

특별기고

비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향

신동석<sup>†</sup>

국립환경과학원

Basic Monitoring Concept for Revised Unit-Load on NPS

Dongseok Shin<sup>†</sup>

National Institute of Environmental Research

Abstract

Many researchers have made a study of NPS unit-loads and the scientific evaluation method which need for formulating and enforcing a Total Maximum Daily Load (TMDL) management system and modifying a pollutant discharge loadings function. Some showed the event mean concentration (EMC) on single land-use. For the most parts, as the results showed on multiple land-uses, those cannot be used for NPS unit-loads calculation. NPS runoff shows various phenomena depending on rainfall amount, intensity and duration, land-use type, dry days, etc. The evaluation of discharged NPS unit-loads needs intensive monitoring data, therefore sampling methods and frequency for NPS monitoring must be different from the general monitoring for water quality trend assessment.

keywords : Monitoring, Non-point source (NPS)

1. 서론

비점오염원에서의 오염물질의 배출량은 강우강도와 강우 지속시간, 토지이용형태, 최종강우 경과일수, 불법적인 오염물질 투입상태 등에 따라 변동된다(라 등, 1996; Sartor et al., 1974).

또한 개발에 따른 불투수층의 면적 비율이 높아 강우유달시간이 짧고, 유출율이 커서 강우 초기에 유량 및 오염물질이 다량 유출되는 현상이 나타난다(방 등, 1997; Field et al., 1993).

이 외에 하수관거 오점, 관거 누수, 우수토실(雨水吐室)의 월류(CSOs) 등으로 인해 하수가 섞인 빗물이 하천으로 방류되는 경우가 발생되고 있으며, 하수관거에 쌓인 퇴적물이 강우 시 빗물에 씻겨 하천으로 유입된다.

이와 같이 유역별로 다양하게 발생되고 있는 비점오염원을 효과적으로 관리하기 위해서는 오염부하량을 정량적으로 산정하고 이동 경로를 파악하는 것이 필수적이다(최 등, 1997).

비점부하량 산정을 위해서 지금까지 다양한 방법들이 제시되어 왔고, 환경부에서는 기존의 여러 조사연구 결과를 종합하여 토지이용에 따른 오염물질 배출부하량을 산정하는 방법으로서 원단위법을 규정한 바 있다.

우리나라에서는 1980년대 초반부터 비점오염원 원단위를 산정하기 시작하였으나 모두 단일강우 또는 2~3회의 실측

자료를 이용하였으므로 각 토지이용에 따른 비점오염원유출 특성을 충분히 반영하지 못하였다(신 등, 2001).

특히 우리나라와 같이 강우량의 변화가 큰 지역의 경우, 강우 특성에 따라 특정 기간에 과도하게 오염부하량이 산정될 수 있으므로 이에 대한 개선이 요구되어 왔다. 또한 수질오염총량관리제 확대시행에 따라 비점오염원 배출원단위의 항목추가 및 최근 연구결과를 반영한 발생/배출원단위의 조정을 요청받고 있는 실정이다.

따라서, 비점오염원 원단위 조사방법 및 배출부하량 산정방법의 표준화가 시급하며, 합리적인 비점오염원 배출량을 산정하기 위해서는 토지이용형태별, 강우조건별 다양한 유량가중 강우유출수 농도(Event Mean Concentration: EMC) 등이 장기적으로 축적되어야 할 것이다.

2. 비점오염원 유출해석 경과

2.1. 비점오염원 유출 특성

비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말한다(환경부, 2007).

