

국내 고속도로 휴게소지역 비점오염원 유출특성 분석

Evaluation of Pollutants Concentrations and Runoff Characteristics in Highway Rest Area

김 정 현 Kim, Jeong-Hyun
 강 희 만 Kang, Hee-Man
 고 석 오 Ko, Seok-Oh

비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (E-mail : kji21c11@khu.ac.kr)
 비회원 · 한국도로공사 도로교통기술연구원 (E-mail : heeman@freeway.co.kr)
 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : soko@khu.ac.kr)

ABSTRACT

The stormwater runoff from rest areas in highways are known as more polluted compared to highways because of more vehicle activities. This study is performed to find pollutant characteristics in the rest areas in the magnitude of statistical pollutant concentrations during storms. Washoff characteristics of pollutants from rest areas by monitoring of rainfall, runoff rate and runoff samples were evaluated. High concentrations of pollutants in runoff were observed at the beginning of runoff and rapid decrease thereafter, indicating that first-flush effects are clearly occurred. Event Mean Concentrations(EMCs) of TSS, COD, TN, and TP are estimated to be in the range of 31.04-127.11mg/L, 35.5-369.5mg/L, 2.62-9.86 mg/L, and 0.53-1.96mg/L, respectively. Heavy metals in runoff showed relatively high values, possibly due to the abrasion of brake pad or tire while cars are slowly moving for parking. EMCs of total Pb, total Cu, and total Ni are in the range of 1206-16293 μ g/L, 237-7906 μ g/L, and 53-6372 μ g/L, respectively. Pollutant loading per rest area calculated by using EMC, flowrate and target area is also described for each pollutant.

KEYWORDS

non-point source, highway rest area, event mean concentration, storm runoff, pollutant loading

요지

최근 비점오염원에 대한 관심이 높아지면서, 환경부 및 유관단체를 중심으로 노면 유출수를 포함한 비점오염원(Non point source)에 대한 현황 조사 및 처리 방법에 대한 관심이 증가하고 있다. 고속도로 휴게소 주차장 노면 유출수는 고속도로 본선 노면 유출수보다 유해물질 오염도가 높을 것으로 예상되어, 본 연구는 이 지역의 노면 유출수 오염도 조사를 통해 유출수 평가 및 노면 유출수 저감 시설의 저감효과를 분석하여 휴게소 노면유출수 관리방안을 수립하는 것을 목적으로 하고 있다. 휴게소지점에 대한 강우유출수 분석 결과 포장지역의 특성인 초기강우현상을 볼 수 있었으며, 강우초기에 입상물질은 중금속과 결합하여 다량 유출되는 특성을 나타내었다. 휴게소 지점의 강우유출수에 대한 오염물질별 EMC에 대한 95% 확신범위로는 TSS 128.2-273.4mg/L, COD 145.4-310.1mg/L, TN 6.1-11mg/L, TP 1.9-2.9mg/L의 범위로 분석되어 고속도로에서 유출되는 강우유출수와 비슷한 수준으로 유출되는 것으로 분석되었으나, 중금속의 경우 고속도로에 비해 고농도의 중금속이 유출되는 것으로 나타났는데, 이것은 차량 정차시 브레이크 패드나 타이어의 마모등에 의한 것으로 판단된다. 휴게소지점에 대한 면적당 발생하는 부하량 통계분석결과, TSS의 평균 부하량은 1411.6 mg/m²로 산정되었으며, COD 709.7mg/m², TN 44.0mg/m², TP 10.4mg/m²로 산정되었다. 중금속의 경우 Total Cu 12927.4 μ g/m², Total Fe 32074.4 μ g/m², Total Pb 40371 μ g/m², Total Ni 10679.2 μ g/m²로 산정되었다.

핵심용어

비점오염원, 고속도로 휴게소, 유량기중 평균농도, 강우유출수, 평균부하량

1. 서론

비점오염물질은 다양한 토지이용에서 발생되어 축적되어

있다가 발생하는 강우에 의해서 집중적으로 유출되는 특징 때문에 관리에 어려움이 많다. 특히 포장률이 높고 많은 차량

의 운행으로 인하여 오염물질의 축적이 높은 고속도로, 도로 및 도시지역의 경우에는 비점오염원 관리를 위한 처리시설 설치가 가능한 면적의 제한으로 인하여 최적 관리방안 수립이 절실히 요구되는 토지이용이다(Bertrand-Krajewski et al., 1998; Charbeneau et al., 1998; Kim et al., 2003). 또한 포장지역은 인간의 활동영역인 수계 인근에 대부분 분포하고 있기에 오염물질 발생시 하천수질에 직접적인 영향을 끼치는 지역이다. 따라서 미국을 비롯하여 국내의 경우에서도 이러한 포장지역의 특성에 기인하여 다양한 비점오염원 중에서 포장지역의 비점오염물질 관리에 관심이 매우 크다(환경부, 2004; U.S. EPA, 1994). 앞서 언급하였듯이 비점오염원은 수계를 전체 부하량으로 관리하는 오염총량제의 성공에 큰 부분을 차지하는 오염원이지만 국내에는 아직도 비점오염원에 대한 기초 자료 및 인식부족으로 인하여 토지이용별 오염물질 유출 원단위 산정이 제대로 이루어지지 않고 있다. 특히 비점오염원은 불확실성(uncertainty)이 매우 큰 오염원이다. 따라서 지속적인 모니터링만이 제대로 된 비점오염원 부하량을 산정할 수 있으며, 최종적으로 오염총량제의 안전율(margin of safety)을 감소시켜 경제적인 효과를 거둘 수가 있는 것이다.

