

강우강도에 따른 노면유출수의 유출 특성

김석구[†] · 김영임 · 윤상린 · 이용재* · 김이호 · 김종오**

한국건설기술연구원 건설환경연구부

^{*}(주)에코섬

^{**}강릉대학교 토목공학과

Characteristics of Road Runoff depending on the Rainfall Intensity

Seog-Ku Kim[†] · Young-Im Kim · Sang-Leen Yun · Yong-Jae Lee* · Ree-Ho Kim · Jong-Oh Kim**

Korea Institute of Construction Technology, Construction Environment Research Department

^{*}EcoSum Co. Ltd.

^{**}Department of Civil Engineering, Kangnung National University

(Received 28 July 2004, Accepted 30 August 2004)

Abstract : Growth in population and urbanization has progressively increased the loadings of pollutants from non-point sources as well as point sources. Therefore, it is necessary to manage both point and non-point sources contaminations for protecting water environment and improving water quality. This study investigated the characteristics of pollutant release over a wide range of rainfall intensities as a requisite to control road runoff that accounts for the largest portion of non-point source contamination in urban areas. Samples of runoff rainwater collected from real road surfaces were analyzed for physicochemical parameters such as pH, suspended solids, and heavy metals. A experimental model road (30 cm×30 cm) was also used to evaluate wash-off properties of pollutants deposited on the surface as functions of time and rainfall intensity. Analysis of runoff samples on rain events showed that the pollutant wash-off patterns for heavy metal and suspended solids were similar. This implies that the particles in rainwater adsorb heavy metals. Experiments using the model road made of impervious asphalt demonstrate a strong first flush phenomenon. At high rainfall intensity, approximately 80% of total pollutants were released within 15 min. The pollutant wash-off rates rapidly increase from 9 mm/hr to 12 mm/hr of rainfall intensity and decrease over 12 mm/hr of rainfall intensity.

keywords : First rainfall, Road runoff, Rain intensity, First flush effect

1. 서론

공공수역으로 유입되는 오염물질의 발생원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원은 주로 가정하수와 공장폐수로 구성되고, 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생하므로 강우시나 비강우시 배출량의 차이가 없다. 그러나 비점오염원은 오염물질이 주로 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로서 일간, 계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건·지질·지형 등에 영향을 받는 특성을 지니고 있다. 또한, 강우시 지표면의 비점오염원이 유출되는 강우 유출수는 다양한 오염물질을 포함하고 있으며, 유출오염부하는 하수처리장에 의한 것보다 매우 높은 것으로 보고 되고 있다(Sarter et al., 1974). 이러한 비점오염원을 효과적으로 제어하면 수용하천의 수질을 개선할 수 있으며, 더 나아가 효과적인 물 사용과 연결될 수 있다. 최근에 비점오염원 제어를 위한 관리 대책이 시행되고 있으며,

비점오염원 관리 장치의 적용 및 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

도시 유출수는 비점오염원 중 큰 비중을 차지하며, 도시화의 진행에 따른 비점오염원의 부하량도 매년 증가하고 있다(Peter et al., 2000; 최, 1997). 또한, 도시는 불투수성 면적 비율이 다른 토지 이용지역에 비해 높음으로 강우 초기에 오염물질이 다량 유출되는 초기 유출 현상이 두드러진다(Michael et al., 1998; Torben et al., 1998; John et al., 1997). 특히 도시 내 도로노면유출수의 경우, 차량 등의 이동으로 오염물질의 농도가 높은 것으로 알려져 있어(Rebecca et al., 2002; Robert et al., 1995), 초기 유출 부하량이 수계 및 하수처리시설에 미치는 영향은 큰 것으로 판단된다. 노면유출수 내 오염물질 처리는 전체 강우 동안의 유출수를 처리하는 방법보다 초기 강우에 의한 유출수를 처리하는 것이 하수처리시설의 부담을 줄임과 동시에 경제적으로 효과적인 처리방법이라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 강우 초기 유출수의 기준을 설정하기 위하여 도로노면유출수의 일반적인 특징과 더불어 강우사상 중 강우강도에 따른 오염물의 유출 특성을 조사하고자 하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
sgkim@kict.re.kr

