

도심 교차로 노면 지표유출수의 초기수질특성에 관한 연구

최 상 용 · 고 광 백 · 이 지 영 · 임 세 호
연세대학교 토목환경공학과
(2005년 12월 1일 접수; 2006년 2월 24일 채택)

Water Quality of the First Flushes in the Surface Runoff at an Intersection

Sang-Yong Choi, Kwang-Baik Ko, Ji-Young Lee and Se-Ho Lim
School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-140, Korea
(Manuscript received 1 December, 2005; accepted 24 February, 2006)

Two sites with different average daily traffic volume at an intersection were selected in order to investigate water quality of the first flushes in the surface runoffs. The effects of rainfall intensities and accumulated non-rainy days before rainfall events on the water quality were also delineated. Samples were collected at every 2 min. interval from each first flush from February to May, 2004 for 4 major rainfall events. COD_{cr} or SS concentrations at the site with an average daily traffic volume (ADTV) of 23,000 vehicles were 2-7 times higher than those at the site with an ADTV of 1,400 vehicles. The longer the accumulated non-rainy days were, the higher the concentration of heavy metals were than those of COD_{cr} and SS in the first flushes.

Key Words : Accumulated non-rainy day, First flush, Nonpoint source, Rainfall intensity

1. 서 론

도시화가 진행됨에 따라 자동차 운행 증가와 더불어 도로정비로 인해 도로표면에 쌓여있는 오염물질들이 갈수기 후 강우가 발생하게 되면 씻김현상으로 인해 우수관거 혹은 하수관거로 유입된다. 관거 내에서는 빠른 유속으로 퇴적물이 재부상하여 갈수기시 하수성상에 비하여 오염물질 부하가 현저히 상승하여 방류수역에 수질 오염을 가중시킨다^{1,2)}. 특히 폐쇄성 수역인 호소의 경우 약 80%가 비점오염원에 의한 영향으로 수질이 악화되고 있는 것으로 보고 되고 있다³⁾. 그로 인하여 비점오염원관리대책이 국내에서도 중요한 문제로 대두되었을 뿐 아니라 비점오염원에 대한 국제적인 관심이 고조되면서 국내에서도 비점오염원에 대한 다양한 저감 방안을 모색하게 되었다. 2004년 환경부에서는 봄철에 가물다가 비가 내릴 경우 하천에 용존산소가 고갈되는 등 수환경의 급변에 따른 어류 폐사가 우려됨

에 따라 '수환경변화에 의한 수질오염사고 예방대책'을 전국 시·도 및 지방 환경청에 시달, 4월부터 본격적으로 추진토록 함으로서 비점오염원관리에 임하고 있다⁴⁾. 비점오염원의 대표적인 저감시설로서 초기우수 처리 장치에 관한 연구는 미국, 영국, 호주 등에서 활발히 진행되고 있으며, 1970년대 이후부터 합류식 하수관거 월류수 및 분류식 우수관거 월류수 제어와 관련된 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 현재까지 도시지역 비점오염원 저감시설은 저류형과 장치형이 주를 이루고 있다. 저류형은 초기우수를 저류시켜 침전에 의해 입자상 오염물질을 제거하는 방법으로 입자상물질과 입자상물질에 부착되어 있는 오염물질 제거에는 효과적이지만 용존성 물질 제거에는 한계가 있다. 장치형은 물리·화학적 장치를 이용하여 강우유출수에 포함된 오염물질을 제거하는 방법으로 Stormfilter, Sandfilter, Swirl concentrators /vertex solid separators, Water quality inlets/oil-grit separators 및 Stormceptor 등이 있다⁵⁾.

