

## 접근풍속과 건물 변동풍압력에 대한 연속파동변환법의 적용

### A Continuous Wavelet Study on Approach Wind and Building Pressure

함 희 정\*  
Ham, Hee-Jung

---

#### Abstract

Application of proper orthogonal decomposition (POD) and continuous wavelet transform (CWT) is introduced to study wind speed and building roof pressures of flow separation region. In this study, a detailed analysis of the approach wind flow, wind-induced building pressure and the relation between the two fields was carried out using the POD technique and CWT analysis. The results show potential of the application of POD and CWT in characterization of spatio-temporal and spectral properties of the approach wind and its induced dynamic pressure events. Some of findings resulting from the application of this analysis can be summarized as follows: (1) The POD first principal coordinate of the roof pressure in the separated shear layer is closely correlated with the longitudinal component of oncoming flow. (2) The CWT analysis suggests that the extreme peak pressure in the separated shear layer is due to condensed large-scale eddy motions.

키워드 : 건물풍압, 시간·주기특성, 고유직교함수전개법, 연속파동변환법  
Keywords : *building pressure, time & frequency characteristics, proper orthogonal decomposition, continuous wavelet transform*

---

#### 1. 서론

대기경계층 속 존재하는 큰 길이스케일의 응집 구조(coherent structure)는 건물 모서리부분에서 발생하는 극대 피크풍압과 밀접한 관련된다는 것으로 인식되고 있다. 이 응집된 큰 와(large eddy)의 구조는 불안정성(nonstationarity)을 보이며 이로 인한 건물 변동풍압력은 시·공간적으로 불규칙성을 보이게 된다. 지금까지 이러한 불규칙성으로부터 통계치를 얻어내기 위하여 저·고차의 모멘트(평균, 표준편차, skewness, kurtosis 등)를 풍속과 풍압력의 해석을 위하여 통상 사용하였으나, 이들의 시·공간적으로 불규칙성을 표현하기에는 미흡한 편이다. 고유직교함수전개법(proper orthogonal

decomposition)은 불규칙(random)적 변동시그널의 장(field)을 의미 있는 시·공간 성분과 중요하지 않는 성분으로 나눌 수 있는 형태인식(pattern recognition)방법으로 변동풍압력장으로부터 시·공간의 특성치를 추출하기에 적합한 방법으로 사료된다.

풍속과 변동풍압력의 피크이벤트와 같은, 극부적인 신호에 대한 해석하기 위하여서는, 시그널이 규칙적(stationary)이라는 가정을 한 푸리에 스펙트럼과 같은 신호처리방법은 적당하지 않다. 최근 연속파동변환 분석에 기초한 시간·주기적 해석방법의 발달과 함께 대기경계층 난류의 해석과 같은 연구에서 연속파동변환(continuous wavelet transform)법의 적용이 시도되고 의미 있는 결과들을 추출하고 있다 [1],[2].

본 논문에서는 저층건물 지붕에서 얻어진 변동

---

\* 강원대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

풍압의 시·공간 성격을 연구하기 위하여 고유직교함수전개법과 적용하였으면 접근풍속과 풍압력 피크이벤트의 시간·주기적 성격을 규명하기 위하여 연속파동변환법을 같이 적용되었다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 고유직교함수전개(POD)법

고유직교함수전개 방법의 주요 목적은 임의 장(field)의 집합의 모든 요소에 가장 관련되어 있는 결정적 함수  $\phi(x, y)$ 를 찾는 것이다. 임의 변동 압력장  $p(x, y, t)$ 이 주어졌고, 함수  $\phi(x, y)$  위에  $p(x, y, t)$ 의 최대 투영값은 서로 내적을 하여 구해진다.

$$\frac{\int p(x, y, t) \phi(x, y) dx dy}{\sqrt{\int \phi^2(x, y) dx dy}} = \max \quad (1)$$

식(1)에서 표현된 투영함수의 최대값은 다음과 같이 평균 제곱값으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\langle (\int p(x, y, t) \phi(x, y) dx dy) (\int p(x', y', t) \phi(x', y') dx' dy') \rangle}{\int \phi^2(x, y) dx dy} > 0 \quad (2)$$

그리고 (2)식은 고유치 문제를 제시한다.

$$\int R_p(x, y, x', y') \phi(x', y') dx' dy' = \lambda \phi(x, y) \quad (3)$$

여기서  $R_p(x, y, x', y')$ 는 압력장  $p(x, y, t)$ 의 공간 상관함수이다. 만약, 압력이 균등하게 공간에 분포되면, 직각 구적법을 적용하여 식(3)은 행렬 방정식으로 변환할 수 있다.

$$[R_p] \{\phi\} = \lambda \{\phi\} \quad (4)$$

여기에서  $[R_p]$ 는 압력 공간(시간지연이 없는 경우) 상관 행렬이고  $\{\phi\}$ 와  $\lambda$ 는 각각 결정된 고유함수와 고유치이다.

식(4)에 의해 정의된 고유치 문제가 풀면, 고유치  $\lambda_n$ 과 고유벡터  $\{\phi\}_n$ 를 계산할 수 있다. 고유벡터  $\{\phi\}_n$ 은 압력장의 전개에서 기본 함수로 이용될 수 있고, 압력장  $p(x, y, t)$ 을 얻기 위해 재정리하면 다음식과 같다.

$$p(x_i, y_j, t_k) = \sum a_n(t_k) \phi_n(x_i, y_j) \quad (5)$$

전개계수  $a_n(t_k)$ 은 고유함수  $\phi_n(x_i, y_j)$ 의 직교성 때문에 다음과 같이 쉽게 계산될 수 있다.

$$a_n(t_k) = \frac{\sum_i \sum_j p(x_i, y_j, t_k) \phi_n(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j \phi_n^2(x_i, y_j)} \quad (6)$$

### 2.2 연속파동변환(CWT)법

일반적인 푸리에 변환은 시그널을 주기의 성분으로 변화하며, 각 주기에서의 시그널 에너지의 크기를 결정하는 데 사용된다. 그러나 이 방법은 어떠한 시간이 특정한 주기의 에너지를 내포하고 있

는지를 나타내지는 못한다. 특히, 풍속과 풍압력의 피크이벤트와 같이 짧은 시간대에 걸친 특정 주기의 에너지 분포를 평가하고자 할 때는, 푸리에 변환이 내재하고 있는 규칙성(stationarity)에 의하여 적용이 불가능하다.

연속파동변환법은 이러한 푸리에 변환의 취약성을 보완한 방법으로, 특정 시간대에 특정 주파수대가 갖는 에너지의 크기를 판단할 수 있다.

연속파동변환은 다음 (7)식에 의하여 정의된다.

$$CWT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \phi_m(\tau) dt \quad (7)$$

여기서  $a$ 는 스케일(scale)이며 스케일은 일반적으로 주기(period)의 단위를 갖는다.  $\tau$ 는 변동변수(translation parameter)이며 시간의 단위를 갖는다. 모(母)함수  $\phi_m$ 는 식(8)로 표현할 수 있다.

$$\phi_m(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (8)$$

연속파동변환에 의한 본래의 시그널로의 복귀는 식(9)에 의한다.

$$p(t) = 1/c^2 \int_a \int_{-\infty}^{\infty} CWT(\tau, a) \frac{1}{a^2} \phi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) da d\tau \quad (9)$$

이때, 식(9)에서  $c^2$ 은 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$c^2 = (2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{p}(\omega)|^2}{\omega} d\omega) < \infty \quad (10)$$

여기서,  $\hat{p}$ 은  $p$ 의 푸리에 변환이고  $\omega$ 는 각진동수이다.

전체 해석 시그널의 에너지  $E_t$ 는

$$E_t = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t) dt \quad (11)$$

로 정의할 수 있으며,  $E_t$ 는 연속파동변환법에 의하여 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$E_t = \int_0^{\infty} E(a) da \quad (12)$$

여기서, 평균 연속파동 스펙트럼은 식(13)과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{E}(a) = \int_0^{\infty} E(a, t) dt \quad (13)$$

즉, 국부 연속파동 스펙트럼은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\bar{E}(a, t) = \frac{|CWT(a, t)|^2}{2 C^2 a^2} \quad (14)$$

여기서, 주파수  $f$ 를 도입이 되면, 전체 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_t = \int_0^{\infty} \bar{E}(f) df \quad (15)$$

그리고 국부 연속파동 스펙트럼은 Perier 등<sup>3)</sup>에 의하여 다음과 같이 표현이 된다.

$$\bar{E}(f, t) = \frac{|CWT(a = \frac{1}{f}, t)|^2}{2 C^2 f_0} \quad (16)$$

여기서  $f_0$ 는 모함수가 갖는 푸리에 변환에서의 피크 주파수이다.

Berterud 등<sup>4)</sup>은 평균 연속파동변환 스펙트럼과 푸리에 스펙트럼의 관계를 맺었으며 그 결과는 다

음과 같다.

$$\bar{E}(f) = \frac{\int_0^{\infty} F(k) \left| \frac{f_0}{f} k \right|^2 dk}{C_{\rho}^2 f} \quad (17)$$

여기서  $F(k)$ 는 푸리에 스펙트럼이고  $k$ 는 파동번호 (wave number)이다

식(14)과 식(16)로부터 연속과동변환 계수는 국부 연속과동 스펙트럼과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 많은 공학연구에서 에너지 분포함수를 제시하고 있으며, Berterud 등은 식 (13)을 정규화하면서, 식 (18)과 같은 에너지 분포함수를 유도하였다.

$$\epsilon(a, t) = \frac{\bar{E}(a, t)}{\int_0^{\infty} \bar{E}(d, t) da} \quad (18)$$

### 3. 풍동 실험

본 연구를 위한 풍동실험은 콜로라도주립대학의 기상풍동에서 수행되었다. 이 풍동은 밀폐형이며 26.8m 길이로 1.8m×2.0m의 시험 단면을 가진다. Fig. 1에 그려져 있는 일반적인 저층건물의 모형 (273mm x 182.5mm x 78.5mm)이 이용되었다. 건물의 기하학적 크기는 텍사스대학 건물 모형<sup>5)</sup>의 1/50의 척도와 같다. 건물 지붕은 Fig. 1에서 보이는 것처럼, 균등한 7개의 압력공으로 분포되어 있다. 평균 풍속의 power-law 지수는 0.14이고, 기류의 기하학적 축척은 수평 난류의 길이척도를 고려한 1/50로 계산되었다.

풍속은 건물모형 182.5mm 상류에 위치한 X형 열선풍속계를 사용하여 1,920Hz의 샘플링 비로 32,768 포인트의 샘플을 측정하였으며, 480Hz에서 저역 필터링 되었다. 건물의 풍압력은 다채널 압력 측정기기를 사용하여 480Hz의 샘플링비로 8,192 포인트의 샘플을 측정하였다.

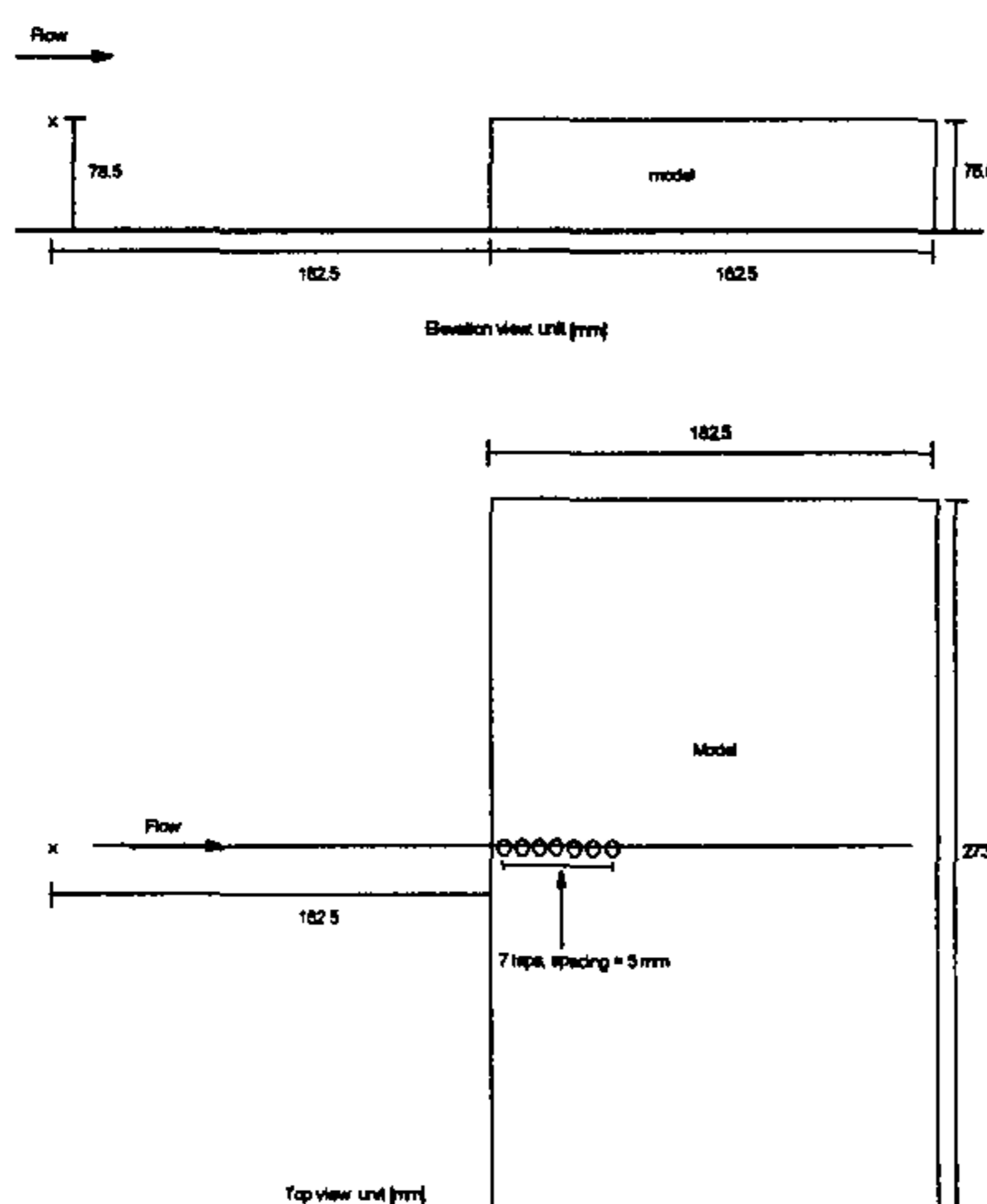


Fig. 1 건물모형, 압력공의 위치, X 열선계의 위치

### 4. 해석

#### 4.1 건물 변동압력의 시간·공간적 성격

풍압력의 평균, RMS, 그리고 최대 피크압력의 모습이 Fig. 2에 나타나 있다. 여기서, 수평좌표는 건물의 높이로 표준화되었다.

