

새만금과 시화 해역의 해안·해양 체계의 이해에 대한 접근 Strategy for Understanding Coastal-Ocean System of the Yellow Sea: Saemangeum and Siwha Region

최병호¹
Byung Ho Choi¹

1. 서 론

2003년 6월 말 현재 시화호의 조력 발전 사업이 이미 턴키방식으로 공개 입찰 단계로 들어갔으며 실질적인 건설 사업은 2004년부터 착수될 전망이다. 우리나라는 과거 30여년에 걸친 타당성 조사가 수행된 바 있으며 1965년의 프랑스 Rance 조력발전소 건설에 이어 의의 깊은 조력에너지 개발 사업이 될 것으로 전망된다. 또한 새만금 방조제 건설은 4호 방조제의 개방 구간이 실질적으로 2003년 6월 10일경 물막이 되었으며 남측의 2개소가 1.1 km와 1.6 km의 개방구간을 남긴 채 새로운 국면에 접어들고 있다. 프랑스는 1960년 초반 조력발전소를 건설함에 있어 조석, 조력 발전에 대한 이해를 책임기술자 Robert Gibrat를 위시한, Biesel, Bonnefille 등의 해양수리학자들이 수치 조석 모형에 의한 방조제의 건설 영향, Grenoble의 원형 회전 수리모형실험의 기여 등을 통해 수립하였으며 수차발전기 개발 및 발전소 건설 역시 Consortium의 형태로서 결집된 노력의 성과로서 성공적인 결과를 창출한 바 있다.

새만금 개발 사업은 방조제 길이가 33 km에 이르는 대규모 공사로서 완공시의 수질 유지에 대한 논란이 시화호의 수질 오염이 사례가 되어 유사한 상황이 발생될 것을 염려한 반대가 이미 전국적으로 확산되어 있는 상황은 잘 알려진 사실이다.

상기의 대규모 해안개발사업을 통해 철저한 우리나라의 해안·해양공학 연구를 통해 학술 수준이 제

고될 수 있는 좋은 기회를 놓치고 있다는 관점에서 이에 대한 성찰이 필요하고 더 늦기 전에 건전한 접근 방법과 연구전략이 필요하다는 관점에서 본고를 작성하였다.

영국이 1987-92년 기간에 NERC (Natural Environmental Research Council)가 주관하여 북해 수질연구를 수행한 사례는 이 조사가 대규모 하수처리장에서의 방출수의 확산이 EU(유럽연합) 수질 기준에 부합하기 위한 수질예측모형의 수립에 목적을 두었던 사업인 것을 상기할 필요가 있다. 15개월의 연속 관측으로 계절적 변화를 결정하기 위한 최소한의 관측 계획을 포함시킨 이 사례에 주목할 필요가 있다. 또한 하구의 대규모 담수호를 설치하기 위한 Wash Water Storage Scheme은 반대에 부딪쳐 실현하지 못하였으며, Severn 하구 조력발전 계획도 20세기 초부터 구상되었던 안이었으나 현실화되지 못하고 있다.

2. 논리적 배경

우리나라 해안의 대규모 개발을 황해 수질역학 연구의 골격 아래 수행하는 동기로서는 기초적이고 전략적인 요구조건이 있다. 과학적으로 황해의 환경보존연구는 한·중 정부간의 협력 과제로서 10여년 전에 이미 수립된 바 있으나 현재에 있어 더 체계적인 접근이 필요하다. 황해의 관측은 과거에 여러 그룹이 시공간적 관측에 있어 무작위적인 표본 추출로서 수행되어 계절적인 변화를 이해하기 적합하지 못한

¹ 성균관대학교 토목환경공학과 (Corresponding Author : Byung Ho Choi, Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea, bhchoi@skku.edu)

모형개발의 전략이 제시되고 있다. 황해의 유동을 야기하는 주요 외력은 조석인데 전 세계 대륙붕에서 소산되는 에너지 총량의 10% 정도가 이 해역의 해저바닥에서 소멸 되므로 이 강한 해저 마찰력은 수주(水柱)를 교란 시킨다. 이외에 기압변화와 더불어 바람은 큰 해일 운동을 야기 하며 계절적으로는 해수면의 가열, 냉각, 하천수의 입력이 중요한 물리 과정을 구동 시킨다.

