

기단성 뇌우 발생시 지표오존농도의 변화 특성

전 병 일

신라대학교 환경공학과

(2003년 1월 22일 접수; 2003년 4월 22일 채택)

Characteristics of the surface ozone concentration on the occurrence of air mass thunderstorm

Byung-II Jeon

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

(Manuscript received 22 January, 2003; accepted 22 April, 2003)

This study was performed to research ozone concentration related to airmass thunderstorm using 12 years meteorological data(1990~2001) at Busan. The occurrence frequency of thunderstorm during 12 years was 156 days(annual mean 13days). The airmass thunderstorm frequency was 14 days, most of those occurrence at summertime(59%). In case August 4, 1996, increase of ozone concentration was simultaneous with the decrease of temperature and increase of relative humidity. In case July 23, 1997, ozone concentration of western site at Busan increased, while its of eastern site decreased as airmass thunderstorm occurred(about 1500LST). It is supposed that these ozone increases are the effect of ozone rich air that is brought down by cumulus downdrafts from height levels where the ozone mixing ratio is larger. Thunderstorms can cause downward transport of ozone from the reservoir layer in the upper troposphere into planetary boundary layer(PBL). This complex interaction of source and sink processes can result in large variability for vertical and horizontal ozone distributions. Thus a variety of meteorological processes can act to enhance vertical mixing between the earth's surface and the atmospheric in the manner described for thunderstorm.

Key words : Airmass thunderstorm, Ozone concentration, Ozone-rich air

1. 서 론

뇌우는 상승기류의 발생원인에 따라 열뇌(기단성 뇌우), 계뇌(전선성 뇌우), 와뇌(저기압성 뇌우)로 분류할 수 있다. 열뇌는 한여름의 오후 내륙이나 산악에서 발생하는 뇌우로 강한 일사에 의해 지표부근의 습한 공기가 따뜻해져 열적 불안정으로 상승하여 형성된 뇌우를 말하고, 계뇌는 성질이 다른 기단(온난한 기단과 차가운 기단)의 경계에서 발생하는 뇌우이며, 와뇌는 발달한 저기압이나 태풍 주위의 강한 상승기류에 의해 발생하는 뇌우이다.¹⁾

뇌우에 관한 국내의 연구로는, 이원²⁾이 서울지방에서 발생한 뇌우를 구조적인 면에서 분석하였고, 정진락³⁾은 뇌우가 발생한 날의 오산 고층기상자료

를 이용하여 안정도지수, 자유대류고도 및 혼합비를 분석하여 경인지역의 뇌우예보법을 개발한 바 있으며, 변희룡과 조석준⁴⁾은 중부지역의 하계 뇌우의 특성 및 그 예보법에 대해 연구하였고, 변우남⁵⁾은 중부 내륙지방에서 발생하는 뇌우와 안정도와와의 관계를 연구하였고, 이홍주⁶⁾는 하계 기단성 뇌우 발생시 풍향, 풍속의 예보법 등을 연구한 바 있다. 이승호⁷⁾는 중부지방을 중심으로 하계에 발생하는 뇌우의 지리적 분포특성과 발생시각별, 강수강도별, 지속시각별 특징을 파악하였다. 허복행 등⁸⁾은 우리나라 중부에서 하계에 발생하는 기단성 뇌우의 종관 및 열역학적 특성을 밝혔고, 김경익과 이홍란⁹⁾은 광주지역에서 발생한 하계 기단 뇌우의 발달기구를 허복행 등⁸⁾과 비슷한 방법으로 연구한 바 있다. 그리고 변희룡 등¹⁰⁾은 여름철 우박재해의 발생과 관련해 뇌우의 발생에 관해 논한 바 있다. 주로 국내의 연구는 뇌우의 발생빈도에 관한 통계학적 고찰과 안정

Corresponding Author : Byung-II Jeon, Dept. of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone : +82-51-309-5056
E-mail : bijeon@silla.ac.kr

도지수를 이용한 예보법 개발 그리고 기단성 뇌우의 열학적 특성과 발달기구에 관련된 연구에 국한되어 있다.