2. 재료 및 방법

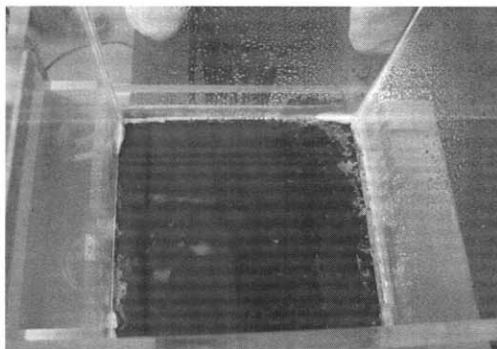
강우강도에 따른 오염물질의 유출특성을 살펴보기에 앞서 실제 노면유출수의 수질특성을 관찰하였다. 2003년 8월~2004년 3월 중 내린 10회의 강우에 대하여 한국건설기술연구원 앞 국가지원지방국도 98도로에서 강우를 채수하였다. 강우 초기 오염물질의 유출량을 파악하기 위하여 강우초기 1시간 동안의 노면유출수를 채수하여 노면유출수의 수질특성을 분석하였다.

또한 오염물질의 유출특성에 강우강도가 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실험실에서 각 강우강도의 강우를 모사하여 실험하였다. 실제 노면배수의 유출 상황과 유사하게 조정하기 위하여 30×30cm의 아스팔트 모형도로를 제작하였다.

Fig. 1은 실험에 사용한 모형도로의 오염된 모습(a)과 실험 진행모습(b)이다. 강우강도는 모형도로에 유입되는 강우강도별 유입량을 계산하여 재현하였으며, 실험 종료 후 총



(a)



(b)

Fig. 1. Road model(30×30cm); polluted before experiment (a), experiment was being processed (b).

유출수의 부피를 이용하여 실험으로 진행된 강우강도를 최종적으로 확정하였다. 인공강우는 압력 분무기를 이용하여 분무 시간을 조절함으로써 실제와 유사한 강우를 모사하고자 하였다. 모형도로의 오염은 실제 도로노면유출수를 이용하였고, 모형 도로를 오염시킨 후 완전히 습기가 마르기 전에 실험을 시작하여 도로노면에서 유출이 시작되는 시점과 같도록 하였다. 실험에서 모사된 강우강도는 3.7, 5.9, 8.8, 11.8mm/hr이다.

각 강우에 대한 노면유출수의 수질 특성을 분석하기 위하여 SS, 중금속을 분석하였고, pH, Conductivity, Turbidity를 측정하였다. 강우강도에 따른 오염물질의 유출현상을 살펴보기 위하여 SS를 분석하였다. pH와 Conductivity는 pH/conductivity meter(Orion model 550A), Turbidity는 Turbidity meter(HACH 2100N)을 이용하여 측정하였고, SS는 유리섬유 여지법, 중금속은 AAS(PerkinElmer AAnalyst 100)으로 분석하였다(APHA et al., 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우 특성 및 노면유출수의 유출 특성

2003년 8월~2004년 3월에 내린 10회의 강우특성을 Table 1에 나타내었다. 강우량 3~143mm, 강우지속시간 2~22hr, 최고 강우강도 2~22mm/hr, 이전 건기일 1~34일 등 다양한 형태의 강우를 확인할 수 있다. Table 2는 채수한 각 강우에서 일반적인 수질 특성 값을 나타내었다. 일반적으로 초기 강우는 산성으로 알려져 있으나 시멘트 면이나 도로 노면 등을 거친 강우는 산성이 약해지는 것으로 보고된 연구가 있다(최 등 2003). 본 실험에서도 pH는 7.2~8.8로 나타났다.

