



강우시 고속도로 노면 유출 오염부하 발생 특성 분석 Relationship between Pollutant and Influence Factors in Highway runoff

강희만¹ · 이두진² · 배우근³ · 강혜진¹

Hee Man Kang¹ · Doojin Lee^{2*} · Wookeun Bae³ · Hye Jin Kang¹

1 한국도로공사 도로교통기술원, 2 K-water연구원 상하수도연구소, 3 한양대학교 건설환경공학과

(2011년 9월 1일 접수; 2012년 2월 6일 수정; 2012년 2월 10일 채택)

Abstract

This study analyzed influence factors and the correlation among pollutants which affect occurrence of leaked pollution based on the long-term runoff flow and water quality investigation results to understand the characteristics of highway rainfall runoff pollution load. According to the result of correlation analysis on TSS (Total Suspended Solid) concentration, antecedent dry days, rainfall intensity, traffic volume and etc. as major influence factors of highway rainfall runoff pollution loads, the correlations were weak or scarce in most items.

These results might be attributed that runoff pollutant concentration changes vary severely on changes of rainfall intensity and rainfall duration within rainfall and it is affected by disturbances of vehicles and street cleaning and etc. as characteristics of the highway. While Cu, Fe and Zn which are discharged with high concentrations out of heavy metals showed high correlation with particulate matter, organic matter(COD), nutrient(TN, TP), Ni and Pb showed relatively low correlation in a correlation evaluation by pollutant. Significant correlation with traffic volumes was not shown and TSS concentration even decreased in accordance with increase of the traffic volume.

In the comparison with precedent studies, it was considered necessary additional analysis of the effects of rainfall section analysis, road type, disturbances of surface contaminants by vehicles, rainfall and climate conditions, surrounding terrains etc.

Key Word : Highway, Runoff Pollution Load, Correlation, Influence Factor

주제어 : 고속도로, 강우유출수 오염부하, 상관관계, 영향인자

1. 서론

고속도로, 일반도로, 주차장 등의 포장지역에서 유출되는 비점오염원은 유출계수가 높고, 배수로에 이르는 거리가 짧아 단기간에 높은 농도로 유출되는 전형적인 초기세척현상을 보이는 특성이 있다

(Kayhanian and Stenstrom, 2008).

도로의 경우 크게 고속도로와 일반도로로 구분되고 고속도로는 중앙분리대로 양방향으로 구분되고 입체교차로를 원칙으로 하는 도로를 말한다(국토해양부, 2011).

* Corresponding author : Tel : 042-870-7503 Fax : 042-870-7549 E-mail : djlee@kwater.or.kr

도로법(2011)상에서 일반도로는 기능상 주간선도로, 보조간선도로, 집산도로, 국지도로 구분되고, 도시계획법상에서는 사용형태에 따라서 자동차전용, 보행자전용, 고가도로, 지하도로 등이 있고, 도로폭에 따라 광로, 대로, 중로, 소로 등으로 구분된다.

이처럼 도로의 종류가 다양하고 도로내 운행차량 뿐만 아니라 인접지역에서의 인간의 활동, 주변토지 이용형태 등에 따라 노면의 오염물 축적과 강우시 유출오염부하발생에 영향을 미치게 된다.

특히 고속도로와 같이 차량이외의 외부 오염원 접근이 어려운 지역의 경우, 강우유출 오염부하가 차량운행으로부터 기인하는 오염물질에 밀접한 연관성을 보이게 된다. 또한 고속도로는 대부분 도시와 도시를 연결하는 농지, 산지, 대지 등 비교적 자연환경이 잘 보존되어 있는 지역을 관통하여 건설되기 때문에 강우시 유출오염부하가 인근 수계나 환경에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

현행 우리나라 수질오염총량관리 기준에서는 모든 도로를 형태나 구조에 구분없이 일반대지로 분류하여 1995년 설정된 BOD 85.9 kg/km²/d, TN 13.7, TP 2.1 kg/km²/d를 적용하고 있으며 이로 인하여 수질오염총량관리 이행계획수립시 도로부분의 비점오염저감에 대한 검토가 일반대지와 동일하게 적용되고 있는 실정이다.

이러한 원단위 기준은 앞서 언급한 바와 같은 다양한 도로의 특성이 제대로 반영되지 못하였기 때문에 비점오염부하량 산정시 심각한 오차를 발생시키고, 기준 원단위에 따라 저감시설의 계획이나 설계시에도 이러한 오차가 영향을 미칠 수 있는 문제가 있다.

