

방해기류 존재시 추적자 가스법을 이용한 푸쉬풀 후드 효율 평가

김태형¹ · 하현철^{2*} · 강호경³

¹창원대학교 환경공학과 · ²벤티크 · ³한국산업안전공단

Evaluation of Capture Efficiencies of Push-Pull Hood Systems by Trace Gas Method under the Presence of Some Cross-draft

Tae-Hyeung Kim¹ · Hyun-Chul Ha^{2*} · Ho-Gyung Kang³

¹Department of Environmental Engineering Changwon National University

²VENTECH Cor.

³Korea Occupational Safety & Health Agency

A push pull hood system is frequently applied to control contaminants evaporated from an open surface tank. Efficiency of push pull hood system is affected by various parameters, such as, cross draft, vessel shapes, tank surface area, liquid temperature. A previous work assisted by flow visualization technique qualitatively showed that a strong cross draft blown from the pull hood to push slot could destroy a stable wall-jet on the surface of tank, resulting in the abrupt escape of smoke from the surface. In this study, the tracer gas method was applied to determine the effect of cross-draft on the capture efficiency qualitatively. A new concept of capture efficiency was introduced, that is, linear efficiency. This can be determined by measuring the mass of tracer gas in the duct of pull hood while the linear tracer source is in between push slot and pull hood. By traversing the linear tracer source from the push slot to the pull hood, it can be found where the contaminant is escaped from the tank. Total capture efficiency can be determined by averaging the linear efficiencies.

Under the condition of cross-draft velocities of 0, 0.4, 0.75, 1.05 and 1.47m/s, total capture efficiencies were measured as 97.6, 95.4, 94.6, 92.7 and 70.5% respectively. The abrupt reduction of efficiency with cross-draft velocity of 1.47m/s was due to the destruction of tank surface wall-jet by the counter-current cross-draft. The same phenomenon was observed in the previous flow visualization study. As an alternative to overcome this abrupt efficiency drop, the 20% increase of hood flow rates was tested, resulting in 20% efficiency increase.

Key Words : push-pull hood, cross draft, open surface tank, capture efficiency, linear capture efficiency, tracer gas method

접수일 : 2006년 8월 3일, 채택일 : 2006년 9월 12일

* 교신저자 : 하현철(경남 창원시 사림동 창원대학교 창업보육센터 벤티크,

Tel: 055-279-8288, Fax: 055-287-8288, E-mail: cfdace@hanmail.net)

I. 서론

푸쉬폴 후드는 일반적인 측방형 후드에 비해 환기량을 50% 정도 줄일 수 있고 개방조 폭이 넓어서 측방형 후드로는 환기시킬 수 없는 곳에도 적용 가능한 장점 때문에 많은 표면처리조에 적용하고 있다(ACGIH, 2001). 푸쉬폴 후드는 푸쉬 슬롯에서 분사된 제트 기류가 조 표면을 따라 흐르면서 개방조에서 발생된 오염물질을 폴 후드 쪽으로 밀어주고, 폴 후드에서는 푸쉬 기류와 오염물질이 작업장으로 확산되지 않도록 충분한 유량으로 배기시키는 역할을 한다. 최근 발행된 ACGIH (ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists) 산업환기 매뉴얼에서는 푸쉬폴 후드 시스템을 설계할 때 푸쉬 보다는 폴 후드 배기유량을 많게 해야 한다는 것을 강조하고 있다(ACGIH, 2004).

푸쉬폴 후드 효율에 가장 큰 영향을 주는 인자는 푸쉬 슬롯의 분사 조건과 주변 방해기류 존재 여부 등이 있다. Mazal 등 (Mazal et al. (a), 2002; Mazal et al. (b), 2000; Mazal et al., 2003)은 푸쉬폴 후드 시스템을 이용한 기류가시화(flow visualization) 실험 및 추적자 가스(tracer gas) 실험을 통해 푸쉬 슬롯 유속(m/s)과 단위길이당 슬롯개방 면적(m²/m)을 곱한 “초기운동량(Initial kinetic momentum)”이라는 개념을 적용하여, 푸쉬폴 후드 효율 향상을 위해서는 개방조 표면에서 발생된 오염물질을 충분히 밀어 줄 수 있는 힘을 갖도록 푸쉬 기류가 충분한 운동량을 확보해야 하고, 또한 푸쉬 기류가 조 표면을 따라 효과적으로 흐를 수 있도록 분사 각도를 적절하게 조절해야 한다는 것을 강조했다. 이와 같은 Initial kinetic momentum 개념은 최근 푸쉬폴 후드 설계 방법이 대폭 개정된 ACGIH 산업환기 매뉴얼 25판(ACGIH, 2004)의 주요 내용으로 소개되고 있다.

하지만, Initial kinetic momentum 개념을 적용한 여러 실험에서도 방해기류 존재시 푸쉬폴 후드 효율 향상 방안에 대한 연구는 실시되지 않았다. 방해기류가 존재하지 않을 경우에는 ACGIH 산업환기 매뉴얼에서 제시된 설계 기준에 따라 푸쉬폴 후드를 가동하면 충분한 효율을 거둘 수 있는데 반해, 방해기류 존재시에는 푸쉬폴 후드 효율이 저하될 가능성이 있다. 이 때문에 현장실험(Woods et al, 1995)과 전산유체역학(Rota et al, 2001)을 이용하여 방해기류 존재하에 푸쉬폴 후드 효율 향상을 위한 설계 조건을 제시하기도 하였다.

우리나라 개방조 후드 주변의 방해기류를 측정 한 송세욱 등(2004)의 연구 결과에 의하면 계절에 관계없이 0.6 m/s 이상의 빠른 방해기류가 측정되어, 개방조 설치 및 설계시 방해기류에 의한 효율저하를 고려할 필요성이 제기되었다. 그리고, 기류가시화 실험을 통한 방해기류 방향과 속도에 따른 푸쉬폴 후드 환기 효율평가 연구에 의하면(송세욱 등, 2005),

폴 후드 방향에서 푸쉬 슬롯 쪽으로 1 m/s 이상의 방해기류가 불 때 환기 효율이 크게 저하되는 것으로 평가되었다. 푸쉬폴 후드에서 개방조를 따라 기류가 약 4가지 정도의 형태로 변화면서 이동을 하는데(Mazal et al, 2003; 송세욱 등, 2005), 기류가시화 실험에서 폴 후드 방향에서 푸쉬 슬롯 쪽으로 빠른 속도의 방해기류가 불 때 개방조표면 중간 정도인 wall jet reorganization zone 영역에서 푸쉬 슬롯 기류와 방해기류가 부딪혀서 연기가 조 외부로 확산되는 현상을 관찰하였다. 기류가시화실험에서는 방해기류 방향 및 세기에 따라 대략적인 환기 효율을 평가할 수 있지만, 정확한 환기 효율 변화 및 환기 효율 저하 원인을 판단하는 데는 한계가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 송세욱 등(2005)이 기류가시화 기법을 이용하여 방해기류 존재 하에 푸쉬폴 후드 효율 변화를 관찰한 연구에 이어서, 추적자 가스법을 이용하여 방해기류 존재시 푸쉬폴 후드의 환기 효율을 정량적으로 평가하여 기류가시화 실험결과와 비교 분석하였다. 또한 푸쉬폴 후드 유량을 변화시켜 방해기류 유무에 따른 푸쉬폴 후드 효율 향상 방안을 수립하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 실험장치

방해기류 방향에 따른 기류가시화 실험(송세욱 등, 2005) 결과를 보면, 폴 후드에서 푸쉬 슬롯 방향으로 방해기류가 불 때 환기 효율이 크게 저하되는 것으로 나타났다. 그 결과를 바탕으로 본 연구에서도 방해기류 방향은 폴 후드에서 푸쉬 슬롯 방향으로 부는 것으로 고정하고, 방해기류 세기 및 푸쉬 폴 유량 변화에 따른 환기효율을 평가하였다.