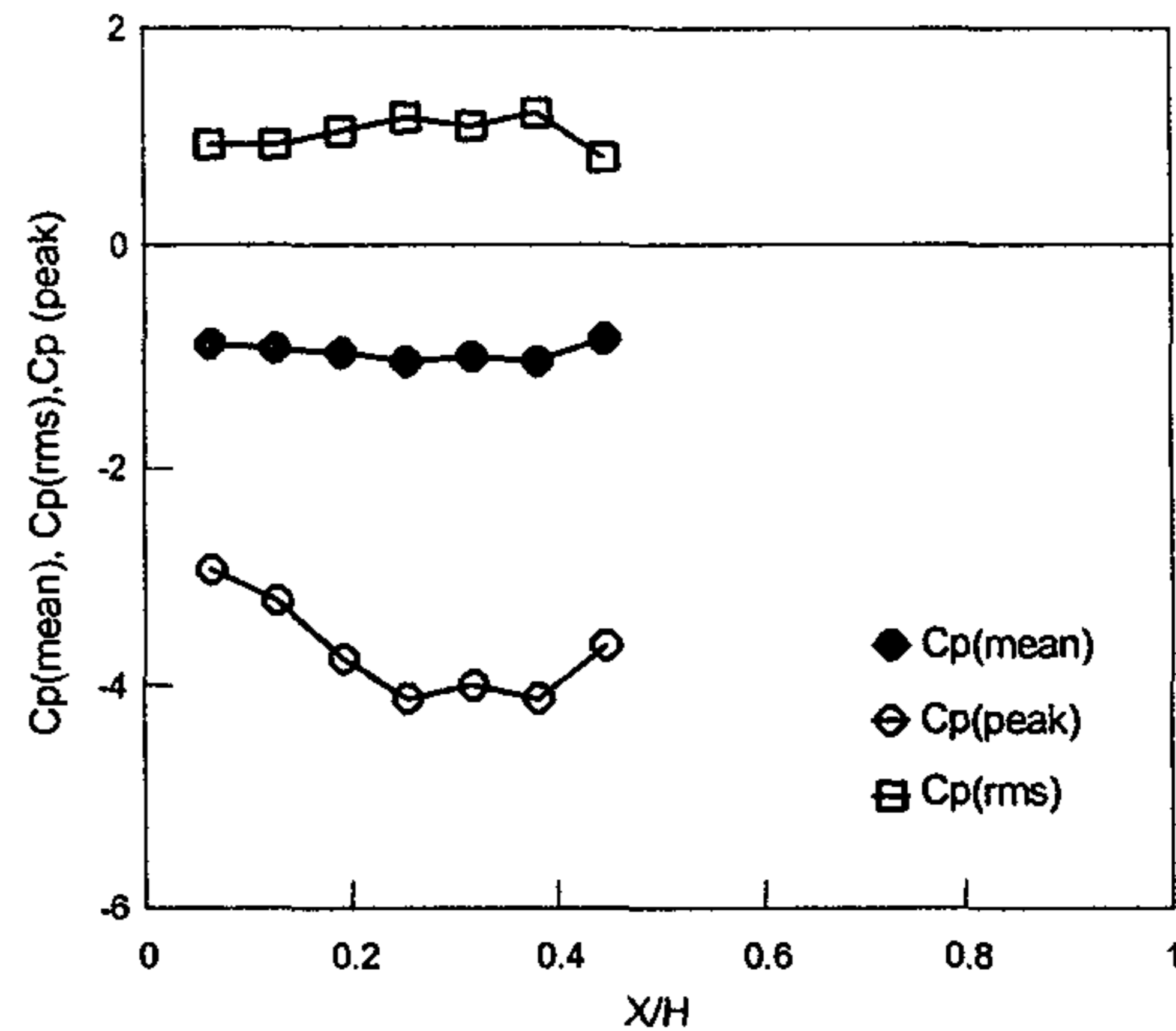


Fig. 2 변풍풍압력의 평균, RMS, 부압력 피크치

Table 1은 고유직교함수전개를 위한 풍압력장의 상관 행렬을 보이고 있다. 고유직교함수 전개에 의하여 해석된 첫 번째 세개의 모드에 해당하는 표준화된 고유치가 Fig. 3에 나타나 있으며, 해당하는 고유함수가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 3으로부터 첫 번째 모드가 전체 에너지의 대부분 (98.2%)을 대표하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4로부터 풍압력의 첫 번째 고유직교함수의 고유함수는 Fig. 2에 나타난 풍압력의 RMS와 비슷한 분포를 하고 있음을 알 수 있으며, 두 번째와 세 번째 모드는 비대칭적인 모습을 보이고 있음을 알 수 있다. 본 결과는 Jeong 등<sup>6)</sup>이 보인 건물 모서리에서의 고유직교함수전개의 관찰과 일치한다.

Table 1 풍압력장의 상관 행렬

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	1.00	0.95	0.90	0.86	0.80	0.72	0.64
P2		1.00	0.95	0.88	0.81	0.73	0.66
P3			1.00	0.96	0.87	0.78	0.70
P4				1.00	0.95	0.85	0.75
P5					1.00	0.94	0.84
P6						1.00	0.95
P7							1.00

