

농촌유역의 강우사상별 농업 비점원오염물질 유출특성

김진호[†] · 한국현 · 이종식

농촌진흥청 농업과학기술원 환경생태과

Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollutants by Rainfall Events in Rural Watersheds

Jinho Kim[†] · Kukheon Han · Jongsik Lee

Division of Environment & Ecology, National Institute of Agricultural Science and Technology, Rural Development Administration
(Received 7 May 2007, Accepted 23 August 2007)

Abstract

This study was conducted to know the characteristics of agricultural non-point source pollutants runoff by rainfall events at the upper catchment of Goseong reservoir in Gonju city, Chungnam Province. For this study, the monitoring sites of the research catchment were set nineteen during the research period (between June 2005 and October 2006). Average runoff coefficient were observed 0.51 in 2005, 0.71 in 2006, respectively. The correlation coefficient (r) between the rainfall and peak-flow was investigated 0.787. By rainfall events, the water quality of the sites were shown like this : BOD 0.555~9.60 mg/L, T-N 0.01~13.50 mg/L, T-P 0.002~2.952 mg/L, and SS N.D~820.0 mg/L. The strong rainfall intensity was the most important factor of the soil erosion. The gabs of the arithmetic mean concentrations and the flow weighted mean concentrations were observed as the followings : BOD 0.0~29.2%, T-N 0.1~11.4%, T-P 0.4~95.2%, and SS 1.7~57.0% in 2005, and BOD 1.0~11.9%, T-N 0.7~7.3%, T-P 9.9~36.5%, and SS 6.6~36.5% in 2006, respectively. The BOD pollution load was 2,117 kg (36% of the total BOD loading of survey periods) while, T-N was 3,209.0 kg (27.9% of the total T-N loading of survey periods), T-P was 136.4 kg (37.4% of the total T-P loading of survey periods) and SS was 72,733.8 kg (51.8% of the total SS loading of survey periods) in the year 2005. In case of 2006, BOD load was 1,321.7, T-N was 2,845.8, T-P was 42.9, and SS was 16,275.8 kg, respectively.

keywords : Event mean concentration, Non-point source, Peak-flow, Rainfall event, Water quality

1. 서론

하천이나 호소로 유입되는 오염물질은 유역으로부터 점원 또는 비점원에서 발생한다. 점원은 배출특성이 명확하여 오염부하량 산정과 관리가 용이하나, 비점원은 오염발생량 및 배출특성의 파악이 매우 어렵고, 발생량이 매우 불규칙하며, 시간에 따른 부하량 변동폭이 크며, 강우초기에 오염물질의 농도가 매우 높다(노상덕 등, 2006; 한국수자원공사, 2003, 2004; Bedient et al., 1980). 특히 오염물질 중 질소와 인 등의 영양물질이 많이 포함되어 있어 하천이나 호소의 부영양화를 일으키는 원인으로 잘 알려져 있다(이현동 등, 2001; Ichiki et al., 1999; Pegram et al., 1999). 최근 국내외에서 비점원오염물질의 유출특성 조사 및 저감기술 개발에 많은 연구가 수행되고 있는데, 특히 비점원오염은 강우량에 비례하여 유출되므로, 강우량의 계절변동이 큰 몬순기후의 특성을 가지고 있는 우리나라의 실정에서는 비점원오염의 유출이 계절적으로 크게 변동할 수 밖에 없다(국

립환경연구원, 1997).

강우시 지표면의 강우유출수는 다양한 비점원오염물질을 포함하고 있으며, 오염부하는 하수처리장에 의한 것보다 높은 것으로 보고되고 있다(Sartor and Buchberger, 1997). 강우유출수중의 오염물질 농도는 기상조건, 수리조건, 지리조건과 토지이용특성 및 토양통 등에 따라 영향을 받는다. 도시지역의 경우 비점원오염물질의 배출량은 강우강도와 강우지속시간, 토지이용형태, 최종강우 후의 경과일수, 또는 유사 비점원오염물질 등에 따라 변동된다(라덕관과 김기성, 1996; Sartor et al., 1974). 또한, 개발에 따른 불투수층의 면적비율이 높아 강우유달시간이 짧고, 유출율이 커서 강우초기에 유량 및 오염물질이 다량 유출되는 현상을 가지고 있다(방기웅 등, 1997; 장성호와 박진식, 2005b). 그러나 농촌유역의 경우 비점원오염물질의 발생은 시비량, 시비방법, 지형, 지질, 기후 등에 의해 영향을 받고, 산림지역은 낙엽 등이 썩으면서 형성된 유기물층이 주요한 오염원으로 작용한다(라덕관과 김기성, 1996). 농촌지역의 비점원오염물질은 평상시에는 주로 지하수를 통하여 유입되기 때문에 오염부하가 낮게 나타나며, 강우시에는 지표유출과 함께 많은 비점원오염물질이 발생하기 때문에 강우초기에 오염부하가 크

[†] To whom correspondence should be addressed.
water@rda.go.kr

게 나타나는 경향을 가지고 있다. 또한, 일반적으로 강우유출수에 함유된 오염물질 농도는 최대유출량이 발생하기 전에 매우 높고 최대유출발생 이후에는 점점 낮아지는 특성을 보인다(최중대 등, 1997, 1999). 일반적으로 강우시에는 지표면과 하상에 퇴적되어 있던 각종 오염물질의 갑작스런 하천유입으로 인하여 하천수의 수질악화의 원인이 되고 있다. 이러한 비점원오염물질은 주로 기후, 지형을 비롯하여 수문학적 조건에 따라 간헐적이고, 분산된 형태로 호소로 유입되며, 그 배출되는 양상이 다양하므로 비점원오염이 정확하게 어떠한 형태로 하천의 수질오염에 영향을 미치는지를 정량적으로 분석, 파악하는데는 많은 어려움이 따르고 있다(황병기 등, 2001; Bedient et al., 1980; Hunter et al., 1979).

최근에는 비점원오염부하량을 추정하기 위하여 주로 토지이용에 따른 원단위를 사용하였으나, 이 또한 강우시 비점원오염부하량은 유역의 토지이용형태, 지표퇴적물량, 강우량 및 강우강도 등에 따라 상당한 차이가 발생하기 때문에 조사지역에서 직접 실측하지 않으면 오차는 상당히 커질 가능성이 있다(노상덕 등, 2006; 박재영 등, 2001; 오영택 등, 2004; 이현동 등, 2001; 장성호와 박진식, 2004).

