

대기오염물질의 장거리 수송과 열적저기압의 관계

이 화 운·김 유 근·김 해 동·정 우 식·현 명 속
부산대학교 대기과학과, *계명대학교 환경학부
(2000년 8월 1일 접수)

Relationship between Thermal Low and Long-Range Transport of Air Pollutants

Hwa-Woon Lee, Yoo-Keun Kim, Hae-Dong Kim*, Woo-Sik Jung and Myung-Suk Hyun
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
*Faculty of Environmental Studies, Keimyung University
(Manuscript received 1 August 2000)

The atmospheric conditions and the transport mechanism of long-range transport of air pollutants from coastal area to inland area were investigated using regular meteorological data and air pollution data obtained from the southeastern area of Korea.

Daytime temperature over the inland area(Taegu) was higher than that over the coastal area(Pusan) and the temperature difference of about 5 ~ 6°C when the thermal low was most fully developed and the sea level pressure over Taegu was lower than that over Pusan by about 4 ~ 5 hPa at that time. Therefore this low pressure appeared to the thermally induced low.

Air mass polluted from the coastal area during the morning period was transported inland area, at first by the sea breeze and by the large scale wind system toward the thermal low generated in the mountainous inland region. This was explained by the fact that the concentration of air pollutants over Taegu increased throughout the late afternoon.

Key words : thermal low, long-range transport, local circulation system

1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 지리적 특성을 가지고 있어서 많은 공단지역과 대도시들이 연안지역에 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 대표적인 항구도시이자 여러 공단지역을 포함하고 있는 부산지역을 비롯하여 거대한 공업지역인 울산지역, 포항제철이 위치해 있는 포항, 광양만을 중심으로 형성되어 있는 여천지역 등의 연안지역 공단과 대도시들을 살펴볼 수 있다.

경계개발이 시작된 초기에는 산업화와 이와 병행된 도시화에 밀려서 대기환경의 보전이라는 부분은 다소간 도외시되어 온 것이 사실이다. 이로 인해 여러 가지 훼손과 파괴가 나타났는데 그 중 공단지역과 대도시지역에서 배출된 대기오염물질의 증가는 심각한 수준으로 나타나고 있다. 하지만 문제의 초점은 대규모의 대기오염배출원이 집중된 지역에서의 대기오염물질농도 뿐만이 아니라 이들 대기오염물질들의 수송에 의한 오염도의 증가라는 측면에서 관심을 가져야만 한다는 점이다.

대기오염물질의 장거리 수송(Long-Range Transport, LRT)에 대한 연구들이 여러 방면에서 많이 수행되어 왔

다. 미국의 서부연안에 있는 로스앤젤레스의 광화학 스모그는 100km이상의 수송과 연관되어 있다는 것이 광범위하게 조사된바 있으며¹⁾³⁾ 수송메커니즘과 관련하여 해풍과 기온역전과의 연관성에 대한 연구도 있었다³⁾. 맑은 날 일본 동경만 주위의 대규모 오염원으로부터 멀리 떨어진 일본 중부 산악지역에서 고농도의 오존이 자주 나타나곤 하는데, 특히 이 지역에서 일최고 농도가 야간시간에 나타났다. 이와 관련해 여러 연구자들은 그러한 야간 고농도는 동경만에서 배출된 대기오염물질들의 장거리 수송과 연관되어 있다는 것을 밝혔다⁴⁾⁸⁾.

이는 종관장이 약한 조건에서 주로 해륙풍 시스템, 연안풍 시스템⁹⁾, 산곡풍 시스템^{9),10)} 그리고 고저풍(plain/plateau wind system) 등과 같은 여러 가지 국지풍계로 구성된 하나의 거대한 규모의 풍계와 관련되어 있다⁸⁾는 것을 나타내는 것이다. 이들 국지순환계의 연관성에 대해서는 연안지역에서 배출된 오염물질이 해풍을 따라 내륙으로 이동하여 이곳에서 배출된 오염물질과 더불어 내륙 지형의 경사면에서 형성된 또 다른 국지순환계에 의해 더욱더 내륙 안쪽으로 진해한다는 것을 밝힌 것들이 있다^{5),11)}.

또한 비교적 단순한 형태의 조건을 통해 그 특징을 뚜렷이 살펴본 연구로, 평탄한 저지대에서 산으로 둘러싸인 분지 안으로 기류의 이동을 2차원 수치 모의한 바가 있는데, 여기서 기류의 이동은 상층에 형성된 수평 온도경도가 중요한 역할을 한다는 것을 밝힌 바 있으며¹²⁾ 기류의 이동과 관련하여 오염물질의 수송을 논한 연구도 있었다¹³⁾. 그러나 이러한 대기오염물질의 장거리 수송에 관해서 국내에서는 그 중요성과 심각성에도 불구하고 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 비록 황사 현상과 관련된 대기오염물질의 수천 km의 수송 등에 대한 연구는 다소 있었지만^{14), 15)} 단기간에 심각한 대기오염문제를 야기할 수 있는 경우인 중관장이 약할 때 지형효과에 의한 수송특성 등에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

우리나라의 남동지역은 동해와 남해를 끼고 있으며 내륙 안쪽으로 협준한 지형이 형성되어 있다. 또한 연안 지역에 대규모의 공단과 대도시들이 형성되어 있으므로 앞서 언급한 바와 같이 연안지역에서 배출된 대기오염물질의 내륙 장거리 수송과 이와 연관된 내륙에서의 가열에 의한 열적 저기압의 영향을 살펴볼 수 있을 것이다.

2. 자료의 선정 및 결과 분석

2.1. 자료의 선정

우리나라 남동지역에서 대기오염물질의 장거리 수송을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 전국에 위치한 73곳의 기상대에서 생산되는 기상관측자료와 부산대학교 대기과학과에서 설치한 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, 이하 AWS)를 사용하였고 대기오염자료는 경상남북도에 설치된 40곳의 대기오염자동측정망 자료를 사용하였다.

