

부산연안역의 대기경계층내 잔류 오존의 연직하향혼합에 의한 지표 오존농도의 변화 특성

전 병 일
신라대학교 환경학과
(2001년 1월 6일 접수; 2001년 12월 5일 채택)

Variations of Surface Ozone Concentration by Vertical Downward Mixing of Ozone in the Residual Layer of the Atmospheric Boundary Layer at the Busan Coastal Area

Byung-Il Jeon

Dept. of Environmental Science, Silla University, Busan 617-736, Korea
(Manuscript received 6 January, 2001; accepted 5 December 2001)

The vertical structure of atmosphere was observed to investigate the variation of surface ozone concentration by vertical downward mixing of residual ozone in the atmospheric boundary layer at the Busan coastal area. Airsonde and pilot balloon measurements were made at Gamcheon-dong and the Kimhae airport for April 26~27, 1996. The vertical profile of potential temperature showed a residual layer between 510m and 1800m from 2100LST April 26 to 0900LST April 27.

The downward mixing of ozone in the residual layer of the atmospheric boundary layer was confirmed from vertical profile of mixing ratio near 600m in the morning. The thickness of the sea breeze layer was 900m at 1500LST April 26. Thereafter, it became to be lowered with time. A low level jet was measured near 900m at 0300LST on April 27 from a pilot balloon measurement. Early morning sharp increase of surface ozone concentration at the Busan coastal area was caused by vertical downward mixing of ozone concentration rather than by photochemical reaction in the atmospheric boundary layer.

Key words : atmospheric boundary layer, surface ozone concentration vertical downward mixing, residual layer

1. 서론

지표오존농도는 광화학반응, 수평이류, 연직혼합 및 침착 등에 의해 결정된다.¹⁾ 국내에서 광화학 반응이나 수평이류 그리고 침착에 의한 오존농도 연구는 어느 정도 진행되어 왔으나,²⁻³⁾ 대기경계층 내 대기오염물질의 연직혼합에 의한 지표오존농도 연구는 전병일⁴⁾를 제외하고는 매우 미흡한 실정이다. 특히 일출 후부터 정오 경까지의 오존농도상승은 대기경계층 내의 잔류층에 남아있던 오존이 지표로 유입되어 영향을 미친다는 연구가 알려지고 있으

나,⁵⁻⁷⁾ 이에 대한 국내의 연구는 거의 없는 실정이다.

부산연안역의 연직대기구조 관측과 해석에 대해서는 문승의 등⁸⁾에 의해 고리지역에서 행해진 바가 있고, 전병일 등⁹⁾은 고리인근지역에서 해풍이 저층 대기구조에 미치는 영향을 상층관측을 통해 규명한 바가 있다. 또한 전병일과 김유근¹⁰⁾은 tether sonde를 이용하여 부산 연안 지표역전층의 생성과 소멸 그리고 규모 등의 저층대기구조의 특성을 분석한 바 있다. 서해안 지역에서는 박순웅 등¹¹⁾, 기상연구소¹²⁾ 그리고 문승의 등¹³⁾이 집층관측을 통해 연안의 대기 연직구조의 특성을 관측하였으며, 동해안 지역에서는 민경덕 등¹⁴⁾이 경상북도의 울진과 월성에서 계절별 상층기상자료를 이용하여 대기 혼합층의 지역 및 계절별 특성을 밝힌 바 있다. 대도시 지역의 상

Corresponding Author; Byung-il Jeon, Dept. of Environmental Science, Silla Univ., Busan 617-736, Korea
Phone : +82-51-309-5158
E-mail : bijeon@lotus.silla.ac.kr

층관측은 윤일희 등¹⁵⁾이 대구에서 기상요소의 연직 구조를 조사한 바 있다.

