

Article

수압식 파고계 자료 분석에서 유속의 영향

이동영^{1*} · 오상호²

¹한국해양연구원 기후·연안재해연구부
²한국해양연구원 연안개발·에너지연구부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

The Significance of Current-effect on Analysis of Wave Data Obtained from a Subsurface Pressure Gauge

Dong-Young Lee^{1*} and Sang-Ho Oh²

¹Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI
²Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Subsurface pressure gauge has many advantages in measuring a wide range of wave spectra in coastal waters from wind waves to long waves. However, a shortcoming of the gauge is related to the difficulties in recovering surface wave spectra from subsurface pressure records. In this study, the effect of current on the pressure transfer function of the pressure gauge, and hence on the surface wave energy spectrum, was investigated by analyzing the subsurface pressure data based on the linear wave theory. For this purpose, laboratory experiments were carried out in a wave-current flume. Subsurface pressure records, as well as the surface elevation data, were obtained simultaneously under different wave and current conditions. Pressure transfer functions were obtained and compared with those estimated from the linear wave theory, both with and without inclusion of the current-effect. It was established that wave spectra obtained from subsurface pressure gauge were in closer agreement with those from surface wave gauge when current-effect on the pressure transfer function was taken into consideration for analysis.

Key words : pressure wave gauge, current-effect, pressure transfer function, wave analysis

1. 서 론

파랑은 항만 및 연안개발, 연안침식 재해방지 등 각종 연안 문제의 해결을 위해 가장 중요한 외력 정보로서 파랑을 효과적으로 관측하는 것은 매우 중요하다. 수심이 깊은 해역에서의 파랑 관측은 부표 내부에 부착된 가속도계로 연직 방향의 가속도를 측정하여 수면 변위를 구하는 부표식 파고계를 많이 이용하고 있다. 그 동안 우리나라의

연안 파랑관측시스템에서는 주로 부표식 파고계에 의한 2차원 파랑 스펙트럼의 관측이 채택되어 이용되어 왔다 (해운항만청 1986). 부표식 파고계를 이용하여 파랑 관측을 할 때는 풍파의 관측은 잘 할 수 있으나 장파 성분의 관측이 어렵고 연안의 낮은 수심에서 조류가 강할 때에는 부이식 파고계의 설치가 어려운 문제점이 있다. 또한, 부표와 같이 해상에 떠 있는 관측 장비는 항해 및 어로 활동에 의해 분실되거나 부서질 위험성이 큰 단점이 있다. 이에 비해 수중에서 수압변동을 측정하여 파랑을 관측하는 방법은 이와 같이 선박에 의한 충돌 및 분실의 위험성이

*Corresponding author. E-mail : dylee@kordi.re.kr

적어 안정적으로 파랑을 관측할 수 있으며, 풍파 뿐만 아니라 장파의 관측도 용이한 장점이 있다. 또한, 수압식 파고계를 이용한 연안파랑 관측은 지지구조물이 필요 없고 설치, 운영이 편리하며, 조위, 해일 등의 정보를 동시에 얻을 수 있는 점에서도 유리하다(Lee and Wang 1984). 한국 해양연구원에서는 실용적인 데이터 로거와 자기기록식 파고 및 조위계를 개발하고, 소모전류를 극소화시키고 메모리를 확장하여 한번 설치로 장기간 천해파랑관측이 가능토록 꾸준히 개선하여 사용하고 있다(Bahk et al. 1989).

다만, 수압식 파고계는 수중 압력의 측정으로 표면파를 간접적으로 측정하기 때문에 수중 압력자료로부터 표면파로 환산하는 과정에서 오차가 발생하는 것이 문제이다. 따라서 수압식 파고계는 이상 파랑과 같은 비선형파의 분석 및 조류가 공존할 때 흐름의 영향을 고려하여 정확한 파랑 정보를 얻을 수 있도록 분석 기술을 제고시키는 것이 필요하다. 수압식 파고계의 자료 분석상의 문제, 그 중에서도 특히 고주파 분석의 오차 문제 및 조류의 영향, 비선형의 영향 등에 관해서는 Lee and Wang(1984)에 의해 다루어진 바 있다. 한국해양연구원은 연안파랑 관측에 수압식 파고계의 적절한 활용을 위해 실험실 실험 및 현장의 여러 다른 환경에서 수압식 파고계와 부표식 파고계 및 ADCP 등의 동시 관측을 수행하여 수압식 파고계 자료의 분석 방법에 대한 검증 및 개선을 위한 일련의 연구를 수행해 왔다. 본 논문에서는 그 중에서 실험실 실험 자료 분석을 통해 얻어진 주요 결과를 소개하고 적용 방법에 관하여 논의하였다.

2. 수압식 파랑 자료 분석시 유속의 영향

수압식 파랑 관측 자료의 분석

수중에서 측정하는 압력은 대기압과 조석, 해일 등에 기인한 수면변동에 의한 정수압 그리고 파랑에 의한 동수압의 합으로 볼 수 있다.

$$P = P_a + \rho g(h-d) + P^+ \quad (1)$$

여기서, P : 관측된 계기압력

P_a : 해수면에서의 대기압

h : 해면 높이

d : 바닥에서 수압 센서까지의 높이

P^+ : 표면파에 의한 수중압력

ρ : 해수의 밀도

g : 중력가속도

여기서 풍파에 의한 성분과 장주기 성분은 주파수대가 서로 다르므로 풍파에 의한 성분 P^+ 와 장파 성분 h 는 다음과 같이 쉽게 분리할 수 있다.

$$h = \frac{(\bar{P} - P_a)}{\rho g} + d \quad (2)$$

$$P^+ = \bar{P} - P \quad (3)$$

여기서 \bar{P} 는 관측된 수중 압력 P 의 평균값이다.

$$\bar{P} = P_a + \rho g(h-d) \quad (4)$$

앞으로 수중 압력 P 를 ρg 로 나눈 물리량을 소문자 p 로 나타낸다. 섭동법을 사용하여 파의 수면변위 η 와 파에 의한 수중압력 p 를 2차항까지 표현하면 다음과 같다(Sharma 1981).

$$\eta = \eta_1 + \eta_{2m} + \eta_{2p} \quad (5)$$

$$p = p_1 + p_{2m} + p_{2p} \quad (6)$$

여기서 η_1 , p_1 은 수면 변동에 따른 수압의 선형 성분을 나타내며, η_{2m} 와 p_{2m} 은 표면과 수중 압력 변동의 비선형항 중에서 각각 선형 성분파의 주파수 차인 저조파(低調波, sub-harmonic) 성분을 나타내고 η_{2p} 와 p_{2p} 는 각각 선형 성분파의 주파수 합인 고조파(高調波, super-harmonic) 성분을 나타낸다.

