

도로 및 기상조건을 고려한 노면온도변화 패턴 추정 모형 개발

Developing Models for Patterns of Road Surface Temperature Change using Road and Weather Conditions

김진국	Kim, Jin Guk	정회원 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구원 (E-mail : jingukkim@kict.re.kr)
양충헌	Yang, Choong Heon	정회원 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원 · 교신저자 (E-mail : chyang@kict.re.kr) 과학기술연합대학교대학원 도시 및 교통시스템공학과 전공책임교수
김승범	Kim, Seoung Bum	국립경상대학교 건축도시토목공학부 교수 (E-mail : kimsb@gnu.ac.kr)
윤덕근	Yun, Duk Geun	정회원 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원 (E-mail : dkyun@kict.re.kr) 과학기술연합대학교대학원 도시 및 교통시스템공학과 교수
박재홍	Park, Jae Hong	정회원 · 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구원 (E-mail : jhpark@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study develops various models that can estimate the pattern of road surface temperature changes using machine learning methods.

METHODS : Both a thermal mapping system and weather forecast information were employed in order to collect data for developing the models. In previous studies, the authors defined road surface temperature data as a response, while vehicular ambient temperature, air temperature, and humidity were considered as predictors. In this research, two additional factors-road type and weather forecasts-were considered for the estimation of the road surface temperature change pattern. Finally, a total of six models for estimating the pattern of road surface temperature changes were developed using the MATLAB program, which provides the classification learner as a machine learning tool.

RESULTS : Model 5 was considered the most superior owing to its high accuracy. It was seen that the accuracy of the model could increase when weather forecasts (e.g., Sky Status) were applied. A comparison between Models 4 and 5 showed that the influence of humidity on road surface temperature changes is negligible.

CONCLUSIONS : Even though Models 4, 5, and 6 demonstrated the same performance in terms of average absolute error (AAE), Model 5 can be considered the optimal one from the point of view of accuracy.

Keywords

machine learning, vehicular ambient temperature, road surface temperature, average absolute error, road type

Corresponding Author : Choong Heon Yang, Research Fellow
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283,
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0184 Fax : +82.31.910.0746
E-mail : chyang@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Jan. 23, 2018 Revised Jan. 29, 2018 Accepted Mar. 16, 2018

1. 서론

동절기 노면결빙으로 인한 미끄럼 교통사고 발생건수 및 부상자 수는 다른 계절에 비해 각각 약 19%와 13%

많다(Black and Mote, 2015). 특히, 미끄럼 사고는 2차사고 및 다중 추돌사고로 이어질 수 있기 때문에 우선적으로 운전자 주의가 요구되지만 도로관리기관들도 이

에 대한 예방대책으로서 동절기 기상정보와 연계하여 지속적으로 노면결빙 여부를 모니터링하여 운전자에게 관련 정보를 제공해주는 것도 중요하다.

국내 일반국도 노면결빙 상태 추정은 현재 운영 중인 도로기상정보시스템(Roadway Weather Information System:RWIS)을 통해 수집된 도로변 대기온도, 대기 습도, 강우량 또는 강설량 등의 정보에 근거한다. 수집된 데이터를 가공·처리하여 나온 최종 정보와 기상청 동네예보를 함께 고려하여 도로 특정 지점에 대한 노면 온도를 예측할 수 있다. 이는 노면온도의 향후 변화를 예측(Nowcast)한다는 데 큰 의미가 있으나, 그 예측이 특정 지점에 국한되는 단점을 가지고 있다(Saas, 1997). 또한, 일반국도의 RWIS는 수도권 및 강원도 중심으로 제한적으로 운영이 되고 있는 실정이다. 그러나 RWIS의 노후화 및 유지·관리 미비로 인해 수집되는 도로변 기상 데이터의 정확도 및 신뢰성에는 문제가 있다. 최근 빠르게 진화하고 있는 ICT 기술의 발전에 따라 각종 저가 기상계측센서가 널리 보급되고 있다. 따라서 일부 도로관리기관에서는 이러한 기술을 이용하여 직접 도로변기상정보를 수집하여 노면상태를 모니터링하고 있다. 그러나 앞서 언급하였듯이 이러한 기술들도 결국은 공간적 범위에 대한 한계가 있다.

일반적으로 노면온도 변화는 도로·기상 등 관련된 다양한 요인들에 영향을 받는다. 그러나 현재 기술로는 이러한 모든 요인들에 대한 자료 수집에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구(양충현 외, 2016)에서 사용한 조사 차량의 외기온도, 습도, 대기온도 이외에 도로환경 및 기상변수를 추가적으로 고려하여 차량이 주행하는 도로구간에 따른 노면온도변화 패턴을 추정할 수 있는 모형을 구축하고 모형의 추정 정확도를 높이고자 하였다.

