

국소배기장치에 의한 오염제어 및 유동특성

한 화 택
국 민 대 학 교
기 계 자 동 차 공 학 부 교 수

1. 머리말

실내에서 발생하는 오염물질을 제거하고 재실자에게 신선한 외기를 공급하기 위한 환기의 개념은 크게 전체환기와 국소환기로 나누어 생각할 수 있다.

전체환기는 일반 사무용 건물이나 주거용 건물에서와 같이 오염원의 발생위치가 고정되어 있지 않으며 불특정 오염물질이 존재하는 실내의 공기를 외기와 적절히 혼합하여 배출함으로써 실내오염물의 농도가 국부적으로 증가하는 것을 방지하는 개념으로 희석환기라고도 한다. 이에 반하여 국소환기는 오염물질이 발생하거나 유해물질을 취급하는 작업장에서와 같이 특정한 오염물질이 정해진 위치에서 발생하는 경우, 오염물질이 전체 실내공간으로 확산되어 혼합되기 전에 고농도의 오염물질을 흡인하여 외부로 배출시키는 개념으로 실내에서 발생한 오염물의 제거에 있어서 매우 효과적이라고 할 수 있다. 대부분의 작업장에서의 환기는 이와 같은 국

소환기의 개념을 이용하고 있다. 국소환기 또는 국소배기의 경우에는 희석환기의 경우와는 달리 실내의 기류분포 특히 배기구 주위의 기류분포가 오염물의 제어 및 환기 특성을 결정짓는데 매우 중요한 역할을 한다.

본고에서는 국소배기장치에 의한 오염제어의 원리를 살펴보고 배기구 주위의 유동 및 푸쉬풀형 배기장치에 의한 유동의 특성에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 국소배기방식의 분류

국소배기장치는 흡입방향, 기류발생원리, 개구면의 형상 및 후드 설치형태 등에 따라 다음과 같이 구분된다.

(1) 흡입방향에 따른 종류

배기구의 설치 방향 또는 흡입방향에 따라서 상방흡입형, 측방흡입형, 하방흡입형으로 나눌 수 있다.

(2) 국소배기(local exhaust)와 푸쉬풀(push

-pull)형 배기장치

후드에 의하여 오염물을 단순히 흡인하여 배기하는 국소배기장치와 분사기류와 흡입기류를 동시에 발생시켜서 오염물을 배기하는 푸쉬풀형 배기장치가 있다.

(3) 2차원형과 3차원형

개구면의 형상이 긴 슬롯형태로 주어지고 앞뒤가 차단되어 2차원적인 유동형태가 발생하도록 하는 2차원형 후드주위의 유동이 3차원적으로 주어지는 3차원형으로 나누어 생각할 수 있다. 일반적으로 3차원형의 경우가 3방향으로부터 기류가 흡인되므로 거리에 따른 기류속도가 급격히 감소하며 2차원형의 경우보다 불리하다.

(4) 외부부착식(external type)과 포위식(enclosure type)

오염발생원이 있는 작업 설비의 외부에 가능한 한 가까이 배기후드를 독립적으로 설치하여 오염물을 배기하는 것을 외부형 또는 외부부착식이라고 한다. 이것은 작업자의 활동에 제약이 적으나 개구면의 면적이 넓어서 오염원으로부터의 거리가 증가함에 따라 배기성능이 급격히 떨어진다. 이에 반하여 후드로써 오염발생원을 대부분 둘러싸도록 설치하여 작업을 위한 최소한의 개구면만을 확보한 것을 포위식이라고 하며 여기에는 커버형, 부스형, 챔버형 등이 있다.

(5) 레시버식(receiver type)과 포착식(capture type)

열부력에 의하여 상승하는 연기나 그라인더(grinder)에 의하여 발생하는 먼지와 같이 특정한 비산방향을 갖는 오염물질에 대하여 발생방향을 개구면으로 에워싸도록 설치하여 배기하는 것을 레시버(receiver)식이라고 하

며 대표적인 형태로 캐노피(canopy)후드가 있다. 이에 반하여 특정한 비산방향이 없이 무작위로 발생하는 오염물질에 대하여 순수한 기류의 힘으로 오염물질을 흡입하는 후드를 일반적으로 포착식 후드라고 한다.

3. 국소배기에 의한 오염제어의 원리

오염발생원으로부터 발생한 유해가스나 분진등의 오염물질을 작업자가 있는 실내공간으로 확산되기 전에 배기후드로 흡입기류를 형성하여 오염물질을 포착 배출하는 것이 국소배기에 의한 오염제어의 원리이다. 국소배기장치를 설계하고 풍량을 결정하기 위해서는 우선 오염물질의 발생특성과 배기후드주위의 공기유동 특성에 관하여 살펴보아야 한다.

