

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 13, No. 1: March 2017 pp. 17-23

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2017.3.31.017>

2003년부터 2015년까지 CA 인증 공기청정기의 성능 시험 결과 분석

김학준 · 홍기정 · 우창규 · 한방우 · 김용진*

한국기계연구원 환경에너지기계연구본부 환경시스템연구실

(2017년 3월 9일 투고, 2017년 3월 21일 수정, 2017년 3월 22일 게재확정)

Analysis of performance test results of CA-certified air cleaners from 2003 to 2015

Hak-Joon Kim · Kee-Jung Hong · Chang Gyu Woo · Bangwoo Han · Yong-Jin Kim*

Department of Eco-Machinery Systems, Environmental and Energy Systems Research Division,

Korea Institute of Machinery & Materials

(Received 9 March 2017; Revised 21 March 2017; Accepted 22 March 2017)

Abstract

In this study, the test results obtained from the performance tests for CA (Korea Association of Cleaning Air) certificated air cleaners which had been commercially available in Korea from 2003 to 2015 were analyzed. Among the test parameters such as flow rate, particle collection efficiency, clean air delivery rate (CADR), ozone emission, odor removal efficiency and noise level, noise level and CADR were correlated with flow rates. Collection and odor removal efficiencies were 20% higher than the limit of the CA certification. The ozone emissions from the air cleaners were negligible because all the air cleaners were equipped with only HEPA filters, not electrostatic precipitation method which produces ozone.

Keywords : Air cleaners, Certification test, Flow rate, Collection efficiency, CADR, Odor removal efficiency, Ozone emission, Noise level

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7775

E-mail : diayolk@kimm.re.kr

1. 서론

산업화와 도시화 이후 각종 건축물에서 에너지 효율을 높이기 위해 단열화 및 밀폐화가 강화됨에 따라 실내에서 발생된 오염 공기가 외부 공기와의 교환 없이 실내에서 계속적으로 체류하면서 실내 공기의 질이 악화되고 있다. 외부에서 실내로 유입되는 오염물질 외에도 실내 건축자재 또는 가구 등에서 배출되는 유해 오염물질로 인해 실내 오염물질의 농도는 지속적으로 증가하고 있으며, 사람들은 도시생활환경에서 하루 시간의 80 ~ 90%를 실내에서 생활하고 있기 때문에 실내 오염원에 노출될 확률이 매우 높아지고 있다 (Burge, 2004). 최근 들어 이러한 실내 오염물질의 오염 농도가 점차 증가하여 장시간 실내 활동을 하는 사람 중에 두통, 현기증, 안질, 후두염 등 건물증후군(SBS; Sick Building Syndrome)이라는 질병의 발생 사례가 보고되고 있다(Brown et al., 1994; Zhang and Smith, 2003; Zuraimi et al., 2006; Li et al., 2007; Guieysse et al., 2008).

최근 미세먼지에 의한 인체 유해성에 대한 사회적 이슈화 및 공기청정기에 의한 실내환경에서의 공기질 개선에 대한 각종 연구가 발표되면서 공기청정기 사용의 필요성이 급격히 부각되고 있다(Kim et al., 2016). 공기청정기는 오염물질 제거방식에 따라 기계식과 전기식 및 복합식으로 분류할 수 있다. 기계식은 집진필터를 이용하여 입자를 제거하는 필터식(filter type), 전기식은 고전압으로 공기를 이온화하는 원리로서 집진판의 유무에 따라 전기집진식(electrostatic precipitation type)과 음이온식(ionizer type)으로 분류할 수 있다(Kim et al., 2008). 복합식(complex type)은 기계식과 음이온식 공기청정기의 집진원리가 복합되어 적용되는 경우를 말한다. 국내에서는 이러한 공기청정기의 미세입자 제거 성능 평가를 위해 한국공기청정협회(Korea Air Cleaning Association, KACA) 공기청정기 성능 표준(SPS-KACA002-132, 2006) 및 한국산업표준 공기청정기 표준(KS C 9314공기청정기, 2010)을 제정하여 운영 중에 있고, 국외에서는 미국의 AHAM(Association of Home Appliance Manufacturers) 표준(ANSI/AHAM AC-1-2006, 2006)과 일본의 JEMA(The Japan Electrical Manufacturers' Association) 표준(JEM 1467, 1995) 등을 제정하여 운영하고 있다. 한국기계연구원은 2003년부터 2015년까지 한국공기청정협회 표준 성능 시험 기관으로 지정되어 국내에서 시

