

해륙풍관측 data의 차원추정 값에 대한 수치적 검증

이 화 운 · 김 유 근 · 이 영 곤
부산대학교 대기과학과
(1999년 5월 20일 접수)

A Numerical Certification to Estimated Dimensions of the Observed Land-Sea Breeze Data

Hwa-Woon Lee, Yoo-Keun Kim, and Young-Gon Lee

Dept. of Atmospheric Sciences, College of Nature Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
(Manuscript received 20 May, 1999)

Estimating dimensions of attractors are the most basic tools to analyze properties of chaotical dynamic systems. In this paper, we estimate correlation dimensions of meteorological variables, such as wind speed (v) and temperature (T) observed in Kimhae International Airport when the land-sea breeze circulation is appeared and find low non-integer values that reflect the deterministic chaos characterizing the dynamics. We compare the results with the correlation dimensions of 2-dimensional model that is calculated by finite element method.

Though the correlation dimensions of the calculated wind speed (v) are less than those of the observed wind speed (v), we can suggest that the land-sea breeze circulation has not a unique mechanism. The land-sea breeze phenomenon is a complicated dynamics, which is constructed with various scale motions of atmosphere. In further research, we hope to find more accurate dynamics of land-sea breeze through wide observations and using of more sophisticated prediction models.

Key word : attractor, correlation dimension, land-sea breeze

1. 서 론

그 동안 꾸준히 제시되었던 혼돈역학은 기존의 뉴턴 역학계에 대한 한계를 극복하고 매우 복잡한 현상의 숨겨진 질서나 규칙성을 찾고자 하는 수많은 과학자들의 활발한 연구로 인해 1980년대 초부터 급격한 발전을 보게되었다. 이러한 노력들에 의해 1970년대 중반 Mandelbrot가 fractal 차원(dimension)을 제시한 이후 capacity, information 차원, 상관차원(correlation dimension), Lyapunov 지수 등 불규칙한 운동이 발생하는 계를 정량화 하기 위한 다양한 방법들이 제시되었다.^{1~3)} 위의 방법들은 일반적으로 복잡한 현상을 나타내는 계에서 측정된 임의 독립변수의 시계열 자료를 위상공간에 나타내었을 때 발생하는 끌개(attractor) 위의 점들의 분포나 밀도를 정량화 하는 것으로 크게 "metric 차원"과 "probabilistic 차원"으로 구분된다.⁴⁾

본 연구에서는 probabilistic 차원들 중 비교적 비선형 현상에 많이 이용되었던 상관차원을 이용하였다. 차원추정에 이용된 algorithm의 유효성을 검증하기 위해 선행 연구들에서 많이 제시되었던 Hénon 끌개와 Lorenz 끌개의 상관차원을 추정하고 비교하였다. 1994년 8월 중 김해공항에서 해륙풍이 연속으로 발생했던 4일에서 8일 동

안 관측된 풍속과 온도 데이터의 시계열로부터 상관차원을 추정하고 분석하였다. 또 간단한 2차원 해륙풍 모델을 구성하여 계산했을 때 관측지점과 유사한 격자 점에서 구해진 풍속의 시계열로부터 상관차원을 추정하여 관측된 풍속의 상관차원과 비교하여 실제 해륙풍 현상을 지배하는 요인들에 대한 정량화에 대한 검증하고 향후 해륙풍 발생 메커니즘을 이해하기 위한 연구에 중요한 근거 자료로 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 기본개념

일반적으로 임의 m -차원 역학계를 연속적인 시간 t 에 대한 상미분 방정식,

$$\frac{dx(t)}{dt} = G(x(t)) \quad (1)$$

또는 이산 시간 n 에 대한 map,

$$x_{n+1} = F(x_n) \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 x 와 G , F 는 모두 m -차원 벡터이다.⁵⁾ 위 두 식에서 x 의 초기값이 주어졌을 때 과도상태(transient)가 사라진 후 나타나는 m -차원 위상공간 끌개들은 역학계 전체의 물리적 과정을 나타낸

다.^{6,7)} 따라서 m -차원 위상공간에 생성되는 끌개로부터 우리는 역학계에 대한 정보나 위상학적(기하학적) 특징들, 특히 끌개의 차원을 구할 수 있다.

