Journal of Environmental Science International
23(12); 1999~2014; Debember 2014
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2014.23.12.1999

ORIGINAL ARTICLE

2007년 3월 31일 서해에서 발생한 기상해일에 대한 기상학적 분석

김현수 · 김유근* · 우승범[1] · 김명석[1]
부산대학교 지구환경시스템학부, [1]인하대학교 해양과학과

Atmospheric Analysis on the Meteo-tsunami Case Occurred on 31 March 2007 at the Yellow Sea of South Korea

Hyunsu Kim, Yoo-Keun Kim*, Seung-Buhm Woo[1], Myung-Seok Kim[1]
Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
[1]Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract

A meteo-tsunami occurred along the coastline of South Korea on 31 March 2007, with an estimated maximum amplitude of 240 cm in Yeonggwang (YG). In this study, we investigated the synoptic weather systems around the Yellow sea including the Bohai Bay and Shandong Peninsula using a weather research and forecast model and weather charts of the surface pressure level, upper pressure level and auxiliary analysis. We found that 4-lows passed through the Yellow sea from the Shandung Peninsula to Korea during 5 days. Moreover, the passage of the cold front and the locally heavy rain with a sudden pressure change may make the resonance response in the near-shore and ocean with a regular time-lag. The sea-level pressure disturbance and absolute vorticity in 500 hPa projected over the Yellow sea was propagated with a similar velocity to the coastline of South Korea at the time that meteo-tsunami occurred.

Key words : Meteo-tsunami, Synoptic weather analysis, Pressure jump, Atmosphere-ocean interaction, Yellow sea

1. 서 론

2007년 3월 31일 새벽에 발생한 기상해일로 군산, 영광을 비롯한 한반도 서해안에서 7명이 사상하였으며 주택, 차량 및 선박의 피해가 있었다. 기상해일은 2007년 3월 31일 사례 전후에도 빈번하게 발생하였으며 과거부터 일회성 이벤트가 아닌 지속적으로 발생한 현상일 것으로 예상되지만 기상해일이 발생한 시각이 야간이거나 인적이 드문 장소에서 발생하여 눈에 띄는 인적 · 물적 피해가 보고 되지 않거나 피해가 발생하였더라도 기상해일에 대한 인식 부족으로 인해 일상적으로 일어나는 해양현상 중 하나로 인지하여 보고가 되지 않는 등의 이유로 이슈화되지 못하였다. 하지만 2007년 3월 31일 사례를 계기로 국내에서는 기상해일이 인명과 재산에 큰 피해를 줄 수 있는 재난현상 중 하나라는 인식이 생기게 되었으며 서해 기상해일의 발생원인을 알기 위한 다각적인 연구들이 수행되었다 (Eom 등, 2012; Choi 와 Lee, 2009; Choi 등, 2008).

Received 29 August, 2014; **Revised** 5 November, 2014;
Accepted 10 November, 2014
***Corresponding author** : Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.kci.go.kr

기상해일은 스페인 동부 Balearic 해, 크로아티아 서부 Adriatic 해, 뉴질랜드 동부 연안을 비롯해 가까운 일본 나가사키 만 등에서 (Renault 등, 2011; Tanaka, 2010; Goring, 2009; Monserrat 등, 2006; Vilibic, 2005) 전 세계적으로 보고되고 있는 현상으로 발생하는 지역에 따라 'rissaga' (Monserrat 등, 1992; Tintore 등, 1988; Ramis와 Jansa, 1983; Fontsere, 1934), 'marubbio' (Colucci 와 Michelato, 1976), 'abiki' (Akamatsu, 1982; Hibiya 와 Kajiura, 1982; Honda 등, 1908) 등으로 다양하게 불리고 있으며 지진에 의해 발생하는 쓰나미처럼 기상학적인 요인에 의해 발생한다고 하여 'meteo-tsunami' 혹은 'meteorological tsunami' 라고도 불린다 (Monserrat 등, 2006). 이들 연구에 따르면 기상해일은 외해에서 발생한 해양장파가 연안으로 접근하면서 수심의 변동으로 인해 연안육역에서 해수가 범람하여 인명과 재산피해를 발생시키며 외해에서 발생한 해양장파는 대기의 요란 (disturbance)에 의해 영향을 받아 발생하는 것으로 보고하고 있다.

국내에서는 본 연구의 관심사례일인 2007년 3월 기상해일 사례일에 대한 발생원인에 관한 많은 연구가 있었는데 대표적으로 Choi 등 (2008)은 매분 해수면, 기압, 바람 분석 자료와 1차원 수치해양모델을 사용하여 서해안에 발생한 해양장파의 형성과 성장과정을 분석하였다. 그 결과, 백령도부터 영광에 이르는 남동방향으로 기압점프 (pressure jump)가 전파되었으며 평균 기압점프의 크기는 4.2 hPa, 이동속도는 24 m/s였으며 해외사례처럼 프라우드만 (Proudman) 공명 (Proudman, 1929)에 의해 기상해일이 발생하였다고 보고하였다. 또한 Eom 등 (2012)은 서해안 조위 관측소의 조위 자료와 기상청의 AWS (automatic weather system)를 활용하여 시간과 주기에 대한 에너지 성분으로 변환하는 웨이블렛 (wavelet) 분석을 하였다. 이를 통해 기상해일의 도달시간과 진행방향을 도출하고 기압점프의 크기와 주기 및 진행방향을 조사하였고 3시간 간격 일기도의 기압분포에 근거해 서해상에서 기압점프의 이동패턴을 유추하였으며 2차원 수치모형으로 가상실험을 함으로써 서해 기상해일 발생의 타당성을 검증하였다. 하지만 이들 연구는 국외 사례연구에서처럼 해양장파를 발생시키는 원인이 대기의 요란임을 가정하였으나 관측자료 수집 등의 한계로 인해 실제 대기의 요란에 의해 나타나는 기압점프가 어디서 발생하여 어떤 방향으로 전파되었는지를 분석하는데 한반도 육상 기상관측자료만을 활용한 단점이 있다. 기압점프의 발생과 이동에 대한 단순 가정을 통해 기상해일을 수치해양모형으로만 재현하는 것에 중점을 두어 기상해일 발생의 주 원인으로 지목되고 있는 기압점프를 기상모형으로 재현하는 것에는 다소 미흡하였다.

따라서 본 연구는 기상해일의 주원인의 하나인 기압점프를 재현하기 위해 2007년 3월 31일 기상해일 발생 사례에 대해 기존 연구에 활용되었던 지상일기도를 비롯하여 대기 연직구조 분석을 위한 기압고도별 (925~300 hPa) 상층일기도, 기압점프를 동반하는 기상현상 분석을 위한 레이더 영상 및 위성영상 등 다양한 기상자료를 활용하여 종관기상분석을 실시하였다. 또한 해당 사례일에 대한 기상모델링을 수행함으로써 기상해일의 발생원인으로 지목되고 있는 기압점프에 의한 대기요란이 어떠한 대기구조 및 상태에서 발생하였는지를 종합적으로 분석하여 기존 연구와 달리 보다 기상학적인 관점에서 기상해일의 근본적인 발생원인을 분석하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 해수면 관측자료 분석

서해 기상해일의 주요 발생원인으로 알려진 기압점프가 어떠한 종관기상학적 요인에 의해 발생하는지를 분석하기에 앞서 기상해일이 어느 시점에 발생하였는지 그리고 어떠한 강도를 보였는지를 아는 것은 필수적인 과정이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기본적으로 파워스펙트럼 분석 (power spectrum analysis) 방법을 활용하였다. 하지만 서해는 조석이 지배적인 환경이므로 기상해일을 분석하기 위해서는 조석성분을 제거해야 하며 최초 기상해일 추출을 위해서 1분 간격 조위자료에서 장주기 성분을 제거할 필요가 있다. 이는 파워스펙트럼 분석 시 저주파수 성분이 섞이면서 실제 파워스펙트럼보다 과장된 결과를 가져올 수 있기 때문이다. 기상해일과 관련한 선행연구에서 Eom 등 (2012)은 서해 이상파랑 (기상해일)이 60분 이내의 주기구간에서 나타나고 있다고 밝히고 있으므로 filter를 이용하여 60분 이내의 주기성분만을 남길 필요가 있다. 일반적인 filter는 자료의 양 끝이 잘린다는 단점을 가지고 있는데 이를 보완하기 위하여, 본 연구에서는 자료의 양 끝이 잘리지 않는 웨이블렛

www.kci.go.kr

재구성 기법 (wavelet reconstruction; WR)을 이용하여 60분 이하의 주기를 가진 파로만 재구성하였다. 이 때 기저함수로는 Morlet wavelet을 사용하는데, 이 함수는 주기에 해당하는 웨이블렛 크기 (wavelet scale)와 주파수 간의 비가 거의 1:1이 된다는 장점을 가진다. 이처럼 WR 기법으로 시계열을 재구성시킴으로써 1분 간격 조위자료에서 기상해일 주기를 가진 성분들만 남기고 장주기성분과 조석성분을 제거한다.

