

강우 시 도시 하천으로의 비점오염원 유출특성

The runoff characteristics of non-point source to urban stream during rainfall

박 운 지· 김 동 옥** 안 종 화*** 이 찬 기****
Park, Woon-Ji Kim, Dong-Oog Ahn, Johng-Hwa Lee, Chan-Ki

Abstract

We studied runoff characteristics of combined sewer overflows in a city while it was raining. The event mean concentration (EMC) of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD_{Cr}), suspended solids (SS), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in one of the combined sewer sites in Chuncheon was 63.5-211.6 mg/L, 114.9-523.8 mg/L, 70.3-436.4 mg/L, 6.4-33.0 mg/L, and 1.09-6.81 mg/L, respectively. In another combined sewer, the EMC of BOD, COD, SS, TN, and TP was 42.1-131.4 mg/L, 107.7-256.5 mg/L, 33.7-221.1 mg/L, 7.9-26.4 mg/L, and 1.16-3.91 mg/L, respectively.

The ratio of the cumulative pollutant mass and the cumulative discharged volume determined using all parameters (BOD, COD_{Cr}, SS, TN, and TP) was over 1.0, which shows the first flush effect. Relationships between flow and loadings of BOD, COD_{Cr}, SS, TN, and TP were 0.90, 0.89, 0.88, 0.89, 0.92, respectively. Although the size of two areas was almost same, pollutant concentration and loading were different because of the amount of rainfall, rainfall intensity and basin area.

키워드 : 비점오염원, 유량평균가중농도, 강우 시, 합류식 하수관거 월류수

Keywords : non-point source, event mean concentration, rainfall, combined sewer overflows

1. 서론

현재 우리나라는 인구증가, 도시화, 산업화에 따라 공공수역으로 유입되는 오염물질 양이 수체(하천, 해양, 저수지 등)의 자정능력을 초과하면서 수질오염이 심각해지고 있다. 공공수역으로 유입되는 오염물질은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다[1]. 점오염원 위주의 수질관리정책으로 인해 점오염원이 크게 개선됨에도 불구하고 강우 시 배출되는 비점오염원으로 인해 수계의 수질은

크게 개선되어지지 않고 있다. 특히, 도시지역에서 발생하는 비점오염원은 유역면적은 적으나 높은 불투수율로 인하여 강우유출량 및 오염물질의 유출량이 크며, 이로 인해 단위면적당 오염부하가 크기 때문에 문제시되고 있다[2][3].

비점오염원 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 합류식하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows : CSO_s)로 초기에는 하수관거에 설치된 우수토실을 통해 차집관거로 유입된 후 하수처리장으로 이송되지만, 차집관거 용량 이상의 우수 발생 시에는 차집관거로 유입되지 못하고 직접 하천으로 유출된다. CSO_s에는 우수와 함께 지표면 오염물질, 관거 내 퇴적물, 미처리된 하수 등이 함께 유출되

* 강원대학교 대학원 환경공학과 박사과정
** 강원대학교 대학원 환경공학과 석사과정
*** 강원대학교 환경공학과 전임강사, 공학박사
**** 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사

기 때문에 건기하수에 비해 수배 이상의 고농도를 나타내면서 인접수역으로 직접 배출되므로 하천을 오염시키는 주요 원인 중 하나로 알려져 있다[4][5].

비점오염원은 강우량에 비례하여 유출되므로 강우량 계절변동이 큰 우리나라에서는 비점오염원 유출이 계절적으로 크게 변동할 수 밖에 없다[6]. 또한, 개발에 따른 불투수층 면적비율이 높아 유달 시간이 짧고 유출율이 커서 강우초기에 유량 및 오염물질이 다량 유출되는 현상을 보이고 있다[4][7][8]. 이러한 유출변화를 예측하고 정량화하는 것은 매우 어려운 실정이므로 도시지역 비점오염물질의 유출특성을 조사, 연구하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 소규모 도시유역을 선정하여 유역 내 하천의 토지이용현황, 강우사상에 따른 유량 및 오염물질에 대한 유출특성을 조사, 분석하고 그 결과를 고찰함으로써 도시지역 비점오염 물질 유출특성에 대한 중요성을 인식하고, 관리 방안 마련을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 조사지점 선정

조사대상지역인 춘천시의 경우 구 도시지역으로 기존 시가지의 관거가 대부분 합류식관거로 이루어져 있으며, 구획정리지구 및 선택지 개발지역 등의 경우에만 단지 내의 하수배제 방식이 분류식으로 설치되어 있다. 그러나 최종 방류수역은 관거

정비 미흡으로 인하여 대부분 합류식 관거에 연결되어 있어 완전한 분류식 하수배제방식이 아닌 미흡한 불완전한 분류식으로서 있는 실정이다.