4. 계절 변화와 공간적 변화도

해수 온도와 염분의 월별 분포를 포함하는 과거의 관측 자료들은 NOAA(Levitus Climatology)의 WDC(NODC)자료, 미 해군의 GDEM, 중국 국가 해양국의 해양도, 국립수산진흥원 및 황해해양도집(인하대 해양과학연구소와 중국과학원 해양연구소), 한국해양연구원의 서, 남, 동해 해양도집으로 발간되었으며 종합 편집된 자료들은 격자화 자료로서 구성되어 이용되고 있다. 황해는 수온 및 염분관측밀도가 높은 육붕해의 하나이다. 반면에 부유토사와 유기질 분포, chlorophyll 분포, 용존 산소, 식물성 플랑크톤, 영양염 분포와 수지, 자료들은 해수 온도와 염분 자료와 달리 풍부하지 못하며 극히 제약적이다. 근년의 황해 LME(Large Marine Ecosystem)프로그램의 현장 관측 활동으로서 단면 CTD, CPR(Continuous Plankton Recorder)이 운용되기 시작하므로 생태모형의 검증자료로서 유용한 자료가 될 것이다. 철저한 계절 관측 자료는 모형의 초기구동(initialization) 및 검증(testing, validation)에 필수적인 자료로써 모형의 예측성에 신뢰성을 부여한다.

5. 추적자의 공급과 분포에 대한 수평 확산 영향

비보존성 추적자의 장기적 분포는 항류 순환 형태(residual circulation pattern)에 의존하는 것으로 알려져 있다. 진희의 연구에서 황해의 잔류시간(residence time)은 조석의 경우 평균적으로 3.7년인데, 황해 중부의 경우는 약 12년이었으며, 그 외의 해역은 1.7~2.5년이었다. 주기평균된 조석순환이 황해 중부해역에서는 현저하게 낮은 강도를 갖기 때문에 황해 중부해역에 폐기물(액상)을 투기하는 행위는 오히려 연안류가 강한 해역에 투기하는 것보다도 더 효율적이지 못한 것을 제시되고 있다. 또한 풍성류 순환에 의한 잔류시간은 동계의 표면해류의 경우는 3.9년 이상이며, 평균적으로는 3.5년 정도이다. 해면기압경사에

의해 유발되는 순환에 의한 잔류시간은 160년 정도이며 밀도류 순환에 의한 잔류시간은 여름에는 35년, 겨울에는 29년 정도가 되는 것으로 초기 추정하였다. 잔차류의 관측은 염분분포, 계류형 유속계, 위성추적 부표 및 수치 모형의 결과로서 제시되어 왔으며 북해의 경우 Sellafeld 핵 채처리 공장에서 방출되는 세습 방사성 동위원소의 분포가 전반적으로는 잔차류 순환형태와 일치하는 것으로 알려졌지만 일부 해역에서는 불일치를 보이고 있어 이러한 보존성 물질의 이류, 확산의 예측도 용이하지 않아 비보존성 물질의 거동은 더욱 더 어려운 사항이다. 황해의 경우 이러한 물질 확산에 대한 기초적인 현장 관측 자료의 부족이 예측적인 수질모형의 수립 및 운용을 어렵게 하는 요소이다.

