

## 개구부가 좁은 직사각형 항만의 공진 특성 (1. 현장관측과 자료 분석)

### Resonant Characteristics in Rectangular Harbor with Narrow Entrance (1. Field Measurements and Data Analyses)

정원무\* · 박우선\* · 서경덕\*\* · 채장원\* · 정신태\*\*\*  
Weon Mu Jeong\*, Woo Sun Park\*, Kyung Doug Suh\*\*,  
Jang Won Chae\*, and Shin Taek Jeong\*\*\*

**요 旨** : 입구폭이 좁고 직사각형 형태인 감천항에서 수압식 파고계를 이용한 장·단주기파 및 유속계를 이용한 항입구 유속관측을 실시하였다. 수압 자료에 경향 제거와 Butterworth 고주파수 통과 필터를 적용하여 조석 성분을 제거하였다. 스펙트럼 밀도의 평활화시 주파수폭을 일정하게 유지하는 일정평활화법에 비해 저주파수에서 고주파수로 가면서 폭을 증가시키는 점증평활화법이 장·단주기측에서 모두 만족할 만한 해상도를 보이는 것으로 나타났다. 후자를 현장관측 자료에 적용하여 구한 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 기준하여 감천항의 부진동 모드를 검토하였다. 전체 자료를 분석한 결과 감천항의 Helmholtz 공진 모드는 주기 31.7분에서 상대진폭비 9.2를 보여 동해안의 여러 항만에 비해 상당히 큰 값을 나타냈으며, 제 2 및 제 3 공진주기는 10.3분과 5.4분으로 제시되었다. 한편, 길이를 1일로 분할한 자료들의 분석 결과 폭풍시에는 평상시에 비해 스펙트럼 밀도가 매우 컸을 뿐만 아니라 제 2 및 제 3 공진의 출현 현상이 우세한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 점증평활화법, 상대진폭비, 평상시, 폭풍시, 입사 장주기파고, 항입구 유속

**Abstract** □ Field measurements were made for long- and short-period waves and current velocities at the harbor mouth using pressure-type wave gauges and a current meter, respectively, at the Gamcheon Harbor which has a rectangular shape with a narrow entrance. The measured pressure data were subjected to spectral analyses after removing tidal effects by applying trend removal and high-pass filtering. For the band averaging of the raw spectra, in order to obtain good resolution over the entire frequency, instead of a constant band width, variable band widths were used, which gradually increase as marching from the lowest frequency towards higher frequencies. The Helmholtz resonance mode at the Gamcheon Harbor shows the relative amplification ratio of 9.2 at the wave period of 31.7 minutes, which is quite large compared with those at the harbors located on the east coast of Korea. The second and the third resonance period was 10.3 and 5.4 minute, respectively. On the other hand, the analysis of every 24 hours data shows that during storms the spectral densities are very large compared to those during calm seas and also the second and third resonances are predominant.

**Keywords** : smoothing method by increasing degree of freedom, relative amplification ratio, calm sea, storm sea, incident long-period wave height, current velocity at harbor mouth

\*한국해양연구소 연안·항만공학연구센터(Coastal and Harbor Engineering Research Center, 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)

\*\*\*원광대학교 건축도시토목환경공학부(Department of Architecture, Urban, Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksan, Chollabuk-Do 570-749, Korea)

## 1. 서 론

항만내에서의 장주기 수면 진동은 예기치 못한 선박의 운동을 유발하여 계류 선박의 하역 중단을 초래하는 경우가 있다. 10분 이상의 장주기 항만 공진을 방지하는 것은 현실적으로 거의 불가능한 것으로 생각되고 있다. 그러나, Wilson(1962)은 남아프리카 공화국의 Table Bay Harbor의 Duncan Basin에서 입구를 좁힘으로써 항만 공진이 감소되었음을 제시하였다. 또한, Ito(1970), Horikawa and Nishimura(1970)는 일본의 Ofunato만에서 입구폭이 좁은 지진해일용 방파제의 성공적인 설치 사례를 보고한 바 있다. 한편, 주기 수 분 이하인 국부 공진 모드의 경우에는 방파제를 연장하거나 평면 배치를 일부분 변경하는 방법이 증폭비를 감소시키거나 공진 모드의 주기를 변화시키는 대책안이 될 수도 있다.

선형 이론에 기초한 수치실험의 경우 항입구를 축소 시킴에 따라 반응 곡선의 침투치의 크기와 첨예도가 증가하게 되는 항만 역설이 존재하게 되며(Miles and Munk, 1961), 이는 항입구가 축소됨에 따라 외해로 빠져나가는 방식 감쇠가 줄어들어 접에 기인된다. 그러나, 실제로는 공진이 발생하는 입구에서는 그 측벽을 따라 발생하는 난류와 입구폭이 좁은 항의 방파제의 선단에서 흐름의 박리가 발생하여 제트와 와류가 형성되는 현상에 의하여 많은 에너지가 감쇠된다. 즉, 입구가 좁아지면 마찰에 의한 에너지 손실이 감소된 방식 감쇠보다 크게 되고, 이것이 항내의 반응을 감소시켜서 항만 역설이 없어지게 된다.

우리나라의 동해안이나 남동해안에 위치한 대형 항만 중에서 항입구가 항폭에 비해 좁은 항만으로는 부산항에 속하는 감천항을 들 수 있다. 이 항은 우리나라의 항만에서는 보가 드물게 항입구의 양쪽에서 항의 횡방향으로 방파제가 건설되어 있으며 항의 폭에 대한 입구폭의 비가 다른 항에 비해 상당히 작다. 또한, 항만의 형태도 거의 직사각형이며 대형 선박이 빈번하게 접안하고 있는 점 등을 고려하여 본 연구 대상으로 선정하였다.

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 상

태에 따라 시간적 변화를 나타내는 점이 정(1999)에 의해 제시되었다. Okihiro *et al.*(1993)은 Helmholtz 모드(grave 또는 pumping 모드)에서는 항외에서의 너울의 영향보다는 기상 여건 또는 지진해일의 영향이 지배적이거나, 주기가 비교적 짧은 부진동 모드들은 너울의 영향을 많이 받는 점을 관측자료 분석을 통하여 제시하였다. 이러한 경우에는 전체의 단일 자료에 대한 분석 결과로 부진동 특성을 해석하는 경우 악천후시의 자료 특성이 전체 기간을 대표하는 것으로 나타날 가능성이 매우 크다. 즉, 비교적 단기간에 변화를 보이는 부진동 현상을 엄밀하게 검토·분석하는 데는 Wavelet 분석 방법(문, 1998)의 이용이 가능하다. 그러나 이 방법은 국내외적으로 아직까지 연구 단계이므로 본 연구에서는 자료 길이를 24시간 정도로 비교적 짧게 하는 STFT(Short Time Fourier Transform)에 의한 분석 결과를 종합하는 방법을 이용하였다.

본 연구에서는 감천항 내외의 4개 정점에서 수압식 파고계를 이용한 장·단주기와 관측과 항입구 손실과 관련하여 국내 최초로 RCM-9 유속계를 이용한 항입구 유속관측을 실시하였다. 장주기와 자료 분석을 위해 스펙트럼 분석에서 통상 사용되던 스펙트럼 폭을 일정하게 유지하면서 에너지를 평활화하는 일정평활화법 대신 저주파수에서 고주파수로 갈수록 일정한 비율로 스펙트럼 폭을 증가시키는 점증평활화법을 제시하고, 후자가 Helmholtz 모드의 침투주파수 재현이나 고주파수 영역의 국부 부진동 모드 분석에 전자보다 적절함을 현장 자료의 비교, 분석을 통하여 입증하였다. 또한, 스펙트럼의 형태에만 의존하여 부진동 모드를 분석하던 기존 방법에 추가하여 상대진폭비를 도입하여 보다 정확하게 부진동의 침투 주파수를 검토하는 방법을 제안하였다. 새로 제시된 방법들을 감천항에서 관측된 자료에 적용하여 감천항의 부진동 특성을 다양하게 검토하고 Helmholtz 모드에서의 유속에 대해서도 검토하였다.

## 2. 현장관측

부산광역시에 속하는 감천항의 부진동 특성과 항입구에서 발생하는 에너지 손실을 파악하기 위하여 장·단 주기와에 대한 현장관측을 실시하였다. 이를 위하여 Fig. 1과 Table 1에 제시한 바와 같이 감천항의 남측에 위치한 묵도 동쪽 약 300 m 해상(정점 P1), 감천항의 입구에서 외측으로 약 180 m 지점(정점 P2), 항입구 중

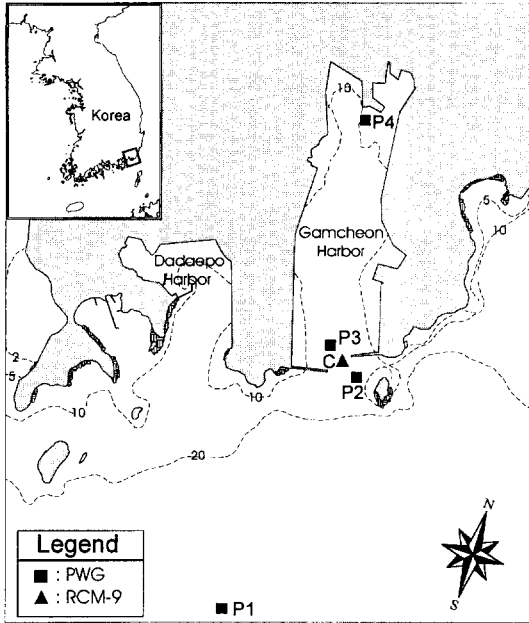


Fig. 1. Location map of field measurement stations.

