

해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술 및 해석 프로그램 개발 최종보고서

2019. 03. 29.

주관연구기관 / 국민대학교 산학협력단
위탁연구기관 / 에스지에이블록체인(주)

해수면상승대비친환경수자원확보기술및해석프로그램개발
최종보고서

2019
국
민
대
학
교
산
학
협
력
단

국
토
교
통
부

국 토 교 통 부
국민대학교 산학협력단

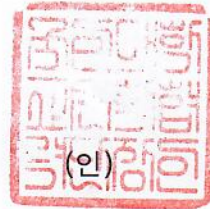
제 출 문

국토교통부 귀하

‘해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술 및 해석 프로그램 개발’(연구개발 기간 : 2017. 04. ~ 2018. 12.) 과제의 수정보완된 최종보고서 1부를 제출합니다.

2019. 03. 29.

주관연구기관명 : 국민대학교 산학협력단 (대표자) 차주현



위탁연구기관명 : 에스지에이블록체인(주) (대표자) 은유민



주관연구기관책임자: 양정석

위탁연구기관책임자: 오정환

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C12 9791-01	해당 단계 연구 기간	2017. 04. 01 - 2018. 12. 31	단계구분	(2단계)/ (총2단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술 및 해석 프로그램 개발			
연구책임자	양정석	해당단계 참여연구원 수	총: 14명 내부: 09명 외부: 05명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 14명 내부: 09명 외부: 05명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	국민대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 에스지에이블록체인(주)			연구책임자: 오정환	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제
-------------------------	------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	3					3					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- 해수면 상승으로 인한 하천 및 하구를 따라 확산 및 침투하는 염수를 억제하여 담수 수자원을 확보하고자 하는 기술을 제안
- 하천변 일부지역에 파일링을 통해 하류방향으로의 유속을 증가시켜 염수확장을 억제
- 파일링 상류 구간의 하천수위가 증가되어 주변 지하수위의 상승이 유발되고 지하 염수침투를 억제
- 본 연구를 통해 제안하는 기술을 해석하기 위한 계산모델 및 전후 처리기 개발

보고서 면수

82

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	● 해수면 상승이 가속화될 것으로 예상되는 가운데, 하천과 하구에서 염수의 확장이 관찰되고 있으며, 지하수위 하강 추세와 더불어 주변 지하 대수층으로의 염수침투도 가속화되고 있음. ● 소량의 염도변화는 생태계에 커다란 영향을 미치고 오염원으로 작용하여 지역 경제에 피해를 야기하고 있음. ● 하천의 염수확장을 막기 위해 댐이나 보의 건설이 제안되지만, 시간과 비용 측면에서 비효율적이며, 생태환경측면에서도 부정적임. ● 지하 대수층으로의 염수침투를 막기 위해 염수양수, 담수주입, 지하댐 건설 등이 제안되고 있지만, 비용이나 실효성 측면에서 의문이 제기되고 있음. ● 따라서, 본 연구에서는 제작 및 유지보수가 용이하고, 비용 대비 효율적이며, 친환경적인 해수면 상승 대비 미래 담수자원 확보를 위한 기술을 제안하고 그 효과를 해석하기 위한 프로그램을 개발하고자 함. ● 수로 좌안과 우안을 따라 pile을 설치하면, 항력으로 인해서 piling 구간의 유속은 감소하고, piling 구간의 상류방향으로는 수위가 상승하는 효과가 예상됨. ● 반면, 수로 내부의 pile 미설치 영역으로는 유속이 증가할 것으로 기대됨. ● 하류 방향 유속의 증가는 염수의 상류방향으로의 확산을 저감시키는 효과를 나타낼 것임. ● 따라서, 본 연구에서는 pile 설치에 따른 흐름특성 변화를 예측하고 평가하기 위해서 pile의 항력효과를 반영하는 2차원 흐름 해석 프로그램을 개발하고자 함. ● piling 구간의 상류방향으로 하천 수위의 상승이 기대되며, 따라서 하천과 인접한 대수층에서의 지하수 수위도 함께 상승하는 효과가 기대됨. ● 하천 주변 지하 대수층에서의 수두 증가는 염수침투를 방지하고, 지하수의 저장용량을 증가시킴으로써, 장기적이며 지속적으로 담수 수자원을 확보하고 증가시키는 효과를 나타냄. ● 따라서, 본 연구에서는 piling을 통한 하천 흐름특성 변화가 지하 대수층에 미치는 효과를 예측하고 평가하기 위해서, 하천 흐름특성 변화를 반영하는 지하수 해석 프로그램을 개발하고자 함. ● 마지막으로, 개발된 하천 흐름 해석 프로그램을 이용하여 piling 영역의 넓이, pile의 직경, 높이, 밀도 등에 따라 하천의 다양한 흐름 특성 변화를 예측·평가하고, 개발된 지하수 해석 프로그램을 적용하여 하천 흐름 특성 변화에 따른 지하 대수층에서의 수두변화를 예측·평가하여 해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술을 평가하고 검증하고자 함.
연구개발성과	● 본 연구의 핵심성과는 다음과 같음. ▷ pile 항력을 고려한 지표수 흐름 특성변화 해석 프로그램 ▷ 하천 흐름 특성변화에 따른 지하수 특성변화 해석 프로그램 ▷ piling을 통한 해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술의 평가 ● 본 연구를 통한 최소 연구개발 성과 ▷ SCI(E)급 학술지 게재 1건 ▷ 일반학술지 게재 2건 ▷ 소프트웨어 3건
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	● 하천 및 하구를 대상으로 해수면 상승에 대비하기 위한 지표수-지하수 상호작용을 평가하는 연구는 국내외에서 최초로 시도하는 독창적이고 도전적인 분야임. ● 선진 기술에 의존하던 국내기술 수준을 넘어 국가 소프트웨어 개발 기술 수준을 한 단계 높일 수 있고, 기후변화에 따른 해수면 상승의 대응기술 분야에서 선도적인 역할과 지위를 확보할 수 있으며, 미래원천기술 확보를 기대할 수 있음. ● 선진시장 및 저개발국과의 협업 및 기술지원을 통해 해수면 상승에 따른 수자원 및 수생태계의 영향평가 등 또 다른 신사업 창출이 가능

	● 하천, 지하수, 환경, 생태, 농업, 수산업 등 다양한 분야와의 협력을 통해 기후변화 대응 기술을 확보하는 등 산학간, 학문간 융·복합 연구에 활용 가능 ● 기후 변화에 따른 환경 및 생태분야에 대한 관심이 고조될수록, 미래 시장성은 더욱 확대될 것으로 예상되며, 해외 시장 진출 및 신규 시장 개척에 활용 가능				
핵심어 (5개 이내)	해수면 상승	지표수-지하수 상호작용	친환경 기술	수치모형	지속가능한 수자원

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	● The sea level rise is expected to be accelerated and the salt wedge expansion in rivers and estuaries is observed. In underground, the salt water intrusion is also accelerated in company with groundwater level drawdown. ● A little change of salinity has great influence on the ecological system and causes local economic damage acting as a pollutant. ● Although the construction of dams or weirs may be proposed as prevention measures for the expansion of salt wedge, it is considered not to be time- and cost-efficient and not to be positive on ecological system. ● Although the salt water pumping, freshwater injection, underground dam, etc. are proposed as prevention measures for salt water intrusion into underground aquifer, the cost and effectiveness of the measures are being questioned. ● Therefore, this research proposes cost efficient and easily maintainable green technology for sustainable water resources as a countermeasure of future sea level rise and develops the numerical program for the analysis and estimation of the effectiveness. ● It is expected that the construction of piles along the right and left bank of a river causes the flow velocity within the piling area decrease and the water surface of upstream reach from the piling area increase due to the drag force of piles. In contrast, the flow velocity around the middle of channel will increase. As a result, the positive effect of downstream increase of flow velocity on the upward expansion of salinity can be obtained. ● Therefore, two dimensional flow analysis program reflecting the effect of drag force of piles will be developed in this research, in order to predict and estimate the change of flow characteristics depending on piling. ● Groundwater level in aquifer adjacent to the upstream reach from the piling area is also expected to increase as a consequence of increase of water surface of a river. The increase of energy head in underground aquifer can play an important role as prevention of salt water intrusion and securement and preservation of sustainable freshwater resources. ● Therefore, groundwater analysis program predicting and estimating the effect of flow characteristics change of a river as a result of piling on the underground aquifer will be developed in this research. ● At last, developed programs will be applied to various conditions of piles, and green technology for sustainable water resources as a countermeasure of future sea level rise will be estimated and verified.
Results	● The main outcome of this research is as the following: ▷ program for the analysis of flow characteristics change of surface water considering the drag force of piles ▷ program for the analysis of characteristics change of groundwater depending on the change of flow characteristics of a river ▷ estimation and verification of green technology for sustainable water resources as a countermeasure of future sea level rise ● The minimum performance of this research is proposed as the following: ▷ 1 article published to SCI(E) journal ▷ 2 article published to domestic journal ▷ 3 software
Expected Contribution	● This research which estimates the interaction between surface water and groundwater reacted to sea level rise in rivers and estuaries guarantees originality and challenge, making an first attempt at home and abroad. ● The standard of national software development technology can be improved to the next level, the position and role as the precursor of countermeasure of sea level rise can be obtained, and the cultivation of future fundamental technology can be warranted through this research.

	● The outcome of this research can be applied to create another newly developed business and research such as the environmental effects evaluation due to sea level rise with cooperation and technical assistance in advanced, developing and underdeveloped countries. ● This research can be utilized for multidisciplinary and academic-industrial cooperative fusion and convergence research between areas of river, groundwater, environment, ecology, agriculture, fisheries, etc. for the countermeasure of climate change. ● It is expected that the outcome of this research should facilitate entering the global market and pioneering new markets because the attention to the environmental and ecological problems due to the climate change is highly engaged around the world.				
Keywords	sea level rise	surface water – groundwater interaction	green technology	numerical model	sustainable water resources

< CONTENTS >

1. Outlines of R&D task	1
2. Domestic and foreign status of technology development	5
3. Research contents and performances	15
4. Goal achievement and contribution to relevant field	63
5. Application plan of R&D achievements	65
6. Foreign science and technology information	67
7. Security rating of R&D achievement	78
8. Status of research facilities and equipment registered in NTIS	78
9. Implementation of safety measures in laboratories	79
10. Representative research results of R&D task	80
11. Others	80
12. References	81

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	5
3. 연구수행내용 및 성과	15
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	63
5. 연구개발성과의 활용 계획	65
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	67
7. 연구개발성과의 보안등급	78
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	78
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	79
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	80
11. 기타 사항	80
12. 참고 문헌	81

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술 및 해석 프로그램 개발
세부 목표	- piling을 통한 하천 흐름 특성변화 해석을 위한 프로그램 - piling을 통한 하천 흐름 특성변화에 따른 대수층에서의 지하수 특성변화 해석을 위한 프로그램 - 하구 및 하천 양안에서 piling을 통한 해수면 상승 대비 염수확산 방지 및 담수 수자원 확보 기술 평가 및 검증

2. 연구개발의 필요성

- 지구 온난화로 인해 대륙 빙하와 바다얼음이 해빙되며, 빙하의 감소로 인해 기온이 상승하고, 해수의 열팽창으로 인해 해수면 상승이 가속됨
- 해수면 상승으로 인해 연안 침식과 범람 및 침수, 해양순환의 변화와 이로 인한 대기운동 및 기온 변화, 해양 생태계의 변화 등 많은 피해가 예상됨
- 소량의 염도변화는 하천이나 하구 내 생태계에 커다란 영향을 미치며, 하천이나 하구 주변 지하 대수층의 염도분포를 변화시켜, 하구와 해안 지역의 농업용수, 농업용수뿐만 아니라 식수원으로서 제 기능을 상실시키는 오염원으로 작용
- 하천과 하구를 따라 유입되는 염수빼기를 방지하기 위해 하도 내 댐이나 보의 건설이 제안되기도 하지만, 시간과 비용, 그리고 생태환경적인 측면에서 비효율적이며, 실행 가능성이 낮음
- 국내 연안지역의 지하수위는 지하수 이용량의 증가와 강우 패턴의 변화로 하강하는 경향을 보이고 있고, 국토의 상당부분에서 지하수위가 하강하고 있는 추세임
- 수산물 양식장 및 농경지, 대규모 산업단지가 하구와 하천을 따라 위치하고 있으며, 인구밀도도 상대적으로 높은 국내 현황에 비추어볼 때, 해수면 상승에 따른 하구 및 하천에서의 염수빼기와 지하 대수층에서의 염수침투를 방지할 수 있는 기법 마련이 매우 시급하며 중요함
- 지하대수층으로의 염수침투 방지 및 저감을 위해 염수양수, 담수주입, 지하댐건설 등에 대한 연구가 진행되고 있지만, 실효성에 의문이 제기되고 있으며, 분석기법이나 결과에 대해서도 신뢰도가 뒷받침되지 못하고 있는 실정임
- 따라서, 해수면 상승에 대비하고 미래 담수 수자원 확보를 위한, 제작 및 유지보수가 용이하고, 비용 대비 효율적이며, 친환경적인 기술의 확보가 시급함
- 본 연구에서는 하천 또는 하구의 양안을 따른 piling을 통해 염수빼기 및 염수침투를 방지하는 기법을 제안하며, 제안 기법을 검증·평가할 수 있는 해석 프로그램의 개발을 제안함
 - piling을 통해 하천의 유속을 증가시켜 하도로 유입되는 염수빼기를 방지하는 효과를 기대
 - piling 구간의 상류 수위가 상승하여, 하천 주변 대수층의 지하수위를 높이는 효과를 기대
 - 다양한 piling 조건에 따른 설치 전후의 영향을 평가하기 위해서는 하천 흐름 특성변화 해석과 지하수 특성변화 해석을 위한 프로그램이 필요하며, 지표수-지하수 상호작용에 대한 해석을 가능하게 하는 모형 필요
- 본 연구에서 제안하는 해수면 상승에 따른 염수확산 방지 및 담수 수자원 확보 기술은 현재까지 제안된 바 없는 매우 독창적인 아이디어이며, 그 동안 제안되었던 어떠한 방지 기법보다도 시간 및 비용적인 측면이나 환경적인 측면에서 매우 탁월함
 - 보나 댐 건설과 같이 시간과 비용이 많이 소요되지 않고 생태계 파괴와 같은 부작용이 수반되지 않는 친환경적인 기법
 - 연안을 따라 부분적인 효과가 나타나는 지하댐 건설이나 담수주입, 염수양수와 같은 지하 대수층으로의 염수침투 방지법과 같은 비효율적인 방법이 아닌 하천을 따라 광범위하고 장기적으로 효과가 지속되는 매우 탁월한 염수침투 방지 기법
- 본 연구에서 제안하는 기법을 통해 하천의 흐름특성 변화와 이에 따른 지하 대수층에서의 지하수 특

성 변화에 대한 동시 예측 기술이 절실히 필요함

- 기존의 연구들은 지표 위의 하천특성 변화 또는 염수쟁기 변화만을 대상으로 하거나, 해안과 인접한 연안 대수층에서의 염수침입에만 초점을 맞추고 있음
- 해수면 상승과 염수쟁기 및 해수침입은 독립적으로 발생하는 것이 아니라 상호작용에 따라 매우 밀접하게 연결되어 있기 때문에, 따로 분리하여 연구되어서는 안되며, 하천 특성 변화, 해수면 변화, 지하담수 특성변화 등 요소들의 상호작용이 동시에 연구되어야 함

○ 국내외를 통틀어서, 하구 및 하천에서 지표수와 지하수를 동시에 고려하여 담수 수자원을 확보하고자 하는 연구는 현재까지 전무하며, 본 연구를 통해서 최초로 시도하고자 하는 매우 독창적이고 도전적이며 향후 발전 가능성이 매우 높은 분야임

- 본 연구를 통해 선진국에 비해 뒤쳐진 분야를 따라잡고, 나아가 새로운 연구 주제 및 기술을 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 그 만큼 매우 중요함
- 더불어 본 연구를 통해 획득한 신기술을 이용하여 신규시장 개척이 가능할 것으로 기대되며, 결과적으로는 국가 신성장 동력의 창출에도 기여할 것으로 예상

3. 연구개발 범위

가. 1차 연도

- 주관연구기관(국민대학교)

- 수로 좌안 및 우안을 따라 pile 설치 시 항력으로 인해서 piling 구간의 유속이 감소하고 piling 구간의 상류방향으로 수위가 상승하는 효과가 예상됨 (그림 1)
- 수로 중심의 pile 미설치 영역으로의 유량 증가로 인해 하류 방향 유속이 증가하게 됨

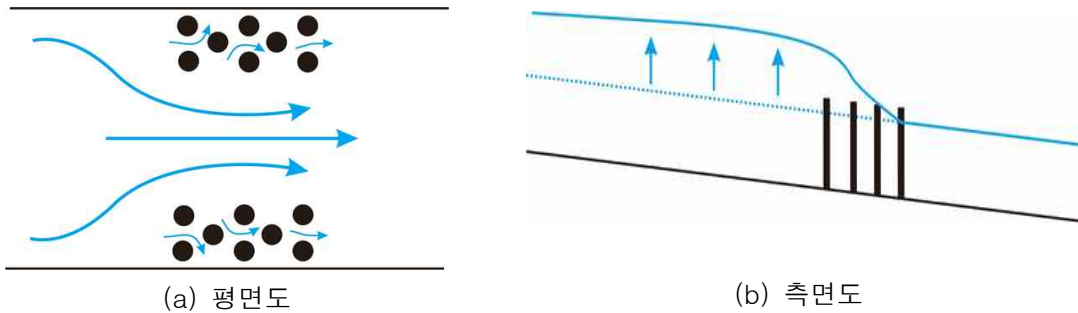


그림 1. piling 설치에 따른 하천 흐름 특성 변화

- 하류 방향 유속의 증가는 염수의 상류방향으로의 확산을 저감시키는 효과를 나타낼 것으로 기대
- 하천 상류 방향으로 염수쟁기의 확산을 억제하기 위해 댐이나 보를 건설하기 보다는 본 연구에서 제안하는 pile 설치를 실시함으로써 시간과 경제적으로 비용이 절감되며, 유지 및 보수 측면에서도 유리할 것으로 기대
- 또한 회귀성 어류를 위한 어도를 따로 설치할 필요가 없으며, 선박의 이동에도 제한이 없으므로 친환경적인 염수 확산 방지 및 저감 기법에 해당
- pile 설치에 따른 흐름 특성 변화를 예측하기 위해서 다음과 같이 항력항이 추가된 2차원 천수방정식을 도입한 모형의 개발이 필요

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_{bx} + \frac{1}{\rho} F_{Dx} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_{by} + \frac{1}{\rho} F_{Dy} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, h 는 수심, p 와 q 는 x 방향 및 y 방향으로의 단위 폭 당 유량, g 는 중력가속도, ν_t 는 난류 동점성 계수, z_b 는 하상높이, τ_{bx} 와 τ_{by} 및 F_{Dx} 와 F_{Dy} 는 각각 x 및 y 방향으로의 바닥 전단응력 및 항력을 나타냄

- 항력의 효과는 pile의 직경, 높이 그리고 설치 밀도와 배열에 따라 달라질 수 있으며, pile의 높이와 수심 사이의 관계에 따라서도 변화할 수 있기 때문에, 수치모형을 이용한 piling 효과 해석이 반드시 필요
- 따라서, 본 연구에서는 식(1)~(3)을 지배방정식으로 하여 pile 설치에 따른 2차원 흐름 특성 변화 해석 모듈을 개발

- 위탁연구기관(SGA 블록체인)

- 입출력 파일 블록화 기술의 구현 : 해석엔진의 입출력 인터페이스를 범용화하기 위하여 2차원 흐름 특성 변화 해석 모형의 입출력 파일의 내용을 분석하여 입출력 구조 블록화 수행
- Mesh 생성 및 에디팅 기술의 구현 : Mesh 생성을 위한 Mesh generator를 개발함. 특히, 지형 자료를 백그라운드 이미지로 가져올 수 있으며, 삼각형 노드와 사각형 노드를 지원할 수 있도록 개발
- 사용자 인터페이스의 설계 및 개발 : 2차원 흐름 특성 변화 해석모형을 수행하기 위해 필요한 지형정보 입력, 메쉬 생성, 이미지 파일의 업로드, 메쉬 에디팅, 프로그램 수행, 결과의 출력 등의 GUI 설계 및 개발

나. 2차 연도

- 주관연구기관(국민대학교)

- 수로 양안의 pile 설치 구간부터 상류방향으로 하천 수위의 상승이 기대되며, 하천과 인접한 대수층에서의 지하수 수위도 함께 상승하는 효과가 기대됨(그림 2)

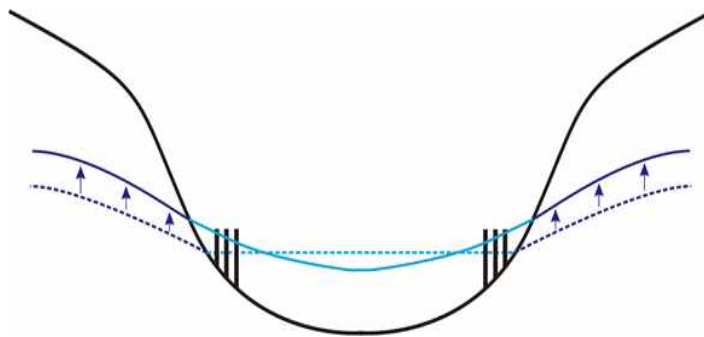


그림 2. 하천 수위 변화에 따른 대수층에서의 지하수위 상승

- 지하수위의 상승은 담수 지하수 수두의 증가를 의미하며, 하천을 따라 주변의 지하수 수두가 증가하여 연안이나 하구로부터 침투되는 염수의 대수층으로의 확산을 방지하는 역할이 기대
- 대수층으로의 염수침투를 방지하고, 담수 지하수의 저장용량을 증가시킴으로써 장기적으로 그리고 지속적으로 담수 수자원 확보량을 증가시키는 효과 기대
- piling을 통한 하천 흐름 특성변화가 지하 대수층에 미치는 효과를 예측하기 위해서는 하천 흐름 특성변화를 반영한 지하수 해석 모형의 개발이 절실히 요구됨
- 따라서, 본 연구에서는 다음의 식을 기본적인 지배방정식으로 사용하여, 2차원 또는 3차원의 정상/비정상 지하수 수두 변화 해석 모듈을 개발하고자 함

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W \quad (4)$$

여기서, h 는 지하수 수두, S_s 는 대수층의 비저류율, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x , y , z 방향의 수리전도도, 그리고 W 는 지표수 유입·유출, 함양, 우물 양수 등과 같은 생성·소멸 항을 나타냄.

-
- 지하수 수두의 변화 및 지하수 유동 변화 그리고 염수의 침입은 지층의 지질특성이나 단층 및 균열과 같은 지구조 특성에 지대한 영향을 받으므로, 지하매질의 특성을 해석 모듈에 반영할 수 있도록 비저류율 및 수리전도도와 같은 매개변수의 다양한 특성값을 영역별 또는 층별로 지정할 수 있도록 함
 - 개발된 하천 흐름 해석 프로그램을 이용하여 piling 영역의 넓이, pile의 직경, 높이, 밀도 등에 따라 하천의 다양한 흐름 특성변화를 예측하고, 개발된 지하수 해석 프로그램을 적용하여 하천 흐름 특성변화에 따른 지하 대수층에서의 수두변화를 예측하여 해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술을 평가하고 검증
 - 평수기, 홍수기 및 갈수기에서의 pile 유무에 따른 하천 특성변화와 지하 대수층의 수두변화를 예측, 평가하고, 하구 해수면 상승에 따른 하천 및 대수층의 수두변화를 예측, 평가하며, 대수층에서의 양수량 변화 등 하구에서 발생 가능한 다양한 시나리오를 개발 모형에 적용

- 위탁연구기관(SGA 블록체인)

- Mesh 생성기 보완 : Thin Triangles을 제거하는 기능 및 선택된 요소(Elements)를 제거하는 기능, Triangles 을 서로 병합하여 사각형 요소를 만드는 기능, Mesh의 Renumbering 기능 등 사용자의 편의성을 높일 수 있도록 메쉬 생성 및 편집 기능 보완
 - 지하수 모의 GUI 개발 : 지하수 모형의 경계조건과 매개변수 입력을 위한 전처리기 및 흐름 해석 모형과의 연계 인터페이스, 모의결과 표출을 위한 후처리기 개발
-

제2장. 국내외 기술 개발 현황

- 기후변화 시나리오에 따른 해수면 상승과 해수면 온도변화 그리고 이에 따른 해수의 특성변화를 모의하기 위한 수치모의는 국내외 연구진들에 의해서 활발히 진행되고 있음 (윤종주와 심재설, 2013)
 - 해외 선진국에서는 축적된 기술을 바탕으로 조석, 바람, 염도분포 등 다양한 외부 인자를 고려한 수치모형의 개발 및 적용이 활발하게 수행되고 있음
 - 하지만, 기존에 개발된 수치모형을 이용하는 연구들은 주로 전 지구적인 규모 또는 매우 광활한 영역에서 행해지고 있으며, 특히 국내에서는 근해를 대상으로 하는 가장 작은 규모의 하구를 대상으로 하는 연구는 매우 드문 실정이며, 하천이나 하구를 고려한다고 해도 세밀한 모의가 불가능 (그림 3)
- 지형자료와 토지이용도, 관측자료 등을 기반으로 지형정보시스템을 활용하여 해수면 상승에 대한 영향평가를 활발히 진행하여 음(이동욱과 부양수, 2011; 장동호와 김장수, 2009)
 - 주로 해수면 상승에 따른 해안 저지대 침수지역 예상과 피해액 산정에 국한 (그림 4)
- 연안 침식 현상이 전 세계적으로 발생하고 있으며, 따라서 해수면 상승이 연안 침식에 미치는 효과에 대한 연구를 진행하고 있음 (그림 5)
 - 연안을 따라 지형변화만을 다룰 뿐, 하도나 하구의 염도변화나 대수층 오염과는 무관
- 수치모형을 이용하여 해수면 상승에 따른 하도 또는 습지 내 염도변화 예측을 진행하고 있음 (Nakamoto et al., 2013; Funahashi et al., 2013; Sierra et al., 2004; Haralambidou et al., 2003)
 - 하천유량에 따른 하도 내 염도변화 평가 또는 예측만을 다룰 뿐, 해수면 상승에 따른 염도 확산 방지 기법을 제안하고 있지는 못함

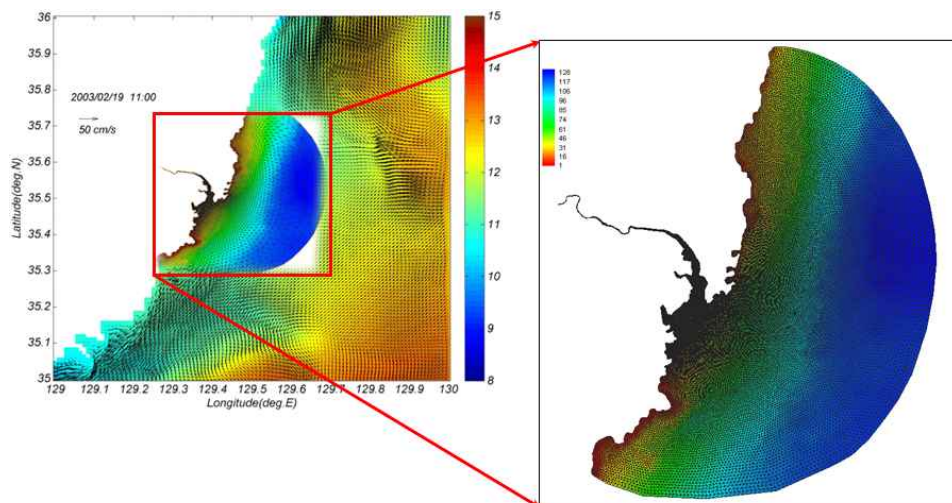


그림 3. 해수면 상승 영향분석을 위한 수치모형 적용은 주로 근해를 대상으로 수행되고 있으며, 하천이나 하구를 세밀히 다루기는 불가능

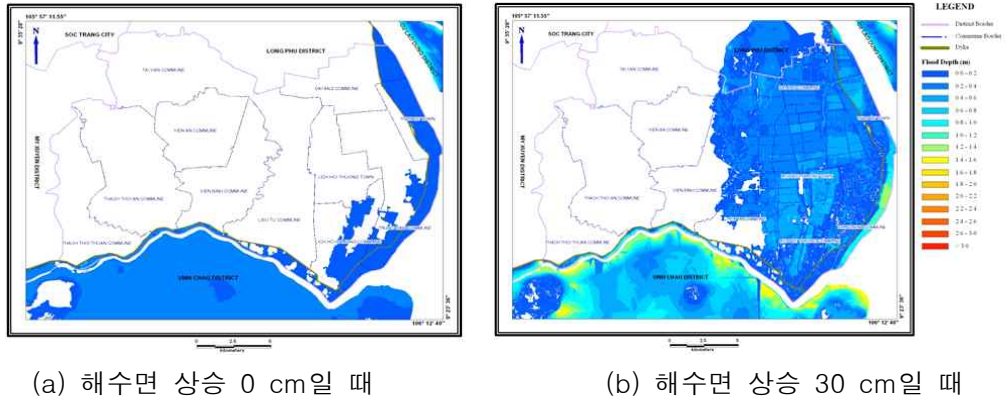


그림 4. 연안지역 해일과 월류에 의한 침수피해 지역 산정 사례

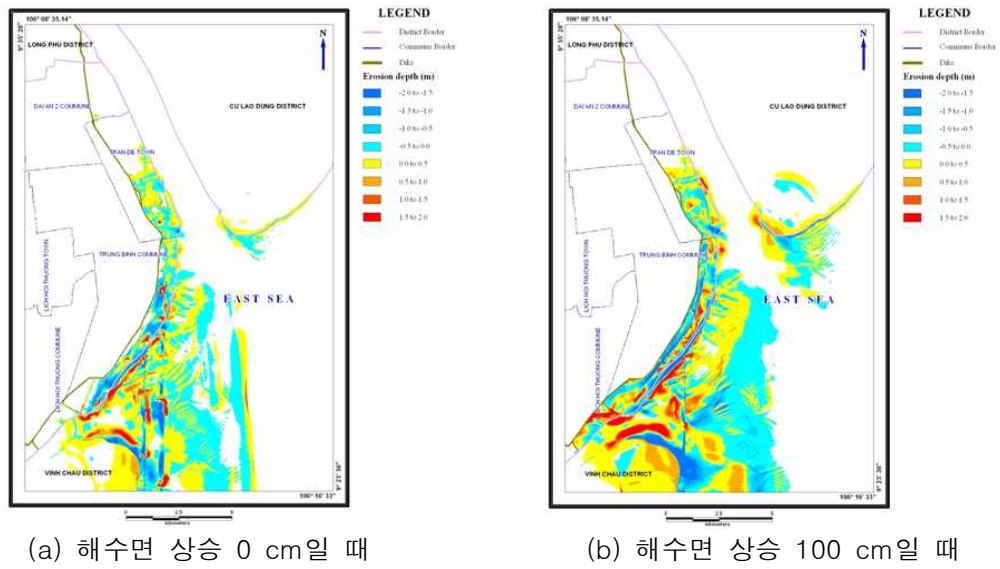


그림 5. 해수면 상승에 따른 연안침식 예측 사례

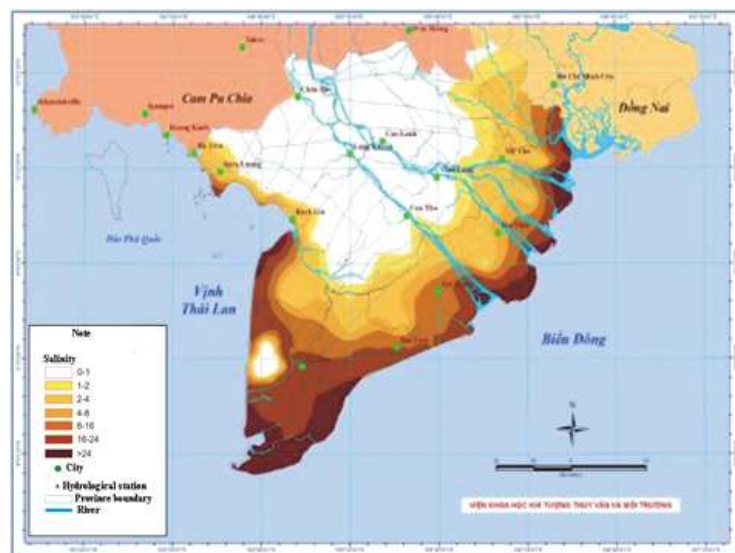
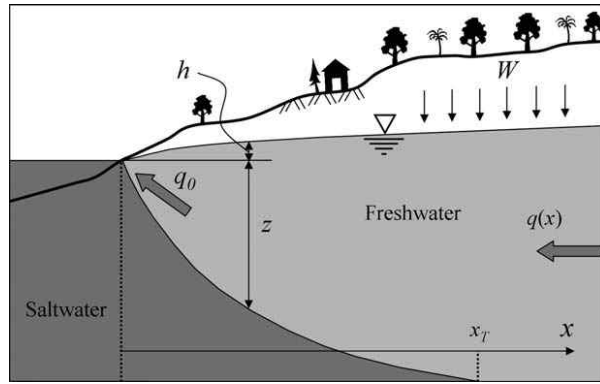
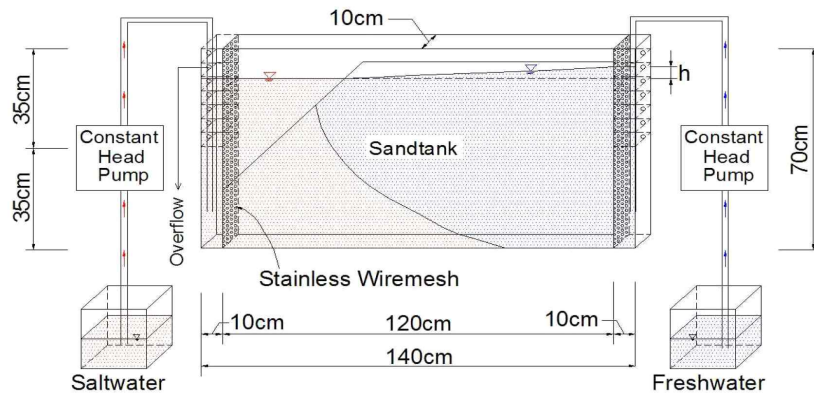


그림 6. 연안지역 지하수 염수침투 예측 사례



(a) 연안 대수층 내 해수침입 모식도



(b) 연안 대수층 내 해수침입 실내실험 장치 예

그림 7. 연안 대수층 내 해수침입 개념과 실험장치 - 연안지역만을 대상으로 하며, 하구나 하천을 고려하지 않음

- 해수면 상승에 따른 연안지역 지하 대수층으로의 염수침투 예측에 대한 연구가 진행되어 옴 (그림 6)
 - 지하수 영역으로 염수 침투에 대한 예측은 기존 우물에서 관측된 자료를 바탕으로, 내삽이나 보간법 같은 간단한 방법을 적용하여 연안지역에 국한하여 예측하고 있는 실정
- 현재 대수층으로의 해수침투에 관한 국내외 연구는 주로 해안 및 도서지역의 대수층 관측(박남식과 이용두, 1997), 실험실 수조를 이용한 담수-염수 경계층 변화(박화준 외, 2009; Oz et al., 2014), 해안 대수층에서의 최대 적정 담수 양수량 산정(서성국 외, 2010), 그리고 수치모형을 이용한 연안 대수층에서의 양수량 변화에 따른 해수침투 모의(심병완과 정상용, 2003; 손용구 외, 2009; Bobba, 1993; Camp et al., 2014)에 초점이 맞춰짐
 - 산업화와 도시화로 인한 환경오염문제가 대두되고 중요시됨에 따라 지표수와 지하수 상호작용 및 강변여과에 대한 연구 진행
 - 최근에는 기후변화에 대한 관심이 증폭됨에 따라 해수면 상승이 해안 대수층에 미치는 영향에 관하여 선진국을 중심으로 연구되기 시작했음에도 불구하고, 국내에서는 해수면 상승에 따른 대수층의 변화 연구가 매우 미진한 상태
 - 국내외를 막론하고 기존 해안 대수층에서의 해수침투에 관한 연구에서는 하천이나 하구를 고려하지 않고, 연안지역 (그림 7)이나 도서지역 (그림 8)만을 대상으로 수행