표본지역은 춘천시 도심지 하천인 공지천 유역으로서 현장여건 및 조사용이성을 고려하여 공지천 유역 합류식 배제방식의 합류식 관거 1, 2지점을 조사지점으로 선정하여 연구를 수행하였다. 조사지점의 위치와 특성은 그림 1과 표 1, 2에 나타내었다.

표 1 조사지점의 특성

	합류식 관거 1	합류식 관거 2
유역면적(ha)	20.75	18.56
하수배제방식	합류식	합류식
배제구역특성	주거·상업·산업 혼합지역	주거·상업 혼합지역
불투수면적(ha)	14.13	15.20
배출구크기(Box)	1.0m×1.0m	2.0m×1.6m

표 2 조사지점 토지이용현황

	합류식 관거 1	합류식 관거 2
인구 (명)	2,892	3,007
녹지 (ha)	3.79 (18.3%)	1.08 (5.2%)
대지 (ha)	9.06 (43.7%)	9.53 (45.9%)
도로 (ha)	3.07 (14.8%)	2.86 (13.8%)
기타 (ha)	4.84 (23.3%)	5.09 (24.5%)
총계 (ha)	20.75 (100%)	18.56 (100%)



그림 1 합류식 관거 1과 2 지점의 위치

2.2 현장조사 방법 및 수질분석

현장조사는 2004년 7월부터 2006년 2월까지 20개월간 수행하였으며, 유량은 자동측정 및 데이터 저장기 가능한 전자식 FLO-TOTE 260 유량계를 사용하여 15분 간격으로 측정하였다. 수질분석은 b iochemical oxygen demand (BOD₅), chemical ox ygen demand (COD_c), suspended solids (SS), to tal nitrogen (TN), and total phosphorus (TP)에 대해 실시하였으며, 분석방법은 Standard Method s[9]와 수질오염 공정시험법[10]에 의거하여 분석 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우 시 유량 및 수질특성

조사지점의 강우 시 유량 및 강우사상에 따른 기초자료를 표 3에 나타내었다. 각 조사지점의 강우량은 4.0~64.5 mm의 범위를 보이며, 최대강우 강도는 1.5~33.5 mm/hr로 조사되었다. 유량의 경우, 합류식 관거 1지점에서 181.9~716.5 m³/s로 나타났으며, 합류식 관거 2지점은 229.4~5857.5 m³/s 로 매우 큰 범위를 보이는 것으로 나타났다. 이는 강우량과 강우강도에 많은 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

강우사상에 따른 유량 및 오염물질의 농도(2005년 9월 30일)를 그림 2에 나타내었다. 강우초기에 오염물질이 유출되는 초기세척효과가 관찰되었으며, 강우량과 강우강도가 많을수록 초기세척효과가 빠르게 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 개발에 따른 불투수층 면적비율이 높아 강우유달시간이

