

# 미세먼지 건강영향에 대한 국내 역학연구 사례

이화여자대학교 의과대학 예방의학교실

이 중 태

## 1. 서론

최근 수도권을 비롯한 도시에서의 인구집중과 증가로 인한 운행 차량 수의 증가와 산업규모 확대 등과 연관된 대기먼지 중 호흡성먼지 또는 미세먼지 농도의 증가가 관찰되고 있으며 이로 인한 주민건강 위해의 가능성이 제기되고 있다. 대기오염 문제의 심각성은 1900년대에 이르러 급격히 진행된 산업화로 인하여 발생된 오염피해 사례를 경험하면서 선진 산업국가들을 중심으로 대두되기 시작하였다. 특히 1952년 겨울에 발생한 런던 스모그 사건을 정점으로 유럽 및 미국을 중심으로 대기오염 인체위해성에 대한 본격적인 역학적 연구가 수행되기 시작하여 상이한 지리·환경적 조건, 인구사회학적 차이, 산업구조 혹은 대기오염 발생원 차이에서 기인되는 대기오염의 질적 차이에도 불구하고 대기오염의 인체위해 가능성을 일관되게 제시하고 있다.

그러나 최근 각 나라마다 대기오염 규제를 강화하면서 현재는 당시와 비교할 때 비교적 낮은 수준의 오염도를 유지하게 되었으며 대부분의 국가에서 법정 기준치를 초과하지 않게 되었으며 오히려 기준을 강화하려는 움직임이 계속되고 있는 형편이다. 그러나 이러한 낮은 수준의 대기오염이 여전히 국민 건강에 위협적인 요소로 되고 있으며, 우리사회에서 진행되고 있는 노령화 추세나 식습관의 변화, 흡연인구 증가 혹은 노령화 등은 현재 수준의 대기오염이 결코 안심할만한 수준이 아니라는 우려가 제기되고 있다.

일반적으로 대기오염물질은 입자상 물질과 가스상 물질로 구분할 수 있는데 입자상 물질의 경우는 입자의 입경크기나 대기 배출원 특성에 따라 다양한 물리·화학적 특성을 나타낸다. 특히 산업 활동이나 연료연소과정과 같은 인위적 발생원에 의하여 배출되는 경우 입자의 직경이 상대적으로 작은 것(미세먼지,  $PM_{2.5}$ )들이 대부분이며, 이들 미세입자를 구성하고 있는 화학물질도 유해성이 큰 중금속(Cd, Cr, As, Pb, Be 등)이나 방향족탄화수소류 같은 성분이 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 밝혀졌다.

따라서 대기오염물질 중에서 특히 많은 관심을 받고 있는 것이 대기먼지의 역할이다. 흔히 호흡성 먼지라면 총부유먼지(Total Suspended Particulates, 이하 TSP)에 비하여 먼지의 직경이  $10\mu m$ 이 내인 것(particulate matters less than  $10\mu m$  in aerodynamic diameter, 이하  $PM_{10}$ , 이하  $PM_{10}$ )을 말하고 있으며 이 중에서 직경이  $2.5\mu m$ 이내인 먼지를 미세먼지(particulate matters less than  $2.5\mu m$  in aerodynamic diameter, 이하  $PM_{2.5}$ )라고 언급한다.

대기 중 먼지의 크기는 발생원 특성을 파악하는 것과 함께 인체건강위해를 예측하는데 있어서 중요한 요인이다.  $PM_{10}$ 보다 입경이 큰 조대먼지의 경우는 주로 자연발생적으로 발생하는 먼지이며 인공적으로 인간의 산업 활동이나 연소과정에서 발생하는 먼지는 대부분 호흡성먼지이며  $PM_{2.5}$ 는 거의 전부가 인간 활동의 결과 발생하는 먼지라고 볼 수 있다. 이러한 발생원 특성만이 아니라 건

강위해를 예측하는데 있어서도 인체 호흡기도 깊숙이 침투할 수 있는 먼지는 거의가  $PM_{10}$ 이며 특히  $PM_{2.5}$ 의 침착률이 제일 크다는 점을 고려할 때 먼지의 크기별 분석과 측정은 매우 중요하다.

실제로  $PM_{2.5}$ 를 이용한 최근의 연구결과를 보면  $PM_{10}$ 을 이용할 때 보다 더 확실한 상관관계를 보이고 있는데 Schwartz 등은 최근의 연구논문(1)에서  $PM_{2.5}$ 는 조기사망과 밀접한 상관관계를 보이는 반면 직경이  $2.5\mu m$ 에서  $10\mu m$  사이인 조대먼지는 사망건수 증가와 유의한 상관성을 보이지 않는다고 제시하면서 주요한 위해요인으로 직경이  $2.5\mu m$ 이내의 미세먼지를 주목하고 있다.