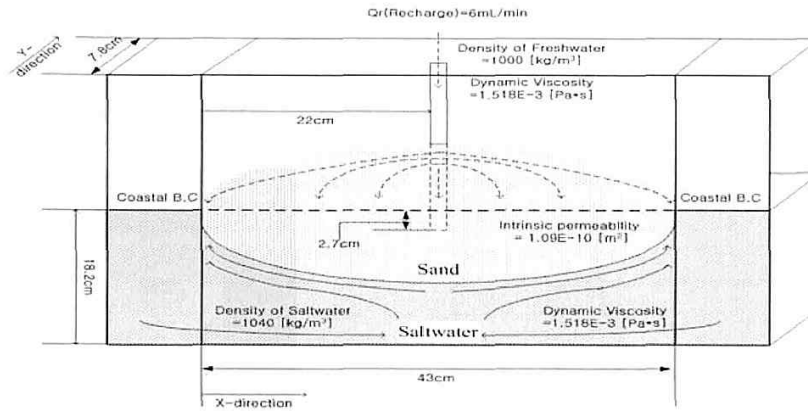


그림 8. 도서지역 해수침입 모식도

- 지하 대수층으로의 염수침투 방지를 위한 해법으로 염수양수, 담수주입, 지하댐 건설 등의 기법이 제안되고, 그 효능에 대해서 연구를 진행
 - 염수양수법이란 대수층 내에 침투한 염수를 양수하여 담수 지하수 영역을 확보하는 방법(그림 9)이며, 담수주입법은 인공적으로 대수층에 담수를 주입하여 침투된 염수를 밀어내는 방법(그림 10)이고, 지하댐건설은 지하 대수층에 댐을 건설하여 염수침투를 차단하고자 하는 방법(그림 11)
 - 현재까지 제안된 지하 대수층으로 염수침투를 저감시키고 방지하는 기법은 시간과 비용 측면에서 비효율적이며, 기법 자체에 대한 효능도 뚜렷하게 밝혀진 바 없음

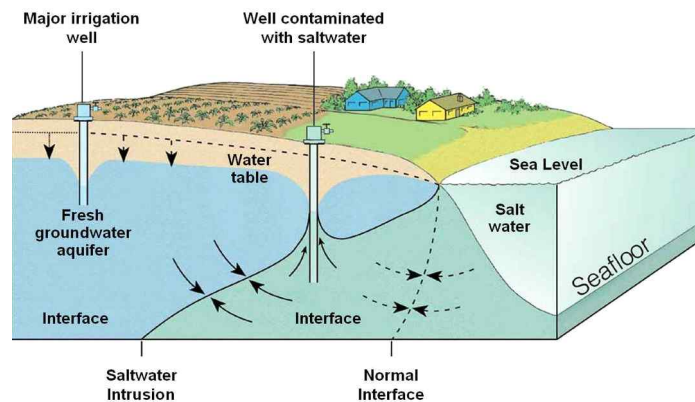


그림 9 염수양수를 통한 염수침투 저감대책

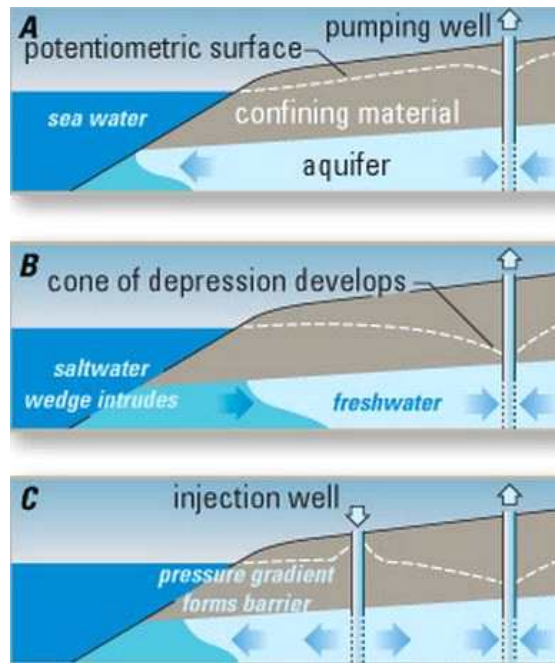


그림 10. 담수주입을 통한 염수침투
저감대책

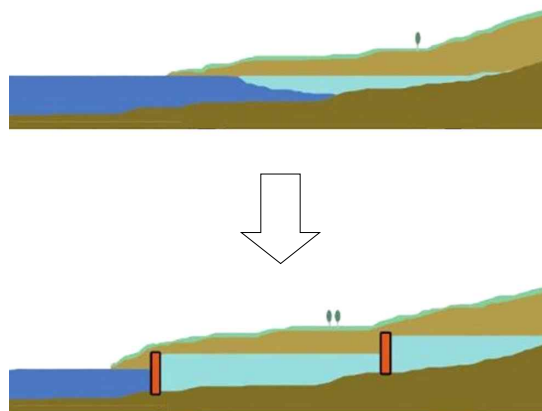


그림 11. 염수침투 방지를 위한 지하댐
건설 개념도

- 현재 대수층으로의 염수침투 해석을 위한 국내 연구의 수준은 선진국에서 이미 개발한 소프트웨어를 단순 적용시키는 단계를 벗어나지 못하고 있음
 - 대수층으로의 염수침투 해석을 위해 표 1과 같은 지하수 유동 해석 수치모형을 사용
 - 이 중 SUTRA, SEAWAT, HST3D, FEFLOW를 가장 널리 사용
 - 이 외에도 Visual MODFLOW는 MODPATH, MT3D, RT3D, PEST 등 다수의 모델링들과 연계가 가능하고, 시각화 가능
 - GMS는 UNIX와 WINDOW 환경 모두에서 사용 가능하며, FEMWATER, MODFLOW와 연계 가능하며, 시각화 가능한 포괄적 그래픽 모델
- 지하 대수층으로의 염수침투를 2차원 혹은 3차원으로 예측하려는 연구가 지속되고 있으나, 하천 흐름특성의 변화를 세밀히 모의하고 이를 지하 대수층의 특성 변화에 반영하는 모형은 전무한 실정

표 1. 염수침투 해석에 사용되는 수치 모형

모델명	특징
SUTRA	2D, 3D, 밀도 변화, 가변 포화 흐름 (variably saturated flow), 용질 혹은 에너지 이동 모델
SEAWAT	3차원 가변 밀도 지하수 흐름 모델
HST3D	3차원 흐름, 열과 용질의 이동 모델
FEFLOW	포화상태, 불포화상태, 질량, 열의 이동, 2D, 3D 지하수 흐름 모델, 시각화 및 GIS 도구 제공
MOCDENSE	유체 밀도와 점성을 선형으로 가정한 흐름 모의
SHARP	다층으로 이루어진 해안 대수층 시스템에서 경계면에 의해 나누어진 담수와 해수의 QUASI-3차원 모델
3DFEMFAT	포화상태 혹은 불포화상태에서의 이동 및 흐름, 순차적 해석에 의한 흐름과 이동, 반복 해석에 의한 밀도 흐름 모델
FEMWATER	3차원, 포화상태, 불포화상태, 밀도 지배적 흐름과 이동 모델

○ 관련기술 특허 현황

제목	비정상 염수빼기 실험장치(Experimental System for Unsteady Saline Wedge)		
출원번호 (일자)	1020080008050 (2008.01.25)	등록번호 (일자)	거절
출원인	서울대학교 산학협력단	국적	대한민국
초록	본 발명은 하구에서 생기는 비정상적인 염수빼기의 거동상태를 실험하기 위한 실험장치에 관한 것으로서, 이를 위해 소정농도의 염수가 채워지며 투명한 재질로 된 염수수조(10); 상기 염수수조(10)의 상측면에 연결되며 소정의 경사각과 길이를 갖는 장방형 단면의 담수공급용 가변경사수로(20); 상기 가변경사수로(20)에 담수를 일정량 공급하기 위한 담수공급수조(30); 상기 염수수조(10)에 연결되어 입수되는 담수량에 비례하여 소정 농도의 염수를 생성하기 위한 염수공급수조(40); 상기 염수수조(10) 내에 설치되어 조석작용을 발생시키기 위한 가동식 웨어(50); 및 담수 및 염수의 공급량과 조석작용을 컨트롤하기 위한 컴퓨터(60);를 포함한다.		
선행분석	• 하구를 통해서 움직이는 비정상 염수빼기의 거동을 살피기 위한 실내 실험 장치임 • 현재 등록 거절된 상태로써 본 제안 과제와의 지적 재산권 분쟁 소지가 없음 • 본 제안 과제 수행 시 참고자료로 활용 가능함		

제목	지하수 내의 담수와 염수의 경계면 측정 장치 및 방법(APPARATUS AND METHOD FOR MEASURING BOUNDARY OF FRESH WATER AND SALT WATER IN UNDERGROUND WATER)		
출원번호 (일자)	1020080089245 (2008.09.10)	등록번호 (일자)	거절
출원인	정현주	국적	대한민국
초록	본 발명은 경계면의 변화가 예상되는 관측공에 밀도와 비례관계를 가지는 전기전도도 값과 담수 대비 염수의 밀도 차이에 의하여 발생하는 수압의 차이를 이용하여 적은 수의 센서를 가지고 담수와 염수의 경계면 위치를 측정하는 지하수 내의 담수와 염수의 경계면 측정 장치와 방법에 관한 것이다. 이를 위해 지면과 지하수 사이에 천공된 관측공 내에 상하로 일정 거리 이격되어 설치되고, 상기 지하수의 전기전도도와 수압을 검출하여 출력하는 복수의 센서부; 및 상기 센서부로부터 출력되는 지하수의 전기전도도와 수압을 저장하고, 상기 센서부 사이의 설치 거리와 각각의 센서부로부터 측정된 수압의 차이에 근거하여 상기 센서부 사이의 평균 밀도 증가율을 산출하며, 각각의 센서부로부터 측정된 전기전도도에 근거하여 밀도 증가분을 산출하여 상기 평균 밀도 증가율을 상기 밀도 증가분으로 나누어 센서부 사이의 경계면의 위치 비율을 산출하고, 상기 경계면 위치 비율에 상기 센서부 사이의 설치 거리를 곱하여 상기 담수와 염수의 경계면의 위치를 산출하여 출력하는 모니터링부를 포함한다.		
선행분석	• 지하수 내 담수와 염수의 경계면 측정을 위한 실내 실험 장치임 • 현재 등록 거절된 상태로써 본 제안 과제와의 지적 재산권 분쟁 소지가 없음 • 본 제안 과제 수행 시 참고자료로 활용 가능함		

제목	자연하천의 하상 변동 수치해석 방법 및 그 장치(Method and Apparatus for Numerical Analysis of Bed Elevation Change in Natural River)		
출원번호 (일자)	1020080103480 (2008.10.22)	등록번호 (일자)	1009805740000 (2010.08.31)
출원인	연세대학교 산학협력단	국적	대한민국
초록	본 발명은 자연하천의 하상 변동 수치해석 방법 및 그 장치에 관한 것으로, 만곡수로에서 유선의 곡률 계산 단계, 만곡부 내측으로 이동하는 이차류 흐름 특성으로 인한 하상응력방향 계산 단계, 하상의 입자가 만곡부 경사면에 위치할 때 받게 되는 중력효과를 반영한 입자이송방향 계산 단계, 이차류 효과와 중력효과를 고려하여 결정된 입자의 이송방향을 이용한 평형유사량의 x, y 성분 계산 단계, 각 요소에서 Exner 방정식을 이용한 요소 행렬 구성 단계 및 상기 요소 행렬구성 단계의 해를 계산하는 단계를 포함하는 자연하천의 하상변동 수치해석 방법 및 그 장치를 제공함으로써 이차류 효과와 중력 효과를 반영한 2차원의 하상변동에 대한 해석이 가능케 된다.		
선행분석	• 하천에서의 하상 변동 해석을 위한 수치해석 방법 및 장치에 관한 기술임 • 본 제안 과제는 하천수 및 지하수의 거동과 염수영향 평가를 위한 수치모형으로 상기 기술과 지적 재산권 분쟁 소지가 없음		

제목	CDG 기법을 적용한 유체 흐름의 2차원 유한요소 수치해석 방법(Method for 2D Finite Element Numerical Analysis of Fluid Flow with CDG Method)		
출원번호 (일자)	1020070137318 (2007.12.26)	등록번호 (일자)	100918245 (2009.09.14)
출원인	연세대학교 산학협력단	국적	대한민국
초록	본 발명에 의한 CDG 기법을 적용한 유체 흐름의 2차원 유한요소 수치해석 방법은 각 요소를 구성하는 다수의 절점의 지형좌표, 초기값, 조도계수, 경계조건, 경계값, 시간단위, 계산 시간 간격을 포함하는 기본자료를 입력받는 기본자료 입력 단계; 수로 측벽의 활동경계조건을 설정할 때 요구되는 수로 측벽의 법선벡터의 방향을 계산하는 법선 방향 계산 단계; 시간에 대한 편미분항을 이산화시켜 음해법을 적용할 때 전단계 시간준위에서 계산된 해를 갱신하는 β 계산 단계; 상기 각 요소를 기준으로 유한요소기법을 적용하여 유도되는 행렬을 구성하는 요소행렬 구성 단계; 요소행렬의 행과 열을 구성하는 행렬 목록을 작성하는 행렬 목록 작성 단계;를포함하여 구성된다. 이로써, 하천 설계, 하천 정비 및 유지 관리, 하천구조물 설계시 안정성 평가, 하천복원에 따른 결과 예측, 홍수량 산정에 따른 결과, 실내 실험 수로 결과 비교 등 현재 수공학 분야에 관련된 모든 2차원 개수로 분야에서 유용하게 사용할 수 있도록 한다.		
선행분석	• 2차원 개수로 흐름 해석을 위한 CDG 유한요소 수치해석 방법에 관한 기술임 • 본 과제에서 제안하는 하도에서의 흐름은 수평 2차원 흐름 해석이 아닌 수직 2차원 흐름 해석이므로, 상기 기술과 지적 재산권 분쟁 소지가 없음		

제목	유한체적법에 의한 2차원 하천 흐름, 범람 해석 방법(Numerical Analysis Method of 2-dimentional Flow and Inundation)		
출원번호 (일자)	1020100062976 (2010.06.30)	등록번호 (일자)	1011510430000 (2012.05.22)
출원인	경북대학교 산학협력단	국적	대한민국
초록	마른 하도 및 복잡한 지형에서의 해석이 가능한 유한체적법에 의한 2차원 하천 흐름/범람 해석 방법이 제시된다. 본 발명에 따른 유한체적법에 의한 2차원 하천 흐름/범람 해석 방법은, n시간에서 $n+1$시간까지의 보존변수를 계산하며, 상기 $n+1$시간에서의 보존변수는, 계산격자에서 회전 변환된 보존변수를 구하는 단계, 계산격자의 경계면에서의 수직방향 흐름율과 법선방향 흐름율을 구하는 단계, 상기 수직방향 흐름율과 법선방향 흐름율을 전체좌표계로 변환하는 단계, 상기 계산격자에서 생성항을 구하는 단계 및 상기 회전 변환된 보존변수, 상기 수직방향 흐름율과 법선방향 흐름율 및 상기 생성항을 이용하여 $n+1$시간에서의 보존변수를 구하는 단계를 포함한다. 본 발명에 따른 유한체적법에 의한 2차원 하천 흐름/범람 해석 방법에 의하면, 마른 하도뿐만 아니라 복잡한 지형에서의 수공학 분야의 문제들도 해석할 수 있는 효과가 있다.		
선행분석	• 유한체적법에 의한 2차원 하천 흐름 해석 방법에 대한 기술임 • 본 과제에서 제안하는 하도에서의 흐름은 수평 2차원 흐름 해석이 아닌 수직 2차원 흐름 해석이므로, 상기 기술과 지적 재산권 분쟁 소지가 없음		

제목	텐서형 와점성계수를 가진 2차원 하천흐름모형을 이용하여 천수흐름을 해석하는 방법(Method for analyzing shallow water flow using the two-dimensional river flow model with tensor-type eddy viscosity)		
출원번호 (일자)	1020090129530 (2009.12.23)	등록번호 (일자)	1011065480000 (2012.01.10)
출원인	서울대학교 산학협력단	국적	대한민국
초록	본 발명은 텐서형 와점성계수를 가진 2차원 하천흐름모형을 이용하여 천수흐름을 해석하는 방법에 관한 것으로, 중력가속도(g), 기준선으로부터 하상까지의 거리(H), 조도계수(n), 직교좌표계에서의 x 방향과 y 방향으로의 난류의 발생 정도를 나타내는 와점성계수(v_{xx} , v_{yy}) 및 직교좌표계와 일치하지 않는 방향으로의 난류 형성 정도를 나타내는 와점성계수(v_{xy} , v_{yx})가 입력자료로 입력장치에 의해 메인 메모리에 입력되고, 중앙처리장치가 상기 입력자료들과 일정한 수학적식에 유한요소법이 적용되어 수치모형화된 메인 메모리 내의 프로그램을 이용해 일정한 수학적식들을 만족하는 임의의 시간과 위치에서의 수심(h)과 종방향 유속(u) 및 횡방향 유속(v)을 산출함으로써, 수평 2차원 평면 내에서 4개의 방향성을 가지는 와점성계수를 도입하고 텐서형 와점성계수에 근거한 2차원 유한요소모형을 적용하여 다양한 흐름 조건에서 복잡한 유속구조를 보다 정확히 재현할 수 있는 효과가 있다.		
선행분석	- 유한요소법에 의한 2차원 하천 흐름 해석 방법에 대한 기술임 - 본 과제에서 제안하는 하도에서의 흐름은 수평 2차원 흐름 해석이 아닌 수직 2차원 흐름 해석이므로, 상기 기술과 지적 재산권 분쟁 소지가 없음 - 와점성계수 계산을 위한 난류모형의 여러 가지 기법이 이미 알려져 있으며, 일반적인 기술에 해당하므로, 상기 기술과 지적 재산권 분쟁 소지 없음		

제목	반응항을 결합한 이송-분산 방정식의 수치모형을 통해 하천에 유입된 열 오염물의 거동을 해석하는 방법(Method for analyzing heat pollutant behavior in river using numerical model of advection-dispersion equation incorporating reaction term)		
출원번호 (일자)	1020100036856 (2010.04.21)	등록번호 (일자)	1010942380000 (2011.12.08)
출원인	서울대학교 산학협력단	국적	대한민국
초록	본 발명은 반응항을 결합한 이송-분산 방정식의 수치모형을 통해 하천에 유입된 열 오염물의 거동을 해석하는 방법에 관한 것으로, 유속(u,v), 분산계수의 텐서($D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$), 열 교환계수(K), 물의 밀도(ρ), 물의 비열(c), 수심(h), 이슬점 온도(Td) 및 일사량(qsw)이 입력자료로 메인 메모리에 입력되고, 중앙처리장치가 상기 입력자료들과 일정한 수학적식에 유한요소법이 적용되어 수치모형화된 메인 메모리 내의 프로그램을 이용해 일정한 상기 수학적식을 만족하는 임의의 시간과 위치에서의 수온(T)을 산출하는 것을 특징으로 함으로써, 자연하천에 유입된 열 오염물질의 확산 및 혼합메커니즘에 대한 기초적이고 근본적인 지식 및 이해의 향상에 도움이 될 것이고, 열 오염물질의 거동을 2차원으로 보다 가시적으로 나타낼 수 있으며, 실무에 효율적으로 활용될 수 있는 효과가 있다.		
선행분석	- 이송-분산 방정식의 수치모형을 통해 열 오염물의 거동을 해석하는 기술임 - 본 과제에서 제안하는 모형은 수직 2차원 모형에 해당하므로, 상기 기술과 지적 재산권 분쟁 소지 없음 - 이송-분산 방정식과 수온방정식은 수리거동 해석을 위한 일반적으로 알려진 지식에 해당하므로, 지적 재산권 분쟁 소지 없음		

-
- 전문사이트인 특허정보넷 키프리스(www.kipris.or.kr) 홈페이지를 참조하여, 핵심어 중심의 선행특허분석을 실시
 - 수치모형과 관련하여 지표수 흐름에 대한 수평 2차원 모형의 개발이 주를 이루고 있으며, 지표수-지하수 상호작용을 다루는 연구는 진행된 바 없음
 - 지표수 염수짜기 거동에 대한 실험장치와 지하수 담수-염수 경계면 측정장치에 대한 특허등록은 거절된 상태이며, 본 제안 과제를 진행함에 있어 참조할 만하며, 활용 가능성 있음
 - 따라서, 본 제안 과제와 중복되거나 중복 가능성이 있어 지적 재산권 분쟁 소지가 있는 특허기술은 존재하지 않음
-

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구개발 추진 전략, 체계 및 일정

가. 연구개발 추진 전략

○ 본 연구를 위한 추진전략은 다음과 같음.

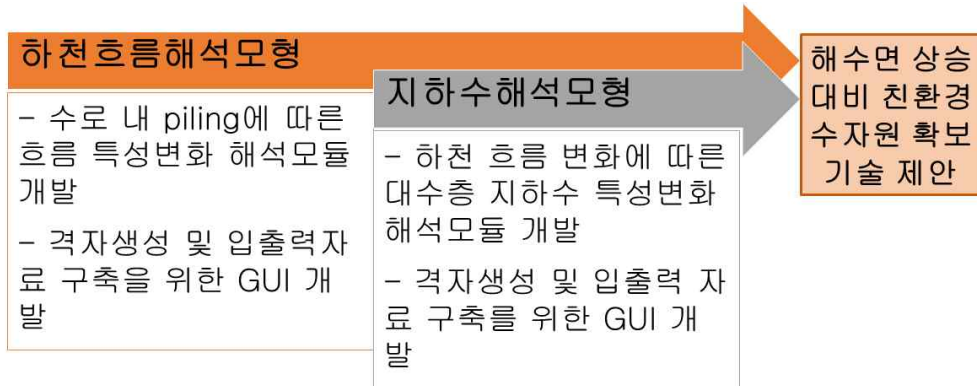
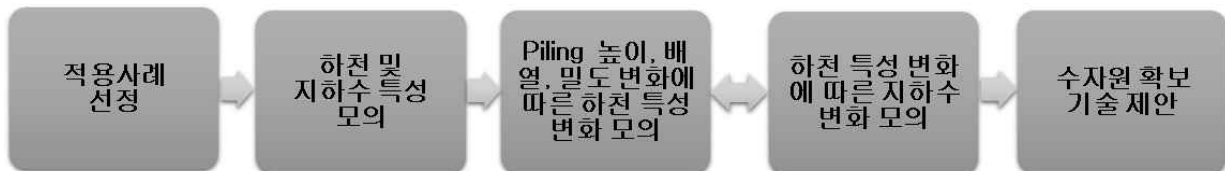


그림 12. 추진전략

○ 하천흐름 및 지하수 해석 프로그램 개발을 위한 추진방법은 다음과 같음.

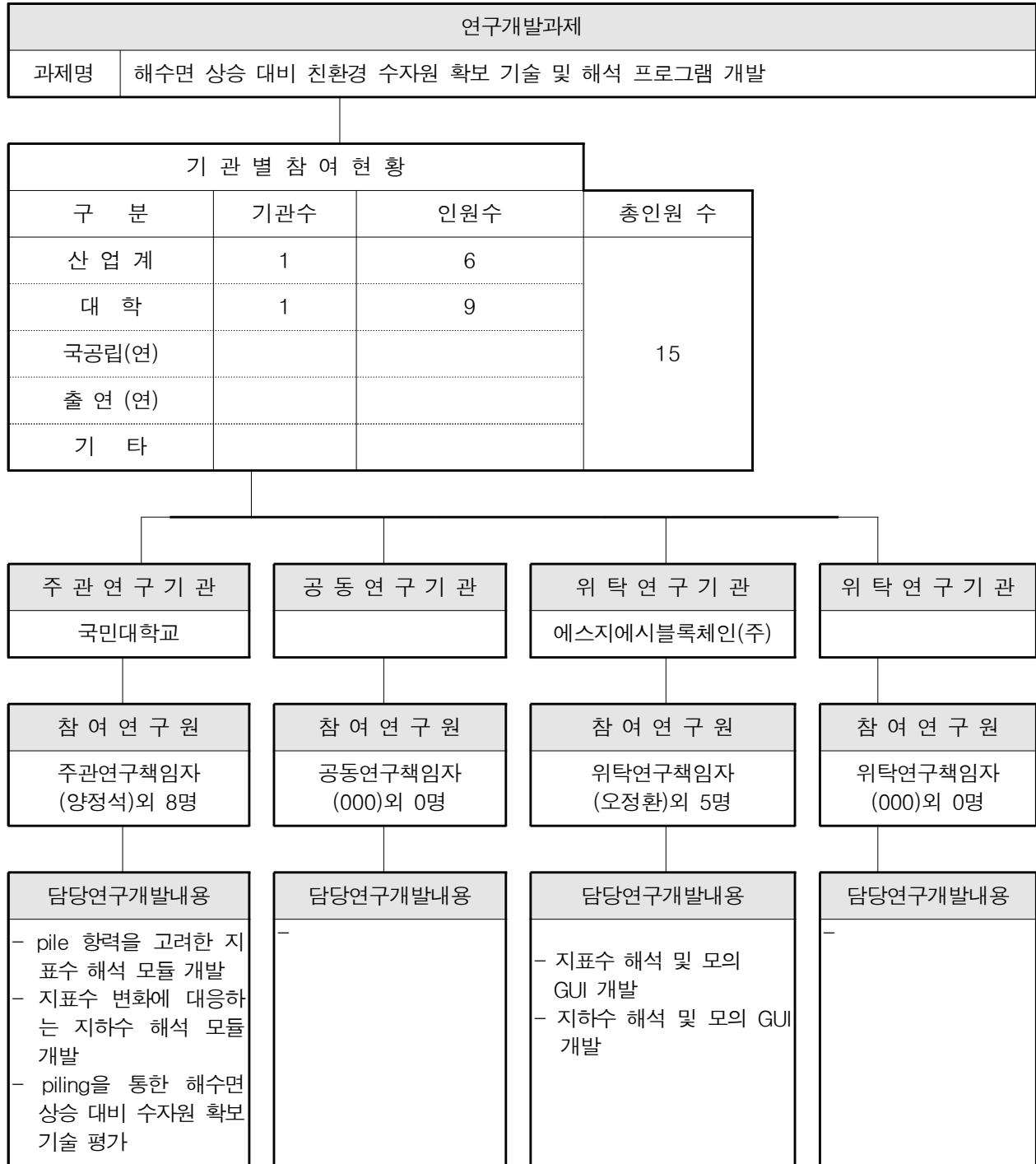


○ 해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술 제안을 위한 추진방법은 다음과 같음.



나. 연구개발 추진 체계

○ 연구수행 체계도



다. 연구개발 추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄															
주관	해수면 상승 대비 친환경 수자원 확보 기술 및 해석 프로그램 개발 (국민대 학교)	1	1-1	1-1-①	자료 조사	문서	15								
					알고리즘 작성	알고리즘	20								
				1-1-②	알고리즘에 기초한 코딩 작업	코드	25								
					코딩 수정 및 보완	해석모듈	20								
				1-1-③	관측자료 수집	문서	15								
					모형 적용 및 검증	해석모듈	22								
		2	2-1	2-1-①	자료 조사	문서	15								
					알고리즘 작성	알고리즘	20								
				2-1-②	알고리즘에 기초한 코딩 작업	코드	25								
					코딩 수정 및 보완	해석모듈	20								
				2-1-③	관측자료 수집	문서	15								
					모형 적용 및 검증	해석모듈	22								
		3	3-1	3-1-①	piling 조건변화에 따른 지표수, 지하수 변화 해석 및 평가	보고서	54								
위탁	친환경 수자원 확보 기술 해석을 위한 GUI 개발 ((주)알엔 에이솔루 션)	1	1-2	1-2-①	하천흐름 모형 입출력 구조 분석	보고서	10								
				1-2-②	하천흐름 모형 GUI 개발	SW	23								
		2	2-2	2-2-①	지하수 모형 입출력 구조 분석	보고서	10								
				2-2-②	지하수 모의 모형 GUI 개발	SW	38								

2. pile 항력을 고려한 하천 흐름 특성변화 해석 프로그램 개발

가. 흐름 지배방정식

○ 수심 적분된 연속방정식과 Reynolds 방정식을 지배방정식으로 사용.

- Boussinesq 와점성 개념의 포물선 분포 모형 (parabolic eddy viscosity model)을 적용시키고, pile에 의한 항력항을 추가하면, 다음 식 (1)~(3)과 같은 지배방정식을 얻을 수 있음.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_{bx} + \frac{1}{\rho} \frac{f_{Dx} h}{1 - c_p} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_{by} + \frac{1}{\rho} \frac{f_{Dy} h}{1 - c_p} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

- 여기서 $p = hu$, $q = hv$ 의 관계에 있으며, p , q 는 x , y 방향의 단위 폭 당 유량성분, h 는 수심, u , v 는 x , y 방향의 수심평균 유속성분, t 는 시간, g 는 중력가속도, z_b 는 하상고,

τ_{bx} 와 τ_{by} 는 하상전단응력의 x , y 방향 성분, f_{Dx} 와 f_{Dy} 는 단위체적당 pile에 의한 항력의 x , y 방향 성분, 그리고 c_p 는 pile 체적 농도임.

- ν_t 는 난류 동점성 계수 또는 와점성 계수으로써, 아래와 같은 관계식을 적용함.

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} U_* h \quad (4)$$

• 여기서 κ 는 von Kármán 상수(≈ 0.4), U_* 는 전단속도임.

- 식(2)와 (3)은 보존형태의 방정식이고, 이를 비보존형태의 방정식으로 나타내고 하나의 행렬식으로 표현하면 다음과 같음.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{A} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{B} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{D}_y}{\partial y} + \bar{F} = \bar{0} \quad (5)$$

$$\bar{U}^T = (h \ p \ q) \quad (6)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ gh - \frac{p^2}{h^2} & 2\frac{p}{h} & 0 \\ -\frac{pq}{h^2} & \frac{q}{h} & \frac{p}{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c - u^2 & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\frac{pq}{h^2} & \frac{q}{h} & \frac{p}{h} \\ gh - \frac{q^2}{h^2} & 0 & 2\frac{q}{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -uv & v & u \\ c - v^2 & 0 & 2v \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{D}_x = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\nu_t \frac{\partial p}{\partial x} \\ -\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{D}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ -\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \\ -2\nu_t \frac{\partial q}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_{bx} + \frac{1}{\rho} \frac{f_{Dx} h}{1 - c_v} \\ gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_{by} + \frac{1}{\rho} \frac{f_{Dy} h}{1 - c_v} \end{bmatrix} \quad (11)$$

• 식(7)과 (8)에서 $c = \sqrt{gh}$ 로 파속을 나타냄.

나. Pile의 밀도

○ pile의 밀도는 아래와 같이 정의됨(Wu et al., 2005).

$$\lambda_a = \frac{4c_p}{\pi d_p} \quad (12)$$

- 여기서 d_p 는 pile 직경, 그리고 c_p 는 pile의 체적 농도로써, 임의의 면적($s_x \times s_y$)을 차지하는 물기둥의 전체 체적에 대한 물기둥 내 pile이 차지하는 체적 비율을 나타내며, 아래와 같이 표현할 수 있음.

$$c_p = \frac{V_p}{V} = N_p \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{\min(h, h_p)}{s_x s_y h} \quad (13)$$

- 여기서 V 는 평가체적, V_p 는 평가체적 내의 pile 체적, N_p 는 평가체적 내의 pile 개수, h_p 는 pile높이임.
- 식(13)을 식(12)에 대입하여 정리하면 아래와 같음.

$$\lambda_a = \frac{4c_p}{\pi d_p} = N_p \frac{d_p \min(h, h_p)}{s_x s_y h} = N_p \frac{A_p}{s_x s_y h} \quad (14)$$

- 여기서 $A_p = d_p \min(h, h_p)$ 는 흐름방향으로 하나의 pile에 대한 투영 면적임.
- 따라서 pile 밀도를 정의하는 식(12)는 임의의 면적을 가지는 물기둥에 대한 pile의 총 투영면적의 비율을 나타냄.
- 식(13)과 식(14)를 살펴보면, pile 밀도와 pile 체적농도는 pile 높이와 수심 비율 즉, 수몰 pile과 비수몰 pile일 때 다르게 산정될 수 있기 때문에, pile 밀도 표현에 대한 기준이 필요함.
- 본 연구에서는 pile 사이의 간격이 x, y 방향으로 동일한 s_p 라고 가정하고, 면적 $s_p \times s_p$ 의 pile 총 즉, $h_p = h$ 에서의 하나의 pile에 의한 밀도를 기준값으로 사용하며, 다음과 같이 정의함.

$$\lambda_a^* = \frac{N_p d_p}{s_p^2} \quad (15)$$

- 비수몰 pile인 경우, $\min(h, h_p) = h$ 이므로, 수심에 대한 pile 높이 비율이 항상 1이지만, 수몰 pile의 경우 $\min(h, h_p) = h_p$ 이며, 따라서 기준값으로 사용되어지는 pile 총 밀도 λ_a^* 를 수심에 대한 pile 높이 비율에 따라 변화시켜야 함.
- 따라서 식(14)로부터 아래와 같은 관계식이 유도됨.

$$\lambda_a = \lambda_a^* \frac{\min(h, h_p)}{h} \quad (16)$$

- pile의 직경과 높이, 그리고 pile 층에서의 pile 밀도가 주어지면, 그 밖의 단위면적당 체적농도, 단위면적당 pile 개수, pile 사이의 간격을 유도 가능함.
- pile 사이의 간격

$$s_p = \sqrt{d_p / \lambda_a^*} \quad (17)$$

- pile 층의 pile 밀도 λ_a^* 는 단위면적의 pile 층 내에서의 pile 밀도인 $N_p d_p$ 와 같아야 하므로,

단위면적당 pile 개수는 다음과 같음.

$$N_p = \lambda_a^*/d_p \quad (18)$$

다. Pile에 의한 항력

- 한 무리의 pile이 존재할 경우, 유체요소의 흐름에 대한 전체 저항 (τ)은 하상 전단응력 (τ_b)과 pile에 의한 항력 (F_D)으로 구성됨.

- 저항 관계식(Stone and Shen, 2002; Wu et al., 2005).

$$(1 - c_p)\tau = (1 - c_p)\tau_b + N_p F_D \quad (19)$$

- 여기서 N_p 는 단위면적당 pile 개수, F_D 는 하나의 pile에 의한 항력을 나타냄.
- 계수 $(1 - c_p)$ 는 pile을 제외한 유체만의 체적을 고려하기 위한 것임.
- pile 사이의 간격이 매우 클 경우 매우 성긴 분포를 보이게 되며, 이러한 경우에 $1 - c_p \approx 1.0$ 에 근사하는 반면, 매우 조밀하게 분포된 pile의 경우, 전체 저항의 대다수를 pile 항력이 차지하고, 하상 전단응력은 상대적으로 매우 작기 때문에 식(19)에서 하상 전단응력 항이 소거될 수 있음
- 식(19)에서 양변을 $(1 - c_p)$ 로 나누면 다음과 같음.

$$\tau = \tau_b + \frac{N_p F_D}{1 - c_p} \quad (20)$$

- 따라서 식(20)에서 pile이 존재하지 않는다면, 전체 저항 (τ)은 하상 전단응력 (τ_b)과 같음.

