

# 장주기파를 고려한 항만 가동율의 평가

김규한\*

\*관동대학교 건설환경시스템공학부

## Evaluation of the Harbor Operation Rate Considering Long Period Waves

KYU-HAN KIM\*

\*Division of Civil & Environmental System Engineering, Kwandong University, Gangneung, Korea

**KEY WORDS:** Long Period Wave 장주기파, Field Observation 현장관측, Harbor Operation Rate 항만가동율, Harbor Calmness 항만 정온도, Mooring Ship 계류선박

**ABSTRACT:** In this study, the characteristics of long period waves are analyzed by field observation at Sokcho harbor on the eastern coast of Korea. Firstly, the pressure data obtained from field observation are transformed into water surface elevations and the wave by wave analysis is applied to the observed wave data. Also, we select long period waves by setting up the range 30~200sec, and suggest the relationship between ordinary waves and long period waves using the concept of the significant wave height. And, we examine the effects of the long period waves on the rate of the harbor operation. The observation results demonstrate that the long period waves with heights of 1.2~14.6cm and periods of 35.8~162.6sec exist at Sokcho harbor. Also, we found the rates of harbor operation based on long period waves are 61.8%~99.5% lower than the usual rates of 93.8%~100%.

### 1. 서 론

항만에서 가장 중요한 기능 중 하나는 선박에 안전한 박지를 확보하는 것이며 선박의 계류 가부는 항내정온도에 의해 판단된다. 지금까지 항내정온도의 평가는 파고에 의해 수행되고 있으며, 하역 잔교에 선박을 계류하는 경우에도 계류의 가부에 대한 판단기준은 잔교 지점의 파고, 주기 및 바람이다. 그러나, 항내의 파고가 작고 바람이 없을 때, 선체 동요가 커서 잔교에 접안할 수 없는 사상(계류불가능 사상)이 발생하는 것은 예전부터 항만정비 측면에서 큰 문제가 되어져 왔다. 즉, 주기 수십 초의 장주기파가 항내의 계류선박에 영향을 미치며, 공진에 따른 동요를 일으켜서 계류의 안정성 및 하역에 지장을 초래한다. 이 점은 항내 정온도의 판단 기준으로서 파고와 주기뿐만 아니라, 장주기파에 의한 선박동요 및 계류 가부의 부가적인 검토의 필요성을 나타내주고 있는 것이다. 장주기파에 의한 선박의 계류불가능 사례를 Nagai et al.(1994)이 보고하였고, Hiraishi et al.(1995)은 선박화물작업에 피해를 입는 일본의 주요항에서 장주기파를 관측·분석하였다. 또한, Ueda(1987)는 계류선박의 동요를 고려하여 하역가동율을 평가하는 방법을 제안하였으며, Ueda and Shiraishi(1988)는 하역중단 사례를 조사하고 이들 사례에 대해 수행된 계류선박의 동요에 대한 수치모의에 기초하여 하역허용 동요량을 제안하였다.

본 연구에서는 한국 동해안의 속초항을 대상으로 하여 파랑 관측을 실시하고, 항만에 입사하는 항외파랑의 관측자료와 항내파랑의 관측자료로부터 장주기파를 검출하고, 관측해역의 장주기파 특성을 분석하여 통상파랑의 유의파와 장주기파의 제원과의 관계를 제안함으로써 장주기파의 제요소에 대한 정량적인 검토를 수행하였다. 아울러, 수심에 따른 장주기파의 특성을 분석하고 장주기파가 항만의 가동율에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

### 2. 현지관측 및 자료분석

본 연구의 실측대상지역은 강원도 북부에 위치하는 속초항으로 항입구 수심 11m에 메모리형 수압식 파고계 WH(Wave Hunter)-102와 항외 수심 22m에 초음파식 파고계 WH(Wave Hunter)-2를 설치하여 1999년 6월 23일 11시~1999년 7월 20일 12시까지 약 28일 동안의 유속, 유향, 파고를 측정하였다. 아울러, 항외 수심 22m에 WH-102를 사용하여 2001년 1월 20일 16시~2001년 2월 28일 9시까지 약 38일 동안 관측된 동계 파랑을 추가하였다. 관측자료는 WH-102의 경우 1.0sec 간격으로 WH-2의 경우 0.5sec 간격으로 1시간마다 연속으로 취득하였으며, 1시간 자료를 1세트로 하여 각각 총 648세트, 1300세트이며 1세트 당 4,096(2<sup>12</sup>)개의 자료를 사용하여 분석하였다.