심에서 안쪽으로 약 130 m 지점(정점 P3), 그리고 감천항내의 중앙 부두에서 약 200 m 떨어진 지점(정점 P4)의 4개소에 paro-scientific sensor를 장착한 수압식 파고계 PWG를 설치하여 현장관측을 실시하였다. 또한, 항입구의 중심에 위치한 정점 C에 Aanderaa사의 유속계 RCM-9을 해저면에 설치하여 1분마다 평균 유속을 관측하였다.

정점 P1과 P4에서는 장주기와 관측을 위해 5초, 그리고 항입구 부근의 정점 P2와 P3에서는 1초 간격으로 자료를 저장하였다. 한편, 정점 C의 RCM-9의 경우 1분 평균유속 자료를 연속적으로 저장하였다. 정점 P1, P4 및 C의 경우 모든 자료가 회수되었으며 상태도 양호하였으나, 정점 P2와 P3의 경우 Data logger의 용량 제한으로 12월 10일 이후에는 자료가 수집되지 못하였다.

각 정점에서 수압식 파고계로 관측된 자료들은 초기의 기기 설정에 따라 각각 1초와 5초 간격으로 연속적으로 기록된 자료이다. 본 관측자료의 경우 1초 간격 자료에도 국부근사법(정, 1999)을 적용하지 않았고 5초마다 1개를 선택하는 방법을 사용함으로써 모든 자료의 자료수집간격을 5초로 통일하였다. 5초 간격의 연속된 17,280개 자료를 1 세트로 하여 12월 10일까지 모두 13 세트의 자료가 구해졌으며, 각 세트의 자료에 대해 이하에 제시하는 방법으로 분석하였다.

### 3. 자료 분석 방법

#### 3.1 Trend removal과 수치 필터링

수압식 파고계로 취득된 원시 자료들을 온도 보정을 거쳐 수압 자료로 변환시키고 각 수압 자료들에 대해 MATLAB(Krauss *et al.*, 1994)을 이용하여 경향 제거(trend removal)와 고주파수 통과 필터링을 실시하였다. 경향 제거 방법에는 average slope method, least squares method 등이 있으나(Bendat and Piersol, 1971) 본 연구에서는 MATLAB에 제시된 후자를 사용하였다.

조석 성분의 제거에는 MATLAB에 제시된 고주파수 통과 필터링을 사용하였다. Recursive 디지털 필터에는 Butterworth, elliptic, Chebyshev type 등의 여러 가지 필터가 있다. Elliptic 필터의 전달함수는 transition width가 다른 필터에 비해 좁으나 passband와 stopband에서 모두 ripple이 발생한다. Chebyshev type I의 경우 passband에서, 그리고 Chebyshev type II의 경우 stopband에서 ripple이 발생하며 transition width는 양자가 모두 elliptic 필터에 비해 약간 넓다. Butterworth 필터의 경우 ripple이 전혀 발생하지 않는 반면 transition width가 다른 필터들에 비해 상당히 넓다(Krauss *et al.*, 1994). 감천항의 부진동 자료의 경우 주기가 가장 긴 Helmholtz 공진주기가 약 30분인 반면 조석 주기는 약

Table 1. Measuring period and location of measurement stations around Gamcheon Harbor in 1997.

Station	Measuring period	Data sampling interval(s)	Location of measurement		Water depth (m)
			Longitude	Latitude	
P1	Nov. 27~Dec. 13	5.0	129°00'00.0"E	34°58'43.2"N	24.0
P2	Nov. 27~Dec. 10	1.0	129°00'45.3"E	35°02'43.6"N	17.0
P3	Nov. 27~Dec. 10	1.0	129°00'35.2"E	35°02'51.7"N	16.2
P4	Nov. 27~Dec. 13	5.0	129°00'01.2"E	35°04'03.1"N	10.4
C	Dec. 10~Dec. 13	60.0	129°00'40.3"E	35°02'47.7"N	16.5

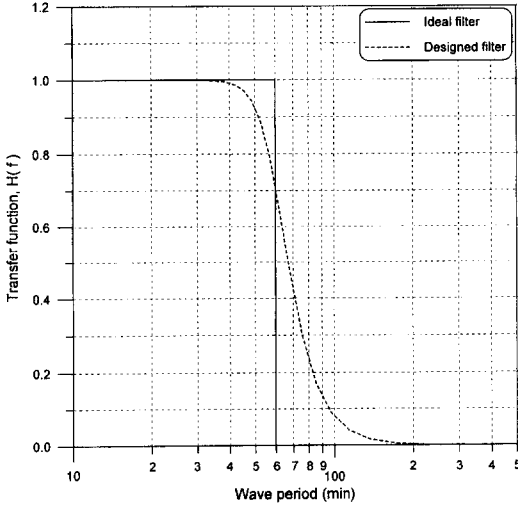


Fig. 2. Transfer function of the Butterworth high-pass filter with cut-off period of 60 minutes.

745분으로 이들 사이의 간격이 상당히 넓으므로 transition width보다는 자료를 오염시킬 가능성이 큰 ripple의 발생 여부에 중점을 두고 사용할 필터를 Butterworth 디지털 필터로 결정하였다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용한 절단 주기가 60분인 Butterworth 고주파수 통과 필터의 전달 함수,  $H(f)$ 를 파랑 주기별로 제시하였는데, 여기서 실선은 목표로 한 ideal 필터, 그리고 점선은 본 연구에서 사용한 필터의 전달함수(2,048개씩 이동 평균을 실시)를 각각 나타낸다. 절단 주기 60분은 감천항의 Helmholtz 공진주기가 약 30분인 점을 감안하여 설정하였다. 그림에서 점선으로 표시된 전달 함수를 살펴보면 주기가 40.2분보다 짧은 성분은 통과율이 99.1% 이상, 주기가 40.2~60.0분인 성분은 70.4~99.1%, 주기가 60.0~97.5분인 성분의 통과율은 8.8~70.4% 사이에서 변화하며, 주기가 170.7분보다 긴 성분은 0.5% 이하이다.

Fig. 3에는 감천항에서 1997년 11월 28일 1시부터 6 시까지의 5시간동안 5초 간격으로 관측된 자료의 분석 결과를 제시하였다. 그림에서 (a)는 온도 보정된 수압 자료, (b)는 경향 제거로 평균치를 제거한 자료, (c)는 앞에서 설정한 Butterworth 고주파수 통과 필터를 통과시킨 자료, 그리고 (d)는 경향 제거와 고주파수 통과 필터링을 모두 실시한 자료를 각각 나타낸다. 이 자료는 저조수에서 고조수로 변화되는 창조시의 자료이다. 먼저, (b)를 살펴보면 원시 자료에서 수심 약 10.4 m에 해당 되는 평균 수압을 빼 값을 보여주며 조석 성분이 거의

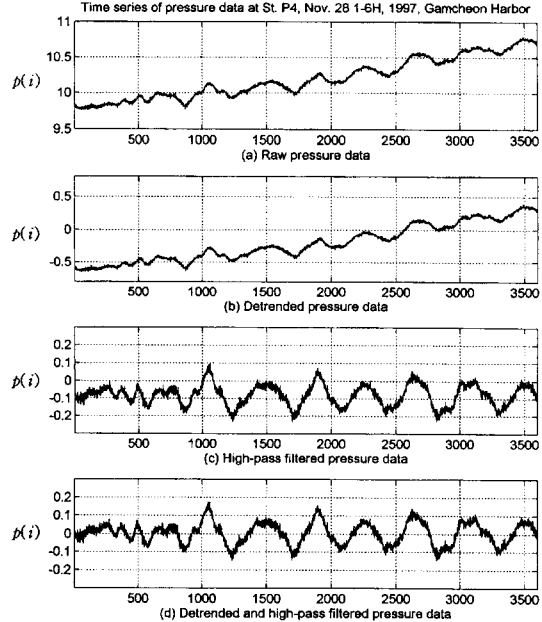


Fig. 3. Time series of pressure data measured at St. P4 for five hours in five seconds interval; (a) raw pressure data, (b) detrended pressure data, (c) high-pass filtered pressure data, (d) detrended and high-pass filtered pressure data.

제거되지 않은 것을 알 수 있다. (c)의 경우 조석으로 인한 경향은 제거되었으나 평균 수압의 제거가 과도한 경향을 나타내고 있다. 따라서, 경향 제거와 고주파수 통과 필터링을 모두 실시하여야 조석 성분을 완전하게 제거할 수 있음을 알 수 있으며 이는 양자를 모두 실시한 (d)에서 확인할 수 있다.

### 3.2 스펙트럼 밀도의 평활화

2개의 자료에 대해 FFT를 적용하면  $2^{n-1}$ 개 주파수에 대한 스펙트럼 밀도가 계산되며 이는 매우 복잡한 형상으로 나타나서 자료의 해석이 곤란하다. 따라서, 적절한 구간에 대해 평활화하는 과정이 요구된다. 평활화 기법에는 일정한 주파수폭에 대해 평균하여 평균 스펙트럼 밀도를 구하는 방법이 일반적이다(이하에서는 일정 평활화법으로 명명). 그러나, 실제 자료를 분석하는 경우 자료 길이가 유한하므로 관심 주파수(예를 들면, Helmholtz 공진 모드 주변)에서의 분해능이 저하되는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 최단 주파수로부터 평균하는 스펙트럼 밀도의 수를 1개씩 증가시켜서 평활화하는 방법(이하에서는 점증평활화법으로 명명)을 도입하였다.

