

한국형 노면결빙방지 자동분사시스템 설치를 위한 기준안 제시

(동절기 교통사고 감소를 위한 능동적 대처 방안)



이 의 준 | 스마트하이웨이사업단 단장
 권 철 | 스마트하이웨이사업단 차장
 김 홍 진 | 스마트하이웨이사업단 과장
 이 정 우 | 스마트하이웨이사업단 연구원

1. 서론

최근 20년간 국내 고속도로 연장은 급격히 증가하였고, 설계 및 시공기술의 발전으로 인해 도로주행속도 상향에 대한 욕구가 높아지고 있다. 이처럼 현대사회에서 도로는, 일반적인 상황에서는 차량주행성이 좋아지고 있지만 동절기 열악한 기상조건에 대한 안전대책이 미비한 실정이다. 일반적으로 도로는 동절기에

비나 눈으로 인해 결빙될 가능성이 크고, 결빙된 도로는 육안으로 쉽게 구분되지 않기 때문에 운전자의 적절한 대응이 어려워 사고 가능성이 매우 높다. 미끄럼에 의한 사고는 경미한 사고에 그치지 않고 대형추돌사고로 이어져 인적, 물적 피해 및 교통흐름 방해에 따른 사회적 피해까지 일으키게 된다. 2011년 국내 노면상태에 따른 교통사고 통계를 살펴보면 결빙 및 적설 시 교통사고율에 비해 치사율이 높아 빙판길 교통사고의 위험성을 확인할 수 있다.(그림 1 참조)



그림 1. 노면 상태별 교통사고 치사율
 (도로교통공단 2012, 2011 교통사고 통계분석)

이에 대하여 선진국은 이미 80년대 후반부터 겨울철 안전한 도로구현을 위한 연구가 활발히 진행되어 현재는 적극적인 대응책으로 활용되고 있다. 미국 미네소타주는 용설액 분사방식의 결빙방지장치를 미시시피강 횡단교량에 설치 후 사고가 70% 감소하였다고 Operational Evaluation Report(2001)를 통해 밝힌바 있으며, 캐나다의 경우도 마찬가지로 온타리오 교량에 용설시스템을 설치한 이후 설치 전 14건이었던 겨울철 사고건수가 0건으로 나타났다는 보고

서를 발표한 바 있다. 이를 통해 알 수 있듯이 동절기 결빙과 적설로 인한 교통사고는 결빙방지 융설액 분사 시스템을 통해 상당수 감소될 수 있다. 특히, 산악 지형이 많은 우리나라 도로현실을 감안하면 겨울철 안전한 도로 구현을 위한 결빙방지 자동분사시스템을 국내 기술로 연구 개발하는 것이 시급한 실정이다. 결빙방지 자동분사시스템은 강설이 예상되거나 진행 중인 상황에서 즉시 대응이 가능하며, 강설 초기에 효율적인 처리로 강설로 인해 발생 가능한 교통사고와 교통지체를 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

2. 자동분사 시스템 설치기준에 관한 연구

산악지형이 많은 우리나라의 지형특성과 매년 증가하고 있는 폭설일수로 인한 인적·물적 피해를 감안하면 동절기 차량주행 안전을 위한 결빙방지 자동분사시스템의 확대설치가 절실한 실정이다. 하지만, 1km당 약 20억 원이라는 고가의 설치비용과 연 20%에 미치지 못하는 가동율에 비해 시스템 운영 및 유지관리비용이 많이 소요되므로 모든 위험지역에 분사시스템을 설치하기에는 현실적인 어려움이 있다. 이러한 문제는 융설시스템 적용구간에 대한 상세 설치기준을 마련함으로써 보완할 수 있는데, 스마트하이웨이사업단에서는 결빙방지 자동분사시스템 설치기준안을 제시하기 위해 다음과 같이 연구를 진행하고 있다.

