

고정식 도로기상관측자료 기반 도로결빙 발생 메커니즘의 유형화 및 전조 특성 분석

이채연¹⁾ · 이한경¹⁾ · 안숙희¹⁾ · 서윤암^{2)*}

¹⁾한국외국어대학교 대기환경연구센터, ²⁾제주대학교 데이터사이언스학과

(접수일: 2026년 7월 6일, 수정일: 2026년 7월 27일, 게재확정일: 2026년 8월 9일)

Classification of Road Icing Mechanisms and Analysis of Precursory Characteristics Using Fixed Road Weather Information System (RWIS) Observations

Chaeyeon Yi¹⁾, Hankyung Lee¹⁾, Sukhee Ahn¹⁾, and Yun Am Seo^{2)*}

¹⁾Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

²⁾Department of Data Science, Jeju National University, Jeju, Korea

(Manuscript received 6 July 2026; revised 27 July 2026; accepted 9 August 2026)

Abstract Road icing is a major winter hazard that significantly increases the risk of traffic accidents. Previous studies have primarily focused on predicting road surface temperature or icing occurrence, whereas the temporal evolution and formation mechanisms of road icing have received less attention. To address this gap, this study used long-term observations from a fixed Road Weather Information System (RWIS). A total of 1,880 icing events observed at 66 of the 67 RWIS stations were analyzed. Superposed-epoch analysis was applied to characterize the 24-h evolution of surface temperature, air temperature, and relative humidity before icing onset. Based on antecedent meteorological and road surface conditions, icing events were classified into four mechanism types using physically based rules. The separability of the proposed mechanisms was evaluated using linear discriminant analysis (LDA) and a Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) classifier. SHapley Additive exPlanations (SHAP) were applied to identify the dominant meteorological factors and their transition characteristics. The results showed that, despite distinct formation mechanisms, all icing types exhibited common precursory features characterized by progressive cooling and increasing relative humidity before icing onset. Surface temperature and relative humidity were identified as the most influential variables governing icing occurrence. In particular, surface temperatures near 2°C, combined with relative humidity around 80%, consistently marked a transition zone where the icing risk increased markedly. These findings demonstrate that road icing is a process-driven phenomenon governed by combined cooling and moisture supply, and provide a scientific basis for developing mechanism-informed prediction models and process-based early warning systems.

Key words: Road icing, Road Weather Information System (RWIS), Precursory characteristics, Icing mechanism, Superposed-epoch analysis

*Corresponding Author: Yun Am Seo, Department of Data Science, Jeju National University, 102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju 63243, Korea.
Phone: +82-64-725-3592, Fax: +82-64-725-2579
E-mail: seoya@jejunu.ac.kr

1. 서 론

도로결빙(road icing)은 겨울철 도로교통 사고를 유발하는 대표적인 위험기상 현상으로, 차량의 제동거리 증가와 조향성 저하를 초래하여 교통안전에 심각한 영향을 미친다. 특히 도로살얼음(black ice)은 얇고 투명한 얼음층이 노면에 형성되어 운전자가 육안으로 식별하기 어렵기 때문에 대형 교통사고의 주요 원인으로 지목되고 있다. 국내에서도 최근 겨울철 고속도로 및 국도에서 발생한 다중추돌 사고의 원인으로 도로결빙이 지속적으로 보고되고 있으며, 이에 따라 도로결빙의 발생 과정을 이해하고 예측 정확도를 향상시키기 위한 연구의 중요성이 더욱 커지고 있다.

국외에서는 도로결빙을 단순한 기온 임계현상이 아니라 노면과 대기 사이의 열·수분 교환 과정에 의해 형성되는 복합적인 현상으로 이해하기 위한 연구가 수행되어 왔다. 대규모 연쇄추돌 사고 사례를 분석한 연구에서는 강설, 저온, 시정 악화 및 노면 상태가 복합적으로 작용하여 교통재난이 발생할 수 있음을 제시하였다(Juga et al., 2012). 이후 노면온도뿐 아니라 물, 눈, 얼음 및 블랙아이스 상태를 예측하는 RoadSurf 모형이 개발되었으며(Kangas et al., 2015), 장기간 도로기상관측시스템(Road Weather Information System, RWIS) 자료를 이용하여 모형의 재현성을 평가하는 연구가 수행되었다(Toivonen et al., 2019). 또한 Model of the Environment and Temperature of Roads (METRo) 모형을 이용한 노면온도 및 도로상태 예측 운영체계가 제시되었고(Crevier and Delage, 2001), RWIS와 기상자료를 활용하여 도로상태와 교통위험도를 분류하는 기법도 제안되었다(Fu et al., 2017). 최근에는 미국 Montana 지역의 RWIS 관측자료를 이용하여 도로결빙 발생 특성과 주요 기상요인을 분석하고, 복사와 수분 공급이 결빙 형성에 중요한 역할을 한다는 결과가 보고되었다(Jin and McBroom, 2024). 이처럼 최근에는 RWIS 관측자료를 직접 활용하여 결빙 특성을 분석하는 연구가 증가하고 있으나, 대부분 결빙 발생 특성 규명, 예측모형 개발 및 검증에 초점을 두고 있다.

국내에서는 기상예보자료를 활용한 노면온도 예측 연구(Yang et al., 2012)와 수치예보 및 도로 물리 특성을 이용한 노면온도 모형 개발(Park et al., 2014; Lee et al., 2022)이 수행되었다. 이후 이동식 관측자료를 이용한 블랙아이스 취약구간 분석(Park et al., 2021), GIS 기반 블랙아이스 위험도 평가(Hong et al., 2022), 야간 결빙 예측 및 도로 순찰 최적화 연구(Jang, 2023, 2025) 등으로 연구 범위가 확대되고 있다. 그러나 국내 연구는 주로 노면온도 예측, 결빙 여부 판정 및 취약구간 탐지에 집중되어 있어, 장기간 RWIS 시계열을 이용한 결빙 이전의 시간적 진화와 발생 메커니즘에 대한 분

석은 제한적이다. 본 연구는 다년간의 고정식 RWIS 관측자료를 기반으로 결빙 이전의 시간적 진화를 분석하고, 발생 메커니즘을 유형화한 후 유형 간 구별성을 정량적으로 검증한다는 점에서 기존 연구와 차별된다.

이상의 선행연구를 종합하면 도로결빙 연구는 크게 세 가지 한계를 가진다. 첫째, 대부분의 연구는 특정 시점의 기온·노면온도 또는 예측 성능 평가에 초점을 두고 있어, 결빙 발생 이전 수 시간에서 수십 시간에 걸친 기상요소의 시간적 진화 과정을 충분히 설명하지 못한다. 예를 들어 물리모형 기반 결빙 예측(Chen et al., 2023)과 기상정보 기반 조기경보(Li et al., 2023)는 예측 및 경보 성능 향상에 중점을 두고 있으며, 결빙 발생 이전의 시간적 진화 과정과 발생 메커니즘을 함께 분석한 연구는 제한적이다. 둘째, 적설 용해 후 재결빙, 강수 후 냉각, 고습 조건 결빙 등 다양한 결빙 발생 메커니즘이 알려져 있으나, 이를 장기간 RWIS 관측자료를 이용하여 체계적으로 유형화하고 유형 간 특성을 비교한 연구는 제한적이다. 셋째, 주요 기상요인의 영향은 다수 연구에서 제시되었으나, 결빙 메커니즘과 시간적 진화를 함께 고려하여 영향요인의 상대적 중요성과 예측 기여 특성을 정량적으로 평가한 연구는 부족하다.

이러한 한계를 보완하기 위하여 본 연구에서는 도로결빙을 특정 시점의 기상조건에 의해 결정되는 현상이 아니라, 결빙 발생 이전의 냉각과 습윤화가 시간적으로 누적되는 과정으로 해석하였다. 이를 위해 국내 주요 고속도로에 설치된 RWIS 자료를 이용하여 결빙 발생 전 24시간 동안의 노면온도, 기온 및 상대습도의 시간적 진화 특성을 분석하였다. 결빙 이전의 수분 공급 특성과 냉각 과정을 바탕으로 발생 메커니즘을 유형화하고 유형별 진화 양상을 비교하였다. 이어 선형판별분석(Linear Discriminant Analysis, LDA)와 Light Gradient Boosting Machine (LightGBM)을 이용하여 유형 간 구별성을 평가하고, 결빙·비결빙 이진분류 모형과 SHAP 분석을 통해 주요 영향요인과 예측 기여 특성을 해석하였다. 마지막으로 SHAP 결과와 규칙 기반 분류 기준의 정합성을 비교하여 저온 및 고습 조건의 타당성을 검토하였다.

본 연구의 목적은 장기간 RWIS 관측자료를 이용하여 도로결빙의 시간적 진화 과정과 발생 메커니즘을 규명하고, 제안한 메커니즘의 구별성과 결빙 발생의 주요 영향요인을 정량적으로 평가하는 데 있다. 이를 통해 도로결빙의 형성 과정을 보다 체계적으로 이해하고, 향후 도로결빙 예측 및 조기경보 체계 개선을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구대상지 및 자료

본 연구에서는 도로결빙 발생 메커니즘을 분석하기

위하여 기상청의 고정식 RWIS 자료를 활용하였다. RWIS는 고속도로 주요 지점에 설치되어 노면과 도로 주변의 기상환경을 1분 간격(한국표준시)으로 실시간 관측하는 시스템으로, 노면온도(surface temperature), 기온(air temperature), 상대습도(relative humidity), 강수량(precipitation), 노면상태(surface condition) 등 도로결빙 발생과 관련된 주요 변수를 제공한다. 노면상태는 기상청 노면상태 코드(01 Dry - 15 Snow/Ice)에 따라 기록된다(KMA, 2026a, 2026b). 본 연구에서 사

용한 모든 예측변수는 RWIS 관측자료로부터 산출하였으며, 결빙 발생 시점의 노면온도, 기온 및 상대습도와 각 변수의 시간차 변화량을 계산하였다. 또한 12시간 누적강수량(precip12)은 RWIS의 일누적 강수량 변수인 RN05의 시간별 증분값을 산출한 후, 결빙 발생 이전 12시간 동안 누적하여 계산하였다.

연구대상지는 겨울철 결빙 사례가 빈번하게 관측된 중부내륙고속도로, 서해안고속도로, 경부고속도로, 호남고속도로 및 통영대전고속도로로 선정하였다(Fig.

