Journal of Environmental Science International
24(5); 657~670; May 2015

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2015.24.5.657

ORIGINAL ARTICLE

낙동강 유역 안개 발생시 기상 특성: 강정고령보 사례를 중심으로

박준상 · 임윤규 · 김규랑* · 조창범 · 장준영 · 강미선 · 김백조
국립기상과학원 응용기상연구과

Atmospheric Characteristics of Fog Incidents at the Nakdong River : Case Study in Gangjeong-Goryeong Weir

Jun Sang Park, Yun-Kyu Lim, Kyu Rang Kim*, Changbum Cho, Jun Yeong Jang, Misun Kang, Baek-Jo Kim

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju 63568, Korea

Abstract

Visibility and Automatic Weather System(AWS) data near Nakdong river were analyzed to characterize fog formation during 2012-2013. The temperature was lower than its nearby city − Daegu, whereas the humidity was higher than the city. 157 fog events were observed in total during the 2 year period. About 65% of the events occurred in fall (September, October, and November) followed by winter, summer, and spring. 94 early morning fog events of longer than 30 minutes occurred when south westerly wind speed was lower than 2 m/s. During these events, the water temperature was highest followed by soil surface and air temperatures due to the advection of cold and humid air from nearby hill. The observed fog events were categorized using a fog-type classification algorithm, which used surface cooling, wind speed threshold, rate of change of air temperature and dew point temperature. As a result, frontal fog observed 6 times, radiation 4, advection 13, and evaporation 66. The evaporation fog in the study area lasted longer than other reports. It is due to the interactions of cold air drainage flow and warm surface in addition to the evaporation from the water surface. In particular, more than 60% of the evaporation fog events were accompanied with cold air flows over the wet and warm surface. Therefore, it is needed for the identification of the inland fog mechanism to evaluate the impacts of nearby topography and land cover as well as water body.

Key words : Evaporation fog, Fog mechanism, Weir

1. 서 론

최근 우리나라는 홍수예방과 생태복원을 위해 한강, 금강, 영산강, 낙동강과 같은 주요 하천에 보와 댐을 설치하여 운영하고 있다. 하천에 설치한 보나 댐은 하천의 흐름을 막아 상류를 저수지 형태로 만들어 설치 전에 비해 하천의 수면적 또는 저수량을 증가시킨다. 하천의 환경 변화는 국지기상환경 변화에 영향을 미치게 되는데, 특히 안개 발생에 관련된 변화가 크게 나타난다(Lee 등, 1990; Ahn 등, 2004). 하천 환경 변화로 인해 발생하는 안개 변화는 주로 발생 빈도의 증가 또는 일조 시간 감소의 형태로 나타난다. 안동 지역에서는 댐 건설로 생겨난 인공호의 수면적 증가로 인해 주변 안개 발생일이 증가하는 결과가 나타났고(Nam 등, 1995; Hong, 1982), 임

Received 6 January, 2015; **Revised** 18 March, 2015;
Accepted 20 March, 2015
***Corresponding author** : Kyu Rang Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju 63568, Korea
Phone: +82-64-780-6790
E-mail: krk9@kma.go.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하댐과 합천댐 건설 후에는 안개 발생 빈도가 증가하고 일조시간이 감소하는 결과가 나타났다(Jeon 등, 2002; Jeon과 Lee, 2002). 이처럼 안개는 국지적인 현상으로, 발생 원인 및 빈도가 지역적 환경조건과 기상 조건에 따라 크게 좌우된다(George, 1960).

안개는 일반적으로 국지적으로 나타나지만, 때론 광범위하게 나타나고 발생범위를 정확하게 예측하기는 힘들며 피해도 매우 크게 나타난다. 도로교통공단에서는 2012년 예년에 비해 기상피해로 인한 치사율은 전반적으로 낮아졌지만, 기상상태별 치사율 중 안개 낀 날이 4.25명으로 가장 높게 나타났으며, 흐림 1.56명, 비 1.18명, 맑음과 눈이 각각 0.95명으로 나타났다(KoROAD, 2013). 안개 발생시 비, 눈 등의 다른 기상상태 보다 교통사고 치사율이 2 ~ 4배 높게 나타나고, 피해는 평상시 보다 더욱 증가한다. 그 예로 2006년 서해대교와 2008년 충남 당진에서는 짙은 안개로 인하여 각각 60명, 21명의 사상자가 발생하였다. 고속도로나 공항 주변에서 발생하는 안개는 차량 및 항공기 운행과 같은 교통관련 사업에 막대한 영향을 미치고, 이 여파로 경제 및 생활 전반에 피해를 준다. 이처럼 안개로 인해 피해가 다양화되고 경제적 손실이 대형화 되어가면서 안개 예측이 중요한 화두로 떠오르게 되었다.

안개를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 안개 발생 원리를 명확히 정의할 필요가 있다. 안개는 선행 연구자들에 의해 다양하게 분류되었으며, 냉각과 증발의 원리로 전선 · 복사 · 이류 · 증발 · 혼합 안개와 같이 크게 5가지로 분류할 수 있다(Arya, 2001; Baars 등, 2002; Roach, 1995a, 1995b; Tardif와 Rasmussen, 2007; Taylor, 1917). 이러한 안개의 발생 형태 및 발생 빈도는 지역적으로 차이가 있다(Lee 등, 2005; Leem 등, 2005; Won 등, 2000). 해안 지역에서 흔히 발생하는 안개는 이류와 전선 안개 형태로 나타나며, 서해와 남해에서 많이 발생한다(Heo와 Ha, 2004; Won 등, 2000). 서산, 군산, 부안, 목포, 해남, 고흥과 같은 서해안 근처 지역에서는 최근 안개 지속 시간의 증가로 인한 광량 부족으로 농작물에 피해가 발생한 것으로 보고되었다(Lee 등, 2014). 내륙의 도시 지역에서는 대부분 복사 안개의 형태로 나타나며, Sachweh와 Koepke(1995; 1997)는 도시지역의 복사안개 빈도는 열섬 효과와 수증기 부족과 같은 이유로 점차 감소한다고 하였다. 최근 Mun과 Lee (2013)는 50년 동안 기상대의 안개 자료를 이용하여 14개 관측지점의 안개 일수와 안개 지속 시간 변화를 분석하였다. 기온상승에 의해 일교차가 감소하여 서울, 울릉도와 영남지방은 안개일수가 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 추풍령과 일부 서해에서는 안개 일수가 증가하고 있다. 한반도 전체적으로 안개 일수는 감소하고 있으나 일부 지역에서 안개 일수와 안개 지속 시간이 증가함을 보였다. 이상의 연구들은 주로 장기간의 관측 자료에서 나타나는 안개 발생일의 기상요소 변화를 통계적으로 분석하여 안개 현황 파악에 그치고 있다. 즉, 안개는 해안과 내륙, 농촌과 도시처럼 안개 발생 메커니즘이 다르고, 지역별로 다른 발생특징을 가지고 있다. 이와 더불어 기후 변화 및 환경 변화에 의해 안개의 발생 메커니즘은 점차 복합적이며 다양해지고 있다.

