

II 미세먼지가 호흡기 건강에 미치는 영향

홍윤기

강원대학교병원 내과, 환경보건센터

Key Words: Air pollution, Particulate matter, Chronic obstructive pulmonary disease (COPD)

Corresponding author: Yoonki Hong, M.D.

Department of Internal Medicine, Environmental Health Center, Kangwon National University Hospital, 156, Baengnyeong-ro, Chuncheon 200-722, Korea

Tel: +82-33-258-9369, Fax: +82-33-255-6567, E-mail: h-doctor@hanmail.net

1. 서론

1952년 영국 런던에서는 5일간의 스모그로 인하여 약 4,000여명이 사망하게 되었고, 대중들이 대기오염의 건강영향에 대한 관심을 가지는 중요한 계기가 되었다. 이 사건 이후로 대기오염에 관한 연구 및 국가적 관리가 본격적으로 시작되었다고 할 수 있다. 이후의 많은 연구들을 근거로 하여 현재 미국 환경청에서는 일산화탄소(CO), 납(Lead), 이산화질소(NO₂), 오존(Ozone), 아황산가스(SO₂), 입자성 물질(particulate matter, PM) 등 6개의 대기오염원에 대한 노출시간, 허용량 등에 대한 기준을 제시하고 있고, 우리나라 환경부에서도 벤젠을 추가한 7개의 대기오염원에 대한 기준치를 제시하고 지속적으로 모니터링하고 있다.

이와 같은 오염물질 배출에 대한 규제를 통하여 대기오염이 건강에 위협요소가 크게 감소할 것이라고 생각하였으나, 최근 미국, 유럽 등의 국가에서 대기오염 수준을 낮게 유지하였음에도 불구하고 여전히 대기오염 정도와 이환율 및 사망률과 많은 관련성이 있다고 보고되고 있다. 세계보건기구는 2012년 대기오염과 관련하여 약 700만 명이 사망하는 것으로 보고하였고¹, 이는 전체 사망의 8분의 1에 해당하는 수치이다. 대기오염 관련 사망과 연관된 주요 질병으로는 허혈성 심질환, 뇌졸중, 만성폐쇄성폐질환(chronic obstructive pulmonary disease, COPD), 폐암, 어린이 하기도 감염이 보고되었다. 우리나라에서도 1990년대부터 대기오염의 위험성을 인지하고 건강영향에 대한 연구 및 국가적 관리를 진행하고 있으나, 황사 등의 영향으로 아직까지는 대기오염의 농도가 비교적 높게 유지되고 있는 실정이다.

현재까지 대기오염이 심혈관 및 호흡기계 등의 질환으로 인한 입원 및 사망의 증가와 관련이 있다고 알려져 있으나, 대기오염의 종류, 농도에 따라 각 질환에 미치는 영향의 구체적 인과관계는 많이 규명되지 않았다. 본 기고에서는 대기오염물질 중에서 위해성이 큰 것으로 알려지고 있는 미세먼지를 중심으로 건강 영향에 관해 알아보고, 여러 질환 중에서도 특히 호흡기 건강에 미치는 영향에 대해서 자세히 살펴보고자 한다.

2. 미세먼지가 호흡기계에 영향을 미치는 과정

대기오염 물질은 입자상 물질과 가스상 물질로 나눌 수 있는데, 입자상 물질(PM)의 경우 가스상 물질(Ozone, SO₂, CO, NO₂ 등)의 경우보다 실제 개인 노출과의 상관관계가 큰 것으로 보고되고 있어, 대기오염에 의한 건강영향평가를 연구할 때 PM이 많이 사용되고 있다. 보통 매우 작은 입자만 폐로 흡입되기 때문에, 건강에 영향을 미치는 입자상 물질을 측정할 때 10 μm 이하 및 2.5 μm 이하의 입자상 물질(PM₁₀, PM_{2.5})인 미세먼지가 주로 사용된다.

