

천해역에서의 장·단주기파 상관관계

Correlations between Long- and Short-Period Waves in Shallow Water Region

정원무¹, 박우선¹, 김규한², 김지희¹

Weon Mu Jeong¹, Woo Sun Park¹, Kyu Han Kim², Ji Hee Kim¹

1. 서 론

천해역에서 관찰되는 장주기파는 발생 기구에 따라 surf beat, setdown wave, locked wave, 또는 Far-infra-gravity wave 등으로 다양하게 불리우며, 모두 0.5~수 분대의 주기를 갖는다. 이들은 정의에 따라 약간씩 다르기는 하지만 모두 계류된 선박의 동요 뿐만 아니라 해안선 침식과도 밀접한 관련이 있다는 것이 일반적으로 인정되고 있다(加藤等, 1989).

장주기파에 관한 연구는 Tucker(1950)가 천해역에서의 분 단위의 장주기파에 대해 언급한 이래로 관심을 끌게 되었으며 지금까지 활발히 진행되고 있다. 장주기파 에너지의 분포 특성에 관한 연구(Olsen and Hwang, 1971; Okihiro *et al.*, 1993; Okihiro and Guza, 1996)도 적지 않게 수행된 바 있지만, 주로 단주기파와의 관계 규명에 초점이 맞추어져 수행되어 왔다(山田, 1975; 關本等, 1990; 松良等, 1994; 田端等, 1995; 朝崎等, 1996). 현재까지 도출된 결과를 보면 장주기파는 단주기파와 상당히 밀접한 관계에 있는 것은 틀림이 없으나 지역적인 특성의 영향을 많이 받는 것으로 나타나 일반적인 관계식이 도출되지 않는 못한 상태이다. 또한, 연구자에 따라 장·단주기파 구분에 대한 정의도 서로 달라 도출 결과의 일관성도 결여되어 있다. 앞서서도 언급한 바 있지만 장주기파는 항만경은도, 해안선 침식 및 항로 매물 등과 밀접한 관계에 있으므로 장주기파 에너지의 적절한 평가는 대단히 중요한 의미를 지닌다.

본 연구에서는 장기 현장관측을 통하여 얻어진 자료를 이용하여 장주기파 특성에 대해서 검토하였다. 1999년 12월부터 2001년 6월까지 속초항 주방파제 외측의 1개 정점(Fig. 1 참조)에서 수압식 파고계를 이용하여 관측한 자료를 사용하여, 장·단주기파 구분 방법에 따른 영향을 살펴보고, 장주기파와 단주기파 간의 파고, 주기 등의 상호관계에 대해서 검토하였다. 또한, 단주기파와 장주기파의 산포도와 회귀식을 이용하여 극치 해석을 통하여 제현빈도별 장주기파 파고 및 주기를 제시하였다.

2. 현장관측과 자료 분석

2.1 현장관측

속초항 주방파제 외측의 1개 정점(■로 표시)에 기억용량 12MB의 수압식 파고계를 설치하여 현장관측을 실시하였다(Fig. 1 참조). 자료는 단주기파도 포함하기 위하여 0.5초마다 독취하였다.

관측기기의 설치대는 어로 활동에 의한 이동과 자료 백업(back-up)으로 인한 정점의 부분적인 이동을 방지하기 위해 方塊 형태로 제작, 설치하였으며, 매회 잠수하여 기기를 회수 재설치하였다. 관측은 1999년 12월 9일~2001년 6월 9일의 약 18개월 동안 실시되었으며 기기의 이상으로 결측된 2000년 1월 14일~2월 17일을 제외한 전체 기간 동안 자료가 수집되었다.

¹ 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

² 관동대학교 건설환경시스템공학부 (Division of Civil and Environmental System Engrg., Kwandong University, 7 imchun-ri, Yangyang-up, Yangyang-gun, Gangwon-do 215-802, Korea)

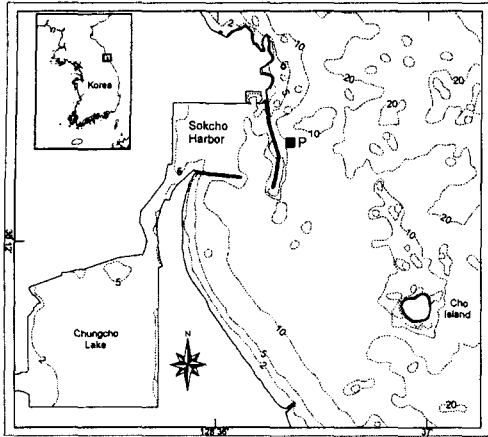


Fig. 1. 속초항 주변의 현장관측정점 위치도.

