

SWMM 모형을 활용한 도로 형태별 초기세척비율 산정

권현각 · 이재운* · 이윤정 · 신석호 · 이춘식¹⁾ · 이재관

국립환경과학원 낙동강물환경연구소, ¹⁾경남과학기술대학교
(2011년 9월 19일 접수; 2012년 1월 11일 수정; 2012년 3월 20일 채택)

The Estimating MFFn by SWMM in The Transportation Area

Hun-Gak Kwon, Jae-Woon Lee*, Youn-Jeong Yi, Suk-Ho Shin,
Chun-Sik Lee¹⁾, Jae-Kwan Lee

*Nakdong River Water Environment Research Center, National Institute of Environmental Research,
Goryeong 717-873, Korea*

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Kyeongnam National University of Science and Technology,
Jinju 660-758, Korea*

(Manuscript received 19 September, 2011; revised 11 January, 2012; accepted 20 March, 2012)

Abstract

The MFFn(Mass First Flush) was analyzed for various rainy events(monitored data from 2008 to 2009) in Transportation area(Highway, National road, Trunk road). Estimated MFFn using SWMM was evaluated by comparison with observed MFFn. MFFn was estimated by varying n-value from 10% to 90% on the rainy events. The n-value increases, MFFn is closed to '1'. As time passed, the rainfall runoff was getting similar to ratio of pollutants accumulation. The result of a measure of the strength of the linear relationship between observed data and expected data under model was good ($R^2=0.89$).

Pollutants runoff loads by volume showed Highway 26.6%, National road 44.8%, Trunk road 35.0% at the MFF20(20% by total runoff). A case of MFF30, pollutants runoff loads by volume showed Highway 40.2%, National road 54.3%, Trunk road 46.8%.

According to the results, Initial precipitation basis were Highway MFF30, National road MFF20, Trunk road MFF30 when the Non-Point source control facilities set up.

Key Words : MFFn, SWMM, Transportation area, Non-Point source

1. 서론

비점오염물질은 배출지역에 따라 도시지역, 농촌 지역, 자연지역, 수계지역으로 구분 할 수 있다. 도시 지역은 주거, 상업, 공업, 교통지역으로 다시 세분화되

며, 농촌지역은 논, 밭, 과수원으로, 자연지역은 산림, 초원지역으로 세분된다(이 등, 1993). 토지이용 형태 중 도시지역에서 강우시 발생하는 비점오염물질은 불투수성에 기인하는 것으로 개발이 확대됨에 따라 비례적으로 증가한다(Michael 등, 1998; Zhi-Qiang 등, 2005; John과 Wteven, 1997). 도시지역은 불투수층 비율과 오염물질 퇴적량 정도가 오염물질 유출을 결정하며, 특히 상업지역 및 공업지역의 불투수층이 60~100%로 높으며, 불투수층 비율이 10%증가 시 유

*Corresponding author : Jae-Woon Lee, Nakdong River Environment Research Center, Goryeong 717-873, Korea
Phone: +82-54-950-9701
E-mail: leejaew@korea.kr

출 부하량이 10~50% 증가하는 것으로 조사 되었다 (김 등, 2001). 특히 도시 내 도로노면 유출수의 경우, 차량 등의 이동으로 오염물질의 농도가 높은 것으로 알려져 있어, 초기 유출부하량이 수계 및 하수처리시설에 미치는 영향은 큰 것으로 판단된다. 초기유출에 대한 효과적인 제어를 위한 기초자료로서 현재까지 비점오염물질에 대한 원단위 조사 등 양과 농도에 대한 조사는 꾸준히 진행되고 있으나, 비점오염물질의 특성상 발생지역, 발생상황 등 많은 요인에 따라 유출 현상이 다르게 나타남으로 지속적인 연구가 수행되어야 한다(김 등, 2006). 강우에 따른 초기 유출에 대해 이 등(2007)의 연구에서는 동일한 구역에서도 강우량 및 강우지속시간에 따라 초기세척현상의 발생 유무가 달라 질수 있다고 발표 하였고, Bedient 등(1978)은 전통적인 도시지역, 임야지역 및 개발이 진행 중인 지역에 대한 강우유출조사를 바탕으로 누적유량-부하량 비 곡선을 작성하여 초기세척효과를 분석하였다. 이와 같이 도시지역과 같은 불투수면적의 증가가 심한 지역에서는 강우 초기에 고농도의 비점오염물질이 유출되는 초기강우현상을 발생 시킨다. 이러한 포장된 도시지역에서의 비점오염물질 유출저감은 오염총량 관리제에서 중요한 관리 대상으로 인식되고 있으나, 현재 국내의 경우 모니터링을 통한 기초 자료의 부족으로 인하여 관리방안 수립에 큰 애로점을 가지고 있다(김과 이, 2005).

본 연구에서는 불투수면적 비율이 높은 교통지역(고속도로, 국도, 도심간선도로)의 현장 모니터링을 통해 MFFn을 산정 시, 모니터링 결측 값으로 인해 발생할 수 있는 오차를 줄이고, 유출량을 실측할 수 없는 강우사상에 대해서도 MFFn을 산정할 수 있게끔, 도심지에 대표적으로 적용할 수 있는 강우유출모형인 SWMM을 적용하여 초기세척비율(Mass First Flush ratio : MFFn)을 산정하였다. 이를 통해 각각의 도로 특성에 따라 저감시설 설치 시 적용할 수 있는 초기강우 기준을 산정하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 연구대상지역

연구대상지역 중 고속도로 지점은 강우 시 노면 유출수가 남강으로 유입되는 소하천인 독산천으로 배출

되는 지점으로, 중부 내륙고속도로 대전-통영 간 상행선으로써 왕복 4차선인 도로이며 이 가운데 대상지점으로 유입되는 상행선 편도 2차선을 대상지역으로 선정하였으며, 중앙분리대 및 노선주변의 갖길을 포함하여 강우 시 우수관거 조사지점으로 총 집수면적은 2,000 m²이다. 조사대상 지점이 위치하고 있는 우수관거로 차집 되는 노면은 V자형 노면 형상을 따라 경사도 5%내외로 노면 측벽을 따라 차집 되어 지고 있다.

