

도로 안전성 확보를 위한 안개 제거 기술에 대한 실험적 연구

김성연* · 진성욱** · 제영완*** · 김윤제****

An Experimental Study on the Fog Dispersion Technique for Road Safety

Sung Yeon Kim*, Sung wook Jin**, Yeong Wan Je***, Youn-Jea Kim****

Key Words: Fog(안개), Fog dispersion(안개소산), Visibility(시정도), Road safety(도로 안전성)

ABSTRACT

Fog is a phenomenon caused by condensation of water vapor in the atmosphere, which is when very fine drops of water float in the atmosphere and the distance of visible is less than 1km. Fog dispersion technology is a technology that removing or weakening fog by using artificial methods to reduce damage caused by fog. It is applied differently depending on the temperature of fog generation rather than the cause of fog. This study conducted an experimental study on the fog dispersion mechanism in order to minimize damage caused by fog on the road, and studied two methods of over-cooling dispersion using solid-carbon-dioxide as a dissipated particle and dissipating fog particles through thermal acoustic waves. As a result the two methods proved experimentally that were capable of dissipating fog.

1. 서론

안개는 미세한 물방울이 공기 중에 부유하여 시야를 감소시키는 기상 현상이라고 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 정의하였다. 이러한 안개는 운전 시 운전자의 시야 확보를 어렵게 만들어 차량 흐름을 방해하고, 교통사고 위험도를 증가시킨다. 3년간(2012~2014년) 경찰청 집계 국내 교통사고 기록에 따르면 사고 100건당 사망자 수를 나타내는 치사율은 안개 낀 날이 9.9명으로 맑은 날 2.2명보다 4.5배 높았다. 실제로 안개로 인한 교통사고는 대형교통사고로 이어지며, 일례로 2015년 서해안 영종대교 106중 추돌사고, 2011년 천안

-논산 고속도로 104중 추돌사고 등이 있다. Figure 1은 2018년 통계청 자료로 안개에 따른 교통사고 월별 현황을 나타낸다. 최근까지도 매년 200건이 넘는 교통사고가 안개에 의해 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 안개로 인한 피해를 줄이기 위해 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

안개소산기술은 안개로 인해 발생하는 피해를 줄이고자 안개를 인위적인 방법을 이용하여 제거하거나 약화하는 기술이다. 복합적인 이유로 발생하는 안개를 예측하기 어려운 점이 있으며, 이로 인해 발생하는 사회, 경제적 피해를 줄이기 위해 안개소산기술이 필요하다.

미국 유타주 교통부에서는 액체 드라이아이스(solid-carbon-dioxide, SCD)를 차가운 안개가 낀 도로와 계곡에 살포하여 시정성을 확보할 수 있는 안개소산기술을 적용하고 있다. Elbing 등⁽¹⁾은 드라이아이스 분사를 통한 안개 소산기술과 적용에 관한 연구를 진행하였고 이를 실험적으로 증명하였다. 국내에서는 국립기상연구소⁽²⁾에서

