

태풍 내습 시 강수에 의한 대기오염물질 (PM₁₀, NO₂, CO, SO₂)의 농도 변화 분석

Effect of the Rainfall during Typhoon Periods on the Variation of Concentration of Ambient Air Pollutants (PM₁₀, NO₂, CO, SO₂) in the Korean Peninsula

안숙희* · 박소연 · 김정윤 · 김백조

기상청 국립기상연구소 정책연구과

(2013년 10월 1일 접수, 2014년 1월 21일 수정, 2014년 2월 16일 채택)

Suk-Hee Ahn*, So-Yeon Park, Jeoung-Yun Kim and Baek-Jo Kim
*Policy Research Division, National Institute of Meteorological Research,
Korea Meteorological Administration*

(Received 1 October 2013, revised 21 January 2014, accepted 16 February 2014)

Abstract

This study has analyzed the concentration variation of four air pollutants (PM₁₀, NO₂, CO, and SO₂) during the typhoon periods over 10 years (2002 ~ 2011). In this study, 10 typhoon events which had rainfalls in Korean Peninsula were selected during the study period. The analysis was performed using the observation data of both the air pollutants and rainfall. In order to examine and compare the concentrations of the air pollutants between normal periods and typhoon periods, we have obtained monthly average concentrations from July to September and daily average concentrations during typhoon periods. For the period from July to September, 34% of the total rainfalls can be explained by typhoons, and the concentration of air pollutants during the typhoon period was lower than the normal period. In addition, the concentration variations of the pollutants during the typhoon period were analyzed according to two categories: differences in the concentrations between the day before and the day of the typhoon (Case 1) and between the day before and after the typhoon (Case 2). The results indicated that the reduction rate of PM₁₀, NO₂, CO, and SO₂ was 30.1%, 17.9%, 11.6%, 9.7% (Case 1) and 22.8%, 21.0%, 9.0%, 8.0% (Case 2), respectively. This result suggested that air quality was significantly improved during the typhoon period than after the typhoon period by the rainfall.

Key words : Typhoon, Rainfall, Air pollutants concentration

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)64-780-6540, Email : ahnsh@korea.kr

1. 서 론

대기오염물질 (air pollutant)이란 사람이나 동물의 건강을 위협하고 식물이나 구조물에 해를 끼치며 환경을 유독화할 정도로 대기 중에 존재하는 고체, 액체, 혹은 기체 형태의 물질로 자연과 인간 활동으로 발생한다(Min and Min, 2008). 대기 중의 입자상 및 가스상 오염물질들은 강수, 안개 및 응축 등에 의한 습식침착(wet deposition)과 강수의 영향 없이 진행되는 중력침강, 확산, 관성충돌 등에 의한 건식침착(dry deposition)의 과정에 의해 대기 중에서 제거된다. 일반적으로 습식침착은 대기 중 입자상 오염물질이 구름 내에서 응결핵(nuclei)으로 작용하여 오염물질이 제거되는 rainout 과정과 비 또는 눈 등의 강하 시 충돌, 간섭, 흡수 및 흡착과정에 의해 제거되는 washout(세정과정)으로 분류되고 대기 중에서 습식에 의하여 제거된 대기오염물질은 건식에 의한 침착량 보다 단시간 내 많은 양이 제거된다(Wesely and Hicks, 2000). 초기강수 시 빗물 중의 대기 오염물질의 농도가 높고, 강수의 경과에 따라 점점 농도감소가 일어나며, 대기 중의 오염물질이 강수시간에 따라 점점 감소하는 washout에 의한 세정효과는 대기오염물질 제거에 있어 상당한 기여도를 보이고 있다(Park *et al.*, 1996).

강수의 대기오염물질 세정에 관한 효과는 대기 중의 오염물질의 농도 변화에 의한 것과 대기중 입자상 물질의 크기와 강수 강도에 따른 세정 특성(Chate and Pranesha, 2004; Chate *et al.*, 2003; Mircea *et al.*, 2000) 등 많은 연구에서 조사된 바 있다. 대기 중의 오염물질의 농도 변화를 통해 강수의 세정 효과를 살펴본 연구로 도시환경의 시정을 크게 제한하고, 폐에 침투하여 건강에 커다란 위협이 되는 미세먼지(PM_{10})와 산성비의 농도와 관련된 이산화질소(NO_2), 이산화황(SO_2)에 대한 연구는 다수 연구되었으나 강수에 대한 용해도가 작은 일산화탄소(CO)에 대한 연구는 상대적으로 적은 편이다.

Jeong (2011)은 기상인자가 광주지역의 대기질 특성에 관한 연구에서 기상현상이 대기오염에 미치는 기여도를 분석하기 위해 맑은 날과 강수 시 대기오염물질을 비교하였으며, 입자상물질인 PM_{10} 가 대기오염물질 중 강수에 의해 가장 많은 감소율을 보였고, 가스상 물질 중에 NO_2 , SO_2 는 감소하였지만 CO 는 거의 변화가 없었다고 보고하였다. Oh (2012)는

남한 지역의 대기오염물질에 대한 여름철 강수의 세정효과를 전체기간과 태풍 및 장마 기간을 제외한 기간에 대해 분석하였고, O_3 을 제외한 대기오염물질에서 강수의 세정효과가 뚜렷하였으며, $PM_{10} > SO_2 > NO_2 > CO$ 순이었다.