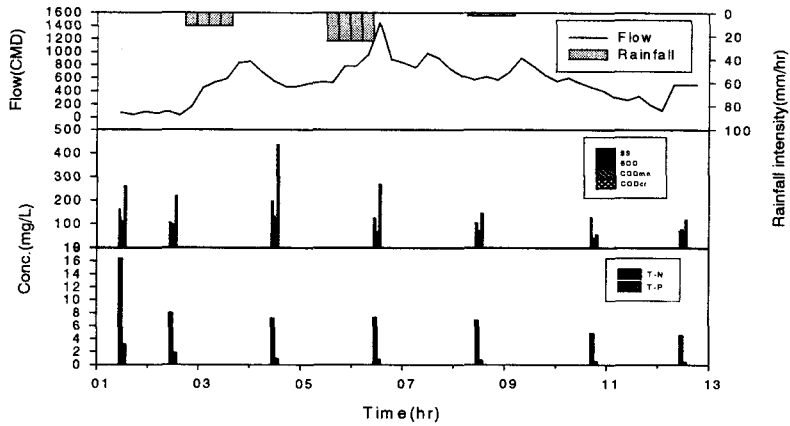
짧고 유출률이 커서 강우초기에 유량 및 오염물질 이 다량 유출되는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 강우유출이 시작된 시점으로부터 건기의 평균농도 까지 하락한 시간은 강우에 따라 다소 차이가 있 었지만 대부분이 30~60분 사이에서 측정되었다. 이러한 결과는 여러 연구자들이 조사한 연구결과 인 60~120분보다 다소 짧게 나타났다[11][12]. 이 는 유역이나 강우량, 강우강도 등에 따라 농도 및 유출특성이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 강우 후에 유입수의 농도가 전체적으로 강우초기 농도보다 현저하게 낮게 나타나는 것으로 조사되 었다. 이는 초기에 진행된 세척효과 이후 지속된 유출현상으로 인하여 하수농도가 희석되어 감소된 것으로 판단된다.

강우에 의한 유출수질 농도의 변화는 강우강도 와 유역의 경사도, 유역면적 등에 따라 크게 다른 양상을 나타내었다. 침투농도와 침투유출량 간의 시간지체 현상은 유역면적이 작고, 불투수층 면적 비율이 클수록 침투농도발생이 침투유출량 발생 이전에 나타나고, 유역면적이 크고(> 10 ha) 불투 수층 면적비율이 작을수록(<30%) 침투유출량이 발생 한 이후에 침투농도가 발생하는 경향을 보이 는데[13], 본 연구결과도 이와 유사한 것으로 나타 났다.

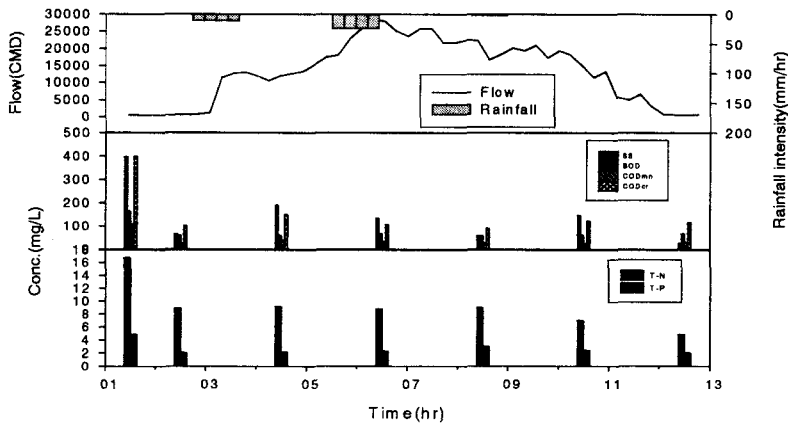
조사지점의 유량가중 평균 농도(Event Mean C oncentration : EMC)와 지역 평균 농도(Site Mean Concentration : SMC)의 결과를 표 4에 나타내었 다. 비점오염물질 유출부하량 산정 시 이용되는 E MC는 강우사상에 따른 평균농도를 의미하며, 채취 된 수질시료의 산술적 농도평균으로 산정되어서는

표 3 합류식 관거 1과 2 지점의 강우특성

지점	날짜	시료채취시간	유량 (m ³ /sec)	강우량 (mm)	선행건기일수 (days)	최대강우강도 (mm/hr)
합류식 관거 1	2004.07.25	11:15~13:30	181.6	12.7	5	15.2
	2004.08.16	16:30~20:30	573.8	25.2	2	33.5
	2005.02.16	19:45~01:30	226.5	13.9	0	1.5
	2005.04.06	16:00~00:30	229.1	5.6	3	3.1
	2005.05.18	20:00~15:30	616.5	28.0	0	5.5
	2005.09.13	06:50~22:10	716.5	64.5	0	15.5
	2005.09.30	10:45~19:30	227.0	44.0	0	5.5
	2006.02.14	03:30~06:00	184.6	4.0	4	2.0
합류식 관거 2	2004.07.25	11:15~13:30	280.0	12.7	5	15.2
	2004.08.16	16:30~20:30	1019.4	25.2	2	33.5
	2005.02.16	19:45~01:30	847.6	13.9	0	1.5
	2005.04.06	16:00~00:30	5733.8	5.6	3	3.1
	2005.05.18	20:00~15:30	1984.9	28.0	0	5.5
	2005.09.13	06:50~22:10	5857.5	64.5	0	15.5
	2005.09.30	10:45~19:30	1400.4	44.0	0	5.5
	2006.02.14	03:30~06:00	229.4	4.0	4	2.0