* 성균관대학교 대학원 기계공학과, 석사 과정

** 성균관대학교 대학원 기계공학과, 석사 과정

*** 성균관대학교 대학원 기계공학과, 박사 과정

**** 성균관대학교 기계공학부, 교수

E-mail: yjkim@skku.edu

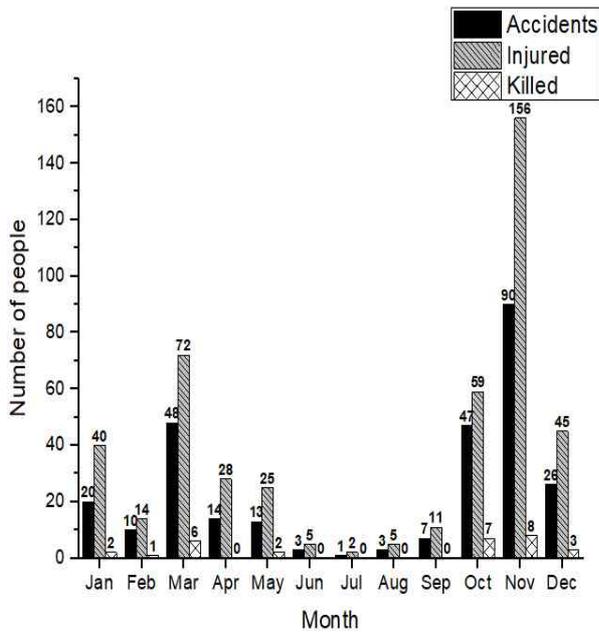


Fig. 1 Monthly status of traffic accidents in Korea due to fog in 2018

흡습성 물질을 이용하여 안개소산에 대한 실험적인 연구를 진행하였으며, 흡습성 물질을 통해 시정도(visibility)를 개선할 수 있다고 입증하였다. 또한 한국도로교통공사⁽³⁾에서는 국내 강원지역 고속도로에서 상습적으로 발생하는 안개 지역에 효율적으로 안개를 제거하기 위한 안개 제거제 개발 및 실내실험장치와 고속도로 실증실험을 통해 안개 제거제의 효과를 증명하였다.

본 연구에서는 안개로 인해 발생하는 피해를 최소화하고자 상습적으로 안개가 발생하는 구역에 안개소산기술 적용을 위한 원천기술 확보를 목표로 한다. 이를 위해 lab-scale의 챔버를 제작하여 실내 실증 실험을 진행하였으며, 드라이아이스를 소산입자로 사용하는 과냉각 소산 방법과 열음향파(thermoacoustic wave, TAW)를 통해 안개입자를 가진(excitation)하여 소산시키는 방법에 관해 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 시정도

안개소산기술은 시정도를 개선시켜 안전성을 확보한다. 이때 시정도는 대기의 혼탁정도를 나타내는 기상요소로서 수평 방향으로 목표물을 볼 수 있는 거리를 말한다.

시정을 측정하기 위해서는 관측점을 중심으로 각 방면으로 거리를 알고 있는 지점에 목표물을 정해놓고 그것을 기준삼아 목시관측으로 시정을 측정하는 일이 많으며, 이론적으로 시정을 산출하기 위해서는 Koschmider법칙⁽⁴⁾를 사용하여 측정할 수 있다. Koschmider법칙은 식 (1)과 같이 표현된다. 이 법칙은 대기 소산계수의 함수로써 관측자가 육안으로 물체를 식별할 수 있는 거리를 구할 수 있다.

$$V = \frac{\ln(C_T)}{\beta} \quad (1)$$

여기서 V 는 시정도를 나타내며, C_T 값은 사람의 눈으로 물체를 식별할 수 있는 시각적 대조의 한계값(contrast threshold)을 의미한다. 연구자에 따라 2%와 5%를 적용하여 사용한다. β 는 산란에 의하여 소모된 소산계수이다.

본 연구에서는 고정된 관측점을 중심으로 일정 지점에 목표물을 정해 놓고 그것을 기준삼아 측정하는 목시관측을 통해 시정도를 측정하였다.

2.2. 안개소산기술

안개는 생성온도에 따라 냉안개(cold fog, 0°C 이하)와 온안개(warm fog, 0°C 이상)로 구분된다. 안개입자를 소산시키기 위한 물리적 특성이 온도에 민감하기 때문에 안개소산기술은 안개의 생성온도에 따라 적용되고 있다.

안개소산기술은 물리적 메커니즘에 따라 크게 두 가지로 나뉘게 된다. 안개입자를 침강시키거나 증발시키는 방법이다. 증발에 의한 안개소산기술은 안개입자에 열에너지를 부가하여 액체 상태인 안개입자를 기체상태로 변화시켜 소산시키는 방법이다. 안개 영역을 강제로 가열시키거나 건조 공기를 유입시키는 방법이 대표적인 증발을 이용한 안개소산기술이다. 침강을 사용한 안개소산 기술은 안개입자를 빗방울이나 눈입자의 크기로 성장시켜 대기 중에서 지상으로 낙하시키는 방법이다. 침강을 이용한 안개소산기술은 핵화(nucleation), 응결(condensation), 충돌(impaction) 등의 과정에 의해 진행되며 흡습성물질이나 냉각물질을 이용한 안개소산기술이 이에 속한다. 핵화 과정은 인위적으로 빙정핵이나 응결핵이 될 수 있는 화학물질을 주입하여 핵을 생성하는 과정을 말한다. 응결 과정은 수분을 흡수하는 성질을 갖는 흡습성 물질이 안개입자의 수증기를 흡수하여 물방울로 성장시키는 과정을 말한다. 충돌 및 병합 과정은 작은 물방울들이 서로 부딪

