다중이용시설의 공기청정 실증 사례 - 스크린골프장, 숯불고기집을 중심으로

김 호 현 | 평택대학교 ICT융합학부 ICT환경융합전공 교수
E-Mail : ho4sh@ptu.ac.kr

1. 서 론

실내공기질(Indoor air Quality, IAQ)은 재실자의 건강, 웰빙, 생산성과 관련성이 높으므로[1], 관리에 대한 기술력과 관심이 높은 실정이다. 최근 중국발 스모그, 황사 등의 국외영향과 국내오염원으로 인한 미세먼지(PM10) 및 초미세먼지(PM2.5)에 대한 노출 및 노출에 따른 건강영향과 실내공기질에 대한 관심이 집중되었다.

더불어, 공기정화기술(Air cleaning technologies)의 중요성은 사회적 요구와 함께 증가하고 있는 실정이나 정화기술의 실내 적용 조건과 유지·관리 측면에서의 제한점 등은 계속 관심을 가져야 할 부분이다. 그 중 공기청정기의 경우 대표적인 실내공기개선 제품으로 알려져 있고, 지속적으로 기술력은 발전해왔다. 주로 지하 생활공간, 병원, 가정, 오피스, 학교, 도서관, 유치원 등 어린이 활동공간에서의 활용이 증가일로에 있으며, 최근에는 지하철, 열차 등 차량, 비행기 등 외부 공간과 차단되거나, 실내공기의 질을 쾌적하게 확보해야 되는 다양한 공간에 적용 또는 개인적인 구매를 통한 보급이 되고 있는 실정이다.

공기청정기의 미세먼지 제거 효과 관련 연구는 국외에서도 그 목적에 맞는 다양한 현장 실험[2)~7)]이 추진되고 있으며, 국내에서도 유사 연구가 진행되었다.[8)9)10)] 바베큐(Korean barbecued food)로 인한 즉, 고기집(Korean barbecue-style restaurant)에서 발생 가능한 호흡성 분진(PM10, PM2.5)의 증가를 보고하였고, 기존 연구[11)12)]를 통해서도 흡연은 PM2.5 노출에 기여한다고 보고되고 있다.[13)]

따라서, 본 연구에서는 미세먼지(PM10, PM2.5)의 주요 발생원인 흡연이 문제시되는 스크린골프장과 연소로 인한 발생원이 존재하는 숯불고깃집을 대상으로 공기청정기의 실증사례 평가에 대한 주요 결과를 제시하였다. 본 원고의 스크린골프장 흡연 실험의 경우 금연구역으로 지정(2017. 12. 03)되기 이전의 실험이었음을 공지한다.

2. 본 론

2.1 실험방법

첫 번째 실증대상 공간인 스크린골프장의 경우 서울시 성동구에 위치하고, 재실자 3명이 18홀의 경기를 하는 동안을 평가하였다. 경기 중 금연시 노출(Baseline), 공기 청정기 적용 전 경기 중 흡연시 노출, 공기 청정기 적용 후 경기 중 흡연시 노출로 구분하여 평가하였다. 경기 중 흡연시 경우에는 동일한 종류의 담배로 18홀 동안 3명이 20 개피를 나누어 피도록 하였다. 경기시간 또한 동일한 시간대 시

작하고 종료하였으며, 3일(2월 5일, 2월 7일, 2월 10일)에 걸쳐 측정하였다. 스크린골프장의 경우에는 지하 밀폐된 공간이므로, 외부 오염원으로 인한 영향은 고려되지 않았다.

두 번째 실증대상 공간인 서울시 성북구에 위치한 숯불고깃집을 선정하였으며, 재실자 8명이 들어갈 수 있는 밀폐된 1개실에서 측정하였다. 손님이 없는 상태에서 노출상태를 평가(Baseline)하고, 공기청정기를 사용하기 전 숯불을 사용하여 고기를 구웠을 경우와 공기청정기를 적용한 후 숯불을 사용하여 고기를 구웠을 경우로 구분하여 2일(2월 6일, 2월 12일)에 걸쳐 평가하였다. 숯불을 이용하여 고기를 구웠으며, 밀폐된 1개실에서 8명이 8인분의 생고기 및 양념고기 등 식사시간 동안 평가하였다. 공기청정기를 적용하기 전과 후는 공기청정기의 가동여부를 제외하고, 생고기 및 양념고기의 양, 숯불을 켜놓은 시간, 식사 시작 및 종료시간 등 모든 조건을 유사한 조건으로 실시하였다.

