

포항신항내 파랑에 의한 Downtime 분석 Analysis of the Wave Induced Downtimes in Pohang New Harbor

정원무* · 오세범** · 채장원* · 김상익*

Weon Mu Jeong*, Se Beom Oh**, Jang Won Chae* and Sang Ik Kim*

요 旨 : 포항신항에서 파랑·파고계 및 수압식 파고계를 사용하여 단주기파 및 장주기파에 대하여 약 1.5개월동안 현장관측을 실시하고 그 기간 동안의 바람 및 downtime 기록도 분석하여 포항신항의 downtime의 원인에 대해 종합적으로 분석하였다. 자료 분석 결과 과거 수치실험에 의한 정온도 평가는 포항신항의 정온도를 보다 안전측으로 예상하였을 것으로 사료된다. 포항신항내 downtime의 원인은 입사파 주기에 관계없이 항외파고가 큰 경우와 파고가 전자에 비해 작더라도 주기가 10초 이상의 너울인 경우의 두 가지로 분석되었다. 한편, 포항신항내 장주기 파고는 주기 수 분 이상의 부진동이 뚜렷한 경우 항의 구석진 부분에서 20 cm 전후로 상당히 크나 downtime과는 큰 관계가 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 너울, 부진동, 항만정온도, 하역중단 원인, 선체운동

Abstract □ To find the causes of the downtime problems in Pohang New Harbor, extensive field measurements of short- and long-period waves for 1.5 months and their analyses were made taking into account of wind and downtime records. Measured wave height ratios inside the harbor are appeared to be slightly larger than predicted ones using numerical methods in the previous studies. It is shown that the major causes of the downtime are the wind wave (or swell) higher than loading criteria and also swell with even smaller wave height but longer period (more than 10 sec). Waves of long-period components [O(min)] were recorded as 20 cm high in case of dominant seiche phenomena but they might not be related with the downtime problems.

Keywords : swell, seiche, harbor tranquility, downtime, ship motions

1. 서 론

영일만내에 위치한 포항신항은 포항제철소를 위한 공업항의 필요에 따라 1968년 5월부터 건설 공사가 시작되었으며 1969년 4월에 개항하였다. 포항신항은 건설 단계에서 포항제철소의 조강 능력 확대에 따라 내항(1979년 12월 완공)에서 출발하여 외항과 동항(1985년 12월 완공)이 포함되는 등 계속 확장되었다. 동항 완공 시 포항신항내 배치는 15만톤 부두와 제1~8 부두 및 길이 393 m의 제1 파제제로 구성되었다(Fig. 1 참조). 그 후 제7~8 부두를 중심으로 하역중단시간(downtime)

이 빈번하게 발생함에 따라 항내 정온도 문제가 제기되었다. 이에 대해서는 여러 기관에서 다각적으로 검토하여 부분적으로 개선되었으나 제3~5 부두에서는 아직도 하역작업이 중단되는 상태가 발생하므로 이의 원인 분석을 위한 연구가 필요하다.

이러한 문제를 조사·분석하기 위한 많은 연구 및 용역 사업이 수행되었으며 주요 사업의 내용을 요약하면 다음과 같다. 건설부(1987)에 의한 대규모 현장관측 및 수치모형실험을 통한 조사·연구에서는 항내정온도 불량외의 원인으로 단주기파를 제시하고 이에 대한 대책을 제시하였는데 이는 크게 다음의 3가지로 구분

*한국해양연구소 연안공학연구부 (Coastal Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

** (주)한아엔지니어링 (Hanah Engineering Co., Ltd, Kwansesa Bldg. 4fl. 209-9 Non Hyun-dong, Kang Nam-ku, Seoul, 135-010, Korea)

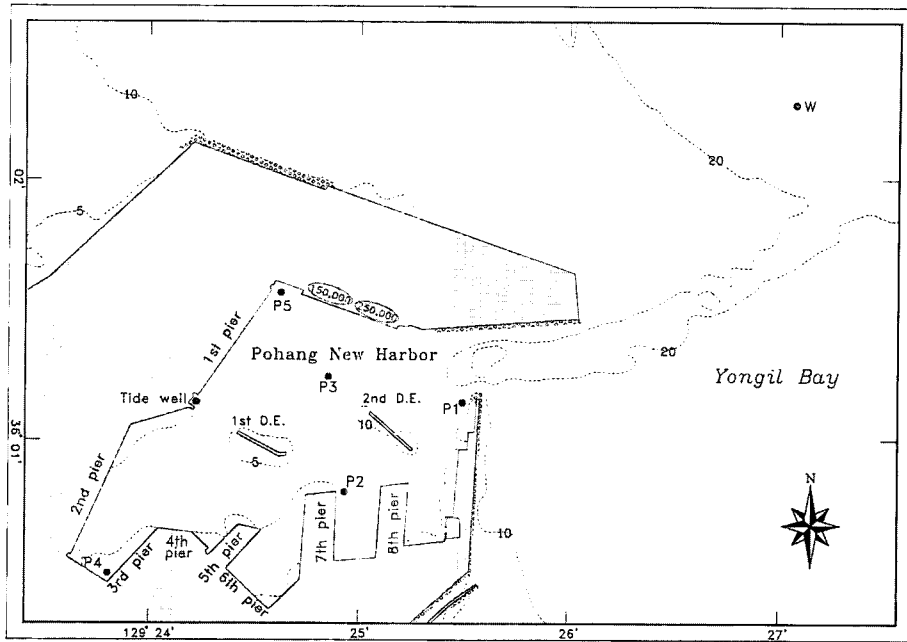


Fig. 1. Location map of field measurement stations and plan view of Pohang New Harbor.

할 수 있다. 먼저, 제7 부두와 제8 부두 전면에서 N54° W 방향으로 길이 420 m의 유공 케이슨식 제2 파제제를 계획하여 제5~7 부두의 파랑 감소를 도모하였다. 그리고, 제8 부두와 특수 부두의 정온도 개선을 위해 동방파제의 선단에서 N43° W 방향으로 길이 60 m의 파제제를 계획하였다. 한편, 항내 중북파의 저감과 제5~7 부두의 중북파 저감을 위해 외항방파제의 항내측 900 m 구간과 제7 부두에 459 m의 내항 소파시설을 계획하였다. 건설부(1987)의 대책안중 제2 파제제는 1992년에 완공되었으나 동방파제의 60 m 연장은 선박 운항에 지장을 초래할 가능성이 있어서 외항방파제의 연장 방안이 강구되었다.

