpha_{i+1j-1} \quad (i, j = 0 \rightarrow i, j = 3, i, j = 4 \rightarrow i, j = 1) \quad (3.2)$$

J 는 연쇄법칙으로 계산된 자코비안 (Jacobian)이다.

본 연구에서 사용하는 유동모형의 지배방정식인 레이놀즈평균 나비에-스톡스 방정식을 곡선좌표계에서 해석하게 될 경우 연쇄법칙에 의하여 식 (1.1), (1.2), (1.9), 그리고 (1.10)은 각각 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{\partial U_k}{\partial \eta_k} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (U_k \bar{u}_i)}{\partial \eta_k} = - \frac{1}{J} \frac{\partial (\beta_{ik} \bar{p})}{\partial \eta_k} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta_k} \left\{ \frac{g_{km}}{J} \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \eta_m} \right\} + F_i \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (U_k k)}{\partial \eta_k} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta_k} \left(\frac{g_{km}}{J} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \eta_m} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (U_k \varepsilon)}{\partial \eta_k} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta_k} \left(\frac{g_{km}}{J} \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta_m} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (3.6)$$

여기서 η_k 는 계산영역에서 x_k 에 대응되는 좌표이고 U 는 계산영역의 면을 직교로 통과하는 유속으로 $U_k = \beta_{ik} \bar{u}_i$ 으로 산정된다. g_{ij} 는 지형형태 텐서로 $g_{ij} = \beta_{ki} \beta_{kj}$ 이다.

(2) 엇갈리지 않은 격자

엇갈린 격자를 사용하면 계산영역에서 SIMPLE 알고리즘에 의해 연속방정식을 사용할 때 질량흐름률을 자동으로 보존시킬 수 있으며 이산화 오류를 줄일 수 있는 이점이 있으나 곡선좌표계에서 계산될 경우 $\bar{u}_i$ 는 더 이상 계산영역의 각 면에 대한 연직방향 흐름을 의미하지 않게 되기 때문에 엇갈린 격자 활용의 이점을 잃게 된다. 따라서 운동량 방정식에 의하여 산정되는 $\bar{u}_i$ 는 다른 스칼라값과 동일하게 계산영역의 중앙에 저장시키도록 하고 계산영역에서 각 면의 유속을 의미하는 U_i 를 엇갈리도록 재배치시켜 엇갈린 격자의 효과를 발생시키도록 한다. 단, U_i 는 $\bar{u}_i$ 에 의해 산정되기 때문에 이를 보간하면서 계산오차가 발생할 수 있다.

나. 하상변동 예측을 위한 수치모형 구축

유동모형은 지형정보와 유량정보를 통해 유속과 하상전단응력을 산정한다. 산정된 유속과 하상전단응력을 이용하여 유사량을 산정하고, 이는 하상토 보존 방정식 (Exner's equation)을 통해 하상고의 변화량을 계산한다.

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ty}}{\partial y} = 0 \quad (3.7)$$

여기서 λ_p 는 하상토의 공극률, z_b 는 하상고, q_{tx} 와 q_{ty} 는 각각 x , y 방향 총유사량이다. 총유사량은 위의 2.에서 제시한 유사량 산정모형을 이용하여 산정한다.

4. 3차원 계산격자 생성기법 조사 3차원 유동 프로그램 및 격자 생성 프로그램 조사

(1) 3차원 유동 프로그램

유동해석을 위한 3차원 CFD 프로그램으로는 Flow3D, Fluent, CFX, ANSYS Workbench와 무료 공개 프로그램인 OpenFOAM을 들 수 있으며, 3차원 계산격자 발생 기법 개발을 위하여 위에서 소개한 프로그램의 주요 특징들을 중심으로 분석을 하였다.

(가) Flow3D

Flow 3D 는 X, Y, Z 방향의 유속을 모두 고려하여 수치모의를 수행하는 완전한 3차원 난류모형으로서 자유수면을 가지는 개수로 흐름, 정상+비정상 유동해석, 층류 및 난류해석, 뉴턴 및 비뉴턴 유체계산, 압축성 및 비압축성 유체계산 그리고 열전달 해석이 가능한 최상의 소프트웨어이다. 유한차분법을 사용하고 있으며, 다른 방법인 유한요소법(FEM, Finite Element Method), 경계요소법(Boundary Element Method)등은 자유표면을 포함하는 유동장 해석(Fluid Flow Analysis)에서 공기와 액체의 경계면을 자세히 표현 가능하다. 자체적으로 3차원 형상의 모델링을 위한 전처리 기능을 보유하고 있지만 구조물의 복잡한 형상을 표현하기 위해서는 전용 모델러를 이용하는 것이 용이하다.

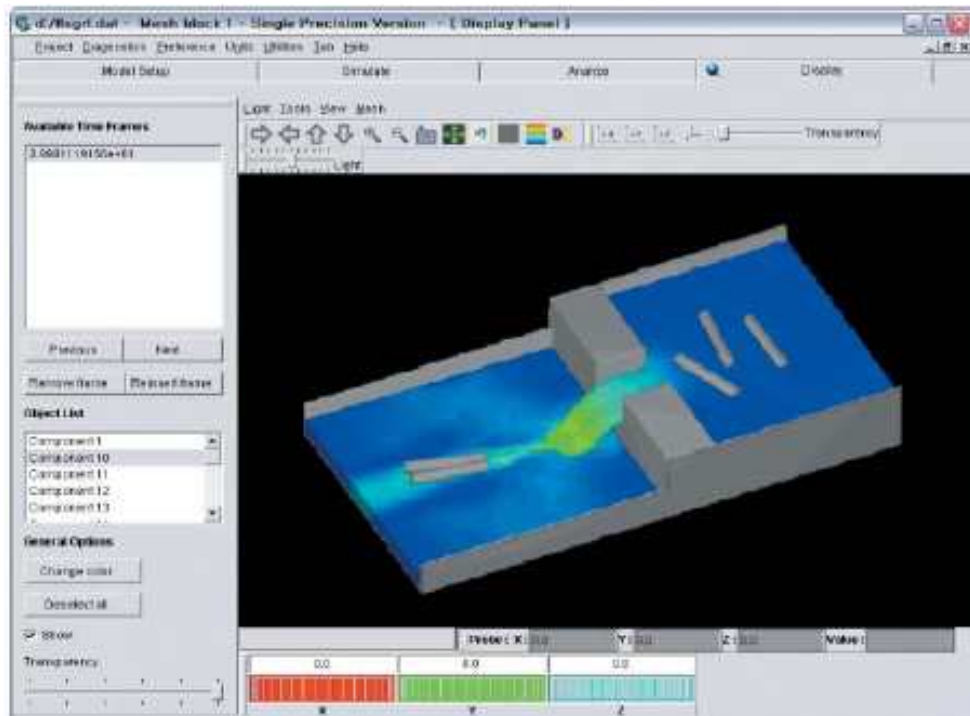


그림 4.1 FLOW-3D 프로그램

① 자유 표면 추적과 VOF 방법

댐의 방류량과 같이 자연현상을 예측하거나 사출성형 및 주조 잉크젯 프린터와 같이 제품 설계를 최적화하는 등의 문제에서는 기체와 액체가 함께 존재하며, 시간에 따라 변화하는 이상유동(공기-용탕, 물, 잉크)을 전사모사하기 위해서 어디까지가 액체이고 어디서부터 기체인지를 구별할 수 있는, 즉 기상과 액상의 경계를 정확하게 표현하는 방법이 매우 중요하다. 이러한 방법들은 고정 격자계를 이용한 방법과 이동 격자계를 이용한 방법으로 크게 나눌 수 있다. 이동격자계를 이용한 방법은 격자가 액체와 기체의 경계에 따라 움직이기 때문에 액체와 기체의 경계가 격자와 일치하게 된다. 따라서 경계의 위치를 찾아내는 특별한 알고리즘이 필요하지 않으며 경계조건(Boundary Condition)을 적용

하기 쉬운 장점이 있다. 그 경계가 심하게 왜곡되는 유동 또는 액적/기포가 생성되거나 합쳐지는 등의 복잡한 유동에의 적용은 거의 불가능하다.

고정 격자계를 이용한 방법은 경계를 추적하지 않고 액체의 체적을 추적하는 VOF(Volume of Fluid)방법을 사용하는 것으로, 액체가 각 격자요소에서 차지하는 비유를 보존 방정식에 적용, 이 방정식을 추가로 풀이하는 방법이다. 이 방법은 격자계를 고정하고 격자계 사이로 흐르는 유체를 추적하는데, 격자가 고정되어 있으므로 액체와 기체의 경계를 나타내기 위하여 그 경계를 추적하는 특별하고 정확한 알고리즘을 필요로 한다.

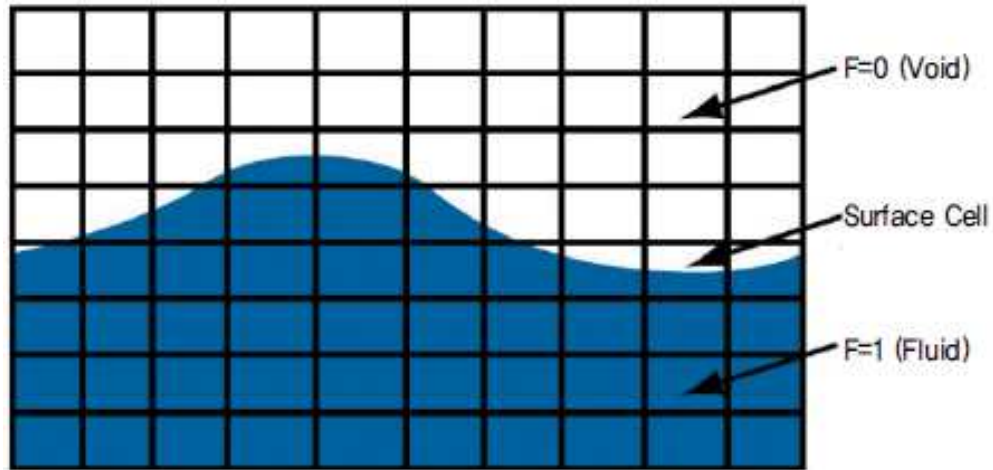


그림 4.2 FLOW-3D의 VOF방법

허트 박사가 창안한 VOF 방법은 액상과 기상의 경계면을 나타내는 기법, 고정된 격자계를 통해 이동하는 경계면을 정확하게 추적하는 알고리즘, 그 경계면에 경계 조건을 적용하는 방법의 세 단계로 구성되어 있다. 이 세 가지 단계 전체를 프로그램이 잘 구현하고 있어야 정확한 유동해석 결과를 얻을 수 있으며, 이 중 하나 혹은 두가지만 구현하는 것으로는 부정확한 결과를 얻게 된다. FLOW-3D는 이 세 가지 단계를 모두 적용한 VOF방법을 사용하며 경계조건과 경계면 추적의 정확성을 향상시키는 다양한 방법들을 포함하고 있기 때문에, FLOW-3D를 사용하면 정확한 유동해석 결과를 얻을 수 있다.

② 격자 생성과 FAVOR 방법

FAVOR(Fractional Area/Volume Representation)은 직각형 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로 각 직각형 격자의 각 면들이 전체 또는 일부가 유체가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀있을 수 있다고 정의하는 것이다. 그러므로 한 직각형 격자에서 유동물질이 차지하는 부피 및 이 매체가 통과하는 면적이 정의되며 이 격자 안에서의 질량, 에너지, 운동량들에 대한 통과 면적에 대한 유입량을 고려한 방정식들의 유한 체적 적분을 통해 일반 물체 주위의 유동에 대한 영향을 기술하게된다. 따라서, 경계밀착좌표계의 좌표변환을 하지 않는 유한차분법 사용시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자에 의한 결과의 정확도 저하를 해결하였다. FAVOR 방법의 개념은 아래의 그림과 같다.

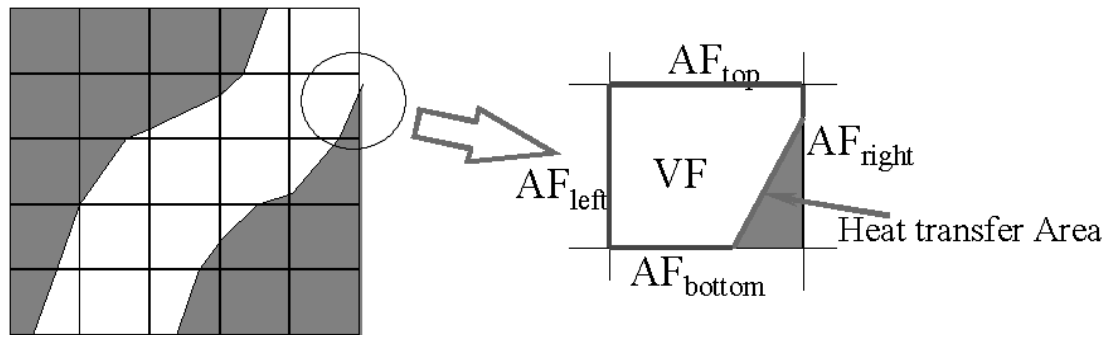


그림 4.3 FAVOR (Fractional Area/Volume Representation)의 개념

FLOW-3D는 경계밀착격자(body-fitted grids)가 가지는 유연성과 직사각형의 구조격자가 가지는 단순명료함의 장점을 결합한 독특한 격자체계를 사용한다. FLOW-3D에서는 사용자가 이동 격자를 고려하여 격자를 생성해야 하는 어려움 없이 자유롭게 시간에 따른 형상변화를 표현 할 수 있으며, 격자의 재생성에 따른 추가적인 계산부하도 발생하지 않는다.

③ 유체-고체 상호작용(Fluid-Solid Interaction) FLOW-3D는 간단한 밸브의 열리/닫힘에서부터 물수제비, 교반기, 빙산의 운동, 선박의 운동 등과 같이 유체 유동과 연동하여 고체의 운동을 함께 전산모사할 수 있는 기능을 가지고 있다. 아래의 그림은 FLOW-3D를 사용하여 선박이 진수되는 과정을 해석한 결과이다.

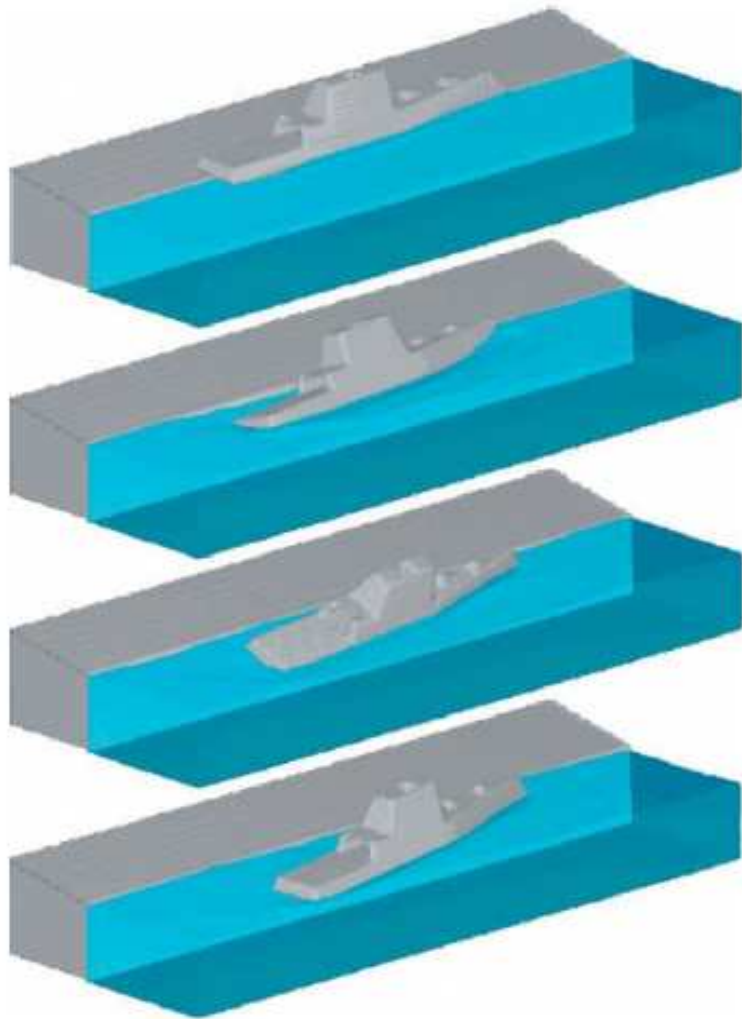


그림 4.4 선박의 진수과정 모사

FLOW-3D는 GMO(General Moving Object)라는 모델을 사용하여 유체-고체 상호작용을 해석하는데, 이 방법은 고체를 변형이 없는 강체(rigid body)로 가정한다. 유체와 연동하는 고체의 운동을 해석함에 있어서, 유체는 고체에 비해 훨씬 쉽게 변형이 발생하고 고체의 변형은 매우 작게 되므로, 이러한 가정은 타당하게 된다. 또한 고체를 강체로 가정함으로써 고체 변형 계산에 필요한 컴퓨터의 부하를 줄일 수 있다.

(나) Fluent

FLUENT는 세계에서 가장 많이 사용하고 있는 상용 전산유체역학(CFD) 해석 프로그램입니다. 전산유체역학 해석에 필요한 전처리(Pre-processing), 계산(Solving), 후처리(Post-processing)의 모든 작업을 할 수 있는 패키지 프로그램의 이름인 동시에 계산 프로그램(Solver)의 이름이기도 합니다. FLUENT 소프트웨어 패키지는 전처리기인 GAMBIT, TGRID와 계산 및 후처리 프로그램인 FLUENT로 구성되어 집니다.

FLUENT는 여러 가지 다양한 물리적 모델을 갖고 있으며 비압축성(low subsonic)에서 압축성(supersonic and hypersonic) 및 천음속(transonic) 유동 등 유동의 전 영역을 해석할 수 있는 CFD전용 Solver입니다. 또한 FLUENT는 수렴가속화를 위한 Multigrid 방법과 연계된 여러 가지 형태의 Solver option을 제공합니다.



그림 4.5 Fluent 프로그램

① 격자 활용 능력 (Mesh Capabilities)

삼각형, 사각형, 사면체, 육면체, 다면체, 프리즘, 피라미드 및 혼합형 격자 사용며, 유체/고체영역 인터페이스를 포함하는 비등각(Non-conformal)격자의 인터페이스 제공합니다. 해석 변수 또는 관련 변수(y^+ , wall proximity 등)에 기반한 아래와 같은 적응 격자 기법을 제공합니다.

- Conformal adaption on triangular and tetrahedral meshes
- Hanging node adaption for all element types
- Automatic interpolation of solution after mesh refinement
- Dynamic hanging node adaption at user-specified intervals
- Geometry-based adaption

격자의 질을 향상시키기 위한 다양한 도구, 생성된 격자를 적절히 처리하는 다양한 방법을 가지고 있으며,하이브리드 격자 생성 유틸리티 및 격자와 격자간 데이터 보간 기능을 지원합니다.

② 동적 격자 변형 기법 (Dynamic Mesh Modeling)

- Mesh motion and deformation automatically handled by solver
 - : Cell deformation using spring analogy
 - : Dynamic cell layering
 - : Local remeshing
 - : 2.5D remeshing
- Automatic refinement/coarsening capability using sizing functions
- Compatible with all other physical models including multiphase and reacting flows
- In-cylinder mesh motion options and crevice/blowby model
- Mesh motion preview
- Six-degrees-of freedom (6DOF) solver

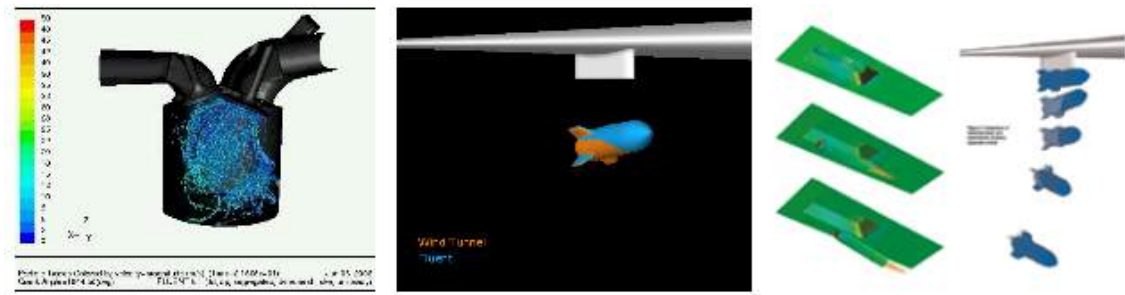


그림 4.6 Fluent의 동적 격자 변형기법

(다) CFX

다른 상용 CFD 프로그램은 형상제작, 격자 생성, Solver등으로 나누어져 있다면, CFX 11.0(Commercial computational fluid dynamics program)의 경우 ANSYS의 Workbench 환경내에서 CAD부터 Post까지의 모든 작업과정이 이루어진다. ANSYS DesignModeler을 이용하여 바로 형상을 구현하거나 CAD프로그램에서 제작한 형상을 import하고, Workbench Meshing 프로그램이나 CFX자체의 mesh 생성프로그램을 이용하여 격자를 생성하게 된다. 또한 CFX는 pressure-based coupled solver 방법을 이용하여 기존의 segregated방식과 다르게 coupled solver로 동시에 해석하므로 coupled solver의 빠르고 안정적인 해석능력의 장점이 발휘된다.

특히 다상유동의 경우 상과 상간의 inter-phase coupling이 중요한데 CFX의 coupled solver는 모든 상의 matrix가 couple 되어 해석되므로 근본적으로 상과 상간의 coupling을 반영할 수 있다. CFX에서 free surface와 bubbly flow, Phase change와 같은 다상유동을 해석하는 Eulerian-Eulerian 모델과 cyclone 등 입자추적에 사용되는 particle tracking model인 Eulerian-Lagrangian 모델을 제공하며, CFX의 출발점이 원자력의 다상유동분야이므로 다른 소프트웨어에 비해 multiphase flow의 해석에 강점을 가지고 있으며, 다른 CFD code에 비해 계산시간이 대폭 단축되는 장점이 있다.

(라) ANSYS Workbench

ANSYS는 FEA(Finite Element Analysis)소프트웨어로 잘 알려져 있으나, 최근 CFX, FLUENT, AUTODYN 등 각각의 분야에서 핵심기술을 가지고 있는 소프트웨어를 인수하여 구조해석 분야뿐 아니라 다양한 분야의 해석을 수행할 수 있는 소프트웨어들을 제공하게 되었다. 이와 같이 각각의 분야에서 우수한 소프트웨어의 제공뿐만 아니라 이들을 통합화하여 Multi-Physics 수행이 가능한 환경으로 Workbench가 개발되었다. 즉, Workbench는 ANSYS사가 제공하는 여러 분야의 소프트웨어들을 서로 연계하여 주어 다분야 통합 시뮬레이션(Multiphysics Simulation)이 가능케 하는 Interface 환경(Framework)이다.

① 특징

- 다분야 통합 시뮬레이션 수행을 위한 ANSYS의 Framework이다.
- CAD로부터 해석결과까지 통합된 환경에서 관리할 수 있도록 database를 제공한다. 생성된 각 데이터들은 모든 Application들 사이에 공유되어진다.
- 유저가 익숙한 Tab를 이용한 GUI를 제공하고 있으며, Project Page tab에서 시작하

여 Geometry, Boundary conditions setup (loads, restraints, materials), FEA/CFD Analysis, Visualization (images and animations) 및 Report 등의 작업을 수행할 수 있다.

② Mesh 생성 기능

ANSYS에서 V11.0 부터 새롭게 선보이고 있는 Workbench-based Meshing Application은 기존 구조해석분야의 ANSYS meshing과 CFX-Mesh, 그리고 ICEM CFD의 Meshing 기법을 종합하여 간단하고 편리하게 만든 새로운 Meshing 환경이다.

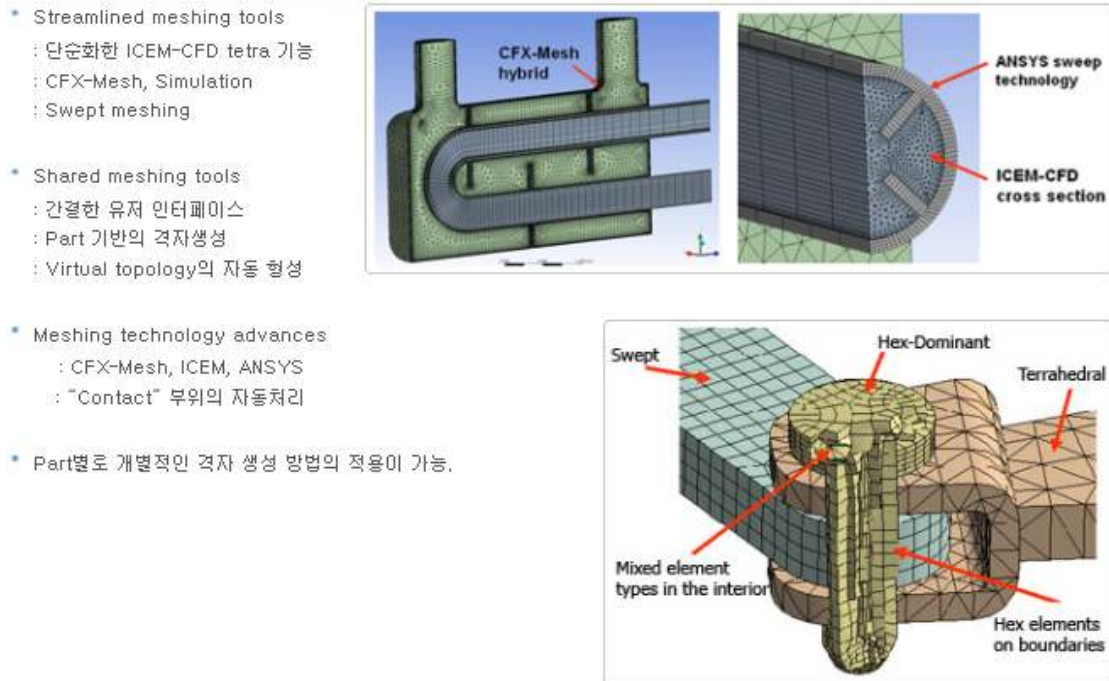


그림 4.7 ANSYS Workbench Mesh Generator

③ ANSYS Workbench 구조

ANSYS Workbench의 현재 구조 및 목표 시스템 구성도는 아래와 같다.

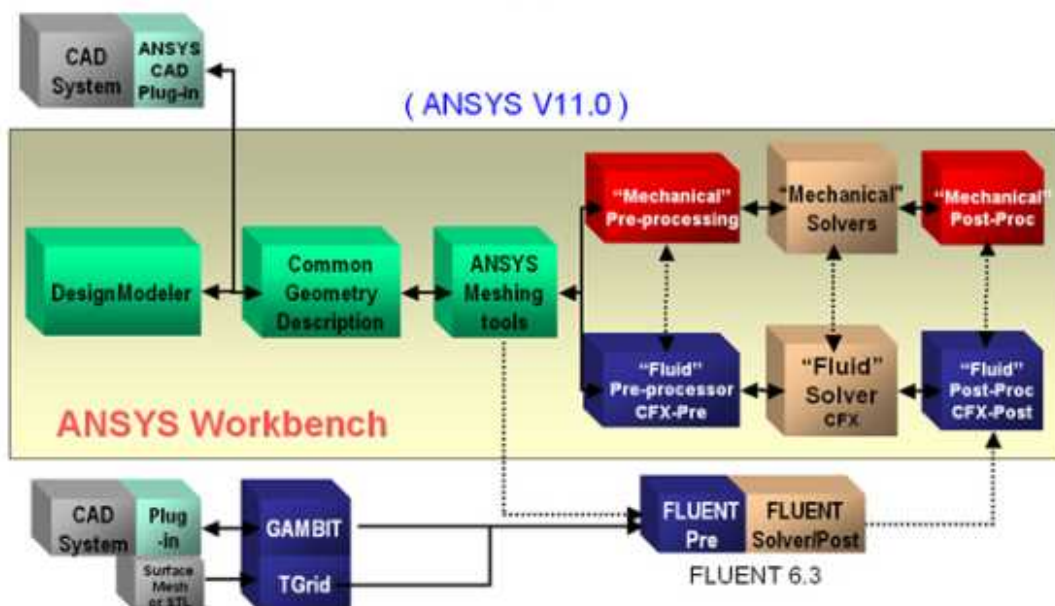


그림 4.8 ANSYS Workbench 구조도

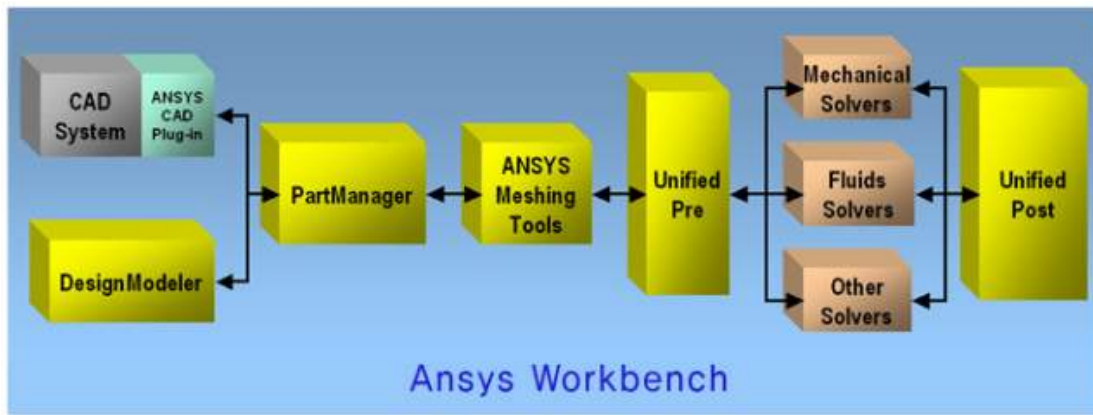


그림 4.9 ANSYS Workbench Longterm Goal

(마) OpenFOAM

① 개요

오픈폼(OpenFOAM:Open Field Operation and Manipulation)은 소스 코드가 공개된 무료 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)해석을 위한 공개용 프로그램입니다. 이 프로그램은 OpenCFD Ltd.에서 개발되었으며 GNU GPL(일반 공중 사용 허가서: General Public License)를 사용하기 때문에 누구나 무료로 다운로드 받아 사용할 수 있으며, 전 세계의 많은 연구자들에 의해 계속 개발되고 있습니다. OpenFOAM은 C++ 모듈로 구성되어 있으며 복잡한 난류 유동뿐 아니라 화학반응, 열전달, 다상유동, 구조해석, 전자기장 등 광범위한 분야에 적용할 수 있는 기능을 갖고 있습니다. 대부분의 엔지니어링 산업분야에서 전세계적으로 많은 사용자가 있으며 대학뿐 아니라 산업체와 연구기관들에서도 널리 사용되고 있습니다.

② 특징

OpenFOAM은 유한체적법 (FVM : Finite Volume Method)을 사용하고 있으며 3차원 비정렬 격자를 지원합니다. 격자의 운동을 구현할 수 있으며 병렬연산을 지원합니다. 또한 오픈폼은 어플리케이션이라고 칭하는 실행파일을 만들기 위한 C++ 라이브러리들의 모음입니다. 이 C++라이브러리들을 이용해서 사용자가 자신이 원하는 프로그램을 만들 수 있습니다. 이 라이브러리들은 우리가 해석하고자 하는 편미분 방정식과 최대한 유사하게 만들어져 있어 지배방정식을 잘 이해하고 있다면 C++ 언어에 대해 자세히 알지 못하더라도 쉽게 프로그램을 만들 수 있습니다. 오픈폼은 C++ 라이브러리들의 소스 파일 뿐 아니라 미리 컴파일 된 많은 어플리케이션들을 함께 제공합니다.

③ 전후처리 과정

오픈폼은 격자생성을 위해 blockMesh와 snappyHexMesh라는 유틸리티를 제공합니다. blockMesh는 사용자가 격자의 좌표를 입력하여 격자를 만드는 방법으로 산업현장의 복잡한 형상을 구현하기에는 한계가 있습니다. snappyHexMesh는 stl파일을 이용하여 육면체 격자를 생성하고 경계면에서는 면의 형상에 따라 격자를 잘라주어 다면체 격자를 생성합니다. 이 방법을 사용하면 어떤 복잡한 형상도 양질의 격자를 생성할 수 있습니다.

다른 전처리 프로그램에서 만들어진 격자를 사용할 수 있도록 데이터 변환 유틸리티

들을 제공합니다. StarCD, Fluent, CFX 등 다양한 상용 프로그램의 격자를 사용할 수 있으며 plot3d 양식의 파일을 사용할 수 있습니다. 최근 Harpoon, GridGen 등 전문 전처리 프로그램들은 오픈폼 형식으로 격자를 내보내는 옵션을 갖고 있어 별도의 데이터 변환 유틸리티를 사용할 필요가 없습니다. 후처리 프로그램인 paraview가 내장되어 있어 계산결과를 확인하고 데이터를 추출할 수 있습니다. 전문 후처리 프로그램인 Fieldview, Ensight 등의 프로그램에서 읽을 수 있는 데이터 형식으로 변환시키는 유틸리티를 제공하고 있으며 StarCD, Fluent 등의 프로그램 데이터 파일 형식으로도 변환할 수 있습니다.

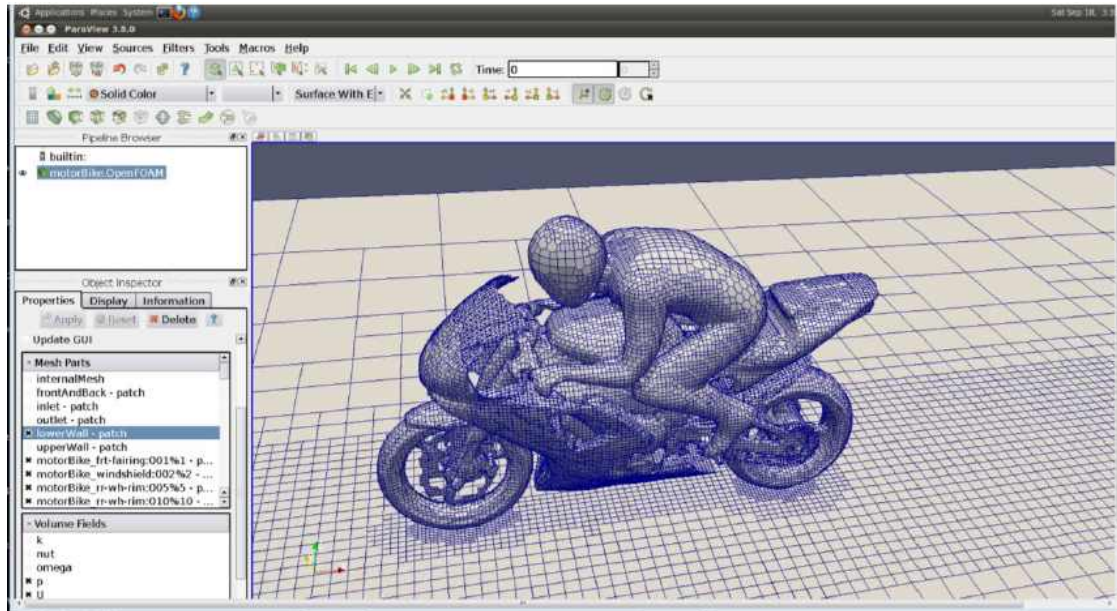


그림 4.10 paraview GUI 환경 및 snappyHexMesh를 이용한 격자 예

(2) 3차원 격자 생성 프로그램 조사 3차원 격자 생성 프로그램은 오픈소스인 Gmsh, Salome를 필두로 GAMBIT, Gridgen, HyperMesh, Femap, ICEM CFD를 들 수 있다.

(가) Gmsh

1997년부터 Christophe Geuzaine과 Jean-Francois Remacle가 개발하였고, 윈도우, 리눅스, 맥OS에서 모두 사용이 가능하며, 현재 2.1.1버전에 이르고 있다. CAD엔진을 기반으로 3차원 유한요소를 자동으로 생성할 수 있으며, 여러가지 후처리 기능을 모두 가지고 있다.

Gmsh는 기하 모델을 표현하기 위하여 Boundary representation(b-rep)법을 사용하며, 기하 모델은 bottom-up 방법을 사용하여, 점-선-면-입체의 순으로 형성하게 된다. 또한 텍스트 형태인 Gmsh 자체의 스크립트 언어를 사용하여 변수를 제어하는 방법으로 기하 모델의 형성이 가능하다. 요소망을 만드는 방법은 Characteristic length에 의해 제어되며, 기하의 형태에 의해 구조화된 요소망, 비구조화된 요소망을 모두 만들 수 있으나 내부적으로는 모두 비구조화된 요소망으로 인식한다.

CAD 파일 포맷은 IGES, STEP을 지원하며, 요소망 포맷은 자체 gmsh 포맷을 비롯하여 MED, UNV, VTK, BDF(Nastran), Plot3D 포맷을 지원한다.

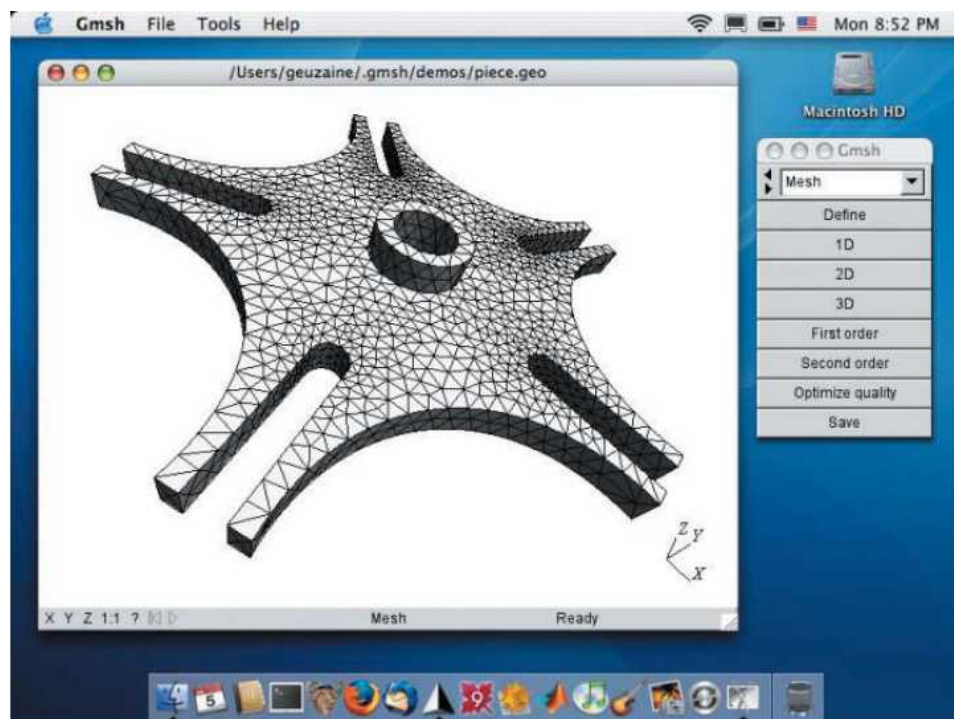


그림 4.11 Gmsh 인터페이스

(나) Salome SALOME(<http://www.salome-platform.org>)는 수치해석을 위한 전·후처리 기능을 가진 오픈소스 통합플랫폼이다. SALOME는 단순하고 효율적인 다중 물리(multi-physics) 해석, 효율적인 전·후처리, 수치해석 코드의 광범위한 사용성, 제품수명관리(PLM)을 위해 2000년에 개발되었다.

SALOME는 CAD 모델과 해석 소프트웨어를 연결하기 위해 개방적이고 유연한 구조를 가지고 있으며, 모든 기능은 파이썬(Python) 콘솔을 통해 실행할 수 있다. SALOME는 CAD 모델의 생성, 수정, 가져오기, 내보내기, 수리(Repair), 정리(Clean), 요소망의 생성, 요소망의 품질 검사, 요소망의 가져오기, 내보내기를 할 수 있다. 또한 해석을 위한 재료 속성과 경계조건의 설정, 해석의 실행과 다양한 해석 결과를 표현할 수 있다.

SALOME에서는 IGES, STEP와 같은 CAD 파일 포맷을 지원하며, 요소망 포맷으로는 MED, UNV, ASCII 포맷을 지원한다.

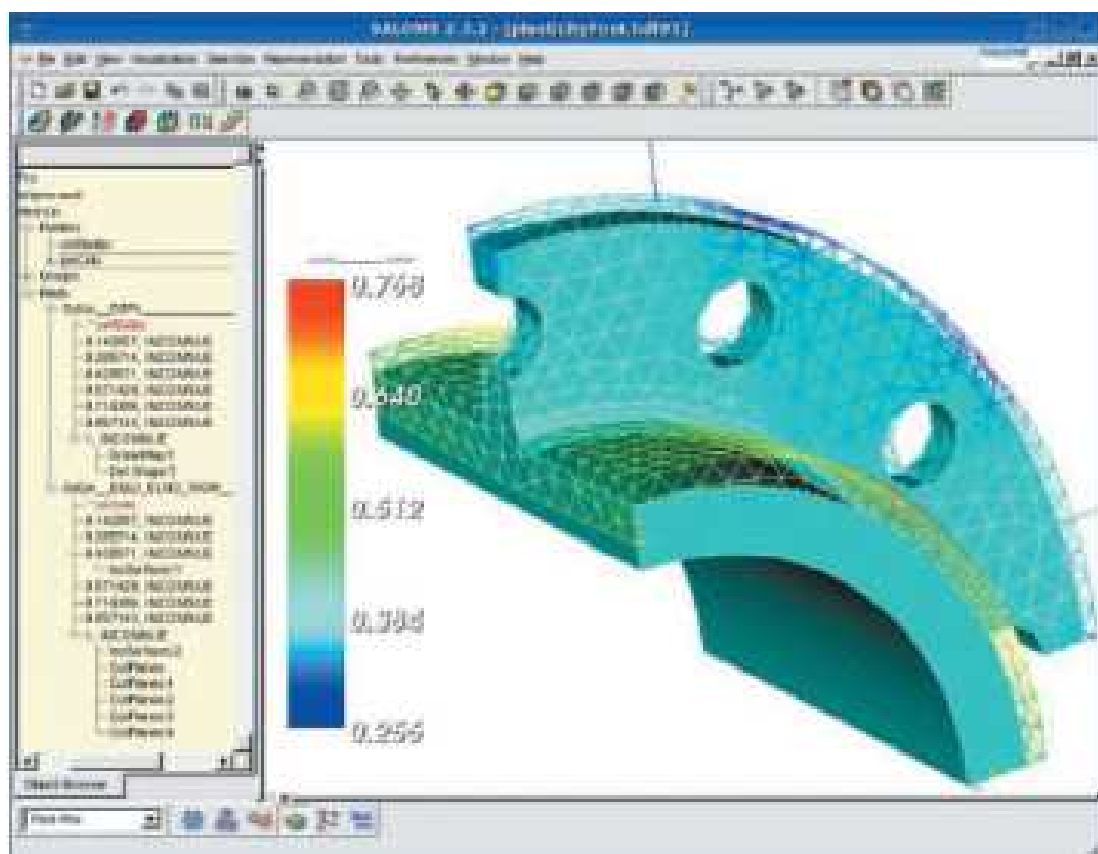


그림 4.12 SALOME 인터페이스

(다) GAMBIT GAMBIT은 Fluent.Inc에서 제공하는 다양한 FVM/FEM solver 와 호환하는 범용 전처리기 이다. ACIS 커널을 사용하는 CAD 기능을 탑재하고 있으며, 전문 CAD software와의 호환이 가능하여 쉽고 빠르게 형상을 구현할 수 있으며, 강력한 격자 생성 기능을 보유 하고 있다. Gambit은 육면체, 사면체, 삼각기둥, 피라미드 등의 다양한 형태의 격자를 지원하며 Gambit의 격자는 solid의 형상에 의존하므로 정렬격자를 생성하려면 형상이 육면체에 상응하는 모양이어야 한다.

① Hexadecimal Mesh

- Map : 단일 블록에 육면체 정렬 격자를 생성한다.
- Sub-Map : 멀티 블록에 육면체 정렬 격자를 생성한다.
- Tet-primitive : 사면체 형상을 자동으로 멀티 블록화하여 육면체 격자를 생성한다.
- Cooper : 정렬 또는 비정렬의 source면을 sweeping하여 사각기둥 형태의 격자를 만든다.
- Wedge mesh
- Cooper : 삼각형 비정렬 source 면을 sweeping 하여 삼각기둥 형태의 격자를 만든다.
- Tetra/Hybrid mesh
- Tgrid : 사면체 요소를 사용하여 비정렬 격자를 생성하며, 거의 실패하는 법이 없다.
- Boundary layer mesh : 주로 비정렬 격자와 함께 쓰이며, 관심 대상 영역 주변의 속도 경계층을 모사하기에 적합한 격자이다.

이외에도 default를 조정하면 복잡하게 연결되어는 분지관들에 대해서 자동적으로 cooper mesh를 할 수 있는 기능을 탑재하고 있으며, size function 기능을 사용하면, edge bunching을 할 필요 없이 정렬 또는 비정렬 격자의 분포를 제어할 수 있다.

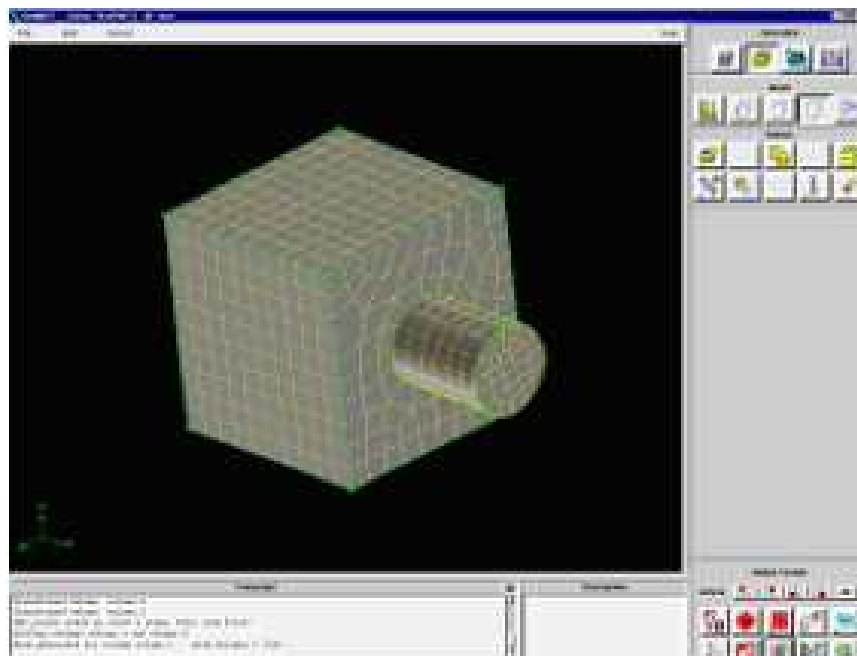


그림 4.12 GAMBIT

(라) Gridgen

① 중앙차분기법

CFD(Computational Fluid Dynamics) 및 구조해석(Structural analysis)을 위한 전처리기(pre-processor)로써 1987년 F-16 전투기의 격자 생성을 시작으로 USAF와 NASA의 R&D센터에서 사용되다가 1995년에 Pointwise Inc.에서 상용으로 개발하여 판매하기 시작한 전용 격자 생성 프로그램이다. 점차 복잡한 형상에 대한 보다 정교한 격자 생성이 요구됨에 따라 전용 격자 생성 프로그램의 수요가 증가하고 있으며 Gridgen은 격자 생성에 소요되는 시간을 줄여줌으로써 전체적인 해석 프로세스를 효율적으로 운용할 수 있도록 해준다.

□ 지원 사항

- 사각 및 육면체 격자
- 삼각 및 사면체 격자
- 싱글 및 멀티 블록 격자
- 블록의 경계면 중첩면 격자
- 2차원 및 3차원 블록 격자
- 복잡한 매핑 및 인덱스 넘버링

			
node	bar	triangle	quad
			
tetrahedral	hexahedral	prism	pyramid

(마) HyperMesh

Altair HyperMesh는 빠르고 쉽게 유한 요소를 생성하는 기능들과, 해석 후 결과를 정확하게 분석하기 위한 각종 툴들을 갖춘, 뛰어난 성능의 FEM Pre 및 Post Processor입니다. HyperMesh는 동시 (Concurrent) 엔지니어링을 가능케 하기 위한, 다양한 설계 및 해석 File Format Import를 지원하고, 신속한 모델링과 복잡한 해석에 대한 Post Processing이 가능하도록 광범위하고 깊이 있는 시각화(Visualization) 기능을 제공합니다.

또한 TCL/TK 스크립트 지원 및 강력한 매크로 기능을 통해서 설계, 제작Process 자동화와 각 단계마다의 특정 작업들을 손쉽게 접근할 수 있도록 하는 강력한 커스터마이징 기능을 제공합니다. 더 나아가, TCL/TK를 사용해서, HyperMesh의 각종 메뉴 등에 원하는 기능을 추가할 수 있습니다.