- 단위면적 내에 존재하는 모든 pile에 의한 항력의 정의

- 하나의 pile에 의한 항력은 다음과 같이 정의됨.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_p U_p^2 \quad (21)$$

- 여기서 C_D 는 항력계수, ρ 는 유체밀도, 그리고 U_p 는 pile 층에서의 평균유속.
- 식(20)에서 $N_p F_D$ 는 단위면적 내에 존재하는 모든 pile에 의한 항력을 나타내며, 따라서 다음과 같이 표현 가능.

$$N_p F_D = \frac{1}{2} C_D \rho N_p d_p \min(h, h_p) U_p^2 \quad (22)$$

- 단위면적에 대한 pile 밀도의 정의로부터 다음 관계식이 유도됨.

$$N_p d_p = \lambda_a^* = \lambda_a \frac{h}{\min(h, h_p)} \quad (23)$$

- 따라서 식(22)를 다음과 같이 표현할 수 있음.

$$N_p F_D = \frac{1}{2} C_D \rho \lambda_a h U_p^2 \quad (24)$$

○ 항력계수 정의

- 식(24)에서 항력계수 C_D 는 pile 배열로 인해서 흐름 폭이 축소된 단면에서의 유속 U_{pm} 이 아닌 배열 사이사이의 전체 단면을 통과하는 흐름의 유속 (apparent velocity) U_p 에 기초하고 있음 (그림 12).

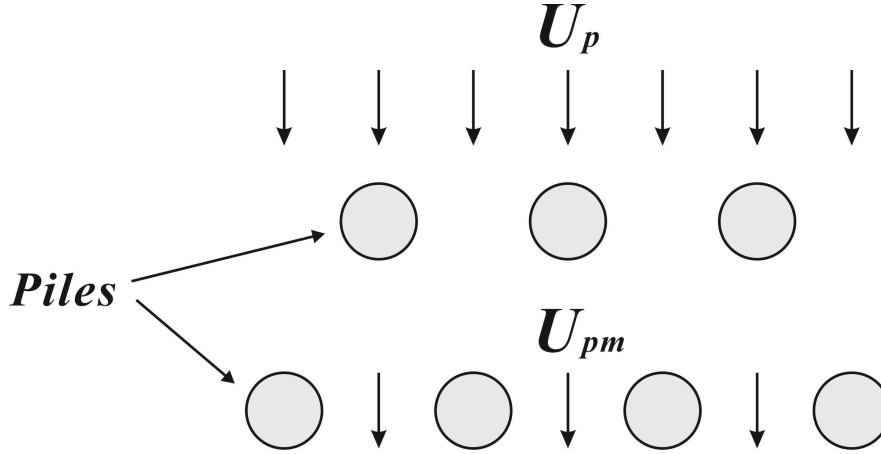


그림 13. 유속의 정의 개념도

- 하지만 pile 밀도, pile 크기, 그리고 pile 레이놀즈수가 변해도 배열로 인해서 단면의 폭이 축소된 흐름의 유속 U_{pm} 에 기초한 항력계수 C_{Dm} 의 변화가 작기 때문에, 조건이 변화함에 따라 변화량이 큰 C_D 를 사용하는 것보다, C_{Dm} 을 사용하는 것이 더욱 합리적임 (Stone and Shen, 2002).
- C_{Dm} 과 U_{vm} 을 적용시킨 pile 항력은 $F_D = 1/2 C_{Dm} \rho A_p U_{pm}^2$ 이므로, C_D 와 C_{Dm} 의 관계식은 다음과 같이 표현됨.

$$C_D = C_{Dm} \frac{U_{pm}^2}{U_p^2} \quad (25)$$

- Stone and Shen (2002)은 식(25)에서 C_{Dm} 의 평균값 1.05를 사용할 것을 제안.

○ Pile의 배열

- pile이 균일하게 분포되어 있을 경우, 단면에서의 유량이 보존되기 때문에, 다음과 같은 관계식을 유도 가능.

$$U_p = U_{pm} \left(1 - \frac{d_p}{s_p} \right) = U_{pm} (1 - \lambda_a^* s_p) \quad (26)$$

- 엇갈리게 분포된 pile의 경우라면, 유속은 다음과 같이 정의(Stone and Shen, 2002).

$$U_p = U_{pm} (1 - d_p \sqrt{N_p}) = U_{pm} (1 - \sqrt{\lambda_a^* d_p}) \quad (27)$$

- 식(26)과 식(27)을 식(25)에 대입하여, 균일 분포와 엇갈린 분포일 경우의 항력계수 C_D 를 계산 가능.

○ 평균유속 관계식

- 비수몰 pile의 경우에, pile 층 평균유속 U_p 는 수심 평균유속 U 와 같음.

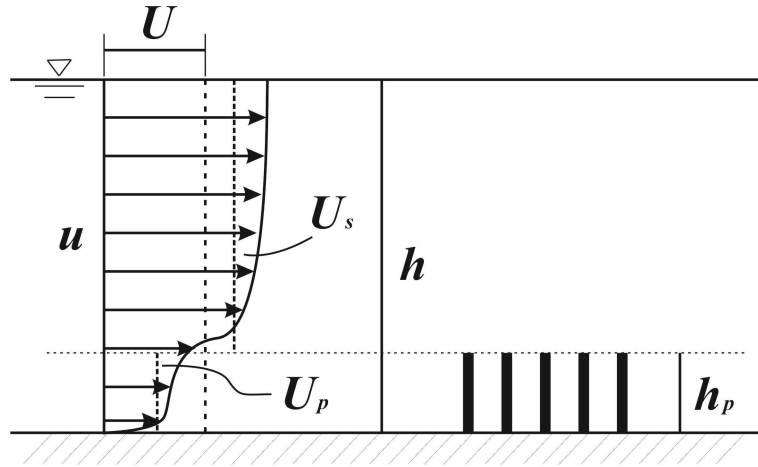


그림 14. 수몰 pile의 평균유속 개념도

- 그러나 수몰 pile의 경우 pile 층 평균유속과 수심 평균유속은 차이를 보이며(그림 13), 이 때 U_p 는 다음과 같은 Stone and Shen (2002)의 관계식을 이용.

$$\frac{U_p}{U} = \sqrt{\frac{\min(h, h_p)}{h}} \eta_p \quad (28)$$

$$\eta_p = \left[\frac{1 - \sqrt{d_p \lambda_a^*}}{\min(h, h_p) \sqrt{d_p \lambda_a^*}} \right] \quad (29)$$

- 결국 식(24)와 식(28)을 이용하여 pile 항력을 다음과 같이 정리할 수 있고, 이를 식(11)과 같이 흐름 지배방정식에 사용.

$$N_p F_D = \frac{1}{2} C_D \rho \lambda_a h \frac{\min(h, h_p)}{h} \eta_p^2 U^2 = f_D \quad (30)$$

라. 하상 전단응력

- 하상 전단응력은 Manning 공식을 이용하여 다음과 같이 정의 및 계산됨.

$$\tau_b = \rho \frac{g n^2}{R_s^{1/3}} U^2 \quad (31)$$

- 여기서 n 은 Manning 조도계수, g 는 중력가속도, R_s 는 동수반경.

○ 동수반경의 정의

- 본 연구에서는 Wu et al.(2005)이 제시한 pile 층과 non-pile 층에서의 동수반경을 가중 평균하는 아래와 같은 식을 이용.

$$R_s = \frac{h_p}{h} \frac{h_p s_p}{2h_p + s_p} + \frac{h - h_p}{h} (h - h_p) \quad (32)$$

- 비수물 pile의 경우, $h_p = h$ 이므로, 식(32)는 아래와 같음.

$$R_s = \frac{hs_p}{2h + s_p} \quad (33)$$

- 또한 pile이 존재하지 않을 경우, 식(32)는 $R_s = h$ 와 같음.
- pile이 매우 성긴 분포를 이루고 있는 경우 ($s_p \gg 2h_p$), $R_s \approx h$ 임.

3. piling을 통한 하천 흐름 특성변화에 따른 대수층에서의 지하수 특성변화 해석을 위한 프로그램

가. 흐름 지배 방정식

○ 지하수 유동 방정식

- 일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해서 흐르는 3차원 지하수 유동은 아래 식을 이용.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (34)$$

- 여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x, y, z 좌표축에 따른 수리전도도, W 는 지하수 단위체적당 의체적흐름, h 는 수두, S_s 는 비 저류율, t 는 시간, S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 공간의 함수이고, W 는 시간과 공간의 함수.
- 유한차분법을 이용한 지하수 흐름 방정식의 전개는 연속방정식의 적용을 통해 격자 내부에서 유입되고 유출되는 모든 흐름의 합은 격자 내부에서 저류변화율과 반드시 같아야하므로, 지하수 밀도가 일정하다는 가정 하에 격자에 대한 흐름의 평형을 나타내는 연속 방정식은 아래와 같음.

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (35)$$

- 여기서 Q_i 는 격자로 유입되는 흐름율, S_s 는 비저류율, ΔV 는 셀의 체적, Δh 와 Δt 는 수두변화 및 시간.

○ Darcy's law

- 특정한 층을 통과하는 물의 유동은 유입되고 유출되는 물의 높이 차이에 비례하고, 유동 경로 길이에 반비례 한다는 것을 발견하면서 매질 특성에 의존하는 계수 K 에 비례.

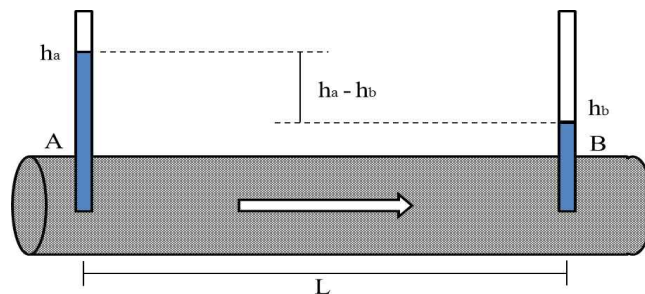


그림 15. Darcy's law 개념도

*Applied Hydrogeology(Fetter, 1988)

- 유입되는 유량 Q 는 A지점에서 B지점까지 수두차 h 에 비례하고 유동길이 L 에 반비례 .

$$Q \propto h_a - h_b \text{ and } Q \propto 1/L \quad (36)$$

- 유량은 A지점에서 파이프의 단면적에 비례하므로 비례상수 K 를 위의 식(36)과 결합한 것이 Darcy 법칙이며 아래의 식과 같음.

$$Q = -KA\left(\frac{dh}{dl}\right) \quad (37)$$

- 여기서, dh/dl 은 수리경사, 음의 부호는 유동이 수리수두가 감소하는 방향으로 일어남을 의미.

나. 유출량 산정 방식

○ 유출량 산정 방식

- NRCS-CN법은 미국자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service, NRCS)에서 실험적 경험을 바탕으로 제시한 방법
- 유효강우량 또는 직접유출량을 구하는 방법으로써 아래와 같은 간단한 공식으로 표현

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (38)$$

- 여기서, F 는 t 시간에서 흙의 저류량(mm), S 는 흙이 포화되었을 경우의 저류량(mm), Q 는 직접유출량(mm), P 는 누가강우량(mm).
- 어떤 시간에서의 흙의 저류량과 완전 포화되었을 경우의 저류량 비율이 직접유출량과 누가강우량의 비율과 같다고 가정.
- 직접유출량은 누가강우량에서 일정 비율로 발생되는데 그 비율이 바로 흙이 완전 포화되었을 경우의 저류량(S)에 대한 어느 시간에서의 저류량(F).
- 강우 발생 초기에는 강우의 전부가 침투 등을 통해 손실되며, 강우강도에 따라 일정 시간이 경과된 후에 유출이 발생되기 때문에 초기 침투 등에 의한 손실을 고려.
- Bosznay(1989)은 초기손실 값을 $0.0 \sim 0.3S$ 의 범위를 가진다는 연구결과를 보였으며, NRCS는 경험을 바탕으로 $0.2S$ 의 관계식을 제시.
- 초기손실은 표면 굴곡에 의한 저류, 차단, 초기침투 등을 포함하고 S 의 결정은 침투의 진행 상태에 따라 크게 다름.
- 침투는 흙의 종류, 지표의 상태 등에 따라 다르기 때문에 NRCS는 이러한 흙의 종류, 지표 상태에 따라 S 를 구하는 방법을 다음과 같이 제시.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \text{ (SI 단위, mm)} \quad (39)$$

- 여기서, CN은 Curve Number(곡선 번호)로써 NRCS에서 흙의 종류 및 지표 상태에 따라 정해지는 값.
- 최종적인 직접유출량 Q 는 다음과 같은 식으로 정리.

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & , P \geq 0.2S \\ 0 & , P < 0.2S \end{cases} \quad (40)$$

다. 입력 매개변수

○ 비산출률(Specific yield, S_y) / 비보유율(Specific retention, S_r)

- 비산출률(S_y)은 포화된 매질로부터 중력에 의해 배수되는 물의 체적을 비율.

$$S_y = \frac{W_V}{V} \quad (41)$$

• S_y 는 비산출률, W_V 는 중력으로 인해 배수되는 물의 체적, V 는 매질의 체적

- 비보유율(S_r)은 중력배수에 저항하여 매질이 보유할 수 있는 물의 체적 비율.

$$S_r = \frac{W_R}{V} \quad (42)$$

• S_r 은 비보유율, W_r 은 중력배수 이후의 매질이 보유하고 있는 물의 체적, V 는 매질의 체적

- 비산출률과 비보유율의 합은 공극률이고 아래 그림15 는 비산출률을 보여주는 토양 분류도

$$n = S_y + S_r \quad (43)$$

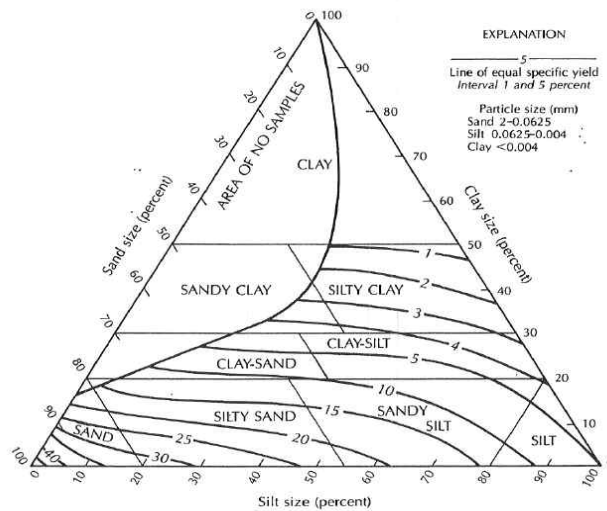


그림 16. 토양분류도

*Applied Hydrogeology(Fetter, 1988)

• 비산출률은 실험적 측정에 의해 결정되며 매질의 입경이 증가함에 따라 증가

○ 비저류계수 (Specific storage, S_s)

- 단위 수두변화에 대한 입자와 공극수의 압축으로 인해 저장되거나 배출되는 포화층의 단위 체적당 물의 양

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad (44)$$

- 여기서 ρ_w 는 물의 밀도(kg/m^3), g 는 중력가속도(m/s^2), α 는 대수층 구성입자의 압출률(N/m^2), n 은 공극률, β 는 물의 압출률(N/m^2).
- 비저류계수는 $1/L$ 차원을 가지며 피압대수층에서 압력전달률에 반비례하고 소성점토인 경우 $0.01m^{-1}$, 기반암의 경우 $10^{-7}m^{-1}$ 정도의 매우 작은 값(한정상, 1998).

○ 저류계수 (Storativity, S)

- 대수층 내에 저류되어 있던 물이 단위수두변화에 따라 단위면적을 통해 유입/유출 될 수 있는 양을 무차원으로 표시

$$S = bS_s \quad (45)$$

- 여기서 S 는 피압대수층의 저류계수, S_s 는 비저류계수, b 는 대수층 두께.
- 저류나 방출은 비산출률 및 비저류계수에 의존하게 되는데 자유면 대수층에서의 저류계수는 아래 식(43) 과 같이 표현.

$$S = S_y + bS_s \quad (46)$$

- 비산출률(S_y) 값은 자유면대수층에서 bS_s 보다 수십~수천 배 크므로 저류계수는 비산출률과 같다고 간주 할 수 있으며, 0.02 ~ 0.30의 범위를 가짐.

4. 하구 및 하천 양안에서 piling을 통한 해수면 상승 대비 염수확산 방지 및 담수 수자원 확보 기술 평가 및 검증

가. 개발 모형의 pile 설치 시나리오 적용

○ 모의영역

- 개발된 수치모형을 이용하여 한강 일부 구간에서의 pile에 의한 흐름특성 변화 예측을 실시
- 수치모의 적용 구간은 한강하천정비기본계획(건설교통부, 2002) 상의 단면번호 71번 (가양대교 부근)부터 단면번호 52번 (김포대교 부근)까지의 약 7.5 km 구간(그림 16).

○ 수치모의를 위한 요소망

- 한강하천정비기본계획 상의 측정단면정보를 바탕으로 모의구간 내의 요소망을 구축(그림 17).
- 절점의 총 개수는 7,250개이며, 요소의 총 개수는 7,062개임.
- 삼각형 요소뿐만 아니라 사각형 요소가 혼재되어 있는 혼합 요소망을 적용.

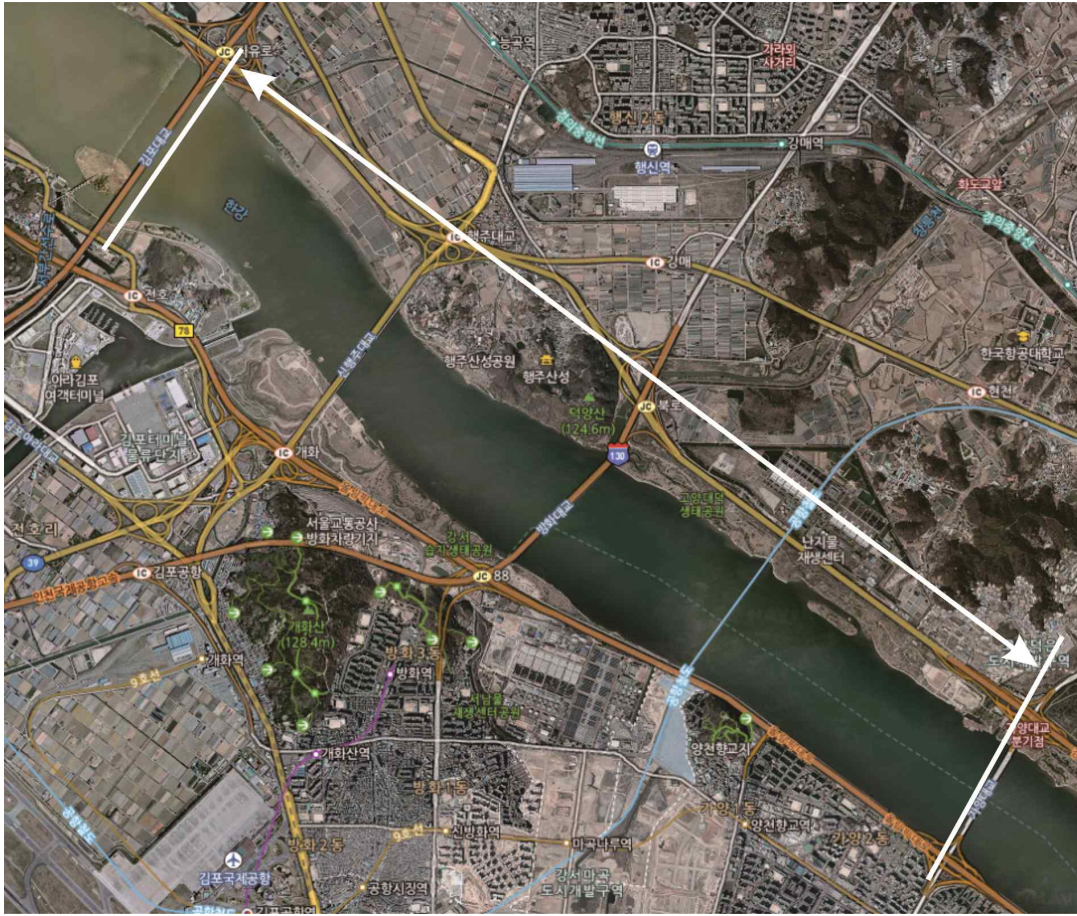


그림 17. 모의영역

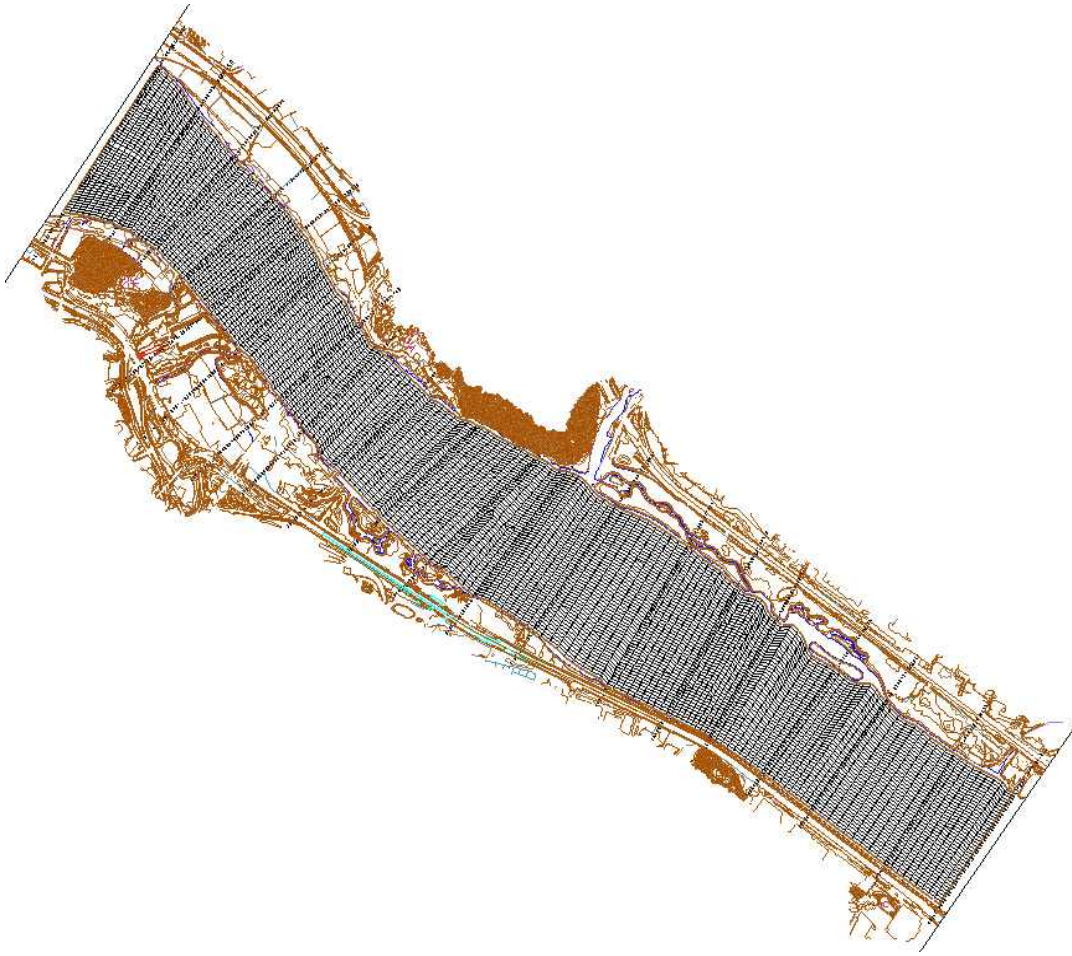


그림 18. 요소망

○ 수치모의를 위한 기본 입력자료

- 횡단 실측 지형자료를 이용하여 모의영역에서의 지형고도를 내삽(그림 18).
- 수로의 조도계수는 한강하천정비기본계획 (건설교통부, 2002)에서 제시한 0.03으로 설정.

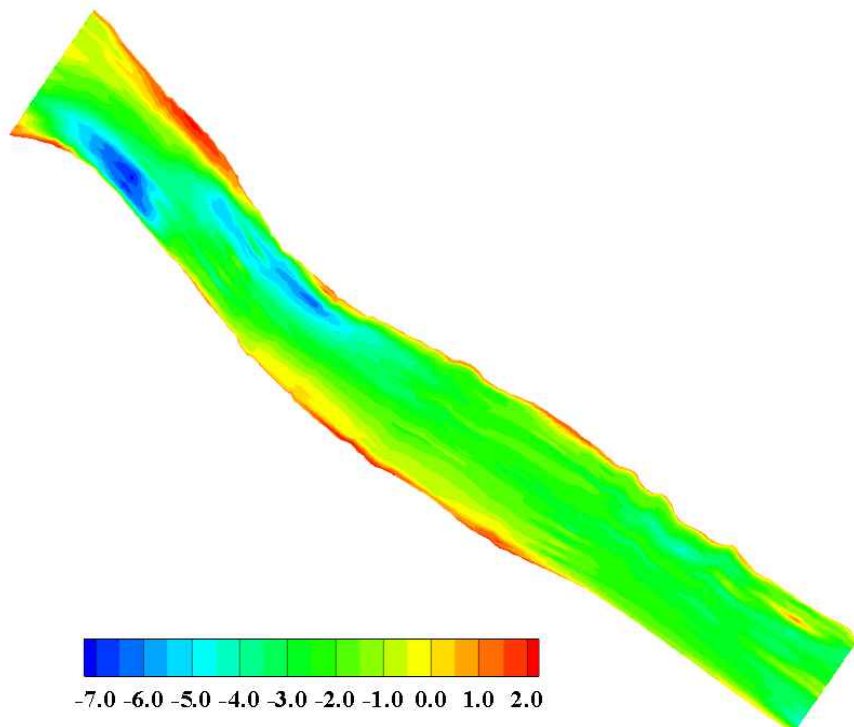


그림 19. 모의영역의 지형고도

- 유량과 수위 경계조건의 설정을 설정하기 위해서는 평수량과 평수위 정보가 요구되나, 평수량과 평수위에 대한 정보 취득이 용이하지 않아 본 연구에서는 다음과 같이 가정.
 - 본 모의영역의 하류에 위치한 신곡수중보의 수위가 2.7m 이상인 경우 조석의 영향으로 인해 조류가 신곡수중보를 월류한다고 기록됨(국토교통부, 2002).
 - 따라서 하류단의 수위를 2.8m로 가정(그림 19).
 - 하류단 수위 2.8m에 해당하는 유량을 찾기 위해서, LDM(Lateral Distribution Method)을 적용하여 하류단에서의 수위-유량 곡선을 유도(그림 20).
 - 하류단 수위 2.8m에 해당하는 유량은 5,052 m^3/s 로 평가.
 - 평가 유량을 상류단 유입유량으로 설정.

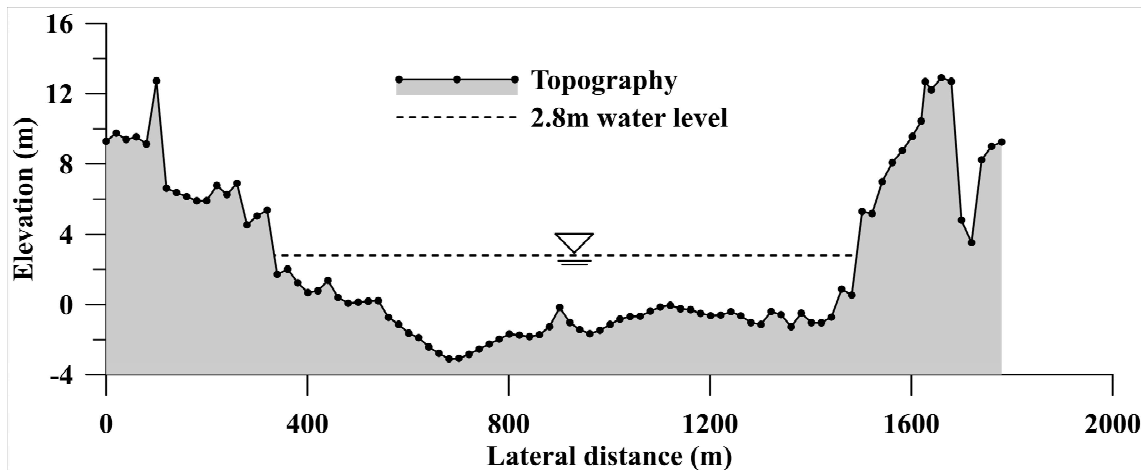


그림 20. 하류단 횡단면 및 2.8m 수면고도

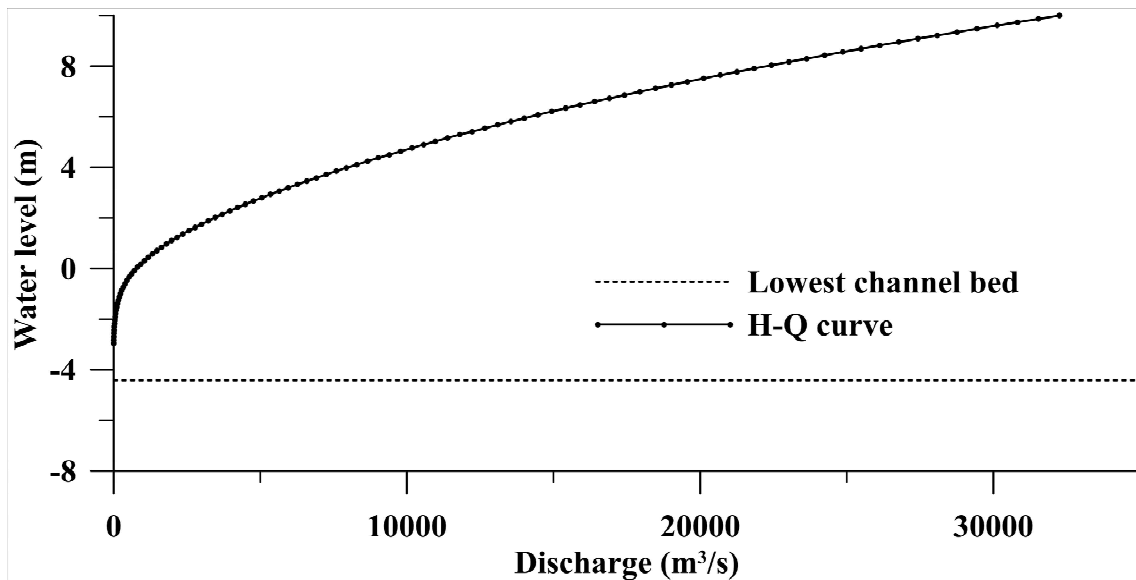


그림 21. 하류단에서의 수위-유량 곡선

○ pile 건설 전 흐름특성 모의

- 그림 21은 계산된 평균유속과 수위 결과를 나타냄.
 - 평가 유량을 상류단의 총유량으로 설정한 결과, 상류단의 모든 절점에 동일한 단위유량이 입력 값으로 설정되어, 상류단 좌측과 우측 끝부분의 유속이 과대평가되고 있으며, 수면 또한 좌우 끝단에서 과도하게 높아지는 결과를 나타냄.

- 보다 현실적이고 정확한 예측을 위해서는 상류단의 절점마다 상이한 단위유량 값을 대입할 필요가 있음
 - 이를 위해 또 다시 LDM 기법을 적용(그림 22).
 - 불규칙한 지형을 반영하여, 수심이 깊은 곳의 단위유량이 수심이 낮은 곳의 단위유량에 비해서 높은 결과를 보임.

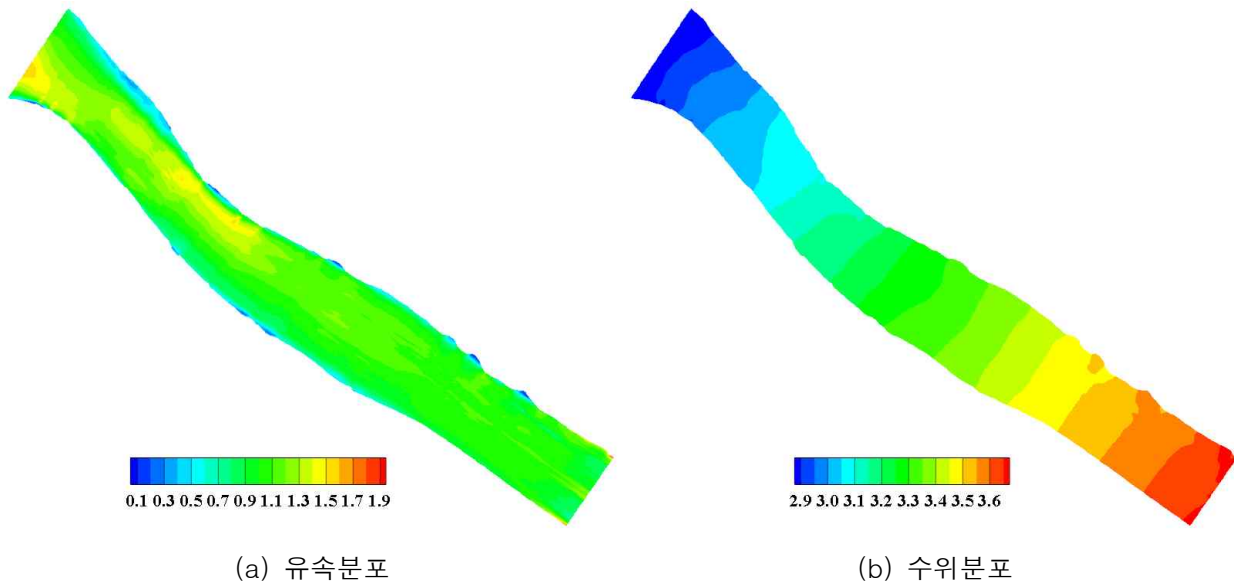


그림 22. 총 유량을 유입경계조건을 설정하였을 때의 모의결과

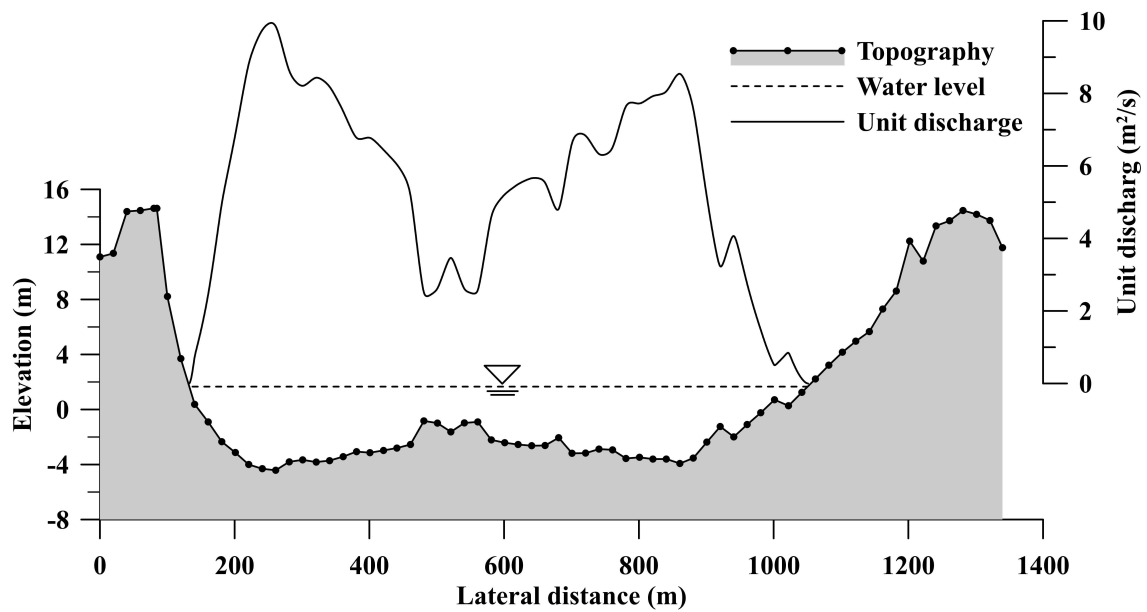
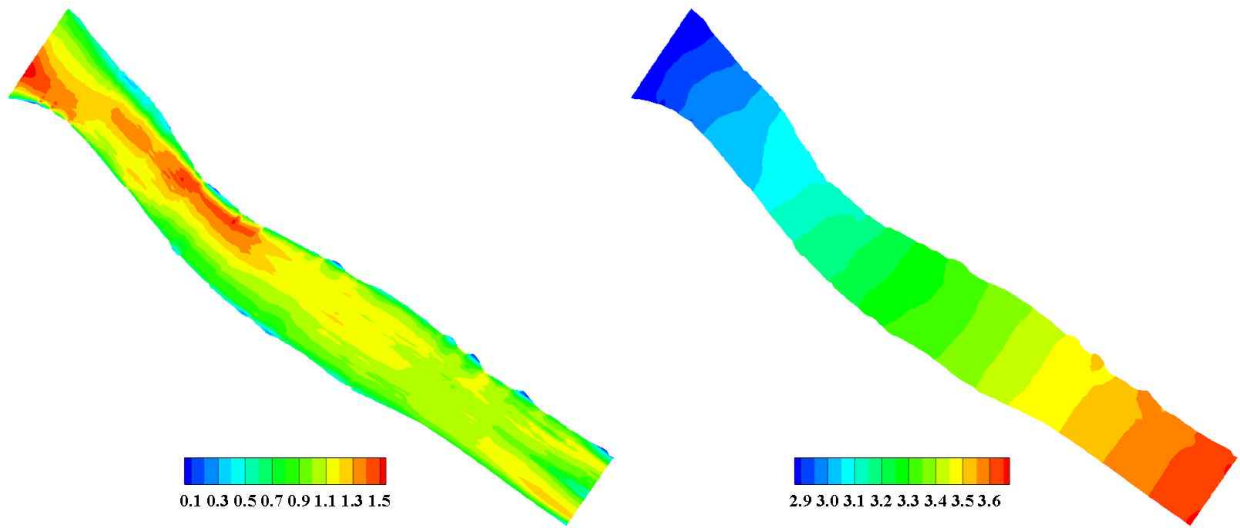


그림 23. LDM으로 평가된 절점별 단위유량 분포

- 그림 23은 상류단 절점별 상이한 단위유량을 설정하였을 때의 계산 결과임.
 - 그림 19과 비교하여, 보다 현실적이고 적합한 계산 결과를 보임.
 - 하류부의 만곡부에서는 만곡부 안쪽의 유속이 바깥쪽 보다 빠른 현상이 모의되고 있으며, 실제로 이러한 만곡부의 효과는 그림 5의 지형 정보에서도 잘 나타나고 있음



(a) 유속분포

(b) 수위분포

그림 24. 절점별 유량을 유입경계조건을 설정하였을 때의 모의결과

○ pile 건설 후 흐름특성 모의

- pile 정보(그림 24)

- 높이 3m, 직경 0.5m의 pile을 가정
- 그림 11과 같이 10m×10m 면적에 2m 간격으로 일정하게 분포하였을 경우를 가정
- 이 때, 단위면적당 pile의 밀도는 0.125에 해당
- 단, pile에 의한 흐름특성 변화만을 모의하고자, 교각이나 지류는 모의영역에서 제외.