그 후 포항신항의 25만톤 원료부두 설계시(포항종합제철주식회사, 1989)에 다시 여러 계획안에 대해 수치모형실험과 수리모형실험에 의한 항내정온도 검토가 실시되었으며 항내 정온과 대형 선박 진입시의 차폐 수역을 확보할 목적으로 외항방파제를 직선으로 300 m 연장하는 계획안이 제시되었다. 포항제철소 제4 투기장 계획(포항종합제철주식회사, 1992)에서는 여러 가지 외항방파제 연장안에 대한 수치모형실험을 실시하여 직선으로 200 m 연장하는 계획안이 제시되었으며 이의 시공은 1996년 완료되었다. Fig. 1은 1996년 후반기의 포항신항 시설물 배치를 나타낸 것이며 여기에는 상기

개선 내용들이 포함되었다.

포항신항의 항내정온도 불량 원인을 파악하고 개선하기 위해 관련 연구에서는 여러 가지 대책안을 제시하고 새로운 실험도 실시하였다. 예를 들어, 건설부(1987)의 사업에서는 국내 최초로 선체운동에 대해 현장관측과 수치실험이 실시되었으며 항내부진동 분석을 위해 수압식 파고계를 사용한 대규모 현장관측도 실시되었다. 그리고, 25만톤 원료부두 계획시에는 역시 국내 최초로 선체운동에 대한 수리모형실험도 실시되었다(포항종합제철주식회사, 1989).

상기 연구들의 수행 내용중 단주기파 수치모형실험에서는 대부분 제시된 천해설계파에 대한 항내파고비만을 검토하여 1개월에 1~2회 발생하는 폭풍파와 하역작업 중단과의 관련성에 대한 분석 등은 수행되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 해운항만청(1994a)의 R&D 사업, 영일만 신항만 개발사업(해운항만청, 1994b) 및 한국해양연구소의 기본연구사업을 통하여 수행된 포항신항 내에서의 장 단주기파의 장기간 동시관측 분석 결과와 포항신항의 하역중단 상태에 대한 자료(포항제철주식회사의 1987~1994년의 각 선석별 하역중단기록)를 토대로 포항신항의 항내정온도 불량 원인을 상세하게 분석하였다. 한편, 항만정온도에 영향을 미치는 요소들로는 풍파와 너울, 군파(group waves), 부진동

Table 1. Downtime records in Pohang New Harbor from 1987 to 1994

Year	Dates of downtime caused by swell	Hours of downtime caused by swell	No. of ships	Tonnage during downtime
1987	68	3,432	346	284,815
1988	42	2,524	144	209,492
1989	80	5,308	440	501,948
1990	78	4,685	416	431,051
1991	21	1,541	134	152,510
1992	73	1,037	410	701,140
1993	77	1,107	401	563,860
1994	54	831	201	355,630

(harbor oscillation or seiche), 기상(바람, 우천, 강설 등) 등의 여러 가지를 들 수 있으나 본 연구에서는 바람을 제외한 기상 요인에 대해서는 검토하지 않았다.

2. 파랑으로 인한 하역중단기록(1987~1994년) 분석

포항신항의 부두 및 선석별 하역작업 중단기록은 포항종합제철주식회사가 조사한 원인(우천시와 swell로 인한 하역 중단으로 크게 구분)별로 작성되어 있으며 그 중 우천으로 인한 경우를 제외(단, 우천시에 악천후가 동반될 가능성도 크나 구분하기 어려워 검토에서 제외하였음)하고 1987년부터 1994년까지의 포항신항의 swell로 기재된 원인(이하에서는 편의상 swell에 의한 원인으로 표기)에 의한 하역중단시간, 선박수, 물량 등을 Table 1에 제시하였다. 이 표를 살펴보면 1991년부터 총하역중단시간은 크게 감소(단, 1991년은 1~6월의 기록만임)하였음을 알 수 있다. 그러나, 선박척수와 하역물량에는 커다란 변화가 없으므로 하역이 중단된 선박의 규모가 증가하였던 것으로 판단된다. 1994년에는 하역중단시간과 선박수가 1992년과 1993년에 비해 상당히 감소하였는데, 이는 제7 부두를 전천후 부두로 개선했던 것에 연유된 것으로 사료된다.

한편, 현장관측을 수행한 1994년의 1년 동안의 swell에 의한 하역중단시간을 분석하여 각 선석별(예를 들어, 선석 41A와 41B가 동시에 있을 때는 양자를 평균)로 Table 2에 제시하였는데 여기에는 선석 규모도 포함하였다. Table 2를 살펴보면 1994년도에 정온도가 가장 불량한 선석은 제4 부두의 41번 선석으로 약 20일의 하역중단시간을 기록하였다. 이 외에 연중 280시간 이상의 하역중단시간을 기록한 선석은 42번, 51번, 52번, 31번, 53번, 32번 등의 순서로 나타났다. 즉, 제4 부두,

Table 2. Downtime hours at wharfs in Pohang New Harbor during 1994

Name of pier	No. of wharf	Designed tonnage	Hours of downtime caused by swell
1st pier	11	150,000	
	12	100,000	
	13	100,000	
	14	100,000	
2nd pier	21	2,000	
	22	5,000	
	23	50,000	
	24	20,000	
	25	10,000	
3rd pier	31	5,000	325.0
	32	5,000	280.0
	33	10,000	159.0
4th pier	41	30,000	473.5
	42	20,000	375.0
5th pier	51	20,000	366.0
	52	10,000	326.0
	53	5,000	291.0
	54	5,000	12.0
6th pier	61	2,000	
	62	2,000	
	63	2,000	
	64	5,000	
7th pier	71	5,000	
	72	10,000	12.0
	73	30,000	139.0
	74	30,000	68.0
	75	20,000	
8th pier	81	30,000	
	82	30,000	
	83	10,000	26.0
	84	20,000	110.0
	85	20,000	
	86	10,000	

제5 부두, 제3 부두의 순서로 정온도가 불량하며 선석이 2개인 제4 부두가 가장 심각한 상태이다.