바닥으로부터 높이 d 에서 측정된 압력에 대한 선형 전달함수 K_1 은 선형파 이론에서 다음과 같이 주어진다.

$$K_1 = \frac{p_1}{\eta_1} = \frac{\cosh(kd)}{\cosh(kh)} \quad (7)$$

여기서 k 는 파수를 나타낸다. 한편, 비선형 압력 성분의 압력 전달함수는 다음 식으로 표현된다(Lee and Wang 1984).

$$K_{2m} = \frac{p_{2m}}{\eta_{2m}} \quad (8)$$

$$K_{2p} = \frac{p_{2p}}{\eta_{2p}} \quad (9)$$

식 (7), (8) 그리고 (9)를 이용하면 파에 의한 수중 압력은 식 (6)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$p = K_1 \eta_1 + K_{2m} \eta_{2m} + K_{2p} \eta_{2p} \quad (10)$$

천해에서 이상파고시 비선형에 대한 고려는 관측된 수압 스펙트럼에서 선형 성분과 비선형 성분을 분리한 후, 선형 성분에 대해서는 선형파의 압력 전달함수, 비선형 성분에 대해서는 저조파 및 고조파에 대한 각각의 압력 전달함수를 적용하여 표면 파랑으로 환산할 수 있다.

선형파 이론에 의한 수압식 파고계 자료 분석

선형파에 대해서는 표면파는 수중압력 변화로부터 식

(7)에 의해

$$\eta_1 = \frac{1}{K_1} p_1 \tag{11}$$

여기서 K_1 은 흐름과 파가 공존하는 경우 다음 분산 방정식으로부터 k 를 구하여 식 (7)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kh + uk \cos \theta + vk \sin \theta} \tag{12}$$

여기서 θ 는 파향, u 및 v 는 유속 성분을 나타내며, ω 는 각 주파수를 나타낸다.

한편, 표면파의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_{\eta\eta} = S_{pp} \left(\frac{1}{K_1} \right)^2 \tag{13}$$

여기서 $S_{\eta\eta}$, S_{pp} 는 각각 표면파 및 수중압력의 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

각 성분파의 표면파와 수중압력 사이에 선형파 이론에 의한 관계가 성립할 때 수중압력은 다음과 같이 푸리에 (Fourier) 분석에 의한 각 성분파의 합으로 표현된다.

$$p_1(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t - \epsilon_i) \tag{14}$$

여기서 A_i , ω_i 그리고 ϵ_i 는 각각 i 번째 성분파의 진폭, 각주파수 그리고 위상을 나타낸다. 선형파인 경우에는 수압자료로부터 구한 성분파를 독립적인 선형파 성분이라고 가정하여 표면파의 시계열을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta_1(t) = \sum_i \frac{1}{K_1} A_i \cos(\omega_i t - \epsilon_i) \tag{15}$$

선형파 이론에 의한 수압식 파고계 자료의 분석에서는 고주파수대에서 잡음의 영향, 비선형 효과 그리고 흐름이 공존할 경우 그 영향으로 오차가 존재하며, 이에 대해서는 Lee and Wang(1984)에 자세히 설명되어 있다.

수압식 파고계에서 수심 및 조류의 영향 분석

흐름과 파가 공존하는 곳에서의 수압에 대한 흐름의 영향은 유속에 의해 파수가 달라져서 압력 전달함수에 영향을 주는 정역학적 효과 및 동압력(dynamic pressure) 변화에 의한 동역학적 효과로 구분할 수 있다. 식 (7)에서 보인 바와 같이 압력 전달함수 K_1 은 파수 k 의 함수인데 이 파수는 수심과 유속에 의해 달라진다. 흐름이 있는 곳에서는 파수는 식 (12)로부터 계산할 수 있으며, 다음과 같이 무차원 형태로 표현할 수 있다.

$$\sqrt{X \tanh(X)} = -\tilde{U} X + \tilde{W} \tag{16}$$

여기서 $X = kh$, $\tilde{U} = (u \cos \theta + v \sin \theta) / \sqrt{gh}$, $\tilde{W} = \omega \sqrt{g/h}$ 이다. 즉, X 는 파장(L)에 대한 수심(h)의 무차원수, \tilde{U} 은 파의 군속도(\sqrt{gh})에 대한 유속성분의 무차원수, \tilde{W} 는 수심(h)과 같은 길이에 해당하는 추의 진동 주파수($\sqrt{g/h}$)에 대한 파의 각주파수(ω)의 무차원수를 나타낸다. 정상 상태의 경우에 어떤 주어진 주파수에 대해서 파수는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 수심과 유속에 따라 달라진다. 압력 전달함수는 파수의 함수인데 그 파수가 흐름에 의하여 달라지므로 압력 전달함수는 흐름의 영향을 받는다. 파수의 변화는 주파수가 클 때, 특히 흐름이 파와 반대 방향일 때 크을 알 수 있다. 또한, 파와 흐름이 공존할 때의 압력 전달함수는 흐름에 의한 동압력의 영향도 추가된다.

각 성분파가 같은 방향으로 진행하는 경우 파랑에 의한 수압자 운동 성분 $U_w(t)$ 는 각 성분파의 합으로 나타낼 수 있다.

$$U_w(t) = \sum_i U_i \cos(\omega_i t - \epsilon_i) \tag{17}$$

여기서 U_i 는 i 번째 성분파에 의한 유속 성분을 나타낸다. 한편, 파랑과 흐름이 공존하는 경우의 동압력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P'(t) &= \frac{1}{2} \rho \left[\sum_i U_i \cos(\omega_i t - \epsilon_i) + U_c \cos \alpha \right]^2 + \frac{1}{2} \rho [U_c \sin \alpha]^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho \sum_i \sum_j U_i U_j \cos(\omega_i t - \epsilon_i) \cos(\omega_j t - \epsilon_j) \\ &\quad + \rho U_c \cos \alpha \sum U_i \cos(\omega_i t - \epsilon_i) + \frac{1}{2} \rho U_c^2 \end{aligned} \tag{18}$$

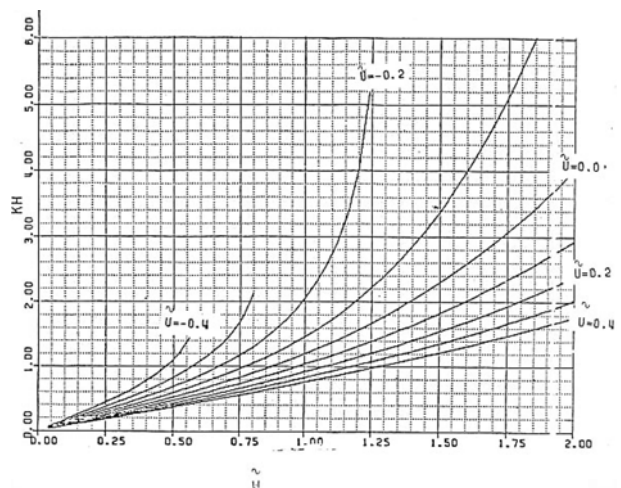


Fig. 1. Variation of kh with dimensionless current, \tilde{U} and dimensionless wave frequency \tilde{W} (Lee and Wang 1984).