입자상 오염물질과 강수 간에 유의적인 음의 상관관계가 증명된 바 있으며(Plaude *et al.*, 2012; Bhaskar and Mehta, 2010), 강우와 가스상 오염물질인 SO_2 의 제거율과의 상관계수도 0.68로 강우량에 비례하여 제거율이 높아지는 경향을 보였다(Kwon *et al.*, 1996). Lim *et al.* (2012)은 PM_{10} 과 NO_2 의 강수세정 기여율과 바람분산 기여율의 정량적 추정연구에서 PM_{10} 과 NO_2 의 세정율은 비강수시와 비교하여 일강수량이 5 mm 이하일 때 각각 15.9%, 12.8%이었고, 50 mm 이상일 경우에는 46.3%, 29.8%의 세정율을 보였다. 또한 강수량에 따른 각각의 농도 감소량 사이에는 유의수준 95%에서 유의한 관계가 있으며, 대기 중 오염물질의 세정율은 기본적으로 강수량에 좌우되고 강수량과 강수강도가 클수록 세정과 흡수효과가 커진다고 보고하였다. 한편 Lee *et al.* (2009)은 NO_2 와 PM_{10} 의 강수량에 따른 농도변화 분석을 통해 강수가 없을 경우와 비교하여 강수량 0.5 mm 이하 시 NO 는 13.3%, PM_{10} 은 14.7% 감소하였고, 25 mm 이상에서는 NO_2 는 32.4%, PM_{10} 은 61.3%로 입자상 오염물질의 저감효과가 매우 뚜렷한 것으로 확인하였다.

기존 연구에 의하면 대기 중의 강수세정에 의한 대기오염물질의 변화에 관한 다양한 연구들이 있으나 태풍에 의한 대기오염물질의 변화에 대해 분석된 연구는 거의 전무한 실정이다. 특히 한반도에 영향을 끼치는 태풍의 경우 대부분 강수를 동반하므로 태풍 기간 및 태풍의 영향 전후에 대기오염물질의 농도가 어떻게 변화하는 지에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 최근 10년간 한반도에 영향을 준 태풍의 영향기간 내 강수와 태풍 전후의 대기오염물질의 농도 변화를 통해 태풍에 동반된 강수에 의한 세정효과를 분석하고자 하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

본 연구에서 대기오염물질 농도 변화 분석에 사용

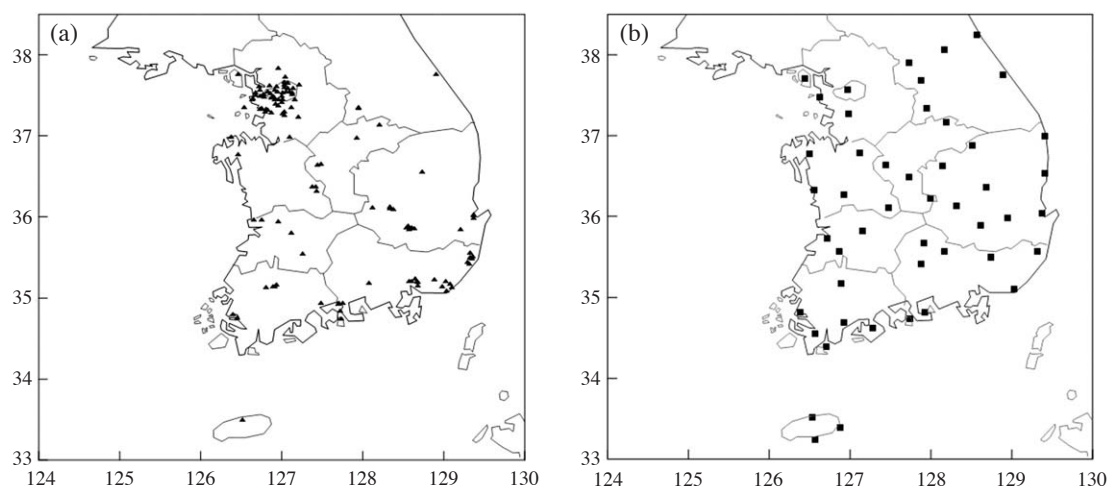


Fig. 1. Location of 118 air pollution monitoring stations (a) and 48 rainfall observation stations (b).

한 자료는 환경부 국립환경과학원의 도시대기측정망으로 측정항목 중에 입자상 물질인 PM_{10} 과 가스상 물질인 NO_2 , CO , SO_2 에 대해 연구개시일로부터 최근 10년간인 2002년부터 2011년까지 측정소의 이전, 신설, 폐쇄 등이 없이 관측의 연속성을 지닌 118개 지점의 1시간 평균 자료에 대해 분석하였다(그림 1(a)). 대기오염측정망의 결측에 의한 오차를 줄이고 통계 자료의 신뢰성을 위해 통계처리 시 1시간 평균 자료를 이용하여 일평균을 계산하였으며, 유효측정비율 75% 이상인 자료만 대상으로 하였다(NIER, 2011).

또한 태풍의 영향기간 동안 강수량도 2002년부터 2011년까지 기간에 대해 기상청의 전국 기상관측소에서 관측한 자료를 사용하였으며, 전국 강수량은 도서지역을 제외한 육지의 대표적인 45개 기상관측 지점(1981년 이후 연속적으로 관측된 지점)과 제주 지역의 3개 기상관측 지점 자료를 평균하여 사용하였다(그림 1(b)).

2. 2 분석방법

2002년부터 2011년까지 태풍백서(KMA, 2011a)와 2011년 태풍분석 보고서(KMA, 2012)를 통해 조사한 한반도에 영향을 끼친 태풍 중에 한반도에 간접적인 영향을 주었거나 영향기간 및 영향기간 전후에 전국 강수의 불연속성을 보인 태풍을 제외한 총 10개의 태풍을 선정하였다(표 1). 여기서 전국 강수의 정의는 태풍의 영향기간 내에 90% 이상의 지점(43개 지

Table 1. List of selected typhoons affecting the Korean Peninsula.

TCID	Typhoon name	Typhoon period
0208	NAKRI	7.13
0215	RUSA	8.30~9.1
0314	MAEMI	9.12~9.13
0407	MINDULLE	7.2~7.4
0415	MEGI	8.17~8.19
0603	EWINIAR	7.9~7.10
0613	SHANSHAN	9.17~9.18
0711	NARI	9.15~9.16
0807	KALMAEGI	7.19~7.20
1004	DIANMU	8.10~8.11

점)에 강수가 있을 때로 한다.

