

ORIGINAL ARTICLE

겨울철 노면에 발생하는 어는 비와 블랙아이스의 기상학적 분석에 관한 사례 연구

박근영^{1)*} · 이순환^{1)*} · 김은지²⁾ · 윤병영³⁾

조선대학교 지구과학교육과, ¹⁾부산대학교 지구과학교육과, ²⁾부산대학교 지구과학과, ³⁾광주지방기상청

A Case Study on Meteorological Analysis of Freezing Rain and Black Ice Formation on the Road at Winter

Geun-Yeong Park, Soon-Hwan Lee^{1)*}, Eun-Ji Kim²⁾, Byeong Yeong Yun³⁾

Department of Earth Science Education, Chosun National University, Gwangju 61452, Korea

¹⁾Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²⁾Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea

³⁾Gwangju Regional Office of Meteorology, Gwangju 61113, Korea

Abstract

Freezing rain is a phenomenon when precipitation falls as a liquid rain drop, but freezes when it comes into contact with surfaces or objects. In this study, we investigated the predictability of freezing rain and its characteristics, which are strongly related with the occurrence of black ice using synoptic scale meteorological observation data. Two different cases occurred at 2012 were analyzed and in the presented cases, freezing rain often occurs in the low-level low pressure with the warm front. The warm front due to the lower cyclone make suitable environment in which snow falling from the upper layer can change into supercooled water. The 0°C temperature line to generate supercooling water is located at an altitude of 850 hPa in the vertical temperature distribution. And the ground temperature remained below zero, as is commonly known as a condition for black ice formation. It is confirmed that the formation rate of freezing rain is higher when the thickness after 1000-850 hPa is 1290-1310 m and the thickness of 850-700 hPa layer is larger than 1540 m in both cases. It can also be used to predict and estimate the generation of freezing rain by detecting and analyzing bright bands in radar observation.

Key words : Freezing rain, Black ice, Synoptic analysis, Case study, Ice formation

1. 서 론

블랙아이스(Black ice)는 겨울철 도로안전운전의 복병으로 도로결빙현상을 일컫는다. 도로 노면이 결

빙되어 있지만 운전자가 볼 때는 단순히 도로가 젖어 있는 것으로 보이기 때문에 ‘검은색 얼음’인 블랙아이스라고 한다. 특히 산모퉁이, 터널 입·출구, 커브길, 저수지 근처 등은 햇빛이 잘 들지 않고 분지 지형 등

Received 27 May, 2017; Revised 7 June, 2017;

Accepted 7 June, 2017

*Corresponding author: Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, 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.

지형적인 요인으로 낮 동안 도로 위에 내린 눈이 녹았다가 밤 사이 다시 얼면서 생기곤 한다(Heo and Kim, 2013).

블랙 아이스는 어는 비의 일종으로 과냉각 상태로 내리던 비가 지표면에 닿거나 물체에 부딪혔을 때 유리면과 같이 코팅된 모습으로 얼어붙는 현상을 의미한다(Zerr, 1997). 이러한 블랙아이스는 2008년 12월 청원~상주 구간 고속도로상에서 발생한 29중 충돌사고, 2012년 김포 고가도로에서 발생한 25중 충돌사고, 2016년 서해안 고속도로 광천 IC에서 발생한 16중 충돌사고 등 다수의 교통사고 발생 원인으로 지목되었다.

이러한 교통사고 방지를 위하여 어는 비와 블랙아이스의 발생 메커니즘 규명과 예측을 위하여 다수의 연구가 진행되었다. 그러나 수치 모델을 이용하여 대기 중의 강수량을 예측하기 위해 많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고 강수가 얼어붙는 현상을 정확히 모의하지 못하고 있다(Huffman and Norman Jr, 1988; Reisner et al., 1998). 이는 자연계에서 구름에서 비가 되는 과정에 대한 관측이 어렵기 때문이다. 반면 실험실 내에서 다양한 미물리현상에 관한 연구는 다수 실시되어, 어는 비가 만들어질 환경 조건들은 잘 연구되어 왔다(Brooks, 1920; Penn, 1957; Mahaffy, 1961; Stewart and King, 1987; Prater and Borho, 1992).

현재 알려진 대표적인 블랙아이스 생성이론은 FR-SI (Freezing Rain and Sleet) 이론이다. 이것은 지표의 기온이 역전되어 있을 때 눈이 내리는 상황에서 어는 비가 형성될 수 있다는 이론이다(Stewart, 1985). 특히 온난전선과 관련되어 있으며, 지표의 차갑고 따뜻한 기층의 두께에 따라 지표의 강수 유형이 결정되는 것을 설명한다(Gray and Davis, 1993).

현재 어는 비의 형성과 관련된 종관적인 패턴은 기압을 기준으로 고기압냉각형, 온난전선 발생형, Cold Air Damming (CAD)형으로 구분하고 있다(Mireles et al., 2012; Kwon et al., 2014). 그러나 이러한 패턴 분류는 종관규모 기압장의 분포만으로 설정하였으며 블랙아이스의 원인이 되는 어는 비의 발생 가능성에 대한 단편적인 정보만 제공한다. 또한 어는 비의 형성에 대한 미물리화학적 접근이 이루어졌는데, 어는 비

는 고형강수가 녹아서 액체가 되는 과정을 통하여 형성된다는 것과 응결핵이 부족한 상태에서 낙하하는 물방울이 과냉각 상태로 낙하하여 형성된다는 것이다(Martner et al., 1993; Rauber et al., 2000). 이러한 노력에도 불구하고 어는 비를 예측하고 내부 발달 메커니즘을 해석하는 것은 어려운 것으로 판단된다. 특히 우리나라의 경우 경압성이 강한 종관적인 특성과 복잡한 지형에 의한 내륙 분지와 해안이 공존한다는 측면에서 어는 비의 발생 메커니즘이 매우 복잡하다고 알려져 있다.

