

지류하천의 유황분석을 통한 BOD₅ 농도변화 유형 분석

정우혁[†] · 김영일 · 김홍수 · 문은호 · 박상현 · 이상진 · 정상만* · 조병욱 · 최정호

충남발전연구원
*공주대학교 건설환경공학부

Study of BOD₅ Variation Patterns with Flow Regime Alteration in the Tributaries

Woohyeuk Jeong[†] · Youngil Kim · Hongsu Kim · Eunho Moon · Sanghyun Park · Sangjin Yi ·
Sangman Jeong* · Byungwook Cho · Jeongho Choi

Chungnam Development Institute

*Department of Civil & Environment Eng., Kongju National University

(Received 26 April 2011, Revised 17 June 2011, Accepted 22 June 2011)

Abstract

We analyzed the variations of water quality with flow regime alterations to determine the characteristics of the stream where the stream management is considerably difficult due to the high variability of the flow rates. In this study, both flow rates and water qualities were monitored at the tributaries, 34 in count, of both Geum River and Sabgyo Lake Basins. The variation of water qualities were divided into 2 types, based on their stream flow rates, known as Type I and Type II. If the water quality of a stream increases during low flow rate periods compared with high flow rate periods, it is classified as Type I; if the water quality of the stream increases during high flow rate periods compared with low flow rate periods, it falls under Type II. The analysis for the variations of water qualities, of all 43 basins, resulted to 24 basins under Type I and Nineteen 19 basins under Type II. The variations of water qualities were analyzed first by using Regression Analysis followed by Statistical Analysis. The average slope of the variations of water qualities and the slope of the standard deviations were 0.00135 and 0.00477, respectively. The Probability Distributions of both Type I and Type II basins were 61.1% and 38.9%, respectively. The basin having a probability distribution of 61.1% and is also known as Type I, increases during periods of low flow rates, due to the presence of point sources. Therefore, the basin should be enforced with stream management. Before the stream management can be implemented in all streams falling under Type II, the sources of contaminants should first be estimated. These contaminants can be classified into two parts, the first is Point source pollution and the second is Non-point source pollution, where the Non-Point source pollution can be sub-divided into two types, with storm runoff and without storm runoff.

keywords : Flow duration curve, Non-point source, Water quality variation, Watershed management

1. 서론

지속적인 유역의 도시화 및 산업화 진전으로 인한 오·폐수의 방류량 증가는 하천의 자정능력을 상실시키고 하수 및 폐수처리장의 건설을 통한 인위적 수질개선능력 범위를 초과하여 수질관리에 어려움을 가중시키고 있다(임봉수 등, 2010). 또한 지표면에 축적된 다양한 오염원들이 표토층에서 자연분해 또는 식물에 흡수되지 못하고 불투수층에서 강우와 결합된 상태로 급격히 유출됨으로써 하천의 생태환경과 수질을 악화시키고 있다. 우리나라는 최근 하천의 생태환경 복원을 위하여 4대강 살리기, 생태하천 복원사업 등이 추진되고 있다. 하지만 이러한 사업들은 치수 및 이수 분야를 위한 목적으로 설계하거나 일부 설계 내용에 조경수준의 생태적 기능을 보완한 사업들이 대부분이다. 이러한 이유는

실질적인 하천의 생태복원을 위해서는 하천의 현재 상황을 면밀하게 검토하고 진단하는 것이 가장 중요하지만 하천현황 자료들이 축적되어 있지 않기 때문이다. 하천과 유역을 평가하고 진단하기 위하여 다양한 자료들의 복합적인 분석이 필요하지만 생태복원을 위하여 가장 중요하게 분석되어야 할 항목은 하천의 수질과 유량을 꼽을 수 있다(김영일 등, 2009). 현재 4대강 본류에서 하천의 수질과 유량모니터링은 지속적으로 이루어지고 있으나, 4대강 본류 수질·유량의 뿌리인 지류하천은 하천 수환경을 진단하기 위한 최소한의 모니터링 자료조차 부족한 현실이다(조병욱 등, 2010).

일반적으로 수질의 변화는 오염원배출량(kg/d)에 비례하고 유량(m³/d)에 반비례한다. 따라서 강우시 혹은 강우 이후 비점오염물질이 급격히 배출된다 할지라도 유량의 증가율이 비점오염원 배출량의 증가율을 초과하면 수질은 낮아진다. 그러나 비점오염원의 증가율이 유량의 증가율을 초과하면 수질은 악화될 것이다(정우혁 등, 2011). 우리나라는

[†] To whom correspondence should be addressed.

mjjwh@cdi.re.kr

강우가 여름에 집중하는 기후적 특성으로 인하여 대부분 하천의 유량변동이 적게는 약 20배에서 크게는 200배 이상에 이른다. 한편 강우유출과 결합하여 배출되는 비점오염원의 양은 오염원의 종류에 따라 무강우기간에 따른 지표에 축적량, 오염·분해의 정도, 배출경로, 처리형태에 따라 결정된다. 이와 같은 특성을 기초로 하천 풍수기의 수질변화 양상을 판단하면, 하천의 수질 개선 또는 악화에 따라 유량증가율과 오염원증가율 둘 중에서 어떠한 인자에 의해 수질이 결정되었는지 추정이 가능하다. 점오염원이 수질악화의 요인으로 작용하는 시기는 평수기 미만의 유량이 적은 시기이며, 이 시기 하천유량의 특징은 비교적 유량변동이 상당히 적다는 것이다. 또한 적은 양의 오염원 배출만으로도 수질악화 폭이 크게 나타나게 된다. 따라서 이러한 시기의 하천수질 악화요인은 대부분 유량증가율보다 오염원증가율이 초과함에 따른 현상이며, 강우유출과 결합된 비점오염원의 유출이 없으므로 점오염원배출에 의해 수질이 결정되는 특성을 갖고 있다. 이러한 특성을 정의할 수 있는 이유는 강우유출이 발생하는 유효강우를 10 mm라고 할 때 연간 40여 일 이내로서 평수량(Q_{185}) 미만의 저수기 기간은 강우유출수가 없는 기간으로 가정할 수 있기 때문이다. 반면 비점오염원이 하천수질을 악화시키는 요인이 되는 경우는 강우유출수와 함께 상당량의 오염원이 하천으로 유입되는 시기이며, 유효강우 발생 직후 또는 수일 이내의 기간으로 한정된다.

선행 연구 조사결과 금강수계내 수질특성을 평가하기 위하여 장기적으로 축적된 수질자료를 바탕으로 다양한 통계적 해석을 실시하였으나 유량자료가 없어 유량 및 수질관계를 파악하지는 못하였다(이혜원과 박석순, 2008). 또한 다양한 방법에 의해 수질과 유량의 관계를 분석하기 위한 연구가 있었으나, 일반적인 유역이 아닌 특수한 유역의 장기 모니터링 분석이거나 모니터링 자료가 부족하거나 수질·유량의 관계분석에 있어 상관관계 평가만으로 그치는 경우가 많았다(김경아 등, 2007; 박해식 등, 2001). 정우혁(2010)은 비점오염원관리가 요구되는 유역을 선정하기 위하여 수질·유량의 관계를 분석하였으나 연구대상 유역이 10개 미만으로 한정적이어서 하천과 유역에 대한 일반적인 평가를 내리기는 부족하다고 볼 수 있다. 하지만 보다 다양한 하천과 유역에 대하여 수질·유량의 관계를 분석한다면 보다 일반적인 결론을 내릴 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 4대강 관리의 기초자료로 활용하기 위하여 유역의 지형특성을 파악하고 지류하천의 수질·유량 모니터링을 수행하였으며 유황분석을 통하여 수질변화 형태를 유형화하였다.