대기경계층 내 잔류층 오존에 대한 국외의 연구 결과를 보면, Neu *et al.*¹⁾은 지표오존농도증가는 주로 오전 11시부터 12시까지 잔류층으로부터 오존의 하향혼합에 의해 결정되고, 그 후 광화학적인 생성과 수평이류에 의해 결정되며, 오후최대농도의 약 50~60%가 잔류층으로부터 유입에 의해 결정되므로, 그날의 최고농도는 전날의 상황에 의해 결정되는 것으로 보고하였다. 또한 간단한 transient turbulence theory에 의해 일최고 오존의 50~70%가 야간 잔류층에 존재하는 오존에 기인하고, 나머지 30~50%는 화학적인 반응이나 수평이류에 의해 생성된다고 하였다. Zhang *et al.*⁵⁾은 미국 북동부 고농도 오존일의 특별관측에서 혼합층에서 오존농도증가율은 약 15ppb/hr이었고, 이른 아침시간의 연직혼합은 지표오존의 '급속한 증가'에 대한 기본적인 원인이라고 하였다. Ryan *et al.*⁶⁾은 1995년 7월 12~15일에 미국 동부지방에서 지표오존농도가 125ppb까지 상승한 것은 오존이 풍부한 지상 600~1200m 고도에서 경계층 하부로 오존이 유입되어 생성된 것으로 해석하였다. Zhang과 Rao⁷⁾는 지표오존의 시간적 변화를 대류와 난류과정에 의한 연직혼합의 역할이라고 보았고, 지표오존과 야간 잔류층의 오존농도사이의 관계를 관측과 모델을 이용하여, 이른 아침의 농도상승을 연직혼합과 광화학 생성의 기여로 정량적으로 구하였다. Kleinman *et al.*¹⁶⁾는 지표오존농도는 대류경계층의 성장에 따른 상층공기의 유입으로 증가하는데, 대략 고농도일의 이른 아침에 오존의 급작스러운 증가의 50%가 잔류층 오존의 유입에 의한 것이고 다른 50%는 화학적 생성에 의한 것임을 보였다. Hastie *et al.*¹⁷⁾은 캐나다 온타리오의 농촌지역에서 일출 후 역전층의 파괴에 의해 오존농도는 전날에 전형적으로 급격히 증가하고 20ppb정도는 혼한 일이라고 하였다. 그리스 아테네에서 Suppan *et al.*¹⁸⁾은 오존농도가 이른 아침에 역전층이 파괴될 때 농도가 급격히 증가하나, PAN(peroxyacetyl nitrate)은 수평적 이류에 영향이 큰 것을 보였다.

이와 같이 지표오존의 시간적 변화는 대기경계층의 일변화에 의해 강하게 영향을 받으며, 대류경계층에서의 entrainment와 fumigation 과정에 의해 영향을 받을 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 이러한 현상을 체계적으로 규명한다면 일최고 오존농도를 예측하는데 매우 귀중한 자료를 제공할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 부산연안에서 air sonde와 pibal

관측에 의한 연직대기 관측자료를 이용하여 대기경계층의 구조와 특성을 고찰하여, 대기경계층 내 잔류층의 존재를 확인하고 일출 후 혼합층의 성장에 따른 잔류층 공기의 하향 혼합현상을 규명하고자 한다. 또한 이 현상에 의해 야간의 잔류층내의 오존이 지표오존농도 변화에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 관측과 분석방법

Fig. 1은 부산광역시 사하구 감천1동 부산화력발전처 부지(T 지점)와 해안에서 내륙으로 약 10km 떨어져 있는 김해공항(K 지점)에서 각각 air sonde와 pibal 관측을 한 지점과 환경부 산하 대기질 관측지점(A부터 I까지)를 나타낸 것이다. air sonde 관측은 1996년 4월 26일 21시부터 27일 12시까지 3시간 간격으로 6회 관측하였으며, pibal 관측은 4월 26일 9시부터 27일 06시까지 3시간 간격으로 7회 관측하였다(26일 24시는 결측임).

