Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 23, No. 1 (2013) pp. 103-112

기 술 노 트

경험적 방법을 통한 발생학적 한반도 안개 구분과 안개 발생 예측가능성 연구

이현동 · 안중배*
부산대학교 지구환경시스템학부

(접수: 2012년11월 26일, 수정: 2012년12월 29일, 게재확정일: 2013년 1월 9일)

Study on Classification of Fog Type based on Its Generation Mechanism and Fog Predictability Using Empirical Method

Hyun-Dong Lee and Joong-Bae Ahn*
Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received: 26 November 2012, Revised: 29 December 2012, Accepted: 9 January 2013)

Abstract In this study, we developed a fog classification algorithm to classify fog type based on fog generation mechanism. For the analysis period of 1986-2005, 15,748 fog events had been reported from the 40 observational sites in South Korea. Thus, practically, it is almost impossible to individually classify the fog type of the whole fog events occurred in South Korea manually. In this study, the characteristics of fog during the research period were investigated and the fog classification flowchart were developed base on the analysis, and the fog classification algorithm was applied for the classification of fogs occurred at the observational sites. Finally, the classified fog-type and hindcasted fog occurance results obtained from the flowchart were evaluated for verification.

Key words: Fog, fog type, fog prediction, fog classification, sea fog

1. 서 론

기상학적으로 안개란 비, 눈, 우박, 이슬, 서리 등과 같이 대기 중의 수증기가 모여 발생하는 현상으로, 수평 시정이 1 km 미만일 때를 일컫는다 (김광식, 1992). 그러나 미세물리적 정의에 따르면 안개란 대기 중 공기 1 kg에 수증기량이 0.05~0.2 g일 때로 정의된다.

안개의 발생역학은 구름의 발생역학과 기본적으로 유사하다. 구름은 대기 중의 수증기가 응결되는 현상으로 지표로부터 높은 고도에서 발생하는 기상현상이지만 안개는 지표 근처에서 발생하는 것이 다를 뿐이다. 때로는 하층운이 지면으로 하강하여 구름의 바닥이 지면에 닿아서 안개가 발생하기도 한다 (안중배 등, 2002). 안개가 발생하기 위해서는 다량의 수증기와 수증기의 응결을 촉진할 수 있는 흡습성 미립자가 있어야 하고 또한 이런 조건을 가진 공기가 노점 온도 이하가 될 수 있도록 냉각이 일어나야 한다.

안개의 종류는 생성 원인에 따라 세 가지로 구분된다. 직접 또는 간접 냉각에 의해 생성되는 안개를 냉각무라 하며, 외부로부터의 수증기 공급으로 인한 포화 과정을 통해 생성되는 안개를 증발무라고 한다. 또한 불포화이고 온도가 다른 두 공기가 혼합했을 때 발생할 수 있는 안개를 혼합무라 한다. 증발무에는 증기무와 전선무가 있으며 냉각무로는 이류무, 복사무, 활승무가 있다. 증발무는 한랭한 공기괴가 온난한 수면으로 이류할 때 발생하며, 기온과 수온의 차가 커야하며 수면에서 그리 높지 않은 곳에 역전층이 존재해야 한다. 전선무에는 온난전선무, 한랭전선무, 전선통과무 등이 있다. 이류무는 공기덩이의 강제 냉각이나 이류에 의한 지표면의 증발에 의하여 수증기가 포

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Rep. of Korea.
Phone : +82-51-510-2290, Fax : +82-51-515-1689
E-mail : jbahn@pusan.ac.kr

화되어 응결하면서 발생하는 안개로 온난 습윤한 공기가 찬 해면을 지날 때 공기 덩이 자체의 냉각에 의해 발생하거나, 한랭 건조한 공기가 따뜻한 지표면을 지날 때 지표면으로부터의 증발에 의하여 수증기가 공급되어 발생하는 안개이다. 이 때 이류공기의 냉각속도는 지면과의 온도차, 이류하는 공기의 속도에 비례한다. 우리나라 해상에서 빈번히 발생하는 해무는 이류무 중의 한 종류이다. 복사무는 육상안개로 야간에 지표면이 강하게 복사냉각 되고 지표면이 습하며 노점온도가 복사냉각에 의한 최저 기온보다 높을 때 잘 발생한다. 활승무는 습한 공기가 산 경사면을 강제 상승하면서 단열팽창에 의하여 기온이 하강하여 포화에 도달할 때 발생하는 안개이다. 활승무는 강제상승이 요인이기 때문에 강한 바람에도 발생하는 특징이 있다 (1998, 김문옥).

국내에서의 안개 관련한 최초 연구는 김성삼과 이내영 (1970)에 의한 것으로 이들은 안개 일수 및 지속 시간을 월별, 연중으로 분석하여 우리나라를 8개의 안개 기후구로 분류하였다. 허인혜와 이승호 (1998)는 우리나라에서 발생한 안개에 대한 전반적인 분석을 실시하였다. 이들은 지역별 연평균, 계절별 안개일수, 연평균 안개 지속시간, 계절별 평균 안개지속시간 등을 분석하여 우리나라를 4개의 안개구로 구분하였다. 이들은 우리나라 내륙에서는 주로 복사무가 발생하며, 동·남해안에서는 이류무, 서해안에서는 복사무와 이류무가 혼합되어서 나타난다고 결론지었다.

안개는 종관규모 대기운동뿐만 아니라 미세물리과정 및 경계층 내에서의 역학과정에 영향을 받으며 서로 종속되어 있어 진단 및 예측이 매우 어렵다 (Croft *et al*., 1997; Chun *et al*., 1999; 임헌호 등, 2005). 또한 안개의 발생과 소산은 지역적 특성에 크게 좌우된다 (George, 1951). 따라서 안개 발생 예측을 위해서는 안개 종류에 따른 발생 특성을 이해하는 것이 중요하며 더불어 지역의 특성을 파악하는 것이 필요하다. 최근 들어 컴퓨터의 계산 능력이 향상되고 수치모델이 복잡한 물리적·화학적 메커니즘들을 다룰 수 있게 되면서 수치모델을 활용한 안개 예측 연구도 활발히 진행되고 있다. 대표적인 예로 안중배 등 (2002)은 동해지역에서 발생하는 해무를 발생학적 특성에 따라 분류하였으며, 해무의 종류에 따른 대표적인 사례 선정을 하여 수치모델을 이용하여 해무를 hindcast하고 그 예측가능성을 평가하였다.

본 연구에서는 안개 종류별 특성을 조사하여 통계적 안개 분류/예측도를 작성하였다. 그리고 이 통계적 방법을 관측 자료에 적용하여 한반도에서 발생하는 안개를 분류하고 지역별 안개 분포를 분석하였다. 또한 인천을 사례 지역으로 선정하여 분류법에 의한 결과와 종관 기상 패턴을 고려하여 재분류한 결과를 비교하여 분류/예측도의 정확성에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 또한 지역적 특성을 고려한 인천지역 이류무와 복사무 예측모형을 시범적으로 개발하여 발생원인별 통계적 안개모형에 의한 예측가능성을 평가하였다.