그러나 위의 방정식으로 주어지는 역학계와는 달리 실제 자연계에서 발생하는 수많은 현상들을 지배하는 역학계들은 그 계를 지배하는 모든 변수들을 동시에 관측하는 것이 불가능하므로 대표적인 변수의 시계열(time series) 자료로부터 다른 변수들을 유추해 내는 시계열 매립(embedding)기술을 이용한다. 이 기술은 임의의 시간 간격 Δt 로 측정된 변수의 시계열을 적절한 지연시간(delay time) τ 에 대해 위상공간의 매립차원을 증가시키면서 구축했을 때 발생하는 끌개로부터 차원을 추정하여 분석하는 것이다.^{8,9)} 그러므로 시계열로부터 원래 계의 위상 궤적(orbit)을 정확히 재현하기 위해서는 적절한 지연시간과 매립차원의 결정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 시계열 값들에 대한 자기상관(auto-correlation)이 최초로 0이 되는 시간을 τ 로 설정하고, 상관차원이 포화될 때까지 매립차원을 증가시켰다. 또한 Grassberger와 Procaccia^{10,11)}가 제시한

$$\nu = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (3)$$

을 이용하여 상관차원을 추정하였다. 여기서 $C(r)$ 은 상관적분(correlation integral)으로,

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-r} \sum_{j=1}^r \theta(r - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \quad (4)$$

와 같이 나타내어지며, 끌개 위의 임의의 점에서 반경 r 의 구내에 각 점들과 관련이 있는 점 x_j 의 개수에 대한 계산을 의미한다. 여기서 θ 는 Heaviside function으로 $r - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$ 가 0보다 작으면 0, 그렇지 않으면 1의 값을 가지며, N 은 자료의 개수이다. 따라서 구의 반경 r 이 충분히 작고, N 이 매우 큰 경우 상관적분 $C(r)$ 은 r 의 power로 표현된다.

따라서 역학계의 시계열에 대해 자기상관을 구한 후 최초로 0이 되는 시간을 지연시간 τ 로 결정하여 매립 위상공간을 구성하고, 이때 발생하는 끌개 위의 각 점들에 대한 구의 반경 r 에 따라 $C(r)$ 값을 구한 후, 식 (3)과 같이 $\log_2 C(r) - \log_2(r)$ 의 그래프를 그렸을 때 나타나는 직선의 기울기 ν 를 계산하여 상관차원을 구한다. 이때 $\log_2 C(r) - \log_2(r)$ 그래프에 나타나는 직선의 기울기 ν 는 아래와 같이 최소자승식(least-squares formula)¹²⁾

$$d = \frac{K \sum_{i=1}^K x_i y_i - \sum_{i=1}^K x_i \sum_{i=1}^K y_i}{K \sum_{i=1}^K x_i^2 - (\sum_{i=1}^K x_i)^2} \quad (5)$$

를 이용하였다.

2.2. 저차원 카오스에 대한 사례연구

이 절에서는 Grassberger와 Procaccia^{10,11)}에 의해 제시된 위의 방법을 이용하여 저차원 카오스를 나타내는 간단한 예들 중 Hénon 끌개와 Lorenz 끌개에 대해 상관차원을 추정하고 비교해 봄으로써 본 연구에 사용된 상관차원 추정 알고리즘의 타당성 및 적합성을 검증하였다. Hénon 끌개와 Lorenz 끌개는 각각

$$x_{n+1} = y_n + 1 - a x_n^2 \quad (6)$$

$$y_{n+1} = b x_n$$

와

$$\dot{x} = \sigma(y - x)$$

$$\dot{y} = -y - xz + Rx \quad (7)$$

$$\dot{z} = xy - bz$$

의 방정식 계를 가지고 가진다. 식 (5)와 (6)의 각 매개변수들은 위의 선행연구들과 동일하게 $a=1.4$, $b=0.3$, $R=28$, $\sigma=10$, $b=8/3$ 으로 두고, 초기치 x_0 , y_0 , z_0 는 모두 0으로 두었다. Fourth-order Runge-Kutta method를 이용하여 각 방정식들을 50,000회 반복하여 각 독립변수들에 대한 시계열을 구하여 위상공간 끌개를 구성한 후 상관차원을 추정한 결과 Hénon 끌개의 상관차원 값은 1.2126이었으며, Lorenz 끌개의 상관차원 값은 2.0941로 추정되었다. 이 값들은 선행연구에서 각 끌개에 대해 추정된 상관차원 값 1.21 ± 0.01 , 2.05 ± 0.01 와 거의 일치하였다.

또한 독립변수들 중 x 에 대해 매립 위상공간을 구성하고 이때 생성된 끌개에 대해 상관차원을 추정하였다. 각 시계열 값의 자기상관을 구하여 최초로 0이 되는 시간을 τ 로 설정하여 매립 위상공간을 각각 3차원과 5차원까지 증가시켰다. 그 결과 Fig. 1과 같이 Hénon 끌개의 독립변수 x 에 대해 2차원과 3차원에 대해 추정된 상관차원 값은 1.2139와 1.2069이었으며, Lorenz 끌개의 독립변수 x 를 3차원, 4차원, 5차원으로 매립했을 때 추정된 상관차원 값은 각각 2.0583, 2.0514, 2.0683이었다. 따라서 본 연구에서 Hénon 끌개와 Lorenz 끌개에 대해 원래 계와 독립변수 x 의 시계열을 매립하여 추정된 상관차원 값들이 선행연구와 잘 일치함을 알 수 있었으며, 이것은 상관차원 추정에 이용된 알고리즘이 매우 정확함을 입증한다.

