

竹邊港 水域의 長週期 水面振動 特性 Characteristics of Long Period Resonant Oscillations around Chukpyon Harbor

鄭遠武* · 朴佑善* · 蔡璋源*

Weon Mu Jeong*, Woo Sun Park* and Jang Won Chae*

요 지: 竹邊港 内外의 2個 定點에 水壓式 波高計를 설치하여 冬季의 악천후시 現場觀測을 실시하고 長週期 副振動 特性을 파악하였다. 觀測資料 分析에 의한 共振週期 解析時 既存의 港內 定點에서 스펙트럼 에너지가 最大인 週期 및 그 分布 形態를 기준한 방법외에 港外에 대한 港內 定點에서의 相對 增幅比를 기준한 방법을 도입하였다. 資料 分析과 數值實驗 結果 竹邊港 水域의 第1 共振 모드는 약 12분에서 약 7배의 增幅比를 가지며 第2 共振 모드는 약 6분인 것으로 나타났다. 觀測期間中 港內에서의 水面振動幅은 약 10~20 cm로 나타났으며 荒天時 港內 定點에서 短週期波의 群波 效果 또는 이 성분이 長週期波에 重疊된 영향에 의한 것으로 생각되는 2~3분 부근의 副振動이 出現하였다. 短週期波와 長週期波에서 통상적으로 사용되는 反射率을 線形的으로 연결시킨 數值實驗을 통하여 3분 이하 副振動에서의 增幅比를 비교적 잘 再現하였다.

Abstract □ Long period waves were measured at two stations outside and inside Chukpyon Harbor using two pressure-type wave gauges for one week that covers storm sea period. Based on the collected data the characteristics of long-period resonant oscillations were analysed: the resonant period corresponding to the peak spectral density are slightly different from one to the component wave period with the largest amplification ratio, and the latter period is suggested as that of the first resonant mode. From the analysed field data and numerical modeling, the first resonant mode of Chukpyon Harbor region appeared to be around 12 minutes with amplification ratio of 7, whose amplitude varies 10~20 cm inside of the harbour, and also the second mode appeared to be around 6 minutes. The waves of 2~3 minute periods were resonated apparently in the harbour, which is considered to be generated from group-bounded irregular waves and non-linear wave-wave interaction etc. The linearly decreasing reflection coefficients used in the numerical modeling appeared to be an alternative in calculating reflected waves in harbor.

1. 緒 論

現在 우리 나라 港灣 및 漁港의 港內靜穩度 問題에 대한 검토는 크게 短週期波와 長週期波에 의한 港內 水面攪亂의 두 가지로 구분되어 수행되고 있다. 前者는 短週期波의 港內 侵入 및 항내에서의 多重反射로 발생하는 重複波에 의한 수면교란 현상에 대한 검토로서 통상 수행되는 設計波 또는 年中 優勢波에 의한 항 내정온도 검토가 이에 속한다(海運港灣廳, 1994). 後者

는 外海에서 침입하는 長週期波 成分이 海底地形 또는 만이나 항만의 형상에 의하여 港內에서 增幅되는 副振動 現象에 대한 검토로서 대형 선박이 출입하는 港灣(예를 들면, 釜山港, 浦項新港, 東海港, 墨湖港 등)에서 이러한 연구가 수행되었다(釜山直轄市, 1991; 建設部, 1987; 韓國海洋研究所, 1993).

本 論文의 연구 대상인 竹邊港과 같은 中·小規模 港灣의 경우 대부분 短週期波에 의한 검토만이 수행되었다. 그 주된 이유는 출입하는 선박의 규모가 작아서

*韓國海洋研究所 沿岸工學研究部 (Coastal Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, 425-600, Korea)

長週期波에 의한 共振週期和 선박 자체의 固有振動數가 상당히 달라서 커다란 船體運動이 발생되지 않거나, 선체 동요가 발생하더라도 그 振幅이 작거나 또는 週期가 짧아서 선박이나 繫留 施設(어항의 경우 페타이어를 많이 사용)의 파손에는 이르지 않았기 때문이다. 그러나, 鄭等(1995)에 따르면 墨湖港의 경우 항에서 波가 큰 경우 港內에서 주기 1~3분 사이에 에너지가 집중되어 共振 現象을 나타내는 것으로 나타났다. 이와 같은 주기 1~3분 정도의 群波는 소형 선박의 경우라도 水平方向의 長週期 動搖를 增幅시킬 수 있다.

本 論文에서는 現場觀測資料 및 數值模型實驗을 이용하여 竹邊港의 長週期波 특성에 대하여 분석하였다. 現場觀측자료(韓國海洋研究所, 1993)는 鄭等(1993)이 제시한 방법에 따라 분석하였으며, 短週期波의 그룹화를 판단하기 위하여 통상적인 30초 간격 자료 외에 10초 간격 자료의 분석도 실시하였다. 竹邊港의 共振 周波數 算定에는 현재 이용되는 港內 波高의 스펙트럼을 기준한 방법 외에 港內·外 觀測定點間의 相對 增幅比를 이용하는 방법도 사용하였다. 複合要素模型을 이용하는 수치실험에서는 공진주파수 및 增幅比의 적절한 재현을 위하여 外部 解析解 領域의 水深 變化, 入射 波向 및 固體 境界面에서의 反射率의 변화에 따른 해석을 실시하였다.

2. 現場觀測 및 資料 分析

2.1 現場觀測 및 資料 編輯

竹邊港內 水面振動 現象의 時間的 및 空間的 特性을 파악하고 數值模型의 入力 및 檢證資料를 수집하기 위

하여 港內·外 2개 정점에서 現場觀測을 수행하였다. Fig. 1에 제시된 港外 定點(S1, 水深 약 34 m)과 港內 定點(S2, 수심 약 6 m)을 선정하고 各 定點의 海底에 Paro scientific sensor를 사용한 水壓式 自動海面記錄機 SWTG(Self-recording Wave and Tide Gauge)를 사용하여 1993년 1월 9일~1월 16일까지(자료 수집간격 : 5초) 現場觀測을 실시하였다. 한편, 네덜란드 Datawell사의 directional waverider buoy를 S1 부근의 W(수심 약 33 m)에 설치하여 短週期波 同時觀測도 실시하였다.