이 때, 사용한 시계열 재구성 방법은 Torrence와 Compo (1998)의 방법으로 원시자료에서 장주기성분이 제외된 단주기성분을 추출하였다.

$$x_n = \frac{\delta_j \delta_t^{1/2}}{C_\delta \Psi_0(0)} \Sigma_{j=0}^{J} \frac{R\{W_n(s_j)\}}{s_j^{(1/2)}} \quad (1)$$

여기서, δ_j는 분해간격, δ_t는 시간간격, C_δ는 재구성 계수로서 Morlet을 기저함수로 적용할 경우 0.776이며, $\Psi_0(0)$은 $\pi^{1/4}$, s_j는 스케일 함수($s_0 2^{j\delta j}$)이며, $R\{W_n(s_j)\}$은 웨이블렛 변환의 실수부를 나타낸다. 이처럼 1차적으로 일반적인 조위관측소 자료에서 기상해일 성분을 추출하였다면 정확한 기상해일의 도달시각을 분석하는 것은 종관기상분석과의 상호비교를 위해 중요한 과정이라 할 수 있다. 따라서 기상해일의 도달시각을 분석하기 위해 기상해일 발생일에서 기상해일 주기성분의 스케일 평균 웨이블렛 파워 (scale-averaged wavelet power; SAWP)가 최대로 발생하는 시각을 해당정점에 기상해일이 최초 도달한 시각으로 산정하였다. 재구성된 기상해일 시계열만으로는 기상해일이 언제 도달하였는지 정량적으로 규정하기 쉽지 않다. 따라서 재구성된 기상해일 성분 시계열을 다시 웨이블렛 변환 (wavelet transform) 시켜 시간에 따라, 주기에 따라 기상해일 파워스펙트럼이 어떻게 분포하는지 분석할 필요가 있다. 이 때, 기상해일 도달시각은 단순히 특정주기의 웨이블렛 스케일러그램 (wavelet scaleogram)의 최대점으로 정해지지 않는다 (Lee 등, 2010). 실제 사고 발생기록이 존재하는 2007년 3월 31일 법성 부근 영광 조위 관측소를 분석한 결과, 실제 기상해일이 도달한 시각에 전 주기 구간에서 해수면이 크게 진동하는 양상을 보이고 있었다. 따라서 기상해일이 도달한 시각에는 기상해일 전 주기구간의 SAWP가 최대로 발생함을 추론할 수 있었다 (Kim, 2014). 기상해일 도달시각을 산정하기 위해서 사용된 SAWP는 특정 주기구간의 평균 분산으로, 서로 다른 시계열이나 서로 다른 주파수 간의 변동을 비교 분석 시 사용할 수 있다 (Torrence 와 Compo, 1998).

2.2. 종관기상분석

분석된 기상해일 발생일과 발생시점을 기준으로 대기가 시·공간적으로 어떻게 변화 되었는지를 알기 위해 기상청의 3시간 간격의 지상일기도, 12시간 간격의 상층일기도 (925, 850, 700, 500, 300 hPa)와 보조일기도 (850 hPa 수분속, 850hPa 수렴과 등풍속선, 700 hPa 상승속도, 300 hPa 발산과 등풍속선), 1시간 간격의 국지일기도 등을 활용하였다. 일반적으로 종관기상분석을 위해 활용된 일기도 자료는 지상 및 상층 관측자료를 기반으로 하여 도출된 것으로 원하는 특정 시간 및 원하는 시간간격의 자료를 얻기 힘들다. 따라서 비교적 짧은 시간 동안 특정 구역에서 발생하고 전파되는 기압점프를 종관일기도 상에서 찾아내는 것은 불가능에 가깝다. 하지만 종관일기도는 특정 기상현상이 발생하기까지의 근원적인 대기구조적 흐름 및 패턴을 파악하는데 있어서는 충분한 시간간격을 갖고 있으며 실제 관측자료를 기반으로 하여 도출되므로 일기예보 등에 활용되고 있는 것에서 알 수 있듯이 대기구조를 정확하게 파악하는데 있어서 기초적이고 필수적인 분석방법이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 종관기상분석의 장·단점을 잘 파악하고 기압점프가 발생하기까지 전반적인 대기구조의 변화경향과 기상패턴을 분석하고자 하였다. 이를 위해 기상해일 발생 5일전부터 발생일까지 종관기상분석을 실시하였으며 종관기상분석을 통해 알게 된 기상해일 발생 당시의 대기 공간구조와 기압점프의 통과 유무에 따른 해양기상요소의 변화를 분석하기 위해 서해 연안에 위치한 주요 기상청 AWS 지점 (군산, 보령, 영광, 위도)과 국립해양조사원의 조위관측소 지점 (안흥, 대흑산도, 위도, 보령, 군산, 영광)의 수평 관측자료를 활용하였다 (Fig. 1).

2.3. 기상모델

종관기상분석을 통해 전반적인 대기구조의 변화경향과 기상패턴을 분석함으로써 기압점프 발생의 광의적 해

www.kci.go.kr

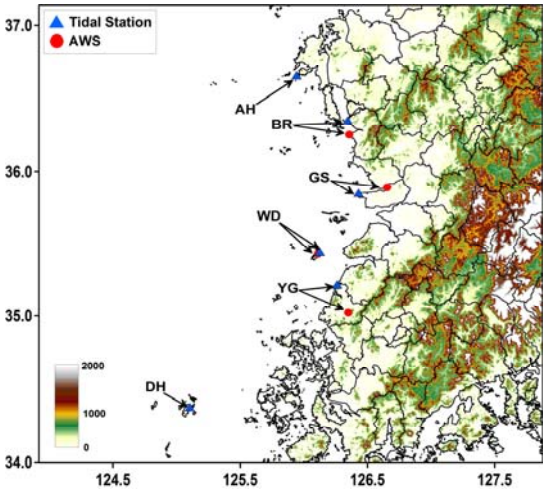


Fig. 1. Map of the yellow sea coastline and the surrounding terrain. Locations of the tidal stations (solid blue triangle) and automatic weather systems (solid red circle) are marked from north to south; Anheung (AH), Boryeong (BR), Gunsan (GS), Wido (WD), Yeonggwang (YG), DH (Daeheuksando).

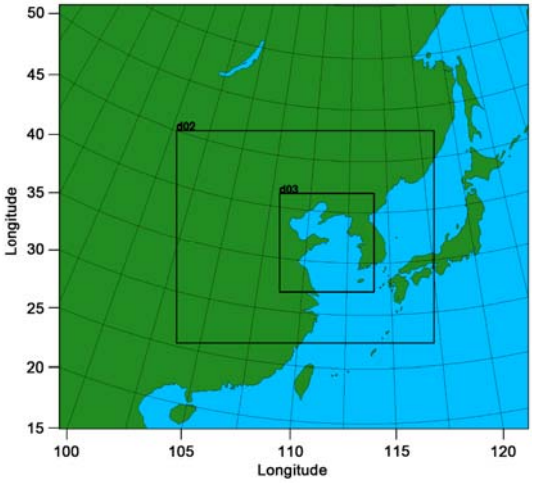


Fig. 2. Map showing 30-, 10- and 3.3 km grid nests (domains 1-3) used for WRF modeling.

Table 1. details of the grids and the physics options used in the WRF model

Domain	D01	D02	D03
Horizontal grid	165×150	271×226	289×307
Resolution (km)	30	10	3.33
Vertical grid	28 Layers		
Microphysics	WSM3	Milbrandt-Yau 2-moment	
Cumulus	Kain-Fritsch		
Boundary layer	YSU		
Land surface layer	Noah-LSM		
Short-wave radiation	RRTMG		
Long-wave radiation	RRTMG		

석을 하고 이를 바탕으로 실제 기상모델링에서 기압점프를 재현하기 위해 본 연구에서는 일반적으로 널리 활용되고 있는 WRF (weather research and forecasting) 모델을 사용하였고 Fig. 2와 같이 연구대상영역을 설정하였다. WRF는 완전 비압축성 비정수계 방정식을 사용하고 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며 연직격자는 높이와 지형에 근거하여 Eulerian 질량 좌표계를 사용한다 (ARW, 2008). 모델링 수행을 위한 도메인 정보와 물리식은 Table 1에 제시하였으며, 기상장은 1° x 1°를 갖는 NCEP/NCAR의 FNL (global final analysis) 6시간 간격 재분석 자료와 0.5° x 0.5°의 공간해상도와 1 day의 시간간격을 갖는 NOAA의 Real time Global SST (sea surface temperature) 재분석 자료를 활용하였다. 또한 지표 또는 고층에서 실측된 기상자료를 이용해 OBSGRID (Objective analysis) 자료동화를 수행하여 불규칙성과 오차를 가질 수 있는 기상장의 질을 향상시킴으로써 기상모델링의 예측결과를 향상시키고자 하였다.