Fig. 1은 방해기류가 존재할 때 푸쉬폴 후드 효율을 평가하기 위한 실험장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 방해기류 생성을 위한 풍동 장치와 푸쉬폴 후드는 송세욱 등(2005)이 기류가시화 실험에 이용한 장치와 동일하게 구성하였다. 추적자 가스는 SF₆(순도 99.999%)를 20배 희석하여 개방조 표면에 설치된 확산튜브(diffuser tube)와 폴 후드쪽 덕트 내부로 공급하였고, 폴 후드 송풍기 뒤편에서 가스 측정기(Bruel & Kjaer, B&K 1302)를 이용하여 덕트내 SF₆ 농도를 측정하여 환기효율을 평가하였다.

(1) 푸쉬-폴 후드

본 연구를 위해 개방조 크기는 0.8m(length) × 1.2m(width) 규격으로 제작하였고, 푸쉬 슬롯과 폴 후드는 Fig. 2와 같이 슬롯 형태로 제작하였다. 푸쉬-폴 후드는

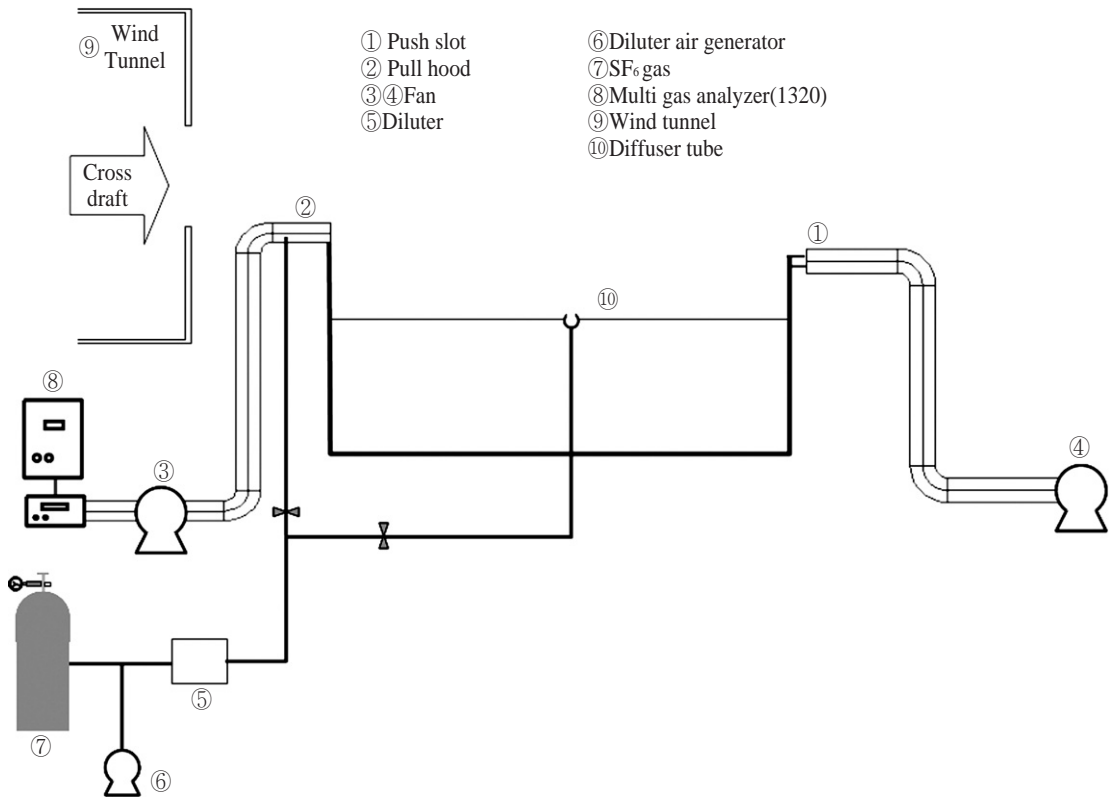
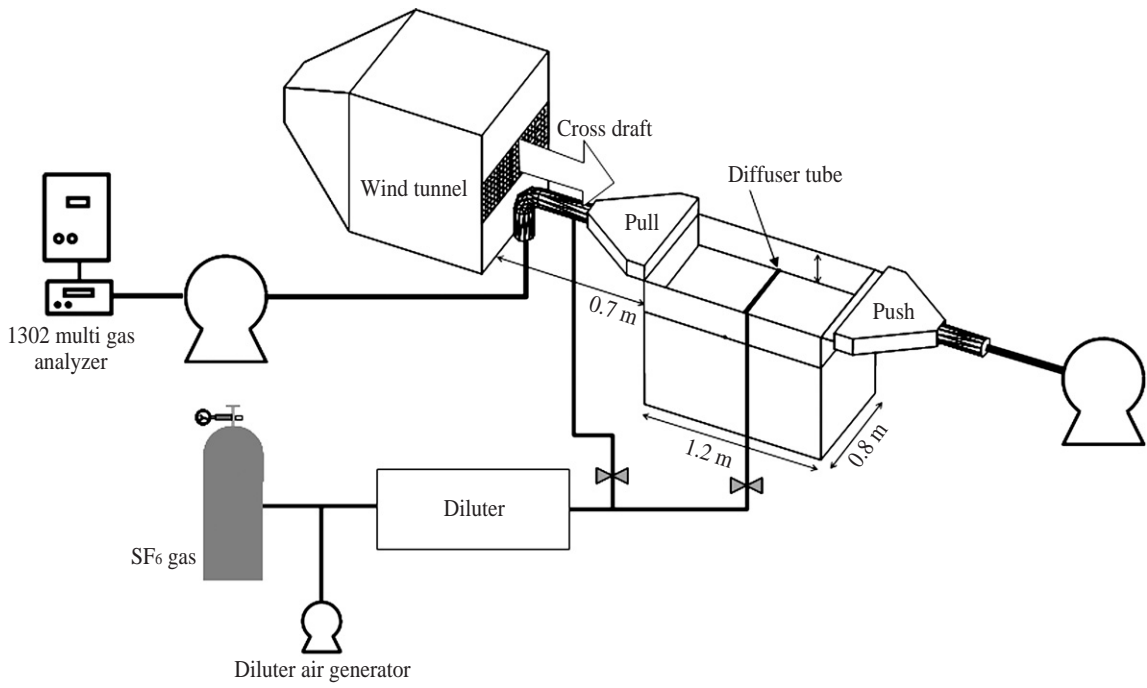


Fig. 1. Schematic diagrams of the push-pull hood system for experiments.

ACGIH 산업환기 매뉴얼(ACGIH, 2004)의 설계 기준에 따라 슬롯 높이를 푸쉬 5mm, 풀 50mm로 설치하였다. 푸쉬풀 후드 환기 효율에 큰 영향을 주는 푸쉬 제트의 분사각도는 기류가시화 실험 결과(송세욱 등, 2005)에 따라 조 표면 0.15m에 위치시키고 하향 5° 방향으로 공급하여 조 표면에서 “wall jet”이 잘 형성되도록 하였다.

푸쉬 슬롯과 풀 후드유량에 따른 푸쉬풀 후드 효율 평가를 위해 푸쉬 슬롯과 풀 후드 각각 설계유량의 20%까지 증가할 수 있도록 하였다. 푸쉬풀 후드 설계 기준인 슬롯 개구면 유속을 10 m/s로 유지할 때 송풍기 유량은 푸쉬 슬롯 2.2 m³/min, 풀 후드 20 m³/min이다.

(2) 추적자 가스 공급 장치 및 가스 측정 장치

개방조 위치별 푸쉬풀 후드 포집효율을 평가하기 위해 추적자 가스로 주로 사용되는 SF₆를 사용하였다. Fig. 3과 같이 추적자 가스 공급 장치를 만들어 순도 99.999%의 SF₆ 가스를 순수 공기와 1:20으로 희석하여 diffuser tube와 풀 후드 내부에 각각 공급하였다. Diffuser tube는 균일하게 SF₆ 가스가 공급될 수 있도록 직경 1 mm 크기의 홀 150개를 뚫었고, 각 홀

에서 분사되는 SF₆ 가스의 분사 속도는 0.3 m/s가 될 수 있도록 희석된 공기를 유량 2 l/min으로 공급하였다. Diffuser tube에서 추적자 가스 분사 속도를 0.3 m/s로 유지한 것은 송세욱 등(2005년)이 실험한 기류가시화 실험에서 적용한 조 표면 온도 50 °C일 때 부력과 동일한 조건을 만들기 위해서이다.

