

옥계항에서 관측된 폭풍파와 저중력파의 상호관계 Correlation between Storm Waves and Far-Infra-Gravity Waves Observed in Okkye Harbor

정원무* · 채장원* · 박우선* · 이광수* · 서경덕**
Weon Mu Jeong*, Jang Won Chae*, Woo-Sun Park*,
Kwang Soo Lee*, and Kyung-Doug Suh**

要 旨 : 옥계항 내외의 5개 정점에서 부이형 파향·파고계와 수압식 파고계를 사용하여 연속관측한 장·단주기파의 장기간 자료를 분석하여 옥계항 주변 해역에서의 장주기파 에너지의 공간적, 시간적 분포를 검토하였다. 장주기파 자료 분석에 일정평활화법, 점증평활화법 및 이동평균평활화법을 적용하여 각각의 장·단점을 검토한 결과 해당 항만의 제1 공진 모드의 주기와 사용하는 자료의 길이에 따라 적절한 에너지 평활화 방법을 사용해야 함을 보였다. 장기간 자료와 2일 길이의 자료들의 분석 결과를 비교하여 평상시와 폭풍시를 구분하여 해석하는 것이 타당함을 보였다. 한편, 관측 자료의 종합적인 분석 결과 옥계항의 Helmholtz 공진 주기는 약 9.6분(상대진폭비 9~10)으로 제시되었으며 저중력파 주기대의 주기 1.2~1.3분과 0.7분의 국부 부진동이 매우 뚜렷하게 나타났다. 그리고, 평상시 자료에서는 항입구와 항내 정점에서 주기 9분 이상에서의 에너지가 저중력파 주기대의 에너지에 비해 100배 이상으로 매우 크게 나타났지만, 폭풍시에는 주파수 대폭에 무관하게 에너지가 크게 나타났으며, 특히 항내에서는 국부 부진동의 에너지가 평상시에 비해 최소 100배 이상으로 제시되었다. 마지막으로 항내에서는 Helmholtz 공진 모드와 주기 1~2분의 저중력파 에너지가 폭풍파고의 크기에 비례하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 저중력파, 이동 스펙트럼, 평상시, 폭풍시, 상대진폭비, 국부 부진동 모드

Abstract □ Simultaneous field measurements of short-period and long-period waves were made at five stations inside or outside Okkye Harbor, which is located in the east coast of Korea. Based on the measured data, spatial and temporal variations of the long-period wave energy were examined. Three smoothing methods were examined for the spectral estimates: fixed interval averaging method, incremental interval averaging method, and moving averaging method. It was shown that a proper smoothing method should be chosen depending on the period of first resonant mode and the length of data being used. By comparing the results obtained using the long-term data with those obtained using two-day data, we showed that it is necessary to analyze the data of calm seas and storm seas separately. The Helmholtz resonant period in Okkye Harbor was found to be about 9.6 minutes with its relative amplification ratio of 9 to 10, and local amplifications were apparent at the periods of 1.2 to 1.3 minutes and 0.7 minute. During calm seas, both at the harbor entrance and inside the harbor the energy of the waves of 9 minutes or longer period was larger than the infra-gravity wave energy by more than 100 times. However, during storm seas the energy level was very high all over the period band, and local amplification was larger than that during calm seas by more than 100 times, especially inside the harbor. Finally it was shown that the energies of the Helmholtz resonant mode and the infra-gravity waves of 1 to 2 minutes are proportional to the storm wave height.

Keywords : far-infra-gravity wave, running spectra, calm seas, storm seas, relative amplification ratio, local resonant modes

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul, 425-600, Korea)

**서울대학교 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

1. 서 론

일반적으로 항내정온도에 영향을 미치는 인자로는 장·단주기파, 바람 및 조류 등을 들 수 있다. 그 중에서 주기가 수십 초 이상인 장주기파가 주로 수천톤급 이상의 계류된 선박의 운동에 영향을 미치게 된다(Wilson, 1967). 최근, 국내 항만의 시설용량 부족으로 기존항만의 확장뿐만 아니라 신항만의 건설이 계속 추진되고 있어 장주기파에 의한 항내 부진동의 발생 및 증폭비 추정 등에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 논문에서는 산업항인 옥계항을 연구 대상항만으로 하고 현장관측자료와 유한요소 수치모형을 이용한 분석을 통하여 옥계항 내외의 공진 특성을 파악하고자 한다. 이 항만은 형태가 정사각형에 가깝고 항내 수심도 상당히 일정하므로 발생하는 부진동 형태 및 그 해석이 다른 항만들에 비해 단순할 것으로 예상된다.

옥계항은 수천톤급 이상의 대형 선박이 시멘트 재료 및 완제품의 운송에 주로 사용되고 있으며, 민간회사에서 건설한 후 정부에 기부 채납한 항만이어서 1990년대 중반까지는 출입 문제 등으로 항만공학자들의 주목을 별로 받지 못하였다. 옥계항에서는 최근 물동량의 증가에 따라 항입구 방향으로 열린 곳에 신설 부두를 건설하였으며 이 부두는 ESE 계열의 파가 침입하는 경우 외해파가 크게 감쇠되지 않고 그대로 침입할 우려가 있다. 한편, 주기 1~3분대의 저중력파(FIG(Far-Infra-Gravity) wave)가 항내로 침입하면 항만의 평면 배치에 따른 고유주기와 공진하여 국부적인 공진 모드가 발생하게 된다. 이 국부 부진동의 주기는 기존 부두들에서 계류 또는 접·이안하는 대형 선박의 고유 주기와 비슷하므로 그 진폭이 큰 경우 당연히 선박 동요의 진폭도 커지게 된다. 이러한 사실들은 지금까지 일반적으로 주지되어 있는 사실들이나 저중력파의 에너지 수준 및 발생 시기에 대해서는 연구 성과가 그다지 많지 않은 편이다.

한편, 정 등(1995)에 따르면 항외의 해상 상태가 평온한 경우와 악천후인 경우에는 공진주기가 3분 이하인 국부 부진동의 특성이 매우 다르게 나타나며 후자가 전자에 비해 에너지 수준이 10배 이상인 것으로 나타났다. 또한, 조석 현상과는 달리 부진동은 항외의 해상 상태에 따라 시간적 변화를 나타내는 점이 정(1999)에 의해 제시되었다. Okihiro *et al.*(1993)은 Helmholtz 공진 모드에서는 기상 여건 또는 지진해일의 영향이 지배적이나, 주기가 비교적 짧은 부진동 모드들은 항외에서의 너울의 영

향을 많이 받는 점을 관측자료 분석을 통하여 제시하였다.

스펙트럼 분석에서 사용되는 FT(Fourier Transform)는 전체 관측시간에 대해 존재하는 파랑의 평균적인 에너지를 구하는 방법으로 일시적으로 존재하는 현상에 대해서는 충분한 정보를 얻어내기에 다소 부족한 면이 있다. 조석과 같이 정상파적인 성격을 가지는 현상과는 달리 국부 부진동 현상은 다분히 비정상적인 형태를 가지는 불규칙적이고 일시적인 현상이므로 FT만으로는 충분한 해석이 곤란하다. 따라서 시간에 따른 주기별 스펙트럼 분포의 변화를 분석할 수 있는 방법이 보충적으로 필요하다. 이 방법으로는 대부분 전체 관측자료를 적절한 구간으로 나누고 각각의 구간에 대해 FT를 적용하는 STFT(Short Time Fourier Transform)를 생각할 수 있다. 그러나, 이 역시 구간이 충분히 길어야 원하는 분해능을 얻을 수 있으나 반대로 구간이 길어지면 시간에 따른 변화 정보를 상당히 잃어버릴 가능성이 크다. 또, 시간 변화 성분의 파악을 위해 구간을 짧게 하면 분해능이 현저하게 나빠지게 되므로 분해능의 유지와 비교적 짧은 구간에서의 정보 해석 능력의 양자를 모두 만족시키는 것은 상당히 어렵다.

이의 대안으로는 running spectra 분석 방법과 Wavelet 해석 기법을 들 수 있다. 전자는 자료를 특정 시점에서부터 일정한 길이를 가지도록 분할하되 시점을 일정한 시간 간격을 두면서 뒤로 늦춰서 자료를 만들고 각 자료에 대해 FT를 적용함으로써 시간 변화에 따른 주기별 스펙트럼 분포를 파악할 수 있는 방법이다. 후자인 Wavelet 기법은 19세기초에 시작되었으나 1980년대 중반까지는 수학적 복잡성으로 인한 방대한 계산량 때문에 별다른 진전을 보이지 못하였다. 그러나, 최근 20여 년 동안에 단편적으로 수행되던 연구들이 점차 Wavelet 이론으로 통합, 정립되어지고 컴퓨터 및 전자계산 기법의 도입을 통해 계산상의 문제가 해결되면서 비정상 및 불규칙 신호 해석에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내에서는 문(1998)이 최초로 Wavelet 분석법을 사용하여 포항신항과 죽변항의 부진동 자료를 해석한 바 있다.

본 연구에서는 Wavelet 분석 방법이 아직까지 국내·외적으로 연구 단계이며 그 해석 결과의 신뢰도가 크지 않은 점을 감안하여 STFT에 의한 분석 결과를 종합하는 running spectra 작성을 시도하였다. 이 방법의 적용시 자료의 시점을 매우 짧은 시간동안 늦추면 아주 길지 않은 자료로도 시간-주파수별 스펙트럼 밀도의 등치선도를 작성할 수 있다.

본 연구에서는 한국해양연구소(1999)에서 1998년 하계부터 추계에 걸쳐 옥계항 내외의 5개 정점(10월 중순의 4일간은 7개 정점에서 파향·파고계와 수압식 파고계를 사용하여 취득한 장·단주기파의 장기간 연속관측자료를 분석한다. 장주기파 자료 분석을 위해 스펙트럼 분석에서 제시되는 원시 스펙트럼 밀도에 대해 스펙트럼 폭을 일정하게 유지하면서 에너지를 평활화하는 일정평활화법, 저주파수에서 고주파수로 갈수록 일정한 비율로 평균하는 스펙트럼 폭을 증가시키는 점증평활화법 외에 이동 평균된 스펙트럼 밀도에 일정평활화법을 적용하는 이동평균평활화법을 적용하고 Helmholtz 및 국부 부진동 모드의 침두 주파수나 상대진폭비 분석에 가장 적절한 방법을 검토한다. 한편, 항외 단주기 유의파고가 1.0 m 이하인 평상시와 4 m 내외인 폭풍시의 자료를 상호 비교·검토함으로써 양 시기의 항내·외 장주기파 및 부진동 특성을 엄밀하게 분석한다. 동 검토 결과들을 종합하여 옥계항 주변의 장주기파 에너지의 분포 특성 및 Helmholtz 공진 모드를 포함한 옥계항에서의 부진동 모드에 대해서도 상세하게 검토한다. 그리고, 폭풍파 내습 전후의 12일간 연속 자료에 대해 running spectra를 작성하여 너울과 항외의 장주기파 및 항내 국부 부진동과의 상관 관계에 대해서도 검토한다.

2. 현장관측과 자료 분석

2.1 현장관측

본 논문에서는 옥계항에 주로 내습하는 장주기파의 에너지 분포와 항내 부진동 현상을 파악하기 위하여 한국해양연구소(1999)에서 수압식 파고계를 사용하여 관측한 수압변동 기록을 재분석하였다. 한국해양연구소(1999)에서는 paro-scientific sensor를 장착한 수압식 파고계(SWTG : Self-recording Wave and Tide Gauge, 기억용량은 4 MB) 6대를 Fig. 1에 제시된 6개 정점(●로 표시된 P1~P6)의 해저면에 설치하여 장주기파 현장관측을 실시하였다. 아울러, 항외의 단주기파 분포 특성과 단주기파의 천해역으로의 전파 변형 및 항내 침입·변형 현상을 파악하기 위하여 단주기파 관측기기인 부이형 파향·파고계(DWB : Directional Waverider Buoy) 1대를 항외 정점인 P1 부근의 정점 W(■로 표시)에 설치, 자료를 취득하였다. 장주기파의 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 해저면 착저형 초음파식 파고계를 사용하여 파향도 파악할 필요가 있다. 그러나 동 기기를 확보하지 못한 점 때문에 이

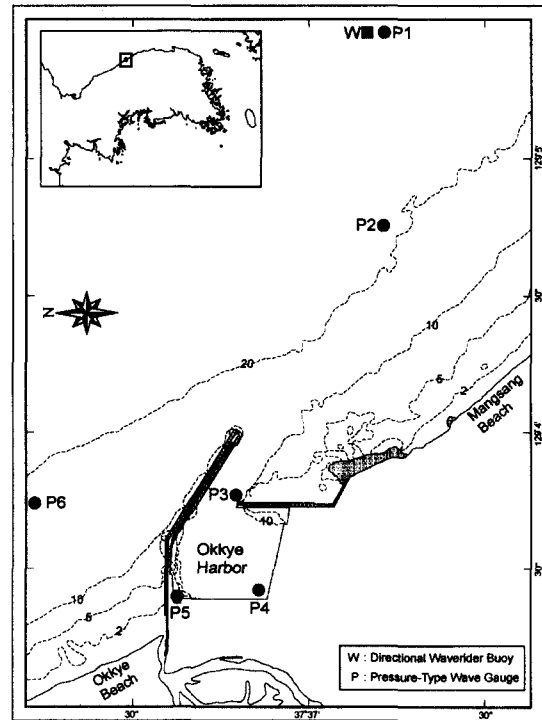


Fig. 1. Location map of field measurement stations.

