

ROADMOD를 이용한 도로청소 및 모래여과시설에 의한 고속도로에서의 강우시 TSS 저감효과 분석

강희만¹ · 전지홍^{2,*}

¹한국도로공사 도로교통연구원 환경연구실 · ²국립안동대학교 환경공학과

Removal Efficiency of TSS Loadings from Expressway by Road Sweeping and Sand Filter Facility Using ROADMOD

Heeman Kang¹ · Ji-Hong Jeon^{2,*}

¹Korea Expressway Corporation Research Institute

²Department of Environmental Engineering, Andong National University

(Received 22 December 2022, Revised 28 December 2022, Accepted 28 December 2022)

Abstract

In this study, the removal efficiency of road sweeping and sand filter facility for removing total suspended solid (TSS) as nonpoint source pollution from expressway was evaluated for the last 10 years (2012~2021) using ROADMOD. ROADMOD is a screening level model and was calibrated for runoff rate and TSS loading both at the inlet, which is the loading from the drainage area, and the outlet, from the sand filter facility. The drainage area is 715 m² and the dimensions of sand filter facility are 1.5 m (wide) × 3.8 m (length) × 1.5 m (depth). The monitoring period for model calibration was the rainfall event during Aug. 31~Sep. 1, 2021 and the amount of rainfall was 74.5 mm. As a result of calibration, the determination coefficients (R^2) of the flow rate were 0.66 and 0.86, for the inlet and outlet, respectively, and those of TSS loading were 0.50 and 0.84, for the inlet and outlet, respectively. Considering that ROADMOD is a screening level model, the calibration results were reasonable to evaluate the best management practices (BMPs) on the expressway. Using ROADMOD simulation results for 2012~2021, the average yearly runoff rate from the expressway was 82% and removal efficiency was 9% for road sweeping, 35% for sand filter facility, and 39% for both road sweeping and sand filter facility.

Key words : Best management practices (BMPs), Expressway, Road-deposited sediment (SDR), Road sweeping, Sand filter facility

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

² 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

고속도로 노면퇴적물은 중금속과 같은 무기화합물질뿐만 아니라 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)와 polychlorinated biphenyl (PCB) 같은 유기화합물질을 함유하고 있으며 이는 강우유출수와 함께 수체 수질오염을 유발시킬 뿐만 아니라 비강우시 노면퇴적물의 재부유로 인한 대기 오염을 유발시킨다(Amato et al., 2010; Breault et al., 2005; Hengren et al., 2006; Zhao et al., 2009). Kang et al. (2021)은 우리나라 수도권 인근의 4개의 주요 고속도로를 대상으로 노면퇴적물의 입도분포와 도로청소에 의한 입도별 제거 효율을 분석하였다. 그 결과 다량의 오염물질을 함유하고 재부유가 가능한 75 μm 이하의 입자의 경우 도로청소에 의한 제거효율은 약 40%를 나타내었으며, 입자가 작을수록 제거효율이 낮은 것으로 보고하고 있다.

도로청소에 대한 노면퇴적물의 수거효율에 대한 연구가 진행되었는데, Kang et al. (2021)은 중부고속도로 83%, 경인고속도로 60.3%, 서해안고속도로 59.9%, 경부고속도로 88.7%로 전체평균 69.0%인 것으로 나타났으며, 도로청소의 수거효율은 도로 노면에 퇴적된 양과 노면의 거칠기에 따라 차이가 있는 것으로 보고하였다. Lee et al. (2012)는 중부내륙 고속도로를 대상으로 청소차량의 속도와 TSS 수거효율을 비교하였는데, 청소차 운전속도를 기존의 6 km/hr로 운행할 경우 TSS의 수거효율은 60%에 이르는 것으로 보고하였으며 청소차의 운전속도를 20 km/hr로 증가할 경우 수거효율이 4%로 급감하는 것으로 보고하였다. Kang and Jeon (2021)은 ROADMOD를 이용하여 도로청소 주기별 노면퇴적물의 비점오염저감효과를 분석하였는데, 청소주기가 8일을 기준으로 주기가 짧을수록 비점오염저감효과가 현저하게 증가하는 것으로 보고하였으며, 30일 주기일 경우에는 8%의 저감효과를 나타내었다. 또한 도로청소와 강우발생 전과의 간격이 짧을수록 도로청소에 의한 비점오염저감효과가 큰 것으로 분석하였는데, 강우발생 직전 도로청소를 실시할 경우 연간 26회의 청소만으로 43%의 저감효과가 있는 것으로 보고하였다.

