



아스팔트 포장 고속도로의 강우 지속시간별 오염물질 유출 경향

Characteristics of Pollutant Washed-off from Highways with Storm Runoff Duration

김 이 형* 이 은 주** 고 석 오*** 강 희 만****
 Kim, Lee Hyung Lee, Eun Ju Ko, Seok Oh Kang, Hee Man

Abstract

During the dry periods, many types of pollutant are accumulating on the paved surface by vehicle activities. Particularly, the highways are stormwater intensive landuses because of high imperviousness and high pollutant mass emissions from vehicles. The accumulated pollutants in highways are washed-off during a rainfall event and are highly contributing on water quality of receiving water bodies. The stormwater runoff from the highways are containing various pollutants such as metals, oil & grease and toxic chemicals originated from vehicles. Therefore, this research is performed to find pollutant characteristics in the magnitude of statistical pollutant concentrations during storm periods. During the monitoring periods, the first-flush phenomenon is visibly occurred on most storm events, which is confirmed from hydro- and polluto-graphs. The 95 % confidence intervals of washed-off pollutant concentration are ranged to 154.7-257.1 mg/L for TSS, 138.9-197.6 mg/L for COD, 3.5-6.4 mg/L for oil & grease, 6.3-9.2 mg/L for TN and 2.3-3.31 mg/L for TP. The first flush effect is mostly occurred within initial 30 min of storm duration.

Keywords : first-flush, highways, nonpoint sources, washed-off pollutants

요 지

고속도로는 건조시 많은 차량의 운행으로 인하여 오염물질의 축적이 높고, 강우시 불투수율이 높아 다량의 강우유출 수가 발생하는 지역이다. 특히 고속도로에서 발생하는 중금속, 각종 독성물질 및 입자상 오염물질들은 유출시 생태계에 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 본 논문은 2005년 개정된 수질환경보전법 및 비점오염원 관리 지침에 의거하여 바람직한 친환경적 고속도로 건설 및 유지관리를 위한 기초자료 제공을 위하여 수행된 연구이다. 이러한 기초자료를 확보하기 위하여 국내 4개 고속도로 지역에서 강우시 모니터링이 수행되었으며, 그 결과를 본 논문에 정리하고자 한다. 건조시에 축적된 각종 오염물질들은 강우 시작과 함께 고속도로로부터 유출되게 되는데, 특히 강우 초기에 다량의 오염물질 유출이 발생하는 초기강우 현상을 모니터링을 통하여 확인하였다. 유출되는 오염물질의 95% 신뢰범위를 살펴보면, TSS의 경우 154.7-257.1 mg/L, COD가 138.9-197.6 mg/L, oil & grease가 3.5-6.4 mg/L, TN이 6.3-9.2 mg/L 그리고 TP는 2.3-3.31 mg/L의 범위를 나타냈다. 대부분의 모니터링에서 초기강우 현상이 발생하였으며, 이러한 초기강우는 강우지속시간 30분 이내에 대부분 끝나는 것으로 분석되었다. 또한 본 논문은 방대한 모니터링 자료를 통계 분석하여 그 결과를 정리하였는데, 이는 향후 고속도로 오염물질 처리 및 저감 시설 설치시 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 고속도로, 비점오염원, 유출 오염물질, 초기강우

* 정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사
 ** 비희원 · 공주대학교 방재연구센터 연구원 · 공학박사
 *** 정희원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공학박사
 **** 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹 · 연구원



1. 서론

환경부는 유역으로부터 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 오염총량관리제(Total Pollution Load Management System)를 도입하였다. 오염총량관리제는 목표수질에 의한 오염물질의 총량관리이며 단위 유역별 오염 부하량을 할당하는 것으로 점오염원 부하량, 비점오염원 부하량 및 안전율의 합으로 산정된다. 국내 4대강의 비점오염원의 오염 부하량 기여율은 일반적으로 22-40%를 차지하고 있으나, 환경기초시설확대로 인하여 비점오염원의 기여율은 증가하고 있다(환경부, 2004a). 따라서 비점오염원 관리 없이는 오염총량제의 성공적인 정착을 기대할 수 없는 실정이다.

