

임의의 표본상호상관함수와 비정규확률분포를 갖는 다중 난류시계열의 디지털 합성방법을 이용한 풍속데이터 시뮬레이션

Wind Data Simulation Using Digital Generation of Non-Gaussian Turbulence Multiple Time Series with Specified Sample Cross Correlations

성승학* · 김 옥¹⁾ · 김경천¹⁾ · 부정숙¹⁾

부산대학교 기계기술연구소, ¹⁾부산대학교 공과대학 기계공학과

(2003년 3월 25일 접수, 2003년 8월 18일 채택)

Seung Hak Seong*, Wook Kim¹⁾, Kyung Chun Kim¹⁾ and Jung Sook Boo¹⁾

Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Pusan National University*

(Received 25 March 2003, accepted 18 August 2003)

Abstract

A method of synthetic time series generation was developed and applied to the simulation of homogeneous turbulence in a periodic 3-D box and the hourly wind data simulation. The method can simulate almost exact sample auto and cross correlations of multiple time series and control non-Gaussian distribution. Using the turbulence simulation, influence of correlations, non-Gaussian distribution, and one-direction anisotropy on homogeneous structure were studied by investigating the spatial distribution of turbulence kinetic energy and enstrophy. An hourly wind data of Typhoon Robin was used to illustrate a capability of the method to simulate sample cross correlations of multiple time series. The simulated typhoon data shows a similar shape of fluctuations and almost exactly the same sample auto and cross correlations of the Robin.

Key words : Digital synthesis of time series, Sample cross correlation, Homogeneous turbulence, Non-Gaussian probability distribution

1. 서 론

본 연구는 추계적 모델 (stochastic model)을 기반

* Corresponding author

Tel : +82-(0)51-510-2485, E-mail: sseong@pusan.ac.kr

으로 하는 난류의 합성 (synthesis) 방법과 그 응용에 관한 연구이다. 난류유동의 수치 시뮬레이션에서 최근 고성능 컴퓨터의 발달로 LES (Large Eddy Simulation) 등의 연구가 활발하게 되면서 난류시계열 합성의 필요성, 난류모델의 중요성은 점점 더 부각되고 있다. 이러한 난류유동의 수치 시뮬레이션을 위한 기

초 연구로서 본 연구의 주요 주제는 난류 시계열이 갖는 특성 중에 (1) 비정규 확률분포와 (2) 다중 시계열의 상호상관함수를 어떻게 시뮬레이션을 통하여 재현할 것인가 하는 것이다. 여기서 다중시계열의 상호상관은 물리적 공간에서의 상호상관(cross correlation)을 말하며 주파수공간에서의 상호스펙트럼(cross spectrum)과는 구별된다. 본 논문의 구성을 요약하면 제2절에서는 추계적 모델 기반의 시계열합성에 대한 배경과 위 두 가지 성질의 합성의 필요성을 기술하고 제3절에서는 위에 제시한 두 가지 특성을 재현할 수 있는 시계열 합성방법을 소개한다. 제4절에서는 본 합성방법의 응용으로서 주기적 경계조건을 갖는 상자내부 난류의 수치계산을 통하여 시계열의 자기상관성, 상호상관성, 비정규분포 등이 균일 난류의 구조에 어떠한 영향을 주는지 관찰한다. 제5절에서는 태풍 로빈(Robin)에 대한 한반도 3개 지역의 매시풍속데이터를 이용하여 일주기성, 계절주기성을 갖는 비정규확률분포 시계열특성을 모의하여 주어진 기간동안의 표본상호상관함수가 정확히 재현된 합성 태풍시계열을 생성하여 본 합성방법의 유용성을 예시한다.

2. 난류 시계열 디지털합성 연구의 배경

난류는 그 현상론적 특성상 확률적(probabilistic) 혹은 추계적 모델(stochastic model)로 자주 모형화되며 확률분포(probability distribution)와 상관함수(correlation function) 혹은 스펙트럼 밀도함수(spectral density function) 등으로 특징 지워진다(Tennekes and Lumley, 1972). 모델의 해석적인 성질은 난류가 균일한(homogeneous or stationary) 랜덤변수로 가정된 결과이다. 그러나 실제로 난류는 비균일(nonhomogeneous), 비정상적(nonstationary), 비등방성(nonisotropic)이며 비정규확률분포(non-Gaussian probability distribution)를 나타낸다. 이들은 기존의 확률적 모형으로 모형화하기 어려운 특징들이며 난류가 갖고 있는 중요한 물리적인 현상 또는 비선형적인 현상들과 밀접한 관련이 있다(Durbin and Petterson Reif, 2001).

균일 난류의 경우 추계적 모델로부터 랜덤시그널 혹은 난류를 합성하는 방법에는 크게 자기회귀적 추

계 모델(autoregressive model)을 사용하거나(Brockwell and Davis, 1991) 푸리에변환(Fourier transform)을 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다(Shinozuka, 1991). 최근 이들의 변형된 형태의 모델들이 연구되고 있다. 대개 정규(Gaussian)확률분포에 대한 모델이 잘 개발되어 사용되고 있다. 실제 난류현상은 비정규(non-Gaussian)분포이며 난류유동 현상에 따라 매우 다양한 형태를 갖는다. 비정규분포의 경우 수학적으로 잘 개발된 모델은 매우 드물다. 스펙트럼 혹은 상관함수특성을 해석적으로 유지하면서 원하는 형상의 비정규분포를 갖게 하는 모델을 구성하기 어려우므로 대개 반복처리방법(iterative methods)으로 상관함수와 비정규분포 특성을 만족시키는 방법이 사용되고 있다(Ammon, 1990).

균일난류는 시간과 공간의 함수형태이므로 다중시계열(multiple time series)로 모델화된다. 이 경우 난류신호간의 상호상관성(cross correlation) 혹은 상호스펙트럼(cross spectrum) 특성이 중요하게 되며 따라서 난류 합성에 포함되어야 할 중요한 성질이 된다. 다중시계열의 경우도 정규분포의 경우 상호스펙트럼 특성을 재현하는 수학적 표현이 잘 개발되어 있어서 특정한 상호스펙트럼의 특성을 모사하는 시계열을 합성해 낼 수 있다. 독립적인 랜덤위상(independent random variable for the Fourier phase)을 갖는 다중 랜덤시계열의 푸리에 표현으로부터 특정한 상호스펙트럼을 갖게 하는 수학적 표현을 얻는 것이 가능하다. 그러나 단일시계열의 경우와 같이 비정규분포를 갖는 시계열을 합성하는 모델을 구성하기가 어렵다. 또한 여기서 주목할 것은 상호스펙트럼의 형태를 모사한다는 점이다.

다중시계열의 합성이 필요한 응용분야의 하나가 LES, DNS 등 난류유동관련 전산유체역학 분야이다. 입력데이터로 합성난류(synthetic turbulence)를 생성하는 것이 필요한데 기존의 추계학적 모델은 이러한 실제의 난류특성을 재현하는데 부적절하다. 먼저 기본적으로 연속방정식을 쉽게 만족시킬 수 없으며 난류인 경우 포함하게 되는 비선형적인 물리적 현상을 합성해 내는데 한계가 있다. 저 레이놀즈수 채널유동 문제의 경우 유동방정식을 이용하는 방법(Lund et al., 1998)을 사용할 수 있으나 고비용의 전산자원이 필요하다. 거친 표면 위 고 레이놀즈수 유동의 경우 아직 적절한 입구측 난류데이터의 생성방법이 개발되

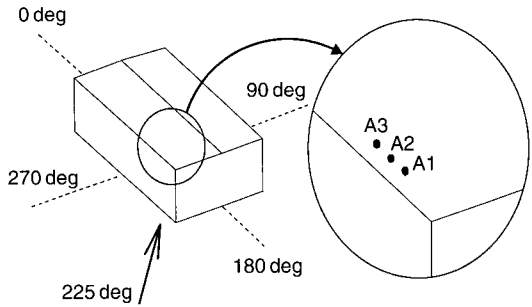


Fig. 1. The three pressure taps which are located near the roof corner edge of the model building for the 225° wind direction.

