[UCI]I804:24011-200000233095

Collection @ chosun

2006년 8월

박사학위논문

인천공항의 안개 유형별 분석 및 예측연구

조 선 대 학 교 대 학 원

대 기 과 학 과

이 충 태

2006년 8월 박사학위논문 인천공항의 안개 유형별 분석 및 예측연구 이충태

Collection @ chosun

인천공항의 안개 유형별 분석 및 예측연구

Classification and Prediction of Fog in Incheon Airport

2006년 8월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

대 기 과 학 과

이 충 태

Collection @ chosun

인천공항의 안개 유형별 분석 및 예측연구

지도교수 류 찬 수·정 효 상

이 논문을 이학박사학위신청 논문으로 제출함

2006년 4월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

대 기 과 학 과

이 충 태

Collection @ chosun

이충태의 박사학위 논문을 인준함

위원장	조선대학교	교 수	조 주 환	인
위 원	조선대학교	교 수	류 찬 수	인
위 원	기 상 청	공학박사	이 종 호	인
위 원	기상산업진흥원	이학박사	오 완 탁	인
위 원	기상연구소	이학박사	정 효 상	인

2006 년 6 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

Collection @ chosun

목 차

ABSTRACTS ····· ix

List of Tables ····· iii

List of Figures ····· iv

Ⅰ. 서 론 ····· 1

Ⅱ. 자료조사 및 분석방법 ····· 4

Ⅲ. 인천공항 안개 특성 분석 ····· 6

A. 인천공항 부근의 지형 ····· 6

B. 안개발생 현황 ····· 7

1. 연도별 안개발생 일수 ····· 7

2. 월별 안개발생 일수 ····· 8

3. 계절별 안개발생 일수 ····· 9

C. 유형별 안개의 분류기준 및 분류 ····· 10

1. 유형별 안개의 특징 ····· 10

2. 유형별 안개의 분류기준 ····· 11

a. 복사무 ····· 11

b. 이류무 ····· 12

c. 증기무 ····· 12

d. 전선무 ····· 13

D. 유형별 안개 특성 분석 ····· 13

1. 유형별 안개발생 ····· 13

2. 풍향 · 풍속별 안개특성 ····· 14

Collection @ chosun

a. 복사무 ····· 14
b. 이류무 ····· 16
c. 증기무 ····· 17
d. 전선무 ····· 19
3. 해기차 분석 ····· 20
4. 상대습도 분석 ····· 24
5. 안개발생 및 소멸시각 분석 ····· 27
6. 안개지속시간 분석 ····· 33
7. 운량 분석 ····· 35
8. 포차 분석 ····· 36
Ⅳ. 수치모델을 이용한 안개유형 분석 ····· 38
A. 항공기상 단시간예측시스템 ····· 38
1. 항공기상 단시간예측시스템의 구성 ····· 38
2. KLAPS의 자료동화 및 수치모델 설계 ····· 39
3. 안개현상과 관련된 수치예측자료 ····· 43
B. 안개 유형 특성 분석 ····· 44
1. 복사무 유형 분석 ····· 45
2. 이류무 유형 분석 ····· 57
3. 전선무 유형 분석 ····· 71
C. 수치예측자료 분석 결과 ····· 82
Ⅴ. 결론 ····· 84
참고문헌 ····· 87
부 록 ····· 91

Collection @ chosun

List of Tables

Table 1. The operation results of Incheon airport ····· 1
Table 2. The classification standard of fog type in Incheon airport ··· 12
Table 3. MM5 configuration design for experiment ····· 41
Table 4. Fog cases selected for study ····· 44

Collection @ chosun

List of Figures

Fig. 1 The cause of aircraft delays or cancels ····· 2
Fig. 2 The meterological cause of aircraft delays or cancels ····· 2
Fig. 3 Weather observation point ····· 4
Fig. 4 The terrain map around Incheon airport ····· 6
Fig. 5 Fog days in yearly from 2001 to 2004 ····· 7
Fig. 6 Fog days in monthly from 2001 to 2004 ····· 8
Fig. 7 Fog days in seasonally from 2001 to 2004 ····· 9
Fig. 8 Fog days in monthly for fog type from 2001 to 2004 ····· 14
Fig. 9 The distribution of wind direction and speed in radiation fog cases ···· 15
Fig. 10 The distribution of wind direction and speed in advection fog cases ·· 16
Fig. 11 The distribution of wind direction and speed in steam fog cases ···· 18
Fig. 12. The distribution of wind direction and speed in front fog cases ··· 19
Fig. 13 The difference air temperature from SST in radiation fog cases 21
Fig. 14 The difference air temperature from SST in advection fog ·· 22
Fig. 15 The difference air temperature from SST in steam fog ····· 23
Fig. 16 The difference air temperature from SST in front fog ····· 24
Fig. 17 The distribution of humidity in radiation fog cases ····· 24
Fig. 18 The distribution of humidity in advection fog cases ····· 25
Fig. 19. The distribution of humidity in steam fog cases ····· 26
Fig. 20 The distribution of humidity in front fog cases ····· 27
Fig. 21 The distribution of occurrence time for radiation fog from 2001 to 2004 28
Fig. 22 The distribution of disappeared time radiation fog from 2001 to 2004 29

Collection @ chosun

Fig. 23 The distribution of occurrence time for advection fog from 2001 to 2004 · 29
Fig. 24 The distribution of disappeared time for advection fog from 2001 to 2004 30
Fig. 25 The distribution of occurrence time for steam fog from 2001 to 2004 ·· 31
Fig. 26 The distribution of disappeared time for steam fog from 2001 to 2004 32
Fig. 27 The distribution of occurrence time for front fog form 2001 to 2004 32
Fig. 28 The distribution of disappeared time for front fog from 2001 to 2004 33
Fig. 29 The continuance time for fog type from 2001 to 2004 ····· 34
Fig. 30 Cloud amounts for fog type from 2001 to 2004 ····· 35
Fig. 31 The cloud amounts of low level for fog type from 2001 to 2004 ····· 36
Fig. 32 Temperature difference($T-T_d$(℃)) for fog type from 2001 to 2004 37
Fig. 33 The concept of AWSRPS ····· 39
Fig. 34 The flow of integrating in AWSRPS ····· 40
Fig. 35 The nested model computational domains ····· 41
Fig. 36 Observed visibility(m) from 0100KST to 1500KST 17 September 2004 45
Fig. 37 The meterological charts at 0900KST 17 September 2004 ····· 46
Fig. 38 Fog images of GOES-9 from 0301KST to 0610KST 17 September 2004 47
Fig. 39 Observed humidity(%) and wind barb(m/s) from 0300KST to 1200KST 17 September 2004 ····· 48
Fig. 40 Observed humidity(%) from 0100KST to 1500KST 17 September 2004 49
Fig. 41 Observed wind direction(deg.) and speed(kt) and from 0100KST to 1500KST 17 September 2004 ····· 50
Fig. 42 Simulated(solid) and Observed(dash) visibility(m) from 0100KST to 1500KST 17 September 2004 ····· 51

Collection @ chosun

Fig. 43 Simulated meterological charts at 0900KST 17 September 2004 · 52
Fig. 44 Simulated relative humidity (shading according to key at right) and wind barb(m/s) from 0300KST to 1200KST 17 September 2004 ····· 53
Fig. 45 Simulated visibility(shading according to key at center low) and wind vector from 0300KST to 1200KST 17 September 2004 54
Fig. 46 Simulated relative humidity(shading according to key at right), Richardson Number(red solid(+), dash(-)), and cloud liquid water(blue body) vertical cross section along A-B from 0300KST to 1200KST 17 September 2004 ····· 55
Fig. 47 Simulated Skew-T from 0300KST to 1200KST 17 September 2004 ·· 57
Fig. 48 Observed visibility(m) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004 58
Fig. 49 The meterological chats at 2100KST 21 Jun 2004 ····· 59
Fig. 50 Fog images of GOES-9 from 2101KST 21 to 0601KST 22 Jun 2004 60
Fig. 51 Observed humidity(%) and wind barb(m/s) from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004 ····· 61
Fig. 52 Observed humidity(%) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun2004 · 62
Fig. 53 Observed wind direction(deg.) and speed(kt) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004 ····· 63
Fig. 54 Simulated(solid) and Observed(dot) visibility(m) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004 ····· 64
Fig. 55 Simulated meterological charts at 2100KST 21 Jun 2004 ····· 65
Fig. 56 Simulated relative humidity(shading according to key at right) and wind barb from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004 ···· 66

Collection @ chosun

Fig. 57 Simulated wind speed(kt) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004 67
Fig. 58 Simulated visibility(km) and wind vector from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004 ····· 68
Fig. 59 Simulated relative humidity(shading according to key at right), Richardson Number(red solid), and cloud liquid water(blue body) vertical cross section along A-B from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004 ····· 69
Fig. 60 Simulated skew-T from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004 · 70
Fig. 61 Observed visibility(m) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 71
Fig. 62 The meterological charts at 2100KST May 12 2004 ····· 72
Fig. 63 Observed humidity(shading according to key at right) and wind barb from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 ····· 73
Fig. 64 Observed relative humidity(%) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 · 74
Fig. 65 Observed wind direction(deg.) and speed(kt) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 ····· 75
Fig. 66 Simulated(solid) and Observed(dot) visibility(m) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 ····· 76
Fig. 67 Simulated meterological charts at 2100KST 12 May 2004 ····· 77
Fig. 68 Simulated relative humidity(shading according to key at right) and wind barb from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 ···· 78
Fig. 69 Simulated visibility(shading according to key at center low) and wind vector from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 ····· 79

Collection @ chosun

Fig. 70 Simulated relative humidity(shading according to key at right), Richardson Number(red solid), and cloud liquid water(blue body) vertical cross section along A-B from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 ····· 80

Fig. 71 Simulated skew-T from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004 · 82

Collection @ chosun

ABSTRACTS

The Classification and Prediction of Fog in Incheon Airport

Lee, Choong-Tae

Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su Ph.D

Prof. Chung, Hyo-Sang Ph.D

Department of Atmospheric Science

Graduate School of Chosun University

ICA(Incheon Airport) was awarded Best Airport Worldwide in 2005, while having been settled down as a hub airport for North-East Asia. Nevertheless it recorded 11,685 cancels or delays out of 541,125 total in air traffic operations for the recent four years. Among 11,685 cancels or delays, cancels which were caused by weather, were 1,694 (14%), primarily which caused by fogs were 968 (58%).

For the purpose of improving the capability of fog forecast, we analysis fog climatology with the data collected from 2001 to 2004 and developed the AWSRPS(Aviation Weather Short range Prediction System). In addition to analysis two neighboring weather stations, observed on Gimpo Airport located in inland and on ICA, Incheon City in seashore, respectively.

Fog cases during the study period was characterized by occurring causes into radiation, advection, stream and front fogs according to the classification criteria being employed at operational service in Aviation Meteorological Office. For fog classification, surface weather data collected from neighboring regions that may

Collection @ chosun

significantly influence fog occurrence at ICA were analyzed, while upper-layer data from Baengnyeongdo and Osan, lighthouse data from Yeonpyeongdo and Sonmido, sea-surface buoy data from Deokjeokdo, respectively.

Analysis on the occurring characteristics of fogs using observations reveals that, in both ICA and Incheon Weather Station, most frequent fogs took place in summer (97 days - 36% and 64 days - 39%, respectively), least frequent in Fall (34 days - 13%, 17 days - 10%, respectively). On the contrary, at Gimpo Airport for 71 days (36%) in Fall, while 34 days (17%) in spring fog took place on average. This indicates that Incheon was significantly influenced by sea fog, while Gimpo by surface inversion of inland in Autumn.

Each frequency of fogs occurred at ICA was in the order of 162 Advection fog, 143 Frontal fog, 71 Radiation fog, and 36 Steam fog, respectively, being commonly influenced by South-westerly advection in summer, while precipitation falling into a weakened inversion in summer and shallow cold pool in winter.

In this case of radiation fog, 32% was occurred from October to November, mostly between 0400～0700 KST of 37 events (52%). For advection fog it occurred in July with 40 events (25%), while most frequently between 0400～0700 KST of 52 events (32%). steam fog took place from November through March, most frequently in February with 14 events (39%), while frontal fog was formed mostly from January through July with 126 times (85%), primarily in the morning with 101 times (71%). Under saturation deficit, with no significant correlation with any cause for fogs, below 1.5℃ fog was mostly formed as many as 375 times (91%).

In order to analyze the fogs at ICA in terms of main cause, numerical validation was conducted under the Short-range Aerodrome Forecasting System. NWP(Numerical Weather Prediction) model can simulate synoptic background

Collection @ chosun

similar to field observations in fog forecasting, but significant differences in simulating pressure system flow speed, wind and humidity at local scale.

Radiation fog (Case 1) can be formed in general under pressure pattern with saddle type or weak pressure gradient and surface inversion, while negative value at surface but positive value at upper layer in Richardson number with about 200 m height.

Advection fog (Case 2) can be characterized when South-westerly wind was dominant and surface inversion took place with 7～8 kts South-westerly, 5～7 of Richardson number and below 100 m height.

Front fog (Case 3) occurred commonly when front or low pressure passes through Korea with 7～8 kts southerly wind, 5～7 of Richardson number, and below 100 m height. At ICA when the humidity was about 98% with 1～4 of turbulence, the cloud water (fog) condensed on the surface was correlated with fog events.

For more accurate fog forecasts in Korea in the future, we need not only more dense observation network, but also radiometers at each aerodrome station to analyze observation radiosonde. Furthermore, great effort should be made to develop NWP models that can reflect complex nature of Aerodrome's topographic features.

Collection @ chosun

Ⅰ. 서 론

인천국제공항(이하 인천공항)은 1990년 6월 14일 신 공항 건설입지로 선정된 후 1992년 11월 12일부터 부지조성공사가 시작되어 영종도와 용유도 사이의 17.3 km의 방조제를 쌓아 만든 총 1,700만평의 광활한 면적의 매립지 위에 건설되었다.

인천공항은 2001년 3월 29일 개항된 이후 Table 1과 같이 매년 항공기 15만여대, 승객 2천4백여만명, 화물 210만여톤이 처리되는 동북아 허브공항으로 발전되었으며, 2005년에는 국제운송협회와 국제공항협회가 공동주관하는 세계 공항만족도 조사에서 '세계 최고의 공항상'을 수상하는 등 괄목할 만한 성장을 이루었다.

이와 같이 인천공항이 동북아의 허브공항으로서 자리매김 되고 있으나 Fig. 1에서와 같이 최근 4년 동안의 항공기 운항회수 541,125회 중에서 지연 및 결항회수가 11,685회를 보이고 있다. 또한, Fig 2에서와 같이 기상으로 인한 지연 및 결항회수가 1,694회로 14%를 나타내고 있으며, 이 중에서도 안개로 인한 지연 및 결항회수가 968회로 58%에 이르고 있어 안개예보의 중요성이 재인식되고 있다.

Table 1. The operation results of Incheon Airport (2001. 7. 1~2005. 6. 30).

Year	Times	Passenger	Freight(Ton)
2001	57,840	9,618,682	962,024
2002	126,094	20,924,171	1,705,897
2003	130,185	19,789,874	1,843,055
2004	149,776	24,084,072	2,133,444
2005	77,230	12,436,802	1,238,032

From : Incheon Airport construction

Collection @ chosun

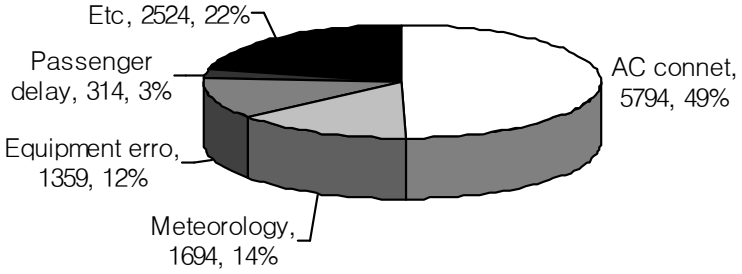


Fig. 1 The cause of aircraft delays or cancels.

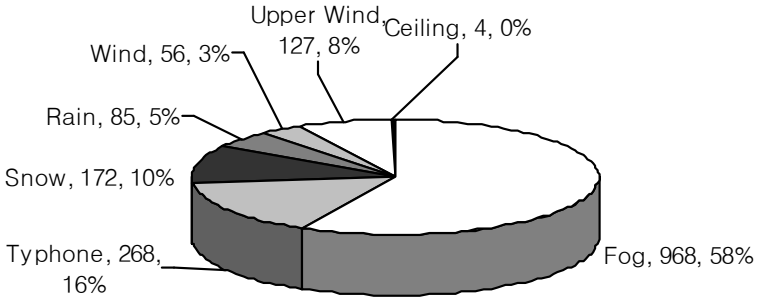


Fig. 2 The meterological cause of aircraft delays or cancels.

최근 항공기의 전기 전자 기술의 발전과 함께 여러 가지 항공기 이·착륙에 제한을 주는 악 기상 조건이 많이 극복되고 있으나 아직도 안개로 인한 시정장애는 항공기의 안정운항을 위협하는 가장 중요한 요소로 작용하고 있다.

안개는 안정적으로 층상화 된 하층대류와 연관되어 발달하고 국지적인 특성에 민감하기 때문에 아직 만족할 만한 예보단계에 이르지 못하고 있는 실정이다(Tremant, 1989). 안개에 관한 연구는 다른 안개보다 생성과정이 명확한

Collection @ chosun

복사무 연구를 시작으로(Taylor, 1917) 진행되어 왔다. 특히 1970년대 영국에서는 산업화와 도시화에 따른 스모그현상이 심각한 사회문제로 대두되면서 복사무에 관한 많은 연구결과가 나왔다(Roach *et al*, 1976a, b).

지금까지 해무의 발생을 이해하고 예측하기 위한 많은 연구들이 국·내외적으로 꾸준히 진행되어 왔다. 우리나라의 해무에 대한 연구로는 서해중부연안과 동해안에 발생하는 해무발생 특성 및 예측가능성에 대한 기초적 연구(기상연구소, 1986)를 비롯하여 영종도 주변해역의 해무예측 연구 I(기상연구소, 2000), 영종도 주변 해역의 해무예측 연구 Ⅱ(기상연구소, 2001), 영종도 주변 해역의 해무예측 연구 Ⅲ(기상연구소, 2002) 등이 있으나, 안개의 유형별 분류에 따른 특성연구와 수치모델에 의한 안개예측 연구가 이루어진 바는 없다.

본 연구에서는 2001년부터 2004년 까지 인천공항의 안개발생을 분석하기 위해 김포공항, 인천기상대(이하 인천)의 안개자료를 이용하여 지역적 안개특성을 비교·분석하였다. 그리고 항공기상대 현업에서 활용하고 있는 안개유형 분류기준에 의하여 인천공항에서 발생한 안개, 즉 복사무, 이류무, 전선무, 증기무 등을 유형별로 분류한 후, 이를 기상현상별, 안개발생·소멸, 안개지속시간 등의 안개발생과 관련된 요소로 분석하여 인천공항에서의 유형별 안개의 특성을 연구하였다. 또한, 최근 2004년에 인천공항에서 발생한 유형별 안개사례를 선정하고, 선정된 안개사례를 항공기상대에서 운영중인 수치모델을 이용하여 수치실험 하였다.

본 연구는 인천공항에서 발생한 안개의 유형별 특성연구와 유형별 안개의 수치실험의 분석 결과를 기반으로 안개예측 연구를 수행하는데 목적이 있다.

Collection @ chosun

Ⅱ 자료조사 및 분석방법

본 연구에서는 인천공항의 안개의 유형별 분석을 위하여 2001년 1월 1일부터 2004년 12월 31까지 4년간의 인천공항의 기상관측자료를 조사·분석하였다.

인천공항과 다른 지점과의 안개발생 경향을 분석하기 위해 Fig. 3에서 보는 바와 같이 해안에 위치해 있는 인천과 내륙에 위치해 있는 김포공항기상대(이하 김포공항) 등 3개 지점의 안개자료를 비교·분석 하였다. 이를 위한 항공기상자료는 항공기상대에서 운영중인 항공기상정보시스템 자료를, 인천의 기상자료는 기상청의 기후자료시스템 자료를 이용하여 연도별, 월별, 계절별로 비교·분석하였다. 또한 인천공항의 안개를 분석하기 위해 항공기상대 예보현업에서 이용하고 있는 유형별 안개 분류 기준을 준용하여 안개를 유형별로 분류하였다.

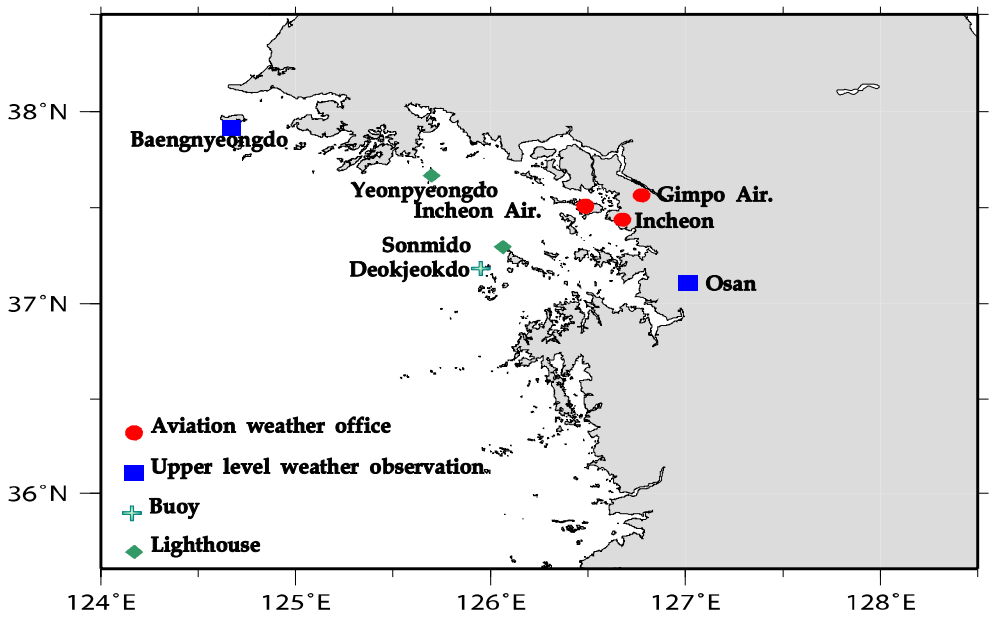


Fig. 3 Weather observation point.

Collection @ chosun

안개를 유형별로 분류하기 위해 이용한 일기도는 기상청 종합기상정보시스템(COMIS)[1]의 지상일기도를 이용하였다. 인천공항 부근의 안개 발생 여부는 연평도, 선미도의 등대기상자료와, 서해해상의 안개발생 여부는 기상청 위성자료 검색시스템에서 안개분석 자료를 이용하여 분석하였고, 기온 역전층을 분석하기 위하여 오산, 백령도의 고층기상자료를 이용하였다. 또한 해기차를 분석하기 위한 해수면 온도와 기온은 덕적도 부이자료를 이용하였다.

이와 같은 기상자료를 이용해 인천공항에서 발생한 안개를 유형별로 분류하고, 이를 항공기상대에서 운영하고 있는 항공기상 단시간예측시스템(AWSRPS)[2]을 이용하여 수치실험을 하였다.

1) Combined Meteorological Information

2) Aviation Weather Short Range Prediction System

Collection @ chosun

Ⅲ. 인천공항 안개 특성 분석

A. 인천공항 부근의 지형

인천공항은 영종도와 용유도 사이에 17.3km 방조제를 쌓아 만든 총 1,700만평의 광활한 매립지위에 건설되었다. Fig. 4에서와 보는 바와 같이 항공기상대는 활주로 내 해발 6.9m에 위치해 있고, 동쪽 7km에는 해발 255m의 운악산, 남서 쪽 1.6km에는 해발 172m의 오성산이 있으며 북동쪽으로는 영종대교를 통해 육지와 연결되어 있다.

한편 김포공항은 한강으로부터 남서쪽으로 4km 정도 떨어져 있는 해발 17.7m의 내륙에 위치해 있고, 동쪽으로부터 남쪽에는 시가지가 위치해 있으며, 그 외에는 농경지로 형성되어 있다.

인천기상대는 인천광역시 서쪽에 위치해 있는 해발 60m의 자유공원에 위치해 있고, 서쪽으로 1km 거리에 서해바다가 근접해 있다.

Fig. 4 The terrain map around Incheon Airport.

Collection @ chosun

B. 안개발생 현황

1. 연도별 안개발생 일수

인천공항 부근지역 3개 지점의 2001년부터 2004년까지 안개발생일수를 Fig. 5에 나타내었다. 인천공항은 전체 270회로 연평균 67일, 김포공항은 전체 197회로 연평균 49일, 인천은 전체 166회로 연평균 41일 순으로 나타났다. 인천공항의 연도별 안개발생일수는 2001년 67일, 2002년 57일, 2003년 79일, 2004년 67일로 나타났다.

김포공항은 인천공항 보다 연평균 18일 정도 적게 나타났고, 연도별 변화경향은 인천공항과 비슷하다.

그러나 인천은 인천공항 보다 연평균 26일 적게 나타나 매년 감소하는 경향을 보이고 있어 인천공항, 김포공항과 다른 경향을 보이고 있는데, 이는 도시화에 따른 수증기원의 감소로 유추된다.

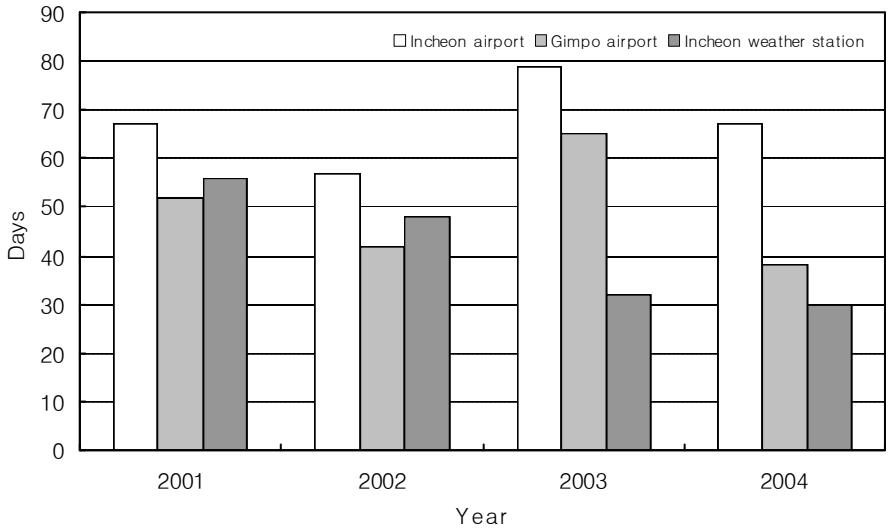


Fig. 5 Fog days in yearly from 2001 to 2004.

Collection @ chosun

2. 월별 안개발생 일수

인천공항과 그 부근지역의 2001년부터 2004년까지 4년 동안의 월별 안개발생 일수를 Fig. 6에 나타내었는데, 인천공항은 전체 270일 중 7월에 45일, 5월에 38일, 6월에 34일 순으로 많이 나타났으며, 12월에 7일, 10월에 10일, 9월에 11일 순으로 적게 나타났다.

인천은 전체 166일 중 7월에 33일, 9월, 10월, 12월에 5일 순으로 인천공항 보다 2~12일 적게 나타났다. 그러나 김포공항은 10월에 30일, 11월에 25일, 1월에 24일 순으로 많이 나타났고, 4월에 7일, 12월에 9일, 6월에 12일 순으로 적게 나타났다.

3개 관측지점의 월별 안개발생일수를 비교해 보면 인천공항, 인천은 월별 안개발생일수가 7월에 가장 많고 12월에 가장 적은 비슷한 경향을 보이고 있으나, 김포공항은 10월에 가장 많고 4월에 가장 적은 경향을 보이고 있는데, 이는 인천공항과 인천은 해안가에 위치해 있어 해무의 영향을 받고 있으나 김포공항은 내륙에 위치해 있어 가을철 지면냉각에 의한 복사무의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

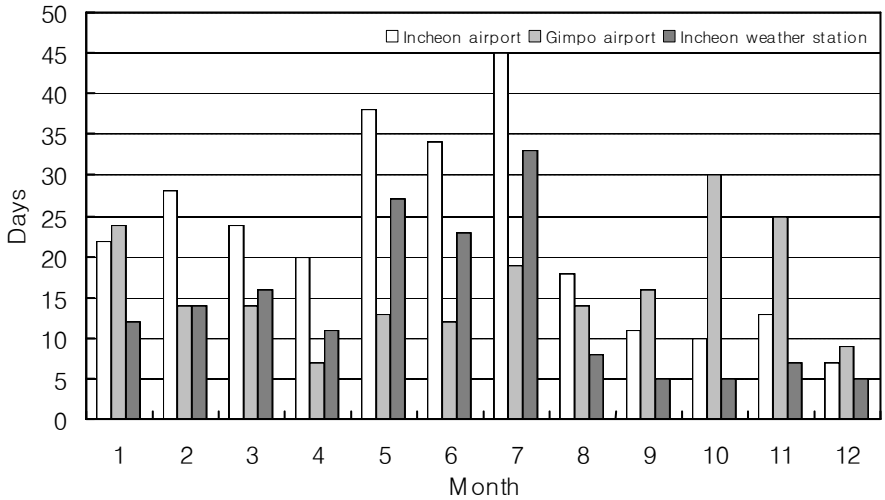


Fig. 6 Fog days in monthly from 2001 to 2004.

Collection @ chosun

3. 계절별 안개발생일수

인천공항과 부근지역의 2001년부터 2004년까지 4년 동안의 계절별 안개발생 일수를 Fig. 7에 나타내었는데, 인천공항에서는 여름에 97일, 봄 82일, 겨울 57일, 가을 34일 순으로 많이 발생하였다. 한편 인천에서는 여름에 64일, 봄 54일, 가을 31일, 가을 17일 순으로 적게 발생하여 발생순위가 인천공항과 비슷한 경향을 보였다.

김포공항에서는 가을 71일, 겨울 47일, 여름 45일, 봄 34일 순으로 적게 나타나 인천공항과 인천의 계절별 안개 발생과는 다른 경향을 보이고 있다. 이는 3.2.2의 월별 안개 발생 분석과 같이 인천공항과 인천이 해무의 영향을 많이 받고 있으나, 김포공항은 가을에 복사무의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

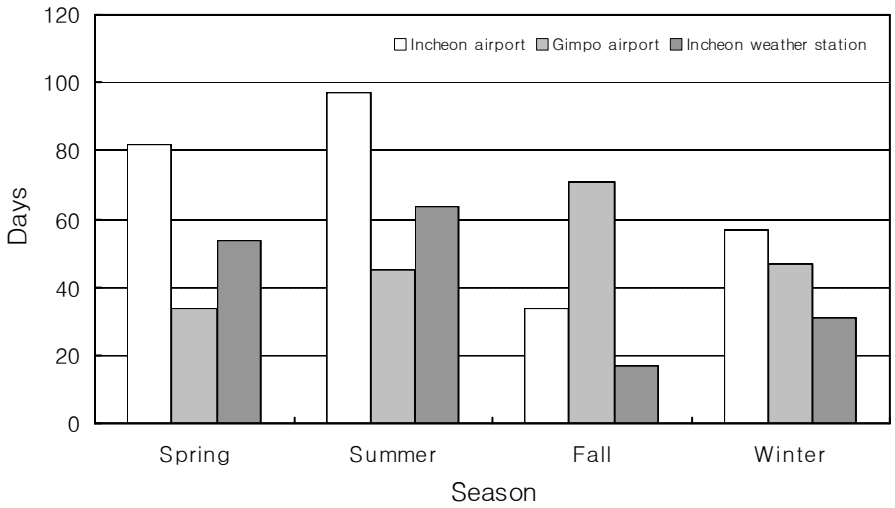


Fig. 7 Fog days in seasonally from 2001 to 2004.

Collection @ chosun

C. 유형별 안개의 분류기준 및 분류

1. 유형별 안개의 특징

안개는 수평시정거리가 1,000m 이하(지상기상관측지침, 2006)로 정의 되며 구름과 같이 수증기의 응결에 의하여 발생되는 현상이다. 안개는 종류는 크게 냉각에 의한 안개와 증발에 의한 안개로 구분된다. 냉각에 의한 안개는 육상에서 야간 냉각에 의한 복사무와 고온 다습한 공기의 이류에 의한 이류무 등이 있고, 증발에 의한 안개로는 찬 공기가 상대적으로 따뜻한 지면으로 이동하면서 접촉면에서 발생하는 증기무, 전선과 동반되어 전선면에서의 강수 후의 증발에 의해 발생하는 전선무가 있다(한국기상학회, 1999).

복사무는 야간에 지면 냉각으로 인한 기온역전에 의해 발생하며, 지표부근의 얇은 습윤 대기층보다 건조한 대기 밑에 깔리는 구름 없는 밤에 가장 잘 발생한다. 얇은 습윤 대기층은 지표에서 방출되는 적외선 복사를 많이 흡수하지 못하므로 이런 날 지표는 급속도로 냉각하고, 땅이 냉각함에 따라 위의 공기도 냉각하여 접지역전이 일어나게 된다(대기환경과학, 2001). 계절적으로는 가을에서 겨울에 걸쳐 많고 특히 분지나 저지대에서 빈번히 발생한다. 복사무의 발생시각은 일출 전후에 빈번히 발생하며 일출 후 2~3시간 후면 소멸된다. 복사무가 발생한 날은 일중에 날씨가 좋고 기온이 높이 올라갈 때가 많다. 해상에서는 기온의 일변화가 적으므로 복사무는 거의 발생하지 않는다(민내언, 1986).

이류무는 습하고 따뜻한 기단이 찬 지표면 위를 이동하면서 발생한다. 복사무와 같이 안정적으로 층상화 된 기층 하에서 발달하지만 그 범위가 넓고 지속시간이 길다(Houze, 1993).

또한, 이류무는 복사무 보다 두께가 두꺼우며 발생하는 범위도 아주 넓다. 또한 지속성이 커 한 번 발생되면 수일 또는 한 달간 지속되기도 한다.

증기무는 따뜻한 수면위에 차고 안정된 기단이 이동해 오면서 수면으로부터 증발에 의한 수증기 공급을 받아 포화되어 발생하며, 불안정한 성층 하에서 발달하므로 상층에서의 일사와 하층에서의 열 공급으로 온도경도가 해소되면 안개가 소산된다.

Collection @ chosun

이류무와 증기무를 구분하는 방법에는 수직적인 온도 경도를 이용한 방법 외에 지면의 수분 함유량과 수직적인 열속의 비를 이용하여 결정하는 방법이 있다. 또한 안개층 내의 수직적인 물방울량의 분포를 이용하여 안개 상층에서 최대 물방울량이 관측되면 이류무이고, 물방울량의 수직적인 차이가 적으면 증기무로 구분하는 방법이 있다(Oliver, 1978).

전선무는 전선에 동반되어 발생하며, 전선을 따라 두개의 공기덩이가 혼합해서 생기는 혼합전선무와 온난전선의 통과에 앞서 찬 공기가 증발에 의한 수증기 공급을 받아서 생기는 온난전선무로 구분 지을 수 있다.