본 연구는 블랙아이스의 따른 교통사고 발생일에 관측된 3차원 입체 기상 자료 및 수치 자료를 활용하여 어는 비의 발생 메커니즘을 분석하고, 기존의 어는 비 예측 결과와의 차이를 비교하여 한반도에서 어는 비와 블랙아이스의 발생에 관한 종관 특성을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사례 선정

현재 기상청에서는 기온 및 기압과 같은 기본적인 기기 관측 뿐 아니라 기상현상, 시정 등 목측 관측이 동시에 수행되고 있다. 특히 전국 70여개 유인 관측소 중 38개 지점에서 어는 비(코드번호 56, 57, 66, 67, 79)를 관측하고 있다. Fig. 1은 2001년부터 2013년까지 유인 기상관측소에서 관측된 어는 비의 빈도를 나타낸 것이다. 발생횟수는 2006년과 2012년에 각각 20일을 초과하였으며, 기간이 지남에 따라 발생빈도는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 월별 발생 빈도에서는 12월 1월 2월 등 겨울철의 발생 빈도가 높게 나타난다. 이는 겨울철 종관 기상 상태가 중하층 대기에서 어는 비 형성에 용이한 조건을 만드는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 어는 비의 발생이 빈번했던 2012년의 사례 중 실제 교통사고가 발생한 2012년 12월 14일과 21일의 종합적인 종관 분석을 통하여 어는 비에 의한 블랙아이스의 발생 메커니즘을 분석하였다.

기상 관측 자료는 주로 AWS (Automatic Weather System)를 통하여 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수량 등

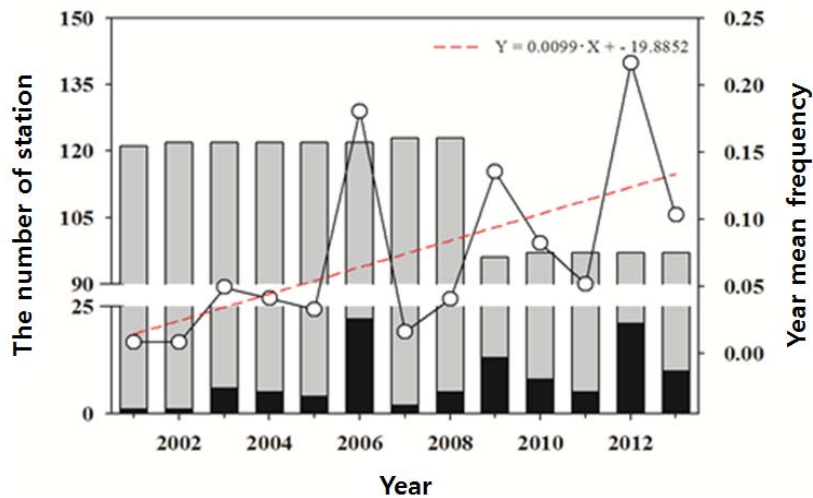


Fig. 1. Year mean frequencies (circle) of the freezing rain for 2001-2013. Red dashed line is its trend curve. The number of piloted observation stations (vertical gray bar) and the records of freezing precipitation (vertical black bar) for each year (Kwon et al., 2016).

을 관측한다. 특히 무인관측소와 달리 유인관측소에서는 기상현상, 구름, 적설에 대한 목측관측을 추가로 수행하며, 관측기록부(야장)에 기록하고 있다. 본 연구에서 어는 비 분석을 위해 대한민국 기상청 산하에 있는 70개의 관측지점 중 38개 지점에 대해 어는 비 코드번호인 56, 57, 66, 67, 79로 기록된 사례를 분석하여 통계 처리하였다. 또한, 과거 여러 사례 중 어는 비에 따른 많은 인명과 재산 피해를 주었던 2012년 12월 14일과 21일의 연쇄 추돌사고 사례를 선정하여 분석하였다.

2.2. 분석 자료

어는 비 발생 지점의 특징을 분석하고자 오산 등의 고층기상관측소 연직관측자료 및 단열선도를 이용하였다. 고층관측 자료의 시간간격이 6시간 또는 12시간 간격이기 때문에, 어는 비가 발생한 시점과 가장 가까운 관측 데이터를 활용하였다. 또한 어는 비로 인해 발생한 사고 지점과 인접한 AWS 관측 자료와 KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) 분석장, 레이더 자료, 일기도, 바람벡터를 활용하였다. 그리고 교통사고와 관련한 통계자료는 경찰청, 도로교통안전공단의 보고서를 참고하였다. 연구에서 사용한 시각은 UTC (Coordinated Universal Time)를 기본

으로 하였고, KST (Korea Standard Time)로 표출된 자료는 UTC 시간으로 환산하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사례 1 (2012년 12월 14일)

첫 번째 사례는 지난 2012년 12월 14일 오전 8시경 경기도 김포시 장기동 고가도로에서 어는 비로 인해 발생한 추돌사고로 이 사고는 한강 신도시 고가도로에서 발생한 사례이다.

