

초대형 작업공간의 환기시스템 시공사례

조선소 작업장 및 자동차 조립공장과 같은 초대형 작업공간의 작업환경을 개선시키기 위한 환기시스템 시공사례에 대해서 설계, 시공, 성능검증 및 완공으로 이어지는 일련의 진행과정을 소개하고자 한다.

최충현

(주)명진에어테크 부설연구소(choich@mjaitech.co.kr)

신승서

대우조선해양(주) 내업지원부(sssabc@empas.com)

머리말

초대형 작업공간은 조선소 작업장 및 자동차 조립 공장 같은 층고가 높고 면적이 넓은 작업공간이다. 최근 조선 및 자동차의 수출 호조로 유해 작업공정이 급격히 증가함에 따라 초대형 작업공간의 작업환경 개선을 위한 대책마련이 필요하다. 특히 조선소의 용접작업장처럼 오염원의 이동이 많고 전체 공장에 걸쳐 오염물 발생위치가 퍼져 있는 경우는 적합한 환기시스템의 도입이 쉽지 않다. 이러한 초대형 작업장 환기시스템은 필요성이 대두되고 있음에도 불구하고 현재 자연환기에만 의존하고 있는 한계기술이다.

조선소 용접작업장은 유해물질이 용접작업 중 흡의 형태로 발생하며 1년 365일중 바람이 불지 않아서 자연환기에 의한 용접흡 배출이 거의 이루어지지 않는 약 30일 이상은 작업장 내의 용접흡이 노동부의 허용기준인 흡농도 5 mg/m^3 (TWA : time weighted average) 이상을 초과하고 있다. 외국의 경우는 위의 허용농도 평균의 기준과 더불어 단시간 노출기준(STEL : short term exposure limit)을 10 mg/m^3 허용기준으로 적용해서 엄격히 관리하고 있다.

조선소 작업장은 용접작업량이 많으며 많은 경우 거의 밀폐된 장소에서 용접이 이루어지고 있다. 밀폐공간에서 작업하는 근로자의 흡 노출 농도는 개방

된 작업장소에서 용접하는 근로자에 비해 1.6배 정도 높다. 그러나 대부분의 작업장들은 기술과 비용 문제 때문에 공간환기설비를 제대로 갖추지 못하고 있고 자연환기에 의존하고 있다. 단지 블록내부의 흡농도를 낮추기 위해서 국소배기방식의 환기를 적용하고 있는 실정이다.

용접작업장에서의 유해요인에 의해서 인체에 미치는 영향으로는 용접흡의 주성분인 철이 폐조직내에 침착되어 발생하는 용접공폐증, 폐기종, 폐부종, 만성 기관지염, 폐암, 방간중독 등의 각종 중금속 중독 및 시력장애 등이 있다. 따라서 이러한 용접흡 등과 같은 유해물질들로부터 작업자들을 보호하기 위해서는 적절하고 효과적인 환경개선이 이루어져야 한다. 이를 위해 초대형 작업공간에 신선공기를 공급하고 용접흡을 효과적으로 배출시킬 수 있는 환기시스템의 설치가 필수적이다.

노동부기준에 부합하면서 저비용의 환기시스템 구축을 위해서 기류를 유인, 배기하여 흡 농도를 저감시키는 환기시스템을 채택하여 공장 환경을 개선하고자 한다.

환기시스템 도입을 위한 사전연구

대상공간인 대우조선해양의 용접작업장은 길이 240 m, 폭 50 m, 높이 37 m의 초대형 작업공간이며 다른 용접작업장과 개방 연결되어 있다. 작업장 내

부 전경을 그림 1 및 그림 2에 나타내었다. 그림 1에서 보면 용접흡으로 인해서 작업공간 전체가 하나의 용접흡 덩어리처럼 보이는 것을 볼 수 있다. 그림 2를 보면 용접작업장 동쪽과 서쪽에 대형 출입구가 있고 남쪽에 중형출입구가 있으며, 북쪽에는 또 다른 용접작업장과 연결되어 있다. 작업공간에는 다양한 형태의 블록이 있으며 그 내부에서는 용접작업이 일어나며 내부의 흡배출을 위해 휴대용 배기팬이 사용되고 있다.

