

연구논문

태풍 우사기와 나리 통과 후 부산지역 미세먼지 농도의 급상승에 관한 연구

전 병 일

신라대학교 환경공학과

(2011년 4월 6일 접수, 2011년 6월 23일 승인)

Sudden rise of fine particle concentration after Typhoon USAGI and NARI passage in Busan

Byung-II Jeon

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 6 April 2011; accepted 23 June 2011)

Abstract

This study was conducted to investigate the sudden rise of fine particle concentration after the passage of typhoon USAGI and NARI in Busan. Nocturnal inversion layer was formed at atmospheric boundary layer and wind direction changed from southerly wind to northeasterly wind after USAGI passed through Busan. Fine particle concentration in Busan rapidly increased by subsidence of air pollutants released from sources and dust transported from in the vicinity of industrial regions. Wind direction changed from northeasterly wind to southeasterly wind, wind velocity increased and lower atmosphere became extremely unstable after NARI passed through Busan. PM_{10} concentration of Busan increased sharply because of surface dust dispersed by strong wind. Fine particle concentration generally decreases by precipitation and wind after typhoon passes through. However, the concentration can also go up not only by subsidence and transportation in nocturnal inversion layer but also by surface dust which temporarily occurs by strong wind.

Keywords : typhoon, fine particle concentration, nocturnal inversion layer, lower atmosphere

I. 서론

태풍은 집중호우, 폭풍 및 해일 등의 악기상을 유발하며 매년 2~3개의 태풍이 우리나라에 상륙하여 막대한 경제적 피해와 인명 피해를 미치고 있다(차은정 등, 2008). 그러나 강수량이 하계에 집중되는 우리나라에서는 태풍이 오지 않은 해는 물 부족 현상이 벌어지기도 한다. 최근에는 지구온난화로 인해 태풍의 규모가 대형화하는 추세를 보이고 있어, 이에 대한 방재대책이 시급히 요구되는 실정이며 태풍에 대한 예보의 필요성과 중요성이 더욱 증대되고 있다.

입자상 물질은 대기 중으로 직접 방출되거나 가스상 물질이 대기 중으로 들어가 2차적으로 먼지가 생성되기도 한다. 지난 수십 년간 대기 에어로졸에 대한 연구는 주로 인간의 건강에 부정적으로 미치는 것에 초점이 맞추어져 왔다(Pope *et al.*, 2004; Brunekreef and Forsberg, 2005; Dockery and Stone, 2007). 또한 대기 에어로졸은 직접적이든(태양복사를 흡수하거나 반사) 간접적이든(구름의 형성, 반사도의 변화) 지구복사수지에 영향을 주어 기후의 변화를 일으키는 것으로 알려지고 있다(IPCC, 2007).

Cao *et al.*(2010)은 한랭전선 통과가 입자상물질의 농도에 미치는 영향을 연구하여, 통과 전보다는 통과 후에 농도 상승을 가져온다고 하였으며, 水本 등(2000)은 일본에서 저기압 중심이 통과할 때 미세먼지의 뚜렷한 증가가 있었다고 하였다. Modey *et al.*(2004)은 고농도 PM_{2.5}가 고압부에서 저압부로 전이되는 과정에서 나타나며 특히 한랭전선이 다가오기 바로 전 남서풍에서 서풍으로의 풍향변화와 깊은 관련이 있다고 하였다.

태풍에 대한 연구는 주로 태풍의 발생이나 예보 및 예측 그리고 피해에 관한 것은 많이 있으나, 대기오염농도와 관련된 연구는 드물다. 김정수(2009)는 최근 5년간(2004~2008년) 우리나라에 영향을 준 19건의 태풍이 대기질에 미치는 영향을 조사한 결과, 미세먼지의 개선효과가 크며 태풍 영향권 하에서는 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외까지 낮아졌다고 하였다. Chuang

et al.,(2008)은 타이완에서 고농도의 에어로졸이 발생했을 때 종관기상형태를 연구한 결과, 태풍의 위치와 진로에 따라 미세먼지 농도가 증가한다고 하였고, 태풍이 타이완의 근처에 있을 때 하루 중 시간당 PM_{2.5}농도가 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 한 시간 이상 발생한 사례가 3년(2002년 3월부터 2005년 2월 사이)에 34일이나 되었다고 하였다. Feng *et al.*,(2007)은 중국의 Pearl River Delta에서 고농도 미세먼지에 미치는 열대성 저기압의 영향을 관측과 수치모의로 연구하였고, 지상의 고농도 미세먼지는 열대성 저기압에 의해 유발된 침강과 저고도 기온역전과 밀접한 관련성이 있다고 하였다.

