

속초항과 청초호의 부진동 특성 (1. 현장관측과 자료 분석)

Long-Period Wave Oscillations in Sokcho Harbor and Cheongcho Lagoon (1. Field Measurements and Data Analyses)

정원무* · 박우선* · 김규한** · 채장원* · 김지희*

Weon Mu Jeong*, Woo Sun Park*, Kyu Han Kim**, Jang Won Chae*, and Ji Hee Kim*

要 旨 : 협수로로 연결된 속초항과 청초호의 장주기파 공진을 검토하기 위하여 항내·외 8개 정점에서 파향·파고계, 초음파식 파고계, 수압식 파고계, 유속계 등을 이용하여 장·단주기파 현장관측을 실시하였다. 자료 분석 결과 속초항과 청초호의 Helmholtz 공진 모드의 주기는 각각 13.6분과 54.5분으로 제시되었으며, 협수로 내 주된 유속의 출현 주기는 55.2분으로 청초호의 Helmholtz 공진 조건에 지배됨을 알 수 있었다. 저중력파로 인한 국부 부진동의 에너지 수준은 평상시보다 폭풍시에 훨씬 더 큰 것으로 나타났다. 항내·외 정점에서의 저중력파 파고와 항외의 단주기파고에 대한 회귀분석 결과 양자는 거의 선형적인 상관 관계를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 양자의 주기들, 단주기 파고와 저중력파 파고, 단주기 파고와 저중력파 주기 사이에는 특별한 상관 관계를 발견하지 못하였다. 한편, 향후 장기간 자료가 축적되면 속초항 해역에서의 저중력파 파고에 대한 극치 해석을 통하여 재현빈도별 저중력파 파고를 추정할 수 있을 것으로 사료되었다.

핵심용어 : 연결 항만, 항만 공진, 현장관측, 저중력파, 폭풍파

Abstract □ To investigate long-period wave responses in Sokcho Harbor and Cheongcho lagoon, field measurements were made for long- and short-period waves and current velocities using a Directional Waverider, a ultrasonic-type wave gauge, four pressure-type wave gauges, and a current meter. From the data analysis, it was found that the Helmholtz resonant periods of Sokcho Harbor and Cheongcho lagoon are about 13.6 and 54.5 minutes, respectively, and the dominant period of wave induced current in the passage between Sokcho Harbor and Cheongcho lagoon is about 55.2 minutes which depends on Helmholtz resonant condition of the Cheongcho lagoon. It was also found that the energy level of the far-infra-gravity waves during storm conditions is very high compared with that during calm sea conditions. To investigate relationships between far-infra-gravity waves and short-period waves at offshore station, regression analyses were carried out especially for 1) heights, 2) periods, 3) direction and height, 4) height and period between short-and far-infra-gravity waves, respectively. The results showed that the long-period wave height is highly correlated with the short-period wave height. However, no special trend was found for the other relations. In the future far-infra-gravity wave heights on return period around Sokcho Harbor region can be suggested by using extreme value analyses of long term measured data.

Keywords : Connected harbor, harbor resonance, field measurement, far-infra-gravity wave, storm sea

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: Weon Mu Jeong, Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul, 425-600, Korea. wmjeong@kordi.re.kr)
**관동대학교 건설환경시스템공학부(Division of Civil and Environmental System Engineering, Kwandong University)

1. 서 론

일반적인 항만은 항내 수역이 수 개로 구분되어 있는 경우는 많으나 수로 등으로 다른 항이나 호수에 연결된 경우는 매우 드물다. 속초항은 협수로를 통하여 청초호와 연결되어 있으므로 그 부진동 특성도 단일 수역을 가진 일반 항만과는 상당히 다를 것으로 예상된다.

한편, 청초호 지역은 '99강원도 국제박람회 개최시설과 관광시설을 위해 남쪽과 서쪽 수역이 상당히 매립되었으며, 속초항과 청초호 지역은 협수로의 매립, 속초항 남쪽 지역의 항만 신설, 신설 항만과 청초호 사이의 수로 개설 등을 포함한 장래 개발계획이 수립되어 있다. 이 경우 기존의 속초항은 청초호와 분리되고 청초호는 신설 수로를 통해 외해 또는 신설 항만과 연결되게 되어 기존의 Helmholtz 공진 모드를 포함한 장주기 부진동 모드에 큰 변화가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 장래 확장에 따른 장주기파에 의한 부진동 및 정온도를 예측하기 위한 일환으로 속초항과 청초호의 현상태 부진동 특성을 엄밀하게 검토·분석하는 것이 필요한 것으로 생각된다.

Okihiro *et al.*(1993)은 Helmholtz 공진 모드와 같이 주기가 긴 부진동에 대해서는 기상 여건 또는 지진해일의 영향이 지배적이거나, 주기가 수 분 이하로 비교적 짧은 부진동 모드들은 항외에서의 너울의 영향을 많이 받는 점을 관측자료 분석을 통하여 제시하였다. 한편, 정(1999)에 따르면 조석 현상과는 달리 부진동은 항외의 해상 상태에 따라 시간적 변화를 나타내는 것으로 나타났다. 또한, 정 등(2001)에 따르면 항외의 해상 상태가 평온한 경우와 악천후인 경우에는 공진주기가 수 분 이하인 국부 부진동의 특성이 매우 다르게 나타나며 후자가 전자에 비해 에너지 수준이 100배 이상인 것으로 나타났다.

그러나 이들의 연구에서는 관측지점이 항외, 항입구 및 항내로 제한되어 장주기파의 천해 발달 특성을 검토하지는 못하였다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 1999년 하계에 항입구 외측의 사빈 해안 전면을 포함한 속초항 내외의 8개 정점에서 부이형 파향·파고계, 착저형 초음파식 파향·파고계, PUV, RCM-9 유속계 및 수압식 파고계 등을 사용한 장·단주기파 연속관측을 실시하였으며, 분석을 통하여 장주기파의 천해 발달 특성과 속초항 및 청초호의 공진에 대해서 분석하였다. 즉, 평상시와 폭풍시의 자료를 상호·비교함으로써 양 시기의 항내·외 장주기파 및 부진동 특성을 엄밀하게 검토하였으며, 이들과 장기간 자료의 분석 결과들을 종합하여 속초항과 청

초호 주변의 장주기파 에너지의 분포 특성 및 Helmholtz 공진 모드를 포함한 부진동 모드에 대해서도 상세하게 분석하였다. 또한, 풍파와 저중력파(Far-Infra-Gravity wave; FIG wave)의 산포도와 회귀식을 이용하여 양자간의 상관관계에 대해서도 검토하였다.

2. 현장관측과 자료 분석

2.1 현장관측

본 연구에서는 속초항 내외의 8개 정점(Fig. 1 참조)에서 네덜란드 Datawell사의 부이형 파향·파고계(Directional Waverider), 일본 I.O. Tech사의 착저형 초음파식 파고계(모델명: Wave Hunter Sigma)와 PUV(모델명: Wave Hunter 102), Aanderaa사의 RCM-9 유속계 각 1대 및 수압식 파고계 3대를 사용하여 취득한 현장관측 자료(한국해양연구소, 2000)를 이용하여 속초항에 주로 내습하는 장주기파의 에너지 분포와 항내 부진동 현상을 검토하였다. 이 관측은 한국해양연구소와 관동대학교 건설환경시스템공학부의 공동 연구로 수행되었다.

Fig. 1의 정점 DW(●로 표시)에는 부이형 파향·파고계를 설치하여 매시간 단주기파의 파고, 주기 및 파향을 관측하였다. 정점 PC1(▲로 표시, 이하에서는 편의상 P1으로 표기)에는 초음파식 파향·파고계(WH-Sigma)를 설치하여 0.5초 간격으로 해수면 변위(η)와 수압 및 유속 자료를 수집하였다. 정점 PC2(▲로 표시, 이하에서는 편의상 P2로 표기)에는 PUV(WH-102)로 1초마다 수압과 유속을, 정점 P3~P6(■로 표시)에는 수압식 파고계(기억용량 8 MB)를 각각 설치하여 0.5초(단, 정점 P5에서는 1초 간격)마다 수압 자료를 취득하였다. 그리고 속초항과 청초호를 연결하는 협수로의 중앙부에는 RCM-9 유속계를 저면에 설치하여 1분 간격으로 평균된 유속과 유향을 관측하였다. 한편, Fig. 1을 살펴보면 청초호 내부에 붉은 점선으로 표시된 부분을 볼 수 있는데 이는 청초호 남쪽과 서쪽의 호안 공사를 위해 관측기간 중에 설치되었던 silt protector를 나타낸다. 그리고 협수로 우측의 점선들은 신설 항만과의 연결 수로를 나타낸다.