포항신항의 평면 배치(Fig. 1 참조)를 통해 검토하면

제3~5 부두는 외항방파제와 제2, 제1 파제제에 의해 차폐되는 구역임에도 불구하고 하역중단시간이 많다. 참고로 포항지방해양수산청(1991)의 결과에서는 동 부두들 전면에서의 파고비가 0.1 정도(p. 91의 도 3-12), 그리고 포항종합제철주식회사(1992)의 결과인 제4 투기장의 제3안에 대한 결과를 살펴보면 0.1 미만으로 상당히 낮게 나타났다(p. 295의 부도 5-13). 한편, 제1 및 제2 부두는 비교적 외해에 개방되어 있는데도 하역중단 기록이 제시되지 않았으며 대상선박이 가장 소형인 제6 부두에서 하역중단이 전혀 기록되지 않은 점이 특이하다.

한편, 1994년 2~3월에는 1대의 파향·파고계와 5대의 수압식 파고계를 사용하여 포항신항 내외에서 파랑 관측을 실시하였으므로 동 자료의 분석 결과를 포항신항내 선석별 하역중단시간 자료(downtime record)와 연계시켜 포항신항내 정온도 불량의 원인 검토를 시도하였다.

3. 현장관측 및 자료분석

3.1 현장관측

항입구에서 북동쪽으로 약 2.5 km 떨어진 지점인 정점 W(Fig. 1 참조)에 파고 파향계인 DWB(Directional Waverider Buoy)를 설치하여 1994년 2월 17일부터 3월 31일까지 매시간 단주기파 연속관측을 실시하였다. DWB를 통해서 는 기기내에 고정된 0.78125초의 sampling interval로 매시간 2,048개의 자료(약 26.7분)를 수집하였다. 항내에서는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 정점 P1~P5에서 5대의 Paro scientific sensor를 장착한 수압식 파고계를 설치하고 자료 독취 간격을 P1~P3는 1초, P4는 5초, 그리고 P5는 8초로 설정하여 연속 수위관측을 실시하였다. 수압식 파고계의 자료 독취 간격이 달라진 이유는 분석의 대상으로 설정한 현상이 약간 다르기 때문이었다. 기타 현장관측에 관련된 내용은 Table 3에 제시되어 있다.

3.2 자료 분석 방법

3.2.1 단주기파

관측된 단주기파 자료들을 파별해석법(WWAM; Wave by Wave Analysis Method), 스펙트럼 분석법(SM; Spectral Method), Longuet-Higgins 등(1963)에 의한 LHM(Longuet-Higgins Method) 및 MEM(Maximum Entropy Method) 등으로 분석하고 여러 가지 파랑특성계수들을 산출하였다. DWB에 의해 구한 자료에는 상기 방법들을 모두 적용하였고, 수압식 파고계로부터 구한 자료는 스펙트럼 분석법을 사용하여 해석하였다.

WWAM은 시계열의 파랑 기록에서 zero-up crossing method로 분석한 개개의 파를 통계적으로 처리하여 파랑 특성 계수를 산출하는 방법이며, 이를 이용하여 최대파고(H_{max}), 상승평균평방근파고(H_{rms}), 유의파고($H_{1/3}$), 1/10최대파고($H_{1/10}$), 최대주기(T_{max}), 유의 주기($T_{1/3}$), 유의과주기($T_{H1/3}$) 등의 파랑특성자료들을 산출한다.

SM은 불규칙파를 분석하는 일반적인 방법으로 관측된 파의 시계열 자료를 FFT 기법으로 분석, 파랑의 에너지 스펙트럼을 구하여 파랑 특성을 파악하는 방법이다. 이 방법에 의해 유의파고(H_s), 첨두주기(T_p), 평균주기(T_m), spectral band-width parameter ϵ , spectral peakedness parameter Q_p 등을 구할 수 있다. 스펙트럼 분석시에는 rectangular window function에 1/8 cosine taper를 사용하였으며 자유도는 20으로 설정하였다.

파향 분석 방법에는 DWB의 제작회사에서 파향·파고계의 내부에서 파향을 처리하여 전송하는 방법인 LHM 및 이보다 우수한 MEM(Kobune and Hashimoto, 1986; 오 등, 1992) 등이 이용 가능하나 평균파향($\bar{\theta}$)과 분산계수(σ^2)를 제시하는 LHM을 주로 이용하였으며, 폭풍시의 상세한 방향 스펙트럼 분석시에는 MEM도 사용하였다.

3.2.2 장주기파

Paro scientific sensor를 장착한 수압식 파고계로 1, 5 및 8초 간격으로 관측된 수압 자료들을 온도 보정을

Table 3. Contents of field measurements around Pohang New Harbor

Measurement station	Measuring device	Measurement period	Data sampling interval (sec)
W	Directional Waverider Buoy	'94. 2/17~3/31	0.78125
P1	Pressure-type wave gauge	'94. 2/28~3/9	1.0
P2	Pressure-type wave gauge	'94. 3/18~3/29	1.0
P3	Pressure-type wave gauge	'94. 3/18~3/29	1.0
P4	Pressure-type wave gauge	'94. 2/28~3/11	5.0
P5	Pressure-type wave gauge	'94. 2/17~3/30	8.0

거쳐 해수위 자료로 변환하였다. 장주기파 분석을 위해 1초 간격 자료의 경우 5개마다 독립하여 5초 간격 자료로 재편집하였으며 5초 및 8초 간격 자료들은 그대로 사용하였다. 각 해수위 자료들의 조석 성분은 6차 Butterworth high-pass filter(절단 주기는 30분)를 사용하여 제거하였다.

조석을 포함한 장주기 성분을 제거한 5(또는 8)초 간격의 자료를 매 3시간마다 2,048개(약 2.8시간) 또는 1,024개(약 2.3시간)를 선택하여 FFT를 이용한 스펙트럼 분석을 실시하고 128개 주파수 성분으로 평균하였다. 이 자료의 길이는 주기가 5~8분대인 포항신항의 국부적인 공진을 포함한 장주기파의 분석에 충분한 것으로 생각된다.