우선 기상자료를 이용하여 1999년 5월 ~ 8월에 발생한 해륙풍일을 선정하였다. 이동성 고기압의 영향하에 있는 날은 대기가 안정하여 대기의 환기작용이 약해지며 지역적으로는 각각의 국지순환계가 뚜렷하게 그 특징을 나타내게 된다. 즉, 대표적인 중규모 국지순환계인 해륙풍계가 주·야간에 형성되며 내륙에서는 지형을 따르는 산곡풍계가 형성되게 되는데 이때 연안지역에서 배출된 대기오염물질의 내륙으로 향하는 장거리 수송을 살펴볼 수 있게 된다. 따라서 선정된 해륙풍일을 대상으로 경상남북도에 설치된 대기오염자동측정망 자료를 이용하여 각각의 도시들의 대기오염물질의 농도변화와 수평분포를 살펴보았다.

Fig. 1은 우리나라 남동지역의 지형도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 우리나라 남동지역은 내륙 안쪽으로 고지대의 복잡한 지형을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 특히 남동 끝자락의 내륙에 해발 1000m 정도의 가지산 일대가 독립적으로 형성되어 있는 것을 알 수가 있고 동해안 지역 위쪽으로 태백산맥의 고지대가 나타나 있는 것을 볼 수가 있다.

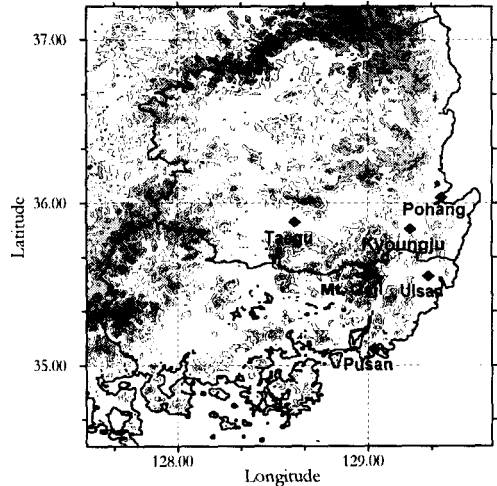


Fig. 1. Southeastern region of Korea. The marks represent several cities and Mt. Gaji. The 1st inner contour shows 200m above the sea level.

2.2 기상자료 분석 결과

일반적으로 중관장의 영향이 적은 날은 우리나라 부근의 기압변화나 기압차가 작아서 동서방향으로 큰 기압차이는 보이지 않는다. 이는 우리나라 부근에 이동성 고기압이 위치한 경우에 잘 볼 수 있는데 이 경우, 내륙지역은 중간에 일출 이후 일사에 의한 지면가열과 지형의 굴곡과 경사도에 따른 차등 가열에 의해 연안지역 및 평지보다 고온을 나타내게 되어 이들 지역에 비해 상대적인 저기압의 분포를 나타내며 야간의 경우는 이와 반대로 장파복사에 의한 지표냉각으로 상대적인 고기압의 분포를 나타내게 된다⁶⁾. 이와 관련하여 바람의 분포를 살펴보면, 크게는 중간에 연안지역에서 내륙지역으로 불어 들어가는 풍계를 볼 수가 있고 야간에는 지형을 따라서 흘러내리는 밀도류와 해안지역을 중심으로 육지에서 불어 나가는 육풍을 볼 수 있게 된다.

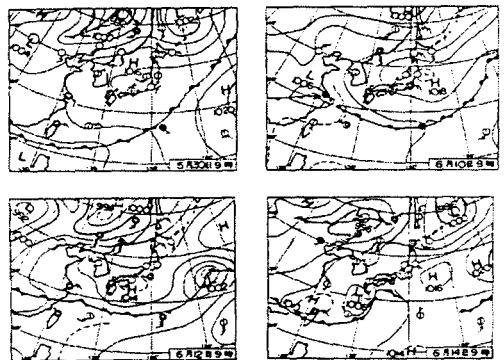


Fig. 2. Synoptic weather charts at 0900LST on 30 May, 10, 12, 14 June 1999.

Fig. 2는 연구 대상으로 선정한 해륙풍일 중 1999년 5월 30일, 6월 10일, 6월 12일 그리고 6월 14일의 지상일기도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 우리나라가 이동성 고기압의 영향권에 들어있어 대체로 날씨가 맑고 전반적으로 우리나라 부근으로 종관장의 영향이 강하지 않다는 것을 알 수 있다. 특히 6월 10일에서 14일까지 비교적 연속적으로 큰 기압변화를 보이지 않는 맑고 안정한 날이 지속되었다.

Fig. 3과 4는 1999년 5월 30일의 0600, 1200, 1800 그리고 2400LST의 해면기압과 바람분포를 나타낸 것이다. 먼저 기압분포를 살펴보면 0600LST에 내륙지역이 연안지역에 비해 상대적으로 고기압의 분포를 나타내고 있는 것을 알 수가 있으며, 특히 고지대의 정상부를 중심으로 뚜렷하게 잘 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 1200LST의 경우를 보면, 일출 후 지면 가열의 영향으로 내륙 안쪽지역이 고기압의 분포를 보이던 0600LST와 달리 서서히 저기압의 분포를 가지는 것을 볼 수 있다. 1800LST에는 내륙 고지대를 중심으로 뚜렷하게 연안지역에 비해 상대적인 저기압의 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 야간인 2400LST를 살펴보면 다시 내륙 고지대를 중심으로 상대적 고기압의 분포를 보이고 있는 것

을 알 수 있다.

