

## 도로 노면 일조량에 따른 결빙 위험도 평가 방법에 관한 연구

### Study about the Evaluation of Freezing Risk Based Road Surface of Solar Radiation

이 동 현<sup>1)</sup>      정 원 석<sup>2)</sup>      김 흥 진<sup>3)</sup>      김 지 원<sup>4)\*</sup>  
Dong-Hyun Lee      Won-Seok Jeong      Hong-Jin Kim      Jiwon Kim

#### Abstract

Anti-icing system can reduce traffic accidents and congestion by quickly removing the frozen road surface area. there is no decision criteria for determining application of the Anti-icing system in Korea. In this study, we proposed the decision criteria for determining application of the anti-icing system based on weather and road conditions, i.e., geometric and topographic conditions. Regional climate survey, Solar Radiation analysis, and dynamic vehicle simulation considered road geometry was conducted to standardize the installation method of anti-icing system. Also, we have developed a software that can be determined an installation of anti-icing system.

Keywords : Anti-icing system, Geometry, Freezing, Decision-making Anti-icing system, Road evaluation

#### 1. 서 론

국내 융설시스템 도입은 1999년에 둔내터널과 진부터널 입구부에 시험시공됨으로써 시작되었다. 이후 2004년에 한국도로공사에서 실시한 도로결빙방지시스템 운영효과 조사에 의해 전열선 방식은 공용중인 도로에 부적합한 것으로 나타나 현재 고속도로에는 융설액 분사 방식 (이하 융설시스템)만이 적용되고 있다. 2000년대 중반이후 실시된 사후조사에 의해 약 60%의 사고감소 효과가 있는 것으로 나타나 매년 설치 구간이 증가하고 있다. 현재 고속도로의 경우 산악 구간 (터널, 교량 입출구부) 및 하천 인접구간 등 기온변화가 크고 습도가 높은 노면결빙 취약지점에 적용하고 있으며, 정량적인 설치 기준이 아직 정립되지 않은 실정이다. 융설시스템은 한번 설치되면 이동이 불가능하고 설치 비용이 매우 많이 소요되기 때문에 설치 위치 선정이 매우 중요하다.

본 연구에서는 융설시스템의 활용도를 높이기 위해 결빙 위험구간을 판정하는 평가 알고리즘과 이를 구현할 수 있는

록 하는 소프트웨어 (Prototype Software)를 개발하였다.

결빙위험구간을 판정하고 융설시스템 설치 여부를 결정하기 위해서는 다양한 요소를 고려하여야 한다. 노면일사량뿐만 아니라 지역의 기후조건과 기하구조를 고려하여야 최적의 설치 위치를 결정할 수 있다. 국내의 경우 일조권을 분석할 수 있는 소프트웨어는 다수 개발된 사례가 있지만 기후조건과 도로 선형조건을 고려하여 결빙 위험 구간을 판정하는 알고리즘이나 프로그램은 아직 개발되지 않은 실정이다.

#### 2. 선형 위험도 평가 방법

본 연구에서는 도로의 기하구조 (평면선형, 종단선형)에 따른 결빙 위험도를 정량화하여 평가 알고리즘에 반영하였다. 이를 위해 실제 주행속도와의 일관성을 비교하는 설계 일관성 분석과 동적 차량 시뮬레이션에 따른 주행 안전성 분석을 수행하였다. 이들 두가지 분석 결과를 조합하여 선형에 따른 결빙 위험도를 정량화하였다.

1) 정회원, ㈜토탈페이브시스템 부장  
2) 정회원, ㈜토탈페이브시스템 과장  
3) 정회원, 한국도로공사 스마트하이웨이사업단 과장  
4) 정회원, ㈜토탈페이브시스템 대표이사, 교신저자

\* Corresponding author : ssam74@daum.net  
• 본 논문에 대한 토의를 2013년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