관측된 水壓 資料를 일련의 換算 프로그램을 이용하여 海水位 資料로 변환하였으며, 이들을 2개씩 또는

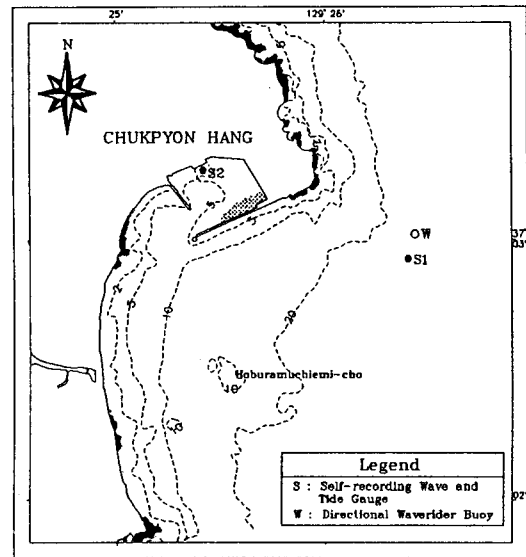


Fig. 1. Location map of long and short period wave measurements around Chukpyon Harbor.

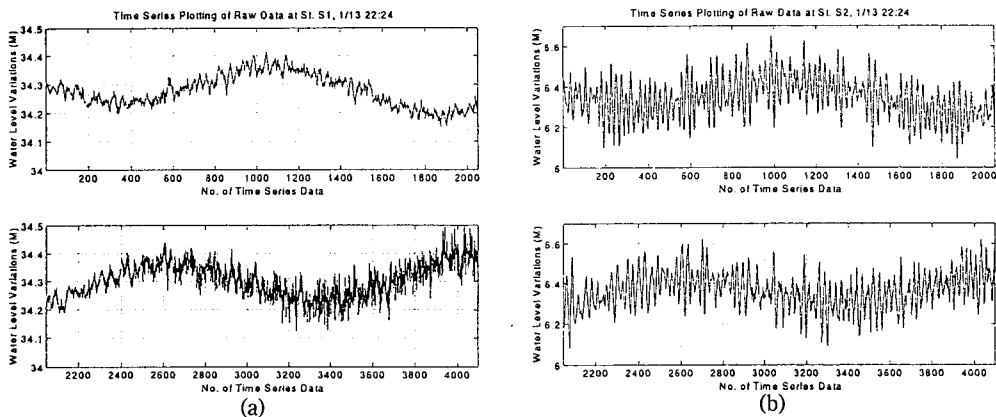


Fig. 2. Time series of raw sea level data measured in Chukpyon Harbor (Jan. 13, 22:24, 1993~Jan. 15, 08:32, 1993). (a) Station S1; (b) Station S2.

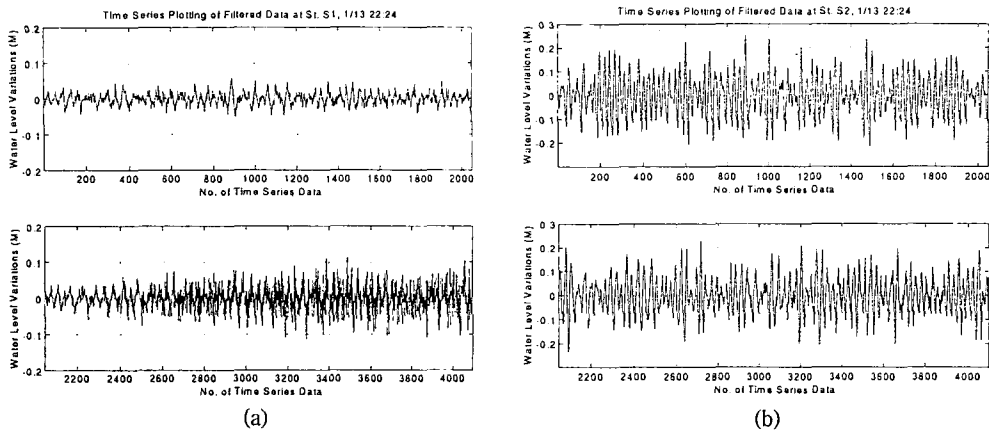


Fig. 3. Time series of filtered sea level data measured in Chukpyon Harbor (Jan. 13, 22:24, 1993~Jan. 15, 08:32, 1993). (a) Station S1; (b) Station S2.

6개씩 산술 평균하여 10초 또는 30초 간격의 자료로 再編輯하였다. 30초 간격의 자료는 竹邊港 水域의 제1 및 제2 공진주기를 파악하기 위하여, 그리고 10초 간격의 자료는 竹邊港 水域의 3차 이상의 共振週期를 파악하기 위한 것이다(30초 간격 자료의 경우 Nyquist period가 1분이 되므로 1~3분 정도의 局部的인 共振週期를 파악하기에는 적절하지 못한 것으로 판단). 定點 S1과 S2에서 수집된 이 자료들의 일부(1월 13일 22시 24분부터 30초 간격의 자료 4,096개)를 동일한 時間帶의 時系列 水位變化 資料로써 Fig. 2(a)와 2(b)에 각각 제시하였다. Fig. 2(a)에 제시된 港外定點(S1)에서의 관측자료를 살펴보면 週期 20분 전후의 長週期 水面振動이 비교적 뚜렷하게 출현하며 시간이 지남에 따라 氣象 惡化로 인하여 短週期 波高가 증가하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 2(b)에 제시된 港內 定點(S2)에서는 週期 10~15분, 振幅 15~20 cm 정도의 長週期 水面振動이 분명히 구분되며 港外와 비교하면 단주기파의 에너지는 거의 나타나지 않는다. 本 論文에서는 불필요한 週期帶의 에너지를 제거하기 위하여 전술한 바와 같이 5초 간격 자료를 2개 또는 6개씩 平均하여 高周波數帶의 에너지를 제거한 후 high-pass filter를 적용하는 방법을 사용하였다(鄭 等, 1995). 즉, trend(여기서는 주로 潮汐 成分이 해당됨)를 제거한 자료에 切斷 週期(cutoff period)를 5분(10초 간격 자료) 또는 20분(30초 간격 자료)으로 設定한 9차(10초 간격 자료) 또는 10차(30초 간격 자료)의 Butterworth high-pass filter를 적용시켰다. Fig. 3에는 high-pass filter를 통과시킨 30초 간격의 時系列 資料를 圖示하였는데 潮汐 成分을 포

함한 低周波數帶의 에너지가 제거되었음을 알 수 있다. 단, filtering을 거친 資料들의 始點部와 終點部에는 filtering 과정에 기인된 자료의 汚染이 일부 출현하였다.

2.2 스펙트럼 分析 結果

2.2.1 30초 간격 資料

觀測定點別로 30초 간격의 4,096개(약 34.1 시간)의 時系列 資料를 만든 후 FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 이용하여 128개의 周波數 成分에 대한 에너지 스펙트럼을 산출하였다. 現場觀測을 통하여 얻어진 자료수는 5 세트였으며, 각 자료의 스펙트럼 분석을 통해 얻어진 결과를 Figs. 4(a)~4(e), Fig. 5 및 Table 1에 정리하였다.

