

## 도로 비점오염 해석을 위한 ROADMOD개발 및 적용: 도로청소 효과 분석

강희만<sup>1</sup> · 전지홍<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>한국도로공사 도로교통연구원 환경연구실 · <sup>2</sup>국립안동대학교 환경공학과

## Development and Application of ROADMOD for Analysis of Non-point Source Pollutions from Road: Analysis of Removal Efficiency of Sediment in Road by Sweeping

Heeman Kang<sup>1</sup> · Ji-Hong Jeon<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Expressway Corporation Research Institute

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Andong National University

(Received 8 February 2021, Revised 16 March 2021, Accepted 23 March 2021)

### Abstract

In this study, an Excel-based model (ROADMOD) was developed to estimate pollutant loading from the road and evaluate BMPs. ROADMOD employs the Chezy-Manning equation and empirical expression for estimating surface runoff, and power function for pollutant buildup, and exponential function for pollutant washoff in SWMM. The results of model calibration for buildup and washoff using observed data revealed a good match between the simulation results and the observed data. The long-term surface runoff and sediment simulated by ROADMOD demonstrated a good match with those by SWMM with 2 ~ 14% of relative error. The shorter sweeping interval (within 8 days) remarkably decreased sediment loads from the road. It was found that the effect of reducing sediment loads from the road was greatly affected not only by the sweeping interval but also by sweeping on the day before a rainfall event. The 48% of removal efficiency of sediment loads from the road was achieved with 26 times of road sweeping per year when sweeping was performed on the day before the rainfall event. A 4-day sweeping interval showed similar removal efficiency (48%) with 96 times of sweeping per year. It is considered that the road sweeping on the day before a rainfall event could maximize the effect of reducing the non-point source pollution from the road with minimization of the number of road sweeping. So, the road sweeping on the day before a rainfall event can be considered as one of the useful and best management practices (BMPs) on road.

**Key words** : Non-point source pollution, ROADMOD, Road sweeping, Sediment load

<sup>1</sup> 연구위원(Deputy Research Director), kheeman@ex.co.kr, <https://orcid.org/0000-0002-6284-4861>

<sup>2,\*</sup> Corresponding author, 교수(Professor), jhjeon@anu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4110-0003>

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.

## 1. Introduction

최근 들어 도로에서의 비점오염물질 유출에 관심이 높아지면서, 도시 비점오염원 관리를 위한 도로비점오염원 관리대책이 별도로 수립되고 있다. 제1차 비점오염원관리 종합대책에서는 도로·교량내 초기우수 관리대책을 제시하였으며(Prime Minister's Office and Ministry of Environment, 2004), 제2차 비점오염원관리 종합대책에서는 포장도로 청소 등 도로비점오염원 관리강화와 비점오염저감형 도로설치 및 유지관리 지침 제·개정을 제시하였다(Prime Minister's Office and Ministry of Environment, 2012).

도로에서의 비점오염물질은 대기오염 강하물질과 포장도로의 마모, 자동차 매연과 타이어마모 등으로 인해 도로노면에 축적된 퇴적물질이 주요 오염물질이다(Yeung et al., 2003). 도로노면에 축적된 퇴적물 중 다량의 오염물질을 함유하고 있는 미세입자는 강우시 쉽게 유기·무기 오염물질을 형태로 수체로 유출되어 수질오염을 야기시키는 것으로 보고되고 있다(Breault et al., 2005; Hengren et al., 2006; Zhao et al., 2009). 도로 퇴적물의 주요 오염물질은 카드뮴, 구리, 납, 아연 등과 같은 중금속인 것으로 보고되고 있으며 물고기를 오염에 내성이 강한 종으로 변화시키고 물고기알과 유충의 생존율을 감소시키는 것으로 보고되고 있다(Schueler, 1996).

도로에서의 비점오염물질 부하량 산정을 위한 다양한 경험식들이 제시되었으며 대부분 유량과 강우강도 등과의 함수로 표현되었다(Barrett et al., 1998; Becher et al., 2000; Grottker, 1987; Gupta and Saul, 1996; Irish et al., 1998; Saget et al., 1996). 국내의 연구사례에서는 Kim and Kang (2004)이 강우시 비점오염물질 부하량을 유출율과 유출계수, 유역특성상수 등을 이용하여 경험식을 도출한 바 있다. 그러나, 지역의 기후적인 특성과 도로의 규모에 따라 도로노면 축적량이 상이하기 때문에 특정한 지역에서 개발된 경험식을 범용적으로 사용하기에는 한계가 있다. 현재 도시에서의 비점오염물질 예측모형으로 Storm Water Management Model (SWMM)이 널리 이용되고 있으며(U. S. EPA., 2015), 도로를 대상으로 SWMM의 적용에 관한 몇몇 연구사례가 보고되고 있다. 도로에서의 강우시 초기세척비율(Mass First Flush ratio, MFFn) 산정(Kwon et al., 2012; Kwon et al., 2011)과 투수성 포장의 유출저감 특성 평가(Lin et al., 2015)에 SWMM을 적용한바 있다. SWMM은 도시유역을 수문 및 오염물질부하량을 모의할 수 있는 상세모형으로 다량의 입력데이터를 필요로 하며 모형의 구축 및 구동에 있어서 고도의 전문성을 요한다(Shoemaker et al., 1997). Jeon and Seo (2018)는 비전문가라도 쉽게 도시지역의 직접유출량과 이에 따른 비점오염물질 부하량, BMPs의 저감효과 등을 분석할 수 있는 엑셀 기반의 도시지역 저영향개발기법 평가모형(LIDMOD3)을 개발한바 있으나 부하량 산정에서 유량중평균농도(Event Mean Concentrations; EMCs)를 기반으로 하기 때문에 도로에서의 비점오염물질 산정과 도로청소의 효과분석에는 그 한계점을 가진다.

도로청소는 도로비점오염원 관리에서 중요한 최적관리기법 중의 하나이다. 특히, 제2차 비점오염원관리 종합대책(Prime Minister's Office and Ministry of Environment, 2012)에서는 비점오염물질의 처리를 사후처리적 형태에서 사전예방적 관리로 전환하는, 비점오염원 관리 패러다임의 혁신적 전환을 꾀하였으며, 이에 따라 도로청소는 도로비점오염원 관리에서 사전예방적 관리형태로 중요한 관리기법 중 하나이다. 본 연구에서는 엑셀을 기반으로 도로퇴적물을 3가지의 입도분포 카테고리 구분하여 도로비점오염물질을 예측할 수 있는 모형(ROADMOD)을 개발하여 그 적용성을 평가하였다. 도로청소 주기별 도로청소에 의해 수거된 노면퇴적물과 노면퇴적물 부하량 저감효과를 비교하여 도로청소주기에 따른 효과를 평가하였으며, 효과적인 도로청소방안을 제안하였다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 ROADMOD 기본이론

#### 2.1.1 지표유출량

ROADMOD의 지표유출모의는 난류흐름을 가정하여 Chezy-Manning 공식과 지표유출깊이와 표면저류깊이 사이의 경험공식을 이용하여 모의한다(Bicknell et al., 2005). 지표유출량은 식(1)에 의해 산정된다.