기상청에서는 2009년 안개 특보제를 시험운영 하였고, 여러 연구자들에 의해 안개 예측에 대한 다양한 연구가 시도 되었다. Lee 등(2005)은 춘천기상대 관측 자료를 사용하여 춘천지역 안개특징을 분석하였으며, 소양호 수문자료를 사용하여 춘천지역 안개 발생을 예측하는 수치모의 실험을 수행하였다. 황해상 해무의 발생 기작을 알아내고 이를 예측하기 위해 수치모델을 이용하여 대기특성과 난류를 추정하는 연구가 진행되기도 하였다(Lee 등, 2000; Won 등, 2000). 이러한 수치 모델을 이용한 방법은 넓은 예측 범위를 가지기에 국지적으로 발생하는 안개를 정확하게 예측하기에는 한계가 있다. 또한, 국지적인 기상 요소의 특징에 따라 안개는 다른 발생 메커니즘을 가진다. 따라서 안개가 발생하는 국지 기상인자의 정량적 특성을 충분히 알고 이를 활용 한다면 안개 예측의 정확도를 높일 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 수변지역에서 발생하는 안개를 통계적 안개 분류법에 따라 분류하였고, 이를 통해 강정고령보 근처 수변지역의 안개 발생 특징을 안개 발생 유형별로 살펴보았다. 또한, 안개 분류별로 안개 발생 전 기온, 습도, 지표온도, 이슬점 온도와 같은 기상인자 특징을 분석하여, 내륙 지역에서 발생하는 안개 특성과는 다른 수변 지역에서 나타나는 안개 발생 특성을 알고자 한다.

2. 자료 및 방법

낙동강 강정고령보 국지기상 관측망은 2010년 최초 구축 이후 2014년까지 관측을 수행하였다. 본 연구에서는 관측망 17개소 중 하천에 가장 근접한 N11 지점의 1분 간격 시정자료 중 시정 결측과 기계적 한계 50 km를 초과하는 값을 제외하고 시정거리 1 km 미만의 자료를 대상으로 분석하였다(Fig. 1). N11 지점은 대구 도심에 위치한 대구기상관측소로부터 약 18 km 떨어져 있고, 하천에서 약 200 m 떨어진 곳에 위치한다. 또한, 수변 지역 안개 발생 분석 결과를 비교하기 위해 도심지역에 위치한 (구)대구기상대(Daegu Weather Station; DWS) 시정자료를 함께 사용하였다. N11 지점에는 시정계 외에도 안개 발생시 기상환경을 살펴보기 위하여 토양 온도와 멀티센서에서 관측한 기온, 습도, 지표온도 및 바람 자료를 사용하였으며 그 재원을 Table 1에 나타내었다. 시정을 제외한 관측요소(기온, 습도, 지표온도, 풍향, 풍속)는 시정 거리가 1 km 미만일 때의 1분 평균 자료를 분석하였다. 이슬점 온도는 매그너스 방정식을 이용한 이슬점 환산 방법을 사용하여 계산하였고, 이슬점 온도와 대구기상대의 기압을 이용하여 절대습도를 계산하였다. 분석 대상 기간은 2012년 1월 1일부터 2013년 12월 31일까지이며 전체 자료 중 시정 결측 자료의 비율은 2.3%였다. 안개 발생시 하천이 대기에 미치는 영향을 살펴보고자 강정고령보 상류에 수온센서를 설치·운영하였으며, 2012년 12월부터 2013년 12월까지의 수온 자료를 이용한 월평균 시계열을 다른 기상인자와 비교 분석하였다. 또한 N11 지점의 수온 변화 경향을 살펴보고자 국립환경과학원에서 설치한 달성 지점의 평균 월별 수온 자료(2009 ~ 2013년)를 이용하여 월별 경향성을 살펴보았다. 대구 지역의 평년 대비 기상 인자별 편차를 살펴보기 위해 최근 10년(2003 ~ 2012년) 동안 대구기상대의 기

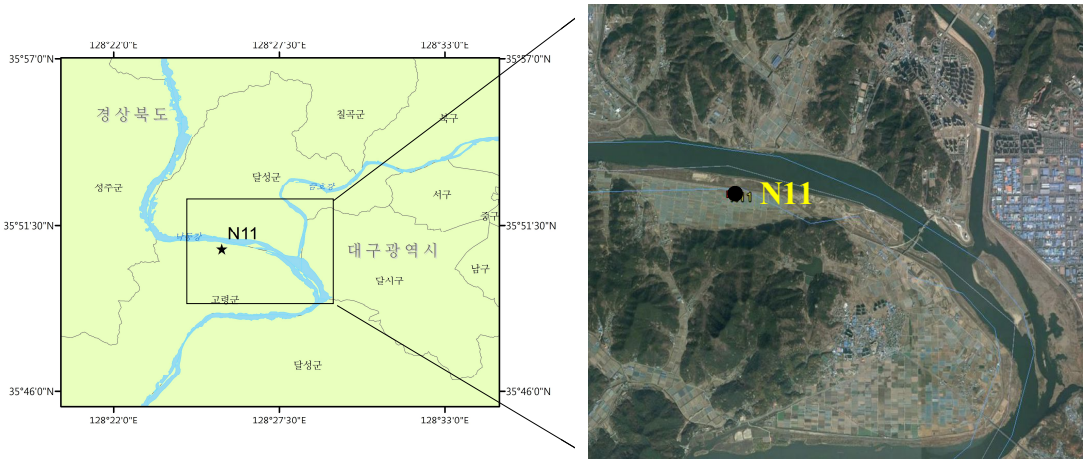

Fig. 1. The Location of N11 meteorological station at the Nakdong river.

Table 1. Instruments used at N11 observation site

Measuring factors	Model	Manufacturer	Sensor height
Wind	R.M Young 05103L	Campbell	10 m
Temperature and Humidity	WS 500	Lufft	7 m
Visibility	OWI 430	OSI	4 m
Radiation	MS 410	EKO	2.5 m
Soil Temperature	WS-T100G1	Lufft	0, -30, -50, -100 cm
Soil Humidity	MTA 2D255	TSE	-10, -30, -50, -100 cm

온, 지표온도, 비습 자료를 월평균 하여 최근 2년간 기상인자와 비교 분석하였다.

3. 결과

3.1 기상 특징

N11 지점의 기상 특징을 살펴보기 위해 수변 지역인 N11 지점과 관측 지점에서 18 km 떨어진 도심에 위치한 DWS의 기온, 지표온도, 습도를 비교하였다.

DWS의 최근 2년(2012 ~ 2013년) 동안 평균기온은 10년(2003 ~ 2012년) 평년 기온보다 여름에 0.3 ~ 2.2℃ 높고, 겨울에 0.4 ~ 1.8℃ 낮게 나타났다. N11 지점의 최근 2년 평균기온은 7월과 8월에 각각 평년 DWS 기온 보다 0.2℃, 0.6℃ 높게 나타났고, 1월과 2월은 평년 DWS 기온 보다 0.7℃, 3.6℃ 낮게 나타났다. N11과 DWS 두 지점 모두 여름은 평년 DWS 기온 보다 높게 나타났고, 겨울에는 평년 DWS 기온 보다 낮게 나타났다(Fig. 2). N11과 DWS의 최근 2년간 기온 경향은 비슷하게 나타나지만, 수변지역에 위치한 N11 지점이 도심에 위치한 DWS 지점 보다 기온이 낮게 나타났다. Mun과 Lee(2013)는 도시화 현상으로 기온 상승과 습도 감소로 인해 대구 안개 발생일이 0.219 일/년 감소하는 현상이 나타난다고 보고한 바 있으며, 이 같은 결과로 수변지역이 도심보다 기온이 낮게 나타나는 것은 인공열 효과가 작게 작용한 것으로 판단된다. 이와 같이 지역별로 다르게 나타난 기온 분포는 안개 발생일에 중요한 영향을 미친다.