조사항목으로 PM10, PM2.5와 블랙카본(Black Carbon, BC)을 선정하였다. 본 연구에 사용된 광산란방식의 측정장비의 경우 시간대별 농도 분포변화에 대한 추적이 가능한 반면, 중량법에 비해 농도의 변화폭이 심한 경향성이 있어 중량법을 통한 보정수식의 개발 및 등가성 평가 등[14]이 이루어지는 바 광산란 연속장비의 결과의 확인 및 검증을 위해 PM10, PM2.5 광산란법 및 중량법 두가지 방법으로 동시 측정하였고, BC의 경우도 PM10, PM2.5 시료채취시간과 동일하게 동시에 측정하였다.

참고적으로 본 연구에서 사용한 측정장비는 Dustmate (Turnkey Instrument Ltd, UK)이었으며, 600 cc/min의 유량으로 시료를 1분 간격으로 평균농도를 사용하였다. 광산란 연속측정의 경우에는 1분 단위의 연속측정이 가능하며, 평가 입경 범위는 0.5 ~ 20 $\mu g/m^3$ 이고, 환경측정모드는 TSP, PM10, 및 PM2.5 측정이 가능하며, 시간대별 농도 변화를 살펴보는데 용이하다. 측정원리는 대기 중에 부유하고 있는 입자상물질에 빛을 조사했을 때, 입자상물질에 의하여 산란된 빛의 양을 측정하고, 산란광의 양은 물리적 성질이 동일한 입자상 물질의 질량농도에 비례하는 원리를 이용해 그 값으로부터 입자상 물질의 농도를 구하는 방법이다.

PM2.5의 경우 저용량공기포집기(mini-volume portable air sampler, Firmetrics Co., US)에 PM2.5 흡입구(PM2.5 inlet)를 장착하여 5 ℓ/min의 유량으로 8시간 동안 시료를 포집하였다. 입경이 2.5 ㎛ 보다 큰 입자는 흡입구의 충돌판에 관성 충돌하여 제거되고, 2.5 ㎛ 보다 작은 입자는 충돌판에서 위로 흐르는 공기의 흐름에 따라 포집 여지에 쌓이게 된다. 본 연구에서는 미량원소성분 분석에 가장 적합한 재질로 알려진 셀룰로오즈 질산염 멤브레인 포집 여지(Cellulose nitrate membrane filter, pore size 1.0 ㎛, Advantec Co., Japan)를 사용하였다. 채취한 시료여지는 먼지농도는 항온, 항습 데시게이터 내에서 24시간 이상으로 충분히 함량 시킨 후, 저울에서 칭량하고 미세분진의 농도는 포집 전, 후 포집여지의 무게 차이를 총 포집유량으로 나누어서 산출하였다.

BC는 2개 파장(370, 880 ㎚)의 빛이 석영 필터에 채취된 입자에 의해 감쇄되는 정도를 각 파장별 질량 농도로 변환하는 Aethalometer (model AE42-7-ER-MC, Magee Scientific)를 이용하여 BC 농도를 측정하였다.

2.2 주요 실증 결과

스크린골프장의 경우 현재까지 다중이용시설법 규제 대상시설로 지정되지 않은 시설이며, 최근 대중매체를 통해 밀폐된 공간에서 제품 내에서 발생하는 내부 오염원과 흡연으로 인한 2차 먼지 발생원으로 인해 실내공기질의 관리 필요성이 부각된 바, 공기청정기를 적용함으로써 PM2.5 등 미세먼지류 저감효과를 평가하기 위해 연구대상 다중이용시설로 선정 하였다.

스크린골프장의 공기청정기 적용 유무에 따른 PM10 농도를 비교하기 위하여 Baseline, 공기청정

기 적용 전, 공기청정기 적용 후로 구분하였고, 주요 결과는 그림 1에 제시하였다.