2. 유형별 안개의 분류기준

안개의 예측능력을 향상하기 위해서는 지역의 특성을 고려한 유형별 특성을 먼저 분석해야 한다. 특히 유형별 분류는 학문적인 정의보다는 지역특성이 고려되고 현업에서 이용하기 편리하게 기준이 설정되어야 유용하게 활용할 수 있다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 분류기준을 정하여 안개를 유형별로 분류하였는데, 각 요소별 점수가 가장 많은 것을 해당 안개로 분류하였고, ◎ 표시된 것은 점수에 우선하여 해당 안개로 분류하였다.

a. 복사무

복사무는 지면이 냉각으로 인해 지면근처에 역전층에서 발생하는 안개이므로 먼저 종관일기도에서도 분석이 가능하다. 일기도에서 고기압의 중심이 한반도에 위치하거나 안장부가 자리 잡고 있을 때의 일기도를 기준으로 정하였다. 바람이 약하고, 지면냉각으로 인해 역전층이 형성되면 복사무가 발생하는 조건이 됨으로 인천공항 AMOS[3] 자료에서 풍속 4kt 이하와 오산, 백령도의 고층기상자료에서 역전층이 있을 때, 인천공항의 AMOS 자료에서 상대습도 90%이상을 기준으로 설정하였다.

3) Aerodrome Meteorological Observation System

Collection @ chosun

Table 2. The classification standard of fog type in Incheon Airport.

Division	Analysis contents	Rad.	Adv.	Str.	Fro.
Meteorological chart patten	○ Radiation fog/Saddle area, Center of isobaric (500km more) ○ Front fog/Rainfall by front passing	○			◎
Yeonpyeong-do	fog occurrence		○	○	
Deokjeok-do	〃		○	○	
Summi-do	〃		○	○	
Western sea	Satellite fog image (western sea)		○	○	
SST	○ Steam fog/T〉SST(2℃more) ○ Advection fog/T〉SST(2℃more)		◎	◎	
Wind speed(kt)	○ Radiation fog/w〈4kt ○ Advection and steam fog/w〉4kt	○	○	○	
Relative humidity	More 90%	○	○	○	○
Skew-T	Surface reversal occurrence	○			

※ Rad. : Radiation fog, Adv. : Advection fog, Str. : Steam fog, Fro. : Front fog

b. 이류무

이류무는 습하고 따뜻한 기단이 찬 지표면 위를 이동하면서 발생 하는 안개이므로 인천공항 주변의 해무발생을 분석하였다. 연평도, 덕적도, 선미도의 안개발생 여부와 위성사진을 통한 서해중부해상의 안개발생 여부를 기준으로 설정하였다. 덕적도 부이의 기온과 수온자료를 이용하여 해수면 온도와 기온과의 차이인 해기차를 구하여 수온보다 기온이 2℃이상인 날을 기준으로 설정하였다. 또한 풍향이 북서에서 남서풍이고 풍속이 4kts 이상인 날을 기준으로 설정하였다.

c. 증기무

증기무는 찬 기단이 이동하여 따뜻한 지표와 접촉할 때 생기는 안개이므로 덕적도 부이의 수온보다 기온이 2℃이상 낮은 때와, 이류무의 기준과 마찬가지로 연평도,

Collection @ chosun

덕적도, 선미도, 서해중부해상의 안개발생 여부를 기준으로 설정하였다. 또한 풍향이 북서에서 남서풍이고 풍속이 4kts 이상인 날을 기준으로 설정하였다.

d. 전선무

전선무는 전선에 동반되어 나타나는 안개로서 찬 공기층에 더운 빗방울이 떨어지면 빗물의 일부는 공기 속으로 증발하는데, 이 과정에서 공기가 포화되고 혼합이 일어나면 안개가 발생한다. 이러한 안개는 통상 온난전선이 통과하기 직전 또는 한랭전선이 통과한 직후에 얇은 대기층에서 발생한다(민경덕, 2001). 실제 안개는 강수와 관련되어 나타나고 있으므로 본 연구에서도 습도 90% 이상이고 기압골 또는 전선의 영향으로 강수가 있던 날을 기준으로 설정하였다. 다른 유형별 기준에 적합하더라도 강수가 있었으면 전선무로 분류하였다.

D. 유형별 안개 특성 분석

1. 유형별 안개발생

인천공항의 유형별, 월별 안개발생일수를 Fig. 8 나타내었다.

인천공항의 안개발생일수는 조사 기간 중 270일 이었으나 발생횟수는 412회 이었다. 이는 안개가 낀 날에도 발생·소멸이 몇 회씩 반복된 날이 있었기 때문이다. 유형별 안개특성을 분석하기 위해 발생일수보다 빈도가 높은 안개발생횟수를 이용하였다.

유형별 안개발생 횟수는 이류무 162회, 전선무 143회, 복사무 71회, 증기무 36회 순이었다. 복사무는 10월에 12회, 11월에 11회, 6월에 10회순으로 발생하였고, 계절별로는 가을, 봄에 많이 발생하였다.

이류무는 7월에 40회, 5월에 36회, 6월에 35회 순으로 적게 발생하여 난기가 강하게 유입되는 여름에 가장 많이 발생하였고, 난기 유입이 약한 11월에 발생하지 않았으며,

Collection @ chosun

12월과 1월에는 1회가 나타나 겨울철에는 이류무가 거의 발생하지 않았다.

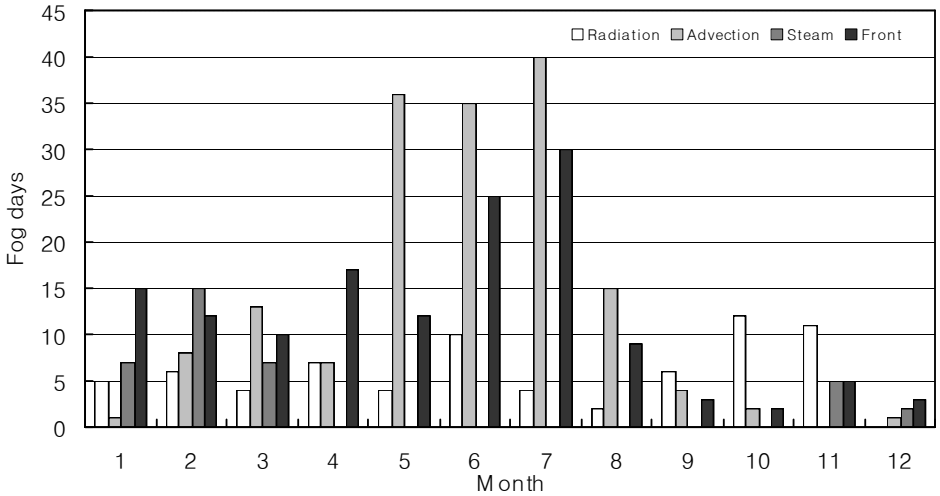


Fig. 8 Fog days in monthly for fog type from 2001 to 2004.

증기무는 2월에 15회, 1월과 3월에 7회, 11월에 5회순을 많이 나타났고, 4월부터 10월 까지는 발생하지 않아 겨울철에 만 나타나는 안개로 분석되었다.

전선무는 7월에 30회, 6월에 25회, 4월에 17회 순으로 나타났고 전 월에 걸쳐 발생하였다.

2. 풍향 · 풍속별 안개특성

a. 복사무

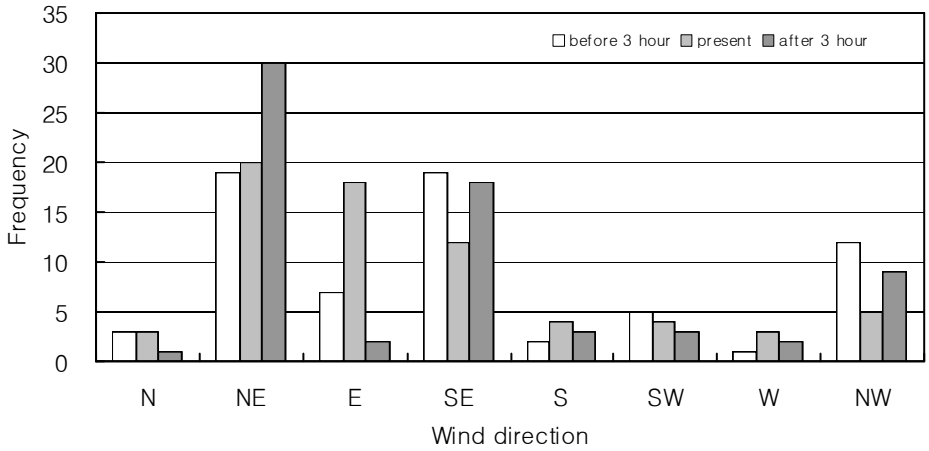
복사무발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍향별 안개의 특성을 Fig. 9(a)에 나타내었다. 발생횟수 71회 중 발생 3시간 전에는 남동풍 19회, 북동풍

19회로 나타나 주 풍향은 남동에서 북동풍이었다. 안개 발생시에도 주 풍향은 남동에서 북동풍이었으나 북동풍이 20회로 많았고, 소멸 3시간 후에 풍향도 남동풍 19회, 북동풍 30회로 나타나 주풍향이 남동에서 북동풍으로 불 때 복사무가 발생하였고, 소멸 후에 남동풍에서 북동풍으로 바뀌는 것을 보면 고기압중심이 북동쪽으로

Collection @ chosun

이동해 갔을 때 소멸되는 것으로 분석되었다.

복사무발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍속별 안개의 특성을 Fig. 9(b)에 각각 나타내었다. 복사무 발생횟수 71회 중 6kt 이하가 복사무 발생시에 62회로 나타났다. 풍속 1kt이하는 발생 3시간 전 21회, 발생시 17회, 소멸 3시간 후 7회순으로 나타나 안개 발생 전에는 1kt이하 횟수가 많았으나, 풍속 3kt 이상이 소멸 3시간 후 64회, 발생시 54회, 발생 3시간 전 50회 순으로 나타나 풍속이 강해지면서 안개가 소멸되는 것을 뒷받침해 주고 있다.



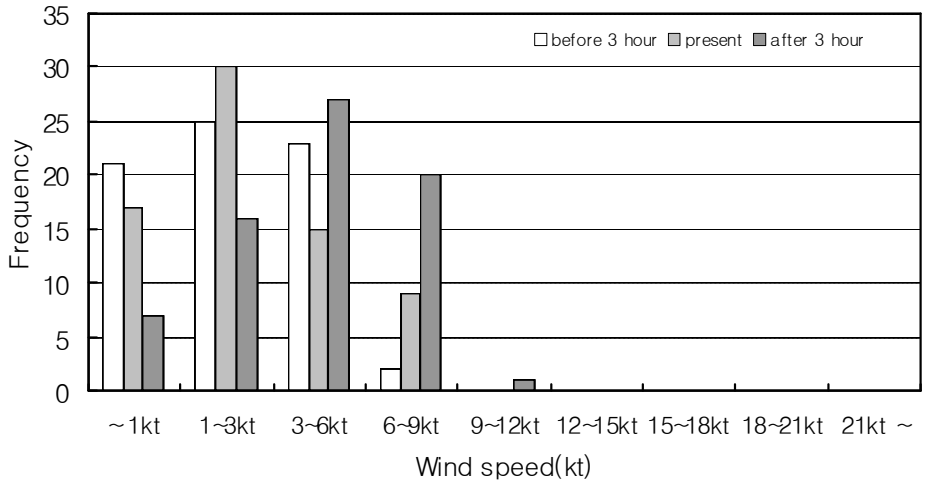


Fig. 9 The distribution of wind direction and speed in radiation fog cases.

Collection @ chosun

b. 이류무

이류무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후 풍향별 안개의 특성을 Fig. 10(a)에 나타내었다. 발생횟수 162회 중 발생 3시간 전에는 서풍 49회, 남서풍 38회로 나타나 주풍향이 남서풍에서 서풍이었고, 발생시에도 남서풍 40회, 북서풍 28회로 주 풍향은 남서에서 북서풍이었다. 소멸 3시 간 후에는 남풍34회, 남서풍 33회로 주 풍향은 남풍에서 남서풍으로 발생 전부터 소멸 될 때까지 남서풍에서 북서풍이 부는 것으로 분석되었다.

이류무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍속별 안개의 특성을 Fig. 10(b)에 나타내었다.

이류무 발생시 풍속은 1kt 이하가 22회를 차지하고 있으나 1~6kt가 134회가 나타났고, 9kt 이상에서는 6회를 보여 거의 발생하지 않았다. 이는 '풍속이 너무 강하면 난류에 의한 수직혼합이 왕성하므로 안개가 발생하지 않거나 층운으로 되고, 풍속이 너무 약하면 냉각되기 어렵다(Telford and Chai, 1984)'는 이론을 뒷받침해 주고 있다.

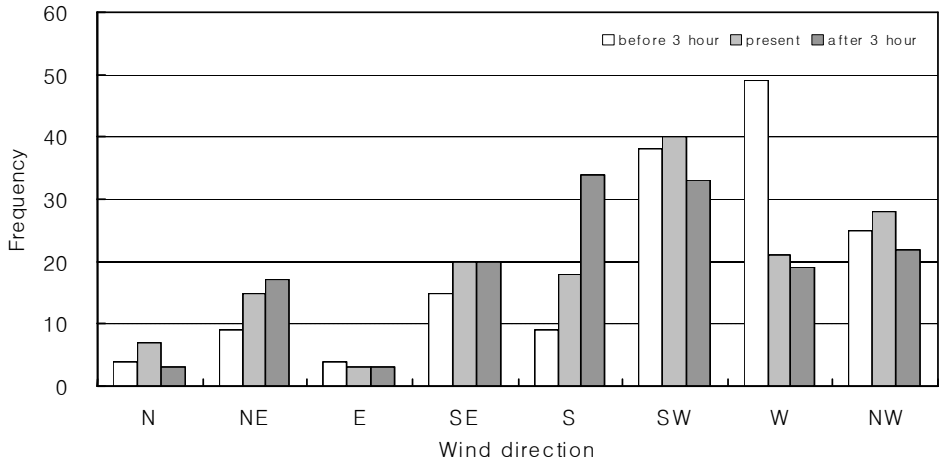


Fig. 10 The distribution of wind direction and speed in advection fog cases.

Collection @ chosun

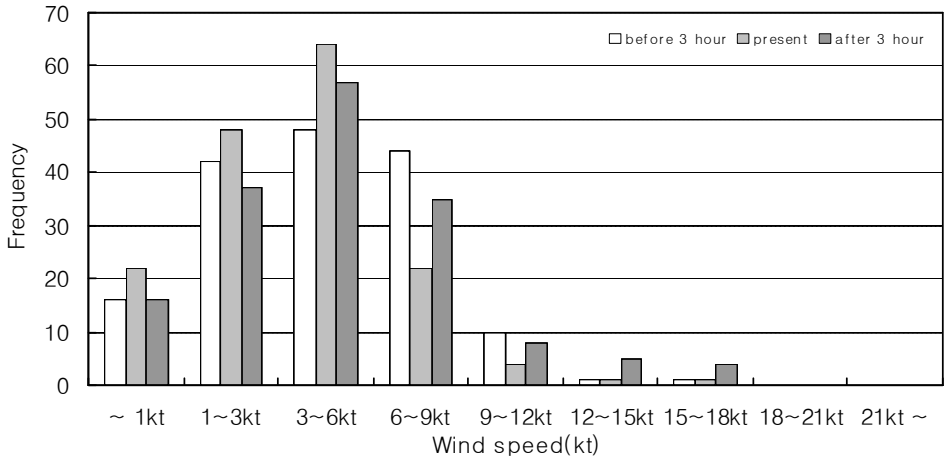


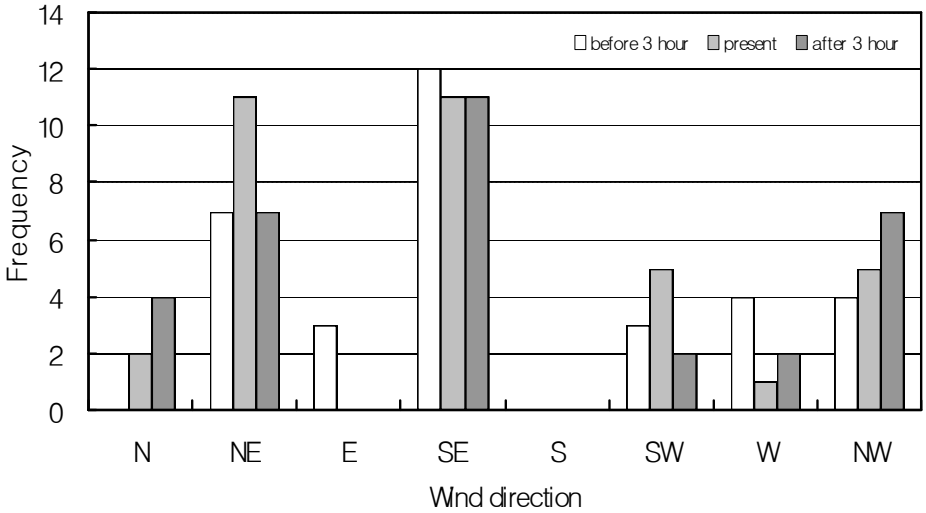
Fig. 10 Continued.

c. 증기무

증기무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍향별 안개의 특성을 Fig. 11(a)에 각각 나타내었다. 발생횟수 36회중 발생 3시간 전에는 남동풍 12회, 북동풍 7회로 나타나 주풍향이 남동풍에서 북동풍이었고, 발생시에도 남동풍 11회, 북동풍 11회로 주 풍향은 남동에서 북동풍이었다. 증기무 소멸 3시간 후에는 남동풍 12회, 북동 풍 7회, 북서풍 4회 순으로 나타나, 발생 전과 발생시의 주 풍향은 남동에서 북동풍 이었으나, 발생 후에는 북서풍으로 바뀌는 알 수 있다. 이는 증기무가 발생되는 대륙성 고기압 전면에서 기압골이 통과하여 풍향이 남동풍에서 북동풍 일 때 증기무가 발생되었고, 소멸 된 후에는 북서풍으로 바뀌는 것으로 분석되었다.

증기무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍속별 안개의 특성을 Fig. 11(b)에 나타내었는데, 증기무 발생은 9kt 이하에서 33회로 92%가 나타났고, 9kt이상에서는 3회로 8%가 나타났다. 이는 이류무에서 풍속 9kt이하에서 96%가 나타나는 것에 이어 두번째로 풍속이 많이 나타나는 것이다.

Collection @ chosun



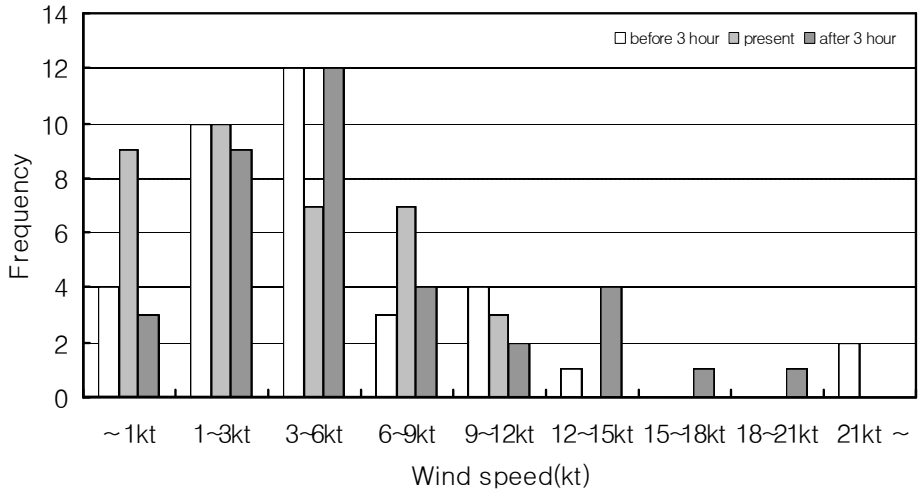


Fig. 11 The distribution of wind direction and speed in steam fog cases.

Collection @ chosun

d. 전선무

전선무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍향별 안개의 특성을 Fig. 12(a)에 나타내었다.

전선무 발생횟수 143회중 발생시에 남서풍 38회, 남동풍 35회로 주풍향이 남동풍에서 남서풍이었고, 소멸 3시간 후에는 북서풍이 27회, 남서풍이 26회로 나타나고 있어, 남풍계열에서 습윤한 난기류가 유입되면서 전선무가 발생하였고, 북서풍으로 바뀌면서 안개가 소멸되었음을 보여 주고 있다. 그러나 전선무의풍향은 모든 풍향에서 나타나 전선, 기압골이 통과하는 통로에 따라 나타난 것을 알 수 있다.

발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 풍속별 안개의 특성을 Fig. 12(b)에 나타내었는데 풍속이 3~12kt에서 110회가 나타났고, 풍속 12kt이상에서도 16회가 나타나 다른 안개에 비해 풍속이 높아도 발생하는 빈도가 높은 것으로 분석되었다.

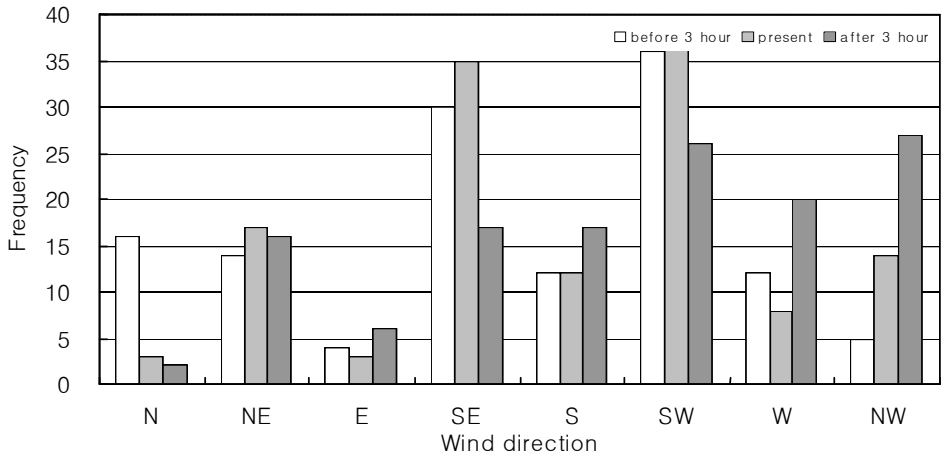


Fig. 12 The distribution of wind direction and speed in front fog cases.

Collection @ chosun

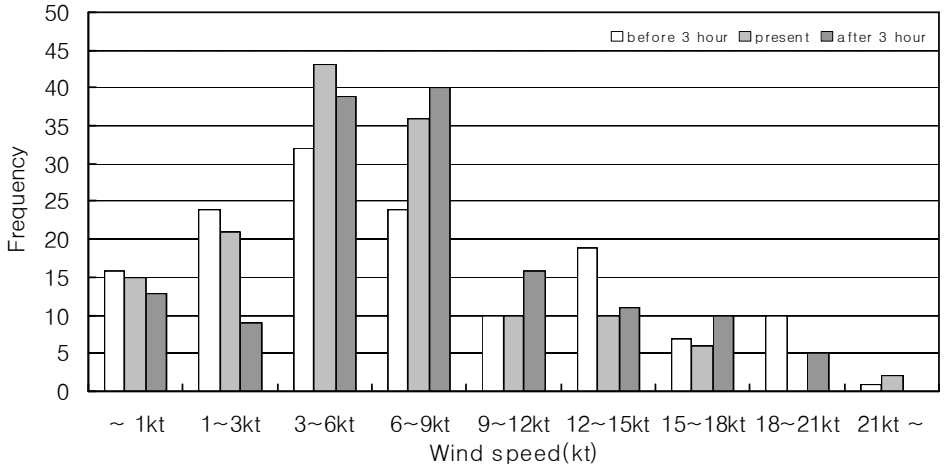


Fig. 12 Continued.

증기무, 이류무, 복사무 등 다른 유형의 안개와 비교해 보면 전선무가 다른 안개보다 풍속이 높을 때에 나타나고 있다. 이는 전선이나 기압골 통과로 인해 강수가 있을 때 안개가 발생함으로 다른 안개발생시보다 풍속이 높은 것을 알 수 있다.

3. 해기차 분석

복사무 발생시 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 덕적도 수온과 기온의 차, 즉 해기차를 Fig. 13에 나타내었다.

부이의 고장 및 점검 일을 제외한 복사무 발생일 58회 중에서 발생 3시간 전에는 해기차 0~2℃에 20회, -2~0℃에11회 2~4℃에 9회 순으로 나타났고. 발생시에는 해기차 0~2℃에 17회, 2~ 4℃에 14회, -2~0℃에 10회순으로 나타났다. 소멸 3시간 후에는 해기차 2~4℃에 16회, -2~0℃에 14회, 0~2℃에 12회 순으로 나타났다. 해수면 온도가 기온보다 높을 때가 37회로 64%를 나타내었고, 해기차 -2~4℃에서 41회로 71%가 발생하여 복사무 발생시 해기차의 절대 값이 4℃이하에서 많이 발생하였다.

Collection @ chosun

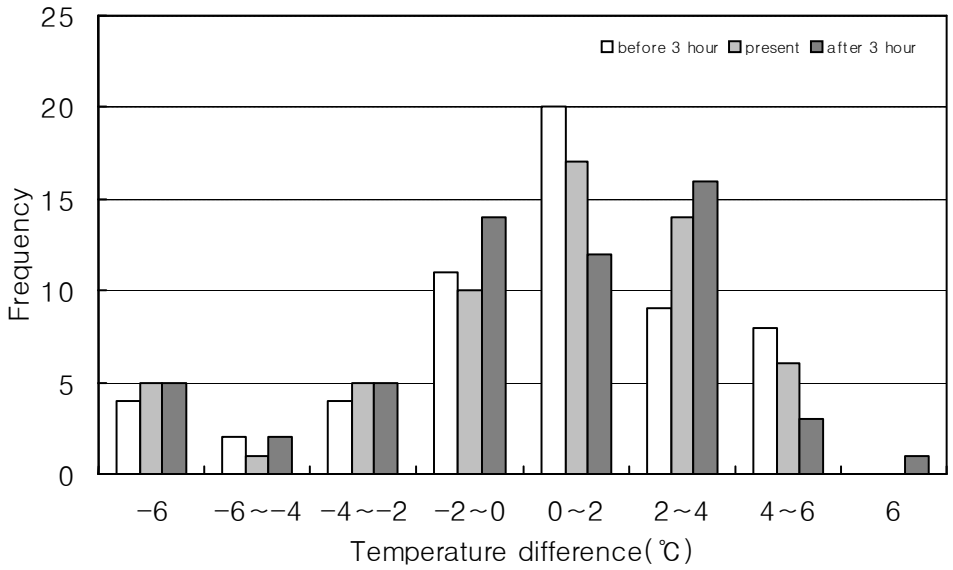


Fig. 13 The difference air temperature from SST in radiation fog cases.

이는 인천공항에서의 복사무 발생은 지면 복사냉각과 해기차에 의해 복합적으로 나타나고 있는 것으로 분석되었으며, 자료조사 중에 나타난 것으로 장소에 따른 해기차가 상이하고 있어 향후 이에 대한 별도의 연구가 이루어 져야하겠다.

이류무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 해기차를 Fig. 14에 나타내었다. 부이고장 및 점검 일을 제외한 이류무 발생일 117회 중에서 발생 3시간 전에는 해기차 -2~0℃에 39회, -6~-4℃에 18회, 2~4℃에 16회 순으로 나타났고, 발생시에는 -2~0℃에 42회, -6℃미만에서 17회, 0~2℃에서 14회 순으로 발생되었다. 소멸 후에는 -2~0℃에 42회, -6℃미만에서 19회, 0~2℃에 13회 순으로 소멸하였고, 나머지 -2℃이하에서 구간에서는 약 10%로 정도로 나타났다. 이는 온난한 기류가 상대적으로 찬 해수면 위를 이동하면서 발생하는 이류무 발생 메커니즘을 잘 뒷받침해 주고 있고, 해기차 -2℃미만에서 75회로 64%가 발생되었으나, 분류기준 이하인 해기차 -2~0℃에서 42회로 36%가 발생되어 이류무 예보 발표 시 참고 해야 한다.

Collection @ chosun

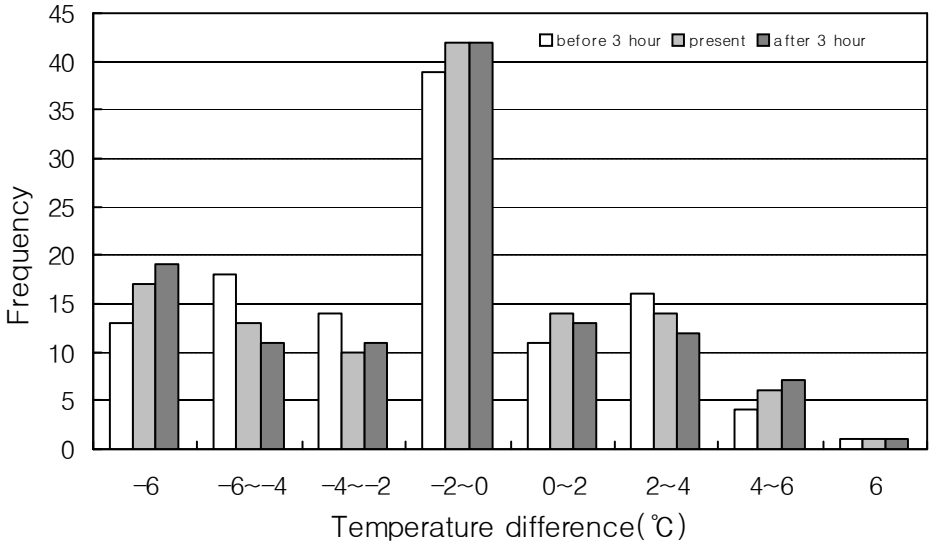


Fig. 14 The difference air temperature from SST in advection fog.

증기무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 해기차를 Fig. 15에 나타내었다. 부이의 고장 및 점검 일을 제외한 발생일 31회 중에서 발생 3시간 전에는 해기차가 0~2℃에서 8회 , 2~4℃이상에서 7회, 4~6℃이상에서 6회 순으로 나타났고. 발생시에는 해기차가 0~2℃에서 12회 , 2~4℃이상에서 6회, 4~6℃이상에서 4회 순으로 나타났다. 소멸 후에는 해기차가 0~2℃에서 9회, 2~4℃이상에서 6회, 4~6℃이상에서 6회 순으로 나타났다. 이는 증기무가 한랭한 기류가 상대적으로 따듯한 해수면 위를 이동하면서 발생하는 원인을 잘 뒷받침해 주고 있고, 찬 수면위에 따듯한 기류가 이동하여 이류무의 발생할 때의 해기차와 따듯한 수면위에 찬 기류가 이동하여 증기무가 발생할 때의 해기차는 비슷하게 분포되었다.

Collection @ chosun

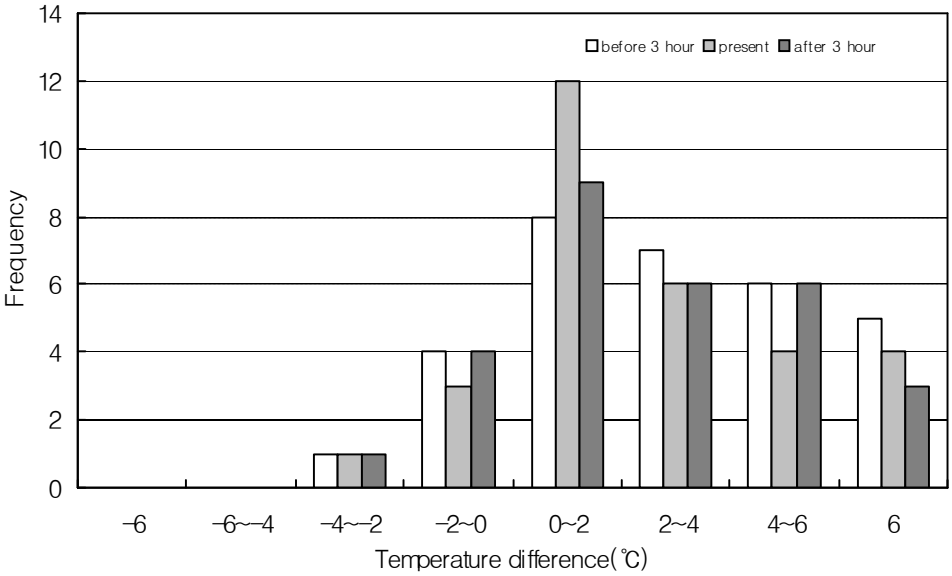


Fig. 15 The difference air temperature from SST in steam fog.

전선무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 해기차를 Fig. 16에 나타내었다.

부이의 고장 및 점검 일을 제외한 발생일 129회 중에서 발생 3시간 전에는 해기차가 -2~0℃에서 49회, 2~4℃에서 20회, 0~2℃에서 18회 순으로 나타났고, 발생시에는 해기차가 -2~0℃에서 43회, 2~4℃에서 22회, 0~2℃에서 20회 순으로 나타났다. 소멸 후에는 해기차가 -2~0℃에서 45회, 2~4℃에서 26회, 0~2℃에서 190회 순으로 나타나 전선무 발생은 해수면온도 보다 기온이 높을 때에 81회로 63% 발생하였고, 이 중에서도 해기차 -2~4℃에서 85회로 66%가 발생하여 해기차의 절대치가 적을 때 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 겨울철을 제외한 계절에 전선 또는 기압골 통과로 인하여 강수가 있을 때는 해수면 온도보다 기온이 높은 것으로, 겨울철 한랭건조한 대륙성 기단의 확장으로 눈 또는 비가 올 때에는 해수면온도 보다 기온이 낮은 것으로 분석되어 전선무 발생시에도 해기차가 양의 상관관계가 있음을 보여주고 있다.

Collection @ chosun

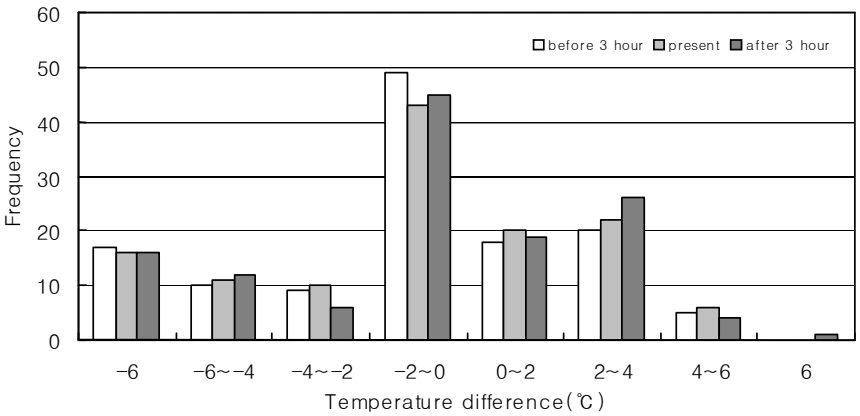


Fig. 16 The difference air temperature from SST in front fog.

4. 상대습도 분석

복사무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 상대습도를 Fig. 17에 나타내었다. 복사무 발생 73회 중에서 발생 3시간 전에는 94~96%에서 27회, 96~98%에서 14회, 90~92%에서 12회 순으로 나타났고 발생시에는 94~96%에서 28회, 96~98%에서 19회, 92~94%에서 9회 순으로 나타났다. 소멸 후에는 94~96%에서 16회, 96~98%에서 7회, 92~94%와 90~92%에서 5회 순으로 나타났다.

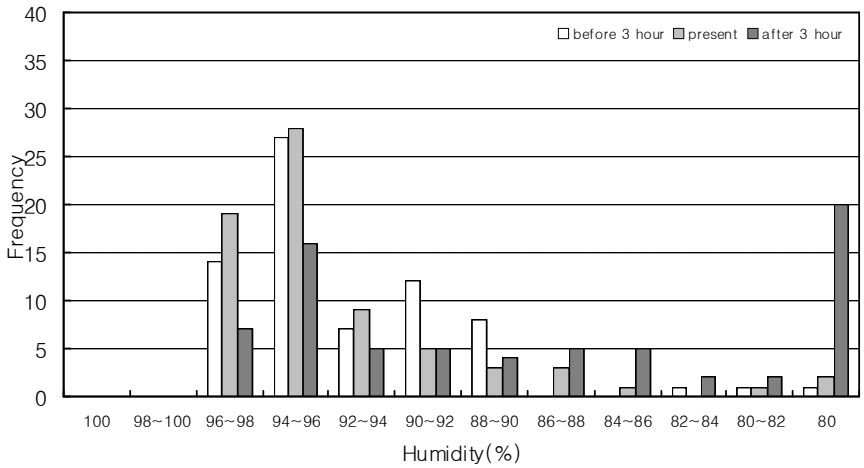


Fig. 17 The distribution of humidity in radiation fog cases.