대기층과 지표층의 온도 구배는 안개 발생 기작에 중요한 역할을 하며, 이를 위해 N11 지점과 DWS 지점의 지표온도를 비교·분석하였다. 평년 DWS 지표온도는 N11 지점 보다 높게 나타났고, 최근 2년간 DWS의 지표온도 보다 높거나 비슷하게 나타났다. N11의 지표온도는 12월을 제외하고 DWS 지표온도 보다 1 ~ 6℃ 낮게 관측되었고, 이는 농촌 및 수변 지역과 도심 지역간 차이로 판단된다. N11의 지표와 대기의 온도 구배는 7월과 8월을 제외하고 지표온도가 기온보다 0.2 ~ 1.3℃ 높게 나타났다(Fig. 3). 이와 같은 기온과 지표온도의 차이는 안개 발생 기작에 중요한 요소 중 하나인 지표 부근의 공기 냉각 및 증발 효과처럼 안개 발생에 긍정적인 영향을 미친다. N11 지점은 수변지역에 위치해 있기 때문에 주변 하천 영향으로 기온이 낮고, 습도가 높은 기상특징이 나타난다. 수온은 지표온도 보다 월 평균 0.1 ~ 6.3℃ 높게 나타났다. 계절별로 N11에서 가까운 강정고령보에서 관측한 수온은 기온보다 봄 · 여름에 1 ~ 3℃, 가을 · 겨울에 3 ~ 5℃ 높게 나타났다. 8월 이후의 가을과 겨울에서는 N11 지점과 DWS 지점 모두 수온이 가장 높게 나타났고 지표온도, 기온 순으로 차가운 대기층과 따뜻한 지표층의 온도구배를 가진다.

수온의 증가는 대기와 수면 사이에서 상호작용하는 에너지가 많다는 것을 의미하므로 잠열과 같은 물의 상

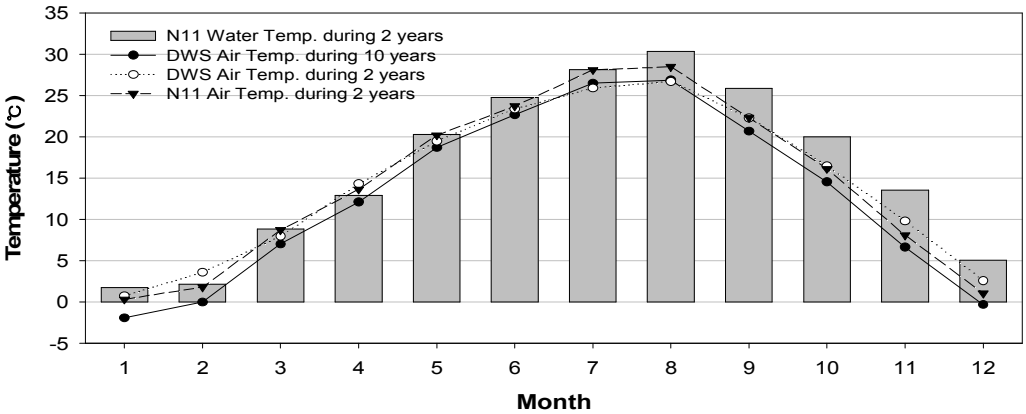

Fig. 2. Monthly average air and water temperature at N11 site during the 2 year(2012 ~ 2013) period and monthly average air temperature at DWS site during the 2 year(2012 ~ 2013) and 10 year(2003 ~ 2012) periods.

변화를 통한 에너지 이동이 발생한다. 이러한 수온 상승에 의한 에너지 순환은 잠열을 통해 대기 중에 수증기를 공급하여 대기 중의 수증기를 증가시킨다. 안개의 여러 발생원인 중 증기나 이류 안개와 같은 물리적 발생 현상은 바다 또는 하천의 수온과 기온 차에 발생한다(Willett, 1928). 맑은 날 수온 증가는 하천 증발이 쉽게 발생하고, N11 지점에서 수온 보다 낮은 기온이 발생할 때는 상하층의 온도구배로 인해 증기 안개가 발생하기 쉬운 환경을 가진다.

N11 지점은 근처에 하천과 논이 있기 때문에 DWS 지점 보다 토양 수분이 높다. 겨울철 지표온도가 N11 지점이 DWS 지점 보다 높게 나타난 것은 토양 수분이 지표 온도를 유지하는 역할을 하기 때문으로 판단된다. 5월부터 10월사이의 N11 지점은 주위에 하천과 농작물의 성장을 위한 다량의 토양수분 영향으로 DWS 지점 보다 비습이 상대적으로 높게 나타났고, 1년 중 가장 많은 증발이 이루어지는 7월과 8월에 가장 높은 비습이 관측되었다(Fig. 4).

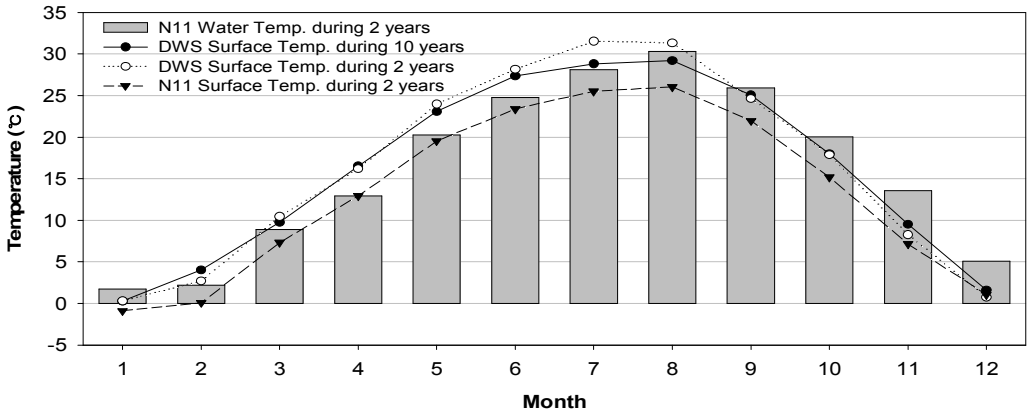

Fig. 3. Monthly average surface and water temperature at N11 site during 2 year(2012 ~ 2013) period and monthly average surface temperature at DWS site during the 2 year(2012 ~ 2013) and 10 year(2003 ~ 2012) periods.

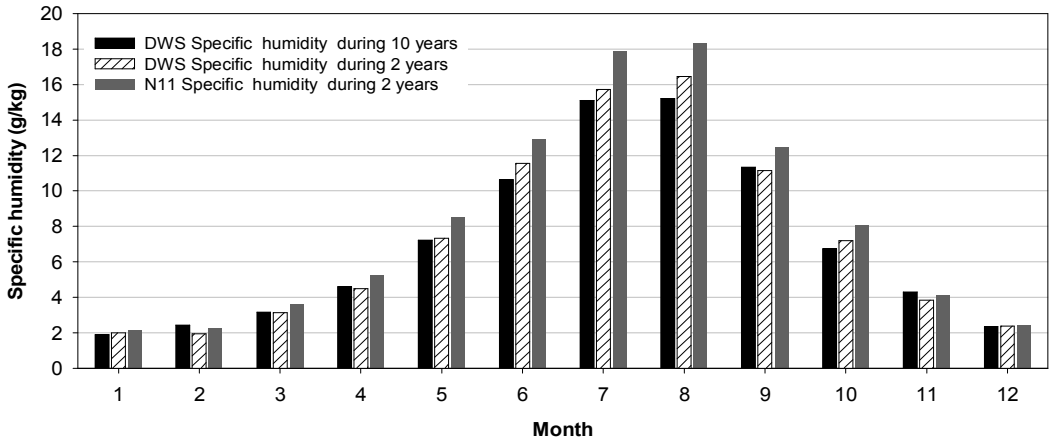

Fig. 4. Monthly average specific humidity at N11 site during 2 year(2012 ~ 2013) period and monthly average specific humidity at DWS site during the 2 year(2012 ~ 2013) and 10 year(2003 ~ 2012) periods.