본 연구에서 사용된 태풍이 한반도에 영향을 준 기간과 영향기간 전후의 강수량 및 강수가 관측된 지점의 수를 표 2에 나타내었다. 또한 앞에서 정의한 전국강수의 기준에 해당하는 기간에 대하여 회색으로 표시하였다. 태풍의 영향기간 동안 전국적으로 강수가 가장 많았던 태풍은 2004년 제15호 태풍 MEGI로 181.8mm이었으며, 그 다음은 역대 재산피해가 가장 컸던 2002년 제15호 태풍 RUSA가 160.9mm이었다. 2002년 제15호 태풍 RUSA와 2003년 제14호 태풍 MAEMI, 2004년 제7호 태풍 MINDULLE, 2008년 제7호 태풍 KALMAEGI, 2010년 제4호 태풍 DIANMU 등 5개의 태풍은 영향기간에만 강수가 있었으며, 2004년 제15호 태풍 MEGI와 2006년 제13호

Table 2. The rainfall of the day before typhoon period, typhoon period and the day after typhoon period. The values in parentheses indicate the number of rainfall observation sites, and the gray-filled areas denote the actual rainfall event.

TCID	Typhoon name	The day before typhoon period	Typhoon period	The day after typhoon period
0208	NAKRI	0 (1)	5.3 (45)	10.5 (47)
0215	RUSA	0.2 (17)	160.9 (48)	0 (1)
0314	MAEMI	5.2 (39)	128.2 (47)	0 (4)
0407	MINDULLE	1.4 (34)	82.3 (48)	3.4 (40)
0415	MEGI	17.8 (44)	181.8 (48)	2 (32)
0603	EWINIAR	11.2 (38)	118.3 (48)	24.7 (46)
0613	SHANSHAN	4.3 (44)	35 (46)	0.2 (3)
0711	NARI	46.5 (48)	131.2 (48)	6.4 (43)
0807	KALMAEGI	0.6 (10)	64.9 (48)	1.8 (36)
1004	DIANMU	1.3 (15)	77.2 (48)	3 (29)

태풍 SHAN SHAN은 태풍영향기간 전날부터 태풍영향기간까지 전국 강수가 있었고, 2002년 제8호 태풍 NAKRI와 2006년 제3호 태풍 EWINIAR는 태풍영향기간부터 다음날까지 전국 강수가 있었다. 2007년 제11호 태풍 NARI만이 태풍의 영향이 시작되기 전날부터 영향기간 다음날까지 계속 강수가 지속되었다.

선정된 태풍 전후의 대기오염물질 (PM₁₀, NO₂, CO, SO₂) 농도는 태풍 영향기간 전날, 영향기간, 영향기간 다음날에 대한 전국 평균값으로 식 (1)과 같이 2개의 경우에 대해 대기오염물질의 농도변화를 살펴보았다. ΔC_1 는 태풍 기간과 태풍기간 전날에 대한 대기오염물질의 농도 차이이고, ΔC_2 는 태풍기간 다음날과 전날의 대기오염물질의 농도 차이이다.

$$\begin{aligned}\Delta C_1 &= C_T - C_{T-1} \\ \Delta C_2 &= C_{T+1} - C_{T-1}\end{aligned}\quad (1)$$

C_T : 태풍의 영향기간 동안의 농도

C_{T-1} : 태풍의 영향기간 전날의 농도

C_{T+1} : 태풍의 영향기간 다음날의 농도

3. 결 과

3.1 월별 대기오염물질 농도와 강수 평균값

2002년부터 2011년까지의 월별 대기오염물질 농

도와 본 연구에 사용된 한반도 영향 태풍기간의 월별 대기오염물질 농도를 그림 2에 나타내었다. Park *et al.* (2006)에 의하면 한반도에 태풍의 영향이 가장 많은 달이 8월, 7월, 9월 순이었으며, PM₁₀, NO₂, CO, SO₂의 월별 농도도 7~9월이 1년 중 가장 낮은 것을 알 수 있다.

PM₁₀의 경우, 한반도 영향 태풍시즌인 7월, 8월, 9월에 농도가 일 년 중 낮게 나타났으며, 겨울철에 점점 증가하여 황사의 영향을 많이 받는 3월과 4월에 농도가 가장 높았다. 그 결과 태풍영향기간 동안의 농도는 태풍이 없었던 달에 비해 7월에 21.3%, 8월에 13%, 9월에 36.5%가 낮은 것으로 나타났다. 이는 Park *et al.* (2012)에서 서울지역 황사 및 고농도 미세먼지 사례를 통해 전반적으로 대기오염물질 배출량이 증가하는 겨울철에 농도가 증가하고, 강우량이 많은 여름철에는 농도가 낮게 나타났다고 보고한 연구결과와 일치한다. 자동차 배기가스나 연료의 고온연소 과정에서 공기 중 질소 성분의 산화에 의해 생성되는 NO₂는 겨울철인 1, 2월과 11, 12월이 높게 나타났으며, PM₁₀과 마찬가지로 강수량이 많은 7월과 8월에 농도가 가장 낮았다. 특히 태풍영향기간 동안 농도 감소율은 9월이 27.3%로 7월(9.3%)과 8월(12.8%)에 비해 2배 이상의 감소율을 보였다. 연료가 불완전 연소를 할 때 발생하는 CO와 연료의 연소과정에서 황 성분이 산화되어 발생하는 SO₂의 월평균 농도 추이에서도 한반도 영향 태풍 시즌이 낮고 겨울철에 높

