

## 제주연안바다 열수지에 의한 강설 · 해무 발생사례 연구

A case study on the snow and sea fog occurrence by heat flux exchanges over the coastal seas around the Jeju Island

주관연구기관	제주지방기상청
연구책임자	윤용훈
발행년월	2004-00
주관부처	기상청
사업관리기관	제주지방기상청
NDSL URL	<a href="http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO200500002471">http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO200500002471</a>
IP/ID	14.49.138.138
이용시간	2017/11/02 17:47:49

### 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.

# 제주연안바다 열수지에 의한 강설·해무 발생사례 연구

A case study on the snow and sea fog occurrence by  
heat flux exchanges over the coastal seas around the Jeju Island

2004

연구기관  
제주지방기상청



기상연구소

Meteorological Research Institute  
Korea Meteorological Administration



# 연구보고서

1. 제 목 : 제주 연안바다 열수지에 의한 강설·해무 발생사례 연구  
A case study on the snow and sea fog occurrence  
by heat flux exchanges over the coastal seas  
around the Jeju Island

2. 연 구 부 서 : 제주지방기상청

3. 연 구 기 간 : 2004. 2. ~ 2004. 10.

4. 연구 책임자 : 기상연구소 해양지진연구실장 윤용훈  
제주지방기상청 기후정보과장 우종규

5. 참여 연구원 : 이춘식 강태진 고수완 한경훈 김경보  
고홍표 강희선 김성수 장승민 서석철  
<sup>1</sup>장유순 <sup>2</sup>김태희  
<sup>3</sup>고희종 <sup>3</sup>문재홍

1 기상연구소 해양지진연구실  
2 관측담당관실  
3 제주대학교

# 목 차

목 차 .....	i
그림 차례 .....	iii
표 차례 .....	vi
요 약 .....	vii
 제 1 장 서론 .....	 1
제 2 장 자료 및 분석방법 .....	3
2-1 자료 .....	3
2-2 분석방법 .....	3
2-3 열수지방정식 .....	5
 제 3 장 제주도부근해상 열수지 특성 .....	 8
3-1 해양 기상변수들의 특징 .....	8
3-2 해수온도(SST) .....	11
3-3 해수면에 도달하는 태양복사량( $Q_s$ ) .....	12
3-4 해수면 장파복사량( $Q_b$ ) .....	13
3-5 잠열속( $Q_e$ ) .....	13
3-6 현열속( $Q_h$ ) .....	15
3-7 순 열교환량( $Q_n$ ) .....	16
3-8 열수지 평형 .....	18
 제 4 장 강설/적설 사례분석 .....	 21
4-1 강설 및 적설발생 현황 .....	21
4-1-1 눈 일수 .....	21
4-1-2 적설량 .....	22
4-2 강설 및 적설시 주요 기상요소 .....	23
4-3 강설 및 적설시 겨울철 평균열수지 .....	25
4-3-1 현열속 .....	25
4-3-2 잠열속 .....	26
4-3-3 순열속 .....	27
4-4 강설 및 적설시 열수지 정규분포 .....	28

4-4-1 현열속 .....	28
4-4-2 잠열속 .....	29
4-4-3 난류속 (현열+잠열) .....	29
4-4-4 보웬비 .....	31
4-4-5 해기차 .....	32
4-5 강설현상 발생시 열수지 조건범위 .....	33
4-6 보웬비를 이용한 적설량 예측(제주) .....	35
4-7 보웬비를 이용한 적설량 예측(제주산간) .....	36
4-8 강설 및 적설시 열수지 시계열 패턴 .....	37
4-9 종관장 분석(사례일 선정) .....	38
4-9-1 지상, 500hPa 일기도 .....	38
4-9-2 850hPa 기온, 포차 .....	39
4-9-3 850hPa 상대온위, 500hPa 소용돌이도위 .....	39
4-10 강설 및 적설시 대기의 연직단면 .....	41
4-10-1 Wind, 상대습도, Moisture Flux Divergence .....	41
4-11 대기선도 분석 .....	41
4-12 위성 및 레이더영상 분석 .....	42
<b>제 5 장 해무 사례분석</b> .....	43
5-1 안개 발생 분포 .....	43
5-2 해무(이류무) 발생 특성 .....	47
5-2-1 해무지속 시간 .....	47
5-2-2 안개 시작 및 종료시간 .....	48
5-2-3 안개 지속시 풍향 .....	49
5-2-4 안개 지속시 풍속 .....	50
5-2-5 안개 지속시 해기차 .....	51
5-3 해무 발생시 열수지 분석 .....	54
5-4 해무 발생사례 선정 분석 .....	58
5-4-1 안개 실태 .....	58
5-4-2 제주도 주변해역 해수온도 분포 .....	59
5-4-3 일기도 분석 .....	61
5-4-4 열수지 분석 .....	63
<b>제 6 장 결론 및 토의</b> .....	68
<b>참고문헌</b> .....	70

## 그림 차례

그림 2-1. 제주도 및 제주도부근해상 관측지점. ....	4
그림 3-1. 열수지에 관여하는 기상변수의 월별분포. ....	8
그림 3-2. 열수지에 기여하는 기상변수들의 연별분포. ....	10
그림 3-3. 제주도부근해상 월별 수온분포. ....	11
그림 3-4. 제주도부근해상 월별 태양복사량. ....	12
그림 3-5. 제주지방기상청 월평균 일사량 및 제주도 평균전운량. ....	13
그림 3-6. 제주도부근해상 월별 해수면 장파복사량. ....	14
그림 3-7. 제주도부근해상 월별 잠열속. ....	15
그림 3-8. 제주도부근해상 월별 현열속. ....	16
그림 3-9. 제주도부근해상 월별 순 열교환량. ....	17
그림 3-10. Yearly heat balance(제주). ....	18
그림 3-11. Outgoing heat flux. ....	19
그림 4-1. 연도별 강설일수(a), 강설시 적설횡수(b). ....	21
그림 4-2. 강설 및 적설시 지상풍향 빈도(제주). ....	23
그림 4-3. 강설 및 적설시 850 hPa 풍향풍속 분포(고산). ....	23
그림 4-4. 제주 현열속과 풍속(a), 현열속과 해기차(b) 상관계수. ....	25
그림 4-5. 흑산도 현열속과 풍속(a), 현열속과 해기차(b) 상관계수. ....	25
그림 4-6. 제주도부근해상 겨울철 현열속 수평분포. ....	26
그림 4-7. 제주 잠열속과 풍속(a), 잠열속과 수증기압(b) 상관계수. ....	26
그림 4-8. 흑산도 잠열속과 풍속(a), 잠열속과 수증기압차(b) 상관계수. ....	26
그림 4-9. 제주도부근해상 겨울철 잠열속 수평분포(12월, 1월, 2월). ....	27
그림 4-10. 제주도부근해상 겨울철 순열속 수평분포(12월, 1월, 2월). ....	27
그림 4-11. 강설 및 적설시 현열속(제주, 1999. 12.~2004. 2.). ....	28
그림 4-12. 강설 및 적설시 잠열속(제주, 1999. 12.~2004. 2.). ....	29
그림 4-13. 강설 및 적설시 난류속(제주, 1999. 12.~2004. 2.). ....	30
그림 4-14. 강설 및 적설시 해기차(제주, 1999. 12.~2004. 2.). ....	31
그림 4-15. 강설 및 적설시 해기차(제주, 1999. 12.~2004. 2.). ....	32
그림 4-16. 난류속과 강설 및 신적설(제주, 1999. 12.~2004. 2.). ....	33

그림 4-17. 보웬비와 강설 및 신적설(제주, 1999. 12.~2004. 2.).	34
그림 4-18. 보웬비와 신적설량과의 상관관계(제주).	35
그림 4-19. 보웬비에 따른 신적설량 발생분포(제주).	35
그림 4-20. 보웬비와 신적설량과의 상관관계(제주산간, 어리목).	36
그림 4-21. 보웬비에 따른 신적설량 발생분포(제주산간, 어리목).	36
그림 4-22. 강설 및 적설시 열수지 시계열 패턴(현열, 잠열, 난류속).	37
그림 4-23. 강설 및 적설시 열수지 시계열 패턴(보웬비, 해기차).	37
그림 4-24. 지상, 500 hPa 일기도(2004. 1. 21. 09시).	38
그림 4-25. 지상, 500 hPa 일기도(2003. 12. 19. 09시).	38
그림 4-26. 850 hPa 기온 및 포차(2004. 1. 21. 21시).	39
그림 4-27. 850 hPa 기온 및 포차(2003. 12. 19. 21시).	39
그림 4-28. 850 hPa 상당온위, 500 hPa 소용돌이도위(2004. 1. 21. 21시).	39
그림 4-29. 850 hPa 상당온위, 500 hPa 소용돌이도위(2003. 12. 19. 21시).	39
그림 4-30. 대기의 연직단면도(2004. 1. 21. 21시).	41
그림 4-31. 대기의 연직단면도(2003. 12. 19. 21시).	41
그림 4-32. 고산 대기선도(2004. 1. 21. 09시).	42
그림 4-33. 고산 대기선도(2003. 12. 19. 09시).	42
그림 4-34. 위성 및 레이더영상(2004. 1. 21. 21시).	42
그림 4-35. 위성 및 레이더영상(2003. 12. 19. 21시).	42
그림 5-1. 제주도 지역별 연간 안개발생일수(2000.~2004.).	43
그림 5-2. 제주시지역 월별 안개발생일수(2000.~2004.).	44
그림 5-3. 서귀포지역 월별 안개발생일수(2000.~2004.).	44
그림 5-4. 제주도지역 월평균 안개발생일수(2000.~2004.).	46
그림 5-5. 제주시지역 안개지속시간(2000.~2004.).	48
그림 5-6. 서귀포지역 안개지속시간(2000.~2004.).	48
그림 5-7. 제주시지역 안개발생 및 소멸시각(2000.~2004.).	49
그림 5-8. 서귀포지역 안개발생 및 소멸시각(2000.~2004.).	49
그림 5-9. 제주시지역 안개발생 및 소멸시 풍향(2000.~2004.).	50
그림 5-10. 서귀포지역 안개발생 및 소멸시 풍향(2000.~2004.).	50
그림 5-11. 제주시지역 안개발생 및 소멸시 풍속(2000.~2004.).	51

그림 5-12. 서귀포지역 안개발생 및 소멸시 풍속(2000.~2004.).	51
그림 5-13. 연간 해기차 분포(2002., 2003. ; 절대값).	52
그림 5-14. 해무발생 모식도.	52
그림 5-15. 해무지속시 해기차(2004.~2004. ; 절대값).	53
그림 5-16. 제주시지역 월평균 현열속, 잠열속 및 해기차(2000.~2004.).	54
그림 5-17. 제주시지역 5~7월평균 현열속, 잠열속 및 해기차(2000.~2004.).	55
그림 5-18. 제주시지역 해무발생시 현열속과 잠열속.	56
그림 5-19. 제주시지역 해무발생시 현열속, 해기차, 풍속.	57
그림 5-20. 제주시지역 해무발생시 잠열속, 수증기압.	57
그림 5-21. 해상안개 위성영상(안개분석, 2004. 6. 22.~23.).	58
그림 5-22. 해상안개 위성영상(가시영상, 2004. 6. 22.~23.).	59
그림 5-23. 해수면 수온분포도(수온분포도, 2004. 6. 22.~28.).	60
그림 5-24. 해수면 수온분포도(위성영상, 2004. 6. 17.~23.).	60
그림 5-25. 지상일기도(2004. 6. 22. 00UTC, 12UTC).	61
그림 5-26. 지상일기도(2004. 6. 23. 00UTC, 12UTC).	61
그림 5-27. 925 hPa 일기도(2004. 6. 22. 00UTC, 12UTC).	62
그림 5-28. 925 hPa 일기도(2004. 6. 23. 00UTC, 12UTC).	62
그림 5-29. 현열속, 잠열속, 해기차의 일변화(2004. 6. 22.~23.).	63
그림 5-30. 보웬비, 해기차의 일변화(2004. 6. 22.~23.).	64
그림 5-31. 현열속, 잠열속, 시정의 일변화(2004. 6. 22.~23.).	64
그림 5-32. 보웬비, 해기차의 일변화(2004. 6. 22.~23.).	65
그림 5-33. 현열속, 잠열속, 시정의 일변화(2004. 6. 26.~27.).	65
그림 5-34. 보웬비, 시정의 일변화(2004. 6. 26.~27.).	66



## 표 차례

표 2-1. 태양복사량 계수 산정표. ....	6
표 4-1. 최근 10년간 총 강설일수(적설). ....	21
표 4-2. 최근 10년간 지역별·월별 최심신적설(1995.-2004.). ....	22
표 4-3. 강설 및 적설시 주요기상요소(제주). ....	24
표 4-4. 겨울철 현열속 평균값(1999. 12.~2004. 2.). ....	29
표 4-5. 겨울철 잠열속 평균값(1999. 12.~2004. 2.). ....	29
표 4-6. 겨울철 난류속 평균값(1999. 12.~2004. 2.). ....	31
표 4-7. 겨울철 보웬비 평균값(1999. 12.~2004. 2.). ....	31
표 4-8. 겨울철 현열속 평균값(1999. 12.~2004. 2.). ....	32
표 5-1. 지역별 연간 안개발생일수(2000.~2004.). ....	43
표 5-2. 제주도지역 평년 안개현상일수. ....	45
표 5-3. 제주도지역 월별 안개발생일수(2000.~2004.). ....	45
표 5-4. 안개실황(제주시 2004. 6. 23 08:15~12:40). ....	58

## 요 약

제주도 연안바다 열수지는 12월에 잠열속( $140\sim 230\text{ W/m}^2$ )과 현열속( $70\sim 110\text{ W/m}^2$ )이 최대를 나타내고 6월에 잠열속( $0\sim 5\text{ W/m}^2$ )과 현열속( $-10\text{ W/m}^2$ )이 최소를 나타냈으며, 열수지에 영향을 주는 해양기상 요소는 해기차와 풍속이 가장 중요한 기상요인으로 나타났다. 이들 값이 높을수록 겨울철 해양에서 대기로 많은 열량이 에너지와 수증기가 현열과 잠열의 형태로 공급되어 대기불안정을 유발하고 강설 및 적설시스템을 강화시키는 것으로 나타났다.

강설 및 적설시 열수지 정규분포는, 우선 강설시에 현열속  $100\sim 150\text{ W/m}^2$ , 잠열속  $150\sim 250\text{ W/m}^2$ , 난류속  $300\sim 400\text{ W/m}^2$ , 보웬비  $0.6\sim 0.8$  범위에서  $70\sim 81\%$  분포 비율을 보였고, 적설시에는 현열속  $150\sim 200\text{ W/m}^2$ , 잠열속  $150\sim 250\text{ W/m}^2$ , 난류속  $350\sim 400\text{ W/m}^2$ , 보웬비  $0.8\sim 1.0$  범위에서  $72\sim 86\%$  분포하였다.

사례분석을 통하여 얻어낸 제주지방의 강설현상 예측인자는 난류수송량  $300\text{ W/m}^2$  이상( $74\%$ ), 보웬비는  $0.7\%$ ( $81\%$ ) 이상일 때가 대부분으로 제주도 해안지역의 동계 강설현상 예측에 난류속 및 보웬비의 적용 가능성을 보였다.

또한 제주시와 제주산간(한라산 어리목)이 신적설량과 보웬비 관계는 제주시가  $0.1\sim 1.0\text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.8$ ,  $1.1\sim 5.0\text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.88$ ,  $5.1\text{ cm}$  이상 적설시 평균보웬비  $0.98$ 로 나타났으며, 제주산간은  $0.1\sim 10\text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.65$ ,  $11\sim 20\text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.71$ ,  $20\text{ cm}$  이상 적설시 평균보웬비  $0.94$ 로 나타나, 제주해안 지역에 강설이 시작되면 이미 한라산 어리목에는  $11\sim 20\text{ cm}$  정도의 눈이 쌓인 것으로 드러났다. 신적설과 보웬비의 상관관계는 선형 1차함수적으로 비례 상승하는 관계로 조사되어 제주도 연안역의 열수지를 이용한 보웬비는 제주도지역의 적설량 예측시 참고자료로 충분한 사용가치가 있음을 알 수 있었다.

조사기간 동안 안개발생시기는 5, 6, 7월로 대부분 봄철과 여름철에 집중적으로 발생하였고, 제주시와 서귀포 지역의 안개발생일수는 각각 75일과 119일로 서귀포지역은 전선무, 제주시 지역은 전선무와 이류무가 주를 차지하는 것으로 나타났다. 이류무 발생일수는 제주시가 31일, 서귀포가 21일로 나타났으며 평균 안개지속시간은 제주시 2시간 39분, 서귀포는 4시간 02분 이었고, 새벽녘인 6~9시 사이에 주로 발생하고 소산하는 것으로 나타났다. 안개 발생 및 소멸시 풍향·풍속은 대부분 동일하게 나타났는데 제주시는 NW-NE풍  $1\sim 2\text{ m/s}$  전후에서 가장 많이 발생 및 소산하였고, 서귀포는 SW-SE풍이  $2\text{ m/s}$  정도에서 주로 발생하고 같은 풍계에서  $3\sim 4\text{ m/s}$ 의 풍

속에서 소멸하였다.

이류무 발생시 해양·대기의 열교환량은 현열속의 경우 가을과 겨울에 해양에서 대기로  $12.4 \text{ W/m}^2$ 과  $38.4 \text{ W/m}^2$  정도의 열을 방출하고 있으며, 봄철과 여름철에는  $4.8$ 과  $-7.6 \text{ W/m}^2$ 로 나타나 여름철에는 대기에서 해수면으로 열량이 유입되는 것으로 나타났다. 잠열속은 계절별로  $45.5, 20.5, 71.4, 91.3 \text{ W/m}^2$ 의 분포를 보이고 있어 연중 해수면에서 대기로 열이 이동하고 있으며 여름철에는 열속의 이동이 적었다.

사례분석을 통하여 안개발생시 열속의 변화량과 보웬비 관계를 알아보았는데, 2004년 6월 23일의 경우 현열속과 잠열속은  $8.27$ 와  $23.57 \text{ W/m}^2$ 로  $15.3 \text{ W/m}^2$ 의 차이를 보였고 보웬비는  $0.34$ 로 낮은 편이었다. 6월 26일과 27일의 경우는 해무가 발생했을 때 열량의 차이가  $4.26 \text{ W/m}^2$  (현열속  $1.46 \text{ W/m}^2$ , 잠열속  $5.70 \text{ W/m}^2$ )로 작은 편이었으며 보웬비는  $0.18$ 로 매우 낮게 나타났다. 결과적으로 잠열속이 크고 현열속이 작을수록 해무의 발생가능성이 컸으나 정량적으로는 불규칙하였고 보웬비가  $0.3$  이하일 때 해무발생 가능성이 높음을 알 수 있었다.

## 제1장 서론

제주도는 대륙과 해양을 연결하는 요충지로 한반도와 떨어져 있는 지리적 조건, 해양의 영향, 한라산의 위치 등으로 국지적 기상변화가 심하게 나타나고, 똑같은 기상현상에 대해서도 그 메카니즘이 육지부와는 상이하게 나타나는 지리적 영향이 강하게 미치는 지역이다.

대기는 해양과 접하고 있어서 해양 특성변화의 영향을 상당부분 받으며 대기의 온도, 습도, 기압변화 등 기단의 변화에 영향을 미친다. 해양-대기 상호작용에 의한 열수지는 복사성분과 난류성분으로 구성되는데, 특히 난류 성분 중 현열과 잠열의 방출은 대기하층에 열과 수증기를 공급하여 불안정한 상태를 유발하는 원인이 되고, 따라서 제주지방의 겨울철 강설 및 봄~여름철 해무발생시스템에 적지 않은 영향을 미치는 원인으로 작용하게 된다. 해양-대기간 열수송량은 주로 해기차와 풍속에 의해서 좌우되면서 수증기 형태로 이루어진다. 본 조사는 열수지에 의한 수증기 공급과 관련 있는 기상현상 중, 제주도 해안지역을 중심으로 나타나는 적설과 해무현상의 발생 메카니즘과 그 특성을 해양-대기의 열수지와 그 수송량을 이용하여 살펴보고자 하였다.

겨울철 제주지방의 강설은 차고 건조한 시베리아 고기압이 확장하면서 상대적으로 따뜻한 해상에서 하층운이 발달하여 나타나는 경우(93%)로 대표된다. 제주지방의 강설현상에 대한 연구는 주로 종관분석을 중심으로 한 일반적인 조건에 관한 내용으로 이미 많은 사람들에 의하여 연구 보고 되었다. 「제주지방의 강설조건(최, 2003)」, 「제주도 적설의 일반적 조건과 예외적 조건에 관한 연구(이 등, 2003)」, 「제주도 지방의 국지 강설특성(박, 2003)」 등이 그것이며, 해수면 열수지를 이용한 연구로는 「겨울철 해면 열수지에 의한 적설가능성 예측(문, 2000)」, 「제주도 연안바다 열교환량에 따른 국지기상특성연구(2003, 현장연구과제)」가 있는데, 이에 대한 연구는 지금까지 상당부분 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 겨울철 적설시 제주연안의 대기와 해양간의 열수지 특성을 분석하고, 열수지와 적설량과의 상관관계를 정량적으로 분석 조사하여 적설예보에 대한 정확도를 향상시키는데 그 목적을 두었다.

안개란 지표면이나 해면부근에서 수증기가 포화되어 응결핵을 중심으로 응결하여 공기 중에 떠다니는 현상으로 가시거리 1 km 이하의 경우를 말한다. 특히 발생지역을 중심으로 육지일 경우를 육무, 바다일 경우 해무라고 한다. 안개는 악시정, 저온, 높은 습도 때문에 항공기 운항과 해상 및 육상교통, 농업, 건강 등에 해로운 영향을 미치며 특히 항공과 어업활동 및 해난사고 등

많은 지장을 초래한다. 안개예보는 각종일기도 및 수치자료의 도움에도 불구하고 발생 및 소멸, 장소, 시간에 대한 정확한 예보를 하기가 힘들다. 본 조사는 제주도앞바다의 해무 분포특성을 살펴보고, 해무의 발생원인을 여기에 관여하는 열수지를 통하여 고찰함으로써 안개예보에 대한 정확도 향상 및 이해증진을 꾀하고자 하였다.

지금까지 수행된 안개에 관한 연구는 Garmon(1996) 등의 기후학적인 조건 연구, Gimmetstad(1993)의 경험적 및 통계적 관계 연구 그리고 수치 모델링에 의한 예보 연구가 주를 이루었고(1977, Baker), 최근에는 위성영상을 이용한 안개 및 하층운 탐지 연구가 일부 위성전문가들에 의해 수행되었다. 특히 Ellrod(1991, 1995)는 GOES 와 NOAA/AVHRR 의 다중채널 자료의 특성을 이용하여 야간 안개 및 하층운을 탐지하기 위한 다양한 시도를 하였다.

국내에서는 주로 통계적인 방법을 이용하여 한반도에서 발생하는 안개를 연구하였다(이 등, 1970; 홍, 1982; 기상연구소 1988). 조(1996)는 댜주변에서 발생하는 중기 안개에 관한 연구가 이루어져 있으며 해무에 관한 연구는 기상청(1997), 김(1998)에 의해 1986년부터 1995년까지 한반도 주변 해역에서 발생한 해무에 대해 종관적 및 통계적인 방법으로 해역별, 계절별 특성이 조사되었으며 강릉지방기상청(2000)에 의해 1988년부터 1997년까지 10년간 영동 해안지방의 안개(해무)발생 특성에 관한 연구가 이루어져 있다. 제주지방의 안개 및 해무에 관한 연구는 여러 기후인자와 비교 및 기압계 유형별 특성 연구와 국지적 안개의 특성 등 다수 이루어져 있다.

본 연구에서는 강수와 동반된 안개와 강수현상이 없이 발생하는 안개를 조사 분석하였다. 또한 기존의 통계조사방법은 물론 해안지역의 열수지와 안개발생의 상관관계를 조사하여 안개예보에 대한 정확도 향상과 안개 예보시 열교환량의 이용에 대해 알아보하고자 하였다.

## 제2장 자료 및 분석방법

### 2-1 자료

#### 가. 조사자료

- 기후자료관리시스템 기상자료(기상청), 지상 및 고층일기도, 고층관측자료  
원격탐사자료(위성, 레이더), 수치예보자료, 자동기상관측(AWS) 바람자료,  
해수온도(국립수산과학원, 국립해양조사원), 적설자료(한라산연구소)

#### 나. 조사 기간

- 열수지 및 강설사례 분석(1995~2004, 10년)
- 해무사례 분석(2000~2004, 5년)

#### 다. 조사지역(지점)

- 제주도연안바다 열수지 조사
  - 국립수산과학원 정선관측 44지점(203~204, 312~315, 400 Line)
  - 국립수산과학원 제주도연안 정점관측 23지점(1~23)
  - 기상관서 9소(제주, 서귀, 고산, 성산포, 흑산도, 완도, 여수, 통영)
  - AWS 4소(추자도, 우도, 마라도, 거문도)
- 사례분석 : 강설발생 사례(제주), 해무발생 사례(제주, 서귀포)

### 2-2 분석방법

본 연구에 사용된 자료는 제주도 연안해역 열수지 분석 자료와 강설 및 해무발생 사례분석을 위한 자료로 크게 대별된다. 먼저 제주도 부근 및 연안 해역 열수지 분석을 위하여 국립수산과학원 정선관측 및 제주도연안해역 정점관측지점 10년(1995~2004년) 수온자료 월평균치(2, 4, 6, 8, 10월)를 이용하였고, 여기에 수반되는 기상변수(대기온도, 운량, 풍속, 수증기압, 해면기압)는 제주도와 인접한 기상청 기상관서(제주, 서귀, 고산, 성산포, 흑산도, 완도, 여수, 통영)의 종관 기상관측자료와 자동기상관측(AWS) 자료를 이용하였다. 제주도연안바다의 열수지 분석은 'Eloit & Clark(1991)'의 기본식을 이용하여 해수면으로 입사되는 태양복사량( $Q_s$ ), 해수면에서 방출되는 해수면 장파복사량( $Q_b$ ), 현열수송량( $Q_h$ ), 잠열수송량( $Q_h$ )을 계산하였다. 태양으로부터의 입사량은 'Gill(1982)'의 경험적 계산식을 이용하여 위도별로 다르게 적용하여 제주지방기상청의 실측값과 비교 하였고, 해면장파복사량은 'Kraus & Rooth(1961)'의 경험식, 현열과 잠열 수송량은 'Bulk 공기역학법(1982)'을 이용하여 계산하여 적용하였다.

사례분석은 기후자료관리시스템의 일기상통계표 및 기사란 10년(해무사례 5년) 자료를 통계 분석하여 그 현황을 파악하였고, 사례일 선정은 2004년도 최근 자료부터 과거 순으로 현상별, 원인별로 종관분석 하여 전체적인 흐름을 파악하고자 하였다. 여기에 기상청 기상분석시스템(FAS : Forecast Analysis System)을 이용하여 대기를 입체분석 하여 보조자료로 활용하였고, 열수지 특성 및 보웬비(Bowen's Ratio)를 적용하여 제주지방의 강·적설 및 해무발생 원인을 정량적으로 분석하여 그 현상을 예측하고자 하였다.

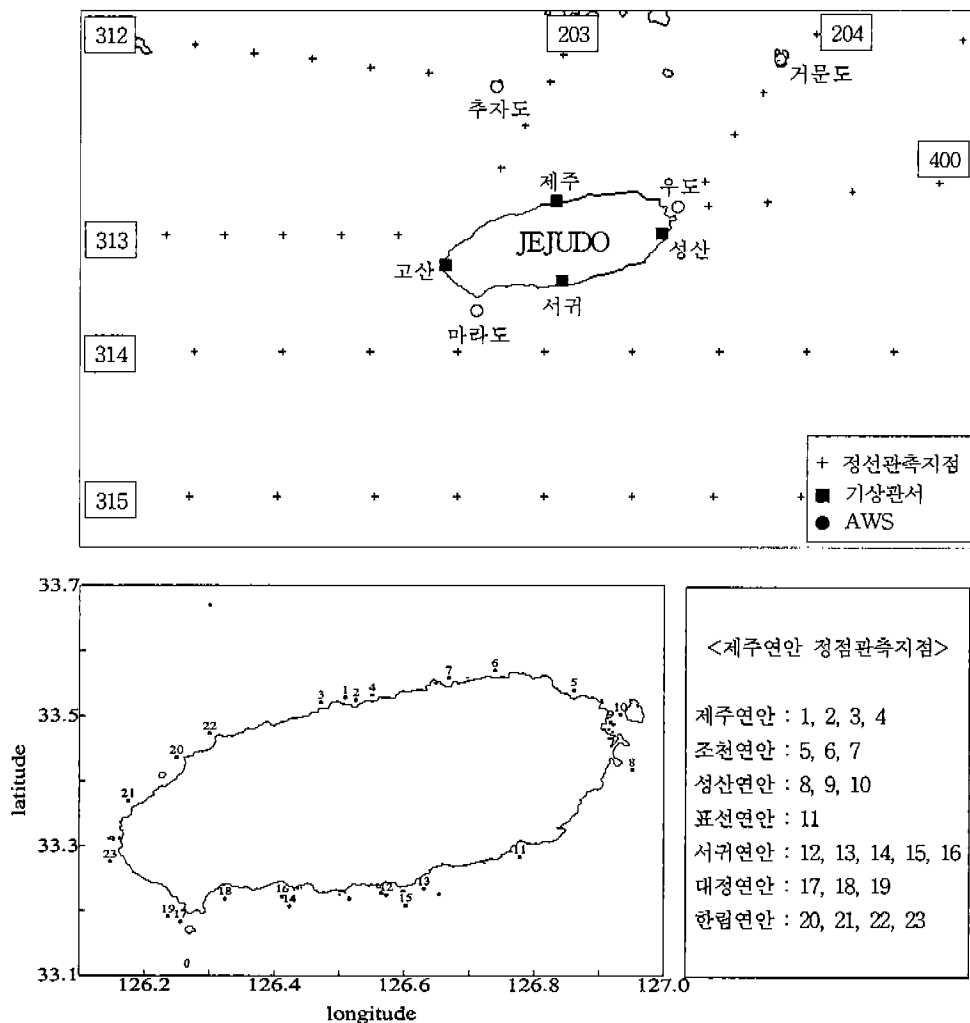


그림 2-1. 제주도 및 제주도부근해상 관측지점(기상청, 국립수산물과학원).

## 2-3 열수지방정식

대기로부터 해양으로의 총 열수지는 복사성분과 난류성분으로 구성되는데 해수면 열수지는 다음식으로 표현된다(Elliot & Clark, 1991).

$$Q_T = Q_s - (Q_b + Q_e + Q_h) \quad (1)$$

$Q_T$ 는 해수면에서 잃거나 얻은 해양의 총 열수지로 순열속(net heat flux)을 의미하며,  $Q_s$ 는 태양복사량,  $Q_b$ 는 해수면에서의 장파복사량,  $Q_e$ 는 잠열속,  $Q_h$ 는 현열속을 나타낸다. 식 (1)에서 음(-) 값은 해양에서 대기열을 공급함을 의미하며, 양(+) 값은 반대로 대기에서 해양으로 열을 공급함을 나타낸다. 태양복사량은 위도대별 평균운량을 사용하여 계산하였으며 나머지 열속은 Bulk aerodynamic method를 사용하였다.

가. 태양복사(incoming solar radiation)

태양복사에너지 중 30%는 대기와 육지(26%) 및 해수면(4%)에서 직접 우주공간으로 반사되고, 나머지 70%는 지구내로 흡수되는데 대기에서 20%, 육지 및 해수면에서 50%가 흡수된다(Knauss, 1978).