2.3. 관측 data에 대한 상관차원 추정

본 연구에서는 1994년 8월중 해풍이 연속적으로 발생한 4일에서 8일 동안 김해국제공항에서 10분 간격으로 관측한 남북방향 풍속성분(v)과 온도(T)의 시계열 data를 이용하였다. 김해국제공항은 Fig. 2와 같이 해안에 인접해 있으며 지형이 거의 없는 평지에 위치해 있기 때문에 해륙풍현상이 매우 뚜렷하게 관측되는 지역이다. 관측 data의 시계열로부터 매립 위상공간을 구성하기 위해 자기상관을 구해 본 결과 Fig. 3과 같이 모두 5시 40분에 최초로 0이하의 값을 나타내었으며, Fig. 4는 지연시간 τ 를 5시간 40분으로 두었을 때 풍속 v 와 온도 T 의 시계열에 대해 구성한 3차원 매립 위상공간이다. Fig. 4에서와 같이 매립된 위상공간에 발생한 끌개가 모두 space filling 됨을 볼 수 있으며, 이것은 좌표축이 서로 독립임을 나타낸다. 따라서 두 기상변수의 시계열에 대해 5시 40분을 지연시간 τ 로 정한 것이 매우 적절함을 알 수 있다. τ 에 대해 매립 위상공간을 2차원에서 14차

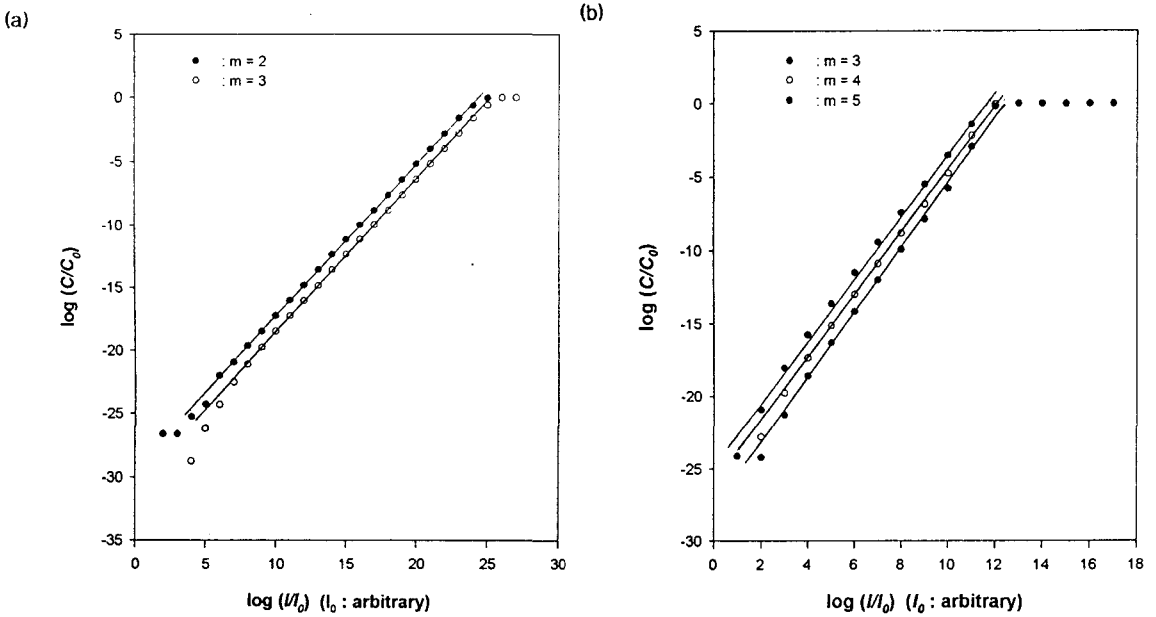


Fig. 1. Correlation dimensions of independent variable x .
 (a) Hénon Map(embedding dimension is 2 and 3), (b) Lorenz Attractor(embedding dimension is 2, 4 and 5).