단주기파와 장주기파의 경계를 어디에 설정할 것인가는 매우 어려운 문제이며 우리나라에서는 아직 사례가 제시된 적이 없다. 본 논문에서는 일본에서의 연구(예를 들면, 加藤 等, 1990; 松良 等, 1994)를 참조하여 단주기파와 장주기파의 경계를 30초로 설정하였다. 이들을 포함한 일본의 연구자들은 일본내의 여러 항만들에서의 현장조사를 통하여 주기 30초 이상의 장주기파가 상당한 선체운동을 야기시킬 수 있는 것으로 보고하였다(朝崎 等, 1996). 주기 30초 이상의 장주기파의 파고와 주기는 스펙트럼 분석으로부터 구해진 0차 및 2차 모멘트(30초 이상의 성분만 대상)를 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$m_n = \int_0^{1/30} f^n \cdot S(f) df \quad (1)$$

$$H_L = 4\sqrt{m_0} \quad (2)$$

$$T_L = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3)$$

여기서, m_n 은 1/30 Hz 이하의 장주기 성분의 주파수 스펙트럼의 n 차 모멘트, $S(f)$ 는 주파수 f 에서의 에너지 스펙트럼, H_L 은 장주기파의 유의파고, T_L 은 장주기파의 평균주기를 각각 나타낸다. 한편, low-pass filtering을 거친 자료에 대해 스펙트럼 분석을 실시하여 장주기파의 주기를 구하는 방법도 생각할 수 있으나 본 연구에서는 자료 수집 간격이 동일하지 않은 등의 이유로 적용하지 않았다.

3.3 단주기파 분석

정점 W에서 관측된 단주기파 자료를 전술한 파랑분

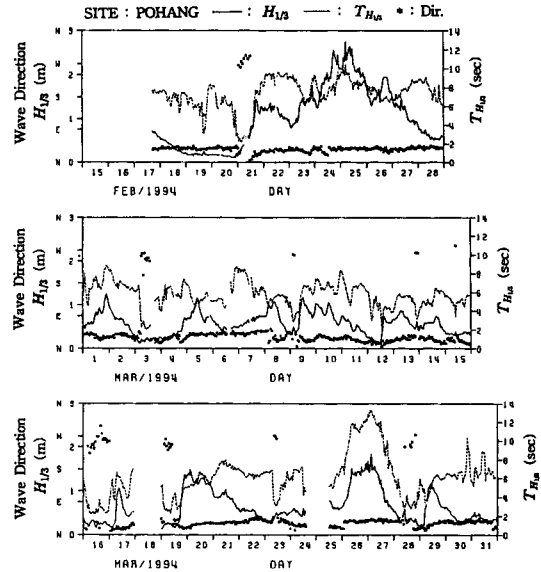


Fig. 2. Variation of $H_{1/3}$, $T_{H1/3}$ and mean wave directions during the measurement period.

석법중 파별분석법(WWAM)을 적용하여 구한 1994년 2~3월간의 유의파고(실선)와 유의파주기(점선) 및 LHM에 의한 대표파랑(*로 표시)의 시간적 변화를 Fig. 2에 제시하였다. 먼저, 2월 하순의 특성을 살펴보면 유의파고가 1.0~2.73 m, 유의파주기가 7.8~10.6초 사이에 분포하였으며 평균파향은 N35° E~N45° E 사이에 주로 분포하였다. 3월의 파랑은 유의파고가 0.50~1.87 m, 유의파주기가 9.0~14.4초 사이에 분포하였으며 평균파향은 N35° E~N45° E 사이에 주로 분포하였다. 한편, 관측기간중의 최대 유의파고는 2월 25일 5시의 2.88 m, 유의파주기는 10.4초, 평균파향은 N39.5° E로 나타났다. 특기할 만한 사항은 3월 26~27일의 너울(swell)로서 유의파고는 1.5~1.8 m였으나 유의파주기는 12~13초에 달하여 통상적인 폭풍시의 유의파주기 10초 이하에 비해 상당히 긴 주기의 파가 출현하였다.

3.4 장주기파 분석

전술한 식 (1)~(3)을 사용하여 구한 5개 정점별 장주기 성분 파랑의 파고 H_L 의 2월 17일부터 3월 31일까지의 시간적 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 먼저, 항입구 부근에 위치한 정점 P1에서는 10일 정도의 관측기간중에 0.1 m를 초과하는 장주기파는 출현하지 않았다. 정점 P2와 P3에서는 개방 수역에 위치하고 거리가 가까워서 매우 유사한 파고 변화를 나타냈으며 제7 부두 입구 부

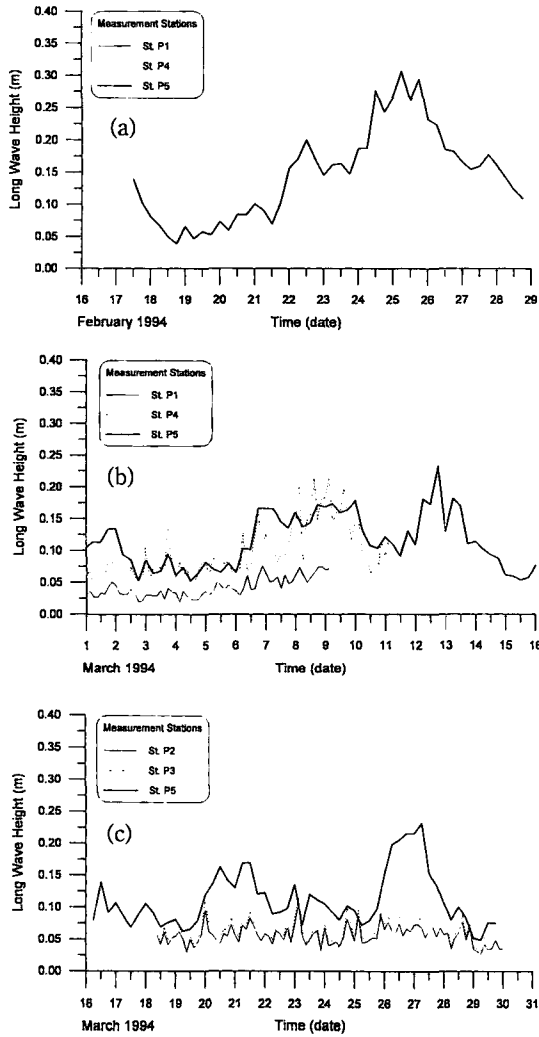


Fig. 3. Variation of significant wave heights of long wave components at 5 measurement stations in Pohang New Harbor.