고속도로에 설치된 비점오염저감시설의 처리효율에 대한 연구사례를 살펴보면, Son et al. (2009)는 와류+여과형 저감시설과 저류+여과형 저감시설에 대한 노면퇴적물의 저감효과가 각각 4%, 50%를 나타내었으며, 저감시설의 용량과 여재교체 등이 저감효율에 영향을 미친 것으로 판단하였다. Lee et al. (2014)은 도로유출수의 자연형 비점오염저감시설의 저감효율을 분석한 결과 식생수로와 빗물정원은 유출수가 발생하지 않아 100%의 저감효율을 나타내었으며, 총부유물질(TSS) 기준으로 인공습지는 83~93%, 모래여과는 60%의 저감효과가 있는 것으로 보고하였다. Park et al. (2016) 고속도로에서의 비점오염물질 저감을 위한 침투도랑의 성능을 평가한 결과 TSS 88%, chemical oxygen demand (COD) 94%, biochemical oxygen demand (BOD) 85%, total nitrogen (TN) 80%, total phosphorous (TP) 75%의 저감효과를 나타낸 것으로 보고 하였다. 그러나 고속도로 유출수의

비점오염저감시설 저감효과는 모니터링 기반의 특정 강우에 대한 저감효과이며 다양한 강우량에 의한 미처리 월류수에 대한 고려가 충분히 반영되지 않았으며, 연간 저감효과에 대한 평가는 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구에서는 도로의 노면퇴적물 오염부하량과 비점오염저감시설의 저감효과를 평가하기 위하여 개발된 ROADMOD를 적용하여 도로청소와 모래여과시설에 의한 강우시 노면퇴적물에 의한 TSS 저감효과를 10년(2012~2021년) 동안 모의한 후 연평균 TSS 저감효과를 분석하였다.

2. Metrials and Methods

2.1 ROADMOD 개요

2.1.1 지표유출량

지표유출량은 식(1)~(2)와 같이 미국자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service, NRCS)의 유효유량인 직접유출고를 산정한 후 유역면적을 곱하여 유출량을 산정하였다(NRCS, 1986).

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S}, P_e \geq 0.2S \quad \text{식(1)}$$

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad \text{식(2)}$$

여기서, P_e 는 직접유출고(mm), P 는 강수량(mm), S 는 최대잠재보유수량(mm), CN 은 유출곡선지수(무차원)이다.

2.1.2 비점오염저감시설내 물수지분석

비점오염저감시설내 물수지 분석은 식(3)과 같다. 배수구역에서 유출되는 유량이 시설유입유량이며 미처리월류량, 증발산량, 저류량, 처리후방류량으로 물질수지식을 구성하였다.

$$W_i = W_{by} + E_T + S_T + W_o \quad \text{식(3)}$$

여기서, W_i 는 시설유입유량(m^3), W_{by} 는 미처리월류량(m^3), E_T 는 증발산량(m^3), S_T 는 시설내 저류량(m^3), W_o 는 처리 후 방류량(m^3)이다. 최종적으로 비점오염저감시설을 통해 유출되는 유량은 미처리월류량과 처리 후 방류량의 합이다.

2.1.3 오염물질 퇴적량

대표적인 도시비점오염 예측 모형인 Storm Water Management Model (SWMM)에서는 노면에서의 오염물질 퇴적량을 멱함수, 지수함수, 포화함수 등으로 구분하여 모형 사용자가 선택하여 적용할 수 있도록 하고 있다. 국내의 연구사례에서는 도로에서의 노면퇴적물 축적량이 멱함수를 따르는 것으로 보고(ME, 2012; Won, 2020)되고 있어, ROADMOD의 오염물질 퇴적량은 멱함수에 의해 모의되며 식 (4)와 같다(Kang and Jeon, 2021).

$$B = \text{Min}(C_1, C_2 t^{C_3}) \quad \text{식(4)}$$

여기서, C_1 은 가능최대축적량, C_2 는 축적율상수, C_3 는 시간 지수, t 는 건기일수이다.

2.1.4 오염물질 유출량

도로에서의 비점오염물질 유출은 전형적인 초기세척효과를 나타내는 것으로 보고(Kwon et al., 2012; Kwon et al., 2011)되고 있으며, ROADMOD에서는 초기세척효과를 모의할 수 있는 SWMM에서 사용되는 지수함수를 사용하며 식(5)와 같다(Kang and Jeon, 2021).

$$W = C_1 q^{C_2} B \tag{5}$$

여기서, W 는 강우시 유출부하량, C_1 은 유출계수, C_2 는 유출지수, q 는 단위면적당 유출량(mm/hr), B 는 도로노면에 축적된 오염물질량이다.

