

파랑 재분석 자료를 활용한 전세계 해양 파랑기후 및 극치(Extreme Return Value) 산정



박상욱

국립기상연구소 지구환경시스템 연구과 기상연구사

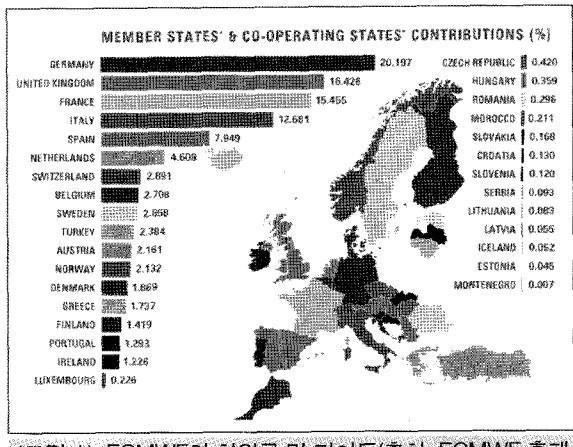
swpark@kma.go.kr

1. 서 론

해양기상 조건에 따른 해상 상태의 신뢰성 있는 자료 확보는 해상 활동 및 해안·해양 구조물 디자인에 중요한 영향을 미친다. 해양기상 조건 중에서도 정교하게 산출된 해상풍에 의하여 모의된 파랑 정보는 전지구 풍파(Wind wave)의 기후학적 분포 및 극치(Extreme return value) 산정에 필수적 요소이다. 해상풍 조건에 따른 파랑 산정은 스펙트럴 모델링 및 자료 동화 기법의 발전 등을 통하여 지속적인 정확도 향상을 이루어왔다. 그러나 VOS (Voluntary Observing Ships), 부이, 레이더식 파랑계 등에 의한 파랑 관측자료는 북반구 대륙 연안에 집중됨으로서 시·공간적으로 매우 한정돼 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 기상예보 선진기관인 유럽중기예보센터(ECMWF: European Center for Medium - Range Weather Forecast, <그림 1>) 및 미

국환경예측센터 (NCEP: National Center for Environmental Prediction) 등에서는 파랑예측 성능을 좌우하는 해상풍의 분석 및 예측성능 개선에 많은 노력을 기울이고 있다. 해상풍 또는 파랑의 분석과정은 수치모



<그림 1> ECMWF의 회원국 및 기여도(출처: ECMWF 홈페이지, <http://www.ecmwf.int/>)

델 및 자료동화 기법의 발전에 따라 점차 세밀화되고 있다.

불규칙하게 분포하는 관측자료를 수치모델에서 사용되는 격자점 자료로 만드는 과정을 객관분석(Objective analysis)이라 한다. 일반적으로 수치모델의 격자점에 존재하는 관측자료의 분포와 개수는 한정되므로 추가의 정보가 필요하게 되며 이러한 정보는 기후치, 물리적 법칙, 또는 수치모델의 예측치를 이용하게 되는데 이러한 값을 배경장(Background)이라 한다. 적절한 배경장을 통해서 관측의 부족한 점을 메우고 역학적, 물리적 균형을 이루면서 배경장에 포함된 정보와 관측값에 포함된 정보를 효과적으로 섞는 과정이 중요하게 되었다. 이러한 과정이 자료동화이며, 자료동화는 수치모델 변수의 시간적 변화와 물리 법칙을 이용하여 관측 정보가 수치모델 상태와 결합되어 만들어져가는 분석 방법인 것이다. 초기의 자료동화 기법은 통계적 방식에 기초한 최적내삽법(Optimal interpolation) 등이 사용되었으나 점차 비중관 관측자료(위성 및 레이더 등)가 증가하면서 변분법(Variational methods)을 적용하는 형태로 발전하고 있다. 재분석(Reanalysis) 자료란 최신의 자료동화 기법을 과거 40~50년 동안의 관측자료에 일관되게 적용하여 확보된 대기 또는 해양의 객관적 상태를 의미한다.

본 글에서는 위에서 언급된 기관에서 수행된 재분석 자료 산출 과정을 기술하고, 해상풍 재분석 자료 및 파랑 관측자료를 입력자료로 하여 가장 최신의 파랑 수치모델 운영 결과에서 나온 파랑 재분석 자료가 어떻게 파랑기후 분포 및 지역에 따른 파랑극치 산정에 활용되는지에 대하여 살펴보고자 하였다.

2. 해상풍 및 파랑 재분석 자료

현재 시점에서 과거 관측 자료의 품질과 공간적 분포를 현재와 동일하게 개선할 수는 없지만 최근에 개발된 수치모델과 자료동화 기법을 과거 기간에 동일하게 적용하여 최적의 기상장 또는 해양장을 만들어내는 것이 재분석의 궁극적인 목적이다.

해양에 비하여 상대적으로 관측자료가 풍부한 기상분야에서 이러한 시도가 우선적으로 이루어졌다. 기상 수치예보 및 자료동화 기술 분야에 앞선 인프라를 보유한 ECMWF와 NCEP 두 기관이 재분석 자료 산출을 선도하고 있다. ECMWF는 1995년에 1978년-1994년 재분석 자료인 ERA-15 (Gibson et al. 1997)와 2002년에 1957년-2002년 재분석 자료인 ERA-40 (Uppala 2001)을 온라인에 공개하였다¹⁾. NCEP은 미국대기과학연구소(NCAR: National Center for Atmospheric Research)와 공동으로 1996년에 1958년-1997년 재분석 자료인 NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay et al., 1996)와 이를 확장한 1948년-2003년 재분석 자료 (Kistler et al., 2001)를 온라인에 공개하고 있다²⁾.