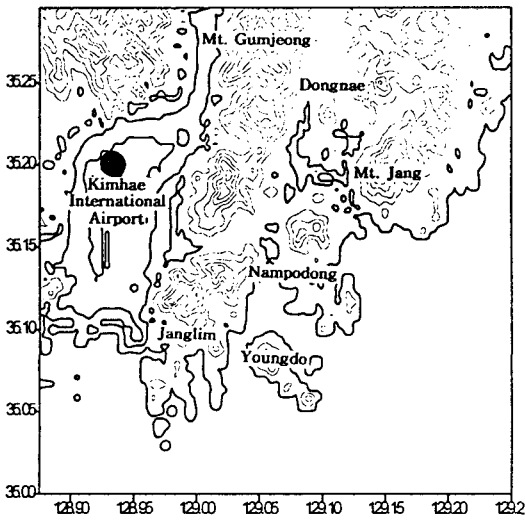


Fig. 2. The geographic map around Kimhae International Airport(●).

원까지 구축하여 상관차원을 추정된 결과 Fig. 5와 같이 약 9차원에서 추정된 차원값의 포화가 발생하였다. 따라서 풍속성분(v)의 포화된 상관차원 값은 $2.57 \pm .001$ 이었으며, 온도의 상관차원 값은 $2.16 \pm .001$ 로 추정되었다.

따라서 김해국제공항에서 해륙풍이 발생했을 때 관측된 풍속성분(v)와 온도(T)의 시계열로부터 추정된 상관차원 값들은 2와 3사이의 비정수임을 알 수 있다. 이것은 해륙풍현상을 포함한 국지 기상계를 특징짓는 초기조건에 민감한 결정론적(deterministic) 카오스로 해석할

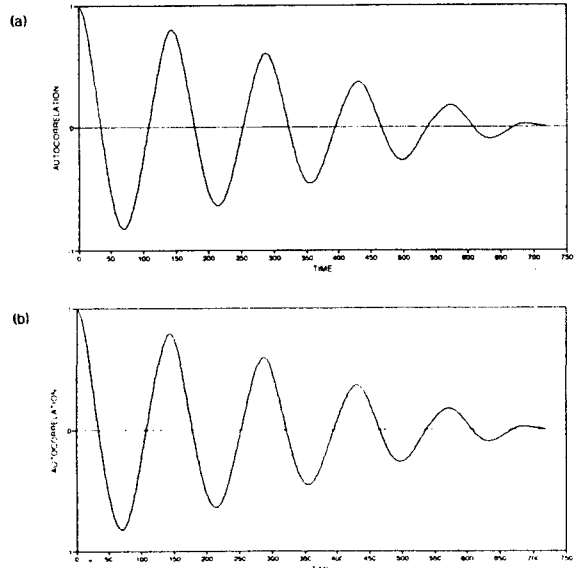


Fig. 3. The autocorrelation values of (a) the wind speed and (b) the temperature in the Kimhae International Airport.

수 있다.¹³⁾ 즉, 해륙풍 현상은 지표와 해수의 비열차에 의해 발생하는 단순한 국지적 기상현상이 아니라 보다 다양한 scale의 대기운동이 결합된 포괄적인 현상으로 해석할 수 있다. 또한 위에서 구해진 비정수 상관차원 값보다 바로 큰 정수값이 김해국제공항 지역의 해륙풍 현상에 대한 역할을 모수화하는데 필요한 독립변수의 최

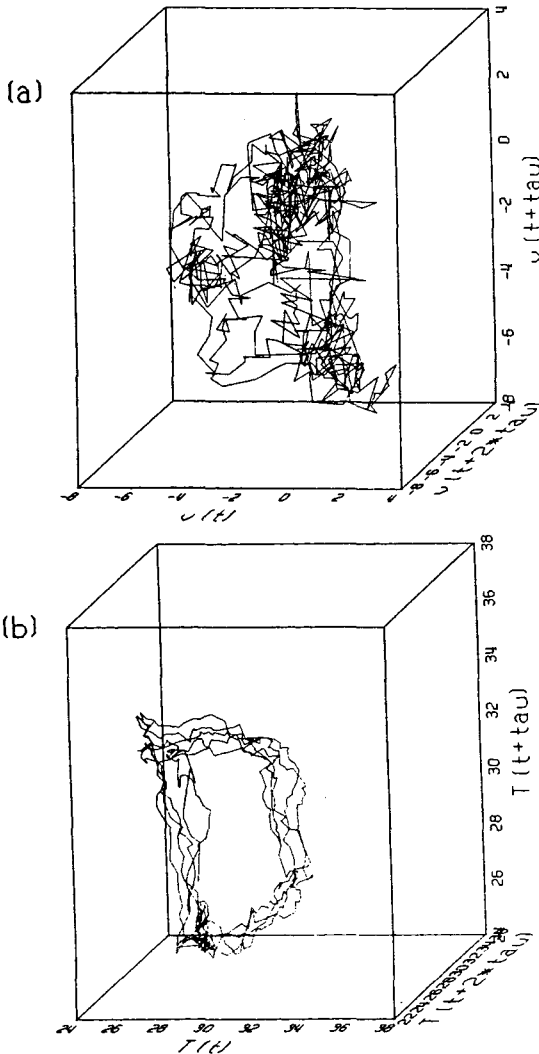


Fig. 4. The three dimensional embedding phase portraits of (a) the wind speed and (b) the temperature in Kimhae International Airport.

