

碩士學位論文

제주도 지역에서의 해풍 발생 특성에
관한 연구

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

崔 丙 成

2 0 0 2

碩士學位論文

제주도 지역에서의 해풍 발생 특성에 관한 연구

指導教授 李 起 浩

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

최 병 성

2 0 0 2

제주도 지역에서의 해풍 발생 특성에 관한 연구

指導教授 李 起 浩

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2002年 8月

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

環境工學專攻

崔 丙 成

崔丙成의 工學碩士學位 論文을 認准함

2002年 8月

審査委員長	許	喆	九	印
委 員	甘	相	奎	印
委 員	李	起	浩	印

List of Figures

- Fig.2.1. The development of an internal boundary layer as air flows from land surface to sea surface.
- Fig.2.2. Cross sectional view illustrating the formation of a sea breeze.
- Fig.2.3. Land and sea breeze circulations across a shoreline by day (a) at night (b) during anticyclonic weather. (Oke, 1978)
- Fig.2.4. Schematic representation of a sea breeze with the geostrophic wind is light.
- Fig.2.5. Typical pattern of land and sea breezes at Los Angeles, on April.
- Fig.2.6. Vapor pressure (mb) distribution during sea breeze with an offshore geostrophic wind.
- Fig.2.7. Daily variations of relative humidity and temperature during the period of land and sea breezes.
- Fig.2.8. The distribution of ozone between 4 and 5 P.M. on July 25, 1973. Dashed lines show the wind direction.
- Fig.3.1. The geographical location of Jeju Island.
- Fig.3.2. Topographical map of Jeju Island and the location of observatory station. a:Jeju b:Seogwipo c:Gosan d:Seongsanpo.
- Fig.3.3. The example of autographic record of aerovane(5 Oct, 1999).
- Fig.4.1. Seasonal distribution of initiating time of sea breeze : (a) North site (b) South site (c) East site (d) West site.
- Fig.4.2. Initiation time of sea breeze after sunrise : (a) North site (b) South site (c) East site (d) West site.
- Fig.4.3. Relationship between duration of sea breeze and length of daytime.
- Fig.4.4. Comparison of monthly averaged wind speed between land and sea breeze in Jeju Island.
- Fig.4.5. Developing time of highest temperature after initiating sea breeze at each site.
- Fig.4.6. Developing time of highest temperature after initiating sea breeze at each season
- Fig.4.7. Typical weather charts during the day of sea breeze for winter season.
- Fig.4.8. Typical weather charts during the day of sea breeze for summer

season.

Fig.4-9. Typical weather charts for summer season the day of sea breeze for summer season.

Fig.4.10. Typical weather charts during the day of sea breeze for spring season.

Fig.4.11. Typical weather charts during the day of sea breeze for fall season.

Fig.4.12. Typical charts of wind vector during the day of sea breeze for winter season

Fig.4.13. Typical charts of wind vector during the day of sea breeze for summer season

Fig.4.14. Typical charts of wind vector during the day of sea breeze for fall season.

List of Tables

Table 3.1. Criteria for the occurrence of sea breeze at each station

Table 4.1. The occurrence number(days) of sea breeze

Table 4.2. The duration of sea breeze

A Study on the Characteristics of Sea Breeze over Jeju Island

Byung-Sung Choi

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry, Cheju National University

Summary

This study was performed to investigate the characteristics of sea breeze blew over Jeju Island. For this purpose, the data of surface winds and weather charts over past 10 years(1991~2000) were gathered from the four meteorological observation stations located near the coastline. From this analysis of the data, the following results were obtained.

1. From the past 10 years data, the number of sea breeze occurred at the northern and southern parts of Jeju Island were higher than those at the eastern and western parts of Island. The sea breeze frequently blew during the spring and fall seasons rather than other seasons.
2. The sea breeze was commonly developed between 7:00AM and 11:00AM. The sea breeze was more frequently developed at the times of 8 for the spring and summer season, 9 for the fall season, and 10 for the winter season, respectively.
3. The duration(persistence) of sea breeze during the day was relatively different from month to month. Over the entire period of this study, the sea breeze persisted from 5 hours to 13 hours. Longer the length of daytime longer the duration of sea breeze at the northern and southern parts of Island. However this tendency could not be shown at the other parts of Island.
4. The sea breeze could be well developed over Jeju Island when the cold continental anticyclone expanding to the southern parts of China continent was modified to migratory anticyclone during winter season, when the migratory anticyclone was travelling through the southern parts of Korean peninsular during spring and fall seasons, and when the

North Pacific high was expanded to Korean peninsular and the eye of typhoon was located at the below of 30°N during the summer season.

In this study, the characteristics of sea breeze occurred at the eastern part and western part of Jeju Island could not be precisely investigated due to the geographical positions of meteorological observation stations.

목 차

Summary

I. 서론.....	1
II. 이론적 배경.....	3
2.1. 비 균일한 경계층에서의 바람.....	3
2.2. 해륙풍의 발달 과정.....	4
2.2.1. 해륙간의 온도 대비.....	5
2.2.2. 해륙간의 기압 대비.....	6
2.2.3. 지균풍의 영향.....	10
2.3. 해륙풍의 영향.....	14
III. 연구자료 및 방법.....	17
3.1. 기상관측지점 위치.....	17
3.2. 기상관측자료 분석.....	19
3.2.1. 바람자료.....	19
3.2.2. 기온, 일기도 및 기상관련자료.....	21
IV. 결과 및 고찰.....	22
4.1. 해풍발생 빈도.....	22
4.2. 해풍의 발생 특성.....	23
4.2.1. 해풍의 발생 시각.....	23
4.2.2. 해풍의 지속 시간.....	27
4.2.3. 해풍의 풍속.....	31
4.2.4. 해풍발생에 따른 최고기온 출현 시기.....	32
4.3. 사례분석.....	35
4.3.1. 해풍 발생일의 일기도 분석.....	35
V. 결론.....	51
참고문헌.....	52

I 서론

국지적인 조건에 따라서 발생하는 소규모의 지상풍계를 국지풍이라고 하는데, 이러한 풍계는 해륙의 분포, 식물의 번식 상태 등에 의해서 지표면이 균일하지 않으므로 나타나는 순환 형태인 것이다. 이러한 국지적인 순환은 지역의 국지 기후를 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 특히 해륙풍은 해안 부근에서는 낮에 육지가 해면보다 더워지면서 큰 온도차로 인해 발생하는 대표적인 국지순환이다. 해풍은 맑은 날 해안가에서 태양으로부터 받은 복사에너지가 대기운동의 에너지로 전환되는 것으로, 낮에 해수면보다 지면의 공기가 더 빨리 가열되면서 육지의 공기가 상승되어 바다에서 육지로 공기가 이동하는 현상을 말한다. 반면에 육풍은 밤에 지면의 공기가 해수면보다 더 빨리 냉각되어 지면의 공기가 바다로 이동하는 현상을 말한다.

이와 같은 해륙풍은 해륙간의 온도차가 낮이 밤보다 커서 해풍이 육풍보다 다소 강하게 분다(소선섭과 곽종흠, 1985). 해풍 발생시에는 해안에서 내륙으로 40~50km, 육풍때는 해안에서 해상으로 10km, 그리고 연직방향으로는 1km정도의 범위를 지니는 것으로 알려져 있다 (김광식, 1992). 초기의 해륙풍에 관한 연구는 지상관측소 한 두 곳에서 해륙풍의 시간변화를 관측하는 것이 대부분으로 Van Belmmelen(1992)이 뉴욕의 Batavia에서 처음으로 행하였다. 그 후 경도풍, 지형, 대기의 안정도 등을 고려하여 해풍을 분석한 결과 내륙침투가 가장 강한 시각은 일중 불안정도가 가장 큰 시각임을 밝혀내었고, 해풍은 때때로 내륙의 약 100km까지 침투하기도 한다고 영국의 Simpson(1977)이 보고한바 있다.

우리나라에서 해륙풍에 관한 연구는 이승만과 전종갑(1979년), 박순웅과 윤일희(1989), 신동빈과 이태영(1989), 현종운과 이동규(1990), 김철희(1992), 이현수(1996) 등이 있는데, 신동빈과 이태영(1989)은 남한의 지형특성과 해륙풍 순환과거 관련성을 연구한 바 있다. 이현수(1996)는 종관 바람장과 수치실험 등을 통해 해륙풍의 순환을 해석하였다. 제주도 지역을 대상으로 한 연구로는 제주도 지역의 평균 바람vector를 이용하여 해륙풍을 해석한 연구 (김유근, 1988), 수치 해석을 통한 해륙풍의 모의 및 국지강수예보에 관한 연구 (현종훈,

1990년), 그리고 서로 다른 종관규모의 바람장에 의해 변형되는 제주도 지역의 국지 바람장에 대한 연구 (임승욱과 이동규, 1994) 등이 있다.

많은 도시가 역사적인 이유나 산업적인 이유로 인해서 해양을 끼고 발달하거나 또는 도시 내에 호수 등의 수체를 지니고 있을 뿐 아니라 대부분의 연안지역이 휴양지역으로서 인기가 많으므로 해안에서 나타나는 국지기상의 연구는 아주 중요하다. 그럼에도 불구하고 해양에 관한 일기의 예보는 연안역에서는 심각한 오차를 보이게 된다. 그리고 해안선을 따라 도시나 공업지역 등이 발달한 경우에는 해륙풍과 같은 국지순환 형태에 따라서 연기의 확산형태 및 확산지역 등이 지배되므로 해륙풍에 관한 연구는 대기오염 관리측면에서도 대단히 중요하다.

주변이 해양으로 둘러싸인 제주도는 우리나라의 다른 어떤 지역보다 휴양지로서 인기가 많으며, 소형선박의 항해가 빈번한 지역이다. 또한 제주도는 해안선을 끼고 제주시와 서귀포시가 위치하고 있을 뿐만 아니라 해발 200m이하의 해안변에 대부분의 주민이 거주하고 있다. 따라서 제주도 지역의 대기오염 관리는 물론이고 연안의 국지예보정확도를 보다 개선하기 위해서는 제주지역 연안을 중심으로 발생하는 해풍의 발생 특성을 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 제주도 해안변에 위치한 4개의 기상관측소에서 수집된 과거 지상풍 관측자료를 중심으로 제주도 연안역에서의 해풍 발생빈도, 발생시기, 지속시간 및 해풍과 관련된 기압배치 등을 분석하여 제주도의 해풍 발생 특성을 파악하고자 했다. 이로써 제주도 해안 지역의 국지예보 능력향상과 대기오염 관리 체계 구축을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

II 이론적 배경

국지적인 조건에 따라서 발생하는 소규모의 지상풍계를 국지풍이라고 하는데, 이러한 풍계는 해륙의 분포, 식물의 번식 상태 등에 의해서 지표면이 균일하지 않으므로 나타나는 순환 형태인 것이다. 이러한 국지적인 순환은 지역의 국지 기후를 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 특히 해륙풍은 해안 부근에서는 낮에 육지가 해면보다 더워지면서 큰 온도차로 인해 발생하는 해륙풍은 연안 국지 기후는 물론이고 연안지역 대기오염 물질 분포에도 상당한 영향을 미치게 된다.

본 장에서는 해륙풍의 발달조건 및 발달과정에 관한 일반적인 이론을 고찰하고자 한다.

2.1. 비 균일한 경계층에서의 바람

수평 방향으로 균일한 지표면 위를 비교적 장시간 불어온 공기는 그 지표면에 친숙해져 특유의 대기 구조, 즉 풍속분포, 기온분포, 습도분포를 보이게 된다. 그렇지만 실제적으로는 도시와 교외, 육지와 해양 등의 경계와 같이 지표면의 특성이 급변하는 경계역이 많이 존재하고 있다. 예를 들어 육상에서 해상으로 바람이 부는 경우를 보면 지표면의 공기 역학적 거칠기 뿐 아니라 표면의 온도와 습도 조건 등도 급격하게 변한다고 알려져 있다.

Fig. 2.1에는 수평방향으로 지표면의 상태가 급변하는 경우의 모식도를 나타낸 그림이다. 일반적으로 지표면의 상태가 변하더라도 그 상공에서 부는 바람은 원래의 난류 상태를 유지하려고 한다. 한편으로 지표면에 직접 접한 공기는 새로운 지면에 친숙해져서 그것을 상공으로 전달한다. 그래서 새로운 지표면에 영향을 받는 대기와 원래 지표면의 성질을 가진 대기 사이에는 경계면이 생성되고, 그 고도는 바람이 불어가는 거리와 더불어 증가하게 된다. 이러한 경계면 아래층을 내부경계층 또는 2차 경계층이라고 부른다.

난류의 성질을 연직방향으로 전달하는 속도는 수평방향의 속도(풍속)보다 훨씬 작기 때문에 내부 경계층 윗면의 경사는 작으며 그 규모는 두께에 대한

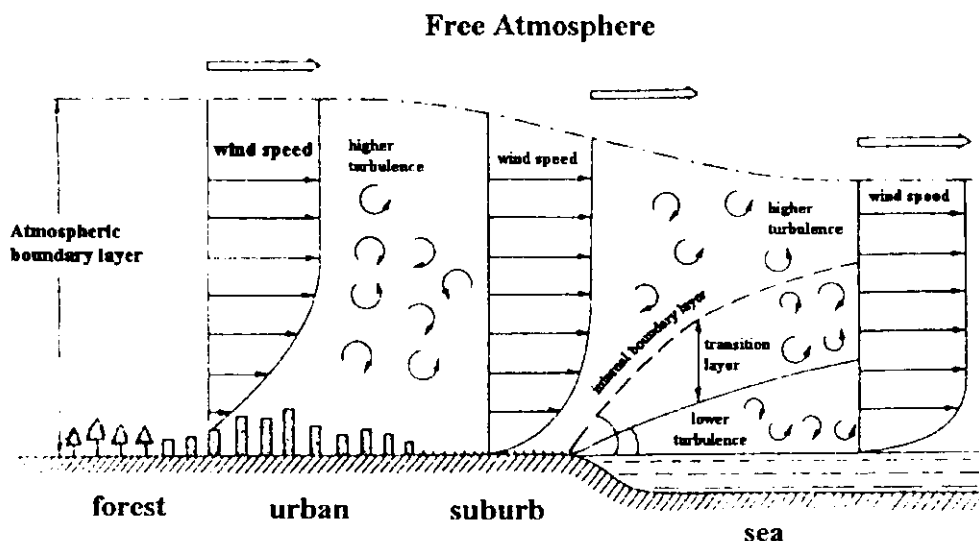


Fig.2.1. The development of an internal boundary layer as air flows from land surface to sea surface.

fetch의 비로서 $1/10$ 의 수준이다. 내부 경계층의 최하층은 완전히 새로운 표면에 친숙해져 두께에 대한 fetch 거리의 비는 $1/100$ 의 수준이다. 그 위의 중간층은 원래 지표상의 성질이 작아지고 새로운 표면상의 성질로 전이되고 있기 때문에 전이층(transition layer)이라고 부른다. (竹内清秀, 近藤純正, 1986)

2.2. 해륙풍의 발달 과정

육지와 해양사이의 분리선은 기상학적인 경계조건에 있어서 불연속을 나타내면서 지표의 가열과 습윤 조건 그리고 거칠기 등이 다르게 나타난다. 따라서 바람, 온도 및 습도의 일중 및 연중 변화는 육지에서 보다는 수체 위에서 훨씬 작고, 해안선 근처에서의 상호작용이 예상된다. 육풍이 부는 동안에 차가운 물의 용승도 또한 중요하게 된다. 해수 표면 온도는 해양 가운데에서부터 천천히 바뀌는 반면에, 바람의 편향(shift)은 해안선 근처에서 수온의 비교적 급격한 상승 혹은 하강을 낳을 수 있다. 이러한 전이 영역의 성질은 육지와 수체 사이의 온도 차이, 지균풍의 강도와 풍향, 지속시간, 지형의 거칠기, 해안선의 형태, 육상의 습윤 상태, 즉 숲과 사막 등의 인자에 좌우된다. (Munn, 1966).

이런 해륙간의 순환은 중규모 기상학적 현상이라고 종종 생각되고 있다. 그

려나 해풍은 아주 국지적 규모에서 시작되므로 미기상학에서는 상당한 관심거리가 되고 있다. 여기서는 해풍의 발달에 영향을 주는 주요요인에 대해서 보다 구체적으로 알아보려고 한다.

2.2.1. 해륙간의 온도대비

지구 표면의 가열은 그 위에 놓인 공기의 가열을 제어하게 되므로 공기 온도의 변화를 이해하려고 하면 먼저 각 표면의 열적인 특성을 알아야한다. 육상 표면은 그 성질이 다르기 때문에 유입되는 태양 에너지를 흡수 또는 반사하는 양도 달라진다. 이로써 그 위쪽에 놓인 공기의 온도 변화를 일으키게 된다. 그러나 육상 표면이 서로 다름으로 인해 나타나는 이러한 차이보다는 육지와 물 사이에서는 더욱 큰 대비를 보이게 된다. 가열의 조건에 따라서 육지는 물보다 급격하게 가열되어 더 높은 온도를 보이거나 반대로 냉각도 급격하여 물보다 더욱 낮은 온도를 나타낸다. 그러므로 표면위에 놓인 공기의 온도 변화는 표면이 물인 경우보다는 육지인 경우에 훨씬 더 크게 나타난다.

