

디퓨저 배치방식에 따른 작업공간내의 환기성능 평가



한 화 택

- 출처 : ASHRAE Journal, 2000년 1월호 pp. 52-59
- C. Y. Shaw, Ph.D., P.E.
(캐나다 국립연구원 NRC내 건설연구소 환기/IAQ 그룹의 책임자이며 현재 ASHRAE TC 4.3-필요환기량 부문과 TC4.10-실내환경모델링 부문에서 활동하고 있다.)

개방형 사무실 건물에서, 총 환기량이 적정할지라도 국부적으로 환기가 부족하거나 또는 과도한 작업공간들이 존재할 수 있다. 이것은 환기시스템을 설계할 때 작업공간의 배치와 관련된 정보를 활용하지 않기 때문이다. 모든 작업공간이 충분히 환기될 수 있도록 하기 위해서는 급기구나 배기구 그리드의 형태나 배치선정 등과 같은 다양한 설계변수들이 작업공간의 HVAC 시스템의 성능에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 본 원고는 최근 수행된 작업공간의 환기 성능에 관한 연구결과를 요약한 것이다.

실험장치의 구성

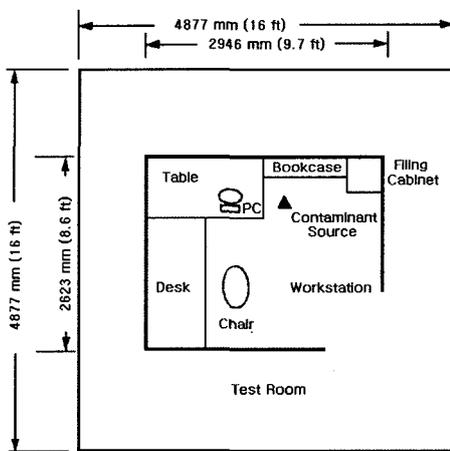
환기실험실은 두 개의 실로 이루어져 있으며 그림 1에 나타난 바와 같이, 각 방의 크기는 4.9m × 4.8m × 2.9m이고 독립적인 HVAC 시스템이 장치되어 있다. 급기, 배기, 외기덕트 내에 댐퍼와 오리피스를 설치하여 풍량을 제어하고 측정할 수 있도록 하였다. 각 방은 1.2m 길이의 라이트 트로퍼(light troffer: LT) 디퓨저와 0.6m²의 사각면 등근목을 가진 디퓨저(square-face, round-neck: SFRN), 두 종류의 기본설계를 갖는 급배기

구를 이용하였다. LT 디퓨저는 고정되어 있으나 SFRN 디퓨저는 이동이 가능하다. 이 디퓨저들을 조합하여 7가지 형태의 급배기구 배치에 대하여 실험을 수행하였다. 2.9m × 2.6m의 모의 작업공간(workstation)이 실험실 안쪽에 위치하고 있으며, 칸막이의 높이는 1.9m이다. 책상, 램프, 의자, 탁자, 책장, 컴퓨터, 파일캐비닛 등이 있으며 작업자의 현열을 모사하기 위하여 60W와 10W 두 개의 전구를 의자 위에 설치하였다.

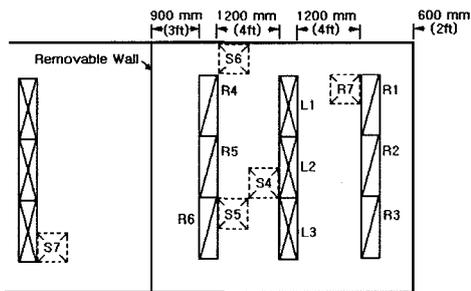
추적가스의 측정위치는 실험실내 15점이며, 9점은 작업공간 내, 4점은 작업공간 주위, 그리고 2점은 작업공간 상부에 위치시켰다. 또한 급기와 배기 그리고 외기덕트에서 추적가스 농도를 측정하였다. 작업공간은 체적이 균등하게 8구역으로 나누어 각 구역 중앙에 추적가스 측정점을 설정하였다. 그림 2와 같이 추적가스 측정위치 1, 2, 3, 4, 5는 의자에 앉은 재실자의 호흡 높이이며 6, 7, 8, 9는 서있는 재실자의 호흡 높이이다. 10, 11, 12, 13은 실험실내 작업공간을 둘러싼 칸막이와 벽 중간에 앉아있는 재실자의 호흡 높이에 위치시켰고 14, 15는 작업공간 상부에 위치시켰다. 추적가스를 포집하기 위하여 두 가지의 추적가스 측정시스템을 사용하였



