

ORIGINAL ARTICLE

## 낙동강 구미 보의 증기 안개 발생 시의 미기상학적 특성

김해동\* · 조창범<sup>1)</sup> · 서광수<sup>2)</sup>

계명대학교 지구환경학과, <sup>1)</sup>국립기상과학원 응용기상연구과, <sup>2)</sup>부산대학교 지구과학교육과

### Micro-meteorological Characteristics during the Steam Fog over the Gumi Reservoir of Nakdong River

Hae-Dong Kim\*, Chang-Bum Cho<sup>1)</sup>, Kwang-Su Seo<sup>2)</sup>

Department Of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

<sup>1)</sup>Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju 63568, Korea

<sup>2)</sup>Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

#### Abstract

We analyzed the micro-meteorological characteristics during typical steam fog over the Gumi Reservoir of Nakdong river with the field observation data for recent 2 year(1 April 2013~31 March 2015) collected by the national institute of meteorological research, KMA.

Steam fog occur when the cold drainage flows over the warm water surface. As the sensible and latent heat from water are provided to the air, the instability of lower atmosphere is increased. The resultant vertical mixing of warm, moist air near water surface and cold air aloft causes the formation of status cloud. The convection strengthened by radiative cooling of the upper part of the stratus causes the fog to propagate downward. Also, the temperature at the lowest atmosphere is increased rapidly and the inversion near surface disappear by these processes when the fog forms. The increase of wind speed is observed because the downward transportation of momentum is caused by vertical mixing.

**Key words** : Steam fog, Unstable atmosphere, Gumi reservoir, Vertical mixing process

#### 1. 서론

안개는 지면에 접해 있는 층운형의 구름이며, 기온이 이슬점까지 하강하거나 증발로 대기 중의 수증기량이 포화에 도달할 때 생성된다. 또 물리적 성질이 다른 두 공기의 혼합으로도 안개가 생성될 수 있다. 안개는 이들 요인 중에서 어느 하나의 원인으로 생성되는 경우는 거의 없고, 위에서 제시한 두 개 또는 세 개의 조건이 모두 관여하여 형성되는 경우가 많다. 그럼에도 불구하고 이들 안

개생성 요인 중에서 어느 것이 더 주로 작용하는가에 따라서 안개생성 유형을 분류한다. 그리고 어떤 유형의 안개이든 간에 기온이 이슬점과 같아지거나 근접하여 발생한다(Aguado and Burt, 2001). 이렇게 발생하는 안개의 분류는 기온과 노점온도의 변화 방향 및 강도에 따라서 이루어진다(Asakura et al., 1992).

강수로 지면이나 대기 중에서 많은 증발이 발생하거나 냉기류가 온난한 수면 위를 지날 때에 수면으로부터 강한 증발이 발생되는 경우가 후자에 속하는 전형적인

Received 9 November, 2015; Revised 7 March, 2016;

Accepted 8 March, 2016

\*Corresponding author : Hae-Dong Kim, Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea  
Phone : +82-53-580-5930  
E-mail : khd@kmu.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.

사례이다(Harami, 1969; Kim, 1997; Okawa, 2007). 성질이 다른 두개의 기단이 혼합하여 안개가 발생하더라도 애초에 수증기량이 적었던 기단은 수증기량이 증가한 것이 되므로 후자로 인한 안개발생으로 간주할 수 있다(Kodama, 1995). 이런 안개는 주로 야간에 고지대에서 복사냉각으로 냉각된 저온의 공기가 중력류의 형태로 저지대의 수면 위로 흘러 들어갈 때에 잘 관찰되는 것으로 증기 안개의 범주에 포함시켜 왔다(Aguado and Burt, 2001). 반면에 일본에서는 이렇게 발생하는 안개를 혼합무로 구별하여 부르고 있다(Sawai, 1993). 이 연구에서는 안개발생에 혼합과정이 우세하게 기여한 경우에도 증기 안개로 지칭하기로 한다.

Asakura et al.(1992)은 안개발생 시의 미기상학적 관측연구를 수행하여 안개의 발생에는 역전층의 존재가 중요한 역할을 한다고 지적한 바 있다. 관측이나 수치실험을 통한 안개 연구자들이 공통적으로 지적하고 있는 점은 안개의 발생은 먼저 역전층의 최하부에서 층운이 나타나고, 그 이후에 층운이 아래 방향으로 서서히 확대되어 안개로 된다는 사실이다(Kim, 1994, 1997; Asakura et al., 1992).

국내에서 수행된 안개발생 메커니즘과 예측방법을 다룬 주요한 안개 연구로 다음과 같은 사례를 들 수 있다. Choi(2001)는 연안지역에서 형성되는 안개는 일반적인 해무와 달리 해륙풍과 산곡풍과 같은 복잡한 중규모 순환에도 영향을 받는다는 사실을 보고하였다. 이러한 연안지역의 안개는 해상의 운송에서 매우 중요한 요인으로 연안지역의 대기 경계층의 복잡성에도 밀접한 관련이 있다. Choi and Lee(2003)는 데이터 마이닝 기법을 이용하여 공항 내 안개 예보에 적용하였으며, Bang et al.(2008)은 2003년부터 2006년까지 한반도 내 지역 공항에서 발생한 48개 안개 사례를 바탕으로 안개와 시정에 보를 위한 연구를 실시하였다. 이들은 3년간의 통계자료를 수치모형에 적용시켜, 안개의 예보가능성을 제시하였다. Yoo et al.(2005)은 인천 공항 내 지상관측자료를 이용하여 안개의 경계값을 산출하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 역전층이 형성될 때 안개를 탐지하지 못하는 단점이 있다.