그 동안 산업폐수 및 생활하수 등 점오염원으로부터의 배출부하량은 배출허용기준의 강화에 따른 고도처리 등 기술개발 및 확대적용의 결과로서 점차 축소되어 왔으나, 비점오염원으로부터의 배출부하량은 지역개발에 따른 불투수성 토지이용의 증가에 비례하여 꾸준히 증가되어 왔다(권, 1998; Fig. 1)

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed. sds1965@me.go.kr

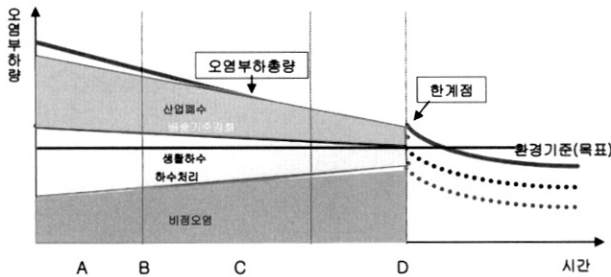


Fig. 1. Trends of pollutant loadings.

불투수성 토지이용은 단위면적당 오염부하가 크고 각종 유독성 물질을 포함하고 있으며, 강우유출수 유달시간이 짧고, 유출율이 커서 강우초기에 유량 및 오염물질이 다량 유출되는 현상이 나타난다(방 등, 1997; Field et al., 1993; Novotny et al., 1981).

2.2. 조사연구 현황

우리나라에서는 1980년대 초반부터 비점오염원 배출량을 조사하기 시작하였으며, 새로운 수질관리정책으로 수질오염 총량관리제가 시행됨에 따라 가용한 실측자료를 종합하여 토지이용형태별 배출원단위를 확정하고 비점오염원이 차지하는 비율을 평가하여 왔다(국립환경연구원, 2004).

원단위를 위한 최초의 부하량 조사는 비점오염원 배출특성 조사연구(국립환경연구원, 1993)로서, 논, 밭 등 일부 지목에 대한 강우 시 배출량을 실측하였다. 이후 비점오염원 조사연구사업(최, 1995)에서는 지적법에 의한 28개 지목분류 중 투수성, 토지이용 특성에 따라 7개 지목(대지, 논, 밭, 임야, 목장, 골프장, 기타)에 대하여 배출부하량을 실측(Table 1)하고 기존에 조사된 연구결과를 종합(Table 2)하여 지목별 원단위를 제시한 바 있으며, 현재 사용 중인 비점오염원 원단위의 근거가 되고 있다.

비점오염원 배출량은 BOD 기준으로 4대강 오염부하의 22~37% 이상 차지하는 것으로 평가되고 있으며, 하수처리장 보급, 배출기준 강화 등으로 점오염물질은 계속 감소하나 도시·도로·농지 등에서 발생하는 비점오염물질은 계속 증가하고 있어, 점오염원 위주의 정책만으로는 획기적인 수질개선이 곤란한 관계로, 정부에서는 4대강 물관리중

Table 2. Research histories on nonpoint pollution

Title	Publication	Year
도시지역/농업지역 비점오염원 관리방안 연구	KEI	97-98
비점오염원 유출부하량 조사지침	국립환경과학원	1994
비점오염원의 오염부하 유출량 조사	한강수계위	2005
논으로부터의 오염물질 배출특성 조사	영산강수계위	2005
도시노면 및 공업지역으로부터 오염물질 배출특성조사	낙동강수계위	2005
비점오염물질 저감시설 삭감효율 평가 분석	낙동강수계위	2005
비점오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석	금강수계위	2005
밭 및 임야로부터의 오염물질 배출특성 조사	금강수계위	2005
고랭지 농업에 따른 오염물질 배출특성 조사	낙동강수계위	2004
도시지역 비점오염 최적관리를 위한 조사사업	환경부	2006
고랭지 밭 비점오염원 최적 관리를 위한 조사사업	환경부	2006

낙동강수계 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사 (환경부, 2003) 등 60여편

Table 1. Unit loads on landuse (kg/km²/day)

Remark	BOD	TN	TP
Upland	1.59	9.44	0.24
Paddy	2.30	6.56	0.61
Forest	0.93	2.20	0.14
Urban	85.90	13.69	2.10
etc.	0.960	0.759	0.027

합대책 추진 강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책을 수립 시행하고 있다(정부합동, 2004).