2. 자료 및 분석 방법

자료는 시정관측을 실시하는 기상관서 41개 지점 기상관측자료를 이용하였다. 따라서 본 연구에서 사용하는 안개란 시정이 1 km 이내인 경우의 기상현상을 일컫는다. 41개 지점 중 진도 지점 자료는 결측 및 불확실성이 높아 제외하였다. 분석기간은 1986~2005년까지 20년 자료를 이용하였으며, 1986년 이후 관측이 시작된 지점은 관측시점으로부터의 자료를 이용하였다. 한반도 연안의 수온 분석을 위해 국립수산과학원의 한반도 주변 연안정지관측 자료를 이용하였다. 한반도 각 해상별 (동해, 남해, 서해, 제주) 대표 지점을 선정하여 그 지점의 관측 자료를 활용하였다. 동해는 울릉도, 남해는 소리도, 서해는 선미도, 제주는 마라도 지점 자료를 선정하였으며 기간은 기상관측자료와 동일하다. 또한 지역 안개모형을 활용한 안개 예측가능성 평가를 위해 2006년 인천기상대 관측 자료 및 2006년 연안정지관측 자료 (선미도)를 활용하였다.

한반도 안개 특성을 파악하기 위해 계절별 안개 일수 및 지속시간을 분석하였다. 그리고 안개 발생 특성에 따른 안개 종류의 분류를 위해 안개 종류별 발생 시 기상 조건을 조사하고 이를 기준으로 분류/예측도를 작성하였다. 각 관측 지점별 자료를 분류/예측도에 적용시켜 종류별 발생 빈도를 나누었다. 그리고 각 지점별, 권역별 안개 분포를 파악하고 분석하였다.

또한 지역 안개모형을 활용한 안개 예측가능성 평가를 위해 신공항이 있는 인천을 선정하여 지역적 특성을 고려한 복사무와 이류무 예측모형을 시범적으로 개발하고 분석을 실시하였다. 인천은 서쪽으로는 서해, 동쪽으로 내륙이 위치한 전형적인 연안 관측 지점이다. 그러므로 해양에 의한 영향뿐 아니라 내륙에 의한 영향까지 동시에 받는 곳이기 때문에 안개의 종류별 특성을 파악하기에 좋은 조건을 갖춘 곳으로 사료된다. 특성 분석 후 비강수일 한반도에서 가장 빈번히 발생하는 이류무와 복사무에 대한 예측성 실험을 수행하였다. 자료의 풍향, 풍속, 상대습도, 기압을 분석하여 예측을 위한 조건을 세우고 그것을 바탕으로 모델 실험을 수행하였다.

3. 한반도 안개 특성 및 분류

3.1. 한반도 안개 특성

Fig. 1은 한반도의 월 평균 안개 일수이다. 한반도

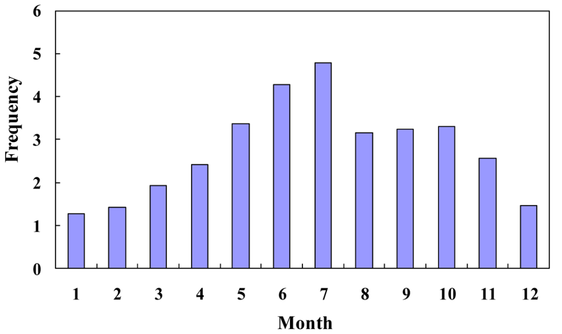

Fig. 1. Monthly frequency of occurrence day of fog on South Korea.

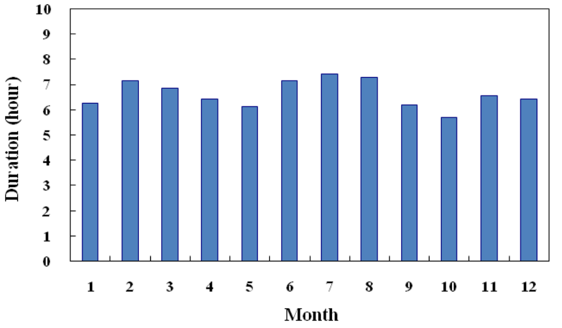

Fig. 2. Monthly duration of lasting time of fog on South Korea.

전체 연평균 안개 일수는 30.1일이며, 대체로 늦봄과 여름철에 안개 발생 빈도가 높다. 계절별로는 여름철이 10.8일로 가장 발생 빈도가 높으며, 다음으로 가을철 8.6일, 봄 6.9일, 겨울 3.8일 순이다. 한반도 월별 안개 지속시간을 계절별로 살펴보면 (Fig. 2) 뚜렷한 특성을 보이지 않으나 여름철이 7.2시간으로 가장 길며, 겨울 6.5시간, 봄 6.3시간, 가을 6.0시간을 보인다.

Fig. 3의 관측지점별 연평균 안개 일수를 살펴보면, 가장 뚜렷한 특징은 내륙 지역이 해안 지역에 비해 안개 일수가 높다는 것이다. 대관령이 130.7일로 가장 높은 안개일수를 보인다. 다른 지역에 비해서도 월등히 높은 빈도를 보이는데, 이는 대관령 지역의 관측 고도가 다른 지역에 비해 높아 공기의 강제 상승에 의한 지형성 구름이 자주 형성되기 때문이다 (허인혜와 이승호, 1998). 진주 75.6일, 영월 60.9일, 안동 57.4일 등 주로 내륙 지역에서 높은 안개 발생 빈도를 보이나 백령도 82일, 흑산도 63.6일 등 서해 도서 지역에서도 높은 안개 일수를 나타낸다. 해안 지역의 안개 일수는 내륙 지역에 대체로 낮으나 서해안 지역은 인천 44일, 군산 38일 등으로 내륙 지역에 비해 낮지 않다. 이는 우리나라가 편서풍 지대에 위치하여 서해

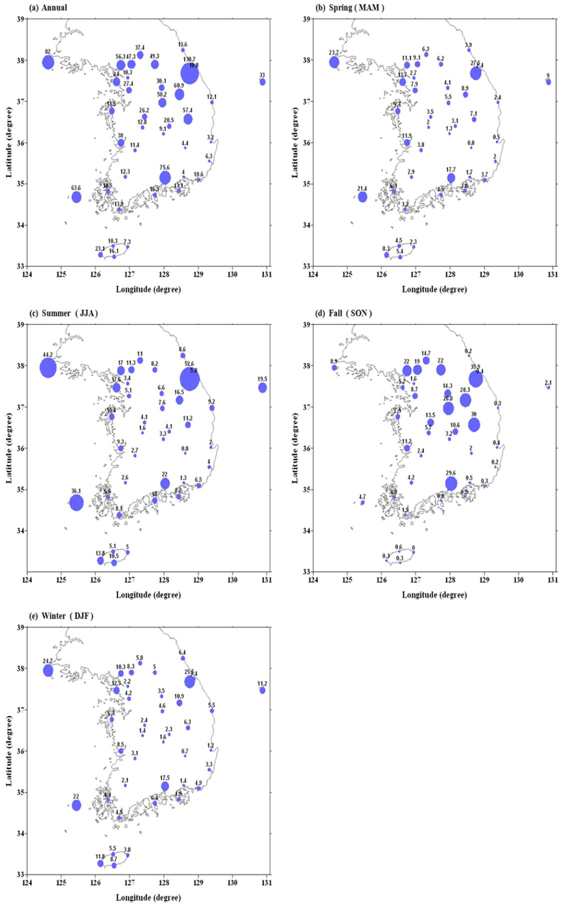

Fig. 3. Annual and seasonal frequency of occurrence day of fog at each station on South Korea, (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) fall and (e) winter.