Lee(2010)는 1997년부터 2008년까지 충청남북도 기상관청에서 관측한 자료를 바탕으로 지역 내 안개 발생 경향성을 분석하였는데, 다양한 통계기법을 적용하여 통

계적 안개 예측가능성을 평가하였다. 한편 KMA(2012)에서는 우포늪을 대상으로 관측기반의 겨울철 증기안개 발생 메커니즘 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서 우포늪에서 겨울철에 발생하는 안개의 약 20%가 증기안개에 해당한다는 결론을 얻고 있다. Park et al.(2015)는 낙동강 강정고령보 부근 수변지역에서 발생하는 안개의 발생 특징을 발생 유형별로 분석한 바 있다. 이 연구에서 그들은 강정고령보에서는 주로 가을철에 증기 안개의 형태로 나타나고, 일반적인 증기 안개보다 지속시간이 길게 나타나는 특징이 있다고 지적하였다.

이와 같이 우리나라에서 수행된 안개연구는 현장관측을 통한 안개발생 시의 미기상학 특성을 분석한 연구는 찾아보기가 어렵고, 기상관서에서 관측된 장기간의 기후 자료를 분석하는 연구에 치우쳐 있었다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 국립기상연구소에서 구미 보에 AWS(Automatic Weather System)와 시정계를 설치하여 얻은 기상 및 수온자료를 이용하여 안개의 발생 시의 미기상학적 특성을 분석해 보고자 한다. 특히 안개 발생의 대부분을 차지하는 가을철 이른 아침 시간에 발생하는 증기안개에 주목하여 안개발생 시의 미기상학적 특성을 분석해 보고자 한다. 이 연구의 결과는 개발에 따른 국지규모의 미기후학적 변화를 이해하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 낙동강 대형 보 주변에 전개되어 있는 기상관측망 자료가 더욱 축적되고, 이를 추가로 상세히 분석하면 관측에 기초하여 안개발생 메커니즘을 이해하고 수변개발이 안개발생에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 기법을 개발하는데 기여할 것으로 생각한다.

## 2. 자료와 연구방법

### 2.1. 자료

Fig. 1에 낙동강 구미보 주변의 토지이용도와 기상관측 지점의 전개상황을 나타내었다. 여기서 AWS (○)는 기온, 습도, 풍향, 풍속을 관측하는 자동기상관측, AWS & Flux (○, G4, 7)는 자동기상관측장치의 기상관측요소와 지표면 플럭스를 동시에 관측, water temp (▲, GW1, 2)는 수온관측이 이루어지고 있는 장소를 가리킨다. 이 연구에서 사용한 수온은 GW1지점, 기온, 습도, 풍속은 G6과 G12 지점의 최근 2년간(2013년 4월 1일



Fig. 1. Land use in Daegu and the locations of the AWSs around Gumi reservoir in Nakdong river.

-2015년 3월 31일)의 자료를 사용하였다. 또 이 연구에 사용된 안개발생과 지속시간의 산출은 G3과 G8에서 관측된 시정자료를 이용하였다.

2.2. 연구방법

낙동강 구미 보에서 발생하는 증기 안개 발생의 메커니즘 해석에 필요한 수면-대기 간의 현열(식(1))과 잠열(식(2))의 계산은 Kondo(1999)를 따라서 다음과 같은 bulk법으로 이루어졌다.

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \tag{1}$$

$$IE = l_p \beta C_H U (q_s - q) \tag{2}$$

여기서,  $c_p \rho$ 는 단위체적의 공기의 열용량( $c_p$ 와  $\rho$ 는 공기의 정압비열과 밀도),  $\beta$ 는 지표면의 증발효율(습윤도라고 부르기도 한다.)인데 0~1의 값을 갖는다. 수면과 적설 면에서  $\beta=1$ 이다.  $C_H$ 와  $C_E$ 는 현열과 잠열의 bulk 수송계수로 풍속과 안정도의 함수이지만, Kondo(1994)는  $C_H$ 와  $C_E$ 가 풍속에 의존성이 약하고, 수면 상에서는 지면가열에 의한 급속한 대기안정도의 변화가 작다는 점을 근거로  $C_E \approx C_H = 1.2 \times 10^{-3}$ 의 사용을 제안한 바 있다. 이 연구에서도 계산과정의 단순화를 위하여 이 근사 값을 이용하였다.  $T_s$ 는 지표면온도,  $q_s$ 는  $T_s$ 에 대한 포화

비습,  $T$ 와  $q$ 는 기온과 대기의 비습이다.  $q$ 와  $q_s$ 는 Kim et al.(1993)과 같은 방법으로 계산하였다.

안개발생시의 미기상학적 특성을 살펴보기 위하여 구미 보 상류와 그로부터 동쪽으로 전개되어 있는 지점(Fig. 1의 G5~G12)의 시정, 기온, 습도, 바람 자료를 이용하여 안개 발생 전후의 바람과 기온의 변화 특성을 조사하였다. 분석에 이용된 기상요소 관측 자료는 1분간 평균자료이다.

3. 결과

최근 2년 동안(2013년 4월~2015년 3월) 구미 보 부근 수변지역에서의 연중 무 강수일의 안개 발생일수를 월별로 정리하여 Fig. 2에 제시하였다. 총 73회의 무 강수 안개가 발생하였는데 9월에 17회, 10월에 24회, 11월에 9회가 발표하여 전체의 약 70%가 집중되었다. 이것은 수온과 기온간의 차이가 가장 큰 계절(현열플럭스가 큰 계절)에 안개가 집중적으로 발생하였다는 것을 의미한다.

