

변위환기를 이용한 대형 용접작업장의 공기환경 개선에 관한 연구

문정환[†], 조동환, 강석윤^{*}, 최충현^{**}, 임윤철^{**}, 이재현^{***}
한양대학교 대학원 기계공학과, ^{*}한양대학교 기계기술연구소, ^{**}(주)명진에어테크, ^{***}한양대학교 기계공학부

Improvement of Indoor Air Environment in a Large Welding Factory by Displacement Ventilation

Jung-Hwan Moon[†], Dong-Hwan Cho, Seok-Youn Kang^{*}, Choong-Hyun Choi^{**},
Yun-Chul Im^{**}, Jae-Heon Lee^{***}

ABSTRACT: In this paper, the indoor air environment in a large welding factory applied to displacement ventilation was investigated with experiment and numerical analysis for previous and new ventilation system. Concentration of fumes was analyzed for three cases with wind direction of outdoor. For experimental results, the dust concentration with new ventilation system decreased about 42-60% and the visibility increased about 11-18%. For numerical analysis, the exhaust efficiency of fumes was low when the wind and exhaust flow direction was inverse. It was found that the fumes in the factory decreased about 77% in case of the northern wind.

Key words: Displacement ventilation(변위 환기), Welding fumes(용접흄), Visibility(가시도), Dust concentration(분진 농도)

1. 서론

오염물질을 제거하는 환기 방식으로 변위 환기(displacement ventilation)를 이용한 방법이 많이 이용되고 있다. 특히 사무실이나 거주공간에 비해 조선소와 같은 대형 용접작업장은 규모가 크고 오염물질의 양과 강도가 매우 다양하게 나타나므로 환기시스템의 설계 및 성능 확보가 매우 어렵다. 또한 팬 용량 및 성능 문제와 자연 환기에 의한 풍향 및 환기량의 변화가 심해 변위환기를 이용하여 환기 성능을 높이기 쉽다.

대형 용접작업장에서 발생하는 용접흄, 분진

등은 내부의 작업자들에게 건강상 위협^{(1),(2)}을 초래할 수 있으므로 노동부에서는 작업장 내 용접흄의 허용 농도를 5 mg/m³으로 규정하고 있다. 그러나 기존에 쓰이고 있는 국소배기장치나 환기시스템은 포집 효율이나 환기효율이 낮아 개선이 요구되고 있다. Lee⁽³⁾ 등은 기존 초대형 작업장에 공간환기를 이용한 환기시스템을 수치해석을 이용하여 적용한 바 있으며 이를 통해 설계된 환기시스템의 정량적인 평가와 유사 공간에 적용할 경우 다양한 외기 조건에 따른 실내 공기의 환경평가 등의 추가연구가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 기존의 환기시스템과 비교하여 변위환기를 이용하여 설계된 개선 환기시스템에 대해 풍향에 따른 작업장 내의 용접흄 농도를 이론적으로 예측하였다. 또한 실험을 통해 실제 분진 농도와 가시거리를 측정하여 작업장 내의 공

† Corresponding author
Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2293-5169
E-mail address: ddasick@ihanyang.ac.kr

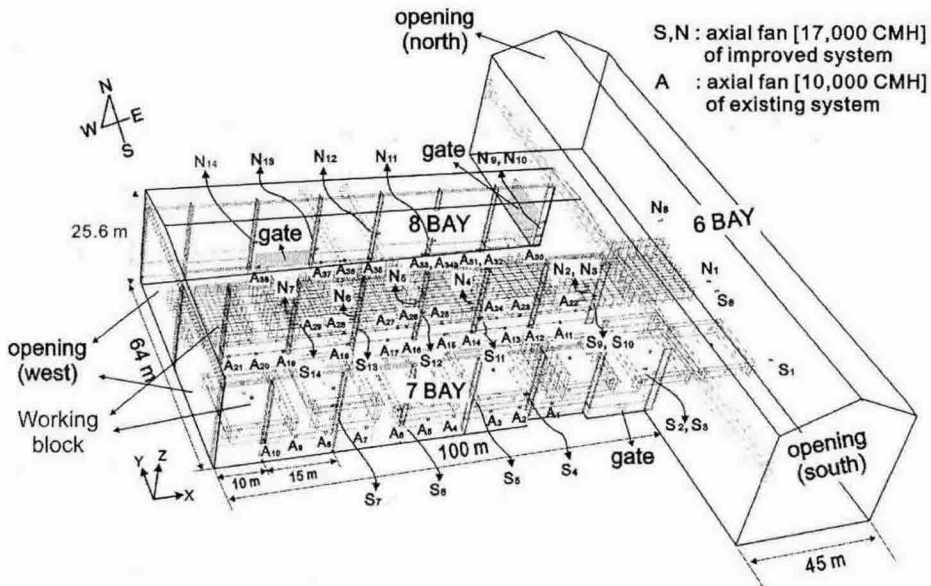


Fig. 1 Schematic of a large welding factory in the present study.

