

한반도 주변해역의 파후 및 설계파



최병호

성균관대학교 건설환경시스템공학과 명예교수

bhchoi@skku.edu

1. 머리말

선진 조선해양국과 해운국으로서의 위상을 유지하기 위한 전구 해양에 대한 기본적인 정보가 필요한데 그 중의 하나는 신뢰성 있는 해양파의 파후(Wave Climate) 통계를 유지하는 일이다. 초기에 자발적인 관측선(Voluntary Observing Ships)에 의한 통계가 1960년대에 영국(영국 물리연구소)의 Hogben과 Lumb에 의해 출판되었으며, 스펙트럼 모형의 출력이 미해군 선박연구소에서 정기적으로 저장되다 전 세계적으로 3세대 해파모형과 인공위성에서의 해파관측이 보편화됨에 따라 여러 기관에서 파후 통계 정보가 제공되게 되었다(예를 들면, 네덜란드 KNMI의 웹기반 파후정보, Ian Young 교수의 Global Ocean Wave Atlas, 노르웨이(OCEANOR)의 위성고도계 관측 파고의 통계 등). 장기해파자료에 의한 파후정보는 전통적으로 선박의 최적 대양항로선정(Ocean Passage,

Ocean Routing)에 필수적이며, 단기대기예보에 의한 해상풍자료로서는 전구해양 및 국지해양의 해파예보가 국내외적으로 범용적인 서비스가 이루어지고 있다.

2. 대양예보

이와 같은 해파정보들을 좀 더 상세하게 제공하기 위한 일련의 노력을 수행하였다. 초기작업으로 일본 기상청(JMA)의 5년 기간의 바람장에 의한 WAM 모형의 산정 결과와 주요 변수의 도출 방법, 미해군의 15년 COAMPS 바람장에 의한 WW3 모형의 산정 결과와 처리 방법(표준출력을 NetCDF Format으로 하여 GMT, FERRET 등을 이용한 용이한 가시화절차)을 각기 2장의 DVD에 수록하여 이용자가 자기 목적에 맞도록 활용할 수 있는 기본자료 체계로서 구성하였다. 이 전구적인 파후 통계와 더불어 실시간적인 3일 정도

의 전구적 해파 예보를 활용하면 완전한 대양항해에의 길잡이가 될 수 있다. 우리나라 주변 해역에 대한 고해상도(재분석 또는 근년에는 자료합성된 예보자료의 축적) 바람장에 의한 파후 통계의 도출이 계속적으로 수행되고 있다.

JMA의 바람장(1988년 4월-1996년 3월)으로 WAM모형을 이용하여 매 6시간마다 10개의 모수(Wave Stress, Height, Period, Swell, etc)가 산정되었는데 DVD(1)에 수록하였다. 개선된 WAM모형은 영국 POL과 ECMWF에서 제공한다. 미 해군의 NOGAPS 바람장에 의한 NWW3 해파모형 14년(1993-2006) 시뮬레이션은 1도 간격, 3시간 간격으로 바람장이 입력되어 NWW3의 시뮬레이션, 출력 결과 역시 4번씩, 매 6시간 간격의 NetCDF 파일로 변환되어 DVD2에 저장, 제공된다. 자료처리 및 그림을 그리는 방법은 다음과 같은데, WW3의 산정결과를 Hs, 평균주기, 평균파향으로 수록하였고, 공개된 가시화도구인 NOAA의 FERRET를 설치한 후 다음 예제의 다음 스크립트를 실행하면 방대한 그림 결과를 출력할 수 있다.

(<http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/>에서 download 및 설치)

- Ferret 실행 후 다음 스크립트로 실행.


```
>SET DATA "ww3.199301.nc"
>SHADE/X=0.00E:1.00W/Y=90.00S:90.00N/Z=0.00/T="02-JAN-1993:00:00:00"
SIG_WAV_HT[d=ww3.199301]
```
- 한 파일 당 한 달간의 데이터가 들어있기 때문에 한 달 평균 값 등의 해석치는 다음의 Ferret에서 산정되고 가시화된다.


```
>SHADE/X=0.00E:1.00W/Y=90.00S:90.00N/Z=0.00
SIG_WAV_HT[d=ww3.199301,t=@AVE]
```