판되고 있는 국내외 공기청정기에 대한 성능 인증 시험 업무를 수행하고 있으며, 공기청정기 성능의 변별력을 높이기 위한 시험 방법의 표준화 및 방향성을 제시하고 있다(Kim et al., 2008, 2011; Han et al., 2013). 특히, 2003년부터 2011년까지 CA 인증제품에 대해 성능 분석을 종합적으로 분석하여 이를 보고한 바 있다(Kim et al., 2011). 현재 한국공기청정협회에서는 2016년 7월 1일부로 CA 인증 표준 시험법(PS-KACA002-132:2016, 2016)을 개정하였고, 구 표준 방식으로 평가된 제품 전체에 대해 종합적인 성능 분석이 필요한 시점이다.

본 연구는 한국기계연구원에서 2003년부터 2015년까지 한국공기청정협회의 공기청정기 성능 표준에 의해 수행되었던 시험 결과를 종합 분석하였다. 특히 공기청정기 풍량이 CA 인증 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 분석 및 정보 제공을 통해 공기청정기 제작사, 판매자 및 연구기관의 공기청정기 연구자들에게는 공기청정기 개발 동기를 자극시키고, 대중에게는 성능이 좋은 공기청정기를 선택하는데 필요한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 실험 방법

표 1은 국내에서 시판되고 있는 국내외 공기청정기가 CA 마크 인증을 획득하기 위한 한국공기청정협회의 공기청정기 성능시험 방법(PS-KACA002-132, 2006)에 대해 개략적으로 설명하였다. 공기청정기 성능시험 항목에는 풍량, 집진효율, 입자청정화능력, 탈취효율, 오존 및 소음 발생량 시험이 있으며, 표 1의 시험 설비 및 조건에서 성능시험을 수행하며, 시험항목 중 집진효율 70% 이상, 탈취효율 60% 이상, 24시간 기준 최대 오존발생량 0.05 ppm 이하, 풍량별 소음량 45 ~ 55 dB이하와 같은 기준치가 있어 이 기준치에 부합하는 공기청정기에 대해 CA 마크를 부여하고 있다. 자세한 성능 시험 방법은 다음과 같다.

2.1 풍량 및 집진효율 시험

풍량 시험은 공기청정기를 0.6 x 0.6 m² 단면의 덕트에 장착시켜 정격 주파수, 정격 전압으로 운전시킨후 덕트 최종단에 장착된 오리피스 또는 노즐형 유량계를 이용하여 최대 풍량을 측정한다.

Table 1. Brief description about the CA certification test of Korea Air Cleaning Association for room air cleaners

CA tests	SPS-KACA002-132 (Korea Air Cleaning Association)
Flow rate	- A test duct (0.6 x 0.6 m ²), Maximum flow rate - No requirement for CA certification
Collection Efficiency	- Potassium Chloride particles, based on number concentration of the 0.3 μm particles - Requirement for CA certification : more than 70%
Clean Air Delivery Rate	- A closed chamber (40±10 m ³), Potassium Chloride particles, based on number concentration of the 0.3 μm particles - Initial concentration : 10 ⁸ -10 ⁹ #/m ³ - During time when the particle concentration reaches 1/3 of the initial - No requirement for CA certification
Odor removal efficiency	- A closed chamber (4±0.1 m ³), Ammonia, acetic acid, Acetaldehyde - Initial concentration : 10-13 ppm - Requirement for CA certification : 60%
Ozone emission	- A closed chamber (40±10 m ³), 24 hours - Requirement for CA certification : less than 50 ppb
Noise level	- A anechoic room, 1 m from the top, front, back, right, left side of an air cleaner - Requirement for CA certification : less than 45 dB(~5 m ³ /min), 50 dB(5-10 m ³ /min), 55 dB(10 m ³ /min)

집진효율 시험의 경우에는 풍량 시험과 동일하게 공기청정기를 덕트에 장착시킨 후 공기청정기 전단에 10⁸ ~ 10⁹ 개/m³ 농도의 염화칼륨입자(KCl, Potassium Chloride aerosol)를 발생시키고, 공기청정기 전·후단부 덕트로 부터 입자샘플링을 하여 광산란식 입자계수기(Aerosol Spectrometer, Model 1.109, Grimm, Germany)로 입자 수농도를 교대로 측정한 후 0.3 μm 입경을 포함하는 채널의 입자 수농도를 이용하여 다음 식으로부터 평균 집진효율을 산출한다.

$$\eta = (1 - \frac{C_o}{C_i}) \times 100$$

여기서, η는 집진효율(%), C_o는 하류 측 수농도(#/m³), C_i는 상류 측 수농도(#/m³)이다.

