

고속도로 요금소 부스 근무환경 개선을 위한 기류해석 연구

A Study on Numerical Simulation for the Work Environment Improvement of Highway Tollgate Booth

박 성 규 · 김 신 도 · 오 명 도¹⁾

서울시립대학교 환경공학과, ¹⁾서울시립대학교 정밀기계공학과
(1999년 5월 11일 접수, 2000년 3월 21일 채택)

Seong-Kyu Park, Shin-Do Kim and Myong-Do Oh¹⁾
Department of Environmental Engineering, University of Seoul
¹⁾*Department of Mechanical Engineering, University of Seoul*
(Received 11 May 1999; accepted 21 March 2000)

Abstract

Simulation study has been carried out to analyze the air flow supplying from the heat pump system inside the tollgate booth by using the Phoenix computer simulation program. Through this simulation analysis we can find the problem of present tollgate booth in terms of air flow, and recommend an improved model, also simulate this model. Final results as follows; It was turned out that the fresh air conditioning is not provided to the worker effectively due to the improper location of inlet and outlet in the present tollgate booth, in addition to that, the air curtain system applied in the booth lowered air circulation from outside. The improved model was suggested, first, to increase the air curtain effect by downsizing the window and by installation of the air curtain suction line to reduce the induced outdoor air, second, to supply the fresh air to the worker directly by relocation of the inlet and outlet of supplying air. With these improved modifications better results have been reached in terms of air flow inside the booth. Next, through the air flow simulation of outside booth, the contaminated outdoor air has been easily infiltrating into the booth through the window because of its rectangle shape. Stream like shape of booth has been proposed through the computer simulation as an alternative shape of tollgate booth for a new design.

Key words : highway tollbooth, computer fluid dynamics, Push-pull air curtain

1. 서 론

고속도로 요금소 부스 근무자를 위한 보다 나은 근무 환경 개선안을 제시하기 위하여, 고속도로 요금소 및 그 주변 지역의 대기환경을 측정·검토하

였다. 근무자가 장기간 근무하는 부스 내부의 대기 환경적인 요소 중 가장 심각한 것으로 나타난 것은 TSP와 미세먼지의 입자상 오염물질이었으며, 가스 상오염물질 중에는 NO₂가 대기환경기준을 초과하고 있어 부스 근무자의 건강을 보호하기 위해서는 기존의 부스를 개선할 필요성이 대두되었다(김신도

등, 1999). 이에 근무자가 장시간 체류하는 버스 내부의 기류 및 오염물질의 거동을 파악하여 기존 부스의 공조시스템을 개선한 신형부스를 제안하여 버스에서 근무하는 근무자의 건강보호와 쾌적한 근무환경을 조성하고자 하였다. 따라서, 고속도로 요금소 부스의 유동을 파악하기 위해 전산유체역학 기법을 이용하여 버스 내부와 외부의 기류 시뮬레이션을 각각 수행하였고, 이에 따른 기존 부스의 문제점을 파악하고 적절한 개선모형을 제시하고자 하였다.

고속도로 요금소 버스 내부의 유동을 파악하기 위한 방법으로는 실험에 의한 방법과 수치해석에 의한 방법이 있다. 현재까지 정확한 자료를 얻기 위해서는 주로 실험적인 방법에 의존하여 왔다. 실험적 방법은 특정 시스템에서의 공기유동에 대해 비교적 정확한 관찰이 가능하나 모델이 변화되었을 때의 상황을 모사하는 데에는 한계가 있다. 또한 실제 형상을 기하학적·역학적 상사로 축소실험하는 과정에서 실제와 다른 결과를 얻게 되는데, 이는 상사에 의한 오차와 측정기계 오차를 무시할 수 없음을 나타낸다. 따라서 최근 수치해석기법이 발달함에 따라 실험적인 방법과 병행하여 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)을 이용한 예측방법이 도입되고 있다(Hoffman, 1989). 수치해석에 의한 결과도 실제 결과와 차이를 나타낼 수 있지만, 버스 내부의 물리적 거동을 정성적으로 예측하는 것은 가능하다. 또한 버스내 환경 개선을 위해 환기구의 위치나 설계방식을 변경할 경우 실험적 방법에 의한 시간적·경제적인 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

복잡한 형상을 갖는 물체주위에서의 유동현상을 예측하기 위해서는 경계밀착 좌표계를 사용하는 3차원 유동해석 프로그램이 필요하다(Nallasamy, 1987). 상용 프로그램으로 개발된 FIDAP, FLOTRAN, FLUENT, FLOW3D 및 PHOENICS 중에서 유한체적법(finite volume method)을 기초로 하는 프로그램은 FLUENT, FLOW3D, PHOENICS 등이 이러한 프로그램에 속한다. 이들 프로그램은 모두 정규 격자계(structure grid)와 비정규 격자계를 혼용하여 사용되므로 복잡한 형상을 갖는 물체의 격자생성 및 계산을 하는데 사용할 수 있다.

본 연구에서는 고속도로 요금소 부스의 유동 특성을 파악하기 위한 해석코드로서 PHOENICS (Para-

boldic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Implicit Code System)를 이용하여 (Patankar, 1980), 기존 부스내의 기류해석을 통한 문제점을 파악하고, 개선 부스에 적용하였다. 이러한 기류개선을 도모하여 버스내에서 근무자가 장시간 근무시 대기오염물질에 대한 노출을 저감시키고 쾌적한 근무환경을 조성할 수 있는 부스의 유동해석 모델을 제시하였다.