제1저자 김규한 연락처: 강원도 양양군·읍 임천리 산 7번지  
033-670-3317 kkhkim@mail.kwandong.ac.kr

Table 1 은 파고계의 위치와 관측기간 및 해당지점의 관측수심을 나타낸다.

Table 1 Details of field measurement

Point	Equipment	Position	Period	Depth
St. 0	WH-102	N 38° 12' 10" E128° 36' 15"	6/23 ~ 7/20, 1999	11m
	WH-Σ	N 38° 11' 36" E128° 36' 50"	6/23 ~ 7/20, 1999	22m
St. 1	WH-102	N 38° 12' 10" E128° 36' 15"	1/20 ~ 2/28, 2001	22m

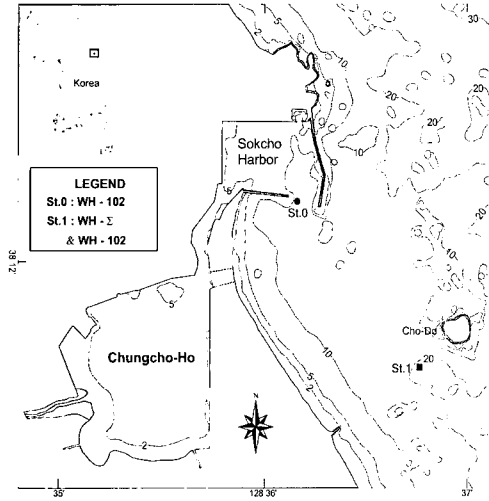


Fig. 1 The location map of field measurement

관측 data로부터 파별해석을 실시하여 파고와 주기를 정의하였으며, 파랑특성계수를 산출하였다. 그 결과, 관측기간 중 Fig. 1의 St. 0 과 St. 1 에서 유의파고와 유의주기의 시계열 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

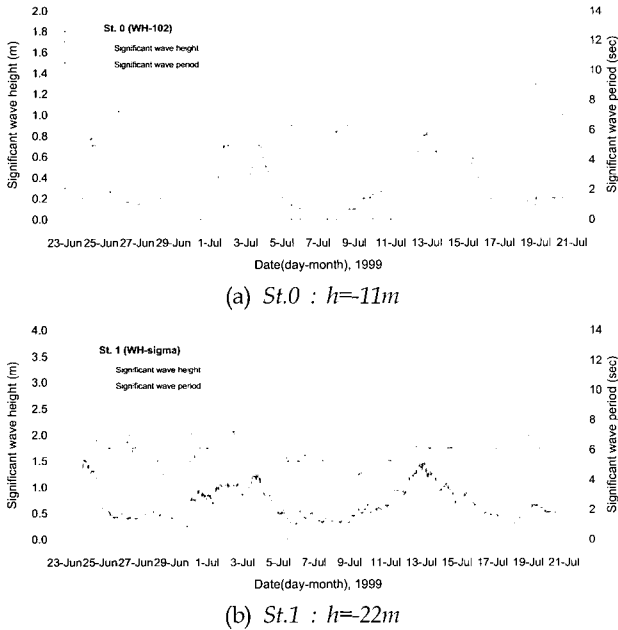


Fig. 2 Variation of significant wave heights and periods from 23th June to 20th July, 1999

### 3. 파랑의 출현특성

장기파랑산출자료집(해양수산부, 1996)으로부터 대상해역에 인접한 격자점에서의 파고·주기 분포와 방향별 파고계급별 발생빈도의 결과를 이용하였으며, 이 중 파고별 주기빈도 출현 빈도를 Fig. 3에 나타내었다.