2.1.5 비점오염저감시설 저감효과

ROADMOD의 비점오염시설에 의한 저감효과모의는 크게 강우유출수의 유출량 저감에 의한 부하량 저감효과와 비점오염저감시설내에서 물리·생화학적 반응 등에 의한 수질저감효과를 각각 모의하며 식(6)~(8)과 같다(Kang and Jeon, 2021).

$$R_S = L_{DA} \times E_{wv} \tag{6}$$

$$R_T = L_{DA} \times E_{wq} \tag{7}$$

$$E_{wv} = \frac{W_T}{E_T + S_T + W_T} \times 100(\%) \tag{8}$$

여기서, R_S 는 유출량 저감에 의한 비점오염저감시설 저감량, L_{DA} 는 배수구역에서의 부하량,

E_{wv} 는 비점오염저감시설에 의한 유출량저감효율, R_T 는 비점오염저감시설의 수질처리에 의한 부하량 저감량, E_{wq} 는 침전/필터에 의한 시설별 수질저감효율이다.

2.2 연구방법

연구대상지역은 경기도 광주시 곤지암읍 일대에 위치한 중부고속도로에서의 비점오염물질을 처리하는 모래여과시설이다. 모래여과시설의 제원은 폭 1.5 m, 길이 3.8 m, 깊이 1.5 m이며 면적은 164 m²으로 모래여과시설로 유입되는 고속도로 배수면적은 715 m²이다. 강우시 채수방법은 국립환경과학원의 강우유출수 조사방법(NIER, 2012)에 의해 이루어졌으며, 시간에 따른 고속도로에서의 노면퇴적량을 모니터링하였다. 강우시 모니터링은 2021년 8월 31일 12시~9월 1일 11시까지 강우 74.5 mm에 대하여 모래여과시설의 유입수와 유출수를 모니터링하였다.

모델의 보정은 모래여과시설의 유입수와 유출수의 유량과 TSS 부하량을 대상으로 실시하였다. 강우시 고속도로에서의 유출수가 모래여과시설로 유입되기 때문에 모래여과시설의 유입수는 고속도로에서의 유출수와 동일하고 간주하였다. 모델의 입출력 자료의 시간간격이 1시간이기 때문에 모델결과 시간과 동일한 시간의 모니터링자료를 선택하여 보정하였다. 보정결과의 적용성은 실측치와 예측치의 분산도와 결정계수를 이용하여 평가하였으며 결정계수는 식(9)에 의해 계산하였다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{9}$$

여기서, y_i 은 실측치, \bar{y} 은 실측치의 평균, \hat{y}_i 는 예측치이다.

보정된 모델을 이용하여 2012년~2021년 10년 동안의 도로에서의 연평균 유출량과 모래여과시설과 도로청소에 의한 TSS 저감효과를 분석하였다. Korea Express Corporation Research Institute (2019)는 수도권 인근 4개의 고속도로에서 도로청소시 노면퇴적물 수거율이 평균 69%인 것으로 보고하고 있으며 본 연구에서도 도로청소시 노면퇴적물 수거율을 69%로 하였다. 30일 간격의 도로청소만 실시한 경우 시나리오1, 모래여과시설을 설치한 경우 시나리오2, 모래여과



(a) Drainage area



(b) Sand filter facility

Fig. 1. Study area.

Table 1. Descriptions of scenarios

Scenario	Description
Scenario 1	Road sweeping (30-days interval)
Scenario 2	Sand filter facility
Scenario 3	Road sweeping (30-days interval) + sand filter facility

시설과 도로청소를 모두 실시한 경우 시나리오3으로 하여 무대책과 비교하여 노면퇴적물 부하량 저감효과를 분석하였다(Table 1).

3. Results and Discussion

3.1 수질모니터링

2021년 8월 31일 13시 강우시 모래여과시설의 유입수와 유출수의 시간에 따른 유량과 SS의 모니터링 결과는 Table 2와 같다. 유입수의 TSS 농도변화는 11.5~94.7 mg/L의 범위를 나타내었으며, 유출수의 TSS 농도변화는 2.0~6.4 mg/L의 범위를 나타내었다. 유입수와 유출수의 유량가중평균농도(Event mean concentration, EMC)는 각각 4.5 mg/L, 54.2 mg/L 인 것으로 나타났으며, EMCs를 비교해 볼 때, 모래여과시설에 의한 수질농도 저감효과는 92%인 것으로 나타났다.

