

副振動에 대한 檢潮우물의 反應 特性 Response of Tide-Well on Seiche

박광순* · 이동영* · 심재설*

Kwang Soon Park*, Dong Young Lee* and Jae Seol Shim*

要 旨 : 본 연구에서는 검조자료의 효율적인 이용 및 검조소의 조위기록 자료로부터 부진동 signal의 적합한 반응 여부를 알기 위해서 도수관을 가진 검조소의 반응특성을 이론적으로 검토하고, 검조우물 안과 밖에서의 현장 동시관측 자료와 시스템의 구조를 기초로 목호항검조소의 부진동에 대한 반응 특성을 조사하였다. 검조우물 안과 밖에서의 현장 동시관측자료로 구한 목호항 검조우물의 반응계수는 0.01이었고, 한편 이와 비교하기 위해 목호항검조소 검조우물의 구조로부터 구한 검조우물의 반응계수는 0.016이었다. 목호항검조소의 검조우물 반응특성 조사결과, 목호항에서의 수십분 이상의 주기를 가진 부진동에 대해서는 진폭반응이 거의 1.0으로 볼 수 있고, 따라서 이들의 검조기록자료는 보정하지 않고 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

Abstract □ The advantage of tide-well system with an intake pipe 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 intake pipe to seiche was examined by in situ measurements for Mukho 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 coefficient of the Mukho tidal station was 0.01. The tide records can be used for the determination of mean sea levels for surveying purposes, as the response of tide-well system can be estimated.

1. 서 론

해양조석을 관측하는 것을 주된 목적으로 하고 있는 검조우물은 현재 조석뿐만 아니라 지진해일이나 부진동 관측계기로서 세계적으로 가장 일반적으로 이용되고 있다. 지금까지 사용되어온 검조시스템은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 미국 등에서 사용되어 온 orifice를 가진 검조시스템과 일본과 우리나라에서 주로 사용되고 있는 도수관(intake pipe)을 가진 검조시스템으로 구분할 수 있다.

도수관을 가진 검조시스템은 해안선이나 항내 안벽 가까이에 검조우물(tide-well)을 설치하여 도수관을 통해 외해 쪽과 연결하여 외해 쪽의 조위변화에 대해 검조우물 내의 수위가 상하운동하는 것을 관측하는

것이다. 이는 도수관의 작용에 의해 주기가 짧은 파랑을 제외하고 장주기의 조석을 기록하도록 되어있다.

이러한 검조시스템은 조석뿐만 아니라 지진해일, 항내부진동 등의 관측을 위한 가장 일반적인 계측시스템이지만, 한편 검조소의 기록은 검조시스템의 비선형성 반응에 의해 때때로 지진해일, 항내부진동 등의 기록은 상당히 변형되는 경우도 있다. 예를 들면 시각적으로 관측된 지진해일 또는 항내부진동의 높이는 상기의 검조시스템의 반응에 의해 검조소에 기록된 높이와는 상당히 다른 경우도 있다. 그리고 설치되어 오랜 기간이 지난 경우에는 해양생물 등이 도수관내에 부착하여 그 구조나 수리학적 특성으로부터 반응특성을 조사하는 것이 어렵다. 그래서 대부분이 도수관을 가진 검조시스템인 일본의 경우 검

*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)

조소의 구조로부터 지진해일에 대한 반응특성을 수리학적으로 조사하거나, Drainage test(Okada, 1985; Satake, 1988; Noye, 1974)에 의해 검조소에서 반응계수(response coefficient)를 결정하여, 이 실험결과를 사용해서 검조우물 밖의 수위를 계산한 바 있다. 조위변동에 대한 검조의 반응을 모형실험 또는 검조의 안밖의 수위를 동시 관측하여 도수관의 효과를 조사한 경우도 있다.

검조시스템이 항내 부진동, 지진해일 등도 기록하기 때문에 지금까지 조사연구의 자료로서 검조기록이 많이 이용되어 왔다. 그러나 이러한 검조기록을 수집, 해석하기 위해서는 각 검조시스템의 반응특성을 파악하는 것이 중요하다. 또 지진해일, 부진동의 발생, 전파 등의 연구를 행하는 수치실험의 결과를 관측결과와 비교하기 위해서도 필요하다. 우리 나라에서도 검조자료의 효율적인 이용 및 검조소의 조위기록 자료로부터 부진동 signal의 적합한 반응 여부를 알기 위해서는 먼저 각 검조시스템의 반응특성을 검토할 필요가 있다.

