

고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정

김이형* · 강주현*

국립공주대학교 건설환경공학부 방재연구센터

*Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, CA 90055, USA

Determination of Event Mean Concentrations and Pollutant Loadings in Highway Storm Runoff

Lee-Hyung Kim* · Joohyon Kang*

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Disaster Prevention Research Center, Kongju National University

*Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, CA 90055, USA

(Received 12 July 2004, Accepted 12 October 2004)

Abstract : This research was conducted to understand the magnitude and nature of the stormwater emissions with the goal of quantifying stormwater pollutant concentrations and mass emission rates of pollutants. Eight highway sites in Southern California area were monitored for three years with collecting of grab and flow-weighted composite samples, rainfall and runoff flow. Generally the EMCs cannot be determined by simple statistical averaging of measured pollutant concentrations because of random characteristics of runoff quality and quantity. Therefore, this manuscripts will show a new EMC determination method. The EMC ranges of 95% confidence intervals are 102.78-216.37mg/L for TSS, 104.53-251.79mg/L for COD, 5.42-10.58mg/L for oil & grease and 2.42-10.18mg/L for TKN. The ranges of washed-off mass loading are determined to 0.06g/m²-17.27g/m² for TSS and 0.1-3.23g/m² for COD.

keywords : EMC, Highway, Los Angeles, Nonpoint pollutant, Washoff

1. 서론

1.1. 고속도로 비점오염원 관리의 중요성

최근 30여 년간의 끊임없는 환경기술 개발은 점오염원에 의한 환경문제 해결에 큰 도움을 주었다. 하지만 세계적인 생활수준의 향상은 새로운 오염물질을 지속적으로 유출하고 있으며, 그 대표적인 예가 비점오염원이다. 비점오염물질은 인간의 활동에 의한 다양한 토지이용에 기인하며, 주로 강우 시 유출수에 의해 유출된다. 또한 급격한 도시건설 및 개발화는 유역의 불투수 지역을 증가시키며 강우 시 유출계수의 증가를 유발한다. 이러한 불투수지역의 증가는 다양한 오염물질이 함유된 대량의 강우 유출수를 인근의 수계로 유출시켜 수질오염, 부영양화 및 홍수를 야기 시킨다(Fig. 1). 특히 포장율이 높아 강우유출수의 유출율이 높은 도로 및 고속도로에서의 차량에 의한 수계 및 토양 오염은 1990년대 이후 세계적으로 매우 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 이러한 비점오염문제 해결을 위하여 IWA (International Water Association)에서는 매년 국제 비점오염원 학술대회(International Conference on Diffuse/Nonpoint Pollution)를 후원하고 있다. 미국의 경우 1990년대 이후 EPA(Environmental Protection Agency) 주도하에 비점오염문제 해결을 위하여,

각 주의 환경보호국에 권한을 위임하여 비점오염원에 관한 모니터링 및 모델링 연구에 매진하고 있다. 또한 비점오염물질의 수계유입을 관리하기 위하여 장기적인 모니터링과 모델링 결과를 이용하여 최적관리방안(Best Management Practices, BMPs) 수립을 추진하고 있다. 최근들어 오염총량제(Total Maximum Daily Load, TMDL)를 통하여 수계관리가 이루어지고 있는데 여기에는 점오염원, 비점오염원 및 안전율이 고려되어 있다. 오염총량은 모니터링 결과와 유역모델을 통한 오염물질의 부하산정 및 관리를 결정하기 위해서 도입 되어졌다. 일반적으로 미국의 경우 하천의 오염을 유발하는 오염물질의 종류들을 다음과 같이 10가지로 분류하여 관리하고 있다: 입자상 물질, 병원균, 영양물질, 중금속, 용존산소, 온도, pH, 농약, 수은, 유기물 등.

다양한 토지이용에서 발생하는 비점오염원 중에서 포장율이 높은 도로나 고속도로는 많은 차량의 운행으로 인하여 강우 시 오염물질의 유출이 높은 토지이용이다. 합류식 하수관거가 설치되어 있는 도시지역의 경우 도로 및 고속도로 유출 오염물질은 CSO(Combined Sewer Overflows) 유출과 더불어 수계에 여러 가지 환경문제를 야기 시킨다. 또한 일반적으로 도로 및 고속도로는 수계를 따라서 형성되어 오염물질이 유출되었을 시 수계오염의 직접적인 원인이 되고 있는데 미국의 경우 다음과 같은 법규로 수계 인근의 도로 및 고속도로 오염물질 유출을 다루고 있다: 청

* To whom correspondence should be addressed.
leehyung@kongju.ac.kr

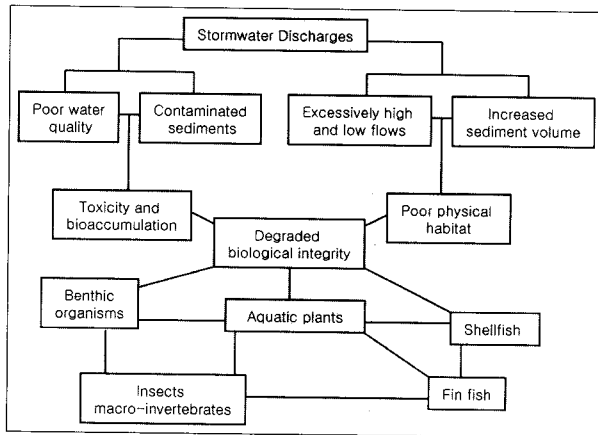


Fig. 1. Effect of Stormwater Discharges on Environment (Kim, 2002).

정수법(Clean Water Act, CWA)의 319 조항, 해양보존 및 위입법(Coastal Zone Management Act and Reauthorization, CZMA)의 6217 조항, 오염물질 유출 저감 시스템(National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES), 각종 수송기관이 이용하는 시설에 관한 교통효력법(Intermodal Surface Transportation Efficiency Act, ISTEA), 국내 만 보호 프로그램(National Estuary Program, NEP), 농약저감을 위한 살충제, 살균제 및 설치류제에 관한 연방법(Federal Insecticide, Fungicide and Rodenticide Act, FIFRA) 등.

도시지역의 도로 및 고속도로로부터 유출되는 비점오염물질의 양은 건조 시 대기로부터 오염물질의 축적과 차량활동에 의하여 다른 토지이용에 비해 부하량이 매우 높다. 특히 입자상 오염물질, 중금속 및 oil & grease 등의 함량이 매우 높으며 인근 수계에 심각한 오염을 야기시킨다. 미국의 경우 고속도로에 의한 수계오염은 기타 토지이용에

비해서 매우 높은데, 일반적으로 수계오염의 10-20%정도를 차지하고 있다(Kim et al., 2003). 따라서 고속도로 및 도로에서의 비점오염물질 유출 연구는 수계오염방지 차원에서 중요한 연구과제이며, 본 연구를 통하여 오염물질의 종류 및 유출특성을 파악함으로써 장래 저감시설 연구에 그 결과를 이용하고자 한다. 본 연구에서 수행하고자 하는 비점오염원 연구는 모니터링 과정을 통한 기초자료 확보가 오염저감기술 개발의 성공여부를 결정짓기에 중요한 연구라고 할 수 있다.