(a) 합류식 관거 1



(b) 합류식 관거 2

그림 2 강우 시 유량 및 농도변화

표 4 합류식 관거 1과 2 지점의 EMC 및 SMC 결과

단위 : mg/L

	지점	날짜	BOD	COD	SS	TN	TP	지점	날짜	BOD	COD	SS	TN	TP	
EMC	합류식 관거 1	2004.7.25	211.6	260.9	316.8	13.8	4.50	합류식 관거 2	2004.7.25	131.4	176.7	192.1	12.6	3.91	
		2004.8.16	129.9	202.9	436.4	19.0	6.81		2004.8.16	87.6	178.5	221.1	9.7	2.43	
		2005.2.16	70.4	171.9	70.3	17.8	3.27		2005.2.16	117.1	256.5	124.3	23.7	2.55	
		2005.4.6	94.5	140.3	194.0	33.0	2.80		2005.4.6	73.8	121.5	143.6	26.4	2.58	
		2005.5.18	72.8	114.9	164.3	20.7	1.93		2005.5.18	68.4	107.7	64.5	12.2	1.66	
		2005.9.13	86.3	280.5	115.0	16.7	2.67		2005.9.13	78.1	112.6	38.6	12.2	1.55	
		2005.9.30	63.5	523.8	115.3	6.4	1.09		2005.9.30	42.1	183.4	33.7	10.2	1.16	
		2006.2.14	64.3	154.5	103.3	7.1	1.99		2006.2.14	57.6	105.2	152.9	7.9	2.38	
SMC			99.2	231.2	189.4	16.8	3.13	SMC			82.0	155.3	121.4	14.4	2.28

안 되며[14][15], 강우 시 발생한 총 오염물질발생량을 총 유출량으로 나누어 산정할 수 있다[3]. 합류식 관거 1과 합류식 관거 2지점의 EMC를 살펴보면, BOD는 각각 63.5~211.6 mg/L, 42.1~131.4 mg/L로 나타났다. 합류식 관거 2 지점이 1지점에 비해 낮은 농도를 보이는 것으로 조사되었는데, 이는 음식점과 유흥업소가 상대적으로 많이 밀집되어 많은 물 사용과 유량 회색효과로 낮은 농도가 발생한 것으로 판단된다. 또한, COD_{Cr}의 경우, 각 조사지점의 농도는 114.9~523.8 mg/L, 107.7~256.5 mg/L, SS의 경우에는 70.3~436.4 mg/L, 33.7~221.1 mg/L로 BOD와 비슷한 양상을 보이는 것으로 조사되었으나, 강우량 및 강우강도에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. TN의 경우는 6.4~33.0 mg/L, 7.9~26.4 mg/L로 조사되었으며, TP는 1.09~6.81 mg/L, 1.16~3.91 mg/L로 나타났다.

도시지역 비점오염 유출량은 선행건기일수, 강우강도, 강우량, 불투수면적 등에 따라 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이는 다른 연구결과[16]와 유사한 것으로 조사되었다. 이에 반해 진영훈 등[17]의 연구결과와 비교해보면, 공지천의 경우, 수배 정도 높은 농도값을 보이는 것으로 조사되었다. 이는 합류식하수관거로 인한 하수 직유입과 지형적, 기후적 차이에 의한 것으로 판단된다.

