

산업단지의 도시 강우유출수 배출 특성

Characteristics of Stormwater Runoff from Urban areas with Industrial Complex

정 용 준*⁺ / 김 시 원**

Yongjun Jung*⁺ / Siwon Kim**

요약 : 본 연구는 산업단지를 포함하는 대도시 지역의 강우유출특성을 평가하였다. 5년동안의 강우패턴은 거의 유사하게 분석되었고, 년 평균 강우량은 5.2~6.6 mm로 나타났다. 일부 강우 사상에서는 초기유출 현상이 관찰되었고, 이때의 EMC는 BOD 19.3~39.9 mg/L, CODcr 45.2~190 mg/L, TSS 67.2~351 mg/L, TN 3.6~10.3 mg/L, T-P 1.2~2.5 mg/L였다. 단일 강우사상에서만 검출된 Zn를 제외하고는 중금속이 검출되지 않았다. 입자 분포는 3% 중량비로 10 μm였고, 50% 중량 누적비는 12 μm로 관찰되었다.

핵심용어 : 강우유출수, 산업단지, 초기유출, 유량가중평균농도

Abstract : This study was investigated to characterize the stormwater runoff pollutant materials from the urban area mixed with industrial area. Almost the similar rainfall pattern is shown during the 5 years, and the yearly precipitation was 5.2~6.6 mm. The first flushing effect during the early-stage rainfall-run off was observed in some events. EMC ranges are 19.3~39.9 mg/L for BOD, 45.2~190 mg/L for CODcr, 67.2~351 mg/L for TSS, 3.6~10.3 mg/L for TN, 1.2~2.5 mg/L for TP. Heavy metal are not detected except Zn which is observed at only one event. The particle size was distributed to 10 μm at the 3% weight volume and the 50% cumulative weight percent was shown at 12 μm

Keywords : Urban stormwater, Industrial complex, First flushing, EMC

1. 서 론

강우시 유출되는 비점오염물질의 체계적인 관리가 선행되지 않는다면 각종 수질오염과 생태계에 상당한 영향을 끼치게 되므로 현재 수행되고 있는 각종 수질관리 방안 및 수처리 기술의 효과 또한 제대로 발휘될 수 없는 실정이다.

정부에서는 비점오염물질 관리의 중요성이 확산됨에 따라 하천 유량까지 고려한 오염총량관리제를 도입하였으며, 이 체도의 성공적 정착과 4대강 물 관리종합대책 강화 및 물관리 목표를 달성하고자 관계부처 합동으로 「4대강 비점오염원관리 종합대책」을 발표하였다(관계부처합동보고서, 2004).

비점오염원은 강우시 토지이용 특성에 따라 다양하게 배출되는 유출오염원으로, 배출지역이 불명확하고, 희석 및 확산되면서 불특정 지역으로 유출됨에 따라 차집이 어렵고, 계절적인 변동이 심한 특징을 나타내고 있다.

최적의 비점오염저감시설을 선정하기 위한 고려사항으로는 토지이용 특성 뿐만 아니라, 토양특성, 지하수위, 경사도, 자연유하 가능성 등의 물리적 실현 가능성 및 시설별 특성을 종합적으로 검토한 후 자연형 시설, 장치형 시설 및 시설형 시설 등을 도입할 수 있다(환경부, 2006). 이와 같은 상황을 고려한 자연형(이 등, 2011) 및 장치형(강 등, 2010) 저감시설들의 운영 및 효율평가 사

+ Corresponding author : yjjung@cup.ac.kr

* 정희원 · 부산가톨릭대학교 환경공학과 교수 · E-mail : yjjung@cup.ac.kr

** 비희원 · 경북대학교 환경공학과 겸임교수 · E-mail : swk777@paran.com

례가 다양한 문헌에서 보고되고 있다.

4대강 수계를 중심으로 시범적으로 설치·운영된 비점오염저감시설이 있지만, 토지이용 형태에 따라 강우유출 오염물질의 배출 특성도 상이하고, 토지이용에 제한이 많은 지역적 특성까지 고려한 비점오염 저감시설을 도입하기 위해서는 다양한 자연 및 지리적 상황 변화에 따른 오염물질의 유출 특성 분석 자료가 더욱 확보되어야 한다. 특히 강우시 산업단지로부터 다양한 비점오염물질들이 유출될 가능성이 높으며, 강우강도 및 크기에 따라 우수관로 및 공단내 노면을 통해 하천으로 배출되어 수중 생태계를 위협하고 있어 국내외 연구가 시급한 실정이다(주 등, 2009).