국내 토지이용에 따른 비점오염물질의 배출부하현황 및 예측자료에 의하면, 전체 BOD(Biochemical Oxygen Demand, 생물화학적 산소요구량) 배출량의 52%가 도시지역에 발생하는 것으로 나타났으며, 2020년에는 전체 배출량의 65.2%를 차지할 것으로 예측되었다(환경부, 2004b). 도시지역의 경우 불투수성 면적 비율이 높아 강우유출수의 표면유출이 다른 토지이용보다 많기 때문에, 강우에 의한 유출유량과 수질농도의 변화가 빠르게 나타나며, 도시지역에서 발생하는 비점오염원은 단위면적당 오염부하가 크고 각종 유독성 물질을 함유하고 있어 수질에 심각한 영향을 끼칠 수 있다(Sansalone et al., 1997; Ujevic et al., 2000; Wiber et al., 1979). 특히 고속도로는 포장율이 높고 유역면적이 작기 때문에 강우가 발생할 시 유역의 끝단에서 출구까지 유하하는 시간이 매우 짧으며(보통 10분 이내) 강우량 대비 유출율, 즉 유출계수가 다른 토지이용에 비해 매우 큰 특징을 가지고 있는 토지이용 형태이다(Dong et al., 1984; Liebens, 2001). 또한 많은 차량의 운행으로 인하여 건조시 오염물질의 축적이 타 토지이용에 비해서 매우 높은 특성을 가지고 있다(김 등, 2004a, 2004b; Kim, 2003; Kim et al., 2004, 2005; Sansalone et al., 1997). 따라서 미국을 비롯하여 여러 선진국들도 이러한 특성을 고려하여 비점오염

원 관리시 고속도로를 우선관리대상으로 분류하여 연구 및 관리 중이다(Sansalone et al., 1997). 고속도로의 경우 대부분 저지대인 하천 및 호수근처를 지나고 있으며 많은 차량의 운행으로 인하여 비점오염물질 발생이 높은 지역이다. 그러나 현재 국내의 경우 고속도로로부터의 오염물질의 유출경향 및 특성 파악이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고속도로지역에서 발생하는 강우유출수의 유출특성을 파악하여 향후 포장지역의 비점오염원 관리시 유출 부하량 산정 및 관리방법 선정에 활용할 수 있도록 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 대상지역 및 방법

서론에서 언급하였듯이 고속도로지역의 강우 유출수는 많은 차량의 운행으로 인해 오염물질의 축적이 많고, 강우발생초기 고농도의 오염물질이 유출되는 특징이 있다. 따라서 본 연구는 고속도로의 비점오염물질 유출특성을 파악하기 위한 모니터링프로그램을 수행하였고, 초기강우의 중요성을 인식하여 강우 유출 초기 1시간동안 집중적인 모니터링을 통하여 초기강우의 특성을 파악하였으며 강우가 끝날 때 까지 모니터링을 수행하였다(이 등, 2006). 모니터링 지점으로는 경부고속도로, 영동고속도로 및 호남고속도로상의 5개 지점을 선정하였다(이 등, 2006). 선정된 지점은 국내 고속도로를 대표하는 도로로 년중 차량 운행이 높은 지역이기에 오염도가 타 고속도로에 비하여 높은 지역이다. 5개 지점은 모두 아스팔트로 포장되어 있으며, 지점의 자세한 정보는 표 1에 정리하였다.