대류권에서의 연직혼합은 평균 약 1개월 정도가 걸리나, 뇌우와 같은 활성 대류가 있을 때는 1시간 내에 연직수송이 일어날 수 있다고 하였다.^{11,12)} 뇌우의 기저로 내려오는 공기는 증발에 의해 냉각되어 주위공기보다 무겁게 되며, 중력에 의해 가속된다. 또한 지면에 도달하는 하강기류는 모든 방향으로 퍼지면서, 차갑고 빠른 지표풍으로 변하여 뇌우 발생지역 5~10mile에 영향을 미치고, 지표풍의 풍속은 종종 25~35mile/h에 이르며, 뇌우의 하강기류는 주위공기보다 더 차갑고 더 습하게 된다.¹³⁾ 뇌우 발생시 일어나는 연직대류는 대기의 화학적 조성에 중요한 인자이며, 뇌우가 발생하였을 때 오염물질이 대기경계층에서 10km까지 수송되는데 걸리는 시간은 한 시간 안에 이루어질 수 있다.¹¹⁾ 또한, 비정상적인 오염농도를 가진 물질이 자유대기에서 측정되었다면 연직대류(deep convection)가 중요한 원인일 가능성이 있다.¹⁴⁾ Dickerson et al.¹⁵⁾은 뇌우가 빠른 연직 수송의 수단이 될 수 있다는 가정 하에 미국 중서부의 뇌우 근처에서 항공기를 이용해 일산화탄소, 탄화수소류, 오존, 반응성화합물을 측정하였고, 그들의 농도는 주변지역보다 폭풍의 외향류(out-flow)지역에서 높은 값을 나타내었다. Ridley et al.¹⁶⁾은 뇌우 발생시 미국 New Mexico 주 상공에서 항공기를 이용하여 활성질소(active nitrogen)의 생성에 대해서 관측한 바 있다. Kirchhoff¹⁷⁾는 아마존강 유역의 특별관측에서 오존 농도의 급격한 상승과 하강은 뇌우와 관련이 있다고 하였으며, Aneja et al.¹⁸⁾은 뇌우 발생시 하강기류 중에 포함된 수증기는 오존형성의 중요한 기인물질인 단주기이면서 고활성 라디칼($HO_x=HO+HO_2$)을 제거할 수 있다고 하였다.

부산연안역의 지표오존농도 연구는 전병일¹⁹⁻²¹⁾에 의해 연속적으로 연구된 바 있다. 해안지역의 고농도 오존 발생은 강한 태양복사에너지에 의한 광화학반응의 활성화, 바닷물의 수증기 중 산소원자와 OH라디칼의 생성이 주 요인이라 하였고, 새벽의 야간 고농도 오존은 강한 바람에 의한 풍속의 증가에 의해 상층의 잔존 오존이 지표오존을 상승하였다고 하였다. 또한 대기경계층의 잔존 오존이 연직하강하여 지표오존농도를 상승하게 한 증거를 기상관측자료를 이용하여 입증한 바 있다. 김유근과 홍정혜²²⁾는 야간 지표오존의 증가가 중규모 현상에 의한 이류현상이나 야간역전층 파괴에 의한 혼합층 상부에 모인 오존의 연직혼합과 같은 공간적 이동이 일어

나기 어려운 저기압 기상장에서 더 많이 발생한다고 하였다.

그동안의 오존에 관한 연구는 (1) 대류권 광화학에서 오존의 중요성²³⁾ (2) 대류권 오존의 생성과 소멸²⁴⁾ (3) 자유대기에서의 오존의 분포라고 할 수 있다.^{25,26)} 대기권에서 뇌우의 발생이 지표오존의 생성과 소멸에 어떠한 영향을 미치는지를 연구한다는 것은 매우 의미가 있다고 할 수 있다. 그리고 부산을 비롯한 우리나라에서는 기단성 뇌우의 발생시 대류에 의한 상층공기의 하강에 의한 고농도 오염물질이 지표의 오존농도에 미치는 영향에 대해서 연구한 예는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부산지역에 발생한 뇌우의 발생과 현황에 대해 먼저 조사를 하고, 기단성 뇌우로 분류된 1996년 8월 4일과 1997년 7월 23일의 경우를 사례로 하여 지표오존농도의 변화 특성을 고찰함으로써 기단성 뇌우와 지표오존농도와의 관계를 규명하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

본 연구는 부산지방기상청에서 관측한 최근 11년간(1990~2001)의 자료를 사용하였으며, 뇌우의 종류를 구별하기 위해서 부산지방기상청의 일별 기상통계표와 일본기상청 발행의 지상일기도, 850hPa, 700hPa일기도를 사용하였다. 또한 사례일로 선정된 1996년 8월 4일과 1997년 7월 23일은 부산지방기상청에 소장된 각종 기상요소의 자기기록지를 이용하였고, 지표오존농도의 변화특성을 고찰하기 위해 환경부 산하 부산시 대기오염자동측정소에 측정된 시간별 오존농도를 사용하였다. 기단성 뇌우의 선정기준은 ①고기압의 중심이나 그 영향권 내에서 발생하고, ②부산지역 이외의 다른 장소에서 이동해 온 것이 아니며, ③오전 9시에 하층운량이 5/10미만, 오후에 적란운이 발생한 경우로 하였다.²⁷⁾

3. 결과 및 토의

3.1. 뇌우의 발생 현황

Table 1은 1990년부터 2001년까지 12년간 부산지역에 발생한 뇌우를 월별로 나타낸 것이다. 조사기간 중 전체 뇌우일수는 156일이었으며, 이 중 기단성 뇌우가 발생한 날은 14일이다. 연도별 뇌우의 발생빈도는 1995년, 1998년과 2001년에 18일로 가장 많이 발생하였고, 다음으로 1997년이 17일이었으며, 가장 적게 발생한 해는 1990년의 7일로 그 편차가 크게 나타났다. 월별로 보면 7월이 41일, 8월이 39일로 하계(6, 7, 8월)가 차지하는 비율이 전체의 약 59%였는데, 이는 우리나라 뇌우가 여름에 60%정도가 발생한다는 이승호⁷⁾의 연구결과와 거의 일치한

