

정책과 기술 02

도로살얼음 발생 가능성 정보 서비스에 도전하다

김백조 | 국립기상과학원 재해기상연구부 목표관측연구팀장

1. 도로살얼음 기상정보는 왜 필요한가?

누구나 막힘없고 안전한 도로 위를 마음껏 달리는 것을 한 번쯤은 생각해 본다. 도로, 차, 운전자 모두 최상의 상태일 때 가능한 상상이다. 차와 운전자의 상태는 개인의 노력과 관심에 따라 얼마든지 가능한 일이다. 하지만 도로상태는 누군가의 노력만으로 좌우되지 않는다. 그 이유는 바로 도로라는 상수(constant)에 미치는 기상이라는 변수(variable)가 있기 때문이다. 기상이 도로에 미치는 영향은 크게 도로안전, 교통흐름, 도로운영으로 나눌 수 있다(<http://ops.fhwa.dot.gov>). 특히 도로 교통사고와 밀접한 주요 기상현상인 비, 눈, 안개 등은 도로 미끄러움이나 결빙, 운전자의 시정 등에 영향을 준다.

최근 들어 겨울철 대형 교통사고 소식을 언론을 통해 자주 접하게 된다. 이와 관련하여 언론에 보도되거나 연구논문에서 자주 소개되고 있는 도로교통사고를 조사하였다. 최근 15년간(2006~2020년)

〈그림 1〉 2006년부터 2020년까지 주요 대형 도로 교통사고(정리: 김백조)



주요 도로 교통사고는 총 13사례로 정리되었다(그림 1). 겨울철 도로 위 교통사고를 유발하는 기상요인은 대부분 도로살얼음과 안개였다. 2006년 10월 3일 서해대교에서 발생한 29중 추돌사고로 12명이 사망하였다. 또한 2015년 2월에 발생한 영종대교 교통사고는 106중 추돌사고로 사망자가 2명이고 부상자가 73명이었다. 안개(해무)가 자주

끼는 서해 연안지역에 위치한 대교나 내륙지역의 안개(복사무)와 도로살얼음으로 인해 고속도로나 국도에서 도로 교통사고가 자주 발생함을 알 수 있다.

지난 10년간(2010~2019년) 안개 낀 날의 교통사고 치사율은 맑은 날 대비 약 5배 수준으로 가장 높으며, 강우·안개·강풍·맑음과 비교 시 안개가 교통사고와 상관관계가 가장 높다는 보고가 있다. 특히 안개 발생 시 시정 및 노면상태 불량으로 치사율이 다른 상태에 비해 월등하게 높다(최재로나, 2011). 또한 도로 노면상태에 따른 교통사고 인명 피해율은 건조한 도로보다 서리가 내렸거나 결빙(살얼음 포함)되었을 때 1.87배까지 증가한다(행정안전부, 2020).

도로살얼음, 안개로 인한 교통사고는 도로상태, 차량제동, 운전시야 등과 관련되어 있어 사고 발생 시 대형사고로 이어진다(김백조, 2021). 이것은 국민의 생명과 안전을 위협하는 정도로 심각하여 국가 차원의 사회적 이슈로 대두되고 있다. 겨울철 도로 운전을 위한 정부 차원의 안전대책 일환으로 도로기상 및 노면정보 집중관측과 이를 통해 수집된 관측자료와 수치예측 자료를 활용한 도로기상 예측정보 생산 및 서비스가 요구되고 있다.

2. 도로살얼음은 어떻게 발생하는가?

겨울철 도로살얼음은 우리가 생활하는 주변 도로에서 쉽게 만날 수 있다. 2021년 3월 1~2일 강릉을 비롯한 강원도에 50cm 이상의 많은 눈이 내렸다. 둘째 날인 3월 2일 오후부터 기온이 높아지면서 길 위에 쌓인 눈이 빨리 녹기 시작하였다. 강릉 시내 주요 도로를 제외하고 사람이 많이 다니지

