

동해의 해무 예측 시스템 연구

서장원* · 오희진 · 안중배¹ · 윤용훈

*기상연구소 해양기상지진연구실

¹부산대학교 대기과학과

A Study on Prediction System of Sea Fogs in the East Sea

JANG-WON SEO*, HEEJIN OH, JOONG-BAE AHN¹ AND YONG-HOON YOUN

*Marine Meteorology and Earthquake Research Laboratory, Meteorological Research Institute
Korea Meteorological Administration, 156-720, Korea

¹Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 609-735, Korea

동해안에서 지난 20년 동안 발생한 월별 안개 발생빈도와 지속시간 분석에 의하면 1월, 2월, 11월, 12월의 안개 발생빈도는 거의 전무함을 알 수 있다. 이 현상은 태백산맥으로부터 동쪽으로 경사를 이루어 복사 안개의 발생이 어려운 지형 특징을 가지고 있기 때문으로 사료된다. 반면에 안개발생빈도의 90%이상을 차지하는 봄, 여름철의 안개 발생 원인은 크게 3가지로 분류된다. 첫 번째는 증기해무로서 오호츠크해 고기압의 확장으로 찬 북동기류가 동해상으로 이루어져 발생한다. 두 번째는 이류해무로서 따뜻한 기단이 상대적으로 찬 해수면 위로 이루어져 냉각, 포화되어 발생한다. 세 번째는 전선해무로서 저기압이 동해상으로 이동하여 수증기가 공급된 상태에서 한랭 전선 후면의 찬공기가 이루어지면서 발생한다. 한편, 해상풍, 상대습도, 운저고도, 시정 등의 예측과 동해 해역의 수직단면에서 안개 예측이 가능한 해무예측시스템(DUT-METRI)을 구축하여 사례기간의 해무를 모사하였고, 위성자료로부터 이를 검증하였다.

We have found that the east coast of Korea has had few sea fogs on January, February, November and December for the past 20 years by the analysis of monthly fog frequency and duration time. These phenomena appear to relate to the topographical characteristics of which the Taebaek Mountains descends toward the east to bar the radiation fog. On the other hand, the cause of occurring the spring and summer fog which has 90% of the whole frequency is divided into three cases. The first is the steam fog caused by the advection of the northeast cold air current on the East Sea due to the extension of Okhotsk High. The second is the advection fog caused by cooling and saturation of warm air mass advected on cold sea surface. And the last is the frontal fog caused by the supply of enough vapor due to the movement of low-pressure system and the advection of cold air behind a cold front. While, we simulate the sea fog for the period of the case studies by implementing fog prediction system(DUT-METRI) that makes it possible to forecast the fog in the vertical section of neighborhood of the East Sea and to predict the sea surface wind, relative humidity, ceiling height, visibility etc. Finally we verified this result by satellite image.

Key words: Sea Fogs, Steam Fogs, Advection Fogs, Frontal fogs, Fog Prediction System

서 론

안개는 여러 가지 성인에 의해 발생하며 1 km 이하의 시정을 나타낼 때 즉, 공기 중에 미세한 수적 또는 물방울이 부유하여 시정을 감소시키는 것을 말한다(WMO, 1996). 기상예보관을 비롯한 대기과학자, 군사작전 전문가, 해양관련 산업 및 어업 종사자 그리고 실시간 자연환경정보를 얻으려는 사용자들에 이르기까지 해상에서 발생하는 해양환경 예측자료는 필수적이다. 해상에서 발생하는 악기상의 예로써 태풍, 폭풍, 해일 그리고 안개나 강수 등에

의한 저시정 등이 있는데, 특히 해무는 해상에서 일어나는 악기상들 중 가장 빈번히 발생하는 기상현상 중 하나이다. 해무에 의한 저시정은 해상 활동을 저하시키고 선박의 좌초 등 경제적 손실과 인명 피해와 직결되기도 한다. 군사적인 측면에서도 해무는 작전 능력을 약화시키는 주요한 자연적 원인이기도 하다. 따라서 해무의 발생을 예측하고 예측기술을 확보하는 것은 단순한 예보 기술적 차원을 넘어 사회·경제·군사적으로도 중요하다. 그러나 해무 예측 기술을 향상시키는 것은 대단히 어려운데 그 주된 원인은 해양에서의 관측자료의 부족 때문이다. 관측 자료의 부족으로 해무 예측 실험 결과를 검증하기도 어려울 뿐만 아니라 발생 초기 조건을 생산하기도 힘들다. 따라서 지금까지의 연구를 살펴보

*Corresponding author: jwseo@metri.re.kr

면 대부분 예측보다는 해무 발생에 대한 통계적 분석 등 학술적인 방향에 치우쳐 있다. 해무 발생에 대한 객관적인 예측을 위해서는 해무에 대한 수치 실험을 통하여 이루어져야 하며 이로부터 해무의 시공간적 분포와 이동 및 발달 등을 살펴봄으로써 해무 예측의 가능성을 제시하여야 한다. 이를 토대로 해무의 발생 및 유지 기구를 이해하고 이를 통해 해무의 예측성능을 높이는 작업이 필요하다.

동해 해상에서 발생하는 해무는 주로 장마 전선에 동반되어 나타나거나 연해주 지역이나 동해 북부 해상에 형성되는 찬 고기압의 영향으로 형성된다. 동해상에서 북동기류에 의해 차고 습한 공기덩이가 상대적으로 따뜻한 해상으로 이동하면서 해양에서의 단번질에 의해 혼합층이 발달하면서 안개 혹은 층운형의 구름이 발생하게 되는 현상을 Yamase 현상이라고 하는데 이때 발생하는 해무는 증기 안개의 성격을 띄게 된다(Tomine *et al.*, 1998). 동해안을 따라 발생하는 안개의 경우는 연해주 지역에서 남하하는 북한 한류와 태백산맥을 넘으면서 고온 건조해진 기류의 영향으로 발생하기도 한다. 또한 쿠로시오 난류의 지류인 대마난류가 대한해협을 통과하여 북상하는 동안 난류에 의해 소규모 소용돌이의 운동이 활발하게 일어나는 해양학적 특성으로 대기-해양 상호작용이 매우 활발히 일어나는 동해상에서 발생하는 해무의 발생학적 기구는 복잡하다(김, 1997).

본 연구에서는 여름철 동해안을 중심으로 속초, 강릉, 동해시 및 울릉도 기상대에서 관측한 시정과 안개발생에 관련 있는 기상요소를 중심으로 동해의 해무발생 특성을 살펴보았다. 이와 동시에 해양기상예측시스템에 의한 해무 예측성능을 검토해 보았으며 울릉도를 중심으로 관측 자료와 위성자료에 의한 수치모델의 검증이 이루어졌다.

자료 및 방법

본 연구에서는 동해안의 안개 발생 특성을 규명하기 위해 기상청(KMA: Korea Meteorological Administration) 지상관측지점인 속초, 강릉, 동해시, 울릉도에서 1982년부터 2001년까지의 자료를 사용하였고, 안개발생빈도는 기상청에서 발간한 기상연보 및 기상통계표 등을 참고로 하였다. 분석 방법으로는 안개발생빈도를 알아보기 위해 20년 평균과 최근 2년간(2000, 2001) 월별안개발생빈도 및 안개발생시간을 분석하였다. 또한 안개발생시 기상 상태를 알아보기 위해 안개발생시의 상대습도 분포, 바람장미로 도시화된 바람장 분포를 분석하였다. 원래 30년 평균치를 '평년값'이라고 하지만, 본 논문에서는 20년 평균을 의미한다. Fig. 1은 본 연구의 연구지역과 비교대상지역을 나타내고 있으며 Table 1은 본 연구에서 통계분석을 위해 사용된 수집자료의 목록과 내용이다.

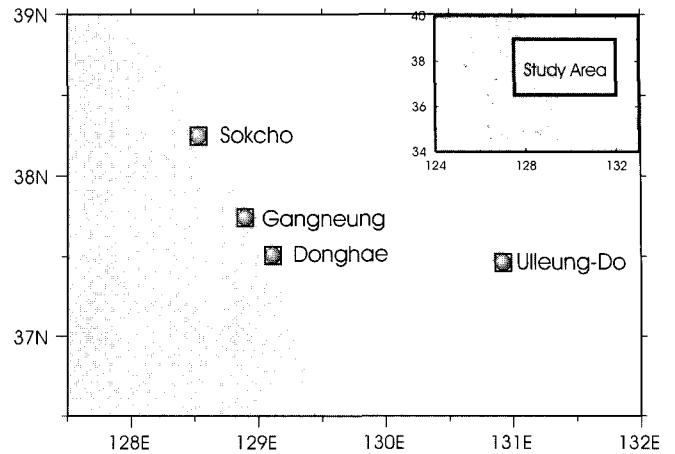


Fig. 1. The map of study area.