□ HyperMesh 기능 요약

- HyperMorph - Mesh morphing module
- Mid-plane surface extraction
- NURB surfaces generation from finite elements
- Quality-based automeshing and smoothing
- Connector entity for generating and managing welds
- Rapid menus system to decrease mouse travel
- Load and boundary conditions applied directly on geometry
- Solver specific user preferences
- One step tetrameshing

- Direct readers for Pro/E and STEP on Windows
- Direct model parameterization via HyperStudy
- HyperLaminate for reviewing and editing composites Product Highlights
- Catia V.5 용 파일을 읽을 수 있음

(바) Femap

Femap은 고급 엔지니어링 유한요소해석(FEA)을 위해 1985년 미국에서 개발된 프리/포스트 프로세서이다. 특히 지난 20여년간 최적의 성능과 사용의 단순성이라는 두 가지 원칙을 끊임없이 구현하고 발전시켜, 현재 새로운 마이크로소프트 오피스와 호환되는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 사용하여 작업 프로세스 및 모든 Femap 기능에 대한 액세스를 간소화하는데 초점을 둔 최신버전의 출시를 눈앞에 두고 있다. 또한 Femap은 CAD 시스템 및 해석 솔버에 대한 독립성을 추구하여, 현재 활용되고 있는 거의 모든 CAD 데이터를 특별한 변환 작업 없이 바로 사용할 수 있으며, 해석 솔버의 선택적인 사용을 가능하게 하여 기존의 솔버를 보유하고 있는 기업에서도 Femap을 활용하여 해석을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

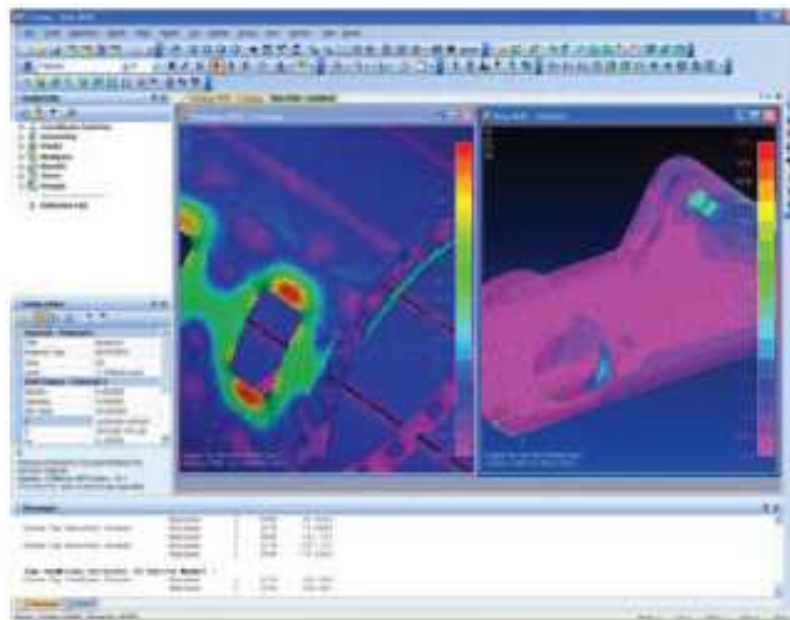


그림 4.13 Femap 인터페이스

① Mesh 기능

v10에서 개선된 새로운 3D 솔리드 및 표면 메시는 곡면에서도 최고 품질의 요소를 보장하고 정확한 유한 요소 모델을 생성하는데 소요되는 시간을 대폭 단축시킬 수 있다. 특히 새로운 메시 기능은 파라메트릭 공간이 아닌 3D 공간에서 실행되기 때문에 요소 와핑(warping)을 제거하고 보다 균등한 형태의 왜곡되지 않은 요소를 통해 일관된 고품질 메시를 생성할 수 있게 되었다. 이것은 폴(pole) 및 여타 곡면 불규칙과 같은 비일관성 문제를 보다 손쉽게 해결할 뿐만 아니라, 취약하게 매개변수화된 지오메트리에서 일반적으로 나타나며, 기존 파라메트릭 메시에 문제가 있을 경우 발생하는 수학적 결함을 해결할 수 있음을 의미한다. 또한 새로운 메시는 복잡한 경계 및 비평면 표면 문제를 해

결함으로써 평면 토폴로지의 한계를 넘어 확장된 일관된 메시를 제공한다.

그리고 solid tet-mesher는 내부 표면, 분기화된 표면(branching faces) 및 곡선을 한꺼번에 처리하여 하나의 형상으로 구성되도록 메시를 통합할 수 있으며, 사용자가 좀더 세부적인 메시 사이즈를 제어할 수 있도록 하였다.

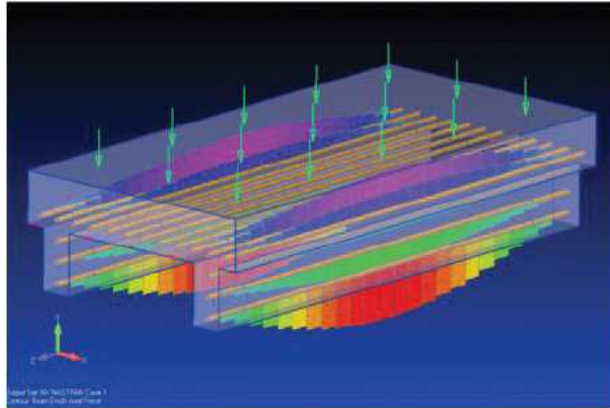


그림 4.14 개선된 Femap mesh

② 개선 도구

지오메트리 보정 및 메시 시딩(seeding)을 지원하는 강력한 신규 자동화 도구를 갖추고 있다. 이러한 새로운 기능은 표면 메시와 응력 집중(stress raisers)을 위한 메시 작업을 지원한다. 향상된 메시 도구는 다음과 같다.

□ 문제가 있는 지오메트리 해결

- 쪼개진 표면을 인접 곡면과 결합
- 행(hanging) 모서리 정제 및 토폴로지 업데이트
- 쪼개진 요소의 자동 제거
- 복잡한 경계 표면 처리 및 메싱 기능 개선

□ 메시 시딩

- 메시 시딩/사이징을 개선하여 Thin 또는 닫힌(closed) 형상에 대한 요소 품질 최대화
- 인접한 소형 형상 인식 및 소형 형상 근접 메싱
- local refinement를 통해 메시 시드를 좁고 긴 섹션 내에 정렬함으로써 메시 사이징 개선

(사) CEM CFD① 개요

ANSYS ICEM CFD는 모든 CAE Simulation을 위한 형상 모델링 및 Mesh 생성작업이 가능하며, 최적화된 Mesh는 100여 종류 이상의 다양한 CAE solver (FEA, CFD, 기타 CAE 해석 solver) 들의 입력파일을 생성하여준다.

ANSYS ICEM CFD는 다양한 종류의 “Mesh”, “Geometry”, “Solver”, “Application”에 모두 적용 가능한 표준화용 Pre-processor 이다.

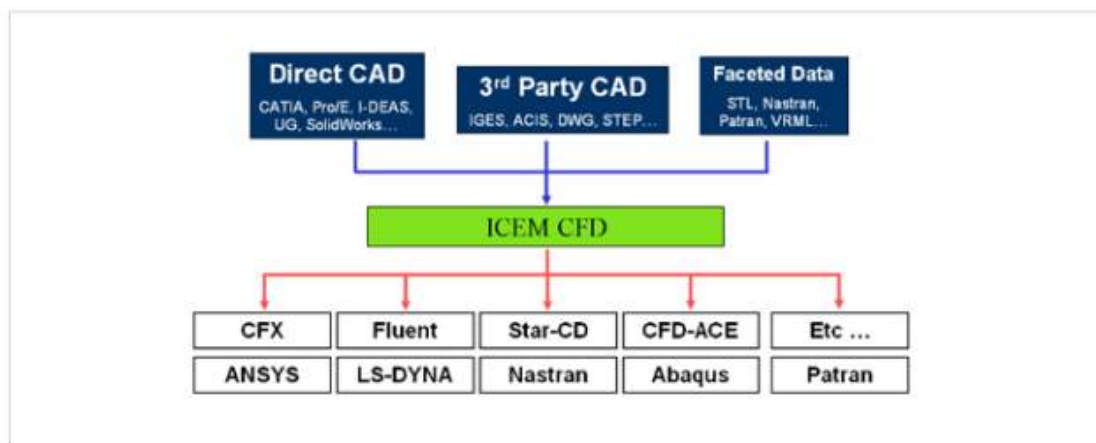
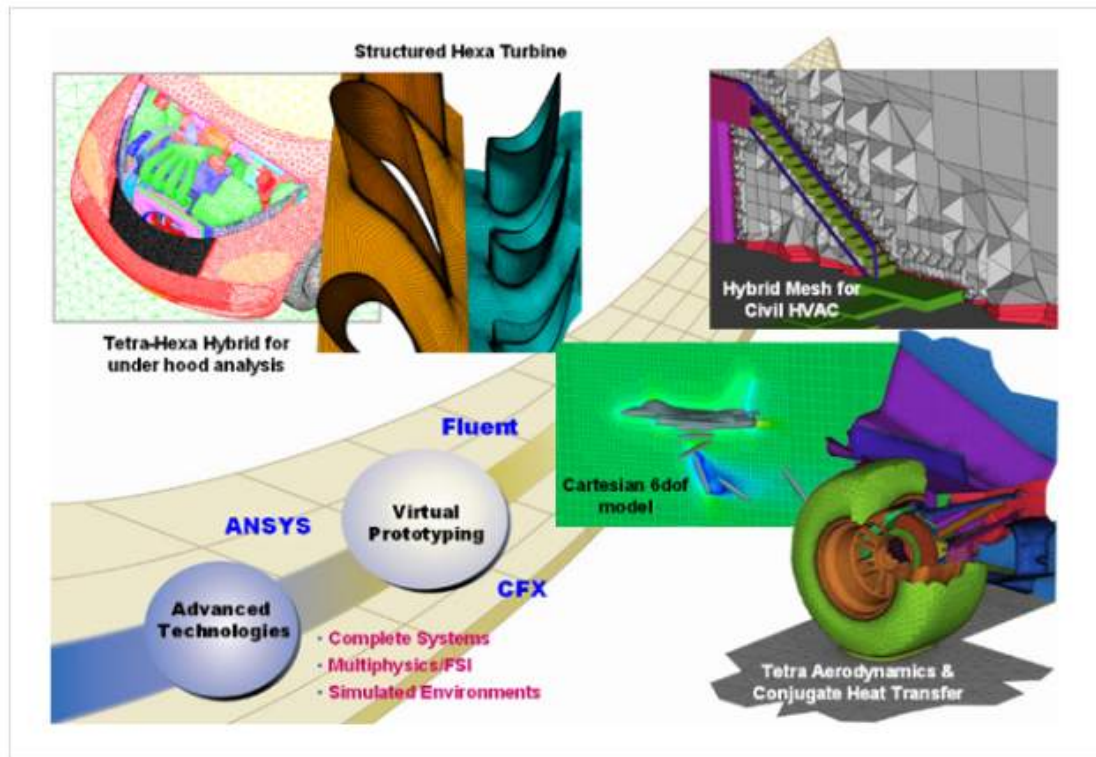


그림 4.15 ICEM CFD

② Efficient Volume Mesh

(가) 복잡한 형상에 대한 손쉬운 Tetra Mesh 생성

□ 중요한 형상 변화를 정확히 반영

□ Mesh size 제어를 위해 다양한 부가 기능

- Curve mesh parameter, Surface mesh parameter, Mesh density 등

- 복잡한 형상에 대한 Deviation, Curvature 혹은 Proximity에 근거한 격자크기의 자동

결정

③ 다양한 Tetra Volume mesh 생성 알고리즘

- Octree (Robust) : Patch independent
- Delaunay (Quick) : Existing surface mesh, uniform transition
- Advancing Front (Smooth) : Delivers required mesh quality

(나) Intelligent Surface Meshing (Shell element)

☐ Patch conformal meshing (Paved mesh)

- Bolt hole, Fillet, Buttons, Flange, Beads 등이 형상으로부터 자동으로 검출되어 격자생성

☐ Patch independent meshing

- Octree 알고리즘을 사용하여 poor geometry에 대한 우수한 품질의 Shell mesh

(다) Fast BF(Body Fitted)-Cartesian Meshing

☐ Mesh 제어를 위해 surface size를 조정할 수 있으며, mesh density 적용이 가능하다.

☐ Mesh Refinement 가능 (uniform, 2:1, 3:1 ...)

(라) Flexible HEXA Meshing (Structured & Unstructured)

☐ Top-Down 혹은 Bottom-up 방식의 blocking 방법 제공

☐ 복잡한 형상에 대한 HEXA blocking 작업을 신속히 수행 할 수 있다.

☐ 유사한 형상에 대한 동일한 격자의 재사용 가능 (parametric study)

- Parametric한 형상의 변화가 발생하는 경우 mesh는 쉽게 업데이트 됨

나. 계산격자 생성 기법 연구 동향 유한요소해석법이 각광을 받기 시작한 초기부터 자동 요소망 생성은 많은 연구자들의 관심을 받아 왔다. 그 동안 여러 분야의 연구자들에 의해 다양한 방법으로 더 좋은 형질의 요소망을 자동으로 만들기 위한 연구가 행해져 왔다.

(1) 자동 요소망 생성에 관한 연구

(가) 삼각형 요소망의 자동생성 알고리즘

곡면 재구성(surface reconstruction) 방법은 삼차원 공간상에 흩어져 있는 점들로부터 삼각형 요소망을 만들어 형상을 만드는 것으로써 Choi등은 부드러운 곡면을 만드는 방법으로 smoothness criterion을 제안하였으며, Hoppe등은 energy function을 정의하고 그것을 최소화하는 방법을 제안하였다. Garland등은 greedy insertion algorithm을 이용하여 지형을 다각형으로 근사화(polygon approximation)하는 방법을 제시하였다.

절점들을 연결하여 삼각형을 만드는 방법 중 가장 대표적인 방법이 Delaunay Triangulation방법(이하 DT)인데 이것은 주어진 점들을 연결하여 만들 수 있는 삼각형들의 집합 중에서 가장 형질이 좋은 삼각형의 집합을 주는 것으로 알려져 있다. Lo는 non-convex 영역에 대하여 DT를 행하는 알고리즘을 제안하였고, Floriani등은 visibility 개념을 이용하여 제한조건을 만족시키면서 DT를 행함으로써 곡면상에 삼각형 요소망을 만드는 방법을 제안하였다. 또한 요소망을 만들어 나갈 때 Advancing Front(이하 AF) 방법이 중요하게 사용 되는데, 전체 영역의 경계를 front로 둘러싸고 그것을 전진시켜 나가면서 요소를 하나씩 만들어가는 방법이다. Sadek은 외부경계선에 절점들을 만들고 두 세그먼트 사이에 그 길이의 비와 사이각을 기준으로 바람직한 내부 절점의 위치를 결정하여 삼각형 요소를 구성하는 알고리즘을 제안하였으며 Lo는 삼각형 patch들로 이루어진 두개의 곡면의 교차선을 찾고 그 주변의 패치들을 제거한 뒤 AF방법을 써서 국부적으로 meshing을 하여 결합함으로써 곡면이 서로 교차하는 형상에 대하여 meshing하는 알고리즘을 제안하였다. Mavriplis은 DT의 효율성과 AF의 명료함의 장점을 이용하는 방법을 제안하였으며, 절점의 위치를 정하는 방법에 있어서 Shimada등은 물리적인 현상에 기초를 둔 구를 채우는 방법을 제안하였으며, Bossen도 유사한 force function을 사용하여 절점을 이동시키고 추가하고 제거하는 pliant method를 제안하였다. 또한 Witkin등은 입자를 이용하여 implicit surface를 표현 또는 제어 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

그리고 어떤 형상을 삼차원 측정기나 laser scanning system등을 통하여 입력받아 만든 삼각형 패치들은 너무 양이 방대하여 저장, 이동, 화면에 나타내기, 수정들이 아주 힘들다. 그래서 일정한 허용오차 내에서 형상을 단순화하여 표현 할 수 있는 방법들이 개발되었다. Hoppe와 Garland등은 edge contraction의 방법으로 요소망을 단순화하였으며, 곡면의 특성들이 잘 보존되도록 알고리즘을 고안하였다. Eck등은 harmonic map parameterization을 이용하여 다중해상도 모델을 구성하는 방법을 기술했다. Garland등은 edge contraction외에 non-edge contraction을 도입하여 근사화 오차를 더욱 줄일 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

(나) 사각형 요소망의 자동생성 알고리즘

사각형 요소망은 삼각형 요소망에 비하여 상대적으로 만들기가 어려워 여러 연구자

들에 의하여 체계적으로 사각형 요소망을 만드는 방법이 개발되어 왔다. Tam등은 medial axis의 정보를 이용하여 사각형 요소망을 구성하는 방법을 제시하였으며 Baehmann등은 quadtree를 이용하여 삼각형, 사각형 요소를 만드는 방법을 제안하였다. 또한 많은 연구자들에 의하여 루핑(looping)방법이 제안되었으며, paving 방법에 관하여서도 많은 연구가 이루어졌다. Lober는 전체 영역을 부 영역으로 나눔으로써 병렬처리가 가능한 알고리즘을 개발하였으며, Rees는 조건에 따라 적절하게 사각형 요소와 삼각형 요소의 조합을 얻을 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, Nowotny는 quadtree방법과 기존 paving 방법의 문제점을 지적하고, geometry에 기반을 둔 decomposition algorithm으로 전체 영역을 분할한 후 paving 방법을 적용하여 사각형 요소망을 만드는 방법을 제시하였다.

그리고 Owen등은 paving 방법의 대안으로 기존의 삼각형 요소로부터 사각형 요소로 변환 하여 사각형 요소를 만드는 방법을 제안하였다. Lee등은 error estimation에 기반을 둔 적응 미세화 방법(adaptive refinement)을 제안하였다.

(다) 사면체 요소망의 자동 생성 알고리즘

3차원 문제를 해결하기 위해서 해석 대상인 복잡한 형상을 사면체 요소로 나누는 여러 방법들이 연구 되었다. 올바른 3차원 요소망 생성을 위한 기초 연구로써 Sapidis등은 solid/solid의 분류 연산자에 관하여 논의하였고, Jones등은 3차원 요소망 생성의 자동화에 도움을 주는 CAD model의 수정 방법에 대하여 기술하였다. 또한 Benzley등은 사면체 요소망과 육면체 요소망이 해의 결과에 미치는 영향에 대하여 논의하였다.

사면체 요소망 생성 방법에 관하여 초기부터 많은 연구자들의 관심을 받아 온 것이 DT의 방법의 3차원으로 확장이었다. Cavendish등은 solid의 단면을 잘라 그것 위에 절점을 만들고 그 절점들에 DT를 적용하여 사면체를 만들었으며, Facello는 각 점에 weight를 주는 일반화된 DT방법(소위 regular triangulation)를 제안하였다.

그리고 초기부터 행해져 온 연구 중의 하나가 quadtree의 3차원으로의 확장이라고 할 수 있는 octree를 이용한 사면체 생성방법이다. Jung등은 사면체 octree를 사용하여 주어진 형상을 근사화하고 경계 부근의 절점들은 원래 형상의 경계로 옮기는 작업을 통하여 사면체를 형성하였으며, Conti등은 octree와 DT를 결합하여 요소를 생성하는 방법을 제안하였고, Garimella등은 finite octree 방법을 이용하여 사면체 요소를 만든 뒤 anisotropival enriching 방법을 이용하여 두께 방향으로 여러 겹의 사면체 요소를 만드는 방법을 제안하였다. 또한 Frey등은 solid 분류의 방법을 통하여 주어진 형상을 voxel들로 채우고 각 voxel에 대하여 사면체 요소로 나누는 방법을 제안하였다.

3차원에서도 AF의 방법은 널리 사용되고 있는데, Chae등은 Sadek의 알고리즘을 3차원으로 확장하여 사면체 요소를 만들었으며, Shostko등은 주어진 형상을 몇 개의 부영역으로 나눈 뒤 각각에 여러 개의 프로세서가 요소망을 동시에 생성하고 나머지 경계영역에 대하여 요소망을 생성함으로써 병렬 처리로 요소망 생성하는 방법을 제안하였다. Jin등은 절점을 선택할때 validity test와 auxiliary test를 행하는 방법을 도입하여 AF방법을 적용하여 요소를 생성할 때 나타날 수 있는 더 이상 진행하기 어려운 경우가 생기는 것을 막는 방법을 제안하였으며, Frey등과 Fleishmann등은 DT와 AF를 이용하여 사면체 요소를 만드는 방법을 제안하였다

Cavendish등과 Yuen등은 3차원 DT에서 sliver가 발생할 수 있음을 지적하고 그 해결방

법을 제시하였다.

3차원 DT의 대안으로 MMSA(Minimize Maximum Solid Angle) 조건을 적용하려는 것에 관한 연구가 있는데, Joe등은 주어진 형상을 convex polyhedron으로 나누고 밀도를 결정한 다음 절점을 생성하고 그것을 DT/MMSA조건을 각각 이용하여 나누고 밀도를 결정한 다음 절점을 생성하고 그것을 DT/MMSA조건을 각각 이용하여 사면체 요소를 만들고 그것들의 상대체적과 솔리드각을 각각 비교함으로써 MMSA조건이 더 우수한 형질의 사면체를 생성한다는 것을 보였다.

(라) 육면체 요소망의 자동 생성 알고리즘 육면체 요소망은 해의 정확성과 변형시 유연함 등의 장점을 가지고 있으나, 일반적인 형상에 대한 생성의 어려움과 경계 적합성등의 부족으로 제한적으로 사용되고 있다. Scheniders등은 octree를 이용한 육면체 요소 생성 방법을 제안하였으며, Armstrong등은 MAT(Medial Axis Transform)을 이용하여 suppressing details를 행한 뒤 부영역으로 나누어 mapping의 방법으로 육면체 요소를 생성하였으며, Chiba등은 형상인식에 기반을 두고 전체 model을 기본 sub model들로 나누어 각각에 대하여 육면체 요소를 만드는 방법을 제시하였다.

다. 요소망 형질의 향상에 관한 연구

앞에서 살펴본 바와 같이 여러 가지 다양한 요소망 생성 방법들이 개발되어 왔지만, 경우에 따라서는 왜곡된 요소가 만들어지거나, 심지어 해석에 사용할 수 없는 요소가 만들어 지기도 한다. 그래서 요소망 형질을 향상시킬 수 있는 기법들이 개발되어 왔는데, 한가지는 평활화(smoothing)또는 mesh relaxation이라고 불리우는 방법으로 절점의 위치를 바꾸어 형질을 향상시키는 방법이고 다른 하나는 지역 변환(local transformation)이라고 불리우는 connectivity를 바꾸어서 형질을 향상시키는 방법이 있다.

평활화 방법에 관한 연구로써, Freitag등은 최적화 접근 방법에 의하여 절점의 위치를 결정하였으며, Canann등은 가장 널리 쓰이는 Laplacian smoothing과 최적화 방법을 함께 적용하였다. 그리고, Shimada등과 Bossen이 제안한 방법은 그 자체가 요소 생성 방법에 속하는데, 물리학에 기본을 두고 입자간의 밀도에 따라 정해지는 거리에 따라 인력 또는 장력을 적용하여 절점의 위치를 결정하였다.

지역 변환에 관한 연구로써는 Hoppe등, Rassineuxemd, Hattangady에 의해서 연구된 edge collapsing, edge swapping, edge splitting 등의 기법을 이용한 surfacedp 대한 지역변환과, Chae등, Kettunen등, Freitag등에 의하여 연구된 face swapping, edge swapping, $N \rightarrow (2N-4)$ 를 들 수 있다. 또한 Shenton등과 Kettunenemd은 2차원의 경우와는 달리 3차원 swapping에서 생길 수 있는 문제점에 관하여 지적하였다.

또한 지역 변환의 특수한 경우로 볼 수 있는 긴 선분을 잘라서 미세화를 하는 bisection 방법도 Rivara와 Merrouche등에 의하여 연구되었다.

라. 요소망 생성 기법

요소망은 크게 구조적인 요소망과 비구조적인 요소망으로 나누어지며, 요소의 크기가 일정한 요소망과 서로 다른 적응적 요소망으로 나눌 수 있다. 구조적 요소망들은 일반적으로 두 가지 성질의 선분으로 구성되며, 같은 방향의 평행한 선분들은 서로 교차되지 않고 다른 방향의 선분과 단 한번 교차하는 성질을 가지며, 유한 차분법등에 사용되는 단순한 구조를 나타낼 때 사용된다.

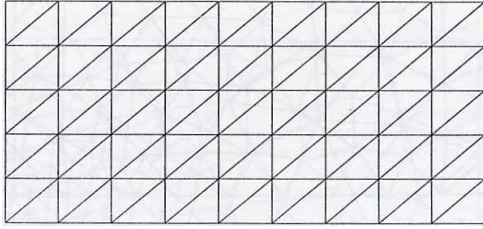


그림 4.16 Uniform Structured Mesh

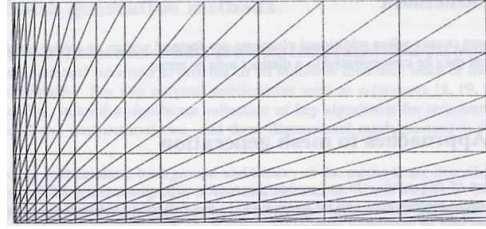


그림 4.17 Adaptive Structured Mesh

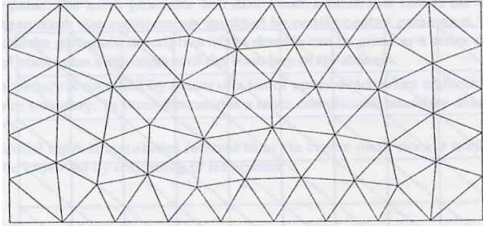


그림 4.18 Uniform Unstructured Mesh

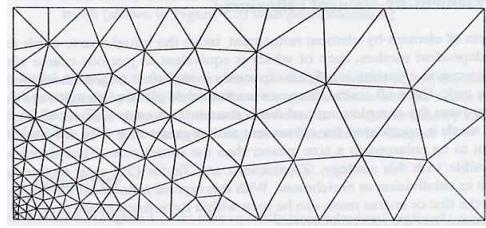


그림 4.19 Adaptive Unstructured Mesh

(1) 구조적 요소망 생성기법

이러한 방법이 사용될 수 있는 경우는 해석하고자 하는 영역의 형상이 단순하여 모의영역이 간단한 형상으로 분해될 수 있을 때 적합하다. 복잡한 형상의 임의의 영역은 이러한 방법으로 요소망을 생성하기 어렵다.

(가) Multi-block 기법

Multi-block 기법은 때때로 Super-Element 기법으로 언급되는데, Thompson, Fritz, Pierrot, Ecer 등의 많은 저자들에 의해서 소개되었다. 기본적인 개념은 주어진 영역을 기초적인 형태의 블록들의 시리즈로 분할하는 것으로 이루어져있다. 각각의 조악하게 나누어진 블록들은 Algebraic Interpolation 기법이나 Solving P.D.E. 등의 기법에 의해 격자망을 형성하게 되고, 전체 영역의 요소망은 처음 분할된 블록들의 서로 다른 요소망들을 합치는 방법으로 얻어진다.

이 기법의 장점은 곡선 좌표계를 사용하여 쉽게 모델의 경계를 정확하게 나타낼 수 있으며, 모델의 내부 요소망 절점 및 경계 절점의 간격을 직접적으로 제어할 수 있다. 더욱이 구조적 요소망 생성을 위한 프로그램 작성이 비구조적 요소망 생성보다 쉽다. 해석하고자 하는 영역을 독립적인 블록으로 나누기 때문에 요소망의 생성 및 프로그램 코드의 병렬적 처리가 가능하다. 블록형성 시 아래 그림과 같이 Conform과 Non-conform의 형태로 구분될 수 있으며, Non-conform으로 분리한 경우 각 블록의 요소망 생성 후 원래의 형태로 합칠 때 주의 하여야 한다.

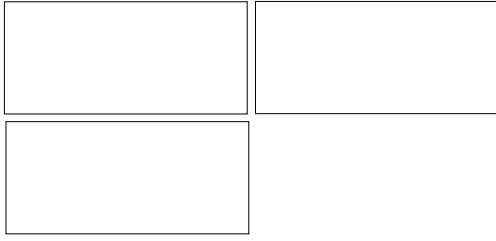


그림 4.20 Conforming division of the domain into blocks

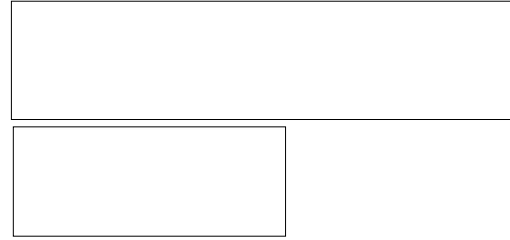


그림 4.21 Non-conforming division of the domain into blocks

(나) Algebraic Interpolation 기법

Algebraic 요소망 생성은 모델의 경계를 따라서 각 노드의 분배계수에 의해 요소망의 절점을 Interpolate하여 구하는 기법이다.

Thompson에 의해 연구되었으며, 볼록 다각형으로 나누어진 영역을 매개변수 영역으로 사상하여 생성되어진 요소망을 해석하고자하는 실제 영역에 역사상하는 방법이다. 여기서 중요한 내용은 매개변수 영역과 해석하고자하는 실제 영역사이의 적절한 사상함수를 결정하는 것이다.

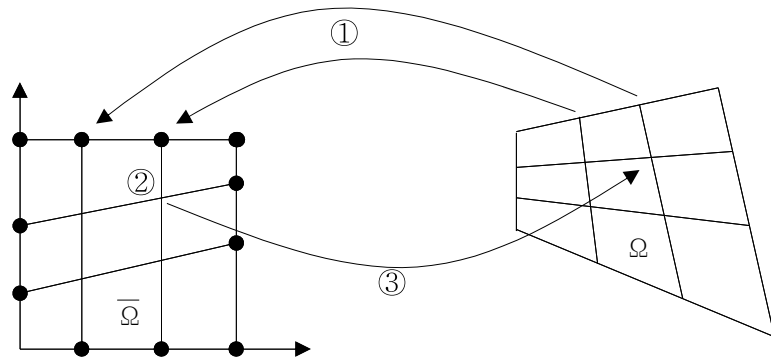


그림 4.22 Algebraic method with mapping

(다) Solving P.D.E. 기법

수치기법인 Solving P.D.E 기법을 이용한 구조적 요소망 생성 모듈은 실제의 물리적 공간 좌표를 계산 공간 좌표(computational space coordinates)의 항으로 정의하고 실제 영역에서 요소망을 생성하기 위해 계산 공간상의 grid에 대한 방정식을 푸는 것을 기본 개념으로 하여 설계 되었다.

본 기법에 적용가능한 편미분 방정식으로는 elliptic equation을 비롯하여 hyper-bolic equation, parabolic equation 등이 있으나 본 연구에서는 일반적으로 닫혀진 경계(closed boundary)를 가진 domain에 적합하고 일반적으로 사용되고 있는 elliptic equation을 이용한 요소망 생성 기법을 적용하였다.

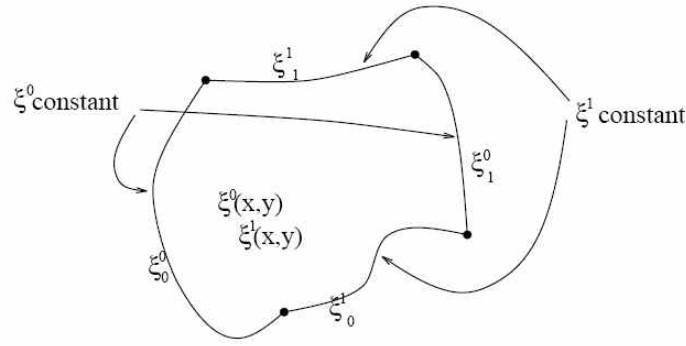


그림 4.23 elliptic grid generation boundaries

solving PDE 모듈의 메쉬 생성 알고리즘 적용 및 모듈 설계를 위해 우선 x, y 를 실제의 물리적 공간 좌표(Ω)와 관련된 공간 변수로 정의하고, ξ, η 를 계산 공간 좌표($\bar{\Omega}$)와 관련된 공간 변수로 정의하였으며, (S)는 편미분 방정식 system, (CL)은 경계조건으로 정의하였다. 이러한 정의를 바탕으로 적어도 하나의 계산 가능한 답이 있는 상호 관련성이 있는 쌍인 (S), (CL)과 다른 성질을 가진 mesh generation method가 대응된다. 이때 generating system이라고 불리는 system(S)의 선택이 중요하며 만족할 만한 어떤 유용한 성질들을 가진 격자를 만들 수 있도록 이 system의 선택이 이루어져야 한다. 이러한 특성들은 얻어진 격자의 사용 방법과 연결고리를 가지고 있으며 이는 곧 물리적인 문제에 대한 고려가 필요함을 의미한다.

이를 위해서는 다음과 같은 두 가지 접근 방법이 사용될 수 있다.

- 먼저 (S)가 변수 x, y 의 향으로 표현되고 경계조건(CL)으로 어떤 isovalue들을 영역의 네 개의 모서리에 조건으로 지정한다. 그 다음 (S)의 역을 취하면 반복기법(iterative method)에 의해서 풀어질 수 있는 연관된 system이 된다.
- (S)가 변수 ξ, η 의 향으로 정의되고 경계조건(CL)으로 Ω 의 정확한 경계 값들이 주어질 경우 (S)는 구조화된 격자 $\bar{\Omega}$ 에서 풀어지고 그 결과로부터 얻어진 해인 $x(\xi, \eta)$, $y(\xi, \eta)$ 는 Ω 의 격자를 만드는데 사용된다.

실제로 후자와 같은 접근 방법은 단지 앞서의 분석을 단순화 시킨 것이고 다소 이론적인 증명이 어려운 방법으로 귀결되므로 본 연구에서는 전자의 방법을 적용하여 solving PDE 메쉬 생성 모듈을 개발하였다.

요소망을 생성하기 위해 사용되는 함수는 먼저 정해지지 않고 미리 결정된 P.D.E.을 풀어서 요소망을 생성하게 된다.

(1) 비구조적 요소망 생성기법

(가) Advancing front 기법

임의의 형상에 적용되는 기법으로 A. George, Carnet, Lohner, Parikh, Peraire, 그리고 Golgolab 등에 의해 연구되었다. 이 기법은 초기 front로 주어진 영역 경계의 이산화된 결과를 사용하며, 이 front의 각각의 변은 새로운 삼각형을 구성하기 위해 사용한다. 그래서 새로운 front가 정의 되면, 모든 front에 대해서 적용될 때 까지 같은 방법을 반

복하게 된다. 본 연구에서는 해석하고자 하는 영역에 적절한 절점들을 생성한 후, 삼각 요소망을 구성하는 방법으로 Advanced front method를 이용하였다. 해석 영역에 적절한 절점을 생성하는 방법으로는 일반적인 격자 구조의 절점 생성 방법을 적용하였으며 경계와의 거리가 가까운 절점은 생성되지 않는다. 또한, Advanced front method를 적용함에 있어, 적절한 삼각 요소를 구성하기 위해 두 개의 인접 절점을 비교하여 최적의 삼각 요소를 구성하게 된다. 단 두 개의 인접 절점만을 비교함으로써 비교적 빠른 시간 안에 최적의 삼각 요소망을 구성할 수 있다. 삼각 요소망을 생성한 후에는 Laplacian smoothing을 이용하여 삼각 요소망의 형질을 개선하였다. 또한, 해석하고자 하는 영역에 절점들을 생성하지 않고 해석 영역에 삼각 요소를 바로 구성하는 방법으로 Advanced front method를 이용하였다. 외부 경계에서부터 시작된 front는 내부 영역으로 확대되어지며 각 front에서 적절한 절점을 직접 생성하여 바로 삼각 요소를 구성하게 된다. front에서 생성된 절점은 인접 절점들이 있는지 검색하여 인접 절점이 있다면 생성된 절점은 삭제되어지며 인접 절점이 삼각 요소를 위한 나머지 한 점으로 채택되어진다. front는 외부 경계와 교차되어지지 않아야 하며 또한 연속된 front를 효율적으로 관리하기 위해 List 자료 구조를 활용하였다.

Advancing Front 기법의 기본적인 개념은 그림 3.25와 같다. 다각형으로 구성된 경계를 세그먼트로 분할하며, 이 세그먼트들이 초기의 front가 된다. front를 기본 면으로 하여 삼각망을 구성하고, front를 다음으로 이동한다. 다각형의 경계에서 모든 front가 없어지게 되면 요소망 생성의 과정이 완료된다. 위의 기본적인 개념은 간단해 보이지만 세부적인 알고리즘의 구현은 매우 복잡하다.

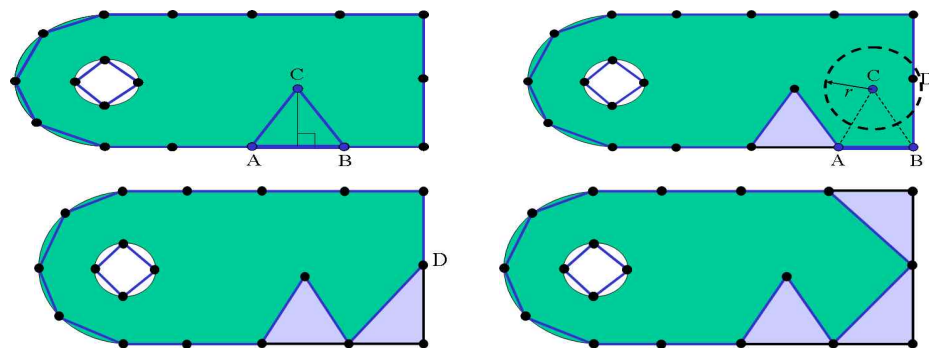


그림 4.24 Advancing Front Method

① Grid Based Advanced Front Mesh 생성 기법

점을 생성하기 위해서 해석 영역은 다음과 같이 방향성을 가지고 구성된다.

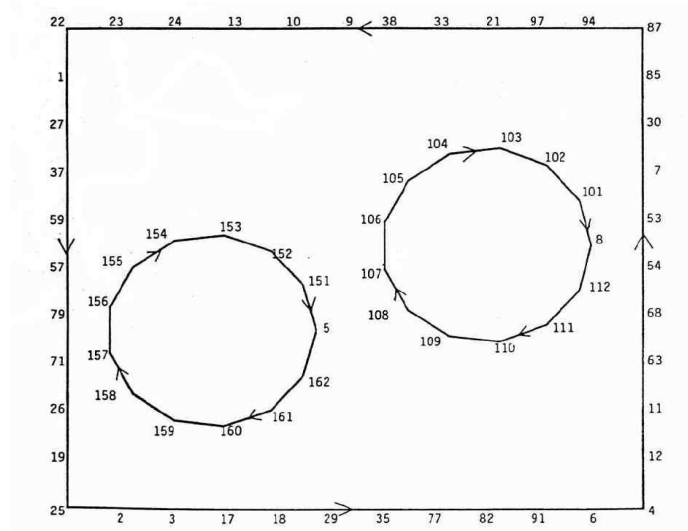


그림 4.25 해석 영역의 구성방법

위의 그림처럼 해석 영역이 구성되어 지면 해석 영역의 y_{min} , y_{max} 를 계산하고 이 y_{min} , y_{max} 사이를 가로지르는 가상의 수평선을 일정 간격(요소 크기)으로 위치한다. 가상의 수평선과 경계와의 교차점을 찾아 두 교차점 사이에 요소 크기 간격의 절점을 위치시킨다. 가상의 수평선의 y 값을 H 라 하면 다음의 수식으로 간단하게 경계와의 교차점을 계산할 수 있다.

$X1 = X(P_i)$, $Y1 = Y(P_i)$, $X2 = X(Q_i)$, $Y2 = Y(Q_i)$ 라 하면 다음(i), (ii) 경우에서 교차가 이루어진다.

(i) $(Y1 - H)(Y2 - H) < 0$ or

(ii) $(Y1 - H)(Y2 - H) = 0$ and $(H > Y1$ or $H > Y2)$

교차점은 $(X_1 + \frac{(H - Y_1)(X_2 - X_1)}{(Y_2 - Y_1)}, H)$ 이다.

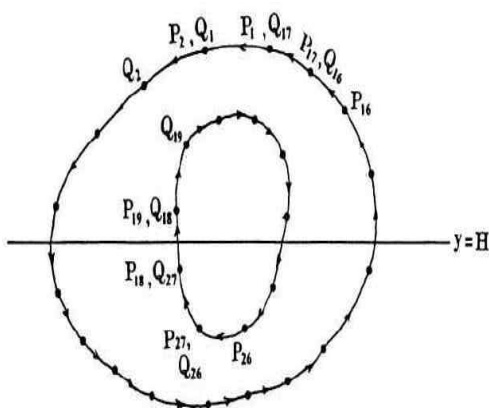


그림 4.26 교차 계산

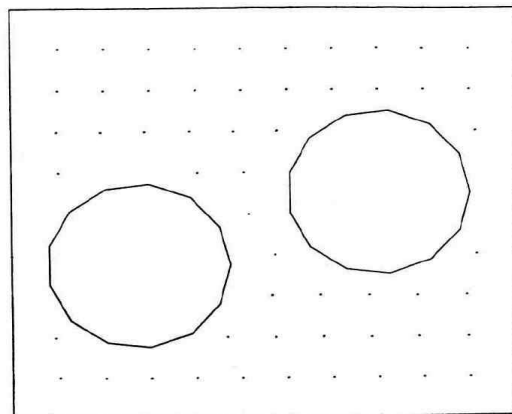


그림 4.27 교차 계산

가상의 수평선과의 교차점이 계산되어지면 각 교차점 사이에 일정 간격의 절점을 생성한다. 단, 절점과 경계와의 간격이 요소크기를 D 라 할 때 $0.7D$ 이하이면 해당 절점은

생성하지 않는다.

절점 구성이 끝나게 되면 삼각 요소를 구성할 수 있다. 삼각 요소 구성은 아래 그림과 같이 외부 경계에서부터 시작 하게 되는데, 외부 경계의 연속된 두 점을 시작 Front로 설정하고 삼각 요소를 구성한다. 삼각 요소를 구성하면서 계속 새로운 Front가 생성되게 되면 점차 해석 영역의 내부로 삼각 요소를 채우게 된다. 내부 영역이 구성됨에 따라 Front는 감소하게 되며 Front의 수가 0가 되었을때 전체영역에 삼각 요소망이 구성된다.

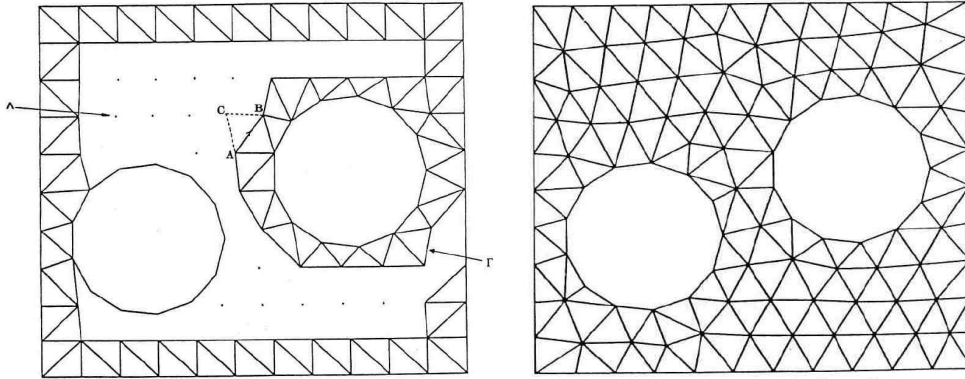


그림 4.28 삼각 요소 구성

위의 그림처럼 삼각 요소를 구성함에 있어 Front(AB)에서 최적의 절점 C를 찾는 방법은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \frac{\Delta ABC_1}{AB^2 + BC_1^2 + C_1A^2}$$

$$\beta_1 = \frac{\Delta C_1BC_2}{C_1B^2 + BC_2^2 + C_1C_2^2}$$

$$\partial_1 = \frac{\Delta AC_1C_2}{AC_1^2 + C_1C_2^2 + C_2A^2}$$

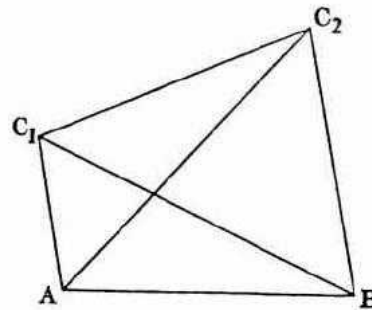
$$\lambda_1 = \max(\beta_1, \partial_1)$$

$$\alpha_2 = \frac{\Delta ABC_2}{AB^2 + BC_2^2 + C_2A^2}$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta C_2BC_1}{C_2B^2 + BC_1^2 + C_1C_2^2} = -\beta_1$$

$$\partial_2 = \frac{\Delta AC_2C_1}{AC_2^2 + C_2C_1^2 + C_1A^2} = -\partial_1$$

$$\lambda_2 = \max(\beta_2, \partial_2)$$



C1, C2가 비교 대상이 되는 절점이라고 하면 $\alpha_1\lambda_1 > \alpha_2\lambda_2$ 일때 C1이 선택된다.

② Element Based Advanced Front Mesh 생성 기법

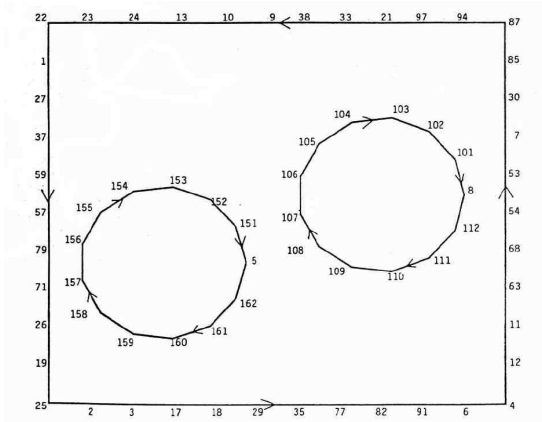


그림 4.29 해석 영역 구성 방법

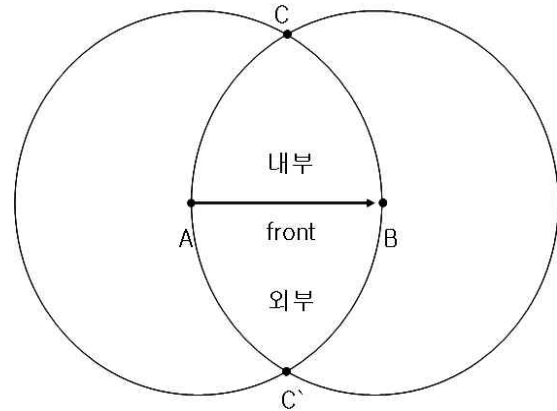


그림 4.30 삼각 요소 구성

위의 그림과 같이 해석 영역이 구성되어지며 1->27 : front1, 27->37 : front2 ... 와 같이 front가 외부 경계에서 구성되어진다. front(AB)가 구성되어지면 나머지 절점(C)를 생성하게 된다. 절점(C) 생성방법은 아래와 같이 정삼각형을 이루도록 한다. 또한 이렇게 생성된 절점은 C, C' 두 개의 절점이 생성되어지는데 이 두 개의 절점 중 내부에 있는 절점 C만 채택되어진다. 그림 3.30에서와 같이 해석영역이 구성되어지면 언제나 절점 C는 Front의 왼쪽에 위치하게 된다.

<code>

```
double dR = pData->m_dMeshSize;
int bMeet = GetIntersectCircleCircle(ptA, dR, ptB, dR, pt1, pt2);
ptC = IsLeft(ptA, ptB, pt1) > 0 ? pt1 : pt2;
```

아래 그림과 같이 절점 C에서 임의의 반지름 R을 기준으로 인접 절점들이 있는지 검사하게 되고 만약 인접 절점이 있다면 인접 절점들 중에서 삼각 요소를 이루게 될 절점 C가 선택되어진다. 절점 1과 2 중에서 절점 C를 선택하게 되는 기준은 가상의 삼각 요소를 이루었을 때 그 외접원의 반지름이 작은 Delaunay order 순서대로 검사를 수행하여 다른 요소 또는 외부 경계와 교차가 없을 때 채택되어진다.

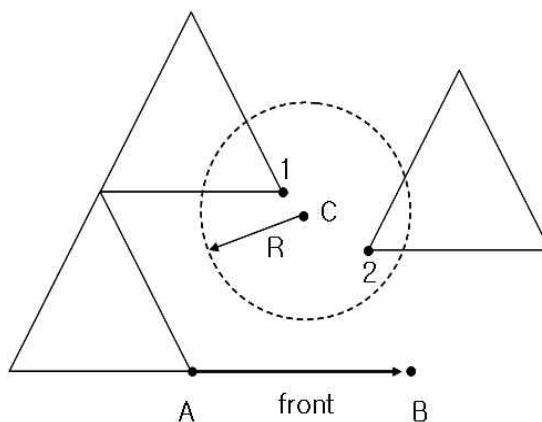


그림 4.31 인접 절점 구성

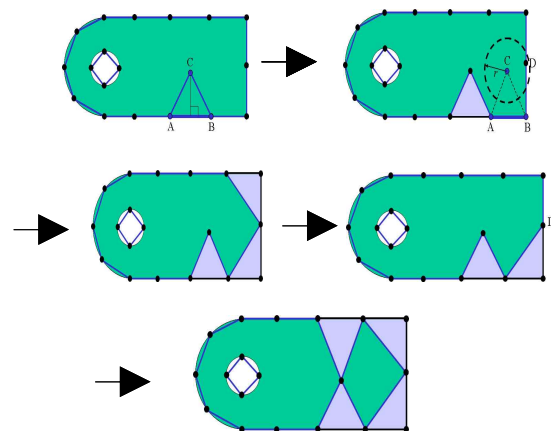


그림 4.32 삼각 요소 구성

그림 3.33와 같은 방법으로 Front가 외부에서부터 출발하여 내부로 전진하게 되면서 삼각요소망이 구성되어진다.