Collection @ chosun

복사무 발생시의 상대습도는 90%이상에서 61회로 84%가 발생하였고 94~98%사이에서 47회로 64%가 발생 하였으며, 소멸 후에는 80%이하가 20회로 27%가 나타나 복사무 소멸과 함께 상대습도가 다른 안개에 비해 급격하게 감소되는 것으로 분석되었다.

이류무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 상대습도를 Fig. 18에 나타내었다.

이류무 발생 162회 중에서 발생 3시간 전에는 94~96%에서 57회, 96~98%에서 36회, 90~92%에서 17회 순으로 나타났고, 발생시에는 94~96%에서 78회, 96~98%에서 53회, 92~94%에서 15회 순으로 나타났다. 소멸 후에는 94~96%에서 54회, 96~98%에서 33, 92~94%에서 17회 순으로 나타났다. 이류무 발생시에는 상대습도 90%이상에서 61회로 84%가 발생하였고 94~98%사이에서 47회로 64%가 발생 한 것은, 이류무가 발생되기 위해서는 상대습도 90%이상이 되어야 함을 증명해 주고 있다. 소멸 후에는 상대습도 80%이하가 20회로 27%를 나타나 복사무 소멸과 함께 상대습도가 급하게 감소되는 것으로 분석되었다.

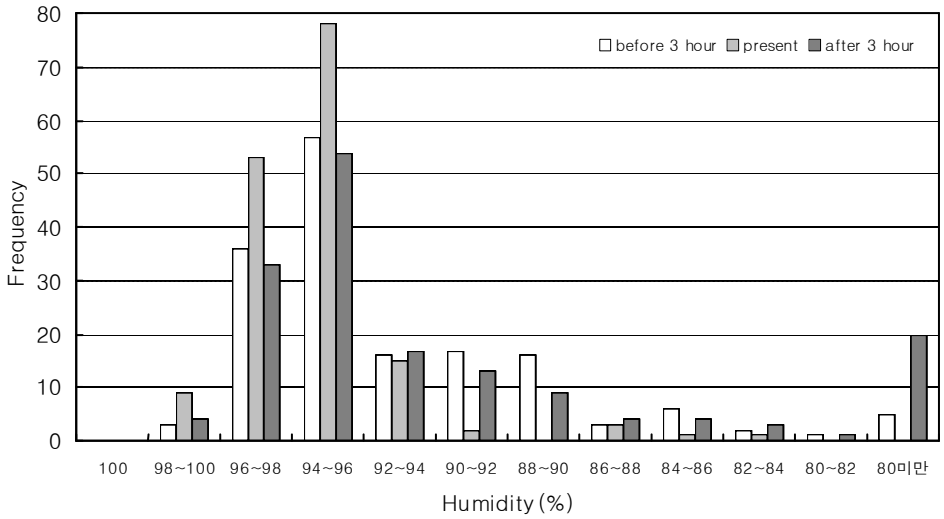


Fig. 18 The distribution of humidity in advection fog cases.

Collection @ chosun

증기무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 상대습도를 Fig. 19에 나타내었다. 증기무 발생 36회 중에서 발생 3시간 전에는 94～96%에서 13회, 96～98%와 90～92%에서 6회 순으로 나타났고, 발생시에는 94～96%에서 24회,96～98%에서 7회, 92～94%에서 2회 순으로 나타났다. 소멸 후에는 94～96%에서 13회, 96～98%에서 6회, 90～92%에서 3회 순으로 나타났다.

증기무 발생시에는 상대습도 90%이상에서 35회로 97%가 발생하였고 94～98%사이에서 31회로 86%가 발생하여, 복사무 발생시의 상대습도 보다 증기무 발생시의 상대습도가 높게 분석되었다.

전선무 발생 3시간 전, 발생시, 소멸 3시간 후의 상대습도를 Fig. 20에 나타내었다.

전선무 발생 143회 중에서 발생 3시간 전에는 94～96%에서 49회, 96～98%에서 39회, 92～94%에서 16회 순으로 나타났고, 발생시에는 94～96%와96～98%에서 63회, 92～94%에서 6회 순으로 나타났다. 소멸 후에는 94～96%에서 63회, 96～98%에서 45회, 92～94%에서 13회 순으로 나타났다.

전선무 발생시에는 상대습도 90%이상에서 134회로 94%가 발생하였고 94～98%사이에서 126회로 88%가 발생하여 다른 유형의 안개의 상대습도 보다 가장 높게 나타났다.

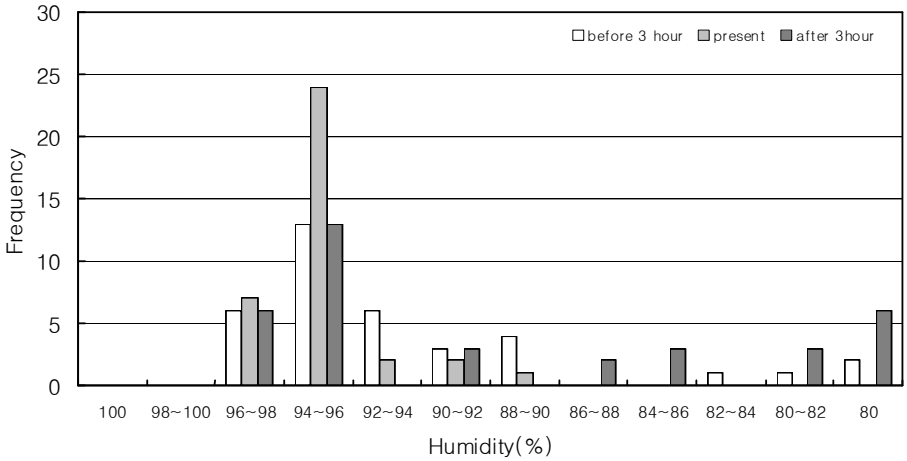


Fig. 19 The distribution of humidity in steam fog cases.

Collection @ chosun

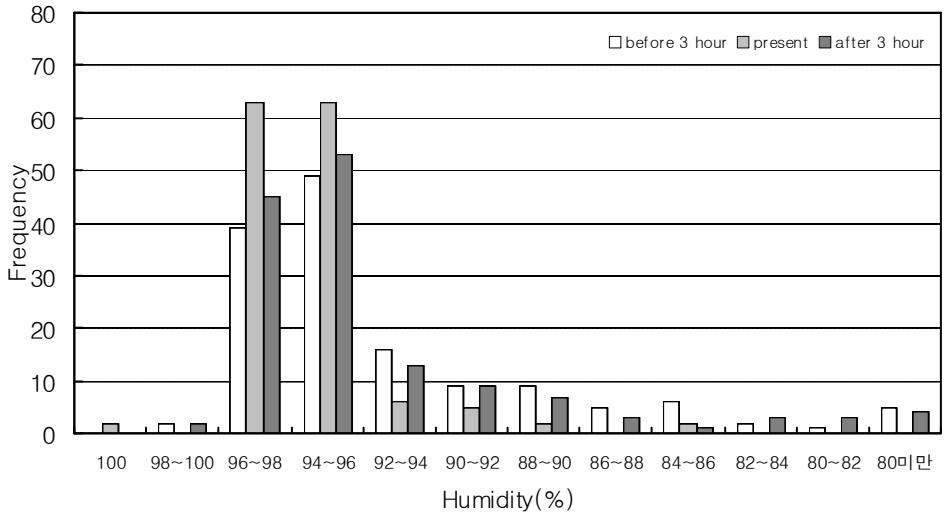


Fig. 20 The distribution of humidity in front fog cases.

5. 안개발생 및 소멸시각 분석

복사무는 발생은 Fig. 21에서 보는 바와 같이 지면이 냉각이 시작되기 시작한 20시부터 발생하기 시작하여 지면최저온도가 나타나는 4~7시 사이에 발생횟수 71회 중 37회로 52%가 발생하였다. 일사에 의해 지면온도가 올라가서 기온역전이 해소되는 10시 이후에는 거의 발생하지 않았다. 월별로는 10월에 12회, 11월에 11회, 6월에 10회 순으로 많이 발생하여 봄, 가을에 주로 발생하였고, 봄에는 6월까지도 많이 발생하는 것으로 분석되었다.

또한 12월에는 안개가 발생하지 않았고, 8월에 2회, 5월, 7월에 4회순으로 적게 발생하여 여름철, 겨울철에는 봄철, 가을철에 비해 적게 발생하는 것으로 분석되었다.

이는 복사냉각에 의한 지면역전이 봄철과 가을철에 많이 나타나는 것을 알려 주고 있으며, 6월 까지 많이 발생하는 것은 봄철 복사냉각이 6월 까지 지속되고 있음을 보여 주고 있다.

Collection @ chosun

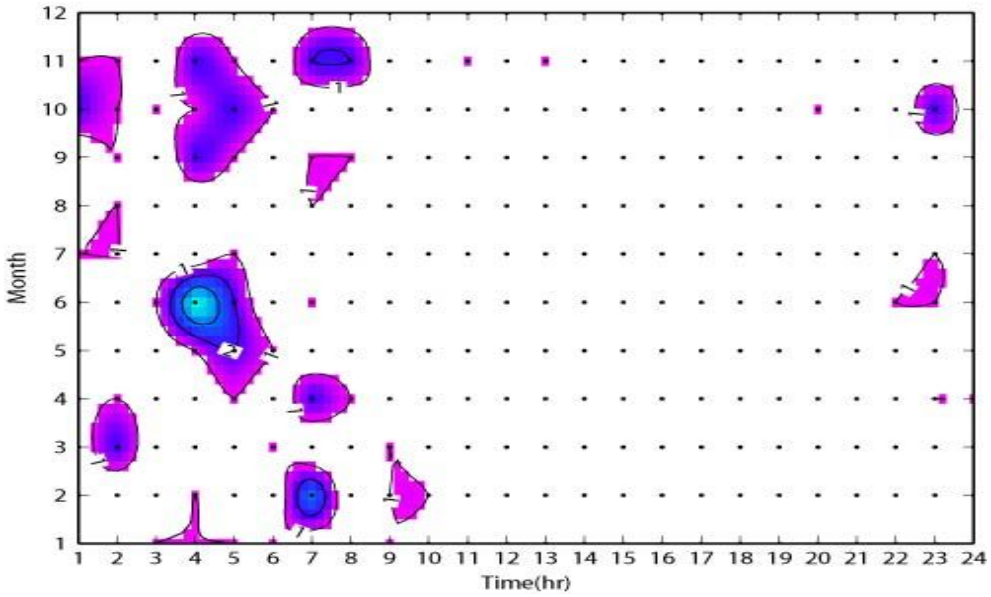


Fig. 21 The distribution of occurrence time for radiation fog from 2001 to 2004.

복사무 소멸은 Fig. 22에서와 같이 발생이 시작한 시각보다 2시간 후인 22시부터 나타나기 시작하였고, 가장 많이 발생한 시각도 5~10시에 50회가 발생하여 70%를 보이고 있다. 이는 봄, 가을에 기온 일교차가 크고, 오전에 접지 역전에 의해 복사무가 많이 발생하고 2~3시간 후에 소멸된 것으로 분석된다.

이류무 발생은 Fig. 23에서 보는 바와 같이 16시부터 발생되기 시작하여 20시부터 발생횟수가 11회로 증가하였다. 이류무도 복사무와 마찬가지로 지면최저온도가 나타나는 4~7시까지 발생횟수 162회 중 52회로 32%가 발생하였다. 이는 이류무 발생원인과 복사무 발생원인이 복합되어 나타났음을 보여 주고 있는데, 난기의 유입이 강한 7월에는 12시 까지 발생하였다.

월별 발생분포를 보면 남쪽에서 난기가 유입되는 5~8월에 126회로 78%가 발생되었으며, 난기의 유입이 없는 10~1월에는 2회로 1%가 발생되었다. 이는 겨울철에는 난기 유입에 의한 이류무 발생이 없음을 알려 주고 있는데, 이 시기에는 한랭건조한 대륙성기단이 확장되어 증기무가 발생하고 있다.

Collection @ chosun

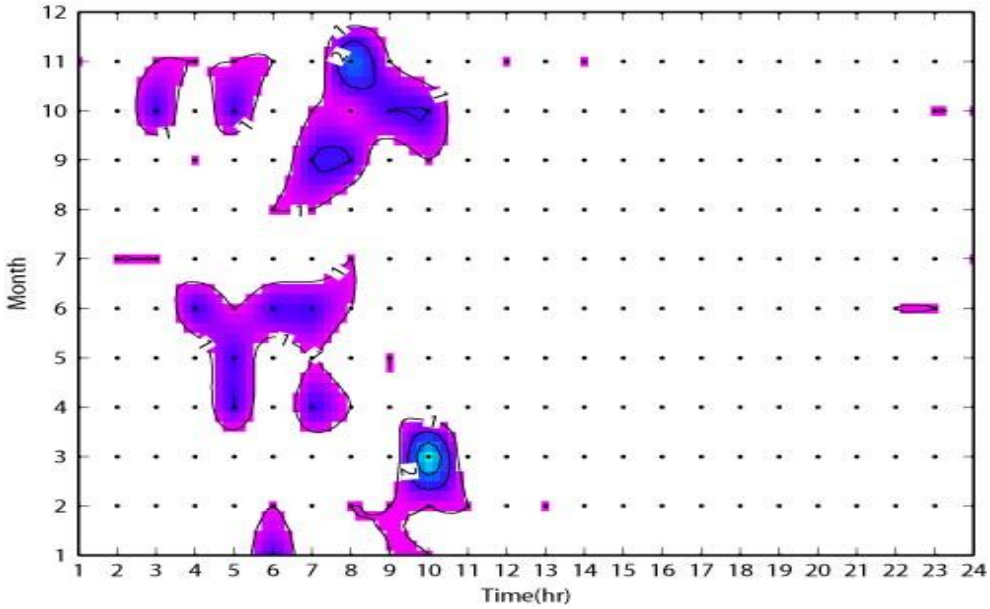


Fig. 22 The distribution of disappeared time radiation fog from 2001 to 2004.

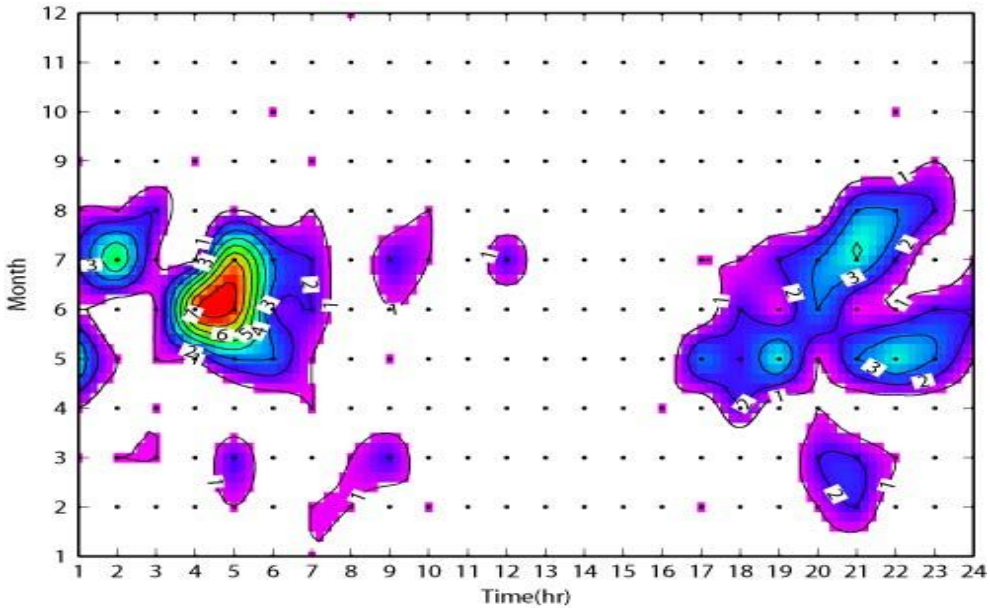


Fig. 23 The distribution of occurrence time for advection fog from 2001 to 2004.

Collection @ chosun

이류무 소멸은 Fig. 24에서 보는 바와 같이 17시부터 나타나기 시작하여 발생시각보다 1시간 늦게 나타나기 시작하였고, 13~16시를 제외하고 일중 소멸시각이 나타났다. 가장 많이 나타난 소멸시각은 5~10시에 87회로 53%가 발생하여 가장 많이 발생한 시각보다 2시간 정도 늦게 나타났다.

이류무의 발생·소멸은 난기의 유입이 강한 여름에 주로 발생하였으며, 발생시간은 난기의 유입이 강한 오후보다 오전에 많이 발생한 것으로 볼 때 복사무와 복합되어 발생되었음을 보여주고 있다.

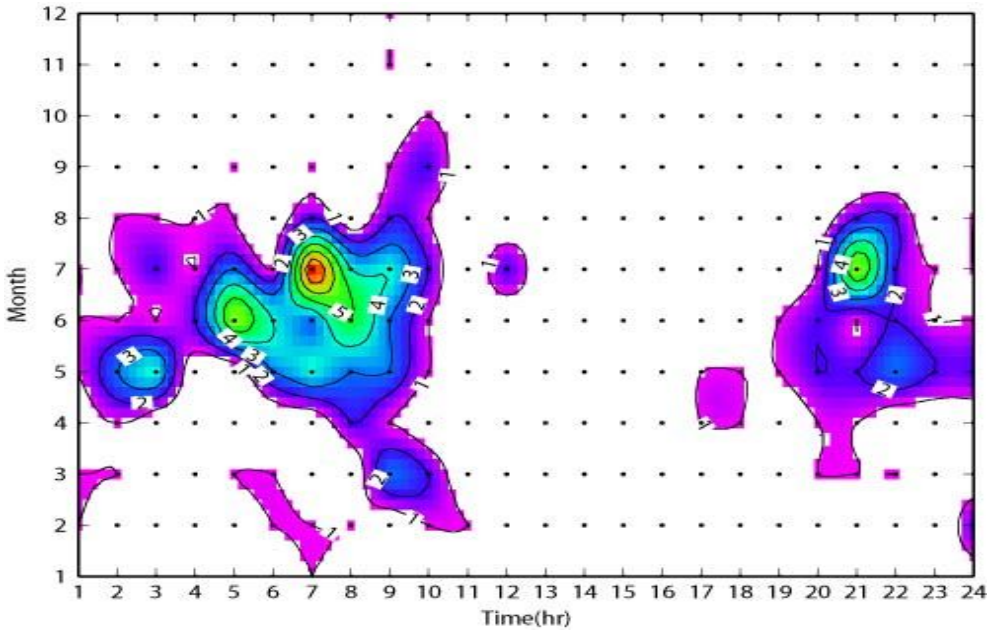


Fig. 24 The distribution of disappeared time for advection fog from 2001 to 2004.

증기무 발생은 Fig. 25에서와 같이 16시부터 발생하기 시작하여 다음날 9시 까지 지속되었다. 발생시간 중 20~21시, 1시에는 안개가 발생하지 않았으나 이는 연구기간이 짧아서 나타나는 결과라고 생각한다. 인천공항에서의 증기무 발생은 11~3월에 걸쳐 나타났으며 이외의 달에서는 한 건도 발생되지 않았다. 이는 증기무의 발생이 전 시간대에서 주로 발생 하는데 자료조사기간 동안에 발생한 안개의 횟수가

Collection @ chosun

적어서 나타나는 결과로 유추되고, 조사기간을 연장하여 별도의 연구가 이루어져야 할 것이다.

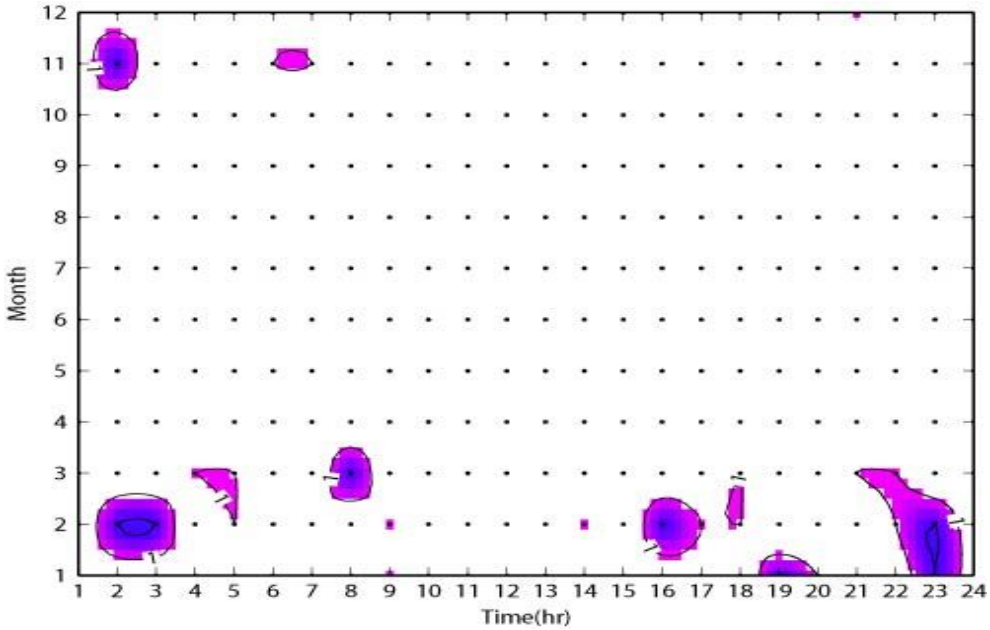


Fig. 25 The distribution of occurrence time for steam fog from 2001 to 2004.

증기무 소멸은 Fig. 26에서 보는 바와 같이 18시부터 나타나기 시작하여 발생시각보다 1시간 늦게 나타나기 시작하였고, 16~17시를 제외하고 일중 나타났다. 가장 많은 소멸시각은 9시에 6회로 나타났으나 비교적 일중 고르게 소멸시각이 나타났다. 증기무의 발생 · 소멸은 한랭한 대륙성 기단이 상대적으로 따듯한 서해해상에 접촉하여 발생함에 따라 주로 겨울철에 나타났고, 16~17시를 제외하고는 일중 나타났다.

전선무는 Fig. 27에서 보는 바와 같이 일중 발생하였으나, 오전에 101회 발생하여 전체 143회중 71%가 발생하였고 오후에는 42회로 29%가 발생하였다. 월별로는 7월에 30회, 6월에 25회, 1월에 15회 순으로 많이 발생하였고, 10월에 2회, 9월과 12월에 3회순으로 적게 발생하였다.

Collection @ chosun

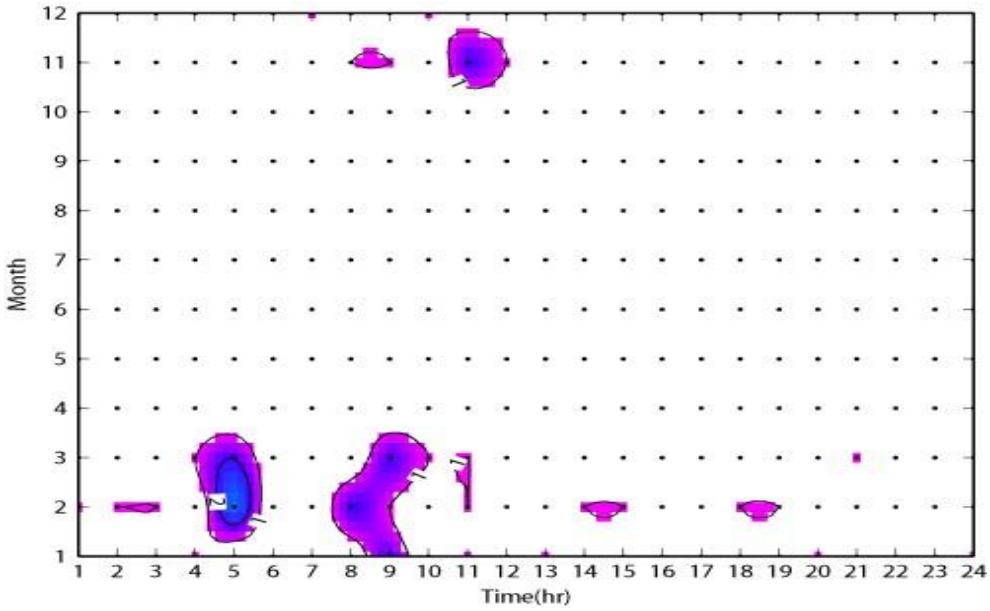


Fig. 26 The distribution of disappeared time for steam fog from 2001 to 2004.

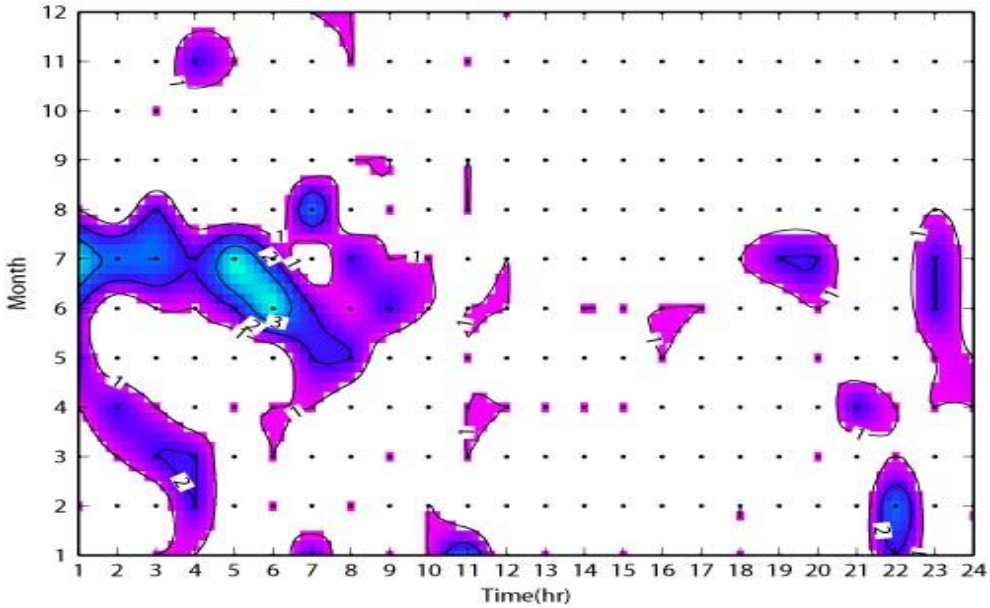


Fig. 27 The distribution of occurrence time for front fog form 2001 to 2004.

Collection @ chosun

전선무 소멸시각은 Fig. 28에서와 같이 발생시각과 비슷하게 오전에 많이 소멸되었고, 오후에는 상대적으로 적게 소멸 되었다. 전선무의 발생 · 소멸은 여름에 장마시기와 겨울철 강수가 있을 때 많이 발생하는 것으로 분석되었고, 특히 강수가 많은 6~7월과 오전에 많이 발생하는 것으로 분석되었다.

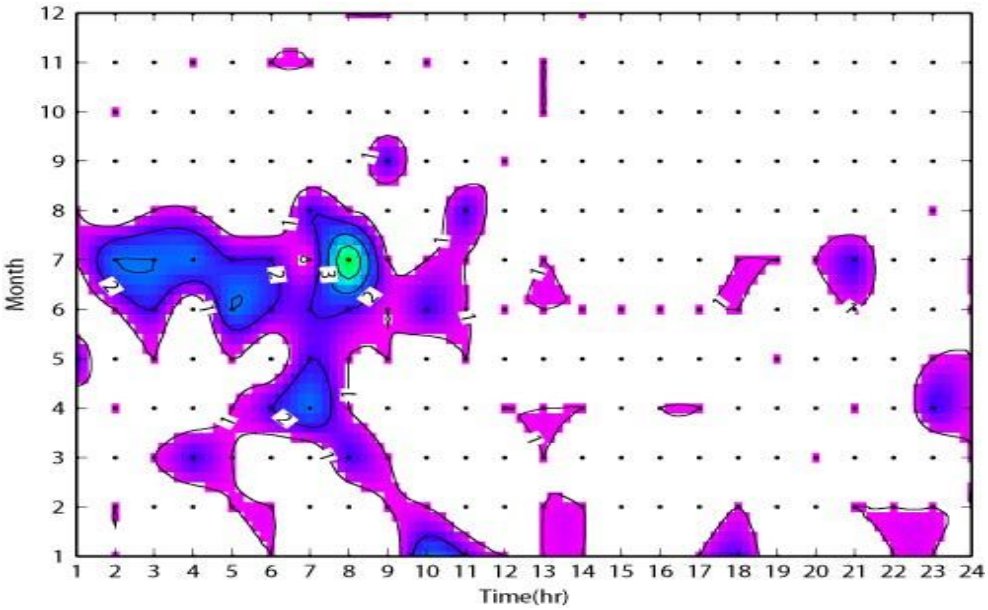


Fig. 28 The distribution of disappeared time for front fog from 2001 to 2004.

6. 안개지속시간 분석

안개 발생 유형별 지속 시간을 Fig. 29에 나타내었다. 복사무 발생횟수 71회중 지속시간은 1시간미만이 33회가 나타났고, 1~3시간 21회, 3~5시간 9회, 5~10시간 8회가 분포되었다. 복사무는 3시간미만이 54회로 76%가 나타났고, 10시간이상은 없었다. 복사무의 최장 지속시간은 9시간 이었고 평균 지속시간은 3시간 54분이다. 이는 복사무 지속시간이 비교적 짧은 것은 지면이 냉각되는 새벽에 발생한 안개가 일사에 의해 지면 역전이 해소됨에 따라 소멸되기 때문인 것으로 유추된다.

Collection @ chosun

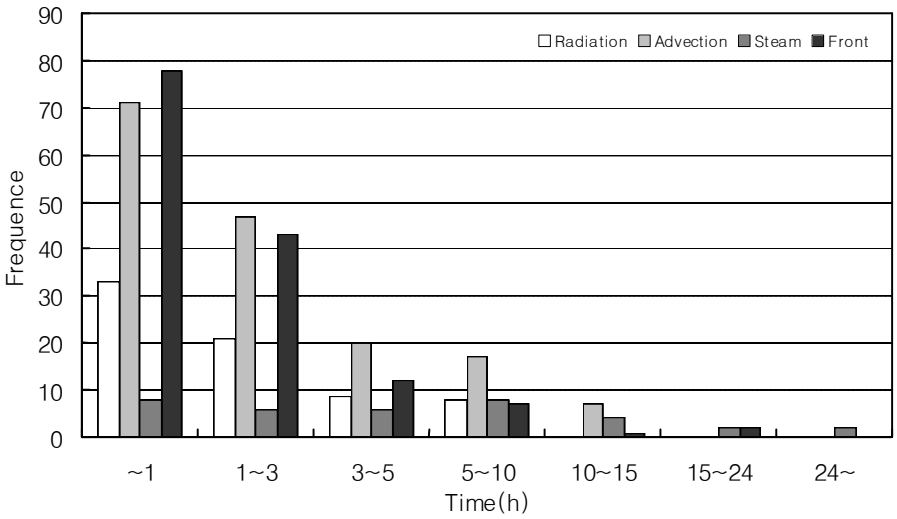


Fig. 29 The continuance time for fog type from 2001 to 2004.

이류무 발생횟수 162회 중 지속시간 1시간미만이 71회가 나타났고, 3시간미만이 118회로서 73%가 나타났다. 이류무는 다른 유형의 안개에 비해 비교적 지속시간이 길었는데, 최장지속시간은 24시간 5분이었고 평균지속시간은 7시간 30분이었다. 이는 이류무가 온난 다습한 공기가 상대적으로 찬 해수면을 이동하면서 발생하는 데에 기인한 것으로, 여름철 난기의 유입시간이 길어짐에 따라 지속시간도 긴 것으로 유추된다.

증기무 발생횟수 36회중 지속시간은 1시간미만이 9회로 나타났고, 3시간미만이 14회를 나타내 15시간미만의 구간에서는 비슷한 분포를 보이고 있어, 다른 안개에 비해 풍속이 높을 때 많이 발생되는 것으로 분석되었다. 증기무도 이류무와 비슷하게 지속시간이 길었고, 최장 지속시간은 24시간 30분이었고, 평균지속시간은 8시간 50분이었다.

전선무의 발생횟수 143회중 지속시간은 1시간미만이 78회로 나타났다. 3시간미만은 121회로 85%를 나타내 다른 유형의 안개에 비해 지속시간이 짧고, 10시간 이상은 3회로 장시간 안개 지속시간은 횟수가 적은 것으로 분석되었으며,

Collection @ chosun

최장지속시간은 15시간 40분이었고 평균지속시간은 5시간 20분이었다.

이는 증기무, 이류무의 발생원인과 전선무의 발생원인 서로 다르기 때문에 나타나는 특징으로 이류무, 증기무의 발생이 해기차에 의해 발생되는 것에 기인하는 것으로 분석된다.

7. 운량 분석

전운량과 유형별 안개를 Fig. 30에 나타내었다. 복사무는 전운량과 상관관계가 낮은 것으로 나타나고 있으나 하층운량은 작아질수록 안개발생회수가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지면복사 냉각으로 인해 복사무 발생이 증가한다는 이론(대기환경과학, 2001)을 뒷받침해 주고 있다.

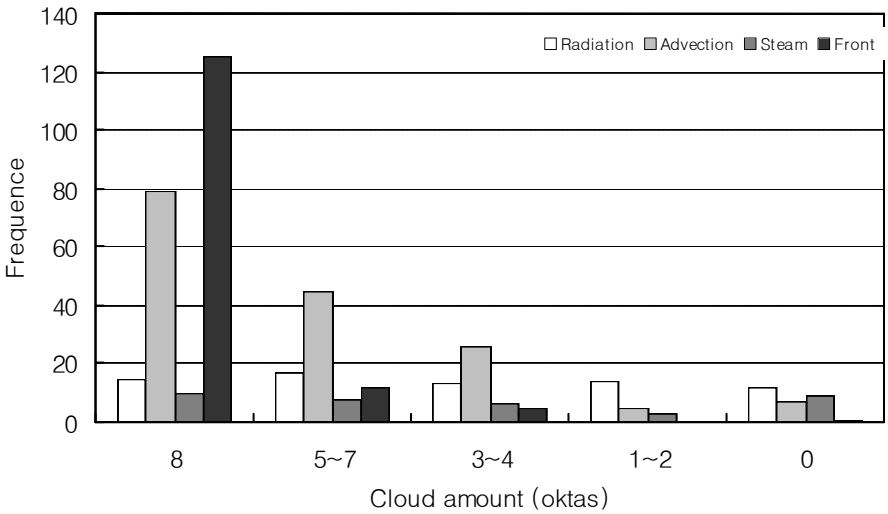


Fig. 30 Cloud amounts for fog type from 2001 to 2004.

최하층 운량과 유형별 안개와의 관계를 Fig. 31에 나타내었는데, 이류무는 전운량이 많을수록 많이 발생하였고, 하층운량 5~7 oktas에서 가장 많이 발생하였다.