해수면에서 흡수된 태양복사에너지는 해수를 증발시켜 해양, 대기, 육지 사이에 물순환을 유발할 뿐만 아니라, 해수의 운동과 대기의 운동을 일으키는 중요한 원인이 된다. 한편, 해수면에서 흡수하는 태양복사에너지의 양은 위도, 관측일, 운량, 알베도에 의해서 좌우된다. 해수면에서 흡수되는 태양복사량은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Gill, 1982).

$$Q_s = (1 - 0.7N) * (1 - \alpha) Q_{s0} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 운량(0~1)으로 구름으로 덮인 부분의 전체 하늘에 대한 외관상의 비율을 말하며,  $\alpha$ 는 알베도(해수면에 입사된 일사에 대한 반사비율)로 본 연구에는 Payne(1972)이 제시한 0.06을 사용하였다.  $Q_{s0}$ 는 구름이 없는 맑은 날 대기상단에 입사되는 일평균태양복사량으로 흔히 Smithsonian formula로 불리운다(Seckel and Beaudry, 1973 ; Reed, 1977).

$$Q_{s0} = A_0 + A_1 \cos \phi + B_1 \sin \phi + A_2 \cos 2\phi + B_2 \sin 2\phi \quad (3)$$

$$\phi = (t - 21) * (2\pi / 365) \quad (4)$$

$Q_{s0}$ 는 위도에 따라 값이 달라지는데 식 (3)에서 계수산정 방법은 표 2-1과 같고,  $t$ 는 Julian day,  $\theta$ 는 위도를 나타낸다.



표 2-1 태양복사량 계수 산정표(Seckel and Beaudry, 1973 ; Reed, 1977).

Coefficient	latitude 20° S ~ 40° N	latitude 40° N ~ 60° N
$A_0$	$-15.82 + 326.87\cos\theta$	$342.61 - 1.97\theta + 0.018\theta^2$
$A_1$	$9.63 + 192.44\cos(\theta + 90^\circ)$	$52.08 - 5.86\theta + 0.043\theta^2$
$A_2$	$-0.64 + 7.80\sin 2(\theta - 45^\circ)$	$1.08 - 0.47\theta + 0.011\theta^2$
$B_1$	$-3.27 + 108.70\sin\theta$	$-4.80 + 2.46\theta - 0.017\theta^2$
$B_2$	$-0.50 + 14.42\sin 2(\theta - 5^\circ)$	$-38.79 + 2.43\theta - 0.034\theta^2$

#### 나. 해수면 장파복사(long-wave outgoing radiation)

해수면은 태양의 복사에너지에 의해 열을 얻기도 하지만, 복사(radiation)를 통해 열을 잃기도 한다. 장파복사량은 해수면온도(SST), 운량, 대기의 수증기압에 의해 주로 결정된다. 해수면의 장파복사량은 직접적으로 측정하기가 어렵기 때문에 Kraus and Rooth(1961)의 경험식으로 표현하였다.

$$Q_b = \xi \sigma T_s^4 (0.39 - 0.058 E_a^{\frac{1}{2}}) * (1 - 0.65 N^2) \quad (5)$$

$\xi$ 은 해수면의 발산율(emissivity)로 0.97,  $\sigma$ 는 Stephan-Boltzman 상수로  $5.6705 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ,  $T_s$ 는 해수면온도(K),  $E_a$ 는 해수면위 대기의 수증기압(hPa),  $N$ 은 전운량(1/10)을 나타낸다.

#### 다. 현열속과 잠열속(sensible heat flux and latent heat flux)

현열속과 잠열속은 모두 Bulk aerodynamic method를 사용하여 다음과 같이 경험식으로 나타냈다.

$$Q_h = \rho_a C_{pa} C_h (T_s - T_a) W \quad (6)$$

$$Q_e = \frac{0.622}{P} L \rho_a D_e (E_w - E_a) W \quad (7)$$

식 (6)에서,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ),  $C_{pa}$ 는 공기의 정압비열( $1.048 \times 10^3 \text{ J/kgK}$ ),  $C_h$ 는 현열속에 대한 교환계수로 Stanton Number( $1.1 \times 10^{-3}$  ; Large and Pond, 1982)이며,  $W$ 는 풍속(m/s),  $T_s$ 와  $T_a$ 는 해수면과 대기의 온도로 단위는 모두 절대온도(K) 이다. 식 (7)에서,  $P$ 는 대기압( $1013.25 \text{ hPa}$ ),  $L$ 은 단위질량의 수증기가 증발할 때 발생하는 증발잠열( $2.51 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ),  $D_e$ 는 잠

열에 대한 Bulk 수송계수(0.0015)로 Dalton Number(Gill, 1982) 이다.  $E_w$ 는 해수온도  $T_w(^{\circ}\text{C})$ 에서의 포화수증기압(hPa)으로 다음과 같이 표현된다.

$$\log_{10} E_w = [0.7589 + 0.03477 T_w] / [1 + 0.00412 T_w] \quad (8)$$

라. 보웬비(Bowen's Ratio)

현열과 잠열의 비를 Bowen's Ratio( $B$ )라 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = Q_h / Q_e = 0.5[(T_w - T_a) / (E_w - E_a)] \quad (9)$$

여기서  $T_w$ ,  $T_a$ ,  $E_w$ ,  $E_a$ 는 해수온도, 해면위 10m에서의 대기온도, 해수면온도에서의 공기의 증기압, 해면위 10m에서의 공기의 증기압을 의미한다. 이로부터 태양복사량, 역복사량, 해양에서의 저장된 열을 고려하여 잠열의 계산도 다음과 같이 가능하다.

$$Q_e = [Q_s - Q_b - Q_T] / [1 + 0.5(T_w - T_a) / (E_w - E_a)] \quad (10)$$

## 제3장 제주도부근해상 열수지 특성

### 3-1 해양 기상변수들의 특징

열수지의 변동에 관여하는 기상변수로는 기온, 운량, 풍속, 수증기압, 해수 온도 등이 있다. 월별·연별로 나타나는 기상변수들의 특징을 제주지방기상청과 서귀포기상대 자료를 중심으로 살펴보았다(그림 3-1, 그림 3-2).

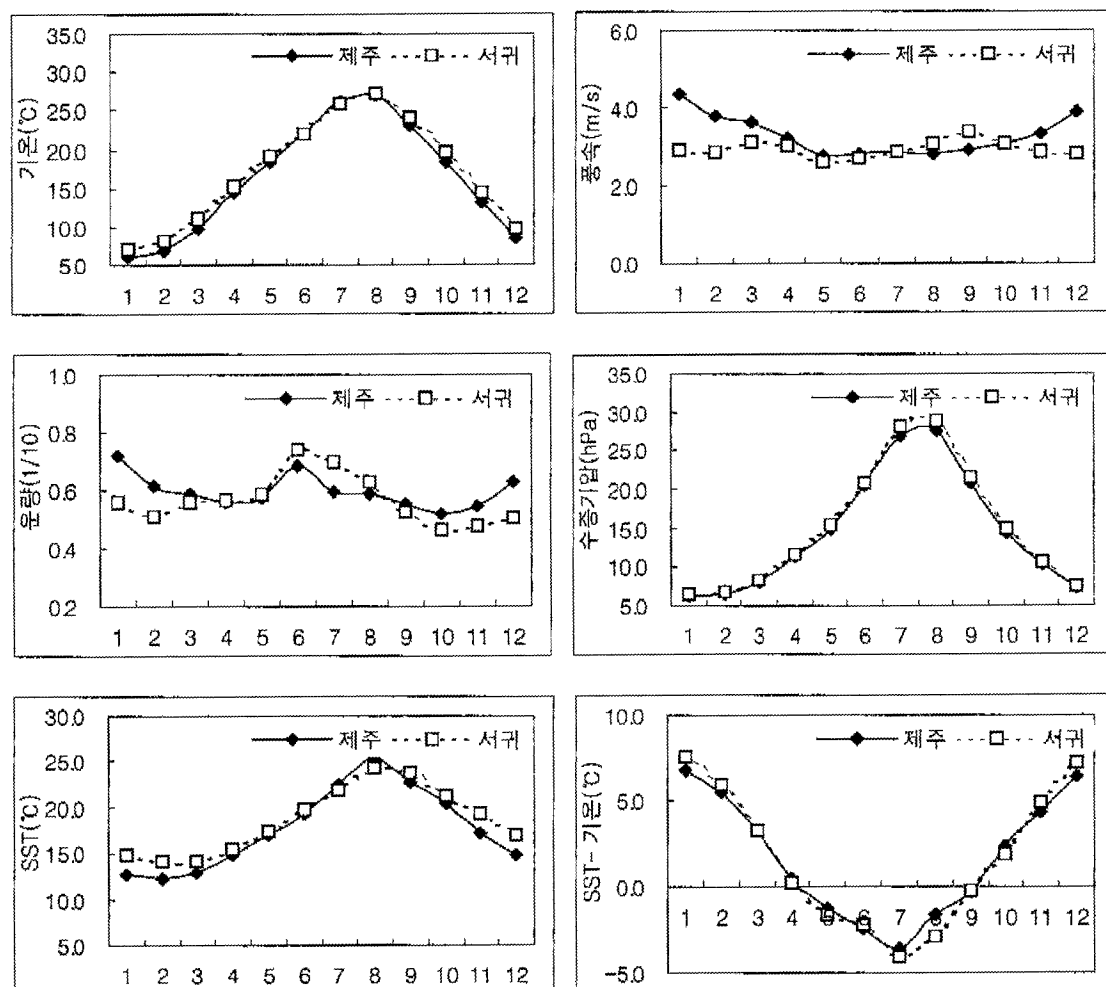


그림 3-1. 열수지에 관여하는 기상변수의 월별분포.

대기온도의 월 평균분포는 1월에 제주 5.6℃로 최소, 8월에 서귀포 26.6℃로 최대이며, 8월을 기점으로 점차 하강하는 추세를 보이고, 평균 변화폭은 1~2월에 0.55℃로 최소, 10~11월에는 5.2℃로 최대를 보인다. 한편, 연 변화는 1995년 제주에서 15.6℃로 최저, 1998년 서귀포 17.5℃로 최대를 보였다.

해양에서의 풍속은 해양과 대기 사이의 에너지 Coupling에 영향을 미치는 주요한 요인이다. 또한, 표면 혼합층의 깊이 변화와 관련되어 대기와의 열교환에도 영향을 미치며(장, 1995), 해표면의 거칠기, 형태, 열적효과 등의 요인에 의해서도 영향을 받는다. 풍속의 월별 평균분포는 2.7~3.6 m/s의 분포로 제주가 서귀포보다 대부분 높게 나타나고, 최대는 1월 제주에서 4.4 m/s, 최소는 5월 서귀포에서 2.6 m/s가 나타났다. 연별 평년값은 1991년과 1992년도에 3.3 m/s로 최대, 1996년도에 2.9 m/s로 최소를 보인다.

운량(구름)은 지구의 물순환과 기후계의 에너지 균형에 주요한 역할을 하며, 산란현상을 통하여 입사되는 태양복사량을 반사하기 때문에 구름으로 인해 해수면에 도달하는 에너지량을 감소시킨다. 운량의 측정단위는 하늘 전체를 10으로 보고 1/10단위로 측정하였다. 월별 평균운량은 0.49~0.71 정도로 동계에는 제주가 높고, 하계에는 서귀포지역의 높게 나타나고 있다. 최대값은 1월 제주 0.72이고, 10월 서귀포 0.46이다. 이는 계절별 몬순(겨울철 북서계절풍과 여름철 남서계절풍)과 연관이 깊은 것으로 사료된다. 연도별 평균운량은 1994년에 제주지역 0.53으로 최소, 1998년에 0.61로 최대를 보인다.

대기가 포함할 수 있는 수증기의 양은 온도만의 함수로, 대기가 포함할 수 있는 수증기의 절대량은 대기의 온도에 의하여 결정되며, 일반적으로 기온이 높을수록 그 양은 증가한다. 이때 수증기만이 갖는 분압을 수증기압, 그 최대값을 포화수증기압이라 한다. 수증기압이 월별 평균분포는 2월 제주에서 5.6 hPa로 최소, 8월 서귀포에서 25.0 hPa로 최대를 보인다. 연도별로는 15.0 hPa~17.0 hPa로 연평균 기온이 높은 서귀포에서 높게 나타나고 있다.

해수온도는 그 변화폭이 대기보다 작고 해수의 물리적 성질을 결정하는 중요 요인으로 해수면의 에너지 수지에 크게 영향을 준다. 해수면의 온도 변화를 일으키는 요인으로서는 해면에서 현열 및 잠열방출, 해류에 의한 이류, 하층에서의 유입 그리고 태양복사에너지가 있다. 해수면 온도의 월별 평균분포는 겨울철(2월) 제주에서 12.2℃로 최소를 보이며, 봄철의 기온상승과 함께 표층 수온도 상승하여 8월 제주에서 25.4℃로 최대를 보이고 있어 그 편차는 13.2℃이다. 연별 평균분포는 2003년도에 17.6℃로 최저, 2001년에 18.7℃로 최대, 1998년에 17.7℃로 최저를 보인다.

‘해기차’란 해수면 온도와 대기온도와의 차이를 말함인데, 특히 해양과 대기간 현열수송에 중요한 인자로 관여한다. 정규분포는 -3.4℃~8.2℃ 범위내에서 하계(5월~8월)에는 대기의 온도가 해수온도 보다 높아서 음(-)의 값을 나타내고, 나머지 달에는 해수온도가 높아서 양(+)의 값을 기록하였다. 절대량에 있어서는 1월 서귀포에서 8.2℃로 최고, 7월 서귀포에서 -3.4℃로 최저

를 기록하였다. 연도별 평균분포는 1998년도  $0.4^{\circ}\text{C}$ (제주  $-0.2^{\circ}\text{C}$ )로 최저를 기록하여 평년보다 기온은 높고 해수온도는 낮은 한해로 기록되었고, 나머지 해는 연평균  $1.4^{\circ}\text{C} \sim 2.1^{\circ}\text{C}$  사이에서 변화폭이 작게 나타났다.

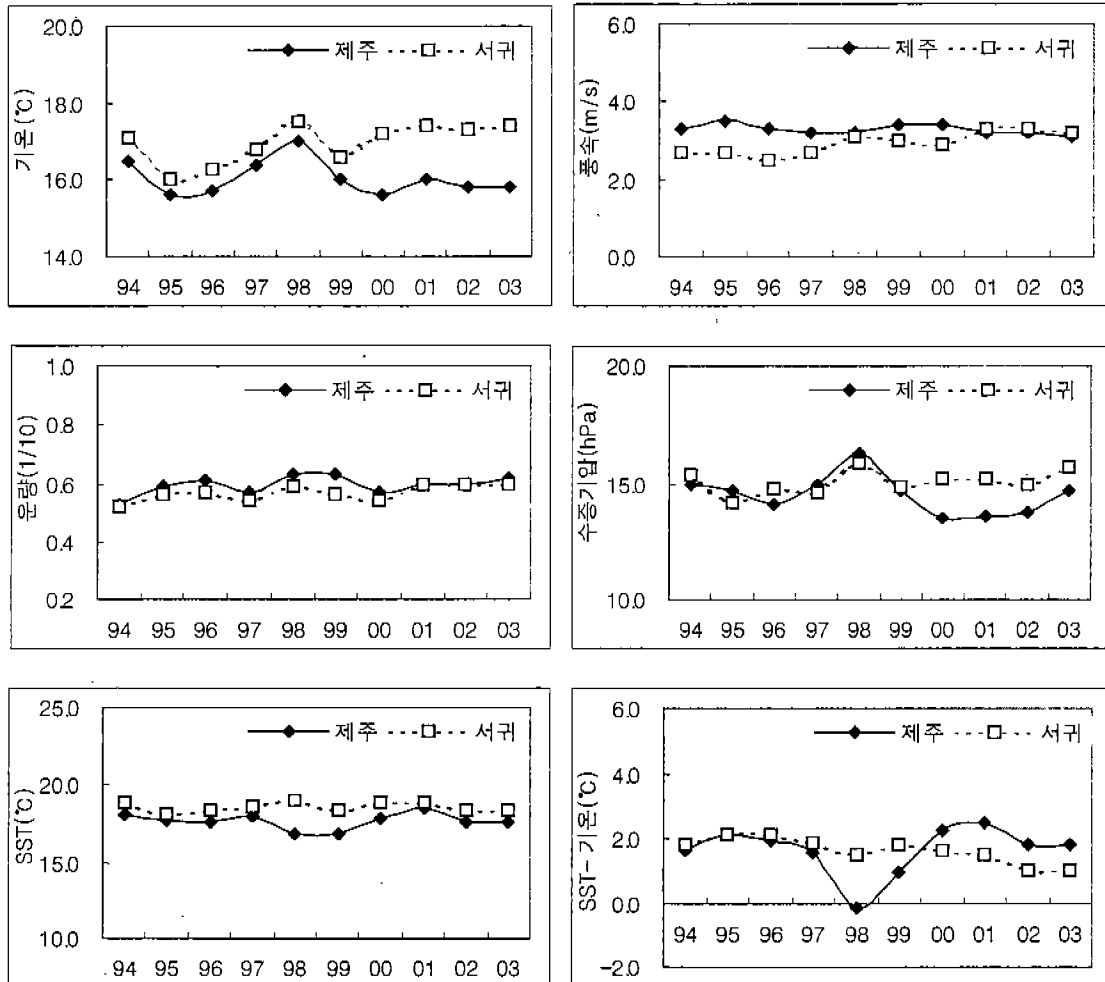


그림 3-2: 열수지에 관여하는 기상변수의 연별분포.

### 3-2 해수온도

제주도 부근해상 월평균 해수온도의 공간분포(그림 3-3)는 제주도 남동해역을 연중 고수온역으로 표현하고 있는데, 이것은 제주도 남쪽에서 북상하는 대마난류의 영향으로 여겨진다. 대마난류에 의한 열수송은 해수온도의 연평균치를 높이고 연교차를 줄이지만, 동계 계절풍에 의한 열수송은 평균 해수온도를 낮게 하고 해수온도의 연교차를 크게 한다(강, 1997). 온도경도의 분포는 동계(2월, 12월)에는 시베리아고기압에 의해 냉각된 냉수대의 이류로 제주도 북서쪽에서 밀(密)하게 나타나고, 반대로 하계(6월, 8월)에는 온난한 북태평양고기압의 확장으로 제주도 남서쪽에서 밀(密)하게 나타나고 있다. 수온의 공간 분포는 2월에 13~15℃ 정도로 최저, 8월에 24~27℃로 최대를 보인다.

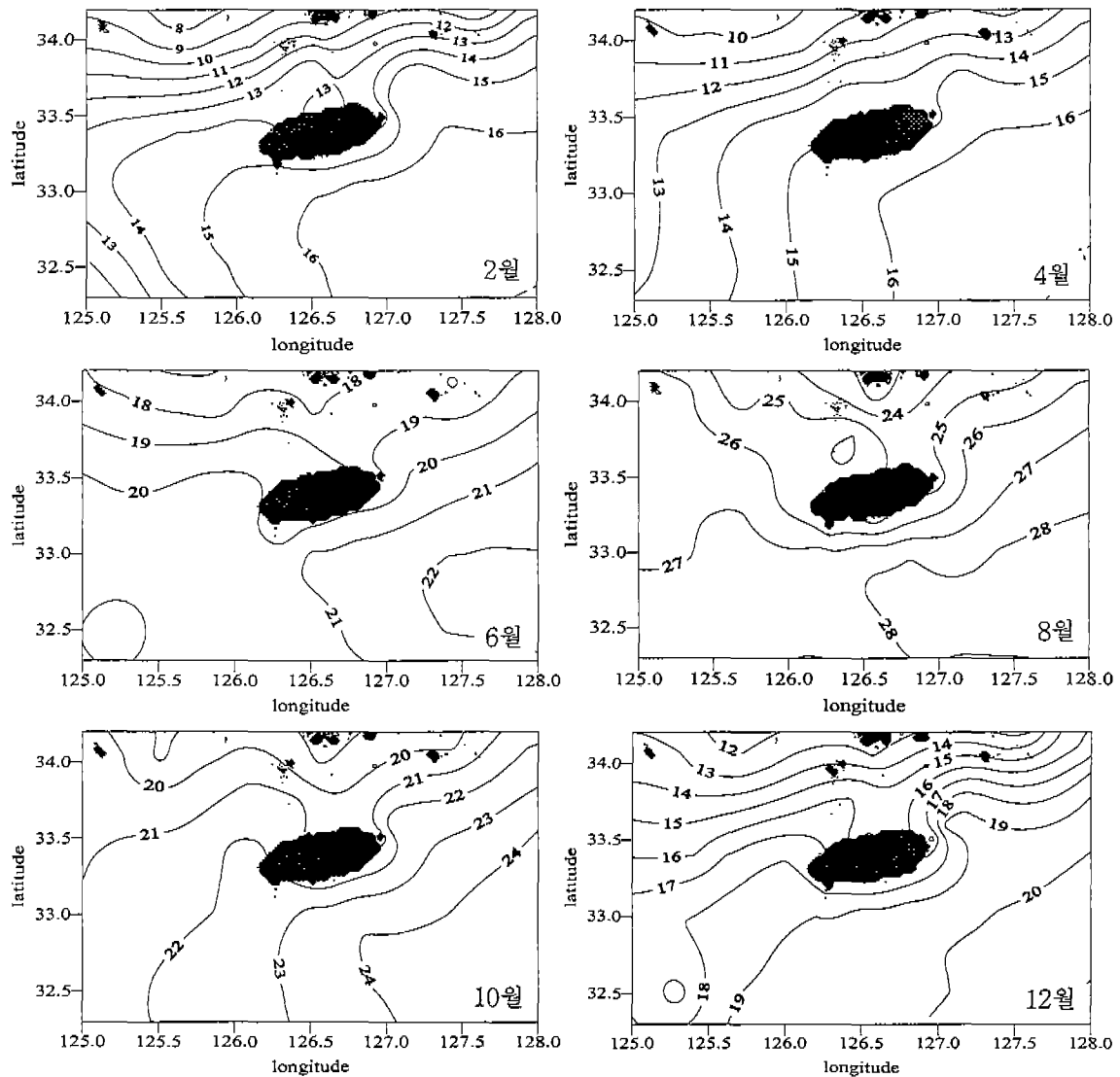


그림 3-3. 제주도부근해상 월별 수온분포(℃).

### 3-3 해수면에 도달하는 태양복사량

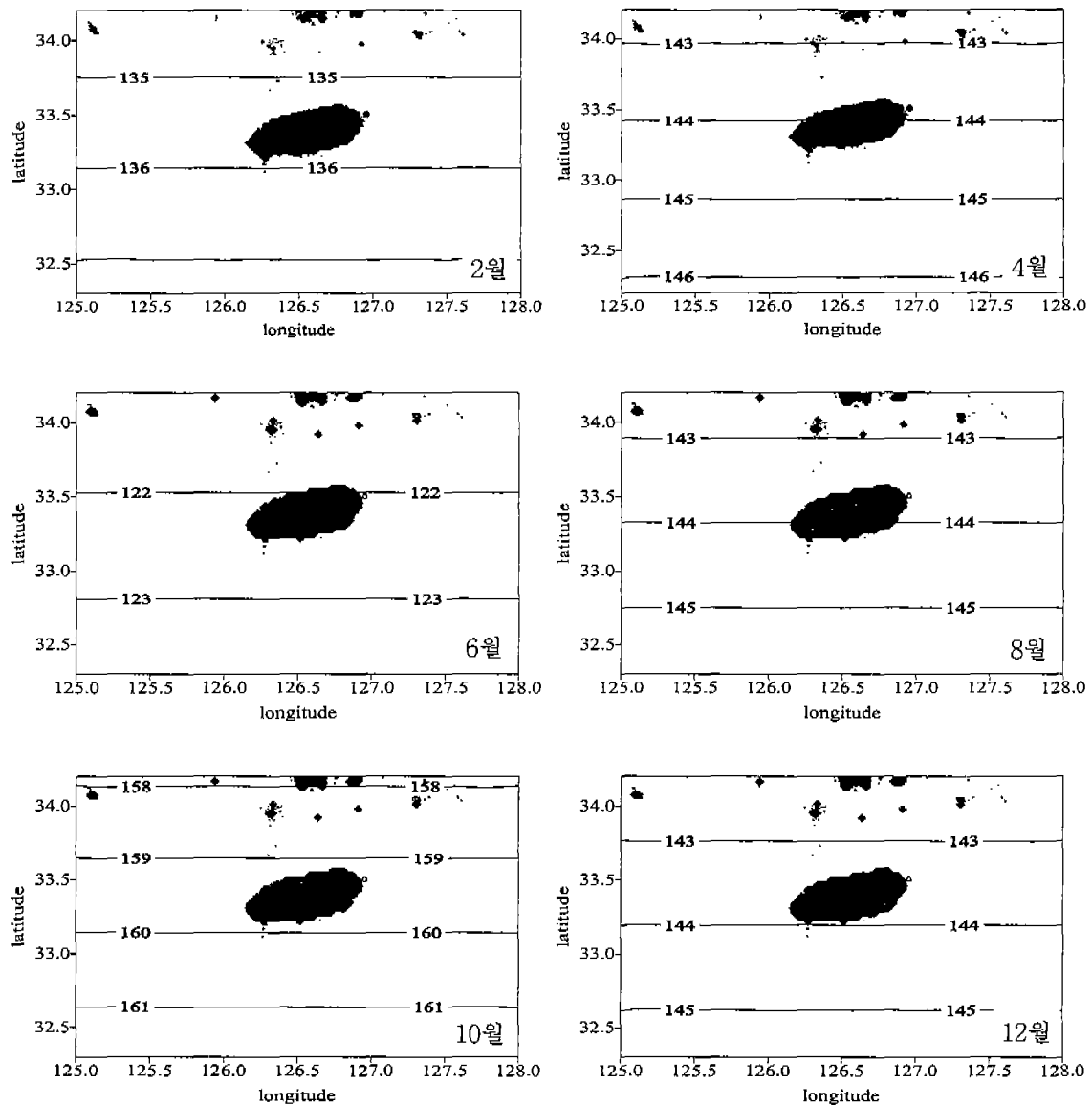


그림 3-4. 제주도부근해상 월별 태양복사량(W/m²).

(그림 3-4)는 태양으로부터 해수면에 입사한 태양복사량의 월별 공간분포도이다. Gill(1982)의 식을 이용하여 계산한 결과 태양복사량은 동서방향으로 위도에 평행하게 선형적인 값을 얻었으며, 변수로 사용된 운량은 제주지역(제주, 서귀, 고산)과 남해안(흑산도, 완도, 여수, 통영) 기상관서의 월평균값을 사용하였다. 제주를 중심으로 월별 태양복사량의 크기를 살펴보면 6월에 최저값 122 W/m², 10월에 최대값 159 W/m²이 나타났는데, 이는 6월 운량(0.72)과 10월 운량(0.48)이 반영된 결과이다. (그림 3-5)에 제

주지방기상청 일사량 실측치와 계산값을 비교하였다. 극대와 극소발생 월(月)에 있어서 다소 차이가 있고 실측치에 비해서 계산값이 비교적 완만하게 나타나고 있으나, 전반적으로 변화 경향이 비슷하고, 연평균 일사량에 대한 편차 또한  $3.8 \text{ W/m}^2$  으로 그 차이가 미미하여 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

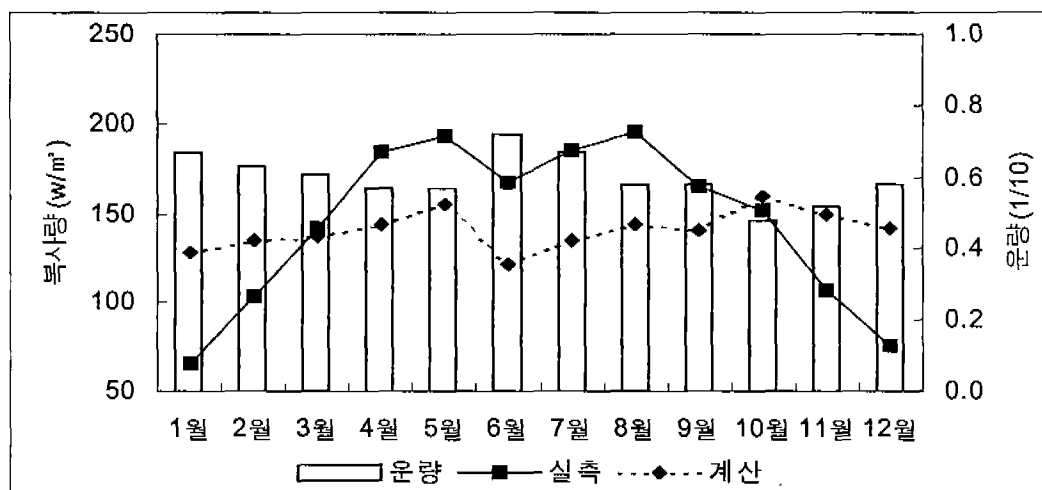


그림 3-5. 제주지방기상청 월평균 일사량 및 제주도 평균전운량.

### 3-4 해수면 장파복사량

(그림 3-6)에 월별 장파복사량의 공간분포를 나타내었다. 월별 해수면에서의 평균 장파복사량은 12월에  $63 \sim 70 \text{ W/m}^2$ 로 최대를 보였고, 8월에  $27 \sim 28 \text{ W/m}^2$ 로 최소를 보인다. 여름철(6월, 8월)의 경우 태양복사량이 해수면 장파복사량 보다 월등히 커서 태양복사에 의해 해표면의 열수지가 지배되고 있음을 알 수 있다.

### 3-5 잠열속

잠열속은 수증기압의 차와 풍속의 크기에 따라 결정되는데, 최대치는 12월에  $140 \sim 230 \text{ W/m}^2$ , 최소치는 6월에  $0 \sim 5 \text{ W/m}^2$ 의 분포를 보이고 있다. 잠열속의 공간적인 변화폭은 여름보다 겨울이 월등히 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 해양과 대기의 수증기압차가 여름에 비해 겨울이 크기 때문이다. 계절별 잠열속의 크기는 겨울(12월)-가을(10월)-봄(4월)-여름(6월, 8월)순으로 크게 나타난다. 이와 같이 난류속(현열속+잠열속)이 겨울철에 최대가 된 것은



찬공기가 따뜻한 해수면과 접촉하면서 해수면이 많은 열을 방출하기 때문이다. 잠열속은 2월~6월까지의 감소하고 8월~12월까지는 증가하다가 2월부터는 다시 감소한다. 잠열속의 값은 연중 양(+)의 값으로 해수면에서의 증기압이 대기에서의 증기압보다 항상 큼을 알 수 있다.