Fig. 2는 사례일 당시의 종관 기상장 및 온도와 바람장을 나타낸 것이다. 사고가 발생했던 2012년 12월 14일 기상상황을 보면, 한반도는 남서쪽에서 다가오는 저기압의 영향을 받아 새벽 3시경부터 서해안 지역에 비가 내리기 시작하였다. 비는 점차 확대되어 아침에는 전국 대부분 지역에서 비, 눈, 진눈깨비, 어는 비 형태로 관측되었다. 풍속은 해안 지역에서 약간 강하게 불었을 뿐, 내륙은 대체로 3 m/s 내외로 약하게 불고 있었다.

사고가 발생한 김포 지역에 강수량은 측정되지 않았지만, 0630 LST에 내린 강수는 사고가 발생한 시각까지 이어져 오고 있었다. 남서풍 계열의 바람이 2.8 m/s로 불고 있었고, 기온은 0800 LST에 -1.6℃가

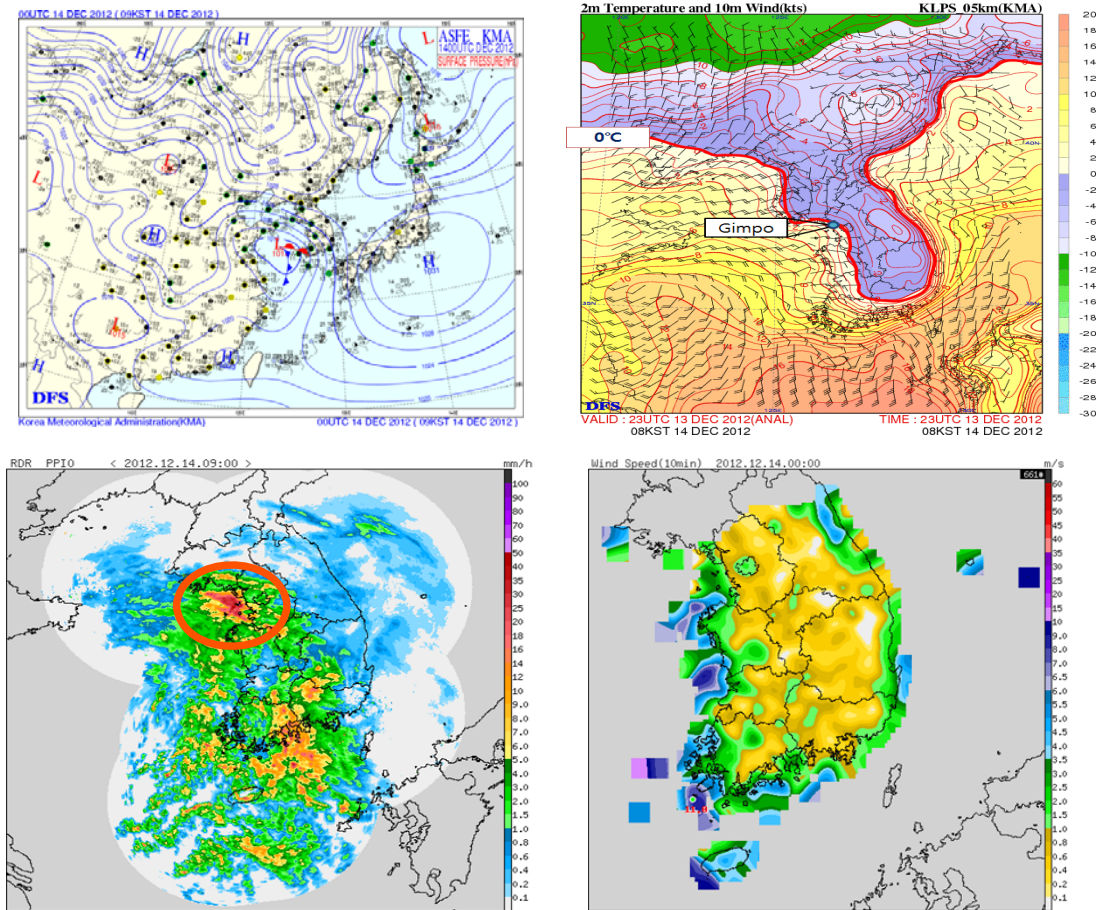


Fig. 2. Surface synoptic chart (left upper), zero degree Celsius line (right upper) with wind vector, RADAR PPI (left lower), and contour of wind speed (right lower) at 14 LST 14 December 2012.

기록되었다. 따라서 지상 일기도 및 관측 자료를 바탕으로 김포 부근에서는 차가운 지상 기온 및 약한 바람 그리고 강수 밴드의 접근 등 어는 비의 형성에 유리한 중관 조건이 나타났다.

