

봄철 황사 전후 산악연안도시, 강릉시에서 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀의 농도비교

최 효

강릉대학교 대기환경과학과
(2008년 2월 15일 접수; 2008년 3월 28일 채택)

Comparison of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations in a Mountainous Coastal City, Gangneung Before and After the Yellow Dust Event in Spring

Hyo Choi

Department of Atmospheric Environmental Sciences, Kangnung National University, Gangneung 210-702, Korea
(Manuscript received 15 February, 2008; accepted 28 March, 2008)

Abstract

In order to investigate the variations and correlation among PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentrations, the hourly concentrations of each particle sizes of 300 nm to 20 μm at a city, Gangneung in the eastern mountainous coast of Korean peninsula have been measured by GRIMM aerosol sampler-1107 from March 7 to 17, 2004. Before the influence of the Yellow Dust event from China toward the city, PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentrations near the ground of the city were very low less than 35.97 μg/m³, 22.33 μg/m³ and 16.77 μg/m³, with little variations. Under the partial influence of the dust transport from the China on March 9, they increased to 87.08 μg/m³, 56.55 μg/m³ and 51.62 μg/m³. PM₁₀ concentration was 1.5 times higher than PM_{2.5} and 1.85 times higher than PM₁. Ratio of (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5} had a maximum value of 1.49 with an averaged 0.5 and one of (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁ had a maximum value of 0.4 with an averaged 0.25. PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were largely influenced by particles smaller than 2.5 μm and 1 μm particle sizes, respectively. During the dust event from the afternoon of March 10 until 1200 LST, March 14, PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentrations reached 343.53 μg/m³, 105 μg/m³ and 60 μg/m³, indicating the PM₁₀ concentration being 3.3 times higher than PM_{2.5} and 5.97 times higher than PM₁. Ratio of (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5} had a maximum value of 7.82 with an averaged 3.5 and one of (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁ had a maximum value of 2.8 with an averaged 1.5, showing PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations largely influenced by particles greater than 2.5 μm and 1 μm particle sizes, respectively. After the dust event, the most of PM concentrations became below 100 μg/m³, except of 0900LST, March 15, showing the gradual decrease of their concentrations. Ratio of (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5} had a maximum value of 3.75 with an averaged 1.6 and one of (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁ had a maximum value of 1.5 with an averaged 0.8, showing the PM₁₀ concentration largely influenced by coarse particles than 2.5 μm and the PM_{2.5} by fine particles smaller than 1 μm, respectively. Before the dust event, correlation coefficients between PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ were 0.89, 0.99 and 0.82, respectively, and during the dust event, the coefficients were 0.71, 0.94 and 0.44. After the dust event, the coefficients were 0.90, 0.99 and 0.85. For whole period, the coefficients were 0.54, 0.95 and 0.28, respectively.

Key Words : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, The Yellow Dust event, Correlation coefficient

1. 서 론

중국의 황사는 주로 봄철 3월~5월 사이에 타카라 마칸사막, 고비사막, 오도로스사막, 로에스 몽골고원, 중국 내몽고의 황토고원에서 발생하여 중국 전역과, 한국, 일본을 거쳐 심지어 미국 동부 해안까지 그 영향을 주고 있다. 황사는 많은 양의 큰 입자와 작은 입자의 먼지를 동반 수송하므로, 황사 수송로에 위치한 지역에서의 먼지농도는 정상시에 비해 4배~10배 이상으로 높아진다¹⁻⁸⁾. 황사의 수송에 의한 고농도의 먼지입자는 인간의 호흡기 질환과 눈병 등의 질환을 크게 증가시키고 있으며, 2.5 μm 또는 1 μm 이하의 극미세먼지는 눈, 코, 목 등의 점막을 통과하여, 인체의 각 부위에서 걸러지지 않은 상태로 폐까지 도달하여, 심각한 호흡기 질환을 일으키고 있다. 또한 식물의 잎에 다량의 먼지가 붙어 탄소동화작용과 호흡에 장애를 일으켜, 식물의 성장을 방해하거나 고사하게 한다. 또한 동물에도 호흡기 질환과 황사에 의한 병균의 전염을 일으켜, 구제역과 같은 심대한 병해를 일으켜 막대한 경제적인 손해를 주고 있다⁹⁻¹²⁾.

중국에서 발생하는 황사는 아프리카의 사하라 사막과 오스트렐리아사막에서 발생하는 황사와는 발생조건이 다소 다르다. 중국의 황사는 습도 30% 이하, 풍속이 8~10 m/s로 강한 바람이 불 때 발생하지만, 주로 평지에 존재하는 아프리카와 오스트렐리아사막의 경우는 풍속이 5 m/s 내.외에서도 발생한다¹³⁻¹⁷⁾. 지난 20년 전 부터 지금까지 황사에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 중국과 몽고의 발원지에서 황사의 생성조건과 장거리 수송에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 주로 종관적인 바람과 기압양상에 의한 수송에 대한 연구와 분진의 중금속과 이온분석 등 화학분석에 연구에 치중되어 왔다¹⁸⁾. 그러나 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 와 같은 극미세먼지의 농도분포 특성과 황사발생 시에 중국으로부터의 장거리 수송에 의한 것과 지역에서 항상 발생하는 미세먼지 양과 결합하여 특정 지역에서의 농도가 몇 시간 동안에 고농도를 초래하는 원인에 대한 연구는 아직까지 미흡하다. 뿐만 아니라 강원도와 같은 청정지역에서의 극미세먼지에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다¹⁹⁻²⁹⁾.

본 연구에서는 황사현상이 나타나기 전부터 후까지 중국->한반도 동해안->동해->일본의 수송로에 있는 동해안 지역에서 미세먼지의 매시각별 농도변화의 특성과 환경부에서 측정하지 않는 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 과 PM_{10} 과의 관계를 파악함으로써 미세먼지 뿐만 아니라 극미세먼지의 변화양상과 예측방법을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역 지형, 측정자료 및 분석방법

2004년 3월 07일~3월 17일의 먼지측정기간 동안 강릉시에 황사 영향이 있기 전, 후의 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 농도를 파악하기 위해 독일 GRIMM회사-모델 1107 먼지측정기를 강릉시의 강원기상청에 설치하여 300 nm ~20 μm 먼지 입경별 농도를 측정하였고, 측정오차범위는 0.01 μm 이다(Fig. 1).

측정된 농도를 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 3가지 형태의 매 시각별 농도로 출력하여 황사 전, 황사기간, 황사 후의 매 시각별 농도분포를 파악하였다.

2.2. 상관관계 및 농도예측공식

매 시각별 미세먼지농도인 PM_{10} , 극미세먼지 농도인 $\text{PM}_{2.5}$ 와 초극미세먼지 농도인 PM_{1} 의 농도분포 상태를 그림으로 나타내었으며, $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} , PM_{1} 과 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{1} 과 PM_{10} 과의 상관관계를 구하여, 황사

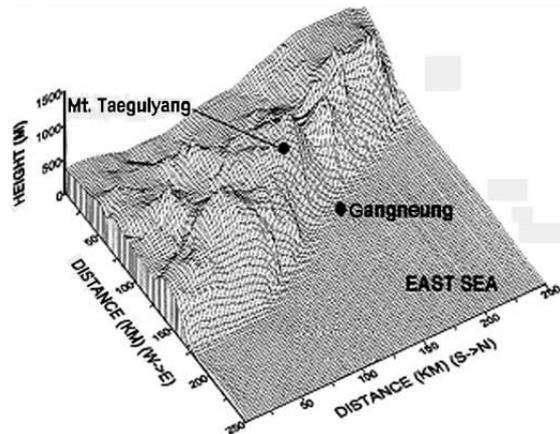


Fig. 1. Three dimensional topographical features adjacent to Gangneung city (20m above mean sea level; and Mt. Taeguallung (860 m) in the eastern Korean peninsula.

