

# 의사스펙트로법에 의한 대기 확산현상의 수치모델(1)

— 대기 확산방정식과 스펙트로모델 —

## Numerical Models for Atmospheric Diffusion Problems by Pseudospectral Method (1)

— Atmospheric Diffusion Equations and Spectral Model —

김 선 태 · 장 영 기<sup>1)</sup>

일본경도대학 공학부 위생공학과

<sup>1)</sup>수원대학교 공과대학 환경공학과

(원고접수 : 1991. 10. 21)

**Sun-Tae Kim, Young-Kee Jang**

Dept. of Environmental and Sanitary Engineering, Kyoto University, Japan

Dept. of Environmental Engineering, Suwon University

(Received 21, October 1991)

### Abstract

In recent years spectral methods have been found to be a powerful tool for the numerical solution of dynamic differential equations. The main attraction of spectral method is accuracy even though it is generally difficult to implement and solve the complex problems using spectral method. We introduced diffusion equations describing the state of air pollution and solved by pseudospectral method in dimensionless form. The results were compared with both those of other numerical methods and analytical solutions. Comparing with finite difference method and finite element method, spectral method shows the highest accuracy for one dimension problem in this study. Also, the results of two dimensional diffusion problems show good agreement with analytical solutions.

### 1. 머릿말

대기중에서의 오염물질의 이동현상을 파악하는 것은, 현재의 오염상태를 이해하고, 또한 장래의 대기의 질을 관리하는 데 있어서 매우 중요한 작업이라고 할 수 있다. 대기중에서의 오염물질의 이동현상을 파악하기 위해서는 야외에서의 실측 및 Tracer에 의한 확산실험, 풍동장치에 의한 모형실험과 모델화에 의한 수치시뮬레이션 등의 결과를 이용한 종합적인 해석이 필요하다. 이중에서도 수치모델은 최근 컴퓨터의 급속한 발달에 따라 대기오염현상 해석을 위한 주요한 도구의 하나로 되고 있다.

확산방정식은 수학적으로 보면 편미분방정식으로, 수치해법은 결국 확산방정식의 경계치문제라고 할 수 있다. 편미분방정식을 풀기 위한 수치해법으로는 유한차분법, 유한요소법이 대표적인 방법으로 알려져 있다. 그러나 최근 편미분방정식에 대해 이론적으로 정확성이 가장 높다고 알려진 스펙트로법의 유체역학의 분야에의 이용이 증가되고 있는 실정이다.

본 연구는 대기 중에서의 오염물질의 이동현상을 파악하기 위해, 대기 확산방정식을 수치적으로 푸는 방법에 대해 살펴 보기로 한다. 특히 수치해법에 있어서는 유한차분법과 유한요소법보다 정확성이 높은 스펙트로법을 이용하여 그 특성과 정확성에 대해

검토하기로 한다. 본 연구는, 우선 제 2 장에서 대기 확산방정식의 유도과정과 수치모델에 대해 살펴보고, 제 3 장에서 스펙트로법의 기본이론과 정확성에 대해서, 제 4 장에서 대기 확산방정식의 스펙트로모델의 구성과 그 결과에 대해 검토하는 것을 그 내용으로 한다.

## 2. 대기 확산방정식과 수치모델

대기중에서의 오염물질의 확산현상 또는 난류현상을 기술하는 방법으로는 오일러(Euler)식 방법과 라그랑지안(lagrange식) 방법이 있다. Euler식 방법은 고정좌표계에 있어서 물질의 변화상태를 기술하는 방법으로, 유체내의 고정된 점에서 측정된 속도성분에 의해 해석하는 방법이다. 한편, Lagrangian 방법은 이동좌표계에 있어서의 물질의 변화상태를 기술하는 방법으로서, 유체로부터 방출된 입자의 이동에 대한 통계성분에 의해 해석하는 방법이다.

수치모델의 경우는 Euler식 접근방식으로, 기본방정식을 수치해법에 의해 풀고자 하는 것이다. 본 장에서는 수치모델의 중심부분인 수치해법에 대해 간단히 정리해 보기로 한다.