비점오염원은 불확실성이 매우 큰 오염원이기에, 강우시 발생하는 강우량과 유출량 측정을 위해서는 세밀한 모니터링 계획의 수립이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 불확실성을 줄이기 위한 방안으로 1분 단위로 강우량과 유출율을 측정하는 자동유량측정기(Automatic Flow Meter, Sigma 950)와 자동 강우계(Automatic Rainfall Gauge, Sigma

표 1. 모니터링 지점별 현황

Site	Highway	No. of Lane	Area (m ²)	Percent Slope(%)	Approx. Percent of Impervious(%)	ADT (cars/day)	Pavement and Drainage Outfall
1	No. 1 highway(North)	4	1,170	1	100	109,209	- Highway pavement: Asphalt - Drainage Outfall: Concrete
2	No. 50 highway(East)	3	936	1	100	196,250	
3	No. 1 highway(South)	4	1,950	1	100	61,426	
4	No. 251 highway(South)	2	1,570	2	100	151,492	
5	No. 251 highway(North)	2	859	3	100	97,711	

* ADT=Average Daily Traffic.

950)를 현장별로 설치하여 모니터링을 수행하였다. 또한 강우로 인해 유출되는 비점오염물질에 대한 수질 특성을 파악하기 위하여 강우가 시작된 직후 유출 시작과 함께 첫 번째 수질샘플을 채취하였으며, 이후 15분까지 5분 간격으로 수질모니터링을 수행하였으며, 30분까지는 15분 단위로, 그리고 30분 간격으로 1시간 동안 모니터링을 실시하였다. 1시간 이후에는 강우 유출이 끝날 때까지 1시간 간격으로 수질 모니터링을 수행하였다. 모니터링이 수행되는 지점에서의 배수구는 도로에서 직접 유출되는 지점으로 건조 시에는 전혀 유출이 발생되지 않는 지역이다. 채취된 강우 유출수 시료는 냉장 보관되어 실험실로 운반되었으며, 유기물, 중금속 및 다양한 오염물질 항목들에 대한 분석을 시행하였다.

3. 결과 및 고찰

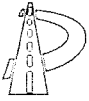
3.1 강우사상에 대한 모니터링 결과

2004년 5월에서 9월까지 5개 지점에서 수행된 7회의 모니터링 결과의 예로, 호남고속도로 지점인 지점 4와 5에 대한 결과가 표 2에 정리되어있다. 강우 전 건조일수(antecedent dry days, ADD)는 2-18일, 전체 강우량(total rainfall)은 6.9-50.5mm, 강우지속시간(storm duration)은 1.0-8.3시간, 평균 강우강도(average rainfall intensity)는 1-13 mm/hr, 유출계수(runoff coefficient)는 0.58-0.90의 범위로 나타났다.

표 2. 모니터링으로 측정된 지점 4와 5에서의 강우사상 결과

Event No.	Event Date	ADD (days)	Total Rainfall (mm)	Runoff Duration (hr)	Avg. Rainfall Intensity (mm/hr)	Runoff Coeff.
E-1	2004/5/28	13	17.5/18.5	3.3/3.5	5.3/5.3	0.87/0.73
E-2	2004/6/17	18	50.5/50.3	8.3/7.6	6.1/6.6	0.85/0.9
E-3	2004/7/3	2	30.7/32.8	6.4/7.2	4.8/4.6	0.93/0.88
E-4	2004/7/11	3	6.9/9.4	7.2/7.3	1.0/1.3	0.62/0.68
E-5	2004/8/14	8	19.5/10.7	1.5/4.4	13.0/2.43	0.58/0.6
E-6	2004/8/22	2	8.4/9.1	1.0/2.1	8.4/4.33	0.84/0.89
E-7	2004/9/11	3	20.6/21.4	6.1/6.0	3.38/3.57	0.85/0.90

* a/b=site 4/site 5의 결과를 나타내고 있음.