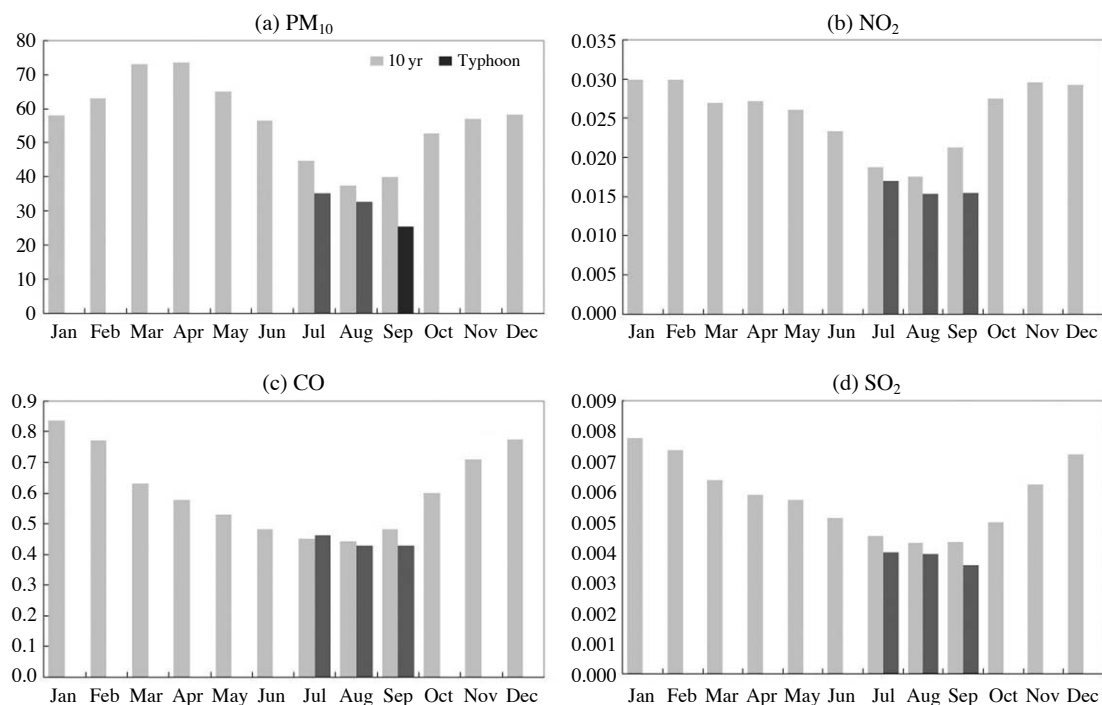


Fig. 2. The monthly average of the pollutant concentration during the normal period (grey) and typhoon period (black) from 2002 to 2011.

은 경향을 보였으나, CO의 태풍영향기간 동안의 7월 농도가 7월 월평균 농도보다 2.2% 더 높게 나타났다. 평균적으로 태풍영향기간에 PM₁₀은 23.7%, NO₂는 17%, CO는 4.4%, SO₂는 12.3% 정도 농도가 낮게 나타났다으며, 태풍영향기간 동안 PM₁₀의 농도 감소가 큰 것을 알 수 있었다.

그림 3은 2002년부터 2011년까지의 월평균 강수량과 태풍이 한반도에 영향을 준 기간에 대한 월평균 강수량이다. 10년 평균 강수량은 7월이 가장 많고, 8월과 9월 순이었으나, 태풍의 한반도 영향 기간 동안 강수량은 8월이 가장 많았고, 9월, 7월 순이었다. 태풍 영향기간에 내린 강수량이 월평균 강수량에서 차지하는 비중은 7월 19%, 8월 45.3%, 9월 45.5%로 8월과 9월에 태풍에 의한 강수가 상당 부분을 차지하는 것으로 나타났다.

3.2 태풍의 영향기간 전후의 대기오염물질 농도 변화

전국적인 강수를 동반한 한반도 영향 태풍에 대해

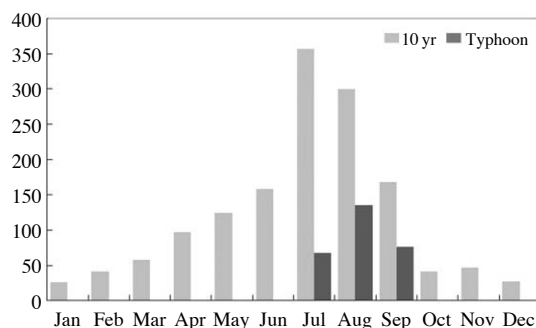


Fig. 3. The monthly variation of average the rainfall during the normal period (grey) and typhoon period (black) from 2002 to 2011.

영향기간 전후의 PM₁₀, NO₂, CO, SO₂ 농도 변화를 살펴보았다. 기술의 편의상 연구 방법에서 설명한 태풍의 영향기간과 영향기간 전날 전국 평균 농도의 차이 (ΔC_1)를 Case 1로 태풍의 영향기간 다음날과 영향기간 전날의 전국 평균 농도 차이 (ΔC_2)를 Case 2로 한다. Case 1을 통해 태풍 기간 동안 강수에 의해 대기

Table 3. The Change of the concentration for Case 1 (ΔC_1).

TCID	Typhoon name	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppm)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)
0208	NAKRI	-1.3	0.002	0.038	0.0001
0215	RUSA	-27.8	-0.009	-0.206	-0.0010
0314	MAEMI	-15.0	-0.005	-0.083	0.0003
0407	MINDULLE	-16.5	-0.003	-0.030	-0.0007
0415	MEGI	-12.6	-0.001	-0.013	-0.0005
0603	EWINIAR	-21.5	-0.008	-0.122	-0.0010
0613	SHANSHAN	-0.9	-0.004	-0.021	-0.0002
0711	NARI	-31.2	-0.006	-0.133	-0.0004
0807	KALMAEGI	-12.8	-0.005	-0.046	-0.0005
1004	DIANMU	-7.2	-0.001	0.005	-0.0004

Table 4. The change of the concentration for Case 2 (ΔC_2).

TCID	Typhoon name	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppm)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)
0208	NAKRI	-15.1	-0.005	-0.015	-0.0014
0215	RUSA	1.7	-0.001	-0.073	-0.0001
0314	MAEMI	22.0	-0.001	0.097	0.0014
0407	MINDULLE	-34.1	-0.010	-0.133	-0.0013
0415	MEGI	-16.6	-0.002	-0.070	-0.0005
0603	EWINIAR	-25.3	-0.010	-0.189	-0.0008
0613	SHANSHAN	12.6	0.007	0.152	0.0011
0711	NARI	-38.7	-0.011	-0.223	-0.0005
0807	KALMAEGI	-19.9	-0.013	-0.079	-0.0014
1004	DIANMU	2.3	0.001	0.057	-0.0001

오염물질의 농도가 어떻게 변화했는지를 알 수 있으며, Case 2는 태풍의 영향 및 강수가 끝난 후에 대기 오염물질의 농도가 어떻게 변화하였는지를 알 수 있다.