수질오염총량관리가 시행되면서 발생오염부하에 대한 장기적인 조사를 통하여 각 토지 이용형태별 원단위를 꾸준히 축적해 왔으나, 국내 고속도로에 대한 독립적인 원단위를 조사한 사례는 많지 않았다.

본 연구에서는 고속도로 강우유출수 오염부하의 발생특성을 이해하기 위하여 장기간의 강우 유출

유량 및 수질조사를 토대로 주요 오염물질, 유출오염 발생에 영향을 미치는 영향인자, 오염물질간의 상관관계 등에 대하여 분석하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구내용

본 연구에서는 고속도로내 세부 토지별로 강우유출수 발생 조사결과를 토대로

- 1) 초기세척 강우범위 결정
- 2) 영향인자별 상관관계 분석
- 3) 오염물질별 상관관계 분석 등을 수행하였으며, 발생특성에 대한 이해뿐만 아니라 관리대안 수립, 처리시설 선정 등에 활용할 수 있는 정보를 제공하고자 하였다.

2.2 연구방법

본 연구에서는 국내 주요 고속도로에서 발생하는 강우유출수를 대상으로 강우, 유량, 수질 등의 분석을 통하여 강우유출 오염부하의 발생특성과 영향을 분석하고자 하였다.

조사대상지점, 조사방법, 조사대상 강우 등은 강(2011)와 동일하게 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 도로 초기세척 강우 기준 산정

불투수면 비율이 점차 증가하고 있는 도시지역에서 유출되는 비점오염물질의 가장 큰 특징은 강우가 발생하고 유출이 시작되는 초기에 고농도의 오염물질 유출이 일어나는 초기세척 현상이다. 특히 도로, 주차장과 같은 포장지역의 경우 이러한 초기세척 현상이 현저하고 단기간에 고농도로 발생하는 특성이 있기 때문에 초기세척 강우유출수의 발생시점을 고려하는 것이 처리시설이나 관리대안 수립시 중요한 고려사항이 된다(Bertrand-Krajewski et. al,

1998; Wu et. al, 1998).

따라서 본 연구에서는 김 등(2005)이 제안한 동적 EMC(Event Mean Concentration) 개념과 Geiger et al.(1987)이 제안한 표준 누적오염물질 부하량 대비 표준 누적 유출수 곡선을 활용하여 모니터링 자료를 분석함으로써 저감시설 설계 시 필요한 초기세척 강우 기준을 제시하고자 하였다.

Fig. 1은 모니터링 지점에서 수행된 조사결과를 바탕으로 동적 EMC를 도출한 예를 보여주는 것으로 강우유출이 시작된 이후 EMC는 20분까지 또는 50분까지 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 그

리고 나서 강우가 끝나고 유출이 끝나는 시간에 동적 EMC는 강우사상에 대한 대표 EMC로 끝나는 결과를 보인다.

Fig. 2와 Fig. 3은 측정된 모니터링 자료를 활용하여 표준 누적오염물질 부하량 곡선 대비 표준 누적 유출량 곡선을 도시한 예를 나타낸 것으로 초기세척 현상이 발생되는 경우 대부분 지수곡선(exponential curve)의 형태를 나타내었으며 동적 EMC와 유사하게 유출직후 30분에서 60분 사이에 유출농도가 현저하게 감소되는 것으로 나타났다.

