

유비쿼터스 관측시스템을 이용한 국내 너울의 특성규명에 관한 연구

The Analysis of Characteristics of Swell in Korea using the Ubiquitous Measurement System

장복진* / 여운광** / 이종국*** / 박광순****

Jang, Bok Jin / Yeo, Woon Kwang / Lee, Jong Kook / Park, Kwang Soon

Abstract

The swell is a major cause of interruption for the activity in a port and the ship navigation in coastal waters, coastal geographical changes, and the disaster with a loss of lives. However, many researches about the observation and the prediction of swells have not been conducted actively due to the difficulties to collect and synthesize the massive amount of long term field data for waves and meteorological information. In this study, the internet-based realtime monitoring system(Fieldbox) was developed to collect the wave data. The characteristics and main components of swells occurred in Korea were analyzed using wave data observed through the Fieldbox and the meteorological data collected by the KMA(Korea Meteorological Administration) and NASA(National Aeronautics and Space Administration). The characteristics of the swell generation patterns were analyzed using the monthly data of the Kwangan Tower between 2004 and 2006 to estimate the specific features such as sources and locations of swells generated in Korea.

keywords : Fieldbox, swell, Kwangan tower, swell source, swell forecast

요 지

너울은 항만활동 및 선박운행을 방해하며, 연안지역의 인명사고와 지형 변화 등을 야기키는 주요 원인이다. 이러한 너울의 관측 및 예측은 장기간에 걸친 파랑 및 바람 관측자료와 주변외해 기상자료의 거시적인 검토가 필요하기 때문에 자료 수집 및 분석에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이러한 어려움 때문에 지금까지는 너울에 관한 연구가 활발히 이루어지기 어려웠다. 이에 본 연구는 인터넷 기반의 실시간 모니터링 시스템인 필드박스를 개발하고 이로부터 수집한 파랑자료, 선형파이론과 국내 기상청과 NASA의 기상자료 등을 이용하여 우리나라에서 발생하는 너

* (주)데이타피씨에스 차장, 공학박사

Manager, Ph.D., DATAPCS LTD, Kyungki-do, Seongnam-si, 463-741, Korea
(e-mail: bjjang@datapcs.co.kr)

** 명지대학교 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Myong Ji Univ., Yongin-si, 449-728, Korea
(e-mail: yeo@mju.ac.kr)

*** (주)데이타피씨에스 연구소장, 공학박사

Research Director, Ph.D., DATAPCS LTD, Kyungki-do, Seongnam-si, 463-741, Korea
(e-mail: jklee@datapcs.co.kr)

**** 한국해양연구소 연안방재연구사업단 단장, 공학박사

Principal Research Scientist, Ph.D., Costal Disaster Prevention Research Div. of Korea Ocean Research & Development Institute, Kyungki-do Ansan-Si, 425-600 Korea
(e-mail: kspark@kordi.re.kr)

울의 특성과 원인을 분석하였다. 2004년부터 2006년 동안 광안타워에서 관측된 자료를 이용하여 너울의 빈도와 총 발생시간을 월별로 통계 분석하였다. 따라서 우리나라의 분기별 너울 발생의 특징을 규명할 수 있었으며 국내에 발생하는 너울의 원인과 위치적 특징 등을 도출하였다.

핵심용어 : 필드박스, 너울, 광안타워, 너울 원인, 너울 예측

1. 서론

너울은 항만에서의 하역활동을 방해하거나 선박의 항해에 지장을 주기도 하며, 침식이나 퇴적 등 지형변화와 개펄 또는 연안 양식장 등의 해양환경변화의 주요 원인이기도 하며, 해안 저지대, 갯바위 낚시지역, 방파제 등의 연안 지역에서의 인명사고 등의 재해 원인이 되기도 한다. 실제로 최근 2008년 2월 24일에 강릉시 안목항 방파제 지역에서 발생한 인명사고 역시 너울성 파도에 의한 것이었다(Fig. 1).

해양분야의 파랑에 대한 변화와 현상규명에 대한 연구는 수많은 현장관측자료와 주변기상에 대한 다양한 자료가 요구된다. 그러나 과거에는 수동적인 현장계측과 주변 기상자료 획득기술의 부재 등으로 인하여 다각적으로 많은 자료를 모으고 분석하는데 어려움이 있었다. 그 이유는 너울에 대한 연구는 장기간에 걸친 파랑 및 바람 관측자료와 주변외해의 기상자료와의 거시적인 검토가 필요하기 때문에 활발한 연구가 이루어지지 않고 있기 때문이다. 현재까지의 너울관련 연구를 살펴보면 주로 1~2개의 폭풍우로 인해 연안에 발생한 너울자료를 이용한 특성 분석에 관한 연구들이 주를 이루고 있다.

Barber와 Ursell(1948)은 폭풍으로부터 발생한 풍파가 긴 거리를 이동하면서 너울로 전파되며, 이 너울은 너울의 주파수와 시간 에너지 밀도함수의 거리에 대한 그래프를 이용하여 이동거리 등을 결정할 수 있음을 설명하였으며 Munk 등(1963)에 의해 이 이론이 개선되었다. 이후 Snodgrass 등(1966)과 Cartwright 등(1977)은 이 방법을 이용하여 너울의 이동과 원인에 대한 후속연

구를 이어갔다. Arakawa와 Suda (1953)는 1935년 9월 태풍발생기간 동안 일본 동쪽 바다에서의 바람, 풍파 및 너울을 분석한 바 있으며, Snodgrass 등(1966)은 뉴질랜드 서쪽 바다의 폭풍에 의해 발생된 15~20초의 주기를 가진 파랑은 그 에너지가 대부분 보존되어 뉴질랜드에서 알래스카까지 적도지역의 동풍이나 강한 유속에도 아랑곳하지 않고 전파됨을 알아냈다. 또한, Snodgrass 등은 폭풍과의 거리가 너울을 발생시킨 가장 큰 원인 중 하나이며 너울 관측자료에서 너울의 주기와 발생시간을 이용하여 이동거리를 구한 그래프를 제시하였다. 또한, Earle와 Bush(1984)는 북동 태평양(북부 캘리포니아) 8개의 해상부이로부터 관측된 자료를 통하여 너울의 전파(이동거리)를 선형파이론으로 계산하고 기상학적 폭풍우의 위치와 비교적 일치하고 있음을 확인한바 있다. 한편, 국내에서도 마찬가지로 너울과 관련된 특성규명과 원인에 대한 활발한 연구는 이루어지지 않았다. 다만, 항만 등 연안에서 너울과 풍파를 관측, 분석하고 너울성 파도에 의한 피해 등에 관한 연구가 이루어진바 있다. 정원무 등(1997)은 포항신항에서 현장관측자료와 바람자료 및 항내 하역시간과 중지시간을 분석하고 중지시간에 대하여 원인을 분석하였는데 그 원인은 항외의 큰 풍파와 주기가 10초 이상인 너울임을 알아냈다. 특히 너울은 대형선박의 횡동요(roll), 전후동요(pitch) 및 상하이동(heave)과 공진을 일으켜 하역활동을 방해하는 것으로 드러났다. 안경모 등(2004)은 측정된 파랑자료를 이용하여 항만설계를 위한 평상파 산정에 대한 방법론을 제시하였는데 항외에서 항내로 진입하는 너울성 파고의 영향이 지배적임을 밝힌바 있다.