도시의 비점오염원 관리를 위해서는 수계로 유입되는 초기우수의 수질에 가장 큰 영향을 미치는 도

Corresponding Author : Sang-Yong Choi, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-140, Korea
Phone: +82-2-362-3013
E-mail: will-do@hanmail.net

로에 초기우수 처리장치의 설치가 무엇보다 시급하다²⁾. 하지만 국내의 경우 도심지역의 노면 지표유출수의 초기 수질특성의 기초 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 도심지역의 노면 지표유출수의 초기 수질특성을 규명하기 위해 Y 교차로 내 교통량과 지형특성이 다른 두 지점을 선정하여 노면 지표유출수의 초기수질을 분석 하였다.

2. 실험 방법

시료채취는 Y 교차로의 Site A와 Site B에서 실시되었다. 두 곳 모두 첫 번째 시료는 강우가 도로면을 충분히 적신 후, 도로노면을 지나 모여 든 지표유출수가 어느 정도 모여 우수유입구에 유입되기 시작할 때 채취하였으며 통상 강우 시작 후 약 10분이 경과하였을 경우이었다. 이후 시료채취는 강우강도에 따라서 약 2분~5분 간격으로 실시하였다. Site A는 상대적으로 차량 통행량과 사람의 통행량이 적고 주위에 다른 오염원이 없는 지역이고, Site B는 이와 반대로 사람과 차량의 통행이 많고 주위의 다른 오염원이 있는 상업 지역으로 도심지역의 노면 지표유출수 초기 수질특성을 파악하기 위하여 선정된 지점이다. Y 교차로 내 두 지점의 위치와 강우시 우수의 흐름은 Fig. 1과 같다. 각 지점의 도로특성과 교통량은 Table 1과 같다. 교통량은 오전 7시부터 저녁 7시까지 12시간의 교통량 분석 자료이다⁶⁾.

시료채취는 갈수기가 끝나는 2월부터 장마전 5월까지 총 5회에 걸쳐 진행하였다. 시료채취 시 수온, 강우량을 현장에서 측정하였으며 측정된 강우량을 통해 강우강도 자료를 구하였으며 일강우량은 기상청자료를 이용하였다. 분석항목은 COD_{cr}, SS (Suspended Solid), Pb, Fe 및 Zn이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지점에 따른 영향

1차 실험은 2004년 2월 초에 25분 동안 0.2mm의 강우를 나타냈고 선행건기일수는 8일이었다. 2차 실험은 3월 중순에 10분 동안 1mm의 강우를 나타냈고 선행건기일수는 11일이었다. 3차 실험은 4월 초에 8시간 동안 10.5mm의 강우를 나타냈고 선행건

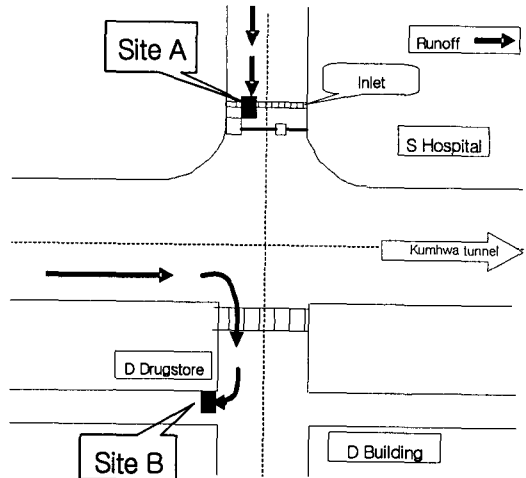


Fig. 1. Sampling points and runoff direction.

기일수는 2일이었다. 4차 실험은 4월 말에 일강우량은 30.5mm, 시료채취 30분 동안 1.2mm의 강우를 나타냈고 선행건기일수는 7일이었다. 5차 실험은 5월 말에 일강우량은 5.5mm, 시료채취 30분 동안 0.4mm의 강우를 나타냈고 선행건기일수는 6일이었다.