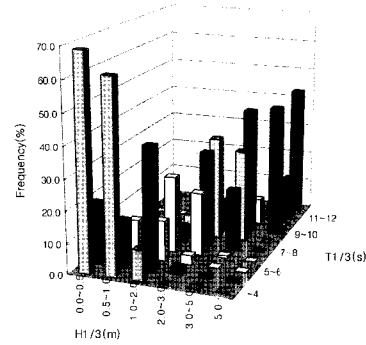


Fig. 3 The wave appearance according to wave heights and periods

### 4. 장주기파의 검출

장주기파의 검출 및 해석에 있어서 장주기파의 주파수대의 범위가 명확하지 않지만 일반적으로 항내에 영향을 미치는 장주기파로는 주기 30sec~2min인 구속파(bounded wave)와 주기 1~60min인 항내부진동(harbor oscillation)을 들 수 있다. 본 연구에서는 외해에서 내습하여 항내에 영향을 미칠 수 있는 파에 중점을 두어 장주기파의 범위를 주기 30~200sec로 설정하였다.

수압식 파고계에 의해 현장관측으로부터 얻어진 수압변동자료를 수면변동자료로 변환시킨 자료로부터 장주기파를 검출하기 위해 필터링하는 과정에서 FFT법을 사용하였다. 이때 시계열 수면변동자료에 FFT를 적용하여 주파수 영역으로 변환시킨 다음, 주파수가  $f < 0.005$  Hz 인 성분과  $f > 0.033$ Hz 인 성분을 제거하고 다시 IFFT(Inverse FFT)를 적용하여 장주기파의 수면변동자료를 구한 후 파별해석을 실시하였다. 검출된 장주기파의 최대파고  $G_{max}$  는 1.6~23.2cm, 최대주기  $T_{Gmax}$  는 33.6~187.6sec, 유의파고  $G_{1/3}$  은 1.2~13.2cm, 유의파주기  $T_{G1/3}$  은 40.2~94.2sec 사이에 분포하였으며, 초음파식 파고계에 의해 현장관측으로부터 나온 수면변동자료를 동일방법으로 해석한 결과 검출된 장주기파의 최대파고  $G_{max}$  는 2.0~47.7cm, 최대주기  $T_{Gmax}$  는 31.7~187.2sec, 유의파고  $G_{1/3}$  은 1.6~14.6cm, 유의파주기  $T_{G1/3}$  는 35.8~162.6sec 사이에 분포하였으며, 이 St. 0 과 St. 1 에서 얻어진 장주기파의 유의파고와 유의파주기의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

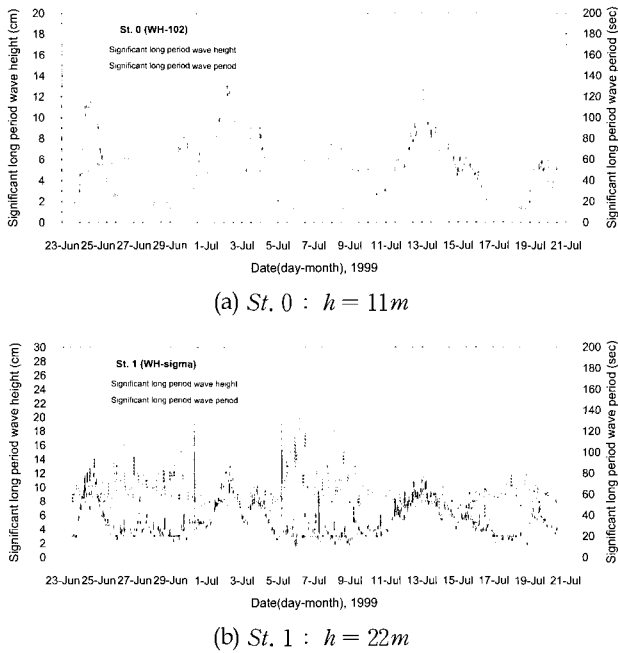


Fig. 4 Variation of significant long period wave heights and periods from 23th June to 20th July, 1999

