도로 구조물 및 도로주변 지형지물에 의한 음영변화를 고려한 도로노면의 상태변화에측모형

손영태^{1*} · 박상현²

¹명지대학교 교통공학과 교수, ²명지대학교 교통공학과 연구원

A Estimating Model of Road Surface Varying Condition Considering Sunshine Duration Affected by Structure and Topography Near Corresponding Roadway

SON, Young Tae^{1*} · PARK, Sang-Hyun²

¹Professor, Department of Transportation Engineering, Myongji University, Gyeonggi 17058, Korea

²Researcher, Department of Transportation Engineering, Myongji University, Gyeonggi 17058, Korea

*Corresponding author: son@mju.ac.kr

Abstract

In this study, Sought to provide the drivers with information on the road surface condition by calculating the evaporation of the road for improve road management service and safety of roads during rain or after rain, and the purpose of this study was to develop a model to estimate the change of road danger section by calculating the evaporation by weather, traffic volume and hourly sunshine duration rate data by structure and topography near corresponding roadway. The evaporation amount estimation model was constructed by using the water budget method and energy budget method, and considering to change in evaporation by vehicle on the road, we applied the model to the calculated vehicle radiant heat and tire friction heat and take into account the reduction rate of radiant energy with shaded areas by structure and topography near corresponding roadway, we used the MicroStation program to visualize the sunshine influence zone by setting the sun's altitude, azimuth, and shading time intervals, and the shading rates of the corresponding section were extracted and applied to the equation.

Keywords: energy budget, evaporation calculation model, micro station, radiant energy, sunshine duration

초록

본 연구는 강우 시 혹은 강우 후 도로관리서비스 향상과 도로의 안전성을 제고하기 위하여 노면의 증발량을 산정하여 노면상태에 대한 정보를 운전자에게 제공하기 위한 방안을 모색하였으며 본 연구에서는 기상, 교통량 자료와 더불어 추가적으로 도로의 지형지물에 의한 시간전개별 일조율 자료를 적용하여 증발량을 산정하여 도로 위험구간의 변화를 예측하는 모형개발을 목표로 하였다. 증발량 산정모형은 물 수지법을 바탕으로 에너지수지법을 적용하여 구축하였으며, 모형에서 도로 위 차량에 의한 증발량의 변화를 고려하기 위해 교통량을 이용해 차량 복사열, 타이어 마찰열을 산정하여 모형에 적용하였다. 또한 도로 인근 지형지물에 의한 음영지역

J. Korean Soc. Transp.
Vol.36, No.4, pp.289-304, August 2018
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.4.289>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 29 May 2018

Revised: 18 July 2018

Accepted: 9 August 2018

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 따른 복사에너지의 감소율을 감안하기 위해 마이크로스테이션 프로그램을 이용해 조사 노선의 경도 및 위도 자료를 토대로 태양의 고도 및 방위각을 계산하여 설정하였으며 음영시간을 1시간 간격으로 설정하여 일조영향구역을 시각화하고 해당 구간의 음영율을 추출하여 이를 증발량 산정에 적용하여 음영지역의 특성을 반영하였다.

주요어: 에너지 수지, 증발량 산정모형, 복사에너지, 일조량, 마이크로스테이션

서론

강우가 발생하면 운전자들은 시야의 제한과 습윤상태인 노면의 마찰력 저하 등을 겪게 되며, VMS 등에서 제공하는 속도저감 경고등을 통해 운전 중 주의를 기울인다. 이 후 강우가 중지되고 노면의 습윤상태가 건조상태로 변하게 되면 일상적인 속도로 운행하게 되는데, 실제 노면의 상태는 도로의 구간별로 건조인 지점과 아직 습윤 상태인 지점이 존재하게 된다. 이와 같이 동일한 기하구조를 가진 도로 노면상태의 차이는 여러 요인에 기인하는데 그 중 중요한 요인은 시간전개에 따른 온도차이에 의한 증발량의 차이가 기인하게 된다. 온도의 차이는 노면에 가해지는 에너지의 차이에 기인하는데 이 에너지는 태양광에 노출되는 정도에 따라 차이를 보이게 되며, 태양광의 노출 정도는 도로 주변의 지형과 도로의 방음벽, 중앙분리대와 같은 음영지역 발생요소에 기인하게 된다. 따라서 본 연구에서는 도로의 구조물과 지형지물에 의한 음영의 변화를 고려하여 도로 노면상태를 파악하고 이를 통해 도로의 위험지점을 탐색하는 모형을 구축하고자 한다. 이에 노면상태를 예측하기 위한 증발량 산정방안으로 에너지수지모형을 활용하였으며 도로의 상황을 현실적으로 반영할 수 있는 교통량 수집자료를 적용하여 교통상황이 반영될 수 있도록 하였다. 또한 도로의 지점별 특성을 반영하기 위하여 지형지물에 의한 음영지역의 일조량을 감안하여 도로상황을 현실적으로 적용함으로써 노면상태를 산정할 수 있도록 모형을 개발하고자 하였다.

