

Experimental and Numerical Studies on Worker Exposure Model in the Booth-Type Hood

김태형¹⁾, Michael R. Flynn²⁾¹⁾창원대학교 환경공학과²⁾Dept. of Environmental Science and Engineering, Univ. of North Carolina -- Chapel Hill

I. 서론

일반적으로 유체가 물체 주위로 흐르고 있을 때, 물체 표면과의 마찰에 의해 경계층분리현상이 일어나고, 이로 인하여 물체의 풍하방향쪽에 재순환영역이 형성된다. 이 때 오염원이 재순환영역 내부에 있을 경우, 오염물질이 제대로 확산되지 못하고 재순환영역에 계속 축적되어 국지적인 고농도 대기오염현상을 초래하게 된다. 쉬운 예로서, 교통량이 많은 도로의 양쪽에 고층빌딩이 늘어서 있는 경우 자동차로 부터 배출된 일산화탄소, 탄화수소의 농도가 다른 지역에 비해 굉장히 높게 나타날 때가 많다. 이러한 경계층 분리현상에 의한 공기 오염문제는 건물 주위의 대기에서 뿐만 아니라 산업장 내에서도 자주 발생한다. 작업공정에서 발생하는 독성 공기오염물질을 포집해 주는 후드의 경우, 후드 앞에 작업자나 다른 방해물체가 전혀 없을 때에는 후드의 실제성능을 제대로 발휘하여 발생하는 오염물질을 완전히 포집해 줌으로써 오염물질이 작업장 내부로 유출되는 것을 막을 수 있다. 그러나 대부분의 경우 작업자나 피작업물체가 후드 앞에 위치하게 된다. 이 때에도 위에서 예시한 건물주위의 국지적인 고농도 현상과 비슷한 현상이 일어나게 된다. 즉, 후드로 흡인되는 공기가 작업자 주위를 흐르면서 경계층 분리현상이 발생하고, 작업자 앞에 재순환영역이 형성되어 후드로 흡인되어야 할 오염물질이 작업자쪽으로 돌아 나오게 되어 작업자가 독성오염물질에 피폭되게 된다.

본 연구에서는 작업장의 후드에서 발생하는 고농도 공기오염현상을 규명하기 위한 기초 단계로서, 공기흐름이 비교적 단순한 페인트 스프레이 부스안에서 작업자가 페인팅하고 있을 때를 연구대상으로 삼았다. 연구의 첫단계로서, 작업자의 오염피폭농도를 예측할 수 있는 Conceptual Model을 만들어 모델에 사용된 가정을 풍동내에서 검정한 후 원래의 모델을 수정했다. 풍동내에서 추적자 가스법에 의해 모델의 예측도를 실험적으로 검증했다. 두번째 접근방법으로는 수치모델중 Lagrangian Method인 Discrete Vortex Method을 이용하여 작업자와 피작업물체 주위의 공기흐름을 예측하였다.

II. Conceptual Model

작업자가 페인트 스프레이 부스안에서 바람을 등지고 곧게 서서 작업하는 상태를 단순화시켜 다음의 가정에 의해 작업자 앞에 형성된 재순환영역에서의 오염물질농도를 예측하는 개념적인 모델(Conceptual Model)을 개발하였다. 가정으로는 1) 작업자를 원기둥으로 간주한다, 2) 작업자의 풍하방향에 Vortex Formation Region이 생기며, 이 영역을 재순환영역으로 간주한다, 3) 작업자의 풍하방향에 Vortex Shedding이 발생하며, 재순환영역에 있어서 Vortex Shedding이 유일한 오염물질 제거과정이다, 4) Vortex 하나의 단면적은 Vortex Formation Region 면적의 1/2과 같다. 이 때 다음과 같은 오염농도 예측모델이 성립된다.

$$C_{st} = \frac{19Q_s}{\pi U H D} \quad (1)$$

모델의 가정을 검증하기 위해 <Fig. 1>과 같이 풍동안에 마네킹을 실제의 작업자처럼 세워놓고 Smoke-Wire Technique과 Hot-Film Anemometry를 이용하여 Vortex Shedding Frequency, Recirculation Region, Vortex Size등을 측정하였다.(Fig. 1) 이러한 측정치를 바탕으로 모델을 수정한 결과 다음 식을 얻었다.

$$C_{st} = \frac{50Q_s}{\pi U H D} \quad (2)$$

수정된 모델의 오염도 예측력을 평가하기 위해 추적자 가스법을 사용하였다. 추적가스로는 SF₆를 이용했고, SF₆의 농도는 비분산적외선법을 채용한 MIRAN-1A로 측정하였다. <Fig. 2>에서 보인바와 같이 실측농도는 예측농도와 비슷한 경향을 보였고 그 크기에 있어서 큰 차이는 보이지 않았다.