연안에서 발생하여 밀려오는 해무에 의한 것으로써 서해안 지역은 같은 위도상에 위치한 동해 보다 3배 정도 높은 안개 일수를 보인다 (기상청, 1997).

봄철의 안개 특징은 서해안에서의 안개 일수가 다른 지역에 비해 높다는 것이다. 앞에서 언급했듯이 우리나라는 편서풍대에 위치하여 서해로부터 다량의 수증기가 공급된다. 봄철은 이동성 고기압과 오호츠크해 고기압의 영향을 받는 시기이다 (허인혜와 이승호, 1998). 이동성 고기압의 발생 시 습하고 안정된 공기의 이류로 인한 서해안 안개 발생이 잦다. 그러나 서해안을 제외하고는 모든 지역에서 낮은 안개 일수를 보인다. 봄철은 건기로써 대기 중 수증기가 적어 안개 발생에 불리한 조건을 가지고 있다.

여름철은 해안 지역에서의 안개 일수가 가장 높은 계절이다. 특히 서해 도서 지방에서의 안개 일수 증가가 뚜렷하다. 초여름 장마전선의 영향과 함께 북태평

양 기단의 영향을 받는 시기라 이류무가 빈번히 발생한다.

가을철은 내륙 지역에서의 안개 일수가 높다. 한반도 가을은 대기가 매우 안정되어 있고 바람이 약하고 구름이 적어 야간 복사냉각으로 인해 복사무가 빈번히 발생한다. 해안 지역에서는 안정된 대기 상태와 육지에 비해 상대적으로 따뜻한 해양의 영향으로 안개 일수가 적게 나타난다.

겨울철은 시베리아 고기압의 영향을 받아 건조하고 안정된 대기 상태로 인해 안개 일수가 매우 낮다. 그러나 서해 도서 지역과 울릉도 지역은 대기에 비해 상대적으로 따뜻한 해양과의 작용으로 증기무가 증가하는 시기여서 안개 일수가 높은 경향이 있다.

3.2. 안개 분류/예측도 개발

40개 지점에서 연구기간인 1986년부터 2005년까지 총 15748번의 안개가 발생하였다. 따라서 발생한 총 안개 발생 사례에 대해 발생원인별로 일일이 분류하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 안개 분류/예측도를 개발하여 모든 안개에 대한 발생원인별 분류를 실시하였다.

전선무 (이하 FRT)는 온난전선 전방에 안정된 찬 공기가 있고 바람이 약할 때와 한랭전선 후방의 강수 지역에서 증발이 일어날 때 발생하며 안개 시작 전 강수가 있다 (Petterssen, 1969). 이류무 (이하 ADV)는 고기압의 중심에 위치하고 바람이 강할 때 발생하며 상대적으로 차가운 수면으로의 이류로 인한 하층 냉각이 있는 경우 발생한다 (Roach, 1995). 또한 복사무 (이하 RAD)는 맑은 날 밤 바람이 약한 경우, 공기의 복사 냉각이 지표면 근처에서 심할 때 발생한다. 야간 지표면 복사 냉각과 함께 약한 바람에 의해 난류 혼합되어 냉각층 두께가 증가하여 발생한다. 그리고 증기무 (이하 EVP)는 차가운 공기가 따뜻한 수면 위로 이류하고 기온과 수온의 차가 커야하며 수면 위 높지 않은 고도에 역전층이 존재하는 경우 발생하며, 온도와 함께 이슬점이 크게 증가 경향을 보인다 (Tardif, 2007).

이러한 안개 종류별 생성 조건 등을 고려하여 안개 분류/예측도 (Fig. 4)를 개발하였다. 먼저 안개 발생 생성 시점부터 소멸 시점까지를 한 번의 사례로 정하고 그 생성이나 소멸 시기에 강수가 존재했다면 FRT로 분류하였다. 다음으로 안개 생성에 큰 영향을 주는 풍속을 고려하여 2.5 m s^{-1} 이상의 풍속을 기록할 경우는 RAD가 생성될 수 없음을 가정하고, 내륙 지역에서 이 속도를 초과한 바람이 불 경우 발생한 안개는 모두 ADV로 분류하였다. 해안 지역에서 2.5 m s^{-1} 이상의 바람이 불어올 시 SST와 대기온도를 비교하여 SST자료가 대기온도 보다 낮을 경우는 ADV로,

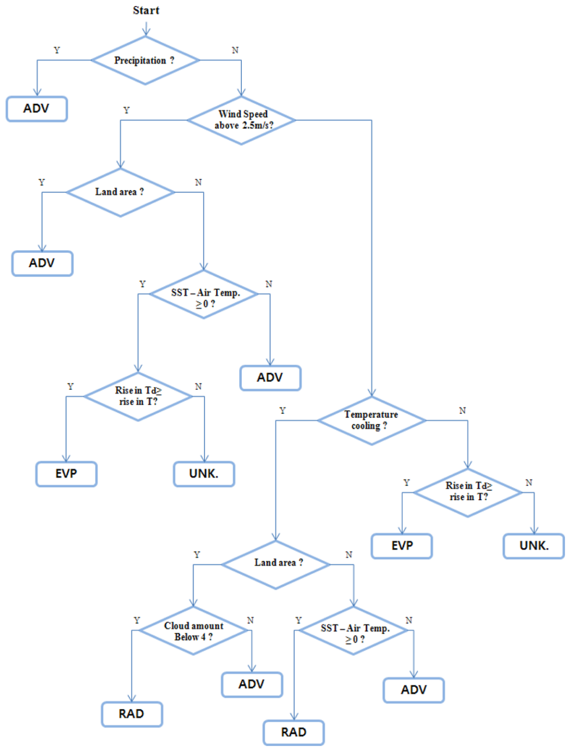

Fig. 4. Flowchart diagram illustrating the fog-type classification algorithm.

반대의 경우는 이전 시간대와 안개 발생 시간대의 기온과 노점온도 변화율을 고려하여 노점온도의 상승률이 기온 상승률 보다 클 경우 EVP로 분류하였다. 풍속 2.5 m s^{-1} 미만의 경우 우선 기온 경향을 고려하여 안개 발생 전 3시간 사이 온도가 상승하였을 경우와 하강하였을 경우로 나누었다. 상승하였다면 대기온도 상승률과 노점온도의 상승률을 비교하여 EVP와 알 수 없는 종류 (이하 UNK)로 분류하였다. 하강하였을 경우는 내륙 지역과 해안 지역을 나누어 내륙 지역의 경우 3시간 전 중하층 운량 4를 기준으로 낮았을 경우 RAD로 분류하고 높았을 경우 ADV로 분류하였다. 더 정확한 분류를 위해서는 지표온도 자료가 필요하나 지표온도 자료는 6시간 간격 관측 자료로 활용도가 떨어져 사용하지 않았다. 해안 지역의 경우 SST와 대기온도를 비교하여 SST자료가 대기온도 보다 낮을 경우 ADV, 높은 경우 RAD로 분류하였다.

