

기류 가시화기법을 이용한 방해기류 방향과 속도에 따른 푸쉬풀 후드 효율 평가

송세욱¹⁾ · 김태형 · 하현철[‡] · 강호경

창원대학교 환경공학과 · 한국산업안전공단¹⁾

Evaluation of Capture Efficiencies of Push-Pull Hood Systems by Cross Draft Directions and Velocities Using Smoke Visualization Technique

Se-Wook Song^{1)†} · Tae-Hyeung Kim · Hyun-Chul Ha · Ho-Gyung Kang

Department of Environmental Engineering Changwon National University · Korea Occupational Safety & Health Agency¹⁾

A push pull hood system is frequently applied to control contaminants evaporated from an open surface tank in recent years. Efficiency of push pull hood system is affected by various parameters, such as cross draft, vessel shapes, size of tanks surface, liquid temperature, and so on. Among these, velocity of cross draft might be one of the most influencing factor for determining the ventilation efficiency. To take account of the effect of cross draft velocities over 0.38m/s, a flow adjustment of $\pm 20\%$ should be considered into the push and +20% into the pull flow system.

Although there are many studies about the efficiency evaluation of push pull hood system based on CFDs (Computational Fluid Dynamics) and experiments, there have been no reports regarding the influence of velocities and direction of cross-draft on push-pull hood efficiency.

This study was conducted to investigate the influence of cross draft direction and velocities on the capture efficiency of the push-pull ventilation system. Smoke visualization method was used along with mock-up of push-pull hood systems to verify the ventilation efficiency by experiments.

When the cross-draft blew from the same origins of the push flows, the efficiency of the system was in its high value, but it was decreased significantly when the cross-draft came from the opposite side of push flows.

Moreover, the efficiency of the system dramatically decreased when the cross-draft of open surface tank was faster than 0.4m/s.

Key Words: Push-pull hood, Cross draft, Open surface tank, pickling and plating, smoke visualization,

I. 서 론

푸쉬풀 후드는 개방조에서 발생하는 각종 유해물질을 제거하기 위한 가장 효율

적인 환기 방법이고, 일반적인 측방형 후드에 비해 환기량을 50% 정도 줄일 수 있기 때문에 공기정화장치 용량과 보충공기량도 줄일 수 있는 장점이 있다(ACGIH,

2004). 푸쉬풀 후드는 푸쉬 노즐에서 분사된 제트가 조(tank) 표면을 따라 흐르면서 개방조에서 발생된 오염물질을 풀 후드까지 이동시키는 역할을 하고, 풀 후드에서는 푸쉬제트와 같이 이동된 오염물질이 작업장으로 확산되지 않도록 충분한 유량으로 배기시키는 역할을 한다.

푸쉬풀 후드의 효율을 극대화하기 위해

* 이 논문은 한국과학재단의 지역대학 우수과학자 육성 지원연구비 지원에 의하여 연구되었음.

접수일: 2004년 11월 6일, 채택일: 2005년 3월 3일

‡ 교신저자: 하현철 (경남 창원시 사림동 창원대학교 환경공학과

Tel : 055-279-8288, E-mail : cfdace@hanmail.net)

푸쉬노즐 설계시 푸쉬 제트의 분사각도와 액 높이 등을 고려하여 푸쉬 제트가 조 표면에서 원할한 에어커튼을 형성할 수 있도록 해야 한다(ACGIH, 2001). 그리고, 최근 개정된 미국산업환기 매뉴얼 25판에서는 푸쉬제트의 운동량을 극대화하여 푸쉬 폴 후드 효율을 향상시킬 수 있는 방법을 자세히 소개하고 있을 정도로 푸쉬폴 후드에서는 푸쉬 제트가 조 표면에서 에어 커튼을 균일하게 형성할 수 있도록 하는 것이 효율향상에 중요한 역할을 한다.

하지만 개방조 주변에 강한 방해기류가 흐를 경우에는 푸쉬제트가 조 표면을 따라 에어커튼을 형성하는데 많은 어려움을 겪게 된다. 우리나라 개방조 후드 주변의 방해기류를 측정한 연구 결과에 의하면, 계절에 관계없이 0.6m/s 이상의 빠른 방해기류가 흐르고 있는 것으로 조사되었다(송세욱 등, 2004). 도금이나 도장 작업장의 경우 좁은 공간에 여러 대의 개방조 후드를 설치하기 때문에 배기유량이 적은 푸쉬폴 후드를 설치하더라도 전체 배기량은 수백 CMM을 초과하고 있어 다량의 보충공기가 필요하지만, 현장 여건상 보충공기를 급기해 주는 곳은 많지 않다. 따라서, 대부분의 보충공기가 창문이나 출입문을 통해 급기되면서 작업장 전체에 강한 방해기류를 형성하고 있는 것으로 나타났다(송세욱 등, 2004).

푸쉬폴 후드 설계 기준을 마련한 미국 산업환기 매뉴얼에 따르면, 푸쉬폴 후드 설계시 방해기류 속도가 0.38m/s (75 ft/min) 이상이면 푸쉬 노즐의 유량은 $\pm 20\%$ 범위에서 적절하게 조절하고 폴 후드 유량은 20% 증가하도록 하고 있다. 또, 방해기류에 의한 푸쉬폴 효율 저하를 방지하기 위해 보충공기는 작업장 상부에서 공급하거나, 푸쉬 방향에서 폴 후드 방향으로 공급하도록 하고 있다.

이러한 이유는 폴 후드 방향에서 방해기류가 불 경우에 푸쉬 제트 기류와 방해기류가 부딪쳐서 조 표면에 에어커튼 형성을 방해하기 때문에 폴 후드 쪽에서 방해기류가 불지 않도록 설치하도록 하고 있다. 전산유체역학을 이용하여 방해기류 존재시 푸쉬폴 후드 설계기준을 제시

한 Rota 등(2001)은 이러한 이유 때문에 방해기류 방향은 악조건인 폴 후드에서 푸쉬 방향으로 부는 것으로 가정하였다.

