

墨湖港의 港內 振動 Resonant Oscillations in Mukho Harbor

鄭遠武* · 鄭景太* · 蔡璋源*

Weon Mu Jeong*, Kyung Tae Jung* and Jang Won Chae*

要 旨 : 墨湖港內 水面攪亂 現象을 分析하기 위하여 湄湖항의 港外, 港入口 및 港內의 3個 定點에서 2회에 걸쳐 약 10일간 水壓式 波高計를 이용하여 現場觀測을 實施하였다. 觀測資料의 스펙트럼 分析 結果 湄湖항의 Helmholtz period는 약 10.0~14.3분, 第2 共振週期는 약 3.3분이 되는 것으로 나타났다. 定點 S3에서 Helmholtz period에서의 平均 增幅比는 약 6.8, 觀測期間中의 港內에서의 海水位 變位 振幅은 약 5~10 cm로 나타났다. 이러한 墨湖港의 Helmholtz period 및 第2 尖頭週期는 數值模型(鄭等, 1993)으로 계산한 결과와 잘 一致하였다. 또한, 數值模型實驗을 통하여 墨湖港의 第1 및 第3 共振週期로 7.5분과 1.9분을 각각 제시하였다.

Abstract □ Three pressure type wave gauges were installed for about 10 days for the analysis of long wave agitations in Mukho Harbor. Helmholtz and second resonant periods of seiche in Mukho Harbor are shown to be approximately 10.0~14.3 and 3.3 minutes from the spectral analysis of measured wave data. Amplification ratio at Helmholtz period reaches about 6.8 and the wave amplitudes in the harbor were in the range of 5~10 cm during the measurement period. Helmholtz and second resonant periods of seiche in Mukho Harbor agree very well with those computed using Jeong *et al.* (1993b)'s model. The model gives rise to the first and third resonant peaks at 7.5 and 1.9 minutes, respectively.

1. 緒 論

港內靜穩度에 영향을 미치는 因子로는 短週期波, 長週期波, 바람 및 潮流 등을 들 수 있다. 그 중에서 週期가 수십초 이상인 長週期波가 주로 수천톤급 이상의 繫留된 大型船舶의 運動에 영향을 미치게 된다 (Wilson, 1967). 최근, 國內 港灣의 施設容量의 부족으로 인한 經濟的 損失이 크게 증가하여 既存港灣의 擴張 뿐만 아니라 新港灣의 건설이 계속 추진되고 있어 長週期 港內副振動의 발생 및 增幅比 등에 대한 연구가 요구되고 있다. 本 論文에서는 漁港과 產業港의 복합적인 기능을 가진 墨湖港을 연구 대상항만으로 既存資料와 現場觀測資料, 그리고 有限要素 數值模型을 이용하여 분석된 湄湖항의 副振動 特性을 파악하고자 한다.

墨湖港에서는 1966년 檢潮所가 설치된 이래 연속

적으로 水位觀測이 실시되고 있다. 秋(1987)에 의하면 副振動의 最大振幅에 主안점을 두고 潮位記錄의 검토를 통하여 1966년 9월 熱帶性 低氣壓 통과시 週期 13분, 振幅 69 cm의 副振動, 1985년 10월 颱風 Brenda 통과시 振幅 78 cm, 그리고 1987년 2월 발달한 溫帶性 低氣壓 통과시 진폭 95 cm의 부진동이 墨湖港에서 발생하였다. 韓國海洋研究所(1993)에서는 1993년 3월과 7월의 2회에 걸쳐 墨湖港의 港外, 港入口 및 港內의 3개 정점에서 동시관측한 결과로서 墨湖港의 제1 尖頭週期가 약 12.2분이며 이 외에 3.2~3.6분 사이의 副振動이 존재함을 제시하였다. 또한, 韓國海洋研究所(1994)에서는 1992년 7월 12일 북해도 지진으로 인한 쓰나미 내습후 墨湖港內에서 8월 5일부터 약 14일간 港內 水位變動을 관측하였으며, 同 資料의 分析 結果를 통하여 平常時 12분, 颱風時 13.4분의 副振動 週期를 제시하였다. 또한, 이 결과들을 살펴보면 颱

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

風時의 경우 4.7분, 3.4분, 1.7분, 또는 50~70초의 週期帶에서 부진동으로 생각할 수도 있는 에너지의 尖頭值가 나타났다.

檢潮所에서의 觀測資料를 이용하여 副振動 解析을 위한 資料를 구하려고 하는 경우에는 肉眼으로 일정한 時間 間隔으로 水位를 讀取해야 하므로 收集 時間 및 海水位에 誤差가 발생할 수 있다. 또한, 檢潮所는 通常 港內에서의 1개소만 운영되므로 副振動의 平面的인 分布를 파악하기에는 부적절하다. 한편, 建設部(1987)의 研究用役時 韓國海洋研究所에서 사용한 Aanderaa WLR-5는 30초 또는 1분 동안 平均한 海水位를 結果로서 제시하므로 1분 内外의 비교적 短週期 副振動 資料를 얻기에는 不適合하다고 할 수 있다. 따라서, 本 研究에서는 精密度가 Aanderaa WLR-5의 sensor와 類似한 Paro scientific sensor를 이용하여 任意의 間隔으로 자료 수집이 가능하도록 改良된 水壓式 波高計 ISTG(Intelligent Seiche and Tide Gauge) 3대를 사용하여 現場觀測을 實施하였다.

港灣副振動의 理論的 解析은 Miles와 Munk(1961)가 放射波(radiation wave)의 概念을 최초로 導入, Green 函數를 이용하여 等水深 港灣에서의 副振動을 解析한 이래 많은 연구자들에 의해 계속적으로 理論的 擴張이 이루어져 왔다. 國內外的 理論的 研究에 대해서는 鄭(1992), 韓國海洋研究所(1992), 李(1993) 등에 정리되어 있으므로 자세한 내용은 이들을 참조하기 바라며, 여기서는 墨湖港에 대한 既存의 數值的 研究에 국한하여 정리하였다.

먼저, 姜과 李(1987)는 Lee(1969)의 境界要素法을 이용한 數值模型으로 20~300초의 入射波에 대해 墨湖港의 副振動을 시험적으로 계산하고 3.5분의 尖頭 週期를 제시하였다. 그러나, 이들은 주기를 300초로 제한하여 이보다 週期가 긴 墨湖港의 제1 尖頭週期는 제시하지 못하였다. 李(1992)는 Lee(1969)의 모형을 개선하여 7~600초 주기의 入射波(入射波向은 S30° E와 N60°E의 2 경우로 假定)에 대해 數值計算을 實施하고 170초(약 2.8분), 80초(약 1.3분) 및 11초를 副振動 共振週期로서 제시하였다. 이 경우에도 역시 入射波 週期를 最大 600초로 제한하여 제1 尖頭週期를 再現하지 못하였다. 한편, 李(1992)가 假定한 것처럼 港內水深을 10m로 하고 週期 11초인 波의 波長을 계산하면 약 103m가 되며, 이는 縱方向 길이가 약 1km인 墨湖港의 규모를 생각할 때 대략 10개의

波가 연속된 상태에서 副振動 現象이 일어나는 것이 된다. 또한, 墨湖港의 橫方向 길이는 대략 400m 내외이므로 대략 4개의 波가 연속되게 되며, 이는 일반적으로 제시되고 있는 港灣副振動의 제2 固有週期인 3/4 波長보다도 훨씬 짧은 파가 공진을 일으키는 것이 된다. 韓國海洋研究所(1993)에서는 複合要素法을 이용한 數值模型으로 55~1,000초의 入射波에 대해 墨湖港의 副振動 特性을 조사하였다. 그 결과, 墨湖港의 제1 尖頭週期로서 약 12.6분, 제2 尖頭週期로서 3.3분, 그리고 局部的인 週期로서 약 1.9분을 제시한 바 있다. 이는 前述한 韓國海洋研究所(1993)의 分析 結果인 약 12.2분 및 3.2~3.6분과 상당히 잘 일치하였다. 한편, 韓國海洋研究所(1994)에서는 李(1992)가 사용한 數值模型을 利用(港內 平均水深은 8m로 假定)하여 600~1,000초의 주기(波向 N67°E)에 대해 數值 計算을 실시하고 670초(약 11.2분) 또는 710초(약 11.8분)의 제1 尖頭週期를 제시하였다.