최근 2년 동안에 각 시간대별로 무 강수 안개가 생성되고 소멸된 시간 및 안개가 나타난 누적 시간분포를 나타낸 것이 Fig. 3이다. Fig. 3(a)에서 안개의 발생은 새벽에서 이른 아침 시간대(03~08)에, 소산은 이보다 4시간

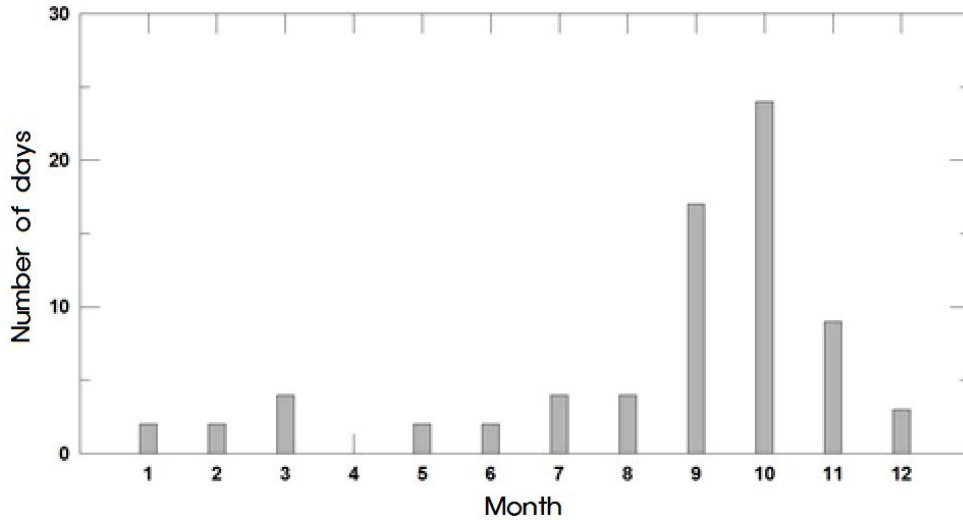


Fig. 2. Monthly frequency distribution of no-rain fog during recent 2 years (2013.04~2015.03).

정도 늦은 아침 07시에서 10시에 많이 발생하였다. 그 결과로 안개가 관측된 시간의 누적 값은 03~10시에 집중되었다(Fig. 3(b)). 이 중에서도 안개발생은 05~06시, 안개 소산은 08~10시에 집중되었다.

무 강수 안개 발생 일에 대한 기류의 영향을 알아보기 위하여 구미 보에서 동쪽으로 이격되어 위치한 G11 지점에서 최근 2년간 안개가 관측된 날의 바람 자료를 이용하여 작성한 바람장미를 Fig. 4에 제시하였다. 산풍이 불 수 있는 야간 시간대에는 풍속이 2 m/s 이하로 약한 동풍 계열의 산풍이 탁월하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

강에서 산지로 향해 부는 곡풍이 발달할 수 있는 낮 시간대에는 서~북서풍 계열로 산풍보다 강한 풍속을 갖는 곡풍이 확인된다. 일사가 없는 야간 시간대(21~06시)에는 구미 보의 동쪽에 위치한 산지에서 생성된 냉기류가 강으로 흘러가고 낮 시간대(11~18시)에는 구미 보에서 산지를 향해서 불어가는 곡풍(국지순환풍)이 탁월함을 확인할 수 있다. 구미 보 부근 수변지대에서 관측되는 무 강수일 안개 집중 발생 시간대(Fig. 3(b))는 냉기류가 탁월한 시간대와 대체로 일치한다는 것을 알 수 있다.

안개발생의 분류는 공기를 포화에 이르게 한 주요 원

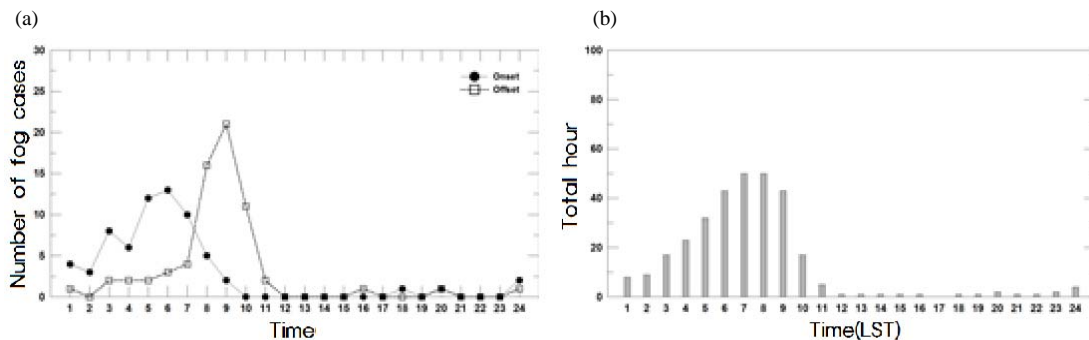


Fig. 3. Circumstances of no-rain fog occurrence during recent 2 years. (a)time distribution of no-rain fog (b)accumulation times of no-rain fog appearance.