SF₆ 농도는 Fig. 1과 같이 풀 후드 송풍기 뒤편 덕트 내부에서 실시간 측정기(Bruel & Kjaer, B&K 1302)를 이용하여 측정하였다. 희석장치에 의해 만들어진 추적자 가스는 풀 후드 내부에 먼저 공급하여 덕트내부 농도를 측정하였고, 볼 밸브를 조작하여 diffuser tube에 공급한 후 덕트 내부 가스 농도를 측정하였다. diffuser tube 위치는 총 12지점이고, 각 지점별로 10분간 3회 반복 실험을 실시하여 평균 농도를 계산하였다. 풀 후드 내부에 추적자 가스를 공급하고 덕트 내부 농도를 측정하는 것은 현재 공급되고 있는 추적자 가스 총량을 알기 위한 것이고, diffuser tube에서 공급한 후 농도를 측정하는 것은 diffuser tube가 위치한 지점에서 발생된 추적자 가스의 포집량을 알기 위한 것이다. 즉, 환기 효율 평가시 분모는 풀 후드 내부 공급시 농도가 되고 분자는 diffuser tube로 공급했을 때의 농도가 된다.

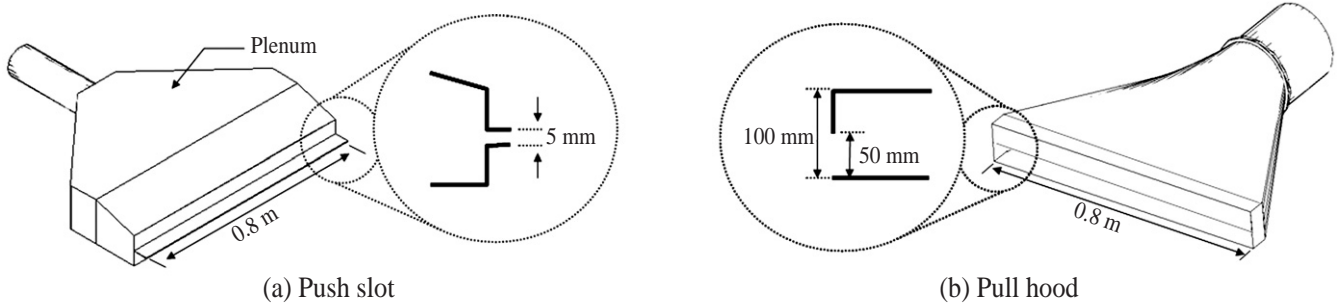


Fig. 2. Schematic diagrams and dimensions of the push slot and pull hood.

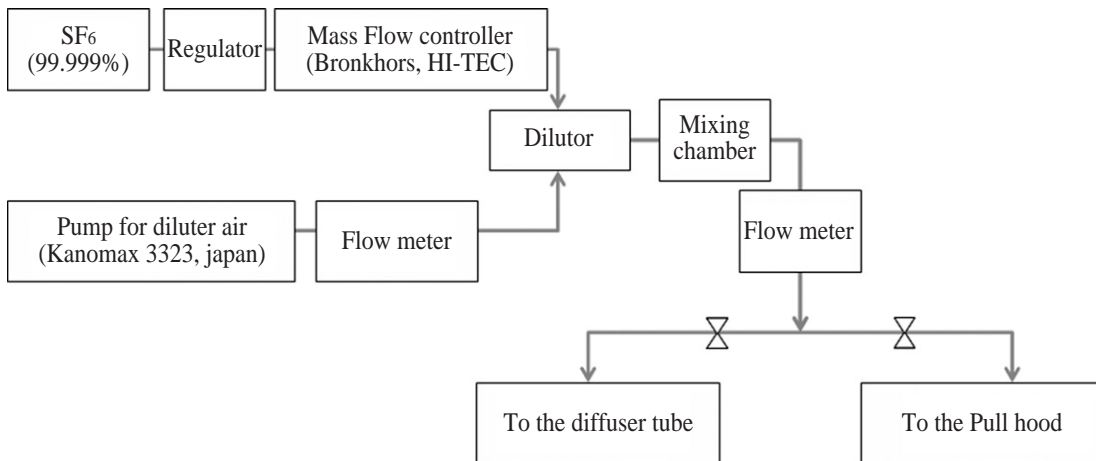


Fig. 3. System for generating of trace gas(5% SF₆).

(3) 방해기류

Fig. 1과 같이 방해기류는 풀 후드 입구에서 뒤쪽으로 0.7 m 떨어진 거리에 0.3 m(height) × 1 m(width)의 개구면을 가진 풍동 장치를 이용하여 발생시켰다. 풍동은 100 m³/min, 150 mmAq 용량을 가진 송풍기에 연결되어 있고, 인버터(LG industrial system, Korea)를 이용하여 송풍기 회전수를 적절히 조절하여 방해기류 속도를 0.4 m/s, 0.75 m/s, 1.05 m/s 그리고 1.47 m/s로 조정하였다.

2. 환기 효율 평가 방법

본 연구에서는 Mazal 등(2003(b))의 연구를 참고하여 환기 효율 평가 방법을 총 환기효율(total efficiency)과 라인별 환기 효율(linear efficiency)로 구분하였다. 먼저 라인별 환기 효율은 diffuser tube가 위치한 12지점 각각의 환기효율이고 총환기효율은 12지점의 라인별 환기 효율을 평균한 것이다. Fig. 4는 라인별 환기효율과 총환기효율 계산방법을 정리한 것이다.

III. 결과 및 고찰

1. 방해기류가 없을 때 환기 효율

Fig. 5는 방해기류가 불지 않는 상태에 라인별 환기효율을 측정된 결과와 송세욱 등(2005년)이 실시한 방해기류가 없을 때 푸쉬풀 후드 기류 가시화 결과를 정리한 것이다. 라인별 환기효율을 측정된 결과(Fig. 5(a))를 살펴보면, 총환기효율은 97.6%로 매우 높게 나타났고, 라인별 효율을 살펴보면 푸쉬 슬롯 쪽 절반면적(푸쉬슬롯에서의 거리 0 ~ 0.6m)은 효

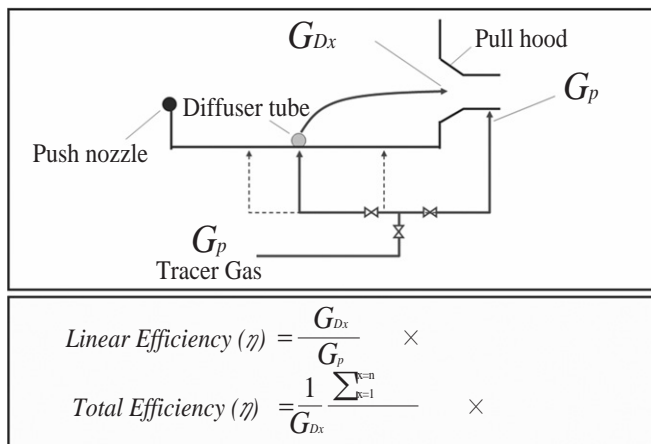
율이 95% 근처이고 풀 후드에 가까운 절반 면적(0.6 ~ 1.2 m)은 효율이 거의 100%에 가깝게 측정되었다. 이와 같은 결과는 Mazal 등(2002(a))이 실시한 푸쉬 슬롯 형태와 유량 변화에 따른 라인별 환기 효율 측정결과와 거의 일치하였다.