for  $SURMS < SURSE$

$$SURO = SRC(SURSM(1.0 + 0.6(SURSM/SURSE)^3)^{1.67} \quad \text{식(1)}$$

for  $SURMS > SURSE$

$$SURO = SRC(SURSM \times 1.6)^{1.67}$$

여기서, SURO는 지표유출량(in/hr), SRC는 유역추적계수(무차원단위), SURSM은 평균저류깊이(in), SURSE는 평형지표저류깊이(in)로 식(2)에 의해 계산되어 진다.

$$SURSE = SSUPR^{0.6} \quad \text{식(2)}$$

$$SSUPR = PSUR - SURS \quad \text{식(3)}$$

$$SURSM = (SURS + PSUR) \times 0.5 \quad \text{식(4)}$$

여기서, SSUPR은 지표유출에 공급되는 수분공급율(in/hr), SURS는 계산시작지점에서의 지표저류량(in), PSUR은 최대잠재지표 유출량(in)이다.

#### 2.1.2 오염물질 부하량

도로의 경우 대기에서의 낙진 등에 의해 오염물질이 시간에 따라 축적되므로 건기일수가 오염물질의 축적량에 큰 영향을 준다. SWMM에서는 오염물질축적량 예측공식으로 떡

함수(Power Function)과 지수함수(Exponential Function), 포화함수(Saturation Function)로 구분·선택하여 사용할 수 있도록 하였으며, 국내 도로에서의 건기일수별 오염물질축적에 대한 연구사례를 분석한 결과 멱함수가 적합한 것으로 보고되고 있다(ME, 2012; Won, 2020). 오염물질 축적량 예측에 있어서 멱함수를 적용하였으며 식(5)와 같다.

$$B = Mn(C_1, C_2t^{C_3}) \quad \text{식(5)}$$

여기서, C<sub>1</sub>은 가능최대축적량, C<sub>2</sub>는 축적율상수, C<sub>3</sub>는 시간지수, t는 건기일수이다.

본 연구에서는 퇴적물을 굵은입자(Coarse, 2 mm 이상)와 중간입자(Sand, 63 μm ~ 2 mm), 미세입자(Silt and clay, 63 μm 이하)로 구분하고 식(5)에 의해서 계산된 퇴적량에서 Kang and Kang (2014)이 산정한 도로청소전 도로퇴적물의 입자크기별 비율(Table 1)을 곱하여 각 입자크기별 축적량을 산정하였다. 입도별 가능최대축적량은 퇴적물의 가능최대축적량(C<sub>1</sub>)에 Table 1의 입도별 비율을 곱하여 산정하였다. Kang and Kang (2014)의 연구결과에 따르면 도로퇴적물 중 굵은입자가 차지하는 비율은 4.1%, 중간입자는 91.2%, 미세입자는 4.7%인 것으로 보고하였다.

축적된 오염물질은 강우에 의해 유출되는데 유출되는 특성에 따라 SWMM에서는 지수함수(Exponential Washoff), 유량비례함수(Rating Curve Washoff), 유량가중평균농도함수(Event Mean Concentration)등을 제공하며 사용자는 이 중 한 가지를 선택·적용할 수 있다. 지수함수는 현재 축적된 오염물질의 양과 유량이 오염물질 유출에 영향을 주는 함수로써 초기세척효과를 잘 모의할 수 있는 함수이다. 유량비례함수는 유량이 오염물질 부하량에 영향을 주는 함수이며, 유량가중평균농도함수는 강우시 유출되는 농도가 동일하다는

가정에 의해 부하량을 계산하는 함수이다. 도로에서의 오염물질 유출은 전형적인 초기세척효과를 나타내므로(Kwon et al., 2012; Kwon et al., 2011), 본 연구에서는 각 입도별 강우시 부하량을 지수함수를 사용하였으며 식(6)과 같다.

$$W_i = C_1q^{C_2}B_i \quad \text{식(6)}$$

여기서, W<sub>i</sub>는 각 입도별 유출부하량, C<sub>1</sub>은 유출계수, C<sub>2</sub>는 유출지수, q는 단위면적당 유출량(mm/hr), B<sub>i</sub>는 각 입도별 축적된 오염물질량이다.

2.1.3 도로청소

입도별 축적된 오염물질의 양에 입도별 도로청소 효율(Table 2)을 곱하여 입도별 도로청소차에 의해 수거된 양을 계산하였으며 식(7)과 같다. Kang and Kang (2014)의 연구결과에 따르면 도로노면의 퇴적물은 청소차에 의해 굵은입자는 60.5%, 중간입자는 47.1%, 미세입자는 25.8%인 것으로 나타나 굵은입자의 수거효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

도로청소가 시행되는 다음날 그리고 강우종료 다음 날부터 건기일수는 다시 0으로 하였다. 청소주기를 입력하면 주기적으로 도로청소가 이루어지도록 모형을 개발하였다.

$$S_i = R_iB_i \quad \text{식(7)}$$

여기서, S<sub>i</sub>는 각 입도별 도로청소 수거량, R<sub>i</sub>은 각 입도별 도로청소 수거효율, B<sub>i</sub>는 각 입도별 축적된 오염물질량이다.

2.1.4 비점오염저감시설

비점오염저감시설에서의 오염물질 저감효과 모의는 LIDMOD3와 동일한 방법으로 비점저감시설 내에서의 유출량 저감에 의한 오염물질 저감과 시설내 수질개선에 의한 오염물질 저

Table 1. The percentage of each particle size of sediment accumulated on road before sweeping (unit: %)

	Total	Coarse (>2 mm)	Sand (63 μm ~ 2 mm)	Silt, clay (<63 μm)
Average	100	4.1	91.2	4.7
STD	-	1.6	1.8	1.5
Maximum	-	7.1	95.5	7.5
Minnum	-	1.6	88.8	0.8

Source: Kang and Kang (2014)

Table 2. The removal efficiency of sediment by road sweeper for each particle size (unit: %)

	Total	Coarse (>2 mm)	Sand (63 μm ~ 2 mm)	Silt, clay (<63 μm)
Average	46.6	60.5	47.1	25.8
STD	11.0	22.6	11.1	37.6
Maximum	66.3	88.8	66.6	63.4
Minnum	25.0	17.4	23.7	-101.7

Source: Kang and Kang (2014)

값을 구분하여 계산하도록 하였다(Jeon and Seo, 2018). 처리 시설내 유출량 저감은 식(8)과 같이 비점오염저감시설내 물수지방정식에 의해 계산되며, 유출량 저감 및 수질농도처리에 의한 비점오염물질 저감효과는 식(9)과 식(10)에 의해 계산된다(Jeon and Seo, 2018).