수표면 온도의 상승과 하강이 지표면 온도보다도 더 느린 가장 중요한 이유는 물과 토양의 이동성(mobility)에 있어서 차이가 크기 때문이다. 다시 말해 물은 가열됨에 따라 열이 난류에 의해서 넓게 흩어진다. 일일 온도변화를 보면 수표면 아래 6 m 혹은 그 이상의 깊이까지 나타나며, 연간으로 보면 해양이나 깊은 호수에서는 200~600 m 두께의 층을 통해서 온도 변화가 나타난다. 반면에 육지에서의 열은 토양이나 암석내부로 깊숙히 침투하지 못하고 얇은 표층에 머문다. 육지는 난류 혼합이 일어나지 않으며, 열은 전도에 의해 전달되게 된다. 따라서 일일 온도 변화는 1 m 깊이까지도 일어나는 경우도 있지만, 대체로 10 cm 깊이 이하로 아주 작다. 연간 온도변화는 보통 15 m 혹은 그 이하의 깊이에 이른다. 따라서 여름철을 보면, 물은 그 이동성이 크기 때문에 육지에 비해 상대적으로 두터운 층에서 서서히 가열된다. 반면에 육상에서는 단지 얇은 층만이 가열되므로 훨씬 높은 온도까지 상승되며, 겨울동안에는 여름에 가열된 암석이나 토양의 얇은 층은 급격하게 냉각되지만 수체는 서서히 냉각된다. 수표면이 냉각됨에 따라 수직 운동이 발생하게 되어 차가운 표면수가 침강하고 그 아래의 따뜻한 물로 치환된다.

이러한 육지와 물 사이에 있어 가열의 차이에 영향을 주는 다른 요인들을 보면, 첫째 육상의 지표는 불투명하므로 열은 표면에서만 흡수된다. 그렇지만 투명한 물체인 물에서 태양 복사선은 수 미터의 깊이까지 투과할 수 있다. 둘째, 육상 지표면의 비열보다는 물의 비열이 거의 3배 더 크다. 따라서 동일한 양에 대해서 동일한 온도만큼 높이는 데 물이 육상보다 더 많은 열을 필요로 한다는 사실이다. 끝으로, 수체로부터의 기화(냉각 과정)가 육상표면에서 기화보다 더 크다는 것이다. 이러한 모든 인자가 총체적으로 작용하여 물이 보다 천천히 데워지고, 더 많은 양의 열에너지를 저장하며, 육지보다 더 느리게 냉각되는 것이다.

2.2.2. 해륙간의 기압 대비

매일 매일의 일기도에서 관찰되는 기압 차이에 기여하는 인자들은 일반적으로 아주 복잡하지만 이러한 차이는 지구의 육상-해상 표면의 단순한 불균일한 가열에 근거를 두고 있다. 온도의 차이가 어떻게 기압 구배를 발생시키고 그에 따라 바람을 일으키는지를 Fig. 2.2에 나타냈다. 이 그림에서 아주 일반적인 해풍의 발달 과정을 볼 수 있다. Fig. 2.2(a)에서는 해뜨기 직전 연안지역의 수직 단면을 나타낸 것이다. 이 시간에는 온도와 압력이 어느 고도에서나 수평적으로는 변하지 않는다고 가정한다. 이러한 가정을 Fig. 2.2(a)에서는 여러 높이에서 압력을 나타내는 등압선을 수평으로 표현하고 있다. 수평적인 압력 구배가 없으므로 바람은 불지 않는다. 그러나 일출 후 육지와 물 사이의 가열이 불균형을 나타냄에 따라 공기 흐름이 일어나기 시작한다. 앞에서 언급한 바와 같이 해양 표면의 온도는 일일 기준으로 아주 약하게 변한다. 반면에 육상 표면과 그 위의 공기는 낮 동안에 실질적으로 데워질 수 있다. 육상 표면 위의 공기가 데워짐에 따라서 이는 팽창되고 Fig. 2.2(b)처럼 등압선이 위쪽 방향으로 휘게 된다. 비록 이러한 데워짐이 그 자체로서는 지표면 기압 변화를 일으키지는 못하겠지만 지표 상공의 압력은 그에 상응하는 해상 고도에서의 압력보다는 더 높아진다. 결과적으로 상공에 나타나는 이들 압력 구배로 인해 공기가 육상에서부터 바다 위로 움직이게 한다. 바다를 향하는 공기의 질량 수송으로 인해 해상 표면의 압력이 높아지게 되어 공기가 모여들고, 육상 지표상에서는 표면 저기압이 나타나게

된다. 상공에서 질량이 다시 분포되면서 전개되는 표면 순환은 Fig. 2.2(c)에서처럼 바다로부터 육지를 향하게 된다. 따라서 상공에서는 바다로 향하는 흐름으로 발달되고 지표상에서는 육지로 향하는 단순한 열 순환을 보이게 된다 (Lutgens and Tarbuck, 1982).

이상에 살펴본 바와 같이 해풍의 강도는 해상과 육상의 기압차이 (Δp_0)에 비례하게 된다. 이 (Δp_0)가 어느 정도 수준인지를 계산해 보면 다음과 같다

두 고도간의 기압차이는 다음의 정역학 방정식으로 표현되며

$$dp = -\rho g dz$$

기체 방정식은

$$p = \rho RT$$

로 표현된다.

위의 정역학방정식을 기체방정식으로 나누면 다음과 같은 적분식이 성립하게 된다.

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R} \frac{dz}{T}$$

$$\ln \frac{p_h}{p_0} = -\int_0^h \frac{g}{R} \frac{dz}{T}$$

여기서 p_0 는 지상의 기압이며 p_h 는 경계층 상단의 고도 $z=h$ 에서의 기압, ρ 는 공기의 밀도, g 는 중력가속도, R 은 공기의 기체상수, T 는 기온을 말한다. 여기서 기온 T 는 엄밀하게 말하면 가온도로서 비습 (q)으로서 표현된다.

$$T_v = (1 + 0.608 q) T$$

이를 단순화하기 위해서 육상의 경계층 기온이 연직방향으로 T_m 의 온도로서 등온이라고 가정하면 위의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln \frac{p_h}{p_0} = -\frac{g}{R} \frac{h}{T_m}$$

여기서 고도 h 에서 수평방향의 기압구배가 0이고, 해상 경계층 전체층의 기온을 T_m' 라고 하면, 해면 기압 p_0' 는 위의 식과 같이,

$$\ln \frac{p_h}{p_0} = -\frac{g}{R} \frac{h}{T_m'}$$

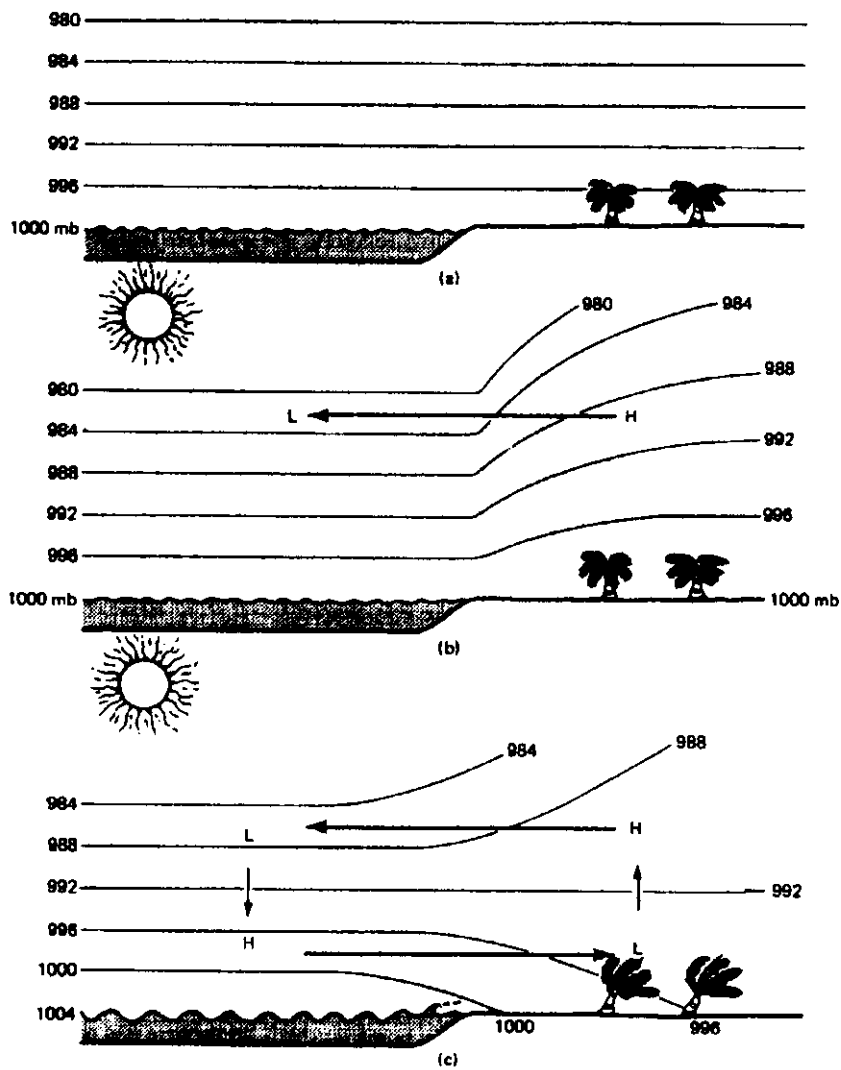


Fig.2.2. Cross sectional view illustrating the formation of a sea breeze.

위의 두 식에서

$$\ln \frac{p_h}{p_0} = \frac{gh}{R} \left(-\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_m} \right)$$

양변을 근사적으로 취해서 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta p_0 = p'_0 - p_0 = -\frac{g p_0 h}{R T_m^2} (T_m - T'_m)$$

이로써 해상과 육상의 기압차 (Δp_0)는 그 기온 차이와 경계층의 두께에 비례하는 것을 알 수 있다. 해상과 육지 사이의 기압 차이는 지상에서 최대가 되지만, 최대풍속이 일어나는 고도는 지면마찰 때문에 200 m 부근이 되고 그 최대 풍속은 5~10 m/s 정도가 된다(竹内清秀, 近藤純正, 1986).

이러한 해풍과 육풍의 모식적인 단면을 Fig. 2-3에 나타냈다. Fig. 2.3(a)에서 보면, 해안선으로부터 내부 경계층이 형성되어 있다. 해상의 기온 연직분포에 역전층이 형성될 때는 육상에 상륙한 해풍이 밑으로부터 열 공급을 받아 역전층이 하부에서부터 점진적으로 파괴되어 내륙으로 들어가서 마침내 경계층 전부가 불안정하게 된다. 해풍과 육풍의 경계를 만드는 해풍전선은 해안에서 내륙으로 전진한다. 전선의 전면에서는 지면으로부터 따뜻해진 공기가 상승하기 때문에 해풍전선의 진입속도가 해풍보다는 늦은 시속 5~10 km 전후가 된다. 내륙의 상승기류로 인해 발생한 적운은 상공에 존재하는 역류(reverse flow)에 실려서 해상으로 이동하게 된다.

Fig. 2.3(b)에서 보인 육풍의 경우에는 해풍과는 달리 경계층은 안정한 성층으로 열의 연직수송이 약하여 기온 변화를 일으키는 두께가 작다. 그러므로 앞의 식에서 알 수 있듯이 육상과 해상의 기압차가 작기 때문에 육풍은 해풍만큼 강하게 일어나지 않는다. 야간에는 해면 온도의 변화폭이 1 ℃ 이하인데 비해 지면 온도는 야간 냉각으로 인해 수온보다 낮아지게 된다. 따라서 육상 경계층의 기온이 해상 경계층의 기온보다 낮아져서 낮과는 반대로 육지에서 해상으로 향하는 육풍이 불게 된다.

이처럼 온도 변화는 압력 구배를 낳고 따라서 바람을 일으키며, 이러한 온도 차이가 크면 클수록 압력 구배와 그에 따른 바람은 더욱 강해진다. 그렇게 만들어지는 일일 온도 변화 및 압력구배는 대기의 아주 얇은 층에 제한된다. 해륙풍이 발생하는 날은 일반적으로 기압 구배가 작은 맑은 날로서 그 범위는 해안선으로부터 수십 km의 지역이다. 해풍이나 육풍의 강도는 기압 경도력, 마찰력, 그리고 전향력의 크기의 합으로 결정된다.

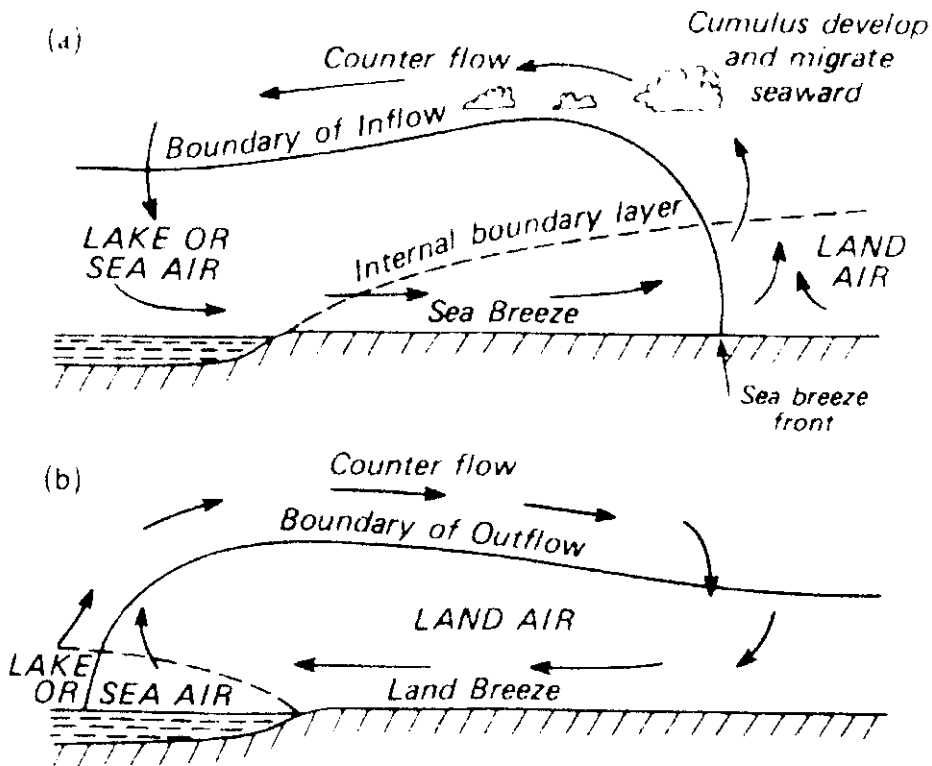


Fig.2.3. Land and sea breeze circulations across a shoreline by day (a) at night (b) during anticyclonic weather.(Oke, 1978)

2.2.3. 지균풍의 영향

지균풍이란 2차원 흐름에 있어서 코리올리힘(Coriolios' force)과 기압경도력이 완전하게 균형을 이루고 있을 때 등고선에 따라 부는 바람으로서, 북반구에서는 저압부를 왼쪽으로, 고압부를 오른쪽으로 하여 바람이 분다. 실제 대기 중에서는 1 km 이상의 상층에서 부는 바람에 대해서 적용할 수 있으며, $V_g = -(g/f)(\partial z / \partial n)$ 로 표현될 수 있다. 여기서 g 는 중력가속도, f 는 코리올리 파라미터, $(\partial z / \partial n)$ 는 등압면의 기울기이다.

따라서 코리올리힘(Coriolios' force)과 기압경도력의 관계로 나타나는 이러한 지균풍의 존재 여부에 따라서 국지적인 순환인 해륙풍의 흐름도 영향을 받게 된다.

가. 지균풍이 약할 경우

지균풍이 아주 약하고, 하늘은 맑으며, 해안선이 직선인 가장 단순한 경우를 고려해 본다. 순환이 개시되면, 육상에는 따뜻한 공기가 위치하게 되고 바다에는 차가운 공기가 위치하게 된다. 그렇지만 온도구조는 두 가지 따라서 변경이 된다. 첫째, 침강하는 공기는 단열적으로 따뜻해진다. 예를 들면 만일 일출시에 바다 위에 약한 역전이 있다면 침강이 일어나는 높이에서 역전은 강해질 것이다. 둘째, 내륙으로 움직이는 바다 공기는 아래에서부터 가열된다. 체감율이 초단열적인 새로운 내부 경계층이 발달된다.

