

간척지 담수호유역의 오염물질 배출구조 및 시공간적 유출특성

Characteristics of Pollution Source Structures and Temporal and Spatial Discharge from the Drainage Basin of a Reclaimed Area

엄명철*(농진공) · 공동수 · 정동일 · 김태근(국립환경연구원) · 권순국(서울대)

Abstract

Discharge characteristics of organic materials and nutrients were estimated in the catchment area of a reclaimed area-Saemankeum-. Discharge load of BOD₅ was high in the domestic system, while nitrogen and phosphorus were discharged mainly from the livestock system and the land. Load was so dependent on the precipitation that it increased in the rainy season, particularly in nitrogen and phosphorus. Loads from nonpoint sources in this area were higher compared with others.

I. 서론

국내 간척지 내부의 담수호는 각종 용수공급은 물론 연안해역 일대의 부족한 수자원의 개발 및 공급을 목적으로 조성되어 왔다.

그러나 최근 들어 유역내의 산업발전, 인구증가 및 도시집중화, 축산 및 양식업의 팽창, 비환경친화적 영농에 따른 하구, 연안 등의 수질오염과 각종 환경악화가 사회적 문제로 부각되면서 하구담수호에 대한 부정적 시각이 만연되기 시작했다.

일반적으로 하구담수호는 상류역의 호수에 비해 넓은 유역을 가지고 있으며 인근 지역에 대규모의 농경지, 축산시설, 도회지, 공업단지 및 양식장이 위치하여 유기오염이나 독성오염은 물론 부영양화에도 취약한 입지적 조건을 가지고 있다. 또한 연안에 인접한 유역은 주로 상수원으로 이용되는 중상류역에 비해 오염원의 관리는 물론 환경기초시설의 투자가 낮아 적절한 처리 없이 오염물질이 유입되고 있으며, 담수화 이후에도 해양과 간척지의 염분침출로 인한 염분성충으로 물의 수직순환이 억제됨에 따라 심층수의 혐기화와 그에 따른 오염물질 용출이 문제가 되고 있으므로 하구 담수호의 안정적 운영을 위해서는 상류유역의 오염부하 삭감대책이 병행되어야 한다.

본 연구는 현재 새만금 간척사업을 통해 새로이 조성될 예정인 새만금호의 상류유역을 대상으로 각각의 오염원별로 오염물질 배출구조 및 시공간적 유출특성을 파악하여 하구 담수호의 수질관리에 기여코자 한 것이다.

II. 오염물질 배출구조

오염물질은 발생원으로부터의 직접배출, 발생원에서의 개별처리 후 배출, 환경기초시설에서의 중말처리 후 배출 등의 여러 경로를 거쳐 수체로 유입된다. 수체에 도달하는 오염물질의 양을 계산하기 위해서는 오염원별 정확한 배출구조의 파악이 무엇보다 중요하다.

1. 생활계

인구는 크게 하수처리구역 인구나 비하수처리구역 인구, 시가화인구와 비시가화인구, 합류식 하수도 인구나 분류식 하수도 인구, 상주인구와 사업장인구, 수거식인구와 단독정화조 인구 및 오수정화시설 인구로 세분된다. 생활계 발생부하량은 상수이용량, 사업장활동인구비, 시가화 정도 등의 속성에 따라 리, 동 및 마을 단위로 구분된 원단위에 의해 산정된다.

발생된 부하량은 단독정화조나 오수처리시설과 같은 개별처리시설을 거치거나, 분뇨처리장 및 하수종말처리장으로 이동하여 처리된다. 아무런 처리시설을 거치지 않는 경우에는 발생부하량 전량이 수계로 배출된다. 그러므로 생활계 배출부하량을 파악하기 위해서는 개별처리시설에서 배출되는 양과 하수처리장 및 분뇨처리장의 이송부하량, 미처리 방류량 등에 대한 유역내 물질수지의 평가가 선행되어야 한다.

