

산 · 학 · 연 논문

미세먼지 대응 기능성식품 연구

하수정¹ · 정성근^{1,2*}¹한국식품연구원 기능성식품연구본부²과학기술연합대학원 대학교 식품생명공학전공

Functional Food for Particulate Matter

Su Jeong Ha¹ and Sung Keun Jung^{1,2*}¹Division of Functional Food Research, Korea Food Research Institute, Seongnam, Gyeonggi 13539, Korea²Food Biotechnology Program, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

서론

미세먼지는 우리 눈에 보이지 않을 정도로 작은 먼지를 뜻하며 다양한 경로를 통해서 생성되는 대기오염 물질이다. 미세먼지는 충돌(impaction), 중력침강(gravitational setting), 확산(diffusion), 정전기적 흡착(electrostatic attraction) 등에 의해 호흡기 내로 침착되어(1), 폐, 심혈관질환 등을 유발하는 것으로 알려져 있다. 특히 아이들은 어른보다 더 민감한 영향을 받게 된다. 이러한 위험성 때문에 WHO 뿐만 아니라 세계 각국에서는 저마다 권고 기준을 마련하여 관리하고 있다. 최근 미세먼지가 사회적 문제로 부각되면서 정부에서는 특별대책, 대응전략 등을 수립하고 적극적으로 미세먼지 위해성 해소를 위해 노력 중이다. 정부의 미세먼지 신속검출, 예보 등의 방안과 맞물려 어쩔 수 없이 접촉하게 되는 미세먼지와 이로 인한 독성을 저감할 수 있는 기능성식품 개발이 요구된다.

미세먼지의 정의와 분류

미세먼지(particulate matter, PM)는 우리 눈에 보이지 않는 아주 작은 물질로 대기 중에 장기간 떠다니는 직경 10 μm 이하의 입자상 물질을 의미하며 입자크기에 따라 분류한다(표 1). 미세먼지는 호흡기를 통해 폐에 침투하여 혈관을 따라 체내에 이동하여 폐, 기관지, 혈관, 뇌 등에 악영향을 미칠 수도 있다(2).

미세먼지 권고기준

미세먼지가 다양한 질병의 원인으로 지목되면서 WHO에서는 1987년부터 가이드라인을 제시해 왔으며, 2013년에는 세계 보건기구 산하의 국제암연구소(International

Agency for Research on Cancer, IARC)에서 1군 발암 물질(Group 1)로 지정하였다. 현재는 우리나라를 포함하여 세계적으로 권고기준을 정하여 시간, 연 단위로 일평균 흡입농도를 제시하여 관리하고 있다. 주요국가의 미세먼지 권고기준은 표 2에 나타내었다. WHO 권고기준 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 미국암학회(American Cancer Society's, ACS)의 임상연구 결과를 통해 생존에 중대한 영향이 관찰되는 범위의 최하위로 선정되었다(3). 하지만, 실제로 제시된 권고기준 이하로 미세먼지에 노출되더라도 미세먼지에 의한 질환의 발생에서 벗어날 수 없으므로 최대한 접촉을 차단하는 것을 WHO에서는 권고하고 있다(4). 우리나라의 미세먼지 권고기준은 WHO 권고기준보다도 2배 이상 높으며, 세계 주요국가의 권고기준에 비해서도 높게 설정되어 권고기준을 강화해야 한다는 요구가 꾸준히 제기되고 있다.

미세먼지의 발생원인과 성분

미세먼지는 제조업·발전소·자동차 등의 1차 오염원(배출원)에서 직접 배출되거나, 대기 중에서 $\text{NO}_x(\text{NO}_2, \text{NO}$ 등), $\text{SO}_x(\text{SO}_2, \text{SO})$, NH_3 , VOCs(volatile organic compounds) 등이 화학반응을 일으켜 2차적으로 생성된다(그림 1)(5). 특히, 미세먼지라고 지칭되는 PM 10은 주로 건설현장, 도로먼지의 재현탁 과정, 바람 등에 의해서 형성되며, 초미세먼지로 알려진 PM 2.5는 연소를 통해서 주로 발생한다(4). 수도권의 경우에도 화학반응에 의한 2차 생성 비중이 전체 미세먼지 발생량의 2/3를 차지할 정도로 매우 높다.