이런 결과로 나타나는 낮 시간의 해풍 구조를 Fig. 2.4에 묘사했다. 역전의 기저부는 해풍 전선면이 아니라 내부 경계층의 꼭대기이며, 해풍 전선면의 높이는 약 1km 정도가 된다. 초기 해풍은 일출 후 한 시간 혹은 그 정도에 강하게 밀려들면서 온도의 급 하강 (2~10 °C 정도) 및 습도의 상승을 나타낸다. 시간이 지나면서 그리고 내륙 쪽으로 들어가면서 해풍의 도달은 식별하기 어려워지는데 그 이유는 가열된 지면에 의해서 변경되기 때문이다. 사실 2차 해풍전선이 발달하고 내륙으로 움직이게 되면 완전히 사라질 수도 있다. 하루 동안에 전이 영역은 상당히 넓게 나타난다. 공기의 궤적이 연장됨에 따라 지구 자전에 의한 전향력(Coriolis force)이 중요하게 되는데, 늦은 오후까지 흐름의 방향이 해안에 평행해 질 때까지 바람의 순전을 일으키기 때문이다.

육지가 물보다 더욱 냉각되는 야간에는 역 순환이 발달하는데 육지의 야간복사 역전과 관련되기 때문에 역 순환은 약하다. 육풍은 보통 간헐적이다. 만일 바람이 고르게 분다면 냉각수의 용승이 일어나고 해륙간의 온도차이는 줄어든다. 야간에 공기 궤적은 전향력이 중요해질 정도로 충분히 길어지지 않는다. 그러므로 육풍은 보통 해안에 대해서 오른쪽으로 불게 된다. 해안선이 울퉁불퉁하면, 바람과 온도는 미규모 변화를 많이 보인다.

해풍은 육지가 삼림일 때보다는 사막일 때 더욱 강하다. 넓은 모래사장은 때때로 충분히 뜨거워져서, 육상과 바다 모두에서 백사장위로 공기가 불어오는 이중 순환 셀을 만들 수가 있다.

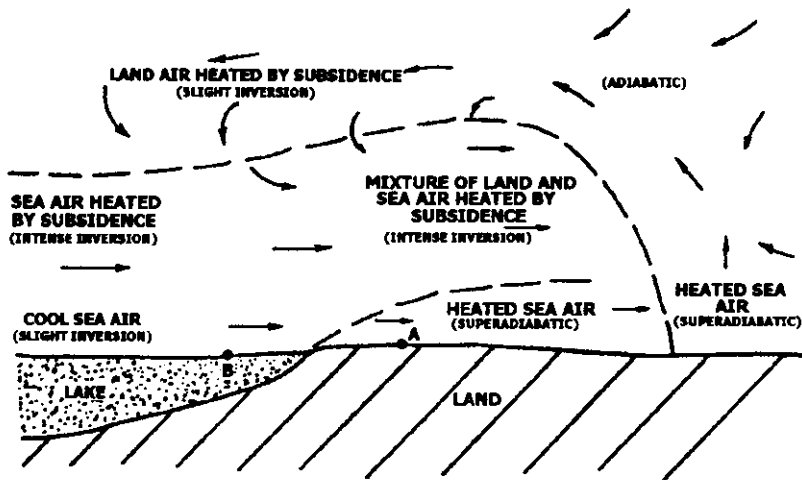


Fig.2.4. Schematic representation of a sea breeze with the geostrophic wind is light.

나. 지균풍이 강할 경우

지균풍이 해안선에 대해 오른쪽 방향으로 해양에서부터 육지 쪽으로 불 때는 상식적으로는 해풍은 불가능하다. 새로운 경계층이 해안선에서 발달하기 시작하여 내륙에서 두터워진다. 이론적으로는 야간에 육풍이 발달하여 지균풍을 극복하는 것이 가능하지만 이는 경사풍 혹은 곡풍과 관련된 경우를 제외하고는 거의 일어나지 않는다.

지균풍이 육상에서 해양 쪽으로 불 때, 해풍은 해안선 근처에서 꺾어 못하거나 혹은 평균적 흐름이 육상에서 해양으로 불게 되어 완전히 소멸될 수도 있다. 반면 야간 육풍은 강해질 것이며, 새로운 경계층이 해상 쪽으로 발달한다. 주간 해풍은 지균풍의 강도, 가열의 차이 정도, 그리고 다른 인자들에 따라서 발달될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 만일 해풍이 생성되어 육지에 도달하게 되면 보통 급격한 바람의 상승(sharp wind lift), 온도의 강하, 그리고 습도의 증가를 수반한다. 일출 후 처음 몇 시간 동안은 가열된 육상 공기는 차가운 해상의 공기를 밀어내면서 지균풍의 방향으로 움직이게 된다. 만일 충분한 압력의 차이가 발달하면 해풍은 해안을 향해 움직이며, 육상 공기의 아래쪽으로 파고들어 한랭전선과 같은 특성이 전개되게 된다(Munn, 1966).

이상에서 살펴본 해륙풍의 풍계에 관한 전형적인 관측 결과를 Fig. 2-5에 나

타냈다. Fig. 2.5는 미국 L.A에서의 4월의 매시 평균풍을 나타낸 것으로 풍향과 풍속을 화살표로 표시하였다. 화살표 앞의 숫자는 그 시각을 나타낸다. 남서쪽에 바다를 두고 북동쪽에 육지를 가진 이 지역에서는 10시경에 해풍이 시작되고 풍향은 시계방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 해풍의 최강은 15시 전후이고, 그 방향은 해안선과 직각인 방향에서 오른쪽으로 벗어나고 있다. 한 밤중을 지나면 육풍이 시작되고 아침 8시경까지 계속된다. 다른 많은 지역에서도 해륙풍의 그림은 시계방향으로 회전하는 것으로 알려져 있다(竹内清秀, 近藤純正, 1986).

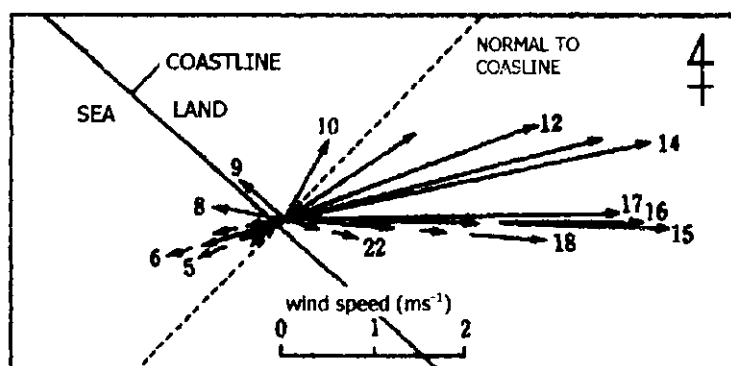


Fig. 2.5. Typical pattern of land and sea breezes at Los Angeles, on April.

해풍과 육풍의 규모는 위치와 계절에 좌우된다. 연중 태양의 가열이 강한 열대 지역에서는 중위도 지역보다는 보다 강하고 빈번한 해풍을 경험하고 있다. 가장 강한 해풍은 차가운 해류에 인접한 해안선을 따라서 발달한다. 중위도에서는 해풍은 일년 중 가장 따뜻한 시기에는 아주 흔하게 나타난다. 그러나 해풍의 파트너인 육풍은 종종 나타나지 않는데, 그 이유는 육지가 해양 온도 이하로 항상 냉각되지 않기 때문이다. 보다 더 고위도인 중위도에서는 기압계의 잦은 이동 때문에 일반적으로 순환이 우세하게 된다. 따라서 이들 지역에서는 해풍과 육풍의 발달이 덜 현저하다.

2.3. 해륙풍의 영향

가. 온도에의 영향

해풍은 해안지역에서 온도에 대한 영향을 미치게 된다. 해풍이 시작된 직후에 육지의 기온은 5에서 10℃ 정도까지 떨어지게 된다. 그러나 이런 바람의 냉각 효과는 일반적으로 열대 지역에서 육지내로 최대 100km까지 이르게 되며, 중위도에서는 그 절반 정도의 거리까지 나타난다. 이러한 차가운 해풍은 일반적으로 정오 직전에 시작되어 오후 중반쯤에는 시간당 10에서 20km 정도로서 최대 강도에 이른다. 보다 작은 규모의 해풍은 큰 호수의 연안을 따라서 발달할 수도 있다. 많은 지역에서 해풍은 역시 구름량과 강수량에 영향을 준다. 예를 들어, 미국 플로리다 반도는 애틀란타와 걸프 만에서 불어오는 해풍의 수렴으로 인해 부분적으로 야기되는 여름철의 최대 강수량을 경험하고 있다.

나. 습도에의 영향

해풍이 발생하면 습도분포가 달라진다. 이러한 습도분포는 수증기압의 구배로써 표현되는데, 해풍의 순환계 내에서 수증기압 분포의 3차원 구조는 비록 잘 밝혀져 있지는 않지만 중요하다.

대표적인 수증기압의 단면을 Fig. 2.6에 나타냈다. 해수면 상공에서 침강하는 공기와 연관된 건조한 허 모양의 형태가 나타남을 볼 수 있다. Fig. 2.7은 해륙풍 발달과정에서 나타나는 상대습도와 기온의 일 변화의 예를 나타낸 것이다. 태양이 뜬 후 한 시간 정도에 발생하는 초기의 해풍이 밀려들면 해풍이 도달한 육지에서는 기온이 2~10℃ 정도의 수준에서 급격하게 떨어지고, 습도는 급격하게 상승한다. 그러나 오후에는 해안에서 상당한 거리에 위치한 내륙에서는 해풍이 지면에 의해서 가열됨에 따라서 사실상 해풍이 희미해지며, 제2의 해풍전선이 해안에서 발달하여 내륙으로 이동하는 경우도 있다. 밤이 되어 지면이 해수면보다 냉각되면 낮과는 반대로 육상에서 해상으로 환류가 발달하게 된다. 그러나 육풍은 약하므로 전향력의 영향을 거의 받지 않아 통상은 해안선에 직각으로 불게 된다(Munn, 1966).

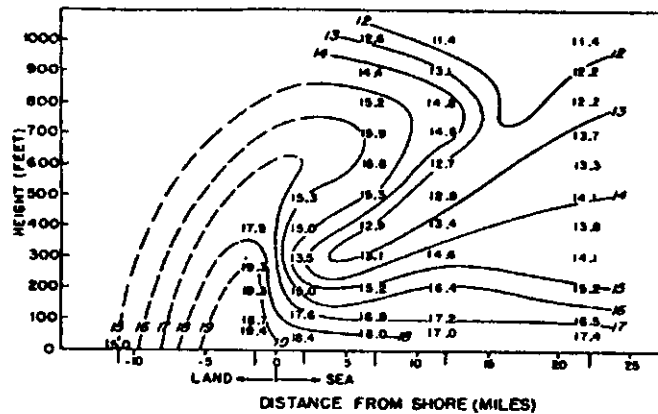


Fig.2.6. Vapor pressure (mb) distribution during sea breeze with an offshore geostrophic wind.

다. 대기 확산에의 영향

해풍이 발달하는 상태에서 해안에 높은 굴뚝이 위치하게 되면 연기는 역전층 내에서 그다지 확산되지 않고 가로로 길게 내륙으로 이동하게 된다. 그렇지만 일정한 거리를 지나면 그 연기가 불안정층으로 된 내부 경계층에 들어오면 강한 확산이 일어나기 시작하기 때문에 대기확산이 된다. 해풍이 발생하게 되면 다음과 같은 영향이 있다.

Fig. 2.8은 미국 로스엔젤레스 지역에서 해풍 발달에 따른 오존농도 분포 양상을 나타낸 것이다(Aguado and Burt, 1999). 해풍이 발달하면, 해풍 전선은 해양에서 비교적 깨끗한 공기와 전선 앞쪽의 보다 오염되고 건조한 공기를 분리시키게 된다. 그림에서 보면 해풍전선이 육상으로 진입함에 따라서 오염물질을 동쪽 혹은 북동쪽으로 밀어내고 있다. 이처럼 해풍전선이 육상으로 진입하게 되면 위쪽에 비교적 깨끗한 공기를 지닌 해풍전선 근처에서 급격한 오존농도 구배를 나타내게 됨으로서 동쪽지역과 북동지역으로 오존 농도가 증가함을 알 수 있다.

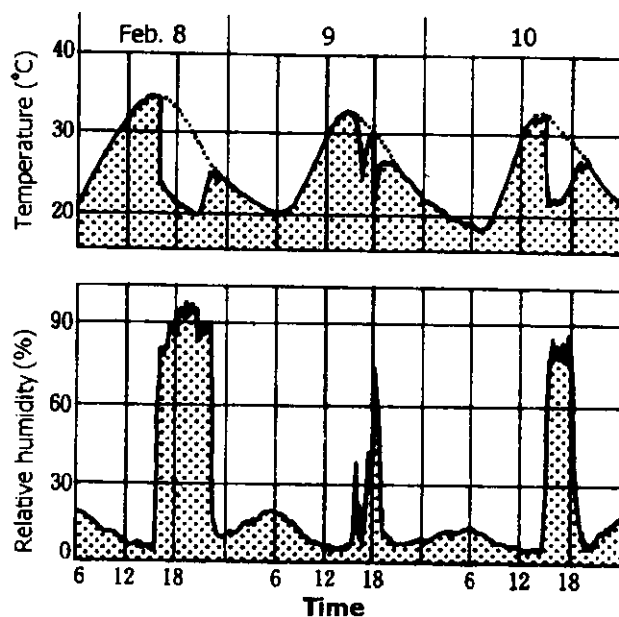


Fig.2.7. Daily variations of relative humidity and temperature during the period of land and sea breezes.

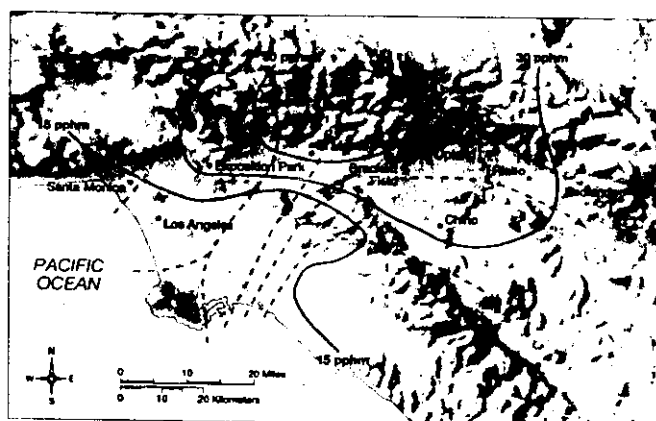


Fig.2.8. The distribution of ozone between 4 and 5 P.M. on July 25, 1973. Dashed lines show the wind direction.

III 연구자료 및 방법

3.1. 기상관측지점 위치

제주도는 우리나라의 남단 $33^{\circ} 6' N \sim 34^{\circ} 0' N$, $126^{\circ} 8' E \sim 126^{\circ} 58' E$ 에 위치한 화산으로 생성된 섬으로써 섬 전체를 볼 때, 남북으로 34km, 동서로 76km이며 총 면적은 1845km^2 이다. 제주도의 중앙부에는 해발 1950m인 한라산의 정상을 중심으로 원주를 얹어 놓은 형태이며, 남북 방향의 경사가 급하고 동서 경사는 완만함을 보이고 있다. 그리고 섬 전체를 보면 해안선에서 해발 200m 이하의 낮은 지역에 대부분의 인구가 밀집하여 있다. 이러한 제주도의 지리적 위치 그리고 기상관측점 및 지형은 Fig. 3.1과 3.2에 각각 나타냈다.

한라산을 중심으로 주변에는 “오름”이라고 불리는 기생화산들이 367개가 곳곳에 산재하고 있으며, 특히 동부지역에는 300~700m의 비교적 높은 오름이 많아 지형에 따른 국지 강풍대가 나타나고 있다.

제주도의 이러한 지형적인 특성으로 인해 날씨의 변화가 국지적으로 서로 다르게 나타나고 있다. 이러한 특성으로 인해 제주도는 Fig. 3-2처럼 한라산을 중심으로 동, 서, 남, 북 방향으로 기상예보구역을 나누고 있으며, 각 예보구역에는 기상관서를 두어 관측 및 예보를 담당하고 있다. 제주도의 북부 중앙부에 위치한 제주시 기상관측점은 해안선에서 약 200m 떨어져 있으며 도심지역에 위치하고 있어 주변에 건물이 산재해 있다. 제주도 남부에 위치한 서귀포시 기상관측점은 해안선에서 200m 가량 떨어져 있고 이 곳 역시 주변에 건물이 산재해 있다. 제주도 동부지역의 관측점은 해안선에서부터 1.5km 정도 떨어져 있으며, 주변지역이 주로 초지로 형성되어 있으며, 많은 오름 등이 위치하고 있다. 제주 서부지역의 관측점은 해발 72m인 해안가 절벽 위에 위치하고 있으며 주변은 농경지로 이루어져 있다.

그리고 4개 기상 관측점이외에 제주도 전역에 걸쳐 10여 곳의 자동기상관측소가 운영되고 있다.