○ Paving 기법

Paving 법은 모든 요소를 사각형으로 형성하며, 해석대상의 경계를 따라가며 요소가 생성되기 때문에 경계부근에서 생성된 요소는 상당히 안정적이다. 그리고, 주어진 기하를 회전시키거나 이동시키더라도 생성되는 요소의 위상에는 영향이 없으며, 요소의 크기는 전이가 용이하다.

Paving 법은 기본적으로 영역의 내부에 요소열을 생성시키는 것이다. 대상의 외부 경계에서는 내부로, 내부 경계에서는 외부로 향하면서 요소의 열을 영역의 경계로 하여 순환적인 적층 방법을 쓰고 있다. 다른 요소 생성법에 비해 경계에서 안정적인 요소의 배치를 이룰 수 있으므로 큰 장점이 있다.

영역의 가장 바깥쪽 루프는 영구 외부 경계로 정의하며 구멍 등이 내부에 존재하는 경우 구멍을 둘러싼 루프는 영구 내부 경계로 정의한다. 대상에 따라 영구 내부 경계는 정의되지 않을 수 있지만 반드시 하나의 영구 외부 경계는 정의되어야 한다.

경계가 정의되면 경계상에 초기 절점을 결정한다. 영구 외부 경계의 경우 반시계 방향(CCW)으로 절점 번호가 매겨지고 영구 내부 경계의 경우는 시계방향(CW)이다.

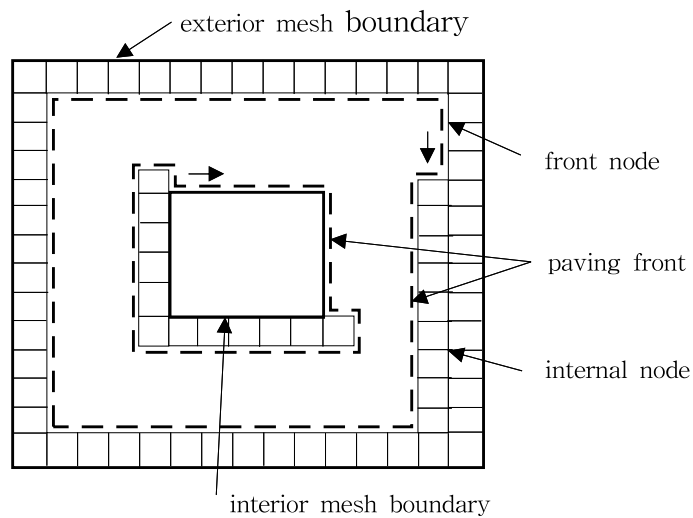


그림 4.24 Mesh boundaries, paving fronts and node types

Paving 경계가 6개 이하의 절점을 가지는 경우에는 요소를 삼입하고 봉합을 수행하여 paving 경계의 요소 생성을 종료한다. 6개 절점을 가지는 경계를 닫는 경우는 paving 경계의 형상에서 몇 가지로 분류하여 행한다. 그 경계의 형상에 따라 삼각형 형상, 사각형 형상으로 분류한다.

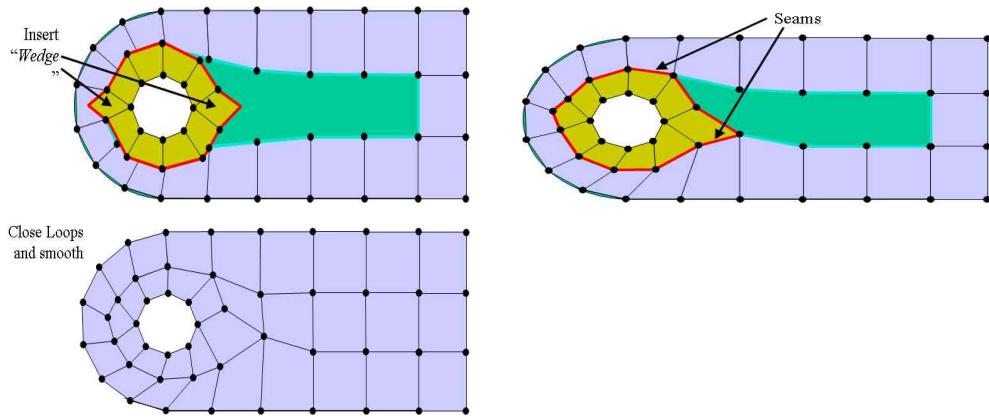


그림 4.25 Paving Method

○ Delaunay Triangulation 기법

Delaunay triangulation은 Voronoi Diagram과 함께 Computational Geometry 분야에 많이 사용되는 효율적인 지역분할 방법이다. Delaunay triangulation과 Voronoi Diagram은 서로 이중적인(dual) 관계에 있다. 즉, 둘 중 어느 하나만을 찾아낸다면 다른 하나도 찾아낼 수가 있다. Voronoi Diagram의 정의는 다음과 같다.

두 점 p 와 q 사이의 Euclidean Distance를 $dist(p, q)$ 라 하자. 한 평면상에 n 개의 분리된 점들의 집합을 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 이라고 하자. P 의 Voronoi Diagram은 그 평면을 n 개의 요소로 나누는 것이다. P 에 있는 각각의 점에 대해서 만일, $dist(q, p_i) > dist(q, p_j)$ 를 만족하면 q 는 p_i 요소에 포함된다. 평면상의 점들은 P 에 있는 점들 중 가장 가까운 점이 속한 요소에 포함된다. 이런 식으로 한 평면을 분할하는 방법을 Voronoi Diagram이라 한다.

Voronoi Diagram의 각 요소에서 인접한 요소의 내부점과 서로를 연결하면 Delaunay triangulation가 된다.

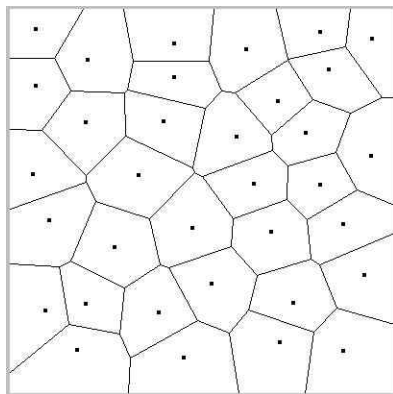


그림 4.26 Voronoi diagram

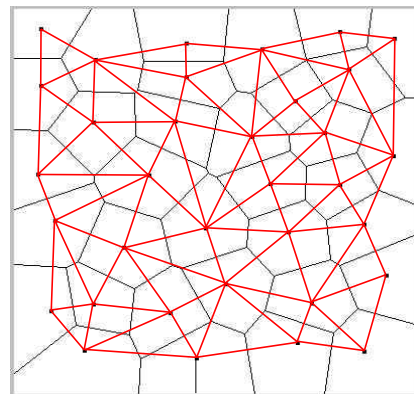


그림 4.27 Delaunay triangulation

볼록한 다각형들로 이루어진 Voronoi 다이어그램에서 공통변을 갖는 두 Voronoi 점들을 선으로 연결하여 Voronoi 다이어그램의 듀얼 그래프를 구하고, 구해진 그래프의 곡선을 직선으로 바꾸어 Delaunay 그래프를 만든다. 그러나, Delaunay 그래프가 삼각형이 아닐 경우도 있는데, 이런 경우에는 임의의 요소를 첨가해서 만들어진 삼각화를 Delaunay triangulation라고 한다. Degree가 3이 아닌 Voronoi 정점을 가진다는 것은 한

원주에 4개 이상의 점을 가진다는 것을 의미하며 이러한 경우는 극히 드물다. 따라서 Degree가 3인 Voronoi 정점만을 가지는 점의 분포를 일반적 분포라고 하고, 점들이 일반적 분포를 가지면 그래프와 Delaunay triangulation은 유일성을 가진다.

○ The Regular Grid Method

Regular Grid Method는 해석하고자 하는 영역에 구성하고자 하는 요소 크기의 사각 격자망을 투영하고, 투영된 사각 격자의 교차점들 중 해석 영역 안에 있는 교점들을 요소의 절점으로 취하는 방법이다. 이렇게 구성된 절점은 Delaunay triangulation 방법으로 요소망을 구성하게 된다. 이렇게 구성된 요소망은 내부에서는 정삼각형의 요소가 생성되는 반면 외부 경계 주위에서는 형질이 좋지 않은 요소가 생성되는 단점이 있다. 따라서 Laplacian smooting, Centroid smooting 과 같은 방법을 통해 전체적으로 요소망을 조절해야 한다.

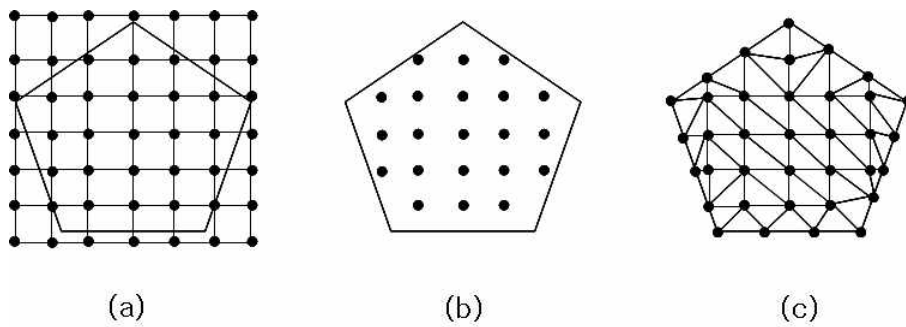


그림 4.28 Regular Grid Method

5. 3차원 계산격자 생성타원 격자생성법

본 과업에서는 타원 편미분 방정식을 적용하여 격자를 생성하였으며 이 방법은 타 3차원 수리모형들이 채택하고 있어 적용시 타 모형과 결과를 비교할 수 있는 등의 장점을 내포하고 있다.

(1) 기본이론

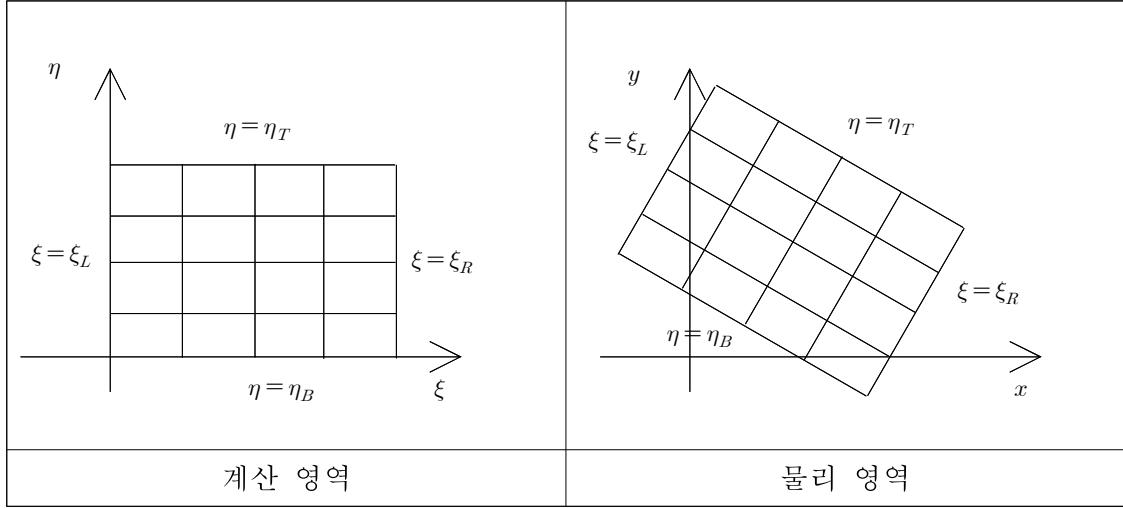


그림 5.1 격자의 영역 변환

타원 방정식에 의한 격자 생성은 물리 영역의 복잡한 형상을 계산영역으로 변환하여 계산한 결과를 물리영역으로 되돌리는 과정을 기본 개념으로 한다. 또한 계산을 간단하게 하기 위하여 직교성을 적용한다.

$0 \leq \xi, \eta \leq 1$ 라 하고 변환 $\xi = \xi(x, y)$, $\eta = \eta(x, y)$ 를 생각하자(<그림 3.40>). 연쇄법칙(Chain Rule)에 의하여

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (5.1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (5.1b)$$

위 식을 다시 편미분하면

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \quad (5.2a)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \quad (5.2b)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \quad (5.2c)$$

위 식을 적용하여 라플라스 연산자(Laplace Operator) ∇^2 을 구하면

$$\begin{aligned}\nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ &= \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left\{ \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right\} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \left\{ \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right\}\end{aligned}\quad (5.3)$$

이 된다 위 식은 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} \end{pmatrix} + 2\beta \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \end{pmatrix} = 0 \quad (5.4)$$

$$\text{단, } \alpha = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2, \quad \beta = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad \gamma = \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2.$$

변환 ξ, η 가 영역안의 어떤 점에서도 0이 아니라고 하자. 즉 ξ, η 의 Jakovian이 non-degenerate라 하자. 이것의 물리적인 의미는 서로 만나지 않는 어느 두 개의 직선도 변환된 평면에서 만나지 않음을 의미한다. 격자를 생성하는 문제는 열전달 방정식과 유사하게 Dirichlet 경계를 가지는 Laplace 방정식을 만족한다. 즉 영역 안에서 다음을 만족한다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} &= 0\end{aligned}\quad (5.5)$$

위 식을 계산영역으로 변환하여 다시 쓰면 (4)식과 같다. 즉

$$\begin{aligned}\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} &= 0, \\ \alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} &= 0\end{aligned}\quad (5.6)$$

단, $\alpha = x_\eta^2 + y_\eta^2$, $\beta = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta$, $\gamma = x_\xi^2 + y_\xi^2$. 물리 영역의 내부의 격자를 제어하기 위하여 다음과 같은 점원(Point Source)를 도입하여 푼다. 이 방정식을 Poisson 방정식이라 한다.

$$\begin{aligned}\xi_{xx} + \xi_{yy} &= P(\xi, \eta) \\ \eta_{xx} + \eta_{yy} &= Q(\xi, \eta)\end{aligned}\quad (5.7)$$

그러면 (5)식은 다음과 같은 식으로 변환된다.

$$\begin{aligned}\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} &= -J^2(Px_\xi + Qx_\eta) \\ \alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} &= -J^2(Py_\xi + Qy_\eta)\end{aligned}\quad (5.8)$$

단, $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ 는 변환의 Jakovian이다. 대상의 유체방정식을 간단하게 하기 위하여 변환이 수직임을 가정한다. 즉 $\beta=0$ 이라 가정한다.

이제 P, Q 를 취하는 방법을 소개한다. P, Q 가 다음과 같은 꼴이라 가정한다.

$$\begin{aligned} P &= \Phi(\xi, \eta)(\xi_x^2 + \eta_y^2) \\ Q &= \Psi(\xi, \eta)(\eta_x^2 + \xi_y^2) \end{aligned} \quad (5.9)$$

(8)식을 (9)식에 대입하면

$$\begin{aligned} \alpha x_{\xi\xi} + \gamma x_{\eta\eta} &= -(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi)^2 \{ \Phi x_\xi (\xi_x^2 + \xi_y^2) + \Psi x_\eta (\eta_x^2 + \eta_y^2) \} \\ \alpha y_{\xi\xi} + \gamma y_{\eta\eta} &= -(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi)^2 \{ \Phi y_\xi (\xi_x^2 + \xi_y^2) + \Psi y_\eta (\eta_x^2 + \eta_y^2) \} \end{aligned} \quad (5.10)$$

이다. 위 식을 정리하면

$$\begin{aligned} \alpha(x_{\xi\xi} + \Phi x_\xi) + \gamma(x_{\eta\eta} + \Psi x_\eta) &= 0, \\ \alpha(y_{\xi\xi} + \Phi y_\xi) + \gamma(y_{\eta\eta} + \Psi y_\eta) &= 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

경계 $\eta = \eta_B, \eta = \eta_T$ 에서는 x 는 ξ 에 대하여 상수이므로 $\gamma = x_\xi^2 + y_\xi^2|_{x=\eta_B, x=\eta_T} = 0$ 이 된다. 따라서 식 (10)은 다음 두 식으로 귀착된다

$$x_{\xi\xi} + \Phi x_\xi = 0, \quad (5.11a)$$

$$y_{\xi\xi} + \Phi y_\xi = 0 \quad (5.11b)$$

(11a)에 x_ξ 를 곱하고 (11b)에 y_ξ 를 곱하여 더하면

$$\Phi(\xi, \eta_B), \Phi(\xi, \eta_T) = -\frac{x_\xi x_{\xi\xi} + y_\xi y_{\xi\xi}}{x_\xi^2 + y_\xi^2} \Big|_{\eta=\eta_B, \eta=\eta_T} \quad (5.12a)$$

마찬가지 방법으로 $\xi = \xi_L, \xi = \xi_R$ 에서 다음 경계조건을 얻는다.

$$\Psi(\xi_L, \eta), \Psi(\xi_R, \eta) = -\frac{x_\eta x_{\eta\eta} + y_\eta y_{\eta\eta}}{x_\xi^2 + y_\xi^2} \Big|_{\xi=\xi_L, \xi=\xi_R} \quad (5.12b)$$

(12a) 및 (12b)식을 적용하여 경계점에서 Φ 및 Ψ 를 계산할 수 있다.

(2) 수치해를 구하는 과정

방정식의 모든 미분을 차분하고 (12a) 및 (12b)식은 경계의 값을 구하는 데 사용한다. x 를 중앙 차분하면 각각의 각각의 $j=1, 2, \dots, JMAX$ 에 대하여

$$x_{\xi}|_{\eta=\eta_B} = \frac{x_{j+1,1} - x_{j-1,1}}{2\Delta\xi}, \quad (5.13a)$$

$$x_{\xi\xi}|_{\eta=\eta_B} = \frac{x_{j+1,1} - 2x_{j,1} + x_{j-1,1}}{(\Delta\xi)^2} \quad (5.13b)$$

(13a) 및 (13B)을 적용하면 경계점들의 분포에서 $\phi_{j,1}$ 에서 $\phi_{j,KMAX}$ 를 계산할 수 있다. 마찬가지로 각각의 $k=1, 2, \dots, KMAX$ 에 대하여 $\psi_{1,k}$ 에서 $\psi_{JMAX,k}$ 를 계산할 수 있다. 계산영역의 내부의 점들에 대하여 다음과 같이 ϕ 및 ψ 에 대한 선형보간법을 적용한다.

$$\phi_{j,k} = \phi_{j,1} + \frac{\phi_{j,KMAX} - \phi_{j,1}}{KMAX-1}(k-1), \quad (5.14a)$$

$$\psi_{j,k} = \psi_{1,k} + \frac{\psi_{JMAX,k} - \psi_{1,k}}{JMAX-1}(j-1) \quad (5.14b)$$

단, $j=1, 2, \dots, JMAX$ 이고 $k=1, 2, \dots, KMAX$ 이다. 모든 경계점에서 ϕ 및 ψ 를 구한 다음 (10)의 수치해는 SLOR(Successive Line Over-Relaxation) 법에 의하여 동시에 구해진다. (10) 식을 중앙차분하면

$$-\left[\frac{\gamma}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\gamma\psi}{2\Delta\eta}\right]x_{j,k-1} + \left[-\frac{2\alpha}{(\Delta\xi)^2} - \frac{2\alpha}{(\Delta\eta)^2}\right]x_{j,k} + \left[\frac{\gamma}{(\Delta\eta)^2} + \frac{\gamma\psi}{2\Delta\eta}\right]x_{j,k+1} \\ = -\left[\frac{\alpha}{(2\Delta\xi)^2} + \frac{\alpha\phi}{2\Delta\xi}\right]x_{j+1,k} - \left[\frac{\alpha}{(\Delta\xi)^2} - \frac{\alpha\phi}{2\Delta\xi}\right]x_{j-1,k} \quad (5.15)$$

큰 괄호 안의 항들은 각각의 j, k 에 대하여 기계산값임에 주의한다. 위 식은 각 반복식에서 j 선을 고정하고 k 방향으로 움직이면서 삼각행렬 풀이법(Tridiagonal Solver)에 의하여 풀 수 있다. 즉, j 를 고정하면 (15)식은 j 점의 이전값을 이용하여 전진하면서 새로운 값을 구할 수 있음을 알 수 있다. 이런 방법으로 j 를 증가시키면서 x 에 대하여 풀 수 있다.

(3) 격자와 수리방정식의 관계

z 방향을 무시하고 2차원적으로 2차원의 비압축 점성 유체는 다음과 같은 기본방정식의 지배를 받는다.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\rho u) &= 0 & (5.15a) \\ \rho(u \cdot \nabla)u + \nabla p &= \mu \nabla^2 u & (5.15b)\end{aligned}$$

단, $u = (u, v)$ 는 속도벡터이고 p 는 압력, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$ 이다. 에너지 h 와 와류 ω 는

$$h = \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2) + p \quad (5.16a)$$

$$\omega = v_x - u_y \quad (5.16b)$$

로 주어진다. 그러면 위 (15a) 및 (15b)는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$(\rho u)_x + (\rho v)_y = 0 \quad (5.17a)$$

$$h_x - \rho\omega = -\mu\omega_y \quad (5.17b)$$

$$h_y + \rho\omega u = \mu\omega_x \quad (5.17c)$$

$$\omega = v_x - u_y \quad (5.17d)$$

연속방정식 (17a)는 다음을 만족하는 유선함수 $\psi(x, y)$ 의 존재를 의미한다.

$$\rho u = \psi_y, \quad \rho v = -\psi_x \quad (5.18)$$

이제 곡선선형(curvi-linear) 좌표계 (ϕ, ψ) 를 도입하자. 여기서 ψ 는 식 (18)에서 정의된 유선함수이고 ϕ 는 임의로 취하자. 즉,

$$x = x(\phi, \psi), \quad y = y(\phi, \psi) \quad (5.19)$$

이라 하고 Jakobian이 영역내의 모든 점에서 다음과 같이 0이 아니라고 하자.

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\phi, \psi)} = x_\phi y_\psi - x_\psi y_\phi \neq 0 \quad (5.20)$$

곡선의 미소증분 ds 의 제곱은 Gaussian Curvature에 의하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}ds^2 &= dx^2 + dy^2 \\ &= E(\phi, \psi)d\phi^2 + 2F(\phi, \psi)d\phi d\psi + G(\phi, \psi)d\psi^2\end{aligned} \quad (5.20)$$

단, $E = x_\phi^2 + y_\phi^2$, $F = x_\phi x_\psi + y_\phi y_\psi$, $G = x_\psi^2 + y_\psi^2$, $J = \sqrt{EG - F^2}$. 또한

$$x_\phi = J \psi_y, \quad x_\psi = -J \phi_y, \quad (5.21a)$$

$$y_\phi = -J \psi_x, \quad y_\psi = J \phi_x \quad (5.21b)$$

유체 방정식 (17a)~(17d)는 좌표계 (ϕ, ψ) 에 의하여 변환되어 모든 항을 (ϕ, ψ) 이 함수로 나타낼 수 있다. 연속방정식은 다음 꼴로 된다.

$$u^2 + v^2 = \frac{E}{\rho^2 J^2} \quad (5.22)$$

와류 및 모멘트 방정식은 다음과 같은 식이 된다.

$$\omega = \frac{1}{\rho J} \left\{ \left(\frac{F}{J} \right)_\phi - \left(\frac{E}{J} \right)_\psi \right\}, \quad (5.23a)$$

$$F h_\phi - E h_\psi = E \omega - \mu J \omega_\phi \quad (5.23b)$$

$$G h_\phi - F h_\psi = F \omega - \mu J \omega_\psi \quad (5.23c)$$

(ϕ, ψ) 의 평면성은 다음의 가우스 방정식에 의하여 보장된다.

$$\left(\frac{J}{E} r_{11}^2 \right)_\psi - \left(\frac{J}{E} r_{12}^2 \right)_\phi = 0 \quad (5.24)$$

단, $r_{11} = \frac{1}{2J^2}(-FE_\phi + 2EF_\psi - EE_\psi)$, $r_{12} = \frac{1}{2J^2}(EG_\phi - FE_\psi)$. 식(23a)에서 (24) 까지의 식들은 다섯 개의 미지수 E, F, G, ω, h 에 대한 4개의 방정식을 구성한다. 이것은 ϕ 의 임의성에 기인하며 이것을 극복하기 위하여 (ϕ, ψ) 가 직교한다고 가정한다. 이 경우에는 $F=0$ 이고 네 개 미지수에 네 개의 방정식을 얻을 수 있다. 식(23a)에서 (24)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\omega = -\frac{1}{\rho J} \left(\frac{E}{J} \right)_\psi \quad (5.25a)$$

$$E h_\psi = -E \omega + \mu J \omega_\phi \quad (5.25b)$$

$$G h_\phi = -\mu J \omega_\psi \quad (5.25c)$$

$$\left(\frac{1}{J} E_\psi \right)_\psi + \left(\frac{1}{J} G_\phi \right)_\phi = 0 \quad (5.25d)$$

단, $J = \sqrt{EG}$

가. 격자생성 구현

격자생성 알고리즘은 전 절의 타원 편미분방정식을 적용하였으며 입력 자료는 EFDC의 모델의 격자생성 파라미터들을 참고하였다. 해를 구하는 과정별로 Black-White Algorithm 등을 가시적으로 표출하였다. 표출은 OpenGL 라이브러리인 VTK를 사용하였다. 대상유역은 낙동강 A보 일원으로 설정하였고 기존의 지형을 참고하여 생성하였다.

(1) 입력자료

(가) 필수입력자료

필수입력자료는 계산영역의 격자의 형상을 기술하는 cell.inp 및 격자생성을 제어하는 grid.inp를 필요로 한다.

(4) cell.inp

이 파일은 격자의 형상과 격자요소를 기술하는 데 0은 마른 육지를 의미하고 5는 물이 흐르는 격자를 의미한다.

표 5.1 Cell.inp의 예

[illegible]

(㉔) grid.inp

① 계산개요

표 5.2 계산개요

변수	설명	예제입력
ISGG=1	Cartesian 또는 Graphics Overlay(계산 공간)를 정의하는 gcell.inp를 읽는다.	0
IGM	X 또는 I 셀의 최대값(Cartesian 또는 Graphics Overlay)	0
JGM	Y 또는 J 셀의 최대값(Cartesian 또는 Graphics Overlay)	0
DXCG	X Grid Size	1.0
DYCG	Y Grid Size	1.0
NWTGG	Graphics Grid를 내삽하기 위한 Weighted COMP Cell의 개수(1 이어야 함)	1

② 격자규모

표 5.3 격자규모

변수	설명	예제입력
ISGG	Cartesian 또는 Graphics Overlay(계산 공간)를 정의하는 gcell.inp를 읽는다.	0
IGM	X 또는 I 셀의 최대값(Cartesian 또는 Graphics Overlay)	0
JGM	Y 또는 J 셀의 최대값(Cartesian 또는 Graphics Overlay)	0
DXCG	X Grid Size	1.0
DYCG	Y Grid Size	1.0
NWTGG	Graphics Grid를 내삽하기 위한 Weighted COMP Cell의 개수(1 이어야 함)	1

③ 계산오차

표 5.4 계산오차

변수	설명	예제입력
RPX, RPK, RPH	X,Y, KI/KJ, HI, HJ의 Relaxation Parameter	1.8
		1.8
		1.8
RSQXM, RSQKM, RSQHM	X,Y, KI/KJ, HI, HJ의 SOR 해에서 최대 제공 잔차	1.E-12
		1.E-12
		1.E-12
RSQKIM	KI/KJ에 대한 수렴 기준	1.E-12
RQSHIM	HI에 대한 수렴 기준	1.E-12
RSGKJM	HJ에 대한 수렴 기준	1.E-12

④ 내삽계수

표 5.5 내삽계수

변수	설명	예제입력
ISIRKI	내부에 대하여 KI/KJ의 내삽에 의한 해	1
JSIRKI	상계수 분산방정식에 의한 내부에서의 KI/KJ의 내삽	0
ISIIHJ	내부에 대하여 HI와 HJ의 내삽 해를 구한 후 $KJ/KI = HI/HJ$ 로 결정	0
JSIIHJ	내부에 대하여 상계수 분산방정식에 의한 HI와 HJ의 내삽	0

⑤ 경계격자

표 5.6 경계격자

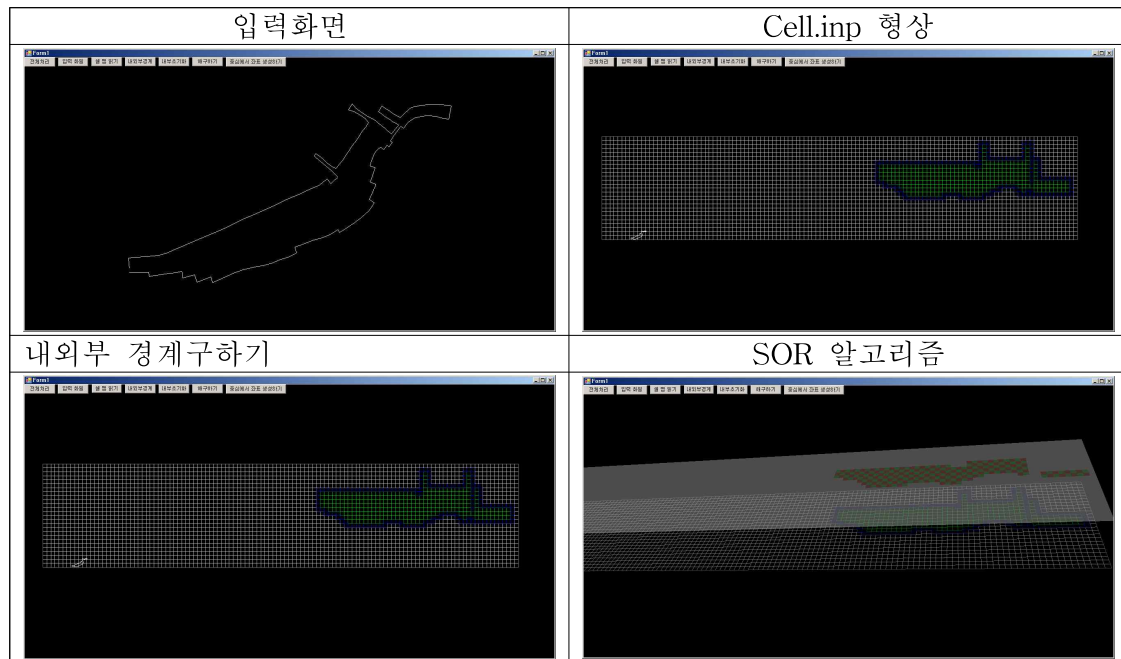
변수	설명	예제입력
I	X좌표의 인덱스	
J	Y좌표의 인덱스	
X(I)	X좌표(진북 및 진동에서 시계방향으로 기술)	
Y(J)	X좌표(진북 및 진동에서 시계방향으로 기술)	

⑥ 출력자료

출력은 grid.out에 물리 영역의 내부 및 경계 모두를 출력하고 이를 grid.dxf로 출력하여 도면에서 활용할 수 있도록 하였다.

⑦ 개발화면

표 5.6 개발화면



나. 격자 생성 결과(1) 격자 생성 결과

낙동강 A보 지점의 격자는 세로로 221개 가로로 43개로 구성된다. 격자는 다음과 같은 형식을 가진다. 격자 생성 파일의 헤더에 격자를 읽어들이기 위한 정보를 기술하는데 최대 허용수위, 최소바닥고, z 방향의 격자 수, 전체 윤격자(Water Cell)을 기술한다. 격자의 제원은 각 행의 윤격자의 시작 및 끝 격자 번호와 행의 총 격자 수를 기술한다. 각 셀의 전체 z 격자수가 나오고 다음의 행번호, 열 번호에 이어서 격자의 제원이 출력된다.

표 5.7 격자생설결과

```
# Max Layer Elev : 30.375
# Min Layer Elev : -3.375
# Number of Layers : 33
#I(Row), J(Col), LayerNum, (x_1, y_1, z_1) ~ (x_8, y_8, z_8)
Total Num Of Ative Cells=3631
Row 3 :StartCol=5, EndCol=21, ActiveNumOfCells=17
NumOfZLayersOf (3, 5) =21
3, 5, 13, 140805.100, 227635.800, 8.928, 140845.000, 227639.300, 8.928, 140841.700, 227679.100,
8.928, 140801.900, 227675.600, 8.928, 140805.100, 227635.800, 9.625, 140845.000, 227639.300, 9.625,
140841.700, 227679.100, 9.625, 140801.900, 227675.600, 9.625
3, 5, 14, 140805.100, 227635.800, 9.625, 140845.000, 227639.300, 9.625, 140841.700, 227679.100,
9.625, 140801.900, 227675.600, 9.625, 140805.100, 227635.800, 10.625, 140845.000, 227639.300, 10.625,
140841.700, 227679.100, 10.625, 140801.900, 227675.600, 10.625
3, 5, 15, 140805.100, 227635.800, 10.625, 140845.000, 227639.300, 10.625, 140841.700, 227679.100,
10.625, 140801.900, 227675.600, 10.625, 140805.100, 227635.800, 11.625, 140845.000, 227639.300,
11.625, 140841.700, 227679.100, 11.625, 140801.900, 227675.600, 11.625
3, 5, 16, 140805.100, 227635.800, 11.625, 140845.000, 227639.300, 11.625, 140841.700, 227679.100,
11.625, 140801.900, 227675.600, 11.625, 140805.100, 227635.800, 12.625, 140845.000, 227639.300,
12.625, 140841.700, 227679.100, 12.625, 140801.900, 227675.600, 12.625
3, 5, 17, 140805.100, 227635.800, 12.625, 140845.000, 227639.300, 12.625, 140841.700, 227679.100,
12.625, 140801.900, 227675.600, 12.625, 140805.100, 227635.800, 13.625, 140845.000, 227639.300,
13.625, 140841.700, 227679.100, 13.625, 140801.900, 227675.600, 13.625
3, 5, 18, 140805.100, 227635.800, 13.625, 140845.000, 227639.300, 13.625, 140841.700, 227679.100,
13.625, 140801.900, 227675.600, 13.625, 140805.100, 227635.800, 14.625, 140845.000, 227639.300,
14.625, 140841.700, 227679.100, 14.625, 140801.900, 227675.600, 14.625
3, 5, 19, 140805.100, 227635.800, 14.625, 140845.000, 227639.300, 14.625, 140841.700, 227679.100,
14.625, 140801.900, 227675.600, 14.625, 140805.100, 227635.800, 15.625, 140845.000, 227639.300,
```

각 격자는 아래 그림과 같이 격자의 바닥면을 구성하는 네 점을 빈시계 방향으로 좌표를 기술하고 이어서 격자의 윗면을 구성하는 격자의 좌표를 기술한다.

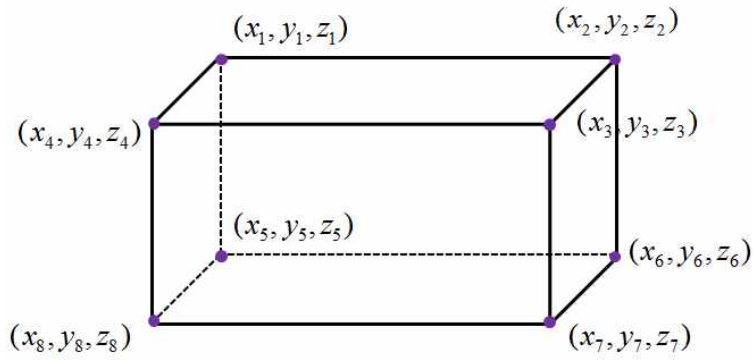


그림 5.2 격자점 기술 순서

생성대상지의 계산격자는 다음과 같다.

표 5.8 계산격자 격자종류

C	123456789012345678901234567890123
222	0000000000000000000000000000000
221	0999999999999999999999999999999
220	099955555555555555555599999999999
219	099995555555555555555599999999999
218	099995555555555555555599999999999
217	099995555555555555555599999999999
216	099995555555555555555599999999999
215	099995555555555555555599999999999
214	099995555555555555555599999999999
213	099995555555555555555599999999999
212	099995555555555555555599999999999
211	099995555555555555555599999999999
210	099995555555555555555599999999999
209	099995555555555555555599999999999
208	099995555555555555555599999999999
207	099995555555555555555599999999999
206	099995555555555555555599999999999
205	099995555555555555555599999999999
204	099995555555555555555599999999999
203	099999555555555555555599999999999
202	099999555555555555555599999999999
201	099999555555555555555599999999999
200	099999955555555555555599999999999
199	099999955555555555555599999999999
198	099999955555555555555599999999999
197	099999955555555555555599999999999
196	099999955555555555555599999999999
195	099999955555555555555599999999999
194	099999555555555555555599999999999
193	099999555555555555555599999999999

192	099995555555555555555555999999990
191	099995555555555555555555599999990
190	099995555555555555555555599999990
189	095555555555555555555555599999990
188	095555555555555555555555599999990
187	099555555555555555555555599999990
186	099955555555555555555555599999990
185	099995555555555555555555599999990
184	099995555555555555555555599999990
183	099995555555555555555555599999990
182	099995555555555555555555599999990
181	099995555555555555555555599999990
180	099955555555555555555555599999990
179	099995555555555555555555599999990
178	099995555555555555555555599999990
177	099955555555555555555555599999990
176	099995555555555555555555599999990
175	099955555555555555555555599999990
174	099995555555555555555555599999990
173	099995555555555555555555599999990
172	099995555555555555555555599999990
171	099995555555555555555555599999990
170	099995555555555555555555599999990
169	099995555555555555555555599999990
168	099955555555555555555555599999990
167	099995555555555555555555599999990
166	099955555555555555555555599999990
165	099995555555555555555555599999990
164	099955555555555555555555599999990
163	099955555555555555555555599999990
162	099995555555555555555555599999990
161	099955555555555555555555599999990
160	099955555555555555555555599999990
159	099955555555555555555555599999990
158	099995555555555555555555599999990
157	099955555555555555555555599999990
156	099955555555555555555555599999990
155	099995555555555555555555599999990
154	099995555555555555555555599999990
153	099995555555555555555555599999990
152	099995555555555555555555599999990
151	099955555555555555555555599999990
150	099955555555555555555555599999990
149	099955555555555555555555599999990
148	099955555555555555555555599999990
147	099955555555555555555555599999990
146	099995555555555555555555599999990
145	099995555555555555555555599999990
144	099995555555555555555555599999990
143	099995555555555555555555599999990

[illegible]

42	099995555555555555555555999999999990
41	099995555555555555555555999999999990
40	099995555555555555555555999999999990
39	099995555555555555555555999999999990
38	099995555555555555555555999999999990
37	099995555555555555555555999999999990
36	099995555555555555555555999999999990
35	099995555555555555555555999999999990
34	099995555555555555555555999999999990
33	099995555555555555555555999999999990
32	099995555555555555555555999999999990
31	099995555555555555555555999999999990
30	099995555555555555555555999999999990
29	099995555555555555555555999999999990
28	099995555555555555555555999999999990
27	099995555555555555555555999999999990
26	099995555555555555555555999999999990
25	099995555555555555555555999999999990
24	099995555555555555555555999999999990
23	099995555555555555555555999999999990
22	099995555555555555555555999999999990
21	099995555555555555555555999999999990
20	099995555555555555555555999999999990
19	099995555555555555555555999999999990
18	099995555555555555555555999999999990
17	099995555555555555555555999999999990
16	099995555555555555555555999999999990
15	099995555555555555555555999999999990
14	099995555555555555555555999999999990
13	099995555555555555555555999999999990
12	099995555555555555555555999999999990
11	099995555555555555555555999999999990
10	099995555555555555555555999999999990
9	099995555555555555555555999999999990
8	099995555555555555555555999999999990
7	099995555555555555555555999999999990
6	099995555555555555555555999999999990
5	099995555555555555555555999999999990
4	099995555555555555555555999999999990
3	099995555555555555555555999999999990
2	099999999999999999999999999999999990
1	000000000000000000000000000000000000

Station	X	Y	Z
1	5,220	15,901	
2	10,220	10,984	
3	20,218	15,224	
4	180,488	15,106	
5	175,557	15,106	
6	170,109	15,106	
7	166,254	15,106	
8	161,793	15,106	
9	156,652	15,106	
10	22,148	18,413	
11	47,11	18,37	
12	41,9.5	18,37	
13	36,4.1	18,37	
14	31,18.7	18,37	
15	26,15.5	18,37	
16	21,15.5	18,37	
17	16,15.5	18,37	
18	11,15.5	18,37	
19	6,15.5	18,37	
20	1,15.5	18,37	
21	5,78	18,37	
22	5,73	18,37	
23	5,67	18,37	
24	6,62	18,37	
25	7,62	18,37	
26	7,62	18,37	
27	7,62	18,37	
28	7,62	18,37	
29	7,62	18,37	
30	7,62	18,37	
31	7,62	18,37	
32	7,62	18,37	
33	7,62	18,37	
34	7,62	18,37	
35	7,62	18,37	
36	7,62	18,37	
37	7,62	18,37	
38	7,62	18,37	
39	7,62	18,37	
40	7,62	18,37	
41	7,62	18,37	
42	7,62	18,37	
43	7,62	18,37	
44	7,62	18,37	
45	7,62	18,37	
46	7,62	18,37	
47	7,62	18,37	
48	7,62	18,37	
49	7,62	18,37	
50	7,62	18,37	
51	7,62	18,37	
52	7,62	18,37	
53	7,62	18,37	
54	7,62	18,37	
55	7,62	18,37	
56	7,62	18,37	
57	7,62	18,37	
58	7,62	18,37	
59	7,62	18,37	
60	7,62	18,37	
61	7,62	18,37	
62	7,62	18,37	
63	7,62	18,37	
64	7,62	18,37	
65	7,62	18,37	
66	7,62	18,37	
67	7,62	18,37	
68	7,62	18,37	
69	7,62	18,37	
70	7,62	18,37	
71	7,62	18,37	
72	7,62	18,37	
73	7,62	18,37	
74	7,62	18,37	
75	7,62	18,37	
76	7,62	18,37	
77	7,62	18,37	
78	7,62	18,37	
79	7,62	18,37	
80	7,62	18,37	
81	7,62	18,37	
82	7,62	18,37	
83	7,62	18,37	
84	7,62	18,37	
85	7,62	18,37	
86	7,62	18,37	
87	7,62	18,37	
88	7,62	18,37	
89	7,62	18,37	
90	7,62	18,37	
91	7,62	18,37	
92	7,62	18,37	
93	7,62	18,37	
94	7,62	18,37	
95	7,62	18,37	
96	7,62	18,37	
97	7,62	18,37	
98	7,62	18,37	
99	7,62	18,37	
100	7,62	18,37	

The map displays a blue water body with a green dashed line tracing its boundary. The line is annotated with coordinate pairs (easting, northing) in a small font. The coordinates are as follows:

- (10, 19, 15.75)
- (23, 16.75)
- (17, 161, 15.880)
- (15, 118, 16.490)
- (17, 112, 14.700)
- (15, 115, 15.120)
- (15, 118, 16.000)
- (15, 111, 15.100)
- (17, 108, 14.800)
- (15, 100, 16.120)
- (15, 110, 15.710)
- (15, 101, 16.410)
- (15, 101, 15.700)
- (15, 96, 15.800)
- (15, 91, 15.800)
- (15, 91, 15.800)
- (15, 93, 14.800)
- (15, 91, 15.100)
- (15, 89, 15.800)
- (15, 88, 15.800)
- (15, 83, 7.110)
- (15, 81, 8.67)
- (15, 79, 8.93)
- (15, 77, 8.657)
- (15, 75, 9.213)
- (15, 73, 11.463)
- (15, 71, 13.39)
- (15, 69, 16.72)
- (22, 119, 18.497)
- (22, 117, 18.24)
- (22, 115, 17.97)
- (22, 113, 16.947)
- (22, 111, 17.1)
- (22, 109, 18.22)
- (22, 107, 20.67)
- (22, 105, 18.962)
- (22, 103, 22.845)
- (22, 101, 16.218)
- (22, 100, 15.347)
- (22, 99, 15.263)
- (22, 98, 15.39)
- (22, 97, 15.55)
- (22, 96, 14.665)
- (22, 95, 15.35)
- (22, 94, 15.93)
- (22, 93, 16.28)
- (22, 92, 15.195)
- (21, 91, 16.01)
- (21, 90, 17.12)
- (21, 89, 17.517)
- (21, 88, 17.098)
- (20, 86, 11.518)
- (20, 84, 17.97)
- (20, 82, 11.323)
- (22, 80, 15.09)
- (23, 78, 16.063)
- (24, 76, 16.196)
- (23, 74, 19.895)
- (23, 72, 14.098)

- 98 -

그림 5.4에는 검증이 용이하도록 격자의 I, J 인덱스 및 바닥고를 표시하였다. 격자는 다음 그림과 같이 3차원으로 표출하는 프로그램을 구현하였다.

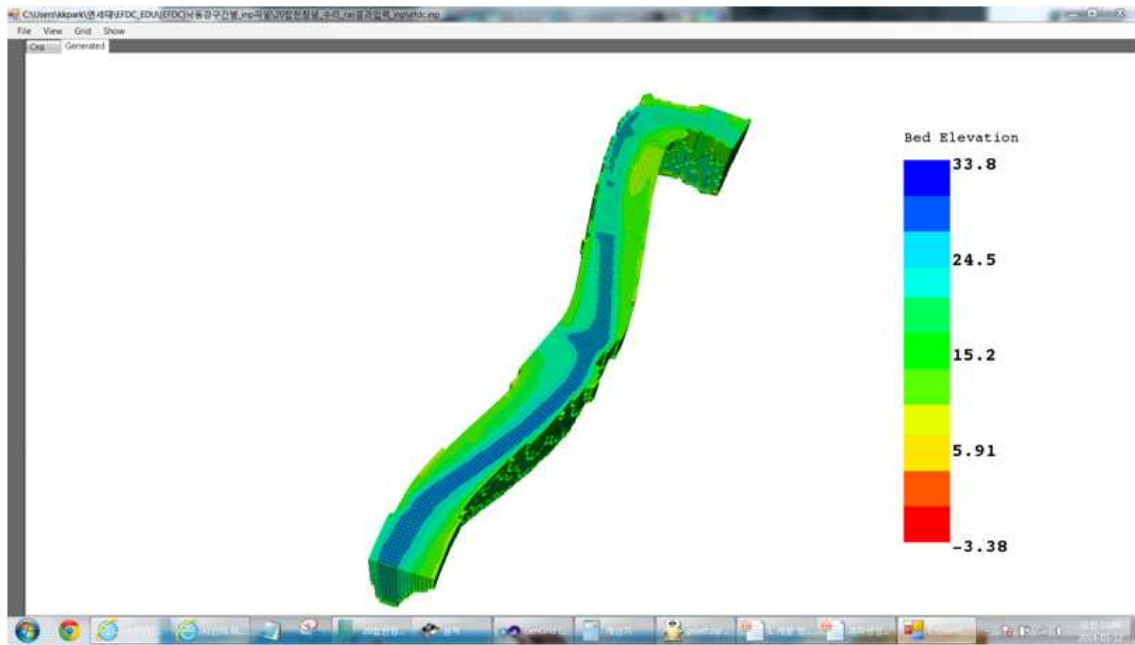


그림 5.5 격자의 3차원 표출 예-1

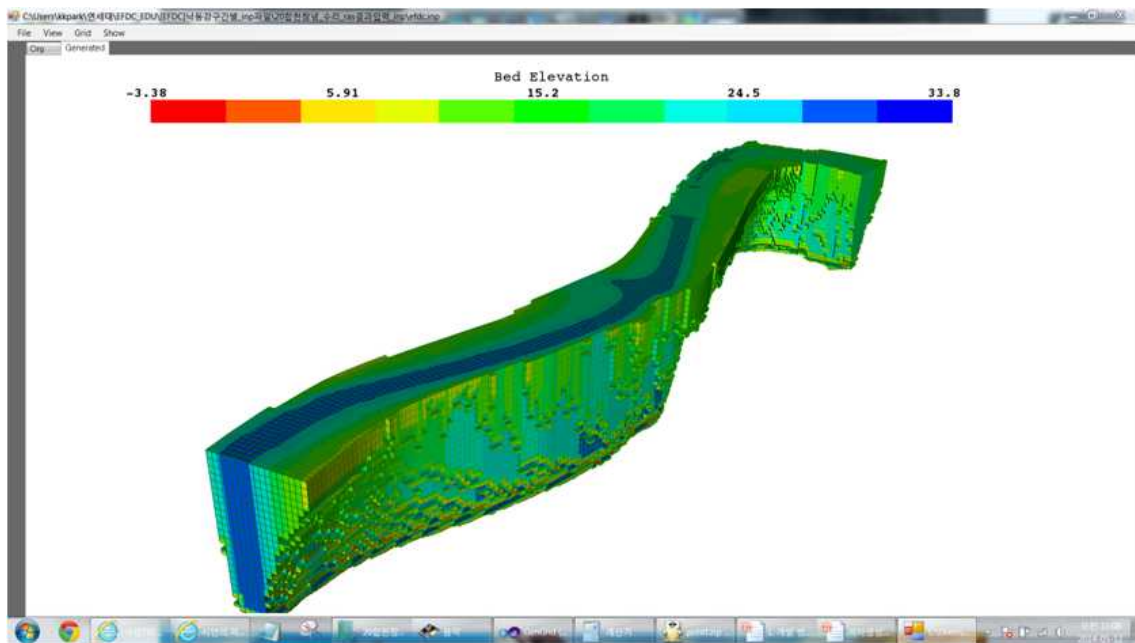


그림 5.6 격자의 3차원 표출 예-2

6. 3차원 수리모형 입력자료 생성

개발된 모형에 대한 전장에서 기술한 바와 같이 격자를 생성하였다. 수리모형을 실행하기 위하여 입력자료를 생성하였다. 대상유역은 하상변동을 모의하기 위한 목적에 부합하도록 낙동강 A로로 설정하였다. 입력자료는 HEC-RAS의 출력자료를 기초로 하여 생성하였다.