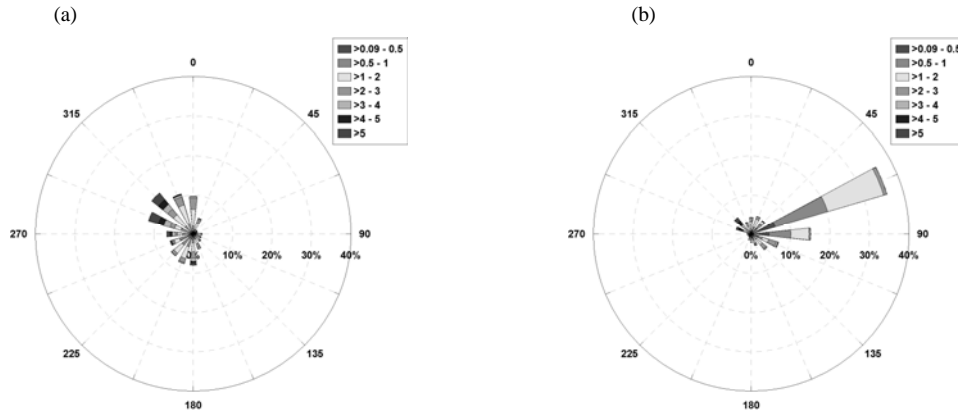


Fig. 4. Wind-rose at G11 observation site. (a)Daytime (09~17LST), (b)Nighttime ( 21~06LST).

인에 따라서 이루어진다. 주로 안개발생 시기에 나타난 기상조건을 기준으로 안개분류 흐름도를 작성하여 안개 발생 유형을 분석하는 방법을 사용하고 있다(Park et al., 2015; KMA, 2012). 그런데 이러한 안개분류 흐름도를 이용할 경우에 애매한 사례가 많아서 번잡스러운 경우가 많이 발생한다. 그래서 이 연구에서는 Shioda(1980)의 방법을 따라서 안개발생 유형을 분류해 보았다. 이 방법은 그래프의 가로와 세로축을 각각 수면에서 이격되어 있는 육상과 수면 상에서의 기온과 수온 및 이슬점과 수온간의 관계를 그렸을 때에 사례일의 조건이 몇 상한에

오느냐를 이용해서 안개발생 유형을 분류한다. 이 방법을 따라서, Fig. 5에 구미 보의 GW1 지점의 수온( $T_w$ )과 육상(G12)의 기온( $T$ ) 및 이슬점온도( $T_d$ )와의 관계를 제시하였다.

그림에서 구미 보의 무 강수 안개 발생은 가로와 세로 축의 값이  $-5 \sim -13^\circ\text{C}$  구간에 집중되어 있는 것으로부터 안개의 종류는 증기 안개가 많은 부분을 차지한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는, Shioda(1980)가 일본의 Bisan-Seto 내해에서 발생하는 안개의 유형을 분류하여, 증기 안개는 3상한에 위치하며 가로와 세로축의 값

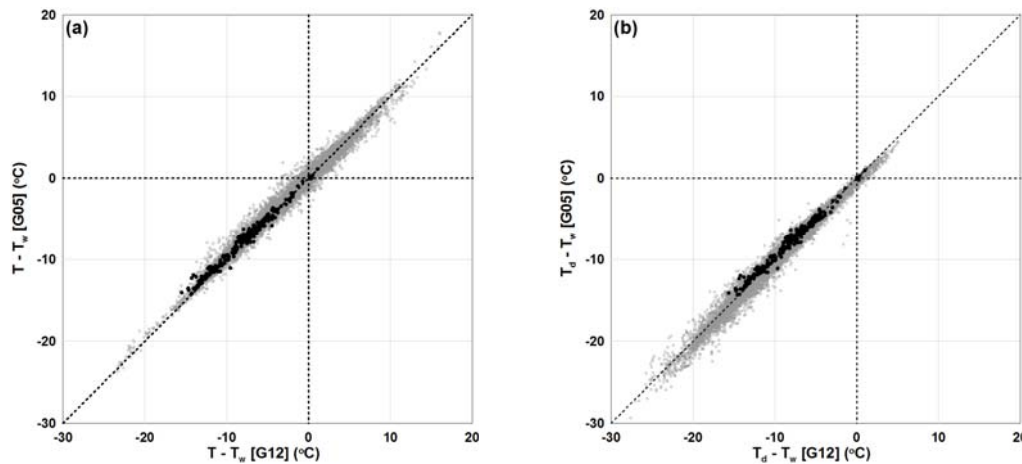


Fig. 5. Relation of (a)temperature on land surface(G12) and to temperature on water surface temperature(GW1) during recent 2 years. (b)Relation of dew point temperature same as (a). Black points indicate the case of no-rain fog formation.

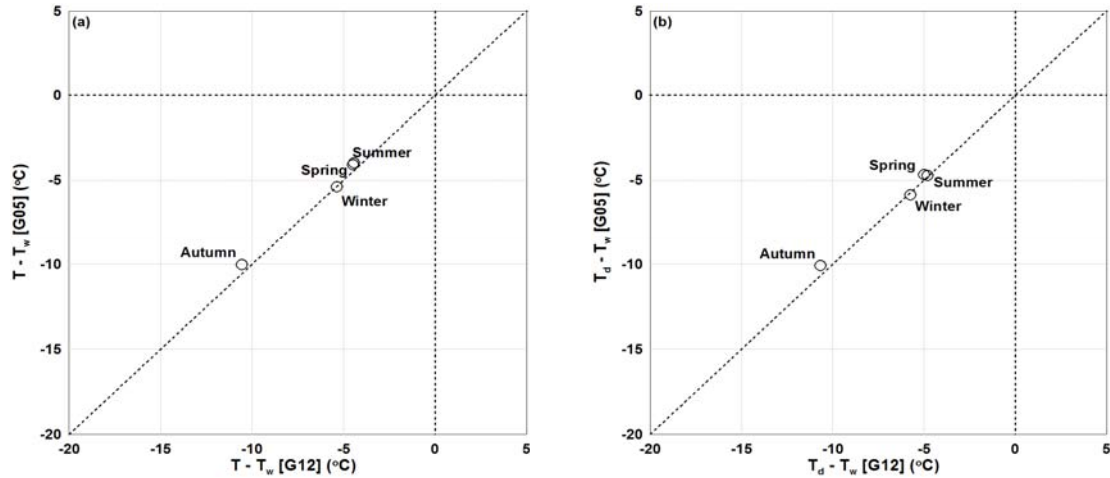


Fig. 6. Same as Fig. 5, except for typical fog occurrence conditions by season.