www.kci.go.kr

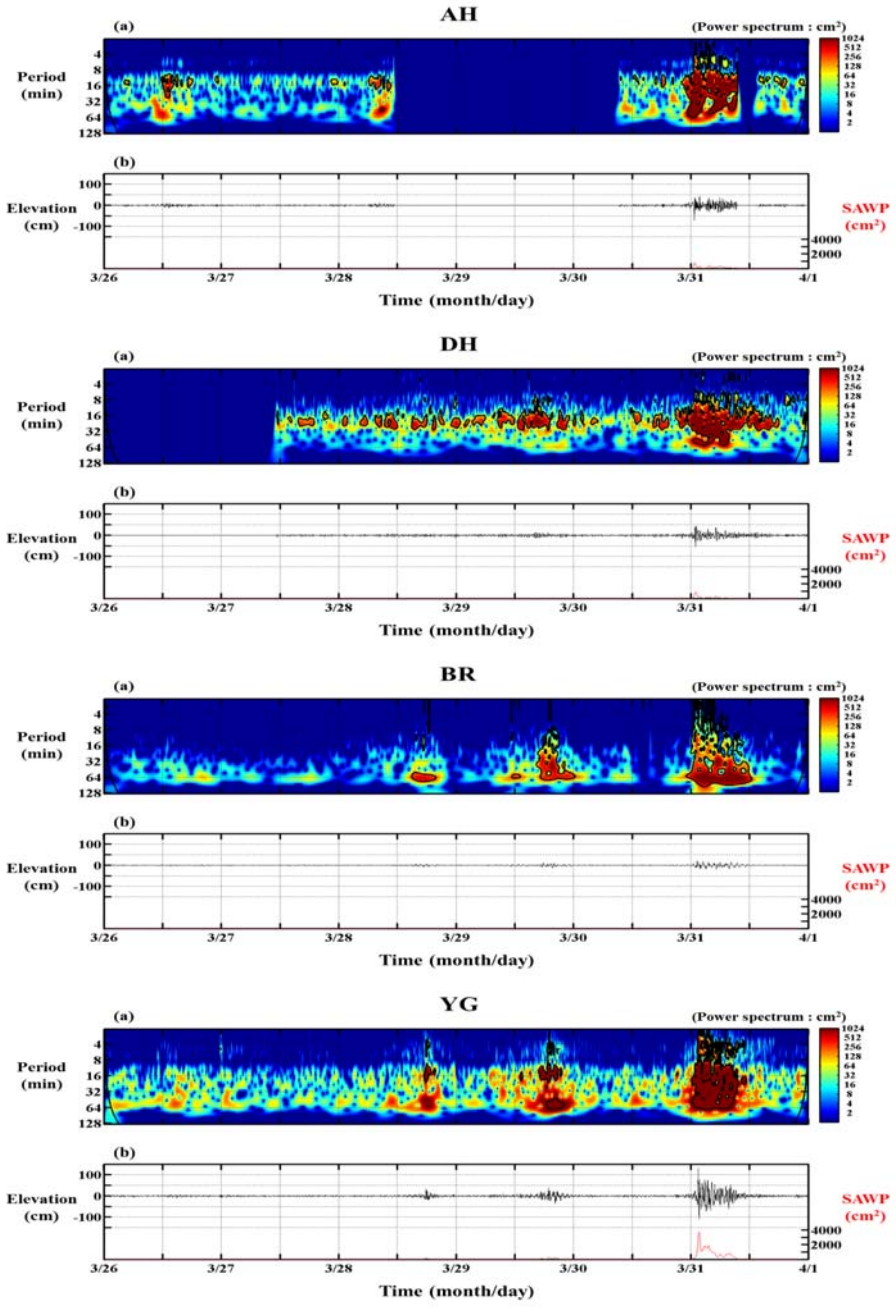


Fig. 3. Sea state on March 31, 2007 at 4 tidal stations. ((a) wavelet scaleogram (contour) of the abnormal waves from reconstructed tide level time series (≤ 60 min); The left axis is Fourier period (in min). The color bar is power spectrum ranging from 2 cm2 to 1,024 cm2. The thick contour encloses the regions of greater than 99% confidence level for power spectrum of the abnormal waves during 6 days. The parabolic line indicates the "cone of influence", where edge effects become important. (b) Reconstructed tide level time series (top black line in the second subplot) and scale-averaged wavelet power of the abnormal waves (bottom red line in the second subplot)).

www.kci.go.kr

3. 기상해일 및 일기도 분석

3.1. 기상해일 도달시각 분석

2007년 3월 31일 서해 기상해일은 안흥, 대흑산도, 위도, 보령, 군산, 영광, 장항의 순서로 도달하였다 (Table 2). 7개 조위관측소에서 발생한 기상해일의 도달시각 순서로 미루어, 2007년 3월 31일 기상해일은 서해 북서방향으로부터 남동의 방향으로 연안에 접근한 것으로 나타났다. 그리고 기상해일이 나타난 7개 조위관측소에서 기상해일이 발생하기 전 크게 2번의 해수면진동이 발생하였다. Fig. 3에서 나타나듯이, 3월 28일, 3월 29일은 3월 31일에 발생한 기상해일만큼 해수면진동이 크게 발생하지는 않았지만 유의구간 99%를 초과하는 파워를 가진 해수면진동이 발생하였음을 알 수 있다.

Table 2. Results of the abnormal waves' arrival time and scale-averaged wavelet power (SAWP) observed in tidal stations on 31 March, 2007

Tidal station	Abnormal waves	
	Arrival time (KST)	SAWP (cm^2)
AH	00:44	814
DH	00:56	914
WD	01:07	3,722
BR	01:11	69
GS	01:28	659
YG	01:40	3,732

서해 7개 조위관측소 중, 최초 기상해일은 북서쪽에 위치한 안흥 조위관측소에서 음의 진폭 (-70.3 cm)으로 발생하였다. 이후 대흑산도에서 12분 시간간격을 두고 양의 진폭 (42.5 cm)으로 기상해일이 전파하였다. 대흑산도는 기상해일이 도달하기 전부터 특정주기 구간 (16~32 min)에서 꾸준하게 진동하는 양상으로 나타나고 있다. 반면, 보령은 다른 조위관측소의 해수면 진동에 비해 상대적으로 작은 폭으로 진동하였다 (15.2~-14.2 cm). SAWP가 가장 크게 발생한 영광에서는 240 cm의 파고 (진폭: 131.8~-108.2 cm)가 발생하였는데, 파의 마루에서 골까지 8분의 시간차이 밖에 나지 않을 정도로 짧은 시간동안 상당히 높은 파고로 나타났다.

3.2. 지상일기도 분석

앞서 분석되었던 기상해일의 도달 시각을 기준으로 종관기상분석을 실시하였다. Fig. 4는 기상해일이 서해안에 도달하기 직전 5일동안 (3월 26일~3월 30일)의 일기도이며 저기압이 산둥반도 및 발해만을 포함한 서해를 통과했을 것으로 예상되는 시각과 가장 근접한 시점 (2007년 3월 26일 12 UTC, 28일 06 UTC, 29일 09 UTC, 30일 15 UTC)의 지상일기도이다. 통상적으로 우리나라는 봄철에 2~3일 주기로 고 · 저기압이 번갈아 한반도를 자주 통과하는 것으로 알려져 있다. 하지만 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 2007년 3월 31일 발생한 기상해일 사례에서는 발생 전 5일동안 산둥반도 및 발해만을 4차례에 걸쳐 저기압이 통과하면서 한반도 부근 대기의 이동흐름이 평년수준보다 빨랐음을 유추할 수 있다. 또한 많은 선행연구에서 기상해일의 주 원인 중 하나로 지목하고 있는 기압점프는 강하게 발달한 저기압의 한랭전선이나 스콜라인 (squall line)과 같은 기상현상이 있을 때 주로 발생하는 것으로 알려져 있는데 (Gomis 등, 1993; Fujita, 1955) 2007년 3월 31일 기상해일 사례의 경우, 모든 저기압의 중심이 산둥반도 부근의 해역을 통과하여 서해안으로 접근하는 공간적인 이동 특성을 보였으며 저기압 무리의 이동 (Fig. 4. (a)), 한랭전선의 동반 (Fig. 4(b), Fig. 4(c)), 강한 뇌우의 동반 (Fig. 4(d)) 등 좁은 구간에서 대기 연직흐름을 급변시키고 대기불안정을 증폭시킬 가능성이 높은 기상현상이 짧은 기간동안 연속적으로 발생하였다. 이처럼 지상일기도 분석을 통해 비교적 짧은 기간 동안에 한반도 부근의 기압계가 빠르게 이동하고 기압점프의 발생을 일으킬만한 기상 현상의 발생이 연속적으로 통과하게 되면 서해상 대기의 잠재적인 불안정을 증폭시키는 하나의 요인이 된다고 사료되며 이처럼 잠재적인 대기불안정이 최고조에 이르렀던 시점에 기압점프가 서해안을 통과할 경우 기상해일 발생으로 이어질 가능성이 있다.

3.3. 대기 연직구조 분석

지상일기도 분석에서 다소 관념적으로 논의되었던 서해상 대기의 잠재적인 불안정 증폭 가능성을 보다 구체적으로 분석하기 위해 기상해일이 발생한 시점 전후의 기압고도별 상층일기도 및 보조일기도를 활용하여 대기의 연직구조를 분석하였다. 상층일기도는 대체로 기압고도에 따라 기준고도가 다르게 나타나는데 본 연구에서는 850 hPa는 지상으로부터 1.5 km로 하층대기, 700 hPa