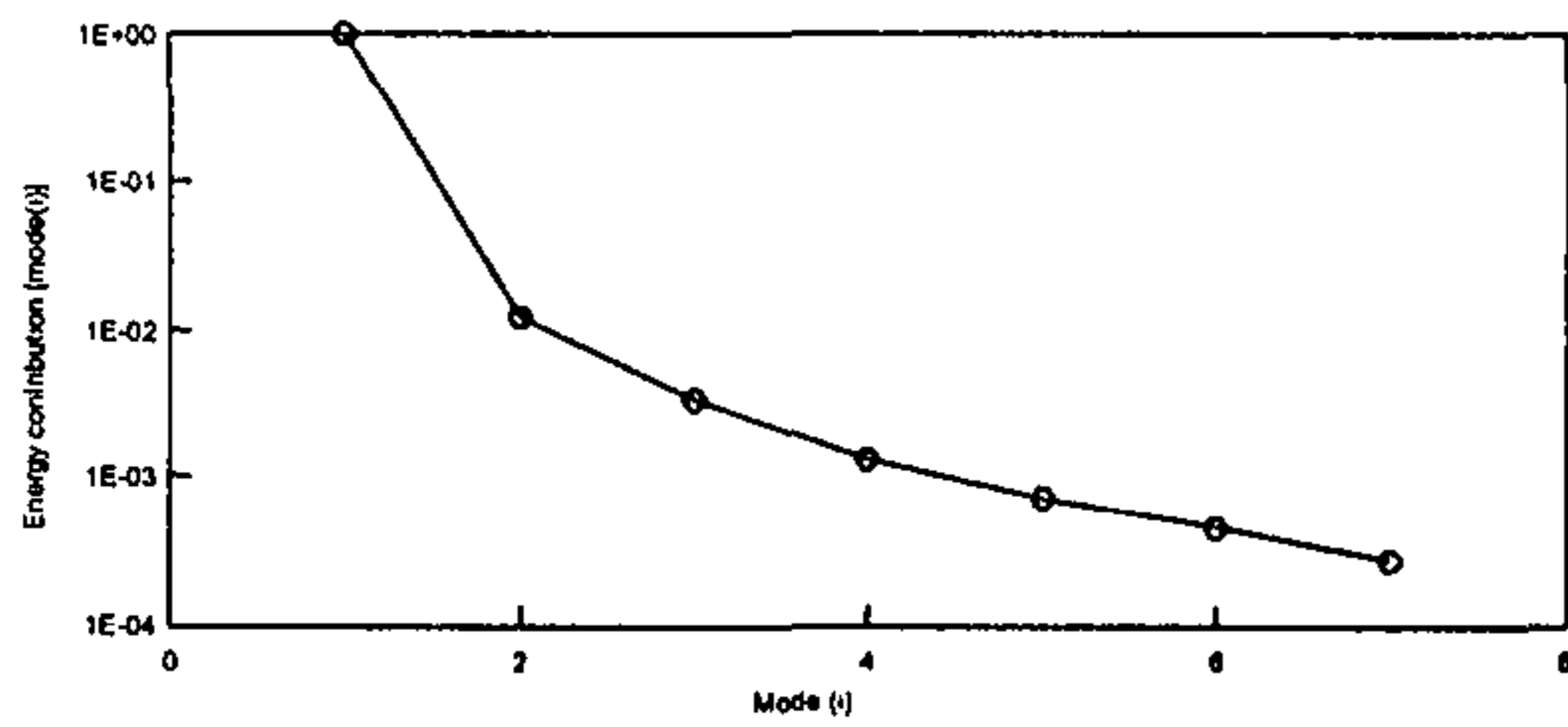


Fig. 3 풍압력 고유직교함수전개의 고유치

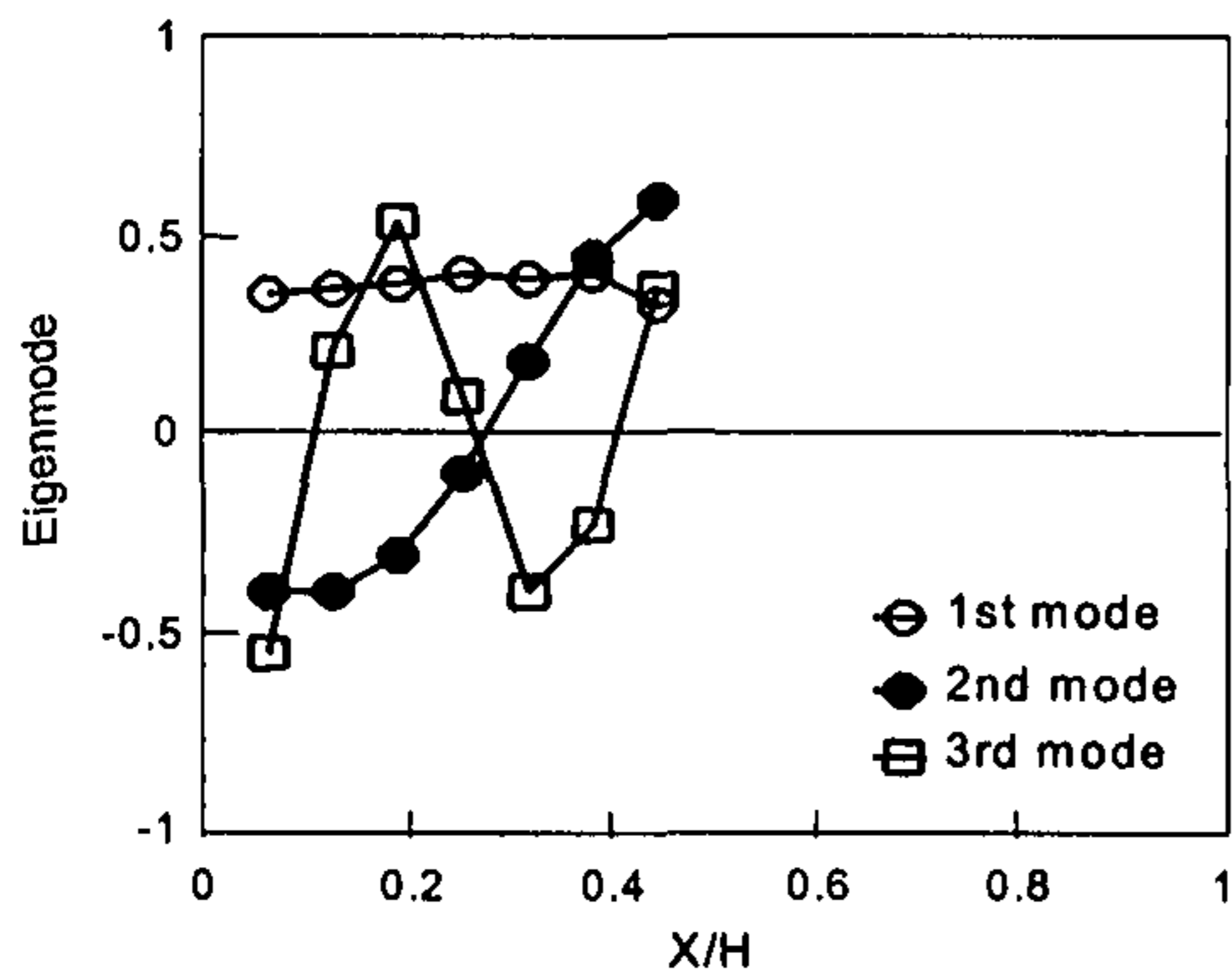


Fig. 4 풍압력 고유직교함수전개의 고유함수

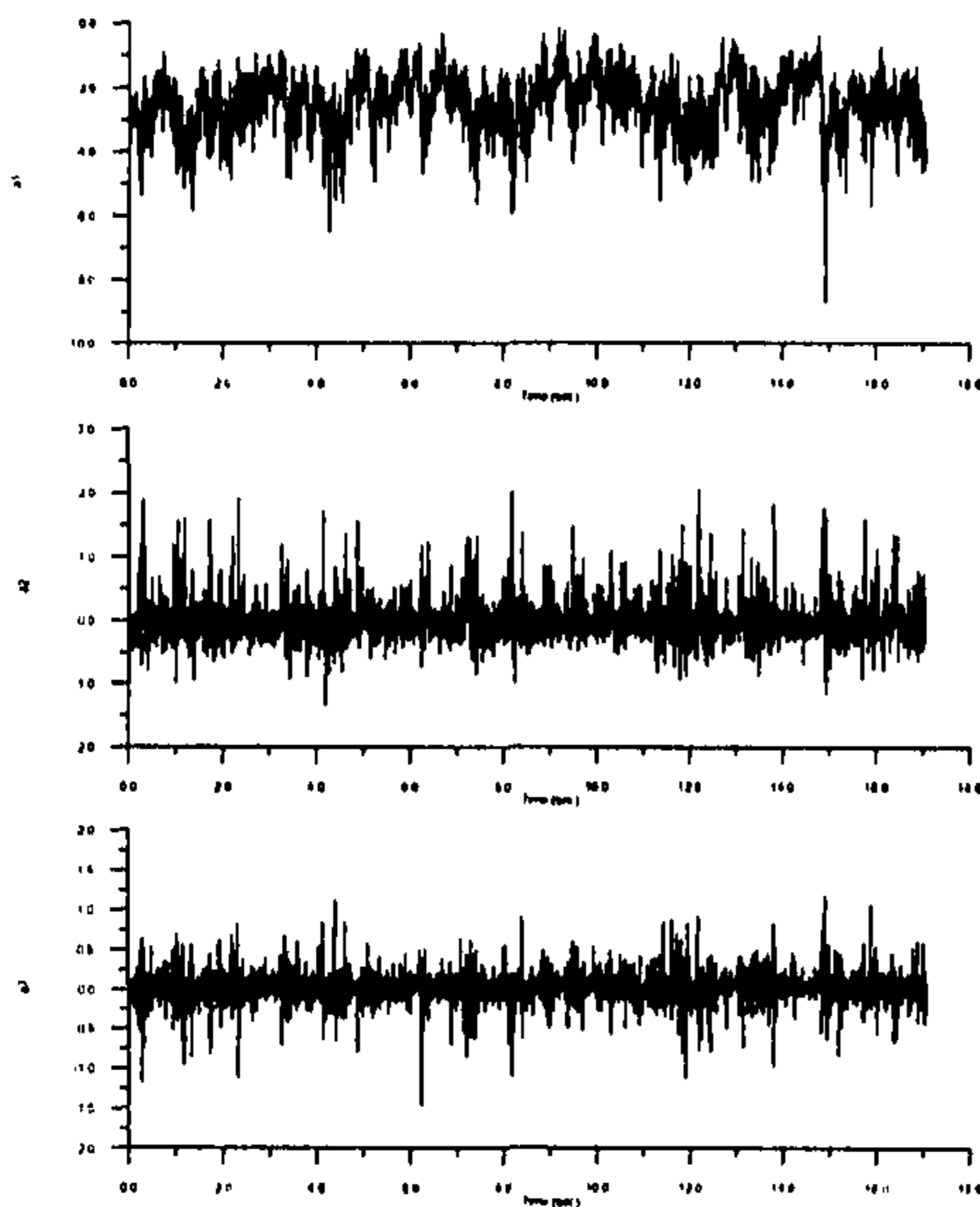


Fig. 5 첫 번째 3개 모드의 전개계수

식(6)에 표현된 처음 3개 모드의 고유직교함수의 전개계수가 Fig. 5에 나타나 있다. Fig 5에 나타난 첫 번째 모드에 해당하는 전개함수로부터, 전개함수의 평균치는 영(0)에서 벗어나고 있으며 부압력의 피크이벤트들이 매우 잘 나타나고 있음을 알

수 있다. 두 번째 세 번째 모드의 전개계수들은 평균치가 영(0)에 가까우며 가우시안 노이즈 시그널의 형태를 띠고, 모드치가 높아가면서 낮은 변동치를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 첫 번째 세 모드에 해당하는 고유함수 전개계수들의 확률분포를 보이고 있다. 첫 번째 전개계수는 가우시안 분포로부터 왼쪽으로 많이 기울어져 있는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 Ham과 Bienkiewicz<sup>7)</sup>가 발표한 모서리 부분의 극대피크의 영향에 기인한 것임을 알 수 있다. 두 번째 모드에 해당하는 확률분포는 가우시안 분포로부터 오른쪽으로 기울어져 있으며, 세 번째 모드에 해당하는 확률분포는 높은 kurtosis(>3)를 갖는 가우시안 분포를 하고 있음을 알 수 있다.

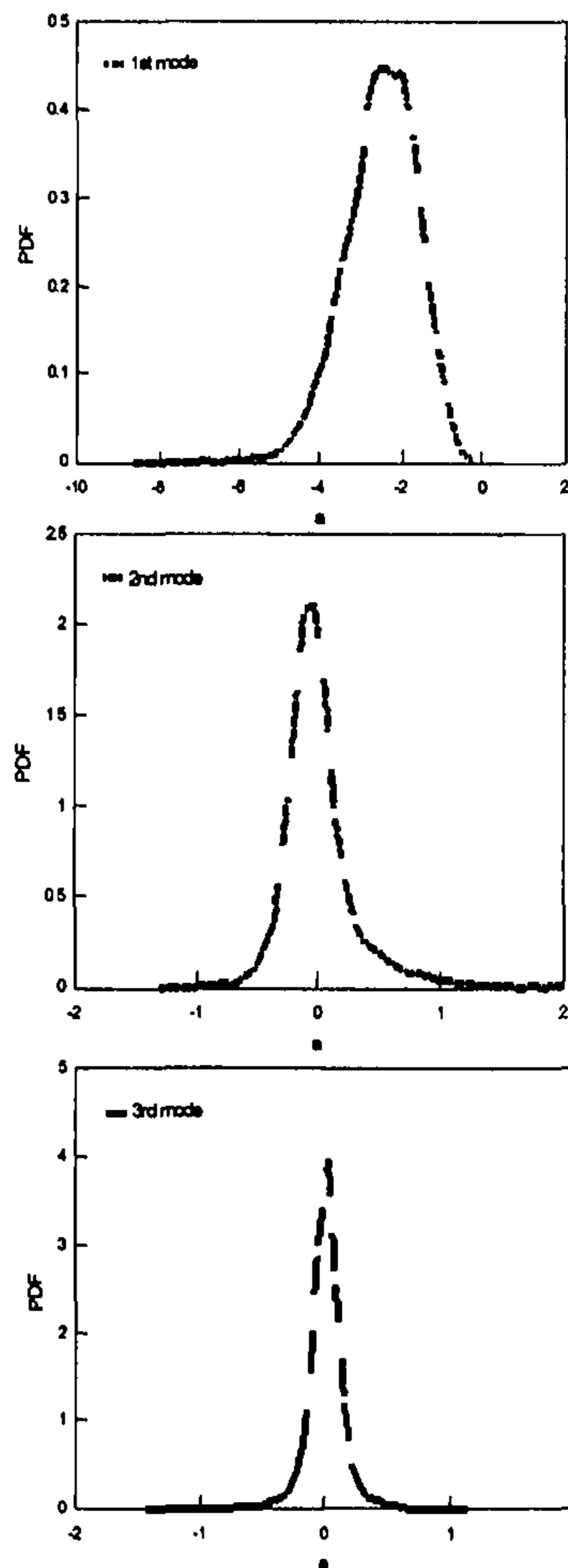


Fig. 6 고유직교함수 전개계수의 확률분포

#### 4.2 접근기류와 건물 지붕 풍압력과의 관계

고유직교함수 전개계수 중 첫 번째 모드에 해당

하는 전개계수가 변동풍압의 에너지에 가장 많이 기여를 하기 때문에, 바람의 박리지역을 표현하는 대표적인 하중의 시간이력으로 선택되었다. Table 2는 변동풍속의 수평, 수직 성분과 고유직교함수 전개계수 사이의 상관계수를 보여주고 있다. 이 표로부터 수평 풍속 성분  $u$ 와 첫 번째 고유직교함수 전개계수 사이의 상관계수가  $-0.58$ 로 가장 높은 것을 볼 수 있다. 이 값은 지붕 가장자리의 변동풍압력이 부압력이기 때문에 음수를 갖는다. 이와 같은 비교적 높은 상관 계수 값은 Table 3에 나타난 각각의 점압력(point pressure)과 변동풍압 사이에서 얻어진 상관계수보다 약간 더 높은 수치이다.

Table 2 풍속과 풍압력 고유직교함수 전개계수의 상호상관계수

	$u$	$w$
$a_1$	-0.584	0.010
$a_2$	0.002	0.022
$a_3$	-0.131	0.011

Table 3 풍속과 풍압력의 상호상관계수

Tap number	$u$
$Pt_1$	-0.531
$Pt_2$	-0.538
$Pt_3$	-0.541
$Pt_4$	-0.543
$Pt_5$	-0.537
$Pt_6$	-0.528
$Pt_7$	-0.511

Fig. 7은 풍속의 수평 성분  $u$ 와 건물 압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수 사이의 상호상관함수를 보여준다. 이 상관함수는 0.027초의 시간지연에서  $-0.61$ 의 최대 값을 가진다. 이와 같은 결과는 비록 접근기류의 흐름이 건물로 인하여 변화되더라도, 풍속의 성분들 중 일부는 여전히 지붕면의 압력 변동과 관련된다는 것을 가리킨다.

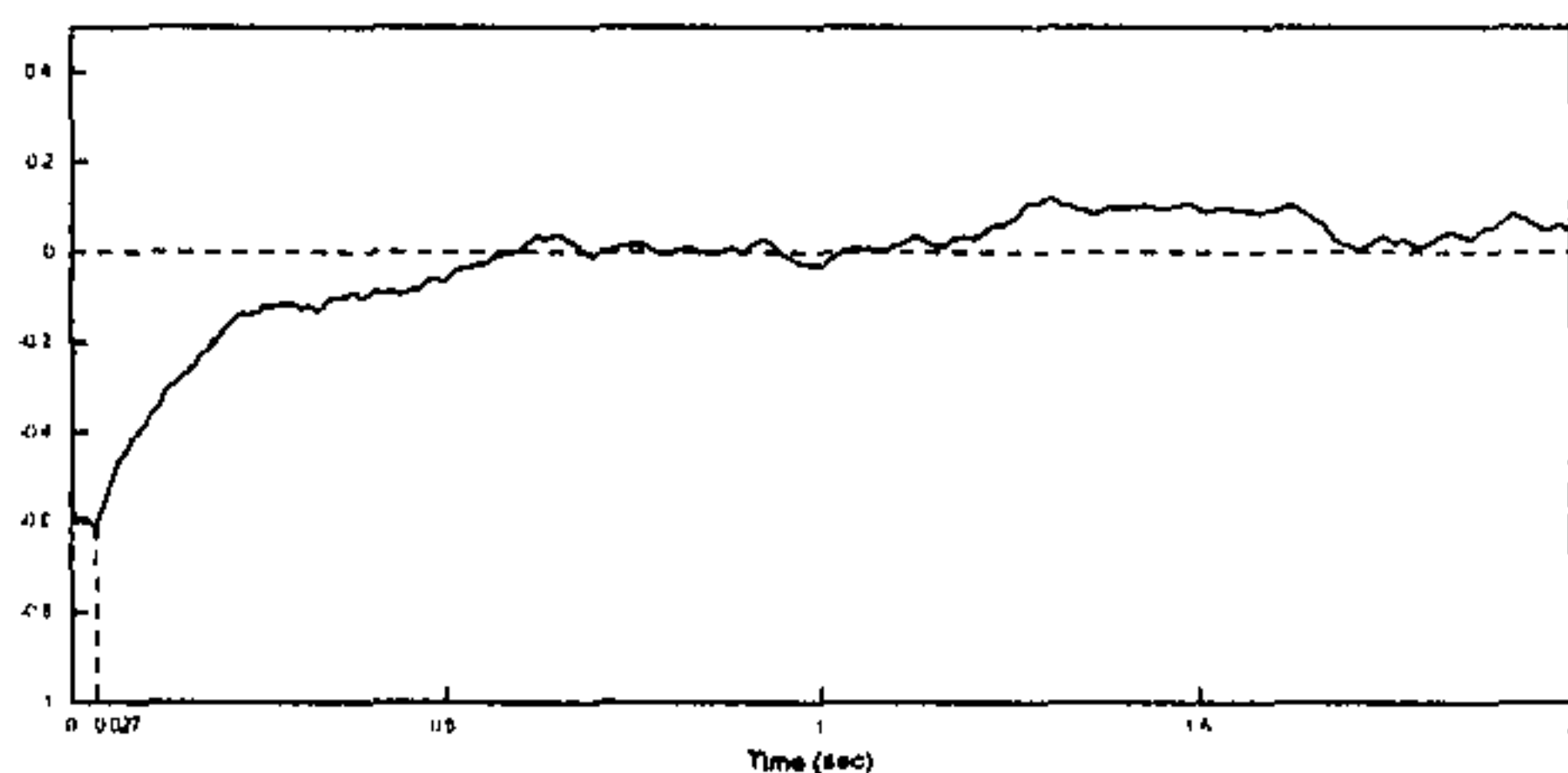


Fig. 7 풍속과 풍압력 고유직교함수 전개계수의 상호상관계수

Fig. 8은 풍속과 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 시간이력을 보여주고 있으며, 첫 번째 모드에 해당하는 전개계수의 전체 시간이력 중 피크 이벤트가 일어나는 5초간의 시간이력이 본 그림에서 표현되고 있다. 일반적으로, 양의 부호를 갖는 풍속의 큰 변동성분이 기류의 박리지점에서 큰 부압력을 유발시키는 것을 알 수 있다.