가. 생활계 초기배출부하량

처리구역 및 비하수처리구역에서 발생된 오염물질은 개별정화조에서 제거되거나 하수처리장과 분뇨처리장으로 이송되며 혹은 정화조에서 침출되어 직접 방류된다. 각각의 속성별 이송, 침출 및 삭감부하량 및 삭감효율(β_1)은 오염물질이나 처리장으로의 이송율에 따라 달리 산정된다.

$$L_{SC} = L_{STC} + L_{SNC}, \quad L_{FC} = L_{FTC} + L_{FNC}, \quad L_{UC} = L_{UTC} + L_{UNC}, \quad L_{RC} = L_{RTC} + L_{RNC},$$

$$L_C = L_{SC} + L_{FC} + L_{UC} - L_{RC}, \quad L_{RC} = \beta_1 L_C \quad (1)$$

여기서, L_C 는 초기배출부하량이며 L_{STC} 와 L_{SNC} 는 각각 하수처리구역과 비하수처리구역에 대한 하수관거유입부하량, L_{FTC} 와 L_{FNC} 는 분뇨처리장 이송부하량, L_{UTC} 와 L_{UNC} 는 정화조 침출부하량, L_{RTC} 와 L_{RNC} 는 정화조 삭감부하량이다.

나. 처리장의 방류부하량

하수관거에 유입된 오염물질은 누수, 우수나 지하수 유입, 관거유달 과정의 변화 및 강우시 하천배제를 거쳐 하수처리장으로 유입된다.

$$L_{WP} = L_{STC} - L_{PLP} - L_{EXP} + L_{PCP}$$

$$L_{WN} = L_{PIN} - L_{PLN} - L_{EXN} + L_{PCN}$$

$$L_W = L_{WP} + L_{WN} \quad (2)$$

여기서, L_W 는 하수처리장 유입부하량, L_{WP} 는 하수처리장 순하수 유입부하량, L_{WN} 은 하수처리장 불명수(지하수나 우수) 유입부하량, L_{STC} 는 하수처리구역의 하수관거유입부하량, L_{PLP} 는 순하수 관거누수부하, L_{EXP} 는 순하수 하천배제부하, L_{PCP} 는 순하수 관거변화부하(관거내의 침전, 퇴적, 용출, 분해 등), L_{PIN} 은 불명수 관거유입부하량, L_{PLN} 은 불명수 관거누수부하, L_{EXN} 은 불명수 하천배제부하, L_{PCN} 은 불명수 관거변화부하이다. 하수처리장으로부터 방류되는

부하량은 순하수와 불명수 처리장 유입부하량에 처리효율(β_2)을 곱하여 산정한다.

$$L_{WOP} = L_{WIP}(1 - \beta_2), L_{WON} = L_{WIN}(1 - \beta_2), L_{WO} = L_{WOP} + L_{WON} \quad (3)$$

여기서, L_{WOP} 는 하수처리장 순하수방류부하량, L_{WON} 은 하수처리장 불명수 방류부하량이며 β_2 은 하수처리장 처리효율이다. 분뇨처리장의 방류부하량은 처리효율(β_3)을 곱하여 산정한다.

$$L_{FO} = L_{FC}(1 - \beta_3) \quad (4)$$

여기서, L_{FO} 는 분뇨처리장 방류부하량, L_{FC} 는 분뇨처리장 유입부하량이며 β_3 는 분뇨처리장의 처리효율이다.

다. 생활계 총배출부하량

이상의 배출구조에서 생활계 총배출부하량은 식(5)와 같다.

$$L_D = L_{FNC} + L_{UC} + L_{PLP} + L_{EXP} + L_{WOP} + L_{FO} \quad (5)$$

여기서, L_D 는 생활계에 의한 총배출부하량이다.

2. 축산계

축산분뇨로부터의 배출부하량은 가축의 종류나 처리방법에 따라 배출경로가 다르므로 이를 고려하여 계산하여야 한다. 가축은 크게 한우, 젖소, 돼지, 가금으로 구분되며, 발생원단위를 축종별로 곱하여 축산계 발생부하를 구한다. 축산분뇨의 처리방법은 개별축사에서 발생원처리와 축산폐수 공공처리시설에서의 수거 및 이송처리로 구분된다.

가. 축산분뇨 개별처리

개별 축사에서 처리방법으로는 폐수처리는 생물학적처리, 톱밥발효, 퇴비화, 액비화가 주로 사용되며 축분 처리는 톱밥발효, 퇴비화, 액비화, 퇴비+액비화, 위탁처리, 야적처리가 대부분이다. 축산폐수의 배출부하량은 처리방법별 처리효율을 곱하여 산정한다.

$$L_{FWD} = F \times S_{FW} \times (1 - \beta_4) \quad (6)$$

여기서, L_{FWD} 은 축산폐수의 배출부하량, F 는 축종별 사육두수, S_{FW} 는 축종별 축산폐수 발생원단위, β_4 는 축산폐수 처리시설의 처리효율이다.