지 않고 있으며 표면근처에 대하여 거친 표면의 영향을 보상에 주는 적절한 소스항(source term)을 추가하여 실제의 난류유동분포를 얻기도 한다 (Brown *et al.*, 2001).

또 하나의 중요한 난류의 성질은 비정규분포 특성이다. 난류의 비등방성과 관련이 있는 난류의 피크특성 (e.g. large amplitude excursions) 등으로 비정규확률분포를 갖게 되는 경우 기존의 비정규확률분포 모델로는 실제의 난류특성을 생성해 내기 힘들다. 예를 들면, EAR (1) (first order exponential autoregressive process)은 난류가 갖는 비정규성과는 다소 거리가 있어 부적합하다 (Gaver and Lewis, 1980). 또한 기존의 추계학적모델이 적합하게 적용될 수 있는 특별한 경우 (정규분포)라도 모델로부터 모의실험 (simulation)된 결과는 실제 난류의 구조 등과 관련이 있는 다음과 같은 시계열간의 상호상관성이 강한 변동특성을 재현해 내기 힘들다.

그림 1은 지표면 위 대기경계층 내에 놓인 구조물에 바람이 모서리 쪽을 향하는 모습을 보여준다. 구조물주위의 유동의 특성을 요약하면 (1) 저층 구조물이므로 대기경계층의 하부 (atmospheric surface layer)의 난류의 영향 아래에 있다. (2) 모서리 주위의 형상의 특징으로 지붕상부에 원추형 와류 (conical vortex)가 생성되어 표면 압력에 강한 음압을 발생시킨다. (3) 모서리로 유입하는 난류의 특성과 표면압력 시계열특징과 밀접한 관계가 있다는 것이다.

그림 2는 난류유동 아래에 있는 인접한 3개의 압력공에서 동시에 측정된 표면압력 시계열을 나타낸 것이다. 가장 큰 피크의 이동특성으로 보아 표면 위

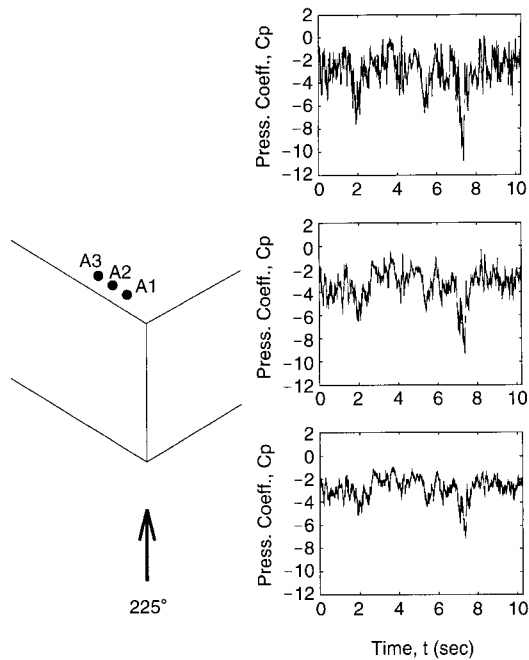


Fig. 2. Simultaneous measurement of multiple surface pressure time series

를 지나는 난류 유동구조와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 상호상관의 정도가 매우 크며 이러한 현상은 표본 시그널마다 다른 특성을 보이며 불규칙적으로 나타난다. 기존의 다중 추계학적 모델 (multivariate stochastic model)은 이러한 극부적으로 강한 상호상관 특성을 갖는 난류를 생성하는데 부적합하다. 여기서 부적합함이란 시뮬레이션관점에서 물리적 공간영역에서의 극부적 성질을 나타내는 임의의 상호상관계수 혹은 함수 (sample correlation function)를 재현하는 것이 불가능하다는 말이다. 즉 상호스펙트럼함수의 형태는 평균적인 (ensemble averaged) 상관함수의 형태이며 특별한 섭동 (fluctuations) 시나리오를 결정하는 표본상관 (sample correlation)은 아니다. 즉 시간영역특성을 나타내지는 않는다. 그것은 시계열의 푸리에 표현에서 표본 시계열은 푸리에 진폭과 푸리에 위상과의 합성이라는 사실로부터 쉽게 알 수 있다. 다중시계열이 필요한 많은 자연과학, 공학 문제에서 평균적인 상호스펙트럼 형상의 특징보다 어떤 순간의 공간적인 분포의 특징이 재현되는 것이 필요한 경우가 있다. LES에서 입구 측 난류의

특별한 섭동 시나리오가 물체주위의 유동구조와 후류 특성에 혹은 물체표면 압력에 어떤 영향을 미칠 것인가에 대한 연구 등에 필요하다. 또한 이 때 입구 측 난류의 비등방적인 특징의 변화를 쉽게 조절하는 난류생성방법 등이 요구된다. 이 경우 기존의 상호스펙트럼 기반의 시뮬레이션 방법으로는 이러한 특성을 모사하는 것이 불가능하므로 표본상호상관(sample cross correlation)을 정확하게 모사하는 deterministic 랜덤 시그널의 생성을 위한 방법이 필요하게 된다.

본 연구에서는 위에서 지적한 필요성을 만족시키기 위하여 Seong and Peterka (2001)가 표면 압력시계열에 적용하였던 방법을 3차원 난류시계열과 다중 태풍 시계열의 시뮬레이션으로 확장하여 적용하고자 한다.

3. 시계열의 합성방법

3.1 합성의 방법론

합성방법은 난류시그널을 진동수가 다른 정현파들의 선형적 중첩으로 보는 것으로 푸리에표현(Fourier series representation or spectral representation)을 기본으로 한다. 기존의 푸리에변환 방법은 정현파의 위상을 균일 확률분포의 백색잡음(white noise)를 사용하여 중첩함으로써 정규분포를 갖는 합성난류를 생성하는 것이다. 이 경우 쉽게 특정한 스펙트럼을 갖는 난류 시그널을 생성할 수 있다. 그러나 비선형성과 밀접한 관련이 있는 비정규분포특성을 갖는 다중난류를 생성하는 데는 단순히 백색잡음을 사용하는 것은 부적절하다. 주파수영역에서 위상을 백색잡음화(randomize) 함으로서 오히려 시계열이 갖고 있는 시간영역에서의 변동특성을 잃어버리게 하는 결과를 가져온다. 임의의 표본상호상관을 모사하는 본 문제의 경우 백색잡음 대신에 표본된 deterministic 위상을 사용한다. 실제로 푸리에 위상은 난류시계열의 피크 특성에 관한 중요한 정보를 갖고 있으며 특별한 선택에 의하여 시계열의 2차 모멘트의 특성을 그대로 보존하면서 비대칭성의 예리한 피크를 생성하는 것이 가능하다(Seong and Peterka, 2001). 측정된 푸리에 위상은 백색잡음의 특성을 보이며 위상데이터로부터 시계열의 특성, 예를들면, 비정규확률분포 혹은 피크특성과 관련이 있는 구조를 찾기 내기 어렵다. 따라서 일반적으로 위상을 모형화 하기 어렵다. 그러

나 비정규분포 추계모델의 푸리에 표현에서 위상부분을 취하여 합성에 이용하면 쉽게 비정규분포시계열을 얻을 수 있다. 여기서는 비정규확률분포 추계모델로 EARPG (1) (first order exponential auto regressive peak generation model)을 사용하는 Seong and Peterka (1998)의 방법을 이용한다. 본 논문에서는 이 방법의 핵심적인 요소만 요약하기로 한다.

