

아산만 방조제 배수갑문 확장사업에 따른 주변해역 수리현상 변화 검토 Estimation of Hydraulic States Caused by Gate Expansion in Asan Bay

박병준* · 이상화**

Byong Jun Park* and Sang Hwa Lee**

요 지 : 아산호 상류지역의 도시화 진행과 이상 기후 등에 따른 강수량 증가로 아산만 방조제 배수갑문 확장의 필요성이 제기됨에 따라 배수갑문 확장으로 인한 방류량 증가가 아산만 및 주변 해역에 미치는 영향을 수리 모형실험과 범용 수치모의 코드인 Delft3D, FLOW-3D를 이용하여 검토하였다. 그 결과 아산만 방조제 배수갑문 확장에 의한 영향은 미흡한 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 배수갑문, 수리모형실험, Delft3D, FLOW-3D

Abstract : The gate expansion was planned to increase discharge capacity of gate structure at sea dike in Asan Bay. So it was estimated for changing of hydraulic states in Pyeongteak Harbor Zone caused by gate expansion, using Delft3D, FLOW-3D and hydraulic physical scale model testing. In result, the influence of gate expansion was indicated to be weak.

Keywords : sluice gate, hydraulic physical scale model test, Delft3D, FLOW-3D

1. 서 론

1.1 사업개요

아산만 방조제는 경기도 평택시 현덕면 권관리와 충청남도 아산시 인주면 공세리 사이에 위치한 총 길이 2,564 m의 방조제로 평택과 아산 주변의 농업용지 이용을 위해 염수차단 및 연안 침식의 방지, 홍수시 원활한 통수능력 배양을 목적으로 총 사업비 377억원을 소요하여 1970년 12월에 착공하고, 1973년 12월에 완공되었다. 그러나 아산호 상류지역의 도시화 진행과 이상 기후 등에 따른 강수량 증가로 1994년 12월 건설교통부의 “안성천 치수대책조사 하천정비 기본계획”에서 아산만 방조제 배수갑문 확장의 필요성이 최초로 제기되었으며, 1999년 11월경부터 지역주민, 경기도 시장군수 협의회, 경기도 평택시에서 침수방지 대책의 일환으로 배수갑문의 확장을 요구하였고, 2002년에는 행정자치부 국립방재연구소의 “2002년 호우 피해 현장조사 보고서” 등에서 직접적으로 배수갑문의

확장을 요구하게 되었다. 아산만 방조제 배수갑문 확장사업은 이러한 요구에 따라 상류부 상습 침수지역의 침수 방지 및 홍수대처 능력증대를 위한 치수적인 기능(안성천의 홍수량 조절) 및 이수적인 기능(농공용수 공급)의 직접적인 효과와 동시에 아산만 일대 관광산업에 도움을 주는 간접적인 기능을 담당하고자 계획되었다. 본 사업의 목적을 간추리면 현재 아산호의 100년 빈도 홍수위 EL.(+) 5.68 m를 설계 당시 홍수위 EL.(+)4.50 m에 근접시키는 방안으로 배수갑문을 확장하여 통수능력을 확보함으로써 유입홍수를 원활하게 배수하는데 있으며, 아산호의 홍수 관리능력의 증대(안성천의 홍수량 조절), 상습침수 농경지의 배수개선 및 침수구역 감소, 아산호 관광단지과 연계한 관광자원으로서의 역할 등이 기대되고 있다.

1.2 연구목적

본 연구의 목적은 아산만 방조제 배수갑문 확장으로 인한 방류량 증가가 아산만(평택항) 및 주변 해역에 미치는

*한국농촌공사 농어촌연구원 수리시험연구팀 연구원(Corresponding author : Byong Jun Park, Hydraulic Div., Rural Research Institute, KRC, Ansan, Gyeonggi-Do, 151-742, Korea, jiwahajal@ekr.or.kr)

**동아대학교 토목공학과 하천·항만연구실 교수(Sang Hwa Lee, Dep. of Civil Engineering, Dong-a University, Busan 604-714, Korea, shlee@dau.ac.kr)

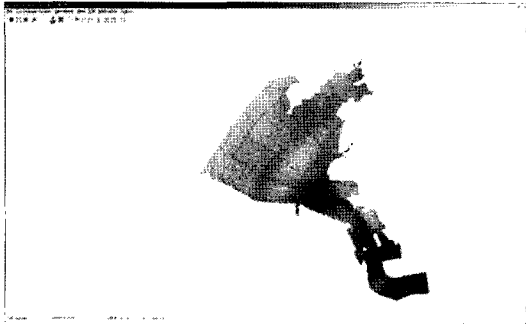


Fig. 1. Curvilinear grid generating(RFGRID).



Fig. 2. Completed 2D geometry & grid(QUICKIN).

장단기적인 영향을 수리모형실험과 수치모의로 사전에 검토하여 주변 환경을 효과적으로 보전하는데 필요한 기초 자료를 제공하고, 사업을 진행함에 있어 정부부처(국토해양부, 환경부)간의 협조사항을 이행하는데 있다.