가. 대상유역

대상유역은 낙동강 A보 인근으로 설정하였다. 아래 그림에서 나타난 바와 같이 상류에는 회천과 황강이 지류로 우안에서 유입된다.

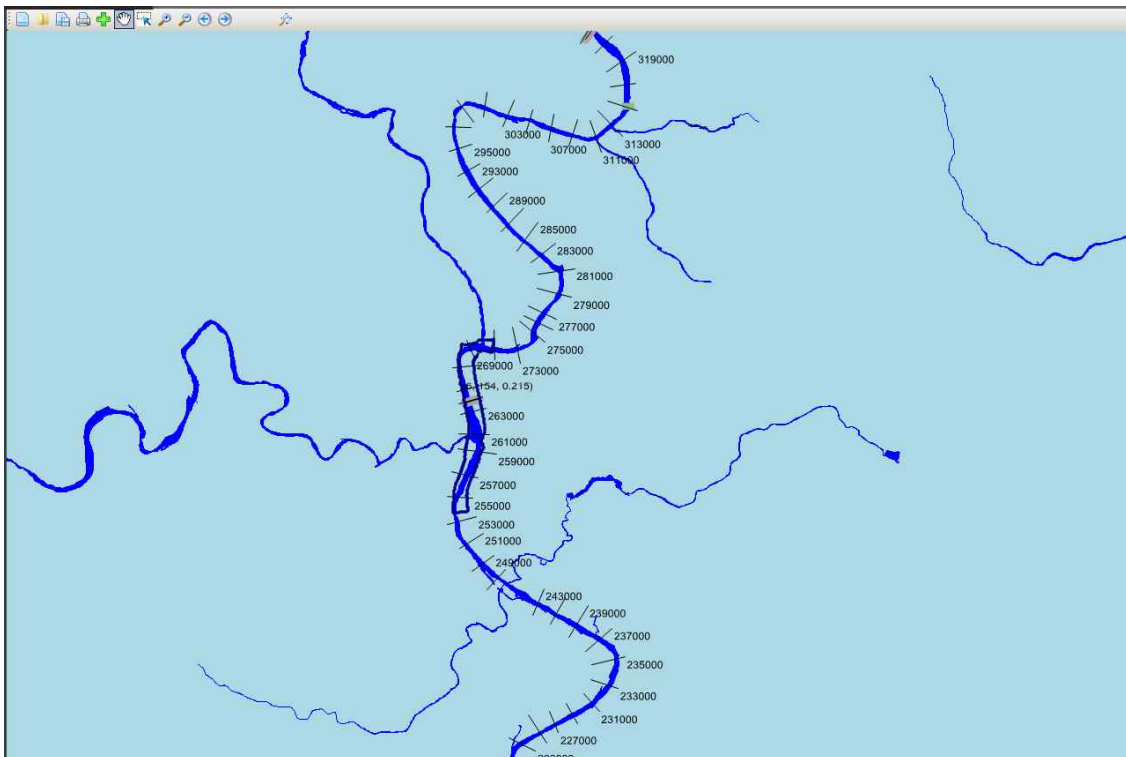


그림 5.7 대상지 상하류 대상유역

HEC-RAS 모형을 실행하여 상류단의 유량과 하류단의 수위조건을 구하였다. 격자와 격자에 대응하는 HEC-RAS모형의 스테이션 간의 상세한 관계는 그림 5.5에 표시하였다. 상류단의 유량은 HEC-RAS 횡단 271번으로 설정하였고 하류단의 수위는 횡단 255번으로 취하였다. 각 격자에 유입되는 유량은 균등배분하였다.



그림 5.8 대상지 인근 HEC-RAS와 격자 관계

그림 5.8에 있는 격자는 종으로 221개 횡으로 43개로 구성하였다. HEC-RAS 결과는 HEC-DSS라는 이진화일 형식에 격납되기 때문에 이 결과와 인터페이스하기 위하여 HEC DSS 파일 형식을 읽어내는 프로그램을 작성하여 지점의 유량 및 수위를 구하였다. 3차원 모형의 상류단 및 하류단의 경계조건을 구하기 위하여 HEC-RAS 결과를 하단의 그림으로 수록하였다. 대응하는 경계 지점은 상류단 271번, 보 지점 및 하류단 253번이다.

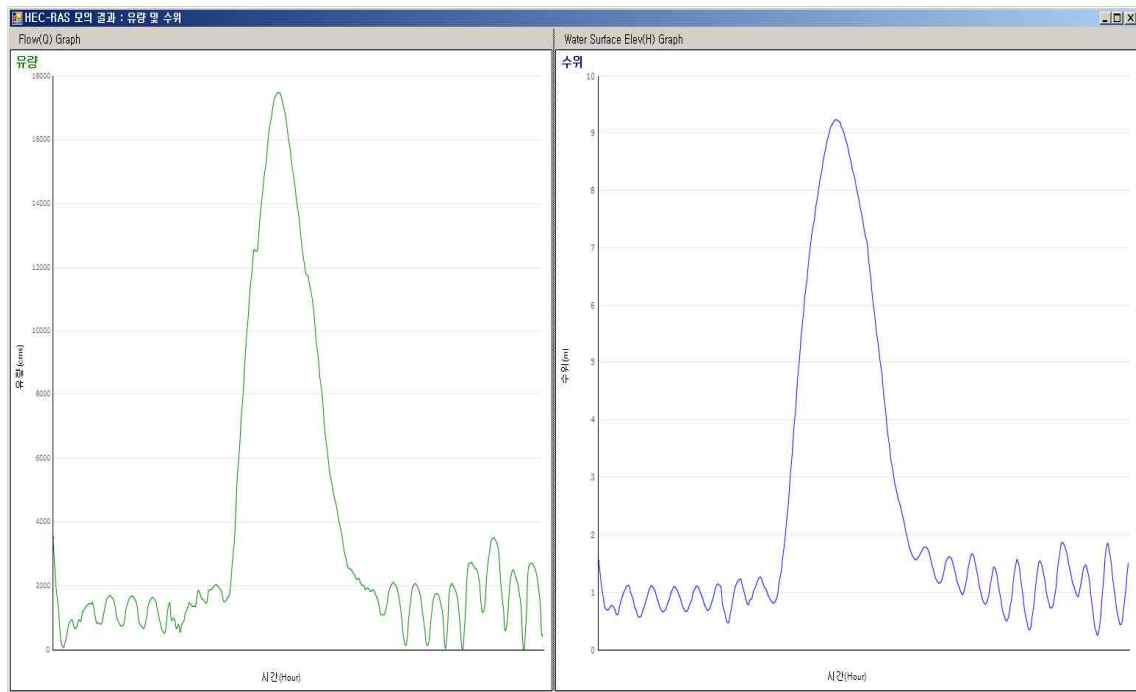


그림 5.9 횡단 271번 수위 및 유량

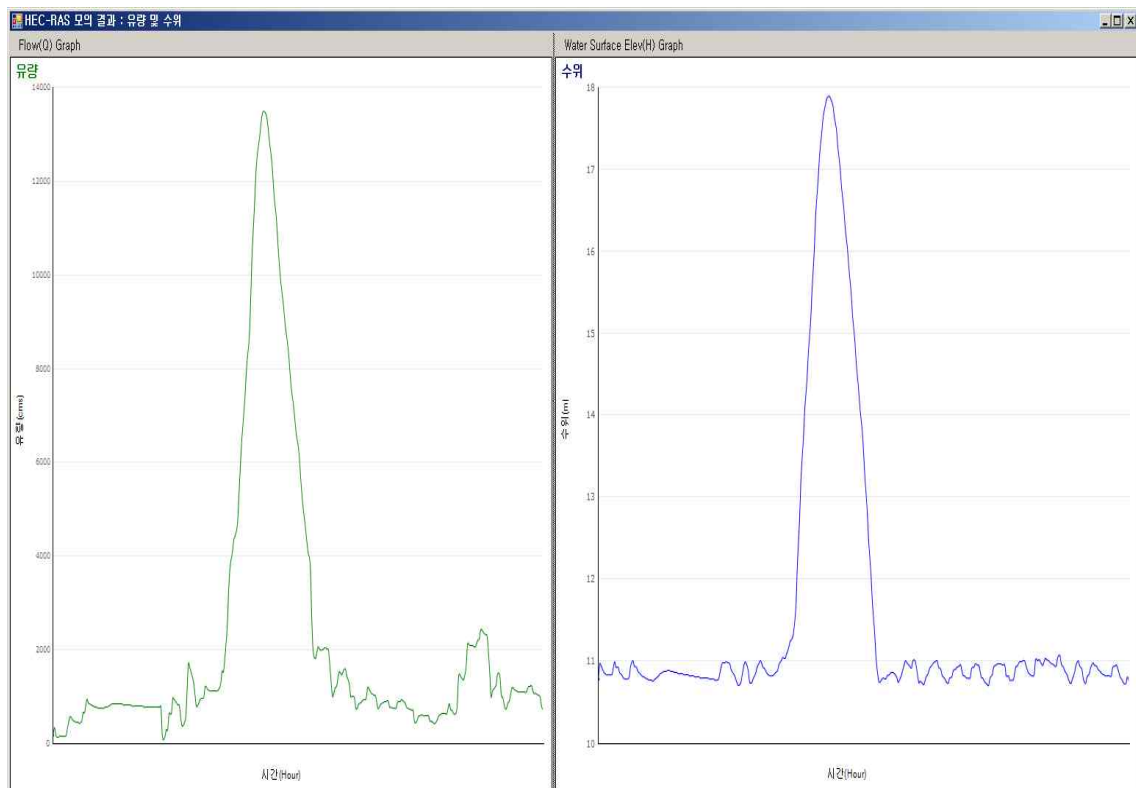


그림 5.10 HEC-RAS 횡단 253번 수위 및 유량

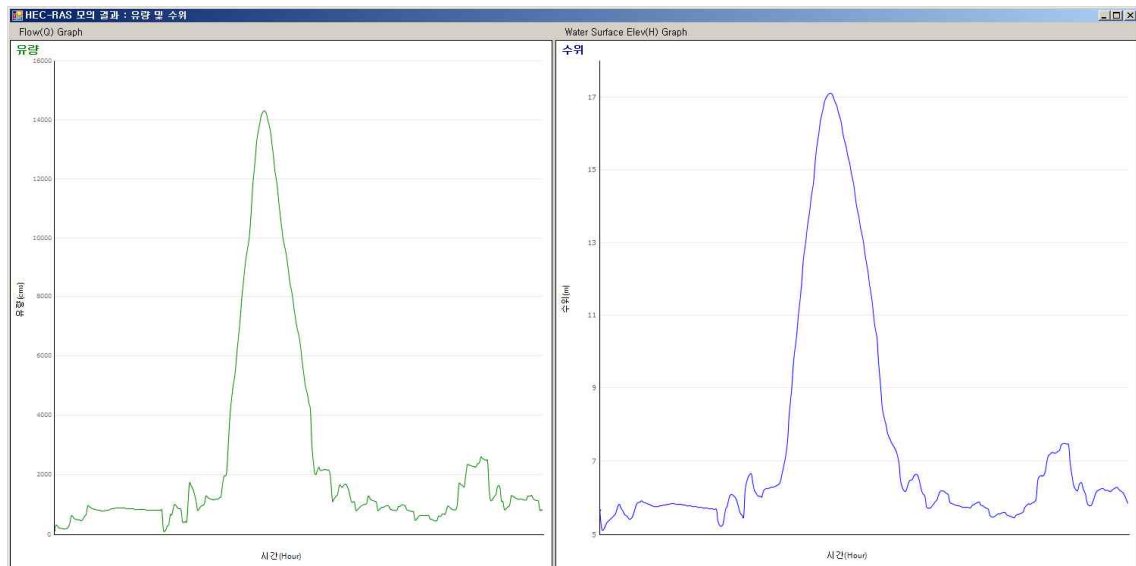


그림 5.11 보 지점 263.504의 수위 및 유량

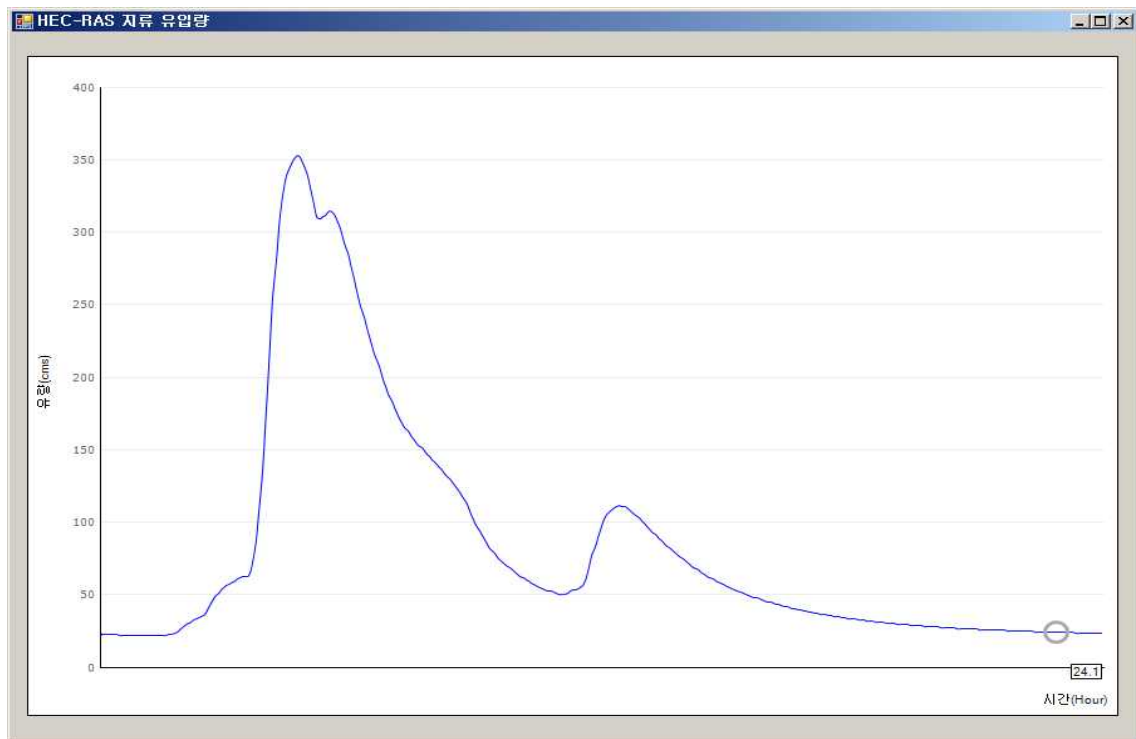


그림 5.12 횡단 259.000 유입량

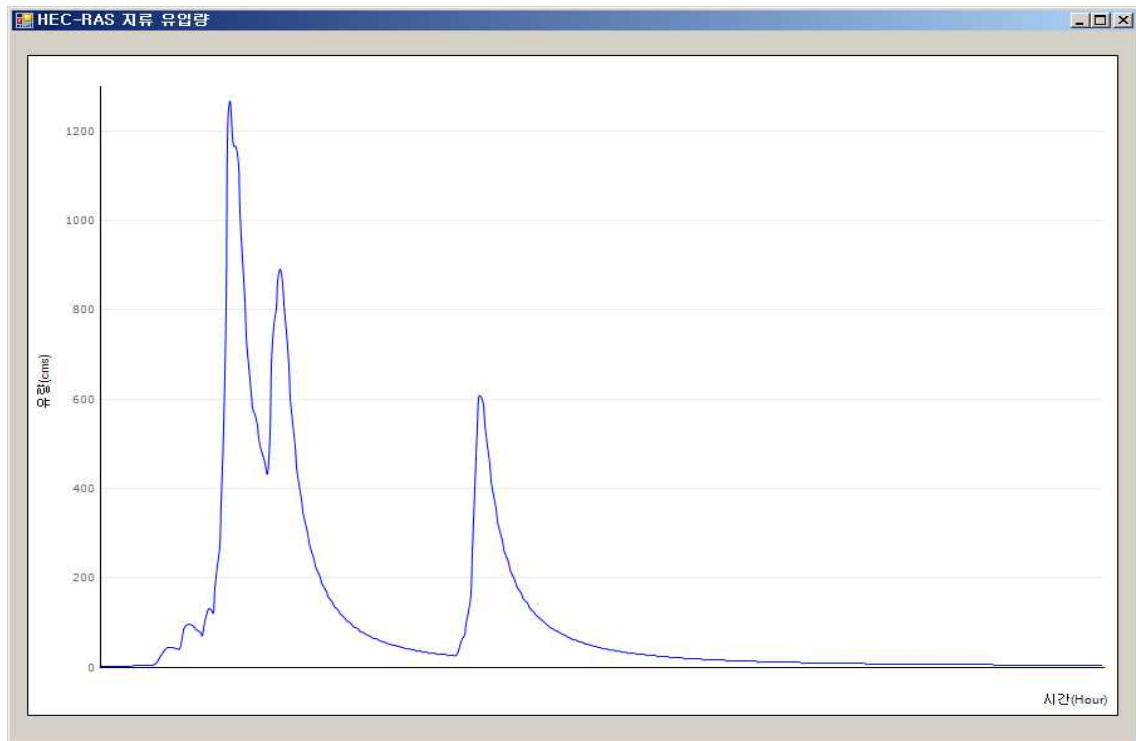


그림 5.12 횡단 269.000 유입량

제3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

1. 3차원 유동해석을 위한 난류모형

하천에서 3차원의 유사이동 및 하상변동을 수치모의하기 위해서 기본적으로 유동계산이 필요하다. 하천에서 난류 유동을 수치계산하기 위해서는 RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) 방정식 모형, 큰 와 수치모의 (LES: Large Eddy Simulation), 그리고 직접수치모의 (DNS: Direct Numerical Simulation)을 이용할 수 있다. LES 혹은 DNS는 학술적인 연구를 위해서 다양하게 적용되고 있으나 실제 공학문제 해결에 사용되기에는 이른 감이 있다. 따라서 본 과제에서는 유동 모형 개발의 범위를 RANS 모형으로 국한시킨다.

RANS 모형은 전술한 바와 같이 혼합거리 모형과 같은 0방정식 모형, 표준 $k-\epsilon$ 모형과 같은 2방정식 모형, 레이놀즈응력 모형 등이 있다. 유동 계산의 정확도를 고려하면 레이놀즈응력모형이 적합하나, 하도변형에 따른 좌표계의 변동성 및 이에 따른 계산량을 고려하면 단순하고도 강력한 유동계산 엔진이 필요한 것을 알 수 있다.

따라서 난류모형의 시험모의에서는 등방성 난류에 기초한 표준 $k-\epsilon$ 모형과 난류의 비등방성을 고려할 수 있는 비선형 $k-\epsilon$ 모형을 폭-수심비가 다양한 흐름에 적용하여 각 모형의 특성 및 적용성을 고찰하였다.

가. 폭-수심비가 2:1 인 개수로 흐름

1) 흐름조건

폭-수심비가 2:1 인 개수로 흐름에 적용하기 위하여 Nezu와 Rodi (1985)의 실내실험 자료를 이용하였다. 실험 수로는 수로의 폭이 0.2 m 이고, 수심이 0.1 m 인 직사각형 개수로이며 경사는 0.00059이다. 하상조건은 유효조도높이가 2.5 mm이다. 이 실험은 흐름이 완전히 발달된 상태에서 측정을 하였다.

2) 평균흐름

그림 6.1은 실험수로에서 주 흐름방향 유속분포를 표준 $k-\epsilon$ 모형과 비선형 $k-\epsilon$ 모형과 실험데이터로 비교한 것이다. y 와 z 는 수심으로 나누었고 유속은 각각 수로 내 최대 유속으로 나누어 무차원화 시켰다. 그림 6.1 (a)는 표준 $k-\epsilon$ 모형의 주 흐름방향 유속분포를 모의한 결과로 중앙 자유수면에서 최대유속이 발생하고 벽면과 바닥을 따라 고르게 분포하는 것을 볼 수 있다. 그러나 실질적으로는 실험자료의 유속분포인 그림 6.1 (c)처럼 최대유속점이 자유수면의 아래로 하강하는 현상 (velocity dip) 이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 6.1 (b)는 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 주 흐름방향 유속분포를 모의한 결과로 유속 최고점의 양상은 재현하나 최고점의 침강을 정확하게 모의하는 것은 아니다. 그러나 그림 6.1 (a)와 (b)를 비교해 보았을 때 비선형 $k-\epsilon$ 모형이 더 잘 모의하는 것을 볼 수 있다.

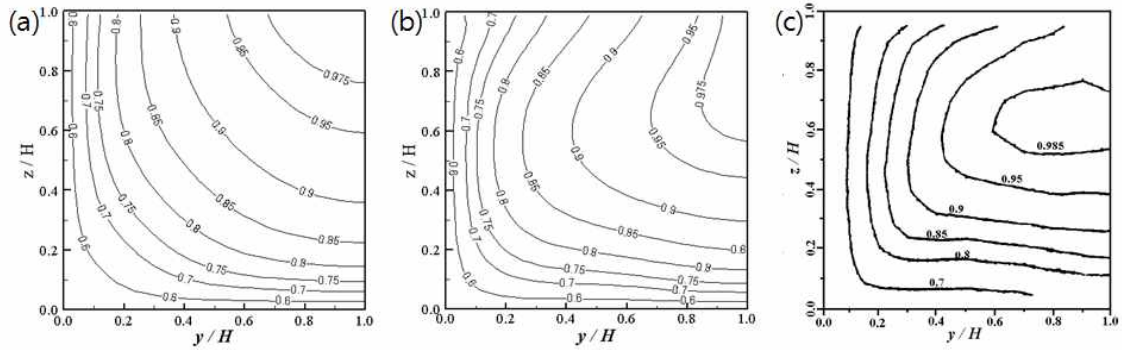


그림 6.1 주 흐름방향 유속분포

그림 6.2는 이차류 유속분포를 나타낸 것으로, 주 흐름방향 최대 유속으로 나누어 무차원화 시켰다. 표준 $k-\varepsilon$ 모형의 결과는 등방성 모형으로 이차류를 정상적으로 모의하지 못하기 때문에 제시하지 못하였다. 그림 6.2 (a)와 (b)를 비교해보면 자유수면의 와와 바닥의 와를 비교적 잘 재현하는 것을 볼 수 있다. 와의 위치와 크기, 방향이 거의 같기에 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 우수함을 잘 볼 수 있다.

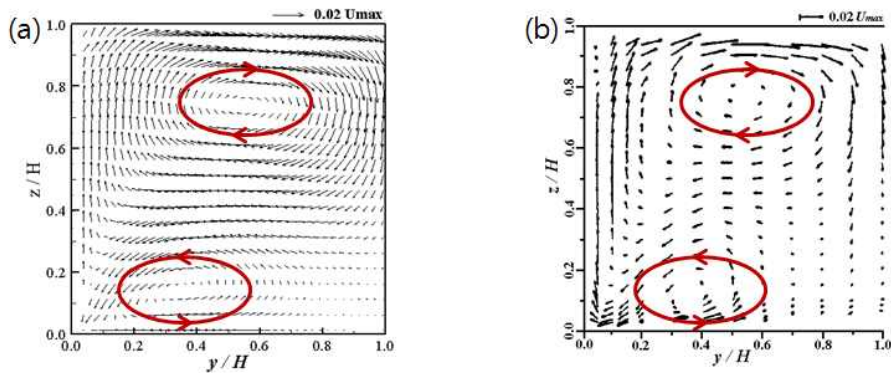


그림 6.2 이차류 유속분포

3) 난류량

그림 6.3은 실험수로에서 주 흐름방향 난류강도분포를 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 비선형 $k-\varepsilon$ 모형과 실험데이터로 비교한 것이다. 난류강도는 각각 전단속도의 제곱으로 나누어 무차원화 시켰다. 그림 6.4 (a)는 표준 $k-\varepsilon$ 모형의 주 흐름방향 난류강도분포를 모의한 결과로 실험결과와 매우 다른 것을 볼 수 있다. 그림 6.2 (b)는 비선형 $k-\varepsilon$ 모형의 주 흐름방향 난류강도분포를 모의한 결과로 바닥 근처에서 난류강도를 과소산정 하지만 전반적인 난류강도 분포는 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 난류강도는 수로중앙 수면 근처에서 최대값을 보이며 바닥과 측벽으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다.

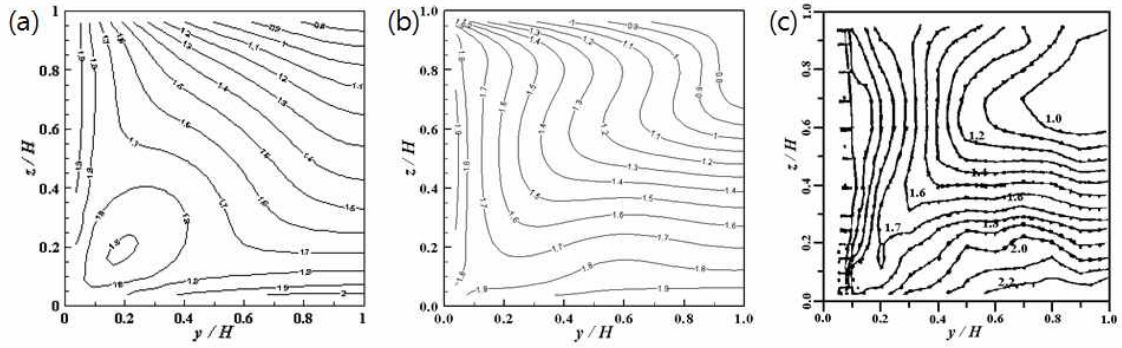


그림 6.3 x-성분 난류강도

그림 6.4는 실험수로에서 연직방향 난류강도분포를 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 비선형 $k-\varepsilon$ 모형과 실험데이터로 비교한 것이다. 세 그림을 비교해 보면 양상은 잘 모의하나 바닥에서 약간 다른 형상을 띄는 것을 볼 수 있다. 표준 $k-\varepsilon$ 모형은 벽 근처에서 더욱 다른 양상을 띄기 때문에 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 더욱 잘 맞는 것을 볼 수 있다.

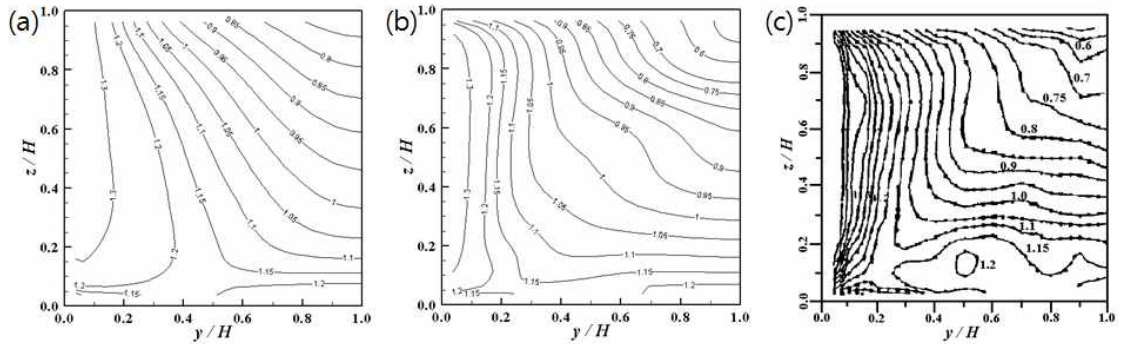


그림 6.4 z-성분 난류강도

그림 6.5는 실험수로에서 발생하는 레이놀즈응력 ($u'w'$)을 모의한 것으로 전단속도의 제곱으로 나누어 무차원화 시켰다. 흐름의 윗부분에서 음의 레이놀즈응력이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이것은 velocity dip 현상과 관계가 있다. 그러나 그림 6.5 (a)로부터 표준 $k-\varepsilon$ 모형은 이를 잘 모의하지 못하는 것을 볼 수 있고 그에 따라 그림 6.1 (a)에서 velocity dip 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 반면 그림 6.5 (b)로부터 비선형 $k-\varepsilon$ 모형은 음의 레이놀즈응력을 잘 모의하는 것을 볼 수 있고 전반적인 레이놀즈응력의 분포를 잘 모의하는 것을 볼 수 있다. 그러나 마찬가지로 벽과 바닥에서 약간의 차이를 보인다. 이들의 데이터를 종합해 보았을 때, 유속의 분포나 난류강도나 레이놀즈 응력은 표준 $k-\varepsilon$ 모형이 대체적으로 잘 모의하지 못함을 보이고 비선형 $k-\varepsilon$ 모형역시 완벽하지는 못하지만 잘 모의하는 편임을 볼 수 있다.

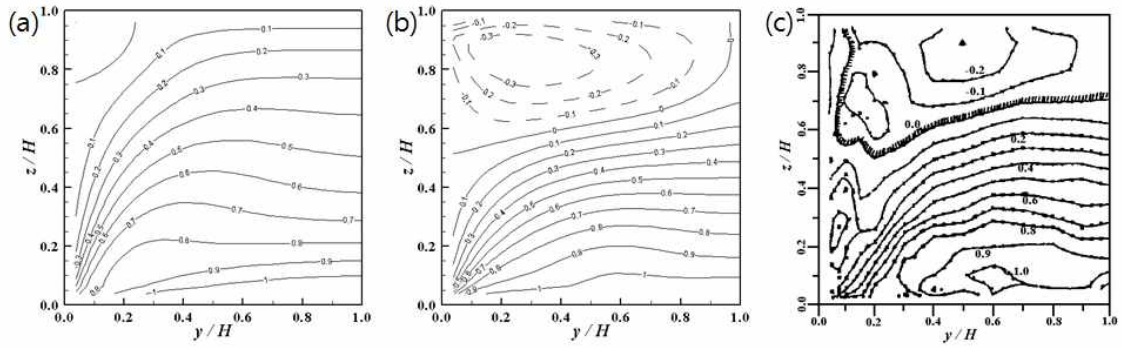


그림 6.5 레이놀즈응력 분포($u'w'$)

나. 광폭 개수로 흐름

1) 흐름조건

광폭 개수로 흐름모의결과를 검증하기 위하여 폭-수심비가 8:1 인 Nezu와 Nakayama (1999)의 실험실험 자료를 이용하였다. 실험수로는 수로의 폭이 0.4 m 이고, 수심이 0.05 m 인 직사각형 개수로이며 경사는 0.000167이다. 이 실험은 흐름이 완전히 발달된 상태에서 측정을 하였다.

2) 평균흐름

그림 6.6은 실험수로에서 주 흐름방향 유속분포를 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 비선형 $k-\varepsilon$ 모형으로 비교한 것이다. y 와 z 는 수심으로 나누었고 유속은 각각 수로 내 최대 유속으로 나누어 무차원화 시켰다. 그림 6.1과 비교를 해 보면 비선형 $k-\varepsilon$ 모형에서도 velocity dip 현상이 일어나지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 광폭수로의 특성으로 광폭 수로의 중심에 가까워질수록 이차류의 크기가 감소하기 때문으로 알려져 있다. 그림 6.6 (a)와 (b)를 비교해 보았을 때 표준 $k-\varepsilon$ 모형의 모의결과는 고르게 분포되는 것을 볼 수 있는데 비선형 $k-\varepsilon$ 모형에서는 벽면에서 크게 발생하는 이차류의 영향이 고려되어 조금 더 복잡한 양상을 띄는 것을 볼 수 있다.

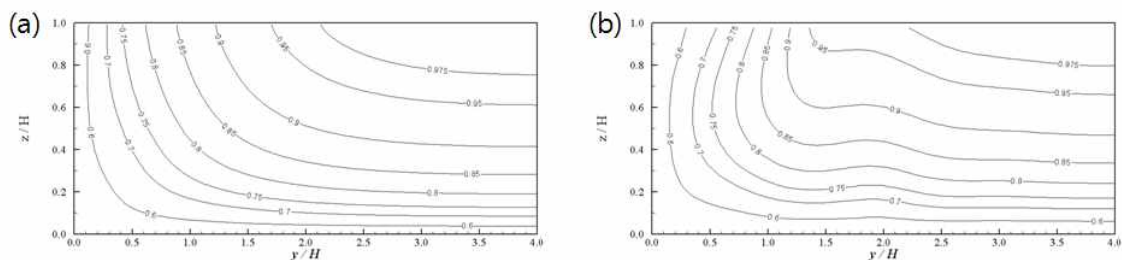


그림 6.6 주 흐름방향 유속 분포

그림 6.7는 이차류 벡터도를 나타낸 것으로, 주 흐름방향 최대 유속으로 나누어 무차원화 시켰다. 그림 6.7을 살펴보면, 벽면에서 매우 큰 이차류가 발생하고 중앙으로 갈수록 이차류의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 광폭수로의 일반적인 현상으로 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 이를 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

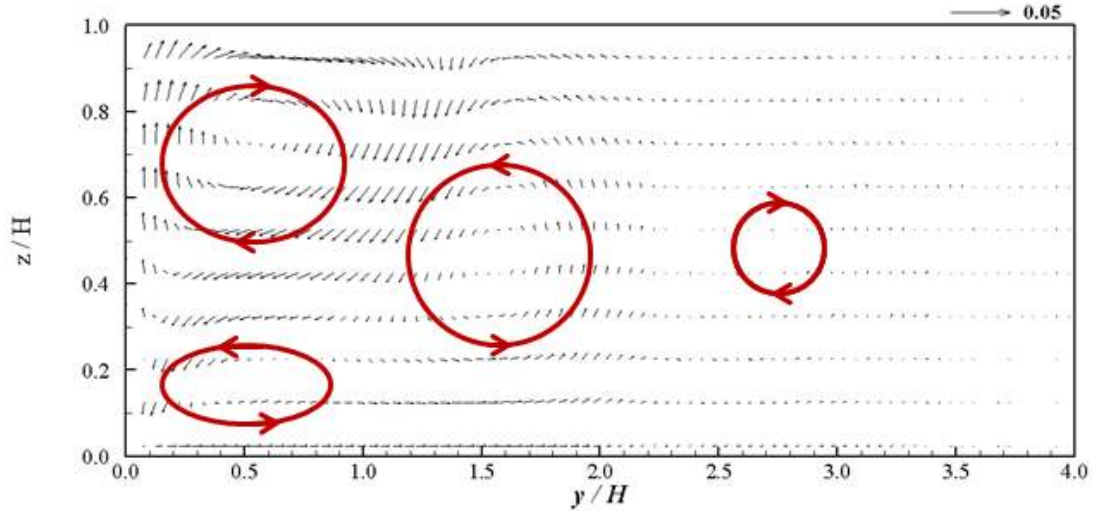


그림 6.7 이차류 유속분포

3) 난류량

Nezu와 Nakayama (1999)가 제시한 결과를 이용하여 광폭수로 중앙에서의 각종 난류량에 대하여 측정하였다.

그림 6.8은 세 방향의 난류강도를 비선형 $k-\varepsilon$ 모형으로 비교해 본 결과이다. 세 자료를 살펴보면, 대체적으로 잘 모의하나 수면에서 잘 맞지 않음을 볼 수 있다.

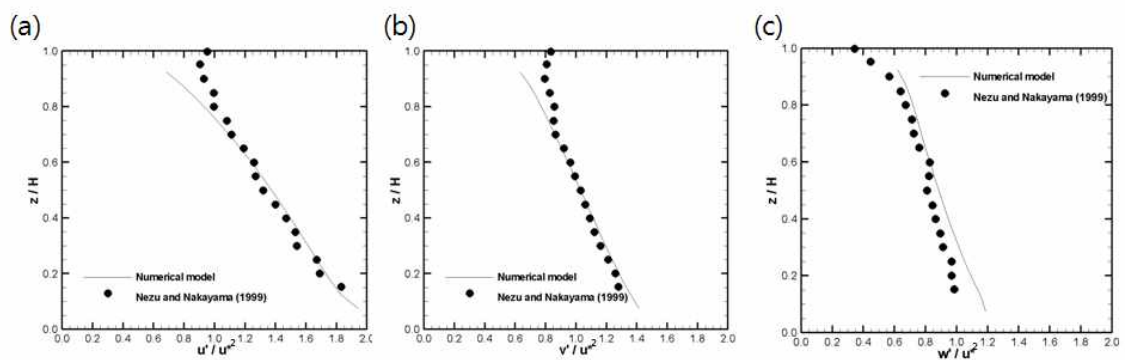


그림 6.8 난류강도

그림 6.9는 각각 레이놀즈응력과 난류운동에너지 (k)를 비교한 결과이다. 그림 6.9 (a)를 보면 수면에서 $u'w'$ 이 0에 매우 가까운 것은 잘 모의하나 바닥으로 갈수록 과소 산정하는 것을 볼 수 있다. 반면, 그림 6.9 (b)로부터 k 는 자유수면에서 과소산정을 하는 것을 볼 수 있다.

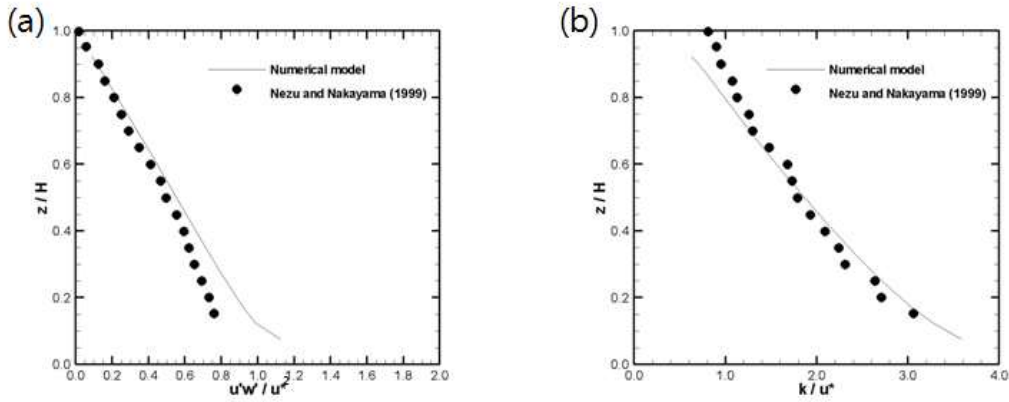


그림 6.9 레이놀즈응력과 난류운동에너지 비교

그림 6.10은 난류의 비등방성 $\left(b_{ij} = \frac{u'_i u'_j}{2k} - 1\right)$ 을 비교한 것이다. 다른 난류량과 마찬가지로 자유수면에서 비등방성을 잘 못 산정하는 것을 볼 수 있다. 이는 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 바닥 및 자유수면에서 난류의 감쇠효과(damping effect)를 고려하지 못하기 때문이다. 난류의 감쇠효과로 인하여 난류의 비등방성의 크기가 증가하게 되어 바닥 및 자유수면과 수직인 방향으로의 난류강도는 감소되고 그 외의 방향의 난류강도가 증가되는 것이다. 그러나 바닥과 자유수면을 제외하면 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 전체적으로 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

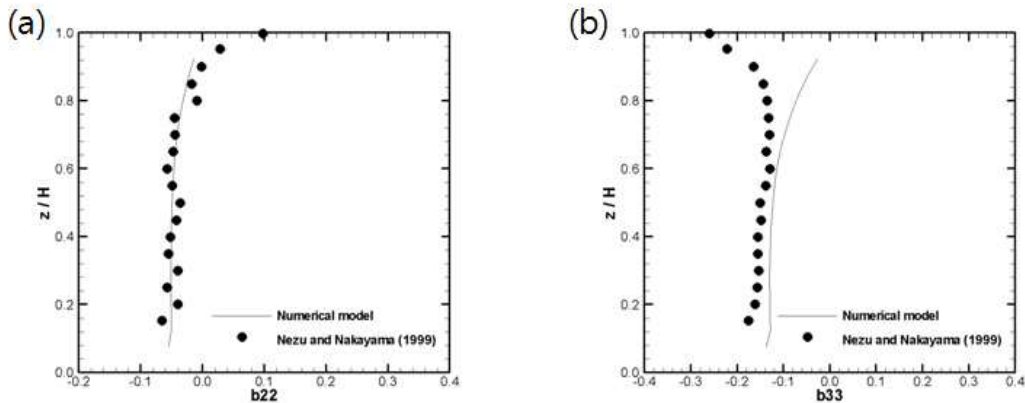


그림 6.10 비등방성

다. 결론

표준 $k-\varepsilon$ 모형과 비선형 $k-\varepsilon$ 모형을 실험자료와 비교하여 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 비선형 $k-\varepsilon$ 모형의 적용성을 검토하였다. Nezu와 Rodi (1985)의 실내실험과의 비교를 통하여 측벽의 영향을 받는 개수로 흐름의 경우 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 표준 $k-\varepsilon$ 모형에 비해 크게 우수한 것을 알 수 있었다. Nezu와 Nakayama (1999)의 실내실험을 통해 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 난류의 감쇠효과를 고려하지 못하여 바닥과 자유수면에서의 비등방성에 오차를 발생시키나 유동해석으로 필요한 유속분포를 잘 산정하고 비등방성의 오차 역시 충분히 감안할 수 있는 수준이므로 유동모형으로서는 사용하기에 문제가 없음을 알 수 있었다.

2. 국내 하천 환경에 적합한 유사량 산정기법

가. The Danube River

적용대상 하천은 슬로바키아에 있는 Danube 강으로 Gabcikovo의 수력발전소 하류 구간이다 (그림 7.1 참조). Danube 강은 오래전부터 제방의 건설로 인하여 심각한 하상 변동이 발생하였다. 그리고 19세기말 건설된 주운수로는 수심유지를 위하여 지속적으로 준설을 필요로 하였다. 또한 20세기 후반에 오스트리아 구간에 건설된 수리시설물로 말미암아 유사량이 80%나 감소되었다. 준설과 유사량의 감소로 인하여 Brastilava 하류 구간에 하상하강이 관측되었고 소류사 이동이 안정화되지 않았다.

그림 7.2는 Danube 강에서 채취된 하상토의 입도분포곡선이다. 대상 구간에서 하상토는 5-22 mm 범위에 존재하며 중앙입경(D50)은 9 mm로 자갈하천으로 판단된다.

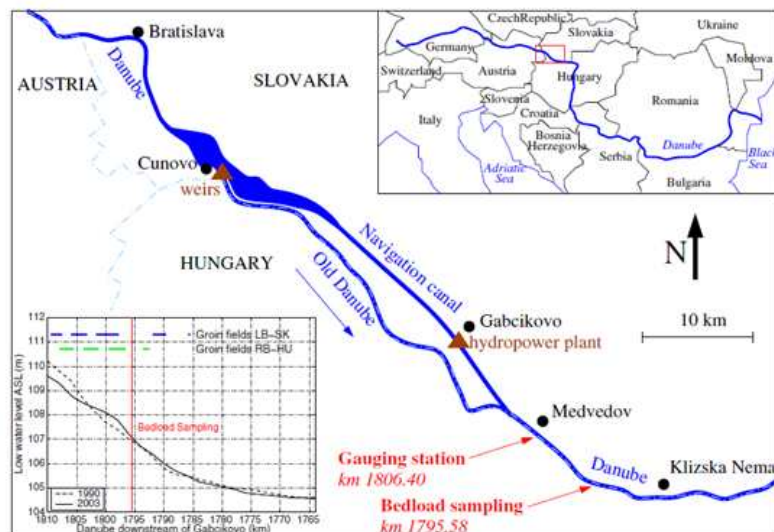


그림 7.1 연구대상 하천 및 소류사 측정 지점

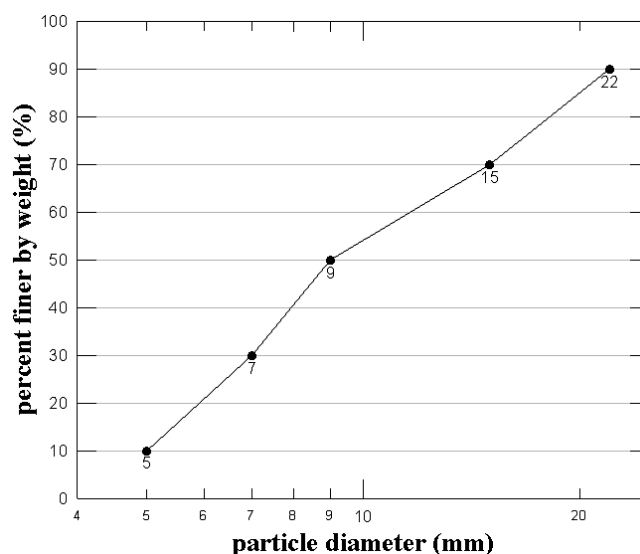


그림 7.2 Danube River 하상토의 입도분포곡선

Holubova등 (2004)에 의하면 Danube River의 평수량은 $950 \text{ m}^3/\text{s}$, 홍수량은 $4,750 \text{ m}^3/\text{s}$, 하상경사는 0.0002이며 폭이 약 350 m 정도이다. Manning-Strickler공식을 이용하여 산정한 조도계수는 0.0217로 계산 되었으나 이는 입자에 의한 영향만을 고려한 결과이므로 다른 추가적인 조도계수의 영향을 고려하기 위해 각 유량에서 측정된 평균 유속과 LDM을 통해 계산된 평균 유속을 그림 7.6에 나타내었다. 조도계수가 0.026 일 때 실측값과 가장 잘 맞는 것으로 판단하였다.

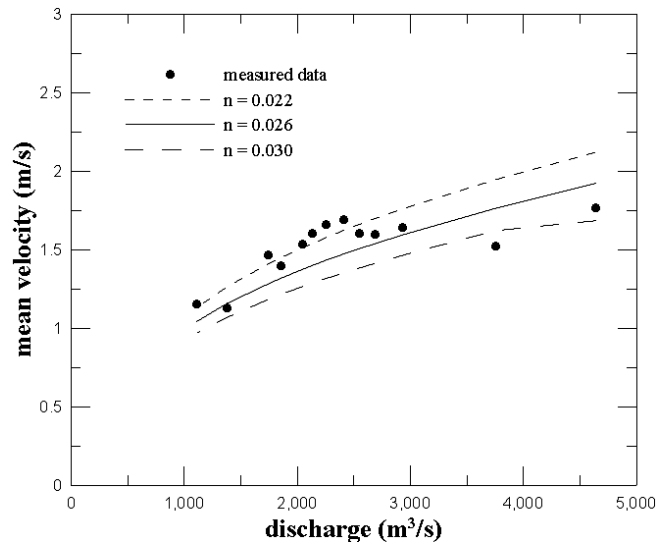


그림 7.3 유속-유량 관계곡선

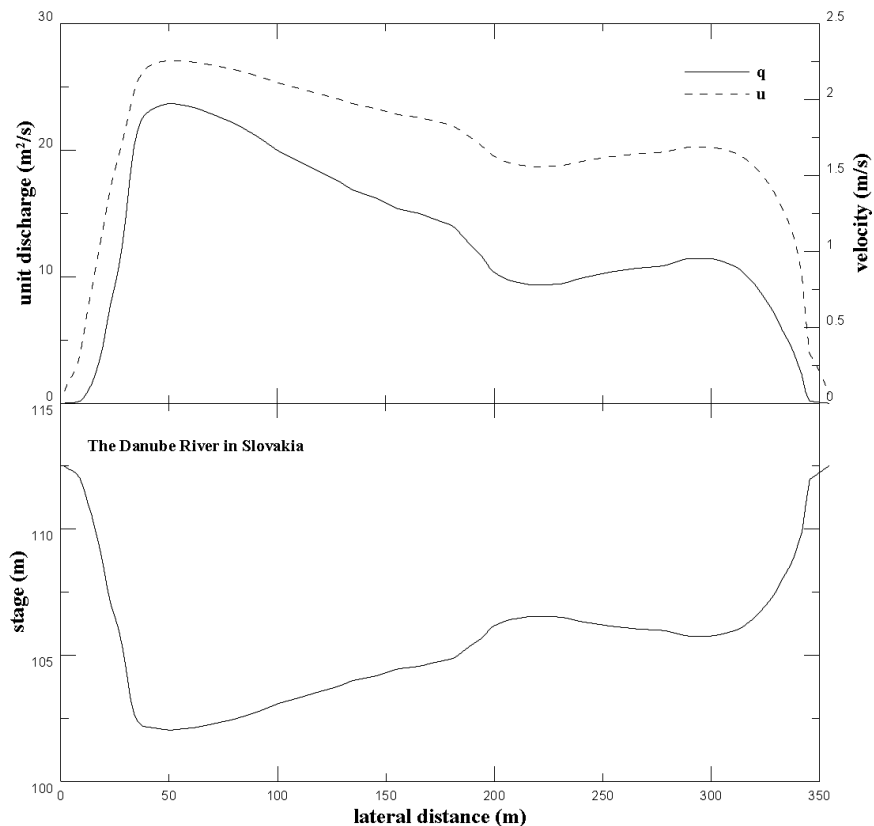


그림 7.4 Danube River의 단면과 유속 및 단위 폭당 유량 분포

유량 형배분법 (LDM)을 이용하여 최고 유량인 4,743 cms일 때의 단위 폭 당 유량과 유속을 그림 7.4과 같이 나타낼 수 있다. 유속은 수심이 가장 깊은 곳에서 빠르게 나타나며 유량도 단면을 따라서 분포하며 최고수심에서 가장 많은 유량이 흘러간다. 이차류 (secondary currents)를 고려하지 않기 때문에 유량변화에 따라 최대 유량 발생점은 변하지 않는다.

