

ORIGINAL ARTICLE

## 수치 대기 모델을 이용한 수변 지역 안개 발생 및 시정 산정에 관한 연구

김은지 · 이강열<sup>1)</sup> · 박창현<sup>2)</sup> · 이순환<sup>3)</sup>\*

부산대학교 지구과학과, <sup>1)</sup>부산대학교 지구환경시스템, <sup>2)</sup>부산대학교 환경연구원, <sup>3)</sup>부산대학교 지구과학교육과

## A Study on Fog Formation and Visibility Estimation in Waterfront Area Using Meteorological Model

Eun-ji Kim, Kang-yeol Lee<sup>1)</sup>, Chang-hyoun Park<sup>2)</sup>, Soon-hwan Lee<sup>3)</sup>\*

Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 46421, Korea

<sup>1)</sup>Department of Earth Environment System, Pusan National University, Busan 46421, Korea

<sup>2)</sup>Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46421, Korea

<sup>3)</sup>Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46421, Korea

### Abstract

Fog can have severe impacts on human life (e.g., accidents in transportation systems) because it causes low visibility. Areas prone to fog near the sea or a river require accurate fog forecasts. In this study, we analyzed the characteristics of fog occurrence around Gumi Reservoir, a part of the inland Nakdong River. We also simulated and predicted visibility using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Visibility was estimated using several point measurements and several different methods: Stoelinga and Warner (SW99), Rapid Update Cycle (RUC), the Forecast System Laboratory (FSL), Decision Tree (DT), revised visibility (RVIS) and Gulpepe\_06 methods. The DT method showed a pattern similar to the observed fog occurrences. In this study, the Gulpepe\_06 method produced the best performance under the lowest visibility situation, although there is some discrepancy in microphysics' simulated results, followed by DT and RUC.

**Key words** : Fog, Weather Research and Forecasting (WRF), Visibility, Gumi Reservoir

### 1. 서 론

안개는 지표면 부근에서 발생하는 기상 현상으로 대기 중의 수증기가 응결하여 작은 물방울을 형성하여 대기 중에 떠 있음으로 인해 수평 시정이 1 km 미만인 경

우를 일컫는다(WMO, 2018). 안개가 발생하면 시정 장애를 유발하여 교통 분야에서는 항공기 출입의 지연과 결항을, 자동차 사고의 경우 시야가 확보되지 않아 연쇄 추돌 사고 등 대형 사고로 이어질 가능성이 크다 (KoROAD, 2020). 그러므로 안개로 인한 사고를 줄이고

Received 4 January, 2021; Revised 1 February, 2021;

Accepted 4 February, 2021

\*Corresponding author: Soon-hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46421, Korea

Phone : +82-51-510-2706

E-mail : withshlee@pusan.ac.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.

피해를 줄이기 위해 안개 예측 정확도를 높이는 것이 필요하다.

안개에 대한 연구의 필요성이 대두되면서 연구자들은 가장 먼저 안개를 이해하기 위해 장기간의 기상 관측 자료를 기반으로 안개의 발생 특성과 예측에 대한 연구들을 수행하였다. 이를 위해 기본적으로 안개의 발생 빈도와 유형을 분석하여 지역적, 기후학적 특징이 안개에 반영되는 것을 도출하고, 해당 안개의 발생 원리 분석을 수행하였다(Baek et al., 2007; Tardif and Fasmussen, 2007; Kim et al., 2013; Mun and Lee, 2013; Akimoto and Kusaka, 2015; Park et al., 2015; Kim et al., 2016; Shim and Lee, 2017). 그러나 자동기상관측 자료, 레이더 등의 관측 자료는 안개 연구에 있어 공간적 제약과 시간적 제약이 있기 때문에 이를 극복하기 위해 많은 연구자들이 수치 모델을 이용하여 안개에 대한 연구를 수행하였다.

수치모델을 이용한 안개 연구는 관측 자료를 통해 얻은 결과들을 바탕으로 안개와 상관관계가 높은 기상 변수들을 이용해 안개의 발생 환경을 모의하거나 시정을 산출하는 방법을 이용한다(Knapp, 1996; Stoelinga and Warner, 1999; Wantuch, 2001; Benjamin et al., 2004; Bergot et al., 2007; Tardif, 2007). 그러나 수치모델을 이용한 국내의 안개 연구는 주로 인천 공항이 위치한 지역이나 해무가 발생하는 해상이나 연안 지역, 그리고 큰 규모의 복사 안개가 발생하는 지역과 같이 지역과 대상에 제한이 있다(Cho et al., 2000; Bang et al., 2008; Heo et al., 2010; Kim and Yum, 2015; Kim et al., 2019; Kim et al., 2017; Kim et al., 2019). 더불어 기온과 이슬점, 상대습도 등의 기상변수를 이용하여 시정을 구하거나, 수치모의를 통해 액체수함량(Liquid Water Contents, LWC)을 다루지만, 직접적으로 물방울 수농도(droplet number concentration,  $N_d$ )와 액체수함량(LWC)을 이용해 시정을 산출하지는 않는다.

실제 시정은 온도와 이슬점보다는 단위 부피에서의 물방울 수농도( $N_d$ )와 공기 중에 있는 물의 질량과 직접적으로 관계가 있다. 대기중에서 물의 질량이 고정될 때 단위 부피에서의 물방울 수농도( $N_d$ )값은 물방울의 직경 크기에 따라 다양한 값을 가질 수 있다(Gultepe and Isaac, 1999; Gultepe and Isaac, 2004). 예를 들어 따뜻한 안개( $T > 0^\circ\text{C}$ ) 조건일 때 액체수함량(LWC) 값이 고

정일 때 물방울 수농도( $N_d$ )가 증가하면 시정이 감소한다. 요약하면 액체수함량(LWC) 또는 수농도( $N_d$ )값이 증가할 때 시정이 감소하게 되는데, 이러한 관계를 수치 모델에서 구한 액체수함량(LWC)과 수농도( $N_d$ )값에 적용하여 시정을 구하는 연구들이 있다. 다만 이러한 연구는 시정계와 전방산란계가 설치되어 있어 수증기에 대한 관측자료를 얻을 수 있는 지점에 대해서만 검증할 수 있는 한계가 있다(Bott and Trautmann, 2002; Thompson et al., 2004; Müller et al. 2006; Gultepe et al., 2006).

현재 서해안이나 공항이 위치한 지역과 비교해 보았을 때 한반도 내륙지역의 안개 예측의 필요성에 비하여 안개 연구가 충분히 이루어지지 않았다. 내륙지역에서도 댐이나 강이 있는 지역은 다른 지역에 비해 안개가 발생하기 쉬운 조건을 가지기 때문에 안개에 대한 대비가 필요하다. 특히 댐이나 보를 건설한 지점은 건설 전과 비교했을 때 안개발생 빈도가 증가하고(Park et al., 2017), 낙동강 중류 지역에 있는 강정고령보의 경우에는 주로 가을철에 증기안개의 형태로 나타나고, 일반적인 증기안개보다 지속시간이 비교적 길게 나타나는 특징이 있다(Park et al., 2015). 내륙에 있는 구미보에서 발생하는 안개도 일반적인 복사안개가 아니다. 구미보에서 발생하는 안개는 안개 발생 시 수면 주위로 급속한 기온상승이 나타나면서 강으로 유입되는 기류의 불안정도가 급상승하면서 안개가 발생하기 때문에 다른 내륙지역의 안개와는 차이가 있다(Kim et al., 2016).

이러한 상황에서 내륙지역의 안개 연구에 앞서 필요한 모든 지점에 시정계가 설치되어 있지 않고, 기상청 또한 안개 예보를 특보 형태로만 제공하고 있어 안개 예보의 필요성을 충분히 충족시켜주지 않고 있다. 그리고 기상모델 이용 시 수분과 관련된 항은 물방울 입자 크기에 따라 포화도 변동이 다양해 정확도가 높지 않아 시정 예측 정확도가 높지 않다. 그래서 안개에 대한 보다 나은 시정 정보를 제공하기 위해 기본적인 기상변수와 더불어 물방울 수농도( $N_d$ )와 액체수함량(LWC)을 고려한 시정 산출방식을 적용하였다.