국도 지점은 강우 시 노면 유출수가 남강으로 유입되는 소하천인 가좌천으로 배출되는 지점으로, 국도 2호선 상행선으로서 왕복 4차선인 도로이며 이 가운데 대상지점으로 유입되는 상행선 편도 2차선을 대상지역으로 선정하였으며, 중앙분리대 및 노선주변의 갖길을 포함하여 강우 시 우수관거 조사지점으로 총 집수면적은 12,400 m²이다. 조사대상 지점이 위치하고 있는 우수관거로 차집 되는 노면은 경사도 5%내외의 완만한 내리막으로 노면을 따라 유출되거나 노면 측벽을 따라 차집 되어 지고 있다.

도심 간선도로 지점은 강우 시 교통지역에서 창원천으로 배출되는 지점으로, 상행선 지점의 편도 2차선이며, 하수배제 방식은 분류식 우수관거로 관경은 500 mm을 지니고 있다. 총 집수면적은 1,200 m²이며, 대상 지역의 상단부에서 하단부까지의 경사도는 5%내외이며 우수관거는 4개, 우수받이는 8개로 조사 되었다.

모형의 입력 자료로 사용된 각각의 조사지점에 대한 지형정보는 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용된 지점의 경우 면적이 작고, 하나의 토지이용형태만 나타내는 곳으로, 일부 투수층이 포함된 단일 피복 지형이다. 지점에 대한 정보는 관할시 하수관망도를 기준으로 하였고, 면적은 관망도를 기준으로 집수구역을 대상으로 현장에서 실측하였다.

Table 1. Information of the land at transportation area

Sites	Area(ha)	Width(m)	Impervious rate	Slope(m/m)
Highway	0.20	45	0.90	0.005
National road	1.24	39	0.95	0.005
Trunk road	0.12	21	0.95	0.005

2.2. 강우유출수 현장 조사

강우유출수에 대한 특성을 조사하기 위하여, 각각

의 조사지점에 강우강도계 및 유량계를 설치하여 조사대상지점에서 일어나는 강우 형태에 따른 유출수의 변화를 살펴보았다. 실측에 사용된 강우강도계는 Tipping Bucket Mechanism 방식의 호주 Envirodata Environmental Monitoring & Management 사의 RG-20으로 1분 단위의 강우량 측정이 가능하다. 유량계의 경우 비만관 전자식 유량계로 미국 MARSH McBIRNEY 사의 Flo-Tote3로 1분 단위의 유량측정이 가능하다. 조사대상지점에 대한 유량계의 설치는 최종 유출구에 설치하여 외부로부터 강우유출수의 유입이 없는 상황에서 유출량을 조사 하였다. 시료 채취 및 분석의 경우 국립환경과학원에서 개정된 ‘강우 유출수 조사방법’에 준하여 이루어졌고, 강우량 및 유출량의 경우 현장조사를 원칙으로 하고, 불가할 시 가장 근접한 기상청 자료를 활용하였다.

2.3. SWMM 모형

2.3.1. 기본 이론

SWMM은 호우에 의한 유출 유량과 수질을 예측하기 위해 강우주상도, 기상학적 입력자료, 소유역이나 하수관로와 같은 시스템의 특성을 고려하여, 실제의 호우사상을 모의하도록 되어 있으며, 1981년에는 SWMM 모형 내의 TRANSPORT block를 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN block을 포함시켜 보완시켰다. SWMM 모형은 도시 유역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유량 추적, 저류량 산정, 오염물의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. SWMM은 RAIN block, TEMPERATURE block, COMBINE block, STATISTICS block 등의 보조 모듈(Service module)과 RUNOFF block, TRANSPORT block, EXTRAN block, STORAGE/TREATMENT block 등의 수문/수리 모듈(hydrology/hydraulic module)로 구성된다 (Lewis, 2005).

2.3.1.1. Runoff 블록의 유출 해석

지표면 유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 운동과 근사법인 비선형 저류방정식이 사용된다. Runoff 블록은 각 소유역의

수심과 유량을 결정하기 위해 연속방정식과 Manning 방정식을 사용한다. 각 계산 시간 Δt 마다 두 개의 미지수(유량 Q^{n+1} 와 수심 d^{n+1} , 위첨자 n과 n+1은 각각 계산시간 t^n 과 $t^{n+1} = t^n + \Delta t$ 에서의 값, Δt 는 계산시간간격을 의미함)가 존재하며, 미지수를 구하기 위해서는 두 개의 방정식이 필요하다. 소유역에 대한 연속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV_b}{dt} = A_s \frac{dd}{dt} = A_s i_e - Q \quad (1)$$

여기서, V_b 는 지표면 위의 물의 체적(= $A_s \cdot d$), d 는 지표면 유출 수심(m), t 는 시간(sec), A_s 는 지표면의 면적(m^2), i_e 는 초과강우강도(m/s), Q 는 유출유량(m^3/s)이다. 초과강우강도는 강우강도(i , m/s)와 침투로 인한 손실(f_p , m/s)의 차로 표현 된다. Runoff 블록에서 지표면 유출은 폭이 넓은 개수로 흐름으로 가정(수리반경이 수심과 같다고 가정)하고, 아래의 Manning 방정식을 사용하여 계산 한다.

