

여름철 강우 시 도로관리를 위한 수막발생구간 예측정보의 정책적 활용방안: 서울시 내부순환로와 올림픽대로를 대상으로*

Policy Application of the Hydroplaning Prediction Model for Road Management in the Summer Rainfall

안숙희** · 양호진*** · 이채연****

Sukhee Ahn · Hojin Yang · Chaeyon Yi

요약: 본 연구의 목적은 여름철 강우 시 수막발생위험도 예측 결과를 활용하여 도로관리 및 사고예방에 적용할 수 있는 방안을 제시하는 것이다. 수막현상이란, 물에 젖은 노면을 자동차가 고속으로 달릴 때 타이어와 노면 사이에 형성된 수막으로 인해 타이어가 노면 접지력을 상실하는 것을 말한다. 도로의 기하구조와 강우강도를 사용하여 수막두께를 산정하는 영국 RLL(British Road Research Laboratory)의 방법론을 적용하였으며, 수막두께에 따른 3단계(보통, 주의, 위험)의 수막발생위험도를 제시하였다. 서울시설공단(Seoul Facilities Corporation, SFCMC)의 수막발생 관측지점 자료를 활용하여 예측결과를 검증한 결과, 대체로 수막발생위치와 모델의 값이 일치하였으며, 이를 통해 도로관리 시 활용가능성을 확인하였다.
핵심주제어: 강우강도, 도로 기하구조, 수막현상, 수막발생위험도, 도로관리

Abstract: The purpose of this study is to suggest a plan that can be applied to road management and accident prevention by utilizing the prediction of the potential area for hydroplaning during the summer rainfall. Hydroplaning is a condition that can exist when a layer of water builds between the tires of the vehicle and surface of the road, the tire has lost its grip on the road. To calculate the water depth, the British Road Research Laboratory (RLL) methodology was applied using the road geometry and rainfall intensity. Levels of caution for hydroplaning were presented using three levels: normal, caution, and danger. As a result of verifying the forecasts using the observational data of Seoul Facilities Corporation (SFCMC), the model's predictions and the locations of the observations were found to be largely consistent. Therefore, the results of the model will be available for road management in case of rainfall.

Key Words: Rainfall Intensity, Geometry of Road, Hydroplaning, Road Management

* 본 논문은 2019년도 기상청 미래유망 민간기상서비스 성장기술개발 사업(KMI2018-08210)의 지원에 의하여 연구되었음.

수막관측 자료를 제공해주신 서울시설공단 교통정보처 운영팀에 감사드립니다.

** 주저자, 한국외국어대학교 대기환경연구소 책임연구원

*** 공동저자, 한국외국어대학교 대기환경연구소 선임연구원

**** 교신저자, 한국외국어대학교 대기환경연구소 책임연구원

I. 서론

기상현상은 운전자의 인지능력, 차량 성능, 교통 흐름 등에 영향을 미친다. 그 중 강우현상이 발생할 경우에는 시정거리(Visibility Distance), 포장마찰(Pavement friction), 도로장애(Lane obstruction) 등의 요소에 영향을 미치며, 이로 인해 발생하는 교통사고는 사회경제적 손실을 가중시킨다.

미국 교통국(U.S. Department of Transportation, DOT)은 2005년부터 2014년까지 10년간의 자료를 바탕으로 날씨가 교통사고에 미치는 영향을 조사한 결과(U.S. DOT, 2015), 평균적으로 매년 교통사고의 22%가 날씨와 관련된 사고였으며, 이 중에서 73%는 노면상태가 습윤일 때 발생한 사고인 것으로 나타났다. 우리나라의 경우도 전체 교통사고 사망자 수는 감소하고 있지만 빗길 교통사고 사망자수는 증가하는 추세로 최근 5년간(2013~2017년) 기상상태별 교통사고 발생현황 분석결과, 강우 발생 시 교통사고 발생 및 사망자 수가 가장 많았으며, 특히 여름철(6~8월)에 집중적으로 발생한 것으로 나타났다(도로교통공단, 2018). 또한, 2017년 장마철 강우 시 교통사고 치사율은 맑은 날씨일 때와 비교해보았을 때 1.24배 높게 나타났으며(한국교통안전공단, 2018), 특히 본 연구의 대상인 서울시 도로에서 지난 5년간(2010~2014년) 발생한 교통사고를 노면상태별로 분석해본 결과, 교통사고는 도로가 건조 상태에서 가장 많이 발생하였으나 교통사고 치사율은 습윤 상태(습윤: 1.48, 건조: 1.02, 결빙: 1.01)일 때 가장 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 강우 발생 시 교통사고가 발생하는 원인으로 도로 상에 발생하는 수막현상을 들 수 있다. 여름철 장마전선 및 태풍, 국지성 집중호우로 인한 강우는 배수가 원활하지 않을 경우 도로에 빗물이 고이는 수막현상을 발생시키며, 수막현상으로 인하여 주행하는 차량은 교통사고 위험에 노출된다. 미국의 FHWA에서는 오래전부터 Gallaway et al.(1979) 등이 도로의 기하구조 형태에 따른 도로 노면의 수막현상에 대한 연구를 수행하였다.

수막현상(Hydroplaning)이란, 물에 젖은 노면을 자동차가 고속으로 달릴 때 타이어와 노면사이에 형성된 수막으로 인해 타이어가 노면 접지력을 상실하는 것(홍승호·나병찬, 2001)으로 다시 말해 물위에 차가 떠있는 현상으로 볼 수 있다. 수막현상은 수막의 두께와 자동차의 주행속도에 따라 발생속도가 다르지만 보통 시속 80 km 정도에서 발생하며(Yager, 1970), 한국교통안전공단(2018)에서 수행한 2017년 제동거리 시험결과에 따르면, 시속 50 km로 주행 중 젖은 노면에서의 제동거리가 마른 노면에서의 제동거리에 비해 최소 1.6배 이상 증가하였다. 강우로 인해 습윤해진 노면에서 제동거리는 평상시에 비해 증가하는 특성을 고려하여 운전자는 주행 시 속도를 하향해야 되지만, 대부분의 운전자들은 습윤 상태의 도로를 주행할 때 속도를 줄이지 않으며(U.S. Federal Highway Administration(FHWA), 1998), 건조한 도로와 습윤한 도로에서의 차량속도 사이에는 차이가 없는 것으로 나타났다(Olson et al., 1984; Lamm et al., 1990).