블랙아이스의 생성은 지표면의 상태가 중요한 요인이 된다. Table 1은 김포 지역과 인접한 강화기상대의 지면 온도를 나타낸 것이다. 강화 지역의 지온은 0100 LST 부터 영하를 나타내고 있으며 이러한 영하의 지온은 0900 LST까지 지속되었다. 사고 발생 지점에서 13 km 떨어진 김포 공항의 지면은 강화 기상대의 기온보다 낮게 나타나고 있다. 이는 연안 지역에 비하여 지온이 낮은 내륙의 특성으로 판단된다. 또한 사

고가 발생한 교량은 지표면의 열손실이 크기 때문에 강화와 김포공항의 지온보다 낮을 것을 추론할 수 있다.

Fig. 3은 2012년 12월 14일 09시의 김포 지점의 연직기온 분포와 850 hPa의 일기도를 나타낸 것이다. 김포 지역의 단열선도를 보면 1000 hPa~850 hPa의 고도에서는 강한 남서풍이 불며 기온상승이 발생하여 영상의 기온이었음을 확인할 수 있었다. 그러나 이전 시간대에서는 850 hPa까지 영하임을 볼 수 있다. 즉 0900 LST 이전에 낮은 기온을 유지하고 있었으나 저기압의 접근에 따라 1.5 km 고도의 기온이 상승하였다. 이는 850 hPa의 일기도에서도 잘 나타나는데,

Table 1. Soil and air temperature in Ganghwa, Gimpo (°C, 2012.12.14.)

Time(KST)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Soil temp. (Ganghwa)	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.0
Air temp. (Ganghwa)	-1.5	-2.0	-1.3	-0.9	-1.1	0.6	-0.1	-0.6	0.6	0.6
Air temp. (Gimpo airport)	-1.1	-1.7	-1.4	-1.6	-1.3	-0.8	-0.3	-0.1	0.2	0.4

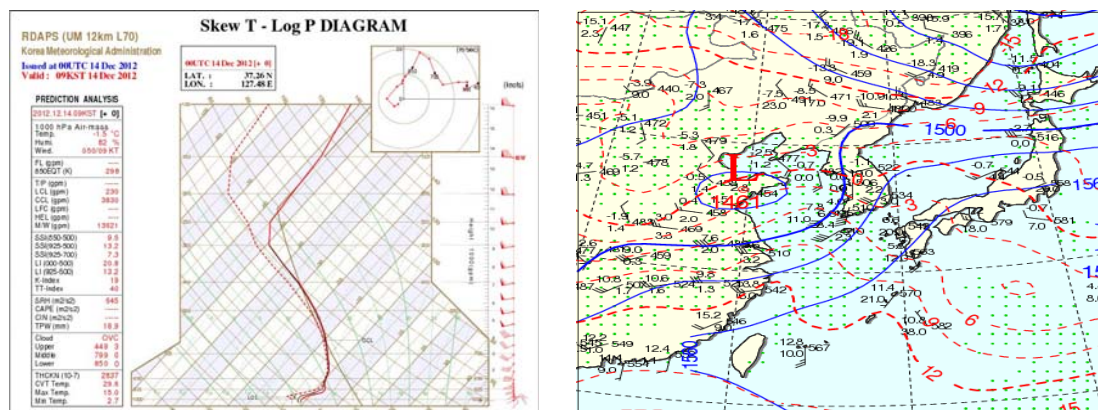
사고가 발생한 지점인 김포 지역을 비롯해 서해상에 등압선과 등온선이 수직을 이루며 경압조건을 보인다. 이는 바람이 고도에 따라 순전하는 온난이류를 활성화하는 등 대기 불안정을 강화시켰다. 그러나 상대적으로 가볍고 온난한 공기의 유입에도 불구하고 하층의 약한 바람은 지상 부근의 차가운 공기가 그대로 머무를 수 있는 조건을 형성하여 지상에서 어는 비가 발생할 수 있는 요건을 형성한다.

사고가 발생한 시각인 12월 14일 08시 1000-850 hPa 사이의 층후를 분석한 결과 1309 m를 보였고, 850-700 hPa 사이의 층후는 1539 m였다. 층후 값을 보았을 때 기온역전이 존재함을 알 수 있다.

그리고 Cantin와 Bachand(1993)의 연구에 의하면 층후의 두께로 강수 유형(snow, ice pellets, freezing rain, rain)을 결정할 수 있다고 한다. 특히 어는 비의 경우 1000-850 hPa 층후의 두께가 1290-1310 m, 850-700 hPa 층후의 두께가 1540 m보다 클 때 어는

비가 발생할 확률이 높다고 한다. 그에 비추어 볼 때 1000-850 hPa의 층후는 어는 비가 생성되기 위한 층후 조건 범위 안에 있었다. 반면, 850-700 hPa의 층후 값은 1540 m보다 커야한다는 일반적인 조건보다는 작은 값이나, 어는 비가 발생할 수 있는 조건에 가까이 위치해 있었다. 여기서 1000-500 hPa의 층후는 범위가 매우 넓게 나타나므로, 적합한 변수로는 보기 어려워 분석에서 제외하였다(Fig. 4).

