한국산업위생학회지 제14권 제3호(2004년 12월)
J Korean Soc Occup Environ Hyg 2004;14(3):243-250

개방조 후드가 설치된 도금작업장의 방해기류 측정

송세욱[1)‡] · 김태형 · 하현철 · 홍좌령

한국산업안전공단[1)] · 창원대학교 환경공학과

Measurements of Cross drafts Around Open Surface Tanks in Plating Shops

Se-Wook Song[1)‡] · Tae-Hyeung Kim · Hyun-Chul Ha · Jwa-Ryung Hong

Korea Occupational Safety & Health Agency[1)]
Department of Environmental Engineering Changwon National University

Open surface tanks are used in a variety of industrial processes, such as picking and plating. Push-pull ventilation system is often the best and most energy efficient way to remove any contaminant which evaporates from the open surface tanks. Existing design guidelines are based on experimental and numerical works which is cannot easily be extended to different operating conditions. Contaminant removal efficiency of push-pull ventilation could be affected by various parameters, such as vessel shape, room location, cross draft, etc. Especially, the velocity of cross draft might be one of influencing factors for the effective ventilation. To account for the effect of cross draft in case of over 0.4m/s, a flow adjustment of ±20% should be designed into the push and +20% into the pull flow system. For effective design and installation of push-pull system, we must be consider the magnitude of Cross draft velocity. However, the cross draft velocity of workplace installed push-pull ventilation system were not measured yet.

In this paper, we measured the cross draft and door/window face velocities in 8 surface treatment shops in which the push-pull type open surface tanks are generally used. Two-directional hot-wire anemometer was used to measure the velocities after checking the main direction of flow by using smoke-tube. The experiments were performed in both winter and summer since the flow patterns and the velocities were thought to show the quite different seasonal variations. Mean cross draft velocities of winter and summer were measured as 0.60m/s and 0.62m/s, respectively, which is over the operating range, 0.4m/s. In addition, the face velocities through doors and windows were measured as 1.38m/s and 1.79m/s, respectively. The measured cross draft velocity is somewhat higher than 0.4m/s which is recommended for the push-pull hood by ACGIH design guideline. This high cross draft velocity could destroy the hood flow in the push-pull hood system. Thus, it is imperative that the ACGIH design guide line should be modified in the near future.

Key Words : Push-pull hood, Cross draft, Open surface tank, picking and plating, Dual sensor hot wire anemometer.

* 이 논문은 한국과학재단의 지역대학 우수과학자 육성 지원연구비 지원에 의하여 연구되었음.
접수일 : 2004년 9월 7일, 채택일 : 2004년 11월 3일

‡ 교신저자 : 송세욱 (경남 창원시 사림동 창원대학교 환경공학과
Tel : 055-279-8288, E-mail : cfdace@hanmail.net)

Ⅰ. 서 론

1945년 Malin(Robinson et al., 1995)에 의해 최초로 고안된 푸쉬풀 후드 시스템은 도금조와 같은 개방조 후드에서 발생되는 각종 유해물질을 효율적으로 제어하기 위해 적용되고 있는 환기 방법이다. 개방조 환기를 위해 푸쉬풀(push-pull) 후드를 적용할 경우 일반 측방형 후드에 비해 필요 환기량을 약 50% 정도 줄일 수 있는 장점이 있다(ACGIH, 2004).

일반적인 산업환기 시스템에서 배기유량을 설계할 경우에는 제어유속(capture velocity)을 고려하지만, 푸쉬풀 후드 설계 시에는 조내 용액 온도와 조의 표면적만 고려하여 배기유량을 설계한다(ACGIH, 2004). 푸쉬 제트에서 분사된 공기가 조 표면을 따라 흐르면서 형성되는 기류가 일반적인 제어 유속보다 높기 때문에 제어유속을 고려할 필요가 없고, 풀 후드에서는 단지 푸쉬 제트에서 분사된 공기를 충분히 받아 주는 역할만 하게 된다.

푸쉬풀 후드 효율은 푸쉬 기류에 의해 크게 영향을 받기 때문에 푸쉬의 조건을 적절하게 변화시켜 실험(기류 가시화 및 효율 평가)과 전산유체역학을 이용하여 환기 효율 향상 방안을 찾는 연구가 활발히 진행되고 있다.

실험을 통한 연구를 살펴보면, 푸쉬 노즐의 분사각도, 기류 분사속도, 노즐의 형태 등에 따른 푸쉬풀 후드 효율변화를 측정하여 적절한 사용 범위를 설정해 주는 연구가 주를 이루고 있다 (Mazal et al., 2002(a) ; Mazal et al., 2002(b) ; Robinson and Ingham, 1996 ; Robinson and Ingham, 2003).

전산유체역학이 발달하지 못한 과거에는 대부분 실험을 통해서 푸쉬풀 후드 효율 향상방안을 연구하였지만, Heinsohn (1991)이 SIMPLE알고리즘을 이용하여 2차원 푸쉬풀 후드 기류를 해석하여 푸쉬풀 후드 효율을 향상시킬 수 있는 푸쉬제트 기류와 배기 유량을 제안한 이래로 전산유체 역학을 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다(Rota et al., 2001 ; Conroy et al., 2002).