대기 확산현상을 해석에 의해 직접 해석하는 것이 가장 정확하겠지만, 현재까지 알려진 대기 확산방정식의 해석해는 극히 제한된 경우에서의 해 뿐이며, 또한 통계적 확산식의 경우도 기상변화에 대해서 융통성이 부족하다고 할 수 있다. 반면 수치모델은 편미분방정식인 대기 확산방정식을 수치해법에 의해 직접 풀고자 하는 방법으로, 계산기와 계산기술의 발달에 따라 앞으로 더욱 기대되는 방법이라고 할 수 있다. 수치해법은 편미분방정식에 대해 이산화된 근사해를 구하고자 하는 방법으로, 유한차분법과 유한요소법이 많이 알려져 있으며, 최근 스펙트로법에 의한 해석의 예도 증가하고 있는 상태이다.

유한차분법은 편미분방정식의 편미분항을 차분으로 근사하여 푸는 방법으로, 기본원리와 근사과정이 간단하므로 유체역학의 여러분야에서 가장 많이 이용되어지고 있는 방법이다. 또한 유한요소법은 대상영역을 여러개의 요소로 분할한 뒤, 요소내에서 물질의 보존법칙을 만족하도록 근사방정식을 만들어 푸는 방법으로 복잡지형의 해석에 가장 적합한 방법이라고 할 수 있다(小竹, 1988).

한편, 스펙트로법은 유한차분법과 유한요소법보다 정확성이 높은 방법으로 최근 그 사용이 증가하고 있는 추세이다. 스펙트로법은 물리량의 분포를

여러 파장의 삼각함수의 합으로 나타내어, 그 파장 공간에서 편미분을 해석하는 방법이다. 스펙트로법의 수학적 원리와 구성에 대해서는 제 3 장에서 살펴보기로 하며, 여기에서는 스펙트로법의 특성과 장단점에 대해 정리해 두기로 한다(日本氣象廳豫報部, 1982).

우선, 스펙트로법의 특성 및 이점을 몇 개의 항목으로 나누어 정리하면 다음과 같다.

1) 스펙트로법은 편미분방정식을 수치적으로 풀기 위한 방법으로 역학과정이나 물리과정이 유한요소법과 같은 격자점모델과 다른 것이 아니라, 편미분방정식을 푸는 과정에서 격자점 모델과 다른 것이다.

2) 스펙트로법은 물리량의 분포를 여러 파장의 삼각함수의 합으로 표시한 뒤, 각 파장의 진폭과 위상을 이용하여 편미분을 해석하는 방법이다.

3) 스펙트로법은, 공간분포가 격자점법과 같은 이산화된 값이 아니라, 연속적으로 주어지는 값으로, 이산화에 의한 절단오차가 생기지 않는다는 결정적인 이점을 갖고 있다. 다시 말하면 스펙트로법은 유한차분법이나 유한요소법에 비해 정확성의 면에서 가장 뛰어나다고 말할 수 있다.

4) 스펙트로법은 공간적으로 연속적인 값으로 표시되기 때문에 격자점보다 해석할 수 있는 정보량이 많아진다.

5) 차분법의 경우와 같은 특별한 고려없이 각종의 보존법칙이 만족되며, 격자점 모델에 존재하는 비선형 불안정성도 없다.

그러나, 스펙트로법의 결점이라고 할 수 있는 것은 경계조건에 대해 격자점만큼 유연성이 없다는 것이다. 스펙트로법에서 사용하는 직교함수는 원칙적으로 처음부터 경계조건을 만족할 필요가 있으며, 이것은 경계조건이 비교적 복잡하지 않다는 것을 전제로 한다. 따라서, 시간적으로 변동하는 경계조건에 대해서는 스펙트로법의 적용은 거의 불가능하다.

## 3. 스펙트로법의 기본원리

스펙트로법은 가중잔차법(MWR; Method of Weighted Residuals)의 일종으로서, 시행함수(Trial Function, Approximating Function)와 평가함수(Tested Function, Weighting Function)로 구성된다. 시행함수는 해의 부분급수확장을 위한 기저함수(Basis Function)로 이용되며, 평가함수는 정해의 대신에 부분함수를 사용하는데서 생기는 오차를 최소화하기 위한 것이다(Canuto, 1988).

