

부산연안역에서 관측된 해풍전선의 특성

전 병 일

부산여자대학교 환경학과
(1997년 4월 30일 접수)

On Characteristics of Sea Breeze Front observed in Pusan Coastal Area, Korea

Byung-Il Jeon

Dept. of Environmental Sciences, Pusan Women's University, Pusan, Korea
(Manuscript received 30 April 1997)

We have analyzed focusing on the characteristics, speed and width of sea breeze front in Pusan coastal area using the meteorological data observed at Kimhae air force meteorological station because the presence of the front has important effects on the distribution of air pollution.

The inland penetration of sea breeze front was recognized by steep variation of meteorological parameters(wind direction, wind speed, temperature, dew point temperature, air pressure, relative humidity) before and after its passage and the variation of SO₂ concentration, the speed and width of the sea breeze front was 2.07m/s and 217m, respectively.

The structure and inland penetration of sea breeze front should be taken into account whenever a model is to be compared with detailed field measurements.

Key words : air pollution, sea breeze front, meteorological parameter

1. 서 론

해면과 육지면의 표면형태와 열적성질의 차이에 의해 연안지역에 1일 주기를 가진 해륙풍이 형성되는 것은 매우 잘 알려진 현상이다. 야간에 내륙의 복사냉각에 의해 차가워진 무거운 공기가 바다로 향해 흐르고, 지상부근에서는 육풍이 불게 된다. 일출 후 육지는 일사에 의해 급속히 승온되고 육상의 대기는 아래쪽으로부터 불안정화 된다. 이것에 비해서 해수는 비열이 크고 상하의 혼합운동도 가해지기 때문에 해면에서는 뚜렷한 온도상승이 보이지 않는다. 이 결과 육상보다 차갑고 무거운 해상의 대기

가 육상을 향해 불게 되는 해풍이 발생한다. 이 때 내륙으로부터 부는 바람과 해풍과의 경계에 형성된 공기의 수렴을 일반적으로 해풍전선이라고 한다(千葉等, 1990). 육상으로 침입하는 해풍의 앞부분은 육상의 공기와 해풍과의 경계가 형성되기 때문에 기온, 습도, 풍속, 풍향 등의 기상요소에 급격한 변화가 보여 한랭전선과 유사한 불연속선이 되고, 해풍전선에 따라서는 적운이 생기고 별안간 비가 생기기도 한다(Simpson, 1994).

연안에 위치한 산업지역이나 도심지역에 해풍전선이 발생하면, 대기오염농도가 급격히 높

게 나타나는데, 이는 양쪽에서 공기의 수렴이 있고, 지표면 가까이 차가운 공기에 의한 안정층에 의해 공기의 연직혼합이 억제되기 때문이다. 또한 해풍이 따뜻한 육지를 지나갈 때 안정한 바다공기에서 발달하는 열적내부경계층은 연안지역의 대기오염물질을 하강기류에 의해 도심지역의 대기오염농도를 급격히 증가시키기도 한다(Lyons and Cole, 1973; Gusten *et al.*, 1988). 또한 전선부근의 공기의 수렴, 전선저층의 바람 shear 그리고 요란 등에 의해 항공기의 이·착륙에 심각한 위협을 가하기도 한다(Lalas *et al.*, 1987).

해풍전선의 연구로는 풍선을 이용한 기류조사 결과로부터 그 부근에 일반적으로 상당히 강한 상승류(1m/s)가 있다고는 알려져 있으며, 지역에 따라 구조가 매우 다르게 나타난다(Helmis *et al.*, 1987). 특히 대도시의 연안지역에 공업지대가 대부분 조성되어 있기 때문에, 여기서 방출되는 대기오염물질이 해풍에 의해 육지로 수송되는 현상과 그것에 의해 광화학스모그의 발생상황을 알기 위해서도 해풍과 해풍전선구조의 연구는 오염물질의 장거리수송(Ueda *et al.*, 1988)과 관련하여 매우 중요하다. 해풍이 영향을 미치는 주된 범위는 일본에서 내륙 10km정도로 짧지만, 영국에서는 내륙 100km, 오스트레일리아에서는 300~600km로 장거리에 걸쳐 해풍이 침입한다는 관측 기록이 보고 되고 있으며, 영국에서도 해풍전선의 침입으로 인한 급격한 기상요소의 변화가 관측되었다(Simpson *et al.*, 1977; Galvin, 1997).