2.2 입자청정화능력 시험

입자청정화능력 시험은 일정 크기의 챔버에서 공기청정기를 가동시킬 때, 일정 시간 동안의 입자 농도 감소율을 측정하는 시험으로, 공기청정기 운전에

의한 입자농도와 자연감소에 의한 입자농도 변화를 측정한다. 40 ± 10 m³의 시험챔버 벽면에서 5 ~ 10 cm, 바닥에서 75 cm 위치에 공기청정기를 설치 한 후, 0.3 μm 채널의 입자 수농도가 10⁸ ~ 10⁹ 개/m³에 도달할 때까지 시험입자 공급장치(Atomizer, Model 3076, TSI, USA)로 KCl 입자를 발생시켜 공급한 후 공기청정기를 최대풍량으로 운전시키면서, 바닥으로부터 120 cm에 설치된 샘플링 튜브를 이용해 입자농도를 입자계수기로 계측한다. 시험 시간은 0.3 μm 채널의 입자농도가 그 채널의 초기 농도의 1/3이 되는 시점까지 수행하며, 자연감소 및 운전감소 시의 초기 및 최종 시간 수농도를 이용하여 다음 식으로부터 청정화능력 값(Clean Air Delivery Rate, CADR)을 산출한다.

$$CADR = -\frac{V}{t} (\ln \frac{C_{t_2}}{C_{t_1}} - \ln \frac{C_{i_1}}{C_{i_1}})$$

여기서, V는 시험챔버의 체적(m³), t는 공기청정기 운전 시 입자농도가 초기농도의 1/3에 도달하는 경과시간(min), C_{i1}는 자연감소 시 측정개시점 t=0에서의 0.3 μm 입경구간 평균입자농도(#/m³), C_{t1}는 자연감소 시 측정시간 t에서의 0.3 μm 입경구간 평균입자농도(#/m³), C_{i2}는 운전감소 시 측정개시점 t=0에서의 0.3 μm 입경구간 평균입자농도(#/m³), C_{t2}는 운전감소 시 측정시간 t에서의 0.3 μm 입경구간 평균입자농도(#/m³)이다.

청정화능력값으로부터 자동적으로 산출되는 적용면적 A(m²)는 1 시간당 1 회의 자연환기 조건에서 공기청정기를 10 분 동안 가동시켜 실내입자농도를 초기농도의 50%로 낮출 수 있는 방의 크기를 기준으로 한 것으로 이때 천장 높이를 2.4 m로 할 경우, 적용면적은 아래의 식으로 산출할 수 있다.

$$A = 7.92 \times CADR$$

2.3 탈취효율 시험

탈취효율 시험은 일정 크기의 챔버에서 공기청정기를 가동시킬 때, 30 분 운전 동안의 농도 감소량을 측정하여 효율을 산출하는 시험이다. 4 m³ 시험 챔버 중앙의 바닥에서 75 cm 위치에 공기청정기를 설치 한 후, 암모니아(NH₃), 초산(CH₃COOH), 아세트

알데히드(CH₃CHO)를 버블러 및 전기 히팅 방식으로 발생시켜 챔버 내 각각의 가스 농도가 10 ~ 13 ppm에 도달할 때까지 공급한다. FTIR(Fourier transform infrared) 분광기(14000, Midac, USA)를 이용하여 초기 가스 농도를 측정하고, 공기청정기를 최대 풍량으로 30 분 운전 후 챔버 내 가스 농도를 측정한다. 각 가스 제거효율 및 탈취효율은 다음 식으로부터 산출한다.

$$\eta_i = \left(1 - \frac{C_{i,30min}}{C_{i,0min}}\right) \times 100$$

$$\eta_t = \frac{\eta_1 + 2\eta_2 + \eta_3}{4}$$

여기서, η_i 는 i 가스 제거효율(%), $C_{i,30min}$ 은 공기청정기 운전 30 분 후 i 가스농도, $C_{i,0min}$ 는 초기 챔버 내 i 가스농도, η_t 는 탈취효율(%), η_1 는 암모니아 제거효율, η_2 는 아세트알데히드 제거효율, η_3 는 초산제거효율이다.