이  $-10^{\circ}\text{C}$  내외인 구간에 집중된다고 지적한 사실과 일치한다. 또 Harami(1969)가 겨울철에 우리나라 동해안에서 발생하는 증기안개에 대하여 수온이 기온보다  $10^{\circ}\text{C}$  정도 높은 해역에 발생이 집중된다고 지적한 사실과도 상응한다.

구미 보에서 무 강수일에 발생하는 안개의 계절별 기온-수온간의 관계를 분석하였다. 가을철의 안개는 가로와 세로축의 값이  $-5\sim-15^{\circ}\text{C}$ 의 범위에, 봄철은 가을철보다 온도차가 작은  $-3\sim-7^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 존재하여 증기안개의 특성을 강하게 나타내었다. 여름철의 안개는 발생횟수가 적지만, 제3상환의  $-5^{\circ}\text{C}$  이내에서 주로 발생하였다. Fig. 6은 각 계절별 안개 발생 시의 평균값을 나타낸 것으로 가을철은 수온과 기온 및 이슬점온도의 차이가 약  $-10^{\circ}\text{C}$  정도로 가장 컸다. 봄철과 여름철은 이보다 작은  $-4^{\circ}\text{C}$  정도의 값을 나타내었다. 겨울철의 안개는 원점을 포함하는 제1상환과 가을철과 중복되는 범위로 구분되어 발생하는 특징을 보여 평균적인 기온과 수온 차의 크기는 봄과 여름철보다 컸다.

Fig. 7에 무 강수 증기안개 발생 시의 미기상학적 변화를 알아보기 위하여 시정(G3, 8)과 G5와 G12 지점의 풍향, 기온, 상대습도 이슬점 및 상대습도의 시간변화를 2013년 10월 16일 부터 19일까지의 야간 시간대(21~09시)에 대해서 제시하였다. G12지점에서는 대부분의 시간대에서  $1.5\text{ m/s}$  이하의 약한(Fig. 8) 동풍계열의 바

람이 불어서 야간 복사냉각으로 생성된 저온다습한 산풍이 저지대로 불어나가는 것을 확인할 수 있다. 산풍이 부는 이 시간대에서 기온이  $4\sim6^{\circ}\text{C}$  내외로 낮고, 상대습도가 90% 이상으로 매우 습윤함을 확인할 수 있다. 이는 Lee et al.(2010)이 부산 성지곡수원지에서 8월에 산풍을 관측하여, 산풍의 상대습도가 90% 이상으로 매우 높고 기온은 저지대에 정체하고 있던 공기에 비하여  $3\sim5^{\circ}\text{C}$  정도 낮았다고 보고한 바와 같은 특성을 잘 나타내고 있다.

이렇게 이미 포화에 가까운 저온의 내륙 공기가 구미 보로 유입되어 추가적인 가습과 가열을 받아 증발-혼합의 메커니즘으로 안개가 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 시정이  $1,000\text{ m}$  이하로 떨어지는 03시 전후에 구미 보 지점(G5)의 지상기온( $2\text{ m}$ )이  $1\sim2^{\circ}\text{C}$  상승하고 그 상태가 지속되는 것을 볼 수 있다. 이것은 산풍에 의해 유입된 기류가 고온의 수면으로부터 가습·가열되어 상승하고(기층의 불안정화) 저온의 공기와 혼합·포화됨으로써 증기 안개가 형성된다는 Aguado and Burt(2001)의 주장과 상응하는 것으로 판단된다.

수면 상에서 대기 안정도가 약화되어 혼합과정이 발생하고 있는지를 보다 상세히 확인하기 위하여 Fig. 8에서 안개 발생 이전 시각부터 안개가 지속된 시간대(2013년 10월 17일 0~6시)에 대해 각 지점의 고도  $2\text{ m}$ ,  $10\text{ m}$  기온을 비교하였다. 강에 가까운 G05, G06 지점에서는