본 연구에서는 대부분 경우에 태풍이 통과할 때 미세먼지농도가 하강하였으나, 반대로 농도가 상승한 2007년 부산지방과 가장 가까운 지역으로 진로를 형성한 우사기(USAGI)와 나리(NARI)를 대상으로 태풍이 부산지역 인근을 통과한 후 부산지역 미세먼지농도가 어떻게 급상승하였는지를 대기오염자료와 기상자료를 이용하여 그 특성을 고찰하였다.

II. 자료 및 방법

부산지역을 태풍이 통과할 때 미세먼지농도의 급상승을 연구하기 위해 사용한 대기오염농도는 Fig. 1과 같이 부산광역시 보건환경연구원에서 운영하는 장림동 측정 자료를 사용하였다(부산광역시, 2007). 부산광역시에서 PM₁₀과 PM_{2.5}를 동시에 측정하는 지점이 장림동 이외에 연산동, 기장읍, 좌동이 있지만, 본 연구에서는 태풍이 통과할 때 가장 측정자료가 양호하고 부산지방기상청에서 가장 가까운 장림동을 선정하였다. 지상관측 기상자료는 부산지방기상청(BRMA; Busan Regional Meteorological Administration)에서 관측한 자료를 사용하였으며(부산지방기상청, 2007), 고농도 미세먼지 발생 시 하층대기의 특성을 고찰하기 위해 미국 와이오밍대학에서 제공하는 단열선도와 미국 NOAA (National Ocean and Atmosphere Administration)에서 제공하는 대기경계층고도(NOAA, 2007)를 이용하였다.

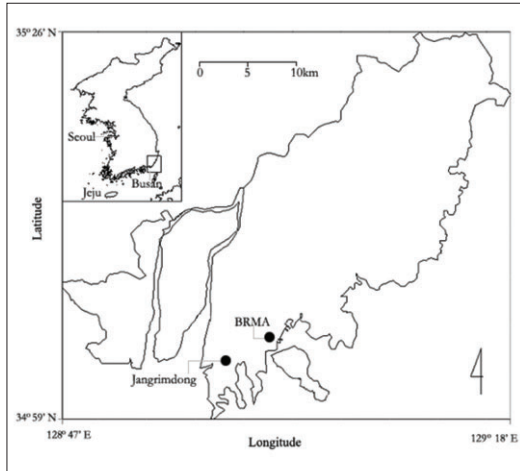


Fig. 1. Sampling site of air pollutants(Jangrimdong) and measuring site of meteorological parameters(BRMA) in Busan for this study

III. 결과 및 고찰

1. 우사기와 나리의 진로와 특성

2007년 제5호 태풍인 우사기는 Fig. 2와 같이 7월 29일 15시에 미국 괌 북쪽 약 510km 부근 해상에서 약한 소형 태풍으로 발생한 후, 8월 2일 15시에 일본 가고시마 동쪽 약 130km 부근에 도달하였고 8월 3일 03시에 부산의 동남동쪽 약 230km 부근에 도달하여 빠른 속도로 동해상을 향해 북동진하여 8월 4일 09시경에 일본 삿포로 남서쪽 약 330km 부근 해상에서 온대성 저기압으로 변질되면서 소멸하였다(차은정 등, 2008). 우사기의 진로가 우리나라와 떨어져 있어서 전국적으로 강수와 바람에 의한 피해는 없었다. 부산지방의 경우, 우사기가 8월 3일 새벽에 가장 근접하였으나 강수량은 0.3mm로 매우 작았다. 최대풍속이 8월 3일 새벽 1시경 6.1m/s이었고, 순간최대풍속은 1시 14분에 10.9m/s이었으며, 최저기압은 2시 19분에 999.4hPa이었다(부산지방기상청, 2007).

