

바닥의 위치가 Vortex Vent의 배기성능에 미치는 영향

이진원, 임영복

포항공과대학교 기계공학과

Effect of the Floor on the Ventilation Performance of the Vortex Vent

Jinwon Lee, Youngbok Lim

ABSTRACT: The vortex ventilation system (VV) which uses a rotating finned swirler installed coaxially with the exhaust duct is a very effective local ventilator. VV can enhance the capture depth by a factor of 3-5 compared to the conventional exhaust hood, in the absence of any solid walls nearby. In real situations there may exist ceiling, side wall and floor, all of which can affect the flow field and suction performance by way of the no-slip condition on the walls. 3D CFD simulation was performed in order to see the effect of the floor on the capture performance of the VV. The presence of floor reduced suction flow velocity, and increased the critical rotational speed which is the rotational speed required for stable vortex formation. Flow velocity profile along the axis could be well approximated by a universal functional form when the distance from the exhaust inlet is non-dimensionalized by the distance to the floor. Capture depth, define by the distance from the exhaust inlet to a point of velocity decreased to 10% of that at the inlet, is reduced by about 10% when the floor distance is 6 times the exhaust hood diameter.

Key words: Vortex vent, swirler(스윌러), capture depth(포집깊이), floor effect(바닥영향), critical rotational speed(임계회전속도)

기 호 설 명

- u_z : 축방향 속도 [m/s]
- U_0 : 후드입구 속도 [m/s]
- z/D : 후드입구에서부터의 축방향 무차원 거리
- L/D : 바닥위치의 무차원 거리

1. 서 론

신개념 국소배기 장치인 Vortex Vent(VV)는 흡입유동 중에 강력한 와류를 형성함으로써 포집

깊이를 증대시키는 장치로서, 오염발생이 국부적으로 집중된 공장설비에서 집진시설의 규모를 증대하지 않으면서 집진성능을 크게 향상시킬 수 있다. Lee 등은 기존의 공기제트를 이용하던 방식을 벗어나 회전식 스윌러(swirler)를 이용함으로써 기존의 집진배기기술에 비하여 포집깊이를 3배 이상 획기적으로 증대시킬 수 있었다.⁽¹⁾

단순 배기 장치에서의 축방향 속도분포는 DallaValle(1933)의 이론식인 식(1)을 따르므로 축방향 속도가 z^{-2} 에 비례하여 급속히 감소하지만, 스윌러를 회전시키는 VV의 경우는 식(2)와 같이 나타나며⁽²⁾, b^{-1} 로서 z^{-1} 에 비례하여 서서히 감소한다.

† Corresponding author

Tel.: +82-54-279-2170; fax: +82-54-279-3199

E-mail address: jwlee@postech.ac.kr

$$\frac{-u_z}{U_0} = \frac{1}{1 + 40/\pi \cdot (z/D)^2} \quad (1)$$

$$\frac{-u_z}{U_0} = \frac{1}{1+a \cdot (z/D)^b} \quad (2)$$

Shtern and Hussain(1996)에 의하면 mass sink에 의해 발생하는 속도는 z^{-2} 으로 감소하고, 반면에 momentum source의해 야기되는 속도는 z^{-1} 으로 감소한다. 그러므로 VV에 의한 축방향 속도의 특성은 jet flow와 같은 momentum source에 의한 식과 같다.

이와 같은 VV의 높은 포집 성능에도 불구하고, 이제까지 연구된 VV의 특성은 모두 단순한 공간, 즉 작동하는 환경에서의 바닥의 영향을 고려하지 않기 위해 바닥이 존재하지 않거나 바닥의 위치가 배기후드에서 멀리 떨어져 있는 상황을 기술 한 것으로서, 실제적인 적용을 위해서는 바닥의 영향이 어느 정도의 위치에서 얼마나 영향을 미치는지 연구할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 바닥의 위치가 VV의 배기성능에 어떠한 영향을 미치는지를 CFD 해석 결과를 토대로 예측하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에서는 비압축성 난류 유동의 해석을 위해 유한체적법(finite volume method)를 사용한 상용 CFD 코드인 FLUENT의 비압축성 유동 모듈(pressure based solver)을 사용하였다. Fig. 1에는 계산에 사용된 3차원 모델의 개략도를 보여주고 있으며 Table 1에는 Vortex Vent의 주요 크기를 보여준다. 계산을 위한 격자는 스월러(swirler)와 바닥 근처에 조밀하게 만들고 육면체의 격자를 약 10만개 사용하였다. 격자 갯수는 그 수를 늘려가면서 계산 결과값이 변하지 않는 최소한의 크기로 정하였으며 Fig. 2는 전체 격자의 형태를 나타낸다. 수치계산에 사용된 경계 조건은 Fig. 3와 Table 2에 표시하였다.