미국을 비롯한 선진국들은 다양한 비점오염원 중에서 도로, 주차장 및 교량 등과 같은 포장된 지역을 우선 관리순위로 정하여 비점오염물질을 관리하고 있다. 그 이유는 포장지역이 강우 유출계수가 크며, 많은 인간 및 차량의 활동으로 인하여 오염물질의 유출 부하량이 면적에 비하여 상당히 높기 때문이다(Kim et al., 2003, 2005a, 2005b). 또한 포장지역에서 유출되는 비점오염물질의 가장 큰 특징은 초기강우 현상이다. 초기강우 현상이란 강우가 발생하고 유출이 시작된 이후 일정기간 동안 고농도로 오염물질의 유출이 일어나는 현상을 의미한다. 포장지역의 경우 이러한 초기강우가 끝나고 난 이후에는 유출수내 오염물질의 농도는 급격하게 감소하는 경향을 보인다(Bertrand-Krajewski et al., 1998; Wu et al., 1998). 이러한 초기강우 현상은 향후 포장지역에서 유출되는 비점오염물질의 최적관리방안 선정시 중요한 설계인자로 사용된다. 그러나 기초 자료의 부족 및 초기강우에 대한 연구의 부족은 경제적 처리용량 산정에 큰 어려움을 주고 있다(Kim et al., 2005a, 2005b). 국내의 경우, 고속도로 등 포장지역에 대한 연구결과들이 발표되어 있으나, 고속도로 휴게소에서 배출되는 다양한 오염물질들에 대한 분석결과들은 미미한 실정으로 배출특성 조사가 거의 이루어지지 않고 있으며, 발생되는 강우 유출수에 대한 면밀한 조사가 비점오염 관리대책마련에 앞서 우선적으로 행해져야 한다. 최근에 국내에서도 상수원 보호구역이나 수계보전지역에 있는 고속도로 휴게소로부터 강우

시 유출되는 노면 유출수로 인한 수계오염에 대한 문제가 환경영향평가 및 휴게소 건설 및 운영에 있어서 주요 이슈로 부각되고 있으며, 휴게소 주변 주민들에 대한 환경영향 피해에서의 불안감 해결이 필요하며 전체적으로는 친환경적 휴게소 건설 및 유지관리를 위한 도로유출수의 오염특성 조사 및 오염저감을 위한 최적시설의 개발은 필수적으로 이루어져야 한다.

특히, 고속도로 휴게소 주차장 유출수는 고속도로 본선 노면 유출수 보다 유해물질 오염도가 높을 것으로 예상되어, 환경영향평가의 주요 이슈로 부각될 수 있으며, 도로 주변 민가들로부터 주요 민원 사항으로 제기될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 휴게소의 노면 유출수 오염도 조사를 통해 오염도 평가 및 향후 휴게소에서의 비점 오염물질의 관리방안을 수립하는데 기초자료를 제공하고자 한다. 구체적인 목표는 강우시 휴게소로부터 유출되는 비점오염물질의 정량적 양과 유출량 산정을 통해 오염물질의 유출경향을 파악하며 초기강우 현상을 정성적으로 파악한다.

2. 실험 방법

2.1. 모니터링 위치

본 연구에서 국내 고속도로 휴게소의 지역특성에 따른 강우유출수의 특성을 평가하기 위하여 사전현장조사를 실시한 후 차량의 이용량이 많은 경기도 지역의 A 휴게소를 대상 지역으로 선정하였다. 이 지역의 총 면적은 14,735m²이다.

2.2. 모니터링 수행방법

본 연구에서 수행한 모니터링 프로그램은 국내에서도 많이 적용하는 방법으로서 미국 EPA 와 California 교통국 공동으로 수행한(고속도로 초기우수 관리)에서 적용한 방법을 선택하여 수행하였다(Caltrans, 2004). 강우가 시작된 후 강우량은 기상청 자료를 활용하였으며 노면 유출량은 1분 단위로 측정이 이루어져 기록하였다. 유출되는 유출수의 수질 특성을 파악하기 위하여 강우가 시작된 직후 첫 번째 수질샘플이 채취되었으며, 향후 15분까지 5분 간격으로 수질모니터링이 이루어졌으며, 30분까지는 15분 단위로, 그리고 30분 간격으로 1시간 동안 이루어졌다. 그리고 1시간 이후에는 강우 유출이 끝날 때까지 1시간 간격으로 수질 모니터링을 수행하였다. 이러한 모니터링 프로그램은 초기강우의 중요성을 인식하여 강우 유출 초기 1시간 동안 집중적인 모니터링을 통하여 초기강우의 특성을 파악하고자 하는 이유 때문이다.