기환경을 비교 분석하였다.

2. 대형 용접작업장

본 연구에서는 D 조선소의 용접장을 연구 모델로 선정하였으며 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 대형 용접작업장은 크게 6, 7, 8 BAY로 구성되어 있으며 각 BAY의 내부는 모두 연결되어 있다. 주된 용접 작업이 이루어지는 7, 8 BAY의 크기는 가로 100.0 m, 세로 64.0 m, 높이 25.6 m이며 서측면은 모두 개구부이다. 또한 6 BAY의 서측면, 7 BAY의 남측면, 그리고 8 BAY의 북측면에는 출입문이 존재한다. 6 BAY의 크기는 가로 45.0 m, 세로 150.0 m, 높이 32.7 m이며 남쪽과 북쪽 방향에 개구부가 있으며 7, 8 BAY와 연결되어 있다.

작업장 내부에는 실제 용접작업이 이루어지는 다양한 형태의 블록이 14개 있으며 작업 형태에 따라 7 BAY에 14대, 8 BAY에는 41대의 용접기가 가동되고 있다.

작업 공간 내부에는 기존 환기 시스템으로 사용 중인 환기팬(A_n)이 7 BAY의 남측에 10대, 북측에 11대, 8 BAY의 남측에 8대, 북측에 9대 등 총 38대가 2.2 m 높이에 설치되어 있다. 환기팬의 풍량은 10,000 CMH이며 각 BAY의 환기팬은

내부의 블록 방향으로 급기된다.

한편 개선 환기 시스템은 기존 환기 시스템 대신 제트팬(S_n, N_n)이 6 BAY에 4대, 7 BAY에 12대, 그리고 8 BAY에 12대 등 총 28대가 각 BAY의 북측과 남측에 설치되어 있다. 제트팬은 7, 8 BAY에서 높이 6.7 m와 10 m에 위치하고 있으며, 6 BAY에서는 8 m에 위치하고 있다. 한편 제트팬의 풍량은 17,000 CMH이며 노즐 출구에서의 전면 풍속은 35 m/s이다. 작업장 내부에서 발생된 용접흄을 외부로 배출시키기 위하여 제트팬은 모두 서측 개구부 방향으로 설치하였으며 일정한 경사각을 가지고 있다.

3. 작업장 용접흄 농도 해석

3.1 지배방정식 및 흄 모델링

대형 용접작업장에 적용된 환기 시스템에 따른 용접흄 농도를 예측하기 위하여 수치해석을 수행하였으며 농도방정식과 함께 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지방정식 그리고 난류운동량 소멸 방정식을 함께 계산하였다. 난류모델로는 용접흄의 부력 효과를 고려한 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 자세한 수식은 생략하였다.

대형 용접작업장 7, 8 BAY에는 CO₂ 용접에

의해 흠이 발생하며 작업량을 고려하여 7 BAY에 14대, 8 BAY에서 41대의 용접기가 여러 블록에서 가동 중인 것으로 가정하였다. 이 때 용접기 1대에서 발생하는 흠은 약 400 mg/min이다.

3.2 경계조건

지배방정식과 함께 정의되는 경계조건의 상세사항을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 v_n 은 팬의 토출면 수직방향 속도이며 v_o 는 외기의 속도, S는 흠 발생량이다. 또한, 외기조건으로는 기상청의 데이터를 기준으로 동남동풍(ESE), 남서남풍(SWS), 그리고 북풍(N)이 1.5 m/s인 세 가지 경우를 Case A, B, C로 나누어 해석하였다.

4. 실험 장치 및 방법

환기 시스템에 따른 공기 환경의 정량적 평가를 위하여 대형 용접작업장의 분진 농도와 가시거리를 측정하였으며 실험 장치 및 측정 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치는 분진측정기, 가시거리측정기 및 PC로 구성되며 분진의 농도는 TSI사의 DustTRAK을 이용하여 측정하였고 가시거리 측정은 SICK사의 VISIC 610을 사용하였다.