전국 6개 주요지역에서 측정된 미세먼지의 구성비율은 대기오염물질(황산염, 질산염)이 58.3%로 가장 높고, 탄소류와 검댕 16.8%, 광물 6.3% 순으로 나타났다(그림 2). 일반적으로 대기오염의 원인이 중국에서 발생하는 황사로 인한 것으로 인식되고 있지만, 미세먼지의 2차 발생원이 화석연료 연소, 자동차 배기가스, 공장 제조공정 인만

*Corresponding author

E-mail: skjung@kfri.re.kr, Phone: 031-780-9369

표 1. 미세먼지의 분류 및 특징

미세먼지 분류	표기	입자크기	특징
미세먼지	PM 10	10 μm 이하	<ul style="list-style-type: none"> 크기가 머리카락 지름보다 약 1/5~1/7 정도 폐포침투
초미세먼지	PM 2.5	2.5 μm 이하	<ul style="list-style-type: none"> 크기가 머리카락 지름보다 약 1/20~1/30 정도 폐포침투, 기관지, 뇌까지 침투 가능

표 2. 우리나라와 세계의 미세먼지 권고기준

미세먼지	권고기준($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
	WHO		한국		미국		EU		일본	
	24시간	연평균	24시간	연평균	24시간	연평균	24시간	연평균	24시간	연평균
PM 10	50	20	100	50	150	-	50	40	-	-
PM 2.5	25	10	50	25	35	15	-	25	35	15

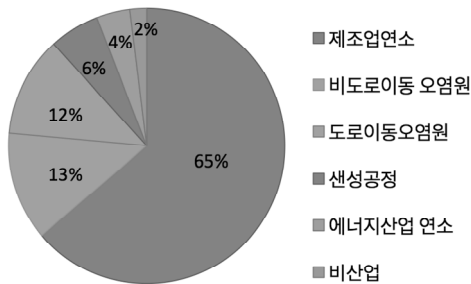


그림 1. 미세먼지 배출원(6).

큼 국내에서 발생하는 미세먼지 비율도 높다고 할 수 있다. 특히, 우리나라의 경우 세계 4위 석탄수입국으로 화석 연료를 사용하여 전기를 생산하는 비중이 높은 만큼 우리나라에서 발생하는 미세먼지도 높다. 실제로 2012년 PM 10과 PM 2.5 배출량은 각각 119,980톤과 76,277톤으로 높게 나타났다(7).

미세먼지와 질병

호흡기를 통해 유입된 미세먼지가 기관지에 축적되면 가래와 기침이 발생하여 기관지 점막이 건조해지면서 세균이 침투할 수 있는 환경으로 변하게 되어, 질환을 유발하게 된다(표 3). 질병관리본부에 따르면, PM 10 농도가

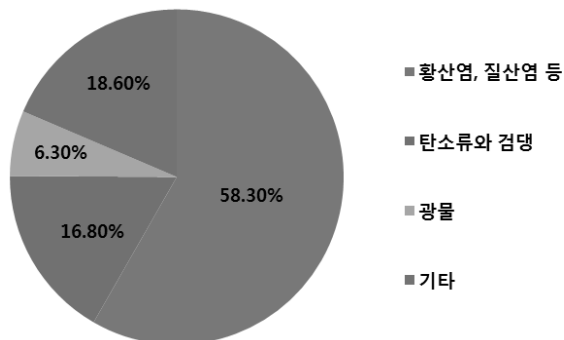


그림 2. 미세먼지 성분 구성(13).

10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 만성 폐쇄성 폐질환(COPD)으로 인한 입원율은 2.7%, 사망률은 1.1% 증가한다고 한다. 특히, PM 2.5 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 폐암발생률이 9% 증가하는 것으로 보고되었다(7). 임상연구를 통해 대기 중의 미세먼지 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 증가할 때마다 12%에서 76%까지 심혈관질환관련 사망률이 증가한다는 결과가 보고되었다(8-10). PM 접촉량이 1일에서 30일 동안 지속되면 혈압과 심실질량(ventricular mass)이 증가(11)하고 PM 흡입에 의해 염증과 산화적 손상이 발생하며 이는 혈중 염증마커인 IL-6, C-reactive protein, TNF- α , IL-1 β 의 증가에서 기인함을 임상과 동물실험을 통해 증명하였다(12).