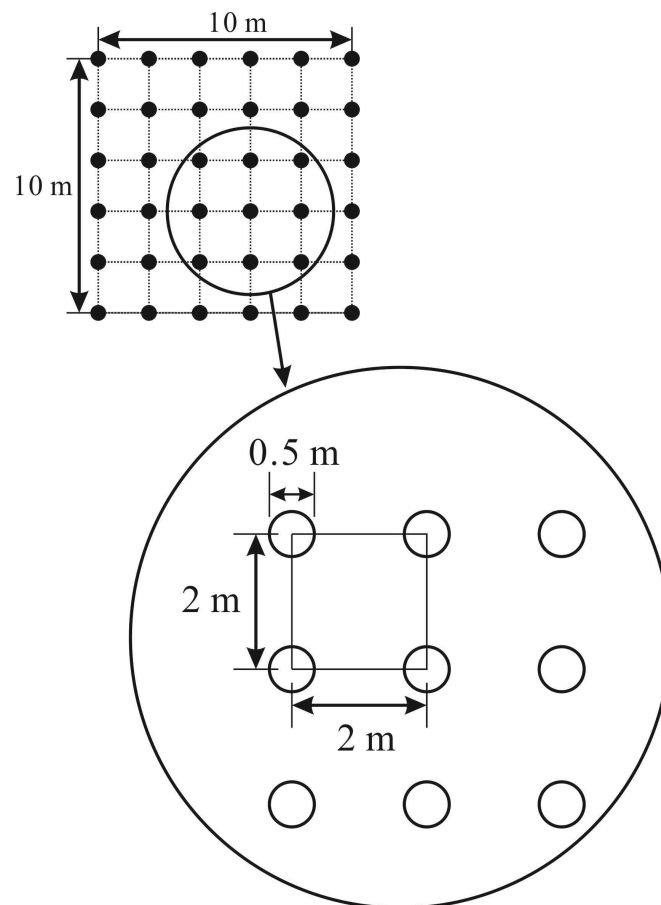


그림 25. pile 정보 및 배열

- pile 설치 위치와 구간 별 시나리오

- pile의 설치 위치와 설치 구간의 변화에 따른 흐름 특성을 평가하기 위해서 그림 25과 같이 총 7개의 시나리오를 구성
- 각 시나리오는 파일 설치 구간의 변화에 따라 2개의 시나리오로 구성됨.
- 따라서 개발 모형의 적용 사례는 총 14가지.

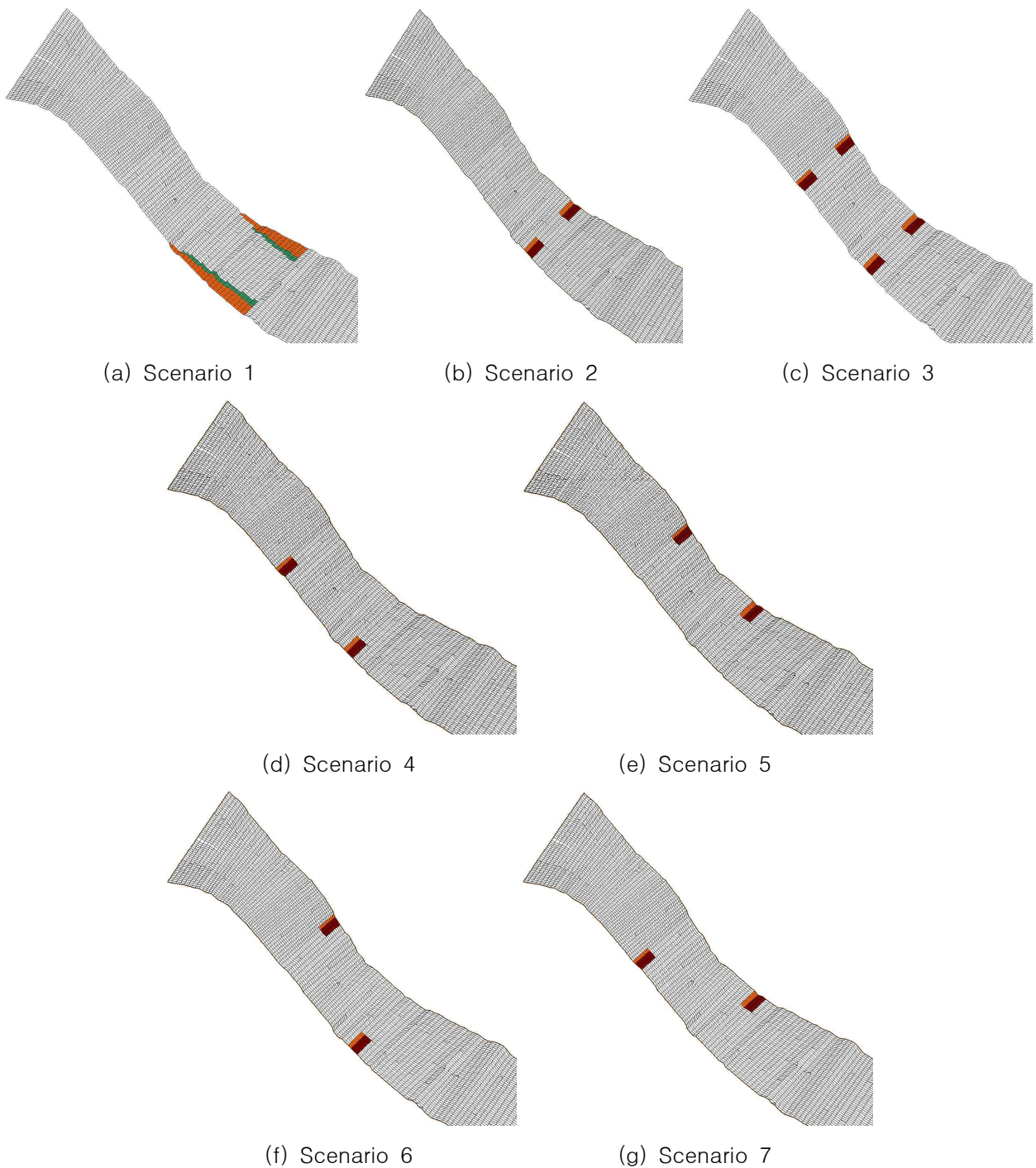


그림 26. pile의 설치 위치와 설치 구간 별 시나리오

- 시나리오 1 결과(그림 26, 그림 27)

- 만곡부의 흐름특성을 변화시키기 위해 수로의 좌안과 우안을 따라 종방향으로 pile을 건설
- pile 설치 구간을 확장시켰을 때 수로 중심부의 유속이 더욱 빨라지는 효과가 있음.
- 파일 설치 구간 하류부의 수위는 약간 감소하는 반면 상류부의 수위는 전체적으로 상승하는 효과가 있음.
- 파일 설치 구간의 수로 중심부만 유속이 변화하고 하류부로 유속의 증가 효과가 미비함.

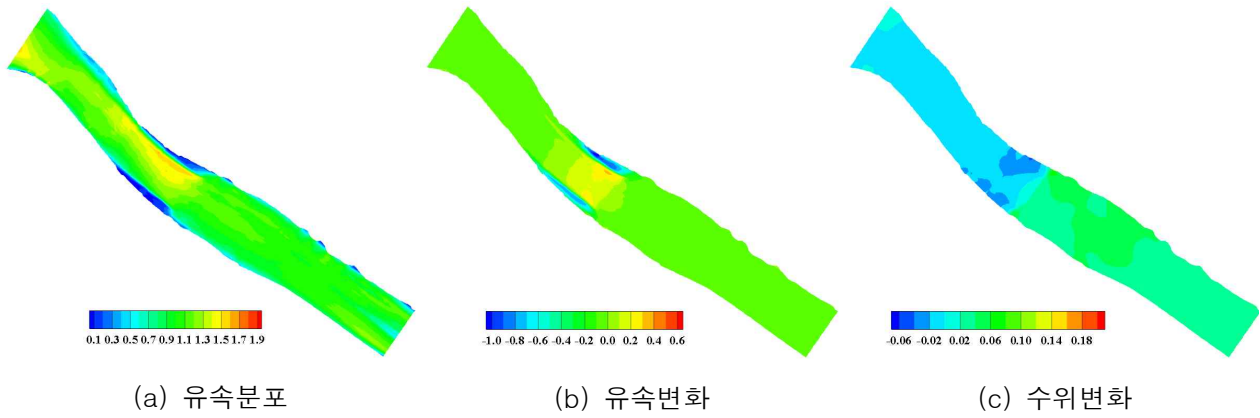


그림 27. Scenario 1-1 결과

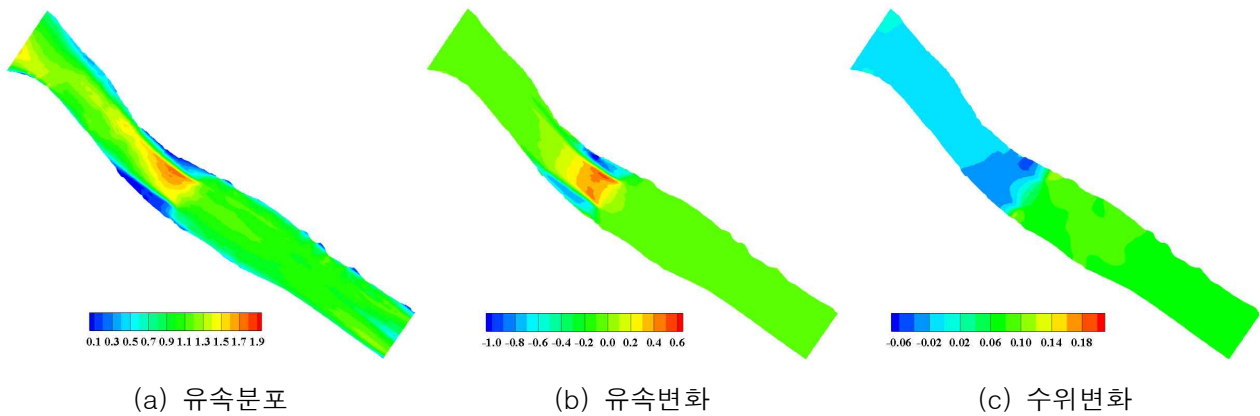


그림 28. Scenario 1-2 결과

- 시나리오 2 결과(그림 28, 그림 29)

- 만곡부 초입에 횡방향으로 pile을 건설
- 시나리오 1과 마찬가지로 pile 설치 구간이 확장될수록 흐름특성 변화 효과가 높아지지만, 유속 증가 범위는 pile 설치 구간 부근에 한정됨.
- 시나리오 1에 비해서 만곡부 흐름특성이 사라지고, 중심부의 유속이 빨라지는 효과가 있음.
- 시나리오 1에 비해서 pile 설치 구간 상류부의 수위 변화량이 약간 증가함.

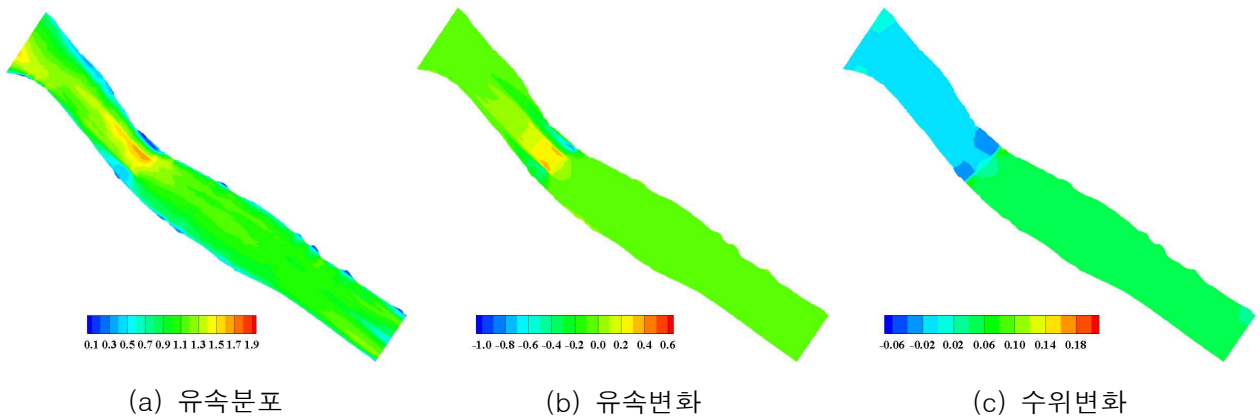


그림 29. Scenario 2-1 결과

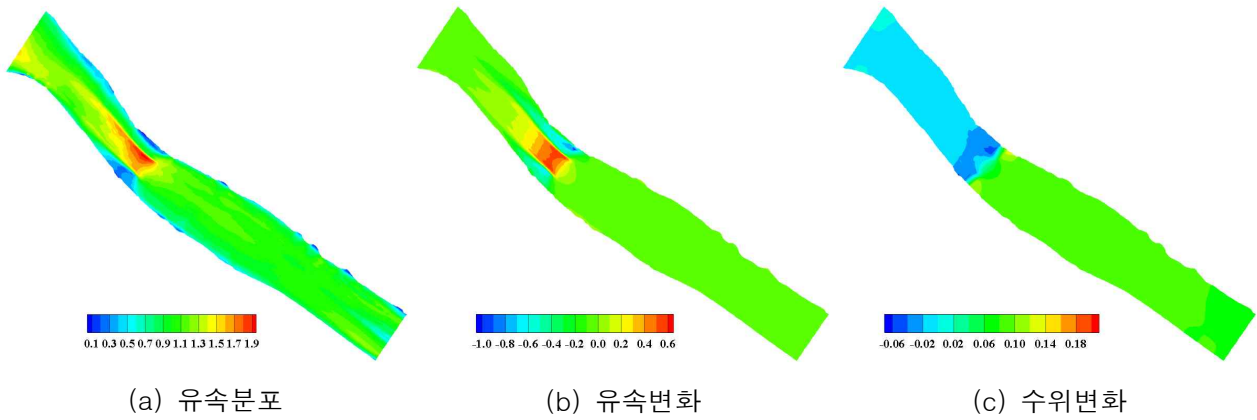


그림 30. Scenario 2-2 결과

- 시나리오 3 결과(그림 30, 그림 31)

- 첫 번째 만곡부 초입뿐만 아니라 두 번째 만곡부 초입에도 pile을 횡방향으로 좌안 및 우안에 건설
- 시나리오 2에 비해서 유속의 증가 영역이 하류부까지 확대되는 결과를 보임.
- pile 설치 구간을 확대시킬수록 상류부의 수위는 10cm 이상 증가됨.

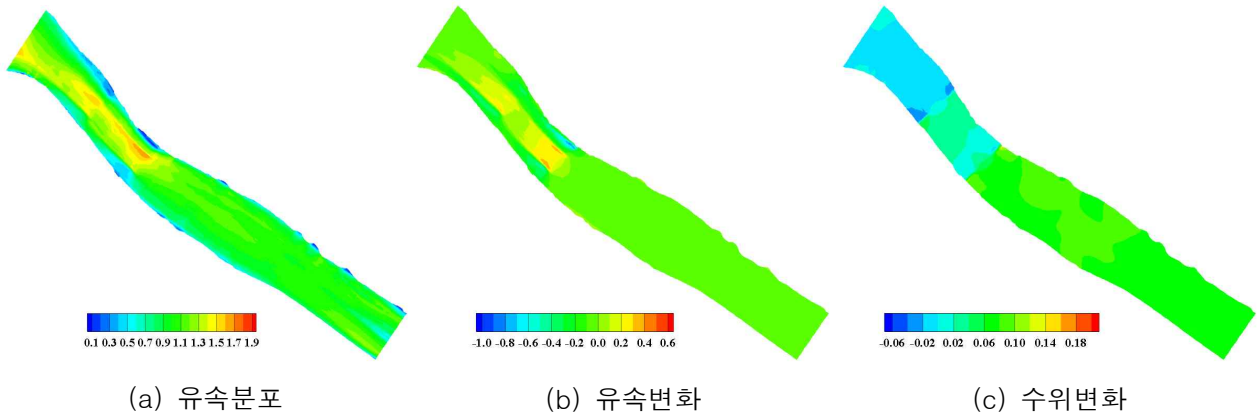


그림 31. Scenario 3-1 결과

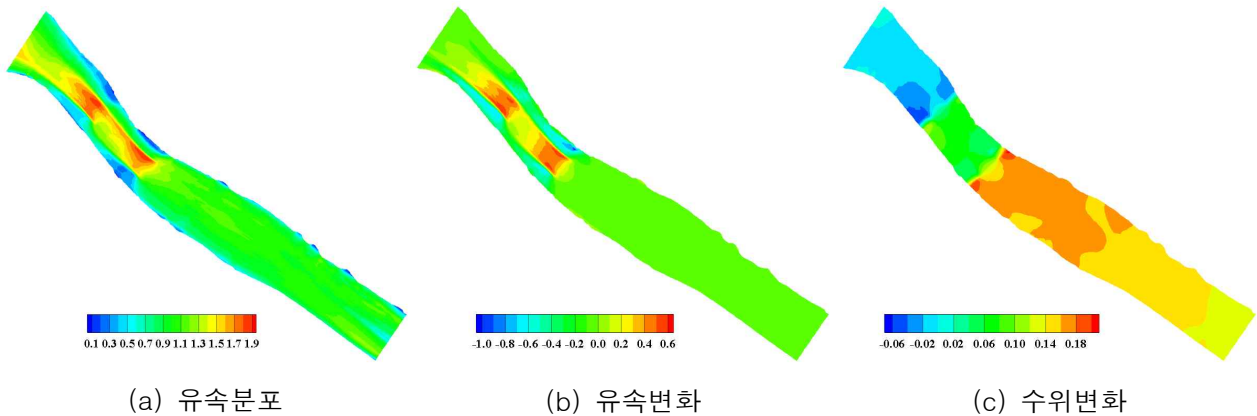


그림 32. Scenario 3-2 결과

- 시나리오 4 결과(그림 32, 그림 33)

- 시나리오 3에서 좌안에만 pile을 건설하였을 경우.
- 첫 번째 만곡부의 안쪽으로 유속이 증가되는 결과를 보임.
- 상류부의 수위 상승 효과는 감소됨.

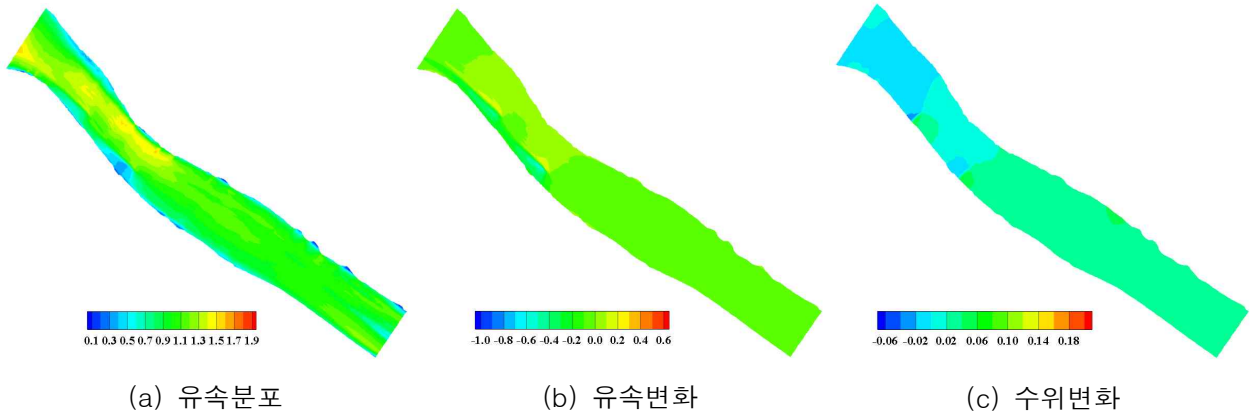


그림 33. Scenario 4-1 결과

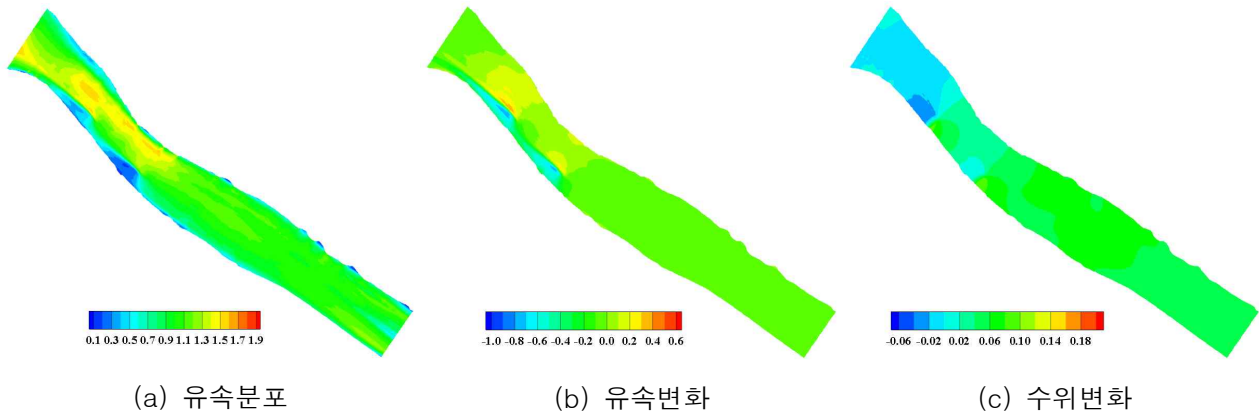


그림 34. Scenario 4-2 결과

- 시나리오 5 결과(그림 34, 그림 35)

- 시나리오 3에서 우안에만 pile을 건설하였을 경우
- 시나리오 4에 비해서 수로 중심부로 유속이 빨라지는 효과를 보임.
- 시나리오 4와 마찬가지로 상류부의 수위 상승 효과는 감소됨.

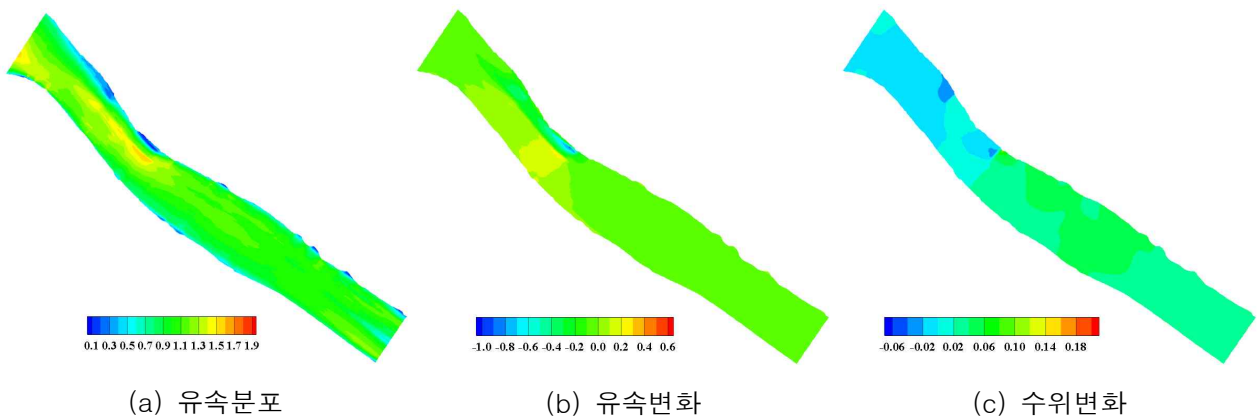


그림 35. Scenario 5-1 결과

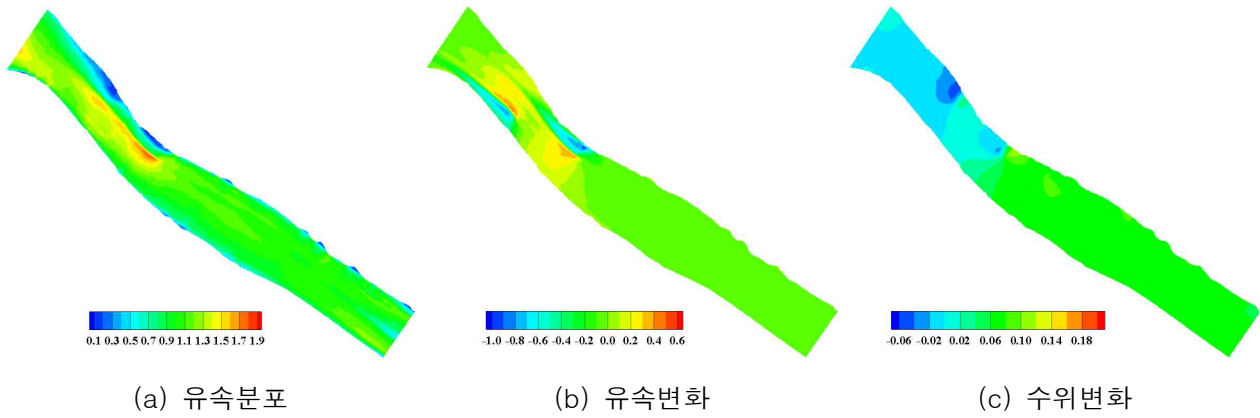


그림 36. Scenario 5-2 결과

- 시나리오 6 결과(그림 36, 그림 37)

- 시나리오 3에서 첫 번째 만곡부의 좌안과 두 번째 만곡부의 우안에만 pile을 건설하였을 경우
- 하류부로의 유속 증가 효과와 상류부로의 수위 상승 효과가 모두 감소되는 결과를 보임.

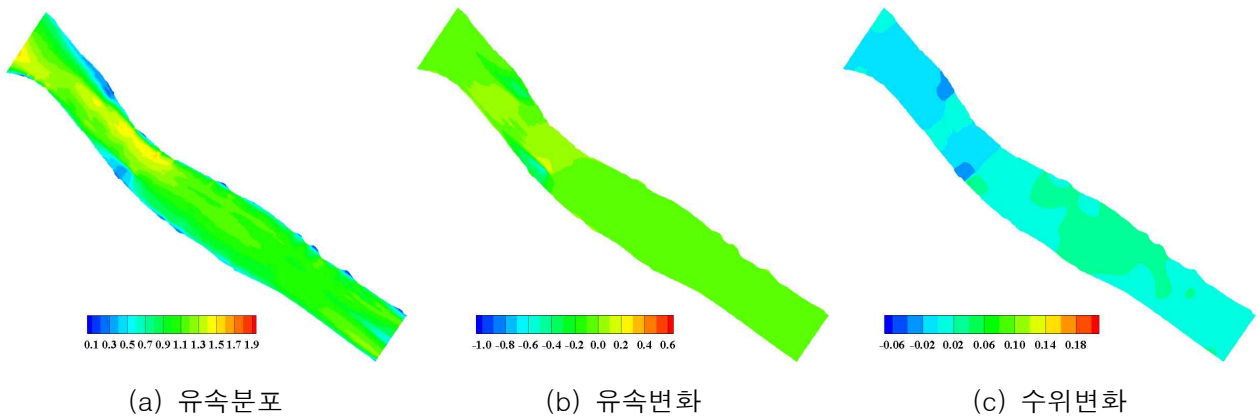


그림 37. Scenario 6-1 결과

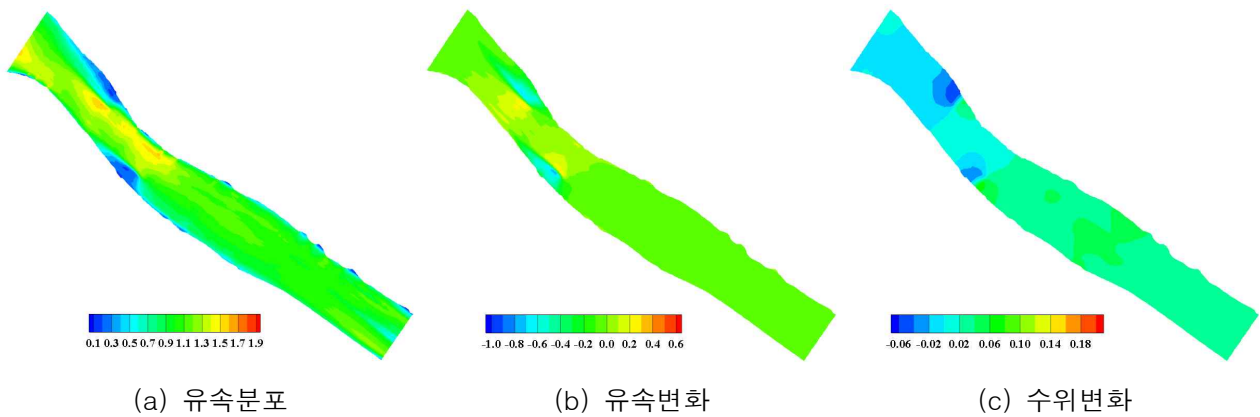


그림 38. Scenario 6-2 결과

- 시나리오 7 결과(그림 38, 그림 39)

- 시나리오 3에서 첫 번째 만곡부의 우안과 두 번째 만곡부의 좌안에만 pile을 건설하였을 경우
- 시나리오 6에 비해서 수로 중심부로의 유속 증가 효과가 나타나며, 상류부로의 수위 상승 효과도 증가함.

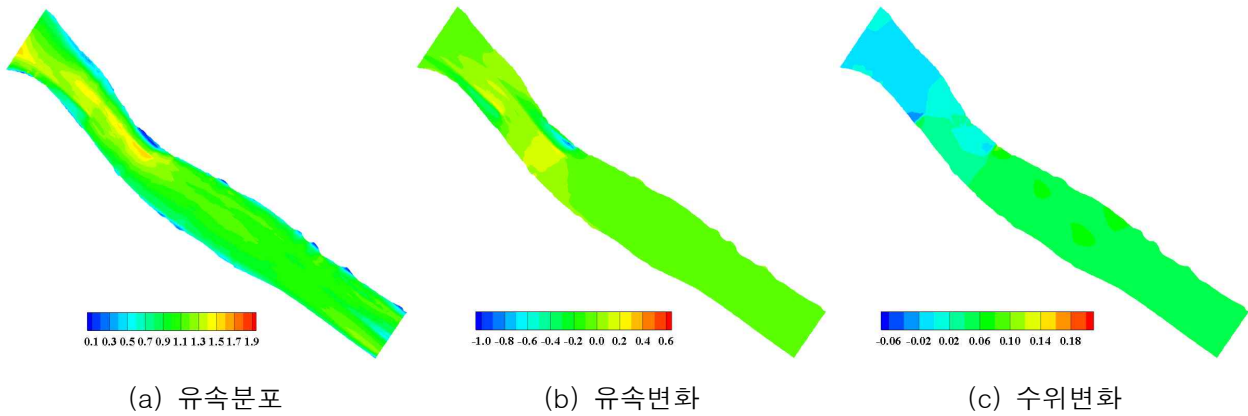


그림 39. Scenario 7-1 결과

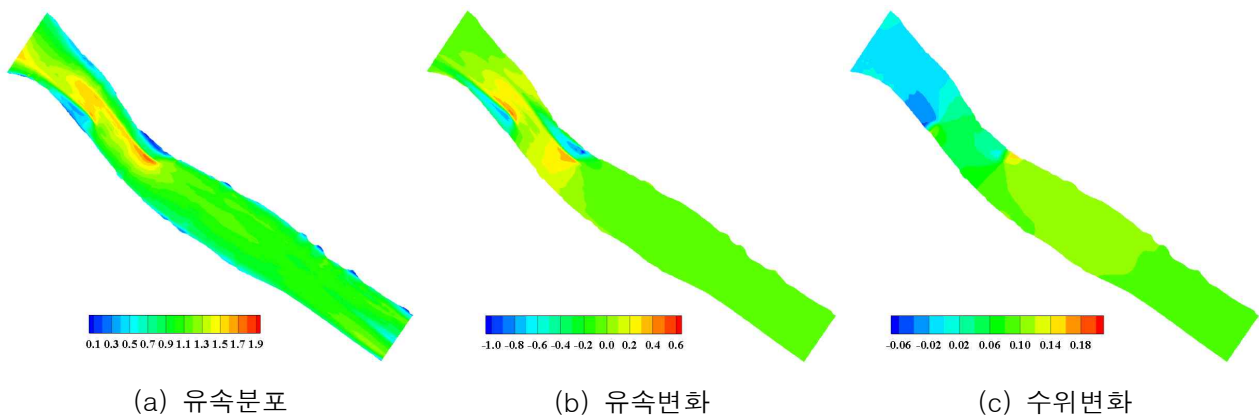


그림 40. Scenario 7-2 결과

- 시나리오 3과 같이 종방향의 일정한 간격으로 수로의 좌안과 우안에 pile을 건설하는 경우, 다른 경우에 비해서 상대적으로 하류부로의 유속 증가와 상류부로의 수위 상승 효과가 증가하여 염수 확산을 억제하는 효과가 상대적으로 탁월할 것으로 예상됨.
 - pile의 높이, 직경, 밀도 등을 변화시키고, pile 건설 위치와 구간을 변화시켜 보다 다양한 시나리오의 결과를 분석할 필요가 있음.
- 개발모형의 적용 가능성을 살펴보기 위해서 다양한 시나리오를 적용하여 모의를 수행하였으나, 개발모형의 보다 정확한 검증과 모의 결과의 신뢰성 확보를 위해서 향후 다음의 사항을 고려할 계획임.
 - 수위와 유량에 대한 실측자료를 이용하여 pile 건설 전 흐름특성에 대한 모의결과를 검증하여 모형의 신뢰성을 확보할 계획임.
 - pile 재료에 따른 항력계수의 차이가 발생할 수 있으므로, 이에 대한 이론적 자료를 추가 조사할 필요가 있으며, 재질에 따른 항력계수의 표준값을 확보할 필요가 있음.

나. pile 건설 전·후 연구지역 지하수 흐름특성 모의

○ pile 설치 위치와 구간 별 시나리오에 따른 지하수 수위 분포 결과

- pile 설치 시나리오 별 지하수 흐름 모의를 위한 모델링 실시
 - 위에서 pile의 설치 위치와 설치 구간의 변화에 따른 흐름 특성을 평가하기 위해서 총 7개의 시나리오를 구성.
 - 하천 경계로부터 2000m 이내의 지역에 대한 pile 설치 전의 지하수 수위 분포와 pile 설치 후 각 시나리오에 대한 지하수 수위 분포 확인.