기단성 뇌우 발생시 지표오존농도의 변화 특성

다. 기단성 뇌우의 월별분포는 5월에 5일, 7월에 4일, 8월에 3일 발생하였다. 김경익과 이홍란³⁾에 의한 광주지방의 10년간(1981~1990) 기단성 뇌우의 발생일 38일과 허복행 등⁸⁾에 의한 중부지방(오산, 수원, 성남)의 10년간(1981~1990)의 기단성 뇌우 발생일 36일에 비해 현저히 낮은 발생일을 나타내었는데, 이는 내륙지방과 해안지방의 지형적인 차이에 의한 특성으로 판단된다. Table 2는 부산지역에서 발생한 기단성 뇌우의 발생시각을 나타낸 것으로, 13시부터 21시까지 넓게 분포하고 있으며, 지면가열에 의한 대류운이 발달할 수 있는 시간적 여유가 필요하기 때문에 17시 이후에 대부분 발생하고 있는 것으로 나타났다.

3.2. 1996년 8월 4일의 경우

3.2.1. 기상상태

Fig. 1(A)은 1996년 8월 4일의 09시 지상일기도이다. 북태평양기단에서 분리된 1014hPa의 고기압이 일본 남해상에 위치하고, 그 북단이 우리나라 남부지방에 영향을 미치고 있다. 북부지방에는 일본 북해도지방에서 발달한 한랭전선의 말단이 통과하고 있다. 따라서 전반적으로 부산을 비롯한 남부지방은 북태평양 고기압의 가장자리에 있어 고온다습한 공기 덩어리의 영향을 받고 있으므로, 일중 태양복사에

의한 광화학반응에 의해 오존농도가 증가할 수 있고, 또한 지표의 가열로 대류성 구름이 발달할 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있다고 할 수 있다. 이날 부산지방의 최고기온은 34.2℃, 최저기온은 26.2℃로 일교차가 6℃이었으며, 최저기온이 25℃이상인 열대야를 기록하였다. 일사량은 21.30MJ/m², 일조시간은 11.3시간, 상대습도 81.5%로 기온과 습도가 높은 날씨였으며, 대류운에 의한 소나기가 18시37분부터 19시 5분까지 28분 동안 0.2mm가 내렸다. 뇌우 현상은 18시 19분부터 18시 59분까지 40분간과 19시 8분부터 19시 25분까지 17분간 각각 천둥현상이 있었고, 20시 10분부터 20시 15분까지 5분 동안 번개가 발생하였다. 따라서 18시 19분부터 20시 15분

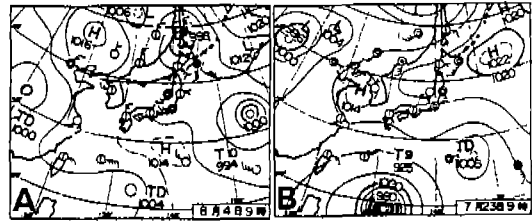


Fig. 1. Surface weather chart at 0000UTC August 4, 1996(A) and July 23, 1997(B).

Table 1. Monthly and yearly occurrence frequency of thunderstorm at Busan from 1990 to 2001. The values in parentheses denotes a occurrence frequency of airmass thunderstorm

Month Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1990					3(1)		2	1	1				7(1)
1991			1	1	3(1)	2	5	1	1		1		15(1)
1992					4(3)	1	1	1			1		8(3)
1993			1	1	1	2	4	3	1				13
1994			1	2	2		1(1)	3	1(1)		1		11(2)
1995		1		1	2	1	6(1)	4(1)			3		18(2)
1996		2			1		2	2(1)		1			8(1)
1997				1(1)	8	2	2(1)	2		1	1		17(2)
1998		1		4		2	2	9					18
1999							2	3	2	1			8
2000			1	1	1		6	5	1				15
2001		1				2	8(1)	5(1)	1	1			18(2)
Total		5	4	11(1)	25(5)	12	41(4)	39(3)	8(1)	4	7		156(14)

Table 2. The frequency of air mass thunderstorm at Busan per hour from 1991~2001

Hour	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17~18	18~19	19~20	20~21	21~22
Number		1	1	2	1	2	3	2	2	

까지 약 2시간 동안 뇌우현상이 있었다고 할 수 있다.

Fig. 2는 1996년 8월 4일 뇌우가 있었던 날의 기온과 상대습도 그리고 기압의 변화를 나타낸 자기기록지이다. 기온과 상대습도는 서로 반비례 관계를 잘 나타내고 있다. 기온의 경우 12시부터 18시까지 33°C 이상의 고온상태를 유지하다가, 18시 이후 기온이 하강하는 경향을 나타내고 18시 50분경부터 19시 20분까지 기온이 급격히 하강하고 있는데, 이는 소낙성 강우와 상층공기의 유입에 의한 것으로 판단되며, 특히 19시를 전후하여 2°C정도가 하강하였다. 기온이 내려가는 것은 하강기류가 존재할 때 증발의 잠열을 빼앗기기 때문으로 판단되며, 차가와진 하강기류는 지면에 도착 후 지면으로 퍼지게 되고, 이 냉기의 선단(先端)이 돌풍전선(gust-front)이 된다.²⁸⁾ 상대습도의 분포를 보면 15시 15분까지 66% 정도의 습도를 계속 유지하다가, 이후 4~5% 하강하였으며, 18시경부터 급격히 상승하였고, 18시 50분경에 67%로 일시적으로 하강한 후, 19시 25분경에 87%로 20%의 급격한 상승이 있었다. 이는 기온에서 언급한 바와 같이 19시를 전후하여 상층의 공기가 하층으로 하강하였다는 것을 나타내고 있다. 기압의 변화를 보면, 15시부터 18시 20분까지 1001hPa를 유지하다가, 그 이후 1hPa의 기압 상승이 있었다. 대체로 뇌우가 발생할 때, 일시적으로 기압이 상승하는 경향이 있으나, 본 연구에서는 다른 결과가 나타났다. 이는 뇌우에 의한 영향보다는 기압의 일변화에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