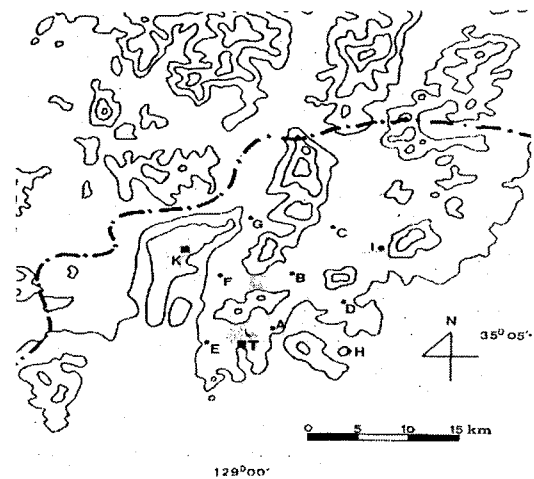


Fig. 1. Geographical map around the observation sites. The air quality monitoring (A~I) are operated by the Environmental Protection Administration. (A: Kwangbokdong, B: Beomcheondong, C: Meongryundong, D: Daeyeondong, E: Sinpyeong-dong, F: Gamjeondong, G: Deokcheondong, H: Dongsamdong, I: Jaesongdong). T and K are Gamchandong and Korea Air Force Meteorological Station, respectively. The contour interval of topography is 200m.

Air sonde 관측은 미국 AIR사의 ADAS(Atmospheric Data Acquisition System)-3B를 사용하였으며, pibal 관측은 100g의 소형 고무풍선을 사용하였다. 또한 본 관측기간 대기경계층의 변화에 따른

지표오존농도의 일변화를 알아보기 위해 환경부의 대기오염 자동측정망에서 측정된 부산시의 시간별 오존농도자료¹⁹⁾를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관측일의 기상상태

일본 기상청 발행 일기도²⁰⁾와 부산지방기상청자료²¹⁾를 분석하여 관측당시의 기상상태를 조사하였다. Fig. 2는 1996년 4월 26~27일 09시의 지상일기도를 나타낸 것이다.

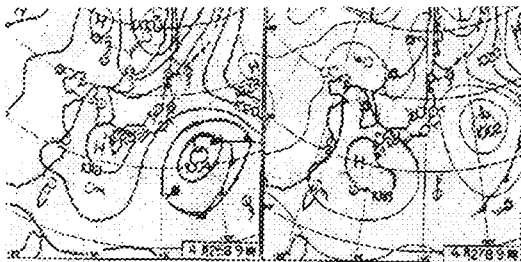


Fig. 2. Surface weather charts at 0000UTC April 26~27, 1996.

4월 26일은 이동성고기압 중심이 우리 나라 남해상에 위치하여 우리 나라 남부지방에 영향을 미치고 있다. 이 날 부산지방의 최고기온은 24.2°C, 최저기온 14.1°C로 일교차가 10.1°C이었으며, 남서풍이 최대 11.0m/s까지 나타났으며, 운량은 0으로 매우 맑은 날씨였다. 4월 27일은 전날과 거의 비슷한 기압분포를 나타내었으며, 고기압중심이 전날보다 조금 남하하였으나, 부산지방은 계속해서 이 고기압의 영향을 받고 있었다. 이 날 부산지방의 최고기온은 26.6°C, 최저기온 15.9°C, -담풍이 최대 9.0m/s까지 나타났으며, 운량은 5/10로 대체로 맑은 날씨였다. 특히 4월 27일은 새벽에 북풍계열의 육풍이 나타났고 12시 이후 남풍계열의 해풍이 불었다.

3.2. Air sonde 관측 결과

3.2.1 온위

Fig. 3은 1996년 4월 26일 21시부터 27일 12시까지 매 3시간 간격으로 air sonde 관측으로부터 구한 온위의 연직분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Stull²²⁾에 의해 제시된 대기경계층의 구분에 따라 관측한 자료를 분류하여 Table 1에 나타내었다.

