BSPE 00202-331-2

檢潮우물 反應特性에 관한 研究

A Study on the tide-well response

1991. 4.

韓國海洋研究所

提 出 文

海洋研究所長　貴下

本 報告書를 "檢潮우물 反應特性에 관한 研究" 事業의 最終報告書로 提出합니다.

1991. 4. 30.

研 究 員 : 朴 光 淳
李 東 永
金 祥 翼
金 善 政

要 約 文

1. 題目 : 檢潮우물 反應特性에 관한 研究

2. 研究의 必要性

현재 우리나라에서 檢潮儀에 의한 潮汐觀測은 全國 약 22개의 水路局 檢潮所에서 실시되고 있고, 거의 전부가 潮位變動을 연속적으로 자동기록하고 있다. 檢潮所의 기본적인 구조는 海岸線이나 港內 岸壁 가까이에 檢潮우물(tide-well)을 설치하여 導水管(intakepipe)을 통해 外海쪽과 연결하여 外海쪽의 潮位變化에 대해 檢潮우물내의 水位가 상하운동하는 것을 관측하는 것이다. 이는 導水管의 작용에 의해 周期가 짧은 波浪을 제외하고 長周期의 潮汐을 기록하도록 되어있다.

檢潮儀는 潮汐뿐만아니라 地震海溢, 港內副振動 등의 관측을 위한 가장 일반적인 계기시스템 이지만 한편 때때로 檢潮儀의 기록은 檢潮儀 시스템의 非線形性 反應에 의해 때때로 地震海溢, 港內副振動 등의기록은 상당히 변형되는 경우도 있다. 예를들면 시각적으로 관측된 地震海溢 또는 港內副振動의 높이는 상기의 檢潮儀 시스템의 反應에 의해 檢潮儀에 기록된 높이와는 상당히 다른 경우도 있다.

구미나 일본의 경우 檢潮所의 구조로 부터 地震海溢에 대한 反應特性을 수리학적으로 조사하거나, Drainage test(Okada, 1985; Satake, 1988)에 의해 檢潮所에서 反應係數(Response coefficient)를 결정하여, 실험결과를 사용해서 檢潮우물 밖의 水位를 계산한 바 있다. 潮位變動에 대한 檢潮儀의 反應을 모형실험 또는 檢潮儀 안밖의 水位의 동시관측을 통해서 導水管(Intakepipe)의 효과를 조사한 경우도 있다. 檢潮儀 시스템의 反應特性에 대한 지금까지 연구에서는 이론이나 실험

에 의한 고찰이 주였고, 관측에 사용하는 檢潮우물의 反應特性에 대한 조사는 많지 않다.

檢潮우물은 海洋潮汐을 관측하는 것을 주된 목적으로 하고 있고, 또한 地震海溢이나 副振動 관측계기로서 세계적으로 가장 일반적으로 이용되고 있다. 이 때문에 조사연구의 자료로서 檢潮記錄이 많이 이용되고 있다. 이러한 檢潮記錄을 收集. 解析하기 위해서는 각 檢潮所의 反應特性을 분명히 하는 것이 중요하다. 또 地震海溢, 副振動의 發生, 傳播 등의 연구를 행하는 수치실험의 결과를 관측결과와 비교하기 위해서도 필요하다. 우리나라에서도 檢潮資料의 효율적인 이용 및 檢潮所의 潮位記錄 資料로 부터 副振動 Signal의 적합한 反應 여부를 알기 위해서는 먼저 檢潮儀 시스템의 反應特性을 검토할 필요가 있다.

3. 研究目標

- o 檢潮우물 觀測型 檢潮儀 시스템(tide-well system)의 反應特性 把握

4. 研究內容 및 範圍

- o 檢潮所 안밖의 水位 同時觀測
- o 模型實驗을 통한 檢潮儀 시스템의 反應 調査
- o 反應係數(Response coefficient)의 決定
- o 檢潮우물(tide-well)의 反應特性 把握

Summary

The advantage of tide well system with an intakepipe near the sea floor is that it can record not only tide but also harbour oscillation, tsunami, rapid change of tide height when a storm was causing rapid fluctuations in sea level. Consequently record of harbour oscillation may be extracted from tidal records by removing the predicted tide and then correcting for the attenuation caused by the tide well system.

The response of tide well with intakepipe to short period wave was examined by in situ measurements, numerical computation of response function and tide well model experiment for Pusan tidal station. The well constant was also computed hydraulically on the basis of the structure of the tide gage system. It has been found that the response is governed by tide well structure.

The tide records can be used for the determination of mean sea levels for surveying purposes, as the response of tide gage sustem can be estimated.

目　次

要約文 3

第 1 章　序 論 15

第 2 章　檢潮儀에 의한 潮汐 觀測 17

第 3 章　檢潮우물의 反應特性 19

第 4 章　模型實驗 44

第 5 章　結 論 및 提言 50

參考文獻 55

Contents

Chapter 1. Introduction 15

Chapter 2. Observation of tide by tide gage 17

Chapter 3. Tide-well response 19

Chapter 4. Model experiment 44

Chapter 5. Conclusions 50

Reference 55

List of Figures

Fig. 2.1 Structure and parameters of the pusan tide gage system 17

Fig. 3.1 Basic model of tide well 19

Fig. 3.2 Experimental wave-tide gages deployed inside and outside the tide-well of Pusan tidal station 25

Fig. 3.3 Comparison of sea level outside the well and inside the well at Pusan tidal station (1990. 9.19 - 9.25) 26

Fig. 3.4 Comparison of sea level outside the well and inside the well at Pusan tidal station(1989.4.14 - 4.28) 27

Fig. 3.5 Amplitude response between the sea level in(a_I) and outside(a_o) versus period, 0.3m diameter intake pipe for Pusan tidal station (KORDI, 1989) 29

Fig. 3.6 Amplitude response between the sea level in(a_I) and outside(a_o) versus period, 0.3m diameter intake pipe for Pusan tidal station 29

Fig. 3.7 Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe (amplitude of input wave : 2.5m, T : 10-480sec) 31

Fig. 3.8 Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amplitude of input wave : 2.5m, T:10-480sec 34

Fig. 3.9 Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe (amplitude of input wave : 19cm, T:10-480 sec) 37

Fig. 3. 10 Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amplitude of input wave : 19cm, T:10-480sec) 40

Fig. 3. 11 Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amplitude of input wave : 19cm, T:40 min.) 43

Fig. 4. 1 Model of tide-well for the Pusan tidal station 45

Fig. 4. 2 Schematic diagram of the apparatus used for experimental work 45

Fig. 4. 3 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.15cm and period of 2.6 sec. 47

Fig. 4. 4 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.4cm and period of 7.0sec. 47

Fig. 4. 5 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.3cm and period of 15.5sec. 48

Fig. 4. 6 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.35cm and period of 32.9sec. 48

Fig. 4. 7 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.7cm and period of 60.4sec. 49

Fig. 4.8 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.65cm and period of 116sec. 49

第 1 章 序 論

현재 우리나라에서 檢潮儀에 의한 潮汐觀測은 전국 약 22개의 水路局 檢潮所에서 실시되고 있고, 거의 전부가 潮位變化를 연속적으로 자동기록하고 있다. 檢潮儀의 기본적인 구조는 海岸線이나 港內 岸壁 가까이에 檢潮우물(tide-well)을 설치하여 導水管(intake pipe)을 통해 外海쪽과 연결하여 外海쪽의 潮位變化에 대해 檢潮우물 내의 水位가 상하운동하는 것을 관측하는 것이다. 이는 導水管(Intake pipe)의 작용에 의해 周期가 짧은 波浪을 제외하고 長周期의 潮汐을 기록하도록 되어 있다.

檢潮儀는 潮汐뿐만아니라 地震海溢, 港內副振動 등의 관측을 위한 가장 일반적인 계기시스템 이지만, 한편 때때로 檢潮儀의 기록은 檢潮儀 시스템의 非線形性 反應에 의해 때때로 地震海溢, 港內副振動 등의 기록은 상당히 변형되는 경우도 있다. 예를들면 시각적으로 관측된 地震海溢 또는 港內副振動의 높이는 상기의 檢潮儀 시스템의 反應에 의해 檢潮儀에 기록된 높이와는 상당히 다른 경우도 있다.

潮位觀測裝置로서의 檢潮儀의 反應特性은 檢潮우물과 導水管에 의한 수리필타에 의해서 거의 결정되지만, 여러 사람에 의해서 옛날부터 흥미가 있어온 것이고, 이에 관련된 여러 조사 연구가 행해져 왔다. 潮位變動에 대한 反應을 모형실험에 의해서 조사한 것 (Noye, 1974a,b)이나 檢潮所에서 檢潮우물 안밖의 水位를 측정해서 導水管의 효과를 조사하는 방법도 있다. 한편 水理學的인 硏究도 많이 있지만 導水管內의 물의 慣性을 고려해서 線形反應에 대해 고찰한 것(Noye, 1974b)과 流入, 流出의 효과를 고려해서 非線形反應에 대해 기술한 것(Cross, 1968; Loomis, 1983)이 있다. 非線形反應으로는 水位差의 평방근에 비례해서 해수가 출입하고 그러한 예는 導水管이 없는 즉 orifice 관측형의 檢潮우물에서 보여진다. 이 경우에도 단순한 正弦波의 입력에 대한 주파수 특성이 조사되고 있다 (Noye, 1974a). 非

線形反應의 경우는 큰 波浪이 있으면 檢潮우물 안밖의 平均潮位에 차이가 생기는 것이 지적되고 있다.

구미나 일본의 경우 檢潮所의 구조로 부터 地震海溢에 대한 反應特性을 수리학적으로 조사하거나, Drainage test(Okada, 1985; Satake, 1988)에 의해 檢潮所에서 反應係數(response coefficient)를 결정하여, 실험결과를 사용해서 檢潮우물 밖의 水位를 계산한 바 있다. 潮位變動에 대한 檢潮儀의 反應을 모형실험 또는 檢潮儀 안밖의 水位의 동시관측을 통해서 導水管의 효과를 조사한 경우도 있다. 檢潮儀 시스템의 反應特性에 대한 지금까지 연구에서는 이론이나 실험에 의한 고찰이 주였고 관측에 사용하는 檢潮우물의 反應特性에 대한 조사는 많지 않다.

檢潮儀는 潮汐을 관측하는 것을 주된 목적으로 하고 있고, 또한 地震海溢나 副振動 관측계기로서 세계적으로 가장 일반적으로 이용되고 있다. 이 때문에 조사연구의 자료로서 檢潮記錄이 많이 이용되고 있다. 이러한 檢潮記錄을 收集.解析하기 위해서는 각 檢潮所의 反應特性을 분명히 하는 것이 중요하다. 또 地震海溢, 副振動의 發生.傳播 등의 연구를 행하는 수치실험의 결과를 관측결과와 비교하기 위해서도 필요하다. 우리나라에서도 檢潮資料의 효율적인 이용 및 檢潮所의 潮位記錄 資料로 부터 副振動 Signal의 反應 여부를 알기 위해서는 먼저 檢潮儀 시스템의 反應特性을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 導水管을 가진 檢潮우물을 대상으로 하여 그 反應特性을 Governing equation 의 數値解를 통해 파악하고 모형실험 결과와 비교하여 釜山港 檢潮所의 檢潮우물 시스템의 反應特性을 파악하고자 하였다.

第 2 章 檢潮儀에 의한 潮汐 觀測

檢潮儀에 의한 潮汐觀測은 전국 약 22개의 檢潮所에서 실시되고 있고 거의가 潮位變動을 연속적로 아니로그 기록지에 자동기록하고 있다. 우리나라 주요 檢潮所의 檢潮儀는 주로 檢潮우물 관측형으로 釜山港 檢潮所의 檢潮儀도 일제 Fuess檢潮儀인데 기록방법은 곡선기록형이다. 이 檢潮儀들은 추에 의해 균형을 이루는 부표의 운동에 의해 水面變化를 측정한다. 기본적인 구조는 港灣의 岸壁 가까이에 檢潮우물을 묻고 導水管으로 檢潮우물의 밖인 外海쪽과 통하게 해서 外海의 潮位變化에 따라서 檢潮우물 우물내의 水位가 상하로 움직이도록 되어 있는 것이다 (Fig. 2.1).

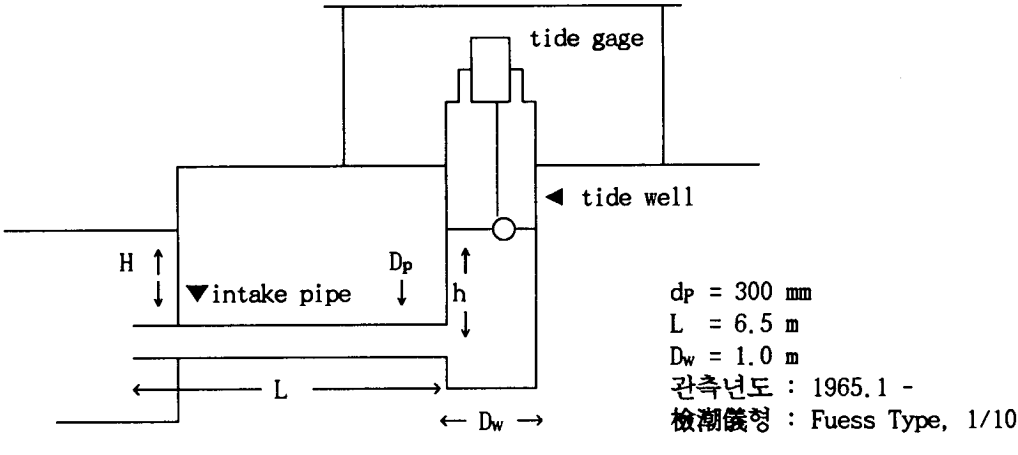

Fig.2.1 Structure and parameter of the pusan tide gage system

檢潮우물 관측형의 檢潮儀는 導水管의 작용에 의해서 周期가 짧은 波浪을 제거하고 長周期의 潮汐을 기록하도록 되어 있다. 檢潮儀는 檢潮우물 위의 설치대에 설치되어 있고 檢潮儀의 풀리(pulley)에 감긴 wire의 끝이 수면에 뜬 부표에 연결되어 있다.

풀리(pulley)에 연결한 부분에 역방향으로 감긴 wire가 있고 균형 추(balance weight)가 붙어 있다. 이 추에 의해서 부표를 매단 wire에 일정한 장력이 주어지고 있다. 檢潮儀의 反應에는 부표의 反應, wire의 느슨함의 효과 등도 포함되지만, 경험적으로 보아 이들의 檢潮우물안의 水位의 변동에 대해서 1-3초의 지연이 생기는 정도이다(日本文部省, 1988). 檢潮우물의 수면에 흐름이나 현저한 波가 없는 한 地震海溢나 暴風海溢 등에 대한 反應特性을 조사할 때는 導水管과 檢潮우물의 효과만을 고려하면 좋다.