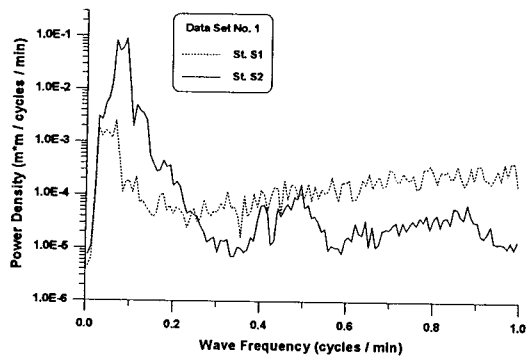
Figs. 4(a)~4(e)에는 定點 S1과 S2에서 관측된 資料(Table 1의 관측자료 1~5에 각각 해당됨)의 스펙트럼을 提示하였다. 이 그림들을 살펴보면 港外定點 S1에서는 5 세트에서 모두 第1 尖頭週期 부근에 에너지가 상당히 넓게 分布(15~25분의 범위)되어 있으나, 港內 定點 S2에서는 港外의 경우에 비해 에너지 分布幅이 상당히 좁아졌음을 알 수 있으며, 尖頭週期도 항외에 비해 10~15분의 短週期側에 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 港外定點에서는 주기 15~25분에서 에너지가 집중되어 있으나 港內로 傳播되면서 주기 10~15분帶로 에너지가 이동되어 집중되는 현상을 보이고 있다. 이는 竹邊港 水域의 第1 固有週期가 10~15분 사이에 있을 가능성이 높은 것을 의미한다.

Fig. 5에는 각 觀測資料의 港外波高에 대한 港內波

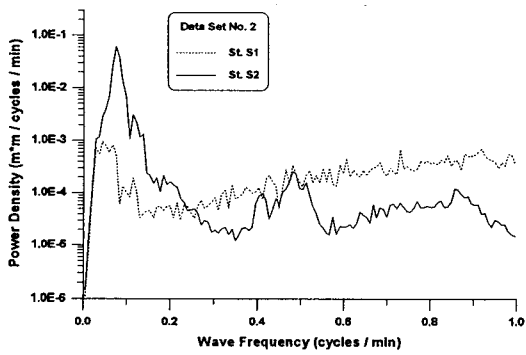
高的相對增幅比를 圖示하였다. 즉, 스펙트럼 分析에 의해 제시된 128개 주파수 성분에 대하여 港外 定點 S1에 대한 港內 定點 S2에서의 相對 增幅比를 다음 式을 이용하여 구한 후 이를 圖示하였다.

$$R_{21} = \sqrt{\frac{S(f)_2}{S(f)_1}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 128) \quad (1)$$

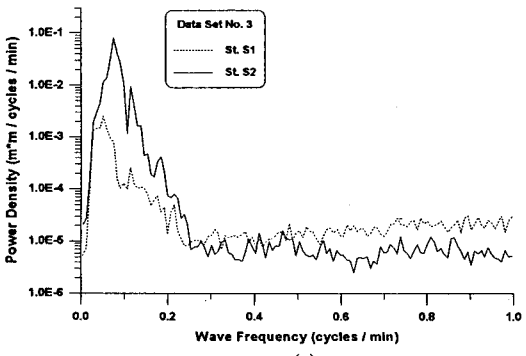
여기서, $S(f)$ 는 周波數 f 에 대한 스펙트럼 密度值를 나타낸다. 이를 살펴보면 港外波高가 상대적으로 작았던



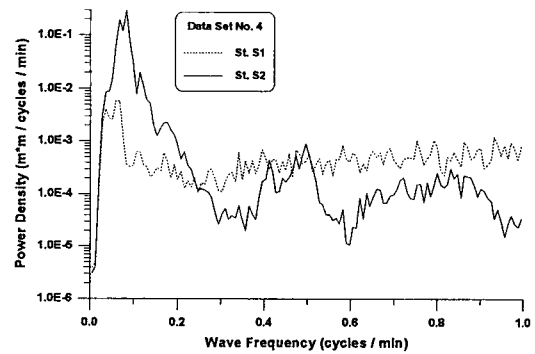
(a)



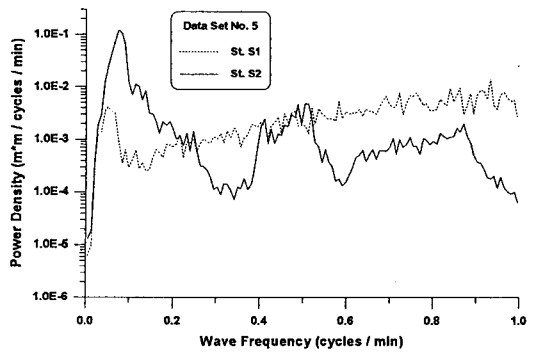
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 4. Spectral densities of sea level data measured in Chukpyon Harbor. (a) Data set no. 1; (b) Data set no. 2; (c) Data set no. 3; (d) Data set no. 4; (e) Data set no. 5.

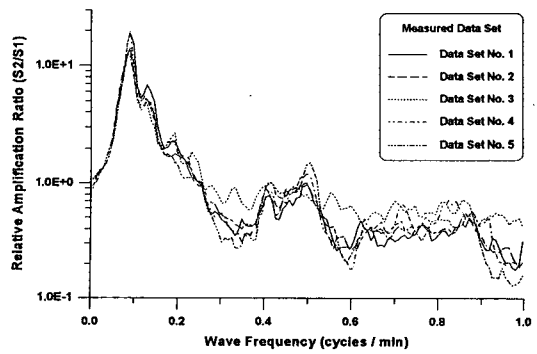


Fig. 5. Relative amplification ratios (S2/S1) obtained by spectral analyses for five data sets.

관측자료 3(Table 1 참조)을 제외하면 全般的으로 유사한 增幅比 變化를 나타낸다. 最大 相對 增幅比는 스펙트럼 分析 結果에서 에너지가 집중되어 있는 週期帶와 비슷하게 10~13분 부근에 분포한다. 관측자료 3을 제외하면 주기 2.4분 및 2분 부근에서 波가 그룹화되

Table 1. Resonant peak periods obtained from the analysis of 5 data sets with sampling rate of 30 seconds.

| Data set no. | Measurement periods (January, 1993) | Resonant periods at station S2 (min) | | Characteristics of measured short-period waves | | | |
|--------------|-------------------------------------|--|--|--|---------------------|----------------|-----------|
| | | Results from power spectra analysis | Results from relative amplification analysis | $\bar{H}_{1/3}$ | $\bar{T}_{H_{1/3}}$ | Mean direction | Direction |
| 1 | 09/16:00~11/02:08 | 11.1~15.1(11.1), 8.8, 5.2~5.7, 2.4, 2.1 | 11.1~12.2(12.2), 2.0 | 1.28 | 6.4 | N67°E | 32.4 |
| 2 | 11/02:08~12/12:16 | 13.5(13.5), 8.8, 2.4, 2.0~2.1 | 12.2(12.2), 2.4, 2.0 | 1.93 | 7.2 | N48°E | 29.4 |
| 3 | 12/12:16~13/22:24 | 13.5(13.5), 8.8, 5.4~5.7 | 11.1~12.2(11.1), 2.4~2.5, 2.0~2.1 | 0.75 | 5.8 | N50°E | 33.6 |
| 4 | 13/22:24~15/08:32 | 11.1~15.1(12.2), 2.4, 2.1 | 11.1~12.2(12.2), 2.0 | 1.83 | 7.2 | N55°E | 30.2 |
| 5 | 15/08:32~16/18:40 | 11.1~15.1(13.5), 2.4, 2.0 | 11.1~13.4(12.2), 2.4, 2.0 | 3.51 | 9.0 | N67°E | 26.0 |

* Bold numerals in the parenthesis denote peak periods in minutes.