전, 황사 중 황사 후의 기간에서 상호간에 어떤 관계를 갖는가를 파악하였다. 본 연구에서는 상관관계로부터 PM_{2.5}와 PM₁을 측정하는 먼지측정기가 없더라도 PM₁₀으로부터 PM_{2.5}와 PM₁의 농도를 추정할 수 있게 예측공식을 만들어서 현재 국내에서 측정되고 있지 않은 극미세먼지와 초미세먼지의 농도추정 가능성을 제시하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 황사수송

강릉시에서 황사가 강릉지역을 통과하기 전인 3월 7일부터 3월 9일까지는 남서풍 계열의 바람이 한반도를 거쳐 강릉시에 영향을 미치고 있어 중국으로부터의 황사의 영향을 기대할 수 없었다(Fig. 2).

3월 10일 09시 이후부터 풍계가 북서풍에서 서풍으로 변화를 보이면서 한반도에 황사의 영향을 기대할 수 있는 기상상태였다. Fig. 3의 입자의 역궤도추적도와 Fig. 4의 GOES 위성사진에서 보는바와 같이 3월 10일 이후부터는 중국 내몽고로부터 강릉시로 황사의 수송이 가능한 공기의 흐름이 있음을 알 수 있다. Fig. 5에서 보는바와 같이 중국으로부터의 황사의 수송에 의해 강릉지역에서 PM₁₀의 농도가 크게 증가하게 되었고 PM_{2.5}와 PM₁의 농도에 PM₁₀의 농도의 증가보다 작지만 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

3월 8일 12시에는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도가 약간의 변화를 보이면서 각각 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 낮았으며, 3월 7일~3월 8일에 PM₁₀의

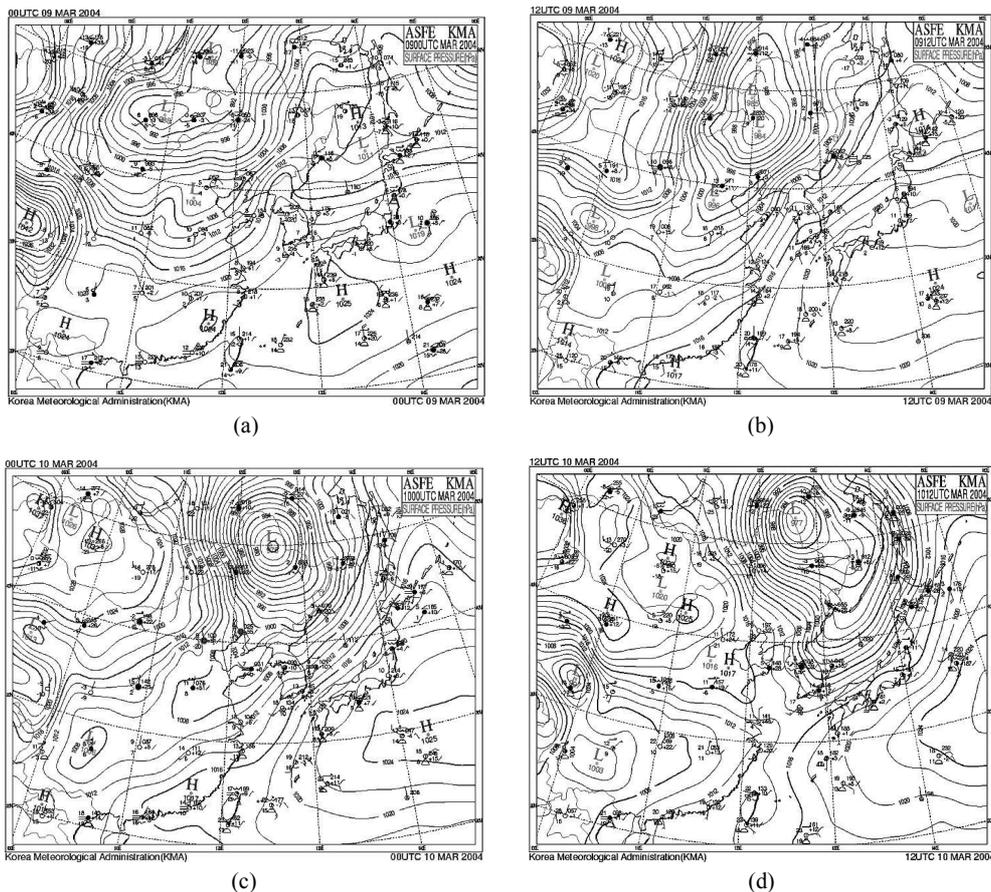


Fig. 2. Surface weather map at (a) 0000 UTC (0900 LST), (b) 1200 UTC (2100 LST), March 09, 2004 and (c) 0000 UTC (0900 LST), (d) 1200 UTC (2100 LST), March 10, respectively.

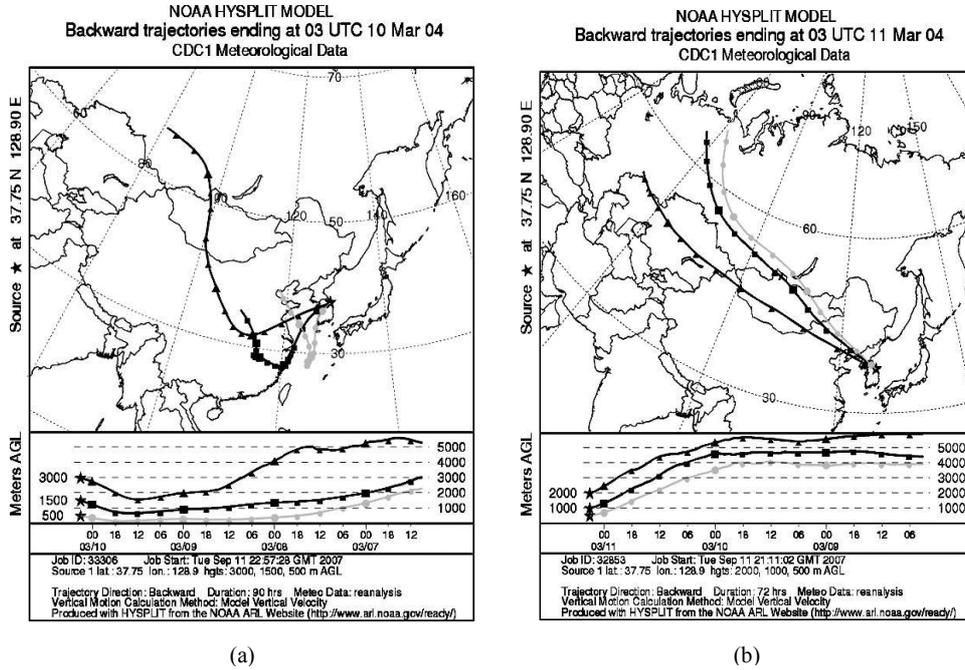


Fig. 3. Backward trajectories ending at (a) 0300 UTC (1200 LST), March 10, 2004 and (b) 0300 UTC (1200 LST), March 11, respectively.

최대농도가 08시와 17시 무렵에 나타났다. 3월 8일부터 3월 10일 12시까지 서풍에서 북서풍으로 풍계가 바뀌면서 중국에서 한반도로 먼지의 수송이 있게 되어 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도가 50 µg/m³~95 µg/m³로 거의 2배의 크기로 높아졌다.