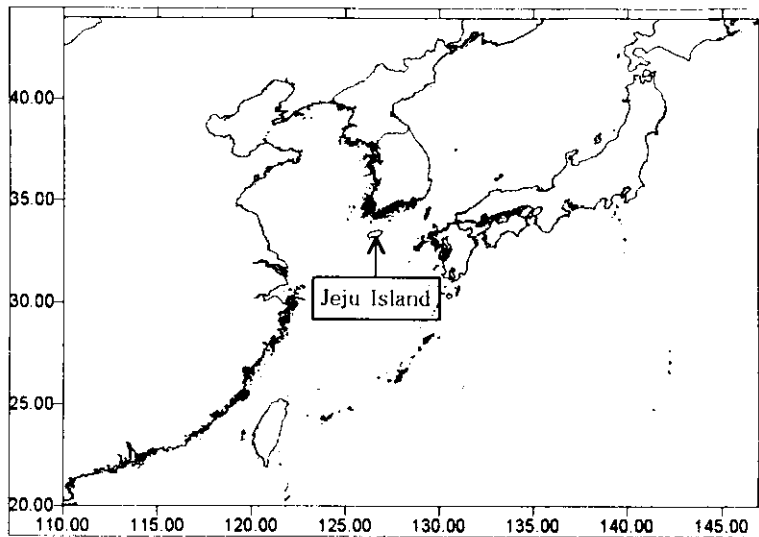


Fig.3.1. The geographical location of Jeju Island.

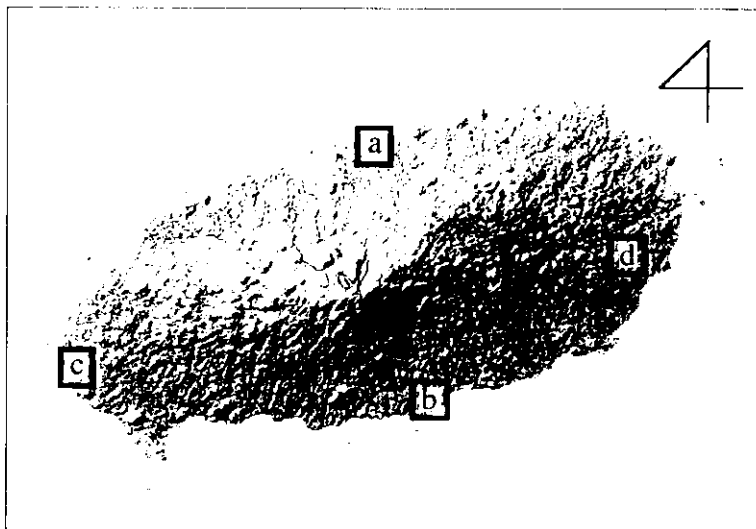


Fig.3.2. Topographical map of Jeju Island and the location of observatory station. a : Jeju
b : Seogwipo c : Gosan d : Seongsanpo.

3.2. 기상관측자료 분석

본 연구에서 사용한 기상관측자료는 기본적으로 4개 기상관측점에서 측정한 1991년부터 2000년까지 10년간의 자료를 대상으로 하였다. 각 기상자료는 24시간 연속으로 기록된 에어로벤 풍향·풍속 자기 기록지와 삼배 풍속계 자료를 중심으로 일 기상 통계표, 지상 및 고층 일기도, 그리고 수치예보자료 등을 수집하여 분석하였다.

3.2.1. 바람자료

제주도내 4개 기상관서에서 관측한 10년간의 지상바람자료는 24시간 연속 기록된 바람자료를 판독하여 분석하였다. 바람을 관측하여 기록한 자기기록지의 예를 Fig.3.3에 나타냈다.

본 연구에서는 해풍의 발생을 지상풍을 기준으로 하였으며, Fig.3-3에서 보는 바와 같이, 에어로벤 풍향·풍속 자기 기록지로서 우선적으로 풍향을 분석하였다. 제주도내 4개 기상 관서별로 해안이 위치한 방향이 서로 다르므로 Table 3.1에 나타난 풍향을 기준으로 우선 해풍을 판독하였다.

해풍을 판독함에 있어 우선 새벽에서 일출 후 풍향이 급변 여부를 우선 판단함과 동시에 Table3.1에서 제시한 기준에 부합하는 방향에서 바람이 유입되는지를 판독하여 일치하면 해풍으로 우선 구분하였다.

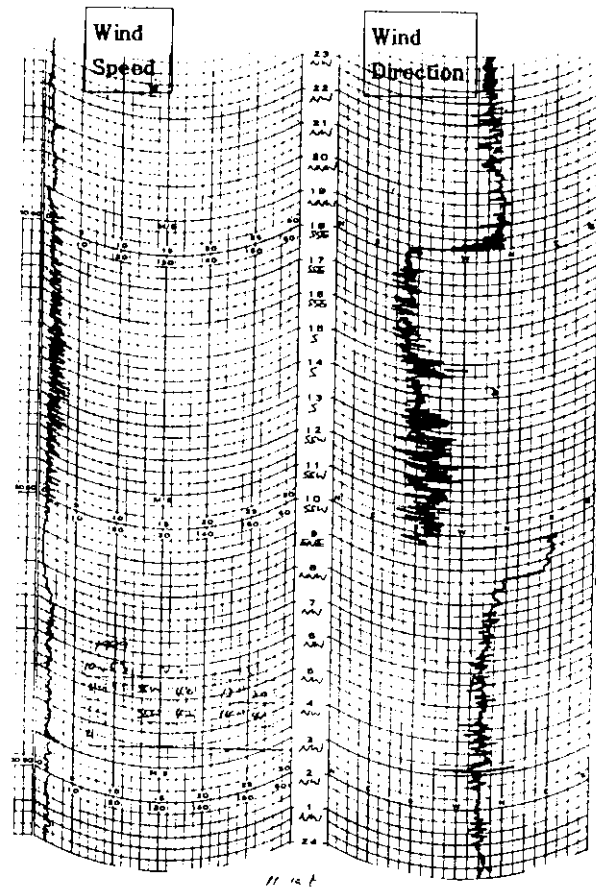


Fig.3.3. The example of autographic record of aerovane(5 Oct, 1999).

다음으로는 풍속자료를 판독하였다. 풍속 자료는 원칙적으로 Fig.3.3(b)에 나타난 바와 같은 삼배 풍속계로 관측된 10분간의 평균풍속을 이용하였다. 앞장에 이미 살펴본 바와 같이, 많은 연구에서 해풍의 발생시 풍속은 보통 5~6m/s로 발표되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 제주도 지역의 해풍 판단 기준으로 풍속은 6m/s 이하인 것으로 판단하였다.

이상의 바람 관측 자료의 판독에서 해풍의 조건에 모두 부합하면, 해풍이 발생한 것으로 판단하였으며, 그 발생 시각, 지속시간 등을 월별, 연도별, 지역별로 파악하여 정리하였다.

Table 3.1. Criteria for the occurrence of sea breeze at each station

Station	Wind direction for Sea breeze	Wind speed
Jeju	NW~NE	≤ 6m/s
Seongsanpo	NE~SE	
Seogwipo	SE~SW	
Gosan	SW~NW	

3.2.2. 기온 일기도 및 기상관련자료

본 연구에서는 해풍의 발생이 국지 지역의 기온에 미치는 영향을 살펴보기 위해서, 1991년부터 2000년까지의 일 기상 통계자료에서 일 최고기온의 발생시각 및 기온을 파악하였다. 바람의 발생은 지상의 기압계와 상층의 기압계의 배치 특성에 따라서 영향을 받게 되므로 지상 일기도 및 상층 일기도의 분석이 필수적이다. 따라서 본연구에서는 해풍 발생 일에 나타난 제주도 전역의 바람장이나 온도분포를 파악하기 위해서는 무인자동 기상관측점의 자료에 근거하여 수치해석으로 표출한 바람 vector와 온도 분포에 관한 영상 자료를 함께 분석하였다.

IV 결과 및 고찰

4.1. 해풍발생빈도

1991년부터 2000년까지 제주도의 4개 지역에서 관측된 지상풍의 풍향과 풍속을 근거로 판단한 해풍의 발생일수를 지역별, 계절별로 구분하여 Table 4.1에 나타냈다. 표에서 보면 과거 10년 동안 제주도 지방에서 4개 관측점에서 관측된 결과를 중심으로 해풍이 발생한 날은 제주시를 중심으로 한 제주북부지역에서 219일, 서귀포시를 중심으로 한 제주 남부지역에서 226일, 성산포를 중심으로 한 제주 동부지역에서 59일 그리고 고산리를 중심으로 한 제주서부지역이 43일이었음을 알 수 있었다. 이로써 보면 과거 10년 동안의 해풍발생빈도는 제주 북부지역과 남부지역에서 집중되고 있으며 동부와 서부지역에서는 상대적으로 출현빈도가 크게 떨어짐을 알 수 있다. 이런 결과를 보이는 것은 크게 세 가지 요인 때문으로 생각할 수 있다. 첫째는 제주도의 지형적인 특성을 들 수 있다. 제주도는 한라산을 중심으로 남·북 경사면의 경사도가 동서 경사면에 비해 크기 때문에 강제적인 상승류의 발달이 원활하게 이루어져 국지순환을 강화시켜주는 요인으로 작용했기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 제주도 지역은 남·북 방향에 도시가 발달해 있어 주로 전원지역으로 이루어진 동·서 지역에 비해 해륙간의 지표면 특성의 차이로 인한 지면 가열정도가 상대적으로 크기 때문에 해풍발달이 보다 용이했던 것으로 보인다.

둘째로는 기상관측점의 지리적 위치와 해안선의 형태의 차이를 생각할 수 있다. 제주도 북부와 남부지역은 해안선이 좌우(동서)방향으로 비교적 직선적인 형태를 보이고 기상관측점이 해안선 가까이에 위치하고 있다. 그렇지만 제주도 동부와 서부지역은 해안선이 바다를 향해 돌출된 만곡 형태를 지니고 있으며 동부지역 관측점은 해안선에서 1.5km 내륙에 위치하고 있어 초기에 약하게 발달하는 해풍을 제대로 관측할 수 없는 상황이다. 또한 서부지역 관측점은 해안변의 높은 절벽위에 위치하고 있어 해풍 순환계내의 바람을 제대로 관측하기 어려운 상태이다.

끝으로 본 연구에서 설정한 해풍 판단 기준 때문에 해풍 발생 빈도에 큰 차이를 보일 수 있을 것이라고 판단된다. 본 연구에서는 해양으로부터 불어오는

바람중에서 관측점을 중심으로 좌우 90° 이내의 범위에 해당하는 바람만 해풍이라고 판단함으로서, 해안선이 해양쪽으로 돌출된 만곡 형태를 보이는 동부와 서부지역에서 실제로 해양에서 불어오는 바람 가운데 이런 풍향범위를 벗어나는 바람은 제외되었기 때문에 해풍 출현빈도가 크게 낮아진 것으로 판단된다.

Table 4.1에서 계절별 해풍발생일수를 보면, 해풍은 주로 봄철과 가을철에 빈번하게 출현되었음을 알 수 있다. 수평방향으로의 지표열 가열특성의 차이가 해풍발달의 근간이기 때문에 지표가열이 가장 강한 여름철에 해풍이 빈번하게 나타날 것으로 예상하였으나 제주도 지역의 봄과 가을철에 보다 빈번하게 나타났다. 그 이유는 우리나라의 봄, 가을철에는 온난한 성질을 지닌 이동성 고기압이 한반도 남부지역을 빈번하게 통과하기 때문에 타 계절에 비해 봄, 가을철에 날씨가 맑고 일반풍이 약한 온난한 날씨를 보이므로 해풍이 쉽게 발달할 수 있다고 판단된다.

Table 4.1. The occurrence number(days) of sea breeze

Site	Season				Total
	Winter	Spring	Summer	Fall	
North	36	50	40	93	219
South	53	61	29	83	226
West	5	12	13	13	43
East	9	19	11	20	59
Total	103	142	93	209	547

4.2 해풍의 발생 특성

4.2.1. 해풍 발생 시각

Fig. 4.1은 제주도 지방에서 과거 10년간 해풍이 발생하기 시작한 시간대를 계절별 빈도수토써 지역별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 제주도 북부지역과 남부지역에서는 07:00 ~ 11:00사이에 집중적으로 발달하기 시작하고 있으며 북부지역이 남부지역에 비해 오전 7시대에 출현하는 빈도가 다소 높음을 알 수 있다.

계절별로 보면, 봄철에는 북부와 남부 지역에서 주로 8시대에 가장 많이 해풍이 시작되었으며 여름철에도 8시대에 시작되는 해풍이 가장 많았으며 7시대부터 출현하는 해풍의 빈도가 증가되고 있음을 볼 수 있다. 가을철에는 봄, 여름철과는 달리 9시대에 가장 많은 해풍발달이 시작되었으며 겨울철에는 10시대에 집중되는 경향을 볼 수 있다.

동부와 서부지역의 경우를 보면 해풍이 발생하는 시간대의 범위는 북부와 남부지역과 비슷한 양상이지만, 계절별 분포양상은 서로 다른 형태를 보임을 알 수 있다. 동부지역의 경우 봄, 여름, 가을철에 해풍시작 시간대가 8시에 집중되고 있으며 겨울철에는 9시대에 집중되어 있음을 알 수 있다. 서부지역의 경우에는 동부지역과도 다소 다른 형태로 보이는데 봄철과 겨울철에는 주로 8시대에 시작되고 여름철에는 7시대에서 8시대에 집중되고 있으며 가을철에는 10시대에 대부분의 해풍이 발달하기 시작하고 있다. 이처럼 해풍발생 시간대에서 제주도 북부와 남부지역이 동·서부 지역과 차이를 보이고, 전원지역인 동·서부 지역 간에도 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 이런 결과를 보이는 것은 앞에서도 언급한 바와 같이, 기상관측점의 위치와 본 연구의 해풍 판단근거에 의한 원인을 포함하여 지형적인 특성에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 4.2는 일출후 해풍이 발생할 때까지의 시간간격을 계절별 빈도수로써 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 제주도 서부지역을 제외한 나머지 지역에서는 해풍의 발생이 일출 후 3~4시간 정도 경과한 후에 일어남을 알 수 있다. 제주도 서부지역은 다른 지역과는 다소 다른 양상을 보이는데 이는 기상관측점이 해안면에 형성된 해발 72m의 높은 절벽 위에 위치하고 있으므로 초기에 발달되어 해면 가까이에서 불어오는 해풍을 제대로 관측하지 못했기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 그리고 동부지역의 경우에도 시간 간격이 비교적 넓은 분포를 보임을 알 수 있다. 이 또한 동부지역 관측점이 내륙으로 비교적 멀리 들어가 있어 온기에 발달한 약한 해풍의 관측이 제대로 파악되지 못해 나타난 결과라고 생각된다.

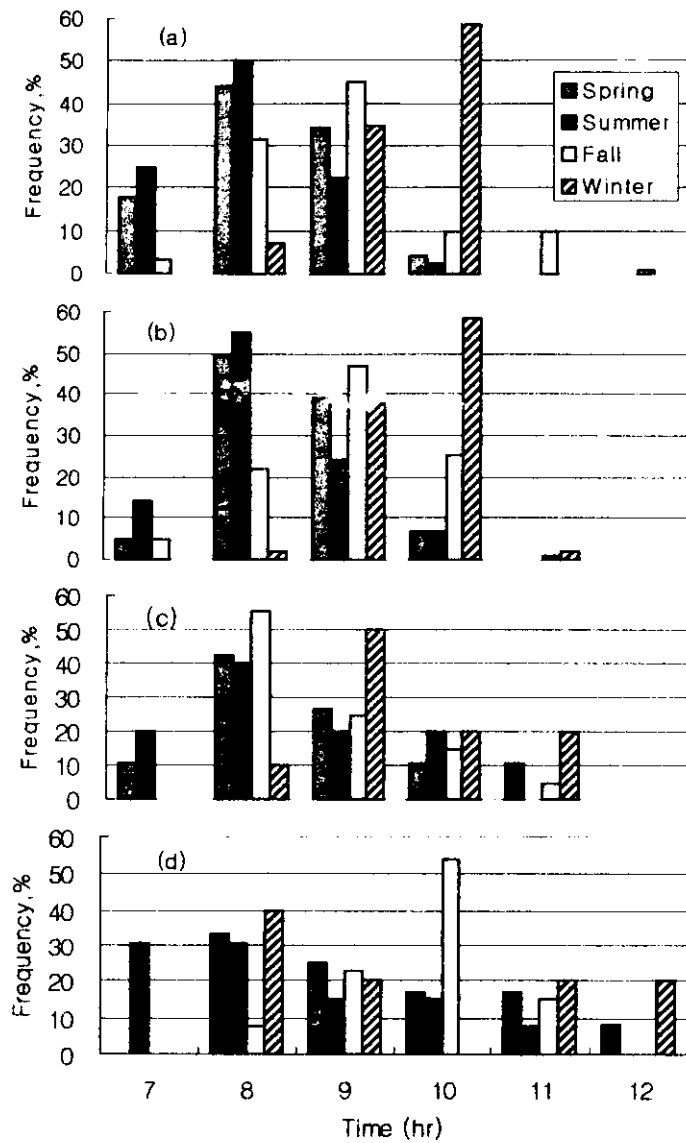


Fig.4.1. Seasonal distribution of initiating time of sea breeze : (a) North site (b) South site (c) East site (d) West site.