2. 해석방법

2.1 지배방정식 및 수치계산

본 연구에서는 유동장을 비정상 난류유동으로 가정하였으며, 그에 대한 연속방정식, 운동량방정식, 난류에너지방정식 및 난류에너지 소산율방정식은 다음과 같다. 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다(Lauder, Spalding, 1972).

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

운동량연속방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_u \tag{2}$$

여기서 τ_{ij} 는 Navier-Stokes 방정식의 레이놀즈 평균시 나타나는 레이놀즈 응력텐서이다.

난류에너지방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t G - \rho \epsilon \end{aligned} \tag{3}$$

난류에너지 소산율방정식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \\ + \frac{\epsilon}{k} (C_1 \mu_t G - C_2 \rho \epsilon) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}$$

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$S_u = -\frac{2}{3}(\mu + \mu_i) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

$$\mu_i G = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$$

$$C_1 = 1.45, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09$$

$$\alpha_k = 1.0, \alpha_\epsilon = 0.9$$

위 3차원 비정상 난류유동에 관한 지배방정식을 수치적으로 풀기 위하여 상용화된 코드를 사용하였다. 현재 상용화되어 주로 사용되고 있는 3차원 유동 해석프로그램 중에서 유한체적법 (finite volume method)를 기초로 한 PHOENICS를 적용하였다. PHOENICS는 완전암시기법 (fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 코드로서 속도 등의 벡터량과 압력, 온도 등의 스칼라량의 존재 위치가 서로 다른 엇갈림 격자계 (staggered grid system)를 사용한다. 또한 PHOENICS에서는 기본방정식을 이산화하는 과정에서 경계면에 수직한 플럭스 J_n (n은 경계면에 수직한 좌표를 뜻함)을 이산화방정식에서 제외시켜 사용자가 이 항을 경계면 최인접 제어체적의 이산화방정식에 생성항으로 부가하여 경계조건을 형성한다. 압력장을 얻기 위해서는 SIMPLEST (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Shortened) 방법을 사용한다. 이 방법은 이산화방정식의 대류항을 계수항으로 처리하지 않고 생성항으로 처리하여, 수렴을 가속시키고 격자간격의 감소에 따르는 수렴성의 저하를 어느 정도 막아주는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 해석영역을 활성 제어영역 (active control region)과 비활성 제어영역 (inactive control region)으로 나누고, 해석영역 이외의 제어체적을 비활성 제어영역으로 처리하였다 (Tompson *et al.*, 1985). 제어체적의 형성에 사용된 계산 격자수는 x, y 및 z방향으로 각각 43×42×47개이다. 속도에 대한 경계조건은 유입구에서 공기가 유입구에 수직방향으로 유입되고, 이때 난류량은 유입공기속도의 1%로 간주하였다. 유출구에 대한 경계조건은 일정한 압력조건을 부여하기 위하여 0 Pa로 고정하였다.

본 연구에서의 기본방정식이 비선형이므로 반복 계산에 의한 해의 수렴이 필요하다. 반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 아래에 정의된 잉여치 (Residual), R값이 조사되었으며, 각 종

속변수에 대하여 잉여치가 1×10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

$$Residual = \sum_{all \ domain} | \sum a_{nb} + b - a_p \phi_p | \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 일반변수, a는 이산화방정식의 계수, b는 생성항, 그리고 아래첨자 p와 nb는 각각 계산제어체적과 인접제어체적의 격자점을 뜻한다.

컴퓨터는 IBM PC Pentium Pro (RAM 68Mbyte)를 이용하였고, 본 연구에서 설정한 수렴조건을 만족하기 위하여 속도장의 경우 약 1,500회의 반복계산이 필요하였으며, 반복계산시 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 종속변수에 대해서 하향이완기법을 적용하였다.

2.2 기존 요금소 부스의 해석

본 연구에서 해석한 기존 부스의 체적은 그림 1과 같은 1,200 mm×2,050 mm×2,200 mm이고, 동일 크기의 급기구와 배기구에서 부스 외부에서 공조된 공기가 4.5 m/s로 급기되고, 4.0 m/s로 배기된다.

그리고, 부스 창문의 상단에 에어커튼이 설치되어 부스 내부의 공조된 공기를 4.5 m/s의 속도로 아래로 분출하여 창문으로 유입되는 오염물질을 차단하는 역할을 하고 있다. 해석시 부스 3차원 체적의 단면은 수직방향 단면 4개, 수평방향 단면 1개를 선정하였다.

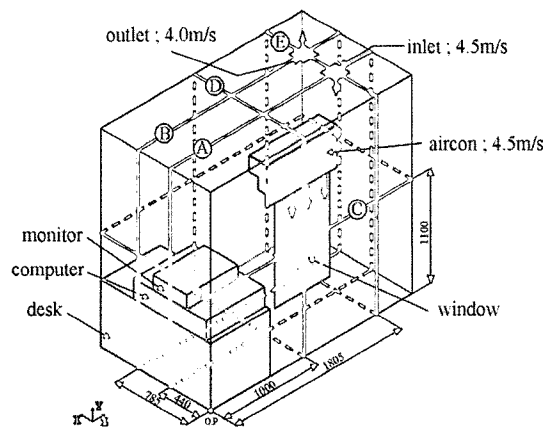


Fig. 1. Schematic of tollgate booth model and plane location of velocity distribution.

3. 요금소 부스의 해석 결과

3.1 기존 요금소 부스

먼저 기존의 요금소 부스를 기준으로 에어커튼이 작동하는 경우를 3차원 체적으로 계산하여 선정된 수직단면과 수평단면에서의 기류의 특성을 살펴 보았다.