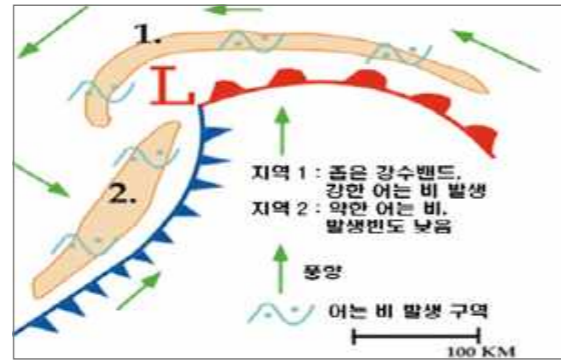
않는 작은 골목길이나 보도 위는 녹은 눈으로 온통 질퍽하였다. 밤이 되면서 기온이 내려가 녹은 눈이 얼기 시작하였다. 다음 날(3.3) 아침 8시경 해가 떠오르면서 길가에 쌓인 눈이 다시 녹기 시작하였다. 경포사거리에 강릉원주대 가는 길의 나지막한 산자락 아래 그늘진 도로는 여전히 영하였다. 녹은 눈이 비스듬한 영하의 도로 위로 흘러내리면서 도로 위에 살얼음이 발생하였다(그림 2). 도로살얼음 위를 달리는 출근 차량들은 파란 신호를 놓칠 세라 빙판길에서도 질주하였다. 도로살얼음의 위험성을 잘 알기에 현장에 있는 나는 불안감이 앞섰다. 하지만 도로살얼음 발생 구간이 채 10m가 되지 않아 운전자가 알아차리는 순간 위험 구간을 빠져나가 큰 사고로는 이어지지는 않았다.

〈그림 2〉 2021년 3월 3일 강릉 경포사거리 인근에서 관측된 도로살얼음 모습(사진: 김백조)



이처럼 도로살얼음은 노면결빙에 필요한 물기(water)나 수분(moisture)이 있는 상태에서 영하의 노면온도일 때 발생한다. 일반적으로 노면온도가 대기 이슬점 온도보다 낮으면 도로에 이슬이 발생하고, 이슬이 영하의 노면온도로 인해 얼게 되어 서리(frost)나 얼음(ice)이 만들어진다. 야간 혹

〈그림 3〉 어는 비(좌)와 저기압 주변 어는 비 발생 특성 모식도(우)



(출처: 기상청, 2013)

새벽 시간대에 대기 중 수증기가 포화되어 발생하는 안개의 경우도 유사하다. 또한 강수 현상이 나타난 후 고인 빗물이나 쌓인 눈이 녹으면서 생긴 물이 영하의 노면을 흐르면서 도로살얼음을 만들기도 한다.

도로살얼음 발생과 관련된 주요 기상학적 원인으로 어는 비(freezing rain)가 자주 언급된다. 기상 센서(온도, 습도, 기압, 풍향·풍속)를 헬륨 풍선에 달아 하늘로 띄워 기상관측을 해 보면 고도에 따라 대기 온도가 다양하게 변화한다. 지면 위 어느 고도에서 만들어진 눈이 내리면서 영상의 대기층에서 녹아 비가 된다. 이 비가 지면 부근의 얇은 영하 층에서 물체에 부딪치면서 얼어붙게 되는 데 이것을 '어는 비(freezing rain)'라고 한다. 어는 비가 발생하기 위해서는 지면이나 지면 부근의 물체 표면온도가 반드시 0℃보다 낮아야 한다. 지상 부근 영하의 공기층 위로 상대적으로 따뜻한 영상의 공기가 침투하기 쉬운 저기압의 온난전선 전면에서 어는 비가 잘 발생한다(그림 3). 지리적 관점

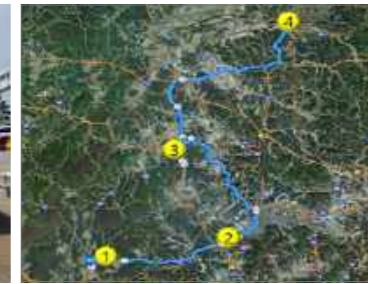
에서 보면 어는 비는 지면 냉각이 잘 일어나는 지역인 해안에서 멀리 떨어져 있고 주변이 산으로 둘러싸인 분지형 지역에서 자주 관측된다.

3. 도로살얼음은 어디서 잘 발생하는가?

도로살얼음을 브레이크 없는 위험이라고 하였다(김백조, 2021). 도로 주행자들에게 도로살얼음은 안전운전에 심각한 위협요인이 되고 있다는 것이다. 겨울철 따듯한 기온은 도로살얼음의 발생 가능성을 증가시키고 있다. 이를 효과적으로 대응하기 위해서 도로살얼음 관측 인프라를 확충하고 위험성 예측 기술을 개발하여야 한다. 이와 같은 단·중기적인 대책의 일환으로 기상관측차량을 이용해 주요 고속도로에서 도로살얼음 발생이 쉬운 지역을 파악하는 것이 필요하다.