2. 연구방법

하천의 유황분석을 통한 수질변화 유형을 분석하기 위하여 우리나라 중서부에 위치한 충청권 34개 지류하천과 43개의 유역을 연구 대상으로 삼았다. 이 하천들은 금강수계와 삼포수계에 포함된다. 금강수계는 동경 $126^{\circ} 40' 25'' \sim 128^{\circ} 03' 53''$, 북위 $35^{\circ} 34' 47'' \sim 37^{\circ} 03' 03''$ 에 위치하며

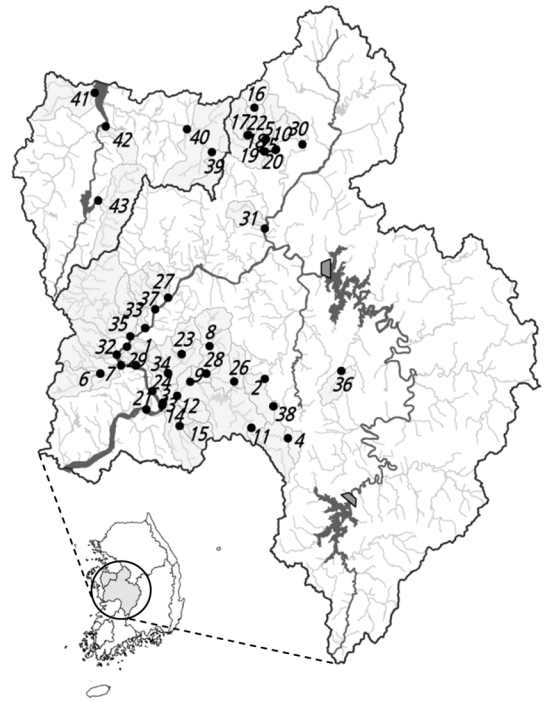


Fig. 1. Study area and observed stations.

총유역 면적은 $9,912.2 \text{ km}^2$, 유로연장은 397.8 km 이고 상류지역에 저수용량 $815 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용담댐과 저수용량 $1,490 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 대청댐이 위치하고 있다. 삼포수계는 동경 $126^{\circ} 42' 53'' \sim 126^{\circ} 42' 17''$, 북위 $36^{\circ} 40' 11'' \sim 36^{\circ} 50' 39''$ 에 위치하며 총유역 면적은 $1,664.7 \text{ km}^2$, 유로연장은 62.1 km 이다. 지류하천 중에서 29개는 금강수계의 중·하류 지역에 위치하고 있으며, 4개는 삼포수계에 위치하고 있다. 각각의 유역의 명칭은 하천명과 동일하게 명명하였으며, 하나의 하천에 2개 이상의 유역을 설정한 경우에는 상류부터 순서대로 명명하였다. 각 유역과 하천의 위치는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 연구대상 지역으로 선정된 유역은 국토해양부의 수치지형도를 이용하여 유역면적, 유로연장, 유역평균폭, 형상인자, 수로의 출구와 최원지점의 표고, 수로평균경사 등의 유역특성 인자를 도출하였다.

유역의 유출유량에 미치는 영향인자 중 가장 큰 영향을 미치는 인자는 강수량이다(Haan, 1977). 유역의 모니터링 기간에 강수특성에 특이사항이 있는지를 조사하기 위하여 기상청에서 운영하는 기상대의 강수자료를 조사하여 과거 자료와 비교하였다. 모든 유역의 수질과 유량은 2008년 1월부터 2009년 12월까지 24개월간 8일 간격을 지향하여 유역의 출구지점에서 수질·유량 모니터링을 수행하였다. 모든 하천에 대하여 24개월간 모니터링을 수행하진 못하였으나 대부분 12개월 이상의 지속적인 자료를 확보하였으며, 유황분석이 가능하도록 자료를 축적하였다. 조사한 수질 항목은 BOD_5 이며 환경부의 수질오염공정시험법에 따라 분석하였고, 유량은 국토해양부 수문관측매뉴얼과 환경부 수질오염공정시험법에 따라 하천횡단면과 유속측정에 의한 방법으로 측정하였으며, 수질과 유량 조사결과는 단순선형회귀분석을 통하여 수질의 변동추세를 유형화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유역현황 분석결과

하천의 유량은 강수량에 따라 급격하게 변동된다. 금강수계의 중심부에 위치한 대전기상청 강우자료에 의하면, 연구 대상유역의 모니터링 시기에 10 mm 이상의 유효강우 일수는 연간 32일 이었으며, 평년 강수량은 1,064 mm이다. 대

전기상청의 과거 30년간 평년 강수량이 1,334 mm임을 고려하면 일반적인 강수량의 80%의 강수가 발생하였음을 알 수 있다. 그리고 삼교수계의 동부에 위치한 천안기상청 강우자료에 의하면, 연구 대상유역의 모니터링 시기에 10 mm 이상의 유효강우 일수는 연간 27일 이었으며, 평년 강수량은 935 mm이다. 천안기상청의 과거 30년간 평년 강수량이 1,229 mm임을 고려하면 일반적인 강수량의 76%에