시행함수의 선택에 있어서 스펙트로법은 유한차분법과 유한요소법과 구별되어지는데, 스펙트로법에 있어서 시행함수는 cos, sin, exp 등의 무한히 미분가능한 함수이다. 스펙트로법의 시행함수로서는 푸리에변환, Chebyshev변환, Legendre변환 등이 이용되어진다. 평가함수의 선택방법에 따라 Galerkin법, Collocation법, Tau법 등이 알려져 있지만, 대기확산방정식의 해석과 관련하여 Collocation법(의사 스펙트로법이라고도 한다)이 가장 많이 사용되어지고 있으며, 본 고에서도 주로 의사스펙트로법을 이용하여 대기확산에 관한 수치모델을 작성하는 것으로 하였다(이하 스펙트로법이라고 하는 것은 의사스펙트로법의 약칭으로 한다).

대기확산방정식의 해법에 이용되는 시행함수는 푸리에의 삼각다항식과 Chebyshev 다항식으로 다음과 같은 방법으로 해석한다(Wengle *et al.*, 1978).

삼각다항식을 시행함수로 하는 푸리에변환법은 식 (1)의 이산역푸리에변환식에 의해 푸리에계수를 구한 뒤, 변환공간에서의 식 (3)과 식 (4)에 의해 1차 미분계수와 2차미분계수를 구하며, 마지막으로 식 (2)의 이산푸리에변환식에 의해 물리공간에 환원시키는 과정으로 1차 편미분 또는 2차 편미분을 해석하는 방법이다. 식중의  $L_x$ 는  $x$  방향의 주기이며,  $x_j = jL_x/N$ ,  $k = 2\pi k/L_x$ 이다.

$$\tilde{u}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} u(x_j) e^{-2\pi i k x_j / L_x} \quad -N/2 \leq k \leq N/2 - 1 \quad (1)$$

$$u(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \tilde{u}_k e^{2\pi i k x_j / L_x} \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$u'(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} (ik) \tilde{u}_k e^{2\pi i k x_j / L_x} \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$u''(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} (-k^2) \tilde{u}_k e^{2\pi i k x_j / L_x} \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

Chebyshev 변환법은 식 (5)의 역 Chebyshev 변환에 의해 Chebyshev 계수를 구하고, 식 (6)의 순환식에 의해 변환공간에서의 1차미분계수를 구한다. 식 (7)은 Chebyshev변환식이다. 변환공간에서의 1차미분계수는 식 (8)와 식 (9)에 의해 물리공간으로 되돌려지게 된다.

$$\hat{u}_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(x_n) \cos(\pi k n / N), \quad |k| \leq N/2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{u}_{N-1}^{(1)} &= 2N \hat{u}_N \\ \hat{u}_{N-2}^{(1)} &= 2(N-1) \hat{u}_{N-1} \\ \hat{u}_{N-1}^{(2)} &= \hat{u}_{N+1}^{(2)} + 2k \hat{u}_k \end{aligned} \quad k = N-1, N-2, \dots, 0 \quad (6)$$

$$u(x_n) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k T_k(x_n) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k \cos(\pi k n / N), \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\frac{\partial u(x)}{\partial x} = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k^{(1)} T_k(x_n) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k^{(2)} T_k(x_n) \quad (9)$$

식 중의 "는 처음과 마지막의 항에 대해서만 1/2를 곱하는 것을 의미한다.

이들 계산은 FFT(고속푸리에변환)에 의해 행해지는데, 스펙트로법에서 가장 계산시간이 많이 걸리는 부분이 이 FFT의 계산부분이다. FFT는 Cooley and Tukey (1965)의 복소수에 대한 고속푸리에변환법의 개발 이후 여러 종류의 방법이 소개되어지고 있다. 본 고에서는 종래의 복소수 푸리에변환법이 실수의 데이터에 대해서 허수의 부분을 0으로 입력하여 계산하는 비경제적인 면을 개선하여, 전처리와 후처리의 작업을 통해서 실수데이터를 2개의 부분으로 나누어 한 개의 데이터군은 실수부분에, 또 한쪽의 데이터군은 허수부분에 넣어서 계산함으로써 계산시간의 단축을 꾀하였다(Cooley *et al.*, 1970; Canuto, 1988).

#### 4. 대기확산방정식에 대한 스펙트로모델의 구성과 평가

##### 4.1 스펙트로법의 정확성

스펙트로법에 의한 대기확산방정식의 해석에 앞서, 스펙트로법의 정확성에 대해서 유한차분법과 유한요소법의 결과와 비교, 검토해 보기로 한다.