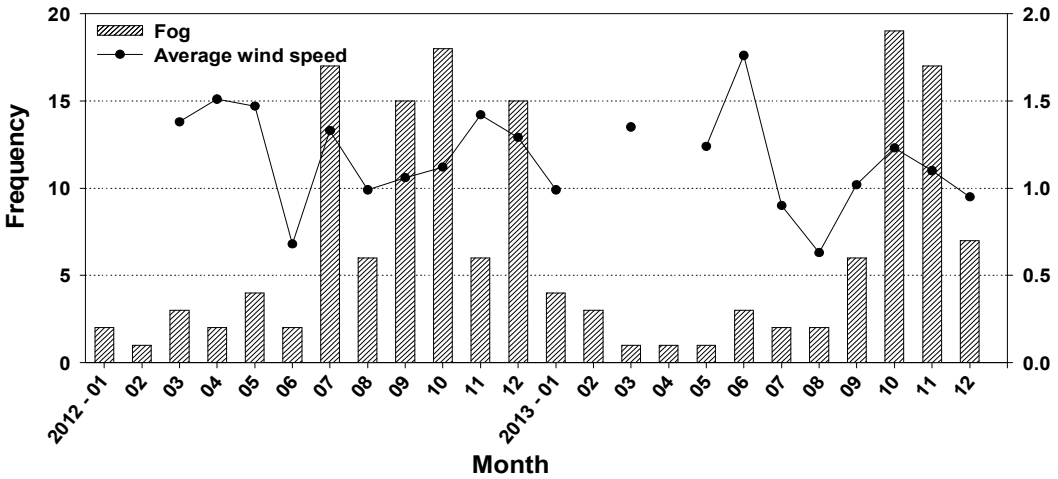

Fig. 5. Monthly occurrence of fog and average wind speed at fog days during the 2 year(2012 ~ 2013) period.

3.2 안개 발생 특성

일반적으로 대기 중 수증기로 인해 수평 시정 거리가 1000 m 이하인 경우를 안개라 정의하며, 이때 관측하는 방법으로는 목측과 시정기기를 이용한 두 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 시정계의 시정거리가 1000 m 이하일 때를 안개로 분류하였다. N11 지점의 강수일을 제외한 안개 발생 횟수는 2012 ~ 2013년 동안 157 회이며, 특히 9월부터 11월까지 발생한 안개가 102회로 가을철에 안개 발생 빈도 대부분이 나타난다(Fig. 5). 이 중 30분 이하의 지속시간을 가진 안개는 63회이며, 30분에서 1시간 사이의 지속시간을 가진 안개 발생은 11회이고, 1시간을 초과한 안개 발생은 83회이다. 일반적으로 내륙지역의 안개 형태는 주로 복사안개로 여름철에 안개 발생빈도가 가장 높게 나타난다(Mun과 Lee, 2013). 하지만, N11 지점의 경우 가을철에 안개 발생 빈도가 가장 높게 나타났고, 복사안개 발생시 나타나는 지표 복사냉각은 거의 발생하지 않았으며, 오히려 새벽시간에 지표온도가 기온보다 높은 안개 발생 메커니즘이 관찰되었다. 이처럼 N11 지점은 가을에 가장 높은 안개 발생 빈도를 보이고 겨울, 여름, 봄 순으로 안개 발생 빈도가 낮아진다. 이러한 가을철 안개 발생이 많은 이유는 대기와 하천의 기온차가 사계절 중 가장 크고 주위 하천이 대기 중 수증기 공급원으로 작용하기 때문으로 사료된다.

안개 발생 원리에서는 기온뿐만 아니라 풍속도 중요한 의미를 가진다. Lee와 Suh(2011)는 2 m/s를 기준으로 풍속이 임계값을 넘을 경우 안개 발생률이 뚜렷하게 줄어들어 이류 또는 소산된다고 하였고, Stewart(1984)는 이류 안개를 제외한 안개 발생일의 풍속은 보통 1 ~ 2 m/s 내외로 나타난다 하였다. 즉, 이류 안개를 제외한 안개의 물리적 발생 원리에서 풍속이 2 m/s 이하 일 때 발생하는 안개가 종류의 대부분을 차지하며, N11 지점 9월과 10월의 안개 발생일 평균 풍속은 1.04 m/s와 1.18 m/s 으로 관측되어 선행연구와 비슷한 결과를 가진다.

안개 발달과 관련된 원인을 파악하기 위해서 기온과 풍속 특징만으로는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 수온자료를 추가하여 발생특성을 분석하였다. 수온관측은 2012.12. ~ 2013.12. 동안 이루어졌으며, Fig. 6은 수온관측 기간 동안 N11 지점에서 안개가 발생했을 때 기온, 지표온도, 수온 자료를 월별로 평균하여 나타낸 것이다. 2월에는 안개 발생이 없었으며, 4월 안개 발생 시간대에는 수온 자료가 없었기 때문에 공백처리 하였다. N11 지점 9월부터 12월까지 기온 - 수온과 지표온도 - 수온 차는 다른 월에 비해 높게 나타났다. 가을과 겨울에 발생하는 안개는 주로 새벽과 아침 시간에 걸쳐서 관찰되며, 아침과 저녁의 일교차가 크게 나타났다. Yi 등(2012)은 산에서 불어오는 냉기류가 야간에 주로 발생하며, 이때의 풍속이 약하다는 것을 밝혔다. N11 지점의 안개 발생시 풍향은 주로 2 m/s 이하의 남서풍 계열의 바람이 관찰되

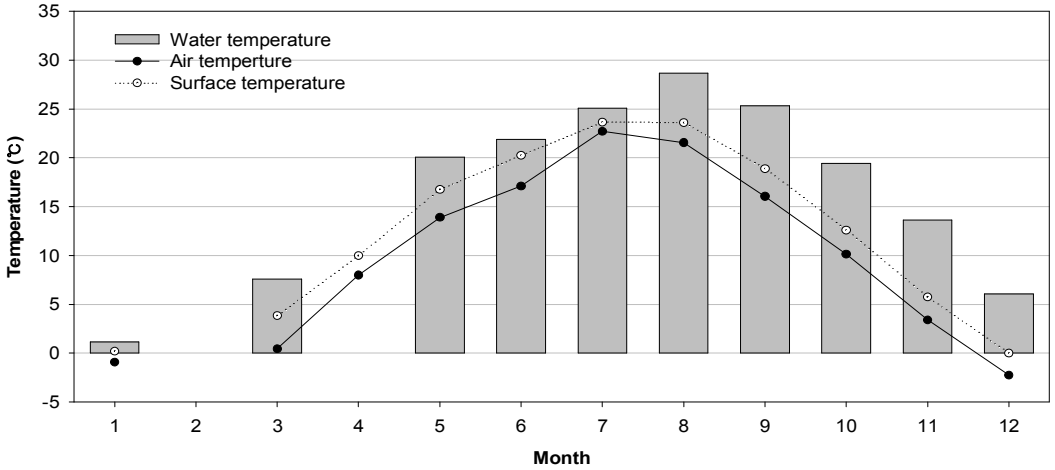

Fig. 6. Monthly average water, air, surface temperature at N11 site on fog days.