근무자 후면 급기구 위치의 종방향 수직단면 A인 그림 2와 배기구 위치의 수직단면 B인 그림 3를 살펴보면, 급기구에서 나온 공조된 공기가 바닥까지 내려와 다시 천장에 있는 배기구로 나가는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 바닥의 먼지나 기타 오염된 물질들이 기류를 타고 재실 근무자에게 영향을

줄 수 있고, 급기구의 위치상 공조된 신선한 공기를 재실 근무자가 직접 공급받기보다는 한번 바닥을 거쳐서 온 오염된 공기를 공급받게 되어있다.

근무자 호흡위치의 수평단면 C인 그림 4는 바닥에서 $y=1,100$ mm의 높이를 갖는 $x-z$ 수평면에서의 부스 내부 기류 분포를 나타내고 있다. 창문에 설치된 에어커튼 작동의 영향으로 재실 근무자의 좌측으로 큰 재순환 영역(recirculation)이 형성되어 근무자에 영향을 주고 있으며, 근무자 후면으로도 배기구 위치에 따른 와류가 형성되었음을 알 수 있다.

부스 창문 근무자 위치의 수직단면 D인 그림 5는 $x-y$ 평면에 $z=1,000$ mm인 지점의 단면을 나타내고 있다. 에어커튼 상부에서 4.5 m/s의 속도로 공기가 분출되는 상태이고, 이 공기들을 별도로 배기

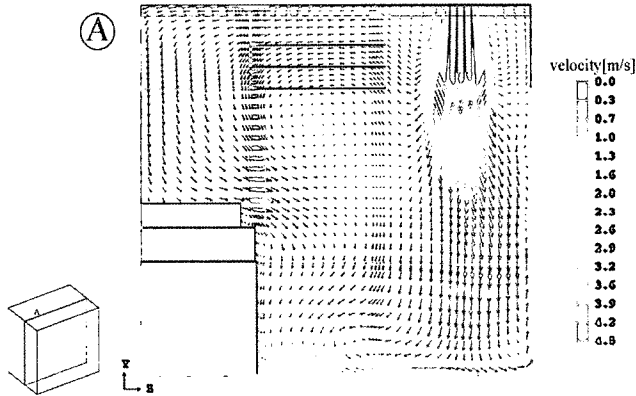


Fig. 2. Distribution of velocity vector at $y-z$ plane (A) of $x=440$ mm (aircurtain on).

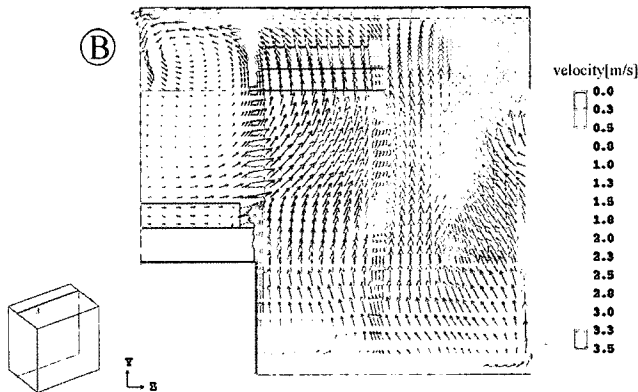


Fig. 3. Distribution of velocity vector at $y-z$ plane (B) of $x=785$ mm (aircurtain on).

되는 부분이 없기 때문에 대부분 내부로 들어오게 되므로 외부의 오염된 공기가 버스 내부로 유입될 수 있다. 또한, 2~3m/s의 높은 속도로 바닥을 지나기 때문에 바닥의 먼지가 부유할 수 있다. 따라서, 근무자가 호흡하는 수평 높이인 그림 4의 C단면과 근무자가 앉아있는 수직단면인 그림 2의 A단면을 종합해 보면, 기류 흐름이 약해지면서 정체하는 구간이 발생함을 확인할 수 있다. 전산유체역학적인 해석은 기류의 흐름을 정상상태(steady state)로 가정한 평균적인 유동으로서 이러한 기류의 정체구간 형성은 오염된 외부 공기가 유입되었을 때 재실 근무자 주위에서 재순환 정체하면서 재실자의 근무 환경에 나쁜 영향을 줄 수 있다고 판단된다.

근무자 후면 급기구 위치의 횡방향 수직단면 E인 그림 6은 x-y축 평면에 z=1,805 mm 지점의 단면이다. 급기구로 토출된 기류가 에어커튼의 영향으로 인하여 창문 쪽으로 휘어지면서 하강하고, 유동장 내부에 작은 재순환 영역을 형성하면서 상승하여 배기구로 빠져나가고 있다. 급기구와 배기구가 동일 선상(x축)에 있기 때문에 바닥에서 올라와 배기되어야 할 공기가 급기구에서의 높은 공기 유입속도로 인하여 원활히 배기 되지 못하고 앞에서 언급한 와류를 형성함을 알 수 있다.

현재 버스 내부의 재실 근무자 중 많은 사람들이 에어커튼에서의 기류를 불쾌하게 느끼므로 에어커튼을 작동시키지 않은 채 근무를 하고 있다. 따라서 에어커튼을 작동하지 않을 때 내부 기류의 변화를

에어커튼 작동할 경우와 비교하여 파악하였다.