상기 현장관측은 1999년도에 1차(6월 23일~7월 7일)와 2차(7월 7일~20일)에 걸쳐 실시되었으며 관측위치와 항목별 관측기간 등을 포함한 자세한 내용을 Table 1에 정리하였다. 정점 DW, P1, P2, P3, P5에서는 전체 관측기간 동안 자료가 수집되었으나 정점 C는 기기 내의 자료저장장치의 용량 제한으로 7월 7일에 관측이 종료되었

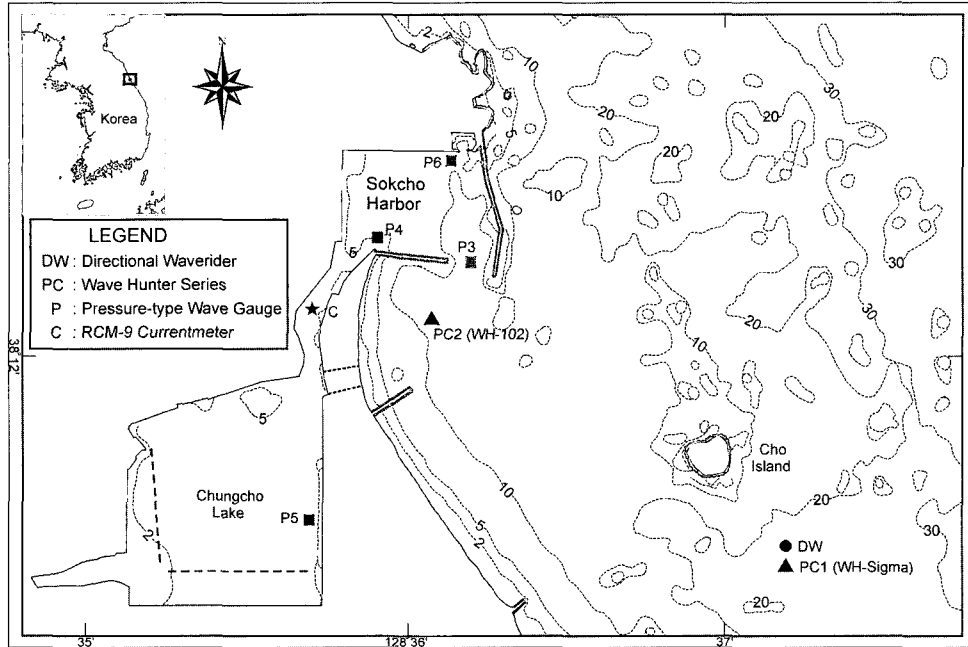


Fig. 1. Location map of field measurement stations around Sokcho Harbor.

Table 1. Location and period of measurement stations around Sokcho Harbor in 1999

Station	Measuring instrument	Data sampling interval(s)	Location of measurement		Water depth (m)	Measuring period
			Longitude	Latitude		
DW	DWB	0.78125	128°37'16.62"E	38°11'26.58"N	25.0	Jun. 23 16H~Jul. 20 12H
P1	WH-Sigma (Ultrasonic)	0.5	128°37'14.76"E	38°11'27.84"N	24.0	Jun. 23 13H~Jul. 20 12H
P2	WH-102 (PUV)	0.5	128°36'04.86"E	38°12'02.70"N	10.0	Jun. 23 13H~Jul. 20 12H
P3	SWTG	0.5	128°36'10.38"E	38°12'12.00"N	13.6	Jun. 23 13H~Jul. 20 10H
P4	SWTG	0.5	128°35'57.13"E	38°12'14.93"N	5.2	Jun. 23 13H~Jul. 07 14H
P5	SWTG	1.0	128°35'43.68"E	38°11'35.58"N	5.0	Jun. 23 13H~Jul. 20 10H
P6	SWTG	0.5	128°36'07.59"E	38°12'27.26"N	8.7	Jul. 07 18H~Jul. 20 11H
C	RCM-9	60.0	128°35'44.42"E	38°12'06.49"N	3.5	Jun. 23 15H~Jul. 07 12H

다. 한편, 정점 P4의 경우 해저 장애물 등으로 기기의 설치 및 회수 작업이 곤란하여 2차 관측 시에는 정점 P6으로 기기를 이동하였다. 대부분의 관측자료들은 양호한 상태였으나 청초호 내의 정점 P5에서 관측된 수압자료에는 spike 형태의 오류가 다소 포함되어 있었으며 이들은 모두 육안으로 교정하였다.

2.2 장주기파 분석 방법

초음파식 파향·파고계, PUV 및 수압식 파고계로 취득된 원시 수압 자료의 경우 각 기기의 특성에 맞는 변환 계수를 사용한 온도 보정을 거쳐 수압 자료로 변환시

키고, 각각의 보정된 자료들에 대해 경향 제거와 고주파수 통과 필터링을 실시하여 조석 성분을 제거하였다. 고주파수 통과 필터로는 정 등(1999)이 사용한 Butterworth 필터를 채택하였다. 수치 필터의 제작 시에 절단 주기는 청초호 내의 Helmholtz 공진 모드의 주기인 50분 부근의 자료 오염을 방지하기 위하여 180분으로 설정하였다. 한편, 편의상 정점에 따라 0.5초 또는 1초 간격으로 취득된 자료들을 5초 간격으로 재편집하여 분석하였다.

장기간의 관측 자료가 있는 경우 가능하면 자료의 길이를 길게 함으로써 분석하는 자료 세트의 수를 적게 하는 것이 1~2일 길이의 여러 자료 세트들을 분석하는 것

보다 시간을 절약하는 면이나 부진동 모드의 해석이 명료해지는 측면에서 보다 유리하다. 그러나 시간적으로 변화하는 물리량인 에너지를 분석하는 경우 특정 시기(폭풍시)의 에너지가 다른 시기(정상시)에 비해 매우 큰 경우가 나타나며, 이 때 전체 자료에 대해서만 스펙트럼 분석을 실시하는 경우 에너지가 큰 시기의 장주기파 에너지의 분포 특성이 전체를 대표하는 것처럼 제시되게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 먼저 1차

와 2차 자료에서 분석구간을 적절하게 선택하여 5초 간격의 연속된 131,072개(약 7일 14시간)의 장기간 자료를 편집하였다. 이 장기간 자료들을 분석하여 부진동 공진 모드들을 엄밀하게 검토한 후, 다시 5초 간격의 연속된 32,768개(약 45.5시간)의 자료 세트들을 편집, 분석함으로써 항의 상태에 따른 항내 부진동의 차이를 엄밀하게 검토하였다. 131,072개 자료의 경우 원시 스펙트럼 밀도의 수가 충분히 많기 때문에 4개씩 산술 평균한 후 검증평