현재 미해군의 NOGAPS(Navy Operational Global Atmospheric Prediction System)는 Version 4.0으로 운용되는데, 전구적 대기 모형 결과로서 해상풍장이 제공되어 전구 해파 산정에 이용되고 대기 모형 결과는 미해군 해양 예보 모형(NCOM, 및 GOF5)에 입력된다. COAMPS(Coupled Ocean Atmospheric Mesoscale Prediction System)는 지역적으로 운용되는데 한반도 해역의 경우(5분 격자)에는 일본 Yokosuka의 Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center(Western Pacific Region)에서 제공되는데 접근은 제한적이다. 아래에는 NOGAPS에서 공개(<http://www.usgodae.org/ftp/outgoing/fnmoc/models/nogaps/>)되는 자료 정보가 있다. 이 외에 TOPEX/POSEIDON 자료, ERS-1자료 및 JASON-1 자료들과 3세대 해파산정, 그리고 VOS자료까지 종합적인 분석이 활발하게 이루어지고 있다.

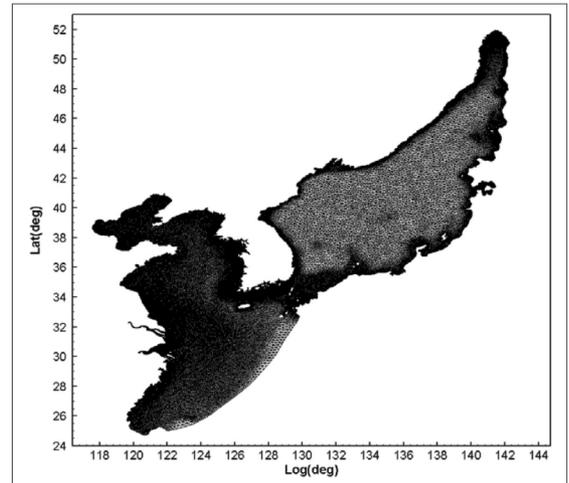
3. 한반도 해역

JRA-25(1979-2004, 26 years)는 일본기상청의 재분석 자료로써, 2013(1958-2012)년에는 ECMWF보다도 예상도가 높은 JRA-55(1958-2012, 55 years)으로 확장 공개 될 예정이며 한반도 근해 및 전구 해양의 장기적인 해파산정을 더 장기적으로 해상도가 높게 산출 할 수 있는 근거가 된다. 우선 JRA-25 바람장 자료를 사용하여 1980년~2011년까지 한반도 해역의 해파특성(서해, 황해, 동중국해)을 가장 잘 묘사 시킬 수 있는 조석-해파-해일 복합시뮬레이션으로 산출하는 시험적인 과업을 완료하였다. 2010년 12월부터 병렬 클러스터에서 산정을 시작하였으므로 시뮬레이션만 1년 반 이상이 소요되었다. 현재 국토해양부가 제공하는 한반도 주변의 설계파는 심

해파, 천해파로 임의적으로 나뉘어 산정되었고, 그 후에는 한국해양과학기술원(구 한국해양연구원)이 HYPA(S), WAM등을 이용하여 산정하였는데, 과업 기간이 오래 소요 되어 모형적용이 일관성이 없고 바람장도 ECMWF와 태풍모형 바람장으로 이원적인 적용을 하였다. 본 과업에서는 2009년 후반 새롭게 Unstructured 격자를 채택한 UNSWAN 모델과 ADCIRC모형을 동일 격자체계의 일체형으로 동적 결합해 2010년 Nortre Dame 대학에서 공개한 2차원 모형 (P)ADCIRC+(P) UNSWAN(Dietrich et al., 2011)을 사용해 장기 파후산정에 적용하였다. 연안의 물리적인 과정을 실험할 때에는 이 서로 다른 스펙트럼상의 파들에 대한 상호작용이 고려되어야만 한다. 이 비구조적 메쉬(Unstructured) 장과 모형은 지형, 수심의 변화 등에 따라 지역적인 해상도를 조절하는 것이 가능하며, 대륙붕에서 연안의 범람역에 이르기 까지 각각 필수적인 물리과정이 재현되기 위한 최소한의 요구조건(격자 간격)을 한 격자상에서 만족 시킬 수 있다.