2.2 자료의 분석

자료 분석은 스펙트럼 분석법을 이용하여 실시하였다. 즉, 수압식 파고계로부터 취득된 자료를 온도 보정한 후, FFT를 이용하여 수압에 대한 스펙트럼을 구하고 이로부터 파고에 대한 스펙트럼을 구하여 다음의 관계식을 이용하여 분석을 수행하였다.

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

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

여기서, H_z 는 유의파고, T_z 는 평균주기를 나타내며, m_0 와 m_2 는 0차 및 2차 모멘트를 의미한다. 참고로 n 차 모멘트 m_n 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$m_n = \int_{f_1}^{f_2} f^n \cdot S(f) df \quad (3)$$

여기서, f 는 주파수, $S(f)$ 는 주파수에 대한 수면변동의 스펙트럼 밀도함수, f_1 과 f_2 는 각각 하한 및 상한 절단주파수이다. 단주기파와 장주기파 모두 같은 식을 적용하였다.

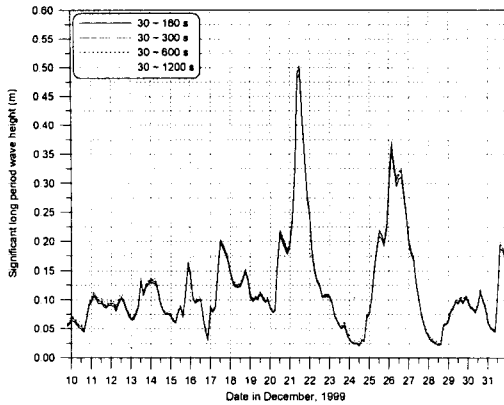
일반적으로 하한 및 상한 절단주파수를 어떻게 설정하느냐에 따라 파랑 특성이 영향을 받게 되며, 특히 단주기파와 장주기파를 구분하는 주파수를 어떻게 설정하느냐는 중요한 의미를 지닌다. 단주기파와 장주기파의 경계를 어디에 설정할 것인가는 상당히 어려운 문제로서 현재까지는 명확하게 결정되지 않고

있으며 취득된 자료의 특성이나 관련 연구자들마다 조금씩 다르다.

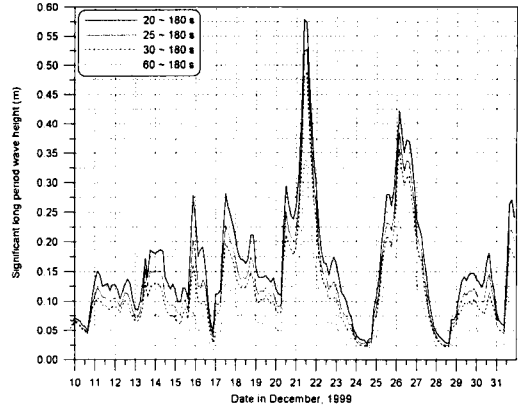
일본의 경우를 예로 들면 關本等(1990)은 주기 20초를 기준하여 이보다 짧은 주기를 파랑 성분, 그리고 긴 주기를 surf beat 성분으로 구분한 바 있다. 그리고 田端等(1995)은 연속된 파형 기록을 이동 평균하는 방법으로 주기 1분 이상을 장주기파 성분으로 정의하였다. 한편, 平石等(1996)도 關本等(1990)과 동일하게 주기 20초를 기준하였다. 이와는 달리 松良等(1994)은 30초를 기준하였다.