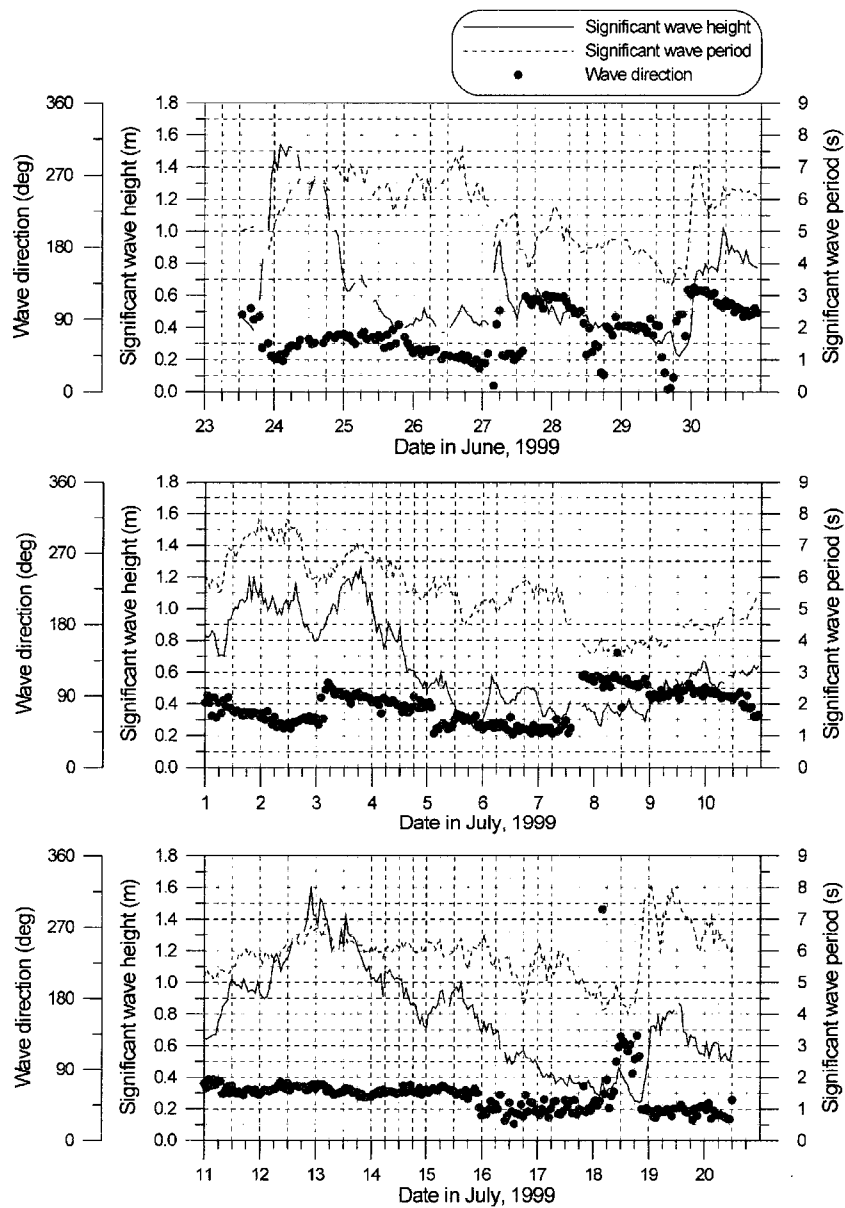


Fig. 2. Time series of $H_{1/3}$, $T_{H_{1/3}}$, and $\bar{\theta}$ measured at station DW from June 23 to July 20, 1999 around Sokcho Harbor.

활화법을 적용하였으며, 32,768개 자료의 경우는 청초호 내의 Helmholtz 공진 주기가 50분 내외로 상당히 긴 점을 고려하여 원시 스펙트럼 밀도를 점증평활화법을 적용하여 평활화하였다.

3. 자료 분석 결과

3.1 단주기파 특성

Fig. 2에 정점 DW에서 매시간 관측된 자료에 파별분석법을 적용하여 구한 유의파고($H_{1/3}$), 유의파 주기($T_{H_{1/3}}$)와 Longuet-Higgins법(오 등, 1992)으로 구한 대표파향

(침두 주기에서의 파향)의 시간적 변화를 도시하였다. 이 그림을 살펴보면 단주기파 관측기간인 6월 23일부터 7월 20일까지 유의파고가 1.5 m 내외인 소규모 폭풍파가 2회 내습하였을 뿐 대부분 상당히 정온하였음을 알 수 있다. 이는 관측기간이 하계에 해당되었고 태풍도 내습하지 않았던 점이 주 원인이라 할 수 있다. 관측기간 중의 유의파 주기는 대체로 8초 이하였으나 관측 종료시점인 7월 19일에는 9초 정도로 나타나서 소규모 폭풍파 내습시보다도 약간 길게 나타났다. 관측기간 중의 대표파향은 대체로 NNE~ENE 사이에 분포하였으나 6월 28일~7월 1일, 7월 3일~4일 및 7월 8일~10일에는 파향이 E~ESE 사

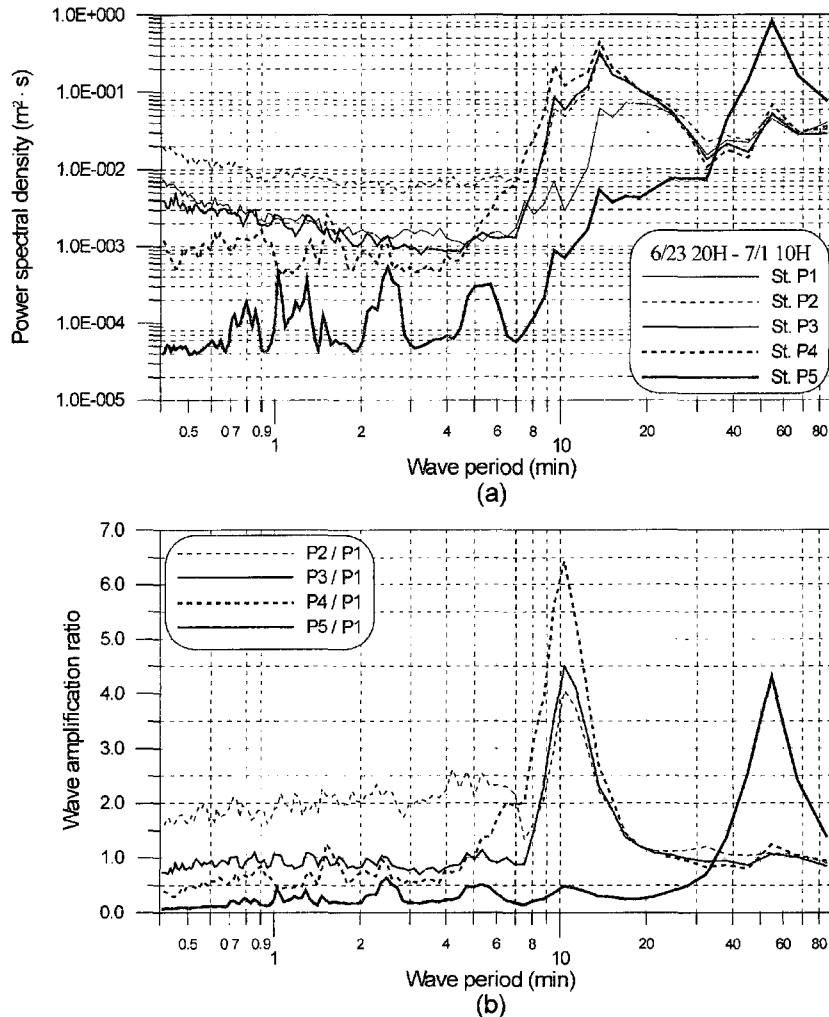


Fig. 3. Results of spectral analyses averaged over 64 components for pressure data measured at Sts. P1~P5 during June 23 20H~July 1 10H, 1999; (a) spectral densities, (b) relative amplification ratios.

이에 분포하였다.

3.2 장주기파 분석 결과

3.2.1 속초항과 청초호의 부진동 특성

1차와 2차 관측 자료 중에서 6월 23일 20시~7월 1일 10시까지와 7월 8일 0시~15일 14시까지(가능한 한 항외 단주기파가 큰 시기를 포함하도록 기간을 설정)의 5초 간격 131,072개의 연속된 자료에 대해 스펙트럼 분석을 실시하였다. 전자는 정점 P1~P5, 후자는 정점 P1~P3, P5 및 P6의 각 5개 정점에 대한 자료들이며 정점별 스펙트럼 밀도와 정점 P1을 기준하여 구한 기타 정점들에서의 상대진폭비를 Figs. 3과 4에 각각 제시하였다.