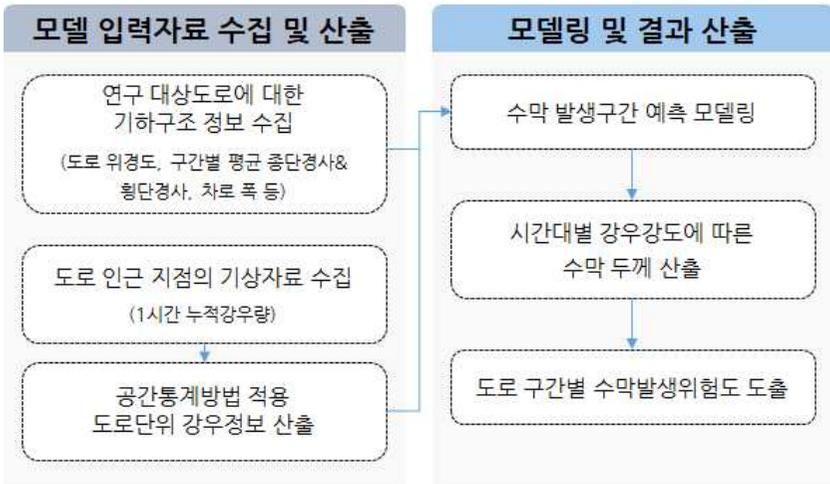
따라서 본 연구에서는 기상조건에 따른 도로의 수막구간 추정 예측모델의 결과를 통해 여름철 강우로 인해 발생할 수 있는 교통사고를 예방하고, 도로 관리자에게 의사결정지원 도구로써 다양한 정책적 활용 방안을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

수막현상은 운전자의 주행 및 노면상태에 영향을 미치는 주요 요인으로 수막발생위험도는 강우강도와 도로의 기하구조에 의해 결정된다. 모델에 입력되는 도로의 기하구조는 이동형 관측차량으로 도로의 위치 정보, 종단경사, 횡단경사, 차로 폭 등의 정보를 수집하였으며, 연구 대상도로인 내부순환로와 올림픽대로 인근에 위치하고 있는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) AWS(Automatic Weather System, 자동기상관측소) 자료를 이용하여 기상정보(강우량)를 반영하였다. 수막발생구간 예측 모델

은 영국 RLL(British Road Research Laboratory) 방법론을 적용하였으며, 모델링을 통해 시간대별 강우강도에 따른 수막 두께를 산출하고, 도로 구간별 수막발생위험도를 도출하였다(그림 1)).

〈그림 1〉 도로 수막 발생 위험도 도출 흐름도



1. 연구대상지 선정

연구지역은 서울시 자동차전용도로 중에 내부순환로와 올림픽대로로 내부순환로의 경우 정릉터널을 제외한 17.5 km, 올림픽대로는 42 km 구간이다(그림 2)). 내부순환로(국토교통부, 2019)는 서울특별시 마포구 망원동 성산대교 북단에서 시작하여 정릉터널을 지나 성동구 성수동 동부간선도로까지 연결하는 순환형 자동차전용도로로 10톤 이상 화물차, 가스·유류·폭발물 등 위험물 운반차량, 건설기계 등의 특수 차량 등은 운행이 제한되는 특징을 가지고 있다. 도시의 순환도로로서 외곽순환도로와 연계하여 서울과 주변 위성도시의 간선 교통량을 처리하는 핵심적인 역할을 하고 있으며, 폭 26~34.8 m의 왕복 4~6차선 규모로 차량 주행 속도는 최고 70~80 km/h, 최저 40 km/h로 되어있다. 이 구간을 선정한 이유는

서울시 자동차전용도로 중에서 다양한 범위의 도로 기하구조 형태가 존재하기 때문에 수막두께를 검증하기에 최적의 장소라고 판단했다(이종학 등, 2017). 올림픽대로(국토교통부, 2019)는 서울 강동구 강일동 강동대교 남단에서 강서구 개화동 행주대교 남단까지 한강변 남쪽을 따라 서울특별시 중심부를 동·서간 관통하는 최초의 자동차 전용도로이다. 기존 도로와는 달리 도로의 선형, 노면의 구배, 교차시설 등의 도로 구성요소와 문형식 교통표지판 등 차량의 고속주행에 적합하게 설계되어있으며, 폭 40 m의 왕복 8차선 규모로 최고 속도 80 km/h, 나머지 구간은 70 km/h로 주행하도록 되어있다.

〈그림 2〉 내부순환로 및 올림픽대로 위치



2. 수막발생구간 예측 모델

본 연구에서 사용된 도로의 수막발생구간 예측 모델은 이종학 등(2017)이 영국 RLL(British Road Research Laboratory) 방법론을 적용하여 내부순환로에 대해 개발한 모델을 기반으로 올림픽대로를 추가하여 공간적인 범위를 확장한 모델로 모델의 정확도는 선행연구에서 검증된 바 있다. 도로의 수막두께를 산정하는 방법론은 경험식을 바탕으로 강우강도, 도로 기하구조, 포장의 표면상태(Texture depth(TXD), 타이닝 깊이)에 따라 민감하게 반응하는 방정식이 제시되었으나(Gallaway et al., 1979), 비가 많

이 오는 지역에 해당하는 가중치를 적용해 강우량이 많은 경우에만 수막 현상이 발생하는 등 우리나라의 조건에는 맞지 않고, 연구대상도로에 대한 TXD 자료를 수집하는데 문제가 있어 강우강도 및 복합경사만으로 수막두께를 산정할 수 있는 영국 RLL의 방법론을 사용하였으며 식은 다음과 같다.