우리나라의 경우 해양수산부(1997a)의 연구에서 상기 일본에서의 연구들을 참조하여 단주기파와 장주기파의 경계를 30초로 설정한 바 있으며, 해양수산부(1997b)의 연구에서는 장주기 선체운동 성분을 감안하여 주기 60~180초의 에너지를 사용하기도 하였다. 한편, Kim et al.(2000)은 30~200초의 파랑을 장주기파 성분으로 정의하여 IFFT와 파별분석법을 사용하여 장주기파 특성 분석을 시도하였으며, 최근 정 등(2002)은 저중력파의 범위를 주기 30~180초로 설정한 바 있다. 그러나 장주기파의 경우 파군에 구속된 구속파의 특성 때문에 내습한 단주기파의 스펙트럼 형태에 지배된다. 따라서 단주기파의 스펙트럼 형태에 대한 검토 없이 일률적으로 장주기파의 절단주파수를 결정하는 것은 궁극적으로 장주기파의 파고와 파대 또는 파소 평가할 우려가 있다.

본 연구에서는 기존연구를 참조하여 장주기파의 절단주파수를 결정하는 데 좀 더 신중을 기하고자, 1999년 12월 10일에서 31일 사이에 관측된 자료를 바탕으로 하한과 상한 절단주파수를 변경시키며 분석을 실시하여 Fig. 2에 제시하였다. 상한 절단주파수를 1/30 Hz로 고정시키고 하한 절단주파수를 1/180, 1/300, 1/600, 1/1200 Hz로 변화시킨 경우의 결과를 보면(Fig. 2(a)) 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 180초 이상의 주기를 갖는 파의 에너지는 무시할 만하다는 것을 의미하는 것이다. 하한 절단주파수를 1/180 Hz로 고정시키고 상한 절단주파수를 1/20, 1/25, 1/30, 1/60 Hz로 변화시킨 결과를 보면(Fig. 2(b)) 하한 절단주파수를 변경시킨 경우와는 달리 상당히 큰 차이치를 보임을 알 수 있다. 이는 상한 절단주파수를 어떻게 설정하느냐가 얼마나 중요한 것인가를 단적으로 보여주는 결과이다.

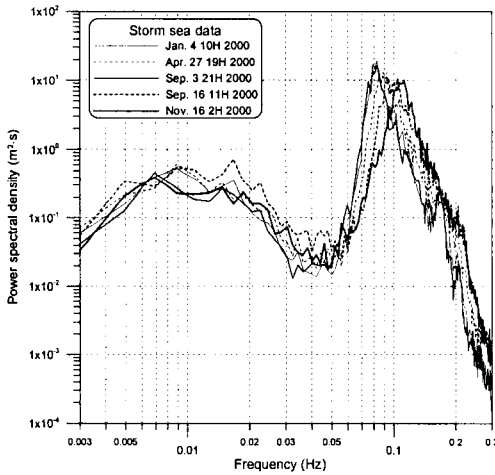


(a)

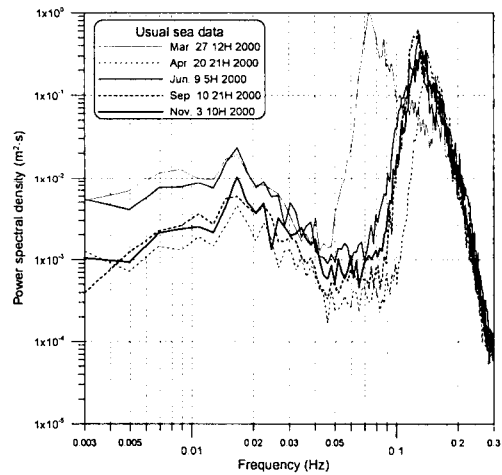


(b)

Fig. 2. 스펙트럼 대폭의 변화에 따른 장주기파고의 비교, (a) 상한 절단주파수를 변화시킨 경우, (b) 하한 절단주파수를 변화시킨 경우.



(a)



(b)

Fig. 3. 파랑 자료의 스펙트럼 밀도의 비교, (a) 폭풍시, (b) 평상시.