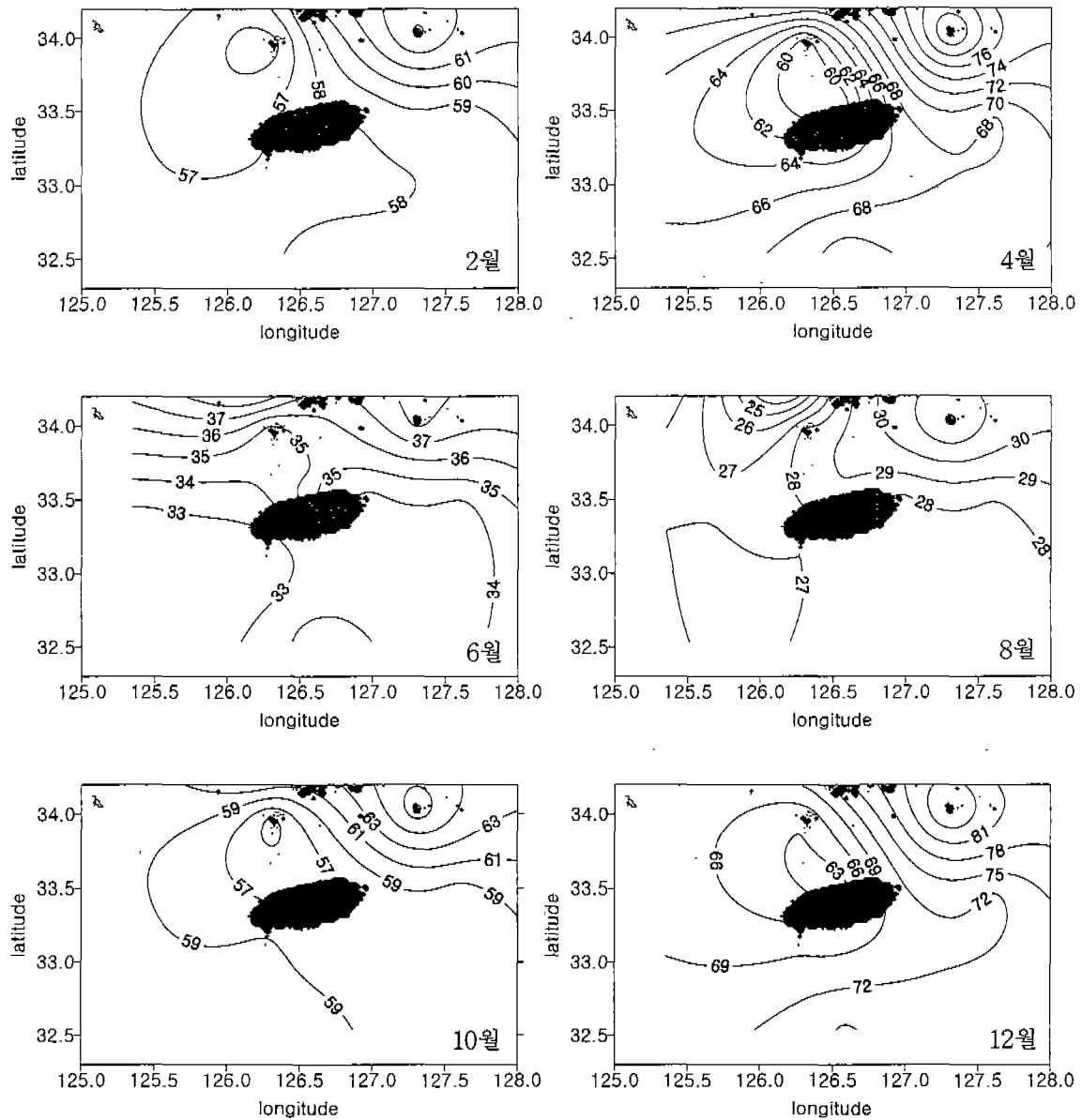


그림 3-6. 제주도부근해상 월별 해수면 장파복사량(W/m²).

### 3-6 현열속

현열 방출량은 풍속, 대기의 온도와 해수면의 온도차에 의해서 결정된다. 상대적으로 다른 복사에너지에 비해 작은 값이지만 동계인 12월에  $70\sim110\text{ W/m}^2$ 로 최대를 보이며, 하계인 6월에  $-10\text{ W/m}^2$ 로 최소를 보이고 있어 연변화폭은  $80\sim120\text{ W/m}^2$  정도이다. 현열속에 의해 대기로의 열 방출량은 겨울-가을-봄-여름 순으로 크게 나타나며, 시간적인 변화폭은 겨울철에 크고 여름철에는 상대적으로 작다.

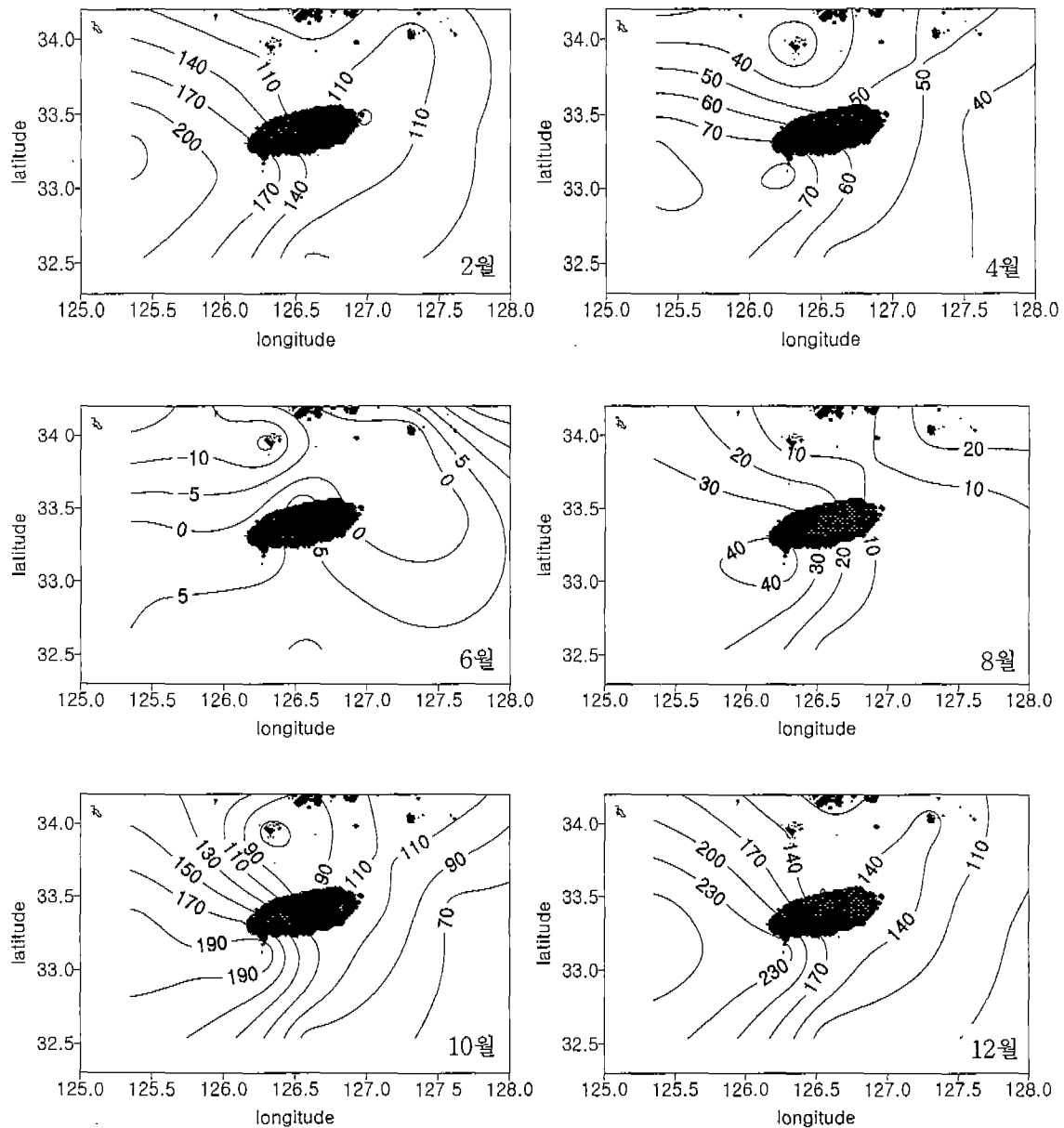


그림 3-7. 제주도부근해상 월별 잠열속( $\text{W/m}^2$ ).

### 3-7 순 열교환량

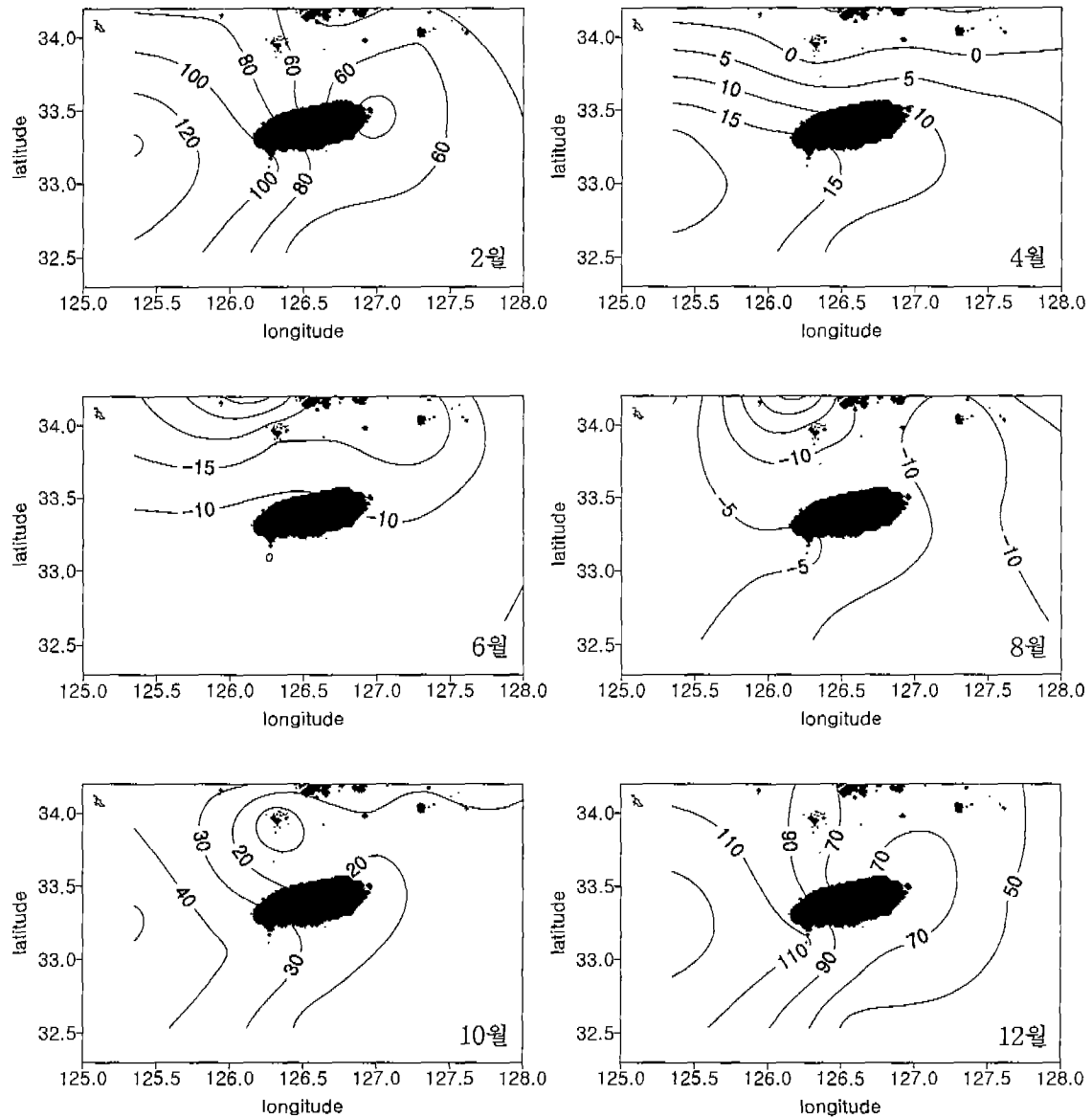


그림 3-8. 제주도부근해상 월별 현열속(W/m²).

제주도부근해상 해수면 순열교환량은 해양이 12월에  $-150 \sim -250 \text{ W/m}^2$ 로 최대의 열량을 잃으며, 8월에  $80 \sim 110 \text{ W/m}^2$ 로 최대의 열량을 얻어서 연간  $230 \sim 360 \text{ W/m}^2$ 의 변화폭을 갖는다. 2월에는 모든 해역의 해수면에서 대기로 열을 방출하고 있으며, 4월에는 마라도 남서쪽해상에서  $-15 \text{ W/m}^2$ 의 열을 방출하고 나머지 해상에서는 대기로부터 열을 받아들이고 있다. 6월과 8월에는 전 해역에서 대기로부터 열을 받고 있으며, 10월부터는 전해역이 냉각되어 열량이 계속 방출된다. 제주도부근해상 열교환량의 연 평균값은  $-23 \text{ W/m}^2$ 으

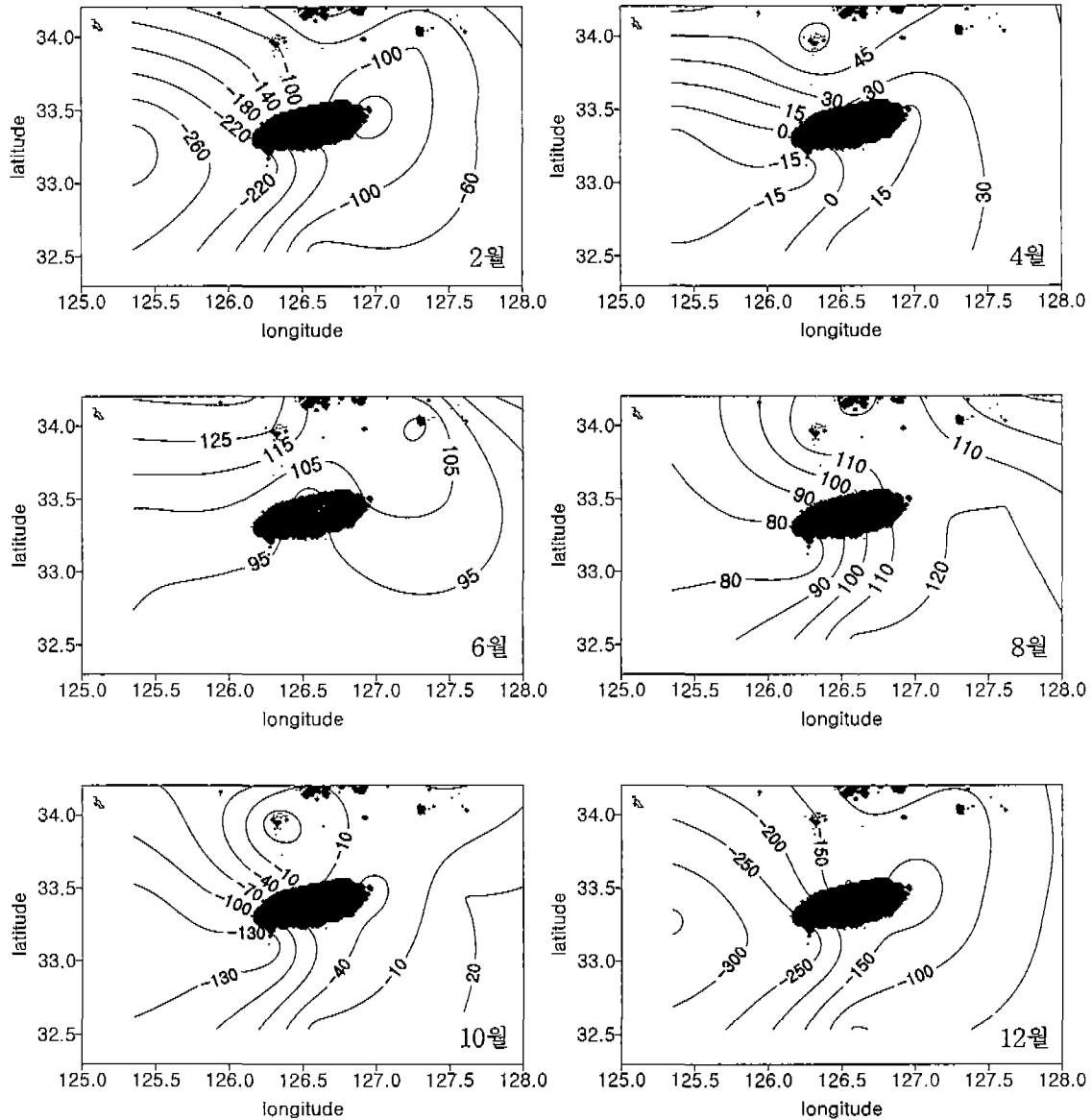


그림 3-9. 제주도부근해상 월별 순 열교환량( $W/m^2$ ).

로 해수면에서 대기로 연중 열량을 방출한다. 조사기간 동안 제주도부근해상에서 대기로 방출되는 열손실량 항목의 크기는 잠열속(50%)-장파복사(32%)-현열속(18%)의 순으로 크게 나타나며, 해수면 열손실의 전체 크기는  $161.3 W/m^2$ 로 해수면에 입사되는 태양복사량( $138.5 W/m^2$ )의 1.2배를 보인다.

### 3-8 열수지 평형

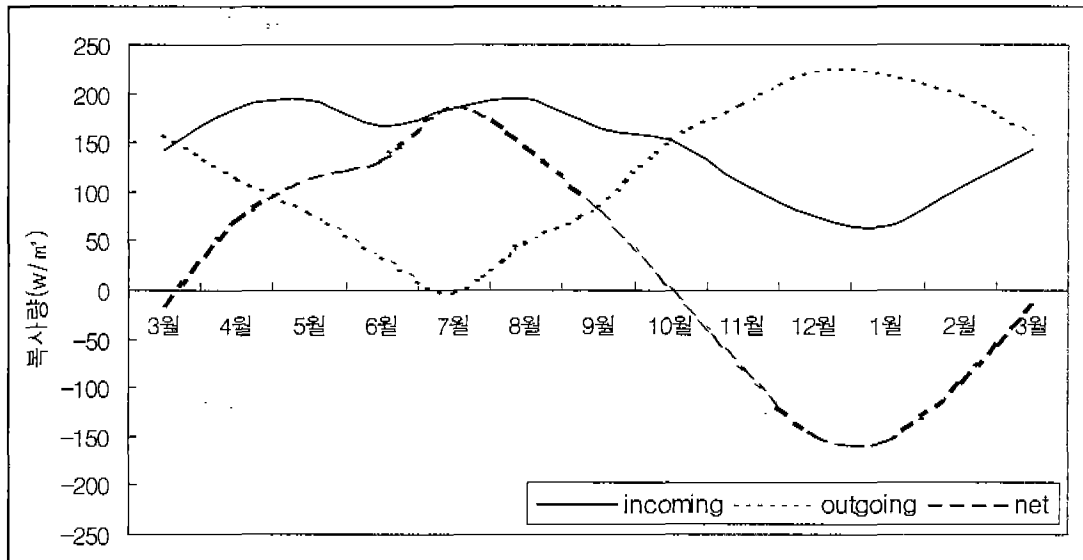


그림 3-10. Yearly heat balance(제주).

고체인 지구가 자전을 하게 됨에 따라 이것에 접한 공기와 해수의 이동이 있게 된다. 지구의 자전과 관계없이 태양광선에 의해 덥혀진 대기와 해수의 순환이 일어나는데 이것을 해양과 대기의 열적인 순환이라 한다. 공기는 태양복사 중 에너지가 낮은 적외선을 일산화탄소와 수증기가 일부 흡수하지만 대부분의 태양광선을 거의 통과시키고, 주로 해면과 육지의 열을 받아서 공기가 더워져서 대기가 상하 및 좌우로 순환하게 된다. 이에 비해 해수는 수 mm이내의 해수표면에서 태양광선 에너지를 직접 흡수하여 가열되고, 이 가열된 해수에서 저층의 해수로 열이 전도되어 저층의 물이 덥혀진다. 뿐만 아니라 대기와 해저로부터도 열을 흡수한다. 부연하면, 지구내부가 용암으로 되어 있어 지구내부로부터 해저를 통한 열의 대류, 대기로부터의 열의 교환, 해면에서 수증기의 응결 및 증발시의 잠열, 화학적 및 생물학적 작용에 의한 열 등을 흡수한다. 지구내부로 부터의 열은  $0.1096 \text{ calcm}^{-2}\text{day}^{-1}$  이고 해면에 입사되는 태양복사량의 0.0025%에 해당하며, 이 열은 해저의 해수수온에 영향을 미친다. 해수의 요동에 의해 발생하는 파랑에너지는  $0.012 \text{ calcm}^{-2}\text{day}^{-1}$  이며, 지구내부로부터 얻는 열의 1/9정도로 작아 무시할 수 있다. 화학적, 생물학적작용에 의한 열은 다른 작용에 비해 매우 적어 무시 된다.

이 중 가장 중요한 열이 태양광선열(solar radiative energy) 즉 태양복사열이 해수의 온도를 좌우하게 되는데 태양의 고도각에 따라 해양으로 입사

되는 태양복사량이 다르다. 즉 북반구에서 여름에는 태양이 북반구에 있어 태양의 고도각이 매우 크므로 해면에 도달하는 태양복사량이 많다. 그러나 겨울에는 태양이 남반구에 있으므로, 태양의 고도각이 작아 입사된 태양복사량이 작다. 다음 (그림 3-10)은 제주지방의 Yearly heat balance 분포이다.

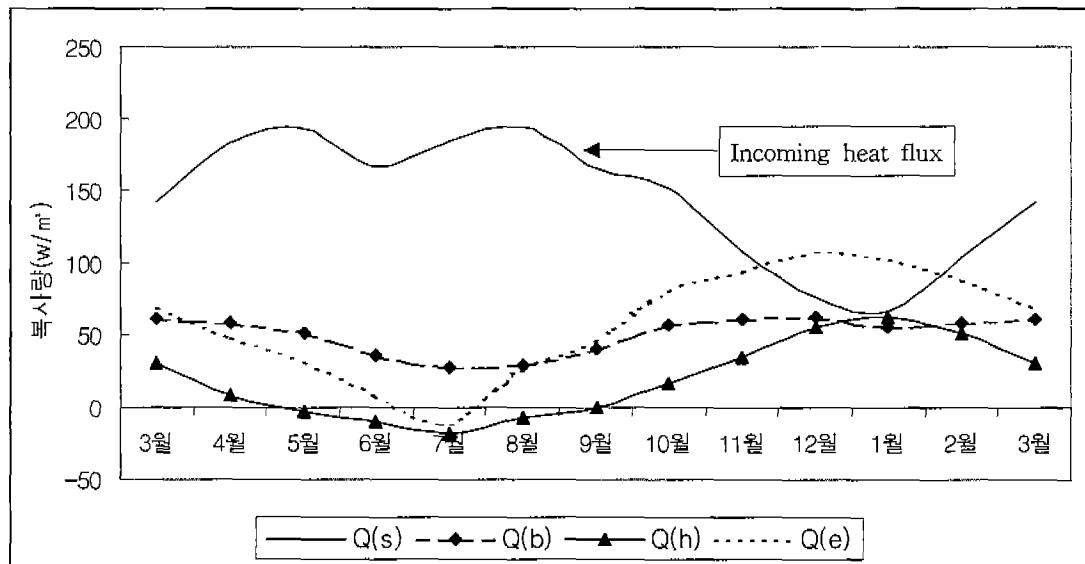


그림 3-11. Outgoing heat flux(Q(s)태양복사, Q(b)해면지구복사, Q(h)현열, Q(e)잠열).

동일지역(제주도 부근해역) 이라도 해양에서의 월별 태양복사량은 각각 다르다. 태양복사량은 1월 중순부터 점차 증가하기 시작하여 8월 중반까지 지속되고, 후반부터 1월 초순까지는 점차 감소하기 시작한다. 6월경에 잠시 입사량이 감소하는 원인은 제주지방의 우기(장마)와 연관되어 운량 증가에 따른 태양복사열 차단효과로 분석된다. 반면에 지구(해수면)로부터의 방출에너지는 7월 중순부터 12월까지 증가하고, 1월부터 7월 초순까지는 감소한다. 따라서 제주지방은 3월 중순부터 10월 중순까지는 에너지 과잉상태에 있게되고, 10월 하순부터 3월 초순까지는 에너지 부족상태에 놓이게 된다. 에너지 최대 열량은 7월에, 최소 열량은 12~1월 사이에 나타난다. 해양으로부터 대기로의 열전달(해수면 열손실)에 관여하는 주요한 원인은 바다로부터 대기로의 역복사(back radiation), 대기로의 현열 방출(sensible heat), 해수의 증발에 의한 잠열손실(latent heat)이다. (그림 3-11)은 제주지방 Outgoing heat flux의 월별 분포도를 나타낸 그림이다. 또한 하루에도 태양복사량은 시각별로 다르게 나타난다. 낮에는 해양으로 입사하는 태양복사량이 해면에서 대기로부터 방출되는 복사량보다 많아 해수

가 덮혀지며 수온이 상승한다. 반면에 일몰 후, 즉 밤에는 해상으로 입사되는 태양복사량은 없고 단지 해면에서 대기로 방출되는 복사량만 존재하며, 그 양은 거의 일정하다.

## 제4장 강설/적설 사례분석

### 4-1 강설 및 적설발생 현황

제주지방(제주, 고산, 서귀) 및 흑산도 지역의 강설 및 적설량 현황을 최근 10년(1995~2004) 자료를 중심으로 하여 살펴보았다.

#### 4-1-1 눈 일수

최근 10년간 지역별 강설일수(적설 포함)는 흑산도 지역이 146회, 제주가 153회, 고산 92회, 서귀포 97회이다. 흑산도 지역 통계기간이 97년부터임을 감안하면 제주지방 보다는 훨씬 강설일수가 많음을 알 수 있고, 도내에서는 북부지역인 제주가 제일 많이 나타난다. 연도별 강설일수는 흑산도가 제주보다 연 4~5일정도 많이 나타났으며, 도내에서는 제주가 12~20일 전후로 고산, 서귀포 지역보다 많았다. 월별 강설일수는 전 지역 모두 1월에 제일 많았고, 지역에 따라 12월과 1월 순이다. 제주지방은 12월보다는 2월에 강설일수가 많았고, 3월에도 7~10회, 그리고 11월에도 강설현상이 드물게 나타났다(표 4-1).

표 4-1 최근 10년간 총 강설일수(적설).

	1월	2월	3월	11월	12월	합계	비율(%) 적설/강설	비고
흑산도	70(35)	28(5)	11(3)	2(0)	36(11)	146(54)	37.0	'97-'04
제주	74(27)	36(11)	10(1)	1(0)	32(3)	153(42)	27.5	'95-'04
고산	46(15)	22(5)	7(1)	-	17(3)	92(24)	26.1	"
서귀포	43(24)	22(11)	7(3)	1(1)	24(9)	97(48)	49.5	"

강설현상 발생시 적설량이 기록된 횟수는 흑산도가 전체 146회중 54회(37%), 제주 153회중 42회(28%), 고산 92회중 24회(26%), 서귀포는 97회중 48회(50%)로 제일 높게 나타났다.

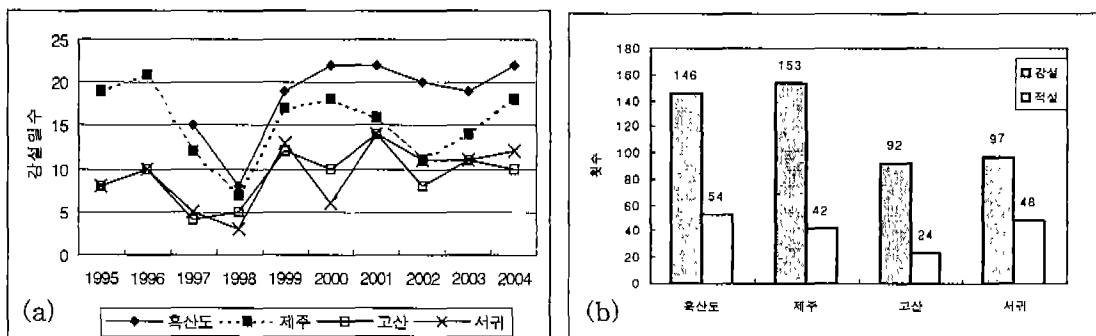


그림 4-1. 연도별 강설일수(a), 강설시 적설횟수(b).



#### 4-1-2 적설량

최근 10년 동안의 지역별·월별 최심신적설 기록을 (표 4-2)에 나타냈다. 도내 최심신적설 극값은(1995~2004) 성산 13.5 cm로 1999년 12월에 기록하였고, 다음은 서귀포 7.9 cm(2003년 1월), 제주 7.5 cm(2001년 1월), 고산 3.2 cm(2003년 1월) 순이다. 흑산도 지역 최심신적설 극값은 2004년 3월 저기압이 서해상을 지나면서 발달한 눈구름에 의해 기록한 5.2 cm 이다. 제주지방의 최심신적설 극값은 모두 발달한 대륙고기압 확장에 의한 경우이다.

표 4-2 최근 10년간 지역별·월별 최심신적설(1995.-2004.).

	1월	2월	3월	11월	12월
흑산도	4.7	0.8	5.2(2004.)	-	1.7
제주	7.5(2001.)	4.3	2.0	-	3.0
고산	3.2(2003.)	0.9	0.1	-	1.7
서귀포	7.9(2003.)	1.3	0.5	2.0	4.4
성산포	12.5(2001.)	8.5	1.7	2.6	13.5(1999.)

따라서, 제주지방의 지역별 강설(적설) 현상이 특징적인 사항은 다음과 같다. 첫째 제주지역은 타 지역보다 강설 및 적설발생 횟수는 가장 많으나 그 양에 있어서는 동부지역인 성산 지역에서 최대를 기록하였고, 서귀포 지역은 강설시 적설량 기록 비율이 가장 높게 나타났다. 둘째, 서부지역인 고산지역은 강설 횟수가 서귀포와 비슷하지만 적설량으로 기록되는 비율은 그 절반에 불과한데, 이는 적설관측이 이루어지고 있는 고산기상대의 지형특징 및 풍속이 반영된 결과로 분석된다. 또한 드문 현상이기는 하지만, 3월과 11월에도 적설을 동반한 강설현상이 간혹 발생하고 있다는 점이다.

#### 4-2 강설 및 적설시 주요 기상요소

제주시에 강설 및 적설발생시 주요 기상요소를 지상풍향과 850 hPa 고도의 풍향풍속을 고산기상대 고층자료를 이용하여 분석하였다. 풍향은 NW~NNE 까지 NW-Iy가 주를 이루면서, 그 중에서도 NNW풍이 강설시나 적설시 주풍향 빈도수 최대를 보였다. 850 hPa 풍향은 270°~360° 방향으로 주풍계를 이루면서 지상보다는 다소 서쪽으로 편향하는 경향을 보였으며, 풍속은 주로 10~20 m/s 범위 내에서 분포하면서 강설시 보다는 적설시에 풍속값이 다소 높게 나타났다(그림 4-2, 4-3).

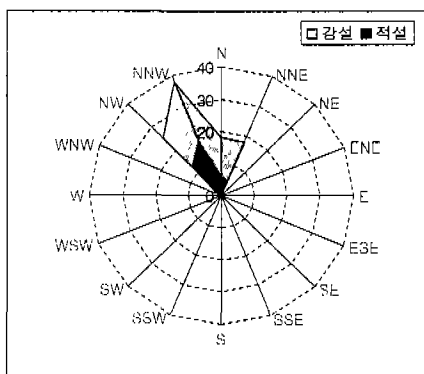


그림 4-2 강설/적설시 지상풍향 빈도(제주).

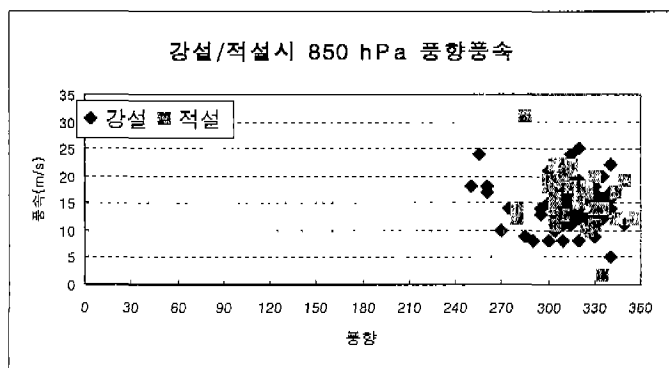


그림 4-3 강설/적설시 850 hPa 풍향풍속 분포(고산).