국립기상과학원에서는 경상남북도 내륙지역의 주요 고속도로(광주대구고속도로, 중부내륙고속도로, 중앙고속도로)를 지나는 약 220km를 대상으로 겨울철 도로기상 및 노면정보 집중관측을 수행하였다(그림 4). 국립기상과학원에서 보유한 기상

〈그림 4〉 도로기상 및 노면정보 집중관측: 관측차량(좌), 관측경로(우), 주요 고속도로와 도로기상관측시스템 설치 위치(표)



| | |
|-----------|---|
| 경상남도 내륙지역 | ① 살피재터널(35.7N:127.9E) 광주대구고속도로(대구방향) |
| 경상북도 내륙지역 | ② 논공교(35.7N:128.4E) 광주대구고속도로(대구방향) |
| | ③ 대성1교(36.1N:128.2E) 중부내륙고속도로(대구방향) |
| | ④ 풍산대교(36.5N:128.6E) 중앙고속도로(춘천방향) |

관측차량을 활용하여 기온, 습도, 기압과 같은 기상요소와 노면정보(노면온도, 노면상태)를 1초 단위로 관측하였다. 도로기상 및 노면정보 집중관측은 2020년 12월 22일과 2021년 1월 29일의 2회에 걸쳐 실시되었으며, 집중관측 경로는 거창 IC에서 서안동 IC까지로 이 구간에는 살피재터널, 논공교, 대성1교, 풍산대교에 도로기상 관측시스템이 설치되어 있다. 기상관측차량을 이용한 도로기상 관측의 경우, 관측자료의 정확도가 무엇보다 중요하다.

참고로 기상관측차량을 통한 서울 도심폭염 집중관측 수행시 고정지점에서 관측된 자동기상관측자료와 비교한 결과, 연구자료로 활용이 가능한 것으로 검증되었다.

일반적으로 도로살얼음은 교량, 터널 입·출구, 계곡 통과, 응달 지역 등에서 잘 발생한다. 도로기상 및 노면정보 집중관측에서 나타난 도로결빙 지역을 살펴보면(그림 5), 2020년 12월 22일 사례의 경우 김천2터널 입구, 예동1교 인근, 봉곡

〈그림 5〉 도로기상 및 노면정보 집중관측에서 나타난 주요 도로결빙 지역

(a) 2020년 12월 22일



(b) 2021년 1월 29일



(출처: 김백조 등, 2022)

1교, 구잠2교, 단말1터널 인근, 단북위촌교, 국국교&산이골에서 결빙이 관측되었다. 2020년 12월 22일 보다 기온이 상대적으로 낮은 2021년 1월 29일에서는 청현교, 도장골천교 인근, 밤골저수지 인근, 서대구TG, 구미IC, 선기졸음쉼터, 남김천IC3교, 낙동JC, 안계양곡교에서 주요 결빙이 나타났다. 도로결빙을 위한 수분공급이 원활한 저수지 인근이나 차가운 공기의 노출이 상대적으로 쉬운 고속도로 TG나 IC에서 자주 발생하였다. 도로살얼음 취약구간으로 잘 알려진 터널, 교량, 고속도로 TG&IC 뿐만 아니라 그늘진 도로나 휴게소에서도 도로결빙이 나타났다. 도로결빙이 관측된 지역을 도로 기하구조(교량, 터널), 그늘진 도로 등으로 정리해 보면, 2020년 12월 22일은 교량 4회, 터널 2회, 그늘진 도로 1회, 기타 1회로 총 8곳에서 나타났으며 2021년 1월 29일에서는 교량 4회, 그늘진 도로 1회, 기타 4회로 총 9곳이었다. 또한 대기 온도가 높음에도

도로결빙이 더 많이 관측된 이유는 앞서 언급한대로 도로살얼음 취약구간인 교량, 터널이 많았던 원인으로 유추할 수 있다. 이처럼 도로살얼음 발생은 교량, 터널과 같은 도로의 기하구조나 지형적 특성의 영향을 받음을 알 수 있다. 도로결빙에 미치는 기온과 노면온도의 영향을 제외하고 다른 기상요소(습도와 풍속)와의 관련성도 조사하였다. 한국도로공사(2021)에서 온도 4도 이하, 습도가 80% 이상일 때 안개, 약한 눈에 의해 도로결빙이 발생한다고 밝힌 바 있다. 또한 바람은 도로 위 수분을 증발시켜 도로살얼음 발생 가능성을 낮추는 기상요인으로 알려져 있다(김백조 등, 2021). 집중관측 사례에서 기온과 노면온도가 상대적으로 낮은 기상 상황에서도 도로결빙 횟수가 증가하지 않는 경우가 있다. 이는 강한 바람과 낮은 습도로 도로살얼음 생성에 중요한 수막 형성이 용이하지 않기 때문으로 생각된다.

4. 도로살얼음 예측정보는 어떻게 생산되는가?