ERA-40 재분석 자료는 ECMWF 중기(10일 예측) 전지구 예보모델인 IFS (Integrated Forecast System)의 모델 프레임을 사용하여 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 수평 격자계 형태로 구성된다. IFS는 전세계 기상예보 기관에서 유일하게 파랑-대기 결합모델 형태로 운영된다. 일반적으로는 대기모델에서 계산된 해상풍 자료가 파랑모델의 입력자료로 사용되어 파랑 예측 정보가 산출되지만 결합모델에서는 해상상태에 따른 항력계수(Drag coefficient)가 대기모델에 되먹임되어 대기 경계층의 물리과정에 영향을 미치는 효과가 고려된 진보된 형태이다. IFS에서 사용되는 파랑모델은 대표적 3세대 스펙트럼 모델인 WAM

1) http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/Reanalysis_ECMWF

2) <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

(WAMDI, 1988)이다. WAM은 WAVEWATCH-III (Tolman, 2002)와 함께 예보기관 현업 및 연구용으로 가장 많이 활용되고 있다.

ERA-40의 자료동화 기법은 3차원 변분법(3DVAR)을 적용하고 있다(〈그림 2〉). 최적내삽 방식이 동일 변수사이를 동화하기 위한 방법인 반면에 변분법에서는 각 항들이 모든 변수들간의 관계를 전부 포함할 수 있도록 벡터 또는 행렬 형태로 주어지기 때문에 한 변수를 동화하는데 관측과 관련된 모든 변수들을 활용할 수 있다. 즉 특정 변수에 대한 분석값을 결정하는데 좀 더 많은 관측정보들이 이용될 수 있다. 따라서 좀 더 양질의 분석값을 생산할 수 있다는 뜻이 된다. 이런 특성 때문에 변분법은 기존의 최적내삽법을 확장한 좀 더 일반화된 동화 방법이라 할 수 있으며, 특히 최적내삽법에서는 직접적인 동화가 거의 불가능한 비종관 관측자료들(위성자료, 레이더 자료 등)까지도 종관자료들과 동시에 동화할 수 있는 유용한 도구라 할 수 있다.

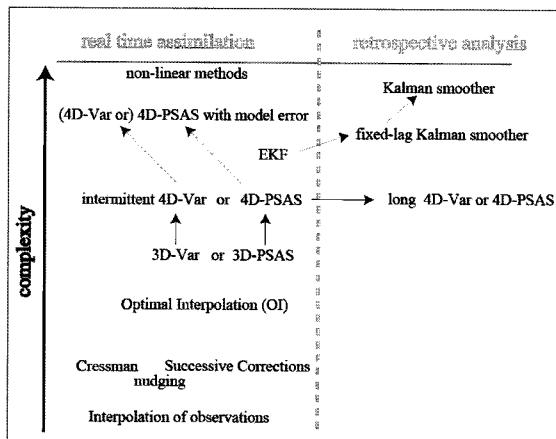
각종 통계적 기법 및 행렬/벡터 이론을 적절히 활용하여 구현된 변분법은 기존 최적내삽법에서는 표

현하기 어려웠던 다양한 변수간의 복잡한 관계를 적극적으로 표현함으로써 자료 동화의 질을 높이려 하고 있다. ERA-40에 사용된 해상관측 자료는 위성자료가 본격적으로 활용되기 이전 기간에 대하여 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set; Woodruff et al., 1998) 자료가 중요하게 동화 과정에 적용되었다. 위성에 의한 해수면 관측이 본격화되기 시작한 1980년대 말 이후에는 SSMI (Special Sensor Microwave Imager)와 Scatterometer 장비가 탑재된 ERS-1/ERS-2 위성의 altimeter 정보로부터 추출된 파랑정보가 1993년부터 자료동화 과정에 쓰이기 시작하였다.

위성자료동화의 구현은 해상관측이 극히 빈약한 남반구 해상상태에 대한 모니터링이 본격적으로 시작되었다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

NCEP/NCAR Reanalysis 재분석 자료는 NCEP의 전 지구 예보 시스템인 GDAS (Global Data Assimilation System)에서 사용되는 대기모델과 3DVAR 자료동화 기법이 적용되어 1.875° 수평격자로 구성되었다. COADS 자료가 동화과정에 사용되었으며 위성관측 해상풍 자료는 사용되지 않았다.

NCEP/NCAR Reanalysis 자료에는 파랑모델을 이용한 재분석 자료는 포함되어 있지 않으며, Cox and Swail (2001)이 작성한 파랑재분석자료 생산과정의 해상풍 자료로서 사용되었다. 전지구 해상풍 및 파랑 재분석 자료에 대한 ERA-40와 NCEP/NCAR Reanalysis 품질 비교는 Caires et. al (2004)에 자세히 언급되어 있다. 이 논문에서 ERA-40 자료의 우수함을 언급하고 있으나 사용자의 목적에 따라 두 자료를 모두 점검해보는 것이 타당하다고 생각된다. 3 절 이후에서 언급된 파랑기후 및 극치산정 관련 내용은 ERA-40 자료에 바탕을 두고 있다.



〈그림 2〉 자료동화 기법의 발전 단계 (출처: Data assimilation concepts and methods, ECMWF Training Course Lecture Series 2001)

3. 파랑 재분석 자료에 의한 파랑기후

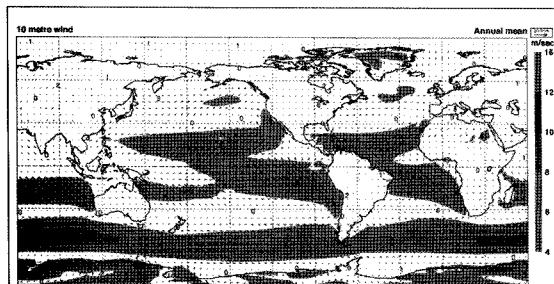
3.1 ERA-40 자료

ECMWF 온라인 페이지를 통하여 ERA-40 재분석 관련자료 액세스가 가능하다. ERA-40 재분석 온라인 홈페이지(<그림 3>)에는 재분석 프로젝트의 배경, 사용된 관측자료, 관련 보고서, 자료 액세스, 기후자료 도감 (Atlas) 등의 항목으로 구성되어 있다. 해상풍 및 기타 기상장에 대한 기후자료 평균장 및 변동성에 대한 그림의 자료는 'ERA-40 Atlas' 페이지를 통해 살펴볼 수 있다(<그림 4>).