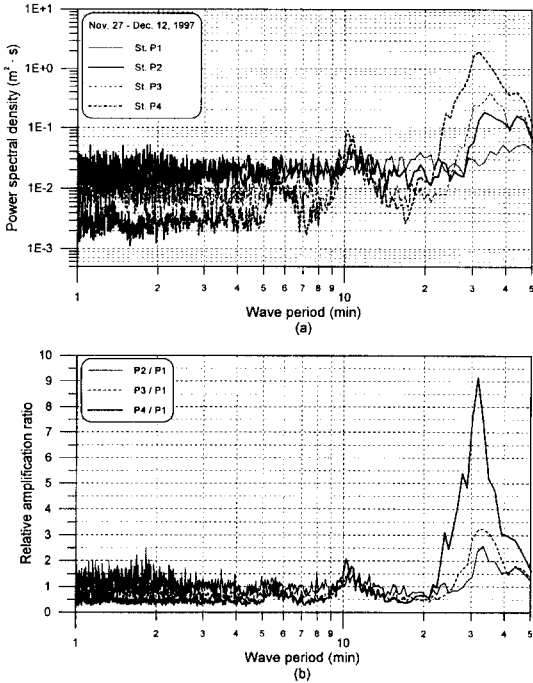


Fig. 4. Results of spectral analysis by fixing degree of freedom as 32 for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 364.1 hours from Nov. 27 16:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

Fig. 4는 전체 자료(약 15.2일)에 대한 결과로 제시된 스펙트럼 밀도를 32개씩 평균한 경우를 도시한 것으로 그림의 (a)는 스펙트럼 밀도, 그리고 (b)는 감천항에서 가장 먼 곳에 위치한 정점 P1을 기준한 상대진폭비를 각각 나타낸다. 스펙트럼 밀도는 주파수에 대해 표시하는 것이 일반적이지만 본 자료의 경우 국부 부진동에 해당되는 주기 1~3분 부근도 자세하게 표시할 필요가 있으므로 제시한 그림처럼 대수축(log axis)에서의 주기에 대한 스펙트럼 밀도로 표시하였다. 정점 P1의 경우에는 Helmholtz 모드가 나타나지 않으나 정점 P2~P4에서는 주기 28~35분 사이에서 이에 해당되는 첨두치가 분명하게 제시되었다. 정점 P4에서는 주기 31.7분에서 스펙트럼 밀도와 상대진폭비가 최대치를 보였으며 상대진폭비는 9.2로 나타났다. 한편, 주기 9~11분에는 제 2 공진 모드가 제시되었다. 그러나, 이보다 짧은 주기에서는 스펙트럼 밀도가 매우 복잡하게 제시되어 뚜렷한 첨두치를 구분하기가 불가능하다. 이처럼 관측자료의 길이가 매우 긴 경우에는 일정평활화법을 사용하더라도 Helmholtz 모드의 공진주기를 포착할 수가 있다. 그러

나, 항외의 해상 상태에 따라 부진동 현상이 다르게 나타나는 경우가 많으므로(정 등, 1995; 정, 1999) 위와 같이 장기간 자료를 사용하는 경우에는 문제가 있다. 물론 Okihiro *et al.*(1993)에 따르면 Helmholtz 모드는 항외의 너울 대신 기상 여건의 영향을 받으나, 이것도 시간적으로 변하므로 장기간 자료를 사용하는 것은 곤란한 것으로 생각된다. 따라서, 비교적 짧은 기간의 자료를 사용하는 것이 바람직하며(예를 들면 24시간), 이 때 일정평활화법을 사용하면 평균하는 스펙트럼 밀도의 수에 따라 다르기는 하나 대체로 Helmholtz 모드의 공진주기를 포착하기가 어렵다. 또한, 비교적 단주기측에서는 자료의 길이에 관계없이 매우 복잡한 형태를 나타낸다.

이하에서는 두 가지 방법의 차이점을 5초 간격으로 연속된 16,384개의 부진동 자료를 해석하는 경우를 예로 들어 설명하였다. 16,384개의 자료에 FFT를 적용하면 8,192개의 주파수에 대한 스펙트럼 밀도를 얻을 수 있다. 일정평활화법에서 스펙트럼 밀도를 64개씩 평균하는 경우 0.17~42.0분 사이의 127개 주파수에 대한 평균된 스펙트럼 밀도가 제시된다. 이 경우에 해석 대상 주기를 0.5~50.0분의 범위로 하면 0.5~42.0분의 43개 주기가 포함되며, 최장주기인 42.0분 외에 제 2 및 제 3 주기로 14.1분과 8.5분이 각각 제시된다. 평균하는 수를 최장주기의 1에서부터 단주기측으로 향할수록 평균하는 스펙트럼 밀도의 수를 하나씩 증가시키는 방법인 점증평활화법을 적용하는 경우 0.17~1,365.0분 사이의 127개 주파수에 대한 평균된 스펙트럼 밀도가 제시된다. 이 경우에 해석 대상 주기를 동일한 범위로 하면 0.5~42.0분의 66개 주기가 포함되며, 동일한 최장주기 42.0분 외에 제 2~제 6주기로 33.3분, 27.0분, 22.4분, 18.8분이 각각 제시되어 서로 큰 차이를 보인다. 감천항의 경우 Helmholtz 공진 주기가 30분 내외로 제시되고 있으나 일정평활화법에서 64개씩 평균하는 경우 42.0분으로 제시되게 되어 큰 차이가 발생한다. 일정평활화법의 경우에 평균하는 수를 작게 하면 상대적으로 단주기 영역에서 에너지의 평활화가 부족하게 되어 매우 복잡한 형태의 국부적인 부진동이 존재하는 것처럼 제시되어 해석이 곤란한 경우가 많다.

이러한 일정평활화법을 적용하는 경우와 점증평활화법을 적용하는 경우의 차이를 직접 확인하기 위하여 감천항의 4개 정점에서 관측된 12월 2일 13시부터 5초 간격의 16,384개의 연속된 수압 자료에 대해 스펙트럼 밀도를 8, 16 및 32개씩 band averaging을 실시하는 일

**Table 2.** Resonant periods and relative amplification ratios of first, second and third modes in Gamcheon Harbor by various method of smoothing.

Method of smoothing		First mode		Second mode		Third mode	
		Period(min)	RAR	Period(min)	RAR	Period(min)	RAR
Method of CDOF	DOF=8	26.0~30.7	13.8~15.9	8.7~12.6	2.6~3.6	5.6~6.7	2.1~2.8
	DOF=16	24.2~33.7	10.3~12.6	9.0~11.3	2.6~3.5	5.9~6.3	2.4~2.5
	DOF=32	28.1	10.5	9.0~12.1	2.7~2.9	5.7~6.5	2.0~2.2
	DOF=64	42.0	6.1	8.5	2.5	6.1	2.5
Moving average	9	27.3~31.8	14.1~15.9	12.2	4.3	5.7	3.7
	17	27.3	15.5	11.2	3.5	5.7	2.8
	33	23.5	12.3	10.5	3.3	6.0	2.0
	65	17.5~20.7	8.3~9.4	9.7~10.3	3.0~3.1	5.5~6.4	2.0~2.2
Method of IDOF		27.0~33.3	11.0~13.2	9.4~12.1	3.0~3.3	5.6~6.2	2.2~2.4

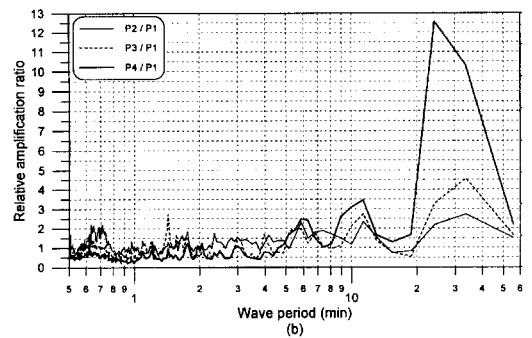
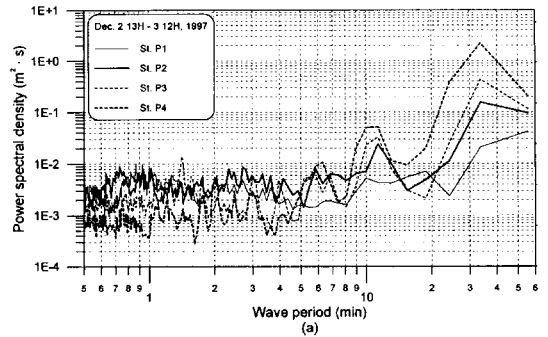
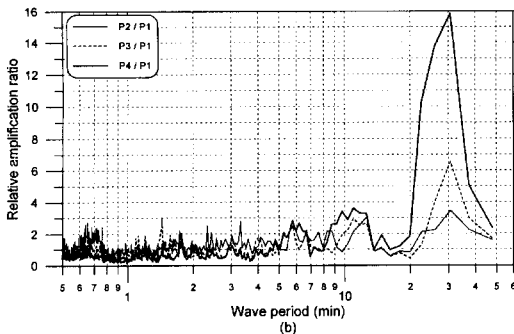
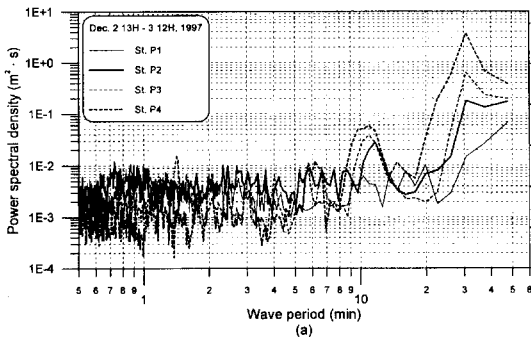
DOF = Degree of Freedom RAR = Relative Amplification Ratio CDOF = Constant Degree of Freedom IDOF = Increasing Degree of Freedom

정평활화법을 적용한 결과, 스펙트럼 밀도를 9, 17 및 33개씩 이동 평균한 결과 및 점증평활화법을 적용한 결과를 Table 2에 각각 제시하였다.