따라서, 본 연구는 강우시 유역으로부터 발생하는 비점원오염의 유출특성을 파악하기 위하여 충남 공주시 정안면 고성리 고성저수지 상류유역을 대상으로 강우시 유입하천에서의 유량변화와 오염물질의 유출특성을 분석하기 위해 강우가 시작되는 시점부터 강우가 종료되어 수위가 안정화될 때까지 유역에서 발생하는 비점원오염물질의 부하량을 조사하여 강우사상에 따른 농업 비점원오염물질의 발생 특성을 고찰하고, 농촌유역의 수질정화 및 수계관리 대책수립에 기초자료로 제공하는데 있다.

2. 연구방법

2.1. 대상지구 및 유역특성

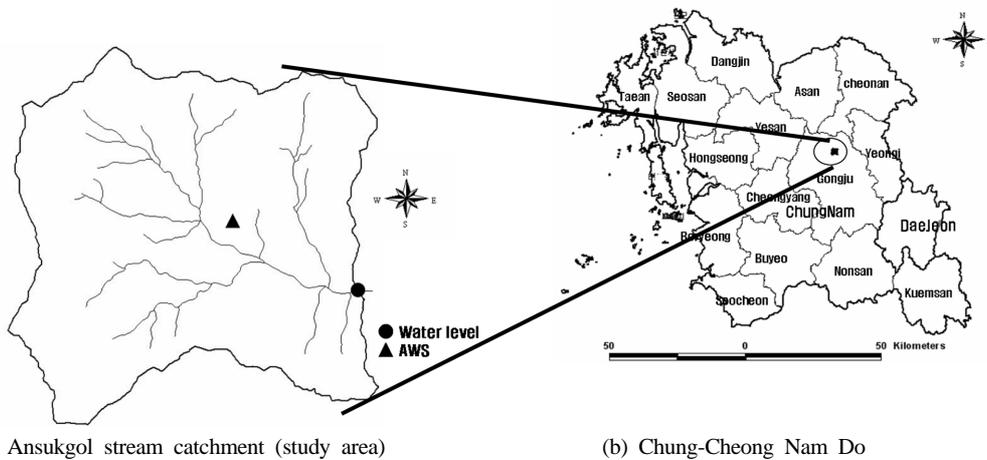


Fig. 1. Study area and monitoring stations in watershed.

Table 1. Hydrologic characteristics of study watershed

Area (ha)	Shape factor	Stream length (km)	Maximum relief (m)	Relief ratio	Average stream slope (m/m)
514.1	0.814	2.46	440	0.1789	0.102

본 연구는 금강수계의 중류부 지류인 정안천 유역 내 공주시 정안면 고성리 고성저수지 상류인 안숙골천 유역을 대상으로 하였으며, 안숙골천은 고성리 안숙골 뒤 산지에서 발원하여 안숙골 마을을 지나 지를 부락을 경유하고 경지 정리 뜰을 유하하여 고성저수지로 유입되는 하천이다. 이 유역은 아직 도시화가 이루어지지 않은 전형적인 농촌지역으로서 임야를 제외하면 전·답 등의 농업으로 이용되는 토지가 주를 이루고 있으며, 토성은 대부분 배수가 매우 양호한 양토 내지 사양토로 이루어져 있다(Fig. 1).

유역의 수문학적 특성인자를 조사하기 위해 1:5,000, 1:25,000 NGIS 수치지도(농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과, 2006a)와 국립지리정보원의 1:25,000 지형도(국립지리정보원, 1997)를 바탕으로 현장 방문을 통해 수문학적 특성인자를 분석하였다. 시험유역의 강우-유출 특성 분석과 오염원의 정량적 해석을 위한 기초자료로 유역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 평균하천경사 등의 수문학적 특성인자를 조사하였다. 수문, 수질 특성에 영향을 주는 유역경계 및 지상인자는 1:5,000 NGIS 수치지도와 AutoCAD와 ArcView Ver. 3.3을 이용하여 추출하였으며, 1:25,000 지형도와 현장답사를 통해 보완하였다. 시험유역의 유로연장은 2.46 km, 유역평균곡(A/L) 1.999 km, 유역형상계수 0.814, 유역평균고도 EL. 199.61 m, 평균경사 10.2%이다(Table 1).

2.2. 토양특성 및 토지이용

유역의 토양특성은 1:25,000 정밀토양도(농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과, 2006b)를 이용하여 토양을 분류하였으며, 그 배수특성의 속성에 따라 수문학적 토양군을 분류하였다. 시험유역의 토양군은 Table 2에 나타난 바와 같이 A군이 1.3%이며, B와 C군이 각각 81.9%, 16.9%로 대부분 B군의 비중이 높았다. 또한, 국립지리원의 1:25,000 지형도 및 토지이용도를 바탕으로 현장 방문을 통해 토지

Table 2. Land use and hydrological soil conditions of study watershed

Hydrological soil condition (%)				Land use (%)				
A	B	C	D	Paddy	Upland	Forest	Residential	Others
1.3	81.9	16.9	0.0	11.8	4.5	73.3	2.4	8.0

이용현황을 조사하였다. 시험유역의 총 면적은 514.1 ha로 이중 밭 4.5%, 논 11.8%, 산림 73.3%, 기타 8.0%로 구성되어 있으며, 산림에서는 주로 밤나무를 많이 재배하고 있는 것으로 조사되었다(Table 2).

2.3. 수문 및 수질조사

시험유역내 기상자료를 획득하기 위하여 시험유역 중간에 위치한 마을회관 옥상에 Automatic Weather System(AWS 2000, CASELLA CEL Corp. UK)을 설치하여 대기온도, 상대습도, 풍속, 풍향, 태양복사열, 기압 등을 측정하였고, 강우량은 버킷팅 방식을 이용하였으며, 모든 기상데이터는 5분 간격으로 데이터를 수집되었다. 또한, 시험유역의 말단 부분에 부자식인 Thalimedes 수위데이터 로거(logger)를 설치하여 5분 간격으로 연속 수위를 측정하였고, 유속측정은 저수위일 경우 도플러 방식인 미국 SonTek Corp.의 Flowtracker, 고수위일 경우 독일 OTT Corp.의 대용량 유속계인 프로펠라형 C31을 사용하거나, 부자 등을 사용하여 유속을 측정, 유량단면법으로 유량을 산정하였다. 이들 수위와 유량자료를 이용하여 수위-유량관계곡선식을 유도하였다. 수질시료채취는 유역말단부에 시료자동채수기(6712, Teledyne Isco Inc. USA)를 설치하였으며, 2005년의 경우 강우사상별로 1시간 간격, 2006년에는 2시간 간격으로 일주기 수질시료를 채취하였다. 수질시료의 분석은 수질오염 공정시험방법(환경부, 2005)에 준하여 실시하였다. 이때 BOD는 DO meter를 이용하여 초기에 DO를 측정 후 5일 경과 후 측정하여 값 차이로 나타내었고, COD_{Mn}은 산성법으로, T-N 및 T-P는 Autoanalyzer(AACS, Bran+rubbe)를 이용하여 분석하였으며, 부유물질(Suspended Solids, SS)은 유리섬유여지법으로 분석하였다.