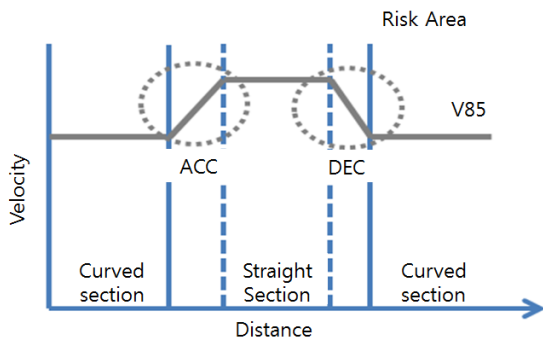


Fig. 1 Evaluation method

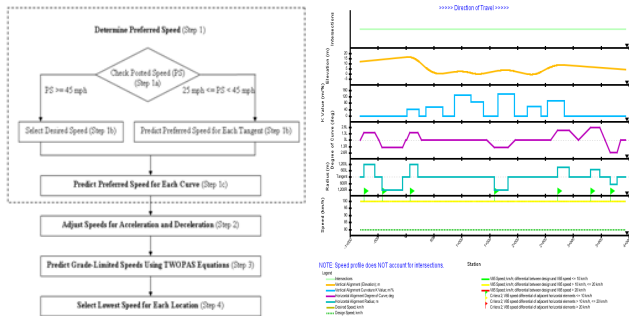


Fig. 2 DCM Analysis

### 2.1 속도일관성 분석

일반적으로 속도 변화가 높은 구간일수록 미끄럼에 의한 사고 가능성이 높다. 따라서 감가속 구간을 판별하여 미끄러질 가능성이 높은 구간을 선별하여야 한다. 구간별 속도변화는 미국 FHWA 도로설계 안전성 평가모델인 IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) 모듈 중 국내현실에 반영할 수 있는 모듈인 DCM (설계일관성모듈)을 국내에 맞게 보정하여 산출하였다.

DCM (설계일관성모듈)은 도로 주행중 운전자의 실수를 최소화 하기위한 방편으로 개발되었으며, 설계도로의 기하구조와 운전자의 기대심리가 일치하는지 여부를 판단하고 85 백분위 운전자 차량속도를 추정한다. 85백분위 운전자 차량 속도는 주행일관성을 나타내는 척도로 실제 공용중인 도로에서 차량의 주행형태 조사에 의해 산출되었다. 본 연구에서는 기본적인 도로 선형 곡선의 변화에 따른 속도의 분산을 도출하여 주행 속도를 일관성을 평가하였다. i 구간을 주행하는 차량들의 속도 85 percentile 속도 (V85i)와 i+1 구간을 주행하는 차량들의 85 percentile 속도 (V85) 차를 바탕으로 직선부와 곡선부사이의 Free-Flow 85백분위 속도 (85th percentile speed) 변화를 평가하였다.

Table 1 Geometric line form of road – velocity difference Correlatio

Horizontal Alignment	straight section (R=more than 2,000)	curved section (R=1,000)	Velocity difference
-9% ≤ G < -4%	102.1	99.02	3.077
-4% ≤ G < 0%	105.98	102.27	3.710
0% ≤ G < 4%	104.82	101.24	3.574
4% ≤ G < 9%	96.61	93.85	2.752
H.A - V.A	105.32	101.82	3.498

본 연구에서는 가능한 최대속도차 (5km/hr, 극단적인 사례 제외) 대비 해당 구간 속도차를 산출하여 위험 구간을 정량화하였다. 다음 Table 1은 평면선형상 직선에서 곡선으로 변화할 경우 발생하는 속도차를 산출한 사례이다.

### 2.2 주행시뮬레이션을 통한 위험도 평가

지속적인 내리막 구간과 같은 경우 선형 조건이 변화하지 않더라도 사고 위험성이 높아지는 경우가 존재하기 때문에 속도일관성분석만으로 위험구간을 정량화하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 자동차의 노면상태에 따른 주행 역학과 제동특성까지 고려하기 위해 동적 차량 시뮬레이션을 통하여 도로와 자동차의 상호 작용에 따른 주행 역학적 안전성을 평가하였다. 본 연구에서는 자동차 동역학 해석용 프로그램은 CarSim을 이용하여 주행시뮬레이션을 수행하였다. 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 조향장치 조절, 구동장치 가/감속 설정 등 직접적으로 차량 거동에 대한 시뮬레이션이 가능하다.



