식품표면에 부착된 미세먼지의 정량법

An automated determination method of particulate matter on food surface

박선영[1] · 방봉준[1] · 임다영[2] · 정동화[2,3,4] · 이동언[1]*
Sun-Young Park[1], Bong-Jun Bang[1], Dayoung Lim[2], Donghwa Chung[2,3,4], Dong-Un Lee[1]*

[1]중앙대학교 식품생명공학과, [2]서울대학교 국제농업기술대학원 바이오식품산업전공,
[3]서울대학교 그린바이오과학기술연구원 식품산업화연구소, [4]서울대학교 식품바이오융합연구소

[1]Department of Food Science and Biotechnology, Chung-Ang University, Anseong 17546, Republic of Korea
[2]Food Technology Major, Graduate School of International Agricultural Technology, Seoul National University, Pyeongchang 25354, Republic of Korea
[3]Institute of Food Industrialization, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Pyeongchang 25354, Republic of Korea
[4]Center for Food and Bioconvergence, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Abstract

Particulate matter (PM) is an air pollutant that causes serious environmental problems in Korea and other countries. The annual average PM_{10} concentration in Korea is around 40 ㎛/m^3, which is more than twice as high as the WHO recommended standard. When consumed with food, fine PM can pose a risk to humans. However, the risk of fine PM has been focused on the risk of fine PM introduced through the respiratory system. We investigated the quantitative measuring methods of PM_{10} on food surface to identify possible risk analysis of fine PM. The surfaces of food with artificially contaminated PM_{10} were observed with a scanning electron microscope(SEM). An automatic object-based image analysis was used to analyze the amount and size distribution of particulate matter contained in SEM micrographs.

Key words: particulate matter, food contamination, SEM, object-based image analysis

* Corresponding author: Dong-Un Lee
Department of Food Science and Biotechnology, Chung-Ang University, Anseong 17546, Republic of Korea
Tel: 82-31-670-3034
Fax: 82-31-675-4853
E-mail: dong-un.lee@cau.ac.kr
Received February 9, 2021; revised March 22, 2021; accepted March 22, 2021

Ⅰ. 서론

미세먼지(Particulate matter, PM)는 우리나라를 비롯한 여러 국가에서 심각한 환경문제를 유발하는 대기오염 물질이다. 우리나라의 경우 연평균 PM_{10} 농도가 40 ㎍/㎥대로 미세먼지 농도분류 기준 상 '보통'을 유지하고 있지만, WHO권고 기준과 비교하면 2배 이상 높은 수준이다. 미세먼지는 일반적으로 직경이 10 ㎛ 이하인 PM_{10}과 2.5 ㎛ 이하인 $PM_{2.5}$로 분류할 수 있다. 미세먼지는 자동차 배기가스, 석탄 연소와 같은 인위적 요소와 토양 및 암석 침식과 같은 자연적 요소로 인해 생성된다 (Dzierżanowski 등, 2011). 이러한 미세먼지는 황산염, 질산염, 암모늄염 같은 이온과 탄소류, 그리고 Al, Cd, Fe, Pb와 같은 금속으로 구성되어 있다 (Son 등, 2012).

미세먼지에 포함되어 있는 Cd, Pb와 같은 중금속은 인체의 특정 조직에 축적되는 경향이 있기 때문에 살아있는 생물에 독성이 있다 (H.-H. Li 등, 2017; Zhai 등, 2015). 그렇기 때문에 미세먼지에 의한 식품오염은 채소의 재배기간 중 중금속 오염과 관련하여 연구되어왔다 (Amato-Lourenco 등, 2016; El-Radaideh 등, 2018). 하지만 중금속뿐만 아니라 미세먼지에 의한 대기오염은 위장관 건강에 부정적인 영향을 미친다 (Kaplan 등, 2010; Orazzo 등, 2009). 마찬가지로, 모델 동물의 위장관에 미세먼지를 투여하였을 때 미세먼지가 위장관에서 흡수되어 장세포에 부정적인 영향을 미친다는 보고가 있었다 (Mutlu 등, 2011).