III. Numerical Model

작업자를 타원기둥, 작업자 앞의 피작업물체를 정사각기둥으로 간주하여 주위의 공기흐름을 예측하였다. 수치모델로는 Lagrangian Method의 일종인 Discrete Vortex Method를 사용했다. 이 방법은 Eulerian Method인 유한차분법과 유한요소법에서 많이 발생하는 수치점도에 의한 에러를 줄일 수 있는 장점을 갖고 있고, 흐름이 복잡한 부분에 자동적으로 상세한 계산을 할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 Vortex element간의 상호작용을 계산할 때 O(N²)의 계산이 필요하기 때문에 계산시간이 과다하다는 단점을 갖고 있다. 이러한 계산시간을 단축시키기 위해 Greengard⁽¹⁾에 의해 개발된 O(N)의 Fast Adaptive Multipole Expansion Method를 이용했다.

먼저 프로그램의 정확도를 검증하기 위하여 원기둥 주위의 공기흐름을 예측하여 Strouhal Number를 비교한 결과, 예측치 0.19, 실측치 0.21로 아주 근접한 결과를 얻었다.(<Fig. 3> 참조) 또한 원기둥 하나를 더 첨가하여 두 원기둥 사이의 거리를 변화시키면서 기류흐름과 Strouhal Number를 예측하였다. Igarashi⁽²⁾의 실험에 의해 얻은 가시화 사진과 Strouhal Number 측정치를 비교하여 아주 훌륭한 결과를 얻었다.(<Fig. 4> 참조) 이와 같이 검증된 모델을 대상문제에 적용하여 <Fig. 5>와 같은 결과를 얻었다. 오염농도를 예측하기 위하여 Turfus⁽¹⁰⁾에 의해 개발된 입자궤적법을 접목시킬 수 있는데 현재 연구 중에 있다.

참고문헌

1. Greengard L. and Rokhlin V. (1987) A fast algorithm for particle simulations. J. Comput. Phys. 73, 325-348.
2. Igarashi T. (1981) Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem. Bull. JSME, 24(188), 323-331.
3. Kim T.H. (1993) Predicted Air Flow Around Objects Using the Discrete Vortex Method, Journal of Air Pollution Research Association, Vol. 9, E, 347-357.
4. Kim T.H. and Flynn M.R. (1992) The Effect of Contaminant Source Momentum on a Worker's Breathing Zone Concentration in a Uniform Freestream. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 53(12), 757-766.
5. Kim T.H. and Flynn M.R. (1991a) Airflow pattern around a worker in a uniform freestream. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 52(7), 287-296.
6. Kim T.H. and Flynn M.R. (1991b) Modeling a worker's exposure from a hand-held source in a uniform freestream. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 52(11), 458-493.
7. Kim T.H. (1991) Modeling a Worker Exposure in a Uniform Freestream, Ph.D. Dissertation, University of North Carolina - Chapel Hill, NC, U.S.A.
8. Merony, R.N. (1990) Bluff-Body Aerodynamic Influence on Transport and Diffusion. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 33, 21-33.
9. Sethian J. A., Brunet J-P, Greenberg A., Mesirov J. P. (1990) Two-dimensional, Viscous, Incompressible Flow in Complex Geometries on a Massively Parallel Processor, PAM-504, Center for pure and applied mathematics, University of California, Berkeley, California, U.S.A.
10. Turfus C. (1988) Calculating mean concentrations for steady sources in rectangular wakes by a particle trajectory method. Atmospheric Environment 22(7), 1271-1290.