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

여기서, W 는 유역의 폭(m), n 은 Manning의 조도계수, d_p 는 지면 저류깊이(m), S 는 소유역의 경사(m/m)이다. Runoff 블록에서 관로 유출은 비선형 저류방정식으로 계산하며, 이 방정식의 해는 Newton-Raphson 방법으로 구한다. 각 적분 연산구간에서 Manning 식을 사용하여, 유출현상의 동역학적 거동은 준정상 상태로 근사하여 처리한다. 이 방법은 수심 d 와 단면적 A 가 시간에 따라 급하게 변화하지 않는 경우에 적용성이 우수하다. 관로유출에서 사용되는 연속방정식과 Manning 식은 각각 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$\Delta V_d = \Delta t \cdot (Q_I + Q_W + Q_{GW} - Q) \quad (3)$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

여기서, V_d 는 관로 내부의 물의 체적, Q_I 는 관로구

간 상류의 유입유량, Q_W 는 측방 유입유량, Q_{GW} 는 지하수 유입유량이다. Q 는 d^n 과 d^{n+1} 의 평균값을 이용하여 Manning 공식으로 구한다. 관로에서도 표면 유출에서와 같이 비선형방정식인 식 (3)과 (4)의 해를 구하기 위해 Newton-Raphson 함수는 다음과 같다.

$$F_d = \Delta V_d + \Delta t \cdot (Q - Q_I - Q_W - Q_{GW}) \quad (5)$$

식 (5)에서 Q 는 유출유량이다. ΔV_d 와 Q 는 d^n 과 d^{n+1} 로 나타낼 수 있으며, 식 (5)로부터 Δd 에 대한 도함수를 구한다(Lewis, 2005).

2.3.1.2. SWMM 모형 구축 및 모의

본 연구에서는 단일 토지 피복으로 이루어진 곳을 대상 지점으로 선정하였으며, 조사 지점 주변의 다른 토지 피복지에서의 강우 시 유출수 유입이 없는, 불투수지역을 대상으로 하였다. 대상 지점에 대한 기초 자료는 지점이 속한 관할시의 협조를 통해 모형의 기초 입력 자료를 구축하였다. 모형은 CHI사의 PCSWMM을 이용하였으며, 대상지점에 대한 지형 및 배수특성 자료는 수치지도 및 지형도를 이용하였다. 모니터링이 실시된 강우사상을 대상으로 모형의 유출량 및 수질에 대한 검·보정을 수행 하였다.

2.4. 초기세척 비율

초기세척 비율은 MFFn를 이용하여 각 오염물질과 강우에 대해 수량화 할 수 있다(Han 등, 2006). 이와 이(2009)에 따르면, 수량화된 값은 누적강우량기준과 강우지속 시간 기준으로 표현할 수 있으며, 이는 초기 강우기준을 의미한다. MFFn은 식 (6)에서 보여 주듯 강우지속시간에 따라 다양하게 변하는 강우유출수 중의 오염물질별 부하량과 유출량을 특정시점에서 강우 유출율과 오염물질 유출율로 계산할 수 있다(Janet 등, 2008).

$$MFFn = \frac{\int_0^{T_1} c(t) \cdot q(t) dt}{M} \quad (6)$$

$$\frac{\int_0^{T_1} q(t) dt}{V}$$

여기서, n 은 강우지속시간 중 일정시점에서의 유출량부피를 의미하고, 범위는 0%~100% 이다. $q(t)$, $c(t)$ 는 t 시간에서의 유출량과 오염물질별 농도, M 과 V 는 각각 유출오염물질 부하량과 유출량을 의미한다.

조사지점별 모니터링된 강우사상의 실측치를 통해 초기세척비율인 MFFn을 이용하여 각 오염물질과 강우에 대해 초기세척량을 정량화 하였다. 정량화된 오염물질의 유출량은 누적강우량기준, 강우지속시간기준, 강우유출량기준 등으로 표현 할 수 있으며, MFF20의 평균값이 2.5인 경우 초기우수유출수의 부피 20%에 오염물질 50%를 포함 하는 것을 의미한다(Matthias 등, 2009). 또한 유출모형(SWMM)을 활용하여 실측이 이루어진 날짜와 동일한 날의 강우자료를 입력 자료로 하여 유출을 모의 발생 시킨 후 그 결과 값을 활용하여 MFFn을 산정하였다. 실측을 통해 MFFn을 산정 할 때 샘플링(유출량, 수질)간격을 조밀하게 하지 않을 경우 총 유출량의 특정 퍼센트에 해당하는 유출량 값이나 수질 값을 확인할 수가 없어, 이러한 경우 오차가 발생할 것을 예측하면서도 목적상 유사한 유출량일 때의 수질 값을 통해 해당지점에 대한 MFFn을 계산하였다. 또한 현장에서 조사하지 못하거나, 특정 양 이상의 강우사상에 대해서는 실측을 통한 MFFn 산정이 어려워 본 연구에서 제안하는 강우 유출모형을 활용한 산정이 필요하다. 본 연구에서는 측정의 어려움 및 유사치 사용에 따른 오차를 줄이기 위해 모니터링 결과를 검·보정 자료로 하여 모의 발생 시킨 후 모의결과를 통해 MFFn을 산정하였다. 산점도 분석을 통해 모의를 통해 산정된 수치와 실측을 통해 산정된 수치의 차이를 확인 하였고, 이를 통해 도로 형태별 MFFn을 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도로별 현장 모니터링 결과

도로형태별 2008년부터 2009년까지 각 9회씩 모니터링된 강우사상은 Table 2와 같다. 도로별 조사된 강우사상은 강우량이 4.8 ~ 119.5 mm까지 다양하게 조사되었고, 강우에 따른 유출량 및 유출율을 나타내었다. 도로형태별 유출율을 살펴보면, 간선도로의 경우 평균 유출율이 0.59로 가장 높게 조사되었고, 국도의 경