$$\frac{dV}{dt} = V + I_{da} + P - E_T - I_{BMP} \quad \text{식(8)}$$

$$R_S = L_{DA} \times E_S \quad \text{식(9)}$$

$$R_T = L_{DA}(1 - E_S) \times E_T \quad \text{식(10)}$$

여기서,  $dV/dt$ 는 비점오염저감시설내 유량변화( $m^3/day$ ),  $V$ 는 계산 초기 저류용량( $m^3/day$ ),  $I_{da}$ 는 배수구역에서의 강우시 비점오염저감시설로 유입되는 유입량( $m^3/day$ ),  $P$ 는 비점오염저감시설로 직접 유입되는 강우량 ( $m^3/day$ ),  $E_T$ 는 증발산량 ( $m^3/day$ ),  $I_{BMP}$ 는 비점오염저감시설에서의 침투량 ( $m^3/day$ ),  $R_S$ 는 유출량 저감에 의한 비점오염저감시설 저감량,  $L_{DA}$ 는 배수구역에서의 부하량,  $E_S$ 는 비점오염저감시설에 의한 유출량 저감효율,  $R_T$ 는 비점오염저감시설의 수질처리에 의한 부하량 저감량,  $E_T$ 는 침전/필트에 의한 시설별 수질저감효율이다.

### 2.2 ROADMOD 적용성 평가

노면퇴적물의 시간에 따른 축적량과 강우시 노면퇴적물 유실량에 대한 모형 보정은 한국도로공사 도로교통연구원에서 실측한 측정자료를 이용하였다(Kang and Kang, 2014). 0.5~1일 간격으로 12.5일간 측정된 단위면적당 노면퇴적물 축적량을 이용하여 ROADMOD의 노면퇴적물 축적량 관련 보정인자를 보정하였다. 두 개의 강우사상에 대하여 강우 전·후의 노면퇴적물량의 실측자료를 이용하여 모형을 보정하였다. 노면퇴적물의 축적과 유실과 관련된 모형의 적용성은 상대오차를 사용하였으며 실측치를 참값, 예측치를 근사값으로 하였다. 상대오차는 식 (11)과 같다.

$$RE(\%) = \left| \frac{V_{appro} - V_{true}}{V_{true}} \right| \times 100 \quad \text{식(11)}$$

여기서, RE는 상대오차,  $V_{appro}$ 는 근사값,  $V_{true}$ 는 참값이다.

가상의 도로를 설정하여 SWMM과 ROADMOD을 구축하고 연간 시간별 강수데이터와 월평균 증발산량을 모형에 입력하여 연간 월별 유출량과 노면퇴적물 부하량을 비교하여 장기모의에 대한 ROADMOD의 적용성을 평가하였다. ME (2012)에서 127개 지자체의 평균 도로청소주기는 3.8일인 것

으로 보고하였으며 본 연구에서의 도로청소의 주기는 이를 고려하여 4일로 하였다. 가상의 도로 조건은 Table 3과 같으며 도로의 조도계수와 저류깊이는 SWMM 매뉴얼의 도로 혹은 불투수면 추천 값을 사용하였다(U. S. EPA., 2015). 연간 시간별 강수데이터는 기상청에서 제공하는 자료를 이용하였으며 2013년 강수데이터를 구축하였다. 장기모의에 대한 ROADMOD의 적용성 평가는 상대오차와 1:1 분산도, 선형1차 회귀식과 결정계수를 이용하였다. 상대오차에서 참값은 SWMM의 모의값을, 근사값은 ROADMOD의 모의값을 이용하여 식(11)을 이용하였다.

### 2.3 도로청소의 효과분석

#### 2.3.1 퇴적물 입자분포

노면퇴적물의 입자분포를 분석하기 위하여, 노면퇴적물을 3가지 카테고리의 입도분포를 구분하여 모의하였다. 노면에서의 축적은 식(5)에 의해 총량으로 축적량을 모의한 뒤 Table 1의 축적량 중 각 입자크기가 차지하는 비율을 곱하여 산정하였는데, 굵은입자가 차지하는 비율은 4.1%, 중간입자는 91.2%, 미세입자는 4.7%를 사용하였으며 도로청소의 입자별 수거효율은 Table 2의 굵은입자는 60.5%, 중간입자는 47.1%, 미세입자는 25.8%를 적용하였다.

#### 2.3.2 도로청소 주기별 노면퇴적물 부하량

도로청소 주기는 2일~30일 간격으로 1일씩 증가하여 분석하였다. 도로청소를 실시하지 않았을 경우를 기준으로 하여 각 주기별 노면퇴적물 부하량 저감량을 산정하여 도로청소를 통한 노면퇴적물 부하량 저감효과를 분석하고, 효율적인 노면퇴적물 부하량 저감을 위한 청소주기를 고찰하였다.

#### 2.3.3 강우전날 도로청소에 의한 노면퇴적물 부하량 저감 효과 분석

규칙적인 도로청소 주기와 구분하여 강우전날 도로청소를 실시할 경우의 노면퇴적물 수거량과 노면퇴적물 부하량을 산정하여 비교하였다. 대상강우는 유출이 일어나는 최소 강우(저류고 6 mm 이상의 강우량)를 대상으로 하고, 강우전날 노면퇴적물 축적량이 최대축적량에 도달하였을 경우에만 도로청소를 실시하는 것으로 하였다. 강우전날 도로청소를 실시할 경우의 연간 도로청소횟수와 노면퇴적물 수거량, 노면퇴적물 부하량을 구한 후, 동일한 노면퇴적물 부하량을 나타내는 도로청소 주기일수와 연간 도로청소횟수와 비교함으로써 강우전날 도로청소방법이 주기적인 도로청소에 비해 도로청소 횟수대비 부하량 저감량에 대해 얼마나 효과적인지 분석하였다.

Table 3. Properties of the study area

	Area (ha)	Width(m)	Slope	Depth of depression storage (mm)	Manning coefficient
Value	1	20	2%	6	0.015

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 ROADMOD 개발

ROADMOD는 크게 입력시트인 General Information, Rainfall, Drainage Area, Parameters, BMPs와, 중간계산단계 시트인 Water Budget, NPS, Removal Efficiency, BMP Budget, 출력시트인 Results시트로 구분되어 있다 (Fig. 1).

General Information 시트에서는 적용프로젝트의 기본적인 정보와 전체면적, 폭, 저류깊이, 기울기 등과 같은 적용대상에 대한 기본적인 정보를 입력한다. Rainfall 시트에서는 시간별 강우자료를 입력하는 곳으로 최대 입력기간은 1년으로 하였다. Drainage Area는 소유역별 도로면적 및 비점오염저감시설 면적을 입력하며 최대 10개의 소유역을 입력할 수 있

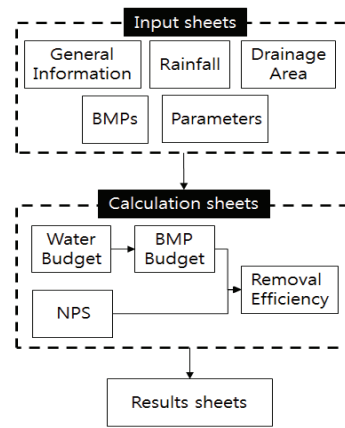


Fig. 1. The components of ROADMOD.