용접 작업장 내부의 분진 농도는 5분간 측정하여 평균하였으며 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 측정 위치는 1.5 m 높이에서 7, 8 BAY의 총 24 지

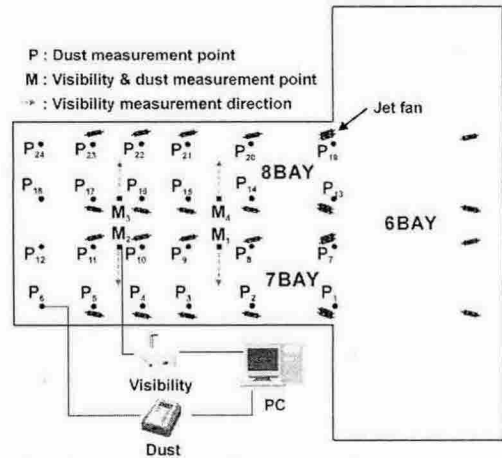


Fig. 2 Experimental setup and measurement points for dust and visibility.

점(P_1 - P_{24})이다.

가시거리 측정 시 계측 장비의 특성상 일정한 높이와 전방 거리 확보가 필요하므로 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 7, 8 BAY의 총 4 곳(M_1 - M_4)에서 측정하였으며 설치 높이는 약 5 m이다. 또한 7 BAY의 경우 가시거리를 북쪽 방향으로, 8 BAY의 경우 남쪽 방향으로 측정하였다. 이 때 측정 간격은 10초이며 측정 시간은 한 지점에서 환기 시스템의 종류에 따라 각각 2 시간씩 총 4 시간동안 이루어졌다.

5. 결과 및 고찰

초대형 용접작업장의 환기 시스템에 따른 공기 환경은 분진농도, 가시거리 그리고 수치해석을 통해 $z=5$ m 단면에서의 용접흠 농도 분포에 근거하여 논의되었다.

5.1 분진 농도

환기 시스템에 따라 측정된 용접 작업장 내 분진의 농도를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 측정된 분진 농도는 외기의 분진 농도 0.03 mg/m^3 이 포함된 값이다. 기존 환기시스템의 경우 7, 8 BAY의 1.5 m에서 측정된 분진의 농도는 각각 $0.36 \sim 1.2 \text{ mg/m}^3$, $0.38 \sim 1.14 \text{ mg/m}^3$ 로 유사한 범위를 가지며 평균 분진 농도는 7 BAY의 경우 0.65 mg/m^3 , 8 BAY는 0.94 mg/m^3 로 나타났다. 한편 개선 환기시스템의 경우 7, 8 BAY의

Table 1 Boundary conditions

Locations	Conditions		
	ESE	WSW	N
A_1 - A_{38}	$v_n = 10 \text{ m/s}$		
N_1 - N_{14}	$v_n = 35 \text{ m/s}$		
S_1 - S_{14}	$v_n = 35 \text{ m/s}$		
wall	$u = v = w = 0$		
gate	outflow		
opening (west)	outflow	$v_o = 1.5 \text{ m/s}$	outflow
opening (north)	outflow	outflow	$v_o = 1.5 \text{ m/s}$
opening (south)	$v_o = 1.5 \text{ m/s}$	$v_o = 1.5 \text{ m/s}$	outflow
welding machine	$S = 6.6 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$		

Table 2 Dust concentrations with ventilation systems

Point (7 BAY)	unit:[mg/m ³]		Point (8 BAY)	unit:[mg/m ³]	
	existing system	improved system		existing system	improved system
P ₁	0.57	0.32	P ₁₃	0.62	0.51
P ₂	0.91	0.44	P ₁₄	0.89	0.43
P ₃	0.61	0.37	P ₁₅	0.79	0.30
P ₄	0.85	0.46	P ₁₆	0.46	0.35
P ₅	0.53	0.34	P ₁₇	0.48	0.28
P ₆	0.37	0.31	P ₁₈	0.38	0.27
P ₇	0.48	0.52	P ₁₉	0.77	0.48
P ₈	0.77	0.55	P ₂₀	3.30	0.62
P ₉	1.20	0.39	P ₂₁	1.14	0.46
P ₁₀	0.48	0.33	P ₂₂	0.72	0.31
P ₁₁	0.37	0.28	P ₂₃	0.74	0.28
P ₁₂	0.36	0.24	P ₂₄	0.76	0.30
avg.	0.65	0.39	avg.	0.94	0.39

분진 농도는 각각 0.24~0.55 mg/m³, 0.28~0.62 mg/m³였으며, 평균 분진 농도는 모두 0.39 mg/m³으로 감소하는 것으로 나타났다. 기존 환기시스템에 비하여 개선 환기시스템의 경우 용접작업장의 1.5 m 높이에서의 평균 분진농도는 7 BAY에서 42%, 8 BAY에서 60% 정도의 감소 효과를 보였다.