용접작업장 출입구의 크기는 그림 3에서 보듯이 동측 출입구가 25 m×30 m, 반대편의 서쪽 출입구가 19 m×30 m이며 많은 기류의 유출입량이 발생하고 기류소통을 원활히 하고자 루버를 설치하였다. 작업장의 남쪽 벽면에는 동서로 길게 환기용 루버를 설치하였고 서측으로 보조작업장이 연결되어 있다. 개구부는 기상조건에 맞추어 바람의 소통이 원활하도록 방향 및 크기가 결정된다. 그러나 이런 자연환기

에 의존하는 환기 방식은 바람이 불지 않는 저기압 상황에서 작업장 내부 용접흡의 배출이 이루어지지 않으므로 작업이 불가능 할 정도의 용접흡 농도 증가가 나타난다.

설계 및 시공

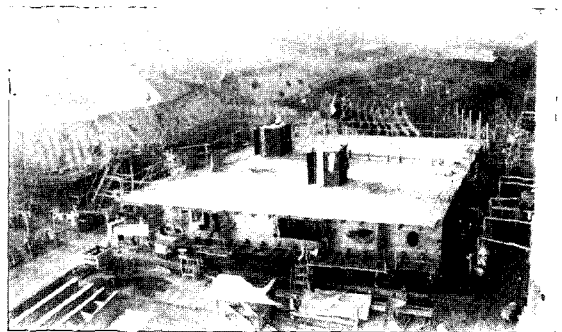
환기 개선을 위해서 우선 상사모형을 제작하여 환기에 적절한 기류유입팬 설치위치 및 설치각도를 정하고 용접 흡 농도의 저감 여부 및 기류 순환 여부 등에 대해서 시뮬레이션으로 검증하고 그 결과를 최종 설계에 반영 하였다.

시뮬레이션

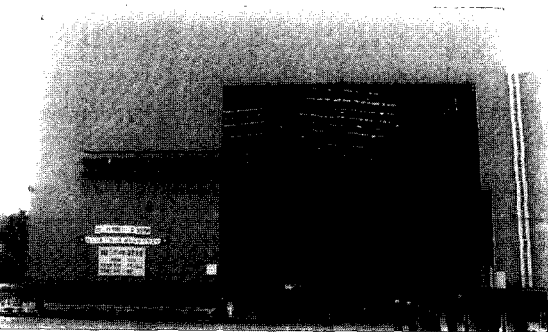
흡 농도분포를 예측하기 위해서 정상상태 농도방정식을 풀이하였다. 농도방정식에는 용접작업장의 내부의 공기속도가 표현되므로 본 시뮬레이션에서



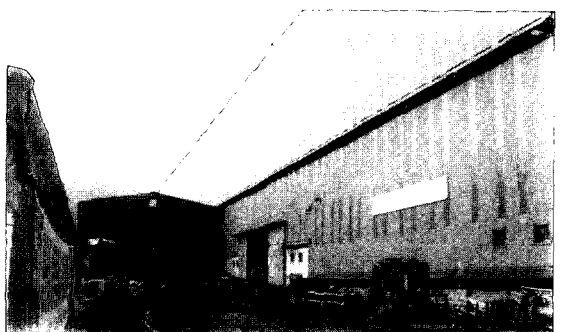
[그림 1] 초대형 작업장 내부(1)