26일 21시의 경우, 지상 약100m까지 혼합층이 형성되어 있으며, 100m부터 560m까지 야간안정층(SBL)이 형성되어 있고, 그림에는 나타나지 않았지만 560m부터 2020m까지 잔류층(RL), 2020m보다 높은 곳에 자유대기가 있다. 24시에 혼합층이 약

100m까지, 야간안정층이 100m에서 510m, 잔류층이 510m에서 1700m 그리고 자유대기가 1700m이상이며, 27일 03시에는 야간안정층이 지표에서 720m, 잔류층이 720m에서 1620m, 자유대기가 1620m이상이며, 06시에는 야간안정층이 지표에서 700m, 잔류층이 700m에서 1800m, 자유대기가 1800m이상에 있다. 27일 09시에는 야간안정층의 하부가 가열되면서 혼합층이 460m까지 생성되었으며, 안정층이 460m에서 800m, 잔류층이 800m에서 1670m까지, 자유대기가 1670m이상에 있으며, 27일 12시에는 혼합층이 더욱 발달하여 지표에서 800m까지 존재하며, 그 위에 안정층과 잔류층이 존재하고 있다.

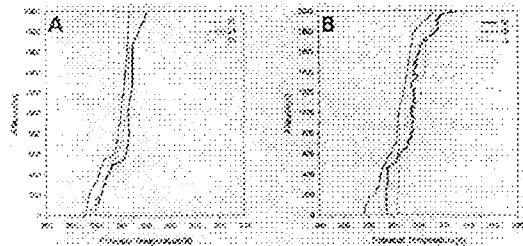


Fig. 3. Vertical profiles of potential temperature at the Busan coastal area at (A) 2100LST(solid line), 2400LST(thick solid line) on 26 April and 0300LST(dotted line) on 27 April, (B) 0600LST(solid line), 0900LST(thick solid line) and 1200LST(dotted line) on 27 April.

Table 1. Variations of the atmospheric boundary layer from 2100LST April 26 to 1200LST, April 27, 1996 at the Busan coastal area.

	Mixed Layer	Stable Boundary Layer	Residual Layer	Free Atmosphere
2100LST	0~100m	100~560m	560~2020m	2020m~
2400LST	0~100m	100~510m	510~1700m	1700m~
0300LST		0~720m	720~1620m	1620m~
0600LST		0~700m	700~1800m	1800m~
0900LST	0~460m	460~800m	800~1670m	1670m~
1200LST	0~1750m			1750m~

따라서 관측기간 동안 잔류층이 26일 야간부터 27일 새벽과 오전에 걸쳐 510m부터 1800m 사이에 존재한 것을 뚜렷하게 알 수 있다. 그리고 이 잔류층은 27일 12시에는 혼합층이 성장하면서 사라졌으며, 잔류층에 있던 공기괴가 혼합층이 성장함에 지표로 하강하였는지에 관한 것은 Fig. 4의 혼합비의 연직변화로써 알 수 있다.

3.2.2 혼합비

Fig. 4는 1996년 4월 26일 21시부터 27일 12시까지 매 3시간 간격으로 나타낸 혼합비의 연직구조를 나타낸 것이다.

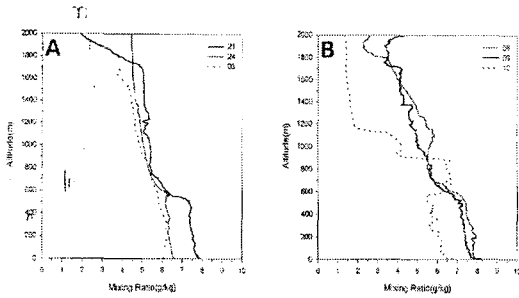


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for mixing ratio.