Fig. 2는 실제 유출되는 SS와 중금속의 유출 농도 및 유출상관관계를 살펴보기 위한 그래프로 SS의 유출 농도에 대하여 각 중금속의 유출 농도를 함께 나타내었다. 분석된 중금속은 차체 마모 성분에 의한 것과 포장재 마모입자에

Table 2. The characteristics of road runoff at the first flush

Items	Data
pH	7.2~8.8
Electric conductivity	0.5 mS/cm
Turbidity	50~512 NTU
SS	145~650 mg/L

Table 1. General conditions of collected rainfall

Items	Date									
	'03	'03	'03	'03	'03	'03	'03	'03	'03	'04
	8/19	9/5	9/9	9/15	10/1	10/19	10/21	11/7	11/12	2/21
Total rainfall (mm)	143	24	56	-	3	-	5	19	5	56
Rainfall duration (hr)	22	4	14	-	2	-	2	14	2	4
Maximum rain intensity (mm/hr)	22	16	21	-	2	-	3	4	3	21
Previous dry-weather day (day)	1	3	4	6	13	18	3	10	1	34

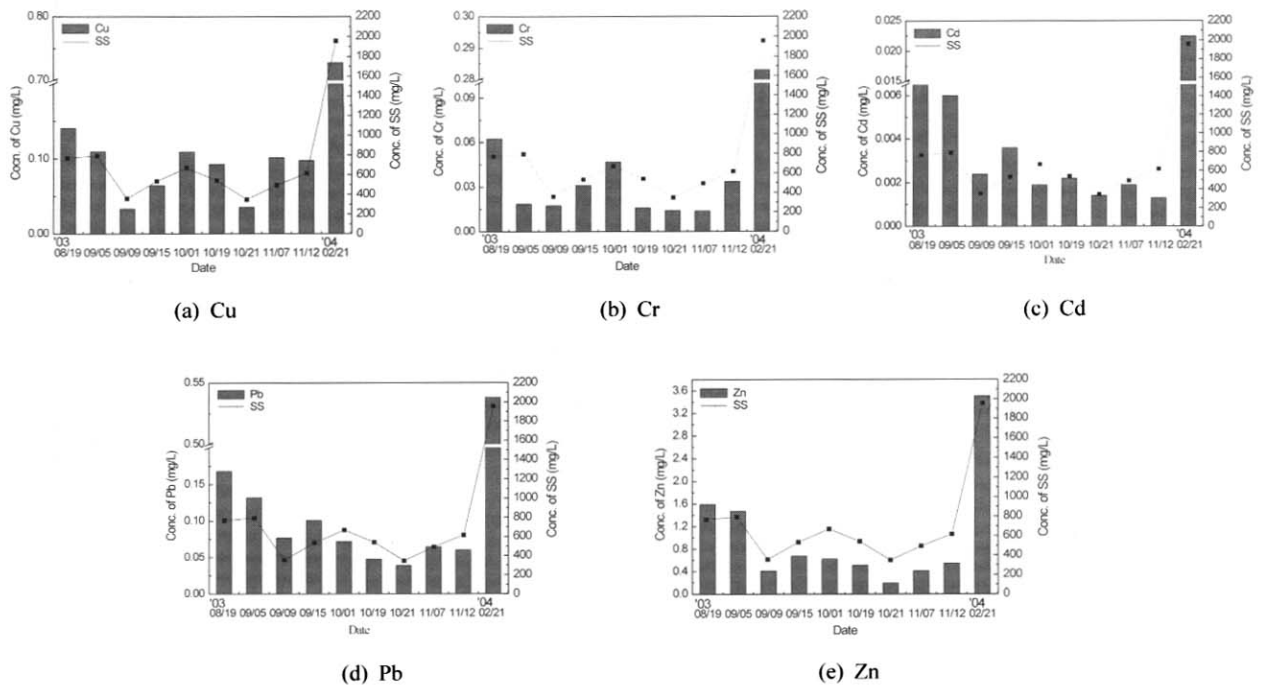


Fig. 2. Runoff concentration of SS and heavy metal of road surface runoff.