따라서 본 연구에서는 강을 횡단하는 방향으로 여러 기상관측 장비가 있는 구미보를 연구지역으로 선정하였고, 일반적인 내륙 복사안개와는 다른 구미보의 안개를 분석 대상으로 하였다. 구미보의 집중 기상관측 기간 이후에도 발생할 안개의 예보를 위해 기상예측모델을 이용

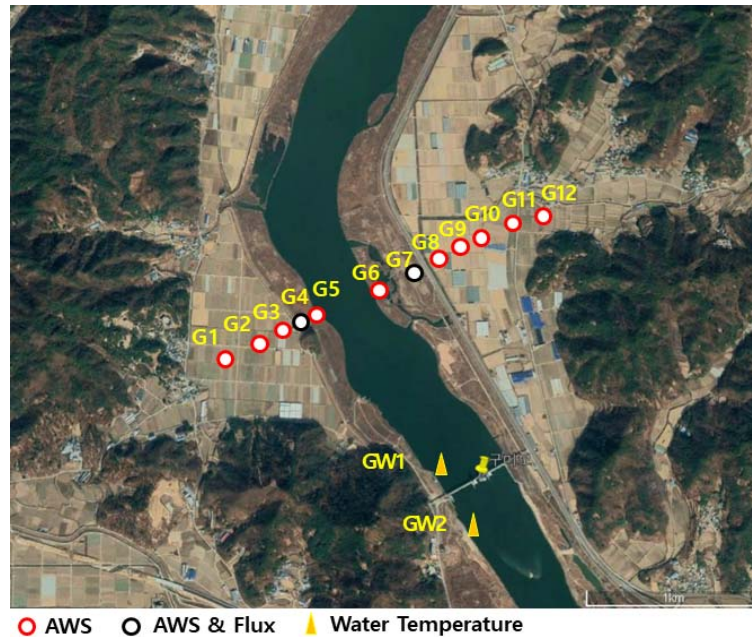


Fig. 1. Locations of meteorological observation system around Gumi Reservoir of Nakdong River.

하여 구미보 지역의 안개 발생을 모의하고 다양한 시정 산출 방식을 비교하여, 구미보처럼 주변에 물이 있는 환경의 한반도 내륙안개 예측에 타당한 시정 예측 방안을 제시하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 관측 자료

구미보는 남쪽에 있는 구미 시내와 대략 20 km 정도 떨어진 지점에 있으며 북에서 남으로 흐르는 낙동강을 기준으로 왼쪽으로 감장산(806 m)과 다봉산(332 m), 금오산(977 m)이 있고, 오른쪽으로 청화산(701 m), 냉산(693 m), 배틀산(369 m)이 비교적 완만하게 이어진 지리적 조건을 가진다. 국립기상연구소에서 낙동강의 좌우를 기준으로 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS), 시정계, 수온측정계, 지표 플럭스 측정장비를 설치해 운영하였다. Fig. 1은 구미보 주변에 있는 기상관측 지점(G1 ~ G12)과 수온관측 지점(GW1, GW2) 위치를 나타낸 것이다. AWS 장비는 기온, 상대습도, 풍향, 풍속을 측정하는 멀티센서(Vaisala 사의

WXT-520), Flux 지점(G4, G7)에는 순복사, 3차원 풍향, 지중 열플럭스, 보조토양 수분과 보조토양 온도를 측정하기 위한 센서들이 설치되었다. 12개의 지면 관측지점 중 특히 G3, G4, G7, G8 지점에 Biral사의 SWS-200 시정계가 설치되어 있어 이 지점들을 중심으로 분석하였다. 본 연구에서는 2013년 4월부터 2015년 3월까지 관측된 자료를 활용하였다. 그리고 관측 기간 중 센서의 이전과 배터리 부족으로 인해 일부 데이터 손실이 발생하였는데 자료의 분석은 한 달 기준으로 80% 이상 보존되는 자료를 기반으로 수행하였다.

### 2.2. 연구방법

Park et al.(2015)은 낙동강에 있는 강정고령보 주변에서 발생하는 안개를 유형별로 분류하였고, 가을철에 주로 증기안개 형태로 나타난다고 하였다. 하지만 모든 물이 있는 환경에서의 수온 자료를 얻을 수 없어 분류 알고리즘에 기온과 수온을 비교하는 조건을 배제하였다. 본 연구에서는, 구미보에서 발생하는 안개 분류를 위해 Lee and Suh(2011)의 활승무와 증기무 조건을 제외한 분류 알고리즘을 사용하였다. Fig. 2와 같이 안개 생성

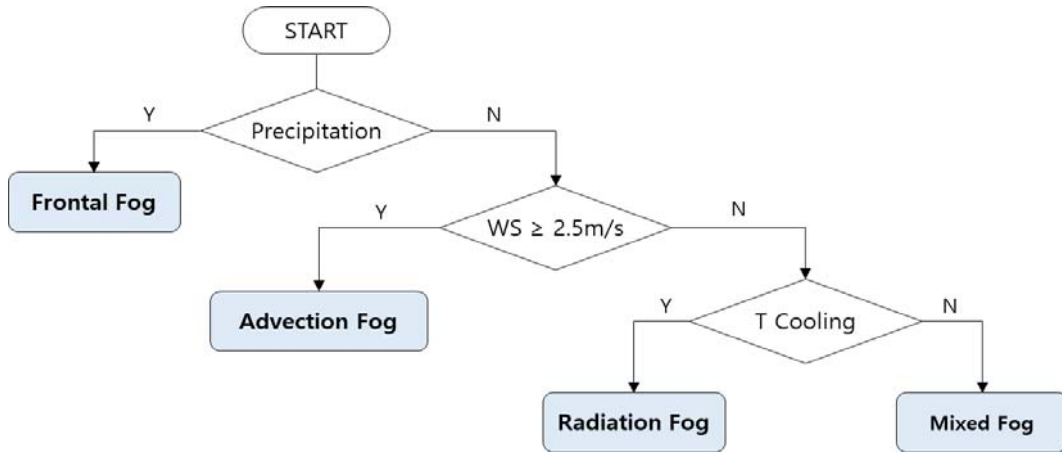


Fig. 2. Flowchart diagram illustrating the fog type classification algorithm.

전 강수의 영향, 수증기를 동반한 바람의 이류 효과, 기온 하강을 근거로 전선 안개, 이류안개, 복사 안개, 그리고 안개 생성 메커니즘을 명확히 규정할 수 없는 경우를 혼합 안개로 구분하였다. Lee and Suh(2011)의 알고리즘은 Tardif(2007)의 안개 분류 알고리즘을 기반으로 간략하게 만든 것이다. 이 분류 알고리즘은 안개 발생 3시간 전 풍속이 2.5 m/s 이상인 경우에는 복사 안개가 생성되지 못함을 가정하고 있고 운량은 활용도가 떨어져 분류 기준으로 사용하지 않는 것이 특징이다.

본 연구에 사용한 기상모델은 Weather Research and Forecasting(WRF, ver. 3.9.1.1)로서 미국 국립 기상연구구소 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발되어 3차원 기상예측 모델로 사용하고 있다. 수치 모델 설정은 Fig. 3과 같이 3개의 도메인으로 구성하였고, 첫 번째 도메인은 수평해상도 9 km(171×171, D1), 두 번째 도메인은 수평해상도 3 km(178×172, D2), 그리고 고해상도 기상환경 분석을 위하여 3번째 도메인의 수평 해상도는 1 km(100×100, D3)로 설정하였다. 입력 자료는 1° × 1° 해상도의 final operational global analysis(FNL) 자료를 초기 입력 자료로 사용하였다. 모델에 사용된 물리 옵션은 Table 1에 나열하였다.

대기 모형에서 구름을 포함한 강수 과정은 미세구름 물리 모수화와 적운 모수화 과정으로 설명된다. 연구에 사용한 기상모델의 수평 격자가 대기 중에서 형성된 구

름의 수평격자보다 클 때 구름을 포함한 강수 과정은 아 격자 규모의 과정에서 다루어지며 적운 모수화 과정에 의해 모수화된다. 반면 대기 모형에서의 수평 격자가 대기 중의 구름 수평 크기보다 작을 경우 구름과 강수 과정은 격자 분해 과정에서 다루어지며 미세 구름물리 과정에 의해 모수화된다. 안개는 특수한 지형을 제외하고는 수평 규모가 1 km 보다는 큰 경우가 많기 때문에 미세 물리 과정이 중요하게 다루어진다(Lim, 2019).

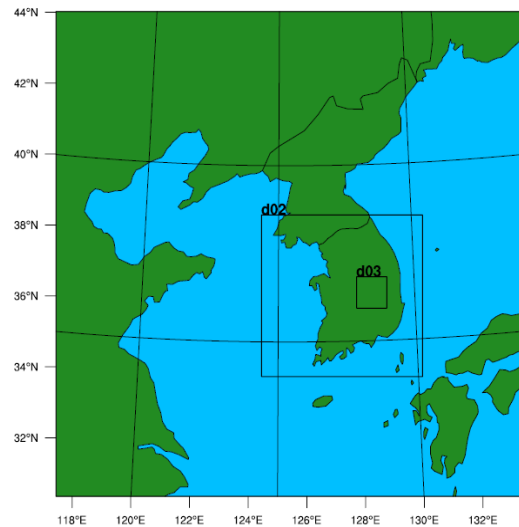


Fig. 3. Domains for the numerical simulation.