우 2008년 조사된 4회의 강우사상에서 설치된 웨어의 이상으로 정상적으로 유출수가 유입되지 않아 유출량이 정상적으로 측정되지 않은 것으로 판단되어 초기 세척비율 산정 및 모형 적용에서는 제외 하였다. 이후 2009년 모니터링 수행 시 웨어를 다시 재작하여 설치하여 유출수에 대한 모니터링을 수행한 결과, 국도에서의 평균 유출율이 0.41로 조사되어, 다른 두 조사지점에 비해 낮게 조사 되었다. 현장 조사 당시 도로별 노면의 노화 및 관리 상태에 따라 유출율의 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 본 조사지점과 같이 불투수율이 높은 지점에서의 강우 시 발생하는 유출량은 강우량에 따라 유출량이 차이가 날수도 있으나, 그 외 선행무강우일수 및 강우강도와 같은 다양한 인자에 의한 영향으로 인해 유출율이 다르게 조사되는 것으로 사료된다.

3.2. SWMM 유출량 및 수질 검·보정 결과

조사지점별 2009년 조사된 실측 모니터링 자료를 활용한 모형의 유출량 검·보정 결과는 Fig. 1과 같으며, 각각의 조사 지점에 대해 매개변수를 검·보정한 결과는 Table 3과 같다. 고속도로의 경우 처음 모형을 구축하기 위하여 적용된 매개변수 중 불투수층 조도계수에 따른 변화율이 가장 크게 조사 되었고, 국도 및 간선도로의 경우도 고속도로와 같이 도로노면의 조도계수에 가장 크게 영향을 받음을 알 수 있었다. 그 외 불투수율, 경사도 및 침투율 등의 매개변수는 도로 형태의 차이에 따라 변화율의 차이가 발생함을 확인 할 수 있다.

Table 2. Summary of various precipitation events

Sites	Events	Date	Precipitation (mm)	Runoff (m ³)	Runoff rate
Highway	Event-H1	2008-04-09	21.0	14.4	0.34
	Event-H2	2008-05-18	11.9	9.1	0.38
	Event-H3	2008-06-28	81.5	78.5	0.48
	Event-H4	2008-10-22	28.5	23.4	0.41
	Event-H5	2009-03-21	22.9	33.9	0.74
	Event-H6	2009-04-24	6.2	6.8	0.55
	Event-H7	2009-05-15	14.9	11.0	0.37
	Event-H8	2009-05-21	102.5	169.1	0.82
	Event-H9	2009-06-22	19.9	32.4	0.81
National road	Event-N1	2008-04-09	21.0	15.8	0.06
	Event-N2	2008-05-18	11.9	8.6	0.06
	Event-N3	2008-06-28	81.5	60.2	0.06
	Event-N4	2008-10-22	28.5	17.9	0.05
	Event-N5	2009-03-13	27.5	167.5	0.49
	Event-N6	2009-04-24	20.0	91.7	0.37
	Event-N7	2009-05-12	5.0	20.0	0.32
	Event-N8	2009-05-21	104.0	409.5	0.32
	Event-N9	2009-06-29	119.5	835.6	0.56
Trunk road	Event-T1	2008-04-09	9.8	4.8	0.41
	Event-T2	2008-05-19	15.5	11.8	0.63
	Event-T3	2008-05-28	53.1	39.0	0.61
	Event-T4	2008-06-04	11.8	4.1	0.29
	Event-T5	2009-03-21	25.4	18.8	0.62
	Event-T6	2009-04-24	14.9	16.2	0.90
	Event-T7	2009-05-12	4.8	4.8	0.83
	Event-T8	2009-05-16	28.3	20.1	0.57
	Event-T9	2009-06-09	15.3	8.71	0.47

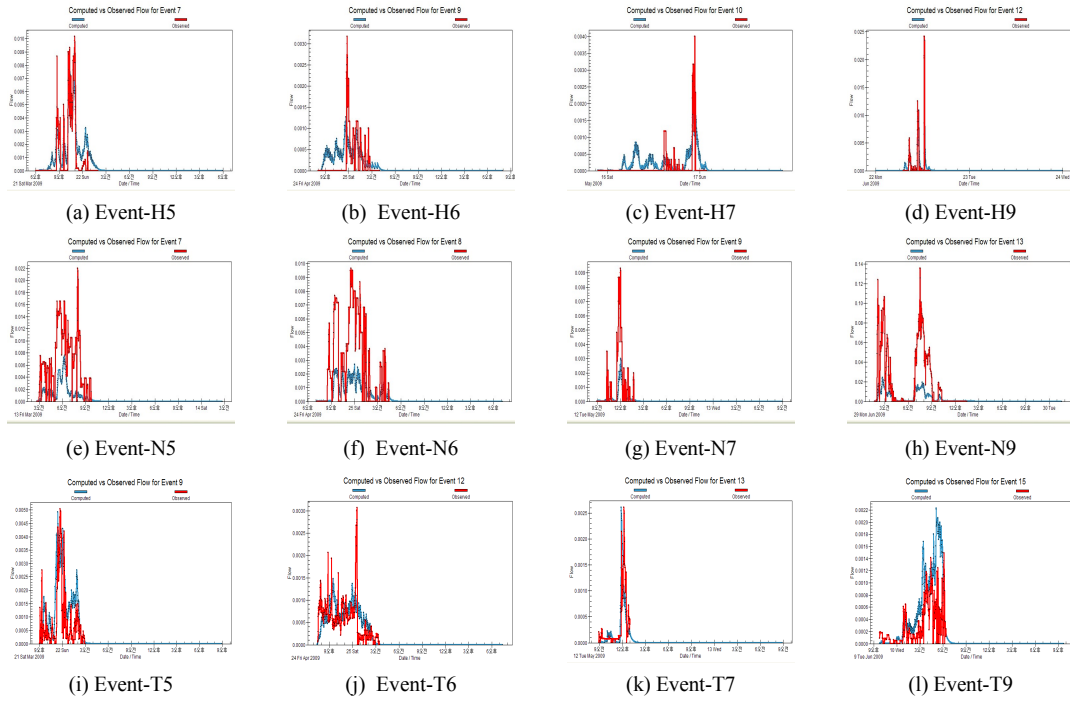


Fig. 1. Runoff calibration at Transportation area(Highway : (a)~(d), National road : (e)~(h), Trunk road : (i)~(l)).