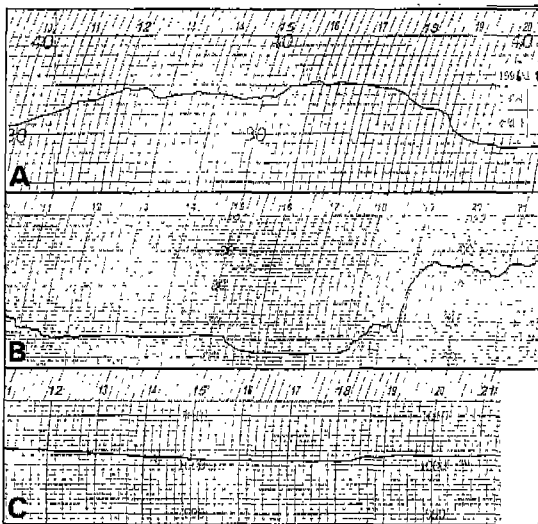


Fig. 2. Variation of air temperature(A), relative humidity(B) and air pressure(C) on August 4, 1996.

Fig. 3은 1996년 8월 4일 뇌우가 있었던 날의 풍향과 풍속의 변화를 나타낸 자기기록지이다. 먼저 풍향을 보면 11시 40분경까지 북서풍계열의 바람이 불다가 12시 15분경부터 남서풍계열의 바람이 불고 있다. 이는 해풍이 이 시각부터 유입되고 있다는 것을 시사하고 있다. Fig. 2에서 12시 40분부터 기온이 하강한 것에서도 확인할 수 있다. 남풍계열의 해풍이 18시 10분까지 계속해서 유입되었고, 이후 풍향이 반시계방향으로 회전하면서 19시경에는 북북동이 불었으며, 19시 30분에는 동북동풍, 20시경에는 북풍이 나타났다. 풍속을 보면, 해풍이 유입될 때는 5~10m/s의 풍속이 계속되었으며, 18시경에는 5m/s이하의 일시적인 하강이 있었고, 뇌우가 발생한 시간대인 18시 19분부터 19시 25분까지 풍속의 변화는 3~11m/s 사이로 풍속의 변동폭은 매우 컸다. 특히 19시경에는 11m/s 정도의 강풍이 불었는데, 이는 앞에서 언급하였듯이 돌풍전선이 발생한 것으로 보인다. 따라서 뇌우가 발생한 시간에 반시계방향의 풍향 변화가 있었고 풍속의 변동폭이 매우 컸다.

3.2.2 오존농도의 변화

Fig. 4는 1996년 8월 4일 부산지역 7개 지점의 오존농도 일변화를 나타낸 것이다. 대부분의 지역에서 7시경에 최저농도를 기록한 후, 오존농도는 급상승하여 13시(대연동, 범천동, 연산동), 15시(광복동), 16시(동삼동, 덕천동), 17시(감전동)에 각각 최고농도를 나타내었다. 대체로 부산의 동부에 위치한 대연동, 범천동, 연산동에서 최고농도를 나타낸 시각이 빨랐고 서부지역으로 갈수록 늦게 나타났다. 그런데 대부분의 지역에서 최고농도를 나타낸 시각 이후 오존농도가 하강하다가 다시 상승하는 경향을

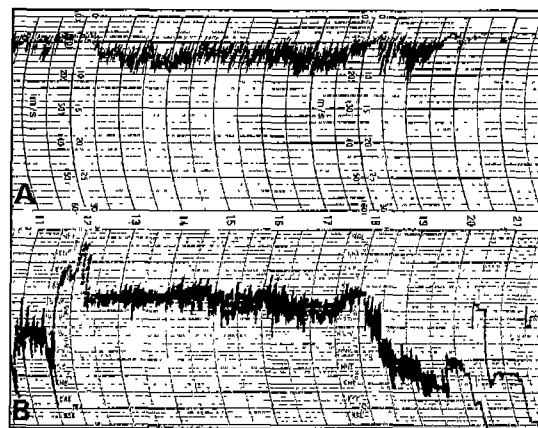


Fig. 3. Variation of wind speed(A) and wind direction(B) on August 4, 1996.