여기서, 환기 효율이 낮은 지역은 푸쉬풀 기류 흐름을 구분하는 4가지 기류 영역 중에서 semi-free flow zone(①)과 impact zone(②)에 속한다. 이 두 영역은 푸쉬풀 기류흐름에서 가장 중요한 wall jet reorganization zone(③)을 형성하기 위한 준비 과정으로 푸쉬 슬롯에서 분사된 기류가 강한 와류를 형성하면서 이동하기 때문에 조표면을 따라 흐르는 wall jet reorganization zone과 wall jet zone(④)에 비해 환기 효율이 크게 낮아지는 것으로 판단된다. 방해기류가 없는 조건에서 환기 효율을 제고하기 위해서는 푸쉬 급기 유량 및 각도를 적절하게 조절하여 semi-free flow zone과 impact zone 범위를 가능한 줄이는 것이 필요한 것으로 판단된다.

2. 방해기류가 있을 때 환기 효율

Fig. 6과 Fig. 7은 방해기류 세기에 따른 푸쉬풀 후드 환기 효율을 정리한 것이다. Fig. 6(a)는 방해기류 유속이 0.4 m/s, 0.75 m/s 그리고 1.05 m/s일 때, Fig. 6(b)는 방해기류 유속이 1.47 m/s일 때 라인별 환기효율을 정리한 것이다.

Fig. 6(a)를 살펴보면 방해기류 유속이 0.4 m/s와 0.75 m/s일 때 라인별 환기 효율이 매우 유사한 패턴을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 방해기류가 없는 경우와 비교해 보면, 푸쉬 슬롯에서부터 0.3m 이내에서는 효율 저하가 크게 발생하지 않지만, 0.3 ~ 0.8m 범위에서는 방해기류가 없는 경우에 비해 효율저하가 크게 발생한 것을 알 수 있다. 효율저하가 발생된 영역은 impact zone(②)과 wall jet reorganization zone(③) 영역으로 푸쉬 슬롯에서 분사된 기류가 impact zone에서 조 바



Where

G_t : generated concentration of trace gas(SF₆)

G_p : concentration of SF₆ injected directly into the duct(ppm)

G_{Dx} : concentration of SF₆ injected into the diffuser tube in position x(ppm)

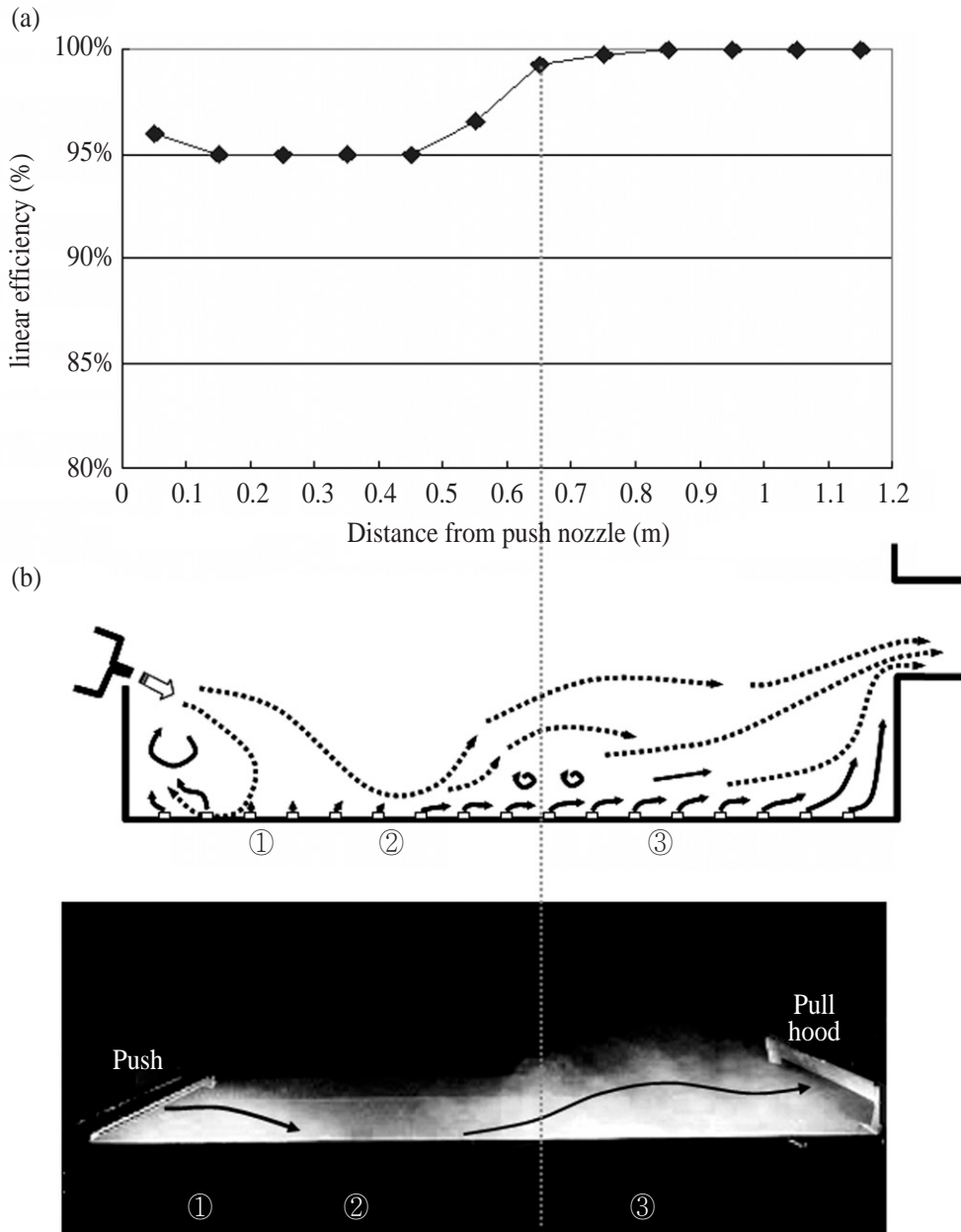
n : position of diffuser tube (n=1 ~ 12)

Fig. 4. Calculation method of push-pull hood efficiency.

다을 친 후 wall jet reorganization zone(③)에서 상승할 때 풀 후드 방향에서 불어오는 방해기류의 영향으로 wall jet(④)을 형성하지 못하고 상승하기 때문에 환기 효율이 저하되는 것으로 판단된다. 이에 반해서 1.05 m/s에서는 semi-free flow zone(①)에서부터 wall jet reorganization zone(③) 범위인 0 ~ 0.8m 영역 전체의 환기 효율이 크게 저하되는 것으로 측정되었다. 방해기류 0.75 m/s와 1.05 m/s일 때 조표면에서의 유속이 각각 0.18 ± 0.16 m/s와 0.29 ± 0.28 m/s로 측정된 송세욱 등(2005년)의 연구 결과에 의하면, 방해기류가 0.75 m/s정도 일

때까지는 푸쉬 슬롯에서 발생된 푸쉬 슬롯의 Initial kinetic momentum이 조표면에 형성된 0.18 ± 0.16 m/s의 방해기류를 극복하고 오염물질을 풀후드까지 밀어주지만, 1.05 m/s일 때 조표면에서 발생된 0.29 ± 0.28 m/s의 유속은 푸쉬 슬롯의 Initial kinetic momentum이 충분히 극복하지 못하기 때문에 환기효율이 약간 낮아지는 것으로 판단된다.