PM10 측정 결과, Baseline 농도는 88.91 ㎍/㎥, 스크린골프 경기 중 흡연인 상태에서 공기청정기 적용 전 농도는 226.01 ㎍/㎥, 스크린골프 경기 중 흡연인 상태에서 공기청정기 적용 후의 농도는 95.80 ㎍/㎥ 이었다. 이는 스크린골프 경기 중 흡연으로 인해 PM10 농도가 약 2.5배 정도 높아졌다는 것을 보여주며 흡연으로 높아진 농도가 공기청정기를 적용함으로써 약 57.61 % 감소한 것으로 나타났다.

PM2.5의 경우, 광산란식 기기로 측정한 결과,경기 중이나 금연인 상태를 나타내는 Baseline 농도는 27.36 ㎍/㎥, 스크린골프 경기 중 흡연인 상태에서 공기청정기 적용 전 농도는 111.96 ㎍/㎥, 스크린골프 경기 중 흡연인 상태에서 공기청정기 적용 후의 농도는 20.84 ㎍/㎥ 이었다. 이는 스크린골프 경기 중 흡연으로 인해 PM2.5 농도가 약 4배 정도 높아졌다는 것을 나타내며, 급격히 높아진 농도가 공기청정기를 적용함으로써 약 81.39 % 저감되었고 Baseline보다 농도가 더 낮아졌다는 것을 보여준다. 중량식 방법으로 비교 측정한 결과, Baseline 농도는 97.15 ㎍/㎥, 공기청정기 적용 전 농도는 115.48 ㎍/㎥, 공기청정기 적용 후 농도는 75.77 ㎍/㎥ 이었다. 중량식으로 측정한 결과도 광산란법 방법과 동일하게 경기 중 흡연으로 인해 PM2.5 농도가 높아졌으나 공기청정기를 적용함으로써 약 34.39 % 감소하여 Baseline의 농도보다 더 낮아졌다.

그러나, 일반적으로 광산란연속측정법은 입자상 물질에 의하여 산란된 빛의 양을 측정하고, 산란광의 양은 물리적 성질이 동일한 입자상 물질의 질량농도에 비례하는 원리를 이용해 그 값으로부터 입자상 물질의 농도를 구하는 방법으로 농도의 변화폭이 심한 단점이 있음에 따른 오차가 존재한다. 그럼에도 불구하고 통상적으로 중량법에 비해 광산란법 결과가 다소 높게 측정되는바 본 연구결과에서는 반대의 농도결과를 일부 보였는데 이는 중량법측정장비(미니볼에어샘플러)에 의한 측정 유량의 제한점(6시간 이상 측정)으로 인해 스크린 운동시간(3시간 내외)외 추가적인 샘플링(5시간이상)으로 인한 제한점으로 인해 광산란법결과에 비해 중량법 결과가 높게 측정된 제한점도 존재한다. 또한, 스크린골프장의 이용 특성상 스윙으로 인한 협소한 공간 등으로 인해 1.5m 이상 벽면에서 떨어져서 측정하지 못한점 등이 결과에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

BC의 경우 스크린골프 경기 중이나 금연 상태인 Baseline 농도는 3.33 ㎍/㎥, 스크린골프 경기 중 흡연인 상태에서 공기청정기 적용 전 농도는 2.66 ㎍/㎥, 스크린골프 경기 중 흡연인 상태에서 공기청정기 적용 후의 농도는 1.66 ㎍/㎥ 이었다. Baseline

