

제주도 지방의 해륙풍의 특성과 2차원 연직순환

Characteristics and Two-Dimensional Vertical Circulation of the Land and Sea Breeze on Cheju Island, Korea

주관연구기관	제주대학교
연구책임자	김유근
발행년월	1990-02
주관부처	과학기술부
사업관리기관	제주대학교
NDSL URL	http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO200200015938
IP/ID	14.49.138.138
이용시간	2017/11/03 09:10:30

저작권 안내

- ① NDSL에서 제공하는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, KISTI는 복제/배포/전송권을 확보하고 있습니다.
- ② NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 상업적 및 기타 영리목적으로 복제/배포/전송할 경우 사전에 KISTI의 허락을 받아야 합니다.
- ③ NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 보도, 비평, 교육, 연구 등을 위하여 정당한 범위 안에서 공정한 관행에 합치되게 인용할 수 있습니다.
- ④ NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 무단 복제, 전송, 배포 기타 저작권법에 위반되는 방법으로 이용할 경우 저작권법 제136조에 따라 5년 이하의 징역 또는 5천만 원 이하의 벌금에 처해질 수 있습니다.

1990. 3. 08

(양식# 3)

표지

과 제 번 호	893 - 0506 - 010 - 1
---------	----------------------

국 문 제 목 : 제주도 지방의 해륙풍의 특성과 2차원 연직순환

(영 문 제 목) : Characteristics and Two-Dimensional Vertical Circulation
of the Land and Sea Breeze on Cheju Island, Korea.

연 구 기 간 : 1989. 3. 1 - 1990. 2. 28

연구기관명 : 제주대학교

연구책임자 : 김유



제 목 문

한국과학재단 이사장 귀하

본 보고서를 제주도 지방의 해복풍의 특성과 2차원 연직순환 연구의 결과보고서로 제출합니다.

1990 년 2 월 일

연구 기관 : 제주대학교

연구 책임자 : 김 유



과 제 번 호	893 - 0506 - 010 - 1			
연구 과 제 명	(국 문) 제주도 지방의 해륙풍의 특성과 2차원 연직순환			
	(영 문) Characteristics and Two-Dimensional Vertical Circulation of the Land and Sea Breeze on Cheju Island, Korea.			
연구 책임 자	소 속	제주대학교	성 명	김 유 근
연구 비	250만원		연구기간	1989년 3 월부터 12 개월

연구내용 (*연구의 배경, 목적, 내용 및 방법 등에 관하여 300자 정도로 요약하되, 가능한한 이해하기 쉬운 용어로 작성할 것).

<p>최근 10년간(1977-1986)의 지상기상자료를 분석하여 조사한 제주도 지방의 해륙풍의 기후학적 특성과 해륙풍 수치model을 설정하여 제주도지방의 해륙풍의 연직순환특성을 조사한 결과는 다음과 같다.</p> <p>해륙풍의 발생빈도는 월별로는 8월이 가장 높고 그 다음이 9월, 10월, 5월, 11월 순이다. 춘계보다는 추계가 더 발생빈도가 높으며 동계가 가장 낮다. 해풍은 제주도의 북부해안이 남부보다 연평균 약 30분정도 더 일찍 발생하고 약 1시간정도 늦게 소멸한다. 반대로 육풍은 남부해안이 북부보다 연평균 1시간정도 일찍 발생하고 연평균 소멸시각은 남북해안이 비슷하다.</p> <p>해풍의 연평균 지속시간은 북부해안이 남부보다 약 1시간정도 길고, 육풍의 그것은 반대로 약 1시간정도 짧게 나타난다. 계절별로는 해풍의 경우 하계가 동계보다 길고 육풍의 경우는 또 그 반대이다. 해풍에서 육풍으로의 전이시간은 하계가 길고 동계가 짧은 경향을 보이며, 육풍에서 해풍으로의 전이시간은 계절적인 특징이 나타나지 않는다. 해풍의 최대풍속의 출현시각은 연평균적으로 북부해안보다 남부가 다소 일찍 나타나나, 육풍은 서로 비슷한 양상을 보여주며, 해풍이나 육풍모두 월평균 출현시각의 계절적 특징은 뚜렷하지 않다. 그리고 해풍과 육풍의 월평균 최대풍속은 각각 남북해안 모두 비슷하고, 연평균으로는 해풍이 육풍보다 다소 강하다.</p> <p>제주도 지방에서는 제주시측이 서귀포측 보다 해풍이 더 강하고 높게 불고 있으며, 반대로 육풍은 서귀포측이 더 강하게 나타난다. 해풍의 순환은 서귀포측 영역에서 뚜렷하게 나타나는 반면, 육풍의 순환은 제주시측에서만 약하게 나타난다.</p>	
KEY - WORD	해륙풍, 해륙풍의 수치model, 해륙풍의 연직순환

연구과제명 표기시 부제목이 있는 경우에는 부제목란에 기입.

FINAL REPORT SUMMARY

Serial Number	893 - 0506 - 010 - 1		
Project Title	Characteristics and Two-Dimensional Vertical Circulation of the Land and Sea Breeze on Cheju Island, Korea.		
Principal Investigator	Name	Organization Address	Title
	Yoo Keun, Kim	Cheju National University	
Counterpart Principal Investigator			
Duration & Amount of Grant	1st year		2nd year
	From 1989. 3 To 1990. 2		From To
	(2.5 million Won)		(Won)
	Total (2.5 million Won)		

Summary of Completed Project

Two studies were done to investigate characteristics of the land and sea breeze on Cheju Island and to establish a simulation model for the breeze. In the first study, characteristics of the land and sea breeze on Cheju Island were determined on the basis of surface meteorological data collected from 1977 to 1986. And in the second study, a two dimensional simulation of the land and sea breeze of Cheju Island were made. The results are summarized in the following.

The frequency of the land and sea breeze was highest in August followed by September, October, May and November in descending order. This indicates that the frequency of the land and sea breeze higher in fall than in spring, and lowest in winter. The sea breeze began much earlier than any other regions of Korea all the year round, and it began about 30 minutes earlier and ended one hour later in the northern coast than in the southern coast of Cheju Island. Meanwhile the land breeze began about one hour earlier in the southern coast than in the northern coast and ended almost at the same time in both coasts.

The annual mean duration of the sea breeze was about one hour longer in the northern coast than in the southern coast, but the land breeze showed an opposite trend. The duration of the sea breeze was longer in summer than in winter and again the land breeze was opposite. Transition period from the sea to the land breeze was relatively long in summer and short in winter, but transition period from the land to the sea breeze was not different between seasons. The time for a maximum velocity of the sea breeze came earlier in the southern coast than in the northern coast, but that of the land breeze came almost at the same time in both coasts with no seasonal variations. Monthly mean maximum velocity of the sea breeze was greater than that of the land breeze.

The sea breeze was much stronger in the Cheju city area than in the Seoguiipo area and the land breeze was opposite. The circulation of the sea breeze took place more distinctly in the area of Seoguiipo, whereas that of the land breeze took place in the Cheju city area at an insignificant level.

KEY - WORD

Land and sea breeze, A simulation model for the breeze

List of Tables	1
List of Figures	3
1. 서론	5
2. 제주도 지방의 해륙풍의 특성	7
2-1. 발생빈도	7
2-2. 발생 및 소멸시각	8
2-2-1. 해풍의 발생 및 소멸시각	8
2-2-2. 육풍의 발생 및 소멸시각	9
2-3. 지속시간과 전이시간	10
2-3-1. 지속시간	10
2-3-2. 전이시간	11
2-4. 최대풍속과 그 출현시각	12
3. 해륙풍Model 과 제주도지방의 해륙풍의 2차원 연직순환	14
3-1. 기초방정식과 차분근사법	14
3-2. 연직방향의 확산계수	16
3-2-1. Ekman층	16
3-2-2. 접지층	18
3-3. 수평방향의 확산계수	21
3-4. 초기 및 경계조건	22
3-5. 제주도지방의 해륙풍의 2차원 연직순환	23
3-5-1. 지형조건과 계산영역	23
3-5-2. 해륙풍의 2차원 연직순환 특성	24
4. 결론	27
인용문헌	28

List of Tables

- Table 1. Occurrence frequency of the sea breeze on Cheju Island (1977-1986)
- Table 2. Occurrence frequency of the land breeze on Cheju Island (1977-1986)
- Table 3. Occurrence frequency of the onset time of the sea breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 4. Occurrence frequency of the onset time of the sea breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 5. Occurrence frequency of the subsidence time of the sea breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 6. Occurrence frequency of the subsidence time of the sea breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 7. Occurrence frequency of the onset time of the land breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 8. Occurrence frequency of the onset time of the land breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 9. Occurrence frequency of the subsidence time of the land breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 10. Occurrence frequency of the subsidence time of the land breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 11. Occurrence frequency of the duration of the sea breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 12. Occurrence frequency of the duration of the sea breeze at Seoguipo (1977-1986)

- Table 13. Occurrence frequency of the duration of the land breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 14. Occurrence frequency of the duration of the land breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 15. Frequency distribution of the transition period from the sea breeze to the land breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 16. Frequency distribution of the transition period from the sea breeze to the land breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 17. Frequency distribution of the transition period from the land breeze to the sea breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 18. Frequency distribution of the transition period from the land breeze to the sea breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 19. Monthly mean maximum velocity (m/s) of the land and sea breeze on Cheju Island (1977-1986)
- Table 20. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the sea breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 21. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the sea breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 22. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the land breeze at Cheju (1977-1986)
- Table 23. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the land breeze at Seoguipo (1977-1986)
- Table 24. Coordinates of each point in Fig.11. [X axis is the horizontal distances from the coastline of Cheju (km), and Z axis is the height (m).]

List of Figures

- Fig. 1. Annual variation of the monthly mean onset time of the sea breeze
- Fig. 2. Annual variation of the monthly mean subsidence time of the sea breeze
- Fig. 3. Annual variation of the monthly mean onset time of the land breeze
- Fig. 4. Annual variation of the monthly mean subsidence time of the land breeze
- Fig. 5. Annual variation of the monthly mean duration of the sea breeze
- Fig. 6. Annual variation of the monthly mean duration of the land breeze
- Fig. 7. Annual variation of the monthly mean transition period from the sea breeze to the land breeze
- Fig. 8. Annual variation of the monthly mean transition period from the land breeze to the sea breeze
- Fig. 9. Explanation of the Z^* coordinate system
- Fig.10. Grid points of the non-uniform mesh
- Fig.11. Meridional cross section of Cheju Island (see Table 24 for the coordinates of each point)
- Fig.12. Land and sea breeze system on Cheju Island at 0900, 1000 and 1100 LST, May 10, 1984
- Fig.13. Land and sea breeze system on Cheju Island at 1200, 1300 and 1400 LST, May 10, 1984

- Fig.14. Land and sea breeze system on Cheju Island at 1500, 1600 and 1700 LST,
May 10, 1984
- Fig.15. Land and sea breeze system on Cheju Island at 1800, 1900 and 2000 LST,
May 10, 1984
- Fig.16. Land and sea breeze system on Cheju Island at 2100, 2200 and 2300 LST,
May 10, 1984
- Fig.17. Land and sea breeze system on Cheju Island at 2400, 0100 and 0200 LST,
May 10, 1984
- Fig.18. Land and sea breeze system on Cheju Island at 0300, 0400 and 0500 LST,
May 10, 1984
- Fig.19. Land and sea breeze system on Cheju Island at 0600, 0700 and 0800 LST,
May 10, 1984

해륙풍은 주로 일반류가 약하고 맑은 날, 해륙의 비열용량차트 비롯된 기온차에 의하여 1일 주기로 발생하는 소규모 국지순환으로서 해안의 형태와 부근의 지형 및 일반류의 변화등에 의해 그 성향이 매우 달라지며, 특히 임해지역의 대기오염물질의 확산과 매우 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 국내외적으로 상당한 관심을 가지고 연구되어 왔다.

초기의 해륙풍에 관한 연구는, Van Bemmelen (1922)이 Batavia 에서 행한 것처럼 지상 관측소 한, 두곳에서 해륙풍의 시간변화를 관측하는 것이 대부분이었다. 그 후 Koschmiedel(1941)가 해풍의 내륙침투가 가장 강한 시각은 일중 불안정도가 가장 큰 시각임을 밝혀 내었으며, Simpson et al.(1977)은 해풍이 때때로 내륙으로 약 100 km 이상까지 침투하기도 한다고 보고하였다.

해풍구조에 관해서는 Wallington(1959)이 비행기관측을 통하여 상승기류의 속도와 구름구조를 중심으로 해풍전선의 구조를 밝혔으며, Fisher(1960)는 일련의 해풍관측을 통해 해풍의 고도가 약 3,000 feet였음을 보고하였고, 해륙풍의 풍향변화에 관해서는 Haurwitz(1947)가 해풍은 전향력의 영향으로 시계방향으로 변한다고 하였으나, Staley(1957)는 관측소에 따라 복잡한 형태를 보이고 있음을 지적하였다.

한편 우리나라에서의 해륙풍, 특히 해풍에 관한 기초적인 조사로는 이승만외(1979)가 평균 vector풍을 이용하여 근산일원의 해풍의 연직분포 등에 관하여, 그리고 동 연구 II (1980)에서는 전주지방에의 해풍의 침투 거리에 관하여 조사하였으며, 최길수의(1982)는 10년간의 지상바람자료를 이용하여 부산지방의 해륙풍 특성에 관하여, 김유근외(1985)는 남해안지방, 특히 사천만을 중심으로 지상자료와 상층풍관측을 통해 해풍의 기후학적 특성과 연직분포를 조사하였다.

근래에 와서는 주로 해륙풍의 수치 model을 개발하는 연구가 활발히 전개되고 있는데, 이러한 modelling은 먼저 Jeffreys(1922)에 의해 선형적으로 연구되기 시작하였다. 그 후 Estoque(1961)가 이류항을 고려한 비선형 model을 제시하였는데, 이 model에서는 풍속과 온위를 구할때 대기경계층의 2차원적인 영역을 접지층과 전이층으로 나누어, 접지층은 flux가 일정하다고 가정해서 해석적으로 구하고 전이층에서는 기초방정식을 수치적분하여 풍속과 온위의 연직분포를 계산하였다.