다. 하나는 실험실 내부 15점과 외부로부터 각각의 추적가스를 포집하기 위한 것이고 다른 하나는 HVAC 시스템과 실험실 외부의 위치에서 추적가스를 포집하기 위한 것이다.



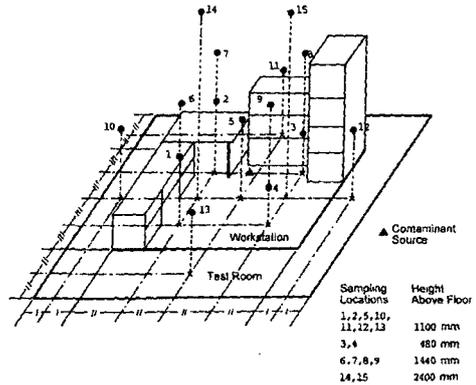
〈그림 1a〉 실험실 평면



〈그림 1b〉 디퓨저 배치

측정방법

환기시스템의 성능을 직접적으로 평가하는 방법은 급기된 공기의 실내기류분포 양상을 측정하는 것이다. 또한 환기시스템의 성능을 평가하기 위하여 공기교환효율(air change efficiency)이나 환기효율(ventilation



〈그림 2〉 샘플링 위치

efficiency)과 같은 몇 가지 다른 변수들이 제안되고 있다. 여기에서는 이러한 변수들을 측정하기 위한 방법과 절차에 대하여 소개한다.

기류분포 기류분포에 따라서 급기의 실내 분포상태가 결정된다. 표 1에 15가지의 실험조건이 표시되어 있다. 각 실험은 급기덕트에 소량의 추적가스 SF6 (14ml)를 주입하여 수행하였다. 주입한 직후 추적가스의 농도를 약 4분 간격으로 측정하여 시간에 따른 변화를 그래프에 표시하였다. 모든 위치에서의 농도가 동일한 레벨에 도달할 때까지 소요되는 시간을 이용하여 환기공기를 분포시키는 HVAC 시스템의 효율을 평가하는데 사용할 수 있다.

공기교환효율 공기교환효율(air change/exchange efficiency)은 공간내에 있는 공기가 얼마나 빨리 신선외기로 교환되는지를 나타내는 척도이다. 이것은 다음 식으로부터 계산된다.

$$e_{rm} = \frac{t_n}{2 \langle t \rangle_{rm}} \quad (1)$$



〈표 1〉 HVAC 시스템의 성능을 평가하기 위하여 사용된 15가지 실험조건

Case No.	디퓨저 배열		작업 공간	바닥틈새높이 mm	급기량 L/s
	급기(Supply)	배기(Return)			
00(기본조건)	L1,L2,L3	R1,R2,R3,R4,R5,R6	없음	152	100
01	L1,L2,L3	R1,R2,R3,R4,R5,R6	있음	152	100
02	L1	R7	있음	152	100
03	L2	R7	있음	152	100
04	L3	R7	있음	152	100
05	S6	R7	있음	152	100
06	S5	R7	있음	152	100
07	S4	R7	있음	152	100
08	S4	R7	있음	76	100
09	S4	R7	있음	0	100
10	L1,L2,L3	R1,R2,R3,R4,R5,R6	있음	76	100
11	L1,L2	R1,R2,R3,R4,R5,R6	있음	0	100
12*	L1,L2,L3	R1,R2,R3,R4,R5,R6	있음	152	100
13*	S7	R7	있음	152	100
14	L1,L2,L3	R1,R2,R3,R4,R5,R6	있음	152	50
15	L1,L2,L3	R1,R2,R3,R4,R5,R6	있음	152	53