모형은 기계학습(Machine Learning) 방법을 통해 구축하였으며, 도로환경변수로는 도로구간(기본구간, 교량구간, 터널구간) 정보를 고려하였고, 기상변수로는 기상청에서 제공하는 실시간 하늘상태(구름양) 정보를 고려하여 모형 구축에 반영하였다.

2. 문헌고찰

동절기 도로관리를 위한 노면온도 예측 모형 관련 연구는 유럽, 일본, 미국 등에서 활발히 이루어져 왔다.

양충현 외(2016)는 Thermal Mapping장비를 통해 수집된 노면온도의 신뢰성을 통계적으로 분석하고 조사

당일의 기상조건, 조사구간의 지형조건에 따라 수집된 노면온도 간 유사성 평가 연구를 수행하였다. 이를 통해 동일노선, 동일기상 조건 하에서의 노면온도패턴 변화의 유사성을 분석하였다. 또한, 2016년도에는 일반 차량에 내재되어 있는 외기온도센서로부터 수집되는 차량 외기온도데이터를 활용하여 차량 주행 구간의 노면온도 변화 패턴을 추정하는 모형을 기계학습(Machine Learning)을 통해 구축하였다.

Shao와 Lister(1996)는 대기와 도로 사이의 경계 구간에 열지수 방정식(Heat Budget Equation)을 개발하여 노면온도를 추정하였으며, Sass(1992)는 HIRLAM (High Resolution Limited Area Model)라고 불리는 대기모형(Atmospheric Model)을 개발하고 RWIS의 기상정보를 활용하여 도로망 노면 상태에 대한 단기 예측 모형을 개발하였다.

Voldborg(1993)는 2006년에 열평형 모형(Heat Balance Model)을 이용하여 노면온도 추정 모형을 개발하였으며, Takahashi et. al(2006, 2008)는 도로변 구조물 및 지형 그리고 단파 및 장파 복사를 고려한 표면 에너지 균형 모형을 활용하여 노면온도 추정 모형을 고도화시켰다. 이외에도 시거(Feng과 Feng, 2012), 지리정보시스템(Numata et. al., 2002), 신경망(Neural Network) 모형(Chapman 와 Thornes, 2006)을 이용하여 노면온도 추정 모형을 개발하였다. 하지만 선행된 수학적 모형 기반의 도로 노면상태 추정 모형들은 독립 변수로 결정된 기상정보가 수집될 수 있는 한정된 지역에서 활용이 가능하며, 추정된 모형의 매개변수 역시 해당 모형이 적용되는 지역적 특성에 맞게 지속적인 보정(Calibration)이 필요하다. 또한, 도로변에서 기상정보를 수집할 수 있는 RWIS는 일반적으로 도로변에 일정한 간격으로 연속적으로 설치되어 있지 않으며 해당 정보를 이용하여 도로망에서 연속적으로 노면 상태를 추정 또는 예측하기 위해서 불가피하게 보간법을 활용하여야 한다(Xu et. al., 2017).

무엇보다도 노면상태 변화는 기상상태, 포장상태, 교통상황 등 많은 인자들에 대한 복합적 상호관계의 결과물인 만큼 이 중 일부의 영향변수만을 고려하여 노면상태를 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 일이다(Gustavsson, 1990). 예를 들어 Chapman과 Thornes(2001)은 노면온도에 영향을 줄 수 있는 기상학적, 지리적, 도로구조적인 인자로 총 20개 이상의 영향변수가 있을 수 있다고 제시하였다. Thornes과 Shao(1991)는 이러한 변수 간 복합적인 영향관계를 모형에 반영하는 방법에 따라 최대 10℃ 이

상의 차이가 생길 수 있다고 밝혔다.

이와 같이 전통적인 독립변수와 종속변수간의 영향관계를 찾아내기 위해서 자료수집을 통해 노면상태를 지속적으로 추정하는 방법론은 시간·비용 측면에서 상당한 제약이 있다.

3. 자료구축

3.1. 자료수집

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 자유로 성동IC~이산포 IC 상·하행 각각 20.28km 구간과 서울외곽순환고속도로 송추IC~자유로JC 상·하행 각각 37.03km 구간을 대상으로 모형 수행에 필요한 자료를 수집하였다. 성동 IC~이산포IC 구간의 경우 기본구간¹⁾과 교량구간만 존재하며, 교량구간의 경우 연장이 짧아 전반적으로 도로구간에 대한 분석에 한계가 있다. 반면, 송추IC~자유로 JC는 다수의 교량구간과 2개의 장대 터널구간이 존재하므로 도로구간을 영향변수로 고려하여 노면온도변화 패턴을 추정하기에 적합하다. 따라서 도로구간 변수를 추가적으로 분석에 고려하기 위해서 서울외곽순환도로인 송추IC~자유로JC 노선을 분석노선으로 최종 선정하였다. 이전연구와 마찬가지로, 조사차량에 부착된 센서를 통해 대기온도, 습도, GPS좌표, 차량외기온도, 노면온도가 수집되었다. 조사 당일의 기상정보는 기상청 제공정보를 활용하였다. GPS시간은 1초 단위, 차량외기온도센서 0.125초 단위, 대기온도, 습도, 노면온도는 10초 단위로 데이터를 수집하였다. 수집된 노면온도 데이터 수는 2016년 총 4,665개, 2017년 3,187개이다. 이 중 절반에 해당하는 데이터를 임의로 추출(Random Selection Process)하여 기계학습을 통한 모형 구축에 사용하였으며, 나머지 절반은 구축된 모형을 평가하는데 사용하였다.