이렇게 미세먼지는 식품과 함께 섭취 시 인체에서 위해인자로 작용할 가능성이 있다. 하지만 미세먼지에 대한 경각심이 생긴지 오래되지 않기 때문에 호흡기를 통해 유입된 미세먼지의 위해성에 연구의 초점이 맞춰져 왔고, 식품으로 섭취하는 미세먼지를 다룬 연구는 부족한 상태이다. 식품 중 미세먼지의 영향에 대한 연구를 위해서는 식품 표면의 미세먼지 정량법 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본문에서는 이미 환경 분야에서 연구되어진 미세먼지의 정량법 중 식품에 적용가능한 미세먼지 정량법과 더불어 식품 원료에의 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

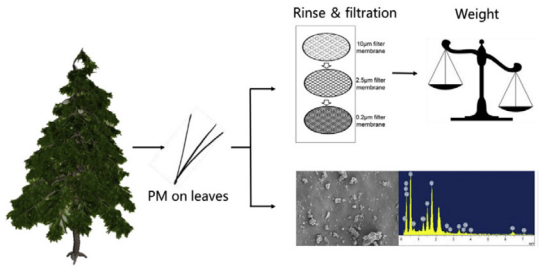

Fig. 1. 중량측정법을 이용한 미세먼지 정량의 모식도 (Song 등, 2015)

Ⅱ. 미세먼지에 의한 식품오염 평가에 적용 가능한 정량 방법

1. 중량측정을 이용한 미세먼지의 정량

환경분야에서 미세먼지 정량법이 연구되어 왔다. 특히, 도심의 가로수 잎은 대기 중 미세먼지를 흡착하여 저감하는 역할을 하기 때문에 효율적인 미세먼지 흡착 종을 찾기 위하여 미세먼지 정량법은 주로 환경분야에서 연구되어왔다. 식품 원료 표면에 적용 가능한 미세먼지 정량법의 첫번째는 중량측정을 이용한 미세먼지의 정량이다. 이 방법은 용매를 이용하여 표면의 미세먼지를 세척한 후 ㎛ 단위의 기공을 갖는 필터에 현탁액을 여과 후 건조하여 미세먼지의 중량을 측정하는 방법이다 (Dzierżanowski 등, 2011).

이 방법은 실험과정이 비교적 간단하기 때문에 가로수 잎 표면에 부착된 미세먼지의 정량을 위해 가장 일반적으로 이용되는 방법이다. 기공 크기가 다른 필터를 순차적으로 이용하면 미세먼지를 크기별로 구분하는 것 또한 가능하다. 다만 대기 중 미세먼지의 약 45%는 수용성 이온이기 때문에 실제 부착된 양보다 과소평가 될 수 있다는 단점이 있다 (X. Li 등, 2012).

2. 주사전자현미경을 이용한 미세먼지의 정량

주사전자현미경(Scanning electron microscope,

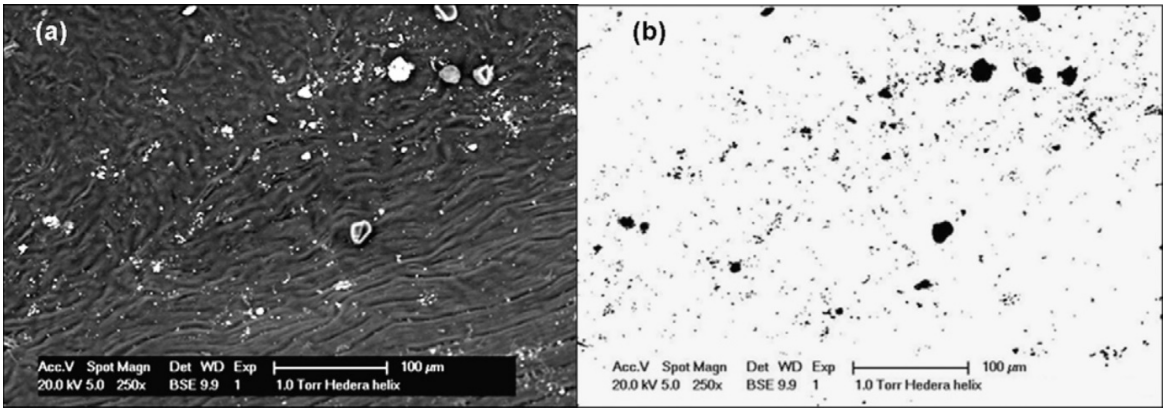

Fig. 2. 픽셀기반 이미지 분석 프로그램을 이용한 미세먼지 정량의 예 (Ottelé 등, 2010)