비교적 입자가 큰 PM은 주로 토양이나 지각 물질에서 유래한 반면, 미세먼지는 주로 제조, 운송, 에너지 생산에서 발생하는 화석연료의 연소에서 발생한다. 실제적으로 미세먼지의 크기와 성분은 매우 복잡하고 다양하며, 입자의 크기, 표면적, 성분이 건강영향의 양상 및 정도를 결정하게 된다. 일반적으로 입자의 크기가 작을수록 폐 깊숙이 침투할 수 있어 건강의 위험도가 더 증가되는 것으로 알려져 있다².

폐에서 PM이 침적하는 주요 기전은 밀착(impaction), 침전(sedimentation), 확산(diffusion)이다³. 밀착은 100 μ m 이상의 PM이 침적하는 기전으로 알려져 있고, 침전은 중력 자체의 힘 아래로 떨어지면서 발생하는데 0.1~50 μ m PM이 영향을 받는다. 확산은 더 작은 물질의 침적하는 기전으로 소기도 및 가스교환 장소에서 무작위 가스이동으로 대체된다. 미세먼지는 주로 침전, 확산을 통하여 호흡기계에 영향을 미치는 것으로 보고된다.

PM이 흡입되었을 때 호흡기관에서 작용하는 방어기전에서 상피표면액(epithelial lining fluid, ELF) 및 폐포대식세포(alveolar macrophage, AM)가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. ELF에 존재하는 surfactant는 6 μ m 이하의 PM을 치환하여 점액성모 청소(mucociliary clearance)를 쉽게 하도록 만드는 작용을 하고⁴, surfactant의 단백질들은 대식세포가 PM을 감지하여 제거하도록 도와주기도 한다⁵. AM은 점액성모 청소 및 기침으로 제거하지 못한 입자들을 제거하는 주요 역할을 한다⁶. 실제로 한 연구에서는 PM의 정도와 AM의 개수 사이에 직접적인 양의 상관관계를 보여주기도 하였다⁷. 또한 최근의 몇 연구들에서는 입자의 크기가 작을수록 입자의 수가 많고 전체 표면적이 커서 강한 염증 반응을 유발하여 더 위험할 수 있다고 보고하였다^{8,9}.

대기오염 농도가 증가함에 따라 위에서 언급한 방어기전에 손상을 받거나, 방어 과정 중 발생하는 염증반응에 의해서 해로운 건강영향이 나타날 수 있다. 실험적으로 AM이 전체 부피의 60% 이상의 물질을 대식하였을 때 대식작용과 화학작용이 억제되었고¹⁰, 대식된 PM의 양이 전체 AM 부피의 6%만 되어도 점액성모 청소가 감소하는 것으로 보고되었다¹¹. 또한, PM을 대식하는 과정에서 나타나는 AM의 활성화는 활성산소, 단백질분해효소, 염증매개체, 성장조절 단백질 등 폐 염증에 관여하는 물질들을 많이 분비하여 폐손상을 유발하게 된다^{12,13}.

3. 미세먼지의 건강 영향 - 역학적 연구결과

1952년 런던 스모그 이후 1970~1980년대 미국 및 체코 등의 도시들에서 대기오염 증가와 사망률이 관계가 있다는 몇 개의 연구들이 발표되었지만¹⁴⁻¹⁷, 연구들은 주로 단면적 분석(cross-sectional)을 통해 이루어졌고 흡연 등의 다른 변수들을 보정하지 않았기 때문에 결과에 많은 비판을 받았다. 대기오염이 사망률에 미치는 영향에 대해서 본격적인 주목을 받게 된 것은 1993년 ‘미국 6개 도시에서의 대기오염과 사망과의 관련성’ 연구가 발표된 이후이다¹⁸. 이전까지 대기오염 연구에서 비판적으로 제기되었던 문제점들을 극복하기 위해, 전향적 코호트 연구로 진행되어 8,111명의 미국인을 14~16년간 추적 관찰한 결과 담배와 다른 가능한 위험인자 등을 모두 보정한 후에도 대기오염과 사망이 관련이 있음을 보여주게 되었다. 이 연구에서는 가스상 물질 및 PM을 포함한 대기오염 물질들 중에서 입자가 작은 미세먼지가 사망과의 관련성이 가장 크다는 결과도 보여주었다.