어는 비의 형성에는 강수 도중의 변화가 매우 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 강수 도중 변질 특성을 파악하기 위하여 레이더 관측 자료를 분석하였다. Fig. 5는 레이더에 의하여 관측된 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator)의 수평 분포와 연직 단면 분포를 나타낸 것이다. 연직 단면은 수평 분포 그림상의 실선영역이다. 먼저 지상 저기압이 접근하면서 14일 0900 LST에 인천 서해안 부근에서 시간당 35 mm의 강수 에코가 관측된다. 이전부터 약한 강수가

**Fig. 3.** Adiabatic diagram (left) at Kimpo site and surface synoptic chart (right) at 09 LST 14 December 2012.

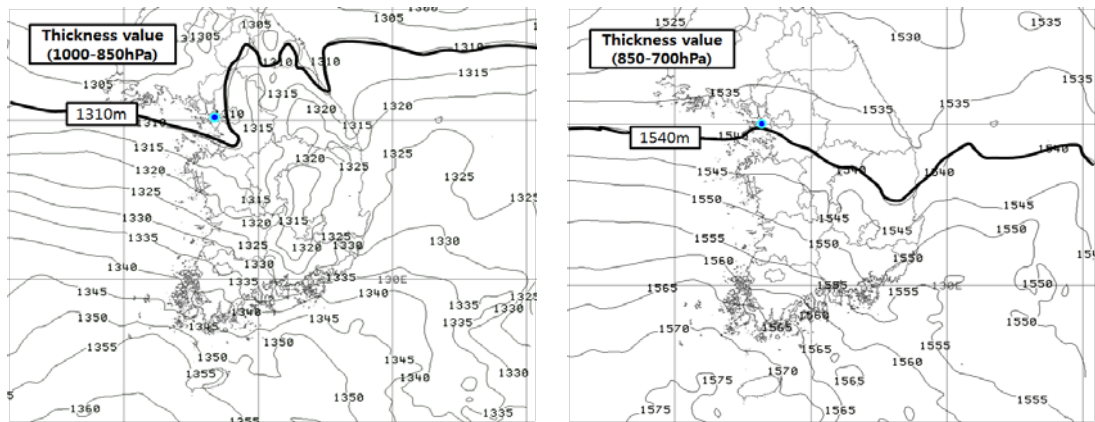


Fig. 4. The thickness of 1000-850 hPa (left), 850-700 hPa (right) at 08 LST 13 December 2012. The marked circle is chain-reaction collision place.

김포 부근에는 지속적으로 나타났다. 이러한 강수 밴드의 단면을 보면, 1.5 km 부근에 강한 밝은 띠가 나타나는데 이는 상층의 영하의 기온에서 생성된 눈이 1.5 km 지점을 통과하면서 녹기 시작하는 것을 의미한다. 즉, 눈 바깥 부근에서 융해된 물에 의하여 높은 반사도가 나타난 것이다. 실제 인근 오산 지역의 관측된 단열선도에서도 850 hPa 부근에서 0℃ 기온선과 교차하여 나타나는 융해층이 확인된다. 따라서 850 hPa 부근의 융해층에 따른 높은 반사도는 하층의 어느 비 형성에 주요 지표로 적용될 수 있다.

3.2. 사례 2 (2012년 12월 21일)

두 번째 사례는 지난 2012년 12월 21일 오전 08시 20분경 전라북도 군산시 성산면 고봉교차로와 와동교차로에서 어는 비로 인해 추돌사고가 발생한 사례이다. 발생지역은 남쪽으로 작은 야산이 존재하고 북쪽으로 전담이 위치하고 있다. 이 지역은 이 사고로 인해 각각 14중, 20중 추돌사고가 발생하여 1명이 사망하고, 15명이 부상을 입는 등 많은 인명피해가 발생하였다. 사고 지역은 야산을 끼고 있어, 평소에도 안개가 자주 끼고, 특히 남쪽에 위치한 야산에 의한 영향으로

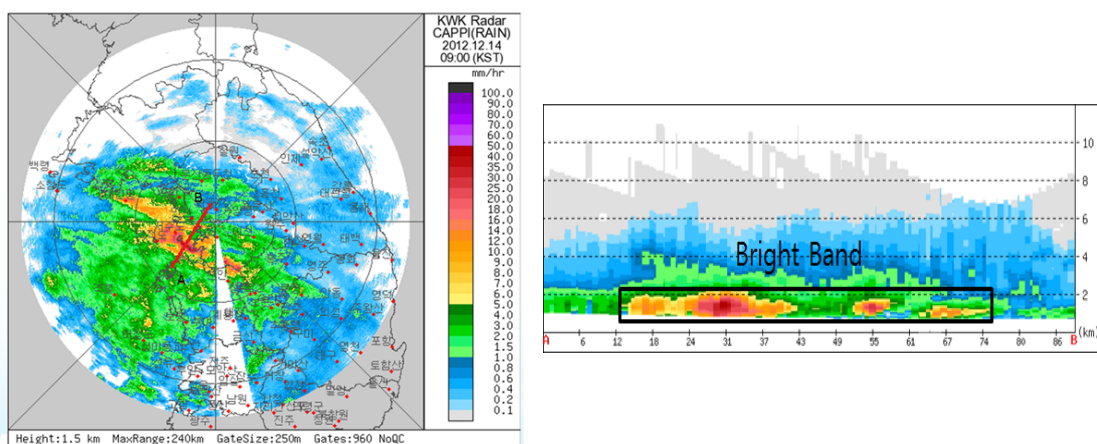


Fig. 5. Radar CAPPI image (left) and vertical structure of A-B cross section at (right) at 09 LST 14 December 2012. The red line indicate the vertical cross section line.