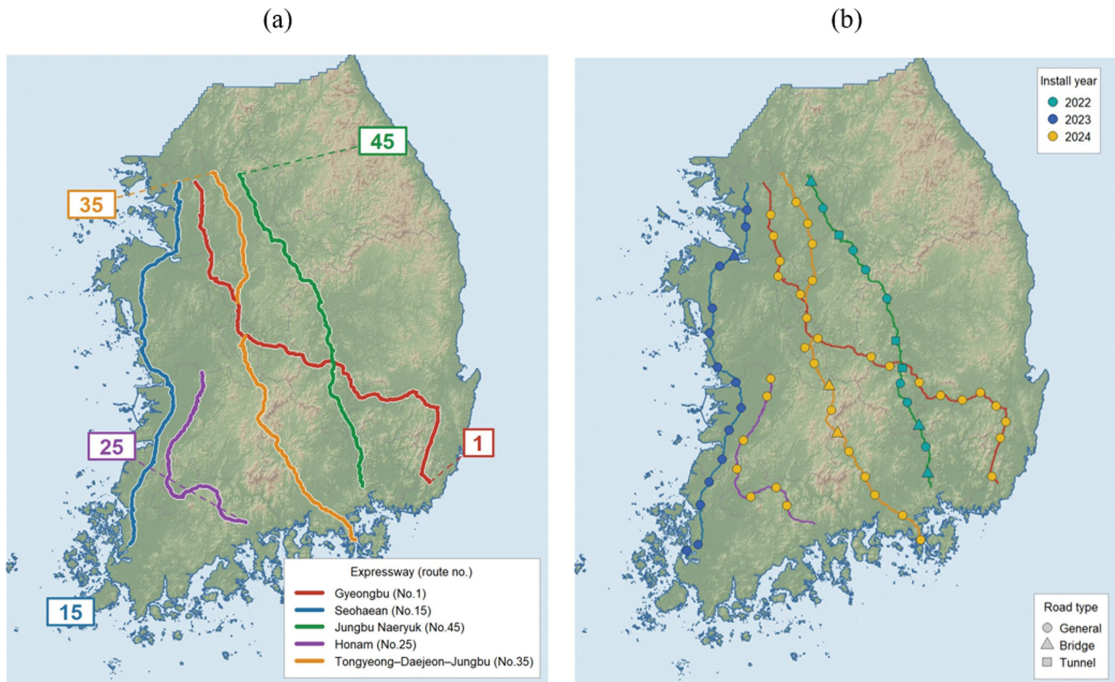


Fig. 1. RWIS observation network used in this study. (a) Spatial distribution of RWIS stations along the five expressways analyzed in this study. (b) Distribution of RWIS stations by installation year and road type. Detailed information for each RWIS station (station name, geographic coordinates, expressway, and road type) is provided in Appendix A.

Table 1. Sites indicates the number of RWIS stations included in the event-based analysis.

Installation Year	No.	Expressway	Observation Period	Sites	Icing events (2023~24)	Icing events (2024~25)	Total icing events
2022	45	Jungbu Naeryuk	2022.12~2025.03	13	72	110	182
2023	15	Seohaean	2023.11~2025.03	16	322	672	994
2024	1	Gyeongbu	2024.11~2025.03	18	0	249	249
	25	Honam	2024.11~2025.03	7	0	201	201
	35	Tongyeong-Daejeon-Jungbu	2024.11~2025.03	12	0	254	254
Total				66	394	1,486	1,880

Note: The full observation network consisted of 67 stations, of which 66 recorded at least one icing event.

1). 노선별 자료 활용 기간은 관측망 구축 시기에 따라 상이하며, 본 연구에서는 2022년 12월부터 2025년 3월까지 수집된 자료를 분석에 활용하였다(Table 1). 자료의 품질과 신뢰성을 확보하기 위하여 자동기상관측자료의 일반적인 품질관리 절차인 물리범위 검사, 변수 간 내부정합성 검사 및 시간일관성 검사를 적용하였다(Meek and Hatfield, 1994; Fiebrich et al., 2010; Estévez et al., 2011). 품질관리 임계값은 선행연구를 그대로 적용하지 않고, 1분 간격 RWIS 자료의 관측 특성과 결빙 사례의 물리적 타당성을 고려하여 본 연구에서 설정하였다. 구체적으로 1) 노면온도와 기온이 $-40 \sim -40^{\circ}\text{C}$, 상대습도가 0~100% 범위를 벗어난 자료를 제거하였고, 2) 동일 시각의 노면온도와 기온 차이가 30°C 를 초과하는 자료를 제외하였으며, 3) 1분 동안 노면온도 변화량의 절댓값이 10°C 를 초과하는 시계열 스파이크와 단계 변화를 제거하였다. 또한 4) 결빙 개시 시점의 노면온도가 5°C 를 초과하는 사례는 물리적 타당성이 낮은 것으로 판단하여 분석에서 제외하였다. 결측자료는 결빙 발생 이전의 시간적 변화 특성을 왜곡할 수 있으므로 보간하지 않았으며, 결빙 발생 전 24시간 동안 연속 시계열이 확보된 사례만 최종 분석에 활용하였다.

2.2 결빙 이벤트 정의 및 시계열 구축

노면상태(surface condition)가 DRY 또는 WET에서 ICE로 처음 전이되는 시점을 결빙 발생 시점(onset, t_0)으로 정의하였다. 동일 지점에서 결빙 상태가 연속적으로 유지되는 경우에는 하나의 이벤트로 간주하였으며, 최초 발생 시점만 분석에 사용하였다. 각 결빙 이벤트에 대하여 발생 시점(t_0)을 기준으로 이전 24시간($t_0-24 \text{ h} \sim t_0$)의 시계열 자료를 추출하였다. 이를 통해 모든 결빙 이벤트를 동일한 기준시간에서 비교 가능한 시계열 자료를 구축하였다. 최종적으로 총 67개 RWIS 관측지점으로 구성된 관측망 중 결빙 이력이 확인된 66개 지점에서 추출한 1,880개의 결빙 이벤트를 분석하였다(Table 1). 결빙 상태의 시간대별 발생 특성을 분석하기 위하여 전체 유효 RWIS 관측자료를 이용하여 각 시간대의 ICE 상태 지속시간을 누적하였다. 노선별 관측기간과 관측지점 수의 차이를 보정하기 위해 각 시간대의 ICE 상태 관측시간을 동일 시간대의 전체 유효 관측시간으로 나누어 표준화 결빙률(normalized icing frequency)을 산출하였다. 이를 통해 노선별 결빙 발생의 상대적 시간 분포를 비교하였다.

2.3 결빙 발생 전 기상요소의 시간적 진화 분석

결빙 발생 이전의 기상 및 노면 상태 변화 과정을 분석하기 위하여 합성에폭 분석(superposed-epoch analysis; Chree, 1913)을 수행하였다. 합성에폭 분석은

발생 시점이 서로 다른 다수의 사건을 동일한 기준시점에 정렬하여 평균적인 시간적 진화 양상을 분석하는 사건 정렬(event-aligned) 기법이다. 본 연구에서는 각 결빙 이벤트를 결빙 개시 시점(t_0)에 정렬하고, 결빙 발생 전 24시간($t_0-24 \text{ h} \sim t_0$) 동안의 노면온도, 기온 및 상대습도 시계열을 중첩하여 각 시점의 평균값과 사분위범위(interquartile range, IQR)를 산출하였다. 이를 통해 결빙 발생 이전에 공통적으로 나타나는 전조 특성과 결빙 발생 메커니즘 유형별 시간적 진화 양상을 분석하였다.

결빙 발생과 관련된 선행강수의 시간적 범위를 평가하기 위하여 각 결빙 이벤트에 대해 결빙 개시 이전의 가장 최근 강수 시점과 결빙 개시 시점 간의 시간차를 산출하였다. 또한 선행강수 시간창을 1시간 단위로 확대하면서 시간창 내 강수 이력이 포함되는 결빙 이벤트의 누적 포착률을 계산하였다. 누적 포착률은 결빙 발생 전 24시간 이내에 강수 이력이 확인된 결빙 이벤트를 기준으로 산정하였으며, 이를 통해 결빙 메커니즘 유형화에 적용할 선행강수 시간창을 결정하였다. 본 분석에서 선행강수는 RWIS 강수량 자료로 관측된 액체 강수인 강우를 의미하며, 노면상태 코드로 확인된 Snow 및 Snow/Ice 상태는 누적 포착률 산정에서 제외하였다.

2.4 결빙 발생 메커니즘 유형화

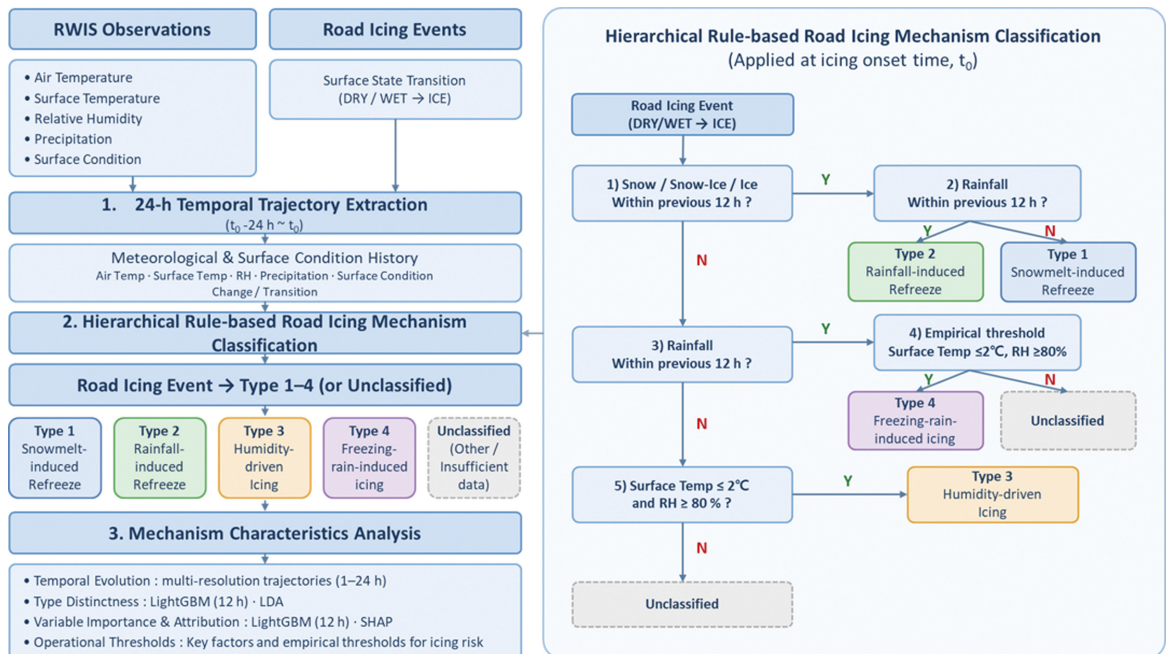
결빙 발생 이전의 수분 공급 방식과 기상 및 노면의 냉각 과정을 기반으로 도로결빙 발생 메커니즘을 유형화하였다(Table 2). 도로결빙은 단일한 기상조건에서 발생하는 현상이 아니라, 강수·적설·대기 중 수분 등 수분 공급원의 차이와 노면 냉각 과정에 따라 서로 다른 경로를 통해 형성될 수 있다. 이에 따라 결빙 발생 전 24시간 동안의 기상 및 노면 상태 변화를 이용하여 대표적인 결빙 발생 경로를 정의하였다. 또한 선행 강수 및 노면상태 이력의 판정에는 선행강수 시간차와 누적 포착률 분석을 통해 선정한 결빙 발생 전 12시간의 시간창을 적용하였다.