근의 P2에서는 3월 23일에, 그리고 항 중앙부의 P3에서는 3월 20일과 23일에 장주기 파고가 0.1 m를 초과한 경우가 각각 1 및 2회 출현하였다. 그러나, 전반적으로는 관측기간중에 큰 변동없이 0.05~0.08 m의 범위에 분포하였다. 한편, 항의 구석에 위치한 정점 P4와 P5에서는 상당히 다른 경향을 나타냈다. 즉, 정점 P4의 경우 3월 7~10일, 그리고 정점 P5의 경우 2월 22~27일, 3월 7~10일, 12~14일, 20~21일 및 26~27일에 장주기 파고가 0.15 m를 초과하고 있다. 이는 정점 P4와 P5가 부두의 깊숙한 곳에 위치하여 직립 안벽에 의한 반사파 및 국부적인 부진동이 우세하였기 때문으로 생각된다.

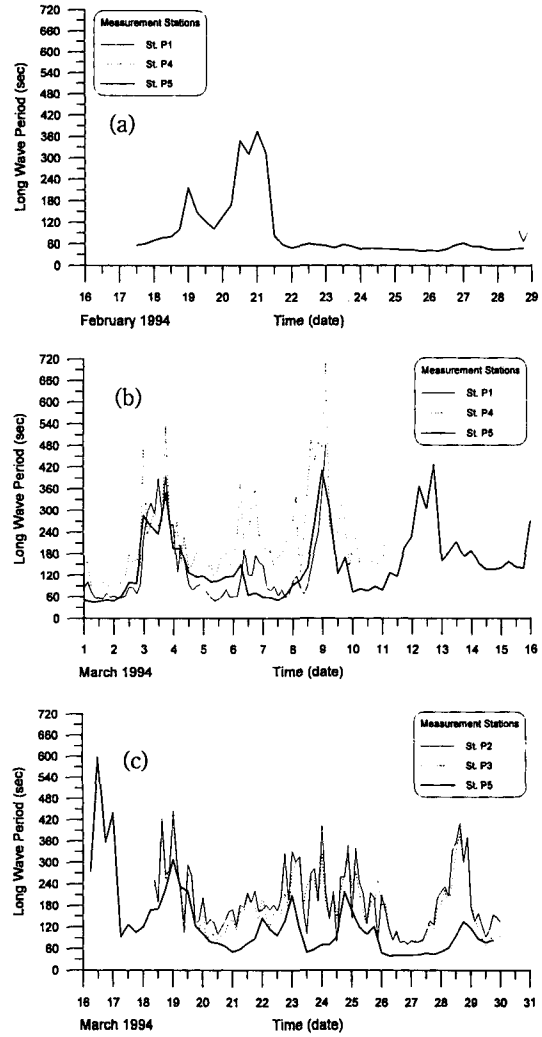


Fig. 4. Variation of mean wave periods of long wave components at 5 measurement stations in Pohang New Harbor.

동일한 시기 및 정점에 대한 장주기와 주기의 시간적 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 먼저, 정점 P1에서의 주기를 살펴보면 3월 3일과 9일 전후에 5~8분 내외로 상당히 길게 나타났다. 정점 P2와 P3에서는 장주기 파고의 경우와 비슷하게 주기의 시간적 변화에도 큰 차이가 없었으며 2~7분 사이에서 상당히 불규칙하게 변화하였다. 정점 P4에서는 제2 및 제3 부두로 이루어진 수역의 국부적인 공진 주기로 보이는 6~8분대의 주기가 다수 출현하였으며 이러한 경향은 정점 P5에서도 비슷하게 나타났다. 장주기 파고와 주기가 큰 경우와 하역 장애와의 상관관계에 대해서는 후술하기로 한다.

4. 하역중단 원인 검토

4.1 풍파에 의한 경우

현장관측기간중 포항신항내에서는 2회에 걸쳐 장시간 swell에 의한 downtime이 발생하였으며, 그 기간은 2월 21~27일과 3월 26~28일이었다. 각 부두 및 선석별 swell로 인한 downtime 기록을 Table 4에 정리하였다. 이 표를 살펴보면 2월의 폭풍시에는 제6 부두를 제외한 전체 부두에서 downtime이 기록되었다. 선석에서 항상 하역작업이 수행되고 있지는 않은 점을 감안하면 2월 하순의 폭풍시에는 제3~5 및 제7 부두의 전체 선석에서의 정온도가 상당히 불량하였을 가능성이 크다.

먼저, 2월 하순의 downtime 발생시의 단주기(Fig. 2) 및 장주기(Figs. 3~4) 성분의 파랑 기록을 살펴본다. Fig. 2에 제시된 항외 정점 W에서의 $H_{1/3}$ 과 $T_{H1/3}$ 을 살펴보면 74번 선석에서 하역이 중단된 2월 21일 18시에는 $H_{1/3} = 1.44$ m, $T_{H1/3} = 7.4$ 초였으며 22일에는 $H_{1/3}$ 은 1.0~1.3 m로 약간 감소하였으나 $T_{H1/3}$ 은 9초 이상으로 상당히 길어졌다. 23일의 전반부는 파랑 상태가 22일과 비슷하였으나 후반부에는 주기가 7초 정도로 짧아진 반면 파고는 1.4~1.5 m로 증가하였다. 24일부터는 파고가 커지기 시작하여 전반부에는 1.3~1.8 m(주기는 6.5~9.3 sec), 후반부에는 1.9~2.6 m(주기는 7.0~8.8초)에 달하였으며 25일은 종일 파고가 2 m(주기는 7.8~9.9초)를 초과한 폭풍 상태가 지속되었다. 26일에는 폭풍이 약간 약화되어 파고가 1.4~2.0 m(주기는 6.6~8.2초) 사이에서 변화하였으며 27일의 전반부에는 1.3~1.6 m(주기는 6.7~7.8초), 후반부에는 1.3 m에서 0.9 m로 약화(주기는 7.6~8.5초)되었다.