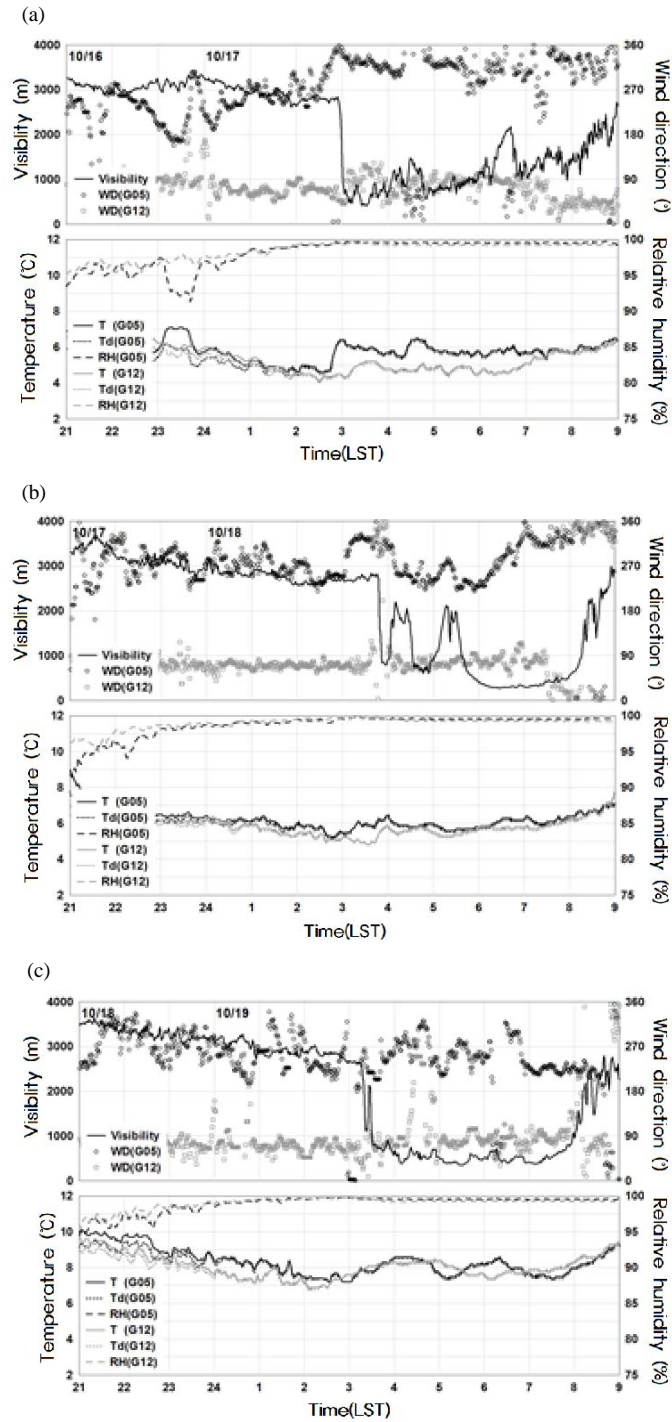


Fig. 7. Sequence of meteorological elements(16~18 October, 2013). (a)16~17(21:00~09:00), (b)17~18(21:00~09:00), (c)18~19(21:00~09:00).

시정 감소(안개 발생)가 발생하는 시간대에 고도 2 m의 기온 상승이 고도 10 m보다 크게 일어나 역전층이 파괴되는 것을 확인할 수 있다. 강에서 내륙 쪽으로 이격되어 있는 G11과 G12에서는 G05와 G06보다 약 20~30분 늦게 역전층이 파괴되었다. 안개(층운)가 형성되는 경우 Asakura et al.(1992)가 주장한 바와 같이, 안개 층 정상부의 복사 냉각으로 안개 층 내에는 대류에 의한 혼합이 발생하고 안개는 서서히 아래로 성장한다. 이렇게 발달하는 공기의 상하 혼합과정에 의해 Kim(1997)이 수치실험을 통해 지적하고 있는 바와 같이 연직 방향으로 균질한 상태(등온위 또는 등온 상태)가 만들어지면서 지표면 부근의 기온이 상승하고 역전층이 해소되는 것이다.

강에 가까운 G05, G06 지점은 안개 발생과 비슷한 시각에 역전 상태가 없어지는데 비해 G11, G12 지점에서는 안개 발생 시각보다 늦게 역전이 없어진다는 사실로부터 안개가 강 쪽에서 먼저 생성된 후에 내륙으로 확장되었을 것으로 추정된다. G09와 G10의 경우에는 2 m와 10 m 사이의 연직 온도차가 안개 발생 전에 비해 감소하였으나 역전 상태는 유지되고 있다. 이것은 강수면 부근의 안개와 다습한 공기가 반류에 의해 상공으로 이동하여 G11, G12 지점에서 안개를 형성하지만, G09와 G10 지점의 지표면 부근 저층에서는 안개가 형성되지 않았을 가능성이 있음을 나타낸다. 또 이 시간대에 풍속(10 m 고도)도 급상승하는데, 이것은 Kondo(1999)가 지적하