檢潮儀는 潮汐을 관측하는 것을 주요한 목적으로 하고 있고 중간적인 周期를 가진 地震海溢를 관측하는 측기로서는 그 反應特性이 그다지 고려되지 않고 있고 기록지 전송속도가 20mm/hr로 지나치게 느리다. 또 지진 등에 의한 움직임이 있으면 wire가 동요해서 고장나기 쉽고 큰 해일 등에 의해 기록범위를 벗어나면 장해가 생긴다. 이와 같은 문제가 있지만, 관측점의 수가 많고 일상적으로 보수가 행해져 연속적으로 관측을 하고 있기 때문에 갑자기 내습하는 暴風海溢이나 地震海溢의 경우에도 잘 관측할 수 있다. 이때문에 조사연구의 자료로서 檢潮記錄이 가장 많이 이용되고 있다.

檢潮記錄을 수집 해석하기 위해서는 각 檢潮所의 장소, 檢潮儀의 特性, 潮位觀測基準面 등을 알 필요가 있다.

第 3 章 檢潮우물의 反應特性

1. 檢潮우물의 反應

檢潮所의 구조, 특히 導水管에는 여러가지 형태의 것이 사용되고 있지만 釜山港 檢潮所와 같이 원통형의 檢潮우물과 똑바른 원통형 導水管 1개를 가진 기본적인 형태(Fig. 3.1)에 대해서 고찰하면 다음과 같다.

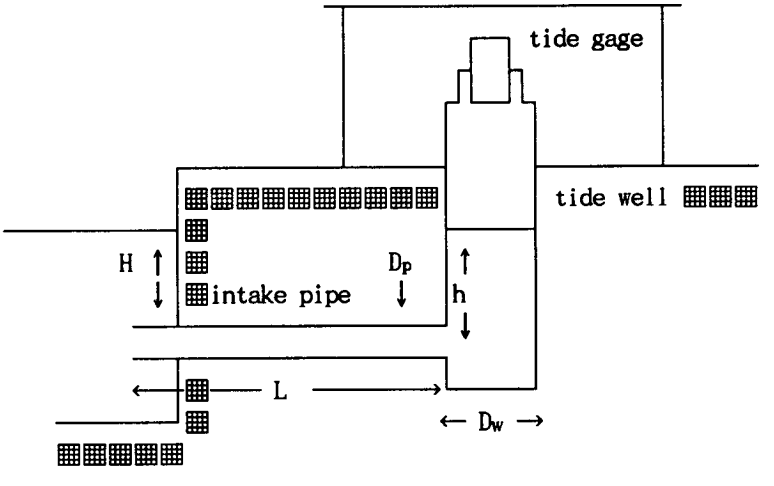

Fig. 3.1 basic model of tide well

Fig.3.1에서와 같이 導水管의 길이와 내경을 각각 L, D_p, 檢潮우물 밖의 潮位를 H, 檢潮우물내의 水位를 h로 한다. 導水管內의 平均流速을 u로 하면, 연속식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{D_p}{D_w}\right)^2 u \qquad (3.1)$$

지금 유속의 변화 (du/dt)가 작은 것으로 무시하면 水位差 (H-h)는 導水管으로의 유입에 의한 損失水頭 h_e, 관내의 마찰에 의한 損失水頭 h_f 및 유출에 의한 損失水頭 h_{ex}의 합과 같고 다음과 같이 된다.

$$H - h = h_e + h_f + h_{ex} \qquad (3.2)$$

여기서, $h_e = f_e * u^2 / 2g$

$h_f = f\ L/D * u^2/2g$

$$h_{ex} = f_{ex} * u^2/2g \qquad (3.3)$$

g는 중력가속도, 流入損失係數 f_e, 摩擦損失係數 f, 流失損失係數 f_{ex}는 導水管의 형상이나 재료에 따라 다르지만, 양단에 角端을 가진 원관으로하면 水理公式集(日本土木學會, 1985)로 부터

$$f_e = 0.5 \qquad (3.4)$$

$$f = 124.5\ n^2 / D_p^{4/3} \qquad (3.5)$$

$$f_{ex} = 1.0 \qquad (3.6)$$

이다. 여기서 n은 Manning의 조도계수로 導水管으로 잘 이용되는 흄관(Hume tube)에서는 n = 0.013 (Murakami, 1983)이다. 그러나 관내에 생물이 부착하기도하고 토사가 퇴적하면 n의 값은 크게 되는 것으로 생각할 수 있다. 식(3.5)는 관내의 흐름이 亂流상태일 때 사용하는 것이지만, 현저한 地震海溢의 경우에는 임계 Reynolds 수(=2310)를 충분히 넘기때문에 문제는 없다(日本文部省, 1988). 식(3.6)은 $D_p << D_w$ 일 때의 값이지

만 통상의 檢潮所는 D_p/D_w = 0.1 이고 f_{ex}는 1.0에 가깝다(日本文部省, 1988). Bernoulli's theorem에서 導水管內의 유속 u 는 Steady flow를 가정하면 우물밖의 水位(H)와 우물안의 水位(h)의 차의 제곱근에 비례한다.

$$u = \mathrm{sgn}\ (H-h) * \{2g|\ H - h\ |\ /\ F\}^{1/2} \qquad (3.7)$$

여기서, u : 導水管內의 流速

sign: (H-h)의 符號에 따라 1 또는 -1인 符號函數(sign function)

F : 無次元 摩擦係數

H : 檢潮우물 밖의 水位

h : 檢潮우물 안의 水位

無次元 摩擦係數 F는 다음과 같다.

$$F = f_e + fL\ /\ D + f_{ex} = 1.5 + \frac{124.5n^2L}{D_p^{4/3}} \qquad (3.8)$$

여기서, n : Minning의 조도계수로 평탄한 콘크리트에 대해 0.01 - 0.03

L : 導水管의 길이 이다.

식(3.1)과 (3.7)로부터

$$\frac{dh}{dt} = W\ \mathrm{sgn}\ (H - h)\{2g|H - h|\}^{1/2} \qquad (3.9)$$

로 표시된다. 여기서 W 는 각 檢潮시스템을 특징 짓는 無次元化한 檢潮우물의 反應係數로 다음과 같다.

$$W = \left(\frac{D_P}{D_W}\right)^2 / F^{1/2} \qquad (3.10)$$

檢潮우물의 反應係數(W)는 檢潮우물의 크기뿐만 아니라 堆積物, 貝類 등의 海洋生物 그리고 導水管內의 다른 장애물에 따라 다르다.

식(3.9)는 非線形인 방정식이고, 外海의 潮位 H 의 변동으로부터 檢潮우물내의 水位 h 를 해석적으로 구하는 것은 용이하지 않다. 예를들면 단순한 파형의 波

$$H = a \sin \omega t \qquad (3.11)$$

가 입력한 경우에 대해서도 엄밀해는 알 수 없고, Runge-Kutta-Gill 의 방법 등으로 수치적분해서 振幅의 減衰나 위상의 지연이 조사될 수 있다 (Cross, 1968). Noye(1974a)는 無次元化한 周期數 β_1을

$$\beta_1 = \omega \, (a / 2g)^{1/2} / W \qquad (3.12)$$

로 정의해서 β_1의 함수로서 H 와 h의 振幅比 및 位相差를 수치적으로 구해 그림으로 나타내고 있다. 가장 간단한 경우에 H가 일정 ($H = H_0$) 하다고 하면, 檢潮우물內의 水位 h 는

$$h = \begin{cases} H_0 - \mathrm{sgn}\,(H_0 - h_0) \quad W^2 g\,(c - t)^2 / 2 & t<c \\ H_0 & t<c \end{cases} \qquad (3.13)$$

이 된다. 여기서 h_0 는 初期水位, c 는 정수로

$$c = \{ 2 \, |H_0 - h_0| \, / \, g\}^{1/2} \, / \, W \qquad (3.14)$$

이다. 초기에 檢潮우물 안밖에서 $\triangle h = |H_0 - h_0|$의 水位差가 있으면 그것을 회복하는데에 요하는 시간 T 는 다음과 같이 된다.

$$T = \{2\triangle h \, / \, g \}^{1/2} \, / \, W \qquad (3.15)$$

檢潮儀에 의한 관측에서 檢潮우물내의 水位 h(t)가 구해져 있으면, 外海의 潮位 H(t)는 다음식으로 계산될 수 있다.

$$H = h + \mathrm{sgn} \left(\frac{dh}{dt} \right) * \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 / \, 2gW^2 \qquad (3.16)$$

이 식은 檢潮所의 反應特性의 보정에 사용될 수 있지만 $(dh/dt)^2$ 의 항을 포함하기 때문에 큰 地震海溢의 경우 기록을 읽는데 오차가 크게 되기 쉽다.

導水管이 없는 즉, orifice를 가진 檢潮우물 (L = 0m) 이나 導水管이 대단히 짧은 경우에는 유입.유출에 의한 損失效果가 크지만, 수 m 이상이 되면 管內의 摩擦이 큰 역활을 하고, 마찰의 크기는 관의 길이보다 내경의 크고 작음이 큰 영향을 미친다(日本文部省, 1988).

지금까지의 고찰에서는 導水管內의 물의 慣性의 효과 (du/dt)를 무시하고 있지만,

길고 두꺼운 導水管에서는 이 가정에 의문이 남는다. 이것을 고려하면,

$$\frac{du}{dt} = \frac{g}{L} \{(H - h) - h_0 - h_f - h_{ex} \} \qquad (3.17)$$

로 된다. 地震海溢와 같이 유속이 振動하는 경우는 문제가 있지만 우선 h_0, h_f, h_{ex} 로서 식(3.3) - (3.6), (3.8)을 사용하면

$$\frac{du}{dt} = \frac{g}{L} \{(H - h) - \frac{F}{2g} \mathrm{sgn}(u)u^2\} \qquad (3.18)$$

로 된다. 식(3.1) 에 대입하면, 反應函數 h에관한 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{g}{L} (\frac{D_p}{D_w})^2 \{ (H-h) - \frac{F}{2g} (\frac{D_w}{D_p})^4 \mathrm{sgn} (\frac{dh}{dt})*(\frac{dh}{dt})^2\} \qquad (3.19)$$

2. 現場觀測

한편 釜山港 檢潮所의 檢潮우물의 反應을 조사하기 위하여 檢潮우물 안과 밖에 波高潮位計를 설치하여(Fig.3.2) 1980.9.19-9.25 기간동안 波高와 潮位의 동시관측을 실시하였다. 潮位는 매 10분마다 2분간 관측치를 평균하였고, 波高는 매시간 마다 1초 간격으로 35분간 관측하여 자료를 분석하였다.

Fig.3.3은 檢潮우물 안과 밖에서의 동시관측결과를 보여주며, Fig.3.4는 1989.4.14 - 4.29 기간동안 상기 방법으로 30분 마다 동시관측한 결과이다. 양 결과로 부터 보면 長周期의 潮汐은 檢潮우물 안과 밖에서 거의 차가 없음을 보여준다.

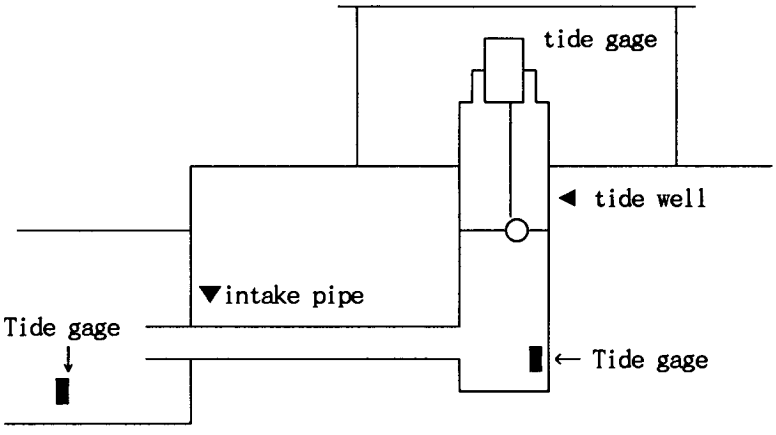

Fig. 3.2 Experimental wave-tide gages deployed inside and outside the tide-well of Pusan tide station.

3. 釜山港 檢潮우물의 反應

檢潮所의 檢潮儀는 潮位를 관측하기 위해 설계되었으나 시스템의 非線形 反應에 의해 때때로 地震海溢 등의 기록은 상당히 변형되는 것으로 나타났다(Okada, 1985). 檢潮所의 反應을 조사하는 방법으로는 Model experiment(Noye, 1974b), 현장에서의 펌프를 사용하여 檢潮우물안의 물을 퍼내거나 넣거나 하여 水位의 회복시간 등을 측정하는 Drainge test에 의한 방법(Okada, 1985 ; Sadake, 1988) 그리고 檢潮우물 안과 밖의 水位變動을 측정해서 그 결과를 비교하는 방법이 있다. 실험결과가 없는 경우에는 檢潮所의 구조로 부터 식(3.10)을 사용해서 反應係數를 결정하는 방법 (Okada, 1985 ; Sadake, 1988)이 있다.