표 3과 4에 태풍 별로 각각의 오염 물질의 농도 변화를 나타내었다. 태풍의 영향기간 동안 대기오염물질의 농도가 대부분 감소하였으며(표 3), 특히 PM₁₀의 농도는 10개의 태풍 사례 모두 감소하여 강수에 의해 PM₁₀의 농도가 낮아진다는 선행연구 결과를 확인할 수 있었다(Jeong, 2011). 2002년 제8호 태풍인 NAKRI의 경우, 태풍 영향기간 동안 NO₂, CO, SO₂의 농도가 증가하였으나 태풍의 영향이 끝난 후에도 전국적으로 10.5 mm의 강수량이 내리면서 태풍 영향 다음날 농도가 감소한 것으로 보인다. 태풍기간에는 강수로 인해 대부분 오염 물질의 농도가 감소하였으나, 2002년 제15호 태풍 RUSA, 2003년 제14호 태풍 MAEMI, 2006년 제13호 태풍 SHANSHAN, 2010년 제4호 태풍 DIANMU 등 태풍기간 다음날 오염 물질의 농도가 바로 증가하는 경우도 있었다(표 4). 이는

태풍기간 다음에 강수가 없었기 때문으로 보인다. 이와 반대로 2002년 제8호 태풍 NAKRI는 태풍기간에는 PM₁₀을 제외한 나머지 오염 물질의 농도가 상승하였으나 태풍기간 다음날에 태풍기간보다 더 많은 강수가 내리면서 모든 오염물질의 농도가 감소하였다. 태풍기간 전부터 다음날까지 계속 강수가 있었던 2007년 제11호 태풍 NARI의 경우 태풍기간보다 태풍기간 다음날 더 많은 농도 감소를 보였다. 이를 통해 지속적인 강수가 있을 때 대기 오염 물질의 농도가 더 많이 감소되었음을 알 수 있다.

또한 각각의 오염 물질 별로 태풍의 영향 전후에 농도가 어떻게 변했는지 살펴보면 PM₁₀의 경우, 태풍의 영향기간 전국 평균 농도는 태풍의 영향기간 전날 보다 감소하였으나, 영향기간 다음날 강수가 없었던 2002년 제15호 태풍 RUSA, 2003년 제14호 태풍 MAEMI, 2006년 제13호 태풍 SHANSHAN, 2010년 제4호 태풍 DIANMU의 경우 PM₁₀의 농도가 상승하였다. 2003년 제14호 태풍 MAEMI(그림 4(b))와 2006년 제13호 태풍 SHANSHAN(그림 4(c))의

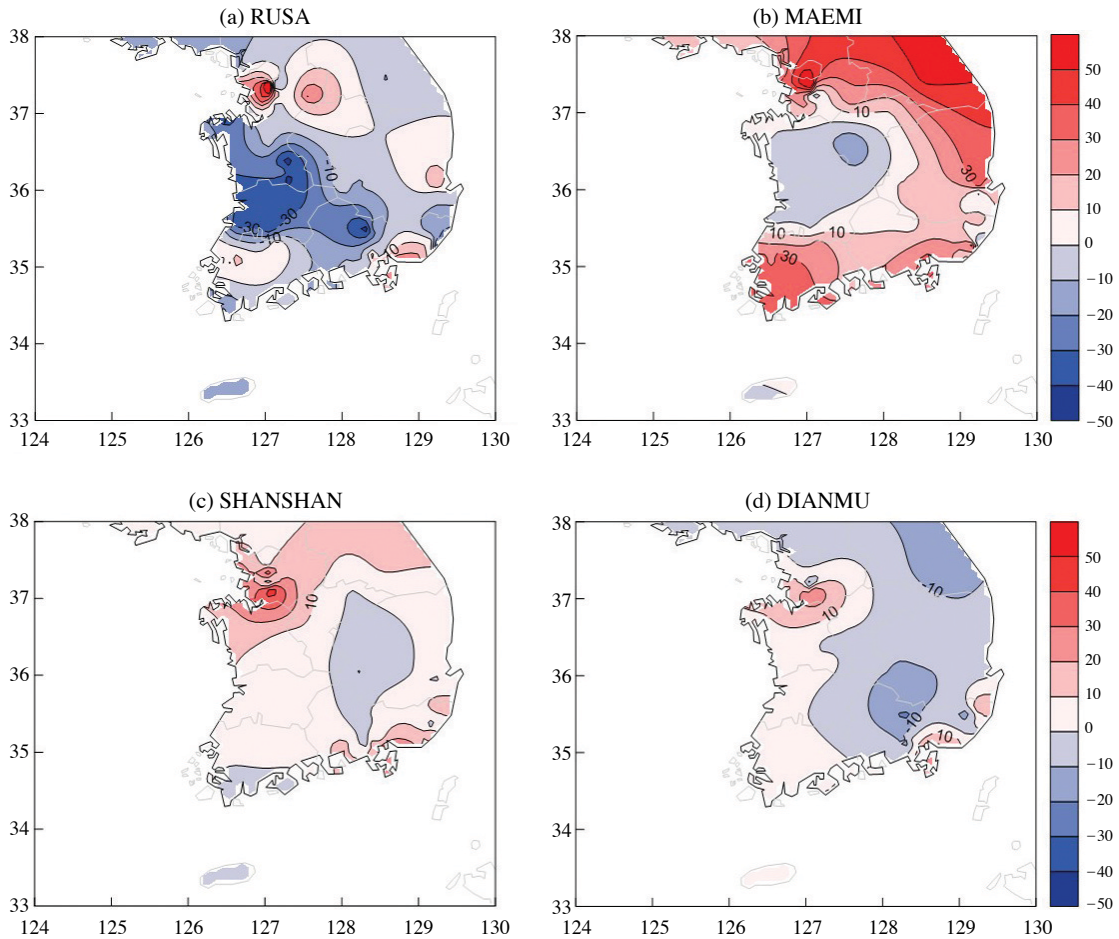


Fig. 4. The increased cases of PM_{10} concentration for ΔC_2 .