본 논문에서는 Southern California에 있는 Los Angeles 지역을 가로지르는 6개의 고속도로 지역에서 수행된 강우량, 유출수 및 오염물질의 유출 특성을 모니터링하여 정리된 결과를 보여주고자 한다.

1.2. 오염물질의 발생 원인

고속도로에서 발생하는 오염물질은 주행하는 자동차, 트럭, 및 gas를 사용하는 각종 운반구로부터 발생한다. Table 1은 고속도로에서 발견되는 오염물질의 종류와 발생하는 원인을 보여주고 있다. 건조 시 도로 노면에 축적되어 있던 oil, antifreeze, grease, 각종 금속물질 및 입자상 물질들은 강우 시 유출수에 의해 하천으로 이동하여 하천의 수질을 악화시키는 원인으로 작용한다. 특히 oil, petroleum과 같은 유해화학물질들은 물고기나 수생 동식물들의 생존에 악영향을 끼치며, 시간의 경과에 의해 유입된 오염물질은 하천이나 호소의 바닥의 퇴적층내로 침전하여 장기적 내부오염의 원인으로 작용한다(Kim et al., 2003, 2004).

1.3. 평균 유출 오염물질 농도(Event Mean Concentrations, EMC)

Table 1. Pollutant types and sources on highway storm runoff (U.S. EPA, 1994)

Parameters	Pollutants	source
Particulates	Particulates	Pavement wear, vehicles, the atmosphere and maintenance activities
Nutrients	N and P	Atmosphere and fertilizer application
	Lead	Leaded gasoline from auto exhaust and tire wear
	Zinc	Tire wear, motor oil and grease
	Iron	Auto body rust, steel highway structures such as bridges and guardrails, and moving engine parts
	Copper	Metal plating, bearing and brushing wear, moving engine parts, brake lining wear, fungicides & insecticides
Metals	Cadmium	Tire wear and insecticides application
	Chromium	Metal plating, moving engine parts and brake lining wear
	Nickel	Diesel fuel and gasoline, lubricating oil, metal plating, brushing wear, brake lining and asphalt paving
	Manganese	Moving engine parts
	Cyanide	Anti-caking compounds used to keep deicing salt granular
	Sodium, calcium & chloride	Deicing salts
	Sulphates	Roadway beds, fuel and deicing salts
Hydrocarbons	Petroleum	Spills, leaks, antifreeze and hydraulic fluids and asphalt surface leachate

건조 시 고속도로에 축적되는 비점오염물질의 부하량 산정은 비점오염원의 불확실성 때문에 정량화하기가 단순하지 않다. 대기 중으로부터 축적되는 오염물질의 부하량 측정은 도로에서 실험을 통해 측정되어야 하지만 좁은 도로, 풍속의 불안정성, 많은 차량의 운행 등의 이유로 인하여 정량적으로 산정하기가 어렵다. 따라서 일반적으로 고속도로에서의 오염물질 부하량은 강우 시 유출되는 오염물질의 농도와 강우 유출율을 이용하여 산정 가능하다. 또한 강우로 유출된 오염물질들이 수계에 직접적인 영향을 끼치기에 건조 시 축적되는 양을 부하량으로 이용하는 것 보다 더욱 더 이용가능성이 높다. 하지만 특정 강우 이벤트에 대한 정확한 EMC가 결정되어야만 올바른 오염물질 부하량을 산정할 수가 있다.

$$EMC = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} \quad (1)$$

$$= \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^t Q_{TRu}(t) dt}$$

여기서, $C(t)$ 는 시간에 따른 유출 오염물질의 농도를 말하며 $Q_{TRu}(t)$ 는 유역으로부터 강으로 인해 유출되는 유출수율을 나타내고 있다.

비점오염원에 있어서 EMC는 어떤 강우 기간동안 유역으로부터 유출된 총 오염물질 양과 유출된 총 유출수의 부피를 이용하여 결정 되어질 수 있다. 하지만 일반적으로 수질자료와 강우자료의 부재로 이러한 단순한 의미마저 어렵게 하고 있다. 따라서 연속적으로 측정된 유출 결과와 오염물질의 농도를 이용하여 식 (1)과 같이 EMC를 결정할 수 있다. 즉 모니터링 프로그램을 통하여 얻어진 수질 데이터를 흐름-무게비(flow-weighted)로 나누어 결정하는 방법이다. Table 2는 미국의 다양한 연구기관에 의해서 측정된 도로지역의 EMC 결과를 보이고 있다. EMC 결과의 차이는 모니터링 방법의 차이와 산정법의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

Table 2. EMCs on highway storm runoff in U.S.A(Kim, 2002)

Unit: mg/L	US EPA ⁽¹⁾	NURP ⁽²⁾	USGS and NPDES ⁽³⁾
TSS	200	174	78.4
BOD	12	10.4	14.1
COD	103	66.1	52.8
Total P	0.52	0.34	0.32
PO ₄ P	0.17	0.1	0.13
TKN	2.4	1.67	1.73
NO ₂ & NO ₃	1.22	0.84	0.66

(1) United States Environmental Protection Agency (US EPA, 1983)

(2) Updated Urban Runoff data from Nationwide Urban Runoff Programs (NURP, 1999)

(3) United States Geological Survey and National Pollutant Discharge Elimination System (1999).

2. 대상지역 및 실험 방법

2.1. 연구지역

본 연구는 California 교통국의 초기강우 특성연구(First Flush Characterization Study, FFCS)의 한 부분으로 시작되었으며 고속도로로부터 강우 시 유출되는 비점오염물질 유출 특성을 파악하기 위하여 1999년부터 수행되어졌다. 일반적으로 고속도로는 수계를 따라 형성되기에 오염물질의 유출은 수계에 직접적인 영향을 끼치게 되며, 특정 지역에서 배출된 오염물질이 차량의 이동에 의해 타 지역으로의 이송이 가능하기에 미국에서는 중요한 수계오염물질로 정의하고 있다.