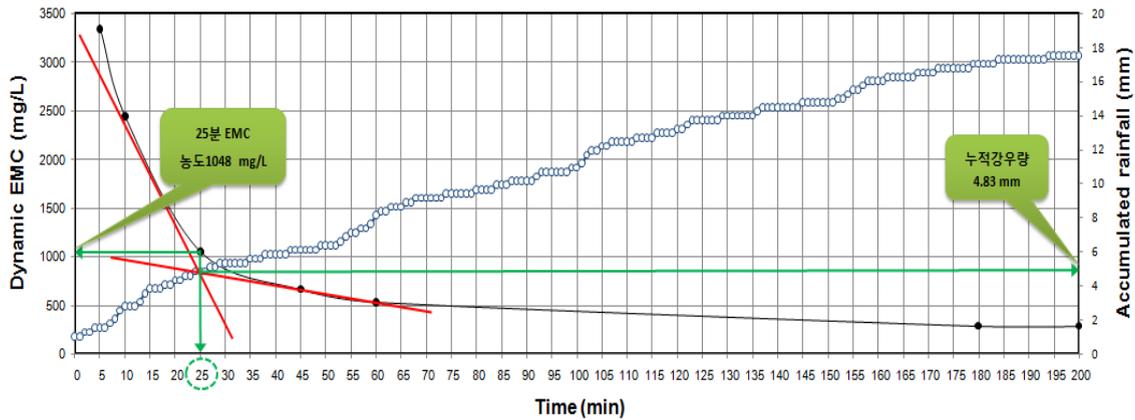


Fig. 1 Example of dynamic EMC(SS)

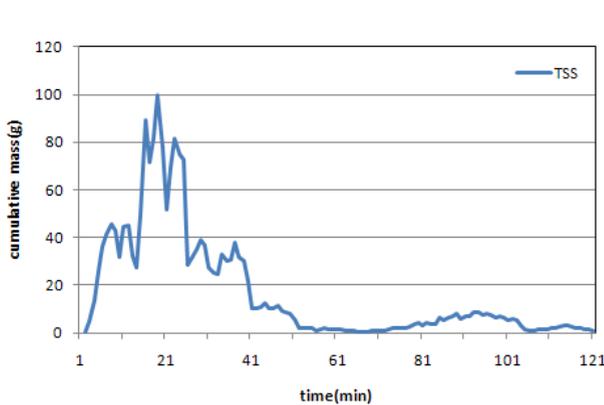


Fig. 2 Fluctuation of TSS concentration during a rain event

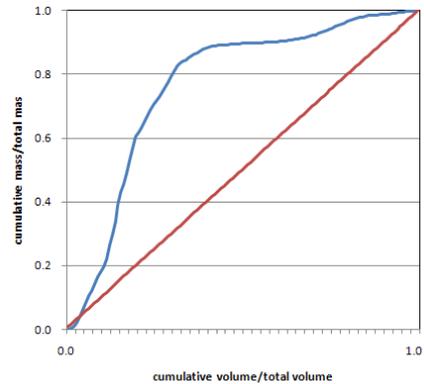


Fig. 3 Curve of cumulative volume and mass rate

Table 1은 초기세척 강우 기준을 산정하기 위하여 동적 EMC를 모니터링에 적용한 결과와 표준 누

적부하량 대 표준 누적유출량 결과를 통계학적으로 분석한 것이다. 전체 17개의 강우 사상에 대하여

동적 EMC를 산정한 결과 누적강우량의 초기세척 강우 기준은 5.19 mm(95% 신뢰구간 3.36-7.03 mm)정도로 산정되었으며 강우지속시간 기준은 31분(95% 신뢰구간 25.7-36.3분)으로 산정되었다. 또한 표준 누적부하량 대비 표준 누적 유출량 곡선을 활용하여 초기세척 기준을 도출한 결과 누적강우량의 초기세척 강우 기준은 5.87 mm (95% 신뢰구간 4.43-7.31 mm)로 산정 되었으며 강우지속시간 기준은 38.1분

(95% 신뢰구간에서 30.3-45.9분)으로 산정되었다. 따라서 고속도로의 초기세척 강우는 누적강우량 기준으로 5.19~5.87 mm, 강우시간으로는 초기 30~40분 사이에 발생하는 것으로 산정되었다. 향후 고속도로에서 비점오염원 저감방안 수립 시 경제적 처리용량 산정을 위해서는 본 결과를 활용하여 초기세척 유출오염부하를 대상으로 설계하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Table 1 Statistics analysis of runoff pollutant concentration to make decide first flush effect

Parameters	동적 EMC		누적 부하량 대비 누적 유출량 곡선 활용	
	Storm duration(min)	Accumulated Rainfall(mm)	Storm duration(min)	Accumulated Rainfall(mm)
No. of cases	17.0	17.00	17.0	17.00
Min.	16.0	0.25	23.0	1.02
Max.	53.0	16.00	59.0	9.14
Median	28.0	4.83	36.0	6.20
Mean	31.0	5.19	38.1	5.87
95% CI Upper	36.3	7.03	45.9	7.31
95% CI Lower	25.7	3.36	30.3	4.43
Standard Dev	10.2	3.57	13.2	2.44

3.2 상관관계분석

3.2.1 EMC와 강우특성인자 상관성 분석

고속도로 세부토지이용별로 산정된 EMC와 강우

특성인자와의 상관성분석에서 강우특성인자 중 선행건기일수, 강우량, 강우강도 등을 변수로 하였고, 입자상 물질인 TSS와의 상관관계를 분석하였다.