3.2 비점오염물질 유출경향

고속도로지역에서 강우시 유출되는 오염물질은 주행하는 자동차, 트럭, 가솔린을 사용하는 각종 운반 도구로부터 발생하며, 건조시 도로노면에 축적되어 있던 기름, 부동액, 그리스, 각종 물질 및 입자상 물질들이 강우시 유출되어 하천으로 유입되어 하천수질을 악화시키는 원인으로 작용한다. 그림 1은 모니터링을 통해 채취된 강우유출수내 오염물질의 농도 변화와 1분 단위로 측정된 강우량 및 유출량의 관계를 나타내는 수리수문 및 농도 곡선이다. 이 결과로부터 초기강우 현상을 뚜렷이 확인할 수 있는데, 대부분의 강우사상에서 강우가 시작되고 유출이 시작된 이후 초기 30분 또는 60분 이내 오염물질의 농도가 급격히 줄어들고, 그 이후로는 완만한 경향을 보였다. 이러한 결과는 고속도로지역에 대한 강우유출

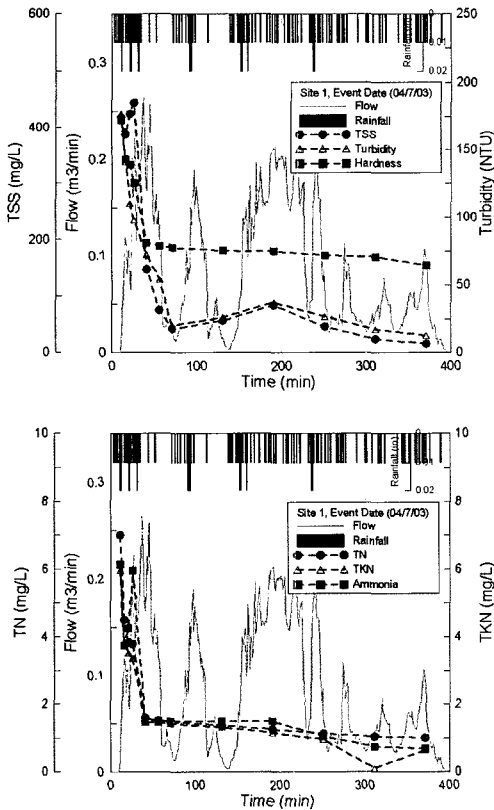


그림 1. 수리수문 및 오염물질 농도 곡선

수의 처리용량을 산정하는데 중요한 자료로 활용할 수 있다.

3.3 유출오염물질의 농도범위

불확실성이 높은 비점오염물질 유출 연구에서 대표적인 값의 정량적 범위를 파악하기 그림 2와 같이 SYSTAT 7.0 버전을 이용하여 통계분석을 실시하였다(SYSTAT version 9.0). 여기서, TSS(Total Suspended Solid, 총 부유물질), VSS(Volatile Suspended Solid, 휘발성 부유물질), TURB(Turbidity, 탁도), COD(Chemical Oxygen Demand, 화학적 산소요구량), CL(Cloude, 염소 이온), DOC(Dissolved Organic Carbon, 용존 유기탄소), TN(Total Nitrogen, 총 질소), TKN(Total Kjeldahl Nitrogen, 총 킬달 질소), NO₂(Nitrite-Nitrogen, 아질산성 질소), NO₃(Nitrate-Nitrogen,

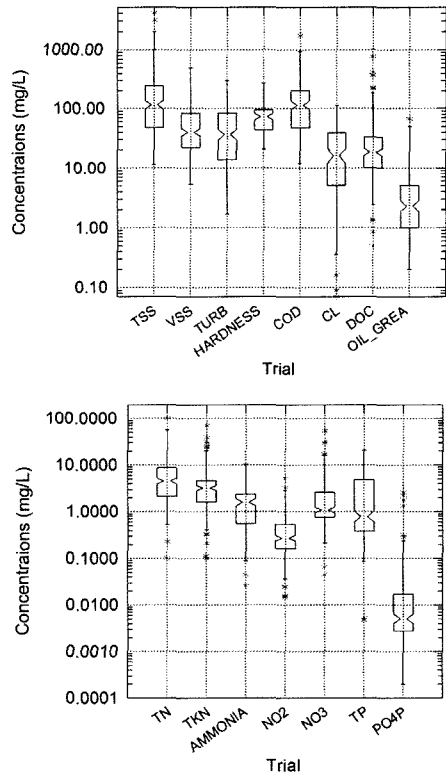


그림 2. 고속도로에서 유출되는 오염물질 농도의 통계적 범위



질산성 질소), TP(Total phosphorus, 총인), PO4P(Phosphate, 인산염 인)를 의미한다.