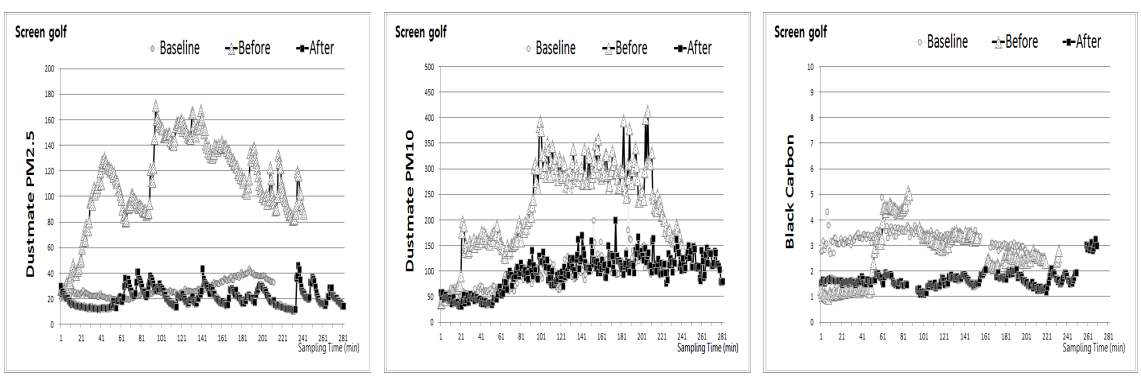

그림 1. 스크린골프장의 공기청정기 설치 전후의 미세먼지 농도 변화

과 비교하여 공기청정기 적용 전의 BC 농도가 오히려 낮아진 것으로 보아 흡연과 BC 농도의 연관성은 볼 수 없으나, 공기청정기 적용 전과 적용 후를 비교해본 결과 적용 전에 저농도로 존재하였더라도 공기청정기 적용으로 인해 BC 농도 저감 효과가 있었다.

최근 서울시 보고에 따르면 보건환경연구원이 실태조사를 바탕으로 한 먼지 배출량을 분석한 결과 서울 대기의 PM2.5 가운데 10 %가량이 고기를 구울 때 즉, 관련 음식점에서 발생하는 것으로 조사됐다. 따라서, 본 연구에서는 PM2.5 발생량이 높은 숯불 고깃집을 대상으로 공기청정기 적용 효과를 평가하였다.

숯불 고깃집의 공기청정기 적용 유무에 따른 PM10 농도를 비교하기 위하여 Baseline, 공기청정기 적용 전, 공기청정기 적용 후로 구분하여 직독식 기기를 이용한 측정 결과 중 주요내용은 그림 2에 제시하였다.

Baseline 농도는 17.78 $\mu g/m^3$, 공기청정기 적용 전 농도는 137.18 $\mu g/m^3$, 공기청정기 적용 후의 농도는 27.53 $\mu g/m^3$ 이었다. 이는 숯불 사용으로 인해 PM10 농도가 약 7~8배 정도 높아졌다는 것을 의미하며, 공기청정기를 적용함으로써 약 79.93 % 감소하였다.

PM2.5의 경우 광산란식 기기로 측정한 결과,룸이 미사용중일 때인 Baseline 농도는 9.81$\mu g/m^3$, 룸에서 숯불을 이용하여 조리하는 상태에서 공기청정기 적용 전 농도는 71.41 $\mu g/m^3$, 룸에서 숯불을 이용하여 조리하는 상태에서 공기청정기 적용 후의 농도는 54.61 $\mu g/m^3$ 이었다. 이는 숯불을 이용한 조리로 인해 PM2.5 농도가 약 7배 정도 높아졌다는 것을 나타내며, 공기청정기를 적용함으로써 약 23.53 % 저감되었다. 중량식 결과의 경우 Baseline 농도는 40.13 $\mu g/m^3$, 공기청정기 적용 전 농도는 376.16 $\mu g/m^3$, 공기청정기 적용 후 농도는 163.68 $\mu g/m^3$ 이었다.

참고적으로, 선행연구[15)~18)]에서 고기 굽는 형태가 가스 또는 숯불의 형태 등에 따라 초미세먼지 입경의 배출 형태가 달라지고, 지역대기질 및 교통상황에 따라서도 입경 분포가 상이하다는 보고를 하였다. 본 연구에서의 결과치는 숯불의 사용, 양념고기의 사용, 공기청정기의 위치 등(공간이 협소하여 측정장비 반대편에 위치)에 의한 다양한 변수들에 의해 초미세먼지의 기여도가 상대적으로 높아 초래된 결과로 사료된다. 또한, 초미세먼지(PM2.5)도 미세먼지내에 포함되므로 초미세먼지의 기여도가 높아지면 미세먼지 농도도 함께 높아져야 되는데, 표 3의 최고치 농도를 보면 초미세먼지의 농도가 더 높은 것은 고농도에서의 측정장비 자료의 신뢰성 등 추가 검증이 필요한 부분 등 한계점을 가지고 있다.