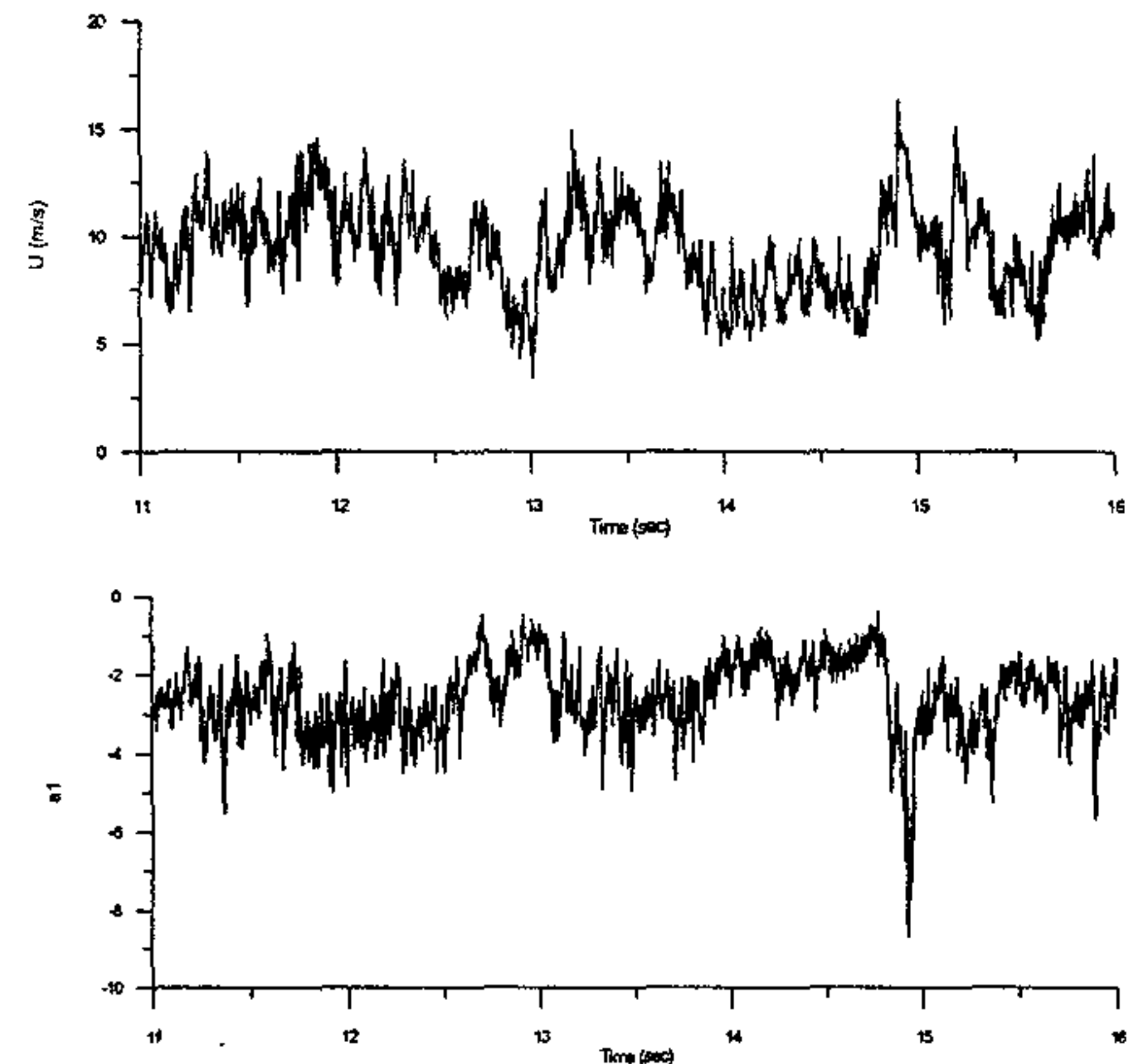


Fig. 8 풍속과 고유직교함수 전개계수의 시간이력

피크 풍압력의 시간·주기 해석을 위하여, 연속파동변환법이 Fig. 9와 같은 Mexican Hat 모함수를 사용하여 식(8)에 적용되었다. Table 4는 Mexican Hat 모함수의 특성치들을 보이고 있다. 식(10)과 Table 4에서 나타난 연속파동변환법 변수  $C_r$ 는  $\pi$  값을 가지며 진동수와는 무관함을 알 수 있다. Mexican Hat 함수의 푸리에 변환은  $f = \pm \sqrt{2}/(2\pi a)$ 에서 최대값을 가지고 있다.

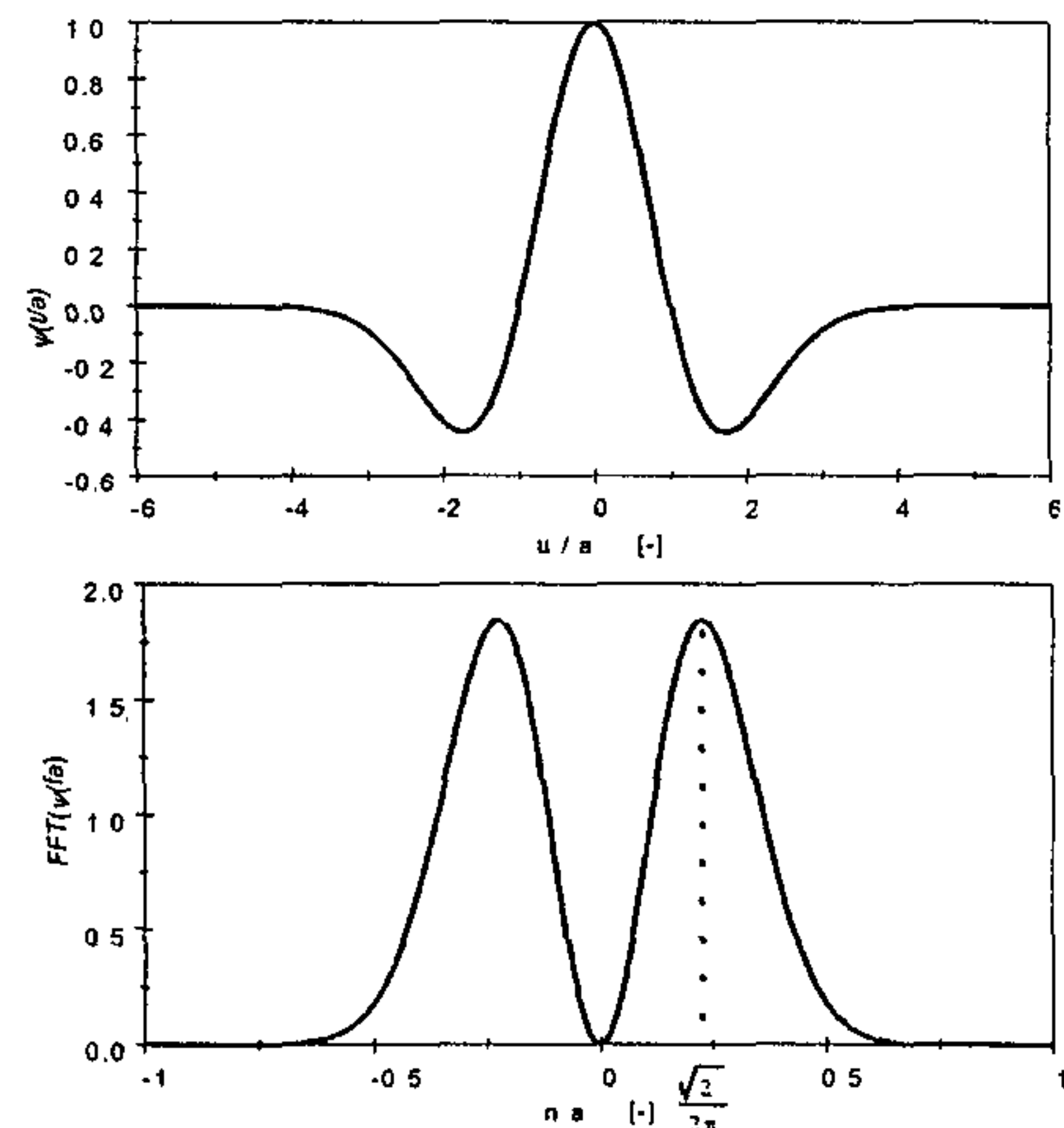


Fig. 9 시간과 주기영역의 Mexican hat 모함수

Table 4 Mexican Hat 모함수의 특성치

Wavelet	Fourier transform	$C_V$	Peak of spectrum
Mexican Hat, $\Psi(t) = (1-t^2)e^{-t^2/2}$	$\sqrt{2\pi}\omega^2 e^{-\omega^2/2}$	$\pi$	$\sqrt{2}$

본 연구에서 식(7)~식(18)을 사용한 연속파동변환법의 알고리즘이 개발되었고 코사인(cosine) 파와 디랙 델타(Dirac delta) 분포의 연속파동변환 결과가 수식에 의한 해석적 결과들과 함께 비교하여 검토되었다. 연속파동변환 해석을 적용하기 전에, 평균값이 풍속의 수평성분과 건물 압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수로부터 제거되었다. 풍속의 신호는 풍압력 신호와의 샘플링 주기를 맞추기 위하여 보간(interpolation)하여 사용되었다. 풍속의 수평성분과 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 피크 근처에서의 시간이력의 1,024개 점이 연속파동변환법을 적용하기 위하여 사용되었다. 본 해석에 적용된 최대 축소와 스케일,  $a$ 는 각각 0.47과 167이었다. 이에 해당되는 주파수는 각각 227Hz와 0.65Hz이다. 이 진동수 영역에서, 연속파동변환 계수 CWT는 700개의 주파수 영역으로 분산되어 계산되었다. 그러므로 연속파동변환 계수의 행렬 크기는 식(7)에 의하여  $[700 \times 1024]$ 이며, 이에 해당하는 컴퓨터 메모리는 약 11.5 메가바이트이다.