었다(Fig. 7). N11 지점의 남서쪽은 약 192 m 높이의 언덕이 존재하고 있으며 안개가 주로 발생하는 새벽시간에 언덕에서 냉각된 차가운 국지풍이 N11 지점으로 불어오는 것이라 판단되며, 언덕에서 불어오는 냉기류는 N11 지점 지표층과 대기층의 온도차를 더욱 크게 한다.

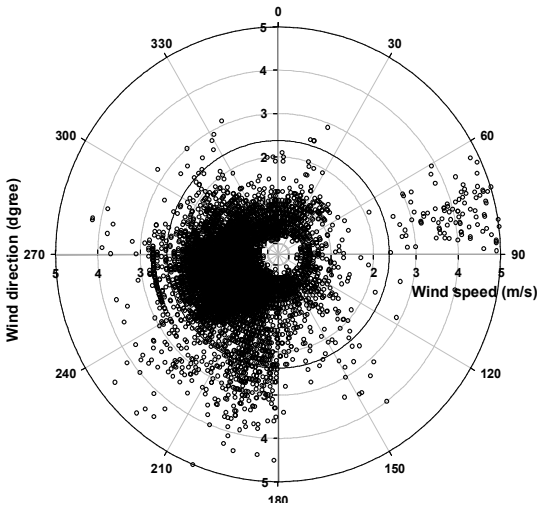

Fig. 7. Scatter plot of wind on N11 site at foggy days during the 2 year(2012 ~ 2013) period.

3.3 안개 유형 분류

안개 발생 메커니즘은 크게 두 가지로 증발에 의한 전선안개와 증기안개, 냉각에 의한 복사안개와 이류안개로 나뉜다(Lee 등, 2011). 주요 안개 발생 메커니즘은 이 분류에 의해 구분되나, 실제 안개는 복합적으로 나타나는 경우가 많다. 본 연구에서는 앞서 분석한 안개 발생시 기상특징을 기준으로 안개 분류 흐름도를 작성하였고, 안개 유형을 네 가지로 분류하여 N11 지점에서 발생한 안개를 유형별로 분석해 보았다(Fig. 8).

분류표에 적용된 네 가지 안개 발생시 기상특징은 Table 2와 같이 나타난다. 안개 발생시 1시간 이전에 강수가 존재한 경우는 전선안개로 분류하였다. 안개 발생 전·후의 풍속이 2 m/s 이상일 때는 이류안개와 증기안개가 발생하고 복사안개는 소산됨을 가정하였다. 안개 발생 전·후 풍속이 2 m/s를 초과하고 지표온도보다 차가운 기온이 형성되고, 이슬점과 기온이 같을 때는 증기안개로 분류하였다. 풍속이 2 m/s 이하이며 지표 냉각이 있다면 복사안개로 구분하였고, 이슬점 상승률이 기온 상승률보다 높을 때는 증기안개로 구분하였다. 그 결과 30분 이상 지속시간을 가지는 94회의 안개 사례 중 안개 발생 1시간 전에 강수가 있었던 전선안개는 6회로, 겨울에 집중적으로 발생하였다. 이류안개는 2년 동안 13회 발생하였으며, 2012년 여름과 2013년 가을에 발생빈도가 많이 나타났다. 내륙 지역에서 복사 안개 발생이 많을 것이라는 일반적인 예상과는 달리 수변지역에서는 복사안개 발생 메커니즘을 가지는 안개가 4회 발생하였으며, 증기안개는 94회 중 66회 발생하였으며, 9월부터 12월 사이에

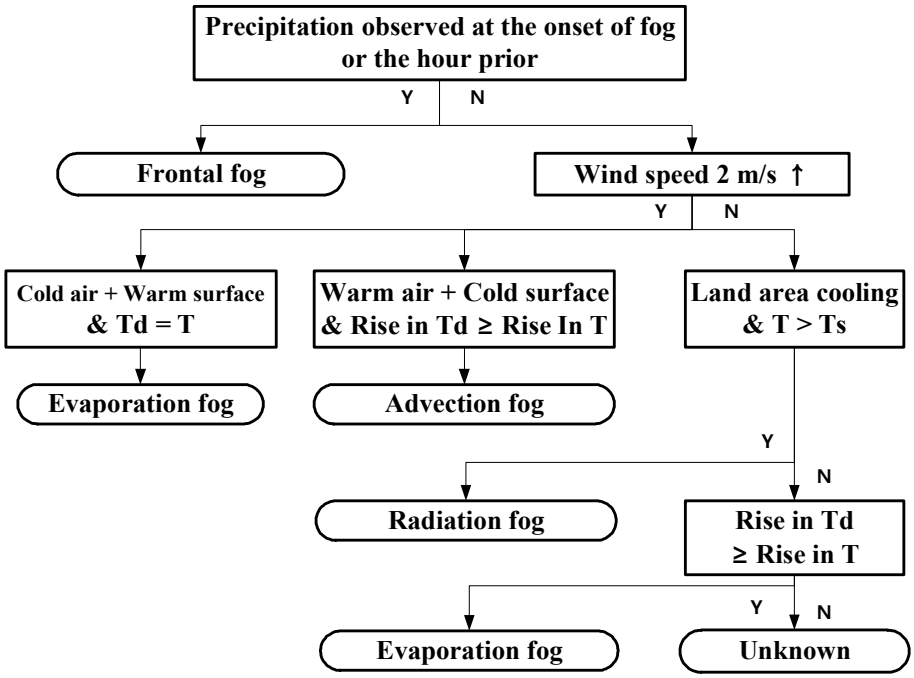

Fig. 8. Flowchart for the fog type classification algorithm.

Table 2. List of fog types used in the classification algorithm of associated primary mechanism, as well as definitions based on the fog formation

Fog type	Primary physical mechanism	Atmospheric character at the onset of fog
FRT (Frontal fog)	Evaporating precipitation	Precipitation before the onset of fog
RAD (Radiation fog)	Radiative cooling land	Wind speed below 2 m/s, clear sky
ADV (Advection fog)	Warm air over cool surface (water and land)	Wind speed over 2 m/s, sudden decrease of air temperature and sudden increase of dew point temperature
EVP (Evaporation fog)	Cold air over evaporation of warm surface (water and land)	Increasing air temperature and greater increase in dew point temperature

가장 많은 빈도로 관찰되었다(Fig. 9). 이러한 특징이 나타난 것은 N11 지점의 지형적인 특징이 작용된 것이라 판단된다. 차가운 대기에 비해 많은 토양수분을 가지는 지표층은 상대적으로 따뜻한 온도를 가지고 있었다. 이 같은 온도 구배는 증기안개가 생성되기에 좋은 조건을 형성하고 있으며, 새벽 시간에 집중적으로 발생하는 특성을 보였다(Fig. 10). 전선안개는 강수의 영향이 크게 나타나기 때문에 발생시각의 특이점은 보이지 않았다. 복사안개는 사례가 많지 않았지만 일출·일몰 전후에 나타나는 특성을 보였고, 이류 안개는 새벽과 저녁 시간에 주로 나타났다.