기단성 뇌우 발생시 지표오존농도의 변화 특성

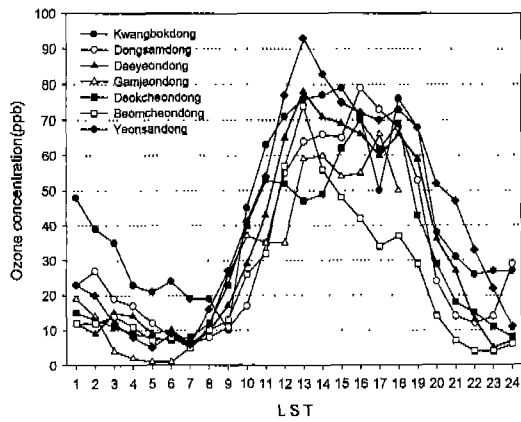


Fig. 4. The diurnal variation of ozone concentration on August 4, 1996.

나타내고 있다. 광복동은 17시 50ppb에서 18시에 76ppb로, 동삼동은 15시 65ppb에서 16시 79ppb로 상승하였으며, 대연동은 17시 60ppb에서 18시 66ppb로, 감전동은 16시 55ppb에서 17시 66ppb로, 덕천동은 17시 62ppb에서 18시 69ppb로, 범천동은 17시 34ppb에서 18시에 37ppb로, 연산동은 17시 70ppb에서 18시 73ppb로 상승하였다.

광복동, 대연동, 덕천동, 범천동, 연산동 등 5개 지역은 18시에 농도상승이 있었으며, 감전동은 17시에 동삼동은 16시에 농도상승이 있었다. 이는 일반적인 부산지역의 오존농도 일변화와는 다른 양상을 나타내는 것이다. 즉 7~8시경 최저농도를 나타낸 후 15시경에 최고농도를 나타내고, 그 후 지속적으로 감소하는 것이 부산지역의 오존농도 일변화 경향이다.²⁹⁾ 그런데 13시경에 최고농도를 나타내고 18시경에 다시 2차 고농도를 나타내었다는 것은 오존농도상승에 기여하는 또 다른 현상이 이 시간대에 나타났다는 것을 의미한다. 18시경은 광화학반응에 의한 오존농도의 생성이 있었다고 보기 어렵다. 그리고 타 지역으로부터 이류, 수송되어 오존농도가 상승할 가능성이 있다고 할 수 있지만, 위에서 기술한 풍향에서 볼 수 있듯이 일중 계속해서 남풍계열의 해풍이 발생하였기 때문에 오존이 수송되었다고는 볼 수 없다. 그렇다면 어떤 원인에 의해 농도의 상승이 있었을까? Fig. 2와 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 18시경에 기온의 하강과 상대습도의 상승, 그리고 풍향과 풍속의 변화가 있었다. 이와 같이 대류운의 발달과 함께 뇌운의 생성으로 상승기류와 하강기류가 공존하는 대류운이 생성되었고, 특히 이 시간대에 하강기류에 의해 상층에 잔존하였던 공기가 하강하여 일시적으로 오존농도를 증가시킨 것이라고 볼 수 있다.

Kirchhoff¹⁷⁾는 1985년 7월 19일의 아마존강 유역의 특별관측에서 06시의 급작스러운 상승은 적은 기둥(cumulus tower)에서의 하강기류에 의해 대기경계층에 잔존하던 고농도의 오존이 하강하였기 때문이라고 하였다. Dickerson et al.¹⁵⁾은 뇌우가 대류권계면에 도달하면 오존이 풍부한 성층권공기가 유입되어, 약 14km에서 오존농도가 500ppb였다고 가정하면 대기경계층의 농도가 81ppb정도가 되려면 4%가 유입되었다고 하였다. Darby et al.³⁰⁾은 1999년 6월 22일 미국 테네시 주의 Nashville에서 돌풍전선이 통과한 후 지표오존농도가 증가한 것은 약 400m 상공의 잔존 오존층의 연직하향에 의한 것이라고 하였다.

이러한 변화를 확인하기 위해서는 대규모의 운동에 의한 연직순환 및 수송에 의한 영향에 대한 연구가 필요하고, 또한 수치모델에 의한 연직수송을 정량적으로 규명할 필요가 있다. 본 사례연구 대상일에 18시경의 일시적인 오존농도 상승현상이 성층권 오존의 유입에 의한 것인지 아니면 대기경계층의 오존이 하강되었는지는 연직적인 오존농도자료가 없어 확실하게 설명하기는 어렵다. 다만 지상에서의 오존공급이 없었다고 가정한다면, 뇌우 발생시 하강기류에 의해 상층에 있던 공기가 하강되어 오존농도가 상승하였다고 볼 수밖에 없다.

3.3. 1997년 7월 23일의 경우

Fig. 1(B)는 1997년 7월 23일 09시 지상일기도를 나타낸 것이다. 우리나라는 북태평양 기단의 영향을 전반적으로 받고 있으며, 서해상에는 북태평양 기단에서 분리된 1014hPa의 고기압이 위치해 있다. 따라서 부산을 비롯한 남부지방은 고온다습한 북태평양 고기압의 영향을 받고 있어 광화학반응과 대류운이 형성될 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있다고 할 수 있다. 이날 부산지방의 최고기온은 31.5℃, 최저기온은 25.0℃로 일교차가 6.5℃였으며, 일사량은 15.00 MJ/m², 일조시간은 7.1시간, 상대습도 85%로 기온이 높고 습한 날씨였으며, 대류운에 의한 소나기가 11시58분부터 12시 15분까지 17분 동안 1.5mm 내렸고, 15시 15분부터 15시 30분까지 15분간 뇌우가 발생하였다.