釜山港 檢潮우물의 구조와 식(3.10)으로 부터 결정된 釜山港 檢潮所의 反應係數 W

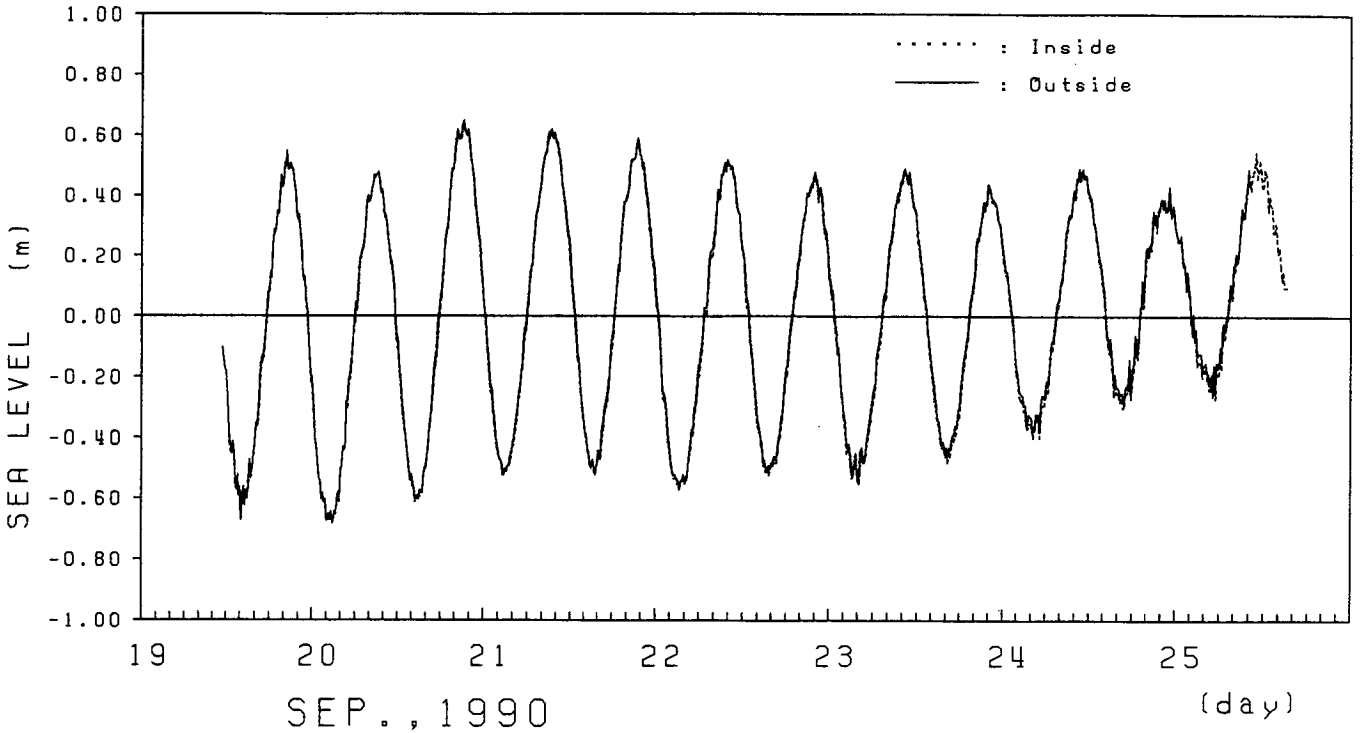

Fig.3.3 Comparison of sea level outside the well and inside the well at Pusan tidal station(1990. 9.19 - 9.25)

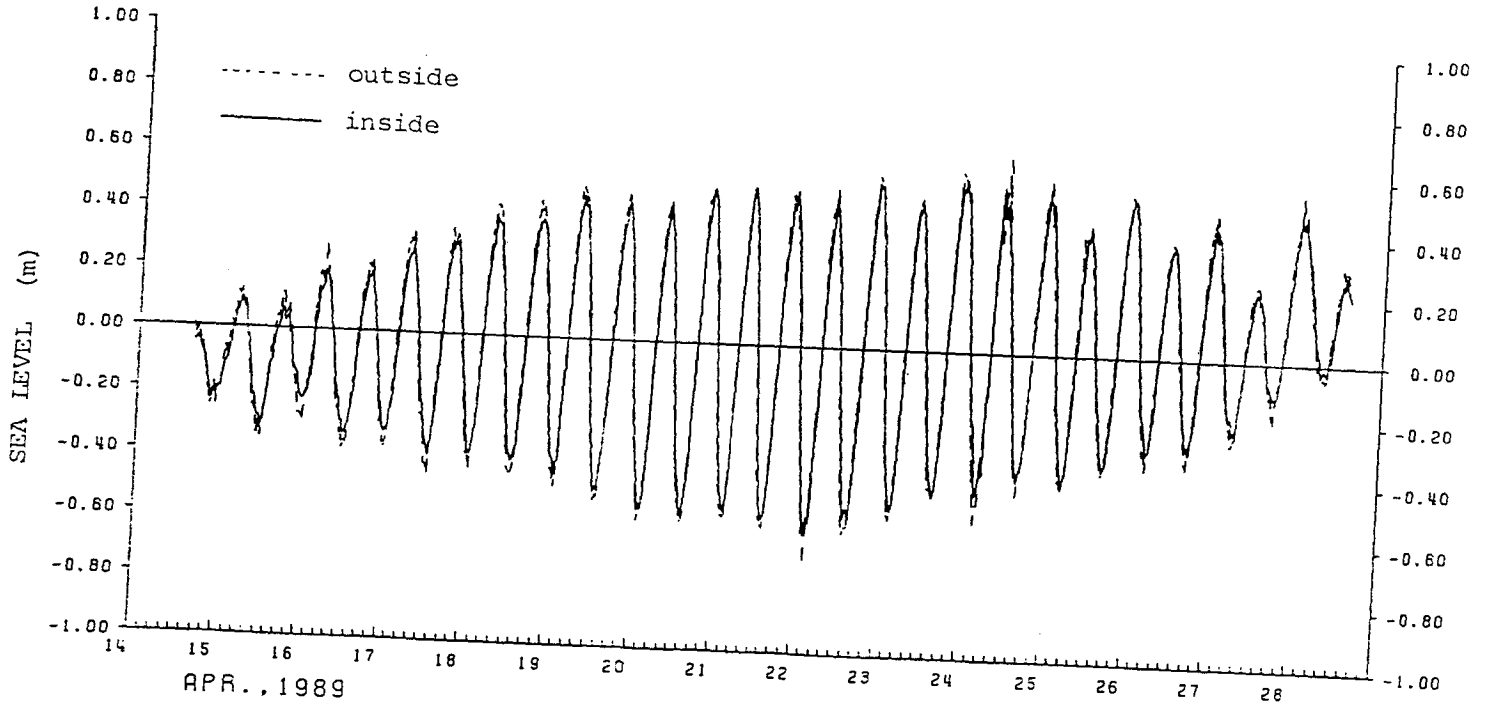

Fig. 3.4 Comparison of sea level outside the well and inside the well at Pusan tidal station(1989.4.14 - 4.28)

는 0.06이었고, 이 反應係數를 기초로 각 周期에 대한 振幅反應 (amplitude response)의 계산결과는 Fig.3.5와 같다. 여기서 보면 周期 1분 미만의 波는 입사파의 크기 및 周期에 따라 減衰정도가 다르고, 周期 1분 이상의 波는 거의 減衰되지 않는 것을 보여준다(해양연구소, 1989). 한편 동시관측 자료와 식(3.16)으로부터 구한 反應係數는 평균 0.077이었다(해양연구소, 1989). 檢潮우물 관측형의 檢潮所에서 反應係數 W는 檢潮우물의 형태 특히 導水管의 내경 및 길이에 따라 크게 다르며, 이론적인 조사결과 導水管의 내경이 작을수록, 그리고 길이가 길수록 작아짐을 나타낸다. 한예로 釜山港 檢潮우물의 내경을 0.1m로 했을 때 反應係數를 기초로 각 周期에 대한 振幅反應은 Fig.3.6과 같다. 여기서 보면 8분 이상의 周期를 가진 파도 상당한 減衰가 있음을 볼 수 있다. 따라서 내경이 크고 導水管의 길이가 짧아질수록 反應係數는 커지며, 이 경우 짧은 周期의 파에 대해서도 減衰가 적다는 것을 알 수 있다.

檢潮우물의 導水管內에 慣性을 무시할 때 反應函數 식(3.9)와 慣性을 고려할 때 反應函數 식(3.19)는 수치적으로 풀 수 있다. 여기서는 Gill 계수 Runge-Kutta 방법으로 풀어 이들의 反應函數를 釜山港 檢潮所의 檢潮우물에 적용하여 검토하였다. 釜山港 檢潮所의 檢潮우물에 振幅 2.5m 그리고 周期가 각각 10초, 30초, 1분, 2분, 4분, 8분의 단순파가 내습한 경우, 導水管內의 慣性을 무시했을 때 檢潮우물의 反應計算 例는 각각 Fig.3.7(a) - Fig.3.7(f)와 같고, 導水管內의 慣性을 고려했을 때 檢潮우물의 反應計算 例는 각각 Fig.3.8(a) - Fig.3.8(f)와 같다. 導水管內의 慣性을 무시했을 때 振幅의 減衰는 周期 10초에서 66.2%, 30초에서 18.3%이고 1분 이상의 周期에서는 振幅의 減衰가 거의 없음을 보여 주어 周期가 길수록 減衰幅이 적음을 나타낸다. 周期의 위상지연은 0.5초에서 3초의 범위를 나타내며 4분이상의 입력파에 대해서는 위상지연이 없다. 導水管內의 慣性을 고려했을 때 각 周期에 대한 振幅의 減衰는 10초에서 71.7%, 30초에서 12.8%의 振幅減衰를 보였으나 1분에서는 8.7%, 2분에서는 2.8% 크게 나타났다. 4분과 8분에서는 振幅減衰는 거의 없다. 그러나 地震海溢 등의 파형이 단순

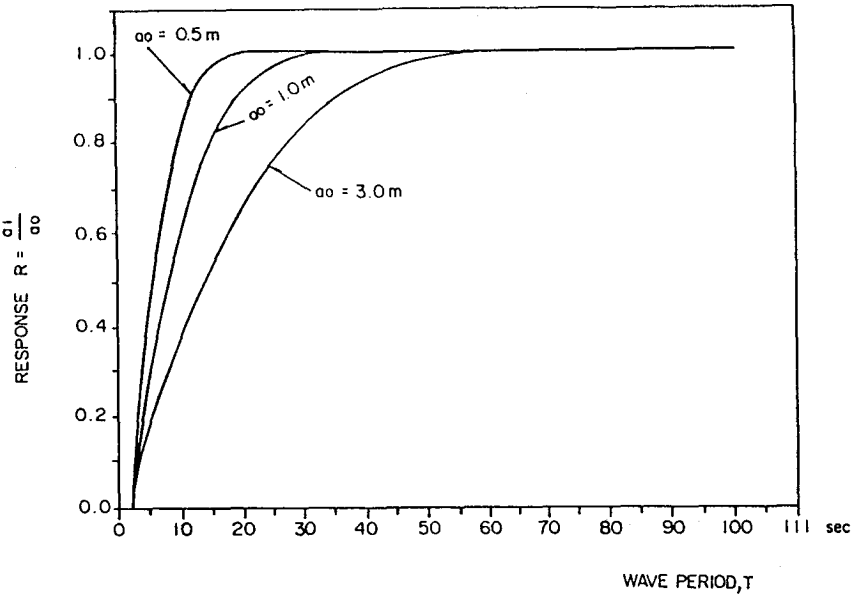

Fig. 3.5 Amplitude response between the sea level in(a_I) and outside(a_o) versus period, 0.3m diameter intake pipe for Pusan tidal station(KORDI, 1989)

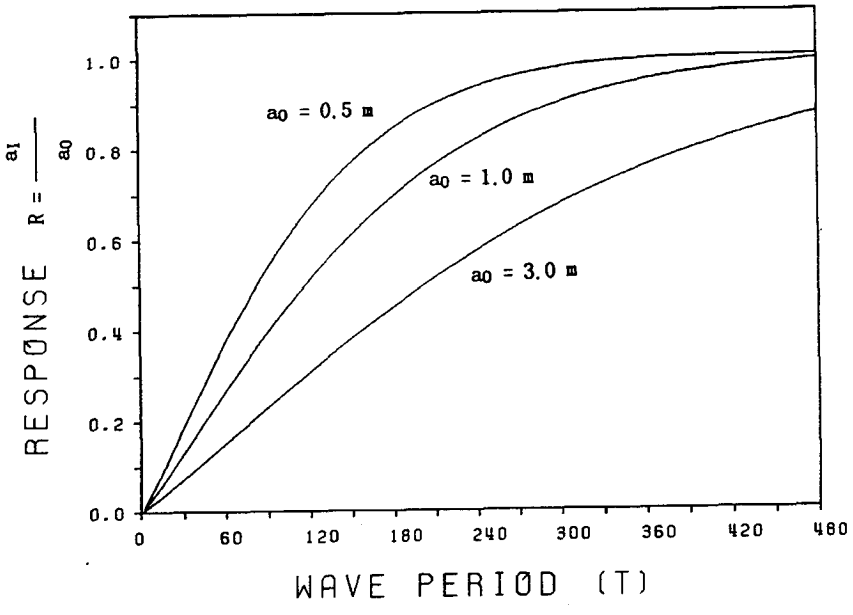

Fig. 3.6 Amplitude response between the sea level in(a_I) and outside(a_o) versus period, 0.1m diameter intake pipe for Pusan tidal station

한 正弦波가 아니고 고주파수 성분을 포함한 것, 해양생물의 부착이나 퇴적물의 퇴적으로 導水管의 내부가 좁아지고 마찰손실이 큰 것 등에 의해 실제의 地震海溢 등의 파형과는 상당히 다를 것이다.

1988년의 釜山港 檢潮記錄에 의하면 振幅 10-29cm 범위의 副振動 발생은 150회로 周期는 81% 이상이 25분에서 59분 사이에 분포하고 있다(해양연구소, 1989). 이와 관련하여 釜山港 檢潮所의 檢潮우물에 振幅 19cmm 그리고 周期가 각각 10초, 30초, 1분, 2분, 4분, 8분의 단순파가 내습한 경우, 導水管內의 慣性을 무시했을 때 檢潮우물의 反應計算 예를 Fig.3.9(a)-Fig.3.9(f)에 나타내었고, 導水管內의 慣性을 고려했을 때 檢潮우물의 反應計算 예를 Fig.3.10(a) - Fig.3.10(f)에 나타내었다. 導水管內의 慣性을 무시했을 때 振幅의 減衰는 周期 10초에서 12.0%, 30초에서 0.2%이고 1분 이상의 周期에서는 振幅의 減衰가 거의 없음을 보여 주고 있고, 입사파의 振幅이 큰 앞의 경우와 비교하면 振幅減衰비는 상당히 적음을 알 수 있고 이는 각 周期에 대한 振幅反應 결과(Fig.3.5)와 일치한다. Fig.3.10(b),(c),(d) 에서 보면 작은 입사파의 경우 周期가 30초, 1분, 2분일 때 오히려 檢潮우물안의 反應이 크게 나타나고, 周期가 2분 이상의 경우에는 Fig.3.10(d),(e),(f) 에서 나타난 바와 같이 振動하는 경우가 나타나고 있어 유속변동의 항이 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 특히 周期가 8분인 경우 周期 27초 전후의 振動이 생김을 볼 수 있다. 다른 예로 慣性項을 고려했을 때 振幅 19cm, 周期 40분의 파가 입력한 경우에 계산결과는 Fig.3.11과 같다. 이경우에도 周期 36초 전후의 振動이 생김을 볼 수 있었다. 이상에서 보면 慣性項을 고려했을 때 큰 파에 대해서는 유속변동의 항이 그다지 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있으나, 그러나 작은 水位變化의 경우에는 상당히 큰 영향을 가지는 것을 볼 수 있으며, 경우에 따라서는 振動하는 것도 생김을 볼 수 있다.

