도로유출수로 인한 하천변 토양오염 연구

A Study of Soil Pollution by Road Runoff

주진걸* · 김하룡**

Joo, Jingul*, and Kim, Hayong**

Abstract

Road runoff, a representative non-point source pollution, is known to seriously deteriorate the river water quality. In order to prevent river contamination due to road runoff, road runoff is infiltrated into the soil along the river. However, road runoff containing high concentrations of heavy metals and total petroleum hydrocarbons (TPH) can cause soil pollution. In this study, soil samples were collected at the point where road runoff flows, and the concentrations of heavy metals, such as cadmium, lead, and zinc, and TPH in them were compared with that in uncontaminated soil. Consequently, the concentration of heavy metals in the soil into which the road runoff flows was up to 21 times higher than that of the nearby uncontaminated soil. In conclusion, the discharge of road runoff into the soil seriously pollutes the soil. Therefore, direct discharge of road runoff to soil should be prevented to prevent soil pollution.

Key words : Road Runoff, Soil Pollution, Non-point Sources Pollution

요 지

대표적인 비점오염원인 도로유출수는 하천 수질을 심각하게 악화시키는 것으로 알려져 있다. 이에 수질오염을 저감하기 위하여 도로유출수를 토양에 침투시키는 방안이 도입되고 있다. 그러나 고농도의 중금속과 석유계총탄화수소를 포함하고 있는 도로유출수는 토양오염을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 도로유출수가 유입되는 지점의 토양시료를 채취하여, 인근의 오염되지 않은 토양과 카드뮴, 납, 아연 등 중금속과 석유계총탄화수소 농도를 비교하였다. 그 결과 도로유출수가 유입되는 토양의 중금속 농도가 인근의 오염되지 않은 토양에 비해 최대 21배 높게 나타났으며, 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 나타났다. 결론적으로 도로유출수의 토양방류가 토양을 심각하게 오염시키고 있으며, 이를 막기 위해서는 도로유출수의 직접적인 토양방류를 막아야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 도로유출수, 토양오염, 비점오염원

1. 서 론

하수처리기술의 발달로 인한 점오염원 유출 저감과는 반대로 개발 및 도시화로 인하여 비점오염원의 유출은 점차로 증가하고 있으며, 하천의 수질에 비점오염원이 미치는 영향이 확대되고 있다(ASCE, 1998). 고밀도로 개발된 도시 지역의 경우 인간활동과 차량의 이동이 많아 비점오염원의 발생량이 많으며, 강우시 불투수지역에서 고밀도의 오염수가 유출되고 있다(Choi and Shin, 1997; Zoppou, 2001; Kim

et al., 2004; Elliott and Trowsdale, 2007; Göbel et al., 2007). 특히, 도시지역의 도로유출수에는 BOD, TN, TP, SS 뿐만 아니라, 차량에서 발생하는 화석연료 부산물 및 중금속 등 독성물질이 다량 포함되어 있는 것으로 알려지고 있다(Hoffman et al., 1984; Pitt et al., 1995; Sansalone et al., 1998; Drapper et al., 2000; Furumai et al., 2002).

도시지역 강우 유출수의 특징을 파악하기 위한 연구는 비점오염원 관련 연구의 초기에 전세계적으로 가장 많이 수행된 분야중의 하나이다. 강우 유출수를 샘플링하고 수질

*정회원, 동신대학교 토목환경공학과 부교수(Tel: +82-61-330-3137, Fax: +82-61-330-3138, E-mail: jgjoo@dsu.ac.kr)

Member, Associate Professor, Department of Civil Environmental Engineering, Dongshin University

**교신저자, 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설환경연구실 책임연구원(E-mail: civilkhy@lh.or.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

분석을 통하여 수질특성을 파악하는 것이다. 1990년대에 Characklis and Wiesner (1997), Deletic et al. (1997), Barrett et al. (1998), Wu et al. (1998), Legret and Pagotto (1999) 등이 고속도로 및 포장지역에서의 우수 유출수의 성상을 파악하였다. 그러나 선행무강우일수, 강우량 등 강우조건과 유역 조건에 따라 각기 다른 결과가 도출되었다. 이에 2000년대 들어서는 우수 유출수의 성상에 영향을 주는 인자에 대한 연구가 진행되었다. Kayhanian et al. (2003), Shinya et al. (2003), Soller et al. (2005) 등은 일평균 자동차 운행횟수, 유출수에 포함되어 있는 입자의 크기분포 등이 우수 유출수의 수질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 국내의 경우 S.Y. Choi et al. (2004), Y.H. Choi et al. (2004), Park et al. (2002), Kim and Kang (2004), Park et al. (2004)이 도시유역의 포장지역에서의 우수 유출수의 특징에 관한 연구를 진행하였다.