3.2 다중시계열의 수학적 표현

길이가 n인 p개의 다중 시계열은 다음과 같이 각각 (p)로 구별되는 푸리에 표현으로 쓸 수 있다.

$$y_i^{(p)} = n^{-1/2} \sum_{k=0}^{n-1} |b_k^{(p)}| e^{i\xi_k^{(p)}} e^{i2\pi k i/n}, \quad p = 1, 2, \dots, m$$

여기서 푸리에 진폭과 푸리에 위상 부분은 각각 다음과 같이 구성함으로써 원하는 표본상호상관(sample cross correlation)과 비정규분포의 특성을 조절할 수 있는 방법을 찾을 수 있다.

$$|b_k^{(p)}| = n^{-1/2} \left| \sum_{i=0}^{n-1} z_i^{(p)} e^{i2\pi k i/n} \right|$$

푸리에 진폭은 다중 표본시계열의 푸리에 변환의 크기를 취하여 구성한다. 이렇게 함으로서 합성시계열의 각각은 표본시계열의 자기상관특성을 갖게 된다. 위상부분은 비정규성의 피크특성의 정보를 갖는 동시에 표본상호상관의 순간적인 deterministic 특성을 결정하는 정보를 갖고 있는 부분이며 다음과 같이 구성한다.

$$\xi_k^{(p)} = \phi_k^{(1)} - \phi_k^{(1)} - \phi_k^{(p)}$$

여기서 $\phi_k^{(1)}$ 는 비정규분포 피크특성을 조절하는데 필요한 위상정보를 갖는 부분으로 비정규분포 단일 시계열의 생성방법과 동일하게 구성한다. 위 첨자 (1)는 표본시계열들 중에 기준이 되는 시계열을 의미하며 임의로 선택될 수 있다. $\phi_k^{(1)}$ 는 표본시계열의 $z_i^{(1)}$ 피크특성을 모사하도록 구성된다. 두 번째로 $-\phi_k^{(1)} + \phi_k^{(p)}$ 는 표본 시계열들 간의 푸리에 위상차를 의미하며 다음과 같이 구성한다.

$$\phi_k^{(p)} = \arctan \frac{\sum_{i=0}^{n-1} z_i^{(p)} \cos(2\pi k i/n)}{\sum_{i=0}^{n-1} z_i^{(p)} \sin(2\pi k i/n)}$$

앞서 $\phi_k^{(1)}$ 는 다음과 같이 구성한다.

$$\phi_k^{(1)} = \xi_k + \delta_k^{(k)}$$

여기서 ξ_k 는 시계열 x_t 의 푸리에 변환으로부터 구하며 위의 표현은 푸리에 변환의 위상부분임을 알 수 있다. 이때 생성된 시계열 x_t 는 비정규성 피크특성을 생성하는 다음의 시계열 모델 EARPG(1)으로부터 생성된다.

$$X_t = aX_{t-1} + I_t E_t$$

여기서 E_t 는 exponential random variable이며 I_t 는 다음과 같이 1이 될 확률이 b 이고 0이 될 확률이 $1-b$ 인 확률변수를 의미한다. 즉, $P\{I_t=1\} = 1 - P\{I_t=0\} = b$ 이다. 지수함수적(exponential) 피크가 확률 b 의 빈도로 입력되고 피크와 피크사이에는 $X_t = aX_{t-1}$ 단조 감소하는 형태가 되어 지수함수적(exponential) 피크를 생성하는 1차 자기 회귀적 상호상관과정(first order auto regressive process)을 구성한다. 자세한 시계열 생성과정은 참고문헌 Seong (1998)을 참조한다.

3.3 상호상관함수의 모사

3.2절의 시계열 합성방법으로 상호상관함수를 모사하기 위해서는 합성 시계열의 푸리에 위상은 표본 시계열들의 주기도행렬(periodogram matrix)과 동일한 값을 갖도록 구성하는 것이 필요하다. 표본 주기도행렬을 평균(ensemble averaging)하면 상호스펙트럼을 추정할 수 있다는 사실을 이용하면 표본 주기도행렬의 정확한 모사가 바로 정확한 표본 상호상관의 모사를 의미한다. 다중 합성시계열 각각의 푸리에 표현에서 위상부분을 표본 시계열의 위상 $-\psi_k^{(1)} + \psi_k^{(p)}$ 을 이용하여 $\xi_k^{(p)} = \phi_k^{(1)} - \psi_k^{(1)} - \psi_k^{(p)}$ 와 같이 구성하면 합성시계열의 주기도행렬은 측정된 표본 시계열의 주기도행렬과 동일하게 된다. 이것은 합성시계열의 푸리에 표현을 주기도함수의 정의에 대입하면 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 표본 시계열들에 대한 위상차 정보를 이용하면 표본 상호상관함수를 상당히 정확하게 모사하는 다중 합성 시계열을 생성할 수 있게 된다.

4. 균일 난류 시뮬레이션

제3절에서 기술된 시계열생성 방법을 대기 난류 유동의 기본적인 형태의 하나인 균일 난류 유동장에

적용하고자 한다. 전산기에서 생성되는 난수(pseudo-random number)를 이용하여 상자 ($64 \times 64 \times 64$ 격자점) 내부 난류의 3차원 공간적인 분포를 시뮬레이션 하였다. 격자 간 길이 스케일은 위의 수식에서와 같이 편의상 $dx = dy = dz = 1$ 로 하였다. 기본적으로 합성난류는 질량보존을 만족해야하고 난류에너지 분포를 가져야한다. 등방성 난류합성의 경우 3차원 시계열의 푸리에 표현에서 푸리에 진폭으로 curl vector를 사용하거나(Ferziger, 1983) 직교 변환텐서를 사용하면(Kraichnan, 1970) 질량보존을 만족하는 난류를 생성할 수 있다. 그러나 이 경우는 정규확률분포를 갖게 되는 경우이며(central limit theorem) 원하는 형태의 에너지분포를 갖도록 하면 완전한 질량보존을 만족시키기 어렵다. 여기서는 비정규특성을 갖는 본 시계열생성방법을 응용하는 것이 목적이므로 본 연구에서는 두 가지의 경우를 시도하고자 한다. 먼저 u, v 2개 성분의 독립된 시계열을 먼저 생성하고 나머지 w 성분을 질량보존을 만족하도록 구하는 방법을 사용한다. 다른 하나는 curl vector를 사용하여 완전한 질량보존을 만족하는 등방성 난류의 생성방법으로 이 방법과 본 시계열 생성방법을 이용하여 비 등방성 난류를 생성하고자 한다.