(표 4-3)에 제주시를 중심으로 겨울철 평균값과 강설현상 발생시, 그리고 적설량 기록시에 주요 기상요소를 나타내었다. 신적설량은 0.1~1.0 cm, 1.1~5.0 cm, 5.0 cm 이상 3단계로 구분하였으며, 기상요소는 지상 및 850 hPa 평균풍속, 평균 및 최저기온, 해기차(SST-지상기온, SST-850 hPa기온)를 분석하였다. 주 경향은 강설현상이 시작되어 눈이 쌓이기 시작하면서 기상요소는 점점 증가하는 추세를 보였는데, 강설이 발생하기 위한 최소조건으로는 풍속이 지상 6.0 m/s이상, 850 hPa 14.0 m/s이상 나타나야 하고, 기온은 평균기온 4.0℃, 최저기온 2.0℃ 이하는 되어야 하는 것으로 나타났다. 해기차는 지상과 약 9.0℃, 850 hPa 기온과는 20.0℃ 이상 되어야 하는 것으로 나타났다. 적설량으로 기록되기 위한 최소 기상조건은 평균기온 약 2.0℃, 일 최저기온은 0℃정도는 되어야 하는 것으로 나타났으며, 나머지 기상요소는 강설현상 발생시와 비슷하게 나타났다.

표 4-3 강설 및 적설시 주요기상요소(제주).

구분	겨울평균	강설시	신적설량(cm)		
			0.1~1.0	1.1~5.0	5.0 이상
지상평균풍속(m/s)	4.0	6.2	6.7	7.4	7.2
850 hPa 풍속(m/s)	10.8	14.1	14.6	16.1	15.5
평균기온(℃)	7.0	3.9	2.2	1.2	-0.8
최저기온(℃)	4.3	1.9	0.0	-1.1	-3.0
SST-지상기온(℃)	6.3	8.9	9.5	10.4	11.6
SST-850 hPa기온(℃)	15.5	20.2	21.5	22.0	24.0

#### 4-3 강설 및 적설시 겨울철 평균열수지

강설(적설)은 12월~2월에 주로 발생하였고, 따라서 그림은 겨울철 10년간의 강설·무강설 모두를 포함하여 해양과 대기의 열교환량을 나타내었다. 제주도부근해상의 연간 순열교환량(net heat flux) 평균값은  $-23 \text{ W/m}^2$  (=입사량  $138.5 \text{ W/m}^2$  - 방출량  $161.3 \text{ W/m}^2$ )으로 연중 해수면에서 대기로 열을 방출하는데, 그 기여도는 잠열속(50%), 역복사량(32%), 현열속(18%) 순이다. 여기서는 강설(적설)을 유발하는 제주도 북서해상 눈구름 발달과 관련 있는 것으로 보이는 현열속, 잠열속, 그리고 입사량과 방출량을 모두 고려한 순 열교환량(net heat flux)에 대해서 분석하였다.

##### 4-3-1 현열속(sensible heat flux)

현열 방출량은 풍속과, 해기차(해수온도와 대기의 온도차)에 의해서 결정된다. (그림 4-4) 및 (그림 4-5)는 제주와 흑산도의 현열과 풍속, 현열과 해기차와의 상관도를 나타낸 것으로, 해양에서 대기로의 현열수송은 풍속과 해기차 모두 강한 양(+)의 상관성이 있음을 보여준다. 상관계수(R)는 제주의 경우 현열과 풍속 0.88, 현열과 해기차 0.76이며, 흑산도는 현열과 풍속 0.80, 현열과 해기차 0.87이다. 일반적으로 상관계수(R)가 0.6 이상이면 상관도가 높고, 0.8이상이면 상관도가 매우 높은 것으로 알려져 있다.

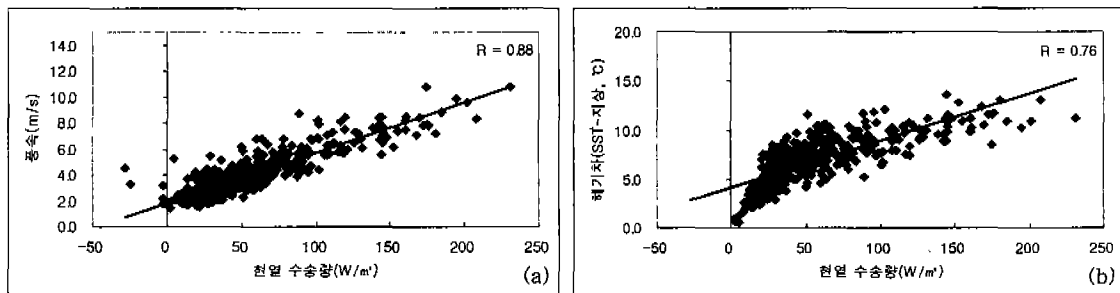


그림 4-4. 제주 현열속과 풍속(a), 현열속과 해기차(b) 상관계수.

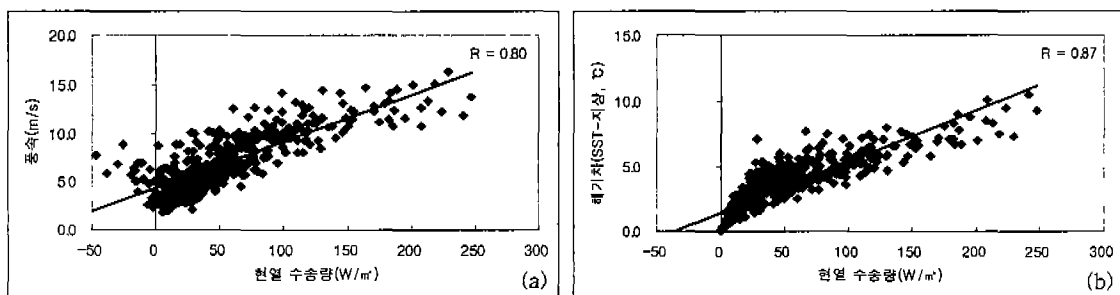


그림 4-5. 흑산도 현열속과 풍속(a), 현열속과 해기차(b) 상관계수.

현열속의 연중 평균값은 상대적으로 다른 복사에너지에 비해 작은 값이지만 동계인 1월에  $80 \sim 120 \text{ W/m}^2$ 로 최대를 보이며; 하계인 6월에  $-10 \text{ W/m}^2$ 로 최소를 보이고 있어 연변화폭은  $90 \sim 130 \text{ W/m}^2$  정도이다. 지역적인 변화폭은 12월  $70 \sim 110 \text{ W/m}^2$ , 2월  $60 \sim 100 \text{ W/m}^2$  이다(그림 4-6). 현열속에 의해 대기로 방출되는 에너지 절대값의 크기는 겨울-가을-봄-여름 순이다.

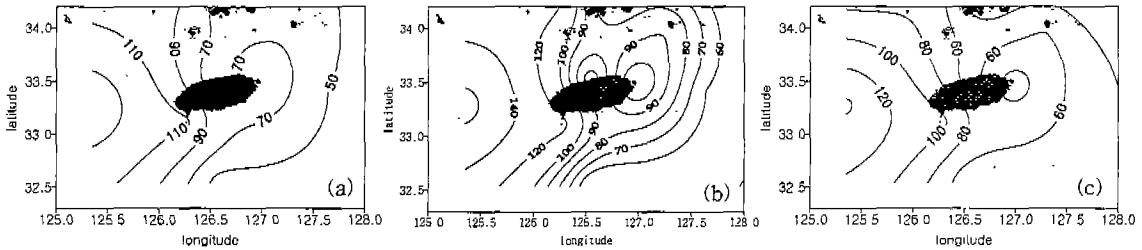


그림 4-6. 제주도부근해상 겨울철 현열속 수평분포(12월(a), 1월(b), 2월(c)).

#### 4-3-2 잠열속(latent heat flux)

잠열속은 수증기압 차(해수면 수증기압과 대기의 온도에서의 수증기압) 및 풍속과 강한 양(+)의 상관성을 갖는다(그림 4-7, 4-8). 상관계수(R)는 제주의 경우 잠열과 풍속 0.93, 잠열과 해기차 0.65이며, 흑산도는 현열과 풍속 0.60, 현열과 해기차 0.75이다. 특이한 점은 잠열과 풍속과의 추세는 선형 비례관계인데 비하여, 수증기압차와의 관계는 다소 log함수적으로 변화한다는 점이다.

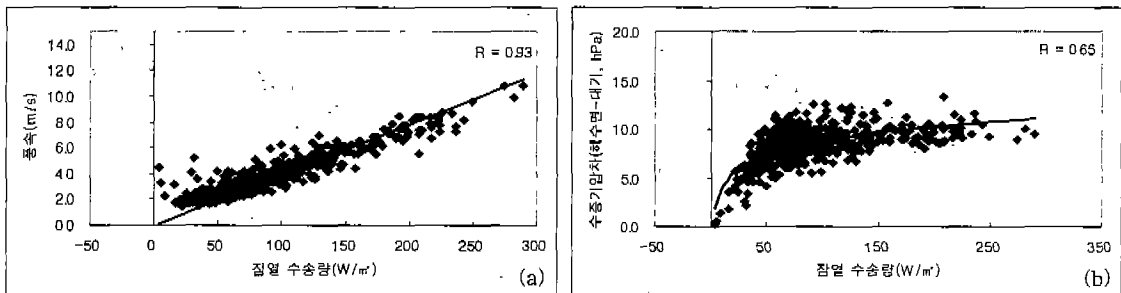


그림 4-7. 제주 잠열속과 풍속(a), 잠열속과 수증기압(b) 상관계수.

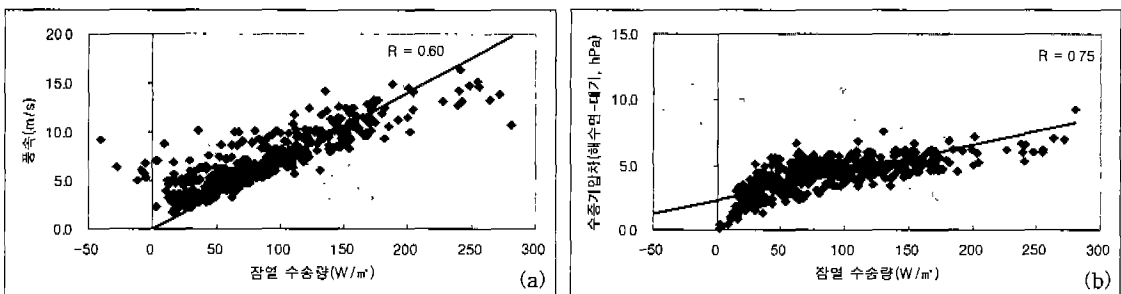


그림 4-8. 흑산도 잠열속과 풍속(a), 잠열속과 수증기압차(b) 상관계수.

해수면에서의 수증기 증발에 의한 잠열속 최대치는 12월에  $140 \sim 230 \text{ W/m}^2$ , 최소치는 6월에  $0 \sim 5 \text{ W/m}^2$  폭이다. 잠열속의 절대값은 겨울철을 포함하여 연중 양(+)의 값으로 해수면에서의 증기압이 대기의 특정온도에서의 증기압보다 항상 큼을 의미하며, 연중 해수면에서 대기로 에너지가 공급되고 있음을 알 수 있다. 월별 변화폭은 1월  $140 \sim 200 \text{ W/m}^2$ , 2월  $110 \sim 170 \text{ W/m}^2$ 로, 제주지방의 겨울철 시공간적 변화폭은  $110 \sim 230 \text{ W/m}^2$  이다(그림 4-9).

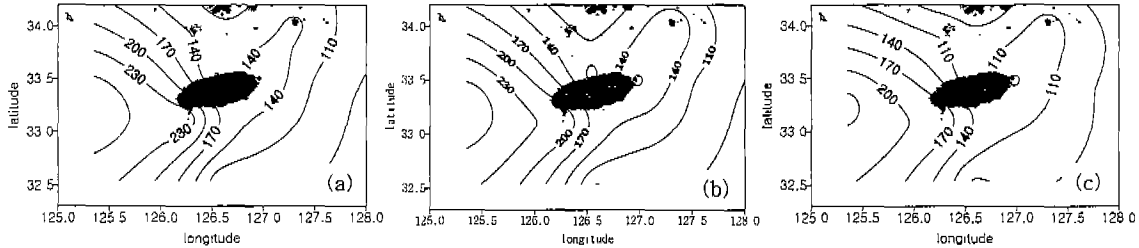


그림 4-9. 제주도부근해상 겨울철 잠열속 수평분포(12월(a), 1월(b), 2월(c)).

#### 4-3-3 순열속(net heat flux)

제주부근해상 동계 해수면 순열교환량은 해양이 1월에  $-120 \sim -280 \text{ W/m}^2$ 로 최대의 열량을 잃으며, 12월  $-150 \sim -250 \text{ W/m}^2$ , 2월  $-100 \sim -220 \text{ W/m}^2$  등이다(그림 4-10). 최대값은 8월  $80 \sim 110 \text{ W/m}^2$ 로 역으로 대기로부터 열량을 얻어서 연간  $230 \sim 360 \text{ W/m}^2$ 의 변화폭을 갖는다. 제주도부근해상 열교환량의 연 평균값은  $-23 \text{ W/m}^2$ 으로 해수면에서 대기로 연중 열량을 방출한다. 조사기간 동안 제주도부근해상에서 대기로 방출되는 열손실량의 크기는 잠열속(50%)-장파복사(32%)-현열속(18%)의 순이다.

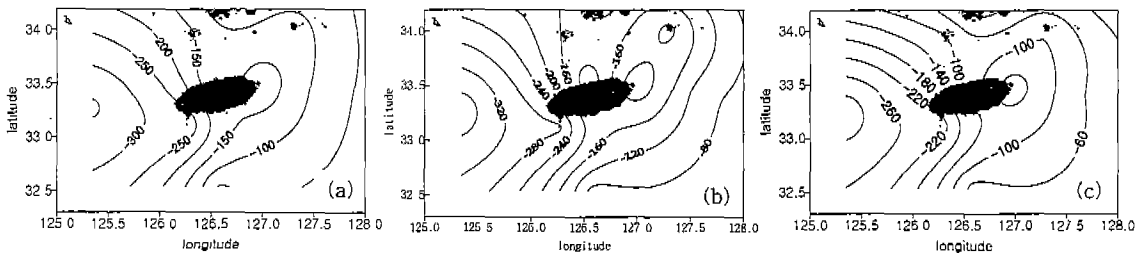


그림 4-10. 제주도부근해상 겨울철 순열속 수평분포(12월(a), 1월(b), 2월(c)).

#### 4-4 강설 및 적설시 열수지 정규분포

(4-3장)이 강설과 무강설을 모두 포함하는 겨울철 평균열수지 분포에 관한 내용이라면, (4-4장)은 전술한 평균적 분포를 포함한 강설과 적설이 발생한 경우를 구분하여 열수지에 관여하는 각 요소별로 분포특징을 서술하였다.

##### 4-4-1 현열속

(그림 4-11)는 1999년 12월부터 금년(2004년) 2월까지 겨울철 5년 동안의 현열속 분포를 겨울철평균, 무강설시, 강설시, 적설시로 구분하여 조사한 결과이다.

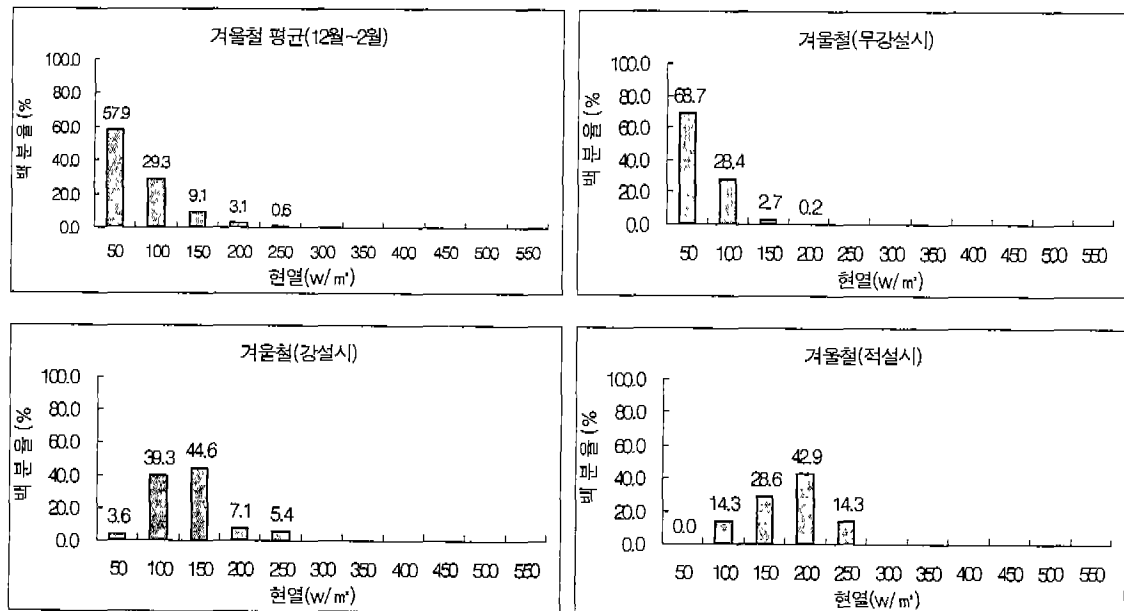


그림 4-11. 강설 및 적설시 현열속(제주, 1999. 12.~2004. 2.).

겨울철평균은 0~100 W/m²(87.2%) 범위이나, 주(主)는 0~50 W/m²(57.9%) 이었고, 무강설시는 0~50 W/m²(68.7%), 50~100 W/m²(28.49%)로 전체적으로는 0~100 W/m² 범위에 97.1%가 포함되어 대부분을 차지하였다. 그러나 강설시와 적설시로 접어들면서 해양에서 대기로의 현열수송량은 현저히 높아지는데, 강설 발생시에는 83.9%가 50~150 W/m² 범위에, 적설시점에서는 100~200 W/m²(71.5%) 범위까지 이르렀다. 결국, 겨울철 무강설시 0~100 W/m² 정도에 머물러 있는 해양에서 대기로의 현열수송량은 강설시 50~150 W/m², 적설시 100~200 W/m²로 50 W/m² 만큼씩 증가하였다.

표 4-4 겨울철 현열속 평균값(1999. 12.~2004. 2.).

	겨울평균	무강설시	강설시	적설시	강설+적설시
현열속	54.6	42.1	105.8	148.9	118.0

#### 4-4-2 잠열속

겨울철 평균 및 무강설 기간동안의 잠열수송량은 0~300 W/m<sup>2</sup> 범위에 걸쳐서 비교적 광범위하게 분포하는 것으로 나타났으나, 주(主) 범위는 0~150 W/m<sup>2</sup>에서 약 85%정도를 차지하였다. 강설현상 발생시는 100~250 W/m<sup>2</sup> (83%)로 상승하였고, 적설시에는 강설시와 비슷하여 100~250 W/m<sup>2</sup> 범위에서 85%의 비율을 차지하였으나, 발생비율에 있어서 하한값은 감소하고 상한값은 다소 증가하였다(50~100 W/m<sup>2</sup> 13.2 → 9.5%, 250~300 W/m<sup>2</sup> 1.9 → 4.8%).

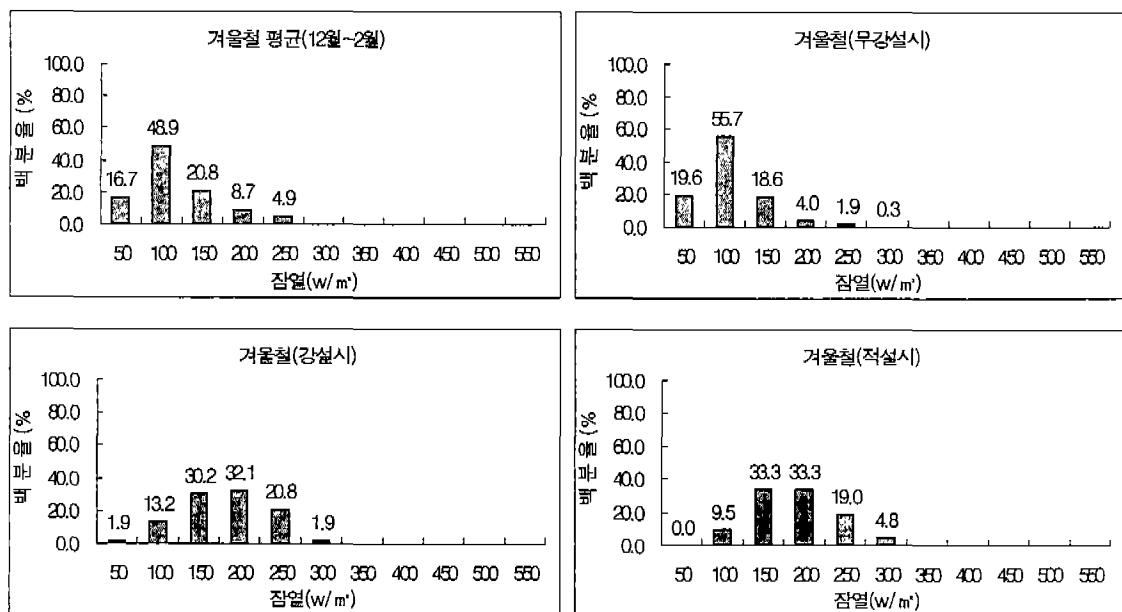


그림 4-12. 강설 및 적설시 잠열속(제주, 1999. 12.~2004. 2. 5년간).

표 4-5 겨울철 잠열속 평균값(1999. 12.~2004. 2.).

	겨울평균	무강설시	강설시	적설시	강설+적설시
잠열속	94.4	81.6	155.3	171.7	160.0

#### 4-4-3 난류속(현열+잠열)

해양은 대기의 온도, 습도, 기압변화 등 기단의 변화에 영향을 미친다.



해양-대기 상호작용에 의한 열수지는 열전도, 증발, 복사에 의해서 일어나는데, 해양과 대기의 온도차가 생기면 전도에 의한 열전달(현열)이 일어난다 (그림 4-12). 증발에 의한 열손실(잠열)은 해양에서 대기로 이동되는 열량의 2/3정도로, 대기가 보다 건조하고 불안정할수록 증발은 더욱 가속된다. 증발은 또한 해양의 온도가 대기온도보다 높을 때 특히 현저하다. 즉, 해양과 접촉한 대기는 상층의 대기보다 더 더워지고 따라서 밀도가 낮아져서 대기의 하부층이 불안정하게 되며, 이때 해양과 접촉한 대기는 습기를 함유하여 상승하게 된다. 이것이 대기현상에 커다란 영향을 준다

무강설 및 겨울철평균 난류속의 분포 범위는 0~550 W/m<sup>2</sup>로 상당히 광범위하게 나타난다. 그러나 70~80%가 50~200 W/m<sup>2</sup> 범위에 분포하고, 강설시는 250~400 W/m<sup>2</sup> 범위 내에서 73.6%, 적설시는 300~400 W/m<sup>2</sup>에서 70%를 기록하였다. 강설 및 적설이 진행될수록 300~400 W/m<sup>2</sup> 분포비율이 강화되었다.

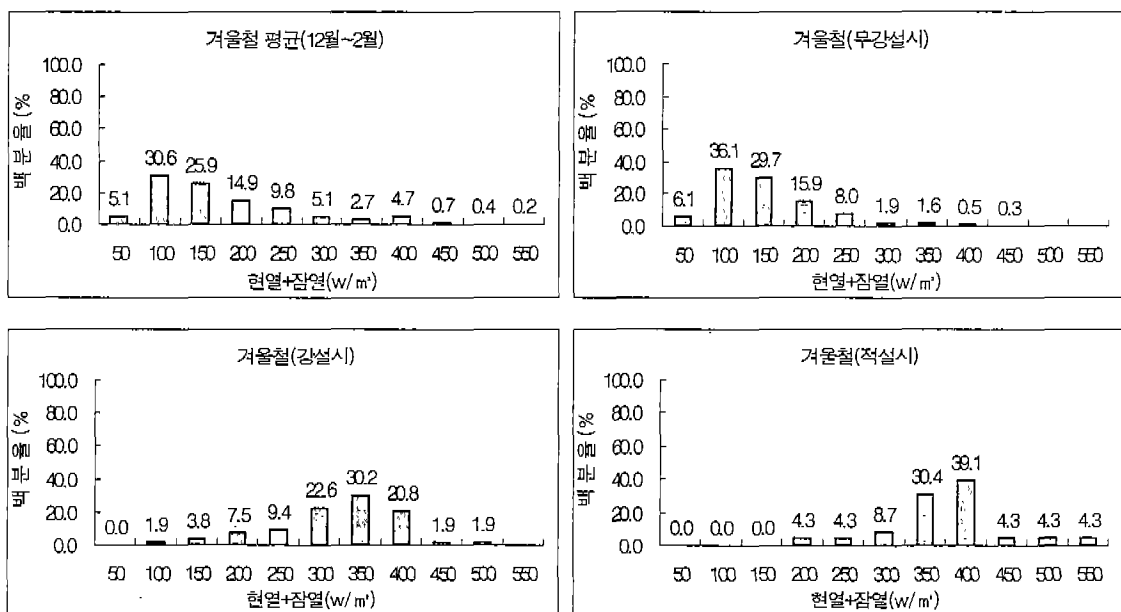


그림 4-13. 강설 및 적설시 난류속(제주, 1999. 12.~2004. 2. 5년간).

(그림 4-13)은 1999년 12월부터 2004년 2월까지 겨울철 5년 동안, 제주지역의 강설 및 신적설과 난류속(현열, 잠열, 현열+잠열)과의 관계를 그래프로 표현하였다. (그림 4-13)에 의하면 제주지역의 강설 및 적설시 난류속 분포는 300~400 W/m<sup>2</sup> 범위에서 비교적 잘 일치하는 것으로 분석되나, 일부분 강설 및 적설이 발생하지 않은 경우도 있어 주의가 요구된다. 또한 강설시와 적설시의 난류속 분포범위는 그 구분의 명확하지 않게 나타났다.

표 4-6 겨울철 난류속 평균값(1999. 12.~2004. 2.).

	겨울평균	무강설시	강설시	적설시	강설+적설시
난류속	149.0	123.7	261.2	320.6	278.0

#### 4-4-4 보웬비(Bowen's ratio)

보웬비(Bowen's ratio)란 현열과 잠열의 비를 말한다. 여기서 보웬비는 극값이 “1”이 아니며, 제주지역은 겨울철에 0.2~1.2까지 비교적 광범위하게 분포한다. 무강설시 0.4~0.6(80.4%) 정도인 보웬비는 강설이 시작되면서 0.6~0.8(92.5%), 적설로 기록되는 시점에서는 0.8~1.0(95%)까지 상승하였다. 평균값은 무강설시 0.5, 강설시 0.7, 적설시 0.9로 나타났다(표 4-7).

(그림 4-14)는 제주지역의 강설 및 적설시 보웬비 분포를 나타낸 그림으로 강설시 기준값 0.7을 중심으로 비교적 잘 일치하는 것으로 분석되나, 일부분 일치하지 않은 경우도 있어 주의가 요구된다.

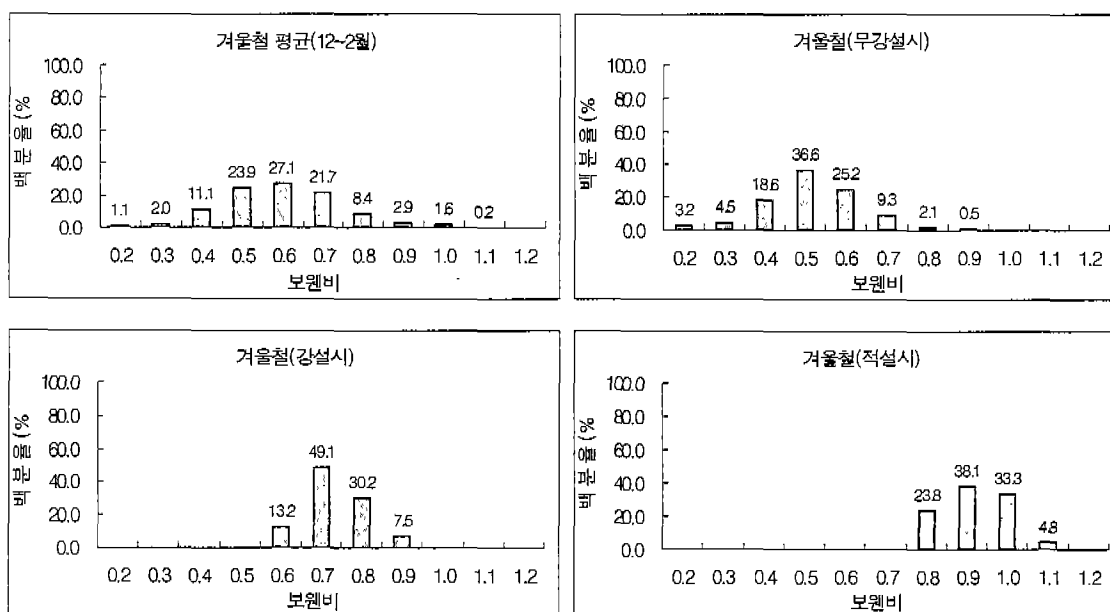


그림 4-14. 강설 및 적설시 해기차(제주, 1999. 12.~2004. 2. 5년간).

표 4-7 겨울철 보웬비 평균값(1999. 12.~2004. 2.).

	겨울평균	무강설시	강설시	적설시	강설+적설시
보웬비	0.5	0.5	0.7	0.9	0.7

#### 4-4-5 해기차

겨울철 해기차 분포는 1~15℃ 범위에서 평균값 약 8℃(7.8), 강설시 10℃, (9.8), 적설시에는 11℃(10.8)의 값을 갖는다 (그림 4-15).

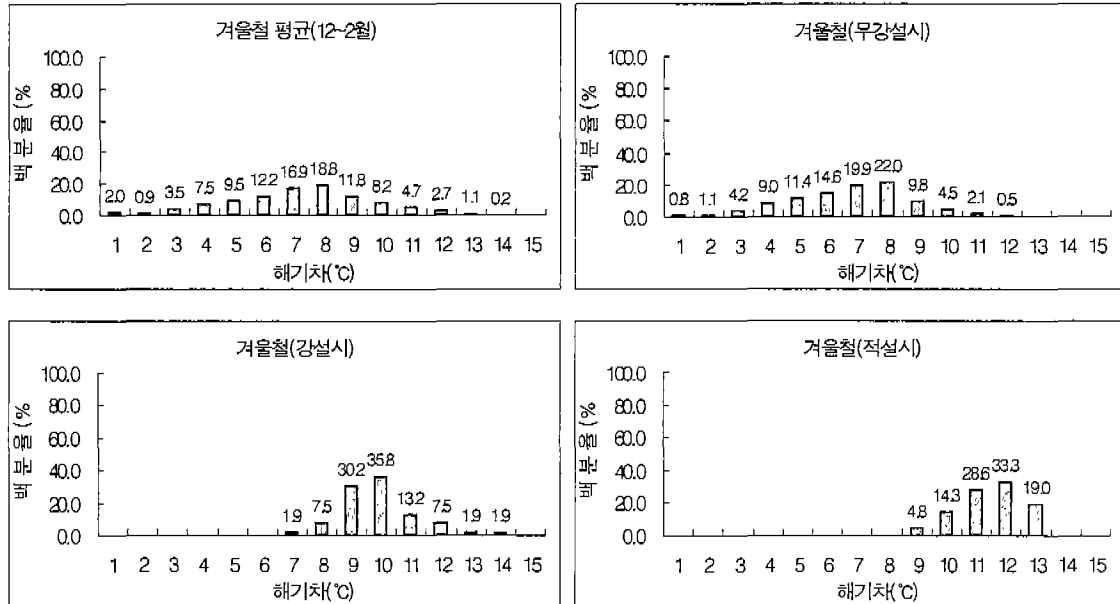


그림 4-15. 강설 및 적설시 해기차(제주, 1999. 12.~2004. 2. 5년간).