채취된 시료는 유출되는 오염물질의 항목을 파악하기 위하여 입자상 물질, 유기물질, 영양염류, 중금속 등으로 분석이 이루어졌으며, 자세한 분석항목은 표 1에 나타내었다.

표 1. Pollutants analyzed in this study

	항 목
입자상 물질	TSS(총부유물질), VSS(휘발성 부유물질), 탁도
유기물질	COD(화학적산소요구량), DOC(용존성 유기탄소)
영양염류	NH ₄ -N(암모니아성 질소), NO ₂ -N(아질산성질소), NO ₃ -N(질산성질소), TKN(총질소), T-N(총질소), PO ₄ -P(인산염인), T-P(총인)
중금속	Cu(구리), Pb(납), Zn(아연), Cd(카드뮴), Cr(크롬), Fe(철), Hg(수은)
기 타	Cl ⁻
일반항목	건기일수, 강우지속시간, 총강우량, 건기일수교통량, 총 runoff량

3. 고속도로 휴게소 모니터링 결과

3.1. 강우자료 분석

휴게소 지점에 대하여 2006년 5월에서 2006년 11월까지 각각 5회의 모니터링이 수행되었고, 유역면적, 강우사상 일자, 유출시작 시간 및 강우가 끝난 시간을 포함하고 있는 분석자료는 표 2에 나타내었다. 강우 전 건조일수의 범위는 3일에서 15일까지로 나타났으며, 전체 강우량은 1.5~77.5mm의 범위로, 평균 강우강도는 0.3mm/hr에서 5.21mm/hr까지 다양한 분포를 나타냈다. 오염물질 유출량에 영향을 끼치는 중요한 인자인 유출을 범위를 분석한 결과 불투수층이 높은 토지이용에서 나타나는 특성으로 나타났으나, 강우사상 4회의 유출 계수값은 적은 강우량과 강우지속시간이 짧은 이유로 인한 것으로 판단된다. 이러한 값은 휴게소 지역으로부터 발생하는 오염물질의 유출 및 예측에 중요한 자료로 사용될 수 있다. 각 강우사상에 대하여 채취된 수질 시료는 냉장 보관하여 실험실로 빠른 시간 내에 운반하였으며 분석이 이루어졌다.

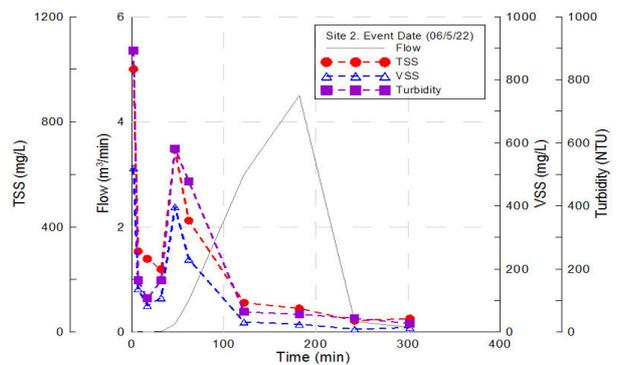
표 2. Monitoring data from highway rest area

Event No.	Event Date	Area (m ²)	ADD (days)	Total Rainfall (mm)	Runoff Duration (hr)	Avg. Rainfall Intensity (mm/hr)	Runoff Coeff.	Runoff (start)	Runoff (end)
E-1	2006/5/22	14,735	15	36.5	7	5.21	0.90	14:50	5/22 22:00
E-2	2006/5/27	14,735	4	32	12	2.67	0.23	08:27	5/27 21:00
E-3	2006/6/14	14,735	3	77.5	18	4.31	0.79	11:04	6/15 06:00
E-4	2006/9/17	14,735	8	1.5	5	0.3	0.076	22:08	09/18 00:15
E-5	2006/11/6	14,735	13	26	12	2.17	0.77	01:20	11/06 12:00

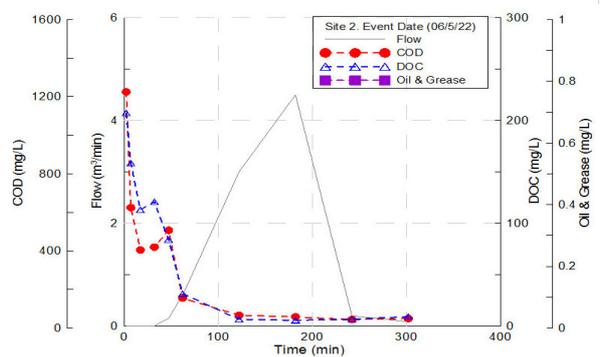
3.2. 유출농도 및 수문 그래프(Polluto-and Hydro-graphs)