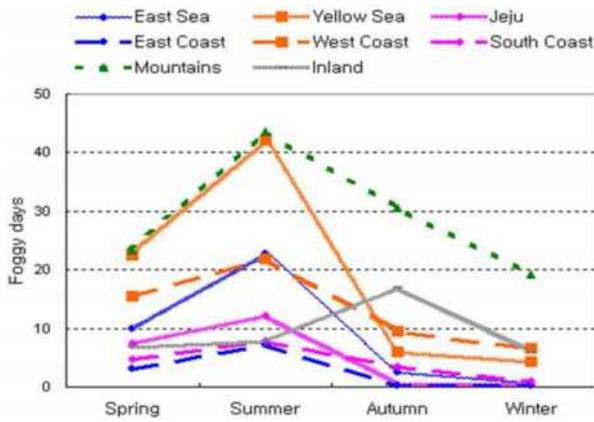


Fig. 2 20-years mean seasonal frequency of foggy days in Korea (1989-2008)

치고 결합하여 큰 물방울로 성장하는 과정을 말한다. 빙정핵 및 냉각물질을 이용하는 방법은 안개입자를 과냉각하여 물 입자를 빙정으로 변화시켜 침강시키기 때문에 냉안개 상태에서 쉽게 활성화된다.⁽³⁾

일반적으로 우리나라는 겨울철 안개 발생이 다른 계절에 비해 많지 않다. Figure 2는 Son 등⁽⁵⁾이 1989년부터 2008년까지 기상청과 공군에서 관측한 1km 미만 안개 분석 결과이며, 국내 겨울철 안개 발생빈도가 다른 계절에 비해 작다는 것을 알 수 있다. 하지만 겨울철 교통사고 비율은 다른 계절과 비교하여 작지 않다는 것을 Fig. 1을 통해 알 수 있다. 이는 냉안개와 온안개에 모두 적용 가능한 안개소산기술이 필요함을 의미한다.

본 연구에서는 냉안개와 온안개 상태에 적용 가능한 안개소산기술에 대한 연구이며, 드라이아이스를 냉각물질로 사용하여 과냉각 방법과 입자의 가진효과를 주기 위한 열음향파를 사용한 복합적인 안개소산기술을 고찰하였다.

2.3. 드라이아이스를 이용한 안개소산

드라이아이스를 이용한 안개소산 방법은 침강을 이용한 안개소산기술의 대표적인 기술이다. 안개소산에 사용되는 소산 입자는 자연환경에 영향을 미치지 않으며 값이 저렴하게 좋다. 드라이아이스는 이러한 조건을 모두 충족한다. 또한 드라이아이스는 무색의 고체로 냉매로서의 특성이 우수하며, 대기압에서 액체상태를 거치지 않고 기체가 되기 때문에 관리 또한 편하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 드라이아이스의 장점을 고려하여 드라이아이스를 소산 입자로 선정하여 연구를 진행하였다.

2.4. 열음향파를 이용한 안개소산

일정 공간에 놓여진 압축성 유체를 급속히 가열하면 유체의 팽창이 발생함에 따라 열음향파라고 하는 압력파를 생성한다. 열음향이란 이러한 열역학적 메커니즘에 의해 열에너지를 음향에너지로 변환하거나 또는 역과정을 의미한다. 열음향파 장치는 스택, 공진기, 전원공급장치로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 공진기를 통해 열음향파를 안개영역에 분사하여 열음향파가 안개 소산에 미치는 영향을 고찰하였다.

3. 실내 실증 실험

안개는 복합적인 원인에 의해 발생하기 때문에 예측하기 어려운 기상 현상이다. 실외에서 안개를 예측하여 실험을 진행하기에는 제한적인 요소가 많으며, 안개의 재현성 확보가 어렵다. 본 연구에서는 재현성 확보를 위해 실내 실증 실험을 진행하였으며 이를 통해 안개소산 메커니즘을 고찰하였다.