소 갯수이다.

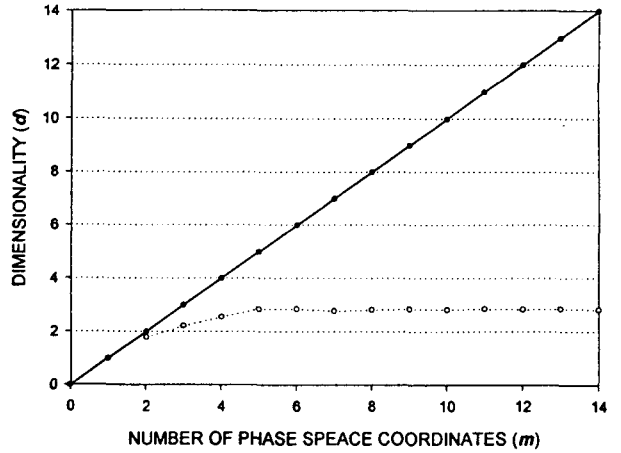
2.4. 수치계산 값의 상관차원 추정

김해국제공항의 관측 자료로부터 추정된 상관차원들에 대한 타당성을 제시하기 위해 유한요소법^{14,15)}을 이용하여 지형이 없는 간단한 2차원 해륙풍 모델을 구성하고, 실제 관측지점과 유사한 격자점에서 계산된 풍속값의 시계열로부터 상관차원을 추정하였다.

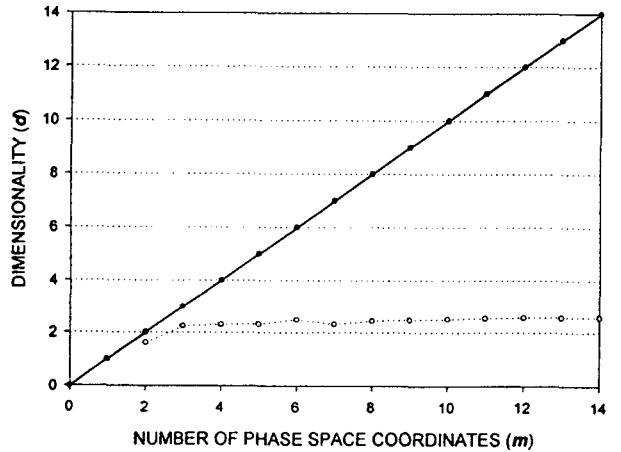
2차원 모델의 지배방정식은 부시네스크 유체에 대한 유선함수 방정식과

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (8)$$

와도방정식



(a)



(b)

Fig. 5. The correlation dimensions of (a) the wind speed and (b) the temperature in Kimhae International Airport.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = g\beta \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \nabla^2 \omega \quad (9)$$

이류항을 포함한 열전도방정식,

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} = \chi \nabla^2 T \quad (10)$$

로 구성하였다. 위 식에서 ψ 는 유선함수, ω 는 와도, T 는 온도, g 는 중력가속도, β 는 체적팽창률이며, χ 는 열확산계수이다. 경계조건은 와도방정식에서 ψ 와 ω 에 대한 자연경계조건,

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial n} \right|_B = -V_s \quad (x, y \in \Gamma_2) \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial \omega}{\partial n} \right|_B = -\omega_n \quad (x, y \in \Gamma_4) \quad (12)$$

을 두고, 모델 영역의 경계상에 열유속 Q_0 가 주어지고,

$$q = x \frac{\partial T}{\partial n} = Q_0 \quad (x, y \in \Gamma_6) \quad (13)$$

경계면 상에 방열이 있다고,

$$q = -\alpha(T - T_{air}) = Q_0^* \quad (x, y \in \Gamma_7) \quad (14)$$

두었다. 여기서 $\Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7$ 은 각각 경계조건 $\partial\psi/\partial n, \partial\omega/\partial n, \partial T/\partial n, -\alpha(T - T_{air})$ 를 도입한 항이고, n 은 법선방향 vector, α 는 유효열전도율, T_{air} 는 경계 Γ_7 상에 접하는 공기층의 온도이다. 위 세 방정식의 양변에 임의의 가중계수(weight coefficient) $\delta\psi, \delta\omega, \delta T$ 를 곱하고 영역 Ω 에 대해 적분한 후 계산영역의 각 삼각형 요소의 세 꼭지점에 대해 근사시키면,

