

대기경계층에서 미세 섬유 확산 모델링

Dispersion Modeling of Fine Carbon Fibers in Atmospheric Boundary Layer

김 석 철* 황 준 식** 이 상 길***
 Kim, Seog-Cheol Hwang, Jun-Sik Lee, Sang-Kil

ABSTRACT

A fine carbon fibers dispersion model is implemented to calculate the scattering range and ground level concentration of carbon fibers emitted at certain altitudes of atmospheric boundary layer. This carbon fibers dispersion model was composed by coupling a commonly used atmospheric dispersion model and an atmospheric boundary layer model. The atmospheric boundary layer model, applying the Monin-Obukov Similarity Rule obtained from measurement input data at ground level, was used to create the atmospheric boundary layer structure. In the atmospheric dispersion model, the Lagrangian Particle Model and the Markov Process were applied to calculate the trajectory of scattered carbon fibers relative to gravity and aerodynamic force, as well as carbon fibers specification.

주요기술용어(주제어) : Fine Carbon Fibers(미세탄소섬유), Atmospheric Dispersion Model(대기확산모델), Lagrangian Particle Model(라그랑지안 입자모델), Atmospheric Boundary Layer(대기경계층)

1. 머리말

비행장에서 항공기 화재사고로 인하여 주변지역에 발생하는 전자장비 장애를 연구한 사례가 있다^[1,2]. 항공기에서 화재가 발생할 경우 항공기 기체소재로 사용된 전도성 물질이 연기와 함께 주변 대기 중으로 방출된다. 공기 중에 전도성 물질의 양이 일정 수준 이상에 도달하면, 비행장 주변의 시설 내부에 위치한 전자장비에서 단락 등에 따른 기능장애가 발생할 수가 있다. 본 연구에서는 지상고도 수 km 이내에서

미세섬유가 방출되었을 때, 미세섬유의 지상농도와 착지범위를 계산할 수 있는 미세섬유 확산모델을 구현하였다. 바람의 의한 미세섬유가 횡방향 이동함과 동시에 중력에 의해서 연직방향으로 낙하하고, 지속적인 방출이 아니라 순간방출에 따른 농도변화를 계산한다는 점에서 본 연구는 전술한 연구와는 차이가 있다. 본 연구에서 미세섬유 확산모델은 두 개의 부차모델(sub-model), 곧 대기경계층모델과 대기확산모델을 연계하여 구성하였다. 대기경계층모델 및 대기확산모델에 대한 설명은 다음과 같다.

† 2008년 4월 30일 접수~2008년 6월 5일 게재승인

* 볼트환경

** 국방과학연구소(ADD)

*** 육군사관학교(KMA)

주저자 이메일 : sckim@bolt.co.kr

2. 섬유확산모델의 구성

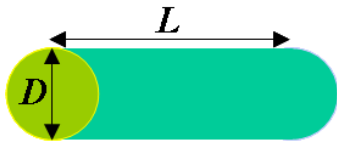
가. 대기경계층모델

특성이 균질한 지표면 상부에 형성되는 대기경계층

에 대해서는 보편적인 상사법칙, 곧 Monin-Obukov 상사법칙이 성립하는 것으로 알려져 있다^[3]. 이 경우 수평방향으로 균질한 대기경계층에서 평균풍속과 난류는 연직좌표만의 함수로 표시된다. 이 연직분포 함수는 ▲ 지면거칠기(z_0 , surface roughness length), ▲ 대기혼합고(z_i), ▲ Monin-Obukhov 길이(L), 그리고 ▲ 마찰속도(u^*)의 인자만으로 표시될 수 있다.

따라서 대기경계층 임의의 고도에서 기류조건은 전술한 4개의 인자가 주어질 경우, Monin-Obukov 상사이론에 의해서 추정할 수 있다. 여기서 지면거칠기는 지표특성에 의해 결정되며, 대기혼합고는 관측 가능한 량이다. 나머지 인자, 곧 Monin-Obukhov 길이와 마찰속도는 직접 관측되는 물리량이 아니지만, 대신 풍속, 기온, 복사열과 현열유속 등의 일반적인 기상관측인자로부터 계산할 수 있다. 본 연구에서 대기경계층 모델은 풍향, 풍속, 기온, 복사열, 현열유속 등의 통상적으로 관측되는 기상요소를 입력인자로 사용하여 Monin-Obukov 상사이론에 의거하여 대기경계층 내 임의의 고도에서 기류조건, 곧 평균풍속과 난류량을 계산할 수 있는 일련의 절차로써 구성하였다.