를 사용하지 못했으며, 이에 대한 부분적인 대안으로 파향·파고계로 구한 단주기파의 파향 정보를 사용하여 참고하였다.

Table 1에는 3차에 걸쳐 실시된 현장관측 내용을 정리하였다. 파향·파고계의 경우 정점 W에서 1~2차 관측에 해당되는 시기인 1998년 8월 30일부터 10월 17일까지 자료가 수집되었다. 장주기파의 경우 1차 관측은 정점 P1~P4에서 8월 26일부터 10월 13일까지, 2차 관측은 10월 13일부터 17일까지, 그리고 3차 관측은 10월 17일부터 11월 25일까지 실시되었다. 1차와 3차는 항내·외의 장주기파 특성 파악이 목적이었으므로 자료수집간격이 5초이나 2차 관측의 경우 단주기파의 전파 변형을 파악할 목적도 포함되었기 때문에 자료수집간격이 0.5초로 설정되었다. 관측된 모든 자료들은 백색잡음이 거의 없는 매우 양호한 상태였다.

2.2 자료 분석 방법

파향·파고계 자료의 분석 방법은 정(1999)에 자세하게 제시되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 수압식 파고계로 취득된 자료의 경우 원시 수압 자료들을 온도

Table 1. Informations on short-period and long-period wave measurements around Okkye Harbor in 1998.

Station	Measuring instrument	Measuring stage	Sampling interval(s)	Measurement period	Location of measurement		Water Depth(m)
					Longitude	Latitude	
W	DWB	First	0.78125	Aug. 30 15H~Oct. 13 14H	129° 05' 12.24" E	37° 36' 39.84" N	26.8
		Second	0.78125	Oct. 13 15H~Oct. 17 13H			
P1	SWTG	First	5.0	Aug. 26 15H~Oct. 13 10H	129° 05' 11.16" E	37° 36' 36.48" N	25.7
		Second	0.5	Oct. 13 15H~Oct. 17 10H			
		Third	5.0	Oct. 17 11H~Nov. 25 15H			
P2	SWTG	First	5.0	Aug. 26 15H~Oct. 13 10H	129° 04' 37.50" E	37° 36' 45.48" N	20.0
		Second	0.5	Oct. 13 16H~Oct. 17 10H			
		Third	5.0	Oct. 17 11H~Nov. 25 15H			
P3	SWTG	First	5.0	Aug. 26 15H~Oct. 13 10H	129° 03' 45.36" E	37° 37' 13.92" N	15.0
		Second	0.5	Oct. 13 15H~Oct. 17 10H			
P4	SWTG	First	5.0	Aug. 26 15H~Oct. 13 10H	129° 03' 24.00" E	37° 37' 7.38" N	15.0
		Second	0.5	Oct. 13 15H~Oct. 17 08H			
		Third	5.0	Oct. 17 11H~Nov. 25 15H			
P5	SWTG	Second	0.5	Oct. 14 10H~Oct. 17 08H	129° 03' 22.74" E	37° 37' 22.80" N	5.8
		Third	5.0	Oct. 17 11H~Nov. 25 15H			
P6	SWTG	Second	0.5	Oct. 13 18H~Oct. 17 09H	129° 03' 33.72" E	37° 38' 0.54" N	16.1
		-	-	-			

보정을 거쳐 수압 자료로 변환시키고, 각각의 보정된 수압 자료들에 대해 MATLAB(Krauss *et al.*, 1994)에 제시된 least squares method를 이용한 경향 제거(trend removal)와 고주파수 통과필터링을 실시하여 조석 성분을 제거하였다. MATLAB(Krauss *et al.*, 1994)에는 고주파수 통과 필터로 Butterworth, elliptic, Chebyshev type 등이 제시되어 있으나 정 등(1999)의 연구 결과를 참조하여 본 연구에서도 Butterworth 필터를 사용하는 것으로 하였다. 즉, 육계항 부진동 자료의 경우 조석 주기는 약 745분이며 이를 제외하고 주기가 가장 긴 장주기파는 약 23 분 정도여서 이들 사이의 간격이 상당히 넓으므로 transition width보다는 자료를 오염시킬 가능성이 큰 ripple의 발생 여부에 중점을 두고 사용할 필터를 Butterworth 디지털 필터로 결정하였다. 필터의 제작 시에 절단 주기는 Helmholtz 공진 모드 부근의 오염을 방지하기 위하여 90분으로 설정하였다.

정 등(1999)은 5초 간격의 연속된 자료 17,280개를 기준으로 하여 자료들을 분할하였으나 본 연구에서는 관측 기간이 매우 긴 점과 유의파고가 3 m를 초과하는 큰 폭풍이 여러 차례 내습하였으며 그 지속 시간도 평균적으로

로 이들을 초과한 점 등을 고려하여 5초 간격의 34,560개를 기준으로 하여 자료를 분할하였다. 한편, 본 논문에서는 파향·파고계 자료가 있는 기간인 1차와 2차 관측 중에서 1차 관측자료만을 사용하는 것으로 하였으며, 2차 관측 자료는 육계항의 유한요소 모델링의 검증 자료로 사용하였다. 1차 관측 자료를 폭풍파를 고려하여 분할한 결과 23 세트가 구해졌으며 각 세트의 기간은 후술하는 단주기파 관측 결과와 같이 제시하였다.

한편, 정 등(1995)은 육계항 부진동 자료의 분석 시에 30초 간격의 4,096개의 자료에 대해 FFT를 적용하여 구한 2,048개의 원시 스펙트럼 밀도를 16개씩 평균하여 128개의 주파수에 대한 평균치를 제시하는 일정평활화법을 사용하였다. 그러나, 이 방법은 자료의 길이가 아주 길지 않으면 제1 공진 모드의 주기를 정확하게 제시하기가 곤란한 경우가 발생한다. 정 등(1999)은 감천항의 부진동 연구에서 5초 간격의 16,384개의 자료에 대해 FFT를 적용하여 구한 8,192개의 원시 스펙트럼 밀도에 일정평활화법의 대안으로 평균하는 스펙트럼 밀도의 수를 최장 주기의 하나에서부터 단주기측으로 갈수록 하나씩 증가시키는 방법인 점중평활화법을 적용하였으며, 이를 사용하면 제

1 공진 모드부터 국부공진 모드까지 구분하기가 더 용이함을 제시한 바 있다. 그들은 또한 스펙트럼 밀도를 이동 평균하는 방법에 대해서도 검토하고 단순한 이동평균법은 제1 공진 모드쪽과 단주기쪽 모두에서 문제점이 있음을 제시하였다. 한편, 본 관측 자료와 같이 해상 상태에 따라 항내·외에서의 부진동 현상이 상당한 차이를 보이는 경우에는 장기간의 단일 자료를 사용하면 특정 부진동 시기의 특성을 명확하게 구분하기가 곤란해지며 여기에 대해서는 후술하기로 한다.

본 연구에서는 32,768개의 자료에 FFT를 적용하여 구해진 16,384개의 원시 스펙트럼 밀도를 32개씩 산술 평균하는 일정평활화법(512개의 주파수로 축소됨), 평균하는 스펙트럼 밀도의 수를 최장 주기의 1에서부터 단주기 측으로 향할수록 하나씩 증가시키는 방법인 점증평활화법(180개 주파수로 축소), 그리고 원시 스펙트럼 밀도를 17개씩 이동 평균한 후 다시 24개씩 산술 평균하는 이동평균평활화법(682개 주파수로 축소)을 동일한 자료에 적용하여 장·단점을 비교함으로써 장주기파의 스펙트럼 밀도를 주파수에 관계없이 보다 정확하게 표시할 수 있는 방법을 검토하였다.

2.3 스펙트럼 평활화 방법의 상호 비교 · 검토

23 세트의 자료 중에서 단주기파 분석 결과를 참조하여 항외에서의 파가 정온했던 평상시와 큰 폭풍파가 내습했던 폭풍시에 해당되는 두 자료를 선택하여 상기 세 가지 분석 방법에 의한 결과들을 상호 비교하였다. 전자로는 5번 자료(9월 3일 12시부터 약 45.5시간), 후자로는 11번 자료(9월 15일 20시부터 약 45.5시간)를 각각 선택하였다. 참고로 전자의 경우 단주기파의 유의파고가 0.32~0.81 m(평균 0.54 m), 후자의 경우 유의파고가 0.23~3.83 m(평균 2.61 m)의 범위에서 변화하였다.

Fig. 2(a)~(d)에는 P1~P4의 4개 정점에서 9월 3일 12시부터 5초 간격으로 연속적으로 구해진 32,768개의 수압 자료에 전술한 일정평활화법, 점증평활화법 및 이동평균평활화법을 각각 적용하여 구한 스펙트럼 밀도를 주기 1.0~60.0분의 구간에 대해 제시하였다[주기 1분 미만은 육안으로 차이를 구분하기가 곤란하여 제시하지 않았으며, 참고로 정 등(1999)의 연구 결과와 이동평균평활화법의 특성을 고려하면 주기 1분 미만의 경우 32개씩 평균하는 일정평활화법에 의한 스펙트럼 형태가 가장 복잡하며 이동평균평활화법, 점증평활화법의 순서로 형태가 단순해짐]. 먼저, Fig. 2(a)와 (b)에 제시된 항외 정점 P1과 P2에 대

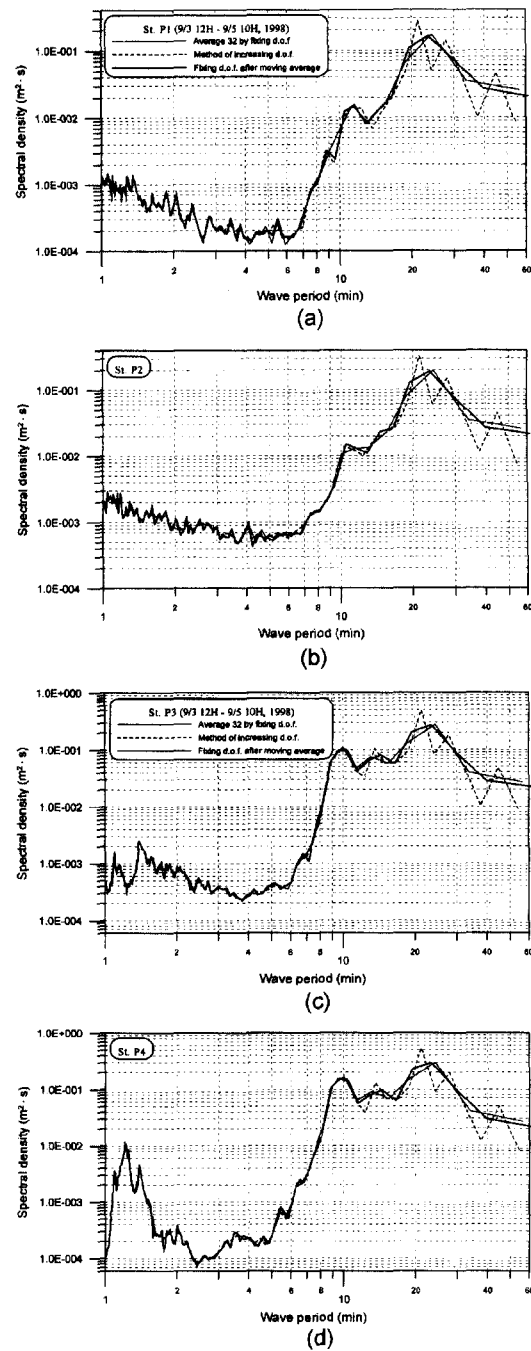


Fig. 2. Comparison of spectral densities obtained by method of averaging 32 components fixing degree of freedom, method of increasing degree of freedom, and method of averaging 24 components after moving average of 17 continuous pressure data measured for 45.5 hours from Sep. 3 12:00, 1998. (a) St. P1, (b) St. P2, (c) St. P3, (d) St. P4.

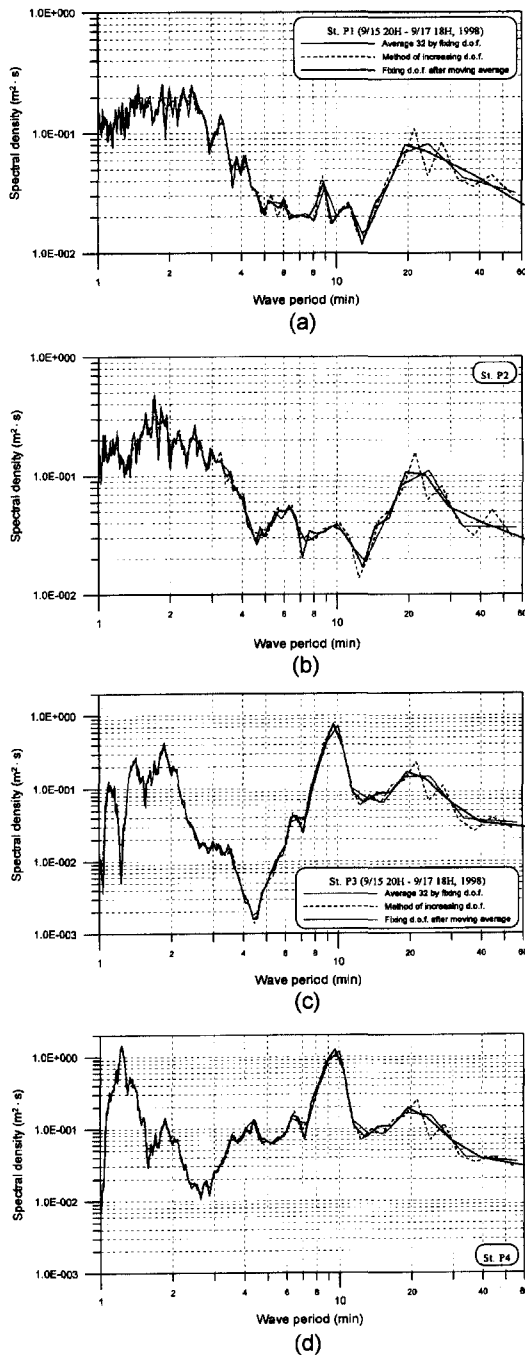


Fig. 3. Comparison of spectral densities obtained by method of averaging 32 components fixing degree of freedom, method of increasing degree of freedom, and method of averaging 24 components after moving average of 17 continuous pressure data measured for 45.5 hours from Sep. 15 20:00, 1998, (a) St. P1, (b) St. P2, (c) St. P3, (d) St. P4.