3.4 안개 유형별 기상 특성

안개는 발생 메커니즘에 따라 지속시간이 다르게 나타난다(Tardif 등, 2007). 본 연구에서는 안개 발생 메커니즘에 따라 분류한 네 가지 안개 지속시간을 Fig. 11과

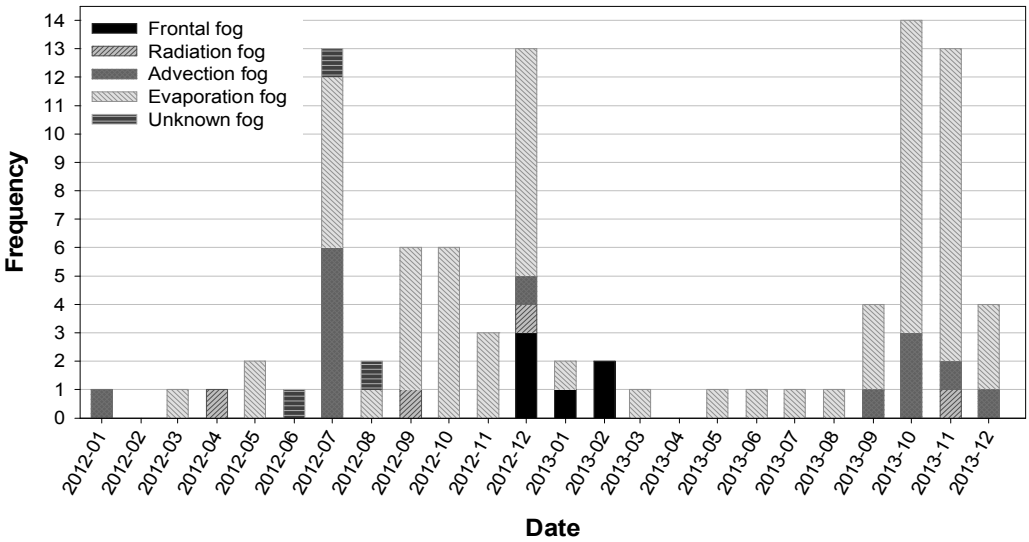

Fig. 9. Monthly fog types at N11 on fog days with 30 minute or longer duration.

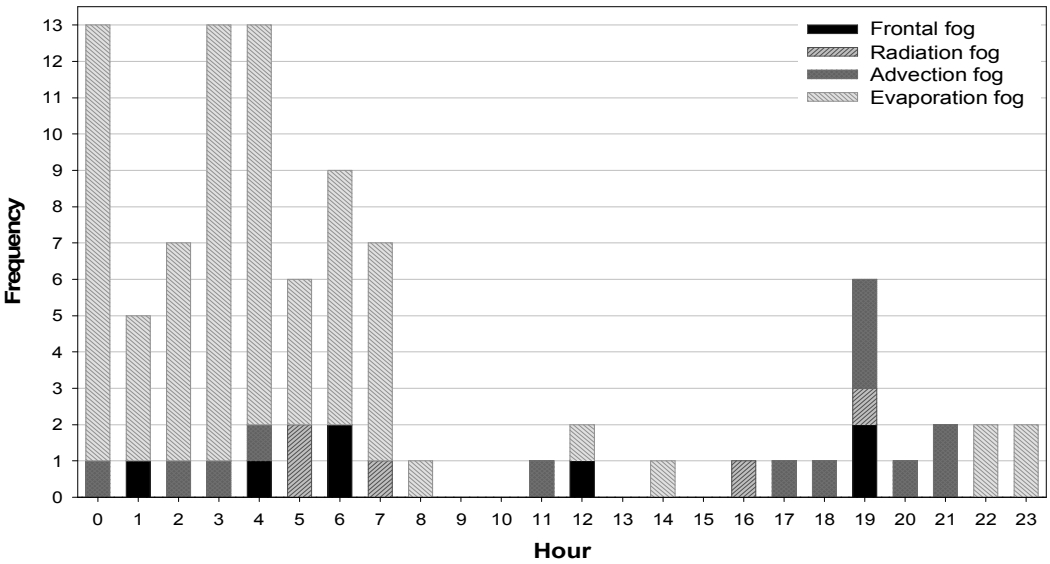

Fig. 10. Frequency distributions of the onset of fog as a function of time for the 2012 ~ 2013 period.

같이 나타냈다. 전선안개와 복사안개는 자료의 수가 충분치 않아 통계적으로 유의한 판단이 어려웠다. 이류안개 지속시간은 평균 3시간으로 나타났고, 증기 안개 지속시간은 평균 4시간 47분으로 나타났다. 일반적으로 증기안개는 지속 시간이 5시간 미만으로 짧게 나타나는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서 분류한 증기안개 지속시간은 5시간을 초과하는 경우가 다수 나타났다. 이렇게 증기 안개 지속시간이 길게 나타나는 원인은 관측 지점이 배산임수 형태의 지형을 띄고 있어 산에서 복사 냉각된 찬 공기가 산풍 형태로 N11 지점으로 불어오게 되고, 이

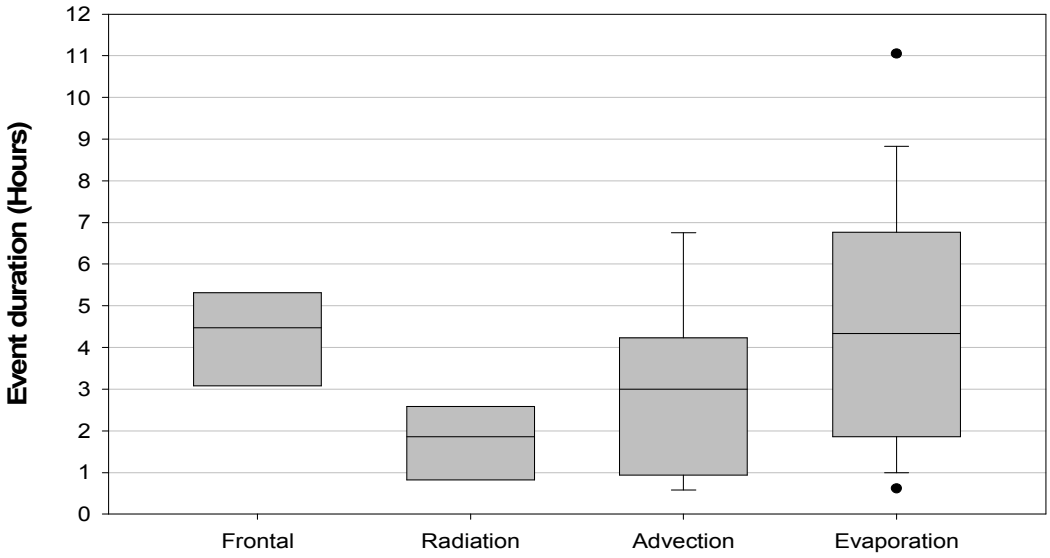

Fig. 11. Duration of fog event for each fog type.

때 대기 보다 따뜻한 초지 형태의 지표층과 따뜻한 하천에서 증발이 연속적으로 발생하기 때문이다. 이 같은 관측 결과로 알 수 있는 사실은 관측 지점에서 발생하는 증기안개는 단일 발생 메커니즘이 아닌 복합적인 발생 형태를 가진 안개가 생성된다는 것이다. 주요 메커니즘은 차가운 대기와 따뜻한 수분이 다량 함유된 지표의 상호작용으로 발생하는 증기 안개 형태이며, 그 시작은 앞서 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 언덕에서 지표 복사로 인한 산풍의 발생에서부터 시작됨을 알 수 있다. 내륙에서 발생하는 안개 형태는 흔히 복사안개라 밝혀졌지만, 이처럼 지형적 특성에 따라 다양하고 복합적인 원인의 안개가 발생 할 수 있다.