Table 3. Calibrated input parameters of SWMM

parameters	initial value			calibrated value			increase and decrease rate(%)		
	Highway	National road	Trunk road	Highway	National road	Trunk road	Highway	National road	Trunk road
area(ha)	0.20	1.24	0.12	0.21	0.158	0.13	5.00	5.33	4.84
impervious rate(%)	90.00	95.00	95.00	95.00	98.00	100.00	5.56	3.16	5.26
slope(m/m)	0.005	0.005	0.005	0.004	0.006	0.006	-20.00	20.00	20.00
roughness coefficient-impervious layer(n)	0.02	0.02	0.02	0.015	0.015	0.015	-25.00	-25.00	-25.00
infiltration rate(%)	25.00	25.00	25.00	26.00	24.80	24.54	4.00	-0.80	-1.84

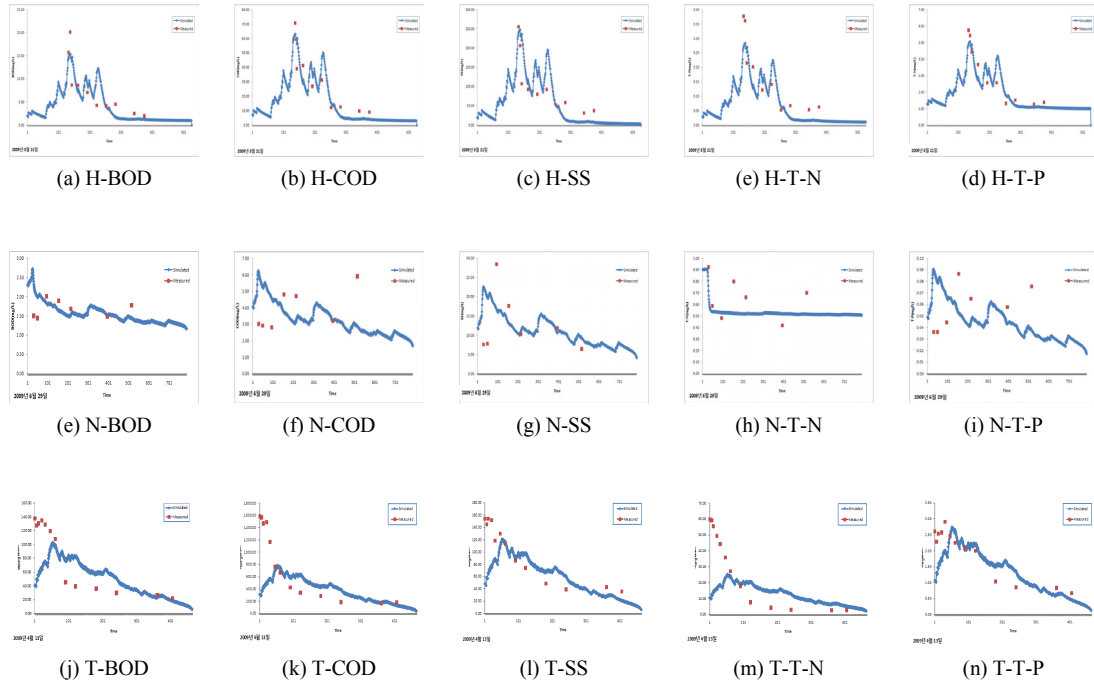


Fig. 2. Water quality calibration(Highway : (a)~(d), National road : (e)~(i), Trunk road : (j)~(n)).

조사지점들에 대한 수질 보정 결과는 Fig. 2와 같다.

3.3. 초기세척비율 산정

도로 형태별 2009년 모니터링된 다양한 강우사상에 대해 n 값을 10~90%까지 변화시키면서 수질항목별, n 수치별로 평균 MFFn을 산정한 결과는 Table 4와 같다. 실측 및 모의결과 모두 수질항목별로 n 값이 증가할수록 MFFn 값은 '1'에 가까운 값을 보여 유출 후반부로 진행됨에 따라 강우의 유출량과 이들 유출수에 포함된 오염물질의 누적비가 유사해짐을 확인하였다. 이와 이(2009)의 연구 결과에서는 MFFn의 평균값이 MFF30에서 최고치를 나타낸 이후 MFF90까지 지속적으로 감소된다고 보고하였으며, 본 연구 결과 역시 기존 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다.

실측치와 모의치의 차이를 확인하기 위해 두 결과치에 대해 산점도 분석을 통해 회귀식을 산정하였으며, 결과는 Table 5 및 Fig. 3과 같다. 산정된 회귀식의

R^2 와 기울기의 경우 1에 가까울수록, 절편의 경우 0에 가까울수록 실측치와 모의치 자료간의 선형성이 높고 잘 일치한다고 할 수 있다.

결과를 살펴보면, 도로형태별 산정된 R^2 의 경우 국도가 0.95로서 가장 높게 조사되었으며, 다음으로 고속도로, 간선도로 순으로 각각 0.89, 0.83으로 조사되었다. R^2 의 경우 3지점 모두 0.8이상으로 조사되어 자료간의 선형성이 높게 나타남을 확인 할 수 있다. 산정된 회귀식의 기울기와 절편을 살펴보면, 국도의 경우 기울기가 1.53, 절편이 -0.48로서 모의치와 실측치간의 적합도가 가장 높게 조사 되었다. 고속도로와 간선도로의 경우도 각각 기울기 0.61, 0.78, 절편 0.50, 0.27로서 비교적 적합도가 높게 조사되었다. 본 결과를 통해 실측 결과를 토대로 강우유출모형의 검·보정을 수행한 후 모의 발생 시킨 결과 값이 실측치를 잘 대변하고 있음을 확인하였다.