따라서 본 연구는 고속도로 강우 유출수에 의한 수계의 오염을 방지하기 위하여 수행되었으며 그 결과는 California 내의 고속도로에서 유출되는 비점오염물질 방지 및 저감 처리대책, 즉 최적관리방안의 선택 및 기술개발에 이용될 것이다. 연구지역은 Fig. 2와 같이 Southern California 지역에서 8개의 모니터링 지점을 선정하였다. 이 지역은 많은 차량의 운행으로 인하여 오염물질의 유출이 심한지역으로

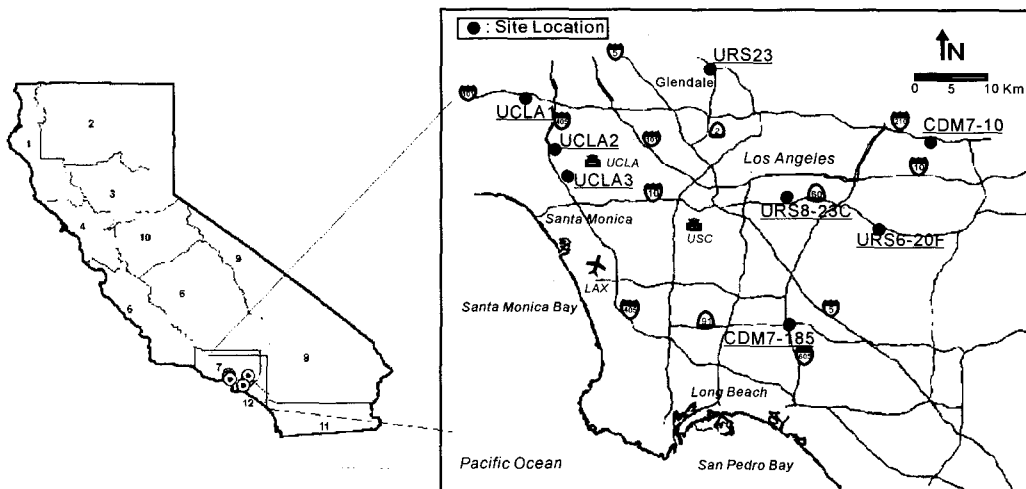


Fig. 2. Monitoring locations in Southern California.

Table 3. Descriptions of monitoring site and rainfall event

Sites	Watershed Area (m ²)	ADT (Cars/day)	Event Date (mm/dd/yy)	ADD (days)	Storm Duration (hrs:min)	Total Rainfall (cm)	Total Volume of Runoff (m ³)
UCLA 1	12800	328000	01/25/00	8.00	19:21	1.68	213.18
			02/27/00	3.90	4:26	0.30	16.14
			10/26/00	33.60	10:57	2.34	255.20
			01/08/01	69.40	6:34	0.38	43.70
			02/19/01	5.40	4:08	0.71	80.86
UCLA 2	16900	260000	03/04/01	4.00	10:32	1.17	136.13
			01/25/00	7.90	19:23	2.36	396.70
			02/10/00	9.90	19:01	0.69	106.47
			04/17/00	39.80	8:34	4.42	300.78
			10/26/00	33.60	10:57	2.31	194.41
UCLA 3	3900	322000	01/08/01	69.40	4:18	0.48	49.60
			03/04/01	4.00	5:05	0.89	140.17
			01/25/00	8.20	7:53	1.75	68.02
			02/12/00	1.10	4:42	1.78	59.46
			03/04/00	5.00	1:33	0.58	20.50
CDM7-10	48100	176000	10/26/00	33.60	11:47	2.59	94.53
			02/19/01	5.30	6:56	2.97	110.53
			02/24/01	1.00	11:36	1.12	37.29
			04/07/01	31.60	10:46	2.16	55.43
			01/25/00	25.20	10:04	1.50	557.23
CDM7-185	2300	220000	02/12/00	2.10	2:50	2.31	950.31
			02/20/00	3.20	13:05	5.64	2598.24
			02/23/00	2.10	13:00	4.24	1737.42
			02/27/00	4.00	5:45	1.09	400.49
			03/08/00	1.00	10:06	2.74	1145.46
URS23	29100	122000	04/17/00	38.90	7:20	4.24	1745.43
			01/25/00	25.00			
			02/12/00	2.00	2:30	1.88	36.98
			02/23/00	2.00	9:35	2.49	56.53
			02/27/00	4.00	1:05	0.38	4.00
URS6-20F	1700	216600	03/08/00	3.00	8:45	2.06	45.70
			04/17/00	39.00	6:55	3.18	70.39
			01/26/01	33.00	7:48	0.89	95.61
			02/10/01	14.60	9:12	0.99	120.42
			02/19/01	5.70	6:24	0.94	116.82
URS8-23C	2500	229000	10/26/00	33.00	10:00	3.18	33.13
			01/26/01	33.00	7:18	1.19	10.53
			02/10/01	14.50	6:36	0.51	2.75
			02/19/01	5.60	5:40	1.04	7.72
			01/26/01	33.00	12:48	0.53	6.59
			02/19/01	5.50	7:12	0.43	10.66

써 California 교통국의 주 오염원 관리대상 지역이다. Los Angeles내 모니터링 현장의 기본 자료 및 강우 이벤트에 대한 모니터링 실측자료는 Table 3에 정리하였다.

2.2. 모니터링 방법

모니터링은 1999-2002년 기간동안 수행되어졌으며 강우량, 유출유량 측정 및 수질분석으로 구성되어 연구되어졌다. 강우량 모니터링은 자동 강우량계를 고속도로 현장에

설치하여 강우 시 1분 단위로 강우량을 측정하였다. 자동으로 측정된 강우량 결과는 연구실에서 1분 단위 강우량, 15분 강우강도, 총 강우량, 최대강우강도, 강우지속시간 등으로 분류되어 통계학적 분석을 실시하였다. 또한 유출량 측정을 위하여 현장에 자동측정 유량계를 설치하였으며 강우 시 노면으로부터 유출되는 유출 수량을 1분 단위로 자동 측정하여 유출계수 및 유출량을 산정하였다. 오염물질 부하량 및 EMC 산정 시 필요한 일반적인 항목은 강우전

건기일수(Antecedent Dry Days, ADD), 유역면적, 유역경사, 하루평균 통행차량 대수(Average Daily Traffic, ADT) 등으로 조사가 이루어졌다.

강우 시작 후 수질채취는 두 가지 방법으로 수행되었는데, 이는 임의채취 방법과 유량을 가중치로 고려한 종합채취 방식으로 구성되어졌다. 임의 채취는 초기 강우 영향을 조사하기 위하여 강우유출이 시작된 후 1시간동안 집중적으로 시행되었으며, 1시간 이후에는 1시간 단위로 강우가 끝날 때까지 수질 샘플을 채취하였다. 종합채취는 EMC 계산을 위하여 수행되었으며, 시간에 따른 자동 채취가 아니라 유출율에 따라 채취하는 부피가 달라지는 유량 가중 방식을 채택하였다.