우리 나라의 연구로는 기상연구소(1980)에 의해 서해안에서 전주까지 약 25km정도 해풍이 침입하였다는 보고가 있으며, 김유근과 안창섭(1985)은 사천해안에서 진주까지 약 40km정도 침입한다고 하였으며, 특히 전병일 등(1996)은 연안지역의 상층기상관측을 통해 해풍이 저층대기구조에 미치는 영향을 구체적으로 밝힌 바 있다.

주변이 바다로 둘러싸여 있는 부산지역에서는 현저한 해륙풍 순환이 있다고 조사되었으며(전병일, 1994), 특히 신평·장림공단과 사상공단이 연안에 접해 있기 때문에 해풍에 의해서 대기오염물질은 상당한 영향을 받을 수 있고, 그와 더불어 발생하는 해풍전선에 의해

국지적으로 대기오염농도가 상당히 높은 지역이 나타날 수 있다. 따라서 해풍전선이 발생하는 장소와 시각을 미리 예측할 수만 있다면 대기오염농도예보와 대기오염에 의한 피해를 줄일 수 있다고 본다. 아직까지 국내에서 해풍전선에 대한 관측이나 그에 대한 이론적 연구가 행하여진 바는 아직 없으며, 특히 두 지점에서의 기상요소의 관측으로 해풍전선에 대한 특성과 성질에 대한 관측과 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 김해공군기상대의 두 지점에서 관측한 1991년 6월 20일의 기상요소로부터 해풍전선의 특성을 체계적으로 고찰하였으며, 이 날 부산지역에서 측정된 SO₂농도에 미치는 해풍의 영향을 살펴보았으며, 마지막으로 해풍전선의 속도와 해풍전선의 폭을 계산하였다.

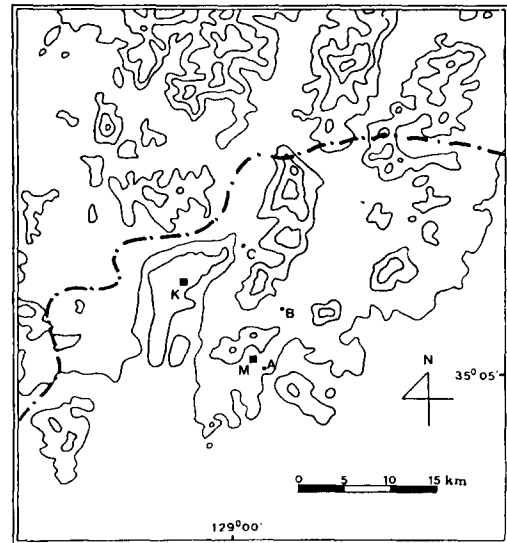


Fig. 1. Map of Pusan coastal area. K and M are Kimhae air force meteorological station and Pusan meteorological administration, respectively. The air quality monitoring stations marked as A~C are operated by the Environmental Protection Administration(A:Kwangbokdong, B:Beomcheondong, C:Gamjeondong).

2. 관측장소와 관측방법

해풍관측은 Fig. 1에서와 같이 해안선으로 부터 약 10km 떨어져 있고 주변이 넓은 김해 평야위의 삼각주에 위치한 김해공군기지에서 실시되었으며, 주변의 지형은 동서 10km, 남북 15km로 평탄한 평야지대이다. 이 지점은 해안방향으로 매우 평탄한 지형을 가지고 있어 해풍이 유입될 때 지형의 영향에 의해 해풍의 구조가 변형될 수 없는 조건을 가지고 있는 것이 특징이다.

김해공항의 활주로 남쪽에 1대의 AWS(Automatic Weather Station : 편의상 Main 이라고 부름)와 육지쪽인 북쪽에 또 다른 AWS(편의상 Sub라고 부름)가 설치되었으며, 두 지점의 거리는 1800m이고 활주로의 방향은 남북방향이며, 해풍의 침입방향은 남쪽이다. 관측기기는 10m의 기상탑에 설치되어 있으며, 남측의 Main에는 풍향·풍속계, 건습구 온도계, 기압계와 습도계가 설치되어 있고, 북측의 Sub에는 풍향·풍속계만 설치되어 두 지점 모두 자기기록지에 연속으로 기록되며 디지털로도 볼 수 있다.