선행연구

1. 노면온도 추정 연구

국내외 노면온도 예측모형의 연구는 주로 지면에서 열수지법(Heat balance method)을 이용한 열 출입의 정량적 분석이 진행되고 있다.

Yang et al.(2011)은 열에너지 균형원리를 활용하여 두 모형을 만들었는데, 모형1은 지표면과 대기 간의 열 교환을 적용한 것이고, 모형2는 포장체의 특성을 반영하였다.

Takahashi et al.(2005)은 열균형 모형을 적용하여 노면 결빙을 예측하는 방안을 연구하였으며 그 방법으로 노면 온도에 영향을 주는 차량의 바닥으로부터의 복사열을 고려하여 예측하였다.

Fujimoto et al.(1970)은 노면온도 예측 모형에 타이어 마찰열이 겨울철 노면 'Black Ice'의 발생에 중요한 영향을 준다고 제시하였다.

2. 증발량 산정 연구

국내외 증발량 산정모형에 관련된 연구는 주로 기온증가로 인한 수면변화와 관련된 연구가 상당히 많이 진행되어 왔다. 증발량에 영향을 미치는 기후요소는 주로 기온, 풍속, 상대습도, 일사량 등이 주요 기상인자로 적용되지만 실제로 증발량에 영향을 미치는 기후요소는 더 다양하다.

증발량을 산정하기 위한 식은 주로 공기동력학(mass transfer)과 에너지수지법(energy budget)을 적용하여 산정하고 있으며 이를 각각 또는 두 방법을 조합하여 증발량 산정식을 제시하고 있다.

Kohler et al.(1955)은 조합식의 에너지수지항과 공기동력항을 경험적인 방법으로 최적화 하여 수표면에서의 증발량 산정식을 제안한 바 있다.

Lee and Kim(1985)은 우리나라 증발량의 시공간적 분석을 위해 Kohler and Richards(1962)식을 적용하였다. Han and Lee(2006)은 해남 농경지에서 관측된 대형 증발접시 증발량을 이용하여 공기동력학적 방법의 매개변수를 추정하였다.

증발량 산정은 일반적으로 Penman 조합식(1948)을 활용하여 산정하는 것이 정확한 증발량을 산정할 수 있지만, 공기동력학적 방법은 기온뿐만 아니라 풍속과 상대습도와 같은 기상요소 자료가 필요하며, 이들 기상요소(풍속, 상대습도 등) 자료는 지형특성에 따라 매우 민감한 영향을 받고, 또한 증발량 산정을 위한 정확도도 상대적으로 높지 않은 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 취득할 수 있는 범위에서의 데이터와 정확한 증발량 산정을 위해 에너지수지방법(Energy Budget Method)를 활용하여 모형을 개발하였으며, 추가적으로 현실적인 도로상황을 반영하기 위해 이와 관련된 요소인 교통량, 차량속도, 타이어 마찰열 등을 고려하여 증발량 산정모형을 개발하였다. 이는 도로를 이용하는 차량에 대한 요인을 반영하여 기존 증발량 산정모형보다 도로에서 활용할 수 있는 현실적인 변수를 적용함으로써 모형의 신뢰성을 높이고자 한 것이며, 특히 교통량을 차종별로 고려하고 타이어 마찰력을 적용하는 단계를 포함시킴으로써 기존의 연구와 차별성을 두었다.

연구방법

본 연구에서는 강우 시 시간전개에 따른 물 고임량에 대한 기초 모듈로 물 수지 모듈을 활용하였으며 물 수지 모듈에서 증발량 값을 산정하기 위해 에너지 수지 모듈을 수행하여 1차 증발량을 산정하고 예측지점을 통과하는 차량에 의한 영향을 고려하는 모듈과 타이어 마찰열과 일조율을 고려하는 모듈을 수행하여 최종 산정식을 제시하였다(Figure 1).