의한 물질들이다. 이 결과는 거주지 및 상업지구 등 다른 토지 이용지역과 비교할 때 노면유출수의 중금속의 농도가 2~6배까지 높게 나타난 최 등(2002)의 결과보다 높은 것으로 나타났다. 또한, SS와 중금속의 유출 경향이 유사한 것을 확인할 수 있다. 각각의 상관관계는 Cu의 경우 0.86, Cr 0.78로 높은 값을 나타내었다. 이것은 중금속이 SS에 흡착된 형태로 유출된다는 기존의 연구(William et al., 1981; Robert et al., 1995)와 일치하는 결과라 판단된다. 그리고 유사한 강우 조건의 오염물질 유출 농도를 비교함으로써 오염물질의 유출에 영향을 미치는 강우 조건을 파악할 수 있다. 8월 19일과 11월 12일 강우의 경우, 이전 건기일수가 1일로 동일하지만 강우강도가 22mm/hr, 3mm/hr로 달라 8월 19일의 오염물질의 유출이 더 많은 것을 볼 수 있다. 또한 8월 19일과 9월 5일 강우를 비교하였을 때 이전 건기일수가 각각 1일과 3일로 8월 19일의 이전 건기일수가 적음에도 불구하고 22mm/hr, 16mm/hr로 강우강도가 높음으로 인해 오염물질의 유출이 더 많이 일어난 것을 볼 수 있다. 이것은 강우강도가 오염물질의 유출에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있게 하는 결과이다. 이후 오염물질의 유출에 강우강도 단독으로 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 2004년 2월 21일의 경우, 유출 오염물의 농도가 이전 강우의 오염물질 유출농도보다 큰 이유는 한국의 특성상 겨울철에 강우가 없어 노면에 오염물질이 축적될 시간이 많았기 때문인 것으로 생각된다.

3.2. 강우강도에 따른 SS의 유출 특성

강우강도란 단위시간(1시간)에 내리는 강우의 양을 말하는 것으로 mm/hr로 나타낸다. 강우강도는 오염물질의 유출

현상에 크게 기여하는 것으로 판단되나 실제 노면에서는 일정한 강우강도의 강우가 내리지 않음으로 유출 특성을 파악하기 쉽지 않다. 따라서 본 실험에서는 각 강우강도를 모사하여 오염물질의 유출 특성을 파악하고자 하였다. Table 3은 모형도로를 오염시키기 위해 사용한 노면유출수 내의 SS양과 실험 후 유출된 SS양을 나타내었다. 사용한 노면유출수의 SS양은 252.6~352.5mg이었으나 실제 유출된 SS는 오염 총량의 41~66%였다. 이것은 실험 도중 모형도로 유출부 근처에서 SS가 유출되지 못하고 모여 있는 현상 때문인 것으로 생각되며, 실제 도로노면에서 우수받이 옆의 연석(경계석) 바로 아래 부분에 SS 및 기타 오염물질이 퇴적되어 있는 현상과 유사하다고 판단된다.

Fig. 3은 강우강도에 따른 오염물질의 유출현상에 대한 것을 나타낸 것이다. 노면을 오염시킨 SS양이 다르기 때문에 강우강도별 유출현상을 비교하기 위하여 각각을 백분율로 표시하였다. 강우강도가 3.7, 5.9, 8.8, 11.8로 높아질수록 오염물질의 초기 유출 현상이 두드러지는 것을 관찰할 수 있다. 총 유출 SS의 80%가 유출되는 시간은 강우강도 3.7mm/hr에서 23분, 5.9mm/hr에서 20분, 8.8mm/hr와 11.8mm/hr에서 15분이 소요되는 것으로 관찰되어 강우강도

Table 3. Outflow characteristics of SS with the rainfall intensity

Rain intensity (mm/hr)	3.7	5.9	8.8	11.8
Total polluted SS (mg)	252.6	254.5	352.2	281.6
Total SS runoff (mg)	102.6	115.4	202.0	184.6
Runoff ratio (%)	41	45	57	66