3.1. 실험 장비

3.1.1. 칼로리미터

냉안개와 온안개의 온도 특성을 조성하기 위해 칼로리

Table 1 Specifications of calorimeter

		Indoor	Outdoor
Capacity	Cooling	2,000~15,000kcal/h	
	Heating	2,000~16,000kcal/h	
Range of hygrothermograph		10~50°C 30~90%RH	-20~60°C 5~90%RH
Range of air volume		3~50m ³ /min	5.5~60m ³ /min
Wind speed		0.5m/s	
Reproducibility		±2%	
Accuracy		±2%	
Air conditioner		1 set 130m ² /min, 2.2kW Heater: 40kW	
Unit of refrigerator		4kW-1set (Bitzer) 5.5kW-2set (Bitzer) Refrigerant: R-22	5.5kW-1set (Bitzer) 7.5kW-2set (Bitzer) Refrigerant: R-22



Fig. 3 Photo of calorimeter apparatus

미터를 이용하여 내부(Fig. 3 참조)에서 실험을 진행하였다. 칼로리미터는 냉·난방 능력의 측정 및 실내외 기기 조합의 적합성 및 내구성, 실용성을 측정하는 설비로써 온·습도 제어시스템을 통하여 내부의 온도를 -20°C 에서 60°C , 상대습도를 5%RH에서 90%RH까지 조절이 가능하도록 구성되었다. 칼로리미터의 자세한 제원은 Table 1에 명시하였다.

3.1.2. Lab-scale 안개생성챔버

Figure 4는 안개소산 복합메커니즘 규명을 위해 제작



Fig. 4 Lab-scale fog chamber

한 lab-scale 규모의 챔버이다. 챔버는 아크릴로 제작하였으며 크기는 $1000\text{mm(W)} \times 2000\text{mm(L)} \times 1800\text{mm(H)}$ 로 이루어져 있다. 챔버 내부에는 안개 발생을 위한 가습기와 드라이아이스 분사를 위한 분사장치(seeding device)를 설치하였다. 챔버 내부의 온도와 습도 측정을 위한 온·습도계를 설치하였고 데이터 수집 장치(data acquisition system)를 이용하여 온·습도 정보를 수집하였다. 챔버의 옆면은 장치 구성을 위한 문을 설치하였으며 문은 내부 공간의 밀폐를 위해 자석으로 고정하였다.

3.2. 실험 방법

3.2.1. 실험 순서

재현성 확보를 위해 외부의 변동 요인을 최소화하였으며, 실험 순서는 다음과 같다.

- 칼로리미터 제어를 통해 안개 종류에 따른 목표 온도 도달(Table 2)
- 안개 생성을 위해 챔버 내부 습도가 목표 습도에 도달할 때까지 가습기 가동
- 위와 같이 실험조건을 맞춰 드라이아이스 분사 및 열음향과 발사
- 시간 경과에 따른 거리별 피사체의 가시성 확인을 통해 안개제거 유무 확인

3.2.2. 세부 실험 내용

자연상태의 냉안개와 온안개 조건을 조성하기 위해 칼로리미터를 이용하여 안개 챔버 내부의 온도를 조절하고, 가습기를 이용하여 습도를 조절하였다. 실험조건에 대한 자세한 내용은 Table 2에 명시하였다. 냉안개와 온안개 환경에서의 실험은 자연소산, 드라이아이스 분사, 드라이아이스 분사 및 열음향과 방출 총 3가지 케이스로 진행하였다. 안개 소산 여부는 챔버 내부의 시정도를 목시관측을 통해 판단하였다. 시정도를 소산 경과 시간별로 비교하기 위해 챔버 내부의 상부(camera 2)와 하부(camera 1)에 두 개의 카메라를 설치하였고 위치에 대한 정보는

Table 2 Experimental conditions of internal chamber

	Warm Fog	Cold Fog
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	17	-3
Humidity [%RH]	90	

Fig. 5에 도시하였다. 또한, 챔버 바닥에 200mm 간격으로 피사체를 설치하여 시정개선여부를 판단하였다. 드라이아이스는 분사장치를 이용하여 5g/s의 분사속도로 200g