따라서 여기서는 도수관을 가진 검조소의 반응특성을 이론적으로 검토하고, 검조우물 안과 밖에서의 동시 현장관측 결과를 토대로 목호항검조소의 부진동에 대한 반응특성을 조사하였다.

2. 도수관(intake pipe)을 가진 검조우물(tide-well)의 반응

Fig. 1과 같은 도수관을 가진 검조소에서 도수관의 유선(streamline)을 따라 Bernoulli's equation을 적용할 수 있다.

$$\frac{1}{2}u^2 + gz + \frac{P}{\rho} = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, u : 도수관내의 유속

P : 압력

ϕ : 속도포텐셜(velocity potential)

어떤 짧은 기간 동안 흐름이 일정하다고 가정하면, $(\partial \phi / \partial t) = 0$ 이고, 이때 $(gz + P/\rho)$ 의 값이 도수관을 따라 일정하다고 하면, 검조우물 안과 밖의 수두(head) 차는 같다. 따라서 도수관내의 유속 u 는 다음식으로 표시할 수 있다.

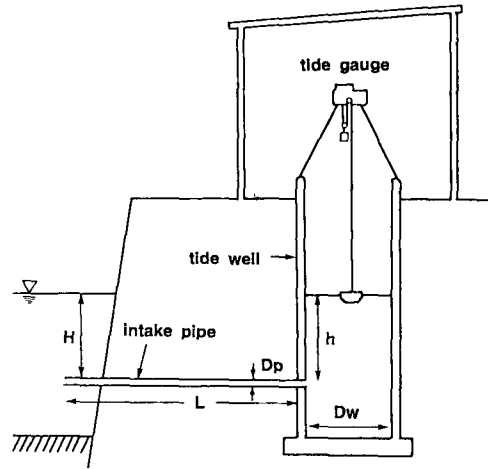


Fig. 1. Basic model of tide-well.

$$u = \sqrt{\frac{2g(H-h)}{C}} \quad H \geq h \quad (2)$$

$$u = -\sqrt{\frac{2g(H-h)}{C}} \quad h \geq H \quad (3)$$

한편 수위차 $(H-h)$ 는 도수관으로의 유입에 의한 손실수두 h_e , 관내의 마찰에 의한 손실 수두 h_f , 유출에 의한 손실 수두 h_{ex} 의 합과 같다.

$$H-h = h_e + h_f + h_{ex} \quad (4)$$

여기서, H : 검조우물 밖의 수위

h : 검조우물 안의 수위

$$h_e = f_e \frac{u^2}{2g}$$

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g}$$

$$h_{ex} = f_{ex} \frac{u^2}{2g}$$

$$f_e: \text{유입손실계수}(=0.5) \quad (5)$$

$$f: \text{마찰손실계수} \left(= 124.5 \frac{n^2}{D_p^{1/2}} \right) \quad (6)$$

$$f_{ex}: \text{유출손실계수}(=1.0) \quad (7)$$

C : 무차원 마찰계수

$$C = f_e + \frac{fL}{D} + f_{ex} = 1.5 + \frac{124.5n^2L}{D_p^{4/3}} \quad (8)$$

D_p : 도수관의 직경

L : 도수관의 길이

여기서 n 은 Manning의 조도계수로 도수관으로 잘 이용되는 흙관(Hume tube)에서는 $n=0.013$ (Murakami, 1983)이다. 그러나 관내에 생물이 부착하기도 하고 토사가 퇴적하면 n 의 값은 크게 되는 것으로 생각할 수 있다. 식 (6)은 관내의 흐름이 난류상태일 때 사용하는 것으로, 현저한 지진해일의 경우에도 임계 Reynolds 수(=2310)를 충분히 넘기 때문에 문제는 없다(일본문부성, 1988). 식 (7)의 $f_{ex}=1.0$ 은 도수관의 직경이 검조우물의 직경보다 상당히 작은 경우 일 때의 값이지만 통상 f_{ex} 는 1.0에 가깝다(일본문부성, 1988). 검조우물안에서 수위는

$$\frac{dh}{dt} = \frac{A_1}{A_2} u \quad (9)$$

또는

$$\frac{dh}{dt} = \text{sign}(H-h) \frac{A_1}{A_2} \sqrt{\frac{2g}{C} |H-h|} \quad (10)$$