이에 따라 본 연구에서는 산업단지를 포함하여 유역면적이 비교적 큰 도시지역의 강우유출수 발생 특성을 분석하여 향후 설계 및 운영될 비점오염 저감시설을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 유역 현황

본 연구의 조사 대상 유역은 대도시지역에 위치한 산업단지와 하천 상류의 도시지역을 포함하여 약 1,000 ha 정도의 배수면적이 되도록 선정하였다. 토지이용 형태별 비율은 산업단지 52.6%, 주거지역 23.5%, 산림지역 21.3% 및 농경지 2.6%로 구성되어 있으며, 도시형 토지이용이 대부분을 차지하고 있어 강우유출수의 배출 특성을 평가할 수 있다. Fig. 1에 표시한 바와 같이 배수 유역중 상류는 주거 및 상업지역이고, 하류는 산업단지 지역이 차지하고 있어 도시지역과 산업단지가 혼재된 도시지역 토지이용 형태를 나타낸다.

2.2 연구 내용

강우유출수 오염분석은 2009년 7월부터 11월 중 강우시 3회 동안 실시하였고, 기상청의 월별 일 강우량 통계자료를 분석하여 대상지역의 최근 5년간, 즉 2005년부터 2009년까지의 월별 강우량을 분석하였다.

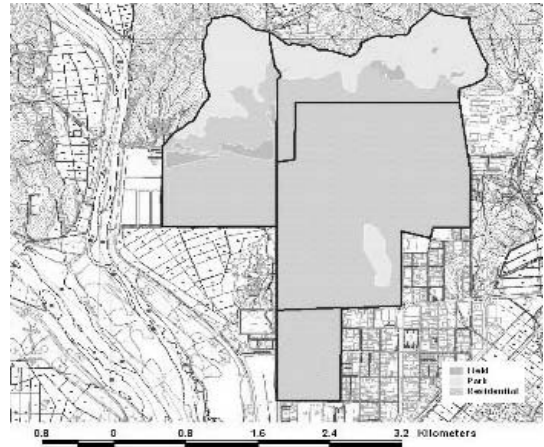


Fig. 1. Map of the study area.

강우유출수의 시료 채취지점은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 유량과 수질을 동시에 측정할 수 있는 하천하류부로 선정하였다. 비강우시에는 차집관거에 의해 유입 유량이 거의 없지만, 강우시에는 차집관거의 CSOs와 비점오염원을 포함한 강우유출수로 분류할 수 있어 유속과 단면적에 의한 유량 측정 방법으로 기저유량을 고려한 강우유출 유량을 산정할 수 있도록 하였다. 수질은 불투수율이 높은 도시지역에서 흔히 관찰되는 비점오염원 배출 특성인 초기강우(First flush) 현상을 파악하기 위하여 크게 강우 초기와 강우 중·후기로 2단계로 구분하여 분석하였다. 강우 초기는 1시간 범위내에서 일정한 간격, 즉 유출직전, 유출후 5분, 10분, 1분, 30분 및 60분 간격으로 6회 채수하였고, 이후에는 강우 종료시까지 강우패턴을 고려하여 적절한 시간 간격으로 유동적으로 6회 더 채수하였다(위 등, 2008).

강우유출수내 오염물질의 농도는 전체 강우 지속 시간동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 유출량으로 나누어 계산한 유량기중평균농도(EMC, Event Mean Concentration)로 평가하였다.

수질은 수질오염공정시험법(환경부, 1995)과 Standard method(APHA, 1998)에 따라 유기물, 영양염류 및 중금속 등을 분석하였고, 입도는 레이저 입도분석기(LS 13 320, Beckman Coulter)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우 분석

Fig. 2에 해당유역 기상청의 월별 일 강우량 통계자료를 분석하여 대상지역의 2005년부터 2009년까지의 월별 강우량을 표시하였다. 2005년부터 2009년까지 월 강우량은 2006년 7월에 최고치를 기록하였고, 매년 7월에 최고치를 기록하였지만, 연강우량 5.2~6.6 mm로 최근들어 증가하는 경향을 나타내고 있다. 본 연구 조사 시기에 이전 년도 강우사상과 비교하여 유사한 강우량을 기록한 것으로 분석되었다.