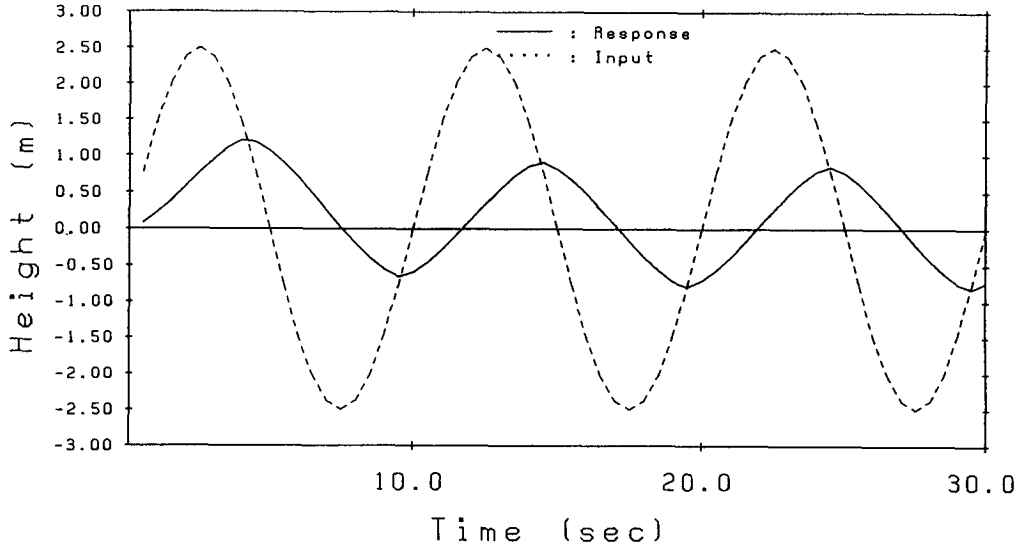

Fig. 3.7(a) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 10sec)

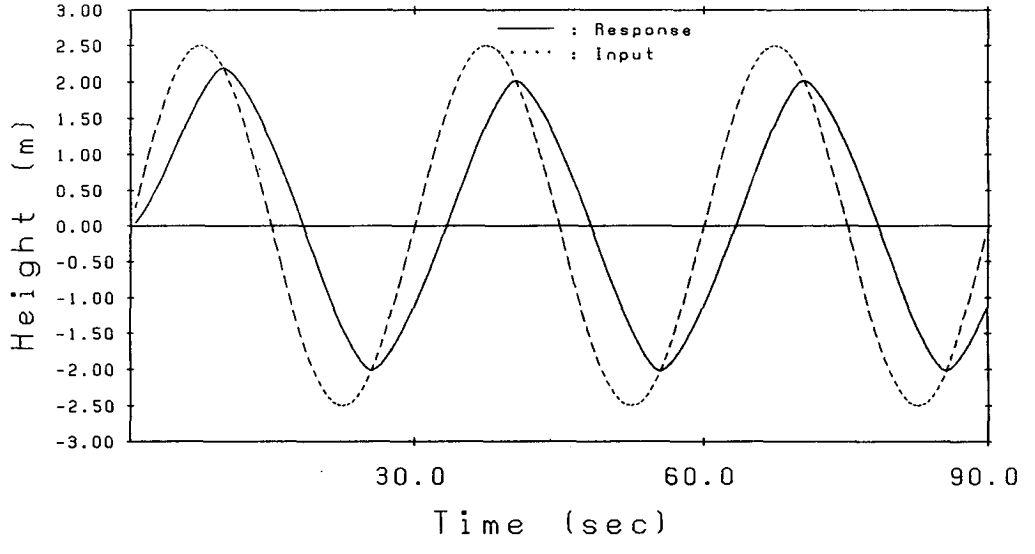

Fig. 3.7(b) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 30sec)

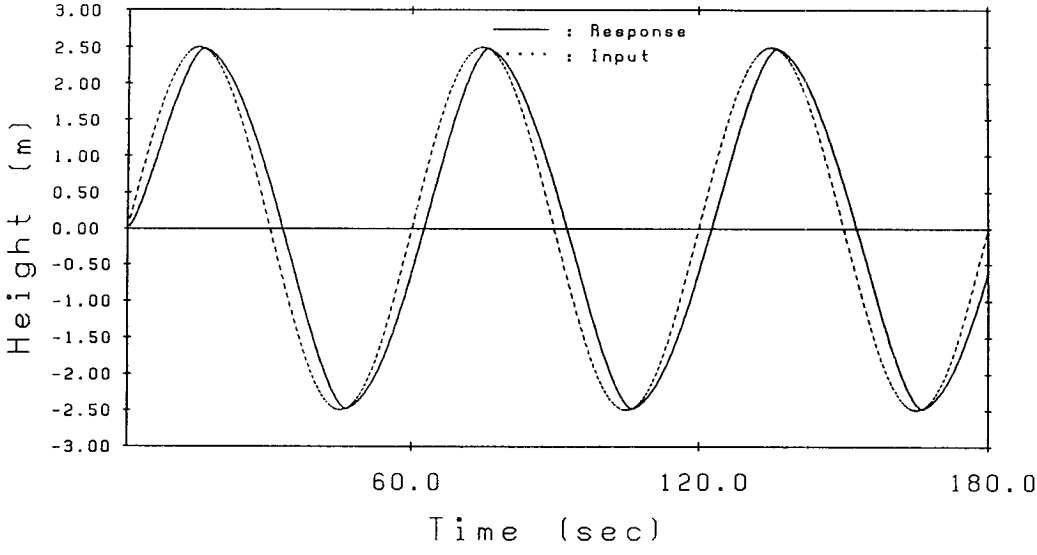

Fig. 3.7(c) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 60sec)

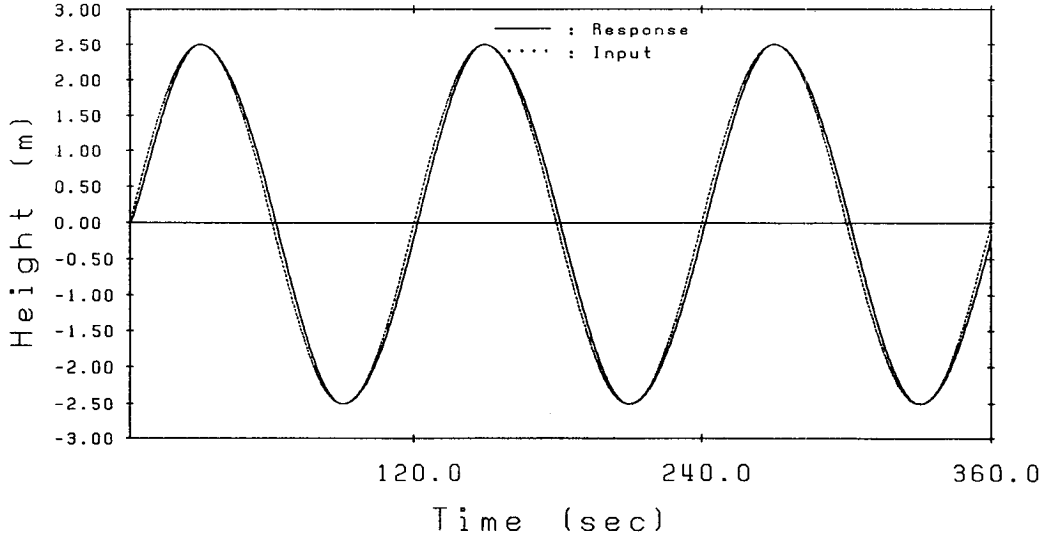

Fig. 3.7(d) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 120sec)

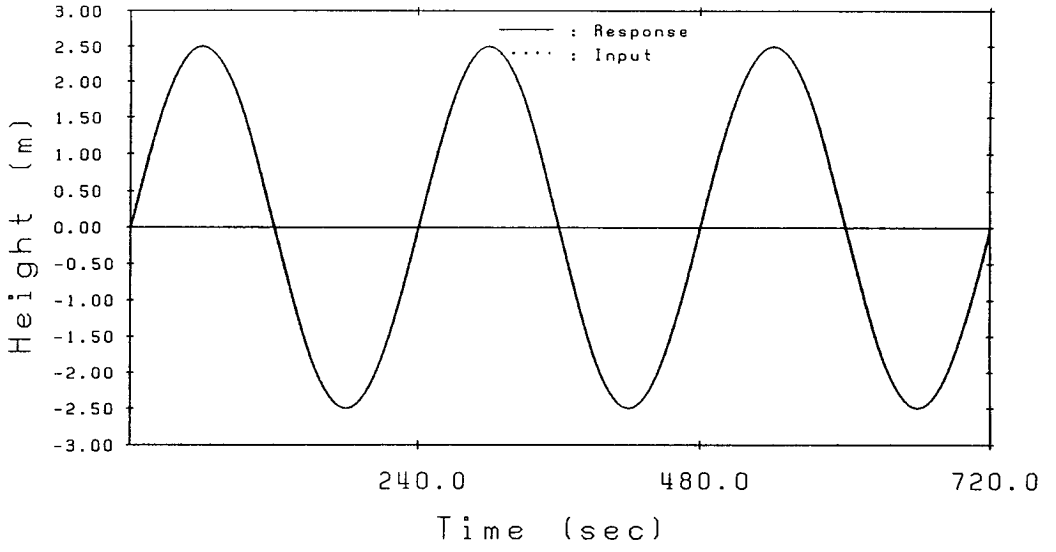

Fig. 3.7(e) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 240sec)

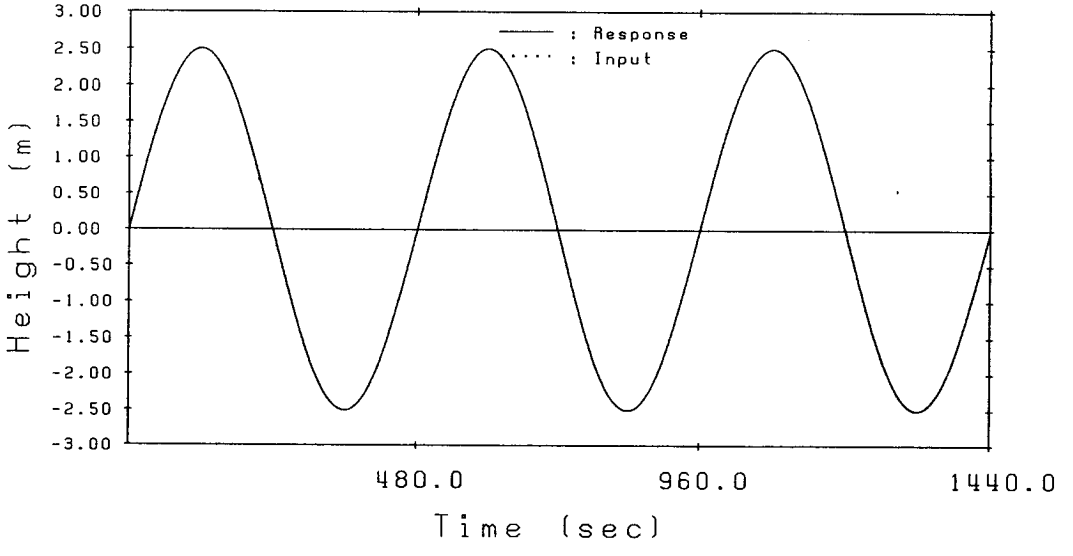

Fig. 3.7(f) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 480sec)

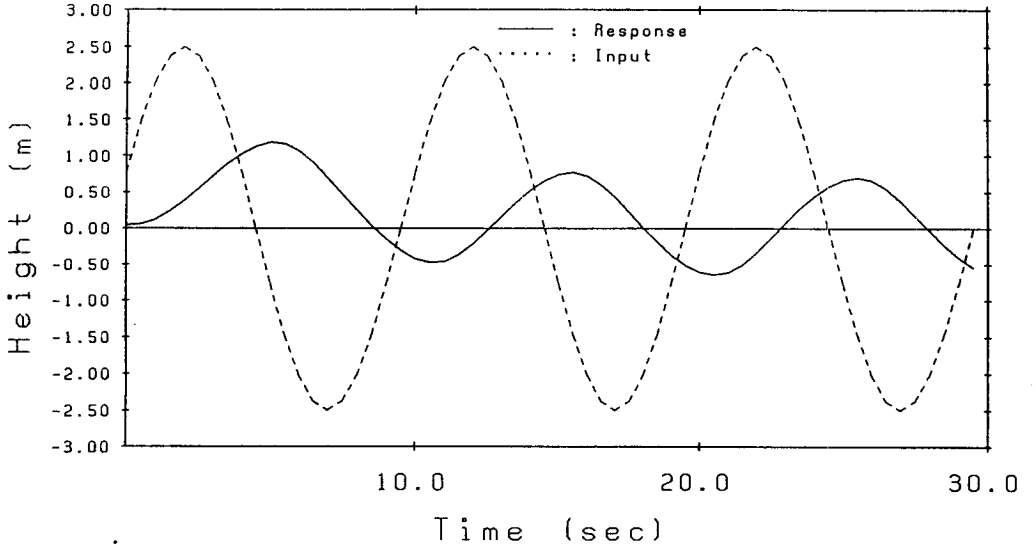

Fig. 3.8(a) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 10sec)

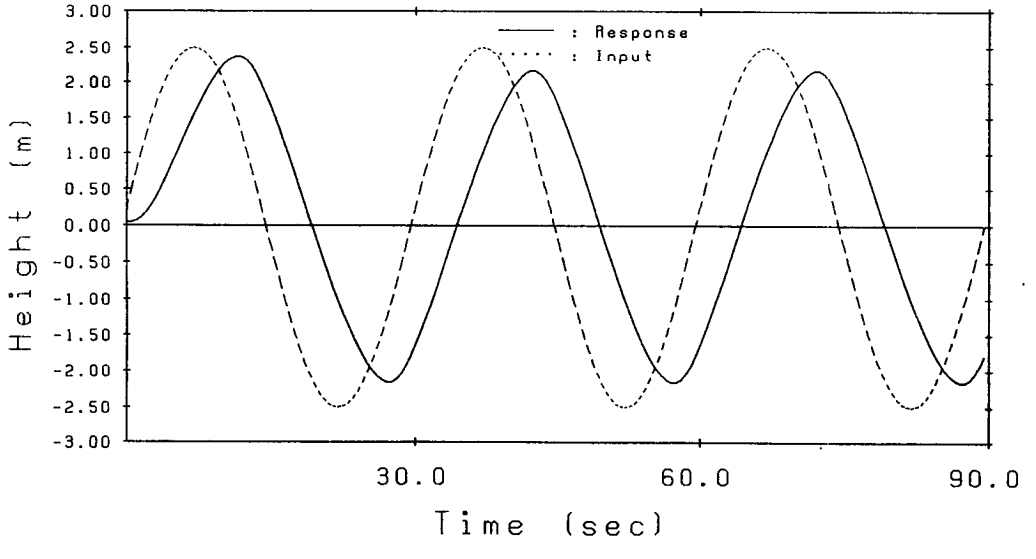

Fig. 3.8(b) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 30sec)