해석해를 구할 수 있는 식 (10)과 같은 1차원의 확산방정식과 식 (11), (12)의 초기조건과 경계조건의 문제를 이용하였다. 이 문제의 해석하는 식 (13)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(x \in 0, 1, 0 < t < \infty)}{\partial x^2} \quad (10)$$

$$U(x, 0) = \sin(\pi x) \quad x \in (0, 1) \quad (11)$$

$$U(0, t) = U(1, t) = 0 \quad (0 < t < \infty) \quad (12)$$

$$U(x, t) = \sin(\pi x) \exp(-\pi^2 t) \quad (13)$$

유한차분법의 경우는 Crank-Nicolson법에 의해 이산화하여 만들어진 삼중대각행렬을 토마스(Thomas)법에 의해 풀었으며(町田, 小島, 1987), 유한요소법의 경우는 2절점의 1차원 요소에서 시간변수에 대해서는 Crank-Nicolson법에 의해 유도된 행렬식을 푸는 것으로 하였다(水本, 原平, 1985). 스펙트로법의 경우는 비주기함수에 대해서 푸리에

**Table 1.** The Results of Numerical Solution of 1-Dim Diffusion Equation.

x	analytical	element	difference	x	analytical	spectral
0.00	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.00	0.0000000000	0.000000005
0.12	0.2960708737	0.2950658798	0.2970397472	0.04	0.0922872705	0.092292220
0.25	0.5470677018	0.5452119112	0.5488579273	0.15	0.3435217828	0.34352076
0.37	0.7147783637	0.7123488188	0.7120996714	0.31	0.6380488179	0.63805222
0.50	0.7736706734	0.7710455060	0.7707717419	0.50	0.7736701071	0.77366792
0.62	0.7147788405	0.7123606801	0.7121006846	0.69	0.6380488179	0.63805222
0.75	0.5470682979	0.5452331305	0.5450184345	0.85	0.3435217828	0.34352076
0.87	0.2960714698	0.2950848341	0.2949619293	0.96	0.0922872705	0.092292220
1.00	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	1.00	0.0000000000	0.00000005

변환보다 정확성이 높은 Chebyshev 변환법을 이용하였다.

$t = 0.026$  sec에서의 결과를 표 1에 나타내었다. 스펙트로법의 경우는 선점 (Collocation Points; 의사 스펙트로법의 해석의 대상이 되는 격자점)이 비등간격이므로 이들 결과를 직접 비교할 수는 없지만, 해석해와의 비교를 통해서 알 수 있듯이 스펙트로법의 결과가 다른 두 방법과 비교할 때 매우 정확성이 높다는 것을 알 수 있다(김선태, 1991).

**4.2 무차원화한 대기 확산방정식에 대한 스펙트로 해법**

대기 확산 설명을 위해 가장 많이 이용되어지는 반경험식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (14)$$

여기에서  $u, v, w$ 는 평균속도이며,  $K_x, K_y, K_z$ 는 난류 확산계수이다.  $y$ 방향에 대해 농도일정의 선 오염원으로 가정하고, 또 수평방향의 확산항과 연직방향의 이류에 의한 영향을 무시한다고 하고, 식 (14)를  $Z = z/H, X = xK_z(H)/H^2u(H), \tau = K_z(H)t/H^2, U = u/u(H), K = K_z/K_z(H), C = u(H)Hc/\theta_0$ 과 같이 무차원화하면 식 (15)와 같이 된다. 여기에서  $\theta = h/H$ 이며,  $H$ 는 혼합고의 높이를 나타낸다.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + U(Z) \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Z} (K(Z) \frac{\partial C}{\partial Z}), \quad (15)$$

$$C(X, Z, 0) = 0, \quad (16)$$

$$C(0, Z, \tau) = \delta(Z-0)/U(0), \quad (17)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = 0, \quad Z = 0, 1. \quad (18)$$

식 (16)는 초기조건이며, 식 (17), (18)는 경계조건을 나타낸다. 여기에서 다음의 식 (19)와 (20)의 수평속도

분포와 난류 확산분포를 생각하면 다음과 같다.