3. 관측결과

3.1 해풍침입시의 특징(1991년 6월 20일의 경우)

해풍의 침입은 해풍이 관측점을 통과할 때 풍향의 급변과 기온의 강하 그리고 노점온도의 상승에 의해 인식될 수 있다. 해풍전선의 모델을 Fig. 2와 같이 나타내 보았다. 그림과 같이 남쪽으로부터 해양의 차고 습한 공기가 내륙의 따뜻하고 건조한 공기 밑으로 파고 들면서 북쪽의 육지로 진행하고 있는 모습으로 한랭전선과 동일한 구조를 보여주고 있다. Fig. 3은 1991년 6월 20일의 0900LST의 지상일기도로서, 기압경도가 작은 이동성 고기압이 서해상에 위치하고 있어, 부산지역은 이 고기압의 영향으로 맑은 날씨를 나타내고 있으며, 해풍이 발생할 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있다. 장마전선은 남해상에서 동서방향으로 길게 자라잡고 있으나, 아직 남부지방까지 영향을 미치지 못하고 있다. 우리 나라에서 장마가 시작되기 전의 시기는 지면이 건조하여 일교차가 심하게 나타나고 해양과 육지의 온도차가 크게 나타나 연안역에서 해륙풍의 발

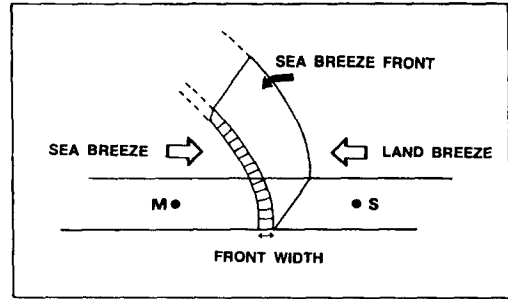


Fig. 2. Schematic representation of sea breeze front(M:Main, S:Sub).

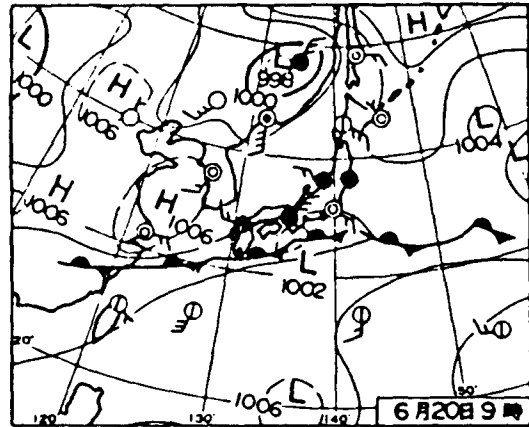


Fig. 3. Surface weather chart at 0900LST June 20, 1991.

생빈도가 높은 경향이 있다(전병일, 1993).

이 날의 부산지방기상청(기상청, 1991)에서 관측한 기상요소를 보면, 일최고기온이 24.6℃, 일최저기온이 18.4℃로 일교차는 6.2℃를 나타내었고, 일조시간은 8.9시간, 일사량은 17.21MJ/m²이었으며, 김해공군기상대의 경우는 일최고기온이 26.9℃, 일최저기온이 18.4℃로 일교차가 8.5℃를 나타내어 내륙으로 갈수록 일교차가 크게 나타났다.

Fig. 4는 1991년 6월 20일 해풍이 발생한 날의 부산지역 대기오염측정소의 SO₂ 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 이 날 대기오염측정 자료의 결측으로 다른 오염물질의 변화는 볼 수 없고 단지 세 지점에서의 SO₂농도를 이용할 수 밖에 없었다. 그림에서 보면, 10시를 전후한 이른 아침에 최고농도를 나타내고 일출 후에도 광복동을 제외하고 2차 peak를 나타내고 있다. 이른 아침의 peak는 러시아워의 자동차에 의