### 5. 통상파와 장주기파의 관계

통상파랑의 파고·주기로부터 장주기파의 파랑특성을 예측하기 위한 정량적인 분석을 실시하고자 먼저 통계적 분석방법인 파별해석을 통하여 구한 통상파의 유의파고  $H_{1/3}$  와 장주기파의 유의파고  $G_{1/3}$  의 관계를 살펴본 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 상당히 일정한 관계가 산정되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 6은 St. 0, St. 1 에서의 통상파의 유의파주기  $T_{1/3}$  과 장주기파의 유의파주기  $T_{G1/3}$  의 관계를 나타낸 것인데 통상파의 유의파주기 5~10sec, 3~8 sec 에 대해 장주기파의 유의파주기는 각각 40~80sec, 40~120sec 정도로 그다지 변화하지 않으며, 양 지점에서의  $T_{1/3}$  과  $T_{G1/3}$  의 상관은 명료하지 않지만, 히스토그램을 보면 장주기성분의 주기는 40~60sec 에 집중해 있는 것을 알 수 있다. 아울러, 현장관측에서 분석된 통상파의 유의파주기에 따른 유의파고의 출현빈도를 분석하여 유의파주기를 다음과 같이 구분하여 각각에 대해 통상파와 장주기파의 유의파고 관계를 분석하여, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

St. 0

$$(a) \begin{cases} 5 s < T_{1/3} \leq 7 s & (\text{Occurrence} : 71.1\%) \\ 7 s < T_{1/3} \leq 10 s & (\text{Occurrence} : 28.9\%) \end{cases}$$

St. 1

$$(b) \begin{cases} 5 s < T_{1/3} \leq 6 s & (\text{Occurrence} : 63.4\%) \\ 6 s < T_{1/3} \leq 10 s & (\text{Occurrence} : 36.6\%) \end{cases}$$

따라서, 통상파의 유의파고 뿐만 아니라 유의주기 또한 장주기파의 파고와 관련이 있으므로 판단하여 이를 동시에 고려해 보고자 통상파의 유의파고와 유의주기의 곱  $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$  을 파라메타로서 장주기파의 유의파고  $G_{1/3}$  을 정리한 것이 Fig. 8 이다. 양자의 상관은 높고, 일차 다항식에 따라 근사 가능한 것을 알 수 있다. 따라서, 이후의 해석에서는 이 식을 사용하여  $H_{1/3}$  과  $T_{1/3}$  에서  $G_{1/3}$  을 추정하였다. 아울러,  $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$  과 장주기성분의 스펙트럼 형상은 명료한 관계를 표시하지 않기 때문에, 주파수에 대응해서 일정한 에너지를 가지고 스펙트럼으로 근사하여 (1)식에 따라 장주기 성분의 에너지를 고려하였다.

$$\begin{aligned} S_L &= (m_0)_L / f_L \\ f_L &= 1/30 \\ (m_0)_L &= G_{1/3}^2 / 16 \\ G_{1/3} &= 0.0102x + 0.014 \\ x &= H_{1/3} \cdot T_{1/3} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $G_{1/3}$  은 장주기 유의파고,  $S_L$  은 입사파의 표준 스펙트럼,  $f_L$  은 장주기파의 주파수,  $(m_0)_L$  은 표준 스펙트럼 모멘트이다.

이상과 같이 통상파의 유의파 제원을 알게 되면 입사 파랑에 포함된 장주기파를 대략 추정할 수 있음이 확인되었다.