2004년 3월, 4월 및 5월의 강우시 채취한 첫 번째 시료를 대상으로 두 지점의 분석결과를 보면 Site A의 COD_{cr}, SS, Fe, Pb, Zn의 평균농도는 각각 514.6mg/L, 487.8mg/L, 9.31mg/L, 0.15mg/L, 1.27mg/L 이고 Site B의 COD_{cr}, SS, Fe, Pb, Zn의 평균농도는 각각 1472.5mg/L, 975.3mg/L, 35.26mg/L, 0.55mg/L, 3.75mg/L이었다. 교통량이 약 17배 많은 Site B가 Site A보다 오염농도가 약 2~4배 높은 것을 알 수 있었고 중금속 중 Fe이 가장 높은 농도를 나타내었다. 또한 시간이 지날수록 우수유입구에 유입되는 물질농도가 고농도에서 저농도로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 초기유출 효과로서 강우 초기에 노면에 축적된 오염물질들이 대부분 유출되기 때문이다⁷⁾.

도로노면에 퇴적된 중금속들은 SS에 흡착된 형태로 유출된다는 연구⁸⁾에 따라 본 연구에서는 초기 우수에 자동차 배기가스 및 브레이크 마모의 영향을 나타내는 Pb와 Fe뿐만 아니라 타이어의 마모를

Table 1. Characteristics of Site A and B at Intersection Y

Site	Characteristics of Intersection Y			Average Traffic volume(Number of vehicles)
	Lane	Slope	Inlet interval	
Site A	one-way 1 lane	2.1%	15~30m	1,400
Site B	one-way 5 lane	4.3%	20~40m	23,000

나타내는 Zn과 SS의 상관관계를 살펴보고자하였다. Fig. 2~4를 살펴보면 두 지점 중 Site B의 SS와 중금속의 농도가 Site A에 비하여 2배 이상 높았고, SS와 중금속이 비슷한 유출경향을 보였다.

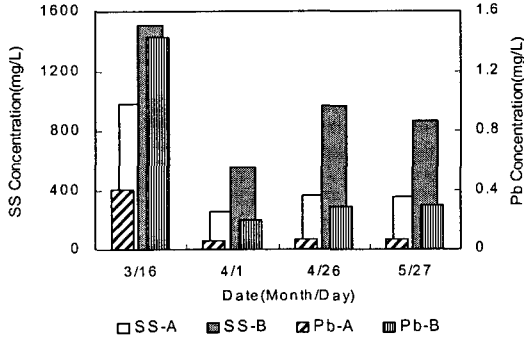


Fig. 2. Pb and SS concentrations in the first flush at Site A and B, 2004.

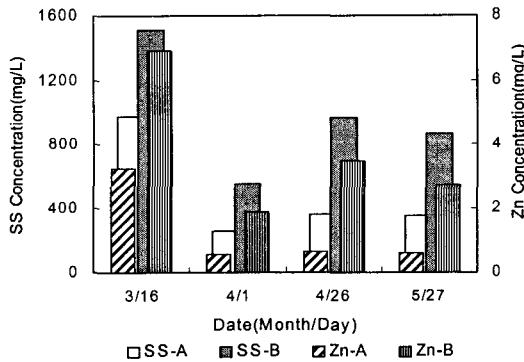


Fig. 3. Zn and SS concentrations in the first flush at Site A and B, 2004.

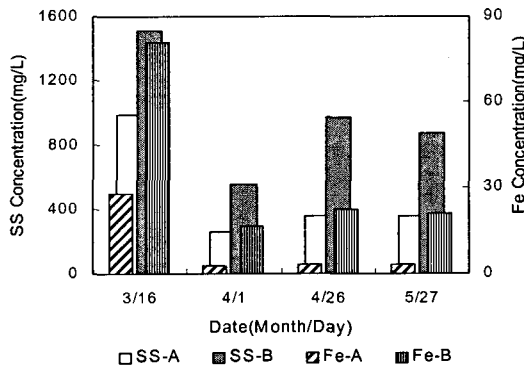


Fig. 4. Fe and SS concentrations in the first flush at Site A and B, 2004.

