

한강수계 오염부하량의 추정에 관한 연구

이숙정*, 전경수**

1. 서 론

도시화와 산업화에 따른 수질오염이 심화로 하천 수질관리의 필요성이 점점 증가되고 있다. 하천수계에 대한 수질관리를 위해서는 수계로 유입되는 오염 부하량에 대한 평가가 선행되어야 한다. 이를 위해서 대상 수계의 하천유량자료와 수질자료의 지속적 관측이 필요하지만 하천유량의 경우 수계 본류로 유입되는 하천유량을 지속적으로 직접 측정하는 것은 많은 인력과 비용이 소요되기 때문에 사실상 매우 어려우며, 따라서 수위와 유량간의 관계식을 이용하여 측정된 수위로부터 유량으로 환산하는 간접적인 유량측정법이 널리 사용된다. 그러나 이러한 수위-유량 관계식을 사용한 유량 측정은 주로 홍수 유출량을 대상으로 한 것들이며, 그나마 수위-유량 관계식이 가용한 수위 관측소는 많지 않다. 또한 대부분의 중소하천의 경우에는 평수 및 갈수시의 수심이 매우 작아 유량의 측정이 어려워 평수 및 갈수시에는 수위-유량 관계식의 도출 및 이에 따른 유량측정이 어렵다는 현실적인 문제도 있다. 이와 같이 유역 유출량에 대한 관측자료가 극히 제한적인 상태에서, 수계에 대한 전체적인 물수지를 파악하고 유역의 장기 유출량을 추정하기 위하여 댐 유입량 및 방류량 자료가 유용하게 사용될 수 있다.

수질자료의 경우 환경부에서 주요하천에 대하여 월 1회의 지속적인 관측이 시행되고 있지만 호우기간에는 이 측정치를 월 평균치로 보기에 무리가 있다. 그러나 현재 지속적 수질측정자료로서 가용한 것은 환경부의 관측자료 뿐이므로 대부분의 연구가 이를 사용하여 진행되고 있다.

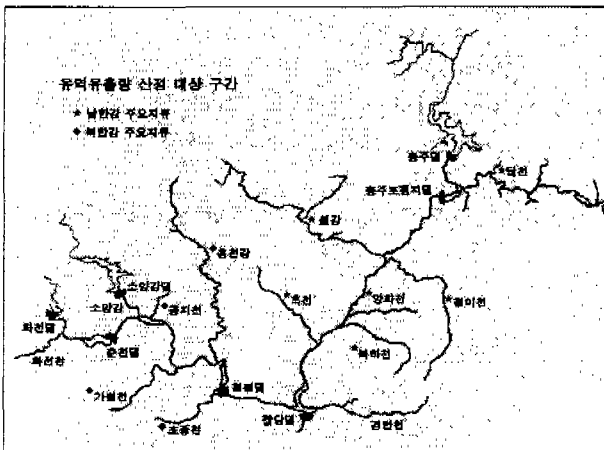


그림 1. 유역유출량 산정 대상유역

본 연구에서는 수도권의 시민들의 생활과 밀접하게 관련이 되어있는 한강수계내의 북한강의 화천댐과 남한강의 충주댐에서 팔당댐까지의 구간(그림 1 참조)를 대상으로 오염실태를 파악하여 오염원의 체계적 관리의 기본이 되는 오염원 자료의 분석을 수행하였다. 이를 위해서 현재 가용한 자료인 댐 유출량과 방류량 자료와 환경부의 환경연감 등의 자료를 사용하여 물수지분석과 물질수지분석을 수행하여 대상유역의 오염 부하량을 추정하였다.

* 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

** 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

2. 오염부하량 추정방법

2.1 물수지 분석

수계에 대한 전체적인 물수지를 파악하고 유역의 장기 유출량을 추정하기 위하여 수력발전소 운영자료집의 댐 유입량 및 방류량 자료로부터 하루 댐 유입량과 상류 댐 방류량과의 차를 구