Fig. 1 Test Route

1) 교량과 터널이 없는 일반 도로구간임.

3.2. 변수선정

본 연구에서는 기존 연구(양충현 외, 2016)에서 노면온도변화 패턴 추정을 위해 고려되었던 영향변수(조사차량 전·후방 외기온도, 습도, 대기온도) 이외에 노면온도의 변화에 영향을 미치는 요인을 추가적으로 검토하였다. 노면온도 변화에 영향을 미치는 요인으로 여러 가지가 있을 수 있으나, 관련 정보를 수집하는데 물리적·경제적으로 제한이 있는 변수들을 배제하였다. 이는 이러한 변수들을 모형에 반영한다 하더라도, 실제로 데이터 공급이 원활하지 않을 경우, 모형의 정확도 및 신뢰도에 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 도로구간과 하늘상태 변수를 추가적으로 고려하였다. 도로구간은 기본구간, 터널구간, 교량구간으로 구분하였다. 예를 들어 터널구간의 경우 일사량을 전혀 받지 못하는 특성이 있고, 교량구간은 지열을 전혀 흡수하지 못하기 때문에 기본구간과 노면온도 차이가 필연적으로 발생한다. 터널 출·입구부와 교량에서 블랙아이스가 자주 발생하는 원인이 이 때문인 것으로 추정되고 있다. Fig. 2는 송추IC~자유로JC 도로구간에 대한 도로구간별 경계를 나타낸다.



Fig. 2 Result of Road Section Classification (Songchoo IC~Jayuro JC)

다음은 구름양에 따른 하늘상태(맑음, 구름 조금, 구름 많음, 흐림)를 고려할 수 있다. 일반적으로 기온의 높고 낮음과 별개로 대기 구름양에 따라 일사량이 달라질 수 있으며 이는 결과적으로 노면온도 변화에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 하늘상태 변수는 기상청에서 제공하는 동내예보의 하늘상태 자료를 통해 구축하였다.

요약하면 본 연구에서는 추가 영향 변수로 도로구간과 하늘상태를 최종 선정하였다. 앞서 설명한 도로구간과 하늘상태 변수를 추가적으로 고려하기 위해서는 현장조사를 통해 수집된 노면온도 및 외기온도 데이터와 기상청에서 제공하는 하늘상태 데이터를 도로구간별로 저장하기 위한 전처리 과정이 수행되어야 한다. 이를 위

해서 Fig. 2와 같은 도로구간별 시·종점에 대한 위치정보를 기반으로 조사차량의 시·종점에 대한 통과시간을 추출하였다. Fig. 3은 수집된 자료의 전처리 과정을 설명한 것이다.

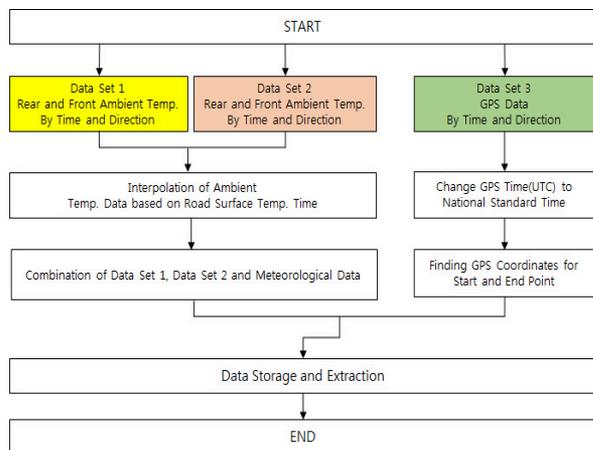


Fig. 3 Pre-processing for Aggregating the Collected Data by Road

4. 영향관계 분석

본 연구의 목적은 조사차량 전·후방 외기온도, 습도, 대기온도에 도로특성 및 기상과 관련된 영향변수를 추가로 적용하여 노면온도변화 패턴 추정의 정확도를 높이는데 있다.