한 결과들을 살펴보면 일정평활화법과 이동평균평활법에 의한 결과는 전체 주기대에 걸쳐 서로 비슷한 반면 점증평활화법에 의한 결과는 주기 20분 미만에서는 두 방법과 비슷하나 20분 이상에서는 세 개의 에너지 첨두형이 나타나서 단일 첨두형이 나타난 다른 두 방법과 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 2(c)와 (d)의 항일구 정점 P3와 항내 정점 P4에 대한 결과를 살펴보면 차이를 보이는 경계가 20분에서 10분 부근으로 이동된 점을 제외하면 전반적인 경향이나 일치도가 정점 P1과 P2의 경우와 거의 비슷하다. Fig. 3(a)~(d)에는 폭풍시 자료에 대한 분석 결과를 제시하였으며 이 경우에도 전반적인 경향이나 일치도가 평상시 자료의 분석 결과와 유사하다.

한편, Fig. 4에는 상기 세 가지 방법에 의해 각각 제시된 평상시 자료(9월 3일 12시부터 45.5시간)의 스펙트럼 밀도로부터 구한 항외 정점 P1을 기준한 항내 정점 P3와 P4에서의 입사파 주기별 상대진폭비를 다음 식을 이용하

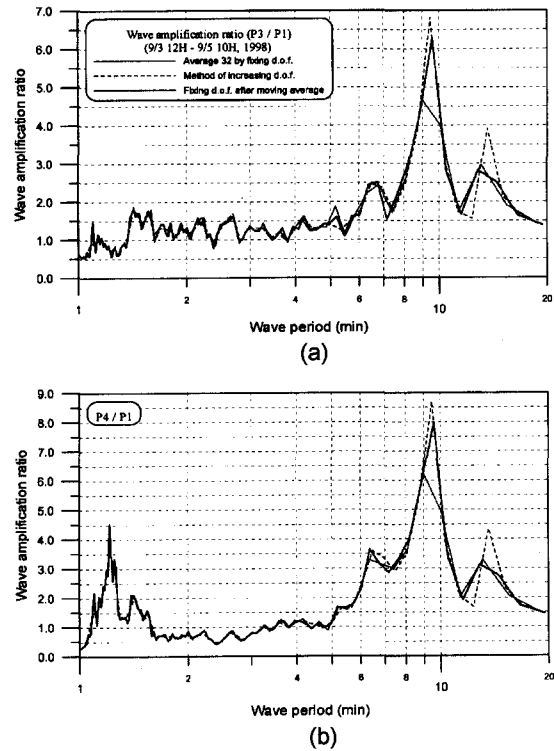


Fig. 4. Comparison of wave amplification ratios obtained by method of averaging 32 components fixing degree of freedom, method of increasing degree of freedom, and method of averaging 24 components after moving average of 17 continuous pressure data measured for 45.5 hours from Sep. 3 12:00, 1998, (a) P3/P1, (b) P4/P1.

여 구하고 도시하였다.

$$R_{ij} = \frac{\sqrt{S(f_i)_i}}{\sqrt{S(f_i)_o}}, (i, j) = 2, 3, \dots \quad (1)$$

여기서, S 는 스펙트럼 밀도, f_i 는 i 번째 주파수, 아랫첨자 j 는 기타 관측정점(여기서는 P3와 P4)의 번호, 아랫첨자 o 는 항의 관측정점을 각각 나타낸다. 정점 P3에 대한 결과인 Fig. 4(a)를 살펴보면 주기 15분 부근에서 제시된 침두형은 일정평활화법과 이동평균평활화법에 의한 결과가 비슷한 반면 주기 9~10분 사이에 제시된 침두형에서는 점증평활화법과 이동평균평활화법에 의한 결과가 비슷하게 제시되었다. 이러한 경향은 정점 P4에 대한 Fig. 4(b)에서도 거의 비슷하게 나타났다. 한편, 주기 9분 미만의 주기대에서는 세 방법에 의한 결과가 서로 비슷하게 제시되었다. Fig. 5에는 폭풍시 자료의 스펙트럼 밀도로부터 구한 정점 P1에 대한 항내 정점 P3

와 P4에서의 입사파 주기별 상대진폭비를 도시하였으며 이 경우 주기 9분과 10분 사이의 침두형에서 일정평활화법에 의한 결과가 다른 두 결과와 약간의 차이를 보이는 점을 제외하면 전체 주기대에 걸쳐 세 가지 방법에 의한 결과들이 서로 매우 비슷한 것으로 나타났다.

상기 결과들은 일견하기에는 정 등(1999)이 감천항 자료의 분석 결과를 통해 점증평활화법이 일정평활화법에 비해 장주기측의 재현성이 훨씬 우수하다고 제시했던 내용과 부합되지 않는 것처럼 보인다. 그러나, 정 등(1999)과 본 연구의 자료 분석 사이에는 사용된 자료의 길이가 감천항의 경우 5초 간격 16,384개였던 점에 비해 본 연구에서는 5초 간격 32,768개로 2배 길이의 자료를 사용한 점을 중요한 차이점으로 들 수 있다. 예를 들면 32개 스펙트럼 밀도를 평균하는 일정평활화법을 적용한 결과 중에서 편의상 주기 10분 이상의 평균된 스펙트럼 밀도만을 살펴보면, 감천항 자료의 분석 시에는 5초 간격의 16,384개의 자료가 사용되어 주기 약 83분, 28분, 17분 및 12분에서 평균된 스펙트럼 밀도가 4개 제시된 반면, 본 연구 결과에서는 32,768개의 자료가 사용되어 주기 약 165분, 56분, 34분, 24분, 19분, 15분, 13분, 11분 및 10분 등의 9개가 제시되므로 해상도가 크게 증가된다. 점증평활화법의 경우 위와는 역으로 16,384개의 자료에서는 주기 10~60분에서 8개의 평균된 스펙트럼 밀도가 제시된 반면 본 결과에서는 14개의 스펙트럼 밀도가 제시되어 여러 개의 침두형이 복잡하게 제시되었다. 이러한 점은 해당 항만의 제1 공진 모드의 주기와 사용하는 자료의 길이에 따라 적절한 에너지 평활화 방법을 사용해야 하며 그렇지 않을 경우 제1 또는 제2 공진 모드의 주기가 실제와는 상당히 다르게 제시될 수도 있음을 나타낸다.

한편, 본 연구에서는 스펙트럼 밀도와 상대진폭비에 대한 상기 비교 결과들을 종합하여 옥계항의 부진동 자료의 분석 시에 이동평균평활화법을 적용하였다.

3. 관측기간 중의 단주기파 특성

항의 정점 W에서의 단주기파 관측은 수신소 위치 등의 문제점으로 인하여 Table 1에 제시된 것처럼 장주기파 관측보다 4일 늦은 1998년 8월 26일 15시부터 실시되었다. 파향·파고계에 의한 단주기파 관측은 매 시간마다 약 27분간 실시되었다. Fig. 6에는 정점 W에서 매시간 관측된 자료에 파별분석법을 적용하여 구한 유의파고($H_{1/3}$), 유의파고평균주기($T_{H_{1/3}}$)와 Longuet-Higgins법(오 등,

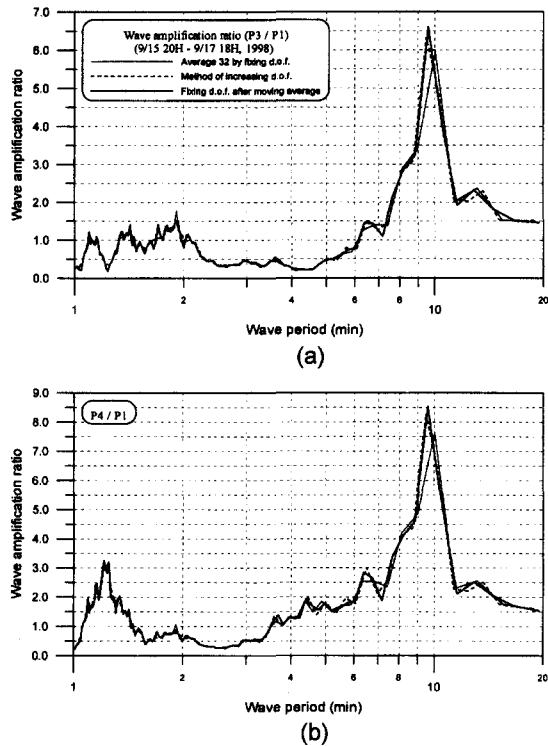


Fig. 5. Comparison of wave amplification ratios obtained by method of averaging 32 components fixing degree of freedom, method of increasing degree of freedom, and method of averaging 24 components after moving average of 17 continuous pressure data measured for 45.5 hours from Sep. 15 20:00, 1998, (a) P3/P1, (b) P4/P1.

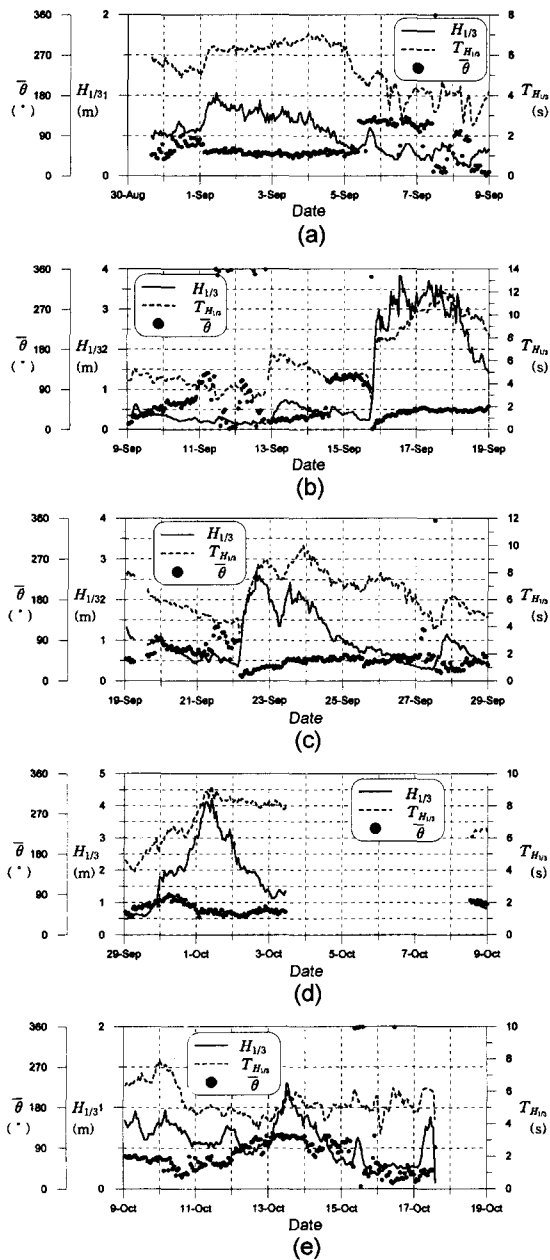


Fig. 6. Time series of $H_{1/3}$, $T_{H_{1/3}}$, and mean wave direction measured at station W in 1998, (a) Aug. 30~Sep. 8, (b) Sep. 9~18, (c) Sep. 19~28, (d) Sep. 29~Oct. 8, (e) Oct. 9~17.

1992)으로 구한 대표 파향(침두 주기에서의 파향)을 도시하였다. 또한, 각각 약 45.5시간으로 구분된 자료 세트들에 해당되는 기간과 그 기간동안의 단주기파의 유의파고, 유의파고평균주기 및 대표 파향들의 변화 및 산술 평균

한 값을 Table 2에 제시하였다. 단, 이 표에서 자료번호 10번과 11번 사이에는 20시간, 13번과 14번 사이에는 18시간의 시간 간격을 두었으며 이는 폭풍파 지속 기간을 보다 잘 포함시키기 위해 실시 하였다.

Fig. 6을 살펴보면 단주기파 관측기간 중에는 유의파고가 4 m 내외인 매우 큰 폭풍파가 2회, 유의파고가 2.5 m 내외인 폭풍파가 1회 내습하여 이 시기가 상당히 악천후에 해당되는 기간이었던 것으로 생각된다. 9월 15일 저녁부터 18일 오전에 걸쳐 내습한 폭풍파는 연속적으로 64 시간동안 유의파고가 2 m 이상, 연속 48시간동안 유의파고가 3 m를 초과한 매우 큰 폭풍파였으며, 태풍 Yanni에 의해 발생한 폭풍파가 내습했던 9월 29일부터 10월 2일 오후의 기간 중에는 유의파고의 최대치가 4.22 m에 달하였으며 연속적으로 25시간동안 유의파고가 3 m 이상을 기록하였다.