이러한 실험 결과는 도로노면에 퇴적된 중금속이 SS에 흡착된 형태로 유출되기 때문인 것으로 판단

된다. 아울러 자동차의 브레이크, 타이어 마모 등으로 인한 중금속도 도로노면에 SS에 흡착된 형태로 강우 시 우수유입구로 유입이 되기 때문에 차후에 도심지역의 초기우수처리장치 설계 시 무엇보다 제거해야 할 주요한 물질은 SS라고 판단된다.

3.2. 선행건기일수에 따른 영향

강우가 시작된 후 처음으로 우수유입구에 유입되는 물질농도를 기준으로 선행건기일수에 따른 물질농도를 비교 분석하였다. 선행건기일수가 초기우수의 수질에 중요한 요소임이 보고 된 바도 있다^{9,10}. COD_{Cr}는 선행건기일수와 물질농도가 선형으로 증가하는 상관관계를 보고한 바 있다¹¹. 본 연구에서도 선형적으로 증가하는 상관관계를 확인할 수 있었다. 선행건기일수가 도로노면을 지나는 초기우수의 수질에 미치는 영향은 Fig. 5~7과 같다.

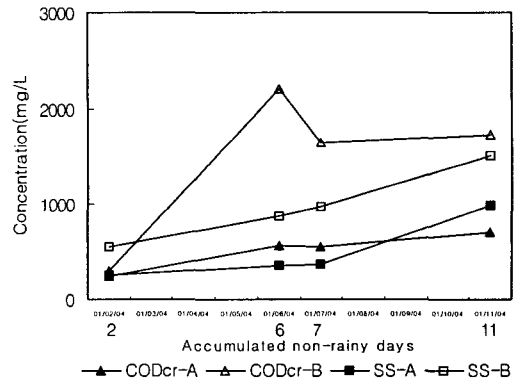


Fig. 5. COD_{Cr} and SS concentrations in the first flush with respect to accumulated non-rainy days at Site A and B.

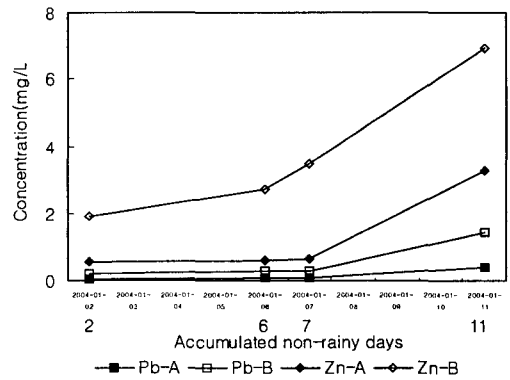


Fig. 6. Pb and Zn concentrations in the first flush with respect to accumulated non-rainy days at Site A and B.

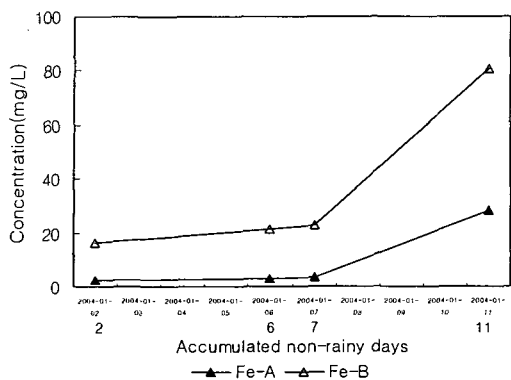


Fig. 7. Fe concentrations in the first flush with respect to accumulated non-rainy days at Site A and B.