The screenshot shows the ERA-40 homepage with the following sections:

- ERA-40 Areas:** Project Monitoring, Data-system Documentation, Observations Data Availability, Performance ERA-40 Atlas, More News.
- ERA-40 Latest News:**
 - The web-version of the ERA-40 Atlas has been released. 06 February 2006
 - The paper describing the ERA-40 re-analysis has been published in the Quarterly Journal October 2005 Part B issue. 19 January 2006
 - The method of Re-analysis was advertised in the 'Parliament Magazine'. 24 November 2005
- More ERA-40 News here**

<그림 3> ECMWF의 ERA-40 재분석 홈페이지 일부 (출처: ECMWF ERA-40 홈페이지)



<그림 4> ECMWF ERA-40 ATLAS 년평균 해상풍 (출처: ECMWF ERA-40 ATLAS)

ERA-40 재분석 자료³⁾는 1957년 9월 1일부터 2002년 8월 31일까지 1일 4회(00, 06, 12, 18UTC) 분석자료로 구성되어 있다. 사용자는 필요 영역, 기간, 변수를 지정하여 자료를 요청할 수 있다. 가령 전지구 영역에 대하여 2000년 1월 1일부터 12월 31일까지 1일 4회 자료를 모두 포함하는 해상풍, 유의 파고, 평균과주기, 평균과향 등 4변수를 요청하게 되면 파일 사이즈는 218.05MB가 되며 5,856개의 필드가 형성된다. 연구 목적으로 사용될 경우 책정된 가격은 124.44GBP(영국 파운드)이고, 이외의 경우에는 1466.52GBP를 지불하여야 한다(<그림 5>). 사용자가 파랑 재분석 자료에서 선택할 수 있는 파라미터는 2D 스펙트라 데이터 등을 포함하여 23종이 된다(<그림 6>).

자료제공 페이지에는 일부 제한적 자료에 대하여 연구 목적일 경우 무료로 제공하는 자료도 다수 포함하고 있다. 재분석 자료 포맷은 세계기상기구

The indicative costings of request	
Total number of fields	5,856
Volume	218.05 MB
Non-research use:	
Handling charge	124.44 GBP
Discounts	0.00 GBP
Information cost	1,342.08 GBP
Total	1,466.52 GBP
Research use:	
Handling charge	124.44 GBP
Discounts	0.00 GBP
Information cost	N/A
Total	124.44 GBP

40 years reanalysis, Wave model, Analysis, Surface

Version: 1
Type of level: Surface
Date: 2000-01-01 to 2000-12-31
Time: 00:00:00, 06:00:00, 12:00:00, 18:00:00
Parameter: 10 metre wind speed, Mean wave direction, Mean wave period, Significant wave height
Domain: Global
Grid: 1.5° x 1.5°

<그림 5> 파랑 재분석 자료에 대하여 산정된 요율(본문 예시 자료 대상)(출처: ECMWF ERA-40 홈페이지)

3) <http://www.ecmwf.int/products/data/d/ordering/source>

(WMO: World Meteorological Organization)에서 수치모델 출력자료에 대하여 공식 포맷으로 지정한 GRIB 포맷으로 되어있으며 사용자 편의를 위한 디코딩 유ти리티도 함께 제공하고 있다.

3.2 KNMI/ERA-40 Wave Atlas

앞절에서 언급된 ERA-40 재분석 자료가 특정기간, 특정지역의 해상풍 및 파랑정보를 필요로 하는 상황에서는 중요한 자료의 소스가 될 수 있지만, 일반적인 해양공학에서 해양구조물의 내구성 진단 등에 요구되는 파랑기후의 산출이나 100년에 한번 일

어날 수 있는 극치 산정(100-year return value) 등에는 ERA-40 자료를 확보하더라도 많은 추가 계산 및 노력이 수반된다. 이러한 목적에 부응하기 위해 네덜란드 기상청(KNMI: Royal Netherlands Meteorological Institute)에서는 ERA-40 재분석 자료를 이용하여 웹-베이스로 만들어진 파랑기후 도감인 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas'를 제작하여 온라인 공개하고 있다(그림 7)⁴⁾. 본 도감에 사용된 ERA-40 파랑 파라미터는 유의파고, 평균 파주기, 평균 파향이다.

WMO에서 제시된 '기후'의 정의는 30년 기간의

Select parameters and wave model versions

Abbreviations
g=Global

- 10 metre wind speed
- 2D wave spectra (single)
- Coefficient of drag with waves
- Mean direction of total swell
- Mean direction of wind waves
- Mean period of total swell
- Mean period of wind waves
- Mean square slope of waves
- Mean wave direction
- Mean wave period
- Mean wave period based on first moment
- Mean wave period based on first moment for swell
- Mean wave period based on first moment for wind waves
- Mean wave period based on second moment
- Mean wave period based on second moment for swell
- Mean wave period based on second moment for wind waves
- Peak period of 1D spectra
- Significant height of total swell
- Significant height of wind waves
- Significant wave height
- Wave spectral directional width
- Wave spectral directional width for swell
- Wave spectral directional width for wind waves

If you wish to select all the parameters for one version click on the version's name (i.e m or g).
If you wish to select both versions of a parameter click on the parameter's name.
For reset just click again on the parameter or level's name

Select All or Select None

〈그림 6〉 ERA-40 재분석자료의 파랑 파라미터 리스트
(출처: ECMWF ERA-40 홈페이지)

Global Wave Climatology Atlas
derived from 45-years of ECMWF reanalysis data

This web-based atlas describes wave climate and variability for use in

- Ocean engineering applications
- Detailed strategic planning of shipping routes
- Scientific areas such as climate research

Contents highlights:

- Climate means, standard deviations and percentiles.
- Maps of extreme statistics
- Wave height, period and direction tabular histograms.
- Description of wind and wave climate variability.