ROADMOD V 1.0		
Ji-Hong Jeon Andong National University		
<b>General Information</b>		
Site Name	TEST	
Scenario	ROAD SWEEPER	
<b>Area Information</b>		
	Area(m2)	Wide(m)
Road	10000	20
BMPs	0	
Slope	0.02	
<b>Design Storm</b>		
Design Storm	25.4	mm

(a) General Information sheet

#### Design BMPs

Grass swale	Recommended Value	User defined Value	Description
d1	0.15	0.15	Soil depth
n1	0.2	0.2	Soil porosity
d2	0.4	0.4	Course gravel layer depth
n2	0.2	0.2	Course gravel layer porosity
k1	13		Sub-soil infiltration rate (mm/hr)
T	2		Inflowing time (hr): recommended time
Dam H	0.3	0.3	Check dam height if installed
Storage Vol (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0.136	0.41	= As(d1*n1+d2*n2+k1*T/1000)

Vegetated strips	Recommended Value	User defined Value	Description
Storage Vol	0.031	0.031	S of D-soils (m): Potential max. retention

Bioretention	Recommended Value	User defined Value	Description
d1	0.38	0.38	Ponded depth (m)
n1	0.2	0.2	Top soil porosity
d2	0.3	0.3	Top soil depth (m)
d3	0.6	0.6	Course gravel layer depth
n2	0.32	0.32	Course gravel layer porosity
Storage Vol (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0.632	0.632	=As(d1+n1*d2+n2*d3)

(b) BMPs sheet

Treatment efficiency by Vegetated filter strips (Calculated by equation with width)											
Pollutant	DA1	DA2	DA3	DA4	DA5	DA6	DA8	DA9	DA10	DA11	
BOD	37%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TSS	59%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
T-N	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
T-P	36%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

source: Desbonnet et al., 1994. Vegetated buffers in the coastal zone: a summary review and bibliography. Coastal Resources Center. University of Rhode Island, RI. This values are automatically calculated by equation.

Street sweeping		
Interval (days)	30	
Removal efficiency (%)	Coarse	75.1
	Sand	60
	Silt, clay	50

Maximum possible buildup		
Max. possible buildup (kg/ha)	SS	938.7
	BOD	
	T-N	
	T-P	

Initial buildup		
Antecedent dry days	16	
Initial buildup (kg/ha)	SS	668
	BOD	
	T-N	
	T-P	

Build-up Parameter	Items	Build-up	Washoff
C1	SS	532.8	0.015
	BOD		
	T-N		
	T-P		
C2	SS	0.79	0.9
	BOD		
	T-N		
	T-P		

Manning coefficient	Depression storage(mm)	
Road	0.01	6

(c) Parameters sheet

Fig. 2. Screen shots of ROADMOD.

다. BMPs 시트에서는 도로비점오염물질을 처리할 수 있는 다양한 최적관리기법의 면적과 제원 등을 입력하는 곳이다. BMPs로서 식생수로, 식생여과대, 식생체류지, 나무여과박스, 침윤트렌치, 투수포장 등을 포함하고 있다. 각 BMP별 설계 항목별 값을 입력하면 저류공간을 계산한다. BMP별 설계항목과 이에 따른 저류공간 계산은 저영향개발기법 설계 가이드라인(ME, 2016)을 준용하였다. BMP의 항목별 제원은 Recommended value와 User defined value로 구분하였는데, Recommended value는 Jeon and Seo (2018)가 추천한 값을 사용하였으며, User defined value는 실제 모형 사용자가 입력하는 값으로 BMP의 용량계산은 User defined value에 의해 계산되어 진다. Parameters 시트는 모형 계산에 필요한 다양한 입력값을 입력하는 곳으로 도로청소 주기와 제거효율, 오염물질 축적과 유실 등과 관련된 모형입력자를 포함한 모형입력시트이다.

Water budget시트와 NPS에서는 각 소유역별 유출량과 비점오염물질부하량을 각각 계산하는 시트이며, 도로청소에 의한 저감량은 NPS에서 계산된다. BMP Budget시트에서는 Water budget에서 계산된 소유역별 유출량과 BMPs에서 계산된 BMP별 저류용량에 의해 BMP에 의해 저감된 유출량저감효율( $E_s$ )을 계산하는 시트이다. Removal Efficiency에서는 NPS에서 계산된 비점오염물질부하량과 Parameters 시트의 BMP별 수질저감효율을 이용하여 소유역별 수질저감효율( $E_T$ )를 계산하여 BMPs적용 후의 비점오염물질 부하량을 계산한다.

Results시트에서는 모형에서 모의된 유출량과 비점오염부하량, 도로청소에 의해 수거된 퇴적물량 등 다양한 모형의 결과를 출력한다.

Table 4. Calibrated buildup parameters for equation (5)

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
Calibrated values	432.9	532.8	0.79

### 3.2 ROADMOD 적용성 평가

#### 3.2.1 퇴적물 축적 및 강우시 유실

Kang and Kang (2014)의 시간별 도로노면 퇴적량 실측 자료를 이용하여 식(5)를 보정한 결과는 Fig. 3과 Table 4와 같다. 시간에 따른 도로노면의 축적량 실측은 옆지점으로 옮겨가면서 측정하기 때문에 같은 지점에서 측정할 수 없다. 또한 비교적 굵은입자의 퇴적물이 단위면적당 퇴적물량에 큰 영향을 미치기 된다. 이러한 도로노면 퇴적물량의 실측에서의 한계점을 고려할 때, 도로노면 퇴적물 축적은 멱함수에 의해 결정계수 0.74로 적절히 표현되는 것으로 나타났다. 최대한계축적량은 12.5일 측정기간으로 결정짓기에는 한계가 있지만 Fig. 3(a)의 마지막 3개의 측정자료에서 정점을 나타내었으며 3개 측정값을 평균값인 432.9 kg/ha를 최대한계축적량으로 결정하였다.

강우시 유실 보정을 위해 Kang and Kang (2014)이 측정한 강우 전·후의 퇴적물량을 이용하였다. 강우 후의 도로노면 퇴적량 축적은 건기시의 측정보다 더욱 힘들기 때문에 가용할 수 있는 2개의 자료를 이용하였으며 실측치와 예측치는 Table 5, 식(6)의 보정값은 Table 6과 같다. 두 개의 강우의 총량은 각각 46.4 mm, 6.8 mm 였으며, 강우사상 46.4 mm의 강우 전 노면퇴적물량은 688 kg/ha였으며 강우후 실측 퇴적물량은 411.3 kg/ha, 예측 퇴적물량은 400.0 kg/ha로 상대오