또한 2년간(1999, 2000) 동해에서 발생한 안개를 NOAA/VHRR 안개탐지 영상자료, 지상일기도, 해무예측모델을 이용하여 각 사례별 특성을 분석하였다.

해무예측시스템

해무는 비선형적인 대기-해양 상호 작용에 의해서 발생하는 대표적인 기상현상 중의 하나로 이를 연구하고 궁극적으로 예보의 단계에 도달하기 위해서는 3차원적인 대기-해양간의 운동이 종합적으로 다루어지는 중규모 역학 모델을 이용한 해무예측시스템이 구축되어야 할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 현재 기상청에서 실무 예보를 위해 현업 중인 중규모 대기 모델 PSU (Pennsylvania State University)/NCAR(National Center for Atmospheric Research) MM5 모델을 기본으로 1일 2회 준 현업적으로 계산하는 예측시스템을 구축하였다.

모델은 -좌표계상에서의 지배방정식으로 구성되어 있으며, 비정역학을 도입하였다. 차분화는 Arakawa B형 staggered 격자망으로 구성되었으며, 공간적으로 2차 중앙차분법을 사용하였고, 시간적으로는 준암시적 방안(semi-implicit scheme) 및 시간분리 방안(time splitting scheme)을 적분 방법으로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 구름 모수화 과정은 대류운동과 관련한 상승·하강운동과 이에 따른 보상운동을 고려하는 Grell(1993)의 모수화 방법을 사용한다. 이 방안은 특히 10-30 km이내의 수평격자에 유용하게 사용되며 격자 규모 강수와 대류성 강수를 분리하여 고려한다. 그리고 복사과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안(cloud-radiation scheme)을 사용하였다. 지면의 온도와 수분을 계산하기 위하여 5층 토양

Table 1. Information about data from observation station in the east coast of Korea (KMA: Korea Meteorological Administration)

Data source	Station	Period	Variable
KMA	Sokcho	70. 1. 1 ~ 01. 12. 31	wind, visibility, weather, temperature, sea level pressure, relative humidity
	Gangneung	70. 1. 1 ~ 01. 12. 31	
	Donghae	92. 5. 1 ~ 01. 12. 31	
	Ulleung-do	70. 1. 1 ~ 01. 12. 31	

모델을 사용하였다. 또한 모델에 사용된 경계층 물리과정에는 Mellor-Yamada TKE(Turbulent Kinetic Energy) 방안을 기본으로 한 Gayno-Seaman PBL(Planetary Boundary Layer) 방안(Gayno, G.A., 1995)을 사용하였는데, 이 방안은 MRF PBL이나 Eta PBL에 비하여 비교적 안개 연구에 적절히 사용될 수 있는 방안으로 알려진다. 이 방안은 물 온위(liquid-water potential temperature)와 총 물혼합비(total liquid water mixing ratio)를 예보 변수로 활용하는 방안으로 다른 PBL 방안과 구분된다.

수치 실험을 수행한 모델의 영역은 한반도를 포함한 동아시아 영역(mother domain)과 동해를 중심으로 한 영역(nested domain)으로 구성된다. 제 1영역(mother domain)은 동서로는 115°E에서 145°E에 이르며, 남북으로는 20°N에서 50°N에 이르는 영역이다. 제 2영역은 127.5°E에서 132.5°E, 36°N에서 40°N에 이르는 영역에 0.2° 간격으로 수직 단면도가 위도별(40°, 39°, 38°, 37°, 36°)로 고도별 25개 층으로 구성 되어있다. 두 영역의 수평 격자 간격은 mother domain과 nested domain에서 각각 30 km, 10 km이고, 연직 간격은 지형을 따르는 σ -좌표계로서 33층으로 되어있다.

모델 수행은 3시간의 nudging 단계와 48시간의 예보과정으로 구성되어있다. 모델의 초기자료는 전지구 예보시스템(GDAPS)의 12시간전의 자료와 GDAPS 현재시각의 분석자료를 초기 추정치 자료로 사용하고 GDAPS 현재시각 6시간 간격 예보자료를 경계 자료로 사용하여 12시간 간격으로 하루에 2번 48시간 예측결과를 계산한다. 본 연구에서 사용한 해무 예측 시스템은 MM5 모델의 출력결과 중 수직 수평성분의 3차원 바람, 기압, 기온, 강수, 고도 등의 기상요소를 이용하여 3차원의 해상풍, 평균해면기압(Mean Sea Level Pressure), 시정과 운고, 강수량, 구름영역, 상대습도와 기온을 생산하고 있는 해양기상예측모델 즉 DUT-METRI(Dual Use Technology-METRI)이다.

동해에서의 해무 특성

평년 안개발생은 강릉이 11.6일로 가장 낮고, 울릉도가 36.5일로 가장 높으며, 표준편차 값은 동해시가 8.7일로 작은 변동성을 보이며, 울릉도는 18.3일로 큰 폭의 변동성이 나타난다(Table 2). 월별 평년 안개 발생빈도를 보면 연안역에서 6월에 최고 값(동해시: 7.2일, 속초: 5.2일, 강릉: 3.1일)을 보이고 7월과 8월에 감소한다. 도서지역인 울릉도에서는 7월에 9.3일로 가장 높은 값을 보이며 8월에 감소한다. 이는 김과 이(1970)의 남한 동해안 기후구의 결과와 일치하는 것이다. 강릉과 동해시에서는 6월, 7월, 8월, 5월 순으로 안개가 많이 발생했고, 해안과 가장 인접한 속초에서는 6월, 7월, 5월, 8월 순으로 안개가 많이 발생하였다. 울릉도에서는 7월, 6월, 5월, 8월 순으로 안개가 많이 발생하였으며, 이 결

Table 2. The statistical analysis (maximum, minimum, average, standard deviation) about frequency of foggy day (unit: day).

	Gangneung	Sokcho	Donghae	Ulleung-do
MAX.	37	36	37	61
MIN.	1	10	3	2
AVE	11.6	17.1	16.6	36.4
STD	10.5	8.7	9.9	18.3

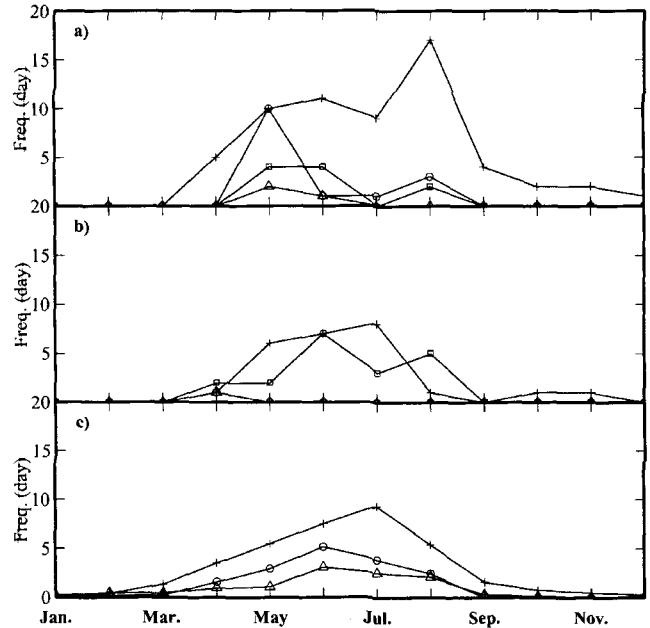


Fig. 2. The frequency of foggy events in the east coast of Korea during (a) 2000 year, (b) 2001 year, (c) the 20 years-normal (+: UL, o: SC, △: GN, □: DH).