바람장의 분포를 살펴보면, 0600LST에는 고지대에서 저지대를 향해 지형을 따라 바람이 불어 가고 있는 것을 살펴볼 수 있다. 그리고 연안지역에 걸쳐서 육지에서 바다로 불어나가는 육풍의 존재를 볼 수 있다. 1200LST의 경우를 살펴보면, 연안지역을 중심으로 육지로 불어 가는 해풍의 존재를 살펴볼 수 있고 각각의 고지대를 향하는 바람들이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 1800LST의 경우를 보면, 전반적으로 연안지역에서 내륙 안쪽지역으로 향하는 일률적인 바람이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 특히, 경상남북도 지역에서의 바람장 분포를 보면 내륙 안쪽까지 일률적인 바람장의 형태를 볼 수 있다. 2400LST의 바람장 분포를 살펴보면 이 시간대에서는 지면 냉각과 더불어 고지대에서 저지대로 불어 내려오는 형태의 바람과 육지에서 바다로 흘러나가는 육풍을 볼 수 있다. 전반적인 바람의 분포를 볼 때, 지상의 바람은 지형을 따라 뚜렷하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

이상에서 종관장의 영향이 약한 경우, 주간에는 내륙 안쪽지역에서 연안지역에 비해 뚜렷한 저기압의 분포를 나타내는 것을 볼 수 있었으며 연안지역에서 내륙으로 불

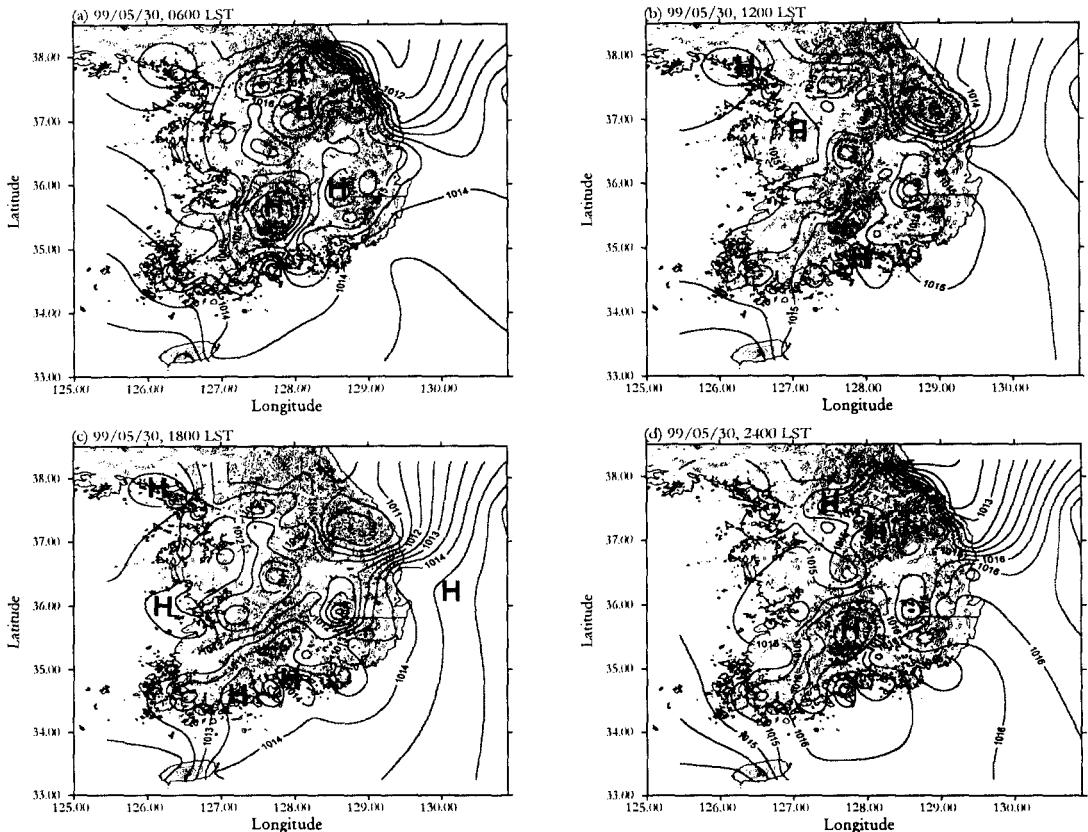


Fig. 3. Distributions of sea level pressure at (a) 0600LST, (b) 1200LST, (c) 1800LST and (d) 2400LST on 30 May 1999, respectively.