근무자 후면 급기구 위치의 종방향 수직단면 A와 배기구 위치의 수직단면 B에서는 토출 공기가 바닥을 거쳐 상승하여 재실 근무자에게 직접적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있고, 상당히 큰 재순환 영역이 형성되어 원활한 배기가 이루어지지 않음을 보여준다. 반면 에어커튼을 작동하는 경우인 그림 2에서는 에어커튼의 영향으로 재실 근무자 부근의 공기유동이 아래로 향하고 있다. 수평단면 C에서 에어커튼 작동한 경우, 앞에서 언급한 와류의 형성이 에어커튼 무작동시에는 보이지 않는다. 그러나 전체적으로는 에어커튼 작동으로 인한 외부 공기의 유입차단효과는 미비하다고 판단된다. 버스 창문 근무자 위치의 수직단면 D에서 기류는 에어커튼이 작동하지 않으므로 재순환 와류영역이 창문쪽으로 형성되어 근무자 위치에서의 기류가 아래에서 위로 향하고 있다. 이는 바닥에서 기류를 타고 올라오는 먼지들이나 창문을 통해 들어올 수 있는 오염된 공기가 유입될 때 재실 근무자에게 더 많이 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 반면 에어커튼이 작동하는 경우인 그림 5에서의 기류는 위에서 아래로 향하고 있다. 근무자 후면 급기구 위치의 횡방향 수직단면 E에서 에어커튼의 영향이 없으므로 에어커튼 작동의 경우인 그림 6에서 관찰된 와류형성이 없이 급기구에서 바닥까지 비교적 원활한 하강 기류가 형성되고 있으나 창문쪽 하단부 모서리 부분에는 약간의 상승기류를 형성하여 반대편 상부에 있는 배

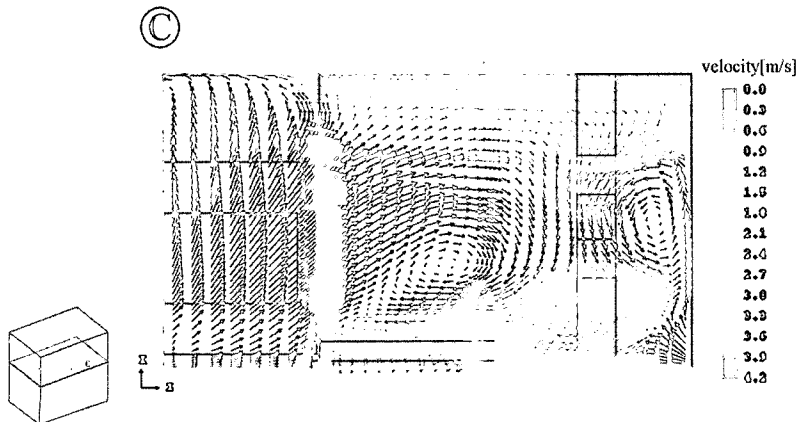


Fig. 4. Distribution of velocity vector at y-z plane (C) of y=1,100 mm (aircurtain on).

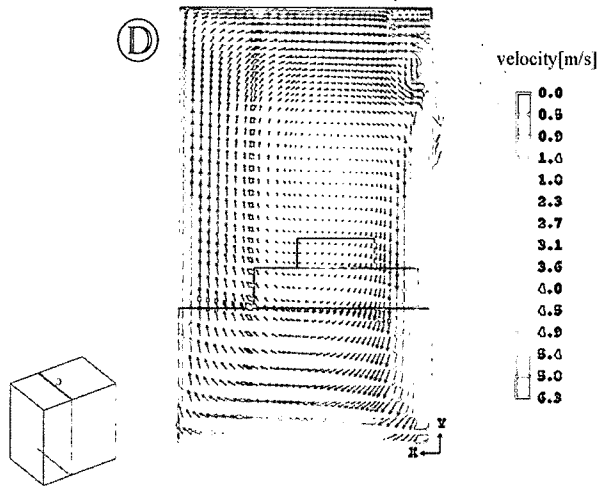


Fig. 5. Distribution of velocity vector at y-z plane (D) of y = 1,000 mm (aircurtain on).

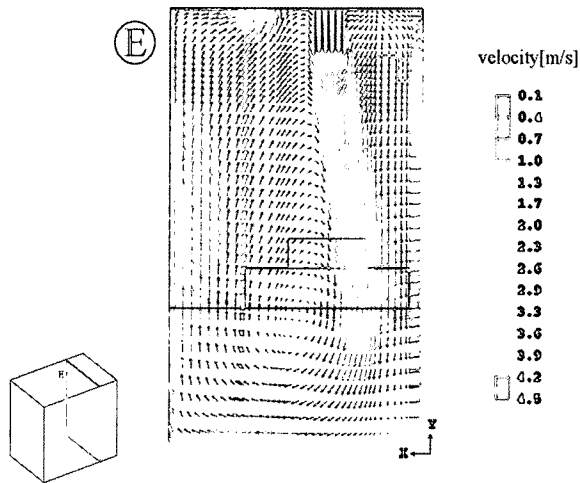


Fig. 6. Distribution of velocity vector at y-z plane (E) of y = 1,000 mm (aircurtain on).

기구로 빠져나가기 어려운 모습을 보여주고 있다. 따라서 그림 6과 마찬가지로 급기기와 배기구의 위치가 적절하지 않음을 보여주고 있다.

시뮬레이션 해석을 통하여 관찰된 기존 요금소 부스의 내부기류는 몇 가지 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다. 첫째는 급·배기구의 위치가 현실적인 측면에서 적절하지 않아 공조된 신선한 외기가 재실 근무자에게 잘 공급되지 못하고 오히려 바닥을 거쳐서 온 오염된 공기가 재실 근무자에게 많이 공급될 가능성이 있고, 배기가 효과적으로 이루

어지지 않고 있다. 둘째는 기존의 에어커튼이 외부의 오염된 공기를 차단하기보다는 오히려 유입시킬 우려가 있고, 또한 재실 근무자가 있는 위치에서 와류를 형성시켜 그 효과가 미비하게 나타났다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위한 개선모형을 종합적으로 고려해야 할 필요성이 대두되었다.