4.1 물리적 공간에서의 시뮬레이션

물리적 공간에서의 시뮬레이션은 필연적으로 세 개의 속도성분 중에 하나는 다른 두개의 속도 성분

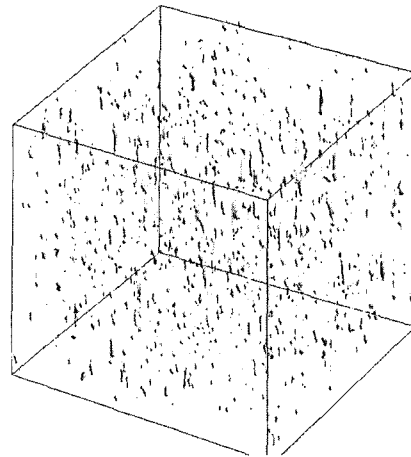


Fig. 3. TKE of Gaussian w-anisotropic turbulence.

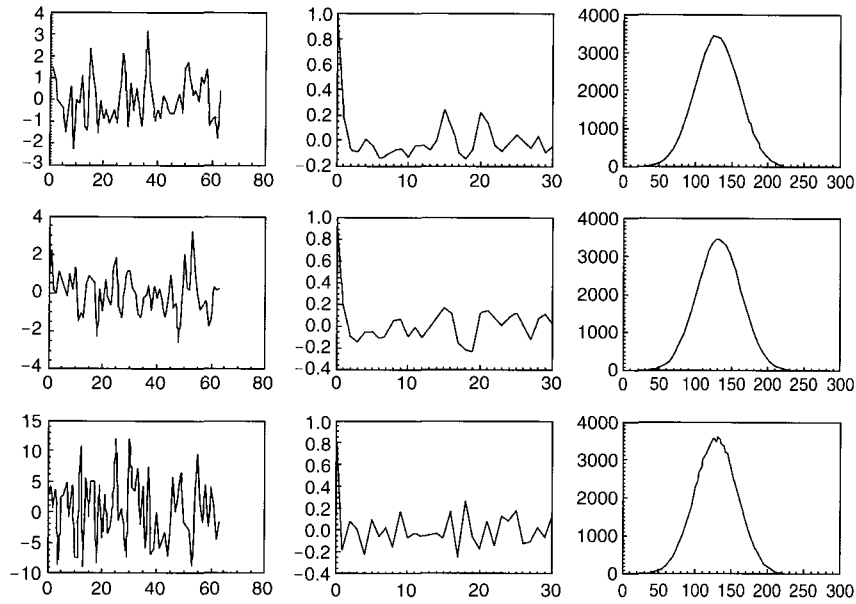


Fig. 4. (a) (Top) Sample time series, autocorrelation, and Gaussian PDF of $u(*, 10, 10)$, (b) (Middle) $v(10, *, 10)$, and (c) (Bottom) $w(10, 10, *)$ from $dw = -du - dv$.

과 다른 성질을 갖게 된다. 예를 들면 w 성분은 u 와 v 성분과는 다른 통계적 특성을 갖게 된다. 왜냐하면 질량보존 $dw = -du - dv$ 식에서 알 수 있듯이 du 와 dv 가 난류와 같이 랜덤한 형태인 경우 dw 의 표준편차는 일반적으로 du, dv 와 같을 수 없다. 이러한 점에서 이 방법은 비등방성 난류를 생성하게 된다. 본 시계열생성방법을 이용하면 두개의 성분 u 와 v 를 동일한 자기상관특성을 가지면서 서로 다른 비정규분포를 갖게 할 수 있으므로 이러한 점에서 또 다른 형태의 비등방성 난류를 생성하게 된다. w 성분은 비압축성 연속방정식으로부터 3D FFT를 이용하여 적분과 미분을 수행하여 비교적 정확하게 구하였다. 평균 0, 표준편차 1.25인 u 와 v 에 대해서 $\text{div}(V)$ 는 평균 0으로부터 표준편차 0.2 정도의 오차를 갖는다. 그림 4는 본 합성방법으로 구한 정규분포 시계열 $u(*, j, k), v(i, *, k), w(i, j, *)$ 의 표본시계열과 각각의 자기상관함수와 확률분포를 보여준다. u 와 v 성분은 1차 자기회귀과정 (first order autoregressive process)에서 계수 0.4를 갖는 경우와 동일한 자기상관을 갖도록 시뮬레이션 되었다. 셋째 줄의 w 성분은 계산된 u 와 v 로부터 연속방정식을 만족하도록 수치적분으로

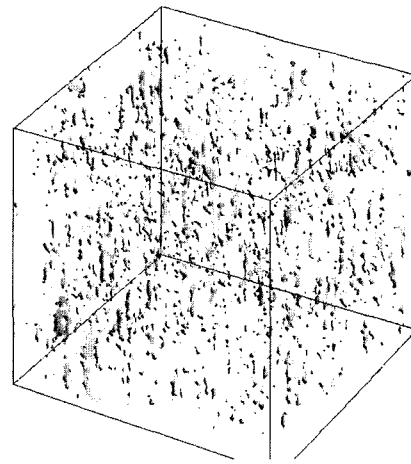


Fig. 5. Enstrophy of Gaussian w -anisotropic turbulence.

구하였으므로 자기상관이 거의 영에 가까운 형태를 보인다. 3차원 속도행렬, u, v, w 행렬은 각각 속도방향으로 동일한 성질의 시계열로 구성하였다. 즉, u 행렬의 경우 $((u(*, j, k) \ j=1, n) \ k=1, n)$ 각각의 j 와 k 에 대하여 n 개의 데이터를 생성하여 속도행렬을 구성하

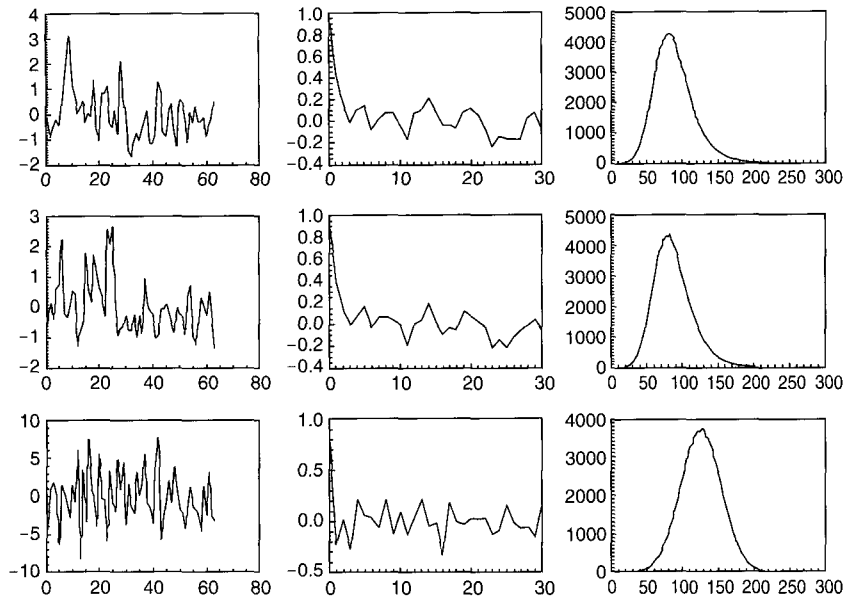


Fig. 6. Sample time series from EARPG(1)/UPS, autocorrelation, and PDF for (a) (Top) $u(*, 10, 10)$, (b) (Middle) $v(10, *, 10)$, and (c) (Bottom) $w(10, 10, *)$ from $dw = -du - dv$.

였다. 따라서 속도방향에 대해서는 자기상관이 되어 있지만 속도에 수직한 방향으로는 상관함수가 영이 된다. v 성분도 같은 방법으로 구성한다.