3.3. 안개 분류/예측도에 의한 관측 지점별 안개 분류

Fig 5는 앞의 안개 분류/예측도에 의해 분류된 한반도 지역의 안개 종류별 발생 빈도이다. 동해안 북부 지역은 연간 안개 발생이 10회 내외로 동해안 남부 지역에 비해 안개 발생 빈도가 높으며, FRT가 가장

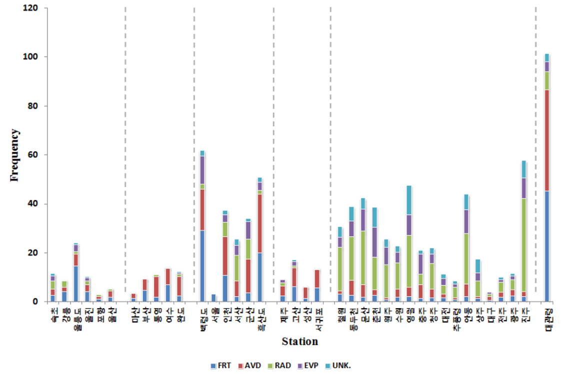

Fig. 5. Frequencies of occurance of fog types based on the classification algorithm.

빈번히 발생하였다. RAD의 발생도 상당 부분을 차지하고 있다. 또한 EVP도 다른 지역에 비해 빈번히 발생하는 편이다. 동해안 지역은 쿠루시오 난류의 지류인 대만난류가 대한해협을 통과하여 북상하는 동한난류의 영향으로 연중 15°C 이상의 수온을 유지한다. 봄과 초여름 북동 지역에 위치한 오호츠크 고기압의 세력의 확장으로 차가운 공기가 이류될 시 발생하는 EVP로 판단된다. 동해안 남부 지역인 포항과 울산은 연간 발생이 5회 내외로 낮으며 FRT에 비해 ADV가 더 빈번히 발생하였다. 이는 남부 지역으로부터의 따뜻한 공기의 이류에 의한 영향을 북쪽지역에 비해 많이 받기 때문인 것으로 사료된다.

남해안 지역은 ADV가 가장 빈번히 발생하며 다음으로 FRT가 많이 발생한다. 남해안의 안개는 5월~8월 대부분이 발생하며, 비 강수일의 경우 강한 풍속에서 빈번히 발생하며, 풍향은 남동-남서풍으로 남풍계열에서 빈번히 발생한다 (기상청, 1997). 이는 남해안의 지형과 위치를 고려했을 때 ADV가 가장 발생하기 쉬운 조건이다. FRT는 부산과 여수 지역에서 발생 안개의 50%와 48%로 절반 이상을 차지하였다. RAD는 통영, 여수, 완도 지역에서 일부 나타났으며 EVP는 다른 해안에 비해서는 매우 적게 발생하였다.

서해안 지역에서는 다른 연안에서처럼 ADV가 가장 자주 발생한다. 그런 특징적으로 해안 지역임에도 불구하고 도서 지역인 백령도와 흑산도, 상대적으로 내륙 지역인 서울 지역을 제외하고 인천, 서산, 군산, 목포 등에서는 RAD가 ADV 다음으로 가장 많이 발생하였다. 이는 발생 시간별로 안개를 분류하여 종류를 규정한 허인혜와 이승호 (1998)의 결과와 일치한다. 특히, 서산에서의 높은 복사무 발생률은 다른 관측 지점들에 비해 상대적으로 내륙에 위치하며, 서쪽으로는 팔봉산, 동쪽으로는 서완산으로 둘러싸인 분지형을 이루고 있어 복사무가 발생하기 좋은 지형에 위치해 있기 때문이다. EVP는 군산과 백령도에서 높은 발생률을 보이고 겨울철 차가운 공기의 영향을 적게 받는 서해 남부 지역으로 갈수록 EVP의 발생률이 작아진다.

내륙 지역은 연안 지역과는 달리 대부분의 지역에서 RAD가 가장 빈번히 발생한다. 특히 중부 내륙 지역에서의 RAD 발생률이 높다. 남부 지역은 중부 지역에 비해 전체적인 안개 발생 횟수가 적다. 이런 차이는 RAD의 발생 빈도가 낮기 때문에 발생한다. FRT는 전체적으로 적은 발생률을 나타낸다. ADV는 안동, 진주 지역에서 다소 높게 나타나나 전체적으로 낮은 발생률을 보인다. EVP는 춘천, 안동, 충주 지역에서 다른 지역에 비해 높은 발생률을 보이는데 이 지역들은 모두 주위에 인공호가 위치해 있는 곳으로 늦봄과 겨울 인공호의 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

대관령 지역은 고산에 위치한 지역적 특색에 의해 안개 발생 횟수가 다른 지역에 비해 월등히 높을 뿐 아니라 FRT와 ADV가 전체 안개의 45%와 41%를 차지한다. 온대성 저기압이나 한대 전선 통과 시 다른 지역에 비해 강수의 발달이 쉬울 뿐 아니라 강수가 없더라도 낮은 구름이 안개로 관측되기 때문에 FRT와 ADV의 횟수가 증가한 것이다. 또한 활승무를 분류 범위에서 고려하지 않았기 때문에 활승무 대부분이 FRT와 ADV에 포함된 것이다. 대관령은 높은 지대로 인해 야간 지표 냉각도 일어나기 쉬운 조건을 갖추고 있다. 이로 인해 RAD도 상당부분 나타난다.

제주 지역 안개는 거의 대부분이 FRT와 ADV로 발생한다. 특히 여름철 남서풍의 영향을 많이 받는 고산과 서귀포에서는 안개 발생 빈도가 높을 뿐 아니라 FRT와 ADV가 다른 두 지역에 비해 많이 발생하였다. 겨울철 북서계절풍의 영향을 받을 수 있는 고산과 제주에서는 EVP가 가끔 발생하였으나 다른 지역에서는 거의 발생하지 않았다.

4. 안개 분류/예측도 검증 및 평가

40개 지점에서 1986년부터 2005년까지 20년간 발생한 총 15748번의 안개에 대한 분류를 일일이 검증하는 것 역시 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 개발된 안개 분류/예측도에 의한 발생원인별 분류에 대해서 2006년 인천 지역에서 발생한 안개 사례들을 활용하여 관측 자료를 이용한 안개 예측가능성 검토를 위한 연구를 수행하였다. 인천 관측 지점은 위도 37°28', 경도 126°37'로 한반도의 서안 경계 지역에 위치해 있다. 약 340°에서 160°를 기준으로 남서방향은 서해, 북동방향은 내륙으로 경계지어있다. 기후분류상 온대기후대에 속하며 여름철에서는 해양성 열대기단의 영향을 받으며 겨울철에는 대륙성 한대기단의

Table 1. Monthly fog types classification by flowchart (F) and hand (H) at Incheon station in 2006.