Collection @ chosun

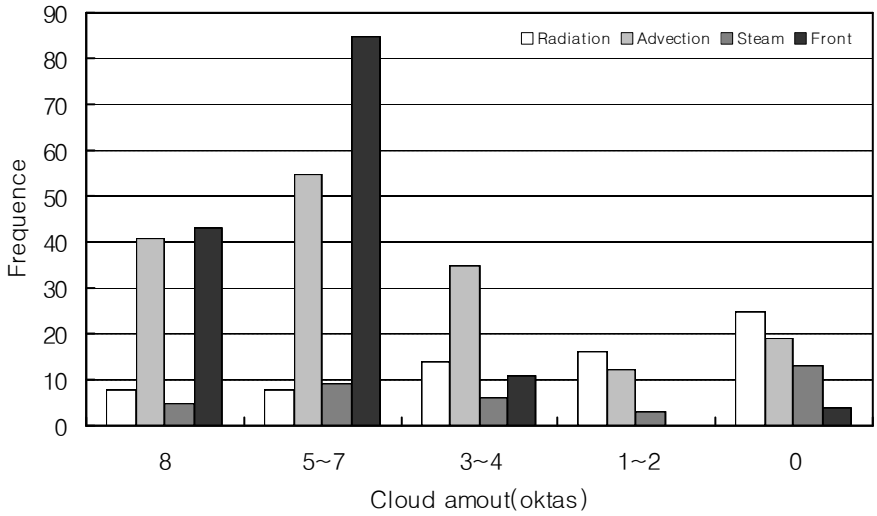


Fig. 31 The cloud amounts of low level for fog type from 2001 to 2004.

전선무는 전운량 8 oktas, 하층운량 5~7 oktas에서 가장 많이 발생하였는데 이는 강수가 있을 때의 전운량, 하층운량의 분포이었다고 해석된다.

증기무에서는 하층운량 5~7 oktas에서 많이 발생하였으나 다른 안개에 비해상대적으로 구름의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 운량에 따른 영향은 전선무, 이류무에서 다른 안개에 비해 영향을 많이 받고 있었는데 전선무에서는 강수가 있을 때의 전운량, 하층운량의 형태가 입증되었고, 이류무에서 구름이 많이 발생한 것은 난기유입에 따라 구름이 형성된 것으로 분석된다.

8. 포차 분석

전운량과 유형별 안개를 Fig. 32에 나타내었는데, 포차분석에서는 안개발생 412회 중 포차 0.5~1℃에서 311회로 75%가 발생하였고, 포차 1.5℃이하에서 375회로 91%가 발생하였다. 안개의 유형별 분류에 따른 포차의 특성은 크게 나타나고 있지 않았다.

Collection @ chosun

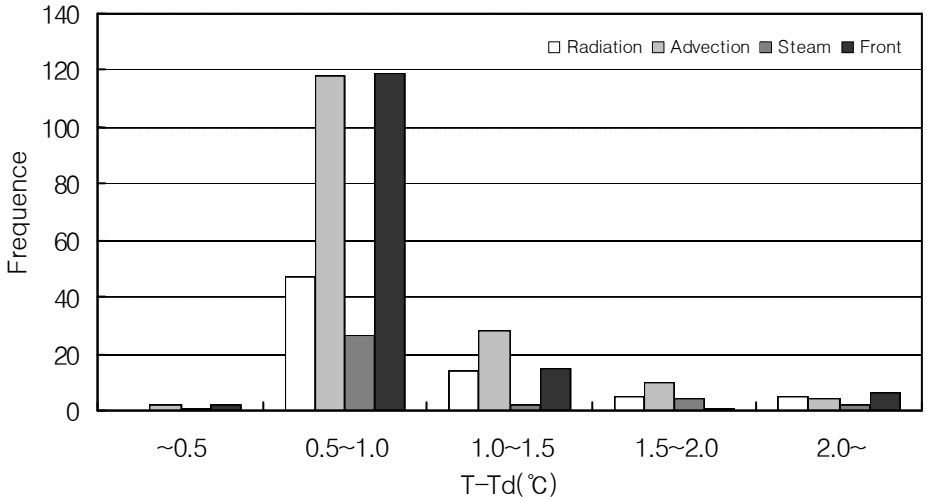


Fig. 32 Temperature difference(T-T_d(℃)) for fog type from 2001 to 2004.

Collection @ chosun

Ⅳ. 수치모델을 이용한 안개유형 분석

A. 항공기상 단시간예측시스템

1. 항공기상 단시간예측시스템의 구성

인천공항 안개유형을 분석하기 위해 항공기상 단시간예측시스템과 기상청 기상정보 시스템의 자료를 이용하였다. 항공기상 단시간예측시스템은 PC-Cluster를 기반으로 CPU가 1.33 GHz, memory가 1024 MB의 성능을 가진 1개의 Master Node와 11개의 Slave Node로 구성되어 있다. 그리고 이 클러스터에 미국 NOAA[4)]/FSL[5)]에서 개발한 국지 분석 시스템(Albers,1995; Albers *et al,* 1996)을 기반으로 기상연구소 예보연구실에서 수정·보완한 KLAPS[6)]와 미국 NCAR의 MM5(Grell *et al*, 1993)를 설치하여 항공기상 단시간예측시스템을 구축하였다. 수치 모델의 초기자료는 전 시간대의 MM5 수치 모의결과(first guess)와 여러 관측 자료를 KLAPS의 자료동화 및 분석 과정을 거쳐 생산하고, GDAPS 수치 예측자료가 모델의 측면 경계자료로 사용되며, SST 자료는 해상도가 0.1° 인 GOES-9의 SST 자료를 사용하여 하루에 4회(0000, 0600, 1800, 1200 UTC) 운영한다. 그리고 수치 적분 초기에 발생하는 스핀업 문제를 완화하기 위하여 4차원 자료동화(FDDA)[7)] 방법을 적용한다(Stauffer and Seaman, 1990).

이러한 항공기상 단시간예측시스템의 모식도를 Fig. 33에 나타내었다.

---

4) National Oceanic and Atmospheric Administration

5) Forecast Systems Laboratory

6) Korea Local Analysis and Prediction System

7) Four-Dimensional Data Assimilation

Collection @ chosun

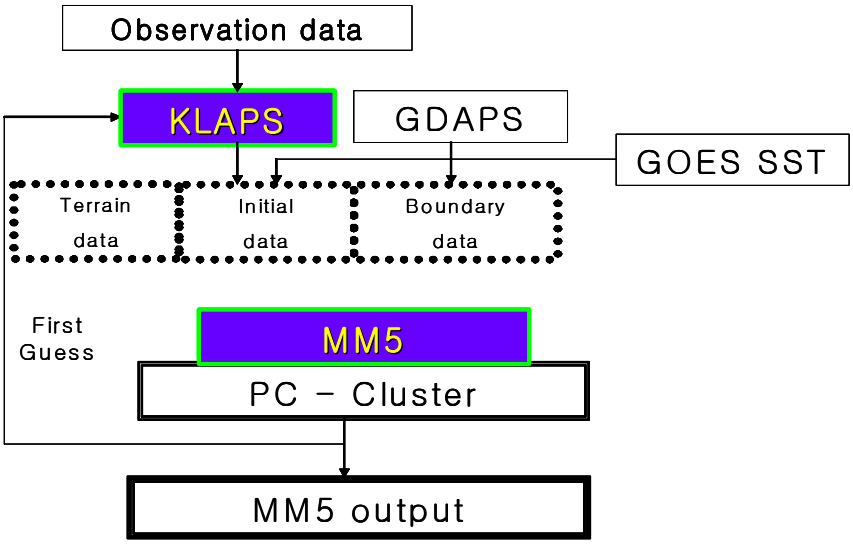


Fig. 33 The concept of AWSRPS.

2. KLAPS의 자료동화 및 수치모델 설계

항공기상 단시간예측시스템은 크게 KLAPS의 자료동화 및 MM5의 수치 예보체계로 구성되어 있다. KLAPS의 자료동화 및 분석 체계는 GTS를 통해 수신되는 각종 종관 관측자료 이외에도 국내 공항 및 공군 기상대에서 제공하는 정시항공 기상보고(METAR)[8]자료, 민간항공기 관측자료 ACARS[9]자료, 위성 관측 자료인 MTSAT[10], 자동기상관측장비 AWS[11] 자료가 이용된다. 하지만 이러한 여러 관측자료들은 각각 다른 형태로 제공되고 있어 KLAPS 분석과정의 입력 자료로 이용하기 위해서는 KLAPS의 데이터 전 처리과정을 거쳐 일정한 형태의 KLAPS 입력 자료를 생산해야 한다. KLAPS의 데이터 전 처리 과정을 거쳐 생산된 입력 자료는 KLAPS의 분석과정에서 활용하여 종관 및 비종관 자료로부터 3차원 분석장을 생산한다.

이러한 KLAPS의 분석과정은 바람분석과 지상분석, 온도분석, 습도분석, 구름분

8) Meteorological Airdrome Report

9) Aircraft Communications, Addressing, and Reporting System

10) Multi-Functional Transport Satellite

11) Automatic Weather System

Collection @ chosun

석, 강수분석, 토양 분석과정으로 구성되어 있으며, 관측자료 각각의 특성을 고려한 분석 및 동화기법이 사용된다. KLAPS의 각 단계별 분석과정은 서로 상호 관련성이 있으며, 이전 시간의 분석 자료와 연속성이 유지되면서 수행된다. 항공기상 단시간예측시스템에서 KLAPS 분석으로 생산된 3차원 분석장은 MM5의 초기장으로 사용이 되는데, KLAPS와 MM5 수치적분 과정을 Fig. 34에 나타내었다.

항공기상 단시간예측시스템에 적용된 MM5는 Table 3에서 보는 바와 같이 격자간격이 18 km, 6 km 그리고 2km 인 세 개의 모델영역을 Fig. 35와 같이 사용하며, 연직 좌표계는 지형을 따르는 σ 좌표계를 이용하여 35층으로 세분화 하였으며 모델의 연직 상단은 50 hPa이다. 그리고 비정역학 방정식계를 사용하고, 연직 경계조건은 복사경계조건(Klemp and Durran, 1983; Bougeault, 1983)을 사용하며, 수분과정은 수증기, 구름물, 빗물(Dudhia, 1989) 및 우박을 포함한 Reisner-II 미세 물리과정을 사용한다.

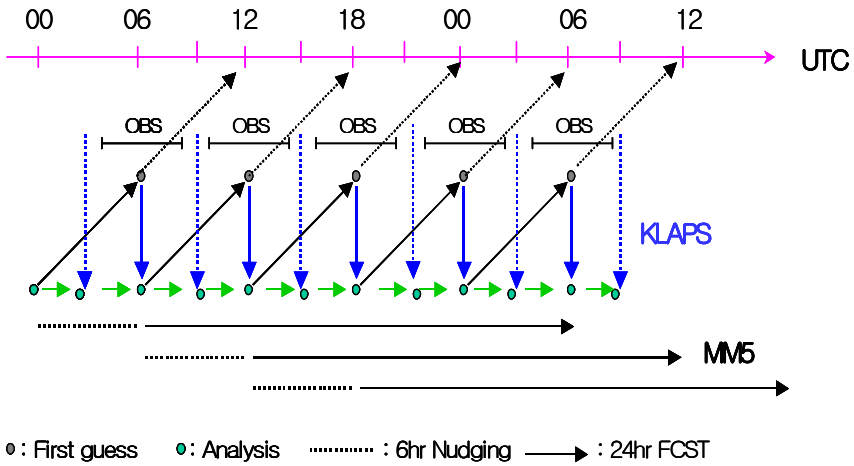
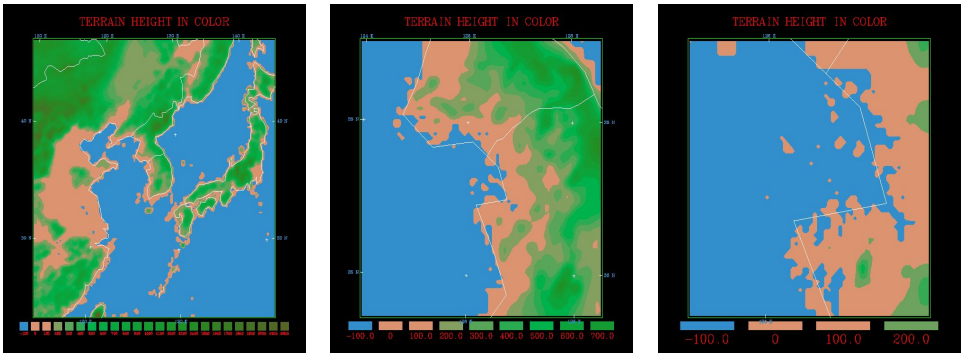


Fig. 34 The flow of integrating in AWSRPS.

Collection @ chosun

Table 3. MM5 configuration design for experiment..

Items	Description		
Dynamic	Nonhydrostatic		
DX	18 km	6 km	2 km
Dimension	148 x 148	115 x 115	82 x 82
Time steps	48	18	6
Vertical layers	35/50 hPa	35/50 hPa	35/50hPa
Forecast Time	30 hrs	30 hrs	30 hr
Initialization	Assimilated by KLAPS	Mother domain (1-way interaction)	2 domain (1-way interaction)
Lateral BC	Time and inflow/outflow dependent relaxation		
Micro physics	Reisner 2		
PBL	MRF		
SST	GOES-9 SST (resolution 0.1°)		
Ground Temp	5-layer soil model		



(a) resolution 18km (b) resolution 6km (c) resolution 2km

Fig. 35 The nested model computational domains.

그리고 경계층 물리과정은 MRF PBL(Sela, 1982, 1988; Hong and Pan, 1996)를 적용했는데, 이는 MRF PBL이 혼합이 잘되는 경계층에서 큰 맴돌이 난류를

Collection @ chosun

잘 나타내고(Wyngaard and Brost, 1984), 하층대기의 온도와 습도, 경계층 고도와 구름의 양을 예측하는데 유용(Holtslag and Moeng, 1990)하기 때문이다. 또한, 지면의 온도와 수분 계산을 위하여 5층 토양 모델(5-layer soil model)을 사용하여 1시간 간격으로 30시간 수치예보 자료를 생산하고 있다. 그리고 수치모의 초기에 발생하게 되는 모델의 스핀업 문제를 완화하고 수치예보의 예측성을 향상시키기 위하여 예보초기시각 이전 6시간 동안 분석완화법(Analysis nudging)
을 기반으로 4차원 자료동화(FDDA)방법을 적용하게 된다.

분석완화는 모델 예측을 분석 값에 강제적으로 접근시키는 완화방법으로 적분하게 되는데, 분석 완화가 끝난 후에 모델이 그 기간동안 역학적 균형을 유지하면서 모든 관측 자료에 접근하게 함으로써 초기 및 경계 자료가 모델과 일관성을 유지하여 수치예보자료의 예측성을 향상시키는 역학적 자료동화의 한 방법이다. 하지만 이러한 분석완화 방법이 수치 예보의 정확도를 저해하는 요인에 대한 완전한 해결 방안을 제공하지는 못하는데, 그 이유는 수치예보의 오차에는 여러 가지 요인들이 있기 때문이다.

이러한 오차에는 실제 대기상태와 수치예보 모델에 입력되는 분석 초기장과의 차이로 표현되는 분석오차와 불완전한 모델의 물리과정 및 수치적 기법에 기인하는 모델오차로 고려되고 있으며, 분석오차는 짧은 기간에 대하여 수치예보 모델의 오차에 가장 현저하게 기여한다(Lorenz, 1969). 그리고 초기 분석오차(Tribbia and Baumhefner, 1988)는 관측기기상의 오차뿐만 아니라 비 규칙적으로 분포되어있는 관측 값들의 내삽 과정에서 발생하며, 다양한 규모에서의 운동과 이들의 비선형적인 상호작용에 의해 더욱 증가한다.

한편 초기 분석오차뿐만 아니라 모델오차는 특히 물리적 모수화 과정에서 발생하며, 이류, 구름물리과정, 그리고 난류와 같은 소규모 과정들의 불확실성에 기인하기도 한다. 이러한 수치 예보의 한계를 극복하기 위한 한 방안으로 6시간보다는 3시간, 3시간보다는 1시간 분석 및 예측시스템의 구축이 단시간 예측시스템의 성능을 향상시킬 것이라는 여러 관련 연구들이 행해지고 있다(Benjamin *et al,* 2003; Miller and Benjamin, 1992).

Collection @ chosun

3. 안개현상과 관련된 수치예측자료

안개 현상은 기상학적 요인과 지형적인 요인 등의 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생하기 때문에 그 현상을 이해하는 것은 상당히 어려운 일이므로 이러한 어려움을 극복하기 위하여 수치예측자료를 이용한 안개 연구(김해동, 1998; Choi *et al*, 1998)가 진행되고 있다.

따라서 본 장에서는 항공기상 단시간예측시스템의 수치예측자료에서 안개에 영향을 미치는 습도, 바람, 난류 그리고 시정 수치예측자료를 이용하여 인천공항 안개의 발생 및 소산과정을 이해하고, 안개예보에 활용 가능한 예보기법을 연구하고자 한다. 한편, 안개 현상과 관련이 있는 난류 및 시정은 수치모델에서 다음과 같이 산출된다.

안개 현상에 있어 습도와 바람은 안개의 형성 단계 및 유지에 중요한 작용을 하는데, 바람이 강하면 난류에 의한 연직 혼합이 강하여 안개가 층운으로 발달하기가 쉬우며, 바람이 너무 약하면 얕은 해양 접지 역전층에 국한된 해무를 발생 시 킬뿐이다(Telford and Chai, 1984). 이러한 난류를 취급할 때 이용되는 주요한 인자는 무 차원수인 리차든 수로 이 수는 열적 난류와 역학적 난류의 비를 나타내며, 다음과 같이 정의한다.

$$R_i \equiv \frac{N^2}{(\frac{\partial V}{\partial z})^2} \quad ; \; N^2 = \frac{g}{\Theta_0}\frac{\partial \Theta}{\partial z}$$

여기서 N^2은 부력진동수이고, $\frac{\partial V}{\partial z}$는 역학적 난류(바람의 연직 시어)이며, Θ_0는 평균온위를 나타낸다. 또한, N^2이 0보다 크면 대기는 열적으로 안정한 상태이고 0보다 작으면 대기는 열적으로 불안정한 상태가 된다. 그리고 리차든 수가 0.25보다 작은 경우 역학적 난류가 부력에 의한 열적 난류보다 4배가 우세한 것으로 알려져 있다.

시정은 빛이 어떤 매질을 통하여 관찰자에게까지 오면서 소산되어 남은 빛의 양으로 수치모델에서는 수분물리 과정에서의 구름물(cloud water), 빙정(cloud ice), 빗물(rain water), 눈(snow) 등을 이용하여 다음과 같이 산출된다.

$$\frac{I_{obs.}}{I_o} = \exp[-\int_0^{x_{obs}} \beta(x)\, dx] \quad ; I_o = \text{입사한빛의 양}, \; I_{obs} = \text{관측점에서의 빛의 양}$$

Collection @ chosun

일반적으로 $\frac{I_{obs.}}{I_o} = 0.02$ 이므로, 최종적으로 시정에 대한 식은 $X_{vis} = \frac{-\ln(0.02)}{\beta}$ 이다.

그리고 여기서 C는 매질의 밀도 (gm^{-3})이며, β(km^{-1}) 는 그에 따른 소산 계이다. 한편, β는 C에 따라 아래와 같은 관계식으로 정의 된다.

구름물 = $144.70C^{0.88}$: Kunke(1984)

빗물 = $2.24C^{0.75}$: M-Pdist'n

빙정 = $327.80C^{1.00}$: Rutledgen and Hobbs(1983)

눈 = $10.36C^{0.7776}$: Stallabrass(1985)

따라서 수치모델에서 시정을 낮게 예측한 지역은 구름변수들로 인한 빛의 소산이 높아 시정이 낮은 지역으로 이해 할 수 있으며, 시정이 1km 이하인 지역은 안개가 예측되는 지역으로 이해 할 수 있다.

B. 안개 유형 특성 분석

안개 유형의 선정은 2004년도에서 안개발생이 집중되어 있는 5월에서 7월을 중심으로 안개 발생 메커니즘에 따라 3개 유형을 선정하여 안개 발생·소멸 시각 그리고 유형별 안개 유형을 Table 4에 나타내었다. 안개 현상은 국지적인 영향 뿐 만 아리라 종관적 배경에도 많은 영향을 받으므로 선정된 유형에 대한 종관적 배경과 국지적인 원인을 고려하여 객관적·수치적인 분석을 하고자 한다.

Table 4. Fog cases selected for study.

No.	Fog occurrence and disappear time	Fog type
Case 1	2004.09.16.0500KST 16.1100KST	radiation fog
Case 2	2004.06.21.0500KST 21.0800KST	Advection fog
Case 3	2004.05.12.1600KST 13.0300KST	Front fog

Collection @ chosun

1. 복사무 유형 분석

사례 1은 인천공항에서 발생한 안개 중 복사무의 특징을 잘 나타내는 사례로 인천공항, 김포공항 그리고 인천의 시정 분포를 Fig. 36에 나타내었다. 기간은 2004년 9월 17일 0100KST에서 1500KST로 0400KST부터 시정이 낮아져 0500KST에 시정이 100m인 심한 안개가 발생하였고, 0600KST에 안개는 더욱 심해져 시정이 50m까지 낮아졌다. 그리고 0800KST 이후 안개가 소산되면서 시정이 1,000m 이상으로 높아졌다. 한편, 인천은 0700~0800KST에 안개가 발생하였고, 김포공항은 0300~0800KST에 안개가 발생하였다. 또한, 0700~0800KST에는 세 지점 모두 안개가 동시에 관측되었고, 0800KST 이후 세 지점 모두 시정이 급격하게 좋아지는 특징을 보였다.

복사무 사례기간 동안 종관적 배경을 이해하기 위하여 지상일기도와 850hPa 상층 일기도를 Fig. 37에 각각 나타내었는데, 지상일기도인 Fig. 37(a)을 보면, 사례기간동안 일본 동해상의 고기압 영향을 받고 있으며, 등압선간의 간격이 넓어 기압경도력이 약하여 대기가 안정되어 있다. 그리고 850hPa 상층 일기도를 나타낸 Fig. 37(b)을 보면 등고선이 서해상에 동서로 늘어져 있어 내륙의 공기가 서해상으로 발달된 온도 골을 따라 유입되고 있다.

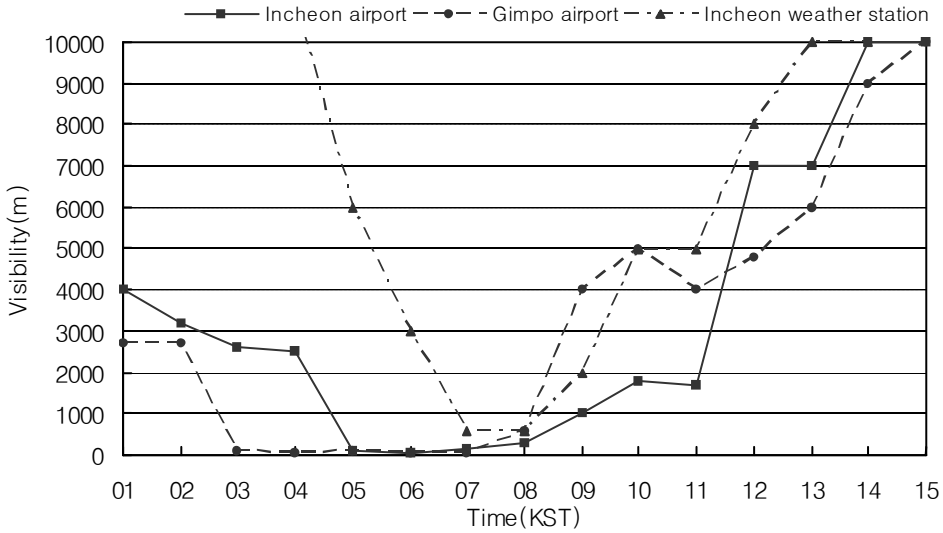
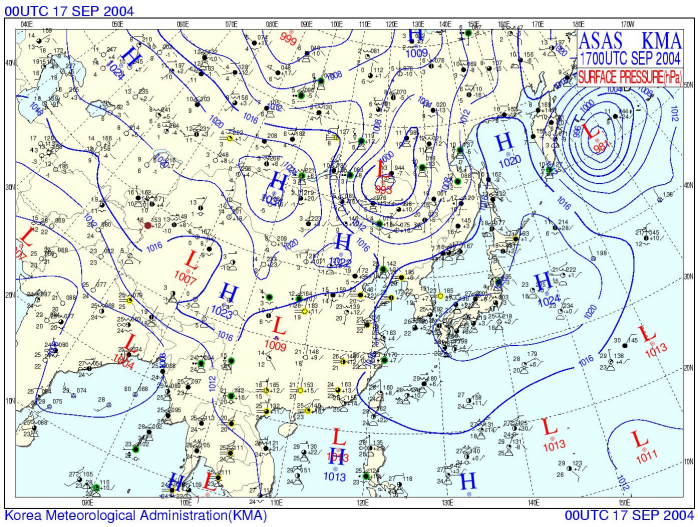
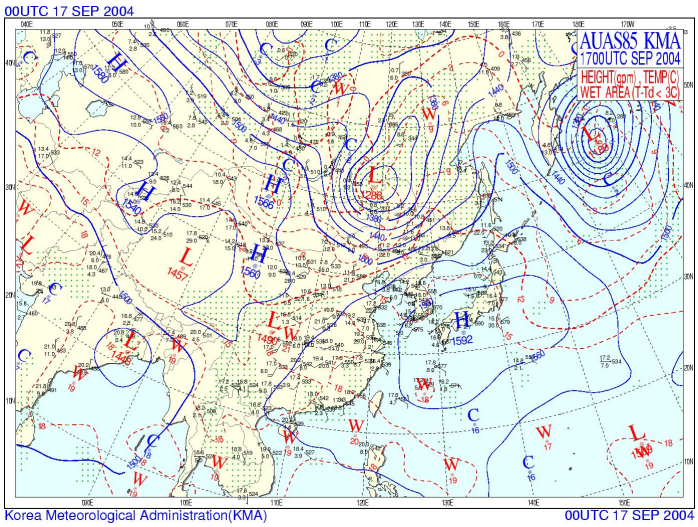


Fig. 36 Observed visibility(m) from 0100KST to 1500KST 17 September 2004.

Collection @ chosun



(a) Surface meterological chart

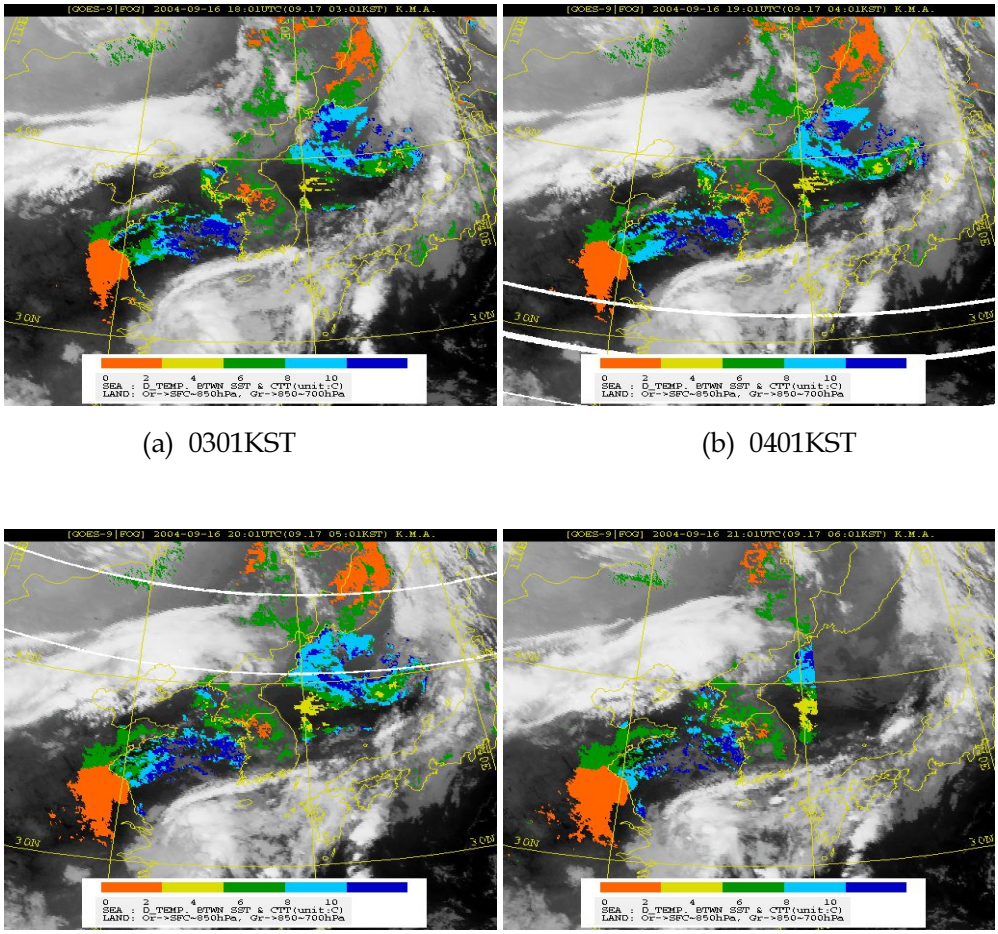


(b) 850hPa level meterological chart

Fig. 37 The meterological charts at 0900KST 17 September 2004.

이러한 종관적인 배경은 내륙의 차고 건조한 대기가 고기압 가장 자리를 따라 서해상으로 이동하고, 상대적으로 따뜻하고 습한 서해상의 대기와 수렴 하여 서해상에 안개가 발생한 것으로 보인다. 또한, 안개영상을 나타낸 Fig. 38을 보면 이러한 사실을 이해 할 수 있는데, Fig. 37의 고기압 가장자리를 따라 서해상과 내륙에 안개가 분포되어 있고 시간이 갈수록 안개는 짙어지고 있는 경향을 보였다.

Collection @ chosun



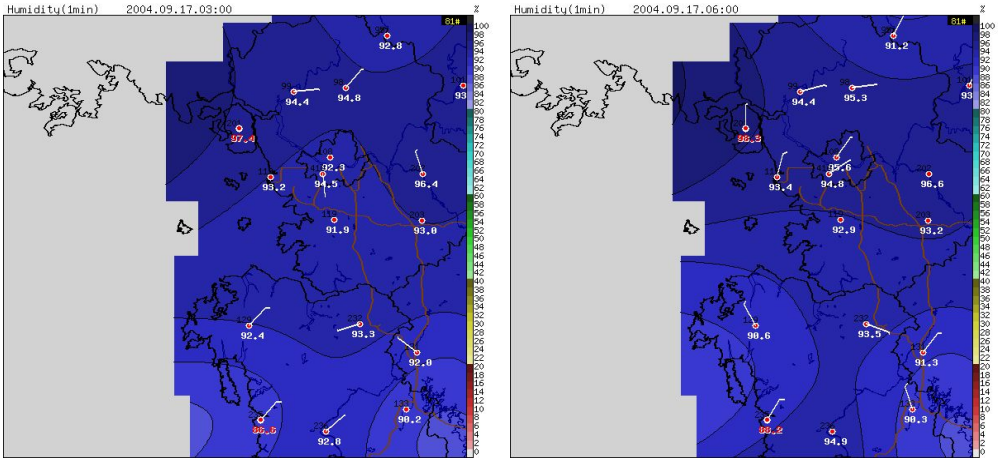
(a) 0301KST (b) 0401KST

(c) 0501KST (d) 0601KST

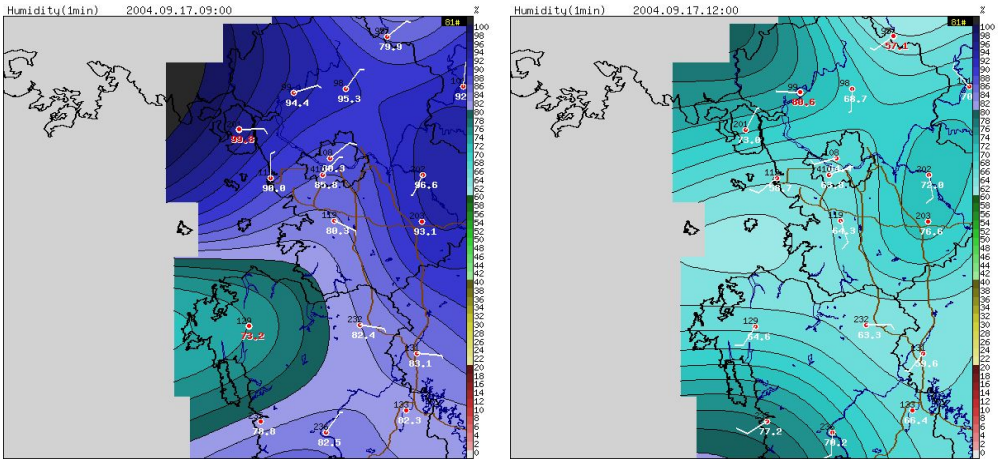
Fig. 38 Fog images of GOES-9 from 0301KST to 0610KST 17 September 2004.

인천공항의 안개현상에 영향을 미치는 지표의 바람과 습도 분포를 나타낸 Fig. 39를 보면, 인천공항에 안개가 발생하기 전인 0300KST에서는 상대습도가 90%이상이 관측되었고, 안개가 발생한 0600KST에는 풍속이 다소 증가 하면서 습도가 약 95%를 보였다.

Collection @ chosun



(a) 0300KST (b) 0600KST



(c) 0900KST (d) 1200KST

Fig. 39 Observed humidity(%) and wind barb(m/s) from 0300KST to 1200KST 17 September 2004.

그러나 안개가 소산된 0900~1200KST에는 습도가 급격하게 낮아졌다. 이러한 안개의 발생과 소산에 영향을 미치는 바람과 습도의 특징을 수치적으로 분석하기 위하여 사례기간동안 인천공항의 습도, 바람의 분포를 Fig. 40~Fig. 42에 각각 나타내었다.

먼저, 상대습도 분포를 나타낸 Fig. 40을 보면0100~0800KST에 세 지점에서 모두 90% 이상을 보였으며, 김포공항의 상대습도는 거의 100%에 근접하여 세 지점 중

Collection @ chosun

가장 높았고, 인천이 가장 낮았다. 그리고 인천공항에 안개 발생시 습도는 95~96%를 보였으며, 김포공항은 100%에 근접하였다. 또한, 인천은 안개 발생시 습도가 93~94%를 보였다. 한편, 인천공항과 인천은 0800KST이후 습도가 급격히 낮아졌고, 김포공항은 1000KST이후 급격히 습도가 낮아져 내륙보다 해안지역의 습도가 빨리 낮아졌다.

복사무 사례기간 동안 인천공항의 바람 분포를 나타낸 Fig. 41을 보면 인천공항은 안개 발생시에는 북동풍이 주로 유입되었고, 같은 시간대에 김포공항은 남서풍이 유입되어 상반된 모습을 보여주었다. 풍속은 인천공항에 안개발생시 풍속은 4~6kt, 김포공항은 2~5kt, 인천은 1~2kt를 보였다. 사례기간동안 인천공항의 풍속이 가장 강했고, 인천이 가장 약하였으며, 1000KST 이후 세 지점에서 풍속이 급격히 증가하는 모습을 보였다.