Fig. 5는 12월 2일 13시부터 22.8시간동안 관측된 자료를 8개씩 평균한 경우의 결과를 도시한 것으로, 이 그림을 살펴보면 정점 P4에서의 스펙트럼 밀도는 주기 30.7

분에서 첨두치를 보였으며, 상대진폭비는 주기 20.0~30.7분에서 13.8~15.9로 제시되었다. 이 경우에는 주기 8.7~12.6분(진폭비는 2.6~3.6)의 두 번째 및 5.6~6.7분(2.1~2.8)의 세 번째 공진도 잘 제시되었으나 그 이하에서는 국부 공진들이 매우 복잡한 형태로 제시되었다.

16개씩 평균한 경우에 대한 Fig. 6을 살펴보면 정점



**Fig. 5.** Results of spectral analysis by fixing degree of freedom as eight for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

**Fig. 6.** Results of spectral analysis by fixing degree of freedom as 16 for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

P4에서의 스펙트럼 밀도는 주기 33.7분에서 첨두치를 보여 8개씩 평균한 경우에 비해 약간 길어졌으며, 상대진폭비는 주기 24.2~33.7분에서 10.3~12.6으로 제시되었다. 이 경우에도 주기 9.0~11.3분(2.6~3.5)의 두 번째 및 5.9~6.3분(2.4~2.5)의 세 번째 공진이 잘 제시되었으나 그 이하의 국부 공진들은 여전히 복잡한 형태로 제시되었다.

Fig. 7은 32개씩 평균한 결과를 도시한 것으로서, 이 경우에는 정점 P4에서의 Helmholtz 모드가 주기 31.7분과 상당히 차이를 보이는 28.1분의 단일 첨두치(상대진폭비 10.5)로 제시되었다. 그러나, 주기 9.0~12.1분(2.7~2.9)의 두 번째 및 5.7~6.5분(2.0~2.2)의 세 번째 공진은 비교적 잘 재현되었으며 그 이하의 국부 공진들도 상당히 평활화된 형태로 제시되었다. 한편, 본 논문에서는 제시하지 않았으나 64개씩 평균한 경우에는 정점 P4에서의 Helmholtz 모드가 주기 42.0분에서 상대진폭비 6.1로 제시되어 다른 경우들과 큰 차이를 보였다.

Fig. 8에는 9개씩 이동 평균을 실시한 경우에 대한 결과를 도시하였다. 이를 살펴보면 주기 4분 이하에서는 일정평활화에서 8개씩 평균한 결과와 유사하나 주기 4

분 이상에서는 보다 복잡한 형태의 반응이 제시되었다. 특히, Helmholtz 공진과 제2 공진 모드 부근에서는 인접한 값들의 특성이 그대로 살아있어서 스펙트럼 밀도와 상대진폭비의 형태가 상당히 복잡하게 제시되었다. Helmholtz 공진 모드의 주기는 27.3~31.8분의 범위에서 14.1~15.9의 상대진폭비로 제시되었으며, 제2 공진은 9.2~12.4분 사이에 세 개의 첨두치를 나타냈다.

이러한 장주기측에서의 평활화를 강화하기 위하여 17개씩 이동 평균을 실시한 경우에 대한 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 이 경우에도 주기 4분 이하에서는 여전히 복잡한 형태의 반응이 제시되었다. Helmholtz 공진과 제2~3 공진 모드에서는 평활화가 상당히 이루어져서 스펙트럼 밀도와 상대진폭비의 형태가 거의 단일 첨두형으로 제시되었다. 그러나, Helmholtz 공진 모드의 스펙트럼 밀도는 주기 27.3~34.1분의 범위에서 첨두치를 보인 반면 상대진폭비는 주기 25.3~29.1분에서 이중 첨두치(double peak)를 보였다.

다시 33개씩 이동 평균한 경우에 대한 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 이 경우에도 주기 2분 이하에서는 여

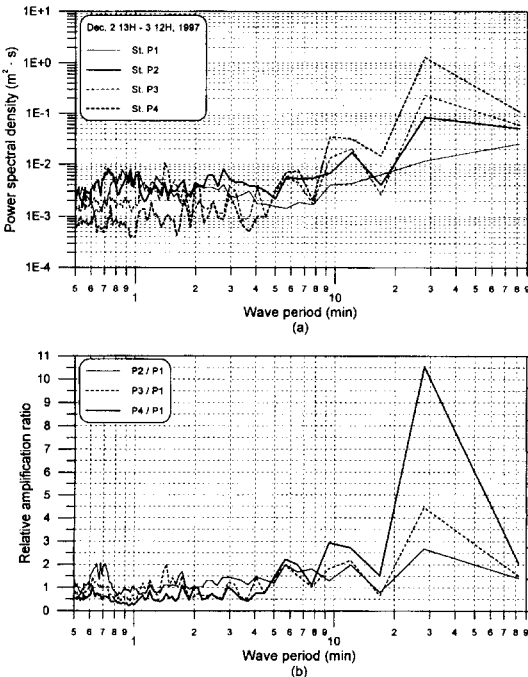


Fig. 7. Results of spectral analysis by fixing degree of freedom as 32 for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

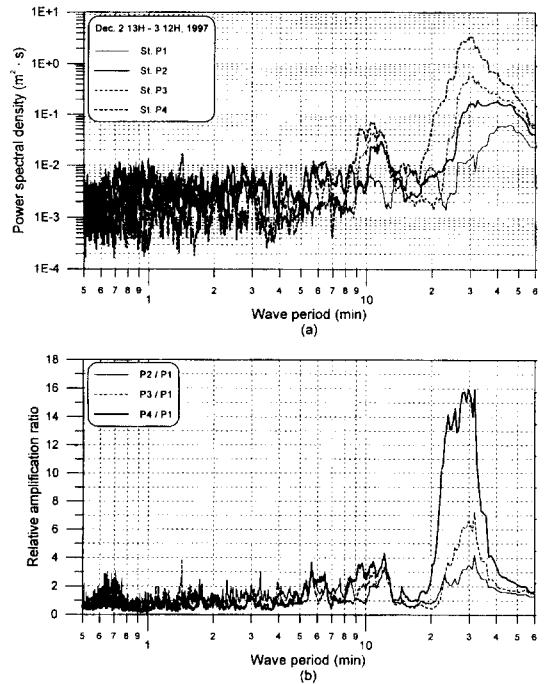


Fig. 8. Results of spectral analysis by moving average of fixing degree of freedom as nine for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

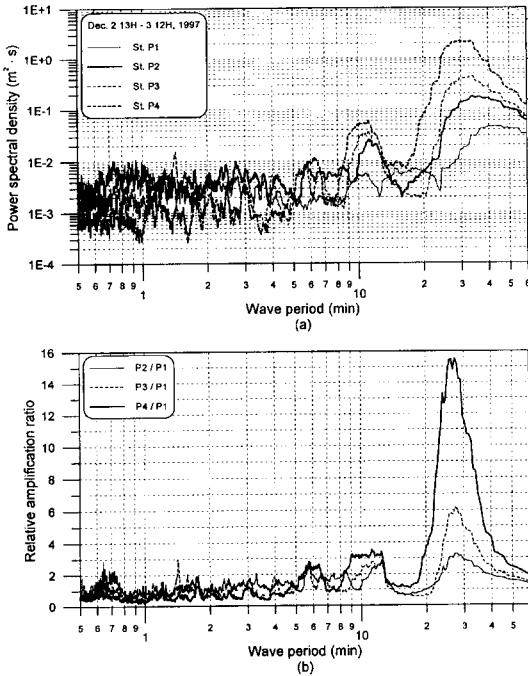


Fig. 9. Results of spectral analysis by moving average of fixing degree of freedom as 17 for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

전히 복잡한 형태의 반응이 제시되었다. Helmholtz 공진과 제2~3 공진 모드에서는 평활화가 크게 이루어져서 스펙트럼 밀도와 상대진폭비의 형태가 단일 첨두형으로 제시되었다. 그러나, Helmholtz 공진 모드의 스펙트럼 밀도는 주기 23.5~42.7분의 매우 넓은 범위에서 첨두치를 보였으며 상대진폭비도 주기 23.5~24.8분에서 첨두치를 나타내어 단주기측으로 크게 이동된 것으로 나타났다. 한편, 본 논문에서는 제시하지 않았으나 65개씩 이동 평균한 경우에는 평활화가 너무 이루어져서 Helmholtz 공진 모드가 거의 제시되지 못하였다.