는 現象이 분명하게 나타나며 이러한 경향은 港外波高가 큰 時點일수록 더욱 분명해진다(觀測資料 4와 5 참조). 港內定點 S2에서의 에너지가 최대인 週期中 출현빈도가 가장 많은 12.2분을 기준하면 無次元화된 相對 增幅比는 12.3~19.8에서 변화하며 약 16의 平均值를 나타내었다.

Table 1에는 스펙트럼 分析에 의한 尖頭週期를 Fig. 4 및 5를 기준한 두 가지 結果를 바탕으로 제시하였다. 첫 번째는 通常의으로 사용되는 港內 定點에서 스펙트럼 에너지가 최대인 주기 및 그 분포 형태를 기준하는 방법이며, 두 번째는 스펙트럼 에너지의 比較를 통하여 구한 港內 定點에서의 相對 增幅比(港內波高/港外波高)가 最大인 週期 및 그 分布 形態를 기준하는 방법이다. 지금까지의 연구(建設部, 1987; 鄭 等, 1993; 鄭 等, 1995)에서는 항내 스펙트럼을 기준한 첫 번째 방법으로 共振現象을 분석하였다. 그러나, 共振이 外海의 에너지가 港 또는 灣內에서 차단되어 特定 周波數帶에서 에너지가 增幅되는 現象임을 감안하면 그 增幅되는 정도 및 주기대를 중심으로 增幅比와 共振周波數를 결정하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다. 항내 스펙트럼을 기준으로 한 방법에 의한 結果를 살펴보면 第1 尖頭週期가 11.1~13.5분 사이에 위치하며 出現頻度를 감안하면 13.5분을 竹邊港 水域의 第1 共振週期로 생각할 수 있다. 그러나, 相對 增幅比를 기준한 結果는 觀測資料 3(11.1 분)을 제외하고는 전부 12.2분을 나타내고 있음을 볼 때 竹邊港 水域의 제1 공진 주기는 12.2분 부근에 존재할 가능성이 더욱 높다.

港外波高가 상당히 작았던 관측자료 3을 제외하면 港內 定點에서 2분 부근(2.4분과 2.0분)에 에너지가 增

幅되거나 入射波 에너지보다 커지는 경향이 나타난다. 이러한 現象은 成分波間의 非線形 相互作用과 群波 現象에 기인된 것으로 판단되며, 이 波高의 크기는 第1 共振에 비해 작으나 防波堤 等の 파랑 에너지 遮斷 構造物에 의한 回折波가 增幅되었다는 점에서, 또한 선박의 피해가 예상되는 荒天時에 출현한다는 점에서 상당히 중요한 의미를 지닌다. 이와 유사한 現象은 墨湖港의 副振動 特性에 대한 鄭 等(1995)의 연구에서도 지적된 바 있다.

2.2.2 10초 간격 資料

10초 間隔 資料에 대해서도 30초 자료의 경우와 동일하게 스펙트럼 分析을 실시하여 그 結果를 Table 2에 나타내었다. 週期에 * 표시가 된 것은 港內 定點에서의 에너지 수준이 港外的 경우보다 작기는 하나 그 자체로는 尖頭值를 형성하는 週期를 나타낸다. Table 2에 제시된 尖頭 週期는 두 가지 기준에 의해 결정되었다. 첫 번째는 短週期波의 港內에서의 그룹화를 나타내는 에너지 集中度로써 power density의 분포가 불룩한 形態를 이루는 경우 제1 공진 모드의 분석시와 같이 共振이 발생한 것으로 판단하였다. 두 번째는 港外波高에 대한 港內波高의 相對波高比가 1을 초과하는 경우 港內 共振이 발생한 것으로 판단하였으며 이는 入射波向을 고려할 때 港內에서의 回折係數는 0.5를 넘지 않을 것으로 판단되기 때문이다.

Table 2를 살펴보면 거의 全 觀測資料에서 2.0~2.2분의 尖頭週期가 출현하며 港外的 短週期 波高가 높을 때(관측자료 4-3~6-1)는 0.88분(약 53초), 0.63분(약 38초)의 尖頭週期도 출현한다. 이 첨두주기들은 包袋波形(wave envelope)을 보이는 群波에 기인된 週期들

Table 2. Resonant peak periods obtained from the analysis of 16 data sets with sampling rate of 10 seconds.

| Data set no. | Measurement periods | Resonant periods at station S2 (min.) | Characteristics of measured short-period waves | | | |
|--------------|-------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------|----------------|-----------------------------|
| | | | $\bar{H}_{1/3}$ (m) | $\bar{T}_{H_{1/3}}$ (sec) | Mean direction | Direction spreadings (deg.) |
| 1-1 | 01/09 16:00~01/10 03:22 | 2.1 | 0.95 | 6.0 | S87°E | 37.1 |
| 1-2 | 01/10 03:22~01/10 14:45 | 2.2*, 1.2* | 0.69 | 5.1 | N68°E | 39.9 |
| 1-3 | 01/10 14:45~01/11 02:08 | 2.0~2.1 | 2.11 | 7.7 | N34°E | 21.7 |
| 2-1 | 01/11 02:08~01/11 13:30 | 2.0~2.1 | 2.30 | 7.5 | N41°E | 21.2 |
| 2-2 | 01/11 13:30~01/12 00:53 | 2.0~2.1, 1.2* | 1.92 | 7.2 | N50°E | 32.9 |
| 2-3 | 01/12 00:53~01/12 12:16 | 2.0~2.1 | 1.38 | 6.9 | N56°E | 37.0 |
| 3-1 | 01/12 12:16~01/12 23:38 | 3.0, 2.4, 2.1 | 0.81 | 6.2 | N58°E | 38.8 |
| 3-2 | 01/12 23:38~01/13 11:01 | × | 0.71 | 5.9 | N55°E | 34.6 |
| 3-3 | 01/13 11:01~01/13 22:24 | 2.0~2.2 | 0.76 | 5.5 | N39°E | 29.2 |
| 4-1 | 01/13 22:24~01/14 09:46 | 2.0~2.2 | 1.13 | 6.4 | N49°E | 29.8 |
| 4-2 | 01/14 09:46~01/14 21:09 | 2.0~2.4, 1.2* | 1.51 | 7.1 | N54°E | 32.2 |
| 4-3 | 01/14 21:09~01/15 08:32 | 2.0~2.1, 1.2~1.4*, 0.88*, 0.63* | 2.97 | 8.2 | N62°E | 28.2 |
| 5-1 | 01/15 08:32~01/15 19:54 | 2.0~2.1, 0.88*, 0.63* | 3.19 | 8.3 | N67°E | 27.4 |
| 5-2 | 01/15 19:54~01/16 07:17 | 2.0~2.1, 1.2*, 0.88*, 0.63* | 2.99 | 8.9 | N66°E | 25.0 |
| 5-3 | 01/16 07:17~01/16 18:40 | 2.0~2.1, 0.88*, 0.63* | 4.31 | 9.9 | N69°E | 25.7 |
| 6-1 | 01/16 18:40~01/17 06:02 | 2.0~2.2, 0.88*, 0.63* | 3.53 | 10.4 | N52°E | 16.3 |