2.4 오존 및 소음 발생량 시험

오존 발생량 시험은 일정 크기의 챔버에서 공기청정기를 24 시간 가동 시켰을 때, 공기청정기로부터 발생되는 최대 오존량을 측정하는 시험으로, 청정화 능력 시험 챔버에서 공기청정기를 최대풍량으로 운전시킨 후 공기청정기 토출구로부터 5 cm 위치에서 실시간 오존 측정장치(Photometric O₃ Analyzer, Model 400E, Teledyne Instruments, USA)를 이용하여 오존 농도를 측정한다. 소음 발생량 시험은 무향실에서 공기청정기를 중앙에 설치하여 최대풍량으로 운전시켰을 때, 공기청정기 전후, 좌우, 상부로부터 1 m 지점에서의 소음값을 측정하고, 이를 평균한 값을 소음발생량으로 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공기청정기 CA 인증 현황 분석

본 연구에서는 한국기계연구원에서 지난 2003년부터 2015년까지 인증 신청 366모델들을 평가하였고, 354 모델들이 인증을 받았다. 그림 1은 공기청정

기 방식별 CA성능 시험 현황을 나타내었다. 2003년부터 2005년까지 인증대수가 증가하다가, 40% 이하로 급감하였으며, 이는 당시 발생한 전기식 공기청정기의 오존 발생 문제로 인하여 공기청정기 시장 규모가 감소하였기 때문이다. 특히, 2015년부터 각종 대중매체를 통한 황사, 자동차 배기가스, 중국발 미세먼지 등 미세먼지 및 초미세먼지에 대한 사회적 이슈화 및 대중들의 공기질에 대한 관심이 급격히 증가하여 2015년의 경우, 전년 대비 2배로 CA 공기청정기 인증 대수가 증가하였고, 지속적으로 증가할 것으로 판단된다. 한편, 그림 2에서와 같이, 2010년 이후에는 이온 발생 모듈을 장착한 제품 또는 필터 단독 방식 제품만 CA 인증을 받았다. 이는 CA 인증을 위해 오존 발생량 0.05 ppm 이하 및 집진효율 70% 이상 기준이 있기 때문이다.

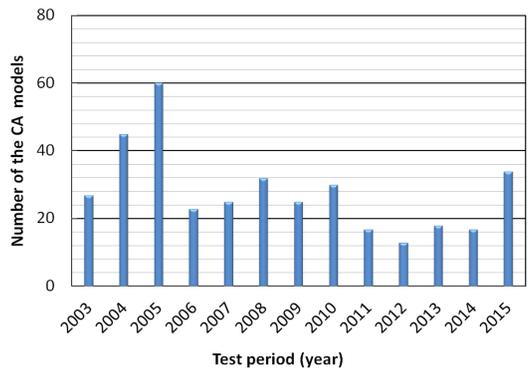


Fig. 1. Number of air cleaners from 2003 to 2015 for the CA certification test

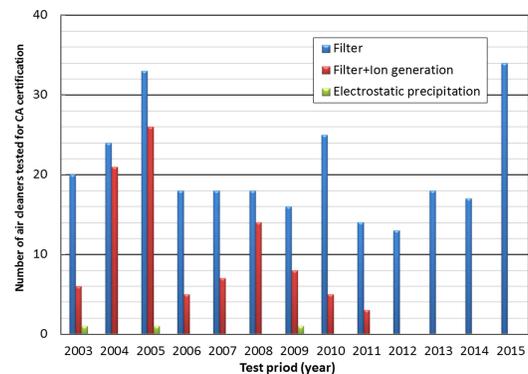


Fig. 2. Number of CA-certified air cleaners by type of filtration from 2003 to 2015

3.2 공기청정기 CA 인증 시험 결과 분석

그림 3에서 그림 8은 한국기계연구원에서 CA 인증 시험을 받은 공기청정기 354 모델들에 대한 연도별 성능 변화를 나타내었다. 괄호에 표기된 값들은 해당년도의 평균값을 나타내었다.