	JAN.		FEB.		MAR.		APR.		MAY		JUN.		JUL.		AUG.		SEP.		OCT.		NOV.		DEC.		YEAR	
	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H
FRT	1	2	1	1	-	1	2	2	1	2	3	3	4	4	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	13	17
ADV	-	-	-	-	2	1	-	1	3	2	6	6	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12	12
RAD	2	1	2	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	2	-	-	-	-	7	6
EVP	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	2	1
UNK	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	1
Total	3		3		4		3		4		9		5		1		-		5		-		-		37	

영향을 주로 받는다. 봄, 가을은 서쪽으로부터 오는 이동성 고기압과 북동 지역에서 확장해오는 차가운 해양성 기단의 영향을 받는다. 계절에 따라 영향을 주는 기압 패턴이 다르기 때문에 생성되는 안개의 종류도 계절에 따라 매우 다르다.

인천 지점의 2006년 기상 관측 자료를 사용하여 분류/예측도를 통한 분류 후, 각 사례에 대한 종관 일기도 및 관측 데이터 직접 분석 재분류 작업을 실시하였다. Table 1은 분류/예측도에 의한 결과와 직접 분석에 의한 결과를 보여준다. 안개 분류/예측도에 의한 분류에서는 총 37회의 안개 발생 사례 중 FRT 13회, ADV 12회, RAD 7, EVP 2, UNK 3회가 각각 발생하였다. 직접 분석을 통해 재분류 작업 후 총 8개의 사례가 수정되었고, 그 결과 FRT 17회, ADV 12회, RAD 6회, EVP 1회, UNK 1회로 각각 분류되었다. 각 사례를 살펴보면, 1월의 경우 RAD 2회 중 1회에서 강수가 관측되지는 않았으나 전선이 통과한 시기여서 FRT로 분류하였다. 3월의 경우 ADV 2회 중 1회에서 관측상 강수가 측정되지는 않았으나 전선이 통과 중이어서 FRT로 분류하였으며 RAD 2회 중 1회에서 종관 일기도, 바람장, 기온 변화 등을 고려하였을 때 RAD로 취급할 수 없었으며 다른 특정 종류의 안개로 할 근거도 제시되지 않아 UNK로 분류하였다. 4월의 경우 EVP가 1회 나타났는데 제주 남서 동중국해 해상의 약한 고기압의 존재와 관측된 남서 계열의 풍향을 고려하였을 때 ADV로 분류하였다. 이는 분류 과정에 사용된 서해 지역 SST 자료와 인천 대기온도 자료의 차이에 의한 오차의 결과로 나타난 것으로 사료된다. 5월의 ADV 사례 중 한 사례도 전선이 통과 중이어서 FRT로 분류하였다. 8월에 발생한 1회의 안개는 분류/예측도에 의해 RAD로 구분되었으나 안개 발생 전 약간 기온 하강 및 남서 계열의 풍향, 1.5 $m\ s^{-1}$ 이상의 풍속을 고려하여 ADV로 분류하였다. 10월의 경우 분류/예측도에 의해 3회의 UNK이 나타났는데 1회는 전선이 통과 중이어서 FRT로 나머지 2회는 일기도에서 보이는 한반도 상공의 고기압과 내륙 방향에서의 약한 풍속 고려하여 RAD로 분류하였다.

재분류 작업을 통한 안개 분류/예측도의 정확성 검토 결과, 분류/예측도의 가장 큰 문제점은 종관 기상 상태를 고려하지 않고 한시적인 관측 자료에만 의존하여 종관 기상 상태에 적합하지 못한 관측 자료가 보정 없이 사용되어 기상 상태에 적합하지 못한 분류가 발생하였다는 것이다. 다음으로 한 지역을 대표점으로 선정하여 사용하며, 일변화를 고려하지 않은 SST 자료와 실제 안개 관측 지점에서의 SST 값 사이에서의 차이가 분류 오차를 보인 것으로 판단된다. 그리고 3시간 간격의 시정 자료를 사용하여 안개 발생 시간대에 대한 정확한 기상 관측 자료가 입력되지 않아 국지적이고 일시적인 경향이 강한 안개 현상의 발생 원인을 정확하게 인지하지 못하여 분류의 한계가 있었다.

5. 지역성이 고려된 경험적 안개예측성 사례연구

Fig. 4에 제시된 안개 분류/예측도는 지역성이 고려되지 않았기 때문에 안개 발생의 국지성과 지역적 특성을 고려할 때 어느 정도의 오차는 불가피하다. 따라서 이 절에서는 안개발생의 지역적인 특성까지 고려하였을 때 예측성이 어느 정도까지 향상될 수 있는지 확인하기 위하여 2006년 인천 지역의 안개 발생 사례에 대한 발생 특성 분석하고 예측성을 살펴보았다. 비강수일 한반도에서 가장 빈번히 발생하는 ADV와 RAD에 대한 분석을 하였으며 분석 변수는 풍향, 풍속, 상대습도, 기압이다. ADV는 가장 최빈월인 5, 6월, RAD는 1, 2월을 선택하여 안개 발생 이전 시간대인 발생 전날 18시에서 24시까지 자료를 중점으로 기상 변수 변화 특성을 살펴보았다. 이를 토대로 예측을 위한 모델 실험을 행하여 예측성을 평가하였다.

5.1. ADV 예측 및 분석

지역적인 ADV 특성 파악을 위해 5월과 6월의 ADV와 비ADV의 풍향, 풍속, 상대습도, 기압의 변화에 대해 살펴보았다. Fig 6에서 (a)는 ADV 발생 전날 18시에서 24시까지의 바람장미이며 (b)는 비ADV 전날

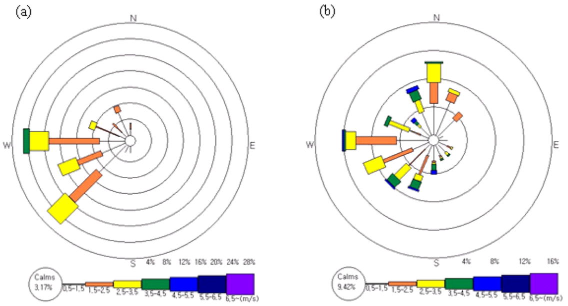

Fig. 6. Windrose from 18 LST to 24 LST before (a) ADV fog days and (b) no-fog days in May and June of 2006.