겨울철 도로교통 안전운전을 위한 기상청 주관의 ‘도로살얼음 대응 및 예측 포럼’ 개최를 통해 협업 기관 간의 협력방안을 논의하였다(기상청, 2020). 도로살얼음으로부터 국민의 안전을 지켜내기 위한 중점 추진과제로 ① 지속적인 도로기상 관측과 예측 개선 ② 도로살얼음 취약지구 선정과 관리(예측 정보 생산, 집중관리 기간 운영, 운전자 계도, 가변형 제한속도 관리 등) ③ 국민과의 체감적 정보 소통 강화(네비게이션을 활용한 위험정보 전달, 차량 탑재 도로살얼음 탐지센서 개발, 민간분야의 참여 등)가 제안되었다. 특히 도로살얼음 예측정보의 필요성과 이를 위한 유관기관 간 협력과 협업이 중요하다. 이를 위해 기상청은 2020년에 도로살얼음 예측정보 생산을 위한 ‘도로살얼음 기상정보 서비스’ 범정부 TF를 구성하여 도로살얼음 예측정보 생산 및 서비스 방안에 대해 관련 기관과 긴밀한 논의를 지속해 왔다. 특히, 도로살얼음 예측정보 생산을 위해 대구대학교와 협업으로 인공지능 기반의 예측모형을 개발하였다. 모형의 입력자료는 도로 단위별 관측자료와 예측자료 그리고 위경도로 구성된다. 관측자료는 자동기상관측장비와 중관기상관측장비에서 수집된 기상자료(기온, 습도, 대기압)의 공간보간법으로, 예측자료는 기상청 초단기 수치예측모델 결과를 활용하여 산출하였다. 이들 자료를 랜덤포레스트기법¹⁾에 적용하여 도로 단위로 노면온도 및 노면상태 위험정보를 생산하였다(그림 6).

(그림 6) 도로살얼음 예측정보 생산체계



도로살얼음의 발생 지점이나 구간을 정확하게 예측하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 도로결빙에 미치는 기상요인과 도로요인 등을 고려하여 도로살얼음 취약구간의 고속도로에 대해 도로살얼음 발생 가능성 정보를 제공한다(기상청, 2021). 도로살얼음 발생 가능성 정보는 경상남북도 내륙 지역의 주요 고속도로 약 220km 구간을 대상으로 하루에 8회로 3시간 간격(00·03·06·09·12·15·18·21시)으로 생산한다. 09시 예보를 위해 당일 08시 20분~08시 30분에 자료 입수 및 처리를 수행한다. 예보기간은 발표시간 +1시간부터~+12시간까지로 1시간 간격이다. 예를 들면 09시 예보의 경우, 오전 10시부터 오후 21시까지 1시간 간격의 예측정보를 생산한다는 의미이다. 도로살얼음 발생 가능성을 관심-주의-경고-위험으로 4단계로 제공하며, 이 단계는 기상관측차량을 통해 수집된 도로기상과 노면정보(온도, 상태)

1) 여러 의사결정나무의 앙상블모형으로 노면온도 예측에 주로 사용되며 노면온도, 기온, 습도 등의 도로기상 요인과 노면정보의 관계를 통해 노면상태 위험성 예측

〈그림 7〉 기상청 방재기상정보시스템(http://afso.kma.go.kr)에서 도로살얼음 발생 가능성 정보 접속방법



(출처: 기상청, 2021)

자료의 통계분석으로 노면상태별 마찰계수 기준으로 정하였다. 위험단계별 마찰계수는 관심은 0.8 이상, 주의는 0.8~0.7, 경고는 0.7~0.6, 위험은 0.6 이하이다. 도로살얼음 발생 가능성 정보는 2021년 12월 30일 09시부터 기상청 방재기상정보시스템(http://afso.kma.go.kr)을 통해 행정안전부, 국토교통부, 한국도로공사, 한국건설기술연구원 등을 대상으로 2022년 5월 31일까지 시범 운영된다(〈그림 7〉).

현재의 도로살얼음 예측모형의 정확도(accuracy)는 0.7이고 Kappa는 0.43이다. Kappa는 우연히 맞추는 것이 아니라 모형으로 잘 분류되어 맞출 확률((Obs. Acc. - Pre. Acc.)/(1-Pre.Acc.))이다. 여기서 Obs. Acc.는 분류 정확도를 의미한다. Kappa가 0.43이면 보통 이상의 예측성을 나타낸다.

5. 도로살얼음 대응을 위해 무엇을 해야 하나?