채취된 유출수 시료는 유출되는 오염물질의 종류와 농도를 파악하기 위하여 실험실에서 다양한 수질분석항목을 선정하여 수행되어졌다. 입자상 물질로는 TSS, VSS, 탁도의 분석이 이루어졌으며, 유기물질분석으로는 TOC와 COD, 영양염류로는 NO₂-N, NO₃-N, TKN, T-N, PO₄-P, T-P의 분석이 이루어졌다. 고속도로 강우유출수에는 많은 차량의 운행으로 인하여 다량의 중금속이 유출될 것이 확실하기에 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Fe, Hg 등의 항목에 대하여 입자상 및 용존 중금속 분석도 이루어졌다. 그리고 고속도로에서 유출 가능한 오염물질 중에서 수계에 영향을 끼칠 수 있는 Cl, Oil&Grease, Total coliform, E. coli, Hardness, Alkalinity, pH 등이 측정되어졌다. 또한 유해 화학물질인 PAH에 관한 분석도 이루어졌지만 본 논문에서는 입자상 물질, 영양염류, 유기물질, 중금속 등에 대하여 결과를 보여주하고자 한다.

Table 3은 모니터링 지점별 유역면적, 평균 운행차량대수, 강우발생 일시, 강우 전 건조일수, 강우지속시간, 이벤트별 총 강우량 및 이벤트별 총 유출수량을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우 유출수의 통계학적 분석

모니터링 기간 중 측정된 중금속의 농도에 대한 통계학적 분석이 Fig. 3에 나타나 있으며, 여기에는 최소, 최대, 중간값, 평균값, 분산, 이상점(outliers), 95% 신뢰구간(Confidence interval) 및 각 % 별 사분위간 범위(interquartile range)를 보여준다. 고속도로 강우유출수내의 중금속 농도는 광범위한 범위를 보이고 있다. 이는 일반적인 유기물질 농도의 통계학적 분석에서도 발견되는데, 그 원인은 초기강우 영향 때문이다. 강우 유출 초기에 고농도의 오염물질의 대량 유출됨으로써 초기강우가 끝난 이후로는 저농도의 오염물질이 유출되기 때문이다.

고속도로 강우 유출수 수질의 통계학적 분석에 의하면, As, Cr 및 Cd의 농도는 매우 낮게 나타났다. 중간값을 보면 Total As는 4.3ug/L(2-20ug/L), Total Cr은 10ug/L 및 Total Cd의 경우 1.5ug/L로 나타났다. 일반적으로 고속도로 유출수에서 발견되는 As와 Cd는 타이어, 금속판, 브레이크 및 엔진의 마모와 살충제로부터 기인하는데 그 농도는 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다. 특히 Cd는 많은 이상점이 나타나는데, 이는 저농도로 인한 영향으로 파악되었다. 유출수 중에서 고농도로 발견되는 중금속은 주로 Cu, Ni, Pb, 및 Zn으로 나타났으며, 중간값은 Cu가 64ug/L(10-1000 ug/L), Ni이 17ug/L(1-400ug/L), Pb가 25ug/L(1-200ug/L) 그리고 Zn이 320ug/L(30-7000ug/L) 정도로 나타났다. 그러나 본 통계에서 보여주는 농도 값들은 전 강우지속기간 동안 발생된 모든 수질농도의 결과를 보여주고 있기에, 초기강우의 값들은 주로 높은 값들이 이를 대표한다.

3.2. 유출 오염물질 평균농도 산정 및 통계분석

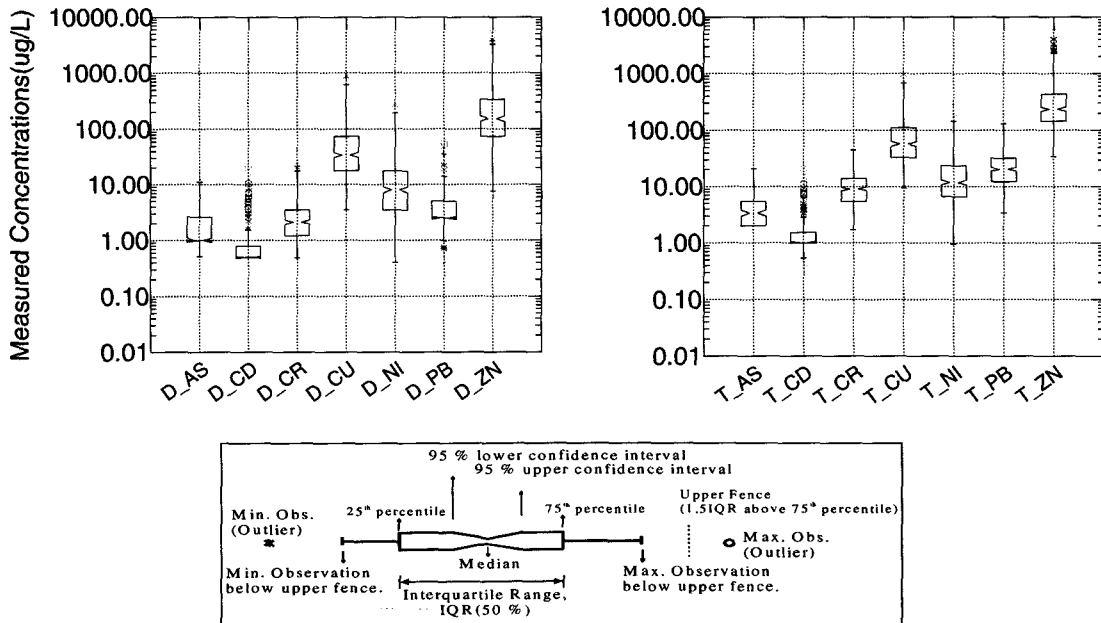
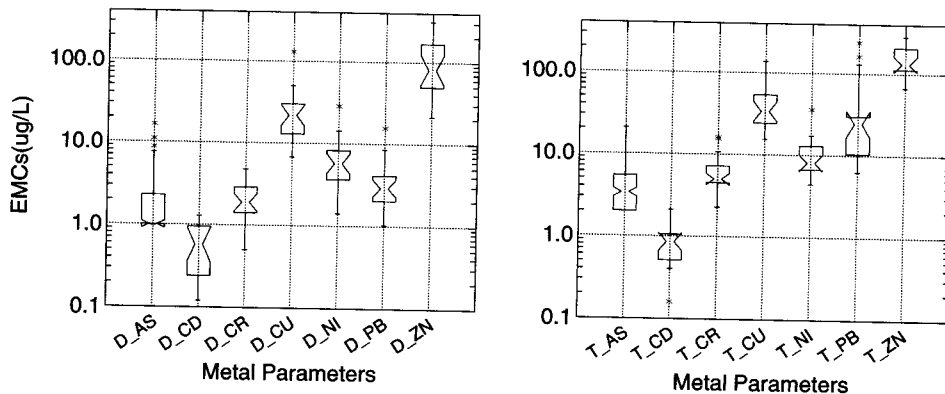


Fig. 3. Statistical analysis for measured runoff concentrations.