표 4-8 겨울철 현열속 평균값(1999. 12.~2004. 2.).

	겨울평균	무강설시	강설시	적설시	강설+적설시
해기차	6.8	6.1	9.8	10.9	9.4

#### 4-5 강설현상 발생시 열수송량 범위

강설현상 발생시 해양에서 대기로 이동되는 열수송량의 정규분포를 통하여 열속의 절대량을 파악하였다. 이러한 결과를 토대로 제주지방의 강설현상이 발생되기 위한 열속 수송범위를 현열과, 잠열, 보웬비를 이용하여 정량관계를 파악하여 그 기준값을 선정하였으며, 여기에는 1999년 12월~2004년 2월까지 5년간 겨울철 강설/적설자료를 이용하였다. (그림 4-16)에 현열과 잠열의 합으로 표현되는 난류수송량과 강설현상 발생시의 관계를 시계열로 표현하여, 사례분석을 통하여 난류속 기준값을  $300 \text{ W/m}^2$  선정하고 이때의 강설현상 발생 유무를 살펴보았다. (그림 4-17)은 같은 기간 동안에 강설현상과 보웬비의 관계를 기준값 0.7선을 절대량으로 하여 강설현상 예측가능성을 살펴보았다. 사례분석을 통하여 제주시에 강설현상이 발생되기 위한 최소한의 조건은 난류수송량은  $300 \text{ W/m}^2$  이상(효율 74%), 보웬비는 0.7 이상(81%) 되어야 하는 것으로 나타났다. 여기서 한가지 주의할 점은 난류수송량( $300 \text{ W/m}^2$ ), 과 보웬비(0.7)가 위에서 밝힌 절대량을 넘어서기만 한다면 눈이 내린다는 것이 아니라 그 가능성이 점점 높아짐을 의미하며, 경우에 따라서는 두가지 강설 예측인자를 상호 보완적으로 적용하면, 그 만큼 강설현상 예측가능성이 증가한다는 의미이다. 예를 들면 난류수송량의  $300 \text{ W/m}^2$ 을 넘었음에도 불구하고 강설현상이 발생치 않았다면, 이때에 현열과 잠열의 비로 표현되는 보웬비를 살펴서 그 기준값을 넘어서는지 확인하여 최종적으로 강설현상 발생 유무를 예측해야 할 것이며, 이 경우에도 이 두 요소는 앞으로도 많은 검증과 보완이 필요한 아직은 객관자료를 보조하는 보조자료로서의 활용가치만 있는 예측인자임을 밝혀 두고자 한다.

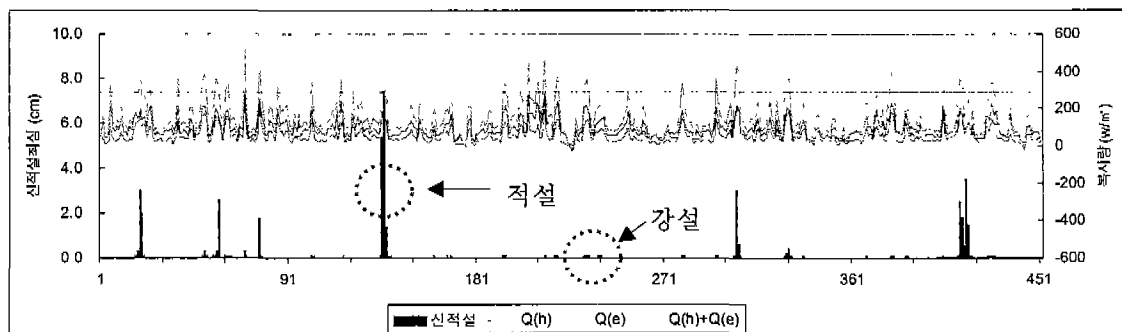


그림 4-16. 난류속(현열+잠열)과 강설 및 신적설(제주, 1999. 12.~2004. 2.).

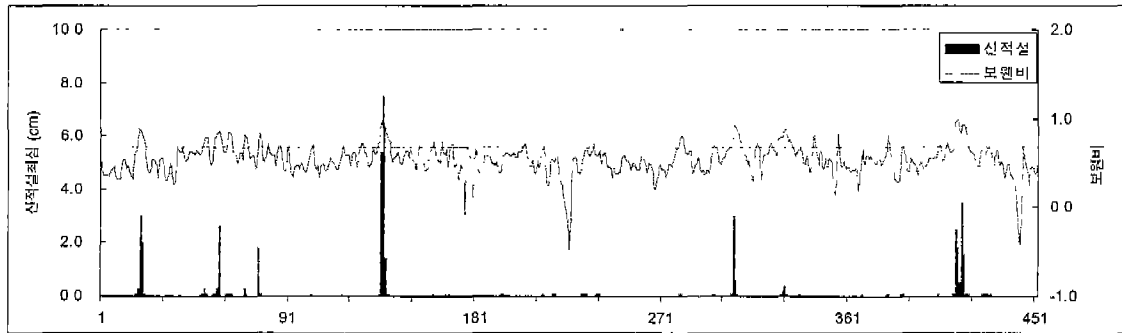


그림 4-17. 보웬비와 강설 및 신적설(제주, 1999. 12.~2004. 2.).

#### 4-6 보웬비를 이용한 적설량 예측(제주)

보웬비와 실황자료(1995~2004, 10년)를 근거로 하여 제주시의 겨울철 신적설량을 예측하고자 하였다. (그림 4-18)은 제주지방기상청의 신적설량과 이때의 보웬비를 이용하여 상관관계를 분석한 그래프이다. 상관관계는 1차함수적으로 선형 양(+)의 비례상관 관계에 있으며 이때의 상관도(R)는 0.68이었다. 10년간 실황자료를 바탕으로 살펴보면(그림 4-19) 보웬비 0.80시 신적설량 0.1~1.0 cm, 보웬비 0.88시 신적설량 1.1~5.0 cm, 보웬비 0.98일 경우는 신적설량 5.1 cm 이상 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 제주시를 중심으로 제주지방의 적설량 예측은 (그림 4-18)의 1차선형회귀식(보웬비 =  $0.032 \times \text{신적설량} + 0.7949$ )을 이용하는 방법과, (그림 4-19)의 실황자료에 의한 보웬비에 따른 적설량 분포범위를 이용하는 방법이 있는데, 이 또한 상호보완 적용해야 할은 물론이다.

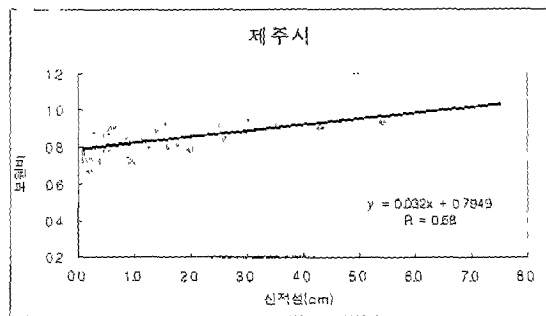


그림 4-18. 보웬비와 적설량과의 상관도(제주).

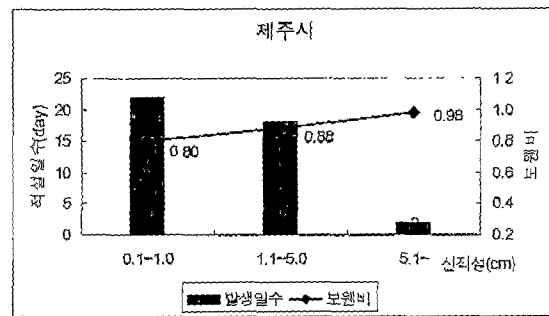


그림 4-19. 보웬비에 따른 적설량 발생분포(제주).

#### 4-7 보웬비를 이용한 적설량 예측(제주산간)

(4-6장)이 제주시를 중심으로 제주도 해안지방에 적설량을 예측하였다면, (4-7장)에서는 한라산을 중심으로 제주산간의 적설예보 및 특보운영을 위하여 한라산 어리목 자료(한라산연구소)를 근거로 하여 신적설량을 예측하고자 하였다. (그림 4-20)은 한라산국립공원관리사무소(한라산연구소)의 신적설량과 이때 제주도북부해상의 보웬비 상관관계를 분석한 그래프이다. 상관관계는 1차함수적으로 선형 양(+)의 비례상관 관계에 있으면서, 이때의 상관도(R)는 0.74로 제주시보다 다소 그 효율에 있어서 앞서는 것으로 나타나면서, 동계 적설량 예측인자로 어느 정도 효용성이 있는 것으로 나타났다. 2002~2004년(2년)까지 어리목 실태자료를 근거로 보웬비에 따른 신적설량 발생범위를 살펴보면, 보웬비 0.65일 신적설량 0.1~10 cm, 보웬비 0.71일 신적설량 11~20 cm, 보웬비 0.94일 경우는 신적설량 21 cm 이상 나타났다 (그림 4-21). 따라서 제주시를 중심으로 한 해안지역에서는 보웬비 0.7 이상 일 때 강설이 시작되어 보웬비가 0.8 정도로 상승하면 눈이 쌓이기 시작하는데 반하여, 한라산 어리목을 중심으로한 제주산간에는 보웬비 0.65일 때 이미 강설현상이 발생하고 제주시에 눈이 내리기 시작하는 보웬비 0.7정도 시기에는 이미 11~20 cm 정도의 적설량을 기록한다는 점이다.

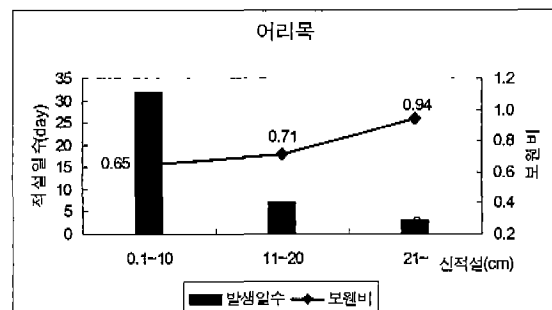
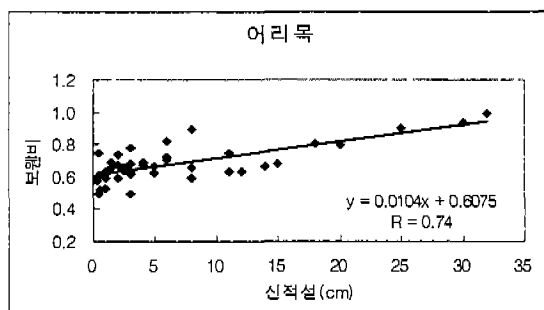


그림 4-20. 보웬비와 적설량과의 상관도(한라산). 그림 4-21. 보웬비에 따른 적설량 발생분포(한라산).

#### 4-8 강설 및 적설시 열수지 시계열 패턴

(그림 4-22)와 (그림 4-23)은 강설 및 적설발생시 시간대별 열수지 발생의 전형적인 시계열 패턴을 표현한 그림이다(2004.1.20~22). 이러한 전형적인 패턴이 발생되기 위한 조건은 지상풍속이 최소한 6.0 m/s 이상 되어야 하는 것으로 나타났다. 바람이 어느 정도 불어주어야만 현열과 잠열에 관여하는 해기차와 수증기압차가 벌어지고, 이는 결과적으로 해양에서 대기로 방출되는 열수송량 기준값( $300 \text{ W/m}^2$ )에 근접하게 되는 것이며, 바꾸어 말하면 바람이 약하게 불 때는 현열과 잠열이 절대량이 낮아지고 따라서 앞서 설명한 강설현상 조건 등은 모두 무의미한 자료가 된다. 따라서 이러한 패턴을 적용하기 위해서는 선행조건을 세심하게 살펴보아야 한다. 시계열 발생패턴은 적설과 강설시의 구분은 뚜렷치 않으나 강설시작 시에는 열속이 급격히 상승하면서 계단식으로 증가하는 형식을 보인다.

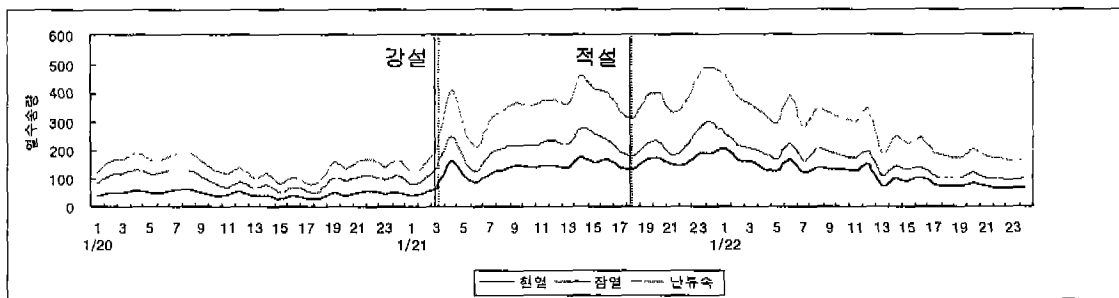


그림 4-22. 강설 및 적설시 열수지 시계열 패턴(현열, 잠열, 난류속).

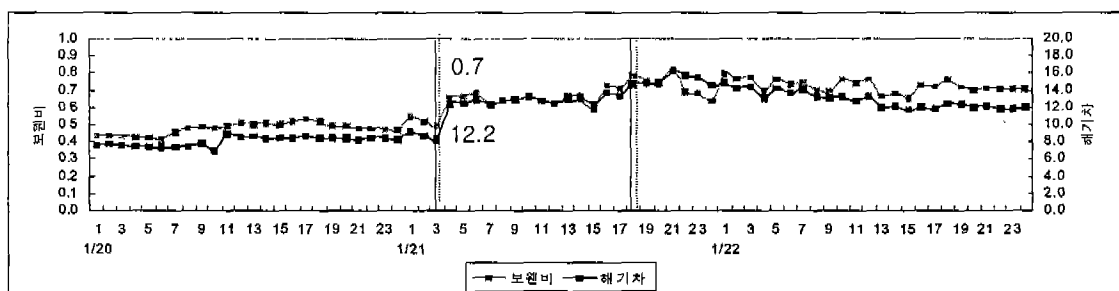


그림 4-23. 강설 및 적설시 열수지 시계열 패턴(보웬비, 해기차).



#### 4-9 종관장 분석(사례일 선정)

강설 및 적설발생시 종관장 분석을 위하여 cP확장에 의한 전형적인 사례(2건)을 선정하여 그 특성을 종합 분석하였다. 첫째는 2004년 1월 21일~22일 동안 제주도 전역에 강설 및 적설량을 기록한 사례로 22일 저녁에 성산지역 신적설최심 8.1 cm를 기록한 사례이다. 두번째 사례 역시 cP확장에 의해서 강설현상이 발생하고 제주 남동부 지역을 중심으로 적설량을 기록한 경우로, 2003년 12월 19일부터 20일 오전까지 강설현상이 있었던 경우이다.

##### 4-9-1 지상, 500 hPa 일기도

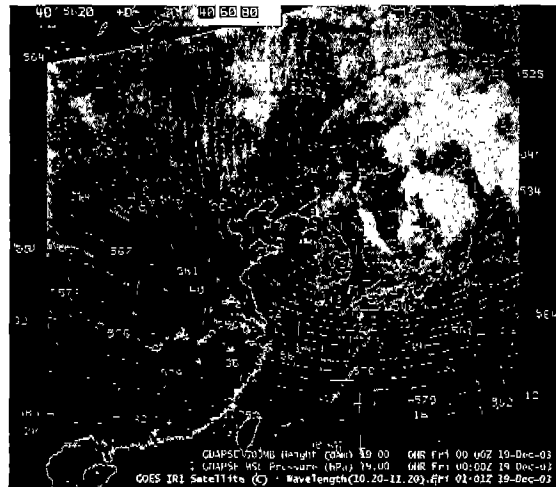
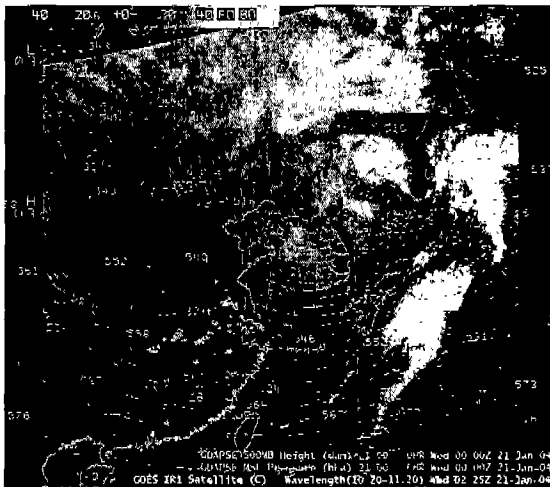


그림 4-24. 지상, 500 hPa(2004. 1. 21. 09시).    그림 4-25. 지상, 500 hPa(2003. 12. 19. 09시).

2004년 1월 21일 지상에서는 바이칼호 남쪽에 중심을 둔 찬 대륙성 고기압이 화남지방으로 확장하면서 영향을 미치고 있고, 대화퇴 부근에 위치한 저기압은 계속 발달하면서 매우 느리게 북동진하고 있어 한반도 주변의 기압경도력이 강하게 유지되었다. 500 hPa에서는 동쪽의 강한 ridge의 저지로 만주지방에 중심을 둔 cold low가 역회전 하면서 생성시킨 단파골이 우리나라 상공에서 맴돌면서부터 강한 한기를 지속적으로 유입시켰다(그림 4-24).

2003년 12월 19일은 전형적인 서고동저의 기압배치로, 몽골리아에 중심을 둔 찬대륙고기압이(1053 hPa) 남동쪽으로 그 세력을 확장하면서 우리나라 부근은 등압선 간격이 매우 조밀하고 해상의 바람도 강하게 불었다. 상층의 한기와 더불어 강한 와의 회전이 진행되면서 제주산간에서는 대설 가능성이 예보되었다. 500 hPa에서는 만주 지방의 절리저기압이 강한 와를 이루면서 한반도를 지나 동해상으로 진출이 예상되지만 상층 한기와 더불어 강한 와의 회전에 의해 한기가 계속 한반도 상공으로 남하하였다(그림 4-25).

#### 4-9-2 850 hPa 기온, 포차

두 사례 모두 850 hPa 하층에 습윤구역이 존재하였는데, 서해상에서 제주도를 거쳐 남동쪽해상까지 멀리 그리고 폭넓게 포차 3~5℃구역이 분포하였다. 2004년 1월 21일 12UTC 실황은 한반도에 강한 온도골이 형성되어 있고 제주도는 -16℃선이 지나고 있다. 2003년 12월 19일 12UTC 역시 한반도에 강한 온도골이 형성되면서 (제주 -10℃선 통과) 서로 비슷한 양상의 분포를 보였다(그림 4-26, 4-27).

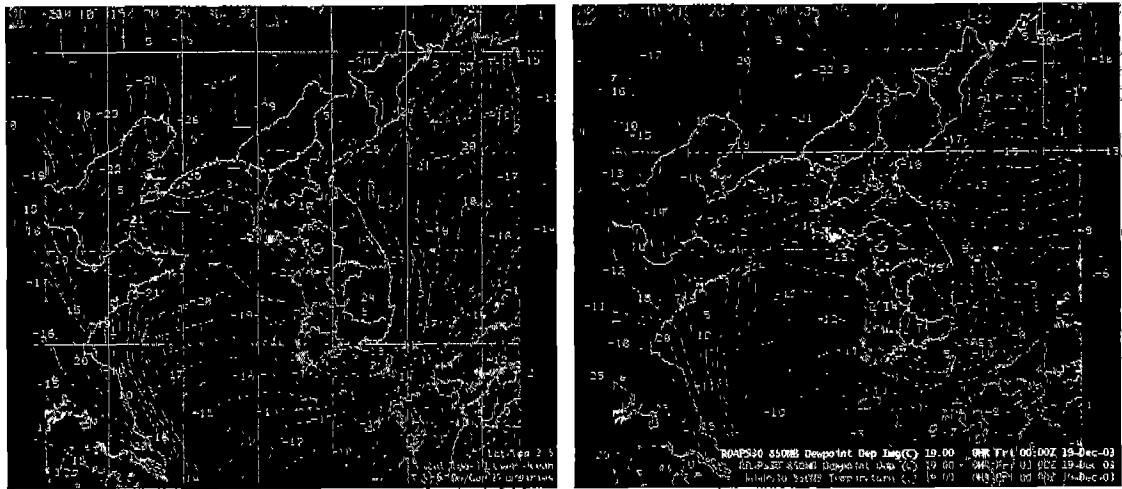


그림 4-26. 850 hPa 기온, 포차(2004. 1. 21. 21시). 그림 4-27. 850 hPa 기온,포차(2003. 12. 19. 21시).

#### 4-9-3 850hPa 상당온위, 500hPa 소용돌이도위

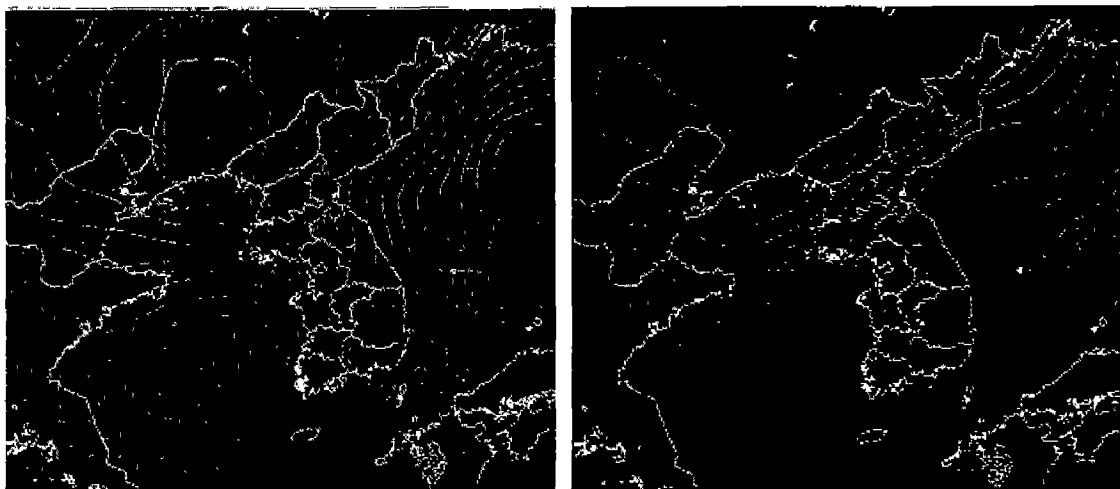


그림 4-28. 850 hPa 상당온위  
500 hPa 소용돌이도위(2004. 1. 21. 21시).

그림 4-29. 850 hPa 상당온위  
500 hPa 소용돌이도위(2003. 12. 19. 21시).

2004년 1월 21일 12UTC 925 hPa 상당온위(적색실선) 분포와 500 hPa 위치소용돌이도(이미지)를 분석한 결과, 하층에는 상대적으로 따뜻하고 습윤한 공기가 분포하고 있고, 상층에는 발해만 부근으로 폭넓게 양(붉은색)의 IPV가 분포하고 있어 상층에서 하층으로 건조역이 하강하여, 서해상 및 제주도 부근해상으로 불안정이 발생하였다. 2003년 12월 19일의 경우도 비슷하게 나타났다(그림 4-28, 4-29).

## 4-10 강설 및 적설시 대기의 연직단면

### 4-10-1 Wind, 상대습도, Moisture Flux Divergence

(그림 4-30, 4-31)의 연직단면도는 초기자료로 부터 강설 peak 시간대의 예상도를 분석한 그림이다. 2004년 1월 20일 12UTC에는 700 hPa까지 북서류가 유입되었고(2003년 12월 19일은 500 hPa), 연직방향의 풍향쉬어는 매우 약할 것으로 예상하였다. 제주도 북서쪽 해상에서는 상층공기의 침강으로 중상층은 건조하고(상대습도 10% 내외) 하층은 850 hPa을 중심으로 상대습도 70~80% 구역이 위치하여 상대적으로 습하게 예측하였다. 이러한 예측값은 당일의 실태분석을 통하여 분석한 결과 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

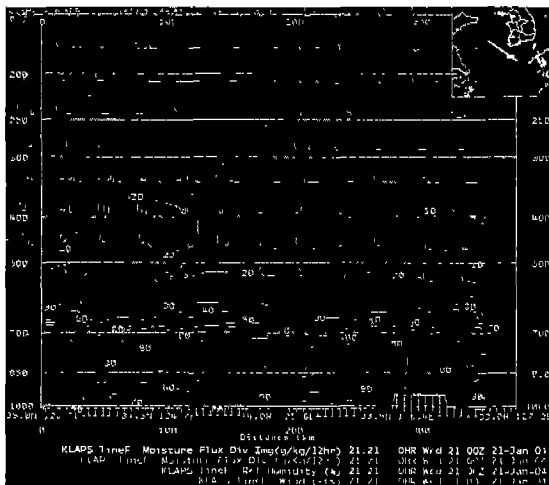


그림 4-30. 대기의 연직단면(2003. 12. 19. 21시).

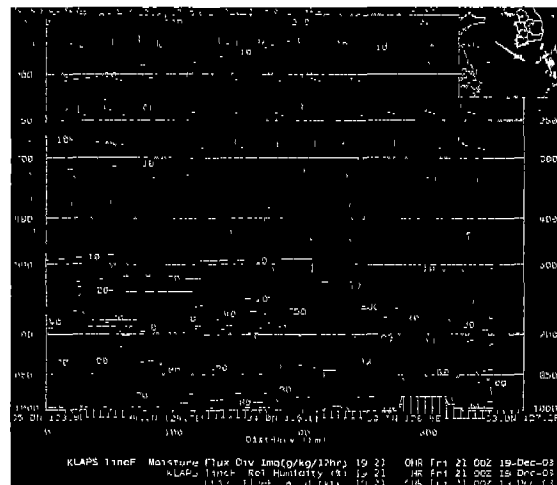


그림 4-31. 대기의 연직단면(2003. 12. 19. 21시).

### 4-11 대기선도 분석

2004년 1월 21일 00UTC, 고산 대기선도에는 약 770 hPa 부근에 역전층이 존재하는데, 이는 상층으로부터의 차고 건조한 공기의 침강에 의해 형성된 것으로, 상층에는 건조역이 나타나고 있고 하층에는 습윤역이 존재한다. 역전층이 고도는 21일 12UTC에 700 hPa 까지 상승하였는데, 이는 차가운 북서기류가 상대적으로 따뜻한 서해상을 지나면서 대기와 해양간에 열교환량에 따른 불안정도의 증가에 의해 나타난 눈구름대의 발달과 운정고도의 상승을 의미한다. 하층 바람(지상~700 hPa)은 점차 북서류로 바뀌면서 20 KT 이상 강해졌다. 2003년 12월

19일 00UTC 역시 비슷한 양상으로, 상층으로부터 차고 건조한 공기의 침강에 의한 단열압축 승온으로 형성된 역전층은 750 hPa 부근에 나타났다(그림 4-32, 4-33).

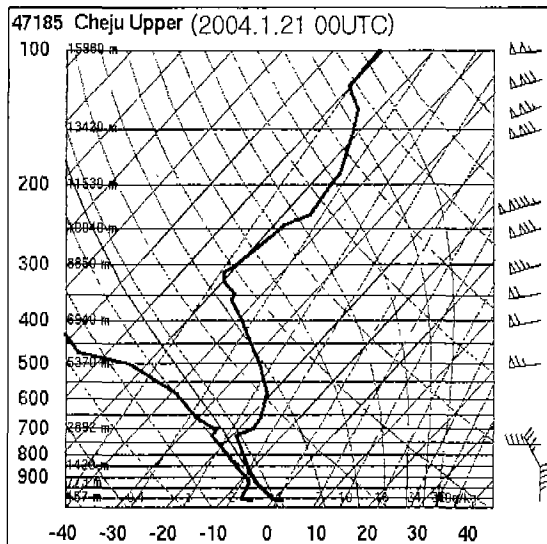


그림 4-32. 고산 대기선도(2004. 1. 21. 09시).

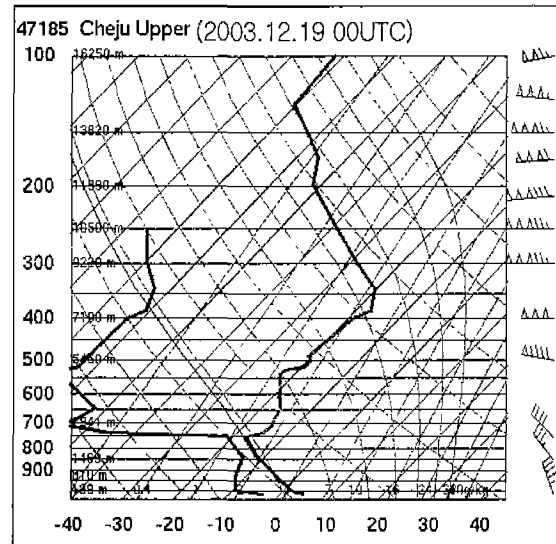


그림 4-33. 고산 대기선도(2003. 12. 19. 09시).

#### 4-12 위성 및 레이더영상 분석

위성 및 레이더영상 자료는 cP가 확장하면서 서해상으로 적운과 발달한 웅대적운으로 구성된 전상의 구름열(근상운, cloud street)이 풍향에 나란하게 형성되어 나타나고 레이더 영상에는 약한 강수에코가 나타났다. 운정고도는 3 km 내외로 상당히 발달된 일부지역을 제외하면 운층의 두께는 거의 일정하게 나타났다(그림 4-34, 4-35).

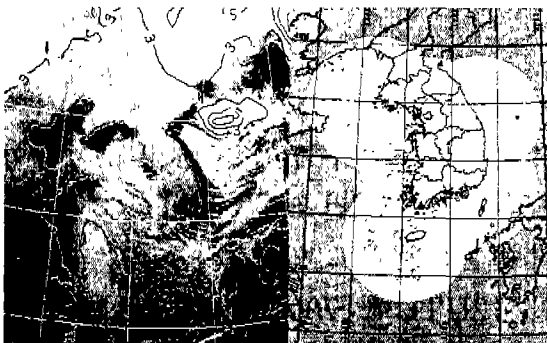


그림 4-34. 위성 및 레이더영상(2004. 1. 21. 21시).

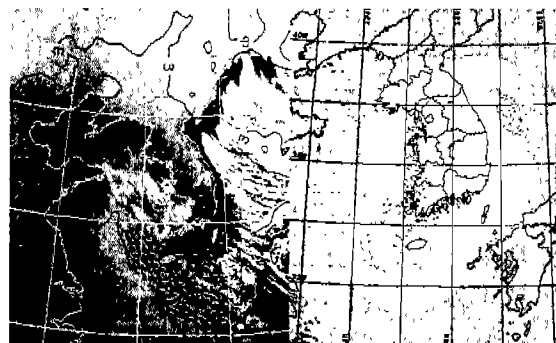


그림 4-35. 위성 및 레이더영상(2003. 12. 19. 21시).

## 제5장 해무 사례분석

### 5-1 안개발생 분포

2000년부터 2004년까지 제주지방기상청과 서귀포기상대의 자료를 이용하여 안개발생일수를 조사하였다. 제주도 지역별해무(안개) 발생일수를 (표 5-1)과 (그림 5-1)에 나타내었다. 2개 지점 총 안개발생일수는 제주와 서귀포 각각 75일과 119일이었으며 강수를 동반한 안개는 44일(59%)과 98(82%)로 나타났다. 이러한 결과는 과거 보고서(해양기상특성집 1997, 제주지방기상특성집 1999)와 유사한 결과를 보이는 것이다.

표 5-1 지역별 연간 안개발생일수(2000년~2004년).