기존 연구결과를 종합하여 푸쉬풀 후드 설계 기준을 마련한 미국 산업환기 매뉴얼에 따르면, 푸쉬풀 후드 설계시 방해기류가 0.38m/s (75ft/min) 이상이거나 조 폭이 2.5m 이상일 경우에는 푸쉬 노즐의 유량은 ±20% 범위에서 적절하게 조절하고, 풀 후드 유량은 20% 증가하도록 하고 있다(ACGIH, 2004).

푸쉬풀 후드는 푸쉬 제트가 조표면을 따라 에어커튼을 형성해주고, 풀 후드에서 푸쉬제트 기류와 오염물질을 배기시키는 형태이기 때문에 푸쉬제트의 기류가 에어커튼을 잘 형성하는 것이 중요하다. 하지만, 방해기류가 강할 경우 푸쉬제트 기류가 에어커튼을 형성하는 것을 방해하기 때문에 오염물질 제어 효율이 크게 저하될 수 있다.

현재 푸쉬풀 후드 효율을 평가하는데 있어 방해기류를 고려한 연구는 크게 진행되지 않고 있다. Watson 등(2001)이 실험 연구를 통해 0.5m/s 정도의 방해기류가 존재하면 푸쉬풀 후드의 환기 효율이 50% 이하로 크게 저하되는 것을 검증한 것과 Rota 등(2001)이 전산유체역학을 이용하여 0.3m/s 이상의 방해기류와 조 폭이 4m 이내인 경우에 푸쉬 유량을 조절할 수 있는 공식을 만든 정도가 방해기류를 고려하여 푸쉬풀 후드 환기 효율을 평가한 연구 결과이다.

미국산업환기 매뉴얼에서 제시한 것처럼 0.38m/s 이상의 방해기류 존재시 ±20% 범위 내에서 유량을 변동하는 것이 아니라, Rota 등의 연구결과와 같이 방해기류가 0.3m/s 이상인 경우에는 방해기류 속도가 빠를수록 푸쉬 노즐의 유량을 증가시키고, 푸쉬노즐 유량 증가에 맞춰 풀 유량도 증가시키는 것이 방해기류를 고려한 푸쉬풀 후드 설계법이 더 타당한 것으로 판단된다.

Rota 등의 연구처럼 방해기류 속도에 따라 푸쉬풀 유량을 적절하게 조절하기 위해서는 현장의 방해기류 실측 자료가 반드시 필요하지만, 개방조가 설치된 작업장의 방해기류 측정 자료가 전무하여 방해기류를 고려한 푸쉬풀 후드 설계에 많은 어려움이 있다. 특히, 우리나라의 산업현장에는 창문 및 출입문의 개방, 대형 선풍기 사용, 급배기 불균형에 따른 작업장 내외 압력차 등에 기인하여 방해기류가 더 강할 것으로 추측되지만 체계적인 측정이 이루어진 적이 없다.

따라서, 본 연구에서는 도금 및 금속표면 처리 작업장 등 푸쉬풀 후드가 설치된 작업장의 방해기류를 계절별로 측정하여 현장의 방해기류 실태를 조사하고, 향후 푸쉬풀 후드 설계 시 이용할 수 있는 방해기류 자료 확보를 목적으로 한다.