산정한 공식을 바탕으로 Danube River에 적용성을 검증하기 위하여 MMPM공식과 CL공식을 비교하였다. 단위 폭 당 소류사량 분포를 계산하여 각각 그림 7.5과 그림 7.6에 나타내었다. Camenen등 (2006)에 제시된 유효조도높이 $k_s = 2.0d_{90}$ 을 사용하였고 위 결과는 DuBoys type 공식의 한계점을 보여준다. MMPM공식은 Duboys type으로 임계 Shields 수 이상에서만 소류사가 발생하나, CL공식은 Exponential type으로 임계 Shields 수 이하인 우안에서도 소류사가 발생한다.

그림 7.7과 1.8은 유량에 따른 소류사량을 계산한 결과와 측정된 자료를 나타낸 것이다. 실측값과의 상대오차는 MMPM과 CL 각각 0.57과 0.41로 CL이 더 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 1차원 모의는 전체적으로 낮게 예측하였으며 저유량에서 오차가 매우 크게 나타났다. 입도분포를 고려한 입도분포 효과에 대한 결과를 그림 7.19와 2.20에 나타내었는데, 입도분포 효과 고려시 두 공식 모두 소류사량이 약 20%정도 감소하는 것으로 계산되었다.

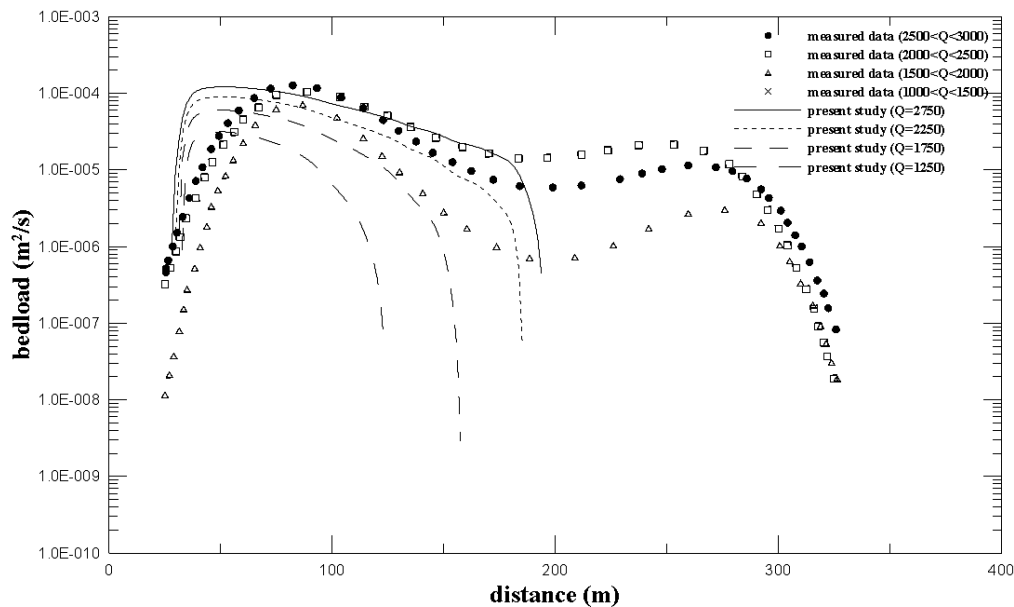


그림 7.5 단위폭당 소류사량 분포 (MMPM)

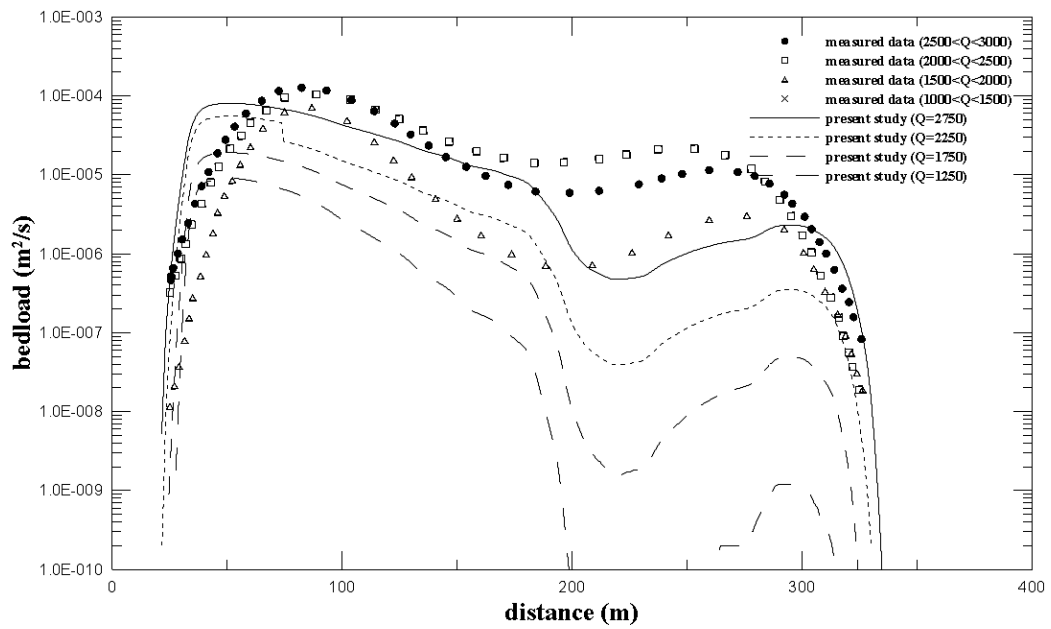


그림 7.6 단위폭당 소류사량 분포 (CL)

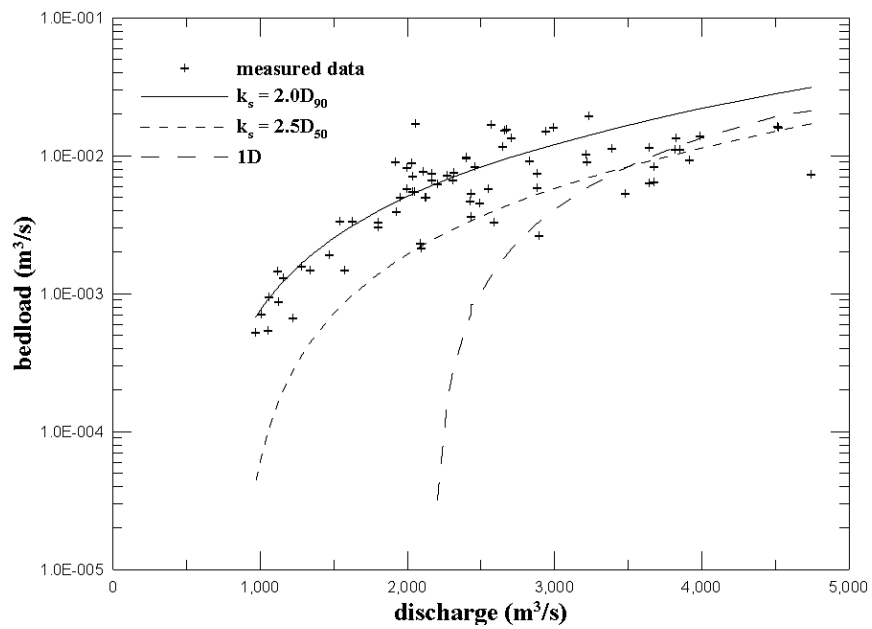


그림 7.7 유사량-유량 곡선 (MMPM)

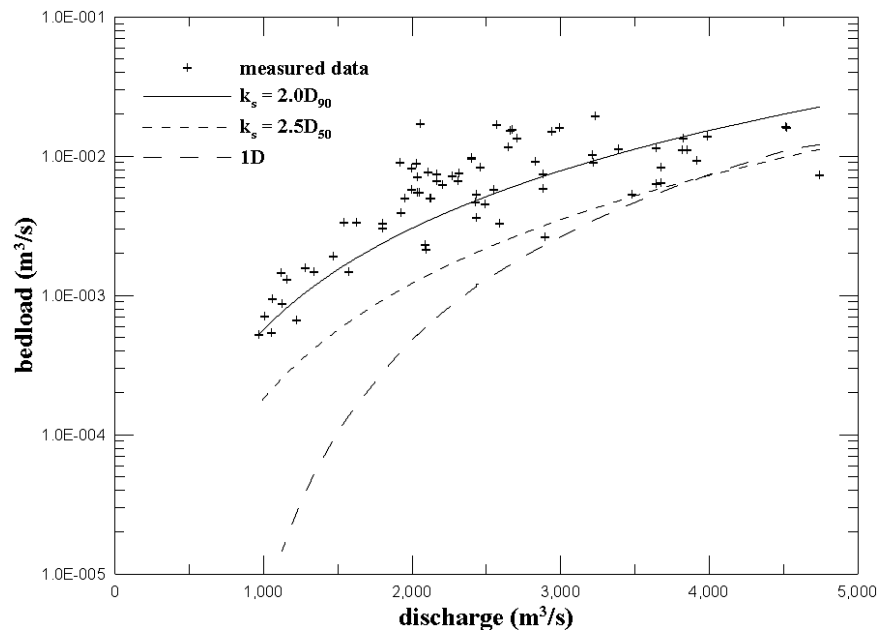


그림 7.8 유사량-유량 곡선 (CL)

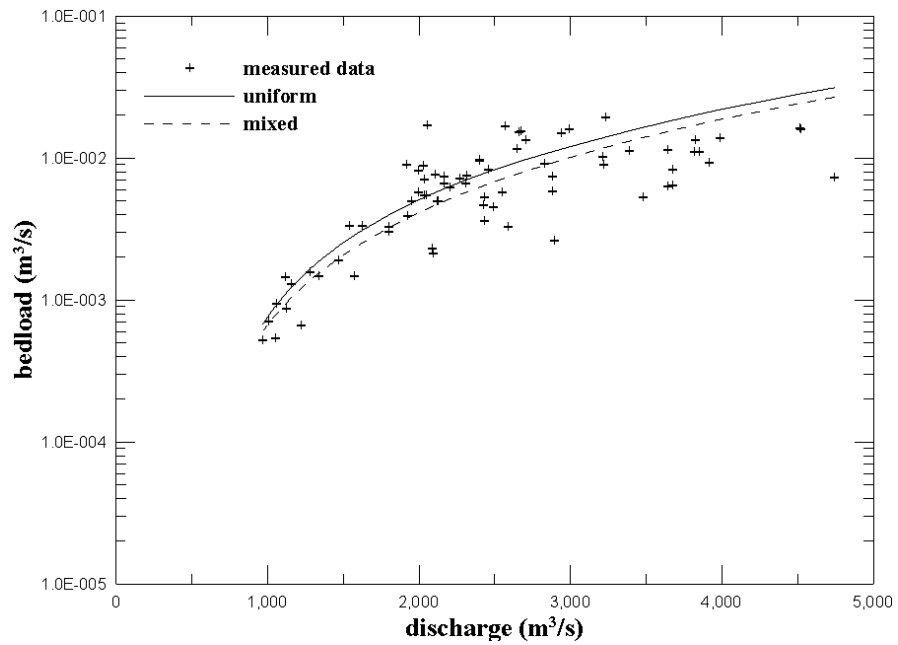


그림 7.9 입도분포 효과 (MMPM)

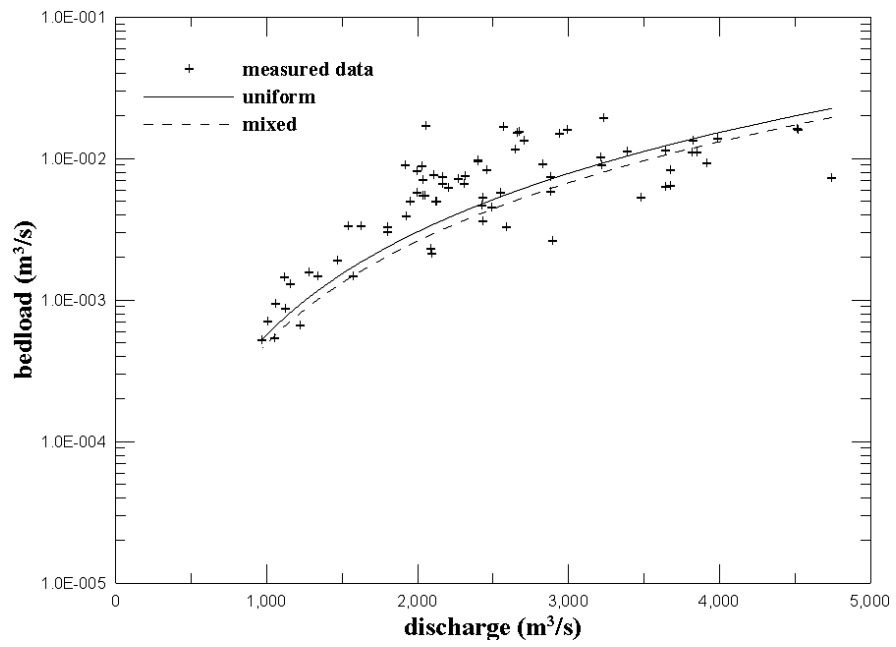


그림 7.10 입도분포 효과 (CL)

나. 국내하천

유량조사사업단 (2007)은 국내하천에서 침식, 유송, 퇴적 작용을 거쳐 하천의 한 지점을 통과하는 하천유사량과 유량과의 관계를 파악하고자 여주, 적성, 낙동, 왜관, 공주, 구례2 수위관측소의 6개 지점에서 유사량 측정을 계획하였다.

본 연구를 통해 제시된 유사량 산정 방법을 적용하기 위해 유량조사사업단 (2007)에 의해 수행된 남한강 수계에 위치한 여주 지점의 유사량 측정자료를 이용하였다. 유량-유사량관계곡선식을 개발하기 위해서는 유사량 측정과 병행하여 수위, 유속, 측정수심, 수면폭, 수면경사, 수온 등과 같은 수리량 측정이 수반되어야 하며 이는 여주수위관측소에서 수행되었다 (그림 7.14).

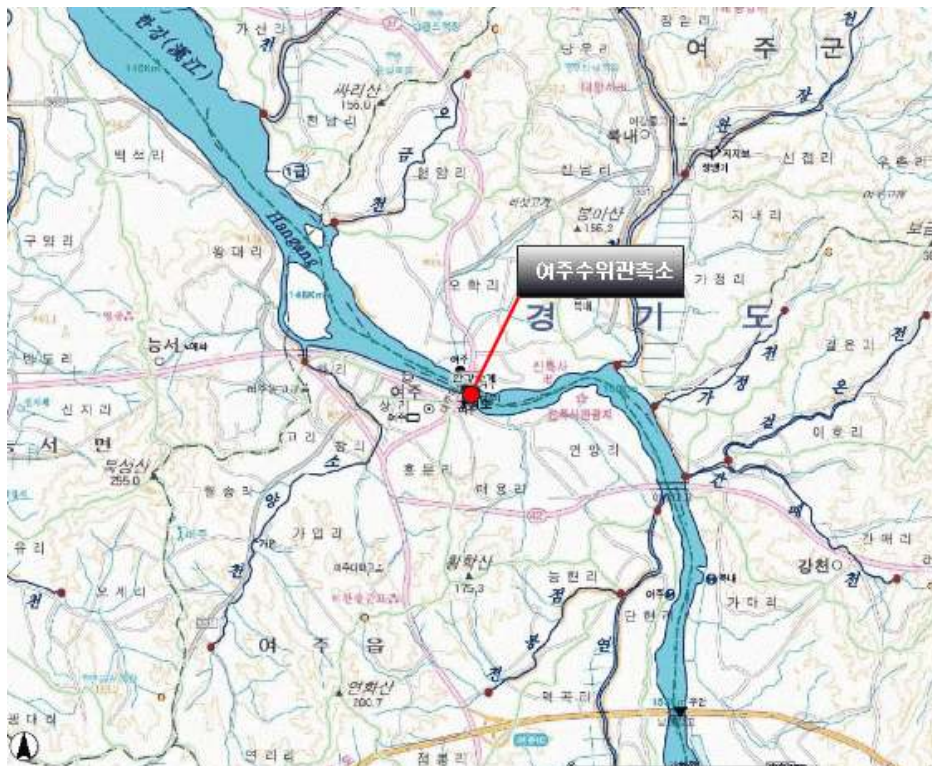


그림 7.11 여주수위관측소 (유량조사사업단, 2007)

여주 지점은 단면상의 측정수심이 깊어 D-74가 아닌 P-61A 측정기기가 적합하지만 P-61A 기기를 설치할 수 있는 과업수행 공간이 부족하여 현장 여건상 D-74 기기로 수심적분에 의하여 유사를 채취하였다. 그림 7.15는 대상 지점에서 측정한 부유사의 채취 위치와 측선배치에 따른 측선수, 하상토 채취 위치 등을 나타낸다.

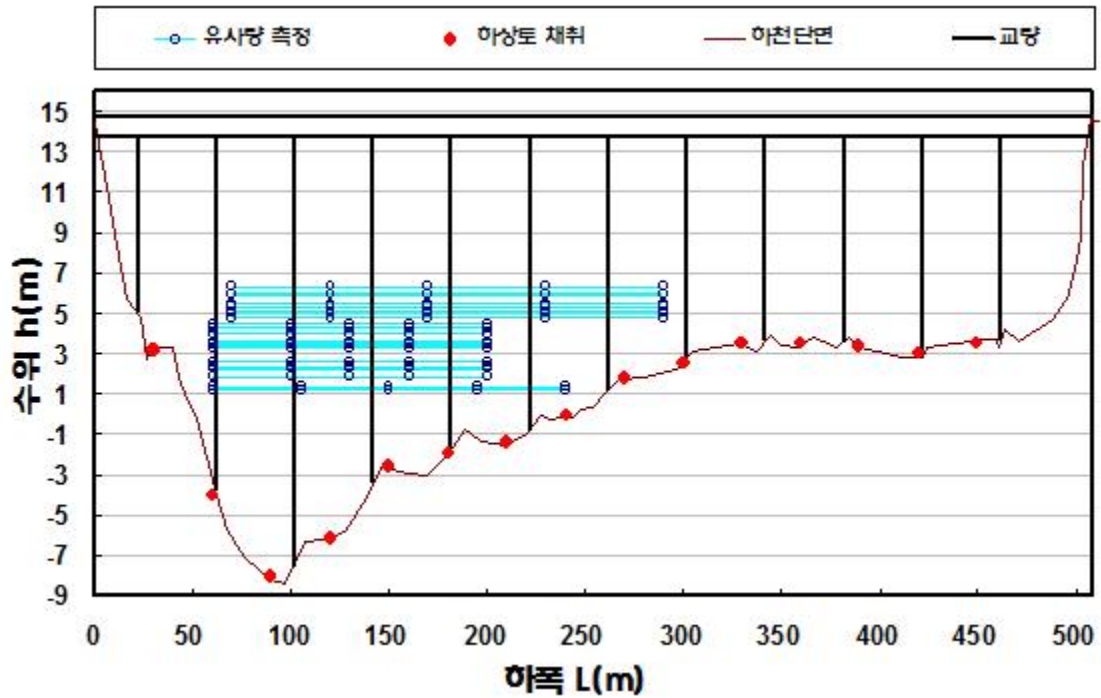


그림 7.12 유사랑 측정위치 및 하상토 채취위치 (유량조사사업단, 2007)

여주 지점에서 홍수 전·후로 2회 씩 채취된 하상토를 체분석법으로 입도분포 분석을 실시하였다. 그림 7.16은 입도분포분석결과에 따른 입경누적분포도를 나타내고 있는데 홍수 전·후 값이 크게 차이가 나고 있다 (유량조사사업단, 2007). 홍수 전·후 및 평균에 대한 주요 입경을 표 10.1에 나타내었다.

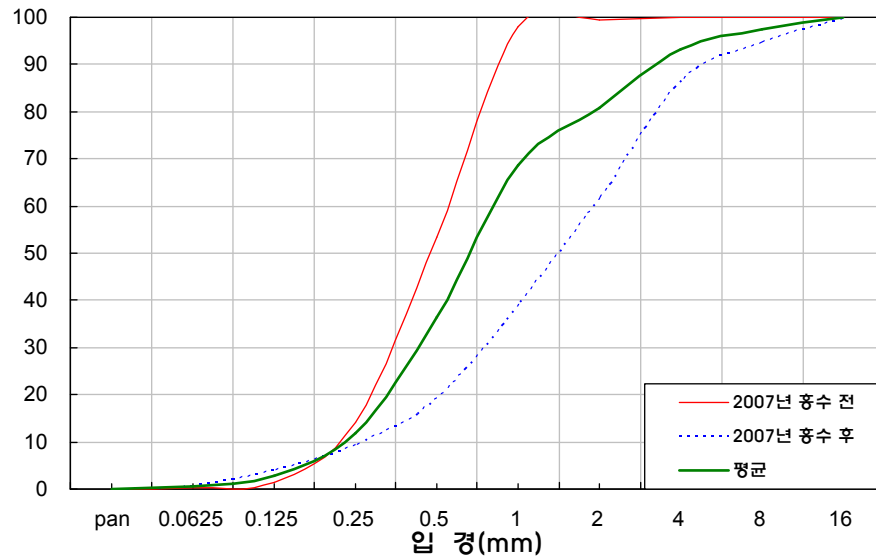


그림 7.13 하상토 입도분포곡선 (유량조사사업단, 2007)

표 10.1 하상토 주요 입경 (여주)

측정시점	D50 (mm)	D65 (mm)	D90 (mm)
홍수 전	0.48	0.63	0.87
홍수 후	1.40	2.25	4.91
평균	0.65	0.93	3.22

유량조사사업단 (2007)에 의하면 여주 지점의 수면경사는 0.000175이며, 최대유량은 $5,827 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 이때의 수위는 6.4m이다. M-S공식을 이용하여 산정한 조도계수는 0.014이며 수위-유량 자료를 이용하여 유량 횡분배법을 통해 결정한 조도계수는 0.03이다. 그림 7.17은 조도계수 산정결과를 나타낸 것이다. 유량 3,000 cms 이하에서 실측값과 계산치가 차이가 나는 것은 하천의 배수효과에 의한 것으로 생각할 수 있다.

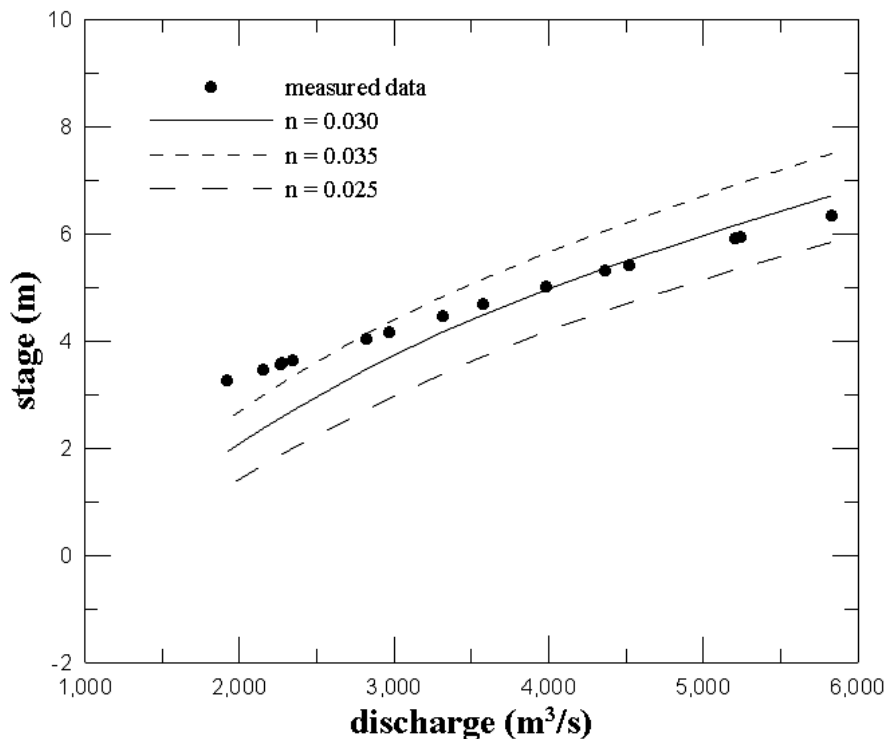


그림 7.14 조도계수에 따른 수위-유량 관계곡선

유량 횡분배법을 이용하여 최대유량 $5,827 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서의 유속 및 단위 폭 당 유량을 그림 7.18에 나타내었는데 유속은 최대수심 지점에서 가장 빠르게 계산되었으며 우안에 비해 좌안에서 유량이 더 크게 발생한다. 그림 7.19는 산정된 소류사량 공식을 적용하기 위해 Einstein 분할법을 이용한 표면마찰에 의한 수심을 계산한 결과이며 전체 수심의 약 37%가 입자에 의한 영향을 받는 수심이다.

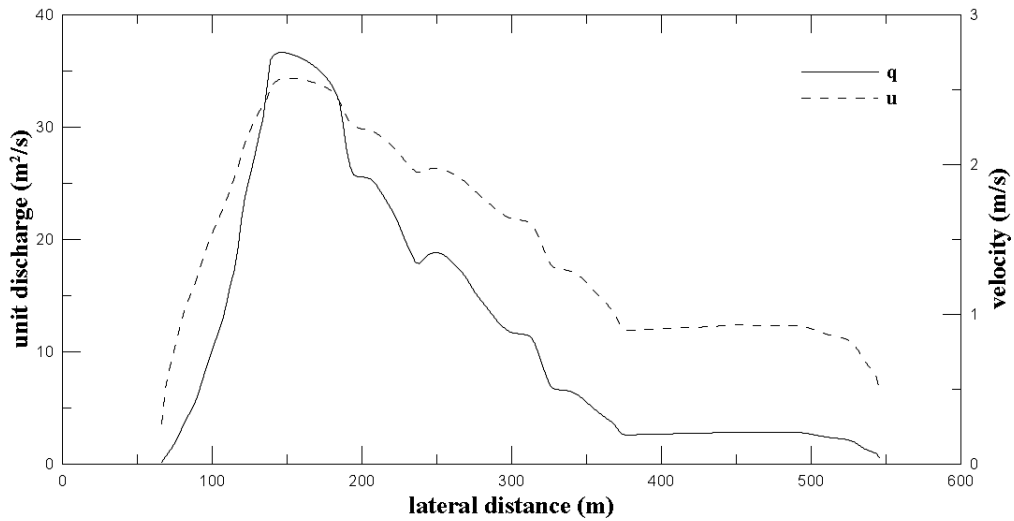


그림 7.15 유속 및 단위 폭 당 유량 분포

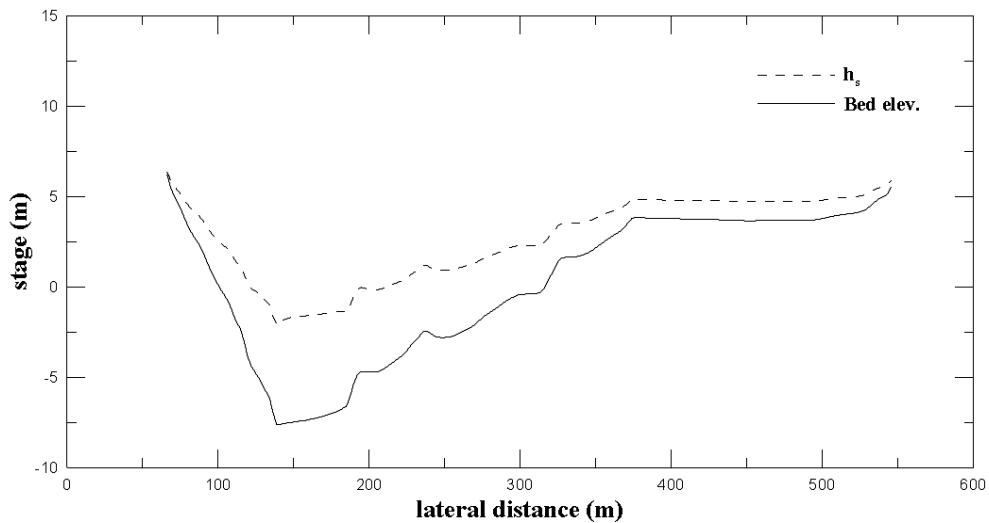


그림 7.16 입자에 의한 표면마찰이 부담하는 수심

최대 유량에서의 소류사 및 부유사를 제시된 방법을 통해 산정하였다. 단위 폭 당 유사량 분포를 나타낸 그림 7.20에서 유사량 또한 최대수심에서 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 유사이동에 있어 소류사량은 총유사량의 약 7~8%를 차지하는 것으로 계산되었다. 최대수심인 14.2 m에서 입도분포 고려한 부유사는 그림 7.21과 같다. 차폐효과 계수 $b=0.2$ 로 계산한 경우 중앙입경보다 큰 입자의 부유사량이 낮게 산정되어 총유사량이 균일입자에 비해 낮게 산정된다. 반면에 $d_i/d_{50} > 1$ 인 경우 $b=0.7$ 이 적용되면 중앙입경보다 큰 입자의 부유사량이 크게 산정되어 총유사량을 적절하게 산정하게 된다.

그림 7.22는 유량조사사업단 (2007)에 의한 실측값으로부터 총유사량을 산정하는 수정아인슈타인방법에 의한 값과 본 연구에 의해 계산된 결과값을 비교한 것이다. 수정아인슈타인방법에 의한 실측값을 회귀분석한 유량-유사량 관계곡선식과 본 연구를 통해 산정된 uniform sediment와 mixture에 의해 산정된 유량-유사량 관계곡선이 서로 유사하게 산정됨을 볼 수 있다.

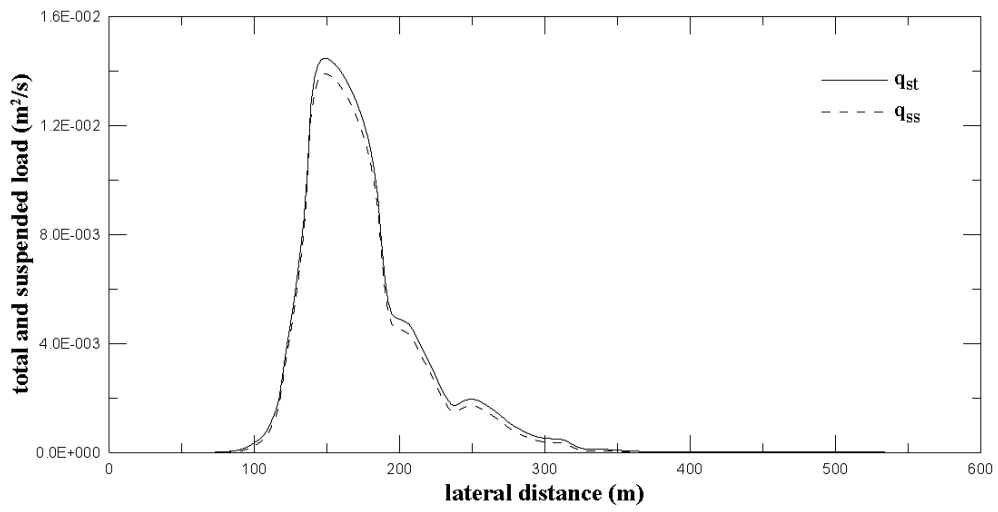


그림 7.17 단위 폭 당 유사량 분포

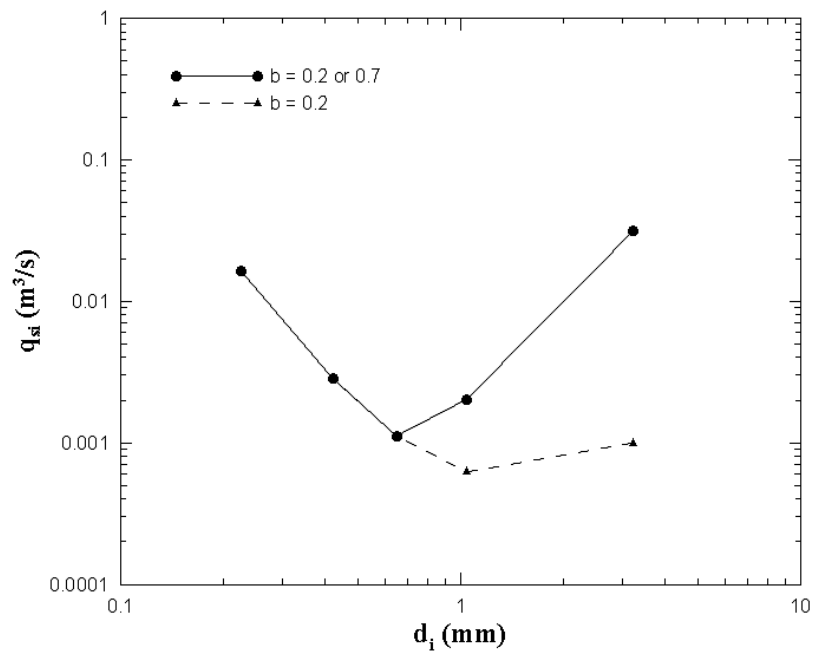


그림 7.18 입자별 단위폭 당 부유사량

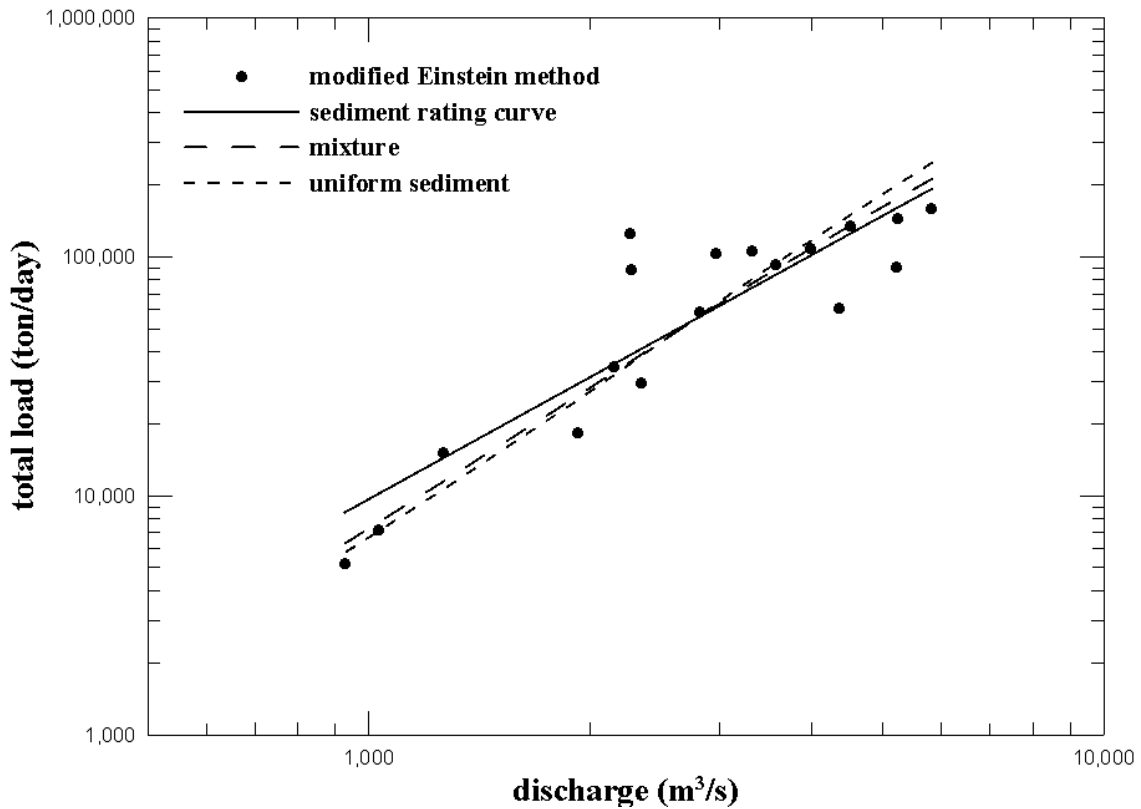


그림 7.19 유량-유사량 관계곡선

다. 결론

본 연구에서는 국내 하천에 적용 가능한 유사량 산정기법을 제시하였다.

유량 횡분배법을 이용하여 등류상태에서 하도 단면의 각 지점에 평균유속, 단위폭당 유량, 전단응력 등을 계산하였다. Einstein 분할법을 이용하여 유사이동에 기여하는 국부 전단응력을 계산하였다. 유동모형에 의해 계산된 수심평균흐름을 통해 횡방향 지점에 따른 소류사 및 부유사량을 산정한 후 이를 합하여 총유사량을 계산하였다. 다양한 소류사량 산정공식을 시험하였으며, 부유사량 산정을 위하여 Rouse 분포를 가정하였다. 연행함수는 Wright와 Parker (2004)가 제시한 공식을 사용하였는데, 이는 경사가 완만한 대형 하천에 적합한 것으로 보고되고 있다. 또한, 실제 유사이동 양상을 반영하기 위해 입도 분포 효과를 적용하였다.

유사량 산정기법을 슬로바키아의 다뉴브강에 적용하였다. 슬로바키아의 다뉴브강의 소류사 측정 자료를 통해 제시한 기법의 적용성을 검증 할 수 있었다. MMPM 공식과 CL 공식을 적용 비교한 결과 두 공식 모두 측정 자료와 유사하게 산정됨을 볼 수 있었다. CL공식은 소류력이 작은 지점에서도 소류사량 산정이 가능하여 하천에서 실측된 소류사량의 횡방향 분포와 유사한 결과를 도출하였다.

유사량 산정기법을 국내에서는 모래하천인 남한강에 적용하였다. CL 공식에 의한 소류사량과 부유사량을 합하여 총유사량을 산정하였다. 계산 결과, 소류사는 총유사의 약 7%를 차지하는 것으로 나타났다. 유량 변화에 따른 유사량의 변화를 계산하여 실측치와 비교하였는데, 산정기법에 의한 유사량 예측 결과가 실측치와 매우 근사하게 일치하는 것으로 나타났다.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 3차원 유동해석과 유사량 및 하상변동 예측

본 연구에서 개발한 3차원 수치모형의 검증은 위해서 국내 하천에 적용하여 검증하는 것이 가장 좋은 방법이라 할 수 있으나 실제 하천에 대하여 정확한 지형, 유속, 유사량, 하상변동량이 측정된 자료를 구하기 매우 어려운 실정이다. 따라서 기 측정된 자료가 있는 복잡한 형상의 실내 실험자료를 찾아 모의하고 비교분석하여 수치모형의 정확성을 검증하고 추가적으로 국내하천에 적용하여 대상하천의 특성을 잘 모의하는지 검토하는 것으로 수치모형의 적용성을 검증하는 것이 대안으로 고려된다.

1. 흐름모의

일반적으로 국내하천의 대부분은 일자형 혹은 만곡형 수로의 형태를 가지고 있으며 지표면에 연직방향으로 특이한 형상을 보이는 하천은 일반적으로 찾기 힘들며 그런 특성의 형상을 가진 지형자료를 구하는 것은 더욱 힘들다. 따라서 대부분의 하천에서 주흐름방향과 횡방향 흐름이 하천 흐름의 특성을 지배한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 주흐름방향과 횡방향 흐름이 가장 크게 변동되는 180도로 꺾이는 수로에 적용하여 모의하였다.

Rozovskii (1961)의 180도 꺾인 실내실험수로에 적용하였으며 기본 제원은 표 8.1에 제시하였고 각 값이 의미하는 것은 그림 8.1에 도시하였다. 두 실험 모두 직사각형 수로이고 벽은 매끈한 벽을 사용하였다. 두 실험은 모두 꺾이는 외측 반지름이 1.2 m로 동일하지만 곡률내측반지름 대 폭비를 각각 0.5와 2로 차이를 두어 그 영향을 알아보았다. 수로 입구와 출구의 경계조건에 대하여 흐름방향으로 변화량이 없도록 하여 중력항과 하상전단응력에 의해 흐름이 계산되도록 하였다, 실험에 측정된 수심과 이를 통해 계산된 내부흐름으로 산정한 유량이 실험에서 사용된 유량과 일치하는지도 검증하였다.

표 8.1 Rozovskii (1961)의 실험제원

번호	R (m)	r (m)	B (m)	유량 (cms)	수심 (m)
1	1.2	0.4	0.8	0.0123	0.06
6	1.2	0.8	0.4	0.0052	0.05

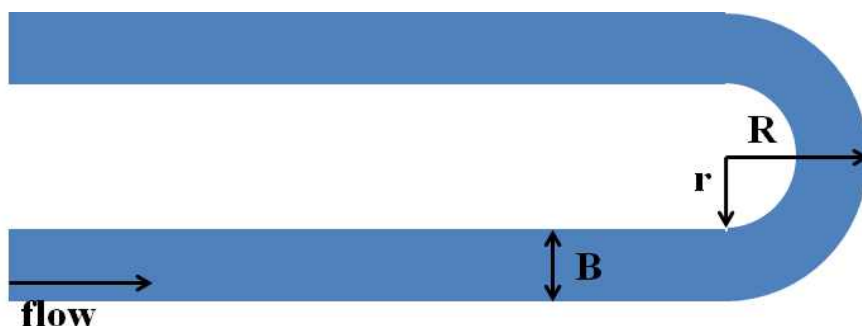


그림 8.1 Rozovskii (1961)의 실험제원

Rozovskii (1961)의 실험 1번 수로에서 수심평균 주 흐름방향 및 횡방향 유속분포를 벡터장으로 도시하여 그림 8.2 에 실험자료와 함께 비교하였다. 본 계산에서 산정된 유량과 실험에 측정된 유량과의 차이는 약 5% 이내로 양호한 편이고 벡터장을 보면 전반적인 양상을 잘 모의하는 것을 볼 수 있다. 이 흐름의 양상을 보면 유입부에서는 평범한 대칭포물선 형태의 유속분포를 보이지만 0도 지점 (꺾이는 구간에 진입하는 지점) 전부터 꺾이는 수로 내측부분이 가속되기 시작하며 90도 지점 (꺾이는 구간의 정점)에서까지 내측 부분이 가속되었다가 이후 점차 외측이 가속되며 180도 지점 (꺾이는 구간을 빠져나오는 지점) 이후는 외측이 내측보다 더 빠르게 흘러가는 것을 볼 수 있다.

Rozovskii (1961)의 실험 6번 수로에서 수심평균 주 흐름방향 및 횡방향 유속분포를 벡터장으로 도시하여 그림 8.2 에 실험자료와 함께 비교하였다. 실험 6번 수로의 모의결과 역시 실험 1번과 마찬가지로 실험에서 보이는 양상을 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 실험 6번 수로 역시 0도 지점에서 들어가기 전에 내측이 가속되었다가 180도 지점을 지나가면서 외측이 가속되는 현상은 실험 1과 동일하지만 90도 지점에서 내측 부분 유속이 빨랐던 실험 1과는 달리 실험 6에서는 거의 대칭형 포물선을 보이는 것을 볼 수 있다.

두 실험 모두 180도 꺾이는 수로이지만 그러한 차이를 보이는 것은 실험 1번 수로가 6번 수로에 비해 급하게 꺾이기 때문이다. 만곡부에 도입하게 되면 외측은 벽에 막히고 내측은 확장되므로 흐름이 내측으로 집중되어 유속이 빠른 구간을 만들며 꺾이게 되나 만곡지점을 지나면서 만곡에 의해 생성된 원심력에 의해 만곡구간을 빠져나왔을때는 외측이 가속되어있는 상태가 된다. 그러므로 곡률내측반지름 대 폭비가 얼마나 큰가에 따라 그 두가지의 영향이 달라져 만곡구간 내부의 흐름상태가 바뀌는 것이다.

그림 8.3은 난류운동에너지로 산정된 전단속도의 분포로 실험 1번 수로에 0도 지점에 들어가는 부분 내측부터 생성되는 큰 전단속도영역이 위에서 설명한 양상을 잘 보여준다. 본 연구에서 개발한 3차원 수치모형이 실험에서 측정된 물리현상을 잘 모의하는 것을 보아 충분히 실제 하천에서 활용가능한 모형이라 할 수 있다.

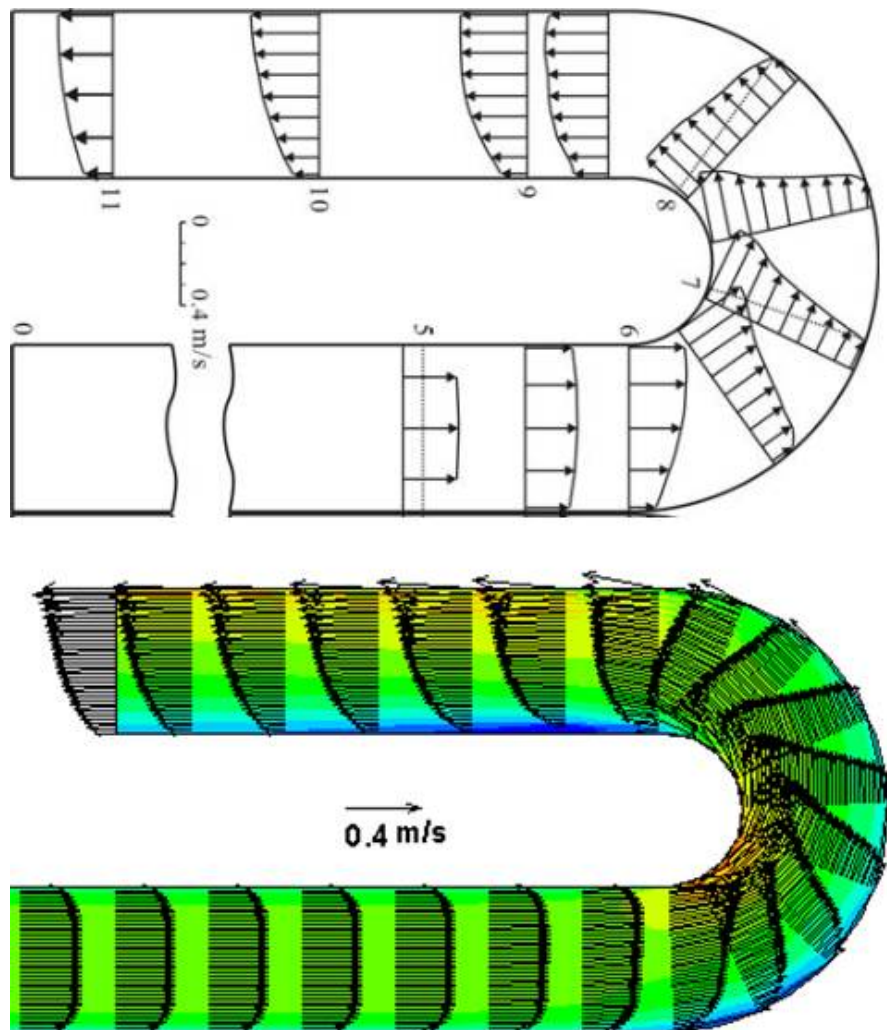


그림 8.2 x, y방향 수심평균 유속분포
(Rozovskii의 실험 (1961) 1)

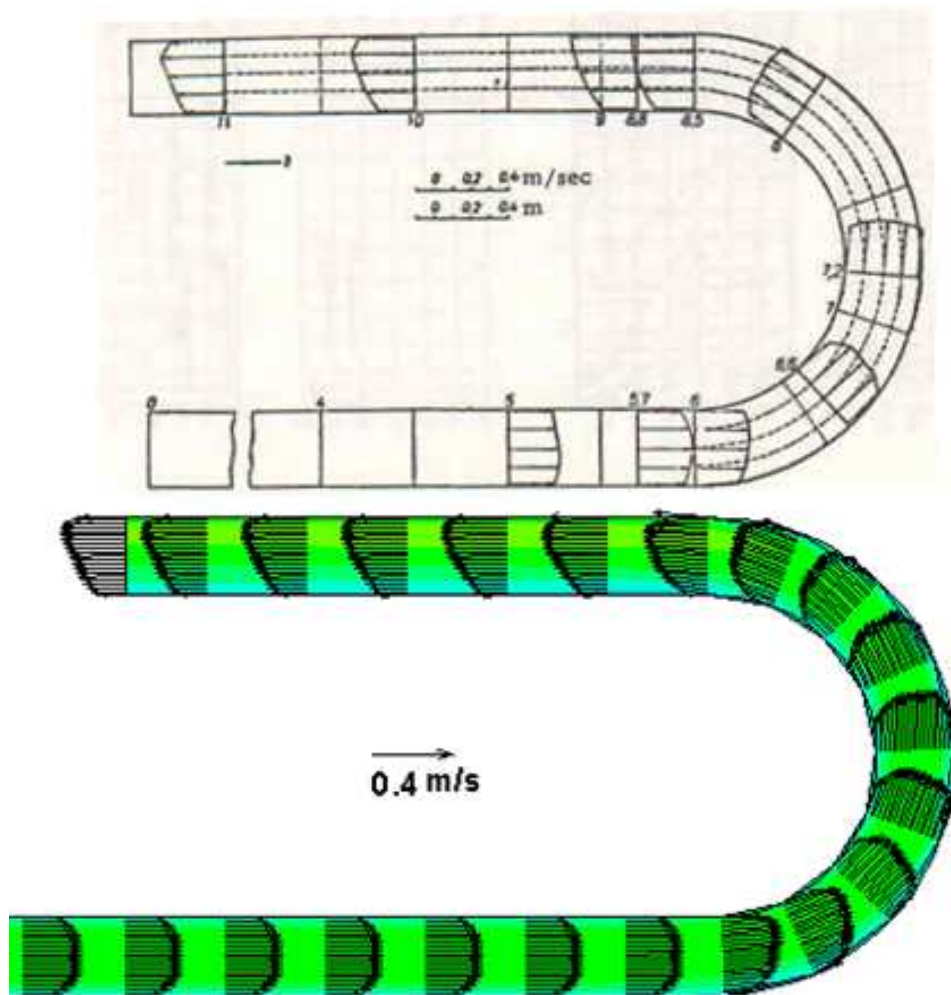


그림 8.3 x, y방향 수심평균 유속분포
(Rozovskii (1961)의 실험 6)

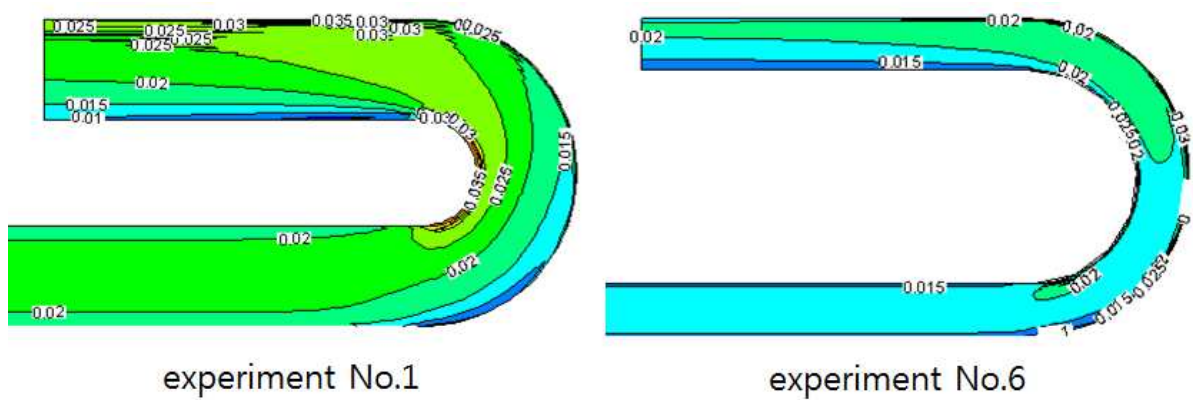


그림 8.4 전단속도 분포 (Rozovskii (1961)의 실험)

2. 하상변동 모의

가. 180도 만곡수로

하상변동 모의를 위하여 Sutmuller와 Glerum (1980)의 180도 꺾인 실험실험수로에 적용하였으며 기본 제원은 표 8.2에 제시하였고 각 값이 의미하는 것은 그림 8.5에 도시하였다. 하상재료는 대표입경이 0.78 mm인 모래를 사용하였다.