- 지하수위 분포 확인을 위하여 지하수 유동 프로그램인 Visual MODFLOW를 이용한 정상류 흐름 모의 실시.
 - pile 설치 전·후에 따른 한강 수위변화 값을 고정수두 값으로 적용하였고, 문헌 조사를 통하여 수리전도도, 함양량 등 지하수 흐름에 영향을 줄 수 있는 입력 매개변수 값을 결정.
 - 개발 모형의 적용 전·후에 따른 총 8가지의 지하수 수위 분포 확인.
- 시나리오 1 적용 지하수 수위 분포 결과(그림 40)
- 만곡부의 흐름특성을 변화시키기 위해 수로의 좌안과 우안을 따라 종방향으로 pile을 건설.
 - 파일 설치 구간 하류부의 수위는 약간 감소하는 반면 상류부의 수위는 전체적으로 상승하는 효과가 있음.
 - pile 설치 후 분석지역 평균 지하수위가 0.45cm 하강하는 것으로 나타남.

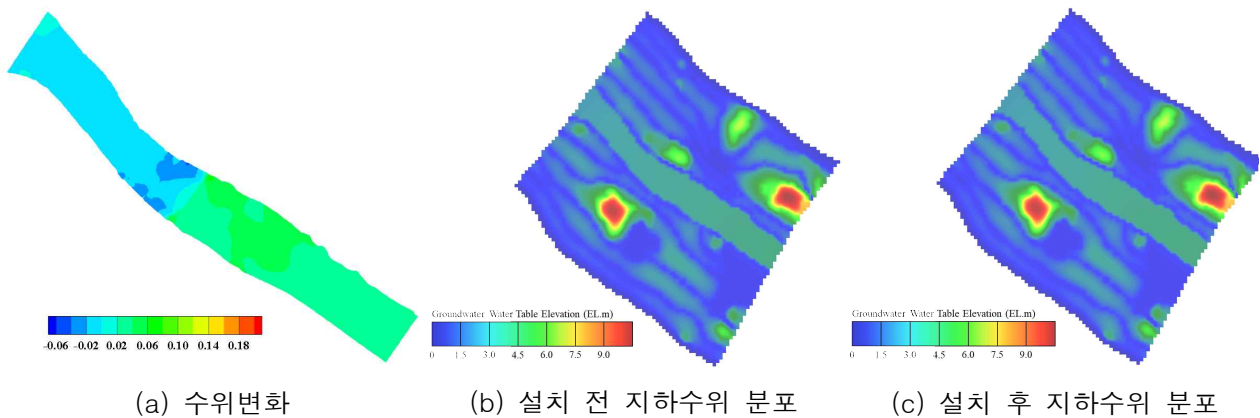


그림 41. Scenario 1 결과

- 시나리오 2 결과(그림 41)
- 만곡부 초입에 횡방향으로 pile을 건설
 - 시나리오 1에 비해서 pile 설치 구간 상류부의 수위 변화량이 약간 증가함.
 - 수위 변화에 따라 pile 설치 후 분석지역 평균 지하수위가 0.05cm 하강하는 것으로 나타남.

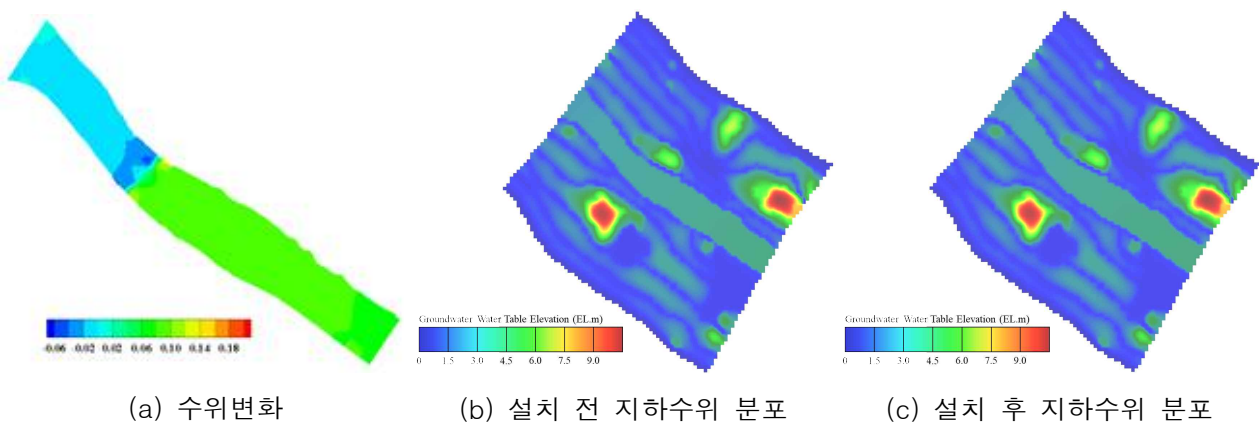


그림 42. Scenario 2 결과

- 시나리오 3 결과(그림 42)
- 첫 번째 만곡부 초입뿐만 아니라 두 번째 만곡부 초입에도 pile을 횡방향으로 좌안 및 우안에 건설.

- pile 설치 구간을 확대시킬수록 상류부의 수위는 10cm 이상 증가됨.
- 설치 구간 확대에 따라 pile 설치 상류의 수위가 높아졌고 이에 따라 pile 설치 전보다 평균 지하수위가 0.66cm 상승하는 것으로 나타남.

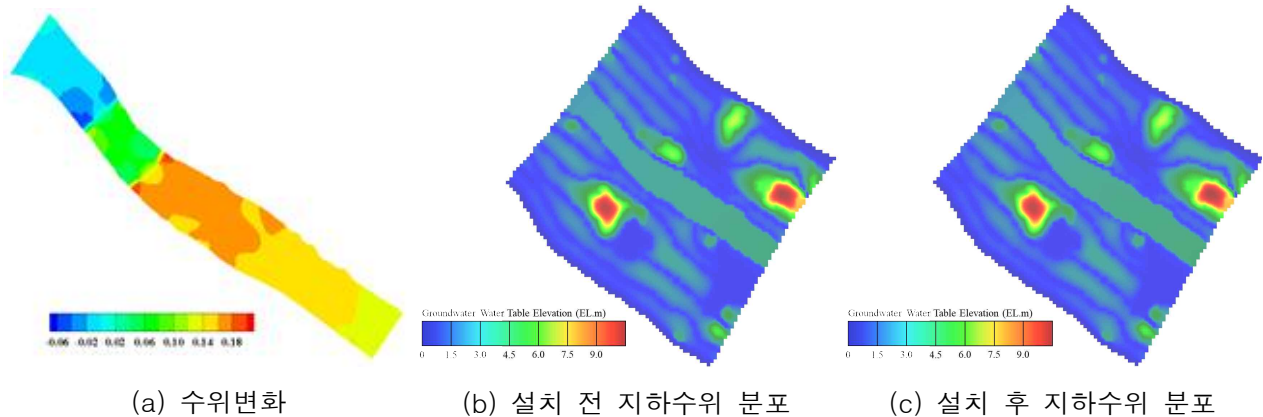


그림 43. Scenario 3 결과

- 시나리오 4 결과(그림 43)

- 시나리오 3에서 좌안에만 pile을 건설하였을 경우.
- 상류부의 수위 상승 효과는 감소되었고, 분석 지역의 평균 지하수위가 0.14cm 하강하는 것으로 분석됨.

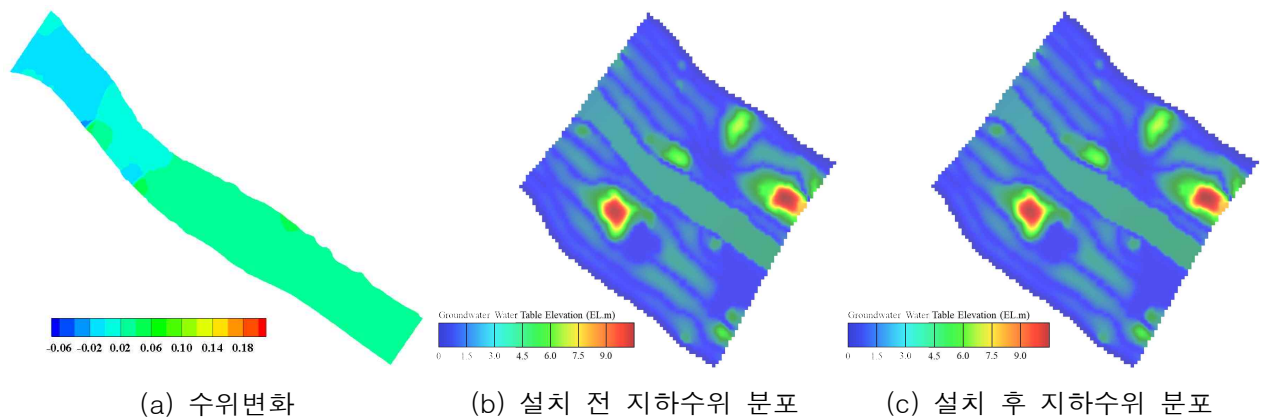


그림 44. Scenario 4 결과

- 시나리오 5 결과(그림 44)

- 시나리오 3에서 우안에만 pile을 건설하였을 경우.
- 사나리오 4와 마찬가지로 상류부의 수위 상승 효과는 감소되었고, 마찬가지로 분석 지역의 지하수위가 0.16cm 하강하는 것으로 나타남.

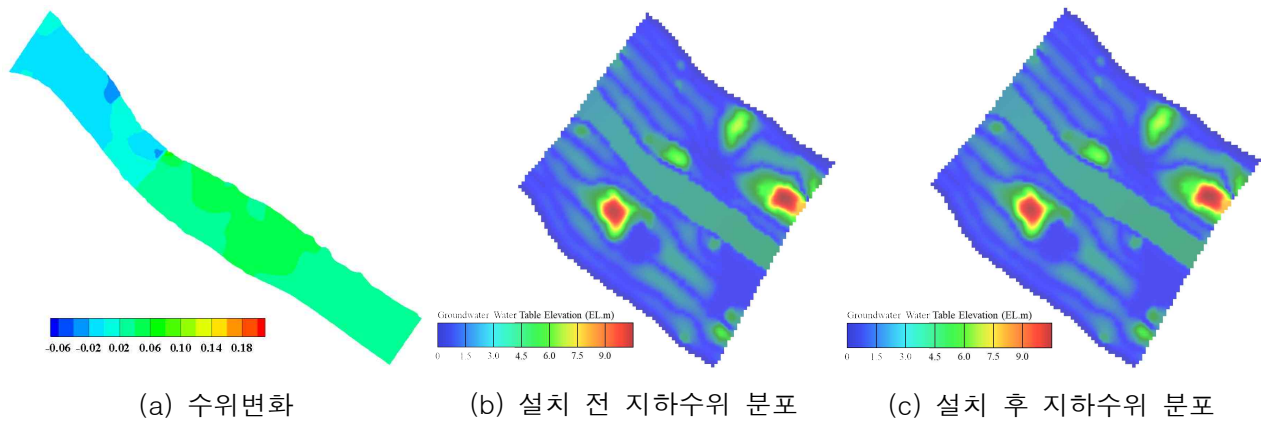


그림 45. Scenario 5 결과

- 시나리오 6 결과(그림 46)

- 시나리오 3에서 첫 번째 만곡부의 좌안과 두 번째 만곡부의 우안에만 pile을 건설하였을 경우.
- 하류부로의 유속 증가 효과와 상류부로의 수위 상승 효과가 모두 감소되는 결과를 보임.
- 분석 지역의 평균 지하수위가 0.27cm 하강하는 것으로 나타남.

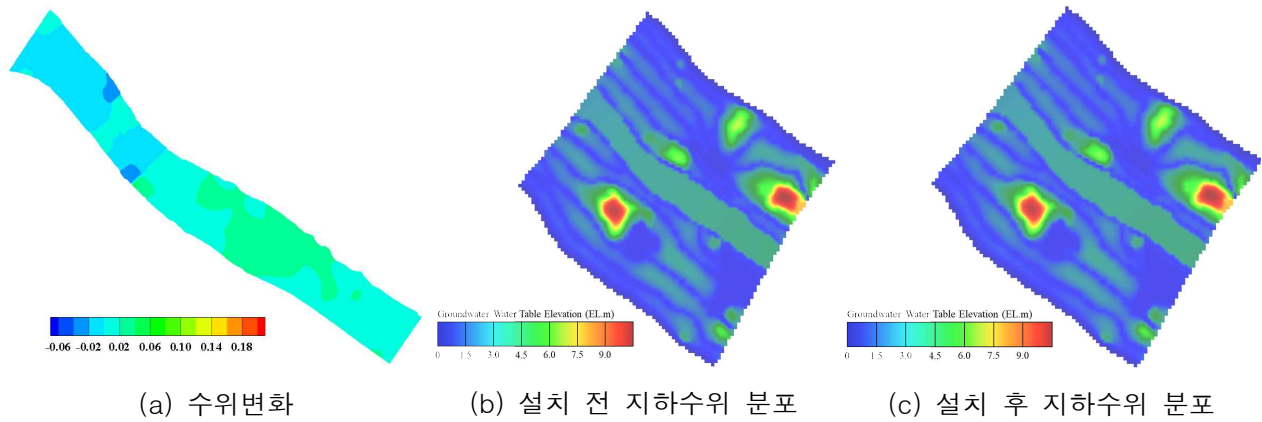


그림 46. Scenario 6 결과

- 시나리오 7 결과(그림 47)

- 시나리오 3에서 첫 번째 만곡부의 우안과 두 번째 만곡부의 좌안에만 pile을 건설하였을 경우.
- 시나리오 6에 비해서 수로 중심부로의 유속 증가 효과가 나타나며, 상류부로의 수위 상승 효과도 증가함에 따라 분석 지역의 평균 지하수위가 1.65cm 상승하는 것으로 나타남.

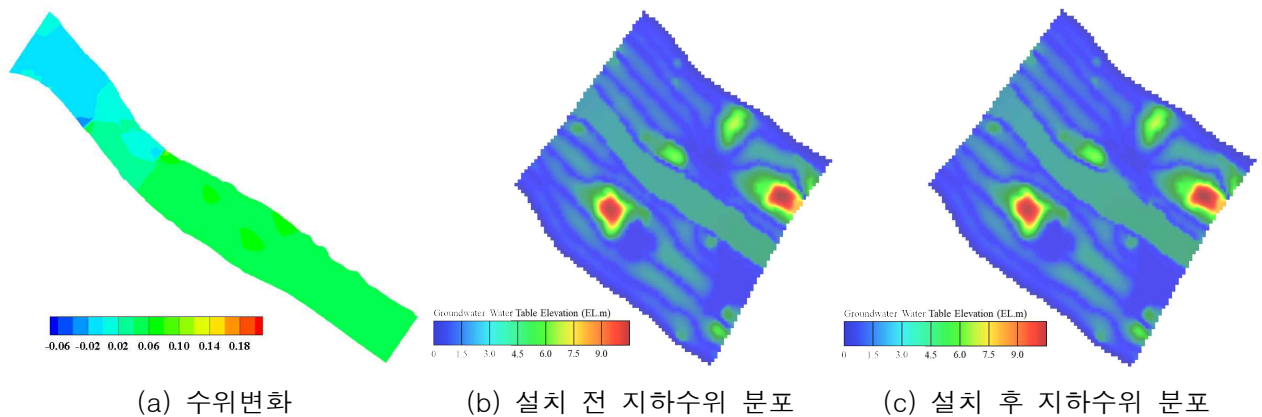


그림 47. Scenario 7 결과

- 개발모형의 적용 가능성을 살펴보기 위해서 다양한 시나리오를 적용하여 하천 흐름 모의를 수행하였고, 모의 결과로 산정된 격자 별 수위를 지하수 흐름 모의에 적용하여 지하수위 분포를 분석.
- 하천 흐름 모의 결과 pile 설치 시나리오에 따른 분석 지역의 평균 하천수위와 평균 지하수위는 다음 그림 47과 같이 나타남.

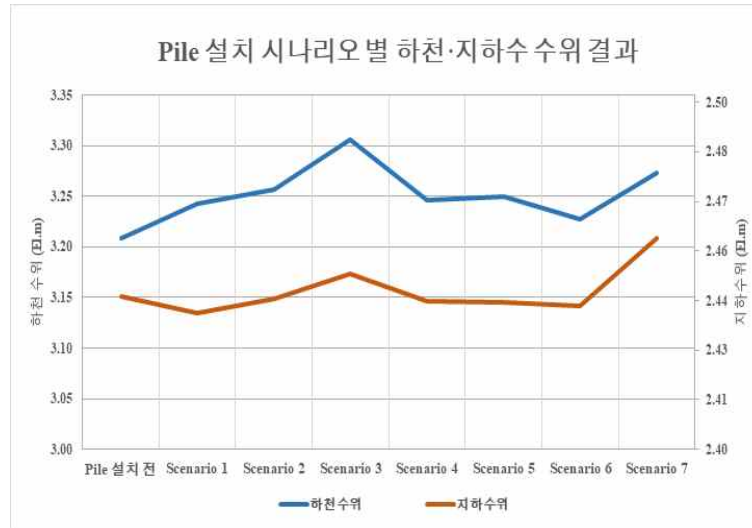


그림 48 Piling 시나리오 별 하천수위 및 지하수위 결과

- 모든 시나리오에서 분석지역의 평균 하천수위는 설치 전보다 상승한 것으로 나타남.
- 분석지역의 평균 지하수위는 pile 설치 전에 비하여 시나리오 1, 2, 4, 5, 6에서 소폭 하강한 것으로 나타남.
- Pile 설치에 따라 시나리오 3에서 평균 하천수위가 9.73cm, 시나리오 7에서 6.42cm 상승.
- 분석 지역의 지하수위가 하강하나 위의 두 시나리오에서의 하천수위 상승이 충족된다면 지하수위가 상승하는 결과를 나타내는 것으로 보임.
- Pile 설치에 따른 하천의 수위 변화에 대한 지하수위에 대한 영향은 미미한 것으로 나타났는데 아래와 같은 이유로 분석 결과가 나타났을 것으로 판단.
 - 한강 하류의 좌안이 서울특별시 강서구, 경기도 김포시 일대, 우안이 서울특별시 마포구, 경기도 고양시 일대
 - 분석 지역은 지중 및 지하 구조물의 개발이 활발하게 이루어졌고, 지하수 흐름 모의 시 지하 구조물, 지하수로 등의 영향은 고려하지 않았음
 - pile 설치에 따른 수위의 변화량이 지하수위에 영향을 미칠 만큼 크게 나타나지 않았던 것으로 판단.
- 수위의 변화에 비하여 지하수위에 직접적인 영향을 미치는 하천의 규모가 컸기 때문에 한강보다 작은 규모의 중·소하천의 경우 pile 설치에 따른 지하수위 변동에 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상됨.

5. GUI 개발

가. 하천 흐름 모의를 위한 GUI 개발

(1) 기존 전처리 GUI 적용 기술 및 문제점

가) 기존 전처리 GUI 문제점 및 개선방안

- 상용 CAD 엔진인 Vectordraw 적용 시 개발상의 이점 및 다양한 파일변환을 지원하고 있으나, 연간 라이선스 비용을 지불하여야 하며, 이는 본 연구 과제에서 지양하는 지속적인 공동연구

개발에 부합하지 않음

- Vectordraw 개발 경험 인력이 국내에 많지 않으며 상용제품에 비하여 가이드라인과 샘플이 부족한 편이며, v6.0 이전과 이후의 개발환경의 변화가 크고 C#기반의 개발환경으로 C++환경으로 최적화하기가 어려움
- 데스크탑의 하드웨어적 특성에 따라 성능이 일정하지 않으며, 10,000여개 이상의 격자 생성 시 성능 측면에서 문제가 발생
- 연구진의 개발 경험 유무와 기존 모듈 활용을 위하여 Vectordraw를 전처리 엔진으로 결정하였으나, 상기의 문제점에 따라 2차년도에는 공개 S/W기반의 개발 프레임워크 및 Graphic 처리엔진을 선정하여 재개발을 결정하였으며, 이에 따라 메쉬 생성 및 기본 알고리즘에 대한 리팩토링을 진행

(2) 격자 생성기(mesh generator)

가) 격자 생성기 기본 구조

- 격자생성기(Mesh generator)에서 사용되는 요소들의 기본 구조는 다음과 같음

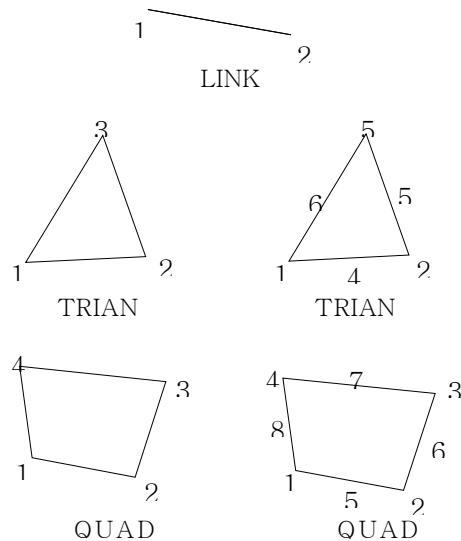


그림 49. 요소 구조와 절점 배열

- LINK는 폐곡선을 구성하는 polyline의 요소들을 정의함
- TRIAN은 삼각형 모양의 요소를 정의하며, 3개의 절점으로 구성된 1차원 삼각요소와 6개의 절점으로 구성된 2차원 삼각요소를 정의됨
- QUAD는 사각형 모양의 요소를 정의하며, 4개의 절점으로 구성된 1차원 사각요소와 8개의 절점으로 구성된 2차원 사각요소로 정의됨
- 삼각 또는 사각 요소를 구성하는 절점의 배열방향은 반시계 방향이며, 2차원 요소의 경우 기본 꼭지점이 정의된 후 꼭지점 중간에 반시계 방향으로 절점이 추가 정의됨
- 본 과제의 격자 생성기는 내부적으로 1차원 및 2차원 요소를 생성 가능하지만, 편의성과 계산 속도를 고려하여 1차원 요소만을 나타냄

나) 비정형 격자생성(unstructured mesh generation)

- 비정형 격자생성을 위해 일반적으로 advancing front, delaunay triangulation, paving의 알고리즘을 이용
 - 생성될 격자의 밀도는 4가지 방법에 의해 결정
- 정의된 요소의 크기로 균일하게 격자를 생성
- background 격자에 대응되는 값으로부터 격자 parameter를 결정
- 각 요소와 절점에 직접적으로 격자 parameter를 정의

주변의 밀도를 이용하여 격자 크기를 정의

- 생성된 모든 삼각요소의 격자는 삼각요소의 통합과 분리를 통하여 사각요소로 변경 가능
- 모든 사각요소의 격자는 사각요소를 삼각요소로 분할하여 삼각요소로 변경 가능

○ The Advancing Front Method

- Advancing Front 기법은 해석하고자 하는 영역의 외곽 경계를 따라서 시계 반대방향으로, 영역의 내부 경계에서는 시계방향으로 절점을 생성하여 삼각 요소를 생성하면서 진행하는 기법
- 먼저 주어진 경계를 따라서 요구되는 요소의 크기로 경계를 세그먼트로 분리하고, 그 각각의 세그먼트를 기초로 하여 세그먼트에 직각의 방향으로 절점을 생성
- 절점 생성 시에는 근접하는 전방의 절점 또는 선분을 검사하여 생성할 절점의 위치 수정 필요
- Advancing Front 기법을 이용하여 시작 경계의 선분을 선택할 때, 경계 선분의 길이를 고려하여 가장 작은 경계선분 부터 진행
- 그렇게 함으로써 요소망의 크기가 변하는 적응적 요소망 생성 시 작은 요소부터 생성하게 되어 보다 우수한 요소망을 형성하게 되며, 큰 요소부터 생성했을 경우 마지막에 작은 요소들이 밀집되는 현상을 방지

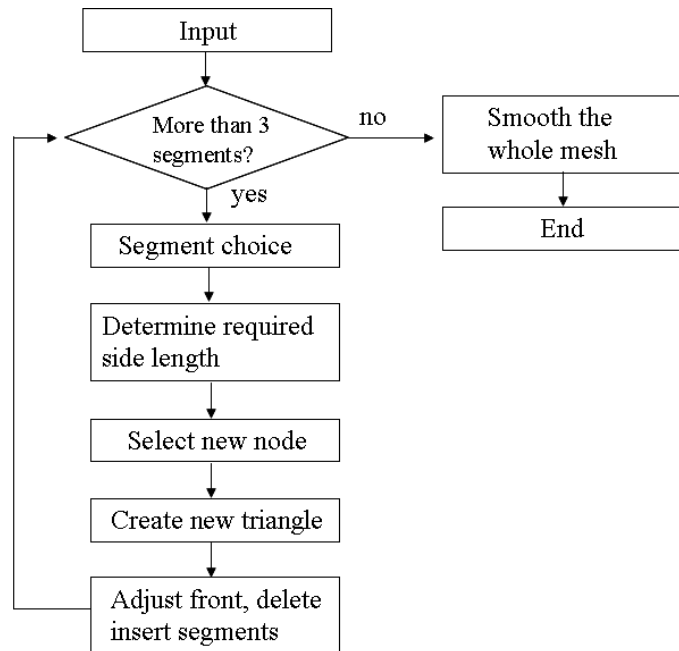


그림 50. Advancing front algorithm

○ Delaunay triangulation method

- Delaunay triangulation은 Voronoi Diagram과 함께 Computational Geometry분야에 많이 사용되는 효율적인 지역분할 방법
- Delaunay triangulation과 Voronoi Diagram은 서로 이중적인(dual) 관계에 있음
- 즉, 둘 중 어느 하나만을 찾아낸다면 다른 하나도 찾아낼 수가 있으며, Voronoi Diagram의 정의는 다음과 같음
- 두 점 p 와 q 사이의 Euclidean Distance를 $dist(p, q)$ 라 할 때, 한 평면상에 n 개의 분리된 점들의 집합을 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 이라고 정의. P 의 Voronoi Diagram은 그 평면을 n 개의 요소로 나눈다. P 에 있는 각각의 점에 대해서 만일, $dist(q, p_i) > dist(q, p_j)$ 를 만족하면 q 는 p_j 요소에 포함되며, 평면상의 점들은 P 에 있는 점들 중 가장 가까운 점이 속한 요소에 포함됨. 이런 식으로 한 평면을 분할하는 방법을 Voronoi Diagram이라 정의
- Voronoi Diagram의 각 요소에서 인접한 요소의 내부점과 서로를 연결하면 Delaunay triangulation이 되며, 본 연구에서는 Delaunay triangulation의 확장된 algorithm인

watson's algorithm을 이용하여 scatter points를 triangulation 함

- Watson's algorithm은 node insertion을 위한 방법으로 초기에 가상의 supertriangle을 만든 후 scatter point들이 이 가상의 supertriangle에 insert 된다고 가정하여 삼각화를 구성
- node가 insert 될 때에 insert된 node에 의해 삼각화가 수행되어야 할 element를 재구성하여 하나의 polygon으로 만든 후 이 polygon과 node를 재구성하여 삼각화를 수행
- node가 x혹은 y 의해 정렬되어있다면 $O(N\log N)$ -complexity를 갖게 되어 비교적 빠르게 삼각화 수행 가능

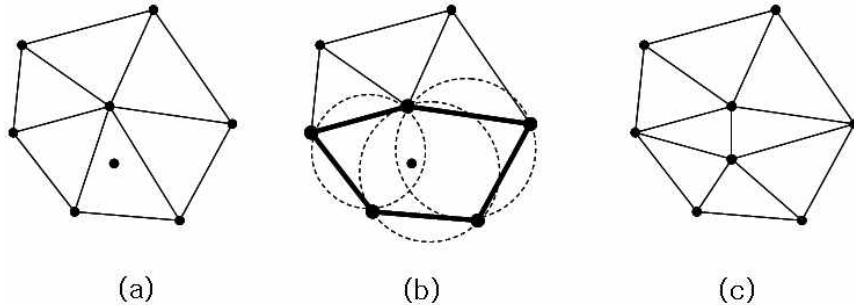


그림 51. Watson's algorithm

○ The Paving Method

- Paving 기법은 해석하고자 하는 영역의 외곽 경계를 따라 사각 요소를 순차적으로 채워나가는 방법으로 영역의 외곽에 경계 절점을 내부각에 따라 7가지로 분류하여 사각 요소를 생성
- 먼저 영역의 외곽 경계에 절점을 균일하게 생성한 후 생성된 외곽 경계 절점을 반 시계방향으로 하여 각 절점(N_i)에 대하여 전 절점(N_{i-1})과 후 절점(N_{i+1})에 의해 이루어지는 내부 각과 각 절점 사이의 거리를 이용하여 새로이 생성될 절점의 거리와 방향을 결정
- 사각 요소 생성은 이렇게 생성된 절점을 포함하여 같은 방식으로 이미 결정된 절점과 N_i , N_{i-1} 절점들을 연결함으로써 수행
- 한 경계의 요소들을 생성하면, 다음 경계에서 생성될 요소들의 크기를 균일하게 하기 위해서 미리 기존 경계 절점들의 위치를 재조정하는 유연화(smoothing)과정을 수행
- 각 사각 요소 생성 도중에 요소가 겹치게 되는 경우가 종종 발생하는데, 이때 봉합(seaming)과정을 수행하게 하여 새로운 내부 경계를 구성하여 상기의 과정들을 반복

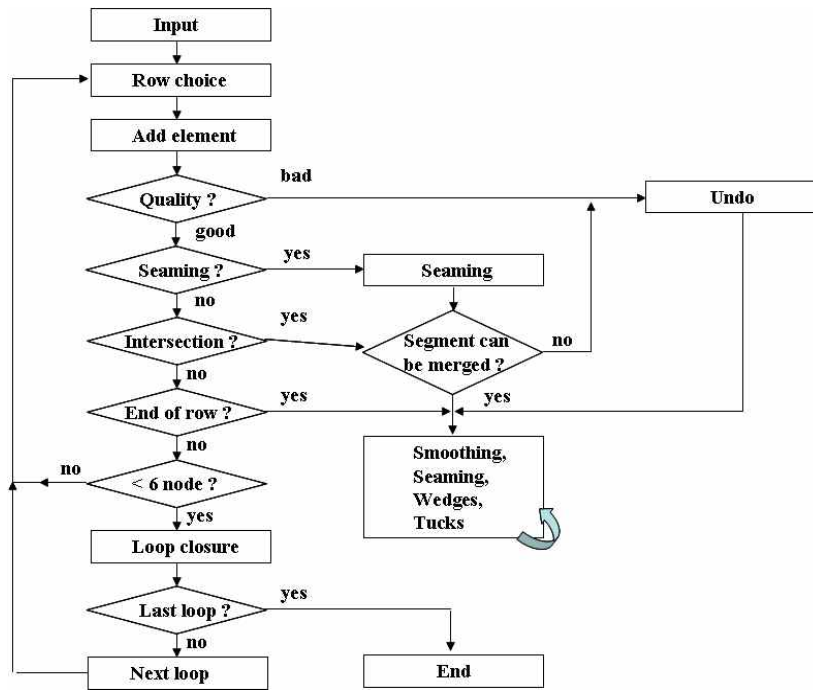
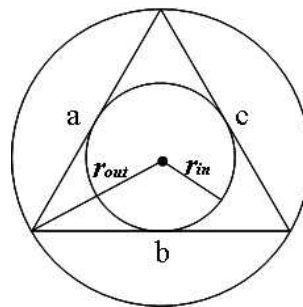


그림 52. Paving algorithm

○ The Element Quality Check

- 유한 요소의 해석에 있어서 삼각 요소의 형상이 정삼각형에 가까울수록 해의 오차가 적어지게 됨
- 이에 따라 본 연구에서는 생성된 요소의 형상이 정삼각형에 어느 정도 가까운 지 확인하기 위해 다음 그림과 같은 방법으로 요소 평가를 수행
- q 의 값이 1에 가까울수록 정삼각형에 가까운 형상이며, 일반적으로 q 의 값이 0.5 보다는 커야 좋은 형상의 요소라고 할 수 있음



$$q = 2 \frac{r_{in}}{r_{out}} = \frac{(b+c-a)(c+a-b)(a+b-c)}{abc}$$

(r_{in} : 내접원의 반지름, r_{out} : 외접원의 반지름, a, b, c : 삼각형 각 변의 길이)

그림 53. 요소 형질 검사

다) 정형 격자 생성(Structured mesh generation)

○ Algebraic interpolation 격자 생성

- Algebraic interpolation을 이용한 격자 생성은 모델의 경계를 따라서 각 절점의 분배 계수에 의해 격자망의 절점을 내삽하여 구하는 기법
- 이 기법은 볼록 다각형으로 나누어진 영역을 매개변수 영역으로 사상하여 생성되어진 격자망을 해석하고자하는 실제 영역에 역사상하는 방법
- 아래 그림에서와 같이 사용자에 의해 분할된 각 해석 영역은 내부각이 90도에 가까운 사각형 요소로 나누어지며, 내삽함수에 의해 실제 해석 영역으로 사상됨. 분할된 사각 영역에서 격자망을 구성할 때에는 대응되는 변의 절점 수를 같게 하여 보다 편리하고 정사각형에 가까운

요소를 생성

- 이와 같은 방법의 격자망 생성에서 요소의 형질은 초기의 사각형 분할과 내삽함수에 의해 결정되며, 삼각요소는 사각요소의 대각선을 기준으로 분할
- 여기서 중요한 내용은 매개변수 영역과 해석하고자하는 실제 영역사이의 적절한 사상함수를 결정하는 것이므로 본 연구에서는 이를 고려하여 algebraic 격자 생성 모듈을 설계
- 본 연구의 algebraic 내삽 모듈을 이용할 경우 곡선 경계를 가지는 사각형 3차 평면, 직선 경계를 가지는 삼각형 1차 평면 등의 geometry 개체에 대한 격자망을 생성할 수 있음

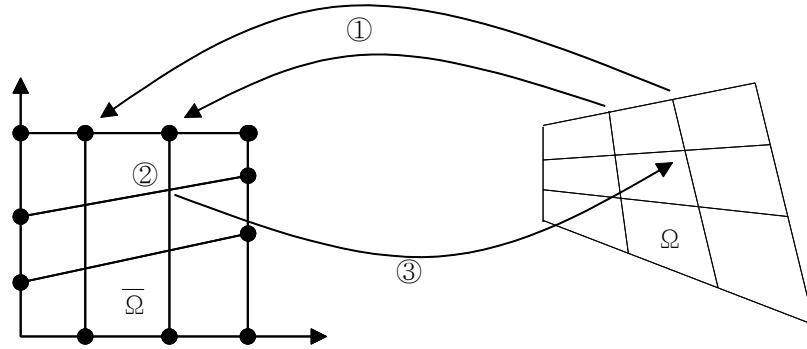


그림 54. Algebraic method with mapping

○ Coon's patch

- 본 연구에서는 Algebraic 내삽함수로 Coon's patch를 이용하여 격자망을 구성
- 사변형의 해석 영역에서는 마주보는 두 변의 분할 개수가 같아야 하며, 사변형의 영역에서는 사각요소의 격자망을 생성한 후에 다시 삼각요소의 격자망으로 쉽게 변환

$$P(u,v) = (1-v)f_2(u) + vf_1 + (1-u)g_1(v) + ug_2(v) \\ - (1-u)(1-v)P(0,0) - (1-u)vP(0,1) \\ - uvP(1,1) - u(1-v)P(1,0)$$

$$0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$$

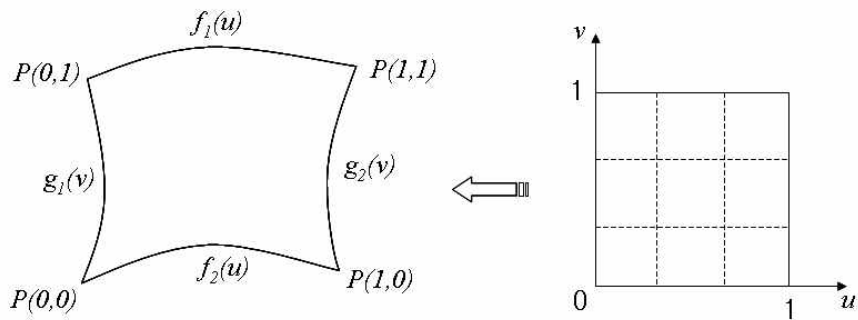


그림 55. 사변형 영역의 사상

- 삼변형의 경우는 세 변의 분할 개수가 모두 같아야 함

$$P(u,v) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{ug(v)}{1-v} + \frac{wh(1-v)}{1-v} + \frac{vh(w)}{1-w} + \frac{uf(1-w)}{1-w} + \right. \\ \left. \frac{wf(u)}{1-u} + \frac{vg(1-u)}{1-u} - wf(0) - ug(0) - vh(0) \right\}$$

$$u+v+w=1 \\ 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1, 0 \leq w \leq 1$$