Developed by:
S. Claes, A. Sterl,
G. Fuentes, and V. Swail

Published by:
<http://www.knmi.nl/waveatlas>

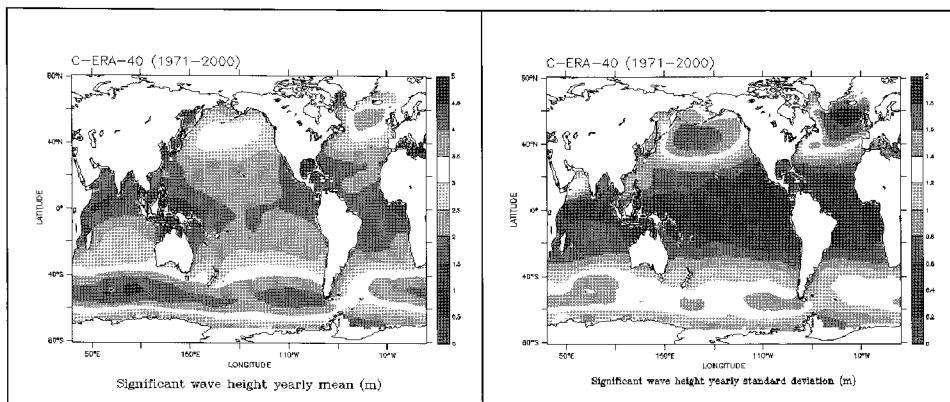
〈그림 7〉 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 홍보 포스터
(출처: KNMI 웹페이지)

4) <http://www.knmi.nl/waveatlas>

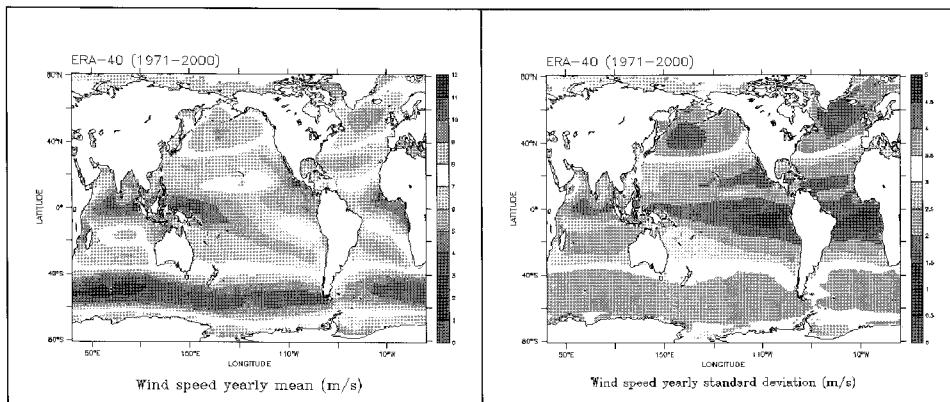
파랑 재분석 자료를 활용한 전세계 해양 파랑기후 및 극치(Extreme Return Value) 산정

평균적 기상 상태를 의미한다. 이에따라 1971년에서 2000년까지 30년 동안의 ERA-40 재분석 자료를 사용하여 파랑기후가 산정된다. 전지구 해상에 대한 유의파고, 평균파주기, 해상풍의 월별 또는 년 평균, 표준편차(그림 8), (그림 9)), 90%, 99% 분위수(Quantile), 년중 유의파고 3m, 6m, 9m를 초과하는 평균일수 ((그림 10)), 년중 해상풍이 11ms⁻¹, 17ms⁻¹, 24ms⁻¹를 초과하는 평균일수((그림 11)) 등에 대한 파랑기후 도감이 제공된다. 해상풍의 분류

기준은 Beaufort 스케일에 따라 강풍 (Beaufort 6, strong breeze, 10.8ms⁻¹), 질강온풍(Beaufort 8, fresh gale, 17.2ms⁻¹), 폭풍 (Beaufort 10, storm, 24.5ms⁻¹)으로 나눈 것이다. 또한 전지구 해상을 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 박스로 나누어 박스지역의 파향별 유의파고, 평균파주기 두변수 히스토그램 테이블 산출이 가능하다.



〈그림 8〉 ERA-40 재분석 유의파고 기후(30년, 1971-2000)의 년 평균(왼쪽) 및 표준편차(오른쪽)
(출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)



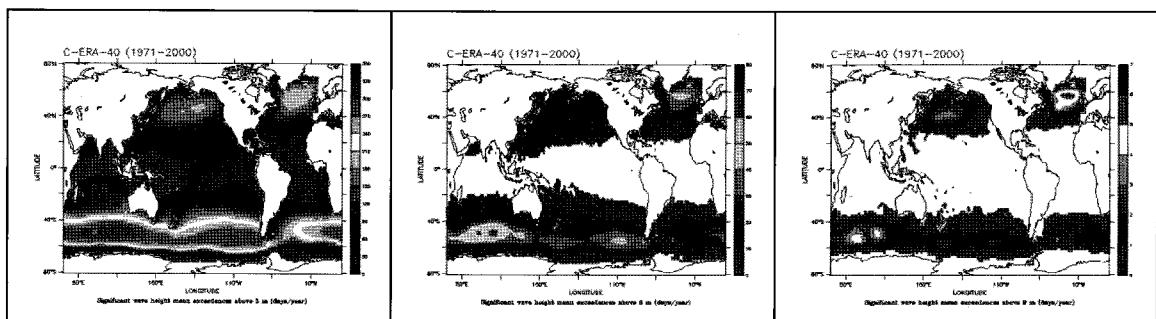
〈그림 9〉 ERA-40 재분석 해상풍 기후(30년, 1971-2000)의 년 평균(왼쪽) 및 표준편차(오른쪽)
(출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)