**Table 1.** Summary of modeling setup

| Category                         | WRF v.3.9.1.1  |
|----------------------------------|--|
| Horizontal Resolution            | 9 km, 3 km, 1 km   |
| Vertical Layers                  | 30   |
| Initial Field                    | NCEP (national center for environmental prediction) FNL (final operational global analysis) data |
| Radiation Process                | RRTM (rapid radiative transfer model)  |
| Microphysics                     | WDM6 (WRF double moment 6 class)   |
| Surface Physics                  | Unified Noah land surface model  |
| Planetary Boundary Layer Process | MYNN (Mellor-Yamada Nakanish Niino)  |

본 연구에서 모델결과와 관측자료의 정확도 분석을 위한 통계자료 Root Mean Square Error (RMSE), Mean Bias (MB), Index Of Agreement(IOA) 계산식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}$$

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

각 식에서 n은 자료 개수, M은 모델값, O는 관측값,  $\bar{O}$ 는 관측 평균값을 의미한다. RMSE와 MB는 관측과 모델값의 편향과 오차를 나타내고 0에 가까울수록 이상적인 값이다. IOA는 관측과 모델 결과값의 일치도를 나타내고 1에 가까울수록 이상적인 값을 의미한다.

### 2.3. 시정 계산

시정은 총 6가지 시정계산 방식을 이용하여 구하였다. 첫 번째 방식인 Stoelinga and Warner method(SW99)는 시정 계산에 액상 구름(Cloud Water, CW), 얼음 구름(Cloud Ice, CI), 빗방울(rain, RW) 그리고 눈(snow, SN)의 질량 농도를 이용해서 구한 소광 계수를 기반으로 시정을 계산하는 방식이다(Stoelinga and Warner, 1999).

Rapid Update Cycle (RUC) 방식은 rapid update cycle 모델에서 사용하는 방식으로 지표의 시정을 구할 때 상대습도[%]만 이용하여 구하는 방식이다. RUC 방식은 여러 상이 혼합된 구름의 미세물리 scheme과 토양, 식생, 눈과 관련된 지표 모수화 과정에 의해 진단된 물리 모수화 과정이 중요하게 다루어진다(Benjamin et al., 2004).

Forecast System Laboratory (FSL) 방식은 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 기상예보 실험(Forecast System Laboratory, FSL)에서 개발한 방식으로 상대습도[%]와 기온[°C]과 이슬점[°C] 차이를 이용해 지표 시정을 구하여 항공과 악기상과 관련해서 주로 이용되었다. FSL 방식은 초기의 시정 감소는 잘 모의하나 물 위에서 시정 감소를 과대 모의하는 경향이 있다. 이것은 Penn state university 및 National atmospheric research center의 Mesoscale Model (MM5)에서 수분과 관련한 편차와 관련되어 있다(Knapp, 1996).

Decision Tree (DT) 방식은 가을과 겨울철 안개 안정도 지수(fog stability index, FOGSI)를 이용하여 2년간의 안개 데이터를 기반으로 회귀 분석을 하여 도출한 식으로 안개 발생 시의 시정을 구하는 방식이다. 하층의 역전층이 있을 때 여러 기상 상황을 고려한 결정 나무(decision tree)를 이용하여 시정을 구하는 방식이다(Wantuch, 2001).

Bang et al.(2008)은 SW99와 FSL을 결합한 시정 계산 방식을 제안하였고 Revised Visibility (RVIS) 방식

이라 하였다. RVIS는 SW99와 FSL을 결합한 시정계산 방식을 개정한 시정계산 방식인데 식에서 계수  $\alpha$ ,  $\delta$ 는 지역과 시간에 따른 변동성을 가지는 값으로 관측 시정과 계산을 통해 도출한 시정인 SW99, FSL 시정값을 이용해 조화 분석을 이용해 통계적으로 도출한 상수이다.

Gultepe et al.(2006)이 제안하는 시정 계산 방식은 물방울 수농도( $N_d$ )와 물방울 혼합비(LWC)와 시정의 관계를 연구해 오던 것을 개량시킨 것이다. Gultepe et al.(2006)은 미세물리에서 물방울 혼합비 값이 고정될 때 물방울 수농도의 값은 0 부터 100  $\text{cm}^{-3}$  단위까지 변할 수 있다고 제안하였다. 그리고 시정은 물방울 수농도와 물방울 혼합비의 함수라고 하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. 구미보 안개 특징

2013년 4월 ~ 2015년 3월 관측 기간 중 강수 현상이 나타나지 않았고 최소 한 시간 이상 지속된 안개의 발생 빈도와 생성과 소산시간 그리고 안개 유형을 분류하여 Fig. 4에 나타냈다. 해당 연도 안개의 발생 일수를 월별로 분석한 것을 보면 구미보에서는 13년도 1 ~ 3월의 결측 기간을 제외하고 60회의 안개가 발생했고 그중 9, 10, 11월에 38번 안개가 발생하였다. 14년은 1월과 2월의 결측 기간을 제외하고 총 16회의 안개가 발생하였고 그중에서 9, 10, 11월에 11번의 안개가 발생한 것을 보면 수온과 기온의 차이가 가장 큰 계절인 가을에 수증기의 증발이 활발하게 나타나면서 따뜻한 수면과 접하는 공기 하부의 온도가 높아져 불안정해지면서 안개가 집중적으로 발생한 것을 확인할 수 있다(Fig. 4a, 4b). 이것은 Kim et al.(2016)의 연구 결과와 일치한다.

Fig. 4c, 4d의 안개의 생성 시각(실선)과 소산 시각(점선)을 보면 안개는 오전 10시 이후에는 거의 발생하지 않았으며 대부분 4 ~ 10시 사이에 소산 되어 새벽 시간에 대부분의 안개가 발생하였다.

안개 유형은 2013년에 이류 안개가 6월에 2회 발생한 것 이외에는 복사안개와 혼합안개가 대부분을 차지하였다. Park et al.(2017)은 기온이 지표 온도보다 낮을 때 이슬점 온도 상승률이 기온상승률보다 큰 경우를 증기안개라고 하였고, 해당 기간 중 가을과 겨울 안개 발생 빈도 중 약 80%가 증기안개라고 하였다. 본 연구에서는 이러

한 증기안개가 혼합 안개로 분류되었다.

#### 3.2. 수치모의 결과

WRF 모델을 이용한 수치모의 사례일은 강수가 없고, 구미보에서 대부분의 안개가 발생하는 9 ~ 11월 중에서 복사안개와 혼합안개가 모두 포함되고, 안개 발달이 뚜렷하게 나타날 수 있을 만큼 지속시간이 가장 길었던 사례가 있는 2013년 10월 12일부터 16일로 설정하였다. 사례일 중 15일 22시 ~ 16일 07시 동안 결측이 있었고 사례일 동안 안개는 3차례 발생하였다. 첫 번째 안개 사례는 복사안개로 분류되었고 최소 관측시정은 140 m 이었고, 10월 14일 06 ~ 08시까지 3시간 동안 지속되었다. 두 번째 안개 사례도 복사안개로 분류되었고 10월 15일 01 ~ 08시까지 8시간 동안 안개가 지속되었다. 05시에 시정이 가장 작은 값이 관측되었는데 이 때 관측시정은 96 m 이었다, 세 번째 안개 사례는 최소 관측시정 142 m 의 혼합 안개로 분류되었고 10월 17일 03 ~ 05시까지 3 시간 동안 안개가 지속되었다. 수치모의 결과 분석에 앞서 수치모의 결과의 정확도를 알아보기 위해 2 m 높이의 기온, 2 m 높이 상대습도, 10 m 높이 풍속의 관측값(검정색 점선)과 수치 모의 계산결과(빨간색 실선)를 Fig. 5에 나타내고, 이 값들의 통계값을 비교하였다. 관측과 수치모의 결과를 비교하여, 기온, 풍속, 상대습도의 통계값을 살펴보면 기온은 RMSE 2.05°C, MB -0.01°C, IOA 0.95이고, 풍속은 RMSE 2.11 m/s, MB 0.40 m/s, IOA 0.47이고, 상대습도는 RMSE 15.61%, MB -7.58%, IOA 0.76이다. 따라서 온도와 상대습도는 관측값과 모의 결과의 오차가 작고 시간 변동성에 있어 잘 일치하는 결과를 보였으며, 풍속의 경우 온도와 상대습도에 비해 상대적으로 정확도가 낮았다.