자원화시설을 거쳐 비점오염원화되는 축분뇨의 부하량은 발생부하량에서 폐수처리시설로 유입되는 부하를 뺀 나머지가 배출된다. 축분 자원화시설에서도 처리방법에 따라 처리율만큼 부하가 삭감되고 나머지는 농경지나 초지에 배출되어 비점오염원의 형태로 강우시에 배출된다.

$$L_{FCN} = F \times (S_F - S_{FW}) \times (1 - \beta_5) \times LA \times RR \quad (7)$$

여기서, L_{FCN} 은 축분의 배출부하량, F 는 축종별 사육두수, S_F 는 축종별 축산분뇨 발생원단위, S_{FW} 는 축산폐수의 발생원단위, β_5 는 축분 자원화시설의 처리효율, LA 는 농지배출비, RR 은 강우에 따른 월별유출비이다. 강우유출비는 10mm/일 이상 강우강도를 부하량의 유출이 일어나는 유효강우량이라 하고 주요 시비기인 5~8월에 연간 발생부하의 80%가 유출된다고 가정하였다.

나. 축산폐수공공처리시설

축산폐수공공처리시설을 통하여 처리되는 축산분뇨의 배출부하량은 축산폐수처리구역내의 부하량과 타 지역에서 수거되어 처리시설을 거쳐 배출되는 양이며 식(8)과 같다.

$$L_{FSTD} = F_{FSTD} \times S_F \times FC/100 \times (1 - \beta_6) \quad (8)$$

여기서, L_{FSTD} 는 축산폐수공공처리시설을 거치는 배출부하량, F_{FSTD} 는 축산폐수공공처리시설로 수거되는 축종별 사육두수, S_F 는 축종별 축산분뇨 발생원단위, FC 는 축산폐수공공처리시설로 수거되는 축산분뇨의 비율(%), β_6 는 축산폐수공공처리시설의 처리효율이다.

3. 산업계

산업계 부하량은 개별배출시설에서 직접 방류하는 경우와 환경기초시설을 통한 방류로 구분된다. 개별배출시설에서 직접 방류하는 경우는 각각의 폐수배출량에 산업폐수 배출원단위를 곱한 양이 배출부하량이 되며 이는 연중 일정하게 배출된다. 환경기초시설에서 처리하는 산업계 부하는 우선 개별처리를 거친 각 사업장의 부하가 처리장으로 이송되어 처리된다. 그러므로 산업계 배출부하량은 개별 사업체의 배출부하량과 폐수종말처리장에서 방류되는 양의 합이 된다.

$$L_{SWTD} = Q \times C_R \quad (9)$$

$$L_{IEO} = L_{SWTD} \times (1 - \beta_7) \quad (10)$$

여기서, L_{SWTD} 는 개별폐수배출시설로부터 직접 방류되는 배출부하량, Q 는 개별폐수배출시설의 폐수배출량, C_R 은 개별폐수배출시설의 방류수질농도(BOD는 폐수배출기준, T-N과 T-P는 폐수배출원단위), L_{IEO} 는 폐수종말처리시설을 통한 배출부하량, β_7 는 폐수종말처리시설의 처리효율이다.

4. 토지이용

토지이용에 의한 발생부하량은 토지이용별면적에 토지이용원단위를 곱한 양이며, 이는 유효강우량의 비율에 따라 수체로 배출된다. 토지의 경우 발생부하량이 곧 배출부하량이 되지만 하수처리구역의 경우에는 토지에서 유출된 부하량이 하수관거에 유입되어 처리되므로 그에 따른 삭감부하량도 고려하여야 한다.

토지에서의 부하 유출은 주로 강우 유출에 의해 일어나므로 강우의 영향을 충분히 고려하여야 한다. 10mm/일 이상 강우강도를 부하량의 유출이 일어나는 유효강우량이라 하고, 논에서는 주요 시비기인 5~8월에 연간 발생부하의 80%가 유출된다고 가정하였다. 논 이외 토지의 월별 배출부하량의 계산은 식 (11), 논 배출부하량은 식 (12)와 같다.

$$L_i = \frac{\gamma_i \lambda Y}{M_i} \quad (11)$$

$$L_{ai} = \frac{\alpha \gamma_{ai} \lambda Y}{M_i}, \quad L_{bi} = \frac{(1 - \alpha) \gamma_{bi} \lambda Y}{M_i} \quad (12)$$