2. 아산만 해역의 수리현상 검토

2.1 사용코드 소개

아산만 해역의 수리현상 검토에서는 화란의 델프트 수리연구소에서 개발한 범용 수치모의 코드 Delft3D의 유동해석 모듈인 Delft3D-FLOW(V3.27)가 사용되었다. Delft3D는 곡선좌표계(curvilinear coordinate)를 사용하기 때문에 불규칙한 경계에 효율적으로 적용할 수 있으며, 가변격자(variable grid)를 사용하여 정밀한 흐름정보가 필요한 대상영역을 세분화함으로써 계산 결과의 정확도와 함께 계산 효율을 높일 수 있다. 또한, 고정경계에서 기조력이나 기상력으로부터 발생하는 조석 및 부정류의 계산이나 수질 및 유사이동 등의 계산을 위한 동수역학적 기초를 제공하는데 이용되도록 만들어졌다. Delft3D는 동수역학적 유동해석 뿐만 아니라 수온, 염분 등의 물리현상(밀도류)까지 모의가 가능한 FLOW, 수질, 식물성 플랑크톤 등의 생물화학현상까지 모두 계산이 가능한 WAQ, 파랑변형 해석을 위한 WAVE, 지형변동 해석을 위한 MOR 등의 여러 가지 모듈로 구성되어 있으나, 최근에는 유동해석 모듈에 MOR이 편입되고, WAVE의 계산 결과가

FLOW에 직접 연동(on-line)이 되는 등 많은 발전을 거듭하여 사용자에게 여러 가지 편의를 제공하고 있다. 특히, 이 패키지는 농어촌연구원 수리시험연구팀(구.수리시험장)이 델프트 수리연구소와 체결한 공동연구 기술협정 프로그램에 따라 도입한 것으로 여러 연구과제와 새만금사업 등에 적용하여 이미 코드의 우수성과 효율성이 입증되었으며, 기능이 계속적으로 보완되고 있다.

2.2 모형의 구성

2차원 수치모의에서는 현재 상태에 대한 모형 검증과 아산만 배수갑문 확장 이후에 나타나는 해수유동, 부유사 확산, 지형변동을 각각 모의하여 비교하였다. 현재 상태에 대한 모형 검증은 평택지방해양수산청의 자료(2006)를 사용하고, 해안선에 따른 계산 격자와 수심자료의 작성은 국립해양조사원의 전자해도(2007)와 평택지방해양수산청 자료를 근거로 Delft3D-RGFGRID와 Delft3D-QUICKIN을 이용해 해상도 10~100 m의 곡선좌표계 격자를 작성하였다. 모형의 경계조건은 배수갑문에서 유량의 형태를 취하고, 외해에서 천문조 형태를 취하되 모형의 외해측 개방경계는 검토하고자 하는 해역으로부터 충분히 외측으로 확보하였으며, 본 연구에서 모의하고자 하는 모형의 영역이 2003년 농어촌연구원 수리시험연구팀에서 구축하고, 델프트 수리연구소의 기술고문인 Mr. Rashid Thabet의 자문을 받은 PTPORT-FLOW 모형의 범위에 포함되므로 기존의 모형에 새로 구축한 모형의 외해 경계와 중첩되는

Table 1. The observation points for calibration of numerical model

	조석검증		조류검증		비고
	평택검조소(PT-1)	삽교방조제(T-3)	노기각남측(PC-1)	행담도동측(PC-2)	
위도(N)	36°57'50"	36°52'54"	36°58'51"	36°56'33"	2006.07.~08.
경도(E)	126°49'20"	126°50'23"	126°47'09"	126°49'29"	

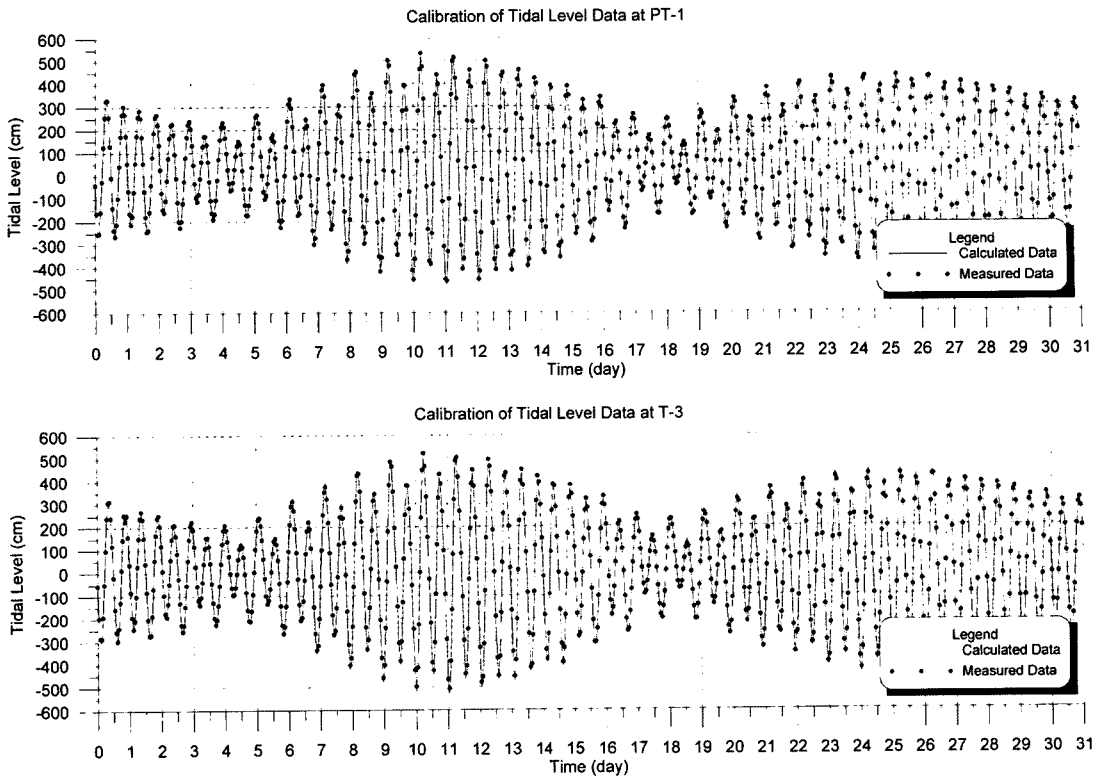


Fig. 3. The result of model calibration for tidal level.