수치모의 사례일 중에 발생한 3번의 안개 중 안개 지속시간이 가장 길고, 시정은 최소인 안개 사례에 대해 모델 결과와 기상관측 값들을 분석하였다. 2013년 10월 15일 새벽의 시정값과 강과 가장 가까운 관측 지점(G5, G6)과 강에서 가장 먼 관측 지점(G1, G12)의 온도와 시정, 풍속, 풍향을 나타낸 Fig. 6을 보면 수치모의 한 온도장(Fig. 7)과 바람장(Fig. 8)과 비슷함을 알 수 있다. Fig. 6a의 선으로 표시된 기온을 보면 강 좌측에 있는 G5 지점은 G1 지점의 기온과 비교했을 때 기온이 확연하게 높지 않지만 강 우측에 있는 G6과 G12 지점의 기온과

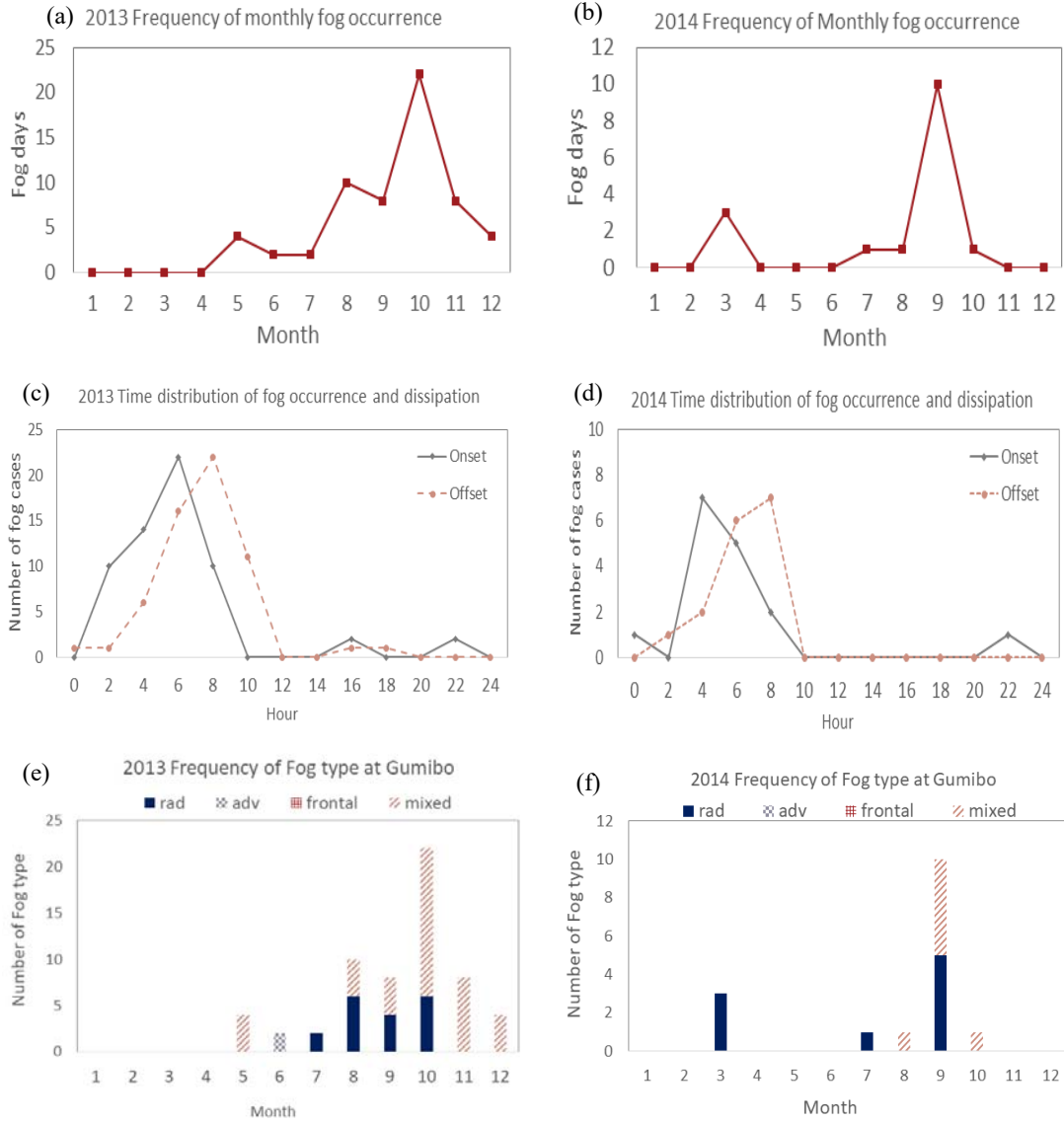


Fig. 4. Frequency(a, b) and time distribution(c, d) of no rain fog and fog type(e, f) during recent 2 years.

비교해 보면 G12 지점보다 강과 가까운 G6 지점의 기온이 더 높게 관측되었다. 자정을 기준으로 시간이 지남에 따라 조금씩 기온이 냉각되었다. Fig. 6b와 Fig. 6c의 선으로 표시된 풍속과 점으로 표시된 풍향 자료를 보면 안개가 발생하는 15일 01 LST부터 08 LST까지는 풍속이 2 m/s 보다 약하게 지속되다가 풍속이 빨라지면서 안개

가 소산되는 시점이 시정이 높아지는 지점과 일치하였다. 풍향은 강 좌측(Fig. 6b)에서는 대체로 북서풍의 바람이 불다가 아침이 되면서 북동풍으로 바뀌었고, 강 우측(Fig. 6c)에서는 북풍과 북동풍 위주로 바람이 불면서 강을 중심으로 산풍이 불어 수렴하였다. 즉, 야간동안 산자락에서의 복사냉각에 의해 온도가 내려간 공기가 산의