Fig. 1. An Accident News by a Swell (MBC News, 2008. 2. 24)

또한 고진석 등(2006)은 최근 발생된 너울성 파랑에 의한 피해 조사 및 복구 사례를 소개하였다.

본 연구는 이러한 해양자료를 효율적으로 수집 및 관리할 수 있는 유비쿼터스 관측 시스템 필드박스(Fieldbox, <http://www.datapcs.co.kr/fieldbox>)를 개발하여 실제 우리나라 동해안과 남해안의 해양관측자료와 기상자료로부터 너울 관련 자료들을 분석하고 너울의 이동거리, 도달시간, 주기 및 원인 등의 특성을 합리적으로 규명하기 위한 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 너울의 정의

파랑은 안전한 선박운항, 해양 및 연안역의 개발과 이용 그리고 방재에 있어서 가장 중요하며 지배적인 자연조건이다. 파랑은 해수면에서 바람에 의해 발생되며 바람에 직접 영향을 받는 풍파와 이 풍파가 전해져 바람이 불지 않는 장소에 도달하는 너울로 구분할 수 있다(안 등, 2002). 너울은 이처럼 바람에 의한 파랑이 또 다른 해역으로 전파되거나 혹은 풍랑이 발생한 해역에서 바람이 급격히 약화된 후에도 여전히 남아있는 풍파를 말한다. 너울은 풍파와 비교하여 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 너울의 주기는 풍파보다 긴 8~20초가 보통이며 파고는 낮다. 이 때문에 풍파의 파고의 파형경사가 0.03 이상인 것에 비해 너울의 파형경사는 0.005~0.02 정도이다(Goda, 2000).

둘째, 너울은 일반적인 풍파에 비해 비교적 긴 주기와 파장을 가지고 있어 풍파나 조석보다 천해역에서 침식이나 퇴적 등 지형변화에 대하여 큰 원인이 된다(Jing and Ridd, 1996).

셋째, 너울은 파봉이 둥글고 매끈하며 파의 봉우리가 길게 이어져 있으며 진행방향의 흐트러짐이 적다(Goda, 2000).

넷째, 주파수 스펙트럼을 보면 침두가 예리하게 뾰족하다(Goda, 2000).

마지막으로 높은 파가 몇 개 연이어 오고 그 후에 작은 파가 계속되는 파고의 비트(Beat)현상이 나타난다(Goda, 2000).

또한 이와 같은 너울의 특성 때문에 다음과 같은 전파특성을 가지고 있다. 파랑은 주파수역의 넓은 범위에 걸쳐서 에너지가 분포하고 있다. 즉, 여러 주파수의 성분파를 포함하고 있으며 각 성분파는 주기에 비례하는 균속도로 전파된다. 이 때문에 주기가 긴 성분파는 전체보다 앞으로 나아가고 주기가 짧은 파는 전체보다 처져서 전파되며 풍역을 벗어나면서부터 너울로서 상당한 장거리를 이동할 수 있다.

2.2 너울의 특성분석 방법

2.2.1 유비쿼터스 현장관측시스템을 이용한 현장관측자료의 수집

본 연구에서 너울관련 연구에 사용한 파랑자료는 한국해양연구원에서 부산 광안타워와 울릉도 쌍정초와 속초 조도 동방등표에 구축한 실시간 연안관측 시스템에서 획득된 데이터이다. 이 현장 데이터는 필드박스를 이용하여 자료가 수집되고 분석되었다.

각 지점에 설치된 실시간 해양관측시스템은 우리나라 남해안과 동해안에 위치하고 있으며, 각각 부산광역시에는 광안리 해수욕장 전방 3 km 지점, 경상북도 울릉군 울릉읍 관음도 북동쪽 2.7 km 떨어진 수중 암초와 강원도 속초시 영랑동 전면해상의 수중암초에 설치된 조도동방등표에 설치되어 있다(Fig. 2와 Table 1).

각 관측지점에서는 조위, 파고, 풍향, 풍속, 기온, 기압, 습도, 수온 등이 실시간으로 측정되고 있다. 파고관측센서는 초음파 파고관측용 센서인 DCU1104를 이용하여 관측되고 있으며, 풍향·풍속관측용 센서는 윈드 모니터(Wind Monitor)05106 센서를 이용하여 측정된다.



Fig. 2. The Location and Panoramic View of Field Sites

Table 1. The Location of Field Sites

Sites	Installation Location	Location Coordinates
Kwangan Tower	A tower, off some 3 kilometers ahead area of Kwangan beach in Busan	35°37' 54.7"N, 129°08' 6.6"E
Ssangjeongcho	A submerged rock, off some 2.7 kilometers northeast from Ullung Island	37°33' 14.6"N, 130° 56' 32.4"E
Sokcho	A light beacon on a submerged rock, off some kilometers from Sokcho, Kangwon province	38°11' 58.12"N, 128°37' 22.19"E

여기서 각 세 지점에서 측정된 자료는 CDMA 무선 통신방법으로 동시에 실시간 획득되고, 연구자가 인터넷을 통해 자료를 모니터링, 관리 및 분석할 수 있도록 필드박스(Fieldbox) 시스템을 개발 및 이용하였다(Fig. 3). 필드박스의 주요 특징을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 현장관측자료의 관리와 모니터링을 위한 인터넷 기반의 프로그램으로서 관련연구자가 인터넷 웹 브라우저를 통해서 실측자료를 효과적으로 수집하고 처리할 수 있도록 개발하였다. 특수한 데이터 모니터링 및 관리 프로그램이 필요한 것이 아니라 언제 어디서든지 인터넷이 가능한 곳에서 현장 관측자료를 확인하고 분석할 수 있도록 하였다. 현재 제공되는 주요기능은 현장 시스템 운영현황, 실시간 현장계측자료 모니터링, 과거자료의 조회, 해당 자료의 엑셀 자료변환 및 다운로드, 기초적인 통계연산, 시스템 설정(모니터링 그래프 등 환경설정) 등이 있다(Fig. 4).