Table 4. Statistical summaries of EMCs and mass loadings

Parameters [Unit: EMC(mg/L), Mass Loading(g/m ²)]		Basic Statistics					Confidence Interval		
		No. of Events	Min.	Max.	Median	Mean	StDev.	95% Upper	95% Lower
TSS	EMC	39	5.21	874.23	87.54	159.57	175.22	216.37	102.78
	Mass Loading		0.06	17.27	0.83	2.43	3.91	3.71	1.14
COD	EMC	26	13.51	776.71	102.87	178.16	182.3	251.79	104.53
	Mass Loading		0.1	3.23	0.98	1.19	0.91	1.56	0.83
TOC	EMC	21	7.36	59.26	12.82	18.09	13.27	24.13	12.05
	Mass Loading		0.03	0.85	0.14	0.22	0.23	0.33	0.12
TKN	EMC	19	1.93	33.85	3.15	6.3	8.06	10.18	2.42
	Mass Loading		0.01	0.15	0.02	0.04	0.04	0.06	0.02
TP	EMC	31	0.11	1.54	0.31	0.41	0.32	0.53	0.3
	Mass Loading		0	0.04	0	0.01	0.01	0.01	0
Oil & Grease	EMC	37	0.52	34.57	5.23	8	7.73	10.58	5.42
	Mass Loading		0.01	0.39	0.05	0.08	0.08	0.11	0.05

**Fig. 4.** Statistical summaries for metal EMCs.

건조 시 고속도로 노면에 축적된 오염물질들은 유역에 내리는 강우에 의해 유출이 이루어지게 된다. 유출된 오염물질은 곧 인근의 수계나 토양으로의 유입으로 이어져 수계에 부영양화를 일으키는 원인으로 작용하거나, 지하수 오염의 원인으로 작용하게 된다. 또한 일부는 수계에서 퇴적층으로 축적되어 분해에 오랜 기간이 소요되거나 장기적인 내부 오염물질들로 작용하게 된다. 따라서 고속도로에서 발생하는 오염물질들의 부하량을 산정하기 위해 강우당 평균 농도, 즉 EMC가 어느 정도인지의 파악이 중요하다.

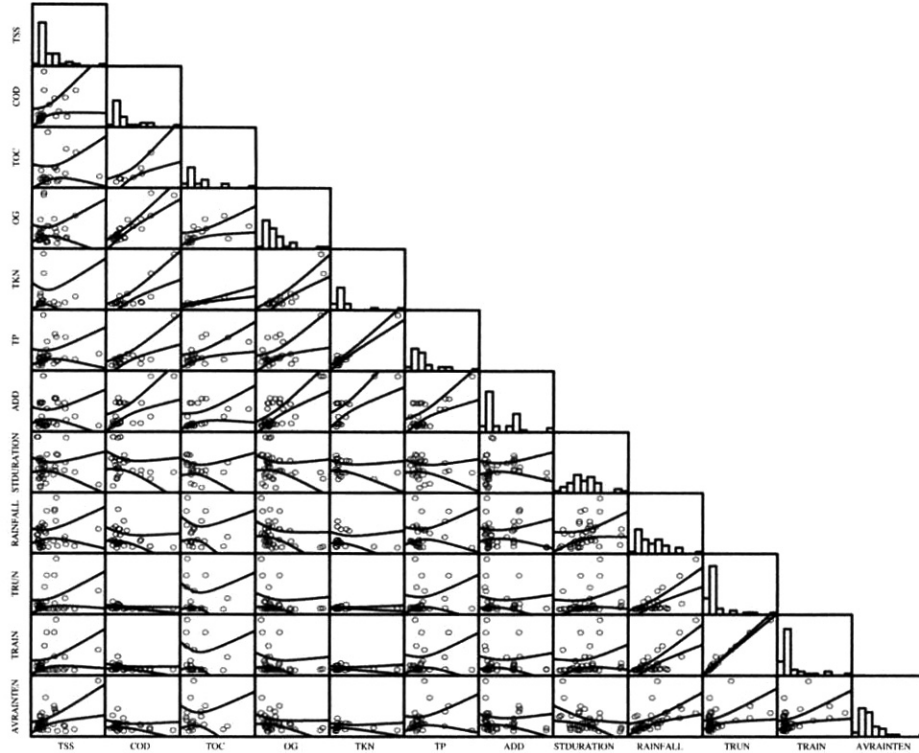
Table 4는 고속도로 유출수에서 일반적으로 발견되는 일반 수질항목에 대한 EMC와 오염물질 부하 농도를 나타내고 있다. TSS EMC의 범위는 5에서 880mg/L를 보이며 COD EMC는 13에서 약 780mg/L로 상당히 넓은 범위를 보이고 있다. Oil & grease의 EMC는 0.5에서 34mg/L의 범위를 나타내는 것으로 산정되었다.

넓은 EMC의 범위는 한 종류의 토지이용에서조차 EMC를 예측한다는 것이 쉽지 않음을 나타낸다. 즉 다양한 토지이용에서 기인하는 비점오염원 연구에서 EMC의 중요성

은 다시 한번 강조되는 현상이다. 이러한 어려움으로 인하여, 비점오염원 연구는 많은 모니터링 결과를 이용한 확률통계학적 자료만이 귀중하게 사용될 수 있음을 나타낸다. EMC의 95% 신뢰구간을 살펴보면, TSS는 약 102.8에서 216.4mg/L의 범위를 나타내며, COD는 104.5에서 251.8mg/L, Oil & Grease는 5.4-10.6mg/L, 그리고 TKN은 2.4-10.2mg/L를 나타내고 있다. Fig. 4는 중금속 오염물질에 대한 EMC의 통계학적 분석결과를 나타내고 있다.