그림 3은 한국기계연구원에서 CA 인증 시험을 받은 공기청정기 354 모델들에 대한 연도별 풍량 변화를 나타내었다. 2003년에서 2015년까지의 평균 풍량은 5.6 m³/min 이었으며, 대부분 5 m³/min 영역에 집중되어 있고, 약 10% 가량 10 m³/min 이상의 대형공기청정기가 CA 인증을 획득한 것으로 나타났다.

그림 4는 풍량에 따른 연도별 소음 발생량 변화를 나타내었다. 8년간 평균 소음량은 46.6 dB로, 45, 50, 55 dB을 기준으로 계단 모양으로 나타내었고, 회귀 분석결과, 풍량에 따른 기준값에 근접한 소음 발생량을 나타내었다. 이는 표 1에서 와 같이, CA 인증 획득을 위한 소음기준치가 풍량별로 설정되어 있어 공기청정기의 풍량에 따라 해당 기준 값 부근에 소음량이 집중적으로 분포되어 있기 때문이다.

그림 5는 CA 인증 공기청정기 모델에 대한 풍량에 따른 공기청정방식별 최대오존 발생량을 비교하였다. 필터식 공기청정기의 경우 모든 공기청정기가 오존을 전혀 발생시키지 않았으며, 이온발생기능이 추가된 일부 복합식 공기청정기의 경우 기준치 0.05 ppm 의 1/5 수준 이하의 최대오존 발생량을 나타내었다. 특히, 2004년 이후 인증을 획득한 2대의 전기집진식 공기청정기 모델의 경우 오존이 0.02 ppm 이상 발생하였으나, 기준치의 1/2 수준으로 낮았다.

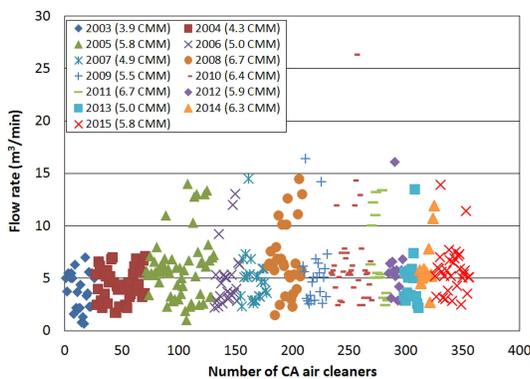


Fig. 3. Flow rates of CA-certified air cleaners from 2003 to 2015

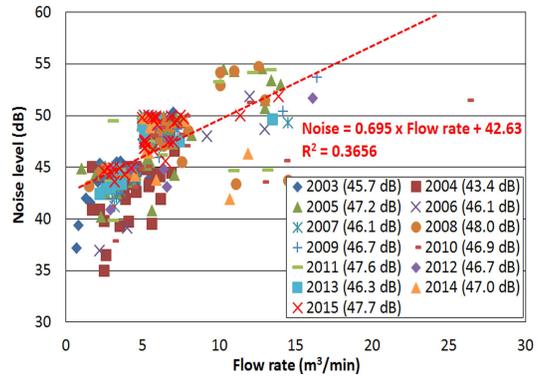


Fig. 4. Noise levels of CA-certified air cleaners from 2003 to 2015

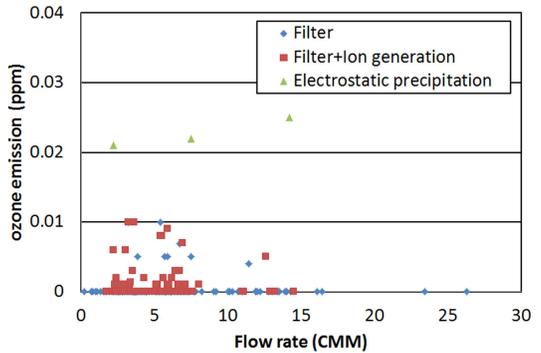


Fig. 5. Ozone emissions of CA-certified air cleaners for 354 models by filtration types

그림 6은 CA 인증 공기청정기 모델에 대한 풍량에 따른 연도별 집진효율 변화를 나타내었다. 8년간 평균 집진효율은 89.9%를 나타내었고, 풍량과 집진효율간 상관관계가 없었으며, 최소 70% 집진성능을 나타내었다. 이는 CA 인증 집진효율 기준치가 70%이기 때문에 공기청정기 제작사에서는 기준치 보다 20% 가량 상회하도록 공기청정기 집진필터 유닛의 성능을 유지하는 것으로 나타났다.