여기서 U_c 는 유속, α 는 파랑과 흐름사이의 각을 나타낸다. 식 (18)의 첫 번째 항은 주파수가 $(\omega_i - \omega_j)$ 와 $(\omega_i + \omega_j)$ 인 2차 항으로서 식 (6)의 p_{2m} 및 p_{2p} 의 한 부분에 해당하며 선형파 이론에서는 다루지 않는 비선형 효과이다. 세 번째 항은 유속이 일정할 때 이에 의한 동압력으로 일정한 값을 가지며 평균 해면의 계산에 작용한다. 이 3개의 항 중에서 파랑과 공존하는 흐름의 일차적 영향은 두 번째 항에서 나오는데 이는 파랑에 의한 궤도 운동에 따른 유속 U_w 에 비례한다.

$$P2 = \rho U_c \cos \alpha U_w \quad (19)$$

여기서 비례상수 $U_c \cos \alpha$ 는 유속 및 파랑과 흐름사이의 각에 관계된다. 유속과 파랑의 작용에 의한 동압력의 1차 항을 포함한 압력 전달함수를 K'_1 로 표시하면 다음과 같으며,

$$p_1 + P2/(\rho g) = K'_1 \eta_1 \quad (20)$$

따라서

$$K'_1 = \left[1 + U_c \cos \alpha \frac{\omega}{g} \right] K_1 = \left[1 + \frac{U_c \cos \alpha}{C} \tanh(kh) \right] K_1 \quad (21)$$

여기서 C 는 파의 위상 속도이다. 즉, 파와 흐름이 공존하는 경우에 유속의 동력학적 효과(dynamic effect)는 선형파의 압력 전달함수 K_1 에 간단한 보정계수 $\left[1 + \frac{U_c \cos \alpha}{C} \tanh(kh) \right]$ 를 적용하여 보정할 수 있다. 흐름에 의한 파수의 변화에 따른 효과는 무차원 주파수의 증가에 따라 특히 파와 유속이 반대 방향인 경우에 커지며, 동력학적 효과(dynamic effect)는 주파수의 증가에 따라 느린 변화를 보여 준다. 이들 영향은 저주파수에서는 서로 반대 방향으로 일부 서로 상쇄되며, 고주파수에서는 흐름에 의한 파수의 변화에 따른 효과가 지배적임을 알 수 있다.

3. 실험실 실험을 통한 유속의 영향 분석

수압식 파고계로 부터 관측된 자료로부터 선형파 이론에 의한 파랑 자료 분석 기술을 확인하기 위하여 해양연

구원 조파수조에서 파랑과 동시에 흐름을 발생시켜 용량식 파고계에 의해 계측된 파랑과 동시에 수중압력 및 유속을 측정하여 비교, 분석하였다. Fig. 2에는 이 실험장치의 개략도와 측정 위치를 나타내었다. 이 수조는 길이가 53 m, 높이 1.25 m, 폭이 1 m로 수조의 한쪽 끝에는 피스톤 형태의 불규칙파 조파기가 설치되어 있으며, 다른 한쪽 끝에는 소파장치가 설치되어 있다. 수조 내의 흐름은 수조 하부에 설치된 순환 파이프를 통하여 펌프, 물을 순환시켜 발생시킨다. 흐름의 방향 및 유속은 밸브의 개폐를 조작함으로써 조절이 가능하다. 실험 수심은 50 cm였고 파압계 및 유속계는 수조 바닥에서 5 cm 위 지점에 설치하였으며, 매 0.05초 간격으로 파고계에 의한 표면파의 직접관측과 동시에 수중 파압 및 유속관측을 실시하였다. 실험은 흐름이 없을 때, 파랑과 흐름의 방향이 같을 때 및 반대일 때의 세 경우에 대해 수행하였다. 각 실험의 파고, 주기 및 유속 조건을 Table 1에 제시하였다.

한편, 수압식 파고계 및 용량식 파고계에 의해 측정된 자료에서 분석한 스펙트럼으로부터 경험적 압력 전달함수 K_{1e} 는 다음과 같이 계산된다.

Table 1. Summary of wave and flow conditions of the test case

Test No.	Hs (m)	Tp (s)	U (m/s)
01	0.020	0.800	0.0
02	0.077	1.600	0.0
03	0.145	2.327	0.0
04	0.015	0.800	0.1
05	0.068	1.600	0.1
06	0.135	2.327	0.1
07	0.013	0.800	0.2
08	0.062	1.600	0.2
09	0.125	2.327	0.2
10	0.023	0.800	-0.1
11	0.082	1.600	-0.1
12	0.153	2.327	-0.1
13	0.024	0.883	-0.2
14	0.087	1.600	-0.2
15	0.159	2.327	-0.2