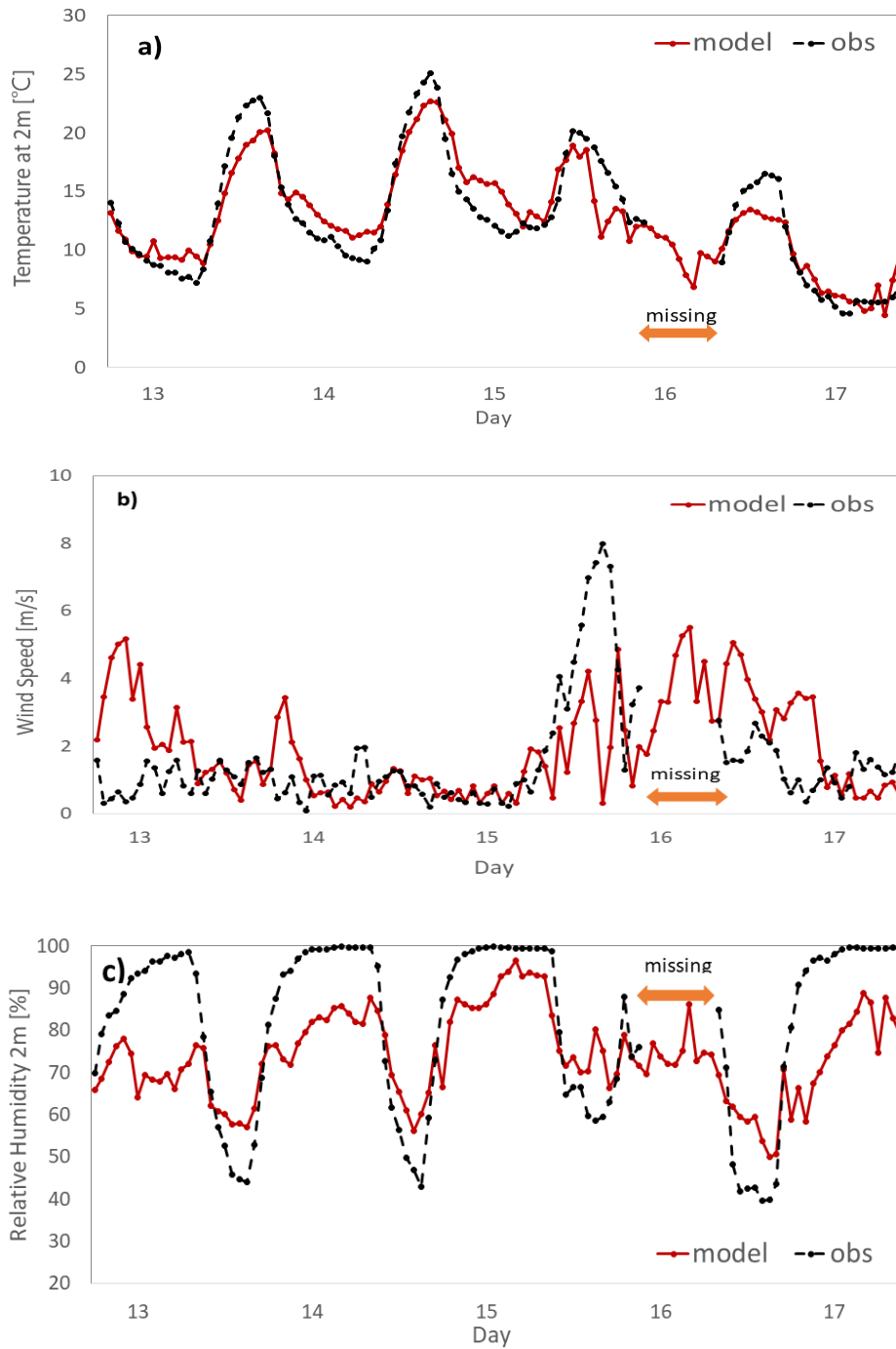
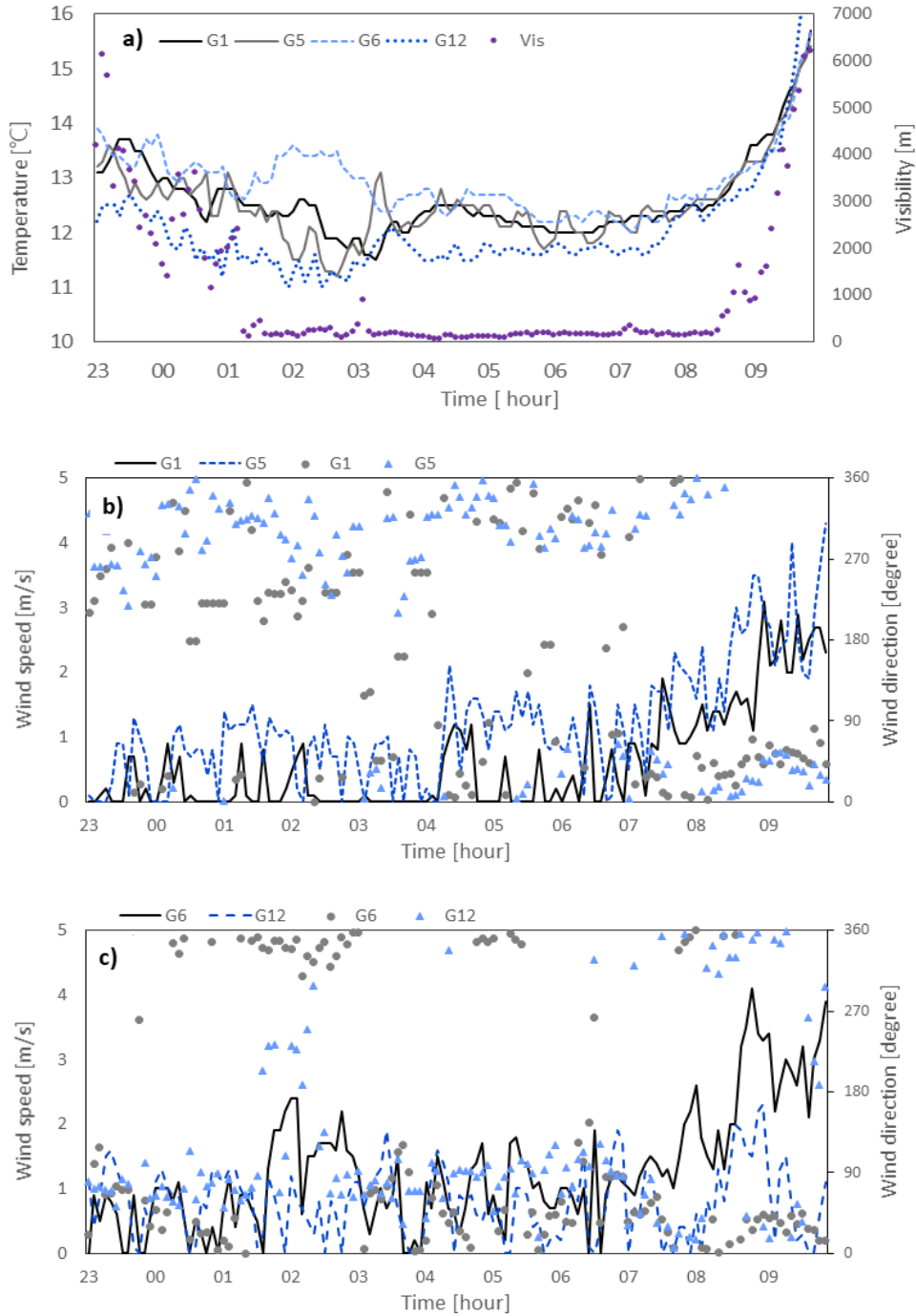
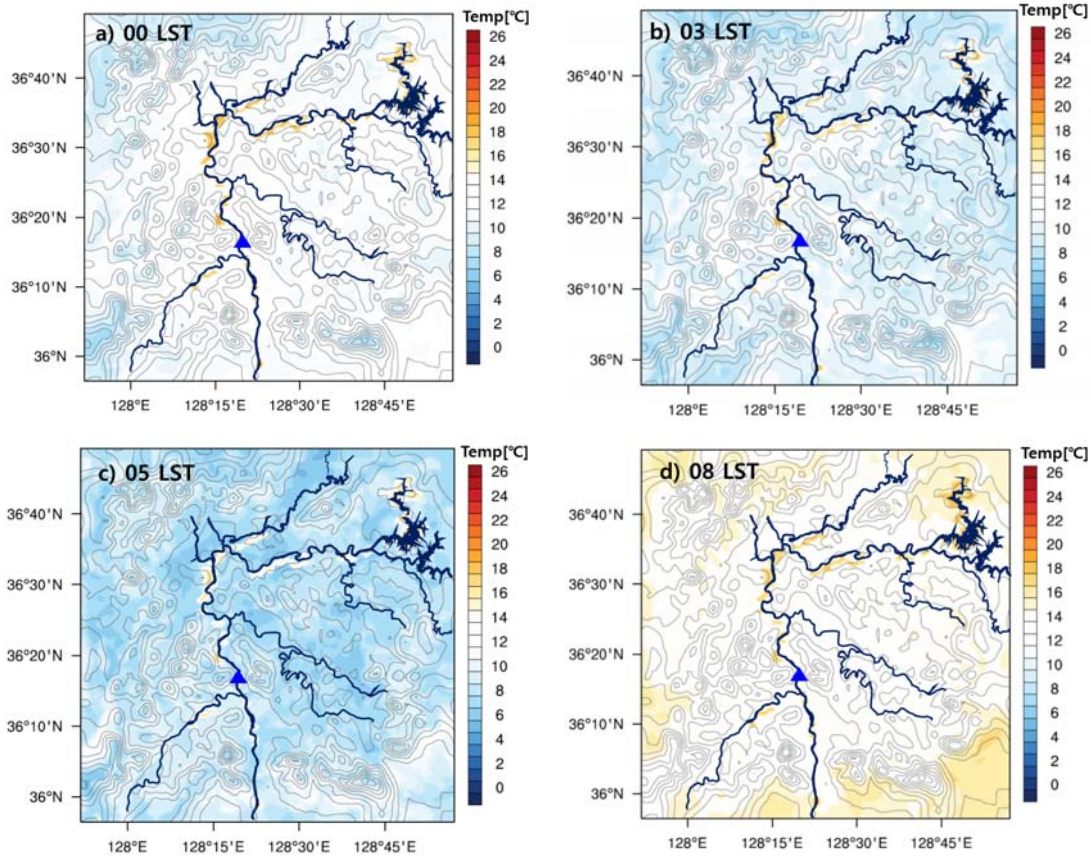


Fig. 5. Time series of (a) temperature, (b) relative humidity and (c) wind speed measured and simulated at Gumi Reservoir G3 point for the fog case(October 12, 2013).





**Fig. 6.** Time series of (a) temperature measured at G1, G5, G6 and G12 point and visibility at G3 point, (b) wind speed and direction measured at G1 and G5 point, (c) wind speed and wind direction measured at G6 and G12 point for the fog case(from 2300 LST October 14 to 0900 LST October 15, 2013).



**Fig. 7.** Horizontal distribution of temperature at 2m(color-code) overplotted with topography, simulated on October 2013 (a) 0000 LST, (b) 0300 LST, (c) 0500 LST and (d) 0800 LST (blue triangle : Gumi Reservoir, bold line: Nakdong River).