비점오염물질은 강우에 의해서 유역에서 유출되며 강우유출수의 농도는 유출되는 유출량과 밀접한 관계를 보이기 때문에 유출농도 그래프(Polluto-graph)와 수문그래프(Hydro-graph)는 동시에 표시하여 분석하여야 한다. 이러한 특징은 점오염원과는 전혀 다른 특징이므로 유출수율 및 농도의 변화는 모니터링 계획수립 시 중요하게 고려되어야 하는 것으로 그 결과를 Polluto- 및 Hydro-graphs로 분석하였다. 휴게소 지역도 포장지역에 포함되는 것으로 포장지역에서 볼 수 있는 초기강우 현상을 볼 수 있었고, 배출 농도를 Polluto- 및 Hydro-graphs를 통하여 정량적으로 또는 정성적으로 나타내어 분석하였다. 즉, 휴게소 지점에 대한 강우사상별 오염물질의 Polluto- 및 Hydro-graphs를 정리하여 강우지속시간에 따른 강우량의 변화, 오염물질의 농도 변화 및 유출율의 변화를 파악하였으며 자료가 방대함에 따라 본 논문에서는 5월 22일에 수행된 모니터링 결과만을 나타내었다.

그림 1(a~f)에서는 2개의 x-축이 존재하는데 아래 x-축은 강우지속시간을 나타내며 위의 x-축은 분당 강우량을 나타내고 있다. y-축은 3개 또는 4개를 나타내고 있는데, 이는 강우지속시간에 따른 유출수율(m³/min)과 유출오염물질의 농도 변화를 강우지속시간에 따라 보여주고 있다.

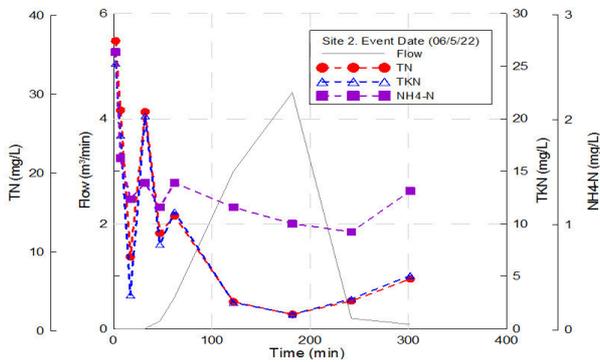


(a) TSS, VSS and Turbidity

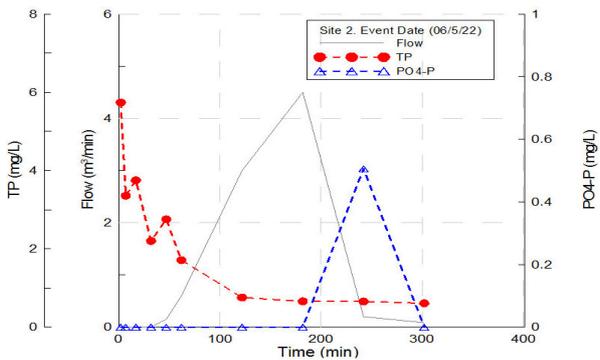


(b) COD, DOC and Oil&Grease

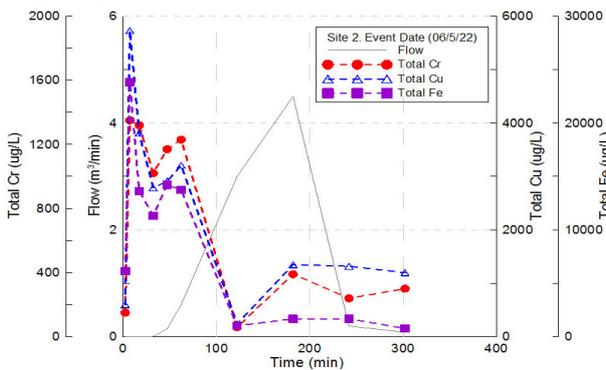
(그림 계속)



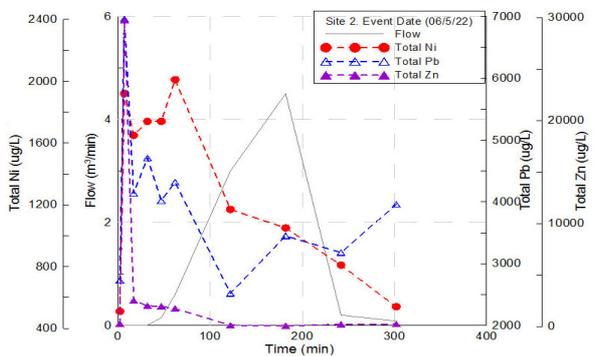
(c) TN, TKN 및 NH4-N



(d) TP and PO4-P



(e) Total Cr, Total Cu and Total Fe



(f) Total Ni, Total Pb and Total Zn

그림 1. Pollutant concentration with rainfall duration in a case of event 1

전체적인 Polluto- 및 Hydro-graphs 변화의 특징은 초기강우 현상을 보여주고 있다. 대부분의 강우사상에서 강우가 시작되고 유출이 시작된 이후 초기 30분 이내 오염물질의 농도는 급격히 줄어들며 그 이후로는 완만한 경향을 보여주고 있다.