오염물질이 발생할 때, 작업에 의하여 주어진 운동에너지나 주위의 난류운동에 의하여 오염물질이 비산하게 되는데 이러한 오염물질의 초기 발생속도를 비산속도라고 한다. 비산속도는 분자의 단순 확산의 경우와 같이 모든 방향으로 균일하게 주어지는 경우도 있고 도장작업이나 연마작업에서와 같이 특정한 방향으로 비산하는 경우가 있다. 오염물질이 비산하여 초기의 비산속도가 0이 되는 한계지점을 비산한계점이라 말하며 후드의 개구면에서 가장 멀리 떨어진 작업위치를 포착점이라고 한다.

이와같은 비산속도에 대항해서 오염물질을 배기기로 흡입하기 위해서는 그 지점에서의 기류속도가 비산속도 보다 커야 하는데 이때 필요한 기류의 속도를 제어속도(control

velocity) 또는 포착속도(capture velocity)라고 한다. 그림 1에서는 비산속도와 제어속도의 관계를 보여주고 있다. 유기용제 증기와 같은 가스상 물질에 대해서는 특수한 경우를 제외하면 비산속도를 거의 0으로 보고 제어속도를 계산해도 무방하나 입자상 물질에 대해서는 작업에 따라 비산속도가 다를 뿐만

아니라 입자의 크기나 비산방향에 따라 입자의 궤적이 달라지므로 가스상 물질에 비하여 큰 제어속도가 필요하다. 표 1은 오염물질의 발산초기속도와 주위의 난기류의 상태에 따른 여러 가지 오염물질 발생상황에서 필요한 제어속도를 보여주고 있다.

표 1. 오염물질 발생상황에 따른 제어속도

오염물질의 발생상황	발생 예	제어속도(m/s)
조용한 대기중에 실제로 거의 속도가 없는 상태에서 발산하는 경우	액면 증발 가스, 증기, 흙 등	0.25~0.5
비교적 조용한 대기중에 낮은 속도로 비산하는 경우	부스식 후드내의 스프레이 도장작업, 단속적으로 용기를 채우는 작업, 저속 컨베이어 작업, 용접작업, 도금작업, 산세척작업	0.5~1.0
빠른 기동이 있는 작업장소에서 활발하게 비산하는 경우	깊은 부스식 후드의 스프레이도장 작업, 자루 채우기 작업, 컨베이어에서 이동물질이 낙하하는 경우, 파쇄기	1.0~2.5
대단히 빠르게 기동하는 작업장소에서 높은 초기속도로 비산하는 경우	연마작업, 블라스트 작업, 텀블링 작업	2.5~10.0

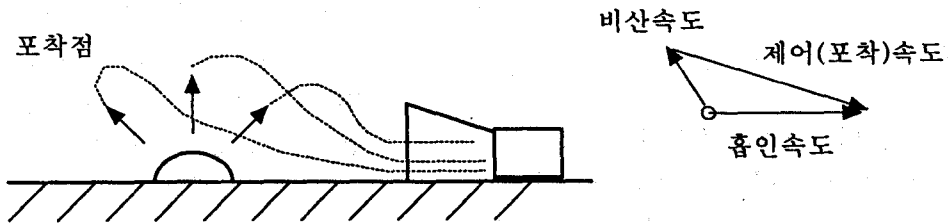


그림 1 국소배기후드에 의한 포착점과 제어속도

4. 국소배기장치 주위의 공기유동 특성

배기후드 부근의 공기유동은 점성의 영향이 그다지 중요하지 않기 때문에 비점성유동(inviscid flow)으로 생각하여 유동장을 보다 간편하게 해석할 수 있다. 비점성유동은 유체의 회전을 유발시키지 않기 때문에 비회전유동(irrotational flow)으로 생각할 수 있으며 비회전유동은 속도포텐셜(velocity potential)이 존재하기 때문에 포텐셜유동(potential flow)이라고도 한다. 비압축성유동에 대하여 연속방정식을 적용하면 이러한 속도포텐셜은 Laplace 방정식을 만족시키게 되는데 이것은 일반적으로 유체유동 방정식인 Navier-Stokes 방정식에 비하여 그 형태가 매우 단순하며 해석도 용이하다. 일반적인 Laplace 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 속도포텐셜로서 유속은 이 속도포텐셜을 미분함으로써 구할 수 있다. 이 방정식의 대표적인 특징은 선형이라는 데에 있다. 선형방정식이라는 말은 여러개의 해 즉 속도포텐셜의 중첩이 가능하다는 말이다.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots \quad (2)$$

따라서 복잡한 형태의 유동이라 할지라도 단순한 형태의 기본유동의 결과를 몇가지 중첩하여 구할 수 있다. 또한 유속도 여러가지 기본유동에 의한 유속을 단순 합산함으로써 구할 수 있다. 포텐셜유동으로 가정할 수 없는 일반적인 유체 유동에 대해서는 이러한

중첩의 원리가 성립되지 않는다.