4월 26일 21시의 경우, 혼합비는 지면에서 600m까지 6.5g/kg이었으며, 그 고도에서부터 급격히 감소하고 있다. 24시에도 21시와 비슷한 연직분포를 나타내고 있다. 27일 03시경에는 지표부근이 6g/kg 정도이고 상층으로 갈수록 완만한 감소를 나타내고 있으며, 06시와 09시의 경우, 지표부근이 8g/kg으로 다소 높았고, 600m부근에서 급격히 감소하여 6g/kg정도를 나타내고 있다. 이 두 시간대에는 600m를 경계로 하층에는 높고 상층에는 낮은 혼합비를 나타내었는데 비해, 12시에는 600m보다 낮은 층에는 혼합비가 6g/kg으로 전 시간대보다 2g/kg 정도 낮아졌고 600m부터 820m사이에는 7g/kg으로 1g/kg정도 상승하였다. 오전시간에 600m부근에서 이와 같은 혼합비의 연직변화가 있었던 것으로 보아, 잔류층이 소멸되면서 공기의 상하혼합이 있었다는 것을 확실하게 보여주고 있다. 즉 야간에 600m이상에서 낮은 혼합비를 가진 공기괴가 일출 후 하층으로 내려와 지표근처에 낮은 혼합비를 나타나게 하였다. 따라서 혼합비의 연직변화를 볼 때 대기경계층 내 잔류층의 공기가 하층으로 내려왔다는 것을 강하게 시사하고 있다. 대체로 27일 12시를 제외하고 모든 시간대에서 지표에서 600m부근까지는 일정한 혼합비를 나타내고, 이 고도에서 상층으로 갈수록 급격히 낮아지는 양상을 나타내고 있다. 또한 혼합비의 연직변화가 심한 600m부근은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 온위의 급격한 변화를 나타내는 고도이며, Fig. 5에서와 같이 강한 바람이 공기의 연직혼합을 일으킬 수 있다.

3.3. pibal 관측결과

부산화력발전처에서 북북서 방향으로 약 15km 떨어진 김해공항의 공군기상대에서 행한 1996년 4

월 26일 09시부터 27일 06시까지 pibal 관측한 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

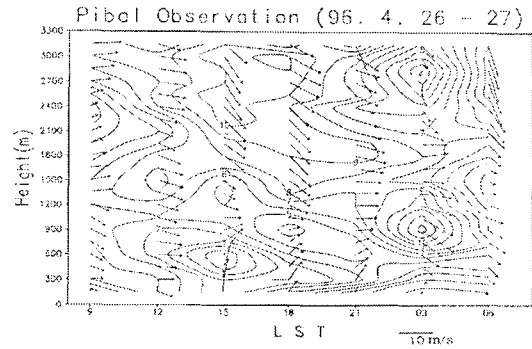


Fig. 5. Vertical profiles of horizontal winds for April 26~27, 1996 at the Kimhae Airport.

1996년 4월 26일~27일의 경우 전반적으로 서풍 계열의 바람이 불고 있다. 특히 26일 15시부터 지상부근에서 바람이 북서풍에서 남풍으로 전환되어 남서풍이 900m고도까지 나타나고 있으며, 종관장의 바람은 북서풍이 불고 있다. 이는 해풍이 900m 고도까지 미치고 있는 것을 시사하고 있으며, 이 현상은 21시까지 지속되었다. 해풍과 반환류인 상층 육풍의 경계가 되는 고도가 15시에 1200m, 18시에 900m, 21시에 600m로 계속 하강하였으며, 대체로 이 고도에서는 풍속이 약하게 나타났다.²³⁾ 27일 03시 이후에는 지상에서부터 상층까지 북서풍이 탁월하였으며, 2400m에서는 북북서풍으로 풍향이 veering 하고 있다.

풍속을 보면, 해풍이 발생한 26일 15시에 500m부근에서 10m/s정도의 바람이 불었으며 시간이 지나면서 풍속은 약화되고 발생고도도 낮아졌다. 18시에는 900m고도에 4m/s정도의 약풍대가 나타났는데, 이는 해풍과 그 위의 반환류가 만나는 고도이다. 27일 03시가 되면서 지상풍속은 약화되고 900m부근에서 12m/s의 북서풍이 탁월하게 나타났다. 일종의 저층제트로서 종관바람장과 육풍이 합해져 강한 풍속이 발생한 것으로 판단되며, 또한 이동성 고기압으로부터의 하강류에 산악 및 그 주변지역의 지표면 복사냉각에 의해 생성된 냉기가 합쳐진 저층 Jet라고 할 수 있다. 저층제트는 연직혼합을 발생시켜 지표농도에 영향을 미칠 수 있다.²⁴⁾