이 경우 u 와 v 로 부터 계산된 w 성분은 u 와 v 보다 큰 표준편차를 갖게 되어 ($dw = -du - dv$) z 방향으로 비등방성을 갖게 된다. 그림 3은 난류에너지 $TKE = 0.5(u_i * u_i)$ 의 공간적인 분포를 보여준다. 그림 5는 엔스트로피 $Enstrophy = 0.5(w_i * w_i)$ 의 공간적인 분포를 보여준다. 여기서 w 는 vorticity vector이다. 난류에너지의 비등방성은 w 성분의 표준편차가 u 와 v 보다 크기 때문이며 난류에너지는 w -방향의 비등방성이 확연히 나타나는 반면 엔스트로피는 약간 다른 형태의 비등방성을 보인다.

그림 6은 비정규분포 난류 시계열의 표본을 보여 준다. 정규분포인 그림 4와 동일하며 u 와 v 에서 다만 확률분포가 비정규분포인 것이 다른 점이다. EARPG(1)/UPS로부터 그림 4와 동일한 자기상관계수를 가지면서 비정규확률분포를 갖는 시계열을 생성하였다. 이때 u 와 v 로부터 계산되는 w 는 u 와 v 의 독립성 (independent identically distributed)에 의하여 자기상관이 영이 되며 확률분포는 정규분포가 된다. u, v ,와 w 와의 확률분포의 차이는 그림 6에서 분명

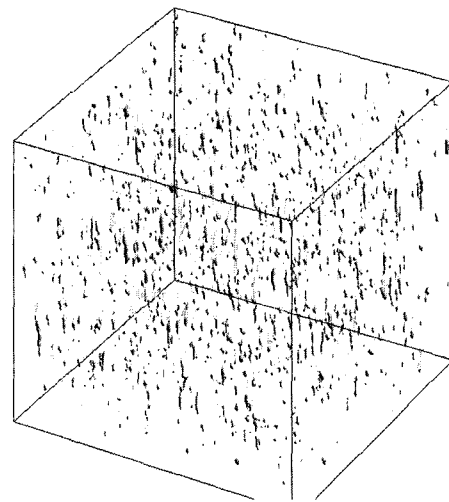


Fig. 7. TKE of non-Gaussian u, v and Gaussian w .

하게 나타난다. 그림 3의 정규분포의 경우와 마찬가지로 그림 6에서 자기상관은 속도방향의 자기상관을 나타내며 속도방향과 수직한 방향의 자기상관함수는 영이 된다. 그림 7과 그림 9는 비정규확률분포를 갖는 난류의 TKE와 Enstrophy를 보여준다. 비정규분

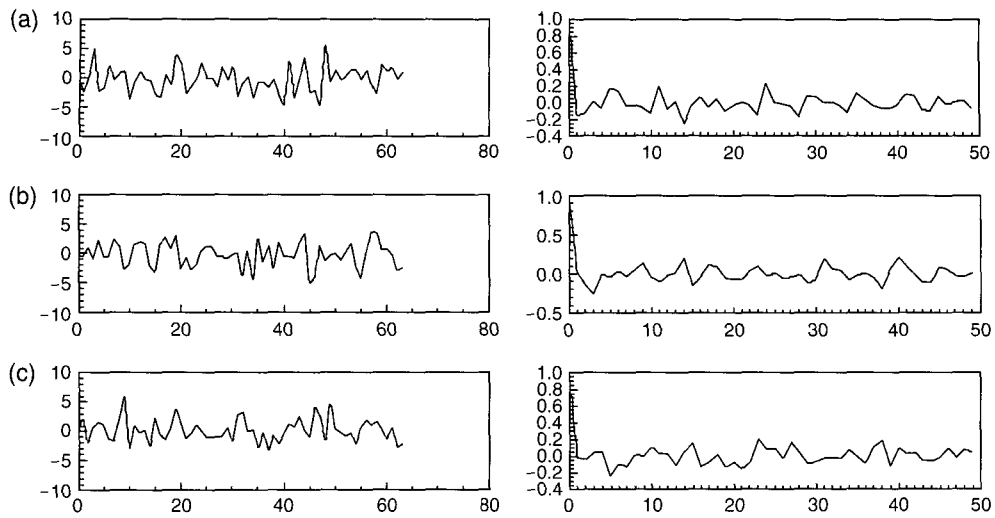


Fig. 8. (a) Sample time series and autocorrelation of isotropic turbulence $u(*, 10, 10)$ (b) $v(10, *, 10)$, and (c) $w(10, 10, *)$.

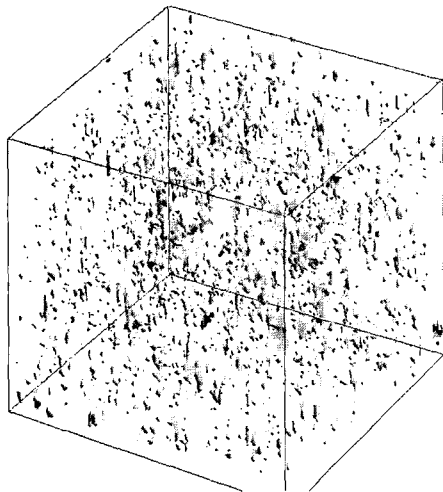


Fig. 9. Enstrophy of non-Gaussian u, v and Gaussian w .

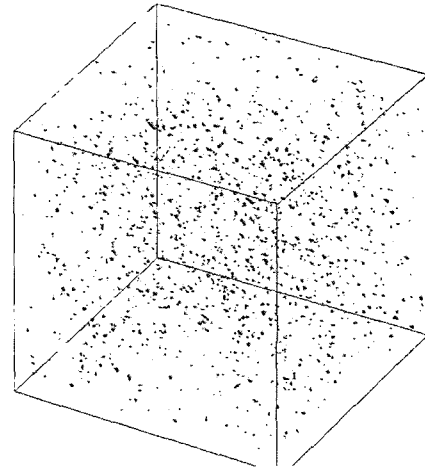


Fig. 10. TKE of isotropic uncorrelated Gaussian turbulence.

포(그림 6, 7, 9)의 경우를 정규분포(그림 3, 4, 5)와 비교했을 때 난류에너지나 엔스트로피의 공간적인 분포의 큰 변화는 보이지 않는다. 두 경우 난류에너지나 엔스트로피의 기준이 동일하지 않기 때문에 그림만으로 그 차이를 비교할 수 없다.