둘째, CDMA 또는 무선인터넷 등을 이용하여 전국의 수십~수백개 현장관측지점에서 동시에 실시간으로 자료를 획득하고 분석 및 관리할 수 있다. 현재 개발된 필드박스는 (주)데이터피씨에스에서 실시간으로 운영하고 있으며 50여개의 지점(400여개의 물리량 관측)에서의 현장자료를 관리하고 모니터링 하고 있다.

그밖에도 필드박스는 현장계측분야의 실시간 자료획득은 물론 과거와는 비교할 수 없을 정도의 수많은 현장자료를 수집할 수 있게 하였으며 이러한 대량의 현장관측자료는 대상 물리현상을 보다 신뢰성 있고 다양한 방법으로 분석할 수 있는 가능성을 높여 주었다. 또한 이렇게 많은 현장관측자료들도 효과적이고 체계적으로 관리하고 분석할 수 있는 인터넷 기반의 도구로서 연구의 생산성을 높이는데 크게 기여하고 있다.

2.2.2 너울 자료의 추출

연안에서 관측된 파랑이 풍파인지 너울인지 구분하

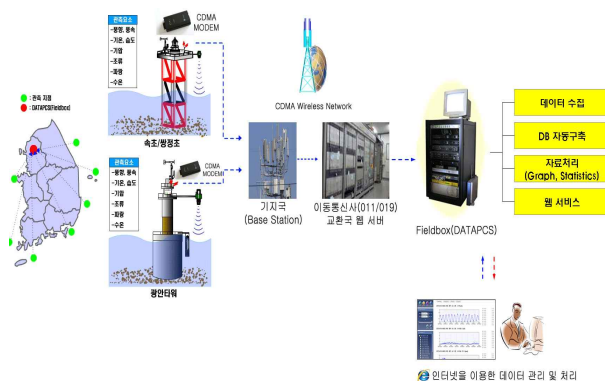


Fig. 3. The Concept Diagram of Field Data Collection and Monitoring

기 위해서는 유의파고 및 주기 자료와 바람 자료를 비교하여 확인할 수 있다. 즉, 바람이 거의 없거나 줄어 들고 있는 상황에서 파고와 주기가 높아지는 현상이 발생하였다면 이는 대부분 너울로 인한 현상이라고 할 수 있다. 보다 명확하게 너울을 구분하여 그 주기분포를 알기 위해서는 관측된 유의파의 주기에 대한 도수분포 또는 확률밀도 함수를 구하거나 관측주기자료의 주파수 스펙트럼을 도시함으로써 풍파와 너울의 구분을 확실하게 할 수 있다.

Fig. 5는 2006년 10월 1일에서 15일 사이에 속초지점에서 관측된 유의파고, 유의파주기 및 바람자료이다. 공통적으로 대략 10월 7일부터 10일까지 유의파고와 주기가 높아지고 있음을 알 수 있다. 그런데 이때의 파는 바람과는 거의 상관없는 너울임을 알 수 있다. 좀 더 너울을 명확히 구분하기 위해 이 기간의 유의파 주기에 대한 도수분포를 구하고 확률밀도 함수를 구하면 이 기간에 약 7초에서 14초 사이의 너울이 발생했음을 알 수 있다(Fig. 6).

2.2.3 너울의 이동거리 계산방법

너울이 이동해온 거리는 주기와 시간을 관측한 현장자료를 통하여 비교적 쉽게 구할 수 있다. 먼저 너울은 연안에 도달할 때까지 대부분 심해에서 발생하여 이동하므로 주파수(f)의 너울 진행속도($v(f)$)는 다음 Eq. (1)과 같이 간단하게 표현된다.

$$v(f) = \frac{C}{2} = \frac{1}{2} \frac{g}{2\pi f} = \frac{g}{4\pi f} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도이며 C 는 파속이다. 너울이 처음 발생한 시간을 t_0 라 할 때, 너울이 이동하여 어느 지점에 도달한 시간(t_a)는 Eq. (2) 구할 수 있다.

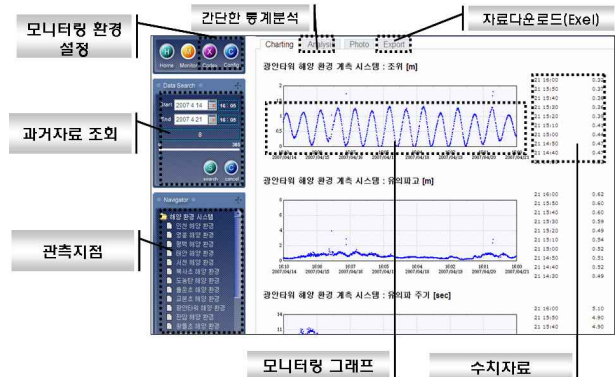


Fig. 4. Web-based User Interface of the Fieldbox

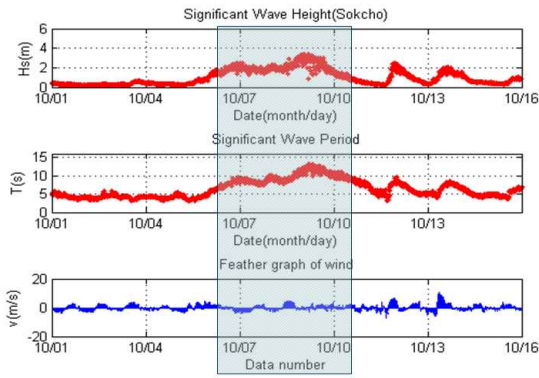


Fig. 5. Significant Wave Height, Period and Wind Data of Sokcho (2006/10/1~2006/10/15)

$$t_a = t_0 + \frac{D}{v(f)} = t_0 + \frac{D(4\pi f)}{g} \quad (2)$$

여기서 D 는 너울이 이동한 거리이다. Eq. (2)는 다시 주파수 f 에 대하여 미분하면 Eq. (3)을 얻을 수 있으며, 이 식으로부터 너울이 관측된 시간과 주기를 알면 손쉽게 너울이 이동한 거리를 구할 수 있다(Earle *et al.* (1984)).

$$\frac{dt_a}{df} = \frac{4\pi D}{g} \approx \frac{t_2 - t_1}{f_2 - f_1}$$

$$D \approx \frac{g}{4\pi} \frac{t_2 - t_1}{\Delta f} \approx \frac{g}{4\pi} \left[\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right] (t_2 - t_1) \quad (3)$$

여기서, T_1, T_2 와 t_1, t_2 는 각각 주파수 f_1, f_2 의 너울 주기와 발생시간이다.