여기서, L_i 는 i 월의 토지배출부하량, L_{ai} 는 시비기 i 월의 논 배출부하량, L_{bi} 는 비시비기 i 월의 논 배출부하량, α 는 시비기 부하가중치(0.8), λ 는 토지이용원단위, γ_{ai} 는 시비기의 총 유효강우량대비 시비기 i 월의 유효강우량비, γ_{bi} 는 비시비기 중 유효강우량대비 비시비기 i 월의 유효강우량비, Y 는 연중 일수(335일 또는 366일)이며, M_i 는 i 월의 일수이다.

5. 양식장

양식계의 부하는 월별 사료투여량과 사료효율 등에 따라 산정한다.

$$L = My\rho(1 - \delta) - Mk\beta + M(1 - \gamma)\rho = M[\rho(1 - \gamma\delta) - k\epsilon] \quad (13)$$

여기서, L 은 양식장 배출원단위($g/m^2/일$), M 은 사료투여량($g/m^2/일$), γ 는 사료섭식율, ρ 는 사료물질함량, k 는 사료효율, ϵ 은 어체물질함량, δ 는 섭식대비 호흡소비율이다.

III. 오염물질 배출부하량

오염물질은 발생원에서부터 여러 가지의 경로를 거쳐 수체에 도달하게 되므로, 수체의 오염도를 예측하기 위해서는 정확한 오염원 파악 및 처리시설의 용량이나 효율, 오염물질 제거율 등이 평가되어야 한다. 본 연구에서는 현재 조성 중에 있는 새만금호를 대상으로 오염물질 배출부하량을 산정하고 이의 유출특성을 제시하였다.

1. 대상유역

새만금 간척사업의 결과로서 내부에 형성되는 인공호수인 새만금호는 호수면적 11,800ha에 저수용량 연간 3억5천만톤 규모로서 농업용수 확보를 목적으로 건설되는 국내 최대의 하구담수호이다. 현재 방조제 공사가 50%정도 진행된 상태이며 향후 2011년 이후에는 담수호의 물을 농업용수로 사용할 계획이다.

그러나 현재 새만금호로 유입되는 만경강 및 동진강의 수질오염도가 높아 향후 새만금호의 수질악화가 우려되는 상태여서, 상류유역 및 호수에 대한 수질보전대책이 법정부적으로 수립되고 있다.

새만금호 유역은 전주시, 익산시 등 큰 도시가 유역의 중류부에 위치하고, 만경, 김제평야가 유역의 하류부에 넓게 펼쳐져 있어, 도시와 농촌의 유역특성이 혼재되어 있는 복잡한 오염부하특성을 갖춘 지역이다.

2. 오염원

가. 인구

표-1 새만금호 유역의 인구현황(1998년)

구분	처리구역	가정 인구(인)				사업장 인구(인)		
		수거식	하수도 인구			단독정화	오수정화	무처리
			합류식 인구		분류식			
			단독정화	오수정화				
시가화	하수처리구역	82,991	306,323	288,475	61,729	282,246	148,785	1,732
	비하수처리구역	110,276	119,541	79,285	2,674	105,400	53,617	577
비시가화	하수처리구역	2,780	650	786	0	1,755	3,493	0
	비하수처리구역	198,742	8,034	86,152	0	56,780	5,702	0
계		193,267	425,864	367,760	64,403	387,646	202,402	2,309
총인구(가정인구)		1,348,438						

새만금호 유역내의 상주인구는 총 1,348,438명이며, 이 중 사업장 인구가 660,087명으로서 평균 활동인구비가 약 49%이다. 현재 생활하수의 처리는 대도시인 전주와 익산시 지역은 하수처리장을 통해 이루어지며, 기타 지역은 분뇨수거 후 분뇨처리장을 통해 처리하거나 단독정화나 오수정화시설과 같은 개별 정화시설을 통해 이루어진다.

나. 축산

새만금호 유역내에서 사육되는 가축은 한우가 112,192두, 젖소 24,224두, 돼지 557,115두이며 가금은 9,855,309수이다. 이 중 현재 왕궁 나환자촌의 축산분뇨 만이 차집관로를 통해 익산시 축산폐수 처리장으로 이송되어 처리되며, 기타 지역은 주로 자원화 시설을 갖춘 개별처리시설을 통해 처리된다. 개별처리형태는 주로 퇴비화와 톱밥발효가 대부분이며 생물학적 처리는 적은 편이다.