경우 강수가 있는 기간에는 농도가 감소하였으나 강수가 끝난 직후 전국 대부분 지역에서 농도가 증가하였으며, 2002년 제15호 태풍 RUSA(그림 4(a))는 수도권과 광주, 부산, 포항 등 대도시를 중심으로 농도가 증가하였고, 2010년 제4호 태풍 DIANMU(그림 4(d))는 서해북부 해상에서 다가오는 기압골의 영향으로 서해안에서 농도가 증가한 것으로 보인다(KMA, 2011b).

NO_2 도 태풍 영향기간 및 태풍의 영향이 끝난 후에 대부분 전국 평균 농도가 감소하였으나, 제13호 태풍 SHANSHAN(그림 5(a))과 2010년 제4호 태풍 DIANMU(그림 5(b))는 강수가 끝난 후 자동차 등록 대수와 통행량이 많은 수도권과 경남 지역의 대도시

를 중심으로 평균 농도가 증가하여 전국 평균 농도가 태풍 영향 전날보다 약간 상승하였다(Oh, 2012).

CO의 경우, 태풍의 영향기간 동안 대기오염물질의 전국 평균 농도가 증가한 태풍은 2002년 제8호 태풍 NAKRI와 2010년 제4호 태풍 DIANMU, 태풍이 지나간 후에 대기오염물질의 전국 평균 농도가 증가한 태풍은 2003년 제14호 태풍 MAEMI와 제13호 태풍 SHANSHAN, 2010년 제4호 태풍 DIANMU이었다. 2003년 제14호 태풍 MAEMI(그림 6(a))는 여수 및 부산을 중심으로 하는 남부지방에서 농도 상승이 나타났다으며, 제13호 태풍 SHANSHAN(그림 6(b))은 수도권을 중심으로 하는 서해안 지역에서 농도가 증가하였고, 2010년 제4호 태풍 DIANMU(그림 6(c))

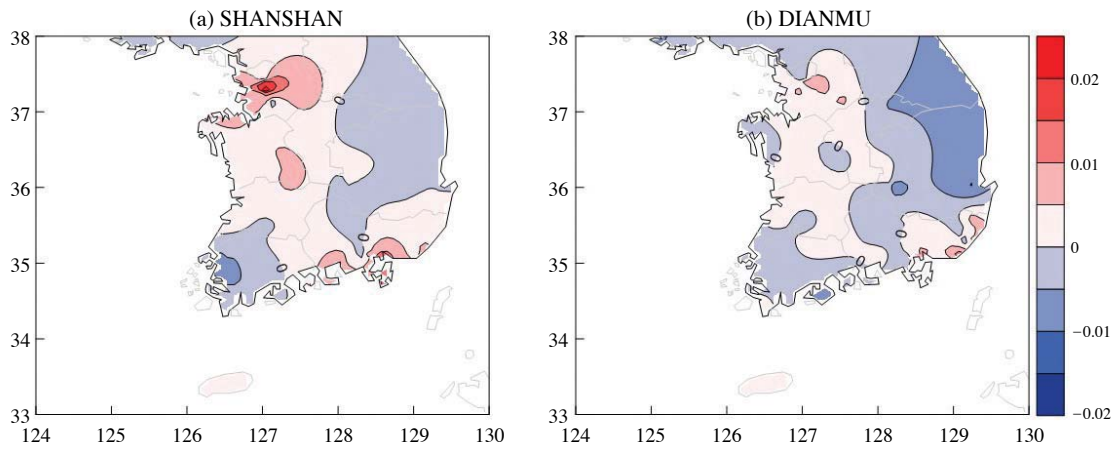


Fig. 5. The increased cases of NO_2 concentration for ΔC_2 .