하지만, 실제 현장 테스트를 실시한 Woods 등(1995)의 연구 결과에 의하면 보충공기 급기 위치를 푸쉬에서 폴 후드 방향으로 설치하더라도 보충공기 급기 유속이 너무 빠르면, 푸쉬 제트와 방해기류를 합한 유량이 폴 후드 배기 유량을 초과하여 푸쉬폴 후드 효율이 급격하게 저하되는 것으로 나타났다. 또, 푸쉬 유량에 따른 환기 효율을 평가한 기존 연구에 의하면 푸쉬 유량이 필요 이상으로 증가할 경우 환기 효율이 급격하게 저하되기 때문에 푸쉬폴 후드 효율을 향상시키기 위해서는 푸쉬 유량을 적절하게 조절할 필요가 있는 것으로 나타났다. (Mazal et al, 2002(a); Mazal et al, 2002(b); Robinson and Ingham, 2003).

이상의 연구 결과에 의하면 방해기류의 방향이 1) 폴 후드에서 푸쉬 제트 방향으로 불 경우에는, 푸쉬 제트가 에어커튼을 형성하는 것을 방해하기 때문에 효율이 저하되고 반대로, 2) 푸쉬 제트에서 폴 후드로 방해기류가 불 경우에는 폴 후드 배기량보다 많은 공기가 폴 후드로 유입되어 푸쉬폴 후드 효율이 저하될 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 방해기류 방향에 따라 푸쉬폴 후드 효율 변화를 설명한 자료는 적은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 기류 가시화 기법을 이용하여 방해기류 방향과 속도에 따라 푸쉬폴 후드 기류 변화를 관찰하고, 방해기류 변화에 따른 푸쉬폴 후드 효율 저하 원인을 밝히고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 방해기류 존재시 푸쉬폴 후드 효율을 향상시키기 위한 설계 인자 도출에 중요한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

II. 연구방법

1. 실험 장치

기류가시화 실험을 통해 방해기류 방향

및 세기에 따른 푸쉬폴 후드 효율을 평가하기 위해 Figure 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 푸쉬폴 후드와 개방조, 그리고 방해기류 형성을 위한 풍동 및 연기 발생장치로 구성되어 있다.

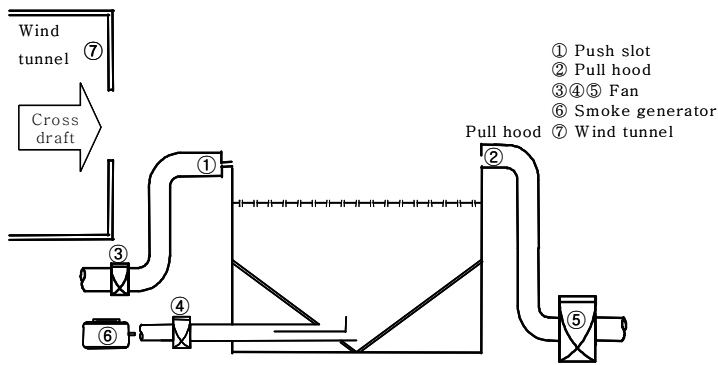
1) 푸쉬 폴 후드

본 연구를 위해 0.8m(Length)×1.2m(Width) 규격의 개방조를 제작하였고, 푸쉬폴 후드는 개방조 너비 방향으로 설치하였다. 조표면은 푸쉬-폴 후드 설계기준(ACGIH, 2004)에 제시되어 있는 최소 높이인 0.2m이내의 범위에서 자유롭게 조절할 수 있도록 하였으며, 본 실험에서는 개방조 상부에서 0.15m에 위치시켰다. Figure 2와 같이 푸쉬와 폴 후드 모두 슬롯 형태로 제작하였고, 개구면에서 균일류가 형성될 수 있도록 하기 위해 충만실(plenum)을 설치하였다. 본 연구에서는 푸쉬-폴 후드 설계 기준(ACGIH, 2004)에 따라 슬롯 높이는 푸쉬 5mm, 폴 50mm로 설치하였다. 푸쉬슬롯과 폴 후드 개구면 유속을 각각 10m/s로 유지하기 위해 송풍기 회전수를 조절하여 푸쉬 슬롯 2.2m³/min, 폴 후드 20m³/min의 유량을 공급하였다.

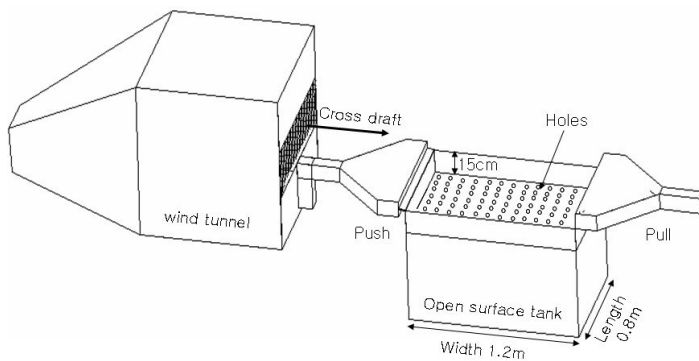
푸쉬 제트의 분사각도에 따라 푸쉬폴 후드 효율에 큰 영향을 받기 때문에 기류 가시화 방법을 이용하여 0~20° 하향범위에서 푸쉬 제트 방향을 조절하면서 가장 효율적인 분사 조건을 찾았다. 기류 가시화 결과 액 높이를 0.15m에 위치시킨 본 실험 장치에서는 하향 5° 방향으로 푸쉬 제트가 공급될 때 가장 효율적인 환기가 이루어지는 것으로 나타나, 푸쉬 제트를 하향 5°로 고정한 후 실험을 수행하였다.

2) 연기 공급 장치

기류 가시화 방법으로 방해기류 방향 및 속도에 따른 푸쉬폴 후드 효율을 평가하기 위해 Figure 1에서 보는바와 같이 조 표면에 연기 공급구(hole)를 뚫어 연기를 공급하였다. 연기 공급구는 7cm 간격의 격자 형태로 너비방향(width) 17 개 × 길이방향(length) 11 개 등 총 187개를 뚫었다. 연기는 연기발생기(ZR232/Jem, USA)를 이용하여 생성하였는데, 폴리에틸렌