3.2 개선 요금소 부스의 해석

기존의 부스에서 새롭게 개선한 사항은 다음의 세 가지이다. 첫째는 창문의 높이를 200 mm 줄여서

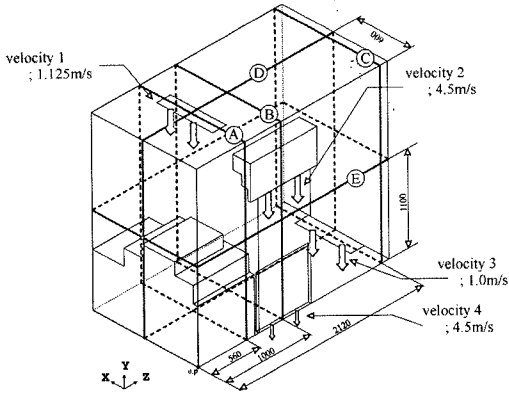


Fig. 7. Schematic of tollgate booth model and plane location of velocity distribution (improved model).

부스 외부의 대기오염물질이 내부로 유입되는 것을 최소화하였다. 둘째는 에어커튼의 오염물질 차단효과를 높이기 위해 에어커튼에서 나온 공기가 외부의 오염된 공기를 유인하여 내부로 들어오는 것을 방지하기 위해 기존의 에어커튼 방식을 창문의 밀부분에 에어커튼의 급기구와 동일한 크기의 배기부를 두는 급·배기 에어커튼(Push-pull Aircurtain) 방식으로 개선하였다. 여기서 흡입된 공기는 외부와 연결된 또 다른 배기부를 통해 외부로 방출되도록 개선하였다. 셋째는 급기구와 배기구의 위치를 변경하였는데, 그 이유는 공조되어 유입되는 신선한 공기를 재실자가 직접 호흡하게 하고, 바닥에 있는 먼지가 재비산 되는 것을 방지하기 위한 것이다. 수정

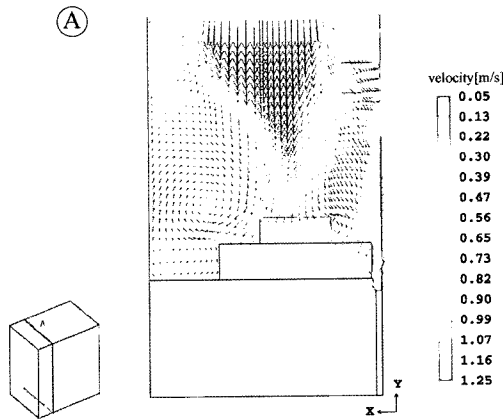


Fig. 8. Distribution of velocity vector at x-y plane (A) of y = 560 mm (improved model).

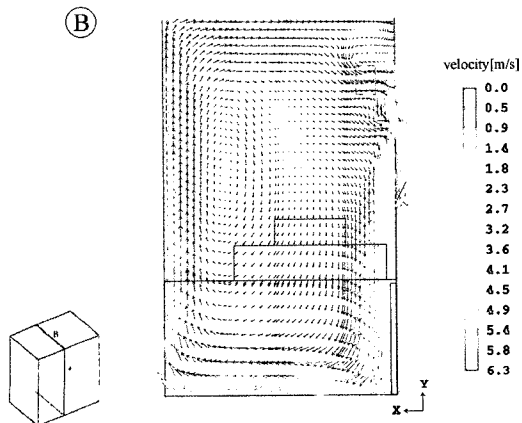


Fig. 9. Distribution of velocity vector at x-y plane (B) of z = 1,000 mm (improved model).

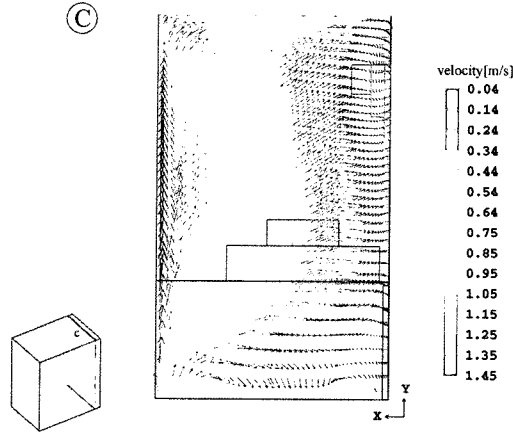


Fig. 10. Distribution of velocity vector at x-y plane (C) of z=2,120 mm (improved model).

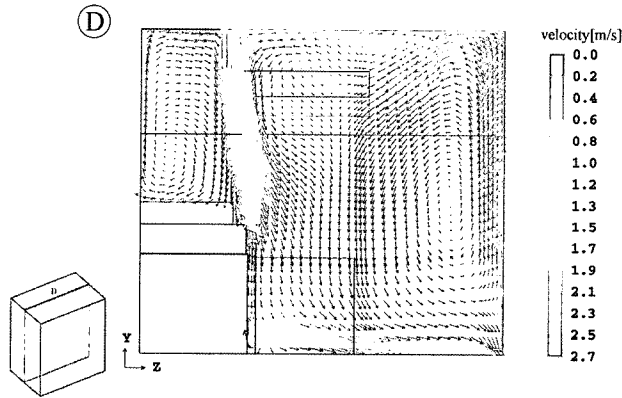


Fig. 11. Distribution of velocity vector at y-z plane (D) of x=600 mm (improved model).