Fig. 5는 1997년 7월 23일 뇌우가 발생한 날의 기온과 상대습도 그리고 기압의 변화를 나타낸 자기기록지이다. 기온을 보면, 11시까지 상승하다가 11시 40분경부터 급격한 하강을 나타내고 있다. 이는 11시 58분부터 내린 소나성 강우에 의한 것으로 보이며, 이후 기온은 계속 상승하여 14시 42분에 최고기온을 나타내었고, 이후 16시 20분까지 약 3℃ 정도의 하강을 나타내었다. 이는 15시 15분부터 15시 30

전 병 일

분까지 나타났던 뇌우의 영향으로 판단된다. 상대습도를 보면, 소낙성강우가 있었던 12시부터 18% 정도의 급격한 상승을 나타내었고, 상승과 하강을 반복하였다가, 뇌우가 발생하기 바로 직전 10%의 상승이 있었다. 1996년 8월 4일과 같이 뇌우가 발생하였을 때, 기온의 하강과 상대습도의 상승이 있었다. 기압의 변화를 보면, 소낙성강우가 있었을 때, 일시적 기압의 상승과 하강이 있었으며, 뇌우가 발생하였을 때 기압은 거의 변화가 없었다.

Fig. 6은 1997년 7월 23일 뇌우가 발생한 날의 풍향과 풍속의 변화를 나타낸 자기기록지이다. 우선 풍향을 보면, 소낙성강우가 있었던 12시경에 일시적으로 남서풍에서 동남동풍의 풍향변화가 있었으나 전반적으로 남서풍 계열의 바람이 15시 15분경까지 지속적으로 나타났다. 이후 풍향이 급변하여 15시 30분부터는 동풍계열의 바람이 계속해서 나타났다. 즉 뇌우가 발생한 이후부터 남남서풍→북동풍→동풍의 시계방향의 풍향 변화가 나타났다. 풍속을 보면, 소낙성강우가 나타났을 때(11시 58분~12시 15분) 일시적 하강과 상승이 연속적으로 나타났으며, 이후 5m/s이하의 값을 나타내다가, 뇌우 발생시각(15시 15분~15시 30분)에 3m/s의 일시적 하강이 20여분 간 나타났다.

Fig. 7은 1997년 7월 23일 뇌우가 발생한 날의 부산지역 6개 지역 오존농도의 일변화를 나타낸 것이다. 오전 10시까지 대연동과 동삼동을 제외하고 4개 지점(광복동, 감전동, 덕천동, 신평동)은 20ppb미만의 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 4개 지점 중 광

복동을 제외하고 3개 지점은 11시 이후 농도는 급상승하여 감전동은 14시에 45ppb, 덕천동은 15시에 64ppb, 신평동은 14시에 39ppb를 나타내었다. 새벽과 오전에 불규칙한 농도변화를 나타내었던 대연동은 4시에 38ppb, 11시에 46ppb, 19시에 67ppb 세 번의 고농도를 나타내었으며, 동삼동은 새벽과 오전에 40ppb에 달하는 농도를 나타내었고 12시 16ppb에서 그 이후 급상승하여 18시에 83ppb, 20시에 84ppb를 나타내었다.

소낙성강우가 있었던 12시에는 신평동을 제외하고 오존농도의 하강현상이 있었으며, 특히 덕천동에서는 17ppb, 동삼동에서는 10ppb가 하강하였다. 뇌우현상이 있었던 15시 이후의 오존농도변화는 계속해서 농도가 상승하는 지역(광복동, 대연동, 동삼동)과 하강하는 지역(감전동, 덕천동, 신평동)으로 나눌

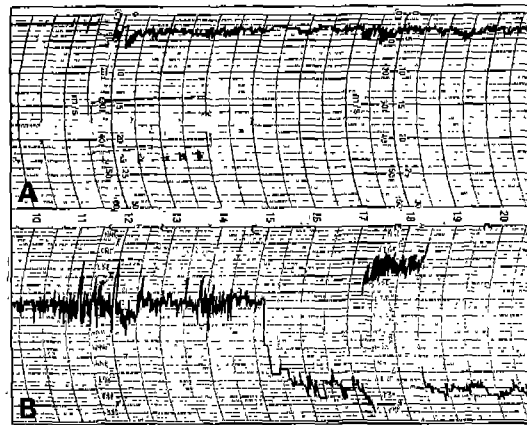


Fig. 6. Variation of Wind speed(A) and wind direction(B) on July 23, 1997.