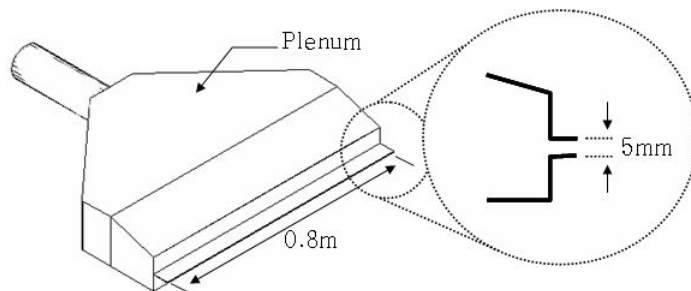


(a) Vertical plan view

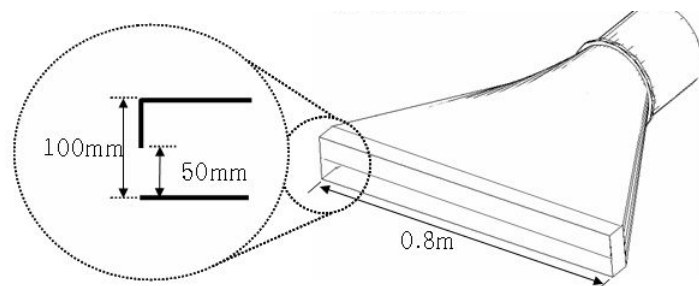


(b) Isometric view of experimental set-up

Fig 1. Schematic diagram of the push-pull hood system for experiments



(a) Push slot



(a) Pull hood

Fig 2. Schematic diagram and dimension of the push slot and pull hood

글리콜(polyethylene glycols)과 탈염수로 구성되어 있는 연막액(high density fog fluid, RP-1/RP, USA)을 공급한 후 가열하는 방법으로 연기를 생성하였다. 연기공급량은 $18\text{m}^3/\text{min}$ 까지 조절 가능한 fan을 이용하여 개방조 하부로 공급하였다. 개방조 하부로 공급된 연기가 연기공급구를 통해 균일하게 주입될 수 있도록, 개방조 하부를 충만시킬 형태로 제작하였고 추가로 충만실 내부에 guide vane과 다공판을 설치하였다. 연기 공급 속도가 너무 느리면 푸쉬노즐에서 유입된 빠른 기류에 의해 연기 공급이 원활하게 이루어지지 않아 기류를 명확하게 구분할 수 없고, 너무 빠른 속도로 연기가 공급되면 푸쉬풀 후드 효율에 큰 영향을 주기 때문에 방해기류에 의한 효과를 명확하게 구분하기 힘들게 된다.

본 연구에서는 예비 실험을 통해 0.3m/s 정도의 속도로 연기가 유입될 경우 기류 흐름도 명확하게 관찰이 가능하고, 방해기류에 따른 푸쉬풀 후드 효율도 구분이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또, 개방조 내부의 액 온도에 따른 부력을 측정해 본 결과 0.3m/s 의 속도는 액 온도가 50°C 일 경우의 부력과 비슷하였다. 푸쉬풀 후드 유량도 65°C 이하인 저온인 경우를 가정하였기 때문에 0.3m/s 의 연기 공급속도는 적절한 것으로 판단된다.

효율평가는 187개 연기 공급구 전체에 연기를 공급하는 총 효율(total efficiency)과 개방조 너비 방향(width)으로 20cm 씩 총 6개 지점으로 구분하여 각각 연기를 공급한 후 각 지점별 기류 흐름을 평가하는 라인별 효율(linear efficiency) 평가로 구분하여 수행하였다.

3) 방해기류

일정한 방해기류 하에서 푸쉬풀 후드 효율 평가를 위해서는 균일한 흐름을 가지는 풍동 내부에 푸쉬풀 시스템을 넣고 실험을 해야 한다. 하지만, $1.2\text{m}\times 0.8\text{m}$ 의 개방조와 푸쉬풀 후드 및 연기발생장치를 넣고 실험할 정도의 대규모 풍동은 제작비용이 너무 많이 소요되어 실험에 어려움이 있고, 현장 방해기류 측정 결과

대부분의 방해기류가 창문이나 출입문 등을 통해 유입되고 있는 것을 감안하여, 본 연구에서도 방해기류가 창문을 통해 유입되는 경우로 가정하고 실험장치를 구성하였다.

또, 방해기류의 방향은 ① 푸쉬풀 후드의 기류 방향인 푸쉬노즐에서 풀 후드 방향으로 부는 경우, ② 푸쉬풀 후드기류와 역방향인 풀 후드에서 푸쉬 노즐 방향으로 부는 경우, ③ 푸쉬풀 후드 기류와 직각 방향인 개방조 측면에서 조 길이 (Length) 방향으로 부는 경우 등을 고려할 수 있다. ③번인 푸쉬풀 후드기류와 직각 방향인 개방조 측면에서 방해기류가 불 경우에는 푸쉬풀 후드 효율은, 푸쉬풀 후드 기류와 방해기류의 세기뿐만 아니라 개방조의 길이(Length)에 큰 영향을 받을 수 있다. 즉, 푸쉬풀 기류보다 방해기류가 세게 불더라도 조 길이가 긴 경우에는 대부분의 기류가 풀 후드를 통해 유입될 수 있지만, 조 길이가 짧은 경우 약간의 방해기류에도 푸쉬풀 후드 효율이 급격하게 저하될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 방해기류 조건에 따른 푸쉬풀 후드 효율 변화를 알아보는 것이 목적이므로 ③번과 같이 방해기류가 개방조 측면에서 부는 경우는 고려하지 않기로 하였다.

Figure 1과 같이 방해기류는 푸쉬 노즐 (또는 풀 후드)의 개구면에서 0.7m 떨어진 거리에 0.3m(height)×1m(width)의 개구면을 가진 풍동 장치를 이용하여 발생시켰다. Figure 1은 ①번 조건과 같이 푸쉬 슬롯에서 풀 후드로 방해기류가 부는 경우를 나타낸 것이고, ②와 같이 풀 후드에서 푸쉬 슬롯으로 방해기류가 부는 경우의 실험은 풍동장치를 그대로 두고, 개방조와 푸쉬풀 후드 방향을 180°회전하여 조정하였다. 풍동은 100m³/min, 150mmAq

용량을 가진 송풍기에 연결되어 있고, 인버터(LG industrial system, Korea)를 이용하여 송풍기 회전수를 적절히 조절하여 원하는 방해기류 유속을 형성하였다.

2. 실험 방법

1) 방해 기류 유속 분포 측정

창문을 통해 바람이 유입되는 상황을 가정하기 위해 풍동을 통해 방해기류를 발생시킬 때, 풍동 토출구의 유속과 실제 개방조가 위치한 지점의 유속은 많은 차이가 있다. 또, 개방조 상부와 실제 푸쉬풀 기류가 흐르는 개방조 표면 위의 방해기류는 크게 다를 수 있다. 실제 푸쉬풀 후드 효율에 영향을 주는 것은 조 표면 주변의 방해기류 속도이기 때문에 본 연구에서는 개방조 표면 0.02m 위치에서 0.1~0.4m/s의 풍속을 유지할 수 있도록 풍동의 토출 속도를 조절하였다. 개방조 표면에서 방해기류속도를 알아보기 위해 18 지점에서 속도를 측정하였다.