강릉시에서 황사가 포착되어 황사기간으로 분류되는 기간은 3월 10일~3월 14일이었다. 지표부근에서의 PM₁ 농도가 50 µg/m³ 이하로 낮으면 하늘이 맑아, 강원기상청에서는 황사현상이 나타나지 않았다고 보도하였다. 3월 10일~3월 14일 기간에는 PM₁의 농도가 50 µg/m³ 이상으로 높아지면서 짧은 시간 내에 100 µg/m³을 초과한 후 3월 10일 20시에 343.53 µg/m³으로 나타났기 때문에 황사기간으로 보도하였다. 3월 14일 12시에 25 µg/m³로 낮아져서 황사가 끝난 것으로 보도되었다. 이 이후 시간부터 3월 17일까지 PM₁₀의 농도가 45 µg/m³~155 µg/m³로 다소 높은 농도 분포를 나타내지만, 이것은 황사가 원인인 아닌 이 지역에서의 강풍에 의해 지표부근의 먼지가 자체 생성되어 나타났다.

낮에 PM의 농도가 낮아지는 것은 태양복사열에

의한 대류경계층의 발달로 지표부근의 먼지 등 오염물질이 대류경계층의 정상으로 상승하므로 지표부근의 PM농도가 낮게 나타난다²¹⁾. 그러나 강릉시에 황사가 대량 수송되었을 시간인 15시 경에는 PM의 농도가 매우 높게 나타났다.

이 후 황사가 강한 서풍에 의해 동해로 흘러나간 후 강릉시의 PM농도가 낮아졌다. 일몰 직후인 18시 이후부터 여전히 강한 서풍의 바람이 강릉시에 불고 있었기 때문에 중국으로부터 한반도로 수송된 황사 먼지들이 지속적으로 강릉지역으로 유입되어 지표부근의 PM농도가 높아지게 되었다. 동시에 이때가 퇴근시간 무렵이므로 도시의 도로 위 차량에서 방출되는 가스 및 먼지와 거주 지역에서 난방연료의 대량사용에 의해 배출되는 가스 및 미세먼지들로 인해 일반적으로 20시~22시 무렵에 PM의 농도가 높아지며, 이 시간대에 황사가 강릉지역으로 대량 수송되어 22시에 농도가 343.53 µg/m³으로 높아졌다.

일몰 후부터 지표가 냉각되어 낮에 형성된 대류경계층보다 훨씬 낮게 형성되는 야간접지역전층이

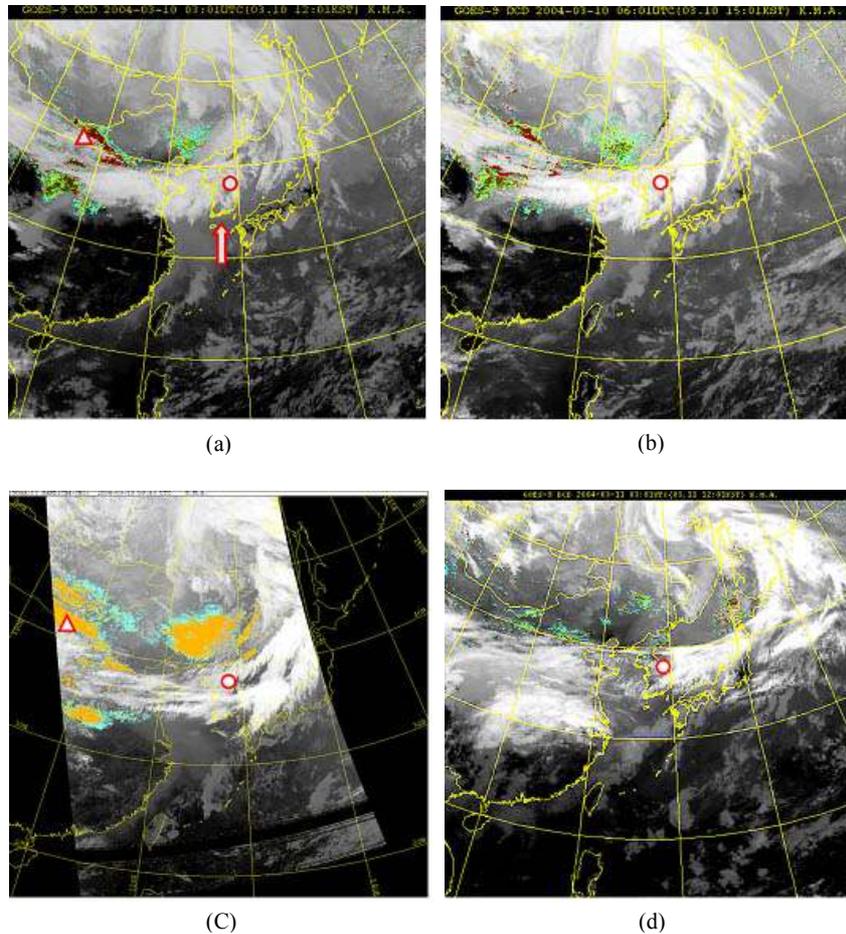


Fig. 4. GOES-9 satellite picture at (a) 0300 UTC (1200 LST), (b) 0600 UTC (1500 LST), (c) 0943 UTC (1843 LST), March 10 and (d) 0300 UTC (1200 LST), March 11, 2004, respectively. Dark-red and blue color areas indicate the dust generation and dispersion areas with high density of dust. Yellow color on NOAA image denote a high density of dust and blue color indicates the dust dispersion area. Triangle, big arrow and circle denote dust generation area in China, Korean peninsula and Gangneung city in Korea, respectively.

불과 300 m 고도로 점차 낮게 형성되고, 안정대기층이므로 수송되어 온 황사먼지와 지표부근에서 방출된 오염먼지들이 모두 지표부근으로 침강되어 모이게 되어 PM₁₀의 최대농도가 22시에 나타났다.

23시 이후부터 다음날 아침까지는 교통량도 줄고, 초저녁에 거주공간을 가열시킨 후에 일반적으로 난방기기를 사용하지 않으므로 난방연료의 사용이 줄어들게 되어 PM의 농도가 점차 낮아지게 되었으며, 3월 11일 06시에 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소하였다. 그러나 06시 이후에는 대관령의 서쪽에서 강릉시로

수송되어 온 황사먼지와 강릉시에서 표층풍, 거리의 차량, 거주 지역으로 부터의 난방연료의 사용에 의한 지역 자체에서 발생된 오염먼지가 결합되어 09시까지 계속 증가하였다. 09시 이후에는 대류경계층의 고도가 다시 높아짐에 따라 지표면지들이 상승한 후 동풍인 해풍에 의해 강릉시내에서 서쪽에 있는 대관령의 정상 쪽으로 이동하여 낮 12시 무렵에는 지표면지 농도가 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮아졌다. 황사기간 중 09시에 PM 농도가 높고, 21시 또는 22시에 최대농도를 나타내었다.

3.2. PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁₀의 매시각별 분포

서울시와 같이 대도시에서는 평상시에 지표부근의 PM의 농도가 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외를 보이지만, 강릉시는 연안에 위치하고, 공장과 같은 오염원이 없어 매우 청정한 지역이므로 PM₁₀의 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘지 않는다. 반면에 3월~5월에 강릉시에 황사가 나타나기 시작하면 PM₁₀의 농도가 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 나타난다.