한편, 장주기파의 경우 Fig. 3에 따르면 15만톤 부두와 제1 부두의 사이에 위치한 정점 P5에서만 8초 간격으로 수위변동이 관측되었으며, 분석 결과 장주기 파고는 22일부터 0.15 m를 초과하기 시작하여 27일까지 지속되고 있다. 폭풍파시에 정점 P5에서의 장주기 파고가 증가한 것은 단주기파에 중첩된 장주기 성분이 항내로 상당히 침입하여 국부적인 부진동으로 증폭된 것으로 판단된다. 한편, 포항측후소에서 관측한 바람 자료(기상청, 1994)를 1994년 2월과 3월에 대해 각각 Table 5에 제시하였다. 이를 살펴보면 2월 23~26일 사이에 파의 침입 방향인 NE~ENE의 바람이 우세하였으나 최대 풍속은 4.3 m/sec 이하로 이 시기의 항외 폭풍파는 다른 해역에서 발생하여 전파해온 것으로 판단된다.

하역이 중단되기 전인 2월 21일 12시부터 48시간마다 8초 간격 자료 8,192개(자료 길이는 약 18.2시간)에 대해 스펙트럼 분석을 실시하고 128개 주파수 성분에서의 에너지 스펙트럼의 시간적 변화를 Fig. 5에 제시

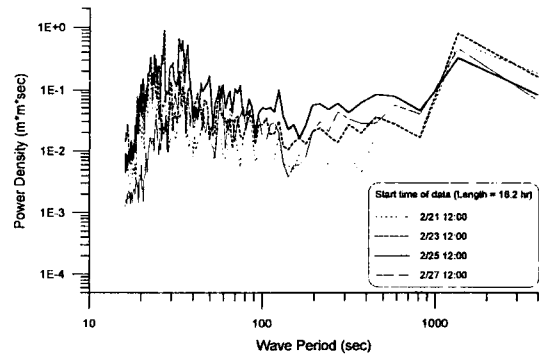


Fig. 5. Variation of spectral densities measured at St. P5 during the storms in February, 1994.

Table 4. Downtime records during field measurement in Pohang New Harbor

Pier	Berth	February							March		
		21	22	23	24	25	26	27	26	27	28
3rd	31A				10~24	0~24	0~24	0~13			
	31B			11~24	0~24	0~24	0~24	0~13			
	32				9~24	0~24	0~20 22~24	0~7			
	33				19~24	0~24	0~10				
4th	41A				2~21				8~24	0~8	
	42A		10~24	0~20 23~24	0~24	0~24	0~19 20~24	0~7	11~24	0~8	
5th	51				15~24	0~24	0~13		11~24	0~24	0~8
	53				10~24	0~24	0~15		15~24	0~18	
7th	74	16~24	0~24	0~24	0~24	0~24	0~24	0~7			

Table 5. Wind data at Pohang during February and March, 1994

Date	February 1994			March 1994		
	Mean wind speed (m/sec)	Maximum wind speed (m/sec)	Wind direction (16-point bearing)	Mean wind speed (m/sec)	Maximum wind speed (m/sec)	Wind direction (16-point bearing)
1	2.0	4.0	WNW	2.3	6.5	WNW
2	3.3	5.7	W	2.5	4.3	SW
3	2.3	3.8	W	1.9	5.0	SW
4	3.0	4.7	WSW	1.6	4.2	W
5	3.1	4.7	WSW	1.8	3.2	NNW
6	1.7	3.3	SW	1.8	6.0	SSE
7	3.0	5.0	SW	1.5	4.2	E
8	2.3	4.0	WSW	1.6	3.7	NW
9	5.0	7.7	W	3.0	7.5	W
10	2.6	5.7	WSW	3.2	5.7	W
11	2.4	5.8	ENE	2.9	5.0	W
12	3.0	5.0	NNE	1.6	3.5	W
13	3.0	4.3	SW	2.3	5.3	W
14	2.5	5.2	W	2.7	5.7	W
15	1.9	3.8	N	2.2	4.2	WNW
16	2.0	3.3	SW	2.8	5.5	SW
17	1.5	2.7	E	2.4	5.5	S
18	2.3	4.3	SSW	2.2	4.0	SW
19	1.9	4.0	S	2.6	4.3	WSW
20	1.9	3.0	SW	2.8	3.5	NE
21	3.6	5.5	WNW	1.9	3.3	ENE
22	3.0	5.3	W	1.5	3.3	WSW
23	2.0	3.0	NE	2.8	5.0	NW
24	3.0	4.3	ENE	3.1	5.0	WNW
25	2.9	4.0	NNE	3.7	5.3	W
26	2.6	3.8	NE	2.4	3.8	WNW
27	2.1	4.5	SSE	3.6	5.8	W
28	3.0	6.3	WNW	4.1	5.5	W
29				2.3	4.5	SSE
30				2.5	4.0	SW
31				2.4	4.5	SW

하였다. 이를 살펴보면 포항신항의 제1 공진주기 부근의 22.5분 주기를 제외하면 30초 전후에서 에너지가 가장 크다. 이 주기대에서의 에너지는 21일에서 25일(downtime이 가장 많았던 작업일)로 갈수록 증가하였으며 그 이후에는 크게 감소하였다. 따라서, 이 주기대에서의 에너지도 downtime에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

이들을 종합하면 21일의 경우 1.44 m의 파고, 22일과 23일의 전반부의 경우에는 주기가 9초 이상인 파랑으로 인하여 하역 중단이 발생하였을 것이다. 23일 후반부터는 증가된 파고로 인하여 주기의 변동에 관계없이 하역 작업이 수행되지 못한 것으로 판단된다.

4.2 너울에 의한 경우

3월 7~9일과 12~13일에 장주기 파고가 정점 P4

또는 P5에서 0.15 m를 초과하였으나 동 기간중 항외 정점 W에서의 단주기 유의파고 및 주기는 7~9일에는 0.5~1.2 m와 5.4~8.5초, 그리고 12~13일에는 0.1~0.9 m와 5.0~7.3초에 분포하였고 하역 중단 사례도 보고되지 않았다. 따라서, 두 정점에서의 장주기 파고는 국부적인 부진동에 의해 야기되었던 것으로 판단된다. 한편, 3월 20일을 전후하여 정점 W에서의 유의 파고가 최대 1.5 m에 달한 소규모 폭풍이 발생하였다. 이 폭풍은 3월 19일 21시의 1.2 m($T_{H1/3} = 4.8$ 초)를 시작으로 20일에는 1.2~1.5 m($T_{H1/3} = 5.1 \sim 6.7$ 초) 사이에 분포하였고 21일에는 0.9 m($T_{H1/3} = 6.3 \sim 8.1$ 초) 전후였으며 22일에는 0.6 m 이하($T_{H1/3} = 6.2 \sim 7.1$ 초)로 약화되었다. 또한, 20일 3시에 정점 P2와 P3에서는 장주기 파고가 0.10 m 내외에 달하였다. 이 시기에 하역 중단이 발생하지 않은 이유는 항외파고가 클 때는 주기가 짧

아서 커다란 선체운동을 발생시키기 어려웠고 그 이후에는 파고가 감소되었기 때문에 사료된다.