2.4. 유출계수 및 유량가중평균농도

유출계수는 유역의 출구를 통과하는 유출량에 대한 총강우량의 비율을 뜻한다. 이러한 유출계수는 유역의 특성(토지이용, 지형 및 지질 등)에 의해 결정되며, 다음과 같은 관계식 (1)로 산출하였다.

$$C = \frac{V_d}{\sum_{m=1}^M R_m}, \quad V_d = \sum_{i=1}^N Q_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

C = 유출계수, V_d = 총유출량(m³)
 Q_i = i번째 유출량(m³/sec), Δt = 측정시간 간격(sec)
 V_d = 유출고(Depth of runoff) = V_d/유역면적
 $\sum_{m=1}^m R_m$ = 총강우량(Total rainfall (mm))

강우시 발생하는 유출수의 오염물질 농도는 유량에 따라 큰 차이를 보이고 있어 오염물질의 평균농도는 유량을 고려한 농도 즉 EMC(Event Mean Concentration)로 나타낸다(Sansalone and Buchberger, 1997; Smullen et al., 1999; U.S. EPA, 1983; Water Quality Management Library, 1995). 각 강우사상에 대한 유출 오염물질의 EMC는 다음 식 (2)와 같다.

$$EMC \text{ (mg/L)} = (\sum Q_i \cdot C_i) / \sum Q_i \quad (2)$$

여기서, Q_i는 각 강우사상에서 i번째 관측된 유출유량(m³/hr), C_i는 각 강우사상에서 i번째 관측된 오염물질 농도(mg/L)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우특성 및 유출계수

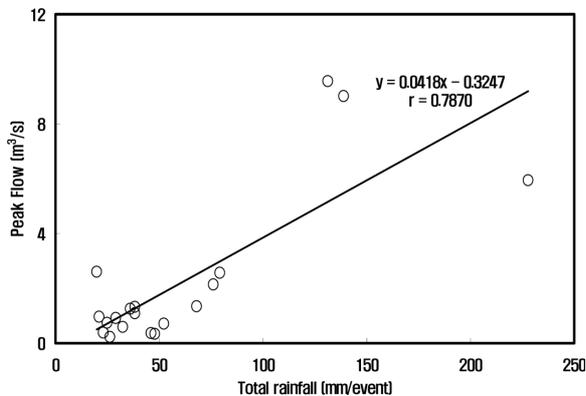
강우사상에 따른 강우특성을 파악하기 위하여 2005년 13개, 2006년 6개의 강우사상에 대해 조사를 실시하였다. 2005년도에 모니터링이 수행된 13개의 강우사상 중에서 최소 강수량은 8월 10~11일에 내린 21.0 mm이고, 최대 강수량은 9월 21~22일에 내린 138.8 mm로 조사되었으며, 조사대상기간 총 강수량은 746.8 mm로, 연강수량 1,652.8 mm의 45.2%에 해당했다. 2006년의 경우 최소 강수량은 7월 1~2일에 내린 19.8 mm, 최대 강수량은 7월 16~19일까지 82시간동안 내린 227.8 mm로 조사되었으며, 조사기간 총 강수량은 404.6 mm로 연강수량 1,039.0 mm의 38.9%에 해당했다. 각 강우사상별 강우강도는 2005년의 경우 4.4~31.4 mm/hr의 범위를 보였으며, 강우지속시간은 8~30시간의 범위로 조사되었다. 2006년은 3.3~31.6 mm/hr의 강우강도의 범위를 보였으며, 강우지속시간은 최소 8시간에 최대 82시간까지의 범위를 보였다(Table 3).

2005년의 경우 13회 강우-유출사상에 대한 유출고는 378.4 mm로 평균 유출계수는 0.51로 나타났으며, 2006년의 경우 6회 강우-유출사상에 대한 유출고는 276.4 mm로 평균 유출계수는 0.71로 조사되었다. 각 강우-유출사상별로 살펴보면, 2005년의 경우 유출계수는 0.05~2.11로 선행강우에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났는데, 선행강우일수가 긴 6월 1~2일의 경우 46.0 mm의 강우량에 대해 2.4 mm의 유출고를 보여 유출계수는 0.05로 나타났으며, 강우량이 가장 많은 7월 11~12일의 경우 유출계수는 0.67로 이는 선행강우 79.2 mm(7월 9일)의 영향으로 유출계수가 큰 것으로 생각되며, 9월 21~22일에도 0.93이라는 높은 유출계수를 나타내었는데, 이 또한 선행강우 194.0 mm(9월 16~19일)의 영향으로 높은 유출계수를 나타낸 것으로 생

Table 3. Characteristics of the rainfall by the storm event

Storm event	Period	Rainfall (mm)	Antecedent rainfall (day)	Max. rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)	Runoff height (mm)	Runoff coefficient
1st	1 to 2 June 2005	46.0	13	11.0	13	2.4	0.05
2nd	10 June 2005	47.8	7	7.8	17	4.4	0.09
3rd	27 to 28 June 2005	68.0	11	18.8	23	7.9	0.12
4th	29 June 2005	38.2	1	20.8	10	10.4	0.27
5th	1 July 2005	29.0	1	22.4	8	4.8	0.17
6th	3 to 4 July 2005	38.2	0	5.8	25	21.6	0.57
7th	9 July 2005	79.2	5	10.2	17	26.3	0.33
8th	11 to 12 July 2005	131.2	1	31.4	23	87.1	0.66
9th	28 to 29 July 2005	52.2	9	12.2	15	5.8	0.11
10th	1 Aug. 2005	32.4	3	7.8	18	12.6	0.39
11th	10 to 11 Aug. 2005	21.0	0	6.0	21	44.3	2.11
12th	19 to 20 Aug. 2005	24.8	1	4.4	23	21.3	0.86
13th	21 to 22 Sep. 2005	138.8	1	18.8	30	129.6	0.93
Sub-total		746.8	-	12.7*	19*	378.4	0.51
14th	14 to 15 June 2006	76.0	4	10.7	22	49.8	0.66
15th	1 to 2 July 2006	19.8	0	3.3	12	25.7	1.30
16th	4 July 2006	23.0	1	4.2	26	12.6	0.67
17th	11 to 12 July 2006	36.0	0	5.4	22	26.3	0.73
18th	17 to 19 July 2006	227.8	0	31.6	82	156.7	0.69
19th	22 to 23 Oct. 2006	26.2	34	4.2	16	5.4	0.21
Sub-total		404.6	-	9.9*	30*	276.4	0.71

* Asterisks in column are average values.