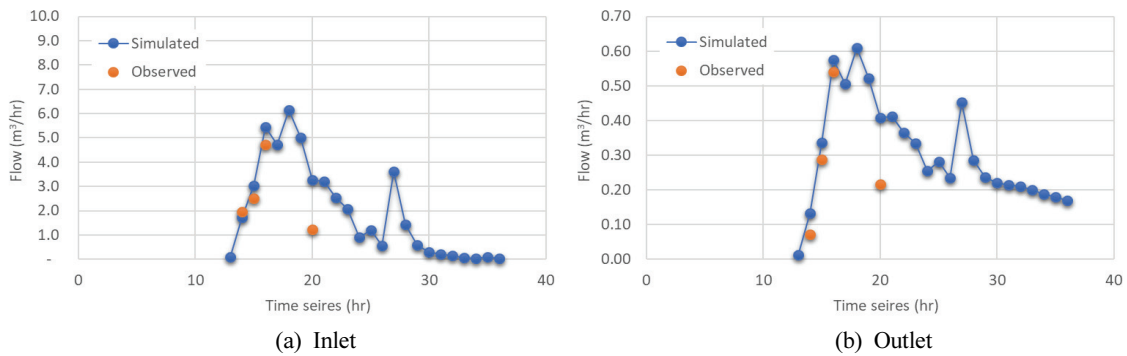


Fig. 2. Comparison of hourly simulated and observed flow at inlet and outlet of sand filtration.

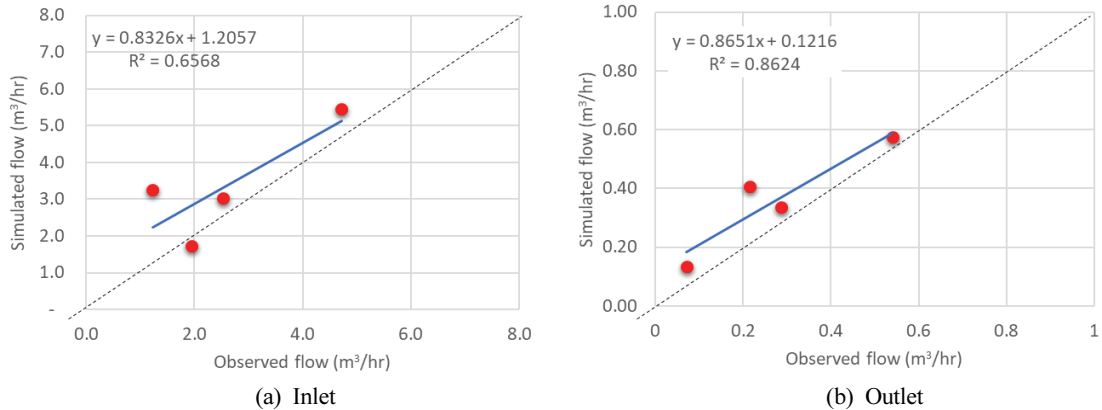


Fig. 3. Scatter plot of hourly simulated and observed flow at inlet and outlet of sand filtration.

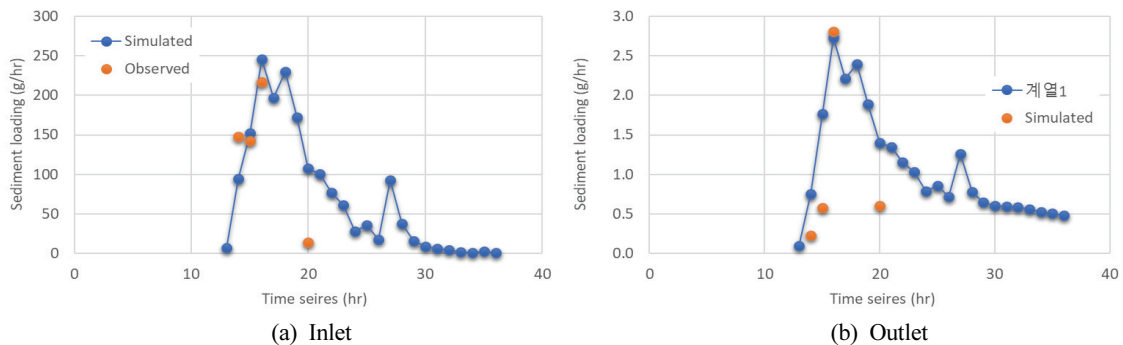


Fig. 4. Comparison of hourly simulated and observed sediment loading at inlet and outlet of sand filtration.