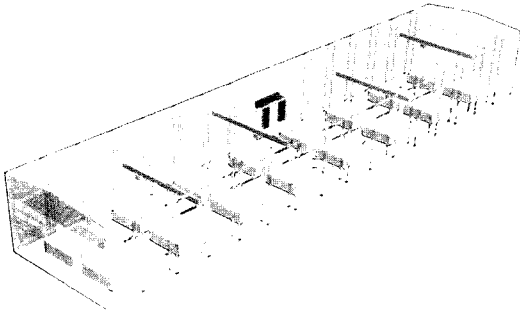
[그림 2] 초대형 작업장 내부(2)



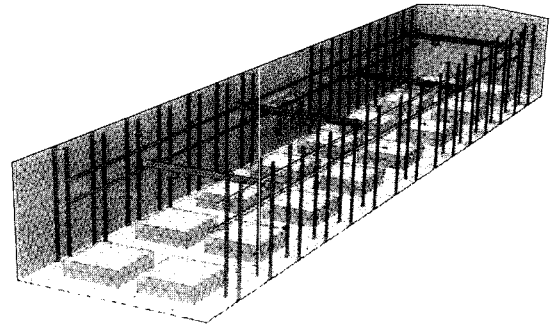
[그림 3] 초대형 작업장 출입구



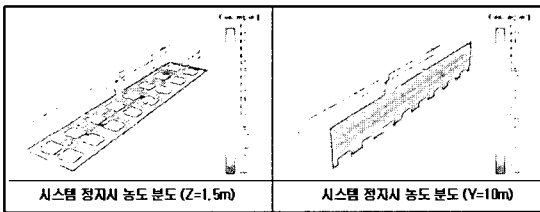
[그림 4] 초대형 작업장 측면



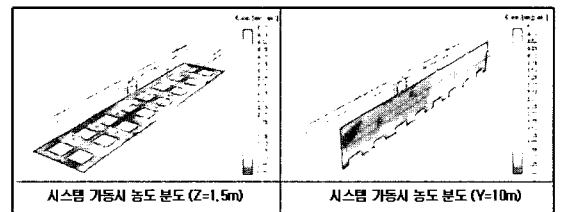
[그림 5] 용접 작업장 시물레이션 모델



[그림 6] 용접 작업장 시물레이션 격자



[그림 7] 시스템 정지시 흡 농도 분포



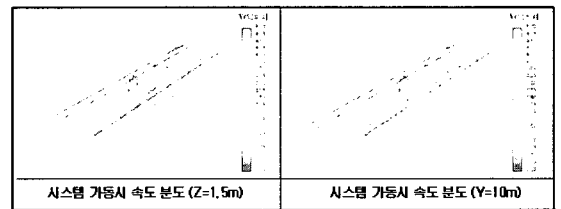
[그림 8] 시스템 가동시 흡 농도 분포

는 공기 유동에 관한 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류운동 에너지 방정식 및 난류운동에너지 소산을 방정식 등이 함께 풀이하였다.

지배방정식과 함께 정의되는 경계조건은 기류유인 팬, 동, 서측 출입구, 남측 루버, 벽면 및 흡 발생영역으로 정의하였다. 14개의 25,000 CMH급 유도급기용 기류유인팬, 6개의 25,000 CMH급 유도환기용 기류유인팬, 6개의 25,000 CMH급 유도배기용 기류유인팬 및 6개의 5,000 CMH급 유도환기용 기류유인팬 등에 팬특성곡선을 따르는 경계조건이 적용되었다.

흡 발생량은 작업장에서 보유하고 있는 219대의 용접기중 가동률 40%인 88대에서 흡이 발생한다고 가정한다. 용접기 1대의 최대 흡 발생량은 6.67 mg/s이며, 따라서 발생하는 총흡량은 587 mg/s이다. 해석의 편의를 위해서 88개의 용접기에서 발생하는 총 용접흡이 14개의 영역에서 균등하게 발생하는 것으로 경계조건을 설정하였다.