3.3. 채취시료의 통계분석 결과

휴게소에서 유출되는 오염물질의 정량적인 분포를 파악하기 위하여 통계분석을 실시하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 휴게소 지점의 입자상 물질 및 유기물질에 대한 통계학적 분석결과

	N of cases	Minimum	Maximum	Range	Median	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	Standard Dev
TSS	42	16.5	1064	1047.5	127.6	200.8	273.4	128.1	233.1
VSS	42	6.81	520	513.2	27.9	75.1	112.2	38.0	119.1
TURB	42	11.2	892.5	881.3	70.5	123.2	174.347	72.0	164.1
COD	42	22	1225	1203	91	227.7	310.1	145.3	264.3
CL	42	5.4	1265.1	1259.6	78.6	170.8	252.1	89.4	261.0
DOC	42	2.72	207.4	204.7	25.6	44.8	59.7	30.2	47.3
TN	42	1.4	36.8	35.4	4.8	8.5	10.9	6.1	7.8
TKN	42	0.4	25.2	24.8	3.8	5.7	7.4	4.0	5.5
NH3	42	0.09	6.2	6.12	0.8	1.25	1.65	0.84	1.28
NO2	42	0	7.76	7.76	0.17	0.77	1.26	0.28	1.57
NO3	42	0	7.35	7.35	1.55	2.02	2.59	1.44	1.85
TP	42	0.45	6.85	6.39	1.95	2.42	2.93	1.91	1.63
PO4-P	42	0	0.506	0.506	0	0.012	0.036	-0.012	0.078

TSS의 경우 최대값과 최소값의 범위가 16.5 - 1,064 mg/L, COD의 경우 22 - 1,225mg/L의 범위를 보이고 있다. 최대값과 최소값의 농도차이를 보면 TSS의 경우 65배, COD는 55.7배를 보이고 있다. 이러한 특징은 비점오염원의 대표적인 특징이며, 다양한 원인 즉 유역면적, 경사, 하루 차량대수, 강우특성 등의 지역적 영향이 오염물질의 유출에 영향을 끼쳐서 나타난 현상으로 판단된다. TN의 최소값과 최대값의 범위는 1.4 - 36.8mg/L로 26.3배의 차이를 보이며, TP의 경우 0.45 - 6.848mg/L로 15.2배의 차이를 보이고 있다.

각 오염물질별 평균농도를 살펴보면, TSS의 경우 200.8 mg/L, COD가 227.7mg/L, TN 8.54mg/L, TP 2.42 mg/L값을 보이고 있으며, 고속도로에서 유출되는 강우유출수와 비교시 거의 비슷한 수준으로 유출되는 것으로 분석되었다. 오염물질별 95%확신범위를 살펴보면, TSS가 128.2 - 273.4mg/L, COD는 145.4 - 310.1mg/L의 범위로 나타났다. 영양물질의 95% 확신범위의 경우, TN이 6.1 - 11mg/L의 범위를 보이며 TP가 1.9 - 2.9mg/L의 범위로 나타났다.

휴게소 지점의 유출되는 중금속의 정량적인 분포를 파악하기 위하여 통계분석을 실시하였으며, 그 결과를 다음 표 4에

나타내었다. 강우유출수내 각 중금속에 대한 최소값과 최대값의 범위를 살펴보면, Total Cd이 0-1230 $\mu\text{g/L}$, Total Cr이 0-4680 $\mu\text{g/L}$, Total Cu가 60-8310 $\mu\text{g/L}$ 및 Total Fe가 780-47700 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 나타내고 있다. 또한 Total Ni이 0-6540 $\mu\text{g/L}$, Total Pb가 660-18240 $\mu\text{g/L}$, Total Zn이 0-29730 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 보이고 있다.

표 4. 휴게소지점의 중금속 농도에 대한 통계학적 분석결과

	N of cases	Minimum	Maximum	Range	Median	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	Standard Dev
SOL_CD	42	0	44	44	3	10.04	14.66	5.43	14.80
SOL_CR	42	0	237	237	13	40.28	60.99	19.57	66.45
SOL_CU	42	6	500	494	43	105.64	151.40	59.87	146.86
SOL_FE	42	25	740	715	68.5	140.97	191.28	90.66	161.44
SOL_NI	42	0	244	244	13	47.31	71.75	22.86	78.43
SOL_PB	42	10	616	606	57	139.66	201.02	78.30	196.90
SOL_ZN	42	5	960	955	38	116.57	176.88	56.25	193.55
TOT_CD	42	0	1230	1230	120	295	416.13	173.86	388.72
TOT_CR	42	0	4680	4680	360	1067.14	1567.87	566.41	1606.85
TOT_CU	42	60	8310	8250	720	2159.28	3044.34	1274.22	2840.17
TOT_FE	42	780	47700	46920	2925	7145.71	9926.02	4365.40	8922.06
TOT_NI	42	0	6540	6540	495	1532.85	2233.42	832.29	2248.12
TOT_PB	42	660	18240	17580	2355	4644.28	6302.65	2985.92	5321.72
TOT_ZN	42	0	29730	29730	315	1508.57	2938.91	78.22	4590.01