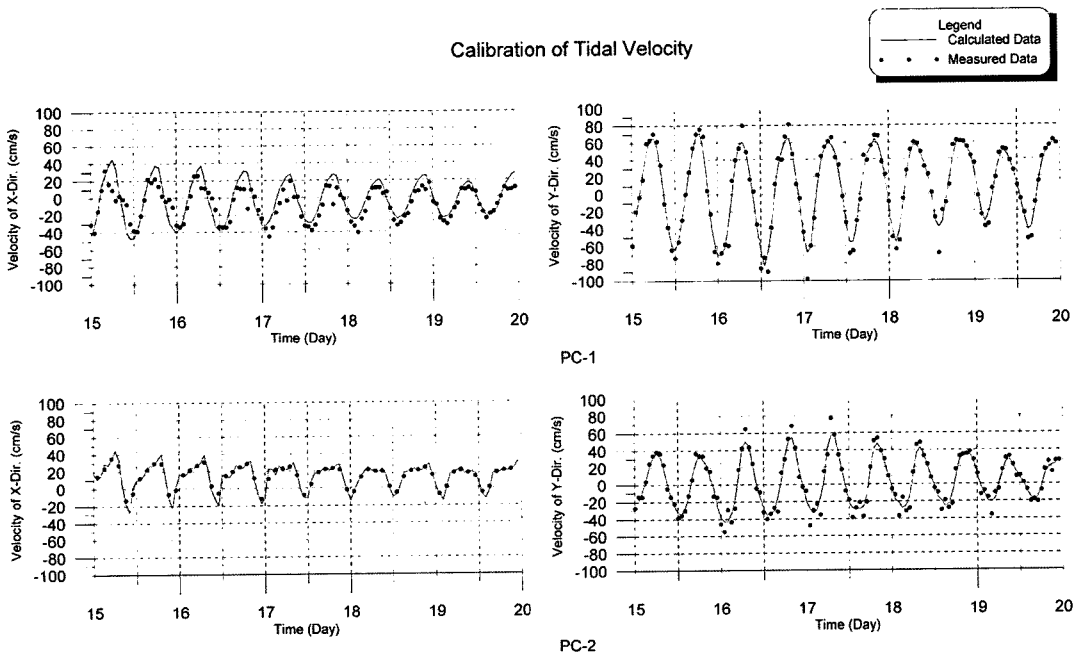


Fig. 4. The result of model calibration for tidal current.

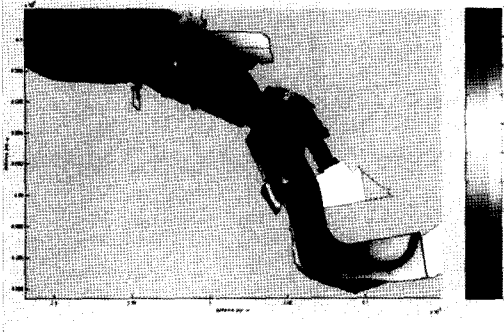


Fig. 5. Rising tide current(before gate expansion).

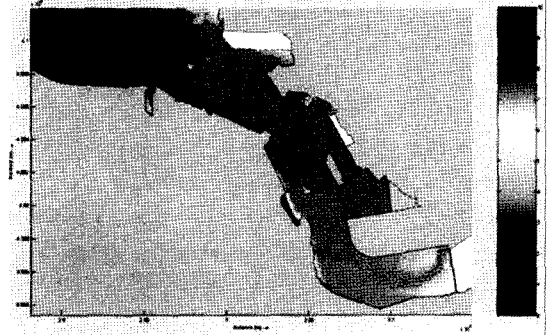


Fig. 8. Falling tide current(after gate expansion).

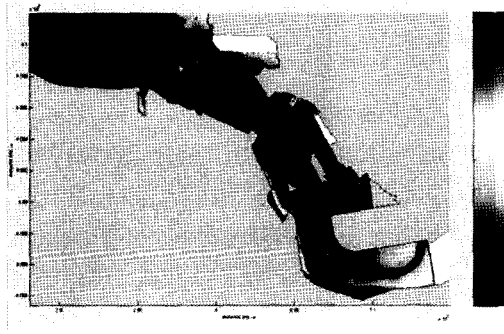


Fig. 6. Rising tide current(after gate expansion).

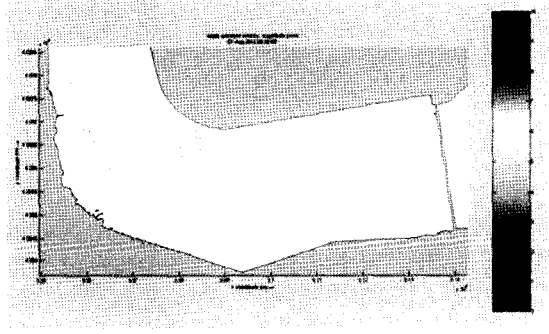


Fig. 9. Falling tide current(all gate closed).

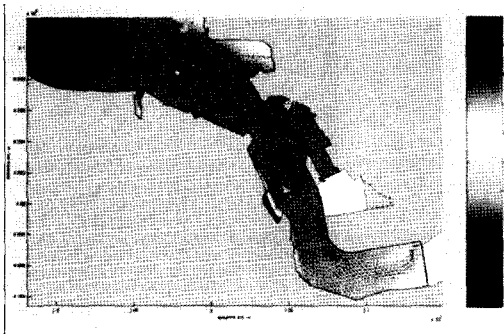


Fig. 7. Falling tide current(before gate expansion).