Figure 1. Reserch flow

1. 에너지 수지 모듈

에너지 수지(Energe budget)란, 저수지에 대한 에너지의 유입과 유출을 설명하는 에너지 흐름에 대한 연속방정식으로 수면에서의 에너지 수지 Equation 1과 같이 나타낸다.

$$Q_{\theta} = Q_s - Q_r + Q_a - Q_{ar} - Q_{bs} + Q_v - Q_e - Q_h - Q_w \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \quad (1)$$

여기서, Q_{θ} : 물에 의해 저장된 에너지의 증가량

Q_s : 수표면에 도달되는 태양복사에너지

Q_r : 반사되는 태양복사에너지

Q_a : 수표면으로 도달되는 대기로부터의 장파복사에너지

Q_{ar} : 물 표면에서 반사되는 장파복사에너지

Q_{bs} : 물로부터 방출되는 장파복사에너지

Q_v : 저수지로 유입 또는 유출되는 물에 의한 순에너지 변화량

Q_e : 증발에 사용된 에너지

Q_h : 감열(현열)로 물로부터 대기로 전도된 에너지

Q_w : 증발된 물로 인해 손실된 에너지

증발된 물로 인해 손실된 에너지(Q_w)는 다른 항에 비해 그 크기가 작으므로 무시 가능하며, 저수지에서 유출되는 장파복사에너지(Q_{ar}, Q_{bs})와 유입되는 장파복사에너지(Q_a)의 차이는 장파복사에너지 교환량(Q_b)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{\theta} = Q_s - Q_r - Q_b + Q_v - Q_e - Q_h \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \quad (2)$$

여기서, Q_b : 장파복사에너지 교환량

본 연구의 경우 저수지가 아닌 도로 위 물고임 구간의 증발량을 계산하므로, 저수지의 수온변화에 따라 발생하는 에너지의 증가량인 Q_{θ} 과, 유입·유출되는 물에 의한 에너지인 Q_v 에 대해고려하지 않고, Equation 2를 증발에 사용된 에너지(Q_e)에 대하여 Equation 3로 정리된다.

$$Q_e = Q_s - Q_r - Q_b - Q_h \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \quad (3)$$

2. 차량에 의한 영향 고려

도로라는 공간적 특성에 의해 증발에 사용된 에너지를 산정하는데 있어 자연적 요인뿐만 아니라, 차량에 의한 열 에너지를 고려하여야 한다.

A. Fujimoto에 따르면 자연적 요인인 일사에 의한 열 성분에 인위적 요인의 차량 열이 복합되어 노면에서의 열 에너지가 나타나는 현상은 Figure 2와 같이 제시되고 있다.

Figure 2. Conceptual diagram of heat transfer at road surface (Fujimoto et al., 2008)

A. Fujimoto가 제시한 차량에 의한 열 에너지는 Equation 4와 같다.

$$Q_V = S_t + R_v + S_{va} \quad (W/m^2) \quad (4)$$

여기서, Q_V : 총 차량 열 플럭스(W/m^2)

S_t : 타이어 마찰열 플럭스(W/m^2)

R_v : 차량 하부 열 플럭스(W/m^2)

S_{va} : 차량 현열 플럭스(W/m^2)

차량열 플럭스(Q_V)를 증발에 사용된 에너지(Q_e)를 산정하는 Equation 4에 추가하면 Equation 5로 도출된다.

$$Q_e = Q_s + Q_V - Q_r - Q_b - Q_h \quad (cal/cm^2/hr) \quad (5)$$

3. 증발량 산정식

차량에 의한 영향을 고려한 Equation 6에서 감열(현열)에 의한 전도에너지(Q_h)와 증발에 사용된 에너지(Q_e)의 비율은 Equation 6. Bowen 비와 같으며 이를 Equation 5에 대입하면 Equation 7로 도출된다.

$$B = \frac{Q_h}{Q_e} = 0.61 \left(\frac{T_o - T_a}{e_o - e_a} \right) \frac{P}{1000} \Rightarrow Q_h = B Q_e \quad (6)$$

$$Q_e = \frac{Q_s + Q_V - Q_r - Q_b}{1 + B} \quad (cal/cm^2/hr) \quad (7)$$

여기서, 0.61: 습도계 계수(대기압을 mb단위로 사용할 때 0.61을 사용)

T_o : 수면온도(노면온도) ($^{\circ}C$)

T_a : 대기온도($^{\circ}C$)

e_o : 수면온도 T_o 에서의 포화증기압(mb)

e_a : 대기온도 T_a 에서의 포화증기압(mb)

P: 대기압(mb)

증발에 사용된 에너지(Q_e)는 Equation 7과 더불어 증발량과 액체에서 기체로 변하는데 필요한 잠열량인 잠재증기화열(L_e)을 통해서도 산정되며 Equation 8과 같다.

$$Q_e = E \cdot \rho L_e \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \quad (8)$$

여기서, E : 증발량(cm/hr)

ρ : 물의 밀도(1.0g/cm³)

L_e : 잠재증기화열(cal/g)

Equation 8을 증발량(E)에 대하여 정리하고 Equation 7에 대입하면 Equation 9와 같이 에너지 수지 방법에 의한 도로 위 증발량 산정식이 도출된다.

$$E = \frac{Q_s + Q_V - Q_r - Q_b}{\rho L_e (1 + B)} \text{ (cm/hr)} \quad (9)$$

본 연구에서 개발된 도로 위 증발량 산정식은 기존의 수면에서의 증발량 산정식과 비교하였을 때 차량 복사열, 타이어 마찰열을 적용하여 도로 위 차량의 영향을 고려하여 제시하였다는 차이점이 존재하며 이를 통해 더 현실성 있는 도로 증발량을 산정할 수 있다.