4. 2 Curl vector 방법

이 방법은 완전한 비압축성유체 질량보존을 만족

하는 방법이다. -1 과 1 사이의 균일난수(uniform random numbers)로 구성된 x, y, z 방향의 3개의 3차원 행렬을 구성하고 벡터 $X=(x, y, z)$ 에 curl을 취하여 얻어지는 벡터를 $V=(u, v, w)$ 로 두면 속도벡터 V 에 대한 $\text{div}(V)$ 는 영이 된다. 이렇게 구성한 속도는 등방성이며 또한 백색잡음(uncorrelated)이 된다. 그림 8은 등방성 난류를 보여준다. 자기상관으로부터 각각의 속도성분은 백색잡음화되어 있고 그림 10과

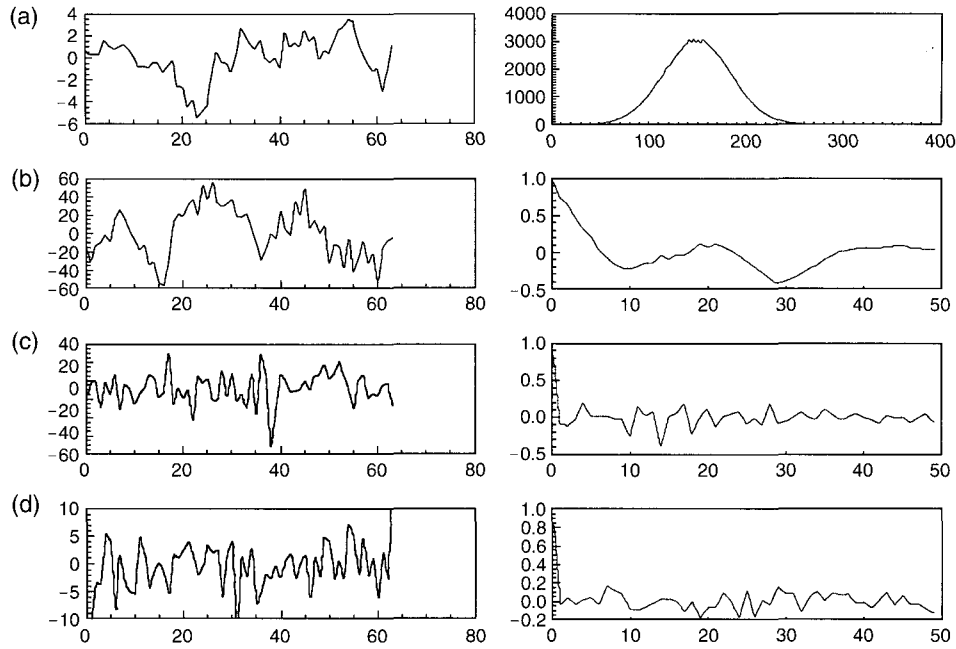


Fig. 11. (a) (Top) realization of EARPG (1)/UPS and a PDF of u, v, w (b) (second line) u(01, *, 10) and autocorrelation (c) (third line) v(10, *, 10) and (d) (bottom) w(10, 10, *) and autocorrelation.

그림 12의 TKE와 엔트로피 분포로부터 등방성을 확인할 수 있다. 이 방법은 가장 쉽게 등방성 난류를 만들 수 있으나 백색잡음에 불과하다. 난류에너지를 실어 주기위한 방법으로 백색잡음 속도벡터의 푸리에 표현에서 푸리에 진폭에 등방성 에너지스펙트럼 함수(isotropic periodogram)을 곱하여 푸리에 진폭을 새로 구성하여 푸리에 역변환을 수행하면 에너지를 갖는(혹은 자기상관이 영이 아닌) 등방성 난류를 생성할 수 있다. 그러나 이 경우는 완전한 $\text{div}(V)=0$ 을 얻을 수 없다. 본 연구에서는 완전한 $\text{div}(V)=0$ 을 유지하면서 correlated 속도성분을 갖는 균일 난류를 생성하기로 한다. 먼저 -1과 1사이의 백색잡음 대신 EARPG (1)/UPS로부터 비정규분포 correlated 벡터 시계열 $X=(a, b, c)$ 에 대한 3개의 행렬을 생성한다. X 에 curl을 취하여 다음과 같은 속도벡터를 구한다.

$$u = \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial b}{\partial z}, v = \frac{\partial a}{\partial z} - \frac{\partial c}{\partial x}, w = \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{\partial a}{\partial y}$$

여기서 c의 표준편차의 크기를 a와 b에 비하여 상대

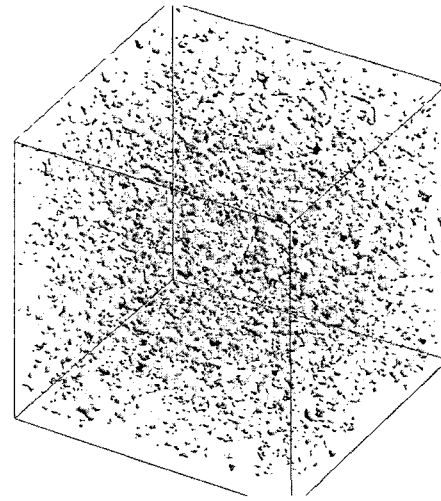


Fig. 12. Enstrophy of isotropic uncorrelated Gaussian turbulence.

적으로 크게 하면 u와 v의 크기가 w에 비하여 상대적으로 크게 된다. u의 경우 c 시그날의 y에 대한 편

미분의 결과가 u 를 결정하게 된다. c 행렬을 구성할 때에 y 방향으로 모델로부터 correlated 시계열을 배열하면 u 속도 성분은 자기상관이 영이 아닌 correlated signal이 된다. 이 경우는 u, v 와 w 와의 표준편차의 차이로 비등방성 균일난류가 되며 완전한 $\text{div}(V) = 0$ 를 만족하게 된다. 이러한 사실은 그림 11에서 확인할 수 있으며 curl과정에서 시계열은 정규분포가 된다(그림 11의 우상). 그림 13과 그림 14에서 비등방성 분포를 보인다.

본 절에서는 curl vector를 이용하면 완전한 연속

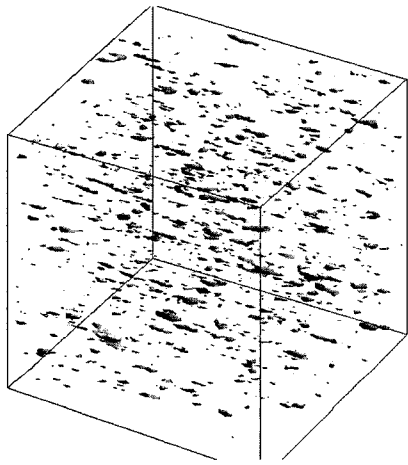


Fig. 13. TKE of anisotropic Gaussian turbulence.

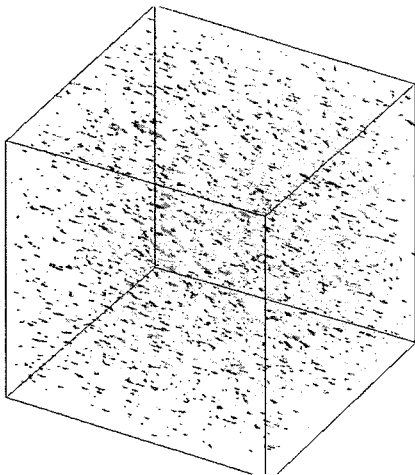


Fig. 14. u -component of anisotropic turbulence.

방정식을 만족하면서 특수한 형태의 비등방성 균일 난류를 생성해 낼 수 있음을 보였다. 이러한 특별한 형태의 비등방성을 갖는 난류는 실제로 존재하지 않는다. 그러나 난류수치계산의 초기조건으로 사용되어 감쇠하는 난류의 연구, LES 등의 입구측 난류생성 등에 응용될 수 있을 것이다. 실제의 균일난류는 (실제로 만들기 어렵지만) 자기상관, 상호상관 등이 영이 아닐 것이며 각 경우마다 특별한 구조를 갖는다. 본 절에서 계산된 비현실적인 난류로부터 유체동역학을 만족하는 실제적인 난류를 구했을 때에 그 특별한 구조를 이해하는 데에 도움을 줄 수 있을 것이다.