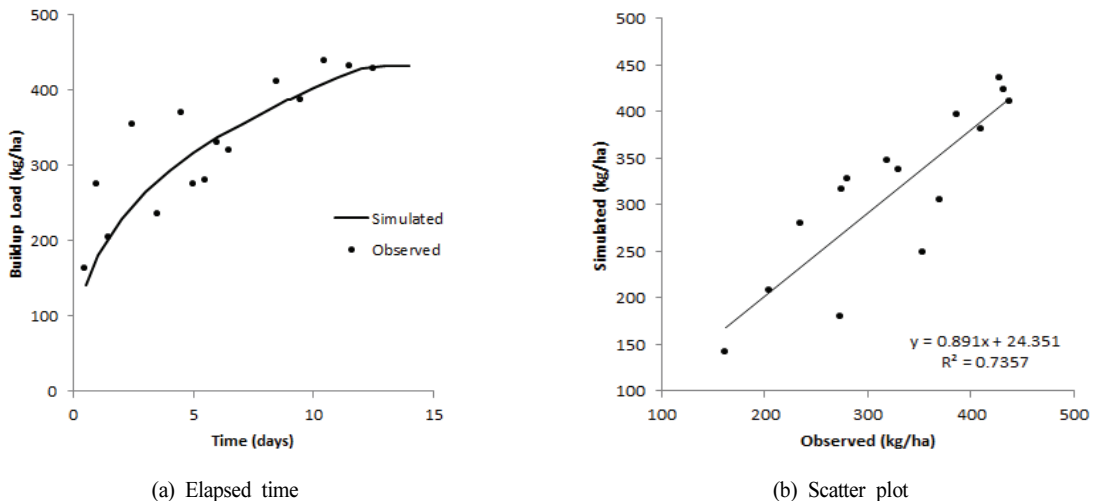


Fig. 3. Comparison between the observed and simulated dust and dirt buildup on the road.

Table 5. Relative errors between the observed and simulated values

Date	Amount of rainfall (mm)	Dust and Dirt before rainfall event (kg/ha)	Dust and Dirt before rainfall event (kg/ha)		relative error (%)
			Observed	Simulated	
Jun. 1~4, 2014	46.4	668	411.3	400.0	-2.7
Oct. 15~16, 2014	6.8	416.8	415.8	413.5	-0.6

차 -2.7%인 것으로 나타났다. 강우사상 6.8 mm의 강우 전·후 실측 퇴적물량은 각각 416.8 kg/ha, 413.5 kg/ha였으며 강우 후 예측퇴적물량은 413.5 kg/ha로 상대오차 -0.6%인 것으로 나타났다. 두 강우사상에 대하여 상대오차 ±3% 이내로 비록 제한된 측정자료이지만 본 연구에서 개발된 ROADMOD는 퇴적물 유실을 적절히 모의하는 것으로 나타났다.

3.2.2 ROADMOD와 SWMM의 장기모의 비교

ROADMOD와 SWMM의 연간 총 지표유출량과 노면퇴적물 부하량의 모의결과는 Table 7과 같다. 연간 총 지표유출량과 노면퇴적물 부하량에 대한 상대오차는 각각 14%, 2%인 것으로 나타나 ROADMOD 또한 연간유출량과 노면퇴적물의 부하량을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

ROADMOD와 SWMM에 의해 모의된 월별 지표유출량과 노면퇴적물 비점오염부하량을 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. ROADMOD의 월별 모의결과는 SWMM의 모의결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 지표유출량과 노면퇴적물 부하량 모의 결과에 대한 결정계수는 각각 0.99, 0.81인 것으로 나타

났다(Fig. 5).

3.3 도로청소 효과분석

3.3.1 퇴적물 입자분포

청소주기를 4일로 가정했을 경우의 강우시 노면퇴적물 부하량과 도로청소에 의한 수거퇴적물의 입도분포별 차지하는 비율은 Table 8과 같다. 연간 총 노면퇴적물 부하량은 1,772.7 kg/ha이며 이 중 2.9%(50.9 kg/ha)가 굵은입자이며, 89.4%(1,584.7 kg/ha)가 중간입자, 6.4%(112.6 kg/ha)가 미세입자인 것으로 나타났다. 청소차에 의한 연간 총 노면퇴적물 수거량은 15,834.0 kg/ha이며 이 중 4.8%(763.8 kg/ha)가 굵은입자이며, 89.4% (1,584.7 kg/ha)가 중간입자, 6.4% (112.6 kg/ha)가 미세입자인 것으로 나타났다. 순수하게 노면에서 퇴적되는 퇴적물의 입자크기별 비율과 강우시 노면퇴적물의 유출량의 입자크기별 비율을 비교하면, 굵은입자는 노면퇴적물 축적량 4.1%에서 노면퇴적물 부하량 2.9%로, 중간입자는 91.2%에서 89.4%로 비율적인 측면에서 감소한 반면, 미세입자는 4.7%에서 6.4%로 증가하였다. 이는 도로청소시 입자크

Table 6. Calibrated washoff parameters for equation (6)

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
Calibrated values	0.015	0.9

Table 7. Comparison between annual surface runoff and sediment load by ROADMOD and SWMM

	Surface runoff (mm)			Sediment load (kg)		
	ROADMOD	SWMM	RE	ROADMOD	SWMM	RE
Annual	757.0	666.7	14%	1,734.0	1,696.0	2%

Table 8. Particle size distribution of the sediment collected by the sweeper and loaded by stormwater (unit: kg/ha)

	Total	Coarse (>2 mm)	Sand (63 μm ~ 2 mm)	Silt, clay (<63 μm)
Sediment loaded by storm water	1,772.7	50.9 (2.9%)	1,584.7 (89.4%)	112.6 (6.4%)
Sediment collected by sweeper	15,834.0	763.8 (4.8%)	14,629.8 (92.4%)	440.4 (2.8%)

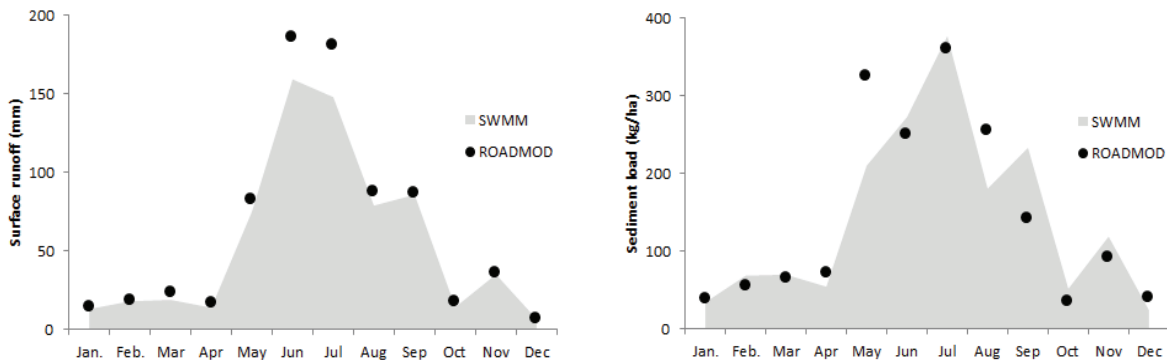


Fig. 4. Comparison between surface runoff and sediment load simulated by ROADMOD and SWMM.