관측기간 중의 유의파고평균주기는 대체로 8초 이하였으나 폭풍파들이 내습한 경우에는 파고 증가에 따라 주기도 점차 길어져서 유의파고의 최대치가 지나간 이후 최장 주기가 나타나며 점차 짧아지는 경향을 보였다. 그러나, 이는 폭풍파의 발달기간의 차이에 따라 상당히 다른 특성을 나타내고 있다. 예를 들어 9월 중순에 내습한 폭풍파의 경우 폭풍파가 내습한 지 하루가 지난 후에 유의파고의 최대치가 나타나며, 유의파고평균주기는 계속 증가되어 다시 하루 정도가 지난 이후에 최대치인 12초에 도달했다가 폭풍파가 약화됨에 따라 점차 8초 부근으로 짧아졌다. 한편, 태풍 Yanni 내습시인 10월 초의 폭풍파의 경우 유의파고가 최대였던 시기에 유의파고평균주기도 최대치인 9초를 나타냈으며 이후 이틀에 걸친 파고의 감쇠 기간 중에도 주기는 8초 내외로 거의 짧아지지 않는 특성을 나타냈다. 한편, 9월 22일~24일에 내습한 폭풍파의 경우 유의파고평균주기의 최대치는 유의파고의 최대치가 나타나고 거의 1.5일 정도 지난 이후에 출현하였으나 파고 감쇠 이후에도 이틀 동안의 상당히 오랜 동안 주기가 7초 내외로 지속되어 전술한 두 폭풍파에서 나타난 특성이 혼합된 경향을 나타냈다.

관측기간 중의 대표파향은 대체로 NE 부근에 분포하였으나 9월 5일 오후부터 7일 오전, 9월 14일 오후부터 15일 오전까지는 ESE~SE 사이에, 그리고 10월 12일 새벽부터 15일 오전까지는 E~ESE 사이에 분포하였다. 한편, 9월 15일과 22일에 시작된 폭풍파의 경우 대표파향이 N 부근에서 시작되어 NNE→NE의 시계 방향으로 변화되었으나 태풍 Yanni 내습시의 경우 ENE 부근에서 시

Table 2. Characteristics of short-period waves measured at stations W around Okkye Harbor in 1998.

Data set no.	Measurement period	$H_{1/3}$ (m)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	Mean direction
1	8/26 20H~8/28 18H	-	-	-
2	8/28 18H~8/30 16H	-	-	-
3	8/30 16H~9/1 14H	0.46~1.04 (0.65)	4.9~6.5 (5.6)	N38°E~S87°E (N62°E)
4	9/1 14H~9/3 12H	0.66~0.94 (0.79)	6.1~6.8 (6.4)	N42°E~N62°E (N51°E)
5	9/3 12H~9/5 10H	0.32~0.81 (0.54)	4.7~7.1 (6.4)	N40°E~S57°E (N54°E)
6	9/5 10H~9/7 08H	0.20~0.60 (0.32)	3.0~5.3 (4.3)	N47°E~S49°E (N66°E)
7	9/7 08H~9/9 06H	0.11~0.63 (0.30)	2.5~5.3 (3.8)	N~N01°W (N61°E)
8	9/9 06H~9/11 04H	0.18~0.46 (0.30)	3.7~4.9 (4.3)	N29°E~S54°E (N61°E)
9	9/11 04H~9/13 02H	0.21~0.73 (0.29)	2.6~6.6 (4.1)	N02°E~N01°W (N88°E)
10	9/13 02H~9/15 00H	0.23~0.71 (0.47)	4.1~6.0 (5.0)	N21°E~S56°E (N72° E)
11	9/15 20H~9/17 18H	0.23~ 3.83 (2.61)	2.71~1.0 (8.1)	N01°E~N18°E (N50°E)
12	9/17 18H~9/19 16H	0.89~3.39 (2.02)	6.2~ 12.0 (9.6)	N39°E~N58°E (N45°E)
13	9/19 16H~9/21 14H	0.43~1.09 (0.70)	4.2~6.3 (5.3)	N55°E~S61°E (N75°E)
14	9/22 08H~9/24 06H	1.33~2.68 (2.02)	5.9~ 10.0 (8.4)	N16°E~N53°E (N36°E)
15	9/24 06H~9/26 04H	0.63~1.57 (0.95)	6.6~8.3 (7.4)	N33°E~N59°E (N47°E)
16	9/26 04H~9/28 02H	0.29~1.15 (0.56)	3.8~7.6 (5.9)	N19°E~N05°W (N54 E)
17	9/28 02H~9/30 00H	0.43~1.78 (0.72)	3.9~6.0 (5.0)	N23°E~N77 E (N52°E)
18	9/30 00H~10/1 22H	1.65~4.22 (2.83)	5.7~9.2 (7.5)	N40°E~E (N63°E)
19	10/1 22H~10/3 20H	1.12~2.87 (1.73)	7.8~8.5 (8.1)	N40°E~N63°E (N50°E)
20	10/3 20H~10/5 18H	-	-	-
21	10/5 18H~10/7 16H	-	-	-
22	10/7 16H~10/9 14H	0.60~1.05 (0.84)	6.0~7.1 (6.5)	N65° E~N77° E (N71°E)
23	10/9 14H~10/11 12H	0.51~0.97 (0.68)	4.5~7.9 (6.0)	N26° E~N72° E (N53°E)

*Numerals in the parenthesis denote averaged values.

작되어 E→ENE→NE의 반시계 방향으로 변화된 점이 특 기할 만 하다.

4. 장주기파 분석 결과

4.1 장기와 단기 자료의 비교

장기간의 관측자료가 있는 경우 가능하면 적은 수효의 자료 세트를 만들어 분석하는 것이 시간을 절약할 수 있고, 또한 해석도 명료해지는 경우가 많다는 측면에서 훨씬 유리할 것으로 생각된다. 그러나 시간적으로 변화하는 물리량인 에너지를 분석하는 경우 특정 시기(폭풍시)의 에너지가 다른 시기(정상시)에 비해 매우 큰 경우가 있으며, 만일 그 전체 자료를 스펙트럼 분석하는 경우 에너지가 큰 시기의 특성이 전체를 대표하는 것처럼 제시되는 경우가 많다. 본 연구에서는 1차 관측자료에 대해 FFT의 특성을 유지하면서 분석할 수 있는 최대 길이인 5초 간격 524,288개의 자료에 대한 분석 결과와 앞에서 제시한 32,768개의 자료 분석 결과들을 상호 비교함으로써 장기

간의 단일 자료 분석을 통하여 부진동 특성을 해석하는 경우의 장·단점을 제시하였다.

옥계항의 4개 정점에서 1차 관측시 취득된 자료는 동시성 확보와 수치 필터링으로 인한 오염 제거를 위한 손실을 반영하면 8월 27일 00시부터 10월 13일 02시까지의 46일 2시간(5초 간격 796,320개)을 확보할 수 있다. 이를 8월 27일 00시부터 9월 26일 08시까지의 5초 간격의 자료 524,288개와 9월 12일 18시부터 10월 13일 02시까지의 5초 간격의 자료 524,288개로 구분하면, 전자는 9월 15일과 22일에 시작된 2개의 폭풍파를 포함하게 되며, 후자는 10월 1일에 내습한 태풍 Yanni로 인한 폭풍파까지 포함하게 된다.

상기 자료들은 32,768개의 자료에 비해 길이가 16배 길기 때문에 원시 스펙트럼 밀도의 평활화를 위한 이동평균평활화법의 적용 시에도 이동평균과 평활화하는 자료의 수를 증가시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 원시 스펙트럼을 33개씩 이동평균한 후 256개씩 산술 평균(1,024개 주파수로 축소)하는 이동평균평활화법을 적용하였다.

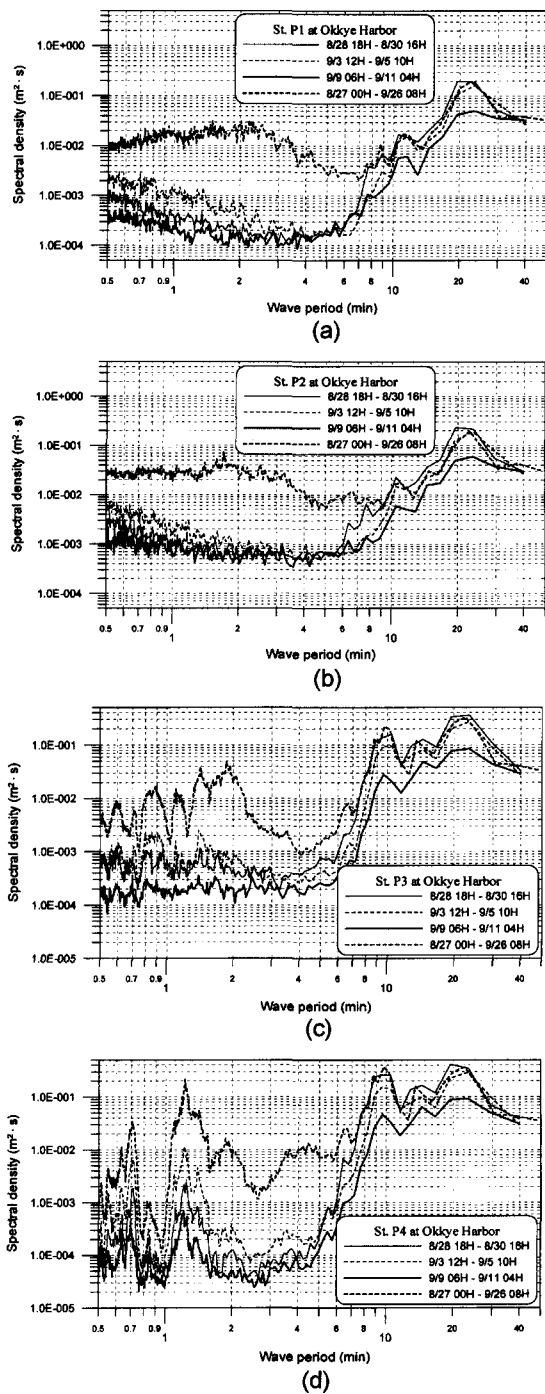


Fig. 7. Comparison of spectral densities obtained from pressure data measured for 728.2 hours from Aug. 27 00:00 and those obtained from data set nos. 2, 5 and 8. Method of averaging components after moving average was applied to all data sets, (a) St. P1, (b) St. P2, (c) St. P3, (d) St. P4.

Fig. 7(a)~(d)는 8월 27일 00시부터 9월 26일 08시까지 P1~P4의 4개 정점에서 구해진 524,288개 자료의 분석 결과인 262,144개의 원시 스펙트럼에 이동평균평활화법을 적용한 결과(굵은 실선으로 표시)와 평상시에 해당되는 2, 5 및 8번(Table 2참조) 자료에 동일한 이동평균평활화법(17개씩 이동평균한 후 24개씩 산술 평균)을 적용하여 구한 스펙트럼 밀도를 주기 0.5~50분의 범위에 대해 함께 제시한 것이다. 먼저, Fig. 7(a)에 제시된 항의 정점인 P1에서의 스펙트럼 밀도를 살펴보면 주기가 가장 긴 20분 전후의 에너지 침투형은 서로 비슷하지만 주기 10분 미만부터는 이들간에 차이가 나타나기 시작하여 단주기측으로 갈수록 서로 명백한 차이를 나타내고 있다. 예를 들면, 주기 2~3분 구간에서는 스펙트럼 밀도의 차이가 50배 이상으로 나타났다. Fig. 7(b)에 제시된 정점 P2에서의 스펙트럼 밀도를 살펴보면 역시 항외에 위치하고 있기 때문에 정점 P1의 결과와 거의 차이가 없는 것으로 제시된다. 한편, 항의 정점들에서는 장기 자료의 스펙트럼이 주기 0.5~6분 사이에서 주기 2분 부근에 정점이 있는 불룩한 형상을 나타내고 있으나, 평상시 자료에서는 이와 반대로 오목한 형상을 나타내었다. 보다 천해역에 위치한 정점 P2에서는 주기 10분 이하에서의 스펙트럼 밀도가 정점 P1에 비해 약간 커졌으며 이는 해안으로부터의 반사파, 천해역에서의 장주기파의 발달 등과 관계있는 것으로 사료되나 그 정확한 이유에 대해서는 추가적인 검토가 필요한 것으로 생각된다. 항입구의 정점 P3에 대한 Fig. 7(c)에서는 주기 7분 부근을 경계로 장기 자료와 2일간의 평상시 자료 사이에 차이가 나타난다. 즉, 주기 7분 이상에서는 양자가 유사하게 3개의 에너지 침투형을 나타내나 7분 이하에서는 가는 점선으로 표시된 9월 3일 12시 자료를 제외하면 스펙트럼의 형태와 에너지 수준 모두에서 큰 차이를 보이고 있다. 항내 정점 P4에 대한 Fig. 7(d)의 경우 정점 P3와 동일하게 주기 7분 이상에서는 자료들이 서로 유사하게 3개의 에너지 침투형을 나타낸다. 한편, 주기 7분 이하에서는 에너지 크기 수준은 큰 차이를 보이고 있으나 스펙트럼의 형태는 상당히 유사하며, 예를 들면 주기 3분 미만에서 국부 공진으로 보이는 에너지 침투형이 3~4개 출현하며 이러한 경향은 2, 5 및 8번의 평상시 자료에서도 에너지가 전반적으로 크게 작기는 하지만 유사한 형태로 제시된다.