本 論文에서는 韓國海洋研究所(1993)의 精密 現場 觀測資料(5초 간격의 資料)를 30초 동안 平均하고 數值 필터로 10차의 Butterworth high pass filter를 사용하여 再處理하였다. 사용한 數值模型은 鄭 等(1993b)에서 개발된 것과 同一하며 固體 境界面에서 部分吸收 境界條件을 사용하고 放射條件의 처리시 解析解를 이용한다. 數值模型의 적용으로 觀測資料의 分析에서 나타나지 않았던 墨湖港의 제1 共振週期를 발견하였으며 一部の 관측자료에서 나타난 제3 共振週기도 再現하였다.

2. 現場觀測 및 資料 分析

2.1 現場觀測 및 資料 編輯

墨湖港內 副振動 現象의 時間的 및 空間的인 特性을 파악하고 副振動 數值模型의 檢證(verification) 資料를 수집하기 위하여 港內外 3개 定點에서 現場觀測을 수행하였다. 觀測定點의 位置로는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 數值模型의 外海境界에 해당되는 港外에 1개 定點(S1), 港入口에 1개 定點(S2), 그리고 港의 內側에 1개 定點(S3)을 선정하였다. 現場觀測은 各 定點의 海底에 설치된 Paro scientific sensor를 사용한 水壓式 波高計 ISTG에 의해 동계의 경우 1993년 3월 18일부터 21일까지, 그리고 하계의 경우 7월 7일부터 7월 12일까지 2회에 걸쳐(資料 蒐集間隔: 5초) 實施

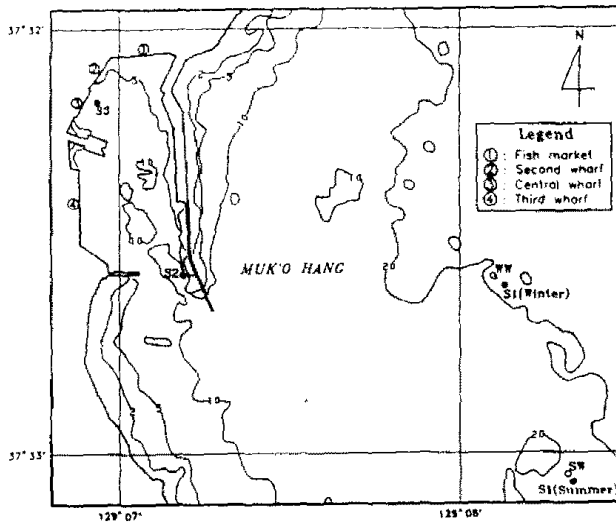


Fig. 1. Location map of seiche measurements around Mukho Harbor.

되었다. 모든 資料는 流失없이 回收되었으며 상태 또한 양호하였다. 各 觀測點에서 5초마다 취득된 자료들은 器機에 내장된 512 KB 용량의 data logger에 저장되고 器機의 回收後 RS232C port를 통하여 personal computer에 移動, 保管되었다. 한편, 港外 定點 S1 부근의 定點 WW 및 SW에 네덜란드 Datawell사의 波高·波向計(directional waverider buoy)를 設置하여 副振動 觀測과 동일한 기간동안 短週期波 觀測을 實施하였다.

Personal computer에 貯藏된 資料들로부터 일련의 換算 프로그램을 이용하여 5초 간격의 海水位 資料(sea level data)를 算出하였으며, 이들을 6개씩 算術 平均하여 30초 간격의 자료로 재편집(resampling)하였다. 定點 S1~S3에서 수집된 이 자료들의 一部(7월 7일 15시부터 30초 간격의 자료 4,096개)를 同一한 時間帶의 時系列 資料로써 Fig. 2에 각각 제시하였다. 이 경우 短週期波의 波高가 작아서 港外 定點 S1에서도 주기 20분 정도의 長週期波의 振動 現象을 인식할 수 있으며 港內로 들어올수록 副振動 現象이 뚜렷하게 나타나고 있다. 觀測資料를 살펴본 결과 觀測期間中 港內 定點 S3에서의 海水位 變位 振幅은 대체로 5~10 cm 정도였으며 最大 振幅은 15 cm 정도였다. 한편, Fig. 2에 제시된 定點 S1~S3의 時系列 曲線을 살펴보면 거의 同位相임을 알 수 있다. 韓國 海洋研究所(1993)에서는 bandpass filter의 一種을 사용하였으나 本 論文에서는 5초 간격의 자료 6개씩을

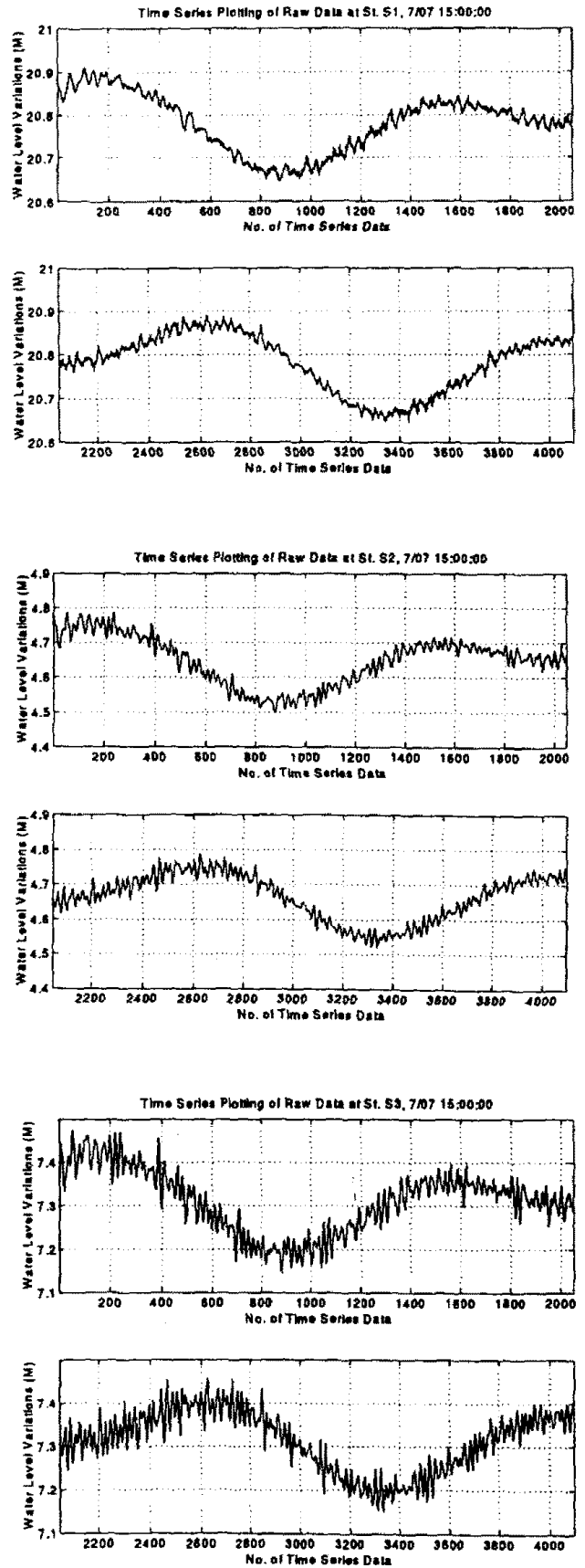


Fig. 2. Time series of raw sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (Jul. 7, 15:00, 1993~Jul. 9, 01:08, 1993).