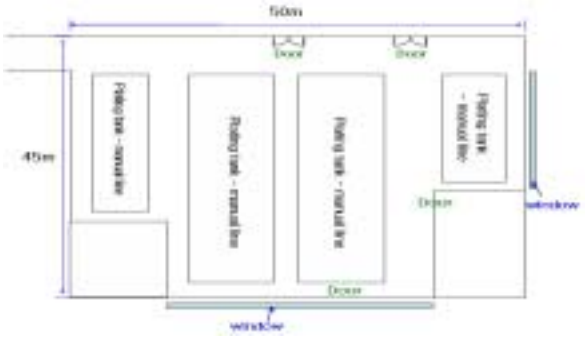
Ⅱ. 연구대상 및 방법

1. 연구 대상

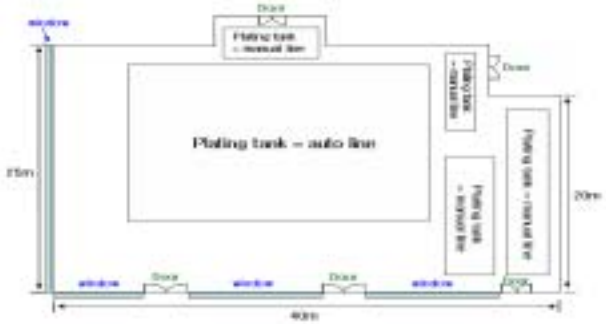
푸쉬풀 후드가 설치된 작업장의 방해기류를 측정하기 위해 부산과 창원에 위치한 금속 표면 처리 및 도금관련 8개 사업장을 연구 대상으로 선정하였다. 동절기 방해기류 측정은 2004년 2월 24일~3월 10일 까지 8개 사업장, 하절기는 2004년 7월 16일~7월 20일 까지 4개 사업장을 대상으로 방해기류를 측정하였다. 8개 사업장을 업종별로 분류하면, 통신기기 및 전자제품 표면처리 2곳, 방위산업체 2곳, 항공기 부품 표면처리 및 도금 2곳, 자동차 부품 표면처리 1곳, 금속 부품 도금 1곳으로 구성되어 있다. Figure 1은 본 연구 대상 작업장 8 곳의 Lay-out으로 도금조와 창문/출입문 위치를 나타낸 것이다. 작업방법은 자동도금(auto line)과 수동도금(manual line) 라인으로 구분할 수 있고, 작업자들은 도금조 사이를 이동하면서 작업 중이었다. 여름에는 모든 작업장에서 출입문과 창문을 열어두었고, 겨울철에는 추위 때문에 창문은 닫아두고 있지만, 출입문은 작업장 상황에 따라 개폐(開閉)를 하고 있었다.

2. 연구 방법

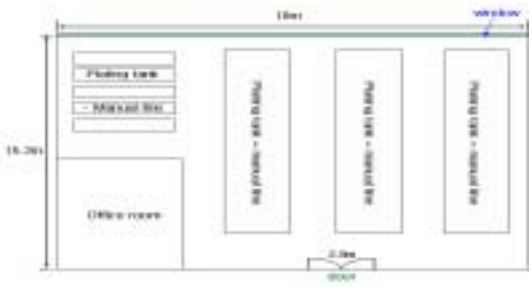
현장 방해기류는 2차원 열선풍속계(TSI Flow Point 1500, USA)를 사용하여 방해기류 속도를 측정하였다. 현장 방해기류



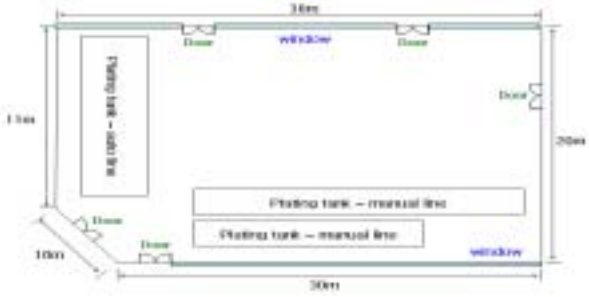
<a> Shop A



<b> Shop B

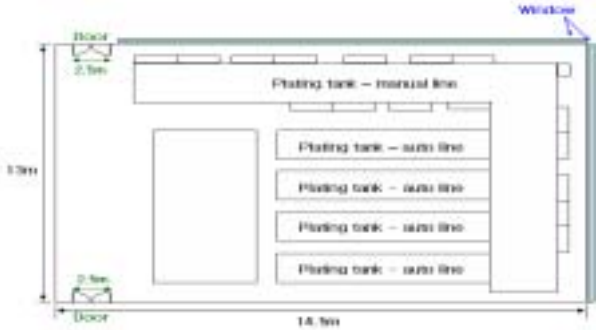


<c> Shop C



<d> Shop D

<e> Shop E



<f> Shop F

<g> Shop G

<h> Shop H

Fig. 1. Lay-out of 8 surface treatment shops

측정 전에 2차원 열선풍속계를 교정하여 측정값의 정확도를 제고하였다.

1) 2 원 열선풍속계 교정

열선 풍속계는 측정이 간편하고 유속을 쉽게 읽어 낼 수 있는 장점이 있는 반면, 측정값의 정확도를 제고하기 위해서 측정 전 반드시 교정(calibration)을 해주어야 한다(하현철 등, 1999(b)). 현장 방해기류 측정을 위한 2차원 열선풍속계는 하현철 등(1999(a))이 열선풍속계 교정에 이용한 풍동 장치를 사용하여 현장 측정 전에 교정을 수행하였다.

2) 현장 방해기류 측정

방해기류 측정시 측정 지점에서 발연관 실험을 통해 주 기류 방향을 확인한 후 주 기류 방향과 2차원 열선풍속계 센서가 마주보게 하여 정확한 방해기류를 측정할 수 있도록 하였다.

Figure 2는 현장 방해기류 측정 모습으로 Figure 2(a)는 발연관 실험을 통해 주기류 방향을 확인하여 센서 위치를 고정하는 모습이다. Figure 2(b)는 2차원 열선풍속계를 이용하여 방해기류를 측정하는 모습으로, 센서에서 측정된 값은 A/D converter를 통해 변환된 후 컴퓨터에 저장된다. 작업장 전체를 균일한 지점으로 나누고 각 지점 당 10분간 10,000Hz의 속도로 연속 측정한 후 평균 풍속을 저장하였다.