강우시 도로에서 유출되는 초기우수는 하천의 수질을 심각하게 악화시키기 때문에, 초기우수가 직접 하천으로 유입되는 것을 막기 위한 다양한 비점오염원 처리시설이 개발되었다. 대부분의 경우 도로 유출수 중 고농도 오염물질을 포함하고 있는 초기우수는 하수처리장으로 이송하여 처리하지만, 부득이한 경우 설치되는 비점오염원 처리시설은 침투통, 침투트랜치 등 대부분 우수를 토양에 침투시키는 방법을 사용하고 있다. 이러한 침투방식의 비점오염원 처리시설은 토양 입자의 여과작용으로 인하여 수질 개선 효과가 탁월하고 무동력으로 운영할 수 있으며, 유지관리가 쉬운 장점이 있다. 다만, 여과되어 토양에 포집된 오염물의 경우 BOD, TN, TP, SS 등은 자연 정화가 가능하지만, 화석연료 부산물 및 중금속 등 독성물질은 자연 분해되지 않고 토양에

남아있을 수 있다는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 도로유출수가 지속적으로 유입되는 토양을 대상으로 인근 토양 대비 중금속 및 석유계총탄화수소로 인한 오염정도를 분석하였으며, 이를 통해 도시지역 도로에서의 우수유출수로 인한 토양오염 여부를 파악하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 대상지역 선정

풍영정천은 지방하천으로 전라남도 장성군 진원면 산정리에서 발원하여 장성군 남면과 광주광역시 광산구를 지나 영산강에 합류한다. 광주광역시 구간이 시작되는 지점부터 하남산업단지가 조성되어 있으며, 하류로는 2000년대 초반 수완지구가 개발되면서 고층공동주택단지가 조성되어 차량통행량이 많은 도심하천이다. 주택 및 상업지구가 시작되는 골웃교부터 영산강 합류지점인 운남대교까지 도보로 이동하며, 9개 교량에 대하여 교량 우수유출수가 하천변 토양으로 유입되는 하천을 선정하였다. 도보교는 규모가 작고, 우수유출수의 오염도가 낮아 검토 대상에서 제외하였다. Fig. 1에 풍영정천의 위치와 검토 대상 교량의 위치를 나타내었다.

성덕교와 장자교는 교량에서의 우수유출수가 배수구를 통해 차집되어 교량 하부로 배출되었으나, 토양을 거치지 않고 우수관을 통해 바로 하천으로 유입되고 있다. 하남대교, 풍영정천 1교, 풍영정천 2교는 상부에서 발생하는 우수유출수를 차집하여 교량 하부의 토양에 방류하고 있다. Fig. 2를 보면 방류구 주변의 흙이 시커멓게 변색되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 1. Current Status of Bridges at Pungyeongjeongcheon

Fig. 2. Rainwater Discharge Status at Pungyeongjeongcheon

2.2 대상 교량 현황 및 교통량

현지 답사를 통하여 교통량이 충분히 많고, 도로에서 배출된 우수유출수가 하천변의 토양으로 유출되어 오염된 토양을 채집할 수 있는 하남대교와 풍영정천 1교, 풍영정천 2교를 연구 대상으로 선정하였다. 각 교량의 상세 제원은 Table 1과 같다.

2.3 오염된 토양시료 채취 및 분석

2.3.1 토양시료 채취 위치

하남대교 좌안과 우안에서 도로 배출수로 인하여 오염된 지역의 토양과 인근 토양을 채취하였으며, 풍영정천 1교와 풍영정천 2교에서 오염된 흙을 채취하였다. 토양 시료 채취를 위해 표면의 잡초 및 유기물 등 이물질 제거한 후, 표토층 (0 cm-15 cm)에서 모종삽을 이용해 시료별 약 0.5 kg의 토양 시료를 채취하였다. 하남대교에서는 좌안과 우안에서 오염된 토양시료와 오염되지 않은 시료를 모두 채취하였으

며, 풍영정천 1교와 2교에서는 오염된 시료만을 채취하였다.