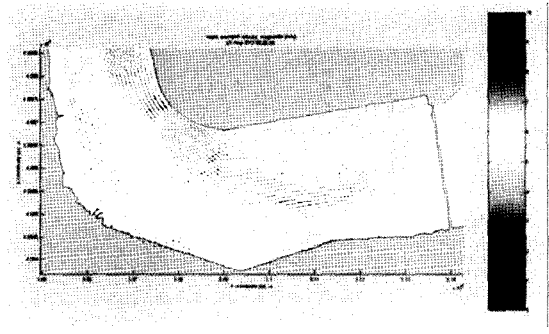


Fig. 10. Falling tide current(old gates opened).

노선을 따라 복수의 관측점을 지정하여 1년치(2005년)를 모의하고, 1시간 간격으로 기록한 결과를 Delft3D-TIDE로 조화분해하여 얻은 37개 분조 값을 입력 후 유동을 60일간 모의하여, 평택지방해양수산청의 관측자료와 비교 후 위상과 지각, 조도계수를 보정하였다.

2.3 모의결과

아산만 방조제 배수갑문 확장, 평택항 남측호안 철거,

화옹 방조제의 해수소통 차단 등으로 인한 아산만(평택항) 일대 수리현상 변화를 예측하기 위해 Delft3D를 이용하여 해수유동, 부유사확산, 지형변동에 대하여 수치모의를 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

해수유동 모의 결과 저조위는 현재보다 1~3 cm 높아지고, 고조위는 현재보다 4~9 cm 낮아지는 것으로 나타났으며, 최강유속은 8~20 cm/s 정도 감소하는 것으로 나타났다.

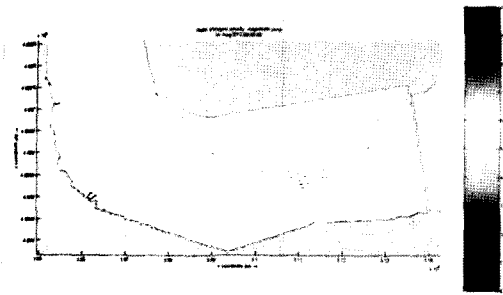


Fig. 11. Falling tide current(new gates opened).

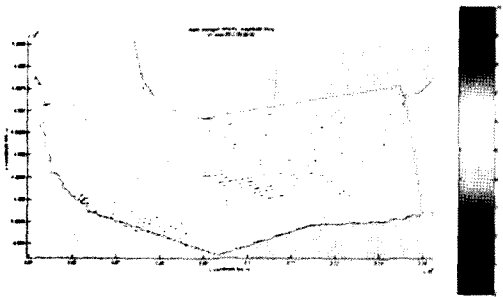


Fig. 12. Falling tide current(all gate opened).

그리고 배수갑문이 확장된 상태에서의 방류에 의한 외곽호안 안정성 문제를 검토하기 위하여 외곽호안 곡선부에 발생하는 최대 유속을 확인 한 결과 Fig. 10 ~ Fig. 12에 나타난 바와 같이 기설 배수갑문만 개방하여 방류하는 경우 3.0 m/s이며, 기설 배수갑문과 신설 배수갑문을 모두 개방하여 방류하는 경우는 3.2 m/s, 신설 배수갑문으로만 방류하는 경우 2.5 m/s인 것으로 나타났다.

이러한 결과는 기설 배수갑문의 방류수가 남측으로 분산하기 때문인 것으로 판단되며, 배수갑문을 확장하더라도 외곽호안 곡선부에 발생하는 최대 유속은 현재 상태와 크게 달라지는 점은 없는 것으로 나타났으며, 오히려 현재와 같은 규모의 홍수를 방류할 경우 신설 배수갑문으로만 방류하면 외곽호안에 미치는 영향은 줄어들어 배수갑문 확장에 따른 이점이 기대된다.

널말뚝 시공(육상시공)에 따른 부유사 확산 모의 결과 초과농도 0.5 mg/l 이상에서 오타방지막을 설치하지 않은 경우 확산범위는 0.60 km², 최대확산거리는 0.50 km, 최대농도는 4.8 mg/l로 나타났고, 오타방지막을 설치하였을 경우 확산범위는 0.02 km², 최대확산거리는 0.10 km, 최대농도는 16.5 mg/l로 나타났다.

지형변동 모의 결과 퇴적이 발생하는 곳은 신설 배수갑문으로부터 약 500 m 가량 직선 거리에 위치하는 수로부와 평택항 외곽호안 곡선 노선부가 끝나는 서측 지점이었으며, 외곽호안 곡선 노선부 시작 직전의 서측 지점에서는 침식이 발생하였다. 행담도 동측부의 서해대교 근처에서는 간헐적으로 퇴적과 침식이 번갈아 발생하였다.

이상과 같이 평택항 항계의 지형변화와 외곽호안에 미치는 영향은 조류가 지배적이며, 아산만 방조제 배수갑문 확장에 의한 영향은 미흡한 것으로 확인되었다.