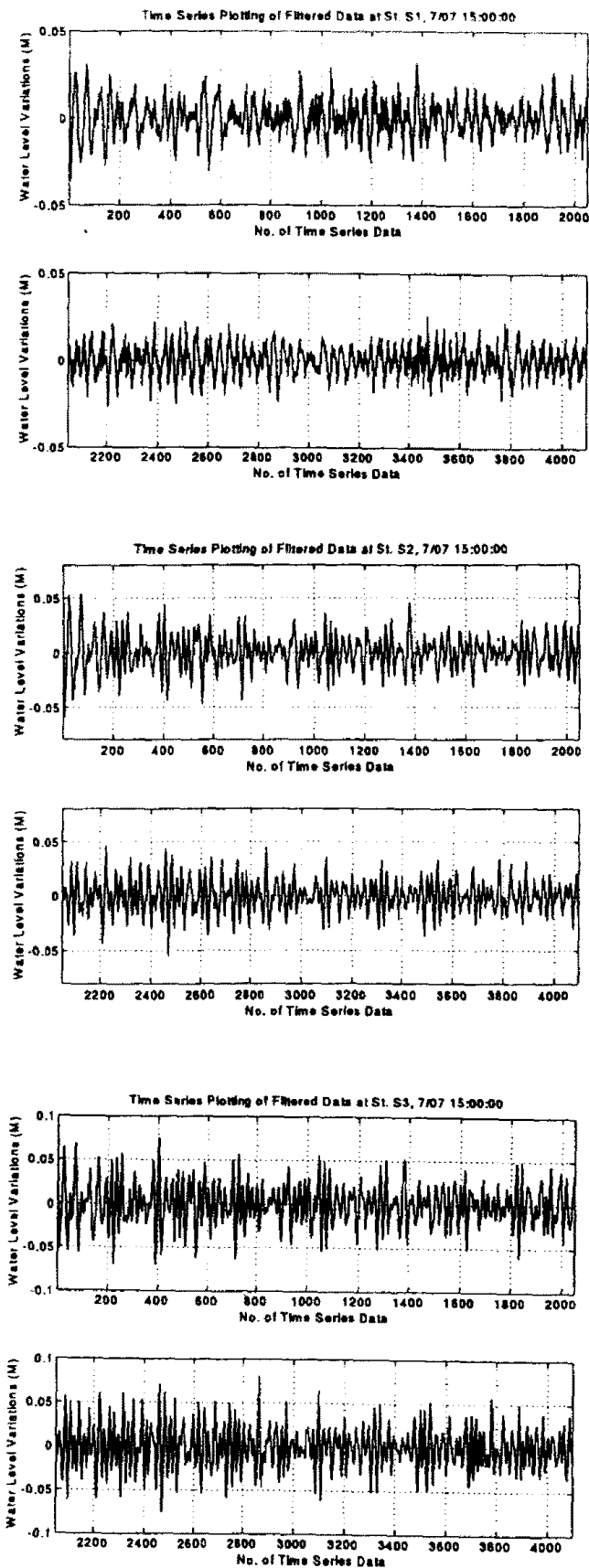


Fig. 3. Time series of filtered sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (Jul. 7, 15:00, 1993~Jul. 9, 01:08, 1993).

평균하여 high frequency의 에너지를 1차 제거한 후 high pass filter를 사용하였다. 즉, 觀測海域에서의 副振動 모드 및 에너지 分布 算定을 위한 스펙트럼 분석을 위하여 기울기를 제거한 資料(detrended data)에 切斷週期(cut-off period)를 20분으로 설정한 10차의 Butterworth high pass filter를 적용시켰다. Fig. 3에는 high pass filter를 통과시킨 時系列 資料를 圖示하였는데 trend와 低周波數帶의 에너지가 제거되었음을 알 수 있다.

2.2 스펙트럼 分析 結果

前述한 方法으로 觀測定點別로 30초 간격 4,096개 (약 34.1시간)의 時系列 資料를 만든 후 FFT(Fast Fourier Transform) 技法을 이용하여 에너지 스펙트럼을 算出하였다. 現場觀測을 통해 얻어진 全體資料數는 3개 定點別로 4,096개를 1 set로 할 때 모두 5 sets였으며, 各 set의 스펙트럼 分析 結果에서 제시된 peak period를 Table 1에 정리하였다. Table 1에 따르면 5 sets중 港内 定點인 S3에서는 약 10.0~14.3분에서 제1 尖頭週期가 제시되어 묵호항의 第1 尖頭週期는 이 사이에 존재할 것으로 판단되었다. 또한, 外海波高가 비교적 높았던 3월의 副振動 週期가 잔잔했던 7월보다 2~3분 정도 긴 것으로 판단된다. 그리고, 墨湖港의 第2 尖頭週期는 set 1과 2에서 出現한 약 4.6분 또는 3.3~3.6분이 될 것으로 예상되었으나 보다 정확한 것은 數值模型實驗 結果와의 비교를 통하여 판단해야 할 것이다. 또한, 局部的인 小規模 振動의 尖頭週期 역시 區分이 명확하지 않으므로 數值模型實驗 結果를 이용해야 할 것으로 판단되었다.

Figs. 4~8에는 定點 S1~S3에서 觀測된 資料의 스펙트럼 分析 結果(Table 1의 data set no. 1~5에 각각 해당됨)를 제시하였다. 먼저, Fig. 4에 제시된 power density를 살펴보면 定點 S1의 경우 25.0분에서 peak가 나타나고 있으나 高周波數帶에 비해 에너지가 매우 작다. 港入口인 定點 S2의 경우 5~6개소에서, 港内에 위치한 定點 S3의 경우 4개소 정도에서 비교적 분명한 peak가 出現한다. Fig 5에서는 定點 S1에서의 25.0분 주기의 peak가 高周波數帶보다 커지고 있으며 定點 S3에서는 14.3분 주기의 제1 尖頭週期외에 3개소에서 peak가 出現하나 그 에너지 수준은 상대적으로 매우 작다. 夏季에 觀측된 data set no. 3~5는 모두 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, Figs. 6~7을

Table 1. Resonant peak periods at S1, S2 and S3 obtained from the analysis of five data sets

Data set no.	Starting time of measurement period in 1993	Resonant periods of seiche at each station (min.)			Characteristics of measured short-period waves		
		S1	S2	S3	$\bar{H}_{1/3}$ (m)	$\bar{T}_{1/3}$ (sec)	Averaged-mean wave direction
1	03/18 15:10	N/A*	16.7, 4.6, 3.6, 2.1, 1.3, 1.1	12.5, 4.6, 3.5, 1.5~1.9	1.67	9.0	N55°E
2	03/20 01:18	25.0	14.3	14.3, 4.6, 3.3 ~3.6, 1.5~1.8	0.77	8.0	N56°E
3	07/07 15:00	20.0	16.7, 10.0	10.0	0.35	4.0	N83°E
4	07/09 01:08	20.0	11.1	11.1	0.43	4.4	N19°E
5	07/10 11:16	16.7	11.1	16.7, 11.1	0.37	5.2	N54°E

*N/A: Not Available(뚜렷한 尖頭週期를 구하기 어려운 경우를 나타냄).