미세먼지 정부의 정책 및 연구방향

최근 2~3년간 미세먼지 체감오염도가 증가하고, 호흡기 질환을 유발하는 등 일상생활의 문제로 그 중요성이 급부상하면서 2016년 6월 정부는 「미세먼지 관리 특별대책」을 발표하여, 미세먼지에 대한 규제 강화를 본격화하였다. 또한, 같은 해 11월 14일에는 보건복지부와 질병관리본부가 공동으로 「과학기술기반 미세먼지 대응 전략」을 발표하였다. 주요내용은 2023년까지 사업장 초미세먼지 배출량을 절반으로 감축하고, 미세먼지 대응 신시장(국내 17조 원, 해외 30조 원) 창출을 기대한다고 하였다. 세부적인 역량의 집중 부분은 ① 발생·유입, ② 측정·예보, ③ 집진·저감, ④ 보호·대응 4대 분야이다(표 4). 이러한 전략은 현 대통령의 공약집과 유사하여 주요 연구 및 관리 방안은 미세먼지 발생의 원천적인 봉쇄와 빠른 측정과 예보를 통한 대국민 전달 등에 초점을 맞추고 있다.

하지만 ① 생활환경을 통해 필수불가결하게 흡입하게 되는 미세먼지, ② 식약처 허가 황사용 마스크의 경우 80% 정도의 미세먼지만 여과가능, ③ 환자, 임산부 등에는 마스크가 오히려 부작용을 일으킬 수 있다는 점 등을 고려하면 정부의 측정, 예측 등의 노력에도 불구하고 우

표 3. 대기오염예보 단계별 미세먼지의 농도 기준

물 질	농도산정 시간기준	등급($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		좋음	보통	나쁨	매우 나쁨
PM 10	24 시간	0~30	31~80	81~150	151 이상
PM 2.5		0~15	16~50	51~100	101 이상

표 4. 「과학기술기반 미세먼지 대응 전략」의 내용

연구부분	구체적인 내용
발생·유입	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 초미세먼지 발생원인과 발생원별 기여도 규명 등 부족한 기반연구를 강화 - 집중 현장조사와 스모그챔버 실험 등을 통해 초미세먼지 생성·변환 메커니즘을 규명하고 모수화(parameterization) - 아직 불분명한 미세먼지 해외 유입량과 국내 주요 오염원별 기여도(1차 배출과 2차 생성을 포함)를 정량적으로 규명
측정·예보	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 시간 농도·성분 측정 원천기술을 확보하고, 미세먼지 정보를 통합 분석함으로써 중장기 정밀예보를 실시 - 실시간 농도·성분 측정기술을 확보하고, 대도시·육상 중심의 기존 관측망을 상공과 해상을 포함하는 실시간 입체 관측망으로 확대 - 독자 예보모델 개발, 빅데이터·인공지능 적용 등을 통해 미세먼지 예보정확도·기간을 획기적으로 향상
집진·저감	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 종전 대비 2배 이상의 성능을 가지는 고효율 저감기술(집진·탈황·탈질)을 개발하고, 그간 간과되었던 응축성 미세먼지와 비산먼지 저감기술을 개발 - 화력발전소, 제철소 등 대·중소사업장 대상 비용 효과적 저감기술을 개발하고 공동 실증 등을 통해 확산을 지원 - 도로, 지하차, 건설현장 등 다양한 생활현장에서 발생하는 비산먼지 저감기술을 개발
보호·대응	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 국민의 실질적인 미세먼지 노출량과 미세먼지의 위해성 정보를 제공하고, 노출저감기술을 개발, 확산을 지원 - 주택, 대중교통, 지하공간, 상업시설 등 생활환경에서 국민의 미세먼지 노출을 저감(50% 이상)할 수 있는 기술을 개발 - 미세먼지의 인체건강 영향에 대한 과학적 정보 확보·제공으로 정부의 미세먼지 대응 정책과 국민의 능동적 대응을 지원 - 분산·파편화되어 있는 미세먼지 관련 정보를 ICT 기반으로 통합하여 ‘개인 맞춤형 미세먼지 정보 체계’를 구축

리는 일정량의 미세먼지를 흡입하게 된다.

대기오염 대응 기능성 식품연구

「정부의 미세먼지 관리 특별대책」, 「과학기술기반 미세먼지 대응 전략」을 보완하는 방안으로 미세먼지의 독성을 생체 내에서 저감할 수 있는 기능성식품연구가 필요하다고 사료된다. 이미 많은 연구를 통해서 식품성분이 염증을 저해하고 대사질환을 억제하는 효능이 밝혀진 만큼 미세먼지에 의한 독성 억제가 가능한 식품소재를 발굴한다면 섭취를 통해서 미세먼지가 생체 내로 침입했을 경우 효율적인 방어가 가능할 것이다. 근래에 대중매체를 통해서 미세먼지에 좋다는 식품군들이 보도되고 있지만, 과학적인 근거자료가 없기 때문에 기존의 생리활성에 미루어 효능을 예측하는 경우가 대부분이다. 과학적 근거를 바탕으로 미세먼지를 자극제(stimulus)로 사용하여 다양한 질환증상을 억제할 수 있다는 연구결과들은 표 5와 같이 정리하였다.