이후 미세먼지를 포함한 대기오염 물질의 독립적인 효과를 확인하기 위해 많은 연구들이 진행되었지만, 지역적, 계절성 등의 차이는 극복하지 못하여 일반화된 결과를 도출하기 어려웠다. 이러한 상황에서 시계열 분석을 통하여 PM₁₀의 독립적인 효과에 대한 신뢰성 있는 연구 결과가 2000년도에 발표되었다¹⁹. Samet 등¹⁹은 미국 20개 도시에서 1987년에서 1994년 사이 PM₁₀, Ozone, CO, SO₂, NO₂ 등과 사망률과의 관계를 조사하였는데, PM₁₀이 다른 오염원들을 모두 보정한 후에도 전체 사망, 심혈관계 사망, 호흡기계 사망과 관련성이 있음을 확인하였다. 또한 PM₁₀의 농도가 10 μ g/m³ 증가할수록 전체사망률 0.51%, 심혈관 및 호흡기계 질환으로 인한 사망률이 0.68% 증가함을 보여주었다. 이 연구는 지금까지도 PM₁₀ 농도에 대한 국가 정책 기준을 마련하는 데 중요한 논거로 이용되고 있다. 2001년 유럽에서도 8개 도시에서 미세먼지에 의한 건강영향에 관한 연구한 결과가 발표되었는데²⁰, PM₁₀ 농도가 증가할수록 천식 및 COPD로 인한 입원이 증가하였다.

이후 입자의 직경이 작을수록 폐흡입을 통한 건강 영향이 클 것이라는 이론적 바탕이 있고 PM₁₀이 건강에 미치는 악영향이 확인되면서, 초미세먼제인 PM_{2.5}가 건강에 미치는 영향에 대해서도 많은 연구가 진행되었다. 2006년

Dominici 등²¹은 PM_{2.5}의 독립적인 건강 영향에 대해 앞서 PM₁₀의 연구 결과와 마찬가지로 검증된 통계적 분석으로 증거 수준이 높은 연구 결과를 발표하였다. 1999년부터 2002년까지 204개 미국 도시에서 건강보험 청구를 바탕으로 조사한 연구에서 기온, 지역 등을 보정한 후에도 PM_{2.5} 노출이 뇌혈관 질환, 심혈관 질환, 부정맥, 심부전, 만성폐쇄성 폐질환, 호흡기계 감염 등의 입원률 증가와 모두 관계 있음을 보여주었다. 이 연구도 현재 PM_{2.5} 농도에 대한 국가 정책 기준을 마련하는 데 중요한 근거로 이용되고 있다.

4. 기타 대기오염 물질에 의한 건강 영향 - 역학적 연구 결과

미세먼지 외 대기오염 물질들 중 Ozone, NO₂, CO 등이 건강에 해로운 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 1950년 대기물질 중 Ozone이 확인된 이후로 Ozone에 관한 연구들은 상반된 결과들을 보여 주었지만, 2004년 Bell 등²²은 Ozone의 독립적인 위해성을 확인해 주었다. 1987년부터 2000년까지 95개 미국도시에서 Ozone 노출과 사망률과의 관계를 분석한 결과 PM, 계절, 날씨 등을 보정한 후에도 1주일간 평균 Ozone 농도 10 ppm의 증가는 전체사망률(0.52%), 심혈관 및 호흡기계 사망률(0.64%) 증가와 관련이 있었다. NO₂는 주로 교통량 증가와 관련된 대기오염의 마커로 연구되었는데, Hoek 등²³이 1986년부터 1994년 네덜란드에서 조사된 바에 따르면 black smoke 및 NO₂ 지속적 노출이 기대 여명 감소와 영향이 있음을 보고하였다. CO도 초기에는 독성 효과에 대한 연구결과들이 보고되어 여러 국가에서 모니터링하고 있지만, 최근 한 연구에서는 대기 중 저농도의 CO 단기 노출이 호흡기계 감염으로 인한 입원률 감소와 관련이 있다고 보고된 바도 있어²⁴, CO의 독립적인 건강 영향에 대한 추가적인 정밀한 연구가 필요한 상황이다.