또한 먼지의 발생원 특성과 연관하여 먼지의 화학적 성분에 따라 인체위해의 정도가 다를 수 있는데 Laden 등의 연구(2)에서 포집된  $PM_{2.5}$ 의 성분을 분석한 뒤 요인분석을 통하여 미세먼지를 여러 발생원으로 구별하였으며, 이 자료로부터 자동차로부터 배출된  $PM_{2.5}$   $10\mu g/m^3$  증가는 3.4%의 일별 사망 증가와 관련이 있고 석탄연료연소로부터 배출된 경우 1.1%의 일별 사망 증가와 관련이 있으나, 자연 상태에서 발생하는 흙먼지가 주성분인  $PM_{2.5}$ 의 경우는 사망률증가와 관련이 없었다고 보고하여 먼지의 발생원 및 화학적 특성에 따라 인체위해가 다를 수 있음을 제시하였다.

결론적으로 먼지의 입경이 작을수록 생체독성이 큰 물질로 구성되었을 가능성이 크며, 인체기도의 해부학적 구조를 고려할 때 입경의 크기가 작을수록 하기도 깊숙이 침착될 확률이 크다. 기존의 연구결과는 대기먼지의 인체위해는 입경 크기에 따라 반비례하는 것[인체위해도 크기: 총부유먼지(Total Suspended Particles, 이하 TSP) < 호흡성먼지( $PM_{10}$ ) < 미세먼지( $PM_{2.5}$ )]으로 알려져 있으며 우리나라에서도 1995년부터 대기먼지에 대한 규제를  $PM_{10}$ 에 대한 기준안(연간  $80\mu g/m^3$  이하)을 마련하여 시행하고 있다. 한편 미국에서는 1997년부터  $PM_{2.5}$ 에 대한 새로운 기준안(연간  $15\mu g/m^3$  이하; 일별  $65\mu g/m^3$  이하)을 정하여 2001년까지의 유예기간을 거쳐 2002년부터 기준에 미흡한 지역을 대상으로 적극적인 관리를 예고하고 있다.

기존 연구로부터 지금까지 알려진 대기먼지의 인체위해는 주로 천식과 같은 호흡기관련 질환 발생과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으나 최근의 역학적 연구를 보면 심혈관계 질환 발생과 저체중이나 조기출산과 같은 생식관련 이상에도 영향이 있는 것으로 보고 되고 있다. 지난 50여년동안 여러 나라에서 수행된 역학연구 결과를 보면 대기오염 중 먼지의 인체 건강 위해성을 일관되게 보고하고 있으며, 제기된 건강영향의 종류는 주로 호흡기계질환과 심혈관계질환으로 이들 질환으로 인한 사망자수 증가, 병원 방문 및 입원을 증가, 소아천식발작으로 인한 응급환자 급증, 폐기능 저하 등이었음을 알 수 있다.

대기오염이 인체건강에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다는 일반인의 우려는 그 동안 있었던 일련의 대기오염관련 사건, 즉 1952년 겨울 영국 런던에서의 사건(3)을 포함하여 벨지움의 Meuse Valley(4), 미국 펜실바니아 주의 Donora(5) 등에서 대기오염 증가로 인한 사망률의 급증이 관찰된 이후 각국에서 지속적이고 체계적으로 증가하게 되었다. 지금까지의 연구결과를 종합하면 대기오염으로 인하여 사망률의 증가(6-12), 호흡기 또는 심혈관계 질환 관련 외래환자수의 증가(13-15), 천식증상의 악화(16), 호흡기질환 증상발현 또는 폐기능 저하(17-19) 등과 같은 건강영향과 유의한 상관성이 있는 것으로 보고 되고 있다. 최근에는 호흡기질환뿐 아니라 심혈관계질환으로 인한 사망과 대기 중 먼지의 상관성에 관한 연구가 많이 보고 되고 이에 대한 병인론적 기전을 밝히려는 연구가 새로운 연구경향을 이루고 있다. 최근 Liao 등(20)의 논문에서 대기 중 미세

먼지 농도의 증가는 노인들에 있어서 안정시 호흡성 부정맥(RR-interval) 검사를 통하여 측정된 자기심장조절(cardiac autonomic control)의 저하와 유의한 상관성이 있음을 제시하였다. 또한 Poloniecki 등(21)에 의하면 heart attacks으로 인한 병원의래 환자들 50명에서 1명은 대기오염에서 기인한 것으로 추정하였다. 이러한 추산에 의해 영국전역에서 대기오염을 저감함으로써 예방 가능한 심근경색 환자 수는 약 6,000명 가량 된다고 하였다.

대기오염과 인체건강 영향에 대한 국내연구는 주로 단면적 연구방법 또는 생태적 연구방법이 적용되었으며, 이러한 연구 결과를 종합하면 도시지역 또는 대기오염도가 심한 지역에서 호흡기증상 호소율이 높으며(15, 22-25), 대기오염에 민감한 집단 즉 저항력이 약한 소아군과 60세 이상의 고령층에서 대기오염으로부터 호흡기 질환 영향을 크게 받는 것으로 조사되었다(26). 또한 대기오염지역의 학생들의 폐기능이 대조지역 학생에 비하여 저하되거나 폐기능 장애율이 높게 나타났다는 보고도 있다(27). 최근에는 2~3년 동안 국내에서도 시계열적 또는 경시적 연구방법을 적용하여 서울시와 울산시를 대상으로 대기오염과 일별 사망발생과의 연관성 연구가 수행되어 대기오염과 사망률에 유의한 관계가 있음을 보고하고 있다(11-12, 15, 28-29).