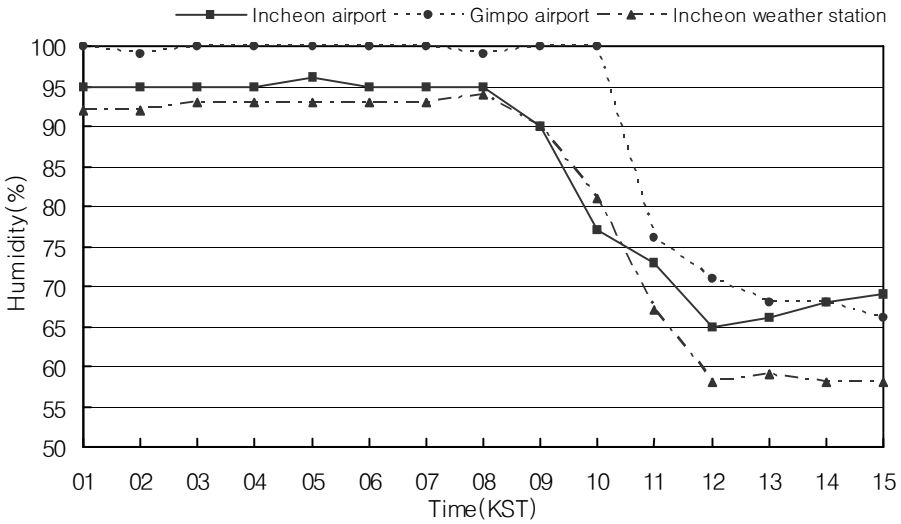
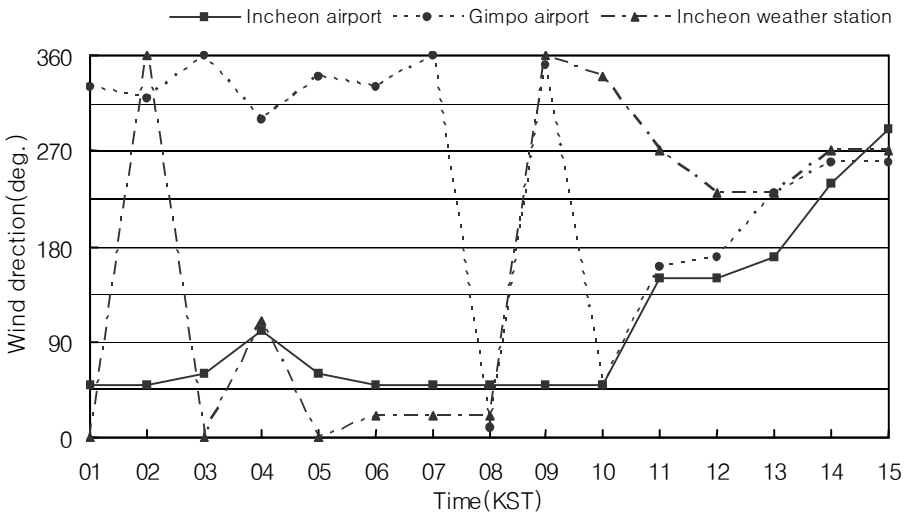
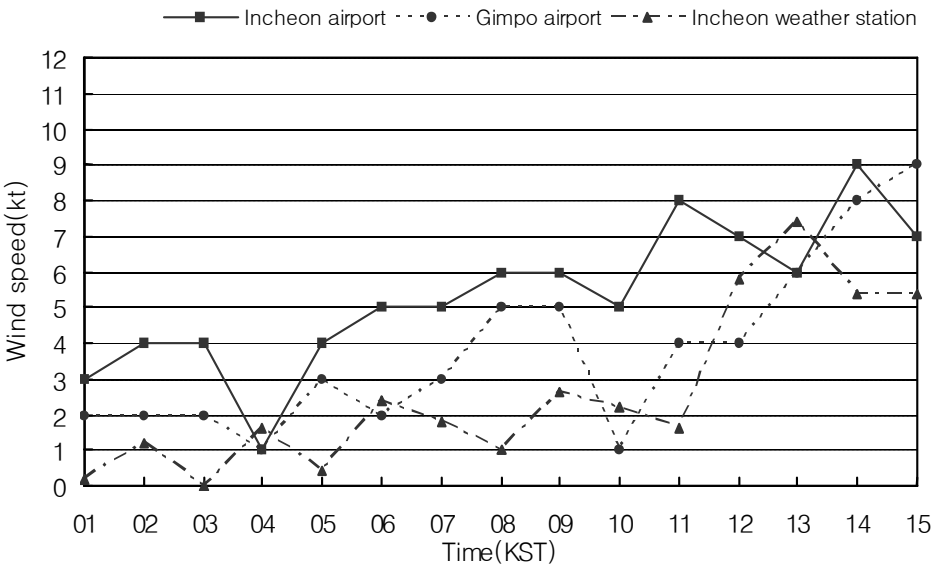


Fig. 40 Observed humidity(%) from 0100KST to 1500KST 17 September 2004.

Collection @ chosun



(a) Wind direction(deg.)



(b) Wind speed(kt)

Fig. 41 Observed wind direction(deg.) and speed(kt) and from 0100KST to 1500KST 17 September 2004.

Collection @ chosun

관측자료 분석에서 나타난 사례 1의 특징은 인천공항에 안개 발생시 습도는 95~96%, 풍향은 북동풍이 유입되었고, 풍속은 4~6kt였다. 또한, 인천 안개 발생시에는 습도가 인천공항보다 다소 낮은 93~94%이었고, 풍속도 다소 낮은 1~2kt였으며 풍향은 인천공항과 같이 북동풍을 보였다. 그리고 김포공항 안개발생시 습도는 100%에 근접하여 세 지점 중 가장 높았고, 안개지속시간도 가장 길었다.

수치모델에서도 인천공항의 안개를 예측하였는데, 인천공항의 시정 수치예측자료 분포를 나타낸 Fig. 42를 보면 실제 안개가 발생한 0500KST보다 시간대에 보다 1시간 늦은 0600KST에 안개를 예측하였고, 실제보다 소산은 3시간이 늦은 1200KST까지 안개를 예측하였다. 또한, 안개 예측 시간대를 제외하고는10,000m 이상을 예측하여 시정 변화의 폭이 컸다. 그러나 0600~0900KST에 발생한 인천공항의 안개 현상을 관측과 유사하게 예측하였다.

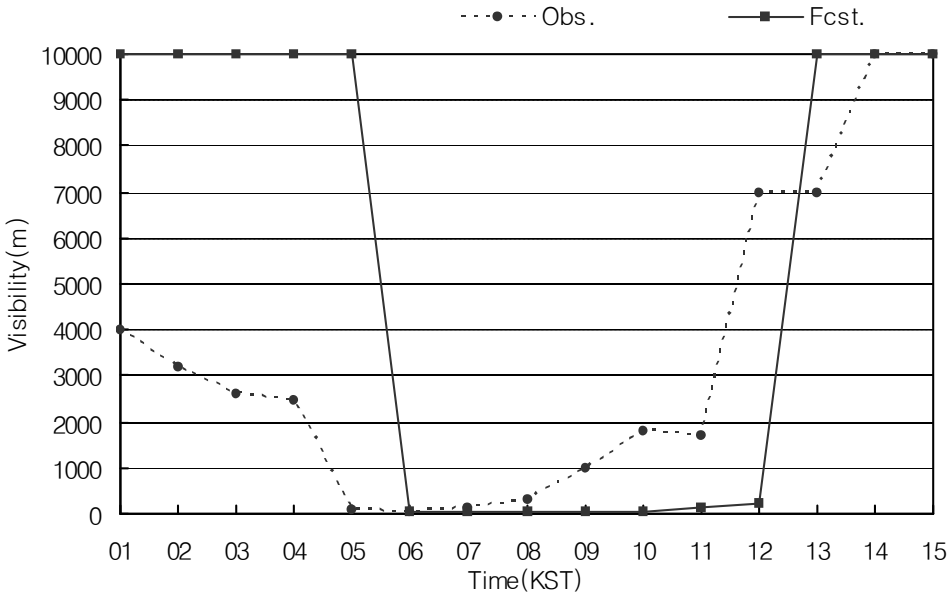
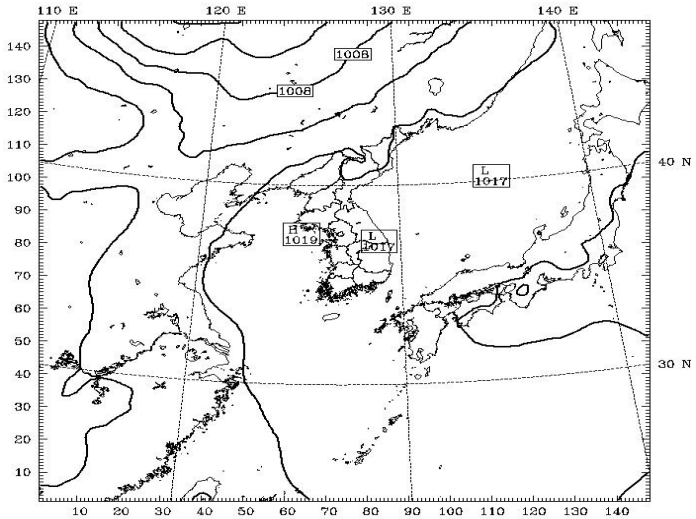


Fig. 42 Simulated(solid) and Observed(dash) visibility(m) from 0100KST to 1500KST 17 September 2004.

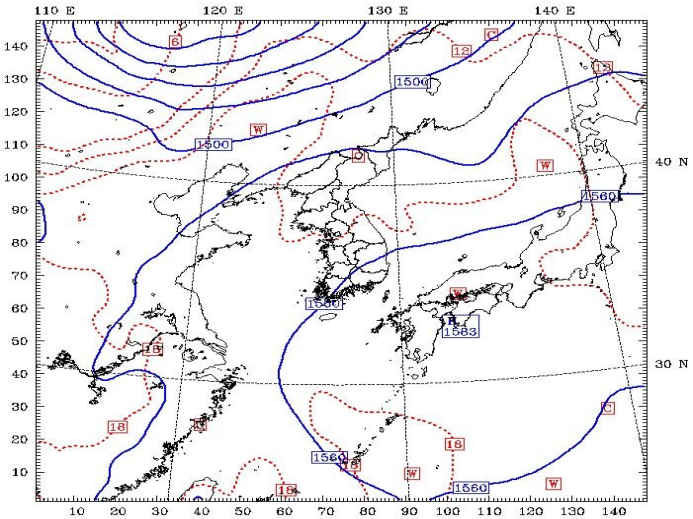
종관적 배경도 실제와 유사하게 예측하였는데, Fig. 43에 각각 나타낸 지상 예측일기도와 850hPa 상층 예측일기도를 실제와 비교해 보면 알 수 있는데,

Collection @ chosun

Fig. 43(a)에서는 한반도가 일본 동해상에 위치한 고기압의 영향을 받고 있으며, 대륙에서부터 발달한 기압골의 분포 등을 실제와 유사하게 잘 예측하고 있다. 또한, 850hPa 예측 일기도에서는 상층 고기압의 영향권에 포함된 한반도와 내륙에서 서해상 발달된 온도 골의 분포등도 잘 예측하고 있어 종관적 배경을 실제와 유사하게 예측을 하였다.



(a) Surface meterological chart

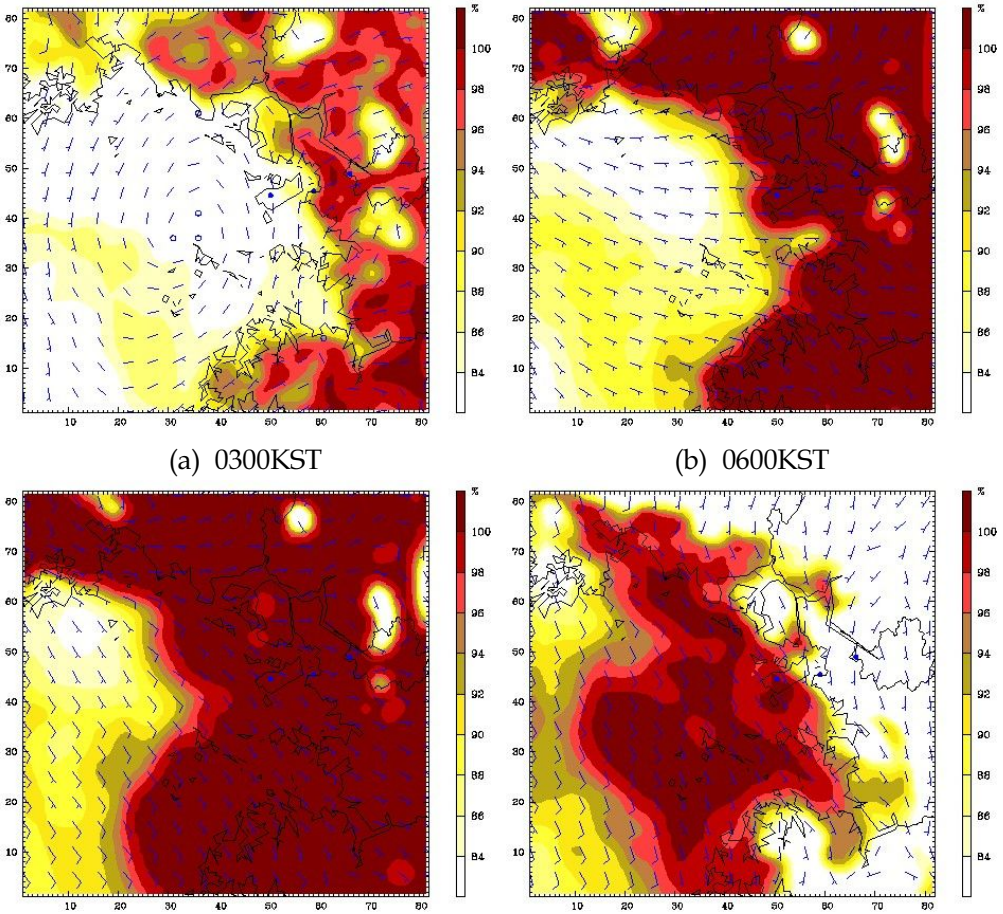


(b) 850hPa level meterological chart

Fig. 43 Simulated meterological charts at 0900KST 17 September 2004.

Collection @ chosun

이러한 종관배경으로 예측된 대기 하층의 습도와 바람을 Fig. 44에 시간대별로 각각 나타내었는데, 실제 인천공항에 안개가 발생하기 전인 0300KST에는 서해안의 저기압으로 인하여 습도가 과소예측 되었지만 안개가 발생한 김포공항의 습도는 약 98%로 실제와 유사하였다. 그리고 인천공항과 김포공항에 실제 안개가 발생한 0600KST에는 습도가 98%로 실제와 유사하게 예측하였으나 실제 습도가 낮아진 0900KST부터의 습도를 과대 모의하여 1200KST까지 높은 습도를 예측하였다. 서해안 습도 예측의 과소 또는 과대모의는 Fig. 45에 나타낸 인천공항 시정 예측에도 영향을 미치는데, 시정을 1km 미만으로 예측한 안개구역은 어둡게 나타냈다.



(a) 0300KST (b) 0600KST

(c) 0900KST (d) 1200KST

Fig. 44 Simulated relative humidity (shading according to key at right) and wind barb(m/s) from 0300KST to 1200KST 17 September 2004.

Collection @ chosun

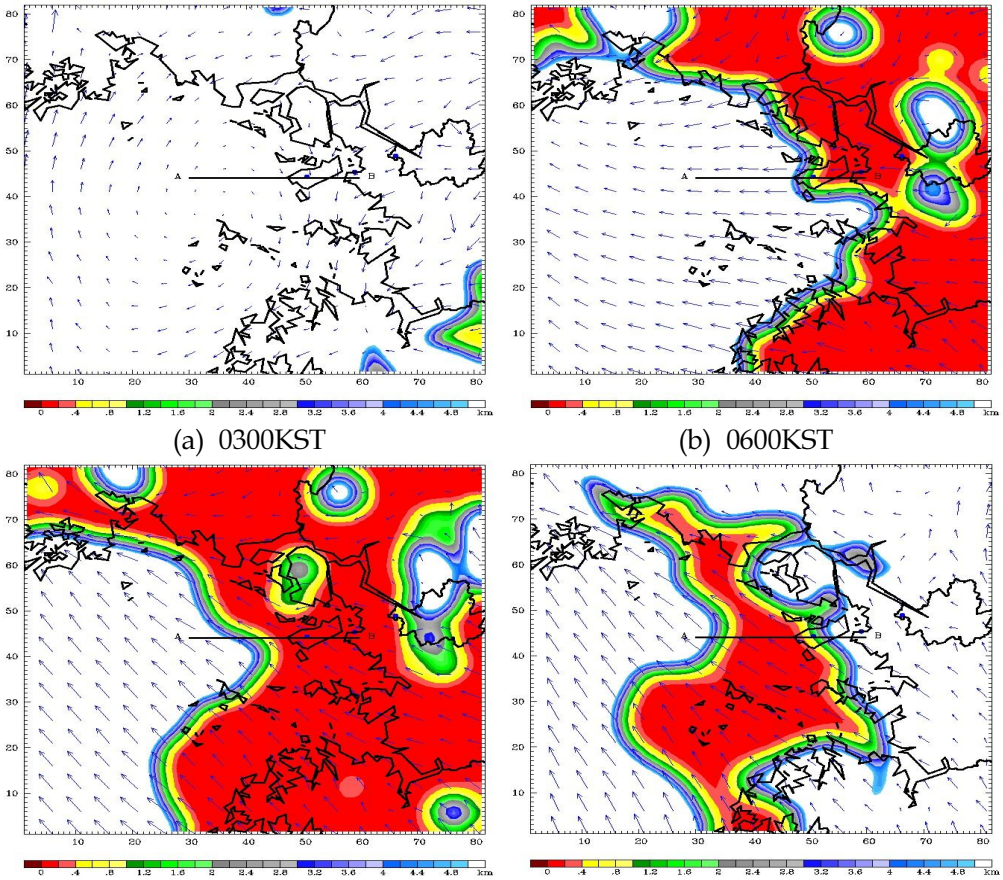
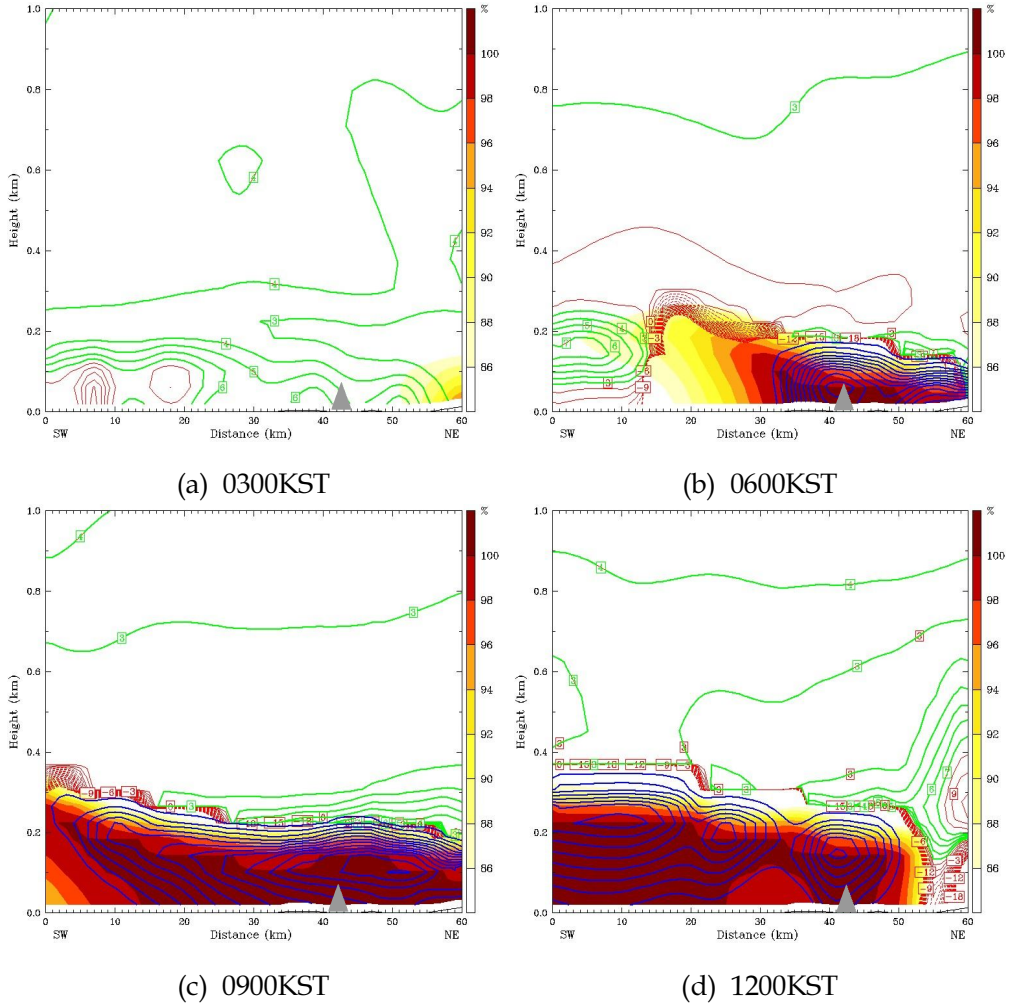


Fig. 45 Simulated visibility(shading according to key at center low) and wind vector from 0300KST to 1200KST 17 September 2004.

0300KST에는 습도의 과소모의로 인해 인천공항 안개가 예측되지 못했고, 0900KST 이후 과대모의 된 습도로 인하여 1200KST까지 안개가 예측되었다. 그러나 인천공항의 안개현상을 관측과 유사하게 예측하였고, 안개영상의 서해상 및 내륙에 분포된 안개도 유사하게 예측하였다.

수치모델에서 인천공항의 복사무 예측 메커니즘을 이해하기 위하여 안개현상에 영향을 미치는 바람, 습도 그리고 구름물을 중심으로 인천공항의 연직대기상태를 시간대별로 Fig. 46에 각각 나타내었다.

Collection @ chosun



(a) 0300KST (b) 0600KST

(c) 0900KST (d) 1200KST

Fig. 46 Simulated relative humidity(shading according to key at right), Richardson Number(red solid(+), dash(-)), and cloud liquid water(blue body) vertical cross section along A-B from 0300KST to 1200KST 17 September 2004.

리차든 수는 붉은색 실선(+)과 점선(-)으로 나타냈으며, 특히 리차든 수 5~7은 녹색, 습도는 그늘칠 하였다. 0300KST에는 습도가 낮아 구름물이 생성되지 않았지만, 0600KST에는 인천공항 주변의 지표 및 해수면 부근에는 상대 습도가 98% 이상이 분포된 구역과 강한 음의 리차든 수가 분포한 구역에 구름물이 생성되었다.

Collection @ chosun

이는 인천공항 주변의 지표 및 해수면의 습한 대기가 강한 열적 불안정 및 대류 작용으로 혼합되어 구름물이 생성되었고, 지상 200m의 강한 안정층으로 구름물이 대기 상층으로 발달하지 못하고, 대기 하층으로 발달하면서 안개가 예측되었다. 그리고 0900KST와 1200KST에도 상대습도가 98%이상 예측된 구역과 리차든 수가 지표 및 해수면에는 강한 음의 구역이 지상 200m 상공의 강한 양의 구역이 분포되어 인천공항의 안개를 예측하였다.

정리하면 복사무 사례인 경우, 수치모델에서 인천공항 지표의 상대습도가 98%이상이고, 리차든 수가 강한 음의 구역 200m 상공에는 강한 양의 구역이 분포되면 높은 습도를 예측하여도 난류에 의한 혼합이 이루어지지 않으면 구름물이 생성되지 않아 안개를 예측하지 못했다.

인천공항의 대기 연직상태를 분석하기 위하여 사례기간 동안의 인천공항의 Skew-T를 Fig. 47에 시간대별로 각각 나타내었다.

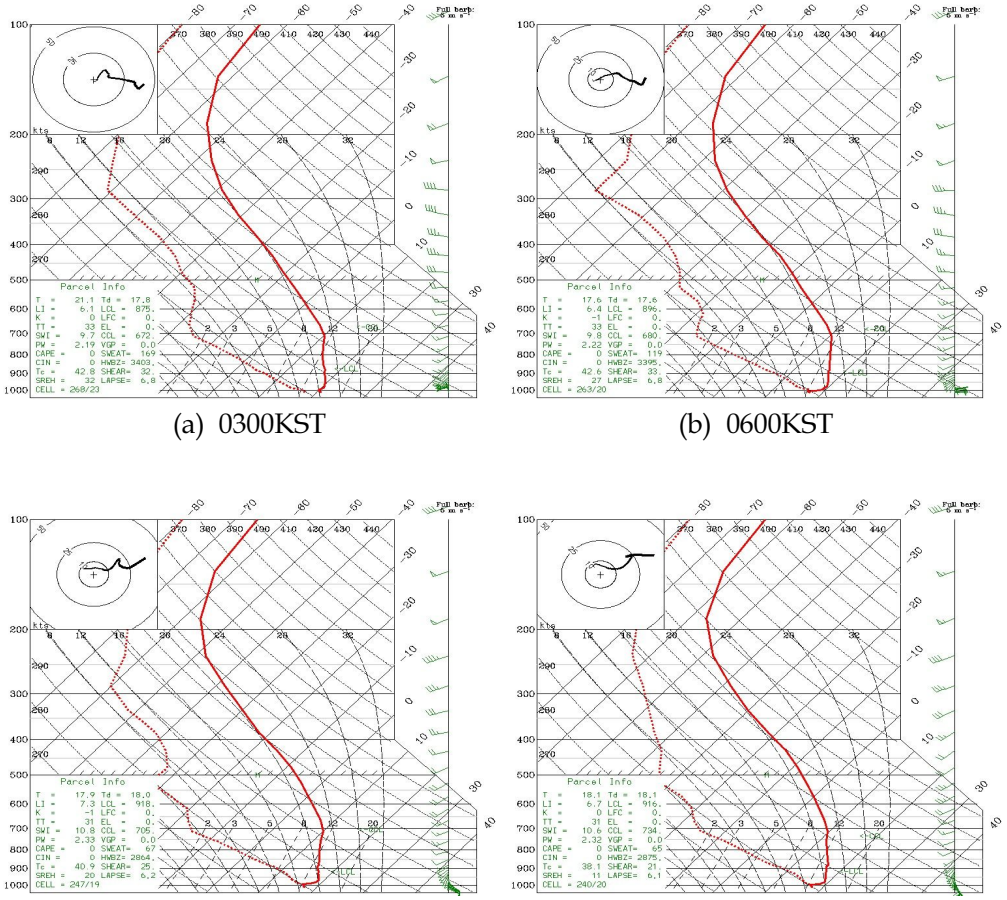
사례기간동안 기온의 역전은 0300KST에서부터 조금씩 시작되어 0600KST에 가장 크게 나타났고, 점차 약해져 1200KST까지 발생하였다. 안개가 발생한 0600KST부터는 대기의 기온과 노점온도가 교차하는 포화층도 낮은 고도에 나타났다.

수치예측자료 분석을 통한 사례 1의 특징은 대륙에서부터 발달한 기압골의 분포와 서해상으로 분포된 온도 골 등 실제 종관적 배경을 잘 예측하였다. 그러나 안개 발생시 풍속과 습도의 과소모의로 실제 안개 발생보다 1시간 늦게

발생을 예측하였고, 안개 소산 시에는 풍속의 과소모의로 인해 습도가 과대모의 되어 실제 안개 3시간 늦게 소산이 되었다. 그리고 인천공항의 습한 대기는

지표의 강한 대류로 인해 혼합되어 구름물을 생성하고, 200m 상공의 강한 안정층으로 인하여 대기 상층으로 발달하지 못하고 지표로 발달하여 인천공항의 안개를 예측하였다.

Collection @ chosun



(a) 0300KST (b) 0600KST

(c) 0900KST (d) 1200KST

Fig. 47 Simulated Skew-T from 0300KST to 1200KST 17 September 2004.

2. 이류무 유형 분석

사례 2는 인천공항 안개 현상 중 이류무의 특징을 가지는 사례로 기간동안에 인천공항과 주변지역에 있는 김포공항, 인천의 시정 분포를 Fig. 48에 나타내었다. 사례 기간은 2004년 6월 21일 1500KST에서 22일 1500KST이며, 21일 2100KST부터 안개가 관측되기 시작하였고, 22일 0300~0400KST에 시정이 1,000m이상을 회복하였으나 22일 0600KST까지 다시 안개가 관측되었다. 그리고 22일 0000KST부터 0300KST까지 안개가 관측되었고, 이후 시정이 3,000m까지 호전되다가 다시 0600KST부터 안개가 관측되었다.

Collection @ chosun

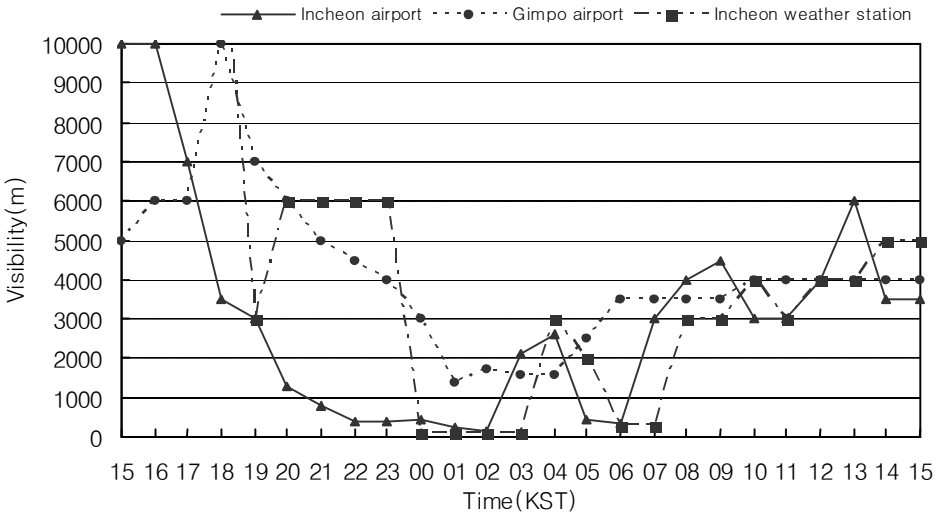
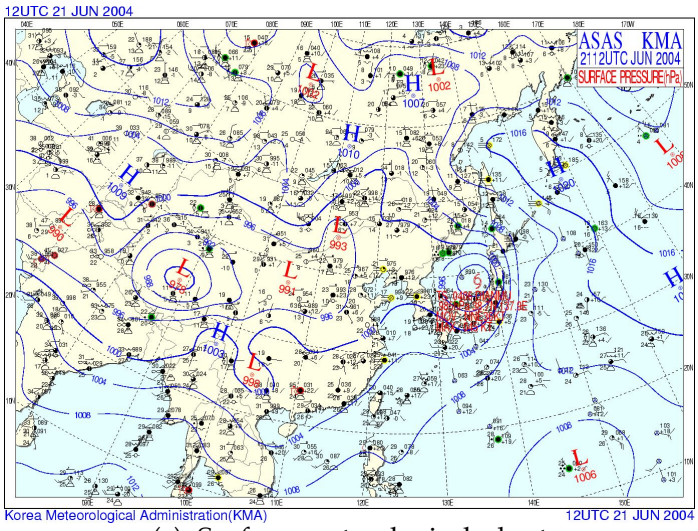


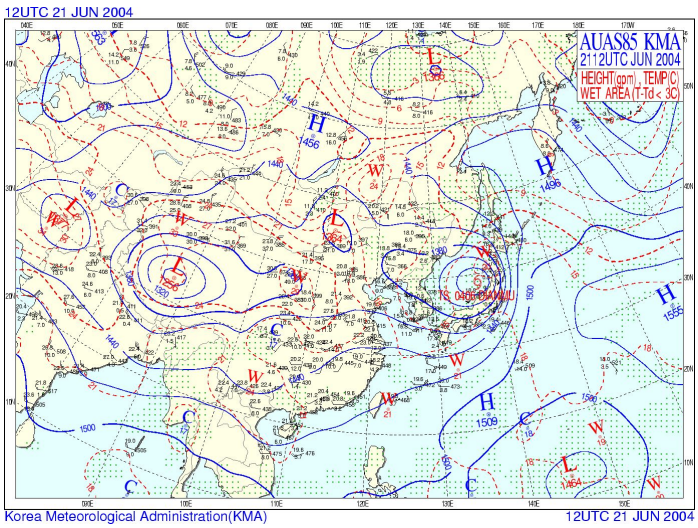
Fig. 48 Observed visibility(m) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004.

또한, 김포공항에서는 안개가 발생하지 않아 해안 지역을 중심으로 안개가 발생한 것으로 나타났다. 사례 2 기간동안의 종관배경을 이해하기 위하여 지상일기도와 850hPa 상층일기도를 Fig. 49에 나타내었는데, 지상일기도인 Fig. 49(a)를 보면 동해상 태풍의 영향으로 서해상에는 기압능이 분포되어 저위도의 따뜻하고 습한 대기가 서해안으로 유입 된 것으로 보이고, 상층일기도인 Fig. 49(b)를 보면 서해안의 상층에는 습윤 구역과 온난역이 분포되어 있다. 이러한 종관적 배경의 영향으로 서해상 대기 상·하층으로 따뜻하고 습한 공기가 서해안으로 공급 되어 발생된 안개가 인천공항으로 유입된 것으로 추리된다.

Collection @ chosun



(a) Surface meterological chart



(b) 850hPa level meterological chart

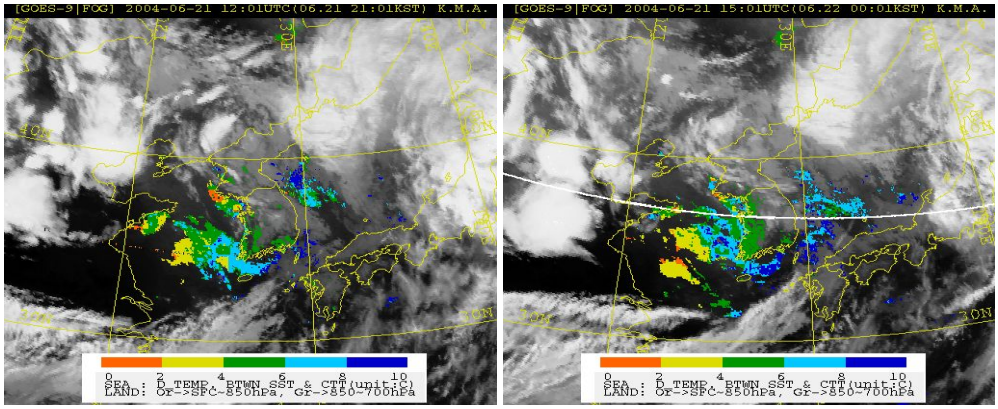
Fig. 49 The meterological chats at 2100KST 21 Jun 2004.

이러한 사실은 안개영상을 나타낸 Fig. 50의 서해상과 서해안에 분포된 안개구역을 보면 이해 할 수 있으며, 이 사례 기간동안 지속적으로 서해상에는 안개가 발생한 것으로 보인다.

안개 현상에 영향을 미치는 습도와 바람의 분포 특성을 알아보기 위하여 인천공항에

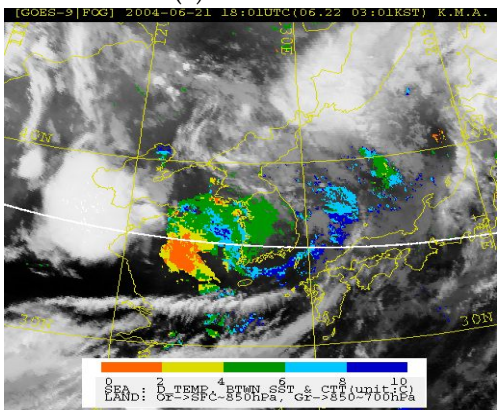
Collection @ chosun

안개발생시 지표 습도와 바람의 분포를 Fig. 51에 시간대별로 각각 나타내었다. 인천공항에 안개가 발생한 시간대에서는 상대습도가 약 96%인 서해상의 습한 공기가 인천공항으로 약 5~10kt의 풍속으로 유입되어 안개가 발생한 특징을 보였다. 또한, 안개가 소산되는 시간대에서는 상대습도가 낮아지는 현상을 보여 상대습도가 안개의 발생 및 소산과 밀접한 관계를 보였다.