난류유동의 수치해를 얻기 위해 식(3)의 연속 방정식과 식(4)의 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 풀었다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & \quad (4) \\ -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] & \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}) & \end{aligned}$$

식(4)에서 $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ 는 Reynolds stress를 나타내는 것으로 적합한 난류모델을 선택해서 사용해야 한다. 그래서 회전하는 유동을 풀기위해 직접적으로 Reynolds stress를 풀어내는 난류모델인 Reynolds Stress Model(RSM)을 사용하였다. 이 모델은 잘 알려진 k-ε model 보다 정확도가 더 높은 것으로 알려져 있다. 그리고 압력의 이산화 방법은 회전유동에 잘 맞는다고 알려져 있는 PRESTO model를 사용하였다. 회전유동의 계산 방법은 SRF(Single Reference Frame) method를 사용하여 정상상태 유동으로 해석하고, periodic 경계조건을 사용하여 전체 형상의 1/4만을 계산하여 리소스를 줄이는 방법을 택하였다.

VV의 배기성능이 바닥의 위치에 따라 어떻게 변화하는지를 확인하기 위해 바닥위치에 따른 유동장 해석을 위한 수치해석을 수행하였다. 그리고 VV의 성능을 결정하는 요소인 스월러의 회전수에 따른 영향도 동시에 확인하기 위해 바닥의 각 위치별 스월러의 회전수를 변화시켜 가면서 배기 성능을 함께 확인 하였다. 바닥의 위치는 배기후드 입구에서의 거리(L/D)로 정하고, 배기후드의 직경 D의 3배의 위치에서부터 33배의 위치까지 변화시켰다.

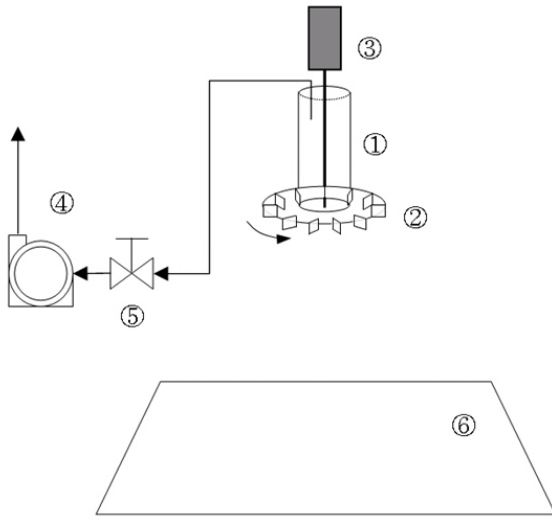


Fig. 1 Schematic of vortex vent ; ①Vortex Vent. ②Swirler ③Motor ④Blower ⑤ Blower controller ⑥Floor

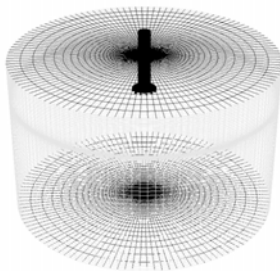


Fig. 2 Grid system of vortex vent

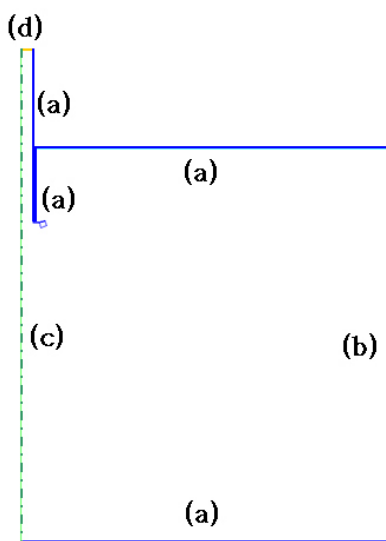


Fig. 3 Boundary conditions (a)Wall, (b)Pressure outlet, (c)Axis, (d)Velocity inlet.