과는 변 등(1997)의 결과와 일치한다. 전 연구지역에서 9월에서 이듬해 3월까지는 발생빈도가 매우 작다. 이로부터 초봄, 가을, 겨울에 주로 발생하는 복사안개 보다는 여름에 주로 발생하는 이류, 증기, 전선안개가 연구지역에서 발생함을 알 수 있다. 또한 6-7월에 8-9월에 비해 안개가 더 많이 형성되는데, 이것은 6-7월에 표층해수가 가열되지 않아 해기차가 크게 나타나지만 8-9월에는 표층 수온이 올라가면서 해기차가 감소하여 나타난 현상이라고 할 수 있다(Cho *et al.*, 2000). 안개발생에 기온 뿐 아니라 찬 표층해수가 영향을 주는 것으로 추정할 수 있다. 연안역(동해시, 속초, 강릉)에서는 평균적으로 동해시에서 가장 많은 안개발생을 보이나 최근 2년 동안에는 속초에서 동해시나 강릉에 비해 훨씬 높은 안개발생빈도를 나타냈다. 1년간 평년 안개 발생일수는 울릉도, 속초, 동해시, 강릉 순으로 나타났다.

최근 안개 발생빈도를 살펴보면 2001년은 2000년에 비해 속초를 제외하고 안개발생일이 약 1/3로 감소하였고, 속초에서의 안개발생은 다른 연안지역에 비해 훨씬 높게 나타났다. Fig. 2를 살펴보면, 2000년에는 연안역에서 5월(속초: 10일, 동해시: 4일, 강릉: 2일)에 가장 높은 안개발생이 나타났으며, 울릉도에서는 8월에 17일로 가장 많은 안개발생이 있었다. 2001년에는 주로 속초와 울릉도에서 6월에서 8월 사이에 안개가 발생했고 속초에서 6월(7일), 울릉도에서는 7월(8일)에 가장 높은 안개발생일수를 나타냈다.

안개 지속시간은 평년에 연안역에서는 6월(속초: 57.5시간, 강릉: 20시간)에 울릉도에서는 7월(92.9시간)에 가장 높은 값을 보여 안개발생빈도와 유사한 경향을 나타냈다. Fig. 3에서는 동해안의 지점별로 안개 지속시간의 빈도를 나타내었다. 2000년에는 동해시와 강릉보다 속초에서 높은 안개발생빈도와 긴 지속시간을 보이는데, 이것은 다른 지역보다 속초가 해안 가까이에 위치했기 때문인 것으로 생각된다. 울릉도에서 6월과 8월에 100시간 이상으

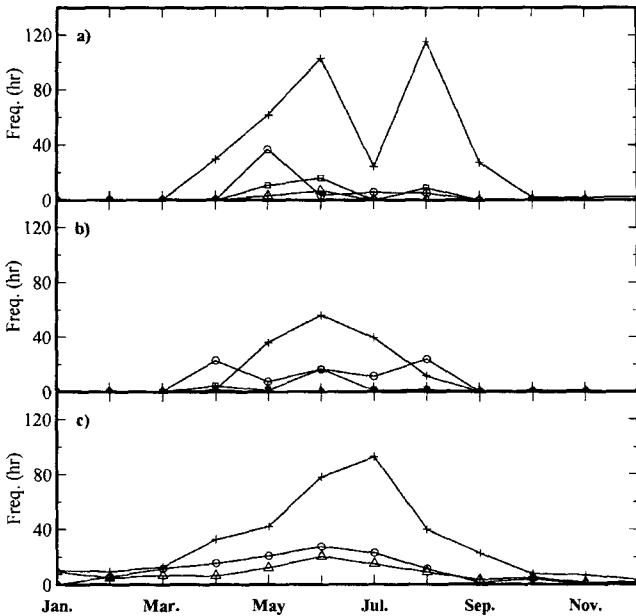


Fig. 3. The frequency of monthly fog duration time in the east coast of Korea during (a) 2000 year, (b) 2001 year, (c) the 20 years-normal (+: UL, o: SC, △: GN, □: DH).

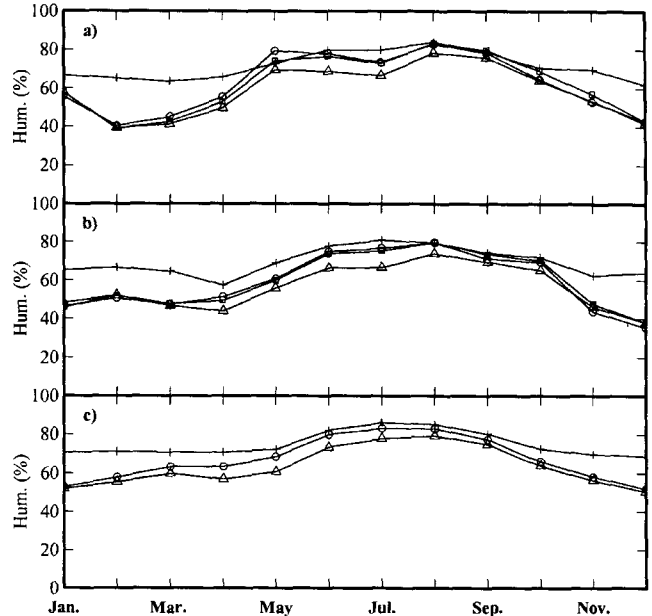


Fig. 4. Monthly average relative humidity in the east coast of Korea during (a) 2000 year (b) 2001 year (c) the 20 years-normal (+: UL, o: SC, △: GN, □: DH).

로 장기간 해무발생이 있었고, 이 시기에 연안지역의 해무가 울릉도의 1/5에 미치지 못했으므로 이때 일어난 해무는 해양에서 일어나는 이류성 해무인 것으로 추정된다. 2001년에는 2000년에 비해 지속시간이 울릉도에서는 감소하였으나 다른 연안역에서는 비슷한 수준을 유지했다. 강릉은 전체 지속시간이 1.5시간으로 안개발생이 거의 없었고, 동해시와 울릉도는 6월(16.7시간, 55.9시간)에 속초는 8월(23.8시간)에 안개지속시간이 가장 길었고, 이는 울릉도(11.7시간)에서 보다 약 2배 정도 더 높은 수치이다.

안개발생기작을 규명하기 위한 분석의 한 부분으로서 평년, 2000년 및 2001년 월별 상대습도를 그림으로 나타내었다(Fig. 4). 평년에 상대습도는 울릉도, 속초, 강릉 순으로서 바다와 가까이 위치할수록 상대습도가 높게 나타난다. 울릉도는 1년 내내 70-90%로 작은 편차를 나타내지만 강릉과 속초는 봄, 가을, 겨울에 65% 이하, 6월에서 9월까지 70% 이상을 보여 전형적인 대륙성 기후의 특성을 보여준다. 2000년에는 특이하게 연안역에서 5월과 8월에 6-7월에 비해 높은 습도가 나타났는데 이는 5월과 8월에 연안역에서 평년보다 높았던 안개발생빈도와 연결하여 생각할 수 있다. 2001년에는 6월부터 8월까지 높은 분포를 보여 해무가 주로 발생하는 시기에 평년값과 유사한 분포를 나타냈다.

20년간 해무발생시 바람장의 분포를 보면 가장 내륙에 위치한 강릉에서는 주풍향이 북, 북서풍으로 풍속 3 m/s 이하의 바람이 약하게 불 때 안개가 발생했으며, 무풍도 약 30% 차지하여 내륙에서 흔히 볼 수 있는 복사안개의 특성을 보여주었다(Fig. 5). 동해시에서는 주풍향이 북, 북동풍으로 해역으로부터 1.5-4.5 m/s의 바람이 불 때 안개가 발생하였고, 속초에서는 주풍향이 북, 남동풍으로 동해시와 같은 수준의 강도로 바람이 불 경우 안개가 발생하여 해역과 가깝게 인접한 연안역에서 볼 수 있는 이류안개의 특성을 잘 보여주었다. 동해시와 속초는 해상으로부터 바람이 불

어울 때에 주로 안개가 발생하게 된다. 이는 해상으로부터 한랭이류에 의해 안개가 형성되거나 동해상에서 형성된 해무가 바람에 의해 동해 연안역으로 이동된 것으로 서해에서 발생하는 안개와는 다른 성격을 가지고 있다. 울릉도에서는 북동, 남서풍이 4.6 m/s 이상까지 동해시나 속초에 비해 강한 바람이 불 때 안개가 발생하였다. 울릉도에서 발생하는 해무는 오호츠크해 고기압에 의한 북동풍에 의해 해수면에서 증발된 수증기가 응결되면서, 여름 몬순인 남서풍에 의해 온난 습윤한 이류가 차가운 해수면 위로 이동하면서 형성되는 것으로 보인다.