5. 대기오염 장기 노출에 의한 건강 영향

미세먼지를 포함한 다양한 대기오염 물질이 COPD 등의 호흡기계 질환 환자에 부정적 영향을 준다는 연구는 많이 발표되었지만, 대부분의 연구들은 단기적 노출에 의한 급성 영향에 관한 결과들이었다. 미세먼지가 호흡기 질환의 발생이나 진행에 미치는 영향을 보여주는 연구 결과는 적은 상태이다. 최근 덴마크의 한 지역에서 35년간의 개인별 평균 NO₂ 노출을 계산하고 후반 14년간의 입원을 분석하였는데, 평균 NO₂ 증가와 COPD 발생(COPD로 인한 첫 입원)의 관련성을 확인할 수 있었다²⁵. 또한 캐나다 한 연구팀은 건강보험 자료를 이용하여 5년간의 대기오염 노출 후 4년간의 새로운 COPD 입원에 대해서 분석하였는데, black carbon이 COPD 입원 및 사망과 관련성이 있었다고 보고하였다. 이 연구에서 미세먼지인 PM_{2.5}는 관련성이 없는 것으로 나타났다²⁶. 개연성이 남아있기는 하지만 아직까지 장기적인 미세먼지 노출이 COPD 발생 및 악화에 관여한다는 증거는 없어 보인다. 앞으로 장기 추적한 데이터들이 축적되고 발전된 분석 방법을 적용하여 종류별 대기오염의 장기적인 노출에 의한 COPD 등 호흡기 질환의 변화를 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

대기오염에 대한 국민들의 관심과 우려가 증가하고 있고, 국내외 연구 결과들도 대기오염이 건강에 미치는 악영향을 경고하고 있다. 하지만 대기 오염의 종류, 노출 정도와 여러 질환들의 악영향에 대한 구체적 인과관계를 규명하는 일은 아직 연구가 더 필요한 상황이다. 국내에서는 황사 및 미세먼지의 영향이 이슈화되고 있지만, 아직까지 오염 수준은 높게 유지되고 있는 실정이다. 또한 인종, 지역 등에 따라 대기오염에 대한 건강 영향에도 차이가 나타날 수 있다. 국내에서의 대기오염 영향과 건강영향에 관련된 자료를 축적하고, 대기오염 종류별 질환에 대한 영향 정도를 정량적으로 분석하는 것은 향후 예방 및 관리에 대한 국가 정책을 수립하는데 중요한 근거가 될 수 있으므로 연구자들의 많은 관심이 필요하다.