지점 강수유무	제주지방기상청						서귀포기상대					
	2000	2001	2002	2003	2004	합계	2000	2001	2002	2003	2004	합계
강 수 시	9	13	8	6	8	44 (59%)	10	10	23	32	23	98 (82%)
무강수시	4	5	16	3	3	31 (41%)	4	0	8	3	6	21 (18%)
합 계	13	18	24	9	11	75	14	10	31	35	29	119

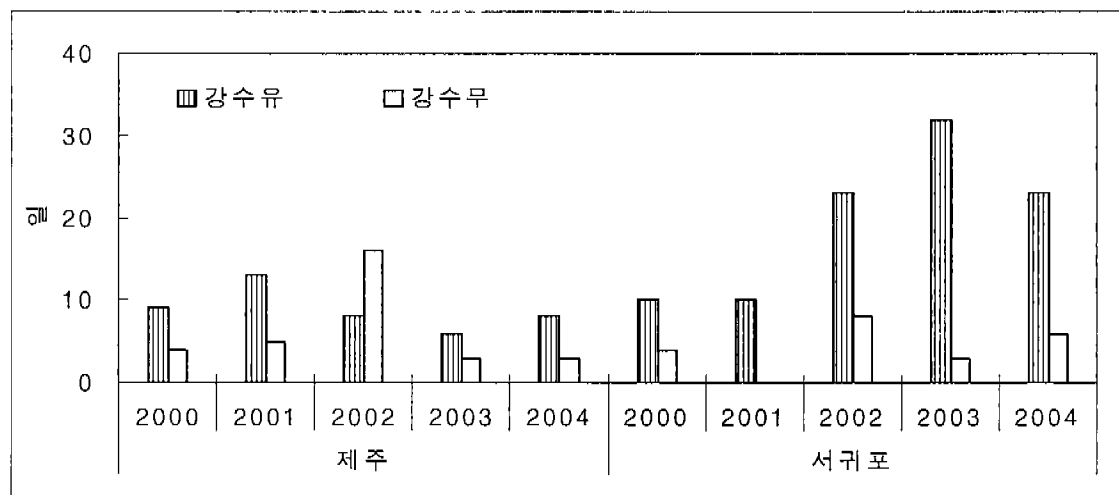


그림 5-1. 제주도 지역별 연간 안개발생일수(2000년~2004년).

그러나 2002년도 제주시지역이 강수현상을 동반하지 않은 안개가 많았으며 제주시 16일이었고 서귀포지역은 대체로 강수를 동반한 안개가 주를 이루고 있다. 월별로 자료를 살펴보면 3월에서 10월까지 안개가 발생하고 있었다. 특히 늦봄과 여름에 집중되어 있다. 이 기간동안은 바다의 수온이 기온보다

낮은 시기이며 이류무가 많을 것으로 판단된다. 따라서 2002년도 제주도 북부에서 관측된 안개(해무)자료를 이용하여 좀더 세부적인 해무분석과 열수지에 대한 상관관계를 조사하였다.

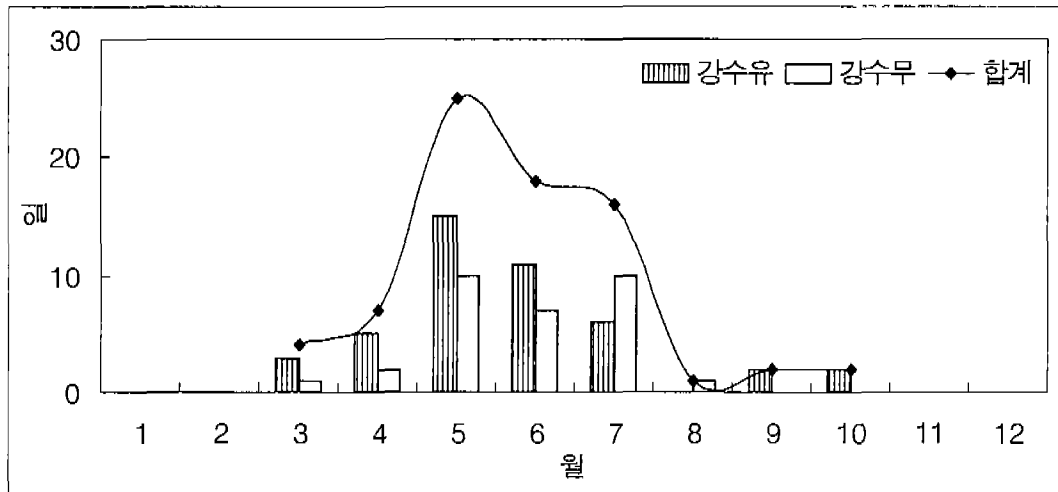


그림 5-2. 제주시 지역 월별 안개발생일수((2000년~2004년).

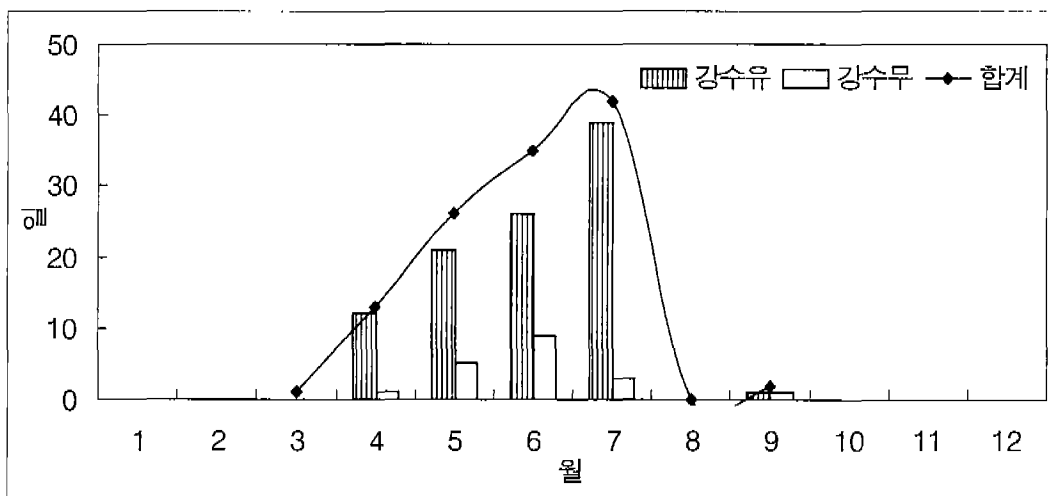


그림 5-3. 서귀포지역 월별 안개발생일수(2000년~2004년).

(그림 5-2)와 (그림 5-3)은 제주시와 서귀포지역의 월별 안개발생일수이다. 조사 기간동안 월별 안개발생일수를 보면 5, 6, 7월에 집중되어 있었다. (표 5-3)의 월별안개발생일수를 보면 5~7월까지 각각 안개발생일수는 제주시의 경우 25, 18, 16일로 전체의 79%, 서귀포는 26, 35, 42일로 87%를 차지하고 있어 4월까지 포함하면 90%가 넘는 비율을 차지한다. 따라서 제주도 지방의 안개는 계절적으로는 봄철(5월)과 여름철(6, 7)에 주로 발생함을 알 수 있으

며 같은 기간 월별 현상일수 평년값(표 5-2)을 살펴보면 제주시는 3.2, 4.3, 3.3일(년 안개현상일수 15일)로 72%(10.8일)을 차지하고 있으며 서귀포 84%의 비율을 차지하고 있어(2001, 한국기후표) 제주도 지방은 5~7월에 많은 안개가 발생하고 있다 (그림 5-4).

표 5-2 제주도지역 평년 안개현상일수.

지점	월											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
제주시	0.1	0.3	1.0	1.8	3.2	4.3	3.3	0.3	0.5	0.2		%
서귀포	0	0.1	0.2	2.2	3.5	6.4	5.7	0.2	0.1	0.1		%

표 5-3 제주도지역 월별 안개발생일수(2000년~2004년).

지점	월 년도	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
제주시	2000	0	0	2	2	2	2	5	0	0	0	0	0	13
	2001	0	0	0	0	8	6	1	0	2	1	0	0	18
	2002	0	0	2	2	7	3	9	1	0	0	0	0	24
	2003	0	0	0	0	5	2	1	0	0	1	0	0	9
	2004	0	0	0	3	3	5	0	0	0	0	0	0	11
	합 계	0	0	4	4	17	11	15	1	2	1	0	0	55
	월평균	0	0	2	2	5	4	4	1	2	1	0	0	%,
서귀포	2000	0	0	0	0	3	7	3	0	1	0	0	0	14
	2001	0	0	0	1	2	6	1	0	0	0	0	0	10
	2002	0	0	0	6	6	9	10	0	0	0	0	0	31
	2003	0	0	1	5	5	4	19	0	1	0	0	0	35
	2004	0	0	0	1	10	9	9	0	0	0	0	0	29
	합 계	0	0	1	13	26	35	42	0	2	0	0	0	119
	월평균	0	0	1	3	5	7	8	0	1	0	0	0	



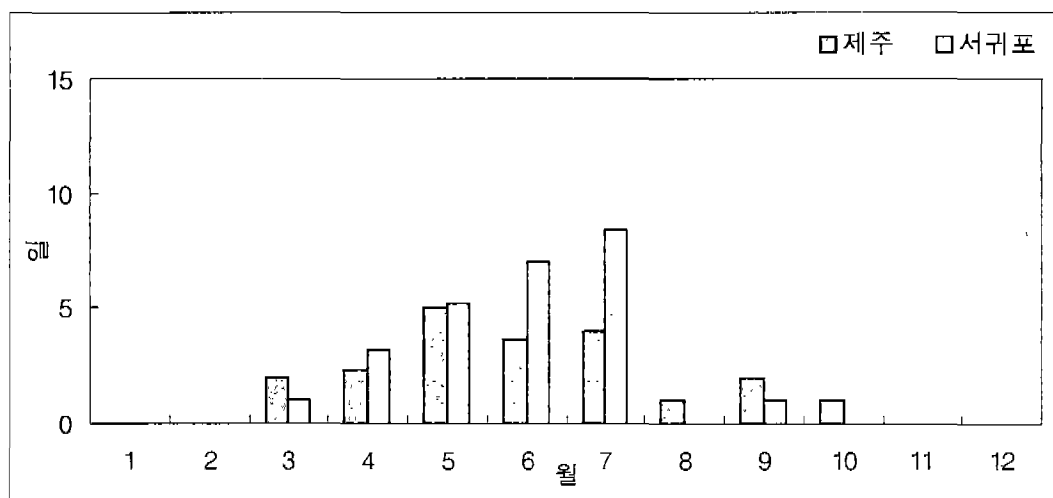


그림 5-4. 제주도지역 월평균 안개발생일수(2000년~2004년).

## 5-2 해무(이류무) 발생 특성

이류무는 차가운 지면이나 수면 위로 따뜻한 공기가 이동해 오면 이 공기의 밑부분이 냉각되고 포화되어 생기는 안개로써 주로 찬 해수면 위로 이동하면서 해상에서 발생하는 전형적인 해무이다. 이류무에는 계절풍 등과 같이 안정된 풍계가 탁월한 기간에 습하고 따뜻한 공기가 찬 지표면 위로 운반되어 생기는 연안지방의 몬순안개, 해상에 생기는 해무, 해양성 열대기단 안에 생기는 열대기단안개 등으로 나누기도 한다. 전형적인 해무인 이류무는 바다 가운데 위치한 제주도의 지형 여건상 가장 많이 발생하는 안개로써 봄철 제주도가 난역에 위치하였을 때 남풍계열의 바람이 유입되면서 주로 발생하고 있다.

이류 공기괴의 냉각은 주로 공기괴와 지표면의 온도차에 비례하고 풍속이 너무 강하면 난류에 의한 수직 혼합이 왕성해져 안개가 발생하지 않고 바람이 너무 약하면 대기가 안정층을 형성하여 접지역전에 국한된 안개를 발생시킬 뿐이다(제주지방기상특성집 1999).

제주지방의 안개는 기온이 수온보다 높은 4월에서 8월에 걸쳐 많이 발생하고 있으며 이류무 발생 가능성이 높다. 따라서 본 조사기간인 2000년부터 2004년까지 제주도 지역에 발생한 강수를 동반하지 않은 안개에 대해 이류무로 간주하고 조사하였다. 강수를 동반하지 않은 안개는 제주시가 31일, 서귀포가 21일(18%)로 나타났으며 이를 이용하여 전형적인 해무인 이류무에 대해 분석하고 열수지와와의 관계를 좀 더 자세히 살펴보도록 하겠다.

### 5-2-1 해무지속시간

(그림 5-5)와 (그림 5-6)은 제주시와 서귀포지역의 안개지속시간을 나타낸 도표이다. 조사 기간동안 안개 지속시간은 제주시의 일평균은 2시간 39분으로 나타났으며 서귀포는 4시간 2분이었다. 2004년 6월 27일 10시간 45분과 2000년 6월 25일 17시간 13분이 제주시와 서귀포에서 가장 긴 시간동안 해무가 발생하였다. 이류무는 전선무나 증기무에 비해 안개지속시간이 길며 특히 고산지역이 제주나 서귀포 보다 지속시간이 긴 것으로 알려져 있다(조 등, 1999).

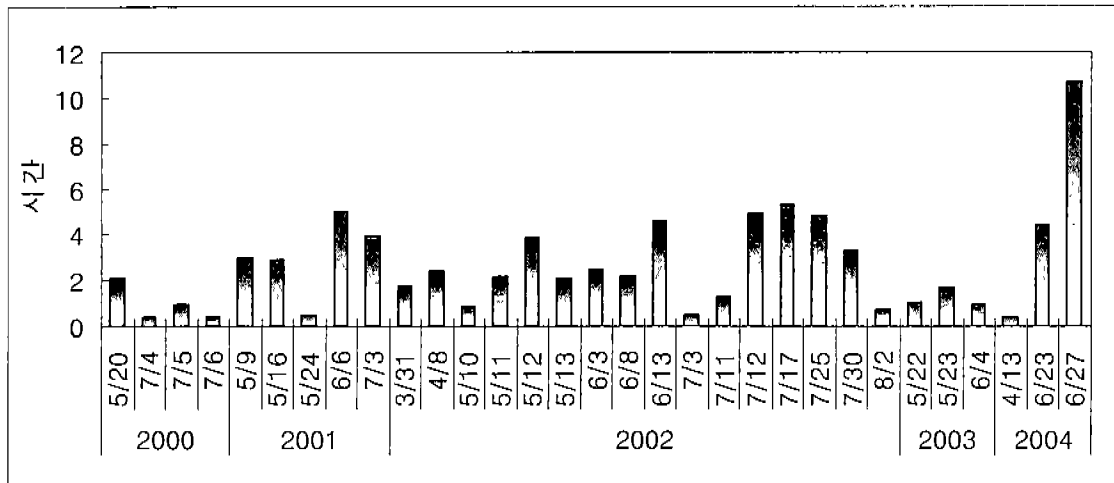


그림 5-5. 제주시지역 안개지속시간(2000년~2004년).

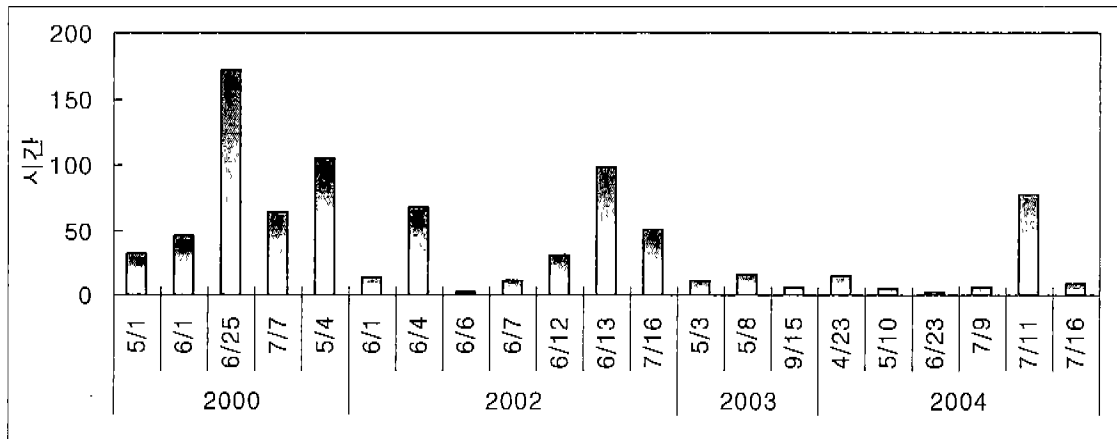


그림 5-6. 서귀포지역 안개지속시간(2000년~2004년).

#### 5-2-2 안개 시작 및 종료시간

(그림 5-7)과 (그림 5-8)을 살펴보면 해무의 발생시간은 제주시 지역은 새벽녘인 06시와 아침녘인 09시에 많이 발생하고 있으며 해무 종료시간은 아침녘인 06~08시 사이와 12경이 가장 많았다. 서귀포지역은 03~06시 사이에 많이 안개가 발생하여 4시, 7시, 9시경에 많이 소멸되고 있다.

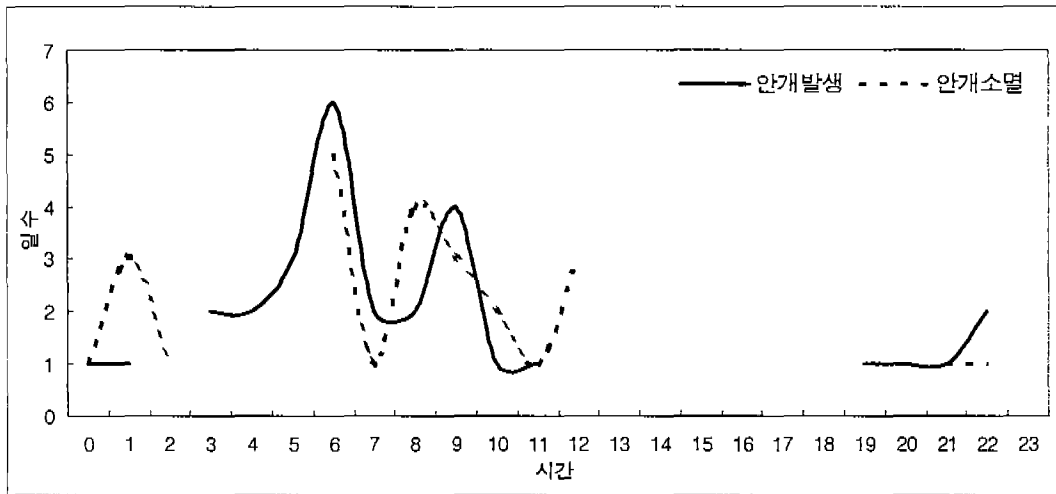


그림 5-7. 제주시지역 안개발생 및 소멸시간(2000년~2004년).

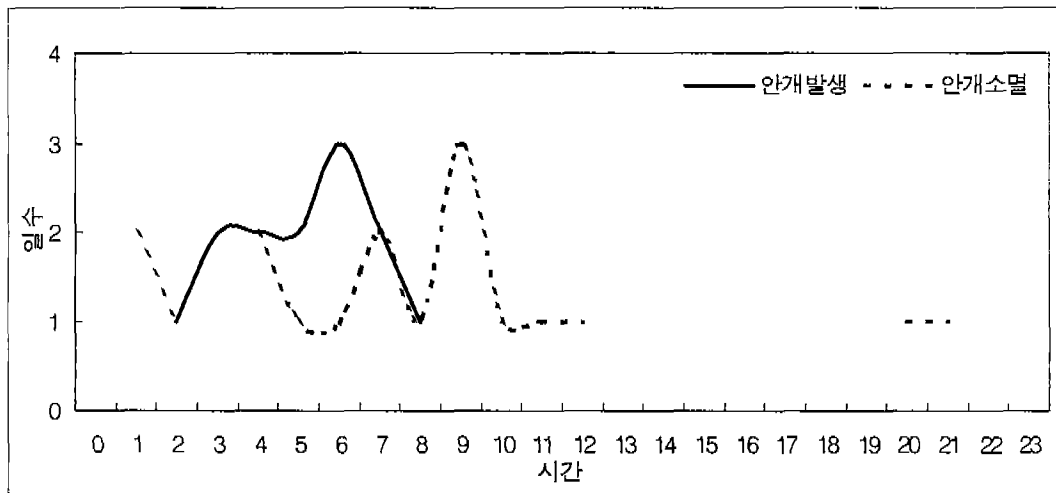


그림 5-8. 서귀포지역 안개발생 및 소멸시간(2000년~2004년).

### 5-2-3 안개 지속시 풍향

(그림 5-9)와 (그림 5-10)을 보면 해무 발생 및 소멸시 풍향을 살펴보면 제주시 NW풍, 서귀포 SW-SE풍에서 많이 발생하고 있으며 발생시 같은 방향인 NW풍 내지 SW-SE풍과 NNE풍에서 각각 소산하고 있다.

조 등(1999)에 의하면 이류무 발생시 제주시는 N풍계열 고산지역은 S풍계열의 바람이 많은 것으로 보고되고 있으나 본 조사에서는 제주와 고산 모두 NW풍과 NE풍에서 주로 발생하고 있었다.

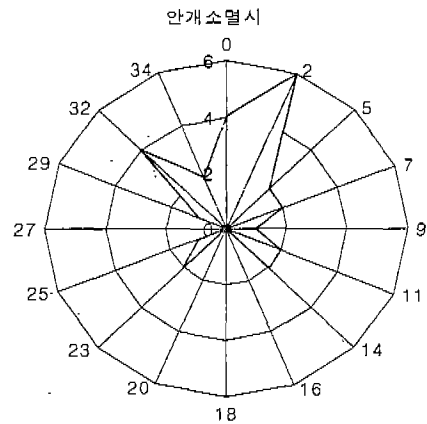
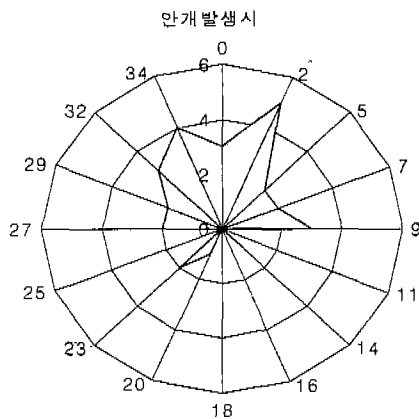


그림 5-9. 제주시지역 안개발생 및 소멸시 풍향(2000년~2004년).

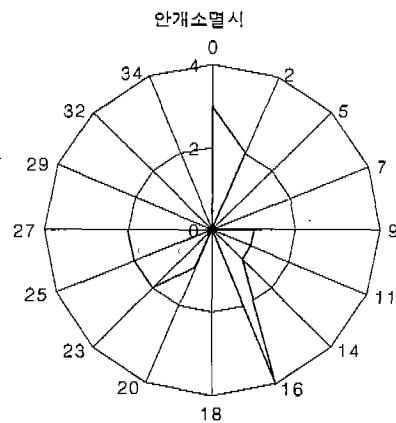
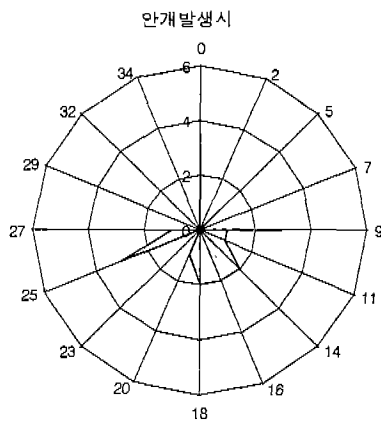


그림 5-10. 서귀포지역 안개발생 및 소멸시 풍향(2000년~2004년).

#### 5-2-4 안개 지속시 풍속

(그림 5-11)에서 제주시 지역의 해무는 1~2 m/s의 바람에서 많이 발생하고 소멸하며, 4 m/s 미만의 풍속에서 대부분 발생하고 소멸하고 있다. (그림 5-12)에서 서귀포 지역의 해무도 비슷한 풍속인 0~3 m/s에서 발생하며 소멸은 이보다 1~2 m/s 강한 1~4 m/s에서 소멸하고 있다. 따라서 제주시 지역의 해무는 비슷한 풍속에서 발생하여 소멸하지만 서귀포지역의 해무는 비교적 약한 풍속에서 발생하여 3~4 m/s의 발생시 보다 좀더 센 바람이 불면서 소멸되고 있다.

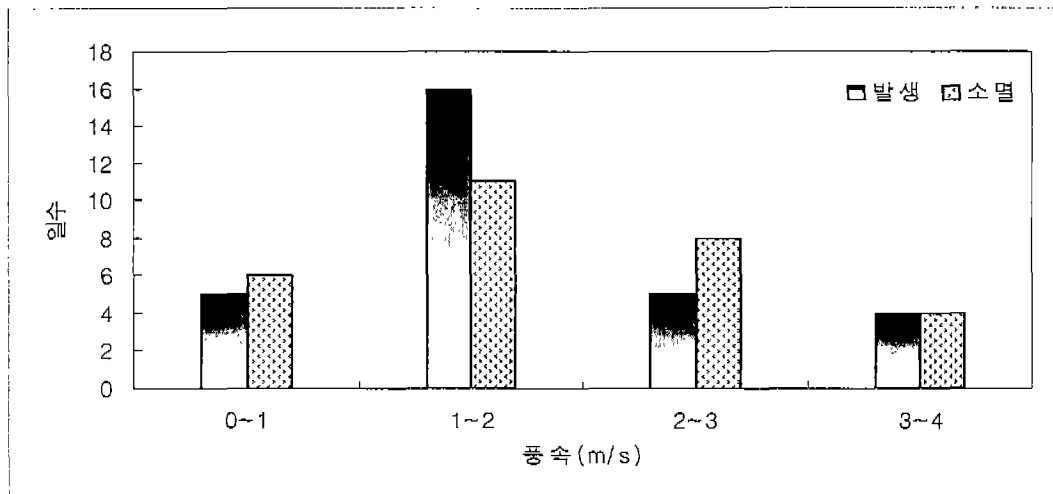


그림 5-11. 제주시지역 안개발생 및 소멸시 풍속(2000년~2004년).

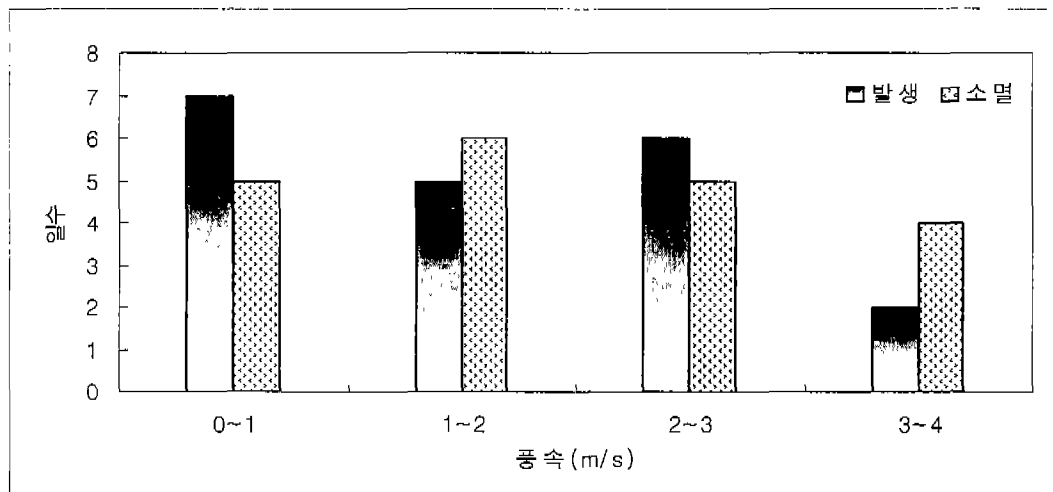


그림 5-12. 서귀포지역 안개발생 및 소멸시 풍속(2000년~2004년).

#### 5-2-5 안개 지속시 해기차

연간 해기차의 변화를 알아보기 위해 2002년과 2003년의 수온과 기온의 차(해기차)를 절대값으로 계산하여 (그림 5-13)에 나타내었다. 2002년도는 계절 별로 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 2.1, 2.4, 3.5, 6.0℃ 였으며 2003년은 각각 2.4, 2.2, 2.7, 6.7℃의 분포를 보였다. 겨울철에 비교적 해기차가 크게 나고 있으며 봄철과 여름철이 겨울철과 가을철에 비해 낮은 편이다. 기온이 수온보다 높을 때 안개가 많이 발생하고 있다. (그림 5-14)에 나타난 것과 같이 3~4월부터 남서쪽에 온난한 이동성 고기압이 우리나라를 지날 때 해상의 찬 해면 위를 지나면서 안개가 발생되는 것으로 보인다.

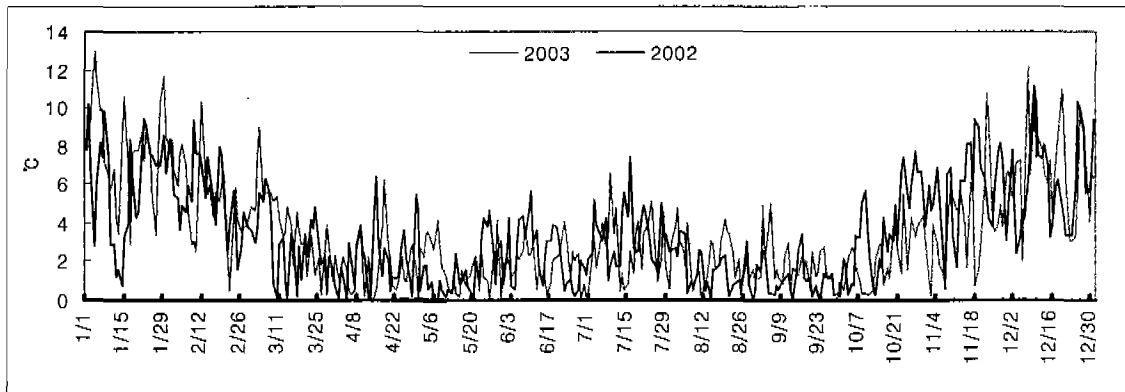


그림 5-13. 연간 해기차 분포(2002년 ~ 2003년 ; 절대값).

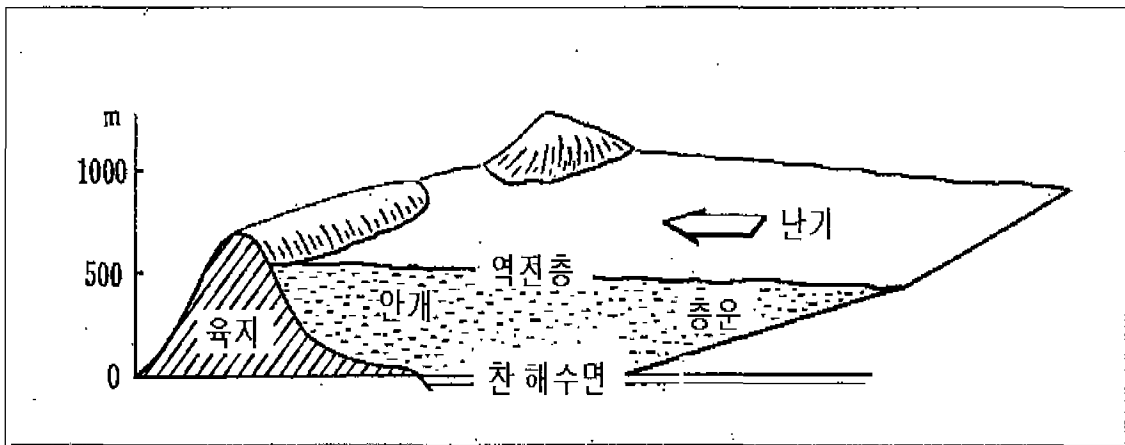


그림 5-14. 해무발생 모식도.