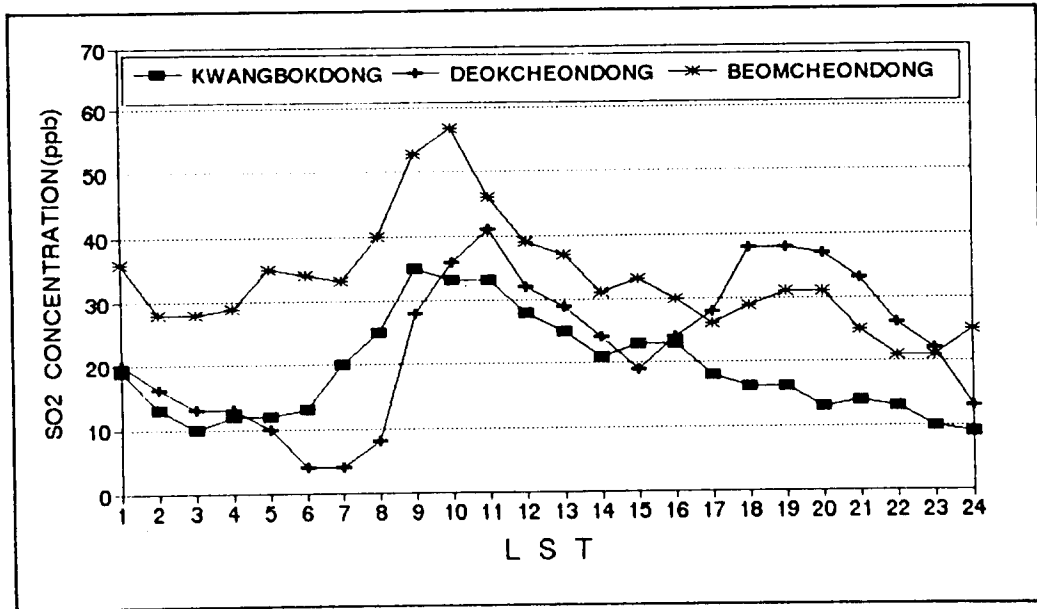


Fig. 4. Diurnal variation of SO₂ concentration at three station in Pusan.

한 배출량증가와 야간의 복사냉각에 의해 형성된 역전층의 영향으로 대기층이 안정하여 확산이 억제되기 때문이며, 11시를 전후의 농도감소는 기온상승에 의한 대기의 불안정과 풍속의 증가가 중요한 원인이 되어 대류에 의한 확산 현상이 잘 일어나기 때문이라 생각된다(전병일 등, 1994). 측정지점이 해안으로부터 내륙으로 갈수록 광복동, 범천동 그리고 덕천동 순으로 위치해 있으며, 최고농도가 나타나는 시각이 내륙으로 갈수록 광복동이 9시, 범천동이 10시 덕천동이 11시로 1시간씩 지연되는 현상이 나타난다. 이것은 해풍에 의해 오염물질이 내륙으로 수송되어 최대농도 발생 시각이 내륙으로 갈수록 지연된다는 생각을 할 수 있다(阿部와 楠田, 1982; Luria et al., 1984). 따라서 이 날은 SO₂라는 대기오염물질을 이용해서 보더라도 부산연안역은 해풍의 영향을 받고 있다고 볼 수 있었다.

Figs. 5~6는 1991년 6월 20일의 김해공항의 Main과 Sub 두 지점에서 해풍전선의 침입과 관련된 기상요소의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 Main에서의 기상요소의 변화를 보면, 풍향의 경우 해풍이 유입되기 전에는 북서풍과 남서풍 사이의 가변적인 풍향에서 해풍이 유입한 후에는 남남서풍으로 고정되어 나타나고

있다. 풍속은 해풍이 불기 전에는 2m/s내외의 약한 상태였으나, 해풍이 들어오면서 6m/s 정도의 강한 바람이 발생하였다. 기온은 약 27.5℃에서 25℃정도로 하강하고 노점온도는 약 18℃에서 21℃로 증가하고 있다. 상대습도는 12시 15분 약 52%이던 것이 76%에 달할 정도로 습기가 많은 해양의 공기가 유입되고 있음을 알 수 있다.

Sub에서의 기상요소의 변화를 보면, 풍향의 경우 해풍이 들어오기 전에는 Main과 같이 북서풍에서 남남서풍사이의 변동폭이 큰 풍향이었으나, 해풍이 유입되면서 약 200도 방향의 남남서풍이 지속적으로 불고 있다. 또한 풍속도 2.5m/s정도에서 6m/s의 강한 바람이 불고 있다. 따라서 해풍의 유입으로 풍향의 급변, 풍속의 급격한 증가, 기온의 감소 그리고 상대습도의 증가가 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 해풍전선의 침입 특성을 구체적으로 파악하기 위해서 Fig. 5(A)와 같이 풍향이 서풍계열에서 남풍계열로 변화되기 시작하는 시각을 전선이 침입하는 시각(T_F)으로 하였고, 풍향의 변화가 끝난 정상상태로 된 시각을 해풍의 침입시각(T_P)으로 보았다. 따라서 전선의 통과시간(t)은