유형 분류는 규칙 기반(rule-based) 방식으로 수행하였으며, 하나의 이벤트가 하나의 유형에만 할당되도록 상호 배타적인 계층적 규칙(hierarchical rule)을 적용하였다(Fig. 2). 유형은 적설 용해 후 재결빙(Type 1), 강수 후 재결빙(Type 2), 고습 조건 결빙(Type 3), 착빙성 추정 강우(Type 4), 그리고 미분류형(Unclassified)으로 구분하였다. 본 연구에서 정의한 유형은 통계적 군집분석을 통해 도출된 분류가 아니라, 결빙 발생 이전의 물리적 진행 과정을 설명하기 위해 설정한 기상학적 개념모형(conceptual model)이다. 규칙 기반 유형 분류에 적용된 노면온도와 상대습도 기준의 민감도를 평가하기 위하여 노면온도 기준을 $0 \sim 3^{\circ}\text{C}$, 상대

Table 2. Physics-based classification criteria for the four representative road icing formation mechanisms.

Mechanism	Classification Criteria	Key Indicator
Type 1 Snowmelt-induced refreezing	Snow, Snow/Ice, or Ice surface conditions observed within the preceding 12 h, with no rainfall during the same period	Residual snow or ice without rainfall
Type 2 Rainfall-induced refreezing	Rainfall observed within the preceding 12 h in the presence of antecedent Snow, Snow/Ice, or Ice surface conditions	Rainfall over antecedent snow or ice, followed by cooling
Type 3 Humidity-driven icing	No rainfall and no antecedent Snow, Snow/Ice, or Ice surface conditions within the preceding 12 h, with surface temperature $\leq 2^{\circ}\text{C}$ and relative humidity $\geq 80\%$	High humidity under low surface-temperature conditions
Type 4 Estimated freezing- rain icing	Rainfall observed within the preceding 12 h without antecedent Snow, Snow/Ice, or Ice surface conditions, with surface temperature $\leq 2^{\circ}\text{C}$ and relative humidity $\geq 80\%$	Rainfall on a low-temperature surface without antecedent snow or ice
Unclassified	Events not satisfying the above criteria or exhibiting mixed or ambiguous characteristics	Mixed or unidentified mechanisms

Note: Type 4 represents icing events inferred to be associated with freezing-rain processes based on antecedent rainfall, surface temperature, and relative humidity conditions. Freezing rain was not directly observed.

**Fig. 2.** Overall framework for identifying road icing formation mechanisms and analyzing their temporal evolution characteristics using RWIS observations.

습도 기준을 75~85% 범위에서 변화시키며 유형을 재 분류하였다. 기준 조건($T_s \leq 2^{\circ}\text{C}$, $RH \geq 80\%$)에 따른 분류 결과와 각 대안 기준의 분류 일치율을 비교 하였다.

2.5 결빙 메커니즘 유형의 통계적 구별성 검증

본 연구에서 제안한 규칙 기반 결빙 메커니즘(Type 1~4)이 통계적으로도 서로 구별 가능한지를 평가하기 위하여 다중분류(multi-class classification) 모델을 구

Table 3. Predictor variables used in the LightGBM models.

Category	Variable	Description
Current conditions	T_{so} , T_{ao} , RH_o	Meteorological conditions at icing onset
Surface temperature change	ΔT_{sk} ($k = 1, 3, 6$, and 12 h)	Difference in surface temperature between t_0 and $t-k$
Air temperature change	ΔT_{ak} ($k = 1, 3, 6$, and 12 h)	Difference in air temperature between t_0 and $t-k$
Relative humidity change	ΔRH_k ($k = 1, 3, 6$, and 12 h)	Difference in relative humidity between t_0 and $t-k$
Antecedent precipitation	precip12	Accumulated precipitation during previous 12 h

Note: All predictor variables were derived from RWIS observations (road surface temperature, air temperature, relative humidity, and precipitation). precip12 denotes the 12-h accumulated precipitation derived from the increment of RN05 (daily accumulated precipitation).

측하였다. 분류 대상은 규칙 기반 알고리즘에 의해 Type 1~4로 분류된 결빙 사례로 한정하였으며, 네 가지 물리적 메커니즘 중 어느 하나에도 해당하지 않는 미분류(Unclassified) 사례는 모델 학습 및 성능평가에서 제외하였다. 입력변수는 결빙 발생 시점의 노면온도(T_{so}), 기온(T_{ao}), 상대습도(RH_o), 시간차 변수 ΔT_{sk} , ΔT_{ak} 및 ΔRH_k ($k = 1, 3, 6$, and 12 h), 그리고 12시간 누적강수량(precip12)으로 구성하였고(Table 3), 분류모델은 LightGBM을 이용하여 구축하였다. 모델 성능은 3회 반복 5-fold 교차검증(repeated 5-fold cross-validation)을 통해 평가하였으며, 정확도(accuracy), Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (macro-AUC), Critical Success Index (macro-CSI)를 산출하였다.

또한 제한한 유형이 새로운 공간 및 시간 조건에서도 유지되는지를 확인하기 위하여 두 가지 추가 검증을 수행하였다. 지점제외 교차검증(leave-station-out cross-validation)에서는 하나의 RWIS 관측지점을 검증자료로 제외하고 나머지 지점을 이용하여 학습함으로써 공간적 일반화 성능을 평가하였다. 겨울시즌 블록 검증(winter-season block validation)에서는 하나의 겨울시즌 자료를 검증자료로 사용하고 나머지 겨울시즌 자료를 학습자료로 이용하여 시간적 일반화 성능을 평가하였다.

한편, 유형 간 분포 특성을 시각적으로 확인하기 위하여 선형판별분석 LDA를 수행하였다. LDA에는 Type 1~4뿐만 아니라 미분류 사례도 함께 포함하여 판별공간에서의 상대적 위치를 확인하였으며, 미분류 사례는 유형 간 경계 영역의 분포 특성을 해석하기 위한 참고자료로만 활용하였다.

2.6 결빙 발생 영향요인 평가 및 SHAP 기반 기여도 분석

결빙 발생에 영향을 미치는 주요 기상요인을 분석하기 위하여 결빙 발생 여부를 예측하는 이진분류

(binary classification) 모델을 구축하였다. 결빙 사례는 2.2절에서 정의한 결빙 이벤트를 사용하였으며, 비교군은 동일 RWIS 지점에서 추출한 비결빙 사례를 이용하였다. 비결빙 사례는 각 관측지점에서 결빙이 발생하지 않은 시점을 결빙 사례의 4배(1:4)로 무작위 추출하였으며, 물리적으로 결빙이 가능한 조건만 비교하기 위해 노면온도 10°C 이하의 자료만 분석에 포함하였다. 입력변수는 Table 3에 제시한 16개의 기상변수를 동일하게 사용하였으며, 분류모델은 LightGBM을 적용하였다. 모델 성능은 3회 반복 5-fold 교차검증을 기본으로 평가하였으며, 추가적으로 지점제외 교차검증과 겨울시즌 블록 검증을 수행하여 공간적 및 시간적 일반화 성능을 검토하였다. 성능평가는 정확도(Accuracy), AUC, CSI, Probability of Detection (POD)를 이용하였다.

모델의 예측 결과를 해석하기 위하여 SHapley Additive exPlanations (SHAP)를 적용하였다. 평균 절대 SHAP 값을 이용하여 변수 중요도를 평가하였으며, 주요 변수에 대해서는 SHAP dependence plot을 작성하여 노면온도와 상대습도 변화에 따른 결빙 발생 기여도를 분석하였다. 이를 통해 규칙 기반 유형 분류에 적용한 노면온도 2°C 및 상대습도 80% 기준이 통계적으로도 일관된 특성을 보이는지를 확인하였다.

3. 결 과

3.1 결빙 발생의 시간적 특성

먼저 전체 유효 RWIS 관측자료를 이용하여 ICE 상태의 시간대별 분포를 분석하였다. Figure 3a는 시간대별 누적 ICE 상태시간을, Fig. 3b는 노선별 관측기간과 관측지점 수를 보정한 표준화 결빙률을 나타낸다.