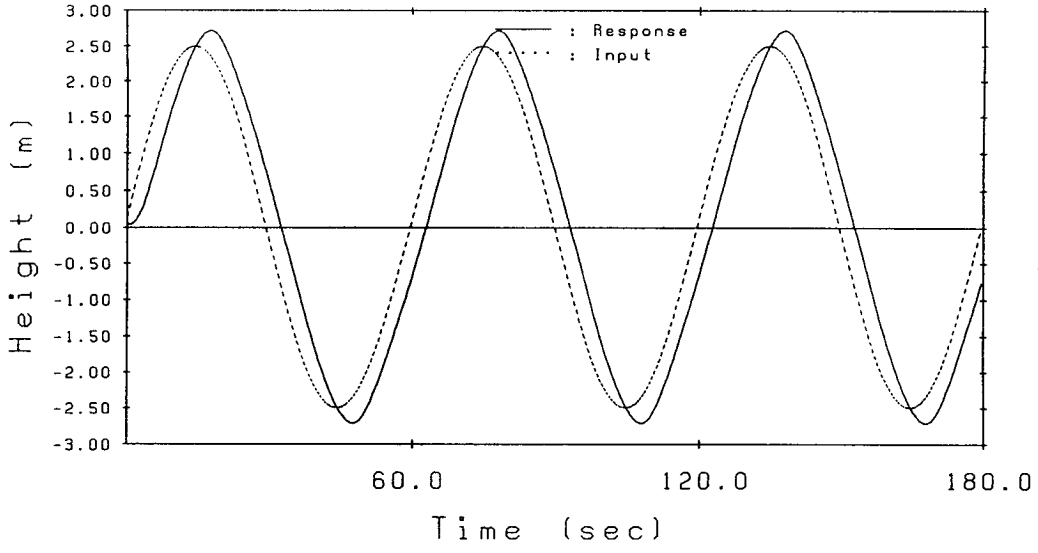

Fig. 3.8(c) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 60sec)

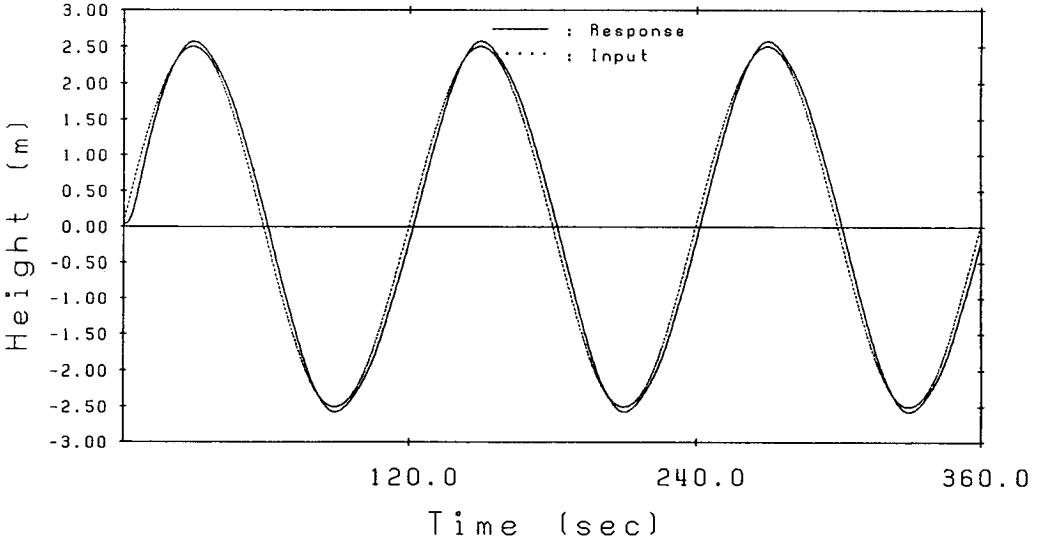

Fig. 3.8(d) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 120sec)

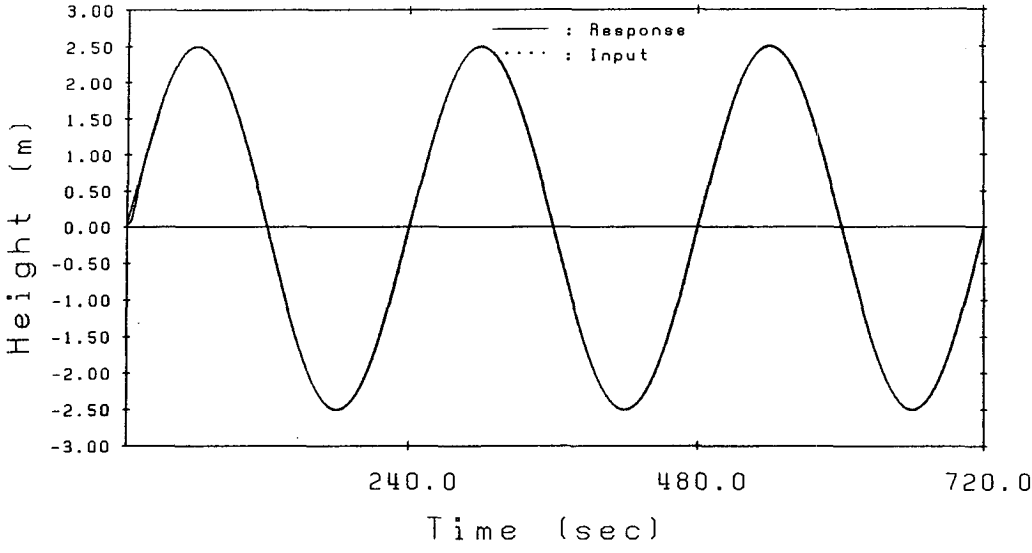

Fig. 3.8(e) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 240sec)

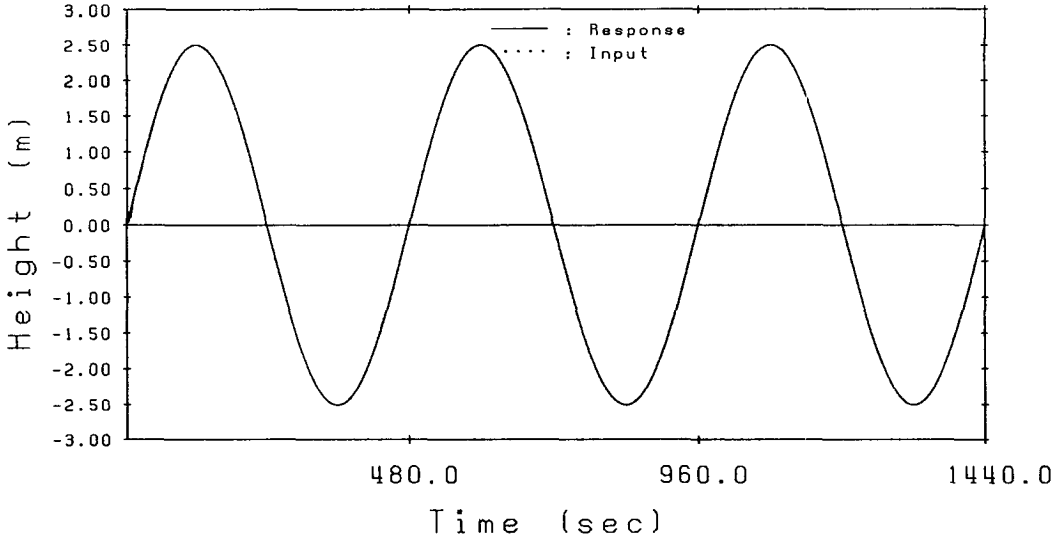

Fig. 3.8(f) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe(amp. of input wave : 2.5m, T : 480sec)

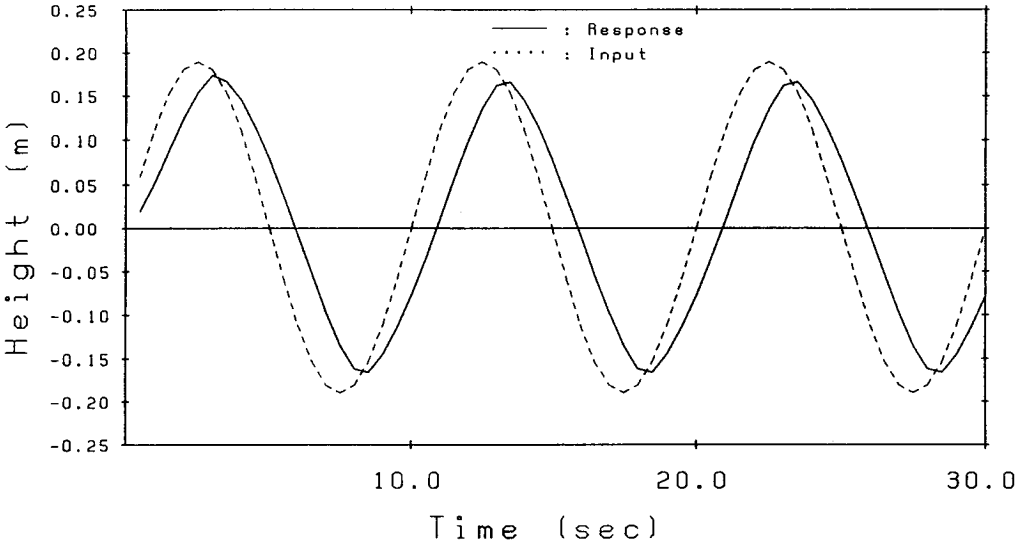

Fig. 3.9(a) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake-pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 10sec)

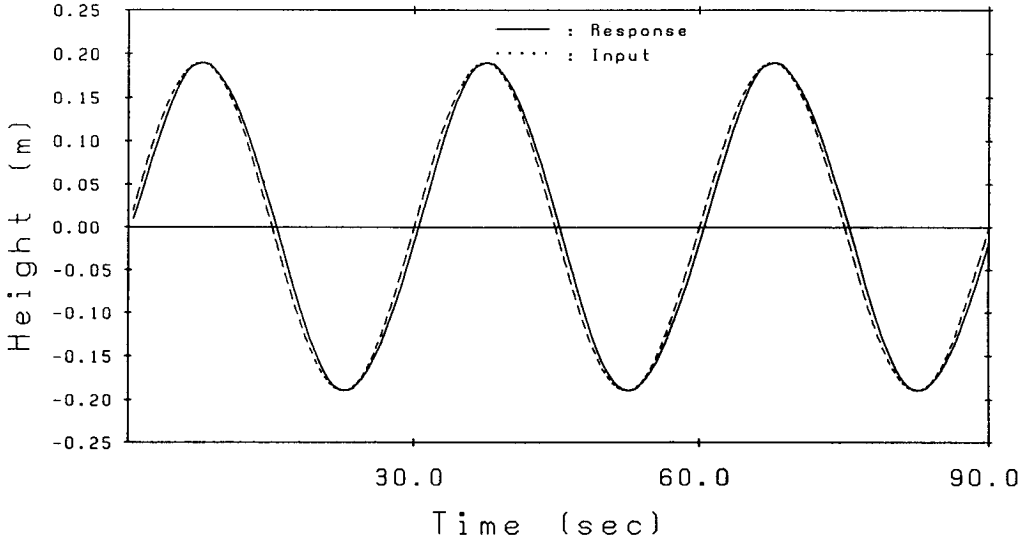

Fig. 3.9(b) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake-pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 30sec)

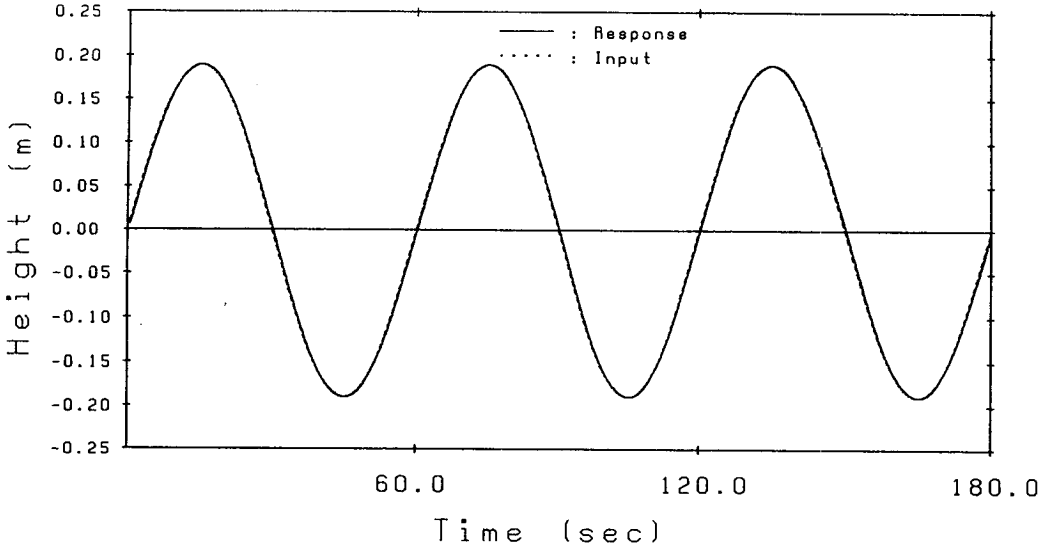

Fig. 3.9(c) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake-pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 60sec)

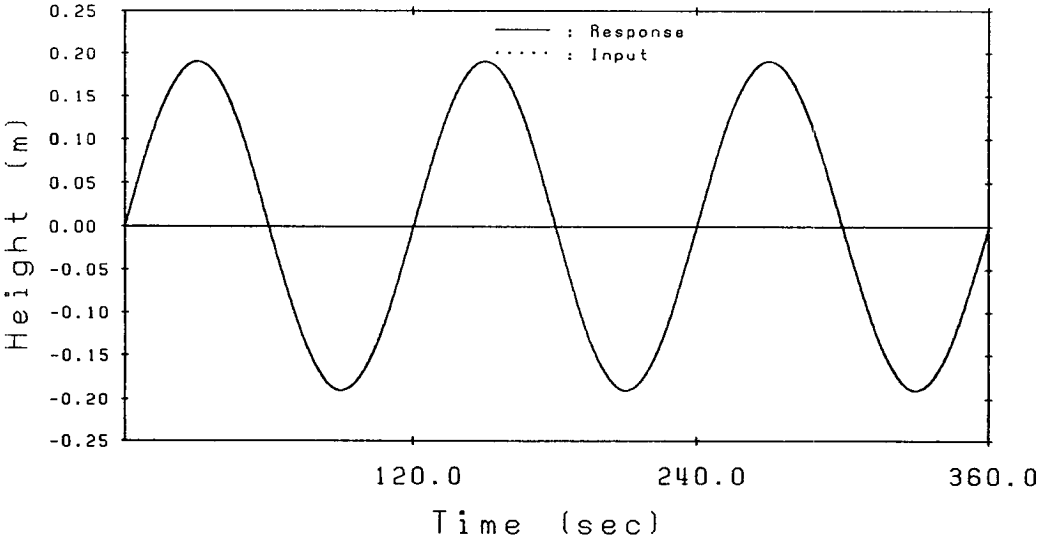

Fig. 3.9(d) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake-pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 120sec)