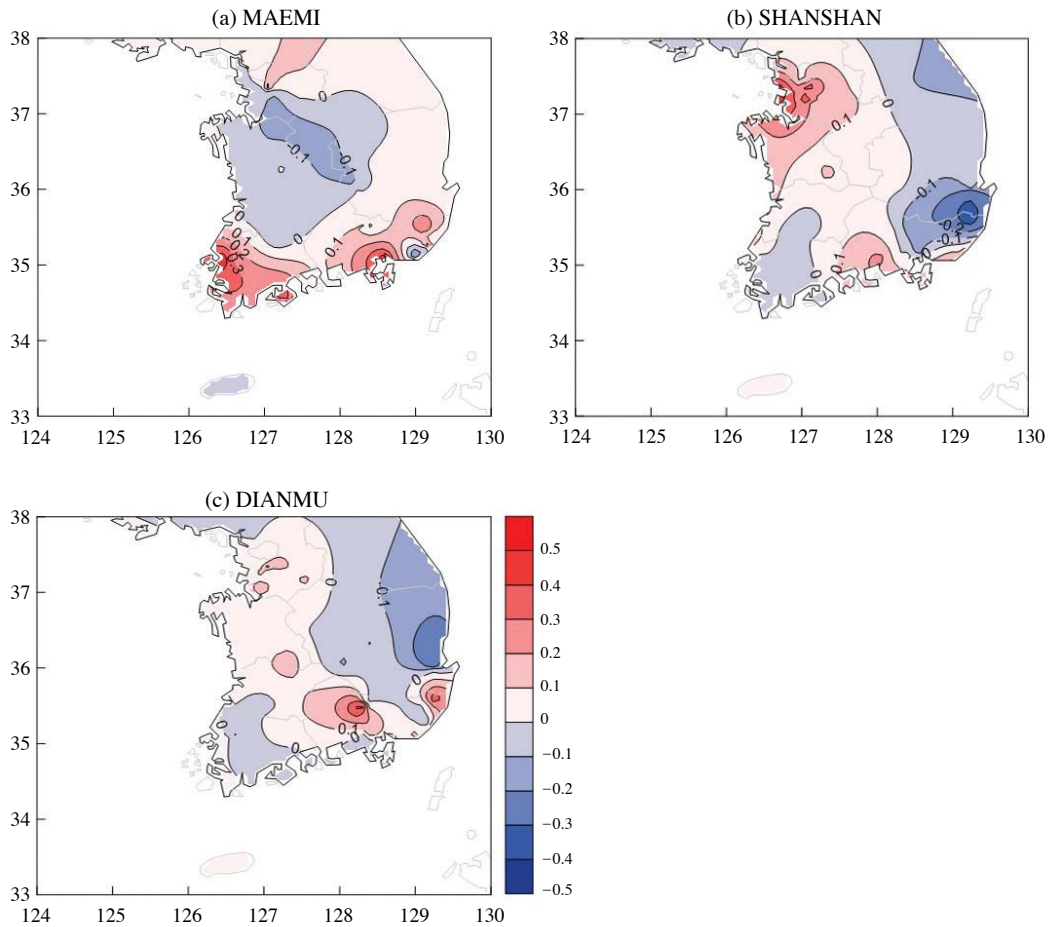


Fig. 6. The increased cases of CO concentration for ΔC_2 .

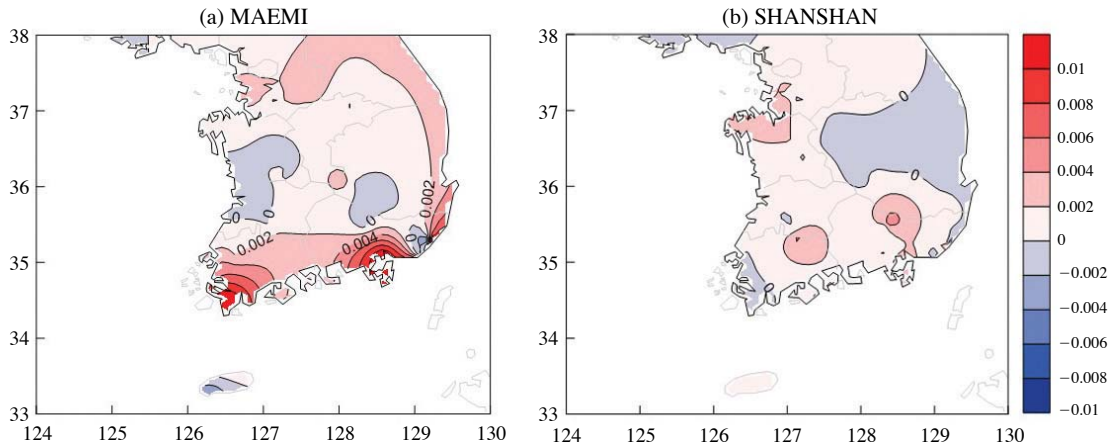


Fig. 7. The increased cases of SO_2 concentration for ΔC_2 .

는 울산을 비롯한 경상남도 지역에서 CO의 농도가 증가하였다.

SO_2 의 전국 평균 농도는 태풍이 지나면서 대부분 감소하였으나, 2003년 제14호 태풍 MAEMI(그림 7(a))는 태풍의 영향기간 및 영향기간 종료 후에 남해안과 동해안을 중심으로 농도가 증가하였는데, 이는 진행경로가 우리나라 전역보다는 남부지역에 상륙하여 동해상으로 빠져나가면서 남해안과 동해안에 고기압이 위치하고, 2~3 m/s의 낮은 풍속(KMA, 2011a)으로 인해 SO_2 의 고농도 현상이 일어난 것으로 보인다(Jeon *et al.*, 1994). 제13호 태풍 SHANSHAN(그림 7(b))는 태풍의 영향기간 동안 전국적으로 강수를 동반하며 농도가 감소하였으나 강수가 동해안 쪽에 집중되면서 강수가 끝난 뒤 서해안과 남해안을 따라 농도가 증가하여 전국 평균 농도가 태풍 영향 전보다 상승한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2002년부터 2011년까지 전국 강수를 동반한 10개의 한반도 영향 태풍을 선정하고, 국립환경과학원의 대기오염 자동측정망 자료와 기상청의 강수량 관측 자료를 이용해 강수에 따른 태풍 전후의 대기 중 오염물질의 농도 저감율을 분석하였다. 한반도 영향 태풍 시준인 7월부터 9월까지 강수량의 34%가 태풍에 의한 것이었으며, 태풍기간의 대기오

염물질 농도가 월별 대기오염물질 농도에 비해 낮게 나타났고, 태풍기간 내 강수와 대기오염물질 농도 감소 사이의 상관관계는 PM_{10} 이 -0.72, NO_2 가 0.5, CO는 -0.63, SO_2 는 -0.42로 NO_2 를 제외한 다른 오염물질에서 음의 상관관계를 보였다. 또한 대기오염물질의 농도변화를 기간별(Case 1: 태풍의 영향기간, Case 2: 태풍기간 다음날)로 나누어 분석한 결과, 강수의 영향이 있는 Case 1이 강수가 끝난 후의 Case 2보다 대기오염물질의 농도가 더 낮았으며, 대기오염물질의 농도 감소율은 PM_{10} , NO_2 , CO, SO_2 순으로 나타났다.

태풍기간 중 강수와 대기오염물질 농도와의 관계를 조사한 결과, 대부분의 태풍에서 영향기간 내에는 강수에 의해 대기질이 개선되었다. 그러나 강수가 끝난 뒤 바로 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 태풍기간 다음날에도 강수가 계속된 경우에는 태풍기간보다 더 많은 농도 감소를 보여 강수량이 많고, 강수의 지속시간이 길수록 대기 오염 물질의 농도가 더 감소하였다. 또한 PM_{10} 의 경우, 강수가 끝난 직후 수도권과 대도시를 중심으로 농도가 증가하거나 서해상에서 다가오는 기압골의 영향을 받은 사례에서 농도가 더 높아졌고, NO_2 와 CO는 자동차 등록대수와 통행량이 많은 대도시를 위주로 농도가 높아졌으며, SO_2 는 고기압 하에서 낮은 풍속일 때 고농도현상이 발생하는 것을 확인하였다.