Fig. 11에는 점증평활화법으로 해석된 결과를 제시하였다. 이를 Fig. 6 및 Fig. 7과 비교해보면 대략 주기 3분을 경계로 장주기측에서는 Fig. 6과, 그리고 단주기측에서는 Fig. 7과 유사한 결과를 보여준다. 그리고, Helmholtz 모드 부근에서는 전체자료의 분석 결과인 Fig. 4에 제시된 값에 가장 근접된 것을 알 수 있다. 상기 검토 결과 및 정(1999)의 동해항 자료에 대한 검토 결과를 종합하면, 점증평활화법을 사용하는 경우 Helmholtz 모드와 같은 장주기측 뿐만 아니라 단주기측에서도 보다 분석하기 쉬운 스펙트럼 형태 및 상대진폭비를 구

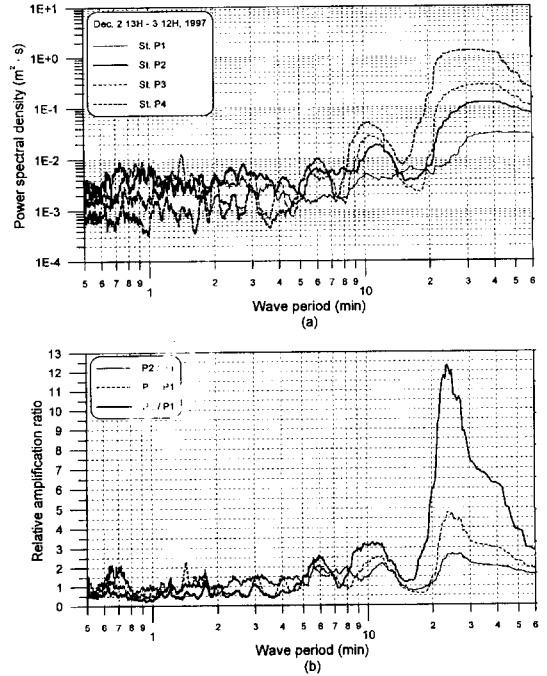


Fig. 10. Results of spectral analysis by moving average of fixing degree of freedom as 33 for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

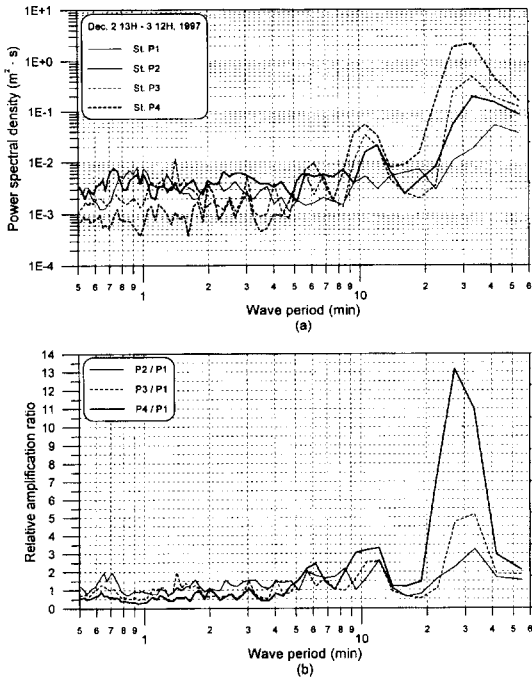
할 수 있는 것으로 사료되었다.

### 3.3 공진 모드 추정

부진동 현상의 이해와 파악에는 관측자료의 분석과 수리모형실험, 수치모형실험 및 해석해를 이용한 역학적 접근 방법이 그 주를 이루고 있다. 이 중 자료의 분석은 현상을 이해하는 데 반드시 선행되어야 할 작업으로 다방면에서의 접근과 해석이 요구된다. 자료 분석을 통한 공진주기 분석 방법은 항내의 1개 정점에서 관측된 해수면 변동 자료에 대한 스펙트럼 분석을 실시하고 에너지가 가장 큰 주기를 공진주기로 결정하는 방법과, 항내·외 정점에서 스펙트럼 에너지를 산출하여 그 상대비가 최고인 주기를 파악하여 공진주기를 결정하는 방법으로 대별된다. 스펙트럼 분석에 의해 제시된 주파수에 대해 항의 정점(0)에 대한 나머지 정점(i)에서의 상대진폭비 산정에는 통상 다음 식이 이용된다.

$$R_{i0} = \frac{\sqrt{S(f)_i(\sigma^2)_i}}{\sqrt{S(f)_0(\sigma^2)_0}}, \quad (i=1, 2, 3...) \quad (1)$$





**Fig. 11.** Results of spectral analysis by increasing degree of freedom for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 2 13:00, 1997; (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

여기서,  $S$ 는 스펙트럼 밀도,  $\sigma^2$ 는 분산,  $f_n$ 는 주파수, 그리고 아래첨자  $n$ 는 관측점의 번호를 각각 나타낸다. 동해항(정 등, 1993)이나 부산항(정 등, 1998)에서는 항외 정점의 위치가 항입구에 가까워서 스펙트럼 밀도를 기준하여 공진 모드의 주기를 검토하였으나, 본 연구의 경우 정점 P1의 위치가 항입구에서 충분히 먼 거리에 있으므로 주로 상대진폭비를 기준하되 전사도 보조적인 방법으로 사용하였다.

**3.4 파랑류 분석**

항입구 손실을 고려한 부진동 수치실험을 위해서는 관측된 유속에서 항입구에 수직한 방향의 유속 성분만에 대한 분석 결과가 필요하다. 이를 위해서 Fig. 1에 제시된 정점 C에서 유속 관측을 실시하였다. DSU(Data Storage Unit)에 저장된 자료를 컴퓨터에 입력하고 유속, 유향 및 성분 유속 자료로 환산하였으며 자료의 시계열 곡선을 그려 기록시의 잘못된 값을 수정하였다. 1분 간격의 유속 자료에서 항입구에 수직한 성분만을 추출하였다. 여기에는 조석에 의한 유속 성분이 포함되어 있으므로 이를 제거하기에 적절한 절단 주기(본 연구에서

는 수압 자료와 동일하게 60분으로 설정)를 갖는 Butterworth 고주파수 통과 필터를 사용하여 조석에 의한 성분을 제거하였다. 또한, 이 자료에 대해 스펙트럼 분석을 실시하였다.

**3.5 입사 장주기파고 분석**

단주기파와 장주기파의 경계를 어디에 설정할 것인가는 매우 어려운 문제이다. 일본의 여러 연구자들은 장주기파의 하한 주기를 20~30초로 설정한 경우가 많았으며 60초로 설정한 경우도 있었다. 참고로 關本 等(1990)은 주기 20초를 기준하여 이보다 짧은 주기를 파랑 성분, 그리고 긴 주기를 surf beat 성분/FIG파(Far-Infra-Gravity wave)으로 구분하였다. 그리고, 加藤 等(1990)은 25초를 기준하여 그 이상을 장주기파 성분으로 규정하였다. 田端 等(1995)은 연속된 파형 기록을 이동 평균하는 방법으로 주기 1분 이상을 장주기파 성분으로 하였다. 한편, 平石 等(1996)도 關本 等(1990)과 동일하게 주기 20초를 기준하였다. 이외는 달리 松良 等(1994)은 30~600초 사이로 국한하여 에너지를 적분함으로써 장주기 성분 파고를 결정하였다. 장주기파 범위로 적절한 주기대폭을 설정하면 스펙트럼 분석에서 구해진 스펙트럼 밀도 중 이에 해당되는 성분만을 사용하는 다음 식을 이용하여 장주기 성분의 파고와 주기를 제안할 수도 있다.

$$m_n = \int_{f_l}^{f_h} f^n \cdot S(f) df \tag{2}$$

$$H_L = 4\sqrt{m_0} \tag{3}$$

$$T_L = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \tag{4}$$

여기서,  $S(f)$ 는 주파수  $f$ 에서의 에너지 스펙트럼,  $m_n$ 은  $f_l \sim f_h$  사이의 장주기 성분의 주파수 스펙트럼의  $n$ 차 모멘트,  $H_L$ 은 장주기 성분의 파고,  $T_L$ 은 장주기 성분의 주기를 각각 나타낸다. 정 등(1997)은 선체운동에 미치는 영향이 큰 주기대로 60~180초를 설정하고 장주기 성분의 파고와 주기를 구한 바 있다.

본 연구에서는 수치실험시의 입사파고를 적절하게 선정하기 위해 Helmholtz 공진과 제 2 공진 모드에 해당되는 주기에서의 장주기파고를 구하였다. 이를 구할 때는 식 (2)와 (3)을 사용하되 원시 스펙트럼 밀도에서 8개씩 band averaging한 일정평활화법에 의한 결과와 정점 P4에서 침두치를 나타낸 주기를 기준하여 정점 P1에서의 스펙트럼 밀도를 사용하였다.

## 4. 관측 결과 분석

### 4.1 단주기파

감천항에서는 파향·파고계에 의한 항의 정점에서의 단주기파 관측은 실시되지 못하였다. 그러나, 항입구 부근의 정점 P2와 P3에서의 자료는 1초 간격으로 취득되었으므로 파향을 제외한 단주기파 분석이 가능하다. 수압식 파고계로 관측된 자료는 해수위 변동 자료로 변환하기 전에는 파별분석법의 적용에 의한 파랑특성계수의 산출이 불가능하므로 항내·외 정점 모두 스펙트럼 분석법에 의한 결과를 이용하였다.

Fig. 12에는 11월 27일부터 12월 10일까지 정점 P2와 P3에서 관측된 유의파고의 시간적 변화를 도시하였다. 이를 살펴보면 11월 29일과 12월 6~7일에 유의파고가 각각 1.2~1.5 m와 2.7~3.0 m인 폭풍파가 내습하였음을 알 수 있다. 한편, 정점 P3는 항입구의 내측에 위치하여 외측에 위치한 정점 P2에서의 파고보다 전반적으로 작은 값을 보인다. 파향에 대한 정보가 없으므로 입사 파향에 의한 효과를 고려하기가 어렵기는 하나 감천항 주변의 지형을 감안하면 정점 P2의 경우에는 관측기간중 파향에 큰 변화가 없었을 것으로 추정할 수 있다.

### 4.2 감천항 공진

13 세트의 관측자료중 단주기파 관측자료 분석 결과(Fig. 12 참조)를 참조하여 평상시와 폭풍시의 두 경우를 선정하여 상세한 관측자료 및 분석 결과를 제시하였다. 평상시로는 12월 2일 13시부터, 그리고 폭풍시로는 12월 6일 16시부터 약 22.8 시간의 자료를 선정하였다.