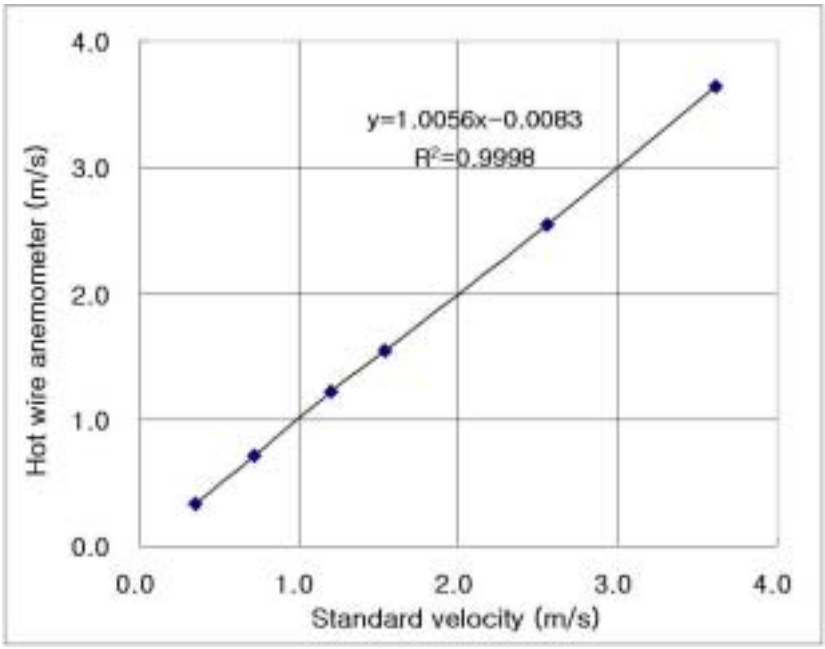


Fig 3. Relationship between measurement velocities(m/s) of dual hot wire anemometer and standard velocities(m/s)

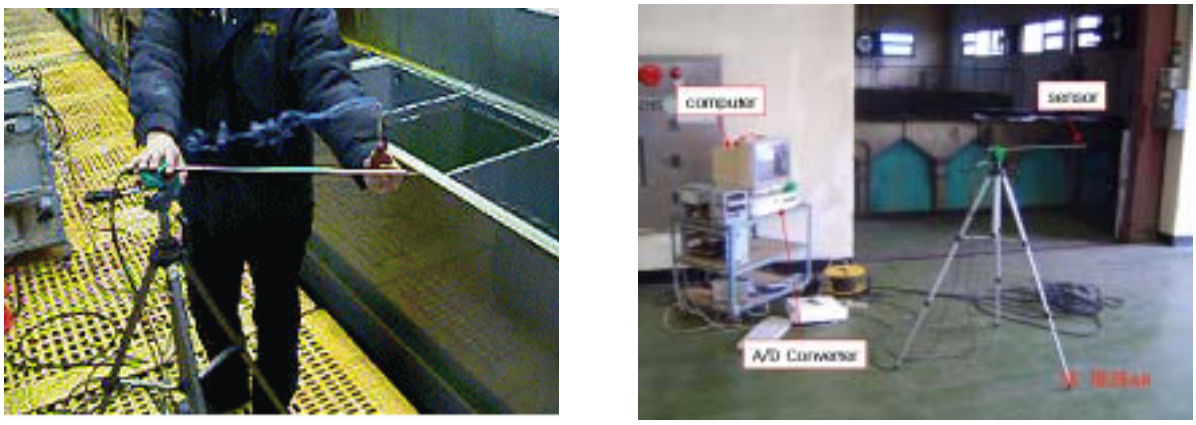
Ⅲ. 연구 결과 및 고찰

1. 2차원 열선풍속계 교정결과

Figure 3은 2차원 열선풍속계 교정 후 풍속 측정 결과를 기준 유속과 비교한 것이다. 6단계의 풍속 측정 결과를 기준 풍속과 비교했을 때 오차 값이 ±0.01m/s이고 상관계수(R^2)도 99.98%로 나타나, 2차원 열선풍속계의 측정값이 매우 정확하다는 것을 알 수 있었다.

2. 방해기류 측정 결과

푸쉬풀 후드가 설치된 부산, 창원지역 8곳의 도금 및 표면처리 작업장의 계절별 방해기류를 측정하였다. 작업장 내부 지역과 출입문 및 창문 개구면으로 구분하여 측정한 결과를 정리하였다.