우선 국소배기장치의 응용하기 위한 몇가지 기본 유동에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 흡입유동(sink flow)은 원천유동(source flow)의 반대개념으로 점 흡입(point sink)에 의한 유동과 선 흡입(line sink)에 의한 유동을 생각할 수 있다. 이들에 대한 속도 포텐셜이 표 2에 나타나 있다. 이 경우 등속도포텐셜은 원형으로 나타나며 유동은 흡입원천을 향하여 반경방향으로 나타난다. 또한 가장 단순한 평형 등속유동(uniform flow)과 기울어진 등속유동(oblique flow)에 대한 속도포텐셜이 표 2에 나타나 있다.

실제의 국소배기후드에서는 흡입구 주위에 플랜지나 기타의 벽면이 존재하며 주위에 등속유동이 존재하는 등 보다 복잡한 양상을 보인다. 또한 앞에서 설명한 점흡입이나 선흡입과 같은 무한소 크기의 배기구는 존재하지 않으며 유한한 크기의 개구면을 갖는다. 여기서는 앞에서 주어진 단순한 기본 유동에 대한 포텐셜을 이용하여 보다 실제 형상이 가까운 배기후드 준위에서의 유동해석과 결과의 예를 보이고자 한다.

(1) 플랜지가 있는 사각 배기구(Flanged Rectangular Inlet)

일정한 크기의 개구면을 갖는 흡입유동에 대한 속도포텐셜을 구하기 위해서는 다음의 표 2에 나타난 선흡입(또는 점흡입)유동을 유한한 크기의 흡입면에 무한개의 선흡입(또는 점흡입)이 존재하는 것으로 생각하여 적분하여 구할 수 있다. 그림 2는 유한한 크기의 개구면에 대한 플랜지가 존재하는 경우의 2차원 흡입유동에 대한 유선분포를 보여주고 있다. 여기서 $2w$ 는 개구면의 크기를 나타내

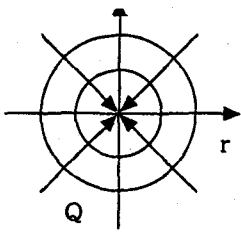
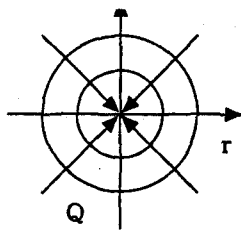
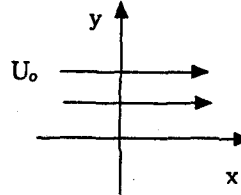
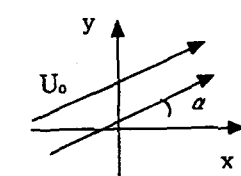
며 Q/L 은 단위 깊이당 체적유량을 나타낸다.

(2) 플랜지가 없는 사각 배기구(Unflanged Rectangular Inlet)

플랜지가 없는 경우에 대해서는 앞의 유선 함수와 속도포텐셜을 좌표변환함으로써 구할

수 있다. 그림 3은 이 경우에 대한 유선분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 플랜지가 있는 경우에 비하여 거리가 멀어짐에 따라 유속의 감소가 더욱 급격하다. 이것은 개구면 뒤쪽으로까지도 흡입유동을 발생

표 2. 기본유동에 대한 속도 포텐셜

Flow	Sketch	Velocity Potential
Point Sink		$\phi = -\frac{Q}{4\pi r}$ (Q : flow rate)
Line Sink		$\phi = -\frac{Q}{2\pi L} \ln r$ (L : depth)
Uniform Flow		$\phi = x U_0$
Oblique Flow		$\phi = x U_0 \cos \alpha$

시켜야 하므로 유동 단면적이 더욱 넓어지기 때문이다. 따라서 단순 국소배기장치의 경우 불필요한 방향으로 플랜지를 설치하여 유동

단면적을 줄여줌으로써 주어진 체적유량에 대하여 큰 제어속도를 발생시킬 수 있다.