#### 4.2.1 평상시

정점 P1~P4의 12월 2일 13시에서 약 22.8시간 동안의 관측된 평상시 자료의 스펙트럼 분석 결과는 앞에 제시한 Fig. 11(a), (b)에 스펙트럼 밀도와 정점 P1에 대한 상대진폭비로 제시되었다. 먼저, Fig. 11(a)의 스펙트럼 밀도를 살펴보면 정점 P1의 경우 주기 42.0분과 1분 근처에서 미약한 첨두가 나타났다. 정점 P2의 경우 주기 33.3~42.0분과 10.6~12.1분에서 첨두가 나타나며 후자는 상당히 분명하게 구분된다. 정점 P3에서는 33.3분과 10.6~12.1분에서 비교적 뚜렷한 첨두가 나타난다. 그리고, 항내의 정점 P4에서는 27.0~33.3분, 9.4~12.1분 및 5.6~6.2분에서 뚜렷한 첨두가 나타날 뿐만 아니라 1~3

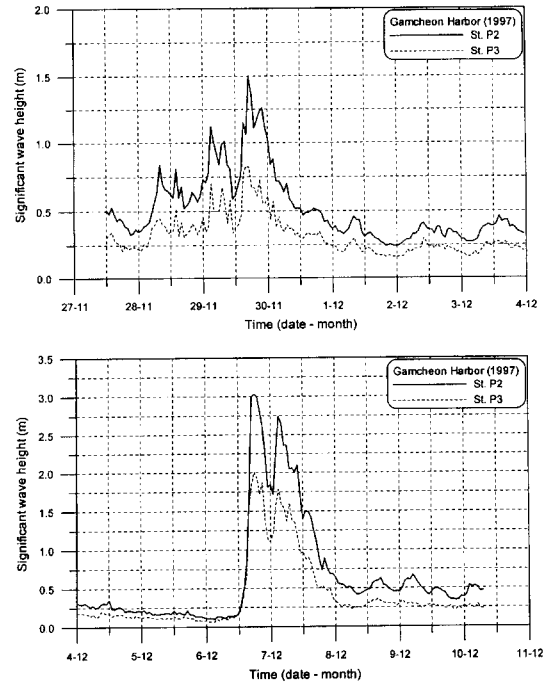


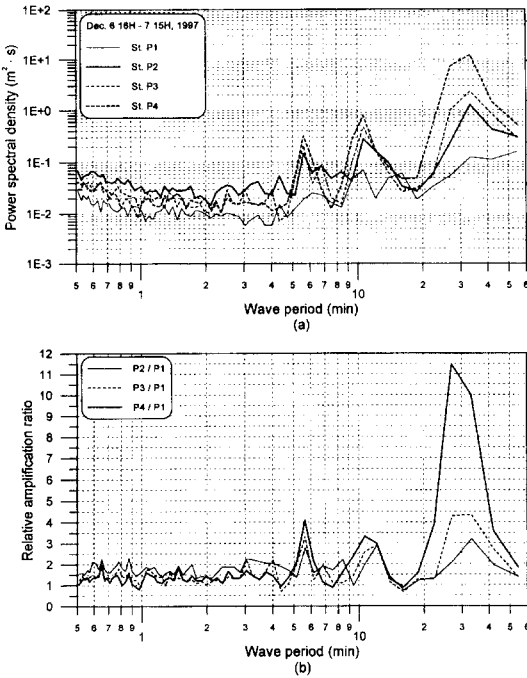
Fig. 12. Time series of  $H$ , measured at Sts. P2 and P3 around Gamcheon Harbor.

분 사이에 다수의 첨두가 나타난다. Fig. 11(b)의 상대진폭비를 살펴보면 항입구 외측의 정점 P2에서는 33.3분(상대진폭비 3.0), 12.1분(2.4), 8.4분(2.0), 5.6분(2.0), 0.7분(2.0) 등에서 첨두가 출현하였으나 상대진폭비는 2~3으로 매우 작다. 항입구 내측의 정점 P3에서는 27.0~33.3분(4.0, 4.7), 10.6~12.1분(2.4, 2.7), 5.6분(2.0), 1.4분(2.0)에서 첨두가 출현하였다. 정점 P4에서는 27.0~33.3분(11.2, 9.9), 9.4~12.1분(3.1~3.4), 5.6~6.2분(2.2, 2.4)에서 첨두가 나타난다.

이 결과들을 살펴보면 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 기준한 분석에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 한편, 감천항의 부진동은 27.0분~33.3분의 주기를 가지는 Helmholtz 모드와 10.6~12.1분의 주기를 가지며 항입구에 가까운 지점에 절점이 생기는 제 2 공진 모드를 가지는 것으로 생각되나 상세한 것은 폭풍시의 자료를 포함한 전체 13 세트에 대한 검토를 통하여 기술하기로 한다.

#### 4.2.2 폭풍파 내습시

정점 P1~P4의 12월 6일 16시에서 약 22.8시간 동안의 관측된 폭풍시 자료의 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 13(a), (b)에 스펙트럼 밀도와 정점 P1에 대한 상대진폭



**Fig. 13.** Results of spectral analysis by increasing degree of freedom for pressure data measured at Sts. P1~P4 for 22.8 hours from Dec. 6 16:00, 1997: (a) power spectral densities, (b) relative amplification ratios.

비로 제시하였다. 이를 평상시에 대한 Fig. 11과 비교해보면 스펙트럼 밀도의 크기가 전반적으로 평상시에 비해 10배 정도로 큰 것을 알 수 있다. 또한, 주기 10.6분과 5.6분의 제 2 및 제 3 공진의 스펙트럼 밀도와 상대진폭비의 폭이 평상시에 비해 매우 좁아져서 단일 침두형을 나타내었다.

먼저, Fig. 13(a)의 스펙트럼 밀도를 살펴보면 정점 P1의 경우 평상시와는 달리 뚜렷한 침두가 나타나지 않았다. 정점 P2의 경우 42.0분, 10.6분 및 5.6분에서 비교적 구분하기 쉬운 침두가 나타났으며, 정점 P3에서는 33.3분, 10.6분 및 5.6분에서 뚜렷한 침두가 나타났다. 그리고, 항내의 정점 P4에서는 27.0~33.3분, 10.6분 및 5.6분에서 뚜렷한 침두가 나타나지만 평상시의 스펙트럼 밀도에서 출현했던 1~3분 사이의 다수의 침두가 출현하지 않았다. Fig. 13(b)의 상대진폭비를 살펴보면 항입구 외측의 정점 P2에서는 33.3분(상대진폭비 3.2), 12.1분(2.4), 8.4분(2.5), 5.6분(3.0), 3.0~4.0분(2.0~2.5) 등에서 침두가 출현하며 평상시에 비해 진폭비가 약간 크다. 그리고, 주기 0.6~1.5분에서 상대진폭비가 2.0~2.3인

침두가 다수 출현한다. 항입구 내측의 정점 P3에서는 27.0~33.3분(4.2, 4.8), 10.6~12.1분(2.3, 2.7), 5.6분(4.2) 외에 4.0분(2.2), 3.0분(2.4), 0.6분(2.0) 등에서도 침두가 출현하였다. 정점 P4에서는 27.0~33.3분(10.1, 9.8), 9.4~12.1분(2.5~3.2) 및 5.6분(4.3) 등에서 침두가 나타났다.

이 결과들에서도 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 기준 한 분석에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 폭풍시에도 Helmholtz mode의 주기는 27.0분~33.3분, 제 2 공진의 주기는 9.4~12.1분으로 제시되었으나 제 3 공진은 주기 5.6분에서 단일 침두치를 나타냈다. 한편, 이 결과에서는 정 등(1995)에 의해 제시되었던 폭풍시의 강한 국부 부진동의 출현 현상이 나타나지는 않았는데 이는 동계 폭풍파여서 입사파향이 항입구를 통과하기 어려운 점(항입구는 S 방향으로 열려져 있으나 동계 폭풍파의 파향은 대체로 NE 방향임)을 그 이유로 생각할 수 있다.

#### 4.2.3 감천항의 항만 공진 특성

감천항의 제 2 공진 모드로 보여지는 10.6분 부근의 공진 모드가 평상시와 폭풍시에 모두 뚜렷하게 나타나는 점은 해양수산부(1997)에 제시되었던 온산항의 부진동 분석 결과와 상당히 다른 경향이다. 온산항의 경우 제 2 공진인 주기 8.4~9.4분의 공진 모드가 폭풍시에 매우 약하게 나타났으며, 특히 태풍 내습시와 같은 고파랑시에는 전혀 나타나지 않았다.

Figs. 11과 13에서 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 기준한 검토 결과가 유사한 점을 감안하여 본 연구에서는 정점 P1에 대한 P4에서의 상대진폭비를 기준하여 감천항 수역의 공진 모드들을 검토하였다. Table 3에는 13 세트에 대한 공진 모드를 제시하였는데 표에서 괄호 안의 숫자들은 상대진폭비를 나타낸다. 한편, 이 표에서 자료 번호는 11월 27일 13시를 시점으로 1일씩 자료를 분할한 순서를 나타내며 정점 P2와 P3의 경우 12월 10일 이후에는 Data logger의 용량 부족으로 관측이 중단되었다.