2.2.4 너울의 도달시간 계산방법

한편, 관측된 너울이 얼마나 오랜 시간 이동하여 연안에 도달했는지를 나타내는 너울의 도달시간은 너울의 평균속도를 관측자료로부터 구하여 추정할 수 있다. 너울의 평균속도(v_m)는 심해파의 이동속도를 구하는 Eq. (1)으로부터 Eq. (4)와 같이 구할 수 있다.

$$v_m = \frac{g}{4\pi f_m} = \frac{g}{4\pi} \times T_m \quad (4)$$

여기서, f_m 는 관측된 너울의 평균 주파수이며 T_m 은 평균 주기이다. T_m 은 관측자료로부터 구할 수 있으며 앞서 구한 너울의 도달시간을 평균속도로 나누면 너울의 도달시간(Δt)을 Eq. (5)을 이용하여 추정할 수 있다.

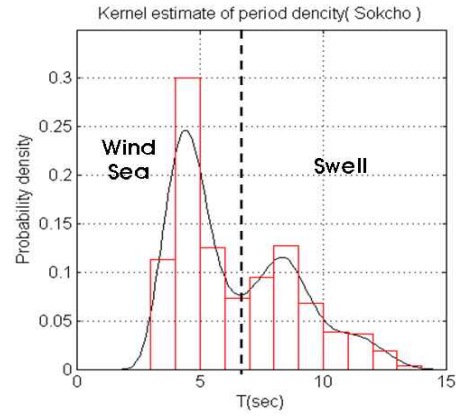


Fig. 6. Kernel Estimate of the Period Density Observed at Sokcho (2006/10/1~2006/10/15)

$$\Delta t = \frac{D}{v_m} \quad (5)$$

이와 같이 너울의 이동거리와 도달시간을 구하면, 관측된 너울이 언제, 얼마나 떨어진 해상에서의 풍파가 전달되어 온 것인지 예상할 수 있고 예상되는 기간 동안의 해상풍 자료와 기상일기도 등을 통해 어떠한 폭풍 또는 저기압이 이 풍파의 원인이었는지도 알 수 있다.

Table 2는 2.2.2절에서 관측 및 발견된 너울에 대하여 광안타워, 속초 그리고 쌍정초 지점에 대하여 너울의 이동거리와 도달시간을 각각 계산한 결과로서 너울은 최초 쌍정초 지점에 도달한 후 속초 그리고 광안타워에 각각 약 2~5시간 차이를 간격을 두고 속초와 광안타워 지점에 도달하였다. 또한 관측된 최대너울 발생 시각에서 너울의 도달시간과 거리를 고려하면 10월 21시에서 10월 8일 5시 사이에 관측지점으로부터 약 800~1,000km 떨어진 지점에 가장 강한 원인저기압이 발생했을 것임을 예측할 수 있다. 구체적인 원인저기압의 추적방법은 2.2.5절에 설명하였다.

2.2.5 너울의 원인추적 방법

너울의 이동거리와 도달시간을 알면 너울의 원인으로 추정되는 외해의 풍파와 이 풍파의 원인 저기압을 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 제공하는 3시간 단위의 기상일기도와 미항공우주국(NASA)에서 12시간 단위로 제공하는 위성 해상풍 관측자료(<http://www.ssmi.com/qscat/>)의 분석을 통해 다음과 같이 합리적으로 추적할 수 있다.

- (1) 관측자료로부터 너울자료를 추출한다.
- (2) 관측자료로부터 너울의 이동거리, 도달시간을 계산한다.
- (3) 관측자료로부터 최대너울(주기가 최대인 너울)이

Table 2. Calculated Swell Propagation Distances and Arrival Time from Wave Theory and Measurement Data

Sites	Occurrence time (Time)	The Period of the swell ($T_1 \sim T_2$)	The terms of the swell ($t_2 - t_1$)	The propagation distances (D)	Mean of the period (T_m , sec)	Mean of the swell velocity (v_m , m/s)	Arrival time (Δt , hr)	The time at maximum swell (T_p)	The prediction time of a source storm ($T_p - \Delta t$)
Kwangan Tower	10/8 17:30 ~ 10/9 13:10	8.0 ~ 14.1	19hr 40min	1,021 km	11.2	8.7	33	10/9 13:10	10/8 04:10
Ssangjeongcho	10/8 12:10 ~ 10/9 00:30	8.5 ~ 13.1	12hr 20min	838 km	11.1	8.7	27	10/9 00:30	10/7 21:30
Sokcho	10/8 13:50 ~ 10/9 04:40	8.2 ~ 13.2	14hr 40min	891 km	10.8	8.4	29	10/9 04:40	10/7 23:40

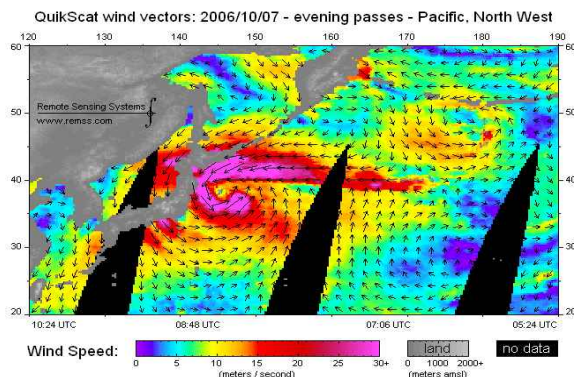


Fig. 7. The Microwave Scatterometer SeaWinds of QSCAT(2006/10/7 19:24, KST)

발생한 시각을 확인한다. 여기서 최대너울이 발생한 시각에서 도달시간만큼의 이전에는 이 너울의 원인이 되었던 풍파가 이동거리만큼 떨어진 우리나라의 외해에 발생했을 것임을 예상할 수 있다.

- (4) 이 시간대의 한반도 주변의 외해에 대한 해상풍 관측자료를 인터넷을 통해 확인하여 강한 해상풍이 발생한 지역과 시간을 확인한다.

Fig. 7은 너울의 원인으로 예측되는 시간대의 해상풍 관측자료의 예로서 동해의 동북방향으로 10월 7일 15m/s 이상의 강한 해상풍이 발생했음을 알 수 있다. 그러나 이 해상풍 자료는 12시간 간격으로 샘플링 되어 제공되므로 보다 정확한 기상원인 추적을 위해 기상청의 3시간 단위 일기도를 이용한다.