이와같은 방법은 Estoque와 Bnumralkar(1969)에 의해서 개선되었고, Shein et al.(1975)과 Kozo(1982)등에 의하여 계승되어왔다. 특히 Kozo model은 열과 운동량의 확산 계수를 동일하게 계산하지 않고 Businger의 보편함수식에서 이들 각각을 도출하였다. 그 후 연직방향의 확산계수를 결정하는 Closure model도 개발되었으며, 수평방향의 확산량을 기초방정식에서 무시하고 그에 의해 생기는 계산의 불안정을 smoothing법을 이용하여 해소하는 방법도 제시되었다. 그리고 해륙풍 model은 초기에는 일반풍이 없는 평지라는 가정하에서 접근하여 근자에는 일반풍과의 상호작용, 지형의 영향 등을 고려하였고, 나아가서는 해륙풍 내부에서 발생하는 작은 규모의 대류 및 3차원model까지 확장하는 연구가 활발히 추진되고 있다. 뿐만 아니라 오염물질의 이류확산에 해륙풍의 순환효과가 크게 강조되는 등 대기환경영향평가를 목적으로 한 대기확산의 simulation 역시 널리 행해지고 있는데, 이와같은 수치 simulation은 기상 변화나 대기오염의 영향평가에 중요한 정보를 제시하고, 또 기상이나 대기오염현상의 이론적 해석에도 많이 이용되고있다.

제주도의 경우 사면이 바다로 형성되어있고, 한라산을 중심으로 양측사면의 경사가 다른 지형적인 특성을 가지고 있어 섬지방 특유의 해륙풍 특성과 연직순환형태가 나타나리라 예견되므로 본 연구에서는 먼저 제주도 남북해안의 해륙풍의 기후학적인 특성을 조사하여 섬지방 특유의 특성을 정립해 보고자 하며, 그 다음 확산방정식의 2차원 차분model을 사용하여 실제 제주도지방에 대한 수치 simulation을 통해 해륙풍의 2차원 연직순환양상과 한라산의 지형적인 영향을 고찰해 보고자 한다.

특히, 본 연구에서는 도시나 산악지방과 같이 흐름의 장이 복잡하고 지형굴곡이 심한 경우의 오염물질 농도계산에 많이 사용되는 확산방정식의 차분model을 사용하였다. 또한 대기경계층을 접지층과 Ekman층으로 나누고 연직방향의 확산계수를 열과 운동량으로 구분하는 model을 설정함으로써 보다 정밀한 계산을 기하였으며, 2*좌표계와 불균등격자망을 해륙풍 model에 적용시켜서 지면이 평지라는 일반적인 가정을 없애고 지형이 해륙풍 순환에 미치는 영향을 보다 명확하게 고찰하고자 하였다.

2. 제주도지방의 해륙풍의 특성

최근 10년간(1977.1 - 1986.12) 제주서와 서귀포의 지상기상자료를 근거로 하여 제주도지방의 해륙풍의 기후학적 특성을 조사하였다. 해륙풍은 주로 기압경도가 약한 날 많이 발생하지만, 해륙풍 발생일을 선정하는 데 있어서 기압경도력이 약한 날이라도 해안의 지형, 산곡풍과 일반류의 변화등의 영향으로 순수한 해륙풍을 추출해 내기는 상당히 어렵다. 그러나 제주도의 경우는 지형도 단순하고 서귀포와 제주시가 한라산을 중심으로 남북해안의 거의 정반대 지점에 위치하고 있어서, 두 지점에서 1일 주기의 풍향변화가 동시에 발생한 날만을 해륙풍 발생일로 추출하면 기존의 연구보다 더욱 순수한 해륙풍 발생일을 선정할 수 있다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 해륙풍 발생일을 선정할때, 한 지점에만 풍향의 일변화가 있으면 다른 순환이 겹쳐 나타날 가능성이 있으므로 제주시와 서귀포의 두 지점이 동시에 1일 주기의 풍향변화를 일으킨 날만을 해륙풍의 발생일로 정의하였으며, 추출된 날들은 그날의 일기도와 대조하여 기압골 통과등 기압계의 변동으로 인하여 풍향의 변화를 일으킨 날들은 해륙풍의 발생일에서 제외시켰다.

2-1. 발생빈도

Tables 1,2는 최근 10년 동안(1977-1986년)의 제주도지방의 해풍과 육풍의 발생일수를 월별로 나타낸 것이다.

제주도지방의 해풍 총발생일은 조사기간 중 총240일로서 연 24.0일(6.6%) 정도이고, 육풍 총발생일은 282일로서 연 28.2일(7.7%)로 나타나 육풍이 해풍보다 다소 발생빈도가 높다. 이것은 연구기간은 다르나 선행연구의 사천(연·98.1일), 김해(연 56.8일) 및 부산(연 65.8일)의 발생빈도 보다는 매우 낮은 값이다. 이러한 값들의 차이는 각 지방의 지형적인 영향도 중요한 이유가 되겠지만 무엇보다 해륙풍의 발생일을 선정하는 기준에 다소의 차이가 있다고 생각되며, 특히 제주도의 경우 제주시와 서귀포 양지점에서 동시에 해륙풍의 발생한 날만을 해륙풍발생일로 간주하였기 때문에 타지역에 비해 그 발생빈도가 극히 낮게 나타났다.

또한, 해풍과 육풍의 월별 발생빈도를 보면, 최대빈도를 보인 달은 해풍(총 37일)과 육풍(총 44일) 모두 8월로서 각각 전체의 15.4%와 15.6%를 차지하였으며, 그다음 9

월, 10월, 5월, 11월 순이다. 해륙풍이 해륙의 비열차에 의해 발생된다는 관점에서 보면 하계에 그 빈도가 가장 높은 것으로 예상되지만, 기압계의 변동도 대단히 큰 영향을 미치므로 장마기인 6, 7월에는 그 빈도가 낮게 나타나고, 특히 6월은 전체 발생빈도의 약 2.5% 정도밖에 미치지 못하여 1년중 가장 낮은 빈도를 나타내 보인다. 그리고 춘계보다는 추계(특히 9, 10월)가 보다 더 발생빈도가 높으며, 태양고도가 낮고 기압경도가 큰 동계(12, 1, 2월)는 그 평균이 전체의 약5% 정도의 매우 낮은 발생빈도를 보여 주었다.

2-2. 발생 및 소멸시각

2-2-1. 해풍의 발생 및 소멸시각

Tables 3, 4는 각각 제주시와 서귀포의 해풍발생시각의 빈도분포를 월별로 나타낸 것이다. 전체적인 해풍의 발생시각이 08시에서 13시 사이에 분포되어, 해풍의 일출후부터 일몰시각사이의 어느 시각에도 발생할 수 있다는 Wexler(1946)의 주장과는 일치하고 있지만 발생시각의 분포가 대단히 이르게 나타났다.

특히 09시와 10시에 제주시와 서귀포에서 각각 총 149회(62.1%)와 총 161회(67.1%)가 발생하여, 주로 12시에서 15시 사이에 발생한 사천(연평균 13.4시)과 김해(연평균 13.9시)지방의 경우보다는 약 4 시간 정도 그 발생시각이 일러, 일출후 태양복사에너지에 의해 지면이 가열되자마자 곧 해풍이 발생됨을 알 수 있다.

해풍 발생시각의 연변화 경향을 보면(Fig. 1), 전년을 통해 제주시(연평균 9.4시)가 서귀포(연평균 9.9시)보다 이르며, 난후기가 한후기보다 그 차이가 크다. 가장 이르게 발생한 달은 서귀포의 경우 6월(평균 8.8시), 제주시의 경우는 7월(평균 8.4시)이었으며, 가장 늦게 발생한 달은 서귀포에서는 1월(평균 11.1시), 제주시에서는 12월(평균 10.9시)이었다. 해풍발생시각의 연변화 경향은 일출시각의 변화와 유사한 경향을 보인다.

제주시와 서귀포의 해풍의 소멸시각은 Tables 5, 6에 나타나 있는 것과 같이, 특이한 몇 경우를 제외하면 하계는 16시에서 22시 사이에, 그리고 동계는 15시에서 19시 사이에 분포되어 있어 하계가 동계보다 해풍의 지배시간이 더 길게 나타났다. 제주시의 경우에는 18시와 19시 사이에 총 121회(50.4%)이고, 서귀포에서는 17시와 18시 사이에 총 130회(54.1%)가 나타나, 연평균으로 볼 때 제주도의 남부해안보다는 북부해

안에서 약 1시간 정도 더 늦게 해풍이 소멸되는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 해풍의 소멸시각의 연변화를 나타낸 것인데, 전년을 통해 서귀포(연평균 17.7시)가 제주시(연평균 18.4시)보다 거의 균등하게 일찍 나타났다. 이것은 결과적으로 제주도의 해풍은 남부해안이 북부해안보다 다소 늦게 발생하고 일찍 소멸되고 있음을 의미하며, 특히 남해안지방인 사천(연평균 19.3시)과 김해(연평균 20.3시)보다는 약 1 - 2시간 정도 일찍 소멸되고 있는데, 이것은 해륙의 규모와 산풍의 영향차이 때문으로 여겨진다. 그리고 해풍이 가장 늦게 소멸한 달은 7월(제주시 : 평균 19.9시, 서귀포 : 평균 19.0시)이었으며, 가장 일찍 소멸한 달은 12월(제주시 : 평균 16.9시, 서귀포 : 평균 16.5시)이었다. 해풍의 소멸시각은 발생시각의 경향과는 반대로 하계로 가면서 점차 늦어졌다가 다시 동계로 가면서 점차 일러지고 있어, 태양의 일몰시각 변화와 유사한 경향을 보인다.

2-2-2. 육풍의 발생 및 소멸시각

육풍의 발생시각은 Tables 7,8 에서 나타난 것과 같이, 대부분의 경우 전년을 통해 육풍의 발생시각이 자정을 넘지 않았으며, 하계로 갈수록 해풍의 영향이 길어져서 육풍의 발생시각이 늦어지고, 동계로 갈수록 일러지는 빈도분포를 보이고 있다. 전체적으로 19시에서 21시 사이에 제주시가 총 172회(60.6%), 서귀포가 총 203회(71.5%) 발생하여 가장 높은 발생빈도를 가지고 있다.

Fig. 3은 육풍 발생시각의 연변화를 나타낸 것인데, 연중 서귀포(연평균 20.1시)가 제주시(연평균 21.0시)보다 일렀으며, 하계와 동계에서 약 1시간 정도의 차이가 발생하였다. 육풍의 발생시각은 전반적으로 하계가 늦고 동계에 일찍 나타나는 현상을 보여주는데, 제주시의 경우 가장 이른 달은 12월(평균 19.5시)이나 서귀포의 경우는 10월(평균 18.6시)에 나타났고, 가장 늦은 달은 제주시는 7월(평균 22.6시)을 정점으로 하여 하계에 나타났으나 서귀포에서는 4, 5월(평균 21.2시)과 6, 7월(평균 21.1시), 그리고 8월(평균 20.8시)이 비슷한 경향을 나타내어 매우 특이하다.

육풍의 소멸시각은 Tables 9,10에서 보는 바와 같이 제주시(연평균 7.9시)와 서귀포(연평균 7.8시) 모두에서 대부분이 06시에서 10시 사이에 분포되어 있고, 특히 07시와 09시 사이에 제주시가 총 214회(82.3%), 서귀포가 총 245회(86.2%)로 빈도가 밀집되어 나타나며, 전반적으로 하계로 갈수록 일러지고 동계로 갈수록 늦어지는 경향을 보

이고 있다.

육풍 소멸시각의 연변화 경향을 보면(Fig. 4), 6월(제주시 : 평균 6.0시, 서귀포 : 평균 6.7시)에 가장 일찍 소멸되며 제주시가 서귀포보다는 다소 일찍 소멸 하였다. 또, 가장 늦게 소멸한 달은 1월(제주시 : 평균 9.5시, 서귀포 : 평균 8.9시)이고 제주시가 서귀포보다는 더 늦게 나타났다. 즉, 해풍의 소멸시각의 연교차가 제주시가 서귀포보다 더 크게 나타나, 북부해안쪽이 남부해안쪽보다 소멸시각의 계절적 변화가 더 심하는 것을 알 수 있다.

2-3. 지속시간과 전이시간

2-3-1. 지속시간

Tables 11, 12는 각각 제주시와 서귀포에서의 해풍의 지속시간빈도를 월별로 나타낸 것이다. 해풍의 지속시간은 제주시에서는 3 - 14시간, 서귀포에서는 2 - 13시간 사이로 매우 다양하게 나타나고 있지만, 대부분의 경우 제주시에는 7 - 11시간 사이가 총 180회(75.0%), 서귀포에서는 6 - 10시간 사이가 총 182회(75.9%)로서 가장 많이 분포되어 있다. 연평균 지속시간은 제주시(9.0시간)가 서귀포(7.9시간)보다 약 1시간 정도 길게 나타나며, 전반적으로 하계(6 - 13시간)가 동계(4 - 9시간)보다 긴 영향을 보여준다.

육풍의 지속시간은 Tables 13, 14에서 보는바와 같이 해풍의 지속시간과는 정반대로 동계(11 - 16시간)가 하계(7 - 12시간)보다 긴 특징을 가지고 있다. 육풍의 지속시간도 4 - 18시간 사이로 해풍의 경우와 마찬가지로 매우 다양하게 나타나지만, 제주시에는 8 - 13시간 사이에 총 219회(77.0%), 서귀포에서는 10 - 14시간 사이에 총 202회(71.2%)로서 가장 많이 분포되어 있고, 또 그 시간 사이에 고르게 분산되어 있다. 연평균 지속시간은 제주시(10.9시간)가 서귀포(11.7시간)보다 약 1시간 정도 짧았고, 해풍의 연평균 지속시간보다는 제주시가 약 2시간, 서귀포가 약 4시간 정도 길게 나타났다.

Figs. 5, 6은 각각 해풍과 육풍의 지속시간의 연변화를 나타낸 것인데, 해풍과 육풍의 경우 연변화 경향이 정반대임을 알 수 있고, 전년에 걸쳐 제주시가 서귀포에 비해 해풍의 지속시간은 길게 나타난 반면에 육풍의 지속시간은 짧았다. 가장 지속시간이 길었던 달은 해풍의 경우에는 제주시에서는 7월(평균 11.5시간), 서귀포는 6월(평균 9.

7시간)이었고, 육풍의 경우는 모두 12월로서 제주시가 13.3시간, 서귀포가 13.8시간이었다. 또 가장 지속시간이 짧았던 달은 해풍의 경우에는 12월로서 제주시가 6.0시간, 서귀포가 5.7시간이었고, 육풍의 경우는 6월로서 제주시가 7.9시간, 서귀포가 9.6시간으로 나타났다.

그리고 사천이나 김해지방에서 해풍의 지속시간이 6월에 각각 평균 8.6시간과 9.7시간으로 가장 길게 나타나고, 12월에 각각 평균 4.0시간과 3.2시간으로 가장 짧게 나타난 것과 비교하면, 연변화 경향은 유사하나 지속시간은 제주도가 더 길고, 연평균 지속시간(사천 : 5.9시간, 김해 : 6.3시간)이 평균 약 2 - 3시간 정도 제주도가 더 길게 나타난다.