식(13)으로 표현되는 풍속과 첫 번째 고유직교함수 전개계수에 대한 평균(데이터 기록의 평균값) 연속파동계수 스펙트럼이 Fig. 10와 Fig. 11에 각각 그려져 있으며 푸리에 스펙트럼과 비교되었다. 평균 연속파동 스펙트럼과 푸리에 스펙트럼은 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

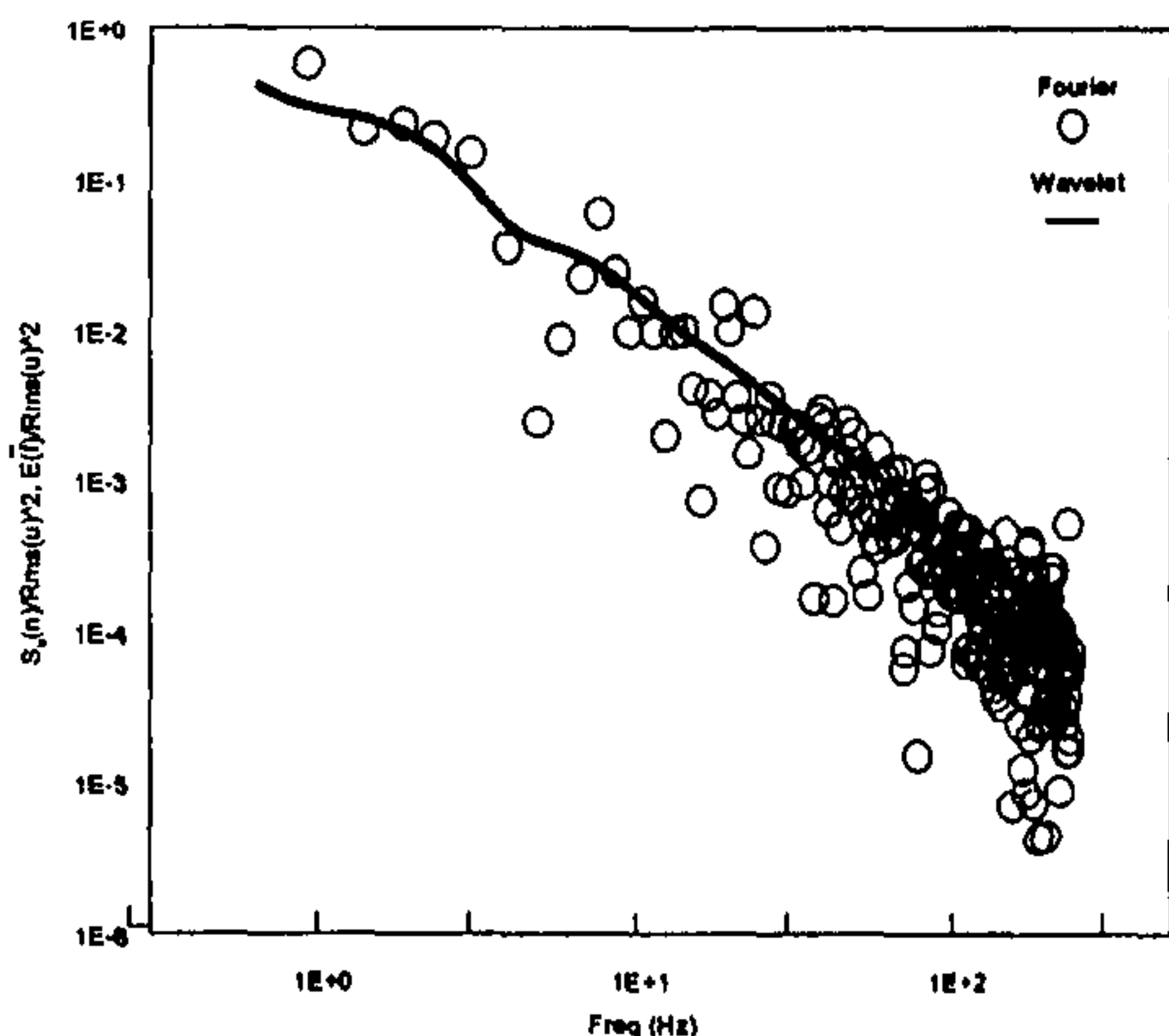


Fig. 10 평균 연속파동계수 스펙트럼: 풍속

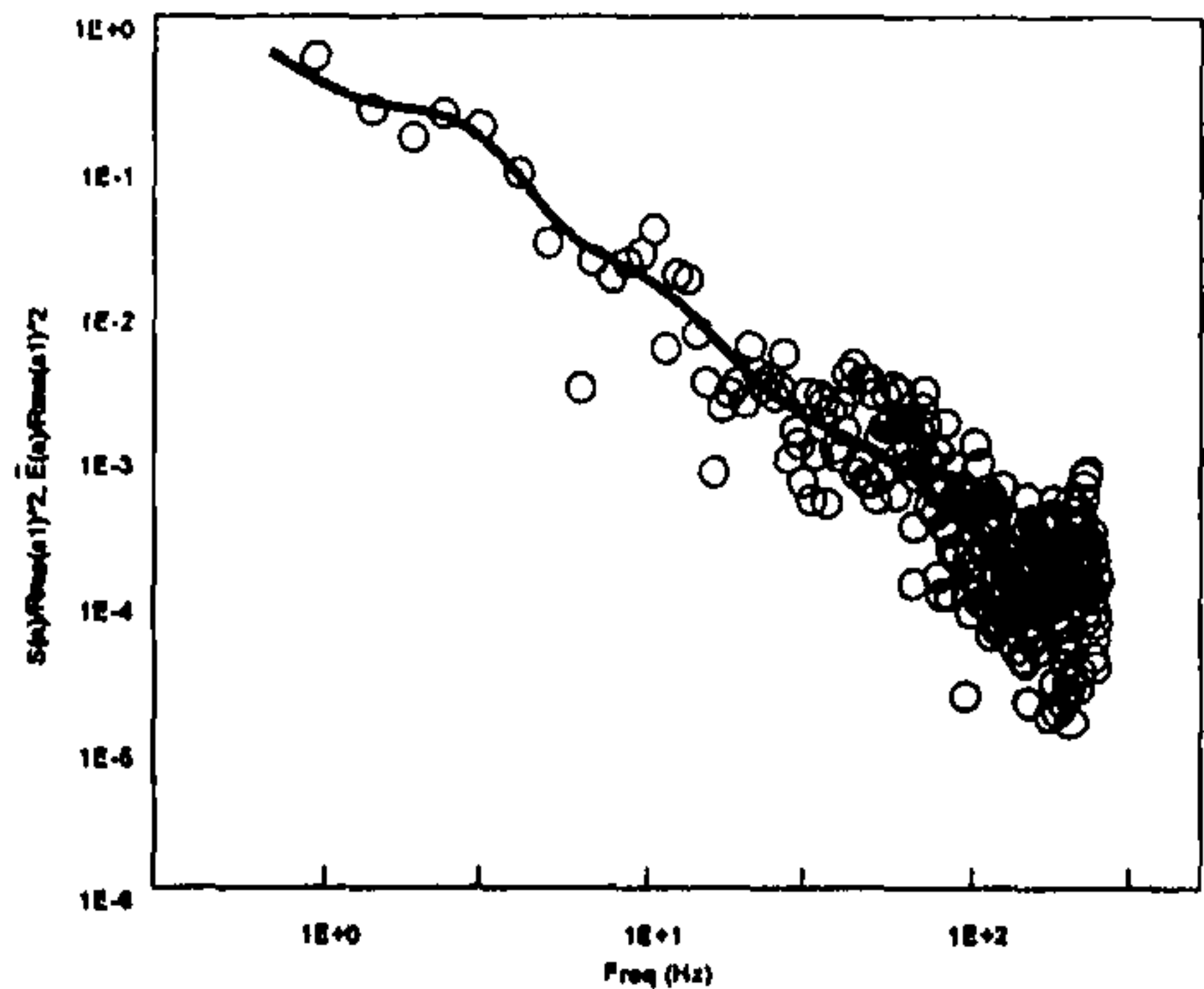


Fig. 11 평균 연속파동계수 스펙트럼: 풍압력

풍속의 연속파동변환 계수가 Fig. 12에 표현되어 있다. 속도 신호의 불연속은 연속파동변환 계수에 의해 잘 표현되고 있다. 대부분의 속도 에너지는 피크 이벤트를 제외하고 5Hz 이하의 진동수에 포함됨을 알 수 있다. 그러나 풍속에서의 갑작스런 변화는 보다 넓은 범위의 주파수대(10Hz 이상)로 에너지가 분산됨을 알 수 있다. 풍속의 시간이력은 두 개의 유사한 피크 이벤트( $t \approx 14.9$ 초와  $t \approx 15.2$ 초)에서 보여지고 있다. 그러나 연속파동변환 계수는 각각의 피크에 관해서 명백하게 다른 에너지의 성격을 보임을 알 수 있다. 즉,  $t \approx 14.9$ 초에서의 피크 이벤트는  $t \approx 15.2$ 초에서 일어나는 피크 이벤트보다 저주파수대에 응집된 에너지를 더 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

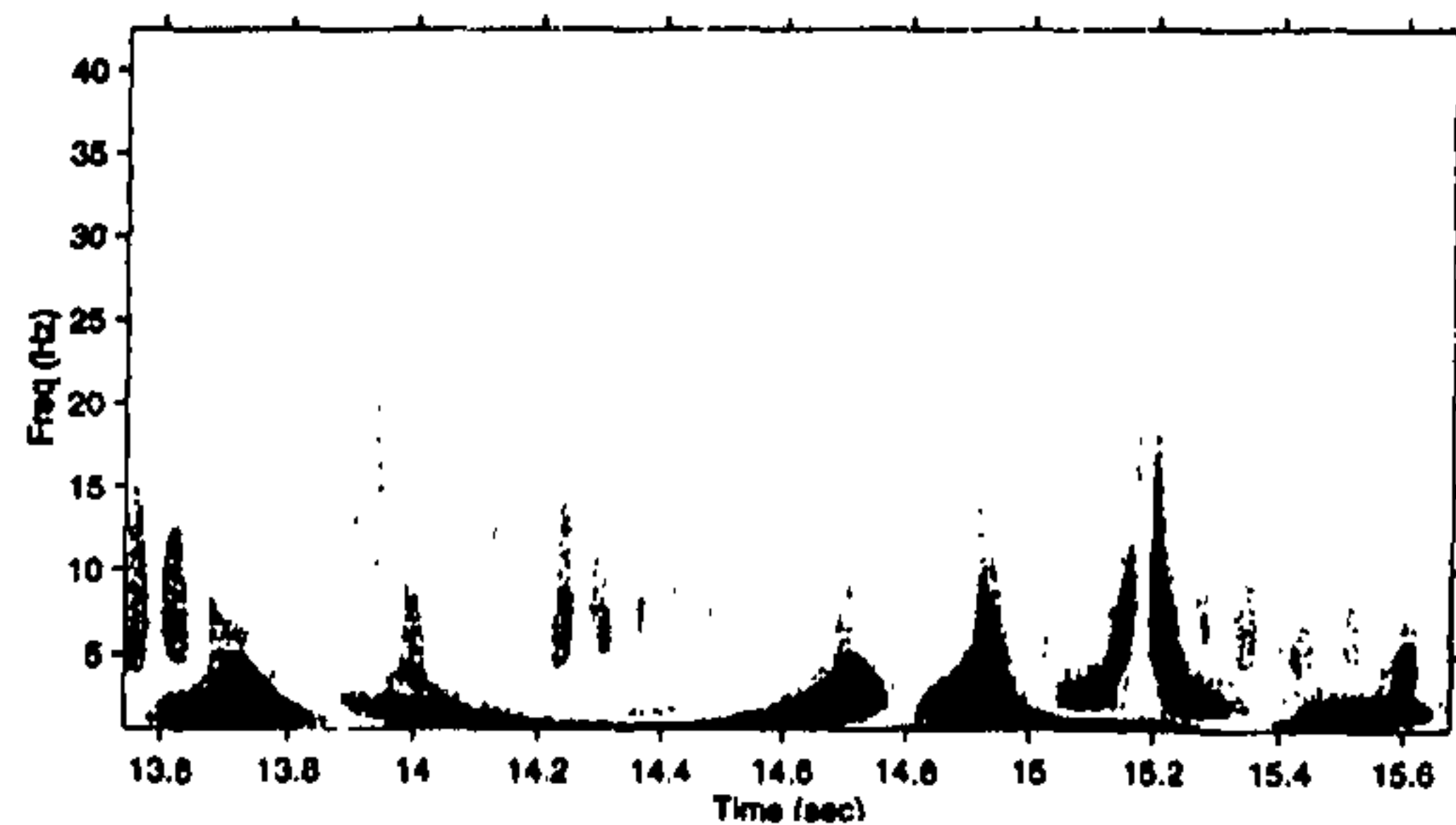
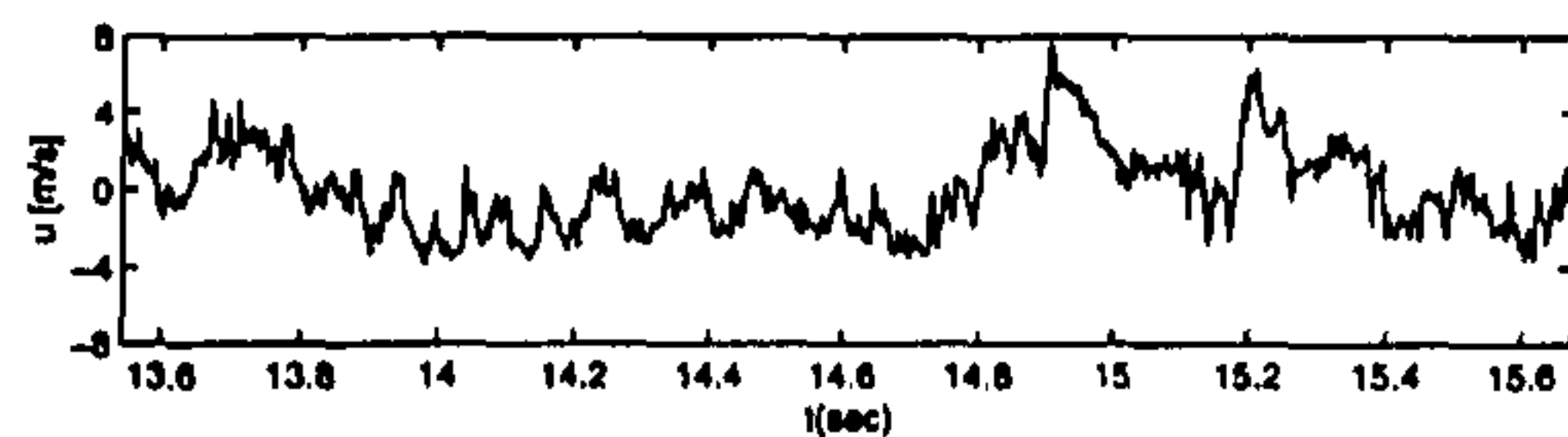


Fig. 12 연속파동변환계수: 풍속의 수평성분

유사한 모습이 Fig. 13에서 건물 압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수에서도 관찰되었다. 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 시간이력은 풍속의 시간이력이 두 개의 피크 이벤트를 보이는 것과

달리 하나의 피크 이벤트를 보인다. Fig. 12와 Fig. 13에서 연속파동변환 계수들을 비교해보면, 풍속의 시간이력에서의 첫 번째 피크가 풍압력의 피크 이벤트를 일으키는 것을 알 수 있다. 이것은 응집된 저주파수 영역에서 속도 에너지 또는 큰 스케일의 와(large eddy)가 풍압력 피크 이벤트와 관련되어 있다는 것을 시사한다..