Fig. 3 CarSim (R=1,000, S= -2%)

Table 2 Risk Index

Risk Index		Vertical Alignment			
		-4%≤G	-2%≤G< 0%	0%≤G< 2%	4%≤G
Horizontal Alignment	Straight (R > 2000)	90.9	85.9	79.8	74.2
	Curve (2000 ≥ R > 1500)	94.9	87.9	83.8	78.8
	S-Curve (2000 ≥ R > 1500)	96.0	91.9	86.9	81.8
	Curve (1500 ≥ R)	97.0	93.9	89.9	84.8
	S-Curve (1500 ≥ R)	100.0	96.0	92.9	89.4

중단 경사와 평면 곡선에 따른 각 시나리오 별 차량의 주행시뮬레이션을 수행하였다. 노면 결빙시 차량의 미끄러짐을 유도하기 위한 극한의 조건을 가정하였다. 시속 100km/h 상태에서 60km/h로 감속주행시 결빙 구간 (마찰계수 0.15)에서 이격거리를 산출하여 이를 바탕으로 결빙위험도를 정량화하였다. 이격거리는 차량 중심축에서 횡방향으로 최대 이격되는 거리를 의미하며, 선형변화가 높을수록 기준선 이탈이 크게 나타났다. 횡방향 이격거리가 가장 긴 중단 경사 -4%와 S곡선 (R=1,500 이하)일 경우의 위험도 점수를 100점 기준으로 환산하여 시뮬레이션에 의한 위험도지수를 결정하였고 각 등급간 차이는 각 조건에서 시뮬레이션시 횡방향 이격거리에 비례하여 산정하였다. 각 선형 조건별 위험도지수는 Table 2와 같다.

본 연구에서는 시뮬레이션 평가 (이격거리)를 통해 파악된 위험도 점수와 V85 속도차를 조합하여 주행 안전성 지수 산출하였으며, 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{주행안전성지수} = \frac{\text{해당구간 V85속도차}}{\text{최대 V85속도차}} \times 30 + \text{위험도점수} \times 70 \quad (1)$$

### 3. 결빙위험도 평가

#### 3.1 일사에너지 평가

일사에너지 산출을 위해서는 해당지점의 방위각 (azimuth) 과 고도각 (altitude)을 이용하여 연중 태양의 궤적을 계산하여야 한다. 본 연구에서는 NASA에서 개발하여 공개한 태양의 궤도계산 및 지구궤도에서의 고도와 방위각 계산 로직 (DE404)을 적용하였다. 다음 Fig. 4는 태양궤적도로 관측자가 천구상의 태양경로를 수직 평면상의 직교좌표로 나타낸 것이다.

분석구간의 태양 궤적 산출 후 도로의 선형데이터를 통하여 측점별 위치정보를 생성하고, 위치정보에서 태양의 위치 (방위각과 고도)를 계산할 수 있다. 본 알고리즘에서는 기 형

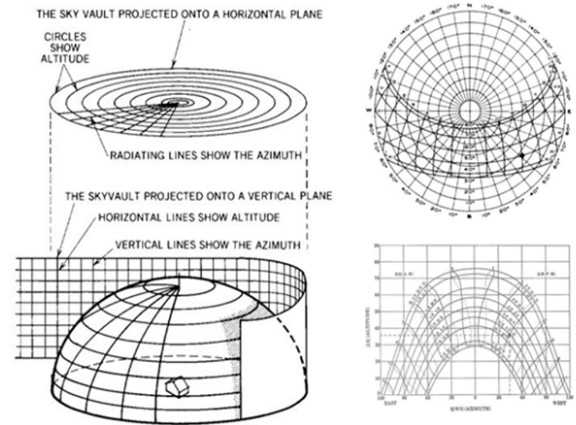


Fig. 4 Solar trajectory

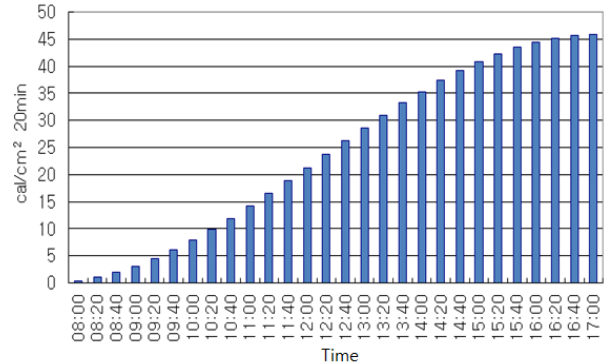


Fig. 5 Cumulative Solar Energy (Winter Solstice)