(가) 유의파고/ 해상풍 년 평균 및 표준편차

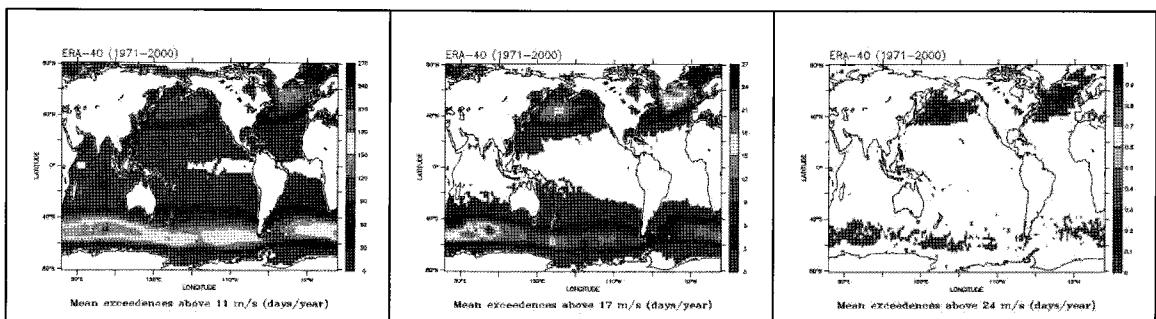
일반적으로 각 반구(Hemisphere)의 겨울철에 해당되는 계절에 파고가 높게 분포한다. 북반구 겨울철, 북태평양 북부(알류샨 저기압의 위치)에는 넓은 면적에 걸쳐 파고 2.5m 이상의 해역이 존재하고, 특히 40°N 선상의 160°E - 170°E 의 범위에는 3m 이상의 해역이 존재한다. 북대서양의 파고 분포도도 비슷한 양상이지만 강도(극전선 저기압의 이동 경로)가 더욱 강하다. 2.5m 이상의 해역이 35°N 이상에서 노르웨이 해까지 분포하고, 그린란드와 아일랜드 남쪽으로 3m 이상의 해역이 위치한다. 인도양에서는 북서 계절풍이 강한 계절이나 위도가 낮아서 바람이 그렇게 강하지 않아 파고도 낮다. 적도 지역

을 포함한 아열대 지역은 1년 내내 낮은 파고를 나타내는 지역이다. 남반구는 낮은 파고 분포를 보이지만 남극환류 (Circumpolar current) 해역은 여름에도 2m 이상의 높은 파고가 띠모양으로 위치한다.

북반구 여름철에 태풍과 허리케인이 발생한 시기를 제외하면 중위도 고기압권 내의 북태평양, 북대서양 모두 파고가 낮게 분포한다. 인도양의 경우 북반구 여름에 남서 계절풍이 탁월하여 북반구 겨울보다 파고가 높게 나타난다. 남반구 겨울 해양은 북반구 겨울 해양에서 나타나는 것보다 파고가 높게 나타난다. 평균 4m 이상의 높은 파고 지역이 남극 대륙을 둘면서 띠 모양으로 존재한다. 저위도로 갈수록 세력은 약해진다. 같은 위도대의 다른 해역에



<그림 10> ERA-40 재분석 유의파고 기후(30년, 1971-2000)의 년중 3m(왼쪽), 6m(가운데), 9m(오른쪽)를 초과하는 평균일수 (출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)



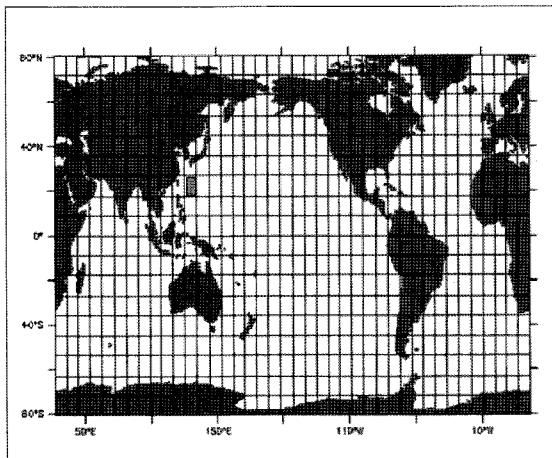
<그림 11> ERA-40 재분석 해상풍 기후(30년, 1971-2000)의 년중 11ms^{-1} (왼쪽), 17ms^{-1} (가운데), 24ms^{-1} (오른쪽)를 초과하는 평균일수 (출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)

파랑 재분석 자료를 활용한 전세계 해양 파랑기후 및 극치(Extreme Return Value) 산정

비하여 북미대륙 서해안에 파고가 약간 높게 분포하는 것은 남반구 고위도에서 발생한 파랑이 너울 형태로 북동진하여 도달하는 것이다.

(나) $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 박스 파향별 유의파고, 평균파주기 두 변수 히스토그램 테이블

〈그림 12〉는 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 박스로 나누어진 전지구 해상을 나타낸다. 사용자가 관심있는 해역을 선택하게 되면(붉은색 박스, Lon=(126,135) Lat=(18, 27)), 〈그림 13〉과 같이 파향별 유의파고와 평균파주기 빈도수 테이블을 산출할 수 있다. 파향은 8방위 (0° - 45° , 45° - 90° , 90° - 135° , 135° - 180° , 180° - 225° , 225° - 270° , 270° - 315° , 315° - 360°)로 분류되며, 〈그림 13〉의 가로축은 유의파고를 세로축은 평균파주



〈그림 12〉 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 박스로 나누어진 전지구 해상(붉은색 박스는 사용자가 선택한 박스를 의미)(출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)