시물레이션 결과는 시스템 가동 전, 후 및 외부기류 유무 등 다양한 경우에 대해서 분석이 이루어졌으며 상세한 해석 결과에 대한 분석은 별도의 논문

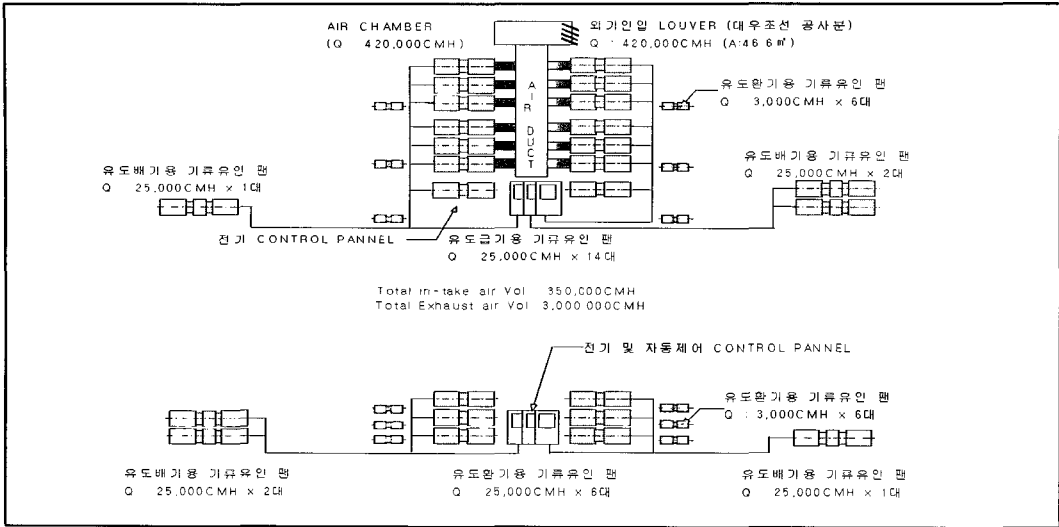


[그림 9] 시스템 가동시 속도 분포

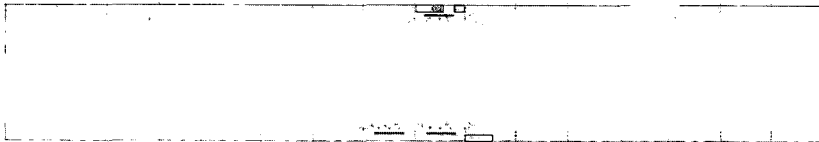
에서 논의될 것이다.

시스템 정지시 작업장 호흡선 높이 1.5 m의 수평 검토 단면과 벽으로부터 10 m 떨어진 수직 검토 단면의 흡 농도분포를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보면 시스템 가동전의 흡 농도분포는 거의 대부분 영역에서 허용농도기준 5 mg/m³를 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 흡농도를 낮추기 위해서 작업장 환경 개선 환기시스템 가동시 흡 농도분포를 그림 8에 나타내었으며 시스템 가동 후의 흡 농도분포는 흡 발생영역을 제외한대부분영역에서 허용농도 5 mg/m³을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 또한 환기시스템 가동시 기류의 속도분포를 그림 9에 나타내