이와 같이 복합적인 요인으로 발생하는 안개를 보다 정확하게 예보하고 분석하기 위해서는 기상요소를 정량화하여 안개 특징을 분석할 필요가 있다. 이를 위해 Table 3에서는 안개 발생 2시간 전부터 안개 발생시까지 각 기상변수에 대한 통계(평균, 분산, 표준편차, 최고, 최소값) 분석을 하였다. 안개 발생시 고려해야 할 기상요소들은 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 가장 기본적으로 측정하기 쉽고 안개 발생에 가장 큰 기여를 하는 온도, 습도, 바람의 특성을 분석하고자 안개 발생 전 2시간 동안 이들의 변화량에 대한 정량적 분석을 하였다.

기온은 대기 중의 수증기 함량에 기여하는 요소 중 하나이다. 기온과 이슬점 온도 편차는 공기 중 포화 정도를 나타내는 지표로 쓰일 수 있다. 기온과 이슬점 온도 편차를 통해 이류안개 발생시 다른 안개들 보다 안개 생성 전 기온이 이슬점 온도 보다 높게 나타남을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서 분류된 이류안개는 따뜻하고 습한 공기가 갑작스레 이동해 오면서 이슬점 온도 상승률이 크게 관찰되었다. 지표근처에서 이류안개 발생 직전의 짧은 시간에 급격한 기온 하강으로 인해 이슬점 온도가 상승된다. 따라서 다른 안개들에 비해 안개 발생 전 2시간 동안의 평균 기온이 평균 이슬점 온도보다 5.46℃ 높게 나타났다. 이류 안개 외의 다른 안개들은 안개 발생 2시간 전부터 편차가 0에 가깝게 나타나 대기가 포화습도상태임을 알 수 있었다. 안개 발생 전 2시간 동안 복사안개와 증기안개의 기온과 이슬점 온도 편차는 같은 경향성을 가지고 있으며, 복사 안개가 평균 온도 편차 0.23, 표준편차 0.32로 가장 작은 기온과 이슬점 온도 편차를 가진다.

전선안개는 따뜻한 기단과 차가운 기단이 만나 증발에 의해 발생하기 때문에 지표층 보다 대기층 온도가 2.69℃ 높게 나타났다. 지표층이 차갑고 대기층이 따뜻할 때 발생하는 이류안개는 안개 발생 2시간 전 역시 이류안개 메커니즘을 따르는 경향을 보였고, 대기와 지표

Table 3. Variation of meteorological factors for each fog type during the 2 hour period before fog onset

Difference of air temperature and dew point temperature (℃)					
	Average	Dispersion	Standard deviation	Max	Min
FRT	0.54	2.24	1.50	8.95	0.01
RAD	0.23	0.10	0.32	0.98	0.00
ADV	5.46	10.37	3.22	15.30	0.64
EVP	0.29	0.87	0.93	9.00	0.00
Difference of air temperature and surface temperature (℃)					
FRT	2.69	26.77	5.17	13.30	-3.50
RAD	-0.62	3.71	1.93	1.80	-4.10
ADV	-0.06	9.16	3.03	8.00	-8.50
EVP	-1.37	3.34	1.83	9.00	-8.40
Specific humidity (g/kg)					
FRT	4.77	4.79	2.19	9.47	1.76
RAD	6.80	9.09	3.01	12.04	3.76
ADV	10.79	39.50	6.28	21.54	1.00
EVP	8.34	20.82	4.56	19.60	1.00
Wind speed (m/s)					
FRT	1.29	0.74	0.86	5.60	0.10
RAD	0.71	0.13	0.35	1.90	0.10
ADV	2.06	2.50	1.58	10.50	0.10
EVP	1.05	0.37	0.61	5.00	0.10

온도 편차는 평균 0℃로 나타났다. 이는 공기 이류에 의해 따뜻한 공기와 차가운 지표가 만난 후, 공기가 급격히 냉각되는 특징이라 할 수 있다. 복사안개는 지표의 복사냉각에 의해 대기층이 차가워지고, 이류안개는 차가운 지표층과 따뜻한 대기층에서 나타나며, 증기안개는 따뜻한 지표층과 차가운 대기층에서 나타난다. 이처럼 전선안개를 제외한 다른 안개 특성들에서는 대기층과 지표층의 온도구배가 중요하게 작용한다. 기온과 지표온도 편차 분석을 통해 복사안개는 지표 냉각이 발생하면서 기온이 떨어지는 것이 일반적인 특성이지만, 안개 발생 전 2시간 동안 지면온도가 다소 높게 나타났다. 증기안개는 토양 수분이 풍부한 따뜻한 지면에서 증발이 발생하기에 안개 발생 2시간 전부터 토양의 기온이 높게 나타났다.

일반적으로 안개 발생시 상대습도는 90% 이상으로 관측된다. 상대습도는 온도에 민감하게 작용하므로 보다 객관적인 분석을 위해 안개 발생 2시간 전 습도를 절대습도로 바꾸어 분석하였다. 강우 현상 이후에 발생하는 전선 안개는 지표와 대기가 충분히 포화되어 나타나기 때문에 수증기 변화량은 2.19 g/kg으로 네 가지 안개 종류 중 안개 발생 전 2시간 동안 가장 작은 변동성을 가지며, 공기 중 수증기 양은 평균 4.77 g/kg으로 관측되었다. 지표 냉각 복사에 의해 생성되는 복사 안개는 대기 중 수증기가 안개 발생 전 평균 6.8 g/kg으로 관측되었다. 지표 및 수면의 증발로 생성되는 증기 안개는 대기 중 수증기 양이 8.34 g/kg으로 복사 안개보다 안개 발생 전 2시간 동안 평균 수증기 양이 많은 것으로 관측되었고, 안개 발생 전 2시간 동안 복사 안개보다 수증기 변화가 많이 나타난다. 이는 증기 안개 발생 전, 2시간 동안 수증기량의 분포를 나타내는 분산이 복사 안개 보다 증기 안개가 2배 높게 나타나는 것에서 확인 할 수 있고, 야간 언덕에서 관측지점으로 부는 산풍의 영향으로 판단된다. 네 가지 안개 종류 중 수증기 분포의 변화가 가장 많이 나타나는 것

은 대기 중 평균 수증기량이 10.79, 분산이 39.50으로 나타나는 이류안개이다. 이류안개는 따뜻하고 습한 공기 이동으로 발생하는 것이기 때문에 습도 변화율이 높게 나타나는 특징이 있다.

안개 발생 전 풍속은 안개 종류를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 안개 발생시 풍속이 작을 때 주로 안개가 발생하며, 이류 안개를 제외하고 안개 발생 2시간 전에 평균 풍속은 2 m/s 보다 작게 나타났다. 공기 이동이 있는 전선안개의 평균 풍속은 복사안개와 증기안개 보다 높은 1.29 m/s로 나타났다. 증기 안개와 복사 안개는 각각 1.05 m/s와 0.71 m/s로 관측되었고, 증기안개가 복사안개보다 평균 풍속이 높게 나타난 것은 증기안개의 경우 산곡풍에 의한 공기 유동이 발생하는 기작 때문으로 해석된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2012 ~ 2013년 동안 낙동강 중류지역에 설치된 N11 지점의 시정계로 안개를 관측하였고, 기상 관측 자료(기온, 습도, 지표온도, 수온)를 이용하여 안개 발생시 기상특징을 관찰하였다. 관측된 안개는 유형별로 분류하였고, 안개 유형별로 발생 전 2시간 동안의 기상 특징을 파악하였다.