표-2 새만금호 유역의 가축사육두수 및 개별처리형태(1998년)

축산폐수 개별처리형태		축산폐수 처리구역				축산폐수 미처리구역			
		한우 (두)	젖소 (두)	돼지 (두)	가금 (수)	한우 (두)	젖소 (두)	돼지 (두)	가금 (수)
분뇨 동시 처리	톱밥발효	60	0	15	0	16,900	7,112	134,862	263,220
	퇴비화	61	0	46,208	213,566	42,610	10,727	198,163	7,241,854
	저장액비화	0	0	0	0	465	88	35,239	0
	위탁처리	0	0	680	0	228	55	7,184	690,028
	야적	22	0	67,026	0	49,913	5,887	33,454	0
	기타	0	0	0	0	1,462	40	3,801	1,436,200
분뇨 분리 처리	액비화+퇴비화	0	0	0	0	246	315	14,020	10,441
	생물처리+야적	0	0	0	0	0	0	0	0
	생물처리+톱밥발효	0	0	0	0	0	0	9,748	0
	생물처리+퇴비	0	0	0	0	38	0	6,173	0
	생물처리+액비	0	0	0	0	187	0	542	0
합계		143	0	113,929	213,566	112,049	24,224	443,186	9,641,743

다. 산업체

새만금호 유역내의 산업폐수 배출업소는 총 1,777개소이며, 주로 전주공단과 익산공단, 정읍공단 등 공단지역에 밀집되어 있다. 이 중 개별처리업소가 1,368개 업소로서 폐수배출량은 46,937m³/일이며, 농공단지 오폐수처리장, 산업폐수 종말처리장, 하수처리장을 통해 산업폐수를 처리하는 업소는 409개 업소로 폐수배출량은 72,955m³/일이다.

표-3 새만금호 유역의 산업체 현황(1998년)

산업폐수 개별처리		산업폐수 처리구역		합계	
사업체수 (개소)	폐수배출량 (m ³ /일)	사업체수 (개소)	폐수배출량 (m ³ /일)	사업체수 (개소)	폐수배출량 (m ³ /일)
1,368	46,937	409	72,955	1,777	119,892

라. 토지이용

새만금호 유역의 총 면적은 292,429ha이며 이 중 농경지가 41.3%, 임야가 41.7%로서 농경지의 비율이 높은 편이며, 특히 만경강 및 동진강 고수부지의 농경지 활용이 활발하게 이루어지고 있다.

표-4 새만금호 유역의 토지이용현황(1998년)

구분	전	답	임야	대지	기타	계
면적(ha)	29,627	91,170	121,955	9,893	39,785	292,429
비율(%)	10.1	31.2	41.7	3.4	13.6	100

3. 오염물질 배출량

새만금호 유역내의 오염원인 인구, 축산, 산업체, 토지이용, 기타(양식장, 온천)에서 수계로 배출되는 오염부하량을 강우 유출특성과, 처리시설 운영현황 등을 고려하여 계산하였다.

새만금호 유역의 총 배출부하량은 BOD가 38,958kg/일, T-N 14,279kg/일, T-P 4,925kg/일이며, BOD는 생활계의 비율이 거의 절반인 45%를 차지하지만, 축산계의 비율은 다른 수질항목에 비해 낮은 22%이다. T-N과 T-P는 모두 축산계와 토지이용계의 비율이 높게 나타나는데 이는 농경지의 비율이 높은 새만금호 유역의 특성을 나타내어준다.

부하량의 월별 유출패턴은 생활계와 축산계, 토지이용계는 주로 강우의 유출패턴과 비슷한 경향을 나타내며 점원 오염원인 산업계는 연중 일정하게 배출된다. 생활계의 경우 발생부하는 항상 일정하지만 유역내의 합류식 하수도시설에 의한 강우유출수의 영향에 의해 배출부하는 강우의 유출패턴과 같은 경향을 나타내게되며, 축산계와 토지이용계는 비점원부하의 특성을 잘 나타내어주고 있다.

표-5는 새만금호 유역의 오염원별 총배출부하량을, 그림-1은 부하량의 월별 유출특성을 나타낸 것이다.