Table 1. Topographical characteristics of the watershed

Basin	Num.	Watershed	Area (A, km ²)	Basin length (L, km)	Average width (L/A)	Shape factor (L/A ²)	Out point AGL (H, m)	Farthest point AGL (H, m)	Channel slope (%)
	1	Gajeung stream	18.8	8.5	2.2	0.257	5	122	0.0138
	2	Gab stream	63.1	19.8	3.2	0.161	93	272	0.0090
	3	Ganggyeong stream	126.9	18.9	6.7	0.354	10	53	0.0023
	4	Geoncheon stream	25.8	7.7	3.4	0.438	188	427	0.0310
	5	Gwanggi stream	41.0	11.0	3.7	0.339	60	147	0.0079
	6	Geum stream-1	68.1	13.7	5.0	0.364	10	40	0.0022
	7	Geum stream-2	157.5	20.0	7.9	0.394	12	40	0.0014
	8	Noseong stream-1	55.7	10.6	5.3	0.500	16	87	0.0067
	9	Noseong stream-2	194.8	23.2	8.4	0.362	5	87	0.0035
	10	Nogdong stream	26.0	12.1	2.2	0.179	52	80	0.0023
	11	Jangseong stream	111.6	24.9	4.5	0.180	61	427	0.0147
	12	Nonsan stream-1	487.3	54.0	9.0	0.167	4	427	0.0078
	13	Nonsan stream-2	535.8	58.1	9.2	0.159	4	427	0.0073
	14	Daheung stream	1.6	1.3	1.3	0.999	4	6	0.0015
	15	Masan stream	34.8	9.8	3.5	0.361	5	151	0.0149
	16	Byeongcheon stream-1	33.1	8.3	4.0	0.484	107	186	0.0095
	17	Byeongcheon stream-2	56.9	16.1	3.5	0.219	64	186	0.0076
	18	Byeongcheon stream-3	105.1	21.1	5.0	0.237	57	186	0.0061
Geum	19	Byeongcheon stream-4	150.4	24.2	6.2	0.256	50	186	0.0056
river	20	Byeongcheon stream-5	214.0	27.6	7.8	0.281	49	186	0.0050
	21	Sadong stream	2.7	2.8	1.0	0.343	3	20	0.0061
	22	Sanbang stream	36.9	9.0	4.1	0.453	64	140	0.0084
	23	Seogseong stream-1	42.5	8.0	5.3	0.669	11	37	0.0033
	24	Seogseong stream-2	147.1	21.9	6.7	0.308	4	37	0.0015
	25	Seungcheon stream	57.6	15.7	3.7	0.234	51	153	0.0065
	26	Sinam stream	33.8	9.3	3.6	0.392	30	113	0.0089
	27	Eo stream	36.8	13.9	2.6	0.189	10	140	0.0094
	28	Yeosan stream	73.9	17.2	4.3	0.251	10	153	0.0083
	29	Wangpo stream	18.8	8.6	2.2	0.253	7	42	0.0041
	30	Yongdo stream	23.8	11.1	2.2	0.195	87	175	0.0079
	31	Weorha stream	43.6	14.5	3.0	0.209	21	131	0.0076
	32	Eunsan stream	65.4	14.6	4.5	0.309	7	112	0.0072
	33	inghwadar stream	49.3	14.9	3.3	0.221	7	156	0.0100
	34	Jeungsan stream	16.7	6.2	2.7	0.434	8	44	0.0058
	35	Ji stream	250.7	52.0	4.8	0.093	7	250	0.0047
	36	Chupung stream	46.6	8.9	5.2	0.585	150	192	0.0047
	37	Chiseong stream	44.0	11.1	4.0	0.355	8	108	0.0090
	38	Haengjeong stream	7.7	3.7	2.1	0.560	187	272	0.0230
	39	Goggyo stream-1	41.9	11.7	3.6	0.308	40	154	0.0097
Sab	40	Goggyo stream-2	236.6	23.3	10.1	0.435	17	277	0.0112
gyo	41	Namweon stream	110.1	19.1	5.8	0.303	1	32	0.0016
lake	42	Dogo stream	42.5	13.5	3.2	0.234	2	57	0.0041
	43	Sinyang stream	173.1	17.6	9.8	0.557	19	151	0.0075

Table 2. Watershed flow rate and BOD₅ monitoring results

Basin	Num.	Watershed	Data count	Q _{aver}	Q _{max}	Q _{min}	CFR	C _{aver}	C _{max}	C _{min}
	1	Gajeung stream	57	0.073	0.172	0.010	17	2.1	7.9	0.7
	2	Gab stream	65	0.424	3.634	0.016	227	1.3	2.9	0.2
	3	Ganggyeong stream	75	2.414	12.985	0.378	34	6.5	14.4	1.7
	4	Geoncheon stream	73	0.113	1.332	0.009	148	0.8	2.9	0.1
	5	Gwanggi stream	71	0.176	1.054	0.007	158	1.7	5.1	0.1
	6	Geum stream-1	57	0.443	2.069	0.075	28	3.1	9.9	0.8
	7	Geum stream-2	67	0.980	5.540	0.115	48	2.9	9.3	0.7
	8	Noseong stream-1	75	0.561	4.324	0.028	154	2.2	6.3	0.3
	9	Noseong stream-2	42	1.276	4.264	0.396	11	1.7	7.8	0.5
	10	Nogdong stream	68	0.116	0.587	0.002	276	1.6	7.3	0.4
	11	Jangseong stream	65	0.665	4.452	0.042	106	1.4	3.0	0.2
	12	Nonsan stream-1	65	4.286	34.160	0.400	85	3.8	9.3	1.1
	13	Nonsan stream-2	65	4.451	35.991	0.498	72	3.9	11.2	1.0
	14	Daheung stream	65	0.152	0.741	0.001	1,001	6.6	21.7	1.6
	15	Masan stream	65	0.683	3.981	0.073	55	5.8	11.5	1.1
	16	Byeongcheon stream-1	71	0.206	1.208	0.020	60	1.1	4.4	0.1
	17	Byeongcheon stream-2	72	0.358	1.145	0.025	46	1.2	3.4	0.3
	18	Byeongcheon stream-3	72	0.741	2.132	0.066	32	1.9	6.4	0.4
Geum river	19	Byeongcheon stream-4	72	0.869	2.702	0.031	88	2.5	11.9	0.8
	20	Byeongcheon stream-5	72	1.222	4.582	0.037	123	3.1	12.2	0.5
	21	Sadong stream	67	0.314	1.317	0.016	82	2.2	6.7	0.6
	22	Sanbang stream	72	0.184	1.313	0.015	88	3.0	10.5	0.7
	23	Seogseong stream-1	67	0.155	1.595	0.001	1,595	1.5	4.7	0.1
	24	Seogseong stream-2	103	1.112	5.210	0.141	37	5.2	16.3	0.9
	25	Seungcheon stream	72	0.322	1.821	0.009	199	3.1	12.6	0.4
	26	Sinam stream	65	0.036	0.158	0.001	130	8.8	19.8	1.4
	27	Eo stream	89	0.164	0.680	0.020	34	1.2	5.0	0.2
	28	Yeosan stream	65	0.754	5.906	0.138	43	1.9	6.3	0.3
	29	Wangpo stream	57	0.053	0.225	0.001	225	2.3	5.6	0.9
	30	Yongdo stream	72	0.111	0.590	0.007	84	1.6	4.2	0.6
	31	Weorha stream	49	0.713	12.075	0.078	155	1.4	4.2	0.5
	32	Eunsan stream	67	0.509	1.494	0.158	9	2.0	8.2	0.5
	33	inghwadar stream	74	0.223	1.231	0.013	95	1.2	3.5	0.3
	34	Jeungsan stream	57	0.124	0.330	0.013	25	10.4	37.6	2.6
	35	Ji stream	74	1.764	9.648	0.285	34	1.4	4.1	0.1
	36	Chupung stream	59	0.221	2.239	0.049	46	1.1	4.8	0.3
	37	Chiseong stream	74	0.204	0.749	0.009	83	2.9	11.4	0.7
	38	Haengjeong stream	73	0.063	1.463	0.003	488	1.0	3.3	0.1
	39	Goggyo stream-1	60	0.174	0.928	0.012	77	1.5	5.6	0.3
Sab gyo lake	40	Goggyo stream-2	60	3.335	6.384	1.715	4	5.9	14.7	2.3
	41	Namweon stream	60	0.908	2.727	0.222	12	5.6	16.2	1.5
	42	Dogo stream	60	0.246	1.368	0.013	105	4.4	13.5	0.9
	43	Sinyang stream	60	1.065	6.121	0.139	44	1.2	2.5	0.1

해당하는 강수가 발생하였음을 알 수 있다. 전반적으로 금강수계와 삼교수계의 연구대상유역은 과거 30년간 평년 강수량보다 약 80%의 적은 강수량으로써 하천의 유량도 과거 30년 평균보다 적을 것으로 추정된다.