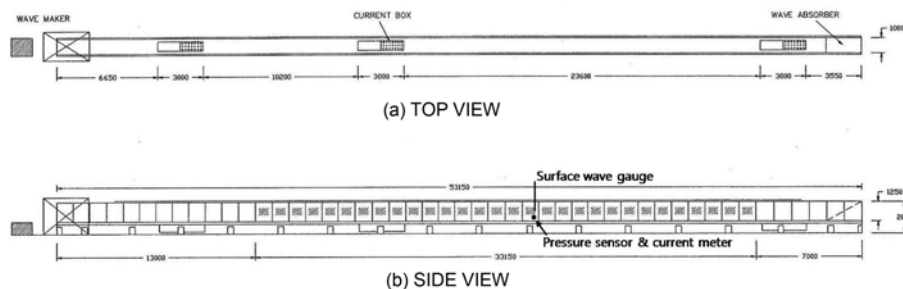
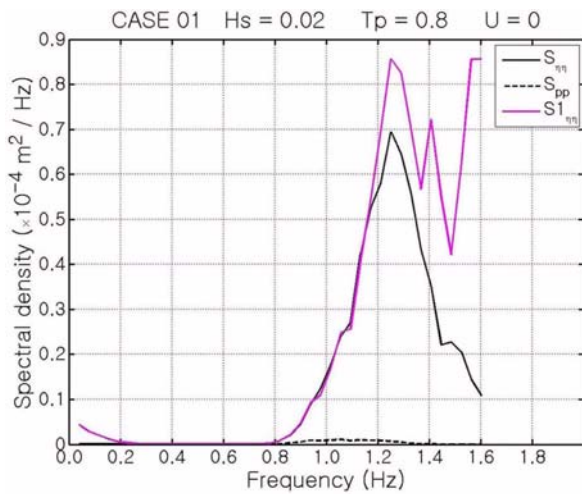
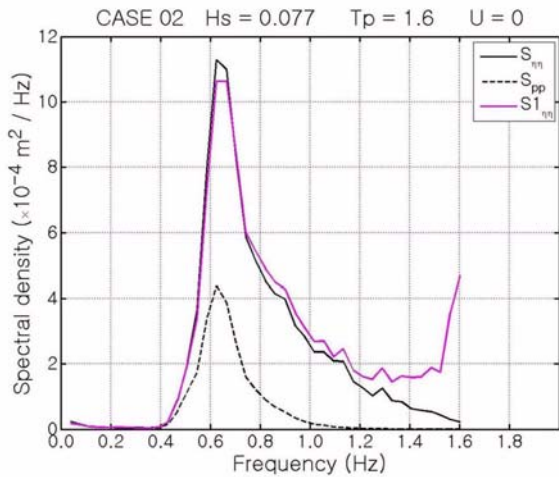


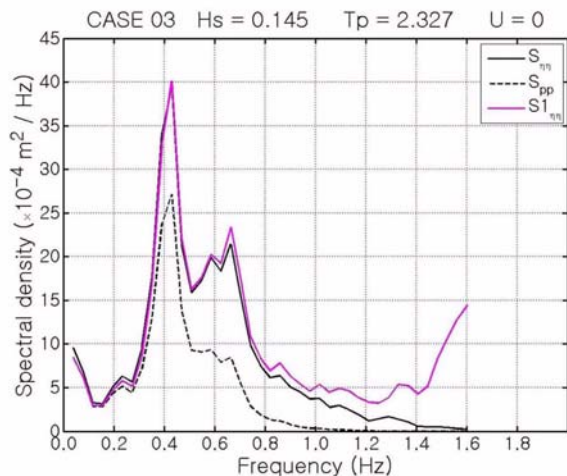
Fig. 2. Schematic view of the wave and current flume and the experimental setup.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Comparison of wave spectrum measured by surface wave gauge (black solid line), estimated by pressure gauge (red solid line), and the pressure spectrum (black dotted line) when $U = 0$.

$$K_{1e} = \sqrt{S_{pp}/S_{\eta\eta}} \quad (22)$$

여기서 $S_{\eta\eta}$ 는 용량식 파고계로 부터 측정한 파랑 자료를 분석하여 얻어진 파랑 스펙트럼을 나타내고, S_{pp} 는 수압식 파고계로 측정된 수압 자료로부터의 압력 스펙트럼을 나타낸다. 위에서 설명한 바와 같이 압력 전달함수 $K_{1\alpha}$ 는 식 (7)로부터 구할 수 있다. 분산관계식 식 (12)로부터 흐름을 고려하지 않고 구한 파수로 계산한 압력 전달함수 $K_{1\beta}$ 를 계산하여 실험에서 경험적으로 구한 압력 전달함수 K_{1e} 와 비교하였다.

Fig. 3~5에는 수위 변동을 직접 측정한 용량식 파고계로부터 구한 파랑 스펙트럼과 수압식 파고계로부터 압력 전달함수를 적용해 계산된 파랑 스펙트럼을 비교하여 나타내었다. Fig. 3은 흐름이 없는 경우(Test No. 1~3)에 수압식 파고계로부터 구한 압력 스펙트럼(S_{pp})와 용량식 파고계에 의한 파랑 스펙트럼($S_{\eta\eta}$) 그리고 선형파 이론에 의한 압력 전달 함수를 적용하여 압력 스펙트럼으로부터 계산한 파랑 스펙트럼을 나타낸다. 선형파 이론에 의한 압력 전달함수를 이용하여 수압식 파고계 자료로부터 계산한 파랑 스펙트럼은 용량식 파고계로부터 구한 파랑 스펙트럼과 대체적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 파랑 에너지가 작은 경우(Fig. 3a)는 고주파수대에서 수압식 파고계로부터 추정된 파랑 스펙트럼이 상당히 크게 나타났는데 이는 고주파수대에서 잡음의 영향으로 볼 수 있다. 파랑이 커질수록(Fig. 3b, 3c) 관측된 파랑 에너지는 선형파 이론으로 추정한 것보다 고주파수대에서는 약간 작게 나타나고 저주파수대에서는 약간 크게 나타나는데 이는 파랑의 비선형 효과의 영향인 것으로 간주된다.

Fig. 4는 흐름이 파랑과 같은 방향일 때에 (Test No. 4~9) 용량식 파고계에 의한 파랑 스펙트럼과 수압식 파고계에 의한 파랑 스펙트럼을 보여준다. 유속을 고려하지 않은 압력 전달함수를 이용하여 계산된 파랑 스펙트럼(붉은색)은 용량식 파고계로 측정한 파랑 스펙트럼 보다 상당히 크게 나타나 큰 차이를 보인다. 그러나 유속을 고려한 압력 전달함수를 이용하여 계산된 파랑 스펙트럼(푸른색)은 용량식 파고계에 의한 파랑 스펙트럼과 비교적 잘 일치한다. Fig. 5는 흐름이 파랑과 반대 방향인 경우에 (Test No. 10~15) 대한 분석결과이며, 유속을 고려하지 않은 압력 전달함수를 이용하여 계산된 파랑 스펙트럼은 용량식 파고계의 파랑 스펙트럼보다 낮게 나타나 차이를 보이거나 유속을 고려한 압력 전달함수를 이용한 경우에는 더 잘 일치함을 볼 수 있다.