도로결빙은 하루 중 특정 시간대에 집중적으로 발생하는 경향을 보였다. 전체 결빙 상태 발생 시간은

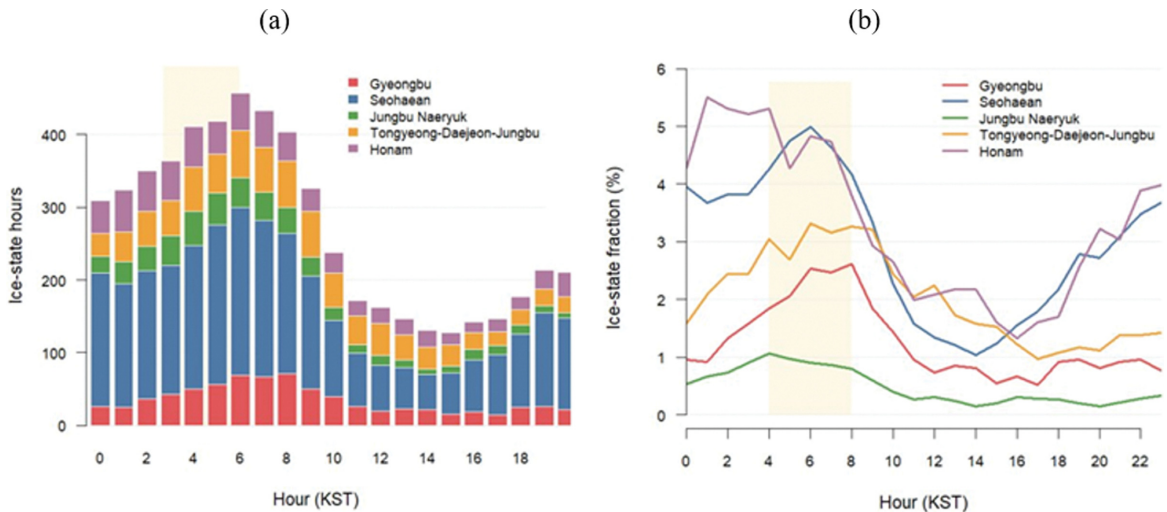


Fig. 3. Road icing occurrence characteristics by highway route. (a) Cumulative icing duration, (b) Observation-period-normalized icing occurrence rate.

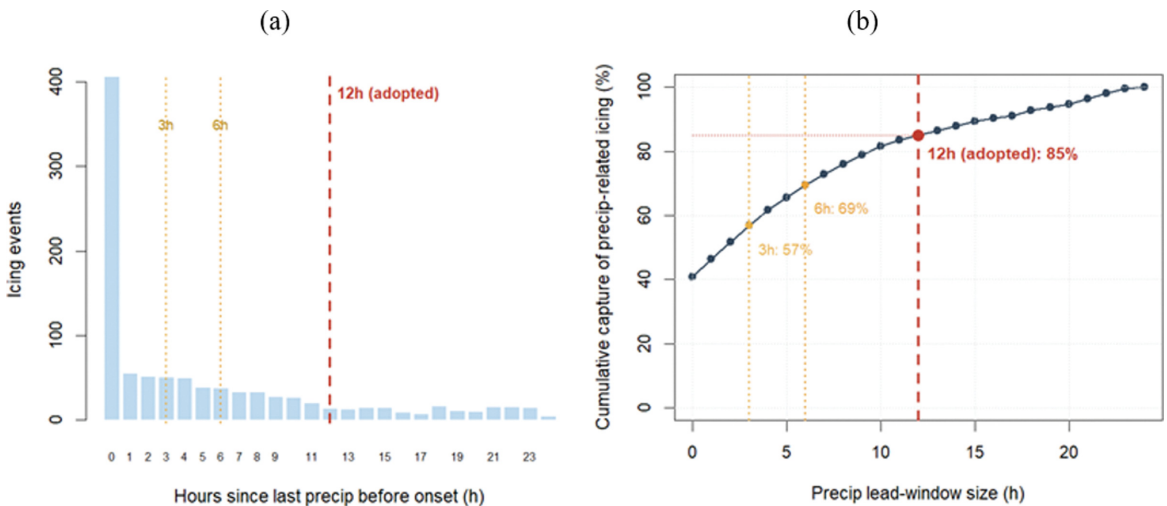


Fig. 4. Rationale for selecting the 12-h antecedent precipitation window. (a) Distribution of the precipitation-to-icing time lag. (b) Cumulative detection rate as a function of antecedent precipitation window length. The cumulative detection rate was computed with respect to the total number of icing events preceded by precipitation.

야간부터 증가하기 시작하여 새벽 시간대에 최대값을 나타냈으며, 오전 이후에는 급격히 감소하였다. 특히 오전 6~8시경에 결빙 상태 시간이 가장 길게 나타났고, 오후 시간대에는 가장 낮은 수준을 보였다. 이러한 경향은 대부분의 고속도로 노선에서 일관되게 나타났다(Fig. 3a).

관측시간 대비 결빙 발생 비율을 나타내는 표준화 결빙률에서도 유사한 특성이 나타났다(Fig. 3b). 결빙률은 새벽 시간대에 가장 높았으며, 오후 시간대에 가

장 낮게 나타났다. 특히 서해안고속도로와 호남고속도로는 다른 노선에 비해 상대적으로 높은 결빙률을 보였으며, 노선별 결빙 발생 특성은 뚜렷한 차이를 보였다. 도로결빙은 단순한 저온 조건보다 야간부터 새벽까지 지속되는 노면 냉각 환경과 더욱 밀접한 관련을 보였다.

다음으로 실제 결빙 발생 이벤트(1,880건)를 대상으로 선행강수와 결빙 발생 간의 시간적 관계를 분석하였다. 강수를 동반한 결빙 사건은 결빙 발생 시점에

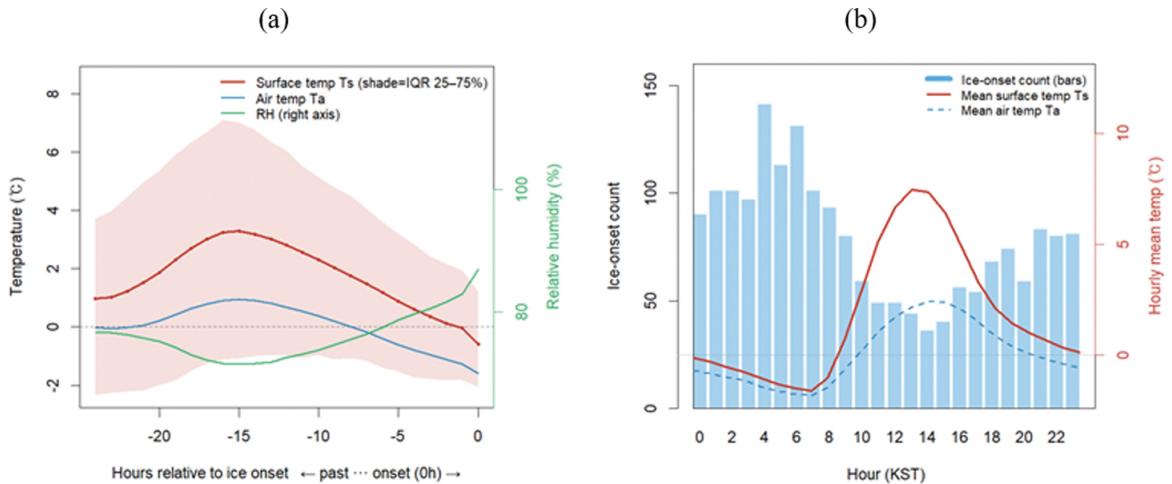


Fig. 5. Superposed-epoch analysis of road icing events. (a) Mean 24-h trajectories aligned to icing onset ($n = 1,880$). Solid lines represent the mean trajectories, and shaded envelopes denote the interquartile range (IQR). (b) Distribution of icing onset time and hourly mean surface and air temperatures.

가까울수록 높은 빈도로 관측되었으며, 선행시간이 길어질수록 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4a). 전체 결빙 사건 중 약 53%는 결빙 발생 이전 24시간 이내에 강수 이력을 포함하였으며, 이들 강수 관련 결빙 사건을 대상으로 누적 포착률을 산정한 결과 약 57%는 발생 전 3시간 이내, 약 69%는 6시간 이내, 약 85%는 12시간 이내에 최근 강수가 관측되었다(Fig. 4b). 이후 시간창을 확대할수록 누적 포착률의 증가 폭은 점차 완만해졌으며, 이러한 결과는 본 연구에서 적용한 12시간 선행강수 시간창의 경험적 근거를 제공한다.

마지막으로 결빙 이벤트를 기준시점(t_0)에 정렬하여 결빙 발생 전 24시간 동안의 평균 시간진화 특성을 분석하였다. 그 결과, 결빙 발생 이전에는 노면온도의 하강과 상대습도의 증가가 함께 나타났다(Fig. 5). 노면온도와 기온은 결빙 발생 약 15시간 전부터 지속적으로 감소하였으며, 상대습도는 같은 시점부터 점진적으로 증가하여 결빙 발생 시점에는 약 80% 이상 수준까지 증가하였다(Fig. 5a). 결빙 발생 시각 분포와 노면온도의 일변화를 함께 비교한 결과에서도 결빙은 노면온도가 약간 냉각에 의해 낮아지는 시간대에 집중되는 것으로 나타났다(Fig. 5b).

이상의 결과는 도로결빙이 특정 시점의 저온 상태에 의해 순간적으로 발생하는 현상이 아니라, 결빙 발생 이전 수 시간 동안의 지속적인 냉각과 수분 공급이 함께 진행되는 과정에서 형성됨을 보여준다. 또한 선행 강수와 기상요소의 시간적 진화 특성은 이후 제시하는 결빙 발생 메커니즘의 유형화와 주요 영향요인 분석을 위한 물리적 해석의 근거를 제공한다.

3.2 결빙 발생 메커니즘 유형화

2.4절에서 제안한 규칙 기반 분류 기준을 적용한 결과, 전체 1,880건의 결빙 이벤트는 Type 1(적설 용해 후 재결빙) 490건(26.1%), Type 2(강수 후 재결빙) 535건(28.5%), Type 3(고습 조건 결빙) 330건(17.6%), Type 4(착빙성 추정 강수) 216건(11.5%), 미분류 309건(16.4%)로 분류되었다(Table 4).

Type 2가 가장 높은 비율을 차지하였으며, Type 1과 함께 전체 결빙 사건의 54.6%를 차지하였다. 따라서 적설 또는 강수 이후 노면이 냉각되는 재결빙 과정이 국내 고속도로 결빙에서 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 한편 미분류 사례는 제안한 네 가지 규칙에 명확히 해당하지 않는 결빙 사건으로, 기존 규칙에 무리하게 포함시키기보다 유형의 물리적 해석 가능성을 유지하기 위해 별도의 범주로 분리하였다.

Type 1은 적설 또는 기존 결빙 상태가 존재한 이후 일시적인 용해를 거쳐 다시 결빙이 형성되는 사례이다(Fig. 6a). 사례에서는 결빙 이전 ICE 상태가 WET 상태로 전환되었으며, 이후 노면온도가 점차 하강하면서 다시 ICE 상태가 형성되었다. 이는 적설 또는 기존 결빙의 용해수가 노면에 잔류한 상태에서 재냉각에 의해 결빙이 발생한 전형적인 재결빙 사례로 해석된다.