수치지형도를 이용하여 유역의 지형을 분석한 결과 Table 1과 같이 나타났다. 가장 큰 유역은 Nonsan stream-3 유역으로 유역면적은 535.8 km²에 달하며, 가장 작은 유역은

Daheung stream 유역으로 1.6 km²이다. 유로연장은 최대 Nonsan stream-3에서 58.1 km, 최소 Daheung stream에서 1.3 km로 나타났고, 유역평균폭은 최대 Goggyo stream-2에서 10.1 km, 최소 Sadong stream에서 1.0 km로 나타났으며, 형상인자는 최대 Daheung stream에서 0.999, 최소 Ji stream에서 0.093으로 나타났다. 유로최원점의 표고는 Nonsan stream에서 427 m로 가장 높은 것으로 나타났고 출구지점

과의 표고차는 423 m이다. 유로최원점의 표고가 가장 낮은 유역은 Dacheung stream 유역에서 6 m로 조사되었고, 출구지점과 표고차는 불과 2 m로 나타났다. 전체 유역의 유로평균경사를 산정한 결과 평균 0.0077%로 나타났고, 가장 완만한 하천은 Geum stream-2에서 0.0014%로 나타났으며, 가장 경사가 급한 하천은 Geoncheon stream에서 0.031%로 나타났다. 연구대상 유역의 지리학적 특성을 분석한 결과, 모든 유역들은 소하천으로 구분되거나 본류인 금강이나 삼교호로 유입되고 있는 지류들로 구성되어 있다. 이러한 유역들은 다양한 크기와 지리학적 형태를 지닌 유역들로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 금강수계와 삼교수계의 모든 지류하천을 모집단으로 선정하는 것은 많은 어려움이 따르지만 이러한 다양한 크기와 지리적 특성을 갖는 유역들의 수질·유량자료의 분석을 통한 통계적 유형평가는 타당할 것으로 판단하였다.

3.2. 유량 및 BOD₅ 측정결과

43개 유역의 24개월간의 수질·유량 모니터링 자료는 24개월 또는 12개월간 지속적으로 자료의 축적이 이루어지지 못하고 1~2개월간의 미측기간이 발생하였다. 또한 연간 8일 간격의 등분포자료를 확보하는 것을 지향하였으나, 홍수기의 모니터링 수행에 한계로 인하여 평수기와 저수기 자료가 상대적으로 많이 축적되었다. 이러한 자료로 실시한 유황분석 결과는 홍수기와 풍수기의 유량이 상대적으로 적게 평가되는 일부 왜곡된 결과를 포함하고 있으므로 실질적인 유량 추정을 위한 유황분석 결과로서의 활용에는 한계가 있다. 하지만 본 연구에서는 유량의 거동에 따른 수질변화 추세를 통한 유형을 분석하는 것이 목적이므로 수질변화 유형에 대해서만 분석을 실시하였다.

측정된 유량 자료는 각 지점별로 최대유량부터 최소유량으로 내림차순 정리하여 순위를 부여하였고, 순위를 초과일수(D_n)로 표현하였다. 각각의 유량측정 결과는 우리나라 하천의 특성을 전형적으로 나타내는 높은 유량변동계수(Coefficient of river flow regime (CFR): Q_{max}/Q_{min})를 보이고 있다. 유량변동계수는 연간 유량의 변화 정도를 나타내는 지수로 하천을 흐르는 최소 유량과 최대 유량의 비율이고 연간 유량변동 특성을 평가할 수 있으며 유량변동계수가 클수록 유황은 불안정하다(Ackers, 1972; Heritage et al., 2001).

측정한 유량자료는 Table 2에 측정횟수, 평균유량, 최대유량, 최소유량을 정리하여 나타냈다. 평균유량이 1CMS가 넘는 유역은 Ganggyeong stream, Noseong stream-1, Nonsan stream-2, Nonsan stream-3, Byeongcheon stream-5, Seogseong stream-2, Ji stream, Goggyo stream-2, Sinyang stream으로 나타났으며 Nonsan stream-3에서 4.451 CMS의 최대 평균 유량을 기록하였고, Sinam stream에서 최소 평균유량을 기록하였다. 각 유역 하천의 유량변동계수는 최소 4에서 최대 1,595까지 상당히 큰 차이를 나타내고 있다. 최고 수질은 Jeungsan stream에서 37.6 mg/L로 가장 높게 측정되었으며, Dacheung stream에서 21.7 mg/L, Sinam stream에서 19.8 mg/L, Namweon stream에서 16.2 mg/L로 나타났다.

최저 수질은 Geoncheon stream, Gwanggi stream, Byeongcheon stream-1, Seogseong stream-1, Ji stream, Haengjeong stream, Sinyang stream에서 0.1 mg/L로 나타났다. 각 유역들의 평균 수질은 최소 Geoncheon stream에서 0.8 mg/L, 최대 Jeungsan stream에서 10.4 mg/L로 나타났고 전체 유역 평균 2.9 mg/L로 측정되었다.

3.3. 유황곡선에 따른 하천수질 회귀분석

유황곡선과 함께 도시한 수질자료를 회귀분석하여 유황변동에 따른 수질변화 추세를 분석하였다. 식 (1)은 초과일수 Day로 최소자승법에 의한 BOD₅ 회귀분석 도출에 활용된 식이며, 여기서 c_n은 회귀식에 따라 추정된 BOD₅ 농도이고 f(c_n)의 형태를 갖는다. c₀는 직선회귀식의 초과일수 Day가 0인 경우 BOD₅ 농도를 나타내는 상수이며 S는 직선회귀식의 기울기로서 수질변화의 정도를 나타내고 D_n은 유황곡선의 초과일수 Day이다. 모니터링 자료를 통계학적인 분석방법에 따라 추정하였으므로 추정식의 검정을 위하여 상관관계수(r), 결정계수(r²), 추정의 표준오차(Standard Error of Estimate: SEE)를 산정하여 Table 3에 나타냈다.

$$f(c_n) = c_0 + S \cdot D_n \quad (1)$$

결정계수는 표본실측으로 추정한 선형회귀식이 관측된 실측농도를 어느 정도 설명해 주고 있는지, 즉 회귀식이 실측농도를 어느 정도 대표하여 그 적합성을 보여주고 있는지를 측정하는 계수로 나타낸 것이며, 0과 1사이의 값을 가진다. 이러한 결정계수는 실측농도와 추정농도 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수를 제공한 것과 같다. r²=1 일 경우 모든 표본 관측치가 추정된 선형회귀선 상에만 있다는 것을 의미하며 따라서 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계를 완전히 설명해 주고 있음을 의미한다. 반면, r²=0 일 경우에는 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계를 전혀 설명해 주지 못함을 의미한다. 유역들의 추정농도와 실측농도 간의 결정계수는 Byeongcheon stream-5에서 0.28으로 가장 크게 나타났고 Gajeung stream에서는 거의 0에 가까운 수치로 가장 작게 나타났으며 전체 유역에서 평균 0.05로 나타났다.