먼저 1차 관측 결과인 Fig. 3(a)를 살펴보면 Helmholtz 공진 주기로 보이는 주기 55분 부근에서 에너지 침투 형태가 모든 정점들에서 나타나서 청초호의 영향이 항외에서도 나타남을 알 수 있다. 항외 정점 P1의 경우 주기 14~24분, 9.5분, 7.5분 등에서 침투 형태가 비교적 뚜렷하게 나타나나, 항입구 외측의 사빈 해안 전면에 위치한 정점 P2에서는 주기 13.6분을 제외하고는 침투 형태가 불분명하다. 이 정점에서는 특히 주기 8분 이하에서의 에너지가 주기에 무관하게 거의 동일하게 나타나며 그 수준도 다른 정점들에 비해 매우 크게 나타난다. 이는 천해역에서의 장주기파의 발달로 인한 것으로 사료된다. 항입구 정점 P3에서도 주기 13.6분과 9.5분을 제외하면 특별한

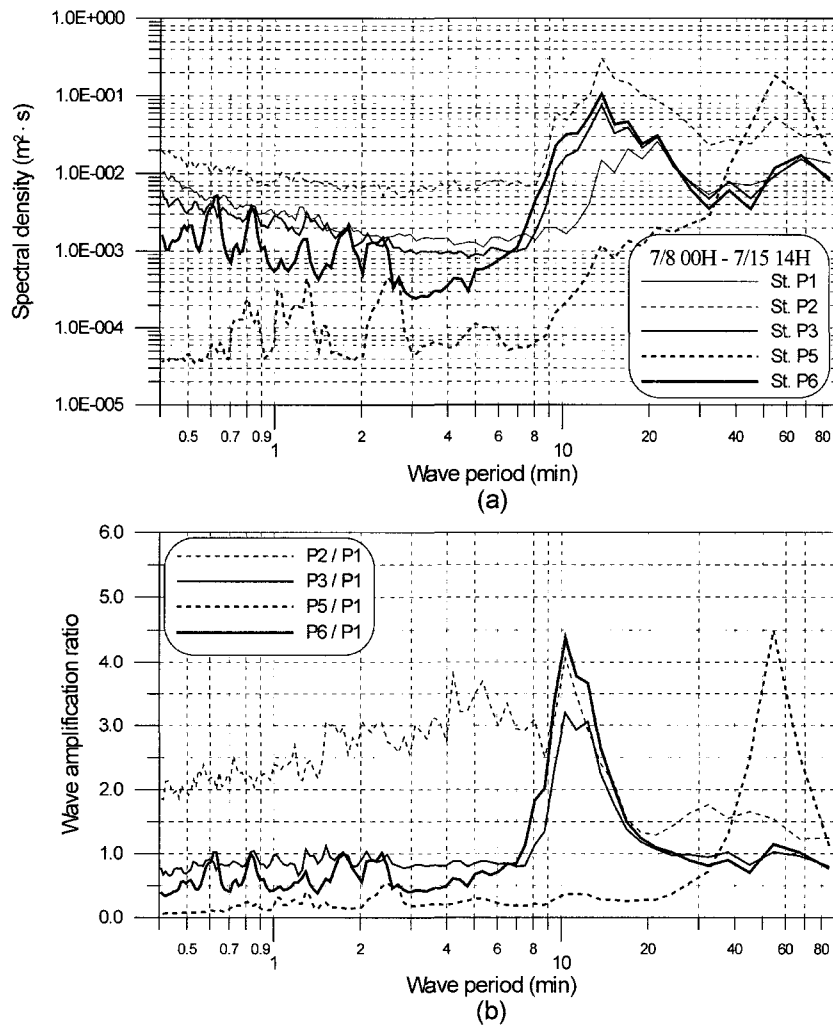


Fig. 4. Results of spectral analyses averaged over 64 components for pressure data measured at Sts. P1~P3, P5 and P6 during June 8 0H~15 14H, 1999; (a) spectral densities, (b) relative amplification ratios.

침두 형태를 찾아보기 힘들다. 청초호로 연결되는 수로 전면에 위치한 항내 정점 P4에서는 주기 13.6분과 9.5분 외에 2.4~2.5분, 1.5~1.6분 등에서 국부 공진 모드로 보이는 침두 형태가 나타난다. 청초호 내에 위치한 정점 P5에서는 주기 54.5분에서 뚜렷한 공진 모드가 나타나는 외에 5~6분, 2.5분, 1.3분, 1.0분 등에서 침두 형태가 나타나지만 그 에너지 수준은 상당히 낮다. Fig. 3(b)에 제시된 상대진폭비를 살펴보면 항입구 정점 P2의 경우 주기 10.3분에서 진폭비가 4.1, 주기 7분 이하의 진폭비는 1.6~2.6 사이임을 알 수 있다. 정점 P3의 경우에는 진폭비가 4.5인 주기 10.3분을 제외하면 눈에 띄는 침두 형태가 없으며, 정점 P4에서는 진폭비 6.4의 주기 10.3분 외에 주기 2.4분(진폭비 1.0)과 1.5분(진폭비 1.3)에서 진폭비가 작은 침두 형태가 나타난다. 한편, 청초호 내의 정점 P5에서는 주기 54.5분에서의 진폭비 4.3의 침두를 제외하고는 다른 뚜렷한 침두 형태를 찾아볼 수 없다.

2차 관측자료를 도시한 Fig. 4(a)를 살펴보면 1차 관측과는 달리 정점 P2와 P5에서만 주기 55분에서 침두 형태가 나타나며 정점 P1, P3 및 P6에서는 이보다 주기가 긴 67분 근처에서 약한 침두 형태가 있음을 알 수 있다. 정점 P1의 경우 주기 14~24분에서만 침두 형태가 비교적 뚜렷하게 나타나며, 정점 P2에서는 주기 13.6분의 침두 형태는 뚜렷하나 주기 9.5분에서는 침두 형태가 다소 불분명하다. 정점 P2의 경우 2차 자료에서도 주기 8분 이하에서의 에너지가 거의 동일한 수준이며 다른 정점들에 비해 전반적으로 매우 크게 나타난다. 정점 P3에서는 주기 13.6분을 제외하면 특별한 침두 형태를 찾아보기 힘들다. 청초호 내의 정점 P5에서는 주기 54.5분에서 뚜렷한 공진 모드가 나타나는 외에 2.4~2.7분, 1.3분, 1.0~1.1분, 0.8분 등에서 침두 형태가 나타나지만 그 에너지 수준은 상당히 낮다. 항내의 정점 P6에서는 주기 13.6분 외에 2.1~2.5분, 1.8분, 1.3분, 0.8~0.9분, 0.6분 등에서 침두 형태가 나타나지만 그 에너지 수준은 낮은 편이다. Fig. 4(b)에 제시된 상대진폭비를 살펴보면 사빈 해안 전면의 정점 P2의 경우 주기 10.3분에서 1차 자료와 동일하게 진폭비가 4.1로 제시되며 주기 7분 이하에서는 진폭비가 1.8~3.8 사이로 1차 자료보다도 상당히 큼을 알 수 있다. 정점 P3의 경우에는 진폭비가 3.1~3.2인 주기 10.3~12.4분을 제외하면 눈에 띄는 침두 형태가 없다. 청초호 내의 정점 P5에서는 주기 54.5분에서 진폭비가 4.5로 제시되고 있으며 기타 주기에서는 뚜렷한 침두 형태가 나타나지 않는다. 항내의 정점 P6에서는 진폭비 4.4의 주기 10.3분

외에 주기 2.2~2.5분, 1.7~1.8분, 0.8~0.9분, 0.6분 등에서 침두 형태가 나타나지만 그 진폭비는 1 내외로 매우 작았다.

3.2.2 해황에 따른 부진동 특성

폭풍시와 평상시의 부진동 특성을 비교, 검토할 목적으로 관측자료 중 소규모 폭풍이 내습하여 단주기 유의파고가 1.6 m 정도였던 7월 11일 20시~13일 18시의 자료를 폭풍시 자료로 선정하고, 단주기 유의파고가 1 m 이하였던 7월 8일 0시~9일 22시의 자료를 평상시 자료로 선정하여 비교·분석을 실시하였다.

Fig. 5(a)와 (b)에 평상시에 정점 P1~P3, P5 및 P6에서 관측된 자료의 원시 스펙트럼 밀도를 점증평활화법으로 평활화한 스펙트럼 밀도와 이를 이용하여 구한 주기별 상대진폭비를 도시하였다. 이 결과를 Fig. 4의 장기 자료에 의한 결과와 비교해보면 정점 P1과 P3는 서로 비슷하나 정점 P2의 경우는 주기 8분 이상에서 장기 자료에 비해 에너지 수준이 약간 낮음을 알 수 있다. 또, 청초호 내의 정점 P5와 항내 정점 P6의 경우 주기 3분 이상에서는 장기 자료와 비슷하나 그 이하에서는 장기 자료에서 나타난 침두 형태들이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(b)에 제시된 상대진폭비의 경우를 비교하여 보면 전반적으로 양자가 유사하나 정점 P6에서는 장기 자료와는 달리 침두 형태가 나타나지 않고 있다.

Fig. 6(a)와 (b)에는 폭풍시의 결과를 도시하였다. (a)의 정점별 스펙트럼 밀도를 Fig. 4와 비교해보면 모든 정점들에서 양자가 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 정점 P5와 P6에서는 주기 3분 이하에서 나타나는 침두 형태들이 장기 자료보다 더 뚜렷함을 알 수 있다. 이러한 침두 형태의 상대적인 명료성은 Fig. 6(b)에 제시된 상대진폭비의 경우에도 찾아볼 수 있다. 한편, 정점 P3와 P6에서는 주기 9분에서 협폭의 침두 형태가 다소 약하게 나타남을 알 수 있다.