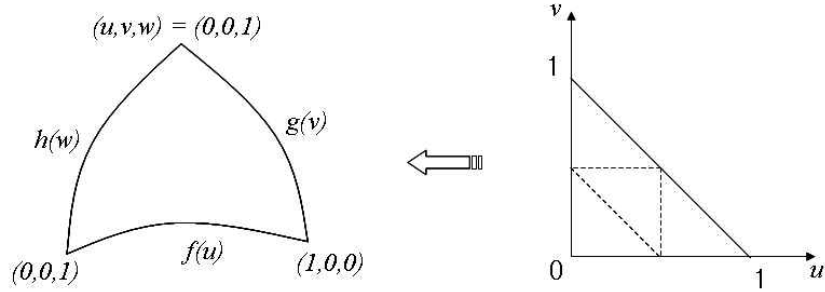


그림 56. 삼변형 영역의 사상

○ 편미분방정식 해법(Solving P.D.E Method)

- 수치기법인 편미분방정식 해법을 이용한 정형 격자망 생성 모듈은 실제의 물리적 공간 좌표를 계산 공간 좌표(computational space coordinates)의 향으로 정의하고 실제 영역에서 격자망을 생성하기 위해 계산 공간상의 격자망에 대한 방정식을 푸는 것을 기본 개념으로 함

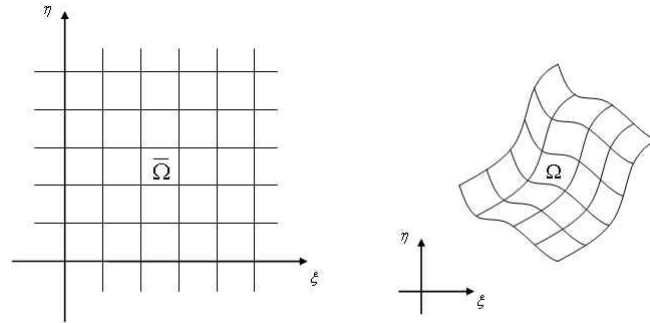


그림 57. 계산 공간좌표와 물리 공간좌표

- 본 기법에 적용 가능한 편미분 방정식으로는 elliptic equation을 비롯하여 hyperbolic equation, parabolic equation 등이 있음
- elliptic equation을 이용한 격자망 생성기법이 일반적으로 사용되고 있으며, 다음 그림과 같이 폐쇄경계(closed boundary)를 가진 영역에 적합함

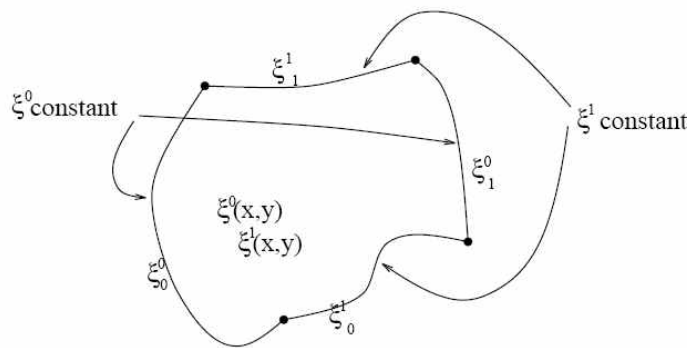


그림 58. elliptic grid generation boundaries

라) 격자생성 프로세스 설계

- 본 연구에서는 비정형 격자생성 뿐만 아니라 정형 격자를 생성할 수 있는 모듈을 추가함
- 정형 격자생성을 위해 algebraic interpolation 모듈을 적용
- Algebraic 기법의 경우 원하는 절점의 분포에 따라 직접적으로 격자망을 생성하는데 반해, 편미분방정식 해법을 적용하는 수치해석기법은 elliptic equation이나 Poisson equation과 같은 편미분 방정식을 풀어 boundary-fitted mesh를 생성
- 따라서 algebraic 기법은 알고리즘이 단순하고 편미분 방정식을 풀어 격자망을 생성하는 수치해석기법에 비해 격자망 생성 속도가 빠른 장점이 있음
- 수치해석기법은 포괄적인 접근법을 사용함으로써 절점 분포의 유연한 변이(smooth transition)와 유연성(smoothness), 직교성(orthogonality) 확보를 통해 우수한 형질의 격자를 생성 가능한데 비해서, algebraic 기법의 경우 격자망 분해에 적용될 수 있음에도 불구하고 격자망의 전체적인 또는 국지적인 유연성(smoothness)과 등질성(uniformity) 등을 보장하지는 않으며, 이에 따라 격자망을 최적화하기 위해서 유연화 기법이 별도로 적용될 수 있도록 설계

(3) 사용자 인터페이스(Graphic User Interface)

가) 개발 도구

- 1차년도 연구를 통하여, Vectordraw cad 엔진을 활용하여 격자생성 연구를 진행하였으나, 상용 엔진으로, 개발 및 배포시 라이선스 문제가 대두되었음
- 10,000여개 이상의 격자를 생성할 경우, 이동, 확대/축소시, 화면상의 버벅거림과 프로그램 실행이 중단되는 문제가 발생하였으며, 이는 하드웨어 특성과도 연관이 있으며, 상용엔진 사용에 따라 불필요한 라이브러리까지 탑재됨으로, 프로그램이 과도하게 무거워지는 경향이 발생하였음
- 이는 Vectordraw 엔진의 최적화와 자료 최적화를 통하여, 어느정도 개선이 되어질 수 있으나, 향후 지속적인 연구의 확장 및 발전에 적합하지 않고, 공개 S/W를 활용함으로써 다양한 연구자가 같이 연구에 참여할 수 있는 발판을 마련하는 것을 본 연구의 목적으로 선회함
- 공개 소프트웨어인 Qt를 개발 도구로 채택

○ Qt

- The Qt Company에서 개발한 오픈 소스 C++ 개발 프레임워크
- '큐트'라고 읽음
- 원래 트롤텍이라는 회사에서 개발했으나 노키아가 트롤텍을 인수한 이후에는 노키아에서 관리하였으며, 2012년 8월 핀란드의 Digia로 승계되었다가 2014년 The Qt Company라는 이름으로 Digia 자회사로 독립
- C++와 QML이라는 자체 스크립트 언어를 기반으로 함
- 현존하는 주요 플랫폼(Windows, Linux, OSX, Android, iOS 등)을 거의 대부분 지원
- 그래픽용 백엔드는 더 이상 GDI+ CoreGraphics등의 플랫폼의 네이티브 API를 사용하지 않고 OpenGL / OpenGL ES / DirectX / Vulkan을 사용
- 현재 버전 5.12.0까지 출시되었으며, 본 연구에서는 최신 버전의 Qt를 이용
- 프로그램 코딩을 위해서 Qt Creator가 제공되며, 현재 버전 4.8.0

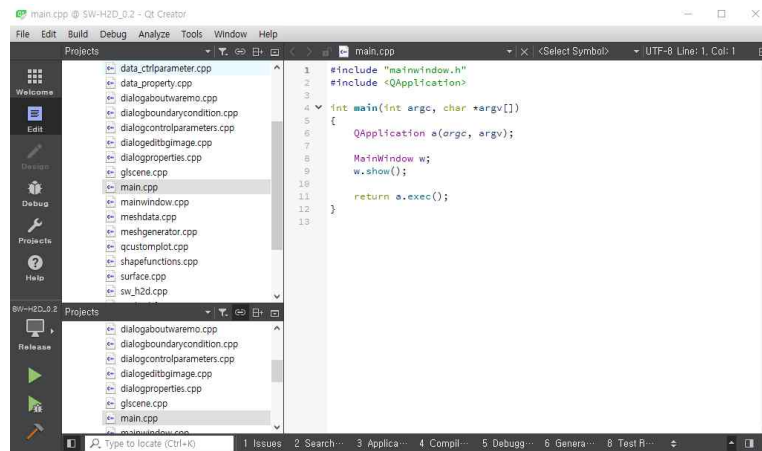


그림 59. Qt Creator

- 메뉴, 대화창, 버튼 등 GUI의 배치를 위해 Qt Designer가 제공되며, 현재 버전 5.11.2

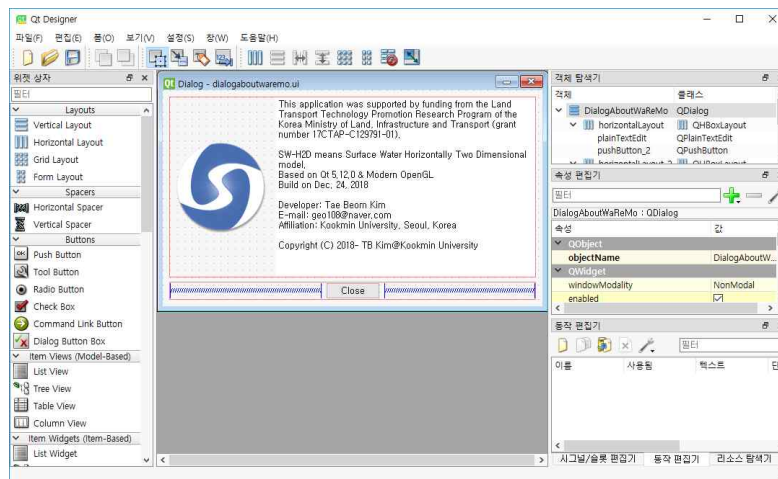


그림 60. Qt Designer

○ OpenGL (Open Graphics Library)

- OpenGL은 원래 Silicon Graphics사에서 만든 3D 그래픽 처리 라이브러리로서 각종 영화와 애니메이션, 시뮬레이션을 비롯한 각처에서 3D 관련 처리를 위해서 가장 널리 쓰이는 제품
- 실제 우리가 3D를 처리하는 프로그램을 만들기 위해서는 대단히 까다로운 그래픽 루틴을 만들어야 하나, 이렇게 까다로운 3D 그래픽을 쉽게 하기 위해서 만들어진 라이브러리가 OpenGL임
- 이 라이브러리를 사용함으로써, 프로그래머는 3D 그래픽을 어떻게 계산하고 화면에 뿌려야 하는가에 대한 저차원적인 고민에서 벗어나서, 그래픽 자체에만 골몰하는 창조적인 작업에 더 많은 시간을 들일 수 있게 됨
- OpenGL은 실리콘그래픽스는 물론이고 여러 유닉스 시스템과 윈도우 NT에도 포팅 되어 있으므로 다른 운영체제들 사이에서도 호환성을 제공
- 아주 빠른 속력이 필요한 게임을 제외하고는 대부분의 3D 관련 프로그램은 OpenGL을 사용하여 만들어지고 있음
- 개발자가 그래픽스 파이프라인을 직접 제어할 수 있도록 GLSL(OpenGL Shading Language) 적용이 가능한 modern OpenGL을 본 연구에 적용

나) SW-H2D GUI 설계 및 개발

○ 전체 구성

- 메뉴, 툴바, 격자생성 창, Graphics/Edit tools로 구성

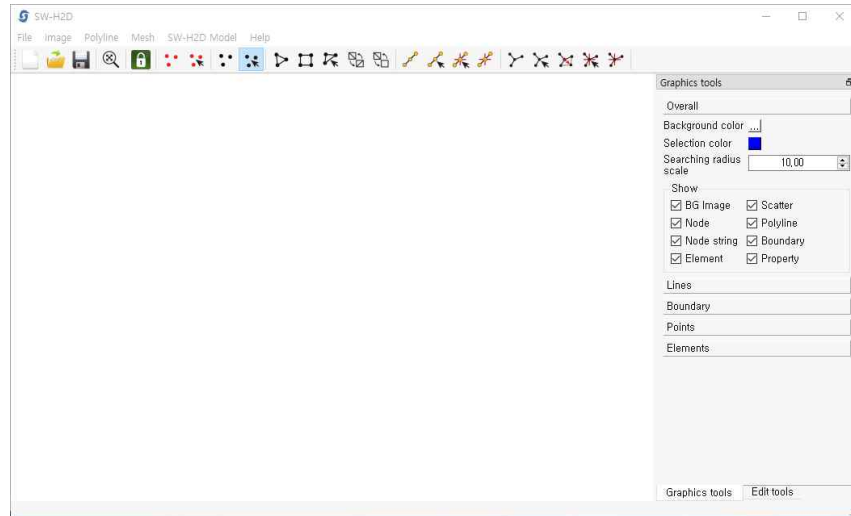


그림 61. GUI 전체 구성

○ File 메뉴

- New: 기존의 자료를 모두 삭제 후 새로운 입력환경 설정
- Open: 기존에 저장되어 있는 자료 파일을 불러옴
- Save: 현재까지 진행된 작업을 project file(확장자 .sw2)에 저장
- Save as: 새로운 project명으로 자료 저장
- Exit: 종료

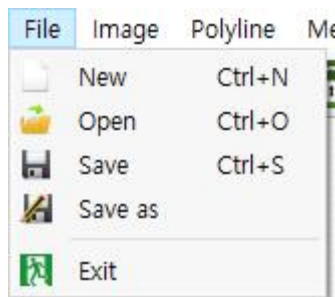


그림 62. File 메뉴

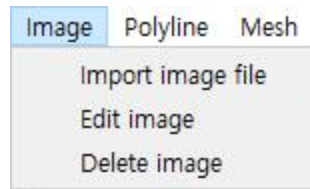


그림 63. Image 메뉴

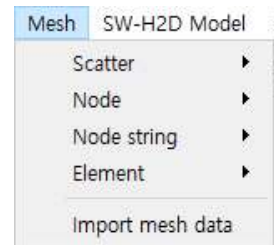


그림 64. Mesh 메뉴

○ Image 메뉴

- Import image file: 배경화면으로 불러들일 이미지 파일 선택창이 열림
- 배경이미지로 Windows Bitmap(확장자 .bmp), Graphic Interchange Format(확장자 .gif), Joint Photographic Experts Group(확장자 .jpg, .jpeg), Portable Network Graphics(확장자 .png), Portable Bitmap(확장자 .pbm), Portable Graymap(확장자 .pgm), Portable Pixmap(확장자 .ppm) 가능
- Edit image: 배경이미지의 좌하단, 우상단 좌표값을 설정하도록 하고, 이미지 크기와 파일 경로 표시
- Delete image: 배경이미지 삭제
- 현재 배경 이미지로는 한 개의 파일만 적용 가능

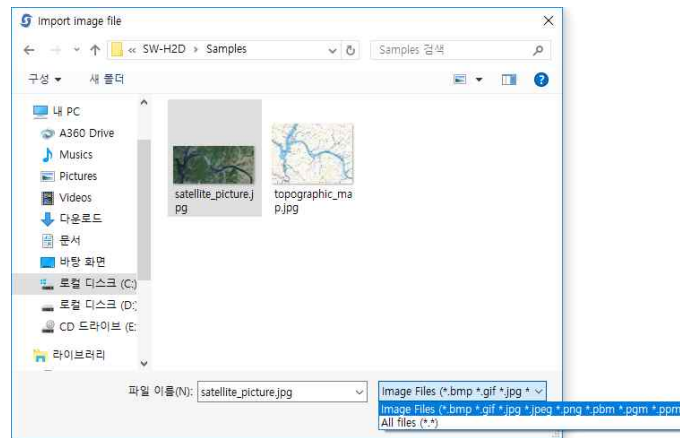


그림 65. Import image file 선택 시 불러오기 창

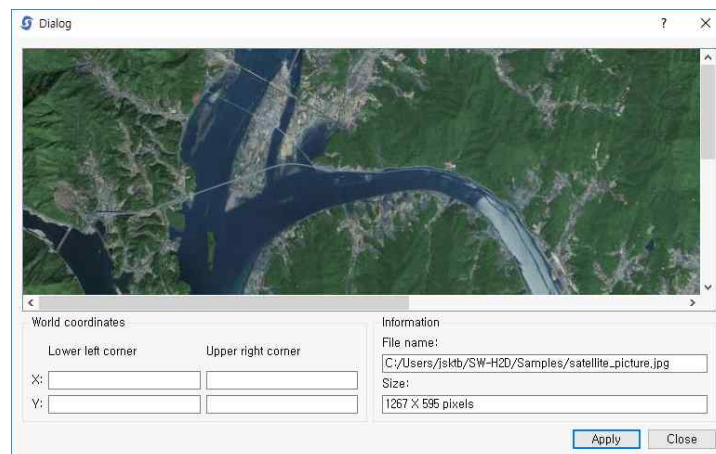


그림 66. 배경그림 좌표 편집창

○ Polyline 메뉴

- Create Polyline: 폴리라인 생성 진입
- Select Polyline: 생성되어 있는 폴리라인 선택
- Move Vertex: 생성되어 있는 폴리라인 절점 선택 후 새로운 좌표로 이동
- Split Polyline: 생성되어 있는 폴리라인의 선택 절점 위치에서 폴리라인 분열
- Merge Polyline: 인접한 두 개의 폴리라인을 하나의 폴리라인으로 병합

○ Mesh 메뉴

- 격자생성에 활용되는 산포점(scatter points), 격자 절점(nodes), 격자 요소(elements), 그리고 Node string 하위메뉴로 구성
- Import mesh data: 타 프로그램에서 생성시킨 격자정보 파일을 불러들여 격자를 구성

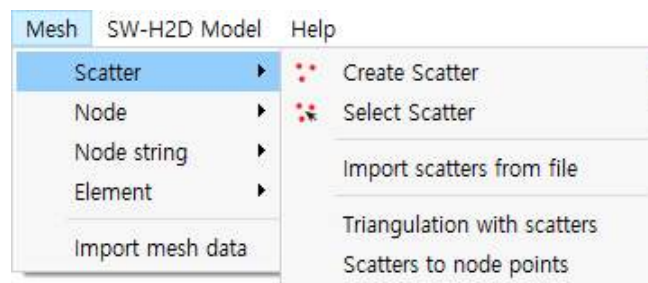


그림 67. Mesh>Scatter 메뉴

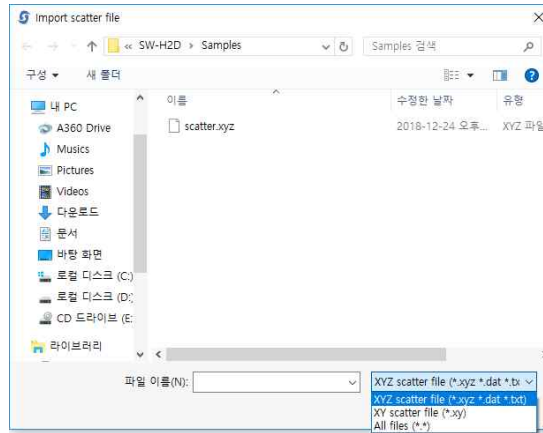


그림 68. Import scatter file 창

- Mesh>Scatter>Create Scatter: 새로운 산포점 생성
- Mesh>Scatter>Select Scatter: 기존 산포점 선택
- Mesh>Scatter>Import scatters from file: XYZ(확장자 .xyz, .dat, .txt) 또는 XY(확장자 .xy) 파일 불러오기
- Mesh>Scatter>Triangulation with scatters: 선택된 산포점을 이용하여 삼각요소 격자 생성
- Mesh>Scatter>Scatters to node points: 선택된 또는 모든 산포점을 절점으로 변환

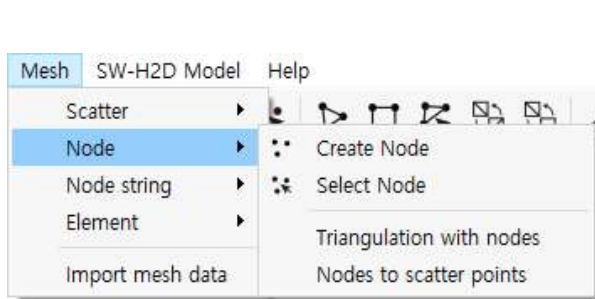


그림 69. Mesh>Node 메뉴

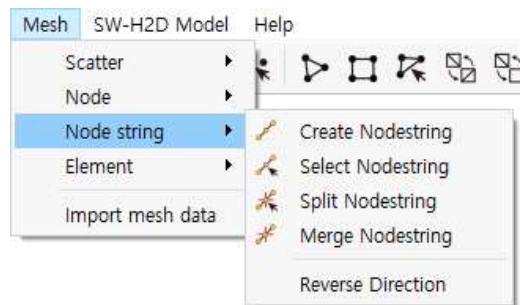


그림 70. Mesh>Node string 메뉴

- Mesh>Node>Create Node: 새로운 절점 생성
- Mesh>Node>Select Node: 기존 절점 선택
- Mesh>Node>Triangulation with nodes: 선택된 절점을 이용하여 삼각요소 격자 생성
- Mesh>Node>Nodes to scatter points: 선택된 또는 모든 절점을 산포점으로 변환
- Mesh>Node string>Create Nodestring: 절점들을 연결한 노드스트링 생성
- Mesh>Node string>Select Nodestring: 기존의 노드스트링 선택
- Mesh>Node string>Split Nodestring: 기존의 노드스트링을 선택 절점 위치에서 분열
- Mesh>Node string>Merge Nodestring: 인접한 두 개의 노드스트링을 하나로 병합
- Mesh>Node string>Reverse Direction: 노드스트링을 구성하는 절점 배열순서 전환

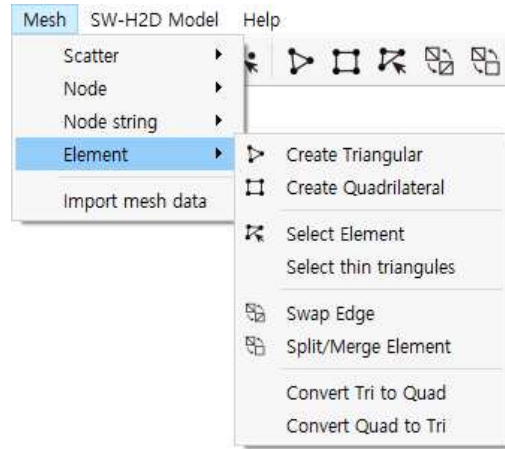


그림 71. Mesh>Element 메뉴

- Mesh>Element>Create Triangular: 세 개의 절점을 이용하여 삼각요소 생성
- Mesh>Element>Create Quadrilateral: 네 개의 절점을 이용하여 사각요소 생성
- Mesh>Element>Select Element: 기존의 요소 선택
- Mesh>Element>Select thin triangles: 기존의 삼각요소 중 가느다란 형상의 삼각요소 자동선택
- Mesh>Element>Swap Edge: 두 삼각요소 사이의 공유 모서리 방향 전환
- Mesh>Element>Split/Merge Element: 모서리를 공유하는 두 삼각요소를 하나의 사각요소로 병합 또는 하나의 사각요소를 두 삼각요소로 분열

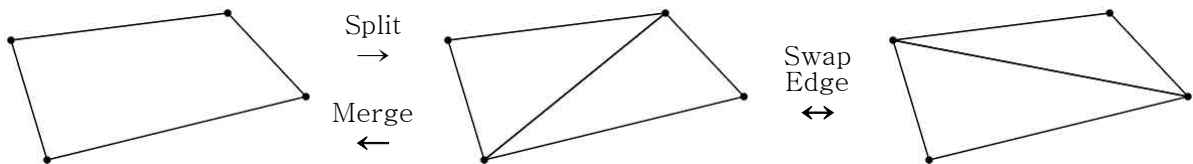


그림 72. Split/Merge와 Swap edge

- Mesh>Element>Convert Tri to Quad: 전체 격자망에서 삼각요소들을 사각요소로 자동 변환
- Mesh>Element>Convert Quad to Tri: 전체 격자망에서 사각요소들을 삼각요소로 자동 변환

○ SW-H2D Model 메뉴

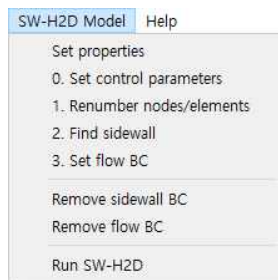


그림 73. SW-H2D Model 메뉴

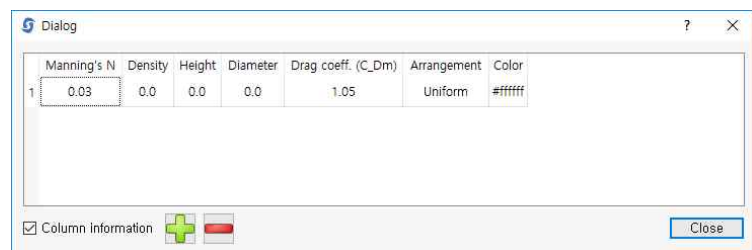


그림 74. 요소 특성 값 설정 창

- Set properties: 요소의 특성 값을 추가 정의하거나 삭제
- 0. Set control parameters: 계산에 필요한 파라미터 설정
 - 시간단위로 초와 분 중에 선택 가능
 - 초기 수두로 수면높이 또는 수심 선택 가능
 - 측벽 경계조건으로 flow 조건과 no-flow 조건 중 하나를 선택 가능
 - 연속모의(hot-start) 설정 가능

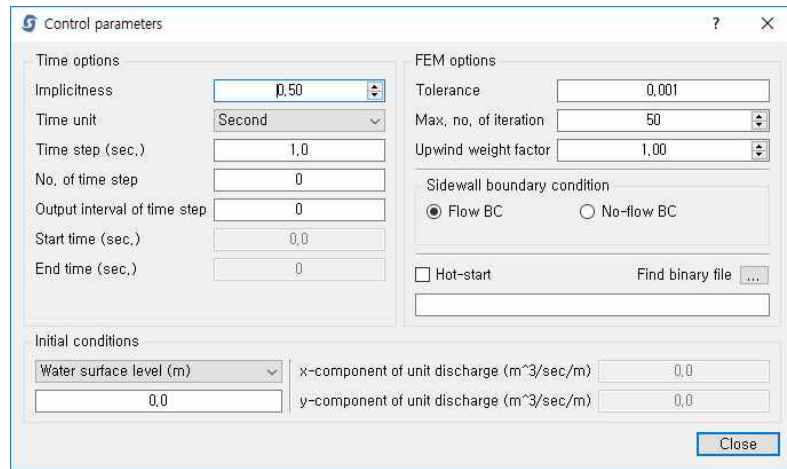


그림 75. Control parameter 대화창

- 1. Renumber nodes/elements: 선택된 노드스트링을 기준으로 절점과 요소의 배열번호 재 정렬
- 2. Find sidewall: 구성된 격자망에서 내외부 측벽을 검색하여 설정

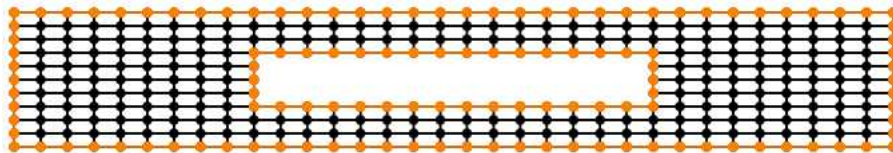


그림 76. 내외부 측벽 설정

- 3. Set flow BC: 선택된 노드스트링에 유입유량 또는 수위나 수심 경계조건 설정
 - 유입유량과 수위/수심 경계조건을 동시에 설정 가능하여 사류(supercritical flow) 조건 모의 가능
 - 시간에 따른 유입유량과 수위/수심 변화 값을 입력 가능
 - 절점마다 동일 유량을 설정할 수도 있고, 절점마다 다른 유량 값을 설정할 수도 있음

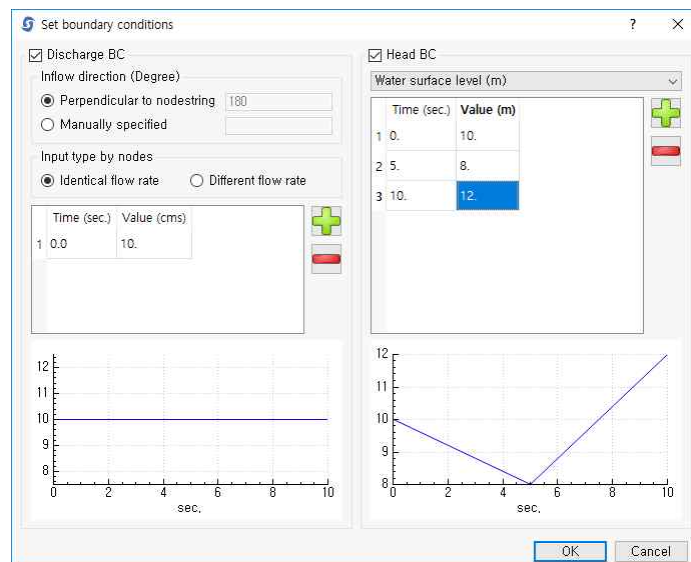


그림 77. 경계조건 설정 대화창

- Remove sidewall BC: 설정된 측벽 정보 삭제
- Remove flow BC: 선택된 노드스트링에 설정된 유량 또는 수위/수심 경계조건 삭제
- Run SW-H2D: SW-H2D 모형 실행

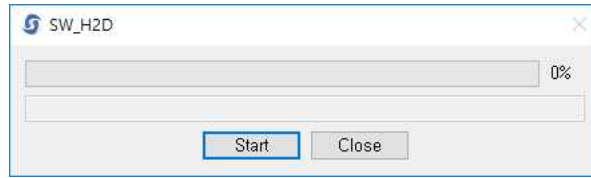


그림 78. SW-H2D 모형 실행창

○ 추가 tool bar 메뉴

- Zoom extend(🔍): 기본적으로 마우스 중간 휠을 이용하여 격자 생성창의 스케일을 조정할 수 있으며, zoom extend 버튼을 클릭하여 기본 스케일로 복귀
- Look/unlock point(🔒🔓): 산포점, 절점, 폴리라인을 구성하는 점들을 unlock 상태에서 마우스로 선택하고 드래그하여 이동 가능

○ Graphics tools

- Overall, Lines, Boundary, Points, Elements 툴박스로 구성
- 구성요소 show/hidden을 선택하거나 색상, 크기, 두께를 설정할 수 있으며, 요소 특성의 투명도를 변경 가능

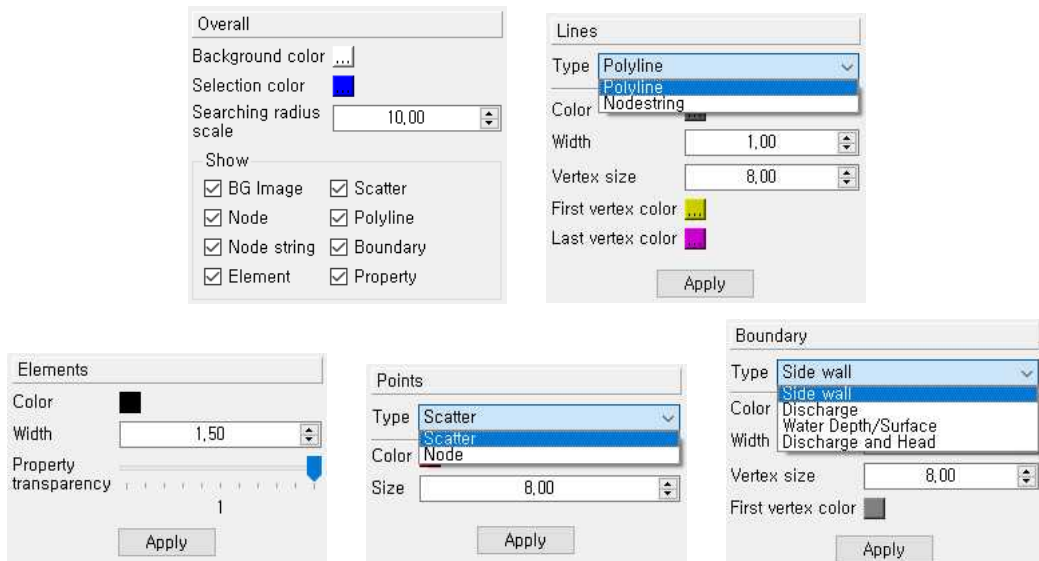


그림 79. Graphics tools 구성

○ Edit tools

- 격자 생성 시 필요한 작업들을 모아놓은 Point information, Point division, Mesh generation, Inter/Extra-polation, Element information 툴박스로 구성
- Point Information 툴박스
 - 산포점이나 절점 또는 노드스트링 선택 시 정보 표시
 - 좌표 값을 변경한 후 Move 버튼을 클릭하여 선택 점을 이동시킬 수 있음
 - 노드스트링 선택 시 Renumbering 버튼이 활성화되어 Both, Front, Band width option에 따라 배열이 재 정렬됨
- Inter/Extra-polation
 - 산포점의 지형고도를 바탕으로 생성된 절점의 고도를 내삽하거나 외삽할 때 사용
 - 내삽법으로 삼각요소 격자에 바탕을 둔 선형보간법(linear interpolation)이나 거리 반비례 가중법(inverse distance weight)을 선택 가능
 - 외삽법으로 상수값을 설정하거나 거리 반비례 가중법 선택 가능

Point Information

Type: Node

ID: 49

Distance:

X coord: 1.36

Y coord: 9.35

Z coord: 9.9976

Move

Nodestring

Renumstring option: Both width

Renumstring

Reverse direction

그림 80. Point information toolbox

Inter/Extra-polation

Interpolation

Method: Linear

Subset: All points

Extrapolation

Method: Single value

Subset: All points

Single Value: 0.0

Truncation

☐ Truncate values

Min. value: 0.0

Max. value: 0.0

Execute

그림 81. Interpolation & extrapolation toolbox

- Point division

- 두 절점 또는 두 점으로 구성된 폴리라인을 선택했을 때 두 점 사이를 더욱 세분하여 점을 생성시킬 수 있음
- 선형 또는 반원 형태로 생성 가능
- 왼쪽, 오른쪽, 중심, 양끝으로 편향시킬 수 있음

- Element Information

- 생성된 요소를 선택했을 때 요소 정보를 표시
- 스피너박스의 번호를 변경하여 선택 요소의 특성 값을 변경 가능

- Mesh generation

- 폐쇄된 상태로 선택된 폴리라인들을 이용하여 정형/비정형 삼각 또는 사각요소 격자를 생성
- 안정적인 격자생성을 위해 참고할만한 선택된 폴리라인들에 대한 정보를 표시

Point division

Method: Line

Bias type: None

Bias extent: 0

Segment No.: 2

Divide

그림 82. Point division toolbox

Element Information

Type:

ID:

Nodes:

Area:

Property No.:

1

Set property

그림 83. Element information toolbox

Mesh generation

Method: Structured

Element type: Triangle

Arc option: Polyline-based

Mesh size: 1.0

Generate mesh

Min, seg. Length:

Avg, seg. Length:

Max, seg. Length:

Closed loop area:

그림 84. Mesh generation toolbox

다) SW-H2D 개요

- Surface Water Horizontally Two Dimensional model을 의미
- Setup_SW-H2D.exe 파일을 실행하여 사용자가 원하는 위치에 프로그램을 설치 후 사용 가능
- 샘플파일도 설치파일에 수록하여 사용자가 선택 가능