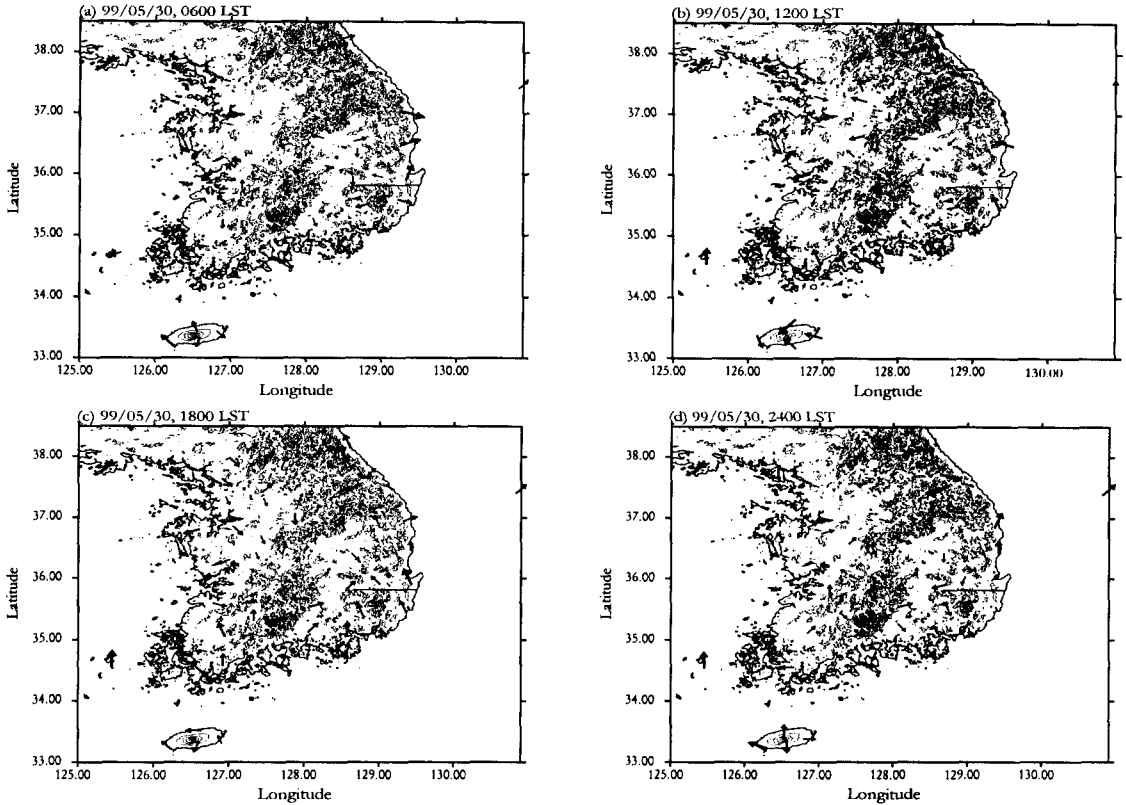


Fig. 4. Same as Fig. 3, except for wind pattern.

어 들어가는 풍계와 저지대에서 고지대의 중심부를 향해 불어 가는 국지순환계의 존재를 살펴볼 수가 있었다.

그렇다면 주간내 내륙안쪽에서 형성되는 이러한 저기압은 어떠한 특성을 가지고 있는 것인가를 살펴볼 필요가 있다. 이를 위해 연안지역인 부산과 내륙안쪽지역인 대구에서의 해면기압과 기온의 시간별 변화를 살펴보았다.

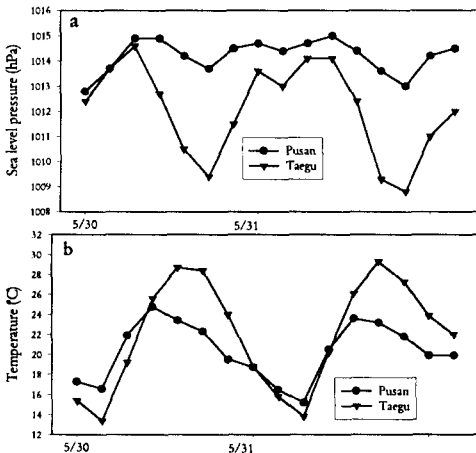


Fig. 5. Diurnal variations of (a) sea level pressure and (b) temperature at Pusan and Taegu.

Fig. 5(a)는 1999년 5월 30일과 31일의 부산지방기상청과 대구기상대에서 관측한 해면기압과 기온의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 양일간에 걸쳐서 주간내 특히 1700 ~ 1800LST 부근의 오후 시간대에 내륙지역인 대구에서 연안지역인 부산에 비해 4 ~ 5 hPa 정도 낮은 해면기압을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 보았던 기압의 수평분포에서도 알 수 있었던 것으로, 본 연구에서 강조하고자 하는 것은 이때 형성되는 내륙지역의 저기압이 대규모 종관장에 의한 저기압이 아니라 주간내 지면가열에 의해 형성된 '열적저기압'이라는 것이다. 이는 Fig. 5(b)의 기온자료를 살펴보면 뚜렷이 알 수 있다. 이 그림을 보면 5월 30일과 31일에 걸쳐서 주간동안 앞서와 같이 1700 ~ 1800LST의 오후 시간대에 연안지역인 부산에 비해서 내륙지역인 대구에서 기온이 5 ~ 6°C 정도 높다는 것을 볼 수가 있는 것이다.

이러한 관측결과를 살펴볼 때, 내륙지역에서 종관장의 영향이 적은 날, 열적으로 형성되는 저기압이 뚜렷이 나타난다는 것을 알 수 있고 이와 관련해 내륙의 열적저기압과 연안지역에서 형성되는 해풍의 영향으로 연안지역에서부터 내륙으로 불어 들어가는 국지 순환계가 형성된다는 것을 자세히 살펴볼 수 있다.

다음은 과연 이러한 날에 연안지역에서 내륙으로의

대기오염물질의 장거리 수송이 나타나는지에 대해서 대기오염자료를 이용하여 살펴보고 이상의 논의에 대한 타당성을 마련하고자 한다.

2.3. 대기오염자료 분석 결과

본 연구에서 사용한 대기오염자료는 경상남북도에 설치된 40곳의 대기오염자동측정망 자료이다. 앞서 선정한 1999년 5월 ~ 8월에 발생한 해륙풍일에 해당하는 자료를 분석하였다.

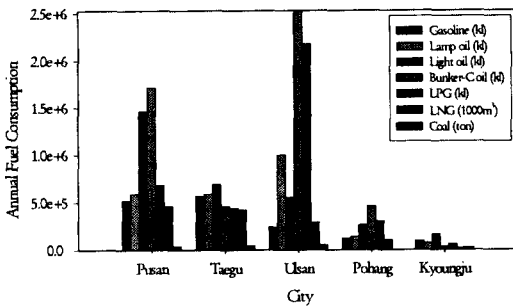


Fig. 6. Annual consumption for each fuel of several cities.