Dir: 45.- 90																	
Total of: 602026 observations, 38%																	
Tm	W Hs	0 - 1.	1 - 2.	2 - 3.	3 - 4.	4 - 5.	5 - 6.	6 - 7.	7 - 8.	8 - 9.	9 - 10.	10 - 11.	11 - 12.	12 - 13.	13 - 14.	14 - 33.	sum
0 - 3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3 - 4.	1.	3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.
4 - 5.	24.	818.	128.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	970.
5 - 6.	155.	1874.	1360.	159.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3547.
6 - 7.	262.	2391.	652.	317.	68.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3692.
7 - 8.	69.	963.	281.	54.	36.	21.	3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1426.
8 - 9.	4.	158.	102.	22.	5.	3.	4.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	301.
9 - 10.	0.	22.	20.	8.	2.	1.	0.	1.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	54.
10 - 11.	0.	2.	2.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	6.
11 - 12.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
12 - 13.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
13 - 33.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
sum	514.	6230.	2545.	561.	112.	26.	8.	3.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	10000.
Dir: 90.-135.																	
Total of: 372199 observations, 24%																	
Tm	W Hs	0 - 1.	1 - 2.	2 - 3.	3 - 4.	4 - 5.	5 - 6.	6 - 7.	7 - 8.	8 - 9.	9 - 10.	10 - 11.	11 - 12.	12 - 13.	13 - 14.	14 - 33.	sum
0 - 3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3 - 4.	1.	5.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	6.
4 - 5.	90.	1119.	82.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1291.
5 - 6.	610.	2343.	496.	57.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3421.
6 - 7.	1231.	2385.	157.	112.	50.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3917.
7 - 8.	230.	709.	71.	27.	24.	27.	5.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1092.
8 - 9.	14.	113.	28.	11.	4.	4.	9.	4.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	186.
9 - 10.	0.	5.	5.	6.	1.	1.	1.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	22.
10 - 11.	0.	1.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	5.
11 - 12.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
12 - 13.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
13 - 33.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
sum	2176.	6665.	909.	214.	79.	34.	15.	6.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	10000.

〈그림 13〉 파향별 유의파고와 평균파주기 빈도수 테이블(45° - 90° 및 90° - 135° 의 두 파향에 대해서만 표시됨)(출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)

기를 세분화한 것이며, 45° - 90° , 90° - 135° 두 파향에 대해서만 표시한 것이다. 빈도수 테이블의 의미는 다음과 같이 해석될 수 있다.

- 선택된 박스 영역내에서 북동동에서 남서서로 진행하는 45° - 90° 의 해파는 전체 자료의 38%를 차지한다.
- 선택된 박스 영역내에서 남동동에서 북서서로 진행하는 90° - 135° 의 해파는 전체 자료의 24%를 차지한다.
- 북동동에서 남서서로 진행하는 45° - 90° 의 해파에서 유의파고 5~6m, 평균파주기 7~8초는 21 건수가 있었다.
- 남동동에서 북서서로 진행하는 90° - 135° 의 해파에서 유의파고 6~7m, 평균파주기 8~9초는 9 건수가 있었다.

선택된 해역이 태풍이 지나가는 길목임을 감안하면 그 빈도수가 비교적 낮은 편임을 알 수 있다. 이 점은 ERA-40 재분석 자료의 해상도(1.5° x 1.5°)가 태풍의 강도를 나타내기에는 부족함에 기인한다. 이러한 열대저기압(태풍, 허리케인, 싸이클론)에 대한 재분석 자료의 취약점을 감안하여 사용한다면 특정 해역의 파랑기후 분포에 대한 레퍼런스 자료로 활용하게 쓰일 수 있다고 판단된다.

4. 파랑극치 (Extreme return value) 산정

3.2절에서 소개된 ERA-40 재분석 자료를 이용한 파랑기후 자료를 토대로 유의파고 및 해상풍의 극치(Extreme return value) 산정 방법과 ‘KNMI/ERA-40 Wave Atlas’에서 제공되는 100년-파랑극치(100년에 한번 일어날 수 있는 크기) 자료에 대하여

살펴보자 한다. 극치산정 이론은 통계학 분야에서 개발되어 수문학 및 보험분야 등 극치값 예상이 필요한 분야에 응용되어 왔다. Caires and Sterl (2005)은 극치산정의 다수 모형 가운데 임계치초과 모형 POT (Peaks-Over-Threshold)(Coles, 2001)를 ERA-40 재분석 자료에 적용하여 추정된 100년-파랑 극치 자료를 계산하여 ‘KNMI/ERA-40 Wave Atlas’에서 도감 형태로 활용할 수 있도록 하였다.

ERA-40 재분석 자료에 의한 파랑 극치값은 NOAA/NDBC (National Data Buoy Center)⁵⁾의 1978년 이후 부이 관측자료에 의한 파랑 극치값과 비교할 경우 ERA-40 재분석 자료가 부이자료에 비해 과소 모의되는 경향을 보이고 있다. Caires and Sterl (2005)은 ERA-40 재분석 100년-유의파고 극치와 부이 100년-유의파고 극치 사이에는 식(1)과 같은 관계가 있음을 보였고, 이 선형식을 이용하여 ERA-40 재분석 100년-유의파고 극치를 보정하였다.

$$X_{100}^{buoy} = 0.52 + 1.30 X_{100}^{ERA-40} \quad (1)$$

〈그림 14〉는 식(1)과 같은 관계식으로 보정된 ERA-40 재분석 100년-유의파고 극치와 해상풍 극치의 전지구 해상 분포를 나타낸다. 폭풍트랙에 해당되는 북태평양, 북대서양, 남극환류 해역에서 높은 극치가 나타난다. 가장 큰 극치값이 나타나는 해역은 유럽과 그린랜드 사이의 북대서양이고 24.5~27.5m 유의파고가 100년에 한번 발생할 수 있음을 의미한다. ERA-40 유의파고 평균이 가장 높게 나타나는 남극환류 해역(〈그림 8〉)보다 북대서양에서 더 높은 극치가 발생할 수 있다는 것은 북대서양의 유의파고 변동폭이 남극환류 해역보다 매우 크다는 것에 기인한다. 남반구 폭풍트랙 지역은 항상 높은 파고가 존재하지만 지구상에서 발생할 수 있는 가