표 8.2 Sutmuller와 Glerum (1980)의 실험제원

R (m)	r (m)	B (m)	유량 (cms)	수심 (m)
5.1	3.4	1.7	0.17	0.2

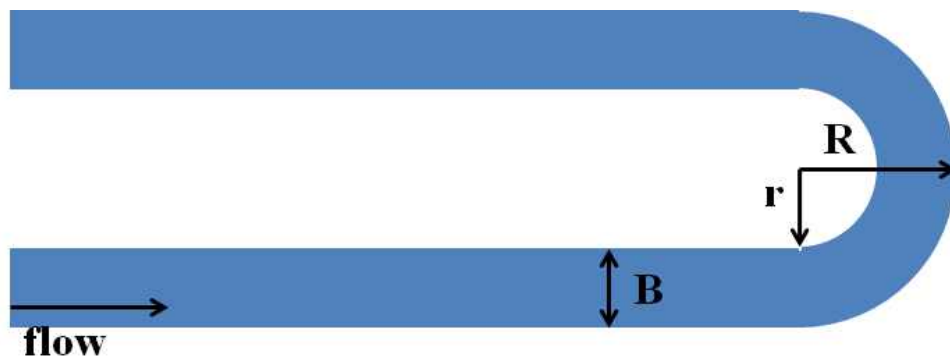


그림 8.5 Sutmuller와 Glerum (1980)의 실험제원

3차원 수치모형을 Sutmuller와 Glerum (1980)의 실험 수로에 적용하여 3방향 유속분포를 벡터장으로 그림 8.6 에 도시하였다. 주 흐름방향 유속이 내측이 가속되었다가 외측이 가속되는 양상이 Rozovskii (1961)의 실험결과와 유사하게 진행된다.

그림 8.7은 시간이 경과함에 따라 하상이 변동하는 양상을 도시하고 실측자료와 함께 비교한 것이다. 그림 8.4에서 전단속도는 내측에서 최대값이 발생하여 내측이 침식될 것으로 보였으나 모의 결과 만곡부 외측에서 침식이 진행되고 내측에서 퇴적이 발생하였다. 이 양상은 Sutmuller와 Glerum (1980)의 실측결과와 잘 맞는 것을 볼 수 있다.

다음과 같은 양상을 보이는 이유에 대하여 분석하기 위하여 만곡부 단면 흐름분포를 그림 8.8에 도시하였다. 단면에서 수심평균시 횡방향 흐름 분포는 거의 0에 가까우나 바닥근처에서 흐름이 내측으로 몰린다. 바닥근처 흐름에 큰 영향을 받는 유사가 내측으로 몰리기 때문에 몰린 유사는 그대로 쌓이게 되고 유사가 충분히 유입되지 않는 외측은 그대로 침식하게 되는 것이다. 이 현상은 1, 2차원 모형으로 모의할 수 없는 현상이기에 복잡한 형상에 대한 하상변동은 3차원 수치모형이 중요하다. 또한 그림 8.7의 실험측정결과 역시 모의결과와 매우 잘 맞는 결과를 보여 본 연구의 모의결과가 성공적으로 수행된 것을 알 수 있다.

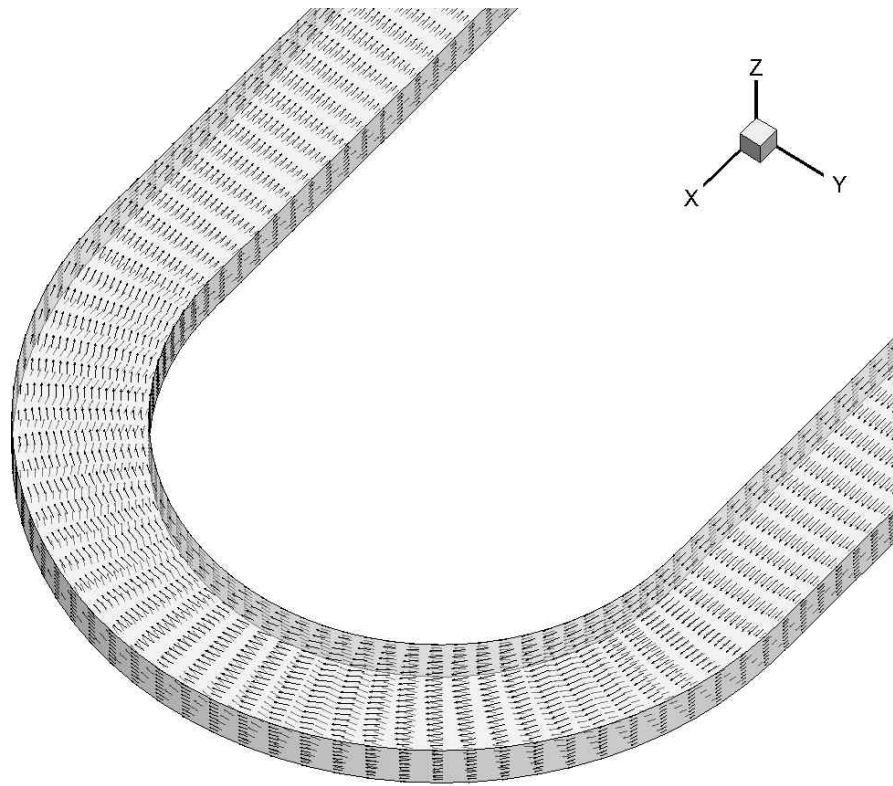


그림 8.6 평균유속 분포 (Sutmuller와 Glerum (1980)의 실험)

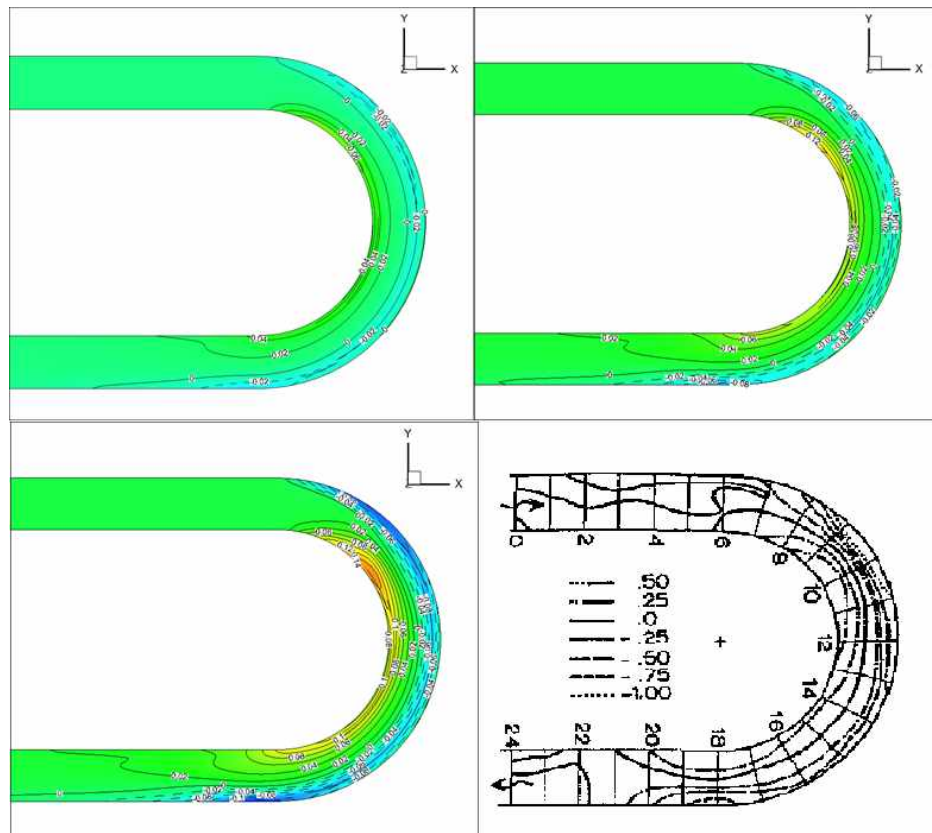


그림 8.7 시간경과에 따른 하상변동량
(Sutmuller와 Glerum (1980)의 실험)

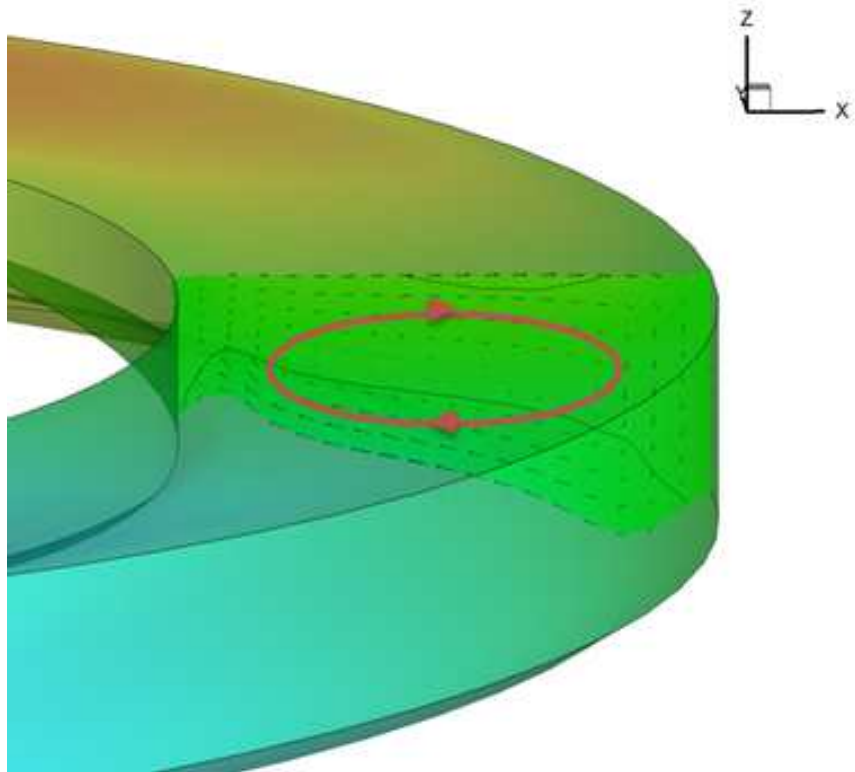


그림 8.8 만곡 정점부에서 이차류 양상
(Sutmuller와 Glerum (1980)의 실험)

나. 90도 만곡수로

하상변동 모의를 위하여 Matsuura (2004)의 90도 꺾인 실내실험수로에 적용하였으며 기본 제원은 표 8.3에 제시하였고 각 값이 의미하는 것은 그림 8.9에 도시하였다. 하상재료는 대표입경이 0.85 mm인 모래를 사용하였다. 실험수로에서 하상변동 예측을 위해 Van Rijn (1984)의 유사량 산정공식을 이용하였다.

표 8.3 Matsuura (2004)의 실험제원

R (m)	r (m)	B (m)	유량 (cms)	수심 (m)
0.902	0.672	0.46	0.029	0.1

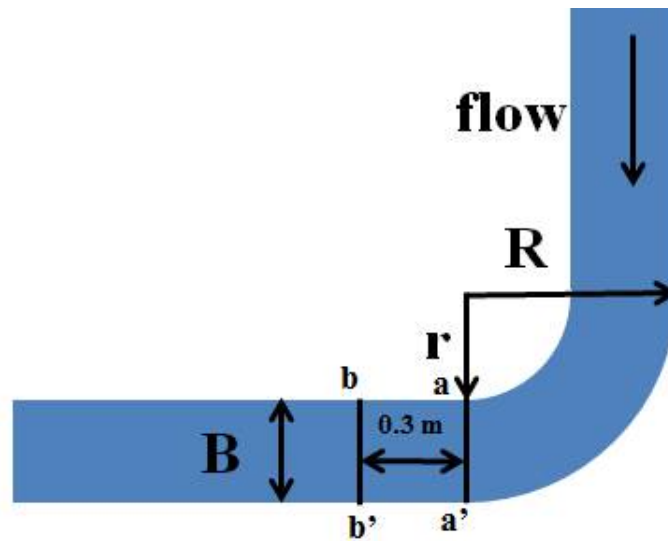


그림 8.9 Matsuura (2004)의 실험제원

그림 8.10은 3차원 수치모형을 Matsuura (2004)의 실험 수로에 적용하여 유속벡터도를 도시한 것이다. 앞서 모의를 수행한 두 가지 경우의 180도 만곡수로 실험과 유사하게 만곡이 되는 시점부터 주 흐름방향 유속이 내측이 가속되었다가 만곡이 끝날 때 외측이 가속되는 양상을 보이고 있다. 그러나 꺾이는 각이 작아 원심력이 작게 발생하고, 가속되는 정도의 크기도 작게 산정된다.

하상변동 결과를 그림 8.11에 도시하였다. 또한 실측결과와 함께 비교하였다. 실측결과를 보면 그림 8.7과 같이 만곡 내측이 퇴적하고 외측이 침식한다. 본 연구에서 사용한 3차원 수치모형의 모의결과 역시 이 현상을 잘 모의하고 있다. 그러나 실측결과에서는 전반적으로 침식이 우세하게 발생하고 내측에 약간 퇴적하는 양상을 보이나 모의결과에서는 상대적으로 침식과 퇴적이 비슷하게 발생하며 침식량을 과소산정하였다. 이것은 유사량 산정공식에서 소류력이 상당히 작을 경우 오차가 커지는 문제에 기인한 것으로 추측할 수 있다.

수로에서 만곡이 끝나는 지점과 그 지점으로부터 0.3 m 지나간 지점의 단면 흐름을 그림 8.12에 도시하였다. Suttmuller와 Glerum (1980)의 실험수로와 마찬가지로 자유수면 근처에서 흐름이 외측으로 이동하지만 바닥근처에서 흐름이 내측으로 몰리는 현상을 보이고 있다. 유사는 바닥근처 흐름에 큰 영향을 받으므로 유사가 내측으로 이동하기 때문에 내측이 쌓이게 되고 유사가 충분히 유입되지 않는 외측은 침식하게 된다. 만곡수로에서 일어나는 일반적인 현상으로 본 3차원 수치모형이 이를 잘 모의하는 것으로 볼 수 있다.

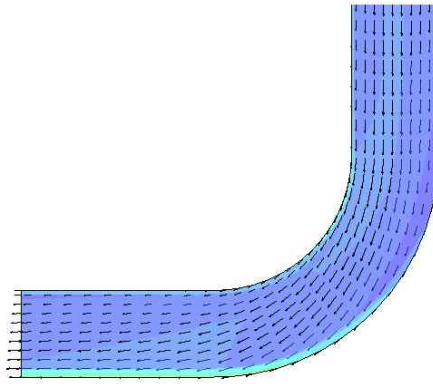


그림 8.10 평균유속 분포
(Matsuura (2004)의 실험)

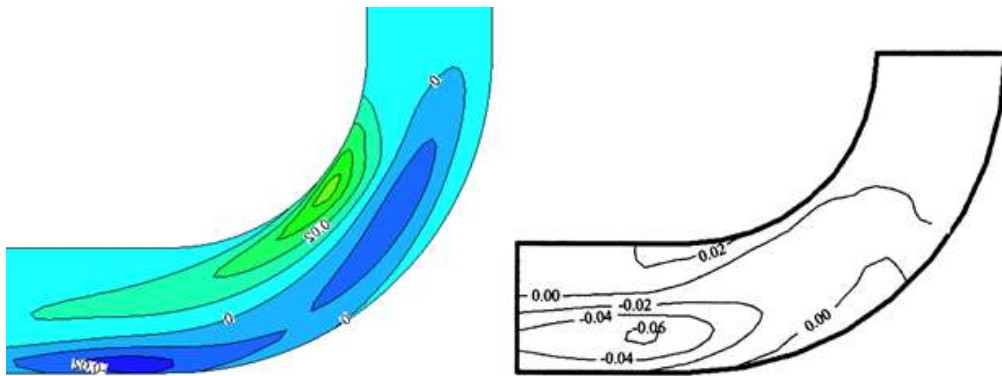


그림 8.11 하상변동량 분포 (Matsuura (2004)의 실험),
모의결과 (좌)와 실측결과 (우)

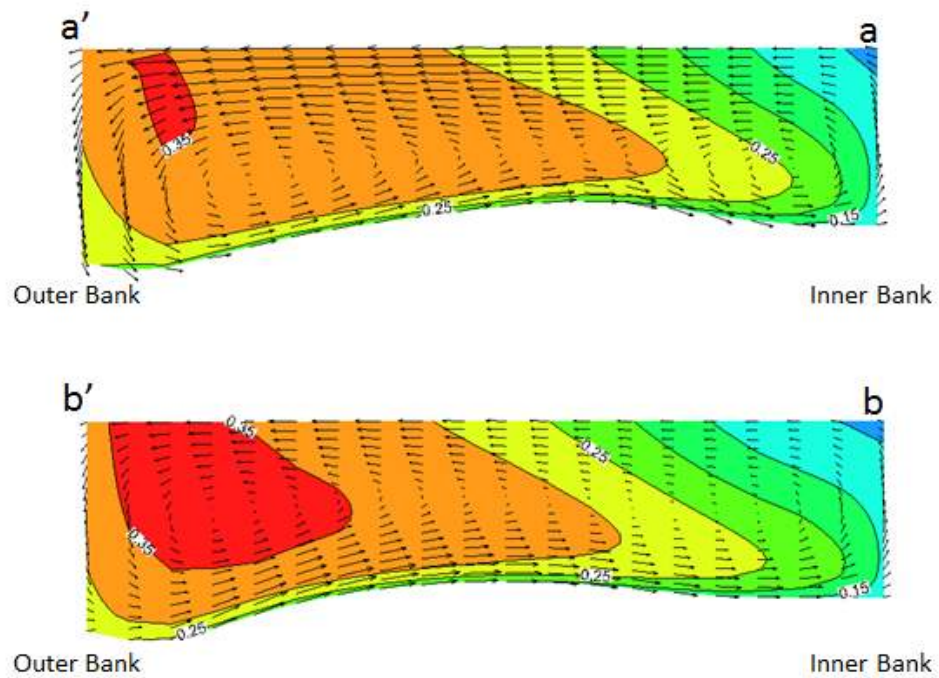


그림 8.12 내부 흐름 분포 (Matsuura (2004)의 실험)

제2절 국내 하천 환경에 적합한 유사량 산정기법

1. 금강

유량조사사업단 (2007)은 국내하천에서 침식, 유송, 퇴적 작용을 거쳐 하천의 한 지점을 통과하는 하천유사량과 유량과의 관계를 파악하고자 여주, 적성, 낙동, 왜관, 공주, 구례2 수위관측소의 6개 지점에서 유사량을 측정하였다.

본 연구를 통해 제시된 유사량 산정 방법을 적용하기 위해 유량조사사업단 (2007)에 의해 수행된 금강 수계에 위치한 공주 지점의 유사량 측정자료를 이용하였다. 유량-유사량관계곡선식을 개발하기 위해서는 유사량 측정과 병행하여 수위, 유속, 측정수심, 수면폭, 수면경사, 수온 등과 같은 수리량 측정이 수반되어야 하며 이는 공주수위관측소에서 수행되었다 (그림 9.1).



그림 9.1 공주수위관측소 (유량조사사업단, 2007)

금강대교 상류 140 m에 돌보가 위치했고 금강대교 하류에 백제대교가 위치하며 상류에 공주대교가 위치해 있다. 금강대교 상 하류방향으로 약 200 m 부분과 공주 지점의 목자관 수위표 부근인 양쪽에서 광과기를 이용하여 수면경사를 산정하였다. 좌안부에는 일부 사수역이 있고 흐름이 치우쳐져 있어 좌안부에서 유심부를 중심으로 5개의 측선을 배치하여 유사량을 산정하였다.

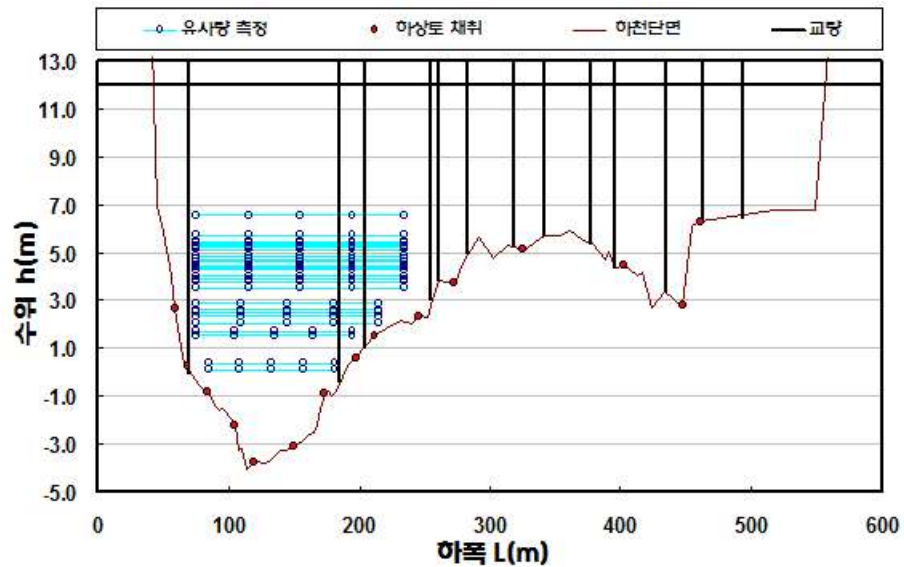


그림 9.2 유사량 측정위치 및 하상토 채취위치
(유량조사사업단, 2007)

공주 지점에서 홍수 전 (4월)·후 (11월)로 2회 씩 채취된 하상토를 채분석법으로 입도분포 분석을 실시하였다. 그림 9.3은 입도분포분석에 따른 입경누적분포도를 나타내고 있는데 홍수 전·후 값이 어느정도 차이가 나고 있다 (유량조사사업단, 2007). 홍수 전·후 및 평균에 대한 주요 입경을 표 9.1에 나타내었다.

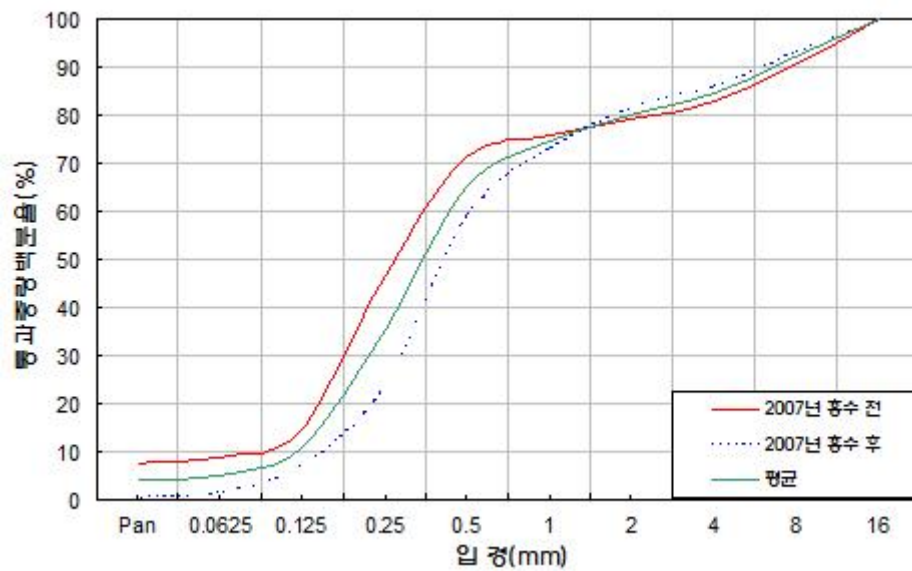


그림 9.3 하상토 입도분포곡선 (유량조사사업단, 2007)

표 9.1 공주 하상토 주요 입경 (유량조사사업단, 2007)

측정시점	D50 (mm)	D65 (mm)	D90 (mm)
홍수 전	0.27	0.40	7.72
홍수 후	0.41	0.62	6.11
평균	0.34	0.50	6.78

유량조사사업단 (2007)에 의하면 공주 지점의 수면경사는 0.0000881이며, 최대 유량은 $2,750 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 이때의 수위는 6.35 m 이다. M-S공식을 이용하여 산정한 조도계수는 0.013이며 수위-유량 자료를 이용하여 유량 횡분배법을 통해 결정한 조도계수는 0.02이다. 그림 9.4는 조도계수 산정결과를 나타낸 것이다. 유량 $1,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하에서 실측값과 계산치가 차이가 나는 것은 하천의 배수효과에 의한 것으로 생각할 수 있다.

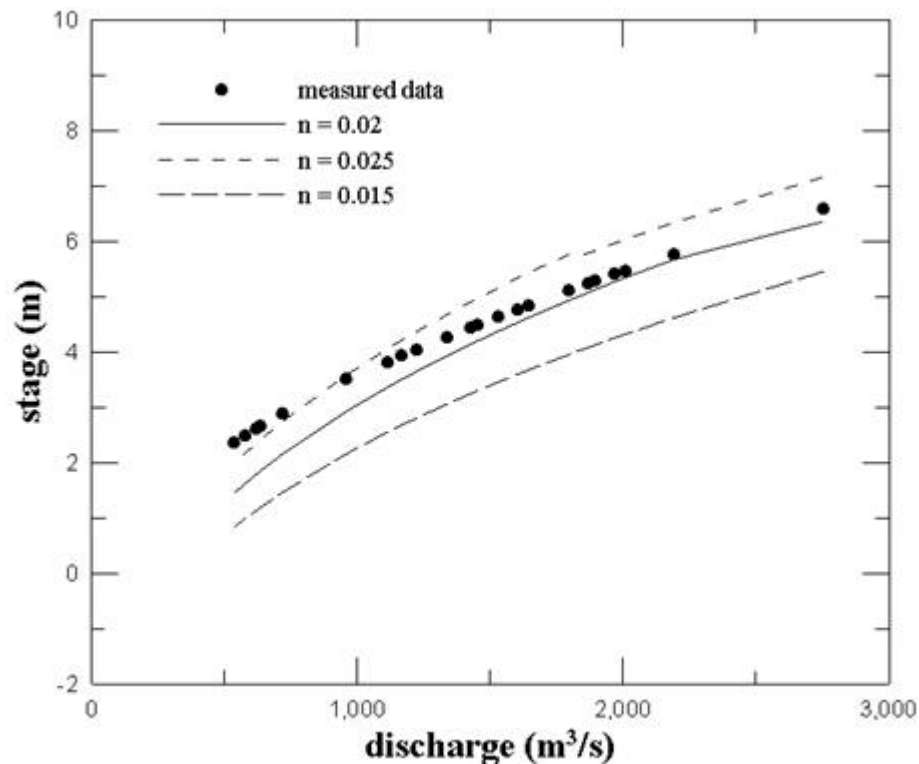


그림 9.4 조도계수에 따른 수위-유량 관계곡선 (공주)

유량 횡분배법을 이용하여 최대유량 $2,750 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서의 유속 및 단위 폭 당 유량을 그림 9.5에 나타내었는데 유속은 최대수심 지점에서 가장 빠르게 계산되었으며 우안에 비해 좌안에서 유량이 더 크게 발생한다. 그림 9.6은 산정된 소류사량 공식을 적용하기 위해 Einstein 분할법을 이용한 표면마찰에 의한 수심을 계산한 결과이며 전체 수심의 약 65%가 입자에 의한 영향을 받는 수심이다.

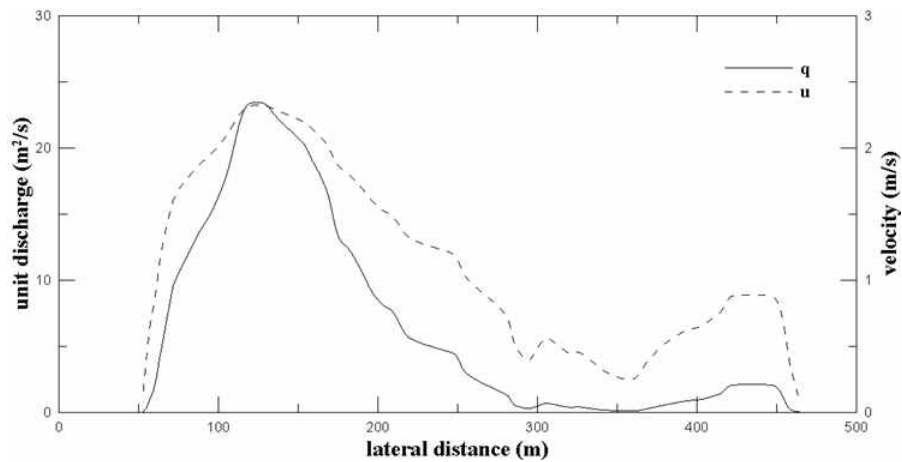


그림 9.5 유속 및 단위 폭 당 유량 분포 (공주)

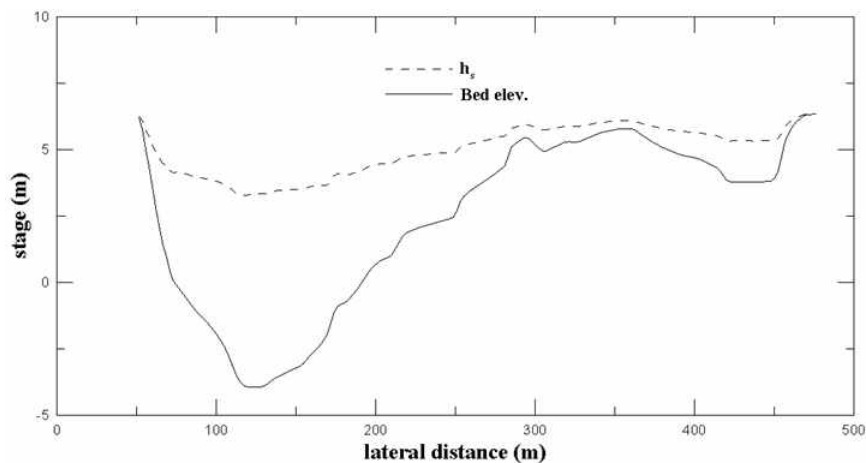


그림 9.6 입자에 의한 표면마찰이 부담하는 수심 (공주)

최대 유량에서의 소류사 및 부유사를 제시된 방법을 통해 산정하였다. 단위 폭 당 유사량 분포를 나타낸 그림 9.7에서 유사량 또한 최대수심에서 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 유사이동에 있어 소류사량은 총 유사량의 약 6%를 차지하는 것으로 계산되었다. 최대수심인 10.2 m에서 입도분포 고려한 부유사는 그림 9.8과 같다. 차폐효과 계수를 $D_i/D_{50} < 1$ 인 경우 $b = 0.2$ 로 계산하고 $D_i/D_{50} > 1$ 인 경우 $b = 0.7$ 로 계산하여 총 유사량을 적절하게 산정하였다.

그림 9.9는 유량조사사업단 (2007)에 의한 실측값으로부터 총유사량을 산정하는 수정 아인슈타인방법에 의한 값과 본 연구에 의해 계산된 결과값을 비교한 것이다. 수정아인슈타인방법에 의한 실측값을 회귀분석한 유량-유사량 관계곡선식과 본 연구를 통해 산정된 uniform sediment와 mixture에 의해 산정된 유량-유사량 관계곡선이 실측값의 약 1.5배 정도 크게 산정하는 것을 알 수 있다. 단 mixture에 의해 산정된 유사량은 고유량과 저유량에서의 유사량 편차를 감소시키는 것을 볼 수 있다.

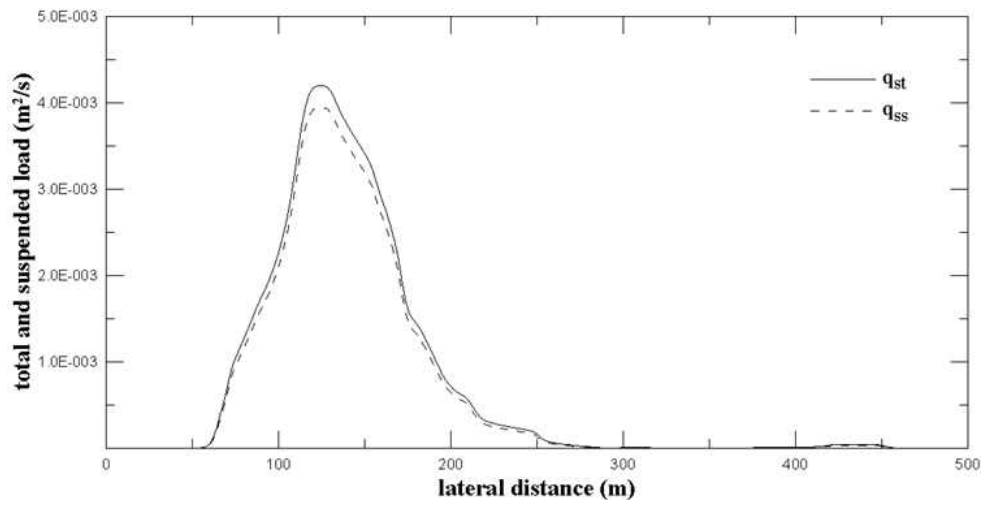


그림 9.7 단위 폭 당 유사량 분포 (공주)

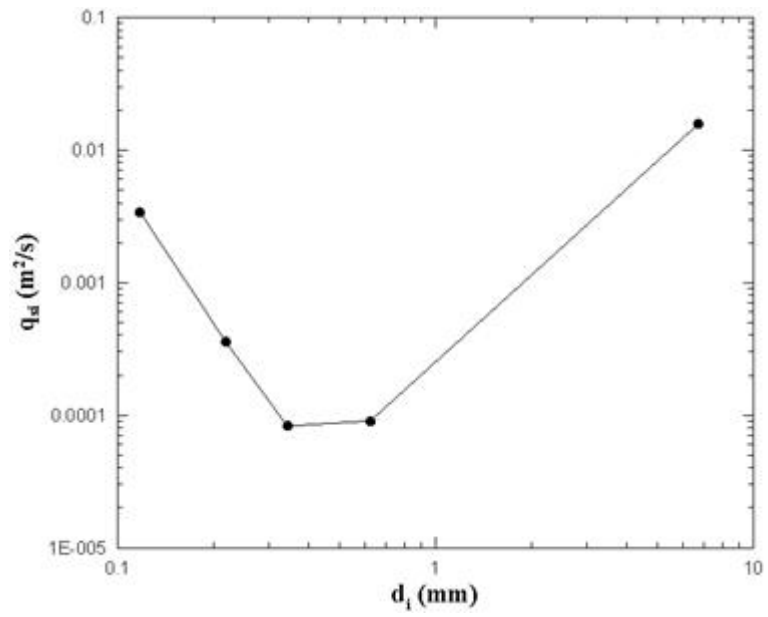


그림 9.8 입자별 단위 폭 당 부유사량 (공주)

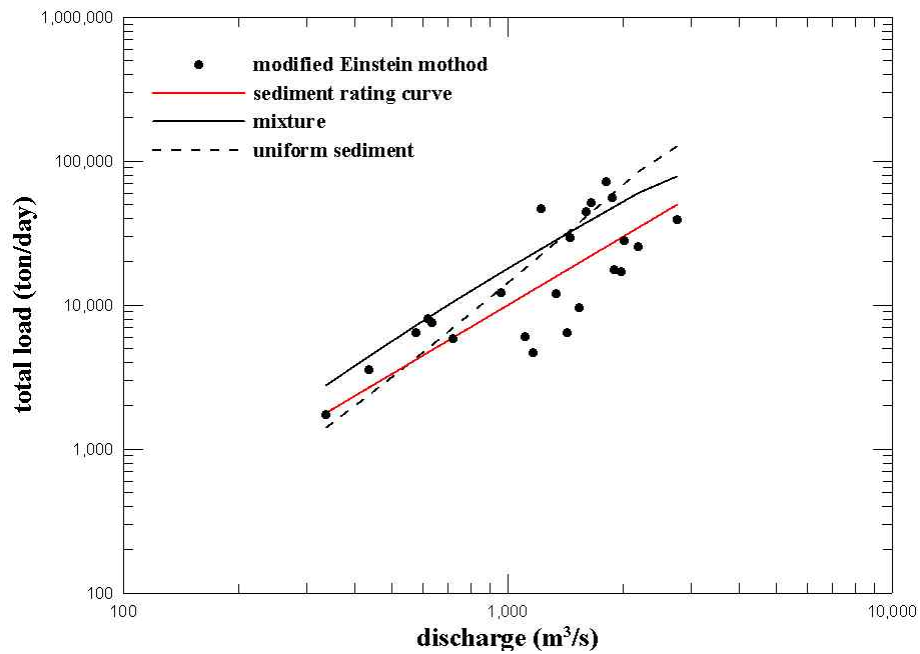


그림 9.9 유량-유사량 관계곡선 (공주)

2. 낙동강

본 연구를 통해 제시된 유사량 산정 방법을 적용하기 위해 유량조사사업단 (2007)에 의해 수행된 낙동강 수계에 위치한 낙동 지점의 유사량 측정자료를 이용하였다. 유량-유사량관계곡선식을 개발하기 위해서는 유사량 측정과 병행하여 수위, 유속, 측정수심, 수면폭, 수면경사, 수온 등과 같은 수리량 측정이 수반되어야 하며 이는 낙동수위관측소에서 수행되었다 (그림 9.10).



그림 9. 10 낙동수위관측소 (유량조사사업단, 2007)

관측지점은 낙단교 부근이고 난간의 높이는 적절하나 인도가 확보되지 않고, 대형차량의 통행이 잦은 구간이다. 하폭은 평수시 280 m이나 홍수시에는 400 m까지 확장된다. 낙단교에서 상류지점에서 측정하였다.평수기의 경우 광파측량기를 이용하여 측정하였고

홍수기의 경우 하류 약 650 m에 위치한 낙단대교 교각에 설치된 보조수위표를 이용하여 측정하였다. 측선배치는 수위에 따른 단면적의 변화를 고려하여 유심부를 중심으로 등간격으로 배치하였다.

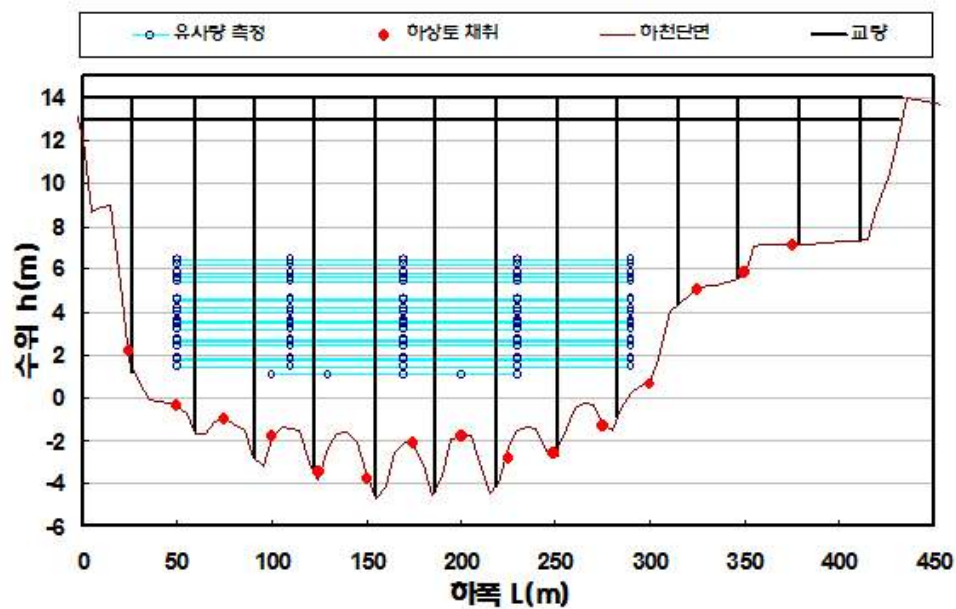


그림 9. 11 낙동 유사량 측정위치 및 하상토 채취위치
(유량조사사업단, 2007)

낙동 지점에서 홍수 전 (4월)·후 (11월)로 2회 씩 채취된 하상토를 채분석법으로 입도분포 분석을 실시하였다. 그림 9.12은 입도분포분석에 따른 입경누적분포도를 나타내고 있는데 홍수 전·후 값이 작은 차이가 나고 있다 (유량조사사업단, 2007). 홍수 전·후 및 평균에 대한 주요 입경을 표 9.2에 나타내었다.

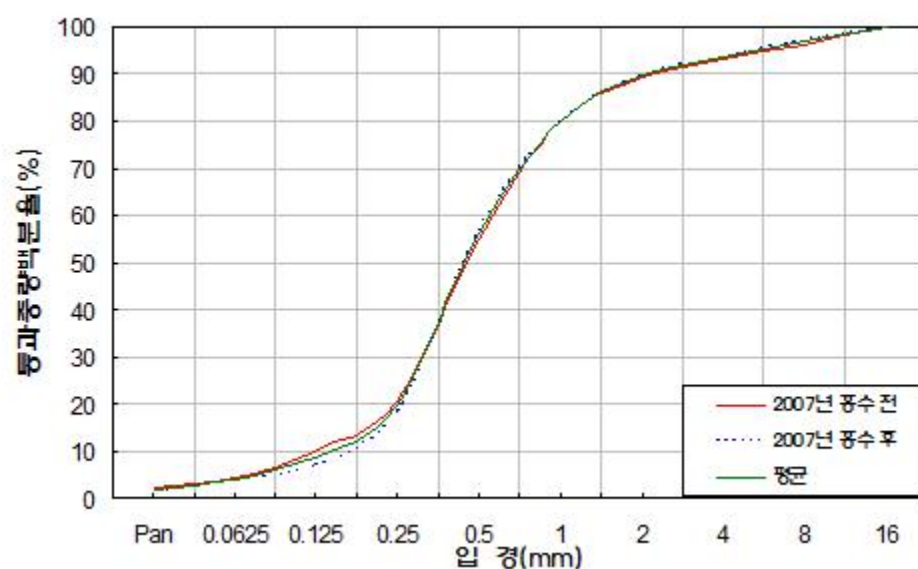


그림 9. 12 낙동 하상토 입도분포곡선 (유량조사사업단, 2007)

표 9.2 낙동 하상토 주요 입경 (유량조사사업단, 2007)

측정시점	D50 (mm)	D65 (mm)	D90 (mm)
홍수 전	0.46	0.70	2.49
홍수 후	0.47	0.67	2.09
평균	0.46	0.68	2.11

유량조사사업단 (2007)에 의하면 낙동 지점의 하상경사는 0.000237이며, 최대 유량은 4,763 m^3/s 으로 이때의 수위는 6.4 m 이다. M-S공식을 이용하여 산정한 조도계수는 0.013이며 수위-유량 자료를 이용하여 유량 횡분배법을 통해 결정한 조도계수는 0.035이다. 그림 9.13은 조도계수 산정결과를 나타낸 것이다. 유량 2,000 m^3/s 이하에서 실측값과 계산치가 차이가 나는 것은 하천의 배수효과에 의한 것으로 생각할 수 있다.

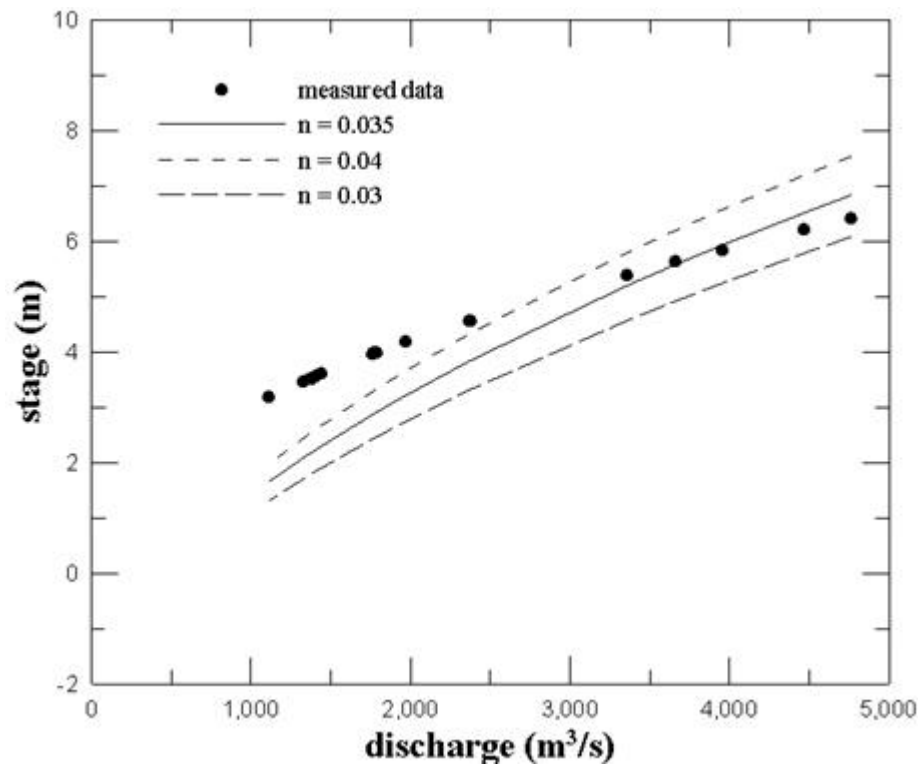


그림 9.13 조도계수에 따른 수위-유량 관계곡선 (낙동)

유량 횡분배법을 이용하여 최대유량 4,763 m^3/s 에서의 유속 및 단위 폭 당 유량을 그림 9.14에 나타내었는데 유속은 최대수심 지점에서 가장 빠르게 계산되었으며 우안에 비해 좌안에서 유량이 더 크게 발생한다. 그림 9.15는 산정된 소류사량 공식을 적용하기 위해 Einstein 분할법을 이용한 표면마찰에 의한 수심을 계산한 결과이며 전체 수심의 약 28%가 입자에 의한 영향을 받는 수심이다.