Type 2는 강수 이후 노면 냉각에 의해 결빙이 형성되는 사례이다(Fig. 6b). 결빙 발생 이전 강수가 관측되었으며 노면은 지속적으로 WET 상태를 유지하였다. 이후 노면온도가 급격히 하강하면서 결빙이 발생하였다. 이는 강수에 의해 공급된 수분이 노면에 남아 있는 상태에서 냉각이 진행되어 결빙으로 전환되

Table 4. Frequency distribution of road icing events classified by formation mechanism.

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Unclassified	Total
Count	490	535	330	216	309	1,880
Percentage (%)	26.1	28.5	17.6	11.5	16.4	100.0

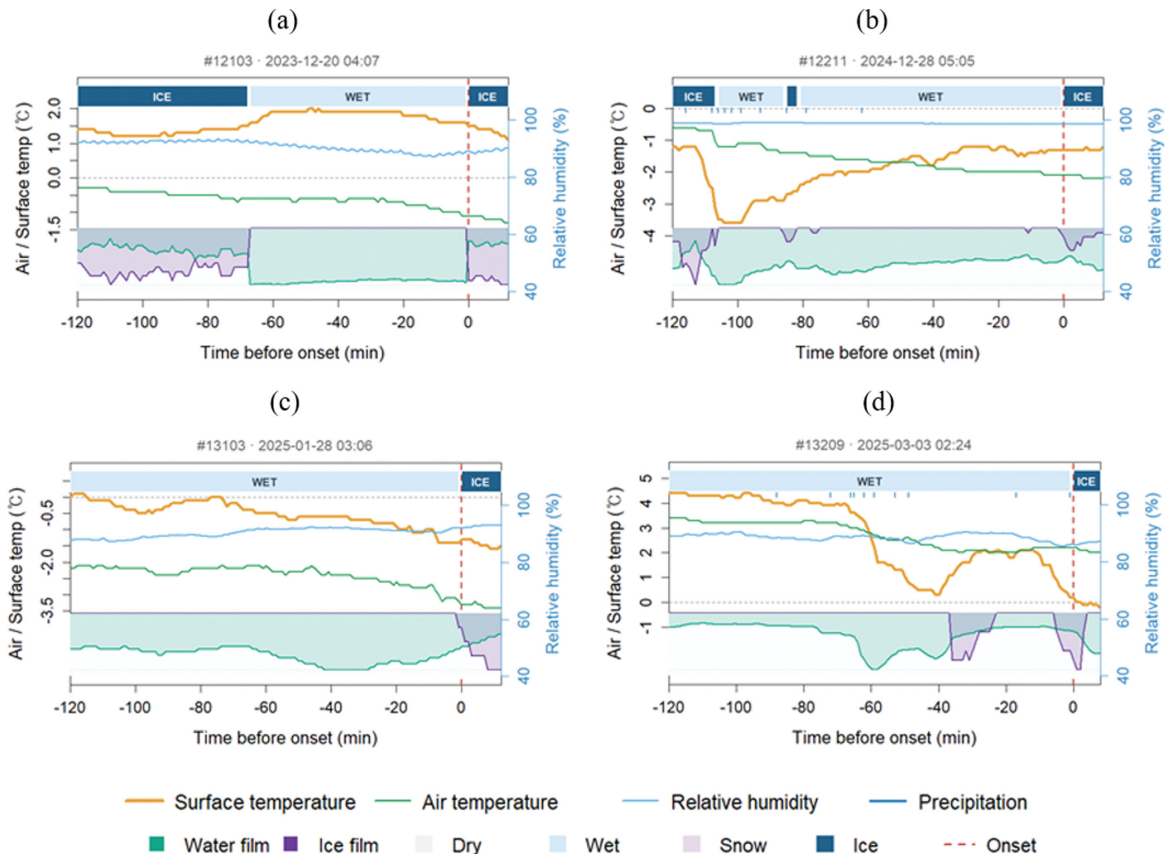


Fig. 6. Representative temporal evolution of the four road icing formation mechanisms prior to icing onset. The notation (e.g., #12103) at the top of each panel indicates the RWIS station ID from which the representative icing event was selected; the first two digits denote the corresponding expressway. Detailed information for each RWIS station is provided in Appendix A. (a) Snowmelt-induced refreezing. (b) Rainfall-induced refreezing. (c) High-humidity icing without precipitation. (d) Estimated freezing-rain icing.

는 과정을 보여준다.

Type 3은 강수 없이 상대적으로 높은 습도 조건에서 발생한 결빙 사례이다(Fig. 6c). 강수는 관측되지 않았으나 상대습도가 높은 상태가 지속되었고, 노면 온도와 기온이 점진적으로 하강하면서 결빙이 형성되었다. 이는 대기 중 수분 공급 또는 노면 습윤화 과정이 결빙 형성에 기여한 사례로 해석된다.

Type 4는 강수와 동시에 노면온도가 영하 조건에 가까운 상태를 유지하면서 결빙이 형성된 사례이다

(Fig. 6d). 강수가 지속되는 가운데 노면온도가 0°C 부근까지 하강하고 결빙 상태로 전환되는 특징을 보였다. 이러한 조건은 착빙성 강수에 의한 결빙 과정과 유사하나, 본 연구에서는 강수 형태를 직접 관측하지 않았으므로 추정된 메커니즘으로 해석하였다.

각 유형은 수분 공급원(적설, 강수, 대기 수분)과 냉각 과정에서 뚜렷한 차이를 보였으며, 동일한 도로결빙이라도 서로 다른 물리적 형성 경로를 통해 발생할 수 있음을 확인하였다.

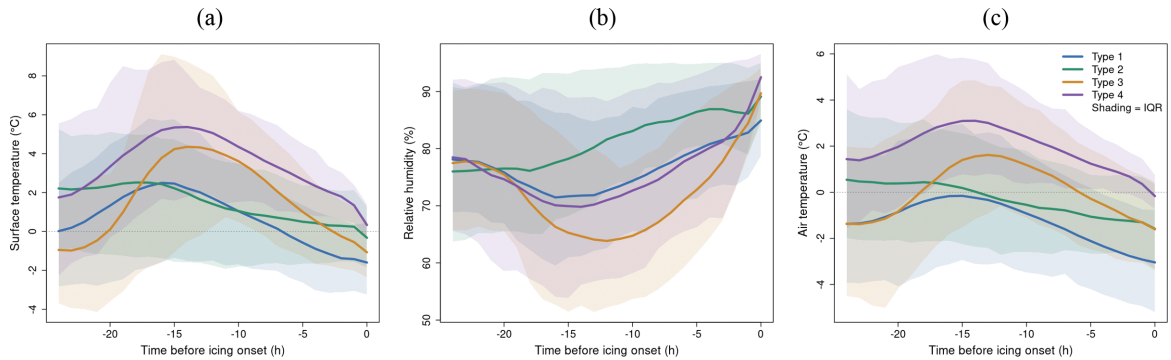


Fig. 7. Mean temporal evolution during the 24 h preceding icing onset for each road icing formation mechanism. Solid lines represent the mean trajectories, and shaded envelopes denote the interquartile range (IQR) for each mechanism type. (a) Surface temperature (T_s). (b) Relative humidity (RH). (c) Air temperature (T_a).

3.3 유형별 시간적 진화 특성 비교

결빙 발생 전 24시간 동안의 기상요소 변화를 유형별로 비교한 결과, 각 유형은 서로 다른 냉각 및 수분 공급 과정을 거쳐 결빙에 도달하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 특히 노면온도와 상대습도의 시간적 변화는 결빙 발생이 단순히 노면온도의 하강만으로 설명되지 않으며, 수분 공급 과정이 함께 작용함을 보여 주었다.

노면온도 변화(Fig. 7a)를 살펴보면, 강수의 영향을 받는 Type 2와 Type 4는 결빙 발생 시점에 노면온도가 거의 0°C 부근에서 결빙 상태로 전환되는 특징을 보였다. 이는 강수에 의해 노면에 충분한 수분이 존재하는 상태에서 노면온도가 결빙 가능한 수준에 도달하면서 결빙이 형성되었음을 의미한다. 반면 결빙 발생 전 12시간 이내에 강우가 관측되지 않은 Type 1과 Type 3은 다른 양상을 보였다. Type 1은 결빙 발생 약 6시간 전에 이미 노면온도가 0°C 이하로 하강하였으며, Type 3 역시 결빙 발생 약 2시간 전에 0°C 를 통과하였다. 그러나 두 유형 모두 노면온도가 0°C 이하가 된 직후에는 결빙이 발생하지 않았으며, Type 1은 평균 상대습도가 85%(노면온도 약 -2°C)일 때, Type 3은 평균 상대습도가 90%(노면온도 약 -1°C) 수준에서 결빙이 관측되었다. 이는 결빙 발생이 낮은 노면온도뿐 아니라 노면 수분의 양과 상태에 의해서도 영향을 받음을 보여준다.

상대습도 변화(Fig. 7b)는 이러한 차이를 더욱 명확하게 보여준다. Type 2는 결빙 발생 전 24시간 동안 상대습도가 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 강수 이후 습윤한 환경이 유지되는 가운데 냉각이 진행되는 과정을 반영한다. Type 3은 다른 유형과 구별되는 특징을 나타냈는데, 결빙 발생 약 12시간 전까지 상대습도가 약 64% 수준으로 감소한 이후, 결

빙 시점으로 갈수록 급격히 증가하여 약 89%에 도달하였다. 이러한 변화는 네 유형 가운데 가장 큰 상대습도 증가폭에 해당하였다. Type 3에서는 노면온도가 결빙 가능한 수준까지 하강한 이후에도 결빙이 즉시 발생하지 않고, 상대습도가 증가한 뒤 결빙으로 전이되는 양상이 나타났다. 이는 무강수 조건의 결빙에서 대기 중 수분 공급이나 그에 따른 노면 습윤화가 주요 선행 과정으로 작용할 가능성을 보여준다.

기온 변화(Fig. 7c)는 노면온도와 유사한 경향을 보였으나, 유형 간 차이는 노면온도에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 반면 상대습도는 유형별 수분 공급 과정의 차이를 가장 뚜렷하게 반영하였으며, 특히 Type 3에서 나타난 급격한 상대습도 증가는 다른 유형과 구별되는 핵심적인 선행 특성으로 나타났다.

3.4 결빙 발생 메커니즘의 통계적 구별성 검증

제안한 규칙 기반 결빙 메커니즘이 통계적으로도 서로 구별 가능한지를 확인하기 위하여 LDA와 LightGBM 기반 다중분류 분석을 수행하였다.