5) <http://www.ndbc.noaa.gov/BUOY/buoy.html>

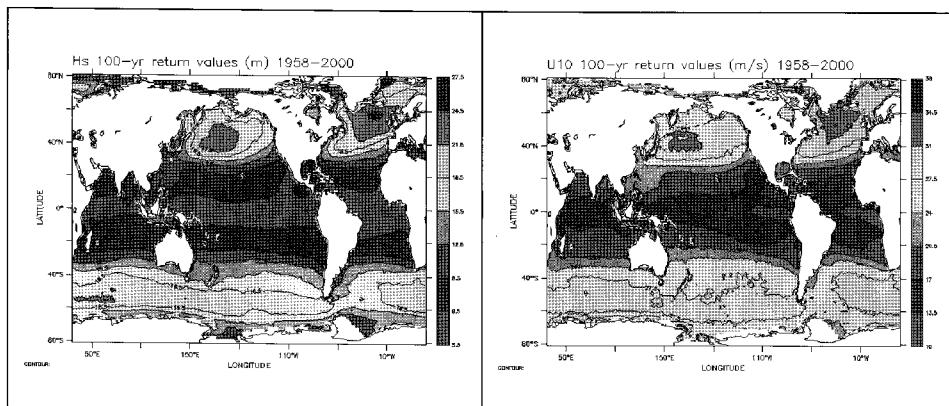
파랑 재분석 자료를 활용한 전세계 해양 파랑기후 및 극치(Extreme Return Value) 산정

장 높은 파고는 오히려 북대서양 폭풍트랙 해역에서 발생할 수 있다.

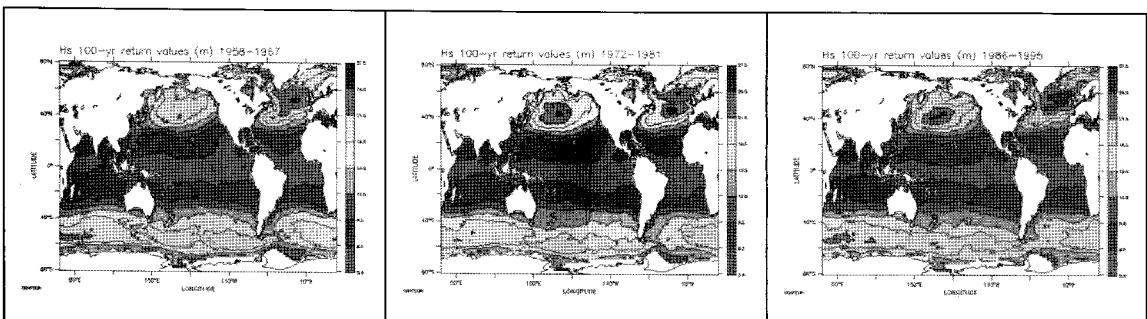
〈그림 15〉은 ERA-40 재분석 자료를 10년 단위 (1958~1967, 1972-1981, 1986-1995)로 분리하여 산정된 100년-유의파고 극치 분포이다. 북태평양 폭풍트랙 해역의 극치는 1972-1981년 구간자료에서 1958~1967년 구간자료보다 크게 증가하였고, 북대서양 폭풍트랙 해역의 극치는 1986-1995년 구간자료에서 1972-1981년 구간자료보다 크게 증가하는 양상을 보인다. 이러한 10년 단위 자료에서 나타나는 극치값의 변동성은 북반구 폭풍트랙 강도 및 빈

도수의 변동성이 반영된 결과로 보인다. 북반구 폭풍트랙의 장기 변동성은 북대서양 진동(NAO: North Atlantic Oscillation)의 변화로 설명되고 있다 (Lozano and Swail, 2002). 북대서양 폭풍트랙 극치 증가 경향은 폭풍 빈도수의 증가보다는 폭풍 강도의 증가에 기인하고, 북태평양 폭풍트랙 극치 증가 경향은 폭풍 강도보다는 폭풍 빈도수의 증가에 기인하는 것으로 분석되고 있다.

이러한 경향은 유의파고 및 해상풍 전지구 평균의 연별 변화 경향에도 나타난다(〈그림 16〉). 두드러지는 점은 유의파고와 해상풍 모두에서 1975년에



〈그림 14〉 ERA-40 재분석 결과: 100년-유의파고 극치(왼쪽)와 해상풍 극치(오른쪽)의 전지구 해상 분포(오른쪽) (출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)



〈그림 15〉 ERA-40 재분석 결과: 10년 단위로 산정한 100년-유의파고의 극치 분포(1958~1967: 왼쪽, 1972-1981: 가운데, 1986-1995: 오른쪽) (출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)

나타난 최저치를 중심으로 이전 시기와 이후 시기의 크기 변동이다. ERA-40 재분석 자료동화 시스템에 사용된 관측자료에 특이한 변화가 없는 것으로 볼 때, 기후 레짐이동(Regime shift)이 반영된 것이 아닌가 생각되고 있다. 기상학에서도 이러한 레짐이동이 회자되는 상황이다. 다만 최근 레짐에 연별 최저치가 이전 레짐보다 높아진 이유는 1979년부터 자료동화 시스템에 사용된 위성관측 자료의 영향으로 해석되고 있다. 따라서 대기 및 해양 기후의 장기 변동성에 대한 이해는 해양구조물 디자인에 반영되어야 할 중요한 고려 조건이 될 것이다.