선행건기일수가 2일, 11일일 때 물질 농도를 비교해보면, COD_{cr}농도는 Site A에서 237mg/L, 708mg/L로 선행건기일수가 9일 증가할 때 COD_{cr}의 농도는 약 3배 증가하였다. Site B에서 302mg/L, 1728mg/L로 선행건기일수가 9일 증가할 때 COD_{cr}의 농도는 약 6배 증가하였다. SS농도는 Site A에서 256mg/L, 980mg/L로 약 4배 증가하였고 Site B에서 555mg/L, 1510mg/L로 약 3배 증가하였다. Pb는 Site A에서 0.054mg/L, 0.401mg/L, Site B에서 0.201mg/L, 1.427mg/L로 약 7배씩 증가하였다. Zn은 Site A에서 0.571mg/L, 3.244mg/L로 약 6배 증가하였고 Site B에서 1.891mg/L, 6.926mg/L로 약 4배 증가하였다. Fe는 Site A에서 2.621mg/L, 28.02mg/L로 약 11배 증가하였고, Site B에서 16.435mg/L, 80.847mg/L로 약 5배 증가하였다. 중금속의 경우 선행건기일수가 7일에서 11일사이의 오염농도 증가율이 선행건기일수가 2일에서 6일사이보다 더 크게 나타났다. 이러한 결과를 통해 선행건기일수가 장기화되면 도로노면에 중금속이 퇴적되는 양이 선행건기일수가 짧을 때보다 더 큰 농도로 퇴적되는 것으로 판단된다.

3.3. 강우강도에 따른 영향

강우강도에 따른 우수유입구에 유입되는 오염물질의 농도감소율을 비교하였다. 본 실험에서는 단위 시간 10분에 내리는 강우의 양을 강우강도로 나타냈다. 농도감소율은 초기 물질농도와 10분 후의 물질농도의 차를 백분율로 나타냈다. 강우강도와 우수유입구에 유입되는 오염물질의 농도감소율은 Fig. 8~12와 같다. 강우강도에 따른 COD_{cr}, SS, 중금속의 농도감소율의 변화를 살펴보면 강우강도가 약 7배 증가함에 따라 SS의 농도감소율은 약 6~15배 증가하였고 COD_{cr} 및 중금속의 농도감소율은 약 2~8배 증가하였다. 이러한 결과는 불투수층의 면적이 넓어 오염물질의 초기 유출 현상이 두드러진다

는 도시지역 비점오염원 유출 특성과 일치하였다(11-13). 높은 강우강도의 경우에는 오염물질의 초기 유출이 두드러져 농도감소율은 증가하였다. 반면 낮은 강우강도의 경우에는 농도감소율이 낮은 결과를

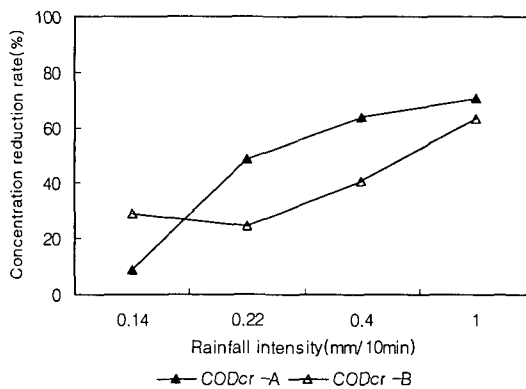


Fig. 8. COD_{cr} concentrations according to the rainfall intensities at Site A and B.

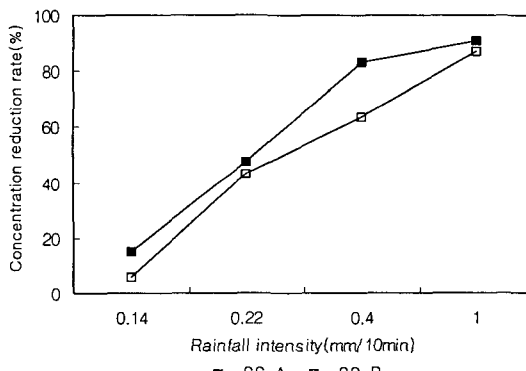


Fig. 9. SS concentrations according to the rainfall intensities at Site A and B.