* 실 칸막이 제거

$$e_{us} = \frac{t_n}{2 \langle t \rangle_{us}} \quad (2)$$

여기서, t_n 은 명목시간상수로서 실 체적을 외기 공급량으로 나눈 값이며, $\langle t \rangle$ 은 실평균 연령으로서 전체 실내공간에 대하여 국소평균 연령(급기가 실내 임의의 위치까지 이동하는데 걸리는 시간의 평균값)을 평균한 값이다.

환기효율 환기효율(또는 오염제거효율)은 배기덕트에서의 정상상태 오염농도와 정상상태 실평균농도와와의 비율로 정의한다. 이것은 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$E = \frac{C_{ra} - C_s}{\langle C_{us} \rangle - C_s} \quad (3)$$

여기서, C_{ra} = 정상상태 배기덕트농도
 $\langle C_{ra} \rangle$ = 정상상태의 평균농도
 C_s = 정상상태 급기농도

바닥의 오염원을 모사하기 위하여 정상상태로 일정 유량의 CH₄를 방출하였다. 이러한 변수를 측정하기 위한 세부적인 절차는 원문에 나타나 있다.

결과와 논의

(1) 급기용 디퓨저의 형상과 배치방식(Case 00~07까지)

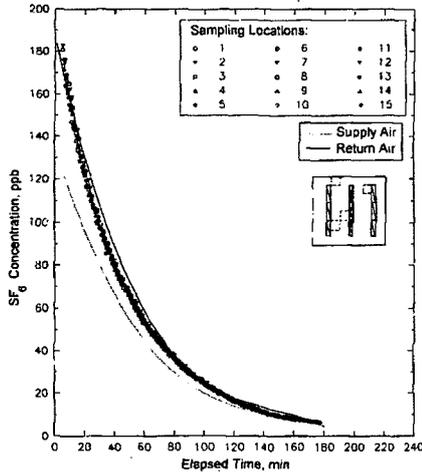
표 1에 상세하게 나타난 7가지의 디퓨저 배치방식 중에서 첫 번째인 Case 00은 급기부에 세 개의 LT 디퓨저와 여섯 개의 LT 디퓨저로 이루어져 있고, 비교를 위한 기본적인 경우로서 작업공간이 없는(빈 방) 형태이다. 작업공간의 칸막이 바닥틈새 높이는 152mm이다. 급기의 온도는 23°C이고 풍량은 외기 20L/s를 포함하여 100L/s로 조절하였다.

기류분포 7가지 디퓨저 배열 중 그림 3과 4는 기본적인 디퓨저 배치방식(3개의 급기 LT 디퓨저와 6개의 배기 LT 디퓨저)에 작업공간이 있는 경우(Case 00)와 없는 경우(Case 01)의 실내공기의 기류분포에 따른 측정위치에서의 추적가스 농도변화를 보여주고 있다. SFRN 급기용 디퓨저가 작업공간 바깥에 있고 작업공간의 다른 한쪽 구석에 하나의 배기용 그릴이 위치해 있는 배치방식인 Case 05인 경우 그림 5에 나타난 것과 같이 시간에 따른 추적가스의 농도변화 곡선으로 보아 가장 적절하지 못한 디퓨저 배치형태를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 위의 측정결과로부터 작업공간 내외부의 거주구역의 추적가스농도는 거의 차이가 나지 않으며 다른 디퓨저 배치방식에 대해서도 유사한 결과를 얻었다.