성된 모델링 파일의 Face와 태양으로 향하는 벡터와의 교차점 검토를 통하여 일조시간을 계산함으로써 일사에너지량을 계산하였다. 일사에너지는 태양상수를 통해 산출할 수 있는데 태양상수는 지구의 대기권 밖에서 태양광선에 수직인 단위면적이 단위시간당 받는 태양복사에너지로 1.96cal/cm<sup>2</sup> · min로 정의하고 있다. 운량에 따라 다르지만 전달계수 (0.6~0.8)를 고려하면 노면에 직접적으로 도달하는 에너지량은 약 1.4cal/cm<sup>2</sup> · min로 추산할 수 있으며, 본 연구에서는 각 시각별 태양의 입사각을 고려하여 위경도 변화에 따른 누적 일사에너지량을 산출하였다. 다음 Fig. 5는 차폐가 발생하지 않은 경우의

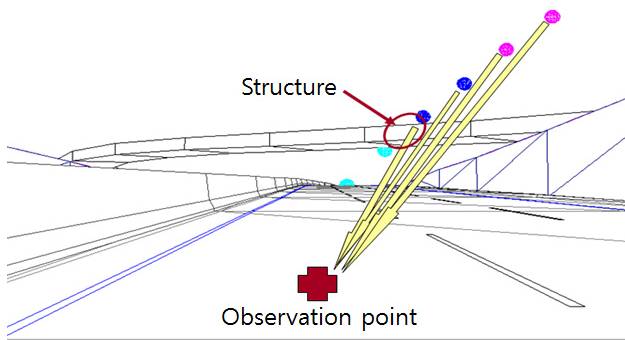


Fig. 6 Solar radiation analysis

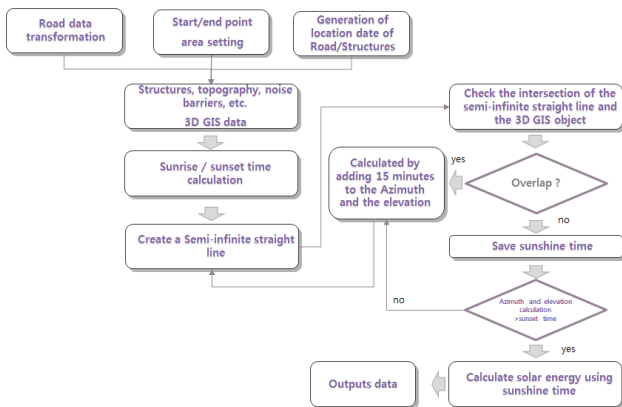


Fig. 7 Solar energy acquisition Algorithm

일일누적일사에너지량을 산정한 사례 (부산 지역 위도 35° 10'42" 경도 129° 04'34")이다.

음영조건을 고려하여 일사에너지를 산출하기 위해서는 CAD 도면 기반상에서 태양 주사선이 노면사이에 지장물에 의해 차폐되는지 여부를 판단하여야 한다. 이를 위해서는 지형 지물과 도로 선형을 삼각망에 의해 3차원으로 구현한 모델링이 필요하다. 이는 Auto-Cad Civil, RD 2005, Road Projector 등의 도로 도면 소프트웨어를 통해 구현이 가능하다. 일반적으로 수치지형도는 1:1,000이나 1:5,000 축척을 적용하며, 절성토면을 고려한 도로 선형 데이터 이용하여 경계 구역을 설정하여 지형 데이터와 도로 선형 데이터를 통합한 삼각망 구축하는데 본 연구에서 사용된 3D 모델은 Auto-Cad Civil를 통해 구현하였다. 3D 모델을 이용하여 태양 위치 계산과 사면 등의 지장물에 대한 교차여부를 평면 방정식을 통해 판정하였으며, 태양좌표의 추적을 위해 유한요소로 구분하여 광선추적법을 적용하는 방식을 적용하였다.