장주기파 분석을 위한 하한 절단주파수(단주기파와 장주기파를 구분하는 주파수)를 보다 명확히 살펴보기 위하여 폭풍파(유의파고 3 m 이상)와 평상파(유의파고 1 m 내외)를 대표하는 각각 5세트의 자료를 선정하여 스펙트럼 분석을 실시하였다. Fig. 3에 구해진 각 경우의 스펙트럼을 제시하였다. 먼저, Fig. 3(a)에 제시된 폭풍시의 스펙트럼을 살펴보면 0.08~0.12 Hz (약 8.3~12.5 초)의 단주기파측 첨두와 0.003~0.025 Hz (약 40~333 초)의 장주기파측 첨두가 분명하게 구분되며 양자의 경계가 0.04~0.05 Hz (20~25 초)에 존재함

을 알 수 있다. Fig. 3(b)의 평상시 자료의 경우 스펙트럼 밀도의 단주기파측 첨두가 0.07~0.08 Hz 사이에 존재하는 3월 27일 12시 자료를 제외한 나머지 자료들은 0.13 Hz 부근에서 첨두가 나타나서 서로 비슷한 형태를 나타낸다. 이 경우의 장·단주기파 경계는 대체로 0.04~0.07 Hz (약 14.3~25 초) 사이에 존재하나 3월 27일 12시 자료의 경우 경계가 폭풍파 자료와 같이 0.04~0.05 Hz에 존재하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에 기초하여, 본 연구에서는 장·단주기파의 경계를 20 초로 설정하였으며, 장주기파의 하한 절단주파수는 1/180 Hz로 설정하였다.

3. 단주기 파와 장주기 파의 상관 관계

3.1 유의파고

Fig. 4 에 2000 년 9 월 1 일~12 월 31 일까지의 4 개월 간에 대하여 식 (1)로 구한 정점 P에서의 장주기파 유의파고, H_s^L 과 단주기파 유의파고, H_s^S 를 동시에 도시하였다. 장주기파의 유의파고와 주기는 3 시간 길이로 구분된 수압 자료들을 분석하여 산출하였으며, 단주기파 유의파고는 해당되는 3 시간의 중앙에 위치한 시각의 값을 사용하였다. 이 그림을 살펴보면 전체 기간에 걸쳐 단주기파 유의파고와 장주기파 유의파고가 서로 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 에는 단주기파 유의파고와 장주기파 유의파고 간의 상관 관계를 검토하기 위하여 이들의 산포도와 이를 이용하여 구한 회귀식을 제시하였다. (a)는 총 4,087 개의 전체 자료를 사용한 결과로서 그림에서 가로 축은 단주기 유의파고(m), H_s^S , 세로 축은 장주

기파 유의파고(m), H_s^L , R^2 는 회귀선의 결정계수 (coefficient of determination), 그리고 N 은 사용된 자료의 수를 각각 나타낸다. 이 그림을 살펴보면 H_s^S 와 H_s^L 간에 거의 선형적인 관계가 성립하고 있으나 단주기 유의파고가 큰 경우에는 장주기파 유의파고가 보다 커지는 경향도 어느 정도 있음을 알 수 있다. (b)~(e)에는 계절별 특성을 파악하기 위하여 4 계절별로 자료들을 분리하고 각각에 대하여 산포도와 회귀식을 구하여 제시하였다. 먼저, 춘계 자료에 대한 (b)를 살펴보면 N 은 1,465 개(35.8%)이며 회귀식이나 R^2 이 전체 자료의 경우와 대체로 비슷함을 알 수 있다. 그러나 (c)에 제시된 하계자료의 경우 이 N 이 798 개(19.5%)로 자료의 수가 조금 작기는 하지만 R^2 은 0.912로 가장 크며 회귀식의 기울기가 다른 경우에 비해 상당히 급하여 동일한 단주기파 유의파고 있다. 추계 자료를 제시한 (d)의 경우를 살펴보면 N 에 대해 장주기파 유의파고가 높아졌음을 제시하고 이 724 개(17.7%)로 자료의 수가 4 계절 중에서 가장