성인에 따른 해무 사례 분석

본 연구에서는 지난 1999년에서 2000년까지의 두 해 동안 울릉도에서 발생한 안개 발생 빈도를 기본으로 다양한 원인에 의해 발생하는 안개 가운데서 대표적인 사례로 증기해무, 이류해무, 전선해무와 같이 3가지 사례로 분류하였다(Table 3).

증기해무 사례의 종관적 상태

증기 안개는 찬 공기가 따뜻한 수면 위로 이동해 오면 기온과 수온의 차에 의해 수면으로부터 물이 증발하게 된다. 수증기의 공급에 의해 공기가 포화되어 안개가 발생하며, 증발에 의해 안개가 생성되므로 증기 안개라 한다.

본 연구에서 증기해무로 선택한 사례 기간인 1999년 7월 12-14일과 2000년 6월 1일, 7월 5일은 한반도 전역이 오호츠크해 고기압의 영향에 있었던 기간이다. Fig. 6은 1999년 7월 13일 21 LST와 2000년 6월 1일 09 LST의 지상과 850 hPa면 일기도이다. 오호츠크해의 강한 고기압의 확장으로 필리핀아 장마전선이 정상적으로 북상하지 못하고 있으며, 북위 30° 부근에는 열대 저압부가

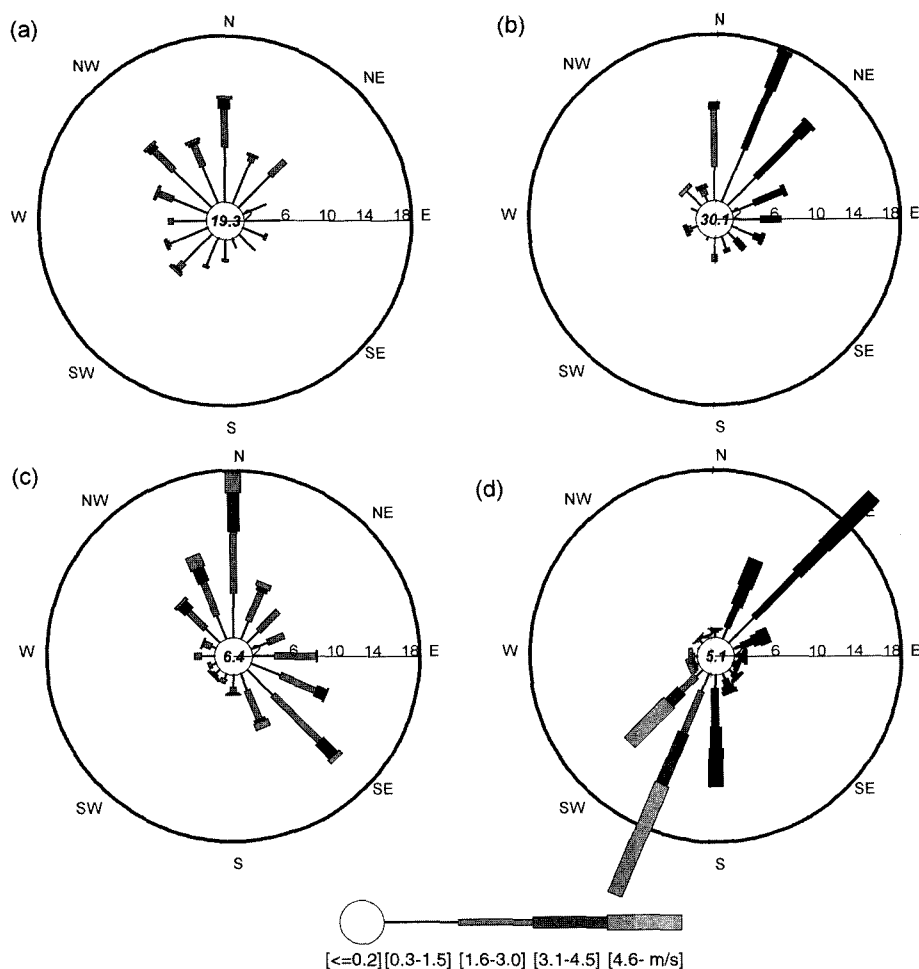


Fig. 5. The windrose during foggy hours at (a) Gangneung (b) Donghae (c) Sokcho (d) Ulleung-do at the periods of 1970 to 2001.

Table 3. Representative fog case of the east coast of Korea.

	Sort of fog	Period	Characteristics
Case 1	Steam fog	July 12-14 1999 June 1, July 5 2000	Cold and dry airmass is advected according to extension of Okhotsk High
Case 2	Advection fog	July 28-30 1999 May 25, June 19, 25, July 28, August 7, 9-10, 15, 30 2000	Warm and damp air is advected according to extension of North Pacific High
Case 3	Frontal fog	July 1-3 1999 May 28, June 24, August 20-21, 27 2000	Passing a warm front accompanied by low pressure system

위치하고 있다. 850 hPa면 일기도에서는 오호츠크해 고기압의 영향을 받는 차가운 공기괴가 동해상에 위치되어 있다. 이 시기의 기압 배치는 소위 북동 남저형의 종관 분포로써, 북쪽의 오호츠크해의 찬 공기가 북동 기류를 타고 남하하면서 남쪽의 열대 저압부로 몰려들게 된다. 이때 남쪽으로 이동하는 한기가 상대적으로 따뜻한 해면 위로 하층 유입되면서 해무나 층운형의 저층운이 형성되는데 이때 발생하는 안개는 전형적인 증기해무라 할 수 있다 (Tomine *et al.*, 1998; 김, 1997; Ninomiya *et al.*, 1996). 따라서 이 기간 동안에 발생한 해무는 오호츠크해 고기압의 확장에 따른 찬 북동기류의 동해상 이류에 의해 발생한 전형적인 증기해무라 할 수 있다.

안개발생동안 위성자료에서 살펴 본 해수면 온도와 울릉도 기온을 비교하여보면 2000년 6월 1일 6시에는 해기차가 약 5°C(기온: 약 12°C, 수온: 약 17°C), 2000년 7월 5일 6시~12시에 약 2°C(기온: 약 21°C, 수온: 약 23°C)를 나타내었다. 이로부터 종관 일기도에 의하면 오호츠크해의 찬 공기가 상대적으로 따뜻한 해수면위로 이류하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 증기 안개는 찬 공기가 따뜻한 해면 위로 이류되면서 접촉면에서의 증발에 의해 안개가 발생한다. 이와 같은 증기해무의 사례를 2000년 6월 1일과 7월 4일의 NOAA-14(CH3-CH4)에 의한 위성 해무탐지 사진을 살펴보았다(Fig. 7). 2000년 6월 1일과 7월 4일에 발생한 안개는 전형적인 증기해무로써 위성사진에도 울릉도 해역에 나타나있