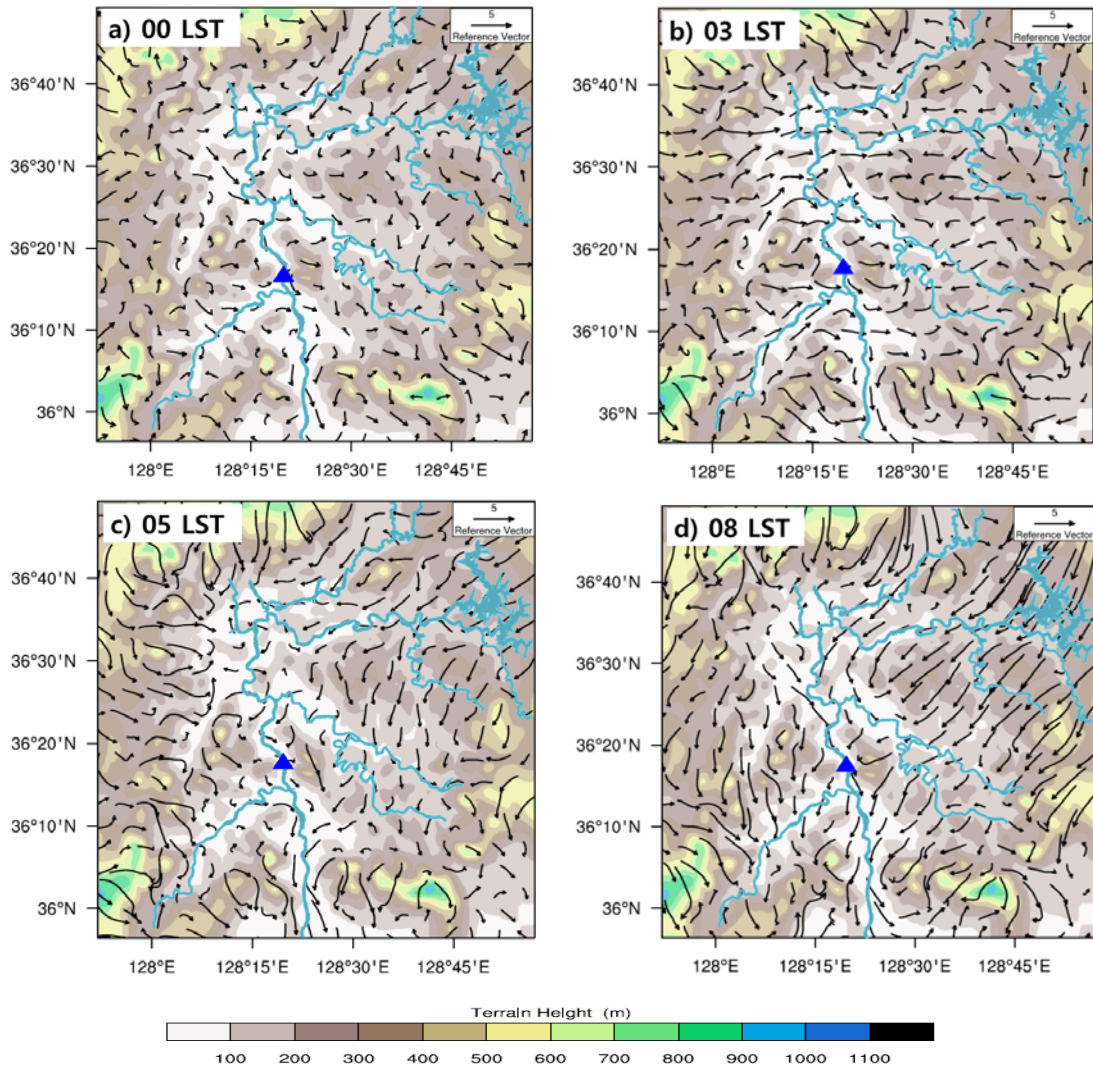
경사면을 따라 강으로 내려오는 것으로서 이는 Kim et al.(2016)의 연구 결과와 일치한다.

Fig. 7, 8은 01 LST부터 08시까지 8시간 동안 안개가 발생한 2013년 10월 15일의 바람과 기온의 모의 결과수평장을 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 지형을 알아보기 위한 등고선과 온도장, 바람 벡터, 관측지점, 강이 표시되어 있다. 10월 15일 야간에 발생한 안개 사례는 복사안개로 분류되었지만 낙동강 표면에서 증발한 수증기의 영향을 받는 것을 모의 결과에서 확인할 수 있다. 안개가 발생하기 1시간 전인 15일 00 LST에는 강이 위치한 지점을 따라 기온이 주변보다 온도가 높음으로 인해(Fig. 7a) 강에서 증발이 원활하게 일어나면서 공기중으로 수증기가 공급되고, 시간이 지날수록 도메인 내에서 복사 냉각에 의

해 온도가 더 낮아졌다(Fig. 7b). 그러나 북서와 북동풍이 불어 강을 중심으로 수렴하는 관측과는 달리 풍향 모의 결과는 서풍이 약하게 불어 수렴기류는 나타나지 않았다(Fig. 8a, b). 관측 시정은 새벽 5시에 가장 작은 값이 나타났고, 수치모의에서는 5시에 강의 동쪽에서 야간 복사 냉각으로 생성된 냉기류의 유입이 늘어났다(Fig. 7c, 8c). 이로 인해 추가적인 가습과 가열을 받아 증발-혼합의 메커니즘으로 안개가 짙어지게 되고 일출 후 지표 기온이 상승하고 북서풍의 강한 유입으로 풍속이 증가하며 안개가 소산된 것으로 판단된다(Fig. 7d, 8d).

### 3.3. 시정 분석

수치 모의 결과를 이용하여 Table 2에 정리한 각각의

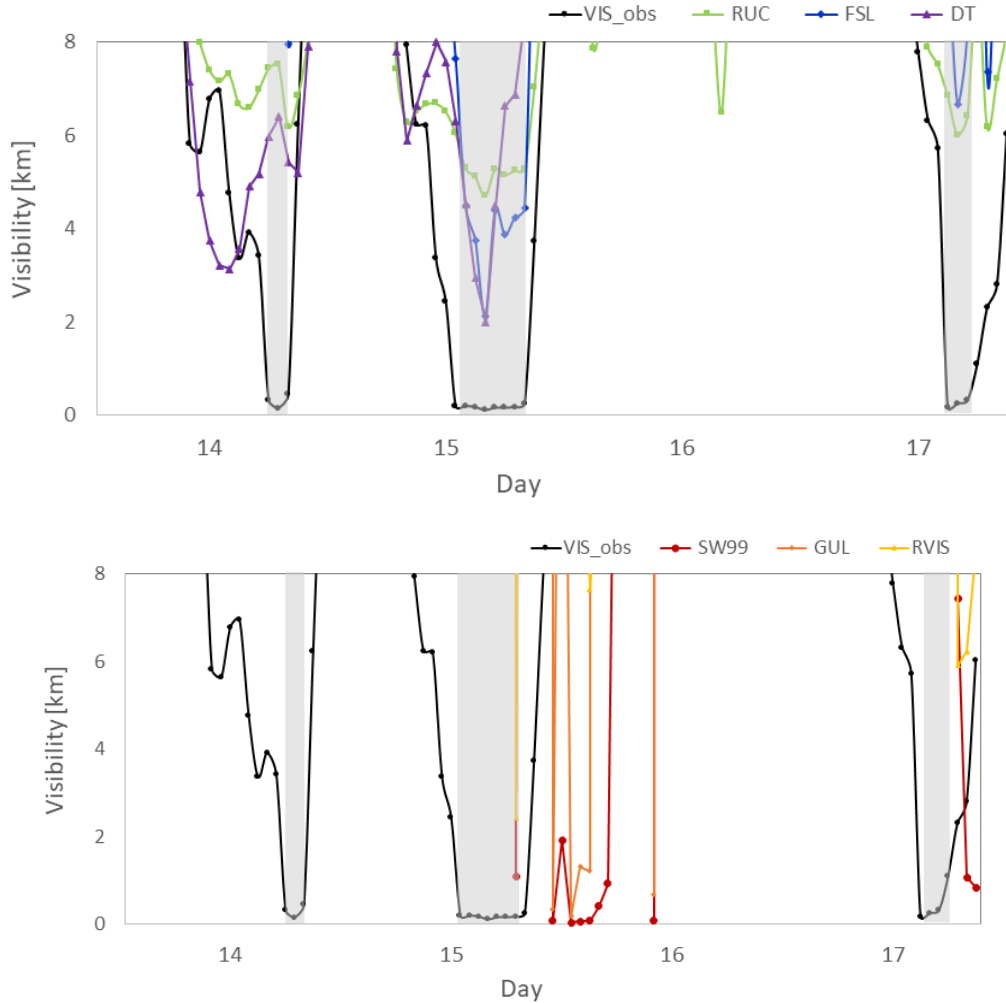


**Fig. 8.** Horizontal distribution of terrain height(color-code) and 10m wind vector, simulated on October 2013 (a) 0000 LST, (b) 0300 LST, (c) 0500 LST and (d) 0800 LST (blue triangle : Gumi Reservoir, bold line: Nakdong River).