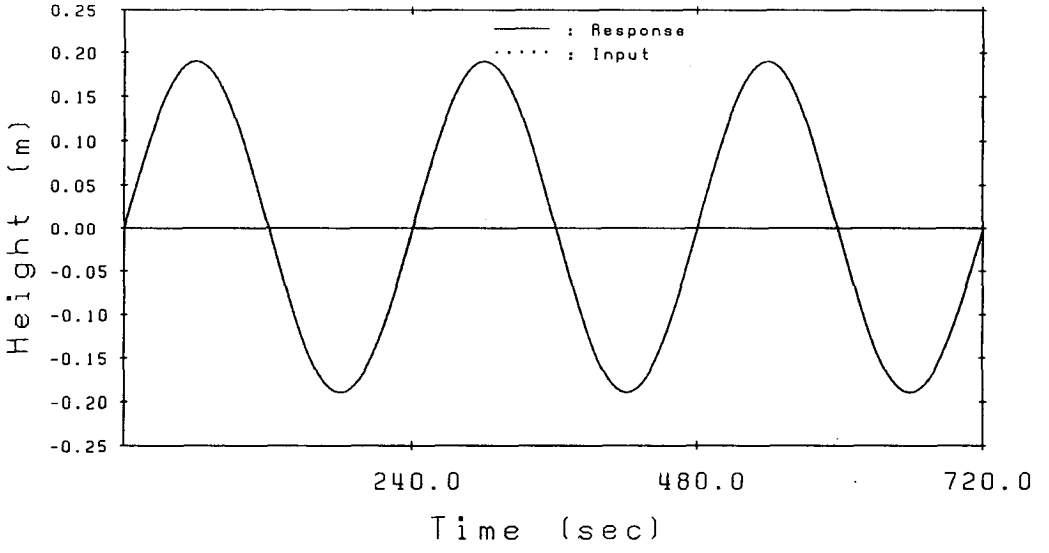

Fig.3.9(e) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake-pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 240sec)

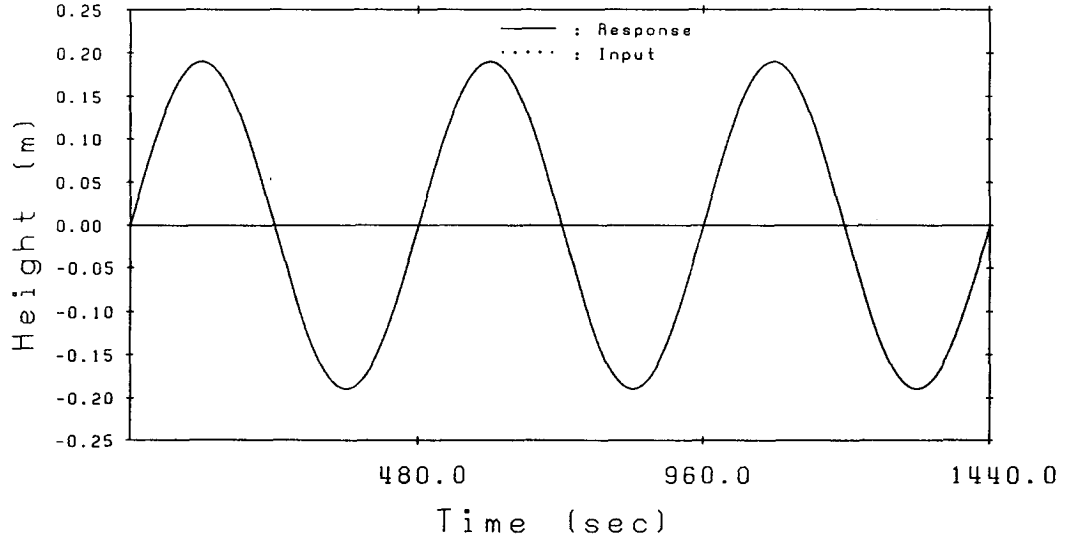

Fig.3.9(f) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of neglect the inertia along the intake-pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 480sec)

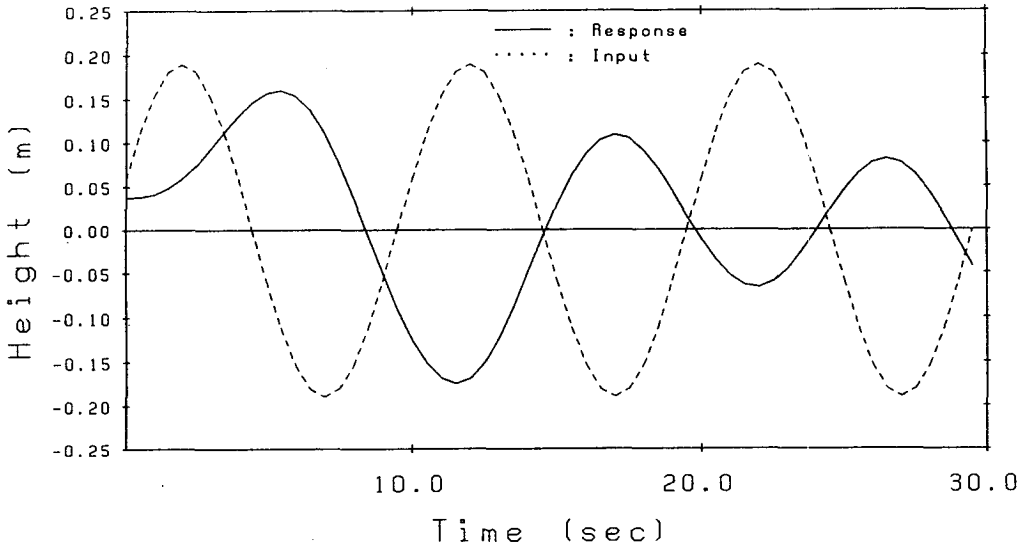

Fig. 3.10(a) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 10sec)

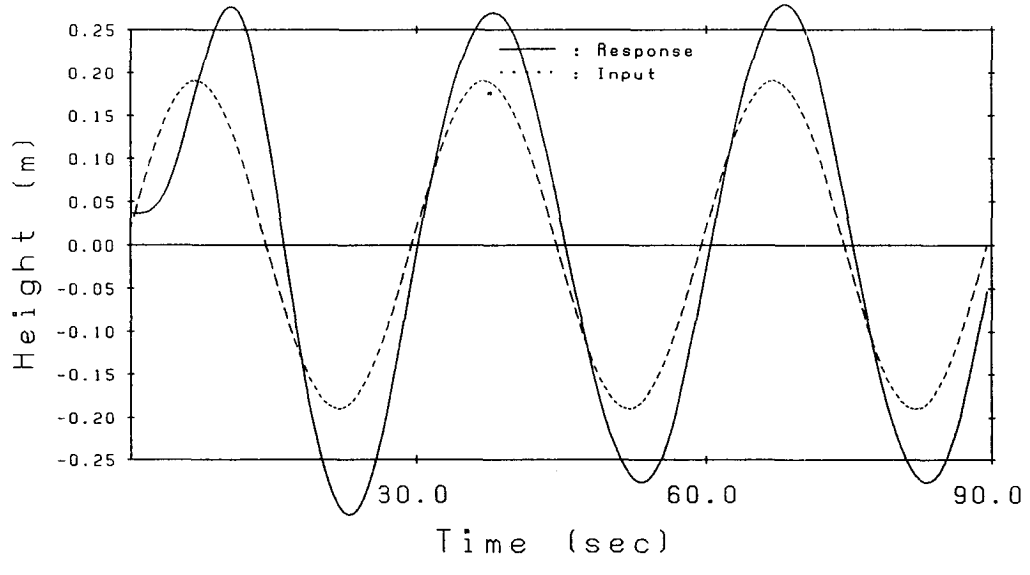

Fig. 3.10(b) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 30sec)

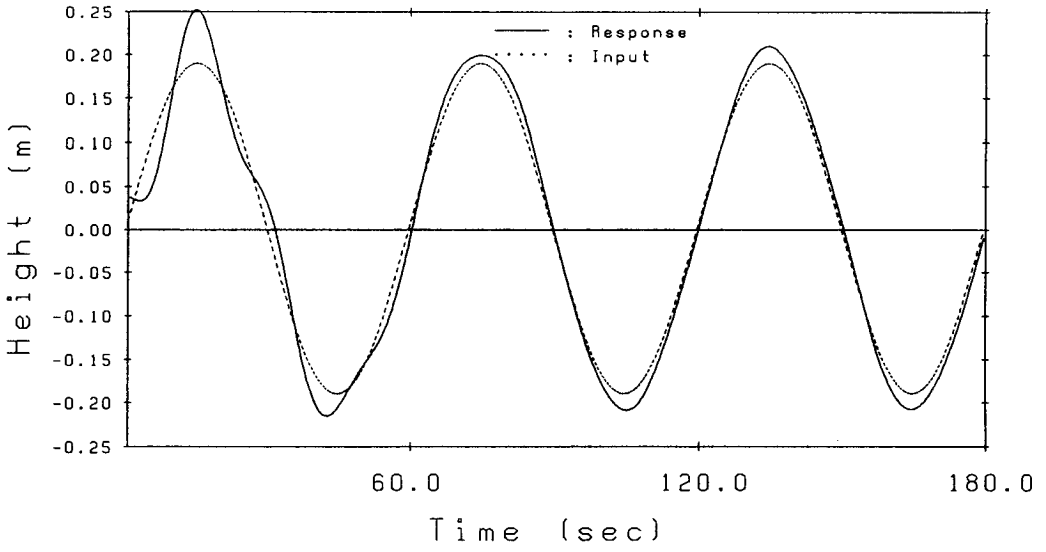

Fig. 3.10(c) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 60sec)

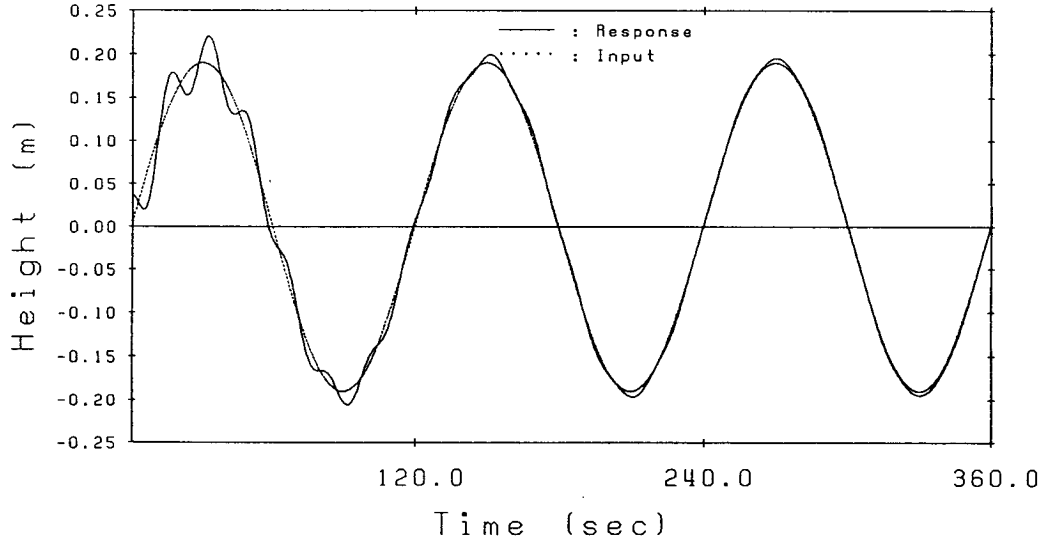

Fig. 3.10(d) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 120sec)

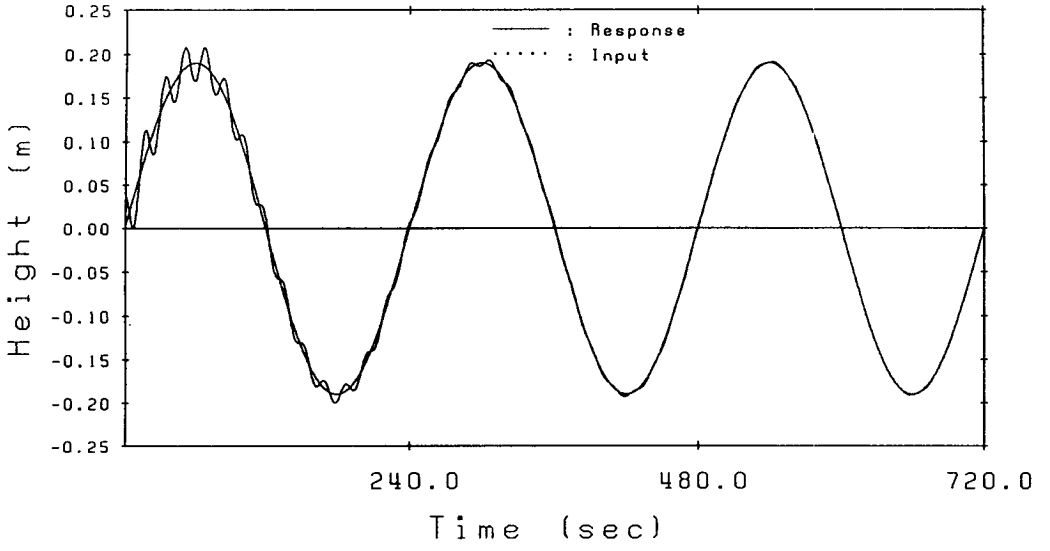

Fig. 3.10(e) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 240sec)

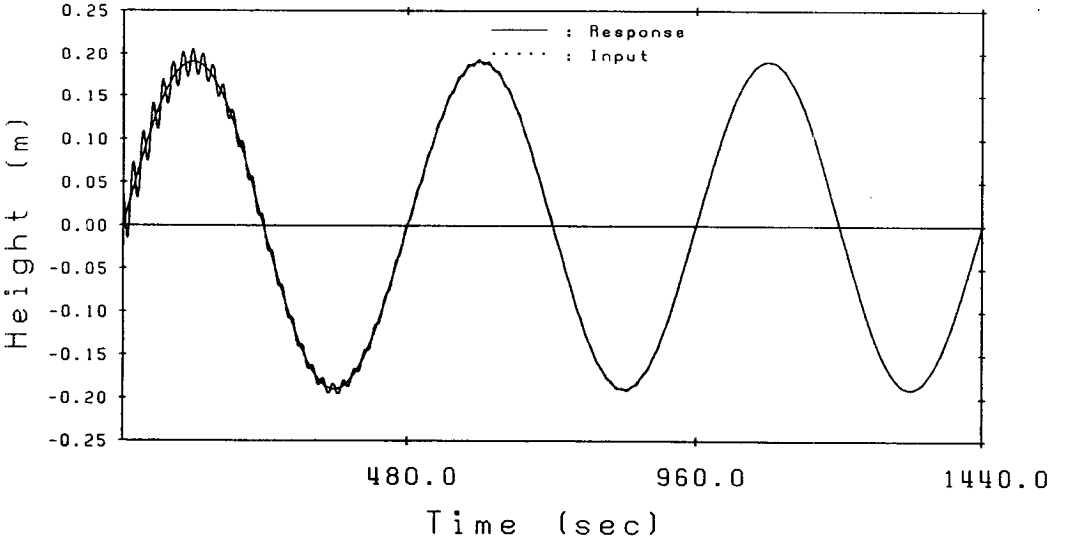

Fig. 3.10(f) Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 480sec)

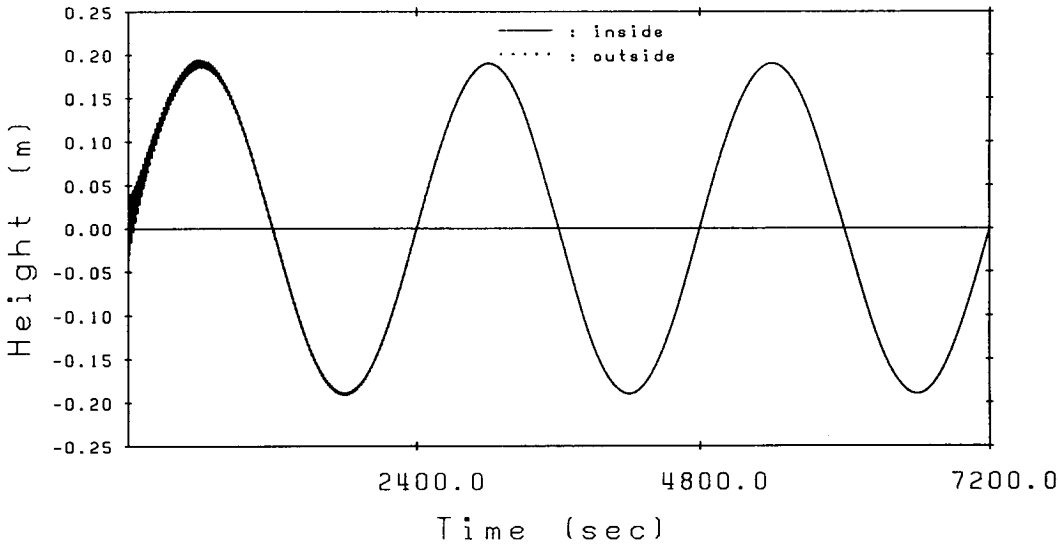

Fig. 3.11 Example of calculated response for tide-well at Pusan tidal station in case of consideration the inertia along the intake pipe (amp. of input wave : 19cm, T : 40 min.)