본 통계분석은 고속도로에서의 오염물질 유출 범위를 파악하고자 전체 지점의 자료를 활용하였다. TSS의 경우 최대값과 최소값의 범위가 11.5-4,090 mg/L, COD의 경우 12.0-1,720 mg/L, 그리고 oil & grease가 0.20-67.5 mg/L의 범위를 보이고 있다. 최대값과 최소값의 농도차이를 보면 TSS의 경우 356배, COD는 143배 및 oil & grease는 338배를 보이고 있다. 이러한 특징은 비점오염원의 대표적인 특성이며, 다양한 원인, 즉 유역면적, 경사, 하루 차량대수, 강우특성 등의 지역적 영향 등이 오염물질의 유출에 영향을 끼쳐서 나타난 현상으로 판단된다. TN의 최소값과 최대값의 범위는 0.1-101.2 mg/L로 101배의 차이를 보이며, TP의 경우 0.005-20.5 mg/L로 4,100배의 차이를 보이고 있다. 이러한 농도 값의 큰 차이는 비점오염물질의 불확실성을 명백히 보여주고 있으며, 장기적 모니터링의 필요성을 의

미하고 있다.

각 오염물질별 평균 농도를 살펴보면, TSS의 경우 205.9 mg/L, COD가 168.2 mg/L, oil & grease의 산술평균 농도는 5.0 mg/L의 값을 보이고 있다. 오염물질별 95%확신범위를 살펴보면, TSS가 154.7-257.1 mg/L, COD는 138.9-197.6 mg/L 그리고 Oil & Grease가 3.5-6.4 mg/L의 범위로 나타났다. 영양물질의 95% 확신범위의 경우, TN이 6.3-9.2 mg/L의 범위를 보이며 TP가 2.3-3.31 mg/L의 범위로 나타났다.

3.4 강우 지속시간에 따른 오염물질의 평균 농도 변화

수리수문 및 농도곡선에 의하면, 강우 초기 1시간 이내에 다량의 오염물질이 고속도로로부터 유출되는 것으로 나타났다. 따라서 강우유출 초기 1시간 이내의 오염물질 유출특성을 면밀히 검토하기 위하여 전체 지점의 농도 자료를 활용하여 통계분석을 수행하