다음 순서도 Fig. 7은 일사에너지를 계산하는 알고리즘을 도식화한 것으로 일정시간 (15분) 단위로 노면의 차폐 여부를 판단하여 에너지량을 산출하였다. 기준일은 가장 태양 고

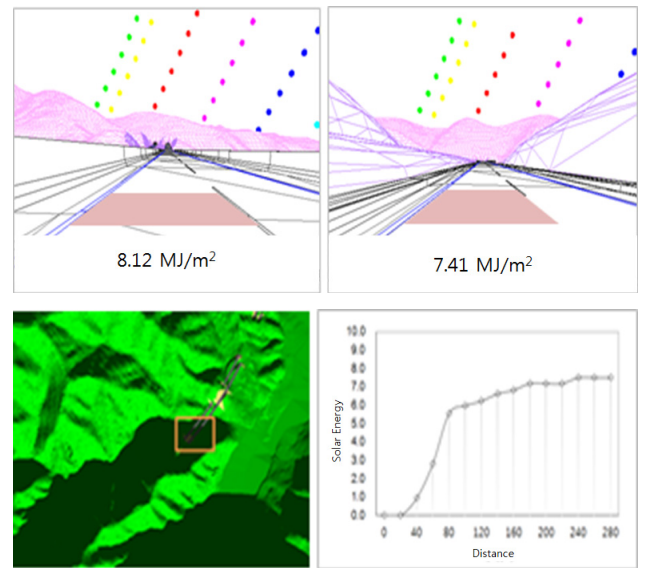


Fig. 8 Solar energy output

도가 낮은 동지 기준 (12월 22일)으로 결정하였다.

다음 Fig. 8은 3D 모델에 대해 본 알고리즘을 적용하여 일사에너지를 산출하고 사례별 일사에너지량을 파악한 사례이다. 최근 설계된 도로 구간 (연장: 3.5km)에 대해 일사에너지 3D 시뮬레이션 수행하였다.

### 3.2 용설시스템 설치 판정

선형과 일사에너지량이 동일하더라도 해당 지역의 기후 조건에 따라 용설시스템 설치 기준을 차별화하여야 한다. 제주도 지역과 대관령 지역에 동일한 설치 기준을 적용할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 기후 평가 지수를 도입하여 해당 지역에 따른 용설시스템 설치 기준을 차별화하였다. 동결지수는 각 지역의 결빙 위험도를 정량화 할 수 있는 가장 대표적인 지표로 해당 구간의 고도 (표고)까지 고려할 수 있다. 따라서 해당 지역의 수정동결지수와 인접 관측소의 최저기온, 적설일수, 결빙일수와 조합하여 해당 구간의 기후를 평가하였다. 각 수정동결지수와 기후 요소 최저값 및 최대값 범위에 따라 기후 평가 지수 (0~10 범위) 산정하였다. 기후평가식을 개발함에 있어 동결지수 수준에 따른 최저기온, 적설일수, 결빙일수 최대/최소 관측값에 대한 범위가 달라 4단계로 구분하여 적용하였다. 개발방법은 전문가 평가에 의해 기후위험도를 산정하고 1차 회귀분석에 의해 각 요소별 평가가중치를 결정하였다. 기후 평가 지수가 높을수록 해당 지역이 결빙될 높아지며, 이를 노면 결빙 위험 구간 평가 알고리즘에 반영하였다.