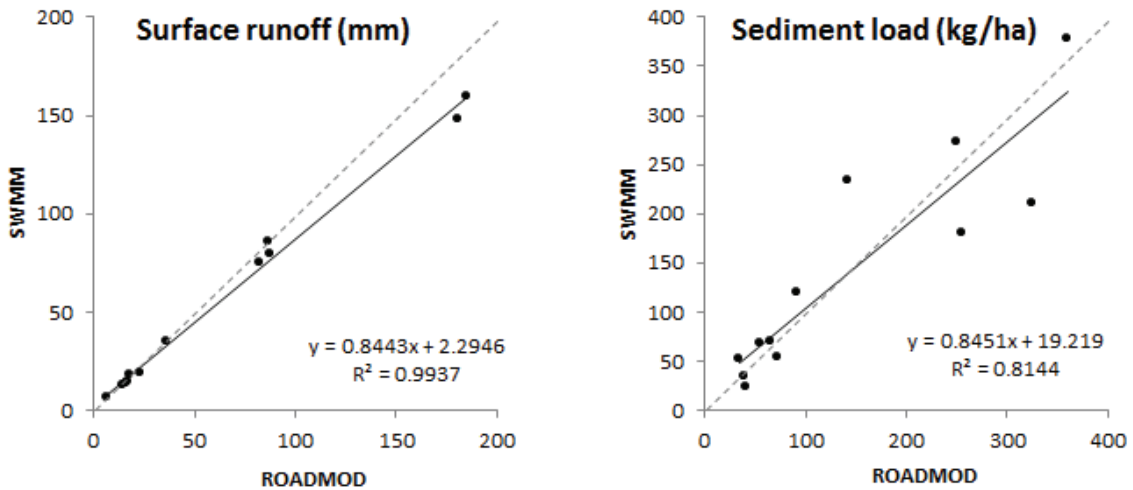


Fig. 5. Scatter plots of simulated surface runoff and sediment load by ROADMOD and SWMM.

기별 수거효율이 영향을 미쳤는데, 굵은입자와 중간입자의 수거효율은 평균수거효율인 46.6%보다 높은 수거효율을 나타내어 더 높은 비율로 수거되었기 때문이며, 미세입자는 평균수거효율보다 낮은 수거효율을 나타내어 더 낮은 비율로 수거되었기 때문이다. 이는 수거된 퇴적물의 입자크기별 비율에서도 잘 설명이 되는데, 굵은입자와 중간입자의 비율은 퇴적물 축적비율보다 높은 값인 각각 4.8%, 92.4%를 나타내었으며, 미세입자의 비율은 축적비율보다 낮은 값인 2.8%를 나타내었다. 일반적으로 도로노면퇴적물에 오염물질이 흡착되어 있으며 미세입자에서 상대적으로 높은 중금속 농도를 나타내는데, Kang and Kang (2014)의 연구에 따르면 중금속 15개 항목중 불검출된 Cd와 Ag를 제외한 모든 수질항목에서 미세입자(<63 μm)가 굵은입자(>2 mm)와 중간입자(63 μm~2 mm)보다 상대적으로 높은 농도를 나타내었다고 보고하고 있다. 따라서, 도로비점오염원 관리입장에서는 도로청소의 경우 수거율이 25.8%로 가장 낮은 미세입자 수거율을 향상시키는 것이 도로에서의 비점오염부하량을 효율적으로 저감시키는 방법 중 하나이다.

3.3.2 도로청소 주기별 노면퇴적물 부하량

도로청소 주기에 따른 도로청소차에 의한 노면퇴적물 수거량 모의 결과는 Fig. 6과 같다. 도로청소 주기 8일을 기준으로 8일 이내의 경우 청소주기가 짧을수록 수거되는 노면퇴적물량이 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였으며, 8일 이상의 주기에서는 청소주기의 변화에 따른 노면퇴적물량의 변화는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 퇴적물 축적량은 Fig. 3 (a)에서 보는 바와 같이 축적초기에는 상대적으로 높은 축적량을 나타내기 때문이다.

도로청소주기가 길어질수록 연간 노면퇴적물 부하량은 증가하는 경향을, 도로청소에 의한 노면퇴적물 저감효과는 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 도로청소 주기를 2일~30일 사이로 할 경우 노면퇴적물 부하량은 3~71%의 저감효율을 나타내었다(Table 9). 노면퇴적물 부하량은 노면퇴적물 축적량에 비해 그래프가 매끄럽지 못하고 상대적인 변동성을 나타내었다.

도로청소주기 8일을 기준으로 8일이내의 청소주기에서는 청소주기가 짧을수록 노면퇴적물의 제거효율이 크게 증가하

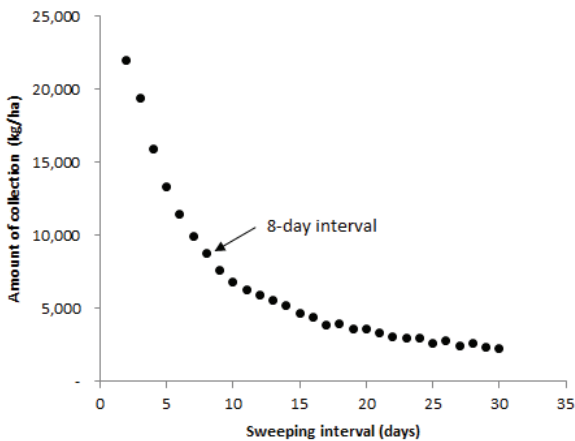


Fig. 6. Amount of sediment collected by sweeper according to sweeping interval.

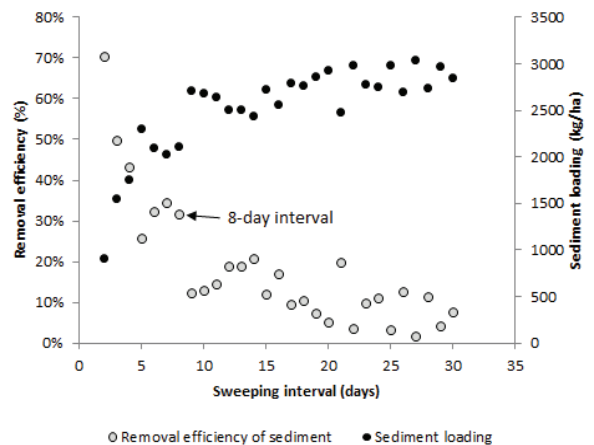


Fig. 7. Removal efficiency and sediment loads from the road according to sweeping interval.



는 것으로 나타났으며, 8일 이상의 청소주기에서는 제거효율은 상대적으로 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 이는 도로청소주기를 최소 8일 이내로 할 경우 노면퇴적물 부하량을 효율적으로 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다. ME (2012)의 청소주기에 따른 총부유물질 저감효율을 분석한 결과에 의하면 청소주기가 10일 이상이 되면 노면퇴적물 배출 부하량의 개선효과가 없는 것으로 보고하였다. Kang et al. (2012)은 고속도로의 청소 주기에 따른 노면퇴적물의 축적량을 평가한 결과 4~6일 사이의 도로청소주기가 강우시 노면퇴적물 부하량을 저감시키는데 적절한 것으로 보고한 바 있다.