Table 2. Monitoring results of inlet and outlet of sand filtration for removing nonpoint source pollution from highway

Inlet				Outlet			
Time	Flow (m ³ /hr)	SS (mg/L)	Loading (g/hr)	Time	Flow (m ³ /hr)	SS (mg/L)	Loading (g/hr)
14:00	1.94	76.0	147.7	14:05	0.07	3.2	0.2
14:05	1.91	67.3	128.4	14:15	0.14	4.8	0.7
14:10	1.33	46.7	62.2	14:30	0.18	5.2	0.9
14:15	1.15	54.0	62.2	15:00	0.29	2.0	0.6
14:30	1.91	94.7	180.7	16:00	0.54	5.2	2.8
15:00	2.52	56.7	142.9	18:00	0.29	6.4	1.8
16:00	4.72	46.0	216.9	20:00	0.22	2.8	0.6
18:00	1.55	22.5	34.8				
20:00	1.22	11.5	14.1				
EMC (mg/L)		54.2		EMC (mg/L)		4.5	

3.2 ROADMOD 보정

모래여과시설의 유입수와 유출수에 대한 시간에 따른 유출량 보정결과는 Fig. 2와 같으며 실측치와 예측치의 분산도는 Fig. 3과 같다. 유입수와 유출수의 유량에 대한 결정계수는 각각 0.67, 0.86인 것으로 나타났다. 모래여과시설의 유입수와 유출수의 시간에 따른 TSS 부하량 보정결과는 Fig. 4와 같으며 분산도는 Fig. 5와 같다. 유입수와 유출수의 TSS 부

하량에 대한 결정계수는 각각 0.50, 0.84인 것으로 나타났다. 도로에서의 강우유출수는 초단위로 시시각각 강우에 따라서 변화하기 때문에 모니터링 자료는 측정 순간의 유량과 부하량이며 모델의 결과는 시간 평균의 유량과 부하량인 것을 고려해 볼 때, 예측치를 실측치와 일치시키는 과정은 매우 어려운 과정일 것이다. ROADMOD는 상세모델(Detail model)이 아닌 단순모델(Simple model)로써 스크리닝 단계에서 도

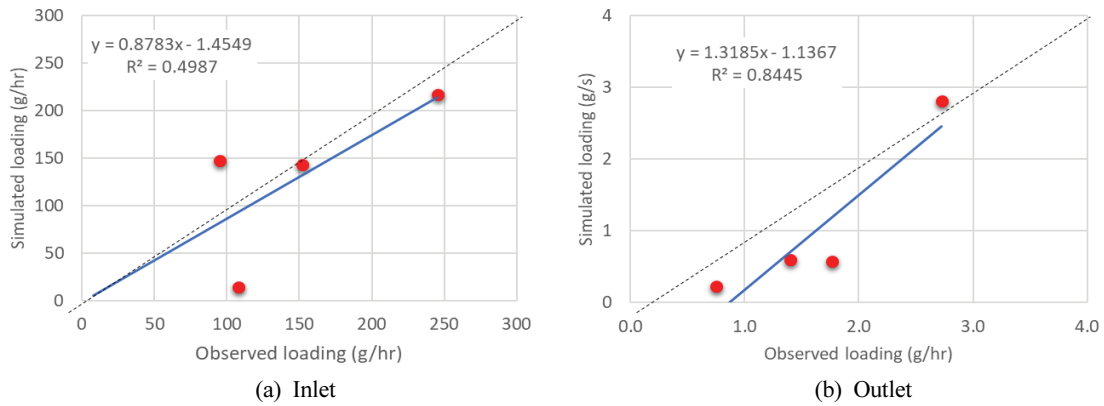


Fig. 5. Scatter plot of hourly simulated and observed sediment loading at inlet and outlet of sand filtration.