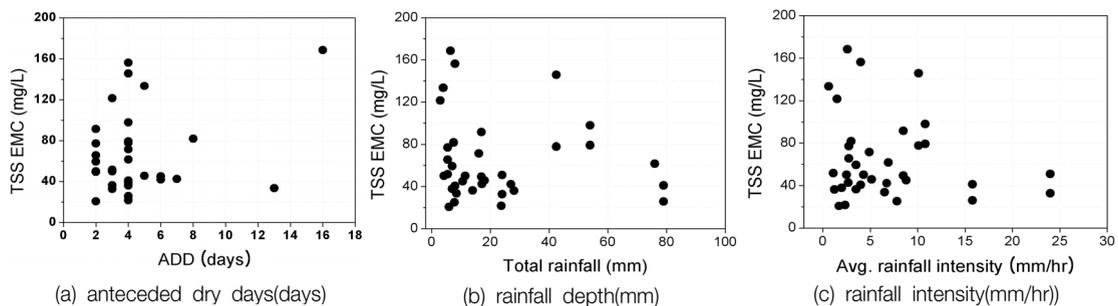


Fig. 4 Relationship between TSS EMC and rain event characteristics(highway-road)

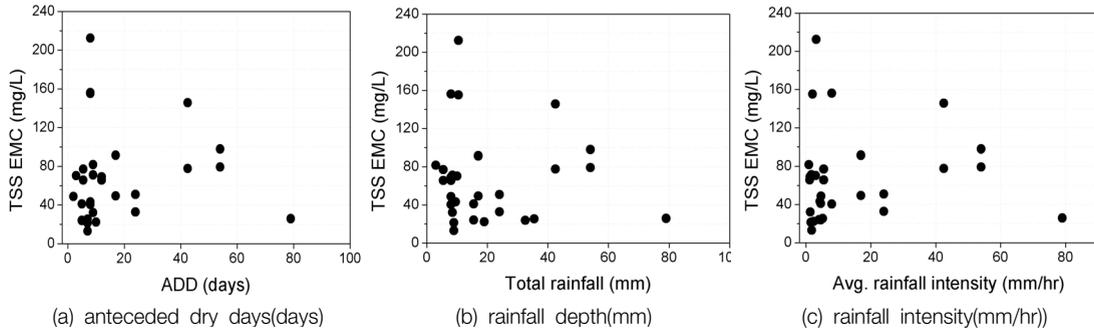


Fig 5. Relationship between TSS EMC and rain event characteristics(tollgates)

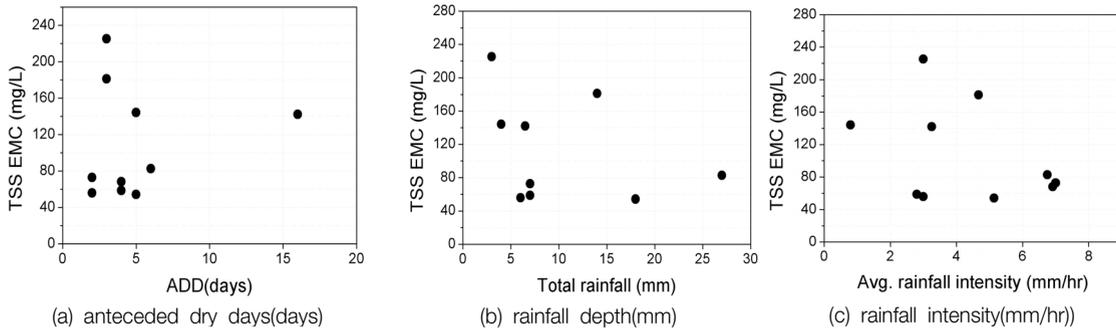


Fig 6. Relationship between TSS EMC and rain event characteristics(reststop)