나. 미세섬유 입자모형



[그림 1] 미세섬유 모형

길이가 짧은 미세섬유는 비산시에 공기력에 따른 형태변화가 작아서 원통형 강체 입자에 가깝다. 미세섬유입자를 그림 1에 표시한 원통형태의 입자라고 간주할 때, 직경(D)과 길이(L)로써 기하학적 형상을 표시할 수 있다. 원통관이 정지된 유체 속을 V의 속도로 이동할 때 유체로 인해 받는 저항력은 방향에 따라 다르다. 원통관의 항력과 양력에 대해서 정확한 해석 해는 알려져 있지 않다. slender body theory에 근거한 몇 가지 근사해가 제시되어 있는데, 본 연구에서는 Cox가 제시한 식을 사용하였다^[4]. Cox의 근사식은 다음과 같다.

$$F_{\parallel} = \frac{2\pi\nu LV}{\ln(2L/D) - 0.80685} + O\left(\frac{\nu LV}{2[\ln(2L/D)]^3}\right) \quad (1)$$

$$F_{\perp}/F_{\parallel} = 1 - \frac{1}{\ln 2(L/D)} + O\left(\frac{1}{[\ln(2L/D)]^2}\right) \quad (2)$$

여기서 F_{\parallel} 와 F_{\perp} 는 원통관이 길이방향 그리고 직각방향으로 V의 속도로 일정하게 움직일 때 해당방향으로 작용하는 저항력이다. 원통형태의 미세섬유가 난류 조건하에서 낙하 확산되는 경우 그 방향은 무작위로 회전될 것으로 간주할 수 있다. 임의의 방향으로 위치하게 된다고 가정하면, 원통형태의 미세섬유에 작용하는 저항력은 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = \frac{1}{3}F_{\parallel} + \frac{2}{3}F_{\perp} \quad (3)$$

직경(D)이 7 μ m이고, 길이(L)가 각각 2mm, 4mm, 6mm인 원통모양 미세섬유 입자의 settling velocity를 계산하면 표 1과 같다.

[표 1] 원통형 고체입자의 settling velocity

L(mm)	Settling Velocity(m/sec)
2	0.021166
4	0.023771
6	0.025294

$D=7\mu\text{m}$ $\rho_p=1,350\text{kg/m}^3$
 $\rho_a=1.21\text{kg/m}^3$ $\nu=0.15\text{cm}^2/\text{sec}$

구형입자와 비교하면, 미세섬유 입자의 settling velocity는 개략 직경 20 μ m의 구형입자와 비슷하다. 미세섬유의 길이가 mm단위일지라도 직경이 μ m단위일 경우 그 settling velocity는 직경이 μ m단위의 구형입자와 유사하게 나타난다.

다. 대기확산모델

미세섬유입자의 비산궤적에 대한 계산은 라그랑지안 입자모델을 적용하였다. 대기경계층모델에 의해서

기류에 대한 정보가 주어졌을 때, 전술한 미세섬유 입자모형에 대한 공기력 함수를 이용하여 미세섬유의 움직임을 계산할 수 있다. 대기경계층 내에서 미세섬유입자의 움직임 곧 난류확산운동은 라그랑지안 입자 모델의 일반적인 절차에 따라 다음과 같이 평균과 난류변동으로 구분하여 모델링한다.

$$U^P(t) = \bar{U}(x^P(t), y^P(t), z^P(t)) - U^R + u^P \quad (4)$$

$$V^P(t) = \bar{V}(x^P(t), y^P(t), z^P(t)) - V^R + v^P \quad (5)$$

$$W^P(t) = \bar{W}(x^P(t), y^P(t), z^P(t)) - W^R + w^P \quad (6)$$

여기서, $U^P(t)$ $V^P(t)$ $W^P(t)$ 는 시간 t 인 순간에 x , y 및 z 방향으로 입자의 순간속도이며, \bar{U} , \bar{V} , \bar{W} 는 입자 위치에서 공기의 평균유동속도이고, u^p , v^p , w^p 는 입자의 난류변동 순간속도이다. U^R V^R W^R 는 공기유동에 대한 입자의 평균상대속도로 U^R 과 V^R 은 영이다. 식 (4)~식 (6)에서 입자의 난류변동 순간속도(u^p , v^p , w^p)는 Langevin 방정식의 유한차분형태인 Markov 과정으로 근사한다^[5].