PM의 농도가 높았다가 부분적으로는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮아지기도 하는데, 이는 낮에 지표 가열에 의해 대기경계층이 팽창하고, 대류에 의해 먼지와 같은 오염물질이 지표에서 지상 1 km 상공으로 상승함에 따라 지표오염농도가 낮고 지상 1 km 내외에서 높게 나타나며, 동시에 고풍과 해풍이 연합된 동풍이 연안 도시에서 내륙 산악의 정상으로 향하는 상승풍 (upslope wind)에 의해 깨끗한 공기가 해양으로부터 강릉분지로 유입한 후 강릉시내의 오염된 공기와 섞이면서 서쪽 산악 정상 쪽으로 이동하기 때문에 농도가 낮게 된다²¹⁾.

Fig. 5는 강릉시에 위치한 강원기상청에서 2004년 3월 7일~17일에 측정된 입자상물질의 3가지 유형인 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀의 매시각별 농도분포이다. 그림에서와 같이 황사가 강릉시에 나타나기 전인 3월 7일~9일까지 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 고농도가 아침 출근 시간대인 08시~09시에 나타나며, 퇴근시간 직후인 18시~21시에 최대농도가 나타났다.

강릉시에서 황사가 포착되어 황사기간으로 분류되는 기간은 3월 10일~3월 14일이었다. 지표부근에서 PM₁₀ 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮으면 하늘이 맑아, 강원기상청에서는 황사현상이 나타나지 않았다고 보도하였다. 3월 10일~3월 14일 기간에는 PM₁₀의 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높아지면서 짧은 시간 내에 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 후 343.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났기 때문에 황사기간으로 보도하였다. 3월 14일 12시에 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮아져서 황사가 끝난 것으로 보도되었다. 이 시간 후부터 3월 17일까지 PM₁₀의 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 높은 농도 분포를 나타내지만, 이것은 황사가 원인이 아닌 이 지역에서의 강풍에 의해 지표부근의 먼지가 자체 생성되어 나타난 것이었다.

황사기간 중에는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 최대농도가

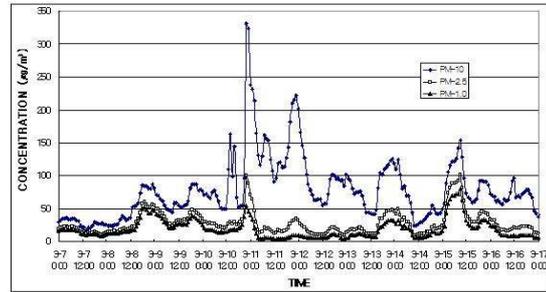


Fig. 5. Hourly concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ at an aerosol sampling point of Gangwon Meteorological Administration, Gangneung city, Korea from March 7 to March 17, 2004.

3월 10일 22시에 각각 343.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. PM₁₀의 농도는 PM_{2.5}와 PM₁의 농도의 약 3배, 6배 정도 높게 나타났다. 특히 황사기간 중에는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도가 빠르게 증가하여 황사 전보다 PM₁₀의 농도가 최대 8.5배, PM_{2.5}의 농도가 4배, PM₁의 농도가 3배 이상의 큰 값으로 나타났다. 따라서 황사기간 전에 비해 황사기간 중에 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도가 모두 많이 증가하지만, PM₁₀ 농도가 PM_{2.5}와 PM₁에 비해 큰 폭으로 증가하므로 황사기간 중에는 2.5 μm 보다 큰 입자의 수송이 강릉시로 많이 이루어졌음을 알 수 있다.

PM₁₀의 고농도가 근무시간이 시작되는 시간인 09시와 퇴근시간 이후 약 5시간 후인 23시에 나타났다. PM의 고농도가 나타나는 이유는 퇴근길 위에서의 많은 교통량과 거주 지역에서 난방을 위해 보일러의 사용을 사용함으로써 각종 가스 상 물질과 검댕이 등의 입자상 물질들의 방출량이 증가하기 때문이다^{20,21)}. 따라서 저녁시간대에 가장 높게 나타났다. 아침 출근시간대에 PM의 고농도가 나타나지만 저녁시간대의 고농도보다 덜 높다. 왜냐하면 아침에는 저녁보다 난방을 위한 보일러 가동시간이 줄기 때문이다.

또 다른 이유는 출근시간대인 09시경에는 많은 차량으로부터 오염물질이 거리 위로 방출되고, 주거지로부터 난방연료의 사용에 의한 오염물질의 방출이 증가하지만, 대기경계층이 대류의 발달로 인해 그 폭이 연직으로 커지면서 오염물질들이 대류의 의해 연직으로 상승하므로 비록 연직 혼합이 일어난다 하더라도 지표오염농도가 비교적 높지 않게

된다. 일반적으로 대류경계층이 최대로 발달하는 낮 12시경에 지표부근의 오염농도가 낮게 나타난다. 반면에 저녁에는 지표냉각에 의해 지표역전층이 낮게 형성되어 대기경계층의 연직 폭이 좁아져서 지표부근에서 방출된 오염물질들이 상승하지 못하고 하강하여 지표부근의 오염농도가 매우 높아지게 된다.

황사 후에는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 최대농도가 153.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 101.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 79.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 황사 전에 아침 출근시간대인 09시에 최대농도가 나타났고, 저녁 퇴근 시간 후인 20시에 고농도가 나타났다. 3월 16일 12시에도 고농도가 나타났는데, 이것은 날씨가 흐려 대류가 강하지 못하여 대기경계층이 낮아졌고, 강한 바람이 불었기 때문에 지표면 지농도가 높아졌다.

본 연구에서 황사가 중국으로부터 강릉시내로 대량 유입되기 전과 황사기간 후에는 오전 07시~09시경에 PM의 고농도가 나타났고, 낮 12시경에는 PM의 농도가 매우 낮았으나 3월 16일 경우에는 예외로 12시에 고농도가 나타났다. 퇴근시간 이후인 저녁 18시~23시에 최대농도로 나타나므로 이전의 학자들에 의한 연구 결과와 잘 부합되었다. 그러나 대량의 황사가 유입되는 황사기간에는 대략적인 경향은 비슷하나 시간대가 다소 차이가 났다.

Fig. 6은 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 농도간의 차이를 나타낸다. (PM₁₀-PM_{2.5})의 분포는 극미세입자인 PM_{2.5}보다 큰 입자들이 평상 시에 비해 황사기간 전, 황사기간, 황사기간 후에 얼마나 증가하여 환경부에서 지역 대기질의 기본으로 삼고 있는 PM₁₀ 농도에 얼마나 기여하는가를 판단하는데 도움이 된다. (PM_{2.5}-PM₁)의 분포는 초미세먼지인 PM₁보다 큰 입자들이 PM_{2.5}의 극미세먼지 농도에 얼마나 기여하는가를 판단하는데 도움이 된다.

비 황사기간을 3월 7일~3월 9일까지로 분류하였으나 3월 9일에 실제 황사의 영향이 나타났으므로, 황사 영향이 전혀 없는 평상시의 PM 농도를 나타내는 3월 7일~3월 8일 경우를 보면 (PM₁₀-PM_{2.5})의 최대 차이가 19.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (PM_{2.5}-PM₁)의 최대 차이가 8.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 반면에 황사기간인 3월 10일~3월 14일에는 (PM₁₀-PM_{2.5})의 최대차이는 3월 10일 23시에 234.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, (PM_{2.5}-PM₁)의 최대차이는

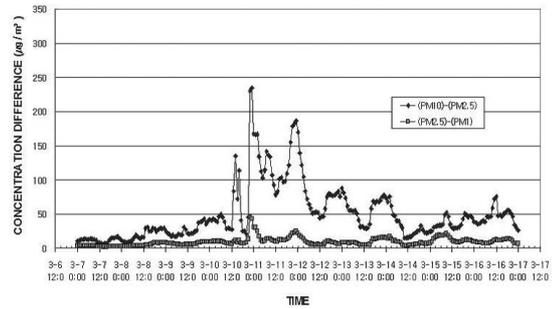


Fig. 6. As shown in Fig. 5 except for concentration difference ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) between PM₁₀ to PM_{2.5} and PM_{2.5} to PM₁.