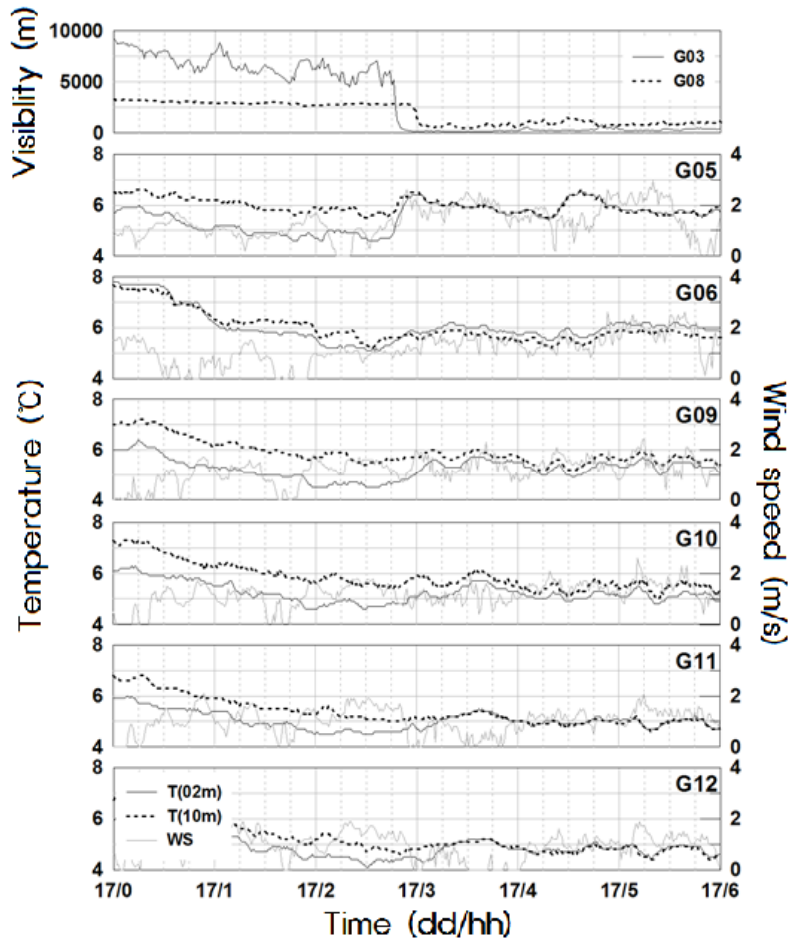


Fig. 8. Time variation of atmospheric stability and wind speed during typical steam fog.



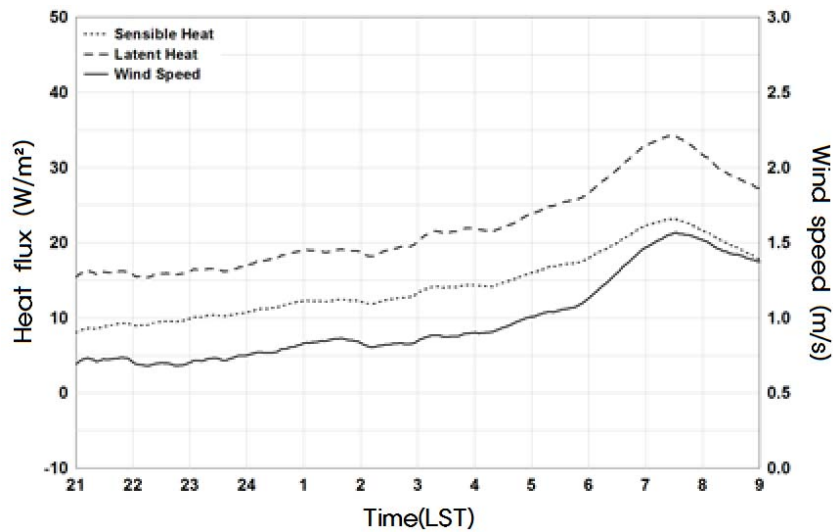


Fig. 9. Time variations of sensible, latent heat and wind speed over Gumi reservoir (GW1) in autumn. upper, middle, lower lines indicates latent heat, sensible heat and wind speed, respectively.

고 있듯이 상하 혼합과정으로 상층의 운동량이 하층으로 전달된 것에 기인하였을 것으로 추정된다.

이러한 증기 안개를 발생시키기에 충분한 열과 수증기 공급이 이루어지고 있는지를 확인하기 위하여 가을철(9~11월) 안개 발생 일의 풍속, 현열, 잠열의 시간변화를 조사하여 Fig. 9에 나타내었다. 안개 발생 집중시간대(05-07시)에서 풍속은 1.5 m/s 이하였으며, 현열은 10~20 W/m<sup>2</sup> 내외이고 잠열은 25~35 W/m<sup>2</sup>임을 볼 수 있다. 이렇게 높은 잠열과 현열은 Aguado and Burt(2001)가 지적하고 있는 증발-혼합 안개(증기 안개에 포함)를 유발하기에 충분한 값이다. 가을 이외의 계절에서는 현열과 잠열이 각각 5 W/m<sup>2</sup>, 10 W/m<sup>2</sup> 이하로 작았다(그림 생략). 이러한 사실로부터 구미 보의 주변 산지와 들판으로부터 수면으로 유입되는 저온 다습한 냉기류가 구미 보에서 가습되어 포화에 도달하여 증기안개가 발생하기도 하고, 냉기가 수면으로부터 현열을 공급받아 하층 대기가 불안정해져 수면 상에서 상대적으로 고온다습해져 있던 공기와 혼합하여 안개가 발생하기도 할 것으로 추정된다. 일단 안개가 발생하면, Pilie et al.(1975)과 Kim(1997)이 지적하고 있듯이 안개 상층에서 강한 복사 냉각(9℃/h 정도)이 발생하여 기층이 더욱 불안정해지면서 안개 층이 발달되어가는 메커니즘이 작동하는 것으로

추정된다.

#### 4. 결론

낙동강 구미 보에서 최근 2년(2013년 4월1일-2015년 3월 31일)간 관측된 기상 및 수문자료를 이용하여 보 주변에서 증기안개가 발생할 때에 나타나는 미기상학적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가을철에 맑고 바람이 약한 날 아침 시간대에 안개 발생이 집중되는 것으로 나타났다. 이 시기에 보의 수면 상에서 발생하는 안개는 육상 냉기류의 온도가 수온보다 5~15℃ 정도 낮은 범위에서 집중되었다(전체의 약 70%). 시베리아 한기의 확장이 시작되는 겨울에는 오히려 안개 발생이 현저히 감소한다. 그것은 가을철보다 수면이 냉각되어 현열과 잠열을 충분히 방출하지 못하고 풍속이 강해지기 때문으로 판단된다. 가을철 이른 아침 시간대에 낙동강 구미 보에서 나타나는 안개는 주변 산지와 농경지에서 야간 복사냉각으로 생성된 저온 다습한 안정 상태의 냉기가 수면으로 유입되어 현열을 받아 하층의 기온이 상승하고, 수증기의 보급으로 가습되어 기층이 불안정하게 될 때 형성된다. 구미 보의 안개발생 집중 시간대(05~07시)에 수면에서 대기로 방출되는 현열과 잠열은 가을에 각각 10~20 W/m<sup>2</sup>, 25~35 W/m<sup>2</sup>