1번, 3번 시료는 하남대교 좌안의 교각 옆 우수관 유출구의 오염된 토양에서 채취하였으며, 2번 시료는 1, 3번 시료의 바로 옆 오염되지 않은 토양에서 채취하였다. 4번 샘플은 교대를 타고 흘러내리는 도로유출수가 고여 토양으로 침투되는 지점에서 시료를 채취하였다. 5번 시료는 1, 2번과 유사하게 하남대교 우안의 교각 옆 우수관 유출구 아래에서 채취하였으며, 6번 시료는 5번 시료 인근의 오염되지 않은 토양을 채취하였다. 풍영정천 1교와 2교는 교량 상판에서 취합한 우수의 배출구가 교대 부분에 있으며, 이를 하천변까지 별도의 관을 연결하여 하천변의 토양에 우수를 침투시키고 있다. 7번과 8번 시료는 관 출구의 토양을 채취하였다. 풍영정천 1교와 2교에서는 별도로 오염되지 않은 토양은 채취하지 않았다. 토양 시료를 채취한 위치 및 사진은 Fig. 3과 같다.

Table 1. Bridge Specifications

Bridge name	Hanam Bridge	Pungyeongjeongcheon 1-gyo	Pungyeongjeongcheon 2-gyo
The year of completion	1993	2001	2001
Types of roads	Metropolitan government road	Metropolitan government road	Metropolitan government road
Location	Heukseok-dong, Gwangsan-gu, Gwangju	Unnam-dong, Gwangsan-gu, Gwangju	Unnam-dong, Gwangsan-gu, Gwangju
Length	72.0 m	75.0 m	90.0 m
Bridge width/Effective width	35.0 m/29.0 m	25.0 m/16.0 m	25.0 m/16.0 m
The number of spans	5	3	3
The longest span	15.0 m	30.0 m	35.0 m
Bridge Type	RC Slab Bridge	PSC Slab Bridge	PSC Slab Bridge
Pier Type	T-type pier	Ramen Type	Ramen Type
Passanger Car Unit (PCU)*	20,168	4,000	4,000

* PCU (Passanger Car Unit) : Traffic volume converted into passenger cars.

When comparing passenger cars with large vehicles such as buses and trucks, the area and speed occupying the road vary depending on the type of vehicle (take up a lot of road capacity), so the value is calculated by converting it to a car standard.

Fig. 3. Location and Photos of Soil Sampling

2.3.2 오염도 분석 방법

채취한 시료는 폴리에틸렌 백(지퍼백)에 담아 토양관련전문기관(토양오염조사)로 지정된 토양오염 측정 전문기관(FITI시험연구원)에 의뢰하여, 토양오염공정시험기준(국립환경과학원 고시 제2018-53호, 2018.12.07.)에 의해 시험을 수행하였다. 토양 시료에서 카드뮴(Cd), 납(Pb), 아연(Zn), 석유계총탄화수소(TPH) 포함정도를 분석하였으며, 시료별 오염도는 Table 2와 같다.

각 지점별로 오염된 시료와 오염되지 않은 시료의 농도를 비교하였다. 하남대교 좌안의 도로유출수로 오염된 시료인 1, 3, 4번 시료는 인근의 오염되지 않은 2번 시료에 비하여 카드뮴과 납이 2.7~4.1배까지 높게 검출되었으며, 아연의 경우 8.5~11배까지 높게 나타났다. 석유계총탄화수소의 경우 가장 오염이 심한 1번 시료는 1.5배 가량 높게 나왔으나, 3, 4번 시료는 오염되지 않은 시료와 거의 차이가 없었다.

하남대교 우안의 경우도 카드뮴과 납의 농도는 하남대교 좌안과 유사하게 나타났다. 오염된 시료(#5)가 오염되지 않은 시료(#6)에 비하여 카드뮴과 납 농도가 2.7~3.6배 높게 검출되었다. 반면, 아연의 경우는 21.3배, 석유계총탄화수소는 3.4배 높게 나타나, 좌안에 비하여 우안쪽에서 오염도가 높게 나타났다.