**Fig. 2.** Comparison of total rainfall and peak flow.

각된다. 2006년의 경우 유출계수는 0.21~1.30의 범위를 보였고, 7월 1~2일의 경우 19.8 mm의 강우에 의해 1.30의 높은 유출계수를 나타내었는데, 이는 선행강우의 영향과 함께 농경지의 인위적인 배수에 의한 유출이 함께 발생되어 유출계수가 큰 것으로 생각된다. 또한, 강우량이 가장 많은 7월 16~19일의 경우는 0.69의 유출계수를 보였으며, 선행강우가 34일로 가장 긴 10월 22~23일의 경우는 강우량 26.2 mm에 의한 유출고는 5.4 mm로 0.21의 유출계수를 나타내었다.

3.2. 강우 및 유량분석

일반적으로 비점원오염의 발생량은 강우강도, 선행무강우일수, 강우지속시간, 유출량, 유출강도 등 다양한 인자들에

의해서 복합적으로 영향을 받는다. 이중 강우강도, 선행무강우일수, 강우지속시간 등의 수문인자들은 우선적으로 단일강우사상에 의한 유출량, 유출강도에 영향을 미치고 궁극적으로는 비점원오염 부하에 영향을 미친다(박재영 등, 2001; Rimer et al., 1978).

현장연구를 통해 수집한 실측자료를 통해 강우와 유량과의 관계를 살펴보고자, 강우사상별 강우량 및 첨두유량을 파악하여 강우량과 첨두유량과의 상관관계를 분석하였다. 연구대상기간동안 강우량과 첨두유량의 현황을 살펴보면, 강우사상당 강우량은 19.8~227.8 mm 범위였으며, 첨두유량은 0.2276~9.5604 m³/sec 범위였다. 배수구역별 강우사상당 강우량과 첨두유량의 상관분석에서 상관계수(r)는 0.787로 높은 상관성을 보이고 있다. 이는, 강우사상당 강우량에 비례하여 첨두유량도 증가하는 경향을 나타내고 있는 것이다. 장성호와 박진식(2005a)이 남천에서 3개 배수구역지점을 대상으로 강우량과 첨두유량과의 상관관계를 조사한 결과 I구역(하류 남천분류)은 -0.8609, III구역(상류동측 남천분류)은 -0.4913으로 2개 배수구역은 역상관, II구역(상류서측 사창천 유입부)는 0.6035로 정상관을 보이고 있다고 하였으며, 본 연구결과의 III유역을 제외하고는 비슷한 값을 나타내었다.

3.3. 강우사상별 수질특성

연구대상기간동안 19개 강우사상에 대해 강우사상별로 수질을 분석한 결과, BOD 농도는 2006년 6월 14~15일의 강우사상(총강우량 76.0 mm)때 2.18~13.50 mg/L의 범위

로 평균 5.89 mg/L로 최대치를 나타내었으며, 2005년 6월 1~2일의 강우사상(총강우량 46.0 mm)의 경우 5.16~8.73 mg/L, 평균 5.69 mg/L의 값을 나타내었다. 이 두 강우사상을 제외하고 강우사상별 BOD의 평균농도는 0.60~3.27 mg/L의 범위를 나타내었다. T-N 농도의 경우는 2005년 6월 1~2일의 강우사상(총강우량 46.0 mm)때 3.34~9.26 mg/L, 평균 6.40 mg/L로 최대평균농도를 나타내었으며, 2006년 6월 14~15일의 강우사상(총강우량 76.0 mm)의 경우는 2.28~9.62 mg/L의 범위로 평균은 4.39 mg/L로 최대농도를 나타내었다. 그리고 2005년 7월 9일의 강우사상(총강우량 79.2 mm)때 2.37~8.91 mg/L, 평균 3.47 mg/L로 높은 농도를 나타내었다. 이 세 강우사상을 제외하고 강우사상별 T-N의 최대농도는 2.5~7.9 mg/L, 최소농도는 0.5~3.04 mg/L, 평균농도는 2.01~4.66 mg/L의 값을 보이고 있었다. T-P 농도의 경우는 2005년 7월 1일의 강우사상(총강우량 29.0 mm)의 경우 0.096~2.952 mg/L, 평균 0.548 mg/L로 최대농도를 나타내었으며, 2005년 6월 29일의 강우사상(총강우량 38.2 mm)의 경우 0.042~2.312 mg/L, 평균 0.626 mg/L로 최대평균농도를 보이고 있었다. 2005년 6월 27~28일(총강우량 68.0 mm), 2005년 7월 11~12일(총강우량 131.2 mm), 2006년 10월 22~23일(26.23 mm)의 강우사상에 대해서도 최대농도가 0.753, 1.053, 1.035 mg/L로 높은 값을 보이고 있다. 이들 5개의 강우사상을 제외하고는 T-P의 강우사상별 평균농도는 0.026~0.153 mg/L로 조사되었다. 이들 T-N과 T-P의 경우 최대농도가 나타낸 시기를 보면 영농기간 중 이앙시기인 6월 초순과 중순, 그리고 시비시기 중 분얼시기인 6월말에서 7월초 사이에 나타난

것으로 강우사상에 대한 유출수의 농도는 영농 및 시비시기와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

SS는 2005년 7월 11~12일의 강우사상(총강우량 131.2 mm)때 5.0~820.0 mg/L의 범위, 평균 135.4 mg/L로 가장 크게 조사되었는데, 이때 최대강우강도는 31.4 mm/hr로 관측되었다. 또한, 2005년 7월 1일의 강우사상(총강우량 29.0 mm)의 경우도 최대농도가 820.0 mg/L로 조사되었으며, 이때의 최대강우강도는 22.4 mm/hr로 강우량에 비해 강우강도가 커 SS의 농도가 높게 나타난 것으로 사료되며, 2006년 7월 17~19일의 강우사상(총강우량 227.8 mm)때는 10.0~310.0 mg/L, 평균 55.8 mg/L로 이때의 최대강우강도는 31.6 mm/hr로 조사되었다. 이것으로 보아 하천수의 SS 농도의 경우 강우량도 중요하지만 강우기간동안의 강우강도가 더 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다(Fig. 3).