현장조사를 통해 수집된 차량의 전·후방 외기온도, 습도, 대기온도와 같은 양적변수(Quantitative Variable)의 경우 기존 연구(양충현 외, 2016)에서 피어슨 상관계수(Pearson's Correlation Coefficient)를 통해 검증하였다. 따라서 본 연구에서는 추가적으로 선정된 도로구간과 하늘상태 변수에 대해서 영향관계를 분석하였다.

4.1. 노면온도와 도로구간과의 영향관계

Fig. 4는 2017년 3월 2일과 3일에 수집된 각 구간별 노면온도 분포를 나타낸 것이다. Q1(1st Quartile)과 Q3(3rd Quartile)에 대한 범위와 중간값(Median)을 기준으로 각 구간별 노면온도 분포를 분석한 결과, 터널구간의 노면온도가 기본구간이나 교량구간에 비해 최대 7℃에서 최소 3℃ 정도 낮은 것을 알 수 있다. 이는 터널구간의 노면온도는 상대적으로 일사량 영향이 적기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 기본구간과 교량구간의 노면온도 분포를 비교해 보면 2017년 3월 3일 상행 데이터의 경우, 교량구간의 노면온도는 기본구간의 노면온도에 비해 약 1℃정도 낮은 것을 알 수 있다. 이는 교

량구간은 지열을 받지 못하기 때문에 차이가 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

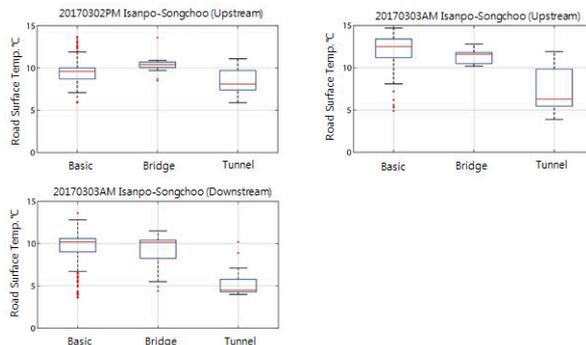


Fig. 4 Box Plot of Road Surface Temperature by Road

노면온도 외 변수(예: 외기온도 등)가 도로구간별로 상이하다면 노면온도 추정에 어려움이 있다. 이 경우, 도로구간 변수와 외기온도 변수를 동시에 모형에 반영할 수 없기 때문에 두 변수 중 하나만 적용해야 한다. 이를 위해, 도로구간과 외기온도와의 연관성을 살펴보았으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5는 Fig. 4와 유사하게 터널구간의 후방외기온도가 기본구간 그리고 교량구간보다 낮은 것을 알 수 있다. 결과적으로 후방외기온도의 경우 구간별 온도의 차이가 노면온도의 경우만큼 크지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 도로구간 중 터널구간을 노면온도 추정을 위한 변수로 고려하는 것이 적절하다고 판단할 수 있다.

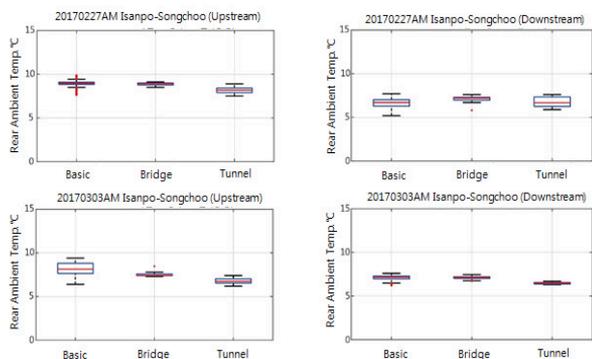


Fig. 5 Box Plot of Ambient Temperature(Rear) by Road

추가적으로 송추IC~자유로JC 구간의 현장조사를 통해 수집된 데이터를 대상으로 도로구간과 노면온도, 전·후방외기온도의 영향관계 분석을 수행하였다. 각 구간별 후방외기온도, 전방외기온도, 노면온도 분포의 평균값에 대한 통계 가설은 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Hypothesis of Road Classification

Hypothesis verification	Null hypothesis (H ₀)	Research hypothesis (H ₁)
1 st	H ₀	H ₁
2 nd	H ₀	H ₁
3 rd	H ₀	H ₁

Table 1에서 설정한 통계가설의 결과는 Table 2와 같다. 가설검증 결과를 살펴보면 2차와 3차 가설검증 결과는 터널구간의 노면온도가 다른 구간의 노면온도에 비해서 낮은 것으로 나타났다. 반면 전·후방 온도의 경우 일부 자료에 한해서 유사한 온도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 교량구간은 터널구간과 같이 뚜렷한 온도 차이를 보이고 있지 않는 것으로 나타났다. 3월 3일(상