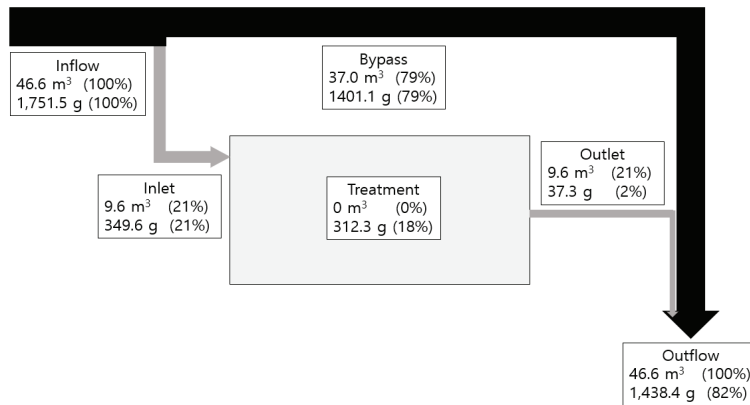


Fig. 6. Mass balance analysis of TSS loading in sand filter facility for rainfall event during calibration period.

로에서의 BMPs의 상대적인 비교 평가에는 적용성이 있는 것으로 판단된다.

2021년 8월 31일~9월 1일 강우(강우량 74.5 mm)에 대한 물질수지분석 결과는 Fig. 6과 같다. 배수구역에서 유출된 유량 및 노면퇴적물량은 각각 46.6 m³, 1,751.5 g이었으며 이중 21%인 9.6 m³과 349.6 g이 모래여과시설로 유입되고 나머지 79%는 미처리 월류수로 유출되었다. 모래여과시설로 유입된 노면퇴적물은 312 g이 처리되어 전체 유입량의 18%를 처리하였으며 처리효율은 89%를 나타내었다. 미처리 월류수와 처리수의 합인 TSS 유출부하량은 1,438.4g으로 전체량의 82%를 차지하였다.

3.3 고속도로 유출율

고속도로에서의 과거 10년간의 연간 강수량과 유출량, 유출율은 Table 3과 같다. 연간유출율은 0.79~0.86의 범위를 나타내었으며, 유출율은 강수특성에 영향을 받아 연간강우량이 많을수록 유출율이 높았다. 10년 평균 유출율은 0.82였다. Huber and Helmreich (2016)는 도로에서의 유출율은 0.9로 나타났으며, Lee (2013)는 아스팔트의 유출율 범위를 0.70~0.95로 제시한 결과와 유사한 유출율을 나타내었다.

3.4 강우시 고속도로 노면퇴적물에 의한 TSS 부하량

고속도로에서의 2012년에서 2021년 사이의 강우시 연간 단위길이당 TSS 부하량은 Table 4와 같다. 무대책의 경우 연평균 545.6 kg/km·yr, 시나리오1(도로청소)의 경우 연평균 495.0 kg/km·yr, 시나리오2(모래여과시설)의 경우 연평균 357.0 kg/km·yr, 시나리오3(도로청소+모래여과시설)의 경우 연평균 333.3 kg/km·yr가 강우시 강우유출수와 함께 노면퇴적물에 의해 유출되는 것으로 모의되었다(Table 4).

3.5 시나리오별 TSS 유출저감효과

시나리오별 TSS 유출저감효과는 Table 5와 같다. 30일 간격으로 도로청소만 실시한 시나리오 1의 경우 무대책시 강우에 의해 유출되는 TSS 부하량과 비교하여 TSS 저감효과

Table 3. Yearly runoff rates

	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff rates
2012	1,745	1,502.0	86%
2013	1,614	1,358.0	84%
2014	880	700.7	80%
2015	987	789.4	80%
2016	1,058	866.2	82%
2017	1,290	1,100.0	85%
2018	1,374	1,140.4	83%
2019	976	796.3	82%
2020	1,617	1,366.8	85%
2021	1,028	809.0	79%
Average	1,257	1,042.9	82%

Table 4. TSS loading with and without BMPs (kg/km)

	No BMPs	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
2011	600.7	570.2	424.1	408.1
2012	643.4	573.9	416.5	390.0
2013	457.4	434.5	279.0	270.9
2014	520.5	491.3	316.6	301.0
2015	532.8	477.8	363.4	330.0
2016	488.6	448.0	316.0	291.5
2017	601.0	549.3	412.6	390.5
2018	468.1	452.5	291.9	290.0
2019	567.8	476.7	396.0	365.1
2020	576.1	476.2	353.7	296.3
Average	545.6	495.0	357.0	333.3

는 3~17%(평균 9%)였으며, 연간 15.6~99.8 kg/km(평균 50.6 kg/km)의 TSS를 저감할 수 있었다. 모래여과시설만 설치한 시나리오2의 경우에는 무대책시와 비교하여 29~39%(평균 35%)의 TSS 유출부하 저감효과를 나타내었으며, 연간