2.3. 비점저감 시범사업 현황

환경부에서는 4대강 비점오염원관리 종합대책 시행의 일환으로서 비점오염원으로부터의 배출부하량을 저감하기 위한 시범사업을 추진해 오고 있으며(Table 3), 시설형태별 효율평가 등을 위하여 유입수 및 유출수에 대한 모니터링을 병행하고 있다.

Table 3. Demonstration projects on stormwater management

Watershed	Duration	Fund (billion won)	Number of project
Han	'04~'08	12.1	27 sites
Nakdong	'05~'08	15.0	5 sites
Keum	'06~'09	12.0	7 sites
Youngsan	'06~'09	15.0	5 sites

3. 비점오염원 유출해석 평가

3.1. 평가인자 분석

비점오염원으로부터의 배출량은 강우인자(선행무강우일수, 강우량, 강우지속시간, 강우강도 등)와 토지이용인자(이용지목, 식생, 불투수율, 발생/배출 원단위 또는 EMC 등)와 기타인자(유역경사, 유역형상, 하천밀도, 유출율 등)에 영향을 받으며, 비점저감시설 평가는 유입인자(유입유량, 유입농도 등), 유출인자(유출유량, 유출농도 등) 및 기타인자(체류시간, 식생조건, 기상·기후조건 등)에 영향을 받는다.

일반적으로 비점오염원으로부터의 유출수는 선행건기일수

(Antecedent Dry Day: ADD)의 크기에 따라 강우 초기에 나타나는 유출수의 최고 농도가 좌우되고, 특히 도시 지역과 같은 불투수성 토지이용의 경우 선행건기일이 길어질수록 유출수의 초기농도가 고농도가 될 가능성이 커지게 된다.

4대강수계의 대표지점(양평, 대구, 대전, 광주)에 대한 최근 10년간 기상청 일강우(기상청, 1996~2005)를 확보하여, 10년평균 연강우량과 10년평균 월강우량을 분석한 결과, 10년평균 연강우량이 나타난 연도의 일강우량은 태풍, 폭우 등 특이 기상 조건으로 인한 영향 때문에 특정 시기에 비점배출량이 과대 또는 과소평가될 가능성이 있는 것으로 파악되어 10년평균 월강우량이 나타난 달의 일강우를 비점유출량 평가에 사용하는 것이 더 합리적인 것으로 판단된다.

토지이용형태별 EMC 조사 자료를 활용한 원단위 개선을 검토하기 위해 최근까지 조사된 연구결과를 종합한 결과, 통계분석에 필요한 자료수의 부족과 10년평균 일강우량 및 강우강도 등을 대한 빈도를 대변하기에 충분하지 못한 것으로 평가되어 체계적인 조사계획의 수립과 이행이 선행되어야 할 것이다.

### 3.2. 불투수성 토지이용에 대한 EMC 종합

#### 3.2.1. 관측현황

비점오염원은 토지이용형태에 따라 다양한 오염물질을 강우유출수와 함께 유출시키므로, 수계구간별 용수목적에 따라 호수의 부영양화 요인 분석을 위한 영양물질, 공단지역 유출수에 대한 중금속류, 주차장과 도심에서의 기름 등 유류성분, 일반 농지의 농약, 산림지역 및 공사장 주변의 토사나 협잡물 등의 주요 토지 이용에 대한 수질항목이 조사되고 있다(김, 2004, 2005; 서, 2006; 최, 1995; 한, 2006a, 2006b).

#### 3.2.2. 선행건기일수 관측에 따른 EMC

김 등 (2002)의 연구에 따르면, 선행건기일수가 100일 이상이고 강우량 200 mm 이상의 강우 발생 시, 금학천, 영문천, 금어천 최상류 지점에서 산정된 유출계수의 값이 각각 0.99, 0.49, 0.88로 도시지역인 금학천 지역의 유출계수가 가장 높은 것으로 조사되었다. 하지만, 본 연구에서 수집한 5개 불투수성 토지이용 관측 자료에서는 선행건기일수 증가에 따른 EMC 값의 증감이 뚜렷하게 나타나지 않았다(Fig. 2).