6. 부유사 물질이동

해안역에서의 육지·해양 상호작용(land-ocean interaction)은 중요한 부분은 부유물질(토사)의 수송 현상이다. 이 과정의 물질수지는 하천, 대기, 인접 수역에서의 입력, 물질의 이류, 확산 그리고 해저에서의 퇴적 및 재부유 과정이다. 이러한 부유물질의 분포에 대한 정확한 이해는 기초 생산력에 영향을 주는 광투과성을 결정하는 농도, 부착력을 갖는 오염물질의 이동경로를 제시하는 물질이동, 해지면 변화를 결정하는 퇴적세굴과정 등으로서 황해와 같이 탁도가 높은 해역에서의 해양생태 모형의 예측성은 부유사거동 예측모형의 신뢰성에 크게 좌우될 것으로 보인다. 80-81년 기간의 미-중 공동 해양 관측(장강 유출수의 영향에 따른 동적 퇴적 체계 연구) 및 그 이후의 제한된 연구 결과에 의하면 겨울철에 있어서는 강한 기상 외력과 조류에 의해 연안역이 재부유현상에 의해 높은 탁도 환경을 보이며, 여름철에는 대하천으로부터의 부유사입력과 역시 조류환경에 의해 황해 동서측 해안이 높은 탁도를 보이며 중앙부로 갈수록 낮은 농도가 관측되고 있다. 이러한 시공간적인 부유사 농도의 계절적이고도 시계열적인 관측을 하는 데는 아직도 많은 애로점이 있다. 황천 및 고파, 강조류 환경에서 관측기가 유실될 확률이 아주 높으나 이 해역에 해저경계층에 대한 적절한 관측 없이는 황해의 역학연구를 상당수준으로 제고시키는데는 문제가 있다.

황하유역에서의 용수이용이 급증함에 따라 발매만으로는 황하 유출수와 니토 토사 입력 변화, 삼협댐의 건설에 따른 장강 유출수의 변화등의 변화가 전반적인 황해 동적 퇴적 체계에 장기적인 영향을 줄 것으

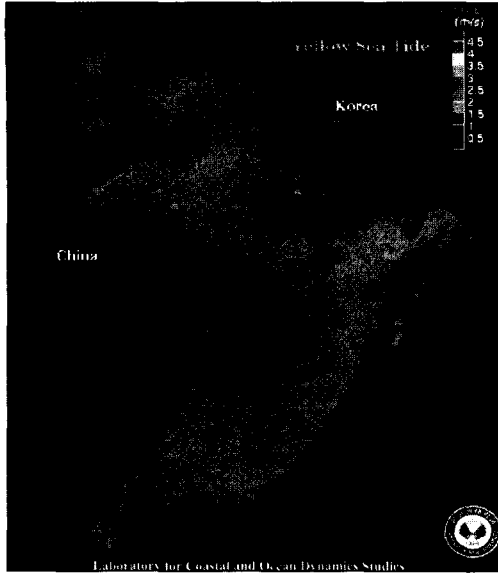


Fig. 5. 황해의 실시간 조류(2003년 7월 15일).

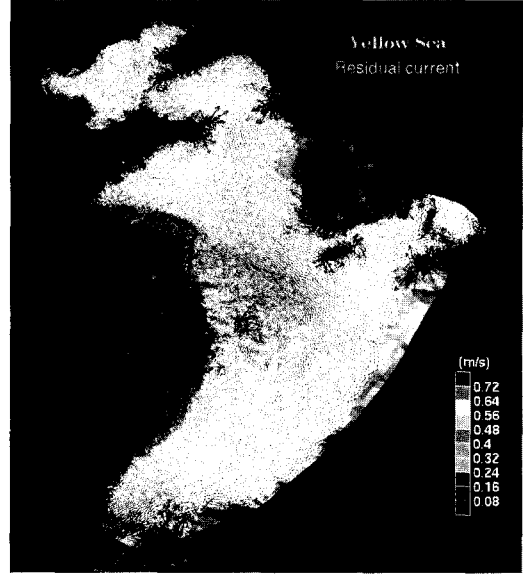


Fig. 6. 평균 조석의 항류 분포.