www.kci.go.kr

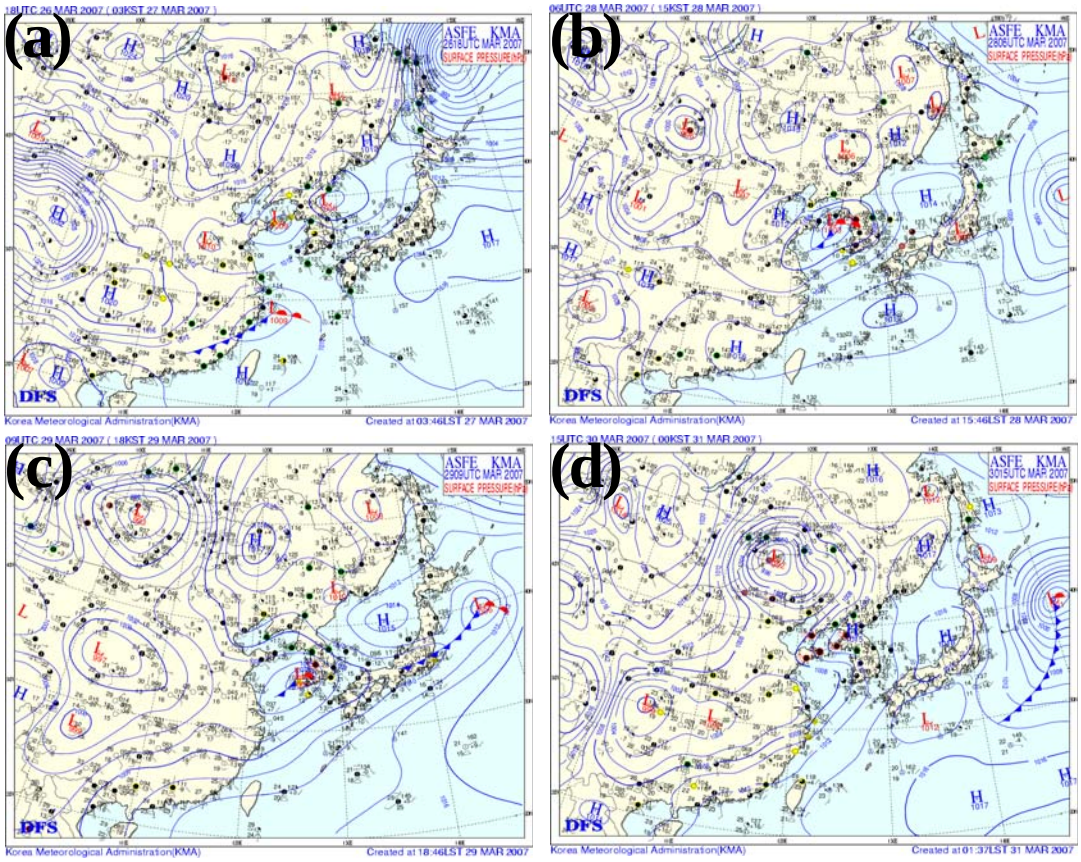


Fig. 4. Weather charts of the surface pressure level when the low passing through the Bohai-bay or Shandong peninsula: (a) 18UTC 26 March 2007, (b) 06UTC 28 March 2007, (c) 09UTC 29 March 2007 (d) 15UTC 30 march 2007, provided by the Korea meteorological agency (KMA).

는 3.0 km로 중층대기, 500과 300 hPa은 각각 5.5 km와 9 km이며 상층대기로 분류하였다.

3.3.1. 2007년 3월 29일 (D-2)

D-5부터 한반도로 지속 유입된 850 hPa의 온난·습윤기단은 중국 화남에서 발해만 부근까지 영향을 주고 이로 인해 발해만 인근으로 온도경도가 강화되고 있으며 산둥반도와 한반도 서해안 일부지역에서는 15 m/s 이상의 강풍이 나타나고 있다 (Fig. 5(a)). 700과 500 hPa에서는 발해만에 기압골이 위치해 있으며 기압골 후면으로 한랭기류가 남하하고 있다 (Fig. 5(b), Fig. 5(c)). 또한 300 hPa의 제트기류는 몽고내륙에서 남북으로 사행하였으나 산둥반도 부근에서 동서방향의 흐름으로 바뀌면서 한반도 상공의 기류는 빨라진다 (Fig. 5(d)). 상층으로 갈수록 저기압의 중심이 서쪽방향으로 기울어져 있던 전날의 대기 연직구조와 달리 D-2의 경우 지상 저기압 중심이 위치한 곳과 상층 저기압 중심이 위치한 곳이 연직적으로 일치하고 있으며 상층대기의 발산이 강하게 나타나고 있어 역학적으로 상·하층의 강한 연직흐름에 의한 연직불안정이 강화될 가능성이 높을 것으로 예상되며 보조일기도에서 이러한 연직구조는 잘 분석된다.

850 hPa 고도에서 산둥반도로 습윤공기가 수렴되고 있고 (Fig. 6(a), Fig. 6(b)), 700 hPa의 연직속도는 산둥반도에서 최대 60 hPa/hour로 D-3과 유사하게 강한 값을 보이고 있으며 (Fig. 6(c)) 또한 300 hPa 상층대기에서는 산둥반도 부근으로 최고 발산속도가 나타나고 있다 (Fig. 6(d)). D-2의 산둥반도 부근 대기구조는 하층대기

www.kci.go.kr

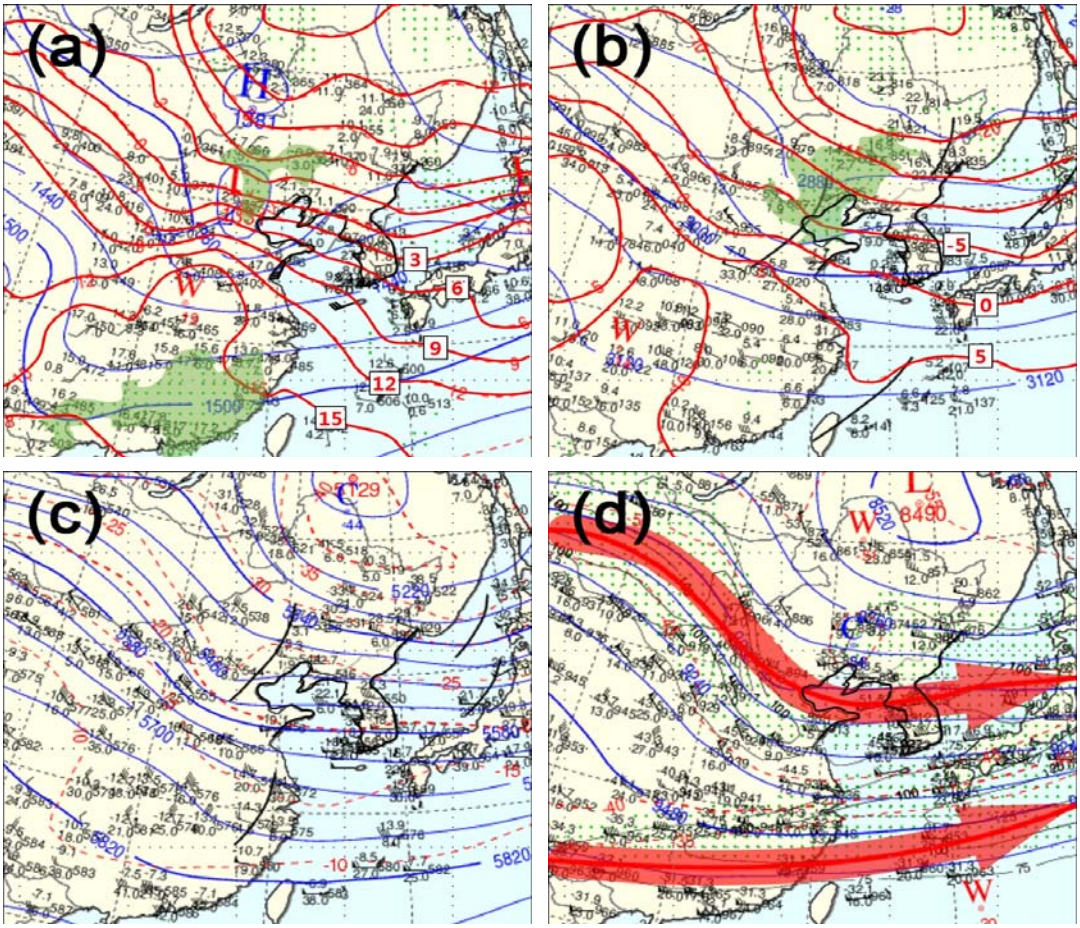


Fig. 5. Weather charts of the upper pressure level at 00UTC 29 March 2007, provided by the KMA: (a) 850 hPa, (b) 700hPa, (c) 500 hPa (d) 300 hPa. Blue solid lines indicate the parallel of altitude (gpm) in each pressure level. Red solid lines indicate the isotherm (℃). Green shaded area shows the humid air. Red arrow lines mean the center flow of the jet-stream.

에서 온난 습윤한 공기의 수렴이 강하게 나타나고 상층 대기는 발산기류가 강하게 나타나며 이로 인해 연직적으로 상승하는 기류가 강해져 대기 상 · 하층의 연직불안정이 크게 나타나고 있는 것으로 보인다.

이 같은 대기 상 · 하층의 연직불안정은 Fig. 7의 레이더 관측 영상에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. D-2 오전에 산둥반도 및 발해만에서 강한 연직불안정을 보였던 대기가 동진함에 따라 서해상을 통과한 저기압은 17시 30분경부터 서해 남부해상에서 띠 형태의 강한 강수에코를 동반하고 있는 것으로 관측되어 한랭전선이 발달하고 있음을 알 수 있다. 이 같은 한랭전선 상에서 강우강도는 시간당 100 mm 이상으로 관측되어 대기 상·하층의 불연속이 아주 강한 상태임을 유추할 수 있다. 이러한 불연속적인 대기구조는 세력을 유지하면서 차츰 동진하여 한 시간 뒤인 18시 30분경 영광에 도달하게 되는데 Fig. 3에서 분석된 파워스펙트럼의 강도와 일치하고 있어 기상해일은 한랭전선의 통과와 관련이 있음을 알 수 있으며 일반적으로 한랭전선이 통과한 직후에는 기압이 급상승한다는 이론에 의해 이 같은 아주 강한 국지성 호우의 통과 후 해상에서의 기압점프가 동반되었을 가능성이 높다.