상기 검토에 따르면 국부 부진동은 평상시보다는 폭풍시에 분명하게 나타나며 이는 정 등(2001)이 옥계항 자료에서 제시한 결론과 동일하다. 또한, 평상시와 폭풍시를 모두 포함하는 장기 자료에 대한 분석 결과만을 이용하여 장주기파를 검토할 경우 폭풍시의 자료에 지배되어 출현빈도가 높은 평상시의 주기 수 분 이하의 국부 부진동은 무시될 수 있다. 따라서 평상시와 폭풍시를 구분하여 분석하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 한편, 폭풍시에는 주기 10분 이상의 에너지는 평상시와 비슷하나 10분 이하에서는 평상시보다 에너지가 큰 것으로 나타났으

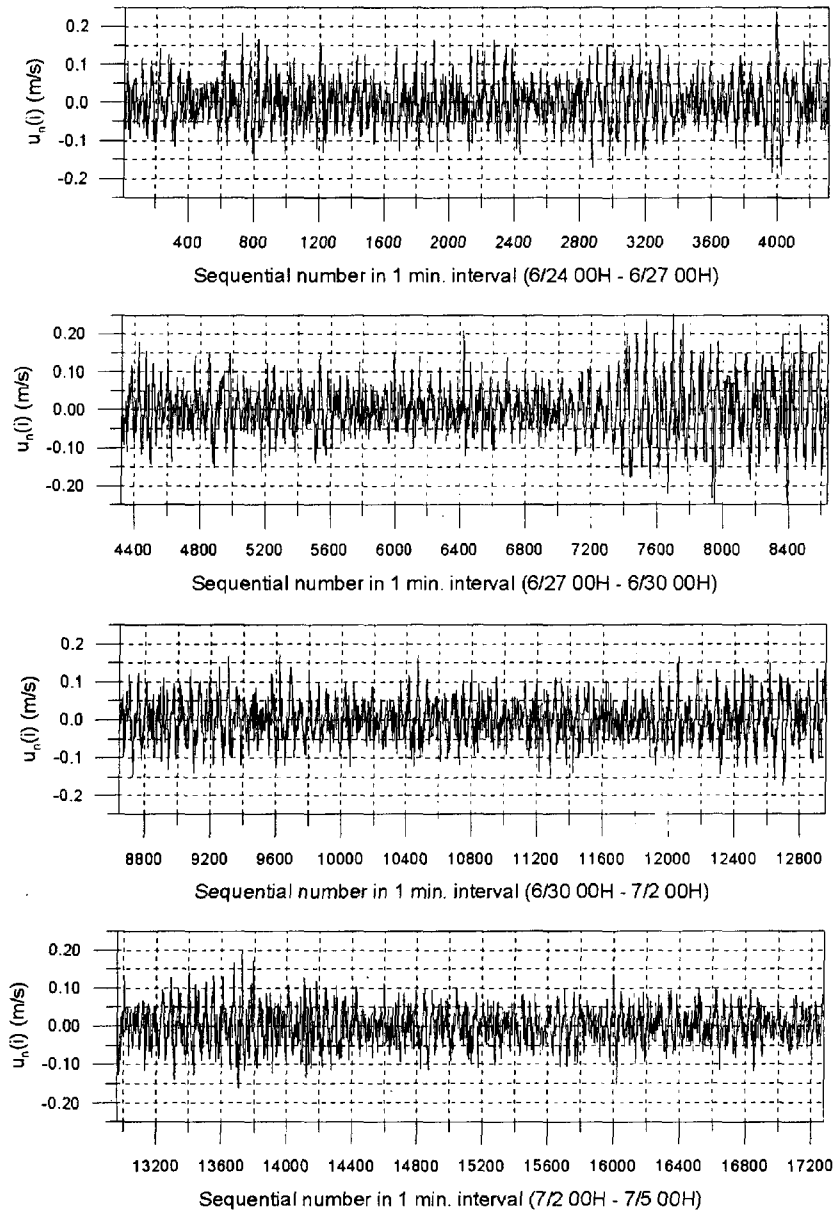


Fig. 5. Time series of filtered velocity component parallel to waterway measured at St. C in Sokcho Harbor (6/24 00H-7/5 00H).

며, 특히 저중력파에 해당되는 주기대인 0.5~3분에서는 평상시보다 100~150배 에너지 수준이 높았다.

3.3 협수로 내의 파랑류 특성

전술한 바와 같이 속초항과 청초호를 연결하는 협수로의 중앙에 위치한 정점 C에서 RCM-9을 해저면에 설치하고 6월 23일부터 7월 7일까지 1분 간격으로 평균 유속

과 유향을 관측하였다. 관측 정점에서의 평균 수심이 3.5 m 정도이며 기기에 장착된 센서의 설치 수심이 3.1 m임을 감안하면 관측된 저층 유속이 표층이나 중층 유속과 큰 차이가 없었을 것으로 사료된다.

Fig. 7에 수로와 나란한 유속 성분의 시간적 변화를 도시하였다. 이는 절단 주기를 240분으로 설정한 5차 Butterworth 고주파수 통과 필터를 사용하여 조석류 성분을 제거한 유

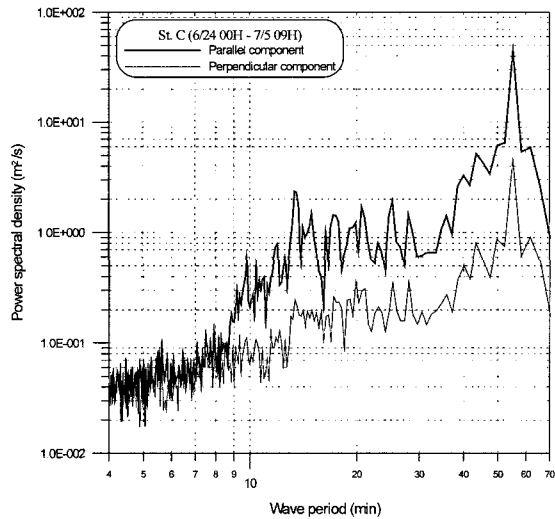


Fig. 6. Power spectral density of long-period wave velocity components measured at St. C in Sokcho Harbor (6/25 00H-7/5 09H).

속으로 주기가 약 60분인 유속이 지배적임을 알 수 있다 (Fig. 8참조). 유속 성분은 대체로 0.1~0.15 m/s에서 분포하며, 6월 29일 07시 부근에 나타난 약 0.25 m/s가 최대 유속이다.

조석류 성분을 제거한 6월 24일 0시~7월 5일 09시까지의 11일 9시간의 연속된 유속 자료(1분 간격의 16,384개 자료)에 대해 스펙트럼 분석을 실시하였다. 원시 스펙트럼 밀도를 16개씩 평균하고 이를 주기 2~90분의 범위에 대해 Fig. 8에 제시하였다. 이를 살펴보면 청초호의 Helmholtz 공진 모드 부근인 주기 55.2분에서 첨두치가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이외에 주기 9~30분 사이에 다수의 첨두 형태가 나타나고 있으나 속초항의 첫 번째 공진조건으로 보이는 주기 13.5분의 첨두를 제외하면 그다지 뚜렷하지 않다.