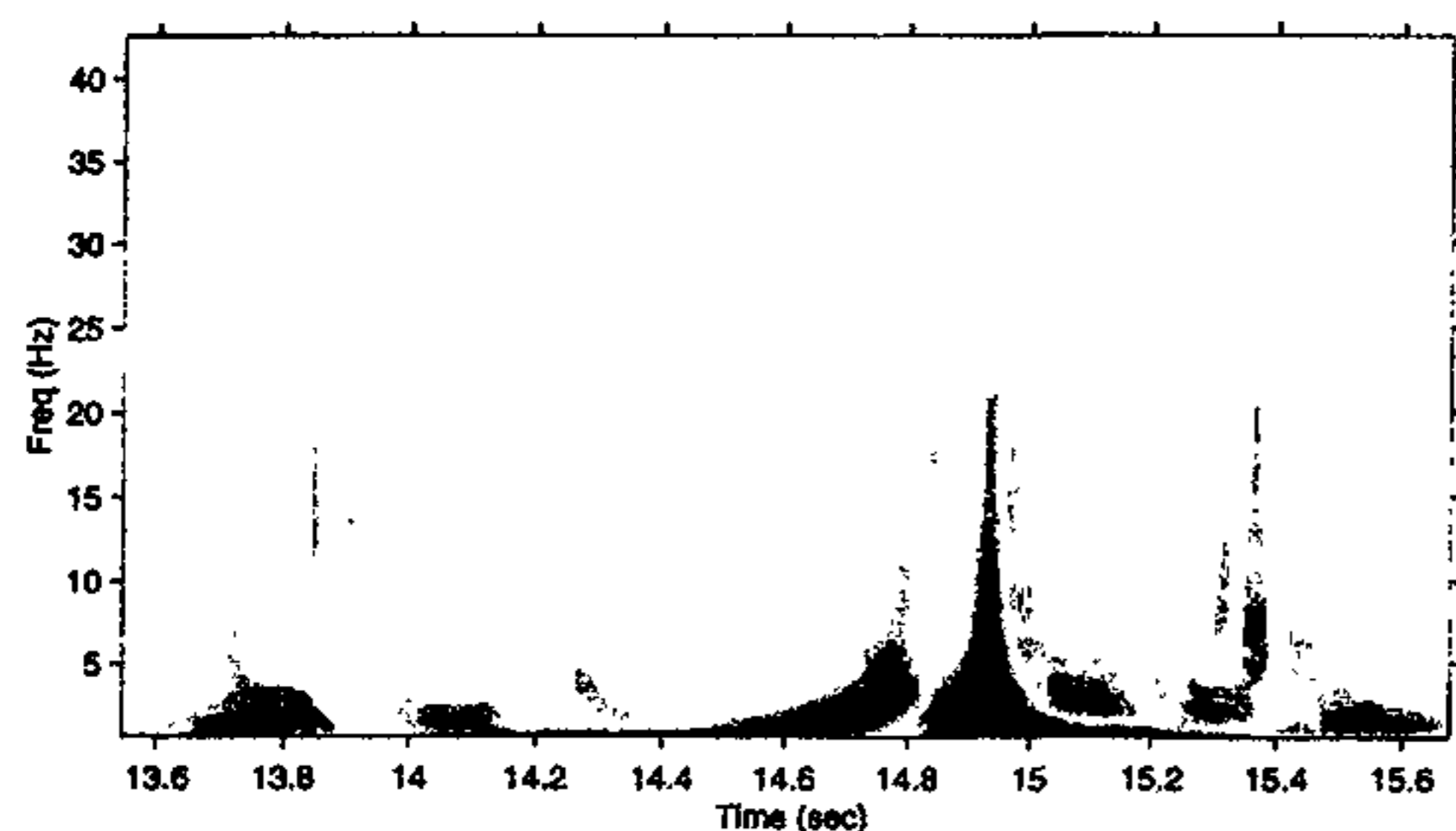
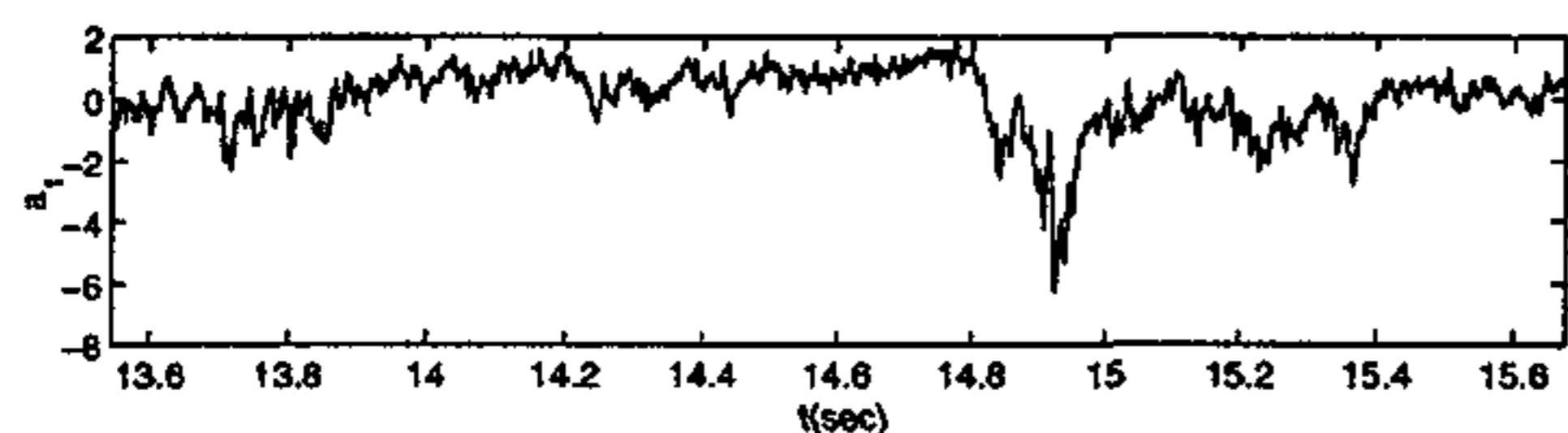


Fig. 13 연속파동변환계수: 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수

식(14)를 이용한 풍속의 수평성분과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 국부 연속파동 계수 스펙트럼이 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 나타나 있다. 또한, 평균 연속파동계수 스펙트럼이 그림에 같이표현되어 있다. 그림에서,  $t \approx 14.06$ 초와 14.08초는 피크 이벤트에 대한 에너지를 나타내지 않는 반면,  $t \approx 14.91$ 초와 14.93초는 풍속과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 시간이력에서의 피크 이벤트와 관련되어 있다. 푸리에 스펙트럼 분석에서 계산되지 않는 국부 에너지에서 큰 변화가 있음을 알 수 있다. 또한, 풍속과 풍압력 사이의 비선형 에너지 이동이 발견되고 있다.