www.kci.go.kr

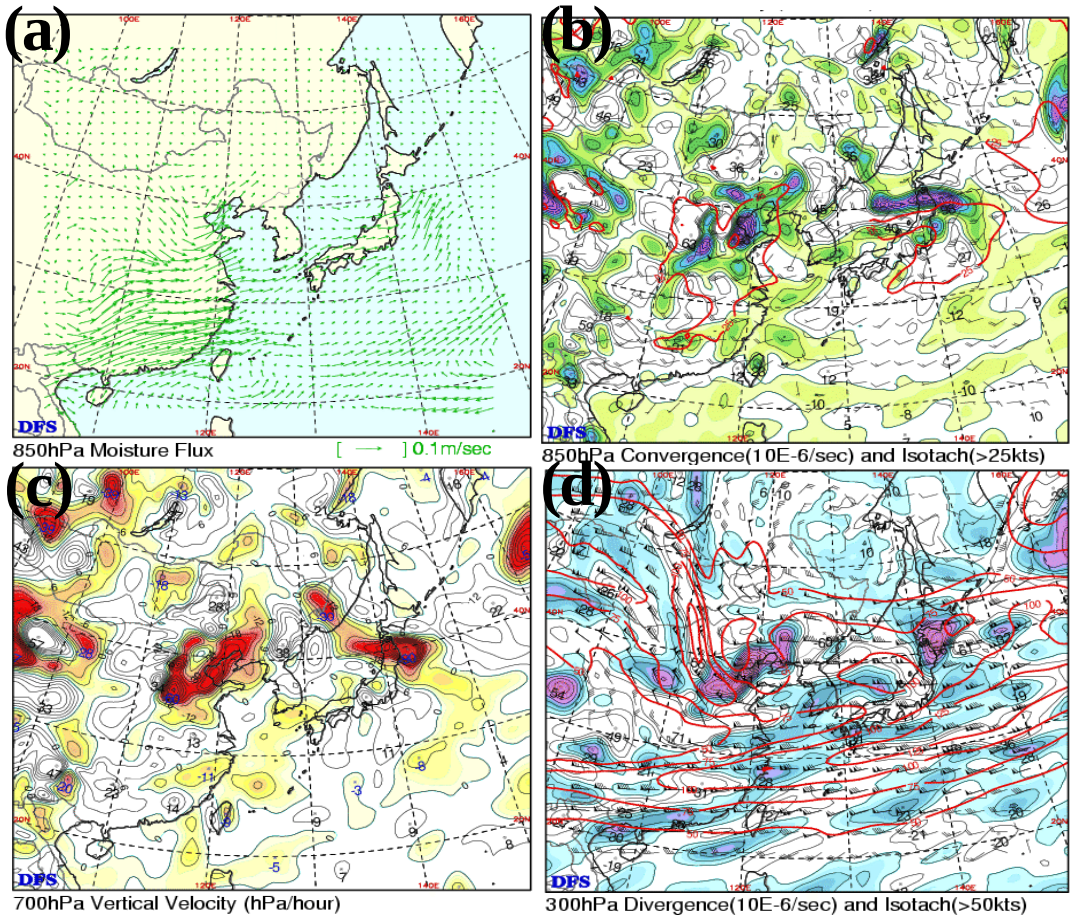


Fig. 6. Auxiliary weather charts at 00UTC 29 March 2007, provided by the KMA: (a) 850 hPa moisture flux, (b) 850hPa convergence and isotach, (c) 700 hPa vertical velocity, (d) 300 hPa divergence and isotach.

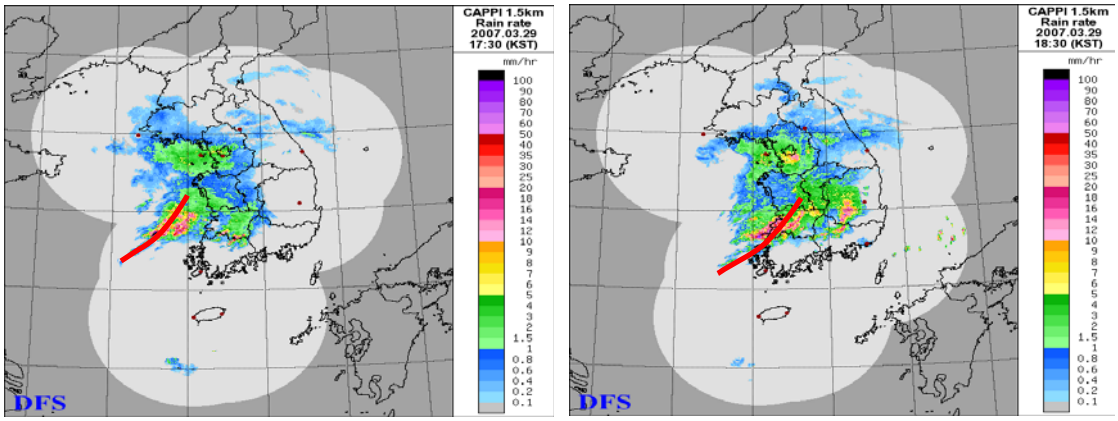


Fig. 7. Radar images over Korea peninsula at 17:30 KST (left panel) and 18:30 KST (right panel) 29 March 2007, provided by KMA.

www.kci.go.kr

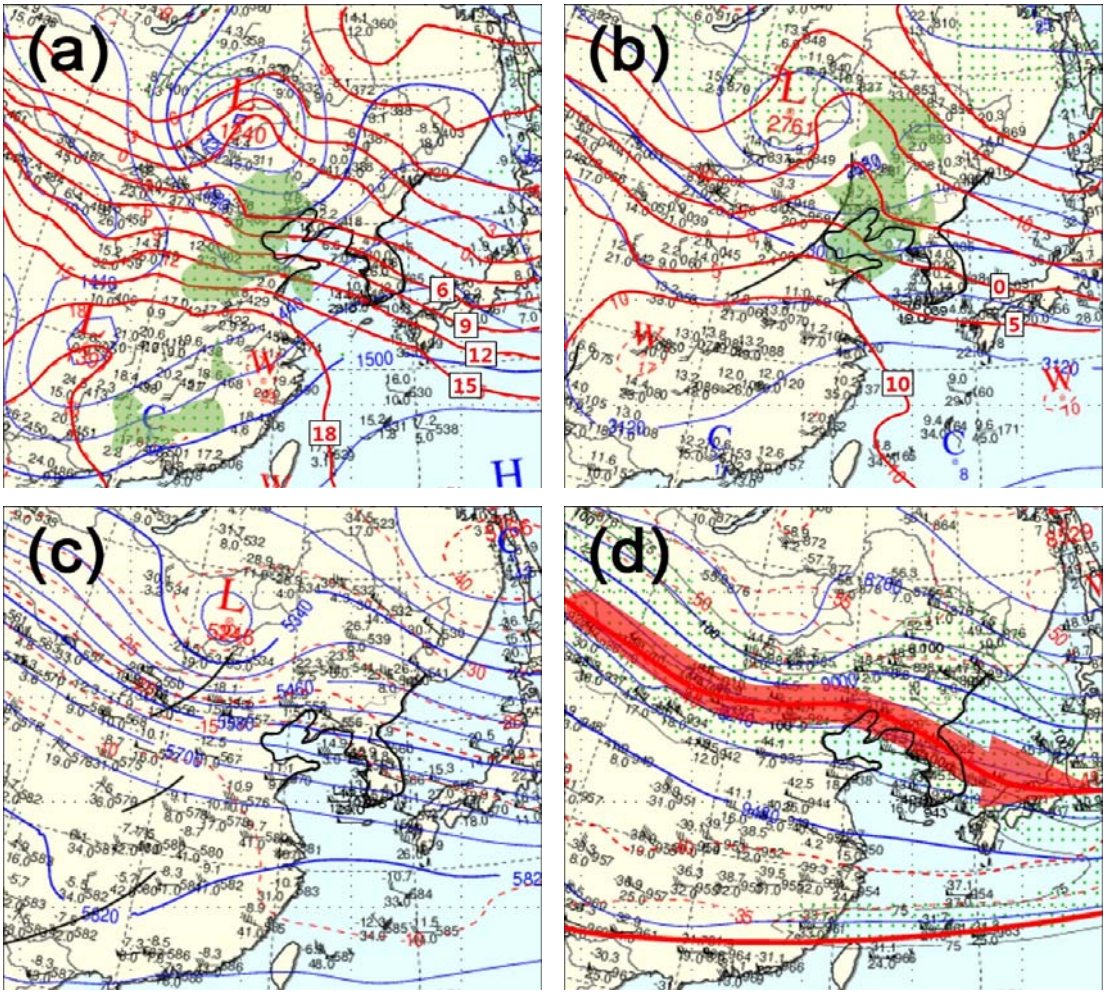


Fig. 8. Same as the Fig. 4 at 12UTC 30 March 2007.

3.3.2. 2007년 3월 30~31일 (D-1 ~ D-day)

앞서 살펴보았듯이 기상해일 발생일 (D-day) 이전에 이미 대기불안정을 야기한 저기압의 통과가 세 차례에 걸쳐있었으며 기상해일 발생 당일에도 뇌우를 동반한 강한 저기압의 통과가 있었음을 지상일기도를 통해 알 수 있었다 (Fig. 4(d)). 따라서 31일 새벽시간에 도달한 기상해일의 기상학적 원인 분석에 있어 30일 야간과 31일 새벽의 대기 연직구조 분석은 중요하다. Fig. 8은 D-1의 야간 상층일기도로서 850 hPa 하층대기의 경우, D-3보다 발해만 및 산둥반도의 기온은 약 6도 가량 증가하였으며 온도경도도 강한 것을 볼 수 있으며 지속적인 온난습윤공기의 유입으로 발해만 부근에 폭넓게 습윤공기가 분포하고 있는 것을 알 수 있다 (Fig. 8(a)). 또한 700 hPa 중층대기에서도 화북에 발달한 기압골 전면을 따라 산둥반도 상공으로 습윤공기가 유입되고 있고 (Fig.8(b)) 상층 기압골 중심을 따라 Jet가 지나면서 느린 하층대기 이동속도에 비해 차가운 상층 대기가 빠르게 이동하여 시간이 지남에 따라 하층의 온난기류 상부에 한랭기류가 위치하게 되어 대기 상·하층의 불안정은 더욱 강화될 가능성이 높은 상태이다 (Fig. 8(c), Fig. 8(d)).