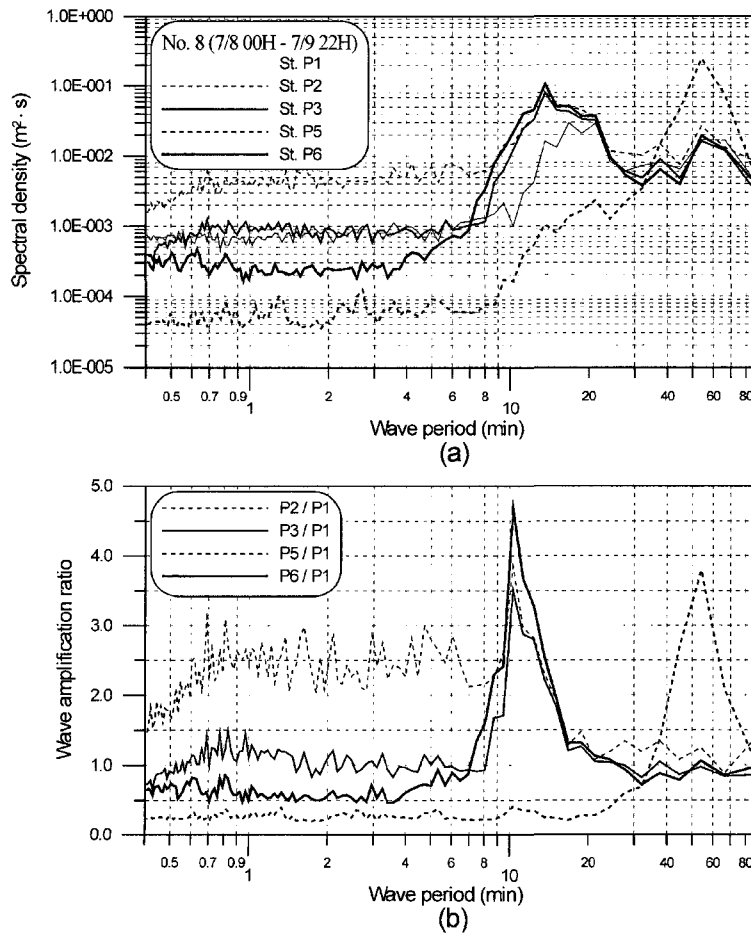


Fig. 7. Results of spectral analysis for pressure data measured at Sts. P1~P3, P5 and P6 for 45.5 hours from Jul. 8 0:00, 1999; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

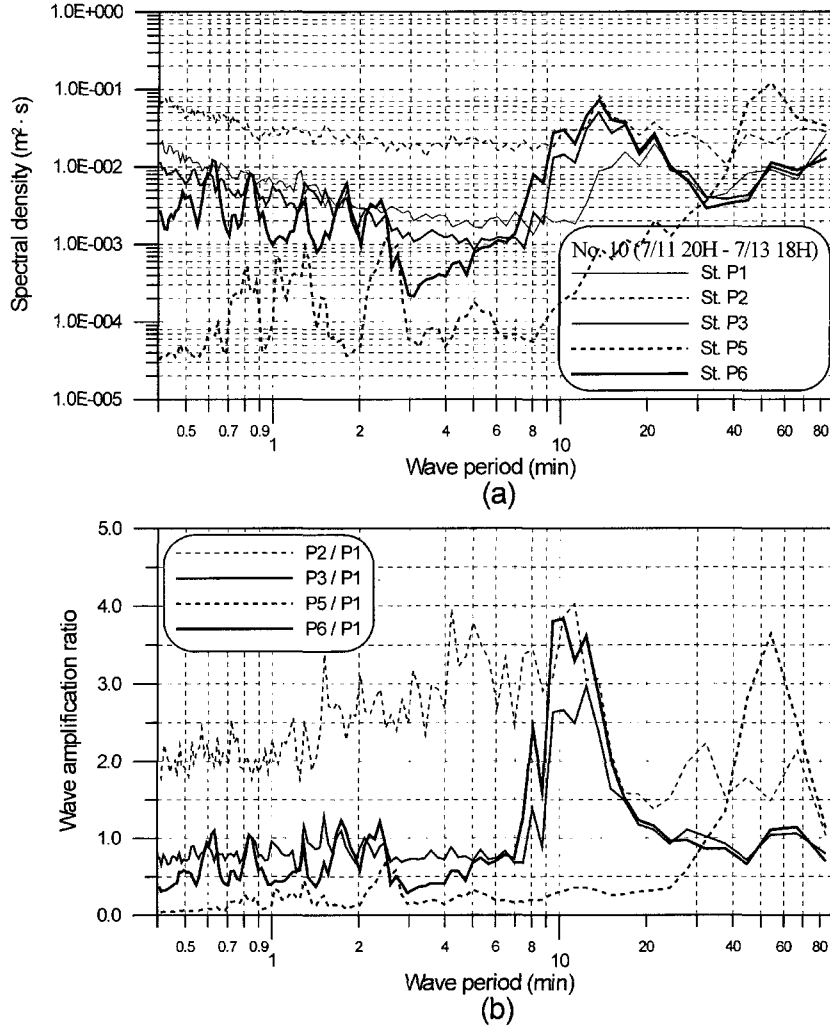


Fig. 8. Results of spectral analysis for pressure data measured at Sts. P1~P3, P5 and P6 for 45.5 hours from Jul. 11 0:00, 1999; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

3.4 저중력파 추정

3.4.1 저중력파의 정의

일반적으로 저중력파의 파고와 주기는 스펙트럼 분석에서 구해진 스펙트럼 밀도를 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$H_L = 4\sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$T_L = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2)$$

$$m_n = \int_{1/T_{upper}}^{1/T_{lower}} f_n \cdot S(f) df \quad (3)$$

여기서, m_n 은 $1/T_{upper} \sim 1/T_{lower}$ Hz 사이의 장주기 성분의 주파수 스펙트럼의 n 차 모멘트, H_L 은 장주기 성분 ($T_{upper} \sim T_{lower}$ 초)의 파고, T_L 은 장주기 성분의 주기, $S(f)$ 는 주파수 f 에서의 에너지 스펙트럼을 각각 나타낸다.

단주기파와 장주기파의 경계를 어디에 설정할 것인가는 매우 어려운 문제로서 현재까지는 명확하게 결정되지 않고 연구자들마다 조금씩 다르다. 일본의 경우를 예로 들면 關本 等(1990)은 주기 20초를 기준하여 이보다 짧은 주기를 파랑 성분, 그리고 이보다 긴 주기를 surf beat 성분으로 구분하였다. 그리고 加藤 等(1990)은 25초를 기준하여 그 이상을 장주기파 성분으로 규정하였다. 한편, 卞

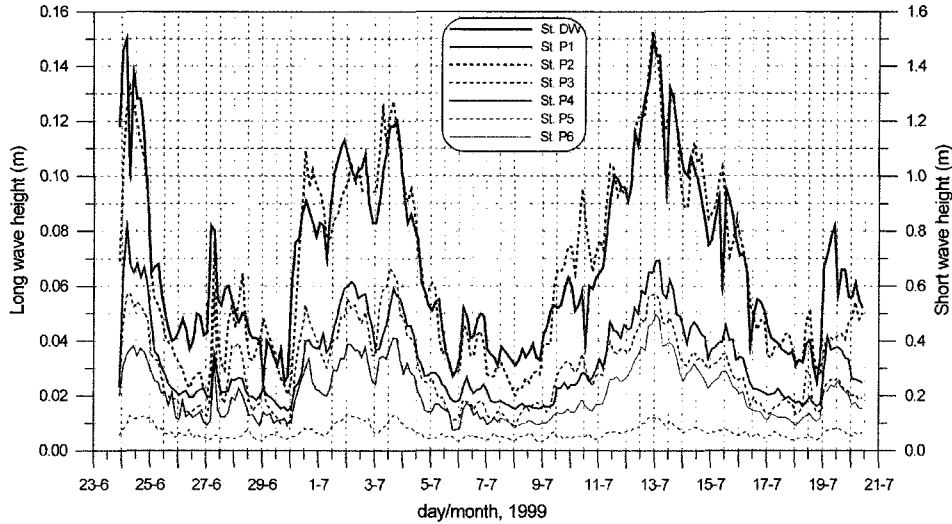


Fig. 9. Time series of significant wave height, H_s , and FIG wave height, H_L , measured around Sokcho Harbor.

石等(1996)도 關本等(1990)과 동일하게 주기 20초를 기준하였다. 이와는 달리 松良等(1994)은 30~600초 사이로 국한하여 에너지를 적분함으로써 장주기 성분 파고를 결정하였다. 우리나라의 경우는 상기 일본에서의 연구들을 참조하여 단주기파와 장주기파의 경계를 30초로 설정한 바 있으며(해양수산부, 1997a), 선체운동을 감안하여 주기 60~180초의 파랑을 사용한 경우도 있다(해양수산부, 1997b). 한편, Kim et al.(2000)은 30~200초의 파랑을 장주기파로 정의하여 IFFT와 파별분석법을 사용하여 장주기파 특성 분석을 시도한 바 있다.