한편, 3월 26일 9시부터 다시 폭풍이 발생하여 26일 후반부에는 정점 W에서의 유의파고가 1.4~1.6 m, 유의파주기가 11.1~12.0초에 달하였다. 이 폭풍은 27일의 전반부까지 지속되어 유의파고가 1.3~1.8 m($T_{H1/3} = 11.6 \sim 13.3$ 초)였다가 후반부에는 0.7~0.9 m($T_{H1/3} = 7.7 \sim 10.0$ 초)로 약화되었으며 28일 전반부에는 0.7 m 이하($T_{H1/3} = 3.0 \sim 6.3$ 초)가 되었다. Table 4에 제시된 바와 같이 동 기간중에는 제4, 5 부두에서 하역 중단이 발생하였으며 이는 유의파고가 3월 20일의 경우보다 약 0.3 m 큰 경우임을 감안하면 중요한 의미를 지닌다. 파향·파고계로 정점 W에서 관측된 파향은 대부분 NNE~NE 사이로 거의 일정하였다.

한편, 장주기 성분의 경우 Figs. 3~4에 따르면 하역 중단이 발생한 3월 27일 전후에는 정점 P2와 P3두에서 모두 장주기 파고가 0.06~0.08 m 내외로 그다지 크지 않았으나 주기는 1.5분 정도로 부진동 성분이 매우 약하게 나타났다. Table 5에 제시된 바람 자료를 살펴보면 3월 26~28일 사이에서 풍향은 WNW~W, 최대 풍속은 5.8 m/sec 이하이므로 이 시기의 항외 폭풍파와 다른 해역에서 발생하여 전파해온 것으로 판단된다.

동 기간중 3개 정점(W, P2 및 P3)에서의 관측자료중 정점 W에서의 유의파고가 0.5 m를 초과한 경우에 대해 스펙트럼 분석에 의한 유의파고 H_s 와 첨두 주기 T_p 의 3월 20~30일 사이의 시간적 변화를 Fig. 6과 7에 각각 제시하였다. 여기서 3월 27일 전후의 폭풍파에 대해 살펴보면 제7 부두와 제8 부두 사이에 위치한 정점 P2에서의 유의파고는 0.28 m에서 0.37 m로 커졌다가 0.15 m까지 작아진 것으로 나타났다. 포항신항의 중앙

에 위치한 정점 P3에서는 유의파고가 0.18 m에서 0.29 m로 커졌다가 0.13 m로 작아졌다. Fig. 7에 제시된 항내의 정점들에서의 첨두주기는 대체로 11~15초 사이여서 통상의 폭풍파에 비해 상당히 긴 것으로 사료된다.

한편, 정점 WW2에서의 파고에 대한 정점 P2 및 P3에서의 파고비는 각각 0.17~0.24 및 0.12~0.23 사이에서 변화하였다. 참고로 포항지방해운항만청(1991)의 결과에서는 이 정점에서의 파고비가 각각 0.1 및 0.15, 그리고 포항중합제철주식회사(1992)의 결과에서는 각각 0.1 및 0.3 정도로 제시되었다. 규칙파 실험인 점파주기가 다른 점을 감안하면 직접적으로 양자를 비교하는 것은 어렵지만 이들의 수치실험에서는 정점 P2에서는 파고비를 낮게 예측하였을 가능성이 있다.

정점 P2에서의 유의파고 0.28~0.37 m는 중 대형선에 대한 하역한계파고인 0.5 m보다 상당히 작으므로 이러한 항내파고에 대해 포항신항내의 제4~5 부두에서 하역이 중단된 점은 주목할 필요가 있다. 그 원인을

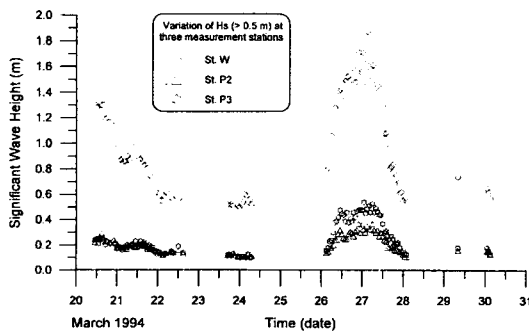


Fig. 6. Variation of significant wave heights at Sts. W, P2 and P3 in March, 1994.

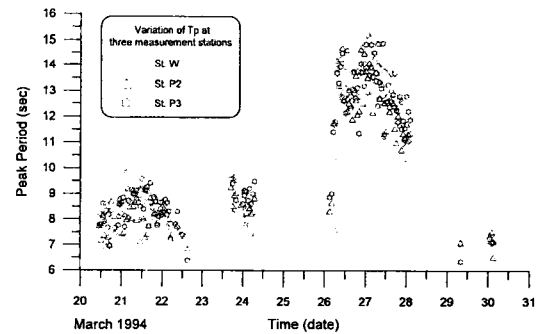


Fig. 7. Variation of peak periods at Sts. W, P2 and P3 in March, 1994.

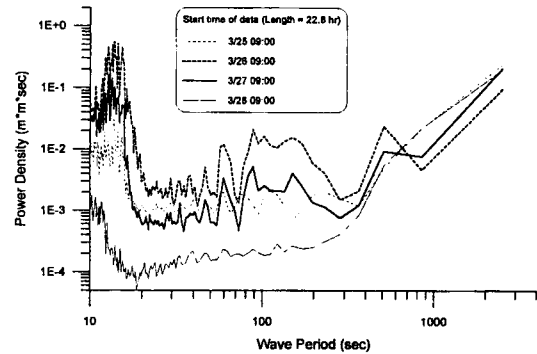


Fig. 8. Variation of spectral densities measured at St. P2 during the storms in March, 1994.