Fig. 8(a)~(d)는 9월 12일 18시부터 10월 13일 02시까지 P1~P4의 4개 정점에서 구해진 524,288개 자료의 분석 결과인 262,144개의 원시 스펙트럼에 이동평균평활화

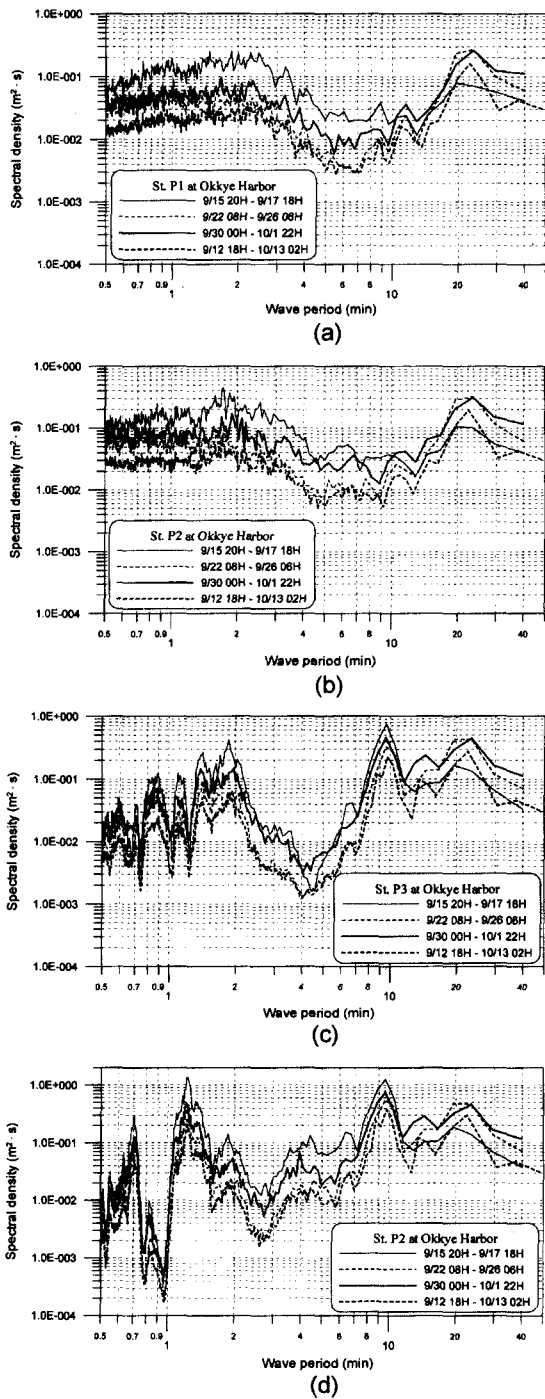


Fig. 8. Comparison of spectral densities obtained from pressure data measured for 728.2 hours from Sep. 12 18:00 and those obtained from data set nos. 11, 14 and 18. Method of averaging components after moving average was applied to all data sets, (a) St. P1, (b) St. P2, (c) St. P3, (d) St. P4.

법을 적용한 결과(굵은 점선)와 폭풍시에 해당되는 11, 14 및 18번(Table 2참조) 자료에 평상시 자료와 동일한 이동 평균평활화법을 적용하여 구한 스펙트럼 밀도를 주기 0.5~50분의 범위에 대해 제시한 것이다. 먼저, Fig. 8(a)에 제시된 항의 정점인 P1에서의 스펙트럼 밀도를 살펴보면 에너지 수준에 약간의 차이가 나타나는 해도 전반적으로 서로 형태가 매우 유사하다. 이러한 경향은 Fig. 8(b)에 제시된 항의 정점 P2에서도 비슷하게 제시된다. Fig. 8(c)와 (d)에 제시된 항입구의 정점 P3와 항내 정점 P4에서도 스펙트럼 밀도는 약간씩의 차이를 보이거나 침두 형태는 서로 매우 유사하게 제시되고 있다.

Fig. 7과 8을 통해 폭풍시와 평상시를 모두 포함하는 장기 자료에 대한 스펙트럼 분석 결과를 이용하여 장주기파 에너지를 검토하는 것은 특히 주기 수 분 이하의 국부 부진동 해석 시에 큰 오류를 범할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 평상시와 폭풍시의 장주기파 분포 특성

전술한 바와 같이 평상시와 폭풍시에 항내·외에서의 장주기파 에너지의 분포 및 항입구와 항내에서의 부진동 현상이 큰 차이를 보이므로 각각에 해당되는 기간 동안의 자료에 대해 상세한 분석을 실시하였다. 평상시 자료로는 9월 3일 12시~5일 10시의 5번 자료(Table 2 참조)와 9월 9일 06시~11일 04시의 8번 자료, 그리고 폭풍시의 자료로는 9월 15일 20시~17일 18시의 11번 자료와 9월 30일 00시~10월 1일 22시의 18번 자료를 각각 선택하였다.

4.2.1 평상시

Fig. 9(a)와 (b)에는 정점 P1, P3 및 P4에서 관측된 5번 자료의 원시 스펙트럼 밀도를 이동평균평활화법으로 평활화한 스펙트럼 밀도(a)와 이를 이용하여 구한 주기별 상대진폭비(b)를 주기 0.5~30.0분의 범위에서 도시하였다. 정점 P1의 경우 Fig. 2(a)의 굵은 실선과 Fig. 9(a)의 가는 실선으로 표시된 스펙트럼 밀도들을 살펴보면, 먼저 주기 23.4분에서 에너지가 가장 큰 침두형이 나타나며 주기 11.5분과 8.9분에서도 약한 침두형이 보인다. 한편, 주기 0.5~4.0분 사이에 다수의 침두 형태가 나타나지만 그 에너지 수준은 매우 낮은 편이다. 참고로 Fig. 2(b)에 제시된 정점 P2에서의 스펙트럼 밀도는 그 형태는 정점 P1과 유사하나 에너지는 약간 높게 나타난다. 여기서는 주기 23.4분의 침두를 제외하면 주기 10.5분과 4.1분에서 다소 불분명한 침두가 나타난다. 항입구 정점 P3의 경우 Fig. 2(c)의 굵은 실선과 Fig. 9(a)의 점선으로 표시된 스펙트

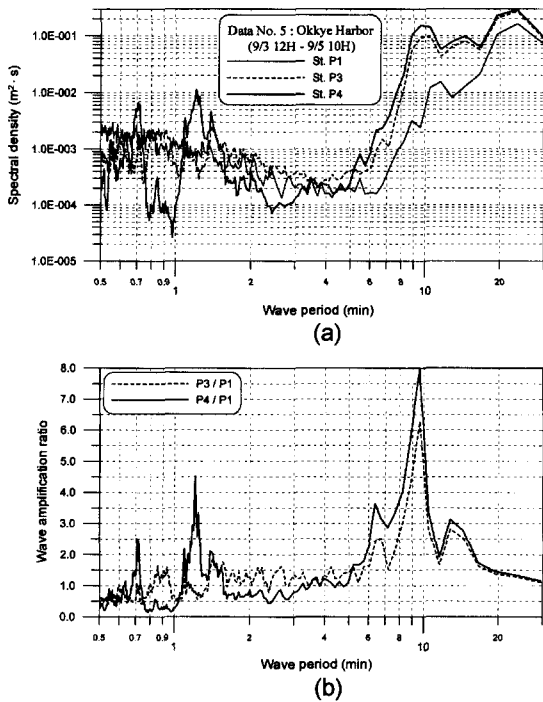


Fig. 9. Results of spectral analysis by method of averaging 24 components after moving average of pressure data measured at Sts. P1, P3 and P4 for 45.5 hours from Sep. 3 12:00, 1998; (a) spectral densities, (b) relative amplification ratios.

럼 밀도들을 살펴보면 주기 23.4분에서 에너지가 가장 큰 첨두형이 나타나며 주기 9.6~10.5분의 첨두형도 매우 뚜렷하다. 이들 사이에는 주기 14.5분의 첨두형이 약하게 나타난다. 주기 2분 이하에서는 주기 1.4분, 1.1분, 0.8~1.0분, 0.7분, 0.6분 등에서 첨두형이 상당히 뚜렷하게 나타난다. 港奥에 위치한 정점 P4의 경우 Fig. 2(d)의 굵은 실선과 Fig. 9(a)의 굵은 실선으로 표시된 스펙트럼 밀도들을 살펴보면 주기 7분 이상에서는 항입구 정점과 매우 유사하게 나타난다. 즉, 이 경우에도 주기 23.4분에서 에너지가 가장 큰 첨두형이 나타나고 주기 9.6~10.5분의 첨두형도 매우 뚜렷하며, 이들 사이에는 주기 14.5분의 첨두형이 약하게 나타난다. 주기 2분 이하에서는 주기 1.4분, 1.2분, 0.7분, 0.6분 등에서 첨두형이 상당히 뚜렷하게 나타난다. Fig. 4(a)의 굵은 실선과 Fig. 9(b)의 점선으로 표시된 정점 P3에서의 상대진폭비를 살펴보면 먼저 에너지가 가장 큰 주기 23.4분에서 공진이 발생하지 않음을 알 수 있다. 주기 9.6분의 공진 모드는 진폭비가 6.3으로 상당히 크며 옥계항 인근 수역의 Helmholtz 공진 모드로 보

여진다. 한편, 이에 인접된 주기 12.9~14.5분에서 진폭비 2.5~2.8로 약하게 제시되는 공진 형태는 실제로는 Helmholtz 공진 모드의 일부이나 정점 P1의 위치에 따른 영향 때문에 상대진폭비의 형태가 분리된 것처럼 나타난 것으로 생각된다. 이는 주기 6.4~6.8분에서 진폭비 2.4~2.5로 제시되는 약한 공진 형태의 경우에도 동일하게 생각할 수 있다. 이 정점에서는 주기 1.4~1.5분(진폭비는 1.7~1.9), 0.9분(진폭비 1.7)에서도 약한 공진 형태가 보인다. Fig. 4(b)의 굵은 실선과 Fig. 9(b)의 실선으로 표시된 港奥의 정점 P4에서의 상대진폭비에서도 주기 23.4분에서는 공진이 발생하지 않는다. Helmholtz 공진 모드인 주기 9.6분의 공진은 진폭비가 8.0으로 매우 크며, 이에 인접된 주기 12.9~14.5분(진폭비 2.8~3.1)과 주기 6.4~6.8분(진폭비 3.2~3.6)의 공진 형태는 위에서 기술한 것처럼 Helmholtz 공진 모드의 일부가 분리되어 제시된 것으로 생각된다. 한편, 이 정점에서는 저중력파의 주기 1.5분(진폭비 2.2), 1.2분(진폭비 4.5), 0.7분(진폭비 2.5) 등에서 매우 뚜렷한 국부 공진 형태가 나타난다.

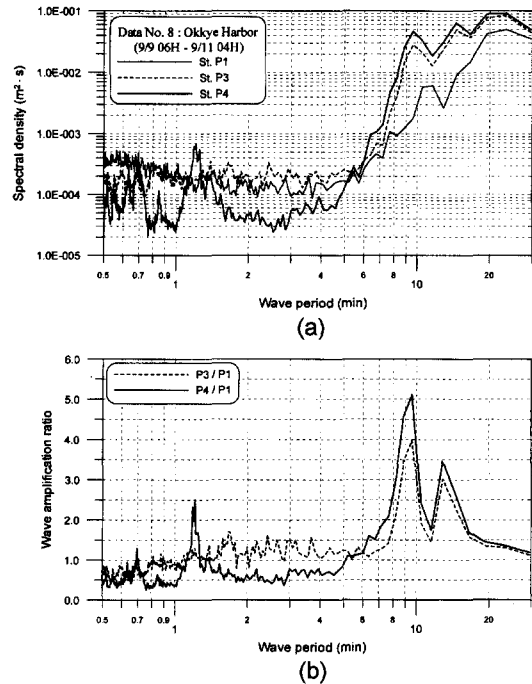


Fig. 10. Results of spectral analysis by method of averaging 24 components after moving average of pressure data measured at Sts. P1, P3 and P4 for 45.5 hours from Sep. 9 06:00, 1998; (a) spectral densities, (b) relative amplification ratios.