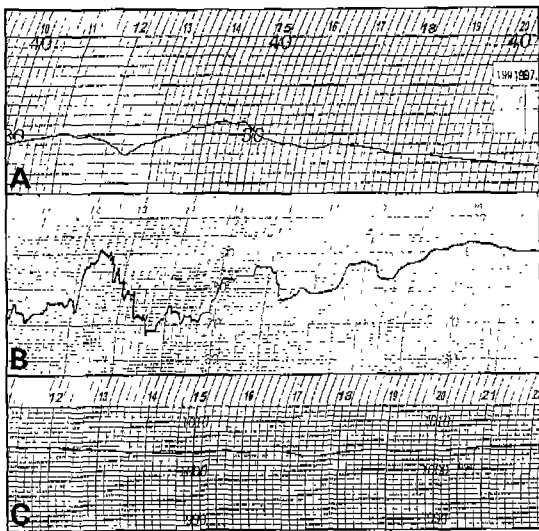


Fig. 5. Variation of air temperature(A), relative humidity(B) and air pressure(C) on July 23, 1997.

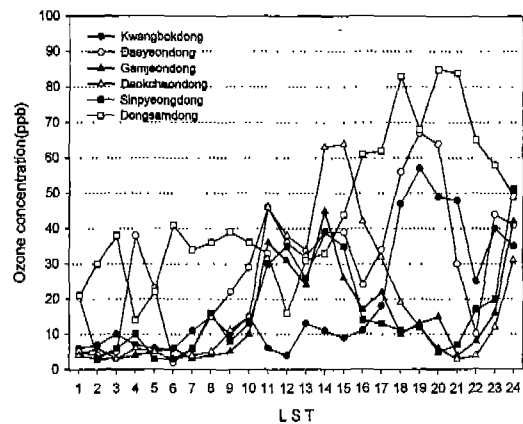


Fig. 7. Variation of ozone concentration on July 23, 1997.

기단성 뇌우 발생시 지표오존농도의 변화 특성

수 있다. 전자의 경우, 최고농도는 광복동과 대연동이 19시, 동삼동이 20시에 나타나는 등 보통의 오존농도의 변화와는 상이한 경향을 나타내었다. 후자의 경우 최고농도가 감전동과 신평동이 14시, 덕천동이 15시에 나타났으며, 이후 계속 감소하여 20시와 21시경에 최소농도를 나타내고 있다. 즉 전자의 3개 지역은 후자의 최소농도를 나타낸 시각에 최대농도를 나타낸 것이다. 이를 어떻게 설명해야 하는가? 오존농도의 상승과 하강을 가르는 시각은 15시 이후로 뇌우현상이 발생한 시각이다. 15시 이후의 바람은 남남서풍에서 동풍계열이 3~4m/s의 풍속으로 계속 불었다. 14~15시경에 최고농도를 나타내었던 지점은 부산의 동부에 위치한 지점들이고 19~20시경에 최고농도를 나타내었던 지점들은 부산의 서부에 위치한 지점들이다. 풍향으로 보아, 오염물질이 서에서 동으로 이류, 수송하여 오존농도를 높였다고 할 수 없다. 전자의 세 지점과 후자의 세 지점은 부산지역의 지형적인 특성상 북동에서 남서로 가로지르는 산맥을 경계로 하여 약 10km정도 떨어져 있다. 따라서 대류운의 발달에 의해 뇌운의 이동과 관련되어 상승기류와 상승기류의 영향에 의해 후자의 세 지점은 대기경계층 위에 잔존하였던 오존의 영향으로 농도가 상승한 것인지에 대해서는 더 논의가 있어야 할 것으로 판단된다. 더욱더 확실히 하기 위해서는 레이다 예보 측정예에 의한 뇌운의 이동을 검토해야 하지만 현재로서는 자료가 없기 때문에 정확한 원인을 찾기는 어려운 실정이고, 다만, 이날의 오존농도의 양상은 뇌우가 있었던 15시를 경계로 상승하는 지역과 하강하는 지역이 확연하게 구별되어 나타났다는 것이 특이한 현상이라고 할 수 있다.

4. 결 론

지난 12년간(1990~2001) 부산지역의 뇌우 발생 자료를 이용하여 뇌우의 발생 특성과 기단성 뇌우가 발생하였던 2개의 사례를 선정하여 오존농도와 비교한 결과 다음과 결론을 얻었다.

- 1) 지난 12년간 뇌우 발생일은 156일(매년 13일)의 뇌우가 발생하였고 기단성 뇌우는 14일이었다. 하계인 6, 7, 8월이 전체의 발생일의 59%를 차지하였다.
- 2) 1996년 8월 4일의 경우 뇌우가 발생한 시각(18시경)에 기온의 하강과 습도의 상승과 더불어 오존농도의 상승을 나타내었다.
- 3) 1997년 7월 23일 경우 뇌우가 발생한 시각(15시경)을 경계로 부산지역 서부에 위치한 지점들의 오존농도는 상승하였고, 동부에 위치한 지점들의

오존농도는 하강하였다.