$$U(Z) = U(0)Z^m \quad (19)$$

$$K(Z) = K(0)Z^n \quad (20)$$

결국 본 연구에 있어서의 스펙트로해법의 최종대 상식은 식 (15)의 확산항을 분리한 식 (21)과 같이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -U(Z) \frac{\partial C}{\partial X} + \frac{\partial K(Z)}{\partial Z} \frac{\partial C}{\partial Z} + K(Z) \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}, \quad (21)$$

그림 1은 스펙트로법에 의한 대기 확산방정식의 해법의 흐름을 표시한 것이다. 우선, 초기치로부터 공간변수에 대하여 푸리에역변환 또는 Chebyshev 역변환에 의해 푸리에계수 또는 Chebyshev 계수를 구한다. 다음은 구해진 푸리에계수 또는 Chebyshev 계수로부터 변환공간에서 1차 미분계수와 2차 미분계수를 구한다. 각각의 미분계수를 푸리에변환 또는 Chebyshev 변환에 의해 원래의 물리공간에 되돌리게 되면 각각의 편미분항이 해석되어지는 것이 된다. 마지막은 시간변수의 근사과정으로 스펙트로법에서는 시간변수에 대해서도 그 변화를 함수로 표시하는 것은 불가능하기 때문에, 시간미분은 시간차분으로 바꾸어 해석하는 것이 일반적이다.

본고에서의 계산조건에 대해 정리하면, 오염원은  $x=0, z=0.19$ 의 위치에서 배출량 1이며, 다른 지점에서는 모두 0인 불연속장의 연속오염원이며, 수평 풍속의 연직분포와 난류 확산계수의 연직방향의 분포는 식 (19)와 식 (20)에서  $m=0, n=1$ 의 경우, 즉 풍속과 확산계수의 연직분포가 일정하다는 단순한 경우이다. 지표면에서의 풍속  $u(0)$ 와 확산계수  $K(0)$ 는 각각 1로 주었다. 선점의 수는  $x$  방향에 16개,  $z$  방향으로 16개로 하였으며, 계산시간간격은 0.0005이다. 확장함수로서는  $x$ 축에 대해서는 Chebyshev 변환과  $z$ 축에 대해서는 지표면과 혼합고에서의 경계

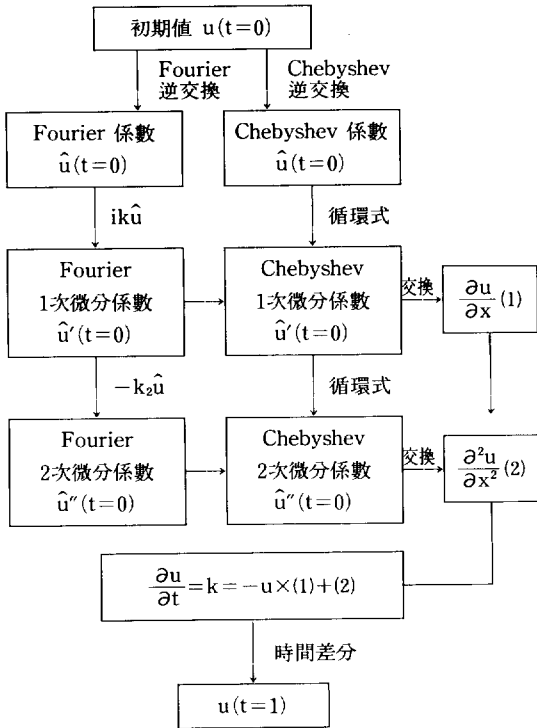


Fig. 1. A Diagram of Pseudospectral Solution for Atmospheric Diffusion Equation.

조건을 자동적으로 만족시키는 푸리에 cosine 변환을 이용하는 것으로 하였다. 푸리에 cosine 변환은 기

저함수를 복소수 푸리에 변환의 지수함수의 대신에 cosine 함수를 이용하여 확장하는 방법이다. FFT법은 앞에서 설명한 바와 같이 2N개의 데이터에 대해서 N개씩의 두 개의 쌍으로 나누어 계산하는 알고리즘을 이용하였고, 시간차분은 Adams-Bashford의 예측자, 수정자법을 이용하였다.