3월 10일 22시에 45.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 3월 14일 12시 이후 강풍이 분 날에는 (PM₁₀-PM_{2.5})의 최대 차이는 75.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, (PM_{2.5}-PM₁)의 최대 차이는 21.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이것은 황사기간보다 그 값들이 작으나 강풍에 의한 영향도 매우 크다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}와 (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁의 매 시간별 분포를 나타내었다. 황사기간 전인 3월 7일~3월 9일까지는 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}의 비가 1.49이었으며, 이것은 황사 전에는 2.5 μm 보다 큰 입자들인 10 μm ~2.5 μm 사이의 입자들이 2.5 μm 이하의 입자들보다 PM₁₀의 농도 형성에 1.49배로 기여한다는 의미이다. 유사하게 (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁의 비가 0.4이므로, 1 μm 보다 큰 입자들인 2.5 μm ~1 μm 사이의 입자들이 1 μm 이하의 입자들보다 PM_{2.5}의 농도 형성에 0.4배로 기여한다는 의미이다.

반면에 황사기간인 3월 10일~3월 14일에는 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}의 비가 7.82, (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁의 비가 2.8이므로 2.5 μm 보다 큰 입자들인 10 μm ~2.5 μm 사

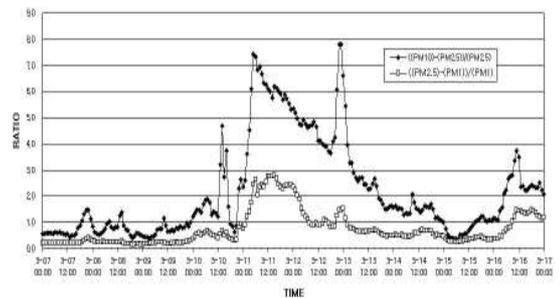


Fig. 7. As shown in Fig. 5 except for ratio of (PM₁₀ - PM_{2.5})/PM_{2.5} and (PM_{2.5} - PM₁)/PM₁.

이의 입자들이 2.5 μm 이하의 입자들보다 PM_{10} 의 농도 형성에 7.82배로 기여하였고, 1 μm 보다 큰 입자들인 2.5 μm ~1 μm 사이의 입자들이 1 μm 이하의 입자들보다 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 형성에 2.8배로 기여하였다. 황사기간 이후인 3월 14일 12시 이후~3월 17일까지는 $\text{PM}_{10}\text{-PM}_{2.5}$ / $\text{PM}_{2.5}$ 의 비가 3.75, $(\text{PM}_{2.5}\text{-PM}_1)/\text{PM}_1$ 의 비가 2.8이므로 2.5 μm 보다 큰 입자들인 10 μm ~2.5 μm 사이의 입자들이 2.5 μm 이하의 입자들보다 PM_{10} 의 농도 형성에 3.75배로 기여하였고, 1 μm 보다 큰 입자들인 2.5 μm ~1 μm 사이의 입자들이 1 μm 이하의 입자들보다 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 형성에 1.47배로 기여하였다.

이는 황사 전, 기간, 후의 $(\text{PM}_{10}\text{-PM}_{2.5})/\text{PM}_{2.5}$ 의 비가 1.49, 7.82, 3.75이었고, $(\text{PM}_{2.5}\text{-PM}_1)/\text{PM}_1$ 의 비가 0.4, 2.8, 1.47을 나타내므로, 특히 황사기간에는 10 μm ~2.5 μm 사이의 큰 입자의 먼지가 PM_{10} 의 농도 증가에 비황사기간보다 2.5배~5배로 매우 크게 기여하였고, 2.5 μm ~1 μm 사이의 미세먼지입자들이 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도에도 비황사기간보다 2배~7배로 기여하였다. 황사기간에는 주로 (2.5 μm ~1 μm) 입자들보다 (10 μm ~2.5 μm)의 입자들이 PM_{10} 의 농도에 크게 기여함으로써 강릉지역의 PM_{10} 의 농도 증가에는 기여한 입자들은 중국에서 황사의 유입될 때 동반된 큰 입자들이었다.

3.3. PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 간의 상관관계와 예측식

3.3.1. 황사 전

Fig. 8, 9, 10은 2004년 3월 7일~3월 17일 관측기간 중 황사가 나타나기 전인 3월 7일~3월 10일 10시까지의 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} , PM_1 과 $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 과 PM_{10} 과의 상관관계와 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 간의 농도 예측을 위해 회귀곡선식을 나타내고 있다.

$\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 상관계수는 0.89로 상관관계가 강하다. 이것은 PM_{10} 의 농도 변화에 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 크게 작용하고 있다는 의미이다. PM_1 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 상관계수는 0.99로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도에 1 μm 이하의 먼지입자들의 총량이 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도에 거의 99% 정도로 영향을 준다는 것을 알 수 있다. PM_1 과 PM_{10} 의 상관계수는 0.82로 매우 상관관계가 크며, PM_{10} 의 농도변화에 1 μm 이하의 먼지들이 크게 기여하였다. 따라서 황사가 강릉시에 나타나기 전에는 PM_{10} 의 농도는 극미세먼지 2.5 μm 와

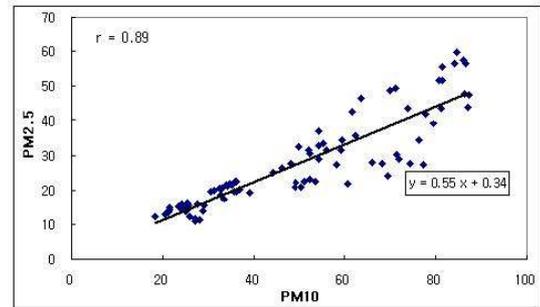


Fig. 8. Correlation coefficient and regression equation yielding a best-fitting straight line for $\text{PM}_{2.5}$ to PM_{10} at Gangneung city, Korea before the Yellow Dust event (March 7 ~ March 10, 2004). r denotes correlation coefficient.

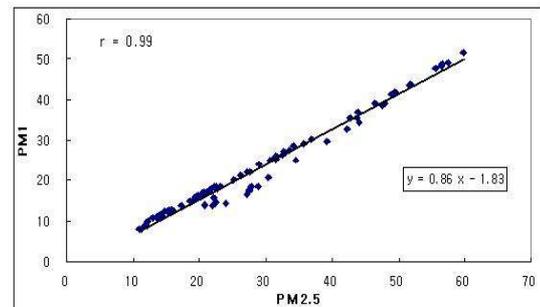


Fig. 9. As shown in Fig. 8, except for PM_1 to $\text{PM}_{2.5}$ at Gangneung city.

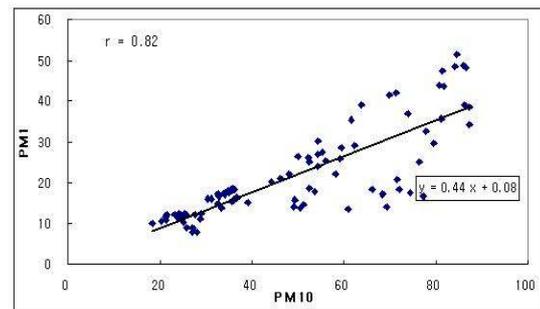


Fig. 10. As shown in Fig. 8, except for PM_1 to PM_{10} at Gangneung city.