**3.3.3 강우전날 도로청소에 의한 노면퇴적물 부하량 저감 효과 분석**

비점오염부하 측면에서 짧은 도로청소 주기뿐만 아니라 강우전날 도로청소는 도로노면에 쌓인 퇴적물의 양을 최소화하여 강우시 노면퇴적물 유출을 효과적으로 저감시킬 수 있다. Table 10은 도로청소 주기 25일과 26일인 경우의 강우전날 청소가 이루어진 횟수와 이에 따른 노면퇴적물 수거량 모의 결과를 나타낸 결과이다. 두 경우 모두 연간 14회의 도로청소가 시행되었으며, 이 중 25일 주기의 도로청소는 강우전날 도로청소가 1회 시행되어 162.7 kg의 노면퇴적물이 강우전날 수거된 것으로 모의되었다. 이에 반해, 도로주기가 1일 더 긴 26일의 경우 강우전날 도로청소가 4회 시행되어 1,009.5 kg의 노면퇴적물이 수거되었다. 청소주기 26일의 강우전날 4회 수거량 모두 수거직전의 퇴적물이 최대퇴적량에 도달한 후 도로청소가 이루어진 것으로 나타나 강우전날 도로청소에 의해 수거된 양이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 따라서, 26일 주기의 도로청소는 11일 주기의 도로청소를 제외하고 9일~30일 도로청소 주기 중 강우시 노면퇴적물 유출량의 저감효과(13%)가 가장 높은 것으로 모의 되었다 (Table 9).

노면퇴적물의 최대축적량인 432.9 kg/ha에 도달한 경우 유출이 발생하는 강우사상(강우량 6mm이상)의 강우발생전날 도로청소가 이루어진 것으로 가정하의 모의한 결과는 Table 11과 같다. 강우발생 전날 도로청소가 이루어질 경우 강우시

**Table 9.** Removal efficiency of sediment loading from the road according to the sweeping interval

Interval (days)	Removal efficiency (%)	Interval (days)	Removal efficiency (%)	Interval (days)	Removal efficiency (%)
2	71	12	19	22	4
3	50	13	19	23	10
4	43	14	21	24	11
5	26	15	12	25	3
6	32	16	17	26	13
7	35	17	10	27	2
8	32	18	10	28	10
9	12	19	7	29	4
10	13	20	5	30	8
11	15	21	20	-	-

노면퇴적물 부하량은 1,702.2 kg/ha, 수거 노면퇴적량은 5,250.5 kg/ha이며, 연간 26번의 도로청소가 이루어진 것으로 모의되었다. 4일 간격의 도로청소방법이 강우시 노면퇴적물 부하량 1753.9 kg/ha로 유사한 값을 나타내었으며 이때 연간 91번의 도로청소를 실시한 것으로 나타났다. 퇴적물수거량을 기준으로 하였을 경우 14일 간격의 도로청소방법이 연간 5187.2 kg/ha로 유사한 값을 나타내었으며 연간 26번의 도로청소를 필요로 하였다. 강우전날 도로청소 방법은 비점오염저감효과 측면에서 매우 효율적인 것으로 나타났다. 강우전날 도로청소는 14일 간격의 도로청소 방법과 동일한 청소횟수인 26회가 이루어진 반면 4일 간격의 91회 도로청소 횟수와 동일한 노면퇴적물 저감효과를 나타내었다. 횟수만을 고려하였을 경우 연간 65회 도로청소 하지 않아도 동일한 저감효과를 나타내는 것으로 모의되었다.

**4. Conclusion**

본 연구에서는 도로노면 퇴적물의 축적과 강우시 유실, 최

**Table 10.** Comparison between the amount of collected sediment according to 25- and 26-day sweeping interval

Sweeping interval	Number of total sweeping	Number of sweeping the day before rainfall	Amount of collected sediment (kg)
25-day	14	1	162.7 kg
26-day	14	4	1,009.5 kg

**Table 11.** Comparison between the amount of sediment load and sediment collected by sweeping on the day before rainfall and periodic sweeping

	Sediment load (kg/ha)	Collection sediment (kg/ha)	Number of sweeping
Sweeping on the day before rainfall	1,702.2	5,250.5	26
4-day interval	1,753.9	15,922.6	91
14-day interval	2,446.2	5,187.2	26

적관리기법, 도로청소 등에 의한 도로 비점오염부하량을 모의할 수 있는 ROADMOD를 개발하여 도로청소 주기와 강우 전날 도로청소에 의한 강우시 노면퇴적물 부하량 및 저감효과를 분석하였다.

ROADMOD는 HSPF와 SWMM의 유출량과 오염물질의 축적과 유실과 관련된 기본공식을 사용하여 개발하였으며, 엑셀기반의 모형으로 사용자가 손쉽게 사용할 수 있도록 개발되었다. 세계적으로 널리 사용되고 있는 SWMM의 경우 노면퇴적물의 입자크기의 구분이 없으며, 도로청소는 주기적인 도로청소만 고려되며 사용자 정의에 따른 불규칙적인 도로청소는 고려할 수 없다는 단점을 가진다. 본 연구에서 개발된 ROADMOD는 노면의 퇴적물을 굵은입자(>2 mm), 중간입자(63  $\mu\text{m}$  ~ 2 mm), 미세입자(<63  $\mu\text{m}$ )로 구분하여 모의하도록 개발하였다. 또한 도로청소의 경우 주기적인 도로청소와 비주기적인 도로청소(사용자가 직접 청소 유무를 입력)를 고려할 수 있다. 모형의 적용성 평가결과 노면퇴적물 일별 축적량에 대하여 ROADMOD의 예측값과 실측값의 결정계수는 0.73을 나타내었다. 매우 한정된 실측자료의 강우 전·후 노면퇴적물량을 이용하여 ROADMOD의 노면퇴적물 유실공식에 대한 적용성을 평가한 결과 실측치와 예측치의 상대오차는 약 3%내외인 것으로 나타나 노면퇴적물의 축적과 유실관련 모의는 적용성이 있는 것으로 평가되었다. SWMM과의 1년간(2013년)의 장기간 모의결과를 이용하여 ROADMOD의 장기모의에 대한 평가를 실시한 결과 연간 유출량의 상대오차 14%, 강우시 노면퇴적물 부하량의 상대오차 2%를 나타내어 장기모의에 대하여 적용성이 있는 것으로 평가되었다.