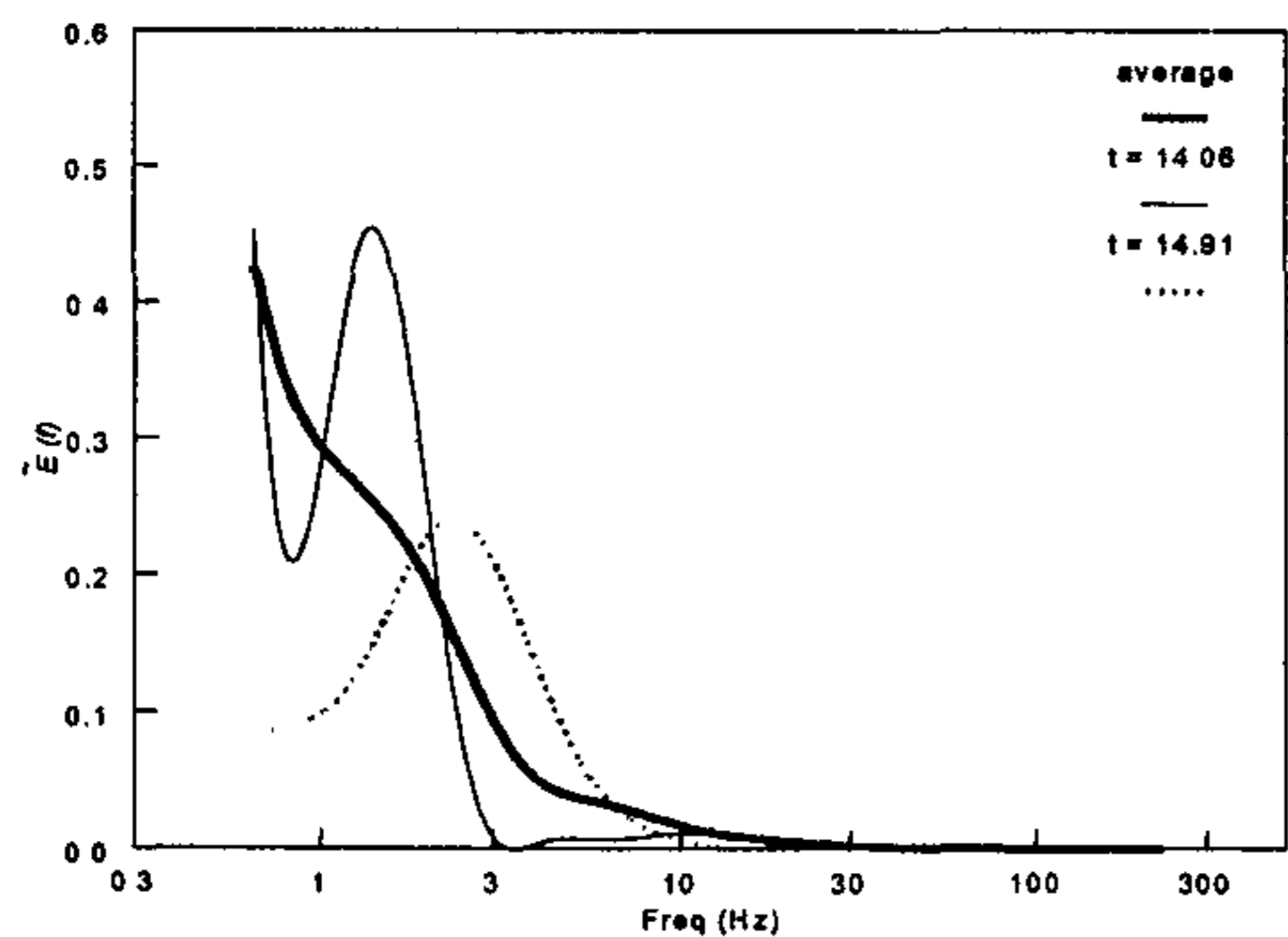


Fig. 14 국부 연속파동계수 스펙트럼: 풍속

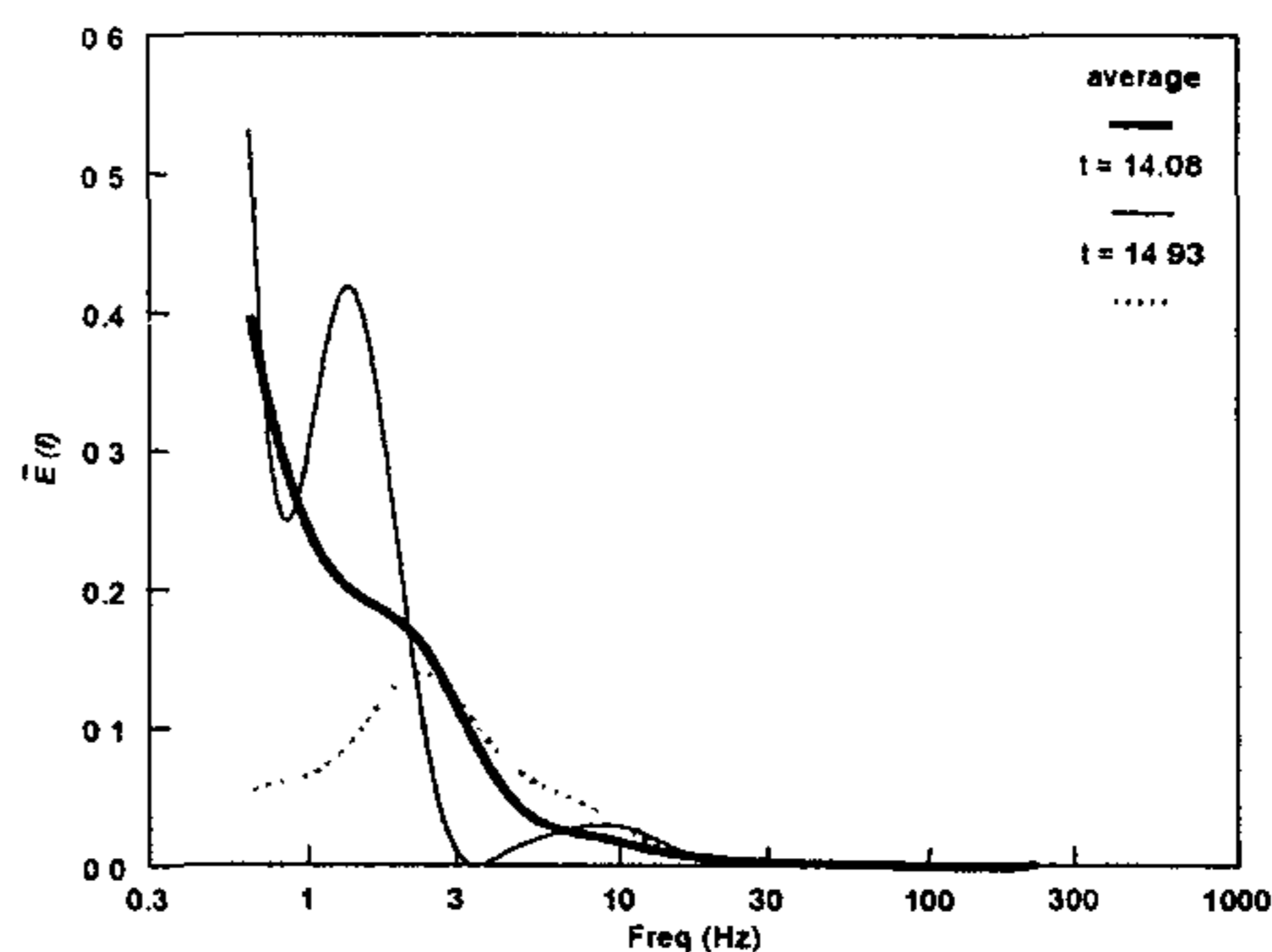


Fig. 15 국부 연속파동계수 스펙트럼: 풍압력

즉,  $t \approx 14.91$ 초와 14.93초에서 풍속과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수에 대한 피크 진동수는 진동수  $f \approx 2.5$ Hz로 같았다. 그러나 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 에너지는 더 넓은 주파수 영역으로 분포되어 있다.

식(7)과 Fig. 12과 Fig. 13에 나타난 연속파동변환 계수는 시간과 주파수를 종속 함수로 하여 에너지를 나타낸다. 즉, 연속파동변환 계수는 특정 주파수에서 에너지의 시간이력을 연구하기 위해 이용될 수 있다. Fig. 16과 Fig. 17은 주파수  $f = 2.5, 5.0, 3.1, 11$ Hz에서 풍속의 수평성분과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수에 대한 연속파동변환 계수의 시간이력을 보여주고 있다.

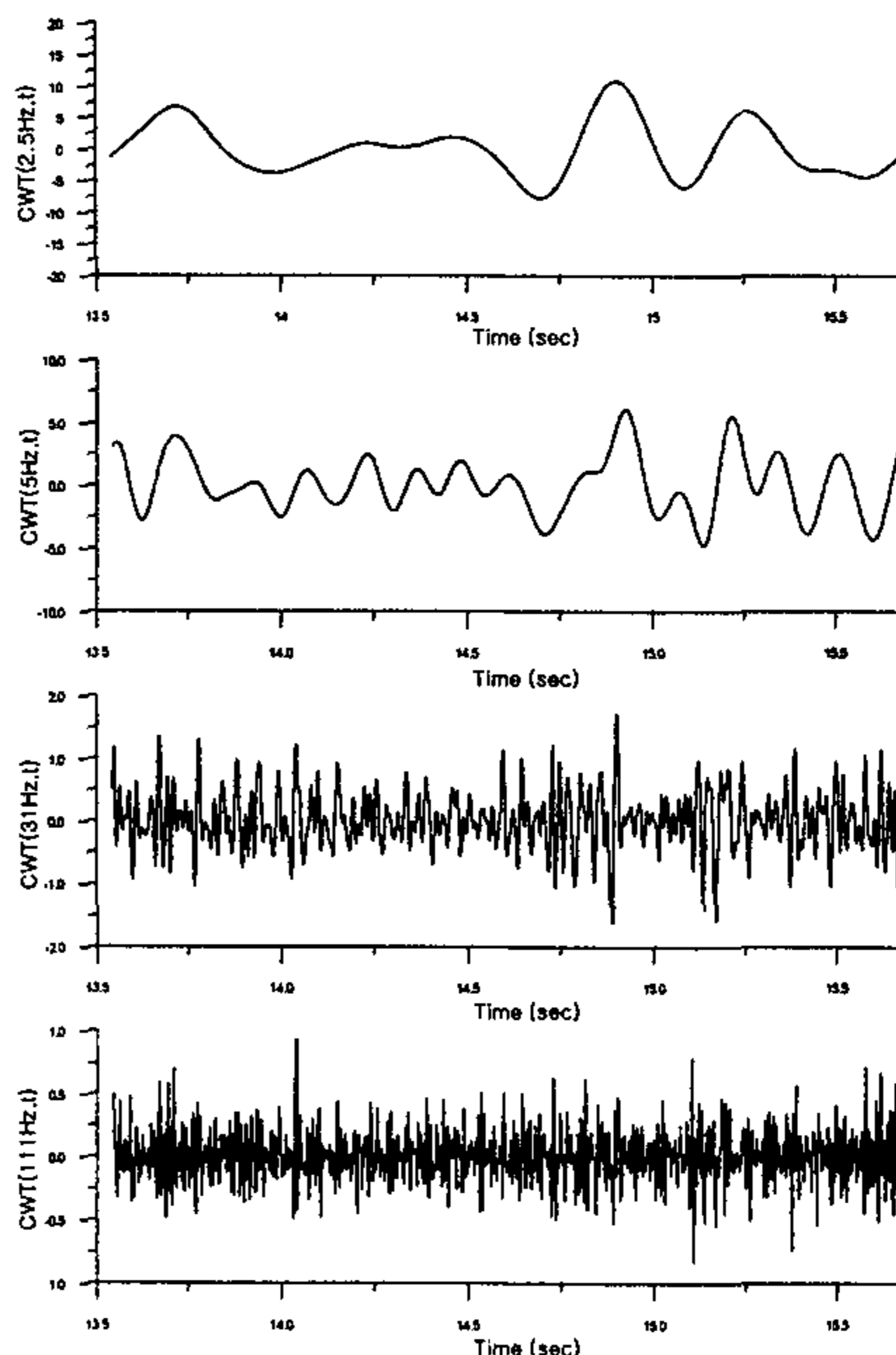


Fig. 16 연속파동변환계수: 풍속의 수평성분

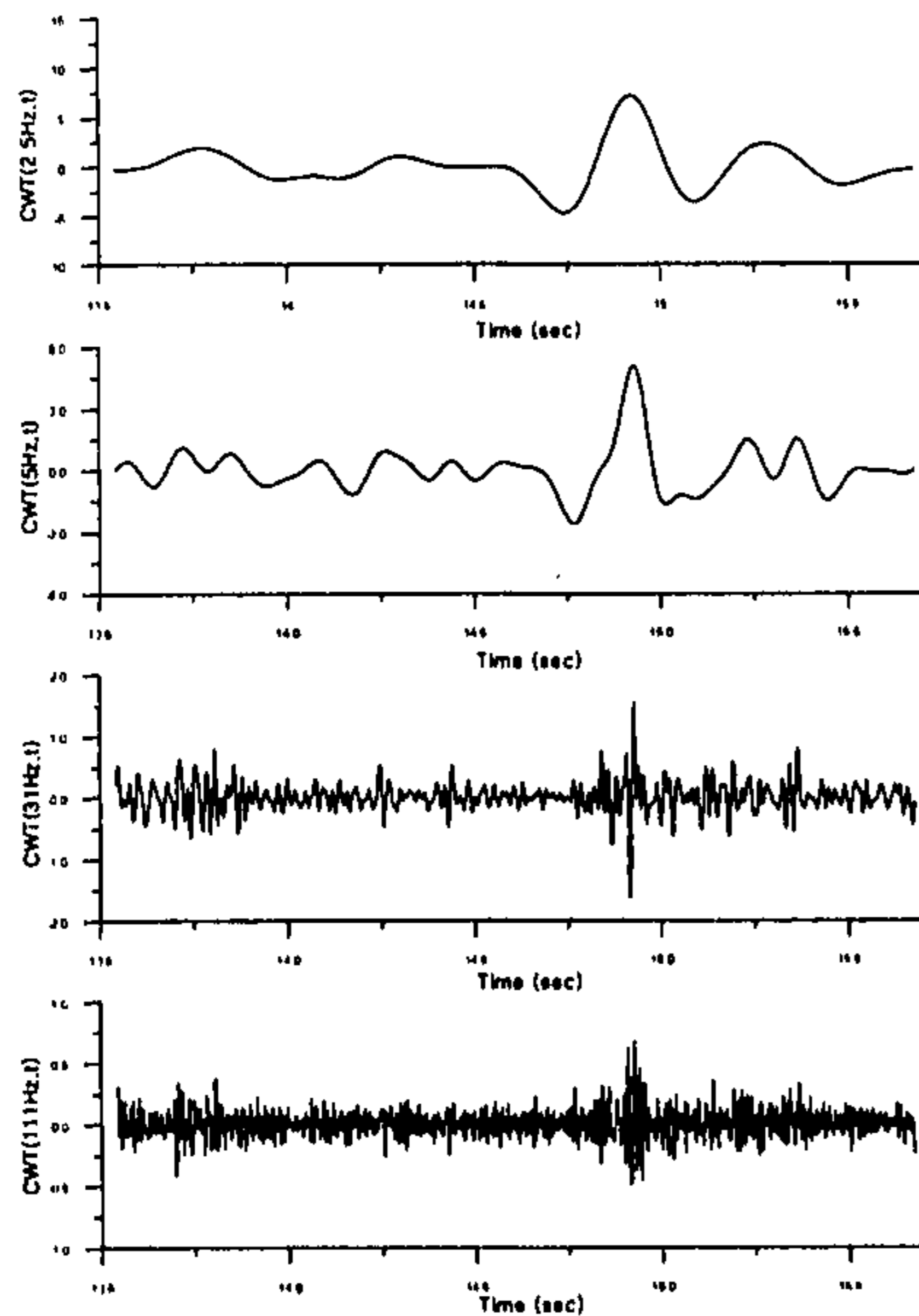


Fig. 17 연속파동변환계수: 풍압력의 고유직교함수 전개계수

Fig. 17에는 풍속의 연속파동변환 계수와 비교를 위하여, 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개 계수의 연속파동변환 계수가 반대의 부호를 하고 있다.

Fig. 16과 Fig. 17에서 볼 수 있듯이, 풍속과 풍압의 연속파동변환 계수는 저주파(예,  $f=2.5\text{Hz}$ ) 주파수대에서 크게 유사성을 보이고 있음을 알 수 있다. 주파수대  $n=5.0\text{Hz}$ 에서는 풍속의 연속파동변환 계수는 변위가 +5를 넘는 두개의 피크 이벤트( $t \approx 14.9\text{초}$ 와  $t \approx 15.2\text{초}$ )를 보이고 있는 반면, 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수의 연속파동변환 계수는 하나의 피크 이벤트 ( $t \approx 14.9\text{초}$ )에서 높은 에너지가 관찰됨을 알 수 있다. 높은 주파수대로 가면서 풍속과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수들의 연속파동변환 계수는 유사성이 없음을 알 수 있다.

두 성분의 상관관계는 푸리에 상호스펙트럼에 기초한 것과 유사한 방법으로 정의되는 연속파동변환 상호스펙트럼을 사용해 더 자세하게 연구될 수 있다. 연속파동변환이 푸리에 변환에서 제공하지 않는 주파수의 국지화를 제공하기 때문에, 이와 같은 접근은 상류의 접근풍속이 건물 풍압력에 주는 영향성을 결합된 시간·주기 영역에서 연구하기에 적합하다고 사료된다. 이와 같은 접근풍속과 풍압력의 고유직교함수 전개계수 사이의 상호 연속파동변환 분석 결과가 Fig. 18에 보여진다. 풍압력 데이터(첫 번째 고유함수 전개계수)를 위하여서

는, 앞에서 얻어진 지연시간  $t=0.02\text{초}$  전개함수의 시간이력에서 빼면서 상호 연속파동변환 분석에 적용하였다. 대부분의 피크 이벤트가 나타나지 않는 지역은 저주파수대  $f \leq 2\text{Hz}$ 에서 높은 상호관계 값을 가지는 반면, 피크 이벤트는  $f \leq 8\text{Hz}$  이하의 진동수에서 큰 상관계수 값을 보임을 알 수 있다.