5. 매시풍속 데이터의 시뮬레이션

비정규분포 다중시계열의 합성법과 푸리에 위상의 성질을 이용하여 태풍 로빈이 한반도를 지날 때 각 지역에서 측정된 매시풍속 시계열에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 태풍이 부산을 지나는 10일간의 표본 매시풍속 데이터에 대하여 상호상관함수를 정확히 시뮬레이션하는 다중 시계열을 생성하였다. 태풍의 이동에 따르는 각 지역 매시풍속 데이터간의 상호상관함수는 태풍의 구조, 태풍의 이동속도 등의 정보를 갖고 있다.

그림 15는 태풍 로빈(Robin)이 한반도를 통과하는 10일간(1993. 8. 6~1993. 8. 15) 부산, 포항, 속초

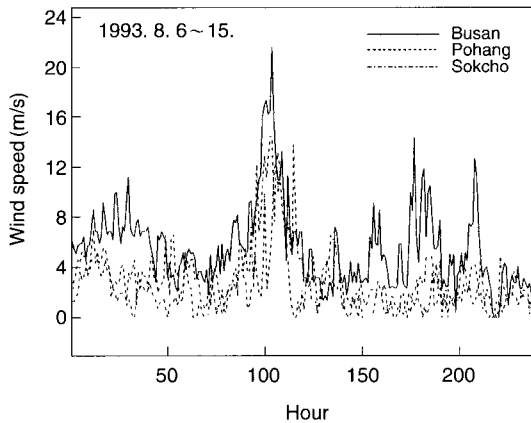


Fig. 15. Observed time series of Typhoon Robin.

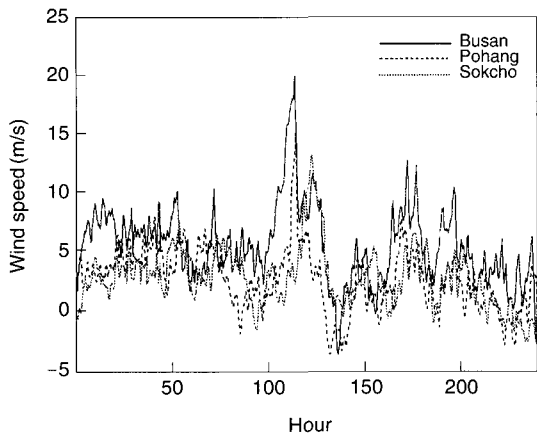


Fig. 16. Simulated time series of Typhoon Robin.

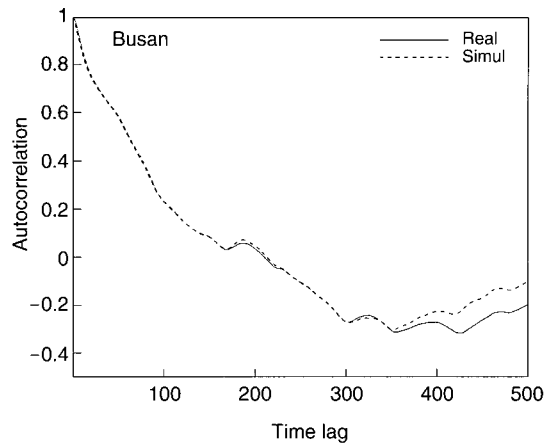


Fig. 18. Autocorrelation functions of Busan hourly data.

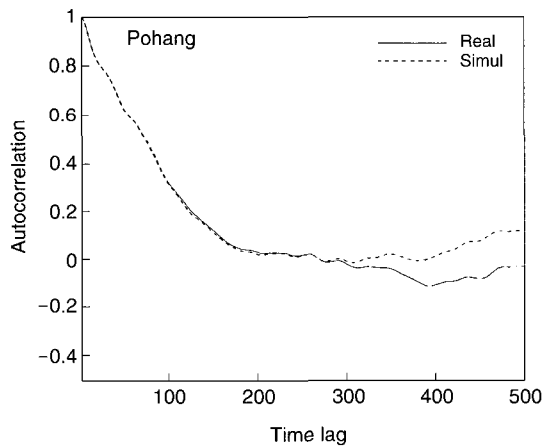


Fig. 17. Autocorrelation functions of Pohang hourly data.

에서 측정된 매시풍속 시계열을 나타낸 것이다. 포항과 속초의 시계열을 비교해 보면 태풍이 북상하면서 그 크기가 점점 약화되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 태풍의 구조와 관련이 있는 시계열의 시간변동 특성을 그대로 가지고 있어서 이들 특징간의 상호상관이 크기 때문에 그림 20, 21에서 상호상관계수의 최대치가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 16은 본 합성방법으로 수행한 시뮬레이션으로 태풍이 지날 때의 매시풍속 특징을 잘 재현하는 다중 합성 풍속 시계열을 나타낸다. 태풍 로빈을 같은 기간만큼 재현한 그림으로 각 도시별 최대치의

시간적 지연을 확인 할 수 있고, 태풍 로빈과 흡사한 모양과 특징을 가지는 시계열이 생성되었다.

본 시뮬레이션에서 주요 합성과정은 크게 두 가지로 요약된다. 하나는 기준이 되는 지역(부산)의 태풍 시계열의 시뮬레이션이고 다른 하나는 기준이 되는 부산의 시계열과 동일한 상호상관관계(10일간에 대하여)를 갖는 타 지역(포항, 속초)의 다중 시계열을 합성해 내는 일이다.

먼저 기준이 되는 부산의 경우 그림 15와 같이 태풍의 중심이 부산 근처를 지날 때 나타나는 최대 풍속 지점 근처의 큰 규모의 피크와 주위의 작은 규모의 피크가 분포하는 특징을 보인다. 로빈의 유동구조와 이동경로, 지표면의 거칠기 등의 특성이 반영된 결과로 볼 수 있다. 이러한 큰 규모의 피크를 포함하는 시계열의 경우 정상성(stationarity)을 기반으로 하는 일반적인 추계적 모델을 이용하여 생성해 내기 어렵다. 본 연구에서는 EARPG(1)/UPS 모델을 활용하여 그림 16에서 측정된 태풍 시계열과 유사한 형태의 시계열을 합성해 냈다.

그림 17은 포항에 대해 측정된 시계열과 합성된 시계열간의 자기상관함수를 비교한다. 자기상관함수를 쉽게 정확하게 재현해 낼 수 있는 것은 푸리에 변환 방법의 장점으로 알려져 있다. 푸리에 변환을 기반으로 하는 본 방법에서도 유사한 좋은 근사를 얻었다. 그림 18과 19에서도 실제 측정된 태풍의 시계열과 재현된 태풍의 시계열의 자기상관함수가 거

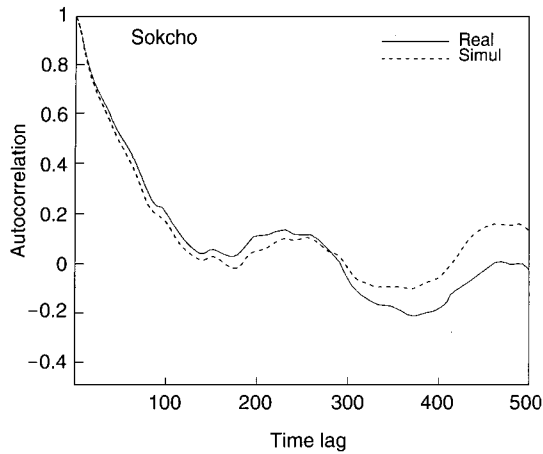


Fig. 19. Autocorrelation functions of Sokcho hourly data.