$$d = 0.046 \left\{ \frac{L_f \times I}{S^{0.2}} \right\}^{0.5} \quad (1)$$

여기서 d 는 수막두께(mm)이고, I 는 강우강도(mm/h)로 시간당 강우량이며, S 는 복합경사(m/m), L_f 는 유로길이(m)를 말한다. S 와 L_f 는 각각 식 (2), (3)을 사용하여 산출이 가능하다.

$$\frac{1}{S} = \sqrt{\left(\frac{1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{S_1^2 + S_2^2}{S_1^2 + S_2^2}\right)} \quad (2)$$

$$L_f - L \frac{S_1}{S} = L \sqrt{1 + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2} \quad (3)$$

위 식에서 S_1 는 횡단경사(m/m), S_2 는 종단경사(m/m), L 은 도로 폭(m)을 의미한다. 도로정보 및 강우정보를 입력변수로 산출한 수막두께를 사용하여 수막발생위험도를 수치적으로 진단할 수 있도록 <표 1>과 같이 기준을 정의하였다. 수막발생위험도는 수막현상이 발생하는 최저 수막두께가 타이어의 속도, 마모정도, 노면의 거칠기 등에 따라 다르지만 2.5~10.0 mm 정도에서 발생한다는 홍승호와 나병찬(2001)의 선행연구를 참고하여 3단계로 구간을 분류하였다.

〈표 1〉 수막발생위험도 구간 정의

	수막 두께 (mm)
0단계: 보통	0.0 ~ 1.0
1단계: 주의	1.1 ~ 2.4
2단계: 위험	2.5 ~

3. 입력자료 구축

1) 도로 기하구조 자료

도로의 기하구조는 강우강도가 같은 경우, 배수가 잘 안되는 지역에서 수막현상이 발생할 가능성이 높기 때문에 수막발생구간을 정확하게 예측하기 위해 필요한 모델의 입력 자료이다.

도로 수막발생구간 예측 모델에 사용된 도로의 기하구조 자료는 2016년 4월부터 8월까지 4개월 동안 차량에 스마트폰을 거치하고, 평균 36 km/h로 저속주행하며, 도로기하구조 수집 Application을 통해 데이터를 수집하였다(〈그림 3〉). 수집항목으로는 좌표(경·위도), 고도, 차로 폭(m), 길어깨 및 중앙분리대 유무, 길어깨 폭(m), 종단 및 횡단경사(%) 등으로 수막두께에 영향을 미치는 요소들이며(〈표 2〉), 수집대상은 서울시의 내부순환로(터널제외 17.5 km)와 올림픽대로(42 km)로 총 길이는 59.5 km이다.

〈그림 3〉 도로 기하구조 수집 체계



〈표 2〉 도로 기하구조 자료 수집 내용

정보	설명
도로명	대상도로의 이름
방향	도로의 진행방향
좌표	위경도 좌표체계
고도 [m]	관측지점의 고도
지점간 거리 [m]	관측지점 사이의 거리
총 차로 수	주행방향(편도)의 차로 수
차로 폭 [m]	노면표시의 중심과 중심 사이
길어깨 유무	도로를 보호하고 비상시에 이용하기 위하여 차도에 접속하여 설치하는 도로의 부분
중앙분리대 유무	통행방향에 따라 차도 분리를 위해 도로의 중앙에 설치하는 분리대와 측대
횡단경사 [%]	도로의 진행방향에 직각으로 잘라낸 단면의 기울기
종단경사 [%]	도로의 진행방향을 따라 종 방향으로 잘라낸 단면의 기울기
곡선반경 [m]	도로가 곡선일 경우, 원심력이 작용하는 원의 반지름
곡선부 길이 [m]	곡선이 시작되는 점부터 끝나는 점까지의 길이
측구 유무	도로와 사유지 등의 배수를 위해 설치하는 배수구
포장종류	도로의 포장 재질

2) 기상 자료

도로 상에는 설치된 기상관측소가 없기 때문에 도로에 인접한 관측소의 자료를 토대로 강우량을 추정해야 한다. 서울시 전역에 분포하고 있는 기상청 AWS 지점의 강우정보를 도로단위로 변환하기 위하여 내부순환로와 올림픽대로 주변에 위치하고 있는 18개 지점의 자료를 사용하였으며(〈표 3〉), 공간통계기법은 k-NN(k-Nearest Neighbor, 최근접 이웃 알고리즘)을 적용하여 도로에서 가장 가까운 지점의 강우정보를 추출하여 모델에 입력하였다. 〈그림 4〉는 각각의 도로에서 가장 가까운 AWS 지점을 표시한 그림으로 AWS 지점과 그 지점에 해당하는 도로를 같은 색으로 나타내었다. 또한, 수막두께를 산출하기 위해서는 시간당 강우강도가 필요하기 때문에 기상청 AWS 자료 요소 중에 1시간 누적 강우량을 사용하였다.

〈표 3〉 도로단위 강우정보 생산에 사용된 AWS 지점 정보

지점명	지점번호	위도	경도
서울	108	37.5714	126.9658
김포(공)	110	37.5683	126.7756
강동	402	37.5555	127.1450
송파	403	37.5115	127.0967
강서	404	37.5739	126.8295
양천	405	37.5296	126.8782
도봉	406	37.5995	127.0295
동대문	408	37.5846	127.0604
마포	411	37.5517	126.9292
서대문	412	37.5705	126.9408
광진	413	37.5338	127.0857
성북	414	37.6117	126.9994
용산	415	37.5204	126.9761
한강	418	37.5249	126.9391
성동	421	37.5472	127.0388
영등포	510	37.5271	126.9071
구리	569	37.5822	127.1570
현충원	889	37.5004	126.9765