3.4. 강우사상별 산술평균농도와 유량가중평균농도의 비교

평균농도를 산정하는 가장 간단한 방법인 산술평균농도는 시간간격이 일정한 경우, 타당한 평균농도로서 제시될 수 있지만, 비점원오염 유출은 실시간으로 변화되는 유출량과 농도의 변화가 있을 뿐만 아니라 샘플채취가 일정간격으로 이루어지지 않아 산술평균에 의한 평균농도는 대표성을 갖지 못하는 단점이 있다(김성수 등, 2002). 따라서, 본 연구에서는 강우시 비점원오염 유출수의 유출특성을 가장 잘 반영하는 것으로 알려진 유량가중평균농도를 이용(황병기, 2005)하여 유출수 평균농도를 산출하는 것이다.

연구대상기간에 발생한 강우사상 중에서 조사된 총 19개

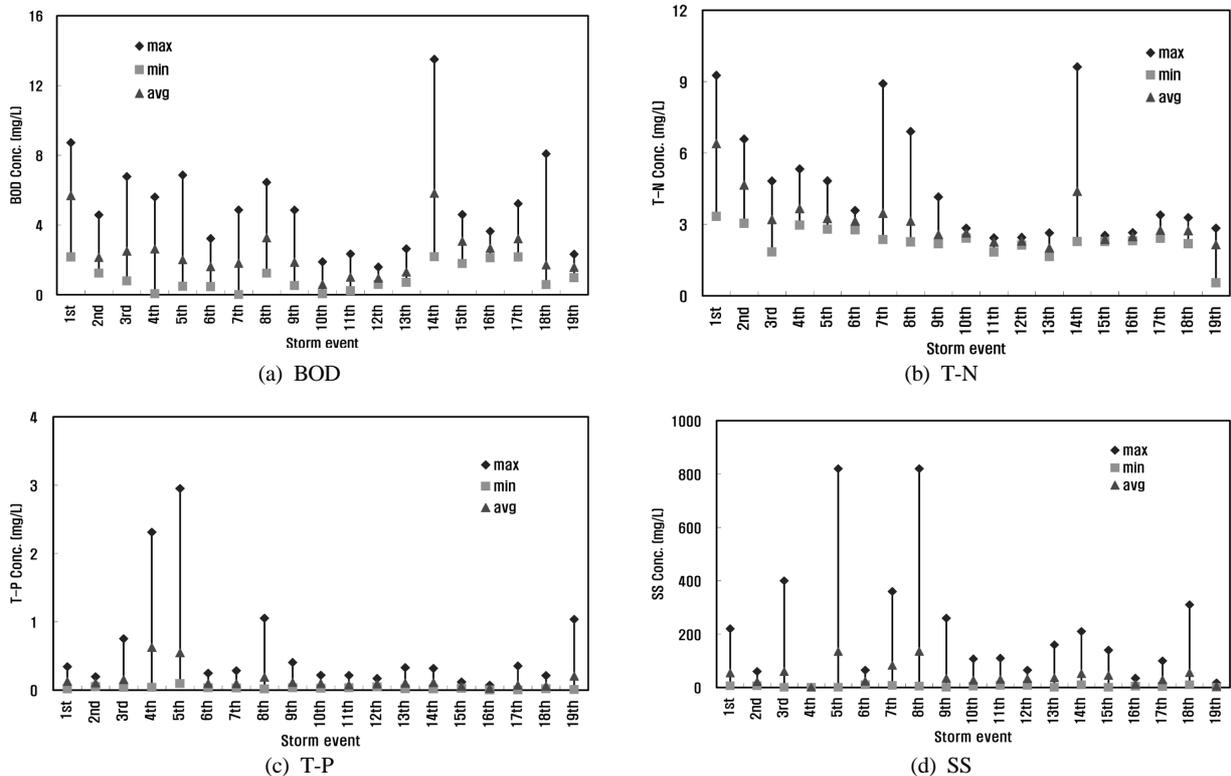


Fig. 3. Water quality constituents of storm event.

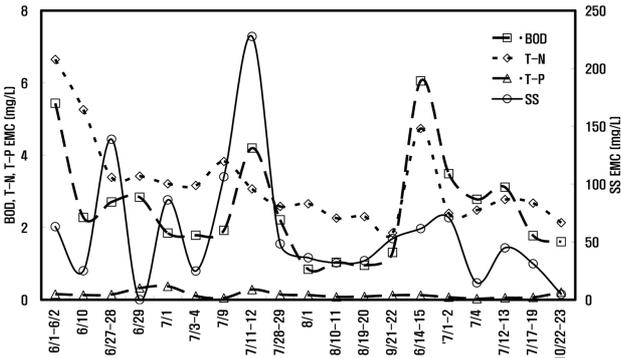


Fig. 4. Variation of the flow rate weighted mean concentration for different storm events.

의 강우 유출사상에 대해 2005년은 1시간 간격, 2006년은 2시간 간격으로 연속 채취한 수질시료에 대해 BOD, T-N, T-P, SS 분석 자료를 이용하여, 강우사상별 산술평균과 유량을 고려한 유량가중평균농도의 차이를 비교하였다(Table 4). Fig. 4는 각 강우사상에 대해 수질항목별 유량가중평균 농도를 도시한 것이다.