第 4 章 模型實驗

물탱크에서 模型實驗을 통하여 檢潮우물 밖의 海面 특히 副振動 등의 상대적으로 짧은 周期에 대한 反應特性 조사하여 이 결과를 기초로 이론적인 反應特性과 비교하였다.

1. 方法

실험은 다음 방법으로 수행하였다. 釜山港 檢潮所의 檢潮우물 모형을 투명 아크릴 판과 PVC 파이프를 사용하여 Fig.4.1과 같이 Lr=0.07의 축적으로 제작하였고, 투명 아크릴 판으로 675 x 675 x 1000mm의 물탱크를 만들었다. 이 탱크안에 모형 檢潮우물을 설치하여 Fig.4.2와 같이 weight를 상하 振動시킴으로써 탱크안에서 水位 振動의 周期와 振幅을 조정하면서 탱크내의 水位를 振動시켜 모형 檢潮우물 안밖에서 水位의 振動과 反應을 동시 측정하였다. 측정장치로는 수압식 파고조위계를 사용하였고 이 계기는 calibration 한 후에 0.5초 간격으로 측정하여 계기내에 디지탈 값으로 기억된 자료를 PC를 이용하여 표면 水位로 환산 분석하였다.

실험에서 입력파의 振幅은 1.15cm - 1.7cm, 周期는 2.6, 7.0, 15.5, 32.9, 60.4, 116 초 였고, 이는 prototype에서 16.4cm - 24.3cm 및 9.8초 - 7.3분에 해당한다.

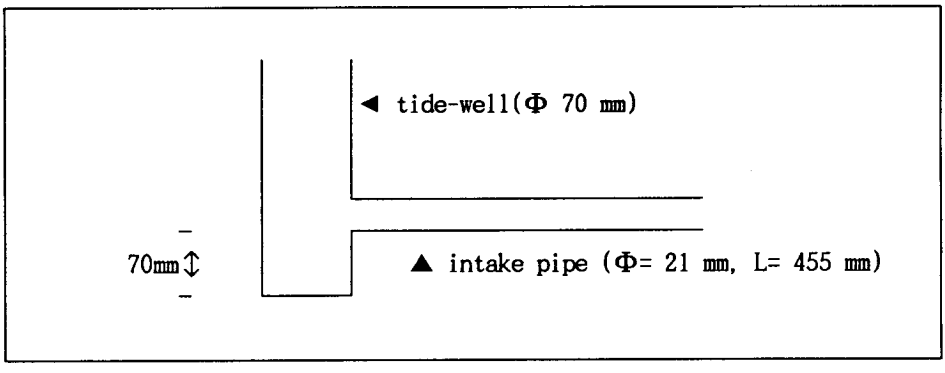

Fig. 4.1 Model of tide-well for the Pusan tidal station

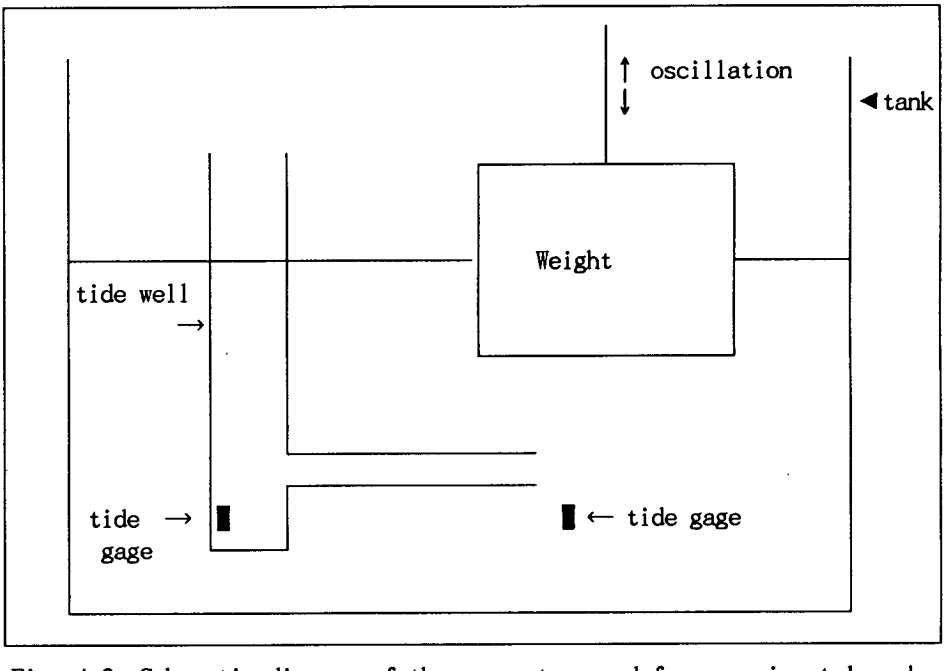

Fig. 4.2 Schematic diagram of the apparatus used for experimental work

2. 結 果

실험결과는 Fig.4.3 - Fig.4.8과 같다. 檢潮우물 모형을 사용한 모형실험에서 振幅 1.15-1.70cm (prototype에서 16.4-24.3cm), 周期 2.6-116초(prototype에서 9.8-7.3분)의 水位變化에 대한 檢潮우물안의 反應結果를 보면 周期 2분 미만에서 약 82% - 15%의 振幅減衰를 보였고 3분이상의 周期에 대해서는 振幅減衰가 거의 없었다. 앞에 기술한 反應函數의 수치적분해와 비교하면 4분이상의 周期에 대한 振幅減衰가 거의 없는 것은 잘 맞는다고 할 수 있으나, 실험에서는 檢潮우물안에서의 수면의 振動이 나타나지 않았고 또 反應이 입사파보타 큰 경우도 보이지 않았다. 한편 모든 결과에서 보이는 것으로 위상지연이 유입때보다 유출때 크게 나타나는 것은 유입때와 유출때의 反應이 다르기 때문으로 생각되며, 모형에서 檢潮우물 안과 밖의 水位差를 7cm(prototype에서 1m) 두었을 때 drain test 결과 안밖의 水位가 같아지는 회복시간은 유출때 1.14초, 유입때 1.26초로 다르게 나타났다.

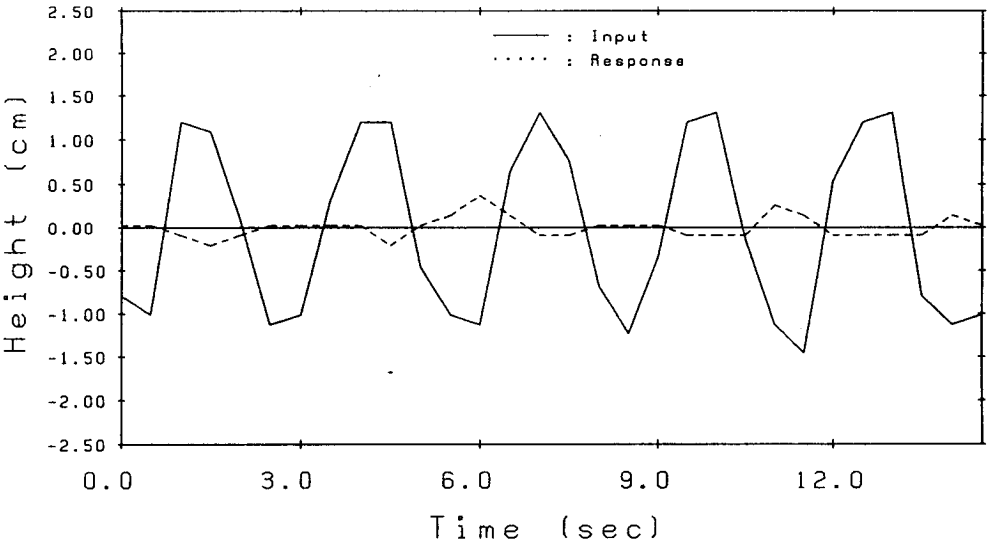

Fig. 4.3 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.15cm and period of 2.6 sec.

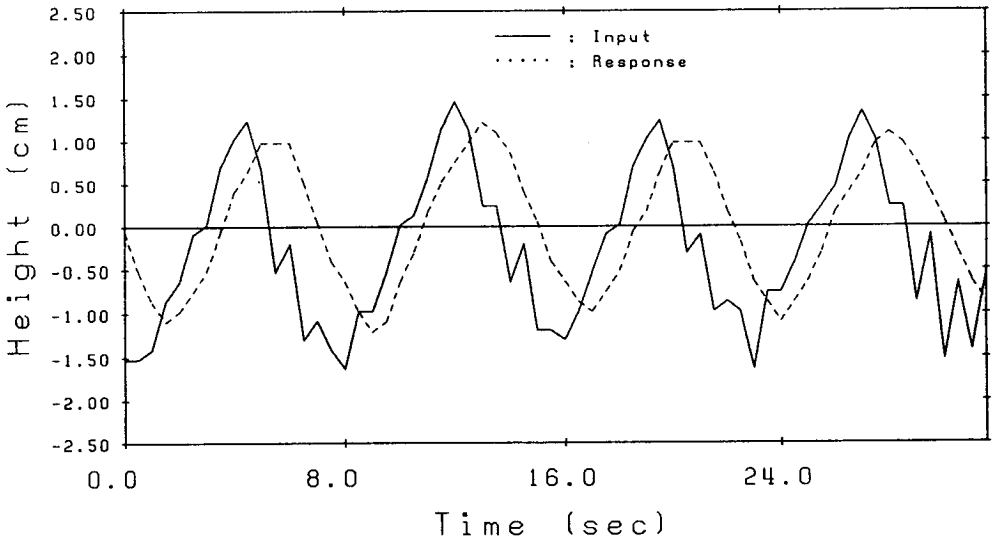

Fig. 4.4 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.4cm and period of 7.0sec.

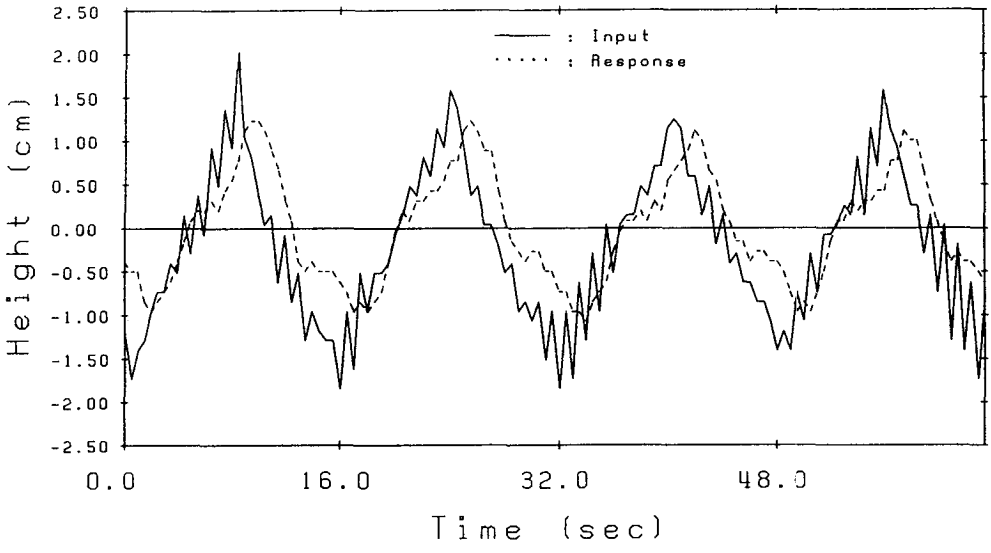

Fig. 4.5 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.3cm and period of 15.5sec.

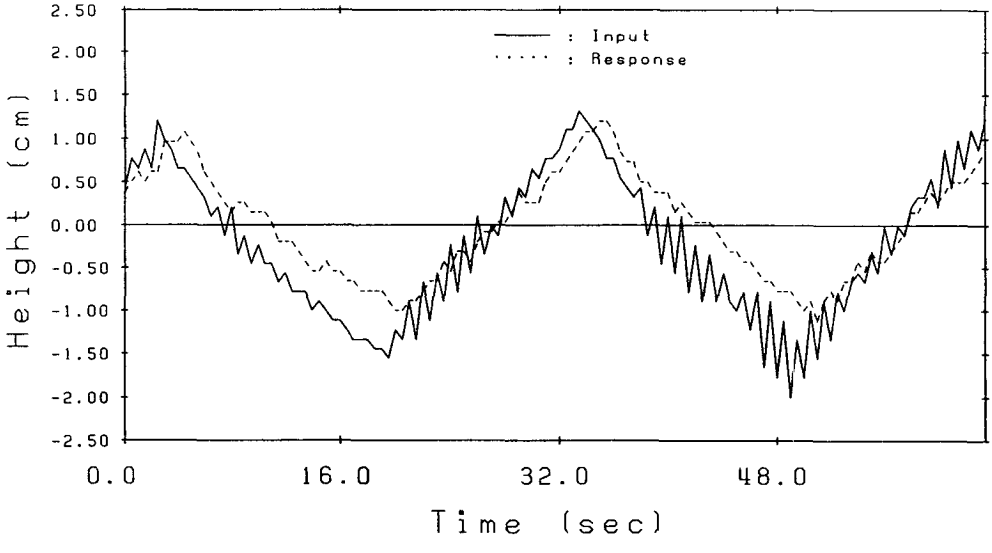

Fig. 4.6 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.35cm and period of 32.9sec.