풍영정천 1, 2교는 오염되지 않은 시료를 분석하지 않아, 하남대교의 오염되지 않은 샘플(#2, #6)의 평균값과 비교하였다. 카드뮴, 납은 1.7~4.1배, 아연은 5.7~10.5배로 하남대교의 비율과 유사하게 나타났으나, 석유계총탄화수소는 4.8~5.6배 높게 나타났다.

각 지점별 오염물의 농도를 토양환경보전법 시행규칙(별표3)에서 규정하고 있는 토양오염우려기준(Table 3, Fig. 4)과 비교하였다.

1지역은 주거지역, 학교 등 인간 생활이 직접 이루어지는 지역과 전, 답, 과수원, 목장용지, 양어장 등 먹거리와 관련된

지역이다. 2지역은 임야, 하천, 체육용지, 유원지 등이며, 본 연구에서 토양표본은 채집한 지역과 일치한다. 3지역은 공장, 주차장, 주유소 용지 등 오염이 많이 발생할 수 있는 지역이다.

도로 유출수에 직접 노출되지 않은 2, 6번 시료의 경우 4가지 항목 모두 1지역의 기준보다 훨씬 오염물의 농도가 낮은 것으로 나타났다. 오염된 시료의 경우에도 카드뮴과 납의 농도는 1지역의 토양오염우려기준보다 낮은 것으로 나타났다. 아연의 경우 6개의 오염지역 시료 중 5개(#1, #3, #4, #5, #8)에서 2지역의 기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 하남대교 우안(#5)의 경우 아연농도가 2지역 기준의 2.3배에 이르는 것으로 나타났다. 석유계총탄화수소의 경우 5, 7, 8번 시료에서 2지역 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 도로유출수를 장기간에 걸쳐 토양에 직접 방류하였을 때 차량에서 기원하는 오염물이 토양에 축적될 것으로 가정하였다. 이에 도로유출수가 배출되는 지점에서 카드뮴, 납, 아연 등 중금속과 석유계총탄화수소에 의한 토양 오염도를 측정하였다. 그 결과 오염되지 않은 인근 토양에 비하여 카드뮴과 납 농도가 2~4배 가량 높은 것으로 나타났으며, 아연은 최대 20배 높게 나타났다. 석유계총탄화수소의 경우 지점에 따라 차이가 컸는데, 최대 5.6배 높게 나타나는 지점도 있었으며 오염되지 않은 지점과 유사하게 나타나는 곳도 있었다. 특히 아연의 경우 하천 등 2지역의 토양오염우려기준을 크게 초과하는 것으로 나타났다. 중금속의 경우 자연적으로 분해 및 제거되지 않아 토양에 축적되며, 석유계총탄화수소의 경우 식물 또는 미생물에 의해 일부 제거되는 것으로 판단된다.

본 연구 결과 도로유출수를 토양에 직접 방류할 경우

Table 2. Results of Measuring the Contamination by Sample

Sample	#1	#2*	#3	#4	#5	#6*	#7	#8
Cd (mg/kg)	0.80	0.23	0.70	0.63	1.07	0.33	0.47	1.14
Pb (mg/kg)	53.8	13.0	40.4	42.6	66.0	18.2	32.2	43.3
Zn (mg/kg)	897.6	81.6	696.0	706.6	1,385.5	65.1	419.6	770.1
TPH (mg/kg)	280	181	170	199	940	273	1,095	1,279

* : unpolluted soil sample

Table 3. Soil Pollution Concern Criteria by Land Use Type

Land Use type	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	TPH (mg/kg)
type 1	4	200	300	500
type 2	10	400	600	800
type 3	60	700	2,000	2,000

Fig. 4. Comparison of Contamination by Samples and Soil Pollution Concern Criteria

중금속은 제거되지 않고 토양에 축적되며, 토양오염을 야기하는 것으로 나타났다. 그 대상이 하천으로 유입되는 비점오염원 저감을 목적으로 하는 침투시설에서도 마찬가지로 사료된다. 따라서 고농도의 중금속을 함유하고 있는 도로유출수를 별도의 정화장치 없이 토양에 침투시킬 때는 토양 오염에 대한 고려가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)에 의해 수행되었습니다.