Lim (2012)은 강수가 대기질에 미치는 영향이 강수의 강도, 지속시간, 풍속 등에 의해 변화한다고 밝

한 바 있으며, 지역적인 강수 및 강도의 차이에 의해서도 변화될 수 있다. 태풍에 의해 수반되는 요인 중에 강수 외에 강풍 또한 대기확산에 의한 대기질 개선에 기여 할 것으로 사료되며, 사전 태풍예보에 따른 교통량의 감소와 그 외의 산업활동의 제약에 따른 대기오염물질 발생량 자체가 저감되어 대기질이 개선되는 가능성도 있으나 영향을 배제한 채 평가하여 향후 이에 대한 연구를 추가하여 대기오염 물질의 농도에 어떠한 기상인자가 더 영향을 미치는 지에 대한 연구를 진행할 예정이다.

본 연구는 최근 10년간 한반도에 영향을 준 태풍에 수반된 강수로 인한 세정효과에 초점을 맞춰 대기질 개선을 정량적 측면에서 분석하였다는 데에 의의가 있다. 또한 최근 이슈가 되고 있는 미세먼지의 경우 여름철에도 고농도 현상 발생할 가능성이 제기되고 있어 여름철 대기질 관리를 함에 있어 활용될 수 있으며, 향후 태풍의 사회경제적 가치평가 연구를 하기 위한 기초 자료로써 재난적 성격이 강한 태풍의 부정적인 측면이 아닌 긍정적인 기능에 대한 인식을 전환시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소의 2013년도 주요사업인 “예보기술 지원 및 활용 연구”사업에 의하여 수행되었습니다.

References

- Bhaskar, B.V. and V.M. Mehta (2010) Atmospheric particulate pollutants and their Relationship with Meteorology in Ahmedabad, *Aerosol Air Qual. Res.*, 10, 301-315.
- Chate, D.M., P.S.P. Rao, M.S. Naik, G.A. Momin, P.D. Safai, and K. Ali (2003) Scavenging of aerosols and their chemical species by rain, *Atmos. Environ.*, 37, 2477-2484.
- Chate, D.M. and T.S. Pranesha (2004) Field Studies of aerosols by rain events, *J. Aerosol Sci.*, 35, 695-706.
- Jeon, B.I., Y.K. Kim, and H.W. Lee (1994) On the Characteristics of the SO_2 Concentration Variation in Pusan, Korea, *J. KAPRA*, 10(4), 245-251. (in Korean with English abstract)
- Jeong, W.S. (2011) A study on characteristics of air quality in Gwang-ju area, Doctor's thesis at Chosun University, 166 pp. (in Korean with English abstract)
- KMA (2011a) Typhoon White Book. National Typhoon Center of KMA, 345pp.
- KMA (2011b) Analysis Report of Typhoon 2010, National Typhoon Center of KMA, 359 pp.
- KMA (2012) Analysis Report of Typhoon 2011, National Typhoon Center of KMA, 299 pp.
- Kwon, Y.S., D.W. Song, and K.H. Kang (1996) Studies on the Transportation and Wet Deposition of Air Pollutant (SO_2) by Modeling and Precipitation Analysis in Wonju City, *Anal. Sci. & Technol.*, 9(1), 98-106. (in Korean with English abstract)
- Lee, T.J., D.H. Shin, J.H. Cho, J.Y. Baek, and D.S. Kim (2009) A study on air pollutant concentration change cause by precipitation using data of air pollution monitoring system for 1998-2007, *Proceeding of the 49th Meeting of Korean Soc. Atmos. Environ.*, 506-507. (in Korean with English abstract)
- Lim, D.Y., T.J. Lee, and D.S. Kim (2012) Quantitative estimation of precipitation scavenging and wind dispersion contributions for PM_{10} and NO_2 using long-term air and weather monitoring database during 2000 ~ 2009 in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(3), 325-347. (in Korean with English abstract)
- Min, K.D. and G.H. Min (2008) *Essentials of Meteorology*, CENGAGE Learning, p. 301.
- Mircea, M., S. Stefan, and S. Fuzzi (2000) Precipitation scavenging coefficient: influence of measured aerosol and raindrop size distributions, *Atmos. Environ.*, 34, 5169-5174.
- NIER (2011) Annual report of air quality in Korea 2011, National Institute of Environmental Research (NIER) of MOE, 444 pp.
- OH, S.M. (2012) The washout effect of summertime rainfall on air pollutants(O_3 , CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10}) over South Korea, Master's thesis at Ewha Womans University, 33 pp. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., K.C. Choi, and Kasahara Mikio (1996) Characterization of Atmospheric Aerosols Scavenged by Rain Water, *J. KAPRA*, 12(2), 159-165. (in Korean with English abstract)
- Park, J.K., B.S. Kim, W.S. Jung, E.B. Kim, and D.G. Lee (2006) Change in statistical characteristics of typhoon affecting the Korean Peninsula, *Atmos. of Korean Meteorol. Soc.*, 16(1), 1-17. (in Korean with English abstract)

Park, S.M., K.J. Moon, J.S. Park, H.J. Kim, J.Y. Ahn, and J.S. Kim (2012) Chemical characteristics of ambient aerosol during Asian Dusts and high PM episodes at Seoul intensive monitoring site in 2009, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 28(3), 282-293. (in Korean with English abstract)

Plaude, N.O., E.A. Stulov, I.P. Parshutkina, Yu.B. Pavlyukov,

and N.A. Monakhova (2012) Precipitation effects on aerosol concentration in the atmospheric surface layer, Russ. Meteorol. Hydrol., 37(5), 324-331.

Wesely, M.L. and M. Hicks (2000) A review of the current status of knowledge on dry deposition. Atmos. Environ., 34, 2261-2282.