Table 2. Results of Hypothesis Verification by Road

Temp.	Date YYYY MMDD	Direction	1 st	2 nd	3 rd
			Basic vs. Bridge	Bridge vs. Tunnel	Basic vs. Tunnel
Surface temp.	20170227	upstream	1*	1	1
	20170227	downstream	0**	1	1
	20170302	upstream	1	1	1
	20170302	downstream	0	1	1
	20170302	upstream	0	1	1
	20170303	upstream	1	1	1
	20170303	downstream	0	1	1
	20170306	upstream	0	1	1
	20170306	downstream	0	1	1
Ambient temp. (Front)	20170227	upstream	0	0	0
	20170227	downstream	0	0	0
	20170302	upstream	1	0	0
	20170302	downstream	0	0	0
	20170302	upstream	0	0	0
	20170303	upstream	1	0	1
	20170303	downstream	0	0	0
	20170306	upstream	1	0	0
	20170306	downstream	0	0	0
Ambient temp. (Rear)	20170227	upstream	1	1	1
	20170227	downstream	0	1	0
	20170302	upstream	1	0	1
	20170302	downstream	0	0	0
	20170302	upstream	0	1	0
	20170303	upstream	1	1	1
	20170303	downstream	0	1	1
	20170306	upstream	0	0	0
	20170306	downstream	1	1	1
20170308	upstream	1	1	1	

* : Reject Null Hypothesis
 ** : Accept Null Hypothesis

류) 데이터에서 교량구간 노면온도는 기본구간에 비해 낮은 반면에 전·후방 외기온도는 상대적으로 높은 경우가 관측되었다. 따라서 도로구간 중 교량구간을 노면온도 추정을 위한 변수로 고려하는 것이 적절하다고 판단할 수 있다. 결과적으로 본 연구에서는 노면온도변화 패턴 추정을 위한 변수로 도로 기본구간, 교량구간, 터널구간 변수를 포함하였다.

4.2. 노면온도와 하늘상태와의 영향관계

본 연구에서는 하늘상태를 노면온도변화 패턴 추정을 위한 새로운 변수로 고려하였으며, 기상청에서 제공하는 동네예보의 하늘상태 자료를 참고하였다. 하늘상태는 Table 3과 같이 구름의 정도에 따라 4단계로 구분하여 시간대 별로 제공되고 있다.

Table 3. 'Sky Status' Code

'Sky Status'	Code
Clear and Clean	1
Slightly Covered Sky	2
Cloudy Sky	3
Very Cloudy	4

Fig. 6은 송추IC~자유로JC 구간에서 수집된 모든 데이터를 대상으로 하늘상태별 도로구간(기본, 교량, 터널)의 노면온도 분포를 Box Plot으로 나타낸 것이다. Fig. 6에서와 같이, 현장조사를 수행했던 날짜의 하늘상태는 맑음, 구름 조금, 흐림, 구름 많음이고, 구름 많음에 해당하는 날은 없었다.

일반적으로 '하늘상태'가 '맑음'일 경우 노면온도는 가장 높고 '흐림'일 경우 가장 낮을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 Fig. 6과 같이 기본구간의 경우 '맑음' 상태에서 노면온도 중간값이 가장 낮았으며, 교량구간의

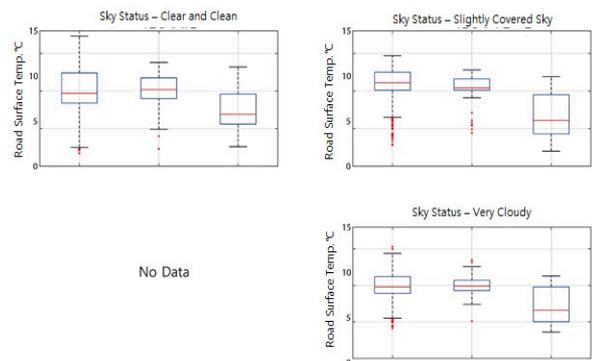


Fig. 6 Road Surface Temperature of Basic, Bridge, and Tunnel by Sky Status

경우 '맑음' 상태와 '흐림' 상태의 노면온도는 유사한 것으로 나타났다. 이는 동일한 대기온도 조건이 아닌 제한된 수집 자료를 기반으로 분석을 실시했기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 하늘상태 변수를 노면온도변화 패턴 추정에 대한 영향변수로 우선 적용 후 분석결과에 따라 최종적으로 변수의 선정 여부를 판단하였다.

5. 모형구축 및 분석결과

5.1. 모형구축

본 연구에서는 노면온도변화 패턴 추정을 위해 MATLAB의 Classification Learner를 이용하여 기계학습을 수행하였다. 먼저, 노면온도변화 패턴을 추정하기 위한 최적의 알고리즘을 Classification Learner로 탐색하기 위해서 노면온도와 직접적으로 영향관계가 있는 변수들을 선정해야 한다. 이전 연구(양충현 외, 2016)에서는 조사차량에 설치된 Thermal Mapping 장비로부터 수집된 대기온도, 습도, 전·후방 외기온도를 영향변수로 설정하여 노면온도변화 패턴 추정을 위한 최적 알고리즘을 선정하였다. 하지만 본 연구에서는 추가적으로 기상정보(하늘상태)와 환경영향변수(도로구간)를 영향변수로 고려하였다. 이를 통해 총 6개의 영향변수별 노면온도변화 패턴 추정 알고리즘 모형을 Table 4와 같이 구축하였다.