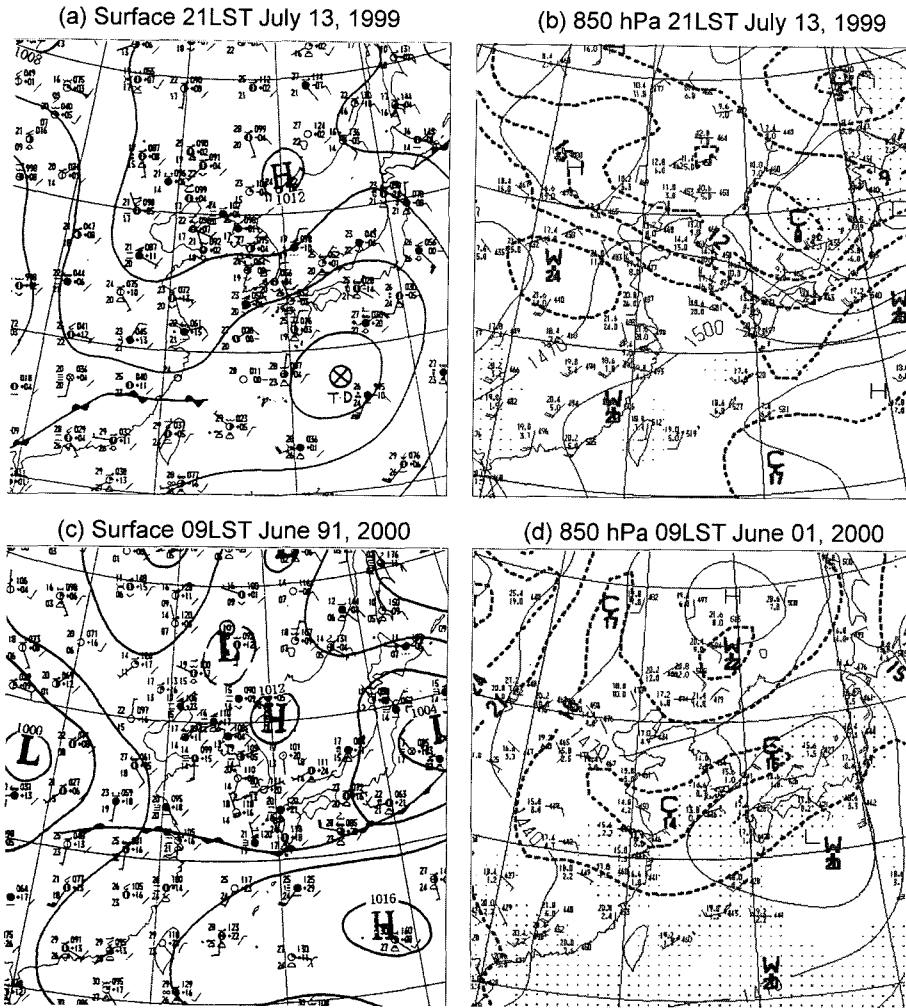


Fig. 6. Surface(a, c) and 850 hPa(b, d) weather chart in case study 1 (steam fog).

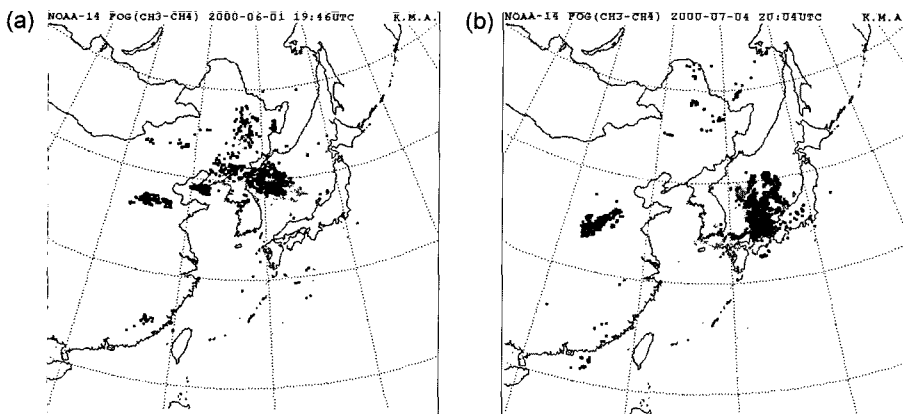


Fig. 7. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14 (CH3-CH4) at (a) 19:46 UTC 1 June 2000, (b) 20:04 UTC 4 July, 2000.

다. 증기해무 시에는 맑은 날에 발생하는 특징을 가지고 있어서 위성사진에도 증층운이나 고층운에 가리지 않기 때문에 위성에 의한 해무탐지가 가장 잘 되는 사례이다.

또한 이 기간(2000년 6월 1일)의 DUT-METRI에서 예측된 해무 발생의 환경조건을 분석해 보기 위해서 예측된 해상풍과 운저고도(ceiling height), 울릉도 상층의 바람 단면도와 상대습도 분포도를 나타내었다(Fig. 8-9). DUT-METRI에서 예측된 해상풍을 살

펴보면 울릉도 주변은 2 m/s이하의 약한 남서풍이 불고 있었고, 울릉도 상공은 구름이 없는 맑은 날씨를 보이고 있었으며 상대습도는 85%이상으로 안개 예측이 가능하였다.

이류해무 사례의 종관적 상태

이류안개는 차가운 지면이나 수면 위로 따뜻한 공기가 이동해 오면 이 공기의 밑 부분이 냉각되고 포화되어 응결에 의한 안개

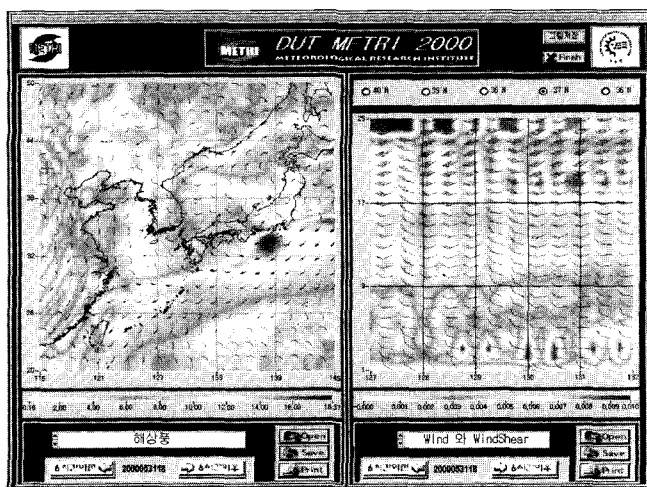


Fig. 8. The distribution of sea surface wind and wind shear at 18UTC May 31, 2000.

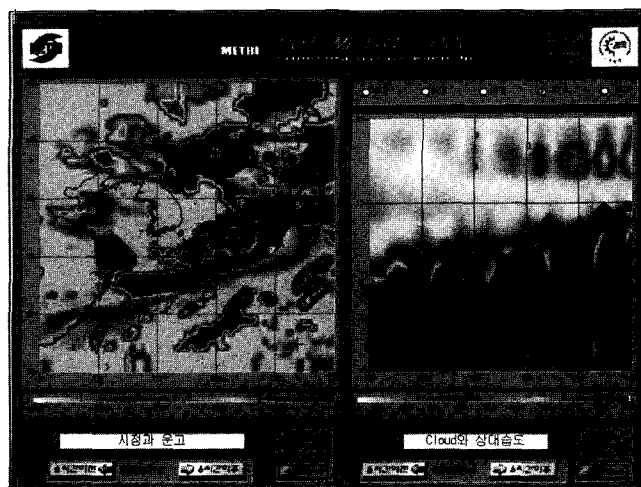
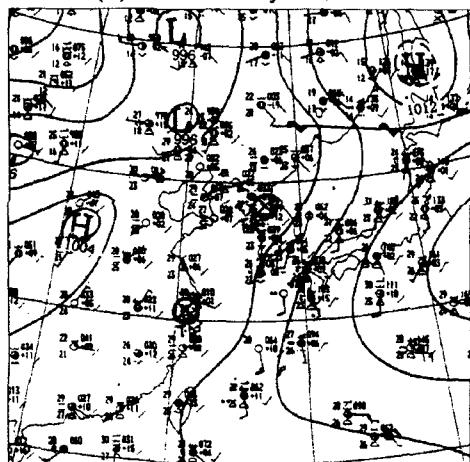
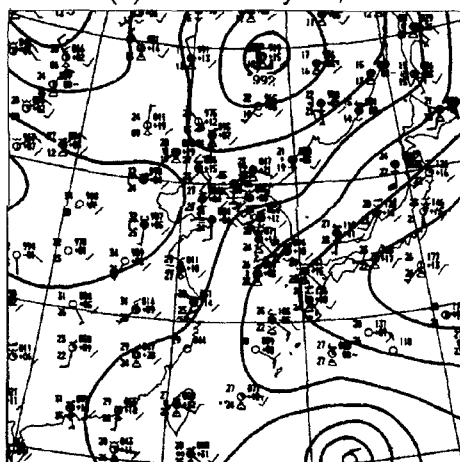


Fig. 9. The distribution of ceiling height and relative humidity at 18UTC May 31, 2000.