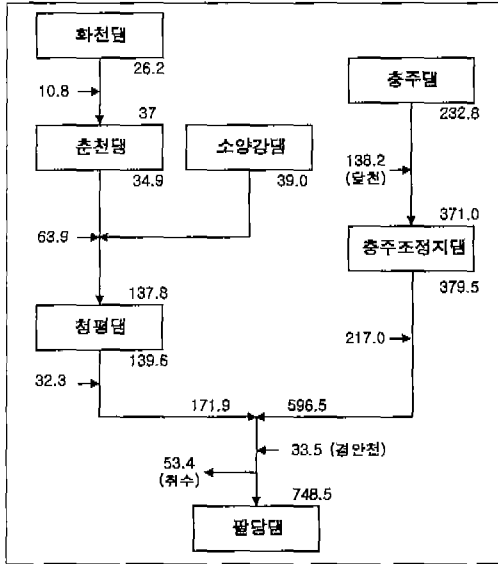


그림 2. 댐 유입량 및 방류량 자료로부터 산정된 댐간 지류유입량의 합의 예 (1997년 8월)

표 1. 대상유역내의 각 지천의 점유유역면적

지천명	점유유역면적(km ²)		지천명	점유유역면적(km ²)
송암천	119		담천	1,592
계성천	74		신성천	41
지촌천	207		대전천	63
한계천	74		원곡천	82
소양강	2,733		구룡천	98
공지천	128		한포천	160
강촌천	84		오량천	60
서상천	83		반천천	34
가평천	592	남	섬강	1,631
홍천강	1,484		칠미천	548
니원천	101	한	연양천	67
조송천	274		곡수천	104
신기천	10	강	한천	22
사기막천	108		양화천	205
죽현천	68		석하천	269
문호천	118		감사천	52
			혹천	292
			덕평천	25
			사남천	48
			삼덕천	22
			사덕천	59

Aug-97 북한강				Aug-97 남한강			
일	유입량	유출량	지류유입량	일	유입량	유출량	지류유입량
1	232.8	38	76	1	26.20	38	76
2		39	77	2		39	77
3		41	78	3		41	78
4		42	79	4		42	79
5		43	80	5		43	80
6		44	81	6		44	81
7		45	82	7		45	82
8	138.2	46	83	8		46	83
9		47	84	9		47	84
10	중주조정지댐 8.5	48	85	10		48	85
11		49	86	11		49	86
12		50	87	12		50	87
13	설상천 2.5	51	88	13		51	88
14		52	89	14		52	89
15		53	90	15		53	90
16		54	91	16		54	91
17	대전천 3.6	55	92	17		55	92
18		56	93	18		56	93
19	한포천 4.6	57	94	19		57	94
20		58	95	20		58	95
21	구룡천 5.6	59	96	21		59	96
22		60	97	22		60	97
23	회포천 8.9	61	98	23		61	98
24		62	99	24		62	99
25	연양천 3.4	63	100	25		63	100
26		64	101	26		64	101
27		65	102	27		65	102
28		66	103	28		66	103
29		67	104	29		67	104
30		68		30		68	
31		69		31		69	
32		70		32		70	
33		71		33		71	
34		72		34		72	
35		73		35		73	
36		74		36		74	
37		75		37		75	
			598.5				296.4

그림 3. 한강수계 각 댐간 지류유입량을 지류의 유역면적으로 분배한 지류유입량 추정결과 (1997년 8월)

하여 지천유입량, 즉 유역 유출량을 산정하였다. 대상유역에 대하여 1992년부터 1997년까지 월별 물수지 분석을 수행하였다. 먼저 대상 유역의 주요댐을 기준으로 댐 유입량과 방류량의 차로부터 각 댐간 지류유입량을 계산하였는데 춘천댐 유입량과 화천댐 방류량으로부터 화천댐과 춘천댐간의 지천 유입유량을, 춘천댐 및 소양강댐 방류량과 청평댐 유입량으로부터 춘천댐 소양강댐과 청평댐간 지천유입량을 산정하고 마찬가지로 방법으로 충주댐과 충주조정지댐간의 지천인 달천의 유입량을 산정했다. 다음으로 청평댐과 충주조정지댐의 방류량과 팔당댐의 유입량에서 취수량을 뺀 값으로부터 청평댐과 팔당댐간의 지천 유입유량 및 경안천 유입유량의 합을 산정하였다. 그림 2에 각 댐을 기준으로 위 부분에 유입량을 아래부분에 방류량을 나타내고 각 댐간 지천 유입유량의 산정과정을 보였다. 이 결과로부터 구해진 각 댐간 지천유입유량의 합을 각 댐간 지천의 점유 유역 면적(표 1 참조)에 대하여 배분하여 각각 지천의 배수유역의 유역 유출량을 산정하였고 이 과정은 북한강 유역과 남한강 유역으로 나누어 수행하였다. 그림 3에 예로서 1997년 8월의 남한강과 북한강의 물수지분석 결과를 나타내었다.