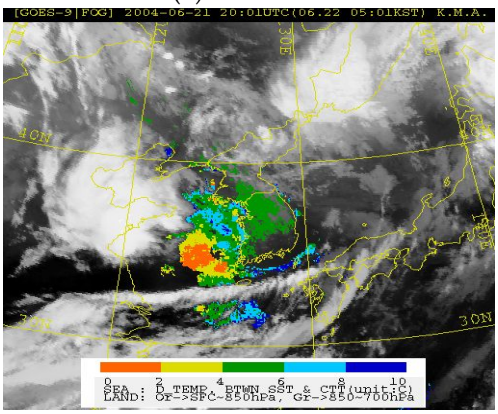


(a) 2101KST

(b) 0001KST



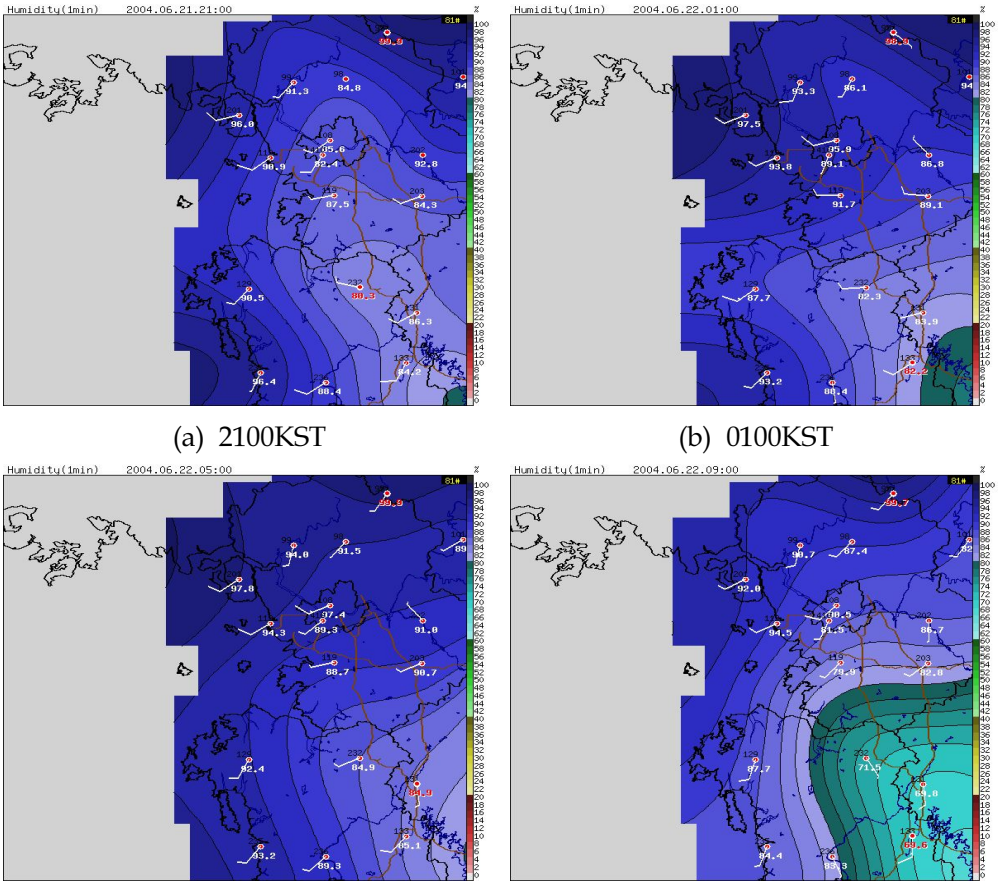
(c) 0301KST



(d)0501KST

Fig. 50 Fog images of GOES-9 from 2101KST 21 to 0601KST 22 Jun 2004.

Collection @ chosun



(a) 2100KST (b) 0100KST

(c) 0500KST (d) 0900KST

Fig. 51 Observed humidity(%) and wind barb(m/s) from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004.

이러한 특징을 보다 수치적으로 분석하기 위하여 사례기간 동안의 인천공항과 그 부근의 습도 분포를 Fig. 52에 나타내었다. 전체적으로 안개가 발생하지 않은 김포공항의 습도는 안개가 발생한 인천공항과 인천보다 낮은 경향을 보였다. 그리고 세 지점에서 습도가 약 96%인 0100~0500KST에 인천공항과 인천에서는 안개가 발생하였지만 내륙에 위치한 김포공항에서는 안개가 발생하지 않아 내륙과 해안지역의 안개발생에 대한 습도의 크기가 상이함을 보여주었다.

바람의 분포를 나타낸 Fig. 53을 보면 안개가 발생한 시간대의 풍향은 세 지점

Collection @ chosun

모두 남서풍이 지속적으로 유지되어 서해상으로부터 서해안으로 습한 남서기류가 유입됨을 알 수 있으며, 풍속은 인천공항 7kt, 인천 3kt 김포공항 10kt 순으로 나타났다. 김포공항은 강한 풍속으로 인해 습한 대기 상태에서도 안개가 발생하지 않은 것으로 추리된다.

관측자료 분석에서 나타난 사례 2의 특징은 동해상 태풍의 영향으로 서해상에 발생한 안개 또는 하층운이 남서기류와 함께 서해안으로 유입되어 인천공항과 인천에 안개를 발생시켰으나 내륙에 있는 김포공항에는 높은 습도에도 불구하고 강한 풍속으로 인하여 안개가 발생하지 않은 것으로 이해된다. 한편, 안개 발생시 습도는 95~96%, 풍향은 남서풍, 풍속은 6~8kt를 유지하였다.

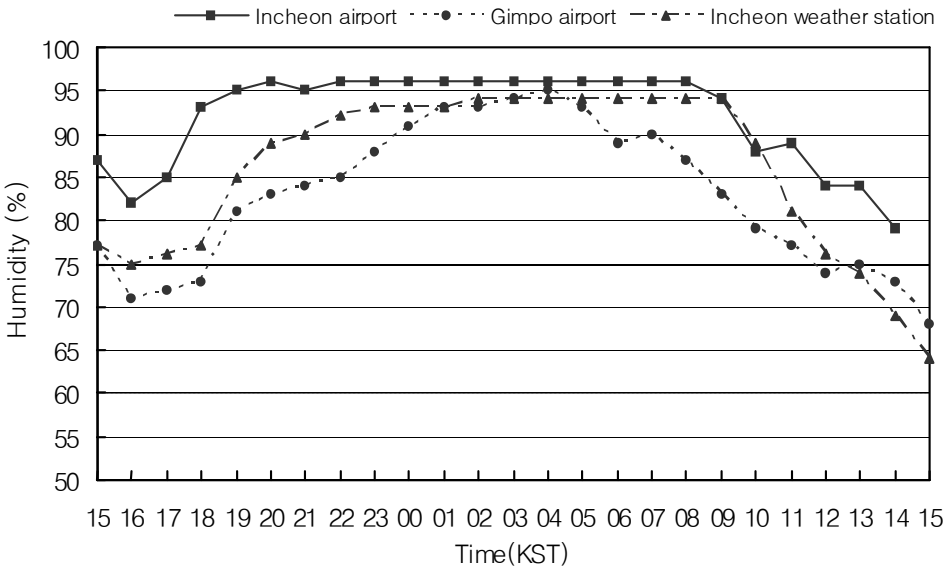
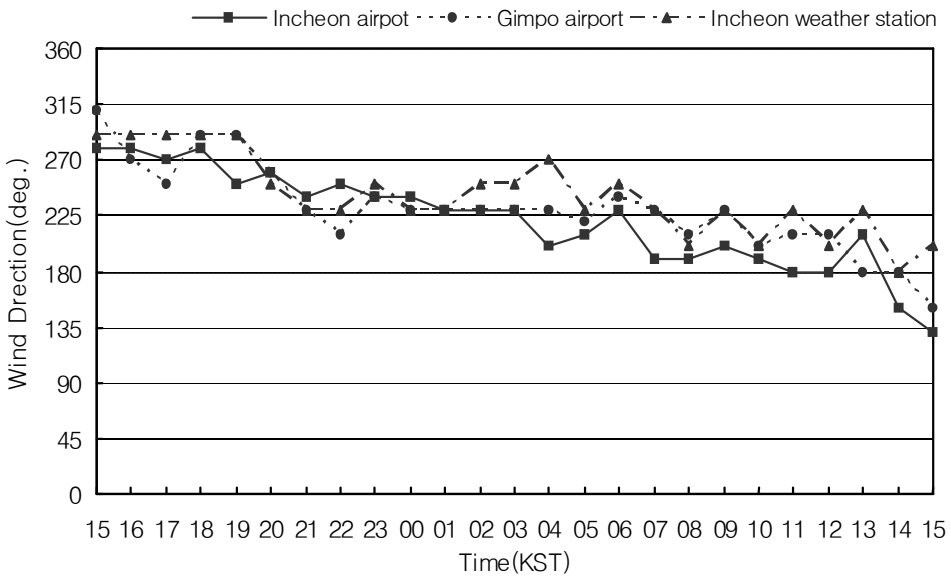
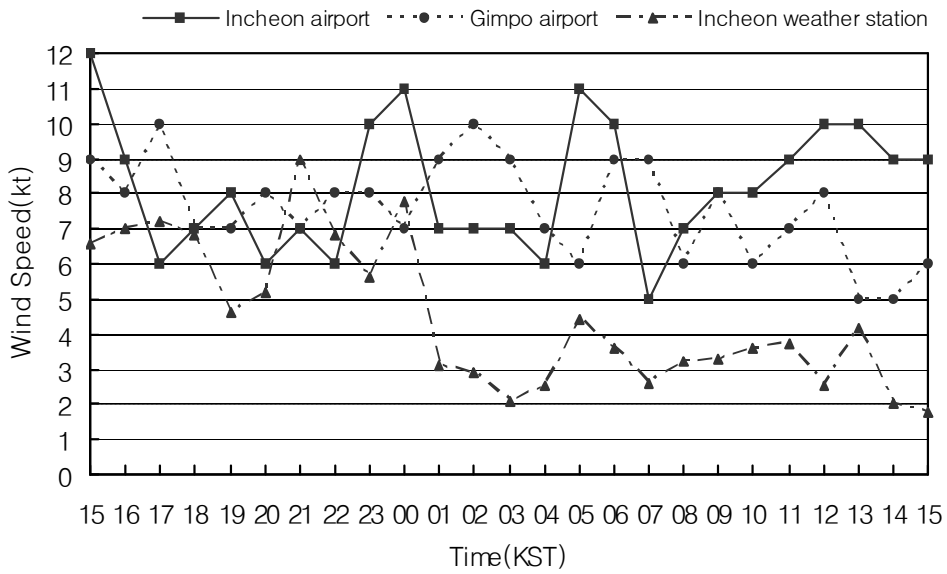


Fig. 52 Observed humidity(%) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun2004.

Collection @ chosun



(a) Wind direction(deg.)



(b) Wind speed(kt)

Fig. 53 Observed wind direction(deg.) and speed(kt) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004.

Collection @ chosun

사례기간동안 수치모델에서 예측한 인천공항의 시정예측 분포를 Fig. 54에 나타내었는데, 0000~0900KST까지 안개를 예측하여 실제 안개현상 시간인 2200~0600KST보다 약 2시간 정도 늦게 발생과 소산을 예측하였다. 그러나 대체로 실제 인천공항의 안개 현상과 유사하게 모의하였다.

이러한 시정 예측에 대한 종관적 예측 배경을 알아보기 위하여 사례기간 동안의 지상과 850hPa 예측 일기도를 Fig. 55에 각각 나타내었는데, 지상예측일기도를 나타낸 Fig. 55(a)를 보면, 동해상의 태풍의 위치와 서해상으로 발달 된 기압능의 분포를 실제 지상일기도와 유사하게 예측하여 서해상으로 따뜻한대기 유입이 되는 현상을 잘 예측하였다.

또한, 850hPa 일기도인 Fig. 55(b)의태풍의 위치와 서해상에 분포된 18℃ 온도선의 온난구역도 잘 예측하여 서해상의 대기 상·하층의 종관적 특징을 관측과 유사하게 예측 하였다.

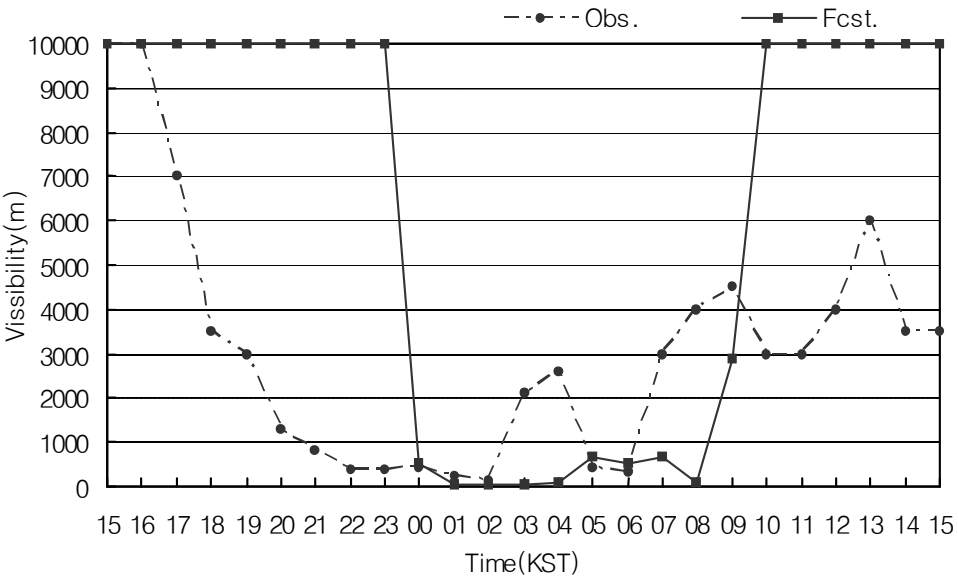
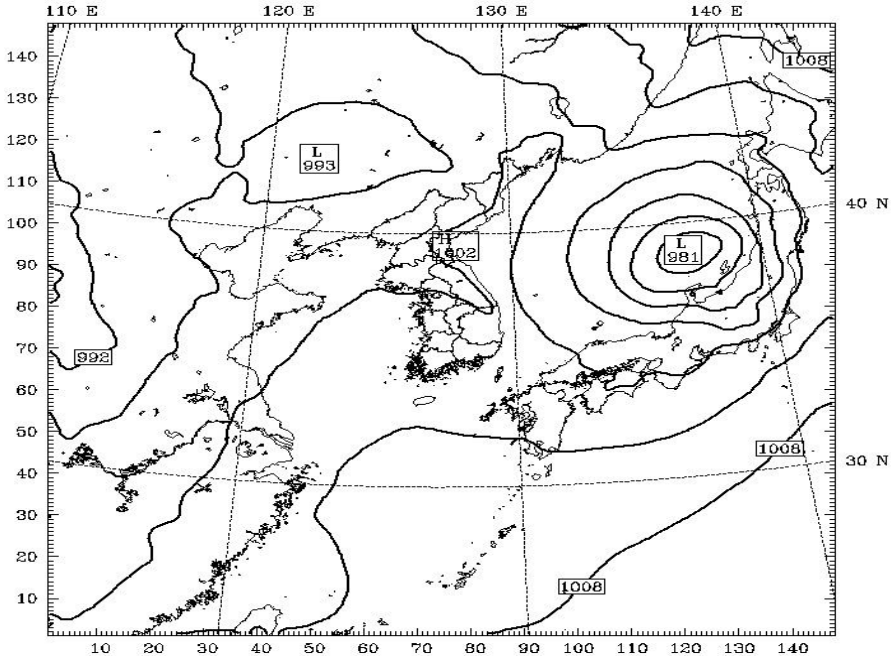
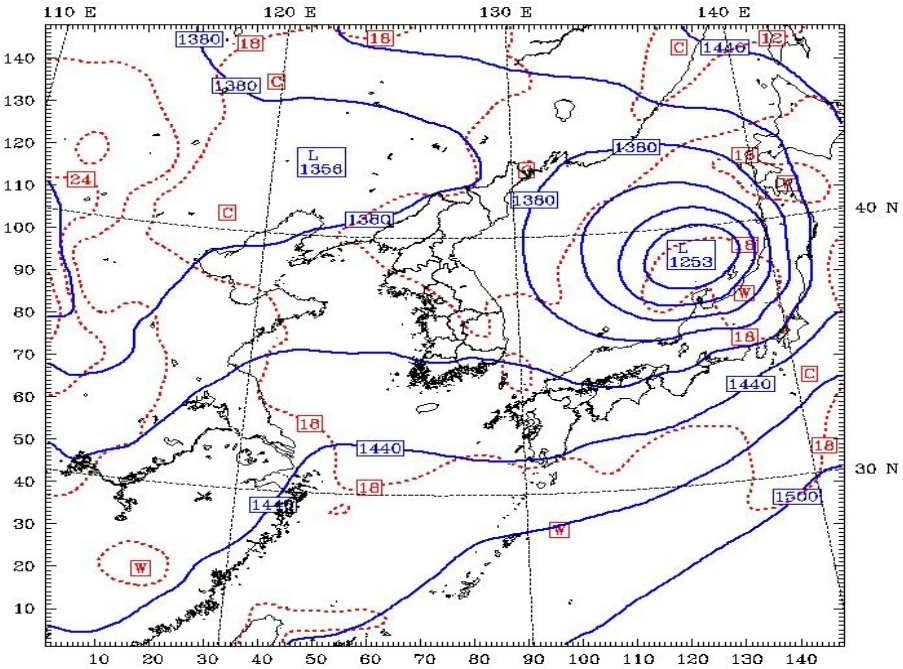


Fig. 54 Simulated(solid) and Observed(dot) visibility(m) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004.

Collection @ chosun



(a) Surface meterological chart.



(b) 850hPa level meterological chart

Fig. 55 Simulated meterological charts at 2100KST 21 Jun 2004.

Collection @ chosun

이러한 종관적 예측은 습도와 하층 바람에도 영형을 미치며, 그 분포에 대한 예측을 Fig. 56에 시간대별로 나타내었다.

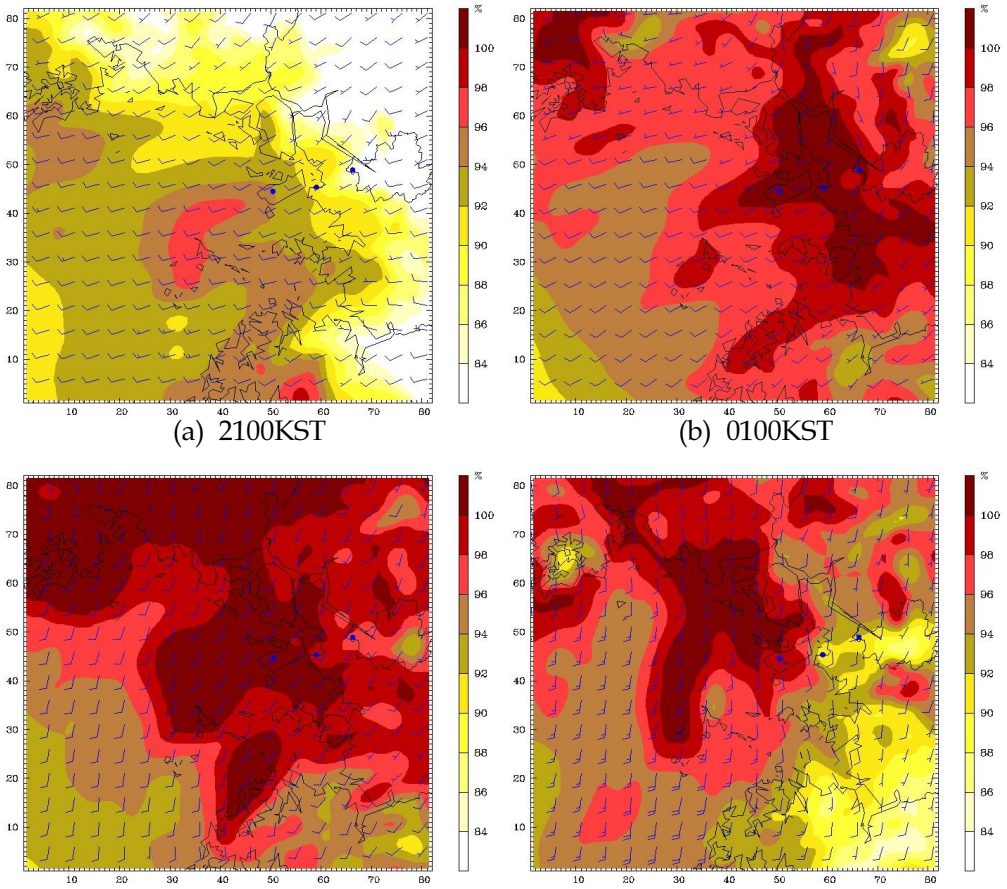


Fig. 56 Simulated relative humidity(shading according to key at right) and wind barb from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004.

실제 안개가 시작된 시간대의 남서풍과 서해상의 풍속은 유사하게 예측하였지만 인천공항에서의 풍속은 낮게 예측하여 습도가 실제보다 과소모의 되었다. 그러나 0100KST와 0500KST에는 습도를 관측과 유사하게 예측하였고, 0900KST에는 실제 관측보다 과대모의 경향을 보였다. 한편, 인천공항의 바람은 Fig. 57과 같이 모든 시간대에서 과소모의 경향을 보였고, 이는 습도의 과소 또는 과대 모의 경향과 더불어 시정 예측에도 영향을 미친다.

Collection @ chosun

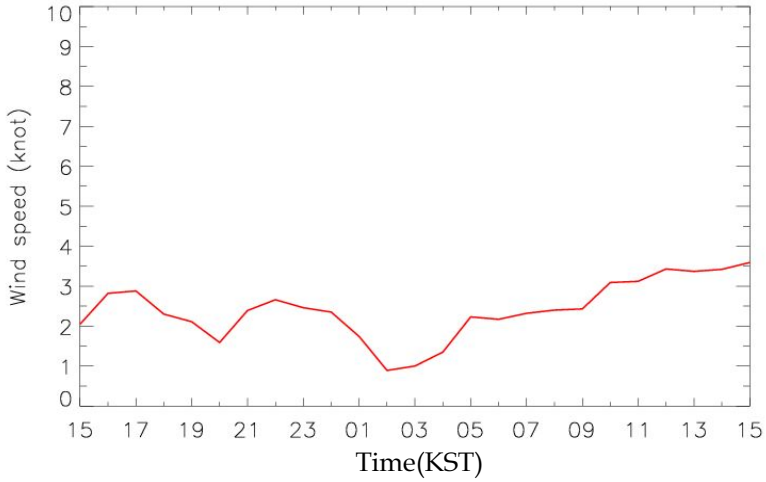


Fig. 57 Simulated wind speed(kt) from 1500KST 21 to 1500KST 22 Jun 2004.

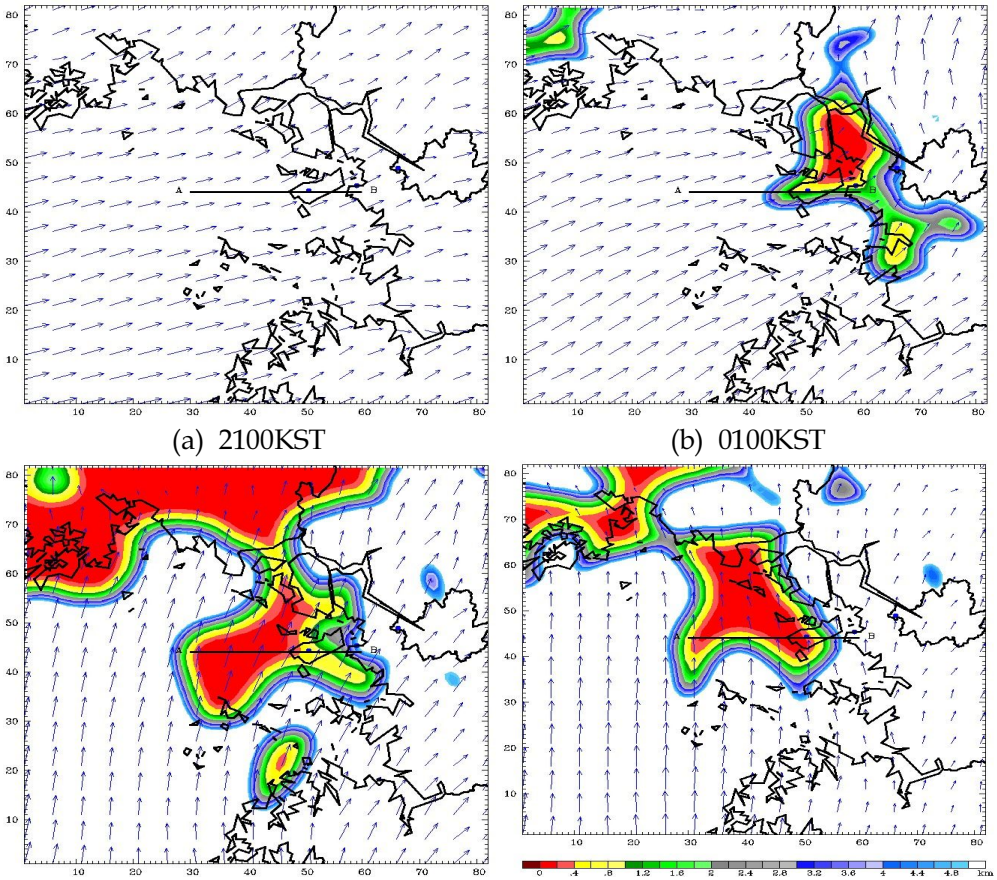
수치모델이 예측한 시정 예상도를 나타낸 Fig. 58을 보면 습도의 과소 모의로 인하여 실제 안개가 발생한 시간대인 0900KST에 안개가 예측되지 않았지만 습도를 관측과 유사하게 예측한 시간대인 0100~0500KST에는 안개를 예측하였다. 그러나 실제 안개가 소산된 0900KST에는 습도를 과대 모의하여 수치모델에서만 안개를 예측하였다. 이는 수치모델의 습도에 대한 과소 또는 과소 모의 경향으로 인하여 실제 안개의 발생과 소산 시간과 다소 차이를 보였으나 서해안의 실제 안개 분포와 유사하게 모의하였다.

이는 안개 발생 및 소산에 영향을 미치는 난류와 습도에 대한 연직분포를 분석해 보면 이해 할 수 있는데, 난류와 습도 그리고 구름물에 대한 인천공항의 연직분포를 Fig. 59에 시간대 별로 각각 나타내었다.

수치모델에서 안개를 예측한 시간대의 인천공항 연직 대기상태는 습도가 약 98%이상이고, 리차든 수가 6~8이 분포되어 있는 구역에 지표에서부터 구름물이 분포되어 있다.

그러나 0900KST의 시정 수평예상에서는 안개를 예측한 반면 연직대기 분포에서는 리차든 수가 음이 나타나면서 인천공항에 구름물이 분포되어 있지 않았다. 이는 실제 안개 소산 시간대와 일치한 것으로 0900KST의 수평 시정 예상도에서 인천공항의 안개예측과는 차이를 보였다.

Collection @ chosun



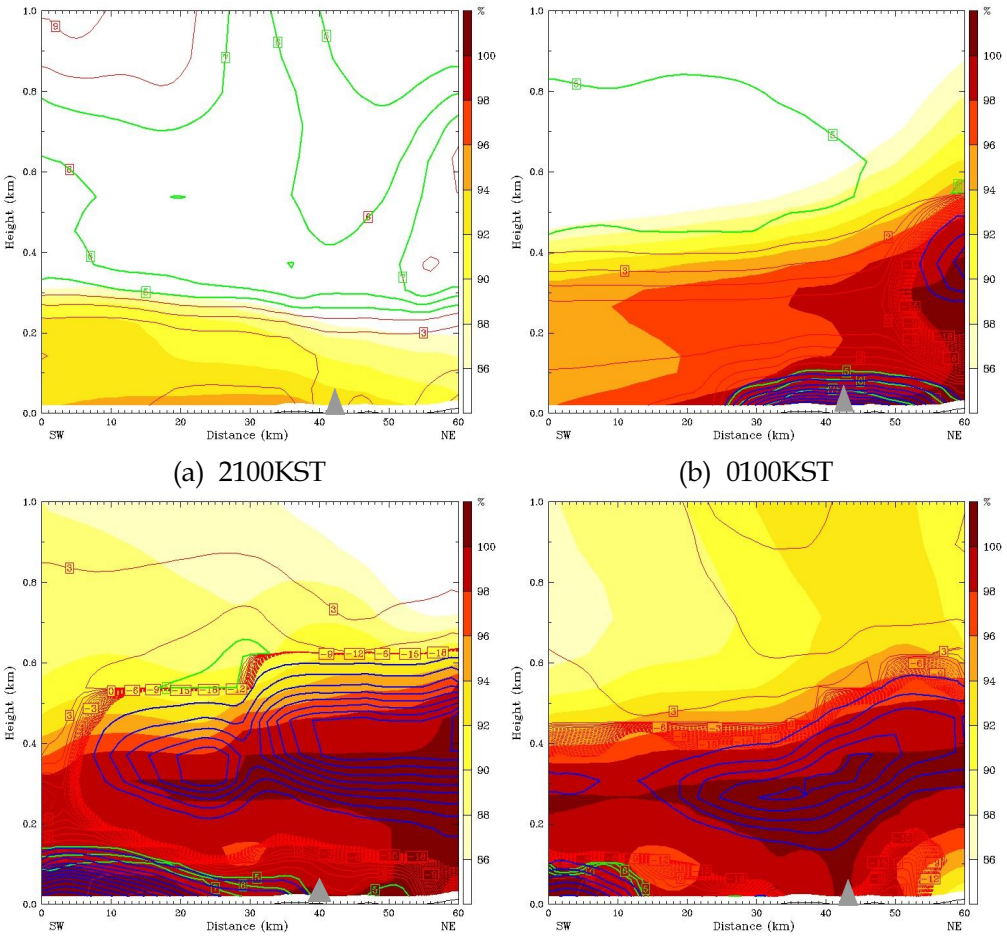
(a) 2100KST (b) 0100KST

(c) 0500KST (d) 0900KST

Fig. 58 Simulated visibility(km) and wind vector from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004.

인천공항의 역전층 및 대기 연직 구조를 분석하기 위하여 Fig. 60에 Skew-T를 시간대별로 각각 나타내었다. 실제 안개가 발생한 2100KST 시간대에는 약한 역전층이 예측되어 지표의 대기가 안정하였다. 그러나 안개가 소산된 0900KST에도 수치모델에서는 안개가 예측되어 역전층이 여전히 나타났다

Collection @ chosun

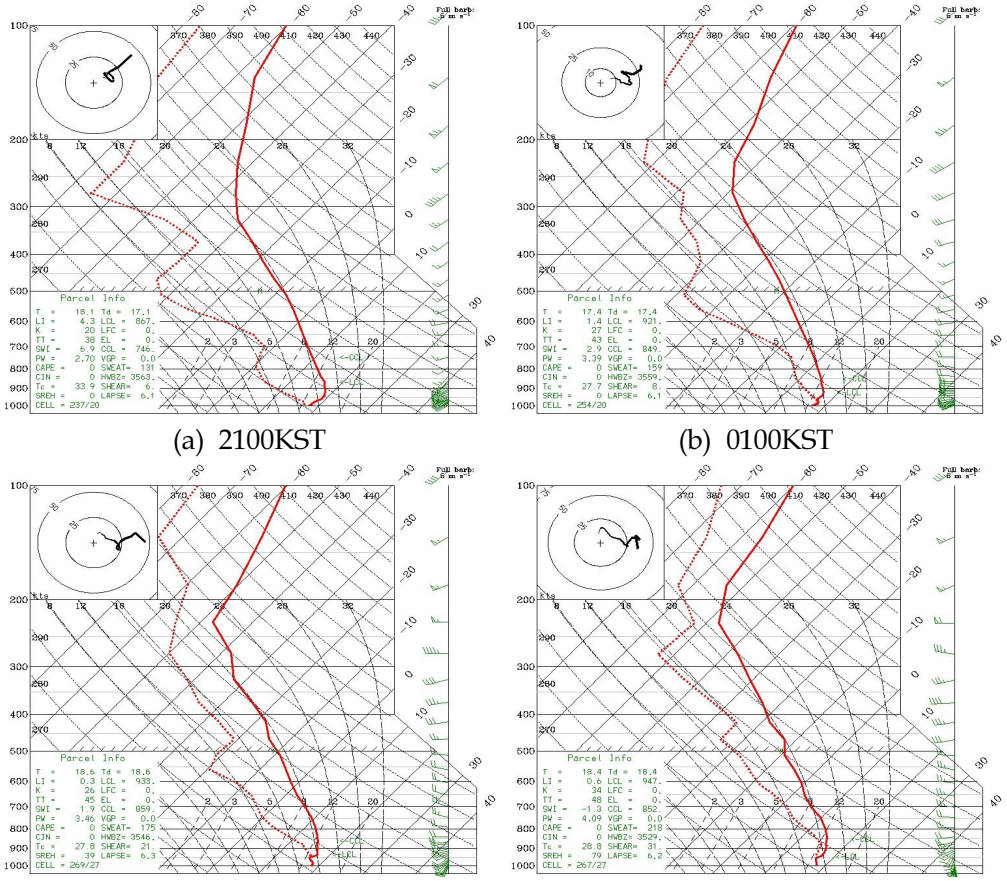


(a) 2100KST (b) 0100KST

(c) 0500KST (d) 0900KST

Fig. 59 Simulated relative humidity(shading according to key at right), Richardson Number(red solid), and cloud liquid water(blue body) vertical cross section along A-B from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004.

Collection @ chosun



(a) 2100KST (b) 0100KST

(c) 0500KST (d) 0900KST

Fig. 60 Simulated skew-T from 2100KST 21 to 0900KST 22 Jun 2004.

수치예측자료 분석을 통한 이류무 유형의 예측 특징은 동해상 태풍의 위치와 상층에서의 온난구역 등 서해상 상·층대기의 종관적 배경을 관측과 유사하게 모의하였다. 그러나 인천공항의 풍속과 습도를 과소 모의하여 실제 안개발생 시간보다 늦게 안개가 예측하였는데, 안개 예측 시에는 습도가 98%이상, 풍속은 약 2kt이었고, 낮은 역전층도 나타났다. 또한, 안개발생시 인천공항의 습도와 난류의 연직분포 특징은 지표의 상대습도가 98%이상이고, 리차든 수가 6~8인 구역에서 구름물이 분포되어 안개를 예측하였다.

Collection @ chosun

3. 전선무 유형 분석

사례 3은 인천공항에서 발생한 안개 중 전선무의 특징을 잘 나타내고 있으며, 사례기간 동안의 인천공항과 그 주변 지역인 김포공항 그리고 인천 시정 분포를 Fig. 61에 함께 나타내었다.