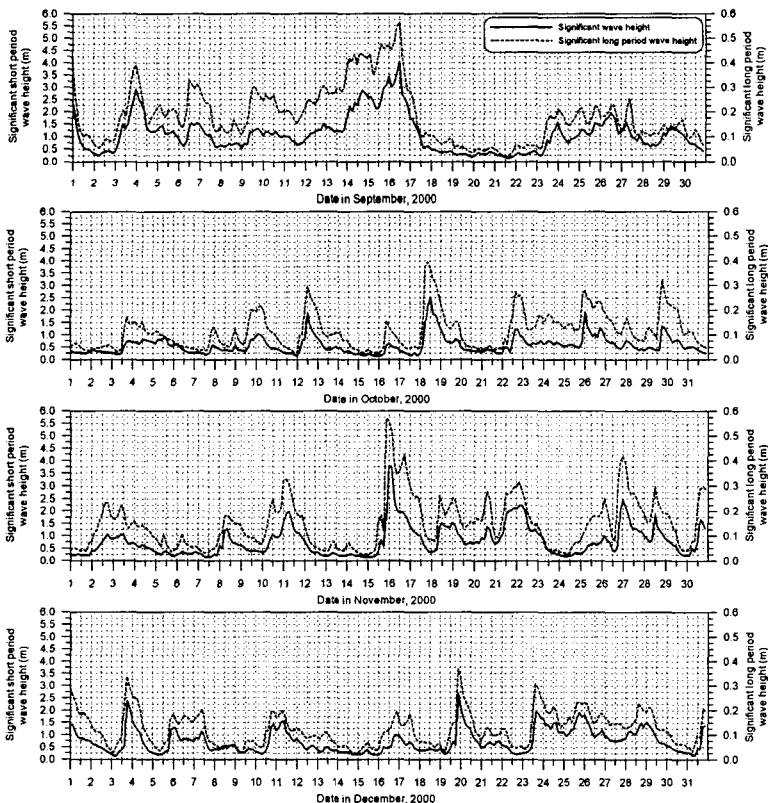
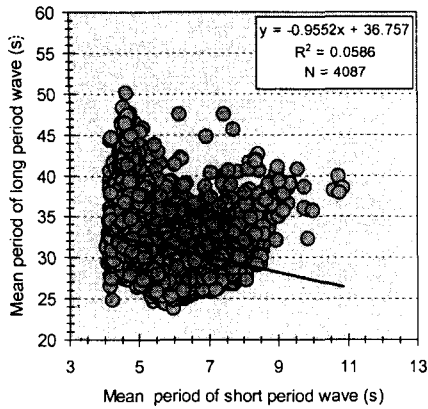
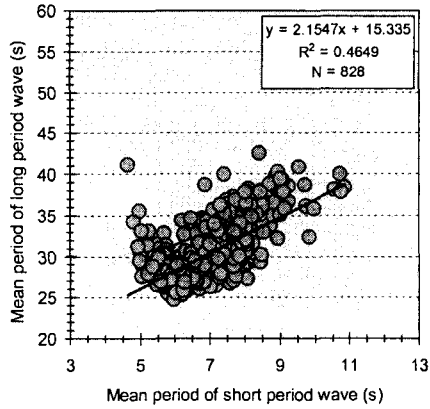


Fig. 4. 단주기파 유의파고와 장주기파 유의파고 비교(2000년 9월~2000년 12월).



(a)



(b)

Fig. 6. 장·단주기파의 평균주기간의 관계; (a) 전체, (b) $H_s^S \geq 1.0$ m.

작으며 R^2 은 0.859로 4 계열 중에서 두 번째로 크고 회귀식은 전체 자료의 경우와 가장 비슷하다. 마지막으로 (c)에 제시된 동계자료에 대한 결과를 살펴보면 N 은 1,100 개(26.9%)이며 회귀식이나 R^2 은 전체 자료의 경우와 비슷함을 알 수 있다.

3.2 평균주기

朝崎等(1996)은 동지나해를 향한 항만의 방파제 외측에서의 관측자료의 분석 결과를 통하여 장주기파 주기(T_L)가 단주기파 유의주기($T_{1/3}$)와 $T_L = 0.975T_{1/3} + 46.1$ 의 관계가 있는 것으로 제시한 바 있지만, 통상적으로는 단주기파의 주기와 장주기파 주기 사이에는 특별한 관계가 성립되지 않는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 朝崎等(1996)과는 달리 식 (2)로 정의되는 평균주기를 사용하여 장·단주기파의 주기간의 회귀식의 도출을 시도하였다. Fig. 6에 전체 자료 및 단주기파 유의파고 H_s^S 가 1.0 m를 초과하는 경우만을 대상으로 한 결과를 각각 제시하였다. 먼저 전

체자료를 사용한 (a)를 살펴보면 R^2 이 0.1 미만인 반면 H_s^S 가 1.0 m를 초과하는 경우에 대한 결과인 (b)를 보면 R^2 이 0.58로 비교적 높은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3 극치 해석