〈그림 4〉 AWS 지점별 해당 도로



3) 수막발생 관측자료

서울시설공단(Seoul Facilities Corporation, SFCMC)은 내부순환로와 올림픽대로를 포함한 11개 노선의 도시고속도로를 관리하고 있으며, 해당 도로의 통행량 및 속도 등 교통정보를 도로전광표지(Variable Message Signs, VMS)를 통해 제공하고 있다. 도로관리와 관련된 주요 업무는 24시간 도로 순찰을 통해 도로상 사고차량에 대한 안전조치활동과 도로부속물, 도로노면, 가로등 상태 등을 점검하는 것으로 강우 발생 시에는 도로상의 수막(물고임) 및 포트홀 등의 현상을 관측하여 이로 인한 사고가 발생하지 않도록 도로시설물을 관리하고 있다. 이에 수막발생구간 예측모델의 성능을 평가하기 위하여 서울시설공단에서 관측한 수막발생 관측지점 자료를 토대로 13개의 사례일을 선정하였다(〈표 4〉). 연도별로는 2017년 7개, 2018년 1개, 2019년 6개 사례이고, 월별로는 7월 6개, 8월 7개 사례이며, 관측도로는 모두 올림픽대로에 위치하고 있다(〈그림 5〉). 수막발생구간 예측모델은 수막발생 관측일에 대해 1시간 단위로 수행하여 관측지점에 대한 강우강도 및 수막두께의 변화를 분석하였다.

〈표 4〉 수막발생 지점 관측 사례

발생일시	종료일시	지속 시간 (분)	관측지점		강우량 (mm/h)	수막두께 예측 값 (mm)	위험 단계
			위도	경도			
2017-07-10 20:27	2017-07-10 22:15	108	37.53	126.91	19.0	1.67	주의
2017-07-23 11:21	2017-07-23 12:15	54	37.52	127.10	27.5	7.41	위험
2017-08-10 18:20	2017-08-10 18:40	20	37.54	126.90	17.5	1.81	주의
2017-08-15 10:44	2017-08-15 11:22	38	37.54	126.90	4.0	1.05	주의
2017-08-15 11:02	2017-08-15 11:20	18	37.55	127.12	13.5	1.48	주의
2017-08-20 22:19	2017-08-20 23:10	51	37.52	126.93	19.5	2.68	위험
2017-08-20 22:50	2017-08-20 23:10	20	37.52	127.09	10.0	1.40	주의
2018-07-02 19:15	2018-07-03 02:28	433	37.52	126.93	0.5	0.26	보통
2019-07-26 09:19	2019-07-26 10:09	50	37.51	126.93	12.5	1.45	주의
2019-07-28 08:21	2019-07-28 08:42	21	37.54	126.90	6.0	1.11	주의
2019-07-28 08:23	2019-07-28 08:42	19	37.51	126.93	0.0	0.86	보통
2019-08-01 03:07	2019-08-01 05:37	150	37.53	127.11	16.0	1.42	주의
2019-08-04 17:29	2019-08-04 17:44	15	37.57	127.15	0.0	0.00	보통

〈그림 5〉 수막발생 관측지점 위치



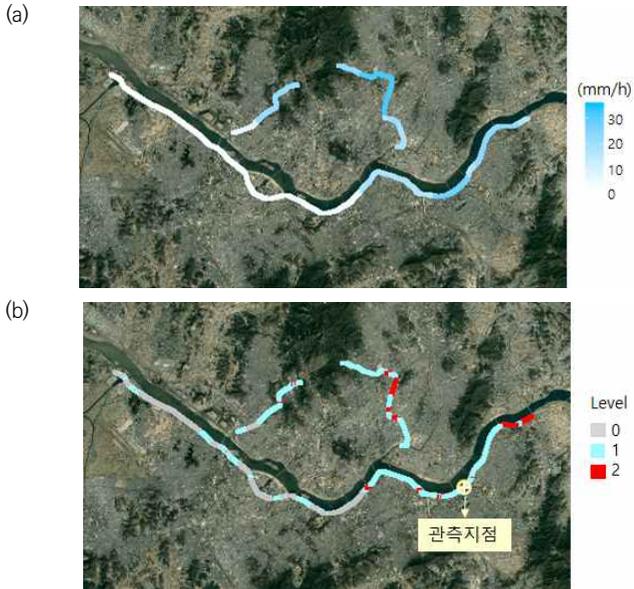
III. 분석결과

도로 수막발생구간 예측모델에서 수막발생위험도는 위험(2), 주의(1), 보통(0) 등 3단계이며, 수막발생구간 예측결과와 실제 수막현상이 발생했던 관측지점의 위치를 중첩하여 비교분석한 결과를 제시하였다.

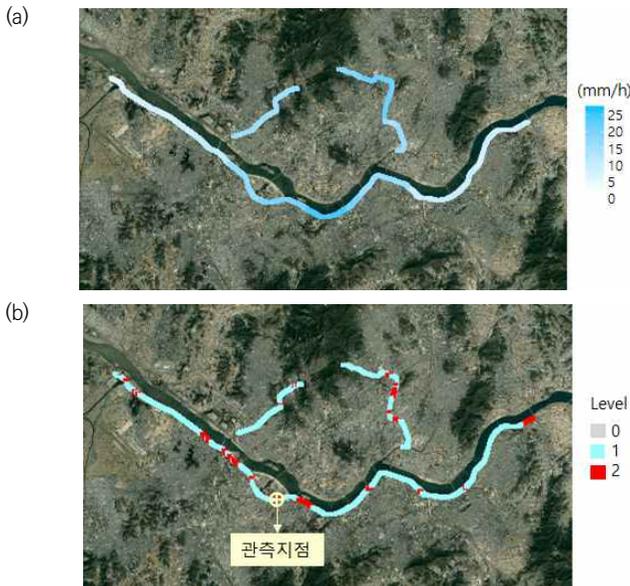
1. 수막발생위험도 위험단계 예측 사례

모델의 예측결과와 수막발생 지점의 관측시간이 일치한 사례로 2017년 7월 23일과 2017년 8월 20일 2개의 사례가 있었다. 2017년 7월 23일의 경우, 서울시 오른쪽 지역에 집중적으로 강우가 발생하였으며, 수막발생 위험도는 도봉, 강동지역에 위험구간이 예측되었고, 강우량이 많은 지역과 일치하였다(〈그림 6〉). 수막발생 관측지점의 1시간 누적강우량은 27.5 mm, 수막두께는 7.41 mm로 정확히 위험구간으로 예측되었다. 2017년 8월 20일 사례는 서울시 중심부에 집중적으로 강우가 발생하였으며, 수막발생위험도 예측 시 강우 외에 기하구조 조건에 의해 위험과 주의로 단계가 다르게 예측되는 것을 확인할 수 있었다(〈그림 7〉). 관측지점의 1시간 누적강우량은 19.5 mm, 수막두께는 2.68 mm로 예측하였다.