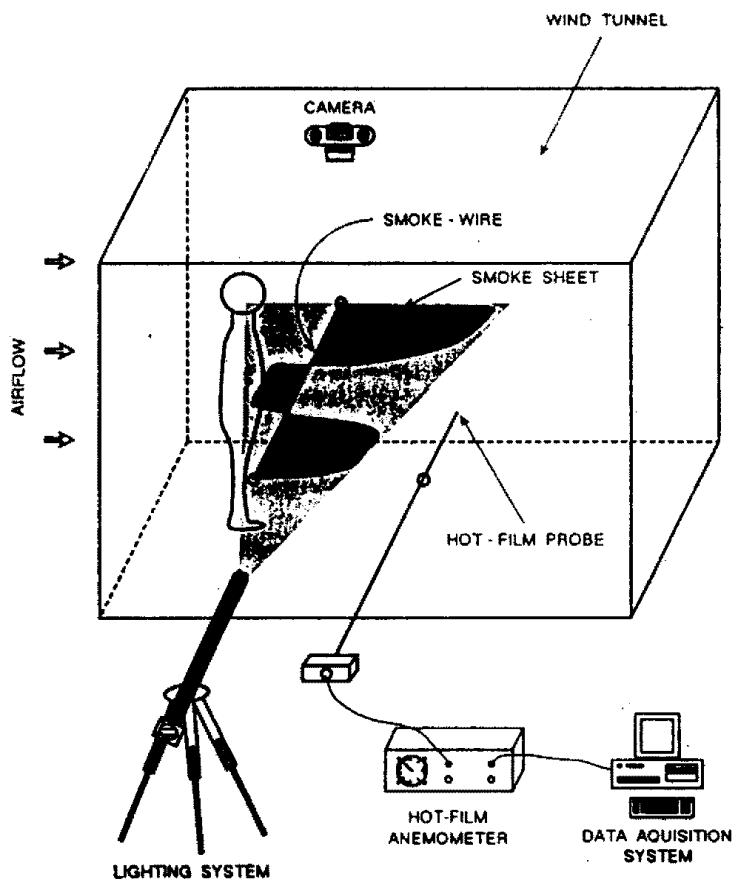


Figure 1. Schematic diagram of the experimental facility

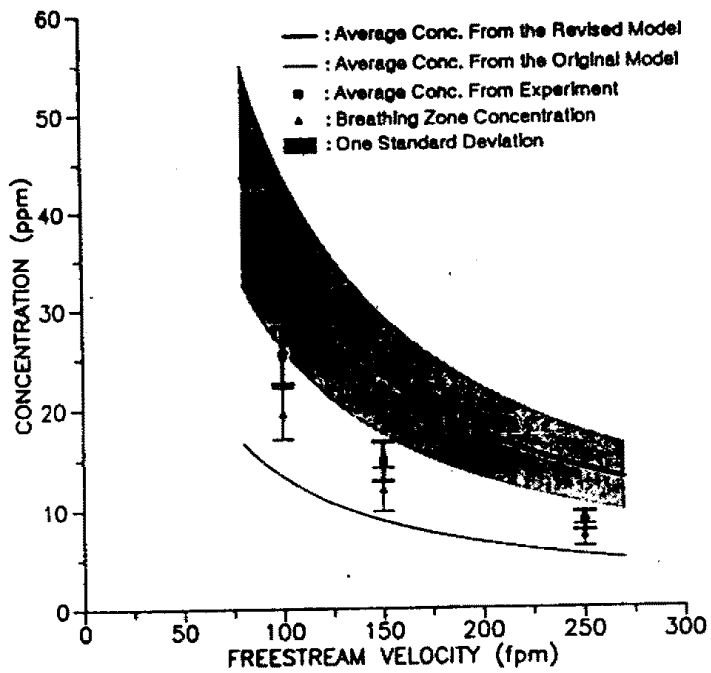


Figure 2. Comparison of measured concentration with predicted values

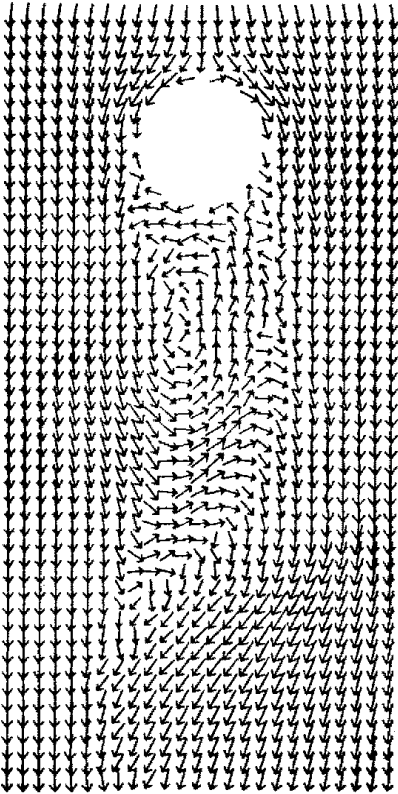