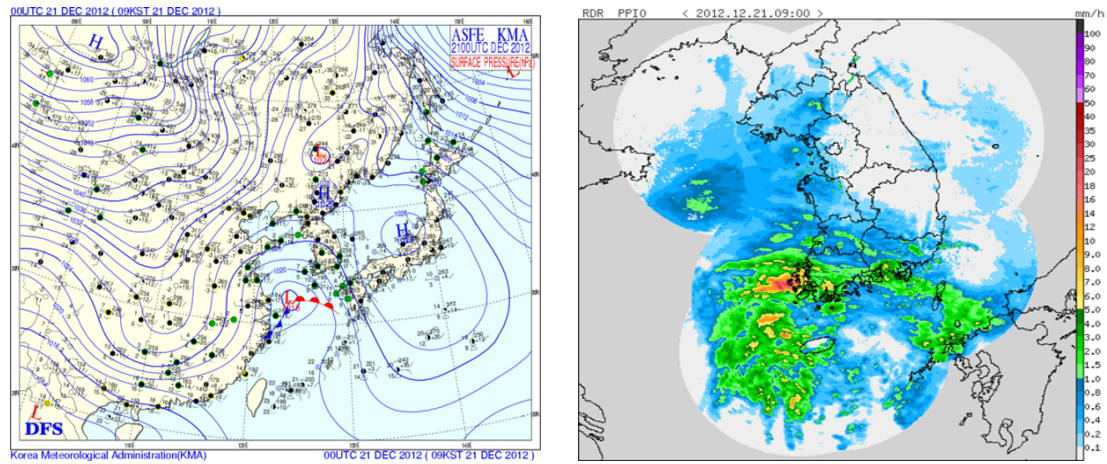


Fig. 6. Surface synoptic chart (left upper), zero degree Celsius line (right upper), RADAR PPI (left lower), and 10 minute averaged wind speed (right lower) at 09 LST 21 December 2012.

상습적으로 결빙이 되는 구간이다. 2012년 12월 군산에서는 결빙이 30일, 안개는 3일 발생하였다.

사례일의 종관 환경을 파악하기 위하여 일기도를 분석하였다. Fig. 6은 연구 대상일의 지상일기도와 레이더 영상을 나타낸 것이다. 전체적으로 시베리아 기단이 지배적인 상황에서 전선을 동반한 저기압이 점차 동북동진하면서 그 전면에서 형성된 강수가 강화되고 있었다. 사고 발생 지역인 군산 지역은 남해상에서 접근하는 저기압의 영향으로 6시 30분부터 비가 관측되기 시작하였다. 이는 레이더 영상에서도 감지된다. 추돌사고가 발생한 시각 사고 지점에서 2~3 km 떨어져 있는 군산기상대의 기온은 0℃ 정도였고, 북풍 계열의 바람이 2 m/s 내외로 약하게 불고 있었다.

이날 군산기상대에는 어는 비가 관측되지 않았다.

하지만 Table 2에서 보는 것처럼 대전지역에 8시 7분에서 10시 35분 사이에 어는 비(▲)가 관측되었고, 진주에서도 8시 9분부터 11시 35분까지 기록되었다 (Table 2).

일반적으로 어는 비가 발생하기 위해서는 지면온도가 영하이어야 할 것으로 알려져 있다(Rauber et al., 1994). 사고 당일 군산기상대 지면온도를 분석한 결과 새벽부터 영하의 기온을 보였고, 사고가 발생한 8시경 지면온도 또한 영하권인 -0.1℃를 기록하고 있었다. 추돌사고가 난 지점은 고지대로 군산기상대에서 관측된 지면 및 대기온도보다 1~2℃ 정도 낮았을 것으로 보이며, 사고 지점에 어는 비가 발생할 수 있는 지면온도 조건이었다(Table 3).

Fig. 7은 사고가 발생한 장소와 인접한 관측소인

Table 2. Red color with underlined denotes the observation time (LST) of the freezing rain

Station	Date	Time(Remarks)
Gunsan (140)	2012. 12.21	=1028-= <u>1200</u> - <u>1500</u> - <u>1800</u> - <u>2100</u> - <u>2400</u> - <u>0630</u> - <u>0900</u> - <u>1200</u> - <u>1515</u> .
Daejeon (133)	2012. 12.21	-0300-0600-0900-0955. 0612-0705. 0807-0900-1035- <u>1125</u> - <u>1200</u> - <u>1440</u> - <u>1500</u> - <u>1557</u> . =1520- <u>1800</u> - <u>2100</u> - <u>2400</u> .
Jinju (192)	2012. 12.21	0721-0809-0900-1135-1200-1500-1707-1800-1924. =2311- <u>2400</u> .

Table 3. Soil and air temperature (°C) in Gunsan weather station at 21 December 2012

Time (LST)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Surface temp. (°C)	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1
Air temp. (°C)	-0.2	-0.1	0.1	0.1	0.7	1.2	1.5	0.6	0.7	0.5

군산기상대의 KLAPS 단열선도 및 시간에 따른 고도별 기온변화 차트이다. 사고가 발생한 시각인 21일 8시의 단열선도를 살펴보았다. 지표와 900 hPa 이상의 고도에서 영하의 기온을 보인 반면, 1000 hPa에서 900 hPa 사이의 고도에서는 강한 남서풍이 불며 2°C 정도의 영상기온이 분포하였다. 또한 고도별 기온변화를 보면, 21일 06시부터 850 hPa 이하의 고도에서 기온이 하강하며, 강수 및 빙결입자 성장을 강화하였을 것으로 보인다. 결국 상층에서 형성된 빙정은 900 hPa 고도를 지나면서 비로 바뀌나 다시 영하의 기온인 지면과 부딪히면서 곧 얼어붙게 되었을 것으로 분석된다.