*밑줄로 표시된 숫자는 에너지 密度가 最大인 週期를 나타냄.

* $\bar{H}_{1/3}$ 과 $\bar{T}_{1/3}$ 에 표시된 bar는 副振動 data set의 길이에 해당되는 약 34시간 동안 港外側의 短週期波 分析 結果들을 산술 평균한 것을 나타냄.

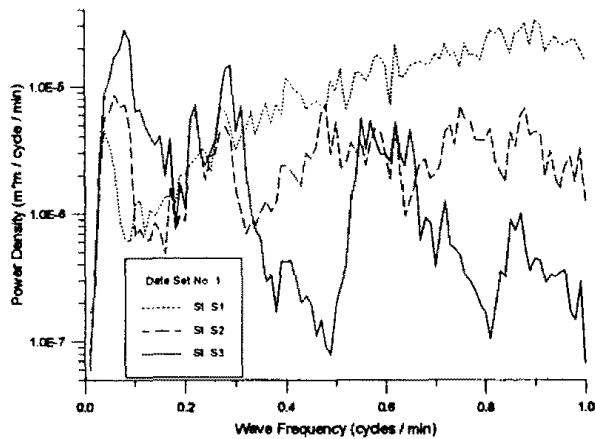


Fig. 4. Spectral densities of sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (data set no. 1).

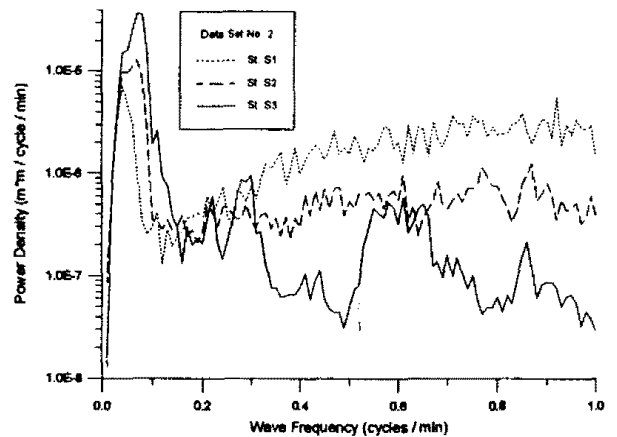


Fig. 5. Spectral densities of sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (data set no. 2).

살펴보면 10.0분 또는 11.분에서 제1 尖頭週期가 나타나며 이 외에는 뚜렷한 peak가 출현하지 않는다. 제1 尖頭週期 부근의 에너지 密度를 살펴보면 정점 S1에서 상대적으로 매우 낮았던 에너지 밀도가 定點 S2를 지나 정점 S3에서 크게 增幅되어 이 週期가 墨湖港의 제1 尖頭週期임을 확실하게 알 수 있다.

冬季와 夏季의 power density 및 Table 1에 제시된 短週期波 特性을 종합적으로 살펴보면 港外의 波가 클 때와 작을 때 港內에서 출현하는 尖頭週期가 달라짐을 알 수 있다. 즉, 港外入射波가 큰 時期(Fig. 4와 5 참조)에는 短週期波의 grouping effect(약 1~3분 주기의 파) 또는 이 成分이 長週期波에 重疊된 影響 등으로 비교적 短週期의 energy peak가 港內에서

나타나는 것으로 생각되나 港內 定點에서의 energy level은 0.6 cycle/min 周波數帶를 제외하고는 港外나 港入口 定點에 비해 상대적으로 낮다. 즉, 港灣의 形態나 水深에 따라 일정한 周波數帶의 에너지 遮斷率이 인접한 周波數帶의 그것보다 상대적으로 작아서 peak의 형태로 나타나는 것으로 생각되며 여기에 대해서는 此後 持續的인 研究가 要求된다.

2.3 短週期波 分析 結果

韓國海洋研究所(1993)에서는 港外 定點 S1 부근에 波向波高計를 설치하여 매 시간마다 26.7분동안 短週期波를 관측하였으므로 副振動 資料의 1 set에 해당되는 동안의 短週期波 特性을 조사하였다. 副振動

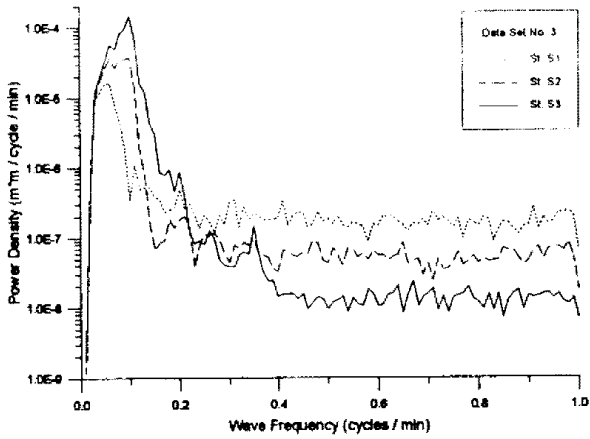


Fig. 6. Spectral densities of sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (data set no. 3).

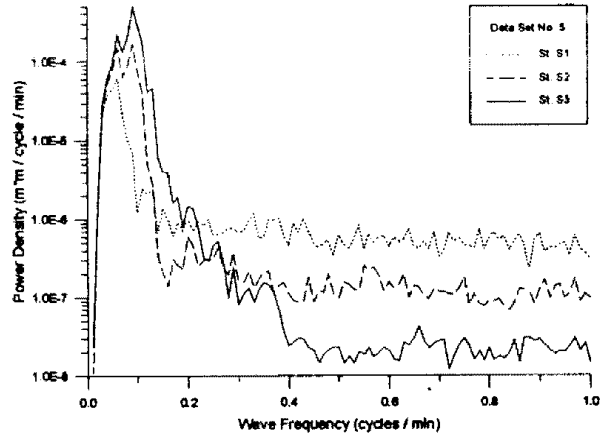


Fig. 8. Spectral densities of sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (data set no. 5).

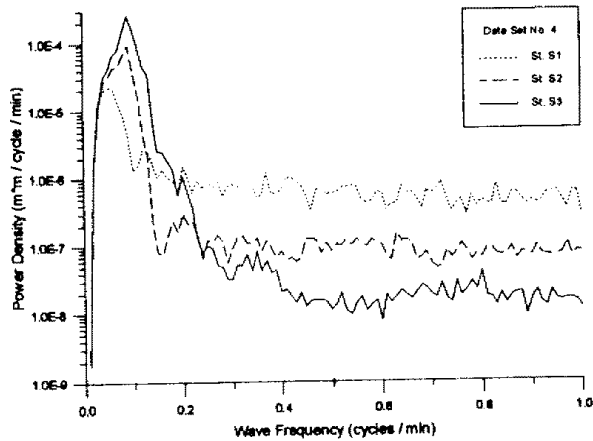


Fig. 7. Spectral densities of sea level data (S1~S3) measured in Mukho Harbor (data set no. 4).

data set의 길이는 약 34시간이므로 이 기간 동안에 短週期波는 波高, 週期 및 波向이 상당히 변화하게 된다. Table 1에는 약 34시간 동안의 短週期波 分析 結果들을 산술 평균한 것을 나타내었으나 동 기간 동안의 短週期波 特性(波高, 週期 및 平均波向)의 변화를 살펴보는 것도 現象의 이해에 도움이 될 것으로 생각되어 以下에 그 내용을 간략히 기술하였다.