4.3 결과 및 고찰

그림 2에 이들 조건의 아래에서 구한 정상상태의 각각 다른 고도에서의 농도분포가 표시되어져 있다. 그림 2에서 수치해와 비교한 해석해는 Demuth (1978)의 해석해로 식 (19)와 식 (20)의 분포식에 대해 식 (22)와 같다.

$$C(x, z) = \frac{2qQ}{Hu(H)} \left[ \mu + \frac{zh^p}{H^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_{\mu-1}(j_{\mu,1}h^q/H^q) J_{\mu-1}(j_{\mu,1}z^q/H^q)}{J_{\mu-1}^2(j_{\mu,1})} \right] \times \exp \left[ -j_{\mu,1}^2 \frac{q^2 K_2(H)}{H^2 u(H)} x \right] \quad (22)$$

여기에서 Q는 배출량, J는 Bessel함수이며, j는 Bessel함수의 근이 된다. 또한 p, q는 다음과 같다.

$$2p=1-n, \quad 2q=m-n+2 > 0, \quad \mu = (m+1)/(m-n+2) \quad (23)$$

그림 2로부터 알 수 있듯이 스펙트럼법에 의한 수치해는 지표면의 농도에서 경계조건의 문제와 진동현상에 인해 약간의 차가 보이지만, 전체적으로 수치해와 해석해가 상당히 일치하고 있다.

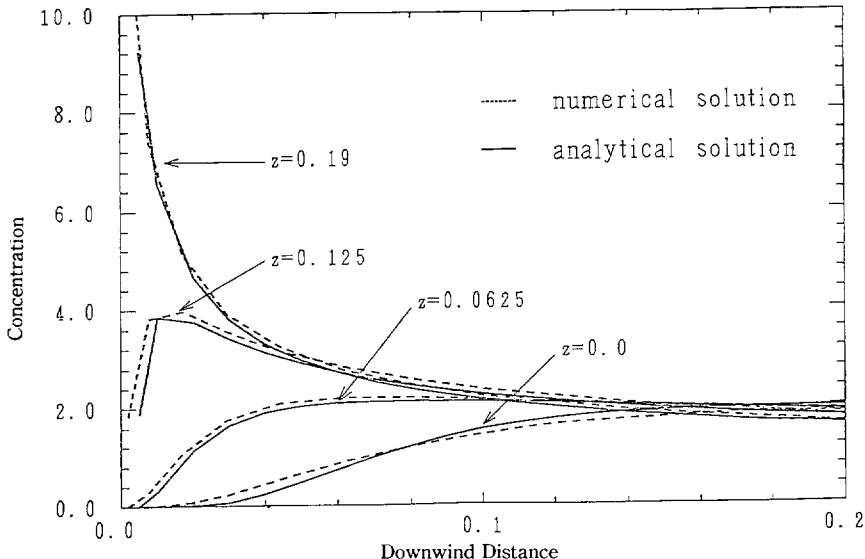


Fig. 2. The steady-state concentration distribution of spectral solution and numerical solution at different height.

그림 3은 정상상태의 연직방향의 농도분포에 대해 수치해와 해석해를 비교한 것으로, 불연속점을 중심으로 약간의 차는 보이지만 전체적으로는 일치하고 있음을 알 수 있다. 2차원의 농도분포를 표시하기 위한 방법으로 등농도분포도(Contour Map)과 등농도 조감도(Bird's-eye view)가 이용될 수 있다. 그림 4의 등농도분포도와 정상상태의 결과로 실시간

(Real Time)의 화상처리시의 시간에 따른 농도변화를 파악할 경우에 이용할 수 있다.

한편 지표면과 연돌고에서의 시간에 따른 농도변화를 1차원적으로 표시한 것이 그림 5이다. 정상상태에 도달하기 전까지 불연속면의 존재가 두드러지게 나타나고 있는데, 이 불연속면의 위치는 그 시간까지 이류에 의해 오염물질이 도달한 거리에 상당한