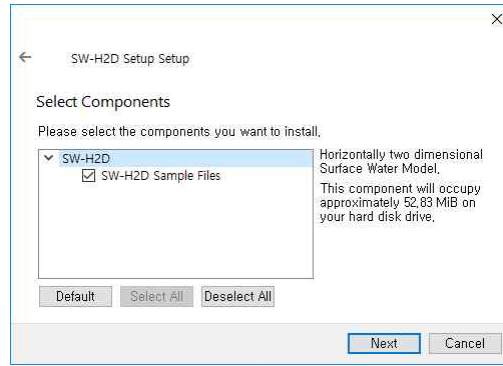


그림 85. SW-H2D 설치 창

- 저장되어 있는 프로젝트 파일을 불러와 언제든지 격자 생성 연속 작업이 가능
- 기본적으로 마우스를 이용하여 작업이 진행되며, 마우스의 왼쪽, 오른쪽 버튼과 중간 휠이 사용됨
- 구성요소의 생성 시 마우스 왼쪽버튼은 구성요소 생성에 사용되며, 화면 이동은 마우스 오른쪽 버튼으로 가능
- 요소 생성 이외에는 마우스 왼쪽버튼으로 화면 이동 가능
- 마우스 중간 휠은 화면 확대와 축소에 사용
- 하나의 프로젝트를 수행하고 나면, 프로젝트 이름으로 총 4개의 파일이 생성됨
 - 확장자 .dat 파일: ASCII 형식으로 출력된 결과 파일이며, 전문 그래픽 프로그램인 tecplot의 입력자료로 사용 가능
 - 확장자 .hot 파일: 2진수 형식으로 출력된 결과 파일이며, 연속 모의에 사용됨
 - 확장자 .sw2 파일: SW-H2D 프로젝트 파일이며, 모든 정보를 저장하고 있는 2진수 형식의 파일
 - 확장자 .vel6 파일: 본 연구에서 개발된 후처리 프로그램에서 결과를 보기 위해 사용되는 결과 파일
- SW-H2D의 심볼은 프로그램 명칭 제일 앞글자인 S를 의미할 뿐만 아니라, 하천을 형상화하였으며 호수와 바다를 연결한다는 의미도 내포



그림 86. SW-H2D
심볼

(4) 후처리 GUI 구축

가) 적용 기술 선정 및 소개

- Visualization Toolkit(VTK)는 객체지향 기법으로 구현된 3차원 그래픽 라이브러리로 소스가 공개되는 프리웨어
- 웬만한 알고리즘이 구현되어 있기 때문에 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있음
- 컴퓨터 그래픽과 가시화에 대한 기본 개념을 알고 있으면, 누구나 쉽게 프로그래밍이 가능
- VTK는 C++ 클래스 라이브러리이며, Tcl/Tk, Java, Python과 같은 스크립트 언어에 대한 인터페이스를 함께 제공
- 스칼라, 벡터, 텐서, 텍스처, volumetric method등의 visualization 알고리즘을 지원하고,

implicit modelling, polygon reduction, mesh smoothing, cutting, contouring, Delaunay triangulation 등과 같은 고급 모델링 테크닉을 지원

- 많은 imaging algorithm을 통합하여 3D graphics algorithm과 데이터를 2D imaging로 믹싱할 수 있음
- VTK는 거의 모든 Unix 플랫폼과 PC들(Windows 98/ME/NT/2000/XP), 그리고 Mac OSX Jaguar이후 버전에서 사용가능하고, 철저하게 검증되어 있음
- 단, 전처리에 사용되는 CAD 기능을 따로 구현해야 한다는 단점이 있음

나) 2차원 후처리 GUI 개발

- 2차원 후처리 GUI는 그래픽 라이브러리로 VTK를 활용하고 있으며, MFC, C++기반으로 개발되어 있으며, 향후 QT 프레임워크 기반으로 통합을 염두에 두고 있음
- 개발된 후처리(2차원 가시화) GUI는 먼저 지형정보 파일을 불러오기, 해석결과를 불러오는 과정으로 구축되어져 있으며, 지형정보와 해석결과가 매칭되지 않을 경우, 가시화가 되지 않도록 구현됨

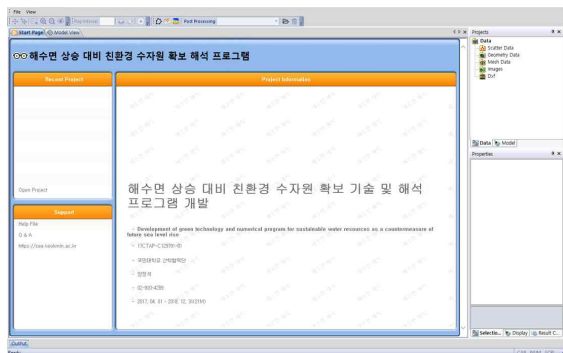


그림 87. 후처리 GUI 메인화면

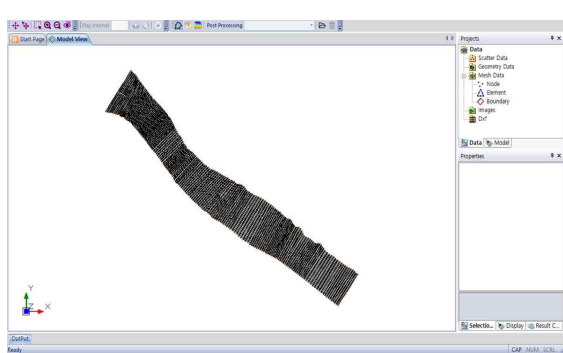


그림 88. 결과파일 불러오기(지형파일)

- 해석결과를 불러오게 되면 아래와 같이, 결과 값이 가시화 되어 표출이 되며, 기본적으로는 수심, 수위, 유속 결과를 확인 가능
- 해석결과를 확대, 축소, 회전, 이동, 다양한 줌 기능을 통하여, 컨트롤이 가능하며, 애니메이션 기능을 통하여, 모의 기간에 대한 결과 파일을 동적으로 확인이 가능

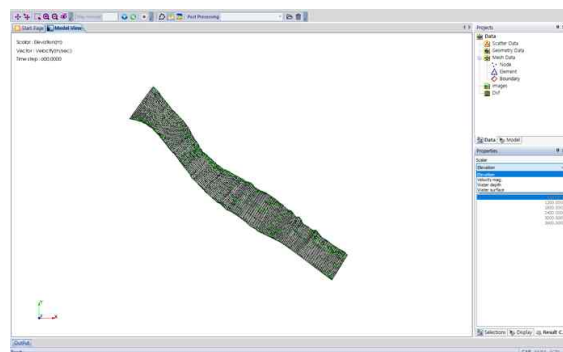


그림 89. 결과파일 불러오기(해석결과)

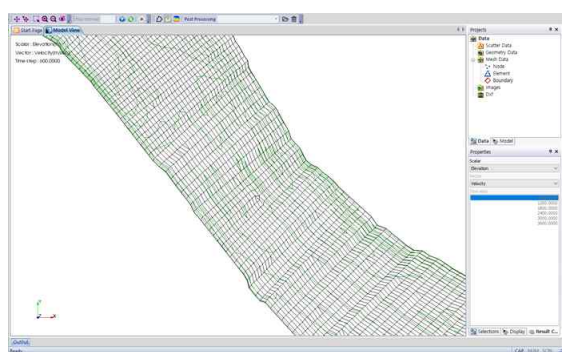


그림 90. 결과 화면

- 하천의 지형정보 중 Z(하상)값을 확대할 경우, 아래와 같이 3차원 하천형상을 확인할 수 있으며, 수표면의 결과 값이 하상격자에 투영되도록 구성되어, 결과 값 확인이 가능하나, 실제로 수심(Z축)에 대한 해석이 수행된 것이 아니므로, 결과 해석 시 이를 염두에 두어야 함

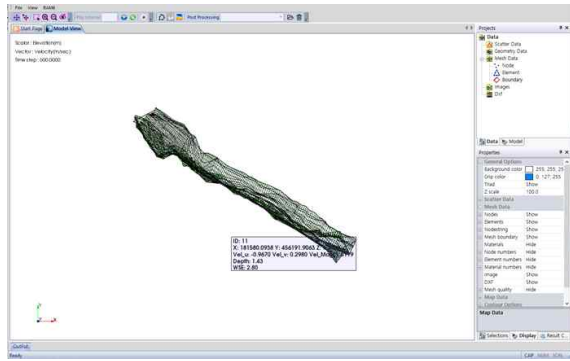


그림 91. 2차원 결과화면(Z값 확대)

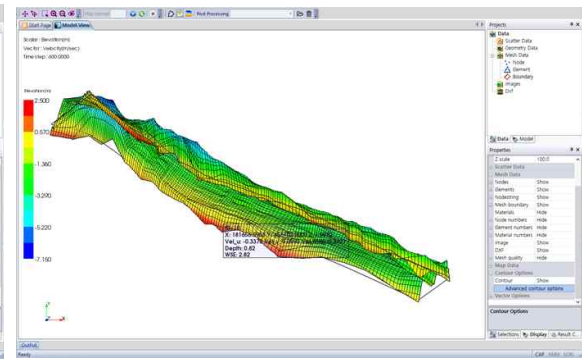


그림 92. 2차원 결과화면(Contour 적용)

- 결과 값은 디자인 탭을 활용하여 다양한 컨트롤이 가능하며, 모의 조건에 따라 자신이 원하는 최적의 형태를 고려하여 다양한 형태로 도식화 가능

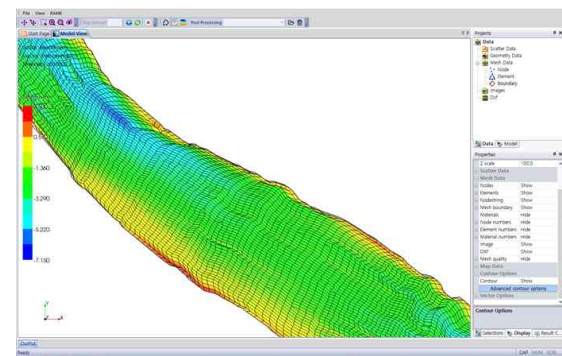


그림 93. 2차원 결과화면(확대)

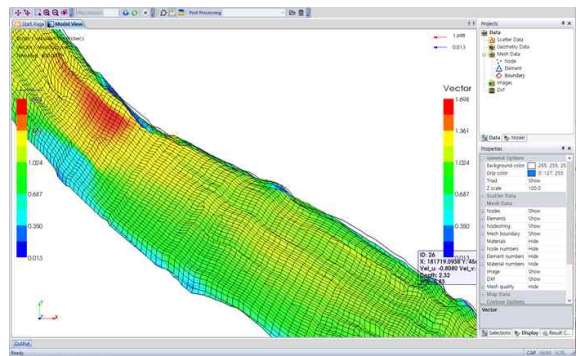


그림 94. 2차원 결과화면(Velocity)

나. 3차원 지하수 해석 GUI 개발

(1) 3차원 CFD 해석 결과 GUI 개발 방향

- 3차원 격자 해석 GUI는 다양한 형태의 상용, 오픈소스 GUI가 개발됨
- 본 과제에서는 과제의 기간 및 여러 내외부 여건에 따라, 3차원 가시화 프로그램에 대한 연구 보다는 현재의 기술 추세에 맞도록 결과 자료의 손쉬운 공유 측면을 고려하여, WEB-GIS 방식으로, 3D 결과 화면을 공유하도록 연구를 진행하였으며, 이에 따라 WEB상에서 3D GIS 결과를 확인하도록 구현

(2) 3D GIS Viewing 개발

- 3D GIS 란?
 - 기존의 2차원 GIS가 갖는 한계를 극복하고 다양한 응용분야에서 3차원 지리 정보의 처리 및 활용을 연구하는 분야로, 3D 공간 Data Models, 공간 database 관리기술, 인터넷 응용 기술, 대용량 데이터 베이스 응용 기술, 실시간 대용량 자료 처리 기술, 3차원 그래픽 처리 기술, 가상 현실 기술 등의 제반 요소 기술들이 종합적으로 적용되는 분야
 - 3차원 지형과 시설물이 연동 관리되고 3차원 공간 지리 정보가 위상학적인 자료 구조에 의해 유동적이고 능동적으로 관리되므로 3차원 공간 정보의 검색, 편집, 분석이 가능
 - 사용자 질의 처리 및 몰입적 상호작용을 지원하여 사용자로 하여금 현실 같은 가상 세계에서 도시공간과 지리학적 문제점들을 더욱 빠르고 쉽게 이해하도록 하는 역할
- LOD알고리즘을 이용한 3D 지형구조화
 - 정확하게 보이기 위해 지형의 어떤 부분이 더 자세하게 보일 필요가 있는지를 결정하기 위해 경험치의 집합을 사용
 - 지형을 랜더링하기 위한 많은 기술적 변화들 중 하나는 지형자체에 존재하는 기능들을 저

장하는 방법에 있으며, 높이맵(height map)은 그 위치에서의 지형의 높이값을 저장하고 있는 이차원 배열로 정의

- 3가지 LOD알고리즘

- 1) 좀더 세밀한 지형이 필요할 때 임의의 메쉬에 삼각형들을 추가하는 다소 새롭고 깔끔한 적응적 메쉬에 기반한 알고리즘
- 2) 지형의 조각(Patch)을 표현하기 위해 사용되는 쿼드트리라고 하는 구조체는 높이 맵에 대한 근사값을 생성하기 위해 지형을 재귀적으로 분할
- 3) 이진 삼각형 트리(Binary Triangle Tree)에 기반한 알고리즘(Real-time Optimally Adapting Meshes: ROAM)

- 여기에서 각 패치는 단순히 (우측의) 이등변 삼각형
- 삼각형의 정점에서 이 삼각형의 빗변의 중점을 분할하면 두 개의 새로운 이등변(우측) 삼각형을 생성
- 이러한 분할은 재귀적이며 원하는 디테일 수준에 이를 때까지 자식노드들에 대해 반복

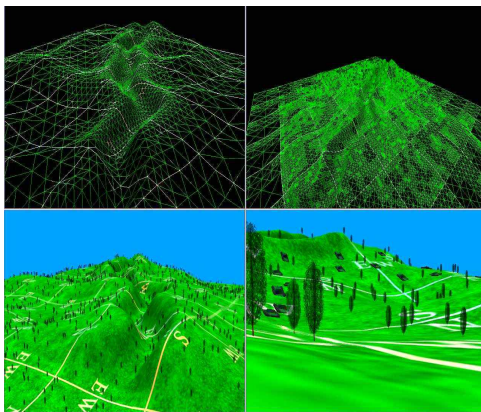


그림 95. QUAD TREE

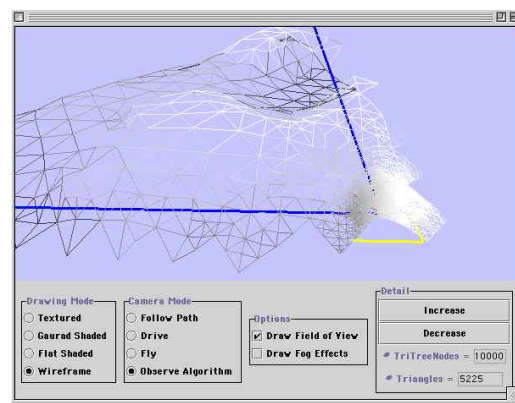


그림 96. ROAM

- SW-H2D 내의 3D GIS View

- SW-H2D에서 GIS는 하천 모델링을 위한 GIS 데이터 이용 및 국내외 판매 및 사용을 활성화하기 위한 다양한 상업화 전략 수립의 일환으로 기획
- 3D Viewing에 주력하기 위해 QUAD TREE를 기반으로 프로그래밍
- OpenGL 3D라이브러리를 이용하여 국내의 모습을 3차원 도시하여 강들의 실제 모습을 정확히 파악할 수 있도록 하였음
- 차후에는 더욱 많은 정보를 추가하여 SW-H2D의 기본기능과 좋은 상호작용을 하여 사용자가 더 직관적이고 현실적인 수치 해석 및 활용을 할 수 있도록 하는 방안을 연구할 계획임

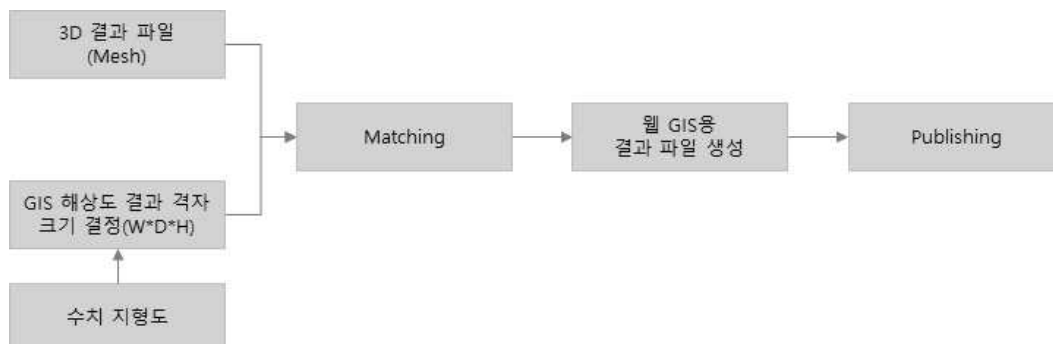


그림 97. 3D GIS VIEW 생성 과정

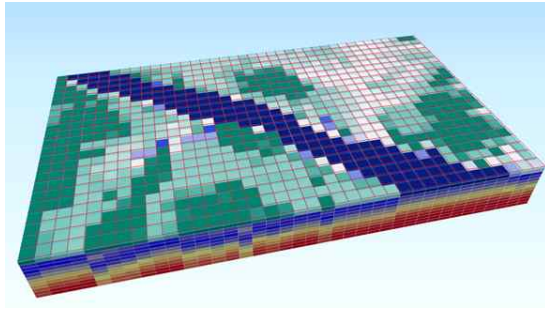


그림 98. 3D VIEW 결과 화면(상부)

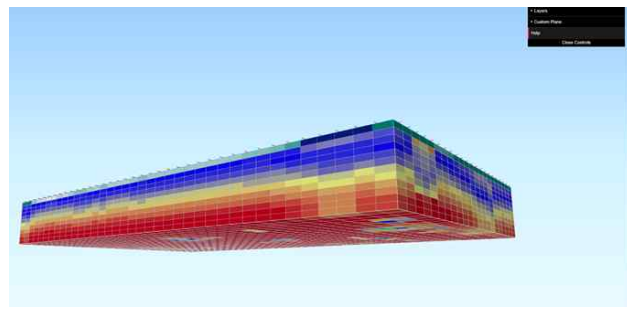


그림 99. 3D VIEW 결과 화면(측면)

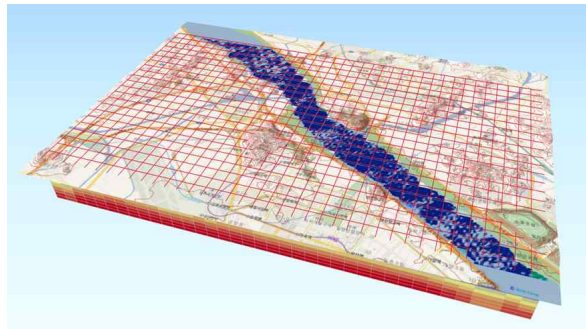


그림 100. 3D VIEW 결과 화면(매쉬업)

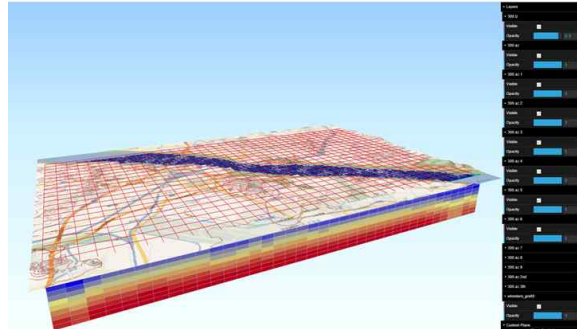


그림 101. 3D VIEW 결과 화면(레이어 컨트롤)

6. 연구개발성과

가. 국내의 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권/호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	낙동강 유역 지하수위 관리 취약성 평가	한국수자원학회 논문집	양정석	50/12	대한민국	한국수자원학회	비SCI	2017.12	pISSN: 1226-6280 eISSN: 2287-6138
2	Prioritizing counter measures for reducing seawater-intrusion area by considering regional characteristics using SEAWAT and a multicriteria decision-making method	Hydrological Processes	Il Hwan Kim	32/25		Wiley	SCI	2018.09	
3	한계 침투량을 고려한 강우와 지하수위의 상관관계를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법 개발	한국수자원학회 논문집	이재범	51/12	대한민국	한국수자원학회	비SCI	2018.12	pISSN: 1226-6280 eISSN: 2287-6138

나. 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Asia-Pacific Coastal Aquifer Management Meeting (APCamm)	김일환	2017.07.17	The university of Danang Da Nang, Vietnam	Vietnam
2	AOGS 2018	양정석	2018.06.05	Honolulu, Hawaii	U.S.A.
3	EGU	김일환	2018.04.09	Vienna	Austria
4	ISE 2018	김태범	2018.08.21	Tokyo	Japan
5	대한토목학회 학술대회	이재범 김일환	2018.10.19	경주	대한민국
6	한국수자원학회 학술대회	임재덕 이재범	2018.5.25	경주	대한민국

다. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	2차원 흐름해석 가시화 모듈	2017.12.21	에스지에이블 룩체인(주)	2018.01.04	C-2018-000436 -2	에스지에이블 룩체인(주)	
2	3차원 흐름해석 가시화 모듈	2019.01.14	에스지에이블 룩체인(주)	2019.01.17	C-2019-001841	에스지에이블 룩체인(주)	
3	SW-H2D	2019.01.08	국민대학교 산학협력단	2019.01.10	C-2019-000890	국민대학교 산학협력단	

7. 연구성과의 차별성, 한계 및 활용 가능성

가. 연구성과의 차별성 및 우위성

- 보와 댐과 같이 하천을 횡방향으로 단절시키는 구조물 설치에 아님이나 좌안 또는 우안에 pile을 설치하여 하천을 단절시키지 않고 염수의 확장을 억제하는 방법의 제안 및 해석 프로그램의 개발을 본 연구에서 최초로 실시
- pile 설치로 인한 하천 흐름에 가해지는 항력을 고려하는 수치모형은 국내외에서 찾기 힘들
- 상류조건 뿐만 아니라 하류조건에 흐름 모의가 가능
- 시간에 따라 변화하는 상·하류단의 유량과 수위 또는 수심 정보를 설정 가능
- 측벽을 따라 no-flow 경계조건 또는 평행하게 흐르는 flow 경계조건을 선택 가능
- 일반적으로 선형적인 하천정보를 하나의 격자셀에 입력하여 지하수 유동을 모의하는 방법이 아닌, 비선형적인 2차원 하천모의 결과를 하천영역 격자셀에 내삽하여 더욱 상세한 지하수 모의를 위한 경계조건으로 적용
- 흐름모의를 위해 입력 정보를 ASCII 파일로 작성한 후 DOS 프롬프트에서 실행시키는 방법이 아니라, GUI를 이용하여 격자 생성 및 변형과 정보입력을 용이하게 함
- 사각형, 삼각형 또는 사각형과 삼각형이 혼합되어 있는 혼합망 사용 가능
- 후처리 인터페이스를 개발하여 모의 결과 해석을 용이하게 함

나. 연구성과의 적용 범위 및 한계

- 본 연구의 성과는 pile 설치 후 하천의 흐름특성 변화와 주변 대수층에서의 지하수위 변화에 초점을 두고 있기 때문에, 염수의 공간적 분포나 시간적 변화를 현재 수준에서는 고려하지 않고 있음
- 상·하류단 유량 및 수위 조건에 따라 모의 영역에서 건조지역이 발생할 수 있으나, 현재 개발 모형에서는 마름/젖음 알고리즘을 고려하고 있지 않으므로, 항상 수심이 0 이상일 경우만 가능
- 하천 특성의 시간 변화에 따라 지하수 특성 변화를 고려하여야 하나, 현재 개발 성과는 일정한 유량 및 수위 조건에서 pile 설치 변화에 따른 지하수위 변화의 정상상태 (steady state)만을 고려

다. 연구성과의 향후 활용 가능성

- 본 연구성과를 바탕으로 염수의 이송·확산 모듈을 추가하여 보다 가시적이고 활용성 높은 모형 개발이 가능함
- 하천 흐름 모의 결과를 지하수 모형에 자동으로 연계하는 모듈의 개발이 가능함
- 지하 대수층에서의 염수 확산 모듈 개발이 가능하며, 하천을 따라 빠르게 변화하는 염수가 지하 대수층에 미치는 영향을 반영하는 모듈 개발이 가능함
- 하천 흐름에 따른 유사 이송을 고려하여 하상의 변화를 예측하는 모듈을 개발하여 pile 설치 후 하상변화를 반영하는 모듈 개발이 가능함

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수		
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법		기준치	
주관	1	pile 항력을 고려한 지표수 흐름 특성변화 해석 프로그램 개발	1-1	지표수 해석 모듈 개발	①	알고리즘 개발	100%	100%	참조 설명서 또는 보고서 작성	보고서	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1 건 사제품: 1 건 SW: 1 건	
					②	프로그램 코딩	100%	100%	코딩 여부	저작권	2		
					③	모듈 검증	100%	100%	모듈의 안정성과 정확성	보고서	2		
			1-2	지표수 해석 GUI 개발	①	기능구현율	100%	100%	구현기능/설계기능	보고서	2		특허: 출원 건 등록 건 논문: 1 건 사제품: 1 건 SW: 2 건
					②	기능정확도	100%	100%	기능 테스트	보고서	2		
	2	하천 흐름 특성변화에 따른 지하수 특성변화 해석 프로그램 개발	2-1	지하수 해석 모듈 개발	①	알고리즘 개발	100%	100%	참조 설명서 또는 보고서 작성	보고서	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 2 건 사제품: 1 건 SW: 1 건	
					②	프로그램 코딩	100%	100%	코딩 여부	저작권	2		
					③	모듈 검증	100%	100%	모듈의 안정성과 정확성	보고서	2		
			2-2	지하수 해석 GUI 개발	①	기능구현율	100%	100%	구현기능/설계기능	보고서	2		특허: 출원 건 등록 건 논문: 1 건 사제품: 1 건 SW: 1 건
					②	기능정확도	100%	100%	기능 테스트	보고서	2		
	3	piling을 통한 해수면 상승 대비 수자원 확보 기술	3-1	수자원 확보 기술 해석 프로그램 평가	①	다양한 piling효과 분석	100%	100%	다양한 piling 조건에 따른 결과 도출	보고서	2	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1 건 사제품: 1 건 SW: 1 건	
계										20	특허: 출원 건 등록 건 논문: 3 건 사제품: 3 건 SW: 3 건		

2. 관련 분야 기여도

- 본 과제의 최종성과물은 수자원, 토질 및 기초, 지질 및 지반, 지구물리 및 응용지질, 생태 및 환경 분야의 국내외 산학연 기관에서 사용 가능함으로 현재 시장규모는 매우 방대함
 - 현재 국내 대학 및 대학교 현황은 약 320개이며, 이 중 본 과제의 최종성과물을 사용 가능한 대학 및 대학교는 약 56개 이상
 - 엔지니어링협회에 등록된 수자원분야 엔지니어링 등록업체는 648개
 - 토질 및 기초분야 등록업체는 1,197개
 - 지질 및 지반분야 등록업체는 240개
- 선진기술에 의존하여 단순히 기술을 도입하는 것이 아닌 국내 독자적인 연구 및 기술력을 확보함으로써 수입대체품으로써의 잠재적인 경제적 기대성과도 예상됨.
 - 현재 국내 학계와 업계에서 지하수 유동해석 및 오염물 이송확산을 평가하고 예측하는데

활용하고 있는 외국산 상용프로그램(MODFLOW)은 개당 구입비용이 850만 원으로 독점적 지위를 확보하고 있음.

- 본 연구에서 개발된 모형의 구매비용을 외국산 프로그램과 경쟁효과를 확보하기 위해 약 300만 원으로 책정할 시, 산학연 기관 중 대략 1/3이 구매한다고 가정할 때 판매액은 약 20억 원 이상으로 예상

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 최종 성과물의 현장적용 활용 방안 및 예상분야

- 본 연구에서 제안하는 piling을 통한 염수침해 확산 방지 및 지하 대수층에서의 지하수위의 증가 효과는 해수면 상승에 대비한 미래 담수 수자원 확보기술로 현장에 직접적으로 활용 가능함. 본 연구에서 개발하는 프로그램을 적용하여 piling 구간의 설정이나 pile의 크기 및 배치에 따른 영향을 예측할 수 있으며, 홍수기 및 갈수기에서의 pile 유무에 따른 효과를 평가하여 가장 효과적인 piling 설계가 가능함.
- 하천과 하구에서의 해수면 상승에 따른 영향을 평가함으로써, 국가 수자원 및 환경 정책 제시나 결정에 있어서 참고자료를 제공하는 도구로 활용 가능함.
- 하구 주변 환경과 생태계 변화 예측을 위한 기본 도구로 활용 가능함.
- 하구 및 연안 대수층에서의 적정 지하수 취수 가능량 예측 도구로 활용 가능
- 향후 건설될 인공구조물에 대하여 사전영향성 검토 수행시 평가 자료로 활용 가능



그림 102. 최종 성과물의 현장적용 활용 방안 및
예상분야

○ 최종 성과물의 실용화 및 제품화 방안

- 염수침해 및 대수층 염수침투 해석을 위한 추가적인 모듈 개발과 해석엔진의 전후처리를 용이하게 해주는 GUI 환경을 연동시켜 하나의 소프트웨어 패키지로 발전시킬 필요가 있음 (그림 103).
- 실내실험 자료 또는 연구 자료와 사용자 매뉴얼 등을 추가하여, 해수면 상승에 따른 염수침해 및 염수침투 영향 평가를 위한 실용화 제품으로 확장 가능.
- 개발은 물론 홍보, 유통, 유지보수와 교육 같은 전 과정을 지속적으로 총괄하고 협업할 수 있도록 관련 업체와의 컨소시엄 구성이 필요.

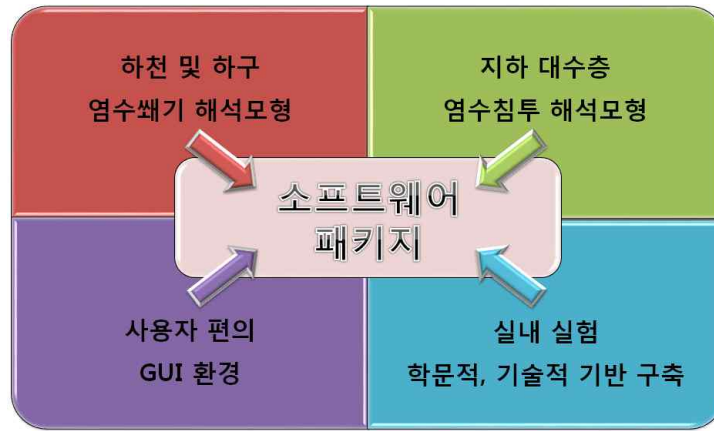


그림 103. 최종 성과물의 실용화 및 제품화 방안

○ 최종 성과물의 미래원천기술 확보 및 신산업 창출 활용방안

- 현재 기후변화에 따른 해수면 상승과 관련한 연구와 기술개발은 연안과 도서지역에만 집중되고 있으며, 하천과 하구에서의 연구 및 기술개발은 상대적으로 미개척 분야에 해당함.
- 국내외를 막론하고, 하천/하구를 대상으로 지표수와 지하수를 연계하는 연구는 시도된 바 없으며, 최초로 시도하고자 하는 분야임.
- 따라서 본 분야의 연구와 기술을 선점함으로써, 관련 분야의 선도적인 역할과 지위 취득이 가능하고 미래원천기술 확보가 가능함.
- 선진시장 뿐만 아니라 저개발국과의 기술제안 및 협력 사업을 통해 본 연구에서 획득한 독자적인 지식과 기술을 적극 활용하고 확장시킬 수 있으며, 따라서 또 다른 신산업을 창출시킬 수 있음.
- 해수면 상승에 따른 수자원과 수생태계의 영향 평가 도구로써 활용 가능하며, 따라서 무궁무진한 신산업 창출이 기대됨.
- 전 세계적으로 해수면 상승이 가속화될 것으로 예상하는 바, 현재 뿐만 아니라 미래의 연구 및 기술시장은 파격적으로 확대될 것으로 전망됨.