LDA 결과(Fig. 8), Type 1~4는 판별공간에서 서로 다른 분포 특성을 나타냈으며, Type 4는 다른 유형과 뚜렷하게 구분되는 군집을 형성하였다. Type 1과 Type 2는 일부 중첩이 나타났으나 전반적으로 서로 다른 분포 특성을 보였다. 미분류 사례는 독립된 군집을 형성하지 않고 Type 1과 Type 3 사이를 포함한 유형 간 경계 영역에 주로 분포하였다. 이들 사례는 모두 실제 결빙(ICE)으로 관측되었지만, 사전에 정의한 네 가지 규칙 가운데 어느 하나를 명확히 충족하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 미분류 사례를 특정 유형으로 강제 편입하지 않고 별도로 유지하여 규칙 기반 유형의 물리적 의미를 보존하였다.

LDA는 유형 간 분포 특성을 시각적으로 확인하기

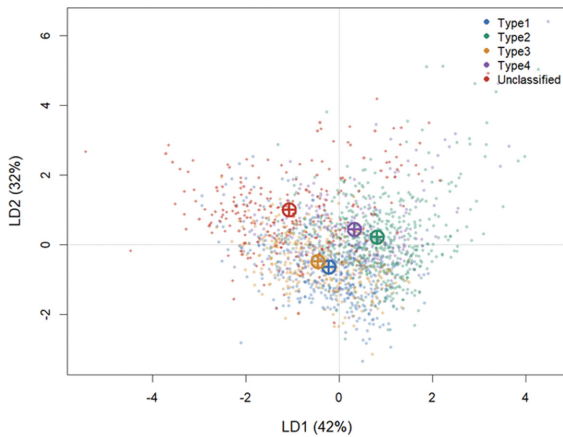


Fig. 8. LDA projection showing the separability of road icing mechanism types.

위한 분석이며, 이러한 구별성을 정량적으로 평가하기 위하여 LightGBM 기반 다중분류 모델을 구축하였다(Table 5). 3회 반복 5-fold 교차검증 결과 평균 정확도는 78.7% (± 0.6), macro-AUC는 0.949 (± 0.002), macro-CSI는 0.624 (± 0.008)로 나타났다. 또한 지점제외 교차검증에서는 정확도 76.4%, macro-AUC 0.939, 겨울시즌 블록 검증에서는 정확도 69.1%, macro-AUC 0.903으로 나타났다. 이는 공간적으로 새로운 지점과 시간적으로 독립된 겨울시즌에서도 제안한 규칙 기반 네 가지 결빙 메커니즘이 공간 및

시간 조건이 달라져도 서로 구별 가능한 특성을 보임을 보여준다.

다만 LDA 투영에서는 유형 간 일부 중첩이 나타난 원인을 확인하고, 유형 분류에 적용한 저온(2°C) 및 고습(80%) 기준의 타당성을 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 노면온도 기준을 $0\sim 3^{\circ}\text{C}$, 상대습도 기준을 75~85% 범위로 변화시켜 재분류한 결과, 기준 대비 유형 분류 일치율은 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 및 $\pm 5\%$ 범위에서 92~98%로 유지되었다. 또한 Type 1과 Type 2는 기준값 변화와 관계없이 동일하게 분류되었으며, Type 3, Type 4 및 미분류 사례에서는 유형 간 경계가 점진적으로 이동하였다. 제안한 규칙 기반 결빙 메커니즘은 통계적으로 서로 구별 가능한 특성을 보였으며, 노면온도와 상대습도 기준을 시험한 범위 내에서 유형 분류 결과는 크게 달라지지 않았다.

3.5 결빙 발생 예측성능 및 주요 영향인자

결빙 발생을 설명하는 주요 기상요인을 분석하기 위하여 결빙과 비결빙을 구분하는 LightGBM 이진분류 모델을 구축하였다(Table 6).

3회 반복 5-fold 교차검증 결과 평균 정확도는 88.5% (± 0.2), AUC는 0.936 (± 0.001), CSI는 0.610 (± 0.006)로 나타났다. 지점제외 교차검증에서는 정확도 88.1%, AUC 0.914로 무작위 교차검증과 유사한 성능을 보였다. 겨울시즌 블록 검증에서는 정확도 85.7%, AUC 0.903으로 다소 감소하였으며, 시간적으로 독립된 겨울시즌을 대상으로 한 검증에서도 AUC 0.90 이상의

Table 5. Performance of the LightGBM multi-class classifier for validating the proposed rule-based icing mechanism classification.

Validation scheme	Accuracy (%)	Macro-AUC	Macro-CSI
Repeated 5-fold cross-validation (3 repeats)	78.7 ± 0.6	0.949 ± 0.002	0.624 ± 0.008
Leave-station-out cross-validation	76.4 ± 0.5	0.939 ± 0.003	0.596 ± 0.005
Winter-season block validation	69.1 ± 0.0	0.903 ± 0.000	0.507 ± 0.000

Note: Performance of the LightGBM multi-class classifier for validating the proposed rule-based icing mechanism classification (Type 1~4). Values represent the mean $\pm$ standard deviation obtained from repeated cross-validation. Unclassified events were excluded from model training and evaluation.

Table 6. Performance of the binary LightGBM model for road icing prediction.

Validation scheme	Accuracy (%)	AUC	CSI	POD
Repeated 5-fold cross-validation (3 repeats)	88.5 ± 0.2	0.936 ± 0.001	0.610 ± 0.006	0.72 ± 0.01
Leave-station-out cross-validation	88.1 ± 0.1	0.914 ± 0.003	0.597 ± 0.004	0.70 ± 0.00
Winter-season block validation	85.7 ± 0.0	0.903 ± 0.000	0.522 ± 0.000	0.62 ± 0.00

Note: Performance of the binary LightGBM model for road icing prediction under different validation schemes. Values represent the mean $\pm$ standard deviation obtained from repeated cross-validation.

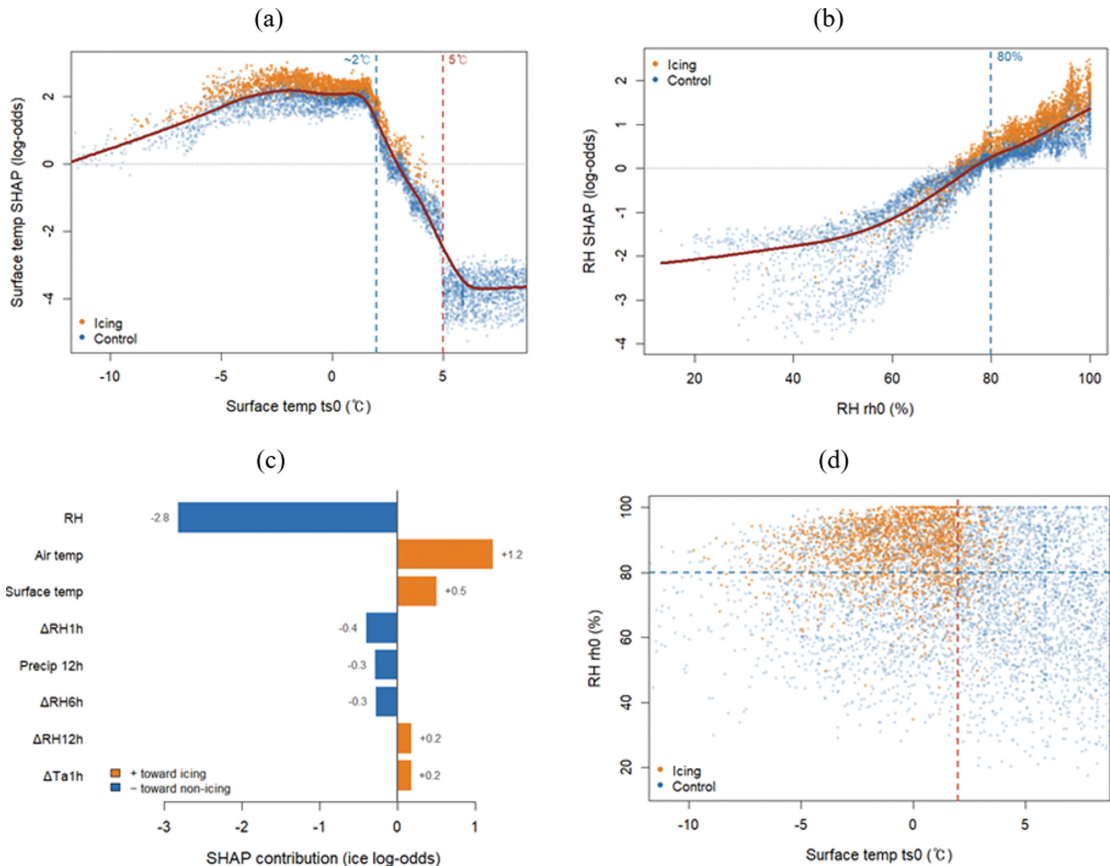


Fig. 9. SHAP analysis of factors influencing road icing occurrence. (a) SHAP dependence for surface temperature, (b) SHAP dependence for relative humidity, (c) SHAP attribution for a representative non-icing case, and (d) Surface temperature-relative humidity distribution for icing and control cases.

예측성능을 나타냈다. 이러한 결과는 동일 지점 정보에 의한 과적합 가능성이 크지 않으며, 새로운 지점과 시간적으로 독립된 겨울시즌에 대해서도 예측성능이 크게 저하되지 않음을 보여준다.

SHAP 의존성 그래프(Fig. 9a)에서, 노면온도는 결빙 발생 기여도의 뚜렷한 전이 특성을 보였다. 노면온도가 낮아질수록 결빙 발생에 대한 기여도는 증가하였으며, 특히 약 2°C 부근부터 SHAP 기여도가 급격히 변화하는 전이 특성이 확인되었다. 반면 약 5°C 이상에서는 결빙 발생 기여도가 크게 감소하여 결빙 가능성이 매우 낮은 것으로 나타났다.

상대습도 역시 결빙 발생에 중요한 영향을 미치는 변수로 확인되었다(Fig. 9b). 상대습도가 증가할수록 SHAP 기여도는 지속적으로 증가하였으며, 특히 약 80% 이상에서 결빙 발생에 대한 양(+)의 기여가 뚜렷하게 증가하였다. 낮은 온도뿐 아니라 높은 상대습도도 결빙 발생 가능성을 증가시키는 방향으로 기여하였다.