통계분석을 통한 평균 농도를 살펴보면 Total Cd이 295 $\mu\text{g/L}$, Total Cr이 1067.1 $\mu\text{g/L}$, Total Cu가 2159.3 $\mu\text{g/L}$ 및 Total Fe가 7145.7 $\mu\text{g/L}$ 의 값을 나타내고 있으며, Total Ni이 1532.8 $\mu\text{g/L}$, Total Pb가 4644 $\mu\text{g/L}$ 그리고 Total Zn이 1508 $\mu\text{g/L}$ 의 값을 나타내고 있다. 95% 통계학적 농도의 확산범위를 보면, Total Cd이 173.7-416.1 $\mu\text{g/L}$, Total Cr이 566.4-1567.9 $\mu\text{g/L}$, Total Cu가 1274.2-3044.3 $\mu\text{g/L}$ 및 Total Fe가 4365.4-9926.0 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 나타내고 있다. Total Ni의 범위는 832.3-2233.4 $\mu\text{g/L}$, Total Pb는 2985.9-6302.7 $\mu\text{g/L}$ 그리고 Total Zn는 78.2-2938.9 $\mu\text{g/L}$ 로 분석되었다. 결과적으로 Cu, Fe, Zn 함량은 주로 높게 나타났으나, 고속도로에서 유출되는 중금속의 결과와 비교 시 고농도의 중금속이 유출되는 것으로 나타났다.

3.4. 시간대별 통계분석 결과

수리수문 및 농도곡선에 의하면, 강우 초기 1시간 이내에 다량의 오염물질이 유출되는 것으로 나타났다. 따라서 강우 유출 초기 1시간 이내의 오염물질 유출특성을 면밀히 검토하기 위하여 휴게소지점의 농도자료를 활용하여 통계분석을 수

행하였으며, 그 결과가 그림 2, 3에 나타나 있다.

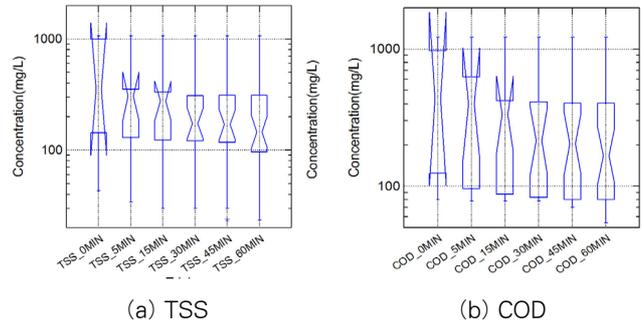


그림 2. Particulates and organic compounds as a function of rainfall duration

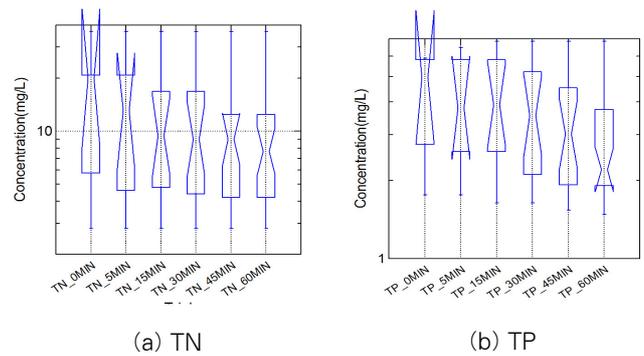


그림 3. Nutrients as a function of rainfall duration

TSS의 경우 평균농도가 강우 유출직후 521.1mg/L에서 5분 동안에 369.3mg/L로 15분 동안에 312.1mg/L, 30분 동안에 366.5mg/L, 45분 동안 267.7mg/L, 60분 동안에는 249.4mg/L로 떨어졌다. COD의 경우, 강우 유출직후 566.8mg/L에서 5분 동안에는 443.3mg/L로, 15분 동안에는 370.1mg/L로, 30분 동안에는 326.4mg/L로, 45분 동안에는 301.4mg/L로, 60분 동안에는 277.6mg/L로 나타났다.

TN의 경우 평균농도가 강우 유출직후 17.2mg/L에서 5분 동안에 14.8mg/L로 15분 동안에 12.5mg/L, 30분 동안에 11.9mg/L, 45분 동안 11.0mg/L, 60분 동안에는 10.3mg/L로 떨어졌다. TP의 경우 평균농도가 강우 유출직후 4.4mg/L에서 5분 동안에 4.1mg/L로, 30분 동안에 3.8mg/L, 45분 동안 3.4mg/L, 60분 동안에는 3mg/L로 떨어졌다.

강우지속시간에 따라 휴게소 노면으로부터 세정되는 분당 오염물질 제거량(mg/L/min)을 그림 4에 나타내었다. 강우로 인한 유출은 강우지속 시간 5분에서 그 값이 가장 큰 것으로 나타났고, 강우지속시간이 길어짐에 따라 그 값이 현저히 낮아지는 것으로 나타났으며, 이것은 초기강우 영향이 그 시간 안에 지배적으로 발생하였음을 의미한다.