그림 7은 CA 인증을 받은 공기청정기에 대한 풍량에 따른 청정화능력값 변화를 나타내었다. CA 인증 공기청정기 모델에 대한 평균 청정화능력값은 4.5 m³/min 이었으며, 적용면적으로 환산하면 35.6 m²(11.5 평)으로 풍량에 대해 선형적인 관계가 있었다.

이는 공기청정기의 집진효율이 약 90%로 일정하기 때문에 청정화능력값은 풍량에 비례한다고 할 수 있다(Niu et al., 1998; Chen et al., 2005).

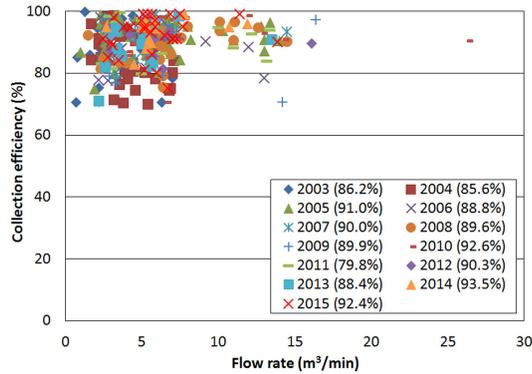


Fig. 6. Collection efficiencies as a function of flow rates of CA-certified air cleaners from 2003 to 2015

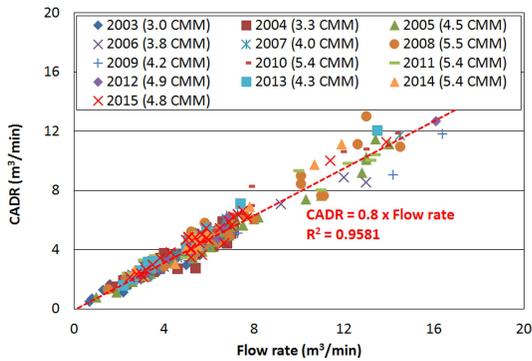


Fig. 7. CADRs as a function of flow rates of CA-certified air cleaners from 2003 to 2015

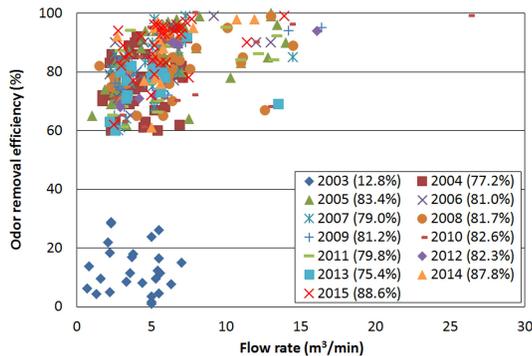


Fig. 8. Odor removal efficiencies as a function of flow rates of CA-certified air cleaners from 2003 to 2015

그림 8은 CA 인증 공기청정기 모델에 대한 풍량에 따른 연도별 탈취효율 변화를 나타내었다. 한국 공기청정협회가 CA 마크 인증 사업을 시작한 2004년부터 모든 공기청정기가 풍량에 관계없이 탈취효율 기준치인 60%를 약 22% 상회하는 탈취필터를 사용하는 것으로 확인되었다. 한편, 2014년부터 공기청정기 탈취효율 평균이 약 88%로 이전 평균 약 80% 대비 8% 개선된 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 국내외 공기청정기 354 모델들을 대상으로 2003년부터 2015년까지 수행해 온 한국공기청정협회 공기청정기 표준 성능 시험 결과를 종합 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 한국기계연구원에서 평가한 CA 인증 제품은 2012년 이후 100% 필터 방식이었으며, 공기청정기의 핵심적인 성능인 집진과 탈취 효율은 풍량과 연관성이 없었고, CA 인증을 받기 위한 최소효율 대비 약 20% 향상된 성능을 나타내었다. 또한, 소음의 경우에는 풍량에 따라 규정된 최대발생량을 만족하는 것으로 나타났다. 한편, 청정화능력값은 풍량에 선형적인 관계를 나타내었고, 풍량에 0.8을 곱한 값을 나타내었다. 현재 한국공기청정협회 CA 인증 표준은 2016년부터 개정되었고, 향후에는 개정 전후 공기청정기 성능 결과를 종합 분석하여 제공함으로써 공기청정기 제작사, 판매사 및 사용자들에게 공기청정기 성능 관련 유용한 정보를 제공하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 선진화사업(GG2790)과 한국기계연구원 주요사업(SC1250)에서 지원된 연구이며, 이에 감사드립니다.