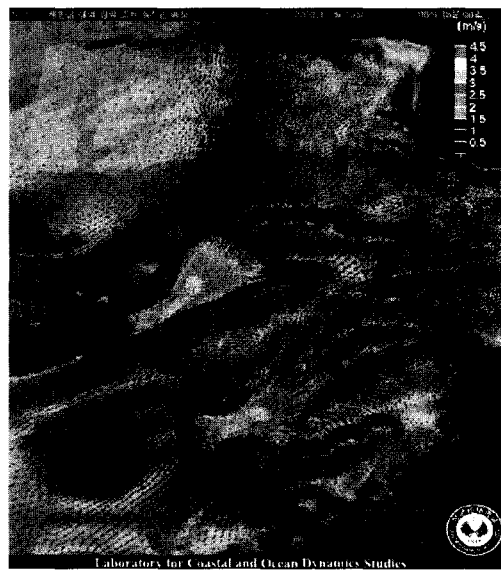
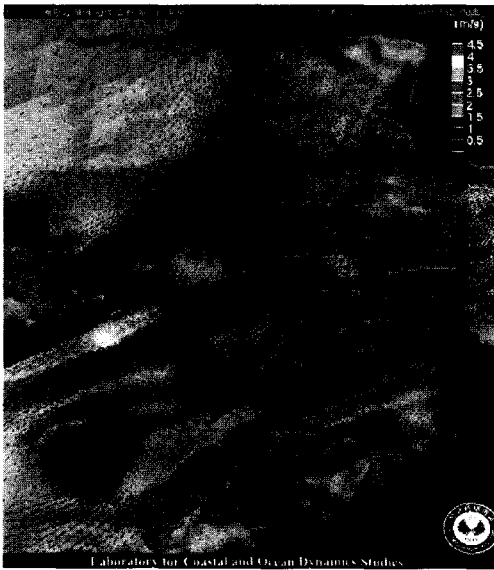


Fig. 7. 새만금 해역에서의 실시간 조류(2003년 7월 15일).

로 생각되고 있으며 대규모 연안개발에 따른 유황변동에 따라서도 동적 퇴적체계는 크게 변동이 될 것으로 예상된다. 따라서 신뢰성 있는 부유사 퇴적모형, 즉 3차원 순압, 경압 해수유동 모형, 해파모형이 결합되어 해저경계층의 정확한 물리과정의 모사를 포함하고 또한 점착성 및 비점착성 부유토사의 과정이 잘 모사가 되는 3차원 부유사 퇴적모형에 의한 황해 체계 및 연안개발 해역의 예측적 토사이동 시뮬레이션

이 여러 관점에서 필요한 시점에 있다.

7. 조석 사주 역학과 퇴적 역학

잔차류 순환과 관련된 니토의 거동은 황해 연안에 넓은 갯벌을 형성하며 또한 황해 중부해역과 제주도 남서해역에는 수십 ~ 수백km의 반경을 갖는 와류와 관련한 넓은 니토 퇴적이 장기적으로 이루어지고 있