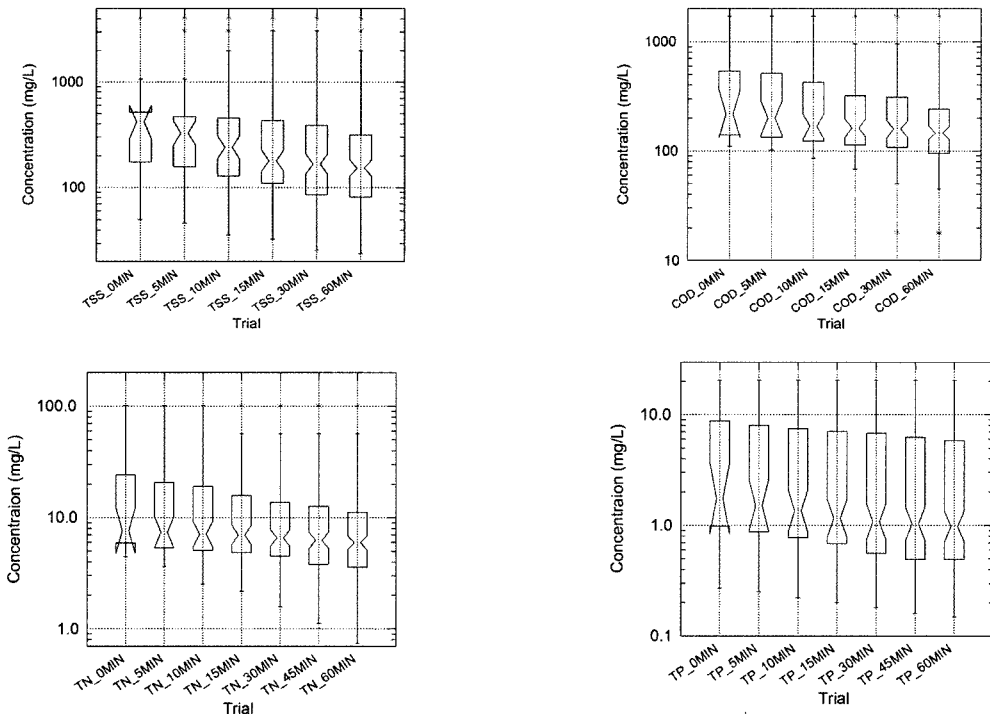


그림 3. 강우지속시간에 따른 고속도로 비점오염물질의 통계학적 유출범위



였으며, 그 결과가 그림 3에 나타나 있다. TSS의 경우 평균농도가 강우 유출직후 575.1 mg/L에서 5분 후 493.2 mg/L, 10분 후 429.6 mg/L, 15분 후 366.5 mg/L, 30분 후 320.3 mg/L, 60분 후에는 284 mg/L로 감소하였다. COD의 경우, 강우 유출직후 410.7 mg/L에서 5분 후에는 348.3 mg/L, 10분 후 306 mg/L, 15분 후 278.4 mg/L, 30분 후 252.9 mg/L, 60분 후에는 231.3 mg/L로 점차 감소하였다. TN의 경우 평균농도가 강우 유출직후 19 mg/L의 값이 60분 후에는 10.92 mg/L로 감소하였으며, TP의 경우 강우 유출직후 5.3 mg/L의 값이 60분 후에는 3.6 mg/L로 감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 살펴보면, 강우 초기에 비해 강우가 시작된 이후 초기 60분 이내에 오염물질의 농도는 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타났다.

각 오염물질별 초기농도에 대한 시간에 따른 저감율이 그림 4에 나타나 있다. 유출직후 농도에 대한 저감율을 살펴보면, TSS의 경우 강우지속시간 15-30분 사이에서 급격하게 저감되는 것으로 나타났으며, COD의 경우 강우지속시간 15분 동안에 오염물질의 농도가 급격히 저감되는 것으로 나타났다. TN과 TP의 경우 30분 동안 많은 양이 유출되는 것으로 나타났다.

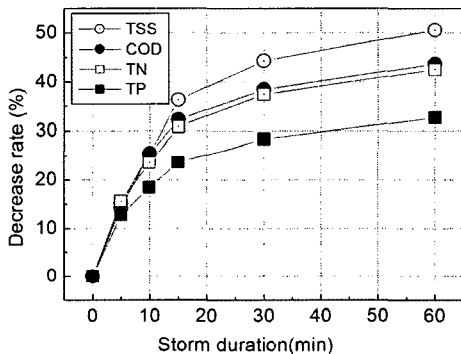


그림 4. 강우지속시간에 따른 오염물질 유출 저감율

강우 지속시간에 따라 고속도로 노면으로부터 세정되는 분당 오염물질 제거량(mg/L/min)을 그림 5

에 나타내었다. 강우로 인한 유출은 강우지속시간 5분에서 그 값이 가장 큰 것으로 나타났고, 강우지속시간이 길어짐에 따라 그 값이 현저히 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 초기강우 영향이 그 시간 안에 지배적으로 발생하였음을 의미한다.