#### 3.2.3. 계절별 관측농도 분석

투수성 토지이용은 농업활동과 연관이 많아 비료투입, 쟁기질, 관개 등의 영향으로 계절적 변동이 존재할 수 있으나, 도로 및 대지와 같은 불투수성 토지 이용의 경우 상시 이용되는 특성으로 인해 수집된 관측 자료에서 계절별 차이가 뚜렷이 나타나지 않았다. 즉, 불투수성 토지이용의 경우 연간 이용 빈도 또는 인위적인 교란 등이 농지와 같은 투수성 토지 이용과는 달리 거의 일정하여, 월별·계절별 강우 시 배출되는 오염물질의 EMC값이 차이를 보이지 않았으므로(Fig. 3), 연평균 자료를 원단위 산정에 사용하여도 무리가 없을 것으로 판단되었다.

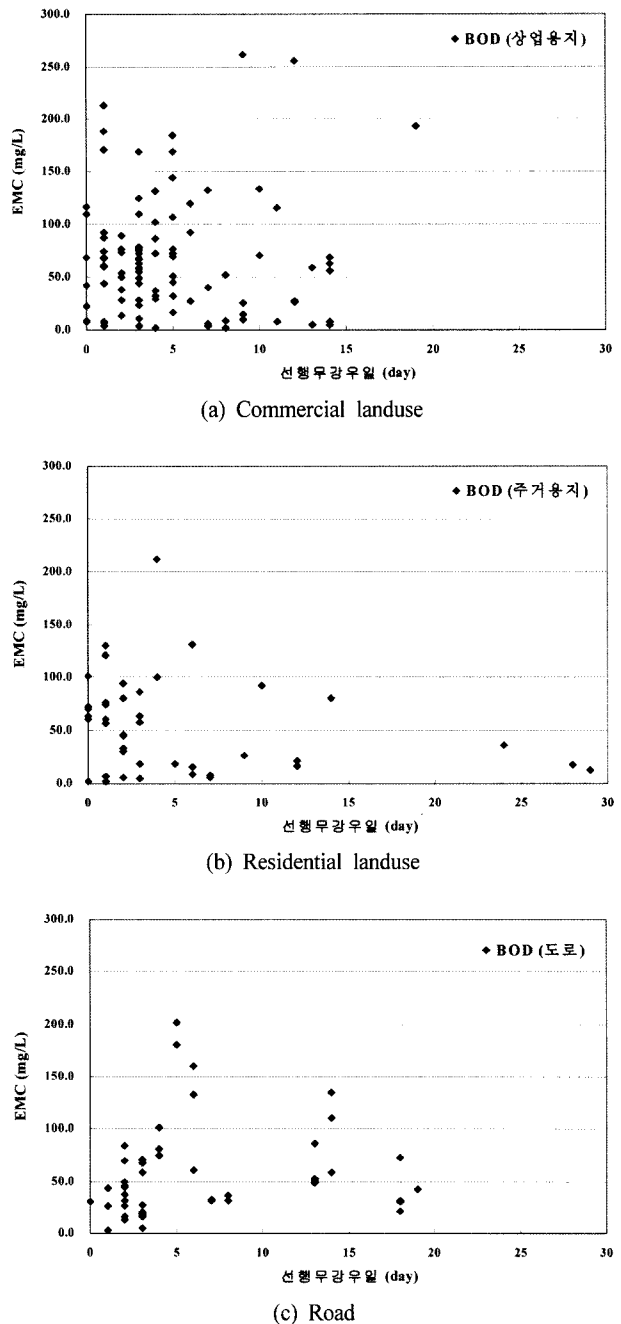


Fig. 2. BOD EMC pattern on antecedence dry day.