×: No distinct peaks.

*: Peak period having the relative amplification ratio less than 1.0.

로 판단된다. 한편, 주기 2.0~2.2분에서의 相對 增幅比는 平均 1.0~1.5, 그리고 주기 1분 이하는 平均 0.7~0.9 정도로 나타났다.

3. 數值計算 및 結果 分析

現場觀測資料 分析 結果로 제시된 竹邊港 水域의 公 진 特性을 再現하기 위하여 數值解析을 수행하였다. 本 論文에서 사용한 複合要素 數值模型은 여러 연구를 통하여 效용성이 입증(韓國海洋研究所, 1993; 鄭 等, 1993)된 바 있으며 固體 境界面에서의 部分反射도 근 사적으로 고려할 수 있다. 現場觀測資料에서 나타난 2 가지 뚜렷한 尖頭週期들, 즉 12.2분의 Helmholtz 공진 주기와 2분대의 局部的인 共振週期에 대한 검토를 위 해 Fig. 6과 같은 有限要素網圖를 작성하였다. 要素網 의 作成時에는 節點間의 距離를 최대 40 m로 設定하 여 50초 주기의 波(水深 5 m에서 波長이 약 350 m)도 충분한 精確도를 가지고 再現할 수 있도록 하였다. 이 는 7,536개의 線形 三角形 要素와 3,953개의 節點으로 구성되었으며 이 그림에 표시된 定點 C1은 港外定點

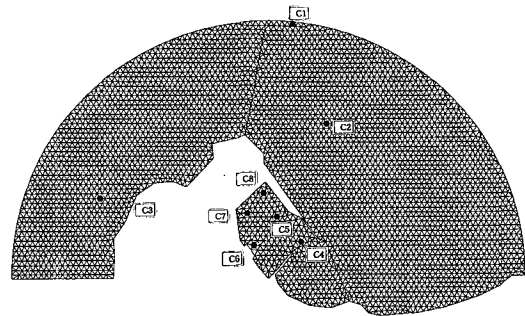


Fig. 6. Finite element mesh for Chukpyon Harbor.

인 S1과, 그리고 定點 C6은 港內定點인 S2와 일치한다. 한편, 本 論文에서는 前述한 연구 結果에 근거하여 固體 境界面에서의 反射率로 直立 岸壁의 경우 0.99, 암초 해안의 경우 0.98, 테트라포드로 피복된 防波堤 의 경우 0.97, 그리고 自然 海岸의 경우 0.95를 사용하 였다.

3.1 解析解 領域의 水深 變化의 影響

과거 水理模型實驗이 수행되었던 幾何學的 形象의

항만들은 대부분 一定 水深의 港灣이었다. 그러나, 실제의 항만들은 港入口와 港內에 船舶의 航行水路가 존재하며 港外에서도 海岸선 부근의 淺水深에서 外海로 갈수록 상당히 깊은 수심으로 변화된다. 本 論文에서 사용한 複合要素 數值模型은 有限要素 解析 領域의 외부에서는 一定 水深의 假定下에 구한 Helmholtz 方程式의 해를 사용하므로 解析解 領域의 수심의 가정에 따라 全般의인 解의 변화가 예상된다. 해석해 영역의 수심은 鄭等(1995)의 경우 有限要素網의 境界와 거의 일치하는 港外 觀測定點에서의 水深을 사용하였으며, 鄭과 朴(1996)의 경우 完全開放 直四角形 模型港灣에

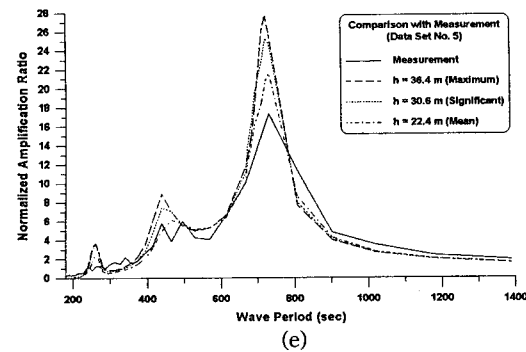
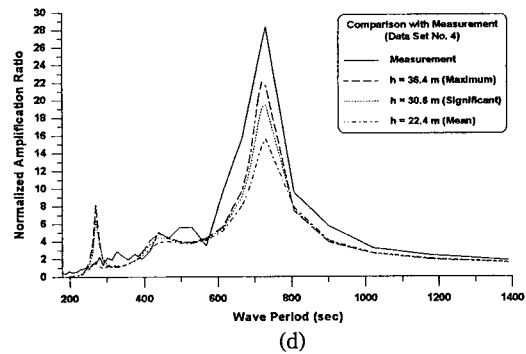
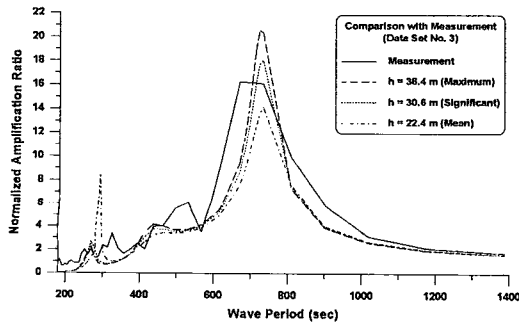
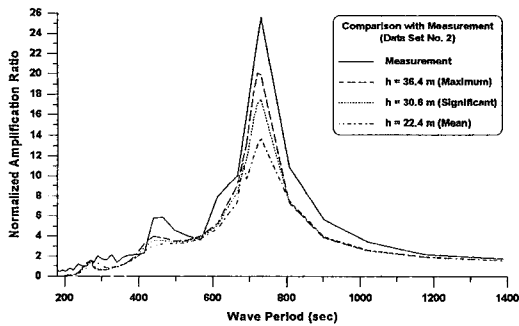
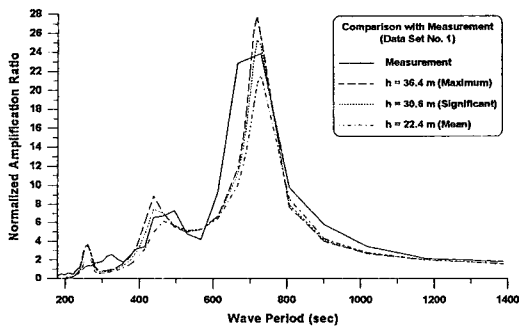