여기서, A_1 : 도수관의 면적

A_2 : 검조우물의 면적

이는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = W \text{sign}(H-h) \sqrt{2g|H-h|} \quad (11)$$

여기서, sign : $(H-h)$ 의 부호에 따라 1 또는 -1인 부호함수(sign function)

W 는 무차원 반응계수로 다음과 같다.

$$W = \left(\frac{D_p}{D_w} \right)^2 / C^{1/2} \quad (12)$$

D_p : 도수관의 직경

D_w : 검조우물의 직경

검조우물의 반응계수(W)는 검조우물의 크기 뿐만 아니라 퇴적물, 패류 등의 해양생물 그리고 도수관 내의 다른 장애물에 따라 다르다. 식 (11)은 비선형 방정식으로 외해의 조위변동 H 로부터 검조우물 내의 수위 h 를 해석적으로 구하는 것은 용이하지 않다. 예를들면 단순한 파형의 파 $H=a \sin \omega t$ 가 입력한 경우에 대해서도 엄밀해는 구할 수 없다. 그래서 Ru-

nge-Kutta-Gill 방법 등으로 수치적분해서 진폭의 감소나 위상의 지연을 조사하는 방법이 있다(Cross, 1968).

만약 $H=a_0 \sin(2\pi t/T)$ 라고 하면 이때 검조시스템의 진폭반응(amplitude response)은

$$R = \frac{a_0}{h_{\max}} \quad (13)$$

검조시스템에 의한 관측에서 검조우물내의 수위 h 가 구해지면 외해의 수위 H 를 다음식에 의해 계산할 수 있다.

$$H = h + \frac{1}{2gW^2} \text{sign} \left(\frac{dh}{dt} \right) \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \quad (14)$$

3. 반응계수 결정 및 검조기록으로부터 외해 수위 계산

3.1 반응계수의 결정방법

검조기록 자료를 이용하기 위해서는 쓰나미나 부진동에 대한 검조시스템의 반응특성을 파악해야 하고, 이러한 반응특성을 결정짓는 것은 시스템의 구조에 따른 반응계수의 정확한 결정이 선행되어야 한다. 각 검조소에 대한 반응계수가 정확히 평가되면 검조기록으로부터 검조우물 밖의 외해 수위를 계산할 수 있다.

검조소의 반응계수를 평가하기 위한 방법으로는 식 (12)와 같이 검조소의 구조로부터 지진해일에 대한 반응특성을 수리학적으로 조사하거나, Drainage test (Okada, 1985; Satake, 1988; Noye, 1974)에 의해 검조우물안의 해수를 펌프로 모두 퍼낸 다음 일정시간(예를들면 10초)마다 회복 수위를 관측함으로써 반응계수(response coefficient)를 결정하여, 이 실험결과를 사용해서 검조우물 밖의 수위를 계산하는 방법이 있다. 그리고 조위변동에 대한 검조소의 반응을 모형 실험 또는 검조우물 안팎의 수위를 동시 관측하여 도수관의 효과를 조사하는 방법도 생각할 수 있다.

3.2 검조기록으로부터 외해 수위의 계산

검조시스템이 비선형인 경우 지배방정식은

$$\frac{dH_2}{dt} + V I_2^{1/2} \text{sign}(H_w) = \frac{dH}{dt} \quad (15)$$

여기서, $H_w = H - h$

한편 Noye(1974)는 긴 도수관을 가진 검조우물에 대해, 무차원화한 주파수 β_2 를 다음 식으로 정의했다.

$$\beta_2 = \left(\frac{32\nu L D_w^2}{g D_p^4} \right) \omega \quad (17)$$

여기서 ν 는 해수의 동점성계수($= 1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$)이다. 그리고 β_2 의 함수로서 H 와 h 의 진폭비 및 위상차를 구하였고, 여기에서 도입된 검조우물 파라메타 N 이 일정 조건을 만족하면, 즉 구조 자체가 일정 조건을 만족하면 시스템의 반응은 선형이 됨을 이론과 실험을 통해 보였다. 검조우물 파라메타 N 은 다음과 같다(Noye, 1974).