2007년 제11호 태풍인 나리는 Fig. 2와 같이 9월 13일 15시경에 일본 오키나와 남동쪽 약 660km 부근 해상인 비교적 고위도에서 약한 소형 태풍으로 발생하였으며, 9월 16일 06시에 서귀포 남쪽 약

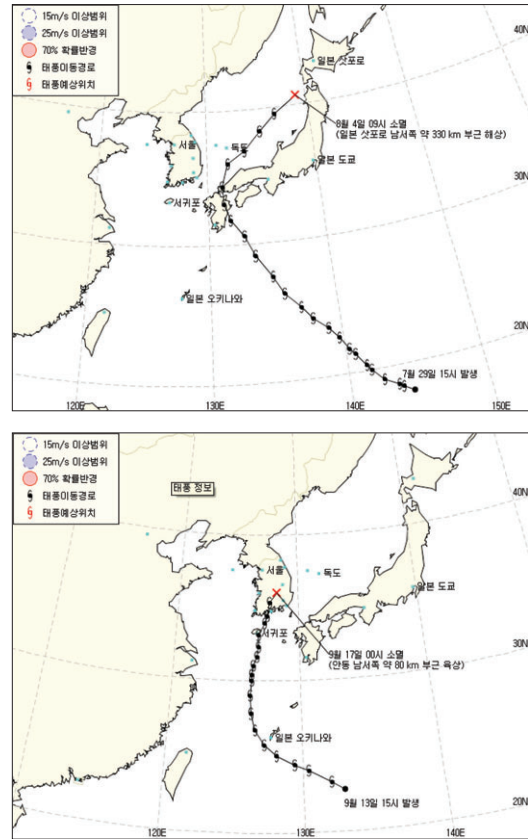


Fig. 2. Routes of USAGI(left) and NARI(right) in 2007

180km 부근 해상에 도달하였고, 같은 날 18시 15분경 전라남도 고흥반도에 상륙하였다. 상륙당시 기압은 980hPa, 중심부근 최대풍속은 27m/s이었고 시속 25km로 북북동진 하였다. 상륙전후의 태풍의 장반경은 160km, 단반경은 북서쪽으로 140km이었다. 9월 17일 00시 안동 남서쪽 약 80km 부근 육상에서 온대성저기압으로 변질되어 소멸되었다(차은정 등, 2008). 부산지방의 강수량은 태풍 전면에서 발달한 구름대의 영향으로 9월 15일에 67.0mm를 기록하였고, 9월 16일에는 12.4mm를 나타내었다. 최대풍속은 9월 16일 23시경에 21m/s 이었고 최대순간풍속은 21시 42분에 21.3m/s이었다. 최저해면기압은 19시 17분에 1001.6hPa이었다(부산지방기상청, 2007).

2. 태풍 우사기 통과 시 미세먼지농도의 특성

Fig. 3은 2007년 제5호 태풍인 우사기가 우리나라에 영향을 주었을 때 부산의 장림동에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, CO, NO₂의 시간별 농도 변화를 나타낸 것이다. 우사기가 일본 남쪽 해상에 있을 때인 8월 1일과 8월 2일의 미세먼지 일변화는 출·퇴근시간에 높고 혼합고가 높은 주간에 낮은 농도를 나타내는 전형적인 일변화 양상을 나타내었다. 그러나 태풍이 부산지역에 가까이 왔을 때인 8월 3일의 경우를 보면, 태풍의 전면에서 발생한 구름대에 의한 강수현상으로 새벽 2시부터 6시까지의 미세먼지농도는 낮았고, 비가 그치자 09시에 PM₁₀ 농도가 일시적으로 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승하였다가 이후 상승과 하강을 반복하였다. 우사기가 부산지방을 완