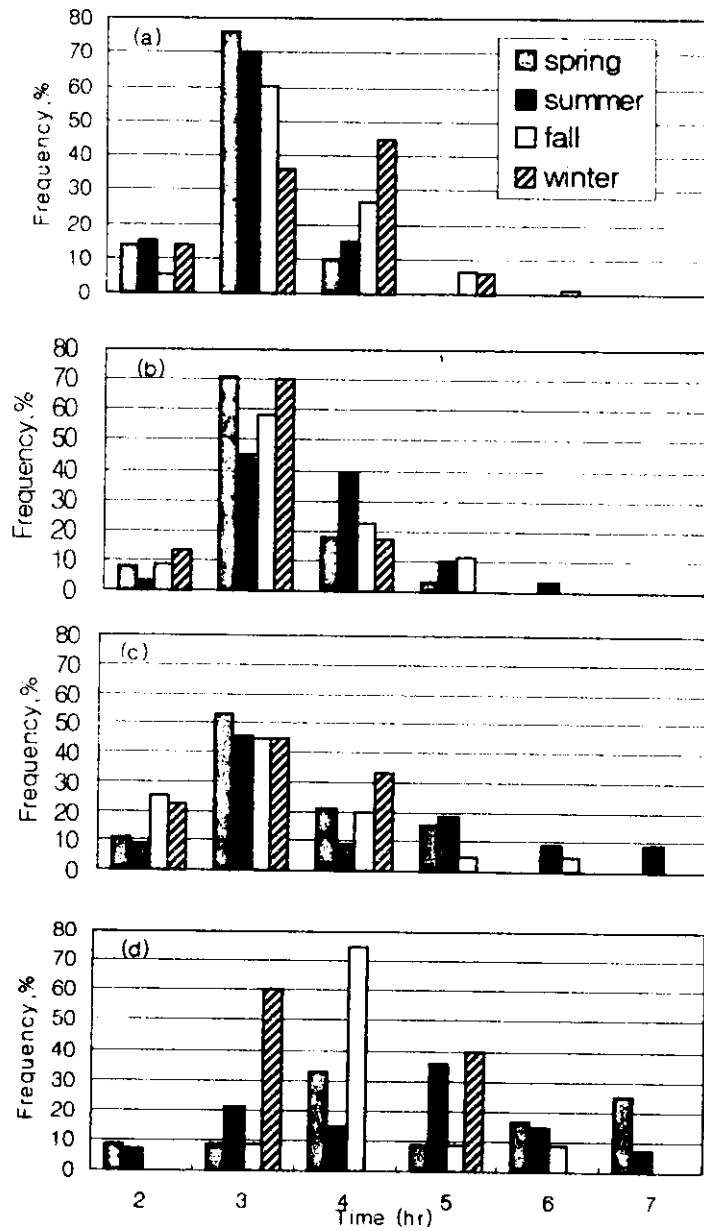


Fig. 4.2. Initiation time of sea breeze after sunrise :
 (a) North site (b) South site (c) East site
 (d) West site.

이상에서 보는 바와 같이 해풍은 도시지역과 전원지역의 차이, 지표 가열의 차이 등과 같은 지형적인 특성 및 해풍 관측점 위치 등 여러 요인의 영향에 따라 그 발생시기가 다르게 파악되었다.

4.2.2. 해풍의 지속 시간

Table 4.2은 제주도내에 과거 10년간 발생한 해풍의 지속시간을 월별로 정리하여 지역별로 나타낸 것이다. 제주도 전 지역을 통틀어 보면 해풍의 지속시간은 계절별로 차이를 보이면서 전년에 걸쳐 5~13시간 정도 지속되는 것으로 나타났다.

Table 4.2에서 해풍 지속시간을 지역별로 보면, 제주도 북부와 남부지역에서는 지속시간의 월별 분포 형태가 비슷하게 나타났지만 동부와 서부지역과는 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 제주도 북부지역의 경우 봄철에는 7~13시간 정도의 지속시간을 보이면서 5월에는 10~13시간 또는 그 이상의 지속시간을 보이는 경우도 나타남으로서 하절기에는 지속시간이 다소 늘어나는 경향을 보임을 알 수 있다. 6~8월을 기점으로 가을철로 접어들면서 지속시간이 점점 짧아져 겨울철에는 대체로 5~10시간 정도의 범위를 보임을 알 수 있다. 제주도 남부지역을 보면, 전체적인 지속시간의 분포형태는 북부지역과 흡사한 형태를 보이지만, 하절기 지속시간이 북부지역에 비해 2시간 정도 짧은 경향임을 알 수 있다.

제주도 동부지역과 서부지역은 북부와 남부지역과는 다른 계절적 해풍 지속시간 분포를 보이는데, 동부와 서부지역의 월별 지속시간 분포는 아주 산발적임을 알 수 있다. 이처럼 계절별 해풍 지속시간이 다르게 나타나는 이유를 파악하기 위해 일출시간과 관련이 되는 낮의 길이와의 상관성을 알아보고자 했다.

Fig. 4.3은 해풍의 지속시간과 해풍이 나타난 날의 낮 길이와의 상관성을 지역별로 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 제주북부와 남부지역은 양자간의 상관성이 비교적 뚜렷한 반면에 동부와 서부지역에서는 양자간의 상관성이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 계절별 해풍 지속시간이 다르게 나타남은 계절에 따른 일출시간의 차이에 인한 것으로, 하절기로 가면서 일출이 빨라지고 낮 시간이 길어지면서 일사가 증가함에 따라 해풍 지속시간이 길어지며 동절기에는

그 반대의 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 북부지역과 남부지역은 도시화가 비교적 진행된 곳으로서 해양과 육지간의 열 흡수 및 반사 특성에 있어 뚜렷한 차이를 보이기 때문에 국지 순환계의 발달이 비교적 용이했기 때문일 것이다. 그리고 서부와 동부지역에서 월별 지속시간이 산발적으로 나타나면서 낮의 길이와 지속시간의 상관성이 낮은 것은 이 두 지역의 기상 관측점의 지리적 위치가 해풍 관측 목적으로 적절하지 못했기 때문으로 판단된다.

Table 4.2. The duration of sea breeze

Time(hr)	Month												Total
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
(a)North Site													
<5											1		1
<6		1									3	2	6
<7	3	1							1	1	7	4	17
<8	7	1	1	1					3	6	10	3	32
<9		4	6	1					2	9	5	4	31
<10		4	7	4				2	11	7	3	2	40
<11			2	7	1		1	6	8	5	1		31
<12			1	4	3	2	4	11	7	1			33
<13			1	4	3	3	1	6	1				19
>13					4		2	2	1				9
(b)South Site													
<5													
<6	1								1	1	2	3	8
<7	3	2	4						4	2	9	3	27
<8	3	7	1	2				1	4	6	11	8	43
<9	7	6	9	6	1	2	1	3	5	12	6	4	62
<10	2	2	6	8	5	2	4	6	4	6		1	46
<11		1	3	4	2		2	2	4	3			21
<12			2	4	4	1	2	2	1				16
<13						1			1		1		3
>13													

Table 4.2. continue

Time(hr)	Month												Total
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
(c)East Site													
<5									1				1
<6										1	2		3
<7	1							1		1		1	4
<8		1	1			1			1	2	4	1	11
<9			2			1	1			2	1		7
<10	1	2	2	1		1	1	1	2			1	12
<11		1		5	6		1		2				15
<12					1	2			1				4
<13					1			1					2
>13													
(d)West Site													
<5			1		1	1							3
<6			1		1			1		2		1	6
<7					1	1				1	2	2	7
<8			2	1	1	1		1		2	1		9
<9					1		1	1	1	1	1		6
<10	1						2	1	2				6
<11		1		1		1							3
<12						1							1
<13								1					1
>13				1									1

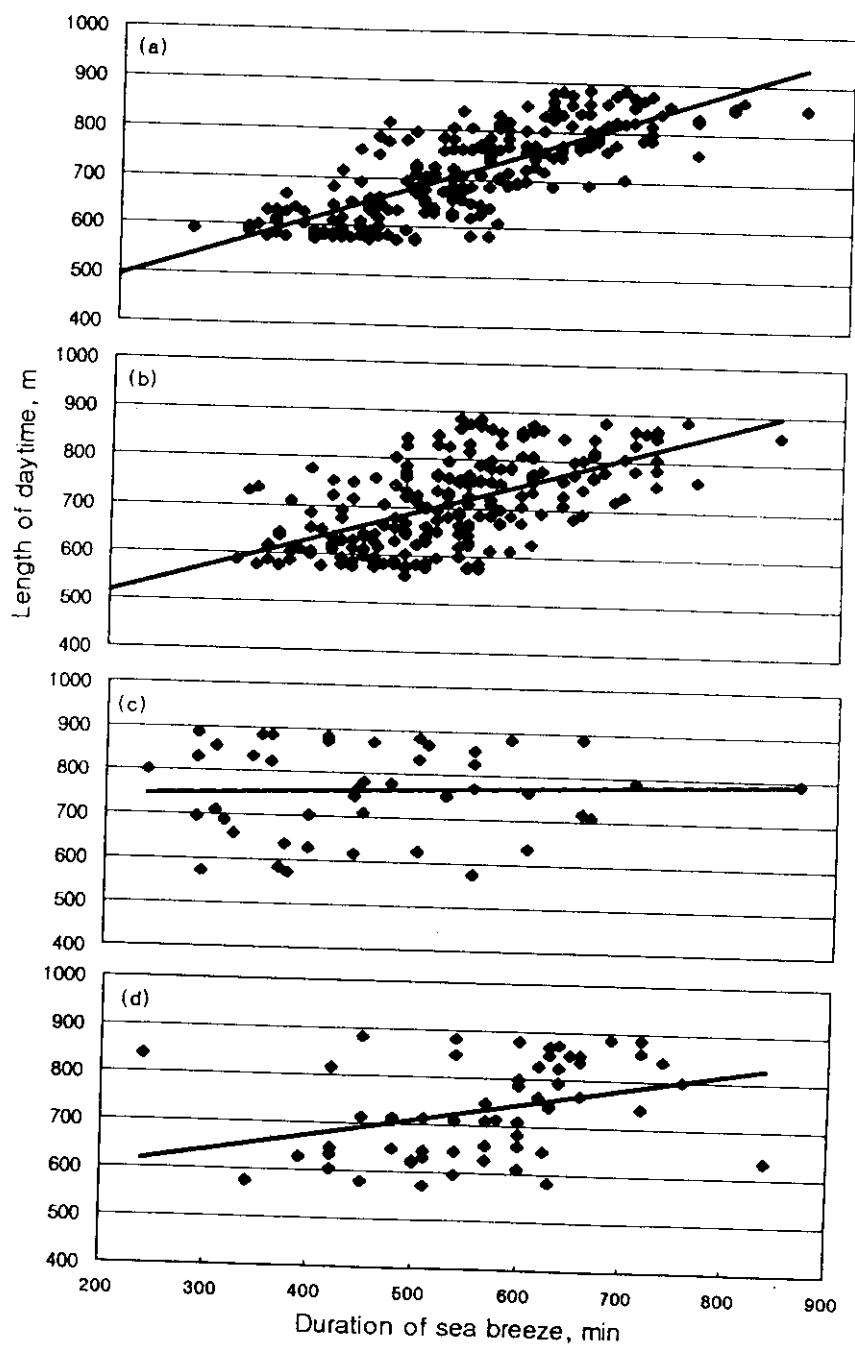


Fig. 4.3. Relationship between duration of sea breeze and length of daytime.

4.2.3. 해풍의 풍속

Fig. 4.4는 연구대상 기간동안에 제주도 지방에서 나타나는 해풍의 월별 평균 풍속과 그에 대응한 육풍의 월별 평균 풍속을 비교한 그림이다.

그림에서 보면 해풍의 풍속은 월 평균 2.0~3.1 m/s의 범위로서 연 평균 2.7 m/s의 수준이고 해풍에 대응한 육풍의 월별 풍속은 1.4~2.4 m/s의 범위로서 연평균 1.8 m/s의 수준이었다.

기존의 연구결과에서 해풍의 풍속은 대체로 5~6 m/s 정도로서 육풍은 2~3 m/s보다 강한 것으로 알려져 있다. 이런 결과를 보이는 이유는 낮 동안에 태양 복사 에너지에 의해서 육지기온이 상승되고 육상에서 상승기류가 강하게 발달함에 따라 국지순환이 강화 되면서 해상에서 불어오는 바람이 가속화되기 때문에 해풍이 육풍보다는 강한 것으로 알려져 있다. 그렇지만 제주도에서 발생된 해풍의 풍속이 통상적으로 알려진 5~6 m/s의 절반수준으로 나타났는데 이는 본 연구에서 풍향이 급변하면 풍속이 대체로 6 m/s 이하인 바람에 대해서만 해풍으로 판단했기 때문이다. 또한 제주도의 육상부는 그 면적이 작아 국지적인 순환 범위가 매우 좁아서 해륙풍의 규모가 적은 것도 풍속이 낮게 평가된 원인으로 볼 수 있을 것이다. 이에 대한 연구는 내륙쪽으로 다수지점에 고도별 풍속의 관측이 되고 지형 및 지표면 특성들에 대한 면밀한 검토가 있어야 할 것이다.

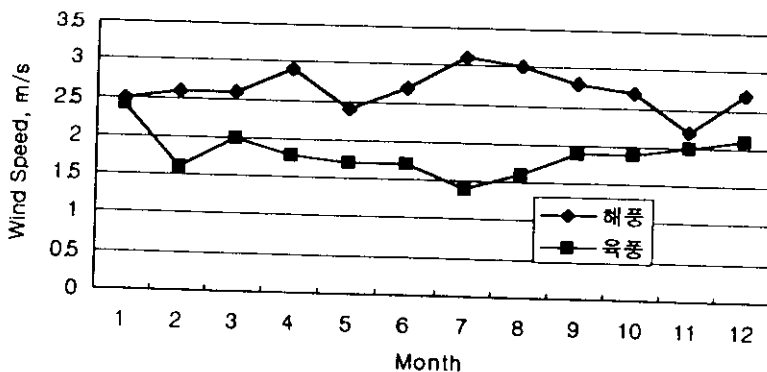


Fig. 4.4. Comparison of monthly averaged wind speed between land and sea breeze in Jeju Island.

4.2.4. 해풍발생에 따른 최고기온 출현 시기

Fig. 4.5은 과거 10년간 제주도 지방에서 해풍 발생일에서 해풍이 나타난 이후 그날의 최고 기온이 나타날 때까지 소요된 시간을 시간대별 빈도수로써 나타낸 것이다. Fig. 4.5에서 보면 제주도 지방에서는 해풍 시작 이후 최고기온이 나타날 때 까지 대체로 3~6시간 정도 소요된 경우가 가장 많았다. Fig. 4.5에서 제주 북부지역과 남부지역을 비교해보면 해풍이 발생한 이후 최고기온이 나타날 때까지의 소요시간이 북부지역보다는 남부지역이 1~2시간 더 빠른 것을 알 수 있다. 제주동부 및 서부지역도 북부지역에 비해 더 빠른 경우가 나타남을 알 수 있다.

이런 특징을 제주북부지역과 제주남부지역에 대해서 계절별로 살펴보기위해 Fig. 4.6에 계절별 소요시간 대별 빈도수를 나타냈다. Fig. 4.6에서보면, 제주북부지역의 봄철에는 해풍 발생 후 4~7시간 정도 경과 후에 최고기온이 나타난 빈도가 가장 높고, 여름철에는 5~7시간 정도 경과시간에 최고기온의 출현빈도가 가장 많으며 그 이상 경과시간의 경우도 타 계절에 비해 비교적 높게 나타남을 볼 수 있다. 가을철에는 3~6시간 정도의 경과시간에 빈도가 높으며, 겨울철에는 2~5시간 정도의 경과시간에 높은 빈도를 보였다. 이로써 보면 봄철에는 5시간, 여름철에는 7시간, 가을철과 겨울철에는 4시간이 경과 했을 때 최고 기온의 출현빈도가 가장 높게 나타났다. Fig. 4.6에서 보면 제주 남부지역의 경우 해풍이 시작된 후 최고기온이 날 때까지 경과된 시간을 보면 봄철에는 3~6시간, 여름철에는 2~6시간, 가을철에는 2~4시간, 겨울철에는 6시간 이내의 시간동안에 최고기온 출현빈도가 높게 나타났다.

이상의 결과를 보면 제주 남부지역에서 해풍 시작 후 최고기온이 나타날 때까지의 경과시간이 제주 북부지역에 비해 다소 빠름을 알 수 있다.