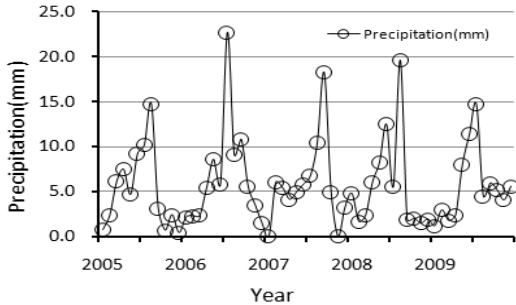


Fig. 2. Profiles of monthly precipitation (2005~2009).

Table 1에 3회의 강우 유출수 모니터링이 실시될 때의 강우사상 특징을 정리하였다. 선행무강우일수 및 선행건기일수(ADD, Antecedent Dry Days)는 4~7일 로 선행건기일수에 의한 비점오염물질의 유출변화를 분석할 정도로 큰 편차를 나

타내고 있지 않다. 전체 강우량은 11~41 mm, 평균 강우강도는 1.83~2.15 mm/hr 및 총강우량은 11만~41만m³의 범위로 측정되었다.

Table 1. Event table for monitoring

Event	ADD (days)	Total rainfall (mm)	Avg.Rainfall Intensity (mm/hr)
I	4	41	2.15
II	5	34	2.13
III	7	11	1.83

3.2 유출 특성

3.2.1 유기물

Fig. 3은 강우유출수내 오염물질 중 유기물의 지표항목인 BOD와 CODcr의 농도변화를 각각의 강우사상별로 표현한 것이다. 강우 I에서 강우유출수내 BOD 농도 범위는 7.6~31.8 mg/L, CODcr 농도 범위는 29.4~61.8 mg/L를 나타냈고, 강우 II에서 강우유출수내 BOD 농도 범위는 16.8~54.2 mg/L, CODcr 농도 범위는 43.8~350.9 mg/L를 나타냈으며, 강우 III에서 강우유출수내 BOD 농도 범위는 21.0~69.8 mg/L, CODcr 농도 범위는 95.7~219.3 mg/L를 나타냈다. 강우 II에서 CODcr이 순간적으로 높았던 것은 강우 중반이후에 퇴적된 퇴적물이 강우와 함께 유출되었기 때문이며, 이는 샘플링 당시의 TSS가 평상시 강우보다 높게 검출되었던 것으로도 뒷받침 할 수 있다.

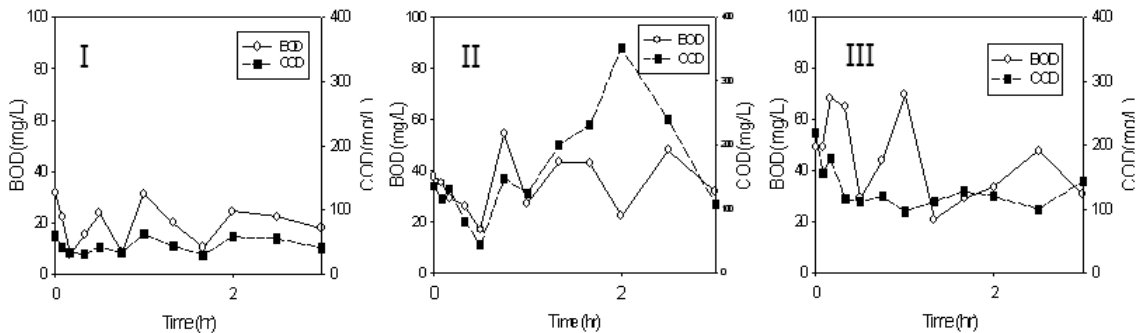


Fig. 3. Organic pollutant-graphs of monitoring samples for each event.

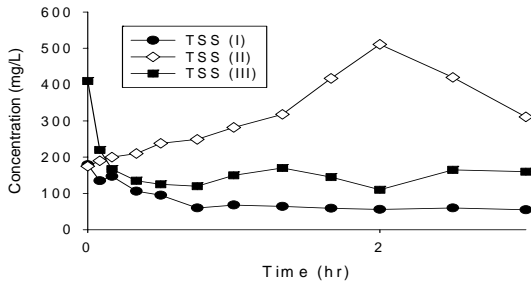


Fig. 4. TSS polluto-graphs of monitoring samples for each event.