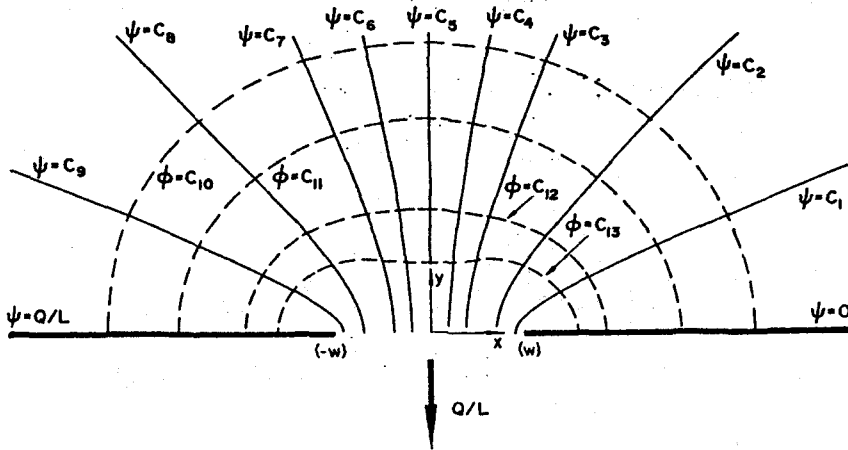


그림 2 플랜지가 있는 사각배기구 주위의 포텐셜유동

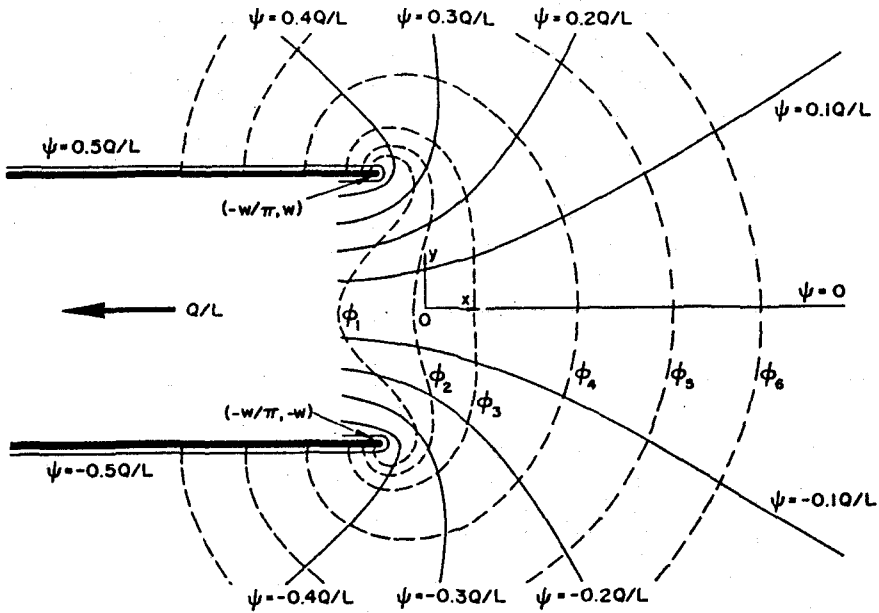


그림 3 플랜지가 없는 사각배기구 주위의 포텐셜유동

(3) 등속유동장에 놓인 배기구(Flanged Inlet in Uniform Flow)

흡입유동 주위에 일정한 크기의 평행한 등속유동이 있는 경우에 대한 유선분포가 그림 4에 나타나 있다. 이것은 앞에서 설명한 플랜지가 존재하는 경우에 대한 속도포텐셜과 등속유동에 대한 속도포텐셜을 단순 중첩함으로써 구한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 분리 유선(dividing streamline)을 경계로 바깥쪽의 기류나 오염물은 개구면으로 흡입될 수 없음을 알 수 있다. 플랜지가 없는 흡입유동이나 비스듬히 흐르는 등속유동이 중첩된 유동에 대해서도 마찬가지로 방법으로 기류분포를 구할 수 있을 것이다.

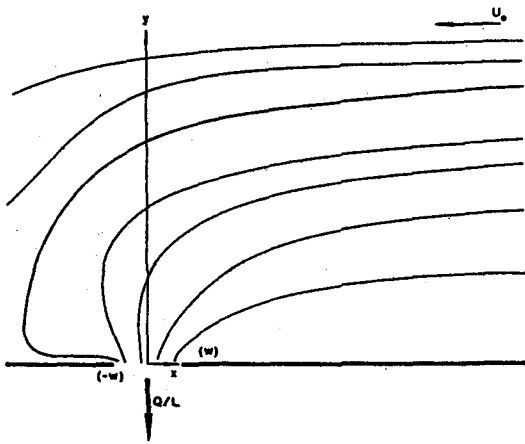
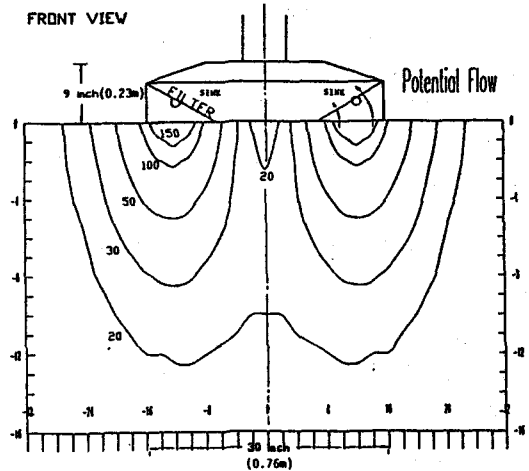