2.1 기상 및 도로 조건 상관성 조사

차량주행안전성은 노면상태(건조, 축축함, 물기 많음, 눈 내림, 결빙 등)에 따라 매우 다른 양상을 띠고 있으며, 이는 해당지역의 대기온도, 습도 및 대기 기상상태(눈, 비, 바람, 우박 등) 등에 따라 큰 차이가 있다. 그림 2는 전국 기후 데이터를 활용하여 평균최저기온과 결빙 및 적설일수를 비교한 것으로 결빙일

수의 경우 평균최저기온과의 높은 상관관계를 나타내고 있다.

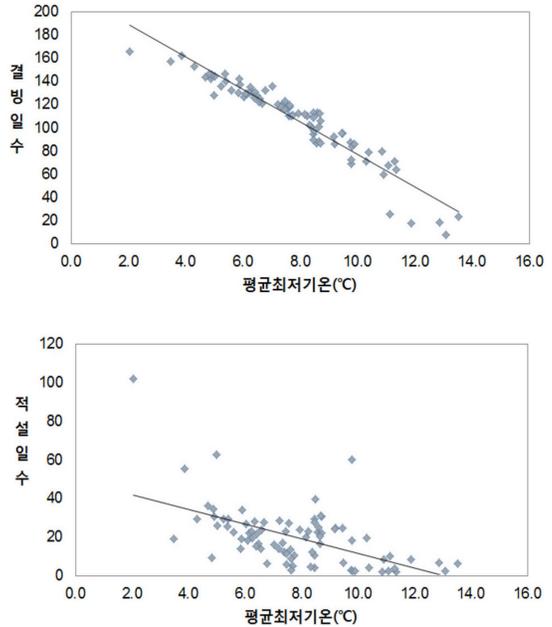


그림 2. 평균최저기온과 결빙 및 적설일수 비교

또한, 도로의 평면선형, 종단곡선 및 횡단면 등과 같은 도로설계요소도 동절기 차량주행안전성에 큰 영향을 미친다. 속도 변화가 높은 구간일수록 미끄럼에 의한 사고 가능성이 높으므로 속도에 대한 변화도를 미국 FHWA 도로설계 안전성 평가모델인 IHSDM(Interactive Highway Safety Design Model) 모듈 중 DCM(설계일관성 모듈)을 국내에

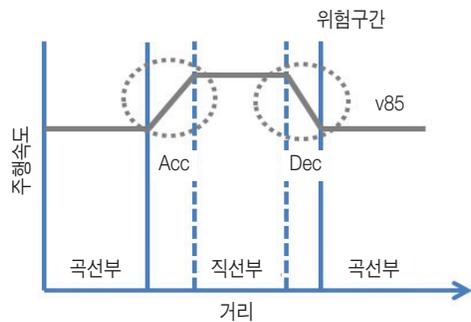


그림 3. 선형 위험구간 정의

표 1. 평면선형 변화에 따른 속도차 산출

종단 \ 평면	직선구간 (R=2,000 이상)	곡선구간 (R=1,000)	속도차	속도차/ 최대속도차 ×100
-9%≤G<-4%	102.1	99.02	3.077	61.54
-4%≤G<0%	105.98	102.27	3.710	74.20
0%≤G<4%	104.82	101.24	3.574	71.49
4%≤G<9%	96.61	93.85	2.752	55.04
평면곡선- 오목 종단곡선	105.32	101.82	3.498	69.96

맞게 보정하여 적용하였다.

이에 따라 교통사고의 원인을 기상조건, 노면상태, 운전자 과실, 차량의 결함 등 다양한 조건 및 환경에 따라 구분, 비교함으로써 강설 시 노면상태에 따라 발생하는 사고의 종류 및 규모를 정량화해야 한다.