추정의 표준오차는 실측수질에 대하여 회귀식이 추정한 추정농도의 정확성을 나타내 주는 척도로서 표준오차가 적을수록, 그 추정농도는 실제농도를 매우 정확하게 추정할 것이고 표준오차가 크다면 실제농도와 상당한 차이로 추정될 것이다. 이와 같이 선형회귀식에 의한 추정에서 추정의 표준오차는 추정농도와 실제농도 사이의 오차를 얼마나 최소화한 회귀식인지 평가하는 방법이다. 유역들의 실측농도를 표본으로 한 선형회귀식의 추정에 따른 표준오차는 Noseong stream-1에서 0.02로 가장 작게 나타났고 Jeungsan stream에서는 7.81로 가장 크게 나타났으며 전체 유역에서 평균 1.58로 나타났다.

본 연구에서 분석된 유역들의 선형회귀식에 대한 결정계수는 통계학적으로 검정할 때 측정농도와 추정농도간의 관

Table 3. Watershed BOD₅ regression analysis results

Basin	Num.	Watershed	c ₀	S	r ²	SEE
Geum river	1	Gajeung stream	2.1	-0.00004	0.00001	1.20
	2	Gab stream	1.8	-0.00300	0.17870	0.70
	3	Ganggyeong stream	7.3	-0.00420	0.02780	2.68
	4	Geoncheon stream	0.9	-0.00030	0.00310	0.54
	5	Gwanggi stream	1.4	0.00140	0.01720	1.09
	6	Geum stream-1	3.3	-0.00080	0.00240	1.74
	7	Geum stream-2	2.6	0.00140	0.00610	1.87
	8	Noseong stream-1	2.6	-0.00240	0.03750	1.27
	9	Noseong stream-2	2.1	-0.00180	0.02920	1.11
	10	Nogdong stream	1.4	0.00080	0.00660	1.11
	11	Jangseong stream	1.7	-0.00140	0.03130	0.83
	12	Nonsan stream-1	3.5	0.00150	0.00970	1.60
	13	Nonsan stream-2	4.0	-0.00100	0.00380	1.80
	14	Daheung stream	7.0	-0.00200	0.00290	3.99
	15	Masan stream	6.7	-0.00490	0.04180	2.51
	16	Byeongcheon stream-1	0.7	0.00210	0.09470	0.69
	17	Byeongcheon stream-2	0.8	0.00190	0.10550	0.58
	18	Byeongcheon stream-3	1.6	0.00160	0.01900	1.22
	19	Byeongcheon stream-4	1.0	0.00780	0.19290	1.75
	20	Byeongcheon stream-5	0.8	0.01280	0.28720	2.15
	21	Sadong stream	3.5	-0.00700	0.25680	1.28
	22	Sanbang stream	1.3	0.00890	0.24550	1.86
	23	Seogseong stream-1	1.4	0.00080	0.00750	0.98
	24	Seogseong stream-2	4.4	0.00420	0.02890	2.60
	25	Seungcheon stream	1.8	0.00690	0.09340	2.31
	26	Sinam stream	9.0	-0.00080	0.00050	3.86
	27	Eo stream	1.2	-0.00030	0.00270	0.66
	28	Yeosan stream	2.1	-0.00130	0.01190	1.22
	29	Wangpo stream	2.7	-0.00200	0.03680	1.10
	30	Yongdo stream	1.3	0.00140	0.03300	0.82
	31	Weorha stream	1.4	0.00050	0.00470	0.75
	32	Eunsan stream	1.6	0.00230	0.03770	1.25
	33	inghwadar stream	1.0	0.00080	0.02070	0.61
	34	Jeungsan stream	6.4	0.02150	0.08010	7.81
	35	Ji stream	1.5	-0.00040	0.00300	0.74
	36	Chupung stream	1.0	0.00020	0.00100	0.72
	37	Chiseong stream	2.3	0.00280	0.01880	2.20
	38	Haengjeong stream	1.1	-0.00060	0.01080	0.62
Sab gyo lake	39	Goggyo stream-1	2.2	-0.00330	0.11340	1.00
	40	Goggyo stream-2	4.8	0.00570	0.06240	2.36
	41	Namweon stream	4.8	0.00450	0.02080	3.29
	42	Dogo stream	4.1	0.00160	0.00380	2.80
	43	Sinyang stream	0.9	0.00160	0.11450	0.47

SEE : Standard error of estimate

계를 설명하기에 상당히 부족한 것으로 나타났으며, 추정에 대한 표준오차 역시 유역에 따라 오차범위가 상당히 큰 것으로 분석되었다. 때문에 측정수질을 회귀분석한 결과는 수질의 추정에 활용하기엔 적합하지 못한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 회귀분석 결과는 다양하게 분포되어 있는 자료를 간략화하는데 활용이 가능하다. 43개의 유역중에서 한예로 Fig. 2에 나타낸 Sinyang stream의 회귀분석 결과는

초과일수가 증가함에도 불구하고 수질은 2 mg/L 미만에서 유지되고 있는 것으로 나타났다. 즉 유량이 최대 44배 변동하는 하천임에도 수질은 일정한 수준을 유지하고 있는 유역적 특성을 보여주고 있다. 이 분석방법의 장점은 각각의 모든 유역자료들에 대한 신뢰성은 다르지만 동일하고 간략한 방법으로 모든 유역을 평가할 수 있다는 것이다. 다시 말하면 선형회귀식은 수질을 추정하기에 적합한 모델

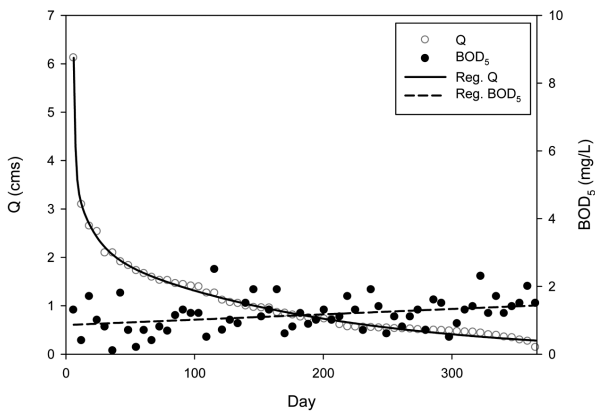


Fig. 2. Sinyang stream Flow duration curve and water quality variation analysis results.