3. 배수갑문 주변의 수리현상 검토

3.1 사용코드 소개

배수갑문 주변의 수리현상 검토에 이용된 FLOW-3D는 미국 뉴멕시코(New Mexico)주 로스알라모스(Los Alamos)에 있는 Flow Science, Inc.에서 개발한 3차원 범용 전산 유체역학 프로그램으로 로스알라모스 국립연구소의 전산 유체역학 연구실에서 F. Harlow, B. Nichols 및 T. Hirt

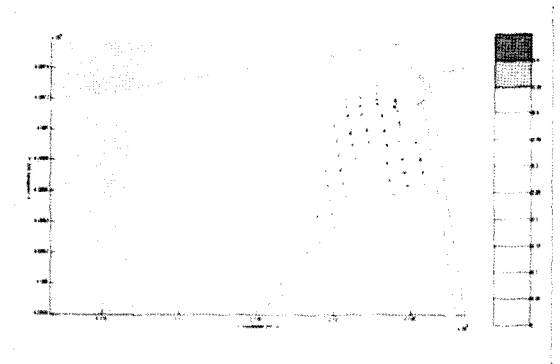


Fig. 13. Sediment concentration(falling tide, using silt protector).

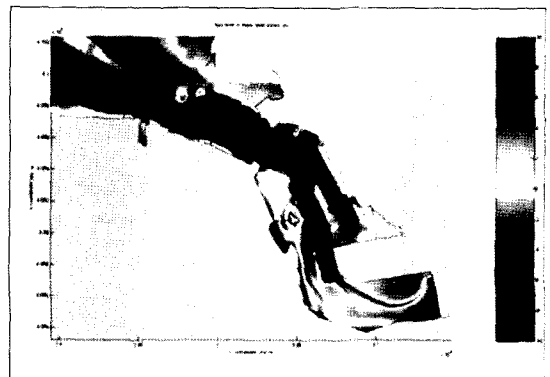


Fig. 14. Bottom level points after gate expansion.

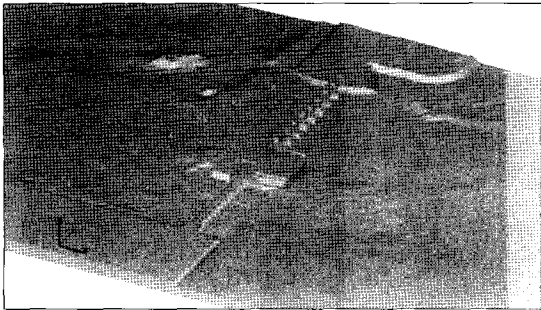


Fig. 15. Completed 3D geometry & mesh.

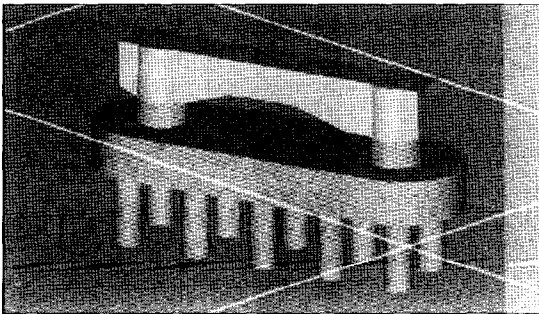


Fig. 16. Detailed view at pier.

등에 의해 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF(Volume Of Fluid)방식을 기초로 하고 있다. 그 후 Dr. Hirt가 1980년에 Flow Science, Inc.를 설립하여 계속 프로그램을 발전시켰으며 1985년부터 FLOW-3D로 명명하였다. 그 후 난류, 천수, 응고 등 다수의 기능이 포함되어 현재의 상용 프로그램이 되었으며 수공학 뿐만 아니라 주조, 잉크젯 등 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다. 전처리, 계산, 후처리 모듈로 구성되어 있고, 해석모듈은 FORTRAN, 전후처리는 C 언어를 사용하고 있으며 PC, 워크스테이션, 슈퍼컴퓨터 등 거의 모든 컴퓨터 기종에서 사용이 가능하다. 해석방법은 기본적으로 비정상 유동상태이며, 연속방정식, 3차원 운동량 보존 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열유동 해석에 그리고 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 발생 항으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 유동에는 기본 대수 모형으로부터 RNG(ReNormalized Group theory) 모형까지의 난류 방정식을 선택할 수 있으며, 자유표면 해석을 위해 VOF 방정식이 사용되고 있다. 직육면체형 격자계 사용시 일반 형상 기술을 보다 정확히

하기 위해 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 기법을 각 방정식에 적용하고 있으며 비압축성 및 압축성의 계산시 해석 속도를 증진시키기 위해 별도의 보조 방정식 등을 사용하고 있다.

3.2 모형의 구성

3차원 수치모의에서는 배수갑문 확장 전과 후에 대한 배수갑문 주변의 수리현상을 검토하고, 평택대교 교각 주변의 국부세굴에 대하여 모의를 수행하였다. 모형은 2차원 평면으로 작성된 준공도면 및 계획도면 등을 토대로 Solid Edge V.19를 이용하여 3차원으로 인공 구조물을 작성하고 STL을 형성하였으며, 자연 지형은 수심측량 성과물을 Point Cloud 파일로 추출하고 삼각망으로 구성하여 STL을 형성하였다. 격자의 범위는 배수갑문을 기준으로 상하류 각각 400 m, 제방 노선을 기준으로 남북 각 300 m로 한정하여 800 m(X) × 60 m(Y) × 12 m(Z)로 작성되었고, 약 413만개의 수평 및 연직방향 모두 동일한 0.5 m의 등격자로 구성하였다. 그 외 물성치로 중력 -9.8066 m/s², 유체 밀도 1,000 kg/m³로 하였고, 난류해석 기법은 RNG, 자유할주 조건으로 선택하였으며, 모의시간은 600초로 하였다. 모형의 경계조건은 호측의 경우 홍수 위인 EL. (+)4.50 m로 하고, 해측은 홍수위 보다 낮은 조위로 각각 2 m 씩 낮춰가며 정상류 상태로 모의하도록 실험안을 수립하였다.