방해기류 유속이 1.47 m/s인 Fig. 6(b)를 살펴보면, 방해기류가 존재하지 않을 때에 비해서 환기 효율이 급감한 것을 알 수 있다. 방해기류 유속이 1.47 m/s일 때 조표면 유속이



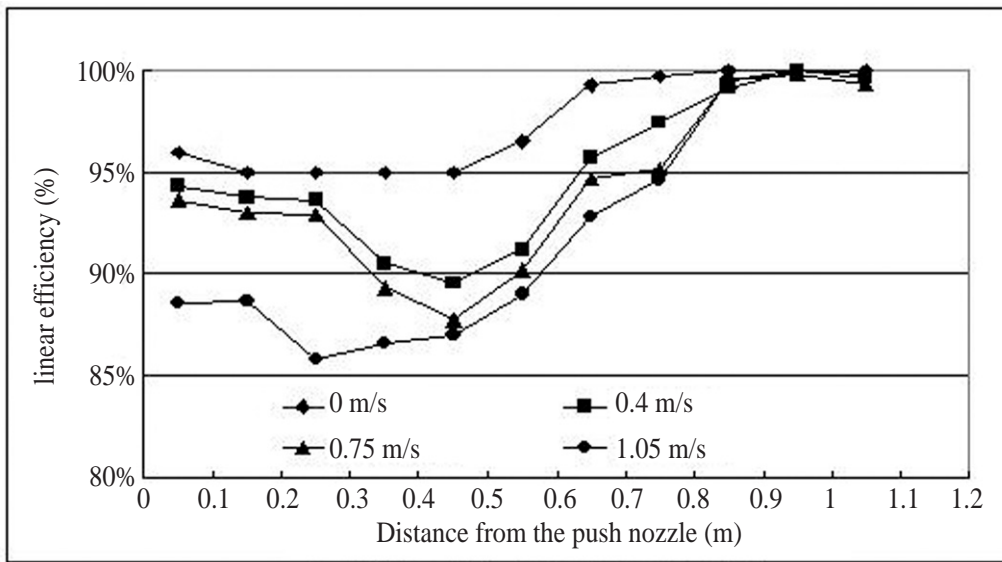
(a) transverse linear efficiency, (b) schematic flow patterns and visualization result(송세욱 등, 2005).

Fig. 5. The result of transverse linear efficiencies and flow visualization with no cross-draft.

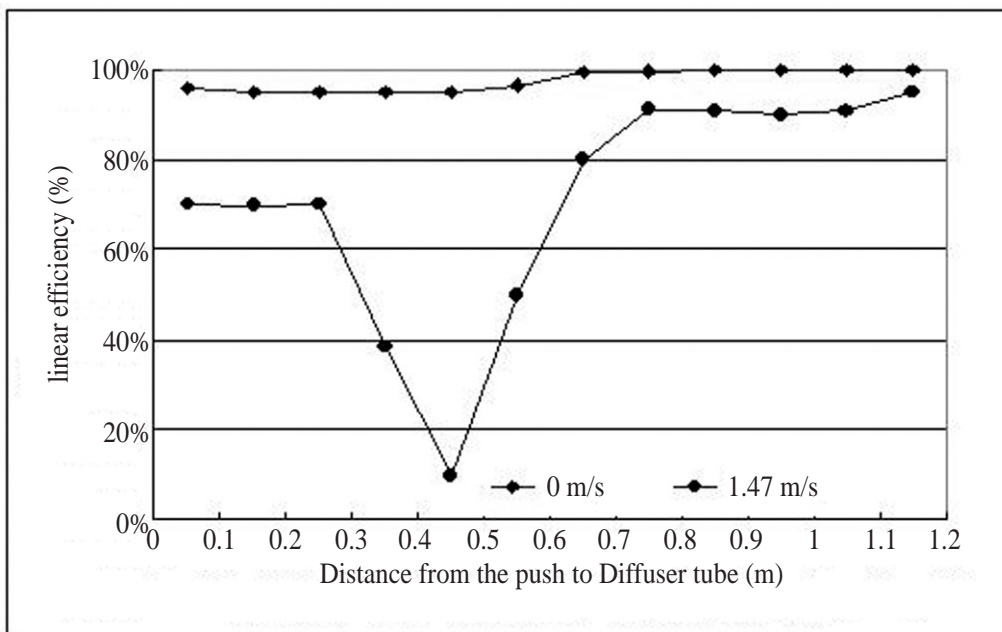
0.37±0.27 m/s로 현재 푸쉬 슬롯에서 발생하는 Initial kinetic momentum으로는 방해기류를 전혀 극복하지 못하고 있는 것으로 판단된다. 특히, 기류 가시화실험(송세욱 등, 2005년)에서는 풀 후드 뒤편에서 발생된 방해기류가 조 바닥면을 강하게 치면서 연기가 확산되는 것을 확인하였는데, 추적자 가스 실험결과를 보면 방해기류가 조 바닥면을 강하게 치는 위치가 impact zone(②)과 wall jet reorganization zone(③)임을 알 수 있다.

Fig. 7은 방해기류 유속이 1.47 m/s일 때 연기 발생 위치별

기류 가시화결과를 정리한 것이다. 기류가시화 결과를 살펴 보면, semi-free flow zone(①)에서 발생된 연기가 바닥면을 따라 흐르다가 wall jet reorganization zone(③)에서 일부가 조 중간부분에서 상승하는 것을 알 수 있다. 하지만, impact zone(②)과 wall jet reorganization zone(③)에서 발생된 연기는 조표면을 따라 흐르기 보다는 조 상부로 확산되어 방해기류를 따라 흘러가는 것을 알 수 있다. 추적자가스 실험과 기류 가시화 실험 결과를 볼 때 풀 후드에서 푸쉬 슬롯 방향으로 방해기류가 강하게 불 때 푸쉬풀 후드 효율을 향상시키기 위



(a) Cross draft velocities : 0.4 m/s, 0.75 m/s and 1.05 m/s



(b) Cross draft velocity : 1.47 m/s

Fig. 6. The result of transverse linear efficiency with the various cross draft velocities.

해서는 푸쉬 슬롯의 Initial kinetic momentum을 증가시켜 방해기류에 의해 조표면에 형성된 기류 흐름을 극복해야 한다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 연구 결과를 살펴보면, ACGIH 산업환기 매뉴얼에서 제시하고 있는 푸쉬풀 후드설계 방법이 조 표면적당 급배기 유량을 계산하는 방법 (ACGIH, 2001)에서, 푸쉬 슬롯의 운동량을 고려한 설계 방법 (ACGIH, 2004)으로 변경된 것이 바람직한 방향이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 방해기류 세기에 따른 푸쉬풀 후드 총 환기 효율을 정리한 것으로 방해기류 유속이 1.05 m/s일 때 까지는 환기

효율이 90% 이상을 유지하지만, 방해기류 유속이 1.47 m/s일 경우에는 70%대로 급감한 것을 알 수 있다. 방해기류 유속에 따른 기류 가시화 실험결과를 정리한 Fig. 9를 살펴보면, 방해기류가 0.75 m/s일 때 까지는 연기형태가 푸쉬풀 후드 기류를 따라 조 표면으로 원활하게 흐르는 것을 알 수 있다. 하지만, 방해기류 유속이 1.05 m/s 이상에서는 연기가 푸쉬풀 후드 기류를 벗어나 조 표면에서 약간 상승한 것을 알 수 있다. 기류 가시화 실험 결과 (송세욱 등, 2005)에서도 정리 했듯이, 방해기류 유속이 1.05 m/s일 때는 wall jet reorganization zone (③)에서 연기가 상승하지만 대부분 연기가 풀 후드로 유입되었다.

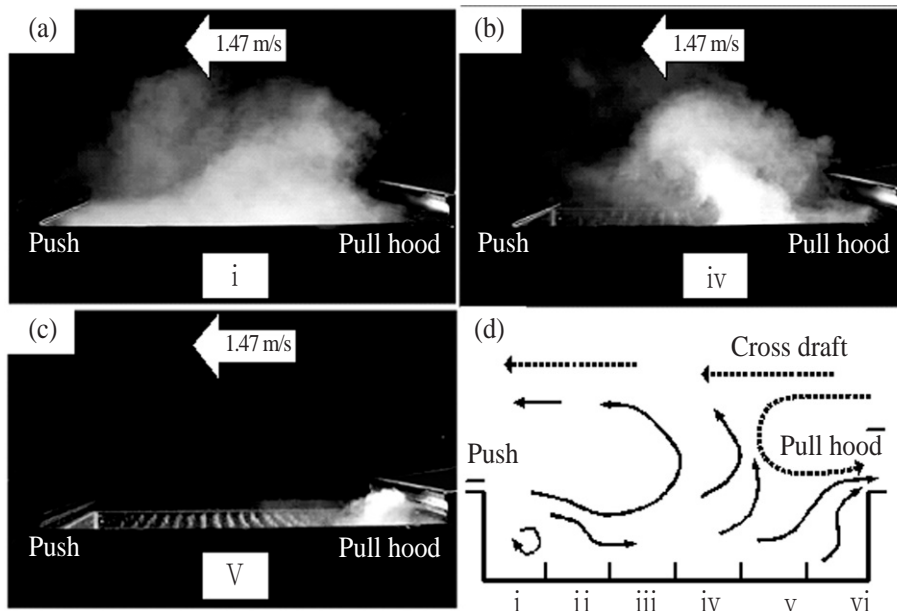


Fig. 7. Flow visualization results with the different smoke supplying positions when cross draft blows towards the opposite direction of push-pull air flows.