과거 50-60년대의 연구 환경과 비교하여 최근의 환경은 대기오염도의 양적·질적 측면에서 많은 변화가 있으며, 특히 양적인 면에서 상당한 개선이 이루어져서 과거와 같은 급격한 대기오염도의 증가와 같은 양상을 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 최근 발표되고 있는 대다수의 연구에서 대상 지역에서의 대기오염도가 각 대상지역에서 적용하는 대기 환경기준치를 초과하지 않았다는 점에서 중요한 시사점을 제시하고 있다. 즉 현재 규제수준 이내에서의 일반도시 대기오염이 위해한 건강영향을 나타낼 수 있다는 것을 암시하는 것이며, 동시에 이에 대한 적절한 관리방안 마련의 필요성을 제시하는 것이라고 할 수 있다. 이와 관련하여 이 글은 대기먼지의 인체위해에 대한 기존의 국내 연구결과를 정리하여 대기먼지의 위해가능성을 밝히는 목적으로 작성되었다.

## 2. 연구 방법

대기오염역학 연구는 대기오염노출 정도에 따라 대기오염의 만성효과 혹은 급성효과 연구로 구분할 수 있다(30,31). 즉 대기오염도의 단기변화(주로 일별 변화)에 대한 건강영향 평가에 주안점을 둔 것이 급성효과 분석 연구라면, 대기오염에 지속적으로 장기간 노출되었을 때의 건강영향을 평가하기 위한 연구는 만성효과 분석 연구라고 할 수 있다. Dockery와 Pope(30)은 대기오염역학 연구를 이러한 급성 혹은 만성효과 연구로 구분 지은 후에 연구대상자 특성과 평가하고자 하는 건강영향의 종류에 따라 세부적으로 나누어 제시하고 있는데 그것을 간략히 나눈 것이 그림 1이다. 그림 1에서와 같이 대기오염역학 연구는 연구가설이 대기오염의 급·만성 효과 중에서 어느 것을 평가하는 것인지, 연구대상자 특성이 일반인구 집단인지 혹은 구축된 코호트를 대상으로 하는 것인지, 평가하고자 하는 건강영향의 형태가 어떤 것인지, 그리고 마지막으로 분석하고자 하는 방법의 특성 등에 따라 크게 4 가지 부분에 의해 특징 지워질 수 있다. 현재까지 수행된 국내 연구결과는 주로 대기오염의 급성효과에 초점을 둔 역학연구이다.

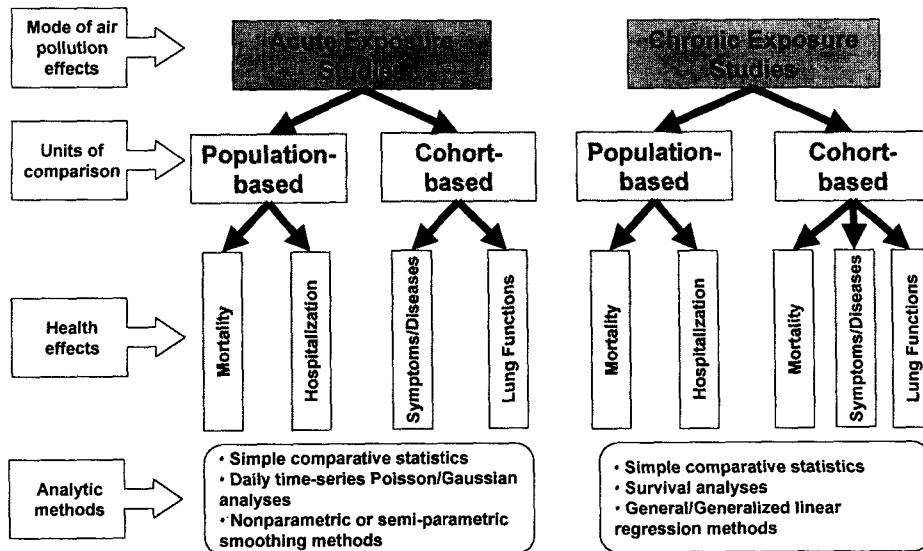


Figure 1. Basic study designs of air pollution epidemiology (Except from Dockery and Pope[30])

1900년대 중반에 있었던 대기오염 사건들을 경험하면서 대기오염의 급성효과에 대한 관심이 높아졌으며 70년대에 들어와 일별 사망과 대기오염도와와의 상관관계를 분석한 논문이 발표되기 시작하였다. 당시의 이러한 상관분석 연구는 통계적 분석방법의 부적절성으로 인하여 결과의 타당성에 많은 의문이 제기되었다. 이후 90년대에 발표된 연구(32)에서는 이전보다 개선되고 통일된 분석방법을 제시하고 있는데, 오늘날에도 당시에 수립된 분석방법을 원형으로 하여 대기오염의 급성효과를 평가하고 있다. 이 때 기본적인 틀을 제공하는 통계모형으로는 추정하려는 건강영향의 종류에 따라, 폐기능 값과 같은 연속변수의 경우는 일반선형회귀식에 기초한 시계열적 통계모형과 호흡기 증상 혹은 사망발생자 및 병원 방문자 수의 경우는 포아송 회귀식에 기초한 시계열적 통계모형 등이 제시되었으며, 가능한 혼란변수로서 대기오염도의 장기추세와 계절적 변동, 그리고 대기온도와 습도와 같은 기후요인 등이 제시되었다.