Fig. 6은 1998년 부산, 대구, 울산, 포항, 경주의 연간 연료별 사용량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 연간 공업지역이며 대도시인 부산, 울산이 다른 지역에 비해 상당히 많은 사용량을 보이고 있음을 알 수 있으며 내륙 소도시인 경주에서는 적은 사용량을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 자료를 통해 볼 때 공간적으로 평균적인 측면에서 부산과 울산의 대기오염도가 경주보다 심할 것이라는 것을 짐작할 수 있다. 그러나 실제 관측된 각 지역의 대기오염농도는 이러한 예상과는 다른 것을 살펴볼 수 있다. 이는 Fig. 7과 같이 1999년 5월 30일, 6월 10일, 6월 12일 그리고 6월 14일 오존의 시간별 변화를 통해 확인 할 수 있는데 이 날들이 비교적 뚜렷한 해풍이 관측된 날들이라는 것은 Fig. 8을 통해 상세히 알 수 있다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 비교대상일로 제시한 4일의 경우 모두에 있어서 나타나는 공통적인 특징이, 오전 시간에는 지역별로 어떠한 뚜렷한 특징이 보이지는 않지만 약 1800LST 이후의 대구에서의 농도값을 살펴보면 이 시간대 부근에는 전반적으로 다른 지역에서는 농도의 하강율이 급속하게 나타나는데 비해, 대구의 경우에는 농도가 다시 증가하거나 농도의 하강폭이 적은 것을 볼 수 있다. 오존의 일반적인 일변화 경향이 대체적으로 1500 ~ 1600LST경에 최고치를 나타내고 이후의 시간으로 갈수록 하강하는 형태를 띠고 있다는 점을 고려해 볼 때 비교대상일 모두에서 나타나는 것이, 대구에서 배출된 대기오염물질만의 영향이 아니라 어떠한 다른 요인이 있다는 것을 나타내는 것이라 볼 수 있다. 또한 유사하게 볼 수 있는 것이, 주간에 경주에서의 농도값이 상당히 높게 나타난다는 점이다. 농도의 최대치가 약 1500LST 부근에서 나타나는데, 이 지역에 배출원이 많이 존재하

지 않는다는 점을 고려해 본다면 이것은 어떠한 다른 요인이 있다는 것을 나타내는 것이라 볼 수 있다.

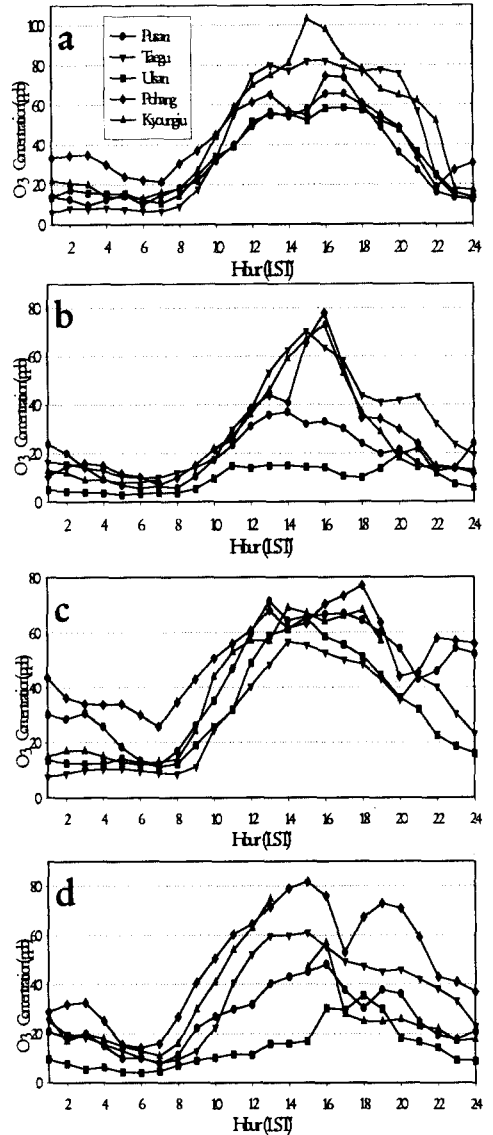


Fig. 7. Diurnal variations of O₃ on (a) 30 May, (b) 10 June, (c) 12 June and (d) 14 June 1999 at several cities, respectively.

그렇다면 이러한 현상이 나타나는 원인은 무엇인지를 살펴볼 필요가 있다. 앞서 기상자료의 분석을 통해 알 수 있었던 것이, 종관장의 영향이 약한 날은 지역적으로 각각의 국지순환계와 내륙지역 안쪽에서 뚜렷한 열적저기압이 형성된다는 점이다. 우리나라 남동지역은 바다와 접해 있어 해륙풍계가 형성될 수 있고, 복잡한 지형굴곡과 경사에 의해서 산곡풍계가 형성될 수 있다. 그리고 이러한 순환계의 의해 주간에 해안에서 내륙으로, 저지대에서 고지대로의 바람은 지면가열과 함께 확장되어 내

룩에 형성되어 있는 저기압 중심부를 향해서 불어 들어
가 합쳐져서 하나의 거대한 국지순환계를 형성한다는 것
이며 이러한 복합적인 관계에 대해서는 선행연구에서 제
시된 바가 있다.²⁰⁾ 또한 해안 저지대에서 불어오는 바람
은 내륙으로 진행할 때 대부분 비교적 저지대의 골을 따
라서 불어간다는 점을 고려해 보면 다음을 생각할 수 있
게 된다.

부산에서 경주까지 고속도로상의 거리는 약 70km이고
대구까지의 거리는 약 150km(한국도로공사 인터넷 홈페
이지 제공)이며 고속도로가 대부분 저지대의 골을 따라
형성되어 있다는 점을 생각해볼 때 이는 바람이 불어 가
는 주된 통로가 될 수 있다.