4. 증발량 산정식 각 항의 산정

도로 습윤 구간에 영향을 주는 태양복사에너지는 차량에 의한 차폐 효과를 받을 수 있으므로 이를 고려하여 Equation 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_s &= t_r \cdot S_s + (1 - t_r) Q_{s\downarrow} \text{ (W/m}^2\text{)} \\ Q_s &= 0.0864 Q_s \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \\ t_r &= \frac{L \cdot N}{1000v} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, t_r : 차량이 노면을 가리는 시간의 비율

S_s : 산란된 방사선의 강도(순태양복사량의 1/2수준)

$Q_{s\downarrow}$: 맑은 날 동안의 순태양복사량(W/m²)

L : 차량길이(m)

N : 교통량(대/시)

v : 차량속도(km/시)

습윤상태의 도로 위를 통과하는 차량의 영향으로 발생하는 차량 열 에너지는 Equation 10과 같이 나타나며, 각 요소들에 대한 산정식은 Equation 11과 같다.

$$\begin{aligned} Q_V &= S_t + R_V + S_{Va} \text{ (W/m}^2\text{)} \\ Q_V &= 0.0864 Q_V \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \end{aligned} \quad (11)$$

A. Fujimoto가 제시한 타이어 마찰열 S_t 는 뉴턴의 냉각법칙에 의해 수립되며 Equation 12와 같다.

$$S_t = \alpha_{tp} (T_t - T_{ps}) \quad (12)$$

여기서, α_{tp} : 타이어와 노면 사이의 열전달율($=60 \text{ W/m}^2/\text{K}$)

T_t : 타이어 온도($^{\circ}\text{C}$)

T_{ps} : 노면 온도($^{\circ}\text{C}$)

여기에서 T_t 는 Equation 13으로 산정되며 노면조건과 관계없이 같이 경험적인 상관관계에 의해 주어진다.

$$T_t = 0.9 T_a + 0.33 V_v \quad (13)$$

차량 하부 열은 차량 하부의 온도를 알고 있다면 Equation 14와 같이 Stefan-Boltzman의 법칙에 따라 계산할 수 있다.

$$R_V = \epsilon_v \sigma (T_v + 273.15)^4 \quad (14)$$

여기서, ϵ_v : 차량 하부의 방사율($=0.80$)

T_v : 차량 하부의 온도($^{\circ}\text{C}$)

차량 하부의 온도(T_v)는 3개로 분류되며, 그 분포는 Equation 15와 같다.

$$\begin{aligned} T_v &= T_a + 44.0 \quad (0 \leq x_v^* \leq 0.2) \\ T_v &= T_a + 25.9 \quad (0.2 \leq x_v^* \leq 0.4) \\ T_v &= T_a + 20.3 \quad (0.4 \leq x_v^* \leq 1.0) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, x_v^* : 차량전방으로부터의 거리(x_v)와 차량길이(L_{vh})의 비

차량 현열 S_{va} 는 뉴턴의 냉각법칙에 의해 Equation 16으로 수립되며 식에 사용되는 요소 중 α_s 의 값은 차량유도 풍속(V_w)으로부터 추정된다.

$$S_{va} = \alpha_s (T_a - T_{ps}) \quad (16)$$

여기서, α_s : 차량과 대기간의 열 전달계수($\text{W/m}^2/\text{K}$) ($=10.4 V_w^{0.7} + 2.2$)

V_w : 차량유도풍속($=av$)

a : $0.08 V_v$

반사복사에너지(Q_r)이란, 지표면에 도달하는 태양복사에너지(Q_s)의 일부가 표면의 반사효과 때문에 지표면을 떠나게 되는 에너지로서 Equation 17과 같이 산정된다.

$$Q_r = A \cdot Q_s \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \quad (17)$$

여기서, A : 반사율(Albedo), 물 표면의 반사율(0.03–0.40)

대기권으로부터 지표면으로 도달하는 에너지의 일부는 장파의 방사열로 대기중으로 소산되어 에너지 손실이 발생되며, 이와 같은 반사 장파에너지가 지표면에 흡수되는 장파에너지보다 크므로 장파에너지 교환량은 에너지의 손실량이 되는 것이며, 이를 산정하는 식은 Equation 18과 같다.