대표적인 비결빙 사례($T_{s0} = -6.4^{\circ}\text{C}$, $RH_0 = 59\%$, 결빙확률 1%)에 대한 SHAP 기여도 분해 결과(Fig. 9c), 낮은 상대습도가 결빙 발생 가능성을 감소시키는 가장 큰 요인으로 나타났다. 반면 노면온도와 기온은 결빙 가능성을 증가시키는 방향으로 기여하였으나, 낮은 상대습도의 음(-)의 기여가 이를 상쇄하여 최종적으로 비결빙으로 분류되었다.

노면온도와 상대습도의 분포를 비교한 결과(Fig. 9d), 결빙 사례는 비결빙 사례보다 상대적으로 낮은 노면온도와 높은 상대습도 영역에 주로 분포하였다. 특히 노면온도 약 2°C 이하와 상대습도 약 80% 이상의 조건에서 결빙 사례가 집중되는 경향을 보였다.

4. 논 의

4.1 도로결빙은 냉각과 습윤화가 결합된 과정적 현상

본 연구에서는 합성에폭 분석과 유형별 시간적 진

화 분석을 통해 도로결빙이 특정 시점의 기온이나 노면온도만으로 설명되는 단순한 임계현상이 아니라, 냉각과 습윤화 과정이 시간적으로 결합되어 형성되는 과정적(process-based) 현상임을 보여준다. 노면온도의 하강이 결빙 형성에 필수적인 조건이지만, 실제 결빙에는 노면에 존재하는 수분이나 추가적인 수분 공급이 함께 요구된다. 따라서 결빙 위험을 평가할 때에는 특정 시점의 기상조건보다 기상 및 노면 상태의 시간적 진화를 함께 고려할 필요가 있다.

4.2 결빙 발생 메커니즘의 다양성과 유형화의 의미

도로결빙은 하나의 발생 메커니즘으로 설명되기 어려우며, 수분 공급 방식과 기상조건의 차이에 따라 서로 다른 형성 경로를 거칠 수 있다. 이를 반영하여 적설 용해 후 재결빙, 강수 후 재결빙, 고습 조건 결빙, 착빙성 추정 강우의 네 가지 대표 메커니즘으로 유형화하였다. 제안한 네 유형은 다양한 결빙 발생 경로를 체계화한 기상학적 개념모형(conceptual model)이다. 반면 서로 다른 메커니즘을 거치더라도 결빙 직전에는 냉각과 습윤화가 공통적으로 나타났으며, 다양한 발생 경로가 최종적으로는 이러한 공통된 물리적 과정을 통해 결빙으로 수렴하는 양상을 보였다. 이는 결빙을 단일 현상이 아니라 서로 다른 형성 메커니즘을 갖는 과정으로 해석할 수 있음을 보여주며, 향후 메커니즘 기반 도로결빙 예측모형 개발과 위험도 해석을 위한 개념적 기반을 제공한다.

또한 미분류 사례가 독립적인 군집을 형성하지 않고 기존 유형의 경계 영역에 분포한 결과는 실제 도로결빙이 명확히 구분되는 이산적인 현상이라기보다, 여러 발생 메커니즘이 연속적으로 전이되는 특성을 갖고 있음을 보여준다. 따라서 본 연구에서 제안한 유형은 모든 결빙 사례를 완전하게 구분하기 위한 분류 체계라기보다, 대표적인 결빙 발생 경로를 체계적으로 설명하기 위한 개념적 틀로 이해하는 것이 적절하다.

4.3 운영적 결빙 판단 기준의 재해석

본 연구 결과는 도로결빙 위험을 판단하는 기존의 단일 온도 중심 접근을 재해석할 필요가 있음을 보여준다. SHAP 분석에서는 노면온도 약 2°C 부근에서 결빙 발생에 대한 기여도가 급격히 변화하는 전이 특성이 확인되었으며, 상대습도는 약 80% 이상에서 결빙 발생에 대한 양(+)의 기여가 뚜렷하게 증가하였다. 또한 결빙 사례 분포와 민감도 분석에서도 이러한 저온 및 고습 조건이 일관되게 나타났다.

이러한 결과는 결빙 위험이 노면온도가 0°C에 도달한 이후 갑자기 발생하는 것이 아니라, 저온과 고습 조건이 함께 형성되는 과정에서 점진적으로 증가함을 보여준다. 따라서 본 연구에서 제시한 저온 및 고습

조건은 운영상 절대적인 결빙 임계값이 아니라, 결빙 위험이 증가하기 시작하는 전이구간(transition range)으로 해석할 수 있다. 이러한 전이구간은 기존 단일 온도 기준을 보완하여 결빙 위험의 조기 인지와 운영 판단을 지원할 수 있다.

4.4 과정 기반 도로결빙 조기경보 체계의 방향

본 연구 결과는 향후 도로결빙 조기경보 체계가 특정 시점의 기상조건이나 노면온도만을 이용하는 임계값 기반 접근에서 벗어나, 결빙 과정을 반영하는 과정 기반 체계로 발전할 필요가 있음을 시사한다. 본 연구에서 확인된 결빙 발생 이전의 지속적인 냉각과 습윤화 과정은 결빙 발생 수 시간 전부터 위험도를 단계적으로 평가할 수 있는 중요한 선행정보로 활용될 수 있다.

특히 결빙 발생 이전 12시간 이내의 강수 이력, 노면온도와 기온의 냉각 과정, 상대습도의 증가와 같은 시간적 진화 특성은 결빙 발생 가능성을 조기에 판단하는 핵심 정보가 될 수 있다. 이러한 과정 기반 정보는 RWIS 관측자료와 수치예보 또는 도로기상예측 자료를 함께 활용할 경우 결빙 위험의 시간적 변화를 보다 효과적으로 추적하고 예측하는 데 활용될 수 있다.

따라서 향후 도로결빙 조기경보 체계는 단순히 결빙 발생 여부를 판단하는 수준을 넘어, 결빙 과정을 단계적으로 진단하고 위험도를 시간에 따라 갱신하는 방향으로 발전할 필요가 있다. 이러한 접근은 제설제 예비 살포, 도로 순찰, 교통 통제 및 운전자 경고와 같은 선제적 대응을 지원하는 보다 실효성 높은 도로결빙 대응체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 주요 고속도로의 66개 RWIS 지점에서 관측된 1,880건의 결빙 이벤트를 이용하여 결빙 발생 전 24시간 동안의 시간적 진화와 발생 메커니즘을 분석하였다. 결빙은 주로 야간과 새벽에 집중되었으며, 전체 사건의 약 53%는 발생 전 24시간 이내에 강수 이력을 포함하였다. 이들 강수 관련 사건의 약 85%에서 최근 강수가 발생 전 12시간 이내에 관측되어, 12시간 선행강수 시간창이 메커니즘 분류에 유효한 것으로 나타났다.

결빙 이전의 수분 공급원과 냉각 과정을 바탕으로 적설 용해 후 재결빙(Type 1), 강수 후 재결빙(Type 2), 고습 조건 결빙(Type 3), 착빙성 추정 강우(Type 4)의 네 가지 대표 메커니즘을 정의하였다. 각 유형은 서로 다른 형성 경로를 보였으나, 결빙 직전에는 노면온도 하강과 상대습도 증가가 공통적으로 나타났다. LDA와 LightGBM 분석에서도 유형 간 구별성이 확인되었으며, 미분류 사례는 주로 기존 유형의 경계 영

역에 분포하여 실제 결빙 메커니즘이 이산적 범주보다 연속적인 스펙트럼을 가질 가능성을 보여주었다.

SHAP 분석에서는 노면온도와 상대습도가 결빙 발생의 주요 영향요인으로 나타났다. 특히 노면온도 약 2°C 부근에서 예측 기여도가 급격히 변화하고, 상대습도 약 80% 이상에서 결빙에 대한 양(+)의 기여가 뚜렷하게 증가하였다. 이는 해당 조건이 절대적인 결빙 임계값이 아니라 위험이 증가하기 시작하는 전이 구간임을 의미하며, 도로결빙이 냉각과 수분 공급이 결합된 과정적 현상임을 뒷받침한다.

본 연구는 장기간 RWIS 시계열을 기반으로 결빙 발생 메커니즘을 유형화하고 그 구별성과 주요 영향요인을 정량적으로 평가했다는 데 의의가 있다. 연구 결과는 메커니즘 기반 결빙 예측과 과정 기반 조기경보 체계 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 다만 분석이 국내 고속도로 RWIS 관측망에 한정되어 있으므로, 향후 다양한 도로환경과 기후조건을 대상으로 유형 체계의 일반성을 검증할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」(KMA2018-00121) 연구와 한국연구재단(No. RS-2022-00166370)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chen, J., C. Sun, X. Sun, H. Dan, and X. Huang, 2023: Finite difference model for predicting road surface ice formation based on heat transfer and phase transition theory. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **207**, 103772, doi:10.1016/j.coldregions.2023.103772.
- Chree, C., 1913: Some phenomena of sunspots and of terrestrial magnetism at Kew Observatory. *Philos. Trans. Roy. Soc. A*, **212**, 75-116.
- Crevier, L. P., and Y. Delage, 2001: METRo: A new model for road-condition forecasting in Canada. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 2026-2037, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<2026:MANMFR>2.0.CO;2.
- Estévez, J., P. Gavilán, and J. V. Giráldez, 2011: Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *J. Hydrol.*, **402**, 144-154, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.031.
- Fiebrich, C. A., C. R. Morgan, A. G. McCombs, P. K. Hall Jr., and R. A. McPherson, 2010: Quality assurance procedures for mesoscale meteorological data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**, 1565-1582, doi:10.1175/2010JTECHA1433.1.
- Fu, L., L. Thakali, T. J. Kwon, and T. Usman, 2017: A risk-based approach to winter road surface condition classification. *Can. J. Civ. Eng.*, **44**, 182-191, doi:10.1139/cjce-2016-0215.
- Hong, S. B., H. S. Yun, S. G. Yum, S. Y. Ryu, I. S. Jeong, and J. Kim, 2022: Black ice hazard assessment using GIS-based spatial analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **22**, 3435-3459, doi:10.5194/nhess-22-3435-2022.
- Jang, J., 2023: Night icing prediction using vehicle-mounted pavement temperature sensor and atmospheric data. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, **21**, 100910, doi:10.1016/j.trip.2023.100910.
- , 2025: Predicting nighttime black ice using atmospheric data for efficient winter road maintenance patrols. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, **29**, 101299, doi:10.1016/j.trip.2024.101299.
- Jin, M., and D. G. McBroom, 2024: Investigating Road Ice Formation Mechanisms Using Road Weather Information System (RWIS) Observations. *Climate*, **12**, 63, doi:10.3390/cli12050063.
- Juga, I., M. Hippi, D. Moiseev, and E. Saltikoff, 2012: Analysis of weather factors responsible for the traffic 'Black Day' in Helsinki, Finland, on 17 March 2005. *Meteor. Appl.*, **19**, 1-9, doi:10.1002/met.238.
- Kangas, M., M. Heikinheimo, and M. Hippi, 2015: Road-Surf: a modelling system for predicting road weather and road surface conditions. *Meteor. Appl.*, **22**, 544-553, doi:10.1002/met.1486.
- KMA, 2026a: Road Weather Information System. Korea Meteorological Administration. (in Korean) [Available online at <https://rwis.kma.go.kr/ops/index.do>].
- , 2026b: Korea Meteorological Administration API Hub. (in Korean) [Available online at <https://api-hub.kma.go.kr>].
- Lee, J.-K., Y. Huh, and J. Park, 2022: Geospatial simulation system of mountain area black ice accidents. *Appl. Sci.*, **12**, 5709, doi:10.3390/app12115709.
- Li, J., H. Ma, W. Shi, Y. Tan, H. Xu, B. Zheng, and J. Liu, 2023: Nondestructive detection and early warning of pavement surface icing based on meteorological information. *Materials*, **16**, 6539, doi:10.3390/ma16196539.
- Meek, D. W., and J. L. Hatfield, 1994: Data quality checking for single station meteorological databases. *Agric. Forest Meteorol.*, **69**, 85-109, doi:10.1016/0168-1923(94)90083-3.
- Park, M.-S., S. J. Joo, and Y. T. Son, 2014: Development of road surface temperature prediction model using