3.3 모의결과

아산만 방조제 배수갑문 확장 상태에서의 내외 수위차에 대한 배수갑문의 통수능력과 가체절에 따른 영향, 그

Table 2. Discharge result

내측수위 (EL.m)	외측수위 (EL.m)	낙차 (m)	방류량 (m ³ /s)			
			수치모의		수리모형실험	
			기설	신설	기설	신설
(+)	4.00	0.50	2,447 (38.3%)	3,947 (61.7%)	2,772 (39.5%)	4,248 (60.5%)
			3,848 (40.3%)	5,690 (59.7%)	4,273 (40.5%)	6,278 (59.5%)
(+)	2.00	2.50	3,838 (40.3%)	5,689 (59.7%)	4,332 (40.5%)	6,375 (59.5%)
			3,848 (40.3%)	5,695 (59.7%)	4,353 (40.5%)	6,385 (59.5%)
(-)	2.00	6.50	3,830 (40.2%)	5,697 (59.8%)	4,362 (40.5%)	6,408 (59.5%)

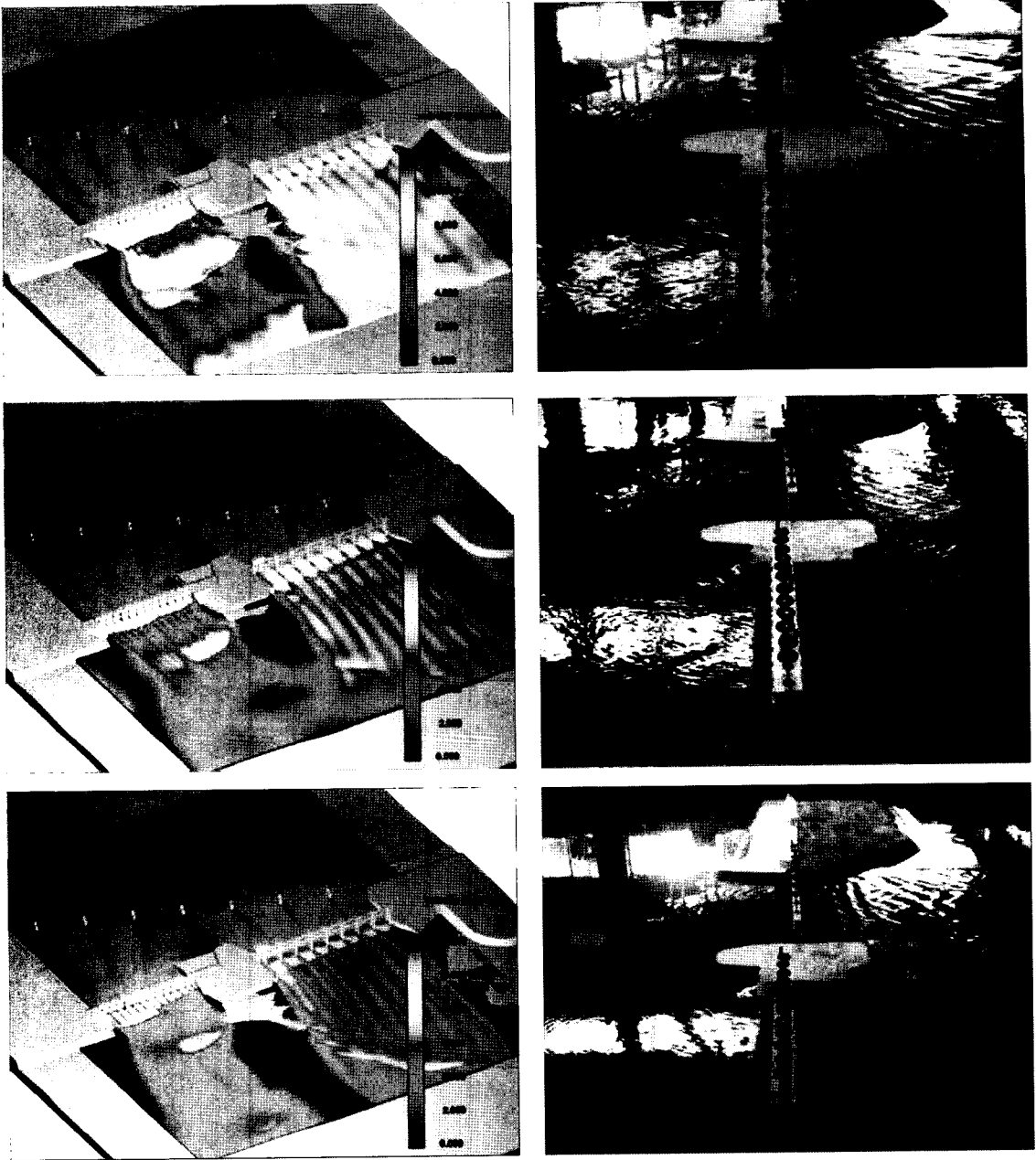


Fig. 17. Estimating of discharge capacity and hydraulic status.

리고 평택호대교 교각 주변의 국부세굴 현상을 검토하기 위해 FLOW-3D를 이용하여 유동과 세굴을 모의하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

배수갑문 통수능력 검토결과 갑문을 확장하여 호측수위 EL.(+)4.50 m에서 가능한 최대 방류량은 $9,543 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 것으로 나타났으며, 여기서 기설 배수갑문은 $3,848 \text{ m}^3/\text{s}$,

신설 배수갑문은 $5,695 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 분담한다. 따라서 기설 배수갑문과 신설 배수갑문의 방류량 분담비는 4:6이라는 결론을 얻었다.