Fig. 10(a)와 (b)에는 정점 P1, P3 및 P4에서 관측된 8번 자료의 원시 스펙트럼 밀도를 평활화한 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 도시하였다. 가는 실선으로 표시된 정점 P1에서의 스펙트럼 밀도들을 살펴보면 주기 23.4분에서 에너지가 가장 큰 침두형이 나타나며 주기 10.5~11.5분에서도 뚜렷한 침두형이 보인다. 이 자료에서도 5번 자료처럼 주기 0.5~4분 사이에서는 에너지 수준이 매우 낮은 침두 형태가 다수 나타난다. 점선으로 표시된 항입구 정점 P3에서의 스펙트럼 밀도들을 살펴보면 주기가 가장 긴 에너지 침두가 주기 19.4~23.4분으로 폭이 넓게 나타나는 점이 5번 자료와 차이를 보인다. 한편, 여기서는 주기 14.5분과 9.6분에서 침두형이 다소 분명하게 나타난다. 그러나 5번 자료와는 달리 8번 자료에서는 주기 4분 이하에서 보이던 다수의 약한 에너지 침두형이 거의 나타나지 않는다. 굵은 실선으로 표시된 정점 P4에서의 스펙트럼 밀도들은 5번 자료와 마찬가지로 주기 7분 이상에서는 항입구 정점과 매우 유사하게 나타난다. 즉, 이 경우에도 주기가 가장 긴 에너지 침두가 주기 19.4~23.4분으로 폭이 넓게 나타나며 주기 14.5분과 9.6분의 침두형도 매우 뚜렷하다. 주기 2분 이하에서는 주기 1.2~1.3분, 0.9분, 0.7분, 0.6분 등에서 침두형이 상당히 뚜렷하게 나타난다. Fig. 10(b)에 제시된 8번 자료의 상대진폭비를 살펴보면 5번 자료와 전반적으로 유사하나 주기 12.9분에서의 진폭비가 커진 반면 6.4~6.8분에서는 공진 형태가 거의 사라졌음을 알 수 있다. 정점 P3에서는 주기 12.9분(진폭비 3.0)과 8.9~9.6분(진폭비 3.5~4.0)에서 5번 자료보다 진폭비는 상당히 작아졌으나 형태는 뚜렷한 침두가 나타나며, 주기 1.5~4.0분(진폭비는 1.5~1.7)에서는 다수의 약한 침두들이 보인다. 실선으로 표시된 정점 P4에서도 주기 12.9분(진폭비 3.5)과 8.9~9.6분(진폭비 4.6~5.1)에서 5번 자료보다 진폭비는 상당히 작아졌으나 형태는 뚜렷한 침두가 나타나며, 주기 1.2분(진폭비 2.5), 0.7분(진폭비 1.3)에서 국부 공진 형태가 보이거나 진폭비는 5번 자료에 비해 상당히 작다.

4.2.2 폭풍시

Fig. 11(a)와 (b)에는 정점 P1, P3 및 P4에서 관측된 11번 자료의 원시 스펙트럼 밀도를 평활화한 스펙트럼 밀도와 이를 이용하여 구한 주기별 상대진폭비를 주기 0.5~30.0분의 범위에서 도시하였다. 정점 P1의 경우 Fig. 3(a)의 굵은 실선과 Fig. 11(a)의 가는 실선으로 표시된 스펙트럼 밀도들을 살펴보면, 먼저 에너지가 가장 큰 침두 형태들이 평상시 자료에서는 주기 23.4분에서 나타났

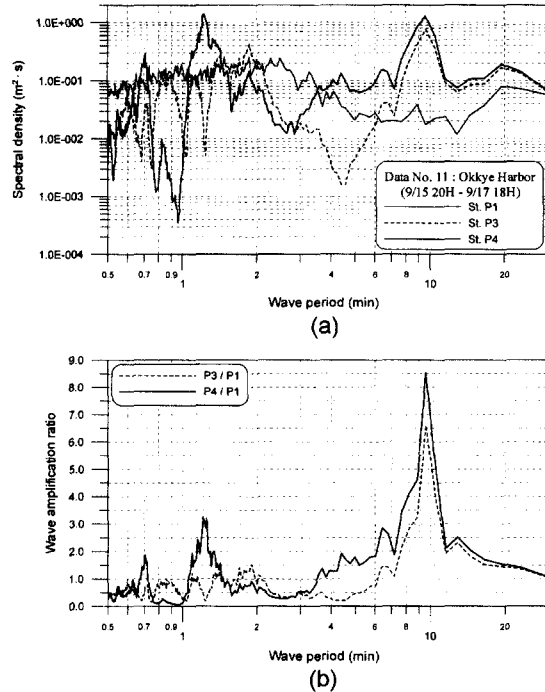


Fig. 11. Results of spectral analysis by method of averaging 24 components after moving average of pressure data measured at Sts. P1, P3 and P4 for 45.5 hours from Sep. 15 20:00, 1998; (a) spectral densities, (b) relative amplification ratios.

던 점과는 달리 저중력파와 주기대인 1.5~2.5분 사이에서 다수 나타난다. 주기가 가장 긴 에너지 침두는 주기 19.4~23.4분으로 평상시에 비해 약간 짧은 곳에서 나타났으며, 주기 3.0~15.0분 사이에 나타나는 다수의 침두 형태들도 평상시 자료에 비해 보다 명료하다. 참고로 Fig. 3(b)에 제시된 정점 P2에서의 스펙트럼 밀도는 주기 15.0분 이상과 3.0분 이하의 범위에서는 정점 P1과 유사하나 그 사이에서는 주기 8.0~10.0분과 5.5~6.5분에서 폭이 넓은 침두형이 나타나는 점이 크게 다르다. 정점 P3의 경우 Fig. 3(c)의 굵은 실선과 Fig. 11(a)의 점선으로 표시된 스펙트럼 밀도들을 살펴보면, 먼저 주기 9.6분에서 에너지가 가장 큰 침두형이 나타나는 점이 평상시 자료와 크게 대비된다. 여기에서도 주기가 가장 긴 에너지 침두는 주기 19.4~23.4분으로 평상시에 비해 약간 짧은 곳에서 나타난다. 한편, 평상시의 5번 자료에서 나타났던 주기 6.4~6.8분의 약한 침두형이 여기에서도 나타나며, 주기 2분 이하에서는 주기 1.9분, 1.4분, 1.1~1.2분, 0.8~0.9분, 0.7분, 0.6분 등에서 다수의 침두 형태가 매우 뚜렷하게 출현한다. 港奥

에 위치한 정점 P4의 경우 Fig. 3(d)의 굵은 실선과 Fig. 11(a)의 굵은 실선으로 표시된 스펙트럼 밀도들을 살펴보면, 평상시 자료의 경우와 유사하게 주기 6분 이상에서는 항입구 정점에서의 형태와 매우 유사하게 제시된다. 단, 이 경우에는 주기 9.6분에서의 침두 에너지보다 주기 1.2분에서의 에너지가 약간 더 큰 차이가 나타난다. 그러나, 주기가 가장 긴 에너지 침두가 주기 19.4~23.4분에서 나타나는 점과 주기 6.4~6.8분에서 약한 침두형이 나타나는 점은 동일하다. 이 정점에서는 주기 4.4분에서도 약한 침두형이 제시되며, 주기 2분 이하에서는 항입구에 비해 침두 형태의 수가 줄어든다. 즉, 주기 2분 이하에서는 1.9분, 1.2분, 0.8분, 0.7분, 0.6분 등에서 침두형이 매우 뚜렷하게 나타난다. Fig. 5(a)의 굵은 실선과 Fig. 11(b)의 점선으로 표시된 정점 P3에서의 상대진폭비를 살펴보면, 전반적인 형태는 평상시와 비슷하나 주기 2.0~6.0 사이에서는 평상시에 비해 진폭비가 크게 작은 것을 알 수 있다. Helmholtz 공진 모드는 주기 9.6분(진폭비 6.6)에서 뚜렷하게 나타나며 주기 12.9분(진폭비 2.3)과 6.4~6.8분(진폭비 1.4)의 공진 형태는 평상시와 마찬가지로 실제로는 Helmholtz 공진 모드의 일부가 정점 P1의 위치 때문에 분리되어 나타난 것으로 생각된다. 이 정점에서는 주기 0.6~2.0분 사이에서 진폭비 1.0~1.5의 약한 공진 형태가 다수 나타난다. Fig. 5(b)의 굵은 실선과 Fig. 11(b)의 실선으로 표시된 정점 P4에서의 상대진폭비도 스펙트럼 밀도와 마찬가지로 주기 6.0분 이상에서는 항입구 정점과 유사하게 나타났다. Helmholtz 공진 모드인 주기 9.6분의 공진은 진폭비가 8.5로 매우 크며, 이에 인접된 주기 12.9~14.5분(진폭비 2.1~2.5)과 주기 6.4~6.8분(진폭비 2.6~2.8)의 공진 형태는 약하게 나타난다. 그리고, 이 정점에서는 주기 1.2~1.3분(진폭비 2.4~3.2)과 0.7분(진폭비 1.9)에서 매우 뚜렷한 국부 공진 형태가 나타난다.

Fig. 12(a)와 (b)에는 정점 P1, P3 및 P4에서 관측된 18번 자료의 원시 스펙트럼 밀도를 평활화한 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 도시하였다. 가는 실선으로 표시된 정점 P1에서의 스펙트럼 밀도들을 살펴보면 11번 자료와는 달리 주기 23.4분에서 에너지가 가장 큰 침두형이 나타나며 주기 10.5~11.5분에서의 침두 형태도 분명한 편이다. 그러나, 이것도 폭풍시 자료여서 주기 1.5~2.5분 사이의 에너지가 상당히 크게 나타난다. 항입구 정점 P3에서의 스펙트럼 밀도들을 살펴보면 평상시와 유사하게 주기 7.0분 이상에서 세 개의 침두 형태가 나타난다. 단, 에너지는 주기 9.6분에서 가장 크지만 주기 23.4분에서의 에너지도 이

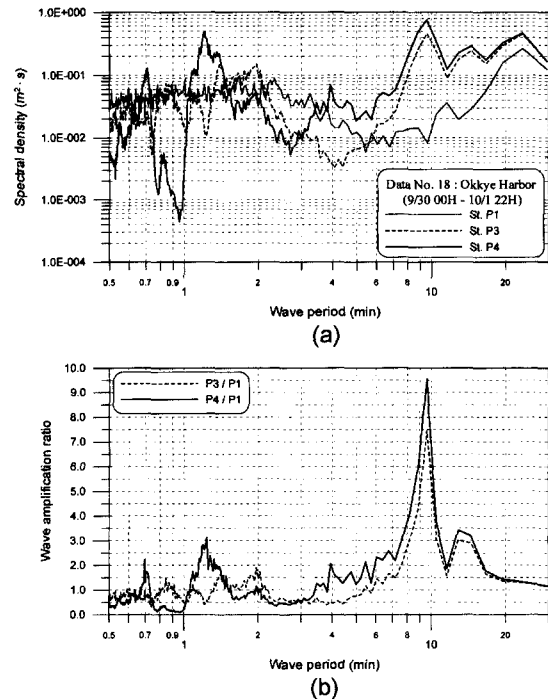


Fig. 12. Results of spectral analysis by method of averaging 24 components after moving average of pressure data measured at Sts. P1, P3 and P4 for 45.5 hours from Sep. 30 00:00, 1998; (a) spectral densities, (b) relative amplification ratios.

와 거의 비슷하다. 주기 2분 이하에서는 1.9분, 1.4분, 1.1분, 0.9분 등에서 다수의 침두 형태가 상당히 뚜렷하게 출현한다. 정점 P4에서의 스펙트럼 밀도들은 주기 9.6분에서 에너지가 가장 큰 침두 형태가 나타나는 점을 제외하면 주기 7분 이상에서는 평상시나 항입구 정점의 자료와 유사하게 나타난다. 그러나, 주기 7분 이하에서는 11번 자료와 매우 유사한 형태를 나타내며, 주기 3.9분과 2.0분에서도 침두형이 약하게 제시된다. 주기 2분 이하에서는 11번 자료와 동일하게 주기 1.2분, 0.8분, 0.7분 등에서 침두형이 매우 뚜렷하게 나타난다. Fig. 12(b)에 제시된 상대진폭비를 살펴보면 평상시의 5번과 폭풍시의 11번 자료가 혼합된, 즉 주기 7.0분 이상에서는 5번 자료와, 그리고 7.0분 이하에서는 11번 자료와 비슷한 형태를 보여준다. 정점 P3에서는 주기 9.6분의 진폭비가 7.5로 비교한 4개 자료 중에서 가장 크게 나타나며 주기 12.9~14.5분(진폭비 2.9~3.0)의 공진 형태도 상당히 뚜렷하다. 여기서도 주기 3.0~6.0분에서는 평상시와 달리 공진 형태가 전

혀 나타나지 않으며, 주기 2.0분(진폭비 1.9), 주기 1.4~1.5 분(진폭비 1.6), 1.1분(진폭비 1.2), 0.8분(진폭비 1.5) 등에서 약한 공진 형태가 다수 나타난다. 정점 P4에서도 주기 9.6분의 진폭비가 9.6으로 비교한 4개 자료 중에서 가장 크게 나타나며 주기 12.9~14.5분(진폭비 3.2~3.4)의 공진 형태도 상당히 뚜렷하다. 주기 6.4~6.8분에서는 11번 자료와 비슷하게 공진 형태를 구분하기 어렵지만 주기 4.0분에서는 진폭비 2.1의 공진 형태가 약하게 제시된다. 11번 자료의 정점 P4와 마찬가지로 이 정점에서도 주기 1.2~1.3분(진폭비 2.2~3.1)과 0.7분(진폭비 2.2)에서 매우 뚜렷한 국부 공진 형태가 나타난다.

한편, 앞에서 언급한 것처럼 폭풍시의 18번 자료의 분석 결과에서는 정상시의 5번과 폭풍시의 11번 자료들의 특성이 주기에 따라 혼합된 형태로 제시되었다. 그 이유는 Table 2와 Fig. 6에 제시된 관측자료의 시작 및 종료 시각과 유의파고의 변화를 같이 고려하면 유추가 가능하다. 즉, 11번 자료의 관측기간(9월 15일 20시~17일 18시)에는 유의파고가 모두 2.5 m(대부분 3.0 m 이상) 이상이었으나 18번 자료의 관측기간(9월 30일 00시~10월 1일 22시)에는 유의파고가 3.0 m 이하인 기간이 거의 절반이어서 후자의 경우 폭풍파가 약했던 기간의 자료가 정상시와 유사한 특성을 나타낸 것으로 보인다. 또한, 전자의 경우 단주기파의 유의파고평균주기가 8~12초 사이로 매우 길었던 반면 후자에서는 6~9초 사이에 분포한 차이도 영향을 미쳤을 것으로 생각되나 자세한 것은 추후 검토를 요한다.