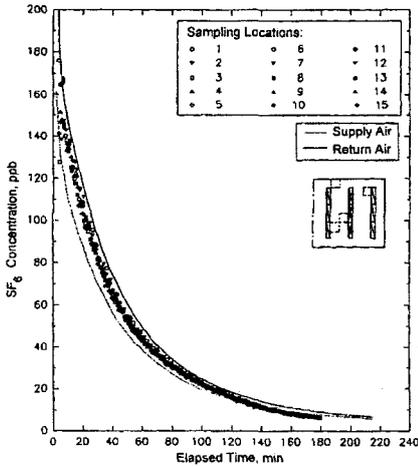
디퓨저 배치방식을 어떻게 하더라도 비슷한 농도의 추적가스를 분포시키고 있으므로



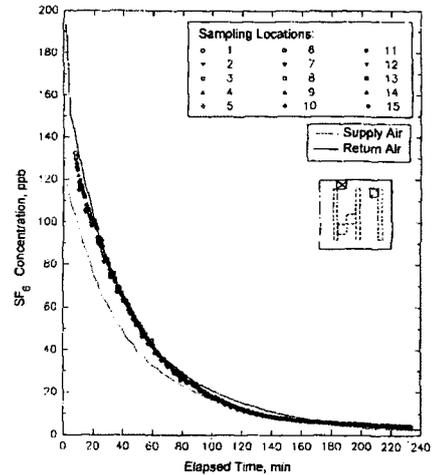
작업공간의 내부와 외부의 환기는 잘 되고 있는 것을 알 수 있으며, 어떠한 하나의 디퓨저 배치방식이 다른 배치방식에 비해 급기되는 공기를 실내에 효율적으로 분배시킨다고 말하기 어렵다. 또한 7가지의 디퓨저 배치방식 모두 작업공간이 있음으로 해서 주위의 기류분포에 영향을 크게 미치지 않는 것으로 나타났다.



〈그림 3〉 Case 00의 기류분포 (기본케이스)



〈그림 4〉 Case 01의 기류분포 (틀새높이 152mm)



〈그림 5〉 Case 05의 기류분포 (틀새높이 152mm)

공기교환효율 표 2는 작업공간(e_{ws})과 작업공간의 주위(e_{sur}) 그리고 실 전체(e_{tm})에서 공기교환율의 평균값을 나타내고 있다. 7가지 디퓨저 배치방식에 대해서 작업공간에서 측정된 공기교환율은 0.56(Case 05)에서 0.66(Case 00)이며, 실 전체로는 0.57(Case 05)에서 0.67(Case 00)의 결과를 보이고 있다. 환기량이 줄어들면 환기성능이 나빠질 것이라는 일반적인 상식과는 반대로 환기량 감소에 따라서 환기효율은 증가하였다. 작업공간에 대한 공기교환율 평균값은 실 전체에 대한 값과 5% 이내로 거의 일치하고 있다. 표 2에는 작업공간의 평균공기연령도 나타나 있다. 작업공간내의 평균공기연령은 42.8분(Case 00)에서 50.6분 사이이다.

이러한 공기교환효율과 평균연령을 가지고 7가지 경우 중에서 가장 비효율적인 디퓨저 배치방식(Case 05같은)을 알아낼 수 있다. 반대로, 추적가스의 분포로 알 수 있는 기류분포 만으로는 이와 같은 사실을 알아내기 어렵다.



〈표 2〉 실험결과 요약

Test Code	〈t〉	ews	esrd	erm	Ews	변수 설명
00	42.8	0.66	0.69	0.67	0.61	기호
01	46.2	0.62	0.61	0.61	0.52	C = 가스농도
02	46.7	0.61	0.61	0.61	0.52	e = 공기교환효율
03	45.3	0.63	0.63	0.63	0.97	E = 환기효율
04	43.6	0.65	0.64	0.65	0.57	tn = 명목시간, V/Q
05	50.6	0.56	0.58	0.57	0.51	Q = 급기량
06	46.4	0.61	0.60	0.61	0.64	V = 실 체적
07	45.9	0.62	0.62	0.62	0.56	〈t〉 = 평균연령
08	47.4	0.60	0.58	0.59	0.53	참자
09	40.0	0.71	0.65	0.69	0.60	ra = 환수공기
10	40.7	0.70	0.72	0.71	0.65	rm = 실험실
11	40.6	0.70	0.68	0.69	0.70	sa = 급기공기
14	68.7	0.83	0.84	0.83	0.67	srd = 주변구역
15	105.3	1.08	1.07	1.07	0.84	ws = 작업공간