$$\tau = T_P - T_F \quad (1)$$

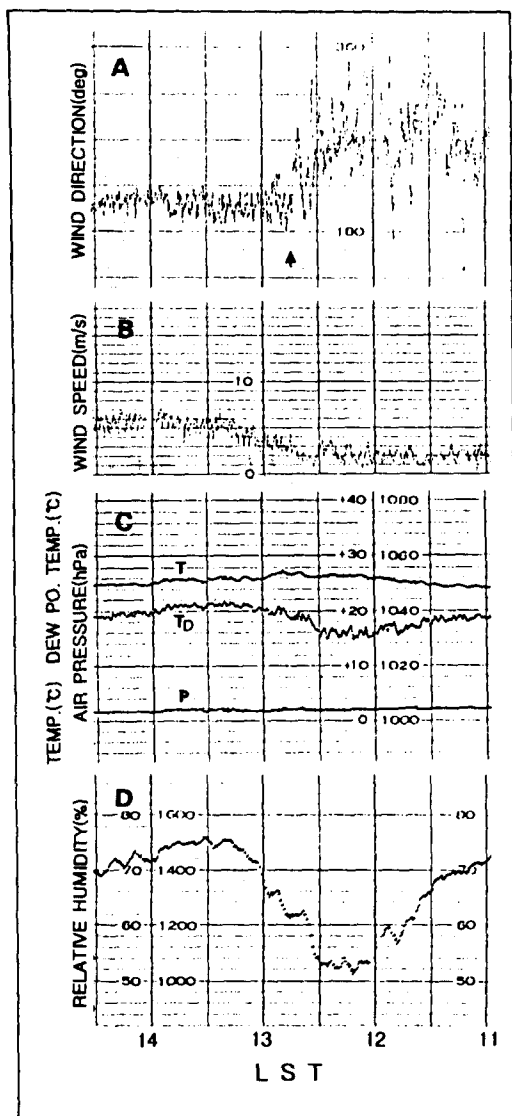


Fig. 5. Meteorological factors from Main of Kimhae air force: Variation of wind direction(A), wind speed(B), temperature, dew point temperature, air pressure(C), relative humidity(D) during the passage of sea breeze front on June 20, 1991. Arrow shows the time of onset of the sea breeze.

나타낼 수 있다. 김해공항의 자료는 자기기록지와 디지털기록지를 동시에 읽어 사용하기

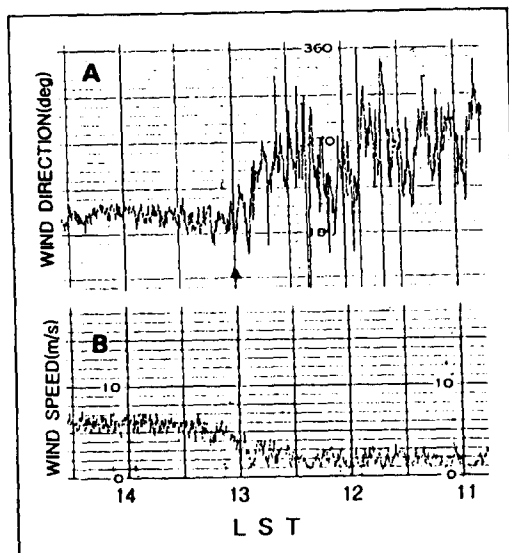


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for Sub of Kimhae air force.

때문에 오차는 거의 없으리라 판단된다. Main에서의 T_F 는 12시 42분이고 T_P 는 12시 45분으로 판단되므로, 전선의 통과시간 t 는 3분이다. 해풍전선이 통과하기 전에 풍향의 변동이 큰 이유는 태양복사에너지에 의한 열대류에 의한 것으로 생각된다. 12시 42분경 기온이 하강하고 노점온도가 상승하는 등의 변화가 나타난 것을 명확하게 알 수 있으며, 기압의 상승도 감지되고 있다. 또한 평균풍속은 전선이 침입하기전 12시 30분부터 12시 42분까지 해풍과 그 대항류와의 충돌로 인해 감소하였고 전선통과후(12시 45분경)에는 해풍이 대항류와 대체되어 탁월해졌기 때문에 급속히 증가하였다.