단점으로 JRA25자료의 1년 복합적 시물레이션은 64CPU를 병렬로 사용 할 시 약 2주 정도의 절대 시간이 걸리는데 계산의 안정성 문제는 Wet/Dry 영역에서 수시로 발생한다. 그리고 전술한 바와 같이 과다한 산정시간이 소요된다. 1차적 Product는 매 1시간 각 노드에서의 유의파고, 주기, 파향, 파랑에너지(유속, 수위는 통합형 모형이므로 조류/조위, 해일이 포함된 출력) 그리고 공간적으로 매 5분 간격(약 9km)의 Wave Energy Spectrum(2차원)이 한반도 주변에 저장되어 새로운 ISO의 설계기준인 다방향 불규칙파를 설계에 사용 할 때 직접 이용 할 수 있도록 저장하였다. 이는 유의파고 주기로서 Bretschneider-Mitsuyasu의 스펙트럼을 구하는 역산과정보다 직접적인 해파모형의 출력 결과이다. 방대한 산정결과는 FTP 서버를 통해 접근 가능하게 설계 되어야 하

는데 1년 산정 결과는 약 280Gbyte (압축을 풀면 약 8배 용량 필요)로서 30년 산정 결과를 서버에서는 저장하고는 있지만, 주요한 Product는 Wave Atlas로서 제공될 수 있으며, 설계를 위한 유의파 또는 Spectrum은 다운로드하여, 사용 할 수 있게끔 기본 설계 하였다. FTP 서버는 RAID Mirror System으로 두 떨어진 곳에 설치되는 것이 바람직하고 기본적으로는 일반 공개(영어로서 작성된 Web 운용)를 목표로 한다. 관공서 및 학교의 방어벽시스템 때문에 자료 전송 및 Protocol 접근 제한이 있어 외부의 전문적인 체계를 도입하여야 하지만, 이러한 점은 관련 기관의 재정적인 지원 또는 자료 활용 기관들의 협조가 필요하다.



〈그림 1〉 해파산정 모형의 격자망도 (조석과 해일이 동일노드에서 산정됨)

2. 접합방법

2.1 (P)ADCIRC + (P)UNSWAN모형의 동적결합

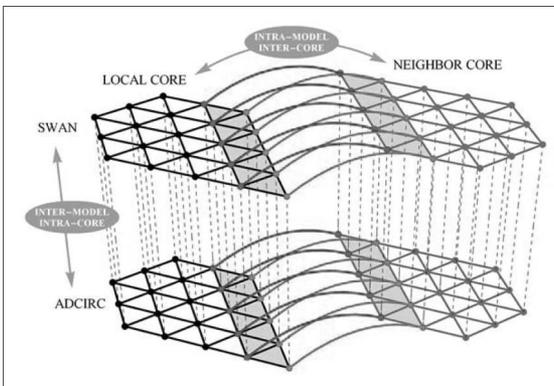
해양, 연안의 물리적인 과정을 실험할 때에는 이 서로 다른 스펙트럼상의 파들에 대한 상호작용이 고려되어야 한다. Unstructured 장과 모형은 지형,

수심의 변화 등에 따른 지역적인 해상도를 조절하는 것이 가능하며, 대륙붕에서 연안의 범람역에 이르기 까지 각각 필수적인 물리과정이 재현되기 위한 최소한의 요구조건(해상도)을 한 격자상에서 만족시킬 수 있다. 본 연구에서는 2009년 후반에 새롭게 Unstructured 격자를 채택한 UNSWAN 모델과 ADCIRC를 Tightly-Coupled한 2010년 Nore Dame 대학에서 공개한 2차원 모형의 (P)ADCIRC+(P) UNSWAN(Dietrich et al., 2011)을 기본으로 적절한 PBL의 표면경계 및 BBL조건을 사용해 장기 파후산정에 적용하였다. Tightly-Coupled방식은 SWAN과 ADCIRC 모형의 영역 분할된 동일한 격자정보를 사

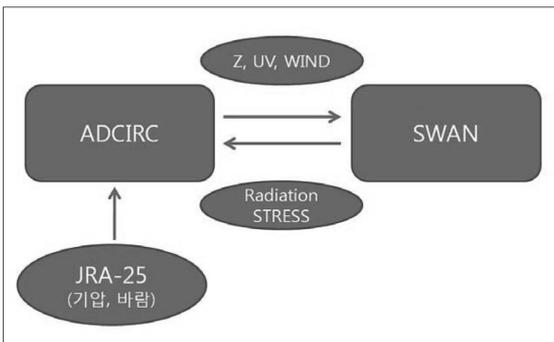
용하여 수위, 유속, 풍속, 잉여에너지 Local Cache를 통해 모델 간에 전달되어 있어 모델간의 보간은 불필요하다. 결합된 모델간의 내부 통신은 core 내부에서 수행되어 병렬컴퓨팅 환경에 따른 영향을 받지 않으며, 이러한 모델간의 커플링 기법은 병렬컴퓨팅 환경의 효율성을 극대화한다(Dietrich J.C., 2010) (<그림 2>).