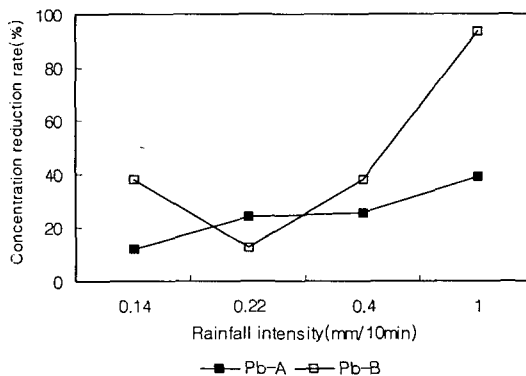


Fig. 10. Pb concentrations according to the rainfall intensities at Site A and B.

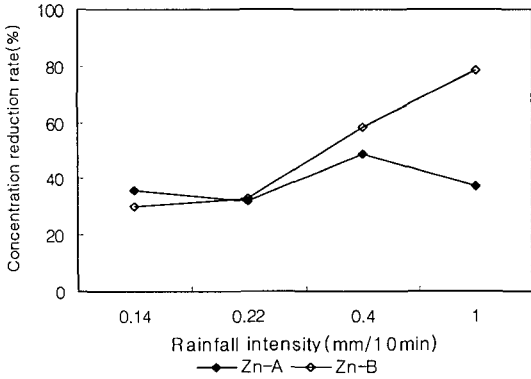


Fig. 11. Zn concentrations according to the rainfall intensities at Site A and B.

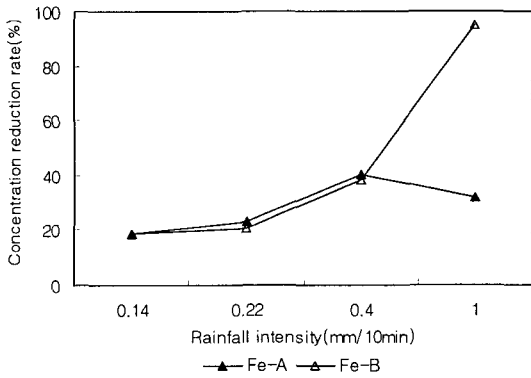


Fig. 12. Fe concentrations according to the rainfall intensities at Site A and B.

나타냈다. 낮은 강우강도에서는 오염물질의 유출이 초기 20~30분 동안 지속적으로 이루어진다는 보고와 유사한 결과를 나타냈다¹⁴⁾.

일정한 오염물 농도가 짧은 시간에 유입되는 것과 긴 시간에 유입되는 것은 큰 차이가 있다. 따라서 갈수기에 강우강도가 큰 강우가 왔을 경우 도로 노면에 퇴적되었던 오염물질이 짧은 시간에 씻김현상으로 인해 우수유입구로 유입되어 하천 등의 수질 환경에 문제를 야기할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 도심지역의 Y 교차로의 지형특성이 비교되는 두 지점을 선정하여 도심지역의 도로면 지표유출수의 초기 수질특성을 규명하고자 하였다.

1) 교통량의 차이가 나는 두 지점(일교통량, Site A : 약1,400대, Site B : 약24,000대)을 비교할 경우에 교통량이 약 17배 많은 Site B지점의 초기 도로면 지표유출수의 COD_{cr} 혹은 SS의 농도가 약 2~7배 큰 것을 확인하였다. 중금속 중 Fe(평균 약

22.29mg/L)이 Pb(평균 약 0.35mg/L)과 Zn(평균 약 2.51mg/L) 보다 약 5~140배 높은 농도를 나타냈다. Fe가 가장 높게 나온 이유는 교차로지역의 브레이크 마모현상이 주요한 원인이라 판단된다.