4.3 폭풍시 저중력파에 의한 국부 부진동 분석

Fig. 6을 살펴보면 1차 관측 기간 중에는 대략 9월 16~17일과 10월 1일에 유의파고 4 m 내외의 큰 폭풍파가 내습하였다. 시간 변화에 따른 저중력파와 장주기파의 관계를 검토하기 위해서는 이러한 폭풍파 전후의 주파수별 에너지 분포를 살펴보는 것이 필요하다. 여기서는 9월 11일 0시부터 24일 23시, 그리고 9월 24일 0시부터 10월 7일 23시까지의 각각 연속된 14일간의 자료를 이용하여 running averaged spectra를 구하고 항내·외 장주기파와 저중력파 에너지의 시간적 변화를 검토하였다.

자료의 구분은 예를 들어 1998년 9월 11일 0시부터 24일 23시까지 정점 P1~P4에서 관측된 각 14일간의 연속된 자료의 경우 2일 길이(엄밀하게는 5초 간격 32.768 개)를 1세트로 구분하되 시작 시간을 1시간씩 뒤로 늦춰서 구성하였다. 따라서, 처음 자료는 9월 11일 0시부터

12일 23시까지, 그리고 마지막 자료는 9월 23일 0시부터 24일 23시까지가 되며 모두 288세트가 된다.

Fig. 13(a)~(d)에는 9월 11일 0시부터 24일 23시까지, 그리고 Fig. 14(a)~(d)에는 9월 24일 0시부터 10월 7일 23시까지 정점 P1~P4에서 각각 구해진 각 288개의 주파수별 스펙트럼 밀도를 사용하여 작성한 시간 경과에 따른 running averaged spectra(주파수별 스펙트럼 밀도의 등치선도)들을 도시하였다. 이 그림들에서 가로 축은 시간의 경과를, 그리고 세로 축은 주파수를 각각 나타낸다. 가로 축의 경우 각 자료의 중심 시각을 기준하므로 Fig. 13의 경우를 예로 들면 1이 9월 12일 0시를 나타내며 1시간씩 시작 시간이 지연되어 288은 9월 23일 23시가 되며, Fig. 14의 경우 1이 9월 25일 0시를, 그리고 288이 10월 6일 23시를 각각 나타내게 된다. 세로 축은 240개의 등간격으로 구분된 주파수를 나타내며 1이 1.0378 Hz(약 160.6분), Δf 가 1.9532 Hz이다. 편의를 위해 눈금에 표시된 값들을 주기로 표시하면 6은 약 15.43분, 12는 약 7.400분, 18은 약 4.867분, 24는 약 3.626분, 30은 약 2.889분, 60은 약 1.433분, 90은 약 0.953분, 120은 약 0.714분, 150은 약 0.571분, 180은 약 0.475분, 210은 약 0.407분, 240은 약 0.356분(약 21.4초)을 각각 나타낸다.

Fig. 13과 14를 Fig. 6과 함께 살펴보면 먼저 항입구와 항내 정점의 경우 폭풍시의 에너지가 정상시의 에너지에 비해 주파수 대폭에 무관하게 크게 나타나고 있다. 항외 정점 P1과 P2의 경우 주기가 7.4분보다 단주기측에서는 항내 정점에서처럼 폭풍시의 에너지가 정상시의 에너지에 비해 크게 나타나고 있으나 그보다 장주기측인 Helmholtz 공진 모드 주변의 장주기파 에너지는 단주기파의 파고와 특별한 관계가 없는 것으로 나타났다. 예를 들어 Fig. 13(a)에서 9월 16~17일의 폭풍시에는 주기 20~30분의 장주기파 에너지가 다른 시기에 비해 오히려 작은 편이나 Fig. 14(a)를 살펴보면 10월 1일에 해당되는 기간 동안의 장주기파 에너지가 다른 시기에 비해 오히려 크게 나타났다. 한편, 항입구와 항내 정점의 경우 Helmholtz 공진 모드(세로 축의 눈금 6과 12 사이)와 주기 1~2분의 저중력파(항입구 정점) 또는 국부 부진동(항내 정점)에서의 에너지가 폭풍파의 발달함에 따라 커지고 다시 폭풍파가 약화되면 에너지가 작아지는 점이 명료하게 나타나고 있다. Fig. 14를 살펴보면 10월 1일의 폭풍시에 항외 및 항입구 정점 P1~P3에서는 너울의 주기에 가까운 21~24초(눈금 210~240)에서의 에너지가 매우 크나 항내 정점 P4에서의 에너지 수준은 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이

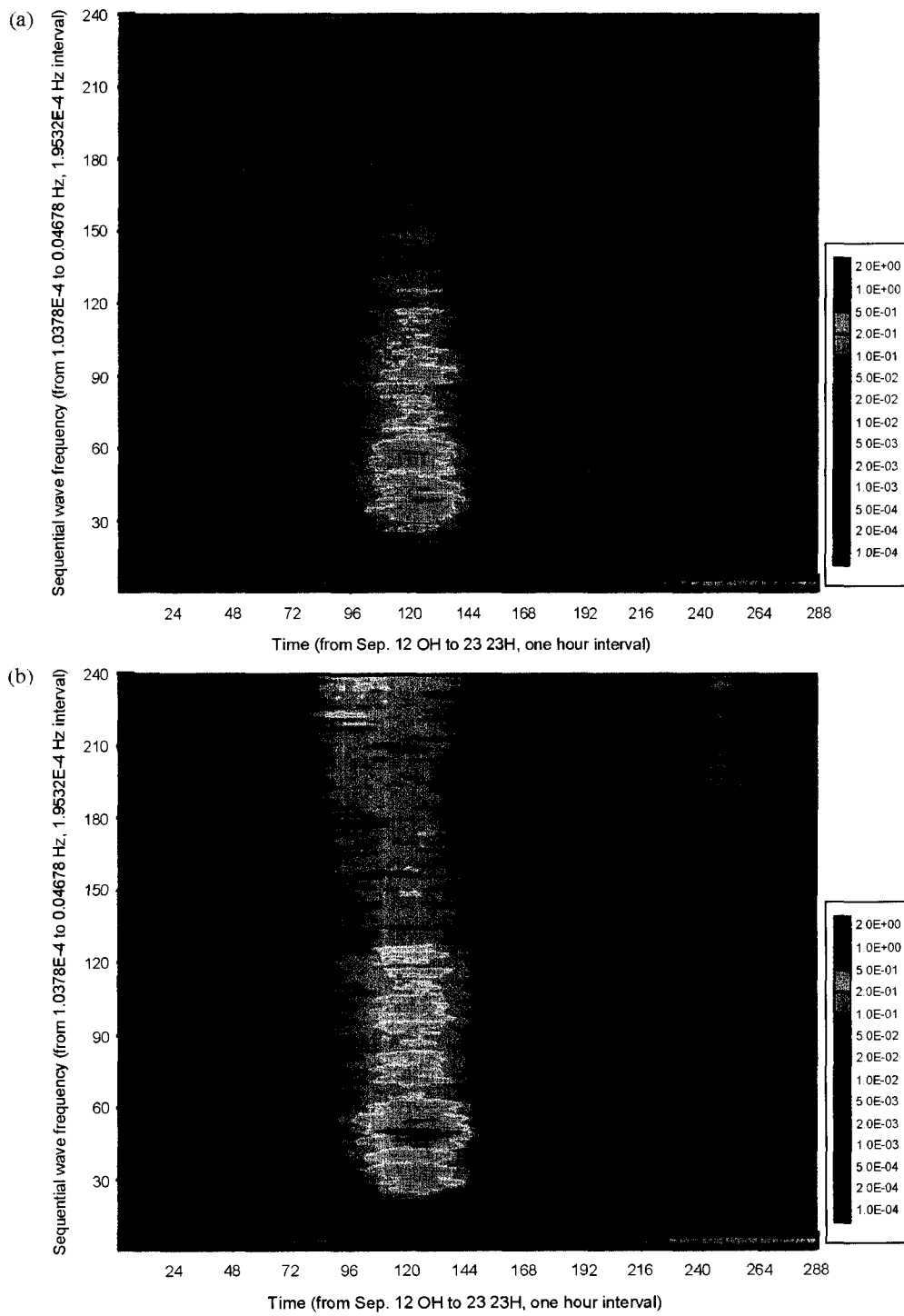


Fig. 13. Running spectra of pressure variation obtained around Okkye Harbor from Sep. 12 00:00 to Sep. 23 23:00; (a) St. P1, (b) St. P2, (c) St. P3, (d) St. P4.

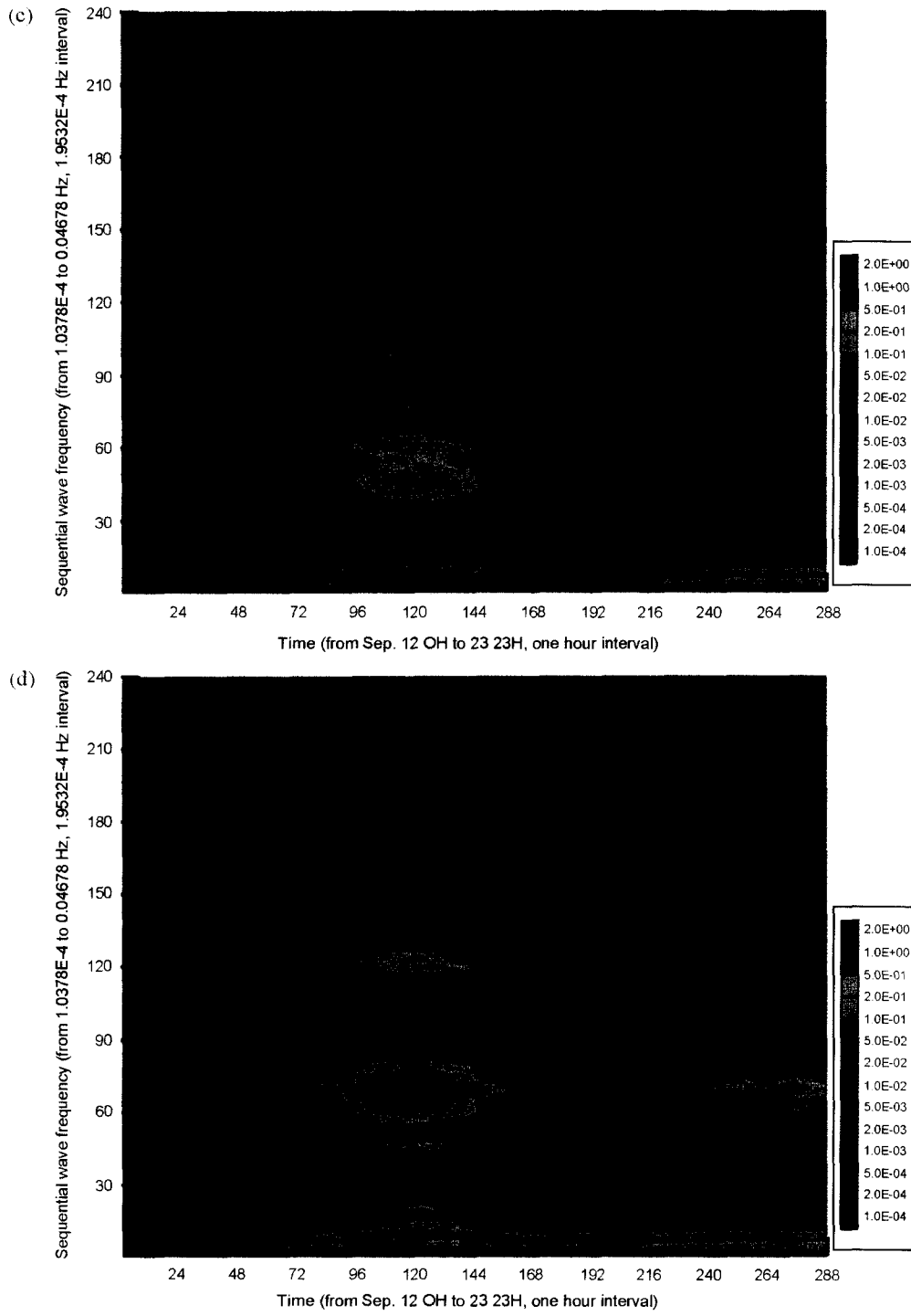


Fig. 13. (Continued).