산술평균농도와 유량을 고려한 유량가중평균농도를 비교해 보면, 2005년 BOD의 경우 상대오차는 0.0~29.2%의 범위로 평균 9.2%로 나타났으며, SS의 경우 상대오차는 1.7~57.0%의 범위로 평균 24.5%를 나타내었다. T-N의 경우 상대오차는 0.1~11.4%의 범위로 평균 3.9%를 나타내었는데, 다른 항목에 비해 상대오차가 상대적으로 적게 나타나는

경향을 보였으며, T-P의 경우는 0.4~95.2%의 범위로 평균 29.1%로 다른 수질항목에 비해 상대적으로 높은 상대오차를 보이고 있었다. 이는 T-P의 경우 T-N에 비해 토양 내 흡착되기 쉬우며 용해성이 작는데, 초기 강우에 의해 적게 유출되었던 토양유실이 중기 및 말기에 갈수록 커져 유량을 고려한 가중평균농도가 상대적으로 커진 결과로 보인다. 2006년 BOD의 경우 상대오차는 1.0~11.9%의 범위로 평균 4.2%로 2005년과 비교해보면 1/2수준으로 상당히 안정되어 있으며, SS의 경우는 6.6~36.5%의 범위로 평균 16.4%로 2005년에 비해 상대오차 범위가 상대적으로 적은 것으로 나타났다. T-N의 경우 0.7~7.3%의 범위로 평균 2.1%이며, T-P의 경우는 9.9~33.9%의 범위로 평균 15.7%로 T-N 및 T-P 또한 2005년에 비해 상대적으로 적은 오차 범위를 보였다(Table 4). Yun and Cho(2005)가 영랑호 유역에서 산술평균농도와 EMC를 비교하였는데, 평균농도는 EMC가 산술평균보다 전반적으로 큰 값을 보이고 있다고 하였는데, 본 연구도 비슷한 결과를 얻었으며, 신용철 등(2005)이 북한강 유역의 강원도 춘천시 동면 월곡리 소하천유역을 대상으로 강우량의 크기에 따른 산술평균농도와 유량가중평균농도를 비교하였는데, 그 결과 BOD와 T-N의 일부 값을 제외하고 전반적으로 100 mm이내의 경우는 EMC의 값이 산술평균값보다 크게 조사되었지만, 100 mm을 초과하는 강우량에 대해서는 T-P를 제외하고는 산술평균값이 더 크게 조사되었다고 보고하였다.

Table 4. Comparison of the arithmetic mean concentration and the flow rate weighted mean concentration of BOD, T-N, T-P and SS for different storm events

Date	Rainfall (mm)	No. of samples	BOD (mg/L)			T-N (mg/L)			T-P (mg/L)			SS (mg/L)		
			Mean	W.M.	R.E (%)	Mean	W.M.	R.E (%)	Mean	W.M.	R.E (%)	Mean	W.M.	R.E (%)
1 to 2 June 2005	46.0	23	5.692	5.435	4.7	6.396	6.649	3.8	0.128	0.156	17.9	54.3	63.2	14.0
10 June 2005	47.8	22	2.147	2.277	5.7	4.658	5.257	11.4	0.107	0.128	16.4	22.5	25.0	9.9
27 to 28 June 2005	68.0	26	2.503	2.704	7.4	3.208	3.387	5.3	0.153	0.145	5.9	59.7	138.7	57.0
29 June 2005	38.2	12	2.621	2.836	7.6	3.671	3.419	7.4	0.626	0.323	93.7	-	-	-
1 July 2005	29.0	8	2.011	1.844	9.0	3.250	3.208	1.3	0.548	0.372	47.3	135.0	86.3	56.4
3 to 4 July 2005	38.2	31	1.620	1.782	9.1	3.139	3.160	0.7	0.100	0.104	3.4	23.8	24.8	4.2
9 July 2005	79.2	21	1.804	1.918	6.0	3.469	3.826	9.3	0.096	0.049	95.2	83.3	106.3	21.6
11 to 12 July 2005	131.2	29	3.271	4.197	22.1	3.137	3.066	2.3	0.187	0.282	33.7	135.4	227.6	40.5
28 to 29 July 2005	52.2	22	1.866	2.210	15.6	2.576	2.581	0.2	0.113	0.144	21.5	34.1	48.3	29.4
1 Aug. 2005	32.4	16	0.596	0.842	29.2	2.643	2.656	0.5	0.099	0.127	21.7	27.3	36.3	24.7
10 to 11 Aug. 2005	21.0	32	1.008	1.033	2.4	2.264	2.257	0.3	0.075	0.079	4.2	30.7	31.8	3.7
19 to 20 Aug. 2005	24.8	15	0.952	0.952	0.0	2.304	2.301	0.1	0.091	0.091	0.4	33.2	33.7	1.7
21 to 22 Sep. 2005	138.8	35	1.303	1.309	0.5	2.007	1.849	8.6	0.102	0.124	17.3	36.8	52.8	30.3
Average			2.107	2.257	9.2	3.286	3.355	3.9	0.187	0.163	29.1	56.3	72.9	24.5
14 to 15 June 2006	76.0	13	5.828	6.054	3.7	4.395	4.738	7.3	0.111	0.125	11.5	52.3	61.4	14.8
1 to 2 July 2006	19.8	12	3.073	3.486	11.9	2.373	2.392	0.8	0.055	0.070	21.8	45.0	70.9	36.5
4 July 2006	18.8	8	2.668	2.776	3.9	2.494	2.478	0.7	0.026	0.030	13.7	12.5	14.6	14.4
11 to 12 July 2006	36.0	12	3.211	3.114	3.1	2.753	2.772	0.7	0.074	0.055	33.9	55.8	44.8	24.5
17 to 19 July 2006	227.8	28	1.756	1.773	1.0	2.736	2.673	2.3	0.058	0.065	10.8	29.0	31.1	6.6
22 to 23 Oct. 2006	26.2	11	1.576	1.603	1.7	2.149	2.131	0.9	0.205	0.210	2.3	4.8	4.7	1.3
Average			3.018	3.134	4.2	2.817	2.864	2.1	0.088	0.092	15.7	33.2	37.9	16.4

* W.M. : Weighted mean; R.E. : Relative error

3.5. 강우사상별 유출부하량

강우사상별로 유출량과 농도를 곱하여 유출부하량을 산정한 결과, 2005년의 경우 BOD는 17.8~842.5 kg의 범위였으며, 강우사상 전체의 유출부하량은 2,117.0 kg(연구기간 전체의 36.0%)으로 산정되었다. T-N의 경우는 41.5~1,145.0 kg의 범위로 총 유출부하량은 3,209.0 kg, T-P의 경우는 1.1~55.0 kg의 범위로 총 유출부하량은 136.4 kg(연구기간 전체의 37.4%)로 나타났다. SS의 경우는 241.3~33,081.1 kg의 범위로 총 유출부하량은 72,733.8 kg으로 조사되었다. 강우사상별 유출부하량의 경우 전체적으로 6월 1~2일의 강우사상(총강우량 46.0 mm)시 수질항목별로 최소값을 보였으며, 최대 강우시인 9월 21~22일의 강우사상(총강우량 138.8 mm)때 SS를 제외하고는 최대값을 나타내었다. 2006년의 경우 강우사상에 대한 총 유출부하량은 BOD 1,321.7 kg, T-N 2,845.8 kg, T-P 42.9 kg, SS 16,275.8 kg으로 조사되었다. 연구기간 전체에 대해 강우사상별 총 유출부하량이 차지하는 비율은 2005년의 경우 T-N 27.9%에서 SS 51.8%로 상당히 높은 값을 나타낸 반면, 2006년의 경우는 BOD 10.9%에서 T-P 20.0%로 조사되었다.