SEM)을 이용한 미세먼지 정량법 또한 주로 환경분야에서 연구되어왔다. 주사전자현미경의 높은 배율과 깊은 심도로 인해 미세먼지를 직관적으로 정량할 수 있고, EDS(Energy disperse spectroscopy)를 이용하여 입자의 원소조성을 분석할 수 있다는 장점이 있는 방법이다. 주사전자현미경으로 촬영한 이미지를 분석하는 방법은 크게 세가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 육안을 이용한 수동 분석방법이다. 이 방법은 별도의 이미지 분석 프로그램이 필요하지 않기 때문에 가장 널리 쓰이는 방법이다. 하지만 긴 시간이 소요되기 때문에 많은 양의 이미지를 분석하기 어렵고, 분석에 주관적 견해가 포함될 수 있다는 단점이 있다 (Yan 등, 2016a).

두번째는 Image J (Ottelé 등, 2010), ImagePro-Plus (Barone 등, 2008)와 같은 픽셀기반 이미지 분석 프로그램을 이용하는 방법이다. 픽셀기반 이미지 분석 프로그램의 사용은 육안을 이용한 수동 분석방법의 한계를 극복할 수 있는 방법 중 하나이다. 하지만 분석을 위해서는 이미지를 이진 이미지(흑백 이미지)로 변환해야 하고, 이 과정 중 최적의 임계 값 설정에 주관적 견해가 포함될 수 있다는 단점이 있다. 게다가 입자와 표면 사이의 대비 차이가 크지 않으면 분석이 어렵다는 한계가 있다.

마지막은 eCognition developer와 같은 객체기반 자동 이미지 분석 프로그램을 이용하는 방법이다 (Yan 등, 2016a). 객체기반 이미지 분석이란 픽셀 간의 연관관계를 판단하여 하나의 객체를 형성한 후 이미지를 분석하는 방법이다. 비교적 복잡한 표면구조에도 적용할 수 있기 때문에 픽셀기반 이미지 분석 방법의 대안이 될 수 있는 방법이다. 또한 Ruleset이라는 이미지 분석 툴을 이용하여 일괄적으로 분석하기 때문에 짧은 시간 내에 다수의 이미지를 자동으로 분석할 수 있고, 객관적 분석이 가능하다. 마지막으로, 한 번의 분석으로 입자의 개수뿐 아니라 모양과 크기와 같은 다양한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

Ⅲ. 미세먼지 정량을 위한 객체기반 자동 이미지 분석의 식품 적용 가능성

최근 환경분야에서 가로수 잎을 대상으로 객체기반 자동 이미지 분석을 적용한 몇 건의 연구가 진행되어왔다 (Lin 등, 2017; Yan 등, 2016a; Yan 등, 2016b). 가장 널리 사용되는 미세먼지 정량 방법인 육안을 이용한 수동 분석법과 비교하여, 수동 분석의 경우 95.53%, 객체기반 자동 이미지 분석의 경우 92.17%로 전체적으로 비슷한 정확도로 분석되었다. 하지만 한 장의 주사전자현미경 이미지를 분석하는데 수동 분석(13.2분)은 객체기반 자동 이미지 분석(0.9분)보다 약 14배의 시간이 소요되었다 (Yan 등, 2016b).