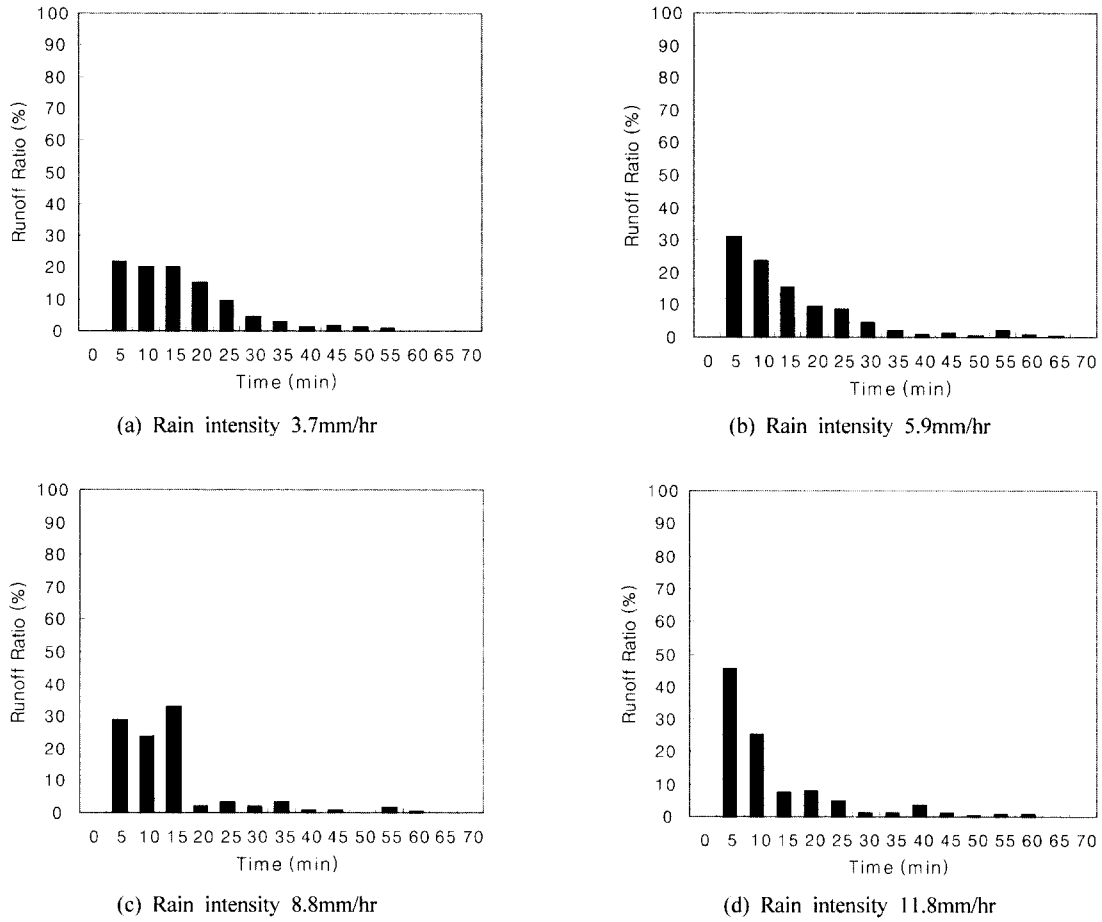


Fig. 3. Runoff phenomena of SS according to the rainfall intensity.