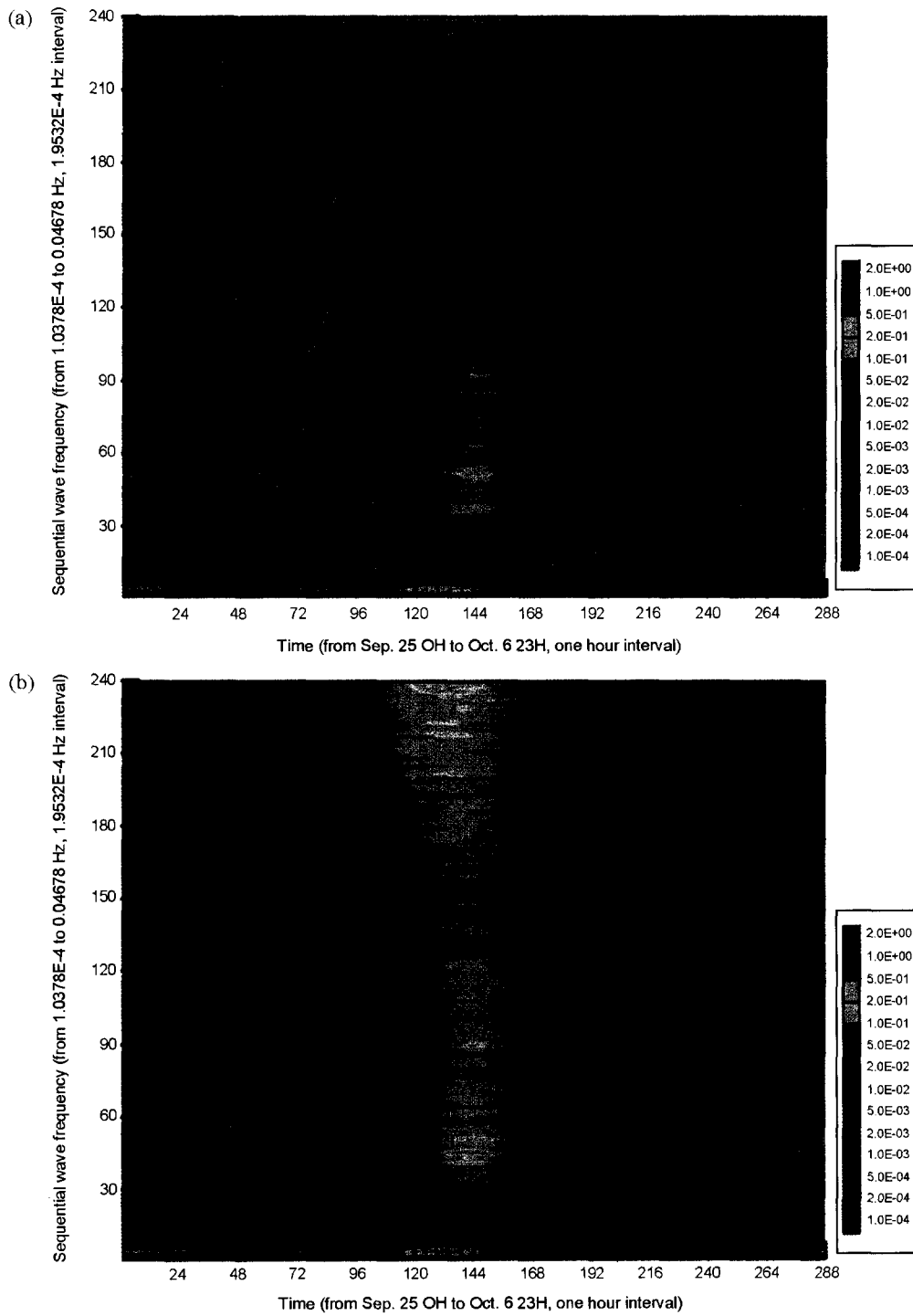


Fig. 14. Running spectra of pressure variation obtained around Okkye Harbor from Sep. 25 00:00 to Oct. 6 23:00; (a) St. P1, (b) St. P2, (c) St. P3, (d) St. P4.

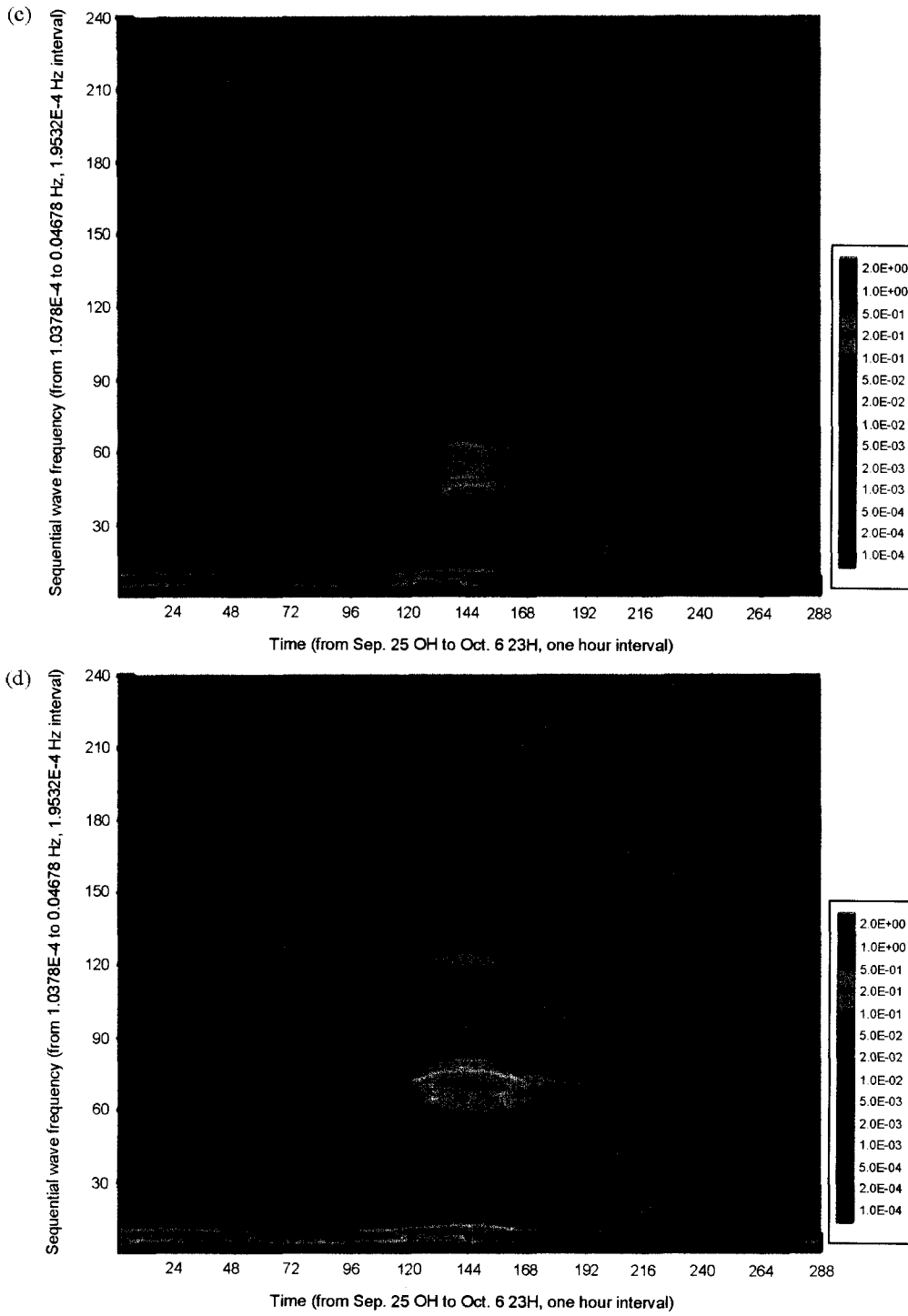


Fig. 14. (Continued).

는 너울의 주기가 항내에서 공진을 일으키기에는 너무 짧고, 또 항입구를 통해 港奥로 전파해오는 동안 굴절, 회절 등의 영향으로 에너지가 크게 감소되었기 때문에 사료된다.

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 옥계항 내의 5개 정점에서 파향·파고계와 수압식 파고계를 사용하여 연속관측한 장·단주기파의 장기간 자료를 분석하여 옥계항 주변 해역에서의 장주기파 에너지의 공간적 및 시간적 분포를 검토하였다. 장주기파 자료 분석에 일정평활화법, 점증평활화법 및 이동평균평활화법을 적용하여 각각의 장·단점을 검토하였다. 한편, 평상시와 폭풍시의 정점별 장주기파 자료를 상호 비교·검토함으로써 각 시기의 항내·외 장주기파 및 부진동 특성을 엄밀하게 분석하였다. 상기 분석 결과들을 종합하여 옥계항 주변의 장주기파 에너지의 분포 특성 및 Helmholtz 공진 모드를 포함한 옥계항에서의 부진동 모드에 대해서도 상세하게 검토하였다. 또한, 2회의 폭풍파 내습 전후의 장기 자료에 대해 running averaged spectra를 작성하여 너울, 항의 장주기파, 저중력파 및 항내 국부 부진동과의 상관 관계에 대해서도 분석하였다. 본 연구를 통해 구해진 주요 결론 및 토의 사항을 아래에 정리하였다.

- 장주기파 자료 분석을 위해 스펙트럼 분석에서 제시되는 윈시 스펙트럼 밀도에 대해 일정평활화법, 점증평활화법 및 이동평균평활화법을 비교·검토한 결과 정 등(1999)의 연구 결과와는 달리 이동평균평활화법이 가장 양호한 분석 결과를 제시하였다.

- 상기 차이는 감천항과 옥계항의 장주기파 분석에 사용된 자료의 길이가 2배 차이인 점과 두 항의 Helmholtz 공진 주기의 차이에서 기인되었으며, 이는 해당 항만의 제1 공진 모드의 주기와 사용하는 자료의 길이에 따라 적절한 에너지 평활화 방법을 사용해야 하며 그렇지 않을 경우 제1 또는 제2 공진 모드의 주기가 실제와는 상당히 다르게 제시될 수 있음을 나타냈다.

- 평상시와 폭풍시를 모두 포함하는 장기 자료만에 대한 스펙트럼 분석 결과를 이용하여 장주기파 에너지를 검토하는 것은 주기 수 분 이하의 국부 부진동 해석 시에 오류를 범할 수도 있다.

- 옥계항의 Helmholtz 공진 주기는 약 9.6분(정점 P1에 대한 상대진폭비는 9~10)이며 주기 1.2~1.3과 0.7분의

국부 부진동이 매우 뚜렷하게 나타났다.

- 항의 정점의 경우 평상시에는 주기 20~30분대의 에너지가 가장 크고 주기가 짧아짐에 따라 에너지가 줄어들다가 4분을 경계로 다시 약간씩 증가되어 가운데가 오목한 U자 형태를 나타내나, 폭풍시에는 주기 6~14분 부근의 에너지가 가장 작고 20분 부근과 1~2분대의 에너지가 큰 M자 형태를 나타낸다.

- 평상시에서는 항입구와 항내 정점에서 주기 9분 이상에서의 에너지가 저중력파에 해당되는 0.5~4분에서의 에너지에 비해 100배 이상으로 매우 크게 나타나지만, 폭풍시에는 전체 주기대에 걸쳐 에너지 수준이 비슷(공진이 일어나는 주기대는 제외)하거나 주기 9분 이상에서의 에너지가 저중력파 에너지에 비해 5배 정도 크게 나타난다.

- 주기 2.5분 이하에서 발생하는 항내 정점에서의 국부 부진동은 그 출현 주기와 상대진폭비의 크기는 시기에 무관하게 거의 비슷하게 나타나지만 에너지 수준은 평상시에 비해 폭풍시에 최소 100배 이상으로 제시되는 차이를 보인다.

- 항의 정점의 경우 주기가 7.4분 이하에서는 폭풍시의 에너지가 평상시의 에너지에 비해 크게 나타나고 있으나 그 이상의 장주기파 에너지는 단주기파의 파고와 특별한 관계가 없는 것으로 나타났다.

- 항입구와 항내 정점의 경우 폭풍시의 에너지가 평상시의 에너지에 비해 주파수 대폭에 무관하게 크게 나타났으며, 또한 항내 정점의 경우 Helmholtz 공진 모드와 주기 1~2분의 저중력파 또는 국부 부진동에서의 에너지가 폭풍파고의 크기에 비례하는 것으로 나타났다.

- 평상시에는 주기 4.0~4.5분대의 에너지가 정점의 위치에 무관하게 비슷하나 폭풍시에는 항외나 항내 정점보다 항입구 정점에서의 에너지가 크게 나타나며 그 자세한 이유에 대해서는 추후 상세한 연구가 요망된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기관고유사업인 “연안방재 구조물의 설계기술 개발”의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 서경덕 교수는 서울대학교 공과대학 공학연구소의 지원을 받았음을 밝히고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

문동준, 1998. Wavelet을 이용한 항만부진동 연구, 석사학위논문, 부산대학교, 100p.

- 오병철, 박경수, 심재설, 1992. Array를 이용한 파향 스펙트럼 산정에 관한 연구, *해양 연구*, **14**(2): 111-129.
- 정원무, 1999. 항만부진동에 대한 현장연구와 유한요소 해석, 박사학위논문, 서울대학교, 445p.
- 정원무, 박우선, 서경덕, 채장원, 정신태, 1999. 개구부가 좁은 직사각형 항만의 공진 특성(1. 현장관측과 자료 분석), *한국해안·해양공학회지*, **11**(4), 201-215.
- 정원무, 정경태, 채장원, 1995. 목호항의 항내 진동, *한국해안·해양공학회지*, **7**(1), 46-56.
- 한국해양연구소, 1999. 연안방재 구조물의 설계기술 개발(I), BSPE 98707-00-1155-2, 336p.
- Krauss, T.P., Shure, L. and Little, J.N., 1994. Signal processing toolbox user's guide, The Math Works, Inc.
- Okiihiro, M., Guza, R.T., and Seymour, R.J., 1993. Excitation of seiche observed in a small harbor, *J. Geophysical Research*, **98**(C10), pp. 18,201-18,211.
- Wilson, B.W., 1967. The threshold of surge damage for moored ships, *Proc. Inst. Civil Engineers*, **38**, pp. 107-134.

Received May 15, 2001

Accepted July 4, 2001