된 급기구는 기존 급기구 4개를 차례로 연결한 모양으로 크기는 기존의 4배이고 위치는 천장의 z=560 mm 지점으로 이동하였다. 반면에 배기구의 크기는 급기구와 같고 위치는 바닥의 z=2,120 mm 지점으로 이동하였다. 급기구, 배기구 그리고 에어커튼에서 나오는 공기유량은 기존모형과 같고, 격자수와 계산방법도 동일하게 하였다. 개선부스에 대한 모형은 그림 7과 같다.

그림 8은 근무자 위치의 횡방향 수직단면인 x-y 평면, z=560 mm인 지점에서 급기구에서 나온 기류의 상태를 나타낸다. 개선된 급기구의 위치가 재실 근무자의 윗부분에 근접해 있으므로 급기구의 면적을 늘려 속도를 약 1/4 정도로 줄였다. 기존에 비해

근무자 위치에서 하향 기류가 잘 형성됨을 알 수 있다.

그림 9는 개선 에어커튼이 설치된 횡방향 수직단면인 x-y 평면, z=1,000 mm인 지점에서의 기류분포를 나타내고 있다. 에어커튼의 효과와 급기구 설치에 관하여 살펴보면 기존의 모형에 비해 에어커튼의 위치를 200 mm 아래로 내렸기 때문에 에어커튼에서 나온 공기의 유속이 창문의 밑 부분까지 속도가 유지됨을 볼 수 있고, 그에 따라 외부의 오염된 공기의 유입이 기존의 모형에 비해 줄어들 수 있음을 알 수 있다.

그림 10는 바닥 배기구가 설치된 횡방향 수직단면인 x-y 평면, z=2,120 mm인 지점에서 배기구로

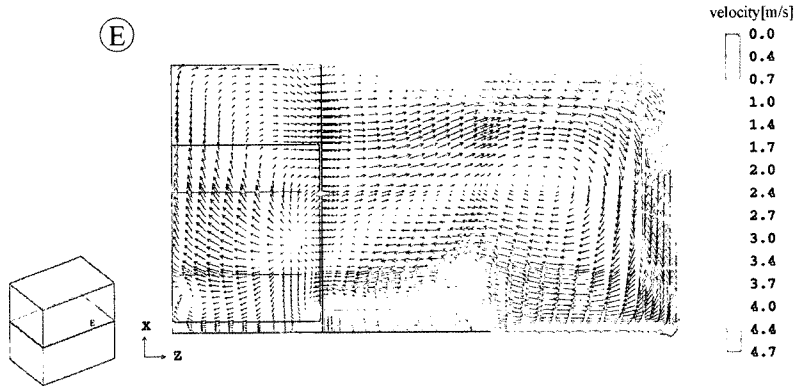


Fig. 12. Distribution of velocity vector at x-z plane (E) of y = 1,100 mm (improved model).

빠져 나가는 기류를 보여준다. 기존모형의 배기구와 비교해 보면 배기되는 공기를 방해하는 요소가 없으므로 원활한 배기가 이루어짐을 볼 수 있고, 위치상 재실 근무자와 멀리 떨어져 있기 때문에 상승하는 기류도 큰 문제가 되지 않는다고 판단된다.

그림 11은 부스 종방향 수직단면인 y-z 평면, x=600 mm인 지점의 기류분포이다. 기존의 모형에 비해 공조된 공기가 직접 재실 근무자에게 공급되는 것을 볼 수 있고, 바닥을 거쳐 바로 배기구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이는 급기기와 배기구의 위치 조정으로 인하여 부스내부의 기류 특성이 개선된 점임을 알 수 있다.

그림 12는 부스 수평단면인 x-z 평면, y=1,100 mm인 지점으로 재실 근무자의 머리 부분의 기류분포를 보여주고 있다. 기존모형의 단면과 비교해보면 재실 근무자 부근에서 재순환 영역이 없어졌음을 볼 수 있다. 이것은 에어커튼의 흡입부 설치에 따른 결과라고 판단된다.

개선 모형 시뮬레이션 결과를 통하여 급기기와 배기구의 위치 변경은 부스내 기류특성 개선에 확실한 효과가 있는 것으로 판단되었으며, 또한, 에어커튼의 흡입구 설치로 외부로부터의 오염된 공기 유입을 어느 정도 개선할 수 있었다. 그러나 앞으로 재실 근무자 환경개선을 위한 좀더 정확한 기류특성 분석을 위해서는 급기구 및 배기구의 위치 뿐 아니라 최적의 부스 크기 선정도 중요하다고 판단된다.

3.3 부스 외부의 형태에 대한 기류해석

본 연구에서는 요금소 부스 내부의 기류해석과 더불어 부스 외부에서의 기류해석을 수행하였다. 기존 요금소 부스의 모양은 위에서 보면 정확히 직사각형 모양인데 이런 이유로 바람이 부스 정면에 부딪힐 경우 면의 모서리 부근에서 바람이 부는 방향 반대로 소용돌이 현상이 생길 수 있고, 그 결과 바람에 섞여있는 오염물질이 창문을 통해 내부로 유입되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 부스 외부기류에 대한 시뮬레이션을 함으로써 기존 직사각형 부스 주위의 기류 흐름을 파악하고, 개선 부스 모형을 제시하고자 하였다.