2) 기류 촬영

비디오 카메라(DCR-TRV60 / SONY, Japan)를 이용하여 개방조 표면에서 발생된 연기가 방해기류 방향과 속도에 따라 풀 후드로 유입되는지 아니면 푸쉬풀 후드 기류 외부로 확산되는지를 촬영하여 푸쉬풀 후드 효율을 평가하였다. 그리고, 개방조 위치별 기류 흐름을 관찰하고, 푸쉬풀 후드 효율저하의 원인을 파악하기 위해 개방조를 6지점으로 나눠 각각 연기를 발생시킨 후 연기 흐름을 촬영하였다. 촬영된 동영상은 1/30초로 분할하여 정지된 사진으로 편집한 후 기류 흐름을 가장 명확하게 설명해 줄 수 있는 사진으로 각 조건별 기류 흐름을 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 방해기류 유속 측정 및 기류 흐름

Table 1은 풍동에서 발생된 방해기류가 개방조 상부 0.45m에서 흐르는 속도와 조 표면(개방조 상부 0.02m)에서 흐르는 속도를 측정하여 정리한 결과이다. 푸쉬풀 후드는 가동하지 않고, 방해기류 생성을 위한 풍동만 가동한 후 방해기류 풍속을 측정하였다.

개방조 상부 0.45m 지점에서는 0.4m/s의 방해기류가 불더라도 실제 개방조 표면(0.02m 상부)에서는 0.1m/s의 낮은 방해기류가 형성되었고, 개방조 상부에서 1.47m/s의 빠른 속도의 방해기류가 형성되면 조 표면에서는 약 0.37m/s의 방해기류가 형성되는 것으로 나타났다. 하지만, 조 표면의 방해기류 분포를 살펴보면 최고 0.64m/s까지 빠른 방해기류가 부는 곳도 있었다.

Figure 3은 개방조 상부에서 1.47m/s의 방해기류가 있을 때 조 표면에서의 유속 분포와 기류 흐름을 개략적으로 나타낸 것이다.

Figure 3(a)는 개방조 단면의 기류 흐름을 나타낸 것으로 풀 후드 뒤편에서 강한 방해기류가 불 때는 풀 후드 전단에 Recirculation 현상이 발생하여 방해기류가 조 표면으로 하강하는 것으로 나타났다. 이 Recirculation 기류에 의해 강한 방해기류가 개방조 표면으로 하강할 경우에 푸쉬풀 후드 기류에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 방해기류 속도가 1.47 m/s일 때 개방조 표면 중앙부의 기류 속도는 0.4m/s를 초과하고, 푸쉬 노즐 쪽에서는 0.7m/s의 빠른 방해기류가 형성되는 것을 알 수 있었다.

Table 1. Cross draft velocity of 0.45m and 0.02m above the tank surface

Cross draft velocity of 0.45m above the tank surface	Cross draft velocity of 0.02m above the tank surface
0.40 m/s	0.10 ± 0.05 m/s
0.75 m/s	0.18 ± 0.16 m/s
1.05 m/s	0.29 ± 0.28 m/s
1.47 m/s	0.37 ± 0.27 m/s

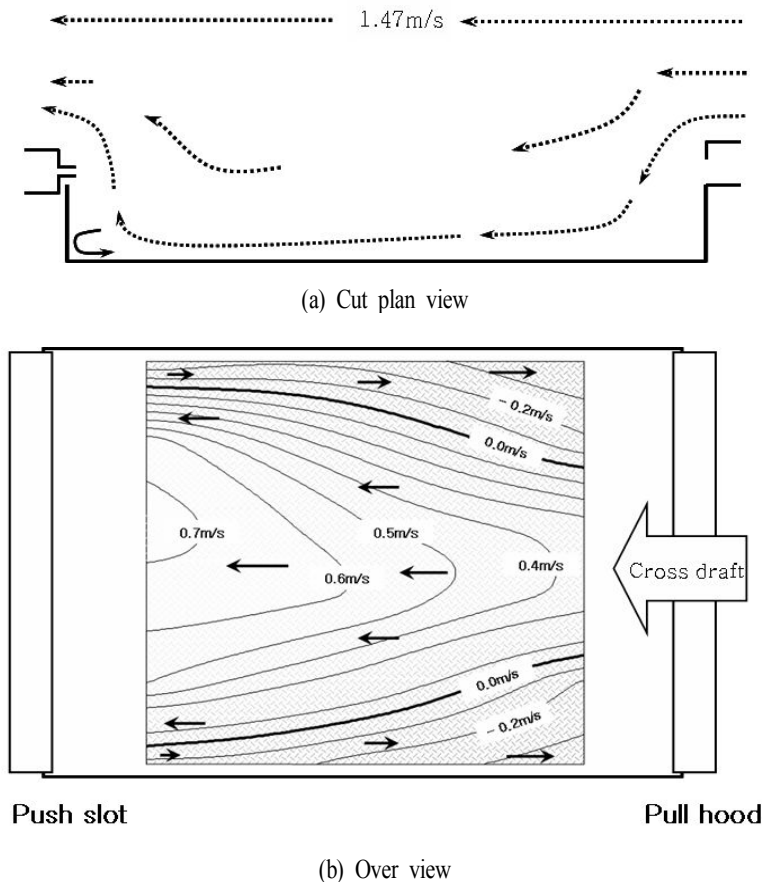


Fig 3. Distribution of flow patterns and velocity fields

또 Figure 3(b)는 개방조 표면의 유속 및 기류 흐름을 정리한 것으로, 개방조 중앙 부에서 빠른 속도의 기류 흐름이 방해기류와 같은 풀 후드에서 푸쉬 노즐 방향으로 형성되어 있다. 하지만, 개방조 측벽에는 방해기류와 반대인 푸쉬 노즐에서 풀 후드 방향으로 기류가 흐르는 것을 알 수 있다. 이러한 기류 흐름은 개방조 중앙 표면을 따라 흐르던 강한 방해기류가 푸쉬 슬롯에 부딪히면서 방해기류와 반대의 흐름을 형성시킨 것으로 판단된다.