2) 선행건기일수가 2일인 경우와 11일인 경우의 오염 농도는 약 2~10배의 차이가 나는 것으로 나타났다. 그리고 선행건기일수가 9일 증가함에 따라 COD_{cr} 및 부유고형물의 오염농도가 약 3~6배 증가하였지만, 중금속의 경우는 약 4~11배 증가하였다. 따라서 선행건기일수가 길어질수록 도로노면에 중금속이 퇴적되는 비율은 COD_{cr} 및 부유고형물이 퇴적되는 비율 보다 증가하였다.

3) 강우강도가 약 7배 증가함에 따라 초기 10분 동안의 COD_{cr}, 부유고형물, 중금속의 농도감소율 약 2~15배 증가했다. 강우강도가 약 7배 증가했을 때 초기 10분 동안의 부유고형물의 농도감소율은 약 6~15배 증가했고, COD_{cr} 및 중금속의 농도감소율은 약 2~8배 증가하였다. 따라서 높은 강우강도에서는 오염물질의 초기 유출이 두드러져 농도감소율이 높게 나타났고, 낮은 강우강도에서는 오염물질의 유출이 비교적 지속적으로 이루어져 농도감소율이 낮게 나타났다.

참고 문헌

- 1) Appel, P. L. and P. F. Hudak, 2001, Automated sampling of stormwater runoff in an urban watershed, North-Central Texas, J. Environ. Sci. Health, A 36(6), 897-90.
- 2) Buffleben, M. S., K. Zayeed, D. Kimbrough, M. K. Stenstrom and I. H. Suffet, 2002, Evaluation of urban non-point source runoff of hazardous metal entering Sanra Monica Bay, California, Water Sci. Technol., 45(9), 263-268.
- 3) EPA, 1996, Nonpoint pointers. U. S. Environmental Agency, Office of Water, EPA-841-F-96-004A, Wahington, D.C..
- 4) 환경부, 2004, 봄철 초기 강우시 어류 집단 폐사 방지 대책추진, 환경부 보도자료, 1-10.
- 5) 최중수, 2003, 도시지역 비점오염원의 적정 저감방안, 대한환경공학회 논문집, 49-57.
- 6) 서울시, 2003, 서대문구청 연세대학교 사거리 교통량 조사, 1075pp.
- 7) Sansalone, J. J., J. M. Koran, J. A. Smithson and S. G. Buchberger, 1998, Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events, J. Envir. Eng., ASCE, 124(5), 427-440.
- 8) Robert, P., F. Richard, L. Melinda and B.

- Michael, 1995, Urban Stormwater Toxic Pollutants: Assessment, Sources, and Treatability, *Wat. Environ. Res.*, 67(3), 260-275.
- 9) Deletic, A. B. and C. T. Maksimovic, 1998, Evaluation of water quality factors in storm water runoff from paved areas, *J. Environ. Eng., ASCE*, 124(9), 869-879.
- 10) Lee, J. H., K. W. Banf, L. H. Ketchum,, J. S. Choe and M. J. Yu, 2002, First flush analysis of urban storm runoff, *Sci. Total Environ.*, 293, 163-175.
- 11) John, J. S. and G. B. Wteven, 1997, Partitioning and first flush of metal in urban, *J. of Environ. Eng.*, 123(2), 134-143.
- 12) Michael, E. B., B. I. Lyn, F. M. Joseph and J. C. Randall, 1997, Characterization of Highway Runoff in Austin Texas Area, *J. of Environ. Eng.*, 124(2), 131-137.
- 13) Torben, I., B. Kirsten and R. A. Margit, 1998, First Flush Effects in an Urban Catchment Area in Aalborg, *Water Sci. Technology*, 37(1), 251-257.
- 14) 김석구, 김영임, 윤상린, 이용재, 김이호, 김종오, 2004, 강우강도에 따른 노면유출수의 유출 특성, *한국물환경학회지*, 20(5), 494-499.