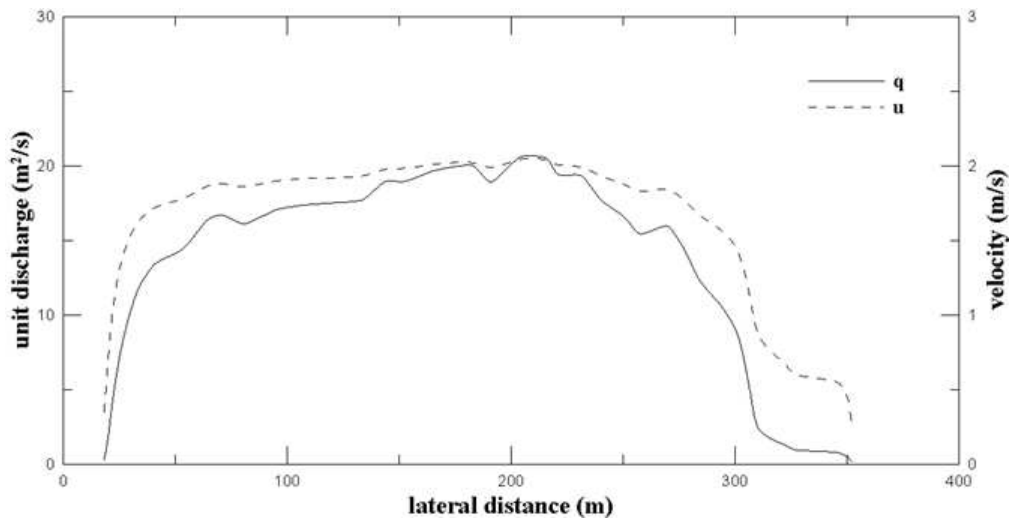


그림 9.14 유속 및 단위 폭 당 유량 분포 (낙동)

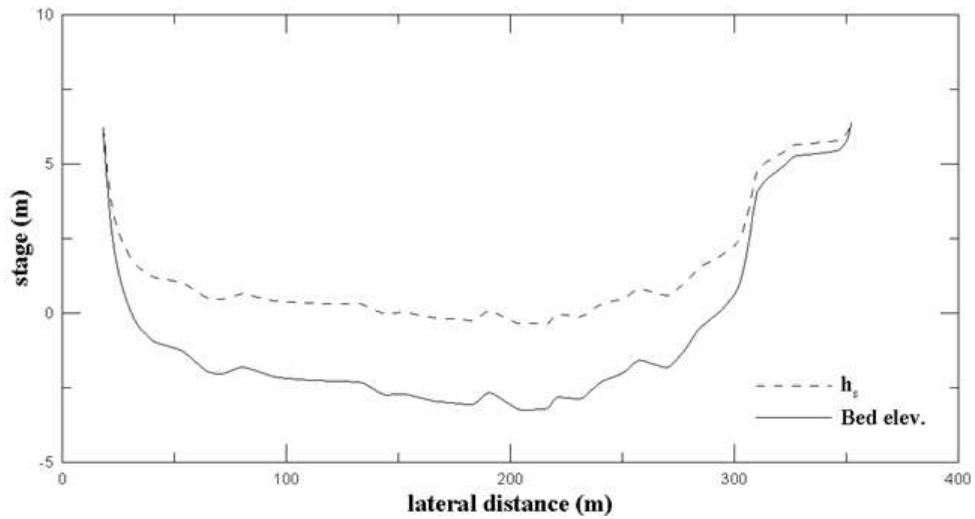


그림 9.15 입자에 의한 표면마찰이 부담하는 수심 (낙동)

최대 유량에서의 소류사 및 부유사를 제시된 방법을 통해 산정하였다. 단위 폭 당 유사량 분포를 나타낸 그림 9.16에서 유사량 또한 최대수심에서 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 유사이동에 있어 소류사량은 총 유사량의 약 5.3%를 차지하는 것으로 계산되었다. 최대수심인 9.3 m에서 입도분포 고려한 부유사는 그림 9.17과 같다. 차폐효과 계수를 $D_i/D_{50} < 1$ 인 경우 $b = 0.2$ 로 계산하고 $D_i/D_{50} > 1$ 인 경우 $b = 0.7$ 로 계산하여 총유사량을 적절하게 산정하였다.

그림 9.18은 유량조사사업단 (2007)에 의한 실측값으로부터 총유사량을 산정하는 수정아인슈타인방법에 의한 값과 본 연구에 의해 계산된 결과값을 비교한 것이다. 실측값을 회귀분석한 유량-유사량 관계곡선식과 본 연구를 통해 산정된 uniform sediment와 mixture에 의해 산정된 유량-유사량 관계곡선이 고유량에서 과다산정하고 저유량에서 과소산정하는 것을 볼 수 있다. mixture에 의해 산정된 유사량은 그 변화폭이 약간 감소하는 것을 볼 수 있다.

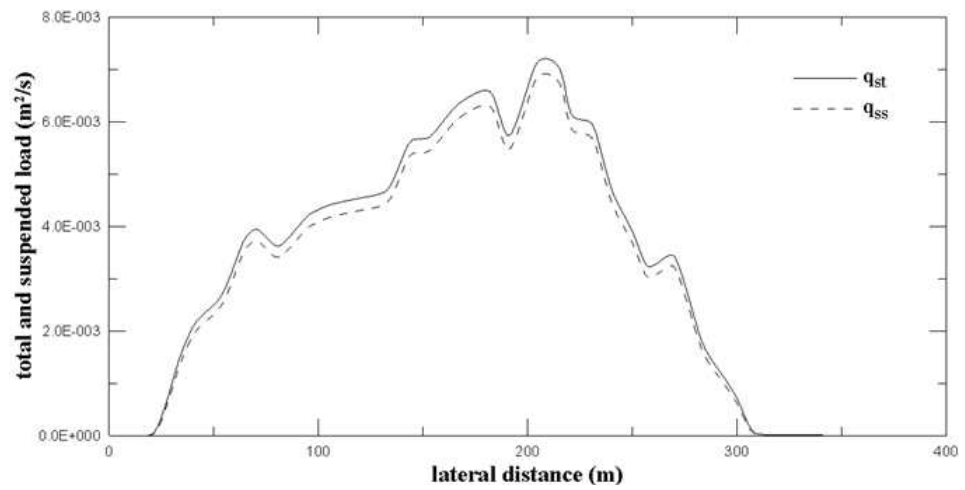


그림 9.16 단위 폭 당 유사량 분포 (낙동)

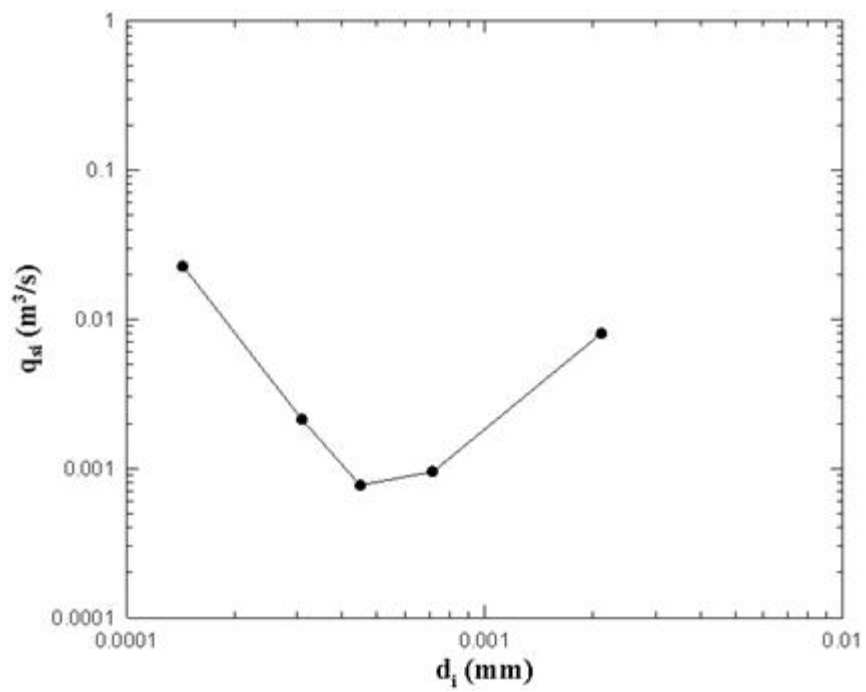


그림 9.17 입자별 단위 폭 당 부유사량 (낙동)

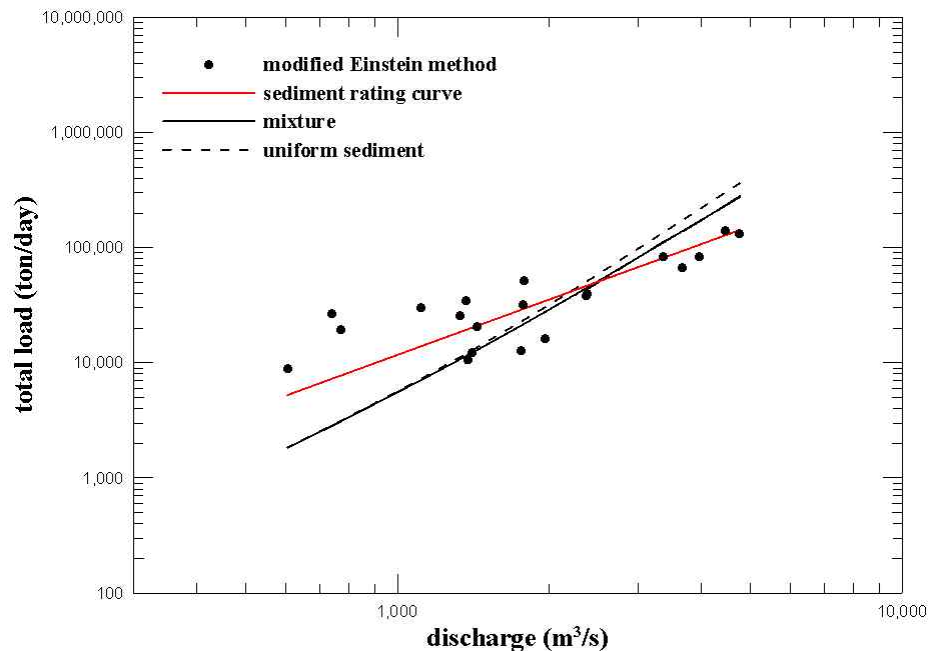


그림 9.18 유량-유사량 관계곡선 (낙동)

3. 임진강

본 연구를 통해 제시된 유사량 산정 방법을 적용하기 위해 유량조사사업단 (2007)에 의해 수행된 임진강 수계에 위치한 적성 지점의 유사량 측정자료를 이용하였다. 유량-유사량관계곡선식을 개발하기 위해서는 유사량 측정과 병행하여 수위, 유속, 측정수심, 수면폭, 수면경사, 수온 등과 같은 수리량 측정이 수반되어야 하며 이는 적성수위관측소에서 수행되었다 (그림 9.10).



그림 9.19 적성수위관측소 (유량조사사업단, 2007)

임진강은 한강의 제 1지류로서 한방도 중앙부에서 남북으로 길게 위치해있다. 북한의 함경남도 덕원군 마식령의 남계에서 발원하여 경기 파주시 탄현면 부근에서 한강에

합류하여 서해로 유입된다. 비룡대교 근처에서 측정하였다.

낙동 지점에서 홍수 전 (4월)·후 (11월)로 2회 씩 채취된 하상토를 채분석법으로 입도분포 분석을 실시하였다. 그림 9.20은 입도분포분석에 따른 입경누적분포도를 나타내고 있는데 홍수 전·후 값이 큰 차이가 나고 있다 (유량조사사업단, 2007). 홍수 전·후 및 평균에 대한 주요 입경을 표 9.3에 나타내었다.

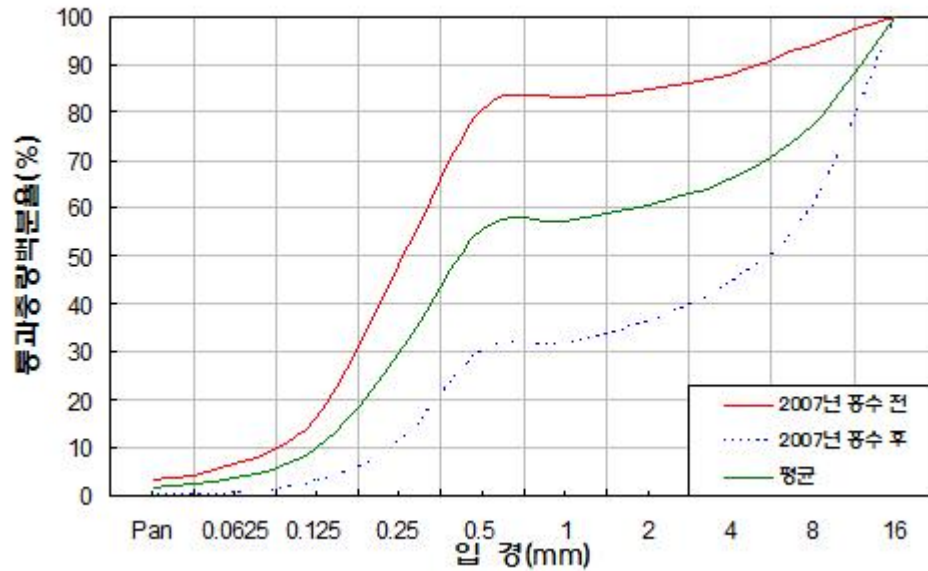


그림 9.20 적성 하상토 입도분포곡선 (유량조사사업단, 2007)

표 9.3 적성 하상토 주요 입경 (유량조사사업단, 2007)

측정시점	D50 (mm)	D65 (mm)	D90 (mm)
홍수 전	0.29	0.39	5.44
홍수 후	5.45	8.89	13.98
평균	0.42	3.66	11.75

유량조사사업단 (2007)에 의하면 적성 지점의 하상경사는 0.000428이며, 최대 유량은 10,691 m³/s으로 이때의 수위는 10 m 이다. M-S공식을 이용하여 산정한 조도계수는 0.020이며 수위-유량 자료를 이용하여 유량 횡분배법을 통해 결정한 조도계수는 0.030이다. 그림 9.13은 조도계수 산정결과를 나타낸 것이다. 검정된 값과 M-S공식에 의한 값의 차이는 하상형상 등의 추가 흐름저항을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

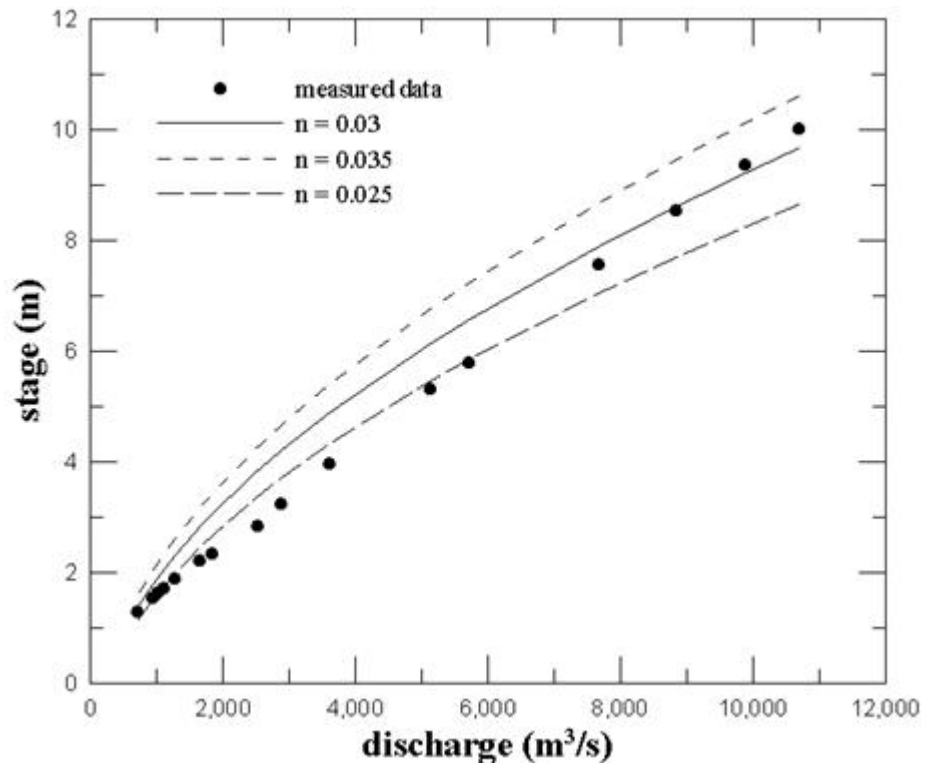


그림 9.21 조도계수에 따른 수위-유량 관계곡선 (적성)

유량 횡분배법을 이용하여 최대유량 10,691 m^3/s 에서의 유속 및 단위 폭 당 유량을 그림 9.22에 나타내었는데 횡방향 단위 폭 당 유량이 비교적 균일하게 분포한다. 그림 9.23은 산정된 소류사량 공식을 적용하기 위해 Einstein 분할법을 이용한 표면마찰에 의한 수심을 계산한 결과이며 전체 수심의 약 34%가 입자에 의한 영향을 받는 수심이다.

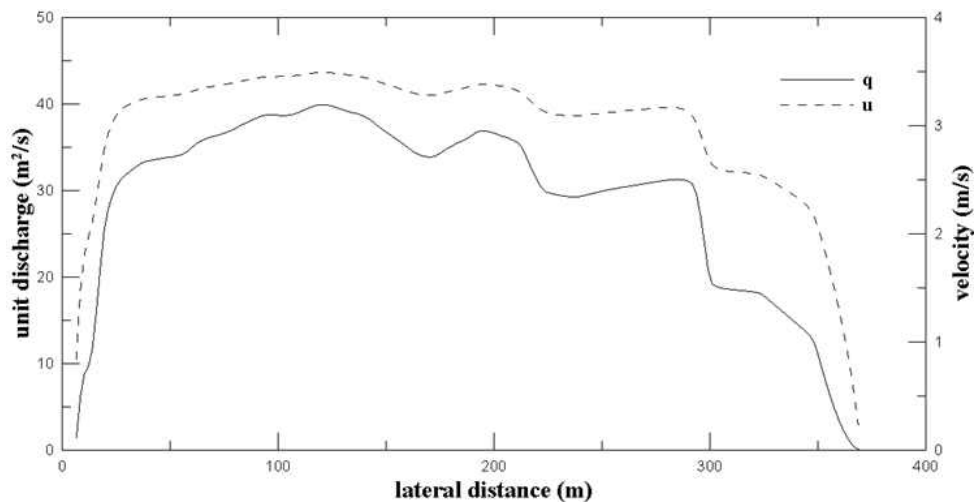


그림 9.22 유속 및 단위 폭 당 유량 분포 (적성)

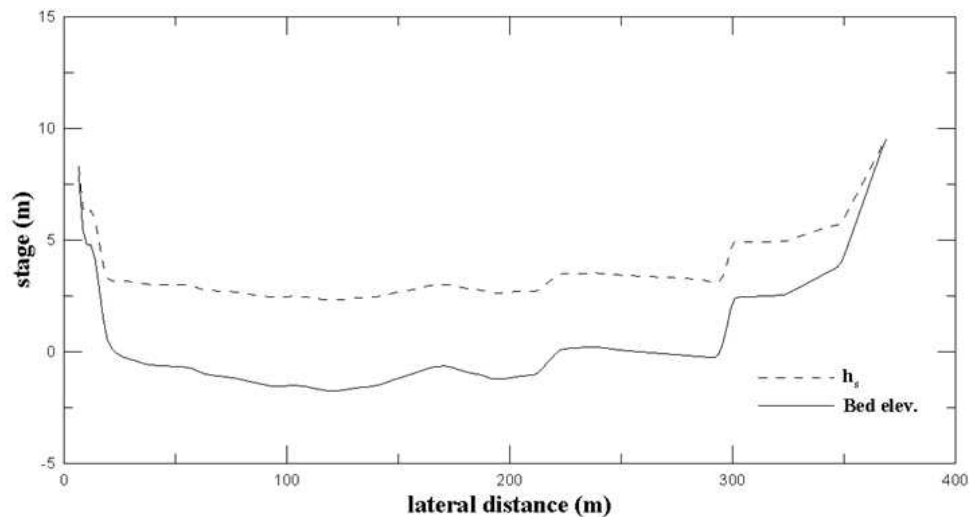


그림 9.23 입자에 의한 표면마찰이 부담하는 수심 (적성)

최대 유량에서의 소류사 및 부유사를 제시된 방법을 통해 산정하였다. 단위 폭 당 유사량 분포를 나타낸 그림 9.24에서 유사량 또한 최대수심에서 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 유사이동에 있어 소류사량은 총 유사량의 약 1.8%를 차지하는 것으로 계산되었다.

그림 9.25은 유량조사사업단 (2007)에 의한 실측값으로부터 총유사량을 산정하는 수정아인슈타인방법에 의한 실측값을 회귀분석한 유량-유사량 관계곡선식과 본 연구에 의해 계산된 결과값을 비교한 것이다. 유량-유사량 관계곡선식과 본 연구를 통해 산정된 uniform sediment에 의해 산정된 유량-유사량 관계곡선은 고유량에서 약 10배 이상 차이나는 것을 볼 수 있다. 그러나 mixture를 고려하여 산정된 유량-유사량 관계곡선은 실측값과 전체적으로 유사하게 산정하는 것을 볼 수 있다.

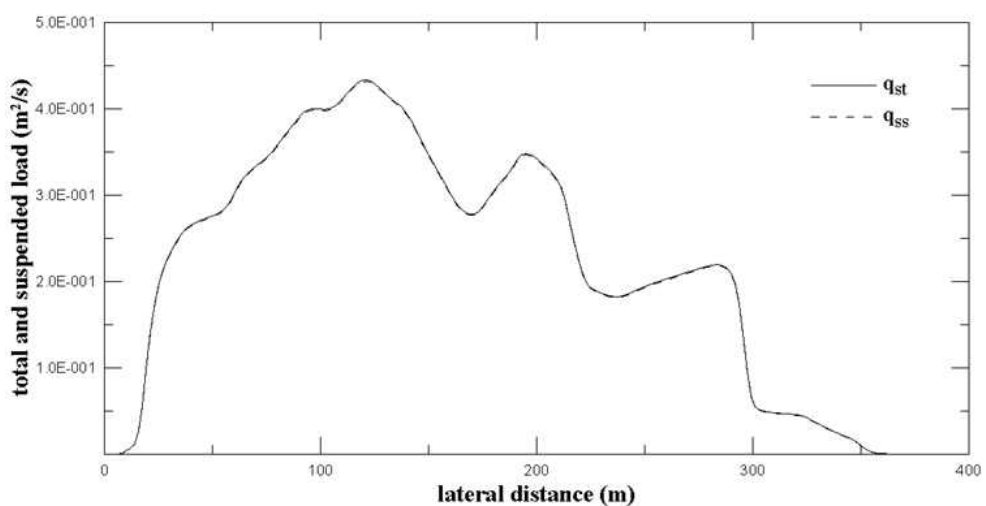


그림 9.24 단위 폭 당 유사량 분포 (적성)

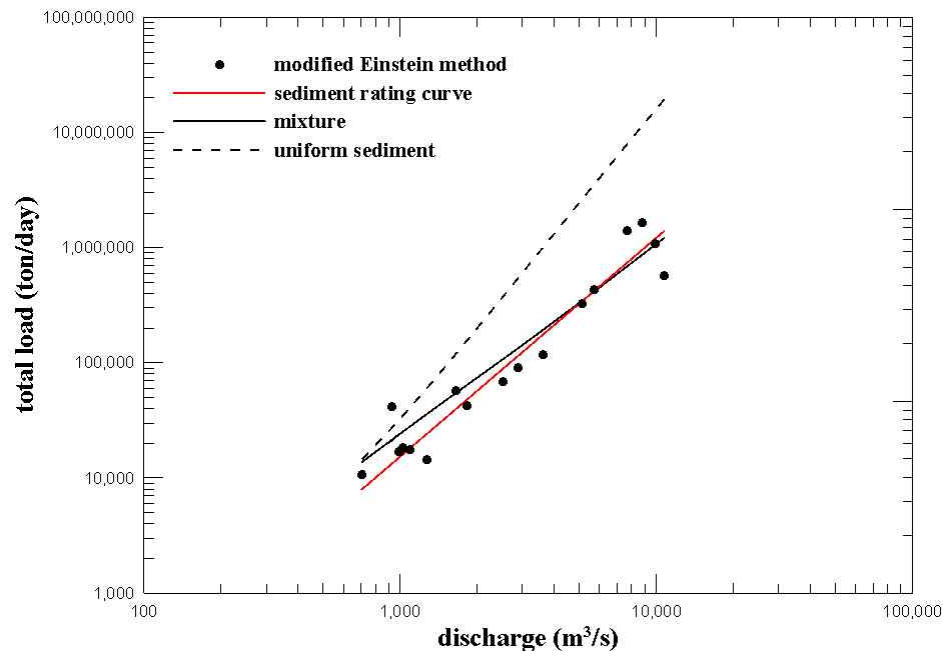


그림 9.25 유량-유사량 관계곡선 (적성)

4. 결론

본 연구에서는 기존에 제시한 국내 하천에 적용 가능한 유사량 산정기법을 검증하였다. 검증을 위해 금강, 낙동강, 임진강에 적용하였다. CL공식에 의한 소류사량과 부유사량을 합하여 총유사량을 산정하였다. 유량 변화에 따른 유사량의 변화를 계산하여 실측치와 비교하였는데, 산정기법에 의한 유사량 예측 결과가 실측치에 근사하게 접근하는 것으로 나타났다.

제3절 3차원 수리모형의 후처리 기법 및 프로그램 개발

1. 3차원 수리모형 후처리 개요

모형 결과는 각 격자의 유속, 난류운동에너지 k (turbulent kinetic energy) 및 ε (dissipation rate of turbulent kinetic energy)를 표출한다. 3차원 결과의 출력의 문제는 결과 자료의 크기가 크고 표출에 성능이 필요하다는 것 외에도 표출의 관점이 너무 다양하게 존재한다는 것이다. 이를 해결하기 위하여 표출을 지형격자, 2차원 시트, 2차원 종단, 3차원 Curtain, 3차원으로 구분하여 표출하는 방식을 채택하였다. 성능의 문제에 대해서는 OpenGL Graphic을 지원하는 라이브러리를 선정 채택하여 그래픽 성능 문제를 완화하였다.

2. 지형격자 표출

지형격자는 모형의 계산 대상인 격자를 표출한다. 격자의 행, 열 및 Z 층의 좌표를 기반으로 3차원으로 생성하여 대상 지형의 개요를 파악할 수 있도록 지원한다. 지형 격자의 표출 예는 다음과 같다.

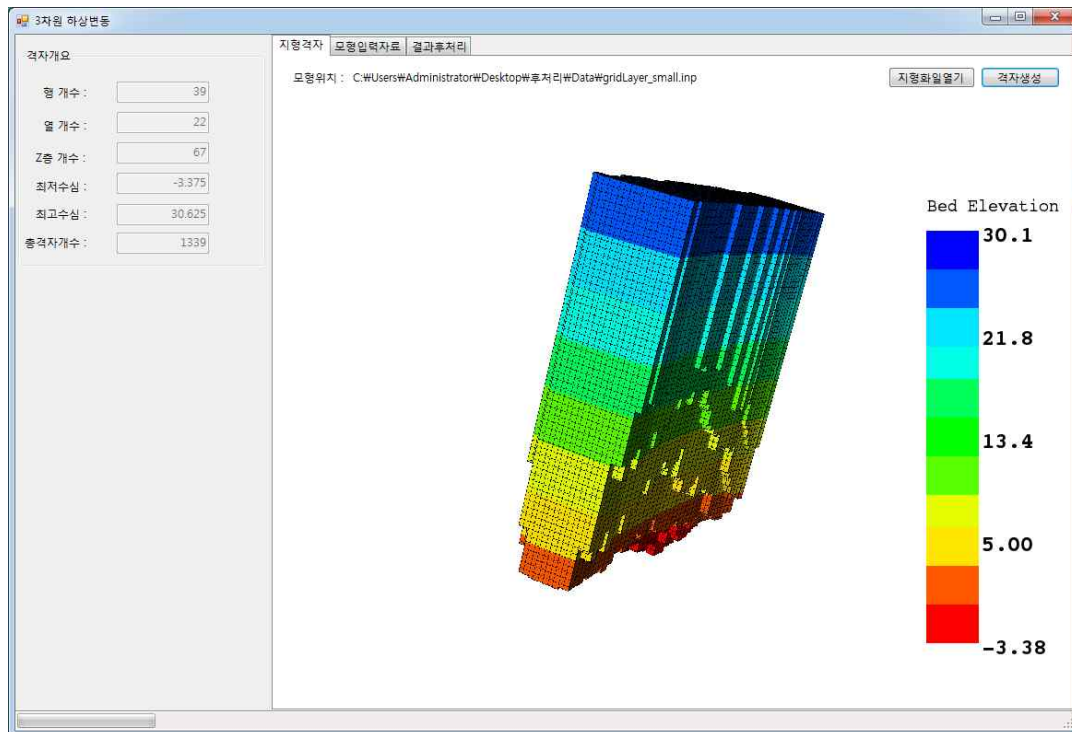


그림 10.1 3차원 지형 표출 예

3. 입력자료 표출

입력자료는 상류단의 유량조건 및 하류단의 수위조건으로 구분되며 각각을 그림 및 표 형식으로 표출하였다. 또한 하상재료대표입경과 공극률, 수중단위중량을 입력하여 흐름과 하상변동의 중요변수를 입력할 수 있게 하였다.

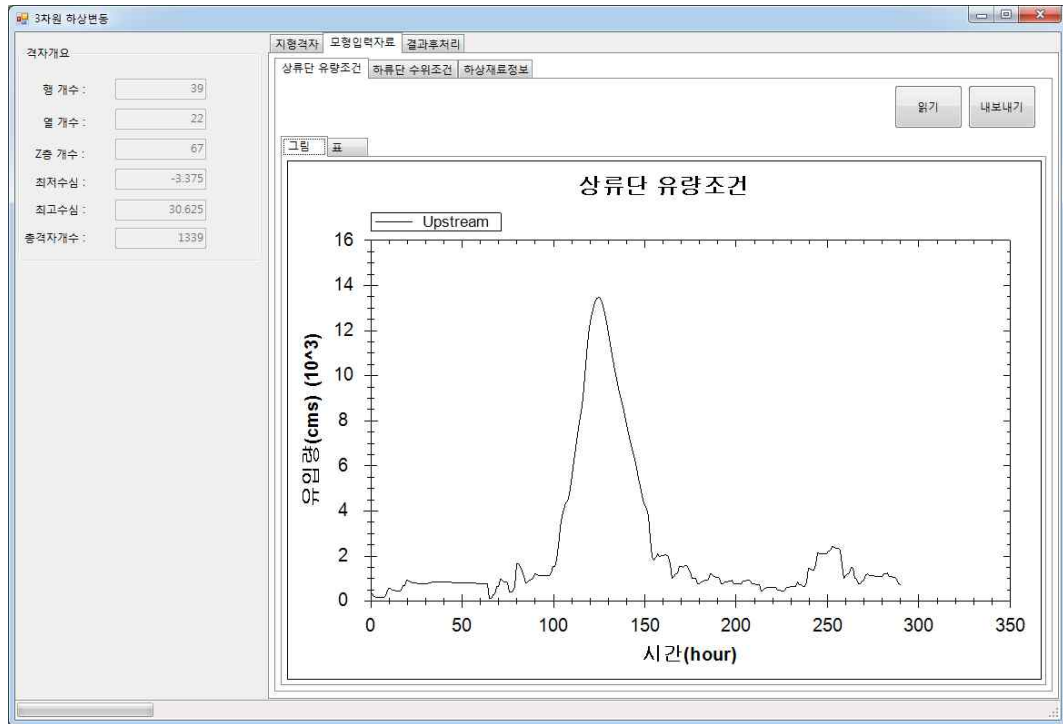


그림 10.2 상류단 유량조건(그림)

시간(hour)	유량(cms)
0	179.386
1	322.083
2	178.504
3	134.477
4	159.369
5	139.513
6	151.043
7	156.525
8	176.583
9	358.368
10	563.696
11	545.577
12	490.712
13	473.998
14	447.095
15	439.14
16	435.066
17	469.243
18	655.029
19	658.444
20	926.293
21	856.439
22	842.37
23	811.612

그림 10.3 상류단 유량조건(표)

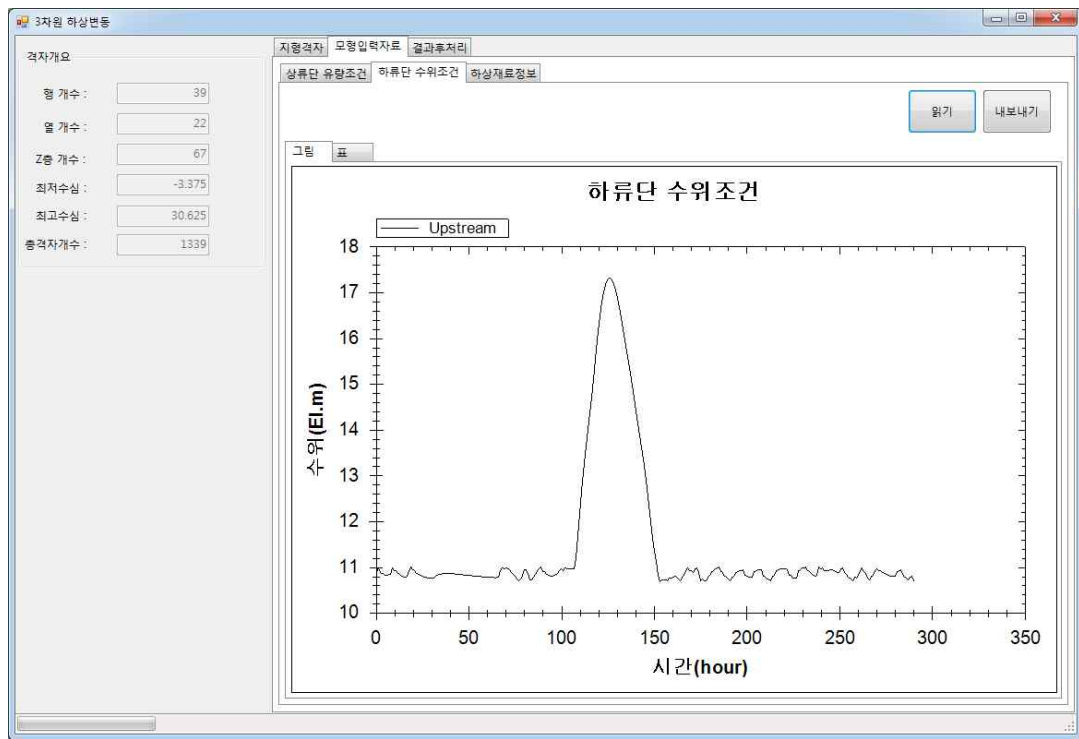


그림 10.4 하류단 수위조건(그림)

The screenshot shows the same software interface as Figure 10.4, but with the '표' (Table) tab selected. The table displays the following data:

시간(hour)	수위(El.m)
0	10.775
1	10.959
2	10.942
3	10.867
4	10.853
5	10.83
6	10.828
7	10.834
8	10.848
9	10.987
10	10.926
11	10.926
12	10.852
13	10.833
14	10.794
15	10.782
16	10.772
17	10.805
18	10.93
19	10.998
20	10.932
21	10.92
22	10.865
23	10.844

그림 10.5 하류단 수위조건(표)

3차원 하상변동

격자개요

행 개수 : 39
 열 개수 : 22
 Z층 개수 : 67
 최저수심 : -3.375
 최고수심 : 30.625
 총격자개수 : 1339

지형격자 모형입력자료 결과후처리
 상류단 유량조건 하류단 수위조건 하상재료정보

하상재료

하상대표입경(mm) : 2
 공극률 : 0.4
 수중단위중량 : 1.65

그림 10.6 하상재료조건

4. 종단 표출

2차원 종단은 선택된 열a에 한정하여 3차원으로 표출하는 것을 의미한다. 각 열에서 유속, k 및 ε 를 선택하여 표출할 수 있도록 구현하였다. 다만 단면의 특성을 감안하여 유속은 크기만을 고려하였다.

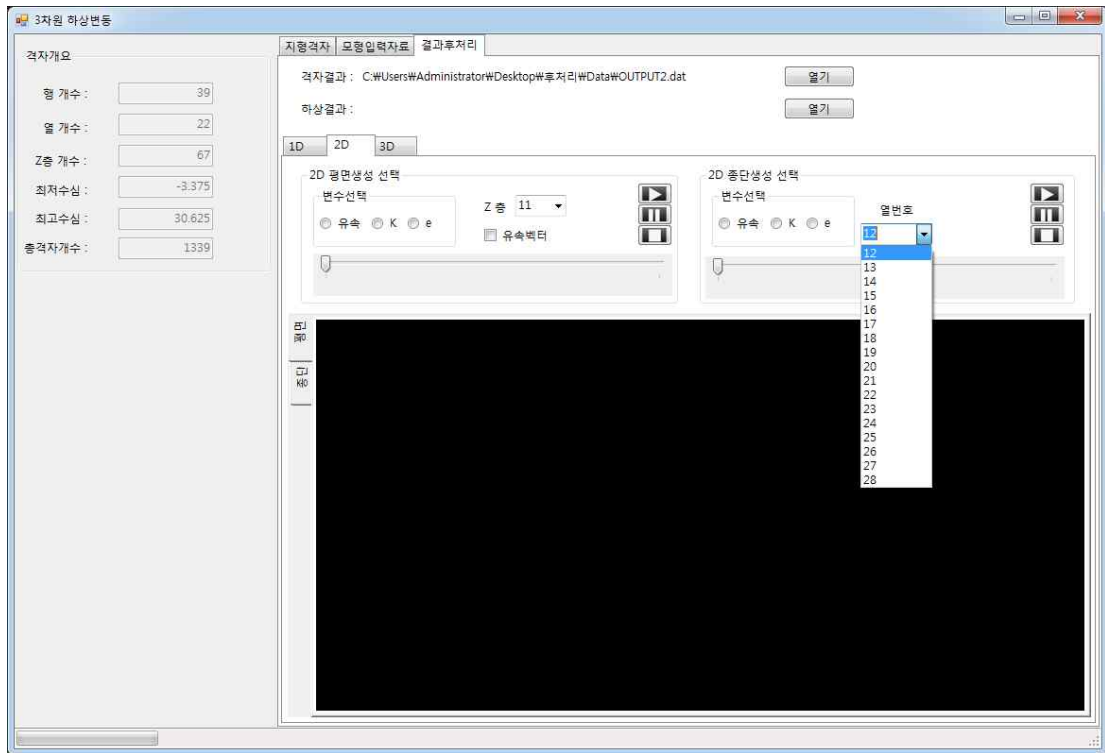


그림 10.7 열의 선택

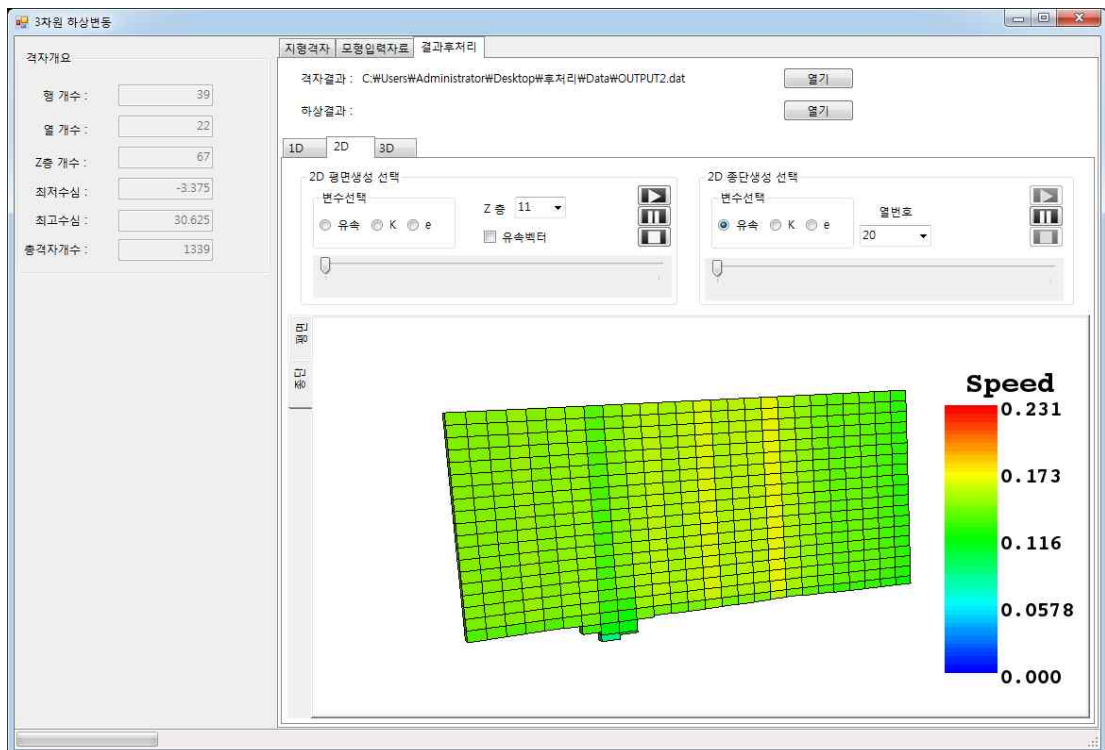


그림 10.8 열 20에서 유속크기의 표출

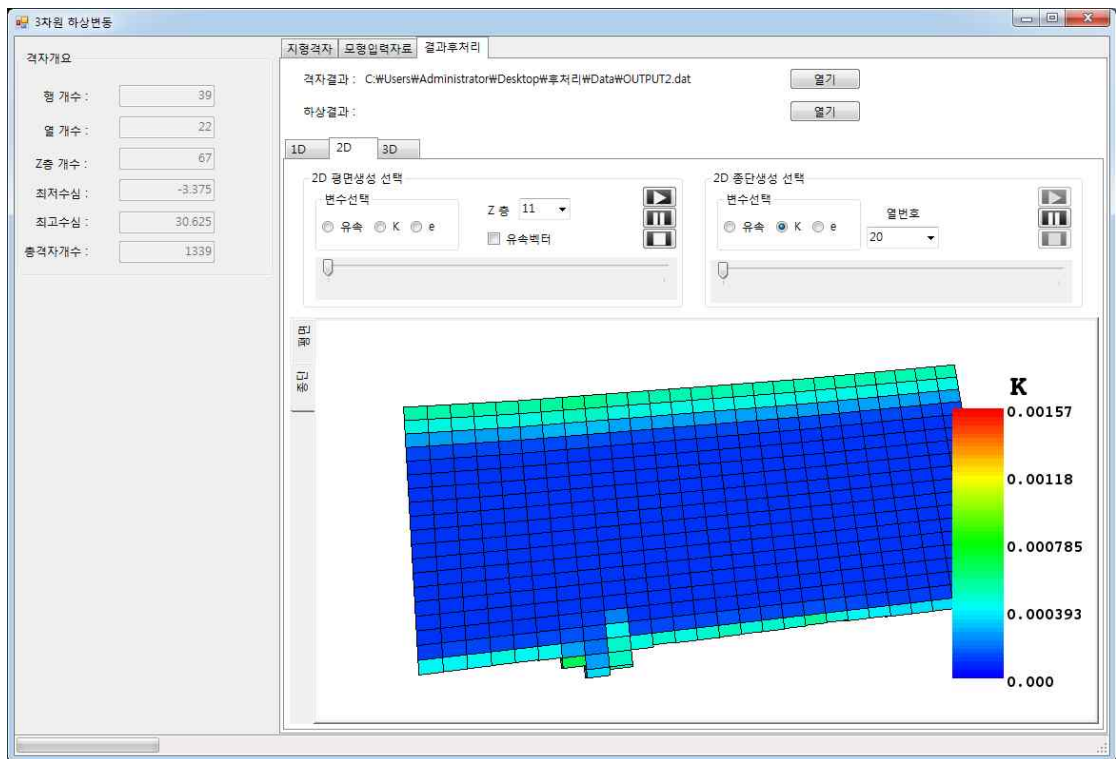


그림 10.9 열 20에서 k 의 표출

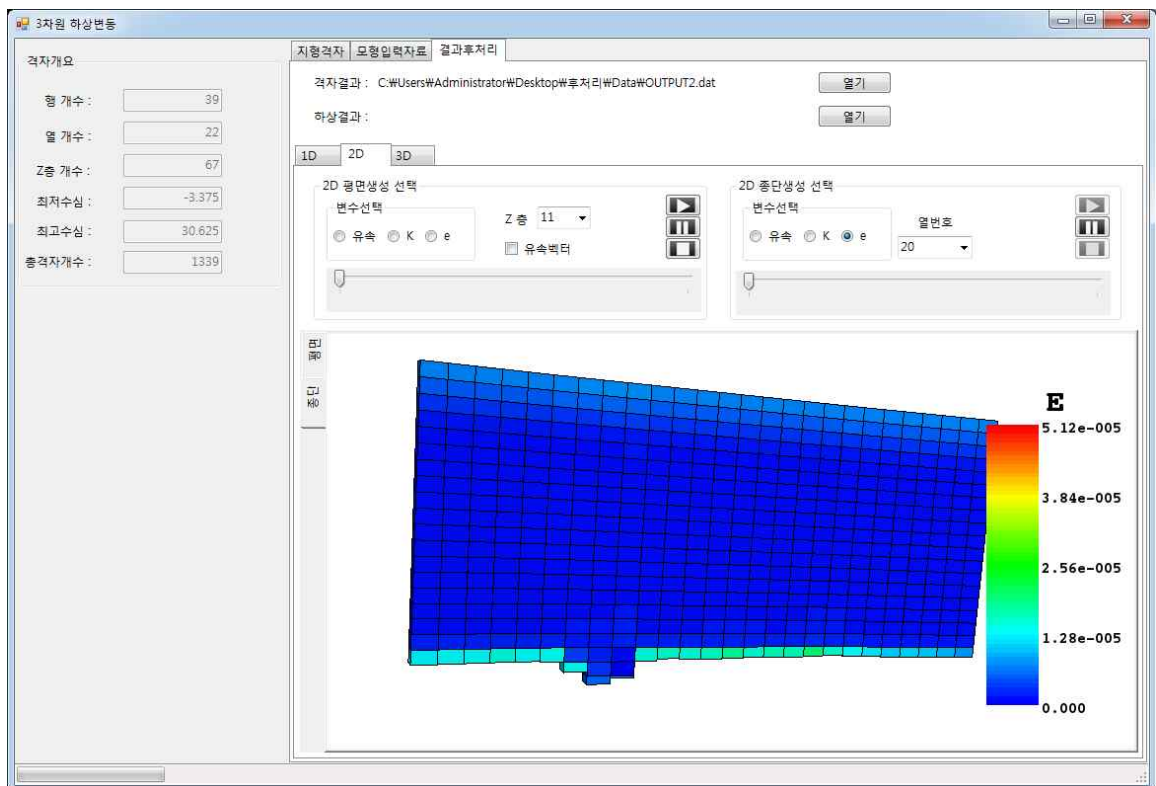


그림 10.10 열 20에서 e 의 표출

5. 2차원 평면표출

2차원 평면은 격자를 일정 깊이에서 표출하는 것이다. 이를 위하여 현재 결과 격자 집합에서 유효한 Z 층을 추출하여 다음 그림과 같이 콤보 박스에 제시한다.