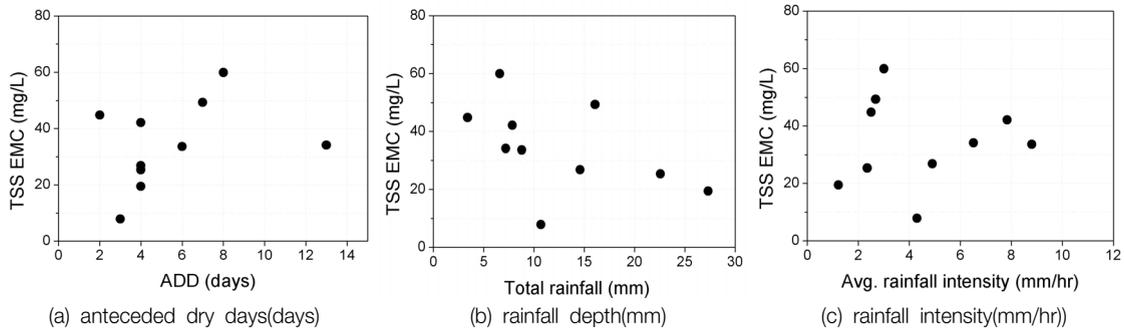


Fig. 7 Relationship between TSS EMC and rain event characteristics(hillside)

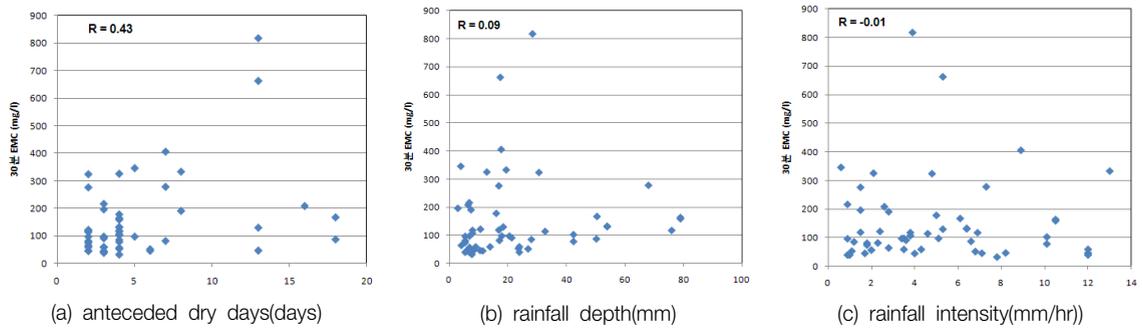


Fig. 8 Relationship to anteceded dry days, total rainfall depth, and rainfall intensity at initial 30 minutes

통상 강우유출 오염농도는 선행건기일수가 길수록 입자성 오염물질의 지표면 축적이 증가하여 유출농도(특히 초기)가 증가하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서 조사된 결과에서는 고속도로와 영업소, 휴게소에서 선행건기일수와 TSS사이엔 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않았다. 고속도로의 특성상 고속의 차량 운행으로 지표면이나 대기의 직간접적인 교란에 의하여 도로면의 오염물질 축적이 일정하게 증가하지 못했기 때문으로 추정된다. 반면에 Fig. 7로 사면지역에서는 상대적으로 TSS와 선행건기일수 사이에 뚜렷한 양의 상관관계를 보여주고 있어 차량운행이 선행건기일수의 영향에 방해 인자로 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 초기 30분 EMC와 선행건기일수, 총강우량, 강우강도와와의 상관관계를 분석한 것으로 선행건기일수, 총강우량, 강우강도가 초기세척효과에 영향을 줄 것으로 예측하였으나, 분석결과 강우전체 EMC와 유사하게 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았다.

3.2.2 오염물질별 상관성분석

고속도로의 경우 많은 차량이 고속으로 운행되므로 이와 관련된 오염물질이 유출되는 특성이 있으며, 특히 중금속은 고속도로 강우 유출수 관리에

있어서 매우 중요한 오염물질로 고려된다.

강우시 유출되는 오염물질은 입자성 오염물질의 비중이 높고 이를 처리하는 시설 대부분도 입자물질을 여과, 침전, 흡착하는 등의 공정으로 이루어져 있기 때문에 오염물질별 상관관계에서 TSS가 중요한 의미를 가진다.

고속도로지역에서 강우 시 유출되는 오염물질간의 상관관계를 파악하기 위하여 통계분석을 실시하였으며, Fig. 9는 Pearson correlation matrix를 나타내고 있다.