$$Q_b = \frac{\sigma T_a^4}{24} (\epsilon_a - 1) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \text{ (cal/cm}^2\text{/hr)} \quad (18)$$

여기서, σ : Stefan-Boltzman상수($1.17 \times 10^{-7} \text{ cal/cm}^2 / ^\circ \text{K/day}$)

T_a : 대기의 절대온도($T_a + 273$)

ϵ_a : 대기의 방사율($c + d\sqrt{e_a}$)

c, d : 경험적인 지역상수(표 참고)

e_a : 실제증기압($e_s \cdot RH$)

e_s : 해당 온도에서의 포화증기압(표 참고)

RH : 상대습도(%)

Table 1. Empirical local constants for long wave energy estimation (c, d)

Country	c	d	Country	c	d
World	0.51	0.066	Sweden	0.43	0.082
Washington	0.44	0.061	England	0.53	0.065
California	0.50	0.032	Australia	0.47	0.063
Oklahoma	0.68	0.036	India	0.62	0.029

Table 2. The effect of temperature on the saturated vapour pressure

t (°C)	Saturated vapour pressure (mmHg)	t (°C)	Saturated vapour pressure (mmHg)	t (°C)	Saturated vapour pressure (mmHg)	t (°C)	Saturated vapour pressure (mmHg)	t (°C)	Saturated vapour pressure (mmHg)
-10	2.15	4	6.10	16	13.63	30	31.82	44	68.26
-9	2.32	5	6.54	17	14.53	31	33.69	45	71.88
-8	2.51	6	7.01	18	15.47	32	35.66	46	75.65
-7	2.71	7	7.51	19	16.47	33	37.72	47	79.6
-6	2.93	8	8.04	20	17.53	34	39.89	48	83.71
-5	3.16	9	8.60	21	18.65	35	42.17	49	88.02
-4	3.41	8	8.04	22	19.82	36	44.56	50	92.51
-3	3.67	9	8.60	23	21.06	37	47.06	51	97.2
-2	3.97	10	9.20	24	22.37	38	49.69	52	102.1
-1	4.26	11	9.84	25	23.75	39	52.44	53	107.2
0	4.57	12	10.51	26	25.20	40	55.32	54	112.5
1	4.92	13	11.23	27	26.73	41	58.34	55	118.1
2	5.29	14	11.98	28	28.34	42	61.5	56	123.8
3	5.68	15	12.78	29	30.04	43	64.8	57	129.8

모형의 적용

본 연구에서 제안된 증발량 산정모형의 적용을 위한 입력자료를 수집하기 위해서는 모형수행에 필요한 기상예측 자료와 교통량자료의 수집이 용이한 구간을 선정하여야 하며 이에, 본 연구에서는 구국도 3호선의 성남-장호원 구간을 대상구간으로 선정하였다.

기상자료 및 교통자료는 수집자료가 연속적으로 나타나있으며, 본 연구에서는 기상자료와 교통자료의 매칭이 가능한 기간인 2018년 3월 15일(수) 1시 - 16일(목) 23시 동안 수집된 자료를 적용하였다.

1. 입력자료

본 연구에서는 앞서 제안한 시간전개에 따른 증발량 산정모형을 적용하기 위해서는 모형의 입력자료인 기상자료, 교통자료, 노면온도 관측자료 등의 관측값을 조사, 수집하였다.

1) 기상자료

Figure 3에서 보는바와 같이 기온은 영하 -5.4°C 에서 영상 15.5°C , 상대습도는 38-100%, 기압은 1012.0-1028.9 hPa를 보였고, 하향단파복사에너지는 $187.18\sim720.38\text{W/m}^2$ 로 나타남. 강수량은 3월 15일 3-12시 동안 최대 10.7 mm의 강우가 발생한 것으로 나타났다.

Figure 3. Weather data

2) 교통자료

교통자료는 도로교통정보시스템에서 수집된 교통량과 속도 관측자료를 제공받아 적용하였다. 해당 지점의 시간당 교통량은 359~4,305대/시로 시간대별로는 오전 7~9시, 오후 5~7시가 첨두시로 나타났으며, 주행속도는 66.2 km/h로 교통량의 변화와는 상관없이 비교적 일정한 것으로 보인다. 교통량과 속도의 시간변화는 Figure 4과 같다.

Figure 4. Traffic and speed data

3) 노면온도 관측자료

증발량 산정에 필요한 노면온도 관측값은 노면상태 조사장비를 활용하여 수집하였으며, 평균적으로 9.67도를 보이고 있는 것으로 나타났다.