온위를 관측한 연안에 가까운 지점과 바람을 관측한 지점(내륙으로 약 10km)이 동일하지 않아 두 요소를 결부시켜 설명하기에 다소 무리가 있는 것은 사실이다. 27일 12시의 pibal 관측 자료가 없어 유감이지만, 부산지방기상청 일기상통계표²¹⁾에 의하

부산연안역의 대기경계층내 잔류 오존의 연직하향혼합에 의한 지표 오존농도의 변화 특성

면 11시부터 해풍이 약하게 유입되었기 때문에 육풍에 의해 혼합비가 낮아졌다고 볼 수 없다. 해풍이 유입되었다고 가정한다면 지표에서 해풍이 유입되는 고도사이에 혼합비가 높아야함에도 불구하고 오히려 하강한 것은 상층의 낮은 혼합비를 가진 공기가 내려왔다는 것을 더욱더 강하게 시사하고 있다.

3.4. 연직하향혼합이 지표 농도에 미치는 영향

Fig. 3과 4에서 볼 수 있는 바와 같이 1996년 4월 26일 21시부터 27일 06시까지 지표부근에 안정경계층이 나타나고 있으며, 그 상층에 잔류층이 1800m 정도의 높이까지 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 야간안정층의 오존농도는 dry deposition과 NO와의 반응으로 상층오존농도보다 낮으며, Neu *et al.*¹⁾은 잔류층에서의 오존농도는 보통 80~100ppb로 상대적으로 균일한 분포를 보인다고 하였다. 4월 26일 21시부터 27일 09시까지 안정경계층, 잔류층이 뚜렷하게 나타났으며, 그리고 12시에는 안정경계층과 잔류층이 사라지고 혼합층과 자유대기만 존재하였다. 27일 06시, 09시, 12시의 고도에 따른 혼합비 변화를 보면, 06시에 지표부근의 혼합비가 8g/kg 정도였으나 09시에는 7.5g/kg, 12시에는 6g/kg를 나타내어, 점차 혼합비가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 혼합비의 감소는 600m 이상의 고도에 있던 낮은 혼합비의 공기가 하향하여 나타난 결과라고 할 수 있다. 즉 일출 후 혼합층이 성장하면서 잔류층의 공기피가 하층으로 유입된 것이라고 할 수 있다.

본 관측기간 중 잔류층의 하향혼합에 의한 영향을 확인하기 위해서, 잔류층에서 야간에 비교적 안정하게 존재하는 오존을 이용하여 그 영향을 고찰하여 보았다. Fig. 6은 환경부 대기오염측정망에 관측기간 중 비교적 측정자료가 유효한 대연동과 감전동 그리고 덕천동의 오존농도자료를 이용하여 4월 26일과 27일의 오존농도의 일변화를 나타낸 것이다. 잔류층이 확인된 4월 27일의 부산지역 대연동, 감전동, 덕천동의 시간별 오존농도를 보면, 오전 7시와 8시에 최저농도를 나타내었고 일출 후 계속하여 오존농도는 증가하고 있다. 대연동의 경우, 14시에 최고농도를 나타내었으나, 12~13시까지 급속한 농도증가를 보였다. 감전동은 12시에 최고 농도를 나타내었으며, 13시~14시에 일시적으로 농도가 하강하였다가 15시에 두 번째 peak를 나타내었다. 덕천동은 13시와 14시에 최고농도를 나타내었고 그 후 서서히 농도가 낮아졌다. 일반적으로 부산지역의 최고농도 발생시각이 15시 부근인데 비해²⁾, 이 날의 최고농도가 나타나는 시각이 비교적 빨랐고, 최고농도가 나타나기까지 걸린 시간도 비교적

짧았다. 이것으로 보아 잔류층에 남아 있던 오존이 일출후 혼합층이 생성되면서 하향하여 지표오존농도를 급속하게 상승시킨 것으로 볼 수 있다.