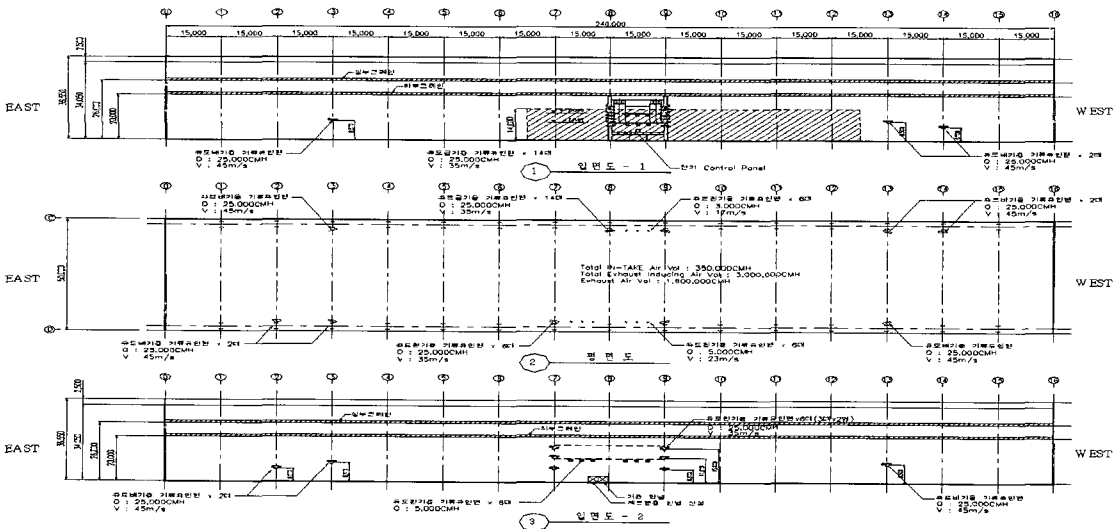
초대형 작업공간의 환기시스템 시공사례



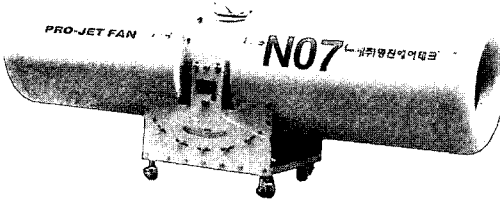
[그림 10] 환기시스템 개념도



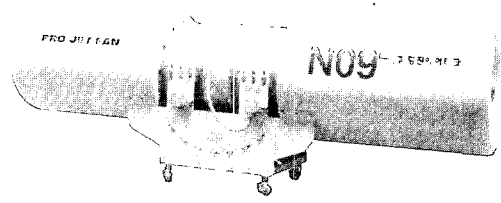
[그림 11] 환기시스템의 기류 분포도



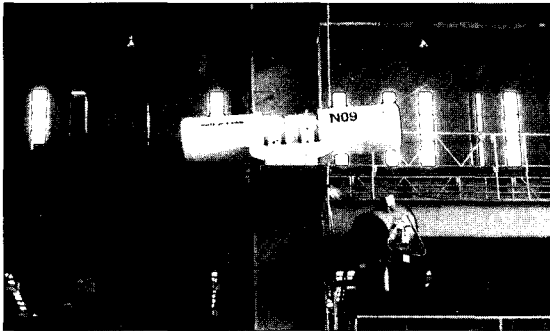
[그림 12] 환기시스템의 기류유인팬 배치 설계도



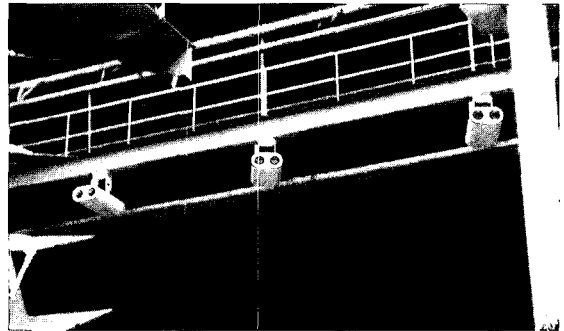
[그림 13] 1단형 기류유인팬



[그림 14] 2단형 기류유인팬



[그림 15] 유도 배기용 기류유인팬



[그림 16] 유도 환기용 기류유인팬(멀티형)

었으며 시스템 가동 전의 정체 영역이 가동 후 완전 사라진 것으로 나타났다. 다양한 경우의 상기와 같은 결과를 분석하여 최적의 기류유인팬 위치 및 각도를 선정하였다.