2-3-2. 전이시간

해풍에서 육풍으로의 전이시간의 빈도분포(Tables 15, 16)를 보면, 1시간 내에 전이되는 것이 제주시가 총 72회(46.5%), 서귀포가 총 54회(34.9%)로 가장 많고, 그 다음이 2시간(제주시 : 30.3%, 서귀포 : 25.8%), 3시간(제주시 : 12.3%, 서귀포 : 22.0%)순으로 대부분이 3시간 이내에서 전이되고 있다. 연평균으로는 제주시가 2.0시간, 서귀포가 2.4시간 정도로 제주시가 약 0.4시간 짧게 나타난다.

해풍에서 육풍으로의 전이시간의 연변화(Fig. 7)를 보면, 계절적 특징이 뚜렷하게 나타나지 않으나 두 지점 모두 6월(제주시 : 3.0시간, 서귀포 : 4.0시간)이 가장 길게 나타나고, 2월과 7월을 제외하고는 전년에 걸쳐 제주시가 서귀포보다 전이시간이 더 짧은 특징을 가지고 있다.

또 육풍으로부터 해풍으로의 전이시간의 빈도분포(Tables 17, 18)에서도, 해풍에서 육풍으로 전이되는 것과 마찬가지로 1시간내에 전이되는 것이 제주시가 총 135회(67.5%), 서귀포가 총 85회(42.5%)로 가장 많이 나타나고, 그 다음이 2시간(제주시 : 27.5%, 서귀포 : 31.5%), 3시간(제주시 : 3.5%, 서귀포 : 15.0%)의 순인데, 제주시의 경우는 대부분이 1 - 2시간 이내(95%)에 전이되고 서귀포는 다소 긴 1 - 3시간 이내(89.0%)에 전이되고 있다. 그리고 연평균으로도 제주시가 1.4시간, 서귀포가 2.0시간으로 제주시가 약 0.6시간 정도 짧게 나타난다. 결과적으로 해풍이나 육풍으로의 전이시간은 제주도의 북부해안이 남부해안보다 연평균 약 30분 정도 짧게 이루어지고 있음을 이해할 수 있다.

육풍에서 해풍으로의 전이시간의 연변화(Fig. 8)를 보면, 제주시의 경우 전년에 걸쳐 2시간 이내로 나타나고, 연중 서귀포시가 제주도보다 다소 길게 나타나나 두 지점 모두 월별 변화진폭은 크지 않다. 이것은 지면이 완전 냉각된 상태에서 해풍을 발생시킬 수 있을만큼 다시 가열되는데 소요되는 시간이 계절적으로 큰 차이가 없다는 것으로 해석할 수 있다.

2-4. 최대풍속과 그 출현시각

해륙풍의 월평균 최대풍속은 Table 19에서 보는바와 같이, 해풍의 최대풍속(제주시 : 4.1m/s, 서귀포 : 4.0m/s)이 육풍(제주시 : 3.2m/s, 서귀포 : 3.3m/s)보다 약 1m/s정도 강하게 나타난다. 그리고 최대풍속의 연변화 경향을 보면, 해풍의 경우 제주시의 극대치가 4.6m/s(8월), 극소치가 3.4m/s(1월)로 연교차가 1.2m/s로 매우 작게 나타나고, 서귀포에서는 극대치가 5.1m/s(2월), 극소치가 3.4m/s(1, 7월)로 나타나 연교차가 제주도보다 약 0.5m/s 더 크다. 또한 육풍의 경우에도 제주시에서는 연교차가 0.7m/s(극대 : 3.6m/s, 극소 : 2.9m/s)이고, 서귀포는 그보다 다소 큰 1.3m/s(극대 : 3.8m/s, 극소 : 2.5m/s) 정도로 나타나 제주도의 해륙풍의 최대풍속은 북부해안쪽 보다 남부해안쪽이 더 연변화 경향이 크다는 것을 알 수 있다.

Tables 20, 21은 각각 제주시와 서귀포에서 해풍의 최대풍속이 출현하는 시각의 빈도를 월별로 표시한 것인데, 조사기간 동안에 총 240회 발생한 해풍중 제주시에서는 13시와 14시 사이(19.6%)에 가장 높은 빈도를 보여 주었으나 보편적으로 12시에서 16시 사이(총 67.5%)에 거의 비슷하게 분산되어 최대풍속이 출현하였다. 그리고 서귀포에서는 14시와 15시 사이(27.1%)에 매우 높은 빈도를 보여주었으나 대체적으로 12시에서 15시 사이(총 66.7%)에서 해풍의 최대풍속이 나타났다. 해풍의 최대풍속의 연평균 출현시각은 제주시(14.0시)보다 서귀포(13.4시)가 다소 이르게 나타났으며, 월평균 출현시각은 계절에 따른 뚜렷한 특징없이 제주시가 12.8시(10월)에서 14.9시(1월) 사이에서 변화하며, 서귀포는 12.4시(2, 6월)에서 13.8시(9, 11월) 사이에서 변화하므로, 해풍의 최대풍속은 제주시에서는 약 13시에서 15시 사이에, 서귀포에서는 1시간 정도 이른 약 12시에서 14시 사이에서 나타난다고 보아야 할 것이다.

그리고 육풍의 최대풍속이 출현하는 시각의 빈도분포는 Tables 22, 23에 나타난 것과 같이, 총 284회 발생한 해풍중 제주시에서는 전체의 절반이상이 1시에서 5시 사이

에 분산되어 있으나 2시와 3시 사이(16.5%)에 최대풍속이 가장 많이 출현하였으며, 서귀포에서는 2시와 4시(약 16%) 사이에 최대풍속이 가장 많이 출현하였으나 제주시와 마찬가지로 전체의 절반이상이 1시에서 5시 사이에 분산되어 있었다. 결과적으로 육풍의 최대풍속의 연평균 출현시각은 2.6시(제주시)와 2.5시(서귀포)로 비슷한 양상을 보여주었으며, 해풍과 마찬가지로 계절별 특징이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 제주시의 경우 1.6시(2월)에서 3.5시(12월) 사이에서 변화하며, 서귀포에서는 1.5시(2월)에서 3.4시(11월) 사이에서 변화하여 두 지점 모두 비슷하게 새벽 1시에서 4시 사이에 최대풍속이 출현한다.

3. 해륙풍 Model과 제주도지방의 해륙풍의 2차원 연직순환

3-1. 기초방정식과 자본근사법

기초방정식계는 운동방정식, 온위방정식, 연속방정식, 정역학방정식이며, 지형의 영향을 고려하기 위해서 Cartesian 좌표계에서의 기초방정식을 지표면의 임의로 바뀔 때 표현할 수 있는 Z^* 좌표계로 변환시킨 방정식을 사용하였다.

연직좌표로서의 Z^* 좌표계의 변환식은

$$Z^* = S \frac{Z - Z_a}{S - Z_a} \quad (1)$$

이다. 여기서 Z 는 고도, Z_a 는 지형고도이며 S 는 계산영역 상면의 고도이다. 이식에 의해 Fig.9와 같이 직교좌표계가 Z^* 좌표계로 변환되어 임의 형태의 지형을 비교적 간단히 계산할 수 있다.

Z^* 좌표계에 의한 2차원 해륙풍 model의 기초방정식은 다음과 같다.

운동방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & f_v - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{Z^* - s}{s} \left(\frac{\partial Z_a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{s}{s - Z_a} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_V^{(u)} \frac{\partial u}{\partial Z^*} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & -f(u - U'_s) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{s}{s - Z_a} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_V^{(v)} \frac{\partial v}{\partial Z^*} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

온위방정식 :

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{s}{s - Z_a} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_V^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial Z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (4)$$

연속방정식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{S - Z_G} \left(u \frac{\partial Z_G}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

정역학방정식 :

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = - \frac{S - Z_G}{S} \frac{g}{C_p \theta} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } w^* = w \frac{S}{S - Z_G} + \frac{Z^* - S}{S - Z_G} \left(u \frac{\partial Z_G}{\partial x} \right)$$

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_{\infty}} \right)^{R/C_p}$$

$$\theta = T \left(\frac{P_{\infty}}{P} \right)^{R/C_p}$$

$$f = 2 \Omega \sin \vartheta$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad \text{이다.}$$

이상의 방정식에 나오는 기호의 정의는 다음과 같다.

u, v, w : x, y, z 방향의 속도성분

w^* : Z^* 좌표계에 의한 연직방향의 속도성분

t : 시간[s]

θ : 온위[K]

T : 온도[K]

R : 건조공기의 기체상수(=0.28705[J/gK] = 0.0686[cal/gK])

C_p : 정압비열(=1005[J/kgK] = 239.05[cal/kgK])

P : 기압[mb]

P_{∞} : 기준 level의 기압(=1000mb)

f : Coriolis parameter [s^{-1}]

Ω : 지구의 회전각속도(= 7.27×10^{-5} [rad/s])

ϕ : 위도[deg]

g : 중력가속도(= 9.8 [m/s^2])

K_H : 수평방향 확산계수[m^2/s]

$K_v^{(u)}$, $K_v^{(v)}$; 각각 운동량, 열의 연직방향 확산계수[m^2/s]

그리고 기초방정식을 차분근사하는 방법에는 대상으로 하는 문제와 계산의 안정성등에 따라 여러가지 방법이 사용되고 있지만, 본 연구에서는 이류항은 풍상차분, 확산항은 Mahrer and Pielke (1975)에 의한 Dufort-Frankel법, 시간에 대해서는 전진형의 차분법을 사용하고 그외의 항은 중심차분을 사용하였으며, 각 변수에 대한 격자망은 Fig. 10과 같은 불균등격자망을 사용하였다.

3-2. 연직방향의 확산계수

대기경계층을 접지층(surface-50m)과 Ekman층(50m이상)으로 나누고 각 층에 대해 달리 model화를 행하였다. 난류효과에 대해서는 여러가지 model화가 행해지고 있지만, 본 연구에서는 Ekman층에서의 난류확산계수는 대기의 상태에 따라 달리 나타나는 현상을 가장 잘 표현할 수 있다고 생각되는 Yamada (1975)에 의한 난류 closure model (YM model)로써 나타내기로 하였고, 접지층내에서는 Monin-Obukhov의 상사이론에 기초를 둔 Businger et al.(1971)의 무자원 풍속-온위 분포식을 이용하여 운동량과 열의 연직방향 확산계수를 표현하였다.

3-2-1. Ekman 층

Ekman층의 연직방향 확산계수는 YM model에 의해 다음과 같이 구할수가 있다.

$$q^2 = B_1 \Omega^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] (1 - R_{ir}) S_w \quad (7)$$

$$\frac{w'^2}{z} = \left[\frac{1}{3} - 2 \frac{A_1}{B_1} - 6 \frac{A_1}{B_1} \left(1 - \frac{2}{3} C_1 \right) \frac{R_{ir}}{1 - R_{ir}} \right] q^2 \quad (8)$$

$$\overline{-u'w'} = \rho q S_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (9)$$

$$\overline{-w'\theta'} = \rho q S_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (10)$$

$$\overline{-u'\theta'} = -3 A_z \rho^2 (S_M + S_H) \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (11)$$

$$\overline{\theta'^2} = B_z \rho^2 S_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \quad (12)$$

여기서 u' , v' , θ' 는 각각 u , v , θ 의 변동량이고 A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 은 실험상수로 각각 0.78, 0.78, 15.0, 8.0, 0.3이다. 또 S_M 과 S_H 는

$$S_M = C_M \frac{(R_{rc} - R_{r'}) (R_{r1} - R_{r'})}{(1 - R_{r'}) (R_{rz} - R_{r'})} \quad (13)$$

$$S_H = C_H \frac{R_{rc} - R_{r'}}{1 - R_{r'}} \quad (14)$$

로 나타낸다. 여기서 C_M , C_H , R_{r1} , R_{rz} 는 실험상수($C_M=1.4326687$, $C_H=1.9527037$, $R_{r1}=0.3257390$, $R_{rz}=0.3161959$)이고, $R_{r'}$ 는 flux Richardson 수, R_{rc} 는 임계 flux Richardson수(=0.2748189)이며, q^2 는 속도변동 에너지, ρ 은 혼합길이이다.

식(9), (10)에서 운동량, 열의 확산계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_V^{(m)} = \rho q S_M, \quad K_V^{(\theta)} = \rho q S_H \quad (15)$$

혼합길이 (ρ)는,

$$\rho = \frac{\kappa z}{1 + \kappa z / \rho_0} \quad (16)$$

와 같이 나타낼 수 있고, κ 는 Karman상수(=0.4)이며, l_0 는 q 의 분포를 이용하여

$$l_0 = 0.1 \int_0^{\infty} z q dz / \int_0^{\infty} q dz \quad (17)$$

로 나타낼 수 있다. 또 Ri_r 는 gradient Richardson 수 (Ri_m)의 함수로서

$$Ri_r = \alpha Ri_m \quad (18)$$

와 같이 나타내어지는데, 여기서

$$Ri_m = \frac{g \frac{\partial \theta}{\partial z}}{\theta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (19)$$

이다. 그리고 α 는 확산계수의 비이므로 정의에서,

$$Ri_r = \frac{Kv^{(\theta)}}{Kv^{(m)}} Ri_m = \frac{C_H}{C_M} \frac{R_{rz} - Ri_r}{R_{r1} - Ri_r} Ri_m \quad (20)$$

이다. 이식을 Ri_r 에 대하여 정리하고, 얻어진 2차 방정식을 풀어 실험상수를 대입하면

$$Ri_r = 0.68149 \{ Ri_m + 0.23899 - (Ri_m^2 - 0.4498 Ri_m + 0.057114)^{1/2} \} \quad (21)$$

되는데, 이 식(21)을 이용하여 식(13)과 (14)에서 S_H 과 S_M 를 구하고, 식(16)에서 l 을 계산한 다음 이들을 이용하여 식(7)의 q 를 구하면 식(15)에 있는 운동량, 열의 확산계수를 구할 수 있다.

3-2-2. 접지층

Monin-Obukhov의 상사이론을 풍속 및 온위의 연직분포에 적용하여 접지층에서의 운동량과 열의 flux 및 연직방향 확산계수를 구하였다. 접지층은 정상적으로 수평방향으로는 균일하다고 하는 이론의 전제조건하에서 풍속 및 온위의 연직경도는 보편함수에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_m(\zeta) \equiv \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (22)$$

$$\phi_h(\xi) \equiv \frac{\kappa z}{\theta_*} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (23)$$

여기서 u_* ; 마찰속도

θ_* ; 마찰온위

κ ; Karman상수

$U = (u^2 + v^2)^{1/2}$

$\xi = z/L$ 이다.