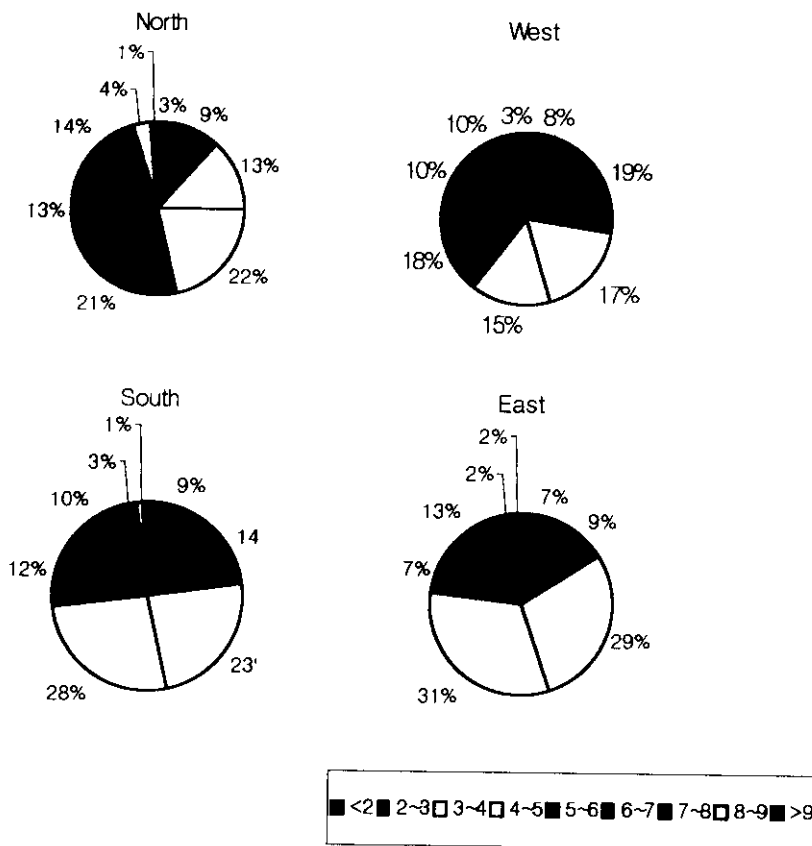


Fig.4.5. Developing time of highest temperture after initiating sea breeze at each site.

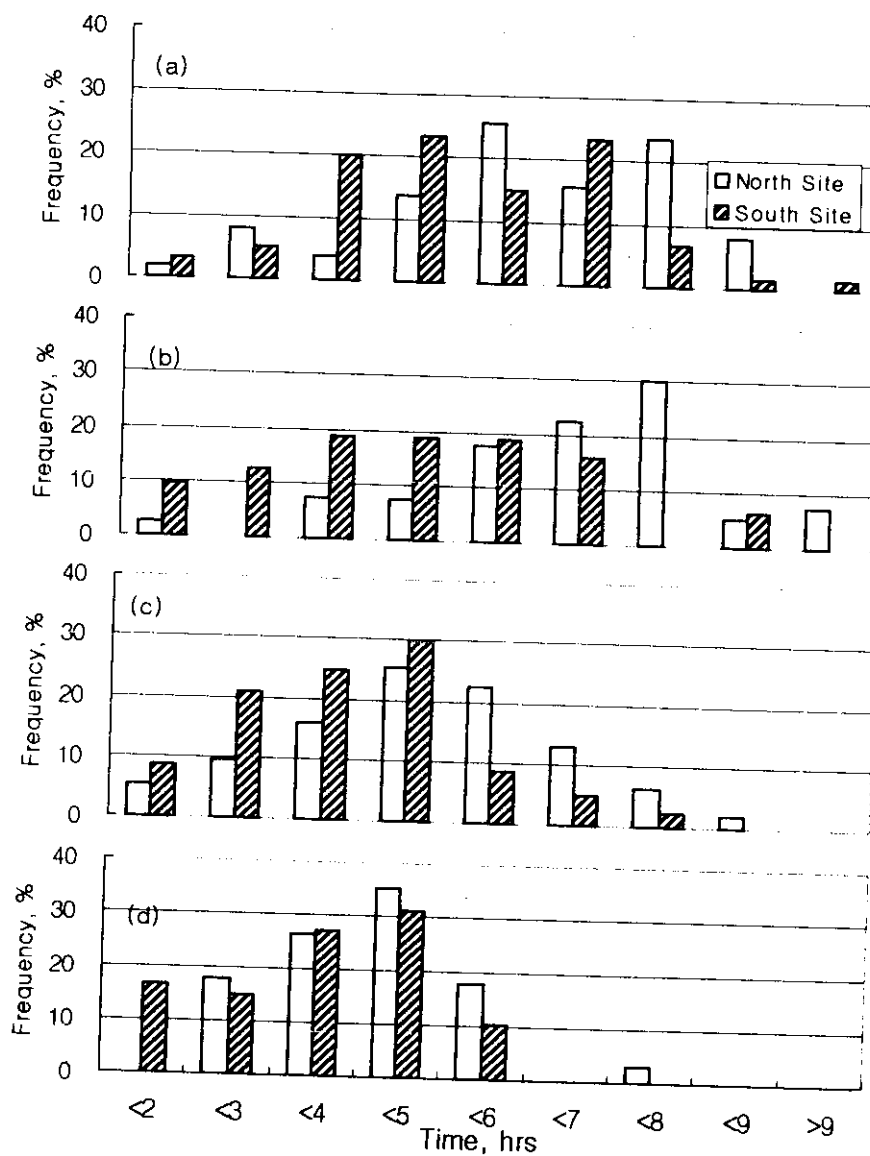


Fig.4.6. Developing time of highest temperature after initiating sea breeze at each season

4.3. 사례분석

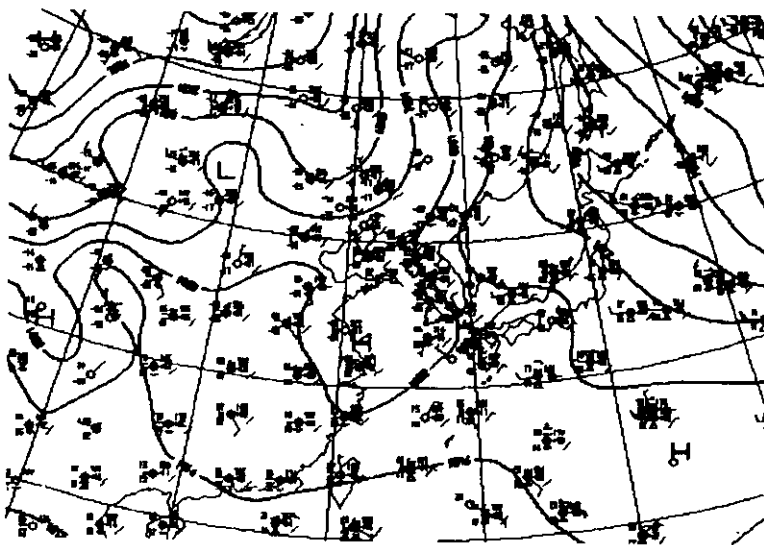
4.3.1. 해풍 발생일의 일기도 분석

가. 겨울철

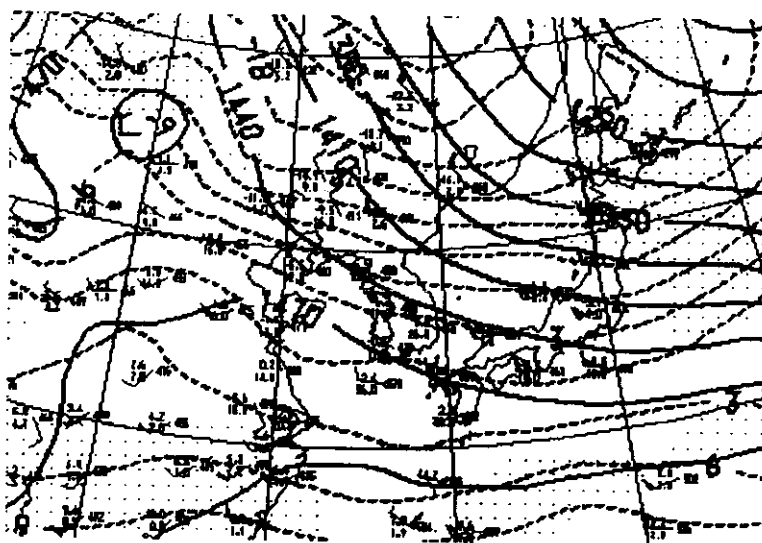
Fig. 4.7은 겨울철에 해풍이 발생한 날의 대표적인 지상 및 850hPa 일기도를 나타낸 것이다. 지상일기도인 Fig. 4.7(a)를 살펴보면 바이칼호 부근에서 발달한 찬 대륙성 고기압은 그 세력을 화중·화남으로 확장하면서 화남지방에서 비교적 온난한 성질인 기단의 영향을 받아 원래의 성질이 변질되어 분리된 고기압이 우리나라로 동진하여 서해상에 중심이 위치하고 있다. 이러한 형태의 고기압은 성질이 온화하여 대체로 날씨가 맑으며, 일반풍의 풍속이 낮으므로 인해 해풍이 잘 나타날 수 있는 조건이 된다.

850hPa의 일기도를 Fig. 4.7(b)에서 보면 점선으로 표시된 등온선은 우리나라 부근에서 동서로 길게 뻗은 형태를 보이며, 발해만 북서쪽에 온도 조절구역이 위치하여 한반도로 한기가 약하게 남하하고 있으나 제주도 부근까지는 영향을 주지 못하는 상태이다. 또한 상해 서쪽에서부터 난기가 이류되고 있으나 제주도 부근까지는 영향을 주지 못하는 상태이다.

겨울철에 우리나라의 날씨에 영향을 주는 기압 패턴은 바이칼호 부근에서 발달된 찬 대륙성 고기압이 남동진하는 경우와 중국 남쪽의 화남지방으로 확장하는 경우를 들 수 있는데, 찬 대륙성 고기압이 남동진하여 그 세력이 강하게 되면 기온이 급격히 하강하고 바람도 강하게 되므로 해풍발생이 어렵게 된다. 그렇지만 찬 대륙성 고기압이 중국 남쪽의 화남지방으로 확장한 후에는 남쪽지역의 따뜻한 기단의 영향을 받아서 고기압이 분리되어 우리나라 남부지방을 통과하게 되면 날씨가 맑고 바람이 약하며 한기와 난기의 영향이 적어서 제주도 지역은 대체로 해풍이 발달할 수 있게 된다.



(a) '00, 12 Feb., 00UTC surface



(b) '00, 12 Feb., 00UTC 850hPa

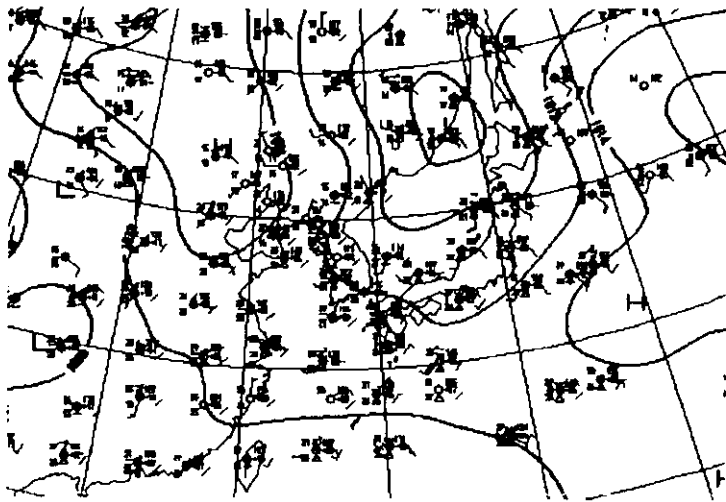
Fig.4.7. Typical weather charts during the day of sea breeze for winter season.

나. 여름철

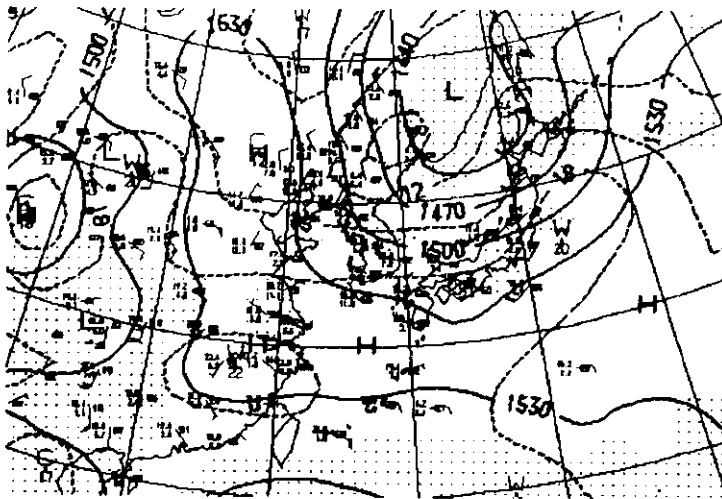
Fig. 4.8과 Fig. 4.9은 여름철 제주도에서 해풍이 발생한 날의 대표적인 일기도를 예로써 나타냈다. Fig 4.8(a)의 지상 일기도를 살펴보면 북태평양고기압이 중국 대륙까지 확장되어 있고, 연해주 부근으로 저기압의 중심이 자리 잡고 있는데 일본 동쪽에 위치한 고기압의 세력에 밀려 동진하지 못하고 있다. 이러한 기압배치일 때에는 제주도를 비롯하여 한반도는 무더운 날씨가 된다. 그리고 Fig 4.8(b)에서 850hPa 일기도를 보면 한반도를 중심으로 등온선이 폭이 넓으면서 동서로 길게 뻗은 형태를 보이고 있어 온도풍(일반풍)이 약한 형태를 보이고 있다. 이러한 기압배치가 이루어지면 지면가열로 상승기류가 발생되고 국지적으로는 적운계열이 나타나는 등 해풍이 발생이 쉬운 여건을 조성하는 것으로 판단된다.

Fig 4.9는 30°N 이남에 태풍이 위치하는 경우의 일기도를 나타내는 것으로서, 지상일기도를 보면 우리나라 부근에는 북태평양고기압이 세력을 유지하고 있어 태풍의 북상을 저지하고 있다. fig.4.9(b)의 상층 일기도를 보면 우리나라 부근에서는 등압선 간격이 매우 넓어 온도풍이 약한 형태를 보이고 있다. 따라서 태풍이 30°N 이남에 위치하고 있으나 북태평양 고기압 세력이 우리나라를 지배하는 경우에는 해풍이 발생할 수 있는 여건이 형성된다고 판단된다.

이처럼 여름철에 우리나라의 날씨는 고온다습한 북태평양 고기압이 중국대륙으로의 확장하거나 또는 북상하는 태풍의 영향을 자주 받게 된다. 우리나라는 북태평양고기압의 영향을 장시간 받게 되면 매우 무더운 날씨로 인해 지면 가열이 가속화되고 왕성한 상승기류로 인하여 적운계열이 자주 생성된다. 이때 해양에서 기류가 육지로 유입되면서 육상과 해상 간에 국지적인 순환이 나타나 해풍이 자주 발생된다.

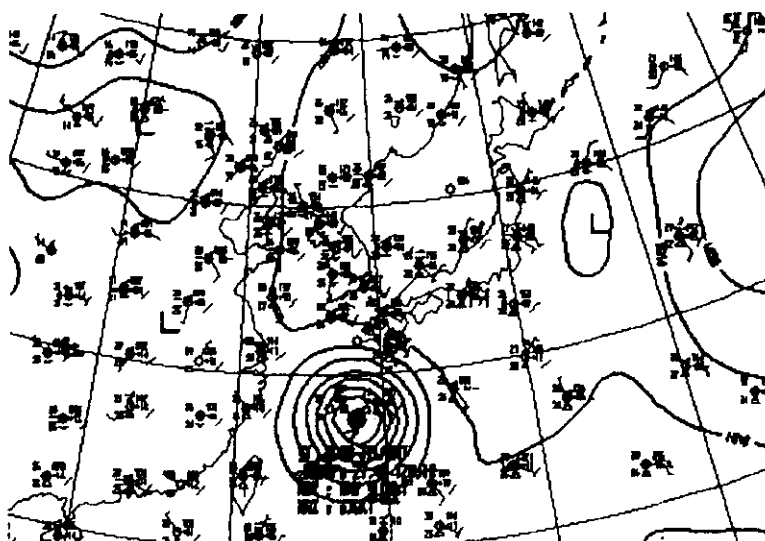


(a) '98, 20 Aug., 00UTC surface

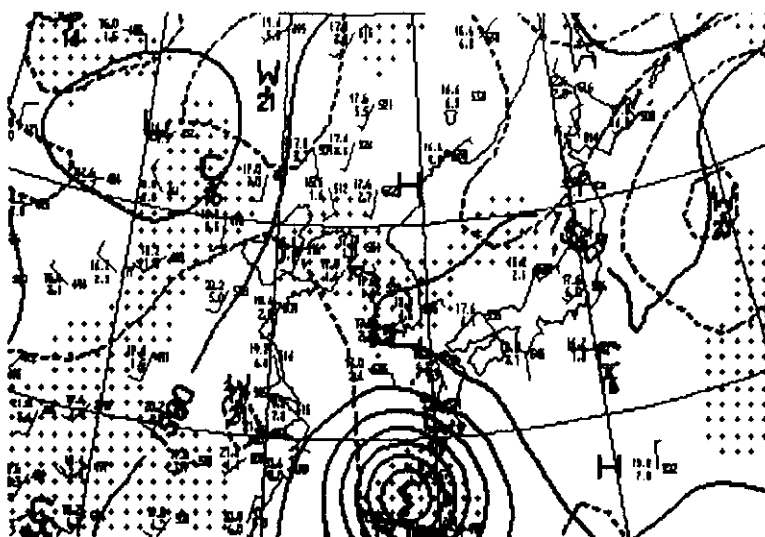


(b) '98, 20 Aug., 00UTC 850hPa

Fig.4.8. Typical weather charts during the day of sea breeze for summer season.



