

도시유역에서의 최적 유출·수질매개변수 결정과 특성 연구

○강 태 호*, 이 종 태**

1. 서 론

본 연구는 도시유역의 개발 및 인구집중 현상으로 인한 인근 도시하천의 오염부하가 날로 증가됨에 따라 하천계획 및 수질관리 측면에서 오염부하량의 예측이 필수적이다. 이를 위하여 도시배수구역 유출수의 오염농도 및 오탁부하량 산정을 위한 주요 매개변수의 영향을 분석하였다. 각 매개변수를 포괄적으로 수용하고 있는 강우-유출-수질모형인 SWMM을 이용하여 실측치를 토대로 수질매개변수의 적정치를 결정하였다.

2. 최적 매개변수의 결정

2.1 유출량 산정

2.1.1. 지표면유출 해석

RUNOFF블럭에서는 지표면유출에 대한 기본방정식으로서 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 운동과 근사법으로서의 비선형 저류방정식이 사용된다. 이 방법은 완전한 홍수파의 상승구간에서 그 적용성이 높다. 계산을 수행하는 데는 상류부 경계만이 필요하고, 각 수로요소는 인접요소와 분리된 계단형 수로로 가정하였다. 각 소유역에서의 지표면 저류 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = A_s \frac{dd}{dt} = A_s i - Q \quad (1)$$

위 식에서 d 는 수심, t 는 시간, A_s 는 지표면적, V 는 물의 부피($= A_s \cdot d$), i 는 초과 강우강도, Q 는 유출량이다. RUNOFF에서 지표면유출량은 수리반경이 수심과 같다고 보아 다음의 Manning식으로 계산한다.

$$Q = W_i \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

식(2)에서, W_i 는 유역의 폭, n 는 Manning의 조도계수, d 는 수심, d_p 는 지면 요철에 의한 저류 깊이, S 는 지표면 경사이다. 위의 두 식을 a 에 대하여 재정리하면 다음의 비선형 저류방정식이 유도된다(Huber, 1988).

2.1.2. 배수로 흐름 해석

RUNOFF에서 관로유출은 앞에서 기술한 지표면 유출과정을 통하여 측방으로 유입되는 유량과 상류 배수로로 부터의 유입량 및 하류로의 유출량 등으로 구성된 비선형 저류방정식으로 부터 계산된다. 본 방정식의 해를 구하기 위하여 모형개발 초기에는 수정 Euler방법이 사용되었으며 후에 보다 안정된 해를 얻기 위해 Newton-Raphson방법으로 대체되었다. Manning식이 각 적분 연산 시간구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동은 준 정상(Quasi-steady) 상태로 근사 처리하였다. 이 방법은 수심 d 와 단면적 A 가 시간에 따라 급하게 변하지 않는 경우에 그 적용성이 크다. 배수로 흐름에 사용되는 연속방정식과 Manning식은 각각 다음과 같다(Huber, 1988).

$$\Delta V = \Delta t \cdot (Q_i + Q_l + Q_k - Q) \quad (3)$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

여기서, Q_i 는 상류구간에서의 유입량, Q_l 는 측방 유입량, Q_k 는 지하수 유입량이다.

2.1.3. 오탁부하량 산정

강우시 배수구역으로 부터의 오염물 배출은 강우 이전까지의 오염물의 축적(build up)과 강우개시 이후의 지표면에 대한 강우의 충격작용과 지표류의 소류력에 의한 오염물질의 이송(washoff)에 의하여 이루어진다.

오염물의 축적은 물리·화학·생물학적 작용에 의해 복합적으로 이루어진다. 오염물 축적에

* 경기대학교 토목공학과 박사과정

** 경기대학교 토목공학과 교수

영향을 주는 요소로서는 선행 무강수기간, 토지이용도, 도로청소빈도 등과 강우, 바람 등의 국지 기상현상 등 여러 가지가 있겠으나, 이를 모두 고려하는 방정식의 구성은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서, 오염물 축적량(build up)은 단순화된 몇가지 유형으로 구분될 수 있으며, 적용대상 배수구역에 적합한 유형의 선택은 해당구역에서의 측정자료로 부터 선택하여야 할 것이나 이에 대한 국내에서의 자료는 획득하기 어려웠으므로 본 연구에서는 SWMM에서 일반적으로 사용 예 시되고 있는 다음의 식(5)의 Power-Linear형을 사용하였다.