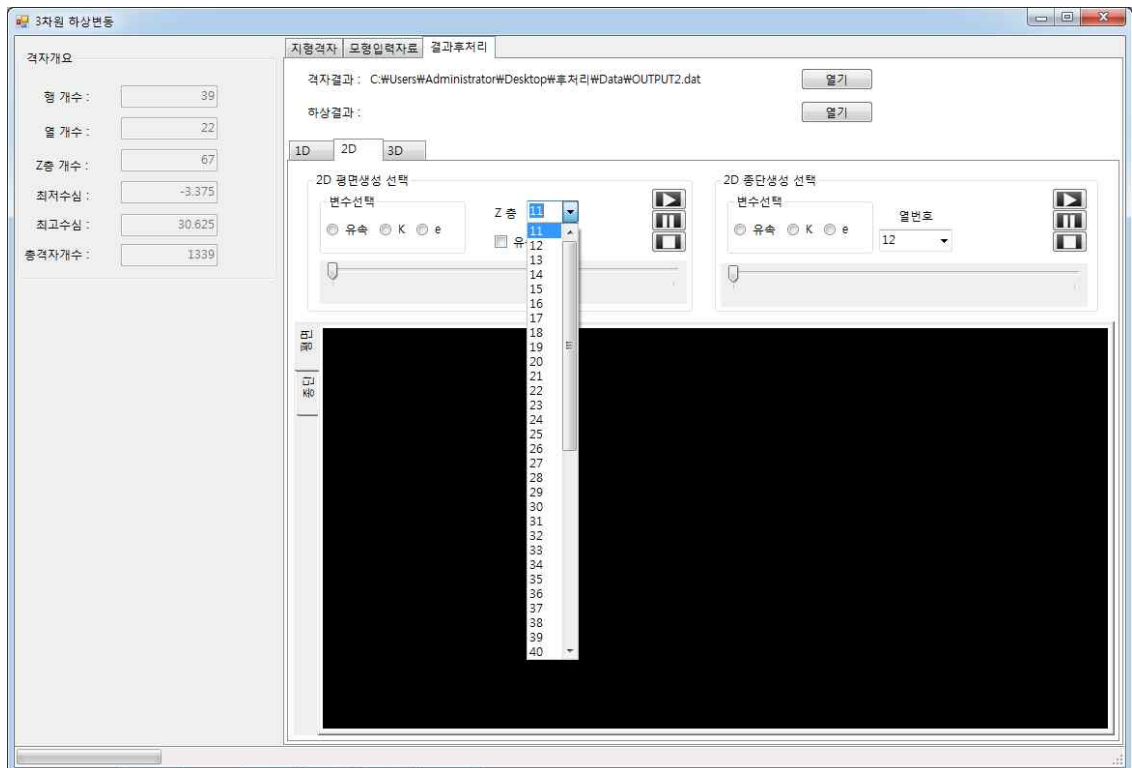


그림 10.11 2D Sheet를 생성하기 위한 Z 층의 선택

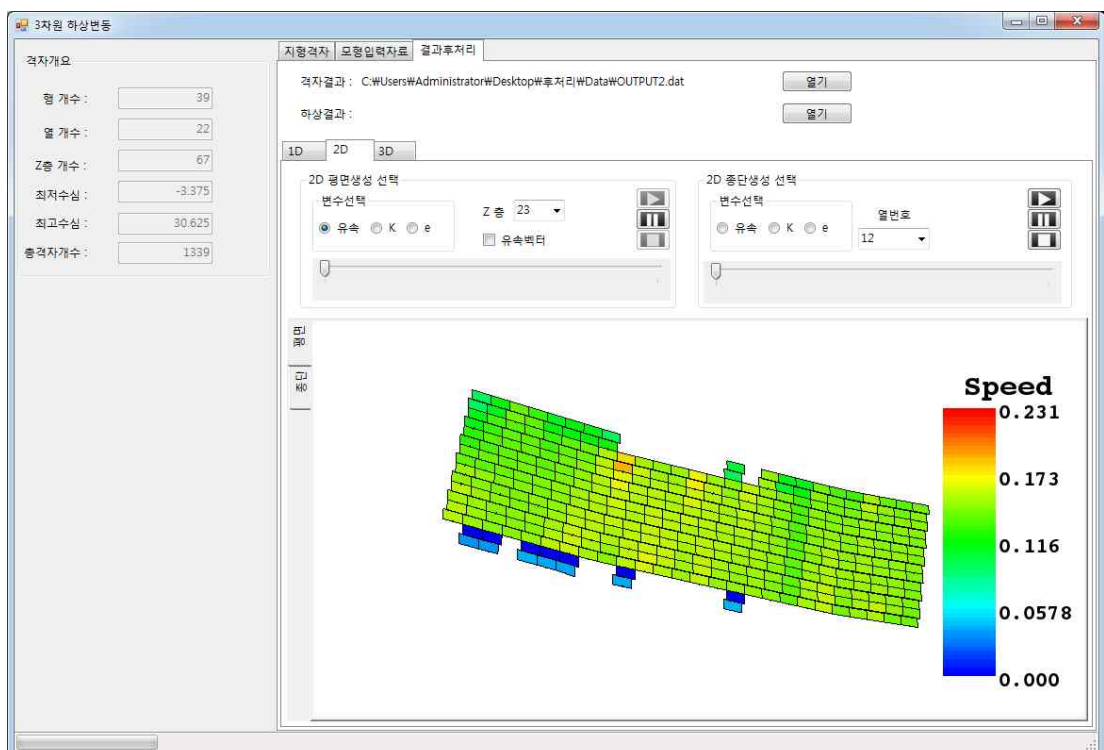


그림 10.12 Z=23에서 속도크기 표출

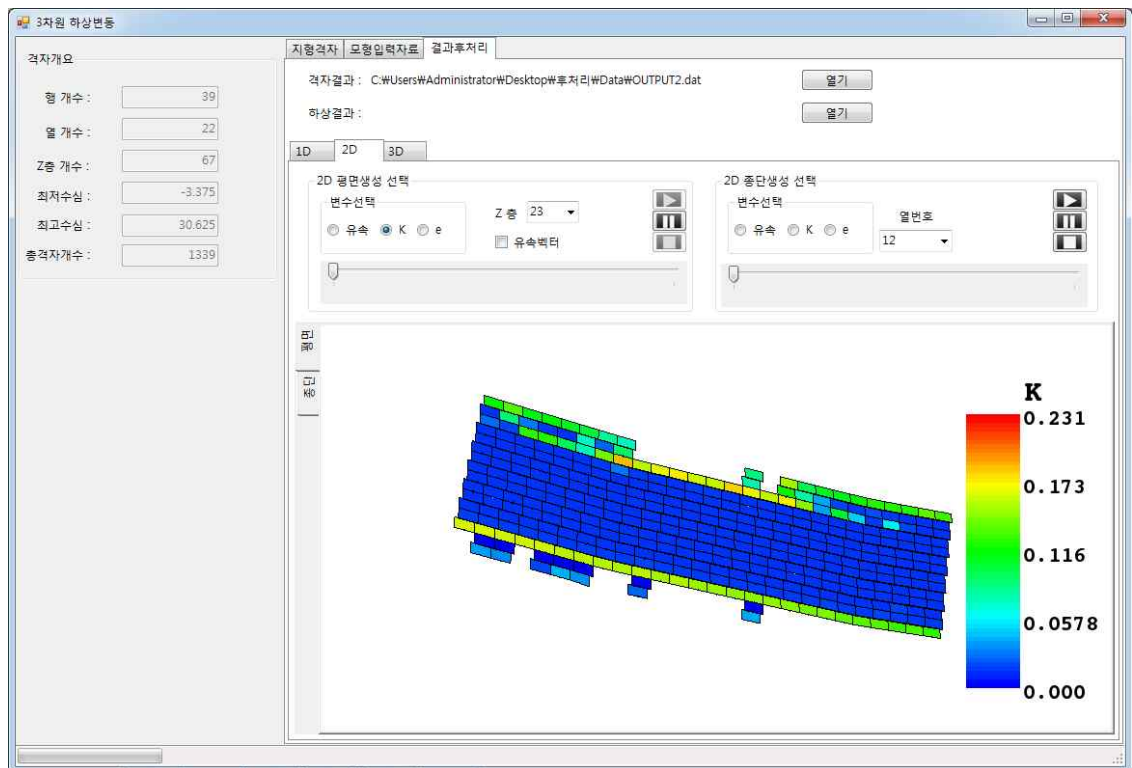


그림 10.13 Z=23에서 k 의 표출

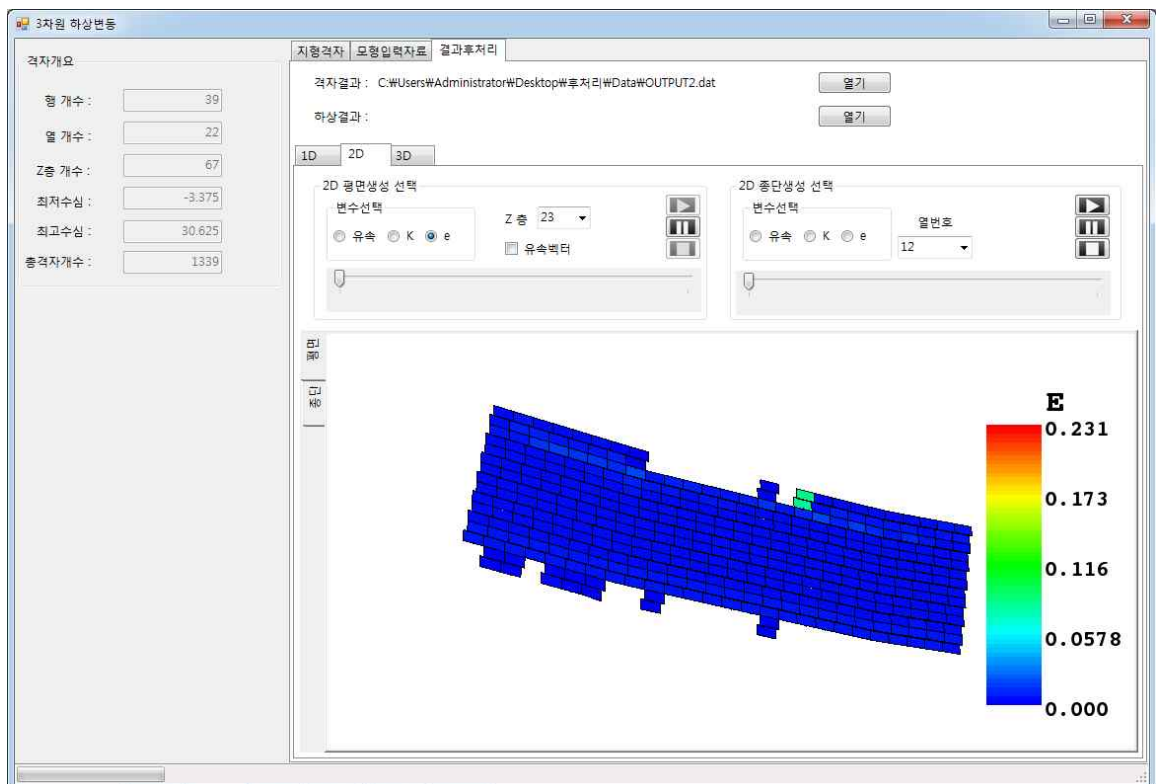


그림 10.14 Z=23에서 ε 의 표출

6. 3차원 표출

3차원 표출은 격자 전체를 대상으로 대상표출정보를 제공하는 것을 의미한다. 이는 내부 격자를 볼 수 없는 문제점이 있으나 전체적인 변화를 검토하는 데는 도움이 된다. 유속, k 및 ε 를 선택하여 표출할 수 있다.

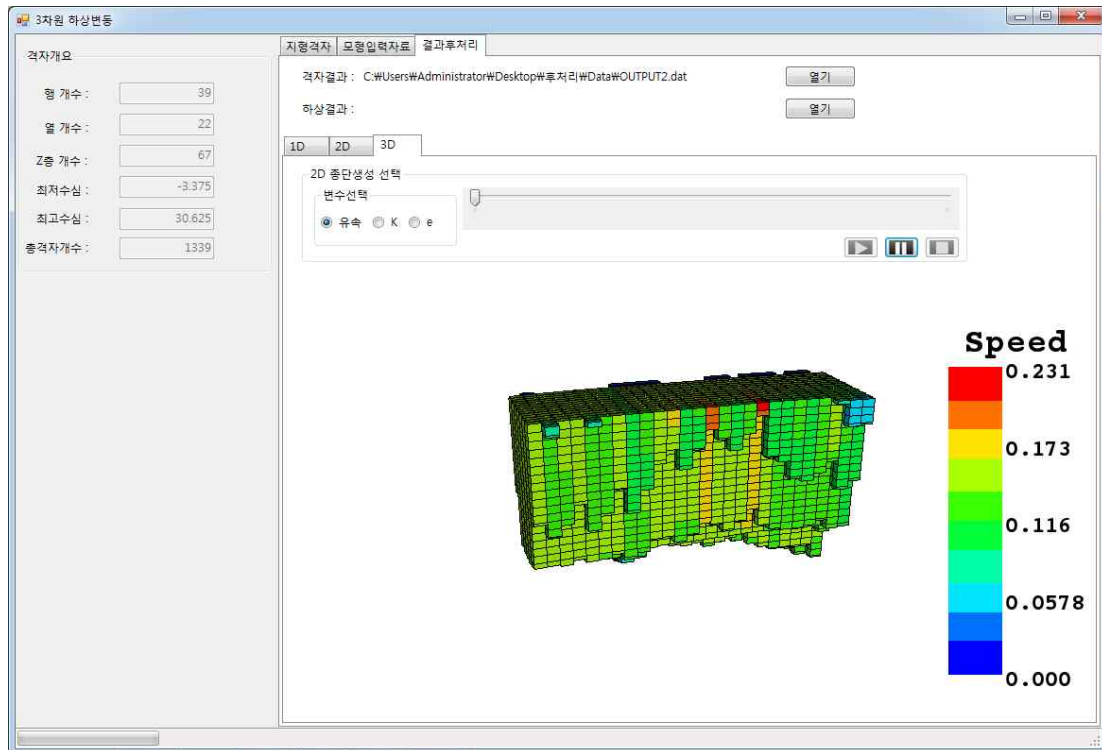


그림 10.15 속도크기 표출

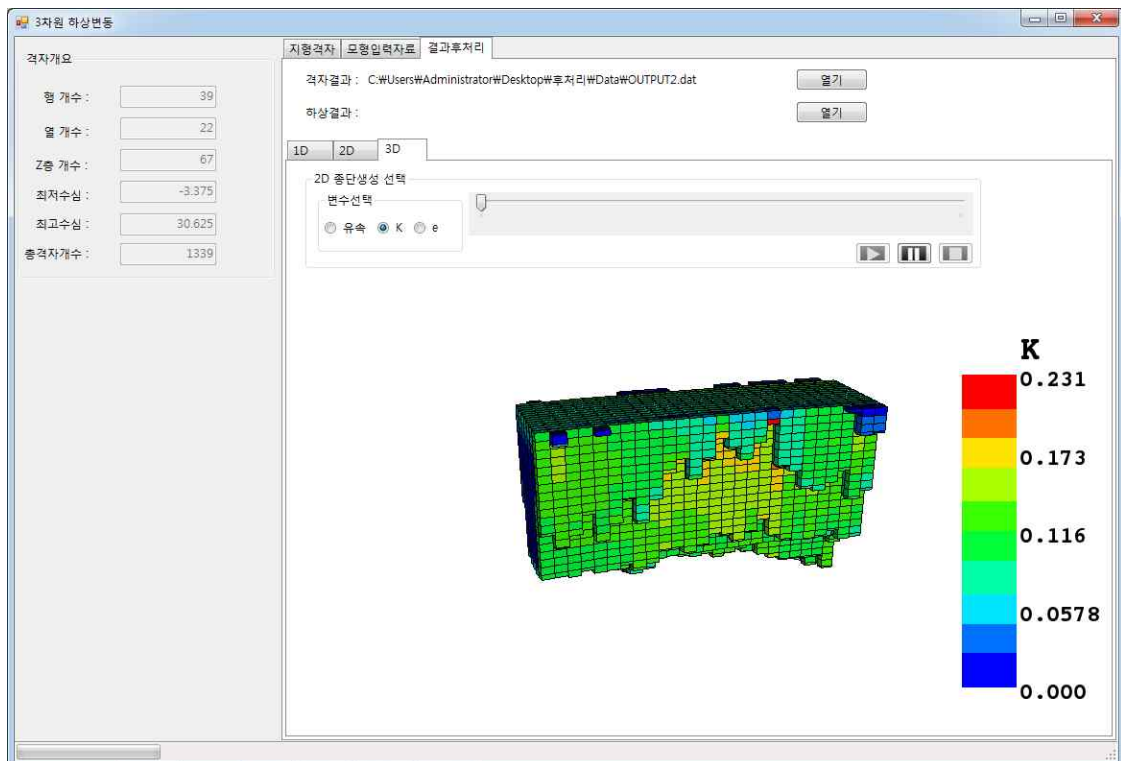


그림 10.16 k 표출

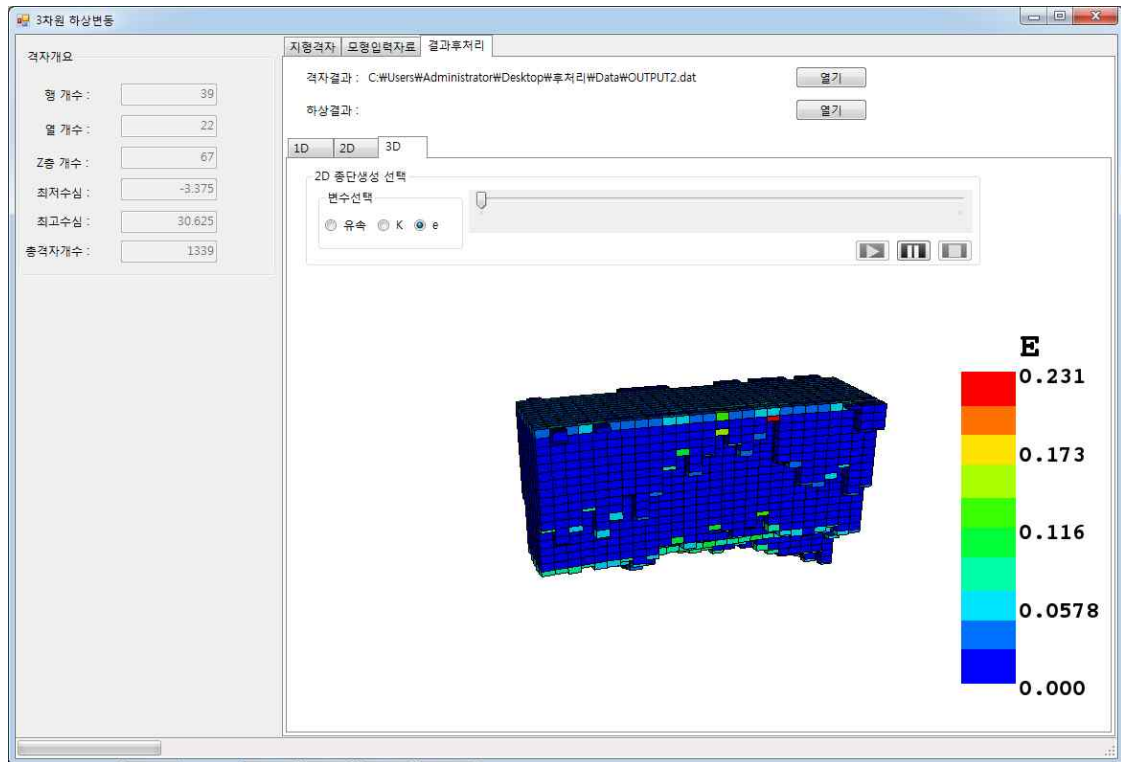


그림 10.17 ε 표출

7. 결론

3차원 수리모형의 결과 표출은 표출방법을 다섯 가지로 표준화하여 표출하여 각 방법의 장단점이 서로 보완되어 전체 및 부분을 파악할 수 있도록 개발하였다.

제4절 통합모형 개발

통합모형의 구성은 그림 11.1에 도시하였다. 전처리 및 후처리 과정은 각각 2장 2절의 3차원 계산격자 생성타원 격자생성법과 3장 3절에 자세하게 설명이 되어있다. 통합모형의 계산을 위한 입력자료는 지형격자 자료, 상/하류 경계조건, 그리고 하상재료 정보가 있다. 지형격자와 상/하류 경계조건에 대하여 3장 3절에 설명이 되어있으며, 하상재료 정보는 대표입경크기, 공극률, 그리고 수중단위중량을 고려하였다. 이 모형은 별도의 조도계수를 필요로 하지 않으며, 입자의 크기에 의해 자동적으로 유효조도높이를 계산하도록 되어있다.

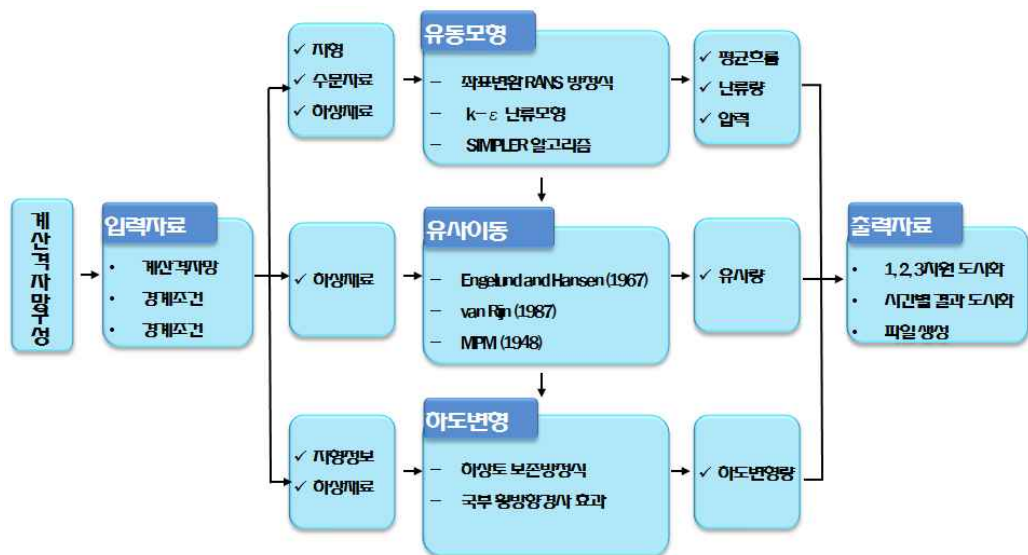


그림 11.1 통합모형 구성

필요한 입력자료를 준비한 후 내부 프로그램인 GRIDREADING.EXE파일을 실행하면 그림 11.2와 같은 창이 나오며 수치모형계산에 적합하게 변환된 입력파일을 추가로 생성한다. 수치모형 계산이 완료되면 OUTPUT.DAT파일이 생성된다. 생성된 OUTPUT파일을 이용하여 내부 프로그램인 PRINTING.EXE파일을 실행하면 그림 11.3과 같은 창이 나온다. 창의 출력과 함께 생성되는 OUTPUT3.INP파일은 본 후처리 프로그램에서 활용되며 OUTPUT2.DAT파일은 TECPLOT과 같은 다른 상용프로그램에서 활용될 수 있다. 본 통합모형을 통해 출력가능한 자료는 평균흐름, 난류량, 압력, 유사량, 그리고 아도변형량에 대하여 1, 2, 3차원적으로 시간에 따른 변화 양상을 보는 것이 가능하다. 또한 그림 11.4와 11.5와 같이 특정 지점을 선택하면 그 지점의 수치가 따로 출력되도록 하여 좀 더 쉽게 원하는 지점의 결과를 볼 수 있도록 하였다.

```
D:\Wsangsi\WGRIDREADING.exe
ROW DATA      65
ROW DATA      66
ROW DATA      67
ROW DATA      68
ROW DATA      69
ROW DATA      70
ROW DATA      71
ROW DATA      72
ROW DATA      73
ROW DATA      74
ROW DATA      75
ROW DATA      76
ROW DATA      77
ROW DATA      78
ROW DATA      79
ROW DATA      80
ROW DATA      81
ROW DATA      82
ROW DATA      83
FINISHED
EACH NO. OF CELLS:      81      44      67
TOTAL NO. OF CELLS:      238788
WRITING....
```

그림 11.2 GRIDREADING.EXE파일 출력화면

```
D:\Wsangsi\WPRINTING.exe
      8      49      30
      9      49      30
     10      49      30
     11      49      30
     12      49      30
     13      49      30
     14      49      30
     15      49      30
     16      49      30
     17      49      30
     18      49      30
     19      49      30
     20      49      30
     21      49      30
     22      49      30
     23      49      30
     24      49      30
     25      49      30
     26      49      30
     27      49      30
     28      49      30
     29      49      30
FINISHED
Fortran Pause - Enter command<CR> or <CR> to continue.
```

그림 11.3 PRINTING.EXE파일 출력화면

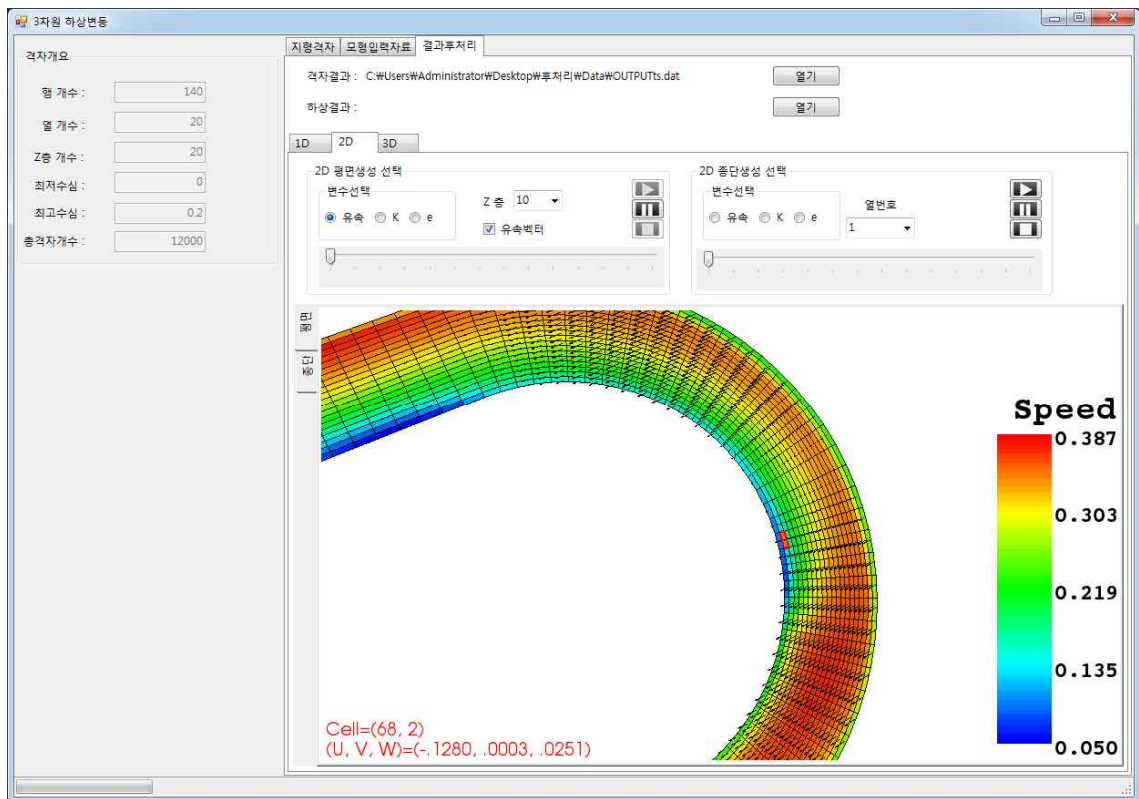


그림 11.4 $t = 0$ 일때 자유수면 근처에서 유속출력

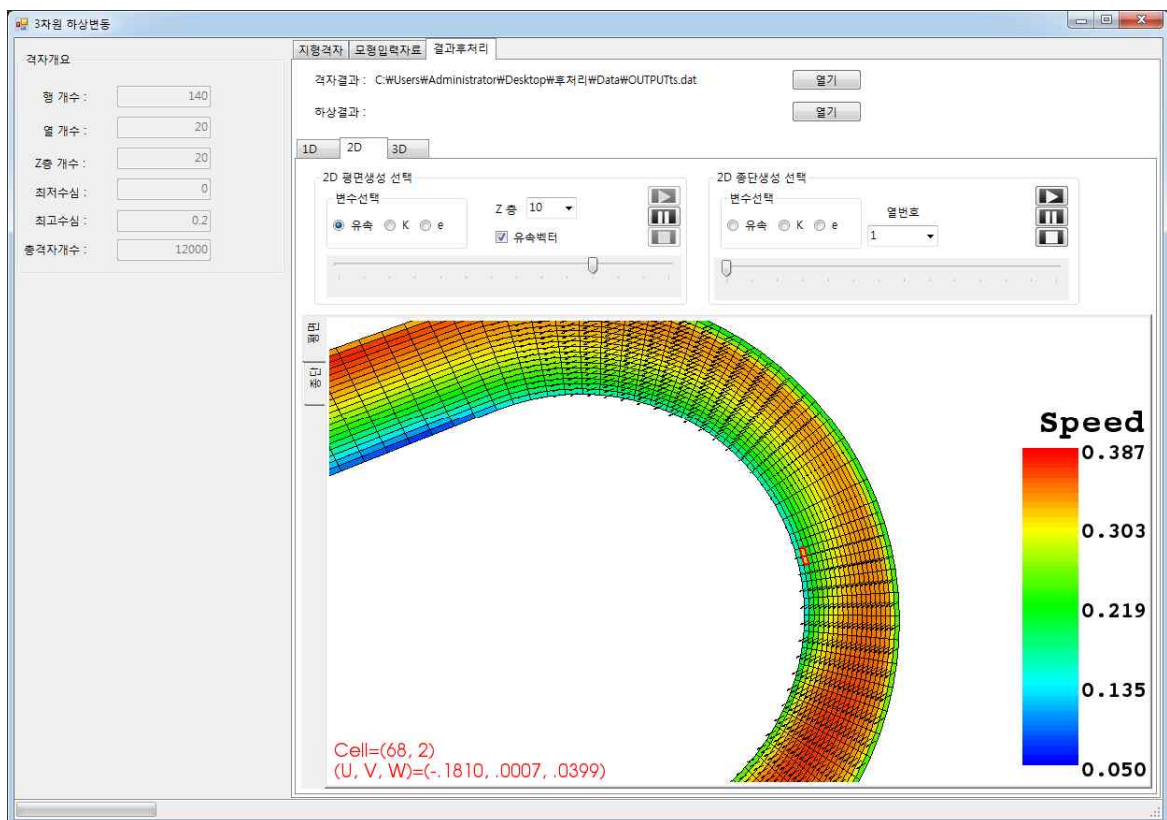


그림 11.4 $t = 30$ 분일때 자유수면 근처에서 유속출력

제5절 3차원 수치모형의 적용범위 및 한계점

일반적인 하천의 기하특성은 왜곡된 차원의 형상을 보인다는 것이다 (dimensional imparity). 즉, 하천의 길이는 폭보다 훨씬 길고, 하천의 폭은 수심보다 훨씬 넓기 때문이다. 이와 같은 하천의 기하학적 특성으로 인하여 하천을 모델링하기 위해서 1차원 모형이 가장 효율적이라고 할 수 있다.

하천을 모델링하여 흐름 및 유사이동, 하상변동 등을 모의하기 위해서는 1차원, 2차원, 그리고 3차원 모형을 사용할 수 있다. 일반적으로 물의 흐름은 3차원 지배방정식으로 표현되므로 3차원 유동에 관한 지배방정식을 바로 해석하는 것이 3차원 모형이다. 3차원 해석은 직접수치모의 (direct numerical simulation)를 제외하면 난류모형을 이용하여 격자의 간격도 조밀해야 하므로 계산비용이 크게 소요된다.

이에 대한 방편으로 3차원 유동방정식을 수심방향으로 적분한 2차원 천수방정식을 해석하는 것이 2차원 모형이다. 2차원 모형은 정수압 법칙을 사용하며 수심적분으로 인해 수심방향으로 유속의 변화를 고려할 수 없다. 따라서 3차원 모형에 비해 동역학적인 흐름을 재현하는데 한계가 있다. 2차원 모형의 계산 비용은 3차원 모형에 비해 저렴하나 1차원 모형보다는 비싸다.

3차원 유동방정식을 하도 단면에 대해 적분한 것이 1차원 모형이다. 1차원 모형은 정수압 법칙을 가정하며 하도 단면에서 수심 및 횡 방향으로의 유속 변화를 무시한다. 전술한 바와 같이 하천의 기하학적 특성으로 인하여 오래전부터 하천관리 및 치수에 주로 사용되어 왔다.

따라서 1차원 모형은 하도 전체 구간에 적용이 용이하다. 그림 12.1은 1차원 모형을 이용하여 수리해석을 수행한 것으로, 영국의 Severn River 60 km 구간에 적용한 예이다. 2차원 모형은 1차원 모형에 비해 하도 길이에 대해 제한을 받을 수 있다. 그림 12.2는 2차원 모형을 미국의 East Fork River에 적용한 것으로 평면상에서 유속의 횡방향 분포에 관한 정보를 얻을 수 있다. 2차원 모형의 적용 시, 경계조건 등을 원활하게 부여하기 위하여 1차원 모형을 병용하는 경우가 많은데, 이것은 구간내 유량 및 수위 관측 지점이 부재할 수 있기 때문이다. 3차원 모형은 계산 비용으로 인하여 하천 시설물/구조물 주위 등 매우 국부적인 구간에 적용될 수 있다. 그림 12.3은 3차원 모형을 이용하여 유동해석을 실시한 결과를 도시한 것이다. 하도에서 수제 설치로 인한 자유수면의 변화를 제시하였다. 마찬가지로 3차원 모형의 적용 시, 1차원 및 2차원 모형과 병용될 경우 경계조건의 부여가 용이해 질 수 있다.

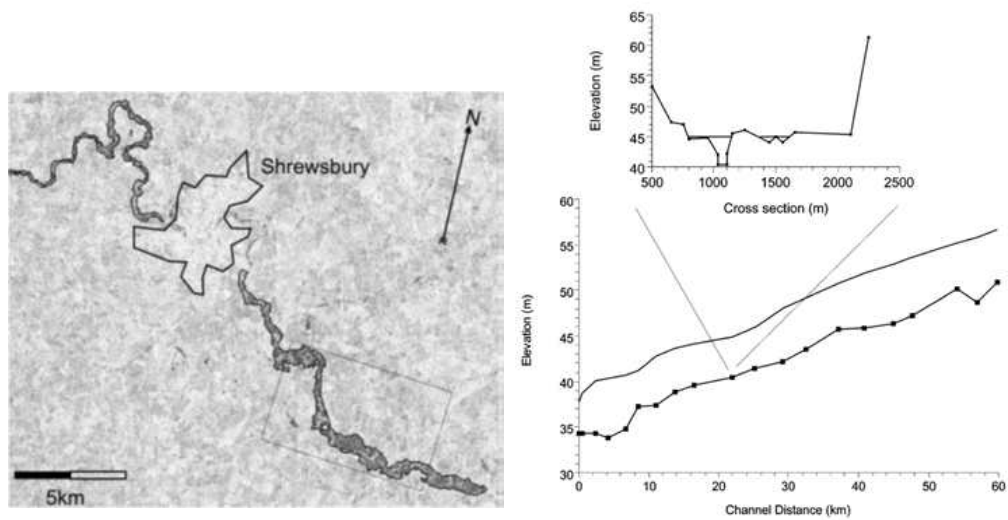


그림 12.1 1차원 모형을 이용한 수리해석 예 (Horritt and Bates, 2002)

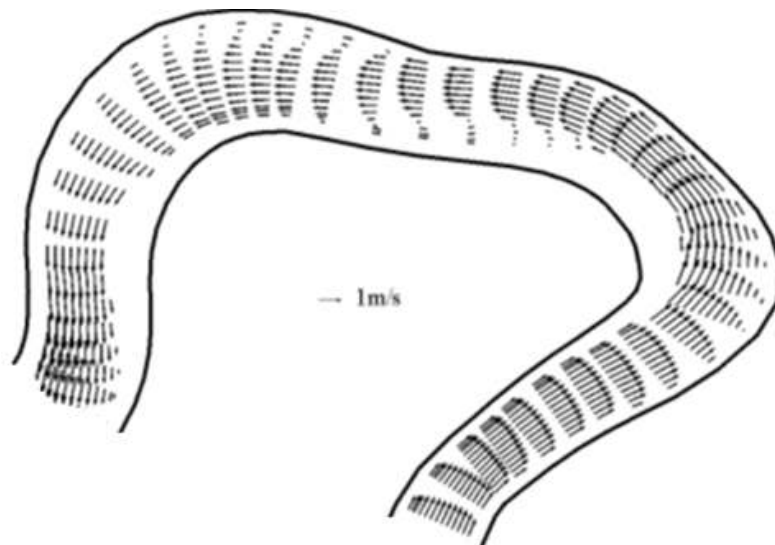


그림 12.2 2차원 모형을 이용한 수리해석 예 (Wu, 2004)

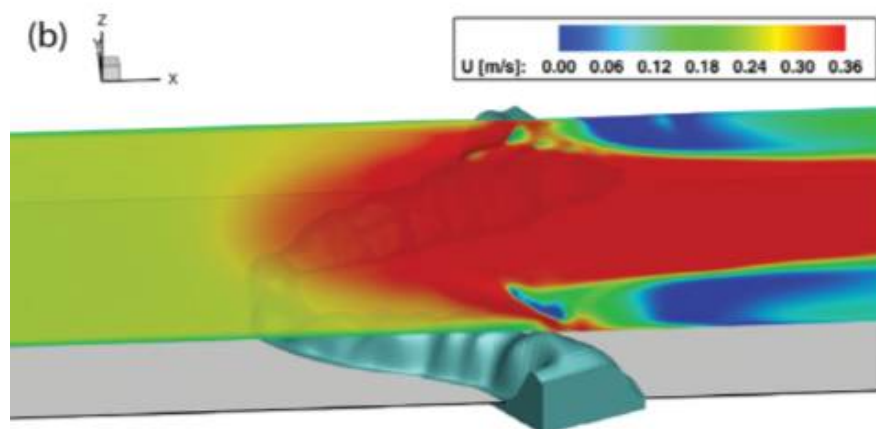


그림 12.3 3차원 모형을 이용한 수리해석 예 (Kang 등, 2012)

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

	과제명	성과목표	성과지표		성과검증 기준			가중치	해당 기관	
					목표치	달성치	검증방법			
질적 목표	1	하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형	1-1 모형개발 기반 역량 강화	①	난류해석 기법 조사	100%	100%	발표	10%	연세대
				②	하천유사량 산정기법 제시	100%	100%	발표	10%	연세대
				③	난류모형 시험 모의	100%	100%	발표	20%	연세대
				④	유사량 산정기법 적용	100%	100%	발표	30%	연세대
				⑤	3차원 계산격자 발생기법 기술조사	100%	100%	시연	30%	웹솔루스
			1-2 유동 및 하도형태 계산모듈 개발	①	하도형태 계산 모듈 제시	100%	100%	발표	10%	연세대
				②	난류 유동 계산 모듈 제시	100%	100%	발표	40%	연세대
				③	입력자료 구축 시스템 설계	100%	100%	발표	30%	웹솔루스
				④	입력자료 구축 시스템 구축 및 테스트	100%	100%	시연	20%	웹솔루스
			1-3 모형의 적용 및 매뉴얼 작성	①	유동 및 하도형태 모의 모듈 통합	100%	95%	발표	20%	연세대
				②	국내하천 적용	오차율 20%	측정난해	발표	10%	연세대
				③	타 프로그램과의 성능비교	100%	30%	발표	10%	연세대
				④	후처리 기법 개발	70%	70%	현장시연	10%	웹솔루스
				⑤	통합 모형의 검증 및 데이터 확보	100%	90%	현장시연	10%	웹솔루스
				⑥	통합시스템 GUI 구축	100%	90%	발표	10%	웹솔루스
				⑦	후처리 기법 연구	100%	100%	발표	10%	웹솔루스
				⑧	시험 구동 및 매뉴얼 작성	100%	40%	제출	20%	웹솔루스
			계							
양적 목표		사업연계지표	성과지표			목표치	달성치	가중치	해당 기관	
			학술지 게재 논문건수(국내/국외)			14건	4건	20%	연세대	
			학술회의 발표 논문건수(국내/국외)			17건	29건	30%	연세대	
			SCI급 학술지 게재 건수			6건	4건(+3건)	10%	연세대	
			분야별 인력양성 배출 실적			6건	5건	10%	연세대	
			S/W 등록건수			1건	1건	10%	웹솔루스	
			특허등록 건수(국내/국외)			1건	2건	10%	연세대	
			지침/매뉴얼의 개발 및 보급			1건		10%	웹솔루스	
			계							

- 본 연구의 최종목표인 하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발에 대하여 제시한 성과목표들은 각 단계를 거쳐 종합적으로 목표치에 근접한 성과를 달성하였다. 양적 성과에 대하여 SCI급 학술지를 4건 게재하였고 현재 3건을 심사중이다. 국내 학술지는 4건 게재되어있고 해외 학술대회발표 6건, 국내 학술대회발표 23건을 수행하였다. 그 외 특허 2건이 출원되어 심사가 진행 중이고 S/W가 1건 등록되었으며 본 과제를 통해 수공학에 전문성을 가진 석사 5명이 배출되었다.

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

○ 국내 하천환경 및 기후변화에 적합한 3차원 하천모형을 제시함으로써 홍수 시 유사 이동량과 이에 따른 하도형태의 변화를 예측하여 국내 대하천 및 중소하천의 홍수방어 능력을 증대시킬 수 있다. 또한, 수치모의를 통해 안정하도를 제시하여 하천개발 사업에 따른 영향을 최소화 시키며, 하천복원 사업시 정교한 모델링을 통해 적응관리의 효율성을 제고할 수 있다.

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

○ 하천개발 사업 전에 이에 따른 이차적 피해를 미리 예측함으로써 하천의 불안정화로 인한 홍수피해를 경감 시킬 수 있다. 수리학적인 성찰이 미흡한 하천복원 사업은 하천의 안정성 저하 및 하천교란의 피해를 발생 시킬 수 있으며, 훼손된 생태계 복원 및 건전한 하천 생태계 보전 등 하천복원 사업의 녹색성장 동력 사업으로서 이용가능성을 제기할 수 있다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제1절 연구성과 활용계획

○ 본 연구에서 개발한 3차원 수치모형을 이용한 하천에서의 흐름해석 결과는 하천에서의 난류가 고려된 정교한 3차원 흐름해석결과를 제공함으로써 하천의 안전성해석, 하상변동해석 등을 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하천에서 준설에 의한 유사량 및 하상변동영향, 사행수로 및 만곡부에서의 흐름특성 등을 해석할 수 있음으로써 강변저류지의 퇴사 관리 및 만곡구간에서 수리구조물 설치 설계에 참고자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

○ 본 연구의 실용화 및 사업화 전략은 아래 그림과 같다. 현재 1단계를 진행중이며 이후 계획에 맞추어 진행하면서 실제 활용할 수 있는 모형을 완성할 계획이다.



제2절 추가연구 필요성

○ 본 연구결과와의 활용성 증진을 위하여 더 많은 검증과정을 거칠 필요가 있다. 그 외에 본 연구 이후 추가적으로 필요한 연구들에 대해서는 다음과 같다.

1. 병렬화 계산기법 도입

○ 3차원 흐름해석은 1, 2차원 해석에 비해 더욱 합리적인 결과를 낼 수 있지만 결과를 얻기 위해 많은 시간을 요구한다. 본 과제의 성과가 상용화되기 위해서는 병렬계산을 도입해 결과를 산출하기까지 걸리는 시간을 줄이는 것이 매우 중요하다고 할 수 있을 것이다.

2. 하도 내 사면 무너짐 해석

○ 흐름 특성에 따라 특정 지역이 지속적으로 퇴적되거나 침식될 경우 주변과의 하상고 차이에 의해 경사가 큰 경사면이 발생하게 된다. 본래 하천에서 특정 지형의 사면각이 너무 클 경우 높은 곳이 무너지며 낮은 곳으로 유사가 유입되며 하상고가 조정된다. 만일 중장기 하상변동을 모의한다면 이 해석이 없을 경우 비정상적인 결과를 발생시킬 수 있는 문제가 있으므로 사면 무너짐 해석은 매우 중요하다고 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 김대근, 황건 (2011). 고정상 및 이동상 수로에서 댐 붕괴파의 3차원 수치해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 31(4B), 333-341.
- 김상호, 한건연 (2000). 유한요소법에 의한 낙동강 유역에서의 2차원 수질해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 20(4B), 525-533.
- 김태범, 최성욱, 민경덕 (2006). CDG 유한요소법을 이용한 수심적분 흐름의 수치모의, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 26(5B), 447-457.
- 서일원, 송창근 (2010). 천수흐름 해석을 위한 2차원 유한요소모형의 개발, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 30(2B), 199-209.
- 양원준, 최성욱 (2002). LES를 이용한 교각주위 국부세굴의 3차원 수치모의, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 22(4B), 437-446
- 윤용남, 박무종 (1994). FESWMS-2DH 모형에 의한 한강 하류부의 수리특성 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 14(4), 847-857.
- 유량조사사업단 (2007). 유량조사 보고서, 건설교통부.
- 한건연, 김상호 (2000). Petrov-Galerkin 기법에 의한 하천에서의 이송-확산 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 20(2B), 251-259.
- 한건연, 박경욱, 백창현, 최규현 (2005). SU/PG 기법에 의한 2차원 하천 동수역학 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 25(2B), 89-96.
- Camenen, B., Holubova, K., Lukac, M., Le Coz, J., and Paquier, A. (2011). Assessment of Methods Used in 1D Models for Computing Bed-Load Transport in a Large River: The Danube River in Slovakia. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 137(10), 1190-1199.
- Choi, S.-U. and Kang, H. (2004). Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 42(1), 3-11.
- Choi, S.-U. and Kang, H. (2006). Numerical investigations of mean flow and turbulence structures of partly vegetated open-channel flows using the Reynolds stress model, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 44(2), 203-217.
- Duc, B.M., Wenka, T., and Rodi, W. (2004). Numerical modeling of bed deformation in laboratory channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(9), 894-904.

- Fang, H. W., and Wang, G. Q. (2000). Three-dimensional mathematical model of suspended-sediment transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126(8), 578-592.
- Ge, L. and Sotiropoulos, F. (2007). A numerical method for solving the 3D unsteady incompressible Navier-Stokes equations in curvilinear domains with complex immersed boundaries, *Journal of Computational Physics*, 225(2), 1782-1809.
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1), 87-99.
- Jia, Y. and Wang, S.S.Y. (1999). Numerical model for channel flow and morphological change studies, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(9), 924-933.
- Joung, Y., Choi, S.-U., and Choi, J.-I. (2007). Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct: an analysis of secondary flows, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 133(2), 213-221.
- Joung, Y. and Choi, S.-U. (2008). Investigation of Twin Vortices near the Interface in Turbulent Compound Open-Channel Flows Using DNS Data, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 134(12).
- Joung, Y. and Choi, S.-U. (2010). Direct numerical simulation of low Reynolds number flows in an open-channel with sidewalls, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62, 854-874.
- Kang, H. and Choi, S.-U. (2006). Reynolds stress modeling of rectangular open-channel flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 51, 1319-1334.
- Kang, H. and Choi, S.-U. (2006). Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetated floodplains using the Reynolds stress model. *Advances in Water Resources*, 29, 1650-1664.
- Kang, S., Khosronejad, A., & Sotiropoulos, F. (2012). Numerical simulation of turbulent flow and sediment transport processes in arbitrarily complex waterways. *Environmental Fluid Mechanics*, Memorial Volume in Honour of Prof. Gerhard H. Jirka. CRC Press (Taylor and Francis group), 123-151.

- Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flow. *Computational Methods in Applied Mechanics*, 3, 269-289.
- Lee, Kil Seong, Park, Kidoo, and Oh, Jin-Ho (2011). Free Surface Flow in a Trench Channel Using 3-D Finite Volume Method, *한국수자원학회논문집*, 44(6), 429-438.
- Lu, Y. and Wang, Z. (2009). 3D simulation for water flows and sediment transport in dam areas of the Three Gorges Project, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 135(9), 755-769.
- Matsuura, T. (2004). *Stream-bank proection in narrow channel bends using 'barbs'-A laboratory study*. MS thesis, Univ. of Ottawa, Ottawa.
- Nezu, I. and Nakayama, T. (1999). Numerical calculation of steep open-channel flows by considering effects of surface wave fluctuations. *International Conference of WEESH*, Seoul, Korea.
- Nezu I. and Rodi W. (1985). Experimental study on secondary currents in open channel flow. *21st IAHR Congress*, Melbourne, Australi, 2, 19-23.
- Nisizima, S. and Yoshizawa, A. (1987). Turbulent channel and Couette flows using an anisotropic $k-\varepsilon$ model. *AIAA Journal*, 25(3), 414-420.
- Rubinstein, R. and Barton, J.M. (1990). Nonlinear Reynolds stress models and the renormalization group. *Phys. Fluids A*, 2(8), 1472-1476.
- Shiono, K. and Knight, D.W. (1990). Mathematical models of flow in two or multi stage straight channels. *Proceedings of International Conference on River Flood Hydraulics*, edited by W.R. White, Wallingford Paper G1, 229-238.
- Speziale, C.G. (1987). On non-linear $k-l$ and $k-\varepsilon$ models of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 178, 459-475.
- Sutmuller, A.M. and Glerum, H.L. (1980). Description and evaluation of measurements carried out in a bend flume with sand bed, Report No. 14710101, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. Tech.
- Prinos, P. (1993). Compound open flow with suspended loads, *Proc., Advances in Hydro-Science and Engineering, First Int. Conf on Hydro-Science and Engineering*, Univ. of Mississippi, Washington, D.C., 1206-1214.

- Shimizu, Y., Yamaguchi, H., and Itakura, T. (1990). Three-dimensional computation of flow and bed deformation, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 166(9), 1090–1108.
- Van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport. Part I: Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 110(10), 1431–1456.
- Van Rijn, L.C. (1987). Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended load transport, *Delft Hydraulic Communication Report*. No. 382.
- Vasquez, J.A., Steffler, P.M., and Millar, R.G. (2008). Modeling bed changes in meandering rivers using triangular finite elements, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 134(9), 1348–1352.
- Wang, S. Y., and Jia, Y. (1995). Computational modeling and hydrosience research, *Proc., Advances in Hydro-Science and Engineering, 2nd Int. Conf on Hydro-science and Engineering*, Tsinghua University Press, Beijing, 2147–2157.
- Wright, S., and Parker, G. (2004a). Flow Resistance and Suspended Load in Sand-bed Rivers: Simplified Stratification Model. *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, 130(8), 796–805.
- Wilcock, P. R., Crowe, J. C. (2003). Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 120–128.
- Wu, W. (2004). Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and non-uniform sediment transport in open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(10), 1013–1024.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.