Table 4. Variables Used in Developing Models

Variables Model	Ambient temp. (Rear)	Ambient temp. (Front)	Sky status	Road classification	Air temp.	Humidity
1	○	○				
2	○	○	○			
3	○	○	○	○		
4	○	○	○	○	○	
5	○	○	○	○	○	○
6	○	○		○	○	○

조사차량의 전·후방 외기온도를 영향변수로 포함하는 모형을 기본으로 하늘상태와 도로구간, 대기온도, 습도를 차례대로 추가하여 총 6개 모형을 구축하였다. 앞서 노면온도와 하늘상태 변수와의 영향관계 분석에서 언급했듯이, 하늘상태 변수 포함 여부에 따라 노면온도변화 패턴 추정 정확도 차이를 분석하기 위해서 Model 6을 추가하였다. 이를 위해서 Classification Learner에서 제공하는 총 22개의 알고리즘을 테스트하였으며, 최적 알고리즘

을 선정하기 위해 Response(노면온도)와 Predictor(전·후방외기온도, 날씨, 구간, 대기온도, 습도)를 취합한 데이터 중 절반에 해당하는 데이터를 무작위 과정을 통해 추출하였다. 나머지 절반에 해당하는 데이터는 선정된 최적 알고리즘 평가를 위해 사용하였다. Fig. 7은 최적알고리즘 선정을 위해 사용된 Response와 Predictor의 분석 중 전·후방외기온도에 대한 결과 예시이다.

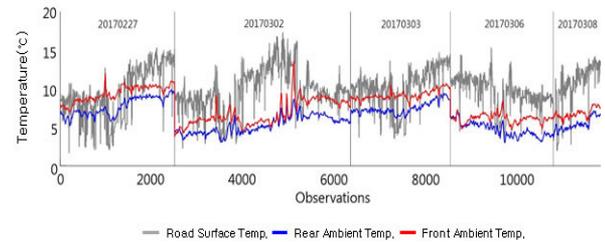


Fig. 7 An Example of Response and Predictor

5.2. 분석결과

Table 5는 Classification Learner를 통해 선정된 최적 알고리즘과 실제 노면온도 예측 값의 정확도를 나타낸 것이다.

Table 5. Best Algorithms and its Accuracy by Models

Model	Best recommended algorithm	Accuracy
Model 1	Weighted KNN	28.7%
Model 2	Weighted KNN	35.1%
Model 3	Fine KNN	37.9%
Model 4	Fine KNN	40.3%
Model 5	Weighted KNN	40.8%
Model 6	Weighted KNN	40.3%

Table 5에서 알 수 있듯이 각 모형에 대해서 노면온도 추정을 위한 최적의 알고리즘은 KNN(Kthnearest neighborhood) 알고리즘으로 분석되었다. 가장 정확도가 높은 모형은 고려된 모든 변수를 포함시킨 Model 5인 것으로 나타났다. 하늘상태 변수를 고려했을 경우 미비하긴 하지만 적용 결과 모형의 정확도가 높아지는 것을 알 수 있었다.

Model 4와 Model 5를 비교해보면, 습도 또한 노면온도변화 패턴 추정에 미치는 영향은 다소 미비한 것을 알 수 있다.

최적 알고리즘으로 선정된 Weighted KNN의 매개변수들을 Model 5에 적용하기 위해 보정작업(Calibration)을 거친 후 각 알고리즘의 성능을 평가하였다. 평가방법

은 전·후방외기온도, 날씨, 구간, 대기온도, 습도 정보를 Predictor로 정의한 후 노면온도변화 패턴을 추정하였다. 이를 통해 추정된 노면온도를 실측 노면온도와의 비교를 위해 산포도 분석을 수행하였다. 최종적으로 모형 정확도를 정량적으로 평가하기 위해 Eq. (1)을 이용하여 절대평균오차(Absolute Average Error, AAE)를 계산하였다.

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\text{노면온도(실측치)}_i - \text{노면온도(추정치)}_i|}{n} \quad (1)$$

Fig. 8은 노면온도의 실측값과 추정값을 산포도를 이용하여 비교한 것이다. 모형에 적용되는 영향변수의 수가 증가할수록 오차로 구분되는 점들의 수가 감소하고 있음을 확인할 수 있으며, AAE 평가결과도 동일한 것으로 나타났다. 다만, Model 4, Model 5, Model 6의 AAE값은 차이가 없는데, 이는 구름양에 대한 날씨와 습도의 미미한 영향관계 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 고려된 모형별 영향변수와 성능지표인 AAE 계산결과는 Table 6과 같다.