3.3. 고속도로 오염물질 유출 영향인자

강우 시 고속도로로부터 오염물질의 유출에 끼치는 영향인자를 파악하기 위하여 측정된 현장조사 자료 및 모니터링 결과 비교 분석하였다. Fig. 5는 TSS, COD, TOC, Oil & Grease, TKN, TP 등의 수질오염 항목에 대하여 강우 전 건조일수(ADD), 강우지속시간(STDURATION), 이벤트 강우량(RAINFALL), 이벤트 전체 강우량 부피(TRAIN), 이벤트 전체 강우 유출량(TRUN) 및 평균강우강도(AVER-AINTEN)와 비교한 결과를 나타내고 있다. 통계학적 분석



	TSS	COD	TOC	OG	TKN	TP	ADD	STDURATION	RAINFALL	TRUN	TRAIN	AVRAINTEN
TSS		0.82	0.75	0.61	0.74	0.18	0.51	0.09	-0.13	-0.70	-0.68	-0.19
COD	0.05		0.87	0.92	0.81	0.16	0.03	-0.44	0.05	-0.66	-0.64	0.16
TOC	0.08	0.03		0.86	0.99	-0.08	-0.16	-0.43	-0.13	-0.38	-0.35	0.04
OG	0.20	0.01	0.03		0.77	0.07	-0.30	-0.55	-0.08	-0.60	-0.59	0.14
TKN	0.09	0.05	0.00	0.07		-0.06	-0.13	-0.40	-0.17	-0.29	-0.26	-0.01
TP	0.73	0.77	0.88	0.89	0.91		0.15	0.11	-0.49	-0.36	-0.40	-0.55
ADD	0.31	0.95	0.77	0.56	0.80	0.78		0.70	0.12	-0.38	-0.37	-0.21
STDURATION	0.86	0.39	0.39	0.26	0.43	0.84	0.12		-0.41	-0.24	-0.24	-0.65
RAINFALL	0.80	0.93	0.80	0.89	0.75	0.33	0.83	0.43		0.27	0.29	0.94
TRUN	0.12	0.16	0.45	0.21	0.58	0.48	0.46	0.64	0.60		1.00	0.30
TRAIN	0.14	0.17	0.49	0.22	0.62	0.43	0.47	0.64	0.58	0.00		0.32
AVRAINTEN	0.72	0.77	0.94	0.79	0.98	0.26	0.70	0.16	0.01	0.56	0.54	

Note: ADD (Antecedent Dry Days, days), STDURATION (Storm Duration, hours), TRUN (Total Volume of Runoff, m³), TRAIN (Total Volume of Rainfall, m³) and AVRAINTEN (Average Rainfall Intensity, cm/hr)

Fig. 5. Affecting factors for washed-off pollutant mass.

을 통하여 영향인자를 파악한 결과 이벤트 전체 강우량 부피(TRAIN)와 이벤트 전체 강우 유출량(TRUN)은 건조전 강우일수와 더불어 중요한 유출 영향인자로 도출되었다 (Kim, 2003).

3.4. 도로 유출수 농도 예측 모형

비점오염원으로부터의 유출되는 오염물질 농도예측은 점오염원과는 다른 특유의 불확실성 때문에 예측이 쉽지 않다. 특유의 불확실성은 유역의 형상, 토지이용, 강우특성 및 기타 환경 인자들에 기인하는데, 이 중에서 토지이용과 강우특성은 매우 중요한 영향인자들이다.

토지이용은 유출되는 오염물질의 종류를 변화시키며, 강우특성은 오염물질의 유출경향을 변화시키기 때문이다. 기타 환경인자로는 강우 전 건조일수, 평균 운행 자동차 대수, 바람의 영향 등이 포함되며, 이들도 유출되는 오염물질의 농도 예측을 어렵게 만든다. 그러나 단일 토지이용에 관련되는 비점오염물질의 유출 농도는 다양한 토지이용을 가진 유역과는 달리 유출되는 오염물질의 종류를 모니터링을 통해 쉽게 파악할 수 있기 때문에, 여러 가지 영향인자들 중에서 크게 영향을 끼치는 인자들을 해석을 통해 도출함으로써 농도의 예측이 가능하다.

오염물질의 농도예측에 사용 가능한 모델을 개발하기 위

하여 접근하는 방식은 다양하다. 이론에 근거한, 즉 물질이 송과 이동에 기인한 모델접근방법과 수많은 실험결과를 이용한 확률통계 접근 방식이 많이 이용되고 있는데, 이러한 접근 방식은 오염물질의 경향 및 이동특성들을 파악함으로써 결정할 수 있다. 도로에서와 같이 강우 시 집중적으로 유출되는 오염물질의 농도예측은 확률통계학적인 접근 방식이 많이 이용되고 있는데, 이는 이미 수많은 모니터링을 통하여 결과를 확보한 경험도 있지만, 강우의 특성과 유역의 특성 등 오염물질의 유출에 끼치는 영향인자들이 많이 존재하기 때문이기도 하다.

Table 5는 고속도로와 같이 포장된 단일 토지이용에서 농도예측을 위해 기존에 제안된 모델들을 보여준다. 도로에서 사용 가능한 농도 예측 모델들은 1990년대 후반부터 미국을 비롯하여 독일, 프랑스, 네덜란드 등 유럽 각국에서 비점오염원 연구의 큰 부분으로 활발하게 연구가 진행 중이다. 대부분의 모델들은 도로로부터 오염물질의 축적에 관

련되는 영향인자들과 강우로 발생하는 영향인자들을 고려한 식들이다. 모든 확률통계에 기인한 모델들이 그러하듯이, 비점오염물질의 유출 농도예측은 수많은 영향인자들 중에서 주요하게 영향을 끼치는 인자들을 도출하여 모델에 적용함으로써 수행되어진다. 기존의 모델들이 도로로부터 유출되는 오염물질의 예측에 고려한 영향인자들은 주로 강우량, 강우강도, 건조 전 강우일수, 교통량, 유출량, 강우지속시간 등이다.

그러나 이러한 확률통계학적인 모델들은 유역의 특성이 고려된 경험식으로 인식되기에 유역 특성 및 강우 특성이 다른 유역에서는 사용하지 못하거나 또는 유역상수를 구하여야만 적용이 가능한 문제점이 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 확률통계학적 방식과 이론적인 물질이동을 고려한 새로운 접근 방식이 필요하다. 식 (2)는 도로로부터 유출되는 오염물질의 농도를 예측하기 위하여 이러한 접근 방식을 채택하여 도출된 모형이다.