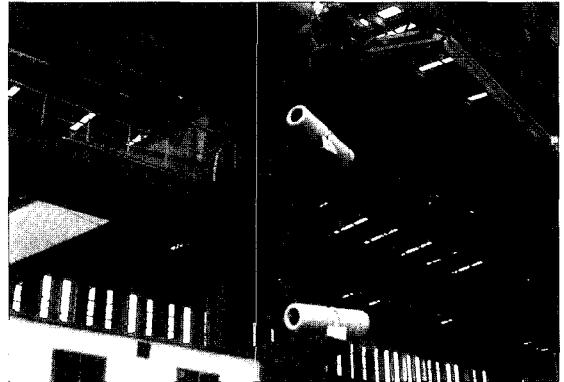
환기 시스템의 설계

환기시스템의 개념도, 기류분포도 및 배치 설계도를 각각 그림 10, 그림 11 및 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보면 본 환기시스템은 중앙에서 신선공기를 급기하고 신선공기를 적절히 혼합하여 동쪽과 서쪽 출입구로 배기시키는 방식으로 설계하였다.

본 시스템에 적용하기 위해서 개발된 초대형 작업장용 기류유인팬은 1쌍의 임펠러와 고정익을 갖는 1단형 기류유인팬과 2쌍의 임펠러와 고정익을 갖는 2단형 기류유인팬이 있으며 그 완성품을 각각 그림 13 및 그림 14에 나타내었다.

환기 시스템의 시공

환기시스템의 시공은 건축물의 안전진단, Bracket와 Chamber의 설치, 기류유인팬 장착, 시운전 및 보



[그림 17] 유도 환기용 기류유인팬

완 순으로 진행 되었다. 유도배기용 기류유인팬은 기류유인효과에 의해서 용접함을 유도하여 출입구 쪽으로 배기하는 역할을 수행하며 그 시공사진을 그림 15에 나타내었다. 유도환기용 기류유인팬은 정체된 용접함을 배기구 쪽으로 유도하는 역할을 수행하며 그 시공사진을 그림 16 및 그림 17에 나타내었다. 유도급기용 기류유인팬은 다중 연결된

Chamber에 의해서 인입된 신선외기를 작업공간에 분사하여 오염농도를 저감시키는 역할을 수행하도록 시공된 사진을 그림 18에 나타내었다.

환기 성능 측정

시스템 설치 전, 후 환기성능을 비교하기 위해서 환기성능 측정이 수행되었으며 그 항목, 기준 및 시험방법은 국제기준에 부합되면서 현장여건을 고려해서 선정되었다. 그 세부 관리항목 및 실행결과를 표 1에 나타내었다.

외기급기량 측정

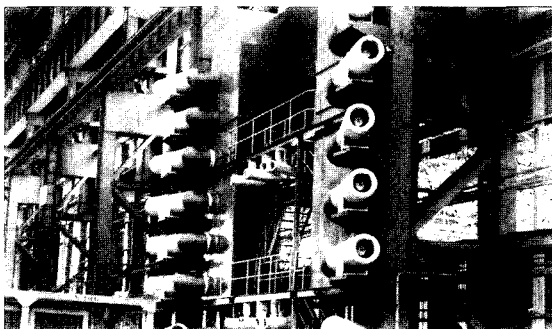
KS B 6311 한국표준규격 기준에 의거해서 급기팬의 토출구에서 등면적법에 의해서 20위치의 풍속을 측정하였으며(그림 19) 외기급기량은 설계기준보다 많은 304,586 CMH로 나타났다.

오염공기 배출량 측정

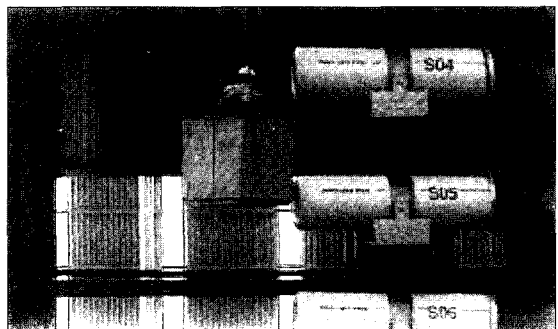
오염공기 배출량은 동서측 출입구의 16개 측정점에서 유출입 풍속을 측정함으로써 배출량을 구하였다. 오염공기 배출량은 설계기준보다 월등히 많은 7,756,700 CMH로 나타났다.