도로교통 사고의 사회적 비용을 줄이기 위해서는 무엇보다 도로살얼음의 정확한 예측정보 생산이

중요하다. 2022년 5월까지 도로살얼음 발생 가능성 정보 시범운영을 통해 사용자 의견을 수렴하고자 한다. 또한 정확한 도로살얼음 발생 가능성 정보를 생산하기 위하여 예측모형의 개선 노력도 지속되어야 한다. 먼저 입력자료로 기상요소와 위경도 외에 터널 및 교량과 같은 도로요인과 예측된 노면온도를 추가하여야 한다. 대구대학교 연구 결과에 따르면(윤상후, 2022), 도로기상 관측자료 기반 노면상태 예측 결과가 우수함을 밝혔다. 하지만 도로기상 집중관측은 하루 중에 보통 오전 6~9시에 주로 수행되므로 관측자료 기반 24시간 도로살얼음 예측정보 생산에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 도로살얼음 발생 가능성 시범운영 구간에 대한 지속적인 집중관측과 이를 통해 생산된 관측자료와 공간보간법으로 생산된 기상정보 간의 비교·분석으로 한층 개선된 예측모형의 입력자료가 생산되어야 한다. 또한 도로살얼음 발생 위험단계별 예측모형을 개발하여 마찰계수 예측을 통한 도로살얼음 예측정보를 생산하는 기법 개발도 고려하여야 한다. 아울러 과학적 도로

살얼음 예측정보 생산과 함께 전달기술 개발을 통한 도로 제설관리 및 안전운전 서비스 체계 확립으로 교통사고 저감 및 예방에 기여하여야 한다. 도로살얼음은 쌓인 눈이 녹았다가 다시 언 경우, 약한 비가 내리는 상태에서 기온이 급격히 내려가는 경우, 지표 부근의 기온이 낮은 상태에서 과냉각상태의 비가 내리는 경우, 기온이 떨어지고 습도가 높아지는 경우에 자주 발생한다. 이처럼 도로살얼음은 비, 눈, 안개와 같은 강수 현상이 우선 있어야 한다. 또한 강수가 얼기 위해서 기온이 영하로 떨어져야 하는데, 이 조건은 기온의 일변화에서

최저기온이 나타나는 새벽이나 이른 아침에 많이 발생한다. 도로 주행자에게 검은 아스팔트로 보일 정도로 빙판의 두께가 아주 얇거나 투명하다. 도로살얼음은 시외 고속도로나 시내 대로에서 발생하는 것뿐 아니라 우리의 생활 가까이에서 쉽게 발생할 수 있다. 이와 같은 도로살얼음 발생 특성을 운전자가 사전에 기억하면서 운전에서 각별히 신경을 쓸 필요가 있다. 또한 눈이 내린 다음 날 아침 기온이 올라가는 시각에 응달 구간을 지나갈 때 속도를 줄이고 운전하는 것이 도로교통 사고를 줄이는 데 꼭 필요하다. 🇰🇷

참고 문헌

- 김백조, 남형구, 하태룡, 김지완, 이용희, 2021: 겨울철 도로기상 및 노면온도의 시공간 변화 특성에 관한 연구, 한국자료분석학회지, 23(5), 2419-2430
- 김백조, 2021: 도로살얼음, 브레이크 없는 위험, 기상청 하늘사랑, 457권, 18-19
- 김백조, 남형구, 김선정, 김지완, 이용희, 2022: 도로 구조 및 상태에 따른 겨울철 기상요소 및 노면온도의 변화 특성, 한국환경과학회지 심사 중
- 기상청, 2013: 손에 잡히는 예보기술: 겨울철 특이 기상 어는 비와 블랙아이스, 제20호 2013년 1월, pp.7
- 기상청, 2020: 도로살얼음 예측 및 대응 포럼, 서울공군호텔, 2020.11.19.
- 기상청, 2021: 도로살얼음 발생 가능성 정보 시범운영 계획, 2021.12.31.
- 윤상후, 2022: 도로살얼음 발생 위험도 예측모형 고도화 및 정보 전달 표출체계 구축, 2021년도 국민생활안전 긴급대응연구사업 위탁과제 최종보고회, 재해기상연구부, 2022.2.6.
- 한국도로공사, 2021: 살얼음 예방 도로불연속점을 찾아라, 도로살얼음 예측정보 제공 개선 업무협약, 전주기상지청, 2021.3.11.
- 행정안전부, 2020: 오전 6시~10시, 빙판길 교통사고의 40.3% 발생, 보도자료, 2020.12.4.
- 최세로나, 이기영, 오철, 김동균, 2012: 기상 및 교통조건이 고속도로 교통사고 심각도에 미치는 영향분석, 한국교통학회 학술대회지, 66권, 247-252.