2.2 물질수지분석

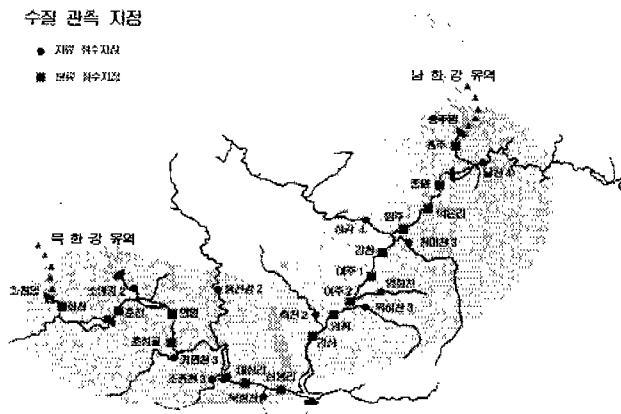


그림 4. 한강수계내의 본류와 지류의 수질 관측지

유역의 유출 오염부하량은 추정된 각 지천의 유역 유출량에 지천 말단에서 측정된 해당 수질 항목에 대한 평균농도를 곱하여 산정할 수 있다. 그림 4는 남한강과 북한강의 수질이 관측되고 있는 지천들의 말단 관측지점 즉, 본류에서 가장 가까운 관측지점과 본류상의 수질관측지점을 나타낸 위치도 이다. 팔당댐 상류의 지천들 중에서 유입수질(농도)의 관측치가 가용한 곳은 남한강 수계의 경우 달천, 섬강, 청미천, 양화천, 복하천, 흑천의 6개로서 이들 지천의 점유 유역면적(4,527 km²)은 충주댐 하류 지천 전체 점유 유역면적(5,467 km²)의 83%에

당한다. 유입수질이 관측되지 않는 나머지 지천들에 대해서는 이 관측치들의 평균치를 유입수질로서 사용하였다. 북한강수계의 경우 소양강, 공지천, 가평천, 홍천강, 조종천, 목현천의 6개 지천의 수질 관측치를 사용하였으며, 이들 지천의 수질평균치를 미관측 지천들의 유입수질로서 사용하였다. 북한강 수계의 경우 수질이 측정된 지천들의 점유 유역면적(5,279 km²)은 화천댐 하류 전체 면적(6,083 km²)의 87%를 차지 한다. 수질 관측 지점이 한 개 이상인 지천에 대해서는 본류에 가장 가까이 위치한 지점에서의 관측 자료를 사용하였다. 먼저 지천 유입부하량 자료를 사용하여 본류 내 각 지점에서의 단위시간당 총질소 흐름률(flux)을 구하고 이를 본류상의 수질관측 지점에서 관측된 수질 자료를 이용하여 계산된 흐름률과 비교할 수 있도록 함께 구하였다. 비교대상으로 사용한 관측치들은 해당 지점에서의 총질소 농도 관측치에 물수지분석으로부터 구한 유량값을 곱하여 구한 것으로 남한강 수계에 대해서는 중원, 덕은리, 원주, 강천, 여주1, 여주2, 및 양평에 대한 관측자료를, 북한강 수계에 대해서는 춘천, 의암, 춘성교, 대성리 및 삼봉리 지점에서의 관측 자료를 각각 사용하여 이들 지점에서의 총질소 흐름률을 각각 계산하였다. 그림 5에 남한강과 북한강의 오염부하량 계산에 사용된 지류의 입력위치, 물질수지 분석의 결과와 비교대상으로 선정한 본류의 관측지점의 위치와 입력된 자료가 관측치인지 미관측지점에 사용한 평균치인지를 나타내었다.

북한강 입력지점				북한강 출력지점			
지류명	지류명	분류명	관측지점	지류명	분류명	관측지점	관측지점
1	화천강	A	38	76			
2			39	77			
3			40	78			
4			41	79	소양강	A	북한강
5			42	80			
6			43	81			
7			44	82	물지천	A	
8			45	83			
9			46	84			
10			47	85			
11			48	86			
12			49	87			
13			50	88			
14			51	89			
15			52	90			
16			53	91			
17			54	92	강촌천	B	
18			55	93			
19			56	94			
20			57	95			
21			58	96			
22			59	97			
23			60	98			
24			61	99	서상천	B	
25			62	100			
26			63	101			
27			64	102	가림천	A	
28			65	103			
29			66	104			
30			67	105			
31			68	106			
32			69	107			
33			70	108			
34			71	109			
35			72	110			
36			73	111			
37			74	112			