한편, 신설 배수갑문 설치를 위한 가물막이 시공 전과 후의 20년 빈도 홍수위 조건에서 배수갑문 방류능력을 검토한 결과 가물막이 시공 전 조건에서는 최대 $4,066 \text{ m}^3/\text{s}$ 를

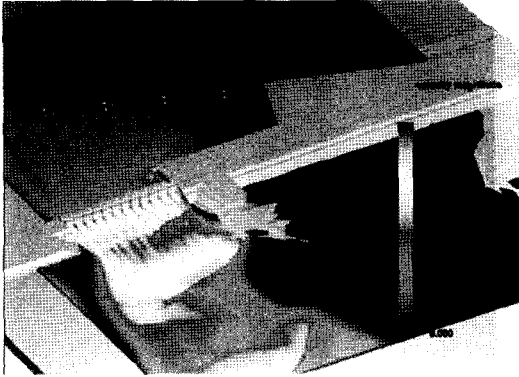


Fig. 18. Hydraulic status before coffering condition.

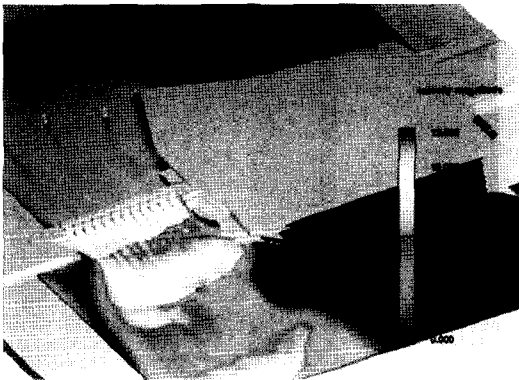


Fig. 19. Hydraulic staus after coffering condition.

방류하고, 시공 후 조건에서는 최대 4,121 m³/s를 방류하여 59 m³/s가 증가하는 것으로 나타나 큰 변화는 없는 것으로 판단되었다.

가물막이 시공으로 인한 인근지역에 미치는 수리영향을 검토한 결과 갑문 유입부의 유속은 가물막이 시공 전

조건에 비하여, 약 0.2~0.3 m/s 증가하고, 유입된 홍수는 안전하게 방류하였으며, 최대 4,121 m³/s까지 방류하는 것으로 나타나 유입구 유속은 소폭 증가하고, 수면하강은 있으나, 한계류가 형성되어 유출구 유속과 수면은 시공 전의 경우와 동일하였다. 따라서 가물막이 시공으로 인한 인근지역에 미치는 수리영향을 상대적으로 미미한 것으로 판단되나, 좌안의 가물막이 돌출 모서리 부분을 완만하게 곡선으로 다듬으면 접근수로 방향으로의 유리한 흐름을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

평택호대교 교각주변 국부세굴 모의에서는 발생유속 1.00 m/s에서 세굴면적은 180 m², 발생유속 2.00 m/s에서 세굴면적은 220 m², 발생유속 3.00 m/s에서 세굴면적은 240 m²인 것으로 나타났으며, 세굴깊이는 1~5 m인 것으로 나타났으나(단, 보호공이 없는 조건에 해당한다).

이상과 같이 배수갑문 내외 수위차가 2.50 m가 넘을 경우에는 한계류가 형성되는 것을 알 수 있으며, 군말뚝 교각주변의 세굴을 방지하기 위하여 견고한 보호공이 요망되는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

아산만 방조제 배수갑문 확장, 평택항 남측호안 철거, 화옹 방조제의 해수소통 차단 등으로 인한 아산만 일대 수리현상 변화를 Delft3D로 예측해 보았다. 그 결과 저조위는 현재보다 1~3 cm 높아지고, 고조위는 현재보다 4~9 cm 낮아지는 것으로 나타났으며, 최강유속은 8~20 cm/s 정도 감소하는 것으로 나타나 조위 및 조류속 변화는 미소한 것으로 판단된다.

또한, 배수갑문이 확장된 상태에서의 외곽호안에 미치

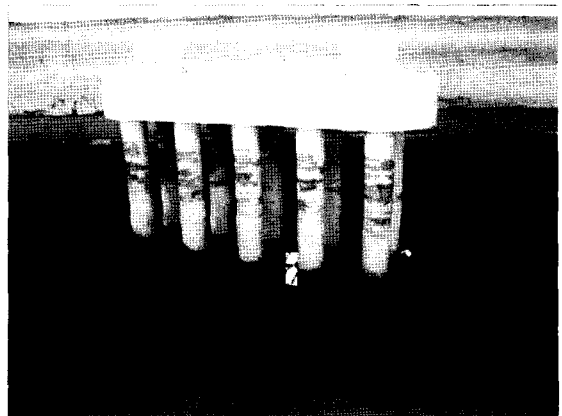
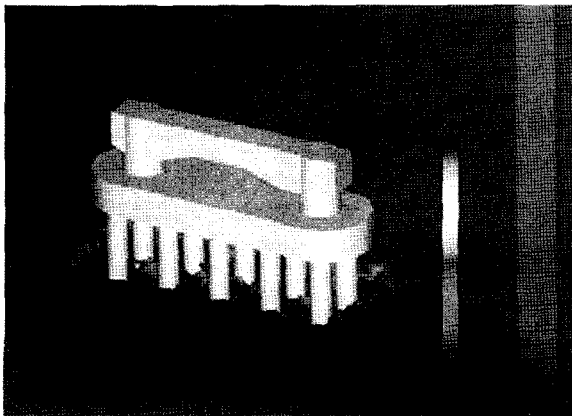


Fig. 20. The result of scouring around a pier(V = 1.0 m/s).