표-5 새만금호 유역의 오염원별 배출부하량

수질항목		생활계	축산계	산업계	토지이용계	기타	계
BOD	배출량(kg/일)	38,958	19,254	5,921	11,657	11,381	87,171
	비율(%)	(45)	(22)	(7)	(13)	(13)	(100)
TN	배출량(kg/일)	14,279	11,736	2,328	12,990	2,261	43,594
	비율(%)	(33)	(27)	(5)	(30)	(5)	(100)
TP	배출량(kg/일)	1,604	1,526	194	995	607	4,926
	비율(%)	(33)	(31)	(4)	(20)	(12)	(100)

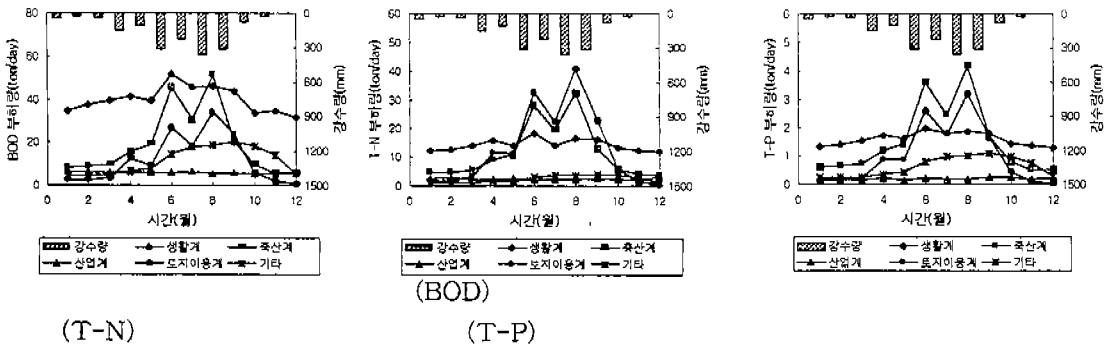


그림-1 새만금호 지역의 오염물질 월별 배출특성

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 향후 조성될 새만금호로 유출되는 오염부하의 배출구조를 오염원별로 제시하였으며, 부하의 시간적 유출특성을 파악하고자 하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 오염원을 크게 생활계, 축산계, 산업계, 토지이용계, 기타로 구분하고 각각의 처리형태에 따른 오염부하 배출구조를 파악하였다.
2. 새만금호 지역의 오염원 중 생활계는 주로 하수처리장 및 개별정화시설에서 처리되지만 수거식 처리형태도 많은 편이다. 가축분뇨는 대부분이 퇴비화나 톱밥발효 등 자원화 시설을 거친 후 농경지에 살포되며, 산업폐수는 전량 처리시설을 거친 후 수체에 방류된다. 새만금호 지역은 농경지의 비율이 매우 높으며 하천의 고수부지에도 농사가 활발하게 이루어지고 있다.
3. 새만금호 지역의 오염부하 배출량 계산 결과 BOD는 생활계의 비율이 거의 절반 수준인 45%를 차지하며 축산계가 22%, 토지이용이 13%순으로 인구에 의한 부하량이 높다. T-N과 T-P는 축산계가 각각 27%, 31%를 차지하며, 토지이용계도 각각 30%, 20%로서 생활계 및 축산계와 비슷한 비율을 보인다. 이는 새만금호 지역의 농경지 비율이 매우 높다는 지역특성을 잘 나타내어준다.
4. 오염부하의 월별 유출부하 특성을 제시하였다. 생활계, 축산계, 토지이용계는 강우의 유출 패턴과 비슷한 부하특성을 나타내며 산업계는 부하가 항상 일정하게 배출된다. 이는 산업계는 강우에 상관없이 오염물질이 배출되지만, 생활계, 축산계, 토지이용계 오염물질은 강우 유출수와 함께 배출되는 특성을 가지고 있기 때문이다. 특히 생활하수가 강우시에 높은 것은 합류식관거로의 강우 유출수의 유입, 처리용량의 제한으로 인한 생활하수의 하천으로의 배제 등에 기인한 것이다.

참고문헌

1. 농림부, 농어촌진흥공사, 새만금지구 담수호 수질보전 대책수립 조사연구(I).
2. 농어촌진흥공사, 1998, 새만금지역의 비점오염원 관리대책 수립연구.
3. 정부합동, 1998, 팔당호 등 한강수계 상수원 수질관리 특별종합대책 맑은한강-세천년의 대계.
4. 國松孝男, 村岡浩爾, 1989, 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版.