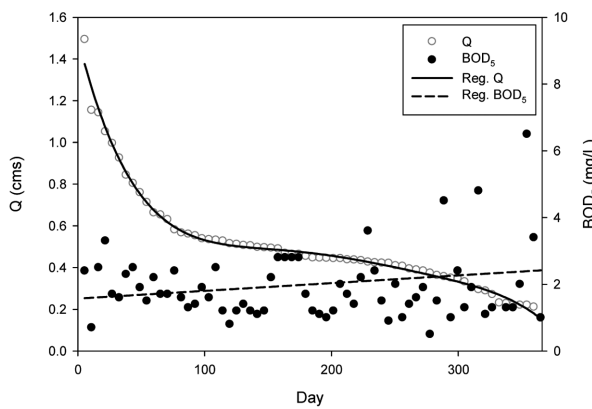
은 아니지만 유역의 수질변화 추세에 대한 특성을 개략화 및 정량화 가능한 지표로 활용될 수 있다(Berthouex and Brown, 2002).

3.4. 하천수질 변동 유형화 및 통계분석

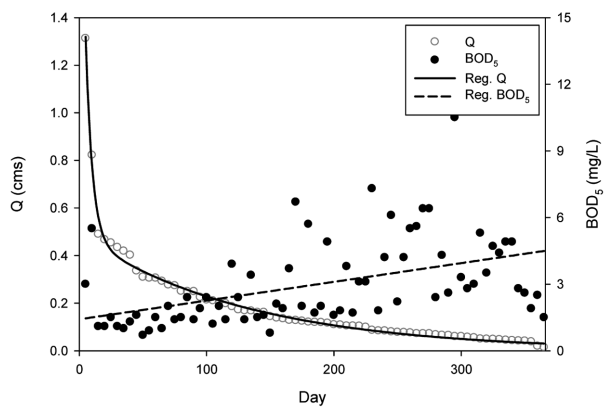
유량의 변동에 따른 하천수질의 변화 유형을 두가지로 구분하였다. I유형은 상대적으로 저수기에 수질이 악화되는 추세를 나타내는 유역이고 II유형은 풍수기에 수질이 악화되는 유역이다. I유형의 회귀분석한 결과는 초과일수가 Q₃₆₅

로 갈수록 수질이 증가하기 때문에 추세선의 기울기가 +로 나타나고 II유형은 초과일수가 Q₃₆₅로 갈수록 수질이 감소하기 때문에 -로 나타난다. 유역적 특성에 따라 강우유출수의 유입으로 하천유량이 급격히 증가하는 경우에는 다량의 비점오염물질 유입으로 인하여 수질이 악화될 우려가 있다. 그러나 유입되는 오염물질의 증가율보다 하천유량의 증가율이 월등히 큰 경우 I유형의 하천과 같이 유량에 반비례하는 수질이 낮아지는 특성을 나타낸다. 유형에 따른 수질 변화유형을 구분함에 있어 기울기 구간을 단순히 +나 -로 구분하는 방법 이외에 절대값에 따라서 혹은 기울기가 상대적으로 0에 근사한 경우를 구분하여 유형화하는 것도 가능하다. 실제로 기울기가 0에 가까운 유역은 회귀분석결과 산포도가 높은 경우에 명확히 저수기 혹은 풍수기에 수질이 악화되는 유형으로 정의하는 것은 유형구분의 신뢰성을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다. 하지만 선행연구자료가 전무한 상황에서 구간을 결정하기 위한 근거가 부족하며, 가장 단순한 연구결과를 도출하고자 하는 목적으로 본 연구에서는 두 가지 유형만으로 단순 구분하였다.

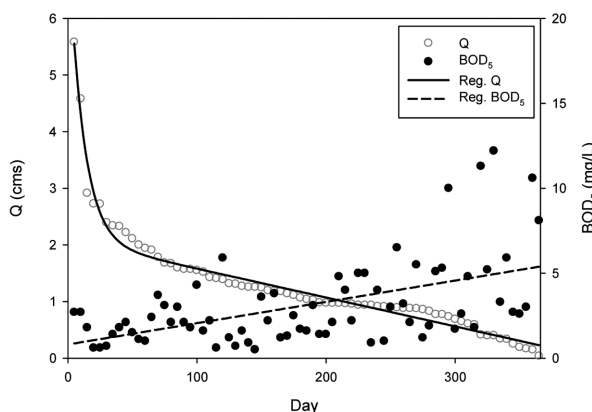
43개 유역 중 점오염원의 영향으로 풍수기 보다 상대적으로 저수기 수질이 악화되는 +기울기의 I유형 유역은 24개, 강우유출수와 결합된 비점오염원으로 인하여 상대적으로 풍수기에 수질이 상승하는 -기울기의 II유형 유역은 19개로 조사되었다. I유형과 II유형으로 조사된 하천의 수질·



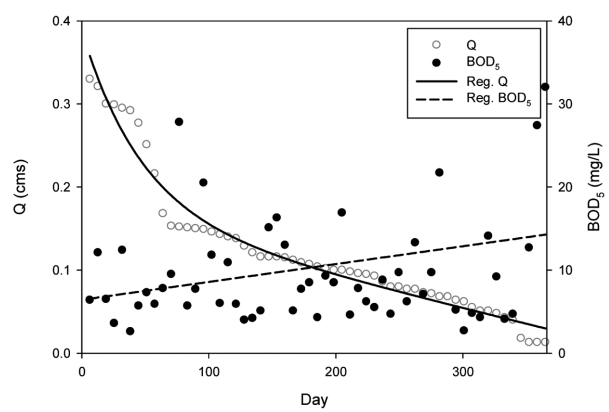
(a) Eunsan stream



(b) Sanbang stream



(c) Byeongcheon stream-5



(d) Jeungsan stream

Fig. 3. Flow duration curve and water quality variation analysis results in Type I group.