<표 1> 세부 관리항목 및 실행결과

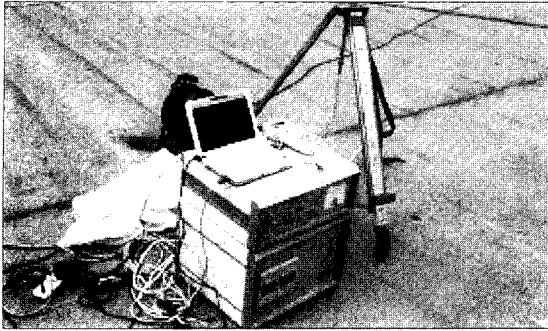
No.	관리항목	계획		실험결과		비고
		시스템정지	시스템가동	시스템정지	시스템가동	
1	외기급기량 (자연환기제외)	0 CMH	300,000 CMH	0 CMH	152,215+152,371 =304,586 CMH	강제 급기 풍량 비교
2	오염공기 배출량 (자연환기제외)	0 CMH	1,600,000 CMH	209,300+(-129,100) =338400 CMH	3,143,500+4,413,200 =7,756,700 CMH	양측 출입구 공기 배출량 비교
3	흙 배출 경과 시간 (중앙부에서 출구측 도달시간)	5 min 이상	3 min 이상	5 min 이상	45 초	기류 가시화 비디오 촬영 배출경과시간 비교
4	흙 분진 농도 (외기농도 차감량 비교)	-	30~50 % 감소	-	34.7 % 감소	대표점 평균값 비교
5	가시도 측정	-	-	-	8.9 % 향상	대표점 평균값 비교
6	소음(작업 소음 제외)	80~90 dB(A)	80~85 dB(A)	68.9 dB(A)	72.5 dB(A)	대표점 평균값 비교
7	공간 평균 풍속 (H :15 m 기준)	0.5 m/s 이하	1.5 m/s 이상	0.57 m/s	1.74 m/s	공간 평균 풍속 비교
8	Canvas Door Close시 환기량 감소율(30% Close 시)	30~60 %	20~40 %	-77,200 CMH (40.3 % 감소)	3,315,800 CMH (24.9 % 감소)	개구부배출량 측정



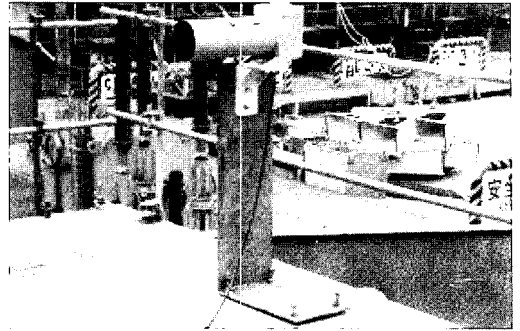
[그림 18] 유도 급기용 기류유인팬



[그림 19] 외기 급기량 측정



[그림 20] 흙 분진 농도 측정



[그림 21] 가시도 측정

흙 배출 경과시간 및 기류 가시화 실험

실험을 위해서 작업장의 중앙부에 연무발생기를 설치하여 연무를 분사시킨 후 디지털 카메라와 디지털 캠코더로 기류유동을 촬영하였다. 배출경과 시간은 스모그가 분사되어 중앙부에서 출입구까지 도달하는 시간으로 하였다. 측정된 배출 경과시간은 설계기준 3분보다 현격하게 단축된 45초를 나타냈다.