2. 방해기류가 없을 때 기류 흐름

Figure 4는 방해기류가 분지 않는 상태에서 187개 연기 공급구에서 연기를 공급했을 때 푸쉬풀 후드 가동시 기류 가시화 결과를 정리한 것이다.

Figure 4(b)는 기류가시화 결과를 간단하게 그림으로 설명한 것으로, Mazal 등

(2003)의 연구와 유사하게 개방조 액 표면에서 4가지 기류 형태를 보여주고 있다. ①은 semifree flow 지역으로 푸쉬 노즐에서 분산된 제트가 "Coanda effect"에 의해서 액 바닥면으로 이동을 한 후 노즐 방향으로 재순환되기 때문에, 바닥면에서 발생된 연기는 강한 와류를 형성하면서 ① 영역내에서 재순환하게 된다. ②는 푸쉬 제트가 액 바닥면을 치는 impact zone으로 바닥면에서 발생된 연기가 풀 후드 방향으로 이동을 하게 된다. ③지역은 wall jet reorganization zone으로 ②의 impact zone에서 바닥에 부딪힌 푸쉬제트가 상승하는 지역이다. ④는 wall jet zone으로 ③ wall jet reorganization zone에서 상승된 푸쉬제트가 풀 후드의 영향에 의해 액 표면을 따라 흐르는 영역이다.

일반적인 푸쉬풀 후드는 이상 설명한 4가지 기류 흐름을 가지고 흐르는데, 방해기류가 없는 조건에서는 푸쉬 제트의 방향과 속도에 따른 기류 흐름이 나타나는 영역에서 약간의 차이가 있을 수 있다. 방해기류가 없는 조건에서 연기를 발생시킨 결과 대부분의 연기가 원활한 기류 흐름을 형성하면서 풀 후드로 배기되는 것으로 관찰되었다.

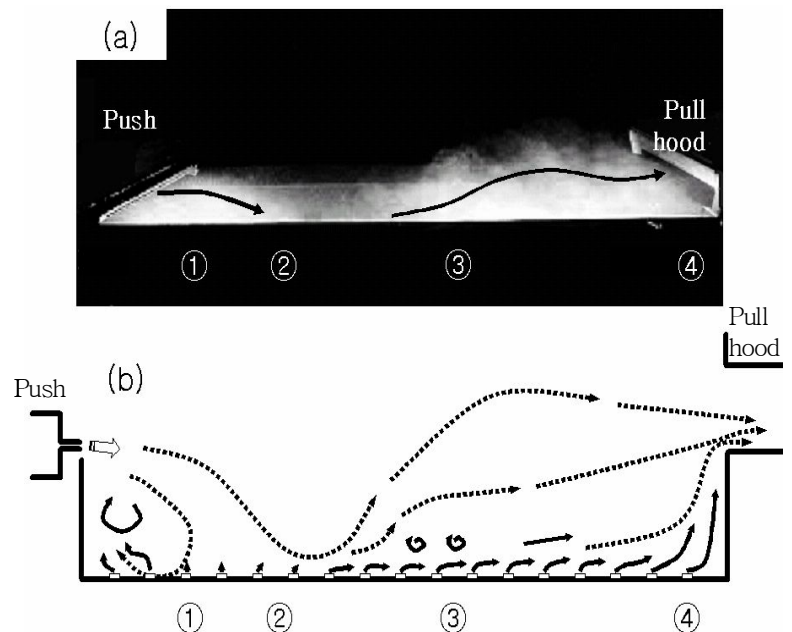


Fig 4. Flow visualization(a) and Schematic flow patterns (b) of push-pull system with no cross-draft

3. 방해기류 방향 및 속도에 따른 기류 흐름

Figure 5는 방해기류의 방향과 유속에

따른 푸쉬풀 후드의 기류 가시화 결과를 정리한 것이다. 방해기류 방향이 푸쉬노즐에서 풀 후드로 불 경우에는 방해기류 속도가 증가하더라도 연기가 크게 확산되

지 않은 것으로 나타났다. 1.47m/s의 빠른 방해기류가 푸쉬노즐에서 풀 후드로 불 경우에 풀 후드 상부에 일부 연기가 확산 되는 것으로 나타났지만, 전체적인 연기