N11 지점 관측 자료를 통한 강정고령보 지점의 안개는 총 157회가 관측되었고, 9월과 11월 사이에 전체 안개 발생의 약 60% 이상인 102회의 안개가 발생하였다. 안개 발생은 가을에 가장 높은 빈도로 나타났으며, 겨울-여름-봄 순으로 많이 발생하였다. 30분 이상의 지속시간을 가지는 94회의 안개 사례는 2 m/s 이하 남서풍 계열의 바람이 불고, 기온이 급격히 떨어지는 새벽 시간에 발생하는 특징이 관찰되었다. 이 때, 지표층과 대기층의 온도 분포는 수온이 가장 높고, 그 다음으로 지표온도가 기온보다 높게 관측되었다.

자세한 분석을 위해 안개 분류법을 이용하여 네 가지 안개 유형으로 분류한 결과, 전선안개 6회, 복사안개 4회, 이류안개 13회, 증기안개 66회, 분류없음 3회로 나타났다. 각 안개별 발생시간 및 지속시간은 안개 종류에 따라 다르게 나타났고, 이 중 증기 안개는 기존 선행연구보다 지속시간이 더 길게 관측되었다.

안개 예보의 정확성을 높이기 위해서는 안개 발생 전 기상 요소의 특징을 정량적으로 알고 활용할 필요가 있다. 본 연구에서는 기온과 이슬점 온도 편차, 기온과 지표온도 편차, 절대습도, 풍속에 대한 안개 발생 2시간 전 변화하는 정도를 분석하였다. 이류안개를 제외한 다른 안개들은 기온과 이슬점 온도의 편차가 1℃ 이내에서 나타나 안개 발생 전 이미 대기는 포화습도상태에 도달하였다. 안개 발생 전 기온과 지표온도의 편차에서는 지표층과 대기층의 온도 구배를 예상 할 수 있으며, 증기 안개 형성시 다량의 토양 수분을 가지는 따뜻한 지표의 조건에서 안개가 생성되므로, 지표에서 증발에 의한 안개가 형성됨을 알 수 있었다. 안개 발생 전 이류안개는 가장 높은 풍속을 나타냈으며, 증기안개가 복사안개보다 다소 높은 풍속이 관측되었지만 그 차이는 크지 않으며, 두 안개 모두 안개 생성 전 1 m/s 미만의 풍속을 가진다.

이와 같은 결과에 따라 강정고령보 사례를 통한 낙동강 중류 지역의 안개는 주로 가을철에 증기안개의 형태로 나타나고, 일반적인 증기안개 보다 지속시간이 비교적 길게 나타나는 특징이 있다. 이는 인근 언덕에서 불어오는 산풍에 의한 차가운 공기 유입으로 따뜻한 지표면에서 발생하는 증발과 더불어 수면에서 발생하는 증발효과가 동시에 발생하기 때문으로 사료된다. 내륙의 낙동강 중류 수변지역에서 발생하는 안개는 지형에 따라 본 연구 결과처럼 하나의 단일 형태가 아닌 복합적인 작용에 의해 안개가 발생한다. 이처럼 안개는 지형 특성이 가장 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 안개 예보를 위해서는 지형의 다양성을 고려하여 여러 사례를 수집 하여 연구 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 연구개발사업 응용기상기술개발연구의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCE

Ahn, J. H., Yoo, C. S., Kim, H. Y., Yoon, Y. N., 2004, An evaluation technique on the hydrometeorologic changes due to dam construction, Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conferences, 2150-2155.

Arya, P. A., 2001, Introduction to Micrometeorology,

2d ed., Academic Press, California, 415.

Baars, J. A., Witiw, M., Al-Habash, A., Ramaprasad, J., 2002, Determining fog type in the Los Angeles basin using historic surface observation data, Proceeding of the 16th Conference on probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, American Meteorological Society, Boston, J104-J107.

George, J. J., 1960, Weather forecasting for aeronautics, Academic press, New York, 667.

Heo, K. Y., Ha, K. J., 2004, Classification of synoptic pattern associated with coastal fog around the korean peninsula, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 40(5), 541-556.

Hong, S. G., 1982, Increase of the fogs in Andong due to the construction of Andong reservoir, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 18(2), 26-32.

Jeon, B. I., Kim, I. G., Lee, Y. M., 2002, A change of local meteorological environment according to dam construction of Nakdong-river – 1. Meteorological data analysis before and after dam construction, Journal of the Environmental Sciences, 11(3), 161 -168.

Jeon, B. I., Lee, Y. M., 2002, A change of local meteoro -logical environment according to dam construction of Nakdong-river – 2. Estimation using numerical model, Journal of the Environmental Sciences, 11(4), 281-288.

KoROAD, 2013, Factor analysis of traffic accidents, Report 2013-54, The road traffic authority, Seoul, Korea.

Lee, C. B., Bong, J. H., Cho, H. M., 1990, Aspects of local climatic change due to dam construction, Journal of Atmospheric Research, 7(1), 75-81.

Lee, H. W., Lee, K. O., Baek, S. J., Kim, D. H., 2005, Analysis of meteorological features and prediction probability associated with the fog occurrence at Chuncheon, Journal of Korean Society for Atmo -spheric Environment, 21(3), 303-313.

Lee, K. M., Suh, M. S., 2011, A study on the characteristics of fog and development of prediction technique in the Chung-Cheong area, Journal of Climate Research, 6(3), 200-218.

Lee, S. Y., Kang, D. H., Kim, J. G., Kim, Y. J., Choi, H. G., Lee, J. W., 2014, Analysis of environmental characteristics for the Greenhouse complex on reclaimed land, Proceeding of the Korean Society of the Agricultural machinery conferences, 19(1), 262-263.

Lee, Y. H., Won, D. J., Kim, K. E., Min, K. D., 2000, The role of turbulence in numerical model on the sea fog over the Yellow sea, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 36(6), 643-654.

Leem, H. H., Lee, H. W., Lee, S. H., 2005, The analysis of the characteristics of the fog generated at the Incheon int'l airport, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 41(6), 1111-1123.

Mun, S. H., Lee, S. H., 2013, A study on the change of fog frequency and duration hours in south korea, Journal of Climate Research, 8(2), 93-104.

Nam, J. C., Shin, M. Y., Yun, J. I., 1995, Discrimination of fog events around artificial lakes in Andong based on hourly meteorological data, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 31(4), 393-398.

Roach, W. T., 1995a, Back to basics: Fog: Part 2 - The formation and dissipation of land fog, Weather, 50(1), 7-11.

Roach, W. T., 1995b, Back to basics: Fog: Part 3 - The formation and dissipation of sea fog, Weather, 50(1), 80-84.

Sachweh, M., Koepke, P., 1995, Radiation fog and urban climate, Geophysical Research Letters, 22(9), 1073-1076.

Sachweh, M., Koepke, P., 1997, Fog dynamics in an urbanized area, Theoretical and Applied Climatology, 58(1-2), 87-93.

Stewart, D. A., 1984, Trends of wind speed in fog, Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclima -tology, Series B, 34(3), 287-298.

Tardiff, R., Rasmussen, R. M., 2007, Event-based climatology and typology of fog in the New York City region, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46(8), 1141-1168.

Taylor, G. I., 1917, The formation of fog and mist, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 43(183), 241-268.

Willett, H. C., 1928, Fog and haze, their causes, distri -bution, and forecasting, Monthly Weather Review, 56, 435-468.

Won, D. J., Kim, S. Y., Kim K. E., Min, K. D., 2000, Analysis of meteorological and oceanographic

characteristics on the sea fog over the Yellow sea, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 36, 631-642.

Yi, C. Y., Kim, K. R., Choi, Y. J., Won, H. Y., Dieter, S., 2012, Nocturnal surface cooling and cold air transport analysis based on high density observation – A case study of Eunpyeong new town in Seoul, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 15(4), 124-137.