그래서 운동량과 열의 연직방향 확산계수는 식(22), (23)을 이용하면

$$K_V^{(m)} = \frac{u_*^2}{\partial u / \partial z} = \frac{\kappa u_* z}{\phi_m} \quad (24)$$

$$K_V^{(\theta)} = \frac{u_* \theta_*}{\partial \theta / \partial z} = \frac{\kappa u_* z}{\phi_h} \quad (25)$$

으로 나타낼 수있다. 따라서 u_* , θ_* , ϕ_m , ϕ_h 등이 결정되면 연직방향의 확산계수를 구할수가 있다.

그런데 접지층에서는 flux가 일정 즉, u_* , θ_* 가 일정하다고 가정할수가 있기 때문에 식(22), (23)을 고도 z_0 에서 z 까지 적분하면 풍속 및 온위의 연직분포는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} U(z) - U(z_0) &= \frac{u_*}{\kappa} \int_{z_0}^z \frac{\phi_m}{z} dz = \frac{u_*}{\kappa} \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{\phi_m}{\xi} d\xi \\ &= \frac{u_*}{\kappa} [\psi_m(z/L) - \psi_m(z_0/L)] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\theta(z) - \theta(z_0) = \frac{\theta_*}{\kappa} \int_{z_0}^z \frac{\phi_h}{z} dz$$

$$= \frac{\theta_*}{\kappa} [\psi_m (z/L) - \psi_m (z_0/L)] \quad (27)$$

여기서, ψ_m ; 무차원 풍속 profile (= $\int (\phi_m/\xi) d\xi$)

ψ_h ; 무차원 풍속 profile (= $\int (\phi_h/\xi) d\xi$)

ξ ; 안정도 parameter (= z/L)

z_0 ; 지표면 roughness

L ; Monin-Obukhovz의 길이 (= $\frac{u_*^2 \theta}{\kappa g \theta_*}$)

θ ; 접지층 평균온위 (= $(\theta(z_z) + \theta_g)/2$) 이다.

고도 z_0 에서의 온위는 Y. Mahrer and R. A. Pilke(1977)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(z_0) = \theta_g + 0.0962 \left(\frac{\theta_*}{\kappa} \right) \left(\frac{u_* z_0}{\nu} \right)^{0.45} \quad (28)$$

여기서 θ_g 는 지표면에서의 온위이다. 고도 z_0 에서의 풍속 $U(z_0)$ 는 0이기 때문에 식 (26), (27)을 정리하면, u_* 와 θ_* 를 구하는 식은 다음과 같이된다.

$$u_* = \kappa U(z) / [\psi_m (z/L) - \psi_m (z_0/L)] \quad (29)$$

$$\theta_* = \kappa (\theta(z) - \theta_g) / [\psi_h (z/L) - \psi_h (z_0/L) + 0.0962 (u_* z_0 / \nu)^{0.45}] \quad (30)$$

또한, 보편함수 ϕ_m 과 ϕ_h 를 구하는 방법에 대해서는 여러가지 실험식이 제안되고 있지만, 본 연구에서는 Businger et al.(1971)의 보편함수식

$$\phi_m = \begin{cases} 1.14 (1 - 13.1 \xi)^{-1/4} , & (\xi \leq 0, \text{ 불안정층}) \\ 1.14 (1 + 4.1 \xi) , & (\xi > 0, \text{ 안정층}) \end{cases} \quad (31)$$

$$\phi_h = \begin{cases} 0.84(1 - 7.9\zeta)^{-1/2}, & (\zeta \leq 0, \text{ 불안정층}) \\ 1.14(0.74 + 4.1\zeta), & (\zeta > 0, \text{ 안정층}) \end{cases} \quad (32)$$

을 이용하였는데, 이때 무차원 profile ψ_m, ψ_h 는

$$\begin{aligned} \psi_m(z/L) - \psi_m(z_0/L) &= 1.14 \left\{ \ln(z/z_0) + \begin{cases} -2 \ln(1+X) - \ln(1+X^2) \\ + 2 \arctan(X) \Big|_{X_0}^X \end{cases}, \quad \zeta \leq 0 \\ &= 1.14 \left\{ \ln(z/z_0) + 4.1 \left[\zeta \Big|_{\zeta_0}^{\zeta} \right] \right\}, \quad \zeta > 0 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \psi_h(z/L) - \psi_h(z_0/L) &= 0.84 \left\{ \ln(z/z_0) - 2 \left[\ln(1+Y) \Big|_{Y_0}^Y \right] \right\}, \quad \zeta \leq 0 \\ &= 1.14 \left\{ 0.74 \ln(z/z_0) + 4.1 \left[\zeta \Big|_{\zeta_0}^{\zeta} \right] \right\}, \quad \zeta > 0 \end{aligned} \quad (34)$$

이다. 여기서, $\zeta = z_0/L$

$$X = (1 - 13.1 \zeta_0)^{1/4}$$

$$X_0 = (1 - 13.1 \zeta_0)^{1/4}$$

$$Y = (1 - 7.9 \zeta_0)^{1/2}$$

$$Y_0 = (1 - 7.9 \zeta_0)^{1/2} \text{ 이다.}$$

3-3. 수평방향의 확산계수

해륙풍 계산에서 수평방향의 확산계수는 대기의 상태에 의해서 결정되는 연직방향의 확산계수와는 달리 주로 계산을 안정하게 하는 목적으로 많이 사용된다. 이 때문에 수평방향의 확산계수에 대해서는 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 정도의 일정한 값을 주는 방법, mesh간격과 풍속경도의 함수로서 표현하는 방법 또는 smoothing법을 사용하는 방법등이 있는데, 본 연구에서는 계산이 불안정하게 되지 않을 정도의 충분히 큰 값인

$$K_E = 10000 \text{ (m}^2/\text{s)}$$

(35)

을 일정지로 주기로 하였다.

3-4. 초기 및 경계조건

계산의 초기조건으로 먼저 전 영역이 정상상태에 있다고 가정하였다. 연직방향의 풍속성분은 전 영역에서 $w = 0$ 으로 하였으며, 수평방향의 풍속성분 u, v 에 대해서도 지근풍이 없는 경우를 가정해서 계산하였으므로 $u = v = 0$ 을 초기조건으로 주었다.

그리고 온위는 다음식

$$\theta = \theta_{sea} + \Gamma \{ Z^* [S - Z_G(X)] S^{-1} + Z_G(X) \}$$

(36)

을 이용하였는데, 여기서 Γ 는 연직방향의 온도경도이다. 압력 Π 에 대해서는 좌표원점에서의 값을 1.0037 즉 1013mb로 가정하고, 온위의 초기분포 및 정역학방정식의 차분근사식을 이용하여 측면상단 및 전 영역의 Π 값을 정하였다.

그리고 경계조건으로 지표면에서는, 수평 및 연직방향의 풍속에 대해서는 $u = v = w = 0$ 으로 하였고, 온위에 대해서는 바다와 육지, 그리고 해안선으로 나누어서, 해면은

$$\theta = \theta_{sea} : \text{const}$$

(37)

으로 하고, 육지표면은 Oochouchi (1978)에 의해 수식화된

$$\theta = \theta_{land} = \theta_{sea} + A \{ 1.4 + 5 \sin [(15t + 6) \pi / 180]$$

$$+ 1.7 \sin [(30t + 310) \pi / 180] \} / 8.0$$

(38)

을 사용한다. 여기서 t 는 계산시작시각(오전 8시)을 기준으로 한 시간이고, A 는 온도진폭 parameter(일중 해륙온도차의 최대치)를 나타낸다. 그리고 해안선상에서는

$$\theta = \frac{\theta_{sea} + \theta_{land}}{2}$$

(39)

으로 하였다.

상면에서의 경계조건으로는, 지표면 가열에 의해 일어나는 일변화는 상면에는 영향

을 미치지 않는다고 가정하고 전 변수에 대해서,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q_v}{\partial t} = \frac{\partial \Pi}{\partial t} = 0 \quad (40)$$

으로 하였다. 또 측면에서의 경계조건으로, 유입측(inflow)에는

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0 \quad (41)$$

으로 하고, 유출측(outflow)에서는 vector량(u, v)과 scalar량(θ , q_v)으로 나누어 다음과 같이 경계조건을 설정하였다. 즉, 수평풍속의 법선성분에 대해서는 Klemp and Wilhelmson(1978)의 경계조건

$$\frac{\partial V_n}{\partial t} + c \frac{\partial V_n}{\partial n} = 0 \quad (42)$$

을 사용하였는데, 여기서 $\partial/\partial n$; 측면의 법선방향의 미분

c ; eddy의 위상속도(= $s \cdot f_B / \pi$)

f_B ; Brunt-Väisälä frequency (= $(\frac{g}{\theta} \Gamma)^{1/2}$)

이고, 본 연구에서는 $c=5\text{m/s}$ 로 하였다.

수평풍속의 접선성분 V_t 와 온위는 내측의 두점의 값으로부터 다음과 같이 구하였다.

$$\phi^{\text{bound}} = 2\phi^{n-1} - \phi^{n-2} \quad (\phi = V_t, \theta) \quad (43)$$

여기서, 우측 상단의 첨자는 격자점을 표시한다. 그리고 z_B 에 대해서는 양측면에서 $\partial z_B / \partial x = 0$ 으로 하였다.

3-5. 제주도지방의 해륙풍의 2차원 연직순환

3-5-1. 지형조건과 계산영역

제주도는 한반도에서 남으로 약 90km 떨어진 한반도 최대규모의 섬으로서 섬전체가 화산활동에 의해서 만들어진 환형태의 화산체이다. 섬의 중앙부에는 고도 1,950m의

한라산이 위치하고, 섬전체의 지형이 단순하기 때문에 simulation을 통하여 그 결과를 해석해 내는 데에는 이상적인 곳으로 여겨진다.

Fig.11은 한라산을 정점으로 제주시와 서귀포를 잇는 정남북 단면도를 나타낸 것인데 고도 500m 간격으로 내삽한 것이다. 서귀포 사면의 경사가 제주시보다 더 급하고 B점은 정상 1,950m, $S_1 \sim S_6$ 은 상층풍 관측고도를 나타내며, 각 점의 좌표는 Table 24에 나와 있다.

그리고 계산영역은 연직방향으로는 한라산의 고도가 대단히 높기 때문에 계산의 안정을 가져오기 위하여 상면의 경계고도를 5,000m로 확대하였고, 수평방향으로는 좌우 측면을 제주시와 서귀포의 해안선으로부터 바다쪽으로 약 30km까지로 잡았다. mesh의 격자점은 수평방향으로는 해안선을 중심으로 해서 바다에서는 5km간격, 섬에서는 $A_0 \sim H_0$ (Fig.11과 Table 24 참조)와 같이, 그리고 연직방향으로는 고도 200m를 기준으로 해서 200m간격으로 400, 600, 800m의 순으로 하였다.

3-5-2. 해륙풍의 2차원 연직순환특성

동서고압대의 지배하에서 이상적인 해륙풍이 발생했다고 생각되어지는 1984년 5월 10일을 선택하여 계산한 결과, 해륙풍의 풍계는 Fig.12~19에 나타난 것과 같다. 화살표는 해안선에 직각 방향으로 불어 들어오는 수평방향의 풍속 v 와 연직방향의 풍속 w 를 합성한 속도 vector를 나타내고, v 와 w 의 축척은 그림 좌상단에 표시되어 있으며, 속도 vector의 절대치가 0.2m/s미만인 경우에는 화살표를 표시하지 않았다.

09시(Fig.12)에는 제주시와 서귀포의 양측해안을 통하여 약한 해풍이 불고 있고, 한라산 정상으로 부터의 하강류는 해풍보다는 다소 강한 속도로 양측의 사면을 통해 내려오고 있다. 이들 반대방향의 두 흐름의 수렴에 의해 제주시의 사면에서는 해발 약 1,000m고도 이상의 상층영역에서 상승류가 나타나고 있고, 서귀포측에서는 해안선상에서 뚜렷한 상승류가 존재한다. 그리고 10시에는 해풍이 보다 강화되며 제주시측사면의 해풍의 강도가 서귀포측보다 더 강하게 나타나고, 연직순환의 특성이 서귀포측에서 뚜렷해지기 시작한다. 11시에는 양측해안에서 해풍이 급격하게 발달하며 서귀포측 해상 약 1km고도부근에서 보상류가 뚜렷하게 나타난다.

그리고 지면이 보다 가열된 12시(Fig.13)에는 섬의 양측에서 더욱 더 해풍이 강해지고 그 순환도 깊어지며, 양측을 비교하면 제주시측이 서귀포측보다 해풍의 상한고도가

높다. 서로 반대방향에서 들어오는 두 해풍은 한라산 정상에서 수렴을 하고 있으며, 제주시측의 해풍의 강도가 서귀포측 보다 강하여 서귀포측 상공에서 뚜렷한 순환이 나타난다. 서귀포측에서의 해풍의 상한고도는 약 1,000m에서 형성되는데, 특히 2,000m 상공에서 가장 강한 보상류가 존재하며, 제주시측에서는 해안으로부터 약 10km 떨어진 바다의 1,600m 상공부근에서 약한 하강류가 발견되는 것을 제외하면 해풍이 한라산을 넘어 서귀포측으로 합류했기 때문에 순환이 거의 발생하지 않는다. 13시와 14시때의 순환특성은 12시와 거의 유사하게 나타난다.

또한 지면온도가 가장 높은 15시경(Fig.14)에는 양측에서 해풍이 일층 가장 강하게 나타나고 있으며, 역시 12~14시의 경우와 마찬가지로 제주시측의 해풍이 서귀포측보다 더 높게 불고 한라산 정상에서 양기류의 수렴현상이 나타난다. 수렴시 제주시측의 해풍이 보다 우세하여 서귀포측으로 유입되기 때문에 서귀포측 상공에서 보다 뚜렷한 순환이 형성되고 있고, 순환고도나 하강류가 나타나는 위치 및 제주시측 사면의 상공에서 나타나는 약한 상승류등은 12~14시의 양상과 거의 비슷하게 나타나지만 그 강도가 보다 강하다. 그리고 16시에는 해풍의 강도와 연직순환특성이 15시와 거의 유사하나 17시에는 그 강도가 다소 약화되었다.

태양일몰시각에 가까운 18시(Fig.15)에는 제주시와 서귀포 양측 모두 해풍은 현저히 약화되나, 계속 제주시측에서의 해풍이 서귀포측보다 강하게 나타나고, 서귀포측 상공에서 순환이 뚜렷하게 발생하지만 그 강도는 현저히 감소되었다. 또 제주시측 상공에서의 흐름의 양상은 12시때와 비슷하나 어떠한 순환의 흔적도 나타나지 않는다. 해풍의 강도는 19시와 20시때의 양상과 같이 시간이 지남에 따라 점점 약화되나, 20시까지도 해풍의 영향을 양측해안에서 받고있다.