ADCIRC 모델과 SWAN 모델의 교환변수로는 해파모델로 Radiation Stress 및 BBL를 위한 Wave Orbital Velocity 대표 파랑 성분이 전달된다.

또한, 조석-해일 모델로부터 유속, 수위 정보가 해파모델로 전달되어 수위 변화에 따른 쇄파대의 변화 유속에 따른 해파의 굴절 등이 반영된다. <그림 3>에는 JRA-25 재분석 자료를 이용한 해파산정 모형의 계산 흐름도를 제시하였다. 한반도 연안의 해파산정에 용이하도록 황동중국해와 동해 전역이 포함된 영역으로 약 270,000개의 노드로 구성된 격자체계를 사용하였다. 파후 산정을 위해서는 연안의 복잡한 지형과 수심을 충분히 반영하기 위해 최소 격자 간격 100~200m(서남해 100m, 동해 200m)를 유지하도록 격자를 구성하였다.



<그림 2> 결합모델의 내부 통신 흐름도 (Dietrich, J.C., 2010)



<그림 3> 해파산정 모형의 계산 흐름도

2.2 기상 자료(해상풍)

한반도 근해의 해파 산정은 과거 기간 기상자료의 의존도가 높으며, 기상자료의 해상도 및 정확도에 의해 산정된 해파의 정확도가 결정될 것이다. 현재 이용될 수 있는 과거 기상 자료의 해상풍 데이터를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 일본 기상청의 인쇄천기도(1일 2회)와 15일 평균 해수, 대기온도로부터의 바람장 산정(한양대, 나정렬 교수) : 초기 제공되었던 데이터 셋에 최근 자료(인쇄천기도가 계속된 기간)를 첨가하여 황동해의 풍성류 산정에 적용

〈표 1〉 JRA25와 JRA55의 특성비교

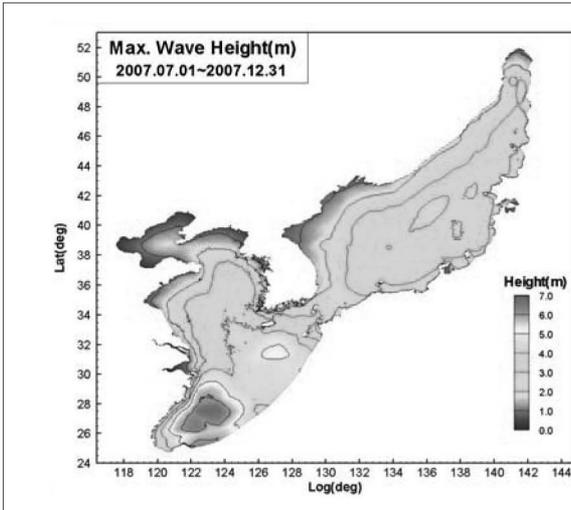
	JRA-25	JRA-55
Reanalysis Years	1979-2004(26 years)	1958-2012(55 years)
Equivalent Operational NWP System	As of Mar, 2004	As of Dec, 2009
Resolution	T106L40 (~120km)	TL319L60 (~60km)
Time Integration	Eularian	Semi-Lagrangian
Assimilation Scheme	3D-Var	4D-Var(with T106 Inner Model)
Bias Correction (Satellite Radiance)	Adaptive Method (Sakamoto et al, 2009)	Variational Bias Correction(Dee et al, 2009)
Tropical Cyclone	Wind Profile Retrievals(TCRs) provided by Dr. Fiorino were Assimilated.	