대기오염의 급성효과를 평가하는데 있어서 우선적으로 고려되는 건강영향의 종류는 호흡기계 질환 및 폐기능 저하 등이다. 이러한 호흡기 질환발생 및 폐기능 저하 등에 미치는 대기오염의 영향을 평가하기 위한 연구설계로는 소위 패널연구(panel study)의 형태로 이루어진다(32). 이 연구설계에 따르면 폐기능이나 호흡기 증상 유무에 대한 측정을 한정된 코호트를 대상으로 사전에 정하여진 기간동안(보통 1개월에서 2개월) 규칙적으로(보통의 경우 일별로) 수행하여 동일한 기간동안 같은 방법으로 측정된 대기오염도와와의 상관성을 평가하여 분석하게 되는 것이다. 예를 들어 이중태와 Shy(33)는 선정된 특정 지역사회를 대상으로 코호트를 구축한 후에 5주 동안 매일 폐기능(순간최대호기율)과 호흡기 증상발현 유무에 대한 측정 및 기록을 하고 동일한 지역에 설치된 먼지오염 측정기 자료(미세먼지, PM<sub>10</sub>)와의 상관성을 평가하여 결과를 제시하고 있다.

대기오염과의 상관성을 평가하는 대상으로는 사망, 병원입원 혹은 외래 및 응급실 방문 등과 같은

경우가 있는데, 이 때는 포아송분포를 가정하는 통계적 회귀모형을 적용하여 분석하게 된다. 이 때 알려진 혼란변수는 기상조건(대기온도와 습도), 계절요인, 대기오염도의 장기추세와 같은 것들로 알려져 있다. 최근에는 이러한 혼란변수들을 통제하기 위하여 비모수 평활법을 적용한 일반화 부가모형(Generalized Additive Models, 이하 GAM)이 제시되어 활용되고 있다(34). GAM은 다음의 식으로 정의되며,

$$\log[E(Y)] = \beta_0 + \sum_i (\beta_i \times \text{Pollutant}_i) + S_1(X_1) + S_2(X_2) + \dots + S_p(X_p),$$

이 때  $Y$ 는 사망자, 병원 입원/방문자, 혹은 호흡기 증상발현자 수이며,  $X_i$ 는 기상변수를 포함한 혼란변수를 나타내며  $S_i$ 는 평활함수를 의미한다. 사용되는 평활함수는 일종의 가중이동평균(weighted moving average) 방법으로서 여러 종류가 있으나 흔히 사용되는 방법이 비모수적 방법인 국지적 가중 평활법(locally weighted regression smoothing; 이하 Loess)이다. 설정된 여러 형태의 통계모형은 Samet 등(35)의 논문에서 제시한 바와 같이 각 모형간의 비동류성(nonnested)을 고려하여 Akaike's Information Criterion(이하 AIC)(36)을 이용하여 적절한 통계모형을 선정하게 된다. 한편 각 오염물질(Pollutant $_i$ )의 경우는 선형관계를 가정하여 모수( $\beta_i$ )를 추정하게 된다.

### 3. 결론

지금까지 국내의 연구에서 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 대한 인체위해에 대한 영향을 연구하여 기존 먼지측정지표(TSP 혹은 PM<sub>10</sub>)의 인체위해 영향과 비교·제시하고 있는 것은 없었다. 부분적이기는 하지만 지난 1995년 이후부터 측정된 호흡성먼지(PM<sub>10</sub>) 농도는 일부 연구에서 총부유먼지의 인체위해 정도와 비교하였다. 대기오염에 대한 인체영향은 주로 급성효과에 초점을 맞춘 것들이 대부분이다.