$$du^p = -\frac{u^p}{T_u^p} dt + \sigma_u^p \sqrt{\frac{2dt}{T_u^p}} \delta_u \quad (7)$$

$$dv^p = -\frac{v^p}{T_v^p} dt + \sigma_v^p \sqrt{\frac{2dt}{T_v^p}} \delta_v \quad (8)$$

$$dw^p = -\frac{w^p}{T_w^p} dt + \sigma_w^p \sqrt{\frac{2dt}{T_w^p}} \delta_w \quad (9)$$

식 (7)~식 (9)에서 T_u^p , T_v^p , T_w^p 는 각각 x , y 및 z 방향으로 입자의 라그랑지안 시간척도(time scale)이고, σ_u^p , σ_v^p , σ_w^p 는 평균에 대한 입자속도변동의 표준편차이다. δ_u , δ_v , δ_w 는 평균이 0이고, 분산이 1인 가우시안 확률분포의 난수(random number)이다.

입자에 대한 라그랑지안 시간척도와 속도변동 표준편차는 공기유동에 대한 변수로 표현 가능하다. 연직 방향 성분에 대해서 해당 관계식은 다음과 같이 주어

진다^[6].

$$T_w^p = \frac{\sigma_w^p T_w}{\sqrt{\sigma_w^{p2} + W^R^2}} \left(1 + \frac{\alpha}{K} \frac{1}{T_w}\right) \quad (10)$$

$$\sigma_w^p = \sigma_w \left(1 + \frac{\alpha}{K} \frac{1}{T_w}\right)^{-1/2} \quad (11)$$

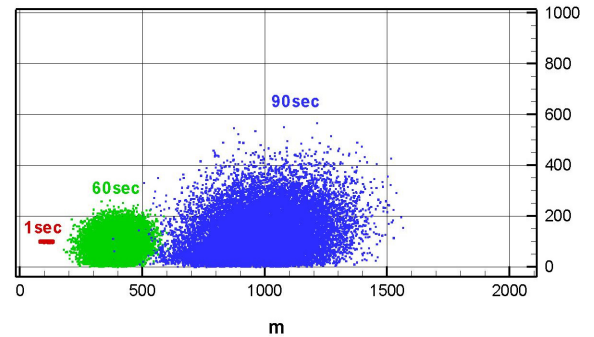
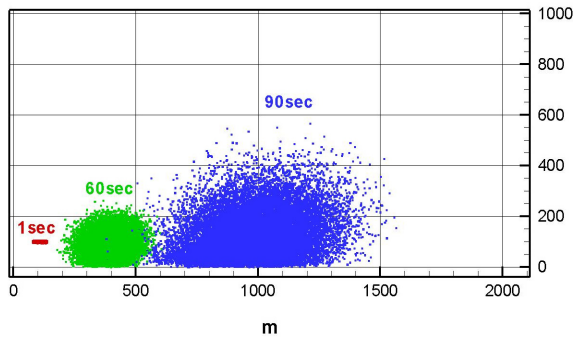
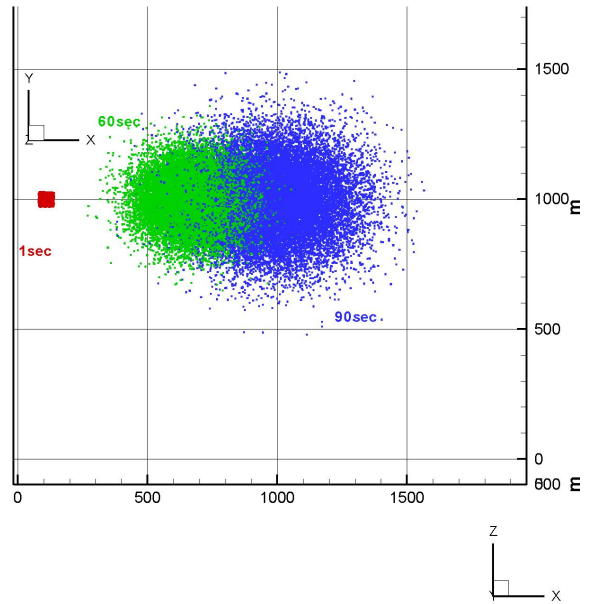
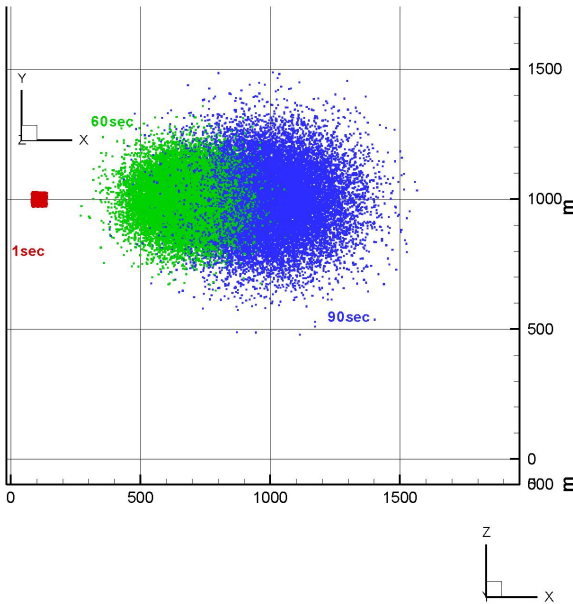
식 (10)과 식 (11)에서 T_w 와 σ_w 는 연직방향으로 공기유동에 대한 라그랑지안 시간척도와 속도변동의 표준편차이다. 수평방향에 대해서도 유사한 관계식이 설정 가능하다. 식 (4)~식 (11)으로부터 주어진 기류 조건에 대해서 입자의 난류확산 양상을 모델링하는 알고리즘을 구성하였다. 풍동실험자료^[7]와 확산모델링 결과를 비교하면, 모든 비교지점에서 모델은 5% 이내로 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다^[8].