Table 3 Climate assessment by freezing index

Freezing Index (°C · days)	Climate assessment index (a: Minimum temperature, b: number of days with snow, c: number of days with freezing)	
	Freezing Index Range	Assessment Equation
0 ~ 200		$y = -0.044 \times a + 0.033 \times b + 0.056 \times c$
200 ~ 400		$y = -0.050 \times a + 0.038 \times b + 0.063 \times c$
400 ~ 600		$y = -0.057 \times a + 0.043 \times b + 0.071 \times c$
More than 600		$y = -0.067 \times a + 0.050 \times b + 0.083 \times c$

Table 4 Installation standards as apply to anti-icing system

Climate assessment index	Driving safety index	Solar Energy (MJ/m <sup>2</sup> )		
		0~1.5	1.5~3.0	3.0~4.5
0~3	Less than 40	Consideration	Consideration	-
	40~60	Installation	Consideration	-
	60~80	Installation	Consideration	-
	80~100	Installation	Installation	-
3~6	Less than 40	Consideration	Consideration	-
	40~60	Installation	Consideration	-
	60~80	Installation	Installation	-
	80~100	Installation	Installation	Installation
6~9	Less than 40	Installation	-	-
	40~60	Installation	Consideration	-
	60~80	Installation	Installation	-
	80~100	Installation	Installation	Installation
More than 9	Less than 40	Installation	Consideration	-
	40~60	Installation	Installation	-
	60~80	Installation	Installation	Installation
	80~100	Installation	Installation	Installation

본 연구에서는 용설시스템 설치 기준 알고리즘 개발을 위해 전문가 패널 검토에 따라 각 평가 인자별 가중치를 산정하였다. 확정된 용설시스템 설치 기준은 Table 4와 같다.

### 3.3 프로그램 개발

본 프로그램 (프로토타입)은 노면 결빙 위험 구간 평가 알고리즘을 바탕으로 기상 정보, 기하구조에 의한 선형평가 및 일조에너지를 고려하여 도로 구간의 도로결빙의 위험도를 판단하도록 구현하였다. 일조에너지를 계산하기 위하여 태양의 위치 즉, 태양의 방위각 및 고도를 계산하고, 도로주변의 사면 및 방음벽 등의 태양광선을 차단여부를 판단하는 것이 주요 기능으로 AutoCAD 3rd Party 프로그램으로 개발되었다. 실용성을 확보하기 위하여 AutoCAD를 기반으로 하는 모듈로 개발되었으며, 32bit-운영환경에서 동작하도록 구성되었다. 또한, AutoCAD를 바탕으로 개발되어 캐드가 PC에 설

	Type of Curve	Radius		Length (Deflection)	Direction
		Start (R1)	End (R2)		
1	Tangent			25.709813023981	CCW
2	Spiral		250	44.1	CCW
3	Simple	250		95.76692624862	CCW
4	Spiral	250		44.1	CCW
5	Tangent			58.413282510258	CW
6	Spiral		250	57.6	CW
7	Simple	250		105.414186177861	CW
8	Spiral	250		57.6	CW
9	Tangent			195.043973035909	CW
10	Spiral		350	41.142857142857	CW
11	Simple	350		94.729447886716	CW
12	Spiral	350		41.142857142857	CW
13	Tangent			9.664874345488	CCW
14	Spiral		200	50	CCW
15	Simple	200		238.029335199131	CCW
16	Spiral	200		50	CCW
17	Tangent			13.585862416062	CW