그림 5. 남한강과 북한강의 지류 및 분류의 오염부하량자료의 입력위치와 종류

3. 오염부하량 추정결과 및 분석

지천관측농도를 사용한 물질수지분석을 수행하고 분류내의 관측지점의 관측농도에 그 지점의 유역유출량을 곱한 오염부하량을 구하여 이중 대상기간 동안의 가용자료로서 팔당댐에 가장 근접한 남한강의 양평과 북한강의 대성리의 결과를 그림 6과 7에 나타내었다.

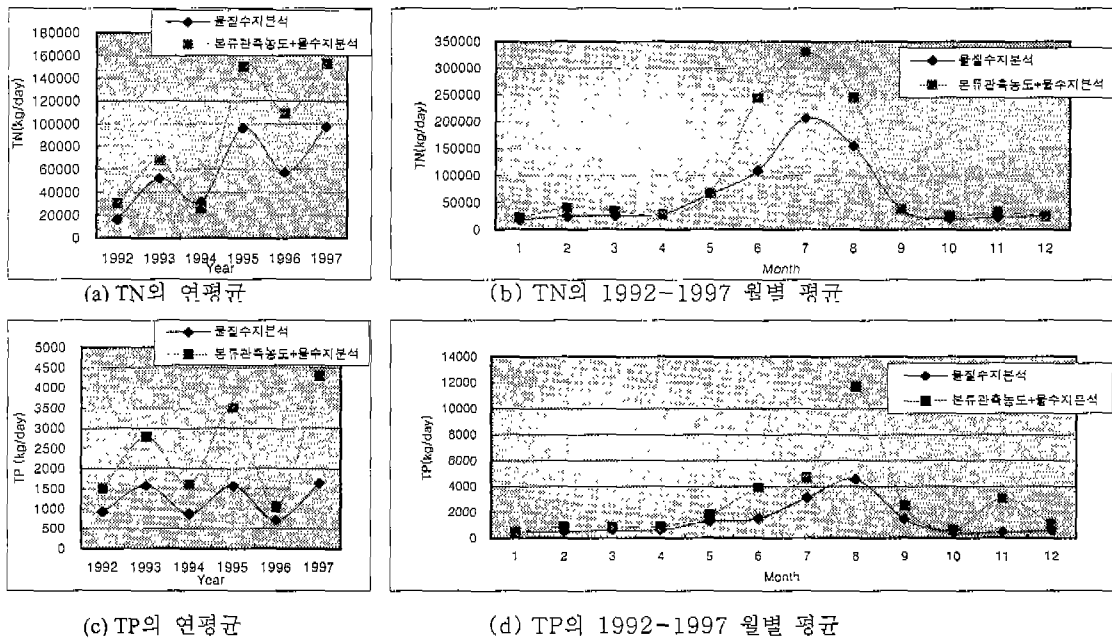
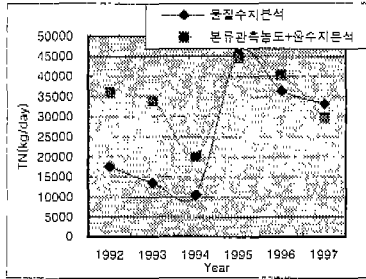
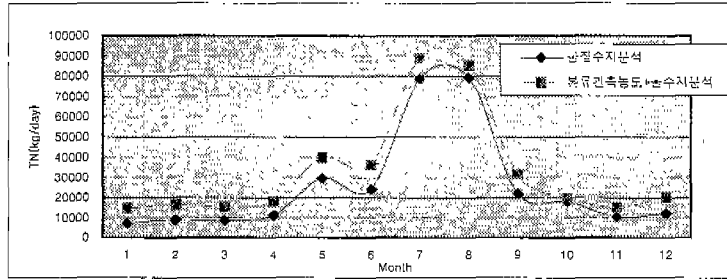


그림 6. 물질수지분석 결과 추정된 오염부하량과 분류관측농도를 사용하여 추정된 오염부하량의 비교(양평)