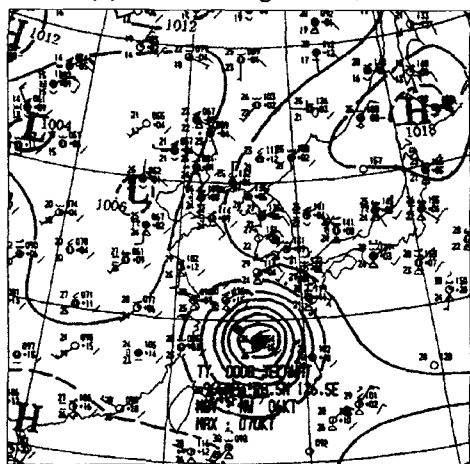
(a) 09LST July 29, 1999



(b) 21LST July 30, 1999



(c) 09LST August 09, 2000



(d) 09LST August 10, 2000

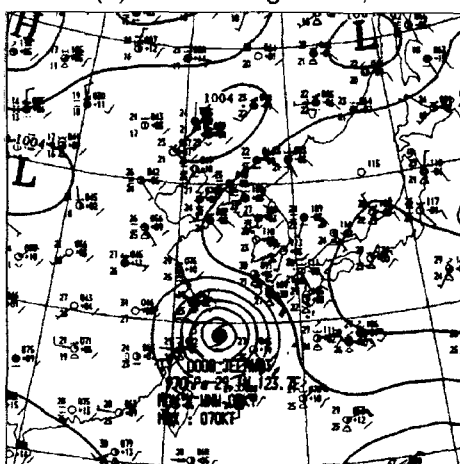


Fig. 10. Surface weather chart in case study 2 (advection fog).

를 이류안개라 한다. 연안이나 해상에서 발생하는 안개는 대부분 이 이류안개이며, 연안무(coastal fog) 혹은 해무(marine fog or sea

fog)라고 한다.

이류해무 사례 기간인 1999년 7월 28-30일과 2000년 5월 25일,

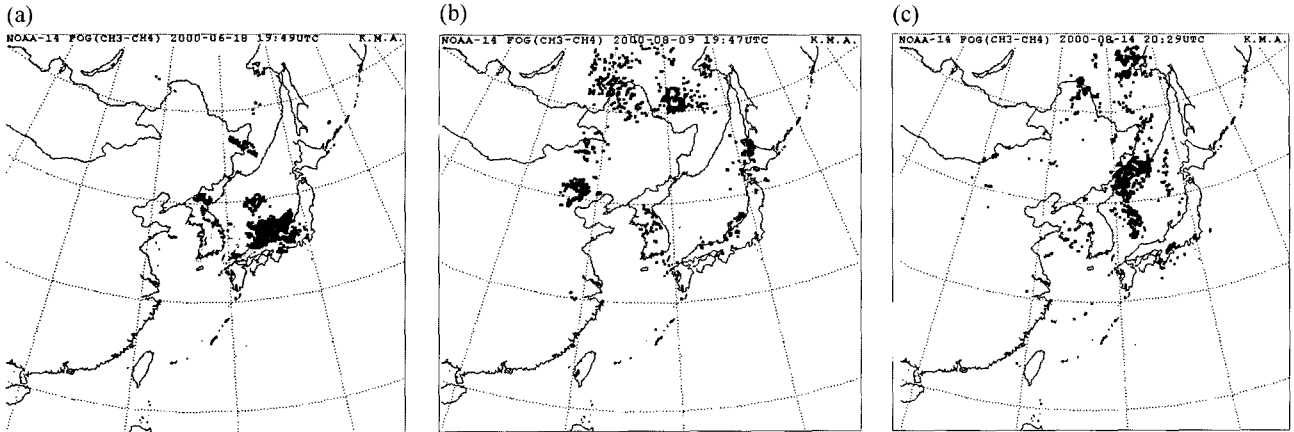


Fig. 11. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14 (CH3-CH4) at (a) 19:49UTC June 18 (b) 19:47UTC August 9 (c) 20:29UTC August 14, 2000.

6월 19, 25일, 7월 28일과 8월 7일, 9-10일, 15일, 30일은 북태평양 고기압의 확장으로 동해 전역이 고기압의 가장자리에서 영향을 받았던 기간이다(Fig. 10). 이 기간은 북태평양 고기압에 의한 남풍 계열의 바람이 동해로 유입되면서 수증기가 이루어져 안개 발생을 위한 종관적인 상황이 전개된 시기이다. 이러한 상황에서 발생할 수 있는 해무는 이류해무라 할 수 있다. 그러나, 이와 더불어 해수온도가 여전히 높았기 때문에 이 기간 동안 발생한 해무는 증기해무의 성격을 어느 정도 갖고 있는 이류해무라 보아야 한다.

안개 발생 기간동안 기온과 해면온도와의 차이는 사례 1과는 달리 평균적으로 1°C 이상 기온이 해면온도보다 높게 나타남을 보인다. Fig. 10의 지상일기도와 함께 고려할 때 이는 지속적인 남풍의 영향으로 따뜻하고 습윤한 공기가 동해상으로 유입되기 때문이다. 따라서 이 기간에 발생한 안개는 습윤한 공기가 이루어져 상대적으로 온도가 낮은 해면위에서 응결하는 이류 안개의 성격을 가진 것으로 사료된다. 2000년 6월 19일과 8월 10일, 8월 15일에 발생한 안개는 이류해무로써 울릉도 주변해역의 위성사진에는 탐지가 잘 되지 않고 있다(Fig. 11). 이류해무는 맑은 날 또는

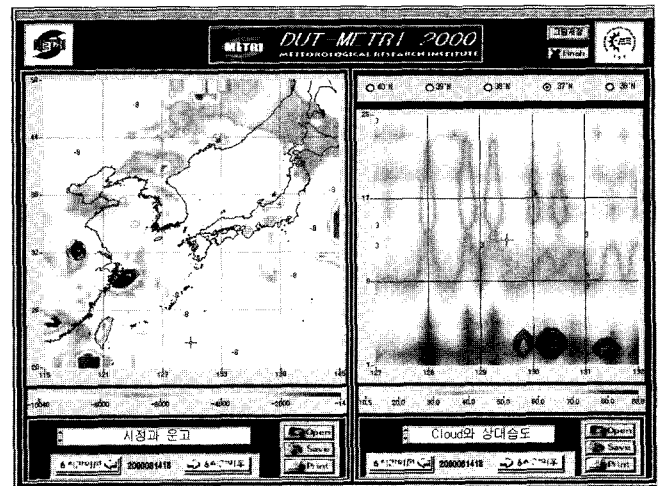


Fig. 13. The distribution of ceiling height and relative humidity at 18UTC August 14, 2000.

다량의 수증기를 머금은 저기압 가장자리에서 발생하는 특징을 가지고 있어서 위성사진에는 중층운이나 고층운에 의해 가려워 지거나 맑은 상태를 나타내기 때문에 위성에 의한 해무탐지가 어려운 사례이다.

이류해무 기간(2000년 8월 15일)의 DUT-METRI에서 예측된 해무 발생을 분석해 보기 위해서 예측된 해상풍과 운저고도, 울릉도 상층의 바람 단면도와 상대습도 분포도를 나타내었다(Fig. 12-13). DUT-METRI에서 예측된 해상풍을 살펴보면 울릉도 주변 해역에서 5 m/s의 남동풍이 불다가 15일 새벽 3시에는 2 m/s이하의 약한 남풍이 불고 있었고, DUT-METRI에서 예측된 운저고도와 이 시각의 사진을 살펴보면 울릉도 상공은 맑은 날씨를 보이고 있었으며 DUT-METRI의 단면도는 상대습도 90%, 울릉도 상공에 안개 예측이 가능하였다.