- the Unified Model output (UM-Road). *Atmosphere*, **24**, 471-479, doi:10.14191/Atmos.2014.24.4.471.
- _____, M. Kang, S.-H. Kim, H.-C. Jung, S.-B. Jang, D.-G. You, and S.-H. Ryu, 2021: Estimation of road sections vulnerable to black ice using road surface temperatures obtained by a mobile road weather observation vehicle. *Atmosphere*, **31**, 525-537, doi:10.14191/Atmos.2021.31.5.525.
- Toivonen, E., M. Hippi, H. Korhonen, A. Laaksonen, M. Kangas, and J.-P. Pietikäinen, 2019: The road weather model RoadSurf (v6. 60b) driven by the regional climate model HCLIM38: evaluation over Finland. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 3481-3501, doi:10.5194/gmd-12-3481-2019.
- Yang, C. H., D.-G. Yun, and J. G. Sung, 2012: Validation of a road surface temperature prediction model using real-time weather forecasts. *KSCE J. Civ. Eng.*, **16**, 1289-1294, doi:10.1007/s12205-012-1649-7.

Appendix. Information on the RWIS stations used in this study.

Expressway	Station ID	Station Name	Road Type	(m) Elev.	Lat.	Lon.	Installed	Events
Jungbu Naeryuk	11102	West Yeosu Service Area	General	90	37.2791	127.5796	2022-12	17
Jungbu Naeryuk	11103	Seongju Service Area	General	103	36.0081	128.2596	2022-12	10
Jungbu Naeryuk	11202	Sinhwa 2 Bridge	Bridge	73	37.47	127.4713	2022-12	31
Jungbu Naeryuk	11203	Jungwon Tunnel	Tunnel	226	37.0865	127.7205	2022-12	25
Jungbu Naeryuk	11204	Daesowon Rest Stop	General	100	36.9733	127.8479	2022-12	24
Jungbu Naeryuk	11205	Goesan Service Area	General	194	36.8314	127.9591	2022-12	35
Jungbu Naeryuk	11206	Mungyeong Service Area	General	176	36.622	128.1506	2022-12	8
Jungbu Naeryuk	11207	Sangju Tunnel	Tunnel	133	36.3164	128.2203	2022-12	12
Jungbu Naeryuk	11208	Gimcheon 3 Tunnel (Exterior)	Tunnel	109	36.1181	128.2783	2022-12	5
Jungbu Naeryuk	11209	South Seongju Chamoe Service Area	General	78	35.867	128.3176	2022-12	3
Jungbu Naeryuk	11210	Nakdong Grand Bridge (Jungbu)	Bridge	17	35.6998	128.419	2022-12	7
Jungbu Naeryuk	11211	Changnyeong Rest Stop	General	41	35.5442	128.4762	2022-12	3
Jungbu Naeryuk	11212	Taegok Overpass	Bridge	15	35.3518	128.4915	2022-12	2
Seohaean	12102	Maesong Service Area	General	32	37.2666	126.8921	2023-10	25
Seohaean	12103	Gunsan Service Area	General	33	36.0202	126.7959	2023-10	46
Seohaean	12104	Hampyeong Cheonji Service Area	General	34	35.1326	126.4812	2023-10	41
Seohaean	12202	Hwaseong Service Area	General	43	37.1456	126.8804	2023-10	35
Seohaean	12203	Seohae Grand Bridge (Approach)	Bridge	7	36.9333	126.7773	2023-10	52
Seohaean	12204	Yongyeon Rest Stop	General	69	36.8613	126.6468	2023-10	41
Seohaean	12205	Hongseong Service Area	General	49	36.5545	126.5803	2023-10	57
Seohaean	12206	Daecheon Service Area	General	9	36.3762	126.5567	2023-10	42
Seohaean	12207	Seocheon Service Area	General	69	36.1289	126.6283	2023-10	50
Seohaean	12208	Seocheon Rest Stop	General	27	36.0203	126.7959	2023-10	60
Seohaean	12209	West Gimje	General	12	35.8347	126.8398	2023-10	63

Appendix. Continued.

Expressway	Station ID	Station Name	Road Type	(m) Elev.	Lat.	Lon.	Installed	Events
Seohaean	12210	Buan Goryeo Cheongja Service Area	General	10	35.6733	126.7345	2023-10	292
Seohaean	12211	Goindol Service Area	General	52	35.4643	126.673	2023-10	49
Seohaean	12212	Yeonggwang	General	29	35.2998	126.5581	2023-10	65
Seohaean	12213	Seongam Bridge	General	64	34.8029	126.3675	2023-10	40
Seohaean	12214	Jungnim Junction	General	30	34.8447	126.466	2023-10	36
Gyeongbu	13102	Oksan Rest Stop	General	32	36.6564	127.3722	2024-08	26
Gyeongbu	13103	Chilgok Service Area	General	62	36.0107	128.4293	2024-08	5
Gyeongbu	13104	Yangsang Service Area	General	48	35.3217	129.0574	2024-08	1
Gyeongbu	13202	Giheung Service Area	General	59	37.2335	127.1066	2024-08	24
Gyeongbu	13203	Anseong Service Area	General	35	37.078	127.1294	2024-08	20
Gyeongbu	13204	North Cheonan	General	34	36.8965	127.1889	2024-08	18
Gyeongbu	13205	Cheonan Samgeori Service Area	General	54	36.7883	127.1723	2024-08	34
Gyeongbu	13206	Jugam Service Area	General	63	36.4855	127.4302	2024-08	23
Gyeongbu	13207	Jeungyak	General	140	36.3371	127.5268	2024-08	9
Gyeongbu	13208	Cheongseong Rest Stop	General	162	36.2717	127.4099	2024-08	25
Gyeongbu	13209	Chupungnyeong Service Area	General	230	36.2006	128.002	2024-08	33
Gyeongbu	13210	Gimcheon Service Area	General	68	36.1301	128.1668	2024-08	7
Gyeongbu	13211	Geomdan Rest Stop	General	38	35.9159	128.6182	2024-08	4
Gyeongbu	13212	Gyeongsang Service Area	General	67	35.8782	128.8098	2024-08	3
Gyeongbu	13213	Yeongcheon Station	General	108	35.9304	128.9721	2024-08	4
Gyeongbu	13214	Geoncheon Service Area	General	92	35.831	129.1085	2024-08	6
Gyeongbu	13215	Hwalcheon IC	General	114	35.7141	129.1919	2024-08	2
Gyeongbu	13216	Eonyang Service Area	General	107	35.5993	129.1412	2024-08	5
Honam	23102	Gokseong Gicha Maeul Service Area	General	107	35.2585	127.1519	2024-08	23
Honam	23202	Yeosan Service Area	General	70	36.0476	127.1036	2024-08	15
Honam	23203	Samnye Rest Stop	General	25	35.9185	127.071	2024-08	20
Honam	23204	Jeongeup Service Area	General	32	35.6002	126.8626	2024-08	36
Honam	23205	Baegyangsa Service Area	General	82	35.3932	126.8062	2024-08	54
Honam	23206	East Gwangju	General	78	35.1927	126.9292	2024-08	25
호남 Honam	23207	Seokgok	일반 General	83	35.1286	127.2472	2024-08	28
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33102	Eumseong Service Area	General	120	37.0206	127.4829	2024-08	16
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33103	Deogyusan Service Area	General	506	35.8182	127.6455	2024-08	32

Appendix. Continued.

Expressway	Station ID	Station Name	Road Type	(m) Elev.	Lat.	Lon.	Installed	Events
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33202	Docheok Rest Stop	General	105	37.3241	127.3383	2024-08	42
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33203	Moga	General	100	37.1678	127.4406	2024-08	35
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33204	Ochang Service Area	General	52	36.7561	127.4807	2024-08	21
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33205	Geumsan Insam Land Service Area	General	194	36.1555	127.4953	2024-08	19
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33206	Yongpo 1 Bridge	Bridge	198	35.9922	127.6231	2024-08	33
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33207	Songgye 3 Bridge	Bridge	389	35.6514	127.6955	2024-08	34
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33208	Sudong Rest Stop	General	134	35.5167	127.7977	2024-08	12
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33209	Sancheong Service Area	General	69	35.3321	127.9382	2024-08	3
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33210	Panmun	General	60	35.2008	128.0232	2024-08	3
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33211	Goseong Gongnyongnara Service Area	General	158	35.0516	128.2654	2024-08	4
Tongyeong-Daejeon-Jungbu	33212	Tongyeong Starting Point	General	24	34.8718	128.4204	2024-08	0