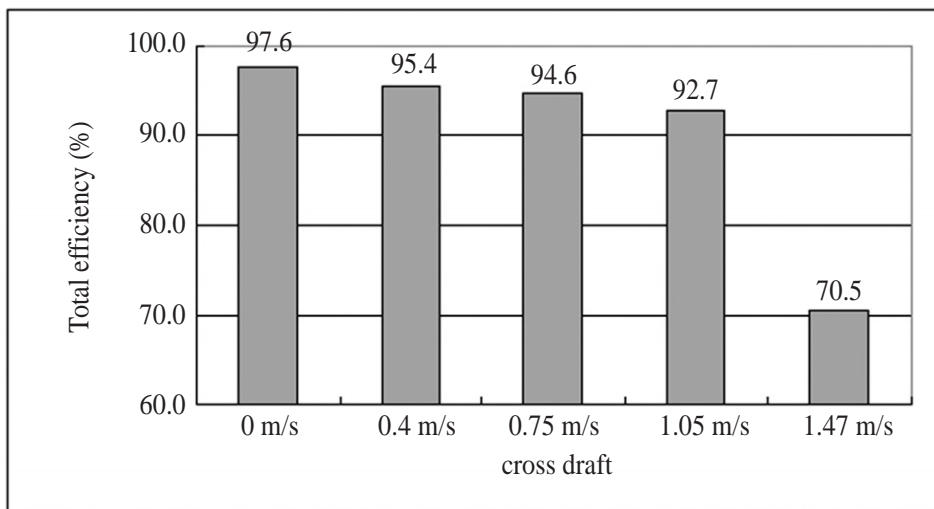


Fig. 8. The result of total efficiency with the various cross draft velocities.

하지만, 방해기류 유속이 1.47 m/s일 때는 wall jet reorganization zone (㉓)에서 상승한 연기가 풀 후드로 유입되지 못하고 풀 후드 뒤편에서 불어오는 방해기류를 따라 푸쉬 슬롯 방향으로

로 확산되었다.

기류 가시화 실험과 추적자 가스 실험을 비교해보면, 방해기류가 0.4 m/s이하 일 때는 방해기류가 크게 영향을 주지 않

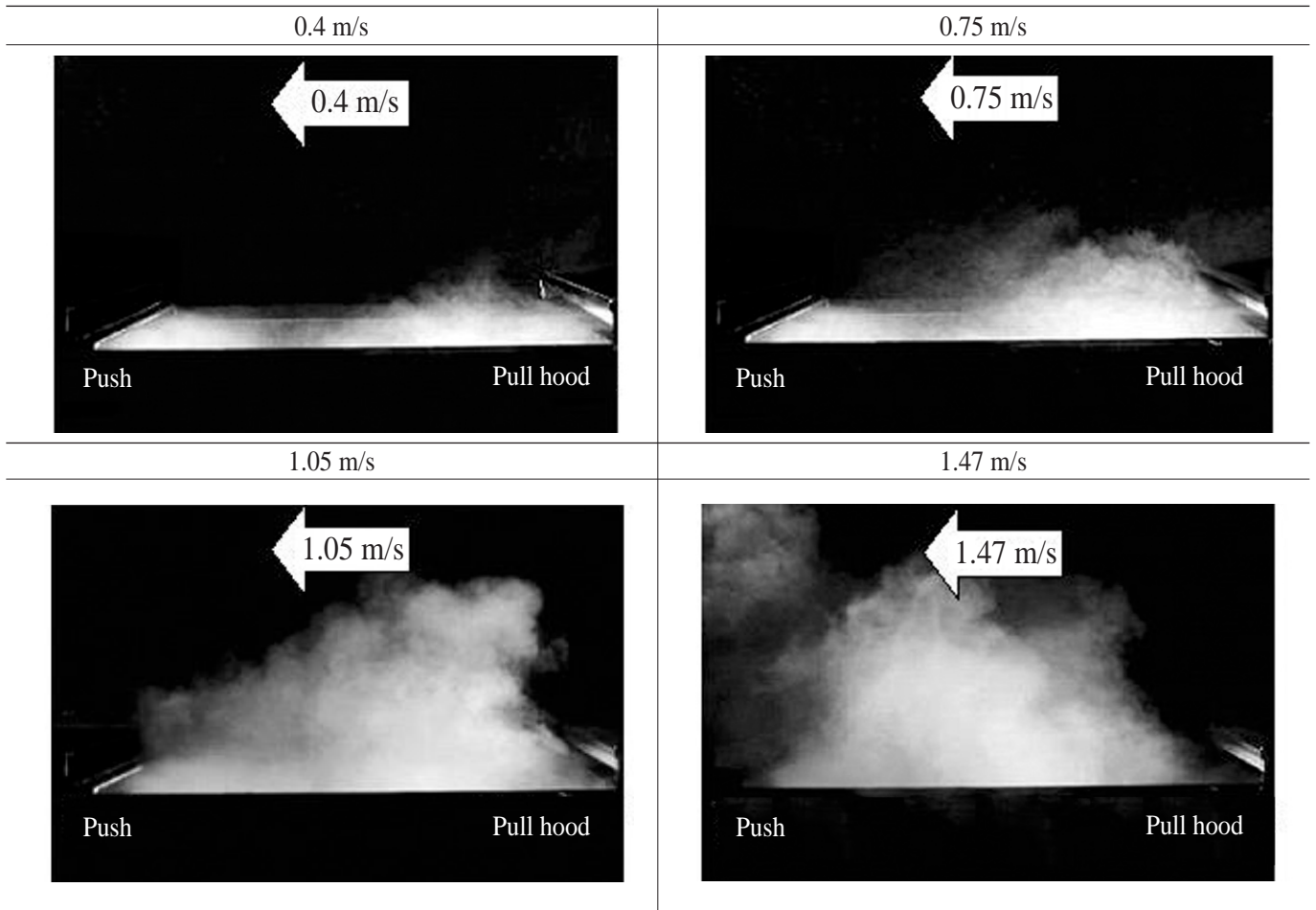


Fig. 9. Flow visualization results for push-pull system with the various cross-draft velocities(송세욱 등, 2005).

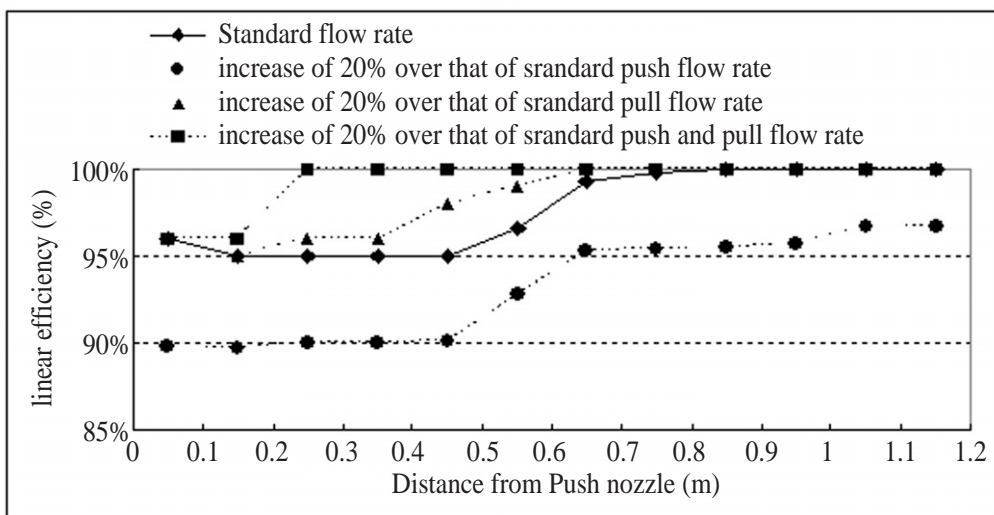


Fig. 10. The result of transverse linear efficiency by increasing push-pull flow rate with no cross draft.