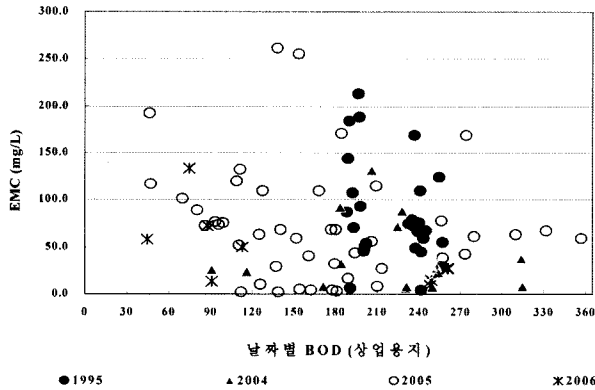
#### 3.2.4. 상관관계 분석

피어슨의 상관계수는 -1에서 +1까지의 값을 갖는데, 변수가 완전한 양의 상관관계에 있으면 +1이고, 완전한 음의 상관관계에 있으면 -1의 값을 갖는다. 만약 두 변수가 전혀 상관관계가 없으면 0의 값을 갖게 되는데, 일반적으로 상관계수의 절대값 크기가 0.6이상이면 상관관계가 높다고 하고, 0.3이하이면 상관관계가 낮다고 한다. 선행건기일수와 계절에 따른 토지이용별 EMC의 상관관계를 분석한 결과로, -0.24~0.59의 범위로 나타나 도시 및 대지와 같은 불투수성 토지이용의 경우 선행건기일수 및 계절에 따라 EMC값이 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다(Table 4). 이러한 결과를 반영하여 토지이용 형태별로 확보한 EMC 자료 전체를 평균하면 Table 5와 같다.

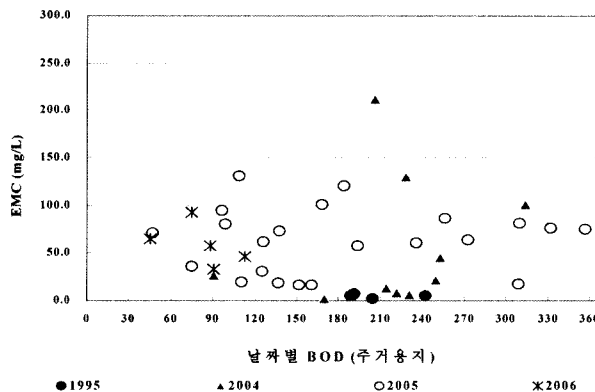
3.3. 비점오염 해석을 위한 조사계획 제안

3.3.1. 강우유출수 조사지침 외국사례

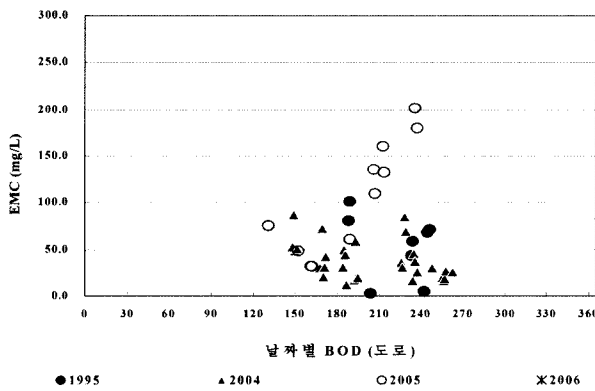
미국 포틀랜드시의 경우, 강우량에 대한 빈도분석 결과 등을 고려하여 강우사상에 대한 기준 및 시료채수 기준을 포함한 지침을 정하고 있다(Table 6).



(a) Commercial landuse



(b) Residential landuse



(c) Road

Fig. 3. Monthly BOD EMC pattern.

Table 4. Correlation analysis (Pearson coefficient)

Landuse	Antecedent dry day	Seasonal
Industrial	0.59	0.51
Commercial	0.02	-0.17
Residential	-0.24	0.01
Parking	0.14	0.27
Road	0.14	-0.01

95% 신뢰수준, t-test (쌍체비교)

Table 5. Averaged EMC on landuse

Landuse	EMC (mg/L)				Data
	BOD	SS	TN	TP	
Industrial	13.34	43.25	4.012	0.309	29
Commercial	68.54	151.71	11.294	1.692	98
Residential	53.00	150.20	11.423	1.622	43
Parking	35.32	115.18	4.350	0.985	12
Road	54.81	146.05	5.065	0.584	51