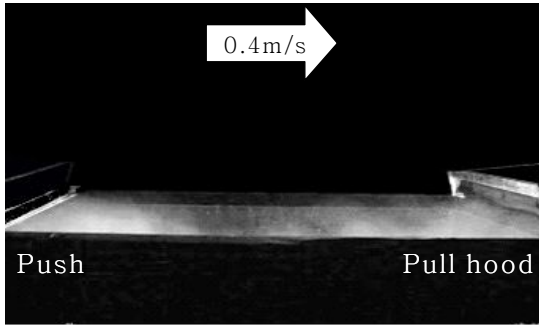
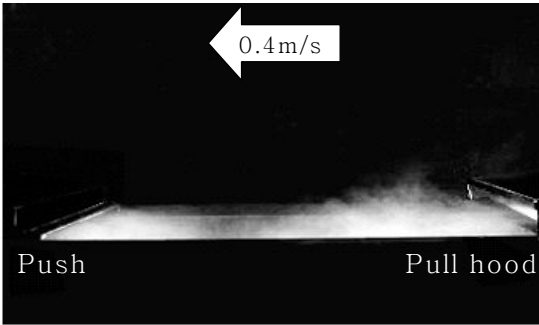
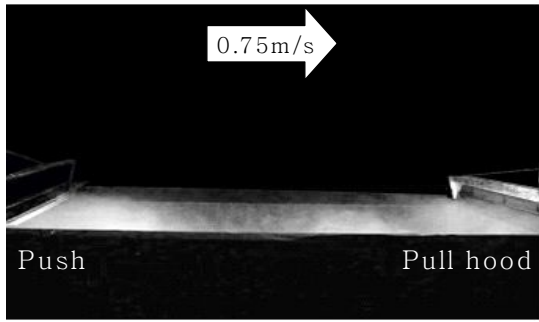
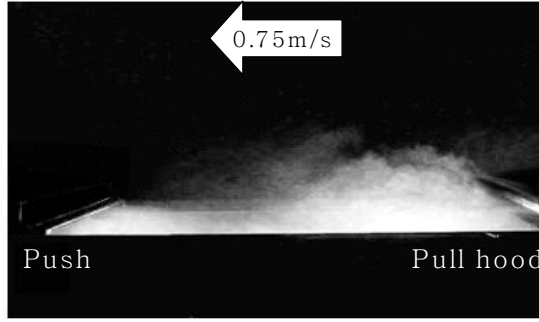
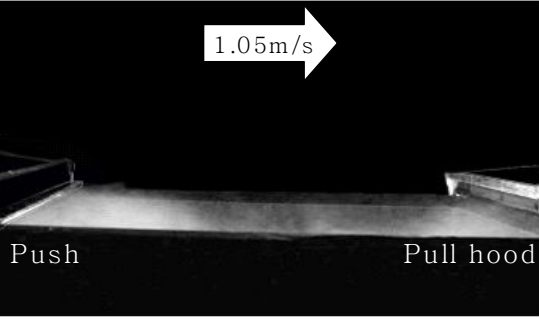
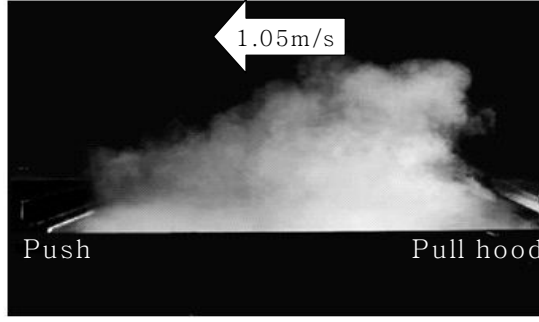
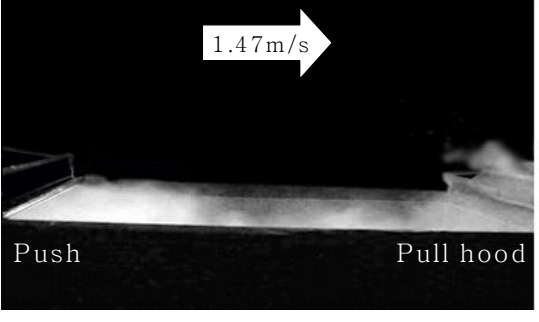
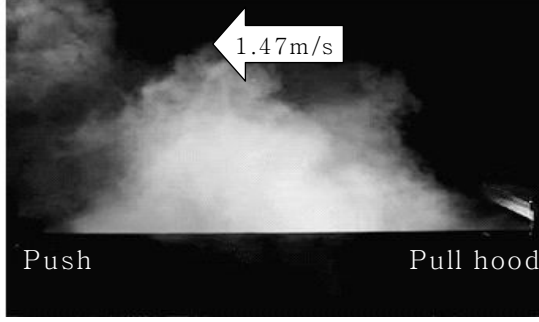
Cross draft velocity	Directions of cross draft	
	Blowing in the horizontal direction of push-pull air flows	Blowing in the opposite direction of push-pull air flows
0.4m/s		
0.75m/s		
1.05m/s		
1.47m/s		

Fig 5. Flow visualization for push-pull system by cross-draft velocities and direction

흐름은 대부분 풀 후드로 유입되는 것으로 관찰되었다.

그와는 반대로, 풀 후드에서 푸쉬 노즐 방향으로 방해기류가 불 경우에, 0.75m/s 까지는 연기가 크게 확산되지 않은 것으로 나타났다. 1.05m/s 이상의 방해기류에서는 많은 양의 연기가 외부로 확산되는 것으로 나타났다. 1.05m/s의 방해기류 하에서는 기류 모습을 살펴보면, 연기가 푸쉬풀 후드 외부로 확산되더라도 전체적인 연기의 분포는 풀 후드 쪽으로 치우쳐 있는 것으로 나타났다. 하지만, 1.47m/s 방해기류 하에서는 대부분의 연기가 외부로 확산되고, 특히, 연기의 분포 자체가 풀 후드가 아니 푸쉬 노즐 쪽에 치우쳐 분포하고 있는 것으로 나타났다.

Table 1의 조 표면에서 측정한 유속자료를 살펴보면, 1.47m/s의 방해기류가 불 때 조 표면에서 0.4m/s이상의 방해기류가 형성되고 있어 0.4m/s이상의 방해기류 하에서는 푸쉬풀 후드 유량을 증가해야 한다는 미국산업환기 매뉴얼의 설계 기준이 어느 정도 설득력이 있다는 것을 알 수 있다.

1) 푸쉬에서 풀 방향으로 불 때 기류 흐름

Figure. 6은 푸쉬 제트에서 풀 후드 방향으로 방해기류가 불 때 푸쉬풀 후드 기류 흐름을 알아보기 위해 1.47m/s로 방해기류가 불때와 방해기류가 없을 때 기류 가시화 결과를 비교한 것이다. Figure 6(a)는 방해기류가 없을 때 기류 가시화 결과 및 기류 흐름을 개략적으로 나타낸 것이다. 푸쉬 제트기류가 ② impact zone을 지나 ③ reorganization zone에 도달하면서 풀 후드의 플랜지 높이까지 상승한 후 풀 후드로 배기되는 것을 알 수 있다. 하지만, Figure 6(b)는 푸쉬 제트에서 풀 후드 방향으로 방해기류가 불 경우의 기류 가시화 모습인데, (a)에 비해서 ③ reorganization zone의 연기 높이가 현저하게 낮아진 것을 알 수 있다. 즉, 푸쉬 제트가 ② impact zone에서 바닥에 부딪친 뒤 상승하려고 할 때 푸쉬 쪽에서 불어온 방해기류가 상승하지 못하도록 눌러주었기 때문에 ③ reorganization zone이 형성되지 않고 바로

④ wall jet zone이 형성되는 것으로 나타났다. 일반적으로 푸쉬풀 후드에 있어 오염물질이 유출될 가능성이 가장 높은 곳이 ③ reorganization zone인데, 푸쉬 노즐에서 풀 후드로 방해기류가 불 경우에는 ③ reorganization zone이 거의 없고, 바로 ④ wall jet zone이 형성되어 푸쉬풀 후드 효율을 높일 수 있는 것으로 보인다. 하지만, 방해기류 유속이 빠를 경우에는 Figure 6(b)에 보이는 것과 같이 풀 후드 상부에서 일부 연기가 외부로 확산되는 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 볼 때 푸쉬에서 풀 후드 방향으로 방해기류가 불 경우에 방해기류 속도가 아주 강하지 않다면, 방해기류가 푸쉬풀 후드 효율 향상에 오히려 도움이 될 수 있다는 것으로 알 수 있다.