환기효율 작업공간의 환기효율(Ews)값을 표 2에 표시하였다. 총 7가지 디퓨저 배치방식 중에서 2가지(Case 02는 1.22, Case 03은 0.97)가 다른 배치방식(약 0.57)에 비하여 훨씬 좋은 환기효율을 나타냈다. 이렇게 환기효율에 큰 차이가 나타나는 이유를 밝히기 위하여 디퓨저 배치방식 중 Case 03과 Case 07을 비교하였다. Case 03(Case 02와 유사)은 한 개의 LT 급기디퓨저(L2)와 한 개의 SFRN 배기 그릴(R7)로 이루어져 있다. Case 03은 다른 경우에 비해 급기 디퓨저가 오염원에 더 가까이 위치해 있다(그림 1).

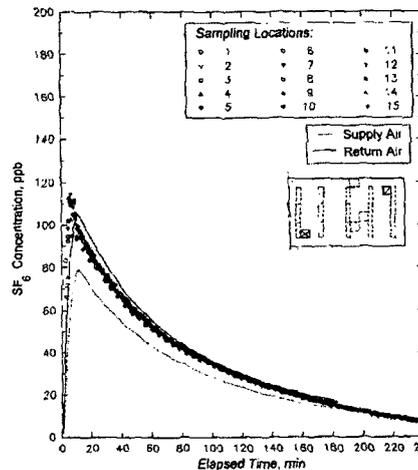
Case 07은 Case 03과 비슷한 형태로 급기 디퓨저가 SFRN 디퓨저(R4)로 교체되었다. 그렇기 때문에, 총 공급량은 같더라도 오염원을 희석시키기 위한 공기는 Case 07에 비해 Case 03쪽이 더 많다. 결과적으로 더 많은 오염원이 배기를 통해 제거되어 Case 07에 비해 Case 03쪽이 더 높은 환기효율을 나타내게 된다.

(2) 실험실 벽면의 영향(Case 01, 12, 13)

앞의 실험은 모두 작업공간을 실험실의

중앙에 위치하여 수행하였다. 작업공간을 둘러싼 칸막이와 실험실 벽면까지의 거리는 약 1m이다. 벽면에 의한 영향을 알아보기 위하여, Case 01과 같은 디퓨저 배치방식을 한 Case 12와, 급기 디퓨저가 인접실에 위치한 Case 13(그림 1의 S7)의 두 가지 경우에 대하여 두개의 실 공간을 가로막고 있던 칸막이를 제거하였다.

그림 6은 Case 13에 대한 기류분포를 보이고 있다. 동일한 풍량이 하나의 실이 아닌 동일한 크기의 두개의 실로 공급되므로 모든 측정 위치에서의 농도는 Case 01에 비하여 낮게 나타났다. 작업공간의 내부와 주위 공간의 모든 측정 위치에서의 농도는 거의 동일하게 나타났다. 이것으로 보아 공급되는 공기는 효과적으로 혼합되는 것을 알 수 있었다. Case 12에 대해서도 유사한 결과를 얻었다.