Table 5. Removal efficiency of TSS loads for each scenario

	Removal rates			Amount of reduction (kg/km)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
2011	5%	29%	32%	30.4	176.6	192.6
2012	11%	35%	39%	69.6	226.9	253.4
2013	5%	39%	41%	22.9	178.3	186.5
2014	6%	39%	42%	29.2	203.8	219.5
2015	10%	32%	38%	55.0	169.4	202.8
2016	8%	35%	40%	40.6	172.6	197.1
2017	9%	31%	35%	51.7	188.4	210.6
2018	3%	38%	38%	15.6	176.2	178.1
2019	16%	30%	36%	91.1	171.8	202.7
2020	17%	39%	49%	99.8	222.3	279.8
Average	9%	35%	39%	50.6	188.6	212.3

169.4~226.9 kg/km(평균 188.6 kg/km)를 저감할 수 있는 것으로 모의되었다. 도로청소와 모래여과시설을 설치한 시나리오 3은 무대책과 비교하여 강우시 TSS 부하량의 32~49%(평균 39%) 저감효과를 나타내었으며 연간 178.6~279.8 kg/km(평균 212.3 kg/km)의 TSS를 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

도로청소시 도로노면 퇴적물 수거효율이 69%임에도 불구하고 강우시 비점오염유출량 저감효율이 상대적으로 낮으며 연간 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 도로 노면에서의 퇴적물량은 도로청소 후 제거된 노면퇴적물은 대기낙진에 의해 최대축적량 만큼 쌓이는데, 도로청소 후 최대축적량 도달하기 전까지 강우유출수가 발행하지 않으면 도로청소에 의한 노면퇴적물의 유출량 저감효과는 없다. 도로청소에 의한 연도별 저감효과의 차이가 큰 것은 도로청소 이후에서 최대축적량이 쌓이기 전까지 강우발생횟수가 연도별 다르기 때문이다. Kang and Jeon (2021)은 도로청소간격에 따른 노면퇴적물의 비점오염저감효과를 분석하였는데, 강우사상 발생전날 도로청소를 실시할 경우 연간 26회 도로청소만으로 비점오염저감효과가 43%를 나타내었으며 이는 4일 간격의 도로청소에 의한 비점오염물질 저감효과와 유사한 것으로 보고하였다. 따라서, 도로청소는 일정한 간격으로 실시하기보다는 강우발생일을 고려하여 실시하는 것이 비점오염저감측면에서 유리하다.

도로청소와 모래여과시설에 의한 TSS 부하량 저감효과를 비교하면 10년평균 도로청소는 9%, 모래여과시설은 35%로 모래여과시설이 약 3.5배 이상의 높은 효율을 나타내었다. 도로청소가 비록 낮은 저감효과를 나타내지만, 도로청소의 경우 고속도로 전체 면적에 대한 저감효과이며, 모래여과시설과 같은 구조적 BMPs는 배수구역에 한정된 저감효과이며 이를 고속도로 전체면적으로 환산하였을 경우 고속도로 청소의 중요성은 더욱 강조될 것이다. 노면퇴적물은 바람에 의해 재부유되어 대기오염을 유발시킨다. Chang et al. (2005)은 공기순환식과 살수식을 혼합한 도로청소에 의해 대기 미세먼지(Total suspended particles, TPS)를 30% 저감한 것으로 보고하고 있다. 이러한 측면에서 도로청소는 수질오염뿐만 아니라 대기오염을 저감시키는 중요한 관리기법 중 하나이다.

4. Conclusion

본 연구는 강우시 도로의 노면퇴적물에 의한 TSS 유출저감효과를 평가하기 위하여 스크리닝 수준의 ROADMOD 모델을 적용하여 경기도 광주시 곤지암읍 일대에 위치한 중부고속도로 유출수 처리를 위한 모래여과시설과 도로청소에 의한 노면퇴적물의 비점오염물질 저감효과를 평가하였다.