$$p_b = C_b \cdot D^B \quad (5)$$

한편, 오염물의 이송은 강우로 인하여 무강수기간에 축적된 오염물이 지표면으로부터 침식 또는 용해되어 운반되는 과정이다. 일반적으로 이송량은 시간에 대하여 다음의 지수함수 관계를 갖는다.

$$P_w(t) = P_o(1 - e^{-W \cdot t}) \quad (6)$$

여기서, $P_w(t)$; 시간 t 에서의 오염물 쓸림 누가량

P_o ; 초기 오염물 축적량 (= p_c)

W ; 쓸림계수

또한, 임의의 시간, t 에서 이송 후의 잔류 오염량, $p(t)$ 는 $P_o - P_w(t)$ 이므로 다음의 식으로 표현된다.

$$p(t) = P_o e^{-W \cdot t} \quad (7)$$

가 된다.

여기서, $p(t)$; 시간 t 에서의 지표면 잔류 오염물량

P_o ; 초기 오염물 축적량

윗 식으로 부터 시간에 따른 이송량의 변화율은 다음의 식과 같다.

$$\frac{dp}{dt} = -W \cdot p(t) \quad (8)$$

윗 식은 이송률이 잔류 오염물량에 비례함을 나타내고 있다. 한편 오염물질들은 지표면에서의 소류력에 의하여 운반되며 이로 인한 오탁부하량은 유출강도 즉, 유출률(runoff rate; mm/hr)의 함수로 산정된다. 쓸림계수 W 가 유출률의 역수에 비례한다고 가정하면 쓸림계수는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$W = k \cdot r^s \quad (9)$$

여기서, k ; 이송 계수, r ; 유출률, s ; 이송지수

2.2 최적 매개변수

2.2.1 최적 유출 매개변수의 결정

유출특성의 민감도 분석에 앞서 실측 유출량에 가장 근사한 모의치를 갖는 적정 매개변수의 추정이 선행되었다(Stephan, 1993). 배수구역에서 실측치와 모의치가 최적으로 접근하는 매개변수들을 SWMM으로 결정하였다. 이에 관하여서는 이종태 등(1997)이 유출-수질 특성인자의 민감도 분석을 연구 발표한 바 있으며, 본 논문에서는 홍제천유역 5개사상과 남가좌유역 5개사상을 이에 더 추가시켜 여러사상에 대해 보완 분석하였다. 해당호우 기간에서의 유량측정은 경기대학교 수공학연구소에서 실시하였다. 모형에서의 주요 계산과정은 앞에서의 식(1)-(5)을 기본으로 하고 있다.

이 과정에서의 얻어진 최적 매개변수들의 값은 다음의 민감도 분석과정에서의 기준값으로 채택하였다. 그림 1~2는 각 유역에서의 최적모의 결과치와 실측치를 비교한 것으로서 비교적 실측치에 근사한 결과를 보여주고 있다. 표 1은 홍제천 및 남가좌유역에서의 최적 매개변수 추정과정을 예시한 것으로서 홍제천 1997년 5월 12일 사상의 유출 매개변수 결정과정이다. 5번째 시도에서의 특성치들을 매개변수로 결정하였으며, 최적 매개변수를 식(10)과 같이 실측치와 모의치를 상대오차로 표현한 것 중 가장 작은 값의 매개변수를 최적 매개변수로 결정하였다.

$$\text{상대오차(\%)} = \frac{|\text{모의치} - \text{실측치}|}{\text{실측치}} * 100 \quad (10)$$

2.2.2 최적 수질 매개변수의 결정

강우-유출분석에서와 마찬가지로 각 수질영향인자들이 결과치에 미치는 민감도를 분석하기 위

표 1. 홍제천 유출 매개변수 결정과정(97/5/12)

		추 정 값 (%)				
시산회수		1	2	3	4	실측치
인자						
	불투수면적비	120	100	100	100	
	유역폭	150	140	120	100	
	관조도	120	100	100	100	
	Q_v	162200	135500	135200	135000	130000
	Q_p	13.59	11.7	11.58	11.44	10.9
상대	Q_v	24.8	4.23	4.00	3.8	
오차	Q_p	24.7	7.34	6.26	4.3	

Q_v : 유출용적(m^3) Q_p : 침투유량 (m^3/s)