정도이었다(다른 계절은 이 값의 50% 이하로 낮음). 가을철의 높은 현열 값은 수변으로 유입되는 안정한 냉기류를 가열하여 대류를 유발하고 공기의 상하 혼합을 조장하여 쉽게 안개를 발생시킬 수 있다. 이로 인해서 고온 다습한 수면상의 공기가 상승하여 상층의 저온 공기와 혼합됨으로써 응결이 발생한다(층운). 그 후에 층운의 상부가 장파복사 발산으로 냉각된다. 이 때 대류활동이 활발해지고 층운이 서서히 아래로 확장하여 안개가 되는 것으로 추정된다.

(2) 안개발생 시기에 강 수변에서는 급속한 기온상승이 나타나는데, 2 m 고도의 기온상승이 10 m 고도보다 훨씬 커서 강으로 유입되는 기류의 불안정도가 급상승하는 것으로 확인되었다. 10 m 고도의 풍속도 불연속적으로 빨라지는데, 이것은 연직 운동에 의해 상층의 운동량이 하층으로 수송된 결과로 추정된다. 강에서 내륙으로 이격되어 있는 거리에서는 이러한 현상이 지연되어 나타났다. 이러한 사실로부터 안개가 강에서 먼저 시작되고 그 이후에 주변으로 확대되어 간 것으로 판단된다. 구미보와 같이 수심을 깊게 하는 국토개발은 수변의 열적 깊이를 증가시켜(열용량 확대) 한랭한 계절에 증기 안개 발생 빈도와 강도에 영향을 미칠 것으로 정성적으로 추정되지만, 정량적으로 그 효과를 판단하기 위해서는 관측의 축적을 바탕으로 보다 세밀한 분석과 수치실험을 통한 다양한 대기 조건에 따른 열적 깊이 변화의 영향을 규명하여야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주관의 『응용기상기술개발연구』의 지원으로 이루어졌습니다.

### REFERENCES

- Aguado, E., Burt, J. E., 2001, Weather and Climate, Prentice Hall Press, 90-117.
- Asakura, M., Nita, T., Ninomiya, K., Tachihei, R., Sekine, R., 1992, Meteorological Technology - Investigation of Meteorology -, Asakura Press, 207-211.
- Bang, C. H., 2007, Study on airport visibility and numerical simulation of fog with WRF, Master thesis of Yonsei university, 25-36.
- Choi, H., 2001, Numerical prediction on fog formation affected by the Yellow Sea and mountain, Journal of the Korean Meteorological Society, 37, 261-282.
- Choi, J. H., Lee, S. H., 2003, Study on the fog forecast methods with data minning technique, Data Base Research, 19, 89-100.
- Harami, K., 1969, On the steam fog in the Japan Sea, Umi-to-Sora, 44, 9-15.
- Kim, H. D., 1994, Study on mechanisms to maintain MCC and air mass modification process in Yamase event, Ph. D., Tokyo university, Tokyo, Japan, 68-110.
- Kim, H. D., 1997, Numerical experiment on the sea-fog formation at the East Coast of Korean Peninsula in early summer, Journal of the Korean Meteorological Society, 33, 337-348.
- Kim, H. D., 2003, Study on the long-term change of urban climate in Daegu, Journal of the Environmental Sciences, 12, 697-704.
- Kim, M. O., 1998, Characteristics on the marine distribution near Korean Peninsula, Master thesis of Chonnam university, 20-36.
- Kodama, Y., 1995, Physical processes of low clouds in Yamase event, Meteorological Research Note published by Meteorological Society of Japan, 183, 49-66.
- Kondo, J., 1994, Hydro-meteorology, Asakura Press, 140-161.
- Kondo, J., 1999, Boundary layer meteorology: (III)Heat budget and meteorology, Tenki, 46, 769-777.
- Korea Meteorological Administration, 2012, Observation base study on the mechanism of fog occurrence, Seoul, Korea, 51-64.
- Lee, K. M., 2010, Study on the characteristics of fog occurrence and its prediction methods in Chungcheong region, Master thesis of Gongju university, 30-35.
- Lee, S. H., Kim, H. D., 2010, Modification of nocturnal drainage flow due to urban surface heat flux, Asia Pacific Journal of Atmospheric Science, 46, 453-465.
- Okawa, T., 2003, Fogs of Okhotsk Sea and Yamase event in Hokaido, Meteorological Research Note published by Meteorological Society of Japan, 214, 47-73.

- 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, *Journal of Environmental Science International*, 24, 657-670.
- Pilie, R. J., Mack, E. J., Kocmond, W. C., Rogers, C. W., Eadie, W.J., 1975, The life cycle of valley fog. Part I: Micro-meteorological characteristics, *Journal of Applied Meteorology*, 14, 347-363.
- Sawai, T., 1993, On the condition and predictability of fog formation, Technical note on the forecast, Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 13-24.
- Yamamoto, G., Kondo, J., 1968, Evaporation from Lake Nojiri, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 46, 166-177.