Table 5. Previous models for washed-off concentrations from streets (Kim, 2002)

References	Previous Models	Explanations
Grottker (1987)	$L_w = L_{w0} \exp(k_1 R)$	R = effective rainfall
Gupta and Saul (1996)	$Load_{ff} = f \left(\begin{matrix} EMC_f, EMF, RFINT, QIN_{max} \\ STDURN, ADWP, Flow \end{matrix} \right)$ $Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + \dots + A_n X_n$ $Load_{ff} = a(StDu)^b (RFINT)^c (ADD)^d$	$Load_{ff}$ = cumulative load in the first flush, kg EMF = event mean flow, $RFINT$ = rainfall intensity, ADD = antecedent dry weather periods $StDu$ = total storm duration, QIN = inflow rate, $R^2 > 0.5$
Saget et al. (1995)	$Y = X^a$	Y = the fraction of discharged pollutant load X = the fraction of discharged volume
Barrett et al. (1998)	$Conc. = a \cdot \exp(-k_1 \cdot H)$	$Conc.$ = concentration, mg/L
Bertrand-krajewski et al.(1998)	$Y = X^a$	Y = the fraction of discharged pollutant load X = the fraction of discharged volume
Charbeneau and Barrett (1998)	$L_w = L_2 + (L_0 - L_2) [1 - \text{Exp}(-k_1 \cdot t)]$	
Deletic and Maksimovic (1998)	$Load_w = a \cdot R_v$	R_v = runoff volume, L/m^2 $R^2 > 0.86$ No correlation between concentration and ADP
Irish et al. (1998)	$Load_w = a + b(Flow) + c(Intensity)$ $+ d(ADP) + e(PINT) + g(PFLOW)$	$PINT$ = the intensity of the preceding event($L/m^2 \cdot \text{min}$) $PFLOW$ = the total volume per unit area(L/m^2) $R^2 > 0.9$
Osuch-Pajdzinska and Zawilski (1998)	$L_w = L_{w0} [1 - \exp(-kH)]$	
Wu et al. (1998)	$L = a + b \cdot VDS$	VDS = total traffic count during a storm event
Chiew and McMahon (1999)	$Load = a(Runoff)^b$	
Becher et al. (2000)	$\ln(L) = B_0 + B_1 \ln(Q_{ru}) + B_2 \ln(Q_{ru})^2$ $+ B_3 t + B_4 t^2 + B_5 \sin(2\pi t) + B_6 \cos(2\pi t)$	$B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$ and B_6 = regression co.

$Load_w$ = the load of pollutant washed-off (kg/m^2); L_w = the load of pollutant washed-off (kg); L_{w0} = pollutant load accumulated on catchment surface prior to rainfall (kg); K = coefficient of washoff rate (1/m); H = total depth of runoff (m).

$$\frac{dm}{dt} = -(k_1 m + k_2 m)Ru(t)^{k_3} - k_1 m \left(\frac{1}{R_c} - 1 \right) Ru(t) \quad (2)$$

여기서, dm/dt = 시간에 따른 유출 오염물질 변화량, $Ru(t)$ = 시간에 따른 유출수율, R_c = 유출계수, k_1 , k_2 , 및 k_3 = 유역 특성 상수.

3.5. 모형의 적용 및 검토결과

식 (2) 모형은 동적 물질이동(dynamic mass transport)의 식으로 나타내어져 있으며, 오염물질의 유출에 끼치는 영향 인자들과 고속도로 강우 유출수의 수질특성을 확률통계학적으로 해석하여 변수들을 선택하였다.

Fig. 6은 새로운 동적 모형을 california에 소재하고 있는 Los Angeles지역의 고속도로 유역에 적용한 COD 농도 예

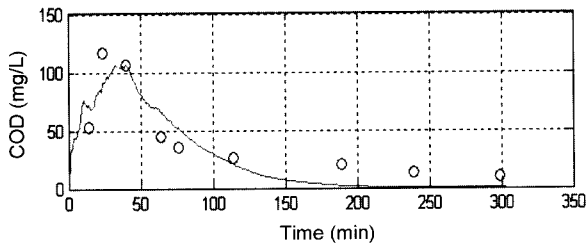


Fig. 6. Example of COD simulation result using new model. (O: measured, -: predicted).

측결과를 보여주고 있다. Fig. 7은 모니터링을 통하여 얻어진 결과들과 모형을 적용하여 얻어진 결과를 비교하고 있다. TSS의 경우 84%이상의 상관계수(R^2)값을 나타내고 있으며, COD, Oil & Grease 및 TKN의 경우 90% 이상의 값을 보여주고 있다. 즉 동적 오염물질 유출모형이 단일 토지이용으로 사용되는 고속도로에서 적용 가능성이 높다는 결과를 나타내고 있다.

4. 결론

고속도로는 광역단체를 잇는 사회기반시설로서 특정지역에서 발생한 오염물질이 어느 한곳에 머무르지 않고 타 지역으로의 이송이 쉽다는 특징을 가지고 있다. 또한 많은 고속도로 및 도로들이 수계 및 도시들을 인접하여 통과하고 있다. 이러한 특징으로 인하여 고속도로에는 건조 시 각종 유기물, 입자상 물질 및 중금속 등 많은 양의 오염물질들이 고속도로에 축적되어 있다가 강우 시 인근 수계나 토양으로 유입되어 장기적인 내부 오염원으로 작용하며 수질 및 지하수에 악영향을 끼친다. 따라서 고속도로 강우 유출수내의 오염물질 문제는 오염총량제의 한 부분으로 중요하게 다루어야 할 부분이다.

본 연구는 미국 Los Angeles지역을 대상으로 선정하여 고속도로 강우 유출수와 유출오염물질과의 관계를 모니터링과 모델링 연구를 통하여 규명하고자 하였으며, 아래에