그리고 지면이 냉각되기 시작하는 21시(Fig.16)에는, 제주시측에는 산사면을 통해 약한 육풍 또는 산풍이 서서히 발생하기 시작하였으나 아직 해풍의 영향이 약하게 남아 있고, 서귀포측에서는 육풍의 형태로 전환되어 나타난다. 전 영역을 통하여 순환의 흔적은 나타나지 않고, 지형의 효과로 인해 서귀포측의 급사면을 통하여 하강류가 빠르게 진행함으로써 서귀포측의 전 영역이 육풍으로 나타난다. 제주시해안에서는 22시에 육풍으로 전환되었고, 23시부터 강화되기 시작한다.

지면의 냉각이 어느 정도 진행된 자정(Fig.17)에는 양측사면 모두에서 산풍이 가세된 육풍이 잘 나타난다. 제주시측 바다 1,000m 고도부근에서 순환이 약하게 발생되고,

그것이 한라산을 넘어 서귀포측의 산풍과 합류함으로써 서귀포측의 풍속이 제주시측보다 강하게 나타나며 그 강도가 점점 강해진다. 서귀포측에서는 순환이 나타나지 않고 상하층이 거의 균일하게 육풍이 불고 있으며 1,000m고도 이하의 하층에서는 풍속도 이전시간보다 다소 강하게 나타난다. 이러한 순환특성은 01시부터 05시까지(Figs.17, 18) 지속되는데, 특히 03시대에 일층 육풍의 강도가 가장 강하게 나타난다.

일출 직전인 06시(Fig. 19)에는 양사면에서 육풍이 다소 약화되나, 앞 시간대의 경우와 비슷하게 제주시측의 약 1,000m 고도의 하층에서 약한 순환이 발생하고, 서귀포측의 전 영역에서는 순환이 발견되지 않는다. 07시에는 서귀포측에서는 아직 육풍의 영향이 약하게 남아 있지만, 제주시측에서는 그 영향이 소멸되었고, 08시에는 서귀포측에서는 아직 육풍이 약하게 불고 있으나 제주시측이 먼저 해풍의 형태로 전환되고 있음을 보여준다.

결과적으로 제주도지방에서는 제주시측이 서귀포측보다 해풍이 강하고 더 높게 불고 있으며, 그 영향으로 서귀포측 영역에서는 해풍의 순환이 뚜렷해지고 제주시측 영역에서는 거의 나타나지 않는다. 역으로 육풍이 불 때에는 제주시측에서 약하게 순환이 형성되고, 그것의 보상류가 서귀포로 넘어가기 때문에 서귀포측이 제주시측보다 육풍의 강도가 훨씬 강하며, 그로 인해 상하층의 흐름이 균일하게 된다. 이렇게 보면 한라산의 지형적인 영향으로 인해 양측에서 동시에 발생한 해륙풍은 일반적인 해륙풍에 비해 그 강도와 연직순환의 특성이 다르게 나타났으며, 서귀포측의 사면이 제주시측보다 경사가 급한 제주도의 지형적인 특징이 본 연구에서 뚜렷하게 나타났다고 생각된다.

4. 결 론

최근 10년간(1977-1986)의 지상기상자료를 분석하여 조사한 제주도지방의 해륙풍의 기후학적 특성과 해륙풍 수치 model을 설정하여 제주도지방의 해륙풍의 연직순환 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

- (1) 해륙풍의 발생빈도는 월별로는 8월(약 15.5%)이 가장 높고 그 다음이 9월, 10월, 5월, 11월의 순이다. 춘계보다는 추계가 더 발생빈도가 높으며 동계(약 5%)가 가장 낮다.
- (2) 해풍은 제주도의 북부해안이 남부해안보다 연평균 약 30분정도 더 일찍 발생하고 약 1시간정도 늦게 소멸한다. 반대로 육풍은 남부해안이 북부보다 연평균 1시간 정도 일찍 발생하나 연평균 소멸시각은 남북해안이 비슷하다. 제주도지방의 해풍의 발생시각은 연평균 9-10시로 남해안지방(13-14시)보다 약 4시간 이르며, 소멸시각은 연평균 17-19시로 역시 남해안지방(19-21시)보다 약 2시간정도 이른다.
- (3) 해풍의 연평균 지속시간은 북부해안이 남부보다 약 1시간정도 길고, 육풍의 그것은 반대로 약 1시간정도 짧게 나타난다. 계절별로는 해풍의 경우 하계가 동계보다 길고 육풍의 경우는 또 그 반대이다. 해풍에서 육풍으로의 전이시간은 하계가 길고 동계가 짧은 경향을 보이며, 육풍에서 해풍으로의 전이시간은 계절적인 특징이 나타나지 않는다.
- (4) 해풍의 최대풍속의 출현시각은 연평균적으로 북부해안(14.0시)보다 남부(13.4시)가 다소 일찍 나타나나, 육풍은 비슷한 양상(약 2.5시)을 보여주며, 해풍이나 육풍 모두 월평균 출현시각의 계절적 특징은 뚜렷하지 않다. 그리고 해풍과 육풍의 월평균 최대풍속은 각각 남북해안 모두 비슷하고 연평균으로는 해풍(약 4.1m/s)이 육풍(약 3.3m/s)보다 다소 강하다.
- (5) 제주도지방에서는 제주시측이 서귀포측보다 해풍이 더 강하고 높게 불고 있으며, 반대로 육풍은 서귀포측이 더 강하게 나타난다. 해풍의 순환은 서귀포측 영역에서 뚜렷하게 나타난 반면, 육풍의 순환은 제주시측에서만 약하게 나타난다.

- 1) 김유근. 안창섭, 남해안지방의 해풍의 특성에 관한 연구, 한국어업기술학회지, 21권, 2, 115-122 (1985).
- 2) 이승만. 정종갑, 남. 서해안지역에서의 해풍에 관한 연구(I), 국립중앙기상대기상연구소 연구보고서, 98 (1979).
- 3) 이태영, 역전층이 해륙풍 순환에 미치는 영향, 한국기상학회지, 22권, 2, 48-61 (1986).
- 4) 정종갑. 신봉희. 이승만, 남서해안지역(근산 일원)에서의 해풍에 관한 연구(II), 국립중앙관상대 기상연구소 연구보고서, 39 (1980).
- 5) 최길수. 문승의. 양민기. 문영수, 부산지방의 해륙풍의 특성에 관한 기후학적연구, 부산대 자연과학논문집, 34집, 411-422 (1982).
- 6) 環境廳 國立公害研究所, 大氣運動と大氣擴散過程のシミュレーション昭和55年度特別研究報告書, R-33-82 (1982).
- 7) 阿部信男. 楠田信, 大分布における海陸風と二酸化硫黃濃度分布の關係, 天氣, 29, 87-90 (1982).
- 8) 竹内清秀. 近藤純正, 大氣科學講座1, 東京大學出版會 (1981).
- 9) Businger, J. A. et al., Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189 (1971).
- 10) Deardorff, J. W., Three-Dimensional Numerical Study of the Height and Mean Structure of a Heated Planetary Boundary Layer, Boundary Layer Meteor., 7, 81-106 (1974).
- 11) Durran, D. R. and J. B. Klemp, On the Effects of Moisture on the Brunt-Vaisala Frequency, J. Atmos. Sci., 39, 2152-2158 (1982).
- 12) Estoque, M. A., A Theoretical Study of the Sea Breeze, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 87, 136-146 (1961).
- 13) Estoque, M. A. and C. M. Bhumralker., Flow over a Localized Heat Source, Mon. Wea. Rev., 97, 850-859 (1969).
- 14) Estoque, M. A., The Sea Breeze as a Function of the Prevailing Synoptic

- Situation. J. Atmos. Sci., 19, 244-250 (1962).
- 15) Fisher, E. L., An Observational Study of the Sea Breeze, J. Meteor., 17, 645-660 (1960).
 - 16) Fisher, E. L., A Theoretical Study of the Sea Breeze, J. Meteor., 18, 216-233 (1961).
 - 17) Haurwitz, B., Comments on the Sea Breeze Circulation, J. Meteor. Soc. Japan, 4, 1, 1-8 (1947).
 - 18) Idso, S. D. and R. D. Jackson, Thermal Radiation from the Atmosphere, J. Geophys. Res., 74, 5397-5403 (1969).
 - 19) Jeffreys, H., On the Dynamics of Wind, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 48, 29-46 (1922).
 - 20) Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics, J. Atmos. Sci., 35, 1070-1096 (1978).
 - 21) Kondo, J., Air-Sea Bulk Transfer Coefficients in Diabatic Conditions Boundary Layer Meteor., 9, 91-112 (1975).
 - 22) Koschmiedel, H., Danziger See Wind Studien, Danziger Meteor. Forschung arbeiten., 10, 1-39 (1941).
 - 23) Kozo, T. L., A Mathematical Model of Sea Breeze Along the Alaskan Beaufort Sea Coast; Part II, J. Appl. Meteor., 21, 906-924 (1982).
 - 24) Mahrer, Y. and R. A. Pielke, A Numerical Study of the Air Flow over Mountains Using the Two-Dimensional Version of the University of Virginia Mesoscale Model, J. Atmos. Sci., 32, 2144-2155 (1975).
 - 25) Mahrer, Y. and R. A. Pielke, A Numerical Study of the Air Flow over Irregular Terrain, Beitr. Phys. Atmos., 50, 98-113 (1977).
 - 26) Mahrer, Y. and R. A. Pielke, The Effects of the Topography of Sea and Land Breeze in a Two-Dimensional Numerical Model, Mon. Wea. Rev., 105, 1151-1162 (1977).
 - 27) Mellor, G. L., Analytic Prediction of the Properties of Stratified Planetary Surface Layer, J. Atmos. Sci., 30, 1061-1069 (1973).

- 28) Mellor, G. L. and T. Yamada. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806 (1974).
- 29) Mellor, G. L. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, *Rev. Geophysics and Space Physics*, 20, 4, 851-875 (1982).
- 30) Myrup, L. O., A Numerical Model of the Urban Heat Island, *J. Appl. Meteor.*, 8, 908-918 (1969).
- 31) Neumann, J. and Y. Mahrer, A Theoretical Study of the Sea and Land Breeze of Circular Island, *J. Atmos. Sci.*, 31, 2027-2039 (1974).
- 32) Oochouchi, Y. et al., A Numerical Study on the Effects of a Mountain on the Land and Sea Breeze, *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 368-386 (1982).
- 33) Ozoe, H. et al., Characteristics of Air Pollution in the Presence of Land and Sea Breeze-A Numerical Simulation, *Atmos. Env.*, 17, 35-42 (1983).
- 34) Pielke, R. A., A Three-Dimensional Numerical Model of the Sea Breeze over South Florida, *Mon. Wea. Rev.*, 102, 115-139 (1974).
- 35) Pielke, R. A. and Y. Mahrer, Representation of the Heated Planetary Boundary Layer in mesoscale Models With Coarse Vertical Resolution, *J. Atmos. Sci.*, 32, 2288-2308 (1975).
- 36) Pielke, R. A., *Mesoscale Meteorological Modelling*, Academic Press, Inc., (1984)
- 37) Sheih, C. M. and W. T. Moroz, Mathematical Modelling of Lake Breeze, *J. Atmos. Env.*, 9, 575-586 (1975).
- 38) Simpson, J. E., Mansfield, D. A. and J. R. Milford, Inland Penetration of Sea-Breeze Front, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 103, 47-76 (1977).
- 39) Staley, D. O., The Low-Level Sea Breeze of Northwest Washington, *J. Meteor.*, 14, 458-470 (1957).
- 40) Van Bemmelen, W., Land and See brise in Batavia. *Beitr. Phys. da frei Atmos.*, 167-177 (1922).
- 41) Wallington, C. E., The Structure of the Sea-Breeze Front as Revealed by gliding Flights, *Weather.*, 14, 263-270 (1959).

- 42) Wexler, R., Theory and Observations of Land and Sea Breeze. Bull. Amer. Meteor. Soc., 27, 272-287 (1946).
- 43) Yamada, T. and G. L. Mellor. A Simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data. J. Atmos. Sci., 32, 2309-2329 (1975).
- 44) Yamada, T., The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model, J. Atmos. Sci., 32, 926-933 (1975).
- 45) Yamada, T., A Numerical Experiment on Pollutant Dispersion in a Horizontally-Homogeneous Atmospheric Boundary Layer, J. Atmos. Env., 11, 1015-1024 (1977).
- 46) Yamada, T., An Application of a Three Dimensional Simplified Second Moment Closure Numerical Model to Study Atmospheric Effects of a Large Cooling-Pond, Atmos. Env., 13, 693-704 (1979).
- 47) Yamamoto, G. and A. Shimanuki, Turbulent Transfer in Diabatic Conditions, J. Meteor. Soc. Japan, 44, 301-307 (1966).
- 48) Yamamoto, G., Generalization of the KEYPS Formula in Diabatic Conditions and Related Discussion on the critical Richardson Number, J. Meteor. Soc. Japan, 53, 189-195 (1975).
- 49) Yoshikado, H. and T. Asai, A Numerical Experiment of Effects of Turbulent Transfer Processes on the Land Sea Breeze, Contributions, Geophys. Ins., Kyoto University, 12, 33-48 (1972).
- 50) Yoshikado, H., Statistical Analysis of the Sea Breeze Pattern in Relation to General Weather Condition. J. Meteor. Soc. 59, 98-107 (1981).
- 51) Yosikawa, A. et al., Sea and Land Breeze over Mountains by a 2-Dimension Numerical Model, Techno. Rep. Osaka Univ., 37, 1885, 171-180 (1987).

논문발표실적 또는 계획

91년도 이내에 관계학술지(한국지구과학회지, 한국기상학회지, 한국어업기술학회지)에 요약하여 발표계재할 예정임.

Table 1. Occurrence frequency of the sea breeze on Cheju Island (1977-1986).

Month Year	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total
1977	1	2	3	1	2	0	3	4	5	6	0	2	29
1978	0	2	2	2	2	2	0	3	6	3	0	3	25
1979	0	1	3	1	2	0	5	4	2	0	0	3	21
1980	0	3	1	0	3	1	0	2	1	1	3	0	15
1981	0	0	0	0	1	0	4	0	0	0	5	0	10
1982	1	0	1	5	5	1	0	2	1	5	1	0	22
1983	4	1	2	5	4	0	0	1	2	0	3	0	22
1984	1	0	6	4	3	1	2	6	3	0	4	2	32
1985	1	0	0	1	0	0	2	7	5	3	0	1	20
1986	3	1	2	4	3	1	3	8	2	8	6	2	44
Total	11	10	21	23	25	6	19	37	27	26	22	13	240
Percent.	4.6	4.2	8.8	9.6	10.4	2.5	7.9	15.4	11.2	10.8	9.2	5.4	100.0

Table 2. Occurrence frequency of the land breeze on Cheju Island (1977-1986).