Table 1 Dimension of vortex vent

Hood inlet diameter(D)	100 mm
Swirler diameter(D _s)	200 mm

Table 2 Flow boundary condition

Velocity inlet(U ₀)	-14.85 m/s
Swirler rotational speed	0-3500 rpm

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 축방향 속도 분포

국소배기장치의 성능은 축방향 속도의 크기가 배기후드에서부터의 거리에 따라 어떻게 감소하는가에 따라 큰 영향을 받는다. Fig 4는 스월러가 2500 rpm으로 회전할 때 바닥의 위치에 따른 축방향 속도분포를 나타낸 것으로 기본적으로 바닥의 위치가 배기후드로부터 멀어질수록 축방향 속도의 감소율이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 성능 곡선

스월러(swirler)형 국소배기장치인 VV의 성능은 스월러의 회전속도에 따른 포집깊이(capture depth)로 나타내는 성능곡선으로 표현할 수 있는데 수치해석 결과 Fig. 5와 같이 나타난다. 포집깊이는 축방향 속도가 배기구 입구에서의 속도의 10%(혹은 5%)가 되는 곳의 위치를 나타낸다. Fig. 5는 스월러의 회전수에 따른 축방향 속도분포를 이용해서 바닥 위치에 따른 성능곡선을 나타낸 것으로, 임계회전속도(약 2100 rpm) 이상에서는 배기구에서 바닥까지의 거리에 따라 성능이 다르게 나타난다. 임계회전속도는 VV의 유동장이 stable한 상태가 되기 시작하는 스월러의 회전수이다. 기본적으로 바닥의 위치가 배기구로 가까워지면 성능이 감소하고, 이 거리가 10D 이상일 때는 성능이 거의 일정함을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 wall에서의 no slip condition에 의해 각각의 바닥위치에서는 축방향 속도가 0으로 나

타나는데, 실제로 배기장치로서의 성능은 배기속도의 5-10 % 이상인 위치에서 나타나므로 이 부분의 data만으로 curve fitting 한 결과 식(5)와 같이 나타난다.

$$\frac{-u_z}{U_0} = \frac{1}{1+a \cdot (z/D)^b} \quad (5)$$

식(5)에서 스월러의 회전수가 2500 rpm 일 때 $a = \frac{0.68}{L/D-2.89} + 2.86$ 이고 $b = \frac{0.4}{L/D-2.19} + 1.11$ 으로 바닥의 위치(L/D)에 반비례함을 알 수 있다. Table 3은 스월러 회전수에 따른 a, b값을 나타낸다.

각각의 스월러의 회전수(2500, 3000, 3500 rpm)에서의 벽의 위치에 따른 축방향속도의 10% 범위와 5% 범위의 포집 깊이는 Fig. 6과 같이 나타나며, 바닥이 충분히 멀리 떨어져 있을 때의 포집깊이로 무차원화하면 Fig. 7과 같이 나타난다. 결과적으로 바닥의 영향은 배기구에서 6D 떨어져 있으면 매우 멀리 떨어져 있을 때 보다 포집깊이가 10% 정도 작아지고 10D 이상 떨어지면 영향이 거의 없다고 할 수 있다.

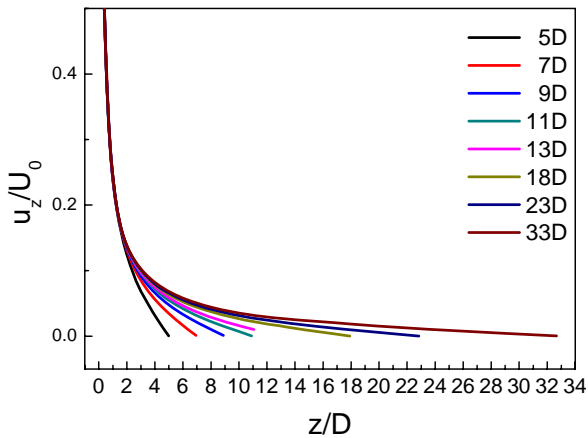


Fig. 4 Axial velocity distributions according to L/D at 2500rpm.

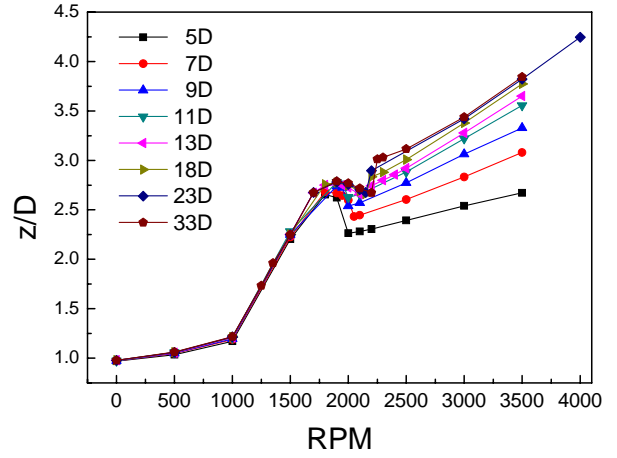


Fig. 5 Capture depth according to swirler rotational speed at various floor position.