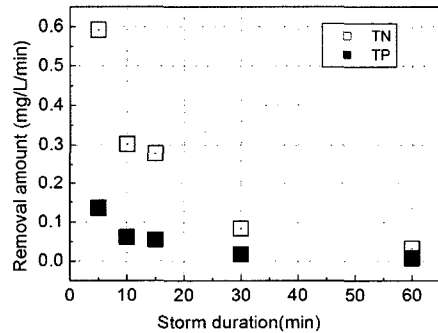
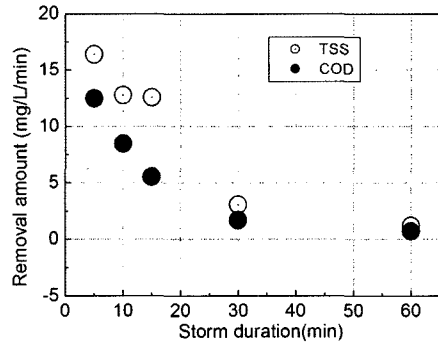
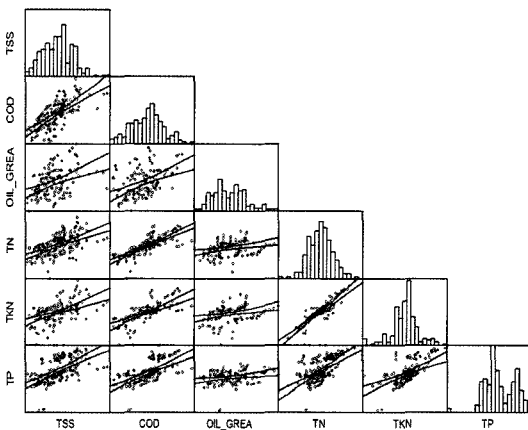


그림 5. 강우지속시간에 따른 오염물질 유출율

3.6 오염물질별 상관관계

고속도로지역에서 강우시 유출되는 오염물질에 대하여 오염물질별 상관관계를 파악하기 위하여 통계분석을 실시하였다. 그림 6은 Pearson correlation matrix로 각 오염물질별 상관관계를 보여주는 것으로 ± 10 신뢰구간을 직선으로 나타낸 것이다. 대각선 아래의 수치는 상관계수(R, correlation coefficients)를 나타내고 있으며 위쪽의 수치는 유의수준(P-value, confidence values)을 나타낸다. 대체적으로 oil& grease를 제외한 TSS, COD, TN,

TKN 및 TP는 이들 사이에 긍정적인 높은 상관관계를 나타내었다. 유출되는 오염물질별 상관관계 분석은 상관계수 분석뿐만 아니라 유의수준 분석이 동반되어야 명확한 상관성을 파악할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 다시 말해서 상관계수 값이 크게 나왔다 하더라도 유의수준 값이 크게 나타나면 결론적으로 오염물질 항목별 상관성은 떨어진다는 것을 의미한다.



	TSS	COD	OIL_GREA	TN	TKN	TP
TSS		0	1	0	0	0
COD	0.387		0	0	0	0
OIL_GREA	0.102	0.646		1	0.943	0.008
TN	0.353	0.419	0.098		0	0
TKN	0.372	0.46	0.154	0.884		0
TP	0.504	0.55	0.283	0.637	0.703	

그림 6. 고속도로 유출 오염물질간의 상관성 및 유의수준

4. 결론

본 연구는 고속도로지역에서의 강우시 유출되는 비점오염물질의 유출특성을 파악하여 향후 포장지역의 비점오염원 관리시 유출 부하량 산정 및 관리방법 선정에 활용하고자 모니터링을 행한 결과 다음과 같

은 결론을 도출하였다.