$$\sum_{\beta} D_{\alpha\beta} \psi_{\beta} - \sum_{\beta} M_{\alpha\beta} \omega_{\beta} - \Gamma_{2\alpha} = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{\beta} M_{\alpha\beta} \dot{\omega}_{\beta} + \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} \psi_{\beta} + \sum_{\beta} \nu D_{\alpha\beta} \omega_{\beta} - F_{\alpha} - \Gamma_{4\alpha} = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{\beta} M_{\alpha\beta} \dot{T}_{\beta} + \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} T_{\beta} + \sum_{\beta} \chi D_{\alpha\beta} T_{\beta} - \Gamma_{6\alpha} - \Gamma_{7\alpha} = 0 \quad (17)$$

으로 나타낼 수 있으며,

$$D_{\alpha\beta} = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial x} \frac{\partial \psi_{\beta}}{\partial x} + \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial y} \frac{\partial \psi_{\beta}}{\partial y} \right) d\Omega = \frac{1}{4\Delta^e} (b_{\alpha} b_{\beta} + c_{\alpha} c_{\beta}) \quad (18)$$

$$M_{\alpha\beta} = \int_{\Omega} \psi_{\alpha} \psi_{\beta} d\Omega = \frac{\Delta^e}{12} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \quad (19)$$

$$A_{\alpha\beta} = \int_{\Omega} \psi_{\alpha} \left(\sum_{\gamma} \frac{\partial \psi_{\gamma}}{\partial y} \psi_{\gamma} \frac{\partial \psi_{\beta}}{\partial x} - \sum_{\gamma} \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial x} \psi_{\gamma} \frac{\partial \psi_{\beta}}{\partial y} \right) d\Omega \quad (20)$$

$$F_{\alpha} = g\beta \int_{\Omega} \psi_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{\gamma} \psi_{\gamma} T_{\gamma} \right) d\Omega = \frac{g\beta}{6} \sum_{\gamma} b_{\gamma} T_{\gamma} \quad (21)$$

$$\Gamma_{2\alpha} = \int_{\Gamma_2} \psi_{\alpha} \frac{\partial \psi}{\partial n} d\Gamma = -V_s \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\Gamma_{4\alpha} = \int_{\Gamma_4} \nu \psi_{\alpha} \frac{\partial \omega}{\partial n} d\Gamma = \nu \omega_n \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\Gamma_{6\alpha} = \int_{\Gamma_6} \psi_{\alpha} Q_0 d\Gamma = Q_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\Gamma_{7\alpha} = \int_{\Gamma_7} \psi_{\alpha} Q_0^* d\Gamma = Q_0^*(T) \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \end{pmatrix} \quad (25)$$

이다. 보간계수 $\phi_{\alpha} = 1/2\Delta^e (a_{\alpha} + b_{\alpha}x + c_{\alpha}y)$ ($\alpha=1, 2, 3$)이고, $Q_0^*(T)$ 가 경계 Γ_7 에 접한 요소인 경우 Q_0^* 의 평균치를 이용한다. 요소방정식을 전체 요소에 대해 반복해서 합한 전체방정식들은

$$[D] \psi - [M] \omega - \Gamma_2 = 0 \quad (26)$$

$$[M] \dot{\omega} - [M(\psi)] \omega + \nu[D] - F - \Gamma_4 = 0 \quad (27)$$

$$[M] \dot{T} - [A(\psi)] T + \chi[D] T - \Gamma_6 - \Gamma_7(T) = 0 \quad (28)$$

으로 나타내어진다. 위 식에서 $[D], [M], [A]$ 는 전체 행렬이고, F 는 부력항이다.

Fig. 6과 같이 계산영역을 140개의 격자에 234개의 요소로 구성하고, 위 전체방정식들을 quasi-backward scheme

을 이용하여 수치적분하였다. 유선함수 ψ 와 와도 ω 의 상층과 하층 경계는 모두 $\omega = \omega_B, \psi_B = 0$ 로 두고 측면경계는 $\omega = \omega_B, \psi_B = 0, \partial T/\partial n|_B = 0$ 로 두었다. 온도는 상층을 16°C를 일정하게 두었고, 계산영역의 맨 밑의 8번째 격자점을 중심으로 지표면 부분은 300K를 기준으로 24시간동안 약 5K의 주기로 변화시키고, 해수면은 300K로 일정하게 두었다. 최초 24시간의 계산값은 제외하고 2일째 값을 $\Delta t = 1$ 초 간격으로 2일 동안 풍속에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 7은 김해공항과 유사한 지점으로 간주되는 ▲표시 지역에서 30,000 line의 시계열이며, 그래프에서와 같이 간단한 2차원 모델에서 계산하더라도 실제 현상과 유사하게 매우 불규칙함을 나타내고 있다. Fig. 8은 시계열 값 중 25,000 line에 대한 각각의 자기상관 그래프로서 최초로 0이 되는 시간을 구한 결과 약 7시간 30분이었다. 따라서 이 시간을 지연시간 τ 로 정하여 매립 위상공간을 2차원에서 14차원까지 구성하고 각 매립 차원에 대한 상관차원을 추정한 결과 Fig. 9와 같이 약 10차원에서 포화가 발생함을 알 수 있으며, 이때 구한 상관차원 값이 1.14325 ± 0.03 이었다.