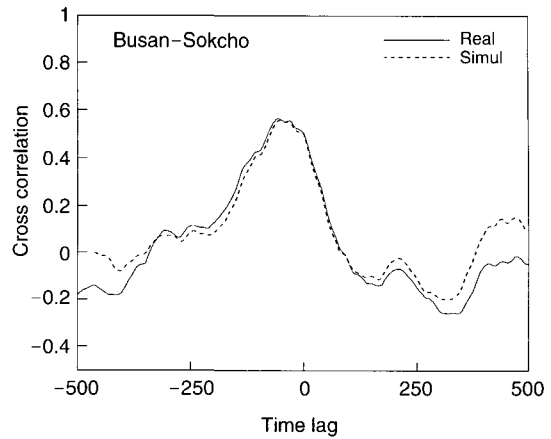


Fig. 20. Cross correlation functions between Busan and Sokcho hourly data.

의 일치함을 볼 수 있다.

그림 20은 부산-속초, 그림 21은 부산-포항 간의 측정된 시계열과 합성 시계열 사이의 표본 상호상관 함수를 비교하고 있다. 각 지역에서의 태풍시계열 간에는 최대치가 0.8을 상회하는 강한 상호상관 값을 보이고 있으며 자기상관의 경우와 유사한 엄밀한 근사를 보이고 있다. 부산과 포항의 경우에는 태풍의 크기가 아주 크고 측정된 풍속자료가 매시풍속자료이므로 거의 동 시간대에 태풍의 영향권에 들었고 부산과 속초의 경우 그림 18에서 확인할 수 있듯이 약 6시간 가량의 시간적 차이를 확인할 수 있는데 상호상관관계를 고려한 시계열의 재현 방법을 통해서 이런 시간적 지연의 차이도 표현할 수 있었다.

매시풍속 시계열 시물레이션에서 나타난 결함으로 합성 시계열이 음의 값을 갖게 되는 경우를 지적할 수 있다. 푸리에 역변환 과정에서 피할 수 없는 현상으로 이러한 점에서 본 합성방법을 그대로 시계열의 예측에 사용될 수 없으며 향후 개선 되어야 할 과제로 남아 있다.

본 시계열 시물레이션은 주어진 재현기간 (return period) 동안에 특정지역에 일어날 최대 풍속을 예측하는 연구에 활용될 수 있다. 극대치이론 (extreme value theory)을 기반으로 하는 전통적인 추정 방법의 결점을 보완하는 시도로서 장기간 (예를들면 10000년)의 시물레이션 데이터를 기반으로 하는 최대풍속의 추정에 관한 연구 (Seong and Peterka, 2000; Dukes

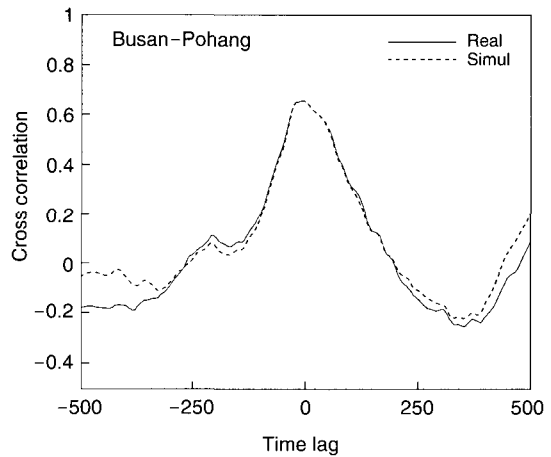


Fig. 21. Cross correlation functions between Busan and Pohang hourly data.

and Palutikov, 1995)에 유용하게 사용되어질 수 있다. 태풍과 같은 강풍의 경우 최대 풍속값에 상당한 영향을 주게 된다. 태풍의 빈도, 시계열 상의 특징 등이 잘 반영된 합성시계열의 생성은 장기간 시물레이션 데이터를 이용하는 최대풍속 예측 연구에 중요한 요소가 된다. 또한 상호상관성을 고려한 다중시계열을 이용한 방법으로서의 확장에도 유용하게 사용될 수 있다. 요약하면 특별한 그러나 실제 측정시계열과 유사한 태풍 시계열 시나리오를 만들어내고 다중 시계

열간의 표본상호상관을 정확히 재현하는 합성방법을 이용하여 타 지역의 태풍 시계열의 형태를 예측하였다.

6. 결 론

압력시계열 생성을 위하여 개발된 새로운 비정규 분포 시계열생성 방법인 EARPG (1)/UPS을 대기유동에 적용을 시도해 보았다. 다중시계열인 3차원 균일난류와 태풍시계열 데이터의 시뮬레이션을 통하여 기존의 합성방법으로 제한적이었던 특성을 재현하는데 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

기존의 다중시계열 합성방법이 주파수 공간에서의 상호스펙트럼의 시뮬레이션이라면 본 합성방법은 시간영역 혹은 물리적 공간영역에서의 표본 상호상관함수를 시뮬레이션하는 방법이다.

본 합성방법은 랜덤한 형태의 다중시계열에 대하여 표본 상호상관함수의 형태를 거의 정확히 재현하면서 비정규적인 피크특성을 시뮬레이션하는 방법으로 특정한 임의의 상호상관함수 관계를 갖는 다중시계열의 합성이 필요한 분야에 널리 사용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-003-E00008).

참 고 문 헌

Ammon, D. (1990) "Approximation and Generation of Gaussian and Non-Gaussian Stationary Processes," Structural Safety, 8, 153-160.
 Brockwell, P.J. and R.A. Davis (1991) "Time Series: Theory

and Methods," 2nd Edition, Springer, New York.
 Brown, A.R., J.M. Hobson, and N. Wood (2001) Large-Eddy Simulation of Neutral Turbulent Flow Over Rough Sinusoidal Ridges," Boundary-Layer Meteorology, 98, 411-441.
 Dukes and Palutikov (1995) "Estimation of extreme wind speeds with very long return periods," J. Applied Meteorology, 34, 1950-1961.
 Durbin, P.A. and B.A. Pettersson (2001) Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows, John Wiley & Sons, Ltd.
 Ferziger, J. (1983) Higher-level simulations of turbulent flows, in J. Essers (ed.), Computational Methods for Turbulent Transonic and Viscous Flows, 93-183, Hemisphere Publishing Co., Springer Verlag.
 Gaver, D.P. and P.A.W. Lewis (1980) First-order autoregressive gamma sequences and point processes, Adv. Appl. Prob., 12, 727-745.
 Kraichnan, R. (1970) Diffusion by a random velocity field, Physics of Fluids, 11, 43.
 Lund, T.S., X. Wu, and K.D. Squires (1998) "Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulations," J. of Computational Physics, 140, 233-258.
 Seong, S.H. and J.A. Peterka (1998) "Digital generation of surface pressure fluctuations with spiky features," J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 73, 181-192.
 Seong, S.H. and J.A. Peterka (2000) "Estimation of Extreme Wind Speeds Based on Synthetic Long-Term Hourly Data," Int. Symposium on Wind and Structures, 425-434.
 Seong, S.H. and J.A. Peterka (2001) "Experiments on Fourier Phases for Synthesis of Non-Gaussian Spikes In Turbulence Time Series," J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 89, 421-443.
 Shinozuka, M. (1991) "Simulation of stochastic process by spectral representation," Applied Mechanics Review, 44(4), 191-204.
 Tennekes, H. and J.L. Lumley (1972) A First Course in Turbulence, MIT press, Cambridge, MA.