2.2 노면결빙 시 미끄럼 특성 및 저항성

노면마찰력의 감소는 차량의 제동거리를 증가시키고, 위급상황 발생 시 제동불능 또는 미끄러짐으로 인한 운전자의 차량통제능력 상실을 유발하므로 매우 위험하다. 각 노면상태에 따른 마찰력을 정량화하고 이에 따른 정지거리 및 제동거리변화, 노면 조건에 따른 도로 경사별 한계가속도, 그리고 포장 종류에 따른 노면상태별 분석이 필요하다. 노면의 마찰계수는 일반적으로 0.0에서부터 1.0 이상까지 다양한 분포를 보인다. 노면이 건조할 경우에는 마찰계수가 보통 0.8 이상이 나와 제동에는 전혀 문제가 발생하지 않는다(표 2 참조). 마찰계수는 젖은 노면, 눈이 내린 노면으로 내려가면서 점점 감소하기 시작하고

표 2. 노면 상태별 마찰계수

노면 상태	마찰 계수	노면 상태	마찰 계수
젖은 빙판	0.05~0.10	건조한 콘크리트	0.80~1.00
결빙 및 서리	0.10~0.20	젖은 콘크리트	0.50~0.80
다져진 눈	0.20~0.25	건조한 아스팔트	0.80~1.00
다져지지 않은 눈	0.25~0.30	젖은 아스팔트	0.50~0.80

노면이 언 상태에서 해빙이 시작되어 빙판에 물이 얇게 고인 상태에서 가장 낮다. 노면상태가 젖은 빙판, 결빙 및 서리의 3가지 상태로 구분될 경우의 마찰계수는 건조한 노면대비 마찰계수가 20% 이하로서 교통안전에 아주 불리한 상황을 초래한다.

그림 4는 마찰 계수와 마찰력 감소에 의한 사고와의 관계(Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety, VTI meddelande 911A, 2001)를 나타낸 연구 결과이다. 여기서 마찰계수는 미끄럼 장비에 의해 측정된 값으로 0.9~1.0일 경우의 사고빈도가 0.4~0.49의 절반 정도로 낮다.

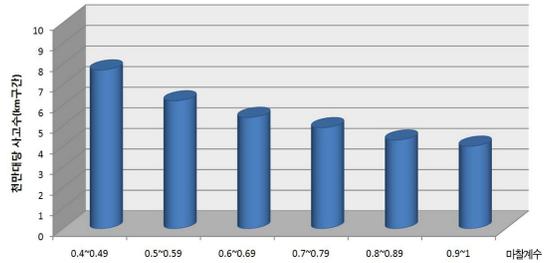


그림 4. 마찰계수별 사고수

2.3 결빙위험지역 일영분석

겨울철 태양의 낮은 고도로 인하여 지역별로 도로의 방향과 주위 건물, 산악지형의 유·무에 따라 도로 노면의 일조량은 상당한 차이가 있으며, 이것은 온도가 결빙점 이하로 내려갈 때 결빙의 유·무를 좌우하는 중요한 파라미터이다. 따라서, 도로의 방향과 주위여건에 따른 일조량 변화를 반영하여야 한다. 기본적인 위험도 산출방식은 노선의 각 구간별 3차원 모델에 대한 음영·일사 시뮬레이션을 실시하여 일사량(일출에서 일몰 사이에 태양궤적에 의해 동일 구간에 태양광이 투사되는 양)에 대한 분석결과를 일조시간 및 에너지 단위로 정량하는 방법을 적용하고 있다.