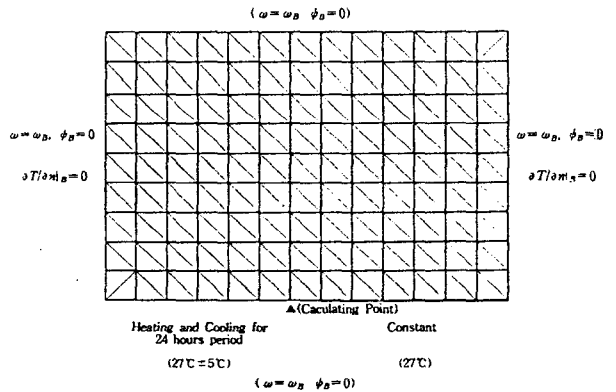


Fig. 6. A model domain that is used in this study.

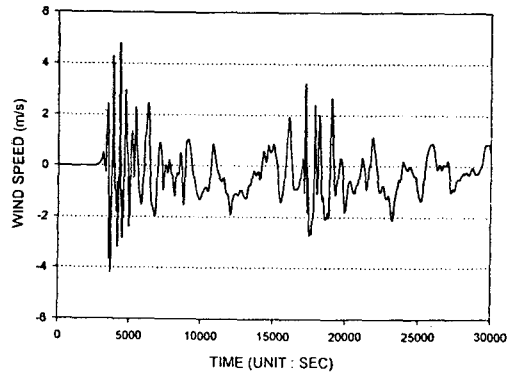


Fig. 7. The time series of the wind speed that is calculated from the model.

위의 결과로부터 우리는 간단한 2차원 모델의 풍속성분(v)의 상관차원이 1과 2사이의 낮은 비정수 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 실제 김해국제공항에서 관측된 시

계열 자료로부터 구해진 상관차원이 2와 3사이의 비정수 차원으로 2차원 모델에서 추정된 상관차원보다 크을 알 수 있고, 이것은 보다 복잡한 대기의 운동이 포함되어 있음을 반증한다. 따라서 보다 광범위한 관측에 의한 분석과 세밀한 지배방정식으로 구성된 모델을 이용한다면 김해국제공항에서 발생하는 해륙풍 현상을 정확히 예측할 수 있을 것이다.

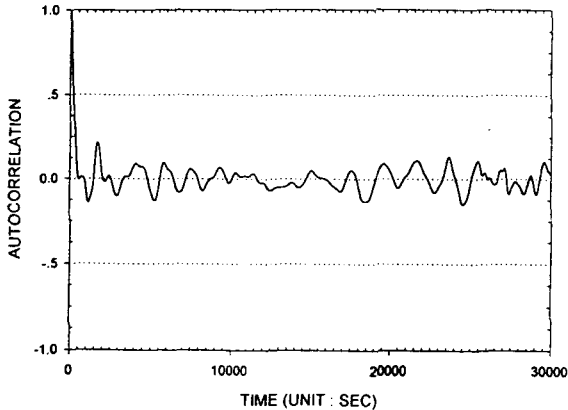


Fig. 8. The Autocorrelation values of wind speed that is calculated from the model(data length : 25,000).

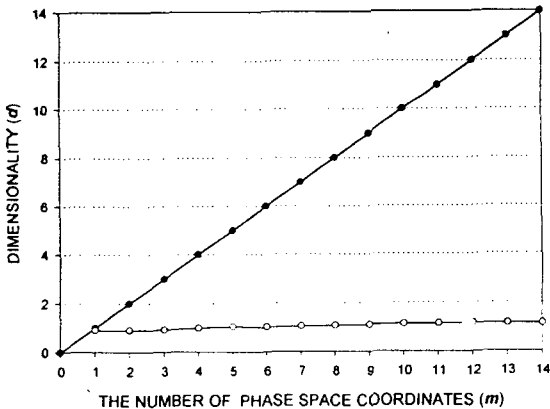


Fig. 9. The correlation dimensions of wind speed that is calculated from the model.