Fig. 7. Comparisons of relative amplification ratios(S_2/S_1) obtained by measurement and numerical calculations using three depth conditions (a) Data set no. 1; (b) Data set no. 2; (c) Data set no. 3; (d) Data set no. 4; (e) Data set no. 5.

대한 수치실험 결과에 근거하여 有限要素領域과 외부 해석해 영역의 원호경계면을 따른 平均水深의 사용을 추천하고 있다. 本 研究에서는 有限要素網의 半圓을 구성하는 節點에서의 수심을 이용하여 最大水深($h_{max}=36.4$ m), 平均水深($h_{mean}=22.4$ m) 및 有義平均水深(有義波高의 정의를 기준하여 설정한 水深: $h^1/3=30.6$ m)을 구하고 각각을 解析解 領域의 수심으로 사용하여 해석을 실시하였다.

解析은 5세트의 觀測資料 各各에 대하여 분석된 128 周波數 成分中 180~1,390초에 속하는 38개 성분 에 대하여 수행하였다. 入射波 振幅은 스펙트럼 분석 으로부터 구한 스펙트럼 밀도를 사용하여 결정하였으며(0.005~0.06 m의 범위) 入射波向은 短週期波 分析 結果에 의한 平均波向을 全體 成分에 동일하게 부여하였다. 한편, 스펙트럼이나 相對 增幅比의 분석으로 제시된 11.1분과 12.2분은 그 간격이 상당히 크므로 數值 計算時에는 680~720초 사이에 10초 간격의 5개 성분을 追加하여 총 43개의 주파수 성분 에 대하여 數值計

算을 실시하였다.

Figs. 7(a)~(e)에는 180~1,390초 사이의 43個成分에 대해 상기 3가지水深條件에 대해 계산된 計算定點 C6(觀測定點 S2)에서의 相對增幅比(C6의 증폭비/C1의 증폭비) 변화를 觀測資料分析結果와 함께 관측자료 1~5에 대하여 圖示하였다. 이를 살펴보면 第1共振의 경우 양자가 모두 720초 부근에서 尖頭値를 나타내며 400~500초의 공진 모드의 경우 增幅比에서 다소 차이가 나기는 하나 共振週期는 비교적 잘 재현하고 있다. 한편, 제1 공진의 增幅比 帶幅(공진이 발생하는 週期帶의 폭)은 관측치에 비해 계산치가 상당히 좁게 재현되었다. 또한, 수치계산 결과에서는 주기 260초 부근에서도 상당한 增幅比의 共振 모드가 발생하고 있는데 이는 入射波向과 固體境界面에서의 反射率이 실제보다 과대하게 設定된 점에 관계되는 것으로 생각된다.

解析解領域의水深變化的 영향을 살펴보면水深이 증가할수록 數值計算에 의한 第1共振週期에서의 增幅比는 비교적 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 現象은 鄭과 朴(1996)이 複合要素法의 適用에 관한 敏感度解析 研究에서도 언급한 바 있다. 또, 그들은 外部解析解領域의水深으로 圓弧境界面을 따른 平均水深을 사용할 것을 추천한 바 있다. 計算値와 觀測値의 增幅比를 비교해 보면 鄭과 朴(1996)이 추천한 平均水深을 사용한 경우의 增幅比는 전반적으로 작으며, 最大水深(36.4 m)을 사용한 경우가 관측치와 보다 잘 부합하고 있음을 알 수 있다. 鄭과 朴(1996)의 결과가 直角形 港灣을 대상으로 類推된 結果임을 감안해 볼 때, 보다 복잡한 구조를 갖는 實際 港灣의 경우(특히 港外의 形상)는 상당히 다를 것으로 예상되므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 本 研究에서는 墨湖港의 長週期波共振特性의 數值模擬(鄭等, 1995) 때와 같이 港外觀測定點의水深(34.1 m)을 解析解領域의水深으로 사용하였다.

3.2 入射波向의 影響

一般的으로 長週期波의 入射波向의 變化는 제1 공진 모드에 큰 영향을 끼치지 못한다는 것이 사실이다. 그러나, 竹邊港水域의 경우는 周邊海岸線地形과水深條件이 통상의 港灣과 많이 다르기 때문에 그 영향이 클 것으로 예상되며, 또, 實際 長週期波의 入射波向

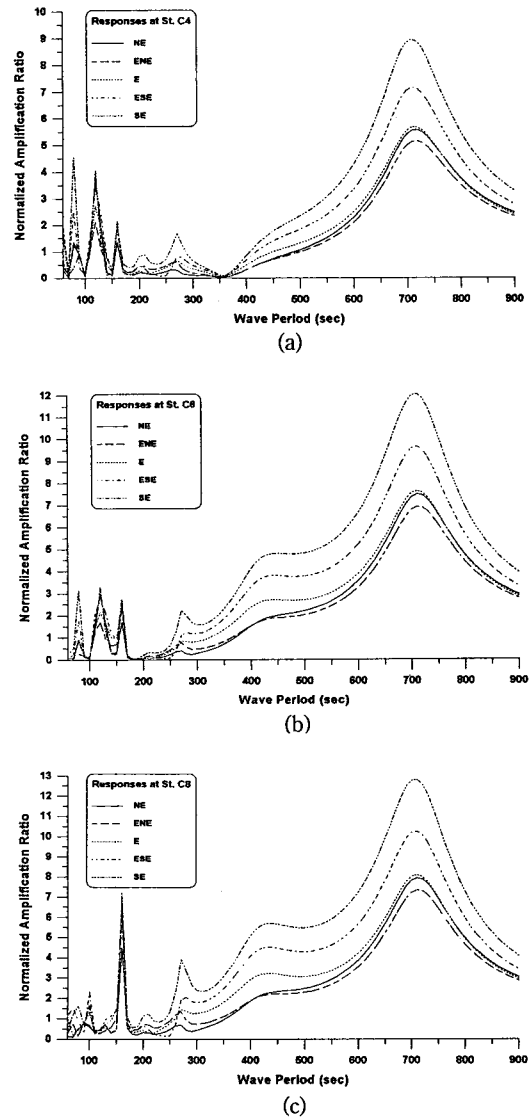


Fig. 8. Normalized amplification ratios for five incident wave directions in Chukpyon Harbor. (a) Station C4; (b) Station C6; (c) Station C8.