현재 미세먼지에 대응할 수 있는 기능성식품 개발 연구는 몇 가지 한계에 봉착하게 된다. 첫째로 표준화된 미세먼지의 부재이다. 현재 관련 연구를 보면 대기 중의 미세먼지를 포집·추출하여 세포 또는 동물에 노출시키는 형

태의 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 이러한 연구의 문제점은 미세먼지 농도와 조성은 일, 월, 년, 지역별로 달라지기 때문에 미세먼지에 대한 독성평가는 가능하지만 어떤 소재가 가장 우수한지에 대한 결과를 얻기가 쉽지 않다. 물론, 엄청난 양의 미세먼지를 확보하고 이를 지속적으로 노출시키면서 가장 우수한 식품소재를 선택할 수 있다면 이상적이지만 지속적인 동물실험이 가능할 정도의 미세먼지를 확보하는 것은 거의 불가능하다. 둘째로 동물실험 이후 임상연구의 한계이다. 임상연구를 위해서는 미세먼지에 의한 독성이 어느 정도 나타나는 실험군을 선정해야 하지만, 미세먼지에 의한 독성의 마커로 사용할 수 있는 것이 아직 밝혀지지 않았기 때문에 적절한 실험군을 모집하기가 여의치 않다.

이러한 환경에서 미세먼지 대응 기능성식품 소재 발굴 방법으로는 미세먼지의 표준화가 매우 중요하다고 할 수 있다. 대기 중의 미세먼지와 동일하지는 않지만 유사한 독성을 나타낸다면 이를 합성하여 일정한 독성을 유발하고 이를 효율적으로 억제할 수 있는 소재의 탐색이 가능할 것이다. 이미 중국에서 미세먼지의 주요성분인 SO_4 , NO_3 와 중금속 Cr의 혼합물을 유사미세먼지로 제작하여 이에 대한 폐독성을 억제할 수 있는 소재로 polydatin 발굴하였다(14). 본 연구는 미세먼지의 사이즈와 산화 강도

표 5. 미세먼지 대응 식품소재와 생리활성

식품소재	생리활성	참고 문헌
Olive Oil or Fish Oil	Flow-mediated dilation ↓ Vasconstriction and fibrinolysis ↓	15
Vitamin D supplementation	Bone-resorbing osteoclasts ↓	16
Omega-3 fatty acid supplementation	Heart rate variability ↓	17
Red orange extract	Serum lipid hydroperoxide levels ↓	18
Omega-3 polyunsaturated fatty acids	Cu/Zn SOD activity and GSH plasma levels ↑	19
<i>Lactobacillus paracasei</i> L9	Airway hyper-responsiveness ↓ Eosinophil and neutrophil infiltration in Bronchoalveolar lavage fluid	20

를 측정하여 대기 중의 미세먼지와 합성미세먼지가 유사하다고 보고하고 있지만, *in vivo* 상에서 합성미세먼지와 대기 중의 미세먼지 독성의 유사성을 직접 증명하지 않았기 때문에 다소 아쉬운 부분이 있다. 현재, 우리나라 화학연구원산하 안전성평가 연구소에서도 탄소원을 중심으로 한 유사미세먼지를 합성하여 그 구조 등을 분석하였고, 현재 *in vivo* 독성평가를 계획 중으로 보도가 되었다. 유사미세먼지가 *in vivo* 상에서 유사한 독성을 유발한다는 것이 증명이 된다면 일정한 독성을 유발하는 합성미세먼지를 이용하여 다양한 식품소재의 미세먼지 유래 독성 저감 정도를 측정할 수 있을 것이라는 희망을 가져본다. 하지만, 이를 위해서는 자연계 즉, 대기중의 미세먼지를 대표할 수 있는 조성과 유사한 독성을 나타낸다는 확실한 증거가 필요하다고 할 수 있다.