〈그림 6〉 2017년 7월 23일 11시 강우분포도(a) 및 수막발생위험도(b)



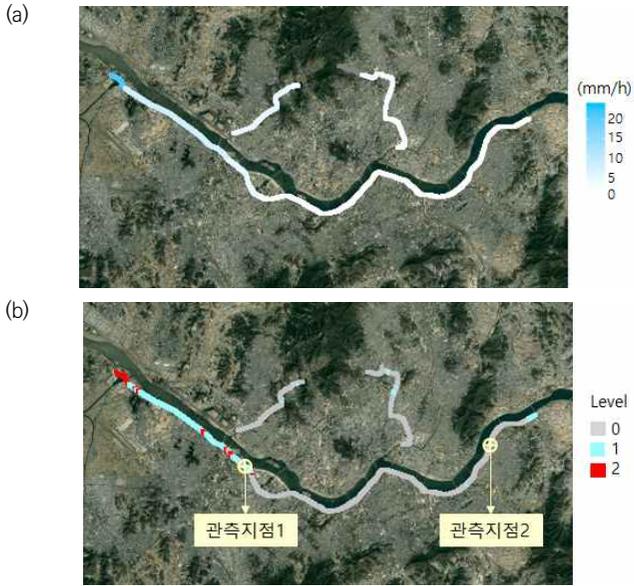
〈그림 7〉 2017년 8월 20일 22시 강우분포도(a) 및 수막발생위험도(b)



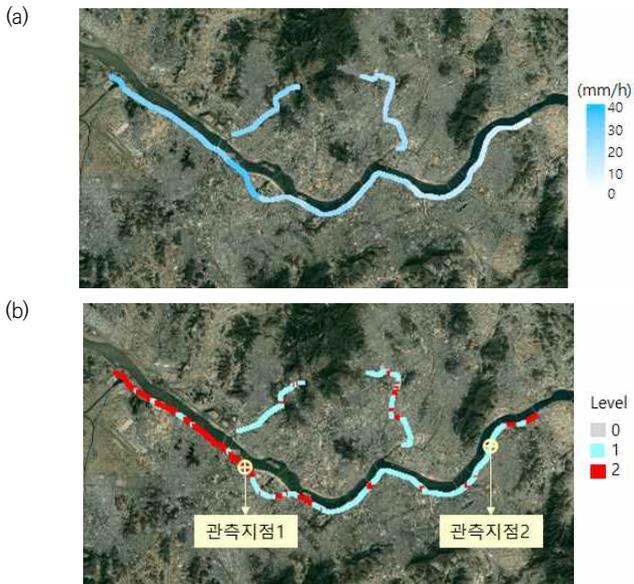
2. 수막발생위험도 주의단계 예측 사례

수막발생위험도의 주의단계는 수막현상이 위험등급 수준까지 발생하지는 않았지만 발생가능성이 있기 때문에 사전 점검을 통해 예방이 가능한 단계로 볼 수 있다. 2017년 8월 15일의 경우, 10시에 강서지역부터 강우가 시작되어(그림 8(a)) 11시에는 서울시 전역으로 확대되었다(그림 9(a)). 수막발생위험도에서도 10시에는 대부분 보통단계였으나(그림 8(b)), 11시에는 서울시 중심을 기준으로 왼쪽 도로에서 대부분 위험단계로 예측되었다(그림 9(b)). 2017년 8월 15일에는 2개 지점이 관측되었다. 지점 1의 경우, 10시에는 1시간 누적강우량 4.0 mm, 수막두께는 1.05 mm로 예측되었으나, 11시에 1시간 누적강우량이 36.5 mm, 수막두께는 2.69 mm로 관측된 시점(10시)에는 주의단계였지만 11시에는 위험단계로 상향 조정되었다. 지점 2는 10시에는 강우가 발생하지 않았으나 11시에는 1시간 누적강우량 13.5 mm, 수막두께 1.38 mm로 예측된 지점으로 수막발생위험도가 10시에 보통단계에서 관측시간인 11시에는 주의단계로 상향 조정되었다. 이는 주의단계에 대한 점검을 실시하여 수막현상이 발생하는 것을 예방할 수 있음을 의미한다. 2019년 8월 1일에는 올림픽대로의 송파, 강동지역에 집중적으로 강우가 발생하였고, 3시 강우분포도(그림 10(a))에서 영등포 AWS의 결측으로 해당구간은 수막두께가 예측되지 않은 것을 확인할 수 있다(그림 10(b)). 수막현상이 관측된 3시의 1시간 누적강우량은 16.0 mm, 수막두께는 1.42 mm의 주의단계로 예측되었으나, 5시에는 보통단계로 하향 조정되면서 수막현상이 소멸한 시간과도 일치하였다. 이를 통해 수막현상의 발생과 종료시간을 예측하여 사전에 활용이 가능함을 알 수 있다.