3. 섬유확산모델 적용결과

전술한 섬유확산모델을 사용하여 미세섬유, 곧 원통형 입자의 낙하 확산과정을 모델링하였다. 사례 연구를 위하여 표 2와 같이 2가지 상이한 기상조건을 설정하였다. 기준풍속은 지상 10m 고도에서 풍속이며, 고도변화에 따른 풍향변화는 없다. 원통형태의 미세섬유의 직경은 7 μ m로 설정하였다. 섬유의 길이(L)에 따른 차이를 보기 위하여 L=2mm인 경우와 L=6mm인 경우를 각각 살펴보았다.

[표 2] 사례분석용 기상조건 : 불안정조건(met_CBL)과 안정조건(met_SBL)

기상인자	조건구분	
	met_CBL	met_SBL
기준풍속(m/sec)	5.67	2.29
마찰속도(m/sec)	0.79	0.19
M-O길이(L : m)	-189	28.1
대기혼합고(z_i : m)	1622	189
지면거칠기(z_0 : m)	0.3	0.3



[그림 2] 방출 후 1초, 60초, 90초일 때의 섬유입자 위치(기상조건 : met_CBL, D=7 μ m, L=2mm)
: (상)xy-투사평면, (하)xz-투사평면

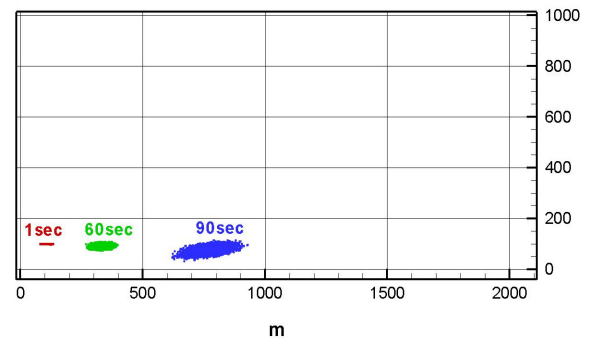
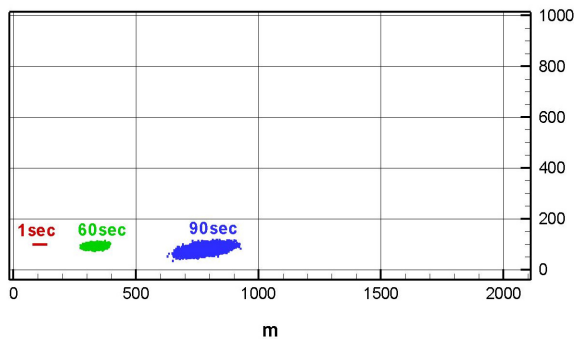