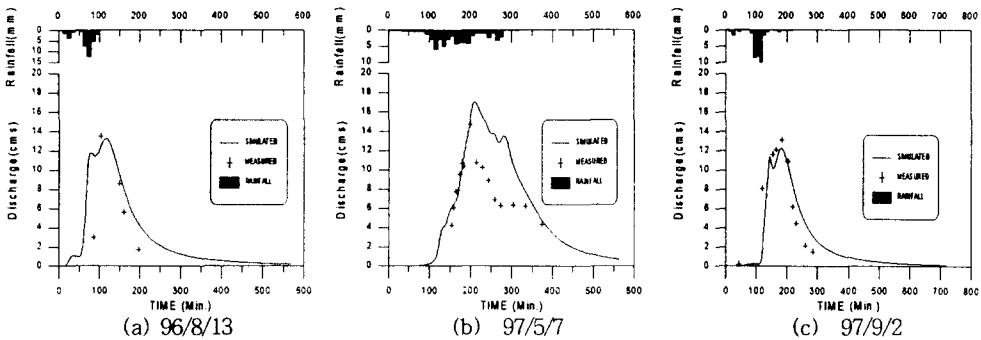


그림 1. 홍제천유역 유출수문곡선

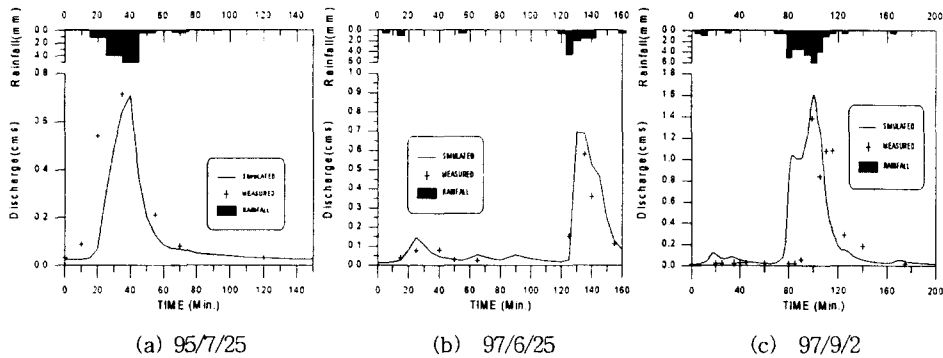


그림 2. 남가좌유역 유출수문곡선

해서는 실측 농도 및 부하량 등에 근사하는 최적 매개변수의 추정이 선행되었다. 본 연구에서는 홍제천유역 및 남가좌유역에서의 강우기간 실측치와 모의치가 최적으로 접근하는 SWMM에서의 수질 매개변수들을 추정하였다. 수질측정은 유역출구에서 강우강도에 따라 채수한 샘플로부터 현지에서 수온, DO, 전도도 등을 측정하였고, SS, BOD, COD, TN, PO_4 -P 등은 환경오염공정시험법에 의거하여 경기대학교 수공학연구실 실험실에서 측정하였다. 한편 유역의 오염물 축적량을 파악하기 위해, 연구 대상유역의 1일 먼지축적량은 서울시 대기 관측소의 평균값과 거의 일치한다. 먼지 축적량은 매일 일정시간에 건기일수에 따라 측정해야 하므로 본 연구에서는 1997년 3월부터 1998년 현재까지 경기대학교 교내에 정사각형(1m x 1m)의 구역을 설정하여 건기일수가 1일~13일간의 먼지를 측정한 결과 최대 오염물 축적량이 $1g/m^2/일$ 정도로 나타났다. 먼지 축적의 일별 분포도를 그림 3에 나타내었다.

표 2는 홍제천 및 남가좌유역에서의 최적 수질 매개변수 추정과정을 나타낸 것으로서 홍제천 1997년 5월 12일 사상의 SS와 BOD성분의 수질 매개변수 결정과정이다. 4번째 시산에서의 특성

치들을 매개변수로 결정하였으며, 최적 매개변수를 식(10)과 같이 실측치와 모의치를 상대오차로 표현한 것 중 가장 작은 값의 매개변수를 최적 매개변수로 결정하였다.