강우사상별 큰 유의성은 없는 것으로 관찰되었는데, 이는 강우시 고농도의 비점오염물질이 수로로 유입됨과 아울러 차집관거에서 유출되는 CSOs가 혼합되었기 때문으로 판단될 정도로 산업단지 주변 여건에 따라 농도 범위가 변하는 불규칙한 유출 특성을 나타냈다.

하지만, 불규칙한 강우유출 특성을 나타낸 강우 II를 제외한 강우 I과 강우 III에서는 강우 초기에 의해 비점오염물질이 고농도로 유출되다가 강우가 지속되면서 비교적 저농도로 안정하게 유출되는 초기강우 현상을 관찰할 수 있었다. 강우유출수내 오염물질 중 TSS의 농도를 표시한 Fig. 4

에서도 강우 II의 유출 현상은 불규칙한 것으로 관찰되었지만, 초기 강우에 의해 높은 오염농도를 나타내다가 강우 I과 강우 III과 비교하여 조금 늦게 일정시간이 경과한 이후부터 기저 농도를 나타내는 것으로 관찰되었다.

3.2.2 영양염류

Fig. 5에 강우유출수내 오염물질 중 영양염류의 농도 변화를 각각의 강우사상별로 표현하였다. 강우 I에서 강우유출수내 TN 농도 범위는 2.3~5.3 mg/L, TP 농도 범위는 0.8~2.1 mg/L를 나타냈고, 강우 II에서 강우유출수내 TN 농도 범위는 8.0~12.5 mg/L, TP 농도 범위는 1.2~1.7 mg/L를 나타냈으며, 강우 III에서 강우유출수내 TN 농도 범위는 3.1~6.3 mg/L, TP 농도 범위는 2.1~3.4 mg/L를 나타냈다. 본 연구와 유사한 조건, 즉 강우시 비점오염원을 포함한 강우유출수와 차집관거에서 유출되는 CSOs가 혼재된 공단지역이 포함된 도시지역 비점오염원 유출수의 평균 TN 농도 16.9 mg/L와 평균 TP 농도 2.7 mg/L를 보고한 연구 결과(강 등, 2010)와 비교할 때 TN 농도는 다소 낮게 나타났고, TP 농도는 유사한 것으로 분석된다.

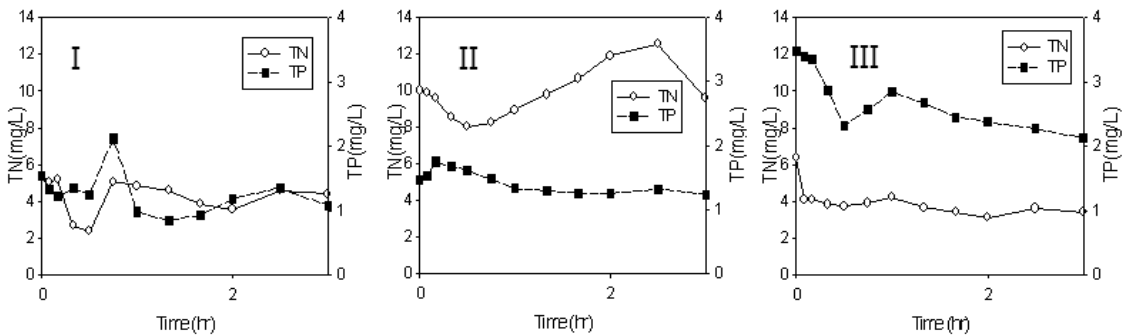


Fig. 5. Nutrients polluto-graphs of monitoring samples for each event.

3.3 EMC 산정

강우사상동안 유출된 전체 오염물질의 양을 전체 유출 유량으로 계산한 EMC를 산정한 결과는 Table 2와 같다. 산정된 BOD, CODcr, TSS의 경우 EMC는 각각 19.3~39.9 mg/L, 45.2~190

mg/L, 67.2~351 mg/L 범위로 나타났고, TN과 TP는 각각 3.6~10.3 mg/L, 1.2~2.5 mg/L로 분석되었다. EMC에 의한 비점오염물질의 유출은 TSS>CODcr>BOD>TN>TP순으로 나타났다. 공업지역을 대상으로 비점오염물질 유출 특성을 분석하여 BOD 27.4~55.2 mg/L, TSS 160.6~

205.3 mg/L, TN 0.5~12.1 mg/L, TP 0.03~0.18 mg/L을 보고한 연구 결과(조 등, 2006)와 비교할 때 유기물은 비슷하지만, 영양물질 특히 총인은 다소 높게 나타났다.