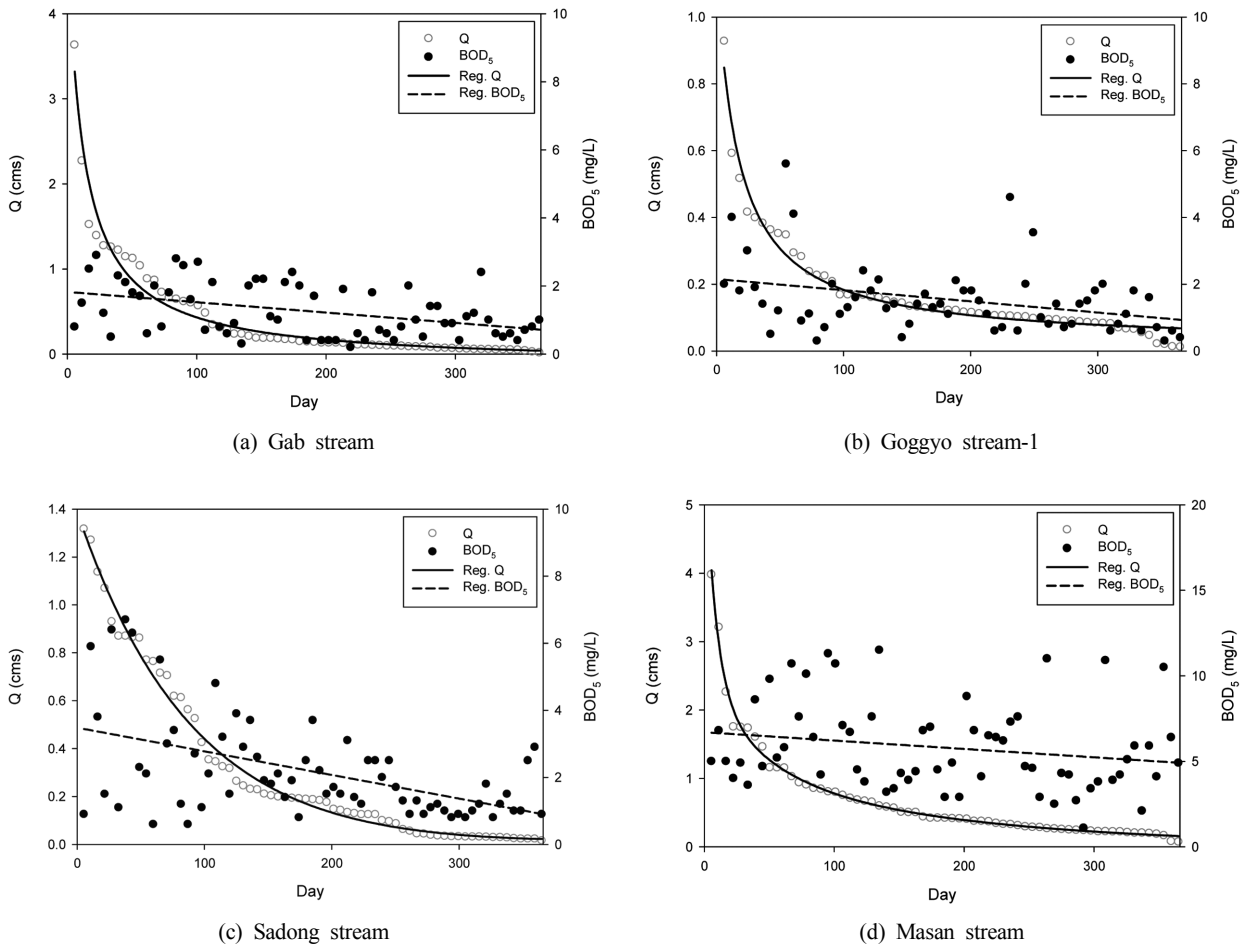


Fig. 4. Flow duration curve and water quality variation analysis results in Type II group.

유량 그래프를 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 조사된 I유형 24개와 II유형 19개 중에서 평균 수질이 낮은 하천부터 높은 하천까지 4개씩을 대표로 나타냈다.

Fig. 3에 나타난 Eunsan stream, Sanbang stream, Byeongcheon stream-5, Jeungsan stream과 같은 저수기에 수질이 악화되는 I유형의 하천들은 비교적 하천의 유량이 적고 강우유출수가 없는 저수기에 수질이 악화된다. 이는 하수 또는 폐수처리시설의 방류수나 기타 점오염원에 의해 유출되는 오염물질로 인하여 수질이 악화되고 있음을 유추할 수 있다. Fig. 4에는 반대로 풍수기에 수질이 악화되는 II유형의 Gab stream, Gogyo stream-1, Sadong stream, Masan stream을 도시하였다. II유형의 하천들은 저수기보다 상대적으로 하천의 유량이 많고 강우유출수가 빈번하게 발생하는 풍수기에 수질이 악화되는 특성을 보여주고 있다. 이러한 하천들은 풍수기에 유량의 증가율보다 유입되는 오염물질의 증가율이 초과하기 때문에 수질이 악화되는 특성을 보여준다. 유역에서 인공유량이 수십배로 증가하는 현상은 불가능하기 때문에 풍수기에 하천의 유량이 증가하는 주요 원인은 강수에 의존한다.

이러한 강수에 의한 유역의 강우유출은 지표면 유출(Surface runoff), 지표하 유출 또는 중간유출(Subsurface runoff or interflow), 지하수 유출(Groundwater runoff) 3가

지로 구분된다(윤용남, 2007).

여기에서 지표면 유출은 지표 및 지상의 각종 수로를 통해 흘러 유역의 출구에 도달하는 유출로서 하천이나 수로에 도달하기 전에는 지표면 위로 흐르는 표면류(Overland flow) 형태로 유출된다. 지표면 유출은 강우의 지표 낙하시 발생하는 충격과 유출과정에 발생하는 소류력의 영향으로 지표에 축적된 부유성 오염물질과 용존성 오염물질을 함유한 채 여과 없이 유출된다. 지표하 유출은 지표토양 속으로 침투하여 지표면 가까운 상부토층을 통해 하천을 향해 횡적으로 흐르는 강우유출의 한 부분으로서 지하수위보다는 높은 층을 흐르는 우수이다. 지표하 유출은 심토층을 거치지 않고 표토층을 통해 유출되므로 지표에 축적되어 있는 오염물질을 포함할 수 있다. 지표하 유출의 입자성 오염물질은 유출과정 중에 유출경로에 따라 표토층에서 여과될 수 있으나 용존물질, 콜로이드물질 등의 작은 입자의 오염물질을 다량 포함하기도 한다. 지하수 유출은 침투된 강우가 비교적 장기간에 걸쳐 침투하여 하천으로 유입되고 지하수 특성상 하천수질보다 상당히 낮은 수질의 형태로 유입된다. 때문에 정량적 판단은 어려우나 풍수기 하천수질을 개선시키는 유출량으로 판단할 수 있다. 유역에서 유출되는 점오염물질이 비교적 일정하다고 가정할 때, 풍수기 하천의 수질을 악화시키는 주요 오염물질은 지표면 강우유

출과 함께 유입된다고 볼 수 있고 Fig. 4에 나타난 II유형의 유역은 지표면 강우유출에 의한 비점오염원 관리가 강화되어야 할 것으로 판단된다.

$$f(c_n)' = S \cdot D_n \quad (2)$$

Fig. 5에는 식 (1)에서 y축 값의 절편인 c₀를 제외한 S와 D_n값만을 고려한 식 (2)를 적용하여 43개 유역의 유량변동에 따른 수질변화의 변위를 산정하여 나타냈다. 전체 하천의 수질변화 기울기를 비교할 수 있도록 도시하였다. 최대 7.8 mg/L에서 최소 -2.6 mg/L의 수질변화 범위를 나타냈으며, 평균 0.5 mg/L증가하는 것으로 나타났다. 이는 +기울기의 I유형 유역들이 수질변화 증가 폭도 크고 더 많은 유역에서 나타나고 있음을 보여준다. 43개 유역의 수질변화 기울기를 통계 분석한 결과, 유역 수질 변화결과를 통하여 산정된 변수 평균(μ)은 0.00135, 중앙값은 0.0008, 표준편차(σ)는 0.00477로 나타났다. 추정된 변수를 아래 나타낸 식 (2) 정규분포의 확률밀도함수에 적용한 결과 Fig. 5와 같은 확률분포로 나타났다.