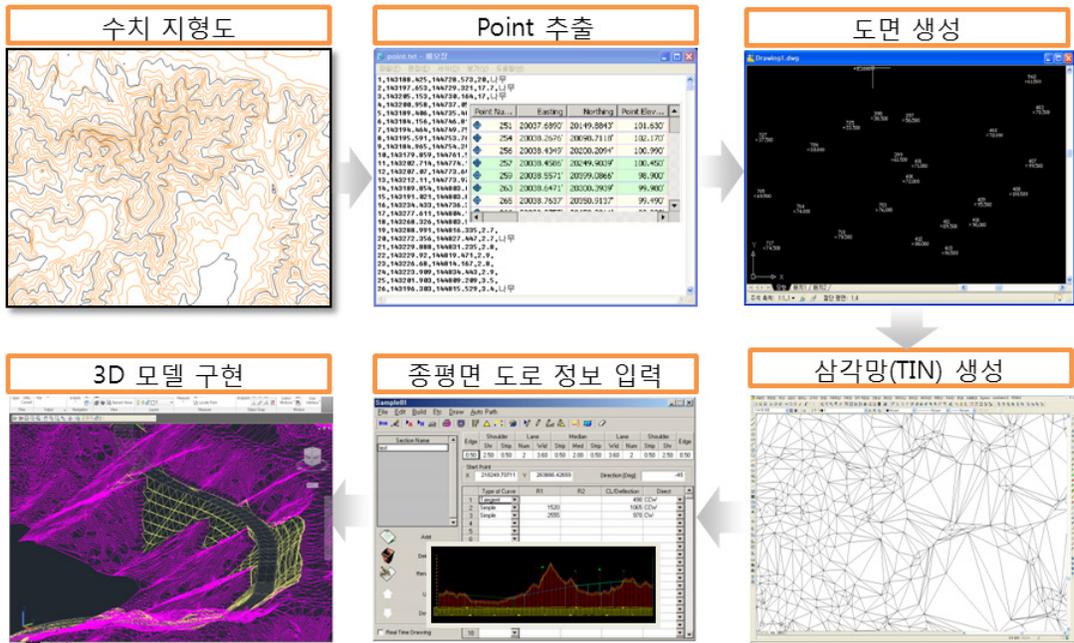


그림 5. 3D모델 구현과정

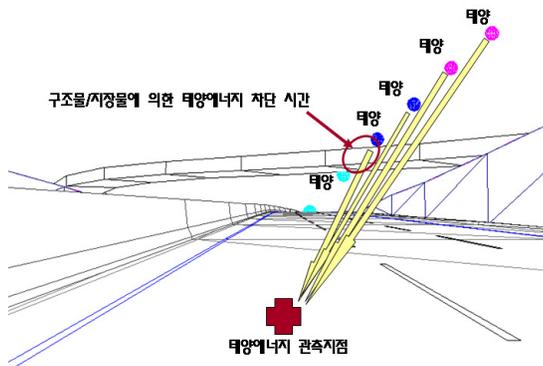


그림 6. 모델링 파일을 이용한 태양에너지 산출방법

에 따른 주행역학적 안전성을 평가할 수 있는 방안으로 자동차 동역학 해석 프로그램인 CarSim을 이용하여 시뮬레이션 분석을 실행하였다.

CarSim은 차량의 설계, 개발 및 테스트를 위한 소프트웨어로 차량의 형상에서부터 동력전달장치, 현가장치, 타이어 및 VDC(Vehicle Dynamic Control) 같은 안전장비 등의 설정이 가능하고, 운전자의 특성에 따른 조향장치조절, 구동장치 가/감속 설정 등 직접적인 차량거동 시뮬레이션이 가능하다.

표 3. 시뮬레이션 조건

구분	적용 값
결빙구간 마찰계수	0.15
최소완화곡선길이	70m
최대편경사	6°
최소평면곡선길이	150m

2.4 노면상태에 따른 주행역학과 제동특성 분석

자동차의 주행역학과 제동특성을 분석하기 위해 앞서 나열된 영향인자를 종합적으로 고려하여 도로를 주행하는 자동차에 부여되는 물리적인 특성을 파악해야 한다. 이를 토대로 도로와 자동차의 상호작용