보조일기도에서도 이러한 연직 불안정을 나타내는 요인이 뚜렷하게 나타나는데 850 hPa 고도에서 중국 화남

www.kci.go.kr

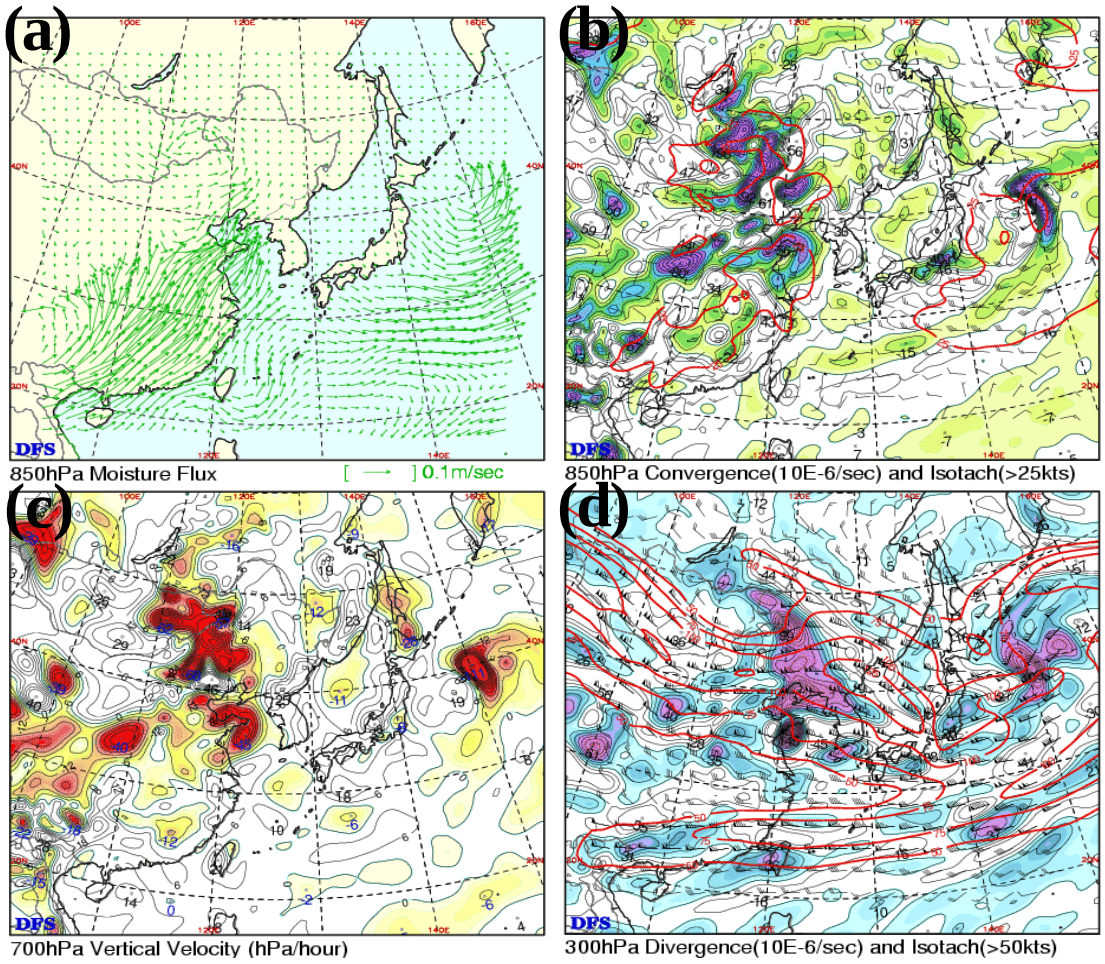


Fig. 9. Same as the Fig. 5 at 12UTC 30 March 2007.

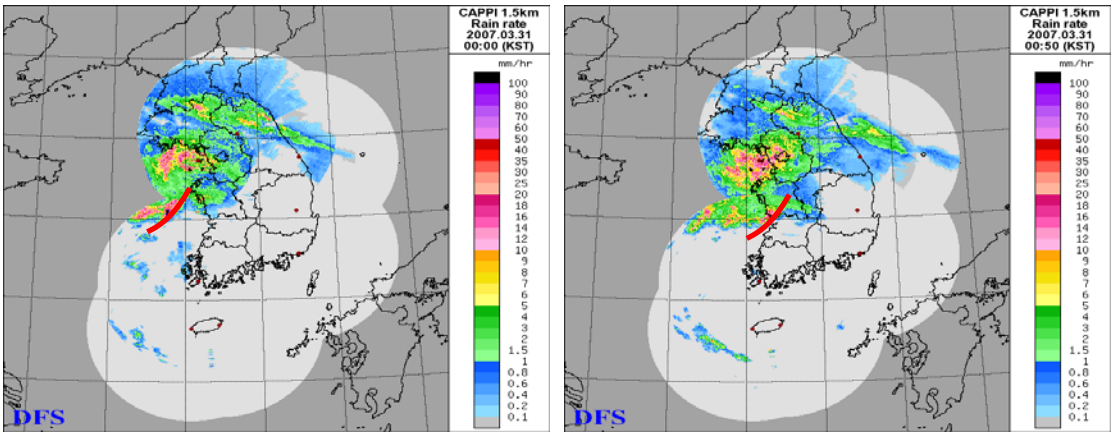


Fig. 10. Same at the Fig. 6 at 00:00 KST (left panel) and 00:50 KST (right panel) 29 March 2007.

www.kci.go.kr

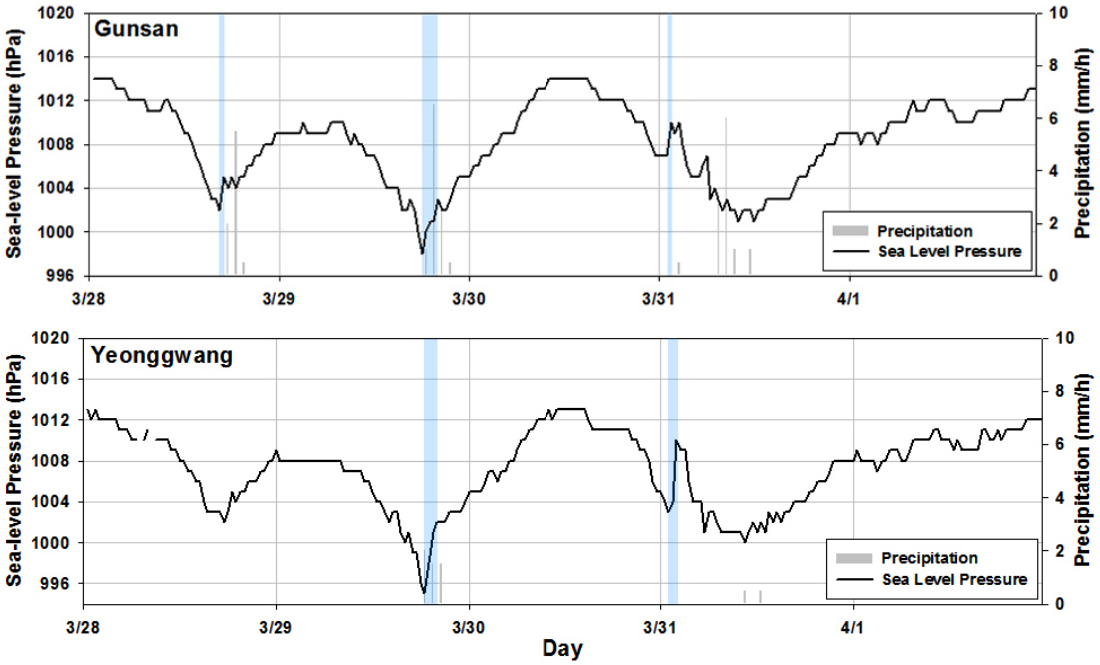


Fig. 11. Time series of the sea level pressure (solid line) and precipitation (gray bar) observed in yellow sea coastline during 5 days. The blue shaded area indicates the part suspected as pressure jump.

으로부터 산둥반도에 이르는 강한 습윤공기의 유입이 나타나고 있으며 (Fig. 9(a)) 실제 산둥반도 부근의 수렴강도가 가장 강하게 나타나고 있다 (Fig. 9(b)). 반면, 하층의 수렴경향과 달리 300 hPa의 상층대기에서는 산둥반도 부근에서 발산흐름이 가장 강하게 나타나고 있으며 (Fig. 9(c)) 하층의 수렴, 상층의 발산으로 인해 700 hPa 중층대기에서는 연직속도가 가장 강하게 나타나는 것으로 나타나 (Fig. 9(d)) 기상해일 발생 수시간 전에 산둥반도 앞 해상에서는 기압점프가 발생할 수 있는 대기연직구조가 갖춰져 있었음을 알 수 있다.

Fig. 10은 D-Day에 서해상에서 동진하고 있는 강수레이더 영상으로 D-1 야간에 산둥반도 및 발해만에서 강한 연직불안정을 보였던 대기가 동진함에 따라 31일 00시 00분 태안 앞바다에서 시간당 100 mm 이상의 강한 국지성 강수에코가 발달하였다. 국지성 강수는 차츰 동남동진하여 31일 00시 50분경 군산에 도달하였으며 Table 2에서 분석된 군산의 기상해일 도달시각 (31일 01시 28분)과 상당히 일치된 결과를 보여준다. 일반적으로 국지성 강수가 발생할 때의 대기는 기압이 급하강하고 통과 직후 기압이 급상승할 가능성이 있으므로 기압점프의 발생을 의심할 수 있으며 Fig. 11의 기압변화와 강수량의 시간에 따른 기록을 보아도 분명히 나타난다. 따라서 기상해일은 대기불안정 (기압 급상승)을 야기하는 한랭전선 혹은 국지성 강수에코의 통과 직후 일정시각의 차 (time-lag)를 두고 발생하는 것으로 사료되며 이는 많은 선행연구에서 보고된 바 있는 해양과 대기의 공명현상에 의해 기상해일이 발생한다는 기록과 일치한다고 볼 수 있다.