各 data set의 有義波高, 有義波週期 및 平均波向의 산술 평균은 Table 1에 제시되었다. 먼저, data set no. 1에 해당되는 기간동안에는 有義波高가 2.3m에서 1.0m로 서서히 減少하였고, 有義波週期는 9.5~10.0 초에서 7.6~8.2초로 감소하였으며, 平均波向은 대체로 N50°E~N60°E 사이에 분포하였다. No. 2에 해당되는 기간동안에는 有義波高가 1.0m에서 0.4m로 서서히 감소하였고, 有義波週期는 7.5초에서 9.0초로

길어졌다가 다시 7.5초로 감소하였으며, 平均波向은 no. 1과 유사하게 대체로 N50°E~N60°E 사이에 분포하였다. No. 3에 해당되는 기간동안에는 有義波高가 0.3~0.4m 사이에 분포하였고, 有義波週期는 3.2~4.6 초 사이에서 增減하면서 변화하였으며, 平均波向은 S 80°E 전후를 나타내다가 3월 8일 밤에는 NNE 系列도 출현하였다. No. 4에 해당되는 기간동안에는 有義波高가 初期의 0.5~0.6m에서 0.4m로 감소하였고, 有義波週期는 4.0~4.8초에서 대체로 분포하였으며, 平均波向은 대체로 N15°E~N35°E 사이에 분포하였다. 마지막으로, no. 5에 해당되는 기간동안에는 有義波高가 0.4m 전후였고, 有義波週期는 4.7~5.4초 사이에 분포하였으며, 平均波向은 대체로 N50°E~N65°E 사이에 분포하였다.

2.4 尖頭週期 分析

墨湖港의 副振動 現場觀測 結果에서 제시된 제1 尖頭週期를 理論式에 의한 推定値와 比較하였다. 한 쪽이 開放되고 다른 쪽이 閉鎖된 等水深의 直四角形 港灣에 대해 사용되는 Merian 公式은 다음과 같다 (Murty, 1984).

$$T_n = \frac{4L}{(2n-1)\sqrt{gh}} \quad (1)$$

여기서, T_n 은 제 n 번째 固有週期, L 은 港의 길이, g 는 重力加速度, h 는 水深을 各各 나타낸다. $L=950\text{m}$ (港 入口에서 港의 가장 内側까지의 길이), $g=9.8 \text{ m/sec}^2$, $h=8.5\text{m}$ 를 이용하여 북호항의 第1 固有週期를 간략

하세 計算하면 약 6.9분이 된다. 추(1987)는

$$\varepsilon = \frac{b}{\pi L} \left(\frac{3}{2} \gamma \ln \frac{\pi b}{4L} \right) \quad (2)$$

의 灣口 補正(mouth correction)을 사용한 式

$$T = T(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

으로부터 제1 固有週기로 약 8.5분을 제시한 바 있다. 式 (2)에서 γ 는 Euler 常數(=0.577125), b 는 港入口의 幅을 각각 나타낸다. 이 結果들은 觀測資料의 分析 結果에서 제시된 墨湖港의 第1 尖頭週期인 10.0~14.3 분과는 상당한 差異를 나타낸다. 單純한 形象의 港灣에서는 Merian 公式에 의해 구한 共振週期가 觀測值와 비교적 잘 일치한다는 점을 감안하면 觀測 結果인 10.0~14.3분 사이의 共振週期는 墨湖港의 제1 固有週期가 아닌 다른 尖頭週期일 가능성이 크다.

한편, 정 등(1993a)은 Freeman 등(1974)이 제시한 Helmholtz resonator에서의 固有周波數에 대한 다음 式

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{gA_c}{A_h l}} \quad (4)$$

를 東海港에 적용한 바 있다. 上記 式에서 ω_0 는 natural frequency(rad/sec), A_h 는 港의 面積, A_c 는 水路의 斷面積, l 은 水路의 길이를 각각 나타낸다. 墨湖港의 경우 $A_h = 363,000 \text{ m}^2$, $A_c = 1,500 \text{ m}^2$ (平均幅 150m, 平均水深 10m), $l = 470\text{m}$ 가 되므로 이들을 사용하여 Helmholtz mode의 frequency를 구해보면 $\omega_0 = 0.00928(\text{rad/sec})$ 가 된다. 이 주파수를 尖頭週기로 바꾸면 약 11.3분이 되므로 Merian 公式으로 구한 6.9분 또는 8.5분보다 觀測結果로서 제시된 10.0~14.3분에

훨씬 接近한다.

2.5 增幅比 算定

스펙트럼 分析에 의해 제시된 第1 尖頭週期 10.0, 11.1, 12.5 및 14.3분에 대해 港外 定點 S1에 대한 나머지 2個 定點(S2 및 S3)에서의 增幅比를 다음 式을 이용하여 구하였다.

$$R_{i1} = \sqrt{\frac{S(f_p)_i}{S(f_p)_1}}, \quad (i=2, 3) \quad (5)$$

여기서, S 는 스펙트럼 密度, f_p 는 peak frequency, 아랫첨자 i 는 定點(S2와 S3)의 번호를 나타낸다. f_p 를 중심으로 3개의 스펙트럼 密度를 平均한 후 上記 式을 이용하여 구한 data set別 增幅比는 Table 2에 제시되었다. Table 2에 제시된 無次元화된 增幅比는 港內定點 S3에서의 에너지가 최대인 週期들과 數值模型에서 제시된 Helmholtz period와 일치된 750초(12.5분)에서의 增幅比의 2가지로 제시되었다. 이들을 살펴보면 定點 S3에서의 에너지가 最大인 週期를 기준한 경우 無次元화된 增幅比가 港入口 부근에서 2.6~5.2, 그리고 中央埠頭 前面에서 4.6~9.8로 상당히 컸으며 變化幅도 상당히 크게 나타났다. 주기를 12.5분으로 고정시킨 경우에는 港入口 부근에서 2.7~3.8, 中央埠頭 前面에서 4.1~7.1로 增幅比의 크기와 變化幅이 모두 에너지가 最大인 週期の 경우보다는 상당히 작게 나타났다. 결국 短期間의 觀測 結果로부터 算出된 增幅比는 시기별로 상당한 차이를 보일 수 있음을 확인하였다. 또한, 표를 살펴보면 에너지가 最大인 週期에서는 外海入射波가 컸던 시기보다는 작았던 시기에 港內에서의 增幅比가 상대적으로 크게 나타났으나 12.5분으로 고정시킨 경우에는 이와는

Table 2. Normalized amplification ratios at stations S2 and S3

Data Set No.	Normalized amplification ratio					
	Peak period measured at S3 (min.)	S2/S1	S3/S1	Helmholz period (min.)	S2/S1	S3/S1
1	12.5	3.0	5.8	12.5	3.0	5.8
2	14.3	2.6	4.6	12.5	3.8	7.1
3	10.0	5.2	9.8	12.5	2.7	4.1
4	11.1	3.8	6.4	12.5	2.8	4.3
5	11.1	4.3	7.4	12.5	2.9	4.7
Average		3.8	6.8		3.0	5.2

反對되는 現象이 나타났다.