Table 2에서 보면 Cu, Fe, Zn의 경우 입자성 물질과 유기물질, 영양염류와의 상관관계가 높은 것으로 나타났고, Ni, Pb의 경우는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 일반적으로 자동차의 부속품 및 각종 유류에 다양한 금속물질이 포함되어 있는데 Cu, Fe, Zn의 경우 다른 중금속에 비하여 타이어, 윤활유, 브레이크 패드 등에 상대적으로 많은 양이 함유되어 있기 때문에, 타 중금속에 비하여 유출되는 농도가 높고 분포가 넓은 특성을 보였다. 또한 중금속은 입자상 물질, 즉 TSS와 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. TSS는 상당량의 COD, TN 및 TP가 부착되어 유출되기에 동시에 상관성이 높게 나타났다.

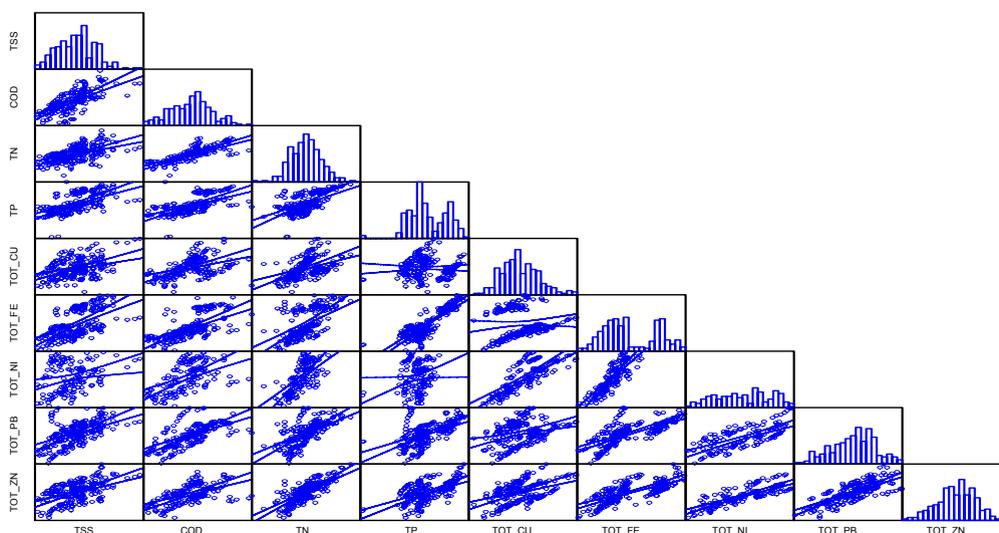


Fig. 9 Interrelation of water quality items from highway runoff

Table 2 Coefficient of correlation of runoff water quality items

	TSS	COD	TN	TP	TOT_CU	TOT_FE	TOT_NI	TOT_PB	TOT_ZN
TSS	0	0	0	0	0	0	0.43	1	0
COD	0.39		0	0	0	0	1	1	0.52
TN	0.35	0.42		0	0	0	0	0.05	0
TP	0.50	0.55	0.64		0	0	1	1	0
TOT_CU	0.83	0.33	0.61	0.54		0	0	0.31	0
TOT_FE	0.74	0.41	0.63	0.53	0.91		0	0	0
TOT_NI	0.21	0.13	0.43	0.12	0.46	0.65		0	0
TOT_PB	0.18	0.15	0.26	0.05	0.22	0.35	0.69		0.05
TOT_ZN	0.59	0.20	0.68	0.40	0.83	0.88	0.59	0.26	

3.3 교통량의 영향

고속도로 비점오염물질의 주요 원인이 차량에 의한 것이므로 H1~H6 지점에 대한 연평균 일간교통량과 TSS 농도사이의 상관성을 분석하였다. 교통량과 강우유출오염부하에 대한 관계에서는 분석방법에 따라 다소 엇갈린 결과를 보고하고 있는데, Kayhanian et. al (2002)은 83개 지점의 고속도로에 대하여 모니터링 한 결과, 교통량과 오염물질 사이의 상관성이 매우 약한 것으로 보고하였다. 반면에 83개의 도로를 교통량 규모에 따라 분류한 후 EMC 농도의 경향을 살펴본 결과 교통량 규모가 클수록 오염부하농도가 증가하는 경향으로 보고하였다.