<a> Smoke test for flow indicator

<b> Experimental set-up

Fig 2. Measuring method of cross draft in practical work place

Table 1. Measurement results of cross draft velocities and door/window face velocities

Classification	winter		summer	
	Cross draft Velocity (m/s)	Door/window Face velocity (m/s)	Cross draft Velocity (m/s)	Door/window Face velocity (m/s)
A	0.52±0.22	1.00±0.80	0.70±3.34	0.69±0.37
B	0.49±0.28	1.61±1.46	0.67±1.00	2.98±0.52
C	0.59±0.22	1.48±0.36	0.72±1.51	2.10±0.30
D	0.79±0.33	1.64±0.41	0.37±0.88	1.39±1.20
E	0.44±0.21	0.90±0.37	-	-
F	0.66±0.61	0.97±0.67		
G	0.79±0.26	1.92±0.87		
H	0.50±0.27	1.53±0.91		
Mean Cross draft velocity	0.60	1.38	0.62	1.79

1) 작업장 내 방해기류 측정결과

Table 1은 겨울과 여름철에 측정한 8개 사업장의 방해기류 속도를 정리한 것이다. 동절기에는 8개 작업장에서 방해기류를 측정하였고, 여름철에는 A~D까지 4개 작업장에서만 측정하였다. 동절기와 여름철 작업장 내부 평균 방해기류 유속은 각각 0.60m/s와 0.62m/s로 계절적으로 방해기류 유속의 차이는 없었고, 두 계절 모두 0.4m/s 이상의 빠른 방해기류가 형성되어 있는 것으로 나타났다.

(1) 동절기 측정 결과

도금 및 표면처리 작업장 8곳에 대한 동절기 방해기류 측정결과는 Figure 4와 Figure 5에 나타내었다.

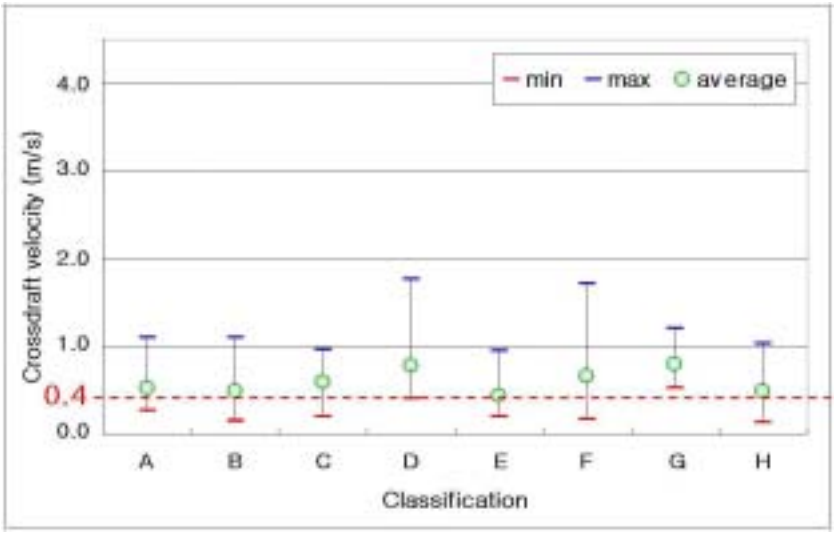


Fig 4. Cross draft velocities in the winter

Figure 4의 작업장 내부 방해기류 측정결과를 보면, 측정이 실시된 8개 작업장의 평균 방해기류 속도는 0.4m/s 이상을 초과하고 있는 것으로 나타났고, D, G 작업장은 작업장 내부 평균 방해기류 유속이 0.8m/s로 높게 측정되었다.

Figure 5는 출입문과 창문을 통해서는 유입되는 외기 유속을 측정한 것으로, 작업장 별로 평균 유입속도는 0.9~1.9m/s이고, A, B, C, D, G, H 작업장은 평균 1.0m/s의 빠른 속도로 출입문과 창문을 통해 외부 기류가 유입되고 있었다. 출입문과 창문을 통해 외부 기류가 유입되는 이유는 푸쉬풀 후드 시스템 이외에 추가의 급기공기가 없고, 풀 후드 배기량이 푸쉬노즐 급기량 보다 절대적으로 많아 작업장 전체에 음압이 형성되기 때문이다.

동절기의 경우 찬 외기가 유입되기 때문에 창문은 닫아두고, 물류와 작업자 출입을 위한 출입문만 열어두고 있어 부족한 급기량이 출입문을 통해 보충되고 있다. Figure 6은 동절기 출입문으로 유입되는 기류와 작업장 내부 방해기류와의 상관도를 나타낸 것으로 상관계수(R^2)가 64% 정도로 높은 유의 수준을 보여주고 있어, 작업장 내부 방해기류의 속도는 출입문으로 유입되는 기류 속도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

따라서, 동절기 도금 및 표면처리 작업장의 방해기류 속도를 낮추기 위해서는 출입문의 개방 면적을 조절하는 등의 방법으로 출입문을 통해 유입되는 기류 속도를 조절해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

(2) 하절기 측정결과

하절기에는 동절기 때 측정한 8개의 사업장 중 4개 사업장을 선정하여 동절기와 같은 방법으로 방해기류를 측정하였고, 그 결과는 Figure 7과 Figure 8에 나타내었다.