한편, Fig. 6~8에는 실험실에서 측정된 압력 전달함수와 선형파 이론에 의해 계산된 압력 전달 함수를 비교하여 나타내었다. Fig. 6은 흐름이 없는 경우(Test No. 1~3)

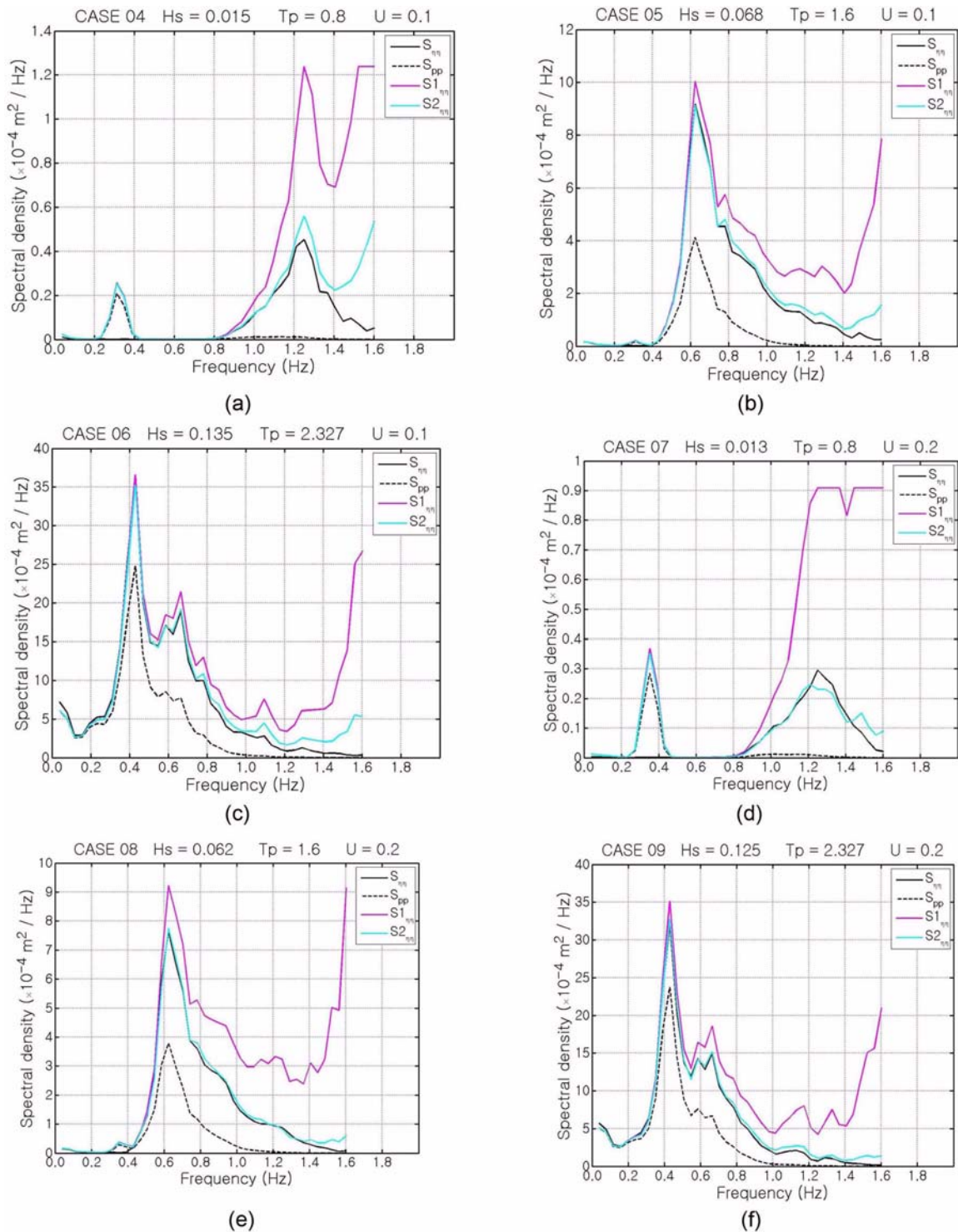


Fig. 4. Comparison of wave spectrum measured by surface gauge (black line) and estimated by pressure gauge when $U > 0$ (blue line: considering the current effect, red line: not considering the current effect).

에 대하여 계측된 압력 전달함수 K_{1e} (점선)와 선형파 이론에 의해 계산된 압력 전달함수 $K_{1\alpha}$ (실선)를 보여주며, 대체로 서로 잘 일치하는 경향을 나타낸다. 그러나, 파고가 커져 비선형성이 강해지는 경우에는 고주파수대에서는

계측된 압력 전달함수가 선형파 이론에 의한 것보다 크게 나타나며, 저주파수대에서는 선형파 이론에 의한 것보다 작게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 Lee and Wang (1984)에 제시된 바와 같이 파의 비선형 상호작용에 의한