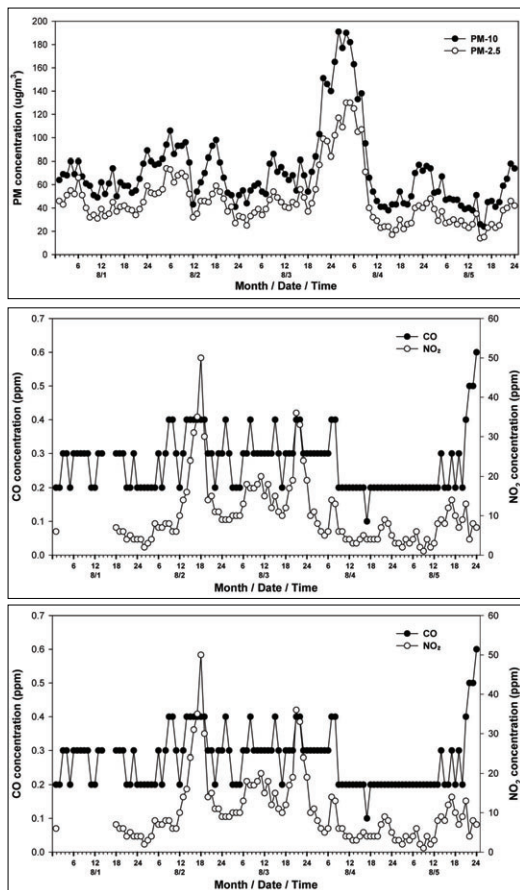


Fig. 3. Variation of hourly air pollutants for USAGI at Busan between 1 and 5 August

전히 빠져나간 후인 21시에 PM₁₀농도는 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었고 8월 4일 09시에 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타낼 때까지 12시간동안 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도 미세먼지를 나타내었다. 초미세먼지인 PM_{2.5}도 PM₁₀과 같은 농도변화 경향을 나타내었으며, 8월 4일 1시부터 8시까지 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 고농도 미세먼지가 발생하였다. 즉 8월 3일 21시부터 8월 4일 오전 9시까지 12시간 동안 고농도 미세먼지가 발생한 것이다. 이 기간 PM₁₀농도는 평균 156.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 평균 106.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.68이었다. 미세먼지는 이른 아침과 늦은 오후에 출·퇴근시의 많은 자동차통행량에 의해 고농도가 나타나고 야간에는 저농도를 나타내는 것이 일반적인 경향이다(전병일, 2003). 미세먼지가 갑자기 고농도를 나타내는 경우는 고농도를 유발하는 대기오염배출양이 있던지, 아니면 인근 지역으로부터 수송된 먼지로 인해 고농도가 나타날 수 있다(전병일과 황용식, 2007). 이 시간대의 기상요소변화를 보면(Fig. 4a 참조), 8월 3일 21시 이후 남풍에서 동북동풍으로 급변하여 8월 4일 새벽 1시까지 같은 풍향을 유지하였고, 2m/s 이하의 매우 낮은 풍속을 나타내었다. 운량은 8/10에서 3/10으로 낮았으며 기온이 내려가고 습도가 올라가는 등 기상요소가 급변하였다. 즉 태풍이 통과한 후 부산지방은 풍속이 약해지고 구름의 양은 작아지고 기온이 내려가는 현상을 나타내었다.

따라서 8월 3일 저녁부터 8월 4일 아침까지 발생한 미세먼지 고농도는 태풍이 지나가고 발생한 안정한 야간경계층에서 발생한 것으로 판단된다. 이에 대한 근거로 1차 오염물질인 SO₂도 8월 3일 21시부터 상승하기 시작하여 8월 4일 새벽 3시까지 0.01ppm이상을 유지하였고 2차 오염물질인 O₃은 SO₂와 반비례관계를 나타내었다. 8월 3일의 주간에는 남풍계열인 해풍이 있었고 고농도가 나타난 시간대인 야간에는 북동풍계열인 육풍이 발생한 것으로 보아 내륙으로 갔던 오염물질이 재순환과정에 의해 농도를 높일 수도 있다(Choi *et al.*, 2008). 이는 1차 오염물질인 SO₂와 CO의 농도가 높은 것에