2) 풀 후드에서 푸쉬 슬롯 방향으로 불 때 기류 흐름

Figure. 7은 방해기류 방향이 풀 후드에서 푸쉬 쪽으로 불 때 연기가 확산되는 원인을 알아보기 위해 개방조를 20cm씩 구분하여 연기를 발생시킨 후 연기 흐름 및 확산 모습을 촬영한 것이다. 개방조는 Figure. 7(d)와 같이 i ~ vi구분한 뒤 각각 연기를 발생시킨 후 기류 변화가 명확한 i, iv와 v 지점의 연기 모습을 Figure. 7에 정리하였다. Figure. 7(a)는 i 번 지점으로 ① semifree flow zone과 ② impact zone 일부가 포함된 영역이다. i 번 지점에서 분사된 연기는 조 중앙까지 이동 한 후 방해

기류의 영향을 받아 상승하여 외부로 확산되는 것을 볼 수 있다. 풀 후드에서 푸쉬 방향으로 방해기류가 형성될 경우에 ③ reorganization zone에서 상승된 연기가 ④ wall jet zone을 형성하지 못하고 확산되는 것으로 나타났다. Figure. 7(b)는 ④ wall jet zone이 시작되는 영역으로 이 지역에서 발생한 연기도 일부는 확산이 되고 일부는 풀 후드를 통해 배기 되는 것을 알 수 있다. Figure. 7(c)는 ④ wall jet zone의 마지막 부분으로 대부분의 연기가 풀 후드를 통해 배기되는 것으로 나타났다.

즉, 풀 후드에서 푸쉬 방향으로 방해기류가 형성될 경우에는 푸쉬 노즐 기류와 방해기류가 부딪치기 때문에 ③ reorganization zone에서 상승된 연기가 방해기류의 영향에 의해 ④ wall jet zone을 형성하지 못하고 모두 확산되는 것으로 나타났다.

Figure. 8은 풀 후드에서 푸쉬 방향으로 방해기류가 불 경우 i 지역에서 연기를 공급한 뒤 조 상부에서 촬영한 연기 흐름을 정리한 것이다.

Figure 8에서 보는 바와 같이 i 영역에서 분사된 연기가 조 표면 전체에서 흐르고 있지만, 풀 후드 전단에서 연기가 개방조 측벽을 따라 흐르고, 풀 후드 전단 중앙부에는 연기가 없는 것을 알 수 있다. 이는 Figure 3(a)와 Figure 7(d)와 같이 풀 후드 뒤편에서 빠른 속도의 방해기류가 불 경우에는 풀 후드 전단에 recirculation 영역이 형성되면서 방해기류가 풀후드 전

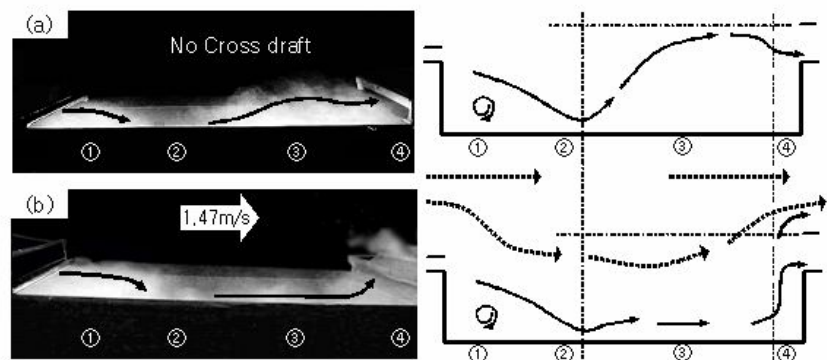


Fig 6. Flow visualization and flow pattern with (a) no cross-draft and (b) blowing in the same direction of push-pull air flows with 1.47m/s

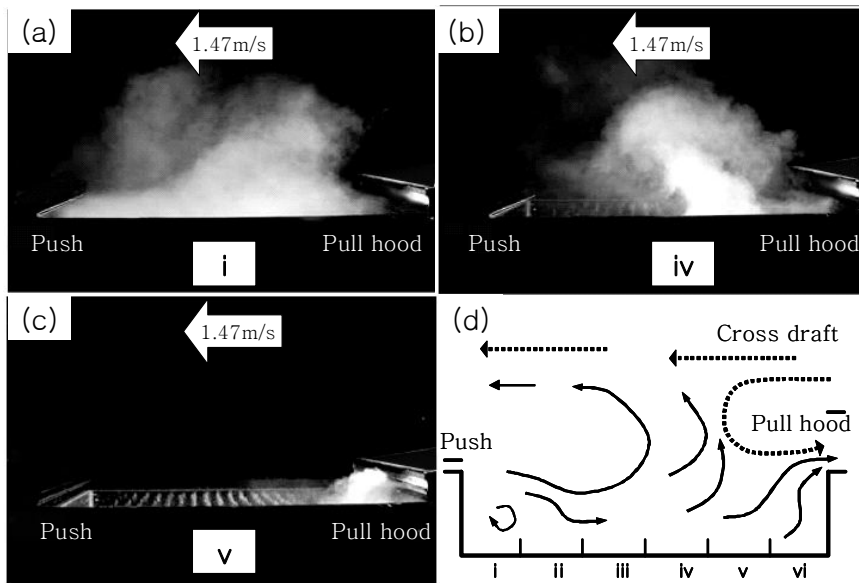


Fig 7. Flow visualizations by smoke supplying positions and flow patterns when cross draft blows in the opposite direction of push-pull air flows

단의 개방조 표면으로 유입된다. Recirculation 현상에 의해 풀 후드 전단으로 유입된 방해기류가 풀 후드를 통해 푸쉬 노즐의 기류보다 먼저 배기됨으로써, ③ reorganization zone에서 상승된 푸쉬 기류는 ④ wall jet zone을 형성하지 못하고 주변의 방해기류와 함께 외부로 확산되는 현상이 발생하고 있다. 하지만, 개방조 측면에는 Figure 3(b)와 같은 방해기류 흐름

에 의해 푸쉬 기류가 벽면을 통해 풀 후드로 흐르기 때문에, 양측벽을 따라 연기가 풀 후드 쪽으로 이동되고 있는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 풀 후드에서 푸쉬 쪽으로 방해기류가 흐를 때 방해기류와 조 표면의 기류 흐름을 가시적으로 나타낸 것이다. 풀 후드 뒤편에서 방해기류가 강하게 흐를 때는 방해기류가 풀 후드를 통해 푸쉬

기류보다 먼저 유입되고 ③ reorganization zone에서 상승된 푸쉬 기류가 방해기류의 영향에 의해 ④ wall jet zone 형성하지 못하는 두 가지 이유 때문에 푸쉬-풀 후드 환기 효율이 급격하게 저하되는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

기류가시화 방법을 이용한 방해기류의 방향과 유속에 따른 푸쉬풀 후드의 효율 평가의 결과는 다음과 같다.