그리고 Sub(Fig. 6 참조)에서는 12시 50분부터 13시에 걸쳐 풍향이 서풍계열에서 남풍계열로 급변하고 있는데, 이 곳에서의 T_F 는 12시 56분이고 T_P 는 13시로서 Main과 달리 전선침입전에 풍향의 편차가 크게 나타나지만, 평균풍속은 Main과 같이 전선통과 중에는 약하고 해풍침입시에는 급속히 증가하고 있다. 따라서 해풍전선의 중요한 특징의 하나는 풍향, 풍속, 기온 그리고 노점온도의 급변이라 할 수 있으며, 전선통과후에 풍속이 급증하는 것은 해풍이 흐름장을 지배하기 때문이라 볼 수 있고, 해풍통과시 풍속이 극히 약화되어 정온상태를 나타내기도 한다(天葉, 1990).

3.2 해풍전선의 폭과 진행속도의 계산

해풍전선 폭의 계산은 (가) 전선이 Main과 Sub 두 지점간을 이동하는 사이에 변화하는 것, (나) 해풍의 침입방향과 두 지점을 연결하는 직선이 이루는 각도를 함께 고려해야 한다. (가)에 대해서는 Main과 Sub에서의 전선의 침입시각(T_{FM} , T_{FS})과 해풍의 침입시각(T_{PM} , T_{PS})을 이용하여 두 지점에서의 전선의 통과시각(τ_M , τ_S)을 각각

$$\tau_M = T_{PM} - T_{FM} \quad (2)$$

$$\tau_S = T_{PS} - T_{FS} \quad (3)$$

이라 하여 구하였으며, 두 지점을 전선이 통과하는 시간 t 는

$$\tau = \frac{\tau_M + \tau_S}{2} \quad (4)$$

으로 계산하였다. (나)에 대해서는 김해공항의 활주도가 남북방향이기 때문에 해안선과 직각을 이루고 있어 해풍방향과 동일하여 고려할 필요가 없다고 생각해서 제외하였다.

전선의 진행속도는 원래 전선의 주시곡선으로부터 구해야 되지만, 두 지점의 자료밖에 없기 때문에 다음에서 서술하는 바와 같은 평균조작을 하였다. 두 지점에서의 전선 앞부분의 통과시각이 T_{FM} , T_{FS} 로 그리고 전선의 뒷부분의 통과시각이 T_{PM} , T_{PS} 에 상당하는 것으로 간주하여, 앞부분의 통과시간(τ_L)과 뒷부분의 통과시간(τ_R)은

$$\tau_L = T_{FS} - T_{FM} \quad (5)$$

$$\tau_R = T_{PS} - T_{PM} \quad (6)$$

의 평균치로 주행거리 L 를 나누는 것으로 전선의 진행속도를 구하였다. 따라서 6월 20일의 해풍전선 진행속도는 2.1m/s로 계산되었다.

그리고 김해공항의 Main과 Sub의 두 지점의 관측자료로부터 전선폭은 D 는
전선폭 = (전선의 진행속도) × (전선의 통과시간)

$$D = \frac{L}{(\tau_L + \tau_R)2} \times \frac{\tau_M + \tau_S}{2} \quad (7)$$

으로 구할 수 있다. 이 날의 경우 τ_M 은 3분(12:45 - 12:42), τ_S 는 4분(13:00 - 12:56), τ_L 은 14분(12:56 - 12:42) 그리고 τ_R 는 15분(13:00 - 12:45)이며, L 은 1800m이다. 따라

서 전선폭은 약 434m로 계산되었다.

해풍전선의 진행속도에 대한 선행연구를 보면, 江口(1977)에 의해 日本의 오사카만에서 해풍전선의 속도는 1.8m/s, 그리고 柳澤(1976) 등은 일본의 茨城의 館野에서 2.2m/s를 얻은 바 있다. 본 연구에서 계산된 해풍전선의 속도는 위에서 열거한 연구자의 것과 비슷한 값을 나타내고 있다. 대체로 해풍전선 진행속도는 규모가 다른 중관장에서 일반풍의 강약에 의해 변화와 대항류의 강도에 매우 민감하며, 또한 발생지역의 지형에 의한 영향도 무시하지 못할 요소라고 할 수 있다.