1. 3차원 CFD 해석 GUI 기술 현황 조사

가. 3차원 유동 프로그램 개요

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

(1) 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 가능
- 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 가능
- 자체적으로 3차원 형상의 모델링을 위한 전처리 기능을 보유하고 있지만 구조물의 복잡한 형상을 표현하기 위해서는 전용 모델러를 이용하는 것이 용이

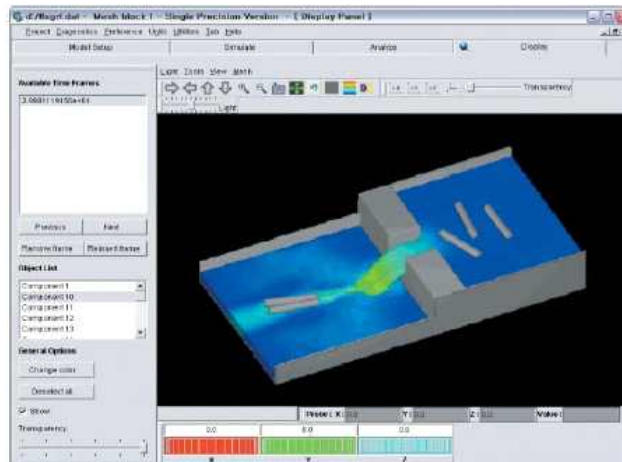


그림 104. FLOW-3D 프로그램

- 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 중요
 - 이러한 방법들은 고정 격자계를 이용한 방법과 이동 격자계를 이용한 방법으로 크게 나눌 수 있음
 - 이동격자계를 이용한 방법은 격자가 액체와 기체의 경계에 따라 움직이기 때문에 액체와 기체의 경계가 격자와 일치
 - 따라서 경계의 위치를 찾아내는 특별한 알고리즘이 필요하지 않으며 경계조건(Boundary Condition)을 적용하기 쉬운 장점이 있음
 - 그 경계가 심하게 왜곡되는 유동 또는 액적/기포가 생성되거나 합쳐지는 등의 복잡한 유동에의 적용은 거의 불가능
 - 고정 격자계를 이용한 방법은 경계를 추적하지 않고 액체의 체적을 추적하는 VOF(Volume of Fluid)방법을 사용
 - 액체가 각 격자요소에서 차지하는 비율을 보존 방정식에 적용, 이 방정식을 추가로 풀이하

는 방법임

- 격자계를 고정하고 격자계 사이로 흐르는 유체를 추적하는데, 격자가 고정되어 있으므로 액체와 기체의 경계를 나타내기 위하여 그 경계를 추적하는 특별하고 정확한 알고리즘이 필요

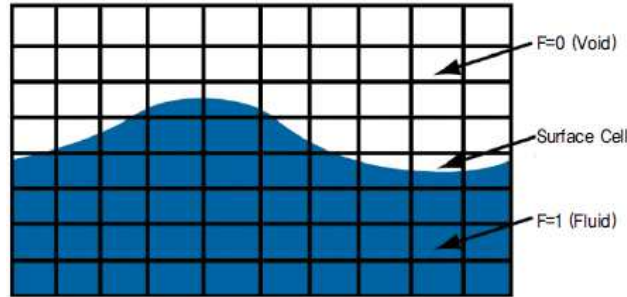


그림 105. FLOW-3D의 VOF방법

- 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 구성
- 이 세 가지 단계 전체를 프로그램이 잘 구현하고 있어야 정확한 유동해석 결과를 얻을 수 있으며, 이 중 하나 혹은 두 가지만 구현하는 것으로는 부정확한 결과를 얻게 됨
- 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 있음

- 격자 생성과 FAVOR 방법

- FAVOR(Fractional Area/Volume Representation)은 직사각형 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로 각 직사각형 격자의 각 면들이 전체 또는 일부가 유체가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀있을 수 있다고 정의하는 것임
- 그러므로 한 직사각형 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 기술
- 따라서, 경계밀착좌표계의 좌표변환을 하지 않는 유한차분법 사용 시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자에 의한 결과의 정확도 저하를 해결

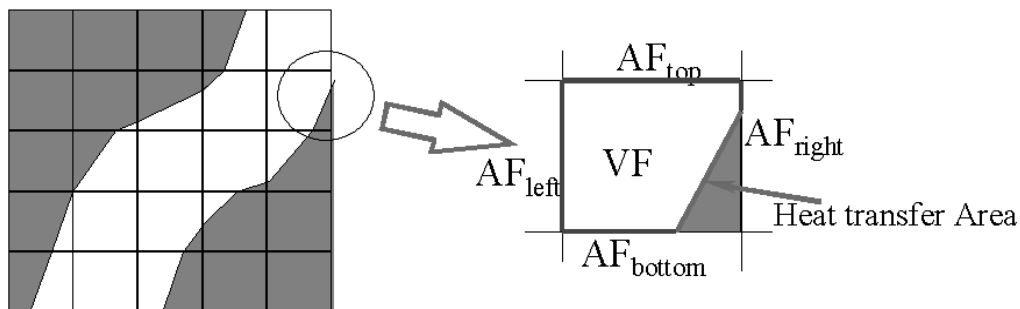


그림 106. FAVOR (Fractional Area/Volume Representation)의 개념

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

- 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 전산 모의할 수 있는 기능을 가지고 있음
- FLOW-3D는 GMO(General Moving Object)라는 모델을 사용하여 유체-고체 상호작용을 해석
- 이 방법은 고체를 변형이 없는 강체(rigid body)로 가정하고, 유체와 연동하는 고체의 운동을 해석함
- 고체를 강체로 가정함으로써 고체 변형 계산에 필요한 컴퓨터의 부하를 줄일 수 있음

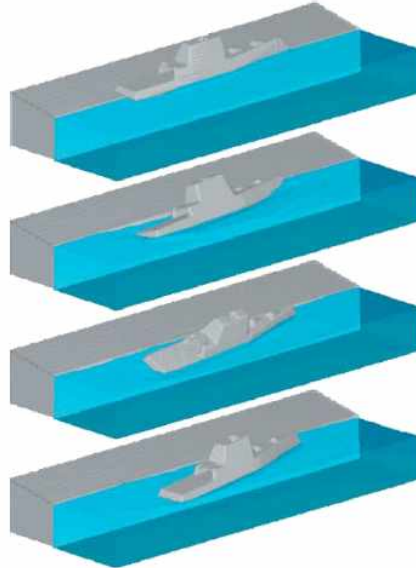


그림 107 선박의 진수과정 모사

(2) Fluent

- FLUENT는 세계에서 가장 많이 사용하고 있는 상용 전산유체역학(CFD) 해석 프로그램
- 전처리(Pre-processing), 계산(Solving), 후처리(Post-processing)의 모든 작업을 할 수 있는 패키지 프로그램의 이름인 동시에 계산 프로그램(Solver)의 이름
- FLUENT 소프트웨어 패키지는 전처리기인 GAMBIT, TGRID와 계산 및 후처리 프로그램인 FLUENT로 구성
- 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 Solver
- 수렴가속화를 위한 Multigrid 방법과 연계된 여러 가지 형태의 Solver option을 제공



그림 108 Fluent 프로그램

- 격자 활용 능력 (Mesh Capabilities)
 - 삼각형, 사각형, 사면체, 육면체, 다면체, 프리즘, 피라미드 및 혼합형 격자 사용
 - 유체/고체영역 인터페이스를 포함하는 비등각(Non-conformal)격자의 인터페이스 제공
 - 해석 변수 또는 관련 변수(y+, wall proximity 등)에 기반한 적응 격자 기법을 제공
 - 격자의 질을 향상시키기 위한 다양한 도구, 생성된 격자를 적절히 처리하는 다양한 방법을 가지고 있으며, 하이브리드 격자 생성 유틸리티 및 격자와 격자 간 데이터 보간 기능을 지

원

- 동적 격자 변형 기법 (Dynamic Mesh Modeling)
 - Mesh motion and deformation automatically handled by solver
 - 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

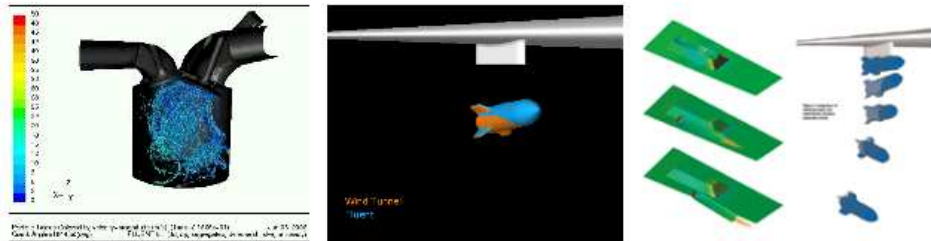


그림 109 Fluent의 동적 격자 변형기법

(3) CFX

- 다른 상용 CFD 프로그램은 형상제작, 격자 생성, Solver등으로 나누어져 있다면, CFX 11.0 (Commercial computational fluid dynamics program)의 경우 ANSYS의 Workbench 환경 내에서 CAD부터 Post까지의 모든 작업과정이 이루어짐
- ANSYS DesignModeler을 이용하여 바로 형상을 구현하거나 CAD프로그램에서 제작한 형상을 import하고, Workbench Meshing 프로그램이나 CFX자체의 mesh 생성프로그램을 이용하여 격자를 생성
- 또한 pressure-based coupled solver 방법을 이용하여 기존의 segregated방식과 다르게 coupled solver로 동시에 해석하므로 coupled solver의 빠르고 안정적인
- 특히 다상유동의 경우 상과 상간의 inter-phase coupling이 중요한데, CFX의 coupled solver는 모든 상의 matrix가 couple되어 해석되므로 근본적으로 상과 상간의 coupling을 반영 가능
- free surface와 bubbly flow, Phase change와 같은 다상유동을 해석하는 Eulerian-Eulerian 모델과 cyclone 등 입자추적에 사용되는 particle tracking model인 Eulerian-Lagrangian 모델을 제공
- 다른 소프트웨어에 비해 multiphase flow의 해석에 강점을 가지고 있으며, 다른 CFD code에 비해 계산시간이 대폭 단축되는 장점

(4) ANSYS Workbench

- FEA(Finite Element Analysis) 소프트웨어로 잘 알려져 있으나, 최근 CFX, FLUENT, AUTODYN 등 각각의 분야에서 핵심기술을 가지고 있는 소프트웨어를 인수하여 구조해석 분야 뿐 아니라 다양한 분야의 해석을 수행할 수 있는 소프트웨어들을 제공
- 각각의 분야에서 우수한 소프트웨어의 제공뿐만 아니라 이들을 통합화하여 Multi-Physics 수행이 가능한 환경으로 Workbench가 개발됨
- 즉, Workbench는 ANSYS사가 제공하는 여러 분야의 소프트웨어들을 서로 연계하여 주어 다분야 통합 시뮬레이션(Multiphysics Simulation)이 가능케 하는 Interface 환경(Framework)
- 특징
 - 다분야 통합 시뮬레이션 수행을 위한 ANSYS의 Framework
 - CAD로부터 해석결과까지 통합된 환경에서 관리할 수 있도록 database를 제공
 - 생성된 각 데이터들은 모든 Application들 사이에 공유
 - 사용자가 익숙한 Tab를 이용한 GUI를 제공하고 있으며, Project Page tab에서 시작하여

Geometry, Boundary conditions setup (loads, restraints, materials), FEA/CFD Analysis, Visualization (images and animations) 및 Report 등의 작업을 수행 가능

- 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 환경

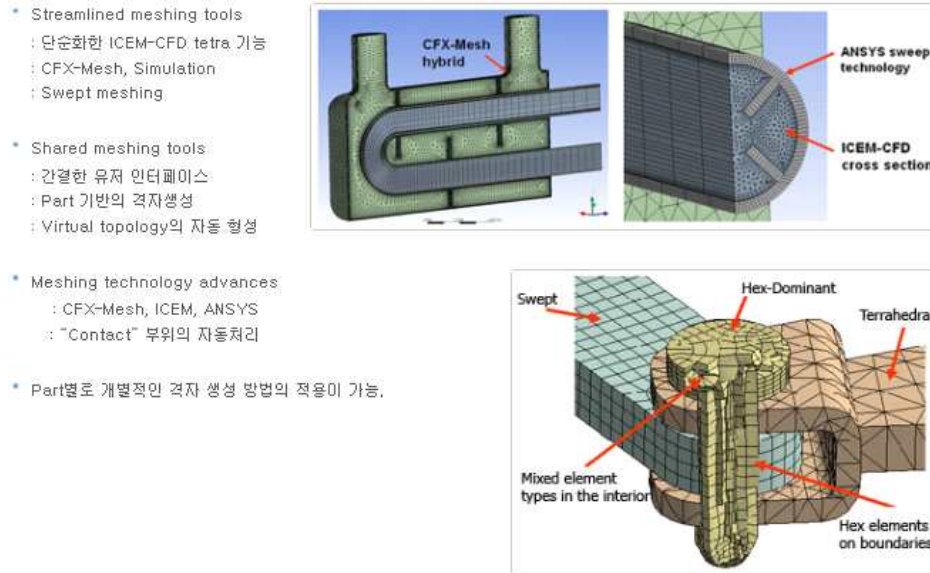


그림 110. ANSYS Workbench Mesh Generator

- ANSYS Workbench 구조

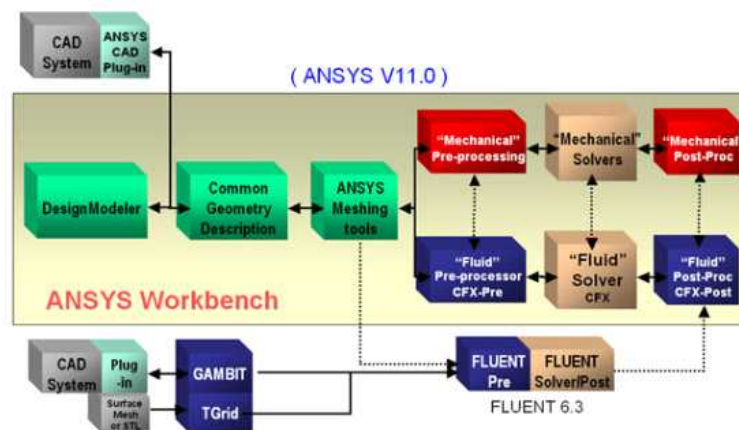


그림 111. ANSYS Workbench 구조도

(5) OpenFOAM(Open Field Operation and Manipulation)

- 소스 코드가 공개된 무료 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)해석을 위한 공개용 프로그램
- 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 있음
- C++ 모듈로 구성되어 있으며 복잡한 난류 유동뿐 아니라 화학반응, 열전달, 다상유동, 구조해석, 전자기장 등 광범위한 분야에 적용할 수 있는 기능을 갖고 있음
- 대부분의 엔지니어링 산업분야에서 전세계적으로 많은 사용자가 있으며 대학뿐 아니라 산업체와 연구기관들에서도 널리 사용

- 특징

- 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하고 있으며 3차원 비정렬 격자를 지원
- 격자의 운동을 구현할 수 있으며 병렬연산을 지원
- 어플리케이션이라고 칭하는 실행파일을 만들기 위한 C++ 라이브러리들의 모음
- C++ 라이브러리들의 소스 파일 뿐 아니라 미리 컴파일 된 많은 어플리케이션들을 함께 제공

- 전후처리 과정

- 격자생성을 위해 blockMesh와 snappyHexMesh라는 유틸리티를 제공
- blockMesh는 사용자가 격자의 좌표를 입력하여 격자를 만드는 방법으로 산업현장의 복잡한 형상을 구현하기에는 한계가 있음
- snappyHexMesh는 stl파일을 이용하여 육면체 격자를 생성하고 경계면에서는 면의 형상에 따라 격자를 잘라주어 다면체 격자를 생성
- 다른 전처리 프로그램에서 만들어진 격자를 사용할 수 있도록 데이터 변환 유틸리티들을 제공
- StarCD, Fluent, CFX 등 다양한 상용 프로그램의 격자를 사용할 수 있으며 plot3d 양식의 파일을 사용 가능
- 최근 Harpoon, GridGen 등 전문 전처리 프로그램들은 오픈폼 형식으로 격자를 내보내는 옵션을 갖고 있어 별도의 데이터 변환 유틸리티를 사용할 필요가 없음
- 후처리 프로그램인 paraview가 내장되어 있어 계산결과를 확인하고 데이터 추출 가능
- 전문 후처리 프로그램인 Fieldview, Ensignt 등의 프로그램에서 읽을 수 있는 데이터 형식으로 변환시키는 유틸리티를 제공하고 있으며 StarCD, Fluent 등의 프로그램 데이터 파일 형식으로도 변환 가능

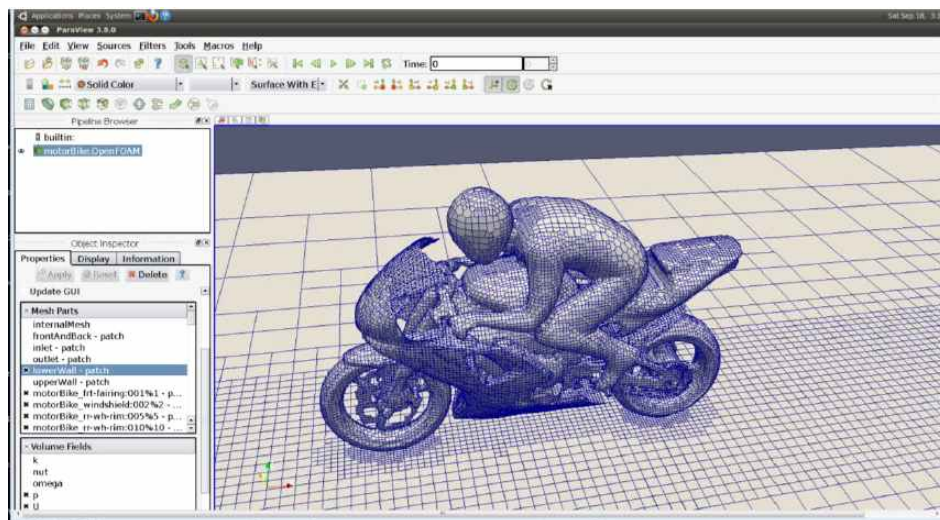


그림 112. paraview GUI 환경 및 snappyHexMesh를 이용한 격자 예

나. 3차원 격자 생성 프로그램 조사

- 3차원 격자 생성 프로그램은 오픈소스인 Gmsh, Salome를 필두로 GAMBIT, Gridgen, HyperMesh, Femap, ICEM CFD를 들 수 있음

(1) Gmsh

- 1997년부터 Christophe Geuzaine과 Jean-Francois Remacle가 개발하였고, 윈도우, 리눅스, 맥 OS에서 모두 사용이 가능하며, 현재 2.1.1버전에 이르고 있음
- CAD엔진을 기반으로 3차원 유한요소를 자동으로 생성
- Gmsh는 기하 모델을 표현하기 위하여 Boundary representation(b-rep)법을 사용하며, 기하 모델은 bottom-up 방법을 사용하여, 점-선-면-입체의 순으로 형성

- 텍스트 형태인 Gmsh 자체의 스크립트 언어를 사용하여 변수를 제어하는 방법으로 기하 모델의 형성이 가능
- 요소망을 만드는 방법은 Characteristic length에 의해 제어되며, 기하의 형태에 의해 구조화된 요소망, 비구조화된 요소망을 모두 만들 수 있으나 내부적으로는 모두 비구조화된 요소망으로 인식
- CAD 파일 포맷은 IGES, STEP을 지원하며, 요소망 포맷은 자체 gmsh 포맷을 비롯하여 MED, UNV, VTK, BDF(Nastran), Plot3D 포맷을 지원

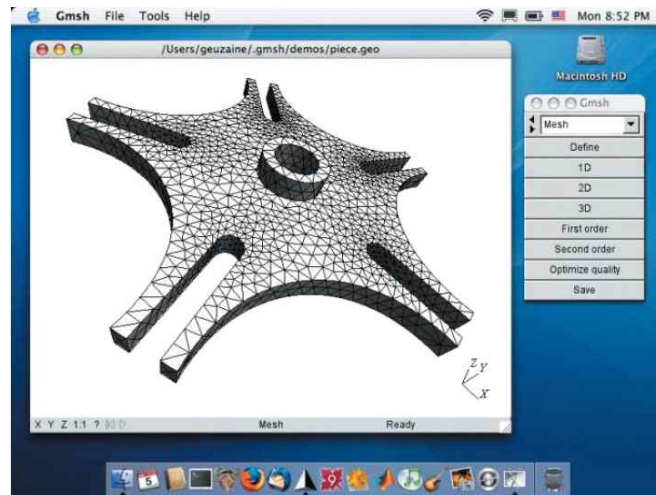


그림 113. Gmsh 인터페이스

(2) Salome

- 수치해석을 위한 전·후처리 기능을 가진 오픈소스 통합플랫폼
- 단순하고 효율적인 다중 물리(multi-physics) 해석, 효율적인 전·후처리, 수치해석 코드의 광범위한 사용성, 제품수명관리(PLM)을 위해 2000년에 개발
- CAD 모델과 해석 소프트웨어를 연결하기 위해 개방적이고 유연한 구조를 가지고 있으며, 모든 기능은 파이썬(Python) 콘솔을 통해 실행
- CAD 모델의 생성, 수정, 가져오기, 내보내기, 수리(Repair), 정리(Clean), 요소망의 생성, 요소망의 품질 검사, 요소망의 가져오기, 내보내기 가능
- 해석을 위한 재료속성과 경계조건의 설정, 해석의 실행과 다양한 해석 결과를 표현 가능
- IGES, STEP와 같은 CAD 파일 포맷을 지원하며, 요소망 포맷으로는 MED, UNV, ASCII 포맷을 지원

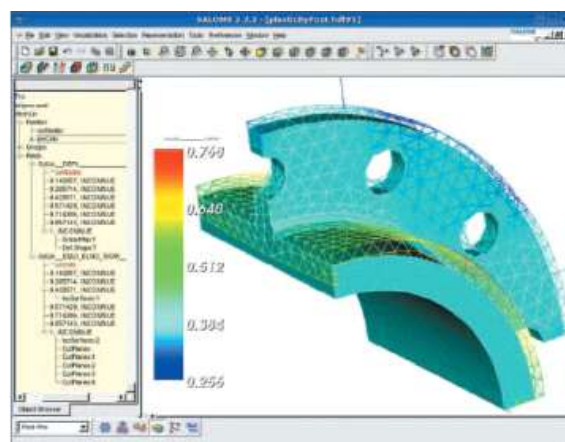


그림 114. SALOME 인터페이스

(3) GAMBIT

- Fluent.Inc에서 제공하는 다양한 FVM/FEM solver와 호환하는 범용 전처리기
- ACIS 커널을 사용하는 CAD 기능을 탑재하고 있으며, 전문 CAD software와의 호환이 가능하여 쉽고 빠르게 형상을 구현할 수 있으며, 강력한 격자 생성 기능을 보유
- 육면체, 사면체, 삼각기둥, 피라미드 등의 다양한 형태의 격자를 지원
- solid의 형상에 의존하므로 정렬격자를 생성하려면 형상이 육면체에 상응하는 모양이어야 함
- Hexahedral mesh
 - Map : 단일 블록에 육면체 정렬 격자를 생성
 - Sub-Map : 멀티 블록에 육면체 정렬 격자를 생성
 - Tet-primitive : 사면체 형상을 자동으로 멀티 블록화하여 육면체 격자를 생성
 - Cooper : 정렬 또는 비정렬의 source면을 sweeping하여 삼각기둥 형태의 격자를 생성
- Wedge mesh
 - Cooper : 삼각형 비정렬 source 면을 sweeping 하여 삼각기둥 형태의 격자 생성
- Tetra/Hybrid mesh
 - Tgrid : 사면체 요소를 사용하여 비정렬 격자를 생성
- Boundary layer mesh
 - 주로 비정렬 격자와 함께 쓰이며, 관심 대상 영역 주변의 속도 경계층을 모사하기에 적합한 격자
- 이외에도 default를 조정하면 복잡하게 연결되어 있는 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 제어 가능

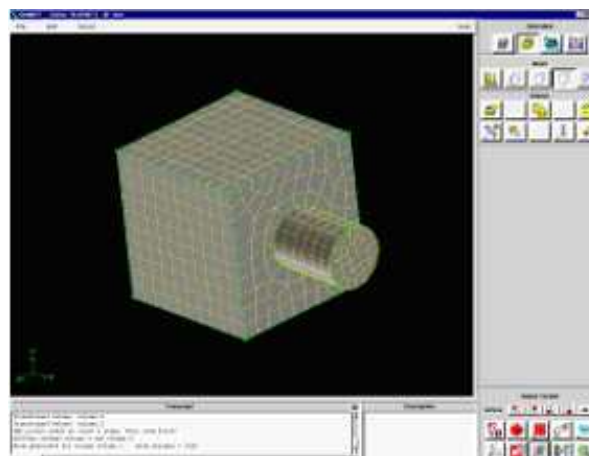


그림 115. GAMBIT

(4) Gridgen

- CFD 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 프로그램
- 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 해줌
- 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

(5) HyperMesh

- 빠르고 쉽게 유한 요소를 생성하는 기능들과, 해석 후 결과를 정확하게 분석하기 위한 각종 툴들을 갖춘, 뛰어난 성능의 FEM Pre 및 Post Processor
- 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 제공
- TCL/TK 스크립트 지원 및 강력한 매크로 기능을 통해서 설계, 제작 Process 자동화와 각 단계 마다의 특정 작업들을 손쉽게 접근할 수 있도록 하는 강력한 커스터마이징 기능을 제공
- TCL/TK를 사용해서, HyperMesh의 각종 메뉴 등에 원하는 기능을 추가 가능
- 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

(6) Femap

- 고급 엔지니어링 유한요소해석(FEA)을 위해 1985년 미국에서 개발된 프리/포스트 프로세서
- 현재 새로운 마이크로소프트 오피스와 호환되는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 사용하여 작업 프로세스 및 모든 Femap 기능에 대한 액세스를 간소화
- CAD 시스템 및 해석 솔버에 대한 독립성을 추구하여, 현재 활용되고 있는 거의 모든 CAD 데이터를 특별한 변환 작업 없이 바로 사용 가능
- 해석 솔버의 선택적인 사용을 가능하게 하여 기존의 솔버를 보유하고 있는 기업에서도 Femap을 활용하여 해석을 수행할 수 있다는 장점

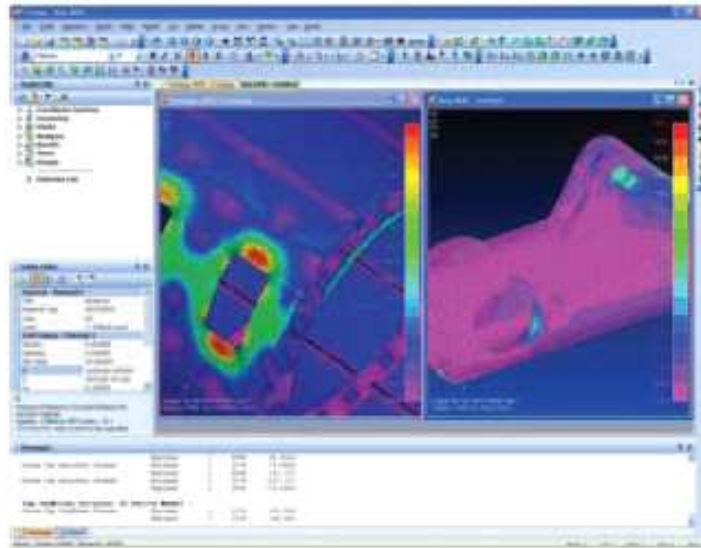


그림 116. Femap 인터페이스

- 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 있음
- 새로운 메시 기능은 파라메트릭 공간이 아닌 3D 공간에서 실행되기 때문에 요소 왜핑(warping)을 제거하고 보다 균등한 형태의 왜곡되지 않은 요소를 통해 일관된 고품질 메시를 생성 가능
- 복잡한 경계 및 비평면 표면 문제를 해결함으로써 평면 토폴로지의 한계를 넘어 확장된 일관된 메시를 제공
- solid tet-mesher는 내부 표면, 분기화된 표면(branching faces) 및 곡선을 한꺼번에 처리하여 하나의 형상으로 구성되도록 메시를 통합할 수 있으며, 사용자가 좀 더 세부적인 메시 사이즈를 제어할 수 있도록 함

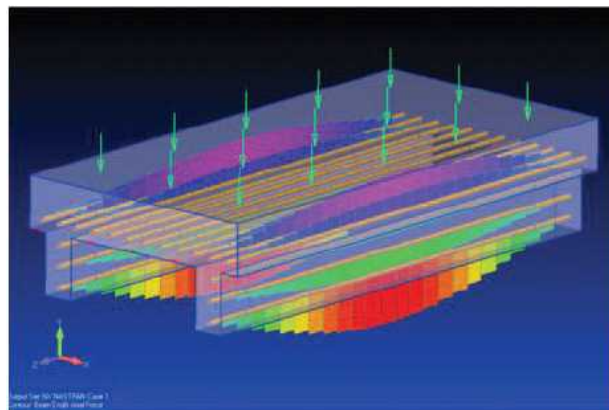


그림 117. 개선된 Femap mesh

- 메시 개선 도구

- 지오메트리 보정 및 메시 시딩(seeding)을 지원하는 강력한 신규 자동화 도구를 갖추
- 표면 메시와 응력 집중(stress raisers)을 위한 메시 작업을 지원

- 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 메시 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

(7) ICEM CFD

- 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 생성하여 줌
 - 다양한 종류의 "Mesh", "Geometry", "Solver", "Application"에 모두 적용 가능한 표준화용 Pre-processor
 - 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
 - 다양한 Tetra Volume mesh 생성 알고리즘
 - Octree (Robust) : Patch independent
 - Delaunay (Quick) : Existing surface mesh, uniform transition
 - Advancing Front (Smooth) : Delivers required mesh quality
 - 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
 - Fast BF(Body Fitted)-Cartesian Meshing
 - Mesh 제어를 위해 surface size를 조정할 수 있으며, mesh density 적용 가능
 - Mesh Refinement 가능 (uniform, 2:1, 3:1 ...)
 - Flexible HEXA Meshing (Structured & Unstructured)
 - Top-Down 혹은 Bottom-up 방식의 blocking 방법 제공
 - 복잡한 형상에 대한 HEXA blocking 작업을 신속히 수행
 - 유사한 형상에 대한 동일한 격자의 재사용 가능 (parametric study)
 - Parametric한 형상의 변화가 발생하는 경우 mesh는 쉽게 업데이트 됨
-

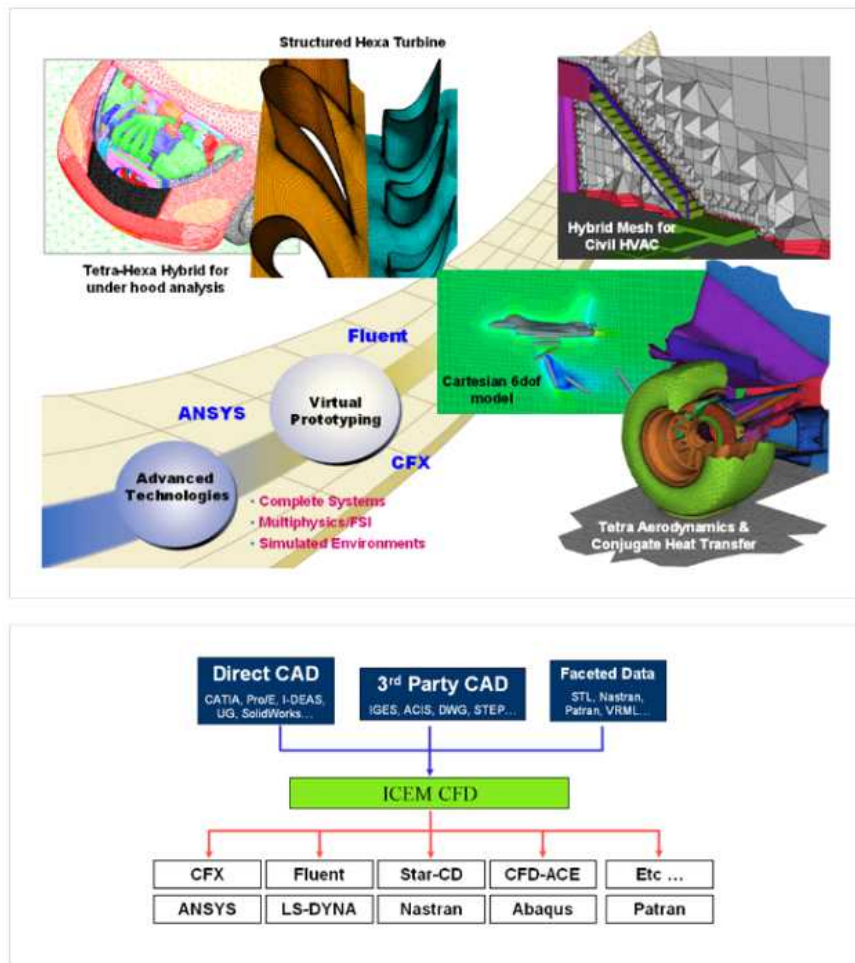


그림 118. ICEM CFD

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		✓
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 4 제2항 일반과제에 해당	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

- 주관부서

주관부서명	담당자명	연락처	비고
시 설 팀	최규석 과장	02-910-4133	

- 관련 보험가입 현황

보험명	보상내용	대상	주관부서
연구실안전공제 (교육시설재난공제회)	사망 1억원, 상해 1천만원 이내	학부생, 대학원생, 연구원 등	시 설 팀
교직원단체보험 (한국교직원공제회)	사망 1억원, 후유장애 1억원 이내 암, 심근경색, 뇌혈관질환 등 진단(1천만원), 실손의료비(질병입원치료비, 상해입원치료비, 상해통원치료비, 상해처방조제비 등)	교수, 직원, 전임연구원 등	총 무 팀
학생단체보험 (동부화재 책임보험)	배상책임 : 수업 및 실험실습실 등의 이용으로 인해 발생하는 사고 손해보상 (1인 2억원 이내, 1건 10억원 이내) 교내·외 치료비 : 재학생의 교내·외 생활, 교외교육, 현장실습, 과외활동으로 인해 발생하는 실손의료비(300만원 이내)	학부생, 대학원생	학생지원팀

- 연구실 안전조치 내역

내역	시기	대상	주관	조치사항
정기 안전점검	연 1회 이상	실험실습실	가스안전공사	가스, 전기시설 등 보완
정기 정밀안전진단	연 1회 이상	실험실습실	대한산업보건협회	안전시설 보완
건강검진	연 1회	연구활동종사자	시설팀/단과대학	

- 연구실 안전교육 내역

내용	시기	대상	주관	내용
정기 안전교육	연 1회 이상	연구활동종사자	대한산업보건협회	정밀안전진단 점검 결과 및 가스안전 등
온라인 안전교육	연 2회 이상	연구활동종사자	한국연구재단 부설 연구개발인력교육원	연구실 안전환경 조성법령 및 유해, 위험요인 등 연구실 안전관리 전반

▶ 연구실 안전수칙 제정 및 안전수칙 게시판 의무 부착

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	낙동강 유역 지하수위 관리 취약성 평가	국민대 학교		한국수자원 학회 논문집		2017.12	단독	
2	논문	Prioritizing countermeasures for reducing seawater-intrusion area by considering regional characteristics using SEAWAT and a multicriteria decision-making method	국민대 학교		Hydrologic al Process	3.18	2018.10	중복	SCI
3	논문	한계 침투량을 고려한 강우와 지하수위의 상관관계를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약 시기 평가 방법 개발	국민대 학교		한국수자원 학회 논문집		2018.10	단독	
4	프로그 램	SW-H2D	국민대 학교		대한민국		2019.01		
5	프로그 램	2차원 흐름해석 가시화 모듈	에스지에 이블록체 인(주)		대한민국		2018.01		
6	프로그 램	3차원 지하수해석 가시화 모듈	에스지에 이블록체 인(주)		대한민국		2019.01		

제11장. 기타 사항

- Bobba, A.G. (1993). Mathematical models for saltwater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Management*, Vol. 7, pp. 3-37.
- Bosznay, M. (1989). Generalization of SCS curve number method. *Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol. 115, pp. 139-144.
- Chen, W.B., Liu, W.C., and Huang, L.T. (2013). The influences of weir construction on salt water intrusion and water quality in a tidal estuary—assessment with modeling study. *Environ Monit Assess*, Vol. 185, pp. 8169-8184.
- Duarte, A.A.L.S. (2012). A Hydroinformatic Tool for Sustainable Estuarine Management. In *Hydrodynamics-Natural Water Bodies*, edited by Schulz, H.E., Simoes, A.L.A., and Lobosco, R.J., pp. 300.
- Fetter, C.W. (1988). *Applied Hydrogeology Fourth Edition*, Prentice Hall, New Jersey.
- Funahashi, T., Kasa, A., Ueno, M., and Yamashita, Y. (2013). Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan. *Journal of Water Resource and Protection*, Vol.5, pp. 343-348.
- Haralambidou, K.I., Sylaios, G.K., and Tsihrintzis, V.A. (2003). Testing alternatives for salt wedge management in an estuary with the use of monitoring and a mathematical model. *Global Nest: the International Journal*, Vol. 5, pp. 107-118.
- Nakamoto, A., Nakayama, K., Shintani, T., Maruya, Y., Komai, K., Ishida, T., and Makiguchi, Y. (2013). Adaptive management in Kushiro Wetland in the context of salt wedge intrusion due to sea level rise. *Hydrological Research Letters*, Vol.7, pp. 1-5.
- Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Gavrieli, I., Gvirtzman, H. (2014). Flow dynamics and salt transport in a coastal aquifer driven by a stratified saltwater body: Lab experiment and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, Vol. 511, pp. 665-674.
- Reilly, T.E., Goodman, A.S. (1985). Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems : A historical perspective. *Journal of Hydrology*, Vol. 80, pp. 125-160.
- Sierra, J.P., Sanchez-Arcilla, A., Figueras, P.A., Gonzalez del Rio, J., Rassmussen, E.K., and Mosoo, C. (2004). EFFECTS OF DISCHARGE REDUCTIONS ON SALT WEDGE DYNAMICS OF THE EBRO RIVER. *River Research and Applications*, Vol. 20, pp. 61-77.
- Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002). Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 128, pp. 500-506.
- Van Camp, M., Mtoni, Y., Mjemah, I. C., Bakundukize, C., Walraevens, K. (2014). Investigating seawater intrusion due to groundwater pumping with schematic model simulations: The example of the Dar es Salaam coastal aquifer in Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 96, pp. 71-78.
- Wu, W., Shields Jr., F.D., Bennett, S.J., and Wang, S.S.Y. (2005). A depth-averaged two-dimensional model for flow, sediment transport, and bed topography in curved channels with riparian vegetation. *Water Resources Research*, Vol. 41, pp. W03015.
- 건설교통부. (2002) *한강 하천정비기본계획*. 건설교통부.
- 박남식, 이용두 (1997). 중-동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투. *지하수환경*, 제4

권, pp. 5-13.

박화준, 김원일, 호정석, 안원식 (2009). 해안대수층에서 담수-염수 경계면 형성에 영향을 미치는 조건에 대한 실험적 연구. 한국수자원학회논문집, 제42권, pp. 1005-1015.

서성국, 오창무, 김원일, 호정석 (2010). 해안대수층에서 담수-염수 경계면 변화에 따른 최대담수량수와 염수침투제어에 대한 실험적 연구. 한국방재학회논문집, 제10권, pp. 159-168.

손용구, 정상만, 차기욱, 허영택, (2009). EFDC를 이용한 낙동강 하구둑 염수침입방지 기능 평가, 한국수자원학회 학술발표논문집, pp.2018-2022.

심병완, 정상용 (2003). SHARP모델을 이용한 해안 대수층의 해수침투 경계면 측정. 지하수토양환경, 제8권, pp. 68-74.

윤종주, 심재설 (2013). 비정규 유한체적 수치모형 FVCOM을 이용한 폭풍해일 및 침수범람 모의. 한국방재학회논문집, 제13권, pp. 337-346.

이동욱, 부양수 (2011). 해수면 상승 시나리오에 따른 제주연안지역 건설시설물의 영향 분석. 대한토목학회논문집, 제31권, pp. 267-274.

장동호, 김장수 (2009). 충남 연안 지역에서 기후변화에 의한 해수면 상승에 따른 취약성 평가. 한국지형학회지, 제16권, pp. 1-13.

한정상 (1998). *지하수환경과 오염*. 박영사.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.