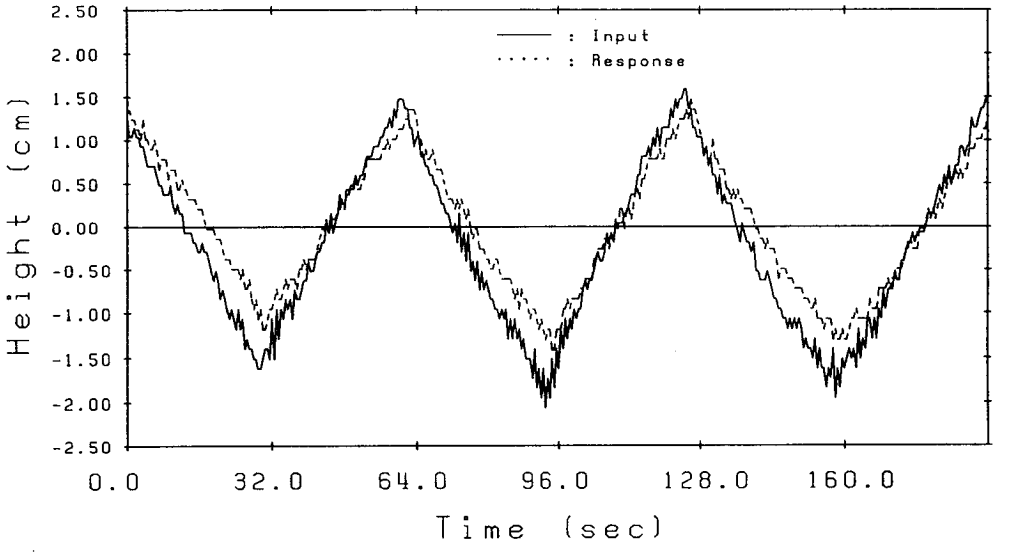

Fig. 4.7 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.7cm and period of 60.4sec.

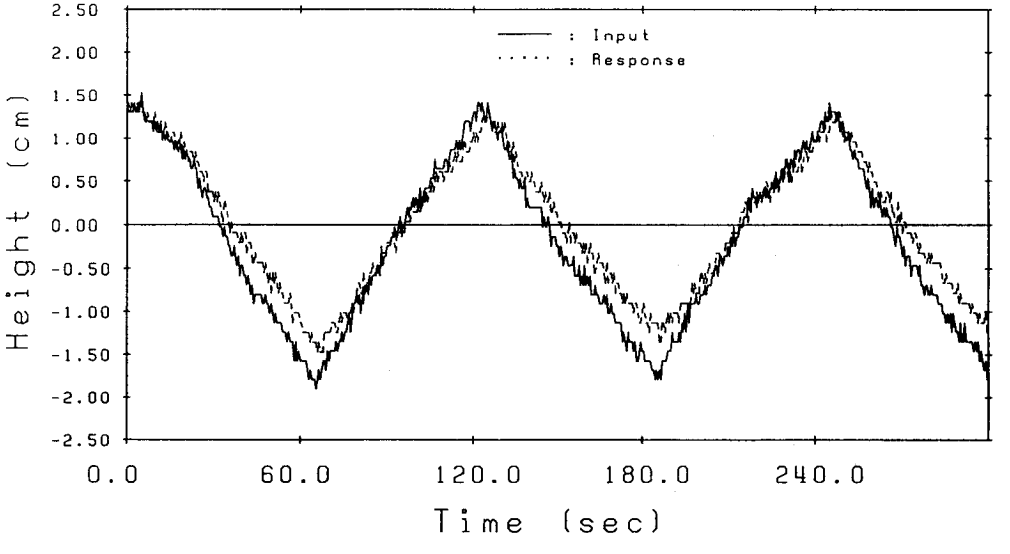

Fig. 4.8 Experimantal results of the response of tide-well model to an input of the wave form with amplitude of 1.65cm and period of 116sec.

第 5 章 結論 및 提言

檢潮儀의 기본적인 구조는 海岸線이나 港內 岸壁 가까이에 檢潮우물(tide-well)을 설치하여 導水管(intake pipe)을 통해 外海와 연결하여 外海의 潮位變化에 대해 檢潮우물 내의 水位가 상하운동하는 것을 관측하는 것이다. 이는 導水管(Intake pipe)의 작용에 의해 周期가 짧은 파랑을 제외하고 長周期의 潮汐을 기록하도록 되어 있다. 도소관을 가진 檢潮우물 관측 시스템의 장점은 여러가지가 있겠으나 그중에서도 가장 중요한 것은 潮汐뿐만아니라 地震海溢, 港內副振動 등의 관측을 위한 가장 일반적인 계기시스템 이라는 것과 이 시스템으로 부터의 기록은 연구목적을 위한 平均海面(mean sea level)의 결정을 위해 사용될 수 있다. 그러나 한편 때때로 檢潮儀의 기록은 檢潮儀 시스템의 非線形性 反應에 의해 때때로 地震海溢, 港內副振動 등의기록은 상당히 변형되는 경우도 있는 것으로 알려지고 있다.

檢潮우물은 潮汐을 관측하는 것을 주된 목적으로 하고 있고, 또한 地震海溢나 副振動 관측계기로서 세계적으로 가장 일반적으로 이용되고 있다. 이 때문에 조사연구의 자료로서 檢潮記錄이 많이 이용되고 있다. 이러한 檢潮記錄을 수집.해석하기 위해서는 각 檢潮所의 反應特性을 분명히 하는 것이 중요하며, 또 地震海溢, 副振動의 發生,傳播 등의 연구를 행하는 수치실험의 결과를 관측결과와 비교하기 위해서도 필요하다. 본 연구에서는 檢潮資料의 효율적인 이용 및 檢潮所의 潮位記錄 資料로 부터 副振動 Signal의 적합한 反應 여부를 알기 위해서 1개의 導水管과 檢潮우물을 가진 檢潮所의 反應特性을 조사하고 이러한 구조를 가진 釜山港 檢潮所를 대상으로 反應函數의 水値積分과 模型實驗을 통해서 그 反應特性을 조사하였다.

釜山港 檢潮所 檢潮우물의 구조로 부터 결정된 檢潮우물의 反應係數는 0.06이었고 檢潮정 안박의 동시관측자료를 기초로 구한 反應係數는 0.077이었다. 전자의 反應係數

를 이용하여 反應函數(response function)를 Gill계수 Runge-Kutta 방법으로 수치적분하여 導水管內의 慣性을 무시했을 때와 고려했을 때의 反應을 조사하였다.

導水管內의 慣性을 무시했을 때 檢潮우물에 振幅 2.5m 그리고 周期가 각각 10초, 30초, 1분, 2분, 4분, 8분의 단순파가 내습한 경우 振幅의 減衰는 周期 10초에서 66.2%, 30초에서 18.3%이고 1분 이상의 周期에서는 振幅의 減衰가 거의 없음을 나타냈고, 振幅 19cmm 인 경우는 周期 10초에서 12.0%, 30초에서 0.2%의 振幅 減衰를 보였고 여기서도 1분 이상의 周期에서는 振幅의 減衰가 거의 없음을 나타냈다. 이것은 각 周期에 대한 振幅反應(amplitude response)과 잘 일치함을 나타낸다. 周期의 위상지연은 0.5초에서 3초의 범위를 나타내며 4분이상의 입력파에 대해서는 위상지연이 없었다.

導水管內의 慣性을 고려했을 때 振幅 2.5m의 각 周期에 대한 振幅의 減衰는 10초에서 71.7%, 30초에서 12.8%의 振幅減衰를 보였으나 1분에서는 8.7%, 2분에서는 2.8% 크게 나타나고, 4분이상의 周期에서는 振幅減衰가 거의 없었으며 위상지연도 거의 보이지 않았다. 한편 입사파의 振幅을 19cm로 작게 했을 때 30초, 1분의 周期에서 오히려 檢潮우물안의 反應이 입사파 보다 크게 나타나고, 周期가 2분 이상의 경우에는 檢潮우물안의 수면이 振動하는 경우가 나타나고 있어 導水管內의 유속변동의 항이 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 특히 周期가 8분인 경우 周期 27초 전후의 振動이 나타났고 周期 40분의 파가 입력한 경우에는 周期 36초 전후의 振動이 생김을 볼 수 있었다. Noye(1974b)에 의하면 어떤 크기의 檢潮우물에서는 導水管內의 흐름의 turbulence에 기인하여 어떤 周期의 작은 파에 대해서는 反應이 減衰대신에 증가되는 결과를 초래할 수 있다고 기술하고 있다. 이상에서 보면 慣性項을 고려했을 때 큰 파에 대해서는 유속변동의 항이 그다지 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있으나, 작은 水位變化의 경우에는 상당히 큰 영향을 가지는 것을 볼 수 있으며, 경우에 따라서는 우물내의 反應이 입력파보다 크고, 또 振動하는 일도 있었다. 그러나 地震海溢 등의 파형이 단순한

正弦波가 아니고 高周波數 成分을 포함한 것, 海洋生物의 附着이나 堆積物의 堆積으로 導水管의 내부가 좁아지고 摩擦損失이 큰 것 등에 의해 실제의 地震海溢 등의 파형과는 상당히 다를 것이다.

한편 축적 0.07(Lr=0.07)인 檢潮우물 모형을 사용한 모형실험에서 振幅 1.15-1.70cm (prototype에서 16.4-24.3cm), 周期 2.6-116초(prototype에서 9.8-7.3분)의 水位變化에 대한 檢潮우물안의 反應결과를 보면 周期 2분 미만에서 약82% - 15%의 振幅減衰를 보였고 3분이상의 周期에 대해서는 振幅減衰가 거의 없었다. 앞에 기술한 反應函數의 수치적분해와 비교하면 4분이상의 周期에 대한 振幅減衰가 거의 없는 것은 잘 맞는다고 할 수 있으나, 실험에서는 檢潮우물안에서의 수면의 振動이 나타나지 않았고 또 反應이 입사파보타 큰 경우도 보이지 않았다.

일반적으로 檢潮우물 내경과 導水管 내경의 비가 0.1정도인 경우 周期 8분에서도 상당한 振幅減衰를 보인 것으로 조사되었다(Satake, 1988). 따라서 釜山港의 導水管 내경을 0.1로 해서 反應函數를 기초로 反應特性을 조사한 결과 마찬가지로 8분의 周期를 가진 입사파에 대해서도 상당한 振幅減衰를 나타냈다. 이상의 결과를 종합해 보면 檢潮우물관측형의 檢潮所에서 反應係數는 檢潮우물의 형태 특히 導水管의 내경 및 길이에 따라 크게 다르며, 이론적인 조사결과 導水管의 내경이 작을수록, 그리고 길이가 길수록 작아짐을 나타내고 導水管의 내경이 크고 길이가 짧아질수록 反應係數는 커지며, 이 경우 짧은 周期의 파에 대해서도 振幅減衰가 적어진다는 사실을 알 수 있다. 그리고 해양연구소(1989년)에 의하면 釜山港의1988년 檢潮資料로부터 조사한 振幅 10cm 이상의 副振動 周期는 81% 이상이 25분에서 59사이에 분포하고 40분에서 55분 사이의 周期를 가진 副振動이 현저하다고 기술하고 있다. 따라서 釜山港 檢潮所의 檢潮우물 反應特性 조사결과로부터 판단할 때, 周期 1분 이상의 파형은 거의 振幅減衰가 없는 것으로 보아 釜山港에서의 수십분의 周期를 가진 副振動 등은 보정할 필요가 없을 것으로 생각된다.

海岸이나 港灣에 위치한 檢潮所에서 反應特性 조사결과 地震海溢, 副振動 등의 파형이 減衰가 많은 경우에 地震海溢, 副振動 등의 파형을 조사하기 위해서는 檢潮儀의 자기기록으로부터 檢潮우물의 反應을 보정해서 檢潮우물 밖의 水位變化를 구할 필요가 있다. 檢潮우물 밖의 水位變化는 일단 檢潮우물의 反應係數를 알면 이를 이용해서 檢潮記錄으로부터 우물밖의 파형을 추정할 수 있다. 한편 현재의 우리나라 檢潮우물 觀測型 檢潮儀에서는 水位變化를 기록할 때 기록지의 전송속도가 20㎜/hour로 대단히 느리기 때문에 颱風이나 暴風 등의 통과시 檢潮記錄을 읽고 數値化하는 데에는 오차의 영향이 클 것이 예상되므로 향후 檢潮記錄을 디지탈화하는 것이 바람직 할 것이다.

參 考 文 獻

運輸省港灣技術研究所. 1983. 1983年 日本海 中部 地震波の 實態と 二.三の 考察. 港灣技研資料. No. 470.

日本文部省. 1988. 日本海中部Tsunamiの發生. 增幅機構と破壞力. 自然災害特別研究成果.

日本土木學會. 1985. 水理公式集.

최병호. 1983. 우리나라 精密水準網에 關한 研究(우리나라 主要港灣의 平均海面 및 潮位分析). 국립지리원, 한국측지학회 보고서, pp.332.

해양연구소. 1989. 연안방재시설의 설계기준 산출 연구(I).BSPG 00076-230-2.

Cross, R.H. 1968. Tide gage frequency response. J. Wat Ways Harb. Div. Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 317-329.

Loomis, H. G., 1983. The nonlinear response of a tide gage to a tsunami. Proc. 1983 tsunami Sympo., pp. 177-185.

Murakami, k. 1983. The response of tide gage to the tsunami. Tech. Note, Port Habour Res. Inst., 470, pp.217-223(in Japanese)

Noye, B.J. 1974a. Tide-well system I: Some non-linear effects of the conventional tide well. J. Mar. Res.,32(1) :1129-153.

Noye, B.J. 1974b. Tide-well system II:The Frequency Response of a Linear Tide Well System. J.Mar.Res.,32(2):156-181.

Noye, B.J. 1974. Tide-well system III: Improved interpretation of tide well records. J. Mar. Res., 32(2) : 183-194.

Okada, M. 1985. Response of some tide-well in Japan to tsunami.

Proc. Int. Tsunami Symp., 208-213.

Okada, M. 1989. Correction of tsunami waveform deeformed by non-linear tide gage response. Proc. Int. Tsunami Symp.

Satake, K. 1988. Tide gauge response to tsunami:Measurement at 40 tide gauge stations in Japan. J. Mar. res., 46(3):557-571.