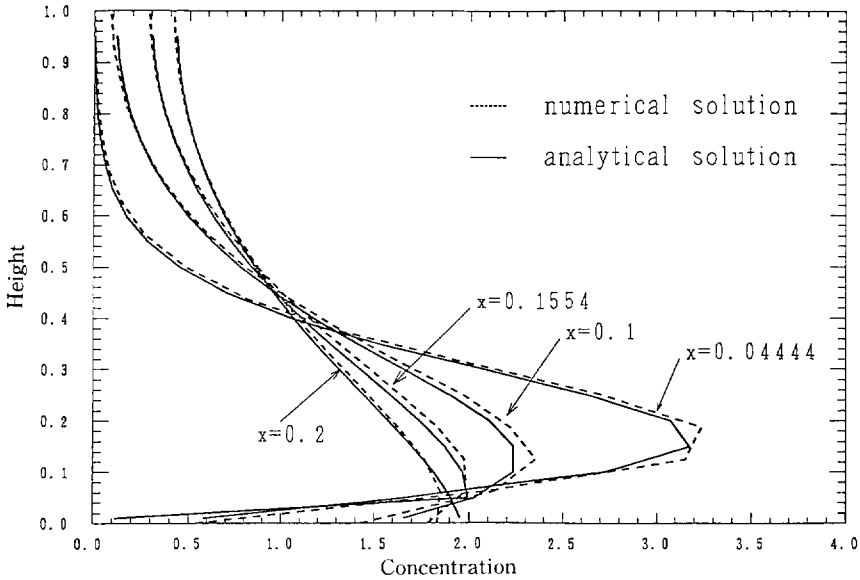


Fig. 3. Vertical profiles of concentrations at four different downwind positions.

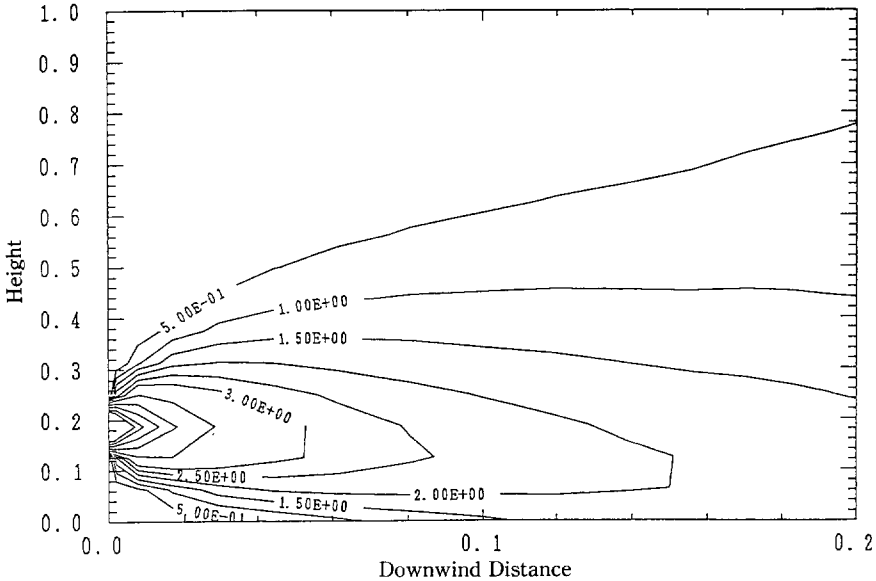


Fig. 4. Contour maps of concentrations at steady state.

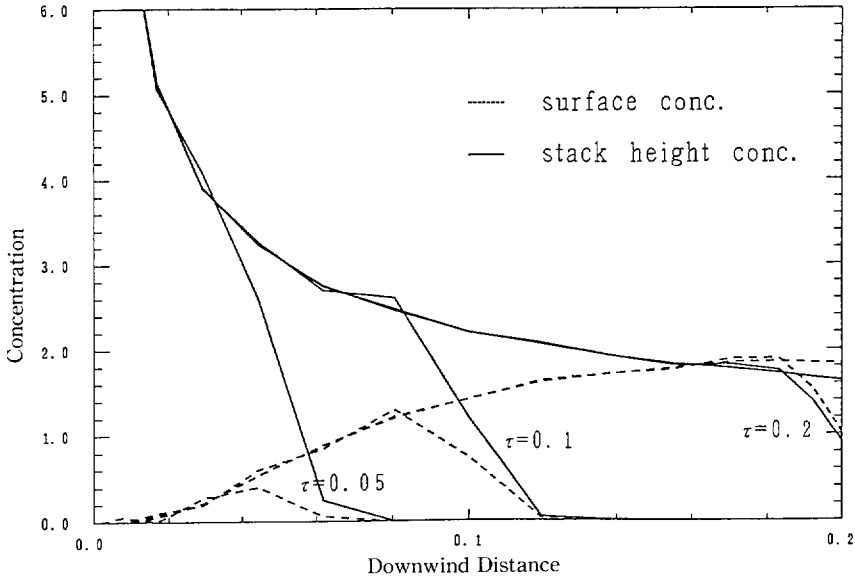


Fig. 5. Time variation of concentrations at surface and stack height.