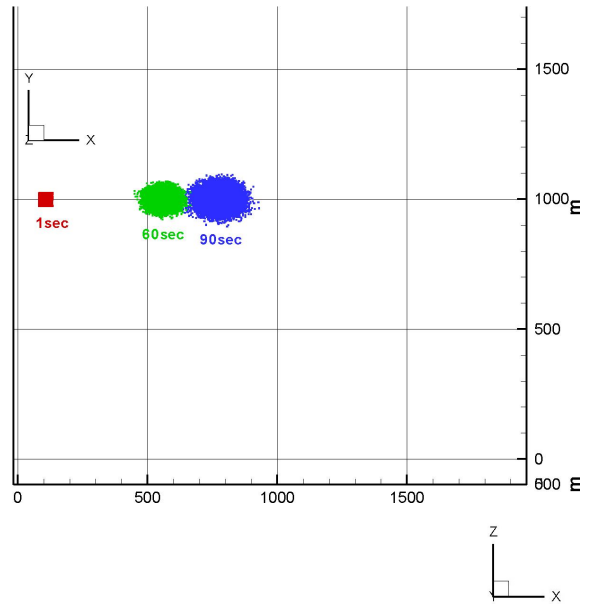
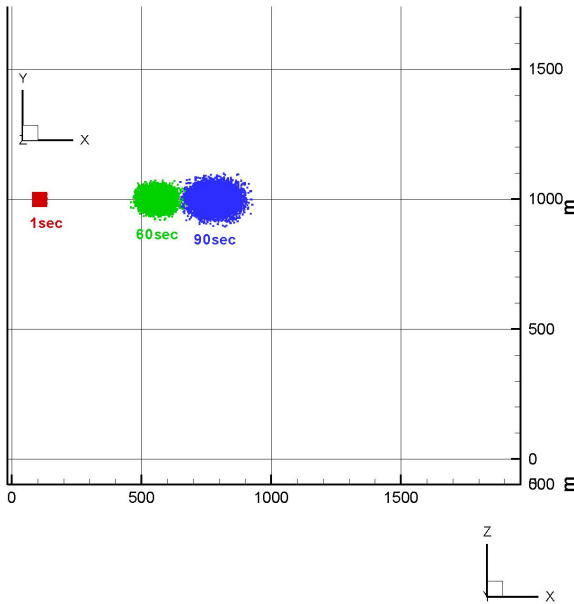
[그림 3] 방출 후 1초, 60초, 90초일 때의 섬유입자 위치(기상조건 : met_CBL, D=7 μ m, L=6mm)
: (좌)xy-투사평면, (우)xz-투사평면

기상조건이 불안정한 경우(표 2의 met_CBL)에 대해서 섬유길이에 따른 미세섬유입자의 확산형태를 그림 2~그림 3에 제시하였다. 그림에서 좌표계는 오른손 직각좌표계이다. x축은 풍하방향이며, y축은 풍직각방향이고, z축은 연직방향이다. 각 그림에서 좌측은 특정시점에 수평면(xy평면)에 입자위치를 투사한 것이며, 우측은 연직면(곧, xz평면)에 입자위치를 투사한 것이다. 각 그림에서 빨간색 입자는 모델링 시작 후 1초 경과한 시점의 입자이며, 녹색과 파란색은 각각 60초, 90초 경과한 시점의 입자를 표시한다. 확산

형태에서 길이에 따른 차이는 현저하게 나타나지 않는다.

기상조건이 안정한 경우(표 2의 met_SBL)에 대해서 섬유길이에 따른 미세섬유입자의 확산형태를 그림 4~그림 5에 제시하였다. 확산에 있어서 기상조건이 미치는 영향이 지대하다.