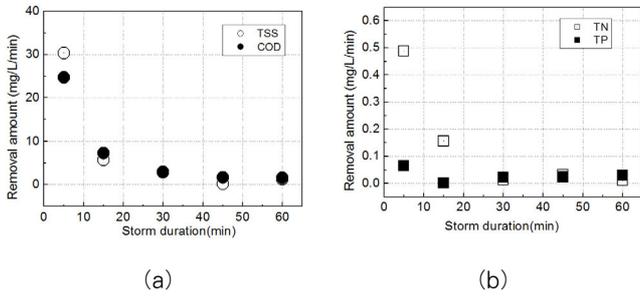


그림 4. Discharge rate of pollutants as a function of rainfall duration

4. 오염물의 유량가중평균농도 산정

휴게소 지점에서 강우시 유출되는 비점오염물질의 부하량 산정은 모니터링을 수행하여 획득된 유출 오염물질의 농도와 강우 유출량을 이용하여 산정할 수 있다. 이 때 이용되는 오염물질의 농도는 유량가중평균농도, 즉 EMC로 불리며 식 (1)과 같이 모니터링 결과를 이용하여 산정된다. EMC는 전체 강우지속시간 T시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산할 수 있으며, 강우에 의해 유출되는 오염물질의 부하량 산정을 위해서는 유량가중 평균농도인 EMC의 정밀한 산정이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 식(1)을 이용하여 각 지점별 강우사상에 대한 EMC를 산정한 후, 산정된 EMC에 대한 통계학적 대표성을 찾기 위하여 통계분석을 행하였다.

$$\begin{aligned}
 EMC &= \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} \\
 &= \frac{\int_0^T C(t) \dot{A}Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt} \quad (1)
 \end{aligned}$$

휴게소지점에 대한 강우사상별 입자상 및 유기물질의 EMC에 대한 통계분석결과를 표 5에 나타내었다. TSS EMC 범위는 31.04-127.11mg/L, COD는 35.5-369.5 mg/L, TN은 2.62-9.86mg/L, TP는 0.53-1.96mg/L의 범위로 산정되었다. 휴게소지점에 대한 강우사상별 중금속의 EMC 값의 통계분석결과를 표 6에 나타내었다. 비교적 높은 농도로 유출되는 중금속의 EMC를 보면 Total Pb의 경우 1206-16293 μ g/L, Total Cu는 237-7906 μ g/L 그리고 Total Ni는 53-6372 μ g/L의 범위로 산정되었다.

표 5. 입자상 및 유기물질 EMCs 통계분석

Parameters	Minimum	Maximum	Range	Median	Mean	Standard Dev
강우량(mm)	1.5	77.5	76	32	34.7	27.479
평균강우강도 (mm/hr)	5	18	13	12	10.8	5.07
ADD (days)	3	15	12	8	8.6	5.32
TSS	31.04	127.11	96.07	103.12	92.61	37.773
COD	35.49	369.49	334	58.02	117.966	141.485
DOC	5.04	45.79	40.75	17.15	18.872	16.33
TN	2.62	9.86	7.24	3.46	4.604	2.973
TKN	1.48	6.34	4.86	2.26	2.804	2.011
AMMONIA	0.21	2.58	2.37	0.32	0.886	1.003
NO2	0.15	0.75	0.6	0.61	0.488	0.262
NO3	0.24	2.86	2.62	1.31	1.312	0.979
TP	0.53	2.24	1.71	1.59	1.404	0.759
PO4P	0	0.23	0.23	0	0.046	0.103

표 6. 중금속 EMCs 통계분석

	Minimum	Maximum	Range	Median	Mean	Standard Dev
SOL_CD	0	39	39	3	9.8	16.392
SOL_CR	0	203	203	13	49	86.467
SOL_CU	25	396	371	36	105.6	162.516
SOL_FE	39	480	441	74	155	184.984
SOL_NI	7	214	207	12	50.8	91.256
SOL_PB	38	565	527	47	151.2	231.511
SOL_ZN	17	259	242	30	74.6	103.886
TOT_CD	0	1108	1108	120	306.6	465.046
TOT_CR	0	4550	4550	284	1087.8	1940.196
TOT_CU	237	7906	7669	668	2043.6	3296.304
TOT_FE	1042	9998	8956	1692	3349	3772.266
TOT_NI	53	6372	6319	491	1614.4	2685.981
TOT_PB	1206	16293	15087	2399	4888.4	6426.338
TOT_Zn	0	1934	1934	146	498	811.707

5. 부하량 산정

유역면적당 오염물질 부하량은 원단위 값 산정을 의미하며, 식 (2)와 같이 계산된다. 이러한 부하량 산정은 식 (1)에서 산정된 EMC를 전체 유출량에 곱한 후 유역면적으로 나누어서 계산한다.