3. 數值計算 및 結果 分析

3.1 現場觀測資料와의 比較를 통한 尖頭週期 分析

韓國海洋研究所(1993, 1994)에 제시된 觀測資料 分析 結果와 本 論文의 結果를 종합하면 墨湖港의 제1 尖頭週期는 10.0~14.3분 사이에 존재할 것으로 생각 된다. 現場觀測資料의 경우 季節 또는 港外의 波浪 狀態에 따라 제1 尖頭週期에 2~3분의 차이가 있는 것으로 나타나서 어떤 週期를 대표값으로 제시하기 곤란하여 數值模型의 利用이 요망되었다. 本 論文에서 사용한 複合要素 數值模型은 여러 研究를 통하여 有效性이 입증(韓國海洋研究所, 1992; 정 등, 1993b; 韓國海洋研究所, 1993)된 바 있으며 固體 境界面에서의 部分反射를 고려할 수 있다. 反射率의 變化에 따른 本 數值模型의 反應은 先술한 研究에 제시되어 있으며, 本 논문에서는 이들에 근거하여 固體 境界面에서의 反射率로 直立 岸壁의 경우 0.99, 테트라포드로 피복된 防波堤의 경우 0.98, 그리고 自然 海岸의 경우 0.95를 사용하였다. Fig. 9에는 本 研究에서 사용한 有限要素網圖를 도시하였는데 이는 4,905개의 線形 三角形 要素와 2,592개의 節點으로 구성되었다. 이 그림에 표시된 定點 C1~C2는 觀測定點인 S1~S2와 동일하며 定點 C3~C8은 이(1992)에 제시되었던 計算 地點 1~6과 거의 일치한다. 한편, 이 그림의 定點 C5는 觀測定點의 S3와 일치한다.

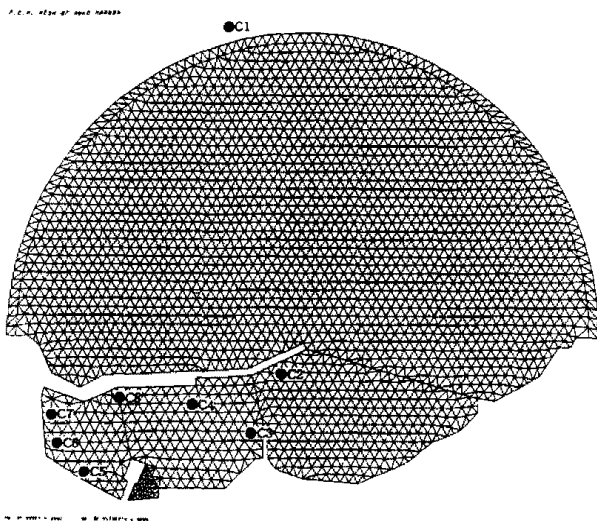


Fig. 9. Finite element mesh for Mukho Harbor.

數值模型에 의한 計算은 먼저, 觀測結果의 分析에서 나타난 북호항의 尖頭週期를 찾기 위하여 일정한 간격으로 週期를 增加시키면서 實施하였다. Fig. 10은 入射波向을 N55°E로 하고 入射波 週期를 60~1,200초(10초 간격)로 한 경우의 數值計算 結果를 無次元化된 增幅比로 나타낸 것이다. Fig. 10을 살펴보면 港入口 및 港内에서 모두 週期 750초(12.5분)에서 尖頭值가 나타나서 觀測資料의 分析結果로 제시된 10.0~14.3분의 거의 中央에 위치하였으며, 이 외에도 200초와 120초 부근에서 尖頭值가 나타났다. 上記 尖頭週期들을 보다 세밀하게 파악하기 위하여 이들을 중심으로 2초 간격으로 數值計算을 다시 실시하여 주기 750초(12.5분), 198초(3.3분) 및 116초(1.9분)를 제시하고 이들에 대한 數值計算 結果를 Figs. 11~13에 等增幅比로 제시하였다. 한편, Fig. 10에서 定點 C2

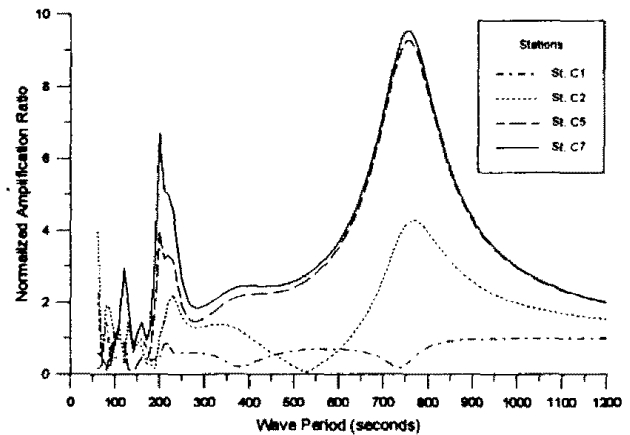


Fig. 10. Computed response curves for wave periods from 60 to 1,200 seconds in Mukho Harbor.

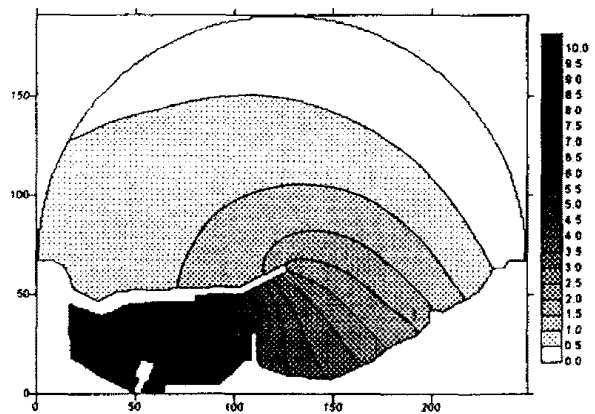


Fig. 11. Computed amplification ratios for wave period of 750 seconds in Mukho Harbor.

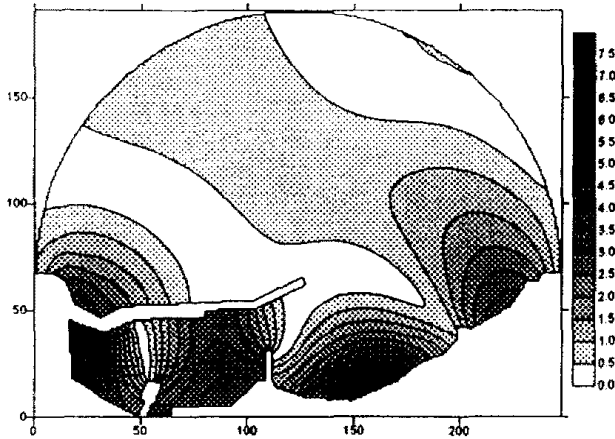


Fig. 12. Computed amplification ratios for wave period of 198 seconds in Mukho Harbor.

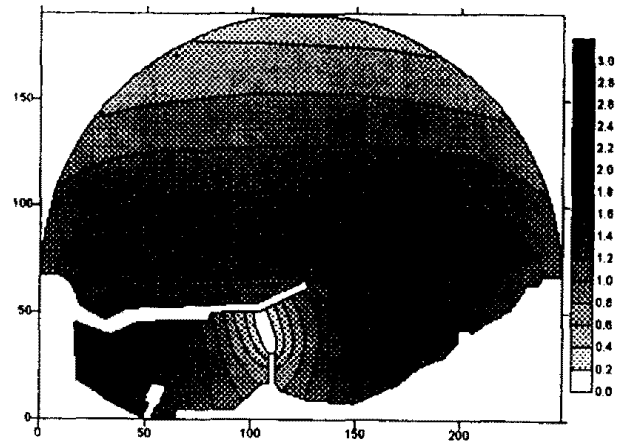


Fig. 14. Computed amplification ratios for wave period of 450 seconds in Mukho Harbor.