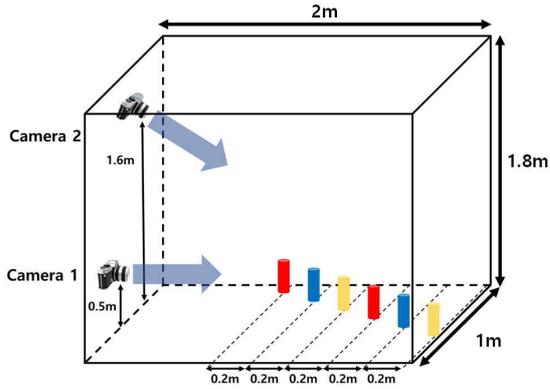


Fig. 5 Location of camera and subject

과 600g을 분사하였다. 드라이아이스의 양은 각각 안개의 상태에 따라 실험이 종료된 시점에서 드라이아이스가 모두 승화되는 양으로 선정하였으며 온안개에서는 600g을 사용하였을 때, 냉안개에서는 200g을 사용하였을 때 모두 승화되었다.

3.3. 실험 결과

Figures 6과 8은 온안개 상태에서의 실험 결과이다. (a)는 자연소산, (b)는 드라이아이스(600g), (c)는 드라이아이스(600g)와 열음향파를 복합적으로 사용한 실험 결과이다. 온안개에서의 실험 결과를 통해 드라이아이스가 온안개상태에서 영향을 미치는 걸 알 수 있었으며, 열음향파와 복합적으로 사용하였을 때 더 선명한 시정이 확

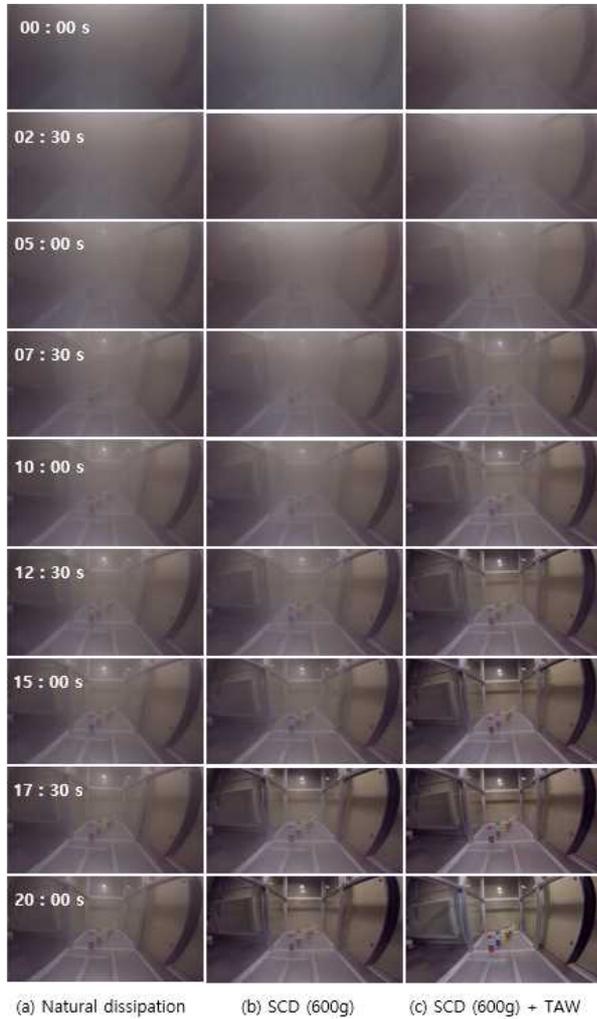


Fig. 6 Results of warm fog (camera 1)



Fig. 7 Results of cold fog (camera 1)

보되는 것을 알 수 있었다.

Figures 7과 9는 냉안개 실험결과로 (a)는 자연소산, (b)는 드라이아이스(200g), (c)는 드라이아이스(600g) 분사결과를 각각 나타낸다. 냉안개 상태에서 드라이아이스가 안개소산에 영향을 미쳤지만, 분사량이 증가함에 따

라 안개소산이 효과적으로 이루어지지 않는았다.