BC의 경우 식사 전 미사용중인 룸의 Baseline 농도는 2.28 $\mu g/m^3$, 룸에서 숯불을 사용하는 상태에서 공기청정기 적용 전 농도는 7.10 $\mu g/m^3$, 룸에서 숯불을 사용하는 상태에서 공기청정기 적용 후의 농도는 3.32 $\mu g/m^3$ 이었다. Baseline과 공기청정기 적용 전의 BC 농도를 보면 숯불 사용으로 인해 BC 농도가 매우 높아진다는 것을 알 수 있으며, 숯불을 사용하는 상태에서 공기청정기를 적용함으로써 BC 농도가 약 53.24 % 감소하였다.

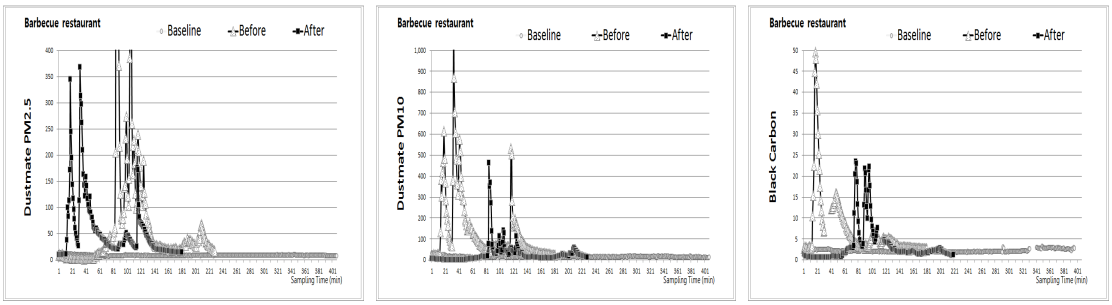

그림 2. 숯불고기집의 공기청정기 설치 전후의 미세먼지 농도 변화

3. 결 론

스크린 골프장의 경우 공기청정기 적용 후 Baseline 보다 낮은 농도 분포를 보였고, 고깃집의 경우 Baseline 보다 높은 농도 분포이나 감소율 23.53(광산란식)~54.49%(중량식)로 평가되어 대상 공간의 운영 특성 및 환기설비 등에 의한 차이는 있지만 다소 높은 PM2.5 저감효과를 보였다.

PM2.5 위해성 평가를 위한 상대위험도값은 0.06 %(PM2.5 농도가 1㎍/m3 증가하였을 때, 0.06% 리스크를 가짐을 의미한다)로 이용시간을 고려하여 급성영향에 대한 역학자료를 사용하였으며, Air Quality Guideline의 meta-analysis 자료를 활용하였다 (WHO, 2005). 이때 baseline mortality는 2012년 국내 전체 사망률인 10만명당 530.8명을 적용하였다. 이렇게 산출된 PM2.5에 대한 위해 감소치는 스크린골프장이 2.90E-5, 숯불 고깃집이 5.34E-5의 위해도 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 제한된 공간에서 측정시 배출발생원과 측정지점에 따른 측정오차, 단기 노출 및 저감효과를 조사한 부분, 광산란법 장비의 한계, 대상공간별 이벤트 시간내 중량법 유량에 의한 측정의 한계, 각기 다른 평형 및 조사지점으로 인한 공기청정기의 저감효율평가를 위한 현장조사의 제한점을 가지고 있으며, 추후 연구시 충분한 고려가 필요하다.