같은 시간대 바람장미이다. 비ADV에 대한 바람장미를 보면 풍향은 동풍과 남풍 계열을 제외한 모든 방향에서 불어온다. 특히, 서풍과 북풍이 두드러진다. 남, 남동, 동풍 계열은 아주 낮은 발생 빈도를 보여준다. 그러나 ADV 발생 전날의 바람장미를 보면 70% 이상이 남서와 서풍 계열에서 불어와 비ADV 전날과의 차이를 보인다. 특히, 대부분이 230°에서 360° 사이에서 불었다. 풍속을 살펴보면 비ADV에서는 무풍에서 6.5 m s^{-1}까지 넓은 범위의 발생 빈도를 보인다. 0.5 m s^{-1} 미만이 9.7%, 0.5~1.5 m s^{-1} 31%, 1.5~2.5 m s^{-1} 31%, 2.5~3.5 m s^{-1} 18%, 3.5~4.5 m s^{-1} 7.3%, 4.5~5.5 m s^{-1} 미만이 2.7%를 차지했다. 그러나 ADV 발생 전날의 결과를 보면 0.5 m s^{-1} 미만이 3.2%, 0.5~1.5 m s^{-1} 35%, 1.5~2.5 m s^{-1} 43%, 2.5~3.5 m s^{-1} 17%, 3.5~4.5 m s^{-1}가 1.6%로 나타났으며, 그 이상의 바람은 발생하지 않았다. ADV 발생 전날과 비ADV 전날의 풍속 차이는 뚜렷하지 않으나 비ADV 전날에 비해 발생 전날에서는 다소 약했으며 3.5 m s^{-1} 이상의 풍속의 거의 발생하지 않았다.

Fig 7(a)은 ADV 발생과 관련된 상대습도의 변화를 보여준다. 실선은 안개가 발생하지 않은 날의 평균값을 나타내고 나머지 선들은 각 ADV 발생 사례별 값을 보여준다. ADV 발생 전날은 비ADV 전날에 비해 상대습도가 높다. 일 중 최고 기온을 기록하는 14시에서 15시 사이에 비ADV 전날 상대습도는 평균 60% 이하이나 ADV 발생 전날의 같은 시간대 상대습도는 대부분이 60% 이상을 나타내었다. 상대습도는 일몰 이후 기온이 하강하면서 급격히 증가하기 시작하여 일출 이전 최고를 보인다. ADV 발생 사례에서는 비ADV 사례의 평균에 비해 일몰 직후 증가율이 크며 모든 사례에서 24시 이전에 88% 이상의 상대습도를 기록하였다. 그러나 비 발생 사례 평균은 최고를 보이는 새벽 4시~6시 사이의 값이 80% 이하를 기록하였다.

Fig 7(b)는 ADV 발생과 관련된 기압 변화를 보여

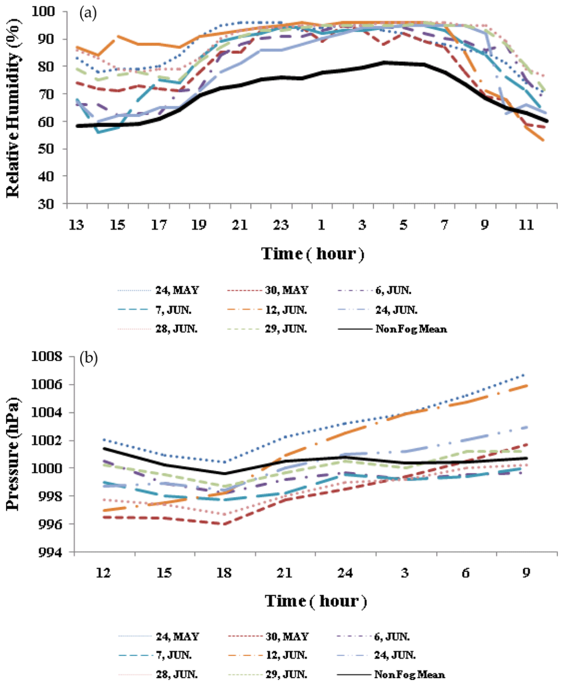

Fig. 7. Time series of (a) relative humidity and (b) air pressure of ADV fog days and no-fog days mean in May and June.

준다. 6월 12일 사례를 제외하고는 12시~18시 사이의 변화 패턴이 유사하다. 그러나 18시 이후 ADV 사례의 경우 기압 상승이 두드러지나 비ADV 평균은 상대적으로 적은 압력 상승을 보이며, 24시 이후에서는 ADV의 경우 계속 상승을 하나 비ADV 평균에서는 하강하는 추세를 보인다. 특히, ADV 사례에서는 18시에서 24시까지는 압력 상승이 최소 15 hPa를 기록하였으나 비ADV 평균에서는 12 hPa로 상대적으로 낮은 상승을 기록하였다.

ADV 분석 결과를 활용하여 예측을 위한 조건을 다음과 같이 정리하였다.

1) 발생 전날 및 당일 발생 이전 강수가 없음.
2) 발생 전날 18시~24시의 매 시간 풍향이 230°~360°에 5회 이상 발생.
3) 발생 전날 18시~24시의 매 시간 풍속 최대가 3.5 m s^{-1} 이하.
4) 발생 전날 24시 상대습도가 88% 이상.
5) 발생 전날 18시에서 24시까지의 기압 증가가 1.5 hPa 이상.

위의 조건을 이용하여 ADV가 가장 빈번히 발생한 2006년 5, 6월 전체 날을 대상으로 ADV 예측 실험을 실시하였다. 관측 결과와 실험 결과를 비교하였을

Table 2. Contigency table for ADV fog prediction. O and F represent Observation and Model prediction, respectively.

O \ F	Yes	No	Total
Yes	7	2	9
No	1	51	52
Total	8	53	61

때 관측에서는 총 61일 중 8회에서 ADV가 발생하였다 (Table 2). 실험에서는 이 중 7회를 정확하게 예측했으며 6월 29일 한 사례에 대해서만 예측에 실패했다. 그리고 비ADV 날 중 6월 18일, 6월 19일에 대해서 잘못 예측했는데, 분석 결과 해당 날들의 평균 시정이 각각 8 km와 6 km로 안개가 발생하지는 않았으나 시정이 낮음을 보였다. 이 경우에 대한 Hit Rate (HR)와 False Alarm Rate (FAR)는 각각 0.78, 0.02이며 Wilks (1995)에 의한 Heidke Skill Score (HSS)는 0.80으로 로 대단히 높은 ADV 예측성을 보였다.