5.2 가시거리

환기 시스템에 따라 측정된 용접 작업장 내 가시거리와 분진농도를 Table 3에 나타내었다. 기존 환기시스템과 개선 환기시스템 모두 가시거리는 7 BAY에 비해 작업량이 다소 많은 8 BAY에서 낮게 나타났으며, 개선 환기시스템의 경우 가시거리는 기존 시스템에 비해 약 11~18% 정도 증가하였다. 가시거리는 분진 농도에 크게 좌우되므로 동일한 위치에서 측정된 분진 농도를 살펴보면 기존 환기시스템에 비해 개선 환기시스템의 경우가 약 33~67% 증가한 것으로 나타났다. 이로 미루어 기존 환기시스템에 비해 개선 환기시스템이 외부로의 오염물질 배출이 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

5.3 용접흄 농도

Table 3 Visibility and dust concentration with ventilation systems

Point	existing system		improved system	
	Vis. [m]	Con. [mg/m ³]	Vis. [m]	Con. [mg/m ³]
7 M ₁	1,621	0.269	1,799	0.109
BAY M ₂	1,427	0.457	1,629	0.258
8 M ₃	1,476	0.236	1,721	0.097
BAY M ₄	1,265	0.518	1,489	0.355

5.3.1 ESE wind

동남동풍이 부는 경우 대형 용접작업장 내의 기존 환기시스템과 개선 환기시스템의 환기 성능을 비교 분석하기 위하여 각각의 정상상태 용접흄 농도를 Fig. 3에 나타내었다.

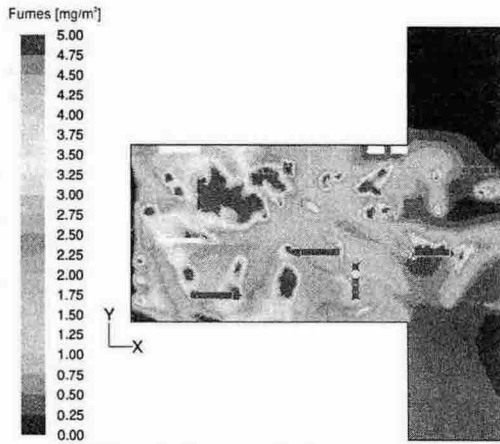
기존 환기시스템의 z=5.0 m에서의 흄 농도인 Fig. 3(a)를 살펴보면 부력에 의해 상승한 용접흄이 공기와 희석되면서 단면 평균 흄 농도가 2.66 mg/m³으로 비교적 낮게 나타났다. 그러나 기류 정체에 의해 블록 주변에서 용접흄 농도가 높게 나타나는 영역이 다수 존재하므로 외부로의 배출을 촉진시켜야 할 것으로 보인다.

Fig. 3(b)의 개선 환기시스템의 z=5.0 m에서의 흄 농도분포를 살펴보면 블록에서 발생한 용접흄은 6 BAY의 남측 개구부로 유입된 외부의 신선한 공기와 희석되어 서측 개구부로 원활히 배출되고 있음을 알 수 있으며 8 BAY의 일부 영역을 제외하고 대부분의 영역에서 2 mg/m³ 이하로 용접흄의 농도가 낮게 유지되었다. 한편 단면 평균 흄 농도는 1.56 mg/m³으로 기존 환기시스템에 비해 낮지만 개선 효과는 크지 않음을 알 수 있다.

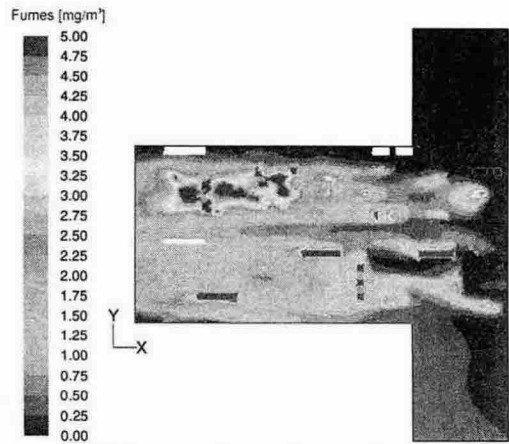
한편 대형 용접작업장 공간 전체의 용접흄 농도는 기존 환기시스템의 경우 1.85 mg/m³, 개선 환기시스템의 경우 0.93 mg/m³으로 동남동풍이 부는 경우 개선 환기시스템의 흄 농도 저감은 기존에 비해 49.7%의 개선된 효과를 보였다.