부스 외부의 형태에 대한 수치해석을 다음과 같은 4가지 경우에 대하여 해석하였고, 기존의 요금소 부스 모형은 case1이다. 시뮬레이션에 관한 기본 정보의 계산영역은 요금소 부스의 앞쪽(z)은 3m, 뒤쪽(z)은 7m 그리고 옆쪽(x)과 위쪽(y)은 각각 5m의 공간으로 선정하였다. 그에 따른 경계조건은 z=0 mm인 지점에서 w=0.5 m/s, u=v=0m/s이고, z=0 mm인 지점을 제외하고 나머지 부분의 모든 외부 압력 경계조건은 대기압으로 두었다.

총 격자의 수는 20×22×40개로 하였으며, 외부 기류에 관한 시뮬레이션에서는 내부 시뮬레이션에서 사용한 직각 좌표계와는 다른 격자 생성방식인 경계밀착 좌표계를 사용하였다. 경계밀착 좌표계란 임의의 3차원 형상의 유동장을 해석할 경우 계산상의 모든 경계면이 좌표면과 일치시켜 일반곡선 좌표계를 기초로 도입된 좌표계이다. 3차원 비직교 형

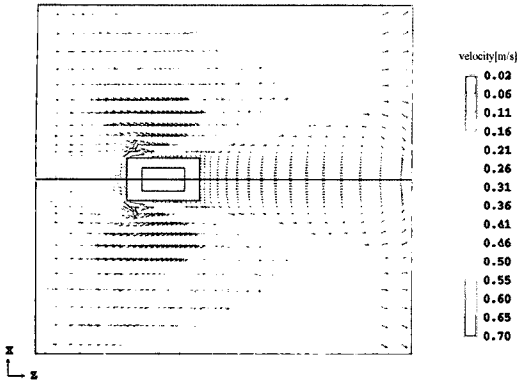


Fig. 13. Distribution of velocity vector at x-z plane of case1 (0°).

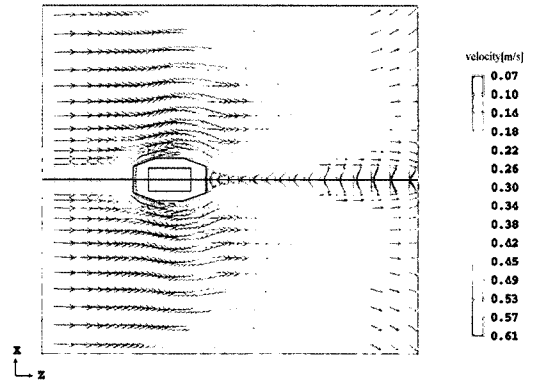


Fig. 15. Distribution of velocity vector at x-z plane of case2 (20°).

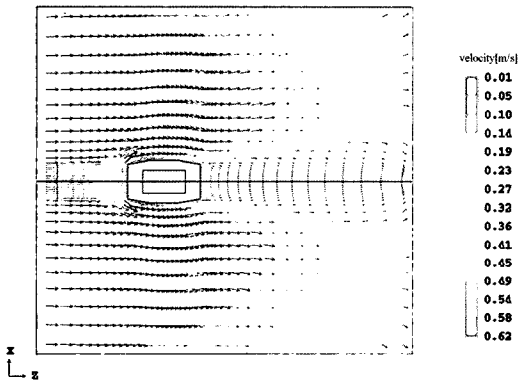


Fig. 14. Distribution of velocity vector at x-z plane of case2 (10°).

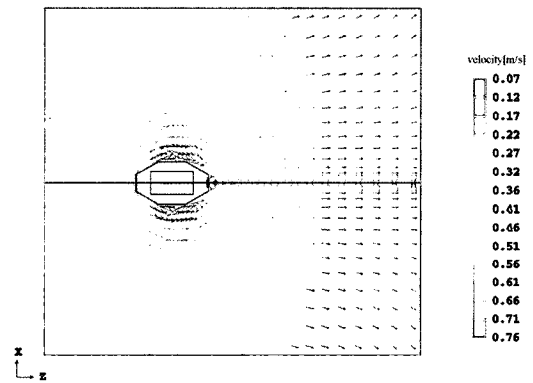


Fig. 16. Distribution of velocity vector at x-z plane of case4 (30°).

상을 가지는 요금소 부스 외부의 유동특성을 관찰하기 위하여 직교 좌표계로 표현된 보존방정식을 경계밀착 좌표계로 변환하여 사용하였다.

case 1은 현재의 요금소 부스 모형을 그림 13에 나타내었다. 현재의 모형이 그 뒷부분에 재순환 영역이 가장 넓고 정도가 심함을 알 수 있다. 또한, 모양이 유선형에 가까울수록 이러한 문제점이 감소될 수 있다고 판단된다. 그러나 유선형에 가까울수록 요금소의 유효공간 또한 줄어들다는 점에서 요금소의 모양과 유효공간에 관한 적절한 설계가 요구된다. case 2는 기존의 요금소 부스 코너 모양을 10° 각은 경우이다. 그림 14를 보면 요금소의 뒷부분에서 재순환 영역이 형성되고 여기서 재순환되는 공

기는 바닥을 거쳐서 온 오염된 공기임을 알 수 있다. case 3은 요금소 부스의 코너 모양을 20° 각도로 각은 경우이다. 그림 15를 보면 그림 14에 비해 재순환 영역의 크기가 매우 줄었음을 알 수 있다. 비록 뒷부분의 속도는 case 3의 경우에 더 빨라졌으나 재순환 영역이 매우 감소되어 case 2에 비해 case 3이 더 개선된 모양임을 확인할 수 있다. case 4는 요금소의 코너 모양을 30°로 각은 경우인데 그림 16을 보면 위의 2가지 경우에 비해 재순환 영역이 거의 보이지 않고 그 넓이도 매우 작아졌다.