하절기 방해기류 측정 결과 4 곳의 작업장 중 D작업장을 제외하고는 0.6m/s 이상으로 동절기 작업장 내부 방해기류 측정값보다 높게 측정되었고, 출입문 및 창문을 통해 유입되는 기류 속도도 동절기보다 하절기가 높은 것으로 측정되었다. 하절기 작업장 내부 방해기류의 원인을

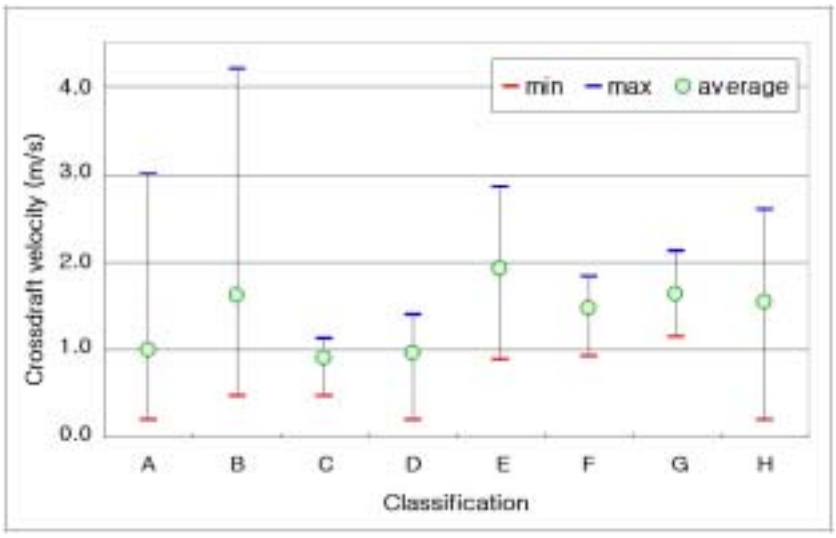


Fig 5. Door and window face velocities in the winter

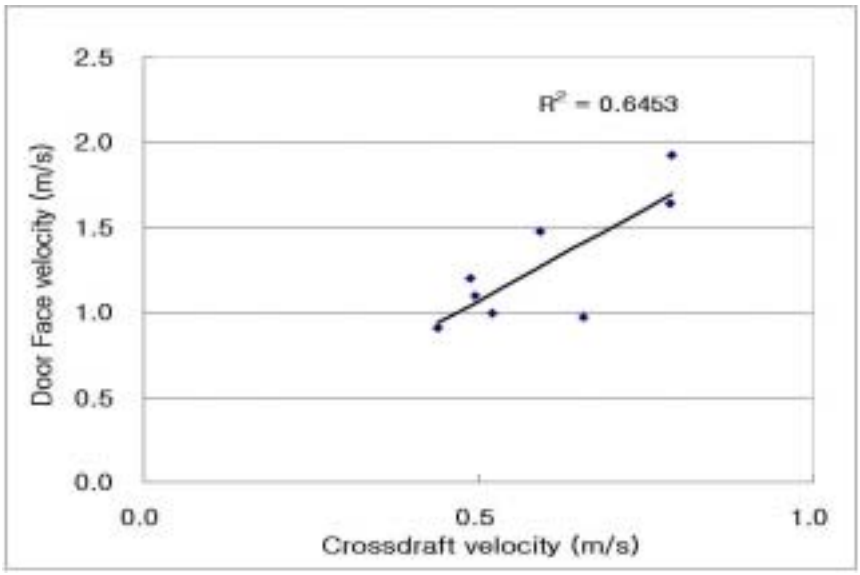


Fig. 6. Relationship between door face velocities and cross draft velocities

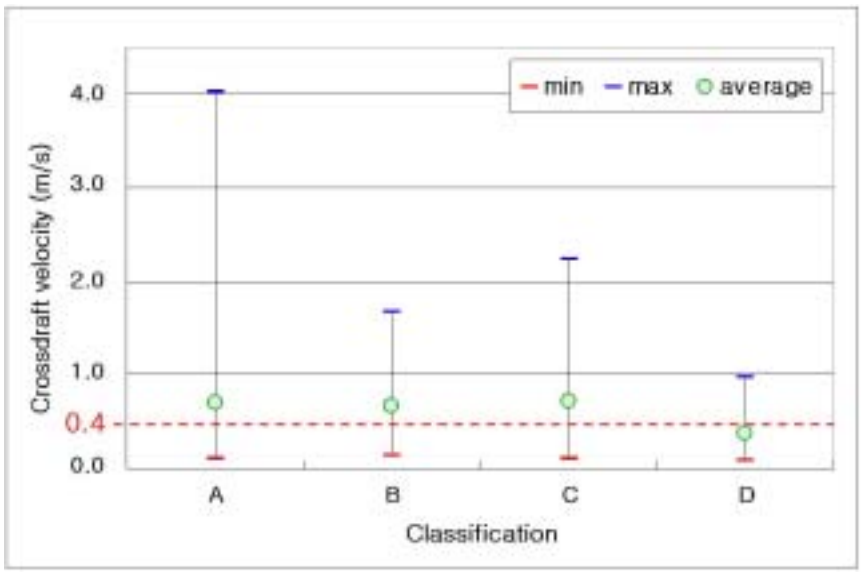


Fig 7. Cross draft velocities in the summer

알아보기 위해 동절기와 마찬가지로, 출입문 및 창문으로 유입되는 기류 세기와 방해기류와의 상관관계를 분석하였다. 하절기 4개 작업장의 출입문 및 창문으로 유입되는 기류 세기와 방해기류와의 상관관계를 살펴본 결과 상관계수(R^2)가 3%에 불과하여, 동절기와는 달리 출입문과 창문으로 유입되는 기류와 작업장 내부 방해기류와는 큰 관계가 없는 것으로 나타났다.