- (5) 이러한 강한 해상풍은 강한 저기압 또는 태풍이 그 원인이므로 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>) 또는 기상청에서 제공하는 방재기상정보 시스템(<http://metsky.kma.go.kr/>)에서 제공하는 일기도 자료를 통해 최종 너울을 발생시킨 저기압을 알 수 있다.

이와 같이 전 지구적 해상풍 관측자료로부터 10월 7일 강한 해상풍을 확인하였고 뿐만 아니라 앞서 2.2.4절

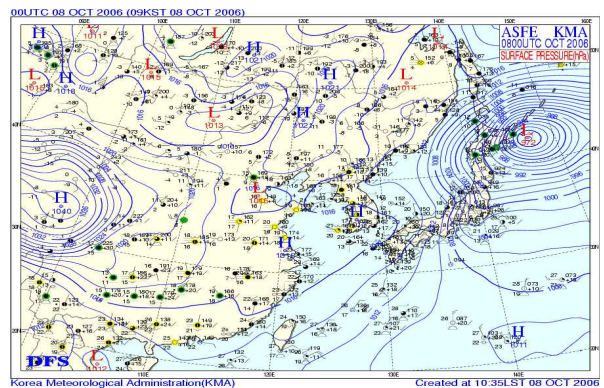


Fig. 8. The Weather Chart of KMA(2006/10/8 00:00)

의 관측자료로부터 계산된 결과에서도 10월 7일 밤부터 10월 8일 오전 사이에 원인지기압이 예상되었다. 또한, 기상 일기도를 통해 동해의 외해에 발생한 해상풍을 확인한 결과, 10월 8일 00시, 03시 및 06시에 우리나라 동해외해에서 강한 풍파를 발생시킨 중심기압 972, 968, 970 hPa의 저기압이 발생하였음을 알 수 있었다(Fig. 8~10). 이 중 중심기압이 968 hPa인 10월 8일 03시의 저기압이 국내 연안에 가장 큰 너울을 발생시켰을 것으로 최종 판단할 수 있다(Fig. 9). 관측자료로부터 계산된 결과와는 약 1~6시간 정도 차이가 있었으며 경우에 따라서는 그 오차가 더 있을 수도 있다. 하지만 계산 결과로부터 큰 어려움 없이 해당너울의 원인 저기압을 추적할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 우리나라 너울의 특성 분석 결과

앞서 설명한 방법으로 2006년도 광안타워에서 관측된 연안의 너울자료와 그에 대한 원인 저기압을 분석하여 저기압의 위치, 중심기압 및 거리에 대한 특성을 각각 분석하고, 이 분석결과를 이용하여 남해와 동해의 외해에 발생하는 저기압의 크기와 위치에 대한 특성을 도출하였다.

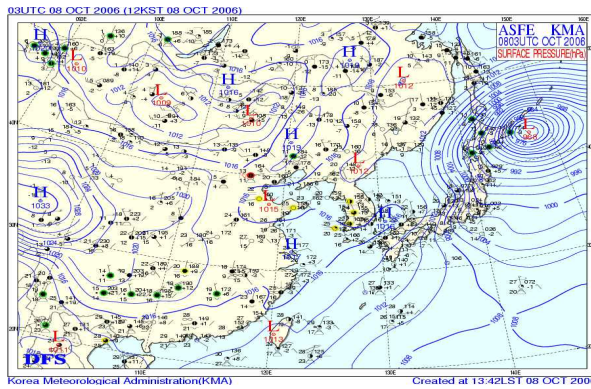


Fig. 9. The Weather Chart of KMA(2006/10/8 03:00)

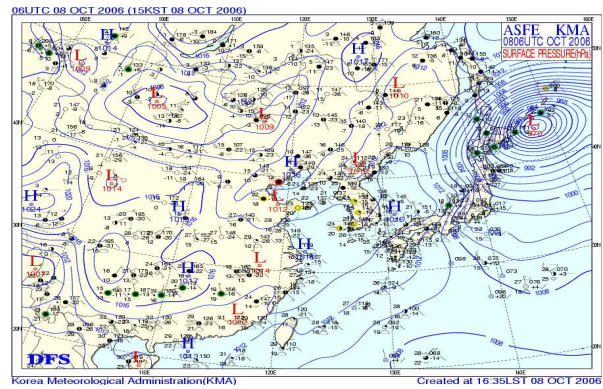


Fig. 10. The Weather Chart of KMA(2006/10/8 06:00)

Table 3. The Swell and Weather Chart Analysis of Kwangan Tower in 2006

Occurrence time of maximum swell (month/day, time)	Max period of significant wave (sec)	Max wavelength of significant wave (m)	Max wave height of significant wave (m)	Occurrence time of a source storm (month/day, time)	Central pressure of the storm (hPa)	Distance of the storm center (d, km)	Arrival time of the swell (Δt , hr)
2/5, 19시	11.0	189	0.95	2/4, 00시	992	1,910	43
2/9, 13시	9.8	147	0.73	2/8, 00시	989	1,710	37
2/17, 20시	9.7	147	1.07	2/15, 18시	1,001	2,160	50
3/21, 14시	11.8	217	1.02	3/20, 06시	968	1,990	32
3/30, 14시	11.1	156	1.04	3/29, 15시	981	1,300	23
4/1, 02시	12.0	163	1.43	3/30, 09시	979	1,580	17
4/21, 01시	9.8	147	0.76	4/20, 12시	998	880	13
4/22, 18시	11.0	189	0.78	4/21, 21시	991	1,530	21
7/14, 22시	13.2	272	1.63	7/14, 06시	975	1,270	16
7/26, 03시	12.0	225	1.05	7/25, 12시	980	1,440	15
8/11, 07시	11.0	189	0.66	8/10, 12시	998	1,150	19
10/9, 13시	14.1	310	2.04	10/8, 12시	968	1,750	25
11/28, 13시	11.4	203	0.89	11/27, 12시	996	1,340	25
12/18, 12시	10.8	182	1.09	12/17, 15시	1,004	980	21
12/30, 06시	13.0	264	2.11	12/28, 03시	963	1,860	27

3.1 너울의 특성 및 원인 저기압 추적결과

Table 3은 광안타워지점에서 2006년도 관측된 총 15개의 너울자료로부터 앞서 설명한 너울을 발생시킨 원인 저기압을 추적하여 그 발생시간, 중심기압, 중심기압과 거리 및 너울의 도달시간을 정리한 것이다. 여기서, 중심기압과의 거리와 도달시간은 2.2.4절의 계산치가 아닌 실제 저기압을 추적한 후 기상자료를 통해 정리된 것이다. 원인 저기압의 추적결과를 요약하면 중심기압이 약 1,000 hPa 이하의 저기압이 우리나라 연안까지 직선거리 약 1,000~2,000 km 사이에 발생했을 때, 해당 외해에 강한 풍파가 너울로 전파되는 것을 알 수 있다. 이 풍파는 약 15~60hr의 도달시간을 가지고 연안에 도달하고 최대주기 약 10~15초를 가지고 있었다. 국내 연안(광안타워)에서는 유의파 주기가 약 15초 이상의 너울은 관측되지 않았다. 이 주기를 심해파의 파장으로

환산하면 약 150~300m 내외의 파장을 가지고 국내 연안에 도달했음을 알 수 있다.