조사지점의 노면온도는 영상 3.5~21.70°C의 분포를 보이고, 태양의 하향복사에너지를 받는 8시부터 최대 높은 시간대인 12~13시까지 약 16.7°C 정도의 차이를 보이고 있다.

분석대상 기간동안 관측된 노면온도 관측값의 시간전개에 따른 변화는 Figure 5와 같다.

Figure 5. Road surface temperature

3. 모형의 적용 결과

본 연구에서는 조사구간의 노면에 기하구조적으로 손상된 변형구간이 없고, 합성경사가 없는 등 도로설계기준에 맞는 도로를 대상으로 가정하여 음영지역이 없는 ‘일반구간’에서의 노면상태를 산정하였다.

본 연구에서 제시하는 증발량 산정모형에 따른 노면상태의 변화를 분석하기 위해서는 강우 전, 강우 시, 강우 후의 노면상태 변화를 보아야 하므로 본 연구에서는 강우량이 측정된 시간인 2018년 3월 15일(수) 1시 - 16일(목) 23시까지 총 47시간의 노면상태 변화를 분석하였다.

해당 기간 동안 평균 4.65mm의 시간당 강우량이 측정되었으며 10.70mm가 시간당 최고 강우량으로 나타났다. 국내 도로설계기준에서는 도로의 상태가 ‘습윤’상태 일 때의 도로 마찰력을 계산하기 위한 실험으로 자동식 미끄럼 측정 장비(Pavement Friction Tester, PFT)를 사용하여 60km/h의 속도에서 물 분사량 600ml/min · mm를 표준으로 하고 있으며 이는 Equation 19를 통해 계산한 결과 약 0.6mm의 수막두께의 수막을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다.

$$h = \frac{Vol}{L \times W} = \frac{0.108588m^3}{(1000m)(0.18099m)} = 0.6mm \quad (19)$$

여기서, h : 수막두께

L : 시속 60km/h 1분간 이동거리

Vol : 총 살수량

W : 살수 폭(타이어 폭+여유 폭)

이에 본 연구에서는 강우 시 습윤상태인 노면의 수막두께는 최대 0.6mm를 형성하는 것으로 가정하여 시간 전체에 따른 증발량과 노면상태를 산정하였다.

증발량 산정에 필요한 에너지 요소를 위에서 제시한 바와 같이 산출하고, 조사기간 동안의 증발량을 산정한 결과 평균 0.0264cm/hr의 증발효과를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 비가 내려서 온도가 감소하는 때와 태양복사에너지가 없는 저녁시간때의 증발량은 더욱 낮은 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.

증발량 산정 후 시간 전개별 증발량과 지하유출량을 감안한 도로에 남은 강우량, 그리고 시간당 강우량을 비교한 결과 Figure 6의 그래프에서 보이는 것과 같이 강우 시작시에 점차 노면의 물이 0.6mm까지 차올라 노면의 상태가 ‘습윤’상태가 되었으며 중간중간 강우가 멈추었을 때 증발량에 의해 점차 건조되다가 다시 비가 시작되어 ‘습윤’상태를 유지하는 것으로 나타났다.

Figure 6. Diurnal variations of evaporation loss and reaming rainfall

분석결과 비가 최종적으로 내렸던 2018년 3월 15일 12시 이후 2시간 뒤인 2018년 3월 15일 14시에 노면의 상태가 ‘건조’가 되는 것으로 분석되었다.

4. 음영지역의 노면상태 산정

음영지역은 증발량의 변화에 주요한 요소인 태양복사열의 영향을 적게 받는 곳으로 음영이 발생할 수 있는 특수 구간의 노면상태는 해당 지점의 특성을 반영할 수 있는 변수를 상수화 하여 노면상태 예측에 적용하여야 한다.

음영구간이 지속됨으로 인한 복사열의 감소를 측정하기 위해 우선 본 조사구간인 구국도 3호선 성남-장호원 구간의 설계 중·평면도를 수집하여 계획노선의 중심선으로부터 횡단 간격 300m지점까지를 평면 범위로 설정하고 조사구역의 3차원 등고선을 생성하였다.

도로설계는 Table 3의 설계기준에 근거하여 Bentley사의 InRoad 프로그램을 사용하여 3차원으로 도로설계를 실시하였으며, 대상지역의 3차원 수치지형모형(DTM)을 생성하기 위해 1:1,000 평면 설계도에서 1m 등고선 자료를 입력하였다. 또한, 세밀한 음영지역 산출을 위해 본 조사구간의 중앙분리대 및 방음벽도 구축하였다.