그림 4 등속유동장에 놓인 사각 배기구 주위의 포텐셜 유동

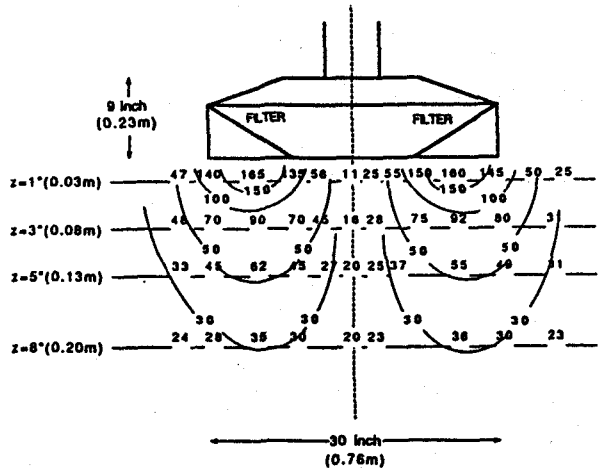
(4) 캐노피 후드(Canopy Hood)

그림 5는 전형적인 캐노피형 후드에 의한 등속도 곡선을 보여주고 있다. 이것은 양쪽에 한개씩의 점흡입원천이 있는 것으로 생각하고 뒷 벽면에 의한 거울 이미지를 고려하

여 총 4개의 흡입유동을 중첩하여 해석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 좌우대칭의 속도분포를 보이며 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다.



(a) 포텐셜유동 해석



(b) 유속측정결과

그림 5 캐노피형 후드 주위의 포텐셜 유동해석과 유속측정 결과

5. 푸쉬풀 배기장치에 의한 유동특성

지금까지 살펴본 바와 같이 배기후드 주위의 흡입기류는 개구면으로부터 멀어질수록 풍속이 급격히 감소하므로 약간만 멀어져도 오염물질을 적절히 흡입하여 배출하지 못한다. 이에 비하여 분사기류는 흡입기류와는 달리 분사되는 제트의 운동량에 의한 관성력이 그대로 유지되어 거리에 따른 유속의 감소율이 작다. 이러한 분사기류의 특징을 이용하여 취출구를 흡입구와 마주 보게 설치함으로써 흡입기류만에 의한 단점을 보완한 것이 푸쉬풀(push-pull)형 환기장치이다. 이때 분사기류는 운반자(carrier)의 역할을 수행하며 흡입기류는 수취자(receiver)의 역할을 한다.

푸쉬풀형 환기장치는 분사기류에 의하여 오염물질을 흡입구 쪽으로 밀어주어 배기성능을 높이는 데에도 쓰이지만 에어커튼과 같이 공기의 차단막을 형성하여 오염원으로부터 작업공간과 작업자를 보호하기 위한 목적으로도 사용된다. 또한 신선한 공기로 구성된 일방향 유동에 의해 작업자에게 신선한 공기를 공급하며 동시에 오염공기를 작업자에게 노출시키지 않고 배출시키는 기능을 가진 푸쉬풀형 일양류 환기장치로도 사용된다.

분사기류에 대해서는 앞에서 설명한 포텐셜코어(potential core)부분이 있고 점차 멀어질수록 제트의 속도는 점차 감소한다. 포텐셜코어까지의 거리는 개구면으로부터 직경의 약 5-10배 정도이다. 중심선을 따라서의 속도 감소율은 개구면의 단면의 형상에 따라서 다르나 개구면의 종횡비(단변/장변)가 1.0에 가까울수록 감소율이 크다. 제트단면에 대한 속도

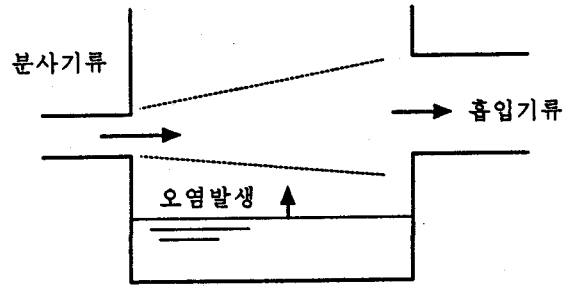


그림 6 푸쉬풀형 환기장치

여기서는 푸쉬풀형 배기장치의 주위의 전체적인 유동분포보다는 주로 분사기류 주위의 유동특성에 대해서 살펴보기로 한다. 분사기류에는 고체 벽면이 가까이 존재하지 않는 자유분사기류(free jet)와 벽면 가까이에서 분사되는 벽면분사기류(wall jet)로 나누어 생각할 수 있다.