시정 식을 구미보의 사례에 적용해 보았다. 시정 산출식은 기본적인 기상 변수인 기온, 상대습도, 풍속 자료를 이용하는 RUC, DT, FSL 그룹과 수증기 관련 변수를 이용하는 SW99, RVIS, Gulpepe\_06 그룹으로 나누어 Fig. 9에 관측 시정과 비교하여 시계열로 나타냈다. 수치모의 결과를 이용해서 구한 시정 값이 실제 안개의 기준이 되는 1 km 미만인 되는 시점과 관측 시정값이 1 km 미만이 되는 시점간에는 시간 차이가 존재하는데 이것을 시

간 지연이라고 한다. 실제 안개 발생 시점보다 수치모의 결과 안개라고 판별되는 시점이 실제와 같거나 조금 더 늦게 나타난다.

시정 결과를 살펴보면 SW99 방식은 해당 지점에서 2번째, 3번째 안개를 포착하였으나, 낙동강을 따라 안개가 공간적으로 연속적으로는 발생하지 않는 한계가 있었다. 이는 수치 모델에서 강폭이 수평 해상도보다 작아 모델에서 강으로 모의 되지 않은 지점들에서 수증기 증발이



**Fig. 9.** Time series of visibility observed and calculated by six methods at G3 point(Grey shaded area: observed fog times).

적게 반영된 것으로 보인다. 그리고 지역마다 미세물리 정보가 부족하여 구름방울 모의 차이가 발생한 것이 오차를 일으켜 첫 번째 안개를 모의하지 못하였다. 두 번째 안개모의는 6시간 지연이 발생했고 최소 시정 400 m, 세 번째 안개는 4시간 지연이 발생했고 최소 시정은 830 m로 모의 되었다.

상대습도만 이용하는 RUC 방식은 1 km 이하의 시정을 도출하지는 못했지만 3번의 안개 사례 모두 유사한 패턴으로 모의하였다. 상대습도만 이용하는 방식이라 일반

적으로 나타나는 시간 지연이 보이지 않고, 야간 시간 동안 관측기온보다 모델상의 기온이 과대 모의되어 상대습도가 관측값보다 작아져 사례별 최소 시정은 각각 6.18 km, 5.11 km, 6.00 km로 다소 크게 나타났다. 결론적으로 RUC 방식은 내륙지역에서 야간에 발생하는 안개를 모의하기에는 적절하지 않다고 판단된다.

기온과 이슬점, 상대습도를 이용하는 FSL 방식으로 구한 시정은 두 번째 안개 사례와 세 번째 안개 사례에서 안개 발생시각을 기준으로 2~3시간의 시간지연이 발생

**Table 2.** Summary of equations used for calculating visibility

| Name       | Equations   |
|------------|---|
| SW99       | $VIS[km] = \frac{-\ln(0.02)}{\beta}, \beta = \beta_{cw} + \beta_{rw} + \beta_{ci} + \beta_{sn}$ |
| RUC        | $VIS[km] = 60 \times \exp[-2.5 \times \frac{(RH-15)}{80}]$                                      |
| FSL        | $VIS[km] = 6000 \times 1.609 \times \frac{T - T_d}{RH^{1.75}}$                                  |
| DT         | $VIS[km] = -1.33 + 0.45 \times FOGSI, FOGSI = 2( T_2 - T_{850}  + (T_2 - T_{850}) - WS_{850})$  |
| RVIS       | $VIS[km] = \alpha \times SW99 + \delta \times (T - T_d) / RH^{1.75}$                            |
| Gultepe_06 | $VIS[km] = \frac{1.002}{(LWC \times N_d)^{0.6473}}$   |

**Table 3.** Relationships between the mass concentration(C, gm<sup>-3</sup>) and the extinction coefficient(β, km<sup>-1</sup>) in the Stoelinga and Warner (1999) scheme

| Hydrometeor             | Relationship                 |
|-------------------------|------------------------------|
| Cloud liquid water, fog | $\beta_{cw} = 144.7C^{0.88}$ |
| Rain                    | $\beta_{rw} = 1.1C^{0.75}$   |
| Cloud ice               | $\beta_{ci} = 163.9C^{4.00}$ |
| Snow                    | $\beta_{sn} = 10.4C^{0.78}$  |

했다. 최소 시정은 7.96 km, 2.13 km, 6.66 km로 안개가 길게 지속되는 두 번째 안개 사례에서 RUC 방식으로 구한 시정인 5.11 km 보다 관측시정에 더욱 가깝게 계산되었다. FSL 방식은 상대습도가 시정 계산식의 분모에 들어가는데 야간 시간동안 과소 모의된 상대습도의 영향으로 시정이 큰 값으로 도출되었다.

지표와 850 hPa 높이의 기상자료를 활용한 안개지수를 이용하는 DT 방식으로 구한 시정은 세 번째 안개는 잘 모의하지 못했지만 첫 번째 안개와 두 번째 안개는 비교적 잘 모의하였다. 첫 번째 안개는 시간지연이 나타나는 SW99의 시정과 달리 오히려 3.13 km의 최소 시정이 나타나는 시각이 관측 기준보다 5시간 일찍 나타났다. 두 번째 안개 사례에서는 최소 시정이 1.99 km로 수분과 관련된 변수를 다루지 않는 시정 계산 방식 중에서는 가장 관측 시정과 근접한 값이 산출되었다. DT 방식은 수치모의 결과 중 정확도가 가장 높은 변수인 기온을 기반으로 시정을 구하기 때문에 수증기 관련 계산량을 줄이고 빠르게 결과를 얻고 싶을 때 이용하면 가장 실제 시정 값에

가까운 값을 얻을 수 있는 방식으로 판단된다.

Bang et al.(2007)에서 제안한 RVIS 방식은 기존의 시정 계산식을 결합하여 제안하는 방식이다. RVIS는 소광계수를 이용하는 SW99와 기온과 이슬점온도, 상대습도를 이용하는 FSL이 결합된 형태인데 조화함수를 이용해 두 가지 시정이 모두 반영하는 결과를 도출할 수 있다. 그 결과 RVIS 방식으로 구한 시정은 SW99와 FSL 방식으로 얻는 시정 패턴 시간대가 달라 동시에 시정이 작은 구간이 나타나지 않아 전반적으로 큰 값의 시정을 구해진다. 따라서, 첫 번째 안개는 모의하지 못하고 두 번째 안개는 아주 짧은 시간 동안만 안개가 지속되는 결과를 구했고, 최소 시정은 2.44 km의 값을 얻었다. 세 번째 안개의 최소 시정 또한 6.23 km의 값으로 큰 값의 시정이 산출되었다.

마지막으로 Gultepe et al.(2006)의 방식은 물방울 구름의 밀도와 수농도를 반영하여 구하는 값인데 미세물리의 한계로 인해 두 번째 안개만 모의하였다. 수증기, 빗방울, 액체 구름방울, 우박, 눈의 수상 중에서 액체 구름방울만

고려대상으로 삼기 때문에 3번째 도메인에서 일부 영역에서만 액체 구름방울이 모의되었기 때문이다. 그리고 두 번째 안개 사례에서 실제 안개 발생 시각과 도출한 시정값을 기준으로 구한 안개 발생 시각에 10시간의 차이가 발생하였다. 하지만 최소 시정은 170 m로 관측시정 최소값인 96 m와 가장 가까운 값이 표출되었다. 결론적으로 Gultepe의 방식은 모델상에서 다루는 미세물리가 개선되면 더 높은 정확도의 시정을 얻을 수 있음을 시사한다. 더불어 내륙지역의 국지적인 영역에서 발생하는 안개보다는 해안과 같은 넓은 지역에서 충분한 수증기가 있을 때의 사례에 적용하면 안개 발생 시각도 잘 예측할 수 있을 것으로 보인다.

#### 4. 결론

구미보 지역의 2013년 04월 ~ 2015년 03월의 집중 기상 관측자료와 기상모델을 이용하여 시정 예측에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과 구미보 지역의 안개는 주로 9월에서 11월인 가을에 집중적으로 발생하고 안개의 유형은 복사안개와 혼합안개로 분석하였다. 강수와 복사냉각, 풍속 이외에도 강에서 발생하는 수증기와 주변 산악 지형에서 부는 산풍이 복합적으로 작용하여 복사안개와 혼합안개 빈도가 높게 나타나는 것으로 추정된다.