참고문헌

- Myong JP. 2016. Health effects of particulate matter. *Korean J Med* 91: 106-113.
- Ailshire JA, Philippa C. 2014. Fine particulate matter air pollution and cognitive function among U.S. older adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* 70: 322-330.
- Pope CA III, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 287: 1132-1141.
- WHO. 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment. <http://www.who.int/iris/handle/10665/69477> (accessed May 2017).
- 김상우, 허가영. 2016. 미세먼지 관리 특별대책의 현황 및 개선과제- 수송 및 발전부문을 중심으로. 사업평가현안분석, 국회예산정책처, 서울, 한국. Vol 59.
- 국립환경과학원. 2013. 대기오염물질배출량 통계. 환경부, 안산, 한국.
- 환경부. 2016. 바로알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?. 환경부, 세종, 한국.
- Krewski D, Jerrett M, Burnett RT, Ma R, Hughes E, Shi Y, Turner MC, Pope CA III, Thurston G, Calle EE, Thun MJ, Beckerman B, DeLuca P, Finkelstein N, Ito K, Moore DK, Newbold KB, Ramsay T, Ross Z, Shin H, Tempalski B. 2009. Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Res Rep Health Eff Inst* 140: 135-136.
- Lepeule J, Laden F, Dockery D, Schwartz J. 2012. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009. *Environ Health Perspect* 120: 965-970.
- Miller KA, Siscovick DS, Sheppard L, Shepherd K, Sullivan JH, Anderson GL, Kaufman JD. 2007. Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women. *N Engl J Med* 356: 447-458.
- Van Hee VC, Adar SD, Szpiro AA, Barr RG, Bluemke DA, Diez Roux AV, Gill EA, Sheppard L, Kaufman JD. 2009. Exposure to traffic and left ventricular mass and function: the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *Am J Respir Crit Care Med* 179: 827-834.
- Calderón-Garcidueñas L, Villarreal-Calderon R, Valencia-Salazar G, Henríquez-Roldán C, Gutiérrez-Castrellón P, Torres-Jardón R, Osnaya-Brizuela N, Romero L, Torres-Jardón R, Solt A, Reed W. 2008. Systemic inflammation, endothelial dysfunction, and activation in clinically healthy children exposed to air pollutants. *Inhal Toxicol* 20: 499-506.
- 국립환경과학원. 2014. 대기오염물질배출량 통계. 환경부, 안산, 경기, 한국.
- Yan XD, Wang QM, Tie C, Jin HT, Han YX, Zhang JL, Yu XM, Hou Q, Zhang PP, Wang AP, Zhang PC, Gao Z, Jiang JD. 2017. Polydatin protects the respiratory system from PM_{2.5} exposure. *Sci Rep* 7: 40030.
- Tong H, Rappold AG, Caughey M, Hinderliter AL, Bassett M, Montilla T, Case MW, Berntsen J, Bromberg PA, Cascio WE, Diaz-Sanchez D, Devlin RB, Samet JM. 2015. Dietary supplementation with olive oil or fish oil and vascular effects of concentrated ambient particulate matter exposure in human volunteers. *Environ Health Perspect* 123: 1173-1179.
- Dusad A, Thiele GM, Klassen LW, Wang D, Duryee MJ, Mikuls TR, Staab EB, Wyatt TA, West WW, Reynolds SJ, Romberger DJ, Poole JA. 2015. Vitamin D supplementation protects against bone loss following inhalant organic dust and lipopolysaccharide exposures in mice. *Immunol Res* 62: 46-59.
- Tong H, Rappold AG, Diaz-Sanchez D, Steck SE, Berntsen

- J, Cascio WE, Devlin RB, Samet JM. 2012. Omega-3 fatty acid supplementation appears to attenuate particulate air pollution-induced cardiac effects and lipid changes in healthy middle-aged adults. *Environ Health Perspect* 120: 952-957.
18. Bonina FP, Puglia C, Frasca G, Cimino F, Trombetta D, Tringali G, Roccazzello A, Insiriello E, Rapisarda P, Saija A. 2008. Protective effects of a standardised red orange extract on air pollution-induced oxidative damage in traffic police officers. *Nat Prod Res* 22: 1544-1551.
19. Romieu I, Garcia-Esteban R, Sunyer J, Rios C, Alcaraz-Zubeldia M, Velasco SR, Holguin F. 2008. The effect of supplementation with omega-3 polyunsaturated fatty acids on markers of oxidative stress in elderly exposed to PM_{2.5}. *Environ Health Perspect* 116: 1237-1242.
20. Wang X, Hui Y, Zhao L, Hao Y, Guo H, Ren F. 2017. Oral administration of *Lactobacillus paracasei* L9 attenuates PM_{2.5}-induced enhancement of airway hyperresponsiveness and allergic airway response in murine model of asthma. *PLoS One* 12: e0171721.