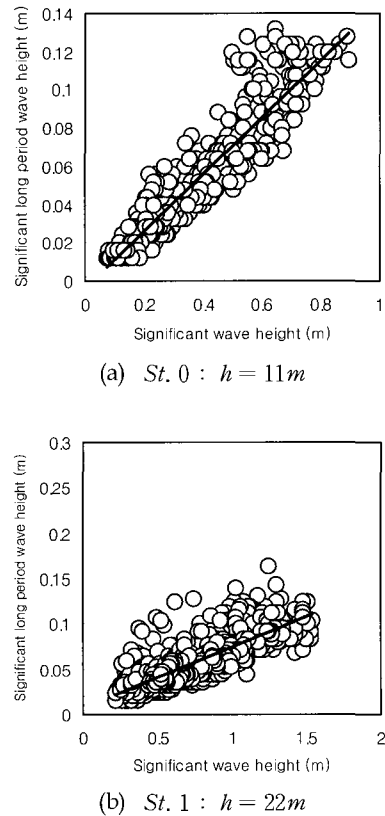


Fig. 5 Relation between  $H_{1/3}$  and  $G_{1/3}$

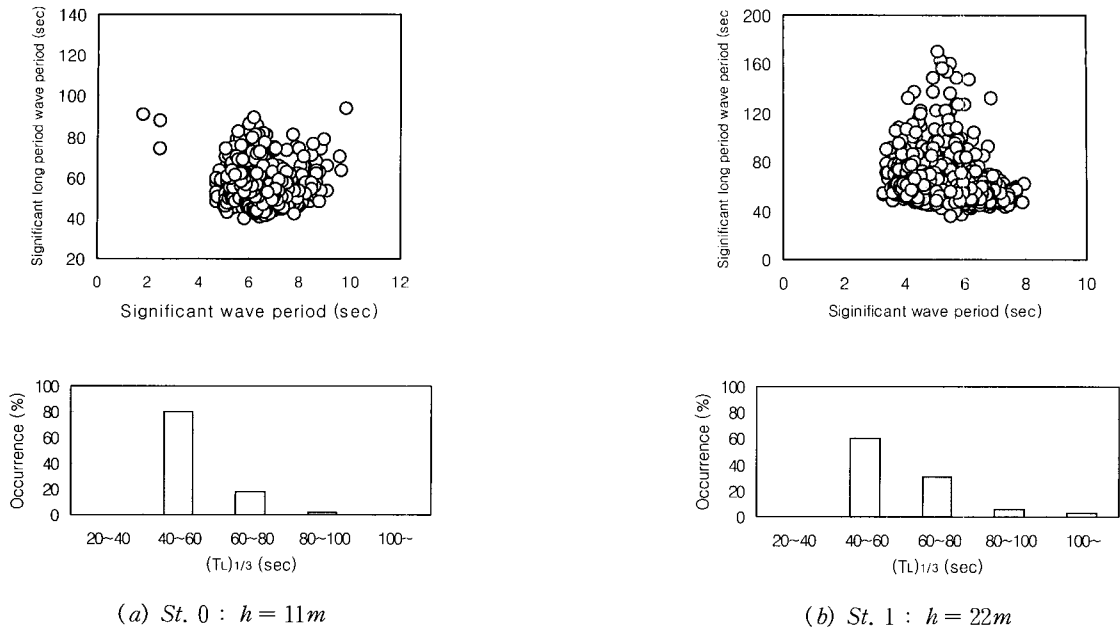


Fig. 6 Relation between  $T_{1/3}$  and  $T_{G1/3}$

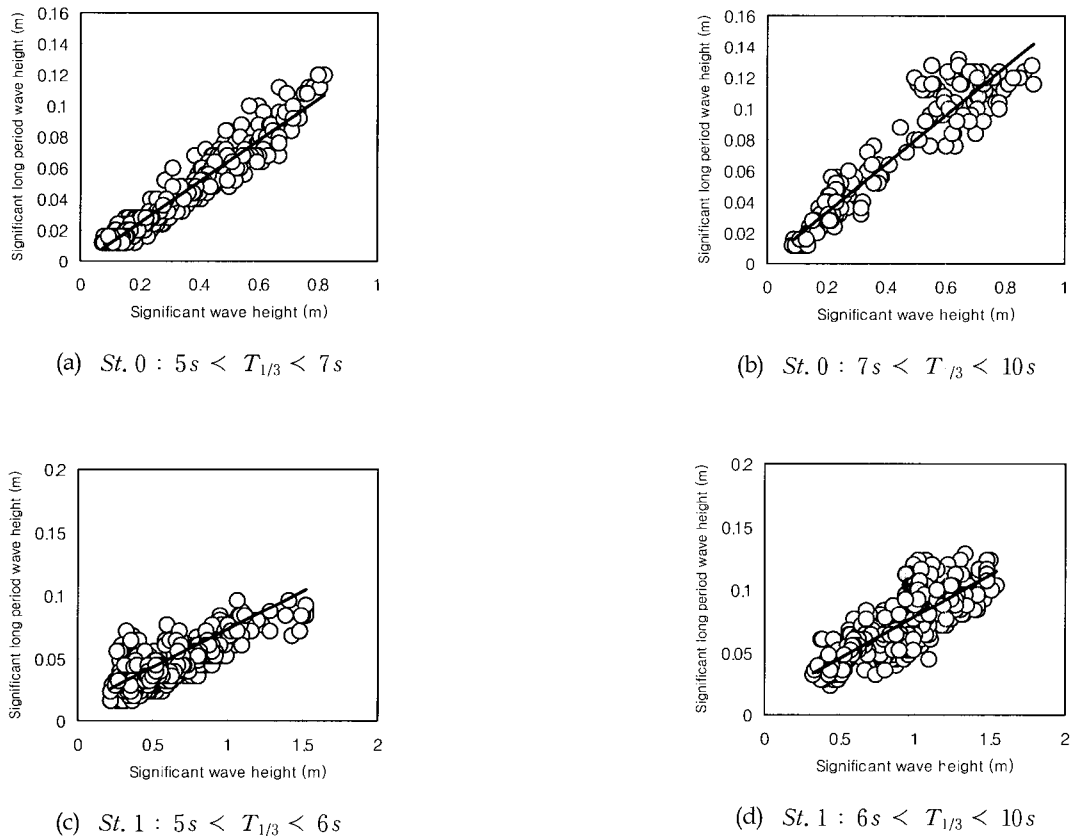
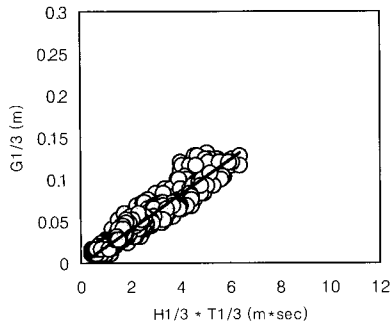
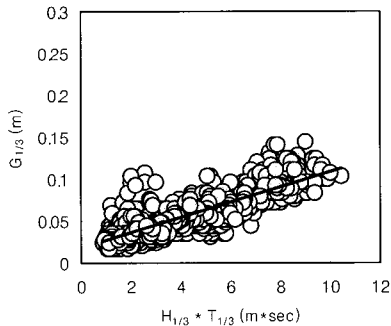


Fig. 7 Relation between  $H_{1/3}$  and  $G_{1/3}$  for the specific range of significant ordinary wave period



(a) St. 0 :  $h = 11m$



(b) St. 1 :  $h = 22m$

Fig. 8 Relation between  $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$  and  $G_{1/3}$

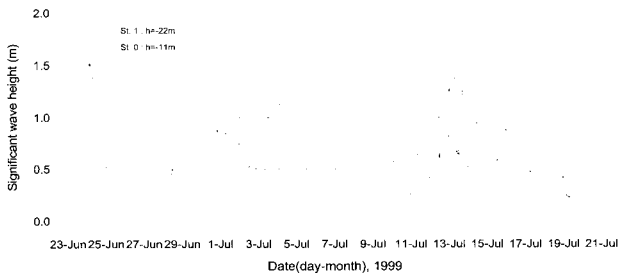