다. 이와 더불어 황해의 해저에서 가장 큰 규모의 모래퇴적은 폭이 수백미터 ~ 수km이며, 길이는 수십km에 달하는 조석사주의 형태로서 존재하고 있다. 황해 해저에서의 모래이동은 비선형성에 기인한 한 방향으로 우세한 창조 또는 낙조시의 최강해저마찰력과 방향성으로서 소류사의 이동경로가 추론이 될 수 있다. 이러한 대규모의 해저퇴적이 높은 에너지환경(강한 조류와 높은 파랑)을 갖는 해역에서 발생하는 이유에 대해서는 아직까지도 만족스러운 물리적 해답이 없다. 경기만의 남측해역에는 장안퇴와 중앙천퇴가 있으며 경기만 전체가 세계적으로 드문 광폭의 조석사주로써 형성되며 서해안을 따라서 선형사주들이 분포되어있는데 수십 년 기간에 수km의 횡적 이동이 관측되기도 하여 공학적인 관점에서도 이의 규명이 절실하다. 이러한 큰 이동은 오도 남사퇴의 경우에 보고된 바가 있다. 새만금 해역의 경우는 4호 방조제가 건설될 때 초기 계획된 물막이 구간에 폭이 1.5km, 길이가 수km인 조석사주가 8-9년에 걸쳐 6-7m의 높이로서 퇴적이 되어 기존의 학술인 조석사주의 초기형성은 적어도 100년 이상이며 성장이 해수면에 가까워지면 표면해파의 영향으로 세굴이 일어나서 준 평형상태를 이룬다는 추정을 의심스럽게 하는 현상이 발생하기도 하여 문제의 접근을 어렵게 하고 있다. 또한 해저바닥의 강조류에 의한 해저마찰력은 이러한 소류사만이 아닌 니토 성분이 우세한 퇴적의 경우에도 유사한 해저퇴적분포를 보이고 있음이 우리나라 서해의 외측에서 남북방향의 중단적인 지구물리 탐사의 결과로서도 제시되고 있다. 새만금의 방조제 건설에 의해 전면의 유속강도가 저하되어 침투 해저 마찰 응력이 $0.3N/m^2$ (우리나라의 경우 대부분의 조간대의 저조선과 일치하는 것이 수치모형의 경험적인 결과이었음)의 등치선의 형성을 근거로 새로운 갯벌이 형성될 수 있음을 정성적으로는 해석할 수 있으나 토사의 공급 상황에 따라서는 갯벌만이 아니라 사주의 형성이 또한 가능할 것이다. 예측성을 갖는 조석사주역학 모형의 수립은 상당한 정밀도의 해저관측활동을 통해서 비로소 가능한 사항으로 보인다.

8. 조석 교란 강도에 따른 생물학적인 영향

광합성에 큰 영향을 주는 태양열 복사, 해표면의 가열 및 해면풍의 계절적인 변화와 상호작용을 하는 조석교란(Tidal stirring)현상은 아마도 황해에서 플랑크톤에 대해 가장 큰 영향을 줄 것이다. 황해에서의 플

랑크톤 생태체계는 크게 지역적인 기초 생산력에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 황해에 있어서 기초 생산력에 영향을 주는 혼합층 광합적 두께는 크게 조류에 의해서 지배된다. 조류의 해저마찰응력은 토사를 재부유시키며 난류운동에너지로서 성층을 형성하는데 국지적인 이러한 조석교란에 따른 성층과 탁도, 해수 온도변화, 해수표면 바람의 변화는 플랑크톤의 계절적 주기성을 부여한다. 반면에 부영양화 과정은 하천 유입수의 식물성 영양염에 의한 입력의 가정을 강조하고 있다. 이러한 조석교란 강도에 따른 생물학적인 영향평가는 구체화된 모형으로부터 초기 평가될 수 있는데 철저한 물리적·생물학적 관측에 근거해야만 하는데 식물성 및 동물성 플랑크톤의 계절적 변화, 지역적인 동식물군의 변화도에 대한 이해가 필요하다. 조석교란은 (유속)³/수심의 모수로서 수치모형으로부터 상당히 신뢰성있게 추정될 수 있으며 또한 성층, 혼합의 조석혼합경계로서 활발한 생물학적 생산력이 발생하는 것은 비교적 잘 알려져 있지만 황해에서 이러한 조석혼합경계(조경)의 생물학적인 평가에 대한 자세한 연구는 수행되지 않았다. 새만금 방조제가 건설이 되어 외측의 조류상황이 변명이 되면 조석교란의 형태역시 변명되어 조경의 위치적 변화가 이루어질 것이다.