#### 3-1 먼지와 사망

먼지와 사망의 경우 대기 중 총부유먼지를 대상으로 수행된 것이 대부분이었으나 최근 호흡성먼지 측정이 상시화 되면서 이에 대한 연구결과가 보고 되고 있는 실정이다. 근래에 발표된 홍윤철 등(37)의 논문은 국내자료로서 처음으로 PM<sub>10</sub>의 역학적 연구결과를 보고하고 있다는 점에서 향후 대기먼지의 인체위해 평가 연구의 방향을 제공한다는 점에서 매우 중요하다. 일반적으로 아래 표 1에서와 같이 먼지 농도의 증가와 일별사망자 발생건 수는 일관되지는 않으나 유의한 상관관계가 있음을 암시하고 있다. 대기 중 총부유먼지 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 증가에 대하여 경우 외국에서의 연구결과와 비슷한 수준인 2~5%의 사망자 수 증가가 발생하는 것으로 평가되었다. 이러한 상관관계는 호흡성먼지를 대상으로 할 때 더 밀접하여 지는 것으로 나타났는데 홍윤철 등(37)의 연구에서 호흡성먼지 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가에 대하여 사망자 수가 0.8% 가량 증가되었던 것으로 보고하고 있는데 이는 총부유먼지의 농도변화를 감안할 때 의미가 있는 것으로 평가된다. 한편 호흡성먼지를 대상으로 한 전국규모의 연구분석(이종태 등, 38)이 완료되었는데 이 결과는 홍윤철 등의 연구와 일관성을 갖는다. 특히 메타적 분석에 의한 종합결과 호흡성먼지 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가에 대하여 사망자 수가 1.3% 가량 증가하는 것으로 평가되어 기존 연구결과와 일치하는 것으로 평가되었다.

현재 국내에는 미세먼지, 즉 PM<sub>2.5</sub> 평가 자료가 거의 없는 편인데 서울시 보건환경연구원에서는 그 동안 서울시내 일부 지역에서 지속적으로 측정을 하였으며 이 자료를 활용한 예비 분석 결과를 아래 표 2에 표시하였다. 표 2에서 제시된 바와 같이 미세먼지의 경우 사망에 미치는 영향이 다른 지표(총부유먼지 및 호흡성먼지)에 비하여 크고 유의함을 알 수 있으며, 비록 신뢰도가 낮더라도 향후 대기먼지 관리에 대한 입장을 어느 정도 제시한다고 할 수 있다.

표 1. 대기먼지와 조기사망의 상관분석 결과

Pollutant	RR (95% CI)	Comments
TSP (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>1</sup>	1.051 (1.031-1.072) for Seoul 0.999 (0.961-1.039) for Ulsan	1991-1995 Dominant SO <sub>2</sub> effect
TSP (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	1.017 (1.008-1.026)	1991-1997 7개 광역시 국내 인구의 절반
PM <sub>10</sub> (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>3</sup>	1.008 (1.000-1.016)	1995-1996 인천시
PM <sub>10</sub> (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>4</sup>	1.011 (1.007-1.015) for 7 major cities 1.013 (1.007-1.019) for Seoul	1999년 4월 - 2001년 12월 국내 인구의 절반

<sup>1</sup>이종태 등, 1999 (11) ; <sup>2</sup>이종태 등, (2000) Environ Res 84: 247-254; <sup>3</sup>홍윤철 등, 1999 (37);

<sup>4</sup>이종태 등, (in review) (38)

표 2. 입경별 대기 먼지와 조기사망<sup>1</sup> (서울, 1999-2001)

Pollutant	RR (95% CI)		Comments
	All aged	65+	
TSP (54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.002 (0.997-1.008)	1.004 (0.996-1.012)	Total deaths
PM <sub>10</sub> (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.002 (0.995-1.008)	1.004 (0.996-1.012)	
PM <sub>2.5</sub> (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.003 (0.996-1.011)	1.007 (0.997-1.016)	
TSP (54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.002 (0.991-1.013)	1.009 (0.996-1.022)	Cardiovascular-related deaths
PM <sub>10</sub> (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.004 (0.991-1.017)	1.014 (0.999-1.029)	
PM <sub>2.5</sub> (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.015 (1.000-1.030)	1.019 (1.002-1.037)	
TSP (54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.008 (0.985-1.032)	1.015 (0.989-1.041)	Respiratory-related deaths
PM <sub>10</sub> (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.017 (0.991-1.042)	1.022 (0.994-1.051)	
PM <sub>2.5</sub> (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.018 (0.989-1.049)	1.034 (1.000-1.069)	

<sup>1</sup>이종태 등. (Unpublished data)

### 3-2 먼지와 상병

먼지와 인체위해의 상관성을 평가하는데 있어서 다양한 형태의 인체위해를 평가하게 된다. 그 중에서 병원 외래 및 응급실 방문자 혹은 병원입원자 수의 변동은 대기오염 농도 변화로 인한 종속 변수로 많이 이용된다. 또한 이러한 분석은 대기오염의 인체위해 가능성에 대한 원인적 상관성을 규명하는데 있어서 동시성(coherence)을 입증하는 것으로 매우 유효한 도구로서 인정되고 있다. 특히 호흡성질환으로 인한 병원입원 및 방문은 대기오염의 인체위해에 대한 병리학적 기전을 설명하는데 있어서도 유효하다. 따라서 본 분석(표3)은 서울시내에 거주하는 어린이(15세 미만)를 대상으로 호흡기천식 발작으로 인한 일별 병원입원율의 변동을 그 날 혹은 가까운 이전 날(들)의 대기오염도 변화로 분석한 것이다.