제주도 지방의 안개는 봄과 여름철에 집중적으로 발생하고 있으며(2002, 기상연구소) 특히 해무인 이류무는 기온이 수온보다 높아지는 4월부터 나타나고 있다고 한다.

(그림 5-15)는 해무지속시 해기차를 절대값으로 나타내었다. 해무 발생 중의 해기차는 평균  $1.9^{\circ}\text{C}$ 였으며 월별로 보면 3~8월까지 각각 0.7, 2.9 0.9 1.7, 3.0,  $2.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 이는 봄철과 여름철의 평균 해기차(2002년과 2003년 기준)보다 평균  $0.4^{\circ}\text{C}$  낮은 분포였으나 2000년과 2002년 7월의 일부는 평균보다  $3.0^{\circ}\text{C}$  가량 높아 이례적인 사례를 보이고 있다. 제주부근 연중 수온은 기온보다 높게 분포하고 있으나 5, 6, 7, 8월에는 기온이 수온보다 높게 나타난다(1998, 고 등).

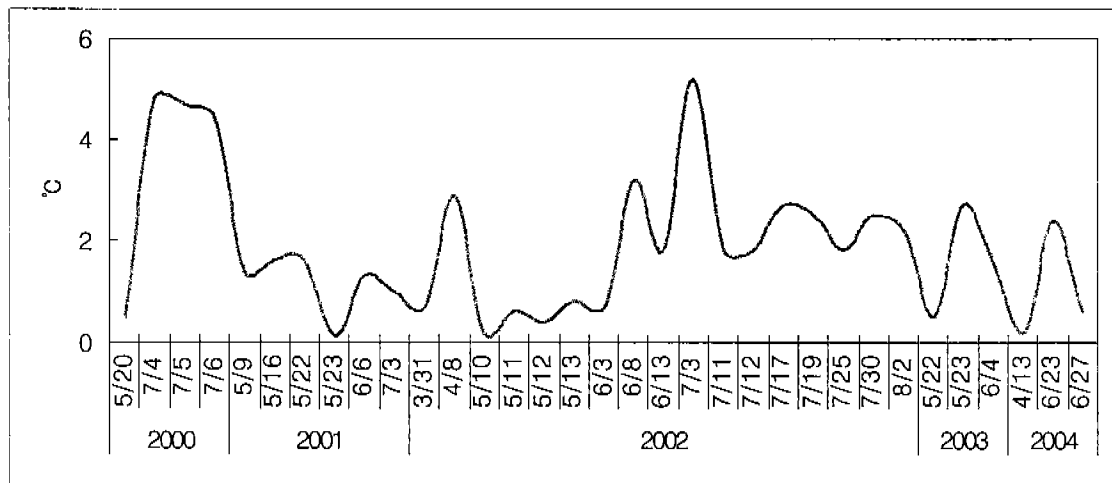


그림 5-15. 해무지속시 해기차(2000년~2004년 ; 절대값).



### 5-3 해무 발생시 열수지 분석

2000년부터 2004년까지 5년간 제주도 북부지역인 제주시의 열수지를 조사하여 제주도 북부 해안지역인 제주시지역의 안개의 특성을 분석하고자 하였다. 현열속과 잠열속이 양(+)의 값을 나타내면 해수면에서 대기로 열이 이동함을 의미하며 반대로 음(-)의 값을 나타내면 해수면으로 열이 이동함을 나타낸다.

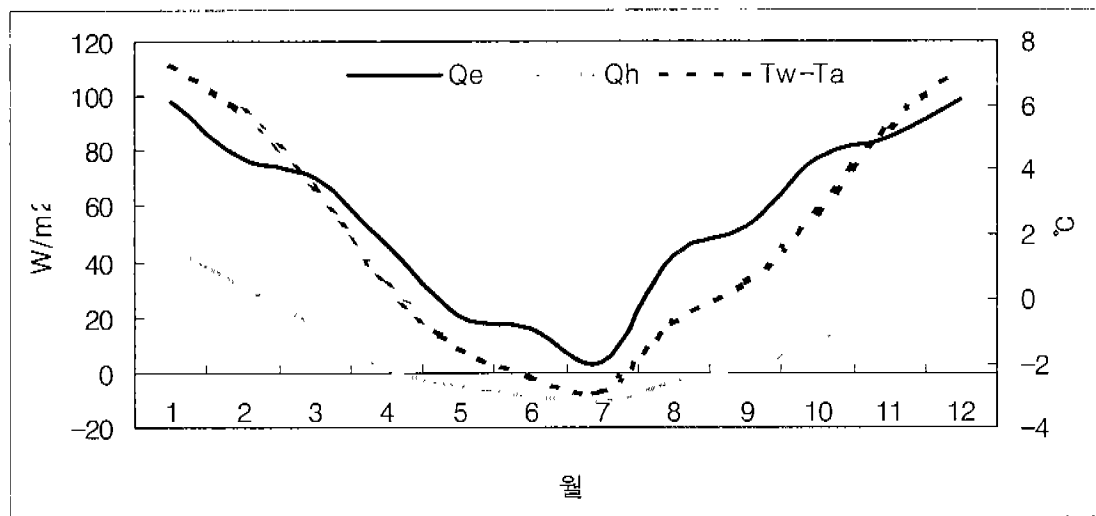


그림 5-16. 제주시지역 월평균 현열속, 잠열속 및 해기차(2000년~2004년).

(그림 5-16)은 5년간 월평균 북부해안지역인 제주시의 현열속(Qh)과 잠열속(Qe) 그리고 해기차를 나타내었다. 해수면에서 대기로 이동되는 월평균 현열속을 살펴보면 계절별로는 봄, 여름, 가을, 겨울의 현열속의 경우 계절별로 각각  $4.8 \text{ W/m}^2$ ,  $-7.6 \text{ W/m}^2$ ,  $12.4 \text{ W/m}^2$ ,  $38.4 \text{ W/m}^2$ 로 나타나고 있어 해기차가 커지는 가을과 겨울에 높게 나타나고 있고 해기차가 적은 봄과 여름에 비교적 낮게 나타나고 있다. 잠열속은 각각  $45.5 \text{ W/m}^2$ ,  $20.5 \text{ W/m}^2$ ,  $71.4 \text{ W/m}^2$ ,  $91.3 \text{ W/m}^2$ 로 나타나고 있으며 여름철에 작게 나타나고 그 밖의 계절에는 높게 나타나고 있다. 계절적으로 볼 때 현열속은 가을과 겨울에 해수면에서 대기로 열을 많이 방출하고 있으나 봄철에는 열속의 이동이 적게 나타난다. 여름철에는 반대로 대기가 해수면으로부터 열이 유입된다.

잠열속의 경우 연중 해수면에서 대기로 방출되고 있으며 여름철에 열속의 이동이 작아진다. 그러나 하계에 대기로 유입되는 열량에 비해 동계에 방출되는 열량이 훨씬 크다. 또한 전형적인 해무인 이류무가 자주 발생하는 5월부터 7월까지 월평균 현열속과 잠열속을 (그림 5-17)에 나타내었다. 현열속의 경우 월별로 각각  $-5.0$ ,  $-8.7$ ,  $-11.2 \text{ W/m}^2$ 이며 5~7월 평균  $-8.3 \text{ W/m}^2$ 의

로 해수면으로 열량이 유입되고 있다. 잠열속은 5~7월 월별 각각  $20.3 \text{ W/m}^2$ ,  $16.1 \text{ W/m}^2$ ,  $3.8 \text{ W/m}^2$ 이며 5~7월 평균은  $13.4 \text{ W/m}^2$ 으로 동계 보다 훨씬 작은 열량이 대기로 방출되고 있다. 따라서 열속은 늦봄인 5월부터 대기의 열이 해수면으로 이동하기 시작하여 한여름인 7월에 가장 많은 열을 대기에서 해수면으로 이동하는 경향을 보이고 있다.

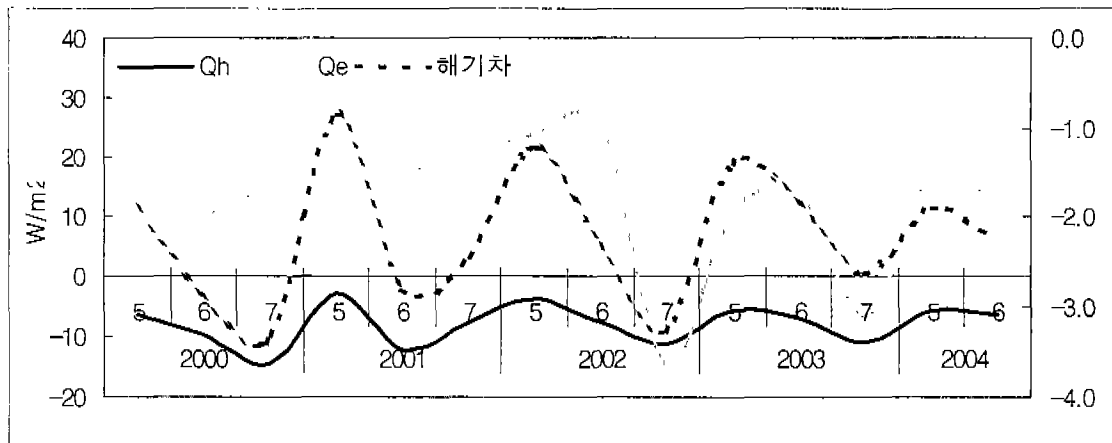


그림 5-17. 제주시지역 5~7월평균 현열속, 잠열속 및 해기차(2000년~2004년).

김 등(1995)에 의하면 제주도 북부 해안지역인 함덕의 경우 한랭기인 겨울철에는 현열 및 잠열의 방출을 통해서 대기에 열량을 공급하고, 온난기인 여름철에는 고온다습한 북태평양고기압의 영향으로 해면온도와 기온의 차가 작아져서 대기로 방출되는 현열과 잠열이 현저히 작아지므로 해양이 대기로부터 얻는 순열속이 증가한다고 한다. 이는 제주도 지역이 해양성 기후로서 해류의 계절변동에 따라 기후의 변동에 많은 영향을 미치고 있으며 따라서 계절에 따라 열수지의 이동이 변하고 있음을 나타낸다.

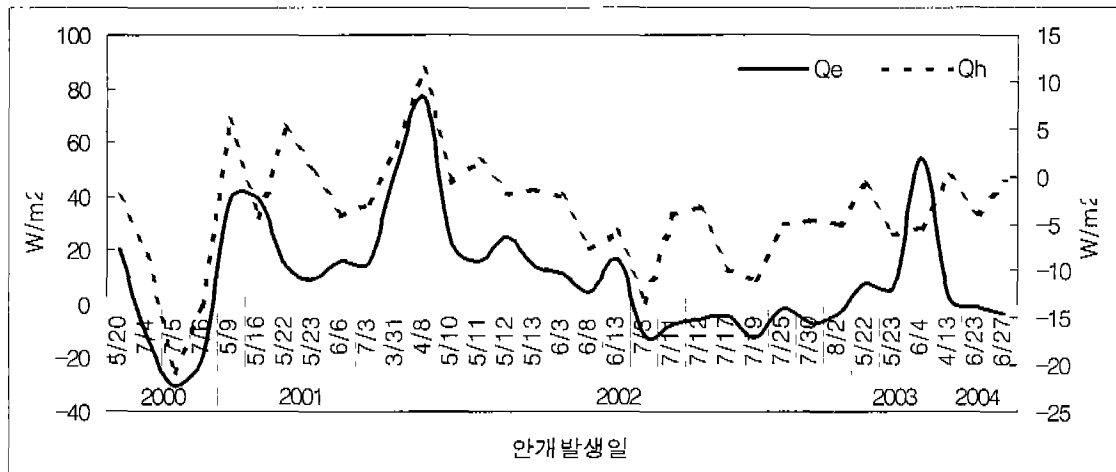


그림 5-18. 제주지역 안개발생시 현열속(Qh)과 잠열속(Qe).

2000년부터 2004년까지 5년간 제주도 북부지역의 안개발생시 현열과 잠열을 (그림 5-18)에 나타내었다. 해무발생시 평균현열은  $-3.8 \text{ W/m}^2$ 로 같은 기간 월평균(5~7월)  $-8.4 \text{ W/m}^2$ 보다  $4.6 \text{ W/m}^2$  높게 나타나고 있으며 잠열속은  $10.4 \text{ W/m}^2$ 로 나타나고 있어 같은 기간 평균잠열속(5~8월)  $14.1 \text{ W/m}^2$ 보다  $3.7 \text{ W/m}^2$  낮게 나타나고 있다.

일반적으로 여름철의 경우 잠열은 대기에서 해양으로 유입되며 이는 해수면에서 수증기의 형태로 나타나게 된다. 7월과 8월에 기온과 수온이 동시에 상승하는데 그 변화폭은 수온이 월등히 높게 나타나고 대기 중 습도 역시 높아지기 때문에 해양에서 대기로의 잠열 공급이 작게 나타나게 된다(1998, 윤 등, 1997, 안 등, 1995, 김 등).

현열속은 해양과 대기의 온도차와 풍속에 의존하며 이를 (그림 5-19)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 풍속이 높음에도 불구하고 현열속의 값은 오히려 낮은 경우가 많으며 반면 해기차가 큰 경우 현열속이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 현열속의 주요인자는 풍속보다는 해양과 대기의 온도이다.

(그림 5-20)에서 잠열속의 경우도 잠열속의 변화인자인 대기의 증기압(Ea)과 포화수증기압(Ew) 역시 기온과 수온의 변화에 따라 크게 변화하므로 기온과 수온이 주요인자이나 잠열속은 그 변화경향이 뚜렷이 나타나지 않는다.

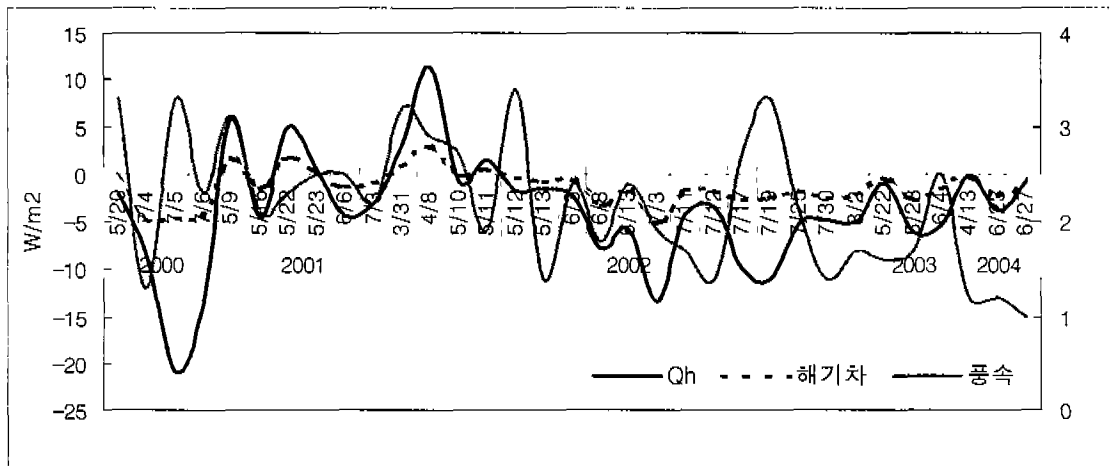


그림 5-19. 제주시지역 해무발생시 현열속, 해기차, 풍속.

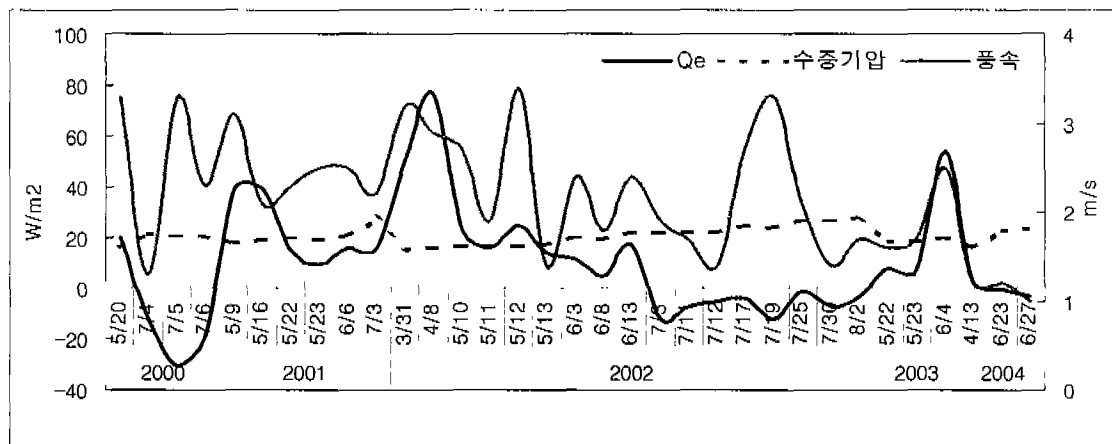


그림 5-20. 제주시지역 해무발생시 잠열속, 수증기압.

제주도 북부지역인 제주시 지역의 해양·대기간 열운반량인 열수지 해석으로부터 해무 발생과의 상관관계를 추정해 본 결과 전형적인 해무인 이류무는 기온이 수온보다 높게 올라가는 3월부터 나타나 8월까지 발생하고 있으며 특히 5~7월에 많이 발생하고 있다. 이 기간 평균 현열속과 잠열속은 각각  $-8.3 \text{ W/m}^2$ 과  $13.4 \text{ W/m}^2$ 로 나타나고 있으며 특히 하계중 7월에는 해무가 자주 발생하는데 이때 현열속과 잠열속이 연중 가장 낮은 값으로  $-11.2 \text{ W/m}^2$ 와  $3.8 \text{ W/m}^2$ 을 나타내고 있다. 또한 해무 발생일 평균 현열속과 잠열속 각각  $-4.9 \text{ W/m}^2$ 과  $1.9 \text{ W/m}^2$ 로 해수면에서 대기로 열수송량이 작거나, 해수면으로 열이 유입될 때 해무의 발생이 잦아지는 것으로 보인다. 따라서 제주 부근해역 및 제주연안지역의 해무(이류무) 발생은 현열속과 잠열속이 낮게 나타날 때 자주 발생하며 이는 해수면에서 대기로의 열속이 작아질 때 해무의 발생가능성이 커짐을 의미한다.

## 5-4 해무 발생사례 선정 분석

### 5-4-1 안개실황

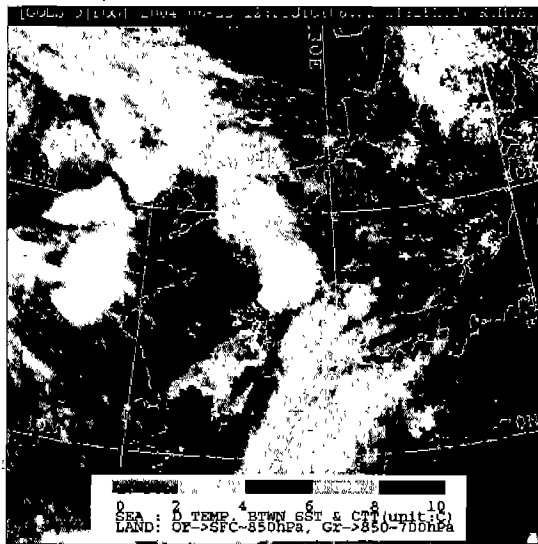
2004년 6월 22일부터 지속적인 박무가 유지되었으며 23일 08시 15분부터 12시 40분까지 4시간 25분 동안 해무가 지속되었다.

표 5-4 안개실황(2004. 6. 23. 08:15~12:40).

구분 지점명	안개 지속 시간	안개 시작 시간	안개 종료 시간	안개 시작전 풍향·속	안개 종료후 풍향·속	기 사
제주시	4.42	6. 23 08:15	6. 23 12:40	NE /0~1	NNE /1~2	- = ~ = '0300 - = '0600 - VS <sub>1</sub> = 0815 - = °0900 - VS <sub>0.5</sub> = 0935 - VS <sub>0.5</sub> = 1030 - = ° 1200 - VS <sub>1</sub> = 1240 -

(그림 5-21)을 통하여 야간 안개분석영상을 살펴보면 2004년 6월 22일 12UTC에 제주도 서쪽해상에 폭넓게 해무가 분포하고 있으며, 22일 20UTC에는 그 세력이 많이 약화되어 제주도 쪽으로 접근하고 있다.

2004년 6월 22일 12UTC



2004년 6월 22일 20UTC

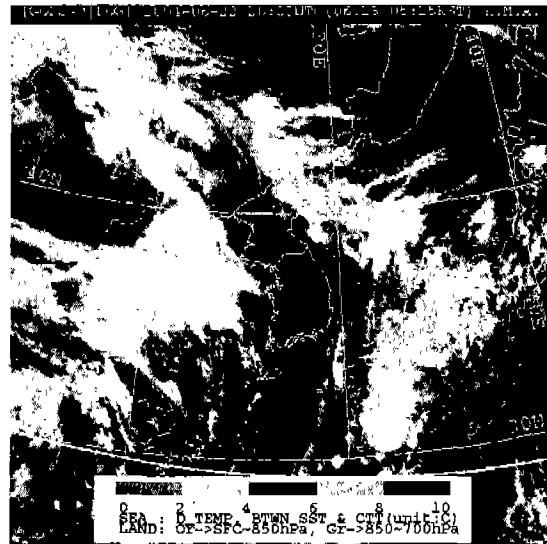
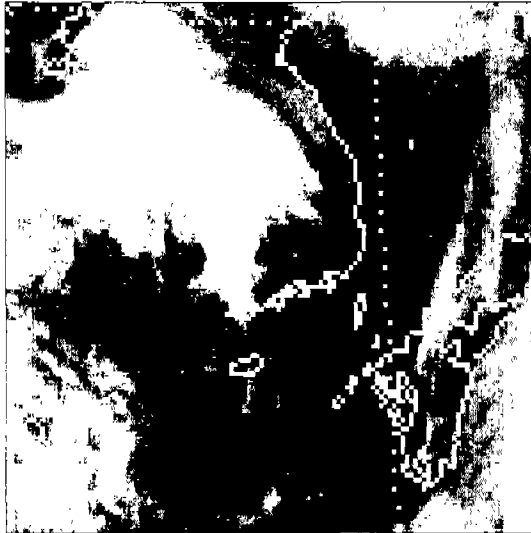


그림 5-21. 해상안개 위성영상(안개분석, 2004. 6. 22.~23.).

(그림 5-22)에서 6월 23일 00UTC의 가시영상을 살펴보면 제주도북부해상을 중심으로 동서로 넓게 하층운이 분포하고 있으며 03UTC의 가시영상에서는 하층운이 소산되어 제주도 주변에는 약한 상층운만이 잡히고 있다. 따라

서 00UTC에 감지된 하층운은 안개로 판단되며 03UTC에는 안개가 소멸하고 없는 영상이다.

2004년 6월 23일 00UTC



2004년 6월 23일 03UTC

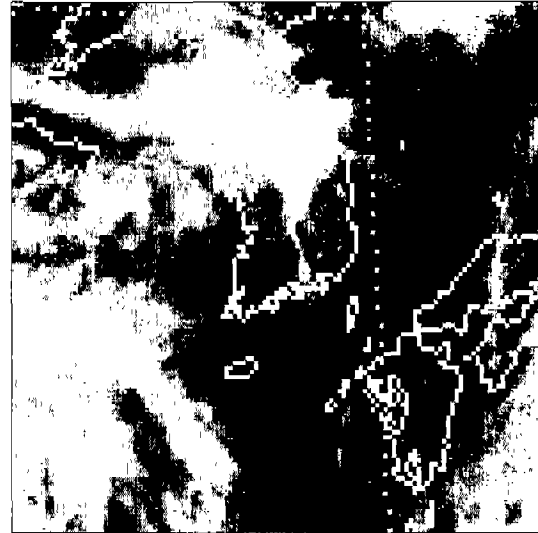


그림 5-22. 해상안개 위성영상(가시영상, 2004. 6. 22.~23.).

#### 5-4-2 제주도주변해역 수온분포

국립수산과학원 한국 근해 광역 수온정보(해양자료속보, 제 2632호)를 살펴 보면(그림 5-23) 2004년 06월 22일부터 28일까지의 한국근해 표면수온은 대마도 근해 22~24℃, 제주도 근해 21~23℃, 이어도 근해 21~22℃, 일향초 근해 19~21℃, 어청도 근해 19~20℃ 내외로 나타난다. 평년에 비해서는 수온이 제주도 근해 1℃ 높게, 이어도 근해 0.5℃ 낮게 나타나고 있다. 수온 전선대는 수온 18℃를 중심으로 진도와 태안반도 연근해역에 나타날 것이며, 제주도-대한해협 서수도 해역에서는 수온 22℃를 중심으로 형성될 것으로 보인다.

(그림 5-24)의 6월23일까지 일주일평균 해수면온도 위성영상에서 제주도 주변해역으로 21~22℃의 분포를 보이며 제주도남부해역은 23℃의 분포를 보이고 있었으나 국립해양조사원의 제주도 검조소에서의 수온분포 18.8~19.6℃보다 2.2~3.4℃ 높게 형성되고 있다.

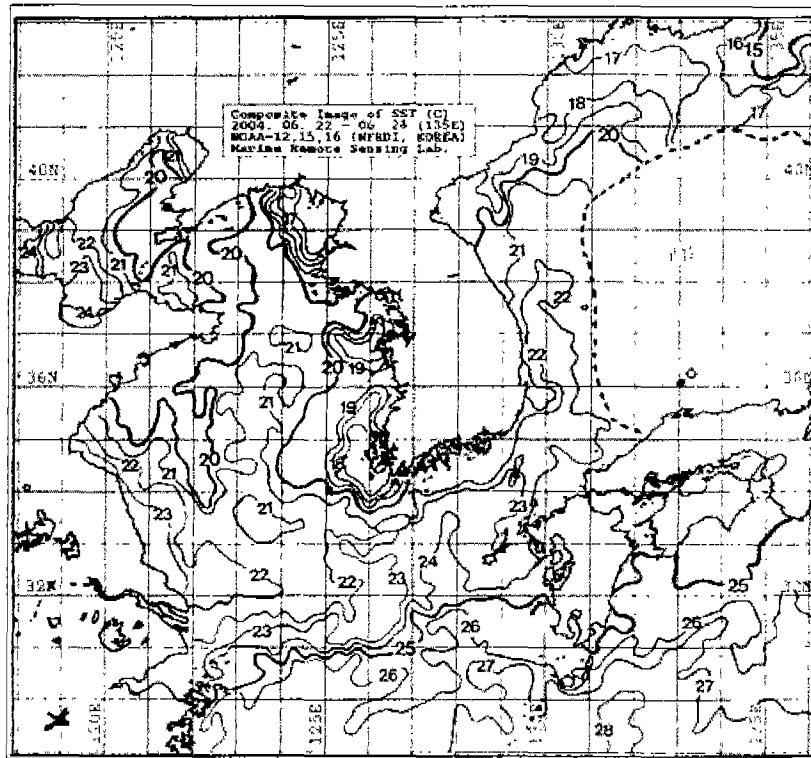


그림 5-23. 해수면 수온분포도(수온분포도, 2004. 6. 22. ~28.).

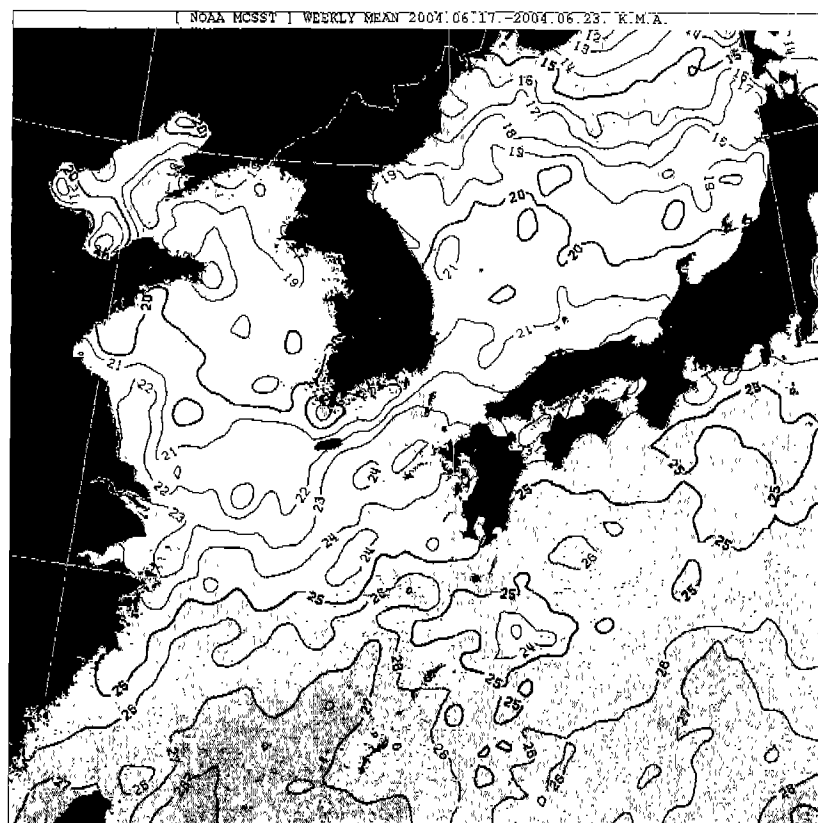
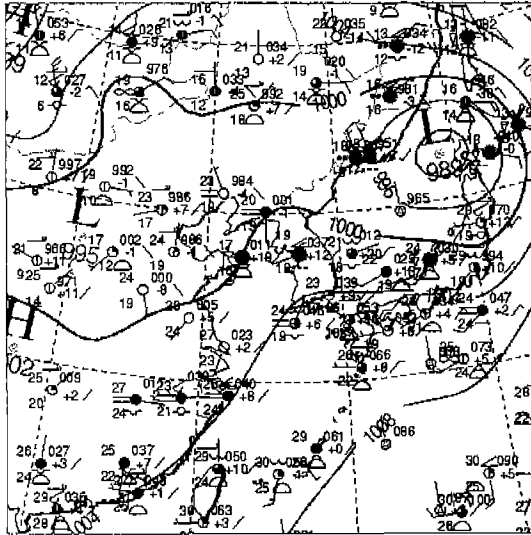


그림 5-24. 해수면 수온분포도(위성영상, 2004. 6. 22. ~28.).

### 5-4-3 일기도분석

2004년 6월 22일 00UTC와 12UTC 지상일기도를 살펴보면(그림 5-25) 제6호 태풍(DIANMU)가 약화되어 일본 서해안을 따라 북동진하며 북상함에 따라 남쪽으로부터 고압대가 확장하여 한반도까지 영향을 주고 있다.

지상일기도(2004년 6월 22일 00UTC)



지상일기도(2004년 6월 22일 12UTC)

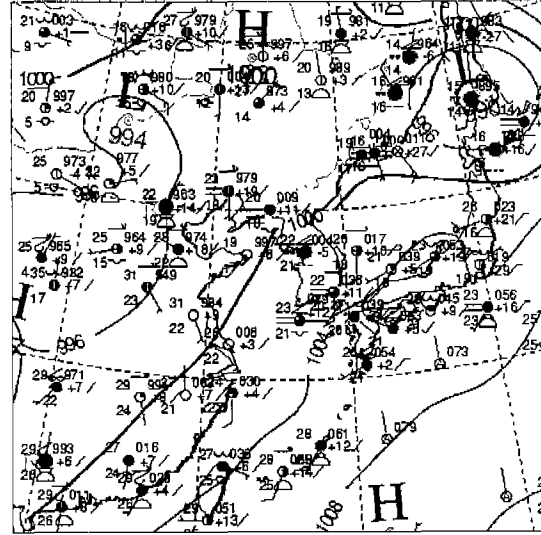
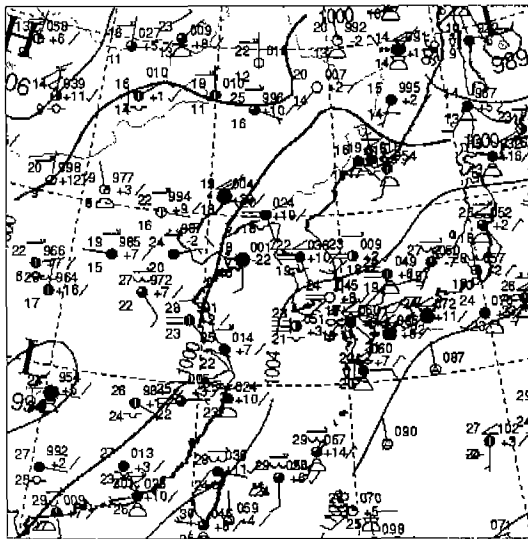


그림 5-25. 지상일기도(2004. 6. 22. 00UTC, 12UTC).