하절기 현장의 방해기류를 측정하면서 나타난 공통적인 특징은 공기조화시스템(냉방기)이 없어 대부분 작업장이 매우 덥고, 도금조에서 발생되는 미스트 및 증기 때문에 습도가 높다는 것이다. 고온 다습한 환경을 극복하기 위해 대부분의 작업자들이 임의로 대형 선풍기를 가동하고 있었는데, 선풍기 평균 토출 유속은 7.5m/s로 측정되었다. 이러한 이유 때문에 A 작업장의 경우 선풍기가 도금조를 향하고 있어 도금조 주변 최대 방해기류 유속이 무려 4m/s 이상 측정되기도 하였다. 즉, 하절기 작업장 내부 방해기류는 출입문과 창문으로 유입되는 보충공기보다는 작업자가 냉방을 위해 사용하는 선풍기 기류가 더 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. 하절기 선풍기 기류에 의해 4m/s 이상의 방해기류가 형성된다면, 푸쉬풀 후드의 오염물질 제거 효율은 거의 없을 것으로 판단되어 선풍기 기류를 적절히 조절할 필요가 있는 것으로 나타났다.

(3) 동·하절기 방해기류 비교

계절에 따른 작업장 내부의 방해기류 세기의 양상을 살펴보기 위해 동·하절기 작업장별 측정 결과를 SPSS(Ver. 10.0)를 이용하여 통계적 유의성을 검정해 보았다. 통계분석결과 방해기류 세기에 대한 계절적인 영향은 유의성이 없는 것으로 나타나 ($p>0.05$), 계절에 상관없이 다양한 원인에 의해 방해기류가 항상 형성되고 있는 것으로 파악되었다.

현장측정을 실시한 8개 사업장 중 동절기 D작업장을 제외하고는 작업장 내부 방해기류 속도가 0.4m/s를 넘는 것으로 조사되어, 향후 푸쉬풀 후드 설계시 방해

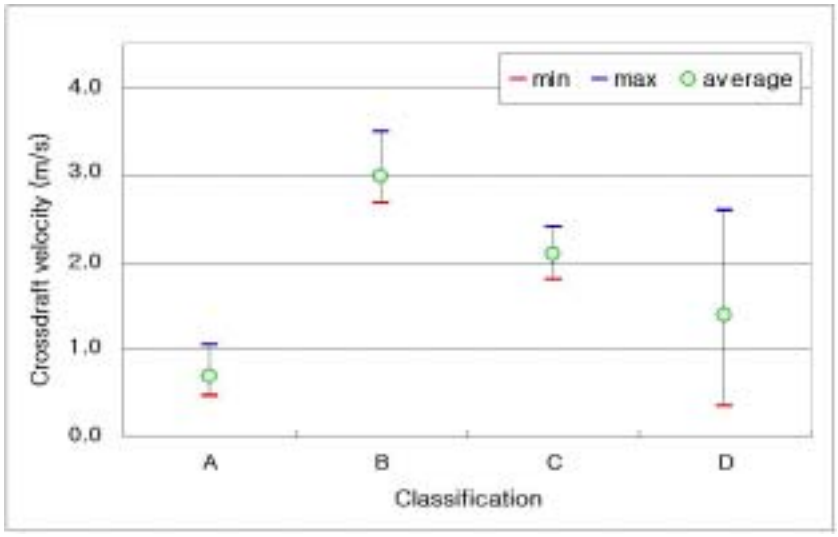


Fig 8. Door and window face velocities in the summer

기류를 고려해야 되는 것으로 나타났다. 또, 동절기 방해기류의 원인은 출입문을 통해 유입되는 보충공기 속도에 영향을 받고, 하절기는 선풍기 등에서 발생된 기류에 의해 주로 영향을 받는 것으로 나타났다.