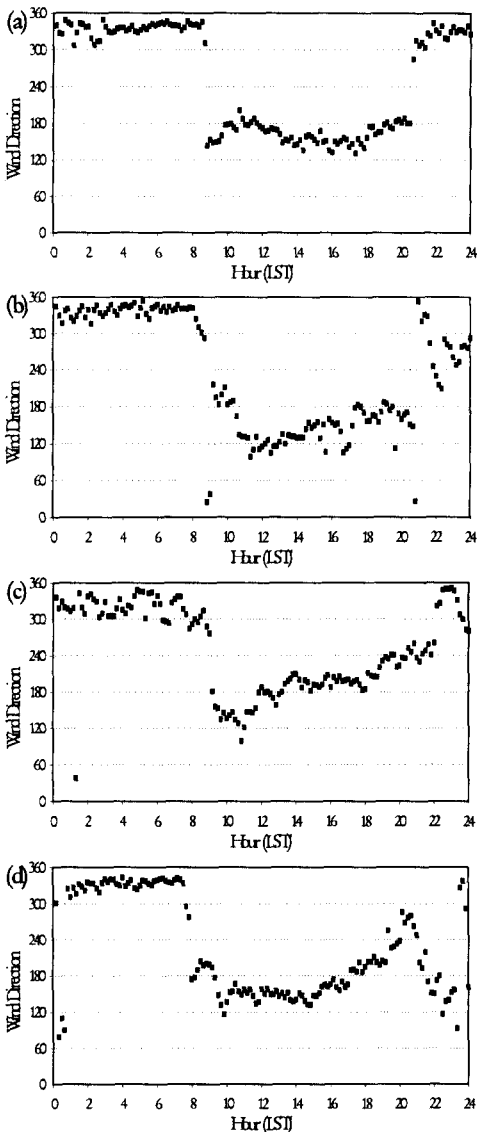


Fig. 8. Same as Fig. 7, except for wind direction at Pusan(Suyoung).

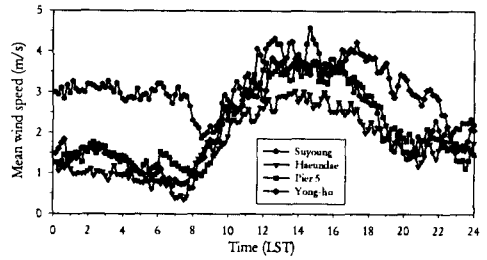


Fig. 9. Mean wind speed at several points in Pusan.

이와 함께 Fig. 8과 같이 부산지역의 봄철 평균 해풍
시작시간이 약 0800 ~ 0900LST부근이며 해륙풍의 평균
풍속은 Fig. 9와 같이 대략 3 ~ 4m/s를 보이고 있음을 알
수 있다. 이러한 여러 가지 조건을 고려하면 부산에서
배출된 대기오염물질이 아침에 형성된 해풍에 의해서 수
송 되는데 이때 해풍의 시간당 진행속도는 약 11 ~ 15km
정도가 된다. 그러면 부산에서 배출된 대기오염물질은
경주에 약 1400 ~ 1500LST경에 도달하게 되는 것이다.
그리고 마찬가지로 대구까지는 약 1700 ~ 1800LST경에
도달한다는 것을 생각할 수 있다. 이것이 아주 상세한
정량적인 분석은 아니며 울산과 포항에서 배출된 대기오
염물을 고려한 것은 아니지만 이상의 과정을 통해 1400
~ 1500LST경에 나타나는 경주에서의 고농도와 1800LST
경에 나타나는 대구의 농도 증가 또는 농도 하강폭의 둔
화경향을 장거리 수송과 관련지어 이해할 수 있는 것이다.

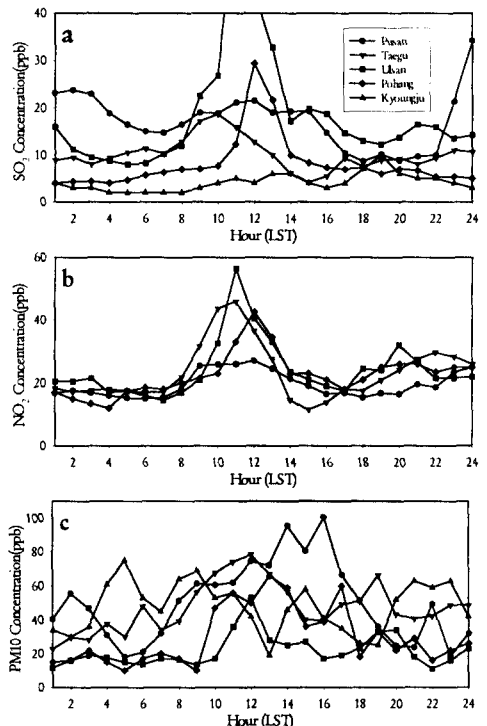


Fig. 10. Diurnal variations of (a) SO₂, (b) NO₂ and (c) PM₁₀ on 11 August 1999, respectively.