단주기파 분석 결과를 이용하여 일최대파고를 선정하고 이를 사용하여 극치 해석을 실시하였다. 정점 P에서 매시간 수집된 자료에서 일최대파고를 구하면 모두 517개가 된다. 이 자료가 Gumbell 분포를 따른다고 가정하고 LSM(Least Square Method)을 이용한 극치 해석을 실시하여 구한 재현빈도별 파고를 Table 1에 제시하였다. 이를 살펴보면 재현빈도 1개월, 1년 및 5년의 최대 유의파고는 각각 2.52, 3.87 및 4.74 m로 제시된다. 재현빈도별 단주기파고와 전체 자료를 사용한 회귀식[Fig. 5(a) 참조]을 이용하여 재현빈도별 장주기파 유의파고를 구하여 역시 Table 1에 제시하였다. 이를 살펴보면 이 지역에서는 연중 최대 장주기파 유의파고가 0.44 m 정도로 제시되는 것으로 나타났다.

Table 1. 극치해석에 의한 재현빈도별 파고 및 주기

	재현주기(개월)						
	0.5	1	3	6	12	24	60
$H_s^L(m)$	2.13	2.52	3.12	3.49	3.87	4.24	4.74
$H_s^S(m)$	0.247	0.289	0.355	0.395	0.436	0.476	0.531

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 속초항 주방파제 외측의 천해에서 현장관측을 실시하여 얻어진 자료에 대한 스펙트럼 분석을 통하여 단주기파와 장주기파의 상호관계에 대해서 해석하였다. 도출된 주요 결론 및 토의 사항을 정리하면 다음과 같다.

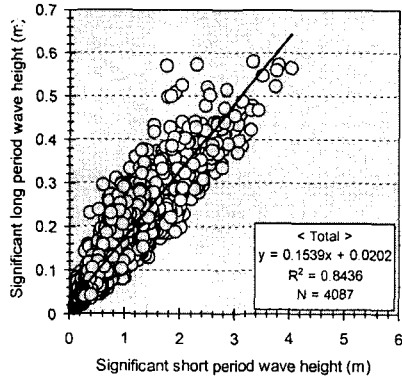
- 평상시와 폭풍시의 대표적인 파에 대한 스펙트럼 분석 결과, 단주기파와 장주기파는 20 초를 경계로 비교적 뚜렷하게 구분되어졌으며, 180 초 이상의 파랑의 에너지는 무시할 만 함을 확인하였다. 이에 근거하여 장주기파를 주기가 20 초에서 180 초 사이에 분포하는 파로 정의하였다.
- 속초항의 정점에서 장주기파 유의파고는 단주기파 유의파고와 밀접한 상관 관계를 가지는 것으로 나타났다. 단주기파 유의파고가 1.0 m 이상인 경우, 장·단주기파의 평균주기도 비교적 상관성이 큰 것으로 나타났다.
- 봄, 가을, 겨울은 유의파고의 상관성이 유사하나 여름철의 경우는 좀 다른 특성을 보였다. 이 시기에는 상대적으로 장주기파의 유의파고가 증가하였다.

상기 결과는 속초 해역에서 1년 6개월간 관측한 자료를 바탕으로 도출된 것으로 일반적인 장주기파와 단주기파의 관계로 보기는 어렵다. 향후 다양한 지점에서 장기간 자료가 축적되면 어느 정도 일반적인 특성을 도출할 수 있을 것으로 판단되며, 나아가서는 장주기파 파고에 대한 극치 해석을 통하여 재현빈도별 장주기파 파고를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