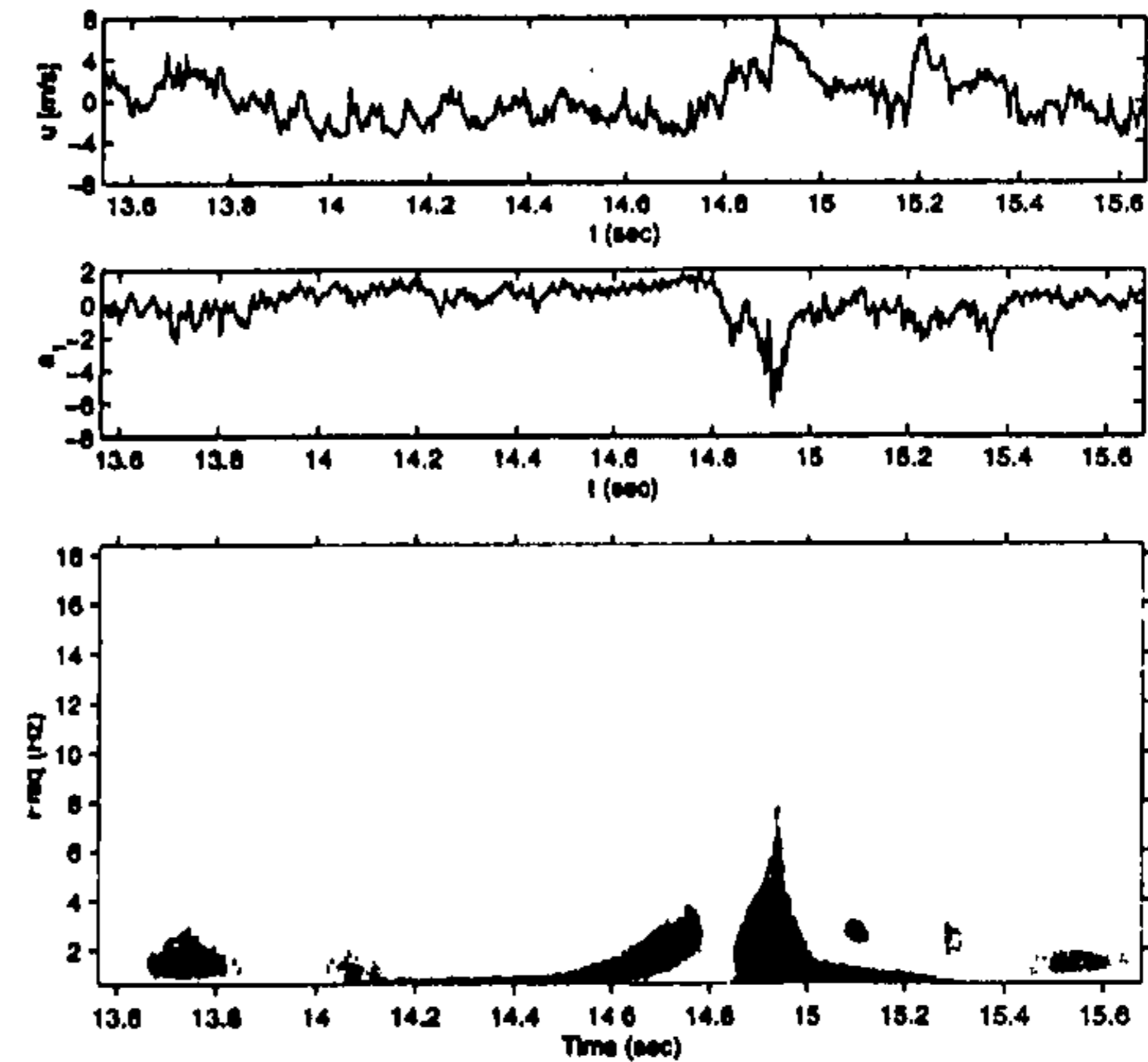


Fig. 18 상호 연속파동변환 계수: 풍속과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수

풍속과 지붕 풍압력의 첫 번째 고유직교함수 전개계수간의 연속파동변환 국부 에너지 분포함수가 Fig. 19에서 2개의 대표적인 시간( $t \approx 14.06\text{초}$ 와  $t \approx 14.91\text{초}$ )에서 주파수의 종속함수로 표현되었다.

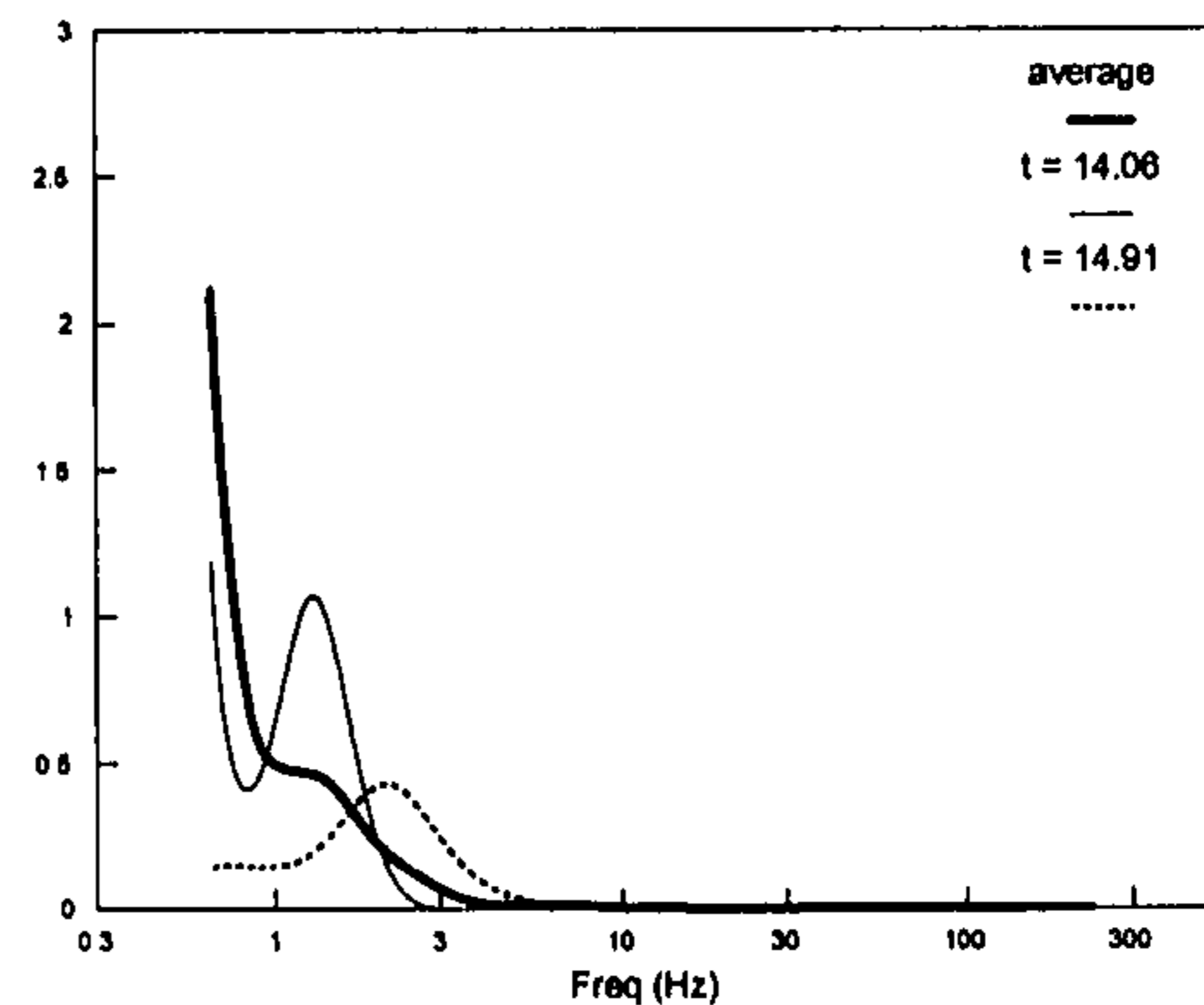


Fig. 19 국부 에너지 분포함수: 풍속과 풍압력의 첫 번째 고유직교함수

국부 에너지 분포함수는 선택된 전체 시간이력으로부터 계산된 평균 에너지 분포함수와 함께 비교되었다. Fig. 19에 표현된 국부 에너지 분포함수는 Fig. 14와 Fig. 15에서 나타난 국부 연속파동변환 스펙트럼과 매우 유사하다. 역시, 이 그림으로부터 국지적인 분포함수와 평균 분포함수 사이의



큰 차이가 관찰되었다. 이들 차이는 피크와 같이 짧은 순간에 의한 바람의 영향은 통상적으로 풍하중 산정에 취하고 있는 정상상태(quasi-steady)이론이 적합하지 않음을 시사한다고 사료된다.

### 5. 결론

본 연구는 저층건물의 박리지역의 변동풍압력과 접근풍속과의 상관관계를 고유직교함수전개법과 연속파동변환법을 적용하여 시간·공간·주기적 성격을 규명하기 위한 것이다. 해석된 풍압력장에 대한 고유직교함수전개법의 결과는 다음과 같다.

고유직교함수전개법으로 해석된 첫 번째 모드가 전체에너지의 98.2%를 기여하고 있음을 보이고 있다. 이 첫 번째 모드에 해당하는 고유함수는 풍압력의 평균 제곱과 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 풍압력장의 첫 번째 고유직교함수 전개계수는 가우시안 분포로부터 왼쪽으로 기울어진 것을 알 수 있다. 이 결과는 기존에 건축물의 하중산정을 위한 정상상태이론이 건물 지붕 가장자리 기류의 박리부분에서 적용되지 않음을 보이고 있는 것으로 사료된다.

연속파동변환법을 이용한 본 연구는 접근풍속과 변동풍하중의 시간·주기적 상호관계를 규명하기 위하여, 연속파동변환법이 푸리에 변환에서 해석할 수 없는 많은 장점을 보이고 있음을 알 수 있었다. 특별, 피크 이벤트와 같은 바람과 변동풍압력의 급격한 변화(unsteady event)의 시간·주기적 성격은 연속파동변환법을 이용하여 합리적으로 해석될 수 있음을 알 수 있었다. 해석된 데이터에서 주기성분의 시간에 따른 변화성은 연속파동변환 계수와 국부 연속파동계수 스펙트럼 및 국부 연속파동계수 에너지 분포함수에 매우 잘 나타나고 있음을 알 수 있었으며 시간에 따른 주기에너지의 변동은 푸리에 변환에서 얻어진 평균치 값들과 많이 다름을 알 수 있었다.

고유함수전개법과 연속파동변환법을 이용한 해석을 통하여, 지붕 가장자리의 변동풍압의 첫 번째 고유함수전개 모드는 접근풍속의 수평방향 성분과 매우 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌으며, 바람의 박리지역에서의 피크 풍압력은 접근풍속에 존재하는 큰 길이스케일의 와류와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

### 기 호

$a$	스케일 ( $\approx 1/\text{frequency}$ )
$a_n(t)$	$n$ 번째 전개계수
$CWT(\tau, a)$	연속파동변환 계수
$C_r$	연속파동변환계수의 허용조건 계수

$e(a, t)$	연속파동변환 에너지 분포함수
$\tilde{E}(a)$	평균 연속파동계수 스펙트럼
$\tilde{E}(a, t)$	국부 연속파동계수 스펙트럼
$f$	진동수, 주파수
$\Phi(x, y)$	고유함수
$k$	파동수
$\lambda$	고유치
$\omega$	각진동수
$p(x, y, t)$	압력장
$R_p(x, y, x', y')$	압력장의 상관 함수
$[R_p]$	압력장의 상관 행렬
$t$	시간
$\tau$	시간이동 ( $\approx \text{time}$ )
$x, y$	공간 좌표
$\Psi_{\omega}(t)$	모(母)연속파동함수
$\langle \rangle$	평균 연산기호

### 참 고 문 헌

- [1] M. Nadler and E. Smith, "Pattern Recognition Engineering", John Wiley & Sons Inc., 208-215, 1993.
- [2] T. Hayashi, "An Analysis of Wind Velocity Fluctuations in the Atmospheric Surface Layer Using an Orthogonal Wavelet Transform", *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 70, pp. 219-230, 1994.
- [3] V. Perrier, T. Pholipovitch, and C. Basdevant, "Wavelet Spectra Compared to Fourier Spectra", *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 36, pp. 1506-1519, 1995.
- [4] A. Bertelud, G. Erlebacher, P. Dussouillez, M. Liandrat, F. Baily, and P. Tchamitchian, "Development of Wavelet Analysis Tools for Turbulence", NASA DR-189674.
- [5] J. Yin, "Probability Study of Wind Pressures on Buildings", Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Eng., Texas Tech Univ., Lubbock, TX, 1996.
- [6] S. H. Jeong, Bienkiewicz, and H. J. Ham, "Proper Orthogonal Decomposition of Building Wind Pressure Specified at Non-uniformly Distributed Pressure Taps", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 87, pp. 1-14, 2001.
- [7] H. J. Ham and B. Bienkiewicz, "Characteristics of Roof Peak Pressure on a 1:50 Geometrical Scale Model of the TTU Test Building" 11th International Conference on Wind Engineering, In a CD, 2003.