안개를 예측하기 위하여 3차원 대기 역학 모형인 WRF를 이용하여 시정 예측에 필요한 기상 요소를 산출하여 6개의 서로 다른 시정 산출식을 적용하여 한반도 내륙지역에 위치하는 구미보의 시정 예측 정확도를 분석하였다. 수치 모델의 기상요소의 예측 정확도를 보면 기온의 정확도가 가장 높고 다음으로 상대습도, 풍속의 순서로 정확도가 상대적으로 낮았다. 이는 모델상의 토지이용도의 해상도 문제로 인해 모델에서 야간의 기온 과대 모의가 상대습도를 과소 모의하는 것과 강이 부분적으로 모의되어 수증기 증발이 적게 나타났기 때문으로 판단된다. 그리고 강의 좌우로 존재하는 산악 지형으로 인해 종관풍과 국지풍이 섞여 풍계가 복잡하게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

수치 모의 기간 중에서 가장 긴 안개가 발생한 10월 15일 기온과 풍향 풍속 모의 결과와 관측 기온과 풍향 풍속을 비교해보면 자정 이후 낙동강 주변은 복사냉각에 의해 기온이 하강하고 상대적으로 비열이 높은 강은 기

온보다 온도가 높아 증발이 나타나기에 유리한 조건을 가지고 있음이 관측과 모델에서 동일하게 나타난다. 안개가 지속되는 동안 풍속이 2~3 m/s 이하로 약하게 부는 것과 달리 관측 자료에서 강을 중심으로 수렴하지만 모델 결과에서는 수렴기류는 나타나지 않았다. 이후 안개가 소산될 때 복사풍이 강하게 유입되는 점은 관측과 모델 모두 일치하는 결과가 나타났다.

시정 도출 결과 수분 관련 직접적인 변수를 사용하지 않는 시정 계산 방식 중에서는 DT 방식으로 구한 시정이 안개가 발생했을 때의 관측 시정과 가장 유사한 패턴으로 나타났으며, 미세 물리 계산 과정을 이용해서 도출한 LWC와  $N_d$  값을 이용하는 SW99 방식과 Gultepe 방식의 시정이 관측 시정과 가장 가까운 값으로 도출되었다. 하지만 미세물리 계산의 한계로 인해 부분적으로 구름 입자가 모의 되어 안개 발생 시각과 관련하여 시간 지연이 나타나는 문제점이 발생하였다.

추후 수치 모의의 수치 모델상에 제대로 반영되지 않았던 낙동강을 모델에 반영하기 위해 지형자료를 수정하고 해상도를 향상시켜 모델상에서 낙동강의 공간적 연속성을 구현하여, 수치모의의 결과를 향상 시킬 계획이다.

#### 감사의 글

본 연구는 부산대학교 교수 국외 장기 파견지원비에 의하여 연구되었습니다.

#### REFERENCES

- Akimoto, Y., Kusaka, H., 2015, A Climatological study of fog in Japan based on event data, *Atmos. Res.*, 11, 200-211.
- Back, S. J., Lee, K. O., Leem, H. H., Lee, H. W., 2007, Climatological analysis of fog occurrence at Chuncheon, *J. Environ. Sci.*, 16, 583-591.
- Bang, C. H., Lee, J. W., Hong, S. Y., 2008, Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24, 92-101.
- Benjamin, S. G., Dévényi, D., Weygandt, S. S., Brundage, K. J., Brown, J. M., Grell, G. A., Kim, D. S., Schwartz, B. E., Smirnova, T. G., Smith, T. L., Manikin, G. S., 2004, An Hourly assimilation - forecast cycle: The RUC. *Mon.*

- Weather Rev., 132, 495-518.
- Bergot, T., Terradellas, E., Cuxart, J., Mira, A., Liechti, O., Mueller, M., Nielsen, N. W., 2007, Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 46, 504-521.
- Bott, A., Trautmann, T., 2002, PAFOG—A new efficient forecast model of radiation fog and low-level stratiform clouds. *Atmos. Res.*, 64, 191-203.
- Cho, Y. K., Kim, M. O., Kim, B. C., 2000, Sea fog around the Korean peninsula, *J. Appl. Meteorol.*, 39, 2473-2479.
- Gultepe, I., Isaac, G. A., 1999, Scale effects on averaging of cloud droplet and aerosol number concentrations: observations and models, *J. Clim.*, 12, 1268-1279.
- Gultepe, I., Isaac, G. A., 2004, Microphysical parameterization for mixed phase clouds using in-situ observations. 14th International Conference on Clouds and Precipitation (ICCP), Bologna, Italy, WMO and Cosponsors, 1326-1329.
- Gultepe, I., Muller, M. D., Boybeyi, Z., 2006, A New visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 45, 1469-1480.
- Heo, K. Y., Ha, K. J., Mahrt, L., Shim, J. S., 2010, Comparison of advection and steam fogs: from direct observation over the sea, *Atmos. Res.*, 98, 426-437.
- Kim, H. D., Cho, C. B., Seo, K. S., 2016, Micro-meteorological characteristics during the steam fog over the Gumi reservoir of Nakdong river, *J. Environ. Sci. Int.*, 25, 405-415.
- Kim, J. S., Kim, J. H., Park, S. H., Kim, Y. C., 2013, The study of characteristics of Korea fog and forecast guidance, *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, 21, 68-73.
- Kim, W. H., Yum, S. S., 2015, Development and validation of the coupled system of Unified Model(UM) and PArmeterized FOG(PAFOG), *Atmos.*, 25, 149-154.
- Kim, W. H., Yum, S. S., Kim, C. K., 2019, Numerical simulation of sea fog over the Yellow sea: comparison between UM+PAFOG and WRF+PAFOG coupled systems, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 56, 89-105.
- Kim, Y. K., Kim, H., Seo, J. W., An, H. Y., Choi, Y. H., 2017, Meteorological analysis of the sea fog in winter season on Gyeonggi bay, Yellow sea: a case study for the 106-vehicle pileup on February 11, 2015. *J. Coast. Res.*, 79, 124-128.
- Knapp, D. I., 1996, Development of a surface visibility algorithm for worldwide use with mesoscale model output. In conference of weather analysis and forecasting, *Amer. Meteor. Soc.*, 15, 83-86.
- KoROAD, 2020, Statistical analysis of traffic accidents, Report, No. 2020-0202-006, Korea Road traffic authority, Wonju, Korea.
- Müller, M. D., 2006, Numerical simulation of fog and radiation in complex terrain: results from COST-722, Ph. D. Dissertation, University of Basel, Basel, Switzerland.
- Lee, K. M., Suh, M. S. 2011, A Study on the characteristics of fog and development of prediction technique in the Chung-Cheong area, *J. Climate Res.*, 6, 200-218.
- Lim, K. S. S., 2019, Bulk-type cloud microphysics parameterization in atmospheric models, *Atmos.*, 29, 227-239.
- Mun, S. H., Lee, S. H., 2013, A Study on the change of fog frequency and duration hours in South Korea, *J. Clim. Res. inst.*, 8(2), 93-104.
- Park, J. S., Lim, Y. K., Kim, K. R., Cho, C. B., Jang, J. Y., Kang, M. S., Kim, B. J., 2015, Atmospheric characteristics of fog incidents at the Nakdong river: Case study in Gangjeong-Goryung weir, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 657-670.
- Park, J. S., Kim, K. R., Kang, M. S., Kim, B. J., 2017, The influence of evaporation from a stream on fog events in the middle Nadong river, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 38, 395-404.
- Shim, H. N., Lee, Y. H., 2017, Influence of local wind on occurrence of fog at inland area, *Atmos.*, 27, 213-224.
- Stoelinga, M. T., Warner, T. T., 1999, Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 385-404.
- Tardif, R., 2007, The impact of vertical resolution in the explicit numerical forecasting of radiation fog: A case study, *Pure Appl. Geophys.*, 164, 1221-1240.
- Tardif, R., Rasmussen, M., 2007, Event-based climatology and typology of fog in the New York city region, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 46, 1141-1168.
- Thompson, G., R., Rasmussen, M., Manning, K., 2004, Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part I: description and sensitivity analysis. *Mon. Weather Rev.*, 132, 519-542.
- Wantuch, F., 2001, Visibility and fog forecasting based on

decision tree method, Idojárás, 105, 29-38.

WMO, 2018, Guide to instruments and methods of observation volume I -, measurements of meteorological variables, Report 8, ISBN 978-92-63-10008-5, World Meteorological Organization, Geneva, Swiss.

- 
- Doctor's course. Eun-Ji Kim  
Department of Earth Science, Pusan National University  
eunji1024@pusan.ac.kr

- 
- Doctor's course. Kang-Yeol Lee  
Department of Earth Environment System, Pusan National University  
kymode@pusan.ac.kr
  - Researcher. Chang-Hyoun Park  
Institute of Environmental Studies, Pusan National University  
chpark@live.com
  - Professor. Soon-Hwan Lee  
Department of Earth Science Education, Pusan National University  
withshlee@pusan.ac.kr