$$N = \frac{128\nu^2 L D_w^2}{g D_p^6} \quad (18)$$

다시 말하면 검조우물 파라메타가 $N \geq 5$ 인 경우, 정상 Poiseuille flow를 가정했을 때, 시스템은 선형이 되고 반응은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dH_w}{dt} + C_2 H_w = \frac{dH}{dt} \quad (19)$$

여기서 C_2 는 다음과 같이 주어진다(Noye, 1974).

$$C_2 = \frac{g D_p^4}{32\nu L D_w^2} \quad (20)$$

조석 관측기록은 검조우물내의 수위 h 로, 특히 조석 주기의 수위 h 는 외해의 수위 H 와 같다. 그러나 조석주기 보다 짧은 고주파수의 경우 수위차

$$H_w = H - h \quad (21)$$

는 무시할 수 없게 된다. 비선형 시스템의 경우

$$H = h + \frac{1}{2gW^2} \text{sign}\left(\frac{dh}{dt}\right) \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \quad (22)$$

로 나타낼 수 있고, 검조우물 파라메타 N 이 $N \geq 5$ 인 경우에는 시스템은 선형이 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다(Noye, 1974).

$$H = h + \frac{1}{C_2} \frac{dh}{dt} \quad (23)$$

따라서 검조시스템에 의한 관측에서 검조우물내의 수위 h 가 구해지면 외해의 수위 H 를 식 (22), (23)에 의해 계산할 수 있다. 이 방법은 검조소의 응답특성의 보정에 사용되고 있고, 또 우리나라 검조시스템의 기록에도 적용할 수 있으나 식 (22)는 $(dh/dt)^2$ 의 항을 포함하기 때문에 큰 쓰나미의 경우 검조기록을 읽는데서 오는 오차의 영향이 크기 쉽다. 결국은 도수관을 가진 검조소의 반응특성은 검조우물 계수 W 또는 Noye(1974)가 도입한 검조우물 파라메타 N 의 값에 의해 결정됨을 알 수 있고, 따라서 이를 정확히 평가하는 것이 중요하다.

4. 묵호항검조소의 반응 특성

묵호항 검조소의 반응특성을 조사하기 위해 검조소의 안과 밖에 조위계를 동시에 설치하여 1993년 8월 5일 14:00부터 매 5초마다 약 14일간 검조우물 안과 밖에서 수위변동을 관측하였다. 이 관측자료중 8월 6일 14시부터 17일까지 11일 간의 매 5초 간격의 데이터를 12개(1분) 평균해서 안과 밖에서 1분마다 수위변동을 나타낸 것이 Fig. 2와 같다. 그림에서 보는

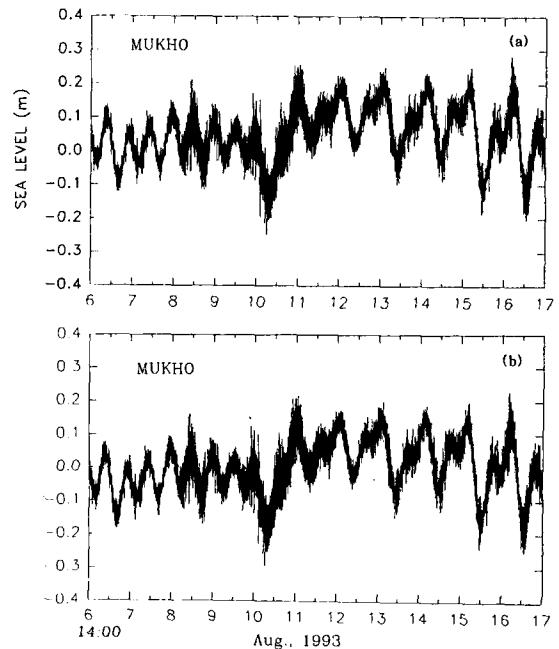


Fig. 2. Time series of sea level variation observed at Mukho a) inside tide-well, b) outside tide-well.