전선해무 사례의 종관적 상태

따뜻한 공기와 찬 공기가 만나는 온난전선이나 한랭전선부근에서 따뜻하고 습윤한 공기가 전선면을 따라 상승하게 된다. 이때

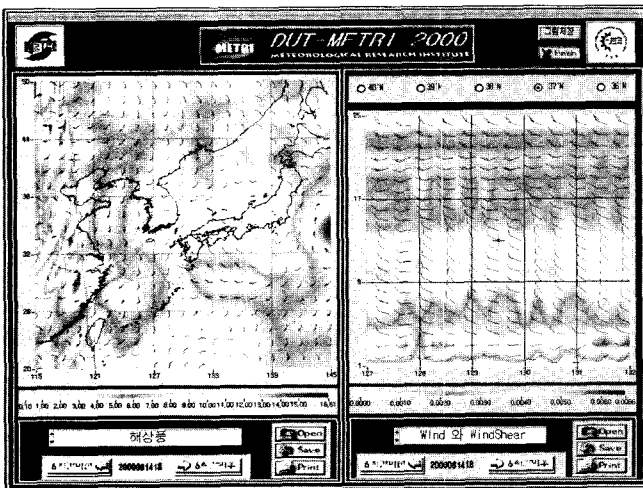
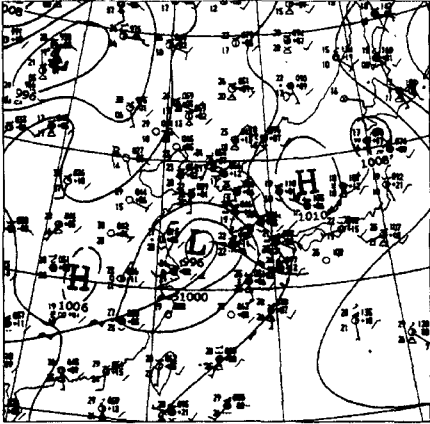
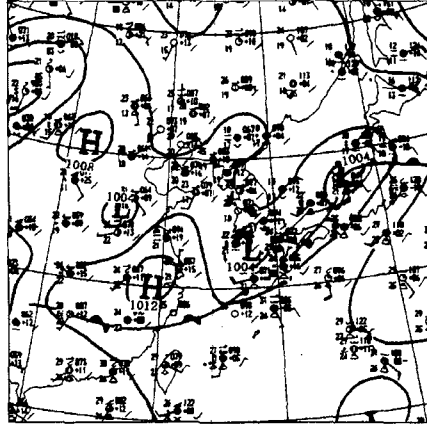


Fig. 12. The distribution of sea surface wind and wind shear at 18UTC August 14, 2000.

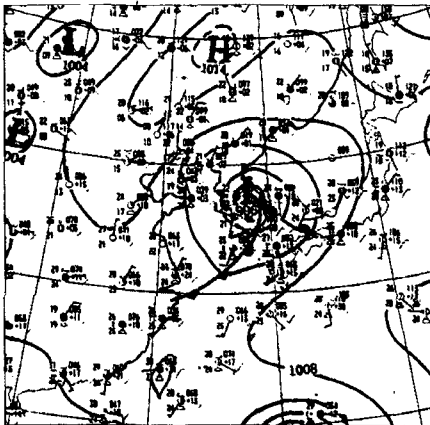
(a) 21LST July 01, 1999



(b) 09LST July 03, 1999



(c) 21LST August 20, 2000



(d) 09LST August 21, 2000

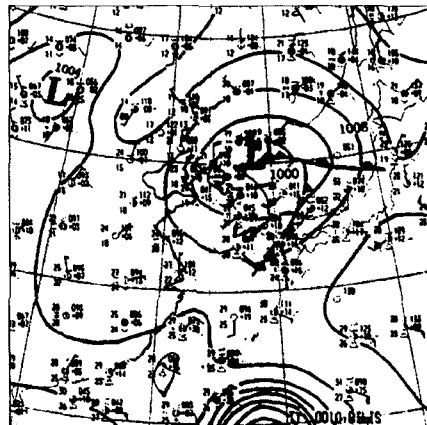


Fig. 14. Surface weather chart in case study 3 (front fog).

이 공기가 온난전선내의 찬 공기와 만나 냉각되면서 비가 오며, 빗방울이 하강하면서 안개를 생성하는데 이를 전선안개라 한다.

동해에 발생한 해무 중 1999년 7월 1-3일과 2000년 5월 28일, 6월 24일, 8월 20-21일, 27일에 발생한 안개를 전선해무 사례로 분류하였다. Fig. 14a and b는 1999년 7월 1일 21 LST와 3일 09 LST의 기상일기도이다. 이 시기에 한반도가 장마 전선의 영향을 받던 시기로 우리나라 서해상에서 자리를 잡고 있던 저기압계가 남해를 거쳐 동해 남부로 빠져나가면서 일본열도와 남중국해에 장마전선이 형성되었다. Fig. 14c and d는 2000년 8월 20일 21 LST와 21일 09 LST의 기상일기도이다. 이 시기에 한반도에 위치해 있는 저기압 중심이 북동진하며 반시계 방향으로 회전하고 있다. 전선해무 발생시 저기압계가 북동진하면서 온난전선 전면에서 강수현상이 일어나 동해상에 충분한 수증기가 공급되었다. 저기압이 반시계방향으로 회전하면서 동해상에 한랭 전선 후면이 위치하였고 찬공기가 이루어지면서 강수에 의한 전선면에서의 증발에 의해 안개가 형성되었을 것으로 판단된다. 안개 발생기간 동안 기온이 해면 온도보다 상대적으로 낮은 상황이었으며, 이 사례는 찬공기의 이류와 수증기의 유입이 저기압계 운동을 통하여 복합적으로 일어나는 전형적인 전선해무 사례라 본다.

DUT-METRI 표출시스템은 해양기상예측모델의 역할 외에도 화면상에서 Fig. 15와 같이 전선기압이 가능한 표출시스템이다. 전선해무 사례기간인 2000년 8월 20일에 DUT-METRI로부터 예측

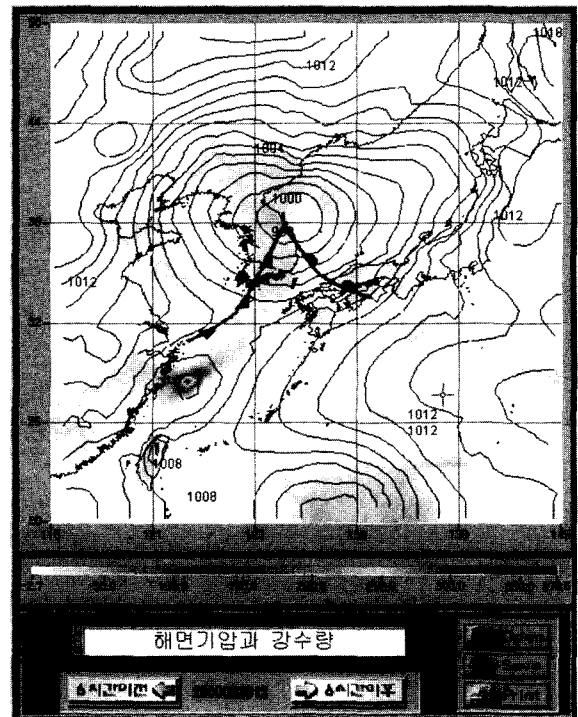


Fig. 15. The distribution of sea level pressure and precipitation at 12 UTC August 20, 2000.

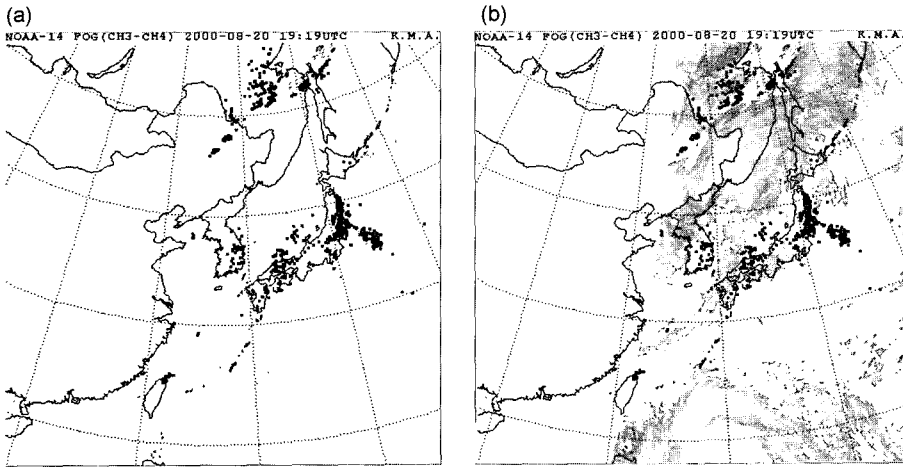


Fig. 16. The satellite image of (a) fog detection and (b) additional cloud transmitted by NOAA-14 (CH3-CH4) at 19:19 UTC August 20, 2000.