Fig. 9 Comparison of significant ordinary wave heights in St. 0 & St. 1

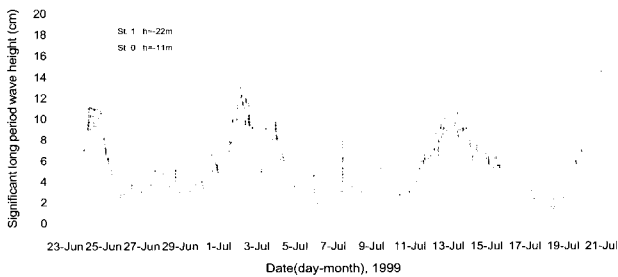


Fig. 10 Comparison of significant long period wave heights in St. 0 & St. 1

Fig. 5에 의하면 통상파의 유의파고가 커짐에 따라서 장주기 파의 유의파고가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 항입구 St. 0와 항외 St. 1에서의 수심별 통상파의 유의파고와 장주기 파의 유의파고와의 비교를 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 항외 St. 1의 통상파고는 항입구 St. 0의 통상파고의 1.

5~3.5배, 평균적으로 2.2배에 해당함에도 불구하고, 장주기파 고는 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 거의 변화하지 않는다. 이러한 경향은 항외에 나타난 장주기 에너지가 그다지 감소됨이 없이 항내로 침입하여 계류선박의 장주기 동요를 야기시킬 가능성이 높다고 판단된다.