공간 분진 측정

이동식 분진측정기와 고정식 분진측정기를 이용하여 1.5 m, 15 m 높이에서 15개 측정점에서 측정하였다. 한 측정점에서 1분간 평균 분진농도를 측정하고 분진 농도 환산은 등체적법 평균농도로 환산하였다. 고정식 분진측정은 블록위에서 하게 되는데 설치방법은 그림 20과 같다. 설계기준 30~50% 흙 농도 저감에 부합하는 34.7% 저감된 것으로 나타났다.

가시도 측정

측정위치에 가시도 측정기의 발광부와 수광부를 설치한 후 정밀 정렬하였다. 가시도 측정기를 가동시킨 후 팬 가동 전 10분, 팬 가동 후 20분 동안 소광계수를 측정 하였다. 그림 21은 블록위에 가시도 측정기의 수광부를 고정시킨 사진이다. 측정된 가시도는 기존 가시도보다 8.9% 향상되었다.

소음도 측정

작업장 평균 소음은 이동식 소음계로 대표값으로 선정된 15 개 측정 위치에서 팬 가동 전, 후의 소음을 측정함으로써 평가되었고, 소음원의 분석을 위해



[그림 22] 소음도 측정

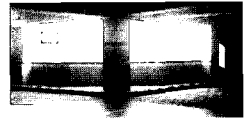
서 정밀주파수 밴드별 소음분석이 가능한 소음계(그림 22)를 블록위에 고정하고 연속해서 데이터를 저장 하였다. 측정된 소음은 설계기준인 80~85 dB(A) 보다 낮은 72.5 dB(A)로 측정되어 설계기준에 만족하는 결과를 얻었다.

공간 풍속 측정

공간풍속은 풍속계를 이용하여 1.5 m, 15 m 높이에서 15개 측정 점을 선정하여 측정되었다. 설계기준인 공간풍속 1.5 m/s를 만족시키는 공간풍속 1.74 m/s의 결과를 얻었다.

Canvas Door Close시 환기량 감소율 (30% Close)

출입구로부터 우수의 침입을 방지할 목적으로



초대형 작업공간의 환기시스템 시공사례

Canvas Door를 닫을 경우 급격히 환기량이 감소되지 않을까를 우려해서 설정된 항목이며 출입구의 Canvas Door를 30% 닫고 고소차를 이용해서 16개 위치의 환기량을 측정하였다. 설계기준인 환기량 20~40%감소에 만족하는 환기량 25% 감소를 나타내었다.

맺음말

초대형 작업장의 환기시스템의 시공사례를 소개하면서 그 동안 일련의 작업에 대한 정리의 기회를 가질 수 있었다. 본 시스템에 관한 설계를 처음 시작했을 때 유사 시공사례를 찾아 볼 수 없었기 때문에 많은 시간이 모형실험, 시뮬레이션, 설계 검증 및 설계 수정에 투자되었다. 공사도 부품 불량으로 인한 교체, 설계 변경으로 인한 기류유인팬의 각도 조절 및

성능보장을 위한 추가 시공 등으로 인해서 비용 증가 및 공사기간 연장으로 많은 애로가 있었다. 다행히 공사가 성공적으로 완공되어 2차에 걸쳐서 시행된 환기성능 측정실험에서 설계기준에 만족한 값을 나타내서 그동안 본 시스템의 완공을 위해 고생하였던 명진에어테크의 직원 및 한양대학교 이재현교수 연구실의 연구원들에게 환한 웃음을 줄 수 있었다.

현재까지 조선소의 용접공장들은 작업공간이 초대형이라는 이유로 공간 환기시스템의 도입을 고려하지 못하고 있었지만 본 시공사례를 시발점으로 초대형 작업공간을 기계식 공간환기의 제외 영역이 아닌 공간 환기 가능 영역으로 끌어 들였다는 점에 보람을 느낀다.

끝으로 본 시공에 직간접으로 도움을 주신 대우조선해양의 관계자, 협력사 관계자 여러분께 다시 한번 깊은 감사를 드리하고자 한다. (☺)