〈그림 6〉 Case 13의 기류분포 (실험실간 칸막이 제거)

(3) 칸막이 바닥틈새 높이에 따른 영향 (Case 01, 07, 08, 09, 10, 11)

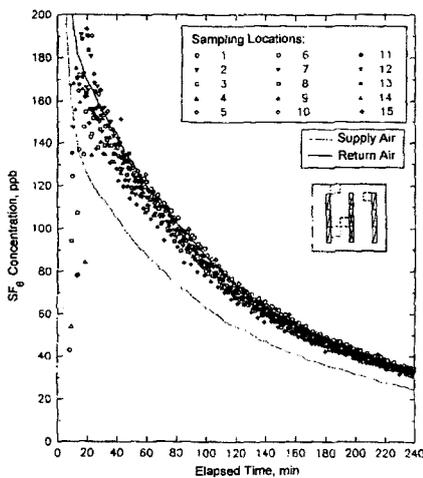
칸막이 바닥틈새 높이가 기류분포에 미치



는 영향을 알아보기 위해 LT 디퓨저를 사용하는 Case 01인 경우 세 가지의 서로 다른 바닥틈새높이에 대해서 실험하였다. 세 가지 높이는 152mm, 76mm, 0mm이다. 모든 틈새 높이에 대하여 기류분포는 유사하였으며 큰 차이를 발견할 수 없었다. SFRN 디퓨저에 대해서도 동일한 결과를 나타냈다.

(4) 급기풍량 변화에 따른 영향
(Case 01, 14, 15)

급기풍량에 의한 영향을 파악하기 위하여 100 L/s, 50 L/s, 25 L/s 로 변화시키며 실험을 수행하였다. 이때의 외기도입량은 각각 20 L/s, 10 L/s, 5 L/s이다. 그림 7은 급기풍량이 25 L/s에 대한 기류분포이다.(100 L/s의 급기풍량에 대한 결과는 그림 4에 나타나 있다.) 이 결과로 볼 때 급기되는 풍량이 줄어들면 측정되는 농도 데이터의 분산이 증가된다는 사실을 알 수 있다. 100 L/s의 풍량에서(그림 4), 작업공간 내로 공급되는 공기가 잘 혼합되려면 20분에서 40분 정도 소요된다. 급기풍량이 25 L/s (그림 7)인 경우에는 혼합에 240분 이상이 소요된다.



〈그림 7〉 Case 01의 기류분포 (급기풍량 25 L/s)

공기교환효율 표 2에는 급기풍량이 100 L/s, 50 L/s, 25 L/s일 때, 작업공간의 공기교환효율(e_{ws})을 나타내며 그 값은 0.62(Case 01), 0.83(Case 14), 1.08(Case 15)이다. 일반적으로는 환기시스템으로부터 행해지는 환기의 경우 급기량이 감소하면 공기교환효율도 감소한다고 알려져 있으나, 이 결과는 반대의 결과를 보여주고 있다.

급기풍량이 100 L/s에서 25 L/s로 감소하면, 외기도입량은 20 L/s에서 5 L/s로 감소한다. 이에 따라, 명목시간상수(식(1)에서 정의한 바와 같이 외기도입량으로 실험실 체적을 나눈 값)는 55.7분에서 222.7분으로 4배 증가하게 된다. 그러나 작업공간의 평균 공기연령(표 2)은 46.2분에서 105.3분으로 2배 정도만 증가하며, 결과적으로 실험실의 평균공기연령은 46.3분에서 105.8분으로 증가한다.

이 결과는 환기시스템으로 이루어지는 환기는 급기풍량(외기도입량)이 감소하면 공기교환효율이 나빠진다는 일반적인 생각과는 다르며 평균공기연령이 공기교환효율보다 급기풍량의 변화를 더 잘 반영하고 있다는 뜻이 된다. 또한 이 결과는 공기교환효율이 다른 환기량을 가진 환기시스템을 서로 비교하는데 적합하지 못하다는 것을 보여주고 있다.

환기효율 표 2는 각각의 급기풍량이 100 L/s, 50 L/s, 25 L/s일 때 환기효율은 0.52(Case 01), 0.67(Case 14), 0.84(Case 15)임을 나타내고 있다. 이 결과로 급기풍량, 또는 외기도입량이 감소하면 환기효율은 감소되지 않고 반대로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 환기량이 많을수록 환기효율이 증가한다는 일반적인 생각과는 반대되는 개념이다.