4. 기상모델링 결과 분석

기압점프의 발생과 전파방향을 분석하기 위해 수행한 기상모델링 결과는 기압점프가 기상해일 발생의 한 원인이라는 사실을 좀더 명확히 뒷받침해 준다. Fig. 12는 최종 연구도메인에서의 해면기압 (sea level pressure; SLP)을 1 hPa 간격으로 분석한 것이다. 기상해일이 서해안에서 발생하기 4시간 전 (30일 22시) (Fig. 12(a))에 산둥

www.kci.go.kr

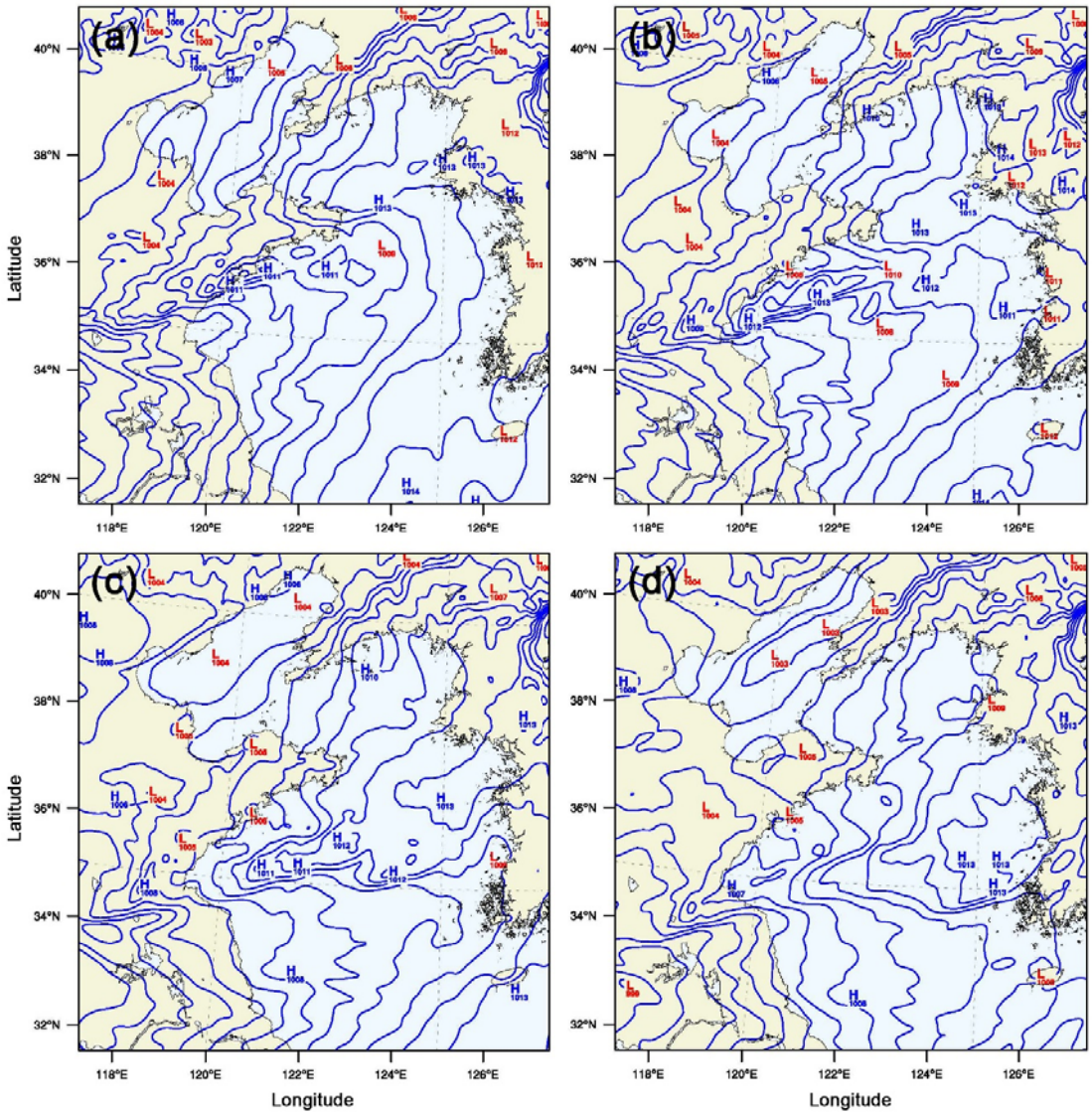


Fig. 12. Weather charts of the surface pressure level projected over the Yellow sea using WRF: (a) 22 KST 30 March 2007, (b) 23 KST 30 March 2007, (c) 00 KST 31 March 2007 (d) 01 KST 31 march 2007.

반도 남쪽에서 기압점프 발생구역으로 의심되는 기압간격이 조밀하며 기압이 급상승하는 구역이 연안을 따라 발생하였다. 이후 이 구역은 차츰 동남동진하면서 한반도 서해안 남부지역인 영광, 군산 등지로 전파되고 있음을 알 수 있다. 이렇게 기압점프가 전파되는 경로를 따라 연직단면도를 분석해본 결과 (Fig. 13) 해당 시각에 산둥반도 남쪽 연안 상공 2-5 km 사이에서 기온 급변 구역이 존재하는 것을 알 수 있었으며 이러한 급변 구역은 시간이 지남에 따라 점차 동남동진하면서 서해 연안으로 전파되었다. 이러한 기온 급변구역이 지표의 기압급변구역과 일치하면서 해수면 상공에 존재한다는 것은 기압점프 발생이 단순히 지표에서 발생한 것이 아닌 대기 상공의 변화에 의해 기인될 수 있음을 보여준다. 이러한 가설은 표준등압면을 표준 해발고도로 환산하였을 때 약 5.8 km

www.kci.go.kr

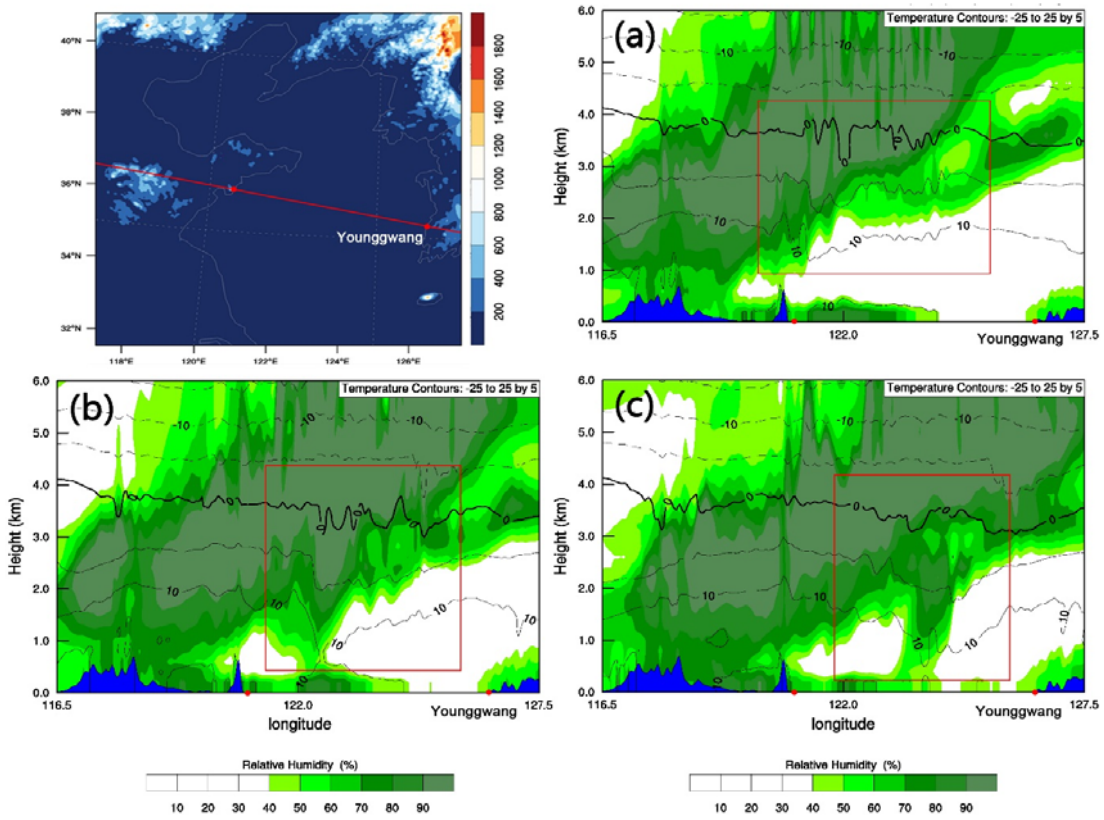


Fig. 13. Cross section of temperature (℃) and relative humidity (%) projected over the Yellow sea using WRF: (a) 23 KST 30 March 2007, (b) 00 KST 31 March 2007, (c) 01 KST 31 march 2007. Red boxes indicate the unstable layer by sudden temperature changes.