어는 비가 발생한 지점의 연직 온도이류를 알아보기 위해 비교적 지상으로부터 마찰이 없는 약 1.5 km 상층인 850 hPa 상층일기도에서도 사례 1과 비슷하게 등온선과 등압선이 수직을 이루는 경압조건을 보이며, 온난이류를 활성화시키고 있음을 알 수 있다.

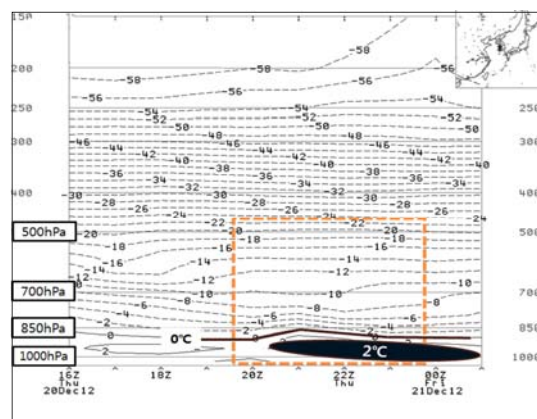
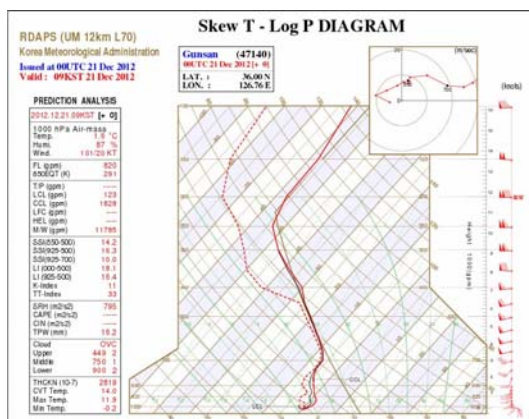
사고가 발생한 21일 08시의 1000-850 hPa 층후를

분석한 결과 1308 m였고, 850-700 hPa 사이의 층후는 1515 m 정도였다. 분석된 층후 값을 보면 두 층간의 기온 역전이 존재하며, 사례 1 및 2001~2003년에 발생한 사례처럼, 1000-850 hPa 층후는 어는 비가 발생하기 위한 조건을 만족하였다. 하지만, 850-700 hPa의 층후 값은 사례 1보다 층 두께가 얇아 눈이 올 수 있는 조건에 가까웠다(Fig. 8).

4. 결론

본 연구에서는 최근에 어는 비로 인해 발생한 대형 연쇄 추돌사고와 관련하여, 어는 비에 따른 블랙아이스 발생 빈도가 높은 2012년의 2가지 사례를 대상으로 어는 비 및 블랙아이스의 예측가능성을 다양한 종관자료를 통하여 살펴보았다.

먼저 두 사례 모두 전선을 동반한 하층 저기압의 유입이 특징으로 나타났다. 하층 저기압에 따른 온난 전선은 상층에서 낙하하는 눈이 과냉각 수적으로 변화

**Fig. 7.** Adiabatic diagram (left), Atmospheric temperature changes by each altitude (right).

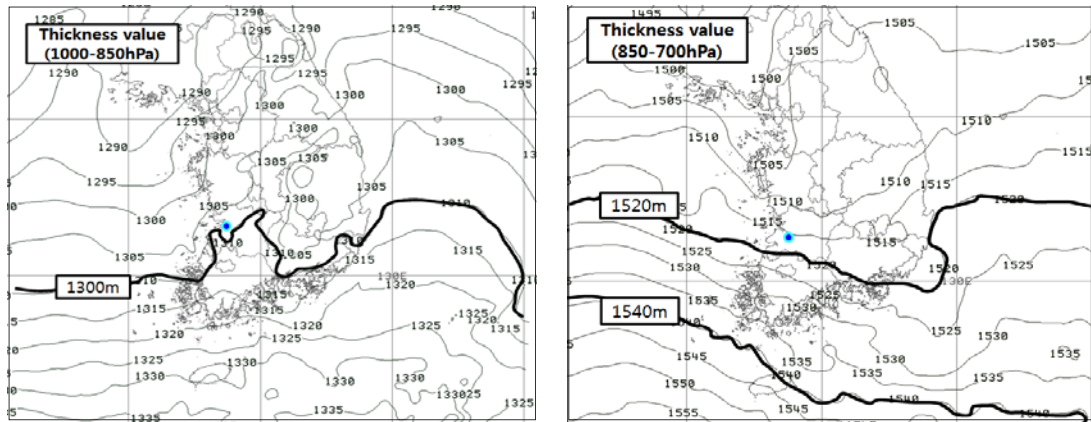


Fig. 8. The thickness values of 1000-850 hPa (left), 850-700 hPa (right) (2012.12.20. 23 UTC). The marked circle is chain-reaction collision place.