표 3. 대기먼지와 소아천식 입원의 상관관계 분석

Pollutant	RR (95% CI)	Comments
PM <sub>10</sub> (40.4µg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	1.07 (1.04-1.11) from time-series analysis <sup>1</sup>	1997-1999 15세 미만의 서울 거주자
	1.05 (1.00-1.09) from case-crossover study <sup>2</sup>	

<sup>1</sup>이종태 등. (2002) Epidemiology; <sup>2</sup>이종태, (2003) 예방의학회지

대기먼지의 건강영향에서 최근 주목을 받고 있는 것이 심혈관 질환으로 인한 사망 및 병원입원의 경우이다. 이와 관련한 연구 결과를 보면 표 4와 같다. 결론적으로 호흡성 먼지 증가는 노인들(65세 이상)에 있어서 허혈성 심질환(ICD-10th code, I20-I24) 관련 병원 입원율 증가와 유의한 상관관계가 있는 것으로 평가되었다. 또한 표 4는 일반인 보다 노인들의 경우 대기먼지에 취약한 집단임을 제시하고 있다.

표 4. 대기먼지와 허혈성 심질환 관련 병원입원의 상관성 평가<sup>1</sup> (서울, 1997-1999)

Pollutant	RR (95% CI)	Comments
PM <sub>10</sub> (40.4µg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	0.99 (0.96-1.01) for all age groups	1997-1999 서울거주자
	1.05 (1.01-1.10) for the elderly (65+)	병원입원만 포함

<sup>1</sup>이종태 등. (2003), Arch Environ Health (in press)

### 3-3 먼지와 폐기능

이 연구는 패널연구(pannel study)로서 국내에서는 처음으로 호흡성먼지와 미세먼지의 인체위해를 비교·평가한 것(표 5)이다. 서울시내 주재한 모 양로원의 노인을 대상으로 총 6주간에 걸쳐 기본적인 건강검진과 더불어 간이폐기능 측정기를 이용하여 폐기능(순간최대호기율, peak expiratory flow rate, 이하 PEFR)을 매일 측정하였으며, 양로원 건물의 옥상에 설치된 두 대의 개별적 대기 먼지 포집기를 통하여 동일 기간의 호흡성먼지 및 미세먼지 농도를 계량하였다. 표 5를 보면 비슷한 폭(interquartile range, 이하 IQR)의 농도 변화에 대하여 폐기능의 저하가 미세먼지의 경우 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

표 5. 대기먼지와 폐기능의 상관관계 분석

Pollutant	Changes of PEFR (l/min)	Comments
PM <sub>10</sub> (44 $\mu$ g/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	-3.56 (-5.19, -1.97)	65세 이상의 노인
PM <sub>2.5</sub> (34 $\mu$ g/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	-4.73 (-6.49, -2.97)	

<sup>1</sup>Interquartile range (IQR, 75%-25%)

## 4. 고찰

국내에서는 PM<sub>2.5</sub>에 대한 관심이 고조되면서 아주 최근에 들어서야 국내의 미세먼지 특성을 분석한 결과가 발표되기 시작하였다(38). 한편 외국의 경우도 PM<sub>2.5</sub>나 먼지 특성을 고려한 건강효과에 대한 평가는 극히 일부에서만 이루어졌으며, PM<sub>2.5</sub>를 이용한 경우가 건강영향과 보다 밀접한 상관성이 있음을 제시하는 연구결과(1,39)가 최근에만 발표되고 있는 실정이다. 한편 호흡성먼지 및 미세먼지는 지역적으로나 시기적으로 그 조성성분에 있어서 매우 다양한 형태를 띠고 있기 때문에 단순히 크기별 농도를 측정하는 것으로 인체건강을 예측한다는 것은 많은 불확실성을 내포하게 된다. 이와 관련하여 국내·외에서 많은 연구가 수행되었던 것은 아니나 측정 및 분석방법의 발전과 함께 이러한 점을 고려한 역학연구 및 실험실 연구수행이 점차 증가되는 추세에 있다. 서울을 비롯한 일반 도시의 경우 자동차의 배기가스가 주요한 먼지 발생원으로 추정되지만 황사와 같은 외부환경 요인에 따라 먼지의 조성성분은 다양할 것으로 예측하고 있다. 따라서 향후 연구에서는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 동시에 채취하여 입자의 입경에 따른 건강상 효과와의 상관관계를 연구하여야 하며 특히 미세입자들의 건강상 효과와의 상관관계를 연구하는 것은 국내뿐 아니라 국제적으로도 비교적 새롭게 시도되는 분야로 정책적 의미뿐 아니라 학술적 의미도 클 것으로 사료된다.

먼지의 건강상 영향은 먼지 입경에 따른 물리적 특성에 의한 것 외에도 먼지의 화학적 특성도 중요한 역할을 한다. 먼지의 크기에 따라 인체 내에 침착되는 정도가 달라지지만, 인체 내에 침착한 먼지가 인체에 미치는 영향은 먼지의 화학적 조성과 큰 연관을 가질 것은 명백하다. 따라서 먼지의 화학적 특성을 입경별로 분석하는 것이 중요하다. 더욱이 먼지의 물리적, 화학적 특성은 계절별, 지역별로 큰 편차를 보이기 때문에 먼지에 노출되는 대상자들이 직접 접하는 먼지를 정확하고 자세하게 분석하는 것이 필요하다. 이러한 통합적인 먼지 분석에 의해 먼지의 물리적, 화학적 특성을 정확히 구체적으로 파악함으로써 먼지가 인체에 미치는 영향에 대한 요인을 더 깊이 이해할 수 있을 것이다.