4. 결 론

부산연안의 김해공항(1991년 6월 20일)에서 관측한 두 지점의 기상요소를 분석한 결과 풍향의 급변, 풍속의 증가, 기온의 감소 그리고 상대습도의 증가를 나타내는 해풍전선의 출현을 확실하게 볼 수 있었으며, 또한 해풍이 부산지역의 지역별 SO₂농도 변화에도 영향을 미치고 있음이 확인되었다. 그리고 해풍전선의 속도와 해풍전선의 폭도 객관적인 방법으로 구한 결과 2.1m/s와 434m이었으며, 일본의 연안공항에서의 관측값과 비슷한 결과를 나타내었다. 앞으로 레이더나 항공기관측을 통한 상층 및 지상의 다양한 관측에 의해 연안역의 해풍전선의 침입유무와 수렴의 정도를 예측하여, 대기오염에 의한 피해를 미연에 방지하고, 아울러 대기질의 수송과 수렴까지도 체계적으로 관측·연구되었으면 한다.

감사의 글

김해공항에서의 관측자료를 제공해 주신 공군기상대 관계자 여러분과 이용섭 대위(현재 기상연구소 원격탐사연구실)에게 심심한 감사료를 포함합니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소, 1980, 남서해안지역(군산일원)에서의 해풍에 관한 연구(II), 39pp.
- 기상청, 1991, 기상월보
- 김유근, 안창섭, 1985, 남해안지방의 해풍의 특성에 관한 연구, 한국어업기술학회지 21(2) 112-122.
- 전병일, 1993, 부산연안에서의 바람의 수치시

- 물레이션에 관한 연구, 부산대학교 석사 학위논문, 65pp.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 부산지역의 SO₂농도 변화 특성에 관한 고찰, 한국대기보전학회지, 10(4), 245-251.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 부산연안역의 바람특성에 관한 고찰, 한국환경과학회지, 3(1), 1-9.
- 전병일, 김유근, 이화운, 황수진, 1996, 해풍 효과에 의한 저층대기구조 변화의 측정, 한국환경과학회지, 5(4), 441-451.
- 江口恒夫, 1977, 大阪市の海陸風について, 天氣, 24, 739-746.
- 阿部信男, 楠田 信, 1982, 大分市における海陸風と二酸化硫黄濃度の關係, 天氣, 29(1), 87-90
- 柳澤善次, 大塚 伸, 神林慶子, 1976, レダと係留氣球による海風前線の觀測, 天氣, 23, 43-48.
- 千葉 修, 石川明弘, 廣田智桂朗, 1990, 接地氣層での海風前線の觀測 I, 天氣, 37, 415-419.
- Galvin, J. F. P., 1997, Sea-breeze front reaches Birmingham and beyond, *Weather*, 52(2), 34-38.
- Gusten, H., Heinrich, G., Cvitas, T., Klasinc, L., Ruscic, B., Lalas, D. P. and M. Petrakis, 1988, Photochemical formation and transport of ozone in Athens, Greece, *Atmos. Environ.*, 22, 1855-1861.
- Helmis, C. G., Asimakopoulos, D. G. and D. G. Deligiorgi, 1987, Observation of sea-breeze fronts near the shoreline, *Boundary-Layer Meteor.*, 38, 395-410.
- Lalas, D. P., Tombrou-Tsella, M., Asimakopoulos, D. N. and C. G. Helmis, 1987, An experimetal study of horizontal and vertical distribution of ozone over Athens, *Atmos. Environ.*, 21, 2681-2693.
- Luria, M, Almog, H. and M. Peleg, 1984, Transport and transformation of air pollutants from Israel's coastal area, *Atmos. Environ.*, 18, 2215-2222.
- Lyons, W. A. and H. S. Cole, 1973, Fumigation and plume trapping on the shores of Lake Michigan during stable onshore flow, *J. appl. Meteor.*, 12, 494-510.
- Simpson, J. E., 1994, Sea breeze and local winds, Cambridge University Press, 233pp.
- Simpson, J. E., Mansfield, D. A. and J. R. Milford, 1977, Inland penetration of sea breeze fronts, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 103, 47-76.
- Ueda, H., Mitsumoto, S. and H. Kurita, 1988, Flow mechanism for the long-range transport of air pollutions by the sea breeze causing inland night-time high oxidants, *J. appl. Meteor.*, 27, 182-187.