3.2 강우유출의 초기세척 효과

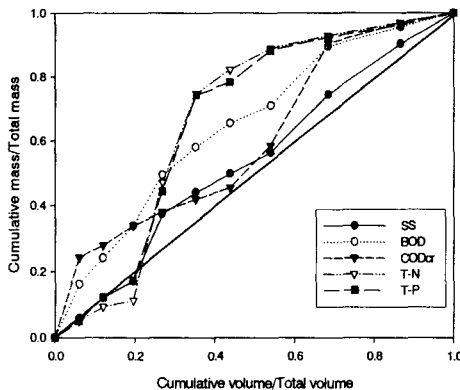
강우 초기에 유출수 농도는 급격히 증가한 후 서서히 감소하는 특성을 나타내는데 이러한 현상을 초기세척효과(first flushing effect)라고 한다. 본 연구에서는 초기세척효과를 M(V) (the cumulative pollutant mass vs the cumulative discharged volume) 곡선을 이용하여 분석하였다. M(V) 곡선은 총 유출유량(total volume)에 대한 누가유출유

량(cumulative volume)의 비와 총 유출부하량(total mass)에 대한 누가유출부하량(cumulative mass)의 비의 관계를 나타낸 무차원 그래프로, M(V)곡선이 그래프의 양분선(45°) 위에 위치하게 되면, 초기세척효과가 발생한 것으로 보고 양분선 아래에 위치하면 초기세척효과가 발생하지 않은 것으로 본다[18].

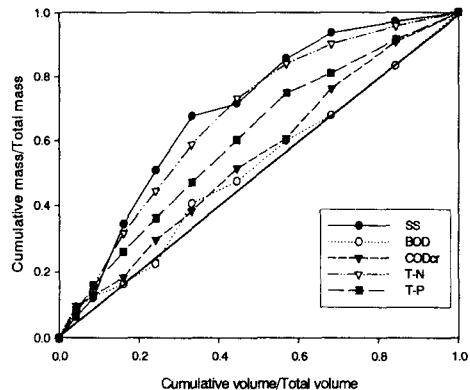
합류식 관거 1과 합류식 관거 2지점의 M(V)곡선(2005년 9월 30일)을 그림 3에 나타내었다. 일반적으로, M(V)곡선은 강우량 및 유역면적 등에 따라 다소 차이가 있으나 대체로 누적오염부하량비가 1보다 큰 항목들은 SS, COD_{Cr} 등과 같은 입자성 물질이나 입자성 물질과 함께 거동하는 물질이고 1보다 작은 항목은 NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, PO₄⁻-P와 같이 토양에 흡착되지 않는 용존성 물질이다. 강우 시 M(V) 분석결과, 전체적으로 1보다 높은 비율을 보이고 있었으며, 초기세척효과가 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 SS, COD_{Cr} 등은 대부분 입자성 물질로 강우 시 초기세척현상으로 인해 관거 내의 퇴적물과 노면에 쌓여 있던 먼지 등이 초기유출수와 함께 유실되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 유량과 오염물질 부하량의 상관관계

초기 강우 시 발생하는 오염부하량은 강우에 의한 유출량과 깊은 관계가 있으며, 유출량을 이용하여 오염물질 부하량을 예측할 수 있다. 유출량 대비 오염부하량 간의 그래프를 그림 4~8에 나타내었다. 연구결과 BOD, COD_{Cr}, SS, TN, 그리고 TP의 상관관계(R²)는 각각 0.90, 0.89, 0.88, 0.89, 0.92로 나타났으며, 모든 항목에서 유량의 증가에 따라 오염도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 도시지역 가정하수 및 공업단지 연구결과와 유사한 것으로 나타났다[19][20].