- 1) 고속도로지역에서의 초기 강우 현상을 수리수문 및 농도곡선에서 확인할 수 있었으며, 대부분의 강우사상에서 강우가 시작되고 유출이 시작된 이후 30-60분 이내에서 농도가 급격히 줄어들었으며, 이후로는 완만해지는 것으로 나타났다.
- 2) 유출오염물질의 통계분석결과, 각 오염물질별 95%의 확신범위로 TSS는 154.7-257.1 mg/L, COD는 138.9-197.6 mg/L, 그리고 oil & grease가 3.5-6.4 mg/L의 범위로 나타났다. TN의 경우 6.3-9.2 mg/L 그리고 TP는 2.3-3.31 mg/L의 범위로 나타났다.
- 3) 유출시간에 따른 입상물질, 유기물질, 영양염류의 유출초기농도에 대한 저감율을 살펴보면, TSS의 경우 15-30분에서 큰 것으로 나타났고, COD의 경우 강우지속시간 15분 동안에 대한 값이 초기농도에 비해 급격히 저감된 것으로 나타났다. 또한 오염물질간의 상관관계를 분석할 결과 대체적으로 oil& grease를 제외한 TSS, COD, TN, TKN 및 TP는 긍정적인 높은 상관관계를 나타내었다.
- 4) 본 연구를 통하여 비점오염원의 다양한 불확실성을 파악하였으며, 장기적인 모니터링 계획 및 수행만이 바람직한 고속도로 강우 유출수의 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원 및 한국건설교통기술평가원(연구과제 번호: 2005-0261)의 연구과제로 수행된 연구결과들이며, 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

참고문헌

1. 김이형, 강주현 (2004a), "강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기 우수 특성 및 기준", 한국물환경학회



- 지, 20(6), pp. 641-646.
2. 김이형, 강주현 (2004b), “고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정”, *한국물환경학회지*, 20(6), pp. 631-640.
 3. 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 임경호, 이병식, 김이형 (2006), “고속도로 노면유출수의 중금속 유출 특성 및 상관성”, *한국물환경학회지*, pp. 128-133.
 4. 환경부 (2004a), [비점오염원관리 업무편람].
 5. 환경부 (2004b), [관계부처합동 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책].
 6. Dong, A., Chesters, G., and Simsiman, G. V. (1984), “Metal composition of soil, sediments and urban dust and dirt samples from the Menomonee river watershed, Wisconsin, USA”. *Water, Air and Soil pollution*, 22, pp. 257-275.
 7. Kim, L.-H. (2003), “Determination of event mean concentrations and first flush criteria in urban runoff”, *Environmental Engineering Research*, 8(4), pp. 163-176.
 8. Kim, L.-H., Kayhanian, M., Stenstrom, M.K. (2004), “Event mean concentration and loading of litter from highways during storm”, *Science of Total Environment*, 330, pp. 101-113.
 9. Kim, L.-H., Kayhanian, M., Lau, S.L., and Stenstrom, M.K. (2005), “A new modeling approach in estimating first flush metal mass loading”, *Wat. Sci. & Tech.* 51(3-4), pp. 159-167.
 10. Liebens, J. (2001), “Heavy metal contamination of sediments in stormwater management systems: the effect of land use, particle size and age”, *Environmental Geology*, 41, pp. 341-351.
 11. Sansalone, J. J., and Bushberger, S. G. (1997), “Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater”, *Wat. Sci. & Tec.*, 36, pp. 155-160.
 12. SYSTAT version 9.0 for windows, SPSS Inc.
 13. Ujevic, I., Odzak, N., and Baric, A. (2000), “Trace metal accumulation in different grain size fractions of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastewaters”, *Water Res.*, 34, pp. 3055-3061.
 14. Wiber, W. G., and Hunter, J. V. (1979), “Distributions of metals in street sweepings, stormwater solids and urban aquatic sediments”, *Journal Water Pollution Control Federation*, 51, pp. 2810-2822.

〈접수:2005. 12. 30〉