에 대한 정보가 없기 때문에 이의 영향에 대한 검토가 필요하였다. 따라서, 入射波向의 차이에 의한 영향을 살펴보기 위하여 NE, ENE, E, ESE 및 SE 등의 5가지 入射波向에 대해 數值計算을 실시하였다.

Fig. 8(a)~(c)에는 港入口의 중앙에 위치한 計算定點 C4, 觀測定點 S2에 해당되는 計算定點 C6 및 항의 가장 내측에 위치한 計算定點 C8에서의 입사파랑에 대한 增幅比를 도시하였다. 그림을 보면, 第1共振週期는 波向에 관계없이 거의 一定하나 增幅比는 波向에

따라 구조물에 의한 회절의 영향을 비교적 크게 받을 수 있다. 즉, 增幅比는 波向이 港의 入口 方向과 銳角을 이루는 경우(SE)에는 큰 값을 보이고 있으며, 鈍角을 이루는 경우(NE)에는 작은 값을 보이고 있다. 이러한 현상은 竹邊港 水域의 제2 및 局部的인 固有週期 부근에서도 비슷하게 나타났다.

以上的 結果로 볼 때, 入射波向은 固有振動 週期를 산정할 때는 큰 문제가 되지 않으나 增幅比를 결정하는 측면에서는 상당히 민감할 수도 있음을 알 수 있다. 長週期波의 入射方向에 대한 정보가 없는 현재의 상태에서는 觀測된 短週期波의 入射方向을 사용하는 것이 최선일 것으로 판단되어 이후의 검토에서는 이를 사용하였다.

3.3 固體 境界面에서의 反射率 影響

週期가 수 분을 넘는 長週期波의 경우 일종의 흐름에 가까우므로 構造物의 종류에 관계없이 1에 가까운 큰 反射率을 나타내게 된다. 예를 들면, Lepelletier (1980), Thompson 등(1993), 鄭 等(1995)은 주기 수 분 이상의 長週期波 模擬時 모두 0.95~0.99 사이의 反射率을 構造物의 特性을 고려하여 선택적으로 사용한 바 있다. 週期에 관계없이 0.95~0.99 사이의 一定한 反射率을 사용하여 數值解析을 수행하면 Fig. 9에 보인 바와 같이 상대적으로 짧은 週期條件(예를 들면, 3분 이하)에서 큰 增幅比를 나타내는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서, 보다 合理的인 解析結果를 얻기 위해서는 固體 境界面의 反射 特性을 적절히 결정해야만 할 것으로 판단된다.

本 研究에서는 주기 10초와 180초를 기준하여 그 사이에서 반사율이 線形的으로 變化하는 것으로 假定하여 解析을 수행하였다. 이 경우 주기 10초에서는 固體 境界面에서의 反射率을 直立 岸壁의 경우 0.9, 테트라포드로 피복된 防波堤의 경우 0.4, 沙濱으로 이루어진 海岸의 경우 0.2로 하였으며, 180초의 경우는 각각 0.99, 0.97, 0.95로 設定하였다. Data set no. 4에 대해 계산된 결과를 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. 원래 사용되던 反射率을 적용한 경우(그림중의 quasi-full reflection coefficient)를 살펴보면 1~3분 사이의 無次元 增幅比가 觀測值에 비해 매우 크게 나타났다. 그러나, 수정된 反射率을 사용한 경우(그림중의 modified reflection coefficient)에는 週期 100초 이하에서 計算值가 작게 나타난 점을 제외하면 觀測值와

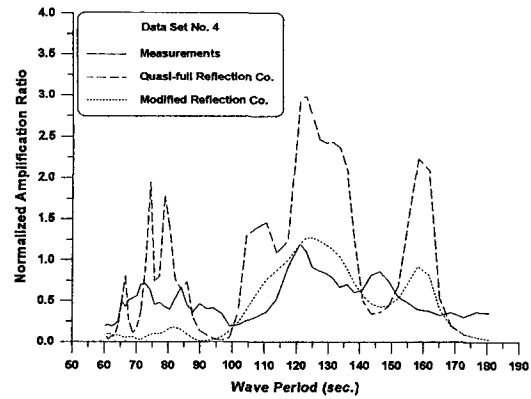


Fig. 9. Comparisons of normalized amplification ratios obtained by measurement and numerical calculations using two reflection coefficients.

비교하여 상당히 良好한 結果를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.4 數值模型에 의한 尖頭週期 分析

上記의 解析 結果를 根幹으로 解析條件을 設定한 후, 觀測結果의 分析에서 나타난 竹邊港 水域의 共振 모드를 재현하기 위하여 50초부터 900초까지 2초 간격으로 週期를 增加시키면서 數值計算을 實施하였다. 水深으로는 港外定點(S1)의 水深인 34.1 m, 入射波向으로는 Table 1에 제시된 短週期波의 平均波向들을 평균한 N 57.4° E, 入射波 振幅은 0.05 m를 사용하였다. 단, 固體 境界面에서의 反射率은 주기에 관계없이 0.95~0.99를 사용하였다. 數值計算 結果를 4개의 計算 定點, C1(港外 觀測定點인 S1에 해당), C4(港入口의 中央), C6(港內 觀測定點인 S2에 해당) 및 C8(港內 가장 깊숙한 지점)에서 入射波 週期 420~900초 및 60~420초에서의 入射波에 대한 增幅比로 Fig. 10(a)와 (b)에 각각 제시하였다. Fig. 10(a)를 살펴보면 港入口 및 港內에서 모두 週期 712초(약 11.9분)에서 尖頭值가 나타나서 觀測資料의 分析結果로 제시된 12.2분보다 약간 짧게 나타났다. 또한, 주기 712초에서 定點 C6(관측정점 S2)에서의 無次元 增幅比는 7 정도로 나타났다. Fig. 10(b)를 살펴보면 C4에서 356초(약 5.9분) 부근에서 增幅比가 0에 접근하는 마디가 형성되며 이는 觀測資料의 分析 結果인 5.3~5.9분과 거의 일치한다. 한편, 160초(약 2.7분), 120초(2.0분) 등에서 港入口 및 港內 計算定點에서 관측자료와 유사하게 共振이 출현하고 있다.