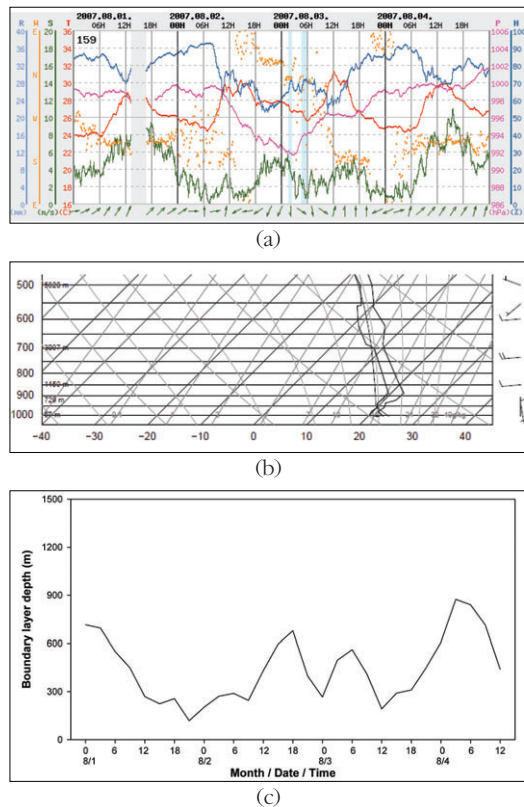


Fig. 4. Variation of meteorological parameters at Busan(a), sounding from Pohang airport for August 3, 2100LST, 2007(b) and boundary layer depth calculated from the NOAA ARL at Busan(c) for USAGI. Y-axis and X-axis of Fig.(b) represent air pressure(unit : hPa) and air temperature(°C), respectively.

서 유추해 볼 수 있다. 특히 야간시간대인 SO₂와 CO의 농도가 미세먼지농도와 동반 상승한 것으로 보아 부산이 아닌 인근 지역으로부터 장거리 수송되어 영향을 미친 것으로 볼 수 있다(Chang *et al.*, 2010).

Fig. 4b는 미국 와이오밍대학에서 제공하는 포항의 2007년 8월 3일 21시의 단열선도를 나타낸 것이다. 포항은 부산에서 북동쪽으로 60km 정도 떨어진 곳으로 상층기상을 참고하는데 별 무리가 없는 정도의 거리에 있다. 지표부근에는 약한 불안정층을 나타내고 있으나 989hPa부터 889hPa까지 강한 역전층을 나타내고 있다. 풍향이 지표에서 상층으로 갈수록 시계방향으로 부는 veering을 하고

있어 공기가 상당히 안정되어 있었다. 그리고 NOAA에서 제공한 부산지역의 대기경계층고도는 8월 3일 21시부터 8월 4일 03시 사이에 300 m 이하로 매우 낮아 하층대기가 매우 안정되어 있었다(Fig. 4c 참조). 따라서 부산지역은 태풍이 통과한 후에 지표부근이 급속히 냉각되었고 강한 야간 역전층이 하층대기에 생성되었으며 지표부근에서 발생한 대기오염물질과 부산 인근에서 수송된 대기오염물질이 상층에서 하층으로 침강되어 미세먼지 농도가 급상승하였다고 판단된다(최효, 2008). Choi and Choi (2008)에 의하면 강릉의 야간 고농도 미세먼지는 야간이 되면서 대기경계층이 낮아져 지표면에서 방출된 오염물질의 확산이 어려워졌기 때문에 생성되었다고 하였으며, 대만의 타이베이에서 태풍 중심부근의 침강역에 위치하였을 때 준단열침강에 의해 오염물질이 침적되어 고농도 미세먼지가 발생하였고(Chuang *et al.*, 2008), 충북 청원의 고농도 미세먼지는 황해에서 수송된 인위적인 대기오염에 의해 발생하였다고 하였다(김학성과 정용승, 2007).

3. 태풍 나리 통과 시 미세먼지농도의 특성

Fig. 5는 2007년 제11호 태풍 나리가 우리나라에 영향을 주었을 때 부산의 장림동에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, CO, NO₂의 시간별 농도 변화를 나타낸 것이다. 나리가 우리나라에 상륙하기 전인 9월 14일 장림동의 PM₁₀ 농도는 09시와 10시에 각각 97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 비교적 높은 농도를 나타내었고, PM_{2.5}도 각각 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내었다. 이후 서서히 감소하여 오후 3시~4시경에 최저농도를 나타내는 전형적인 일변화 특성을 나타내었다. 9월 14일에 태풍진행의 전면에서 발생한 구름대의 영향으로 약한 강수가 있었지만, 미세먼지농도에 큰 영향을 미치지 못했다. 9월 15일 오전에 부산지방이 태풍의 전면에 있었으나 풍속이 약하였으며 PM₁₀은 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, PM_{2.5}는 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비교적 초미세입자의 농도가 상대적으로 낮아 PM_{2.5}/PM₁₀의 비는 0.5를 나타내었다. 12시부터 시작된 강수로 인하여 미세먼지농