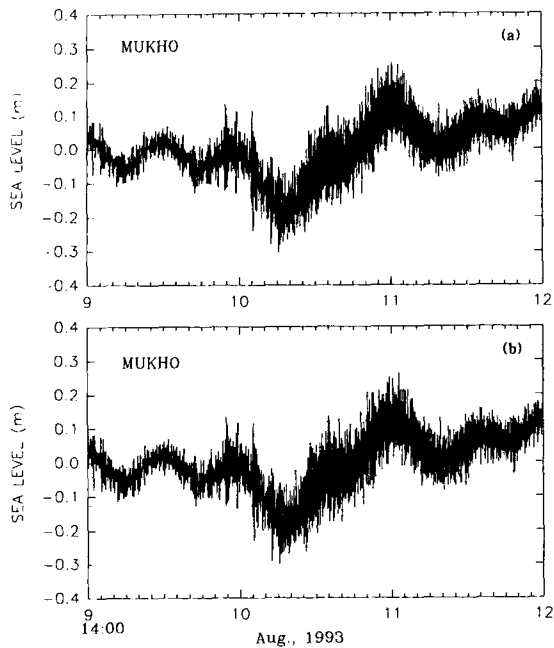


Fig. 3. Time series of sea level variation observed at Mukho during the passage of typhoon Robyn a) inside tide-well. b) outside tide-well.

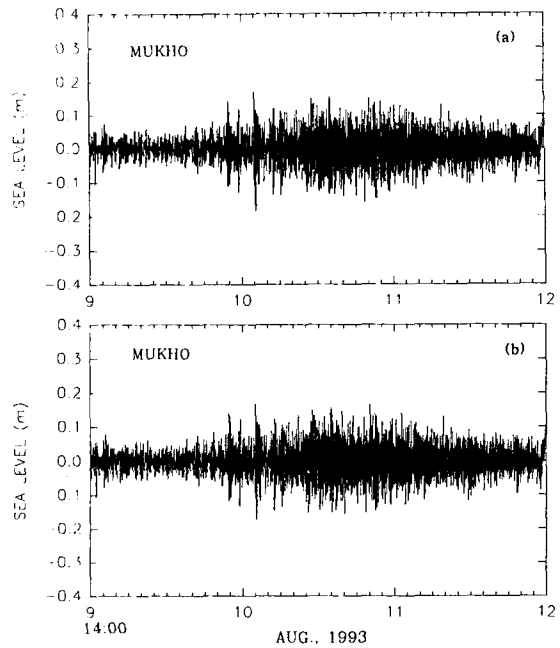


Fig. 4. Time series of seiche during the passage of typhoon Robyn a) inside tide-well. b) outside tide-well.

바와 같이 이 관측 기간중 8월 11일 전후해서 제7호 태풍인 Robyn이 통과하였고, 이로 인해 부진동이 현저한 기간의 자료를 얻을 수가 있었다. 부진동이 현저했던 11일을 전후한 3일 동안의 자료를 6개(매 30초) 평균해서 30초마다의 수위변동을 그린 것이 Fig. 3과 같고, 이 자료로부터 조석의 trend를 제거하고 부진동 성분만 추출해서 그린 것이 Fig. 4와 같다. 여기서도 보여지듯이 8월 10일부터 11일에 부진동이 현저했음을 알 수 있다.

따라서 8월 10일 14시부터 8월 11일 14시까지 1일간의 매 5초간 17280개의 자료를 분석하였다. 이 기간동안의 검조우물 안과 밖의 자료와 식 (14)를 이용하여 목호항 검조시스템의 반응계수(well coefficient) W 를 계산하였다. 동시 관측자료로부터 계산된 검조우물 계수 W 는 0.01이었다. 이 검조우물 계수를 사용하여 검조우물 밖의 입사파 진폭 0.1 m, 0.3 m, 0.5 m에 대한 목호항 검조소의 주기별 진폭반응(amplitude response)을 구한 것이 Fig. 5(a)와 같다. 여기서 보면 진폭 0.1 m의 경우 1분 이상의 주기성분은 거의 감쇠가 없음을 볼 수 있고, 진폭 0.3 m의 경우 약 2분 이상의 주기성분 그리고 진폭 0.5 m의 경우 2분 40초