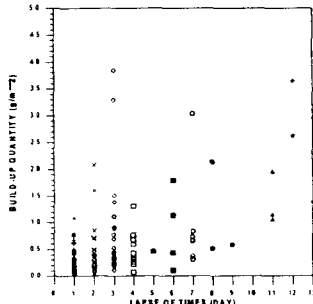


그림 3. 건기일에 따른 먼지 축적량 모형과 잘 일치하였다. 나머지 성분들은 실측치와 약간 차이가 있었다. 97년 9월 2일 사상의 경우 그림 4에서 보면 침투농도면에서는 모든 사상에 대해서 잘 일

홍제천유역에서 각 오염성분별 농도 및 부하량을 산정한 것으로서 모의치가 발생시간 및 침투치에 있어 실측값에 근접함을 보여주고 있다. 각 수질성분에 대한 이송지수(s)는 0.002-0.05, 이송계수(k)는 1.2-3.6, 오염물축적계수(Cb)는 수질성분에 따라 0.1-11.45의 큰 범위를 나타내었다.

96년 8월 13일 사상의 경우 그림 4와 같이 침투농도와 총 부하량면에서 BOD₅, COD, SS 모두 SWMM 모의치와 잘 일치하였다. 그러나, 침투 발생시간면에서는 다소 후반부에 나타났다.

97년 5월 7일 사상의 경우 침투농도면에서는 모든 수질 성분에 대해서 양호하게 산출되었다. 총부하량면에서는 BOD₅성분의 경우 SWMM 모의치는 실측치 보다 적게 산출되었고 COD성분은

표 2. 홍제천 수질(SS · BOD) 매개변수 결정과정(97/5/12)

추 정 값 (%)						추 정 값 (%)							
인자	1	2	3	4	5	실측치	인자	1	2	3	4	5	실측치
C _b	200	150	125	100	100		C _b	200	150	125	100	100	
k	50000	500	250	125	100		k	50000	500	250	125	100	
s	150	120	100	100	100		s	150	120	100	100	100	
P _v	484100	244000	140700	8388	67200	130000	P _v	42200	16740	7240	3886	3140	6590
P _p	22870	5160	2819	1750	1388	10.9	P _p	1942	331.1	133	72.17	57.6	58.0
상대 오차	P _v 2482	75	1.22	93.9	51.6		상대 오차	P _v 540	154	9.86	41.03	52	
	P _p 1456	271	102.9	25.9	0.07			P _p 3248	470	129.3	24.43	0.7	

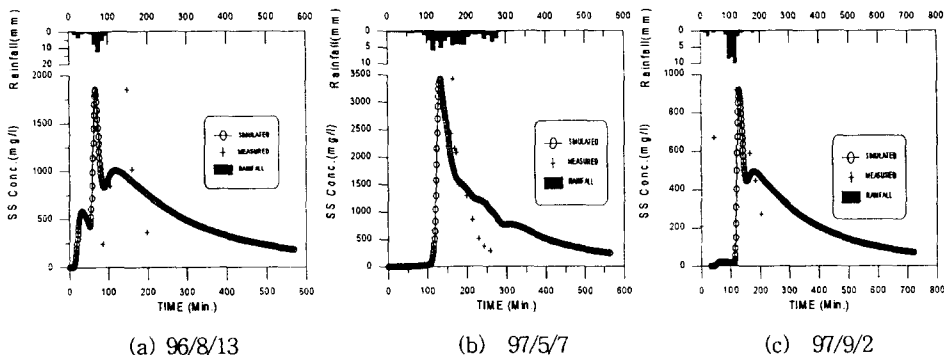


그림 4. 홍제천유역 오염도곡선(SS)

치하였다. 총부하량면에서는 SS와 TP성분에 대해서 다소 많이 산출되었고 그외의 성분은 대체로 양호하게 산출되었다. 침투 발생시간면에서는 BOD₅와 COD성분이 대체로 일치하였고 나머지 성분은 실측치보다 다소 전반부에 발생하였다. 남가좌유역에서는 그림 5에서와 같이 각 오염성분별 농도 및 부하량을 산정한 것으로서 모의치가 모든 사상에 있어 실측치의 전체적인 경향을 따라주나 침투값 및 침투 발생시간에는 약간 차이가 남을 보여주고 있다. 이는 소유역에서 유출의 도달 시간과 강우에 의한 이송시간 계산에 있어 SWMM모델의 기본가정인 초기 쓸림 오염물은 강우가 1시간에 약 0.5in(12.7mm) 온다면 노면의 존재하는 먼지 및 잡물의 90% 이상이 쓸려나간다고 가정하였기 때문에 이러한 오차가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 실제 측정시 본 소유역에서는 도달시간이 약 5분도 안되는 경사가 급한지역인 특성을 가지고 있고, 강우강도가 강할 때 훨씬 많은 쓸림이 관측되었다. 각 수질성분에 대한 이송지수(s)는 0.002~0.05, 이송계수(k)는 1.2~3.6, 오

염분축적계수(C_b)는 수질성분에 따라 0.1~11.45의 큰 범위를 나타내었다.