〈그림 8〉 2017년 8월 15일 10시 강우분포도(a) 및 수막발생위험도(b)



〈그림 9〉 2017년 8월 15일 11시 강우분포도(a) 및 수막발생위험도(b)



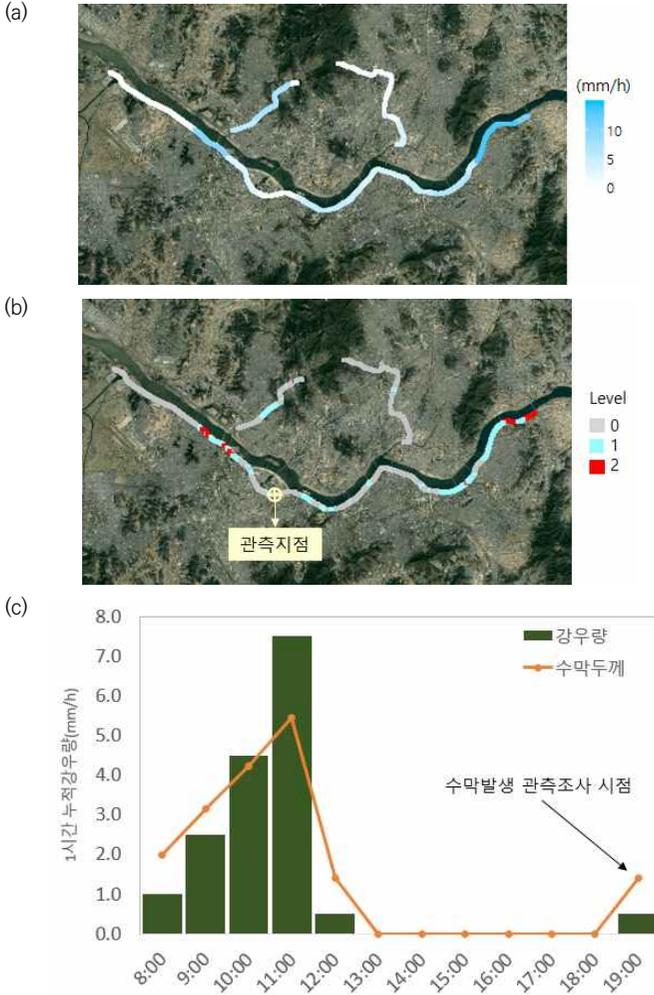
〈그림 10〉 2019년 8월 1일 3시 강우분포도(a) 및 수막발생위험도(b)



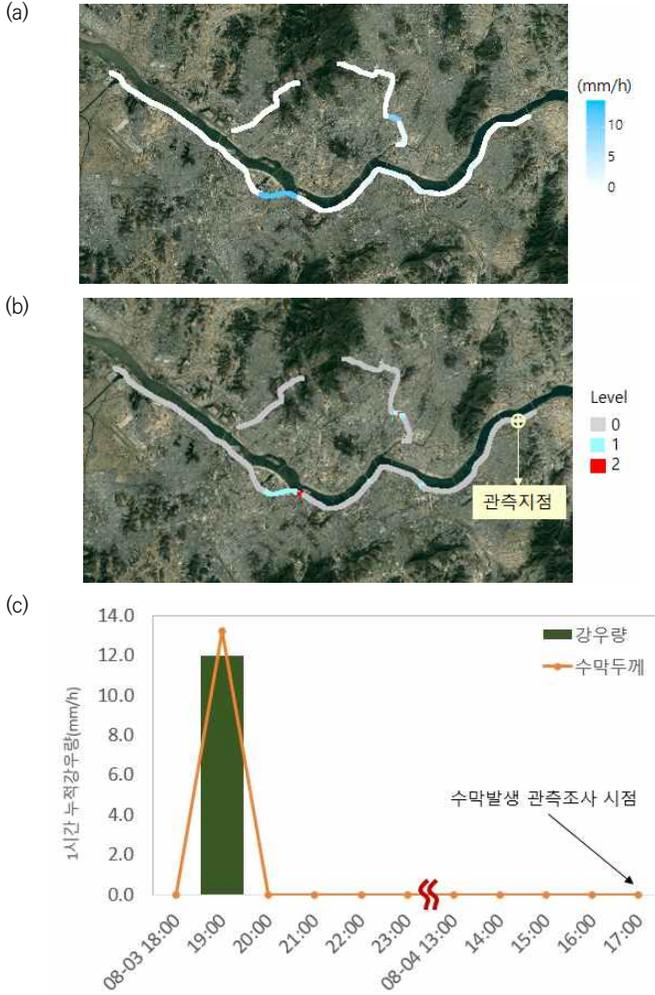
3. 수막발생위험도 보통단계 예측 사례

마지막으로 관측지점이 수막발생구간에 위치하지 않는 경우로 강우가 발생하지 않았는데 수막발생 지점이 관측된 사례에 대하여 살펴보고자한다. 2018년 7월 2일 19시의 1시간 누적강우량은 0.5 mm로 수막이 발생하지 않을 것으로 예측되었으나 수막현상이 관측되었다(〈그림 11〉). 이에 관측시간 이전에 대해서 분석해본 결과, 지점의 12시간 누적강우량이 16.5 mm로 나타났으며, 7월 2일 11시의 모델 예측결과에서 해당 지점에 대해 수막발생위험도가 주의단계로 예측된 것으로 확인되었다. 2019년 8월 4일 사례도 수막발생 관측시간에는 1시간 누적강우량이 0.0 mm이었으나, 24시간 누적강우량이 12.0 mm로 8월 3일 19시에 수막발생 주의단계로 예측되었다(〈그림 12〉). 이는 수막현상을 도로상의 CCTV 화면을 통해 수동적으로 관측하거나 신고를 통해 접수가 되고 있어 수막현상이 발생한 이후 발생지점에 대한 도로관리처의 인지가 늦어진 경우로 보인다.