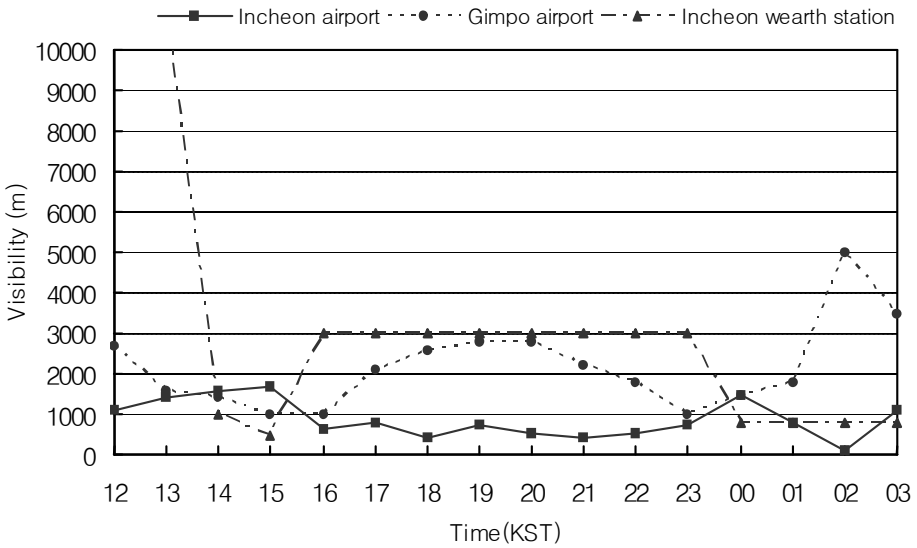


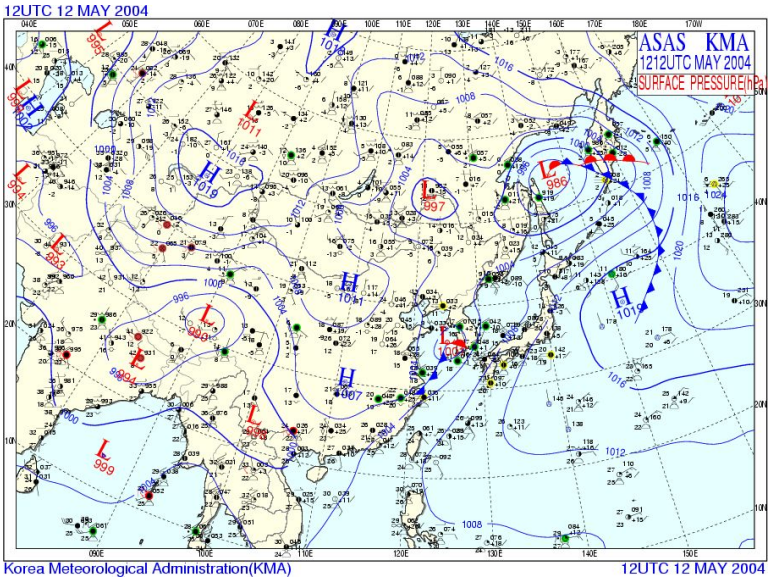
Fig. 61 Observed visibility(m) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

인천공항의 시정은 1400KST부터 낮아져 1600KST에 안개가 발생하였고, 0200KST까지 안개가 지속되었다. 그리고 인천은 12일 1500KST에 안개가 잠시 발생하였으며, 13일 0000KST부터 0300KST까지 지속되었다. 반면, 김포공항은 12일 1500~1600KST에 최단시정이 1,000m까지 관측이 되었지만 이후 3,000m으로 높아져 안개가 발생하지 않았다.

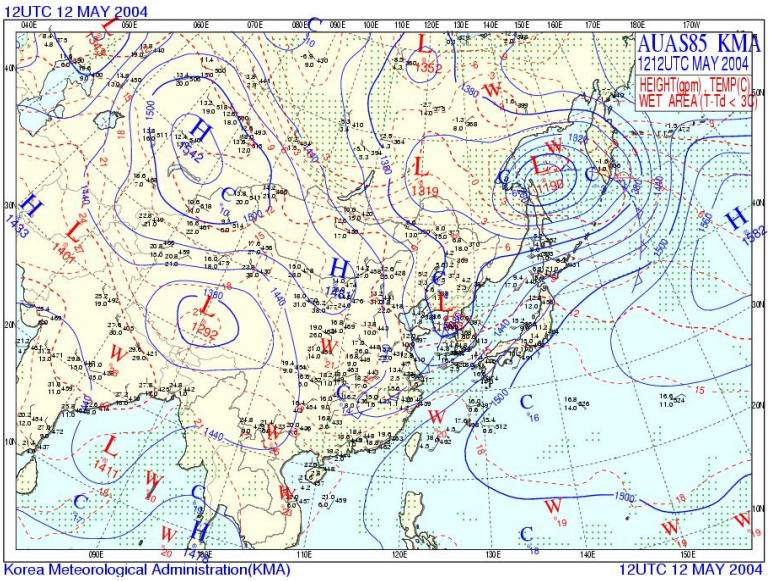
사례 2에 대한 종관적 배경을 이해하기 위하여 지상일기도와 850hPa 상층 일기도를 Fig. 62에 나타내었는데, 지상일기도 나타낸 Fig. 62(a)를 보면 서해상에 위치한 저기압 전면의 영향으로 서해상의 따뜻하고 습한 하층대기가 인천공항으로 유입되고 있으며, 850hPa 일기도를 나타낸 Fig. 62(b)에서는 산둥반도에 위치한 상층 저기압의 영향과 온도골의 분포로 대륙의 차고 건조한 공기가 서해상 상층으로 유입되어

Collection @ chosun

상대적으로 습하고 따뜻한 서해상의 하층대기와 만나면서 전선을 형성하고, 이 전선에 의해 인천공항에 안개가 발생한 것으로 추정된다.



(a) Surface meterological chart

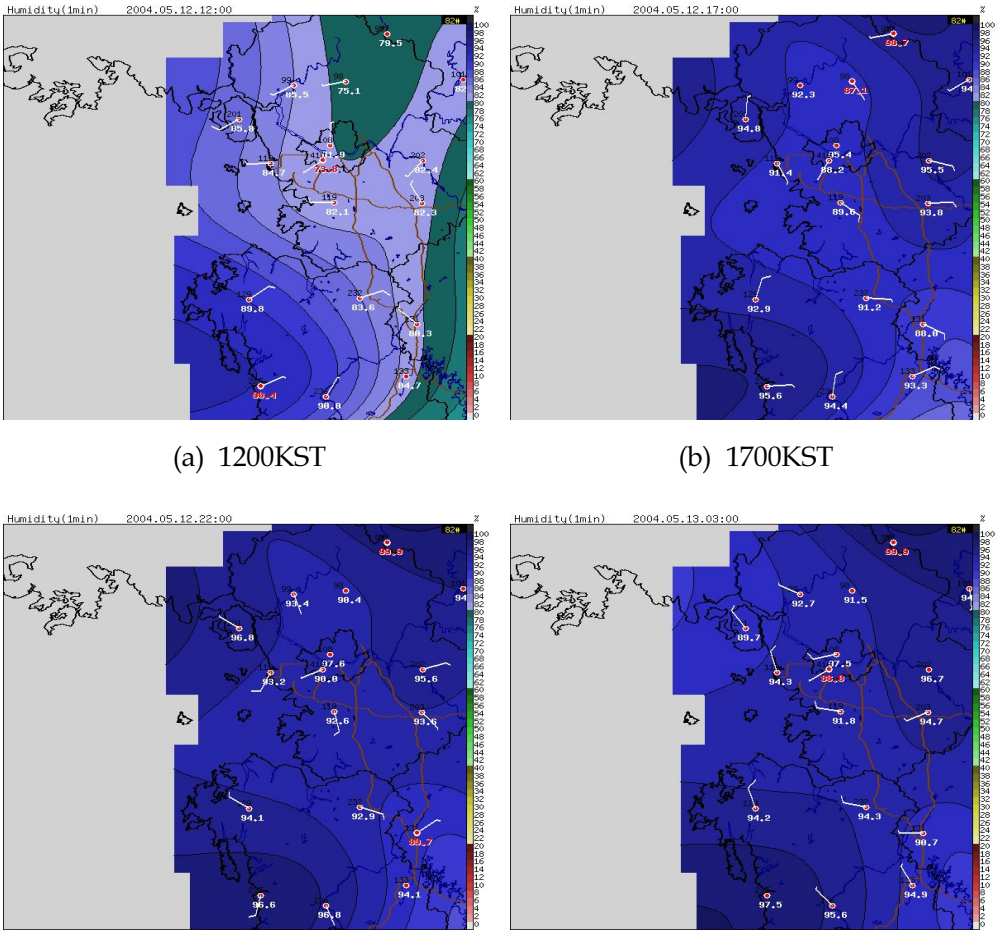


(b) 850hPa level meterological chart

Fig. 62 The meterological charts at 2100KST May 12 2004.

Collection @ chosun

안개현상에 영향을 미치는 바람과 습도분포를 나타낸 Fig. 63을 보면, 서해안의 습도가 낮은 1200KST에는 안개가 발생하지 않았지만 서해안의 저기압에 의해 서해상의 습한 대기가 유입되면서 습도가 높아지는 1700KST에서는 안개가 발생하였다. 그리고 저기압이 내륙으로 통과하면서 서해안의 풍향 변화와 함께 습도 분포도 변하고 있는데, 인천공항을 포함은 주변지역의 습도, 바람의 수치적 분포 특징을 Fig. 64~Fig. 66에 각각 나타내었다.



(a) 1200KST (b) 1700KST

(c) 2200KST (d) 0300KST

Fig. 63 Observed humidity(shading according to key at right) and wind barb(m/s) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

Collection @ chosun

먼저, 안개 발생시 습도 분포를 나타낸 Fig. 64를 보면 인천공항의 습도는 1200 KST에서 안개가 발생한 1600KST까지 급격히 증가하여 이후 95~96%가 관측되었고, 인천도 안개가 발생한 1400KST까지 급격하게 습도가 증가하여 91%까지 증가하였다. 하지만 안개가 발생하지 않은 김포공항의 습도는 최단시정이 관측된 시간만 90% 이상을 보였고, 시정이 3,000m 이상일 때는 습도가 90% 미만으로 나타났다. 이는 습도가 높을수록 시정은 낮고, 습도가 낮을수록 시정은 높아 서로 역의 상관관계가 있음을 알 수 있다.

인천공항의 바람 분포를 나타낸 Fig. 65를 보면 풍향은 지상일기도의 저기압이 내륙으로 이동함에 따라 인천공항을 포함한 김포공항, 인천 풍향이 남동에서 북서로 변한다. 인천공항의 안개 발생시 풍속은 4~8kt까지 증가하지만 평균적으로 6kt 정도 이고, 인천은 안개 발생시 5~8kt까지 불었으며, 풍속이 가장 약했다.

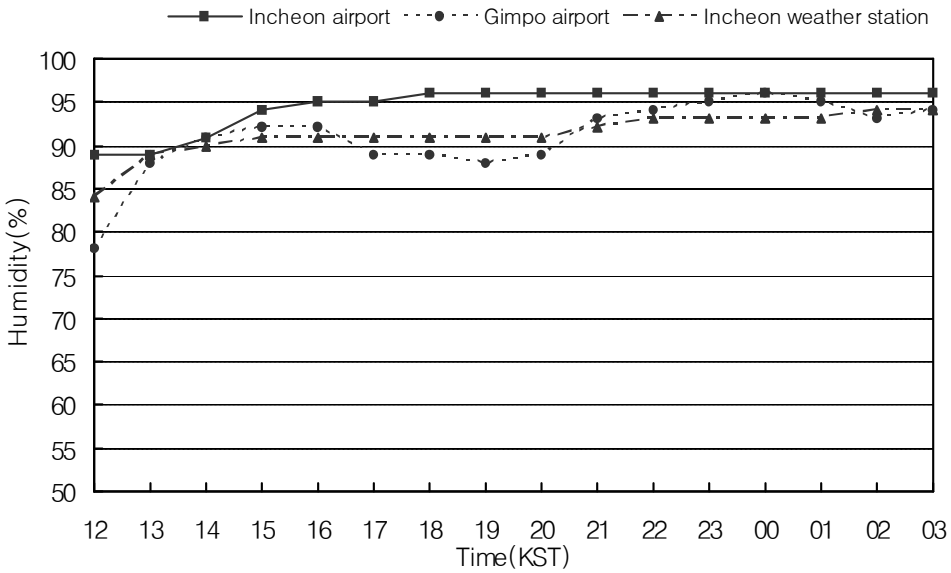
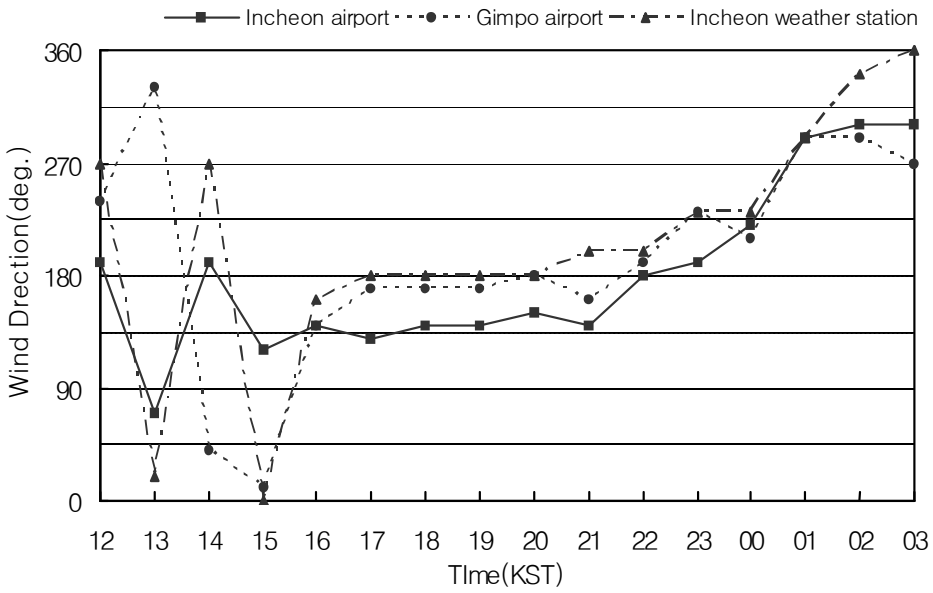
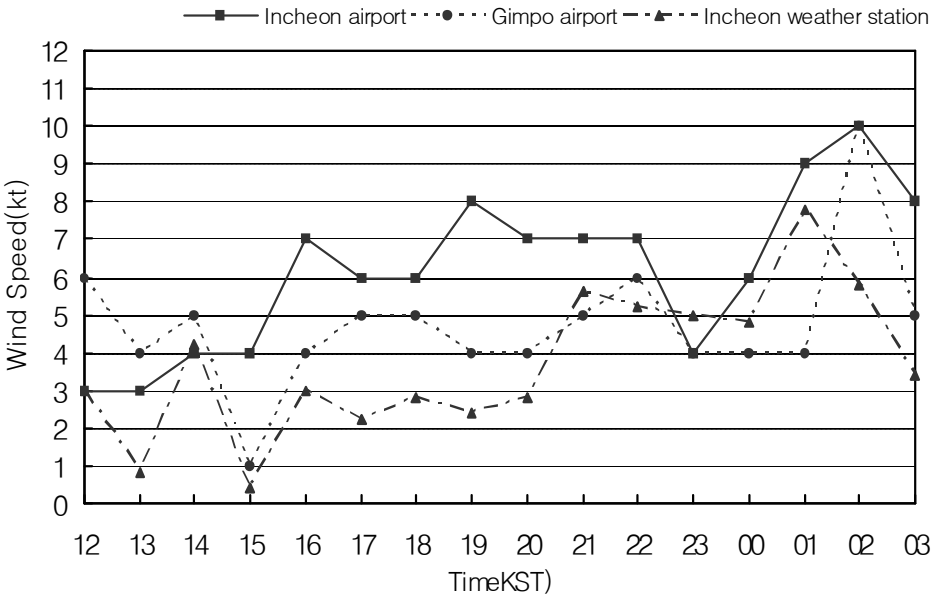


Fig. 64 Observed relative humidity(%) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

Collection @ chosun



(a) Wind direction(deg.)



(b) Wind speed(kt)

Fig. 65 Observed wind direction(deg.) and speed(kt) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

Collection @ chosun

이러한 관측자료의 특징을 종합해 보면 인천공항 안개 발생시 습도는 95~96%이며, 풍향은 남동에서 남서로 풍속은 약 6kt 정도이다. 또한, 인천은 안개 발생시 습도는 약 92%였고, 풍향은 남서에서 북으로 풍속은 약 5kt 정도 이었다.

수치모델에서도 사례기간동안에 인천공항의 안개를 예측하였는데, 인천공항의 시정 예측분포를 Fig. 66에 나타내었다.

실제 인천공항의 안개가 발생한 시간보다 빠르게 안개 발생을 예측하였고, 빠르게 소산을 예측하여 2200KST 이후부터 급격하게 10,000m 이상의 시정을 예측하였다. 이러한 시정예측 오차는 수치모델의 종관적 배경 및 바람과 습도에 대한 예측 오차로 인한 것인데, 이를 분석해 보면 다음과 같다.

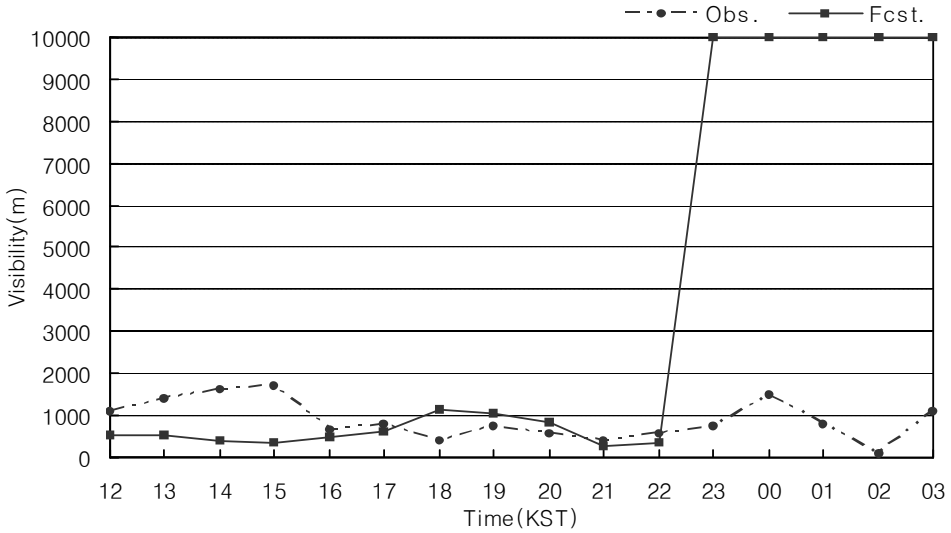
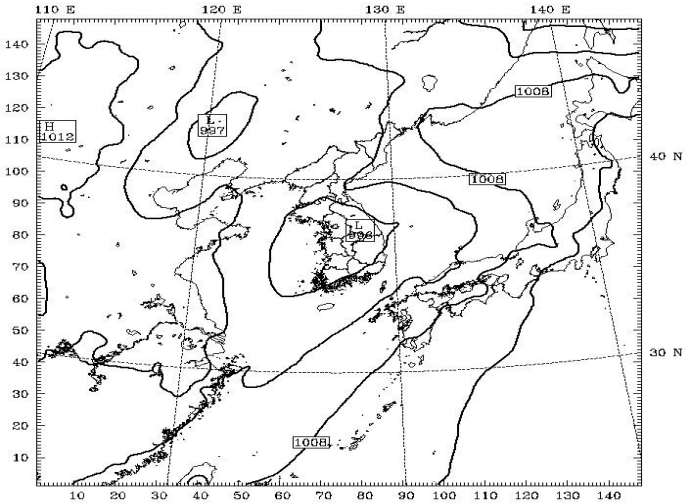


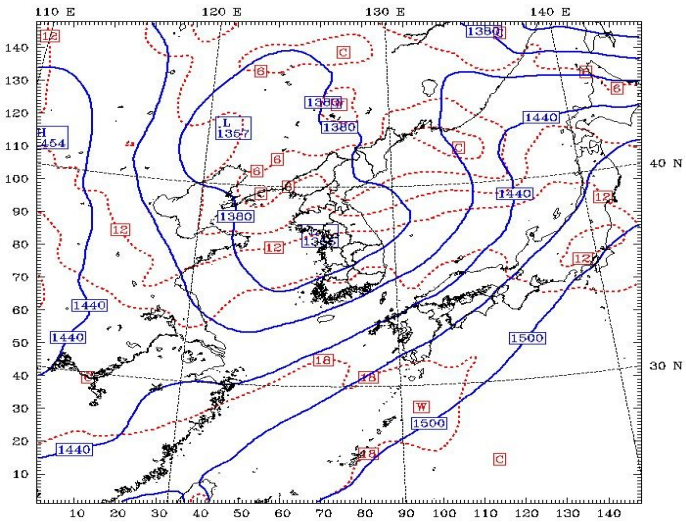
Fig. 66 Simulated(solid) and Observed(dot) visibility(m) from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

사례기간 동안 수치모델에서 예측한 종관적 배경을 Fig. 67에 지상 및 850hPa 수치예측 일기도를 각각 나타내었는데, 지상예측일기도를 나타낸 Fig. 67(a)을 보면 저기압이 실제 저기압 위치보다 동쪽의 내륙에 위치하여 저기압 시스템이 실제보다 빠르게 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 850hPa 예측 일기도를 나타낸 Fig. 67(b)에서는 실제 상층 저기압의 위치와 서해상의 온도골 분포 비교적 잘 예측하고 있다.

Collection @ chosun



(a) surface meterological chart



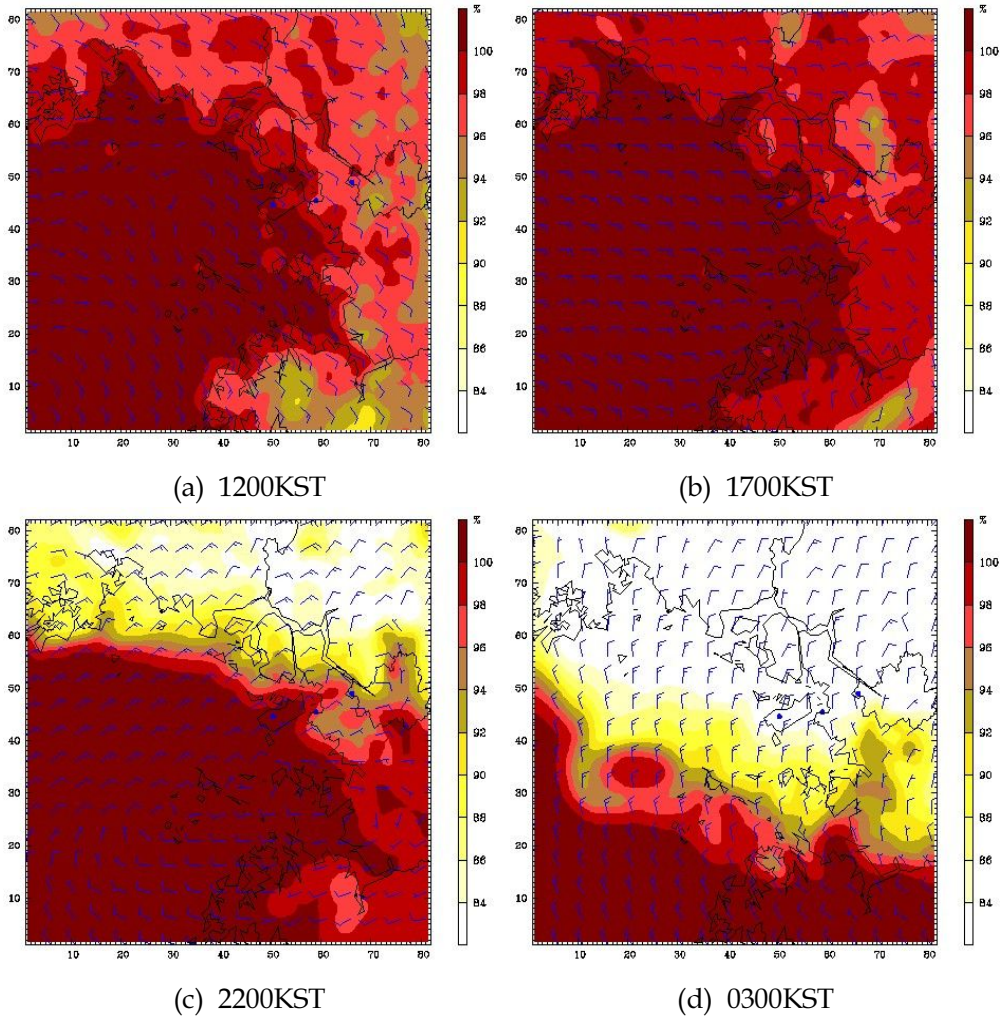
(b) 850hPa level meterological chart

Fig. 67 Simulated meterological charts at 2100KST 12 May 2004.

이러한 수치모델의 하층대기의 종관적 배경 오차는 지상의 습도와 바람에 대한 예측 오차에 영향을 주어 Fig. 68과 같은 바람과 습도를 예측하게 되는데, 안개를 예측한 1200～2200KST에는 서해안의 습도분포가 98% 이상을 예측하였지만 실제 습도분포는 90% 미만으로 수치모델의 습도에 대한 과대모의로 인하여 실제 안개발생

Collection @ chosun

시각보다 빠르게 예측 하였다. 반면, 13일 0300KST의 실제 습도는 95% 이상이지만 수치모델에서는 0300KST이후 급격하게 습도가 낮아져 약 84% 미만으로 습도를 과소 모의하여 안개의 소산 시간을 빠르게 하였다. 이는 수치모델이 저기압의 이동 속도 모의를 실제보다 빠르게 모의하면서 풍계에 영향을 주어 습도를 과대 또는 과소 모의하게 되었고, 이로 인해 안개의 발생과 소산이 실제보다 빠르게 진행되었다.



(a) 1200KST (b) 1700KST

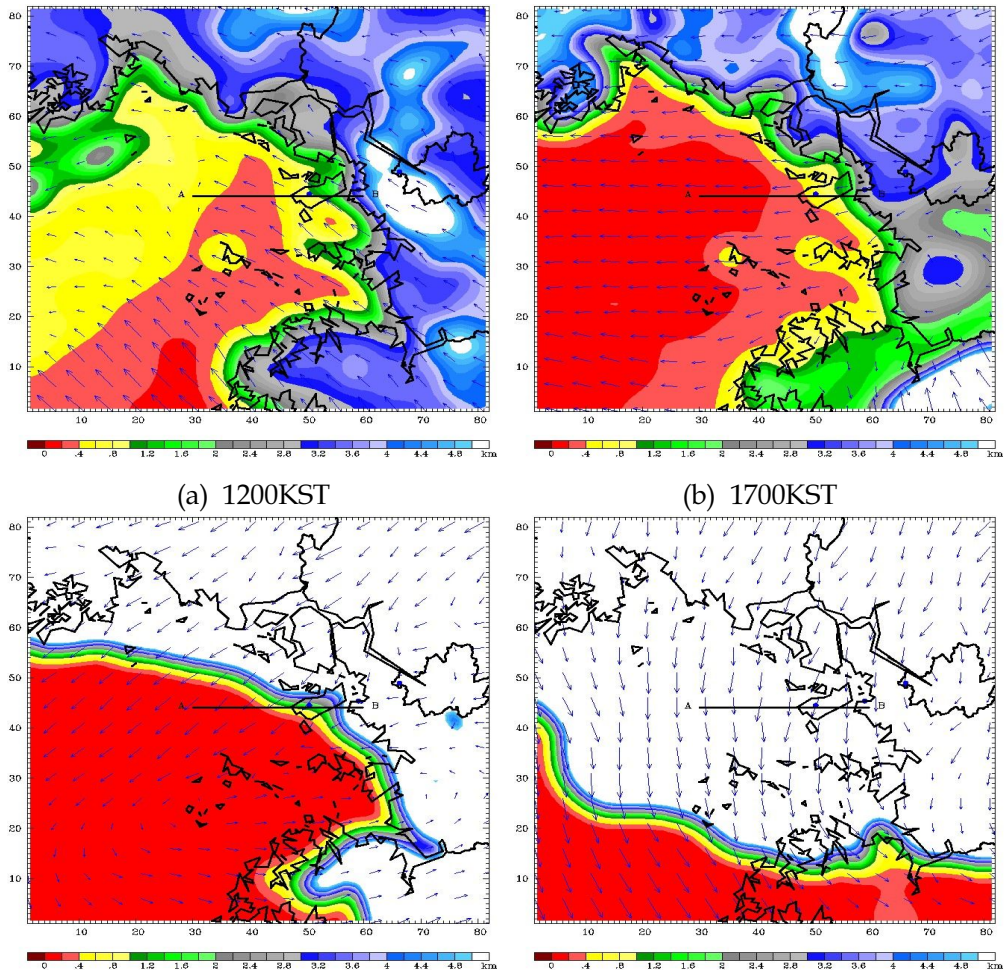
(c) 2200KST (d) 0300KST

Fig. 68 Simulated relative humidity(shading according to key at right) and wind barb from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

Collection @ chosun

인천공항과 서해안의 시정 분포를 시간대별로 각각 나타낸 Fig. 69에 나타내었는데, 시정이 1km 미만으로 예측된 안개구역은 음영으로 나타내었다.

수치모델의 시정예측은 인천공항 습도예측의 과대 또는 과소모의 경향에 영향을 받으며, 인천공항 안개 발생과 소산 시간대를 실제보다 빠르게 예측하였고, 안개 예측 시간대에서는 관측된 시정보다 더 짧게 예측하는 경향을 보였다.



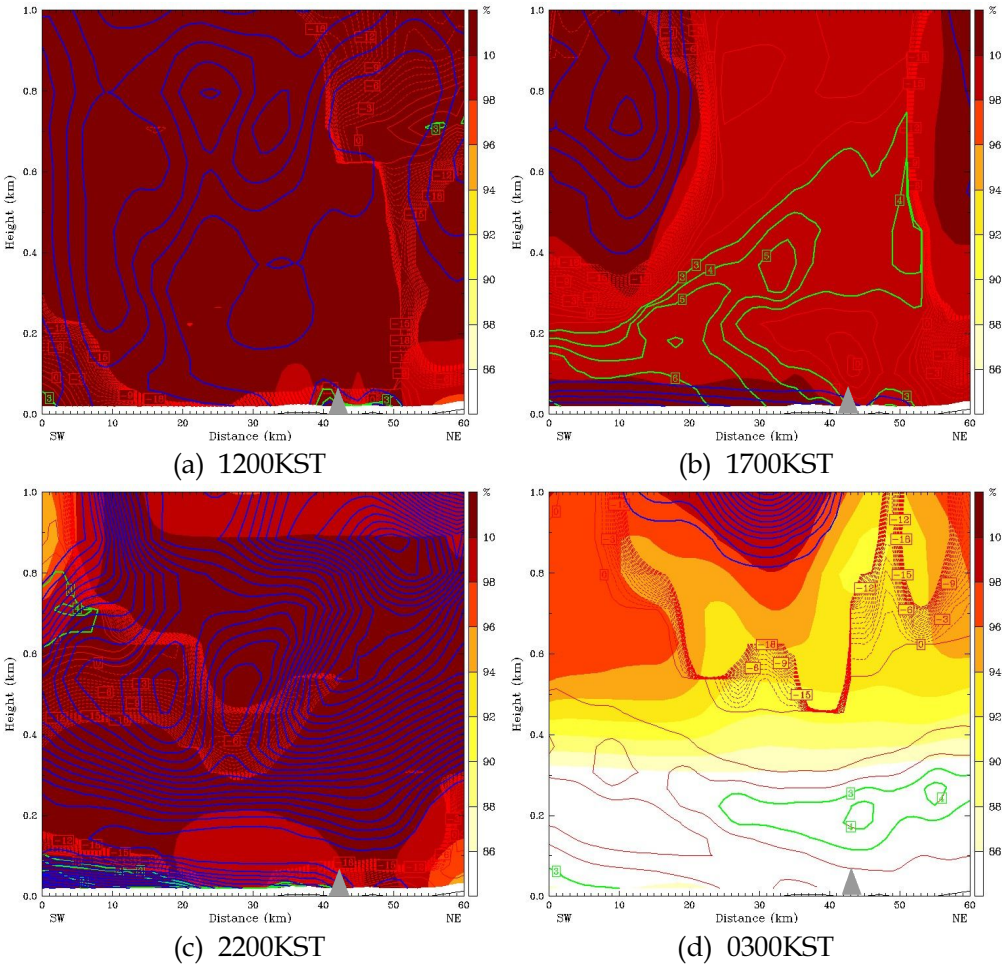
(a) 1200KST (b) 1700KST

(c) 2200KST (d) 0300KST

Fig. 69 Simulated visibility(shading according to key at center low) and wind vector from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

Collection @ chosun

이러한 안개 예측지역의 기상요소 특징을 분석하기 위하여 인천공항의 습도, 난류, 구름물의 연직분포를 Fig. 70에 시간대 별로 각각 나타내었다. 인천공항에 안개를 예측한 시간대에서의 인천공항 주변 연직대기 분포 특징은 지표면에는 상대습도가 98% 이상이고 리차든 수가 3~5인 구역에 구름물이 생성되어 안개를 나타내었고, 지표 상층에서의 강한 음의 리차든 수 구역에서도하층운인 구름물이 분포하였다.



(a) 1200KST (b) 1700KST

(c) 2200KST (d) 0300KST

Fig. 70 Simulated relative humidity(shading according to key at right), Richardson Number(red solid), and cloud liquid water(blue body) vertical cross section along A-B from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

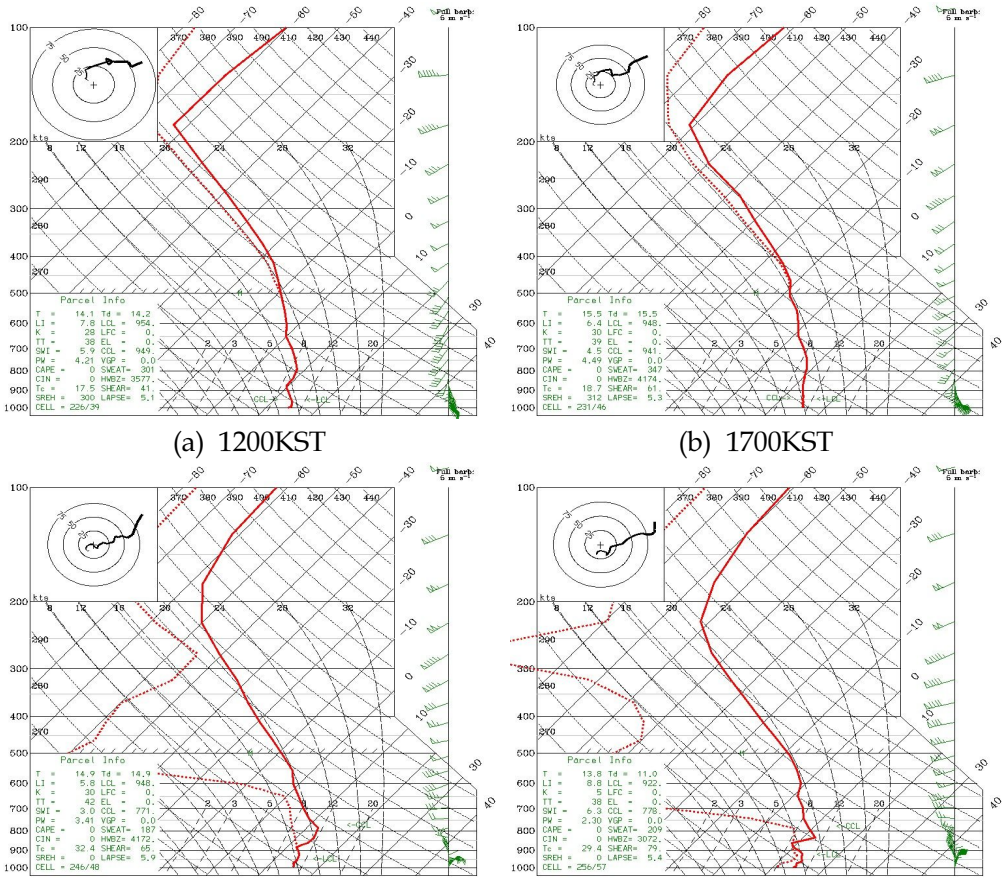
Collection @ chosun

반면, 안개가 소산된 시간대에서는 습도가 86% 미만이 되어 구름물이 생성되지 않는다. 또한, 리차든 수가 5를 초과하면 상대습도가 높다하더라도 대기는 열적으로 강한 안정된 상태가 되므로 난류의 혼합에 의한 구름물이 생성되지 않는다. 하지만 강한 대류가 발생하는 구역에서는 하층운을 보이는 구름물이 분포하였다. 이는 습한 대기(상대습도 98% 이상)상태에서 난류의 적절한 혼합(리차든 수 3~5)은 지표 또는 해수면에 구름물을 생성하여 안개가 예측되었고, 강한 대류(리차든 수 음)는 하층운을 예측하게 된다.