3.2 원인 저기압의 위치 특성분석

Fig 11은 Table 3에서 너울의 원인으로 추정된 최저기압의 중심을 지도상에 표시한 결과이다. 최대 주기의 너울을 발생시킨 저기압은 우리나라를 기준으로 동해와 남해의 먼 바다에 집중되어 있는 것으로 분석되었다. 특히, 동해 외해의 저기압 중심위치는 북위 36~53도, 동경 140~150도 사이에 집중되었으며, 남해 외해에는 한차례 북위 27도, 동경 122도 부근에서 너울의 원인 저기압이 발견되었다. 이러한 결과는 일반적으로 너울은 수천 km 이상에서 발생한 풍파가 전해져 발생하지만, 외해가 일본에 의해 막혀 있는 우리나라의 지형학적 위치로 볼 때 동해와 남해의 외해에서 약 800~2,000 km 사이에 저기압이 위치하고 있을 경우 우리나라 연

안에 최대주기 10~15초 사이의 너울이 발생함을 알 수 있었다.

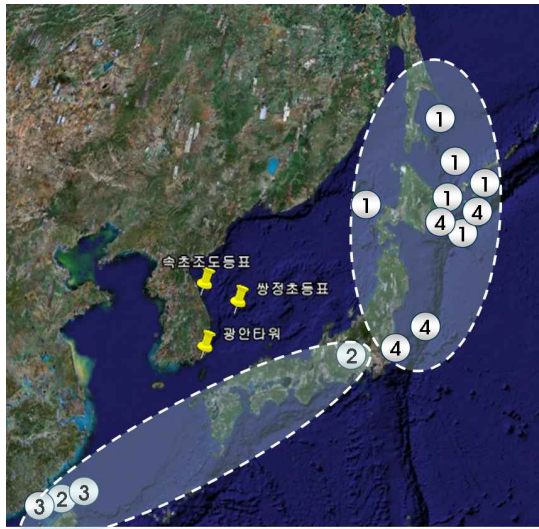


Fig. 11. Locations of the Depression Centers Divided Quarterly

Fig. 11의 원인저기압 중심위치에 숫자로 표시한 것은 발생분기를 표시한 것으로서 점선으로 표시된 것처럼 각각 1,4분기(봄, 겨울)에는 동해 먼 바다의 저기압이었고 약 70%를 차지하고 있었다. 그리고 나머지 너울들은 2,3분기(여름과 가을)에 남해 외해에 발생한 태

풍이 원인이었다.

3.3 광안타워에서 2004~2006년 관측된 월별 너울의 발생시간 분석

연중 우리나라 연안에서 발생하는 너울의 경향을 파악하고 이를 토대로 너울예측에 대한 가능성을 제시하기 위하여 관측지점 중 가장 결측율이 적은 광안타워에서 너울이 발생한 기간을 조사하여 월별로 통계분석을 하였다. 이 통계에는 2004년부터 2006년의 3년간의 자료가 이용되었다. 너울은 8.5 초 이상의 주기가 3 시간 이상 발생한 경우를 조사하였으며, 8.5 초 이상의 주기가 발생하였더라도 바람자료를 확인하여 풍파인지 너울인지 확인하여 풍파인 경우에는 제외시켰다. Table 4~6과 Fig. 12~13는 각각 2004년, 2005년과 2006년 월별 관측된 너울을 통계적으로 집계한 것이다.

Fig. 12은 2004년부터 2006년까지 연도별로 매월 너울이 발생한 시간을 도시한 것이다. 연도별로 공통적으로 보이는 특징은 겨울철 1분기와 4분기에 우리나라에 너울이 가장 많이 발생한 것으로 조사되었다. 그러나 2005년도에는 다른 연도와는 달리 8월에서 10월 사이에 가장 많은 너울이 관찰되기도 하였다. 한편, 2분기에는 너울의 발생이 전체적으로 매우 적음을 알 수 있다.

Fig. 13은 2004년에서 2006년까지 월별 총 너울 발생 시간을 합산한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 우리나라

Table 4. The Measured Swell Time and Period of Kwangan Tower in 2004

Occurrence time of the swell (Year month/day hour:min)	End time of the swell (Year month/day hour:min)	Total occurrence time (Hour)	Occurrence time of the max swell (Year month/day hour:min)	Max period of the swell (sec)
2004 01/09 21:00	2004 01/10 07:00	10	2004 01/10 05:00	10.1
2004 01/12 14:00	2004 01/13 01:00	11	2004 01/12 20:00	11.3
2004 01/13 19:00	2004 01/16 07:00	60	2004 01/13 22:00	11.2
2004 01/24 15:00	2004 01/26 03:00	36	2004 01/24 18:00	12.9
2004 02/16 11:00	2004 02/17 11:00	24	2004 02/16 21:00	10.7
2004 02/23 15:00	2004 02/25 06:00	39	2004 02/24 14:00	12.3
2004 02/28 00:00	2004 02/28 07:00	7	2004 02/28 03:00	9.9
2004 03/06 10:00	2004 03/07 01:00	15	2004 03/06 13:00	9.9
2004 04/27 20:00	2004 04/29 10:00	38	2004 04/28 06:00	11.1
2004 05/20 02:00	2004 05/21 09:00	31	2004 05/20 13:00	12.4
2004 07/02 14:00	2004 07/04 06:00	40	2004 07/03 01:00	11.1
2004 08/13 03:00	2004 08/14 05:00	26	2004 08/13 09:00	12.2
2004 10/10 03:00	2004 10/10 20:00	17	2004 10/10 09:00	9.3
2004 10/20 17:00	2004 10/22 03:00	34	2004 10/21 12:00	10.4
2004 11/03 01:00	2004 11/04 10:00	31	2004 11/03 08:00	11.6
2004 12/05 20:00	2004 12/07 20:00	48	2004 12/06 13:00	12
2004 12/18 14:00	2004 12/19 06:00	16	2004 12/18 21:00	10.4
2004 12/25 12:00	2004 12/26 00:00	12	2004 12/25 14:00	10.3