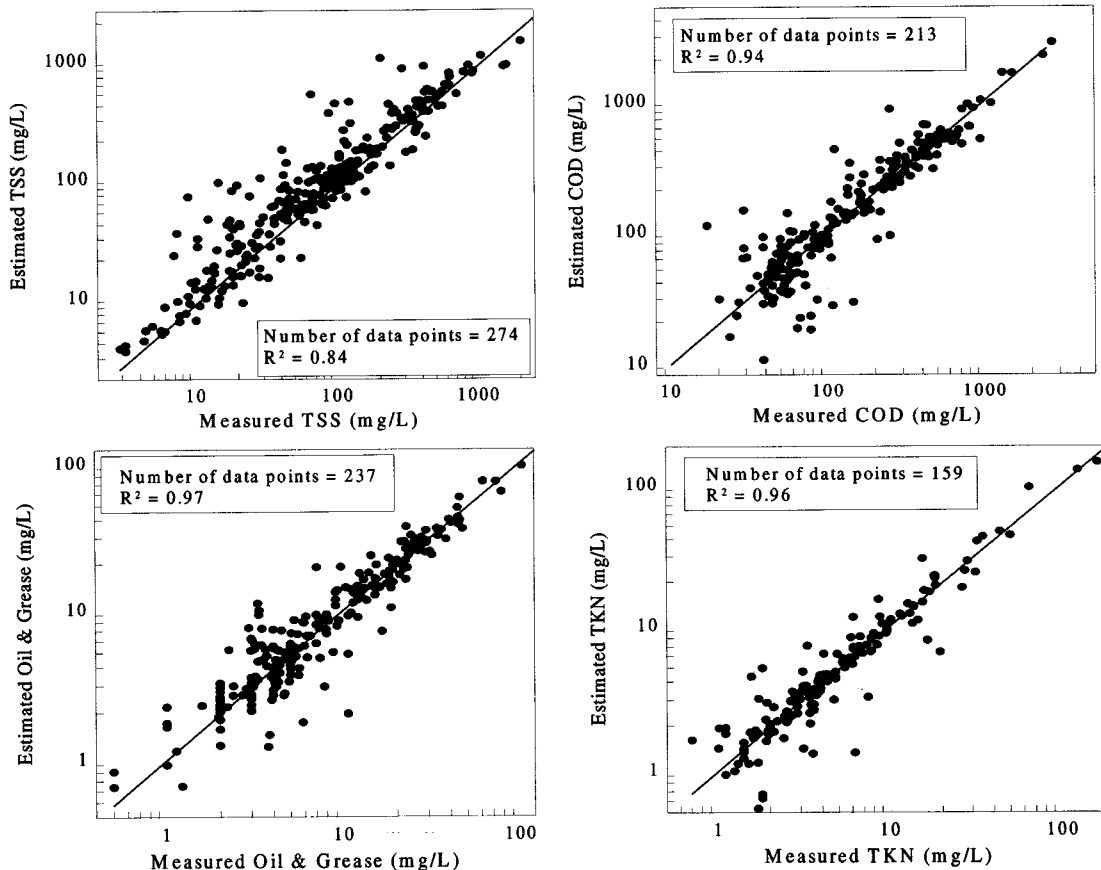


Fig. 7. Relationship between measured and estimated concentrations.

정리된 연구 결과는 국내에서도 긴요하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

1. 유역의 특성 및 강우의 특성에 의하여 큰 영향을 받는 비점오염물질의 유출경향은 일반적으로 강우 이벤트 당 농도, 즉 EMC로 대표되며 중요한 연구 분야이다. 하지만 EMC는 강우의 특성에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구의 결과에 의하면, TSS가 5-880mg/L, COD가 13-780mg/L 및 Oil & grease가 0.5-34mg/L의 범위를 나타내는 것으로 산정되었다. EMC의 95% 신뢰구간을 살펴보면, TSS는 102.8-216.4mg/L, COD는 104.5-251.8mg/L, Oil & Grease는 5.4-10.6mg/L, 그리고 TKN은 2.4-10.2 mg/L를 나타냈다. EMC 값의 넓은 범위는 유역특성(특히 유역면적), 강우강도, 유출계수, 강우전 건조일수 및 평균 통해 차량대수 등에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.
2. 유역면적에 따른 오염물질 부하량의 95% 신뢰구간은 TSS의 경우 1.14-3.71g/m², COD의 경우 0.83-1.56g/m², TOC의 경우 0.12-0.33g/m², TKN의 경우 0.02-0.06g/m², Oil & Grease의 경우 0.05-0.11g/m²로 산정되었다.
3. EMC값은 강우의 지속시간, 이벤트 총 강우량, 이벤트 총 유출유량 및 강우강도에 반비례 하여 상관되는 경향을 보였다. 즉, 큰 강우일수록 오염물질의 희석효과에 의하여 적은 EMC값을 보였다.
4. 유출수 중에서 고농도로 발견되는 중금속은 주로 Cu, Ni, Pb, 및 Zn였으며, Tot Cu의 범위가 10-1,000ug/L, Tot Ni이 1-400ug/L, Tot Pb가 1-200ug/L 그리고 Tot Zn이 30-7,000ug/L의 범위를 나타냈다.
5. 본 논문에서 제안한 동적 오염물질 유출 모델은 단일 토지이용 중에서 포장율이 높아 유출이 급격히 일어나는 고속도로 등과 같은 유역에서의 유출농도 예측에 적용율이 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 California 교통국(California Department of Transportation)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

Barrett, M.E., Irish, Jr. L.B., Malina, Jr. J.F., and Charbeneau, R.J., Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area, *J. of Environmental Engineering*, **124**(2), pp. 131-137 (1998).

Becher, K.D., Schnoebelen, D.J., and Akers, K.K.B., Nutrients discharged to the Mississippi River from Eastern Iowa watershed, 1996-1997, *J. of The American Water Resources*

Associa., **36**(1), pp. 161-173 (2000).

Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G., and Saget, A., Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon, *Wat. Res.*, **32**(8), pp. 2341-2356 (1998).

Charbeneau, R.J., and Barrett, M.E., Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads, *J. of Water Environmental Research*, **70**(7), pp. 1295-1302 (1998).

Chiew, F.H.S., and McMahon, T.A., Modeling runoff and diffuse pollution loads in urban areas, *Wat. Sci. & Tech.*, **39**(12), pp. 241-248 (1999).

Deletic, A.B., and Mahsimovic, C.T., Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas, *J. of Environmental Engineering*, **124**(9), pp. 869-879 (1998).

Grottker, M., Runoff quality from a street with medium traffic loading, *The Science of the Total Environment*, **59**, pp. 457-466 (1987).

Gupta, K., and Saul, A.J., Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows, *Wat. Res.*, **30**(5), pp. 1244-1252 (1996).

Irish, Jr. L.B., Barrett, M.E., Malina, Jr. J.F., and Charbeneau, R.J., Use of regression models for analyzing highway storm-water loads, *J. of Environmental Engineering*, **124**(10), pp. 987-993 (1998).

Kim, L.-H., *Monitoring and Modeling of Pollutant Mass in Urban Runoff: Washoff, Buildup and Litter*, Dissertation of Ph. D., University of California, Los Angeles (2002).

Kim, L.-H., Choi, E., and Stenstrom, M. K., Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments, *Chemosphere*, **50**(1), pp. 53-61 (2003).

Kim, L.-H., Kayhanian, K., Lau, S.-L., and Stenstrom, M. K., A new modeling approach in estimating first flush metal mass loading, *Conference proceedings of 7th International Conference on Diffuse Pollution*, August, Dublin, Ireland (2003).

Kim, L.-H., Choi, E., Gil, K.-I., and Stenstrom, M. K., Phosphorus release rates from sediments and sediment characteristics in Han river, Seoul, Korea, *Science of the Total Environment*, **321**, pp. 115-125 (2004).

Osuch-Pajdzinska, E., and Zawilski, M., Model of storm sewer discharge. I: description, *J. of Environmental Engineering*, **124**(7), pp. 593-599 (1998).

Saget, A., Chebbo, G., and Bertrand-Krajewski, J., The first flush in sewer system, *Proceeding of the 4th Int. Conf. on Sewer Solids-Characteristics, Movement, Effects and Control*, pp. 58-65, Dundee, UK (1995).

U.S. EPA, *Nonpoint sources pollution control program*, U.S. EPA, Report 841-F-94-005, USA (1994).

Wu, J.S., Allan, C.J., Saunders, W.L., and Evett, J.B., Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff, *J. of Environmental Engineering*, **124**(7), pp. 584-592 (1998).