EMC와 단순 산술평균으로 산정한 평균 농도를 비교했을 때 유기물 및 중금속(김 등, 2005)까지

수질항목 전체에 걸쳐 농도차이가 발생하여 강우 유출 부하량 및 저감시설 용량산정에도 큰 오류를 발생시킬 수 있으므로, 강우유출수에 의한 비점오염물질 저감과 관련된 시설을 설계할 때는 다양한 토지이용 성상별 EMC 산정이 필수적이다.

Table 2. EMC on each event

Event	BOD	CODcr	TSS	TN	TP	Pb	Zn
I	19.3	45.2	67.2	4.2	1.2	ND	ND
II	35.5	190	351	10.3	1.4	ND	0.09
III	39.9	119	146	3.6	2.5	ND	ND

Unit: mg/L

선행건기일수가 증가할수록 강우 초기에 다량의 오염물질이 유출되어 대부분의 수질항목에서 EMC가 높게 나타나 수계오염도와 관련이 있는 것으로 일반적으로 알려져 있지만, 본 연구에서는 선행건기일수와 농도와의 유의성은 미미한 것으로 판단된다. 선행건기일수에 대한 영향보다는 불규칙한 오염물질 배출 특성을 나타내는 산업단지 지역이 포함되었다는 것과, 차집관계에서 유출되는 CSOs의 영향이 더 크게 작용한 것으로 판단된다. 또한 일부 연구자에 의하면 선행건기일수는 강우유출 오염농도와는 크게 관련되지 않다는 보고(Whipple et al., 1981)도 있어 이와 같은 결과를 뒷받침해 준다.

중금속의 경우 Pb는 검출이 되지 않았지만, Zn는 강우 II에서 한번 검출된 것으로 나타났다. 아

파트 지역을 대상으로 비점오염 유출 특성을 평가한 연구(조 등, 2006)에서도 다른 중금속은 낮은 수치를 보였지만, Zn은 비교적 높은 수치를 보고한 것과 유사하게 나타났다. 이는 산업단지 지역의 불규칙한 특성과 아파트 주거환경에 의한 배출 원인으로 해석할 수 있다.

3.4 입도분석

Fig. 6에 강우 III을 대상으로 유량을 고려한 혼합 샘플에 대하여 강우유출수내 오염물질의 입도 분포를 분석하였다. 입도 분포에서 입경이 약 10 μm일 때 전체 3% 전후의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

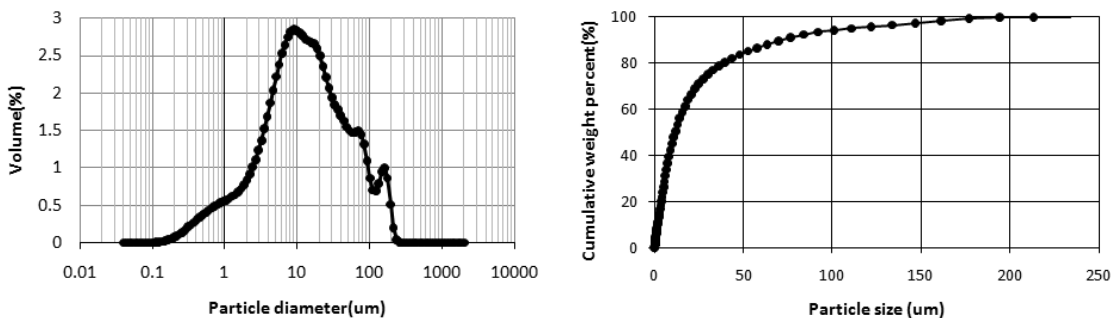


Fig. 6. Particle size distribution of pollutants.