數值計算 結果에서 제시된 第1 共振週期 712초에

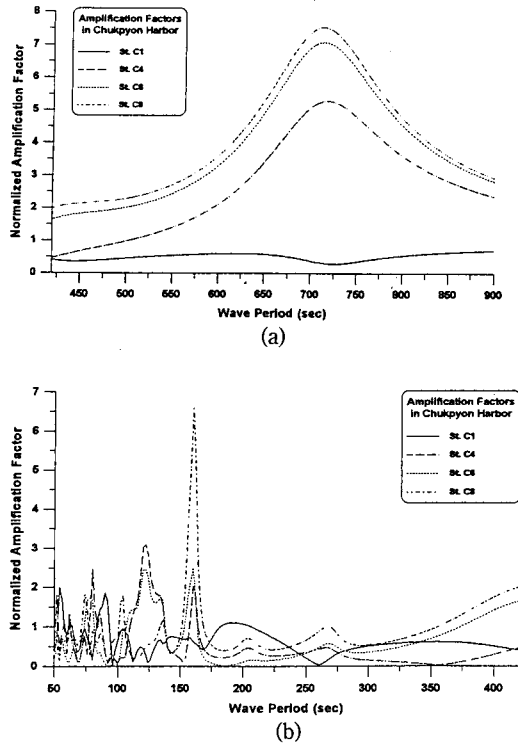


Fig. 10. Normalized amplification ratios at four stations around Chukpyon Harbor. (a) periods from 420 to 900 seconds; (b) periods from 50 to 420

대해 계산된 增幅比 等值線圖를 Fig. 11에 제시하였는데 이를 살펴보면 港外 入射境界보다 약간 내측에 마디(node)가, 그리고 港內 깊숙한 곳에서 腹(anti-node)이 생기는 것을 알 수 있다. 한편, 數值計算에서 第2 共振週기로 생각되는 356초에 대해서 계산된 增幅比 等值線圖를 Fig. 12에 도시하였는데 여기서는 港入口에서 마디가, 그리고 港內 깊숙한 곳에서 복이 발생하고 있으므로 이 週期를 竹邊港 水域의 第2 共振週기로 생각할 수 있다.

4. 結論 및 討議

竹邊港에서 2대의 水壓式 波高計를 사용하여 冬季의 악천후시에 약 일주일간 現場觀測을 실시하여 長週期 副振動의 특성을 파악하였다. 觀測資料 分析和 數值模型實驗 結果를 통하여 구해진 本論文의 主要 結論 및 討議 事項을 요약하면 다음과 같다.

- 冬季 暴風波時 관측된 竹邊港內에서의 海水位 變位 振幅은 약 10~20 cm로 나타났다.

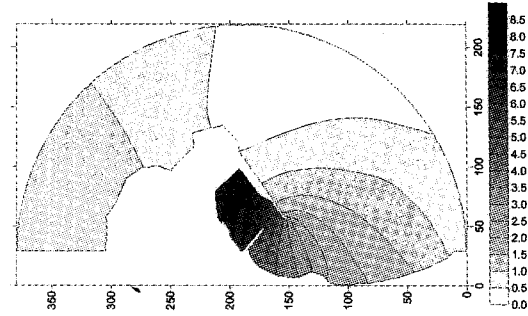


Fig. 11. Computed amplification ratios for wave period of 712 seconds in Chukpyon Harbor.

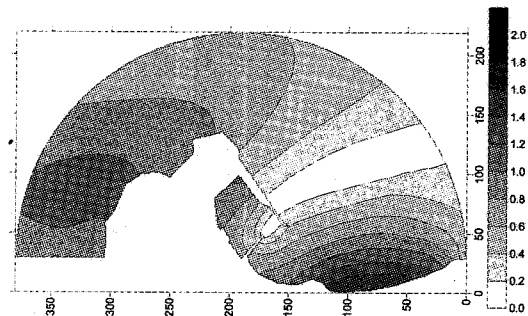


Fig. 12. Computed amplification ratios for wave period of 356 seconds in Chukpyon Harbor.

- 竹邊港 水域의 第1 共振週期는 약 12분 부근에, 제2 공진주기는 약 6분 부근에 존재한다.
- 數值實驗 結果 제1 공진 모드의 無次元 增幅比는 港內 定點 S2를 기준으로 할 때 약 7배 정도이며 港內 가장 안쪽에서는 약간 증가한다.
- 觀測時의 外部 波浪條件에 따라 港內 定點에서 2~3분 부근의 尖頭週期帶에서의 반응이 상당히 다르게 나타나고 있는데 이는 港外 入射波가 상당히 큰 경우 短週期波의 群波 效果 또는 이 성분이 長週期波에 重疊된 영향 때문인 것으로 사료된다.
- 短週期波와 長週期波에서 통상적으로 사용되는 反射率을 線形的으로 變化시킨 數值實驗을 통하여 3분 이하 副振動에서의 增幅比를 비교적 잘 再現하였다.

謝 辭

本論文은 科學技術處에서 시행한 特定研究開發事業인 “港灣靜穩度 유지대책 수립에 관한 연구(III)”와 “東海岸의 港灣埋沒 및 海岸變形에 관한 연구(II)”의

연구 결과의 일부이며, 現場觀測과 자료 정리에 수고 해주신 韓國海洋研究所 沿岸工學研究部の 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

建設部, 1987. 浦項新港 波浪調査 및 모델실험 용역 보고서, 제 2권 波浪調査 및 모델 실험편, 研究機關 韓國海洋研究所, 440 pp.

釜山直轄市, 1991. 數值模型(副振動 豫測)實驗 研究 用役, 研究機關 韓國海洋研究所, 469 pp.

鄭遠武, 朴佑善, 1996. 港灣 共振에 대한 複合要素 數值模型의 敏感度 分析, 韓國海岸·海洋工學會誌, 8(2).

鄭遠武, 鄭景太, 蔡璋源, 1993. 東海港의 副振動 特性(2. 數值計算), 大韓土木學會論文集, 13(3): 185-192.

鄭遠武, 鄭景太, 蔡璋源, 1995. 墨湖港의 港內 振動, 韓國海岸·海洋工學會誌, 7(1): 46-56.

韓國海洋研究所, 1993. 港灣靜穩度 유지대책 수립에 관한 연구(III), 科學技術處, BSPG 00192- 621-2, 361 pp.

海運港灣廳, 1994. 迎日灣 新港 開發 外廓施設 實施設計 用役 報告書, 제 2권 수치모형실험편, 研究機關 韓國海洋研究所, 551 pp.

Lepelletier, T.G., 1980. Tsunamis-harbor oscillations induced by nonlinear transient long waves, Report no. KH-R-41, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, California Inst. of Technology, Pasadena, CA.

Park, W.S., Chun, I.S. and Jeong, W.M., 1994. Infinite element for the analysis of harbor resonances, *J. of the Korean Soc. of Coastal and Ocean Engineers*, 6(2): pp. 139-149.

Thompson, E.F., Chen, H.S. and Hadley, L.L., 1993. Numerical modelling of waves in harbors, *Waves '93*, 590-601.