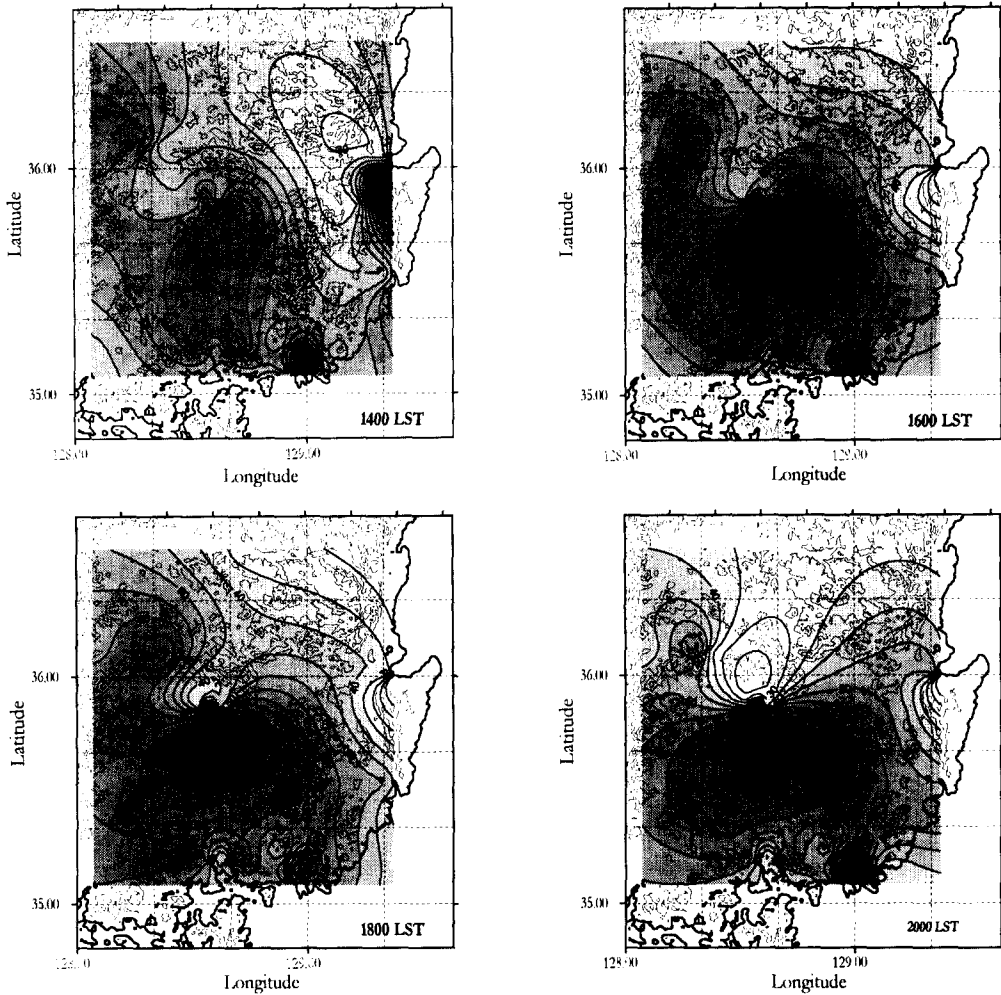


Fig. 11. Horizontal distributions of $O_3+NO+NO_2$ around the southeastern area in Korea on 17 August 1999.

Fig. 10은 해륙풍이 있었던 날 중에서 1999년 8월 11일의 각각의 지점에서 측정된 SO_2 , NO_2 그리고 PM_{10} 의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서도 볼 수 있는 것이 대구지역의 경우에 다른 지역에서 농도의 감소가 나타나는 늦은 시간대에 오히려 농도의 증가하거나 앞서 오존과 유사한 경향을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 1999년 8월 17일 경상남북도 지역을 대상으로 분석한 ' $O_3+NO+NO_2$ '의 분포경향을 시간대별로 나타낸 것이다. 오존의 생성과 소멸에 대한 절대량이 ' NO '와 ' NO_2 '에 관련되어 있다는 점을 고려한다면 이러한 물리량은 시간대별로 오존의 생성과 소멸에 따른 비교의 어려움을 극복할 수 있다. 따라서 이것을 '총량'으로 보면 일 중 시간대별 농도변화를 살펴보는데 아주 좋은 방법이라고 할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 1400LST에서 오후로 갈수록 내륙안쪽지역인 대구에서의 농도가 높으며 늦은 오후에 다른 지역보다 고농도가 오래도록 지속되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 시간별 농도분포

의 변화 경향은 앞서 언급한 기상자료의 분석과 대기오염자료의 연관 관계를 잘 설명하고 있는 것이라 볼 수 있다.

이상의 대기오염 자료 분석을 통해 종관장이 약한 맑은 날, 지역별로 각각의 국지순환계와 내륙의 열적저기압에 의해 우리나라 남동지역의 대규모 대기오염 배출원인 연안지역에서 내륙으로 오염물질의 장거리 수송이 발생한다는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 기상자료와 대기오염자료를 이용하여 종관장의 영향이 약한 날, 이 지역에서 형성되는 열적저기압을 살펴보고 대기오염자료를 분석하여 연안지역에서 내륙지역으로 대기오염물질의 장거리 수송을 살펴보았다.

우선 해륙풍일을 대상으로 기상자료를 살펴본 결과, 종관장의 영향이 약한 날에는 야간시간대에 고지대 정상부를 중심으로 내륙안쪽지역에서 연안지역과 비교해 상

대적인 고기압의 분포를 나타내고 있음을 알 수 있었으며 육지의 가열이 충분히 일어난 오후시간대에 기압의 분포를 살펴본 결과, 앞서와 반대로 내륙의 고지대 정상부를 중심으로 연안지역에 비해 뚜렷하게 상대적인 저기압의 분포를 하고 있는 것을 볼 수 있었다. 이와 같이 종관장이 약한 날에는 내륙안쪽지역에서 뚜렷한 저기압이 형성되는 것을 알 수 있었는데 이를 자세히 살펴보기 위해 연안지역인 부산과 내륙에 위치한 대구에서 해면기압과 기온의 분포를 분석한 결과, 1700 ~ 1800LST 부근으로 연안지역인 부산에 비해 내륙지역인 대구에서 약 4 ~ 5 hPa 정도 낮은 기압을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이러한 저기압의 원인이 종관장의 영향이 아니라는 것을 살펴보기 위해 이 날의 종관일기도와 기온의 분포를 살펴본 결과, 주간에 대구가 부산에 비해 고온을 나타낸다는 것을 알 수 있었으며 특히 1700 ~ 1800LST에 대구가 부산보다 약 5 ~ 6℃정도 높은 기온을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이러한 것으로 볼 때, 이날 주간에 나타난 저기압은 내륙의 가열에 의해 형성되는 '열적 저기압'이라는 것을 확인할 수 있었고 이러한 열적 저기압의 영향으로 연안지역에서 형성되는 해풍과 지형에 의해 형성되는 곡풍(경사류)이 내륙안쪽 멀리까지 진행한다는 것을 알 수 있었다.