### 6. 항만 가동율의 산정

최근 Ueda et al. (1994)에 의해 항만정온도를 지금까지의 선석 전면의 파고에 의한 표시방법으로부터 계류 선박의 동요량을 지표로 하는 하역 가동율로서 직접 평가하려는 시도가 이루어지고 있다. 이는 수송효율의 향상 등 항만에 대한 요구가

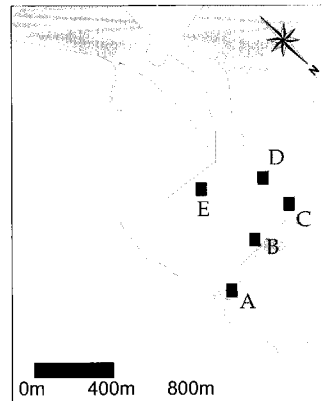


Fig. 11 The investigation points inside harbor

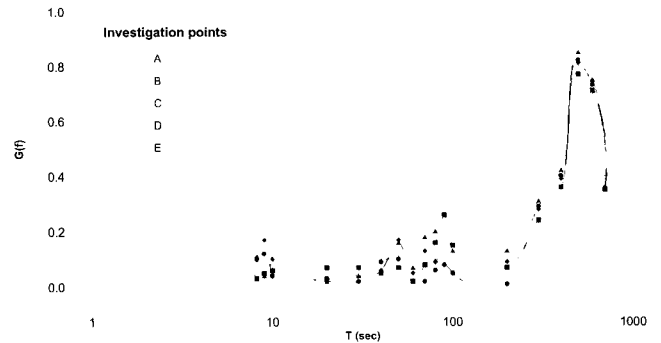


Fig. 12 Response function of wave height inside harbor (reflection coefficient 0.9)

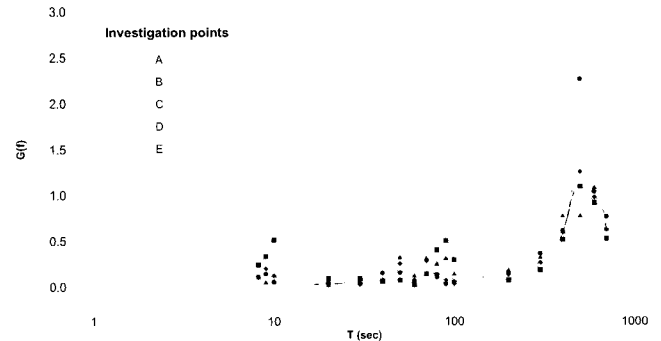


Fig. 13 Response function of wave height inside harbor (reflection coefficient 1.0)

고도화되고 있는 점에 따른 것이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 항외파랑으로부터 알 수 있는 파랑특성 중 파군주기와 선체 동요의 관계에 대하여 검토하였다. 그러나, 실제 항만에서 계류된 선박에 입사하는 파랑을 예측하는 것은 쉽지 않으므로, 여기에서는 항내·외 파랑 관측자료와 수치모형실험을 통한 항만 가동율의 평가에 대하여 검토하였다.

**6.1 항내파의 증폭율**

시간의존 환경사방정식을 이용하여 항내호안의 반사율이 0.9 및 1.0일 경우의 주기변화에 따른 항내파고의 응답함수(증폭율)를 계산한 결과가 Fig. 12와 13에 주어져 있다. 그림에 의하면 반사율에 따라 피크(peak)주기는 변화하지 않지만, 그 응답배율은 큰 차이를 나타낸다. 그러나, 반사율 0.9 및 1.0일 경우 공통적으로 주기 500초 및 100초 전후의 50초와 70~90초 사이에 공진점이 나타난다. 결국, 항내에서는 70~90초 근방이 에너지 측면에서도 peak라고 할 수 있으며, 이 점으로부터 항내에서는 부진동에 의해 장주기파가 증폭됨을 알 수 있다.