강우사상별로 유출부하량을 살펴보면, 2005년 6월 1~2일 및 6월 10일의 경우 강우량이 46.0 mm와 47.8 mm이지만 선행무강우일수가 상대적으로 길어 SS의 유출부하량은 각각 241.3 kg과 311.6 kg으로 조사된 반면, 8월 10~11일

과 8월 19~20일의 경우는 위 강우시기와는 반대로 강우량은 1/2수준인 21.0, 24.8 mm이지만 SS 유출부하량은 1,894.5 kg 1,254.4 kg로 조사되었다. 2006년의 7월 1~2일의 19.8 mm의 강우량에 의해서는 SS 유출부하량이 1,555.2 kg으로 관측된 반면, 선행강우일수가 34일로 가장 긴 10월 22~23일의 강우량 26.2 mm에 대해서는 겨우 215.7 kg의 유출부하량이 발생하는 것으로 나타났다. 이로부터 소량의 강우에 의해서도 선행무강우일수가 짧고 토양이 포화되면 유출에 의한 유출부하량이 커지는 경향을 보이고 있는데, 장성호와 박진식(2005a)이 남천에서의 3개 지점을 대상으로 선행무강우일수와 초기유량유출과의 상관관계를 분석한 결과 2개 지점에서 높은 상관성이 있음을 제시하는데, 본 연구도 마찬가지로 결과를 얻어 선행무강우일수와 강우량의 크기는 유출부하량과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 농촌 소유역의 강우사상별 농업비점원오염 유출특성을 파악하기 위해 충남 공주시 정안면에 위치한 고성저수지 상류유역을 대상으로 강우사상별 수문·수질 특성을 분석하였다. 연구기간동안 2005년 13개, 2006년 6개의 강우사상에 대해 분석하였는데, 2005년의 경우 강우사상별 강수량은 21.0~138.8 mm이며, 강우사상에 대한 총

Table 5. Relationship between runoff volume and discharge loads for different storm events

Date	Discharge loads (kg)			
	BOD	T-N	T-P	SS
05/6/1-2	17.8	41.5	1.1	241.3
05/6/10	21.0	47.1	1.3	311.6
05/6/27-28	46.2	91.9	2.9	957.3
05/6/29	40.1	74.3	2.5	949.8
05/7/1	21.8	42.7	1.4	446.7
05/7/3-4	134.2	252.1	8.4	3,030.7
05/7/9	125.6	207.4	8.0	3,989.8
05/7/11-12	663.5	909.7	43.3	33,081.1
05/7/28-29	37.4	78.0	2.3	668.2
05/8/1	26.0	54.6	1.6	453.4
05/8/10-11	84.2	157.5	5.3	1,894.5
05/8/19-20	56.9	107.3	3.5	1,254.4
05/9/21-22	842.5	1,145.0	55.0	25,455.0
Sub-total	2,117.0 (36.0)*	3,209.0 (27.9)	136.4 (37.4)	72,733.8 (51.8)
Observed**	5,872.4	11,505.9	365.1	140,404.9
06/6/14-15	182.5	369.0	5.5	2,098.0
06/7/1-2	141.5	273.9	4.0	1,555.2
06/7/4	33.6	37.9	0.5	207.1
06/7/11-12	100.6	154.0	2.2	859.8
06/7/17-19	822.5	1,971.0	30.2	11,340.0
06/10/22-23	40.9	39.9	0.5	215.7
Sub-total	1,321.7 (10.9)*	2,845.8 (18.2)	42.9 (20.0)	16,275.8 (17.7)
Observed**	12,084.8	15,654.6	214.4	92,012.1

*Numbers in brackets are the percentage, which subtotal value was divided by observed one.

**Observe values are pollutant loads during the period from 2005 to 2006.

강수량은 746.8 mm로 연구기간 강수량 1,389.6 mm의 53.7%에 해당한다. 2006년의 경우 강수량은 19.8~227.8 mm로 강우사상에 대한 총 강수량은 404.6 mm로 연구기간 강수량 790.0 mm의 52.4%에 해당한다. 각 강우사상별 강우강도는 2005년의 경우 4.4~31.4 mm/hr의 범위를 보였으며, 강우지속시간은 8~30시간, 2006년의 경우는 3.3~31.6 mm/hr의 강우강도와 강우지속시간은 8~82시간까지의 범위를 보였다.

2005년의 경우 강우사상별로 유출계수는 0.05~2.11로 선형강우에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났으며, 전체 강우사상에 대한 유출고는 378.4 mm로 평균 유출계수는 0.51로 조사되었다. 2006년의 경우 유출계수는 0.21~1.30의 범위를 보였으며, 강우사상에 대한 유출고는 276.4 mm로 평균 유출계수는 0.71로 2005년에 비해 높은 것으로 조사되었다. 강우사상별 강우량과 침투유량과의 상관분석을 실시한 결과 상관계수는 0.787로 높은 상관성을 보이고 있었으며, 강우사상당 강우량에 비례하여 침투유량도 증가하는 경향을 나타내었다.

강우사상별 평균 농도는 BOD의 경우 0.60~5.83 mg/L, T-N 2.01~6.40 mg/L, T-P 0.026~0.626 mg/L, SS 4.8~135.4 mg/L로 조사되었으며, 산술평균농도와 유량을 고려한 유량가중평균농도의 상대오차를 비교한 결과, 2005년 BOD의 경우 0.0~29.2%의 범위로 평균 9.2%, SS의 경우 상대오차는 1.7~57.0%의 범위로 평균 24.5%를 나타내었다. T-N의 경우 상대오차는 0.1~11.4%의 범위로 평균 3.9%를 나타내었는데, 다른 항목에 비해 상대오차가 상대적으로 적게 나타나는 경향을 보였으며, T-P의 경우는 0.4~95.2%의 범위로 평균 29.1%로 다른 수질항목에 비해 상대적으로 높은 상대오차를 보이고 있었다. 2006년의 경우 평균상대오차는 BOD 4.2%, SS 16.4%, T-N 2.1%, T-P 15.7%로 2005년과 비교해보면 전체적으로 낮은 오차범위를 보이고 있다.