Pollutant Loading per Watershed Area(mg/m²)

$$= \frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2)} \quad (2)$$

산정된 EMC를 이용하여 휴게소 지점의 유역면적에 대한 오염물질의 유출 부하량 통계분석결과를 표 7에 나타내고 있다. 통계분석결과 TSS의 평균 부하량은 1411.6mg/m²로 나타났다으며, COD는 709.7mg/m², TN 44.0mg/m², TP는 10.4mg/m²로 산정되었다. 중금속의 평균 부하량은 Total Cu가 12927.4 μ g/m², Total Fe 32074.4 μ g/m², Total Pb 40371 μ g/m², Total Ni 10679.2m²의 범위로 나타났다. 고속도로와 비교시 휴게소 면적당 유출되는 중금속 부하량이 높은 것으로 분석되었고, 이러한 원인으로서는 차량이 정차하면서 브레이크 패드나 타이어의 마모 등으로 인하여 중금속 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

표 7. 면적당 오염물질 부하량

Parameters	Min.	Max.	Mean	95% CI Upper	St.Dev
TSS(mg/m ²)	3.47	3533.39	1411.586	3468.822	1656.838
COD(mg/m ²)	8.79	1927.71	709.714	1740.765	830.378
TN(mg/m ²)	0.39	106.2	43.974	106.237	50.145
TP(mg/m ²)	0.18	23.14	10.38	23.018	10.179
Total Cd(μ g/m ²)	0	10138	2943	8376.265	4375.794
Total Cr(μ g/m ²)	0	12494	5009.4	11947.14	5587.455
Total Cu(μ g/m ²)	32	37201	12927.4	33376.54	16469.14
Total Fe(μ g/m ²)	117	93434	32074.4	83281.82	41240.97
Total Ni(μ g/m ²)	16	33600	10679.2	28773.11	14572.31
Total Pb(μ g/m ²)	135	105910	40371	102190.9	49787.95
Total Zn(μ g/m ²)	0	11201	3453.6	9345.222	4744.941

6. 결론

고속도로 휴게소 주차장 노면 유출수는 고속도로 본선 노면 유출수보다 유해물질 오염도가 높을 것으로 예상되어, 본 연구는 이 지역의 노면 유출수 오염도 조사를 통해 유출수 특성을 평가하여 휴게소 노면유출수 관리방안을 수립하는 것을 목적으로 하고 있다.

휴게소지점에 대한 강우유출수 분석결과 포장지역의 특성인 초기강우현상을 볼 수 있었으며, 강우초기에 입자상물질은 중금속과 결합하여 다량 유출되는 특성을 나타내었다.

휴게소 지점의 강우유출수에 대한 오염물질별 EMC에 대한 95% 확신범위로는 TSS 128.2-273.4mg/L, COD 145.4-310.1mg/L, TN 6.1-11mg/L, TP 1.9-2.9mg/L의 범위로 분석되어 고속도로에서 유출되는 강우유출수와 비슷한 수준으로 유출되는 것으로 분석되었으나, 중금속의 경우 고속도로에 비해 고농도의 중금속이 유출되는 것으로 나타났다는데, 이것은 차량 정차시 브레이크 패드나 타이어의 마모등에 의한 것으로 판단된다.

휴게소지점에 대한 면적당 발생하는 부하량 통계분석결과, TSS의 평균 부하량은 1411.6mg/m²로 산정되었으며, COD 709.7mg/m², TN 44.0mg/m², TP 10.4mg/m²로 산정되었다. 중금속의 경우 Total Cu 12927.4 μ g/m², Total Fe 32074.4 μ g/m², Total Pb 40371 μ g/m², Total Ni 10679.2 μ g/m²로 산정되었다. 즉, 휴게소지점에서 면적당 유출되는 중금속 부하량은 고속도로의 경우보다 높은 것으로 분석되어 노면에 축적된 중금속이 강우유출수내 고농도로 유출되기 전에 중금속에 대한 발생원 및 관리가 요구된다.

참고 문헌

- 환경부, 영산강·섬진강수계 광역시·도 경계지점의 목표수질 (2004), 환경부고시 제2004-54.
- Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G., and Saget, A. (1998) "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon", *Wat. Res.*, 32(8), pp. 2341-2356.
- Charbeneau, R.J., and Barrett, M.E. (1998) "Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads", *J. of Water Environmental Research*, 70(7), pp. 1295-1302.
- Kim, Lee-Hyung (2003), "Determination of Event Mean Concentrations and First Flush Criteria in Urban Runoff", *Environmental Engineering Research*, 8(4), pp. 163-176.
- Kim, Lee-Hyung, Masoud Kayhanian, Sim-Lin Lau and Michael K. Stenstrom (2005a) "A new modeling approach in estimating first flush metal mass loading", *Wat. Sci. & Tech.* 51(3-4), pp. 159-167.
- Kim, L.-H., K.-B. Kim, K.-H. Lim, H.-M. Kang, J.-H. Lim, and S.-O. Ko (2005b) "Dynamic EMCs and first flush criteria in highway storm runoff in Korea", *The 9th IWA Specialized Conference on Diffuse pollution*, Johannesburg, South Africa.
- Wu, J.S., Allan, C.J., Saunders, W.L., and Evett, J.B. (1998) "Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff", *J. of Environmental Engineering*, 124(7), pp. 584-592.
- U.S. California Department of Transportation (2004), *CALTRANS, DIVISION of ENVIRONMENTAL ANALYSIS*, Report ID CTSW - RT -01 -050.
- U.S. EPA (1994), *Nonpoint sources pollution control program*, U.S. EPA, Report 841-F-94-005, USA.

접 수 일 : 2010. 11. 1
 심 사 일 : 2010. 11. 9
 심사완료일 : 2010. 12. 1