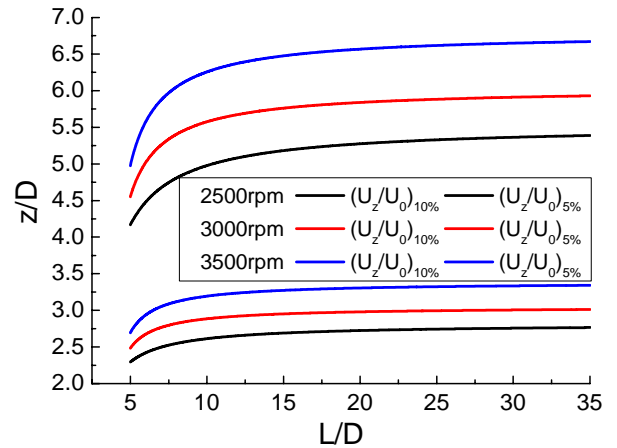


Fig. 6 Reduced capture depth (z/D) versus the distance to the floor (L/D) for three rotational speeds and two reference velocities for capture region.

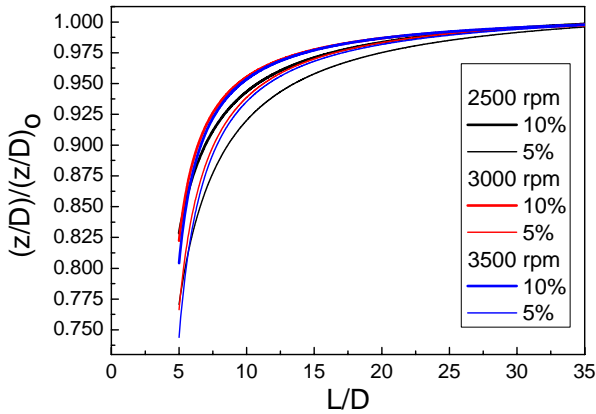


Fig. 7 Non-dimensional reduced capture depth $(z/D)/(z/D)_0$ versus the distance to the floor (L/D) for three rotational speeds and two reference velocities for capture region.

Table 3 Fitting constant according to swirler rotational speed

rpm	a			b		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
2500	2.89	0.685	2.86	2.19	0.403	1.11
3000	3.90	0.299	2.66	3.01	0.277	1.09
3500	3.99	0.262	2.43	3.21	0.259	1.07

$$a = \frac{C2}{L/D - C1} + C3, \quad b = \frac{C2}{L/D - C1} + C3$$

참고 문헌

1. Lee, S.M. and Lee, J. W., 2005, A New Local ventilation System Using a Vortex Flow Generated with the Finned Rotating Annular Disk, ASHRAE Trans., Vol. 111(1), pp. 149-158.
2. Lee, S. M. and Lee, J. W., 2006, Performance of the vortex ventilator based on capture efficiency, HAVC&R Research Vol. 12(3c), pp. 889-901.
3. DallaValle, J.M. 1933, The importance of velocity characteristics in the design of local exhaust hoods, The Journal of Industrial Hygiene, Vol. 15, pp. 18-26.
4. Shtern, V. and Hussain, F., 1996, Hysteresis in swirling jets, Journal of Fluid Mechanics, Vol 309, pp. 1-44.

4. 결 론

바닥의 위치가 VV의 배기성능에 미치는 영향을 CFD simulation을 통해 연구함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 바닥의 위치가 배기후드입구에서 떨어질수록 포집 깊이가 길어지나 10D 이상이 되면 영향이 거의 없다.

(2) 축방향 포집 속도는 바닥의 위치에 관한 함수로 표현 가능하고, 이는 바닥의 위치를 알면 포집속도와 포집 성능을 예측할 수 있음을 나타낸다.

(3) 바닥의 영향은 바닥의 위치가 배기구에서 6D 떨어져 있으면 충분히 멀리 떨어져 있을 때 보다 포집깊이가 약 10% 작아지고 10D 이상 멀어지면 영향이 거의 없다고 할 수 있다.