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(S-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

43개 유역의 수질변화 기울기는 평균을 기준으로 -0.0006~0.0033 범위가 차지하는 확률이 31.7%, -0.0036~0.0063 범위의 확률은 70.1%로 나타났다. 저수기에 수질이 악화되는 I유형과 같은 +기울기 형태를 보이는 하천이 차지하는 확률은 61.1%이고, 풍수기에 수질이 악화되는 II유형과 같은 -기울기 확률은 38.9%로 분석되었다. 통계분석 결과와 같이 조사된 유역들 중 61.1%가 풍수기보다 저수기에 수질이

악화되는 수질변화 유형을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 하천들은 저수기에 하천수질을 악화 시키는 오염원들에 대한 관리가 강화될 필요가 있다. 여기서 유의할 점은 수질변화 유형의 기울기는 저수기와 풍수기를 상대적으로 표현하고 있다는 것이다. 저수기에 수질이 악화되는 I유형을 나타내고 있음에도 풍수기에 3 mg/L 이상의 수질이 빈번하게 관측된 Fig. 3의 Jeungsan stream과 같은 하천은 풍수기에 유입되는 오염물질 관리 또한 강화될 필요가 있다. 또한 38.9%에 해당하는 풍수기에 수질이 악화되는 유형의 하천들 중에서 3 mg/L를 초과하는 하천들은 수질을 악화시키는 요인을 선행적으로 파악한 후 관리 계획을 보완할 필요가 있다. 풍수기 비점오염물질로서 강우시 강우유출수와 결합하여 지표면 유출 형태로 유입되는지, 강우유출과 무관한 형태로 유입되는지 또는 점오염원에서 유출된 것인지에 대한 명확한 분석이 이루어진 후에 원인에 따른 조치계획을 세워야 할 것이다.

4. 결론

4대강 관리의 기초자료로 사용하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 금강수계와 삼교수계에 위치하고 있는 34개 지류하천에서 43개 유역의 수질과 유량을 모니터링 하였고, 유량측정 결과로 유황분석을 수행하였으며, 유량변동에 따른 BOD₅ 수질변화 유형을 통계분석 하였다. 조사된 하천들은 유량변동에 따라 2가지 유형의 수질 변화 패턴으로 구분할 수 있었다. I유형은 풍수기보다 저수기에 수질이 악화되는 수질변화 유형이며, II유형은 풍수기에 상대적으로 수질이 악화되는 수질변화 유형이다. 수질변화 기울기가 +로 나타나는 I유형의 하천은 24개, -인 II유형은 19개로 조사되었고, 조사된 하천들의 수질변화 평균 기울기는 0.00135

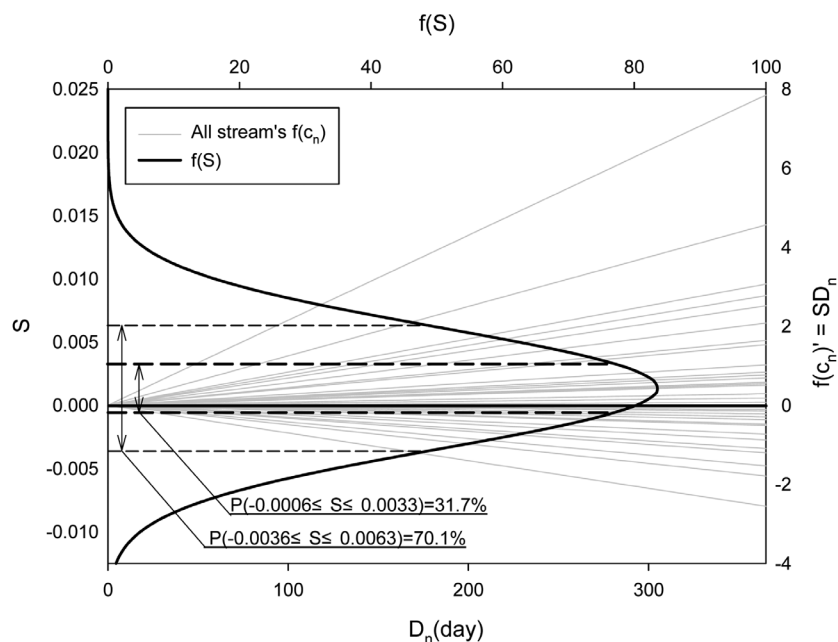


Fig. 5. Water quality variation slopes and probability distribution of slope.

에 0.00477의 표준편차로 나타났다. 확률분포를 분석한 결과 I유형의 하천은 61.1%의 확률로 나타났고, II유형의 하천은 38.9%로 나타났다. 저수기 주요 오염원이 점오염원임을 감안하면 점오염원에 대한 관리가 강화될 필요성이 있는 것으로 나타났다. 또한 풍수기에 하천수질이 악화되는 II유형의 하천들은 수질을 악화시키는 오염물질이 강우유출수와 결합된 비점오염물질인지, 강우유출과 무관한 비점오염물질인지, 점오염원에서 유출된 오염물질인지에 대한 선행 평가 후에 유역과 지류의 조건에 적합한 관리계획을 보완할 필요가 있다.

참고문헌

- 김경아, 김예진, 송미정, 지기원, 유평중, 김창원(2007). 다변량 통계분석을 이용한 낙동강 상수원수의 수질변화 특성조사. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 814-821.
- 김영일, 김홍수, 정우혁, 이상진(2009). 수질오염총량관리제 시행에 있어 하천 유량·수질 모니터링의 중요성. *공동추계 학술발표회 논문요약집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 185-186.
- 박해식, 박청길, 송미경, 백경훈, 신성교(2001). 통계분석법을 이용한 낙동강 수질특성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(6), pp. 693-701.
- 윤용남(2007). *수문학*, 청문각.
- 이혜원, 박석순(2008). 비모수 통계기법을 이용한 만경강 유역의 장기간 수질 경향 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 480-487.
- 임봉수, 조병욱, 김영일, 김도영(2010). 유량-수질관계 비교를 통한 하천 수질개선 우선순위 선정기법 적용. *대한환경공학회지*, **32**(8), pp. 802-808.
- 정우혁, 이상진, 김건하, 김영일, 김홍수(2010). 하천 수질·유량관계 분석을 통한 비점오염원관리 유역 선정방법 연구. *공동 추계 학술발표회 논문요약집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 61-62.
- 정우혁, 이상진, 김건하, 정상만(2011). 유황분석과 수질변화 평가를 통한 비점오염원 관리대상지역 선정방법 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **27**(2), pp. 228-234.
- 조병욱, 정우혁, 김영일, 김홍수, 이상진(2010). 지류하천의 수질·유량 모니터링을 통한 수질변화 유형분석. *공동 추계 학술발표회 논문요약집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 145-146.
- Ackers, P. (1972). River regime: research and application. *J. Instit. Water Eng.*, **26**, pp. 257-281.
- Berthouex, P. M. and Brown, L. C. (2002). *Statistics for Environmental Engineers*. Lewis Publishers, The United States of America.
- Haan, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State University Press, The United States of America.
- Heritage, G. L., Broadhurst, L. J., and Birkhead, A. L. (2001). The influence of contemporary flow regime on the geomorphology of the Sabie River, South Africa. *Geomorphology*, **33**, pp. 197-211.