좀더 상세하게 살펴보면, 대연동의 경우, 10시부터 11시까지 1시간에 13ppb가 상승하였다. 광화학반응이 가장 활발한 시간대인 12시에는 3ppb/hr이었고 13시 이후에는 약한 상승이거나 오히려 감소하는 경향이 있었다. 이러한 오전시간대의 오존농도의 상승은 전날 지상의 고농도 오존이 대기경계층내에 잔류하다가 익일 오전의 잔류층 공기의 하향혼합에 의한 상승이라고 판단된다. 이른 아침에 지표오존 변화율의 peak는 오존이 풍부한 공기가 상층으로부터 유입되기 때문에 연직혼합이 지표오존농도를 상승시키는데 있어 우세한 인자라는 것을 제시하고 있다. Mckendry *et al.*²⁵⁾은 이른 아침동안의 태양복사와 온도는 광화학반응에 의한 오존농도에 빠른 증가를 만드는 데 충분하지 못하고, 연직수송과정이 이른 아침동안의 지표오존농도의 빠른 증가를 설명할 수 있다고 하였다.

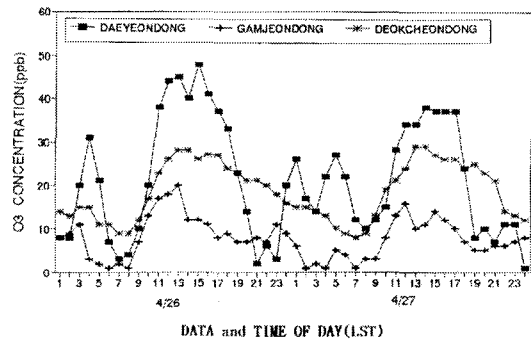


Fig. 6. Diurnal variations ozone concentration(ppb) at Daeyeondong, Gamjeondong and Deokcheondong for April 26~27, 1996.

4. 결 론

1997년 4월 26일과 27일의 상층기상관측자료와 오존농도자료를 이용하여 부산연안역의 대기경계층의 특성과 잔류층의 오존이 지표오존에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온위의 연직구조를 분석한 결과, 대기경계층 내 잔류층이 4월 26일 야간부터 4월 27일 오전까지 510m부터 1800m 사이에 존재하는 것이 관측되었다.
2. 오전 중 600m부근의 혼합비 연직변화로 부터 대기경계층 내 잔류층의 공기가 하층경계층으로 유입된 것을 알 수 있었다.
3. pibal 관측자료를 분석한 결과, 4월 26일 15시의 해풍의 고도는 900m 정도였으며, 그 고도는 시간이 지남에 따라 점점 하강하였다. 또한 4월 27일

03시에 900m부근에서 풍속이 강한 일종의 저층제트가 발생하였다.

4. 부산연안역의 오존농도 일변화 중, 이른 아침의 급격한 오존농도상승은 광화학반응에 의한 것보다는 전날 잔류층에 존재하는 오존이 하층으로 유입되어 지표오존농도에 영향을 미친 것이라고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 신라대학교 연구비에 의해 이루어졌음.