강우시 유출되는 비점오염물질에 대한 잠정적 오염 예상도를 평가하고자 주차장 축적입자의 입도 분포를 조사한 결과 가적통과율 50%를 나타내고 있는 입경이 425~850 μm 로 보고한 연구자료(이 등, 2006)와 비교할 때, 본 연구 대상지역에서의 강우유출수내의 입도 분포는 가적통과율 50%일 때 12 μm 전후를 나타낸 것으로 분석되어 상당히 작게 나타났다. 강우 III에서 유출수내의 TSS농도를 표시한 Fig.4와 영양염류를 표시한 Fig.5를 비교하더라도 입자성 상태로 존재하는 T-P는 유사한 거동을 나타내고 있고, T-N도 초기 유출현상이 유사하게 나타나고 있다. 이에 따라 저감시설은 입자성 물질을 제거함에 따라 영양염류, 특히 T-P도 동시에 제거될 수 있도록 설계되어야 할 것으로 판단된다. 분석 입자의 대부분이 작은 입자 및 콜로이드성을 나타내므로, 후속되는 비점오염저감시설에서는 입자의 크기를 크게 하여 제거할 수 있는 응집제 투입과 관련된 시설의 도입이 필요하다.

4. 결 론

산업단지 지역을 포함한 도시지역의 강우유출수 비점오염물질 발생 특성을 분석하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 2005년부터 2009년까지 5년간 연평균 강우량은 5.2~6.6 mm로 거의 일정한 강우 패턴을 나타냈다.
2. 강우 I 과 강우 III에서는 강우 초기에 비점오염물질이 고농도로 유출되다가 강우가 지속되면서 비교적 저농도로 안정하게 유출되는 초기 유출 현상이 나타났다.
3. BOD, COD_{cr}, TSS의 경우 EMC는 각각 19.3~39.9 mg/L, 45.2~190 mg/L, 67.2~351 mg/L 범위로 나타났고, TN과 TP는 각각 3.6~10.3 mg/L, 1.2~2.5 mg/L로 분석되었고, Pb는 검출이 되지 않았지만, Zn는 강우 II에서 1회 검출되었다.

4. 입도 분포에서 입경이 약 10 μm 일 때 전체 3% 전후의 대부분을 차지하였고, 가적통과율 50%일 때 12 μm 전후를 나타냈다.

참 고 문 헌

- 강용태, 고영발, 한동우, 송근관, 한상윤, 손정호, RSF-CAST 시스템을 이용한 도시지역 비점오염원 유출수와 하수의 처리, 한국수처리학회지, 18(3), pp. 3~12. 2010.
- 관계부처합동보고서, 국무조정실, 행정자치부, 농림부, 산업자원부, 환경부, 건설교통부, 산림청, 물관리종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원 관리 종합 대책. pp. 7~24. 2004.
- 김이형, 이선하, 주차장 및 교량 강우유출수의 중금속 오염 물질 특성과 동적 EMCs, 한국물환경학회지, 21(4), pp. 385~392. 2005.
- 이상현, 조윤철, 생태적 인공습지를 이용한 회야담 수질개선에 관한 연구, 한국습지학회지, 13(3), pp. 489-497. 2011.
- 이소영, 이은주, 김준명, 이병식, 김이형, 주차장 축적 입자의 입도분포, 침강성 및 입자별 중금속 부착량 산정, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동 춘계학술발표회 논문집, P-33. 2006.
- 위승경, 김이형, 정용준, 길경익, 교량 강우유출수 내 비점오염물질의 유출특성 및 상관성, 한국물환경학회지, 24(3), pp.378~382. 2008.
- 조은일, 이용두, 제주시에서 배출되는 비점오염물질 유출 특성, 한국수처리학회지, 14(3), pp. 51~59. 2006.
- 주동진, 이상도, 윤영삼, 이재관, 신현석, 이태호, 초기강우에 의한 공업지역의 비점오염원 유출 특성, 대한상하수도학회·한국물환경학회 2009 공동 추계학술발표회논문요약집, P-184. 2009.
- 환경부, 비점오염원관리 업무편람, pp. 45~87. 2006.
- 환경부, 수질오염공정시험법, 1995.
- APHA, AWWA and WEF, Standard method for

examination of water and wastewater,
20th edition, Washington D.C., U.S.A.
1998.

Whipple, W. and Hunter, J.V., Settleability of
urban runoff pollution, J.WPCF., 53(12),

pp. 251~257. 1981.

- 논문접수일 : 2011년 12월 16일
- 심사의뢰일 : 2011년 12월 19일
- 심사완료일 : 2012년 02월 23일