5.2. RAD 예측 및 분석

지역적인 RAD 특성 파악을 위해 1월과 2월의 RAD와 비RAD의 풍향, 풍속, 상대습도, 기압의 변화에 대해 살펴보았다. Fig 8에서 (a)는 RAD 발생 전날 18시에서 24시까지의 바람장미, (b)는 비RAD 전날 같은 시간대 바람장미, (c)는 RAD 발생 당일 3시에서 9시까지의 바람장미, (d)는 비RAD 당일의 같은 시간 바람장미이다. RAD와과 비RAD 전날 야간 풍향, 풍속을 살펴보기 위해 (a), (b)를 비교해 보았다. RAD 전날의 경우 남서풍 및 북풍 계열의 바람이 우세하나, 동, 남동풍을 제외하고는 모든 방향에서 바람이 불었다. 그러나 비RAD 전날의 경우 북풍계열의 바람이 뚜렷하게 나타났으며 동풍 계열의 바람을 제외하고는 거의 발생하지 않았다. 풍속에서 RAD 전날의 경우 최고치가 3.5 m s^{-1} 이하로 대체적으로 약했으나 비RAD 전날의 경우 3.5 m s^{-1} 이상의 바람이 우세하였다. RAD 전날 야간의 풍향, 풍속 결과 인천 지역에서의 RAD 발생을 위한 조건에 부합되지 않는 것으로 판단하여, RAD 일과 비RAD 일의 3시에서 9시 사이의 바람장미를 분석하였다. 분석 결과 RAD의 경우 전날 야간에는 북풍에 비해 남서풍의 바람이 많이 불었으나 당일 3시 이후에는 무풍과 북풍이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 비RAD의 경우 다소 시계방향으로의 반전이 있었으나 여전히 북풍 계열의 바람이 뚜렷했다. 이 결론으로 보아 밤 동안의 풍향 변화가 이 지역의 RAD 발생에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 풍속의 경우는 RAD와 비RAD 모두에서 전날 야간에 비해 약해지는 경향을 보여준다.

Fig 9(a)은 RAD 발생과 관련된 상대습도의 변화를

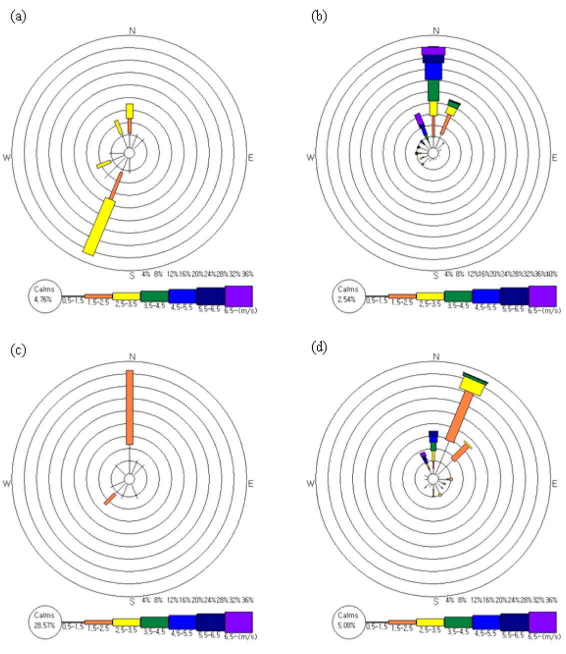

Fig. 8. Windrose from 18LST to 24LST before (a) RAD fog days and (b) no fog days, and from 03LST to 09LST at (c) RAD fog days and (d) no-fog days in January and February.

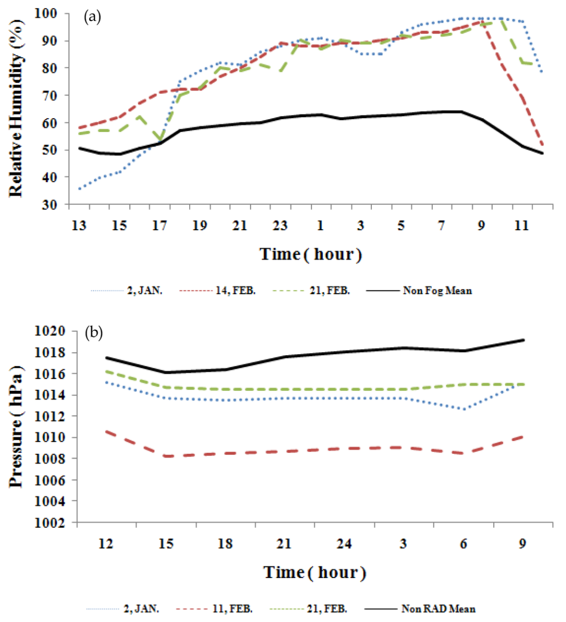

Fig. 9. Time series of (a) relative humidity and (b) air pressure during RAD fog days and no-fog days mean in January and February.

보여준다. 실선은 비RAD의 평균을 나타내고 나머지 선들은 각 RAD 사례별 값을 보여준다. RAD는 건조한 늦가을과 겨울철에 나타나 비RAD와 비교하였을 때 상대적으로 아주 높은 상대습도를 가진다. 그림에서 알 수 있듯이 RAD 전날 18시 이후 상대습도는 비RAD에 비해 높은 상승률을 보이고 24시경 85%를 넘으며, 그 이후 증가율이 약간 감소하나 아침까지 증가는 계속된다. 비RAD 최고치가 나타나는 8시 상대습도를 비교해보면 비안개일은 65% 이하로 RAD의 90% 이상에 비해 매우 낮은 상대습도를 보인다.

Fig 9(b)은 RAD 발생과 관련된 기압 변화를 보여준다. 실선은 비RAD 평균이며 나머지 선은 각 RAD 사례를 나타낸다. RAD 사례는 비RAD 평균에 비해 낮은 기압을 보인다. 그리고 15시 이후 기압이 급격히 변화하는데, RAD의 경우는 비RAD 평균에 비해 상대적으로 낮은 기압 변화를 보인다. 비RAD 평균의 경우 15시 이후 압력이 급격히 상승하나 RAD의 경우 새벽 3시 이후까지 압력 변화가 거의 없거나 약한 상승을 보일 뿐이다. 18시와 24시를 기준으로 변화량을 보았을 때, RAD 사례의 경우 최대 증가가 10 hPa 이하로 낮은 압력 변화를 보인다.

RAD 분석 결과를 활용하여 예측을 위한 조건을 다음과 같이 정리하였다.

1) 발생 전날 및 당일 발생 이전 강수가 없음.
2) 발생 전날 18시~24시의 매 시간 풍속 최대가 $3.5\ m\ s^{-1}$ 이하.
3) 발생 전날 24시 상대습도가 85% 이상.
4) 발생 전날 18시에서 24시까지의 기압 증가가 1 hPa 이하.

위의 조건을 이용하여 2006년 1, 2월 전체 날을 대상으로 RAD 예측 실험을 실시하였다. 관측 결과와 실험 결과를 비교하였을 때 관측에서는 총 59일 중 3회에서 RAD가 발생하였다 (Table 3). 실험에서는 RAD가 발생한 모든 사례를 정확하게 예측했다. 그리고 비RAD 날 중 1월 27일에 대해서 잘못 예측했는데, 분석 결과 해당 날의 평균 시정이 7 km로 안개가 발생하지는 않았으나 낮은 시정을 보였다. 이 경우에 대한 HR과 FAR은 각각 1.0, 0.02이며 HSS는 0.85로

Table 3. Contigency table for RAD fog prediction. O and F represent Observation and Model prediction, respectively.

O \ F	Yes	No	Total
Yes	3	0	3
No	1	55	56
Total	4	55	59

ADV와 마찬가지로 RAD에 대한 예측성 역시 대단히 높았다.