– 참고문헌 –

1. Zhang, Y., Mo, J., Li, Y., Sundell, J., Wargocki, P., Z hang, J., Little, J.C., Corsi, R., Deng, Q., Leung, M,H,K., Fang, L., Chen, W., Li, J., Sun, Y. “Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review.”Atmospheric Environment. 45, pp.4329~4343(2011).
2. Batter man, S., Godwin, C., and Jia, C.R.,“Long duration tests of room air filters in cigarette smoker’s homes.” Environmental Science & Technology, 39. pp. 7260~7268 (2005).
3. Davis, W. T., Cornell, C., and Dever, M., “Comparison of Experimental and Theoretical efficiencies of residential air filters.” TAPPI Journal, 77, pp. 180~186 (1994).
4. Lorimier, C., Le Coq, L., Subrenat, A., Le Cloirec, P., “Indoor air particulate filtration onto activated carbon fiber media.” Journal of Environmental Engineering ASCE. 134, pp. 126~137 (2008).
5. Offermann, F, J., Sextro, R. G., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., Nazaroff, W. W., Nero, A. V., Revzan, K, L., Yater, J., “Control of respirable articles in indoor air with partable air cleaners.” Atmospheric Environment. 19, pp. 1761~1771 (1985).
6. Prabit,. B, Timothy, L., Melanie, N, Susan, K., Ray, C., and Michael, B., “Infilteration of forest fire and residential wood smoke: an evaluation of air cleaner effectivenes.” Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 18, pp. 503~511(2008).
7. Zuraimi, M. S., Nilsson, G. J. and Magee, R. J., “Removing indoor particle using portable air cleaners: Implication for residential infection transmission.” Building and Environment. 46, pp. 2512~2519(2011).
8. Kwak, H. C., Jung, Y. Y., Kim, J. C., Pang, S. K., Sohn, J. R., “The Field Performance of Removal Efficiency on the Indoor Air Pollutant

Using Air Cleaner in Small-sized Crowd Facilities." Journal of the Korean Society of Living Environmental System. 16(6), pp. 692~699(2009).

9. Park, H. J., Kwon, J. T., Sohn, J. R., Woo, W. G., Kim, K., K., "Performance evaluation on the removal efficiency of indoor air pollutants in apartments by air cleaner." Korea Society of Environmental Administration. 17(2), pp. 105~116(2011)
10. Sung-OK, B., Kim, Y-S., Perry, R. "Indoor air quality in homes, offices and restaurants in Korean urban areas-indoor/outdoor relationships. Atmospheric Environment. 31, pp.529~544(1997).
11. Morawska, L., Jamriska, M., Bofinger, N.D., "Size characteristics and ageing of the environmental tobacco smoke." Science of the Total Environment. 196, pp. 43~55(1997).
12. Hussein, T., Glytsos, T., Ondra' cěk, J., Doha'nyosova', P., Ž di'mald, V., Häeria, K., Lazaridisc, M., Smoli'k, J., Kulmalaa, M., "Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house." Atmospheric Environment. 40, pp4285~4307(2006).
13. Nazaroff, W.W., Hung, W.-Y., Sasse, A.G.B.M., Gadgil, A.J., "Predicting regional lung deposition of environmental tobacco smoke particles." Aerosol Science and Technology. 19, pp. 243~254 (1993).
14. Kim, S.J., Kang, H.S., Son, Y.S., Yoon, S.L., Kim, J.C., Kim, G.S., Kim, I.W. "Compensation of light scattering method for real-time monitoring of particulate matters in subway stations." Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 25(5), pp.533~542 (2010).
15. Sjaastad, A.K., R.B. Jorgensen, and K. Svendsen "Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), mutagenic aldehydes and particulate matter during pan frying of beefsteak" Occup. Environ. Med 67(4), pp. 228～232 (2010).
16. Wahlin, P., F. Palmgren, and R.VanDingenen "Experimental studies of ultrafine particles in streets and the relationship to traffic." Atmos. Environ. 35(Suppl 1), pp. S63～S69 (2001).
17. Svendsen, K., A.K. Sjaastad, and I. Sivertsen "Respiratory symptoms in kitchen workers". Am. J. Ind. Med. 43(4), pp. 436～439 (2003).
18. Wang, Y., Y. Zhu, R. Salinas, D. Ramirez, S. Karnae, and K. John "Roadside measurements of ultrafine particles at a busy urban intersection." J. Air Waste Manag. Assoc. 58, pp. 1449～1457 (2008).