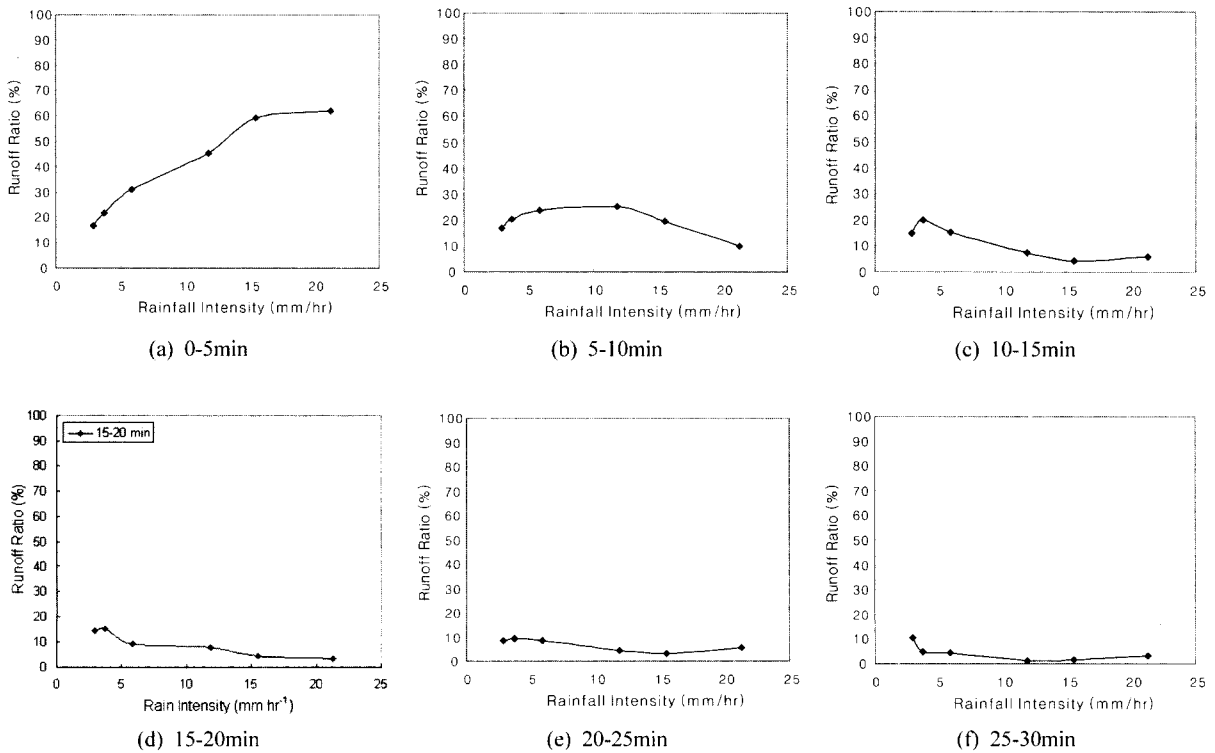


Fig. 4. Runoff outflow characteristics with time and rainfall intensity.

가 높아질수록 오염물질의 유출이 빨라지는 것을 확인하였다. Fig. 4는 시간 변화에 따른 강우강도별 SS 유출량의 변화를 나타낸 것이다. 시간에 따른 유출 변화를 살펴보기 위하여 기존에 실험한 4개의 강우강도에 2.9, 15.5, 21.3 mm/hr에 대하여 추가적으로 실험하였다. 0~5분 동안 SS의 유출 현상을 살펴보면 강우강도 21.3mm/hr에서 유출이 가장 많이 일어났다. 그러나 시간이 지나면서 최고 유출이 일어나는 강우강도가 점점 낮아지며 15~20분에는 3.7mm/hr에서 SS 유출률이 가장 많아지는 것을 관찰할 수 있다. 20분 이후의 시간에 대해서는 대부분의 강우강도에서 유출되는 SS의 양이 일정한 수준에 도달하였다. 이것은 불투수층의 면적이 넓어 오염물질의 초기 유출 현상이 두드러진다는 도시지역 비점오염원 유출 특성(Michael et al., 1998; Torben et al., 1998; John et al., 1997)과 일치하는 결과로 높은 강우강도의 경우, 오염물질의 유출이 두드러져 시간이 경과할수록 유출되는 오염물질의 양이 급격히 감소한다. 반면 낮은 강우강도의 경우, 오염물질의 유출이 초기 20~30분 동안 지속적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있는 결과라 판단된다.

오염물질의 유출이 가장 많이 일어나는 강우강도를 도출하기 위하여 각 강우강도에 따른 SS 유출 변화량을 Fig. 5에 나타내었다. 각 강우강도에서 오염물질의 유출이 가장 두드러진 초기 0~5분 동안의 유출량을 백분율로 환산하여 이용하였다. X축은 강우강도를 나타내며 Y축은 특정 강우강도(M_i)의 SS 유출량에서 그 이전 강우강도(M_{i-1})의 유출량을 뺀 값으로 강우강도의 증가에 따른 SS의 유출 증가량을 나타낸다. 계산값에 대한 회귀식의 기울기가 (+)이면 M_i 과 M_{i-1} 의 유출량 차이가 큰 것을 나타내고, (-)이면 M_i 의 유출량이 M_{i-1} 의 유출량보다 소폭 증가한 것을 나타내며, 유출량의 변화가 적다는 것을 의미한다.