Table 6. Sampling guideline for stormwater management facilities (Portland, Oregon)

Number of sample	15 ~ 30회
Range of rainfall	최소 강우 3mm 이상 50%는 10mm 이상 10%는 21mm 이상
Range of inflow	Off-line 시설은 10~100% 이내 On-line 시설은 10~125% 이내
Antecedent dry day	비강우기간이 최소 6시간 이상
Min. runoff duration	최소 6시간 이상
Range of rainfall intensity	최소강우강도는 0.5mm/hr 이상 50%는 0.8mm/hr 이상 10%는 1.27 mm/hr 이상 최대강우강도는 2.54mm/hr 이상
Sampling duration	강우유출수 전체 기간
Treatment	분석이전 1mm 이상 헹잡물, 토사 등을 제외시킴

3.3.2. 원단위 개선을 위한 조사계획(안)

기존 원단위는 지적법에 의한 대분류 지목에 대한 결과이나, 유역모델을 이용한 비점유출해석을 지원하기 위해서는 환경부가 공개하고 있는 토지피복분류 전자지도의 증분류에 해당하는 23종(Table 7)에 대한 강우시 오염물질 유출 농도를 조사할 필요성이 제기되었다.

Table 7. Classification of landuse cover

Medium (23 category)		General (7 category)	
110	주거지역	100	시가화/건조지역
120	공업지역		
130	상업지역		
140	위락시설지역		
150	교통지역		
160	공공시설지역		
210	논	200	농업지역
220	밭		
230	하우스재배지		
240	과수원		
250	기타재배지	300	산림지역
310	활엽수림		
320	침엽수림		
330	혼효림	400	초지
410	자연초지		
420	골프장		
430	기타초지		
510	내륙습지	500	습지
520	연안습지		
610	채광지역	600	나지
620	기타나지		
710	내륙수	700	수역
720	해양수		

또한, 기존의 조사결과에서 도출된 개선점을 반영하기 위하여 토지피복분류별, 채수시간대별 공통 조사항목(유량, BOD, TOC, SS, TN, Org-N, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, TP, Org-P, PO<sub>4</sub>-P) 및 토지피복별 필요시 추가 조사항목(VOCs, 살충제, 중금속류, 노말핵산추출물질-광유류, 대장균 등)을 결정하면 분석에 필요한 최소 시료채수량을 결정할 수 있다.

토지피복분류(중분류 23종)별 모니터링 대상구역 선정시에는 유출율을 고려한 강우량별 강우유출수 채수에 필요한 조사지역 최소면적이 검토되어야 하며, 단일 토지피복 지역 선정을 위한 사전 도상조사 및 현지실사가 필요하다. 대상 지역의 물리적 이화학적 토양특성 조사와 더불어 조사대상 배수구역 기초 자료의 구축(도면 작성 및 유역면적 산정 등)도 필요하다.

조사대상 지역의 수문분석을 위하여, 최근 10년간 일강우 분석을 통한 강우량별 빈도를 분석하고, 빈도분석결과를 반영한 조사대상 강우량의 크기와 강우량(또는 강우강도)별 통계처리에 필요한 조사 횟수(최소 조사 년수)를 결정한다.

모니터링 방법을 선정하기 위해서는 토지피복분류별, 강우사상별 및 유출시간대별 유출패턴 예비조사를 실시하고 조사지역까지의 이동시간을 고려, 일기예보(강우량, 강우시작시기 등)에 따른 날짜별(또는 시간대별) 출장계획을 잠정 결정한다. 토양특성(투수성, 불투수성), 유출지속시간 등은 적정 채수간격 결정에 기초자료로 활용한다.

토지피복분류별 조사대상구역의 채수위치가 결정되면 측정지역현황 도면대장 작성 및 관리방법을 결정하고 강우유출수 유량/수질 조사에 필요한 최소인력 및 장비목록과 확보방안을 수립하여야 한다.