대기먼지의 인체위해 가능성은 지금까지 수행되었던 많은 국내·외 연구에서 일관되게 보고하고 있으며 먼지의 입경이 작을수록 위해성은 더 클 것으로 제시하고 있다. 따라서 국내에서도 이에 대한 연구가 먼지의 물리·화학적 특성에 따른 생체독성 연구와 병행하여 인체위해의 정도를 비교할 수 있도록 연구설계된 역학 연구수행이 필요하다. 또한 인체위해에 대한 관점에서 더 나아가 향후 관리안 수립을 통한 대기먼지를 저감하였을 때의 효과 및 편익에 대한 평가연구에도 관심을 가져야 할 때라고 사료된다. 지금까지의 효과 혹은 편익 분석은 시뮬레이션이나 예측평가에 의한 것이 대부분이었는데 반하여 앞으로는 지속적인 감시와 체계적 자료구축을 통하여 실측자료를 활용한 효과 및 편익분석 평가가 이루어져야 할 것이다. 이렇게 제시된 비교위해 평가와 효과분석 평가 자료는 국내 대기오염정책을 수립하고 실행하는데 있어서 중요하고 실증적인 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 먼지의 인체위해 기전과약에 대한 일부 실험실 연구에서 산화스트레스에 의한 것이 주요한 독성기전의 하나로 제시하면서 항산화제(Vitamin A, C, E 등)의 독성저감 효과에 대하여 언급하고 있다. 이러한 점으로부터 대기먼지의 오염도를 저감하는 것과 병행하여 국내인 중에서 일정부분을 차지하고 있을 고민감군 혹은 고위험군에 대한 예방적 차원에서 먼지의 인체위해를 저감할 수 있는 대안으로서 항산화제 효과 분석연구 수행은 매우 의미가 있을 것이다.

이상으로 지금까지 국내·외에서 수행된 연구를 종합하면 1) 대기오염물질 중 먼지의 인체위해 영향이 중요하며, 특히 먼지의 크기별 분포과약과 더불어 화학조성에 대한 분석을 통한 총체적 위해도 평가가 이루어져 위해도 비교가 가능한 실증적 자료가 제시되어 환경정책 수립에 적용 가능하여야 하며, 2) 먼지 관리안 혹은 기준안을 적용할 때 효과 및 편익에 대한 평가가 이루어져야 하며 이에 대한 예측평가 한국형 표준기법이 제시되어야 하며, 3) 한국인에 있어서의 대기먼지에 대한 민감군 혹은 고위험군의 규모와 특성을 파악하며, 4) 먼지노출로 인한 인체 위해의 병인론적 기전을 파악하면서 그 과정에서 도출되는 먼지 노출에 대한 생체지표 개발을 통하여 보다 타당한 역학연구 결과의 제시 등이 향후 연구에 고려되어야 할 사항이다.

## 5. 참고 문헌

1. Schwartz J, Norris G, Larson T, Sheppard L, Claiborne C, Koenig J. Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality. *Environ Health Perspect* 1999;107:339-342
2. Laden et al. Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. *Environ Health Perspect* 2000; 108: 941-947
3. Logan WPD. Mortality in London fog incident. *Lancet* 1953;1:336-338
4. Firket J. The cause of the symptoms found in the Meuse Valley during the fog of December, 1930. *Bull Acad R Med Belg* 1931;11:683-741
5. Ciocco A, Thompson DJ. A Follow-up on Donora ten years after: methodology and findings. *Am J Public Health* 1961;51:155-164
6. Ozkaynak H, Spengler JD. Analysis of health effects resulting from population exposures to acid precipitation precursors. *Environ Health Perspect* 1985;63:45-55
7. Schwartz J, Dockery DW. Increased mortality in Philadelphia associated with daily air pollution concentrations. *Am Rev Respir Dis* 1992;145:600-604
8. Xu X, Gao J, Dockery DW, Chen Y. Air pollution and daily mortality in residential area of Beijing, China. *Arch Environ Health* 1994;49:216-222
9. Borja-Aburto VH, Loomis DP, Bangdiwala SI, Shy CM, Rascon-Pacheco RA. Ozone, suspended particulates, and daily mortality in Mexico City. *Am J Epidemiol* 1997;145:258-268
10. Touloumi G, Katsouyanni K, Zmirou D, Schwartz J, Spix C, et al. Short-term effects of ambient oxidant exposure on mortality: A combined analysis within the APHEA Project. *Am J Epidemiol* 1997;70:177-185
11. Lee JT, Shin D, Chung Y. Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea. *Environ Health Perspect* 1999a;107:149-154
12. Lee JT, Schwartz J. Reanalysis of the effect of air pollution on daily mortality in Seoul, Korea: A case-crossover design. *Environ Health Perspect* 1999b (in press)
13. Pope CA III. Respiratory disease associated with community air pollution and a steel mill, Utah Valley. *Am J Pub Health* 1989;79:623-628
14. Schwartz J. Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, AL. *Am J Epidemiol* 1994;139:589-598
15. 임종한, 이종태, 김동기, 신동천, 노재훈. 서울지역 대기오염이 호흡기계질환 수진건수에 미치는 단기영향에 관한 연구. *대한산업의학회지* 1998;10:333-342
16. Whittemore AS, Korn EL. Asthma and air pollution in the Los Angeles area. *Am J Pub Health* 1980;70:687-696
17. Koenig JQ, Larson TV, Hanley QS, Rebolledo V, Dumler K, et al. Pulmonary function changes in children associated with fine particulate matter. *Environ Res* 1993;63:26-38
18. Ostro BD, Lipsett MJ, Wiener MB, Selner JC. Asthmatic response to airborne acid aerosols. *Am J Pub Health* 1991;81:694-702
19. Pope CA III, Dockery DW. Acute health effects of PM<sub>10</sub> pollution on symptomatic and asymptomatic children. *Am Rev Respir Dis* 1992;145:1123-1128
20. Liao D, Creason J, Shy C, William R, Watts R, Zweidinger R. Daily variation of particulate