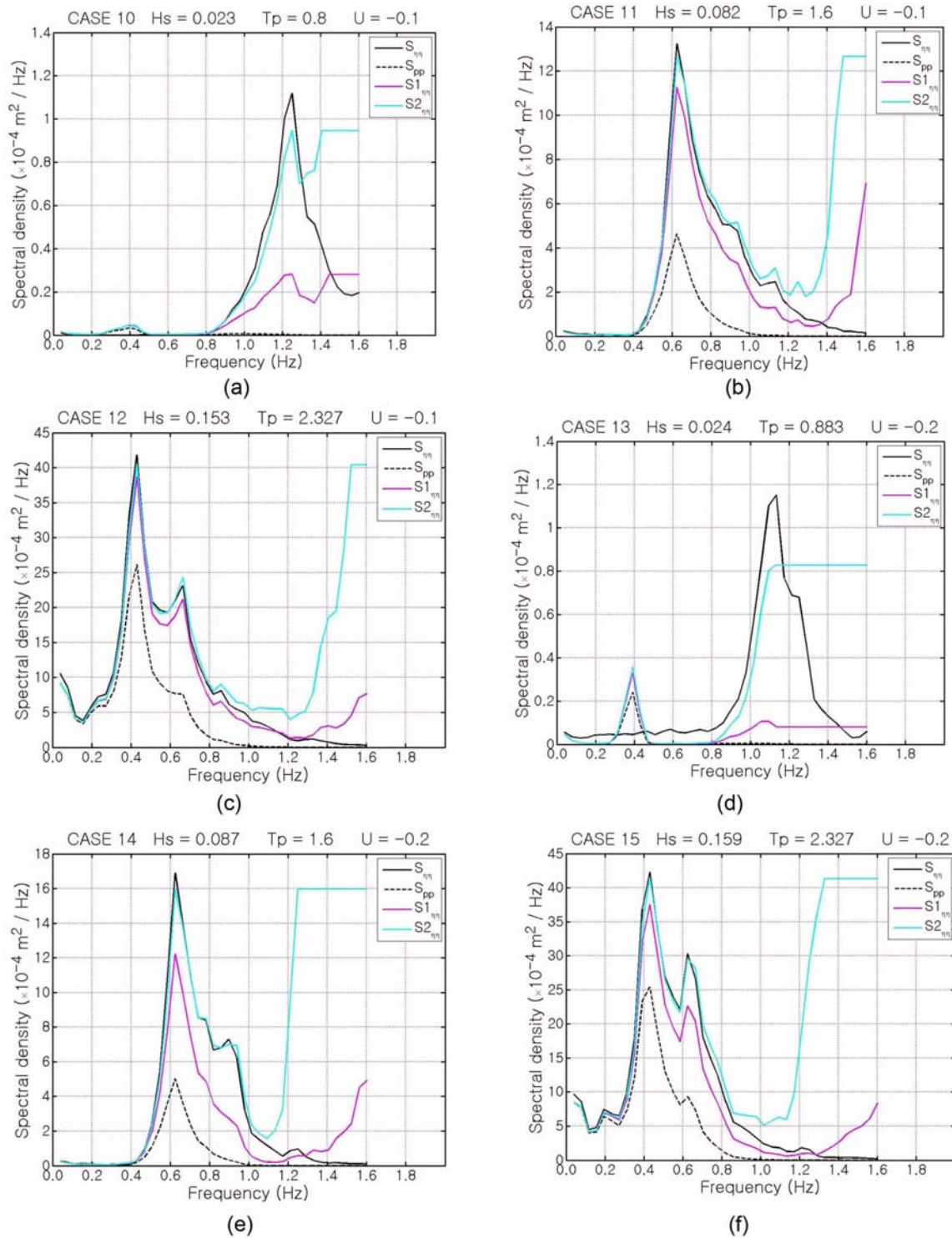


Fig. 5. Comparison of wave spectrum measured by surface gauge (black line) and estimated by pressure gauge when $U < 0$ (blue line: considering the current, red line: considering the current effect).

구성파의 주파수의 합 또는 차로 나타내지는 비선형 성분의 전달함수가 선형파의 전달함수와 다르기 때문이다.

Fig. 7은 흐름의 진행 방향이 파와 같은 방향에 대한 실험

결과이며, 실험에서 압력 전달함수 K_{1e} 는 흐름을 고려하지 않고 계산한 압력전달함수(점선)와는 흐름이 클수록 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 파고가 크

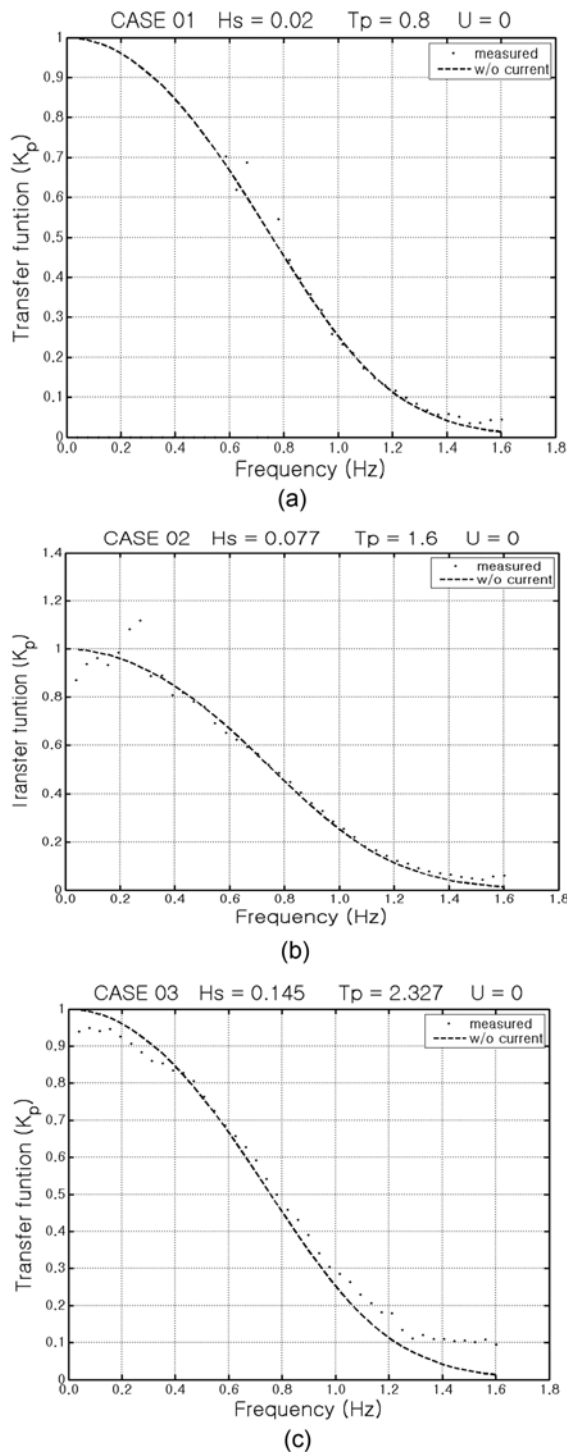


Fig. 6. Comparison of the measured pressure transfer function (dots) with that of the linear wave theory (dotted line) when $U = 0$.

고 유속이 큰 경우는 파의 비선형성에 의한 효과와 유속에 의한 동력학적 효과가 같이 영향을 주어 유속을 고려하지 않고 선형파 이론에 의해 계산한 결과와는 큰 차이

가 남을 알 수 있다. 파가 작은 경우에 파랑 에너지가 아주 작은 주파수대에서는 실험에서 구한 압력전달 함수가 이론에 의해 계산한 것과 크게 다르게 분산되는 경우가 있지만(Fig. 7a, 7d; Fig. 8a, 8d), 대부분의 경우에 유속의 영향을 고려한 압력 전달 함수는 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8은 흐름의 진행 방향이 파와 반대 방향에 대한 실험(Test No. 10~15) 결과로 Fig. 7과 마찬가지로 압력 전달함수 계산시에 흐름의 영향을 고려한 경우 더욱 정확한 파랑 스펙트럼을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 선형파 이론에 근거하여 파수 및 그에 따른 압력 전달함수 계산 시 유속의 영향을 고려하게 되면 보다 정확한 파랑 스펙트럼을 얻을 수 있음을 보여준다.