Table 5. The Measured Swell Time and Period of Kwangan Tower in 2005

Occurrence time of the swell (Year month/day hour:min)	End time of the swell (Year month/day hour:min)	Total occurrence time (Hour)	Occurrence time of the max swell (Year month/day hour:min)	Max period of the swell (sec)
2005 01/01 00:00	2005 01/01 20:00	20	2005 01/01 04:00	10.3
2005 01/15 04:00	2005 01/15 07:00	3	2005 01/15 05:00	10
2005 01/16 15:00	2005 01/18 03:00	36	2005 01/16 18:00	11.2
2005 02/01 13:00	2005 02/02 19:00	30	2005 02/01 17:00	10.4
2005 02/20 17:00	2005 02/21 00:00	7	2005 02/21 16:00	10.1
2005 03/04 17:00	2005 03/05 03:00	10	2005 03/04 21:00	9.5
2005 03/13 20:00	2005 03/14 04:00	8	2005 03/13 22:00	10.1
2005 03/24 23:00	2005 03/25 11:00	12	2005 03/24 00:00	9.4
2005 03/31 20:00	2005 03/31 12:00	4	2005 03/31 22:00	9.7
2005 04/01 00:00	2005 04/01 18:00	18	2005 04/01 03:00	10.3
2005 08/05 22:00	2005 08/08 08:00	58	2005 08/06 00:00	12.9
2005 08/14 22:00	2005 08/15 12:00	14	2005 08/14 20:00	11.8
2005 09/01 03:00	2005 09/03 14:00	59	2005 09/02 16:00	13
2005 09/12 06:00	2005 09/13 03:00	21	2005 09/12 09:00	12.8
2005 10/02 19:00	2005 10/03 07:00	12	2005 10/03 02:00	13.3
2005 10/22 07:00	2005 10/24 18:00	59	2005 10/23 08:00	13.8
2005 11/30 00:00	2005 12/01 00:00	24	2005 11/30 22:00	11.2
2005 12/12 19:00	2005 12/13 14:00	19	2005 12/13 02:00	11.4
2005 12/14 21:00	2005 12/14 14:00	17	2005 12/15 10:00	10.7

※ 7/1~7/20, 12/3~12/12일까지 결측기간

Table 6. The Measured Swell Time and Period of Kwangan Tower in 2006

Occurrence time of the swell (Year month/day hour:min)	End time of the swell (Year month/day hour:min)	Total occurrence time (Hour)	Occurrence time of the max swell (Year month/day hour:min)	Max period of the swell (sec)
2006 01/03 21:00	2006 01/07 06:00	81	2006 01/05 01:00	13.2
2006 02/03 20:00	2006 02/06 10:00	62	2006 02/05 19:00	11.0
2006 02/08 18:00	2006 02/09 12:00	18	2006 02/09 13:00	9.8
2006 02/17 18:00	2006 02/18 00:00	6	2006 02/17 21:00	9.7
2006 03/21 12:00	2006 03/22 21:00	9	2006 03/21 14:00	11.8
2006 03/23 03:00	2006 03/23 10:00	7	2006 03/23 08:00	10.3
2006 03/30 07:00	2006 03/30 17:00	10	2006 03/30 14:00	11.1
2006 03/31 01:00	2006 04/01 17:00	40	2006 04/01 02:00	12.0
2006 04/20 22:00	2006 04/21 07:00	9	2006 04/21 01:00	9.8
2006 04/22 13:00	2006 04/23 03:00	14	2006 04/22 18:00	11.0
2006 07/14 03:00	2006 07/16 20:00	65	2006 07/14 22:00	13.2
2006 07/26 01:00	2006 07/26 07:00	6	2006 07/26 03:00	12.0
2006 08/11 00:00	2006 08/11 18:00	18	2006 08/11 07:00	11.0
2006 10/08 20:00	2006 10/10 14:00	42	2006 10/09 13:00	14.1
2006 10/23 18:00	2006 10/25 13:00	43	2006 10/24 02:00	13.1
2006 11/27 12:00	2006 11/29 08:00	44	2006 11/28 08:00	11.4
2006 12/18 00:00	2006 12/19 03:00	27	2006 12/18 12:00	10.8
2006 12/28 16:00	2006 12/31 12:00	68	2006 12/30 06:00	13.0

연안에 발생하는 너울은 매년 1분기와 4분기에 연간 발생하는 너울의 약 70%가 발생하였으며 2분기와 3분기에 나머지 30%가 발생하였다. 특히 2분기에는 너울이 발생이 가장 적었는데, 3년간 6월에는 너울이 한 번도

발생하지 않았다. 이러한 통계는 우리나라 해수면이 5~6월에 가장 안정적이라는 통상적 사실을 증명하는 예이기도 하다.

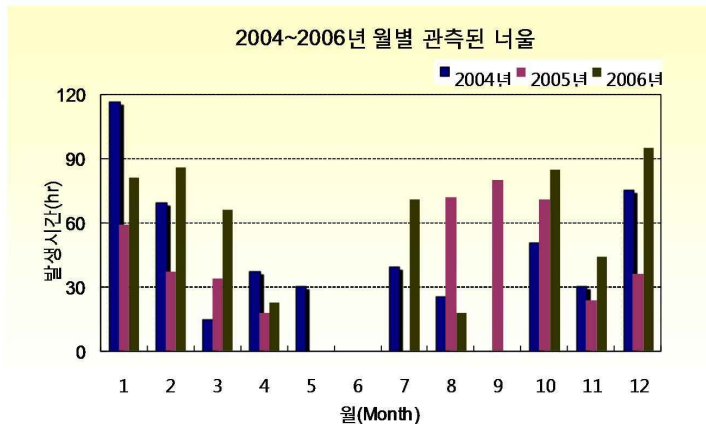


Fig. 12. The Measured Swell Time at Kwangan Tower(2004~2006)

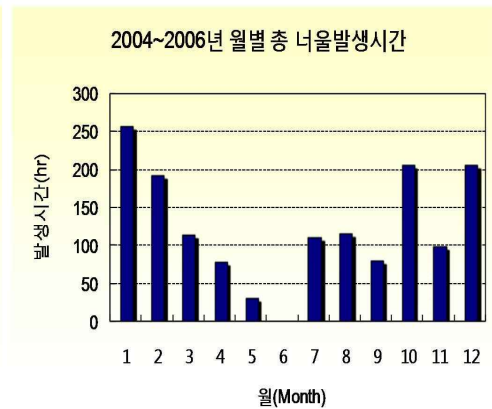


Fig. 13. The Total Measured Swell Time at Kwangan Tower(2004~2006)

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 현장자료를 실시간으로 수집, 관리하고 인터넷 기반의 현장자료 분석 시스템인 필드박스 시스템을 개발하고, 이를 이용하여 우리나라에서 발생하는 너울의 특성과 원인을 규명하기 위한 논문으로서 결론은 다음과 같다.