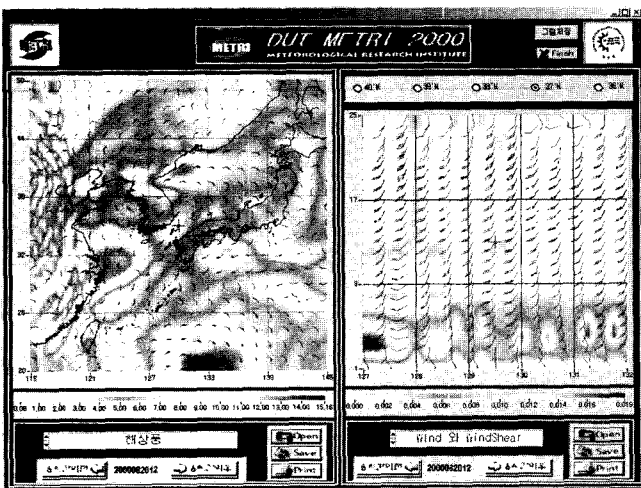


Fig. 17. The distribution of sea surface wind and wind shear at 12 UTC August 20, 2000.

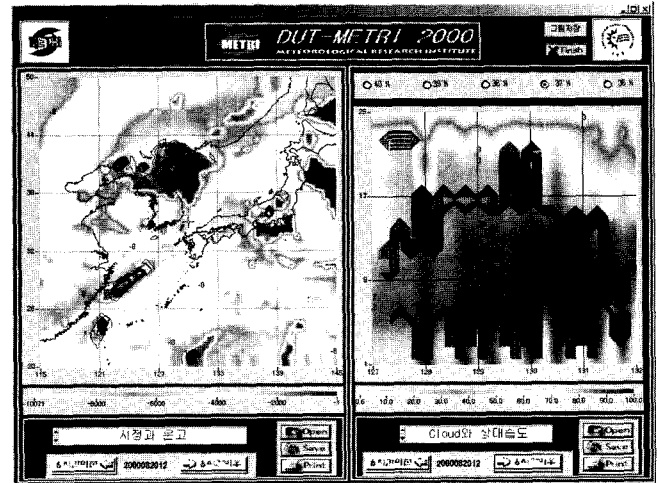


Fig. 18. The distribution of ceiling height and relative humidity at 12 UTC August 20, 2000.

된 해면기압과 전선위치, 강수량을 위성사진과 비교하여보면 예측된 강수대와 전선대의 위치에 구름이 분포하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 전선해무 사례에는 강수를 동반한 전선대를 따라서 많은 구름이 분포하기 때문에 위성에 의한 해무탐지가 이류안개와 같이 어려운 실정이다(Fig. 16).

전선해무 기간(2000년 8월 20일)의 DUT-METRI에서 예측된 기상환경을 분석해 보기 위해서 예측된 해상풍과 운저고도, 울릉도 상층의 바람 단면도와 상대습도 분포도를 나타내었다(Fig. 17-18). DUT-METRI에서 예측된 해상풍을 살펴보면 울릉도 주변 해역에서 다소 강한 7 m/s의 남서풍이 예측되었으며, DUT-METRI에서 예측된 운저고도와 이 시각의 위성사진을 살펴보면 울릉도 남부해역에 강수를 동반한 전선대와 구름영역을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

결론 및 토의

한반도 동해안에서 지역적 요소를 알기 위한 기초연구로서 안개발생빈도, 안개발생, 소멸, 지속시간, 안개발생시 습도와 바람을

위에서 서술하였고 이것은 다음과 같이 요약된다. 연안에 위치한 강릉, 속초, 동해시는 6월에 가장 많이 발생했고, 도서지역인 울릉도는 7월에 가장 많은 안개발생을 보인다. 평년에 안개지속시간도 울릉도에서 7월에, 강릉, 속초에서는 6월에 가장 높은 값을 보인다. 동해안의 해무는 5월부터 8월에 집중되어있고 9월부터 4월까지 거의 발생하지 않는데, 이는 5월부터 8월까지 높은 해기차를 보이거나 9월에는 표층해수가 따뜻해져 해기차가 감소하고, 지형적으로 동쪽으로 경사를 이루고 있어 복사안개의 발생을 방해하기 때문이다. 연구지역에서 기상요소를 요약하면 울릉도는 1년 내내 상대습도 70% 이상을 보이며 6월에서 9월까지 80% 이상을 보인다. 강릉과 속초는 6월에서 9월 사이에 상대습도 70% 이상을 나타내며 동계와 춘계에는 65% 이하를 보인다. 안개발생시 습도분포는 속초를 제외하고는 상대습도 90% 이상에서 안개가 발생해서 도서지역에서 발생하는 이류안개의 특성을 잘 보여주고 있다(기상연구소, 2000). 바람은 강릉지방의 주풍향은 남서풍, 속초지방은 서풍계열, 울릉도는 북동풍이 주풍향이다. 강릉지방에서는 연구지역 중 가장 내륙에 위치되어 있으므로 약한 풍속에서 안개가 발생하며 지형상 북풍계열의 바람이 새벽에 바다로부터 불어오르

로 주풍향이 북풍일 때 안개가 발생한다. 안개발생시 동해는 북, 북동풍, 속초는 북, 남동풍, 울릉도는 북동, 남서풍이 주풍향을 이룬다. 동해의 안개는 해기차로 인해 국지적으로 발생하는 것으로 보이며, 해역에서 발생한 안개는 바다로부터 불어오는 바람으로 인해 연안역으로 이동하여 내륙까지 영향을 주는 것으로 보인다.

앞서 살펴본 것과 같이 해무 사례 별 분류에 따른 각 해무발생 예측에서는 모델에서 모사된 시정거리가 종관규모에서는 잘 모사되지 못하는 점이 있다. 그러나 상대습도와 운저고도, 해상풍 및 단면도에서의 안개예측은 모델에서 비교적 잘 모사해줌으로 수치모델을 통해 해무를 객관적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과와 더불어 그 밖의 기상 변수들에 대한 분석을 토대로 살펴볼 때, 구축된 모델은 다양한 연구 사례에 대하여 해무와 관련된 습도의 증가 등과 같은 종관적 상태 등을 적절하게 모사하고 있다. 따라서 동해에서 발생하는 해무의 발생 사례를 특성별로 분류하여 더 많은 모사실험을 하여 통계적으로 유의한 결과를 도출할 경우 해무 발생 기구 및 예측 모델 개발에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

또한 향후 DUT-METRI의 예측성능을 높이기 위해 보다 더 하층의 특성을 잘 모사하는 미세격자의 해무예측 시스템과 중규모 모델의 대기중의 물량(liquid water content) 예측성능을 높이는 방향을 모색하여 해무의 객관적 예측 성능을 발전시켜 나갈 계획이다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 민간겸용기술사업의 “체계운용을 위한 기상해양환경 분석기술” 과제 및 기상청 기상지진기술 개발 사업의 “해양기상변화 탐지기술개발” 과제로 수행된 것입니다. 본 논문을 심사해 주신 이상호 교수님, 신흥렬 교수님과 조양기 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

기상연구소, 2000. 영종도(인천공항) 주변해역의 해무예측연구(I). 기상연구소, 30pp.

김성삼, 이내영, 1970. 한국 안개 기후구 설정에 관하여. 한국 기상학회지, **6**, 1-15.

김해동, 1997. 초여름 한반도 동해안의 해무 발생에 관한 수치실험. 한국기상학회지, **33**: 337-347.

변희룡, 이동규, 이화운, 1997. 동해 및 주변에서 발생하는 해무의 특성과 예측 가능성 조사, 한국기상학회지, **33**: 41-62.

Cho, Y. K., M. O. Kim, B. C. Kim, 2000. Sea Fog around the Korean Peninsula. *J. of Appl. Meteor.*, **39**: 2473-2479.

Gayno, G. A., 1995. Development of a higher-order, fog-producing boundary layer model suitable for use in numerical weather prediction. M.S. Thesis, The Pennsylvania State University, 104pp.

Grell G. A., 1993. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**: 746-787.

Ninomiya K., J. Fujinori, T. Akiyama, 1996. Multi-scale features of the cold air outbreak over Japan sea and the Northwestern Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan.* **74**: 745-761.

Tomine K., T. Kawabata, T. Setoguchi, 1998. A Case Study of Fogs at Misawa Fishing Port, *J. Meteor. Soc. Japan.* **76**: 115-168.

WMO, 1996. International meteorological vocabulary. WMO. Geneva, Switzerland.

2002년 12월 2일 원고접수

2003년 4월 25일 수정본채택

담당편집위원: 이상호