4. 결론 및 제언

이 연구에서는 수압식 파고계 자료로부터 파랑 스펙트럼을 취득하는 경우 흐름의 영향을 고찰하였다. 선형파 이론에서 표면 파랑으로부터 수중으로의 압력 전달함수는 파수의 함수로 표시되는데 파수는 파랑 분산식에서 수심과 흐름에 따라 달라지기 때문에 압력 전달함수는 수심과 유속에 따라 달라진다. 해양연구원이 보유한 2차원 조파수조에서 흐름과 파랑을 동시에 발생시켜 흐름 및 파고 조건이 서로 다른 총 15개 조건에 대하여 수압 및 수면 변위를 동시에 측정하여 수압식 파고계 자료 분석에서의 유속의 영향을 평가하고 검정하였다.

지금까지는 일반적으로 수압식 파고계 자료 분석 시에 흐름의 영향을 고려하지 않고 파수 및 압력 전달함수를 계산하였기 때문에 수압식 파고계로부터 얻어진 파랑 스펙트럼은 흐름이 파와 같은 방향일 때에는 파랑 에너지가 실제보다 크게 나오고, 흐름이 파와 반대 방향일 때에는 실제보다 작게 나오는 경향이 나타났다. 이 연구 결과로부터 압력 전달함수의 계산에 흐름의 영향을 고려할 때 수압식 파랑 자료로부터 환산된 파랑 스펙트럼은 용량식 파고계를 이용하여 관측된 파랑 스펙트럼과 대체적으로 잘 일치함을 확인하였다. 파고가 커지는 경우에는 선형파 이론에서 무시한 비선형 파랑의 영향으로 인해서 고주파수대와 저주파수대에서 차이가 커지는 경향이 나타났지만 파랑 에너지가 집중되어 있는 주파수대에서는 흐름을 고려하여 계산한 압력 전달함수가 실험에서 측정된 것과 대체로 잘 일치하였다. 따라서 수압식 파고계 자료 분석시에 수심뿐만 아니라 유속의 영향까지 고려하여 계산할 경우 실제 관측값에 가까운 파랑 스펙트럼의 계산이 가능함을 알 수 있다.

선형파 이론에 의한 압력 전달함수는 유속의 영향 이외에도 흐름에 의한 동압력의 영향도 포함된다. 즉, 파랑과

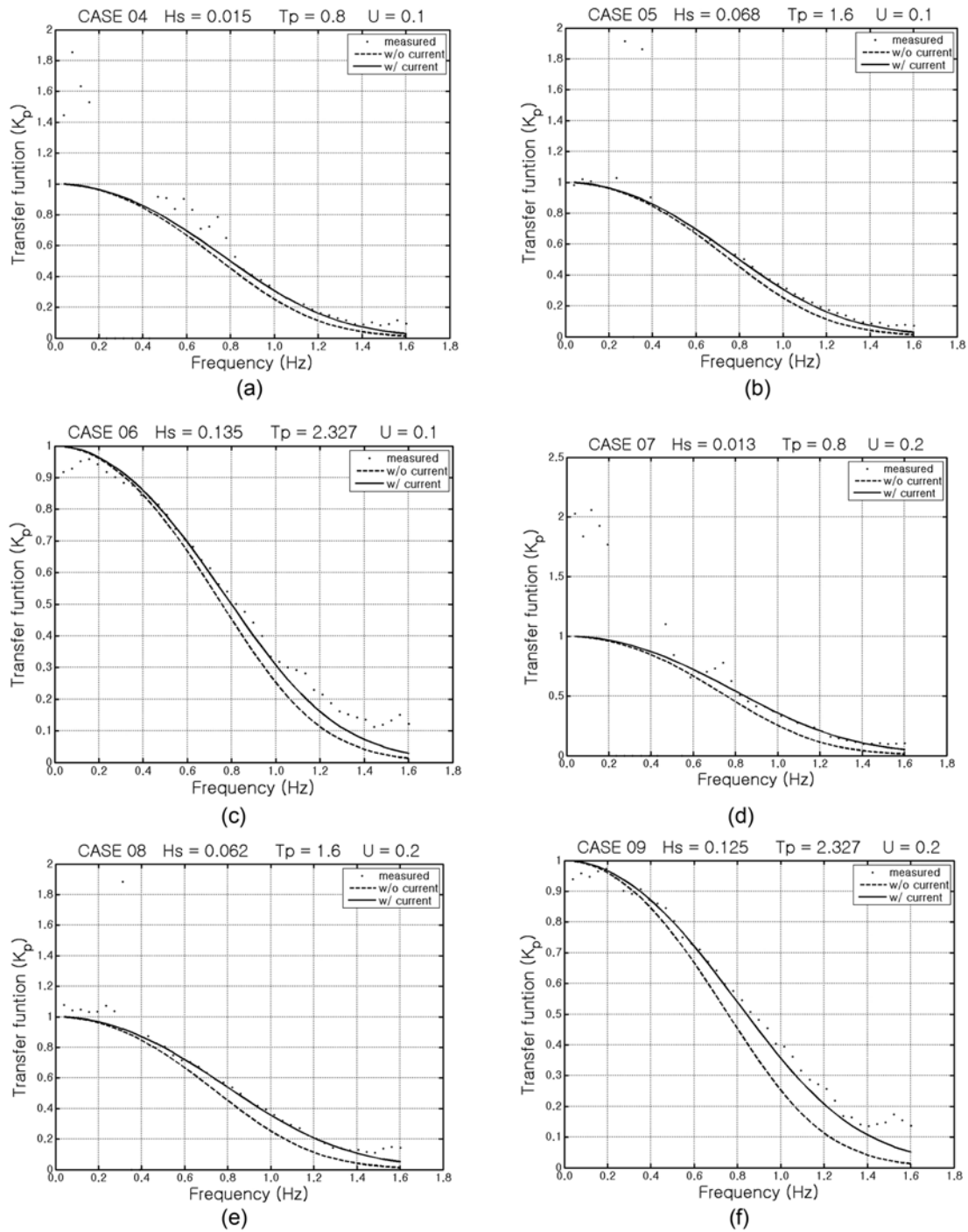


Fig. 7. Comparison of the measured pressure transfer function (dots) with that of the linear wave theory when wave and current are in the same direction (dotted line: considering current effect, solid line: not considering current effect).

흐름이 공존하는 해역에서 수압에 대한 영향은 파랑에 의한 수입자 운동에 의한 비선형항과 파랑과 흐름의 복합 작용에 의한 선형항, 그리고 흐름에 의한 상수항으로 분리되는데 이러한 영향에 대해서는 향후 비선형 영향과 같이 자세하게 분석할 계획이다.