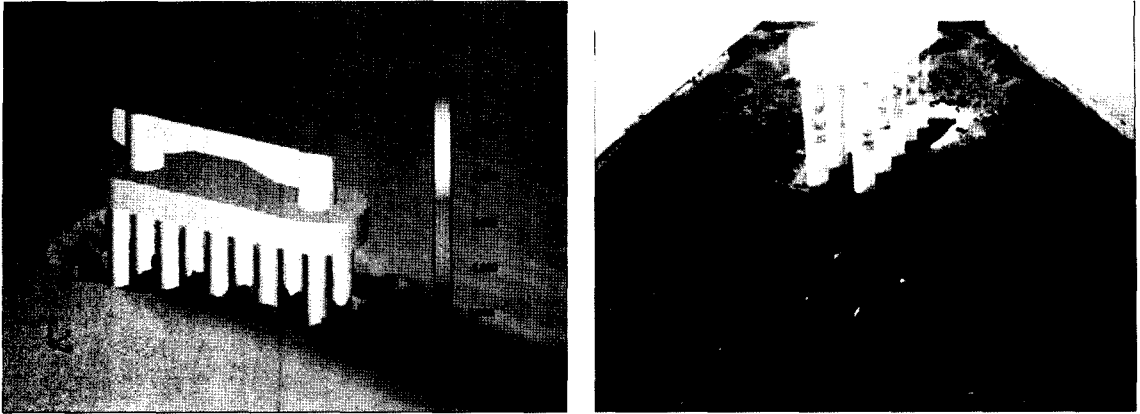


Fig. 21. The result of scouring around a Pier($V = 3.0$ m/s).

는 영향을 검토하기 위하여 낙조시 홍수량 방류조건에서도 수치모의를 실시하였다. 그 결과 외곽호안 곡선 노선부 최강유속은 현재 상태에 비하여 0.2 m/s 정도 증가하는 것으로 나타나 크게 달라지는 점은 없다고 판단되며, 신설 배수갑문으로만 방류할 경우 외곽호안에 미치는 영향은 현재 상태의 경우보다 0.5 m/s 줄어드는 것으로 나타나 오히려 외곽호안의 보호와 홍수조절의 측면에서 배수갑문 확장에 따른 이점이 기대된다. 그러나 본 연구의 결과를 근거로 할 때 구조물의 안정성 확보 차원에서 외곽호안 곡선 노선부의 수제공의 설치가 요망된다.

아산만 방조제 배수갑문 확장 상태에서의 내외 수위차에 대한 배수갑문의 통수능력과 신설 배수갑문 설치를 위한 가체절 전후의 수리현상, 그리고 평택호대교 교각 주변의 국부세굴 현상을 FLOW-3D로 모의해 보았다. 그 결과 내외 수위차가 2.50 m가 넘을 경우에는 한계류가 형성되는 것을 알 수 있었다. 배수갑문의 최대 방류량은 $9,527 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났으나 수리모형실험에서는 $10,770 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 것으로 나타나 수리모형실험에 비하여 수치모의 결과가 15% 가량 작은 값을 나타내었으나 기설 배수갑문과 신설 배수갑문의 방류량 분담비는 4:6인 점은 동일하였다. 이러한 수치모의와 수리모형실험간의 정량적 차이는 앞으로 더 꾸준한 연구로 각각의 결과에 대한 신뢰성 판단 기준과 당위성을 명확히 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

신설 배수갑문 설치를 위한 가체절에 대한 영향 검토 결과 가체절 후 유입부 유속은 가체절 전에 비하여 0.2~0.3 m/s 가량 증가하지만, 유입된 설계홍수는 기설 배수갑문만으로 안전하게 방류하는 것으로 나타나 가체절 시공이 상류유역 침수와는 상관성이 없다는 것을 알 수 있었다.

신설 배수갑문의 설치로 인한 군말둑 교각 주변의 세굴 양상을 모의해 보았다. 그 결과 유속이 3 m/s 이상 발생할 경우 심도가 깊은 말둑과 기초를 필요로 하였으며, 국부세굴을 방지하기 위해 보호공이 요망되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 농림부, 경기도청이 발주하고, 한국농촌공사 경기도본부가 시행하는 “아산만 방조제 배수갑문 확장사업”의 일환으로 수행되었습니다. 연구를 가능케 한 담당자 분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- 권숙국, 나정우 (1986). 배수갑문의 유량계수 결정에 대한 실험적 연구. 한국농공학회지, 28(1), 51-59.
- 김남일 (2003). Investigation of Scale Effects of Hydraulic Model for Dam Spillway Using 3-D CFD Model. 박사학위논문, 서울대학교.
- 박영진 (2007). 해수유통과 배수갑문 운영을 고려한 하구호의 수리·수질 변화 해석. 박사학위논문. 서울대학교.
- 어대수, 박영진 (2003). 평택항 외곽호안 2공구 수리실험 보고서. 농업기반공사 농어촌연구원
- 평택당진항 수리현상 검토보고서 (2006). 평택지방해양수산청
- 홍남식 (2005). 오탁방지막이 3차원 해수유통에 미치는 영향. 동아대학교 부설 환경문제연구소 연구보고, Vol. 27(1), 89-96.
- 홍남식, 천제호 (2004). 부산신항 개발로 인한 항내 해수유

동의 변화. 동아대학교 부설 환경문제연구소 연구보고, Vol. 26, 71-79.

Elias, E.P.L., Walstra, D.J.R., Roelvink, J.A., Stive, M.J.F. and Klein, M.D. (2001). Hydrodynamic Validation of Delft3D with Field Measurements at Egmond. Proceedings

of the international conference, Vol.3, 2714-2727.
FLOW-3D V9.20 User Manual (2007). Flow Science Inc.

Received March 23, 2008

Accepted April 1, 2008