(a) 합류식 관거 1



(b) 합류식 관거 2

그림 3 비점오염물질의 M(V)곡선

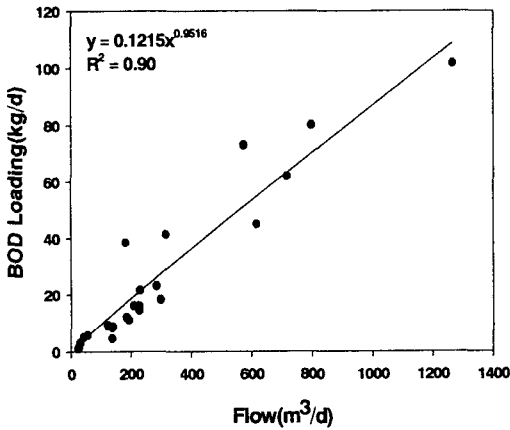


그림 4 유량과 BOD 부하량과의 상관관계

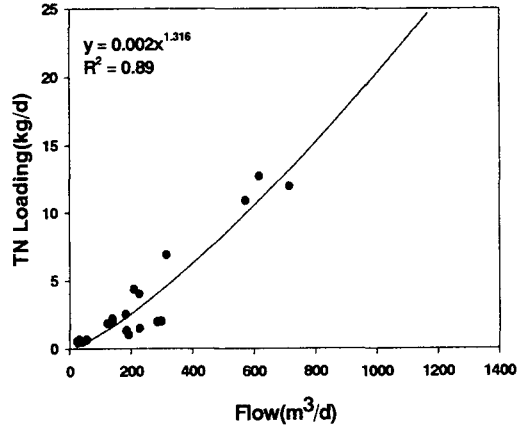


그림 7 유량과 TN 부하량과의 상관관계

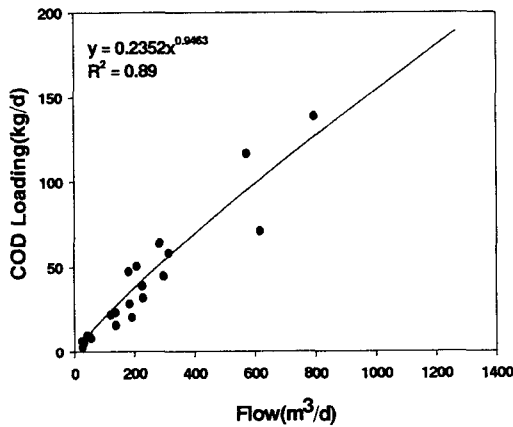


그림 5 유량과 COD_{Cr} 부하량과의 상관관계

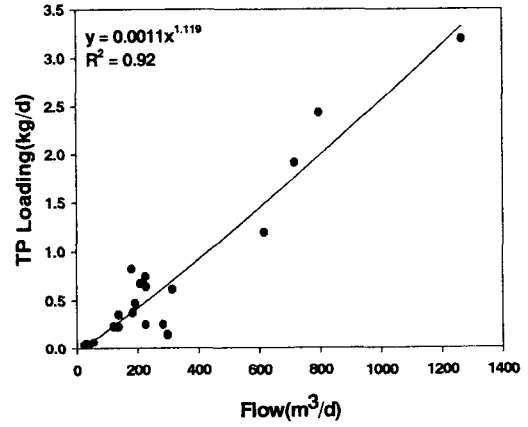


그림 8 유량과 TP 부하량과의 상관관계

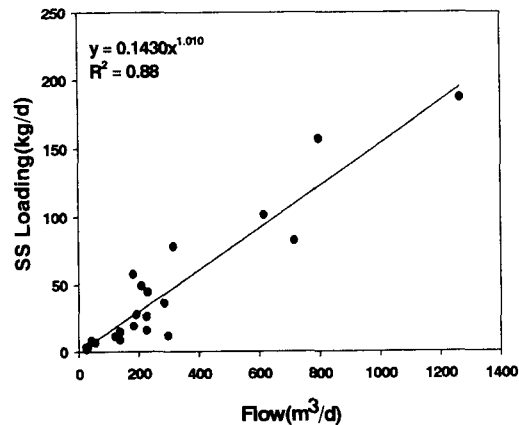


그림 6 유량과 SS 부하량과의 상관관계

4. 결론

소규모 도시지역에서 강우 시 합류식 하수관거 유출특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 합류식 관거 1과 합류식 관거 2지점의 EMC 를 살펴보면, BOD는 각각 63.5~211.6 mg/L, 42.1~131.4 mg/L로 나타났으며, COD_{Cr}은 114.9~523.8 mg/L, 107.7~256.5 mg/L, SS는 70.3~436.4 mg/L, 33.7~221.1 mg/L로 조사되었다. TN은 6.4~3.0 mg/L, 7.9~26.4 mg/L, TP는 1.09~6.81 mg/L, 1.16~3.91 mg/L로 나타났으며, 농도 및 유출특성은 선행건기일수, 강우강도, 강우량, 불투수면적 등에 따라 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. 강우 시 M(V) 분석결과, 전체적으로 1보다 높은 비율을 보여 초기세척효과가 나타나는 것으로 조사되었다.