연구기간동안 유출부하량에 대해 조사된 강우사상이 차지하는 유출부하량의 비율은 2005년의 경우 27.9~51.8%로 상당히 높은 값을 나타낸 반면, 2006년의 경우는 10.9~20.0%로 조사되었는데, 유출부하량의 경우 강우량과도 어느 정도 상관성은 있으나, 선형무강우일수와 강우강도에도 상당한 영향을 받는 것으로 생각된다. 위 결과와 같이 유출부하량의 경우 연도별로 상당한 차이가 보이고 있어 비점원오염의 유출 해석에 있어 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서는 장기간의 모니터링이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- 국립지리정보원(1997). 1:25,000 지형도 및 토지이용도.
- 국립환경연구원(1997). 하천·호수의 수질보전과 유역관리에 관한 한·일 공동세미나.
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진(2002). 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. *대한환경공학회지*, **24**(11), pp. 2019-2027.
- 노상덕, 김장현, 이대근, 김선주, 손병용, 전양근(2006). 횡성호 유역의 비강우시 및 강우시 오염물질 유출특성. *한국물환경학회지*, **22**(4), pp. 695-705.
- 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과(2006a). 1:5,000, 1:25,000 NGIS 수치지도.
- 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과(2006b). 1:25,000 정밀토양도.
- 라덕관, 김기성(1996). 수질에 미치는 비점오염원의 영향. *공업기술연구소 논문집*, **10**(10), pp. 139-149.
- 박재영, 오종민, 김영철(2001). 삼교호 유입하천에서 강우시 주요 오염물질의 유출 특성. *한국육수학회지*, **34**(1), pp. 62-69.
- 방기용, 이준호, 유명진(1997). 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구. *한국수질보전학회지*, **13**(1), pp. 79-99.
- 신용철, 최중대, 임경재, 심혁호, 류창원, 양재의, 유경열(2005). 북한강 중류 산간농업 소하천에서의 오염부하특성분석. *한국농공학회지*, **47**(6), pp. 83-92.
- 오영택, 박제철, 김동섭, 류재근(2004). 강우시 소옥천에서의 비점오염원 유출 특성. *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 657-663.
- 이현동, 안재환, 배철호, 김운지(2001). 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. *한국물환경학회지*, **17**(3), pp. 313-326.
- 장성호, 박진식(2004). 직지사천에서의 강우시 비점오염물질의 유출특성. *수처리기술*, **12**(3), pp. 109-115.
- 장성호, 박진식(2005a). 남천에서의 강우시 비점오염물질의 유출특성. *한국환경보전학회지*, **31**(1), pp. 1-6.
- 장성호, 박진식(2005b). 도시지역 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구 - 달서천 및 대명천을 중심으로. *한국환경과학회지*, **14**(12), pp. 1171-1176.
- 최중대, 김정제, 정진철(1997). 산지에서의 환경보전형 농업을 위한 토양의 질 평가 -모니터링 시스템의 구축과 기초자료의 수집-. *한국농공학회지*, **39**(2), pp. 113-123.
- 최중대, 이찬만, 최예환(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회지*, **32**(4), pp. 501-510.
- 한국수자원공사(2003). *대청호 수질개선을 위한 소옥천 환경조사 보고서 II*.
- 한국수자원공사(2004). *대청호 비점오염 저감방안 수립*.
- 환경부(2005). *수질오염공정시험방법*.
- 황병기(2005). 강우시 도시지역 비점오염원 유출특성 분석. -홍제천 상류 유역을 중심으로-. *환경영향평가*, **14**(2), pp. 63-73.
- 황병기, 유세진, 차영기(2001). 안양천 유역의 강우시 비점오염원에 따른 유출부하특성에 관한 연구. *환경영향평가*, **10**(3), pp. 223-234.
- Bedient, P. B., Lambert, J. L. and Springer, N. K. (1980). Storm-water pollution load-runoff relationship. *Journal of WPCF*, **52**(9), pp. 2396-2404.
- Hunter, J. V., Sabatino, T., Gomperts, R. and Mackenzie, M. J. (1979). Contribution of urban runoff to hydrocarbon pollution. *Journal of WPCF*, **51**, pp. 2159-2038.
- Ichiki, A. and Yamada, K. (1999). Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Japan. *Water Sci. Technol.*, **39**(12), pp. 17-25.
- Pegram, G. C., Quibell, G. and Hinsch, M. (1999). The non-point source impacts of peri-urban settlements in South Africa: implications for their management. *Water Sci. Technol.*, **39**(12), pp. 283-290.
- Rimer, A. E., Nissen, J. A. and Reynolds, D. E. (1978).

- Characterization and impact of stormwater runoff from various land cover types. *Journal of WPCF*, **50**, pp. 252-264.
- Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering*, ASAE, **123**(2), pp. 143-152.
- Sartor, J. D., Boyd, G. B. and Agardy, F. J. (1974). Water pollution aspects of street surface contaminants. *Journal of WPCF*, **46**(3), pp. 458-467.
- Sartor, J. D. and Buchberger, S. G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering*, ASAE, **123**(2), pp. 134-143.
- Smullen, J. T., Shallcross, A. L. and Cave, K. A. (1999). Updating the U.S. nationwide urban runoff quality database. *Water. Sci. Technol.*, **39**, pp. 9-16.
- U.S. Environmental Protection Agency (1983). National Urban Runoff Program, Vol. I. NTIS PB84-185552, U.S. EPA, Washington, D.C.
- Water Quality Management Library (1995). Nonpoint Pollution and Urban Stormwater Management, In: Statistical characteristics of diffuse loads-Event Mean Concentrations. V. Novotny (eds), **9**, Technomic Publishing Company, Inc, Lancaster, Pennsylvania, pp. 57-62.
- Yun, S. J. and Cho, J. H. (2005). Characteristics of pollutants discharge in Youngrang lake watershed. *2005 proceeding the Korean society of water and wastewater*, pp. 442-448.