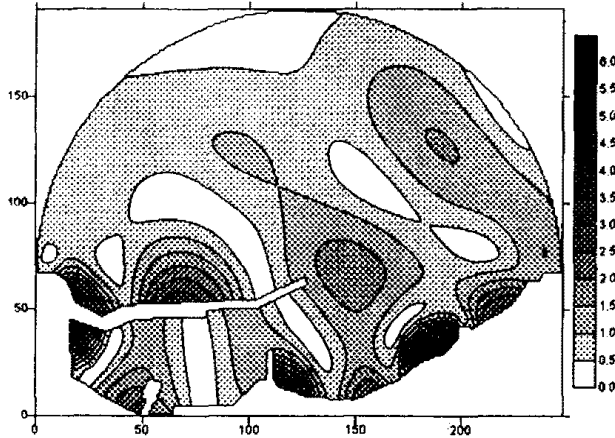


Fig. 13. Computed amplification ratios for wave period of 116 seconds in Mukho Harbor.

에서의 增幅比 曲線을 살펴보면 525초 부근에서 增幅比가 거의 0에 접근하는 마디가 위치함을 알 수 있다. 즉, 港入口에서 마디가 생기는 尖頭週期를 찾기 위하여 港入口 中央部에 定點을 설정하고 주기 420~540초의 波에 대해 數值計算을 실시하였으며 그 결과 450초 부근에서 墨湖港의 제1 共振週期가 존재함을 확인하였다. Fig. 14에는 墨湖港의 제1 共振週期인 450초(7.5분)에 대한 結果를 等增幅比로 제시하였다.

먼저, 마디가 港入口에서 상당히 外海쪽에 위치하는 Helmholtz period인 12.5분의 共振에 대한 Fig. 11을 살펴보면 入射境界 附近에서 마디(node)가, 그리고 港內 가장 안쪽에서 북(anti-node)이 나타나서 觀測된 尖頭週期和 마찬가지로 Merian 公式으로 구한 尖頭週期보다는 Helmholtz resonator 理論으로 구한 尖頭週期에 접근한다. 尖頭週期 7.5분에 대한 Fig. 14의

경우 마디가 港入口의 中央部에서 생기고 있는데 이는 港入口에서 1/4 波長이 걸쳐지는 것으로 볼 수 있으므로 이 週期가 墨湖港의 第1 固有週期인 것으로 생각된다. 尖頭週期 3.3분에 대한 Fig. 12의 경우 마디가 港入口의 中央部보다 약간 外측과 港의 中央部보다 약간 내측의 2개소에서 생기고 있는데 이는 港入口에서 거의 3/4 波長이 걸쳐지는 것으로 볼 수 있으므로 이 週期가 墨湖港의 第2 固有週期인 것으로 생각된다. 週期 1.9분에 대한 Fig. 13의 경우 마디가 港入口의 中央部보다 外측, 港의 中央部, 그리고 항의 내측의 3개소에서 생기고 있는데 이는 港入口에서 거의 5/4 波長이 걸쳐지는 것으로 볼 수 있으므로 이 週期가 墨湖港의 第3 固有週期인 것으로 생각된다.

3.2 入射波向의 變化에 따른 共振週期 및 增幅比 變化 分析

長週期波의 入射波向에 따른 共振週期和 增幅比의 變化를 살펴보기 위하여 NNE, NE, ENE, E, ESE, SE 및 SSE의 7가지 入射波向에 대해 數值計算을 실시하였다. 入射波向을 제외한 기타의 數值實驗條件은 尖頭週期 分析時와 동일하다. Fig. 15에는 港入口보다 약간 내측에 위치한 定點 C3에서의 無次元化된 增幅比를 圖示한 것인데 이를 따르면 Helmholtz period는 물론 Helmholtz period에서의 增幅比가 波向에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 이러한 結果는 Mei(1983)의 理論的 結果와도 일치한다. 港入口에 가까이 위치한 定點 C3에서는 波向에 관계없이 墨湖港의 第1 固有週期 부근에서 마디가 발생

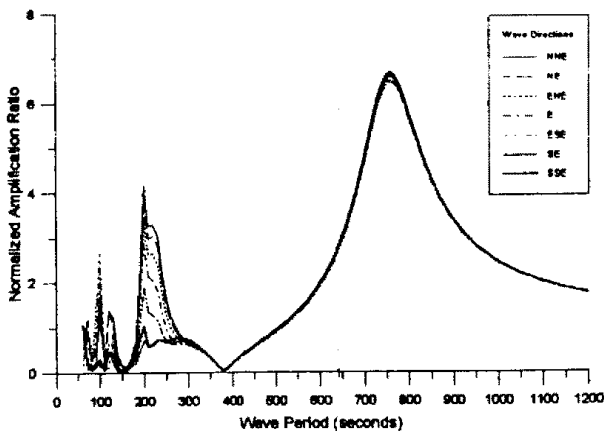


Fig. 15. Computed response curves for seven varied wave directions (NNE~SSE) at Station C3.

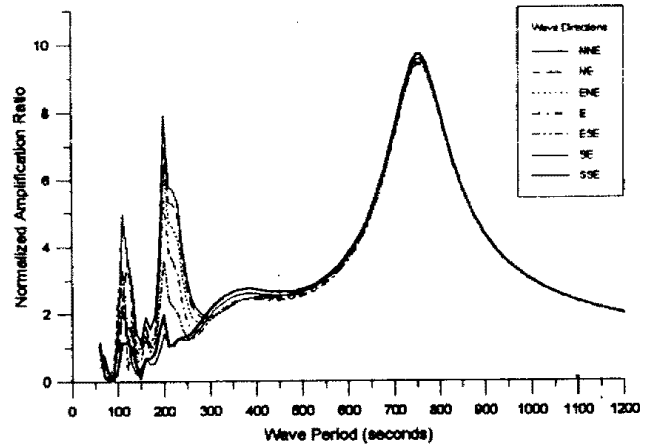


Fig. 17. Computed response curves for seven varied wave directions (NNE~SSE) at Station C7.

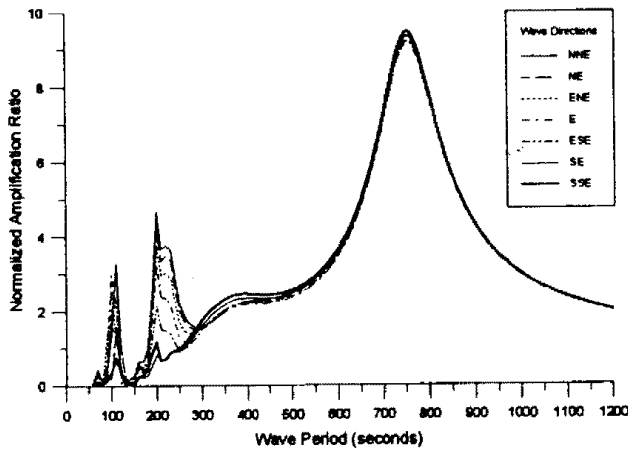


Fig. 16. Computed response curves for seven varied wave directions (NNE~SSE) at Station C5.