5.3.2 SWS wind

남서남풍이 부는 경우 기존 환기시스템과 개선 환기시스템의 정상상태 용접흄 농도를 각각 Fig. 4에 나타내었다. 기존 환기시스템의 z=5.0 m에서의 흄 농도인 Fig. 4(a)를 살펴보면 단면 평균 흄 농도가 2.12 mg/m³으로 비교적 낮게 나타나지만



(a) existing ventilation system



(b) improved ventilation system

Fig. 3 Distributions of the fume concentration with ventilation system at $z=5.0$ m for ESE wind.

동남동풍이 부는 경우와 마찬가지로 기류 정체로 인해 블록 주변에서의 용접흠 농도가 국소적으로 높은 영역이 다수 존재하며 6 BAY로의 용접흠 확산으로 외부로의 배출이 원활하지 않음을 알 수 있다.

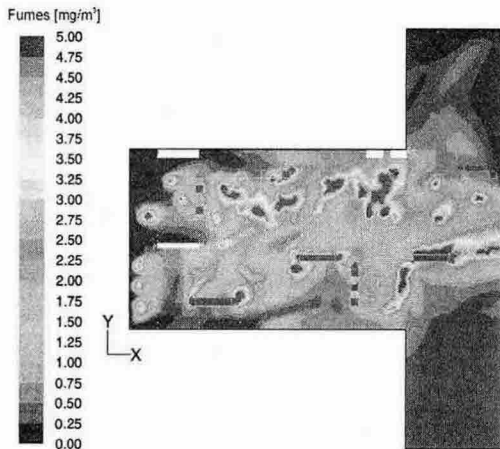
Fig. 4(b)의 개선 환기시스템의 $z=5.0$ m에서의 흠 농도분포를 살펴보면 블록에서 발생한 용접흠이 6 BAY로 확산되지 않으며 서측 개구부로의 배출이 비교적 원활함을 알 수 있다. 8 BAY의 일부 영역을 제외하고 대부분의 영역에서 2 mg/m^3 이하로 용접흠의 농도가 낮게 유지되었다. 한편 단면 평균 흠 농도는 1.53 mg/m^3 으로 기존 환기시스템에 비해 낮지만 동남동풍의 경우

와 마찬가지로 흠 배출 성능의 개선 효과는 크지 않음을 알 수 있다.

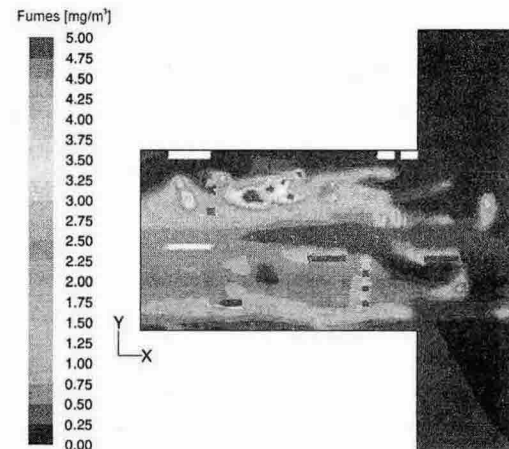
한편 대형 용접작업장 공간 전체의 용접흠 농도는 기존 환기시스템의 경우 1.71 mg/m^3 , 개선 환기시스템의 경우 1.15 mg/m^3 으로 서남서풍이 부는 경우 개선 환기시스템의 성능은 기존시스템에 비해 약 33%의 개선 효과를 보이거나 Case A에 비해 낮은 것으로 나타났다.