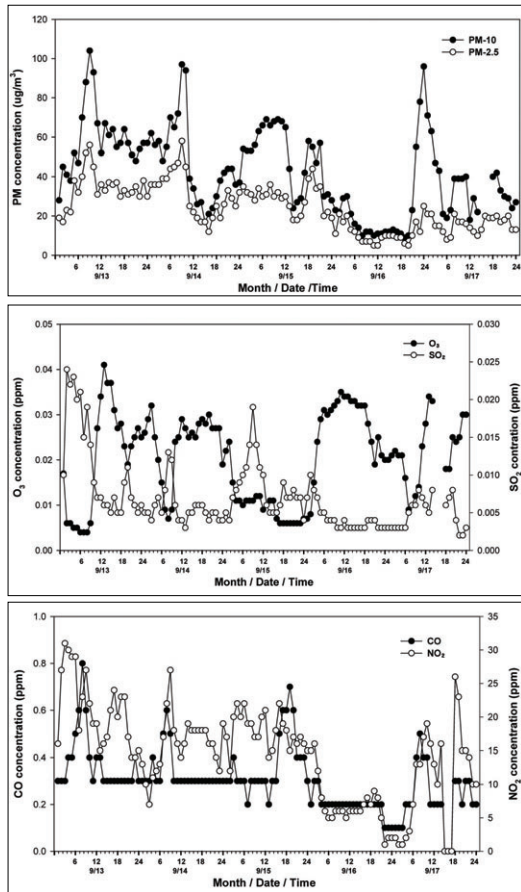


Fig. 5. Variation of hourly air pollutants for NARI at Busan between 13 and 17 September

도는 급격히 하강하였고, 18시경부터 약해진 강수와 퇴근차량의 영향으로 PM₁₀은 18시에 58µg/m³, 21시에 57µg/m³를 유지하였고, PM_{2.5}도 동반상승하여 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.7로 나타났다. 9월 16일 새벽부터 나리의 영향으로 부산지방은 북동풍의 강한 바람이 불기 시작하였으며 강수현상도 산발적으로 나타났다. 따라서 오전의 장림동 PM₁₀은 20µg/m³ 이하의 매우 낮은 농도를 나타내었고, PM_{2.5}도 10µg/m³ 이하의 농도를 나타내었다. 그러나 PM₁₀은 9월 16일 23시에 78µg/m³, 9월 17일 00시에 96µg/m³를 나타내면서 급격히 증가하였지만, PM_{2.5}는 PM₁₀과는 달리 높은 농도를 나타내지 않았으며 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.24로 매우 작았다. 이때 부산지방의 기상요소는 Fig. 6a과 같이 9월 16일 20시부터 북동풍에

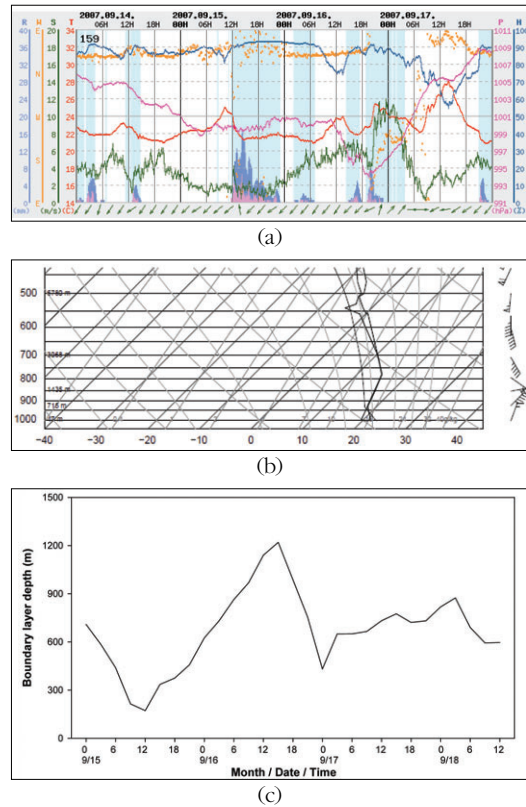


Fig. 6. Variation of meteorological parameters at Busan(a), sounding from Pohang airport for September 16, 2100LST, 2007(b) and boundary layer depth calculated from the NOAA ARL at Busan(c) for NARI