스펙트럼 분석을 통해 분석하였다.

하역이 중단되기 전인 3월 25일 9시부터 24시간마다 5초 간격 자료 16,384개(자료 길이는 약 22.8시간)에 대해 스펙트럼 분석을 실시하고 128개 주파수 성분에서의 에너지 스펙트럼의 시간적 변화를 Fig. 8에 제시하였다. 이는 2월 하순의 폭풍파에 대한 Fig. 5와는 상당한 차이를 나타낸다. 2월 하순의 폭풍파시에는 전체 주파수대에서 상당히 큰 에너지 분포를 보임에 비해 3월 하순의 폭풍파시에는 주기 8.5분, 1~4분 및 15초 전후에서 비교적 분명한 peak를 보이며 특히 15초 전후에서 탁월한 peak를 나타낸다. 한편, 주기 1~4분의 에너지 peak는 2월 하순 폭풍파시의 30초 전후에서의 peak와 대응되는 군파(또는 구속파)의 에너지로 판단된다. 이 주기대에서의 에너지는 25일에서 26일(downtime이 본격적으로 시작된 작업일)로 갈수록 증가하였으며 27일에 약간 약화된 후 28일에는 크게 감소하였다. 따라서, 이 폭풍파의 경우에도 1~4분 주기대에서의 에너지가 downtime에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토의

항내정온도가 문제시되는 포항신항에서 파향·파고계(Directional Waverider Buoy) 및 수압식 파고계를 사용하여 단주기파 및 장주기파에 대하여 약 1.5개월동안 실시한 현장관측자료와 그 기간 동안의 바람 및 downtime 기록을 이용하여 포항신항의 downtime의 원인에 대해 종합적으로 분석하였다. 본 연구를 통해 구해진 결론은 다음과 같다.

- 현장관측자료 분석 결과를 종합적으로 검토하면 포항신항에 대해 과거 실시되었던 수치실험들은 부두 전면에서의 파고비를 실제보다 약간 작게 예측하였을 가능성이 크다. 따라서, 과거 수치실험에 의한 정온도 평가는 포항신항의 정온도를 보다 안전측으로 예상하였을 것으로 생각된다.

- 포항신항내 downtime의 원인은 크게 두 가지로 구분된다. 먼저, 항외파고가 2 m 이상일 경우 주기에 관계없이 항내파고가 하역한계파고를 초과하여 하역작업이 중단된다. 다음에 항외파고가 1.5 m 정도로 전자에 비해 작더라도 주기가 10초 이상인 너울인 경우 고유주기가 10초 전후인 대형선박의 횡동요(roll), 전후동요(pitch) 및 상하이동(heave)과 공진을 일으켜서

downtime이 초래된다.

- 포항신항내 장주기 파고는 주기 수 분 이상의 부진동이 뚜렷한 경우 항의 구석진 부분에서 20 cm 전후로 상당히 크나 downtime과는 큰 관계가 없는 것으로 나타났다. 단, 단주기파나 너울의 군파(또는 구속파) 성분은 항외파가 큰 경우 항내에서도 상당한 에너지를 가지며 선체 동요에도 상당한 영향을 미칠 것이다.

- 포항종합제철주식회사의 제4 투기장 공사중 외항방파제의 200 m 연장 공사는 1996년에 완공되었으므로 현재는 1994년의 관측시에 비해 단주기파 차단 효과가 향상되었다. 따라서 본 현장관측자료를 사용하여 수치모형을 개선하고 검증한 후 방파제 연장으로 인한 개선 효과를 확인할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 해운항만청에서 시행한 “천해파랑 산출 시스템 구축” 및 “영일만 신항 개발 외곽시설 실시설계”, 그리고 한국해양연구소의 기본연구사업인 “포항신항내 파랑 침입에 대한 현장관측 및 수치실험”의 연구 결과의 일부이며, 현장관측 및 자료 분석에 수고해 주신 한국해양연구소 연안공학연구부의 여러분들에게 감사드립니다. 아울러 일부 관측자료를 제공해주신 한국해양연구소 연안공학연구부의 이동영 박사와 downtime 기록을 제공해주신 포항종합제철주식회사의 관계자에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청, 1994. 기상월보. 2월호, 3월호.
- 건설부, 1987. 포항신항 파랑조사 및 모델실험 용역 보고서. 제2권 파랑조사 및 모델 실험편, 440 pp.
- 오병철, 박경수, 심재설, 1992. Array를 이용한 파향 스펙트럼 산정에 관한 연구. 해양연구, 14(2): 111-129.
- 포항종합제철주식회사, 1989. 포항항 종합계획 및 원료부두 설계용역 보고서, 항내정온도 검토편, 182 pp.
- 포항종합제철주식회사, 1992. 포항제철소 제4 투기장 조성 수치모형실험보고서. 377 pp.
- 포항지방해운항만청, 1991. 포항신항 제7 부두내 안벽측 조공사 실시설계용역 보고서. 175 pp.
- 한국해양연구소, 1995. 포항신항 항만부진동 현장관측 및 수치실험. BSPE 00469-784-2, 180 pp.
- 해운항만청, 1994a. 천해파랑 산출 시스템 구축 용역 1차

- 년도 보고서. 312 pp.
- 해운항만청, 1994b. 영일만 신항개발 외곽시설 실시설계
용역 보고서, 제2권 수치모형실험편. 551 pp.
- Kobune, K. and Hashimoto, N., 1986. Estimation of direc-
tional spectra from maximum entropy principle. *Proc.*
5th Int. Offshore Mech. and Arctic Eng., ASME, Vol.
1, pp. 80-85.
- Longuet-Higgins, M. S., Cartwright, D. E. and Smith, N.
D., 1963. Observation of the directional spectrum of
sea waves using the motions of a floating buoy. In
Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, pp. 111-136.
- 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, 第37卷,
pp. 101-105.
- 松良精三, 渥美洋一, 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, 第41卷, pp. 71-75.
- 朝崎勝之, 松尾憲親, 藤畑完生, 飼亮行, 清水琢三, 1996. 港
内副振動に關する現地觀測と長週期波を考慮した荷役
稼働率の評價. 海岸工學論文集, 第43卷, pp. 886-890.