1. 방해기류 방향에 따른 기류 가시화 결과

방해기류 방향에 따른 기류 가시화 실험 결과 푸쉬풀 후드 효율을 향상시키기 위해서는 방해기류 방향은 푸쉬 노즐에서 풀 후드 방향으로 유지되는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 푸쉬풀 후드가 설치된 작업장에서 발생하는 대부분의 방해기류는 창문을 통해 유입되기 때문에 방해기류에 의한 푸쉬풀 후드 효율 저하를 방지하기 위해서는 푸쉬풀 후드 기류 방향을 고려하여 창문을 설치해야 할 것으로 판단된다.

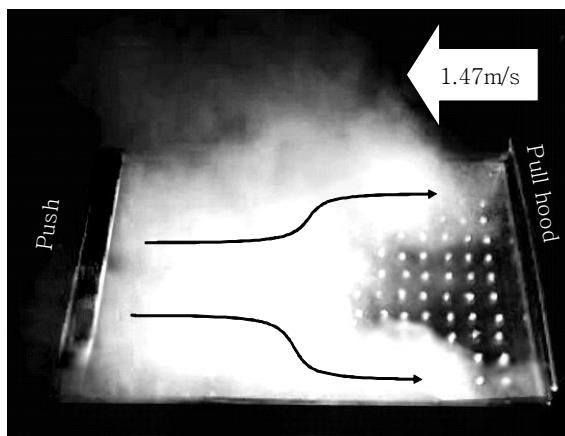


Fig 8. Overview of flow visualization when smoke supplied position i

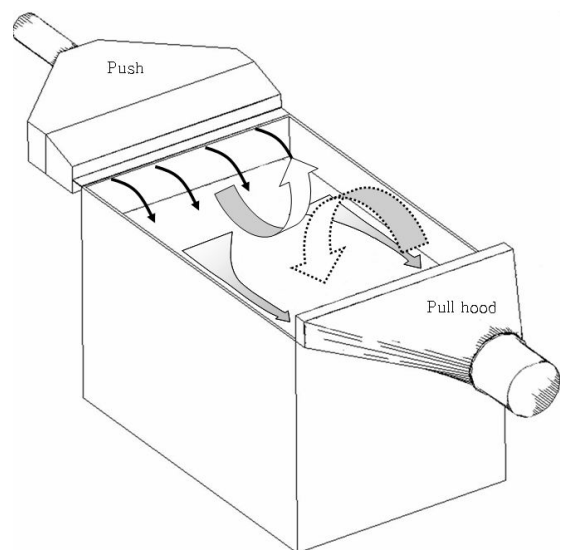


Fig 9. Schematic diagram of air patterns when cross draft blows in the opposite direction of push-pull air flows

2. 방해기류가 푸쉬 노즐에서 풀 후드로 형성될 경우 기류 흐름 분석

방해기류 유속이 저속(1m/s 이하)인 경우에는 방해기류 존재시 푸쉬풀 후드 기류가 더 효율적으로 형성되는 것을 알 수 있었다. 푸쉬 노즐 방향에서 방해기류가 불 경우에는 Impact zone을 거치면서 Reorganization zone에서 상승하려는 푸쉬 기류를 방해기류가 상승하지 못하도록 눌러 주는 역할을 하기 때문에, 오히려 푸쉬 풀 후드 효율이 향상될 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 방해기류 속도가 너무 빠를 경우에는 풀 후드 배기유량보다 많은 푸쉬기류와 방해기류의 공기가 풀 후드 쪽으로 이동하고 약간의 연기만 풀 후드 주변으로 확산되는 것으로 나타났다. 즉, 방해기류가 푸쉬노즐에서 풀 후드로 적절하게 불 경우에는 방해기류가 존재할 경우에 오히려 푸쉬풀 후드 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3. 방해기류 방향이 풀 후드에서 푸쉬 노즐로 형성될 경우 기류 흐름 분석

방해기류가 풀 후드에서 푸쉬 노즐 방향으로 불 경우에는 Reorganization zone에

서 상승하는 푸쉬 기류와 방해기류가 부딪히면서 푸쉬 기류의 상승이 증가되기 때문에 방해기류 속도에 상관없이 푸쉬풀 후드 효율이 저하되는 것으로 나타났다. 특히, 방해기류 유속이 1m/s 이상인 경우에는 대부분의 연기가 풀 후드로 유입되지 않고 작업장으로 확산되었다.

REFERENCES

송세욱, 김태형, 하현철, 홍좌령. 개방조 후드가 설치된 도금작업장의 방해기류 측정. 한국산업위생학회지 2004; 14(3):243-250

American Conference of Governmental Industrial Hygienists : Industrial Ventilation a Manual of Recommended Practice 24th Edition, 2001. p. 10:108-110

American Conference of Governmental Industrial Hygienists : Industrial Ventilation a Manual of Recommended Practice 25th Edition, 2004. p. 10:99-117

Mazal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A. Determination and Interpretation of total and transversal linear Efficiencies

in push-pull ventilation systems for open surface tanks. Ann. occup. Hyg 2002(a);46(7):629-635

Mazal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A. Influence of push element geometry on the capture efficiency of push-pull ventilation systems in surface treatment tanks. Ann. occup. Hyg 2002(b);46(4): 383-393

Mazal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A. Visualization of Airflows in Push-Pull Ventilation Systems Applied to Surface Treatment Tanks. Ann. occup. Hyg 2003(c);64(4):455-460

Robinson M, Ingham B. Design and operation for push-pull ventilation of open surface tanks. International journal of energy research Int. J. Energy Res 2003;27:757-770

Rota R, Nano G, Canossa L. Design guidelines for push-pull ventilation systems through computational fluid dynamics modeling. AIHAJ 2001;62:141-148

Woods J, McKarns J. Evaluation of capture efficiencies of large push-pull ventilation systems with both visual and tracer techniques. AIHAJ 1995;56: 1208-1214