서 동남동풍으로 급격한 풍향변화가 있었고, 풍속도 약 6m/s에서 약 10m/s로 매우 강한 바람이 불었다. 강수현상은 새벽에 4mm정도의 약한 비가 있었고, 오후 2시부터 5시까지 6mm, 저녁 7시부터 11시까지 11mm의 강수가 있었다. 강수가 끝나고 고농도의 PM₁₀이 3시간 동안 발생한 것이다. 따라서 9월 16일 23시부터 9월 17일 1시까지 고농도 PM₁₀은 풍속이 강하고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮은 것으로 보아 측정지역 주변에서 강한 바람으로 인해 입자크기가 큰 PM₁₀이 비산되어 고농도를 나타낸 것으로 보인다. 이 시간대에 1차 오염물질의 SO₂의 농도가 0.003ppm으로 매우 낮게 나타났고, CO와 NO₂의 농도도 매우 낮게 나타났다. 따라서 이 경우는 PM₁₀만 높고 가스상 물질인 SO₂와 CO 그리고 NO₂의 농도가 낮은 것으로 보아 국지적인 순환이나 장거리

수송에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다(Chang *et al.*, 2010). Fang *et al.*, (2009)은 태풍이 도달했을 때 풍속이 상승함에 따라 PM_{10} 농도가 증가한 것은 국지적인 오염원으로부터 재비산하여 대기로 유입한 먼지가 많다는 것을 의미하고, 반면에 입자가 작은 $PM_{2.5}$ 는 강수에 의해 씻겨 갔거나 강한 바람에 의해 날려갔다는 것을 의미한다고 하였다. Fig. 6b는 2007년 9월 16일 21시의 포항의 단열선도를 나타낸 것이다. 지표에서 680hPa까지 기온과 노점온도가 거의 같은 것으로 보아 아직 태풍 후방에 남아있는 구름의 영향을 받고 있으며 하층대기의 풍속이 매우 강하다는 것을 알 수 있다. 그리고 NOAA에서 제공한 부산지역의 대기경계층 고도(Fig. 6c 참조)는 야간임에도 불구하고 600m 이상으로 다소 높아 불안정하다는 것을 의미하고 있다. 최효(2008)는 황사가 끝난 후에도 다소 높은 미세먼지 농도를 보인다면 강한 바람으로 지표부근의 먼지가 비산하여 나타난 것이라고 하여 강풍에 의해 먼지 농도가 상승할 수 있음을 밝혔다. 지표부근에 강한 바람이 불면 아무래도 입자가 큰 먼지가 비산하기 때문에 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 감소할 수 있다고 하였다(Tecer *et al.*, 2008).

IV. 결론

2007년의 태풍 우사기와 나리의 통과 시 부산지역의 미세먼지 급상승에 관한 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 태풍 우사기가 부산지방을 통과한 후, 8월 3일 21시부터 8월 4일 09시까지 12시간 동안 미세먼지 농도(PM_{10} 과 $PM_{2.5}$)가 높게 나타난 이유는 지표부근에 야간역전층이 발생하고 남풍에서 북동풍으로 풍향이 급변한 것으로 보아 지표 부근에서 방출된 대기오염물질의 침강과 부산지역 인근으로부터 수송된 먼지에 의해 급속히 상승한 것으로 보인다.

2. 태풍 나리가 부산지방을 통과 후, 9월 16일 23시부터 9월 17일 01시까지 PM_{10} 농도가 높게 나타난 이유는 풍향이 북동풍에서 동남풍으로 급변하고

풍속이 6m/s에서 약 10m/s로 강하게 불었으며 하층대기가 매우 불안정한 것으로 보아 강한 바람에 의해 지표의 먼지가 비산하여 급격히 상승한 것으로 보인다.