또한 객체기반 이미지 분석을 통해 얻은 미세먼지

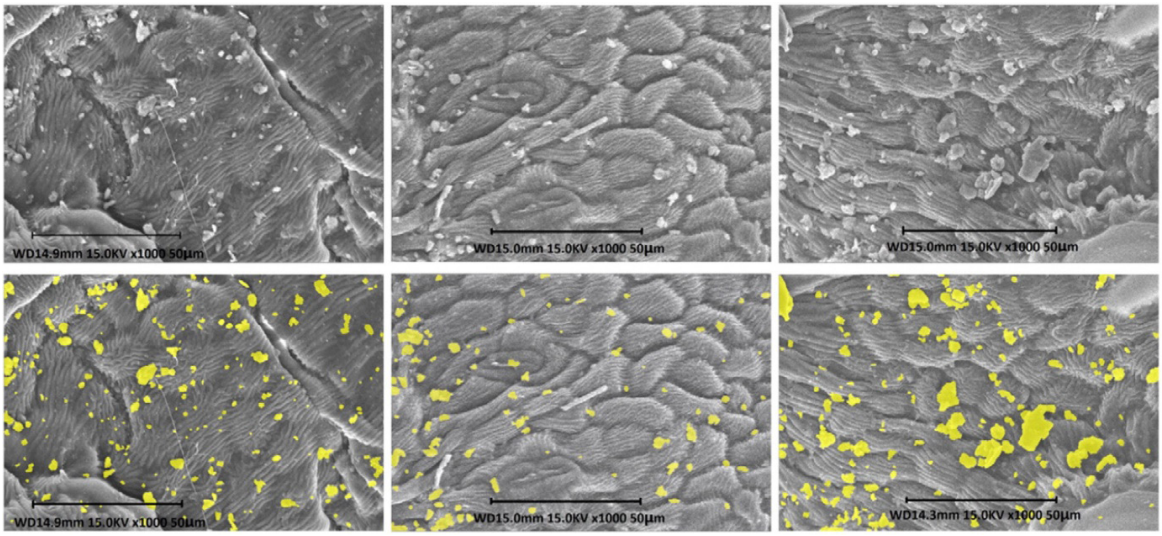

Fig. 3. 객체기반 자동 이미지 분석을 이용한 미세먼지 정량의 예 (Yan 등, 2016b)

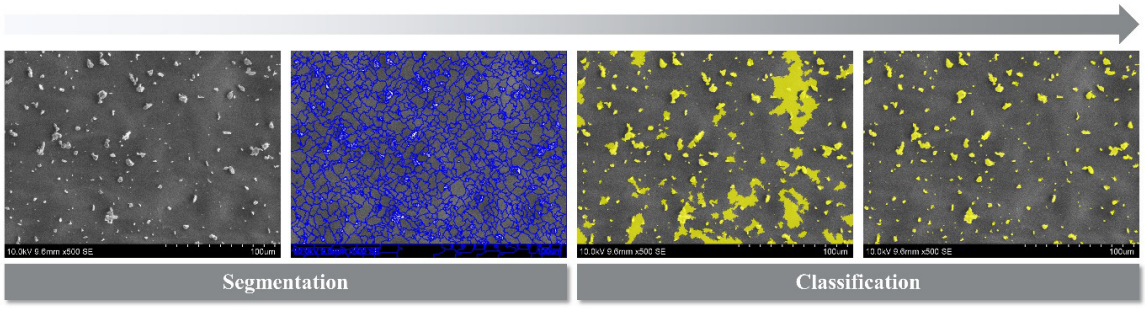

Fig. 4. 객체기반 자동 이미지 분석을 이용한 피망의 미세먼지 분석 과정

의 크기와 모양에 대한 정량적 결과를 이용하면 미세먼지의 근원 또한 추정할 수 있다 (Lin 등, 2017). 예를 들어 1 ㎛보다 큰 입자는 주로 자연적 근원으로부터 생성되고, 1 ㎛보다 작은 입자는 인공적 근원으로부터 생성된다. 인공적으로 생성된 입자의 경우 단순한 형태를 갖는 것이 특징이다. 이러한 정보들을 이용하여 식품 표면에 부착된 미세먼지를 분석한다면 식품별 미세먼지에 의한 오염 정도를 더욱 체계적으로 분류할 수 있을 것이라 기대된다.

최근 중앙대학교 식품생명공학과에서는 소비량이 많은 식품원료를 시작으로 식품 별 미세먼지의 탈 부착 특성에 대한 연구가 진행중이다. 파일럿 규모의 미세먼지 부착 챔버를 이용하여 피망, 토마토 등의 식품을 노출한 후 표면의 미세먼지를 정량 함으로써 객체기반 자동 이미지 분석을 식품원료에도 적용할 수 있음을 확인하였다. 또한 표면의 굴곡 등 특성 차이에 따라 미세먼지 부착 정도에 차이가 있음을 명확하게 확인할 수 있었다. 식품 분야에서 미세먼지 관련 연구가 시작되는 시점에서, 앞으로 소비자 대상 설문조사를 통한 미세먼지 오염 우려식품 선정 또는 식품 표면 특성 분석을 통한 미세먼지 오염 취약 식품을 도출하여 해당 식품을 우선적으로 연구할 필요가 있다.