Month Year	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total
1977	1	4	2	1	2	0	4	2	6	7	0	2	31
1978	0	2	2	3	2	2	0	4	5	4	0	4	28
1979	0	2	3	1	2	0	6	5	3	0	0	5	27
1980	0	4	1	0	4	1	0	4	1	1	4	0	20
1981	0	0	0	0	2	0	5	0	0	0	4	0	11
1982	1	0	1	7	5	1	0	4	2	5	1	0	27
1983	5	2	2	5	5	0	0	1	1	0	5	0	26
1984	1	0	7	4	3	1	3	6	4	0	6	2	37
1985	1	0	0	1	0	0	3	8	5	2	0	1	21
1986	2	1	5	5	3	2	3	10	4	9	8	2	54
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	31	28	28	16	282
Percent.	3.9	5.3	8.2	9.6	9.9	2.5	8.5	15.6	11.0	9.9	9.9	5.7	100.0

Table 3. Occurrence frequency of the onset time of the sea breeze at Cheju (1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent
08				6	13	3	13	9					44	18.3
09			6	13	11	3	5	24	16	9	1		98	36.7
10	3	6	12	4	1		1	4	10	13	16	3	73	30.4
11	7	3	2						2	4	4	8	30	12.5
12	1	1										2	4	1.7
13											1		1	0.4
14													0	0.0
15													0	0.0
16													0	0.0
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean (time)	10.8	10.5	9.8	8.9	8.5	8.5	8.4	8.9	9.5	9.8	10.3	10.9	9.4	

Table 4. Occurrence frequency of the onset time the sea breeze at Seoguipo(1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent
08				3	9	2	8	7	2				31	12.9
10	1		6	12	7	3	5	19	9	12	4		78	32.5
10	3	6	9	2	5	1	3	8	12	9	7	6	71	29.6
11	3	2	2	5	2		2	2	2	4	7	5	36	15.0
12	2		2	1				1	1	1	1	1	10	4.2
13	2	2	1		1		1		1		3	1	12	5.0
14													0	0.0
15					1								1	0.4
16									1				1	0.4
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean (time)	11.1	10.8	10.2	9.5	9.4	8.8	9.2	9.2	10.0	9.8	10.6	10.8	9.9	

Table 5. Occurrence frequency of the subsidence time of the sea breeze at Cheju (1977-1986)

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
14													0	0.0
15		1								1	1	1	4	1.7
16	2	1	3	1	2	1	1	2		2	4	3	22	9.2
17	3	1	1	1	6	1	1	2	4	7	8	7	42	17.5
18	4	4	5	5	3	1	3	7	10	10	8	1	61	25.4
19	2	3	10	10	6	1	2	9	12	5			60	25.0
20			1	4	6	1	4	12	1			1	30	12.5
21				1	1		4	2	1				9	3.7
22				1	1	1	3	1		1	1		9	3.7
23							1	2					3	1.3
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean (time)	17.6	17.7	18.3	19.0	18.6	18.7	19.9	19.3	18.5	18.0	17.3	16.9	18.4	

Table 6. Occurrence frequency of the subsidence time of the sea breeze at Seoguipo(1977-1986)

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
13					1								1	0.4
14			1						1	1			3	1.2
15	1	1	1	1					1		2	3	10	4.2
16	1		2	1	1	1	1	3	1	10	7	2	30	12.5
17	6	4	4	3	3	1	2	4	8	8	9	7	59	24.5
18	2	4	8	10	12	2	4	10	8	6	4	1	71	29.6
19	1	1	3	6	6		4	13	7	1			42	17.5
20					2	1	7	6					16	6.7
21				2					2				4	1.7
22			1			1	1	1					4	1.7
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean (time)	17.1	17.4	17.6	18.2	18.0	18.5	19.0	18.5	17.9	16.8	16.7	16.5	17.7	

Table 7. Occurrence frequency of the onset time of the land breeze at Cheju (1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
17													0	0.0
18									1	2	2	5	10	3.5
19	5	5	1		2			1	3	16	16	6	55	19.4
20	2	5	11	7	5			4	19	3	4	2	62	21.8
21	1	2	4	12	8	1	4	14	6	2	1	0	55	19.4
22		2	5	2	5	3	7	10	3	1		2	40	14.1
23	3			4	3	2	7	10		3	4	0	36	12.7
00		1	2	2	5	1	6	3	1	1	1	1	24	8.4
01								2					2	0.7
02													0	0.0
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean (time)	20.5	20.3	20.9	21.3	21.6	22.4	22.6	21.9	20.3	19.9	19.9	19.5	21.0	

Table 8. Occurrence frequency of the onset time of the land breeze at Seoguipo (1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
17										3	1		4	1.4
18	3	2					1	1	1	8	8	8	32	11.3
19	6	8	7	2	3		1	5	13	13	9	4	71	25.0
20	1	5	13	9	10	4	5	13	9	4	8	3	84	29.6
21			2	7	3	1	11	17	6			1	48	16.9
22				4	7		3	4	3		1		22	7.7
23			1	1	2	1		1	1				7	2.4
00	1			4	2	1	3	1			1		13	4.6
01					1								1	0.4
02								2					2	0.7
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean (time)	19.3	19.2	19.9	21.2	21.2	21.1	21.1	20.8	20.0	18.6	19.2	18.8	20.1	

Table 9. Occurrence frequency of the subsidence time of the land breeze at Cheju (1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
01						1							1	0.4
02													0	0.0
03												1	1	0.4
04		1			1								2	0.7
05					2			2	1				5	1.8
06				1	5	2	3	3	1		1	0	16	5.6
07			2	13	15	3	17	21	9		1	2	83	29.2
08	1	3	14	10	5	1	3	18	17	11	4	2	89	31.3
09	4	8	5	2			1		3	15	20	4	62	21.8
10	6	3	1	1					1	2	2	6	22	7.7
11			1						1			1	3	1.1
12													0	0.0
13													0	0.0
14													0	0.0
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean (time)	9.5	8.7	8.4	7.6	6.8	6.0	7.1	7.3	7.8	8.7	8.8	8.8	7.9	

Table 10. Occurrence frequency of the subsidence time of the land breeze at Seoguiipo (1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
01								1					1	0.4
02			1		1								2	0.7
03													0	0.0
04			1	1			1	1					4	1.4
05			1	2			2		1				6	2.1
06			1		4	3	4					1	13	4.6
07	1		1	12	18	3	12	24	5	1	1		78	27.4
08	1	4	11	11	4	1	4	15	20	17	14	4	106	37.3
09	7	11	6	1	1		1	3	5	9	9	8	61	21.5
10	2								1	1	3	3	10	3.5
11									1		1		2	0.7
12													0	0.0
13													0	0.0
14													0	0.4
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean (time)	9.9	8.7	7.8	7.2	7.2	6.7	6.9	7.0	8.1	8.1	8.6	8.8	7.9	

Table 11. Occurrence frequency of the duration of the sea breeze at Cheju (1977-1986).

Month Duration(h)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
2													0	0.0
3											1		1	0.4
4													0	0.0
5	2	3									1	5	11	4.6
6	4		4							2	4	5	19	7.9
7	2	1			1	1		1	3	6	9	2	26	10.8
8	1	4	3	3	4		2	2	6	7	5	0	37	15.4
9	2	2	10	4	6	2		9	11	9	1	1	57	23.8
10			2	9	2	1	5	9	6	1			35	14.6
11			1	4	7		2	9	1	1			25	10.4
12				2	4	1	2	2	1		1		13	5.4
13				1	1		5	4					11	4.6
14						1	3	1					5	2.1
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean (duration)	6.7	7.2	8.5	10.0	10.0	10.2	11.5	10.4	9.0	8.2	7.1	6.0	9.0	

Table 12. Occurrence frequency of the duration of the sea breeze on Seoguipo(1977-1986).

Month Duration(h)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
2									1				1	0.4
3												1	1	0.4
4	2	1		1							3	3	10	4.2
5	3	2	4		2				3	4	4	1	23	9.6
6	1	1	1	2	1			2	1	2	7	3	21	8.8
7	3	2	5	3	1	2	2	3	4	9	5	4	43	17.9
8	2	4	5	3	3		4	5	8	9	3	1	47	19.6
9			4	6	7	1	2	9	6	1			36	15.0
10				5	8	1	5	11	4	1			35	14.6
11				2	3		4	5	1				15	6.2
12			1	1		1	2	1					6	2.5
13						1		1					2	0.8
14								1					0	0.0
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	
Mean (duration)	6.0	6.6	7.5	8.7	8.9	9.7	9.6	9.3	7.9	7.2	6.1	5.7	7.9	

Table 13. Occurrence frequency of the duration of the land breeze at Cheju (1977-1986).

Month Duration(h)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent
4					1	1							2	0.7
5													0	0.0
6					3		1	1					5	1.8
7				3	3		3	4				1	14	4.9
8		1	3	3	5	4	8	7	1		1		33	11.6
9		1		4	6	1	8	13	2	2	1	1	39	13.7
10	1		4	4	2	1	4	10	3	3	3		35	12.3
11	2	1	5	7	5			7	10	1	1	1	40	14.1
12	1	2	7	5	2			2	13	1	1	1	35	12.3
13	2	6	2	1	1				2	10	8	5	37	13.0
14	2	3	1							9	10		25	8.8
15	3								1	1	2	4	11	3.9
16		1	1							1	1	3	7	2.5
17									1				1	0.4
18													0	0.0
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean (duration)	13.0	12.5	11.3	10.0	8.9	7.9	8.5	9.3	11.5	12.8	12.9	13.3	10.9	

Table 14. Occurrence frequency of the duration of the land breeze at Seoguipo(1977-1986).

Month Duration(h)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
4							1						1	0.3
5								2					2	0.7
6			1		1		1	1					4	1.4
7	1			3	4	2	1	2					13	4.6
8				2	2		3	1	1		1		10	3.5
9			3	5	6		1	3	1				19	6.7
10			1	5	3	3	8	9	5		1	1	36	12.7
11			1	7	8	1	6	13	4				40	14.1
12	1	1	8	3	2	1	2	10	7	4	4	3	46	16.2
13		7	6	2	2			1	10	9	5	2	45	15.9
14	4	5	2					2	3	8	8	3	35	12.3
15	4	2							1	5	8	5	25	8.8
16	1								1	2	1	2	7	2.5
17													0	0.0
18			1										1	0.3
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean (duration)	13.7	13.5	11.9	10.0	9.7	9.6	9.7	10.4	12.1	13.7	13.5	13.9	11.7	

Table 15. Frequency distribution of the transition period from the sea breeze to the land breeze at Cheju(1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent
1	3	5	9	7	3		4	12	10	10	6	3	72	46.5
2	1	1	2	3	7	1	6	6	7	5	6	2	47	30.0
3		1		2		1	4	3	4	1	2	1	19	12.3
4		1		1	1	1		3			1		8	5.2
5				1	1			1					3	1.9
6					1		2	2					5	3.2
7								1					1	0.6
8													0	0.0
Total	4	8	11	14	13	3	16	28	21	16	15	6	155	100.0
Mean	1.3	1.8	1.2	2.0	2.5	3.0	2.5	2.5	1.7	1.4	1.9	1.7	2.0	

Table 16. Frequency distribution of the transition period from the sea breeze to the land breeze at Seoguipo(1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent
1	2	5	3	5	4		6	7	6	7	5	4	54	34.9
2		2	2	4	4	1	2	8	7	5	5		40	25.8
3	1	1	3	1	2		4	9	4	4	4	1	34	22.0
4			1	1	2	1	3	2	3		1		14	9.0
5			1	1			1	1				1	5	3.2
6					1	1							2	1.3
7	1							1	1				3	1.9
8			1	2									3	1.9
Total	4	8	11	14	13	3	16	28	21	16	15	6	155	100.0
Mean	3.0	1.5	3.0	2.9	2.5	4.0	2.4	2.5	2.4	1.8	2.1	2.0	2.4	

Table 17. Frequency distribution of the transition period from the land breeze to the sea breeze at Cheju(1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
1	7	4	9	13	12	2	12	20	12	20	17	7	135	67.5
2	2	5	7	4	7	1	5	10	8	2	1	3	55	27.5
3			1			1		1	1	1	2		7	3.5
4					1			1				1	3	1.5
5													0	0.0
6													0	0.0
7													0	0.0
8													0	0.0
9													0	0.0
Total	9	9	17	17	20	4	17	32	21	23	20	11	200	100.0
Mean	1.2	1.6	1.5	1.2	1.5	1.8	1.3	1.5	1.5	1.2	1.3	1.5	1.4	

Table 18. Frequency distribution of the transition period from the land breeze to the sea breeze at Seoguipo(1977-1986).

Month Time	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
1	2	5	7	11	7	2	3	15	5	15	8	5	85	42.5
2	1	2	4	4	6	1	8	10	12	4	9	2	63	31.5
3	4		2	1	5	1	4	4	3	4	2	3	30	15.0
4	1	2	2		2		4	1				1	13	6.5
5	1						1	2			1		5	2.5
6				1									1	0.5
7													0	0.0
8			1						1				2	1.0
9			1										1	0.5
Total	9	9	17	17	20	4	17	32	21	23	20	11	200	100.0
Mean	2.8	1.9	2.7	1.6	2.1	1.8	2.5	1.9	2.2	1.5	1.9	2.0	2.0	

Table 19. Monthly mean maximum velocity(m/s) of the land and sea breeze on Cheju Island (1977-1986).

Breeze	Month Station	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Mean
Sea	Cheju	3.4	4.1	4.3	4.3	4.2	3.9	4.3	4.6	4.2	4.1	3.8	3.5	4.1
	Seoguipo	3.4	5.1	4.7	4.0	3.7	4.3	3.4	4.0	4.0	3.8	4.0	3.5	4.0
Land	Cheju	3.4	3.3	3.4	3.2	2.9	3.0	2.7	2.8	3.0	3.6	3.6	3.5	3.2
	Seoguipo	3.6	3.8	3.5	3.3	3.1	2.9	2.5	2.7	3.4	3.7	3.4	3.3	3.3

Table 20. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the sea breeze at Cheju(1977-1986).