2) 작업장 내 기류 흐름

Figure 9는 B작업장의 30지점 방해기류 측정 결과를 그래프 작성 프로그램인 Surfer(Version 8.0, Golden software, USA)를 이용하여 기류 방향 벡터와 등속도 분포를 표시한 것이다. 방해기류 방향을 살펴보면, 동하절기에 상관없이 출입문이나 창문을 통해 유입되어 작업장 내부로 향하는 동일한 기류 패턴을 보여주고 있다. 등속도선 분포를 살펴보면, 동절기의 경우 외부 기류가 유입되는 출입문 쪽은 1.0m/s 이상의 높은 속도가 형성되는 반면 작업장 내부는 0.2~0.5m/s의 속도 분포를 보여주고 있다. 하지만, 하절기의 경우 동절기와 마찬가지로 출입문과 창문 지역의 방해기류 속도가 높고 특히, 선풍기가 위치한 지역에 아주 높고 강한 기류가 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

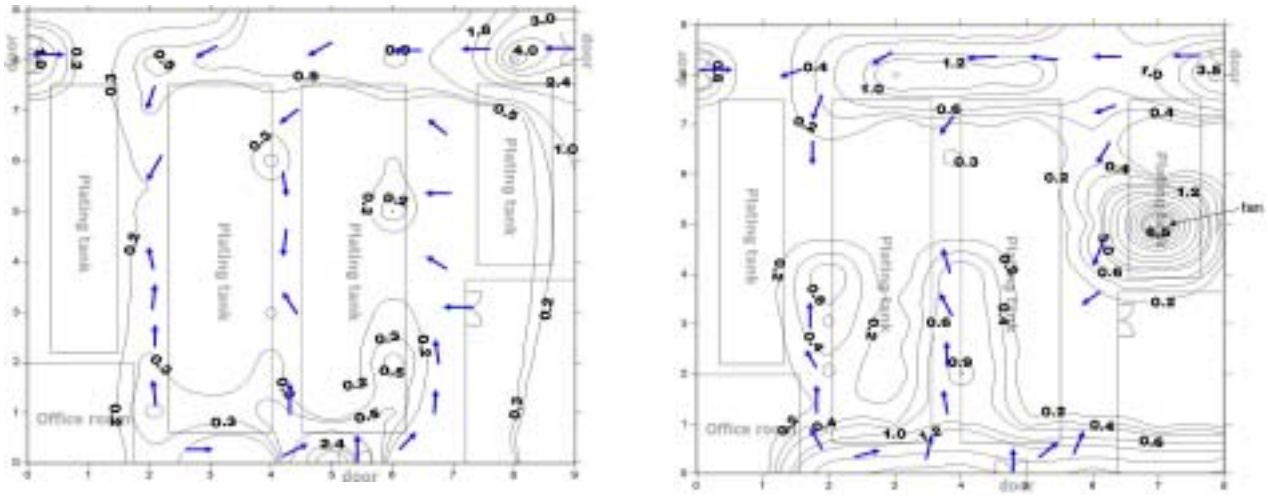
등속도 분포도를 살펴보면, 앞서 설명한바와 같이 동절기에는 출입문으로 유입되는 기류가 하절기에는 선풍기 기류가 작업장 내 방해기류를 형성하는 주원인인 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

우리나라 도금사업장에서 발생하고 있는 방해기류의 세기의 정도를 파악하기 위해 동절기와 하절기의 도금 및 표면처리 작업장 방해기류 속도를 측정하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 8 개 작업장의 동절기 평균 방해기류 유속은 0.60±1.16(m/s), 4개 작업장의 하절기 평균 방해기류 유속은 0.62±3.41 (m/s)로 측정되어, 푸쉬풀 후드 설계시 방해기류 속도를 고려해 주어야 하는 0.4m/s를 모두 초과하는 것으로 조사되었다.

2. 방해기류 속도는 계절에 관계없이 항상 높게 측정되었고, 방해기류의 형성 원인을 살펴본 결과 동절기에는 출입문을 통해 유입되는 기류에 의해, 하절기에는 작업장 냉방을 위해 가동하는 선풍기 기류에 의해 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다.



<a> winter

<b> summer

Fig 9. Flow pattern and cross draft velocity contours in plant B by season

3. 8개 도금 및 표면처리 작업장의 방해기류를 측정해 본 결과 계절에 상관없이 0.6m/s 이상의 높은 방해기류가 형성되고 있기 때문에, 향후 푸쉬풀 후드 설계시 방해기류를 고려하여 적절히 푸쉬풀 유량을 조절해야 하는 것으로 나타났다.

REFERENCE

하현철, 김태형, 김은아, 김종철, 오정룡, 등. 풍동장치를 이용한 열선풍속계의 보정 및 실태 평가. 한국산업위생학회지 1999(a);9(2):110-122

하현철, 김태형, 김종철, 심광진, 김은아. 열선풍속계 보유 및 관리 실태조사와 효율적 관리방안. 한국산업위생학회지 1999(b);9(2):123-134

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

Heinsohn J. Industrial ventilation : Engineering Principles.; 1991. p. 577-588

Conroy L, Trevelyan P, Ingham B. An analytical, numerical, and experimental comparison of the fluid velocity in the vicinity of an open tank with one and two lateral exhaust slot hoods and a uniform Cross draft. Ann. occup. Hyg 2000;44(6):407-419

Robinson M, Ingham B. Recommendations for the design of push-pull ventilation systems for open surface tanks. Ann. occup. Hyg 1996;40(6):693-704

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

Watson I, Cain R, Cowie H, Cherrie W. Development of a push-pull ventilation system to control solder fume. Ann. occup. Hyg 2001;45(8)669-676