향후 뇌우 발생이 오존농도에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 레이다에 의한 영상자료, 대기경계층자료, 지상관측자료 등을 확보하여 정확한 성인 규명이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 吉野正敏 等, 1985, 氣候學·氣象學事典, 742pp.
- 2) 이완, 1966, 1965년 1월 26일 서울지방에 발생한 뇌우에 관하여, 한국기상학회지, 2(1), 24-30.
- 3) 정진락, 1967, 경인지역에 대한 뇌우 예보 연구, 한국기상학회지, 3(1), 11-17.
- 4) 변희룡, 조석준, 1981, 우리나라 중부지방에서의 하계 뇌우 특성 및 예보법에 관하여, 한국기상학회지, 17(2), 28-34.
- 5) 변우남, 1985, 중부내륙지방의 뇌우와 안정도 지수와의 관계, 기상연구소지, 11, 63-175.
- 6) 이흥주, 1984, 우리나라 중부지방의 하계 기단성 뇌우 발생시 최대풍속 및 풍향 예보법에 관하여, 공군기상전대 기상연구지, 10, 30-50.
- 7) 이승호, 1990, 우리나라에서 하계에 발생하는 뇌우에 관한 연구, 공군기상전대 기상연구지, 14, 133-160.
- 8) 허복행, 김경익, 민경덕, 1994, 우리나라 중부지방에서 하계에 발생하는 기단성 뇌우의 종관 및 열역학적 특성, 한국기상학회지, 30(1), 49-63.
- 9) 김경익, 이홍란, 1994, 광주지역에서 발생한 하계 기단 뇌우의 발달기구, 한국기상학회지, 30(4), 597-613.
- 10) 변희룡, 임장호, 임미현, 1996, 여름철 우박재해의 발생과 연관된 대기순환, 한국기상학회지, 32(2), 189-210.
- 11) Chatfield, R. B. and P. J. Crutzen, 1984, Sulfur dioxide in remote oceanic air: Cloud transport of reactive precursors, Journal of Geophys. Res., 89, 7,111-7,132.
- 12) Kley, D., 1997, Tropospheric chemistry and transport, Science, 276, 1,043-1,045.
- 13) Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven, 1996, Introduction to wildland fire, John Wiley & Sons, Inc., 769pp.
- 14) Ferek, R. J., R. B. Chatfield and M. O. Andreae, 1986, Vertical distribution of dimethylsulphide in the marine atmosphere, Nature, 320, 514-516.
- 15) Dickerson, R. R., G. J. Huffman, W. T. Luke, L. J. Nunnermacker, K. E. Pickering, A. C. D.

- Leslie, C. G. Lindsey, W. G. N. Slinn, T. J. Kelly, P. H. Daum, A. C. Delany, J. P. Greenberg, P. R. Zimmerman, J. F. Boatman, J. D. Ray and D. H. Stedman, 1987, Thunderstorms: An important mechanism in the transport of air pollutants, *Science*, 235, 460-465.
- 16) Ridley, B. A., J. E. Dye, J. G. Walega, J. Zheng, F. E. Grahek and W. Rison, 1996, On the production of active nitrogen by thunderstorm over New Mexico, *Journal of Geophys. Res.*, 101, 20,985-21,005.
- 17) Kirchhoff, V. W. J. H., 1988, Surface ozone measurements in Amazonia, *Journal of Geophys. Res.*, 93, 1,469-1,476.
- 18) Aneja, V. P., S. P. Arya, Y. Li, G. C. Murray and T. L. Manuszak, 2000, Climatology of diurnal trends and vertical distribution of ozone in the atmospheric boundary layer in urban North Carolina, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 50, 54-64.
- 19) 전병일, 1999, 부산 연안역의 야간 고농도 오존 발생 특성과 기상학적 관련성, *한국환경과학회지*, 8(3), 287-292.
- 20) 전병일, 2000, 부산 해안지역의 고농도 오존 발생 특성에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 9(4), 295-302.
- 21) 전병일, 2001, 부산연안역의 대기경계층내 잔류 오존의 연직하향혼합에 의한 지표오존농도의 변화 특성, *한국환경과학회지*, 10(6), 417-422.
- 22) 김유근, 홍정혜, 1998, 야간 지표 고농도 오존에 관한 연구, *한국대기보전학회지*, 14(6), 545-554.
- 23) Logan, J. A., M. J. Prather, S. C. Wofsy and M. B. McElroy, 1981, Tropospheric chemistry: A global perspective, *Journal of Geophys. Res.*, 86, 7,210-7,254.
- 24) Kelly, N. A., G. T. Wolff and M. A. Ferman, 1984, Sources and sinks of ozone in the rural areas, *Atmos. Environ.*, 18, 1,251-1,266.
- 25) Logan, J. A., 1985, Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends and anthropogenic influence, *Journal of Geophys. Res.*, 90, 10,463-10,482.
- 26) Gregory, G. L., E. V. Browell and L. S. Warren, 1988, Boundary layer ozone: An airborne above the Amazon Basin, *Journal of Geophys. Res.*, 101, 1,452-1,468.
- 27) Prezerakos, N. G., 1989, An investigation into the conditions in which air mass thunderstorm occur at Athens, *Meteorological Magazine*, 118, 31-36.
- 28) 大生久雄, 2002, 雷雨の一生とカストフロント, *気象*, 46(3), 3-6.
- 29) 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 박사학위논문, 119pp.
- 30) Darby, L. S., R. M. Banta, W. A. Brewer, W. D. Neff, R. D. Marchbanks, B. J. McCarty, C. J. Senff, A. B. White, W. M. Angevine and E. J. Williams, 2002, Vertical variations in O₃ concentration before and after a gust front passage, *Journal of Geophys. Res.*, 107(D13), ACH9.