Table 3. Road design standards

Road type	Motorway, Highway
Design speed	90km/h
Road width	30.6m
Width	$6 \times 3.6 = 21.6\text{m}$
Median strip	3.0m
Shoulder	$2 \times 3.0 = 6.0\text{m}$

1) 평면선형 및 종단선형 입력

수치지형모형을 통해 Figure 7과 같이 실제 지표면을 모형화 한 후, 조사구간의 평면선형(Horizontal Alignment)을 수립하기 위해 도로의 기하학적 프로젝트를 생성하고 선형계획을 위한 IP를 배치하고 연결함으로써, 새로운 도로의 중심선을 생성하고 커브셋을 생성하여 선형을 부드럽게 하였다.

또한 조사구간의 종단면자료를 입력하여 도로의 종단경사를 정의하며, 평면선형을 따라서 차례대로 종단면내의 경계 내에서 종단선형(Vertical Alignment)을 정의하였다.

Figure 7. Road design

2) 불규칙 삼각망 생성

Figure 8는 지형에 도로 설계값을 입력하여 완성된 도로를 불규칙삼각망(TIN) 형태로 보여주는 것으로서, 이를 통해 3차원으로 본 구간을 나타냈을 때 일조분석이 가능해진다.

Figure 8. TIN model by road design

3) 일조 모델링

음영이란 일출에서 일몰 사이에 지형지물에 의해 태양 빛이 가려져 그림자가 발생하는 것으로 도로 주변에서는 보통 주변의 산과 도로 위 중앙분리대, 방음벽 등에 의해 발생할 수 있으며 강수량이 많은 경우 도로노면의 물고임 체류구간이 될 수 있게 영향을 줄 수 있는 인자이다. 따라서 조사기간 동안의 도로 노면의 일조영향을 파악하여 각 지점별 음영지역에 의한 일조율을 분석하여야 한다.

본 연구에서는 보다 사실적인 도로를 묘사하기 위해 도로 위 음영이 발생시킬 수 있는 시설물을 추가 설계하였으며, 본 조사구간의 경우 관련 시설물로 중앙분리대와 방음벽이 존재하여 해당 시설물을 Figure 9와 같이 설계 후 시간전개별 음영정도를 확인하였다.

Figure 9. Solar exposure modeling

3차원 모델에 대한 일조 시뮬레이션을 통한 시각적 분석을 실시하기 위해 Figure 10과 같이 본 조사구간의 2018년 3월 15일 15시, 16시, 17시, 18시 일조량 데이터를 추출하고 3D 모델링을 한 결과 Figure 10과 같이 시간전개에 따라 음영구역이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

Figure 10. Change of shaded area on time flow

조사구간의 음영 데이터는 계속해서 중첩되고 데이터화 되며 이를 활용하여 음영이 심함 구간을 3차원 형식으로 시각적으로 나타낼 수 있다. 예로 2018년 3월 15일 7-10시까지의 데이터를 중첩하여 나타내면 Figure 11과 같이 해당 구간의 지점별 일조시간을 알 수 있다.

Figure 11. The result of overlapping shaded data

Figure 11과 같이 MicroStation 프로그램을 통해 특수구간에서 발생하는 시간대별 음영정도를 파악하고 이러한 음영구간의 특성을 반영할 수 있도록 음영시간에 따른 보정계수를 적용하기 위해서 지형지물의 그림자가 노면을 가리는 시간의 비율을 계산하여 태양복사에너지에 적용하기 위해 지형지물에 의해 감소된 복사에너지 산정식을 Equation 20과 같이 나타내었다.

$$Q_{sb} = t_b \cdot S_s + (1 - t_b) Q_s \downarrow \quad (W/m^2) \quad (20)$$

여기서, Q_{sb} : 지형지물의 음영에 따라 감소된 복사에너지(W/m^2)

t_b : 건물 및 시설물이 노면을 가리는 시간의 비율

S_s : 산란된 방사선의 강도(순태양복사량의 1/2수준)

$Q_s \downarrow$: 맑은 날 동안의 순태양복사량(W/m^2)

앞서 시간전개별 물고임부의 변화를 알아봤던 시간대인 2018년 3월 15일 01시 - 16일 23시까지 본 조사구간의 지형지물에 의한 음영시간은 Figure 12와 같이 오전 07-10시 동안 유지되었으며, 이후 17-19시에도 음영구간이 발생하는 것으로 나타났다.

Figure 12. Change of shaded area on time flow

해당 데이터를 통해 음영시간에 따른 노면상태를 분석한 결과 인근 지형지물에 의한 음영에 따라 해당 구간의 노면상태가 ‘건조’가 되는 시간이 1시간 늦춰진 것으로 나타났다.