냉안개와 온안개에서의 드라이아이스 분사결과를 비교를 위해 카메라 1을 이용하여 드라이아이스 600g을 사용하였을 때 냉안개와 온안개의 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 온안개에서보다 냉안개에서 효과적으로 안개소산



Fig. 8 Results of warm fog (camera 2)



Fig. 9 Results of cold fog (camera 2)

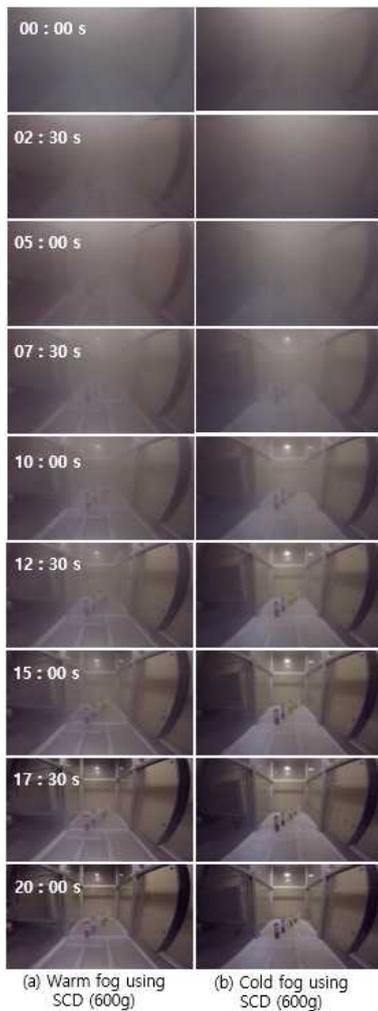


Fig. 10 Comparison results between warm fog and cold fog (camera 1)

이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 냉안개 환경에서 안개입자가 빙정으로 쉽게 활성화될 수 있기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 도로에 안개로 인한 피해를 줄이고자 냉안개와 온안개 환경에서 안개소산기술의 영향을 고찰하기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 본 논문의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 칼로리미터를 이용한 실내 실증 실험을 통해 온안개와 냉안개에서 드라이아이스와 열음향파가 미치는 영향을 관찰하였다.
- 2) 온안개에서 드라이아이스는 안개소산에 영향을 미

쳤으며, 드라이아이스와 열음향파를 복합적으로 사용하였을 때 가장 효과가 있음을 알 수 있었다.

- 3) 냉안개환경에서 드라이아이스는 효과가 있었으나 드라이아이스 분사량이 늘어남에 따라 안개소산이 빠르게 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 복합메커니즘을 활용한 안개소산기술에 대한 연구를 진행하였으며, 이를 검증하기 위해 실내 실증 실험을 진행하였다. 드라이아이스와 열음향파를 적용한 실내 실증 실험을 통해 안개소산을 통한 시정개선 효과를 볼 수 있었다. 이를 통해 안개가 상습출몰 도로에 안개소산기술을 적용하여 안개로 인해 발생하는 피해를 줄일 수 있다고 판단된다.

향후, 본 연구에서 고찰한 복합메커니즘을 바탕으로 실제 도로에 적용 가능한 안개소산장치 개발 및 시정도를 정량적으로 측정하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업의 지원으로 수행되었음(No.20CTA-157760-01).

참고문헌

- (1) Elbing, F., Möller, D. and Ulbricht, M., 2001, "Fog dispersion by Dry Ice Blasting : Technology and Applications", Proceedings of 2nd International Conference on Fog Collection, St. John's, Canada.
- (2) 정진임, 서성규, 등, 2013, "흡습성물질을 이용한 안개조절 실험 수행에 대한 가이드라인", 국립기상연구소 기술노트 NIMR-TN-2013-013.
- (3) Lee, K. H., Kang, H. M. and Kim, K. H., 2016, "A Study of Fog Remover Indoor Demonstration Test and Highway Application Test", OTKCRK170470.
- (4) Koschmieder, H., 1925, "Beiträge zur Physik der Freien Atmosphäre", Theorie der horizontalen Sichtweite, Vol. 12, No. 1, pp. 33~55.
- (5) Son, H. J., Kim, M. K., Kim, J. K., Hawang, M. K. and Woo, S. C., 2010, "The Analysis of the characteristics of long term variability of the fogs formed over Korean peninsula," Proceedings of the spring meeting of KMS, pp. 108~109.