Fig. 9에 나타낸 것은 저중력파(FIG wave)의 범위를 20~180초, 30~180초, 30~300초 및 30~1,200초로 설정하여 정점 P1에서의 2차 관측자료로부터 구한 저중력파 파고 분포도이다. 여기서, 저중력파의 파고는 3시간 길이로 구분된 수압 자료들을 분석하여 구하였다. 이 그림을 살펴보면 20초와 30초로 설정한 결과에서 큰 차이가 나타남을 알 수 있는데 이는 단주기측의 주파수 대폭이 상대적으로 큰 점과 20~30초 사이에 상당한 에너지가 존재하는 데 기인된 것이다. 이와는 반대로 적분하는 주기를 180초에서 1,200초까지 증가시킨 경우에는 저중력파 파고에 큰 변화가 나타나지 않았다.

본 연구에서는 구속파 또는 장주기파가 일본의 태평양 연안에서는 기본파(elementary wave)의 11배, 동해 연안에서는 7배의 주기를 갖는다는 久保等(1994)의 제안에 기초하여 공학적으로 의미를 가지는 파의 최소 주기를 4초로 가

정하고 저중력파의 범위를 30~180초로 설정하였다.

3.4.2 저중력파의 파고와 주기 추정

Fig. 10에 식 (1)~(3)으로 구한 정점 P1~P6에서의 저중력파 파고, H_L 을 정점 DW에서 관측된 단주기 유의파고, H_s 와 같이 도시하였다. 단, 저중력파의 파고와 주기는 3시간 길이로 구분된 210 세트의 수압 자료들을 분석하여 산출하였으며, 단주기 유의파고는 해당되는 3시간 동안의 관측치들을 산술 평균한 것이다. 이 그림을 살펴보면 먼저 단주기 파고와 장주기 파고들이 서로 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 즉, 항입구 정점 P2의 경우 관측 시기에 무관하게 정점 DW에서의 단주기 파고의 거의 1/10에 해당되는 값을 보여준다. 또한, 항입구와 항내 정점들에서도 전반적인 크기는 항내로 항할수록 작아지지만 파고의 증감 경향은 단주기 파고와 동일하다. 이러한 경향은 청초호 내에 위치한 정점 P5에서도 어느 정도 찾아볼 수 있다.

항입구 외측의 정점 P2에서 저중력파 파고가 항의 정점을 포함한 다른 정점들에서보다 큰 이유로는 몇 가지를 생각할 수 있다. 먼저, 천해역에서의 장주기파의 발달을 들 수 있다. 다음에는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 정점 P2는 두 방사제와 사빈 해안으로 둘러싸인 ㄷ자 형태 수역의 입구에 위치하고 있으므로 이 지역에서는 해안선을 포함한 구조물로부터의 반사파와 국부 부진동을 들 수 있다. 정점 P1과 P3의 저중력파 파고가 비슷한 이유로는 후자에서는 주방파제에 의한 회절로 파고가 감소되는 반면

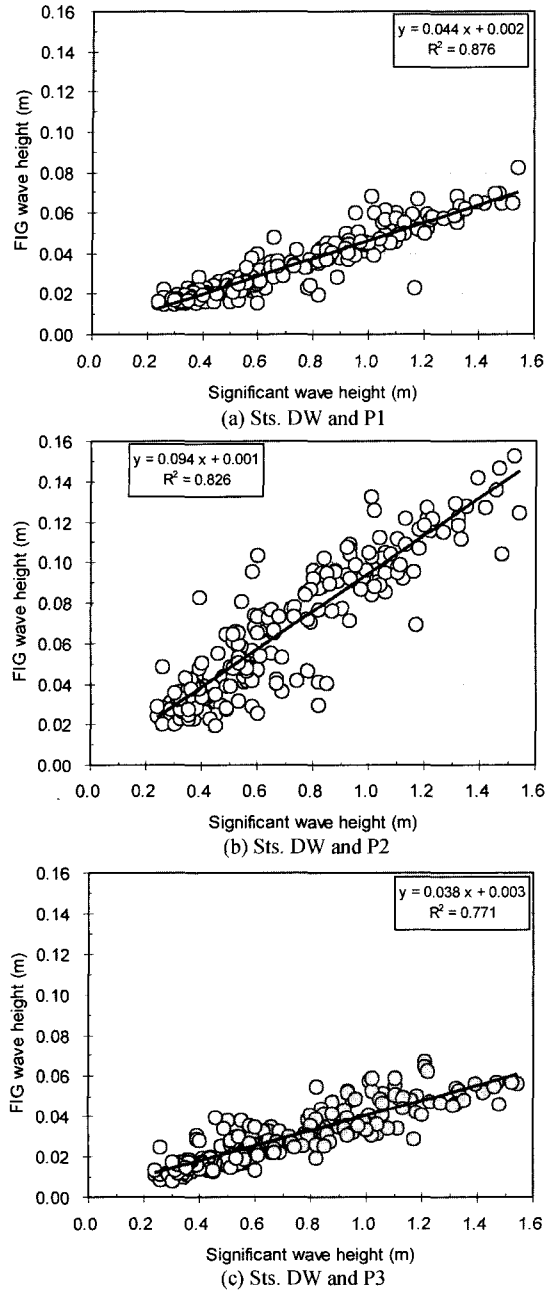


Fig. 10. Correlations between significant wave heights and FIG wave heights; (a) Sts. DW and P1, (b) Sts. DW and P2, (c) Sts. DW and P3.

중복파가 보다 강하게 형성된 점을 생각할 수 있다.

단주기 유의파고와 저중력과 파고의 상관 관계를 검토하기 위하여 회귀 분석을 실시하였다. Fig. 11(a)~(c)에

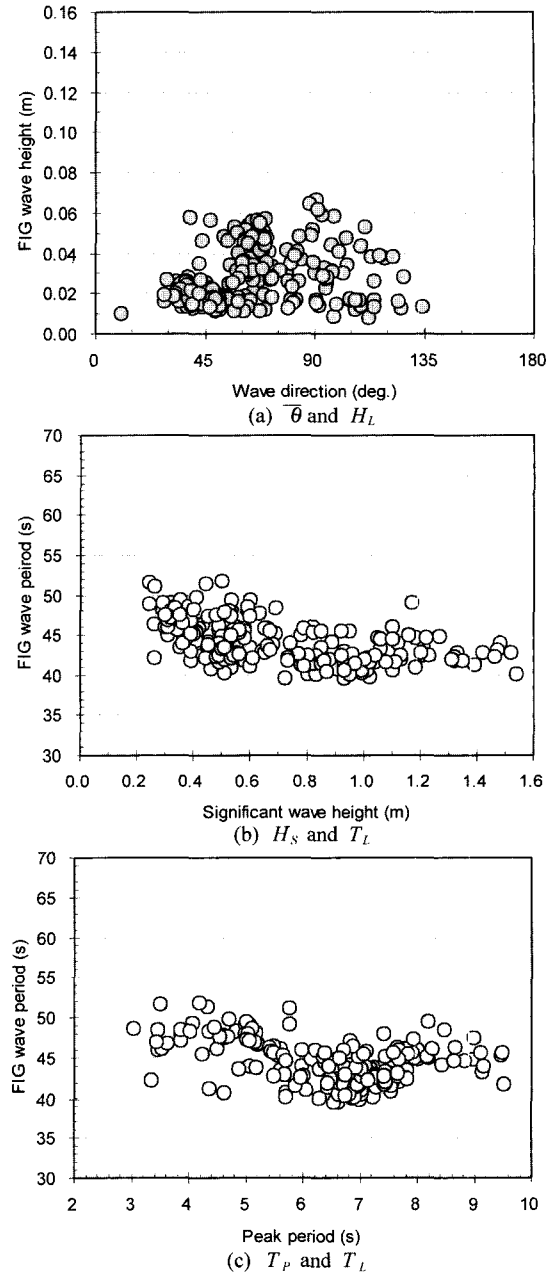


Fig. 11. Correlations between various short period and FIG wave characteristics; (a) wave direction and FIG wave height, (b) significant wave height and FIG wave period, (c) peak period and FIG wave period.