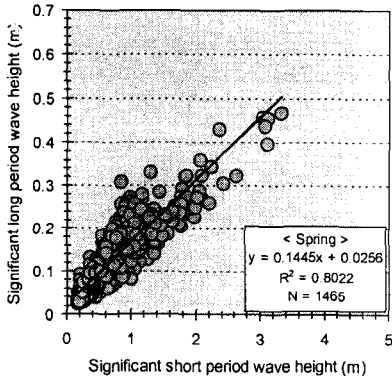
참 고 문 헌

정원무, 박우선, 김규한, 채장원, 김지화, 2002. 속초항과 청초호의 부진동 특성(1. 현장관측과 자료 분석). 한국해양·해양공학회지, 14 권(1), 51-64.
 해양수산부, 1997a. 부산 신항 방파제 실시설계 용역 수치모형실험보고서. 연구기관 한국해양연구소, 375.
 해양수산부, 1997b. 울산 신항만 방파제 기본설계보고서(제 2 권 수치모형실험편). 연구기관 한국해양연구소, 615.
 加藤一正, 柳嶋慎一, 栗山善昭, 磯上知良, 1989. 荒天候の berm 地形の侵蝕-長週期波に注目した現地観測-. 海岸工学論文集, 36, pp. 354-358.

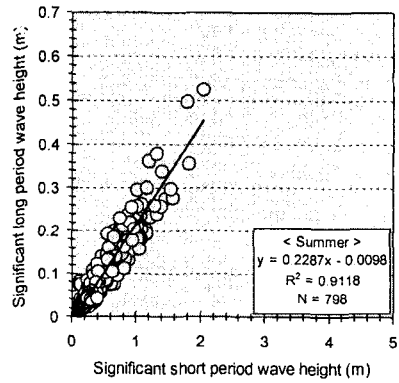
關本恒浩, 近藤浩石, 藤谷昌弘, 今井澄雄, 黒田輝夫, 1990. 波群特性とサーフビートを考慮した防波堤堤頭部の設計波力について. 海岸工学論文集, 37, pp. 624-628.
 松良精三, 屋美洋一, 菅沼史典, 宮本義憲, 1994. 波群に拘束された長週期波の港内における増幅特性と船體動揺に關する現地観測. 海岸工学論文集, 41, pp. 71-75.
 田端竹千穂, 田所篤博, 平石哲也, 玉城重則, 1995. 港灣における長週期波の増幅現象に關する現地観測. 海岸工学論文集, 42, pp. 301-305.
 朝崎勝之, 松尾憲親, 藤畑定生, 鶴飼形行, 清水琢三, 1996. 内副振動に關する現場観測と長週期波を考慮した港灣稼働率の評價. 海岸工学論文集, 43, pp. 886-890.
 合田良實, 1975. 淺海域における波浪の碎波變形. 港灣技術研究所報告, 14(3), pp. 59-106.
 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. and Guza, R. T., 1996. Observations of seiche forcing and amplification in three small harbors, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg.*, ASCE, 122(5), pp. 232-238.
 Okihiro, M., Guza, R. T. and Seymour, R. J., 1993. Excitation of seiche observed in a small harbor, *J. Geophysical Research*, 98(C10), 18, pp. 201-18, 211.
 Olsen, K. and Hwang, L. S., 1971. Oscillations in a bay of arbitrary shape and variable depth, *J. Geophysical Research*, 76(21), 5, 048-5, 064.
 Tucker, M. J., 1950. Surf-beats: Sea waves of 1 to 5 minutes period, *Proc. Roy. Soc. A.*, 202, pp. 565-573.



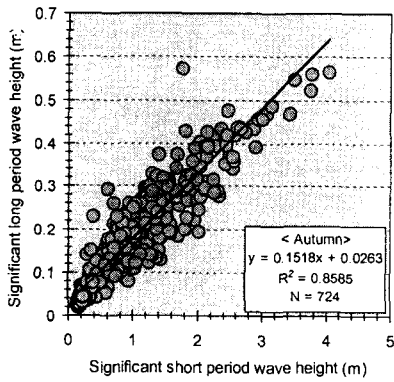
(a)



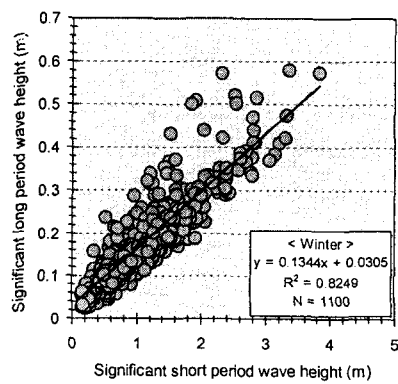
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 5. 단주기파 유의파고와 장주기파 유의파고의 관계; (a) 전체, (b) 봄, (c) 여름, (d) 가을, (e) 겨울.