지만, 1.05 m/s일 때는 푸쉬 슬롯의 운동량이 약간 부족하여 푸쉬 슬롯이 조면을 따라 충분한 제트 기류를 형성하지 못해 푸쉬 슬롯 쪽 환기량이 약간 감소하는 것으로 나타났다. 하지만, 방해기류가 1.47 m/s일 때는 푸쉬 슬롯에서 발생된 운동량이 방해기류를 극복하지 못하기 때문에 조표면에 제트를 형성하지 못해 푸쉬 기류가 상승하면서 방해기류의 영향으로 환기 효율이 급격하게 저하되는 것으로 나타났다.

3. 푸쉬풀 유량 변화에 따른 환기 효율

1) 방해기류가 없는 조건

Fig. 10은 방해기류가 없는 조건하에서 푸쉬 슬롯, 풀 후드 그리고 푸쉬풀 유량을 설계 유량의 20%씩 증가했을 때 환기 효율 변화를 정리한 것이다. Fig. 10을 살펴보면 풀 후드 유량과 푸쉬풀 후드 유량 모두를 증가시키면 표준 유량일 때 보다 환기효율이 높아지는 것으로 나타났다. 특히, 푸쉬풀 후드 유량을 20% 증가시켰을 경우에는 조 표면 대부분에서 환기 효율이 100%로 측정되었고, 풀 후드 유량만을 20% 증가시킨 경우에는 0.2 ~ 0.8 m 범위에서 표준유량일 때 보다 높은 환기 효율이 측정되었다. 하지만, 푸쉬 유량만 20%를 증가시킨 경우에는 표준 유량일 때 보다 환기 효율이 오히려 나빠지는 것으로 측정되었다. 이는 푸쉬 슬롯에서 분사된 제트기류를 풀 후드에서 충분히 배기시키지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 방해기류가 거의 없는 표면처리조에서 환기 효율을 제고하고 싶을 경우에는 푸쉬 슬롯 유량만 증가시킬 것이 아니라, 풀후드 유량도 같이 증가시켜야한다는 것을 알 수 있다. 특히, 푸쉬풀 후드의 경우 푸쉬 슬롯 유량 감소는 크게 발

생하지 않는 반면에 풀 후드에 연결된 송풍기의 배기 유량은 부식 등 다양한 이유에 의해 환기유량이 크게 감소하는 경우가 많다. 이러한 경우에 푸쉬풀 후드의 환기 효율이 급감할 수 있기 때문에 푸쉬풀 후드를 설치한 곳에서는 주기적으로 푸쉬 슬롯 및 풀 후드 유량을 측정하여 초기 유량과 큰 차이가 있는 지 확인할 필요가 있다.

Fig. 11은 푸쉬풀 유량 변화에 따른 총환기효율을 정리한 결과이다. 표준환기량일 때 환기효율이 98%인데 반해 풀 후드 및 푸쉬풀 후드 유량을 증가시키면 최대 약 2%정도 환기 효율이 증가하지만, 푸쉬 슬롯 유량을 증가시켰을 경우에는 5%정도 환기 효율이 저하되는 것을 알 수 있다. 푸쉬슬롯과 풀후드의 유량을 증가시킬 경우 송풍량 증가 등으로 인해 설치비 및 운전비 상승 요인으로 작용하는데 반해, 환기 효율 증가는 크지 않기 때문에 비용효과를 고려할 때 작업장 내부 방해기류가 없는 경우에는 표준 환기량을 유지하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 하지만, 푸쉬 슬롯 유량만 증가시키는 것은 푸쉬풀 시스템의 환기효율을 크게 저하시키는 결과를 초래하기 때문에 신중한 접근이 필요하다.

2) 1.47 m/s 방해기류 존재시

Fig. 12는 방해기류 유속이 1.47 m/s일 때 푸쉬풀 유량 증가에 따른 환기효율 변화를 정리한 결과이다. Fig. 6(b)를 보면, 1.47 m/s의 방해기류 존재시 0.3 ~ 0.6m 범위에서 환기효율이 급감하였고, 특히 0.45m에서의 라인별환기 효율은 약 10%대로 급락하는 것으로 나타났다. 하지만, 푸쉬풀 유량을 증가시킨 Fig. 12에서는 모든 조건에서 환기 효율이 80% 이상으로 상승한 것으로 알 수 있다.

푸쉬 슬롯 유량을 20% 증가시켰을 경우에는 Fig. 6(b)에서

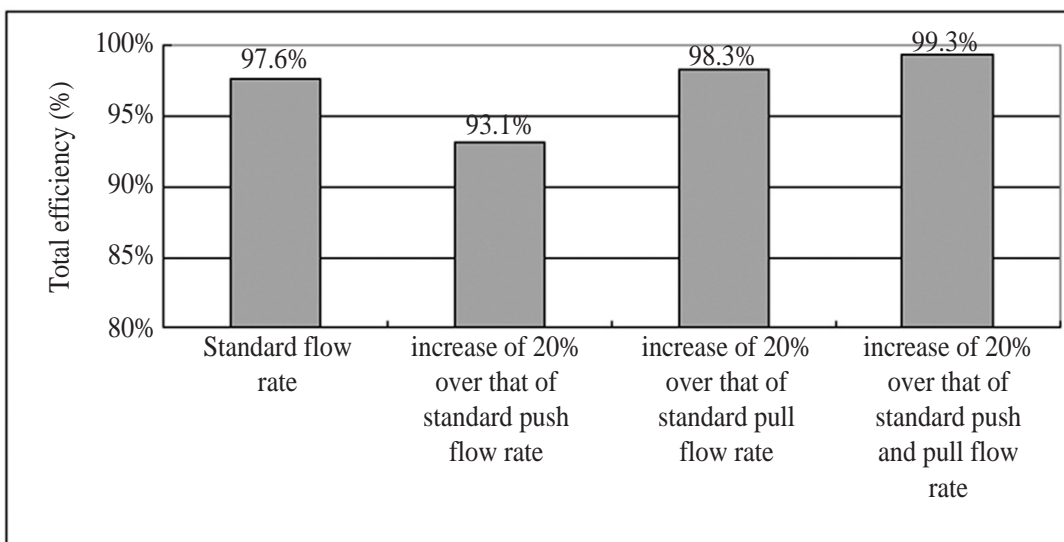


Fig. 11. Total efficiency by increasing push-pull flow rate with no cross draft.

와 같이 0.3 ~ 0.6 m 범위에서 약간의 효율 저하 현상은 발생하지 않지만 풀 후드 부근에서 효율이 낮은 것을 알 수 있다. 즉, 푸쉬 슬롯 유량만 증가시켰을 경우에는 방해기류를 극복할 수 있는 Initial kinetic momentum이 생겨 오염물질을 풀 후드 부근으로 밀었지만, 풀 후드 배기 유량이 부족하여 환기 효율이 충분히 상승하지 못한 것으로 판단된다. 풀 후드만 20% 증가시킨 경우에는 0.3 ~ 0.6 m 범위에서 효율 저하 현상이 여전히 발생하고 있지만, 전체적인 라인별 효율은 80%를 상회하고 특히, 풀 후드 부근에서는 100%의 라인별 환기 효율을 보여주고 있다.