5.3.3 N wind

북풍이 부는 경우 기존 환기시스템과 개선 환기시스템의 각각의 정상상태 용접흠 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 기존 환기시스템의 $z=5.0$ m에서

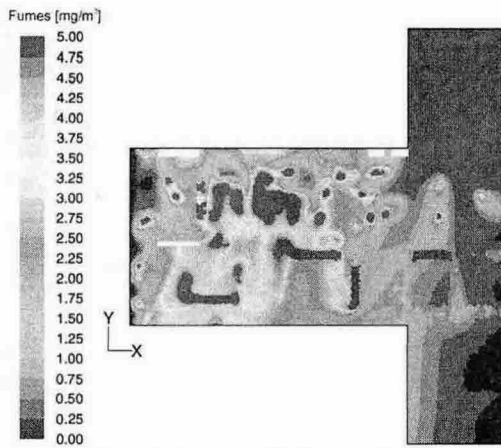


(a) existing ventilation system

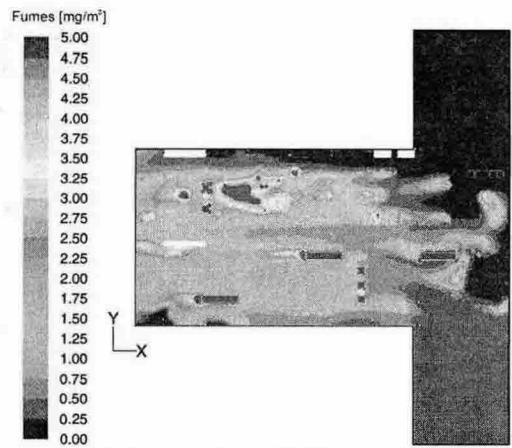


(b) improved ventilation system

Fig. 4 Distributions of the fume concentration with ventilation system at $z=5.0$ m for SWS wind.



(a) existing ventilation system



(b) improved ventilation system

Fig. 5 Distributions of the fume concentration with ventilation system at $z=5.0$ m for N wind.

의 흡 농도인 Fig. 5(a)를 살펴보면 작업장 외부로 용접흡이 배출되지 못하고 기류 정체로 인해 블록 주위에서의 농도가 2.5 mg/m^3 이상인 영역이 대부분을 차지한다. 또한 단면 평균 흡 농도는 2.79 mg/m^3 으로 앞서 두 경우에 비해 가장 높은 것으로 나타났다.

Fig. 5(b)의 개선 환기시스템의 $z=5.0$ m에서 흡 농도분포를 살펴보면 6 BAY의 북측 개구부에서 유입된 신선공기는 제트팬에 의해 서측 개구부로 기류 이동이 활발하여 블록에서 발생한 용접흡이 대부분 배출되고 있음을 알 수 있다. 8 BAY 중앙의 일부 영역을 제외하고 대형 작업장의 용접흡 농도는 1 mg/m^3 이하로 낮게 나타났으며 단면 평균 흡 농도는 0.89 mg/m^3 으로 기존 환기시스템에 비해 68%의 흡 농도 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

한편 대형 용접작업장 공간 전체의 용접흡 농도는 기존 환기시스템의 경우 2.10 mg/m^3 , 개선 환기시스템의 경우 0.49 mg/m^3 으로 나타났다. 이를 통해 북풍이 부는 경우 개선 환기시스템의 성능은 기존에 비해 77%의 개선 효과가 있으며 앞의 경우에 비해 가장 우수한 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 환기 시스템에 따른 대형 용접 작업장의 공기 환경을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 대형 용접작업장에 개선 환기시스템을 적용한 경우 평균 분진농도는 7 BAY에서 42%, 8 BAY에서 60% 정도 감소하였으며 가시거리는 약 11~18% 정도 증가하였다.

(2) 제트팬에 의한 변위 환기 방향과 반대 방향으로 외기가 유입되는 경우 내부의 용접흡은 정체되며 흡 배출 성능이 가장 낮게 나타났다.

(3) 변위 환기를 이용한 개선 환기시스템의 용접흡 배출 성능이 가장 우수한 경우는 북풍이 부는 경우이며 기존에 비해 약 77%의 용접흡 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Kwag, Y. S., 1997, A study on Airborne of Welding Fumes and Metals in Confined Spaces of a Shipyard, Journal of Korean Industrial Hygienists Association, Vol. 7, No. 1, pp. 113-131.
2. Byeon, S. H., 1995, A study on the airborne concentration of welding fume for some manufacturing industries, Journal of Korean Industrial Hygienists Association, Vol. 5, No. 2, pp. 172-183.
3. Lee, S. S., Moon, J. H., Lee, T. G., Choi, C. H., and Lee, J. H., 2004, Improvement of Working Environment by the Space Ventilation System in a Large Welding Factory, Proceeding of SAREK, pp. 358-350.