첫째, 개발된 필드박스 시스템은 연구자가 인터넷 기반으로 실시간 관측자료는 물론 과거의 자료까지 손쉽게 분석 및 처리 할 수 있게 하였다. 또한 인터넷에서 직접 얻을 수 있는 기상자료(해상풍 및 기상일기도 등)의 종합적인 분석이 가능하여 너울의 특성과 그 원인인 저기압을 빠르고 효율적으로 규명할 수 있게 되었다.

둘째, 우리나라 남해안과 동해안에서 관측된 너울의 특성을 부산광안타워, 쌍정초등표, 속초조도등표지점의 너울 발생사례를 통해 관측자료를 분석하고 기존 선형 파이론을 이용하여 너울의 이동거리와 도달시간을 계산하였다. 이러한 방법을 이용하여 광안타워에서의 2006년도 너울자료와 원인저기압을 추적한 결과, 너울을 발생시키는 저기압의 위치가 동해와 남해의 외해(직선거리 800~2,000 km)에 위치하고 있었으며, 이는 일본으로 외해에 둘러싸여 있는 우리나라의 지형적 특성 때문인 것으로 판단된다. 동해 외해의 저기압 중심위치는 북위 36~53도, 동경 140~150도 사이에 집중되었으며, 남해 외해에는 한차례 북위 27도, 동경 122도 부근에서 너울의 원인 저기압이 발견되었다. 각 원인 저기압들이 이 위치에서 각각 강한 풍파를 발생시켰으며 이 풍파들이 우리나라 연안을 향해 약 15~50 hr 동안 이동하여 주기가 약 10~15 초 사이의 너울로 전파되었다.

셋째, 광안타워에서 2004년~2006년 관측된 파랑자료를 토대로 우리나라 연안에 월별 발생하는 너울의 시간

적 특성을 분석한 결과, 1분기와 4분기에 연간 발생한 너울의 70 %가 발생하였으며, 2분기와 3분기에 나머지 30 %가 발생하는 것으로 나타났다. 겨울철(1, 4분기)에는 동해의 외해지역에 주로 발생한 저기압에 의한 풍파가 주요 원인이었으며, 여름과 가을(2, 3분기)에는 남해의 외해지역의 강한 저기압(태풍)에 의한 풍파가 주요 원인이었다.

본 연구에서 제시한 너울의 특성과 원인 분석은 실시간 현장관측과 기상자료 획득이 인터넷을 통해 가능하게 된 것이다. 과거에는 이렇게 인터넷을 통해 기상자료와 현장관측자료를 모두 분석하는 것이 불가능하였으나 최근에는 기상자료의 경우 국내에서는 2006년부터 인터넷을 이용하여 연구자나 일반인이 손쉽게 자료를 획득할 수 있게 되었으며 NASA 등에서 제공하는 위성 해상풍 관측자료 등도 근래(1999년 7월부터)에 들어서야 가능하게 되었다. 또한 본 연구에서 활용한 유비쿼터스 현장 관측시스템은 연안 뿐 아니라 외해에 설치 및 적용할 경우 피해가 우려되는 너울성 파도에 대하여 예측 및 예보가 가능해질 것이다.

이와 같은 인터넷과 현장관측기술 등의 발전은 연구에 필요한 자료를 직접 얻어내야 하는 기존의 시간적 경제적 어려움을 해결해 주었을 뿐 아니라 과거에 불가능했던 새로운 연구접근방법을 가능케 하였다. 본 연구는 이러한 유비쿼터스적인 연구 환경을 효과적으로 활용한 좋은 선례이며, 향후 여러 분야에서 다양한 연구 접근 방법으로 새롭고 진보된 연구를 제시할 수 있도록 확대해나갈 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호

2-1-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Arakawa H. and Suda K. (1953). "Analysis of winds and swell over the sea to the east of Japan during the typhoon of Sep. 26, 1935." *Monthly Weather Review*, Vol. 81, No. 2, Feb. 1953, pp. 31~37.
- Barber, N.F. and Ursell, F. (1948). "The generation and propagation of ocean waves and swell." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 240(824), pp. 527~560.
- Cartwright, D.E., Driver, J.S. and Tranter, J.E. (1977). "Swell waves at Saint Helena related to distant storms." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 103, No. 438, pp. 655~683.
- Earle, M.D. and Bush, K.A. (1984). "High-height long period ocean waves generated by a sever storm in the northeast pacific ocean during February 1983." *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 14, pp. 1286~1299.
- Goda, Y. (2000). "토목강좌 해안·항만." Shokokushi Publishing Co., Ltd.
- Jing, L. and Ridd, P.V. (1996). "Wave-current bottom shear stresses and sediment resuspension in Cleveland Bay." *Australia. Coastal Engineering* 29, 169~186.
- Munk, W.H. Miller, G.R. Snodgrass, F.E. and Barber N.F.(1963), "Directional Recording of Swell from Distant Storms" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A* 255(1062), pp. 505~584.
- Snodgrass, F.E., Groves, G.W., Hasselmann, K.F., Miller, G.R., Munk, W.H. and Powers, W.H. (1966), "Propagation of ocean swell across the Pacific". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A* 259(1103), pp. 431~497.
- 고진석, 안익장, 엄현민 (2006). "동해안에서의 너울성 파랑에 의한 피해." **한국방재학회지**, 한국방재학회, Vol. 6, No. 4, pp. 57~64.
- 안희도, 신승호, 정원무, 이광호 (2002). "파를 쥌다." 한국해양연구원.
- 안경모, 천제호 (2004). "장기 파랑측정자료를 이용한 정상파 산정방법론." **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, Vol. 16, No. 3, pp. 178~189.
- 정원무, 오세범, 채장원, 김상익 (1997). "포항신항내 파랑에 의한 Downtime 분석." **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, Vol. 9, No. 1, pp. 24~34.
- <http://www.kma.go.kr/>
- <http://www.datapcs.co.kr/Fieldbox>.
- <http://www.ssmi.com/>

(논문번호:08-31/접수:2008.03.10/심사완료:2008.06.12)