9. 수질 역학 모형

수질 예측 과업은 주요 성분의 수송과 확산, 근원(공급)과 소멸(퇴적) 과정, 상호 작용의 물리 과정의 모델링의 적절한 이해에서 비롯하는데 영양염, 용존 산소, 식물성 플랑크톤, 중금속 등의 과정을 지배하는 물리 과정, 토사 이동의 부모형들, 미생물학 및 급속성 “상호작용이” 고려된 복잡한 3차원적 모형 수립이 필수적이다. 따라서 이러한 예측 모형의 구동에 있어서 전반적인 관측활동의 중요성이 대두된다. 황해에서의 물리 과정은 비로소 전반적인 상황이 이해되기 시작하는 초기단계에 있으며 3차원 유동장의 재현에 있어 수직, 수평 확산 과정의 모수화에 대한 문제는 여전히 미결 상태이며 중, 소규모의 와동과 계절적 성층, 하천수의 유출에 따른 하구에서의 상층혼합(over-mixing) 과정들을 정확히 재현시키는 문제 역시 충분한 수준에 있지 못하다. 영양염 분포의 모델링은 확산되는 육상 기원의 입력의 연구로서 유용한 접근인데 전반적인 광역의 관측 자료를 필요로 하는데, 용존 입자 추적 광물에 의한 조사도 역시 필요하다. 북해 연구의 경우, 수질 역학 모형의 수립을 위해서 20여개 기관과 100여명의 과학자가 참여하였다.

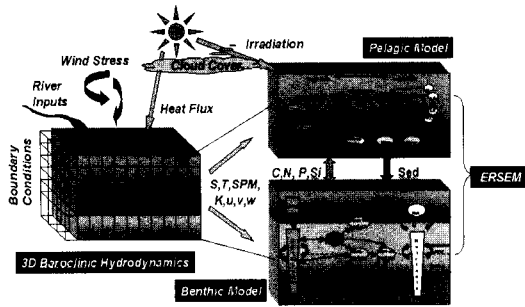


Fig. 8. 동수역학 모형과 해양 생태 모형의 결합 예.

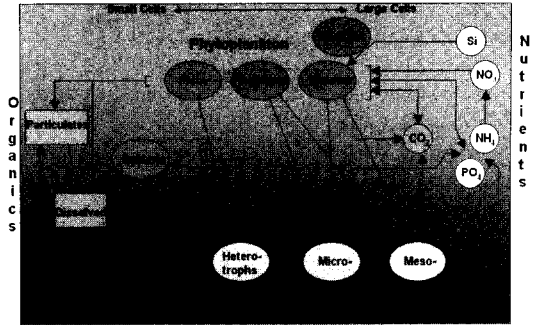


Fig. 9. 해양 생태 모형의 부모형(표영(pelagic) 생태모형)의 예.

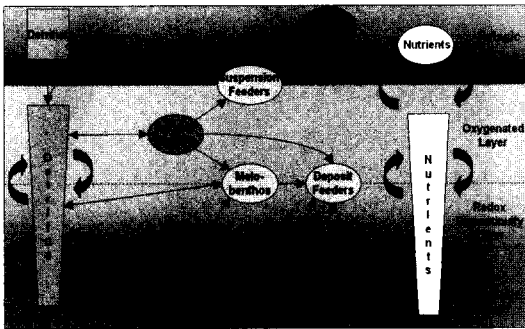


Fig. 10. 해양 생태 모형의 부모형(저서(benthic) 생태모형)의 예.

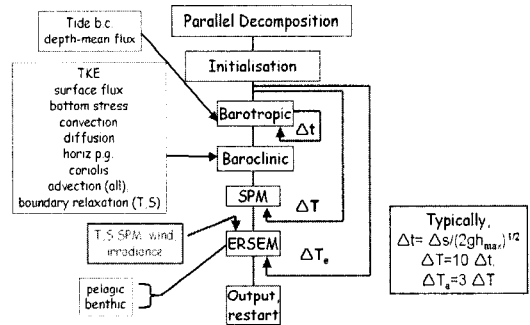


Fig. 11. 동수역학 모형과 해양 생태 모형의 운용을 위한 흐름도.