**6.2 항만 가동율의 산정결과**

통상파와 장주기파의 입사파로부터 안벽 전면의 파고를 추정하고, 통상파의 하역한계파고를 0.5m, 장주기파의 하역한계파고를 0.15m로 설정하여 항내 각 지점에서의 항만 가동율을 평가하였다. 아울러, 항내의 장주기성분파고는 선형중첩의 가정하에 (2)식에 따라 구할 수 있다. 또한, 장주기파의 파향을 하나로 대표시키는 것은 매우 난해한 문제이므로, 본 연구에서는 통상파의 파향으로 대표시켜 설정하였다.

$$G_{1/3} = 4\sqrt{m_0}$$

$$m_0 = \int_{1/200}^{1/30} S_L |G(f)|^2 df = S_L G_0 \quad (2)$$

$$G_0 = \int_{1/200}^{1/30} |G(f)|^2 df$$

여기서,  $G_{1/3}$ 은 항내파 장주기성분 유의파고,  $S_L$ 은 입사파 장주기성분 스펙트럼,  $G(f)$ 는 항내파 응답함수,  $f$ 는 주파수이다.

**Table 2** The calculation results of harbor operation rates (%)

Spot	Ordinarily wave standard	Long period wave Consideration
A	93.8	61.8
B	99.8	99.3
C	100	99.0
D	99.9	99.5
E	100	99.4

**7. 결 론**

항입구 지점의 장주기성분 파고는  $H_{1/3}$ ,  $T_{1/3}$ 에 의존하고,  $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ 이 커짐에 따라 증가한다. 또한, 연간 최대급의

$H_{1/3} = 5m$ ,  $T_{1/3} = 10 \text{ sec}$ 에서 장주기성분 파고  $G_{1/3} = 0.48m$ 에 달한다. 대상항만인 속초항에서 장주기파로 결정되는 항만 가동율은 61.8~99.5%로서 통상파랑에 대한 가동율 93.8~100%(하역한계 유의파고 0.5m)에 비해 가동율이 낮게 나타났다. 이것은 통상파랑에 대해서는 방파제에 의해서 정온도를 항상 시킬 수 있어도 장주기파까지 제어하기는 어렵기 때문에 항외의 장주기파의 출현 특성이 하역가동율에 크게 영향을 미치는 것을 나타내고 있다. 일반적으로 97.5% 이상의 가동율이 확보되어야 양호한 항만 및 어항으로서 인정받을 수 있다. 이 점을 고려한다면 본 연구에서 검토된 속초항은 통상파랑에 대해서는 어느 정도 정온한 항내조건이 만족되지만, 장주기파랑에 대해서는 항내 정온도가 만족스럽지 못한 곳이 확인되었다. 이처럼 장주기파를 고려하여 항만 가동율의 계산을 재 수행함으로써 보다 실질적인 계류선박의 계류안정성을 검토할 수 있음이 확인되었다. 아울러, 항만 가동율 산정시 수치모형실험과 병행하여 선체동요 모의실험 등 수리모형실험을 통하여 선박의 계류상황을 명확히 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다.

**참 고 문 헌**

Hiraish et al. (1995). "Field Observation of Harbor Oscillation by Long Period Waves", J. of Coastal Engineering, in Japanese, Vol 42, pp 301-305.

Kim et al. (1999). "A Study on Characteristics of Long Period Waves by Field Observations", Conf. of Civil Engineering, KSCE, in Korean, pp 427-430.

Longuet-Higgins, M.S. and Stewart R.W. (1962). "Relation Stress and Mass Transport in Gravity Waves with Application to 'Surf Beats'", J. Fluid Mech, Vol 13, pp 481-504.

Nagai et al. (1994). "Relationship of a Moored Vessel in a Harbor and a Long Period Wave Caused by Wave Groups", Proc. 24th Coastal Engineering, Conf., ASCE, Vol 1, pp 847-860.

Ueda, S. (1987). "Motion of moored ships and Their Effect on Wharf Operation Efficiency", Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol 26, No 5.

Ueda, S and Shiraishi, S. (1998). "The Allowable Ship Motion for Cargo Handling at Wharves", Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol 27, No 4, pp 3-61.

Ueda, S. et al. (1994). "Real Time Prediction System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbor", Proc, 28th International Navigation Congress.

2002년 1월 18일 원고 접수  
 2002년 3월 20일 최종 수정본 채택