6. 결 론

본 연구에서는 안개 분류/예측도를 개발하여 모든 안개에 대한 발생원인별 분류를 실시하였다. 실제로 한반도 40개 지점에서 연구기간인 1986년부터 2005년까지 관측된 안개발생 횟수는 총 15748번으로 모든 안개발생 사례에 대해 발생원인별로 일일이 분류하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 안개 종류별 특성을 조사하여 안개 분류/예측도를 작성하였으며, 이를 토대로 한반도 관측 지점별 안개 종류를 분류하였다. 또한 인천을 사례 지역으로 선정하여 안개 분류/예측도에 의해 분류된 안개를 발생원인별로 검증하였다. 또한 본 연구에서는 지역성이 고려된 경험적 안개 예측모형을 개발하여 인천에서 발생한 ADV와 RAD에 대한 안개예측 가능성을 평가하였다.

한반도 안개 특성을 살펴보면, 계절에 따른 안개 일수는 5, 6 ,7월에 가장 높으며 지속시간은 계절에 따른 특별한 차이를 보이지 않는다. 지역별 안개 일수를 보면 봄철에는 이동성 고기압의 영향으로 인한 서해로부터의 수증기 공급이 많아 서해안에서의 안개가 잦다. 여름철은 한반도 대부분의 지역에서 안개 일수가 높다. 특히 해안 지역에서의 증가가 뚜렷하다. 가을철은 대기가 안정되고 수증기가 풍부하여 내륙의 안개 증가가 두드러진다. 겨울철은 시베리아 고기압의 영향으로 건조하고 안정된 대기 상태로 인해 안개 일수가 가장 낮다.

안개 분류/예측도를 작성하여 관측 지점별 안개를 종류별로 분류하였다. 동해지역에서는 대체적으로 안개일수가 적으며 FRT가 가장 빈번히 발생하나 지역적 차이가 있다. 해안지역이라 ADV가 상대적으로 빈번했다. 남해지역은 ADV가 가장 빈번히 발생하며 다음으로 FRT가 많이 발생했다. 남해안 지형 및 위치를 고려하였을 대 남쪽으로부터의 온난한 공기 이류로 인한 ADV 발생이 용이한 결과이다. 서해지역은 ADV가 가장 빈번히 발생했으며 다음으로 RAD가 많이 발생한다. 제주지역은 FRT와 ADV가 거의 대부분의 안개를 차지한다. 아열대 기후구에 속하는 지역이라 다른 안개들의 발생 빈도는 매우 낮다. 내륙지역은 RAD의 발생이 높다. 특히, 중부 내륙지역에서 자주 발생한다. 남부지역은 안개 일수가 내륙지역에 비해 낮은데 이는 RAD의 빈도가 중부지역에 비해 매우 낮기 때문인 것으로 평가된다. 대관령은 관측 지점 중 안개 일수가 가장 높은 곳으로 고산에 위치하여 FRT와 ADV가 빈번히 발생한다. 고산지역은 활승무의 발생이 용이하나 분류 시 고려되지 않아 대부분

이 ADV로 분류되었을 것으로 판단된다.

안개 분류/예측도는 지역성이 고려되지 않았기 때문에 안개 발생의 국지성과 지역적 특성을 고려할 때 어느 정도의 오차는 불가피하다. 따라서 안개발생의 지역적인 특성까지 고려하였을 때 예측성이 어느 정도까지 향상될 수 있는지 확인하기 위하여 2006년 인천에서 발생한 안개 중 ADV와 RAD에 대한 예측모형을 만들고 그 예측가능성을 평가해 보았다. 이를 위하여 2006년 인천 안개 사례들을 대상으로 안개발생시 풍향, 풍속, 상대습도, 기압에 대한 분석을 실시하고 안개 사례별로 종관 기상 패턴을 고려하여 분류를 실시하였다. 그것을 바탕으로 두 안개에 대한 예측모형을 만들고 예측성을 살펴보았다. ADV에 대한 5, 6월 자료 분석 결과 총 61일 중 8회의 ADV가 발생하였는데 모형은 이 중 7회를 정확히 예측하였다. 그리고 비ADV 53일 중 2회를 잘못 잡았는데, 해당 날 안개는 발생하지 않았으나 시정이 낮음을 보였다. RAD에 대한 1, 2월 59일 중 3회가 발생하였는데 예측 실험에서는 모든 사례를 정확하게 예측하였으며, 비ADV 55일 중 1회를 잘못 잡았다. 그러나 해당 날 또한 해당 시기 다른 날에 비해 매우 낮은 일평균 시정을 기록하였다. ADV와 RAD 두 경우의 예측에 대한 Heidke Skill Score는 각각 0.80, 0.85로써 모형은 대단히 높은 예측성을 보였다.

실험을 통해 안개의 발생 메커니즘을 이해하고 종류에 맞게 분류하여 특성을 파악한 후 지역적 안개 예측 모델을 만든다면, 복잡한 계산과 과정을 거치지 않고서도 예측력 높은 경험적 모델을 개발할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 향후 각 지역에 적합한 통계적 ADV, FRT, RAD 등 발생역학별 안개발생 예측모형을 개발하여 활용하는 경우 예측성 높은 안개예보에 도움이 될 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

기상청, 1997: 한반도 연안 해무 특성집. 136 pp.

김광식, 1992: 기상학사전. 양문사, 735 pp.

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

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

민경덕, 1976: 경부 고속도로상의 안개 구역에서의 안개 발생에 관한 연구. *한국기상학회지*, **12**(1), 13-24.

안중배, 남재철, 서장원, 이해진, 2002: 해무 예측 모듈 개발과 울릉도 해무 사례 적용 연구. *한국기상학회지*, **38**(2), 155-164.

이종범, 1981: 춘천지방이 인공호에 의한 안개 및 운량의 변화. *한국기상학회지*, **17**(1), 1018-1026.

임헌호, 이화운, 이순환, 2005: 인천국제공항에서 발생한 안개의 특성분석. *한국기상학회지*, **41**(2), 1111-1123.

허인혜, 이승호, 1998: 한국의 안개 분포와 특성. *한국지리환경교육학회지*, **6**(1), 71-85.

Chun Y., K. Boo, J. Kim, S. Kim, H. Cho, and S. Hong, 1999: Analysis of the radiation fog at the Kimpo International Airport in Atumn. Journal of Atmos. *Res*, **16**(1), 30-43.

Croft, P. J., R. L. Pfost, J. M. Mdlin, and G. A. Johnson, 1997: Fog Forcasting for the southern region: A conceptual model approach. *Wea. Forecasting*, **12**(3), 545-556.

George, J. J., 1951: Fog, Compendium of Meteorology. *Amer. Meteor. Soc*., 1187.

Petterssen, S., 1969: *Introduction to Meteorology*. 3d ed. McGraw-Hill, 333 pp.

Roach, W., 1995: Back to basics: Fog: Part 3-The formation and dissipation of sea fog. *Weather*, **50**, 80-84.

Tardif, 2007: Event-Based Climatology and Typology of Fog in the New York City Region. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1141-1168.

Wilks, D. S., 1995: *Statistical methods in the atmosphere science*. Academicc Press., 266 pp.