(1) 자유제트(Free Jet)

자유제트는 벽면이 가까이 존재하지 않는 공간으로 분출되는 분사기류를 말하며 여기에는 개구면의 형상에 따라 원형제트와 3차원 사각제트, 2차원 슬롯형 제트 등이 있다. 자유제트에 대한 개략도가 그림 7에 나타나 있다. 이러한 제트기류의 중심부는 초기의 분사속도가 그대로 유지되는 포텐셜코어(potential core)부분이 있고 점차 멀어질수록 제트의 속도는 점차 감소한다. 포텐셜코어까지의 거리는 개구면으로부터 직경의 약 5-10배 정도이다. 중심선을 따라서의 속도 감소율은 개구면의 단면의 형상에 따라서 다르나 개구면의 종횡비(단변/장변)가 1.0에 가까울수록 감소율이 크다. 제트단면에 대한 속도

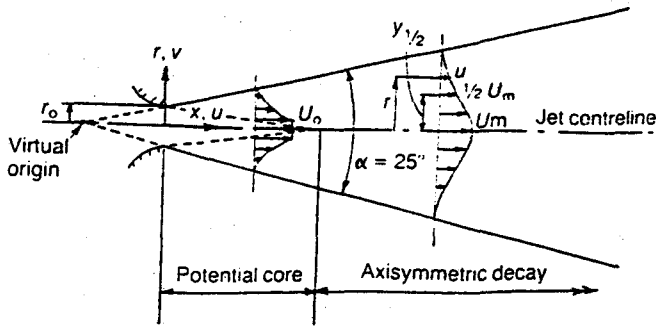


그림 7 자유제트의 개략도

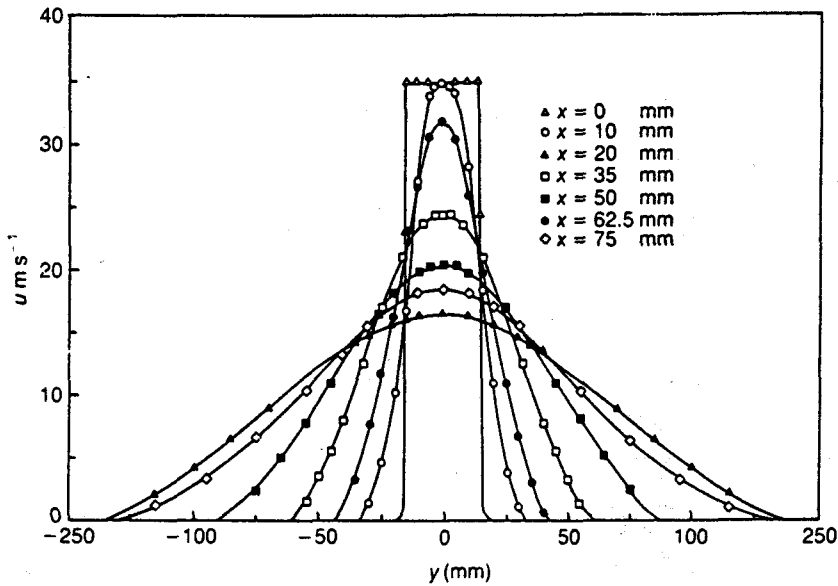


그림 8 자유제트의 유속분포

분포는 그림 8에서 보는 바와 같이 중심에서 최대의 속도를 보이며 중심에서 멀어질수록 속도가 감소한다. 분사기류는 주위의 유체를 끌어들이므로 일정한 분사각을 갖고 거리에 따라서 제트 단면적이 증가한다. 분사각은 개구면의 형상에 따라 다소 다르나 약 25-30도의 값을 갖는다.

(2) 벽면제트(Wall Jet)

벽면제트란 분사기류가 벽면에 인접하여

나란히 분출되는 것을 말하며 여기에도 개구면의 형상에 따라 3차원제트, 2차원 슬롯형 제트 등을 생각할 수 있다. 벽면 제트의 경우에도 자유제트의 경우와 마찬가지로 개구면 가까이 중심부에 포텐셜코어가 존재하며 거리가 멀어질수록 제트속도가 감소한다. 벽면제트유동은 벽면상에서는 경계층유동, 그리고 반대쪽에는 자유전단유동이 공존하는 것으로 볼 수 있다. 주어진 단면에서의 속도

분포는 벽면이 존재함으로써 비대칭 양상을 보이며 벽면 가까운 곳에서 최대속도를 보인다. 그림 10에는 단면에서의 유속분포를 보여주고 있다. 개구면으로 부터의 거리가 멀어짐에 따라서 벽면이 없는 쪽으로 일정한

분사각을 보이며 제트의 단면적이 증가한다. 분사각은 약 10-15도 정도의 값을 갖는다. 분사기류가 가까이에 있는 벽면 쪽으로 계속 부착되어 있는 것은 Coanda 효과 때문이다.