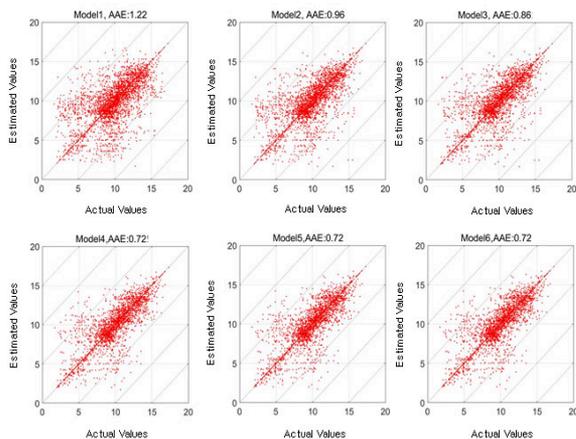


Fig. 8 Actual Road Surface Temperature vs Estimated Road Surface Temperature (Dispersion Analysis)

Model 4,5,6은 AAE 관점에서 동일한 성능을 보이는 모형으로 간주할 수 있다. 다시 말해서, 날씨, 구간, 대기온도, 습도는 노면온도변화 패턴 추정 정확도에 크게 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 Table 5와 같이 기계학습을 통한 최적 알고리즘 성능 평가 결과 미비하긴 하지만 정확도 측면에서 약간의 성능이 향상된 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 노면온도를 예측하기 위해 최종적으로 제시하고자 하는 영향변수는 전·후방외기온도, 습도, 대기온도, 도로구간, 그리고 하늘상태를 고려한 Model 5이다.

6. 결론

본 연구에서는 노면온도변화 패턴 추정 정확도를 향상시키기 위해 기존 연구에서 사용한 차량의 외기온도, 습도, 대기온도 자료 이외에 도로구간과 하늘상태 정보의 추가적인 구축을 통해 영향관계를 분석하였다.

분석구간은 서울외곽고속도로의 송추IC-자유로JC로 선정하였으며, 2017년 2월과 3월에 수집된 현장조사 수집 자료와 동일 기간 동안 기상청의 하늘상태 정보를 활용하였다. 분석 방법론으로는 MATLAB의 Classification Learner의 기계학습법을 활용하였다. 최종적으로 본 연구에서 노면온도변화 패턴 추정을 위해 선정된 영향변수는 차량의 전·후방외기온도, 대기온도, 습도, 도로구간, 하늘상태 총 6가지이며 노면온도와의 영향관계는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 차량의 후방외기온도는 노면온도와 영향관계가 가장 높은 것으로 나타났으며 영향관계가 가장 낮은 변수는 습도로 분석되었다.

둘째, 도로구간 중 터널구간의 노면온도가 가장 낮으며 교량구간과 기본구간 간의 노면온도 차이는 통계적

Table 6. Models and Variables

Model \ Var.	Ambient temp. (Rear)	Ambient temp. (Front)	Sky status*	Road classification**	Air temp.	Humidity	AAE (°C)
Model 1	○	○	○	○	○	○	1.22
Model 2	○	○	○	○	○	○	0.96
Model 3	○	○	○	○	○	○	0.85
Model 4	○	○	○	○	○	○	0.72
Model 5	○	○	○	○	○	○	0.72
Model 6	○	○	○	○	○	○	0.72

* Clear and Clean, Slightly Covered Sky, Cloudy Sky, Very Cloudy

** Basic Section, Bridge Section, Tunnel Section

으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

셋째, 하늘상태 변수의 추가는 노면온도 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

넷째, 영향관계 분석결과 도로구간에 따라 노면온도가 상이하다는 점은 주목할 만한 결과라고 할 수 있다. 만약 노면온도 이외에 차량의 외기온도와 같은 영향변수 역시 도로구간별로 유사한 차이를 보인다면 도로구간 변수를 노면온도변화 패턴 추정 모형에 반영하기 어렵다. 결과적으로 차량의 외기온도와 도로구간은 서로 독립적인 것으로 나타나 모형 구축을 위해 사용하였다.

영향관계 분석과 더불어 본 연구에서는 6개의 변수를 기반으로 MATLAB의 Classification Learner를 활용하여 노면온도변화 패턴을 추정하였다. 구축된 총 6개의 모형에 대한 정확도를 검증하기 위해 각 모형별로 최적 알고리즘을 선정 후, 산포도 및 AAE값을 기준으로 정량적인 정확도 평가결과를 도출하였다. 그 결과 Model 4(6개의 변수 중 습도 제외), Model 5, Model 6(6개의 변수 중 하늘상태 변수 제외)이 최적 모형으로 선정되었다. 그러나 그 중 두 개의 변수를 포함하고 있는 Model 5에서 동일한 성능평가 결과를 보여 본 연구에서는 Model 5를 최적의 모형으로 선정하였다.