모델보정결과 모래여과시설의 유입유량과 TSS 유입부하량의 실측치와 예측치의 결정계수는 각각 0.67, 0.50, 모래여과시설 유출유량과 처리후 부하량의 결정계수는 각각 0.86, 0.84를 나타내었다. 도로에서의 유출은 시간에 따라 급변하기 때문에 측정자료의 경우 측정시점에서의 부하량(혹은 유량)이며, 모델은 시간평균 부하량(혹은 유량)인 점을 고려할

때, 스크리닝 수준에서 ROADMOD의 적용성이 있는 것으로 판단되었다. 모델 적용결과 과거 10년(2012~2021년)의 연평균 도로에서의 유출율은 0.82인 것으로 나타났다. 30일 간격의 도로청소만 실시할 경우 강우시 연평균 TSS 부하량의 9% 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 모래여과시설만 설치할 경우 연간 35%, 도로청소를 실시하고 모래여과시설을 설치할 경우 39%의 저감효과를 나타내었다. 도로청소에 의한 강우시 노면퇴적물 부하 저감효과는 경우 도로청소가 이루어지고 노면퇴적물이 최대축적량으로 쌓이기 전까지 발생한 강우에 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다.

도로청소는 도로 전체를 대상으로 이루어지는 반면 모래여과대와 같은 구조적 BMPs는 배수구역을 대상으로 처리되기 때문에 도로청소 또한 도로비점오염원 관리를 위한 중요한 BMP이다.

본 연구는 1회 강우시 유출자료를 통하여 보정만 이루어졌다는 한계점을 가지고 있다. 추후 다양한 강우유출수에 대한 검보정이 이루어진다면 보다 신뢰성 있는 결과를 도출함으로써, 전국에 설치된 도로비점오염원 저감을 위한 BMPs의 정량적인 평가와 지역적·기후적인 특성을 고려한 BMPs 우선순위 결정, 비점오염원 관리대책의 기초자료 제공 등에 활용 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Amato, F., Nava, S., Lucarelli, F., Querol, X., Alastuey, A., Baldasano, J. M., and Pandolfi, M. A. (2010). A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods, *Science of Total Environment*, 408, 3070-3084.
- Breault, R. F., Smith, K. P., and Sorensen, J. R. (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.
- Chang, Y. M., Chou, C. M., and Su, K. T. (2005). Effectiveness of street sweeping and washing for controlling ambient TSP, *Atmospheric Environment*, 39, 1891-1902.
- Herngren, L., Goonetilleke, A., and Ayoko, G. A. (2006). Analysis of heavy metals in road-deposited sediments, *Analytica Chimica Acta*, 571, 270-278.
- Huber, M., Welker, A., and Helmreich, B. (2016). Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning, *Science of the Total Environment*, 541, 895-919.
- Kang, H. and Jeon, J. H. (2021). Development and application of ROADMOD for analysis of non-point source pollutions

- from road: Analysis of removal efficiency of sediment in road by sweeping, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(2), 103-113. [Korean Literature]
- Kang, H., Kim, H. H., and Jeon, J. H. (2021). Analysis of characteristics and removal efficiency of road-deposited sediment on highway by road sweeping according to particle size distribution, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(4), 286-295. [Korean Literature]
- Korea Express Corporation Research Institute. (2019). *Monitoring removal efficiency of dust emission and nonpoint source pollution from highway by sweeping*, Korea Express Corporation Research Institute, Korea. [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]
- Lee, D., Kang, H., and Yoon, H. (2012). Effect of road sweeping on the abatement of runoff pollution loads from in the highway, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 26(6), 851-860. [Korean Literature]
- Lee, J. S. (2013). *Hydrology*, Goomibook, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Lee, S. H., Cho, H. J., and Kim, L. H. (2014). A study on removal efficiency and applicability of natural type road non-point pollutant reduction facilities, *International Journal of Highway Engineering*, 16(6), 9-17. [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]
- National Institute Environmental Research (NIER) (2012). *Stormwater runoff monitoring program*, National Institute Environmental Research, Incheon, Korea. [Korean Literature]
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). (1986). *Urban hydrology for small watersheds*, Technical release 55, Conservation Engineering Division, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, USA.
- Park, K., Kang, H., and Kim, Y. (2016). Evaluation of the performance of woodchip-filled infiltration trench treating stormwater from highway, *Journal of Wetland Research*, 18(2), 183-193. [Korean Literature]
- Son, H. G., Lee, S. Y., Maria, C. M., and Kim, L. H. (2009). Characteristics of NPS pollutants and treatment of stormwater runoff in paved area during a storm, *Journal of Wetlands Research*, 11(2), 55-66. [Korean Literature]
- Won, M. (2020). *Analysis of contaminant reduction efficiency by streetsweeper using SWMM*, Master thesis, Andong National University, Andong, Korea. [Korean Literature]
- 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.