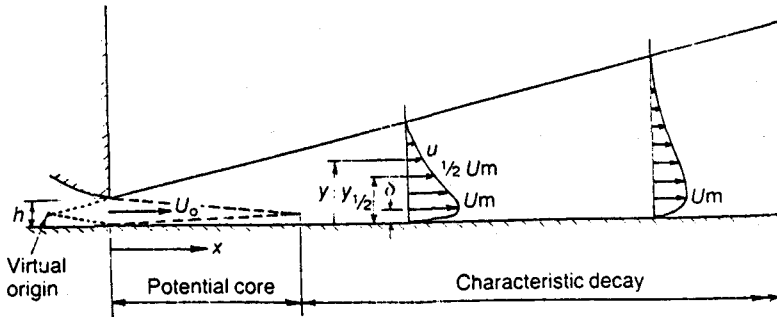


그림 9 벽면제트의 개략도

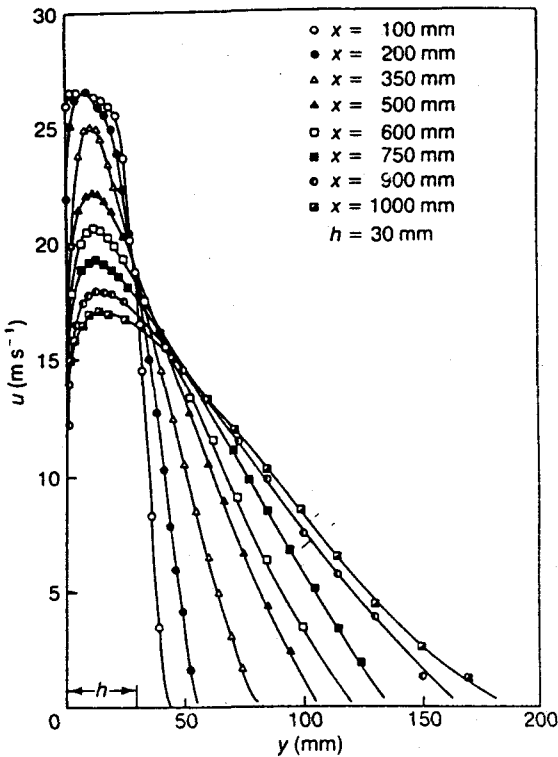


그림 10 벽면제트의 유속분포

분사기류에 대하여 개구면으로 부터의 거리에 따른 중심 최대속도의 감소상태를 그림 11에서 보여주고 있다. 개구면의 단면이 2차원 슬롯형태인 경우와 3차원 정사각형의 경우를 보여주고 있으며 흡입유동의 결과도 중첩하여 보여주고 있다. 자유제트나 벽면제트의 경우 모두 3차원 단면에 대한 속도 감소율이 2차원 슬롯 형태의 단면에 비하여 크게 나타난다.