References

ASCE. (1998). *Urban runoff quality management*, reston, va.
 Barrett, M.E., Irich Jr. L.B., Malina, J.F., and Charbeneau, R.J. (1998). Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 131-137.
 Characklis, G.W., and Wiesner, M.R. (1997). Particles, metals, and water quality in runoff from large urban watershed. *J. Environ. Eng.*, Vol. 123, No. 8, pp. 753-759.
 Choi, J.Y., and Shin, E.S. (1997). *A study on the management*

of non-point pollution sources in urban areas. Korea Environment Institute.
 Choi, S.Y., Ko, K.B., Lim, S.H., Shin, J.S., and Oh, Y.K. (2004). Water qualities of the first flush passing the road in urban area. *The Collection of thesis of the Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society of Water Environment Joint Autumn Academic Presentation*, pp. 88-91.
 Choi, Y.H., Oh, J.I., Hwang, H.G., and Kim, J.H. (2004). Characterization of runoff-contaminants from the bridge: Washoff patterns of each pollutant. *The Collection of thesis of the Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society of Water Environment Joint Autumn Academic Presentation*, pp. 765-772.
 Deletic, A., Maksimovic, C., and Ivetic, M. (1997). Modelling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 99-117.
 Drapper, D., Tomlinson, R., and Williams, P. (2000). Pollutant concentration in road runoff: Southeast Queensland case study. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 313-320.
 Elliott, A.H., and Trowsdale, S.A. (2007). A review of models

- for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22, pp. 394-405.
- Furumai, H., Balmer, H., and Boller, M. (2002). Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff. *Water Science and Technology*, Vol. 46, No. 11-12, pp. 413-418.
- Göbel, P., Dierkes, C., and Coldewey, W.G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 91, pp. 26-42.
- Hoffman, E.J., Mills, G.L., Latimer, J.S., and Quinn, J.G. (1984). Urban runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons to coastal waters. *Environmental Science and Technology*, Vol. 18, No. 8, pp. 580-587.
- Kayhanian, M., Singh, A., Suverkroop, C., and Borroum, S. (2003). Impact of annual average daily traffic on highway runoff pollutant concentrations. *J. Environ. Eng.*, Vol. 129, No. 11, pp. 975-990.
- Kim, L.H., and Kang, J.H. (2004). Characteristics of first flush in highway storm runoff. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 20, No. 6, pp. 641-646.
- Kim, S.K., Kim, Y.I., Yun, S.L., Lee, Y.J., Kim, R.H., and Kim, J.O. (2004). Characteristics of road runoff depending on the rainfall intensity. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 20, No. 5, pp. 494-499.
- Legret, M., and Pagotto, C. (1999). Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. *The Science of the Total Environment*, Vol. 235, pp. 143-150.
- Park, J.H., Choi, S.I., and Han, M.Y. (2002). Water quality variations of rainwater collected from the paving areas. *The Collection of thesis of the Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society of Water Environment Joint Spring Academic Presentation*, pp. 101-104.
- Park, J.Y., Choi, S.H., Kim, S.W., and Cho, Y.H. (2004). Patterns and pollutants Loading estimation of urban surface runoff. *The Collection of thesis of the Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society of Water Environment Joint Autumn Academic Presentation*, pp. 378-383.
- Pitt, R., Field, R., Lalor, M., and Brown, M. (1995). Urban stormwater toxic pollutants: Assessment, sources and treatability. *Water Environmental Research*, Vol. 67, No. 3, pp. 260-275.
- Sansalone, J.J., Koran, J.M., Smithson, J.A., and Buchberger, S.G. (1998). Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 427-440.
- Shinya, M., Tsuruho, K., Konishi, T., and Ishikawa, M. (2003). Evaluation of factors influencing diffusion of pollutant loads in urban highway runoff. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 47, No. 7, pp. 227-232.
- Soller, J., Stephenson, J., Olivieri, K., Downing, J., and Olivieri, A.W. (2005). Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management. *Journal of Environmental Management*, Vol. 76, pp. 309-318.
- Wu, J.S., Allan, C.J., Saunders, L., and Evett, J.B. (1998). Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 584-592.
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 16, pp. 195-231.

Received	October 22, 2021
Revised	October 25, 2021
Accepted	October 29, 2021