Table 4. The road surface on time flow of general area and shaded area

Section	Date	Evaporation loss	Underground runoff	Rainfall	Remaining rainfall	Road surface
General section	2018031513	0.260	0.000	0.00	0.15	Wet
	2018031514	0.254	0.000	0.00	0.00	Dry
Shaded section	2018031513	0.218	0.000	0.00	0.23	Wet
	2018031514	0.213	0.000	0.00	0.02	Wet
	2018031515	0.383	0.000	0.00	0.00	Dry

결론

본 연구에서는 강우 시 혹은 강우 후 도로의 안전성을 제고하기 위하여 물 수지법을 바탕으로 에너지수지법을 이용하여 시간전개별 일조율에 따른 증발량 산정모형을 개발하였으며 이에 따라 강우 시 도로의 상태변화를 나타내었다.

본 연구에서 개발한 증발량 산정모형은 기존의 공기동역학과 에너지학을 적용한 모형을 바탕으로 개발하였으며, 우리나라의 현실적인 도로의 특성을 고려하고자 교통량, 속도, 타이어 마찰력, 차량에 의한 차폐효과 등 통행 차량의 특성을 반영하고 도로 주변 상황 반영을 위해 도로 주변 지형지물에 의한 일조량의 감소율을 감안하여 기존 증발량 예측모형을 발전시켰다.

본 연구에서는 도로상태가 도로설계기준에 맞는 일반 도로(최대 수막두께 0.6)를 활용하였으며, 실제 기상자료를 취득 후 본 연구에서 개발한 증발량 산정 모형을 적용한 결과, 10시간 동안 평균 4.65mm/hr의 강우량이 발행한 지점의 도로상태가 습윤상태에서 건조상태로 바뀌는 시간은 비가 그친 후 2시간 뒤 인 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서는 도로 주변 지형지물에 의한 일조량 감소율을 감안하기 위해, 시범 노선을 선정하여 도로 노선 주변의 수치지형자료를 받아 도로설계프로그램에 반영하였으며, 이를 3차원으로 모형화 하고 태양의 궤도 및 고도 각을 설정하여 1시간 간격의 음영지역을 구하였으며, 음영지역이 존재하는 구간의 조사시간간격을 설정하여 해당 시간간격동안 조사된 1시간 간격의 음영지역 데이터를 취합하여 원하는 시간 간격동안의 일조율을 산정하여 증발량 산정 모형에 적용한 결과, 구간의 노면상태가 건조가 되는 시간이 1시간 가량 늦춰진 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 도로 위 증발량산정 모형은 다양한 기상조건과 도로상태에 따라 그 활용성이 달라질 수 있다. 따라서 추후에는 소성변형, 다양한 도로구간(터널, 교량 등), 계절별 다양한 기상조건의 특성에 따른 도로 위험도 변화에 대한 연구를 진행하여 각 특성별 요소를 모형에 적용하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 향후 모형의 활용성을 높이기 위하여 도로관리 및 도로정보제공을 위한 증발량 예측모형의 개발이 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Funding

This work was supported by the Korea Meteorological Institute of Korea grant funded by the Korea Government (MSIP) (KMIPA2017-0050).

ORCID

SON, Young Tae <http://orcid.org/0000-0002-8193-8521>

PARK, Sang-Hyun <http://orcid.org/0000-0003-3168-8031>

References

- Fujimoto A., Watanabe H., Fukuhara T. (2008), Effects of Vehicle Heat on Road Surface Temperature of Dry Condition, Standing International Road Weather Conference, 14-16.
- Fujimoto A., Watanabe H., Fukuhara T. (2006), Effects of Tire Frictional Heat on Snow Covered Surface, Standing International Road Weather Conference, 13, 117-122.
- Han J.S., Lee B. Y. (2006), Measurement and Analysis of Free Water Evaporation at HaeNam Paddy Field, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 7(1), 92-98.
- Koher M. A., Nordenson T. J., Fox W. E. (1955), Evaporation From Pans and Lakes, U. S. Dept. commerce Research, Paper. 38.
- Lee H. S., Kim J. S., Park J. K. (2005), Analysis on Sunshine Influence of Road Using GIS, Journal of Korean Society for Geospatial Information Science, 419-425.
- Lee K. H., Kim M. I. (1985), Seasonal Variations of the Evaporation in Korea, Journal of Korean Association of Hydrological Sciences, 18(3), 243-251.
- Penman H. L. (1948), Natural Evaporation From Open Water, Bare Soil, and Grass, Proc. Roy. Soc. London, A193, 120-146.
- Takahashi N., Asano M. Ishikawa N. (2005), Developing a Method to Predict Road Surface Icing Conditions Applying a Heat Balance Method, Proceedings of Cold Region Technology Conference, 21, 201-208.
- Yang C. K., Park M. S., Yun D. K. (2011), A Road Surface Temperature Prediction Modeling for Road Weather Information System, J. Korean Soc. Transp., 29(2), Korean Society of Transportation, 123-131.