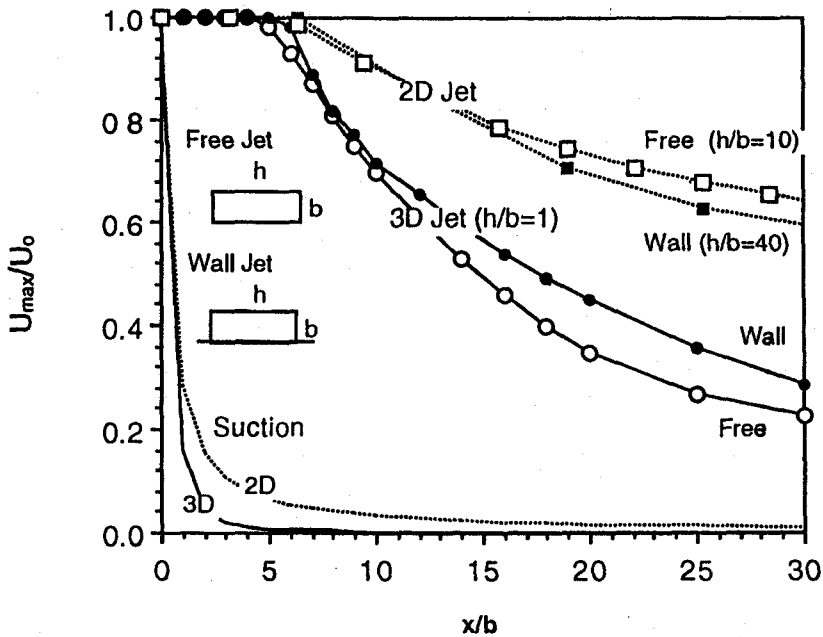


그림 11 거리에 따른 분사기류와 흡입기류의 중심속도 변화

6. 맺음말

지금까지 작업장에서 사용되고 있는 국소 배기장치 주위의 유동특성과 오염제어의 원리에 관하여 살펴보았다. 국소배기장치에 의한 오염제어에 관한 해석을 하기 위해서는 우선유동장에 대한 해석이 선행되어야 하고 주어진 유동장내에서의 오염물질의 확산 또는 궤적 등의 거동에 관한 해석이 이루어져야 한다. 배기구 주위의 유동은 유체의 관성력이 무시될 수 있으므로 포텐셜 유동의 해석에 의하여 용이하게 해석할 수 있고 중첩의 원리가 적용된다. 흡입기류는 개구면으로부터의 거리에 따라 유속이 급격히 감소하므로 오염원으로부터 가능한한 가까이 설치하여야 한다. 이에 반하여 분사기류는 유동 관

성력이 오랜 거리동안 지속되어 운반자로서의 역할을 수행한다. 그러나 분사기류가 흡입기류와 같이 존재하는 푸쉬풀 유동에 대해서는 포텐셜 유동의 해석이 불가능하다. 특히 복잡한 형상을 갖는 실제적인 국소배기장치 주위의 정확한 유동해석을 위해서는 전산 유체역학 등에 의한 유동해석이 필요하다.

작업장에서 필요한 국소배기장치를 적절히 설계하기 위해서는 이와같은 배기장치 주위의 유동특성에 대한 이해를 바탕으로 작업의 종류에 따른 오염원의 발생조건, 그리고 작업장의 난기류상태와 같은 주변환경에 대한 여러 가지 경험적 데이터를 축적하여야 한다.

-참 고 문 헌-

1. Kuehn, T.H., Ramsey, J.W., Han, H., Perkovich, M., Youssef, S., 1989, A Study of Kitchen Range Exhaust Systems, ASHRAE Trans., Vol. 95, Pt. 1, pp. 744-752, CH-89-9-2.
2. Heinsohn, R.J., 1991, Industrial Ventilation, John Wiley and Sons, New York.
3. 이승일, 천만영, 황경철, 신은상, 강병욱, 강공언, 1995, 공장환기기술, 동화기술, 서울.
4. 신기술 편집부, 1994, 공장환기, 신기술, 서울.
5. Awbi, H.B., 1991, Ventilation of Buildings, E & Fn Spon, London.
6. Hinds, W.C. 1982, Aerosol Technology, John Wiley and Sons, New York.
7. Sandberg, W., 1996, Building Ventilation, John Wiley and Sons, New York.
8. Rajaratnam, N., 1976, Turbulent Jest, Elsevier, Amsterdam.
9. Foerthmann, E., 1934, Uber turbulents Strahlausbreitung, Ing, Arch., Vol. 5, p. 42, (English Translation, NACA TM 789, 1936)
10. Brandt, A.D., 1947, 'Industrial Health Engineering', John Wiley & Sons, New York.
11. Liddament, M. W., A Guide to Energy Efficient Ventilation, Air Infiltration and Ventilation Centre, London.

뉴스

KS허가 민간 이양

앞으로 KS(한국산업규격)표시 허가주체가 국립품질기술원에서 민간으로 이관된다. 또 단체표준품질 인증제품도 KS표시제품과 마찬가지로 국가 지방자치단체 공공기관 등의 우선구매 대상에 포함된다.

행정쇄신위원회는 이같은 내용의 「산업표준화 관련제도 개선방안」을 확정, 대통령에게 건의했다고 발표했다.

개선안은 그동안 국가기관인 국립기술품질원에서 해오던 KS표시허가와 이에따른 사후관리 업무를 한국전기전자시험연구원 한국화학시험연구원 등 민간기관에 이양, KS허가제를 인증제로 전환토록 했다. 개선안은 또 단체표준을 활성화하기 위해 우수한 단체표준은 KS규격으로 전환, 적용범위를 확대하고 정부 등의 우선구매 대상에 포함시키기로 했다.

이와함께 KS제정 예고제를 도입, 규격 제정시에는 확정전 2개월이상의 사전예고를 실시해 보다 많은 이해관계자가 참여할 수 있도록 했다.