Figure 3. Air flow around a circular cylinder

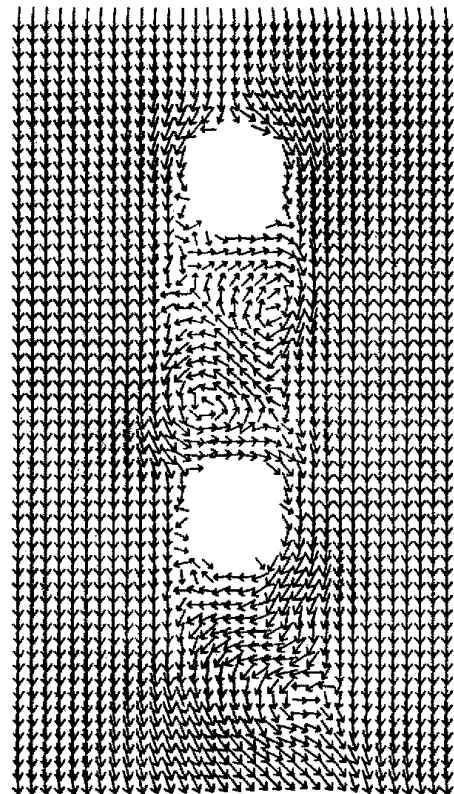


Figure 4. Flow around two circular cylinders in tandem

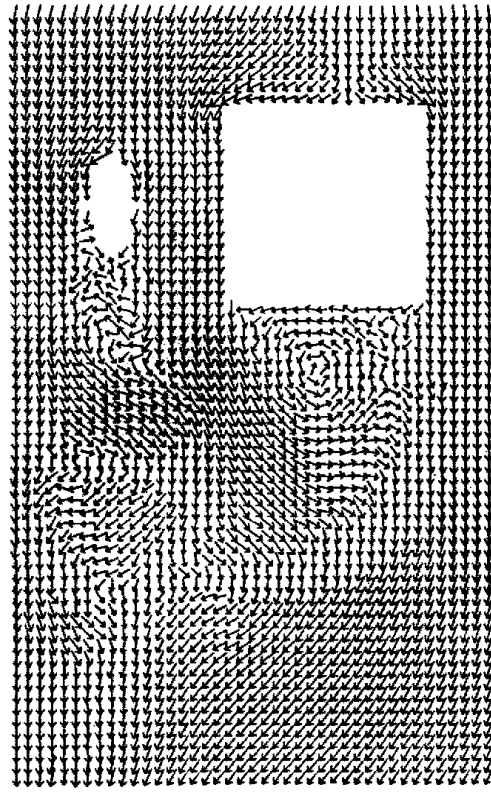
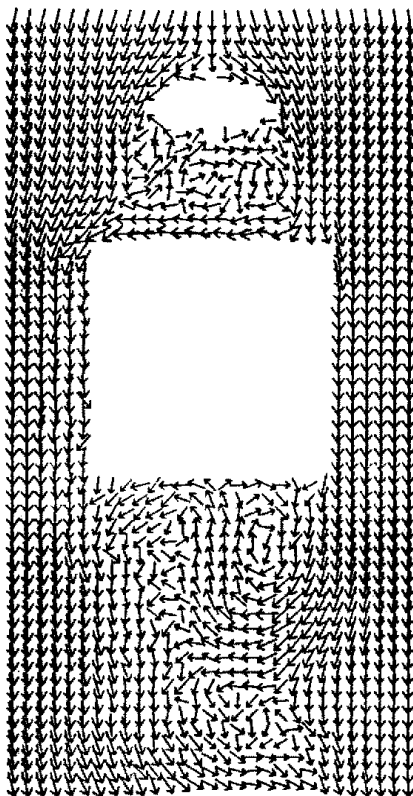


Figure 5. Air flow around an ellipse and a square