이러한 결과는 오염원을 대신하여 일정유량의 CH₄를 주입하였기 때문에 특정한 디퓨저/그릴 배치방식에 대한 결과일 수 있다. 점 발생원으로 모사된 오염원의 주입위치는 책상과 책장구석 근처의 바닥에 위치시켰다. 급기량이 100 L/s일때 급기구에서 유입되는 공기제트는 작업공간 하부까지 도달할 만큼 강하다. 이 경우 실내공기와 오염원은 작업공간 하부에서 주로 혼합된다. 혼합된 오염물질은 작업공간 내 장애물이 없는 공간과 주위공간을 따라 배기덕트로 이동한다. 결과적으로, 작업공간 내의 오염농도는 작업공간의 주위공간과 배기덕트의 오염농도보다 더 크게 나타난다. 25 L/s일때는 급기되는 공기제트가 작업공간 하부까지 도달할 만큼 강하지 않기 때문에 오염물질은 천장을 향해 다시 상승하게 된다. 실내공기와 오염물질은 실내 윗부분에서 혼합되고 이 혼합공기는 작업공간 상단의 배기덕트로 이동하게 된다. 결과적으로 작업공간의 상단부에서 훨씬 균일한 혼합이 이루어진다.

이 특정한 디퓨저/그릴 배치방식에 대한 결과는 급기풍량이 25 L/s보다 100 L/s일때가 작업공간(또는 실험실)의 평균농도가 낮으므로 환기효율이 높아야 된다는 사실을 검증시켜주지 못하고 있다. 공기교환효율과 마찬가지로 환기효율도 다른 환기량(공기교환량)을 가진 환기시스템들을 서로 비교하는데 적합하지 않음을 보여준다.

■ 결론

밀폐된 작업공간에서 급기공기의 실내 분포능력을 비교하기 위해 7가지의 디퓨저 배치방식을 각각 비교하였다. 디퓨저/그릴의 배치형태와 여러 조건변화에 따른 기류분포

실험의 연구결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

일곱가지의 디퓨저/그릴 배치방식들 모두 작업공간과 그 주위공간에 급기되는 공기의 기류를 효과적으로 분포시키고 있다. 특정한 하나의 배치형태가 다른 나머지 경우 보다 월등히 효율적인 기류분포상태를 나타내지는 않았다. 다른 모든 실험조건은 고정시키고 실험실 한쪽에 부가적인 공간을 추가했을 때 작업공간에 공급되는 급기풍량이 줄었으나, 작업공간 내의 기류분포에는 영향을 미치지 않았다. 작업공간의 칸막이 바닥틈새 높이는 기류분포에 거의 영향을 미치지 않았다.

일반적으로 사무실 건물에 많이 사용되는 3개의 LT 급기 디퓨저와 6개의 동일한 배기구를 사용한 배치방식에서 환기효율과 공기교환효율 모두 급기풍량이 증가함에 따라 감소하였다. 이것은, 적절히 설계된 환기시스템에서 환기량이 증가함에 따라 환기조건이 양호해진다는 종래의 인식과 반대되는 개념이다. 이러한 결론을 사무실건물에 대해 보편적으로 쓰이는 다른 디퓨저/그릴 배치방식에도 적용할 수 있는지를 검증하는데는 더욱 많은 연구가 요구된다.

이러한 예를 보아, 공기교환효율과 환기효율을 서로 다른 환기량(공기교환량)을 가진 환기시스템의 성능을 비교하는 척도로 사용하는 데에 세심한 주의가 필요하다는 것을 알 수 있다.

이러한 사실들을 검증하기 위해서는 한 개나 여러 개의 작업공간을 갖는 실제 현장조건에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. ●

〈정광섭 이사(kschung@plaza1.snuc.ac.kr)〉