할 수 있는 조건을 제시한다. 두 번째로 연속 온도 분포에서 두 사례 모두 850 hPa 고도에 0°C 기온선이 위치하며, 과냉각 수적이 많이 발생할 수 있는 조건이 갖추어졌음을 알 수 있다. 또한 블랙아이스가 형성되기 위한 조건으로 일반적으로 알려진 것과 같이 지면 온도가 영하의 상태로 유지되었다. 주변 관측 지점의 값은 거의 0°C 에 가까우나, 실제 사고 발생 지역은 지형 조건상 0°C 이하의 조건이 형성되었을 것으로 유추된다.

1000-850 hPa 층후값은 사례 1에서는 1309 m, 사례 2에서는 1308 m로 두 사례 모두 범위 안에 있으나, 850-700 hPa 층후값은 각각 1539 m, 1515 m로 일반적으로 어는 비가 발생하는 값보다는 작게 나타났다.

온도이류의 경우 두 경우 모두 온난이류의 영향을 받으며 입자가 성장하거나 과냉각화가 강화되었음을 추측할 수 있다. radar의 밝은 띠(bright band) 자료를 보면 강수를 과대 모의하는 밝은 띠(bright band)가 사례 1에서 0°C 기온이 존재하는 고도인 약 1.5 km에서 관측되었다. 이를 보아 radar를 활용해 밝은 띠를 탐지하고 분석함으로써 어는 비를 예측할 수 있으리라 판단된다.

위치와 지형과 관련해 보면 포장된 도로 위에 어는 비가 내려 발생하는 블랙아이스의 경우 아침 최저기온을 보이는 6~8시에 많이 발생하고 있다. 특히 지표면으로부터 열손실이 커서 대기 온도보다 지표면 온

도가 약 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 정도 낮은 교량에서 두드러지게 발생함을 알 수 있었다. 해안에서 멀리 떨어져 있고, 주변이 산으로 둘러싸인 분지형 지역의 경우 지표면에서 냉각이 잘 일어나기 때문에 어는 비가 발생할 확률이 높다.

이처럼 블랙아이스의 경우 지형의 특성이 반영되기 때문에 정확한 예보를 위해서 다양한 사례를 수집하여 연구 분석할 필요가 있다. 추후 수치모델을 이용하여 예보를 함에 있어 국내의 특성을 반영한 사례의 특징들을 기준으로 예보 기준을 삼는다면 조금 더 정확한 예보를 할 수 있을 것이라 생각된다.

REFERENCES

- Brooks, C. F., 1920, The nature of sleet and how it is formed, Mon. Wea. Rev., 48, 69-73.
- Cantin, A., Bachand, D., 1993, Synoptic pattern recognition and partial thickness techniques as a tool for precipitation types forecasting associated with a winter storm, Centre Meteorologique du Quebec Tech. Note 93N-002, 9.
- Changnon, S. A., 2003, Characteristics of ice storms in the United States, J. App. Meteorol. and Clim., 42, 630-639.
- Gay, D. A., Davis, R. E., 1993, Freezing rain and sleet climatology of the southeastern USA, Clim. Res., 3, 209-220.

- Heo, J. S., Kim, G. Y., 2013, New word for transportation, monthly traffic, *Traffic res. Ins.*, 38-42.
- Huffman, G. J., Norman, Jr. G. A., 1988, The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 116, 2172-2182.
- Kwon, H. N., Byun, H. R., Park, C. K., 2015, Case studies on freezing rain over the Korean Peninsula using KLAPS, *Atm.*, 26(1), 389-405.
- Kwon, S. H., Byun, H. R., Park, C. K., Kwon, H. N., 2016, On the freezing precipitation in Korea and the basic schemes for its potential prediction, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 52, 35-50.
- Mahaffy, F. J., 1961, The ice storm of 25-26 February 1961 at Montreal, *Weatherwise*, 6, 241-244.
- Martner, B. E., Snider, J. B., Zamora, R. J., Byrd, G. P., Niziol, T. A., Joe, P. I., 1993, A Remote-sensing view of a freezing-rain storm, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2562-2577.
- Mireles, M., Pederson, K. L., Elford, C. H., 2012, Meteorological techniques, *Tech. Note 98-002 Air Force Weather Agency*, 200.
- Penn, S., 1957, The prediction of snow vs. rain forecasting guide, *U.S. Weather Bureau*, 2, 29.
- Prater, E. T., Borho, A. A., 1992, Doppler radar wind and reflectivity signatures with overrunning and freezing-rain episodes: Preliminary results, *J. Appl. Meteorol.*, 31, 1350-1358.
- Rauber, R. M., Olthoff, L. S., Ramamurthy, M. K., Kunkel, K. E., 2000, The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events, *J. Appl. Meteorol.*, 39, 1185-1195.
- Rauber, R. M., Ramamurthy, M. K., Tokay, A., 1994, Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's day ice storm, *Wea. and forecasting*, 9(2), 183-208.
- Reisner, J., Rasmussen, R. M., Bruintjes, R. T., 1998, Explicit for forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.*, 124, 1071-1107.
- Stewart, R. E., 1985, Precipitation types in winter storms, *Pure appl. Geophys.*, 123, 597-609.
- Stewart, R. E., King, P., 1987, Freezing precipitation in winter storms, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1270-1279.
- Zerr, R. J., 1997, Freezing rain: An Observational and theoretical study, *J. Appl. Meteorol.*, 36, 1647-1661.