입도분석결과 축적퇴적물의 경우 중간입자가 가장 큰 비율을 나타내었으며, 미세입자가 가장 낮은 비율을 나타내었다. 도로청소의 효율은 굵은입자, 중간입자, 미세입자 순으로 도로청소 후 남은 입자가 강우시 유출할 경우 굵은입자와 중간입자의 비율은 감소하고 미세입자의 비율은 증가하여 전체 입자의 6.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 환경적인 측면에서는 가장 많은 비중을 차지하는 2 mm이하의 중간입자와 미세먼지와 다량의 오염물질이 흡착되어 있는 미세입자의 도로청소효율을 증가시키는 것이 도로비점오염 저감대책 중 하나로 추천할 수 있다. 도로청소 주기별 노면퇴적량 저감효과를 분석한 결과 8일 이내에서 청소주기가 짧을수록 노면퇴적물 부하량 저감효과가 현저하게 감소하는 것으로 나타나 효율적인 노면퇴적물 부하량 저감을 위해서는 도로청소 주기를 8일 이내로 추천한다. 노면퇴적물 부하량 저감효과는 도로청소의 주기뿐만 아니라 강우사상 전날의 청소유무에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 유출이 발생하는 강우량이상의 강우사상 전날 노면퇴적량이 최대축적량일 경우 연간 26회의 도로청소를 시행할 경우 43%의 저감효과를 나타내었다. 노면퇴적물 부하량 저감효과측면에서는 4일 주기 연간 96회의 도로청소를 실시한 경우와 유사한 효과를 나타내었으며, 퇴적물 수거량 측면에서는 14일 주기의 도로청소와 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 강우직전의 도로청소는 도로청소의 횟수는 작은 반면 비점오염부하량의 저감효과를 극대화할 수 있다는 점에서 도로비점오염원관리 대책

중 하나로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 도시비점오염물질 모의에 널리 사용되고 있는 SWMM의 경우 상세한 모의가 가능하나 모형구동에 고도의 전문성을 필요로 하며 도로청소 모의의 경우 주기적인 청소만 반영할 수 있으나 불규칙적인 도로청소는 모형에서 반영할 수 없다. 본 연구에서 개발된 ROADMOD의 경우에는 주기적인 청소뿐만 아니라 비주기적인 청소 효과를 반영할 수 있으며 누구나 손쉽게 사용할 수 있도록 엑셀 기반으로 개발되어 보다 폭넓은 실무진들의 사용이 가능하다. 추후 추가적인 실측 자료를 이용한 모형의 적용성 평가 및 보완이 이루어진다면 ROADMOD를 이용하여 보다 효과적인 도로비점오염원 관리를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

이 논문은 2019학년도 안동대학교 해외과제연구보조금에 의하여 연구되었음.

## References

- Barrett, M., E., Irish, Jr. L. B., Malina, Jr., J. F., and Charbeneau, R. J. (1998). Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area, *Journal of Environmental Engineering*, 124(2), 131-137.
- Becher, K. D., Schnoebelen, D. J., and Akers, K. K. B. (2000). Nutrients discharged to the Mississippi river from Eastern Iowa watershed, 1996-1997, *Journal of The American Water Resources Association*, 63(1), 161-173.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L. Jr., Jobes, T. H., and Donigian, A. S. Jr. (2005). *HSPF Version 12.2 User's Manual*, EPA-July 2005. U. S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia 30605.
- Breault, R. F., Smith, K. P., and Sorensen, Jr. (2005). *Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, removal efficiencies by mechanical and vacuum-type sweepers*, US Department of the Interior, US Geological Survey, New Bedford, MA.
- Grottker, M. (1987). Runoff quality from a street with medium traffic loading, *Science Total Environment*, 59, 457-466.
- Gupta, K. and Saul, A. J. (1996). Specific relationships for the first flush load in combined swer flows, *Water Research*, 30(5), 1244-1252.
- Hemgren, L., Goonetilleke, A., and Ayoko, G. A. (2006). Analysis of heavy metals in road-deposited sediments, *Analytica Chimica Acta*, 571(2), 270-278.
- Irish, Jr. L. B., Barrett, M. E., Malina, Jr. J. F., and Charbeneau, R. J. (1998). Use of regression models for analyzing highway storm-water loads, *Journal of Environmental Engineering*, 124(10), 987-993.
- Jeon, J. H. and Seo, S. C. (2018). LIDMOD3 development for design and evaluation of low impact development, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(4), 383-391.

- [Korean Literature]
- Kang, H. and Kang, H. (2014). *Evaluation of Non-Point Source Pollution Reduction by Expressway Sweeping*, RT-2014-57-534.9607, Environment Research Division, Korea Expressway Corporation Research Institute, Korea. [Korean Literature]
- Kang, H., Lee, D., and Yoon, H. (2012). Effect of road sweeping on the abatement of runoff pollution loads from in the highway, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 26(6), 851-860. [Korean Literature]
- Kim, L. H. and Kang, J. (2004). Determination of event mean concentrations and pollutant loadings in highway storm runoff, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 20(6), 631-640. [Korean Literature]
- Kwon, H. G., Lee, J. W., Yi, Y. J., Shin, S. H., Lee, C. S., and Lee, J. K. (2012). The estimating MFFn by SWMM in the transportation area, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(3), 277-287. [Korean Literature]
- Kwon, H. G., Lee, J. W., Yi, Y. J., Yoon, Y. S., Lee, C. S., and Lee, J. K. (2011). The applicability for estimating MFFn by SWMM in the trunk road, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(5), 605-616. [Korean Literature]
- Lin, W., Ryu, S. W., Park, D. G., Lee, J., and Cho, Y. H. (2015). Performance evaluation of the runoff reduction with permeable pavements using the SWMM model, *International Journal of Highway Engineering*, 17(4), 11-18. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2012). *A feasibility of analysis of road sweeping for reducing non-point source pollution*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016). *The guideline of design of low impact development*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Prime Minister's Office and Ministry of Environment. (2004). *1<sup>st</sup> comprehensive NPS management plan*, Prime Minister's Office and Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Prime Minister's Office and Ministry of Environment. (2012). *2<sup>nd</sup> comprehensive NPS management plan*, 11-1480000-001222-01, Prime Minister's Office and Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Saget, A., Chebbo, G., and Bertrand-Krajewski, J. (1996). The first flush in sewer system, *Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on Sewer Solids-Characteristics, Movement, Effects and Control*, 58-65, Dundee, UK.
- Schueler, T. (Ed.) (1996). Stream channel geometry used to assess land use impacts in the Pacific Northwest, *Watershed Protection Techniques*, 2(2), 345-348.
- Shoemaker, L., Lahlou, M., Bryer, M., Kumar, D., and Kratt, K. (1997). *Compendium of tools for watershed assessment and TMDL development*, EPA841-B-97-006, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, USA, 13-14.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2015). *Storm water management model user's manual Version 5.1*, EPA/600/R-14/413b, United States Environmental Protection Agency.
- Won, M. (2020). *Analysis of contaminant reduction efficiency by streetsweeper using SWMM*, Master thesis, Andong National University, Andong, Korea. [Korean Literature]
- Yeung, Z., Kwok, R., and Yu, K. (2003). Determination of multi-element profiles of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF), *Applied Radiation and Isotopes*, 58(3), 339-346.
- Zhao, H., Yin, C., Chen, M., and Wang, W. (2009). Risk assessment of heavy metals in street dust particles to a stream network, *Soil and Sediment Contamination*, 18(2), 173-183.