본 연구에서 밝힌 바와 같이 압력 전달함수가 수심과 흐름에 의해 영향을 받기 때문에 수압식 파고계에서 얻은 자료를 분석할 때에는 수심과 유속의 영향을 고려하는 것이 요구된다. 수압식 파고계 자료 분석 시에 수심 정보는 수압 자료 분석으로 쉽게 얻을 수 있기 때문에 압력 전달

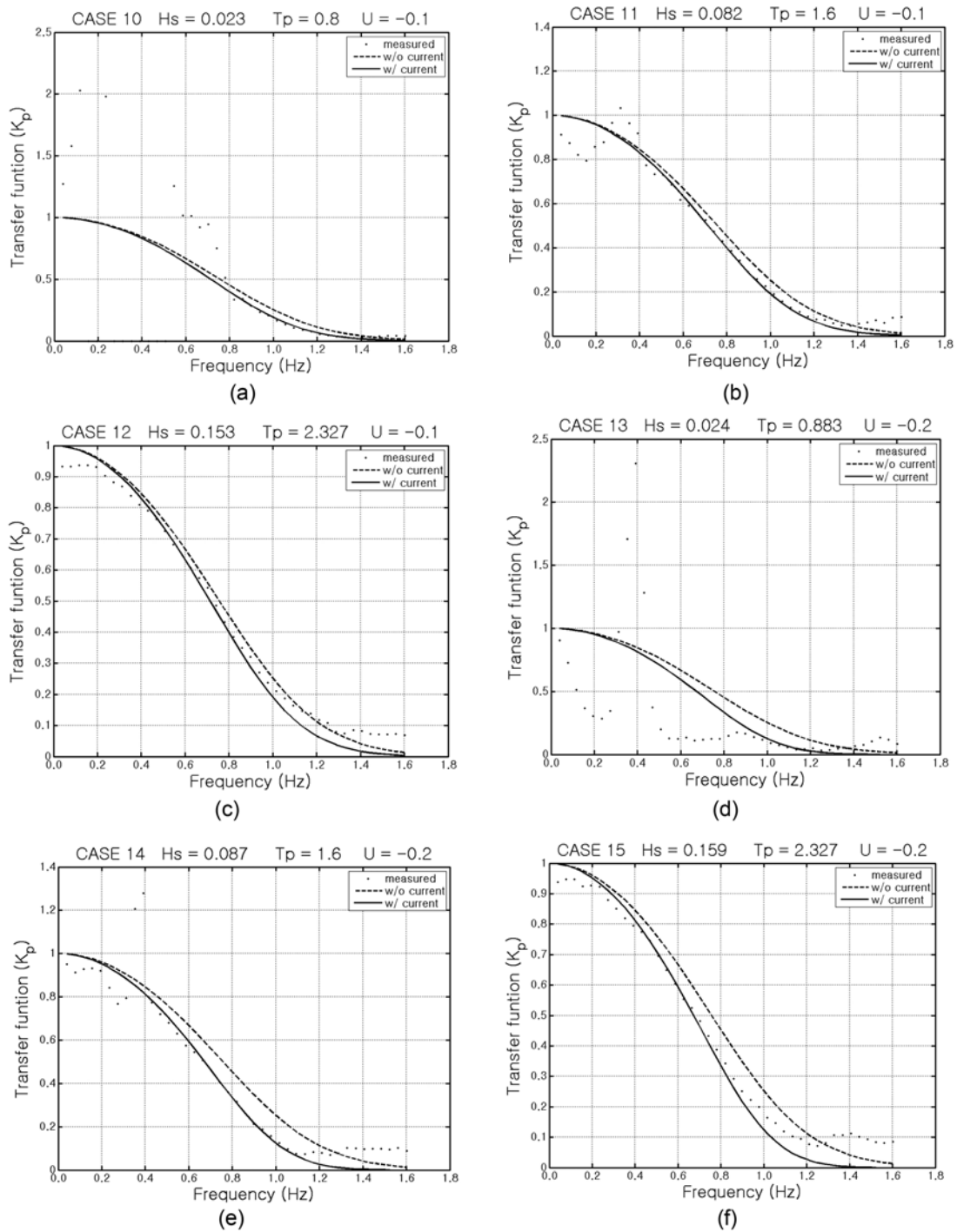


Fig. 8. Comparison of the measured pressure transfer function (dots) with that of the linear wave theory when wave and current are in the opposing direction (dotted line: considering current effect, solid line: not considering current effect).

함수의 계산에서 수심의 영향은 쉽게 고려할 수 있지만 일반적으로 유속 정보는 얻을 수가 없어서 이를 무시하는 경우가 대부분인 실정이다. 우리나라 서해와 같이 조류가 강한 곳에서는 수압 및 유속 병합식(PUV) 파고계를 이용하면 유속 정보까지 함께 얻을 수 있어 파랑 정보를 더욱

정확히 얻을 수 있다. 그러나 수압 센서만 설치하는 경우에는 자료 분석에 유속의 영향을 고려하는데 문제가 있다. 근래에 와서는 수치 모델이 크게 발달하여 수치 모델로도 상당히 정확한 조류 시뮬레이션이 가능하기 때문에 정밀 조석 모델을 적용하여 계산된 조류를 이용하여 수압

식 파고계 자료 분석 시에 조류의 영향을 고려하는 것도 하나의 경제적인 방법이 될 수 있다. 다만, 파가 연안으로 접근하여 비선형성이 커지게 되면 수압식 파고계 자료의 분석에 파의 비선형의 영향을 고려하여 분석하는 것이 필요하다. 향후 여러 환경에서 수압식 파고계와 부이식 파고계의 동시 현장 관측실험으로 수압식 파고계의 자료 분석 방법의 개선과 검정이 요구되며, 연안에서 유속의 영향과 비선형 영향이 복합되는 천해역에서 또한 동시 현장 관측 실험을 통하여 수압식 파고계의 활용도를 높이는 것이 요구된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기본 사업 “해상 파랑 관측 및 조사” 사업의 일환으로 이루어 졌으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 해운항만청 (1986) 파랑관측 업무개선방안 연구보고서. 해양 연구소, BSP100058-129-2, 174 p
- Bahk KS, Lee DY, Kang SW (1989) Development of an efficient data logger and its application to coastal field data measurement. *Ocean Res* **11**(1):65-67
- Lee DY, Wang H (1984) Measurement of surface waves from subsurface gage. In: *Proceedings of 19th international conference on coastal engineering*, Houston, Texas. ASCE, New York, pp 271-286
- Sharma JN (1981) Second order directional seas and associated wave forces. *Soc Petrol Eng J* **21**:129-140

Received Nov. 26, 2009

Revised Dec. 5, 2009

Accepted Dec. 17, 2009