전선무 발생시 인천공항의 역전층 및 대기 연직 성분을 분석하기 위하여 Skew-T를 시간대별로 Fig. 71에 각각 나타내었다. 수치모델에서 안개가 예측된 시간대에서는 대기하층과 800~900hPa에 역전층이 분포되어 있고, 지표에서부터 약 500hPa까지 기온과 노점온도선이 교차되어 포화된 공기가 분포되어 있지만 안개 소산이 예측된 시간대에서는 포화된 공기층이 사라졌다.

수치예측자료 분석을 통한 전선무 유형 예측 특징은 저기압의 이동 속도를 실제보다 빠르게 모의하면서 풍향 변화에도 영향을 주어 인천공항 하층대기의 습도를 과대 또는 과소모의하게 되었고, 결국 안개 발생 및 소산시간을 실제보다 빠르게 모의하였다. 그리고 안개가 예측된 시간대에서는 역전층이 높은 고도까지 나타나 안개 예측시 안정한 대기 상태를 예측하였다. 인천공항 전선무 예측 메커니즘은 서해안의 위치한 저기압에 의한 전선의 영향으로 서해상의 습한 공기가 인천공항으로 유입되면서 난류의 적절한 혼합으로 구름물을 생성하게 되어 안개를 예측하였다.

Collection @ chosun



(a) 1200KST (b) 1700KST

(c) 2200KST (d) 0300KST

Fig. 71 Simulated skew-T from 1200KST 12 to 0300KST 13 May 2004.

C. 수치예측자료 분석 결과

수치모델에서 인천공항 안개 예측 시 유형별로 특징을 보였는데, 먼저 사례 1인 복사무에서는 실제 안개보다 1시간 늦게 안개 발생을 예측하였지만 안개 소산은 3시간 길게 예측하였다. 그리고 습도는 실제보다 과대모의 경향을 보이며 98%까지 예측하였고, 풍속은 1.2~1.8kt로 과소모의 경향을 보였다. 그리고 상대습도가 98% 이상이고, 리차든 수가 지표에는 음의 값과 200m 상공에는 강한 양의 값을 가지면 대류의 혼합으로 생성된 구름물이 하층운으로 발달하지 못하여 안개가 예측되었다.

사례 2인 이류무에서는 실제 안개 발생 및 소산 시간이 3시간 차이를 보였고,

Collection @ chosun

안개 예측 시 실제 시정보다 짧게 예측을 하였다. 그리고 상대습도가 약 98% 이상으로 과대모의 경향을 보였고, 풍속은 1.2～2.3kt로 과소 모의 경향을 보였다. 그리고 지표의 상대습도가 98% 이상이고, 리차든 수가 6~8을 가지면 구름물이 지표에 생성되어 안개가 예측되었다.

사례 3인 전선무에서는 실제 안개 발생 시간 보다 4시간 빠르게 예측하였고, 5시간 빠르게 안개 소산을 예측하였으며, 실제 시정보다 더 짧게 예측하는 경향을 보였다. 또한, 습도는 99% 이상으로 과대모의 경향을 보였고, 풍향은 남동에서 동 그리고 북으로 실제와는 반대방향으로 변했다. 또한, 풍속은 2~3kt로 과소모의 경향을 보였다. 그리고 지표의 상대습도가 98% 이상이고, 리차든 수가 3～5이면 구름물이 지표에 생성되어 안개가 예측되었다.

수치모델에서 인천공항 안개 예측 시 나타난 습도와 바람의 공통적인 수치적 특징은 상대습도는 98%로 과대모의 경향을 보였고, 풍속은 2～3kt로 과소모의 경향을 보이며, 안개 예측 시 실제보다 시정을 짧게 예측하는 경향을 보였다. 또한, 인천공항에서 지표의 상대습도가 98% 이상이고, 난류로 인한 적절한 혼합이 있으면 구름물이 생성되어 안개가 예측되었다. 그러나 강한 대류나 안정한 난류로 인해 안개가 하층운으로 발달하거나 소산되는 경우도 있었다. 이는 안개 예보업무에 시정 수치예측자료 이외에 습도와 난류로 구성된 수치자료를 활용 할 수 있는 가능성을 보여 주었다. 한편, 안개 사례에 대한 종관적 배경은 실제 대기 상·하층의 상태를 비교적 실제와 유사하게 모의하지만, 국지적 규모의 기압계 이동 및 바람에 대한 과대 또는 과소모의 경향으로 인하여 인천공항의 시정예측이 실제 안개 발생·소멸시각이 다소 차이를 보였다. 하지만 인천공항의 안개 발생 메커니즘 및 서해안과 내륙 전반에 발생한 안개 현상을 관측과 유사하게 예측하였다.

Collection @ chosun

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 2001년 1월 1일부터 2004년 12월 31일까지의 4개년 동안의 관측 자료를 이용하여 인천공항의 안개 발생 빈도 및 유형별 특성을 분석하였으며, 유형별 안개 사례를 선정하고 수치실험을 통하여 안개 발생의 메커니즘을 연구하였다.

1. 연구기간 동안의 인천공항의 안개를 김포공항과 인천의 안개로 비교·분석하고, 유형별 분류기준을 정하여 분류하고 이를 풍향 풍속, 습도, 해기차 등 안개와 관련된 요소와의 특성을 분석하였다. 그 특성을 살펴보면

a. 인천공항은 조사기간 중 전체 발생횟수 270회 중 여름철에 97일로 가장 많이 발생하였고, 가을철에 34일로가장 적게 발생하였다. 인천은 전체 발생횟수 166회 중 여름철에 64일로 가장 많이 발생하였고, 가을철에 17일 순으로 적게 발생하였다. 한편 김포공항은 가을철에 71일로 가장 많이 발생하였고, 봄에 34일로 가장 적게 발생하여, 인천공항과 인천은 해무의 영향을 많이 받고 김포공항은 접지역전에 의한 복사무의 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다.

b. 인천공항에 발생한 안개의 412회중 유형별 횟수는 이류무 162회, 전선무 143회, 복사무 71회, 증기무 36회순으로 나타나 여름철 온난 다습한 남서류 유입에 따른 해무의 영향과 여름철, 겨울철 강수에 따른 안개가 많이 발생하는 것으로 나타났다.

- 복사무는 10~11월에 23회로 32%가 발생하였고, 발생시간은 0400~0700 KST에 37회로 52%가 발생하였다. 발생시에 풍향은 남동에서 북동풍이 50회로 70%가 나타났고, 풍속은 6kt 이하 62회로 87%가 발생하였다. 평균안개지속시간은 3시간 54분이었고, 최장시간은 9시간 이었으며 3시간미만이 45%가 나타나 다른 안개에 비해 지속시간이 가장 짧았다.
- 이류무는 7월에 40회로 25%가 나타나 가장 많이 발생하였고, 0400~0700 KST에 52회, 32%가 발생하였다. 풍향은 남서에서 북서풍이 87회로 53%가 나타났고, 풍속은 6kt 이하가 112회로 69%가 나타났다. 해기차는 -2~0℃사이에서 34회로 21%가 발생하였고, 평균안개 지속시간은 7시간 30분이었다..

Collection @ chosun

- 증기무는 11월부터 시작하여 이듬해 3월 까지 발생하였고, 2월에 14회로, 39%가 나타나 가장 많이 발생하였다. 풍향은 남동에서 북동풍이 11회로 31%가 나타났고, 풍속은 6kt이하가 25회로 69%가 나타났다. 해기차는 2℃이상에서 6회로 30%가 발생하였고, 평균안개 지속시간은 5시간 20분이었다.
- 전선무는 1~7월에 126회로 85%가 발생하였고, 오전시간대에 101회로 71%가 발생하였다. 풍향은 남동에서 남서풍이 73회, 51%이었고 풍속은 6kt이하가 79회, 55%를 나타났다. 평균안개 지속시간은 8시간 50분이었고, 최장시간은 24시간 30분이었으며 3시간미만 85%가 나타났다.
- 포차는 유형별 안개와 상관관계가 없이 0.5~1.5℃이하에서 370회로 90%가 발생하였고, 습도도 유형별 안개와 상관없이 387회로 94~98%사이에서 94%가 발생하였다.

2. 인천공항 안개를 유형별로 분석하기 위해 항공기상 단시간예측시스템을 이용하여 수치실험을 하였는데, 수치모델에서 안개 예측 시 종관적 배경은 실제 대기 상·하층의 상태를 비교적 실제와 유사하게 모의하지만, 바람은 안개 사례 기간동안 과소모의 된 경향을 보였고, 습도는 98% 이상을 예측하여 과대모의 경향으로 인하여 인천공항의 안개예측이 실제 안개 발생·소멸시각과 차이를 보이게 되었다. 유형별 특징을 살펴보면

a. 복사무(사례 1) 유형에서는 기압패턴이 안장부에 들거나 기압경도력이 완만하고, 접지 역전층이 발생하였다. 풍향은 북동에서 남동풍이 4kt이하로 불고 있었다. 지표에서 상대습도가 98% 이상, 리차든 수가 음(-)의 값을 보이고 상층에서 양의 값(+)을 보이면 지표에 구름물이 생성되어 안개가 예측되었으며, 연직규모는 약 200m였다.

b. 이류무(사례 2) 유형에서는 남서쪽에서 남서기류가 유입되고 역전층이 발생하였다. 풍향은 남서풍이 7~8kt로 불고 있었고, 지표의 상대습도가 98% 이상, 리차든 수 6~8이면 구름물이 생성되어 안개가 예측 되었으며, 연직규모는 100m 이하였다.

c. 전선무(사례 3) 에서는 전선 또는 기압골이 우리나라를 통과 할 때 남서쪽에

Collection @ chosun

서 남서기류가 유입되고 있었고, 바람은 남풍계열이 7~8kt로 불었다. 지표의 상대습도가 98% 이상, 리차든 수 3~5이면 구름물이 생성되면서 안개가 예측되었으며, 연직규모는 5km 이하였다.

3. 향후 우리나라에서도 정확한 안개예측을 위해서는 좀더 조밀한 안개 관측망을 구축하여야 할뿐만 아니라 특히 각 공항마다 연직 분포를 분석할 수 있는 라디오미터를 설치하고, 공항의 지형적 특성이 고련된 수치모델을 개발하는 등에 투자가 지속적으로 이루어 져야 할 것이다.

Collection @ chosun

참고 문헌

기상연구소, 1986; 서해중부 연안과 동해안에 발생하는 해무발생 특성 및 예측가능성 연구.

기상연구소, 2000; 영종도 주변해역의 해무예측 연구 I.

기상연구소, 2001; 영종도 주변 해역의 해무예측 연구 Ⅱ.

기상연구소, 2002; 영종도 주변 해역의 해무예측 연구 Ⅲ.

기상청, 2006; 기상관측지침, 134pp.

김문옥, 1998; 한반도 주변해역의 해무 분포 특성. 전남대학교 대학원 석사학위논문, 64pp.

김해동, 1998; 초여름 한반도 동해안의 해무발생에 관한 수치실험, 한국기상학회지, **33**, 337-348.

류찬수, 황연남, 2004; 주암댐 주변 안개발생 예측 연구, 지역발전연구, 9-2, 21-40.

민경덕, 2001; 대기환경과학. 시그마프레스, 76pp.

민내언, 1986; 해양기상학, 한국해양대학교 해사도서출반부, 181-188.

안중배, 이해진, 2000; 중규모 해양모형을 이용한 한반도 주변 해역 해양순환 재현. 한국해양학회지 바다, **5,** 186-194.

원덕진, 1998; 황해상의 해무 특성과 수치 모델을 이용한 해무의 통계예측, 경북대학교 대학원 석사 학위 논문, 74pp.

한국기상학회, 1999; 대기과학개론. 시그마프레스, 93pp.

Albers, S. C., 1995; The LAPS wind analysis. *Wea. Forecasting*, **10**, 342-352.

Albers, Steven C., John A. McGinley, Daniel L. Birkenheuer, John R. Smart, 1996; The Local Analysis and Prediction System (LAPS); Analyses of Clouds, Prediction, and Temperature. *Wea. Forecasting*, **11,** 273287.

Collection @ chosun

Benjamin, S.G., D. Devenyi, S.S. Weygandt, K.J. Brundage, J.M. Brown, G.A. Grell, D. Kim, B.E. Schwartz, T.G. Smirnova, and T.L. Smith, 2003 ; An Hourly Assimilation/Forecast Cycle; The RUC, *Mon. Wea. Rev.* (submitted).

Benjamin, S.G., K.J. Brundage, P.A. Miller, T.L. Smith, G.A. Grell, D. Kim, J.M. Brown, and T.W. Schlatter, 1994 ; The Rapid Update Cycle at NMC. Preprints, 10*th Conference on Numerical Weather Prediction*, AMS, Portland, OR, 566-568.

Bougeault, P., 1983; A non-reflective upper boundary condition for limited-height hydrostatic model. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 420-429.

Choi, H, J. W. Kim and S. Takahashi, 1998; Three dimensional numberical prediction of fog formation over coastal comple terrain. J. *of korean Meteor. Soc.*, **34**, 319-335.

Dudiha, J., 1989; Numerical study of convection observation observed during the winter monsoon experiment using a meso scale two-dimensional model. J. *Atmos. Soc.*, **46**, 3077-3107.

Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1993; A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model(MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-397+IA, 114pp.

Grell, G. A., Y-H. Kuo, and R. Dasch, 1993; Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization *Mon. Wea. Rev.*, **121**. 764-787.

Holtslag, A. A. M., and C-H. Moeng, 1990; A high resolution air mass transformation model for short range weather forecasting. *Mon. Sea. Rev.*, **118**, 1561-1575.

Hong, S. Y., and H. L. Pan, 1996; Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**,

Collection @ chosun

2322-23239.

Houze, R. A. Jr., 1993 ; Cloud dynamics. Academic press, 573 pp.

Klemp, J. B., and D. R. Durran, 1983; An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 430-444.

Lorenz, E. N., 1969: The Predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, **21**, 289-307.

Miller, P.A., and S .G. Benjamin, 1992; A system for the hourly assimilation of surface observations in mountainous and flat terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **120**.

Oliver, D. A., 1978 ; The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. J. Atmos. Sci. **35**, 301-316

Roach, W. T., R. Brown, S. T. Caughey, J. A. Garland and C. J. Readings, 1976a ; The physics of radiation fog. Part Ⅰ ; A field study. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **102**, 313-333.(Roach *et al.*,1976a,b)

Sela, J. G., 1982; The NMC spectral model, NOAA Tech. Rep. NWS-30, 36**pp**.

Sela, J. G., 1988; The new NMC operational spectral model. *Eighth Conference on Numerical weather Prediction, February* **22-26**, Baltimore, Maryland.

Stauffer, D. R., and N. L. Seaman, 1990; Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I; Experiments with synoptic-scale data. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1250-1277.

Stoelinga, M. T., and T. T. Warner, 1999; Nonhydrostatic, Mesobeta-Scale Model Simulations of Cloud Ceiling and Visibility for an East Coast Winter Precipitation Event. J. of *App. Meteo.*, **38**, 385-404.

Collection @ chosun

Taylor, G. I., 1917; The formation of fog and mist. Quarterly Journal of Royal Meterological Soceity, **43**, 241-268.

Telford, J. W., and S. K. Chai. 1984; Inversions, and fog, status and cumulus formation in warm air over cooler water, *Boundary-Layer Meteor.*, **29**, 109-137.

Tremant, M., 1989 ; The forecasting of sea fog. Met. Mag., **118**, 69-75.

Tribbia, J. J., and D. P. Baumhefner, 1988: The reliability of improvements in deterministic short-range forecasts in the presence of initial state and modeling deficiencies. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2276-288.

Wyngaard, J. C., and R. A. Brost, 1984; Top-down and bottom-up diffusion of a scalar in the convective boundary layer. J. *Atmos. Sci.,* **41**, 102-112.

Collection @ chosun

부 록

Appendix 1. The status of Incheon Airport's Fog(2001).

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
01	07	07:20	17:37	10:17	front
01	07	19:00	20:00	01:00	steam
01	10	22:22	22:30	00:08	front
01	10	22:38	23:40	01:02	front
01	19~20	18:48	10:54	16:06	front
01	20	11:55	13:43	01:48	front
01	21	05:29	06:00	00:31	radiation
02	02	14:16	15:35	01:19	steam
02	15	08:45	10:00	01:15	front
02	15	10:34	14:46	04:12	front
02	19	07:07	13:46	06:39	radiation
02	19~20	16:10	19:25	27:15	steam
02	20~21	22:55	01:13	02:18	steam
02	21	02:41	05:05	02:24	steam
02	22	03:05	05:36	02:31	steam
02	22~23	20:18	00:38	04:20	steam
02	27	18:41	18:51	00:10	front
02	27	22:00	22:28	00:28	front
03	02	06:35	10:36	04:01	radiation
03	04	09:13	09:22	00:09	front
03	14	20:19	20:43	00:24	front
03	19	02:05	10:42	08:37	radiation
03	25	08:47	09:30	00:43	advection
03	25	09:49	10:21	00:32	advection
04	02~03	23:23	00:14	00:21	radiation
04	08	02:13	05:30	03:17	radiation
04	08	05:53	07:00	01:07	radiation
04	18	07:17	08:31	01:14	radiation
04	18	08:48	09:19	00:31	radiation
04	19	02:00	08:40	06:40	front
05	02	18:37	20:48	02:11	advection
05	02	21:15	21:24	00:09	advection

Collection @ chosun

Appendix 1. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
05	02~03	22:48	00:07	00:19	advection
05	03	00:25	09:13	08:48	advection
05	07	17:45	18:00	00:15	advection
05	07	18:20	20:00	01:40	advection
05	09	07:24	07:40	00:16	front
05	15	19:00	21:17	02:17	advection
05	15~16	21:50	00:03	02:13	advection
05	19	17:13	19:40	02:27	advection
05	20	01:55	03:30	01:35	advection
05	20	20:07	23:05	02:58	advection
05	21	01:11	08:10	06:59	advection
05	25~26	23:25	02:00	02:35	advection
05	26	02:39	03:30	00:51	advection
05	26	03:41	07:10	03:29	advection
05	26	22:00	22:30	00:30	advection
05	27	05:09	07:47	02:38	radiation
06	04	01:54	03:23	01:29	advection
06	04	04:44	09:30	04:46	advection
06	05	05:30	06:30	01:00	radiation
06	09	00:30	05:00	04:30	advection
06	09	06:30	08:00	01:30	advection
06	18	06:10	10:47	04:37	front
06	18	11:11	12:00	00:49	front
06	24	16:50	17:17	00:27	front
06	26	03:30	04:03	00:33	radiation
06	26	04:22	04:46	00:24	radiation
06	26	05:10	07:00	01:50	radiation
06	29	09:45	14:00	04:15	front
06	30	01:00	02:00	01:00	front
06	30	06:21	09:30	03:09	front
07	01	05:19	05:46	00:07	advection
07	03	12:05	12:16	00:11	advection
07	05	09:19	09:32	00:13	advection

Collection @ chosun

Appendix 1. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
07	05	12:54	13:51	00:57	front
07	08	07:11	08:24	01:13	advection
07	09	05:15	07:50	02:35	advection
07	10	18:23	21:30	03:07	advection
07	11	00:35	09:53	09:18	advection
07	11	10:11	10:36	00:25	advection
07	12	04:50	08:50	04:00	advection
07	12	21:18	21:38	00:20	advection
07	12	21:47	22:30	00:51	advection
07	21	12:14	12:20	00:06	advection
07	22	08:37	08:48	00:11	front
07	23	01:05	02:00	00:55	front
07	23	02:37	08:30	05:53	front
07	23	09:07	11:00	01:53	front
07	26～27	23:39	00:20	00:41	radiation
07	27	06:36	07:20	00:44	advection
07	27	09:32	10:14	00:42	advection
07	29	03:37	04:18	00:41	front
07	29	04:32	05:30	00:58	front
08	01	07:33	07:37	00:04	front
08	04	02:35	06:30	03:55	radiation
08	04	07:30	07:42	00:12	radiation
10	24	01:20	03:00	01:40	radiation
10	24	04:21	05:08	00:47	radiation
10	24	06:10	10:48	04:38	radiation
10	26	05:48	10:38	04:50	radiation
10	27	03:39	13:00	09:51	front
10	27	20:43	24:00	03:27	radiation
11	20	02:00	09:36	07:36	steam
11	21	02:00	11:00	09:00	steam
11	21～22	18:06	11:16	17:10	steam
11	23	06:30	08:00	01:30	steam
11	24	07:30	12:00	04:30	steam

Collection @ chosun

Appendix 2. The status of Incheon Airport's Fog(2002).

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
01	10～11	20:04	04:12	08:08	steam
01	12	04:40	06:45	02:05	radiation
01	15	00:30	02:15	01:45	front
01	15	03:07	18:20	15:13	front
02	02	17:30	18:29	00:59	steam
02	02～03	18:30	05:30	11:00	steam
02	04	10:02	11:05	01:03	radiation
02	21	20:30	21:30	01:00	front
02	21～22	22:00	00:00	02:06	front
02	22	01:00	09:25	08:25	front
02	26～27	21:30	01:41	04:11	radiation
02	27	05:45	06:39	00:54	radiation
02	27	08:06	10:49	02:43	radiation
02	27～28	23:08	11:05	11:57	advection
02	28～29	16:02	11:00	18:58	advection
03	01	18:08	21:30	03:22	advection
03	01～02	21:49	05:00	07:11	advection
03	10	04:10	08:11	04:01	front
03	13	01:40	05:07	03:27	advection
03	13	05:30	06:11	00:41	advection
03	15	08:30	09:30	01:00	front
03	26	02:45	10:08	07:23	advection
03	31	03:30	09:07	05:37	advection
03	31	09:50	10:15	00:25	advection
03	31	20:05	20:14	00:09	advection
03	31～1	21:15	09:43	12:28	advection
04	02	07:30	07:50	00:20	radiation
04	03	07:49	08:00	00:11	radiation
04	06	16:40	17:21	00:41	front

Collection @ chosun

Appendix 2. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
04	06	18:20	18:30	00:10	front
04	06	18:40	20:05	01:25	front
04	07	03:50	07:00	03:10	front
04	07	14:00	17:22	03:22	front
04	15	21:24	23:11	01:47	front
04	16	01:00	02:00	01:00	front
04	16	02:49	05:30	02:41	front
04	16	05:34	06:15	00:41	front
04	16	06:35	06:51	00:16	front
04	16	07:22	07:35	00:13	front
04	29	12:05	13:00	00:55	front
04	29	13:20	14:10	00:50	front
04	29	21:36	21:54	00:18	front
05	04	06:00	06:30	00:30	radiation
05	10	04:46	08:30	03:44	radiation
05	11	05:34	06:30	00:56	radiation
05	11	07:30	08:00	00:30	radiation
05	11～12	22:00	03:50	05:50	advection
05	12	05:07	07:48	02:41	advection
05	14	06:00	09:49	03:49	radiation
05	19～20	23:34	01:00	01:26	advection
05	30	01:30	02:20	00:50	advection
05	30	23:08	00:00	00:52	front
06	01	04:46	07:18	02:32	front
06	01	20:38	20:46	00:08	front
06	02	04:49	07:16	02:27	radiation
06	02	07:30	08:00	00:30	radiation
06	07	20:02	21:30	01:28	advection

Collection @ chosun

Appendix 2. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
06	10	20:39	21:52	01:13	front
06	10～11	23:35	03:34	03:59	front
06	11	03:47	06:05	02:18	front
06	11	06:05	06:39	00:34	front
06	11	07:00	08:20	01:20	front
06	11	08:30	08:48	00:18	front
06	12	18:44	19:30	00:46	front
06	12～13	23:30	00:43	01:13	front
07	03	06:30	07:44	01:14	advection
07	14	17:41	23:30	05:49	front
07	16	02:13	03:47	01:34	front
07	17	02:07	08:40	06:33	front
07	22	02:14	03:11	00:57	front
07	31	01:46	02:44	00:58	advection
07	31	05:11	05:30	00:19	advection
07	31	06:30	06:52	00:22	advection
08	01	21:11	21:30	00:19	front
08	07	03:18	03:30	00:12	front
08	07	03:45	04:11	00:26	front
08	27	07:23	07:30	00:07	front
08	27	07:33	08:03	00:30	front
09	03	04:00	09:00	05:00	advection
10	12	01:52	03:00	01:08	radiation
10	12	03:38	07:00	03:22	radiation
11	29	11:00	12:30	01:30	front
11	29	13:00	14:00	01:00	front
12	16	07:35	08:30	00:55	front
12	18	08:00	09:30	01:30	radiation

Collection @ chosun

Appendix 3. The status of Incheon Airport's Fog(2003).

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
01	03	09:58	10:08	00:10	front
01	03	10:34	14:00	03:26	front
01	03	13:46	14:00	00:14	front
01	09～10	23:50	13:00	13:10	steam
01	13	04:30	09:30	05:00	steam
01	13～14	19:00	00:30	05:30	steam
01	17	15:39	18:00	02:21	front
01	22	11:30	11:41	00:11	front
01	27	07:00	10:00	03:00	front
01	27	11:30	12:19	00:49	front
02	09	02:09	03:00	00:51	steam
02	09	05:30	14:38	09:08	advection
02	09～10	17:00	00:30	07:30	advection
02	14	04:30	06:11	01:41	steam
02	14	07:30	08:30	01:00	steam
02	14	09:00	09:30	00:30	steam
02	14～15	23:00	02:30	03:30	steam
02	15	03:30	08:00	04:30	steam
02	17	07:50	10:30	02:40	radiation
02	18～19	21:46	07:00	09:14	advection
02	19	07:30	08:00	00:30	advection
02	25	07:54	08:30	00:36	advection
02	25	09:30	09:42	00:12	radiation
02	27	10:00	11:00	01:00	advection
03	02	22:30	00:30	02:00	front
03	09	09:39	10:00	00:21	radiation
03	16	11:30	13:39	00:09	front

Collection @ chosun

Appendix 3. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
03	25	02:11	03:30	00:09	advection
03	25	05:09	09:00	03:51	advection
03	27	02:30	03:00	00:30	front
03	27	04:00	04:30	00:30	front
04	11	22:30	23:30	01:00	front
04	12	00:00	07:08	07:08	front
04	12	20:30	21:00	00:30	advection
04	18	15:20	16:45	01:25	front
04	18～19	23:48	00:30	00:42	front
04	27	01:30	02:45	01:15	advection
04	27	03:00	08:30	05:30	advection
05	07	04:00	05:30	01:30	front
05	07	07:00	07:10	00:10	front
05	17	17:03	17:35	00:32	advection
05	17	19:34	22:30	02:56	advection
05	18～19	19:21	09:30	14:09	advection
05	21	06:00	07:00	06:00	advection
06	04	05:52	08:30	02:38	advection
06	07	04:30	05:00	00:30	radiation
06	13	05:30	09:24	03:54	advection
06	13	09:41	10:00	00:19	advection
06	17	04:51	08:45	03:54	advection
06	18	04:28	06:00	01:32	advection
06	18	06:30	07:00	00:30	advection
06	18	07:12	09:21	02:09	advection
06	20	05:25	06:00	00:35	advection
06	20	23:11	23:30	00:19	advection
06	22	21:00	22:00	01:00	advection

Collection @ chosun

Appendix 3. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
06	22	22:30	22:52	00:22	advection
06	22	23:00	23:30	00:30	advection
06	23	09:43	11:00	01:17	front
06	23	12:15	13:00	00:45	front
06	23	14:30	15:00	00:30	front
06	23	15:30	16:30	01:00	front
06	23	17:00	18:30	01:30	front
06	29	19:51	20:30	00:39	advection
06	29	22:30	22:45	00:15	advection
06	30	00:30	01:00	00:40	advection
06	30	05:00	07:30	02:30	advection
07	01	05:51	08:30	02:39	advection
07	10	20:46	21:06	00:20	advection
07	10	21:11	21:30	00:19	advection
07	17	05:00	09:00	04:00	advection
07	18	10:00	10:47	00:47	front
07	21	02:44	03:00	00:16	radiation
07	22	05:08	06:00	00:52	front
07	22	06:04	06:13	00:07	front
07	23	01:08	02:00	00:52	front
07	29	03:00	04:00	01:00	front
08	03	09:30	11:00	01:30	front
08	03	11:30	11:45	00:15	front
08	03～04	23:23	09:13	09:50	advection
08	04～05	22:30	09:30	11:00	advection
08	07	01:13	01:21	00:08	front
08	12	07:05	07:52	00:47	advection

Collection @ chosun

Appendix 3. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
08	14	05:30	07:00	01:30	advection
08	19	23:30	23:45	00:15	front
08	21	03:09	04:11	01:02	advection
08	21	21:18	21:41	00:23	advection
08	21	21:44	22:47	01:03	advection
08	22	03:00	03:30	00:30	advection
08	24	10:24	10:44	00:20	advection
09	04	07:17	10:00	02:43	advection
09	05	08:48	09:00	00:12	front
09	05	09:34	09:44	00:10	front
09	09	11:33	12:00	00:27	front
09	15	01:30	07:00	05:30	advection
09	15～16	23:40	10:30	10:50	advection
09	17	02:30	10:19	07:49	radiation
10	06	05:06	05:15	00:09	radiation
10	06	09:00	09:30	00:30	radiation
10	07	06:23	10:00	03:37	advection
10	22	00:30	02:00	01:30	front
10	31～01	22:30	09:30	11:00	advection
11	02	04:30	05:30	01:00	steam
11	02	08:00	08:08	00:08	steam
11	03	04:44	04:54	00:10	front
11	07	05:00	06:00	01:00	front
11	07	08:00	10:44	02:44	front
11	07	11:30	13:16	01:46	front
12	22	08:00	09:30	01:30	advection
12	23	00:20	10:30	10:10	steam
12	23～25	21:38	07:00	33:22	advection

Collection @ chosun

Appendix 4. The status of Incheon Airport's Fog(2004).

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
01	02	04:30	06:00	01:30	front
01	06	07:00	07:30	00:30	advection
01	06～07	23:00	09:00	10:00	steam
01	07	09:45	11:00	01:15	steam
01	30	03:00	12:07	09:07	radiation
01	31	06:00	09:00	03:00	radiation
01	31	09:05	10:30	01:25	radiation
02	14	04:30	05:00	00:30	front
02	21	06:08	13:30	07:22	front
02	21	22:00	23:07	01:07	front
02	22	00:46	02:30	01:44	front
02	22	04:30	06:00	01:30	front
03	05	08:30	09:30	01:00	steam
03	13	20:20	21:46	01:26	advection
03	13	21:50	22:00	00:10	advection
03	13～14	22:06	01:30	03:24	advection
03	14～15	22:05	04:19	06:14	steam
03	15	04:46	05:00	00:14	steam
03	15	05:30	10:00	04:30	steam
03	17	03:04	04:30	01:26	front
03	24	03:00	05:30	02:30	front
03	24	06:00	08:30	02:30	front
04	19	11:30	12:00	00:30	front
04	20	00:10	05:12	05:02	radiation
05	03	08:20	08:37	00:17	front
05	03	11:00	11:14	00:14	front
05	09	01:00	01:30	00:30	front
05	10	09:13	10:30	01:17	advection
05	11	05:00	05:30	00:30	radiation
05	12	08:18	09:19	01:01	front

Collection @ chosun

Appendix 4. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
05	12	16:00	19:30	03:30	front
05	12	20:00	23:12	03:12	front
05	13	00:42	01:17	00:35	front
05	13	01:34	03:00	01:26	front
05	16	06:41	09:08	02:27	advection
05	17	04:37	05:02	00:25	radiation
05	21	01:00	03:09	02:09	advection
05	28～29	21:00	02:35	05:35	advection
05	29	05:30	07:46	02:16	advection
05	29	19:53	22:00	02:07	advection
05	29	22:43	23:30	00:47	advection
05	29～30	23:44	06:36	06:52	advection
06	09	04:43	06:13	01:30	radiation
06	09～10	18:30	05:38	11:08	advection
06	10	05:45	06:00	00:15	advection
06	10	07:30	08:15	00:45	advection
06	12	04:30	08:08	03:38	advection
06	18	05:17	05:42	00:25	front
06	18	06:30	07:19	00:49	front
06	21	04:34	05:30	00:56	advection
06	21	05:45	05:54	00:09	advection
06	21～22	20:50	02:42	05:52	advection
06	22	04:43	05:06	00:23	advection
06	22	05:14	06:30	01:16	advection
06	22～23	23:50	00:43	00:53	front
06	23	01:30	03:24	01:54	front
06	23	04:30	06:40	02:10	front
06	23	07:09	07:35	00:26	front
06	23	10:09	10:30	00:21	front
06	27	05:00	05:08	00:08	front

Collection @ chosun

Appendix 4. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
06	29	03:00	04:00	01:00	advection
06	29	04:13	04:30	00:17	advection
06	29	05:00	05:07	00:07	advection
07	02	03:00	03:30	00:30	advection
07	02	18:30	18:44	00:14	front
07	02	19:07	19:20	00:13	front
07	02	19:40	20:00	00:20	front
07	03	01:35	02:09	00:34	front
07	03	03:30	03:49	00:19	front
07	03	04:04	04:12	00:08	front
07	03	05:21	05:48	00:27	front
07	03	06:00	08:20	02:20	front
07	08	19:21	21:37	02:16	advection
07	10	05:07	08:00	02:53	radiation
07	11	02:18	04:30	02:12	advection
07	11	05:00	05:30	00:30	advection
07	11	20:48	21:30	00:42	front
07	13	01:36	01:55	00:19	front
07	13	02:16	03:17	01:01	front
07	13	05:16	09:13	06:57	front
07	15	05:40	07:48	02:08	advection
07	16	05:11	07:00	01:49	front
07	16～17	23:39	00:52	01:13	front
07	20～21	22:30	01:40	03:10	advection
07	21	02:16	07:00	04:44	advection
07	21~22	19:27	07:05	11:38	advection
07	22	20:21	20:43	00:22	advection
07	22	20:51	21:15	00:24	advection
07	22	21:30	22:00	00:30	advection
07	22～23	22:17	00:30	02:13	advection

Collection @ chosun

Appendix 4. Continued.

Month	Day	Occurrence	Dissipation	Continue time	Fog type
07	23	01:00	09:05	08:05	advection
07	24	01:00	02:07	01:07	radiation
07	28	20:34	21:37	01:03	front
07	28～29	23:34	08:00	08:26	front
07	29	08:30	08:41	00:11	front
07	31	02:36	07:15	04:39	advection
07	31	07:30	07:51	00:21	advection
08	07	22:19	22:30	00:11	advection
08	07～08	23:16	00:39	01:23	advection
08	08	01:48	02:46	00:58	advection
08	08	02:54	05:20	02:26	advection
08	31～01	22:41	05:30	06:49	advection
09	10	07:05	07:34	00:29	radiation
09	14	04:08	04:35	00:27	radiation
09	14	05:16	07:21	02:05	radiation
09	17	04:06	08:10	04:04	radiation
09	17	08:48	08:50	00:02	radiation
10	07	02:35	09:23	06:48	radiation
10	07	23:00	23:07	00:07	radiation
10	07～08	23:30	08:09	08:39	radiation
11	01	04:13	07:36	03:23	front
11	19	01:21	01:56	00:35	radiation
11	19	02:30	03:55	01:25	radiation
11	19	04:52	04:58	00:06	radiation
11	19	05:40	06:05	00:25	radiation
11	19	07:03	08:08	01:05	radiation
11	28	07:46	08:16	00:30	radiation
11	28	08:48	09:50	01:02	radiation
12	04	12:15	14:04	01:49	front