이상의 주기성분은 거의 감쇠가 없음을 알 수 있으며, 입사파의 진폭이 커질수록 검조시스템에 의해 감쇠가 없는 주기도 커짐을 알 수 있다. 한편 동시관측자료나 drainage test의 실험자료가 없는 경우 검조소의 구조로부터 반응계수를 평가할 수 있는데, 식 (12)와 목호항 검조소의 구조자료로부터 계산한 검조우물 계수 W 는 $n=0.013$ 일 경우 0.016이었고, 위와 마찬가지로 검조우물 밖의 입사파 진폭 0.1 m, 0.3 m, 0.5 m에 대한 목호항 검조소의 주기별 진폭반응을 구해보면 Fig. 5(b)와 같다. 이 경우 진폭 0.1 m의 경우 40초 이상의 주기에서 진폭반응은 거의 1이었고, 진폭 0.3 m의 경우 약 1분 20초 이상에서 그리고 진폭 0.5 m의 경우 1분 40초 이상에서 진폭반응이 거의 1.0임을 볼 수 있으며, 계수가 커질수록 검조시스템에 의해 진폭반응이 1인 주기가 작아짐을 알 수 있다.

검조우물 안과 밖의 관측자료를 스펙트럼 분석한 것이 Fig. 6과 같다. 여기서 알 수 있듯이 에너지 밀도는 입사파의 주기가 1000초(16.6분)에서 피크를 보이며, 이 이상의 주기에서는 감쇠가 없음을 볼 수 있다. 단 100초 미만에서 검조우물 밖의 에너지에 비해 안의 에너지가 감쇠함을 볼 수 있고 10초를

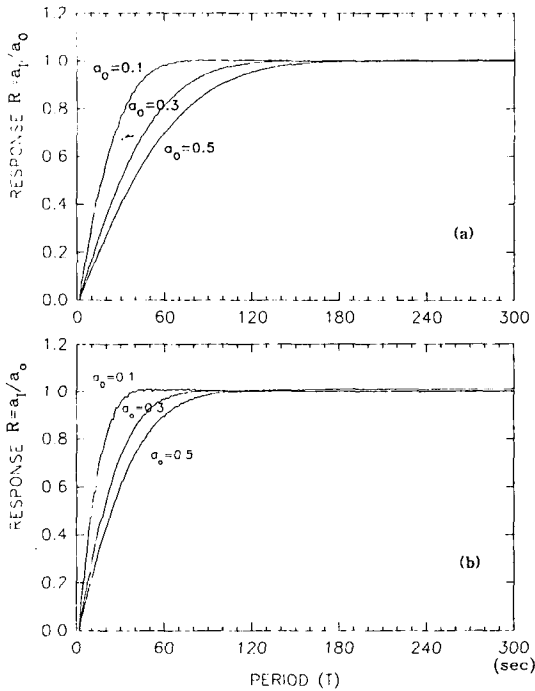


Fig. 5. Amplitude response of seiche period using a) observed data ($W=0.01$), b) tide-well system ($W=0.016$).

진후해서는 상당한 에너지 감쇠가 있음을 볼 수 있다.

5. 결론 및 고찰

해안이나 항만에 위치한 검조소에서 반응특성 조사결과 지진해일, 부진동 등의 파형이 감쇠가 많은 경우에 지진해일, 부진동 등의 파형을 조사하기 위해서는 검조의 자기기록으로부터 검조우물의 반응을 보정해서 검조우물 밖의 수위변화를 구할 필요가 있다. 검조우물 밖의 수위변화는 일단 검조우물의 반응계수를 알면 이를 이용해서 검조기록으로부터 우물밖의 파형을 추정할 수 있다.

본 조사에서는 검조자료의 효율적인 이용 및 검조소의 조위기록 자료로부터 부진동 signal의 적합한 반응 여부를 알기 위해서 1개의 도수관과 검조우물을 가진 목호항검조소의 반응특성을 현장 동시관측 자료와 시스템의 구조를 토대로 조사하였다.