3. 유출량과 오염부하량의 상관관계(R^2)는 BOD, COD_{Cr} , SS, TN, TP 각각 0.90, 0.89, 0.88, 0.89, 0.92로 유량증가에 따라 오염도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

4. 강우사상, 배출구역의 특성에 따라 유사한 면적임에도 불구하고 농도 및 유출특성이 매우 다르게 나타났으며, 이에 장기간의 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국수자원공사, 대청호 수질개선을 위한 소옥천 환경조사 보고서, 2003.
- [2] Beacher, K. D., Schnoebelen, D. J., and Aker s, K. K. B., "Nutrients discharged to the Mississippi river from eastern Iowa watershed", *Journal of the American Water Resources Association*, Vol.36, No.1, pp.161-173, 2000.
- [3] Barrett, M. E., Irish, Jr. L. B., Malina, Jr. J. F., and Charbeneau, R. J., "Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area", *Journal of Environmental Engineering*, Vol.124, No.2, pp.131-137, 1998.
- [4] Novotny V. and Chesters G., *Handbook of urban runoff pollution ; sources and management*, Van Nostrand Reinhold CO., N. Y., pp.312-390, 1981.
- [5] Lape J. and Dwyer T. J., "Controlling combined sewer overflows(CSOs): EPA's CSO control policy", in *Proceeding of the 1994 WERF, Kentucky Tenn.*, pp.0-18, 1994.
- [6] 국립환경연구원, 비점오염원 유출부하량 조사 지침, pp.3-10, 1992.
- [7] 방기웅, 이준호, 유명진, "도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구", *한국수질보전학회지*, 제13권, 제1호, pp.79-99, 1997.
- [8] Field R. and O'Shea M. L., "Integrated stormwater management", Lewis Pub. Ann Arbor, pp.3-120, 1993.
- [9] APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th, 2005.
- [10] 수질오염공정시험방법주해, 환경부고시 제 99-208호, 2004.
- [11] 윤현식, 합류식하수관거 월류수의 오염물질 특성과 처리, *한양대학교 박사학위논문*, 1998.
- [12] 여중현, 김건하, "도시소유역에서 하수관거 월류수의 배출특성연구", *대한토목학회논문집*, 제25권, 제1B호, 2005.
- [13] 이준호, 방기웅, 이종각, 최종수, 유명진, "강우시 도시유역에서의 유출오염부하량 원단위 산정", *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문초록집*, pp.615-619, 1998.
- [14] Deletic, A. B., and Mahsimivic C. T., "Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas", *Journal of Environmental Engineering*, Vol.124, No.9, pp.869-879, 1998.
- [15] Ujevic, I., Odzak, N., and Baric, A., "Trace metal accumulation in different grain size fractions of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastewaters", *Water Research*, Vol.34, pp.3055-3061, 2000.
- [16] 김갑수, 이종태, "중랑천 비점오염원 부하량 및 원단위 산정", *대한환경공학회지*, 제28권, 제8호, pp.813-819, 2006.
- [17] 진영훈, 박성천, "영산강 유역 도시지역의 비점오염원 배출특성에 관한 연구", *한국물환경학회지*, 제22권, 제4호, pp.605-613, 2006.
- [18] Bedient P. B., Lambert J. L., and Springer N. K., "Stormwater pollution load-runoff relationship", *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol.52, No.9, pp.2396-2404, 1980.
- [19] 강용태, 양희천, 조용현, 장성부, "도시지역 가정하수의 오염부하량을 이용한 비점오염원 유출특성에 관한 연구", *한국수처리학회지*, 제14권, 제2호, pp.57-66, 2006.
- [20] 강용태, 한상윤, 전종규, "초기강우에 의한 공업지역 내의 비점오염원 유출특성에 관한 연구", *한국수처리학회지*, 제15권, 제1호, pp.59-68, 2007.