초미세먼지인 1 μm 이하의 먼지입자들이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_1 간의 상관관계가 매우 높아 상호간의 예측공식을 사용하여 PM_{10} 으로부터 $\text{PM}_{2.5}$ 의

농도, PM_{2.5}로부터 PM₁농도와 PM₁로부터 PM₁₀의 농도를 예측할 수 있다. 예측치는 관측치와 비교해서 매우 높은 정확성을 갖는다.

3.3.2. 황사기간

Fig. 11, 12, 13은 강릉시내에 황사가 나타난 2004년 3월 10일 11시~3월 14일까지 PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}, PM₁과 PM₁₀과의 상관관계를 나타내었다. 또한 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 간의 먼지 농도를 예측할 수 있게 회귀곡선식을 주어졌다.

PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}, PM₁과 PM₁₀과의 상관계수는 0.71, 0.94, 0.44 이었다. PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}의 상관관계가 71%와 94%로 강하게 나타나, PM_{2.5} 농도가 PM₁₀의 농도 증가에 기여하였고, PM₁₀의 농도가 PM_{2.5}의 농도 변화에도 크게 기여함을 알 수 있었다. 그러나 PM₁의 농도와 PM₁₀의 농도와의

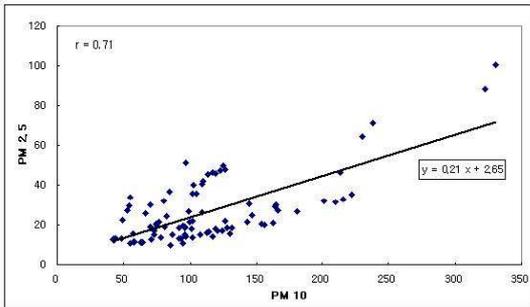


Fig. 11. Correlation coefficient and regression equation yielding a best-fitting straight line for PM_{2.5} to PM₁₀ at Gangneung city, Korea during the Yellow Dust event (March 10 ~ March 14, 2004). r denotes correlation coefficient.

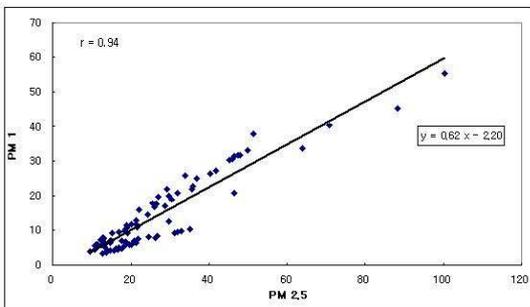


Fig. 12. As shown in Fig. 11, except for PM₁ to PM_{2.5} at Gangneung city.

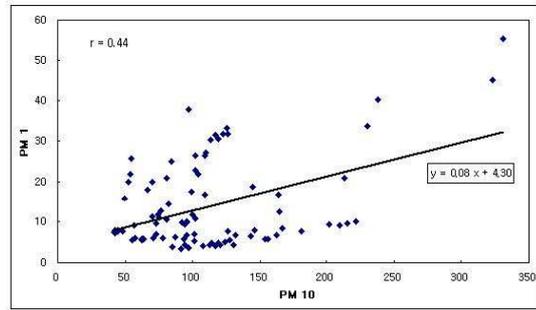


Fig. 13. As shown in Fig. 11, except for PM₁ to PM₁₀ at Gangneung city.

상관계수가 0.44로 보통 정도의 상관관계를 나타내므로 1 μm 이하의 먼지입자들이 PM₁₀의 농도 증가에는 어느 정도의 영향을 주었으나 크게 기여하지는 못했다.

PM_{2.5}와 PM₁₀의 황사기간 전인 평상시의 높은 상관관계에 비해 다소 낮다. 왜냐하면 황사기간에는 2.5 μm 이상의 큰 먼지입자가 강릉시로 많이 유입되므로 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자의 구성분포가 낮기 때문에 PM₁₀의 농도 증가에 PM_{2.5}의 기여도가 다소 떨어지게 되었다. 이것은 Fig. 5, 6에서도 그 관계가 잘 나타나고 있다. 또한 PM₁₀으로부터 PM_{2.5}의 농도와 PM_{2.5}로부터 PM₁을 충분히 잘 예측할 수 있으며, 예측치가 관측치와 비교해서 정확성을 갖는다.

그러나 PM₁과 PM₁₀과의 상관계수가 0.44로 보통 정도이지만, PM₁이 PM₁₀의 농도 증가에 상당한 정도까지 기여함을 알 수 있으므로 예측공식을 사용하여 PM₁과 PM₁₀을 상호 예측치가 관측치에 비해 정확도가 많이 떨어짐을 알 수 있다.

3.3.3. 황사 후

Fig. 14, 15, 16은 2004년 3월 14일~3월 17일까지 황사현상이 강릉시내에서 사라진 후의 PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}, PM₁과 P₁₀과의 상관관계와 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 간의 농도 예측을 위해 회귀곡선식을 나타내고 있다.

PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관계수는 0.90으로 매우 상관관계가 높다. 이것은 PM₁₀의 농도 변화에 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 매우 크게 작용하고 있다. PM₁과 PM_{2.5}의 상관계수는 0.99로 PM_{2.5}의 농도에 1 μm 이하의 먼지입자들의 총량이 PM_{2.5}의

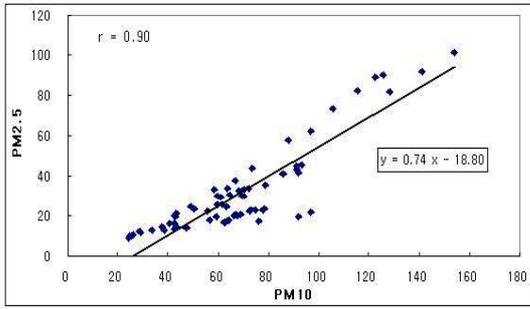


Fig. 14. Correlation coefficient and regression equation yielding a best-fitting straight line for PM_{2.5} to PM₁₀ at Gangneung city, Korea after the Yellow Dust event (March 14 ~ March 17, 2004). r denotes correlation coefficient.

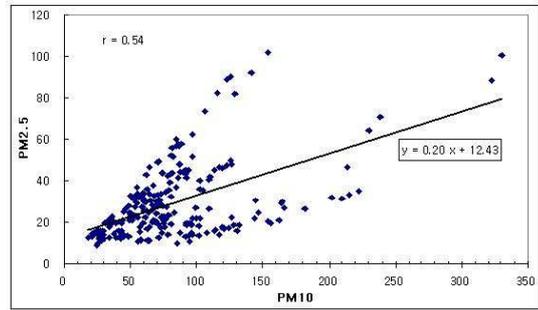


Fig. 17. Correlation coefficient and regression equation yielding a best-fitting straight line for PM_{2.5} to PM₁₀ at Gangneung city, Korea before and after the Yellow Dust event (March 07 ~ March 17, 2004). r denotes correlation coefficient.

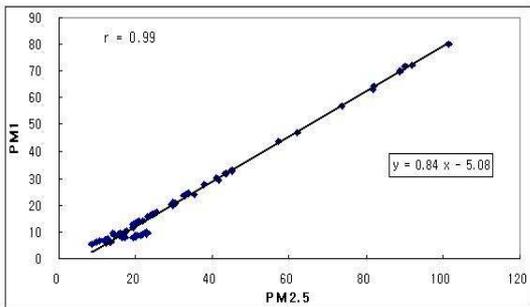


Fig. 15. As shown in Fig. 14, except for PM₁ to PM_{2.5} at Gangneung city.