지상누적농도를 그림 6~그림 9에 제시하였다. 지상누적농도의 분포형태는 기상조건에 따라 다르다. 기상조건이 같은 경우에 지상누적농도의 분포형태는 섬유의 길이에 상관없이 유사하다. 그러나 기상조건과



[그림 4] 방출 후 1초, 60초, 90초일 때의 섬유입자 위치(기상조건 : met_SBL, $D=7\mu\text{m}$, $L=2\text{mm}$) : (좌)xy-투사평면, (우)xz-투사평면

[그림 5] 방출 후 1초, 60초, 90초일 때의 섬유입자 위치(기상조건 : met_SBL, $D=7\mu\text{m}$, $L=6\text{mm}$) : (좌)xy-투사평면, (우)xz-투사평면

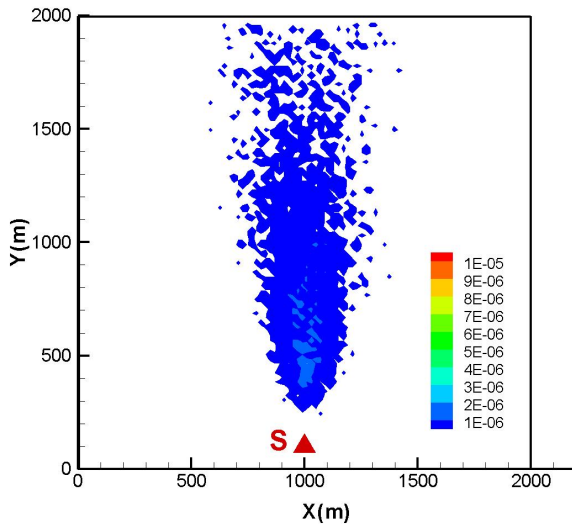
상관없이, 섬유의 길이가 길 경우($L=6\text{mm}$) 짧은 경우에 비해서($L=2\text{mm}$) 지상농도 최대위치가 초기 방출위치에 근접해지는 경향이 분명하게 나타난다.

4. 맺음말

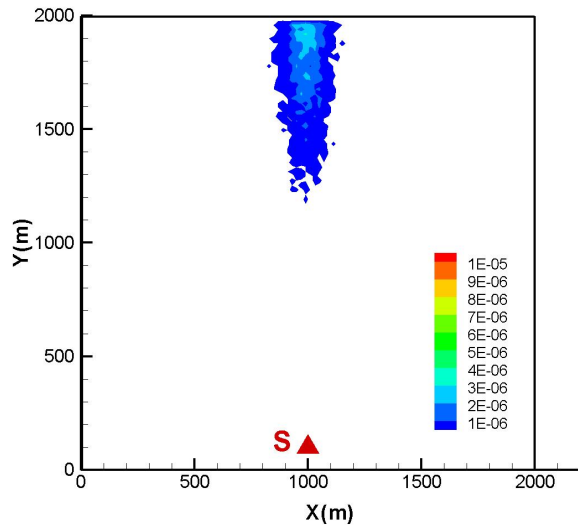
본 연구에서는 지상고도 수 km 이내에서 미세섬유가 방출되었을 때, 미세섬유의 지상농도와 착지범위를 계산할 수 있는 미세섬유 확산모델을 구현하였다.

미세섬유 확산모델은 대기확산모델과 대기경계층모델을 연계하여 구성하였다. 미세섬유 확산은 원통형 입자의 낙하 확산과정을 모델링 하였으며 기상조건이 불안정한 경우와 안정한 경우로 구분하여 사례연구를 실시하였다. 확산형태에서 길이에 따른 차이는 현저하게 나타나지 않았으나 기상조건이 미치는 영향은 지대한 것으로 나타났다.

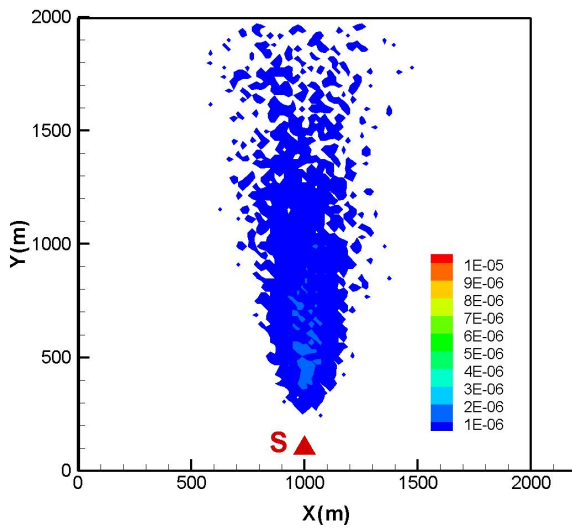
지상농도도의 분포형태는 기상조건에 따라 다르며 기상조건이 같은 경우에 지상농도도의 분포형태는 섬유의 길이에 상관없이 유사하다. 그러나 기상