Table 4. The average value of MFFn at Transportation area

MFFn (%)	BOD		COD		SS		T-N		T-P		
	obs	sim	obs	sim	obs	sim	obs	sim	obs	sim	
Highway	10	1.48	1.34	1.60	1.44	1.31	1.51	1.34	1.26	1.59	1.46
	20	1.45	1.27	1.54	1.36	1.43	1.41	1.35	1.21	1.48	1.37
	30	1.31	1.28	1.39	1.38	1.22	1.44	1.24	1.23	1.40	1.40
	40	1.29	1.23	1.36	1.34	1.15	1.39	1.20	1.19	1.33	1.35
	50	1.19	1.19	1.29	1.28	1.04	1.33	1.12	1.16	1.21	1.30
	60	1.15	1.14	1.18	1.21	1.00	1.24	1.06	1.12	1.14	1.22
	70	1.07	1.09	1.08	1.15	1.01	1.17	1.03	1.08	1.03	1.15
	80	1.01	1.06	0.99	1.10	0.97	1.12	0.94	1.06	0.94	1.11
	90	1.01	1.03	0.99	1.05	0.96	1.06	0.94	1.03	0.93	1.05
National road	10	1.48	1.34	1.60	1.44	1.31	1.51	1.34	1.26	1.59	1.46
	20	1.45	1.27	1.54	1.36	1.43	1.41	1.35	1.21	1.48	1.37
	30	1.31	1.28	1.39	1.38	1.22	1.44	1.24	1.23	1.40	1.40
	40	1.29	1.23	1.36	1.34	1.15	1.39	1.20	1.19	1.33	1.35
	50	1.19	1.19	1.29	1.28	1.04	1.33	1.12	1.16	1.21	1.30
	60	1.15	1.14	1.18	1.21	1.00	1.24	1.06	1.12	1.14	1.22
	70	1.07	1.09	1.08	1.15	1.01	1.17	1.03	1.08	1.03	1.15
	80	1.01	1.06	0.99	1.10	0.97	1.12	0.94	1.06	0.94	1.11
	90	1.01	1.03	0.99	1.05	0.96	1.06	0.94	1.03	0.93	1.05
Trunk road	10	1.48	1.34	1.60	1.44	1.31	1.51	1.34	1.26	1.59	1.46
	20	1.45	1.27	1.54	1.36	1.43	1.41	1.35	1.21	1.48	1.37
	30	1.31	1.28	1.39	1.38	1.22	1.44	1.24	1.23	1.40	1.40
	40	1.29	1.23	1.36	1.34	1.15	1.39	1.20	1.19	1.33	1.35
	50	1.19	1.19	1.29	1.28	1.04	1.33	1.12	1.16	1.21	1.30
	60	1.15	1.14	1.18	1.21	1.00	1.24	1.06	1.12	1.14	1.22
	70	1.07	1.09	1.08	1.15	1.01	1.17	1.03	1.08	1.03	1.15
	80	1.01	1.06	0.99	1.10	0.97	1.12	0.94	1.06	0.94	1.11
	90	1.01	1.03	0.99	1.05	0.96	1.06	0.94	1.03	0.93	1.05

Table 5. Correlation of observed and simulated MFF

Sites	Item	BOD	COD	SS	T-N	T-P	Average
Highway	R2	0.95	0.94	0.71	0.92	0.95	0.89
	slope	0.592	0.587	0.787	0.497	0.591	0.61
	intercept	0.461	0.513	0.415	0.584	0.544	0.50
National road	R2	0.97	0.99	0.90	0.96	0.95	0.95
	slope	1.445	1.481	2.541	0.386	1.777	1.53
	intercept	-0.411	-0.348	-1.656	0.652	-0.621	-0.48
Trunk road	R2	0.98	0.93	0.72	0.86	0.67	0.83
	slope	0.659	0.844	1.455	0.091	0.857	0.78
	intercept	0.386	0.220	-0.472	0.995	0.232	0.27