Ⅳ. 결론

미세먼지에 의한 대기오염이 계속되는 환경에서 미세먼지에 의한 식품 안전성 또한 우려된다. 식품 표면의 미세먼지를 정량 할 수 있는 방법 중 객체기반 자동 이미지 분석은 ruleset을 기반으로 하여 짧은 시간 안에 객관적 분석이 가능하다. 또한 미세먼지의 양과 입도분포를 함께 측정할 수 있기 때문에 미세먼지에 의한 식품오염 평가에 다각적으로 적용될 수 있다. 이러한 객체기반 자동 이미지 분석을 식품 중 미세먼지의 정량에 적용한다면 식품 별 미세먼지 부착 특성 데이터를 효율적으로 축적할 수 있을 것이라 예상된다.

Ⅴ. 감사의 글

본 연구는 2020년도 식품의약품안전처의 연구개발비(19163MFDS112)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Amato-Lourenco LF, Moreira TCL, de Oliveira Souza VC, Barbosa F, Jr, Saiki M, Saldiva PHN, Mauad T. The influence of atmospheric particles on the elemental content of vegetables in urban gardens of Sao Paulo, Brazil. Environ. Pollut. 216: 125-134 (2016)

Barone TL, Zhu Y. The morphology of ultrafine particles on and near major freeways. Atmos. Environ. 42: 6749- 6758 (2008)

Dzierżanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawroński SW. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. Int. J. phytoremediat. 13: 1037-1046 (2011)

El-Radaideh N M, Al-Taani AAA. G. Geo-environmental study of heavy metals of the agricultural highway soils, NW Jordan. Arab. J. Geosci. 11: 787 (2018)

Kaplan GG, Hubbard J, Korzenik J, Sands BE, Panaccione R, Ghosh S, Villeneuve PJ. The inflammatory bowel diseases and ambient air pollution: a novel association. Am. J. Gastroenterol. 105: 2412 (2010)

Li HH, Chen LJ, Yu L, Guo ZB, Shan CQ, Lin JQ, Gu YG, Yang ZB, Yang YX, Shao JR, Zhu XM, Cheng Z. Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China. Sci. Total Environ. 586: 1076-1084 (2017)

Li X, Wang L, Wang Y, Wen T, Yang Y, Zhao Y, Wang Y. Chemical composition and size distribution of airborne particulate matters in Beijing during the 2008 Olympics. Atmos. Environ. 50: 278-286 (2012)

Lin L, Yan J, Ma K, Zhou W, Chen G, Tang R, Zhang Y. Characterization of particulate matter deposited on urban tree foliage: A landscape analysis approach. Atmos. Environ. 171: 59-69 (2017)

Mutlu EA, Engen PA, Soberanes S, Urich D, Forsyth CB, Nigdelioglu R, Chiarella SE, Radigan KA, Gonzalez A, Jakate S, Keshavarzia A, Budinger GRS, Mutlu GM. Particulate matter air pollution causes oxidant-mediated increase in gut permeability in mice. Part. Fibre Toxicol. 8: 1-13 (2011)

Orazzo F, Nespoli L, Ito K, Tassinari D, Giardina D, Funis M, Cecchi A, Trapani C, Forgeschi G, Vignini M, Nosetti L, Pigna S, Zanobetti A. Air pollution, aeroallergens, and emergency room visits for acute respiratory diseases and gastroenteric disorders among young children in six Italian cities. Environ. Health Persp. 117: 1780-1785 (2009)

Ottelé M, van Bohemen H D, Fraaij A. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. Ecol. Eng. 36: 154-162 (2010)

Son JY, Lee JT, Kim KH, Jung K, Bell ML. Characterization of fine particulate matter and associations between particulate chemical constituents and mortality in Seoul, Korea. Environ. Health Persp. 120: 872-878 (2012)

Song Y, Maher BA, Li F, Wang X, Sun X, Zhang H. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution. Atmos. Environ. 105: 53-60 (2015)

Yan J, Lin L, Zhou W, Han L, Ma K. Quantifying the characteristics of particulate matters captured by urban plants using an automatic approach. J. Environ. Sci. 39: 259-267 (2016a)

Yan J, Lin L, Zhou W, Ma K, Pickett ST. A novel approach for quantifying particulate matter distribution on leaf surface by combining SEM and object-based image analysis. Remote Sens. Environ. 173: 156-161 (2016b)

Zhai Q, Narbad A, Chen W. Dietary strategies for the treatment of cadmium and lead toxicity. Nutrients. 7: 552-571 (2015)