〈그림 11〉 2018년 7월 2일 19시 강우분포도(a), 수막발생위험도(b),
1시간 누적강우량과 수막두께 변화(c)



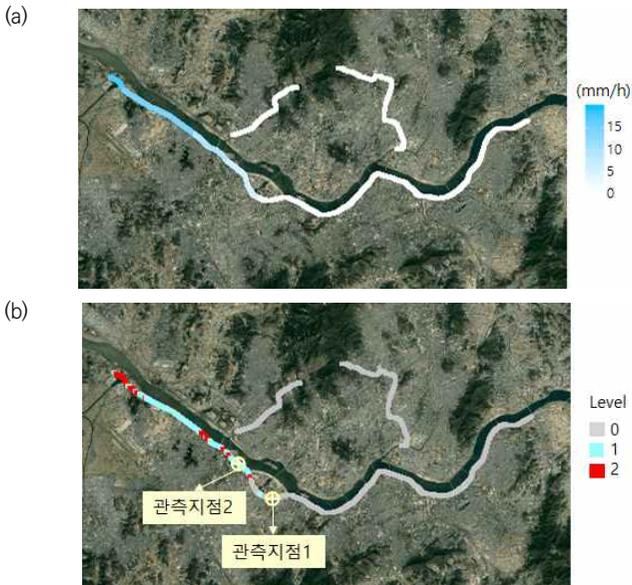
〈그림 12〉 2019년 8월 4일 17시 강우분포도(a), 수막발생위험도(b), 1시간 누적강우량과 수막두께 변화(c)



2019년 7월 28일 08시에는 2개의 지점이 관측되었다(〈그림 13〉). 지점 1의 경우, 한강 AWS의 자료가 입력 자료로 사용되어 1시간 누적강우량이 0.0 mm이었으나, 지점 2는 영등포 AWS 지점의 1시간 누적강우량인 6.0 mm이었다. 이로 인해 지점 2는 지점 1과 달리 수막발생위험도가 주의단

계로 예측되었다. 지점 1이 포함된 도로구간은 대표되는 강우량을 한강 AWS 지점의 자료를 사용하였는데, 직선거리 1.5 km 거리 내에서도 강우의 특성이 다르며, 매우 국지적인 것을 알 수 있었다. 이는 공간통계기법 중 k-NN 기법을 적용할 때에 가장 가까운 거리에 있는 AWS 지점의 강우 자료를 입력하여 발생한 문제로 볼 수 있으며, 고해상도의 레이다 자료 등을 이용하여 개선할 필요가 있다.

〈그림 13〉 2019년 7월 28일 8시 강우분포도(a) 및 수막발생위험도(b)



IV. 고찰

본 연구는 기상조건에 의한 도로의 영향 중 수막현상에 초점을 두고 서울시 내부순환로와 올림픽대로를 대상으로 강우강도에 따른 수막발생구간 예측을 통해 강우 시 관리가 필요한 도로구간의 도출 및 결과에 대한 다양한 정책적 활용 방안을 제시하고자 하였다.

수막발생구간 예측모델 결과와 서울시설공단의 수막발생 관측지점의 자료를 비교하여 분석해본 결과, 강우분포도와 수막발생위험도가 거의 일치하였으며, 구간별로 같은 지점의 AWS 강우량이 입력 자료로 사용되더라도 수막발생위험도는 도로의 기하구조에 의해 위험도의 단계가 다르게 예측되는 것을 확인하였다. 또한, 강우가 발생하지 않았으나 수막발생이 관측된 사례에서, 해당지점의 12시간 또는 24시간 누적강우량을 살펴보면 강우가 존재하고 있었던 것으로 보아 관측시간 이전에 수막현상의 발생을 예측하였다.

연구의 한계점으로는 강우정보의 결측 및 정확성을 들 수 있다. 우선 2019년 8월 1일 사례의 경우, 영등포 AWS 지점의 결측으로 수막발생위험도 예측 결과가 생략된 구간이 나타났다. AWS의 경우, 일시적인 기계 장애로 관측이 이루어지지 않거나 통신 장애 등으로 인한 오류들이 포함되어 있으며, 자료가 수집되지 않는 결측(missing value)이 발생한다(민재식 등, 2016; WMO, 2004). 두 번째로 2019년 7월 28일 사례에서 수막현상이 비슷한 위치에서 관측되었지만, 각각 사용된 AWS 자료에 따라 모델의 입력 자료인 강우량이 달라지고, 이로 인해 수막발생위험도의 예측 결과도 달라졌다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 관측공백을 최소화할 수 있는 기상자료들(레이더, 위성 등)을 활용하고, 도로단위 강우정보를 생산하는데 최적의 공간통계기법을 적용하여 개선된 강우정보를 생산하고자 한다. 또한, 교통정보를 제공하고, 현장에서 도로를 관리하는 입장에서는 수막의 발생위치 뿐만 아니라 시작시간과 종료시간의 정보에 대해 미리 알림을 받는 것이 중요하다. 본 연구에서는 실황 강우자료를 사용하였지만 향후 강우 예측자료를 사용하여 수막의 발생과 종료되는 시간을 예측할 수 있는 기술로 개선이 필요하다.

V. 결론

연구결과를 바탕으로 한 여름철 강우 시 도로관리를 위한 정책적 활용 방안은 다음과 같다.

1. 모델에서 생산되는 수막발생위험도와 강우분포도를 통해 해당 도로의 전 구간에 대한 모니터링이 가능하다. 이를 활용하여 강우 시 도로별 통행량 및 주행속도 등의 변화를 추정하여 차량통행지연 시점을 예측할 수 있으며, 사전에 도로점검을 실시하여 상습적으로 침수가 발생하는 구간의 도로통제에 활용할 수 있다. 이는 기상 취약구간에 대한 집중적인 관리 및 교통예보서비스를 가능하게 하며, 교통소통 장애로 인한 도로교통 혼잡비용¹⁾을 감소시킬 수 있다.
2. 수막발생위험도의 주의단계는 수막현상이 발생하지는 않았지만 발생가능성이 있기 때문에 위험단계가 되기 전에 점검을 통해 예방이 가능한 단계로 볼 수 있다. 따라서 주의단계에 해당하는 구간에 대해 우선적으로 점검을 실시하여 수막현상 및 빗물침투 등으로 인한 도로파손(예, 포트홀) 예방이 가능하며, 이로 인해 도로의 보수비용²⁾이 절감될 수 있다.
3. 마지막으로 모델의 수막발생위험도 예측 결과와 서울시설공단의 수막현상 관측지점에 대한 자료가 지속적으로 축적이 된다면, 강우강도에 따라 상습적으로 수막현상이 발생하는 구간을 도출하여 도로의 사전 점검 계획을 수립하고, 파손된 도로에 대한 유지·보수 관리 작업 시 정해진 예산 대비 도로관리 우선순위를 결정하는데 필요한 과학적 근거로 활용할 수 있다. 이를 통해 도로관리비용 예산 확보 및 도로관리 정책에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다.