Treg 등(연도)도 13개의 도로에 대해 연평균 교통량과의 TSS농도와의 상관성 분석 시 상관계수가 0.58정도로 상관성이 어느 정도 있다고 보고하였으나, 본 조사에서는 Fig. 10과 같이 고속도로 6개 지점의 교통량과 TSS농도를 비교한 결과, 두 인자간의 상관성이 매우 낮은 것으로 평가되었으며 교통량 증가에 따라 TSS 발생농도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 실제 강우유출 오염부하가 교통량 이외에 도로형태, 차량에 의한 지표오염물 교란여부, 강우 및 기상조건, 주변지형 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문으로 판단되며, 이에 대해서는

교통량과 관련성이 높은 오염물질을 중심으로 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

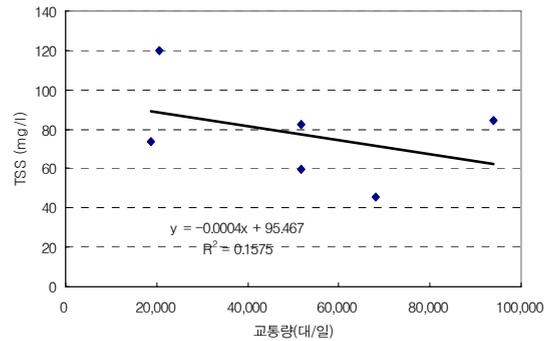
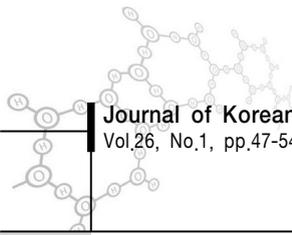


Fig. 10 Relationship between traffic volume and TSS EMC

4. 결론

본 연구에서는 고속도로를 대상으로 장기간에 걸쳐 수행된 강우시 유출오염부하 조사결과를 바탕으로 강우유출오염부하의 발생특성, 영향인자, 유출오염부하사이의 상관관계 등에 대하여 분석하였다.

고속도로 강우유출수의 주요 오염인자인 TSS농도와 선행건기일수, 강우량, 강우강도, 교통량 등에 대하여 상관성 분석을 수행한 결과, 대부분의 항목에서 약한 상관관계가 나타나거나 상관성이 거의



없는 것으로 나타났다. 이는 강우사상내에 강우강도, 강우지속시간 등의 변화에 따라 유출농도 변화가 심하게 발생하고 고속도로의 특성상 차량운행으로 인한 오염물질의 교란, 도로청소 등에 의해서도 영향을 받는 것으로 사료되었다.

반면에 유출 오염물질별 상관성 평가에서는 중금속 중 높은 농도로 유출되는 Cu, Fe, Zn의 경우 입자성 물질과 유기물질, 영양염류와 높은 상관관계를 보였고, Ni, Pb의 경우 상대적으로 상관성이 낮은 것으로 평가되었다.

교통량과의 관계에서는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았고, 교통량의 증가에 따라 오히려 TSS 농도가 줄어드는 경향을 보였는데, 선행 연구결과와 비교할 때 강우구간부석, 도로형태, 차량에 의한 지표오염물 교란여부, 강우 및 기상조건, 주변지형 등의 영향에 대해 추가분석이 필요할 것으로 판단되었다.

참고문헌

국토해양부 (2011) 도로법.

국립환경과학원 (2006) 비점오염부하량 평가기법 연구(Ⅰ) : 도로 및 대지 원단위를 중심으로.

김이형, 이선하, 주차장 및 교량 강우유출수의 중금속 오염물질 특성과 동적 EMCs (2005) 한국물환경학회지, 21, pp.385-392.

Kayhanian, T., and Stenstrom, M. K., (2008) First-Flush Characterization for Stormwater Treatment, Stormwater, March-April, (www.stormh2o.com/march-april-2008/pollutants-run-off-4.aspx).

Bertand-Krajewski, J., Chebbo, G., and Saget, A., (1998) Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon, Wat. Res., 328, pp.2341-2356.

Wu, J.S., Allan, C.J., Saunders, W.L., and Evett, J.B., (1999) Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff, J. Envir. Eng., 124, pp.584-592.

Geiger, W., (1987) Flushing effects in combined sewer systems, Proceeding of the 4th Int. Conf. on Urban Drainage.

Kayhanian, M., Singh, A., Suverkropp, C., and Borroum, S., (2002) The Impact of Annual Average Daily Traffic on Highway Runoff Pollutant Concentrations, University of California.