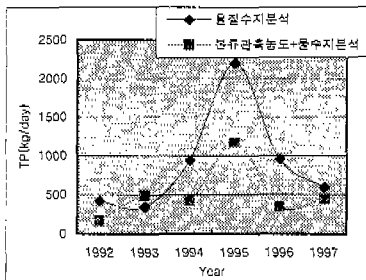
그림 6과 7의 (a)는 TN을 대상으로 1992-1997년동안 양평의 월별 오염부하량을 연평균한 결과이고 (b)는 대상기간동안의 해당 월의 수치를 평균한 것이다. 같은방법으로 TP에 대해서 그림 6과 7에 (c)과 (d)에 나타내었다. 그림 6(a)과 (c) 결과로부터 대체로 질소와 인의 증감추세가 비슷한 것을 알수 있고 그림 6(b)과 (d)를 보면 우기인 7~9월의 오염부하량 증가가 두드러지는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)와 (d)도 그림 6의 경우와 같이 우기에 오염부하량이 높은 경향을 보이지만 그림 7의 (a)는 (c)과 비교하여 지천유입 부하량을 사용한 경우는 비슷한 추이를 보이나 본류 관측농도를 적용한 경우는 매우 다른 경향이 나타난다.



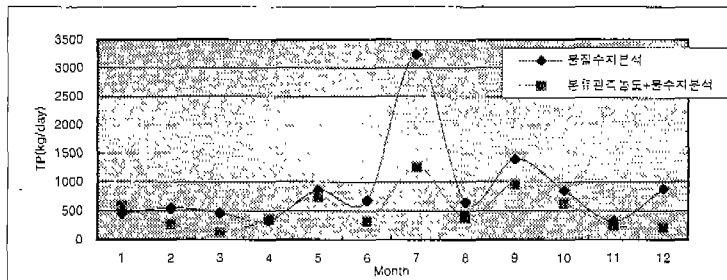
(a) TN의 연평균



(b) TN의 1992-1997 월별 평균



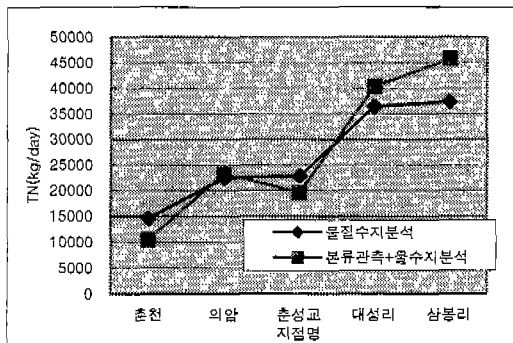
(c) TP의 연평균



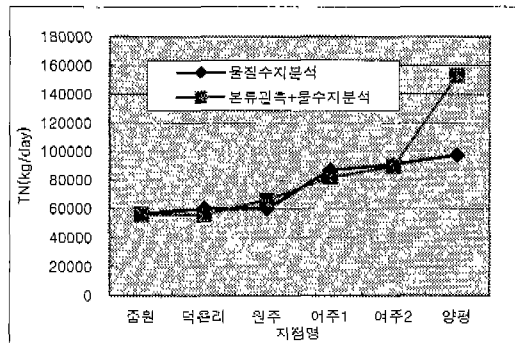
(d) TP의 1992-1997 월별 평균

그림 7. 물질수지분석 결과 추정된 오염부하량과 본류관측농도를 사용하여 추정된 오염부하량의 비교(대성리)

그림 6과 7로부터 대체로 남한강의 오염부하량이 북한강보다 더 크다고 추정할 수 있으나 정확한 추이를 보기위해 그림 8에 1997년의 TN을 대상으로 남한강과 북한강의 월별 물수지분석으로 계산된 오염부하량 평균과 월별 본류관측농도와 물수지분석을 사용한 경우의 평균을 합산한 결과를 상류에서 하류방향으로 나타내었다. 이 결과 남한강의 오염부하량이 북한강보다 더 큰 것을 알 수 있고 상류에서 하류로 갈수록 오염부하량의 양이 늘어나는 것을 볼 수 있다.