- 2) ECMWF의 재분석 과업에 의한 1.125° (1979-1994) 및 현업예보 0.5°(1995-2000) Surface Velocity Field 바람장 : 5분 경위도 격자체계와 1시간 자료로 보간하여 1TB용량 자료로 생성, 2001년부터 현재까지는 0.2도 격자해상자료를 유상 제공받았다.
- 3) JMA의 재분석 데이터 셋에서의 바람장 (<http://jra.kishou.go.jp>) : 1979~2012년은 2.5도, 1.25도 전구자료로 하루 6시간 간격
- 4) ECMWF(NCEP) 재분석 모형 출력장에 태풍 파라미터를 MM5모형 또는 WRF모형에 보거싱 후 생성

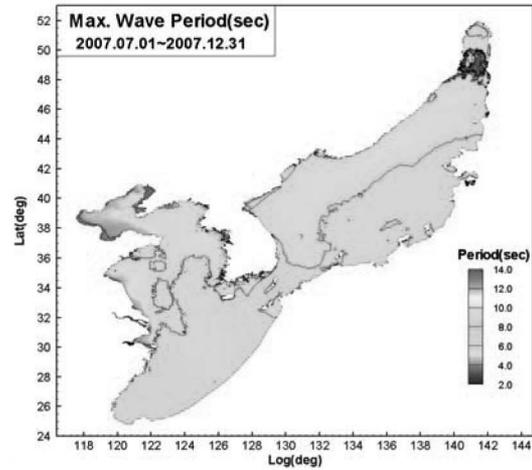
사용된 JRA-25의 기상 재분석 자료와 2013년에 확장 공개 될 예정의 JRA-55의 기상 재분석 자료의 특성을 제시하였다(〈표 1〉 참조). 향후 공개 될 JRA-55의 기상 재분석 자료를 사용할 경우 해상도 및 정확도가 높아 자료의 활용도가 높을 것으로 예상된다. 또한, 이 자료는 설계과 산정에 필요한 50년 이상의 기상(해상풍) 자료를 사용할 수 있어 적절한 검증 후 한반도 연안의 신뢰성 높은 파후 및 설계과을 산정하는 일관된 기초자료로 사용될 수 있다.

3. 진행 상황

ADCIRC와 UNSWAN은 모두 동일한 격자상(FEM)에서 해일-조석-해파가 산정되는 일체형 체계이며, 64노드의 병렬시스템 2기를 사용하여 계산을 수행하였다. 1년 계산에 약 2주 정도의 계산 수행시간이 필요하였으며, 4Tera 외장 백업 장치를 통해 지속적으로 백업하는 시스템을 구축하였다. 계산은 매 1시간 간격으로 각 노드에서 유의파고, 주기, 파향, 파랑에너지 그리고 해상풍의 영향이 포함된 조류, 조위(약기상시 해일 포함)가 출력되도록 설정하였다. 공간적(경도 : 124.0~131.3, 위도 : 32.7~40.0)으로 5분(약 9km)간격의 해상도로 Wave Energy Spectrum(2차원)을 계산하였다. 이는 새로운 ISO의 설계기준인 다방향 불규칙파를 설계에 사용할 때 직접 이용 할 수 있으며, 유의파고 주기로서 Bretschneider-Mitsuyasu의 스펙트럼을 구하는 역산과정보다 직접적인 해파모형의 출력 결과이다. 현재 진행 상황은 1980년~2011년까지 계산을 수행하였다. 이중 〈그림 4〉, 〈그림 5〉에 계산결과의 일부인 2007년 후반기의 최대 파고 분포와 주기 분포를 제시하였다. 〈그림 6〉은 2007년도에 해당하는 기상청 부이중 하나인 칠발도에서 관측된 유의파고와 주기를 계산된 결과와 비교하였다.