는 정점 DW에서의 단주기 유의파고와 정점 P1~P3에서의 저중력과 파고간의 산포도와 이를 이용하여 구한 선형 회귀식을 표시하였다. 이 그림들에서 x 축은 단주기 유

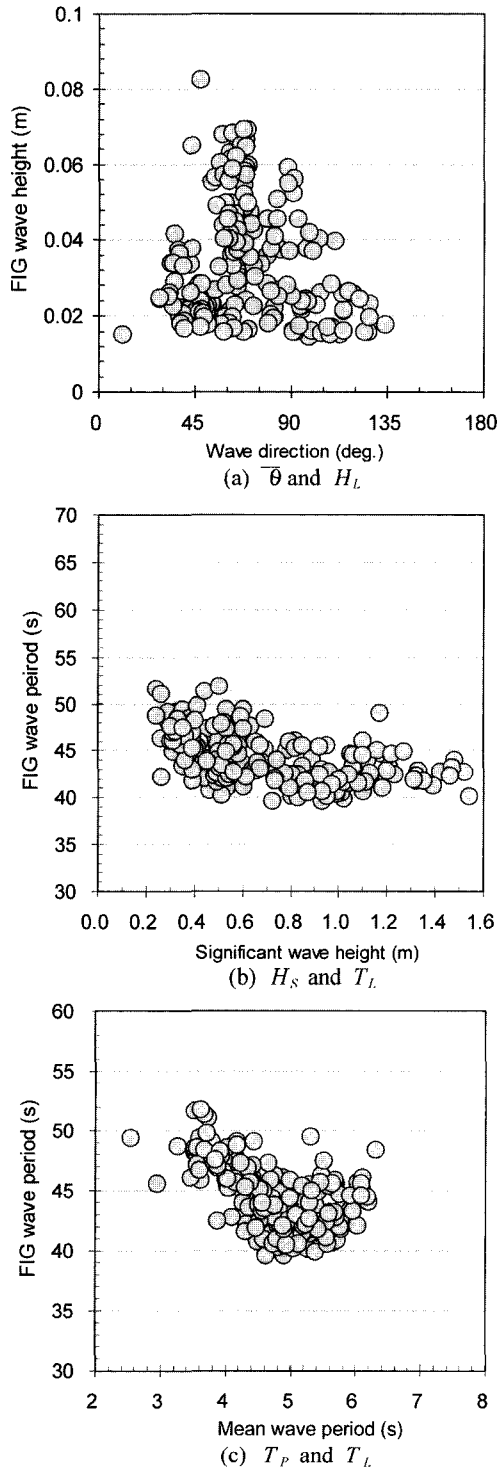


Fig. 12. Correlations between various short-period wave and far-infra-gravity wave characteristics; at St. P1; (a) $\bar{\theta}$ and H_L , (b) H_s and T_L , (c) T_P and T_L .

의파고, $H_s(m)$, y축은 저중력파 파고, $H_L(m)$, R^2 은 회귀식의 결정계수(coefficient of determination)를 각각 나타낸다. 정점 DW와 거의 동일한 위치인 정점 P1에서의 R^2 이 0.876으로 가장 크고 항입구로 향할수록 0.826, 0.771로 작아지고 있으나 모두 상관성이 크게 나타나고 있다.

한편, Fig. 12(a)~(c)에는 정점 DW에서의 단주기파 파향($\bar{\theta}$)과 저중력파 파고(H_L), 단주기 유의파고(H_s)와 식 (3)으로 정의한 저중력파 주기(T_L) 및 단주기파의 평균주기(T_P)와 저중력파 주기의 산포도를 각각 제시하였는데, 그림들을 살펴보면 모두 뚜렷한 관계를 찾아보기 어려움을 알 수 있다.

한편, 항외 정점의 경우에는 큰 상관이 없을 것으로 생각되나 항입구 또는 항내 정점의 경우에는 침입한 저중력파 외에 항만의 평면 배치에 의한 국부적인 부진동도 포함되게 되므로 결과의 해석에 주의를 요한다. 그리고 본 연구에서 제시한 관계식을 이용하여 속초항 해역에서의 저중력파 파고의 극치 해석을 시도하는 것은 한 달 미만의 관측기간을 고려할 때 곤란할 것으로 생각되나 앞으로 현장관측자료를 축적하여 이에 대한 연구를 수행하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 속초항과 청초호 내외의 8개 정점에서 파향·파고계, 초음파식 파향·파고계, 수압식 파고계 및 유속계를 사용하여 연속관측한 장·단주기파의 관측 자료를 분석하였다. 본 연구를 통해 구해진 주요 결론 및 토의 사항을 아래에 정리하였다.

- 청초호와 속초항의 Helmholtz 공진 모드의 주기는 각각 54.5분과 13.6분으로 제시되었으며, 속초항 내외의 정점에서도 청초호의 영향이 어느 정도 나타났다. 속초항에는 주기 2.1~2.5분, 1.8분, 1.3분, 0.8~0.9분, 0.6분 등에서 국부 공진 모드가 나타나지만 그 에너지 수준은 낮은 편이다.

- 평상시와 폭풍시를 모두 포함하는 장기 자료에 대한 분석 결과는 에너지가 큰 폭풍시를 대표하게 되므로 주기 수 분 이하의 국부 부진동 해석 시에 주의를 요한다.

- 저중력파로 인한 국부 부진동은 평상시보다 폭풍시에 분명하게 나타나며 에너지 수준이 100~150배 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 정 등(2001)에 제시된 것처럼 폭풍파고의 증가에 따라 더 심화될 가능성이 큰 것으로 판단된다.

- 협수로 내의 유속은 정초호의 Helmholtz 공진 조건에 가장 큰 영향을 받으며, 관측된 최대 유속은 약 0.25 m/s이다.

- 항입구 외측의 정점 P2에서는 장주기파의 발달과 증폭과 등의 영향으로 항의 정점에 비해 저중력과 파고가 2배 정도로 커지는 것으로 나타났다.

- 속초항 내외의 정점들에서의 저중력과 파고는 단주기 파고와 밀접한 상관 관계를 가지는 것으로 나타났으나 단주기파 파고와 저중력과 파고, 단주기 유의파고와 저중력 파고 및 단주기파의 평균주기와 저중력과 주기 사이에는 특정한 경향이 나타나지 않았다.

- 향후 장기간 자료가 축적되면 속초항 해역에서의 저중력과 파고에 대한 극치 해석을 통하여 재현빈도별 저중력과 파고를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구소의 기관고유사업인 “연안방재 구조물의 설계기술 개발”의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 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.
- 정원무, 박우선, 서경덕, 채장원, 정신태, 1999. 개구부가 좁은 직사각형 항만의 공진 특성(1. 현장관측과 자료분석), *한국해안 해양공학회지*, **11**(4): 201-215.
- 정원무, 채장원, 박우선, 이광수, 서경덕, 2001. 육계항에서 관측된 폭풍파와 저중력파의 상호관계, *한국해안 해양공학회지*, **13**(3): 209-229.
- 한국해양연구소, 2000. **연안방재 구조물의 설계기술 개발(I)**, BSPE 99753-00-1243-2.
- 해양수산부, 1997a. **부산 신항 방파제 실시설계 용역 수치모형실험보고서**, 수행기관 한국해양연구소.
- 해양수산부, 1997b. **울산 신항만 방파제 기본설계보고서(제2권 수치모형실험편)**, 수행기관 한국해양연구소.
- Kim, K.-H., Kim, J.-H., and Pyun, C.-K., 2000. A study on characteristics of long period waves by field observation, *Proc. 4th Intern. Conf. on Hydro-Science and -Engineering*, Seoul, Korea.
- Okihiro, 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.
- 加藤一正, 中村聡志, 池田直太, 1990. 波の連なりと長週期波の關聯に關する現地觀測. *海岸工學論文集*, **37**: 101-105.
- 關本恒浩, 清水琢三, 窪泰浩, 今井澄雄, 島津昌央, 1990. 港灣内外のサーフピートの發生 傳播に關する現地調査. *海岸工學論文集*, **37**: 86-90.
- 久保雅義, 水井眞治, 齋藤勝彦, 1994. 自然環境の厳しい漁港における入港問題について. *日本航海學會論文集*, **91**: 1-10.
- 松良精三, 屋美洋一, 菅沼史典, 宮本義憲, 1994. 波群に拘束された長週期波の港内における増幅特性と船體動搖に關する現地觀測. *海岸工學論文集*, **41**: 71-75.
- 田端竹千穂, 田所篤博, 平石哲也, 玉城重則, 1995. 港灣における長週期波の増幅現象に關する現地觀測. *海岸工學論文集*, **42**: 301-305.
- 平石哲也, 林恒一郎, 栗田一昭, 河野信二, 1996. リーフおよび港灣内における現地觀測に基礎した長週期波對策. *海岸工學論文集*, **43**: 206-210.

Received January 22, 2002

Accepted March 7, 2002