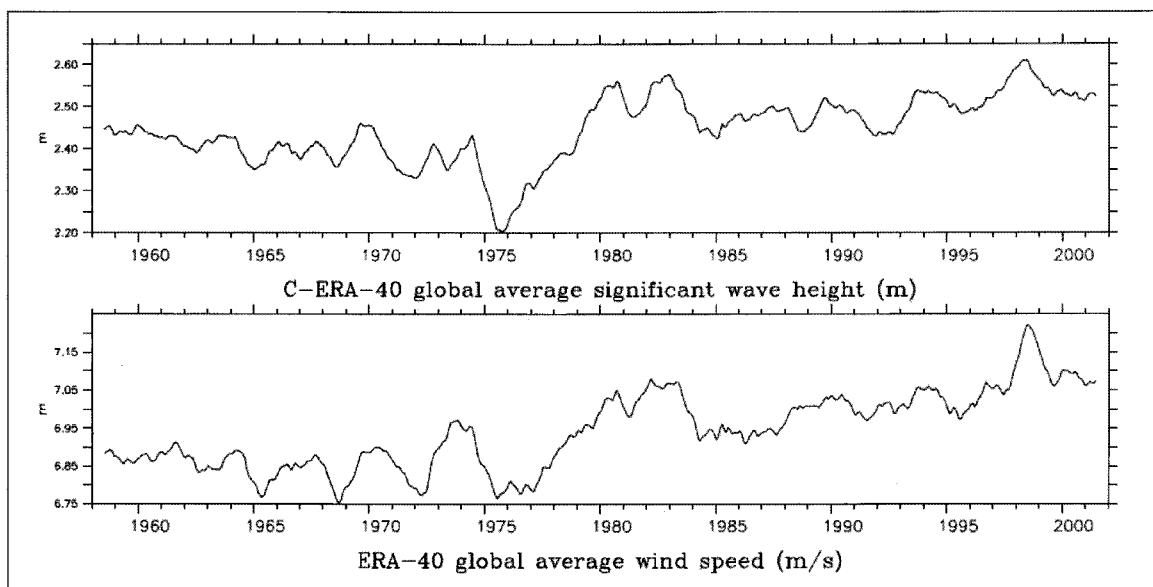
5. 맺음말

해안·해양공학회의 비주류(기상전공) 회원인 저자의 입장에서 학술대회 및 논문에서 논의되는 해

양구조물과 풍파의 상호작용, 풍파극치에 따른 내구성 설계 등을 볼 때, 연관된 기상학 정보의 공유가 필요함을 항상 느껴왔다. 본 글은 전지구 해양의 해상풍 및 파랑 기후산출과 극치산정에 관련된 자료동화 기술, 재분석 과정, 기후 및 극치 자료 내용 및 출처에 대해 나름의 지식으로 정리해 본 것이다. 약 50년 기간의 기상 재분석 자료는 여러 면에서 중요한 의미를 갖는다.

기상학에서 발전되어 온 자료동화 및 모델링 기법이 집약되어 있으며, 일관된 틀에서 만들어진 기후자료는 높은 신뢰도를 갖는다. 본문에서 집중적으로 다루어진 ERA-40 재분석 자료는 이러한 의미에서 가장 앞서가는 것으로 판단된다. 그러나 이 자료가 해양공학에서 접근하는 모든 분야에 최적으로 적용될 수 있는 것은 아니다. 자료의 활용에 앞서 몇 가지 짚어보아야 할 점을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 재분석 자료의 해상도이다. 모델의 1.5°



〈그림 16〉 ERA-40 재분석 결과: 유의파고(위) 및 해상풍(아래)의 전지구 평균의 연별 변화(출처: 'KNMI/ERA-40 Wave Atlas' 웹페이지)

파랑 재분석 자료를 활용한 전세계 해양 파랑기후 및 극치(Extreme Return Value) 산정

x1.5° 해상도에서는 열대저기압(태풍, 허리케인)의 강도를 충분히 재현하지 못한다. 열대저기압이 빈번하게 영향을 미치는 영역에서의 자료 활용에는 이 점이 충분히 고려되어야 한다.

둘째, 재분석 유의과고 산출에 천해효과는 포함되지 않았다는 점이다. 해양구조물이 주로 연안에 위치하는 점을 감안하면 자료 적용에 주의가 요구된다. ERA-40 재분석 자료를 만든 ECMWF에서는 보다 높은 해상도의 재분석 자료 산출을 계획하고 있으나, 막대한 전산자원이 요구되는 전지구 해역에 대한 고해상도($1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 미만) 재분석 자료의 생산은 가까운 시기에 이루어질 것 같지는 않다.

끝으로, 기상청에서는 3세대 파랑모델로 구성된 전지구 및 북동아시아 영역 파랑 수치예보 시스템의 운영을 시작한지 10년이 되어간다. 그 사이 슈퍼컴퓨팅 자원의 확대 등으로 적용모델 및 해상도 등에서 많은 개선을 가져왔지만 파랑 자료동화 분야와 재분석 분야는 기술적 측면에서 여전히 많은 노력이 절실히 요구되는 상황이다.

참고문헌

- Caires, S., A. Sterl, J.-R. Bidlot, N. Graham and V. Swail (2004). Intercomparison of different wind wave reanalyses, *J. Climate*, 17, 1893-1913.
- Caires, S. and A. Sterl (2005). 100-year return value estimates for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data, *J. Climate*, 18, 1032-1048.
- Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer-Verlag, 226.
- Cox, A. T. and V. R. Swail (2001). A global wave

hindcast over the period 1958-1997: Validation and climate assessment, *J. Geophys. Res.*, 106, 2313-2329.

Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Nomura, A. Hernandez and E. Serrano (1997). ERA description, ECMWF Re-analysis Final Rep. Series 1, 71.

Kalnay, E., and Coauthors (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.

Kistler, R., and Coauthors (2001). The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 247-267.

Lozano, I., and V. Swail (2002). The link between wave height variability in the North Atlantic and the storm track activity in the last four decades, *Atmos. Ocean*, 40, 377-388.

Tolman, B., Balasubramanyan, L. D. Burroughs, D. V. Chalikov, Y. Y. Chao, H. S. Chen and V. M. Gerald (2002). Development and implementation of wind generated ocean surface models at NCEP, *Wea. Forecasting*, 17, 311-333.

Uppala, S. (2001). ECMWF reanalysis, 1957-2001, Proc. ECMWF Workshop on Reanalysis, Reading, United Kingdom, ECMWF, ERA-40 Project Report Series, 1-10.

WAMDI Group (1988). The WAM model - A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.

Woodruff, S. D., H. F. Diaz, J. D. Elms and S. J. Worley (1998). COADS Release 2 data and metadata enhancements for improvements of

학술기사

marine surface flux fields, Phys. Chem. Earth, 23, 517-527.

저자 약력

- 1984-1989, 서울대학교 대기과학과 (기상학 학사)
- 1989-1992, Texas A&M 대학교 기상학과 (기상학 석사)
- 1994-1997, 한국과학기술연구원(KIST)/ 시스템공학연구소(SERI) 연구원
- 1997-현재, 기상청/국립기상연구소 기상 연구사
- 2001-2003, Scripps Institute of Oceanography (La Jolla) 방문연구원