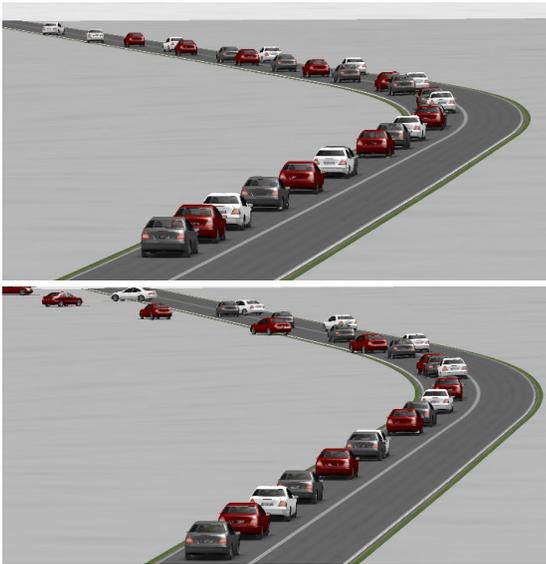


그림 7. 시뮬레이션 결과

2.5 소결

스마트하이웨이 연구에서는 결빙방지 자동분사시스템 설치를 위한 기준안 제시방법으로 기후정보를 통해 해당구간의 결빙가능성과 도로선형에 의한 평가를 통해 위험구간을 우선 선별하고, 각 구간 별로 일사에너지 값을 산출하여 위험구간에 대한 대처방안을 제시하고 있다. 그림 8은 노면결빙 위험구간 평가 알고리즘을 제시한 것이다.

3. 결론

도로의 결빙은 동절기 대형교통사고의 주요 원인으로 지목되고 있는데, 이를 사전에 대처하여 교통사고 및 사망자를 최소화하는 것은 스마트하이웨이 사업의 핵심가치 중 하나이다.

현재 국내에 적용된 결빙방지 자동분사시스템은 대부분 고가의 해외 제품으로서 비용, 성능 및 지역적 특성을 고려하지 못하고 설치의 편의성만 강조한 채 운영되어 다양한 문제점이 보고되고 있다. 노면결

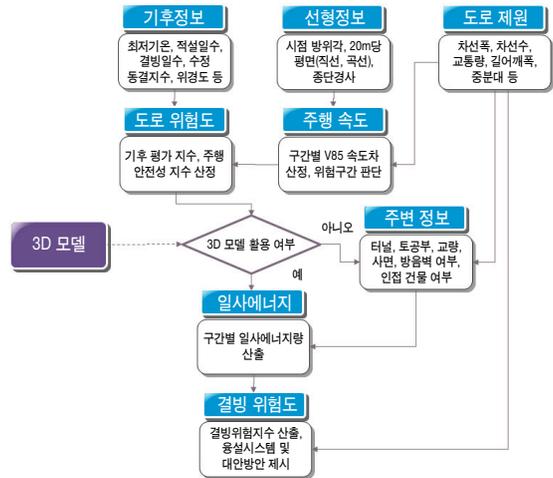


그림 8. 노면결빙 위험구간 평가 알고리즘

빙을 방지하기 위한 시스템이 효과적으로 활용되기 위해서는 설치장소에 따라 다양한 상황에 대한 위험도를 정량화하고 이를 바탕으로 최적화된 위치 및 센서 간격, 분사량 등을 결정할 수 있는 기준을 정립하여야 한다. 또한, 노면의 상태를 정확하게 파악하고 이를 통해 노면결빙 징후를 사전에 예측할 수 있는 기법을 개발하고, 국내 특성에 맞는 성능과 합리적인 설치 및 유지관리비용을 고려한 결빙방지 자동분사시스템의 개발이 필수적이다.

참고 문헌

1. 국토해양부, 건설교통기술평가원, 2012, SMART Highway 2단계 보고서
2. 이동현, 정원석, 김지원, 고석범, 기하구조 및 지형적 요소를 고려한 응설시스템 설치 기준 정립에 관한 연구, 2011, 한국도로학회지
3. 도로교통공단, 2011 교통사고 통계분석, 2012
4. Swedish National Road and Transport Research Institute, Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety, VTI meddelande 911A, 2001
5. Grant Mackey, "Road Surface Friction: Measurement, Testing and Accuracy", DTUP, South Australia.