따라서, 부스 외부 형태를 유선형으로 한다면 외부의 대기오염물질의 정체를 최소화 할 수 있다고 판단된다. 그러나, 단독 부스 주위의 유동과 실제 가

로 연동으로 존재할 때의 유동의 특성과 양상은 다르게 나타날 수 있다고 판단되지만, 본 연구에서는 단독 부스에 대한 해석을 통하여 부스 외부 형태에 따라 외부대기오염물질의 창문을 통한 유입이 최소화될 수 있는 조건을 파악할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속도로 요금소 부스 근무자의 근무환경개선을 위한 부스 내부와 외부의 기류 시뮬레이션을 통해 기존 부스의 문제점을 파악하고, 이를 개선한 부스 형태를 제시하였다.

내부 기류 시뮬레이션을 통해 관찰된 기존 부스의 문제점은 급·배기구의 위치가 적절하지 않아 공조된 신선한 외기가 재실 근무자에게 잘 공급되지 못하고, 오히려 바닥을 거친 오염된 공기가 재실 근무자에게 많이 공급될 우려가 있고, 배기가 효과적으로 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 그리고 에어커튼이 외부의 오염된 공기를 차단하기보다는 오히려 외부의 오염된 공기를 유입시킬 우려가 있고, 또한 재실 근무자가 있는 위치에서 와류를 형성시켜 그 효과가 나타나지 않았다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 개선부스의 조건을 파악하였다.

기존 부스의 문제들을 해결하기 위해 새롭게 개선한 사항은 첫째, 부스창문의 크기를 줄이고, 둘째, 급기구의 위치를 부스 전단 상부, 배기구를 후단 바닥부분으로 하는 공조기 위치를 변경하고, 셋째, 급·배기 에어커튼(Push-pull Aircurtain) 방식을 채택하였다. 개선 모형 시뮬레이션 결과를 통하여 급기구와 배기구의 위치 변경은 확실한 기류 개선효과를 가져왔고, 에어커튼의 흡입부 설치로 외부로부터의 오염된 공기의 유입을 차단하는 효과도 동시에 나타남을 확인하였다.

부스의 외부기류 시뮬레이션으로 기존 요금소는 그 모양이 직사각형이었을 때 창문 주변에 와류가 생성됨을 관찰할 수 있었다. 이를 개선하기 위해서 부스의 모서리를 변형하여 유선형에 가깝게 만들었을 경우는 창문 측면에서 와류의 정체가 최소화됨을 확인하였다. 변형각도가 약 20° 이상이 되었을 때, 거의 와류의 생성을 볼 수 없었으나 요금소 부스 실내 체적이 작아짐으로 근무자의 활동에 지장

이 초래되지 않도록 하면서 부스 외부 형태를 유선형화시킬 필요가 있다고 판단된다.

본 연구를 통하여 부스 외부 및 내부의 기류특성을 해석할 수 있는 시뮬레이션 기법이 구축되었고, 기존의 고속도로 요금소 부스내부에 설치된 공조시스템의 기류특성을 정량적으로 평가할 수 있게 되었다. 본 연구에서 제시된 부스 창문의 크기 축소, 공조시스템의 위치와 방식의 개선, 창문의 급·배기 에어커튼 방식의 채택 등 기존의 요금소 부스를 개선한다면, 부스 내부 근무자의 건강을 보호하고, 쾌적한 근무환경을 조성할 수 있다고 판단된다. 앞으로는 부스 내부 근무자의 재실에 따른 기류변화와 근무자의 발열에 따른 온열환경까지 고려한 기류해석을 한다면, 좀더 정확하고 정량적인 기류해석이 이루어질 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국도로공사와 공동으로 수행되었습니다. 이에 많은 도움을 주신 한국도로공사 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 김신도, 박성규, 봉춘근, 김종호, 강혜진, 이의상(1999) 고속도로 요금소 주변의 대기오염 현황에 관한 연구, 공기조화냉동공학회지, 11(3), 359-368.
- 배진효, 이재현(1996) Bi-CGSTAB 해법에 의한 복합격자망 해석방법에 관한 연구, 대한기계학회 논문집, 20(8), 2611-2625.
- 전영남, 엄태인, 조선희(1997) 빌딩주위의 자동차 배기가스의 분산에 대한 수치해석, 대한환경공학회지, 19(5), 601-610.
- 정태섭, 임익현, 김경수(1998) 도로터널의 유동해석에 관한 연구, 대한환경공학회지, 20(11), 1523-1533.
- Hoffman, K.A. (1989) Computational fluid dynamics for engineering, Engineering Education System, 1st Edition, 148-150.
- Kim, T.H. and H.C. Ha (1997) Lagrangian numerical prediction of contaminant concentration around obstacles, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 13(E), 1-10.
- Kouchi, A., R. Ohba, and K. Okabayashi (1998) Study on prediction of visible plume from wet-type cooling

- tower, *Journal of Wind Engineering*, 75, 43-48.
- Launder, B.E. and D.B. Spalding (1972) *Lectures in mathematical model of turbulence*, Academic Press, London.
- Nallasamy, M. (1987) Turbulence models and their applications to the prediction of internal flows, *computers and fluids*, 15(2), 151-194.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill, New York.
- Spalding, D.B. (1993) *Phoenics training course notes* Cham TR/300, CHAM.
- Tompson, J.F., Z.U.A. Warsi, and C.W. Mastin (1985) *Numerical grid generation : Foundations and applications*, North-Holland.