(a) '00, 8 Aug., 00UTC surface



(b) '00, 8 Aug., 00UTC 850hPa

Fig.4-9. Typical weather charts for summer season the day of sea breeze for summer season.

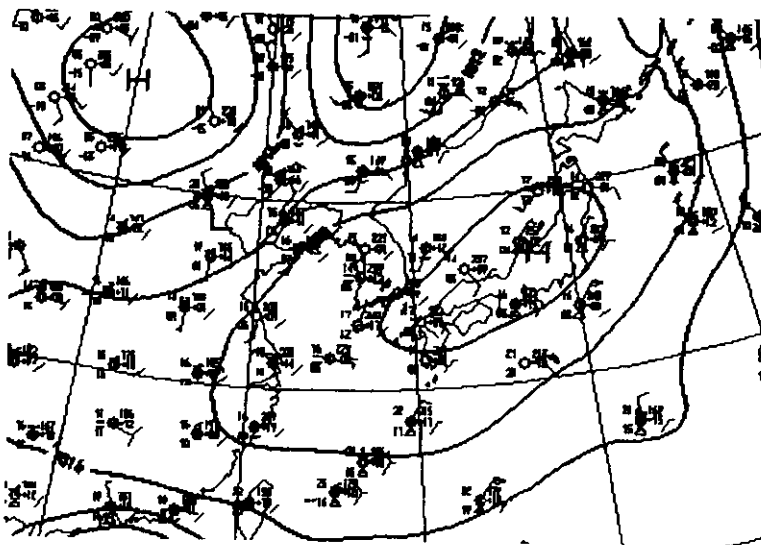
다. 봄과 가을철

Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 봄철과 가을철에 해풍이 나타난 날의 대표적인 850hPa 일기도를 나타냈다.

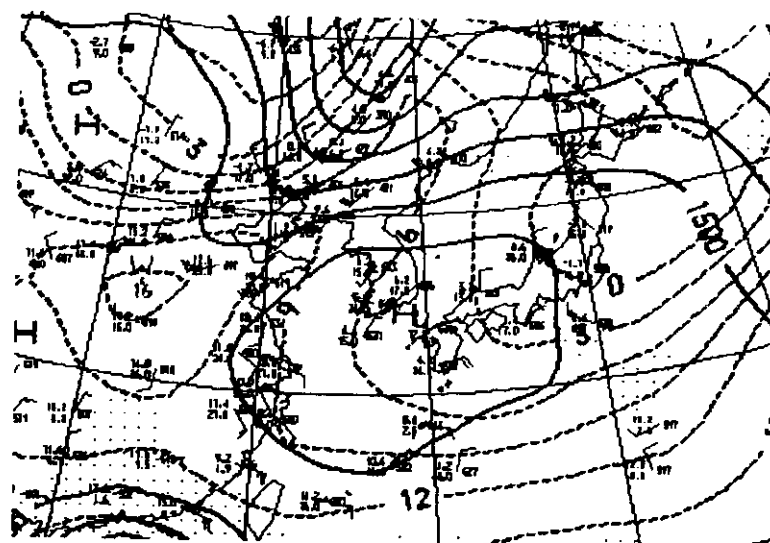
Fig. 4.10(a)과 fig. 4.11(a)을 보면 아주 유사한 기압배치를 보임을 알 수 있다. 즉 우리나라와 일본부근에 고기압의 중심이 위치하면서 그 주변까지 고기압의 영향을 폭넓게 받고 있으면서 등압선 간격이 매우 넓어 바람이 비교적 약하고 온화하며 대체로 맑은 날씨를 보임으로서 해풍이 발생하기 쉬운 일기도 형태이다.

Fig. 4.10(b)와 fig. 4.11(b)에 나타낸 상층의 일기도를 살펴보면 봄철과 가을철에 큰 차이가 없이 비슷한 형태임을 알 수 있다. 즉, 발해만 북서쪽에서 온도선이 조밀한 구역으로부터 한기의 남하가 약하게 나타나고 있다. 그리고 한반도 남부지역에 고기압 중심이 자리 잡거나 우리나라 중부 이남으로 폭넓은 고기압 세력이 위치하면서 한반도를 중심으로 등온선의 간격이 매우 넓게 위치하는 형태를 보이고 있다.

이러한 지상 및 상층 일기도에서 살펴본 바와같은 기압패턴은 우리나라의 봄철과 가을철에 빈번하게 볼 수 있는 형태로서 이런 경우 날씨는 대체로 맑고 온도풍이 비교적 약하게 불어 해풍이 나타나기 쉬운 여건이 제공된 것으로 판단된다.

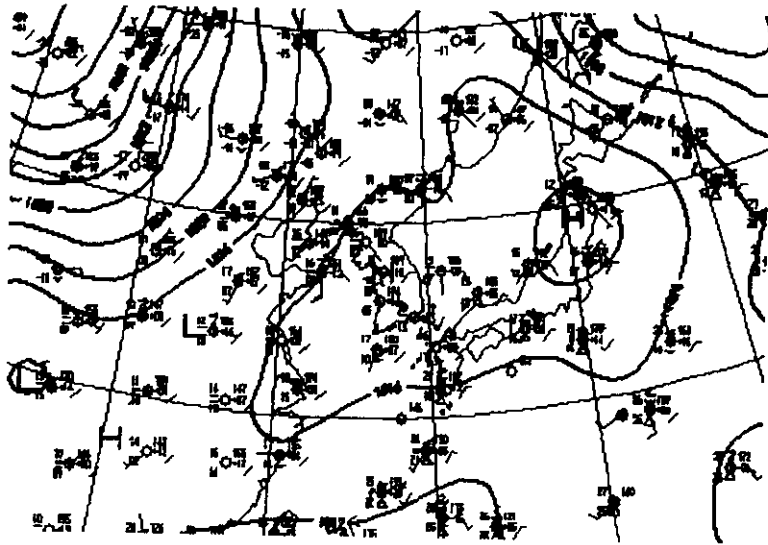


(a) '99, 30 Apr., 00UTC surface

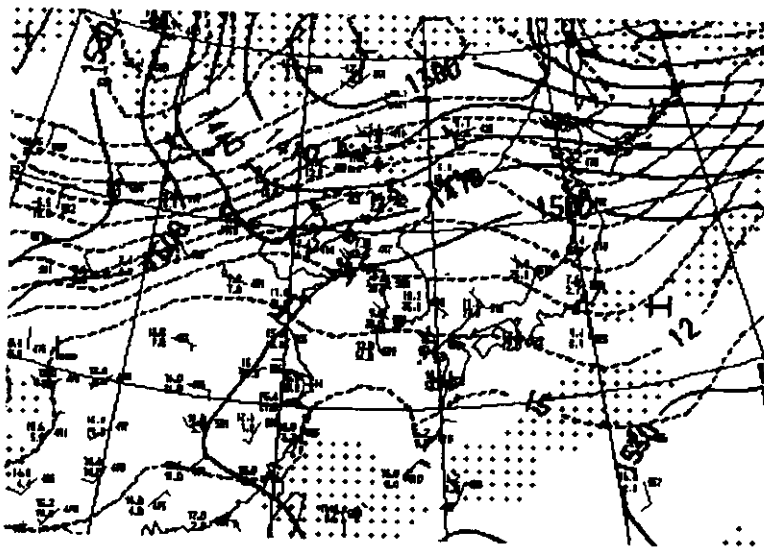


(b) '99, 30 Apr., 00UTC 850hPa

Fig.4.10. Typical weather charts during the day of sea breeze for spring season.



(a) '00, 6 Nov., 00UTC surface



(b) '00, 6 Nov., 00UTC 850hPa

Fig.4.11. Typical weather charts during the day of sea breeze for fall season.

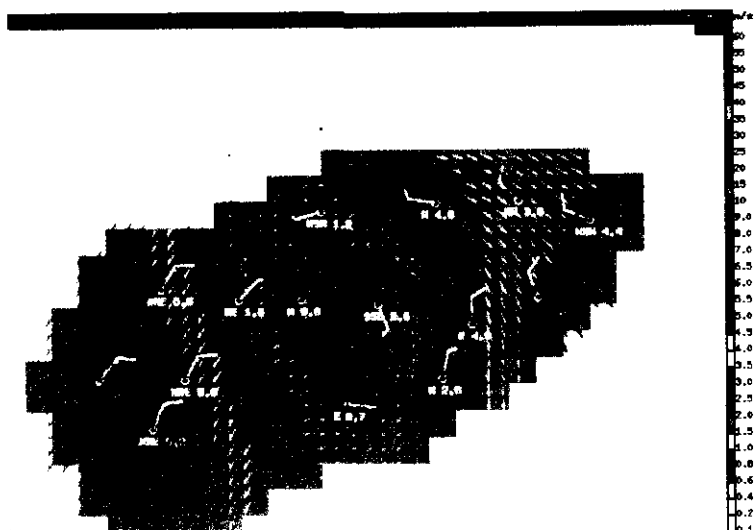
4.3.2. 해풍 발생일의 바람장

앞에서는 우리나라 주변의 일기도를 해석하여 해풍의 발생이 가능한 기압 배치를 파악하였으며, 여기서는 이런 기압 배치하에서 실제로 제주도 지역내에 설치된 무인 자동기상 시스템으로 관측된 바람자료를 토대로 계산한 바람벡터를 이용하여 해풍발생일의 제주도 전역의 바람장을 해석하고자 했다.

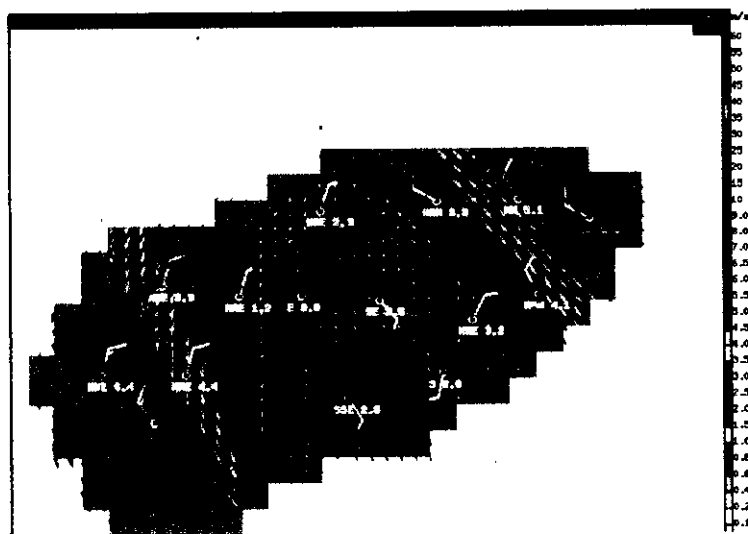
Fig. 4.12~4.14에는 계절별로 해풍이 나타난 날의 바람 벡터를 해풍 전이 시각에서부터 3시간 간격으로 나타냈다. Fig. 4.12는 겨울철에 해풍이 나타난 날의 바람벡터인데, 제주 북부와 남부지역의 가운데에서는 한라산 정상 방향, 즉 섬의 중앙부를 향해 아주 약한 바람이 해양으로부터 유입되고 있으며, 섬의 동부와 서부지역에서는 북서계열 및 북동계열의 비교적 강한 바람이 해양으로부터 육지를 거쳐 다시 해양으로 불어나가는 형태임을 볼 수 있다. 오후로 들면서 북부와 남부지역에서 풍속이 다소 강해지면서 섬의 중앙부로 수렴되어 근위하여 동부지역으로 빠져나감을 볼 수 있다. 이로써 보면 겨울철의 해풍은 섬의 중앙부를 향해 북부와 남부지역의 해안으로부터 섬 중앙부로 약하게 수렴하는 형태를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 4.13은 여름철의 경우로써 해풍의 전이시각(Fig. 4.13(a))에는 섬 전체에 바람이 거의 불지 않음을 알 수 있다. 해풍 전이 후 초기에는 동부지역에서 북서계열의 약한 바람이 나타나지만 나머지 지역에서 풍속은 아주 낮지만 전 해안선을 가로질러 해양으로부터 섬 중앙부를 향해 바람이 불고 있는 경향임을 볼 수 있다. 이로써 보면 제주도에서는 여름철에 해풍이 나타날 경우에는 섬 전체 지역에 걸쳐 동시에 나타날 가능성이 큰 것으로 판단된다.

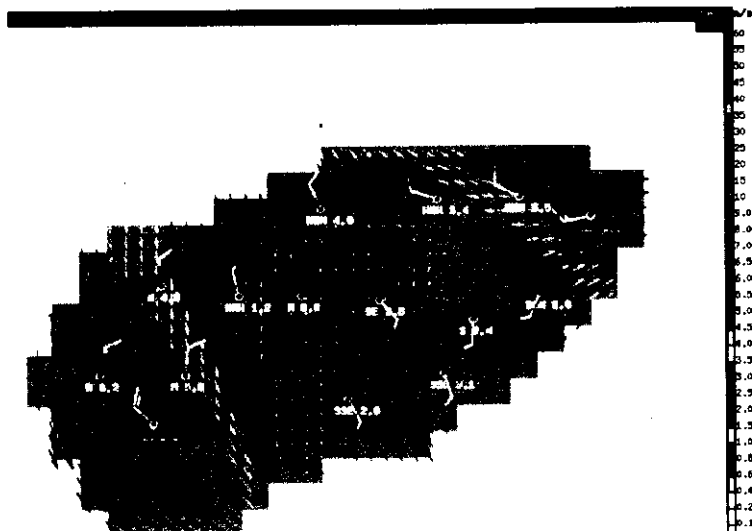
Fig. 4.14는 가을철에 해풍이 나타난 날의 바람 벡터로서 해풍으로의 전이 시각에는 여름철과 마찬가지로 제주도 전역에서 바람이 아주 약하며, 해풍으로 전이된 후에는 해양으로부터 전 해안선을 가로질러 육상으로 바람이 불면서 제주도 남서지역으로 수렴함을 볼 수 있다. 이런 현상은 오후로 들면서 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 그리고 섬 전체에 걸쳐 반시계 방향의 풍계를 형성하면서 풍속도 여름철에 비해 비교적 큰 것을 알 수 있다.