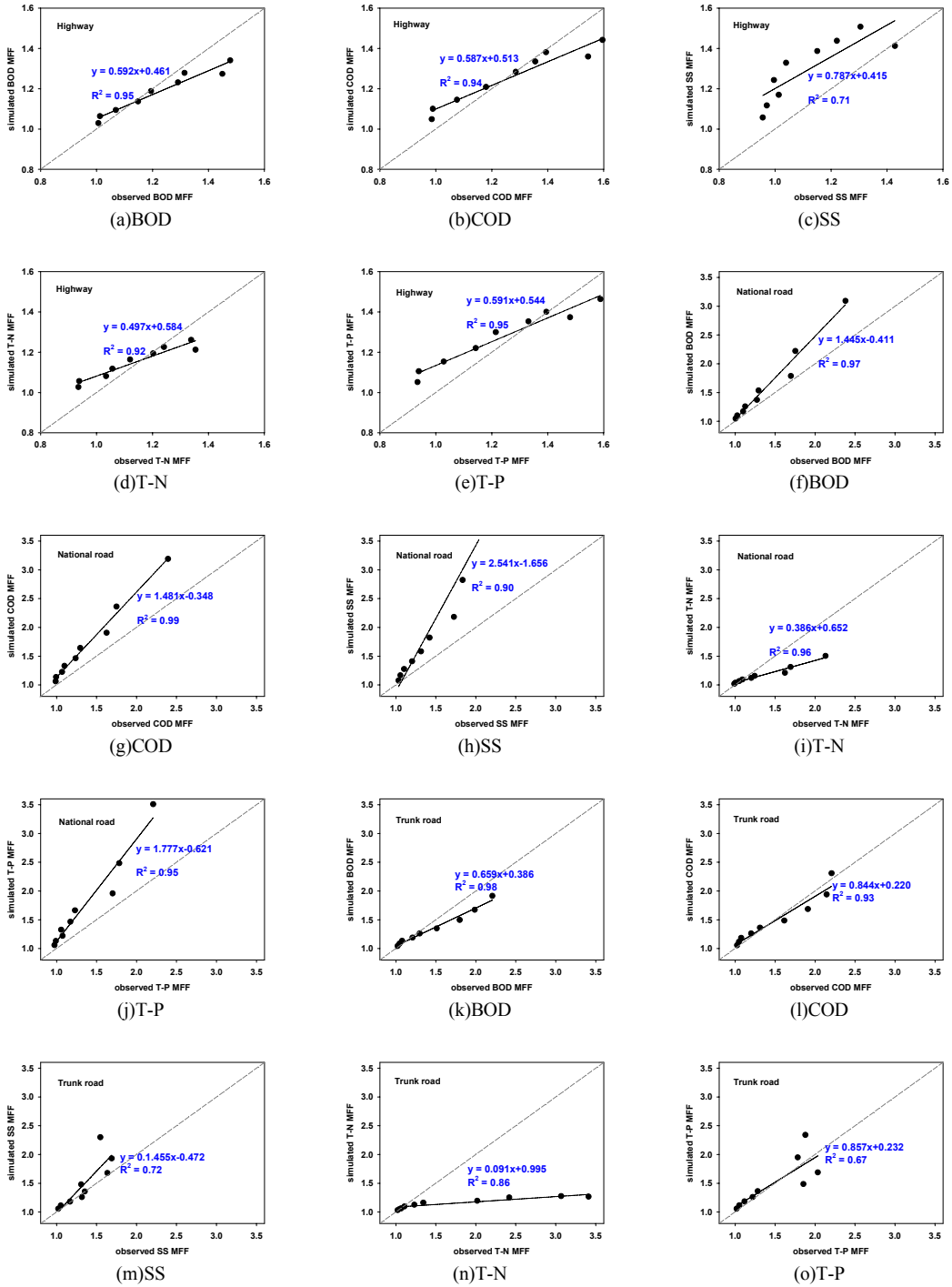


Fig. 4. Scatter diagram of observed and simulated MFF(Highway : (a)~(e), National road : (f)~(j), Trunk road : (k)~(o)).

도로형태별 모의 산정된 MFFn을 Table 6에 나타내었다. 산정된 결과를 살펴보면, MFF20(총유출량의 20% 유출이 발생하였을 경우)일 때 고속도로 26.6%, 국도 44.8%, 간선도로 35.0%의 비점오염부하가 발생하는 것으로 조사 되어 불투수율이 유사한 지점임에도 도로형태별 강우 초기 발생되는 비점오염부하량의 차이를 나타내었다.

기존 연구자들에 의해 제시된 MFF30에서는 국도가 54.3%로 가장 높은 발생율을 나타내었고, 간선도로 46.8%, 고속도로 40.2%순으로 조사 되었다.

본 연구 결과를 토대로 비점오염원 저감시설 설치시 용량 기준을 강우 발생 시 유출되는 전체 비점오염원의 40% 정도의 저감을 목적으로 할 경우 도로형태별 초기강우기준을 고속도로 MFF30, 국도 MFF20, 간선도로 MFF30 으로 설정 할 수 있을 것으로 판단된다. 더불어, 특정 오염물질에 대한 저감시설 용량 결정이 필요할 시 오염물질별 MFFn이 산정된 Table 4를 통해 가능할 것으로 판단된다.

비점오염원은 발생특성과 유출경로 등 환경 여건이 다양하여, 최적의 관리를 위해서는 발생단계에서 오염배출을 최소화하고 수계로 유입되기 전에 제거하는 것이 가장 현실적이고 경제적이다. 이를 위해서는 다양한 토지이용 형태에 따른 비점오염원의 발생 및 유출에 대한 장기적인 모니터링이 수반 되어, 다양한 기초자료를 바탕으로 본 연구와 같은 모니터링 자료의 활용을 통한 실무에 대한 적용성을 높여야 할 것으로 사료된다.

Table 6. The average value of MFFn by modeling at transportation area

MFFn	Highway	National road	Trunk road
10	1.40	3.08	2.03
20	1.33	2.24	1.75
30	1.34	1.81	1.56
40	1.30	1.56	1.40
50	1.25	1.40	1.30
60	1.19	1.28	1.22
70	1.13	1.19	1.16
80	1.09	1.11	1.10
90	1.04	1.05	1.05

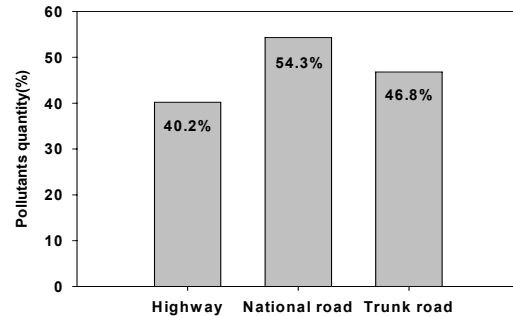


Fig. 5. Comparison of pollutants quantity at initial runoff (MFF30).

4. 결론

본 연구에서는 도심지에 위치하고 있는 고속도로, 국도, 간선도로에서의 강우 시 발생하는 유출수에 대해 장기모니터링을 수행한 결과를 강우유출모형에 적용하여 유출량을 모의 발생 시켰다.