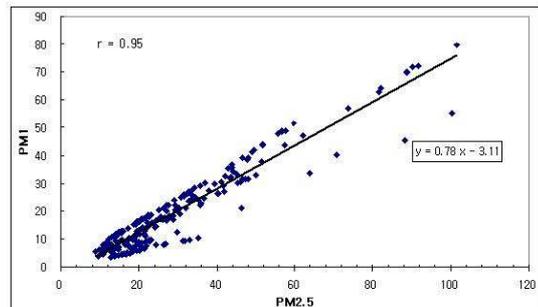


Fig. 18. As shown in Fig. 17, except for PM₁ to PM_{2.5} at Gangneung city.

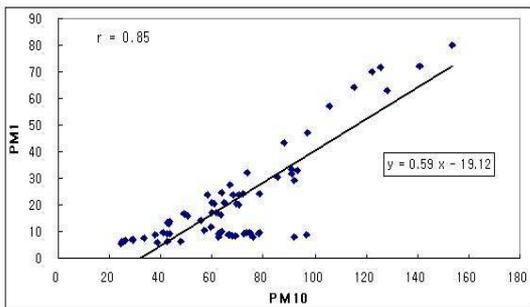


Fig. 16. As shown in Fig. 14, except for PM₁ to PM₁₀ at Gangneung city.

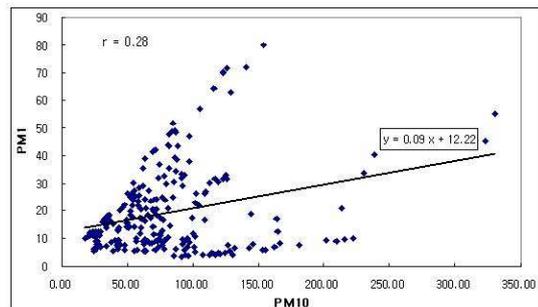


Fig. 19. As shown in Fig. 17, except for PM₁ to PM₁₀ at Gangneung city.

농도에 99% 정도로 거의 전부라 할 정도로 영향을 준다는 것을 알 수 있다. PM₁과 PM₁₀의 상관계수는 0.85로 매우 상관관계가 크며, PM₁₀의 농도변화에 1 μm 이하의 먼지들이 2 μm 이하의 입자들과 함께 크

게 기여하였다는 것을 알 수 있다. 따라서 황사가 강릉시에 끝난 후에는 PM₁₀의 농도는 극미세먼지 2.5 μm와 초미세먼지인 1 μm 이하의 먼지입자들이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 황사현상

Table 1. Correlation coefficient and regression formula among PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at Gangwon Meteorological Administration, Gangneung city, Korea from March 7 to March 17, 2004.

Period	Item	Correlation Coefficient (r)	Prediction Formula
2004. 3. 07. ~ 3. 10.	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.89	Y = 0.55X + 0.34
	PM ₁ - PM _{2.5}	0.99	Y = 0.86X - 1.83
	PM ₁ - PM ₁₀	0.82	Y = 0.44X + 0.08
2004. 3. 10. ~ 3. 14.	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.71	Y = 0.21X + 2.65
	PM ₁ - PM _{2.5}	0.94	Y = 0.62X - 2.20
	PM ₁ - PM ₁₀	0.44	Y = 0.08X + 4.30
2004. 3. 14. ~ 3. 17.	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.90	Y = 0.74X + 8.80
	PM ₁ - PM _{2.5}	0.99	Y = 0.84X - 5.08
	PM ₁ - PM ₁₀	0.85	Y = 0.59X - 19.12
2004. 3. 07. ~ 3. 17	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.54	Y = 0.20X + 12.43
	PM ₁ - PM _{2.5}	0.95	Y = 0.78X - 3.11
	PM ₁ - PM ₁₀	0.28	Y = 0.09X + 12.22

이 나타나기 전의 경우와 유사하게 강릉시내의 PM₁₀의 농도변화에 2.5 μm 이하의 극미세먼지가 대부분을 차지한다는 것을 의미한다.

PM₁₀, PM_{2.5}와 PM₁ 간의 상관관계가 매우 높으므로 예측공식을 사용하여 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도변화를 예측할 수 있을 것이며, 높은 정확도를 갖는다.

3.3.4. 전 기간

Fig. 17, 18, 19는 2004년 3월 7일~3월 17일까지 황사현상이 강릉시내에서 나타나기 전, 중간, 후의 기간에 PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}, PM₁과 PM₁₀과의 상관관계와 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 간의 농도 예측을 위해 회귀곡선식을 나타내고 있다.

PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관계수는 0.54로 매우 보통 정도의 상관관계를 나타내어 PM₁₀의 농도 변화에 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 어느 정도만 작용하였을 나타낸다. 반면에 PM₁과 PM_{2.5}의 상관계수는 0.95로 매우 상관관계가 높아 PM_{2.5}의 농도 변화에 1 μm 이하의 먼지입자들의 총량이 95% 정도로 매우 크게 영향을 주었다. 그러나 PM₁과 PM₁₀의 상관계수는 0.28로 매우 상관관계가 낮아, PM₁₀의 농도변화에 1 μm 이하의 먼지들이 기여도가 매우 낮았다.

Table 1에서 보는바와 같이 따라서 황사 전, 기간 중, 후를 구분하지 않고 PM₁ 농도와 PM_{2.5} 농도간의 상관계수가 95%를 나타내므로, 예측공식을 사용하여 상호간의 농도를 예측하는 것은 정확성이 매우

높아 권장 할만하다. 그러나 PM_{2.5}와 PM₁₀과의 상관관계는 보통 정도이므로 예측공식을 사용할 수 있으나 정확성은 다소 떨어진다. 특히 PM₁과 PM₁₀과의 상관계수가 0.28로 상관관계가 매우 낮아 예측공식을 사용하기는 어렵다. 결론적으로 2004년 3월 7일부터 3월 17일까지 강릉시내에 황사가 나타나기 전, 후 기간에 걸쳐 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 농도에 관한 관측 자료를 분석한 결과 황사 전, 황사기간, 황사 후 기간으로 나누어서 분석하여, 상호간의 농도를 예측하는 것이 타당하다고 생각된다.

4. 결 론

일반적으로 동해안에 위치한 강릉시에서는 PM₁₀의 최대농도가 50 μg/m³ 이하로 낮지만, 한반도에서 봄철 3월~5월의 황사기간에는 PM₁₀의 농도가 100 μg/m³ 이상으로 급격하게 증가한다.

1) 황사 전에는 PM₁₀과 PM_{2.5}와의 상관관계가 높고, PM₁과 PM_{2.5}의 상관계수는 거의 100%에 달하므로 PM의 농도는 대부분 2.5 μm 이하의 먼지입자들이 크게 작용한다.

2) 황사기간에는 PM₁₀의 농도는 PM_{2.5}, PM₁농도의 약 3배~5배, 4배~6배 정도 높게 나타났으며, 황사 전보다 PM₁₀, PM_{2.5}와 PM₁ 농도가 최대 8.5배, 4배, 3배 이상의 큰 값으로 증가하였다. 특히 PM₁₀ 농도가 PM_{2.5}와 PM₁에 비해 큰 폭으로 증가하므로 황사기간 중에는 2.5 μm보다 큰 입자가 중국으로부터

강릉시로 많이 수송되었으며, 이들 큰 입자들이 PM의 농도에 크게 기여하였다. 황사기간에는 PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM₁₀과의 상관관계가 강하지 않아 PM₁₀의 구성은 2 µm 이상의 먼지입자들이 농도변화 크게 영향을 미친다.

3) 황사 후의 PM의 농도변화는 황사 전과 유사하였다.