6월 23일 00UTC와 12UTC를 보면(그림 5-26) 일본 남쪽해상에는 mT가 자리잡고 있으며 장마전선이 북상하고 화중지방의 저기압은 활성화되고 있다.

지상일기도(2004년 6월 23일 00UTC)



지상일기도(2004년 6월 23일 12UTC)

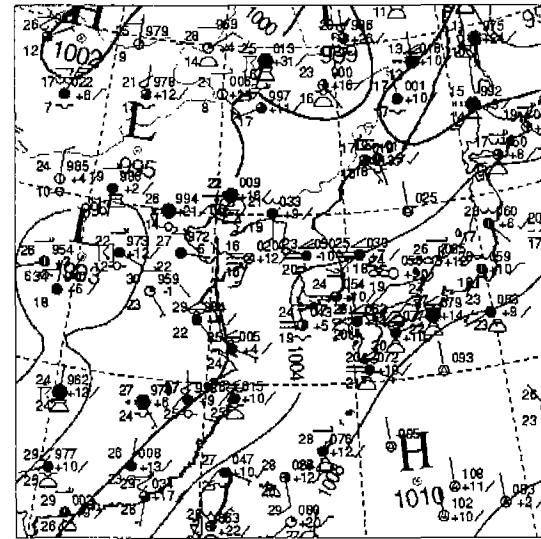
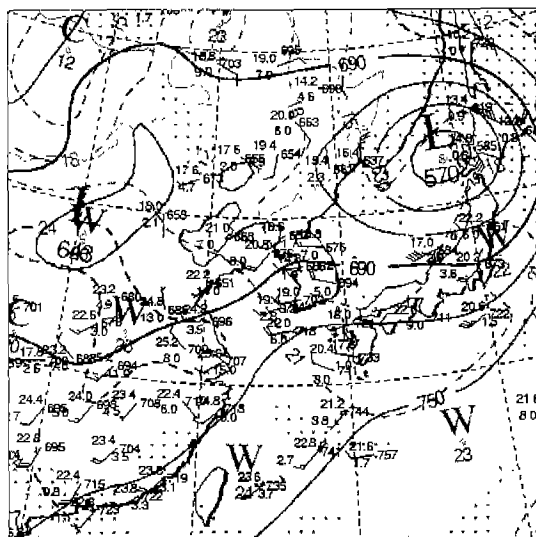


그림 5-26. 지상일기도(2004. 6. 23. 00UTC, 12UTC).



따라서 남고북저형의 기압배치가 형성되어 제주도를 비롯한 우리나라 부근으로는 남쪽으로 습한 공기가 계속 이류되고 있다. 6월 22일 925hPa 일기도(그림 5-27)에서는 태풍이 북상하면서 고온다습한 난기가 만주와 화북 지방까지 유입되겠으며 그 북서쪽에서 상대적으로 낮은 기온의 유입되겠다.

925hPa(2004년 6월 22일 00UTC)



925hPa(2004년 6월 22일 12UTC)

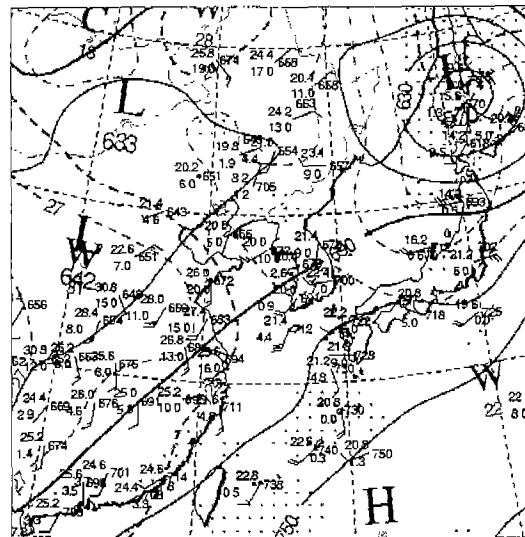
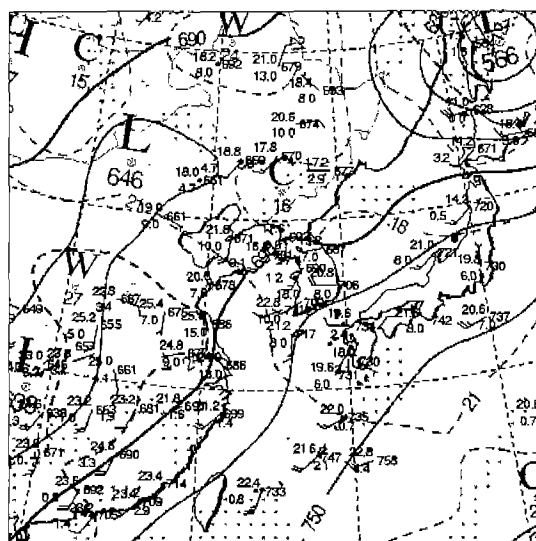


그림 5-27. 925 hPa 일기도(2004. 6. 22. 00UTC, 12UTC).

6월 23일 925 hPa 일기도를 살펴보면(그림 5-28) 북태평양 고압대가 화남 쪽으로 세력을 점차 뻗고 있어 화중지방의 저기압은 계속 북동진하고 있다. 22일과 23일은 남서류가 계속 유입되어 많은 습기가 우리나라에 축적되겠다.

925 hPa(2004년 6월 23일 00UTC)



925 hPa(2004년 6월 23일 12UTC)

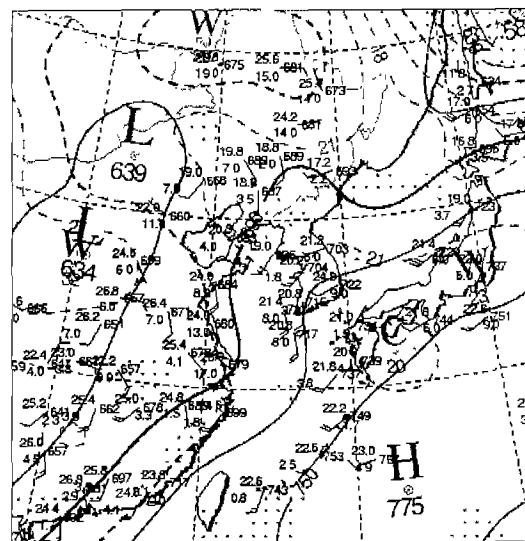


그림 5-28. 925 hPa 일기도(2004. 6. 23. 00UTC, 12UTC).

#### 5-4-4 열수지분석

2004년 6월 22일은 박무현상이 있었으며 23일은 08시 15분부터 12시40분까지 안개현상이 발생하였다. 따라서 이 두 날의 열수지를 비교하여 그 특징을 살펴보았다. 일평균 현열과 잠열은 22일이  $-6.7 \text{ W/m}^2$ 과  $-7.5 \text{ W/m}^2$  였으며 23일은  $-5.2 \text{ W/m}^2$ 과  $-10.8 \text{ W/m}^2$  으로 6월평균 열속보다 현열은 2.0과 3.5  $\text{W/m}^2$ , 잠열은 23.6과 26.9  $\text{W/m}^2$  크게 나타났다.

해기차는 22일과 23일이 각각  $-3.5^\circ\text{C}$ 와  $-3.3^\circ\text{C}$ 의 차이를 보이고 있었다. (그림 5-29)는 열속과 해기차의 일변화를 3시간 간격으로 나타낸 그림이다. 현열속과 잠열속의 변화 경향은 비슷하였고 해기차가 클수록 현열속과 잠열속의 변화도 크게 나타나고 있어 비례관계를 보이고 있다.

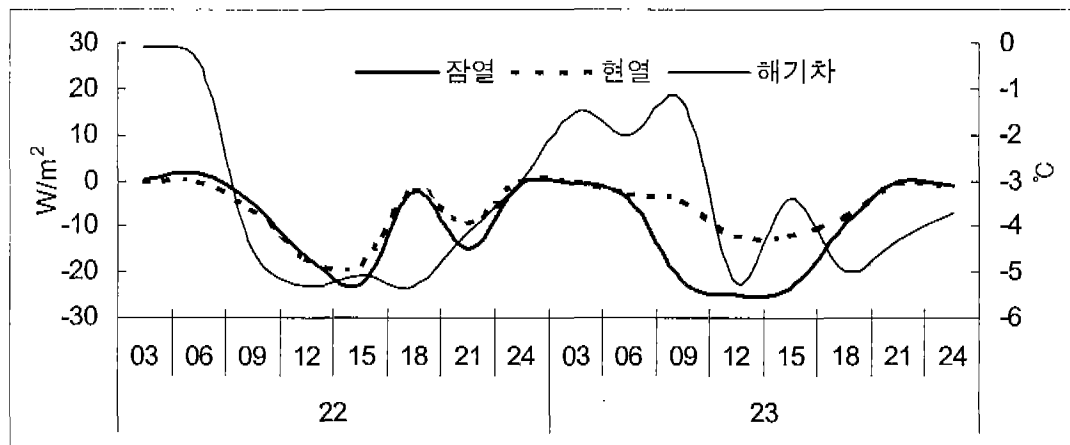


그림 5-29. 현열속, 잠열속, 해기차의 일변화(2004. 6. 22.~23.).

(그림 5-30)에서 보웬비의 분포는 22일과 23일 각각 0.6과 0.7로 비교적 높게 나타났으며 해기차가 커지면 보웬비는 다소 작아지는 경향을 보이고 있어 반비례관계를 보이고 있었다. 그러나 열속의 변화와 보웬비의 변화와 안개발생과의 관계를 나타내는데 부족한 점이 있어 열속의 변화를 양적으로 보기위해 이를 절대값으로 계산하여 시정과 비교분석하였다.

(그림 5-31)은 열속과 시정과의 관계를 살펴보기 위해 열속의 절대값을 이용하여 시정 분포와 비교하였다. 22일 03시경 현열속과 잠열속은 각각 0.01과 0.19  $\text{W/m}^2$ 의 분포를 보이고 있었으며 시정은 8 km로 약한 박무현상을 보였고 열속(절대값)이 17.2와 16.8  $\text{W/m}^2$ 으로 많은 에너지 변화를 보이면서 시정은 6 km로 점차 악화되었다. 23일 08시경에 잠열이 22.1  $\text{W/m}^2$ 로 증가하면서 시정은 1 km 이하로 낮아져 안개현상이 발생하였다 이때 현열속은 3.0  $\text{W/m}^2$ 였다. 12시경에 잠열속은 25.0  $\text{W/m}^2$ 으로 최대치를 보이면서 차츰

줄어들었고 시정도 12시를 고비로 13시경부터 좋아지기 시작하여 안개현상이 해소되고 약한 박무현상이 이어졌다.

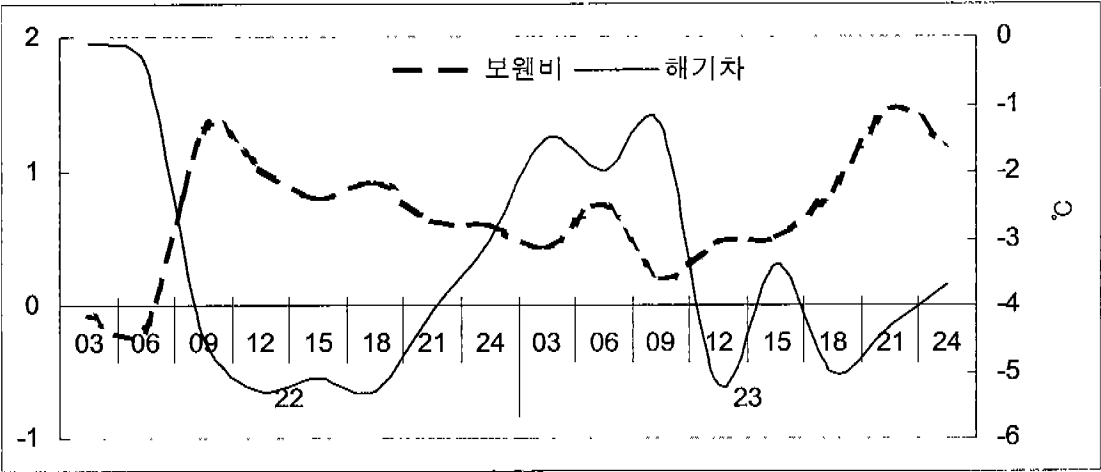


그림 5-30. 보웬비, 해기차의 일변화(2004. 6. 22.~23.).

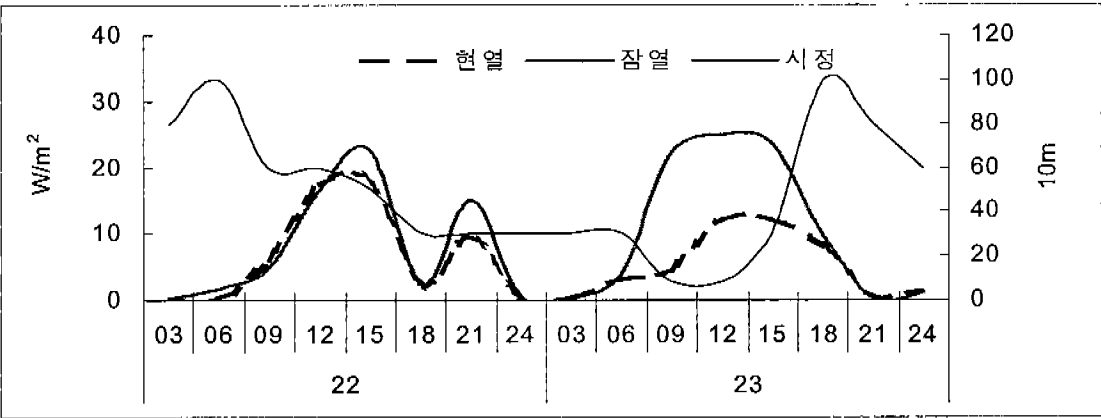


그림 5-31. 현열속, 잠열속, 시정의 일변화(2004. 6. 22.~23.).

23일의 일평균 현열속과 잠열속의 절대값은  $5.24$ 와  $10.78 \text{ W/m}^2$  이었으며 평균 현열속과 잠열속의 차는  $5.54 \text{ W/m}^2$  였다. 해무발생시는  $8.27$ 과  $23.57 \text{ W/m}^2$ 로  $15.3 \text{ W/m}^2$ 의 차이를 보이고 있어 일평균보다 많은 열량차이를 보이고 있었다.

보웬비의 변화경향에 따른 시정의 변화를 보기 위해 보웬비의 절대값을 이용하여 (그림 5-32)에 나타내었다.

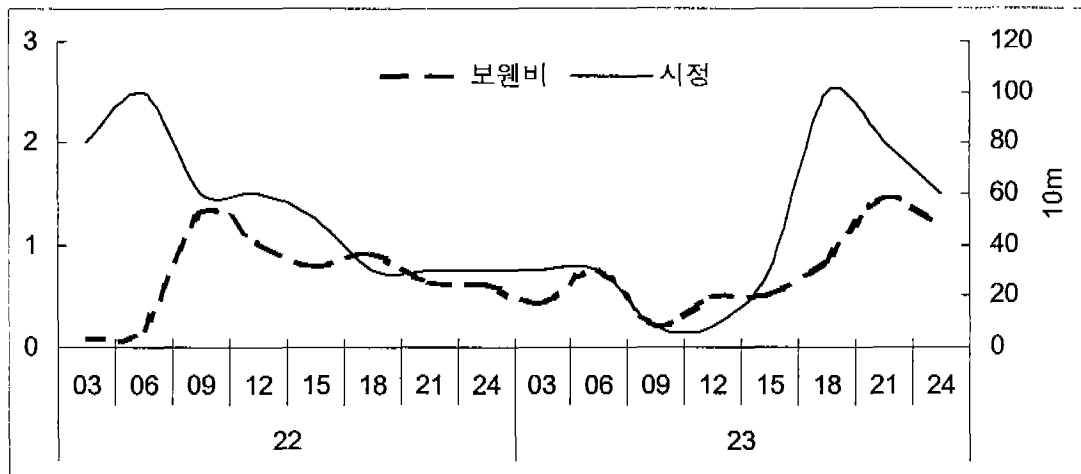


그림 5-32. 보웬비, 시정의 일변화(2004. 6. 22.~23.).

대체로 보웬비가 증가하면 시정은 좋아지고 보웬비가 낮아지면 시정은 악화되는 경향을 보이고 있었다. 박무현상이 있는 22일 06시경 보웬비는 1.31이었으며 안개현상이 발생한 23일 09시경에는 0.21으로 낮아졌다. 안개현상이 해소되는 12시 이후에 보웬비는 0.48로 높아지기 시작하였다. 23일 일평균 보웬비는 0.74로 높은 편이었으며 안개 발생시 보웬비는 0.34로 일평균보다 0.40 낮은 값이었다.

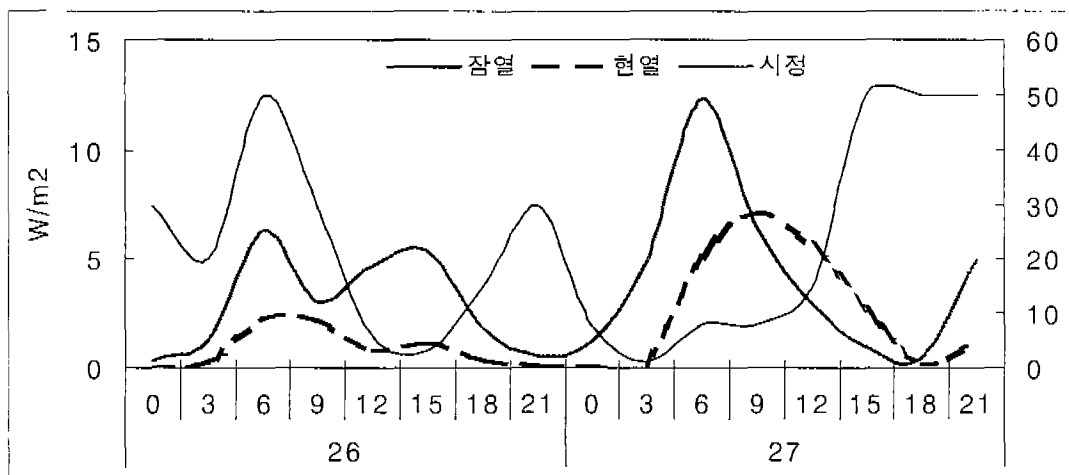


그림 5-33. 현열속, 잠열속, 시정의 일변화(2004. 6. 22.~23.).

2004년 6월 26일과 27일의 경우를 살펴보면(그림 5-33) 26일과 27일 박무현상이 계속 지속되면서 안개현상도 나타나고 있다. 그림에서 현열속과 잠열속 변화와 시정변화의 상관성을 알아보기 위해 열속을 절대값으로 계산하여 나타내었다. 26일 06시의 현열속과 잠열속(절대값)은 2.29와 6.33  $W/m^2$ 이며

시정은 5km로 박무현상이 있으며 15시에는 현열속과 잠열속이 0.76과 4.67 W/m<sup>2</sup>이었으며 안개현상이 발생하고 있다. 21시에 현열속과 잠열속이 0.34와 1.81 W/m<sup>2</sup>일 때 안개가 옅어져 박무가 되었으며 27일 현열속과 잠열속이 0.08과 1.21 W/m<sup>2</sup>이 되면서 다시 안개가 발생하였다. 그리고 27일 13시 이후 현열속과 잠열속이 7.07과 6.45 W/m<sup>2</sup>일 때 안개현상이 박무로 전환되었다.

26일과 27일의 평균 현열속과 잠열속의 절대값 차이는 1.76 W/m<sup>2</sup>이나 해무가 발생했을 경우의 열량차이는 4.26 W/m<sup>2</sup>으로 다소 높게 나타나고 있다. 23일의 안개 발생시와 유사한 경향을 보이고 있었으며 특히 잠열속의 변화에 따라 시정이 크게 변화하는 경향을 보였고 잠열속이 크게 증가하여도 현열속이 커지면 시정은 악화되지 않거나 악화된 상태에서 좋아지는 경향을 보이고 있었다.

(그림 5-34)는 보웬비의 변화경향과 시정과의 상관관계를 보기 위해 보웬비의 절대값으로 나타낸 것이다. 26일 15시에 보웬비가 0.16일 때 시정은 3km에서 600m로 악화되었으며 21시에 0.19일 때 다시 1.5km로 조금 회복되어 박무현상이 이어졌다. 27일 03시에 0.07일 때 시정은 800m가 되었고 12시에 1.10이 되면서 안개현상에서 박무로 전환되었다.

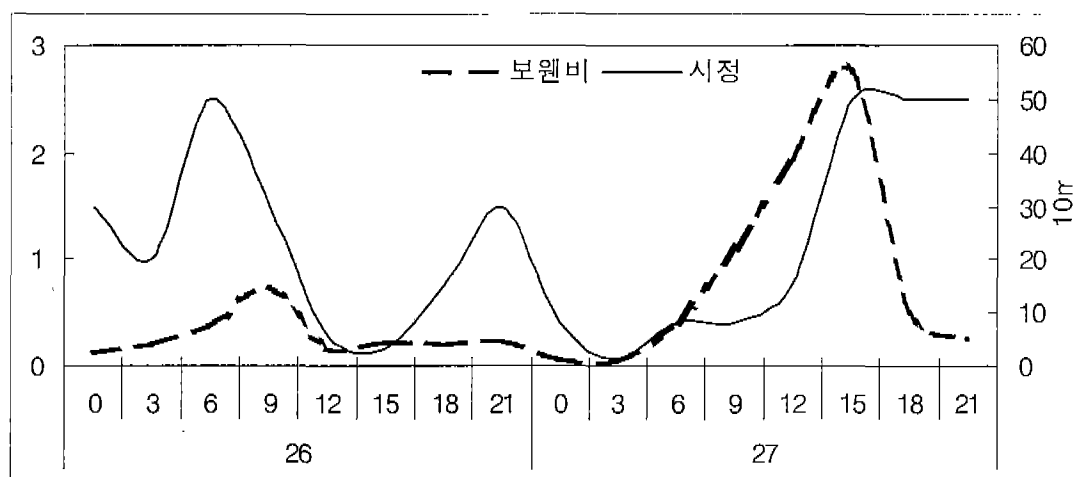


그림 5-34. 보웬비, 시정의 일변화(2004. 6. 22.~23.).

23일 안개현상시와는 달리 보웬비의 변화폭이 작았으며 26일과 27일 양일의 평균 보웬비는 0.58이며 안개발생시 보웬비는 0.18로 낮은 분포를 보였다.

현열은 수표면이나 지표면과 대기의 에너지 이전을 나타내며 잠열은 수증기의 응집이나 응축이 있을 때 발생하는 응축잠열을 나타낸다. 따라서 안개가 발생하기 위해 수표면이나 지표면에서의 수증기의 응축은 열속의 변화를 갖고 오게 되며 하계의 경우 수온이 기온보다 낮기 때문에 그 변화는 음(-)

의 값으로 해수면으로 열량이 유입되는 형태를 보이고 이로 인해 포화된 해수면에서 응축이 일어나 잠열이 증가하며 안개가 발생하게 된다. 그러나 현열보다 잠열의 변화가 많아지면 보웬비는 작아지는 경향을 보인다.

## 제6장 결론 및 토의

1995년부터 2004년까지 10년간 기상자료를 이용하여 제주도 북부해상을 중심으로 제주도 연안바다의 열수지를 계산하였으며, 현열속과 잠열속, 보웬비로 표현되는 해양-대기 상호간의 열수송량을 이용하여 제주지방의 강설(적설량) 현상과 해무발생 예측가능성을 찾고자 하였다.

제주도 연안바다 열수지는 12월에 잠열속( $140 \sim 230 \text{ W/m}^2$ )과 현열속( $70 \sim 110 \text{ W/m}^2$ )이 최대치를 기록하고, 6월에 잠열속( $0 \sim 5 \text{ W/m}^2$ )과 현열속( $-10 \text{ W/m}^2$ )이 최소치를 기록하는 것으로 나타났으며, 열수지에 영향을 주는 해양기상 요소는 해기차와 풍속이 가장 중요한 요인으로 작용하였다. 이들 값이 높을수록 겨울철 해양에서 대기로 많은 열량이 에너지와 수증기가 현열과 잠열의 형태로 공급되어 대기불안정을 유발하면서 강설시스템에 관여하는 것으로 나타났다. 반면에 해무발생이 빈번한 5~8월은 현열과 잠열이 음(-)의 값을 나타내면서 대기에서 해양으로 에너지 수송이 있음을 알 수 있었다.

강설 및 적설시 열수지 정규분포는, 우선 강설시에 현열속  $100 \sim 150 \text{ W/m}^2$ , 잠열속  $150 \sim 250 \text{ W/m}^2$ , 난류속  $300 \sim 400 \text{ W/m}^2$ , 보웬비  $0.6 \sim 0.8$  범위에서  $70 \sim 81\%$  분포 비율을 보였고, 적설시에는 현열속  $150 \sim 200 \text{ W/m}^2$ , 잠열속  $150 \sim 250 \text{ W/m}^2$ , 난류속  $350 \sim 400 \text{ W/m}^2$ , 보웬비  $0.8 \sim 1.0$  범위에서  $72 \sim 86\%$  분포하였다.

사례분석을 통하여 얻어낸 제주지방의 강설현상 예측인자는 난류수송량  $300 \text{ W/m}^2$  이상( $74\%$ ), 보웬비는  $0.7\%$ ( $81\%$ ) 이상일 때가 대부분으로 제주도 해안지역의 동계 강설현상 예측에 난류속 및 보웬비의 적용 가능성을 보였다.

또한 제주시와 제주산간(한라산 어리목)이 신적설량과 보웬비 관계는 제주시가  $0.1 \sim 1.0 \text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.8$ ,  $1.1 \sim 5.0 \text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.88$ ,  $5.1 \text{ cm}$  이상 적설시 평균보웬비  $0.98$ 로 나타났으며, 제주산간은  $0.1 \sim 10 \text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.65$ ,  $11 \sim 20 \text{ cm}$  적설시 평균보웬비  $0.71$ ,  $20 \text{ cm}$  이상 적설시 평균보웬비  $0.94$ 로 나타나, 제주해안 지역에 강설이 시작되면 이미 한라산 어리목에는  $11 \sim 20 \text{ cm}$  정도의 눈이 쌓였던 것으로 분석되었다. 신적설과 보웬비의 상관관계는 선형 1차함수적으로 비례 상승하는 관계로 조사되어 제주도 연안역의 열수지를 이용한 보웬비는 제주도지역의 적설량 예측시 참고자료로 충분한 사용가치가 있음을 알 수 있었다.

조사기간 동안 안개발생 시기는 5, 6, 7월로 대부분 봄철과 여름철에 집중적으로 발생하였고, 제주시와 서귀포 지역의 안개발생일수는 각각 75일과 119일로 서귀포지역은 전선무, 제주시 지역은 전선무와 이류무가 주를 차지하는 것으로 나타났다. 이류무 발생일수는 제주시가 31일, 서귀포가 21일로 나타났다으며 평균 안개지속시간은 제주시 2시간 39분, 서귀포는 4시간 02분 이었고, 새벽녘인 6~9시 사이에 주로 발생하고 소산하는 것으로 나타났다. 안개 발생 및 소멸시 풍향·풍속은 대부분 동일하게 나타났는데 제주시는 NW-NE풍 1~2 m/s 전후에서 가장 많이 발생 및 소산하였고, 서귀포는 SW-SE풍이 2 m/s 정도에서 주로 발생하고 같은 풍계에서 3~4 m/s의 풍속에서 소멸하였다.

이류무 발생시 해양·대기의 열교환량은 현열속의 경우 가을과 겨울에 해양에서 대기로  $12.4 \text{ W/m}^2$ 과  $38.4 \text{ W/m}^2$  정도의 열을 방출하고 있으며, 봄철과 여름철에는 4.8과  $-7.6 \text{ W/m}^2$ 로 나타나 여름철에는 대기에서 해수면으로 열량이 유입되는 것으로 나타났다.

사례분석을 통하여 안개발생시 열속의 변화량과 보웬비 관계를 알아보았는데, 2004년 6월 23일의 경우 현열속과 잠열속은 8.27와  $23.57 \text{ W/m}^2$ 로  $15.3 \text{ W/m}^2$ 의 차이를 보였고 보웬비는 0.34로 낮은 편이었다. 6월 26일과 27일의 경우는 해무가 발생했을 때 열량의 차이가  $4.26 \text{ W/m}^2$  (현열속  $1.46 \text{ W/m}^2$ , 잠열속  $5.70 \text{ W/m}^2$ )로 작은 편이었으며 보웬비는 0.18로 매우 낮게 나타났다.

제주도 주변해역에서 발생하는 해무는 잠열의 증가와 비례관계를 보이고 보웬비와는 반비례 관계를 보여서, 잠열속과 현열속의 증감과 보웬비의 변화에 따라 해무발생 가능성을 파악할 수 있었으나 그 정량적인 관계는 뚜렷하지 않았다. 결과적으로 잠열속이 크고 현열속이 작을수록 해무의 발생가능성이 컸으나 정량적으로는 불규칙하였고 보웬비가 0.3 이하일 때 해무발생 가능성이 높음을 알 수 있었다.



## 참고문헌

- 강원지방기상청, 2000. 영동 해안지방의 안개(해무)발생 특성조사.
- 기상연구소, 1998. GMS-5 자료를 이용한 해무탐지 연구.
- 기상연구소, 2000. 해무 예측 실용화 연구.
- 기상연구소, 2001. 영종도 주변해역의 해무예측 연구(I).
- 기상연구소, 2002. 영종도 주변해역의 해무예측 연구(III).
- 기상청, 1997. 한반도 연안 해무특성집, pp 107~130.
- 기상청, 2001. 한국기후표.
- 제주지방기상청, 1998. 제주기상특성집(제1권), pp 189~197.
- 제주지방기상청, 1999. 제주기상특성집(제2권), pp 147~170.
- 제주지방기상청, 2000. 제주기상특성집(제3권), pp 3~10, 175~182.
- 제주지방기상청, 2000. 제주도앞(부근)바다 해양기상 특성조사.
- 제주지방기상청, 2002. 제주기상특성집(제4권), pp 1~20.
- 제주지방기상청, 2002. 제주기상특성집(제5권), pp 27~35.
- 제주지방기상청, 2002. 제주지방국지예보실무지침서.
- 국립해양조사원, 1993~2002. 제주시 및 서귀포 수온자료.
- 국립수산물과학원, 2002. 주간해·어황정보(6. 16~22).
- 고유봉 외, 1998. 제주의 바다.
- John A. Knauss저/ 안희수 등 역, 1993. 물리해양학.
- 김문옥, 1998. 한반도 주변의 해무 분포특성, 석사학위논문.
- 문재인, 1993. 열수지로 본 겨울철 황해난류수의 북상, 제주대학교 석사논문.