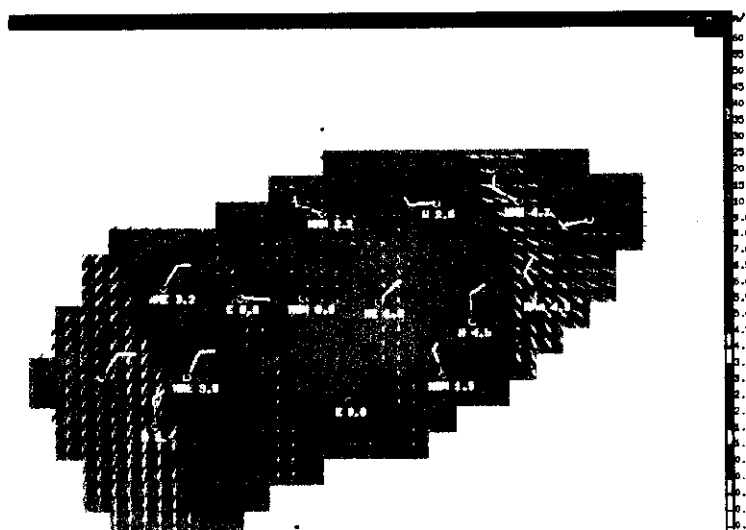
(a) 00, 12 Feb., 09 : 25



(b) 2000. 12. Feb., 12 : 00

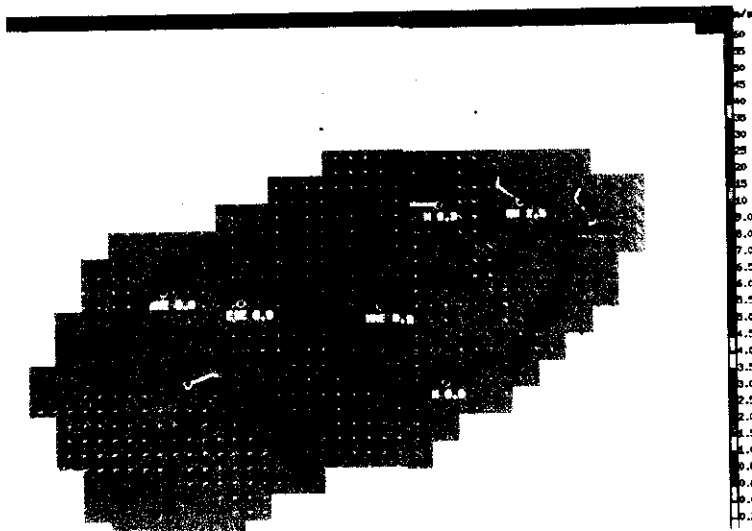


(c) `00. 12 Feb., 15 : 00

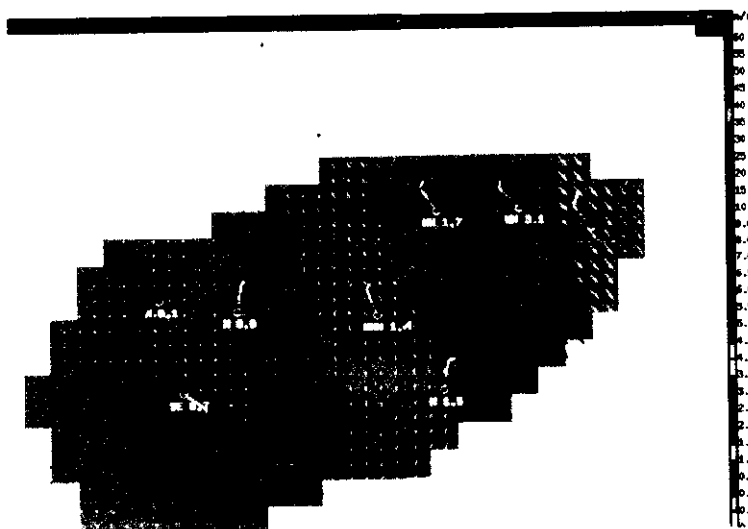


(d) `00, 12 Feb., 19 : 25

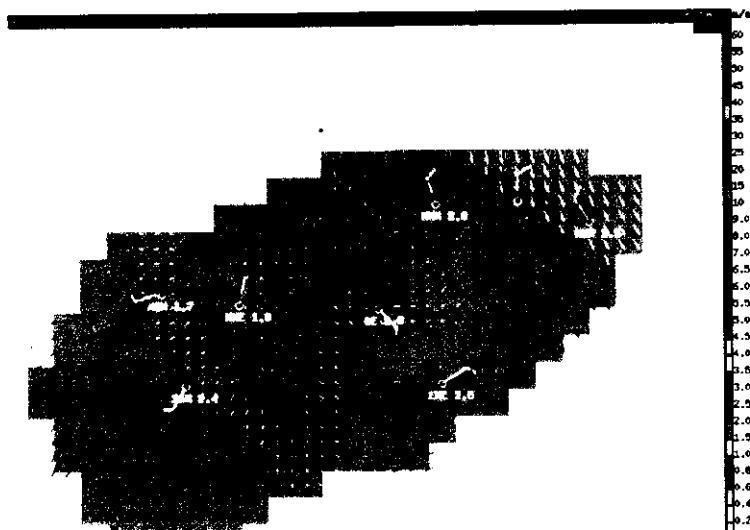
Fig.4.12. Typical charts of wind vector during the day of sea breeze for winter season



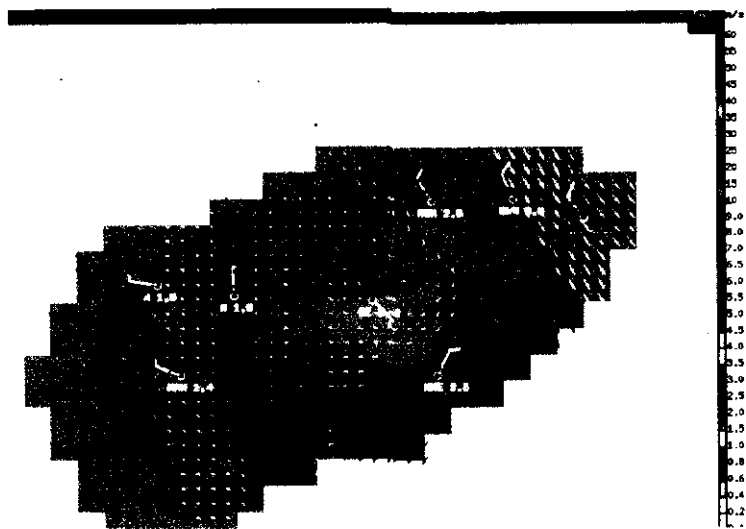
(a) '98, 20 Aug., 07 : 50



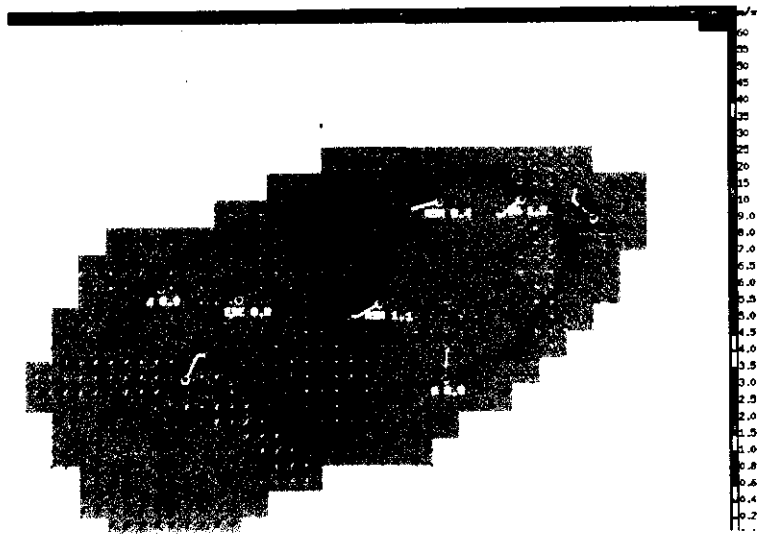
(b) '98, 20 Aug., 09 : 00



(c) '98, 20 Aug., 12 : 00

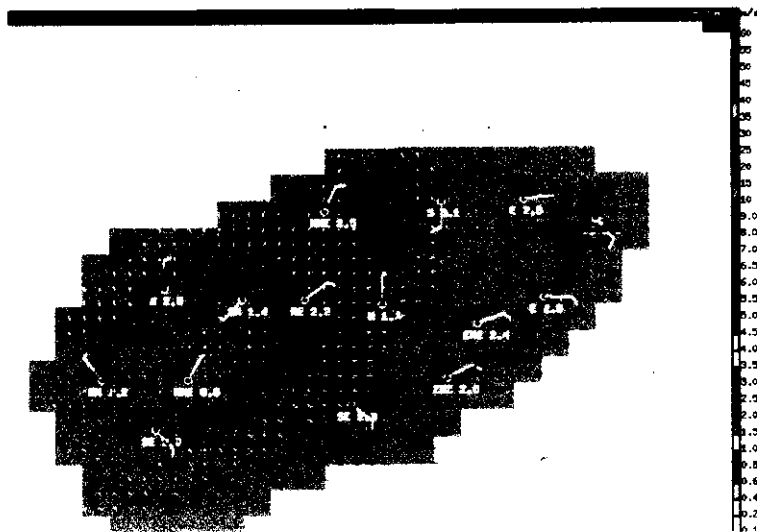


(d) '98, 20 Aug., 15 : 00

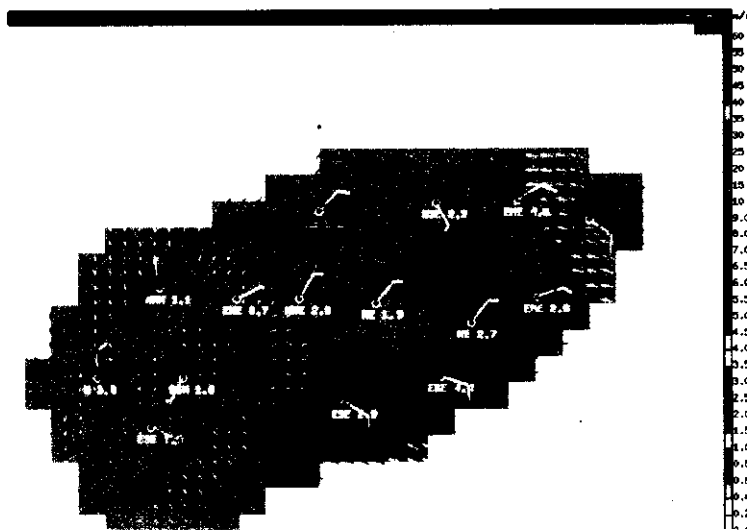


(e) '98. 20 Aug., 20 : 00

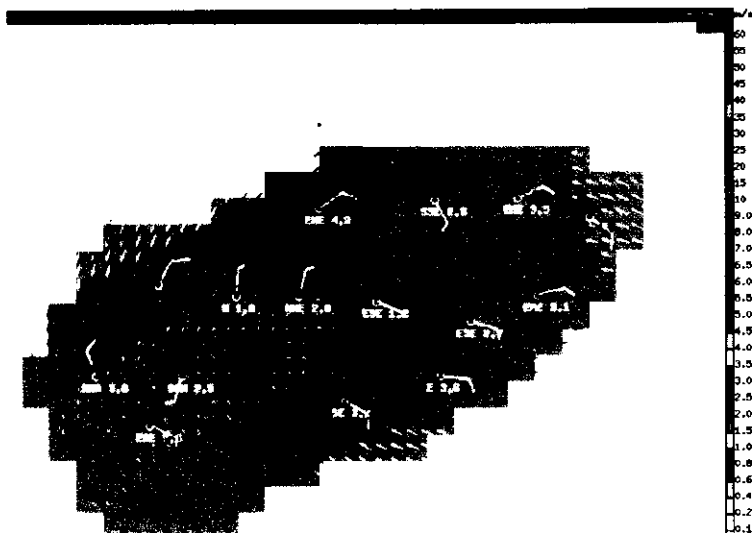
Fig.4.13. Typical charts of wind vector during the day of sea breeze for summer season.



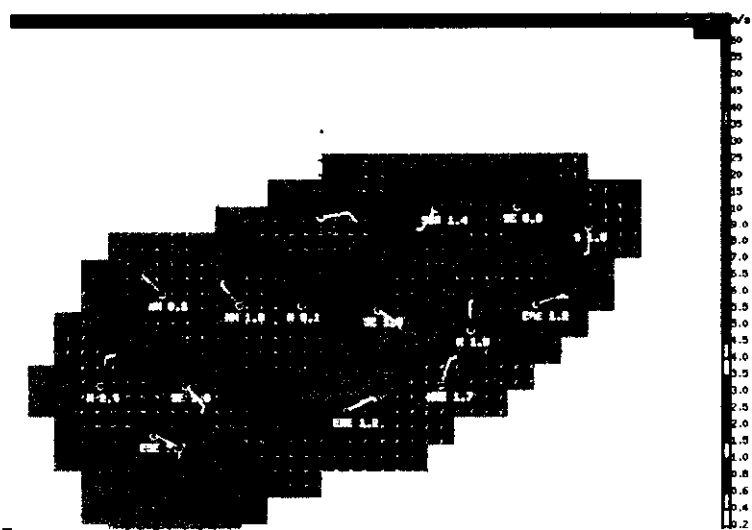
(a) 00, 6 Nov., 10 : 20



(b) 00, 6 Nov., 12 : 00



(c) 00, 6 Nov., 15 : 00



(d) 00, 6 Nov., 17 : 35

Fig.4.14. Typical charts of wind vector during the day of sea breeze for fall season.

V 결 론

제주도에서 나타나는 해풍의 특성을 파악하기 위해 제주도 북부, 동부, 남부 및 서부지역의 해안 근처에 위치한 4개의 기상관측소에서 1991년부터 2000년 까지 관측된 지상풍 자료와 일기도 등의 기상자료를 분석한 요약하면 다음과 같다.

1. 과거 10년간 제주도 지역에서 나타난 해풍 발생 횟수를 지역별로 보면 제주 서부와 동부지역보다는 제주 북부와 남부지역에서의 해풍 발생 빈도가 높게 나타났다. 그리고 계절별로는 봄과 가을철에 해풍이 자주 발생함을 알 수 있었다.
2. 제주도 지방에서는 07:00 ~ 11:00 사이에 해풍이 발생되는데 봄철과 여름철에는 8시대, 가을철에는 9시대, 그리고 겨울철에는 10시대에 해풍 발생이 가장 활발하게 이루어졌다.
3. 해풍의 지속시간은 계절별로 차이를 보이면서 전 조사기간에 걸쳐 5~13 시간정도 지속되고 있고 제주 북부와 남부 지역에서 발생한 해풍의 지속시간은 하절기에 길어지는 경향을 보였으나 동부와 서부 지역은 계절적으로 뚜렷한 경향을 볼 수 없었다.
4. 제주 지방에서는 겨울철에는 친 대륙성 고기압이 중국 화남지방으로 확장된 후 변질된 고기압이 우리나라에 영향을 미칠 때, 봄과 가을철에는 이동성 고기압이 우리나라 남부지방을 통과할 때, 그리고 여름철에는 북태평양 고기압이 우리나라에 영향을 미치거나 또는 30°N 이남에서 태풍이 위치하고 있을 때 해풍이 비교적 잘 발달하는 것으로 파악되었다.

본 연구에서 대상으로 선정한 4개 기상관측소 가운데 동부 및 서부 지역의 관측소는 그 지리적 위치 때문에 실제 나타난 해풍의 특성을 제대로 파악할 수 없었던 것으로 판단되므로 앞으로 제주도에서 해풍 발달과정 및 특성을 제대로 파악하기 위해서는 관측점의 지리적 위치와 공간적 분포를 면밀하게 검토해야할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 강태진, 2000, 제주지방기상특성집 제3권, 101 ~ 111, 반석원색인쇄사
- 김광식, 1992, 기상학사전, 향문사
- 김상운 · 민경덕, 2001, 지형과 지표특성이 여름철 대구지역의 국지순환과 기온변화에 미치는 영향, 한국기상학회지, 37(5), 487 ~ 489
- 김종만, 현동식 1998, 제주지방기상특성집 제1권, 86 ~ 97, 반석원색인쇄사
- 김철희, 전종갑, 1992, 종관바람을 고려한 한반도에서의 3차원 해륙풍 수치 모의, 한국기상 학회지, 28(2), 165 ~ 166
- 민병언, 1973, 해양기상학, 206 ~ 207, 세종문화사
- 박순웅, 윤일희, 1989, 종관바람장의 변화를 고려한 이차원 해륙풍 수치 모델링, 한국기상 학회지, 25(2), 80 ~ 81
- 소선섭, 곽종흠, 1985, 일반기상학, 257 ~ 260, (주)교문사
- 신동빈, 이태영, 1989, 한반도 중부 지방에서의 해륙풍 순환에 미치는 지형의 영향, 한국기상학회지, 25(2), 56 ~ 58
- 임경택, 1992, 기상학개론, 213 ~ 214, 東和技術
- 현종운, 이동규, 1990, 3차원 중규모 모델을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의, 한국기상학회지, 26(2), 121-135
- 홍성길, 최희승, 1980, 미기상학, 50 ~ 52, 新光出版社
- 竹内清秀, 近藤純正, 1986, 地表に近く大氣, 185 ~ 190. 凍京大學出版会
- Aguado, E. and J.E.Burt, 1999, understanding weather and climate, 370 ~ 371. Prentice-Hall.
- Munn, R.E., 1966, Descriptive micrometeorology, 173 ~ 188 Academic Press.
- Lutgens, F.K. and E.J Tarbuck, 1982, The atmosphere, 2nded., 146 ~ 149, 182 ~ 185, Prentice-Hall
- Oke, T.R., 1978, Boundary Layer climate, 145, Methueu.

감사의 글

늦게 학문을 시작하여 이 논문으로 결실을 맺을 수 있어 무한히 기쁘며, 제가 작은 결실을 맺을 수 있도록 도움을 주신 환경공학과 여러 교수님과 제주지방기상청장님, 과장님, 선배님, 동료들에게 감사를 드립니다.

특히 학과일과 강의로 바쁘신 중에도 이 논문을 위해 끝까지 지도하여 주시고 배려를 하여주신 이기호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 저의 논문 심사를 맡아 많은 조언과 면밀한 검토를 하여 주신 허철구 교수님, 감상규 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

또한 학문연구로 항상 바쁘신 중에도 처음부터 완성될 때 까지 자료편집, 자료교정 작업 등 저를 도와준 오태권님께도 깊은 감사드리며, 양희준님, 김대준님, 대기실험실 후배들께도 감사 드립니다.

항상 나의 곁에서 묵묵히 뒷바라지와 조언을 하여준 아내와 가족들에게 감사드리며, 스스로 열심히 공부하며, 똑똑하고 건강하게 성장하고 있는 딸들과 아들들에게도 감사의 마음을 전합니다.

2002. 7.