목호항 검조소의 부진동에 대한 반응을 조사하기 위해 검조우물 안과 밖에 자기기록식 파고조위계를 설치하여 동시에 관측을 실시하였고, 마침 기기 설

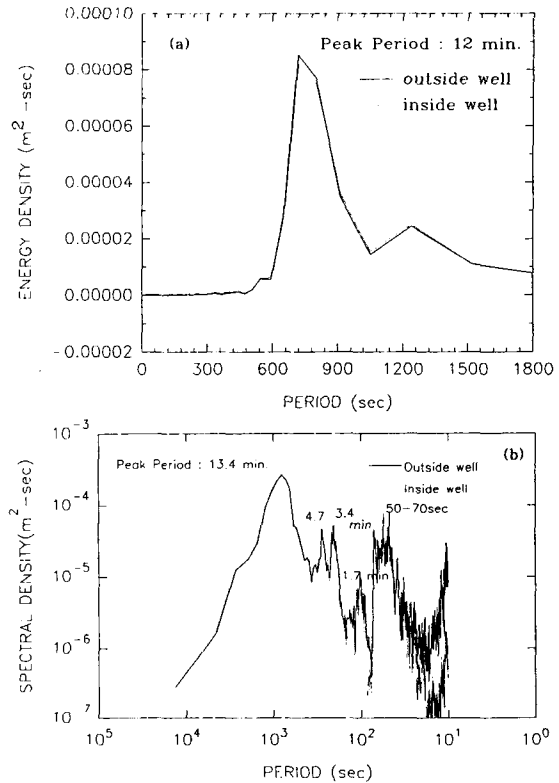


Fig. 6. Spectral analysis of seiche a) at ordinary times, b) during the typhoon Robyn.

치기간동안 제7호 태풍인 Robyn이 통과하여 항내에서의 현저한 부진동을 관측할 수 있었다. 이로부터 구한 목호항 검조소의 반응계수는 0.01이었고, 한편 이와 비교를 위해 목호항검조소 검조우물의 구조로부터 구한 검조우물의 반응계수는 0.016이었다.

태풍 Robyn 통과시 부진동이 현저했던 기간의 자료분석 결과 현저한 부진동의 주기는 16.6분으로 진폭은 0.1-0.3m의 범위를 보이고 있다. 목호항 검조소의 부진동에 대한 진폭반응 분석결과 입사파의 진폭 1m 미만의 경우 주기가 2-3분 이상에서는 거의 1.0이었다. 한편 입사파의 진폭이 3m로 커질 경우를 가정하면, 주기가 4분 20초 이상에서는 진폭반응이 1.0으로 나타났다. 그러나 고주파수는 풍파성분은 40-50% 이상의 감쇠를 보이고 있다. 이상의 목호항 검조소의 검조우물 반응특성 조사결과로부터 판단할 때, 목호항에서의 수십분 이상의 주기를 가진 부진동에 대해서는 진폭반응이 거의 1.0이라고 볼 수 있고, 따라서 이들의 검조기록자료는 보정하지 않고 사용할

수 있는 것으로 판단된다.

한편 관측결과로부터 구한 반응계수와 검조소의 구조로부터 구한 반응계수를 비교하면 구조로부터 구한 반응계수가 약간 크게 나타났는데, 이는 해양생물의 부착이나 퇴적물의 퇴적 등에 의한 영향으로 간주할 수 있다. 해양연구소(1991)에서도 언급한 바와 같이 검조우물관측형의 검조소에서 반응계수는 검조우물의 형태 특히 도수관의 내경 및 길이에 따라 크게 다르며, 이론적인 조사결과 도수관의 내경이 작을수록, 그리고 길이가 길수록 반응계수가 작아지는 반면, 도수관의 내경이 크고 길이가 짧아질수록 반응계수는 커지며, 이 경우 짧은 주기의 파에 대해서도 진폭감쇠가 적어진다고 볼 수 있다.

謝 辭

본 연구는 한국해양연구소 '93년도 특정연구과제인 "國家綜合海洋觀測網 構築 技術 開發(III)" (BSPN 00184-628-2)의 일환으로 수행된 것임을 밝히며, 관측자료의 처리를 도와준 전기천 선임연구원에게 感謝를 드립니다.

참고문헌

運輸省港灣技術研究所, 1983. 1983年 日本海 中部 地震波의

- 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 Tsunami의 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.
 崔秉昊, 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, 한국 측지학회 보고서, pp.332.
 해양연구소, 1991. 검조우물반응특성에 관한 연구, BSPE 00202-331-2.
 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 Symp., pp.177-185.
 Murakami, K., 1983. The response of tide gage to the tsunami, Tech. Note. Port Harbour 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., 1974c. 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., pp.208-213.
 Okada, M., 1989. Correction of tsunami waveform deformed 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.