〈그림 4〉 2007년 후반기의 최대 파고 분포



〈그림 5〉 2007년 후반기의 최대 주기 분포

4. 문제의 서술

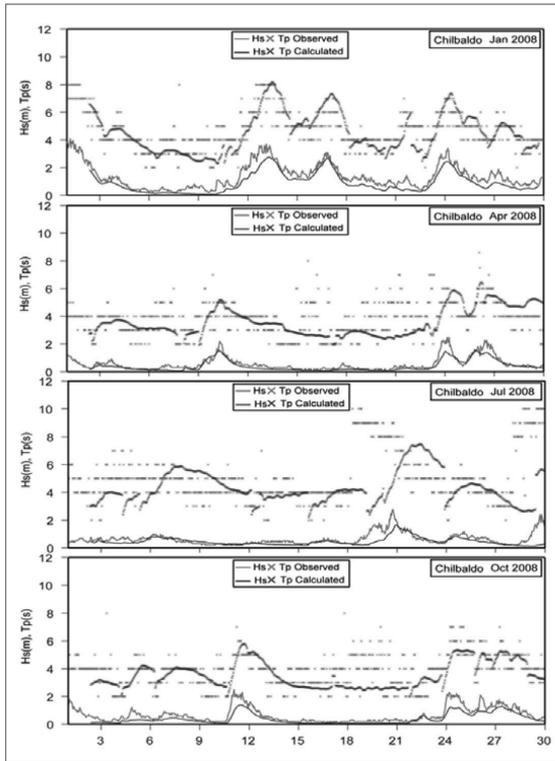
풍과의 JRA-25의 기상 재분석 자료 입력과 Tightly-Coupled된 (P)ADCIRC+(P)UNSWAN의 일체형 결합모형을 이용하여 일관적인 파후 및 설계파 산정을 수행할 수 있는 것을 제시하였다. 이 일차적인 방대한 산정결과는 FTP 서버를 통해 접근 가능하게 설계되어야 하는데 1년 산정 결과는 약 280Gbyte(약 8배로 압축된 용량)로서 25년 산정 결과를 서버에서 저장하고는 있지만, 주요한 Product는 Wave Atlas로서 제공 될 수 있으며, 설계를 위한 유의파 또는 Spectrum은 다운로드하여 사용 할 수 있게 기본 설계를 하였다.

또한 기본적인 목적은 계산된 파후 및 설계파를 일반 공개(Web 서버 운용)하여 해안공학 실무자들에게 정보를 제공하는 것이다. 관공서 및 학교 등의 특별한 기관에서는 방어벽시스템 의해 자료 전송 및 Protocol 접근 제한이 있어 외부의 전문적인 서버관리체계가 도입되어야 하는데, 이 점은 관련 기

관의 재정적인 지원 또는 협조가 필요할 것으로 판단된다.

또한 복합과정모형의 경제적인 개선(예: 반음해법 유한요소모형적용)과 해상도가 상대적으로 높은 Surface (Wind) Velocity Field Data Set을 적용시키는 방향도 검토되어야 한다. 그러나 특정기간의 이상고파 특히 동해안의 Swell 산정(72년 Helen에 의한 동해안의 이상고파는 아직도 3세대 해파모형으로 재현이 잘 되지 못함)과 동중국해상의 태풍에 의한 Swell의 황해로의 전파 등에 대해서는 앞으로도 검증적 연구가 필요하다.

본 글에서는 제일의 조선국 그리고 활발한 해운활동을 수행하는 해운국으로 보유해야 할 전구해양의 해파정보와 특성적인 한반도 주변의 해파 Atlas작성을 위한 초기성과를 서술하였다. 이러한 과업에서 창출되는 이상파의 통계 및 지구변화에 따른 변동경향의 파악은 설계파의 재 정의를 위해 중요한 과제로서 우리 해안공학자의 기여가 절실하다.



〈그림 6〉 칠발도 부의의 관측치와 계산치

참고문헌

- Dietrich, J.C. (2010). Development and application of coupled hurricane wave and surge models for southern Louisiana, thesis of Doctor of Philosophy, Notre Dame University.
- Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luettich, R.A., Jensen, R.E., Smith, J.M., Stelling, G.S., Stone, G.W. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58, 45-65.
- Gulev, S.K. et al. (2012). Global atlas of ocean waves based on VOS observations (www.sail.msk.ru/atlas/index.htm).
- Young, I. and Holland, G. (1996). *Atlas of the Oceans: wind and wave climate*. Pergamon Press, Berlin.
- Young, I.R. et al. (2011). Global trends in wind speed and wave height. *Science* 332, doi:10.1126/science.1197219.

저자 약력 최병호

- 1989 - 2006: 한국해양과학기술학회 논문집 편집위원장, 부회장, 회장
- 1998 - 1999: 대한토목학회지 편집위원장
- 2000 - 현재: 한국공학한림원 창립회원
- 2005 - 2006: 한국해양과학기술연합회 회장
- 2001 - 현재: 아시아 태평양 해안 학회 고문위원 및 고문위원회위원장 (2009-2011)
- 2011. 9 - 현재: 성균관대 명예교수