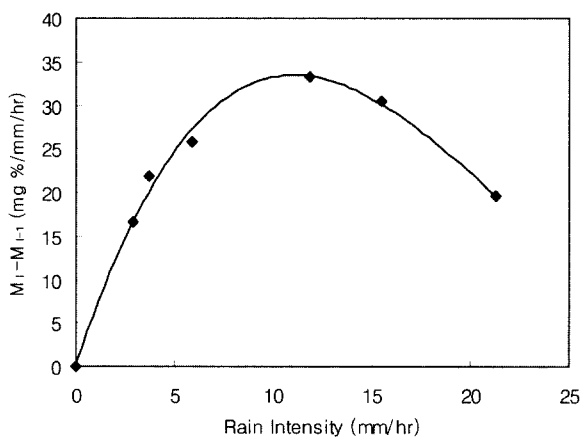


Fig. 5. Change of SS efflux according to the rain intensity.

Fig. 5를 살펴보면, 낮은 강우강도에서 유출량은 강우강도가 높아질수록 증가하여 9~12mm/hr의 강우강도에서 최고점을 이룬다. 이후 강우강도가 높아질수록 오염물질의 유출량 증가폭은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 강우강도 9~12mm/hr가 오염물질의 유출이 크게 일어나는 기준 강

우강도로 판단되며, 이것은 오염물질 유출에 영향을 미치는 최소 강우강도라고 보고된 강우강도 10mm/hr와 유사한 결과이다(최 등, 1998).

4. 결론

도시 내 비점오염원의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 도로 노면배수의 효과적인 처리를 위하여 초기 우수만을 선택적으로 처리하고자 강우강도에 따른 유출특성을 평가한 본 연구는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강우시 도로노면유출수의 중금속은 SS와 유사한 유출현상을 나타내었으며, 다양한 강우인자 중 강우강도가 오염물질 유출에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.
2. 강우강도가 SS의 유출에 미치는 영향을 살펴보고자 강우강도를 조절하여 SS의 유출현상을 살펴보았다. 강우강도가 높아질수록 SS의 유출량이 증가하였으며 오염물질의 초기 유출 효과가 뚜렷하게 나타났다.
3. 초기 우수 처리를 위한 강우강도 설계 기준은 오염물질의 유출량이 급격히 증가하는 강우강도 9~12mm/hr로 조사되었다.

사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 최상일, 박준형, 조장환, 포장면 유출 빗물의 특성 변화, *한국물환경학회지*, **19**(1), pp. 83-90 (2003).
- 최지용, 신은성, 농업지역 비점오염원 관리방안 연구, *한국환경정책·평가연구원*, 서울 (1998).
- 최지용, 신은성, 도시지역 비점오염원 관리방안 연구, *한국환경정책·평가연구원*, 서울 (1997).
- 최지용, 신창민, 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안, *한국환경정책·평가연구원*, 서울 (2002).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition (1998).
- John J. S., and Wteven G. B., Partitioning and first flush of metals in urban, *J. of Environ. Eng.*, **123**(2), pp. 134-143 (1997).
- Michael E. B., Lyn B. I. Jr., Joseph F. M. Jr., and Randall J. C., Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area, *J. of Environ. Eng.*, **124**(2) pp. 131-137 (1998).
- Peter C. V. M., Barbara J. M., and Edward T. F., Urban Sprawl Leaves Its PAH Signature, *Environ. Sci. Technol.*, **34**(19), pp. 4064-4070 (2000).
- Rebecca S. S., John C. C., and David R. A., Treatment of Parking Lot Stormwater Using a StormTreat System, *Environ. Sci. Technol.*, **36**(20) pp. 4441-4446 (2002).
- Robert P., Richard F., Melinda L., and Michael B., Urban Stormwater Toxic Pollutants: Assessment, Sources, and Treatability, *Wat. Environ. Res.*, **67**(3), pp. 260-275 (1995).

Sartor, J. D., Boyd, G. B., and Agardy, F. J., Water Pollution aspects of street surface contaminants, *Journal of WPCF*, **46**(3), pp. 458-467 (1974).

Torben L., Kirsten B. and Margit R. A., First Flush Effects in an Urban Catchment Area in Aalborg, *Wat. Sci. Tech.*,

37(1), pp. 251-257 (1998).

William W. Jr., and Joseph V. H., Settleability of Urban Runoff Pollution, *J. of WPCF*, **53**(12), pp. 1726-1731 (1981).