10. 해양 생태 모형

물리학자들과 생물학자들이 협력하여 생태계에 대한 이해를 추구하기 위해서 구주 연합은 ERSEM (The European Regional Seas Ecosystem Model) 프로그램을 수행한 바 있는데, 궁극적인 완전한 해양생태모형을 지향하는 연구과업이 수행되고 있다. 북해 전역의 모형에 추가적으로 리버풀만의 상세한 현장 관측 (Liverpool Observation Program)으로 개선되고 있다.

11. 예측 전략

전술한 바와 같이, 포괄적이고도 상세한 관측에 의거한 예측 모형의 수립 및 운용은 용이하지 않은 과업으로서 단기간에 만족할 만한 성과를 거두기는 어려울 것이다. 그러나 새만금 사업과 같은 중요한 국가 사업이 해양 수리 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 이러한 과정이 필수적인 경로로서 생각된다. 기존의 수질 예측에 있어서 이러한 기본적인 물리현

상에 입각한 수질모델링의 노력이 부족하였던 점은 충분히 인식되어야 한다. 새만금 계획이 해수 유통이 안되는 상황에서의 수질 예측 역시 이 지역의 분수계를 포함하는 복잡한 수문 모형과 오염 유출 예측과 더불어 생성되는 호수 내의 계절적이고도 3차원적인 순환이 고려된 물리 모형을 근간으로 해야 함에도 불구하고 간과되었던 사항이었으며 현재 해수 유통안이 대두되는 상황에서의 수질 역학을 자세히 이해한다는 것은 현재의 우리의 학술 수준으로는 극복하기 어려운 것으로 생각되나 현재의 문제들에 대한 미래 예측을 조망하기 위한 결집된 노력과 통찰력이 필요한 것으로 생각된다. 조력 발전을 위한 연구 역시 실질적인 건설에만 초점을 둘 것이 아니라 관련된 수리 환경 및 생태 체계의 변화 예측 연구가 유사한 관점에서 수행되어야 될 것으로 생각된다. 이러한 미래 예측을 위한 기본 모형(황해 국지 유통 시뮬레이터)에 의거한 결과들의 일부가 http://wave.skku.ac.kr/Seamang_eum_Forecasting에 제시되어 있으며 전술된 접근 전략에 의한 철저한 과학적 연구 없이 직관적인 예측에

의거한 결정은 현명하지 못한 접근일 것이다.

참고문헌

- Charnock, H., Dyer, K.R., Huthnance, J.M., Liss, P.S., Simpson, J.H. and Tett, P.B., 1994. *Understanding the North Sea System*. 1st ed., The Royal Society, Chapman & Hall.
- Choi, B.H., 1981. Effect on the M_2 tide of tidal barriers in the west coast of Korea. Korean Ocean Res. Development Inst., Report, 81-10.
- Choi, B.H., 1984. A stratification-mixing model of the Yellow Sea and the East China Sea. *Proc. Korean Soc. Civil Engrs*, 4, 125-132.
- Choi, B.H., 1986. Prediction of sand transport directions of the offshore tidal-sand banks in the Yellow Sea. International Association for Hydraulic Research, *Proceeding of 5th APD*: 231-247.
- Choi, B.H. and Lie, H.J., 1992. Physical oceanography programme of the East China Sea and East Sea(Japan Sea) dynamics in Korea. Presented to PORSEC-'92 in Okinawa, August 25 to 31.
- Choi, B.H., 2003. A strategy for modeling pollution dynamics of the Yellow Sea. Unpublished manuscript.
- Lie, H.J., 1989. Tidal fronts in the southeastern Hwanghae(Yellow Sea). *Continental Shelf Research*, 9(6), 527-546.