Month Time(LST)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
09:00-09:59			1			1				1			3	1.2
10:00-10:59			2	1	1		2	2		2			10	4.2
11:00-11:59	1	1		2	4		3	2	2	5	2	1	23	9.6
12:00-12:59		2	4	4	3		2	7	6	5	6		39	16.2
13:00-13:59		2	6	3	3	1	3	6	6	7	4	6	47	19.6
14:00-14:59	4	1	4	3	3	1	4	4	5	2	2	2	35	14.6
15:00-15:59	3	3	1	4	3		1	8	5	4	7	2	41	17.1
16:00-16:59	3	1	2	5	6	1	2	5	3		1		29	12.1
17:00-17:59				1	2	1	2	2	1			1	10	4.2
18:00-18:59						1		1				1	3	1.2
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean(time)	14.9	13.6	13.3	14.2	14.3	14.8	13.6	14.2	14.1	12.8	13.9	14.3	14.3	

Table 21. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the sea breeze at Seoguipo(1977-1986).

Month Time(LST)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
09:00-09:59						1	1	1					3	1.3
10:00-10:59		1	1	1	2		1	1		1	1		9	3.8
11:00-11:59	1	3	4	2	3	2	1	3	1	4		2	26	10.8
12:00-12:59	2	2	3	6	5		4	3	2	5	6		38	15.8
13:00-13:59	4	3	2	6	7		2	9	6	8	5	5	57	23.8
14:00-14:59	2		6	8	5	3	8	10	12	1	6	4	65	27.1
15:00-15:59	1		2		2		1	5	5	4	3	2	25	10.4
16:00-16:59	1	1			1			5	1	3	1		13	5.4
17:00-17:59			1						1				2	0.8
18:00-18:59			1				1						2	0.8
Total	11	10	20	23	25	6	19	37	28	26	22	13	240	100.0
Mean(time)	13.7	12.4	13.7	13.1	13.2	12.4	13.6	13.5	13.8	13.4	13.8	13.6	13.4	

Table 22. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the land breeze at Cheju(1977-1986).

Month Time(LST)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
19:00-19:59												1	1	0.4
20:00-20:59			1										1	0.4
21:00-21:59	1		1	2	1					2	2		9	3.2
22:00-22:59		2	1	1	1			3	5	1	1		15	5.3
23:00-23:59		1		2		1	3	2	3	2	2	1	17	6.0
00:00-00:59	1	1	4	2	2		1	4	3	3	3	1	25	8.8
01:00-01:59	2	5	2	3	5	2	6	6	2	4	3	1	41	14.4
02:00-02:59	2	1	3	6	3	1	5	10	9	2	1	4	47	16.5
03:00-03:59	4	2	3	5	4		2	8	4	1	3	1	37	13.0
04:00-04:59	1		1	4	4		6	5	4	3	4	2	34	12.0
05:00-05:59		2	4	2	6	2		3	1	5	4		29	10.2
06:00-06:59			1		2			2	2	2	4	2	15	5.3
07:00-07:59		1	2			1	1	1		3	1		10	3.5
08:00-08:59												3	3	1.0
09:00-09:59													0	0.0
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean(time)	2.2	1.6	2.7	2.0	3.1	3.2	2.4	2.7	1.9	2.8	2.9	3.5	2.6	

Table 23. Frequency distribution of the appearance time of the maximum velocity of the land breeze at Seoguipo(1977-1986).

Month Time(LST)	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Total	Percent.
19:00-19:59					1		1						2	0.7
20:00-20:59	1			1						1			3	1.1
21:00-21:59		1			1		1	1	2	1		2	9	3.2
22:00-22:59		2	2	1	1	1	1	3	1	4	1		17	6.0
23:00-23:59			1	3		1	1	2	2	2	1	1	14	5.0
00:00-00:59	1	2	2	5	5		1	3	3	4	2	2	30	10.6
01:00-01:59	1	1	1	2	2		4	7	2	2	2	2	26	9.1
02:00-02:59	2		5	4	6	1	3	8	5	6	3	2	45	15.8
03:00-03:59	1	3	3	5	5	1	7	7	5		5	4	46	16.2
04:00-04:59	1	4	4	2	6	2	3	6	5	1	9		43	15.1
05:00-05:59	2	1		1	1			4	4	4	1		18	6.3
06:00-06:59	1	1	4	3		1	1	3	2	3	2		21	7.4
07:00-07:59			1				1		1		2	2	7	2.5
08:00-08:59	1								1				2	0.7
09:00-09:59													1	0.3
Total	11	15	23	27	28	7	24	44	33	28	28	16	284	100.0
Mean(time)	2.1	1.5	2.9	2.1	2.6	2.3	2.2	2.2	2.3	1.9	2.4	2.5	2.5	

Table 24. Coordinates of each point in Fig. 11.[X axis is the horizontal distances from the coastline of Cheju(km),and Z axis is the height(m)].

coordinate point	X ,	Z	coordinate point	X ,	Z
A	0.00,	0	A	5.00,	0
B	10.25,	500	B	10.25,	0
C	14.25,	1,000	C	14.25,	0
D	16.25,	1,000	D	16.25,	0
E	17.50,	1,950	E	17.50,	0
F	19.50,	1,500	F	19.50,	0
G	21.25,	1,000	G	21.25,	0
H	24.50,	500	H	24.50,	0
I	31.25,	0			

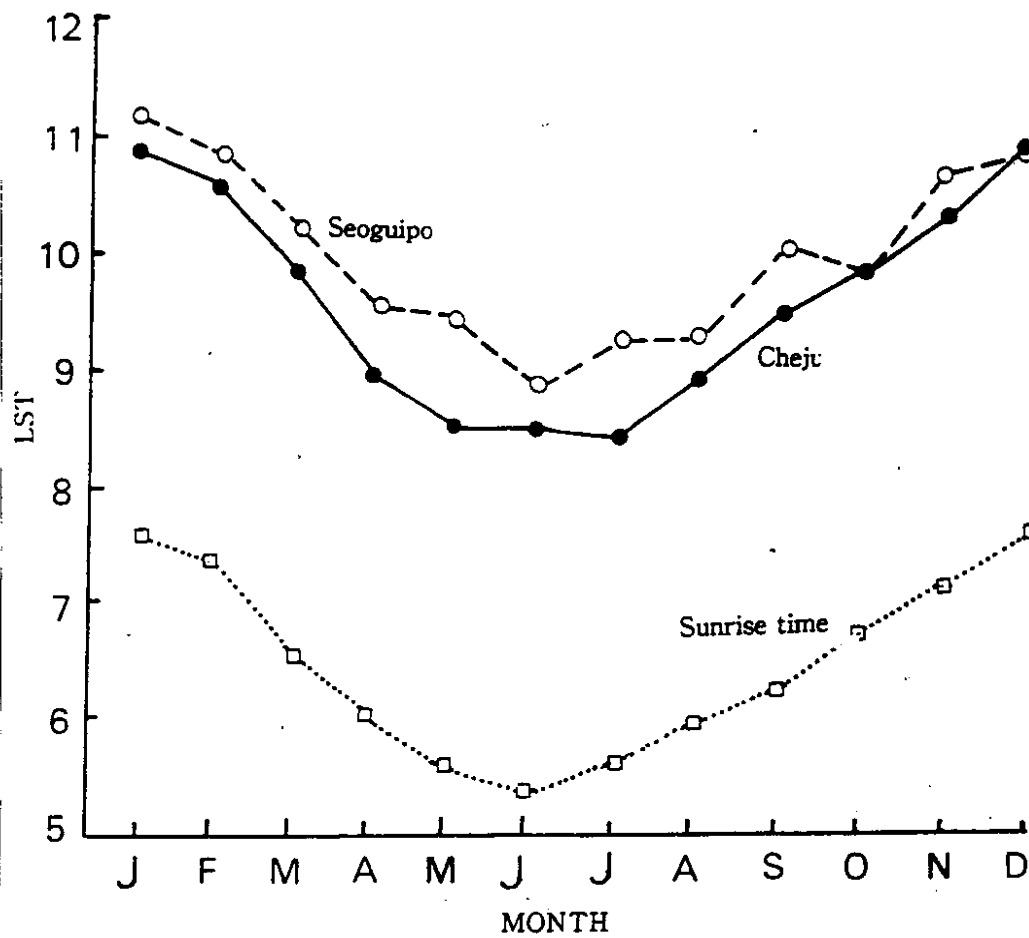


Fig. 1. Annual variation of the monthly mean onset time of the sea breeze.

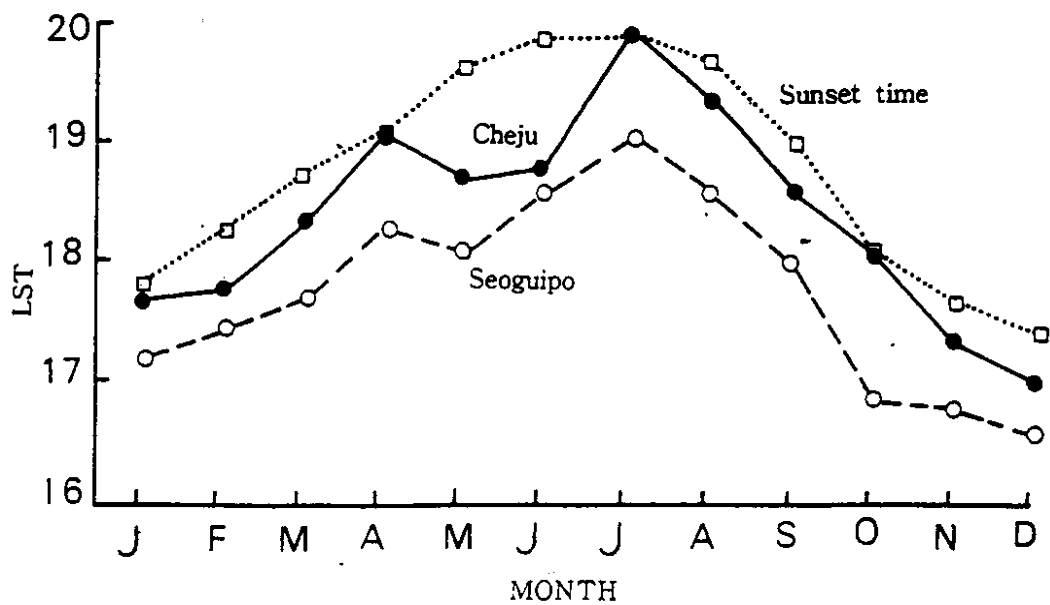


Fig. 2. Annual variation of the monthly mean subsidence time of the sea breeze.

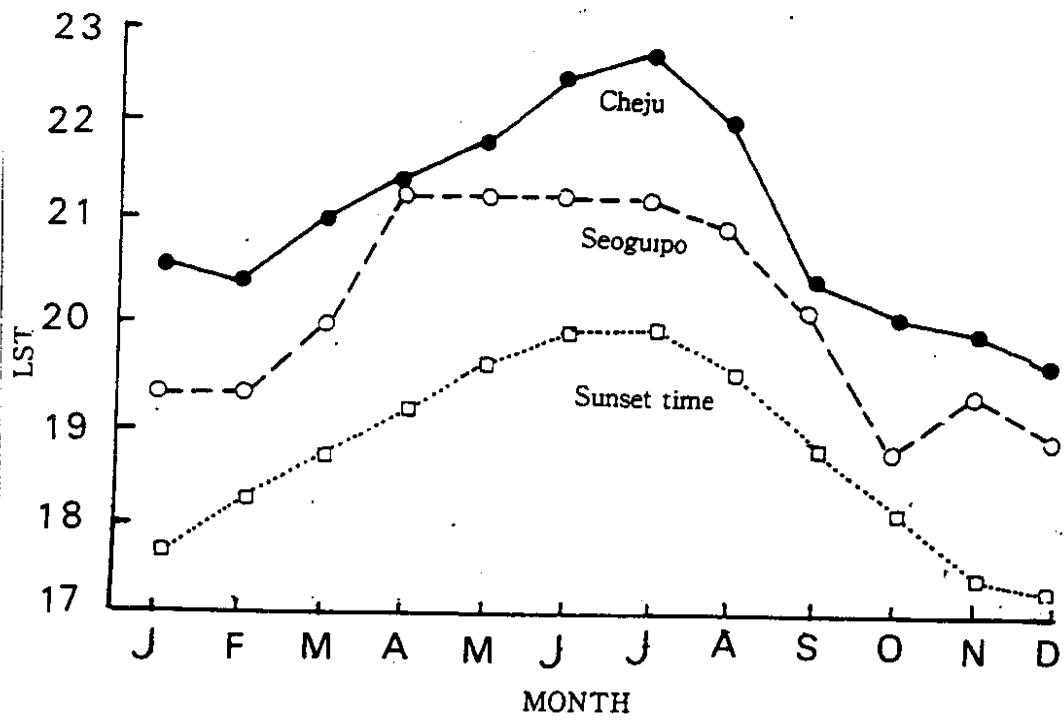


Fig. 3. annual variation of the monthly mean onset time of the land breeze.

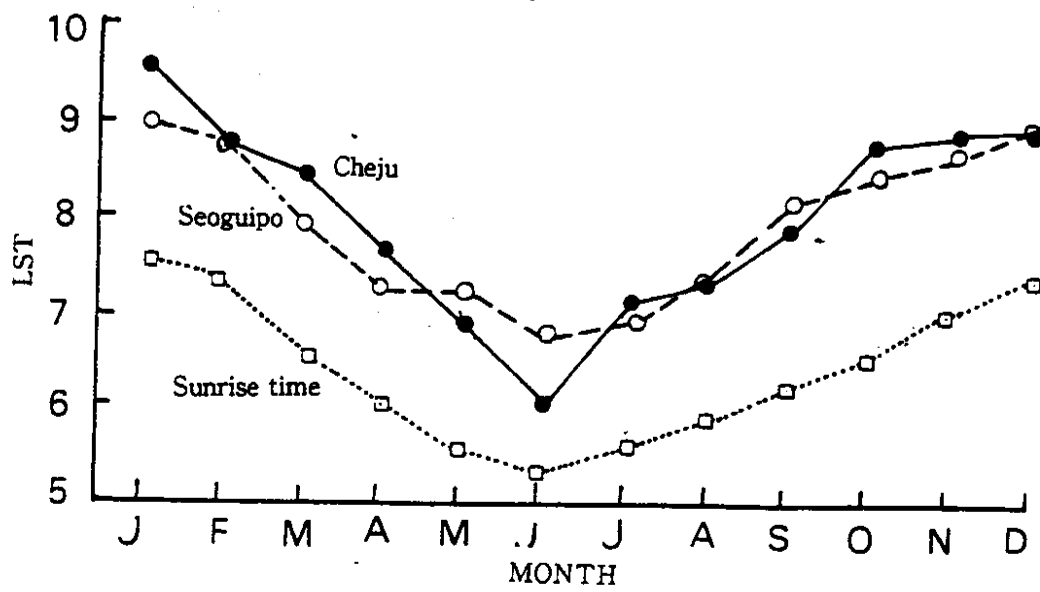


Fig. 4. Annual variation of the monthly mean subsidence time of the land breeze.