또한 계절별(또는 월별) 및 강우량별 조사자료 관리를 위해서 정도관리 및 분석자료 DB 관리계획과 강우량별 빈도 분석결과를 반영, 적정분석자료 확보 이후의 조사계획(조사대상 토지피복 변경 또는 추가 등)을 수립한다.

강우유출수 예비 시범조사를 통하여 채수시간대별 공통항목 및 필요시 추가 항목을 확정하며 토양특성별 모니터링 방법을 필요시 정정하여 차회 모니터링 계획을 수정하여 반영할 필요가 있다.

#### 4. 결론

최신 조사연구 결과를 반영한 비점원단위의 조정을 위해서는 정기적으로 자료 확보와 평가가 수행되어야 하며, 오염총량관리계획 등의 수립주기와 증장기 연구계획을 검토하여 원단위 갱신주기에 반영하여 정책시행에 혼선을 방지할 필요가 있다.

원단위법 이외에 비점오염원 배출량해석 지원을 위하여 유역모델 등을 활용할 수 있도록 토지피복분류별 또는 세분류 지목별 배출수 EMC DB의 축적/갱신이 필요하다. 또한 비점오염원에서 배출되는 유량과 수질농도 관측기준(채수 시간간격 및 빈도, 관측대상 강우크기, 대상유역 특성에 따른 관측필수 수질항목 등)의 표준화가 선행되어야 할 것이다.

개발사업에 따른 비점오염원계획의 세부평가지침 및 정기적인 개정주기 공개, 평가에 사용할 강우자료(인근측후소, 티센망) 및 기간(최근 10년, 15년, 30년)의 결정, 저감시설별 대표 EMC 및 처리효율(연평균, 계절평균, 월평균 등), 유사시설의 정의, 실측자료가 없는 저감시설에 대한 평가원칙이 조속히 확정될 필요가 있다.

#### 참고문헌

국립환경연구원, 비점오염원으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구 (1993).

국립환경연구원, 수계 오염총량관리기술지침 (2004).

권순국, 우리나라 비점원 수질오염관리의 문제점과 개선방안, *대한환경공학회지*, **20**(11), pp. 1497-1510 (1998).

기상청, *기상월보* (1996~2005).

김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정욱진, 정안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, *대한환경공학회지*, **24**(11), pp. 2019-2027 (2002).

김이형, 고속도로 강우 유출수 내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 631-640 (2004).

김이형, 강우시 주차장 및 교량에서 유출되는 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs, *한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 248-255 (2005).

라덕관, 김기성, 수질에 미치는 비점오염원의 영향, *공업기술연구소 논문집*, **10**(10), pp. 139-149 (1996).

방기웅, 이준호, 유명진, 도시 소유역에서의 비점오염원 유출 특성에 관한 연구, *한국수질보전학회지*, **13**(1), pp. 79-99 (1997).

서규태, 도시노면 및 공업지역으로부터의 오염물질 배출특성조사에 관한 연구, 3년차 중간보고서, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 (2006).

신은성, 최지용, 이동훈, 토지용도와 유역특성을 고려한 비점오염물질 원단위 산정에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **17**(2), pp. 137-146 (2001).

정부합동, 4대강 물관리종합대책 추진 강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책 (2004).

최지용, 비점오염원 조사연구사업 보고서, 환경부 (1995).

최지용, 신은성, 도시지역 비점오염원 관리방안 연구, 한국환경정책평가연구원 (1997).

한영광, 금강수계 비점오염원 관리시설 시범설치사업 기본 및 실시설계 보고서, 환경관리공단 (2006a).

한영광, 영산강섬진강수계 비점오염원 관리시설 시범설치사업 기본 및 실시설계 보고서, 환경관리공단 (2006b).

환경부, 낙동강수계 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사, (주)우대기술단 (2003).

환경부, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 (2007).

Field, R. and O'Shea, M. L., *Integrated stormwater management*, Lewis pub Ann Arbor (1993).

Novotny, V. and Chesters, G., *Handbook of nonpoint pollution; source and management*, Van Nostrand Reinhold Co. N. Y (1981).

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).