에 해당되는 500 hPa의 절대와도 분석에서 좀더 명확해진다 (Fig. 14). 500 hPa 절대와도 공간분석장에서 변폭이 크게 나타나는 구역이 30일 22시에 산둥반도 남쪽연안에서부터 서해안쪽으로 넓게 분포해 있으며 (Fig. 14(a)) 이러한 절대와도 급변 구역은 31일 01시에 서해안 연안으로까지 확장되었다 (Fig. 14(d)). 이러한 상층 대기 불안정요소의 전파는 지상의 불안정 전파와 상당부분 일치하고 있어 앞서 설정한 가설을 뒷받침 한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

2007년 3월 31일 새벽에 발생한 기상해일의 원인을 기상학적인 관점에서 해석하고자 본 연구에서는 기상해일 발생 5일전부터 발생일까지 종관기상분석을 실시하였고 기압골 통과 시에 나타나는 대기연직구조와 그에 따른 불안정 가능성을 중점적으로 살펴보았다. 그 결과, 2007년 3월에 발생한 기상해일의 경우, 발생 이전에 한랭전선을 동반한 저기압이 수 차례에 걸쳐 발해만 및 서해를 통과하면서 대기가 불안정한 상태가 되었고, 이런 상태에서 기상해일 발생 당일 산둥반도를 통과한 한랭전선을 동반한 저기압으로 인해 기압점프가 발생하면서 기상해일이 발생하였을 것이라 사료된다. 이 같은 불안정 누적은 해양장파의 분석결과에서도 나타나는데 29일 통과한 저기압이 통과한 직후 파고가 증가하였고 이후에도 전반적으로 파고는 높게 유지되었으며 30일 야간과 31일 새벽에 저기압이 통과하면서 기상해일이 발생한 것으로 사료된다.

www.kci.go.kr

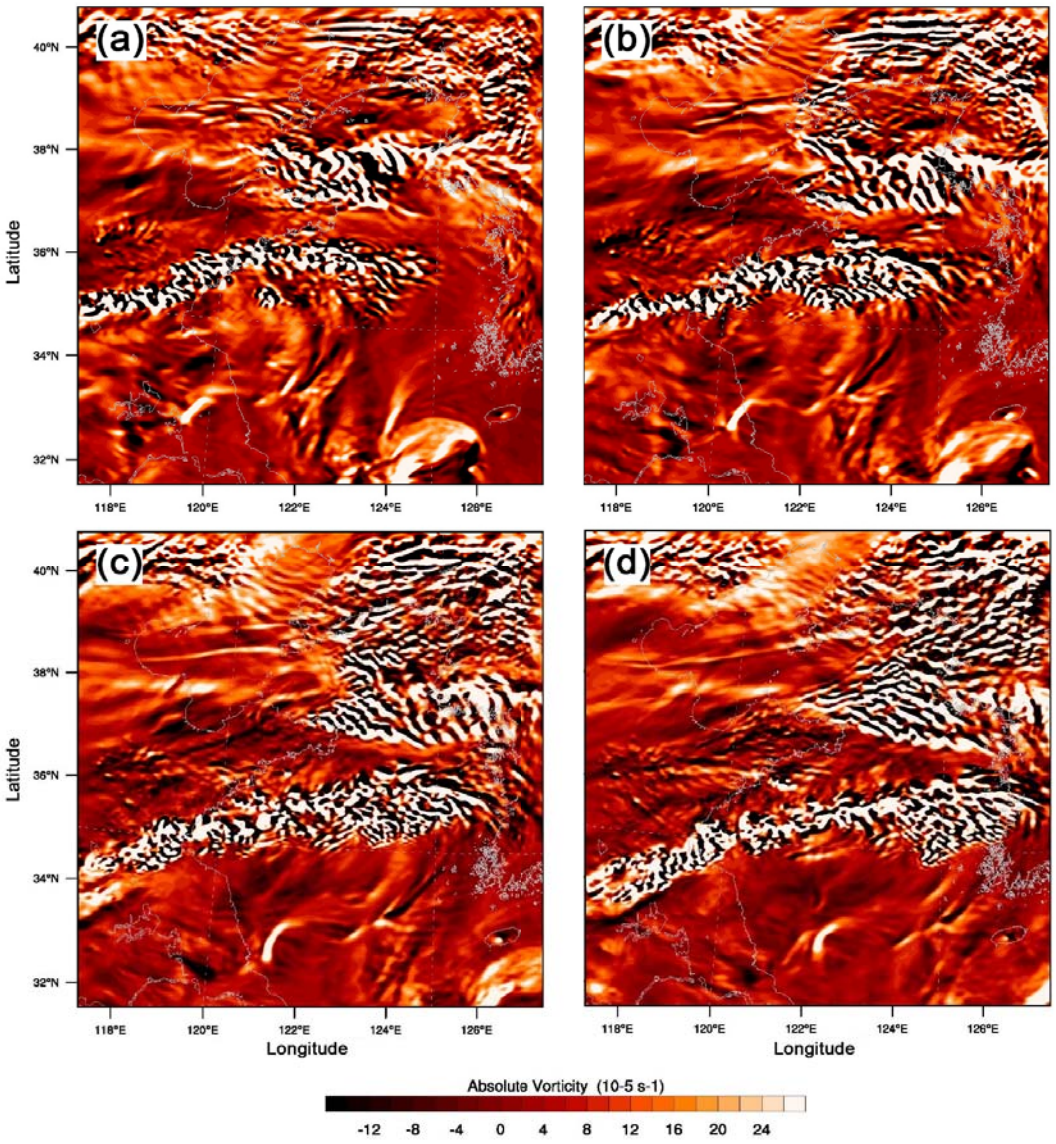


Fig. 14. Spatial distribution of the absolute vorticity in 500 hPa projected over the Yellow sea using WRF: (a) 22 KST 30 March 2007, (b) 23 KST 30 March 2007, (c) 00 KST 31 March 2007 (d) 01 KST 31 march 2007.

이러한 가설을 뒷받침 하기 위해 본 연구에서는 기상모델링을 수행하였으며 2007년 3월에 발생한 기상해일은 산둥반도 남쪽 연안에서 시작되어 한반도 서해 남부연안으로 전파한 기압점프의 속도 및 방향과 유사하다는 사실을 알 수 있었다. 또한 기상해일이 발생한 시점에 지상의 기압급변 구역과 상층의 대기요란 구역이 존재하였으며 공간적인 위치가 일치하였다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 결과로 미루어 보았을 때, 기압점프에 의해 발생하는 기상해일을 판별할 때는, 단순히 지표 혹은 해수면에서 발생하여 전파하는 기압점프만 분석하는 것이 아닌 종관규모의 대기 유동장 흐름의 변화를 살펴볼 필요가 있다고 사료된다.

www.kci.go.kr

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2021)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Akamatsu, H., 1982, On seiches in Nagasaki Bay, Papers in Meteorology and Geophysics., 33(2), 95-115.

Choi, B. J., Park Y., Kwon, K., 2008, Generation and growth of long ocean waves along the west coast of Korea in March 2007, Ocean Polar Res., 30(4), 453-466.

Choi, J. Y., Lee D. Y., 2009, Analysis of small-scale atmospheric pressure jumps related to the generation of abnormal extreme waves at Boryeong, Ocean Polar Res., 31(4), 370-388.

Colucci, P., Michelato A., 1976, An approach to the study of the ‘‘Marrubbio’’ phenomenon, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 13(69), 3-10.

Eom, H. M., Seung, Y. H., Woo, S. B., You, S. H., 2012, Analysis of abnormal wave at the west coast on 31 March 2007, Journal of Korean Society of Coastal Ocean Engineers, 24, 217-227.

Fontsere, E., 1934, Les ‘seixes’ de la costa catalane, Servei Meteorologic de Catalunya, Notes d’Estudi, 58, 1-12.

Fujita, T., 1955, Results of detailed synoptic studies of squall lines, Tellus, 7, 405-436.

Gomis, D., Monserrat, S., Tintore, J., 1993, Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands, J. Geophys. Res., 98(C8), 14437-14445.

Goring, D. G., 2009, Meteotsunami resulting from the propagation of synoptic-scale weather systems, Phys. Chem. Earth, 34, 1009-1015.

Hibiya, T., Kajiura, K., 1982, Origin of ‘Abiki’ phenomenon (a kind of seiches) in Nagasaki Bay, Journal of the Oceanographical Society of Japan, 38, 172-182.

Honda, K., Terada, T., Yoshida, Y., Isitani, D., 1908, An investigation on the secondary undulations of oceanic tides, J. College Sci. Imper. Univ. Tokyo, 108.

Kim, M. S., 2014, Comparative analysis of propagation direction of abnormal waves in the Yellow Sea on 31 March 2007 and on 25 April 2008 by analysis methodology for abnormal waves, Master Dissertation, Inha University, Incheon.

Lee, B. C., Kao, C. C., Doong, D. J., 2010, An analysis of the characteristics of freak waves using the wavelet transform, Terr. Atmos. Ocean. Sci., 22(3), 359-370.

Monserrat, S., Thorpe, A. J., 1992, Gravity-wave observations using an array of microbarographs in the Balearic Islands, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 118, 259-282.

Monserrat, S., Vilibić, I., Rabinovich, A. B., 2006, Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 1035-1051.

Proudman, J., 1929, The effects on the sea of changes in atmospheric pressure, Geophysical Supplement to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2(4), 197-209.

Ramis, C., Jansa, A., 1983, Condiciones meteorol ´ ogicas simult´ aneas a la aparici ´ on de oscilaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria en el Mediterr ´ aneo occidental, Rev. Geof˝ ısica, 39, 35-42.

Renault, L., Vizoso, G., Jansa, A., Wilkin, J., Tintore, J., 2011, Toward the predictability of meteotsunamis in the Balearic sea using regional nested atmosphere and ocean models, Geophys. Res. Letters, 38, L10601.

Tanaka, K., 2010, Atmospheric pressure-wave bands around a cold front resulted in a meteotsunami in the East China Sea in February 2009, Natural Hazards Earth System Sciences, 10, 2599-2610.

Tintoré, J., Gomis, D., Alonso, S., Wang, D. P., 1988, A theoretical study of large sea level oscillations in the Western Mediterranean, J. Geophys. Res., 93, 10797-10803.

Torrence, C., Compo G. P., 1998, A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 79, 61-78.

Vilibic, I., Domijan, N., Cupic, S., 2005, Wind versus air pressure seiche triggering in the Middle Adriatic coastal waters, J. Mar. Syst., 67, 189-200.

www.kci.go.kr