4) 황사가 나타나기 전에는 (PM₁₀-PM_{2.5})의 최대 차이가 19.97 µg/m³, (PM_{2.5}-PM₁)의 최대 차이가 8.25 µg/m³이었다. (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}의 비는 1.49와 (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁의 비가 0.4이었으며, 10 µm ~2.5 µm사이의 입자들이 2.5 µm 이하의 입자들보다 PM₁₀의 농도 형성에 크게 기여하였다.

5) 반면에 황사기간에는 (PM₁₀-PM_{2.5})의 최대차이는 234.52 µg/m³이었으며, (PM_{2.5}-PM₁)의 최대차이는 45.03 µg/m³이었다. (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}의 비가 7.82, (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁의 비가 2.8로, 2.5 µm보다 큰 입자들인 10 µm~2.5 µm사이의 입자들이 2.5 µm 이하의 입자들보다 PM₁₀의 농도 형성에 크게 기여하였다.

6) 황사 후에는 (PM₁₀-PM_{2.5})의 최대 차이는 75.40 µg/m³이었고, (PM_{2.5}-PM₁)의 최대 차이는 21.62 µg/m³이었다. PM₁₀-PM_{2.5}/PM_{2.5}의 비가 3.75, (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁의 비가 2.8로 10 µm ~2.5 µm사이의 입자들이 2.5 µm 이하의 입자들보다 PM₁₀의 농도 형성에 다소 크게 기여하였다.

7) 황사기간에는 주로 (2.5 µm~1 µm) 입자들보다 (10 µm~2.5 µm)의 입자들이 PM₁의 농도에 크게 기여함으로써 강릉지역의 PM₁₀의 농도 증가에는 중국에서 황사의 유입될 때 동반된 큰 입자들이었다.

8) 본 연구를 통해 매 시각별 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀의 농도변화에 대한 상호간의 예측과 PM의 농도변화를 파악함으로써 현재 정부와 지자체에서 측정하고 있지 않은 PM_{2.5}와 PM₁₀의 매 시각별 농도변화를 예측함으로써 연구결과를 실용적으로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-312-C00444; “황사

전후 산과 연안에서 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀의 농도와 대기경계층과의 관계”). 한국학술진흥재단 및 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Carmichael G. R., 1997, Tropospheric ozone production and transport in the springtime in east Asia, Proc. Third International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere, Nov., Nara, Japan, 56-65.
- 2) Chon H., 1994, Historical records of yellow sand observations in China, Res. Env. Sci., 7-6, 1-11.
- 3) Chung Y. S., Yoon M. B., 1996, On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings, Atmos. Env., 30, 2387-2397.
- 4) Duce R. A., Unni B. C., Ray K. J., Prospero J. M., Merrill J. T., 1980, Long-range transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability, Science, 209, 1522-1524.
- 5) Fei J., Qing Y., 1998, The numerical simulation on dust-storm over east Asia II: A case analysis, (J), Acta Sci. Natur. Univ. Pekinensis, 34(5), 639-645.
- 6) Gao Y., Anderson J. R., 2001, Characteristics of Chinese aerosols determined by individual particle analysis, J. Geophys. Res., 106 (D16), 18037-18045.
- 7) Huang M., Wang Z., 1998, A model for long-range transport of yellow sand in East Asia, Atmos. Sinica, 22, 625-637.
- 8) Jigjidsuren S., Oyuntsetseg S., 1998, Pastureland utilization problems and ecosystem. Ecological sustainable development, Ulaanbaatar, 2, 206-212.
- 9) Choi S. W., Song H. D., 1999, Variation of concentration of heavy metal during Yellow sand period of winter season at Taegu area, Bull. Env. Sci., 4(11), 1-13.
- 10) Chun Y. S., Kim J. Y., Choi J. C., Boo K. O., Oh S. N., Lee M. H., 2001, Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, Atmos. Env., 35, 2715-2721.
- 11) Chung Y. S., Kim H. S., Natsagdorj L., Jugder D., Chen S.J., 2001, On yellow sand occurred during 1997-2000, J. Korean Meteor. Soc., 37, 305-316.
- 12) Chung Y. S., Kim H. S., Jugder D., Natsagdorj L., Chen S. J., 2003, On sand and duststorms and associated significant dustfall observed in Chongju-Chongwon, Korea, Water, Air, and Soil Pollut.: Focuss, 3, 5-19.
- 13) Wang Z., Ueda H., Huang M., 2000, A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow

- sand over East Asia, *J. Geophys. Res.*, 26, 947-956.
- 14) Westphal D., Toon O. B., Carson T. N., 1987, A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, *J. Geophys. Res.*, 92, 3027-3049.
 - 15) Xuan J., Sokolik I. N., 2002, Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China, *Atmos. Env.*, 36, 4863-4876.
 - 16) Yamamoto K., Aoyama M., Ito K., Kasahara M., Kitada T., Kurata G., 2003, Development of long range transport model for mineral dust in east Asia, Proc. ASAAQ conference, March, Tsukuba, Japan.
 - 17) Zhang Y., Zhong Y., 1985, The simulation and diagnosis for a strong wind associated with northeast low, *Acta Meteor. Sinica*, 43, 97-105.
 - 18) Phadnis M. J., Carmichael G. R., 2000, Numerical investigation of the influence of mineral dust on the tropospheric chemistry of East Asia, *J. Atmos. Chem.*, 36, 285-323.
 - 19) Choi H., Zhang Y. H., Takahashi S., 2004, Recycling of suspended particulates by the interaction of sea-land breeze circulation and complex coastal terrain, *Meteor. & Atmos. Phys.*, 109-120.
 - 20) Choi H., Speer M. S., 2007, Influences of secondary chemical gas processes on PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations over the Korean coast, *Advances in Geophys.*, 8, 209-224.
 - 21) Choi H., Choi D. S., 2008, concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ influenced by atmospheric circulation and atmospheric boundary layer in the Korean mountainous coast during duststorm period, *Atmos. Res.*, DOI:10.1016/j.atmosres.2008.03.018.
 - 22) Choi H., Zhang Y. H., 2008, Prediction of duststorm evolution by vorticity theory, *Atmos. Res.*, DOI:10.1016/j.atmosres.2008.03.019.
 - 23) Choi H., Zhang Y. H., Kim K. H., 2008, Sudden high concentration of TSP affected by atmospheric boundary layer in Seoul metropolitan area during dust-storm period, *Env. International*, DOI:10.1016/j.envint.2007.12.023.
 - 24) Kim H. K., Kim M. Y., 2003, The effects of Asian dust on particulate matter fractionation in Seoul, Korea during spring 2001, *Atmos. Env.*, 51, 707-721.
 - 25) Kim H. K., Kim M. Y., Kim J., Lee G., 2002, The concentrations and fluxes of total gaseous mercury in a western coastal area of Korea during the late March period of 2001, *Atmos. Env.*, 1352-2310.
 - 26) Lin T. H., 2001, Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: Observed evidence and simulation, *Atmos. Env.*, 35, 5873-5882.
 - 27) McKendry I. G., Hacker J. P., Stull R., Sakiyama S., Mignacca D., Reid K., 2001: Long-range transport of Asian dust to the lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *J. Geophys. Res.*, 106 (D16), 18361-18370.
 - 28) Murayama N., 1988, Dust cloud "Kosa" from the east Asian dust storms in 1982-1988 as observed by the GMS satellite. *Meteor. Satell. Cent. Tech.*, Note, 17, 1-8.
 - 29) Natsagdorj L., 1992: Strong wind frequency around the Bulgan Soum of Umnigobi Aimag, Publication of Hydro-Meteor., Res. Institute of Mongolia, Ulaanbaatar, 7, 74-80.