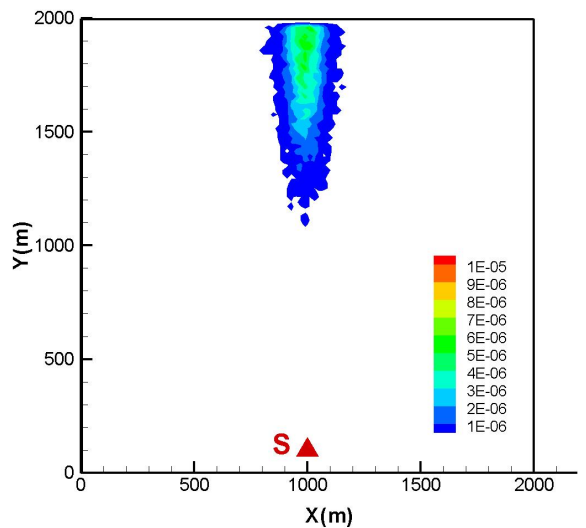
[그림 6] 지상누적농도(기상조건 : met_CBL, $D=7\mu\text{m}$, $L=2\text{mm}$, 누적농도단위 : 개 · sec/m^2)



[그림 8] 지상누적농도(기상조건 : met_SBL, $D=7\mu\text{m}$, $L=2\text{mm}$, 누적농도단위 : 개 · sec/m^2)



[그림 7] 지상누적농도(기상조건 : met_CBL, $D=7\mu\text{m}$, $L=6\text{mm}$, 누적농도단위 : 개 · sec/m^2)



[그림 9] 지상누적농도(기상조건 : met_SBL, $D=7\mu\text{m}$, $L=6\text{mm}$, 누적농도단위 : 개 · sec/m^2)

조건과 관계없이, 섬유 길이 길 경우 짧은 경우에 비하여 지상누적농도 최대위치가 초기 방출위치에 근접해지는 경향이 뚜렷함을 보여주었다.

참 고 문 헌

[1] Pocinki, L. S, L. D. Kaplan, M. E. Cornell and R. Greenstone, "Advanced Risk Assessment of the Effects of Graphite Fibers on Electronic and Electric Equipment : Final Phase I Report",

- NASA Contract Report 159027, 1979.
- [2] Pride, R. A., A. D. McHatton and K. A. Musselman, "Electronic Equipment Vulnerability to Fire-Released Carbon Fibers", NASA Technical Memorandum 80219, 1980.
- [3] Wyngaard, J. C. "Structure of PBL, in Lectures on Air Pollution Modeling", A. Venkatram and J. C. Wyngaard Eds, American Meteorological Society, Boston, MA, p. 402, 1988.
- [4] Cox, R. G., "Journal of Fluid Mechanics", Vol. 44, p. 791, 1970.
- [5] Wilson, J. D and B. L. Sawford, "Review of Lagrangian Stochastic Models for Trajectories in the Turbulent Atmosphere", Boundary Layer Meteorology 78, pp. 191~210, 1996.
- [6] Edson, J. B. and C. W. Fairall, "Spray Droplet Modeling 1. Lagrangian Model Simulation of the Turbulent Transport of Evaporating Droplets", Journal of Geophysical Research Vol. 99, No. C12, pp. 25295~25311, 1994.
- [7] Raupach, M. R. and B. J. Legg, "Turbulent Dispersion from an Elevated Line Source : Measurements of Wind-Concentration Moments and Budgets", Journal of Fluid Mechanics 136, pp. 111~137, 1983.
- [8] 김석철, "이상적인 중립 대기경계층에서 라그랑지안 단일입자 모델의 평가", 한국대기환경학회지 제 19권 제4호 No. 8, pp. 397~414, 2003.