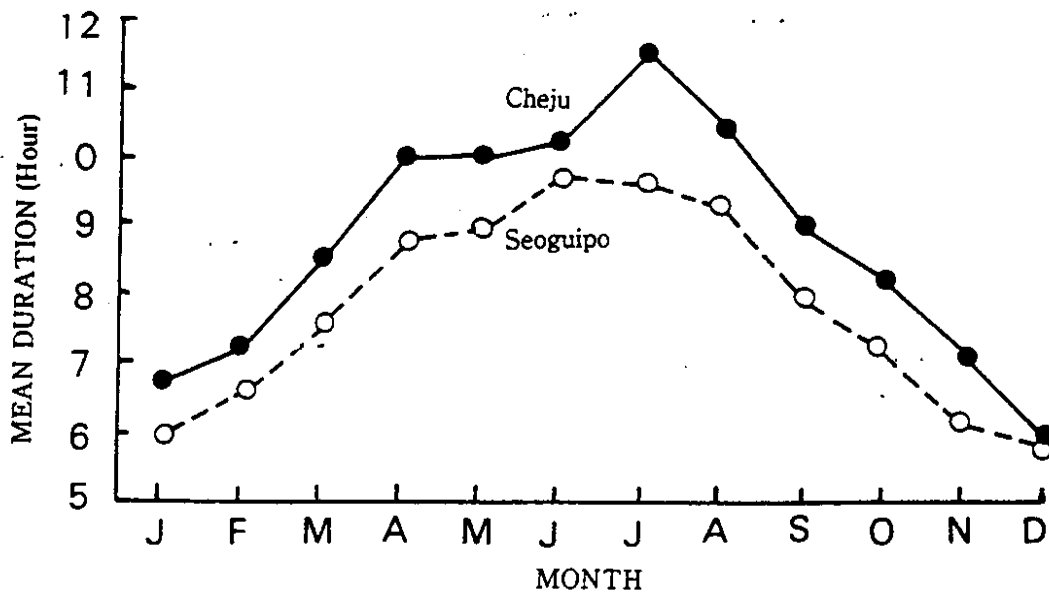


Fig. 5. Annual variation of the monthly mean duration of the sea breeze.

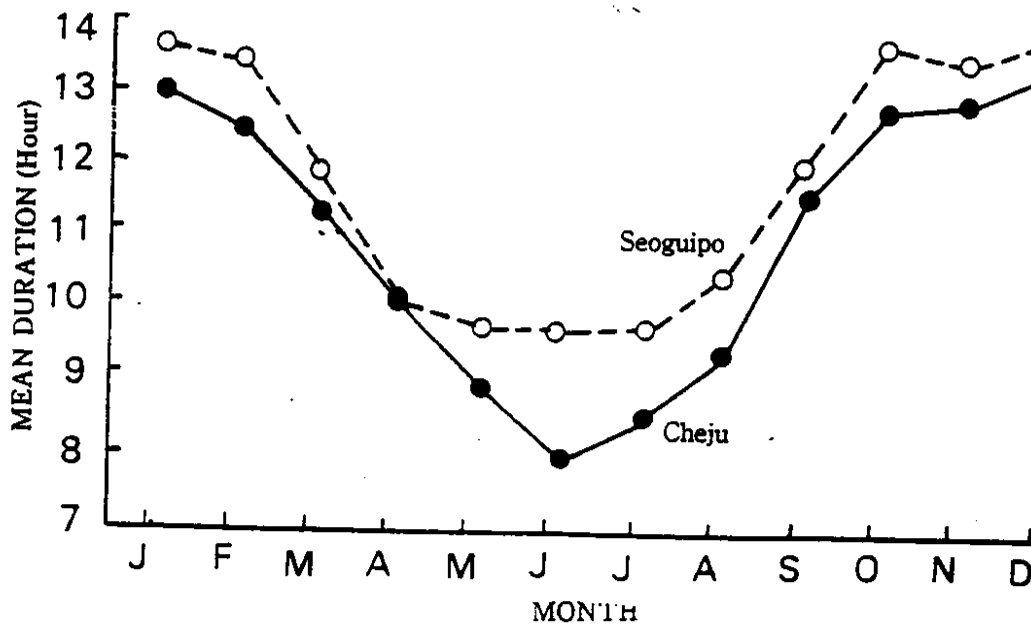


Fig. 6. Annual variation of the monthly mean duration of the land breeze.

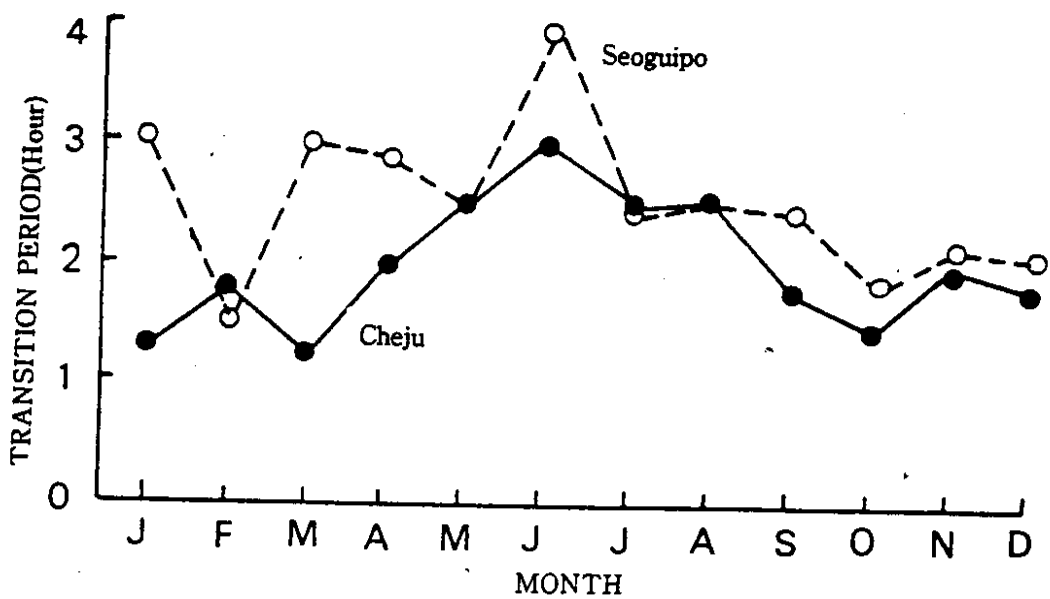


Fig. 7. Annual variation of the monthly mean transition period from the sea breeze to the land breeze.

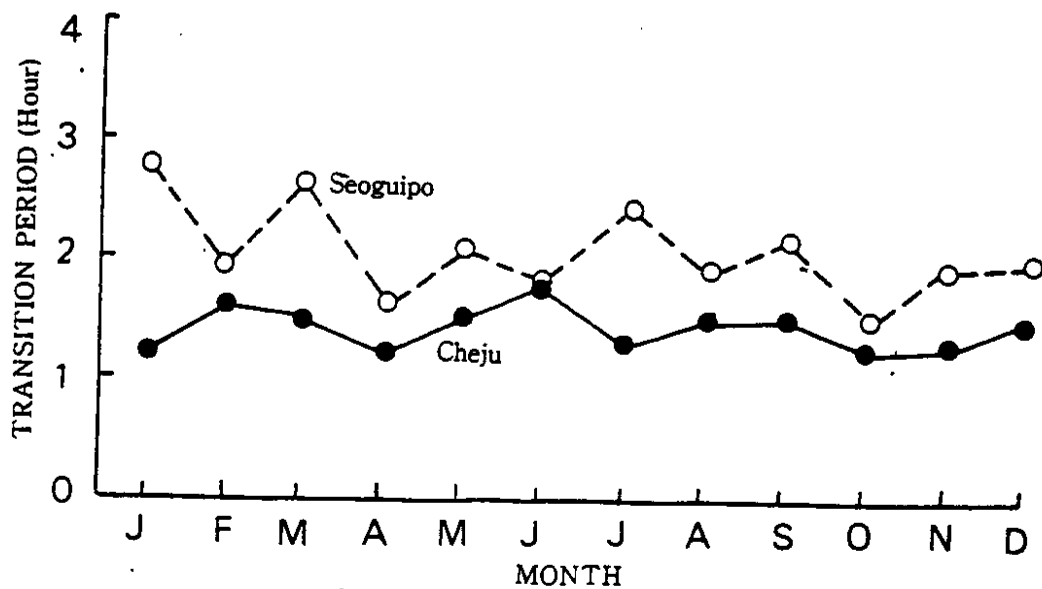
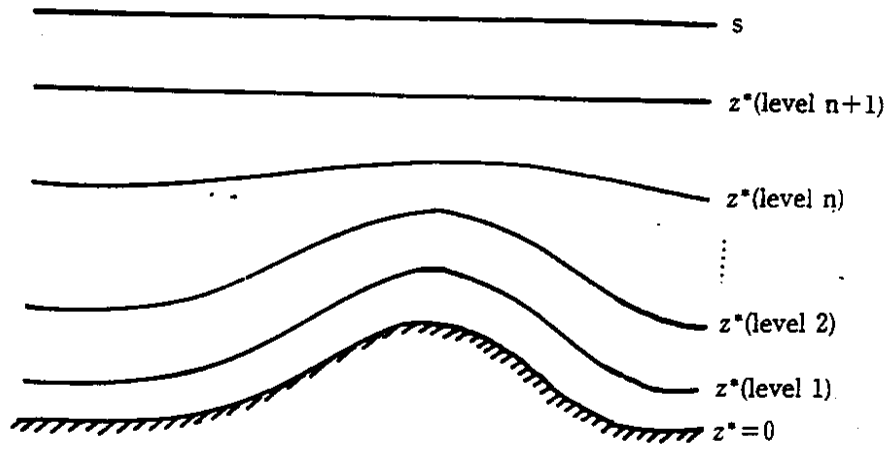
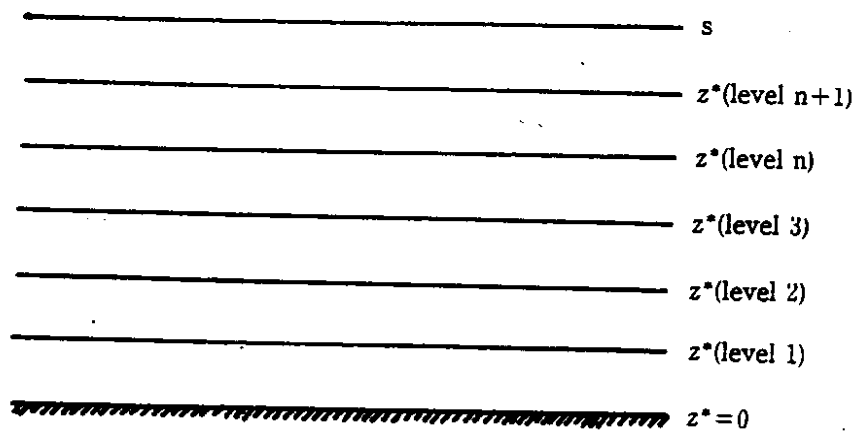


Fig. 8. Annual variation of the monthly mean transition period from the land breeze to the sea breeze.



(a)

Cartesian coordinate system



(b)

Z^* coordinate system

Fig. 9. Explanation of the Z^* coordinate system.

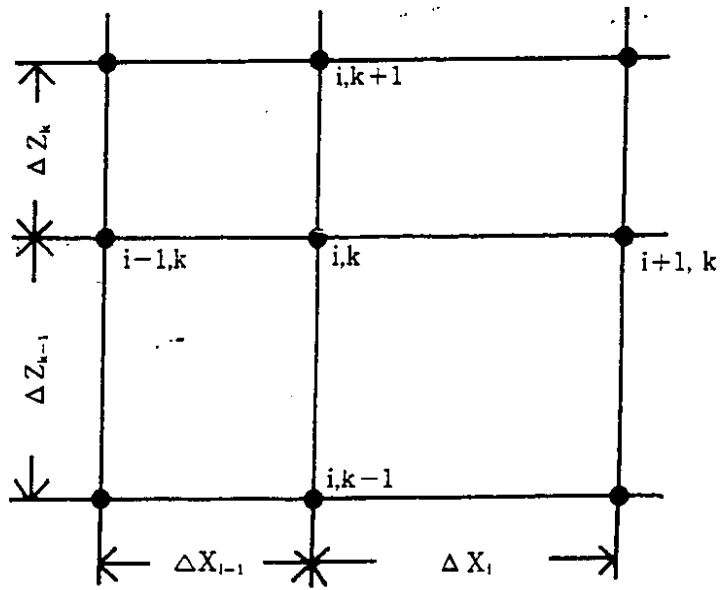


Fig. 10. Grid points of the non-uniform mesh.

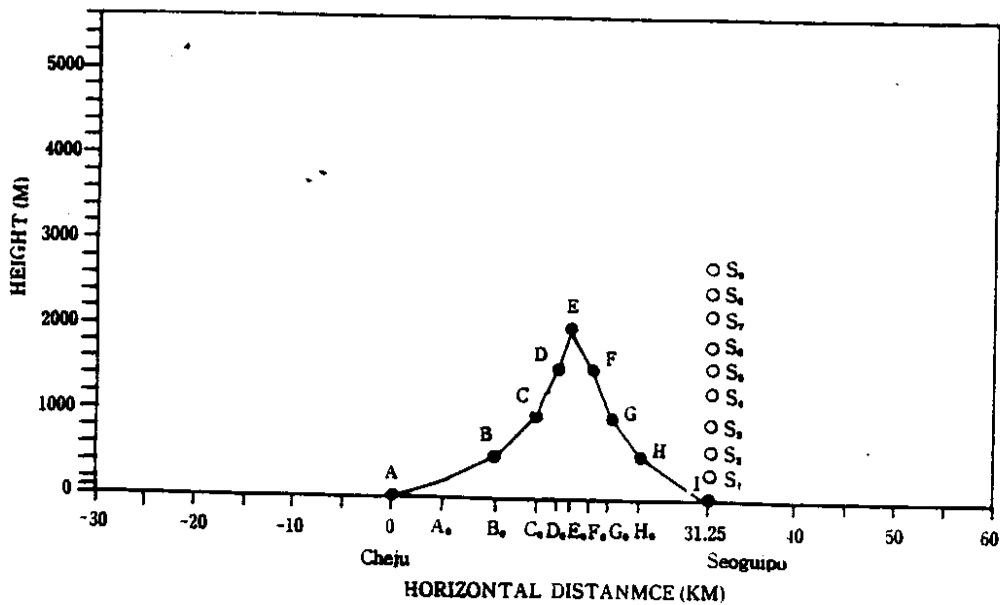


Fig. 11. Meridional cross section of cheju Island(see Table 24 for the coordinetes of each point).