이 표를 살펴보면 항입구 외측의 정점 P2에서는 13 세트가 모두 주기 33.3분에서 Helmholtz 모드가 출현하여 완전히 고정된 값을 나타낸다. 그러나, 항입구 내측의 정점 P3에서는 주기 33.3분이 4 세트, 27.0~33.3분이 9 세트여서 파가 항입구를 통과하면서 Helmholtz 모드의 주기가 약간 짧아지는 것을 알 수 있다. 그리고, 항내 정점 P4에서는 주기 27.0~33.3분 및 27.0분이 각각 8 세트여서 이러한 경향이 심화된 것으로 나타났다. 주기 27.0~33.3분에 국한하여 정점 P3와 P4의 Helmholtz

**Table 3.** Results of seiche data analyses based on measured data at Sts. P1~P4 around Gamcheon Harbor in 1997.

Data no.	Resonant period in min. (relative amplification ratio)		
	St. P2	St. P3	St. P4
1	33.3(3.4), 12.1(2.8)	33.3(4.9), 10.6~12.1(3.0, 2.9), 6.8(2.3), 5.2(2.7)	27.0~33.3(10.0, 10.2), 9.4~12.1(4.0~3.4), 5.2 6.2(2.0 2.5)
2	33.3(2.8), 10.6~12.1(2.7), 8.4(2.3), 5.6(2.5)	27.0 33.3(3.2, 3.9), 10.6(3.6), 5.6(2.8)	27.0(11.3), 10.6(4.2), 5.6(2.9)
3	33.3(2.7), 10.6~12.1(2.8, 2.3), 8.4(2.8), 6.8(2.1), 5.2~5.6(2.4, 2.5), 2.7(2.6)	27.0 33.3(5.1, 4.1), 10.6(4.0), 6.8(2.1), 5.2~5.6(3.0, 2.9)	27.0(14.9), 10.6(5.0), 5.2~5.6(3.1, 3.0)
4	33.3(3.7), 10.6~12.1(2.2), 5.6(2.4)	33.3(5.4), 10.6(3.0), 5.6(3.5)	27.0~33.3(13.4, 11.3), 10.6(3.7), 5.6(3.9)
5	33.3(2.5), 12.1(2.4), 8.4(2.0), 5.6(2.5)	27.0~33.3(3.4, 3.6), 10.6(3.1), 5.6(2.9)	27.0(11.4), 10.6(3.8), 5.6~6.2(3.2, 2.8)
6	33.3(3.0), 12.1(2.4), 8.4(2.0), 5.6(2.0), 0.7(2.0)	27.0~33.3(4.0, 4.7), 10.6~12.1(2.4, 2.7), 5.6(2.0), 1.4(2.0)	27.0~33.3(11.2, 9.9), 9.4~12.1(3.1 3.4), 5.6~6.2(2.2, 2.4)
7	33.3(3.2), 12.1(2.0), 8.4(2.3), 5.6(2.1)	33.3(4.4), 10.6(2.7), 5.2~5.6(2.0, 2.3)	27.0~33.3(10.1, 9.0), 10.6(3.4), 5.6~6.2(2.3, 2.0)
8	33.3(2.7), 5.6~6.2(2.3, 2.1), 4.0(2.0), 3.5(2.0), 2.7(2.0)	27.0~33.3(3.8), 10.6(2.3), 5.2~5.6(2.1~2.4)	27.0(12.9), 10.6(3.1), 6.2(3.0)
9	33.3(3.8), 10.6~12.1(2.3, 2.6), 6.8(2.3), 1.5~3.0(2.0~2.1)	33.3(6.8), 10.6(3.8), 6.8(2.3), 5.6(3.0), 1.0~3.0(2.0~3.3)	33.3(13.6), 10.6(4.7), 5.6(2.8)
10	33.3(3.2), 12.1(2.4), 8.4(2.5), 5.6(3.0), 3.0~4.0(2.0~2.5), 0.6~1.5(2.0~2.3)	27.0~33.3(4.2, 4.8), 10.6~12.1(2.3, 2.7), 5.6(4.2), 4.0(2.2), 3.0(2.4)	27.0~33.3(10.1, 9.8), 9.4~12.1(2.5~3.2), 5.6(4.3), 0.6(2.0)
11	33.3(3.4), 12.1(2.7), 8.4(2.1), 5.6(2.5)	27.0~33.3(4.2, 5.5), 10.6(3.3), 5.6(3.2)	27.0~33.3(12.0, 10.8), 10.6(4.1), 5.6(3.1)
12	33.3(3.9), 12.1(3.7), 5.6(2.5), 4.7(2.8), 3.5(2.2), 0.7(2.5)	27.0~33.3(4.6, 5.8), 10.6~12.1(3.0), 5.2(3.5)	27.0~33.3(13.1, 12.8), 9.4 12.1(3.5 3.7), 5.2 6.2(3.0)
13	33.3(3.7), 10.6(2.6), 5.6(3.3), 3.5(2.2), 0.7(2.4)	27.0~33.3(5.1, 7.3), 10.6(3.5), 5.6(3.7), 3.0(2.0)	27.0~33.3(13.0, 12.1), 10.6(4.2), 5.6(3.1)

모드의 상대진폭비를 살펴보면 P3의 경우 9 세트 중에서 1 세트를 제외한 8 세트에서 33.3분의 진폭비가 컸음에 비해 P4의 경우에는 8 세트 중에서 7 세트가 27.0분의 진폭비가 더 커서 전술한 내용을 보다 확실하게 뒷받침해 준다.

감천항의 제 2 공진으로 보여지는 9.4~12.1분의 공진 모드는 항입구 외측의 정점 P2에서도 대부분 2.0~2.8의 진폭비를 나타내어 절점선이 항입구에서 상당히 외측으로 떨어진 지점에 형성되는 공진 모드인 것으로 생각된다. 이 공진 모드는 정점 P3에서는 진폭비가 2.3~4.0, 정점 P4에서는 2.5~5.0 정도로 나타나며 항내로 갈수록 진폭비가 약간 증가하기는 하나 Helmholtz 모드의 진폭비에 비하면 상당히 작다.

한편, 정점 P2에서는 8.4분의 공진 모드가 7 세트에서 2.0~2.8의 약한 진폭비로 나타난다. 이 공진 모드는 항내의 P3와 P4에서는 전혀 나타나지 않으므로 항내에서만 발생하는 P3와 P4의 9.4~12.1분 또는 6.8분의 공진 모드와 구분된다. 또한, 항입구 내외의 정점 P2와 P3

에서는 수 개의 자료 세트에서 6.8분의 공진 모드(P2는 2 세트이며 진폭비는 2.1~2.3, P3는 3 세트이며 진폭비는 P2와 동일)가 나타나나 정점 P4에서는 전혀 나타나지 않는다. 이러한 경향은 주기 5.2~6.2분의 공진 모드에서도 나타나는데 정점 P2에서는 10 세트에서 진폭비 2.0~3.3, P3에서는 13 세트 전부에서 진폭비 2.0~4.2를 보이는 5.2~5.6분의 공진 모드가 나타난 반면 정점 P4에서는 주기 5.2~6.2분, 진폭비 2.0~4.3로 약간 다르게 나타났다. 한편, 정점 P2와 P3에서는 이외에도 0.6~4.0분 사이에 최대 3.3의 진폭비를 나타내는 국부적인 공진 모드가 출현하지만 항내 정점 P4에서는 전혀 나타나지 않았다.

전반적으로 감천항 수역에서는 공진주기가 약 30분이고 상대진폭비가 대략 9~14인 Helmholtz 모드가 가장 우세하며 이것보다 주기가 짧은 9.4~12.1분과 5.2~6.2분의 공진 모드도 상당히 분명하게 나타난다. 동해안의 동해항이나 묵호항 등에서는 Helmholtz 모드를 제외한 공진 모드가 상대적으로 미약하게 출현했던 점을 감안하

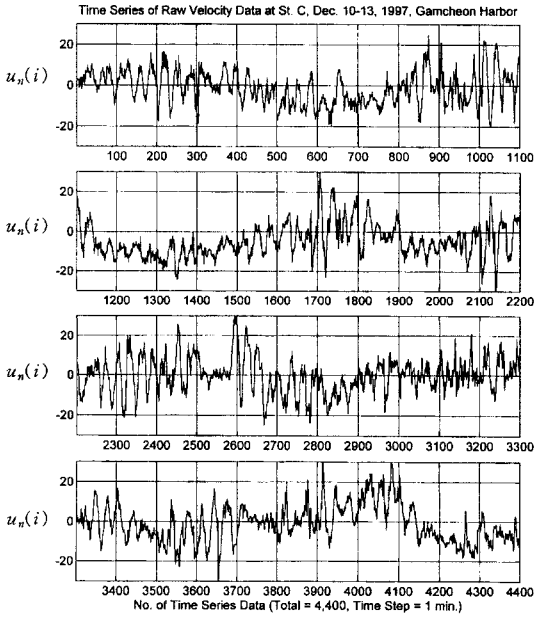


Fig. 14. Time series of raw velocity component normal to harbor mouth measured at St. C in Gamcheon Harbor (Dec. 10~13, 1997).

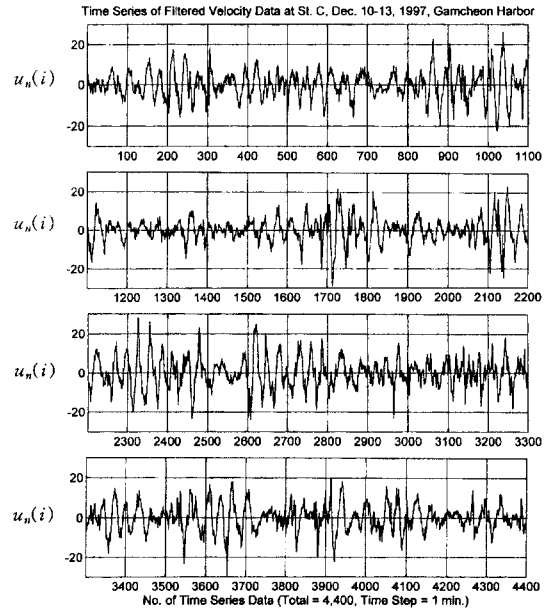


Fig. 15. Time series of filtered velocity component normal to harbor mouth measured at St. C in Gamcheon Harbor (Dec. 10~13, 1997).

면 부분적으로 개방된 직사각형 항만과 유사한 감쇠항의 평면적인 형태가 이러한 공진 모드를 분명하게 형성시키는 것으로 사료된다.