1) 도로교통 혼잡비용은 차량운행비용과 시간가치비용을 환산한 것으로 2015년 추정치 기준 서울시의 경우, 9.4조 원 수준이었으며(한국교통연구원, 2014), 고속도로에서 강우 및 강설과 같은 기상악화로 인한 혼잡비용은 3,981억 원으로 추정되었다(정연식 등, 2009).

2) 2009~2011년까지 서울시의 파손된 도로의 면적은 총 23.6만㎡에 달하였으며, 이에 대한 보수비용으로 1,098.5억 원의 예산이 투입되었다(아주경제, 2011).

본 연구는 강우 발생 시 도로 상의 수막현상의 발생으로 인한 교통사고 위험가능성을 미리 인지하고, 도로시설관리 및 교통사고 예방 대책 마련과 그에 소요되는 비용을 감소하는데 기여할 수 있을 것이다. 향후 레이더 및 위성자료 등 관측공백을 최소화할 수 있는 기상자료의 활용성 검토 및 다양한 공간통계기법을 고려하여 강우정보에 대한 정확도를 개선하기 위한 연구를 진행할 예정이다.

■ 참고문헌 ■

- 국토교통부, 2019, 『도로현황조사 2019』, 세종: 국토교통부.
- 도로교통공단, 2018.7.9., “최근 5년간 기상상태별 교통사고 분석해보니,” 보도자료.
- 민재식·이우훈·지준범·장민, 2016, “인공신경망을 이용한 기상관측장비 결측 보완 기술에 관한 연구,” 『디지털융복합연구』, 14(8), pp.245-252, DOI: 10.14400/JDC.2016.14.8.245.
- 아주경제, 2011.11.11., “서울시 3년간 도로보수비로 1098억 썼다,” 보도자료.
- 이종학·노정훈·박석주, 2017, “연속류 도로구간의 수막정보 발생구간 추정 및 적용연구 - 서울시 내부순환도로를 중심으로,” 『한국도로학회 논문집』, 19(6), pp.147-153.
- 정연식·김주영·조한선·심재익, 2009, 『비 반복적 발생 지정체로 인한 혼잡비용 추정방안 연구』, (연구총서: 2009-29), 고양: 한국교통연구원.
- 한국교통안전공단, 2018.6.26., “여름 장마철, 빗길 교통사고 사망자 집중 발생,” 보도자료.
- 한국교통연구원, 2014.4.23., “2015년 교통혼잡비용 33조 4천억 원으로 예측,” 보도자료.
- 홍승호·나병찬, 2001, 『도로 선형별 미끄럼 저항 특성 연구(I)』, (도로연: 01-22), 성남: 한국도로공사 도로연구소.
- Gallaway, B. M., D. L. Ivey, G. Hayes, W. B. Ledbetter, R. M. Olson, and D. L. Woods et al., 1979, *Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning*, (FHWA-RD-79-31), Washington: Federal Highway Administration (FHWA), <https://archive.org/details/pavementgeometri00gall>.
- Lamm, R., E. M. Choueiri, and T. Mailaender, 1990, “Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways,” *Transportation Research Record 1280*, Transportation Research Board, Washington, DC, pp.199-207.
- Olson, P. L., D. E. Cleveland, P. S. Fancher, and L. W. Schneider, 1984, *Parameters affecting stopping sight distance*, (UMTRI-84-15), Michigan: The University

- of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI).
- Yager, T., W. P. Phillips, and W. Hore, 1970, *A comparison of aircraft and ground vehicle stopping performance on dry, wet, flooded, slush, snow, and ice covered runways*, (NASA Technical Note TN D-6098), Washington: National Aeronautics and Space Administration.
- U.S. Federal Highway Administration (FHWA), 1998, *Synthesis of safety research related to speed and speed management*, (FHWA-RD-98-154), Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/98154/speed.cfm#environ>
- WMO (World Meteorological Organization), 2004, *Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations*, (CIMO/OPAG-SURFACE/ET-ST&MT-1/Doc.6.1(2)), Geneva: WMO.
- U.S. Department of Transportation, 2015, "Ten-year averages from 2005 to 2014 analyzed by Booz Allen Hamilton, based on National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) data," https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm, [2018.9.10]

안숙희: 공주대학교 대기과학전공으로 석사학위를 취득하고, 현재 한국외국어대학교 대기환경연구센터에 책임연구원으로 재직 중이다. 기상자료와 도로기상예측모델을 활용하여 도로환경 및 도로관리 정책·계획분야에 적용 가능한 서비스 개발연구를 수행하고 있다(shahn@hufs.ac.kr).

양호진: 부경대학교 환경대기과학전공으로 석사학위를 취득하고, 현재 한국외국어대학교 박사과정 중 및 대기환경연구센터에 선임연구원으로 재직 중이다. 도시 미기후 및 미기상과 관련된 관측자료 분석, 기계학습, 수치기상모델링 등의 방법론을 사용하여 연구 수행을 하고 있다(hobakzzz@nate.com).

이채연: 한양대학교 대기공학전공으로 석사학위를 취득하고, 현재 한국외국어대학교 박사과정 수료 및 대기환경연구센터에 책임연구원으로 재직 중이다. 기상자료와 환경모델을 응용하여 도시기후·환경정책 및 계획분야에 적용될 수 있는 서비스정보 개발연구를 수행하고 있다(https://www.researchgate.net/profile/Chaeyeon_Yi).

투 고 일: 2019년 11월 06일
심 사 일: 2019년 11월 08일
게재확정일: 2019년 11월 15일