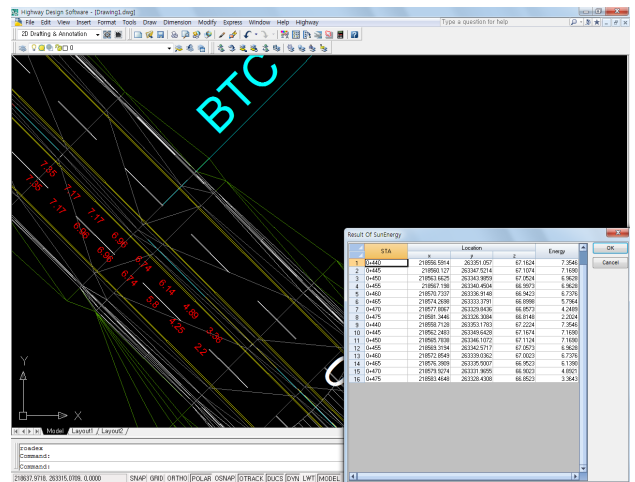


Fig. 9 Analysis of the solar energy

치되어 있어야 한다. 개발환경은 AutoCAD사에서 제공하고 있는 개발툴인 ObjectARX 라이브러리를 기반으로 하여 Visual Studio 2005를 기반으로 테스트 및 개발되었다. AutoCAD를 사용함으로써 도면에 직접적으로 텍스트 및 polyline등의 객체를 이용하여 위험등급 및 데이터를 표시할 수 있다. 선형 분석을 위해서는 평면선형 (곡선반지름, 곡선길이, 곡선방향)과 종단선형 (측점, VIP, 종곡선), 설계속도 등을 측점간격별로 입력하여야 하며, 이밖에도 태양의 고도 및 방위각 계산을 위한 위도, 경도와 수정동결지수 결정을 위한 표고 등의 입력변수가 필요하다.

### 4. 결론

본 연구에서는 기상 정보, 기하구조에 의한 선형평가 및 일조에너지를 고려하여 도로 구간의 도로결빙의 위험도를 판단할 수 있는 노면 결빙 위험 구간 평가 알고리즘을 개발하였다. 이를 구현하기 위해 태양의 방위각 및 고도를 계산하여 도로주변의 사면 및 방음벽 등의 태양광선을 차단여부

를 판단하고 일조에너지를 산출할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이를 통해 도로상 융설시스템 설치 여부 및 최적 위치 선정을 할 수 있어 보다 효율적인 도로 관리가 가능할 것으로 기대한다. 후속연구로 일조 조건별 현장실험 (일사에너지 측정)을 통해 알고리즘 보정이 필요하며 교통량에 따른 경제성 판단 기준을 제시하여 설치 우선 순위 결정할 수 있는 의사결정 논리 개발에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 개발사업의 연구비 지원 (과제번호 07-기술혁신-A01)에 의해 수행되었습니다.

#### References

1. Ben Duprey, "CarSim User Manual", Mechanical Simulation Corporation, 2012.
2. Evaluation of Design Consistency methods for Twolland rural highways, Executive Summary, FHWA-RD-99-173.
3. Federal Highway Administration Office, "Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) Engineers Manual", ITT Corporation, Information Systems, 2011.
4. Hong, S. H., "A Study of Skid Resistance on Geometric Design for Highway Pavements", Korea Expressway Corporation Research Institute, 2001 (in Korean).
5. Manabu Kaneko, Winter Road and Human Factors, 99 Cold Region Technology Conference, November 1999.
6. Noh, K. S., "A study on side friction factor and radius of curve", Korea Institute Of Construction Technology, 1997 (in Korean).
7. Report of the Technical Committee on Road Surface Characteristics, XVIIth World Road Congress, PIARC, Vienna, 1979.
8. Richard S. Figliola and Donald E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, John Wiley & Sons, 2000.

Received : 06/19/2013  
 Revised : 07/29/2013  
 Accepted : 07/31/2013

#### 요 지

결빙 방지 분사 시스템은 강설이 예상되거나 진행 중인 상황에서 신속하게 대응 가능하며, 동절기 결빙으로 인해 발생하는 교통사고와 교통 지체체를 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 현재 국내에는 결빙 방지 분사 시스템의 설치 기준은 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 선형, 기상조건, 일조조건 등을 다양한 도로 조건을 정량화하여 어떤 구간에 우선적으로 결빙 방지 분사 시스템을 적용하여야 하는지 판단할 수 있는 기준을 제시한다. 이를 위해 국내 지역별 기상 조사, 지형지물에 의해 음지 발생 여부 분석, 선형과 미끄럼 저항성을 고려한 차량 시뮬레이션 등을 수행하고 이론적 검토를 통해 설치 기준 방법을 정립하였고, 또한 이를 반영하여 시스템의 설치를 판단할 수 있는 소프트웨어 (프로토타입)를 개발하였다.

**핵심 용어** : 결빙 방지 분사 시스템, 지형, 결빙, 융설시스템 의사결정, 도로평가