### 4.3 항입구의 파랑류 검토

항입구 손실을 고려한 부진동 수치실험의 보정·검증을 위해서는 관측된 유속에서 항입구에 수직인 방향의 유속 성분만에 대한 분석 결과가 필요하다. 1분간 평균한 유속 자료에서 항입구에 수직인 성분만을 추출하여 Fig. 14에 제시하였다. 이를 살펴보면 조석에 의한 유속 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 절단 주기를 60분으로 설정한 Butterworth 고주파수 통과 필터를 사용하여 조석에 의한 성분을 제거한 후, 항입구에 대해 수직인 유속 성분을 Fig. 15에 제시하였다. 이를 살펴보면 조류 성분이 완전히 제거되었으며 약 30분 간격으로 유속의 최대치(0.25~0.30 m/s)가 나타남을 알 수 있다. Fig. 16은 항입구에 수직인 유속 성분의 스펙트럼 밀도를 도식한 것으로, 이를 살펴보면 Helmholtz 모드에 해당되는 주기 28.2~31.9분 부근에서 유속이 최대치를 나타냈다.

### 4.4 장주기 성분 파고 검토

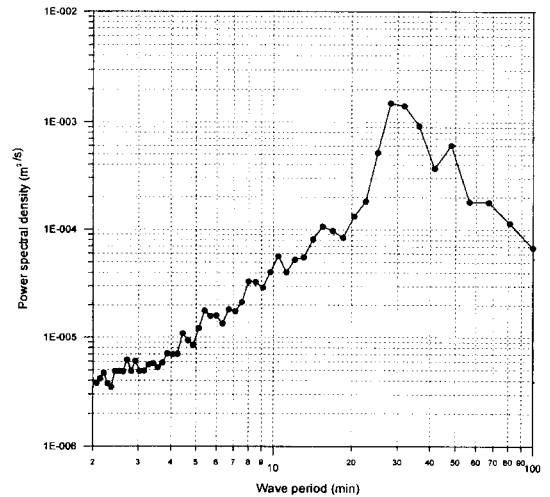


Fig. 16. Power spectral density for observed velocity component normal to harbor mouth at St. C in Gamcheon Harbor.

앞에서는 5초 간격의 16,384개 자료에 대해 스펙트럼 분석을 실시하고 장주기 부진동 분석을 실시하였다. 여기서는 자유도 8의 일정평활화법에 의한 스펙트럼 분석 결과에 식 (2)와 (3)을 적용하여 정점 P1에서의 16 세트에 대한 장주기 성분 파고를 구하고 이를 Table 4에 제시하였다. 단, Helmholtz 모드의 에너지 평균 구

**Table 4.** Amplitude of incident wave for Helmholtz, second and third resonant modes obtained from spectral analyses.

Data no.	Amplitude of incident wave in cm		
	Helmholtz mode	Second resonant mode	Third resonant mode
1	0.98	0.35	0.15
2	0.88	0.48	0.21
3	0.86	0.42	0.14
4	0.74	0.34	0.10
5	0.70	0.32	0.18
6	0.47	0.19	0.11
7	0.60	0.22	0.08
8	0.39	0.21	0.06
9	0.51	0.25	0.08
10	0.97	0.72	0.35
11	0.78	0.39	0.16
12	0.52	0.22	0.15
13	0.45	0.12	0.06
14	0.38	0.11	0.05
15	0.36	0.10	0.05
16	0.40	0.22	0.06

간은 26.0~37.4분, 제 2 공진 모드의 구간은 9.7~11.0분, 그리고 제 3 공진 모드의 구간은 5.2~5.6분으로 설정하였다. 이를 살펴보면 Helmholtz 공진 모드의 경우 입사파 진폭은 최대 1 cm 정도로 제시되었다.

## 5. 결론 및 토의

감천항에서 발생하는 부진동 현상의 공간적 및 시간적인 특성을 파악하고 부진동 수치모형의 보정 및 검증 자료를 수집하기 위하여 항내·외 5개 정점에서 장·단주기파와 항입구 유속관측을 각각 실시하였다. 5초 간격의 수압 자료와 1분 평균한 항입구에 수직인 유속 성분에 대해 스펙트럼 분석을 실시하였다. 현장관측 및 자료 분석을 통하여 구해진 주요 결론 및 토의 사항은 다음과 같다.

- 조석 성분은 경향 제거와 고주파수 통과 필터링을 모두 실시하여야 완전히 제거됨을 확인하였다.

- 일정한 주파수폭에 대해 평균하는 일정평활화법을 24시간 자료에 적용하였을 때 스펙트럼 밀도를 64개 또는 32개씩 평균하는 경우 Helmholtz 모드 부근의 해상도가 저하되었으며 16개 또는 8개씩 평균하는 경우에는 국부 부진동 모드가 너무 복잡하게 제시되었다.

- 이동 평균의 적용시 스펙트럼 밀도를 9개씩 평균한

경우에는 전체 주파수 영역에서 스펙트럼이 너무 복잡한 형태로 제시되었다. 17개씩 평균한 경우 장주기측에서는 단일 침두형이 제시되었으나 단주기측에서는 여전히 복잡한 형태로 제시되었다. 32개씩 평균한 경우에는 Helmholtz 모드가 단주기측으로 상당히 이동되었으며 64개씩 평균한 결과는 이러한 경향이 심화되었다.

- 점증평활화법에 의한 결과에서는 주기 3분을 경계로 장주기측에서는 8개씩 평균한 일정평활화법과, 그리고 단주기측에서는 16개씩 평균한 일정평활화법과 유사한 결과를 나타냈다. 이를 종합하면 점증평활화법을 사용하는 경우 Helmholtz 모드와 같은 장주기측 뿐만 아니라 단주기측에서도 보다 분석하기 쉬운 스펙트럼 형태 및 상대진폭비를 구할 수 있는 것으로 사료되었다.

- 전체 16일 길이의 자료분석 결과 감천항의 Helmholtz 공진 모드는 31.7분(상대진폭비 9.2), 제 2 공진 모드는 10.3분(1.8), 제 3 공진 모드는 5.4분으로 제시되었다.

- 24시간 길이의 자료 분석 결과 폭풍시의 경우 스펙트럼 밀도의 크기가 전반적으로 평상시에 비해 매우 크게 나타났다. 또한, 제 2 및 제 3 공진의 스펙트럼 밀도와 상대진폭비의 폭이 평상시에 비해 매우 좁아져서 단일 침두형을 나타내었다.

- 1분 간격의 유속 자료에서 항입구에 수직인 방향의 유속 성분만을 추출하여 분석한 결과 Helmholtz 모드에 해당되는 주기 28.2~31.9분에서 침두치(유속은 0.25~0.30 m/s)가 나타났다.

- Helmholtz 공진 모드의 입사파 진폭은 최대 1 cm 정도로 나타났다.

- 항입구를 빈번하게 통과하는 선박 때문에 유속계를 저면에 설치하여 저면 유속을 관측하였으나 차후에는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용한 층별 유속의 관측이 필요한 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구소의 기관고유사업인 “연안방재 구조물의 설계기술 개발”과 기본연구사업인 “구속파의 전파 특성 해석”의 일환으로 수행되었으며 현장관측에 수고하신 관계자 여러분들께 감사의 뜻을 포함합니다.

## 참고문헌

문동준, 1998. Wavelet을 이용한 항만부진동 연구, 석사학

- 위논문, 부산대학교, 100 p.
- 정원무, 1999. 항만부진동에 대한 현장연구와 유한요소 해석, 박사학위논문, 서울대학교, 445 p.
- 정원무, 강석구, 소재귀, 정경태, 염기대, 1998. 부산항 부진동 특성(1. 현장관측), 해양연구, **20**(3): 307-323.
- 정원무, 정경태, 채장원, 1993. 동해항의 부진동 특성(1. 현장관측), 대한토목학회논문집, **13**(3): 173-183.
- 정원무, 정경태, 채장원, 1995. 목호항의 항내 진동, 한국해양안·해양공학회지, **7**(1): 46-56.
- 정원무, 채장원, 전기천, 이종찬, 조홍연, 김용권, 백원대, 박승준, 김미경, 1997. 구속파의 전파 특성 해석, BSPE 97625-00-1055-2, 한국해양연구소, 174 p.
- 해양수산부, 1997. 울산 신항만 방파제 기본설계보고서(제2권 수치모형실험편), 연구기관 한국해양연구소, 615 p.
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G., 1971. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons, 407 p.
- Horikawa, K. and Nishimura, H., 1970. On the function of tsunami breakwaters, *Coastal Engrg. in Japan*, **13**, pp. 103-112.
- Ito, Y., 1970. On the effect of tsunami breakwater, *Coastal Engrg. in Japan*, **13**, pp. 89-102.
- Krauss, T.P., Shure, L. and Little, J.N., 1994. *Signal Processing Toolbox User's Guide*. The Math Works, Inc.
- Miles, J.W. and Munk, W., 1961. Harbor paradox. *J. Waterways and Harbors Div., ASCE*, **87**(WW3), pp. 111-130.
- Okihiro, M., Guza, R.T. and Seymour, R.J., 1993. Excitation of seiche observed in a small harbor, *J. Geophy. Res.*, **98**(C10), pp. 18201-18211.
- Wilson, B.W., 1962. Discussion of "Harbor paradox." by Miles, J.W. and Munk, W., *J. Waterways, Harbors and Coastal Engrg. Div., ASCE*, **88**(WW2), pp. 185-195.
- 加藤一正, 中村聰志, 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. 港灣内外のサーフビートの發生 傳播に關する現地調査, 海岸工學論文集, **37**: 86-90.
- 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 December 9, 1999

Accepted January 6, 2000