- air pollution and poor cardiac autonomic control in the elderly. *Environ Health Perspect* 1999;107:521-525
21. Poloniecki JD, Atkinson RW, de Leon AP, Anderson RH. Daily time series for cardiovascular hospital admissions and previous day's air pollution in London, UK. *Occup Environ Med* 1997;54:535-540
  22. 권숙표, 윤명조, 정용 등. 산업장 및 공장배기가스가 도시민의 건강에 미치는 영향에 관한 연구. *최신의학* 1969;12:85-102
  23. 신영수, 이영일, 조광수 등. 대기오염이 시민건강에 미치는 영향에 관한 연구. *대한의학협회지* 1972;15:339-350
  24. 윤정숙, 김두희. 도시주민과 농촌주민의 호흡기증상. *예방의학회지* 1985;18:113-127
  25. 정규철. 서울시 대기오염이 시민보건에 미치는 영향에 관한 조사연구. *예방의학회지* 1969;2:1-22
  26. 차철환, 고응린, 안윤옥. 대기오염이 상병양상에 미치는 영향에 관한 연구. *고려대학교의대논문집* 1981;18:377-388
  27. 윤명조, 조규상. 도시대기오염의 현황과 건강에 미치는 피해에 관한 조사 연구. *카톨릭대학교 의학부 논문집* 1971
  28. 권호장. 서울시의 대기오염과 일별 사망의 관련성에 대한 시계열적 연구. *서울대학교 대학원 박사학위논문*. 1998
  29. 이종태, 이성임, 신동천 등. 울산시의 대기 중 분진과 일별 사망에 대한 연구. *예방의학회지* 1998;31:82-90
  30. Dockery DW, Pope CA III. Epidemiology of acute health effects: summary of time-series studies. In: *Particles in our air* (Wilson R, Spengler JD, eds). Harvard University Press; 1996. p. 123-148
  31. Pope CA III, Dockery DW. Epidemiology of chronic health effects: cross-sectional studies. In: *Particles in our air* (Wilson R, Spengler JD, eds). Harvard University Press; 1996. p. 149-165
  32. Pope CA III, Schwartz J. Time series for the analysis of pulmonary health data. *Am J Respir Crit Care Med* 1996; 154(6 Pt 2): s229-s233
  33. Lee JT, Shy CM. Respiratory function as measured by peak expiratory flow rate and PM<sub>10</sub>: six communities study. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1999; 9: 293-299
  34. Pope CA III, Kalkstein LS. Synoptic weather modeling and estimates of the exposure-response relationship between daily mortality and particulate air pollution. *Environ Health Perspect* 1996; 104: 414-420
  35. Samet JM, Zeger SL, Berhane K. The association of mortality and particulate air pollution. In: *Particulate air pollution and daily mortality: replication and validation of selected studies* (The phase I.A report of the particle epidemiology evaluation project). Health Effects Institute, Cambridge, MA
  36. Akaike H. Statistical predictor identification. *Ann Inst Stat Math* 1970; 22: 203-217
  37. Hong YC, Leem JH, Ha EH, Christiani DC. PM<sub>10</sub> exposure, gaseous pollutants and daily mortality in Incheon, South Korea. *Environ Health Perspect* 1999; 107(11): 873-878
  38. 김병화, 김동술 (1999) 수원지역 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 화학적 특성, *한국대기환경학회 1999년 춘계*

학술대회 논문집, pp. 21-23.

39. Dockery DW, Pope CA III, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FE.  
An association between air pollution and mortality in six US cities. N Eng J Med  
1993;329:1953-1759