하고 있다. 墨湖港의 제2 固有週期 부근에서는 波向이 NNE에서 SSE로 변화함에 따라 增幅比가 상당히 낮아지고 있어서 비교적 短週期의 波는 入射波向의 변화에 따라 增幅比가 상당히 변할 것으로 예상되며 이러한 현상은 墨湖港의 제3 固有週期 부근에서도 비슷하게 나타났다. Fig. 16에는 中央埠頭 前面에 위치한 定點 C5에서의 增幅比를 도시하였는데 Helmholtz period와 同 週期에서의 增幅比는 波向에 관계없이 거의 동일하다. 墨湖港의 제1 固有週期는 분명하게 구분하기 어려우나 波向의 變化에 따라 增幅比에 약간의 차이가 나타났다. 墨湖港의 제2 固有週期에서의 반응은 定點 C3의 경우와 거의 동일하게 波向의 변화에 따라 增幅比가 크게 감소하고 있으며, 제3 固有週期の 경우 波向에 따라 그 값이 190초와 200초로 약간씩 변화하고 있음을 알 수 있다. Fig. 17

에는 어관장 전면에 위치한 定點 C7에서의 增幅比를 圖示하였는데 Helmholtz period와 同 週期에서의 增幅比 및 墨湖港의 제1 固有週期에서의 반응은 定點 C5의 경우와 거의 동일하다. 墨湖港의 제2 및 제3 固有週期에서의 反應 역시 크기의 차이를 제외하면 定點 C5의 경우와 거의 동일하다.

3.3 觀測值와 數值實驗 結果의 增幅比 比較

Table 2에 제시되었던 無次元化된 增幅比와 비교하기 위하여 尖頭週期를 12.5분으로 固定하고 入射波向으로는 短週期波 觀測結果에서 제시된 平均波向을 사용하여 2個 定點에서의 無次元化된 增幅比를 계산하였다. 그 결과 港入口 附近에서는 無次元化된 增幅比가 4.1~4.2, 그리고 中央埠頭 前面에서는 9.1~9.4로 나타나서 觀測值와는 상당한 차이를 나타내었다. 즉, 全般的으로 數值模型으로 계산한 결과가 관측 결과보다 증폭비를 상당히 크게 再現하였으며 入射波向이 변화하여도 增幅比에는 별다른 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

4. 結論 및 討議

墨湖港에서 3대의 水壓式 波高計를 사용하여 冬·夏季에 약 10일간 現場觀測을 實施하여 墨湖港 副振動의 特性을 把握하였다. 또한, 既 樹立된 解析解와 有限要素를 複合적으로 이용한 數值模型을 墨湖港에 적용하여 現場觀測 結果와 比較·分析함으로써 墨湖港 副振動의 Helmholtz period와 第1~3 共振週期를

제시하였다. 觀測資料의 스펙트럼 分析 結果와 數值 模型實驗으로 구해진 本 論文의 主要 結論 및 討議 事項은 다음과 같다.

- 墨湖港의 港內 觀測資料(S2, S3)의 分析에서 목 호향의 Helmholtz period는 10.0~14.3분으로 나타났다.

- 現場觀測資料 分析 結果에서는 墨湖港의 제1 共振週期가 나타나지 않았으나 數值模型으로 7.5분을 제시하였으며 이는 Merian 公式에 의한 墨湖港의 제1 共振週期 6.9분(단구보정시 8.5분)과 상당히 비슷하였다.

- 墨湖港을 Helmholtz resonator로 보고 구한 尖頭週期는 약 11.3분으로 나타나서 관측 결과(10.0~14.3분)나 數值模型에 의한 결과인 12.5분과 거의 일치하였다.

- 港內 定點 S3에서의 Helmholtz period에서의 平均增幅比는 약 6.8 정도여서 迎日灣의 약 2에 비해 상당히 크나 觀測期間中の 港內에서의 海水位 變位 振幅은 5~10 cm(최대 15 cm)로 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

- 觀測時期에 따라 港內 定點에서 尖頭週期에서의 反應이 상당히 다르게 나타나고 있는데 이는 港外 入射波가 상당히 큰 경우 短週期波의 grouping effect 또는 이 成分이 長週期波에 重疊된 영향 때문인 것으로 判斷된다. 또한, 時期別로 목호향의 第1~3 共振週期の 出現 與否가 다른 理由는 港外波高의 크기 또는 入射波向의 差異에 기인된 것으로 사료되나 이에 대해서는 追後 持續的인 研究가 要望된다.

- 數值計算을 통하여 觀測資料의 分析에서 구분되지 않았던 墨湖港의 제1 共振週期 7.5분을 제시하였으며, 또한 제2 및 제3 固有週期로 3.3분과 1.9분을 각각 제시하였다.

- 固體 境界面에서 部分吸收 境界條件을 사용하였으나 尖頭週期에서의 增幅比 再現은 실제보다 상당히 크게 예측하여 港灣構造物의 種類(岸壁, 消波施設 等)나 自然 海濱 等에 대해 適切한 反射係數의 選定에 대한 研究가 要望된다.

- 海底面 摩擦係數는 모두 0으로 하였으며, 港口의 急縮小 等에 의한 에너지 損失 效果를 고려하기 위해서는 앞으로 이에 대한 詳細한 研究가 요망된다.

謝 辭

이 論文은 科學技術處에서 施行한 特定研究開發事業인 “항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(III)”의 研究 結果의 一部이며, 現場觀測時 수고해주신 韓國 海洋研究所 海洋工學研究部의 여러분들에게 感謝드립니다.

參考文獻

- 姜始桓, 李弘植, 1987. 墨湖港의 副振動特性에 대한 數值解 析의 試算에 대하여, 大韓土木學會 學術講演會, pp. 372-379.
- 建設部, 1987. 浦項新港 波浪調査 및 모델實驗 用役 報告書: 第2卷 波浪調査 및 모델 實驗編.
- 李哲應, 1993. 波群效果를 고려한 港灣의 振動解 析, 서울대 학교 土木工學科, 工學博士學位論文.
- 李弘植, 1992. 境界要素法에 의한 墨湖港의 副振動特性에 관한 研究, 大韓土木學會論文集, 12(2), pp. 255-263.
- 鄭遠武, 1991. 複合要素法에 의한 港內 波浪 侵入 變形 研究, 明知大學校 土木工學科, 工學碩士學位論文.
- 鄭遠武, 鄭景太, 蔡璋源, 1993a. 東海港의 副振動 特性: 1. 現場觀測. 大韓土木學會論文集, 13(3), pp. 173-183.
- 鄭遠武, 鄭景太, 蔡璋源, 1993b. 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), pp. 185-192.
- 秋敎昇, 1987. 韓國 沿岸에서 發生한 暴風 地震 海溢 現象에 對하여, 대성문화사, 강릉.
- 韓國海洋研究所, 1991. 항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(I), 科學技術處, BSPG 00135-373-2.
- 韓國海洋研究所, 1992. 항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(II), 科學技術處, BSPG 00153-481-2.
- 韓國海洋研究所, 1993. 항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(III), 科學技術處, BSPG 00192-621-2.
- 韓國海洋研究所, 1994. 國家綜合海洋觀測網 構築 技術 開發 (III), 科學技術處, BSPN 00184-628-2.
- Freeman, N.G., Hamblin, P.F. and Murty, T.S., 1974. Helmholtz resonance in harbours of the Great Lakes. *Proc. 17th Conf. Great Lakes Res.*, pp. 399-411.
- Lee, J.J., 1969. Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology.
- Miles, J. and Munk, W., 1961. Harbor paradox. *J. of the Waterways and Harbor Division, ASCE*, 87(WW3).
- Mei, C.C., 1982. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. Wiley-Interscience, New York.
- Murty, T.S. 1984. *Storm Surges: Meteorological and Ocean Tides*. Canadian Government Publishing Centre, Friesen Printers Ltd.
- Wilson, B.W., 1967. The threshold of surge damage for moored ships. *Proc. Inst. Civil Eng.*, 38, pp. 107-134.