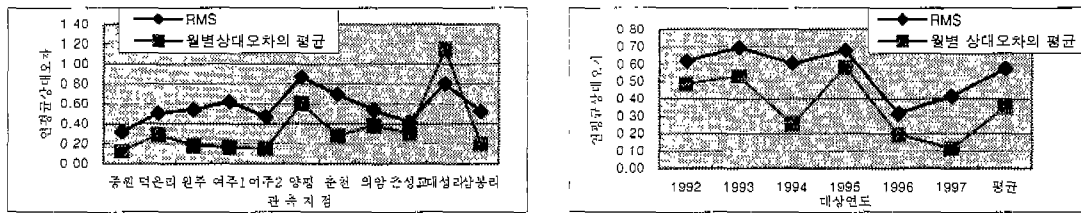
(a) 1997년 북한강 TN 부하량의 지점별 평균



(b) 1997년 남한강 TN 부하량의 지점별 평균

그림 8. 1997년 TN부하량의 지점별 평균

그림 6와 7의 몇몇 경우에서와 같이 지천유입농도를 사용한 물질수지분석결과가 본류관측농도에 물수지분석을 곱한 수치보다 작게 나타나는 것은 본류의 오염부하량이 지천유입농도외에 다른 오염부하량(비점오염부하량)이 있음을 고려할 때 자료의 신뢰성에 대한 문제와 물질수지분석의 정확도에 대한 문제가 제시된다. 이와 같은 문제를 해결하고 보다 정확한 오염부하량의 추정을 위해서 향후 자료의 통계적 분석을 시행하여 자료의 추이를 검토하고 통계모형을 구성하여 자료의 모의발생을 통한 보다 신뢰도 높은 자료를 확보하고 이를 바탕으로 물의 흐름, 오염원의 확산 및 여러 수질성분간의 상호반응 등이 적용되는 수학적 모형에 의한 접근방법을 사용한 오염부하량의 추정이 수행되어야 할 것이다. 자료의 통계분석의 일단계로서 본류관측지점의 관측농도에 그 지점의 유역유출량을 곱한 오염부하량(O)과 같은 지점의 물질수지분석 결과(T)와의 비교분석을 위하여 각 지점의 상대적 차((T-O)/O)를 월단위로 구하였다. 이때 계산결과 중 하나인 오염부하량 본류수치(O)를 참 값으로 가정하여 상대적 차를 상대오차로 정의하고 위와 같은 분석을 TN과 TP를 대상으로 1992-1997년까지 지점별로 실시하였다. 월별 TN과 TP의 상대오차를 구하고 이 값으로부터 월별 상대오차의 제곱평균제곱근(RMS: Root Mean Square)을 구한 것과 월별 물질수지분석결과와 월별 평균과 본류관측농도에 물수지분석결과를 곱한 오염부하량을 각각 연평균한 수치의 상대오차를 구하였다. 이 두가지 연평균 상대오차를 대상기간에 대하여 지점별로 평균하여 그림 9(a)에 비교하여 나타내고 그림 9(a)에 대상 연도의 모든 지점의 연평균상대오차를 평균하여 연도별로 비교한 것을 나타내었다. 그림 9로부터 월별 상대오차의 RMS보다는 월별 상대오차를 평균하여 구한 상대오차의 경우가 오차범위가 더 작음을 알 수 있다. 이는 월별 상대오차를 연평균함으로써 월별 상대오차의 편차가 줄어 들었기 때문이다.



(a) 지점별(1992-1997)

(b) 연도별

그림 9. 연평균 상대오차의 비교

4. 결론

한강수계의 남한강과 북한강의 화천댐, 충주댐이하 팔당댐까지를 대상으로 1992-1997년까지의 기간에 대하여 총질소와 총인의 오염부하량의 추정을 수행하였다. 유역유출량의 산정에는 댐 유입량 및 방유량자료와 하천의 점유유역면적을 사용한 물질수지분석을 수행하였고 이를 바탕으로 유입지천농도를 사용한 물질수지분석을 수행하고 이 결과와의 비교분석을 위하여 물질수지분석 결과에 본류 관측농도를 곱하여 본류 관측지점의 오염부하량을 산정하여 이를 비교한 결과 7-9월 우기의 오염부하량이 두드러지는 것과 질소와 인의 증감추세가 비슷한 것을 알 수 있다, 또한 대체로 본류관측농도와 물질수지분석을 사용한 결과가 물질수지분석결과보다 크게 나타났다. 이는 지류유입 오염부하량 외에도 다른 오염부하량이 본류에 가중되는 것으로 추론할 수 있다.

5. 참고문헌

환경처 (1992-1993) 한국환경연감.
 환경부 (1994-1995) 환경통계연감.
 환경부 (1997) 환경연감.
 발전처 (1971-1997) 수력발전소 운용자료집.
 전경수, 이길성 (1993) "QUAL2E 모형의 한강수계 적용", 한국상하수도학회지, 제 6권, 제 2호, pp. 43-56.