참 고 문 헌

- 1) Neu, U., Kunzle, T., and H. Wanner, 1994, On the relation between ozone storage in the residual layer and daily variation in near-surface ozone concentration- a case study, *Boundary-Layer Met.*, 69, 221-247.
- 2) 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 박사학위논문, 119pp.
- 3) 노순아, 2000, 오존의 건성침적 특성에 관한 수치모의, 부산대학교 석사논문, 84pp.
- 4) 전병일, 1999, 부산연안역의 야간 고농도 오존 발생특성과 기상학적 관련성, *한국환경과학회지*, 8(3), 287-292.
- 5) Zhang, J, Rao, S. T., and S. M. Daggupaty, 1998, Meteorological processes and ozone exceedances in the Northeastern United States during the 12-16 July 1995 episode, *J. Appl. Meteor.*, 37, 776-789.
- 6) Ryan, W. F., Doddridge, B. G., Dickerson, R. R., Morales, R. M., Hallock, K. A., Roberts, P. R., Blumenthal, D. L., Anderson, J. A., and K. L. Civerolo, 1998, Pollutant transport during a regional O₃ episode in the Mid-Atlantic States, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 48, 786-797.
- 7) Zhang, J. and S. T. Rao, 1999, The role of vertical mixing in the temporal evolution of ground-level ozone concentrations, *J. Appl. Meteor.*, 38, 1674-1691.
- 8) 문승의, 유혜주, 김유근, 1984, 고리지역의 접지지역에 관한 기후환경학적 연구, 부산대학교 환경문제연구소 환경연구보, 2, 69-77.
- 9) 전병일, 김유근, 이화운, 황수진, 1996, 해풍효과에 의한 저층대기구조 변화의 측정, *한국환경과학회지*, 5(4), 441-451.
- 10) 전병일, 김유근, 1998, 부산연안에서 관측된 저층대기의 특성에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 7(2), 195-201.
- 11) 박순웅, 이영웅, 봉종현, 1989, 혼합층성장에 관한 특별관측, *한국기상학회지*, 25(3), 138-147.
- 12) 기상연구소, 1997, 한반도 대기질 감시 기술 개발 및 예측모델 연구(III), 기상연구소, 179pp.
- 13) 문승의, 노재식, 김백조, 하창환, 최성식, 1998, 집중관측을 통한 서해연안의 대기 수직구조 특성, *한국환경과학회지*, 7(3), 335-347.
- 14) 민경덕, 김상희, 김경익, 권병혁, 1999, 경북지역 대기 혼합층 발달의 계절 및 지역적 특성, *한국기상학회지*, 35(4), 539-548.
- 15) 윤일희, 민경덕, 박동제, 1994, 대구 상공에서의 대기오염물질확산에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 3(3), 241-252.
- 16) Kleinman, L., Yin-Nan, L., Springston, S. R., Nunnermacker, L., Xianliang, Z., Brown, R., Hallock, K., Klotz, P., Leahy, D., Lee, J. H., and L. Newman, 1994, Ozone formation at a rural site in the southeastern United States, *J. geophys. Res.*, 99(D2), 3469-3482.
- 17) Hastie, D. R., Shepson, P. B., Sharama and H. I. Schiff, 1993, The influence of the nocturnal boundary layer on secondary trace species in the atmosphere at Dorset, Ontario, *Atmos. Environ.*, 27A(4), 533-541.
- 18) Suppan, P., Fabian, P., Viras, G., and S. E. Gryning, 1998, Ozone and peroxyacetyl nitrate mixing ratios during the MEDCAPHOT-TRACE campaign in Athens, Greece, *Atmos. Environ.*, 32, 2089-2102.
- 19) 환경부, 대기오염자동측정망 오존농도자료, 1996.
- 20) 일본기상청, 천기, 1996.
- 21) 부산지방기상청, 일기상통계표, 1996.
- 22) Stull, R. B., 1989, An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 666p.
- 23) Hsu, S. A, 1988, Coastal meteorology, Academic Press, 260pp.
- 24) Lu R. and R. P. Turco, 1994, Air pollutants transport in a coastal environment. Part I: two-dimensional simulations of sea breeze and mountain effects, *J. Atmos. SCI.*, 51, 2285-2308.
- 25) Mckendry, I. G., Steyn, D. G., Lundgren, J., Hoff, R. M., Strapp, W., Anlauf, K., Froude, F., Martin, J. B., Banta, R. M., and L. D. Olivier, 1997, Elevated ozone layers and vertical down-mixing over the Lower Fraser Valley, BC, *Atmos. Environ.*, 31(14), 2135- 2146.