참 고 문 헌

1. World Health Organization. Burden of disease from the joint effects of household and ambient air pollution for 2012. Geneva, Switzerland: World Health Organization; 2014.
2. Miller FJ, Gardner DE, Graham JA, Lee RE Jr, Wilson WE, Bachmann JD. Size consideration for establishing a standard for inhalable particles. *J Air Poll Control Assoc* 1979;29:610-5.
3. Stuart BO. Deposition and clearance of inhaled particles. *Environ Health Perspect* 1976;16:41-53.
4. Schürch S, Gehr P, Im Hof V, Geiser M, Green F. Surfactant displaces particles toward the epithelium in airways and alveoli. *Respir Physiol* 1990;80:17-32.
5. Kendall M, Tetley TD, Wigzell E, Hutton B, Nieuwenhuijsen M, Luckham P. Lung lining liquid modifies PM(2.5) in favor of particle aggregation: a protective mechanism. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 2002;282:L109-14.
6. Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, Soderholm SC, Finkelstein J. Role of the alveolar macrophage in lung injury: studies with ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 1992;97:193-9.
7. Brain JD. Mechanisms, measurement, and significance of lung macrophage function. *Environ Health Perspect* 1992;97:5-10.
8. Gilmour PS, Ziesenis A, Morrison ER, Vickers MA, Drost EM, Ford I, et al. Pulmonary and systemic effects of short-term inhalation exposure to ultrafine carbon black particles. *Toxicol Appl Pharmacol* 2004;195:35-44.
9. Johnson RL Jr. Relative effects of air pollution on lungs and heart. *Circulation* 2004;109:5-7.
10. MacNee W, Donaldson K. Mechanism of lung injury caused by PM10 and ultrafine particles with special reference to COPD. *Eur Respir J Suppl* 2003;40:47s-51s.
11. Morrow PE. Possible mechanisms to explain dust overloading of the lungs. *Fundam Appl Toxicol* 1988;10:369-84.
12. Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, Soderholm SC, Finkelstein J. Role of the alveolar macrophage in lung injury: studies with ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 1992;97:193-9.
13. Zhou H, Kobzik L. Effect of concentrated ambient particles on macrophage phagocytosis and killing of *Streptococcus pneumoniae*. *Am J Respir Cell Mol Biol* 2007;36:460-5.
14. Lave LB, Seskin. Air pollution and human health. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 1977.
15. Evans JS, Tosteson T, Kinney PL. Cross-sectional mortality studies and air pollution risk assessment. *Environ Int* 1984;10:55-83.
16. Ozkaynak H, Thurston GD. Associations between 1980 U.S. mortality rates and alternative measures of airborne particle concentration. *Risk Anal* 1987;7:449-61.
17. Bobak M, Leon DA. Air pollution and infant mortality in the Czech Republic, 1986-88. *Lancet* 1992;340:1010-4.
18. Dockery DW, Pope CA 3rd, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med* 1993;329:1753-9.
19. Samet JM, Dominici F, Curriero FC, Coursac I, Zeger SL. Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *N Engl J Med* 2000;343:1742-9.
20. Atkinson RW, Anderson HR, Sunyer J, Ayres J, Baccini M, Vonk JM, et al. Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. *Air Pollution and Health: a European Approach*. *Am J Respir Crit Care Med* 2001;164:1860-6.
21. Dominici F, Peng RD, Bell ML, Pham L, McDermott A, Zeger SL, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA* 2006;295:1127-34.
22. Bell ML, McDermott A, Zeger SL, Samet JM, Dominici F. Ozone and short-term mortality in 95 US urban communities, 1987-2000. *JAMA* 2004;292:2372-8.
23. Hoek G, Brunekreef B, Goldbohm S, Fischer P, van den Brandt PA. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet* 2002;360:1203-9.
24. Tian L, Qiu H, Pun VC, Lin H, Ge E, Chan JC, et al. Ambient carbon monoxide associated with reduced risk of hospital admissions for respiratory tract infections. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;188:1240-5.
25. Andersen ZJ, Hvidberg M, Jensen SS, Ketzel M, Loft S, Sørensen M, et al. Chronic obstructive pulmonary disease and long-term exposure to traffic-related air pollution: a cohort study. *Am J Respir Crit Care Med* 2011;183:455-61.
26. Gan WQ, FitzGerald JM, Carlsten C, Sadatsafavi M, Brauer M. Associations of ambient air pollution with chronic obstructive pulmonary disease hospitalization and mortality. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;187:721-7.