3. 태풍이 통과 후 강우나 바람에 의해 미세먼지의 농도가 하강할 수 있으나, 태풍 통과 후 야간역전층에서의 침강이나 이류에 의해 농도가 상승할 수 있고 또한 강한 바람에 의해 일시적으로 지표의 먼지가 날려 미세먼지농도가 상승할 수 있다.

참고문헌

- 김정수, 2009, 태풍의 사회경제적 영향에 관한 위크숍-태풍시즌동안 대기질 변동과 개선 효과, 기상청세미나.
- 김학성, 정용승, 2007, 동아시아 지역에서 광역적 대기오염의 이동: 위성과 지상관측, 한국지구과학회지, 28(1), 123-135.
- 부산광역시, 2007, 대기오염측정망자료.
- 부산지방기상청, 2007, 일기상통계표.
- 전병일, 2003, 부산지역 PM_{10} 농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 한국환경과학회지, 12(10), 1033-1041.
- 전병일, 황용식, 2007, 최근 5년간 부산지역의 미세먼지(PM_{10}) 농도 특성에 관한 연구, 환경영향평가, 16(6), 533-542.
- 차은정, 박윤희, 권혁조, 2008, 2007년 태풍 특징, 대기, 18(3), 183-197.
- 최효, 2008, 봄철 황사 전후 산악연안도시, 강릉시에서 PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} 의 농도비교, 한국환경과학회지, 17(6), 633-645.
- Brunekreef, B., and Forsberg, B., 2005, Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health, European Respiratory Journal, 26, 309-318.
- Cao, R., Makino, K., Tohno, S., Yamamoto, K., 2010, Effects of frontal passage on the

- concentrations of particulate matter, *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, 45(3), 126-131.
- Chang, S.C., Chou, C., Chen, W.N., and Lee, C.T., 2010, Asian dust and pollution transport-A comprehensive observation in the downwind Taiwan in 2006, *Atmospheric Research*, 95, 19-31.
- Choi, H., and 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, *Atmospheric Research*, 89, 330-337.
- Choi, H., Zhang, Y.H., and Kim, K.H., 2008, Sudden high concentration of TSP affected by atmospheric boundary layer in Seoul metropolitan area during duststorm period, *Environment International*, 34(5), 635-647.
- Chuang, M.T., Chiang, P.C., Chan, C.C., Wang, C.F., Chang, E.E., and Lee, C.T., 2008, The effects of synoptical weather pattern and complex terrain on the formation of aerosol events in the Greater Taipei area, *Sci Total Environ.* 399, 128-146.
- Dockery, D.W., and Stone, P.H., 2007, Cardiovascular risks from fine particulate air pollution, *NEJM*, 356, 511-513.
- Fang, G.C., Lin, S.J., Chang, S.Y., and Chou, C., 2009, Effect of typhoon on atmospheric particulates in autumn in central Taiwan, *Atmospheric Environment*, 43, 6039-6048.
- Feng, Y., Wang, A., Wu, D., and Xu, X., 2007, The influence of tropical cyclone Melor on PM10 concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: Numerical modeling versus observational analysis, *Atmospheric Environment*, 41, 4349-4365.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.*
- Modey, W. K., Eatough, D. J., Anderson, R. R., Martello, D. V., Takahama, S., Lucas, L., Davidson, C., 2004, Ambient fine particulate concentrations and chemical composition at two sampling sites in metropolitan Pittsburgh: a 2001 intensive summer study, *Atmospheric Environment*, 38, 3165-3178.
- NOAA, <http://www.arl.noaa.gov/READYamet.php>.
- Pope, C.A., Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., and Godleski, J.J., 2004, Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution, *Circulation*, 109, 71-77.
- Tecer, L.H., Suren, P., Alagha, O., Karaca, F., and Tuncel, G., 2008, Effect of meteorological parameters on fine and coarse particulate matter mass concentration in a coal-mining area in Zonguldak, Turkey, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58, 543-552.
- 水本美桂, 日置正, 竹前道夫, 2000, 低気圧通過による大気汚染物質濃度の變化について, 京都府保健環境研究報, 45, 91-95.