Reference

- AHAM.(2006). ANSI/AHAM AC-1-2006, Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners. Association of Home Appliance Manufacturers(AHAM).
- Brown, S.K., Sim, M.R., Abramson, M.J., and Gray, C.N.(1994). Concentrations of volatile organic compounds in indoor air - a review, *Indoor Air*, 4, 123-134.
- Burge, P.S.(2004). Sick building syndrome, *Occupational and Environmental Medicine*, 61, 185-190.
- Chen, W., Zhang, J.S., and Zhang, Z.Z.(2005). Performance of air cleaners for removing multiple volatile organic compounds in indoor air, *ASHRAE Transactions*, 111, 1101-1114.
- EPA.(1999). Test Method 318, Extractive FTIR method for the measurement of emissions from the mineral wool and wool fiberglass industries. US Environmental Protection Agency.
- EPA.(1998). Test Method 320, Measurement of vapor phase organic and inorganic emissions by extractive Fourier transform infrared(FTIR) spectroscopy. US Environmental Protection Agency.
- Guieysse, B., Hort, C., Platel, V., Munoz, R., Ondarts, M., and Revah, S.(2008). Biological treatment of indoor air for VOC removal: potential and challenges, *Biotechnology Advances*, 26, 398-410.
- Han, B., Kang, J.S., Kim, H.J., Kim, Y.J. and Won, H.(2013). Analysis on particle cleaning capacity of indoor air cleaners for different flow rates considering energy consumption, *Particle and Aerosol Research*, 9(3), 139-147.
- JEMA.(1995). JEM 1467, Air Cleaners of Household and Similar Use. Japanese Electrical Manufacturers' Association(JEMA).
- KACA.(2006). SPS-KACA002-132, Room Air Cleaner Standard. Korea Air Cleaning Association (KACA).
- KACA.(2016). SPS-KACA002-132:2016, Room Air Cleaner Standard. Korea Air Cleaning Association(KACA).
- Kim, H.J., Song, D.K, Hong, W.S., Han, B., and Kim, Y.J.(2008). Comparison of the methods of KACA and AHAM for particle cleaning capacity performance test of an indoor air cleaner, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 5(1), 287-307.
- Kim, H.J., Han, B., Kim, Y.J., Cha, S.I.(2011). Analysis of CA Certification Performance Test Results and Improvement of CA Test Method for a Better Differentiation of Gas Removal Performances for Room Air Cleaners, *Particle and Aerosol Research*, 7(3), 87-97.
- Kim, H.H., Park, C.J., Kim, J.C., Lee, Y.J., Lee, C.M., Kwak, Y.K., Son, H.L., Lee, S.Y. and Lim, Y.Y.(2015). PM risk reduction in accordance with application of an air cleaner - Focused on home(studio apartment), *Journal of Odor and Indoor Environment*, 14(4), 253-262.
- Li, F. and Niu, J.(2007). Control of volatile organic compounds indoors - development of an integrated mass-transfer-based model and its application, *Atmospheric Environment*, 41, 2344-2354.
- NIOSH.(2002). Method 3800, Organic and inorganic gases by extractive FTIR spectrometry, *NIOSH Manual of Analytical Methods*, 4th Ed, 1-47.
- Niu, J., Tung, T.C.W., and Chui, V.W.Y.(1998). Using large environmental chamber technique for gaseous contaminant removal equipment test, *ASHRAE Transactions*, 104(Part 2), 1289-1296.
- Zhang, J.J. and Smith, K.R.(2003). Indoor air pollution: a global health concern, *British Medical Bulletin*, 68, 209-225.
- Zuraimi, M.S., Roulet, C-A., Tham, K.W., Sekhar, S.C., David Cheong, K.W., Wong, N.H., and Lee, K.H.(2006). A comparative study of VOCs in Singapore and European office buildings, *Building and Environment*, 41, 316-329.