모형의 신뢰도 확보를 위해 실측치와 모의치에 대한 산점도 분석을 수행하였다. 산정된 모의치를 통해 도로 형태별 MFFn을 산정하였고, 오염물질별 초기세척비율 차이를 확인 하였다. 결과를 바탕으로 도로 형태별 초기강우기준을 산정하고, 향후 본 연구결과의 적용 방안에 대해 고찰해 보았다. 연구가 수행된 조사 지점이 아닌, 다른 유역에 속한 임의의 지점에 대해 SWMM 모형을 활용하여 MFFn 산정 시 정밀한 현장 조사를 통한 기초자료 확보가 가장 우선시 되어야 하며, 실측된 자료를 통해 모형의 감·보정을 수행할 시 모의치의 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

1) 도로형태별 2008년부터 2009년까지 각 9회씩 모니터링된 강우사상은 강우량이 4.8~119.5 mm까지 다양하게 조사되었고, 간선도로의 경우 평균 유출율이 0.59로 가장 높게 조사되었고, 국도의 경우 2009년 조사 기준 평균 유출율이 0.41로 다른 두 조사지점에 비해 낮게 조사 되었다. 도로와 같이 불투수율이 높은 지점에서의 강우시 발생하는 유출량은 강우량에 따라 유출량이 차이가 날수도 있으나, 그 외 선행무강우일 수 및 강우강도와 같은 다양한 인자에 의한 영향으로 인해 유출율이 다르게 조사되는 것으로 사료된다.

2) 도로 형태별 2009년 모니터링된 다양한 강우사상에 대해 n 값을 10~90%까지 변화시키면서 수질항목별, n 수치별로 평균 MFFn을 산정 하였다. 또한 구축된 강우유출모형을 활용하여 오염원별 모의발생 후 MFFn을 산정 하였다. 실측치와 모의치의 차이를 확인 하기위해 산점도 분석을 수행하였고, 결과 평균 R^2 가 0.89로 산정되어 선형성이 높게 조사 되었다. 또한 평균 기울기 0.97, 절편 0.41로 산정되어 실측치와 모의치 간의 적합도가 비교적 높게 조사 되었다.

3) MFF20(총유출량의 20% 유출이 발생하였을 경우)일 때 고속도로 26.6%, 국도 44.8%, 간선도로 35.0%의 비점오염부하가 발생하는 것으로 조사 되어 불투수율이 유사한 지점임에도 도로형태별 강우 초기 발생되는 비점오염부하량의 차이를 나타내었다. 기존 연구자들에 의해 제시된 MFF30에서는 국도가 54.3%로 가장 높은 발생율을 나타내었고, 간선도로 46.8%, 고속도로 40.2%순으로 조사 되었다.

4) 비점오염원 저감시설 설치 시 용량 기준을 강우 발생 시 유출되는 전체 비점오염원의 40% 정도의 저감을 목적으로 할 경우 도로형태별 초기강우기준을 고속도로 MFF30, 국도 MFF20, 간선도로 MFF30 으로 설정 할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 비점오염원은 발생특성과 유출경로 등 환경 여건이 다양하여, 그에 따른 관리를 위해서는 발생단계에서 오염배출을 최소화하고 수계로 유입되기 전에 제거하는 것이 가장 현실적이고 경제적이다. 이를 위해서는 다양한 토지이용 형태에 따른 비점오염원의 발생 및 유출에 대한 장기적인 모니터링이 수반 되어, 다양한 기초자료를 바탕으로 본 연구와 같은 모니터링 자료의 활용을 통한 실무에 대한 적용성을 높여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

김석구, 김영임, 강성원, 윤상린, 김소정, 2006, 강우에 의한 도로 비점오염원 유출 특성, 대한환경공학회지, 28(1), 104-110.
김이형, 이선하, 2005, 주차장 및 교량 유출수의 증감속

오염물질 특성과 동적 EMCs, 한국물환경학회지, 21(4), 385-392.
김종찬, 김요용, 박익범, 정주용, 민윤기, 2001, 비점오염원 관리방안, 경기도보건환경연구원.
이인선, 신상철, 정동일, 이영진, 이현정, 이현재, 박동기, 신현정, 1993, 비점오염원으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구, 국립환경연구원 보(15), 국립환경연구원.
이준호, 조용진, 방기웅, 최창수, 2007, 강우시 교량도로 유출수 수질 및 입경분포, 공동 추계학술발표회 논문집, 대한상하수도·물환경학회, 135.
이홍신, 이승환, 2009, 국내 중소 도시지역 강우유출수의 유출특성, 대한환경공학회, 31(3), 193-202.
Bedient, P. B., Harned, D. A., Characklis, W. G., 1978, Stormwater analysis and prediction in Houston, J. Environ., 104(6), 1087-1100.
Han, Y. H., Han, S. L., Lau, M. K., Stetrom, M. K., 2006, Correlation analysis among highway stormwater pollutants and characteristics, Water Sci. Technol., 53(2), 235-243.
Janet, B., Sergio, P., Michael, K. S., 2008, First flush in a combined sewer system, Chemosphere, 71, 827-823.
John, J. S., Wteven, G. B., 1997, Partitioning and first flush of metals in urban, J. of Environ. Eng., 123, 134-143.
Lewis, A. R., 2005, STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL, EPA/600/r-05/040, Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati.
Michael, E. B., Lyn, B. I. Jr., Joseph, F. M. Jr., Randall, J. C., 1998, Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas Area, J. of Environ. Eng., 124(2), 131-137.
Matthias, O., Karl-Heinz, R., Marie-George, T., 2009, Investigation of first flushes in medium-sized mediterranean catchment, J. Hydro., 373, 405-415.
Zhi-Qiang, D., Joao, L. M. P. L., Vijay, P. S., 2005, Fractional kinetic model for first of stormwater pollutants, J. of Environ. Eng., 126(4), 313-320.