푸쉬풀 후드를 모두 20%씩 증가시키면 전체적인 환기 효율이 높아지는 것으로 나타났다. Fig. 13은 푸쉬풀 후드 유량 증가에 따른 총환기효율을 정리한 것으로, 유량을 증가시킨 모든 조건에서 환기 효율이 20%정도 상승한 것으로 나타났다. 풀 후드에서 푸쉬 슬롯 방향으로 방해기류가 존재할 경우에는 푸쉬 슬롯과 풀 후드 각각 유량을 20%씩 증가시켰을 때, 총환기효율에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

IV. 결론

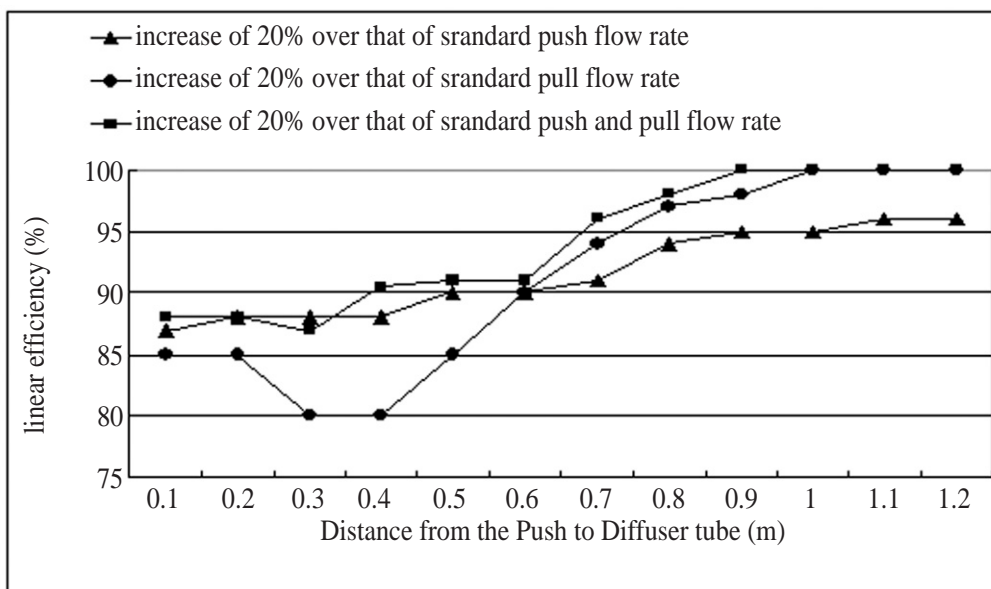


Fig. 12. The result of transverse linear efficiency by increasing push-pull flow rate with cross draft at 1.47m/s

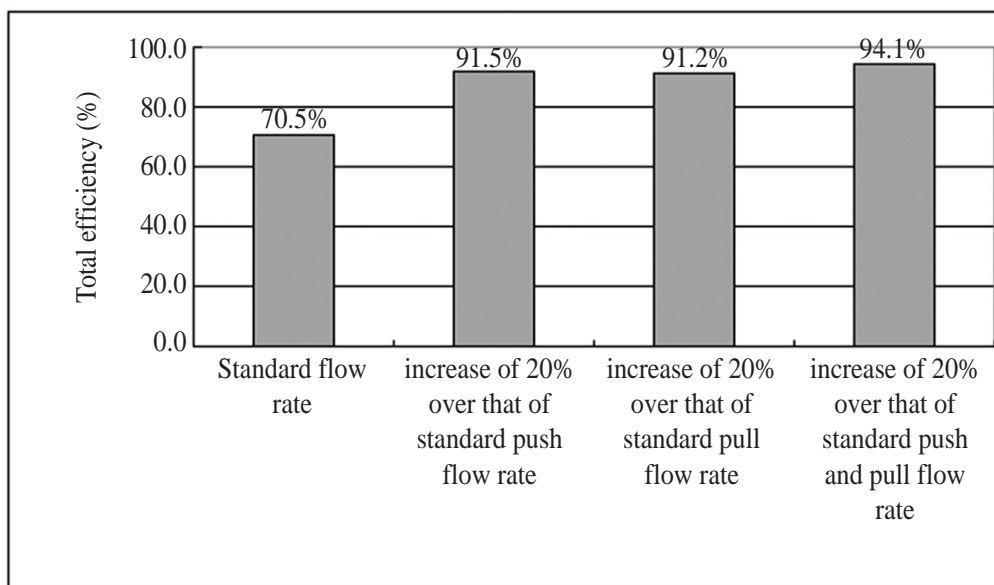


Fig. 13. Total efficiency by increasing push-pull flow rate with cross draft at 1.47m/s

추적자가스법을 이용한 방해기류의 존재시 푸쉬풀 후드 효율을 총 환기효율(total efficiency)과 라인별 환기효율(linear efficiency)로 구분하여 평가하였고, 푸쉬풀 후드 효율 향상 방안을 수립하기 위해 푸쉬 슬롯 유량, 풀 후드 유량 및 푸쉬풀 후드 유량을 각각 20%씩 증가시켰을 때 환기 효율을 평가하였다.

1. 방해기류 존재시 푸쉬풀 후드 효율 평가

방해기류는 풀 후드쪽에서 푸쉬 슬롯 방향으로 0 m/s, 0.4 m/s, 0.75 m/s, 1.05 m/s 그리고 1.47 m/s 불 때 방해기류별 환기 효율을 평가하였다. 총환기 효율은 방해기류 속도 증가에 따라 각각 97.6%, 95.4%, 94.6%, 92.7% 그리고 70.5%로 측정되었다. 방해기류 속도가 1.05 m/s일 때 까지는 환기 효율이 크게 저하되지 않지만, 1.47 m/s의 방해기류가 불면 환기 효율이 방해기류가 없을 때 보다 27.1% 정도 환기 효율이 저하되는 것으로 나타났다.

라인별 환기효율을 평가한 결과 방해기류 유속이 빨리 질 수록 푸쉬 슬롯쪽에서 환기 효율이 크게 저하되는 것으로 평가되었고, 특히, 방해기류 유속이 1.47 m/s일 때는 푸쉬 슬롯에서 0.25 ~ 0.6m 떨어진 지점의 환기 효율이 10% 정도로 급감하는 것으로 측정되었다.

2. 유량 증가에 따른 푸쉬풀 후드 환기 효율 평가

방해기류가 없는 조건에서 푸쉬 유량, 풀 유량, 푸쉬풀 유량을 각각 20%씩 증가시킨 후 환기 효율을 평가하였다. 풀 유량과 푸쉬풀 유량을 증가시킨 경우에는 표준 환기량으로 푸쉬풀 후드를 운전했을 때보다 환기 효율이 높아졌지만, 푸쉬 슬롯 유량만 20% 증가시킨 결과 환기 효율이 표준유량일 때 보다 환기 효율이 4.5% 낮아지는 것으로 나타났다. 풀 후드 유량 증가없이 푸쉬 슬롯 유량만 증가시켰기 때문에, 푸쉬 슬롯 유량을 풀 후드가 충분히 배기시키지 못했기 때문이다.

또, 방해기류가 1.47 m/s 존재할 경우에 유량 증가에 따른 환기량 평가 결과 표준 환기량일 때 보다 환기 효율이 20% 이상 높아지는 것으로 측정되었다. 풀 후드 유량만 증가시킨 경우는 풀 후드쪽 환기량이 증가하고, 푸쉬 슬롯 유량을 증가시키면 푸쉬 슬롯 쪽 환기효율이 높아졌다. 특히, 푸쉬 슬롯 유량을 증가시키면 0.25 ~ 0.6m 지점에서 환기 효율이 10% 정도로 급감하는 현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 방해기류가 존재하지 않을 경우에는 표

준 환기량으로 푸쉬풀 후드를 가동하는 것이 가장 비용효과적이고, 풀 후드 환기량이 감소하지 않도록 주기적인 관리가 필요한 것으로 나타났다. 방해기류가 존재할 경우에는 푸쉬풀 후드 유량을 약 20% 정도 증가시켜서 운전하는 것이 환기 효율을 제고하는데 가장 효율적인 방법인 것으로 조사되었다.

REFERENCES

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

송세욱, 김태형, 하현철, 강호경. 기류 가시화기법을 이용한 방해기류 방향과 속도에 따른 푸쉬풀 후드 효율 평가. 한국산업위생학회지 2005;15(1):36-44

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(a);64(4):455-460

Mazal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A. Methodologies for determining capture efficiencies in surface treatment tanks. Ann. occup. Hyg 2003(b);64:604-608

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