노면온도변화 패턴의 추정을 위한 영향변수간 자료수집 빈도수가 상이할 경우 정확도의 손실이 발생하게 된다. 예를 들어 기상정보의 경우 정보 갱신주기는 1분이며, 외기온도는 10초 간격일 경우 보간법을 통해 두 정보를 매칭시켜야 한다. 그러나 이 경우 정확도 및 정보 누락이 불가피하게 되므로, 영향변수간 체계적인 자료수집이 필요할 것이다.

마지막으로 모형성능 향상을 위해 가장 중요한 요소는 다양한 환경 조건에서 수집된 양질의 학습데이터이다. 이를 위해서 다년간의 동절기 정보에 대한 자료수집 및 이력관리가 필수적이며 추가적으로 지속적인 모형 보정 또한 수반되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 “차량센서 기반 주행환경 관측·예측·안전운행 도로기술 개발” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Black, A.W., Mote, T. L. (2015). Effects of Winter Precipitation on Automobile Collisions, Injuries, and Fatalities in the United States. *Journal of Transport Geography*, Vol. 48, pp.165-175.

Chapman, L., Thornes, J. E., and Bradley, A. V. (2001). Modelling of Road Surface Temperature from a Geographical Parameter

Database. Part 1: Statistical, *Meteorological Applications*, 8(4), pp.409-419.

Chapman, L., Thornes, J. E. (2006). A Geomatics-based Road Surface Temperature Prediction Model, *Science of the Total Environment*, 360(1), pp.68-80.

Feng, T., Feng, S. (2012). A Numerical Model for Predicting Road Surface Temperature in the Highway, *Procedia Engineering*, Vol. 37, pp.137-142.

Gustavsson (1990). *Variation in Road Surface Temperature due to Topography and Wind*, *Theoretical and applied climatology*, 41(4), pp.227-236.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2015). *Development of Driving Environment Observation, Prediction and Safety Transportation based on Automotive Sensors*, 1st Year Report.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2016). *Development of Driving Environment Observation, Prediction and Safety Transportation based on Automotive Sensors*, 2nd Year Report.

Numata, M., Okamoto, J., Tashiro, T., Ito, T. (2002). A Basic Study of Short Term Forecasting Methods of Snowfall and Road Surface Temperature Using Intelligent Visibility Meter, *11th International Road Weather Conference Standing International Road Weather Commission*.

Sass, B.H. (1992). A Numerical Model for Prediction of Road Temperature and Ice, *Journal of Applied Meteorology*, 31(12), pp.1499-1506.

Sass, B.H. (1997). A numerical Forecasting System for the Prediction of Slippery Roads, *Journal of Applied Meteorology*, 36(6), pp.801-817.

Shao, J., Lister, P. J., Hart, G. D., Pearson, H. B. (1996). Thermal Mapping: Reliability and Repeatability, *Meteorological Applications*, 3(4), pp.325-330.

Shao, J., Lister, P. J (1996). An Automated Nowcasting Model of Road Surface Temperature and State for Winter Road Maintenance, *Journal of Applied Meteorology*, 35(8), pp.1352-1361.

Takahashi, N., Tokunaga, R. A., Asano, M (2006). Toward Strategic Snow and Ice Control on Roads: Developing Method for Surface-Icing Forecast by Applying Heat Balance Model. In : *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*, No. 06-2067.

Takahashi, N., Tokunaga, R. A., Asano, M (2008). Road Surface Temperature Prediction Model Taking into Account Effects of the Surrounding Environment. In : *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*, No.08-1445.

Thornes, J.E., Shao, J. (1991). A Comparison of UK Road Ice Prediction Models, *Meteorological magazine*, 120(1424), pp.51-57.

Voldborg, H (1993). *On the Prediction of Road Conditions by a Combined Road Layer-Atmospheric Model in winter*. In :

- Transportation Research Record, 1387, pp.231-235.
- Xu, B., Dan, H.C., Li, L. (2017), Temperature Prediction Model of Asphalt Pavement in Cold Regions based on an Improved BP neural network, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 120, 25, pp.568-580.
- Yang, C.H., Yoon, C.J., Kim, J.G., Park, J.H., Yun, D.K. (2016), Evaluation of Reliability for Road Surface Temperature Change Patterns and Road Segmentation based on Road Surface Temperature, *International Journal of Highway Engineers*, Vol. 18, No. 4, pp. 103-111.
- Yang, C.H., Kim, S.B., Yoon, C.J., Kim, J.G., Park, J.H., Yun, D.K. (2016), Analysis of Road Surface Temperature Change Patterns using Machine Learning Algorithms, *International Journal of Highway Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 35-44.