선정된 해륙풍일의 대상으로 대기오염 농도자료를 살펴본 결과, 오전시간대에는 지역별로 유사한 변화경향을 나타내었으나 경주에서 약 1500LST부근에 다른 지역에 비해 뚜렷한 고농도의 경향을 나타내었고 대구에서는 약 1800LST이후 다소 고농도의 유지 또는 농도감소폭이 적게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 경주의 경우, 이 지역이 대기오염 배출원이 많지 않다는 점을 고려한다면 오전시간대에 연안지역인 부산과 울산에서 배출된 대기오염물질이 이 지역에서 형성된 국지순환계인 발달된 해풍과 곡풍을 따라 수송되어온 것이라 할 수 있는 것이다. 또한 대구에서 나타나는 야간시간대의 이러한 특징도 주간에 내륙에 뚜렷하게 형성되어 있는 열적저기압과 연안과 저지대에서 형성된 해풍과 곡풍에 의해 연안지역으로부터 수송되어온 대기오염물질의 영향인 것이다.

본 연구에서 분석한 국지순환계와 대기오염물질의 장거리수송에 대한 내용을 바탕으로 지역별로 대기오염농도의 정확한 예측을 위해서는 지역적으로 형성되는 국지순환계의 특성을 상세하게 분석하여야 할 것으로 보이며 이를 통해 대기오염물질의 정확한 수송경로를 파악할 수 있을 것이다. 이를 통해 지역별 국지순환계와 대기오염물질의 수송경로가 정확히 파악되면 여러 가지 화학적 반응식이 포함된 광화학반응 모형을 이용한 정량적인 특성분석이 가능할 것이며 실질적으로 지역별 농도예측을 제공할 수 있도록 이들을 포함하는 대기유동장 모형을 구축할 수 있을 것으로 생각된다. 이는 차후의 장기적인 대기오염대책과 저감방안 등을 마련하는 기본정책 구성에 참고자료로서 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Edinger, J. G., M. H. McCutchan, P. R. Miller, B. C. Ryan, M. J. Schroeder and J. V. Behar, 1972, Penetration and duration of oxidant air pollution in the south coast air basin of California, J. Air Pollut. Contral Assoc., 22, 882-886.
- 2) Blumenthal, D. L., W. H. White and T. B. Smith, 1978, Anatomy of a Los Angeles smog episode : Pollutant transport in the daytime sea breeze regime, Atmos. Environ., 12, 893-907.
- 3) Carroll, J. J. and R. L. Baskett, 1979, Dependence of air quality in a remote location on local and mesoscale transports : A case study, J. Appl. Meteor., 18, 474-486.
- 4) Kurita, H., K. Sasaki, H. Muroga, H. Ueda and S. Wakamatsu, 1985, Long-range transport of air pollution under light gradient wind conditions, J. Climate Appl. Meteor., 24, 425-434.
- 5) Kurita, H., and H. Ueda, 1986, Meteorological conditions for long-range transport under light gradient winds, Atmos. Environ., 20, 687-694.
- 6) Kurita, H., 1986, Long-range transport of air pollutants from the coastal region to the inland mountainous region. Ph.D. thesis, Tohoku University, Sendai.
- 7) Ueda H., S. Mitsumoto and H. Kurita, 1988, Flow mechanism for the long-range transport of air pollutants by the sea breeze causing inland nighttime high oxidants, J. Climate Appl. Meteor., 27, 182-187.
- 8) Ueda H., S. Mitsumoto, H. Kurita, Y. Arisawa and T. Kawamura, 1988, Formation of a large-scale wind system as a combination of local winds under light gradient wind conditions - Numerical experiment, Second International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, International Organization Committee of ASAAQ, Tokyo.
- 9) Ueda, H., 1983, Effects of external parameters on the flow field in the coastal region - A linear model, J. Climate Appl. Meteor., 22, 312-321.
- 10) Mannouji, N., 1982, A numerical experiment on the mountain and valey winds, J. Meteor. Soc. Japan, 60, 1085-1105
- 11) Power, H., 1994, *Urban Air Pollution. Volume I*, Computational Publications, 187-219
- 12) Stephan, F. J. De Wekker, Z. Shiyuan, D. F. Jerome and W. David, 1998, A Numerical Study of the Thermally Plain-to-Basin Wind over Idealized Basin Topographies, J. Appl.
- 13) Kimura, F. and T. Kuwagata, 1993, Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range, J. Appl. Meteor., 32, 1538-1547.
- 14) 대한항공, 한국항공대학교, 1994, 황사 및 장거리 이

1) Edinger, J. G., M. H. McCutchan, P. R. Miller, B. C.

- 동되는 오염물질이 우리나라에 미치는 영향 연구(I), 환경처 보고서
- 15) 정관영, 박순용, 1995, 한반도의 황사 출현시의 종관 기상 특징, 한국기상학회지, 31(1), 45-63.
 - 16) Simpson, J. E., 1994, *Sea breeze and Local Circulation*, Cambridge University Press, 37-44.
 - 17) Winston, J., Radhika R., K. Narayanannair, K. Sen and K. Kunhikrishnan, 1992, On the Structure of Sea-Breeze Fronts Observed Near the Coastline of Thumba, India, *Bound.-Layer Meteor.*, 59, 111-124.
 - 18) Chiba, O., 1993, The turbulent characteristics in the lowest part of the sea breeze front in the Atmospheric surface layer, *Bound.-Layer Meteor.*, 65, 181-195.
 - 19) 정우식, 이화운, 2000, 연안복잡지형에서 해풍시작에 대한 지형의 영향, 한국기상학회지, 36(2), 245-256.
 - 20) 環境科學研究報告, 1988, 沿岸域から内陸域にいたる 廣域大氣汚染に關する研究, B307-R11-2, 21-30.