3. 결 론

본 연구에서는 현재 많은 분야에서 이용되는 있는 실제 실험 또는 관측 자료의 시계열로부터 그 현상을 지배하는 역학에 대한 정량적 추정하기 위해 많이 사용되는 방법 중 비교적 효율적이라고 할 수 있는 상관차원을 추정하는 방법을 이용하여 김해공항에서 관측된 풍속, 온도의 시계열과 간단한 2차원 해륙풍 모델에서 계산된 풍속의 시계열에 대한 차원을 추정 및 비교하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 김해지역에서 1994년 8월중 해륙풍이 발생한 4일에서 8일 동안 관측된 풍속 성분(v)와 온도(T)의 시계열에 대한 상관차원을 추정한 결과 2와 3사이의 낮은 비정

수 차원을 구할 수 있었다. 이것은 지역의 대기현상이 해륙풍현상을 포함한 국지 기상계를 특징짓는 초기조건에 민감한 결정론적 카오스이며, 해륙풍현상의 역학을 나타내는데 필요한 독립변수는 최소 3개 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

2) 유한요소법을 이용한 간단한 2차원 해륙풍 모델에서 계산된 풍속의 시계열에 대한 상관차원은 1과 2사이의 낮은 비정수 차원으로, 실제 관측치의 상관차원 보다 낮은 값을 나타내었다. 이것은 실제 해륙풍 현상의 전체 규모에 대한 역학을 표현한 것이 아닌 매우 간단한 모델로부터 구해진 결과에 의한 것으로 생각된다. 따라서 보다 광범위한 관측과 세밀한 지배방정식으로 구성된 예측 모델을 이용할 경우 김해국제공항에 발생한 해륙풍현상의 역학을 정확히 설명할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 실제 주기적인 현상이 지배적이지만 국지적으로 정확한 예측이 힘든 해륙풍 현상을 차원추정의 관점에서 논의하여 보았다. 보다 정확한 결과 및 논의를 도출하기 위해서는 보다 광범위하고 세밀한 관측이 우선 이루어져야 하며, 임의 기상변수의 시계열로부터 정확한 상관차원을 추정하기 위해 보다 정밀한 지연시간 τ 의 결정방법과 효율적인 차원추정 알고리즘이 구축되어야 할 것으로 사료된다. 그러나 본 연구로부터 김해지역뿐만 아니라 임의 지역의 실제 해륙풍 현상을 장기간 정확히 예측할 수 있는 모델이 구축될 수 있음을 시사하고 있다.

감사의 글

본 논문은 1995년도 부산대학교 학술연구조성비를 지원받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- 1) Grassberger, P., 1983, Generalized dimensions of strange attractors, Phys. Lett., 97A, 6, 227~230.
- 2) Wolf, A., J. B. Swift, H. L. Swinney, and J. A. Vastano, 1984, Determining Lyapunov exponents from a time series, Physica 16D, 285~317.
- 3) Theiler, J., 1986, Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data, Phys. Rev. A., 34, 2427~2432.
- 4) Farmer, J. D., E. Ott, and J. A. Yorke, 1983, The dimension of chaotic attractors, Physica 7D, 153~180.
- 5) Russell, D. A., J. D., Hanson, and E. Ott, 1980, Dimension of Strange Attractors, Phys. Rev. A., 45, 14, 1175~1178.
- 6) Strogatz, S. H., 1994, Nonlinear dynamics and chaos, ADDISON-WESLEY Publ. Com., 498pp.
- 7) Ott, E., T. Sauer, and J. A. Yorke, 1994, Coping with chaos, John Wiley & Sons, Inc., 418pp.
- 8) Packard, N. H., J. P., Crutchfield, J. D. Framer, and R. S. Shaw, 1980, Geometry from a time series, Phys. Rev. Lett., 45, 9, 712~716.

- 9) Fraser, A. M. and H. L. Swinney, 1986, Independent coordinates for strange attractors from mutual information, *Phys. Rev. A.*, 33, 1134~1140.
- 10) Grassberger, P. and I. Procaccia, 1983a, Characterization of Strange Attractors, *Phys. Rev. Lett.*, 50, 5, 346~349.
- 11) Grassberger, P. and I. Procaccia, 1983b, Measuring The Strangeness of Strange Attractors, *Physica* 9D, 189~208.
- 12) Parker, T. S. and L. O. Chua, 1989, *Practical Numerical Algorithms for Chaotic System*, Springer-Verlag, 348pp.
- 13) Fraedrich, K., 1986, Estimating the Dimensions of Weather and Climate Attractors, *J. Atmos. Sci.*, 43, 5, 419~432.
- 14) Connor, J. and C. Brebbia, 1976, *Finite Element Techniques for Fluid Flow*, Butterworth, 310pp.
- 15) Zienkiewicz, O., 1971, *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, 512pp.