다.

5. 맺 음 말

본 연구는 수치모델에 의한 대기확산현상의 해석을 위한 연구의 한 부분으로서, 대기확산현상을 기술하는 수치모델의 작성을 위한 수치해법을 중심으로 살펴 보았다. 수치해법 중에서도 정확성에 있어서 가장 뛰어난 스펙트로법을 이용하여 무차원화한 대기확산방정식을 푸는 방법과 그 결과의 정확성에 대해 유한차분법과 유한요소법과의 비교 또는 해석해와의 비교를 통하여 살펴보았다. 또한 그 결과를 토대로 몇 가지의 대기확산현상에 대한 검토를 행하였다.

스펙트로법은 복잡지형과 같은 경계조건이 단순하지 않는 경우에 대한 적용이나 계산시간의 면에서 보면 유한차분법과 유한요소법보다 뛰어난 방법이라고 할 수 없으나, 계산결과와 정확성의 면에서는 두 방법과 비교하여 매우 뛰어난 방법임에 틀림없다. 스펙트로법의 역사가 다른 두 방법에 비해서 짧으며 적용의 예도 적었지만, 앞으로 그 정확성을 이용하기 위한 적용이 증가하리가 보이며 따라서 현재의 문제점을 극복할 수 있는 알고리즘의 개선과 개발이 있으리라 사료된다.

(추가) 본고 의사스펙트로법에 의한 대기확산현상의 수치모델의 구성의 제 1 보에서는 간단한 무차

원의 대기확산방정식을 풀기 위한 스펙트로법의 기본적인 원리와 정확성에 대해서 살펴 보기로 하였으며, 다음의 제 2 보에서는 실제규모(scale)에서의 스펙트로법에 의한 확산방정식의 해석과 복잡지형에의 적용에 대해 간단한 테스트지형을 중심으로 보고하고자 한다.

참 고 문 헌

金善泰, 平岡正勝(1991) 대기확산방정식의 수치해법에 관한 고찰, 제12회 대기보전학술연구발표회 요지집, 38-42.  
 町田東一, 小島紀男(1987) パソコンBAISC數値計算II, 東海大學出版會, 55-71.  
 小竹進, 土方邦夫(1988) パソコンで解く熱と流れ, 丸善株式會社, 27-28.  
 水本久夫, 原平八郎(1985) エンジニアリングサイエンスのための有限要素法プログラム編, 森北出版株式會社, 62-74.  
 市川陽一(1985) 風の場, 大氣擴散場に及ぼす地形影響評價方法に關する研究, 京都大學衛生工學科士學位論文, 1-5.  
 安田龍介(1987) 大氣の流れと擴散への亂流モデルの適用に關する基礎的研究, 京都大學衛生工學科修士學位論文, 1-7.  
 日本氣象聽豫報部(1982) スペクトル法による數値豫報(その理論と實際), 5-11.

- Canuto C., Hussaini M.Y., Quarteroni A. and Zang T. A. (1988) Spectral methods in fluid dynamics, Springer-Verlag.
- Cooley J.W., Tukey J.W. (1965) An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, Math. Comput. 19, 297 — 301.
- Cooley J.W., Lewis P.A.W. and Welch P.D. (1970) The fast Fourier transform algorithm, Programming consideration in the calculation of sine, cosine and Laplace transforms, J. Sound. Vib. 12(3), 315 — 337.
- Demuth CI (1978) A distribution to the analytical steady solution of the diffusion equation for line sources. Atmos. Environ. 12, 1255 — 1258.
- Seinfeld J.H. (1986) Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & Sons Inc.
- Wengle H., Bosch B.V. and Seinfeld J.H. (1978) Solutions of atmospheric diffusion problems by pseudospectral and orthogonal collocation methods, Atmos. Environ. 12, 1021 — 1032.