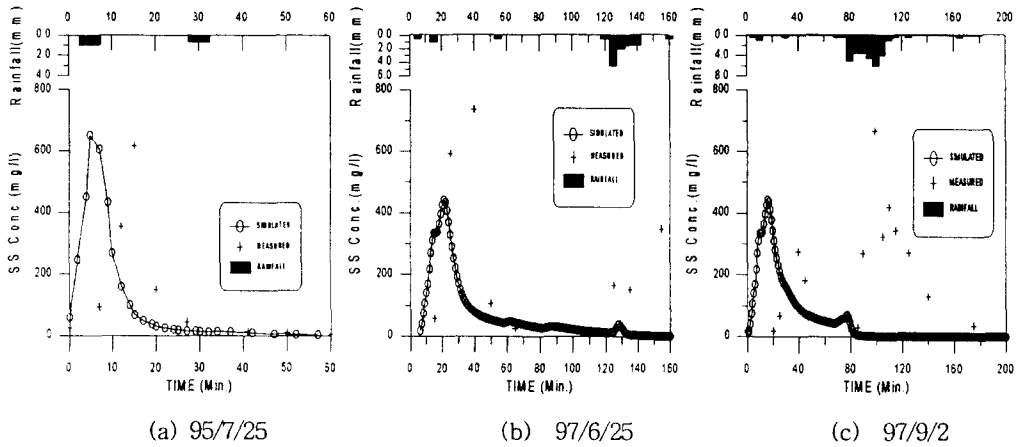


그림 5. 남가좌유역 오염도곡선(SS)

2.3 유출 - 수질 매개변수의 특성

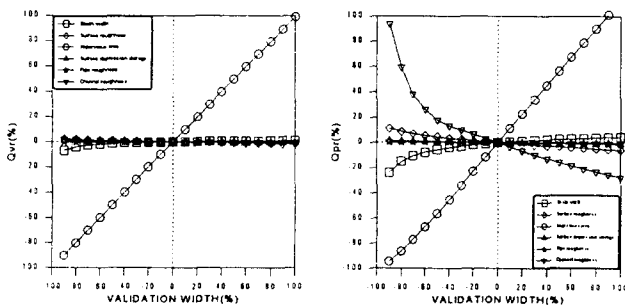
2.3.1 유출 매개변수의 민감도

홍제천 및 남가좌유역의 유량 민감도 분석은 유출용적과 침투유량에 대해서 불투수면적, 유역폭, 관 조도계수, 지표면 조도계수를 $\pm 10\%$ 씩 변화시켜 최적모의 유출량에 대한 변경된 유역특성 인자에 의하여 산정된 유출량의 비 Q_{vr} 와 침투유량의 비 Q_{pr} 를 계산하였다.

SWMM모형의 불투수면적, 유역폭, 관 조도계수, 지표저류량, 지표 조도계수에 대한 10개 사상에 대하여 민감도 분석을 해본 결과는 그림 6, 7과 같다. 홍제천에서 총 유출량에 가장 민감한 인자는 불투수면적비이며, 그의 인자는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 산정되었다. 침투유량에 가장 민감한 인자는 투수면적비이며, 그 다음이 하천 조도계수였다. 남가좌유역과 같은 소유역에서도 총 유출량에 가장 민감한 인자는 불투수면적비이며, 그의 인자는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 산정되었다. 침투유량에서도 가장 민감한 인자는 불투수면적비이며, 그의 인자는 거의 영향을 미치지 않았다.

2.3.2 수질 매개변수의 민감도

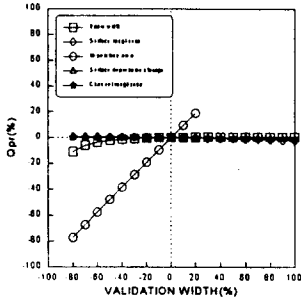
수질 매개변수들의 민감도 분석을 위해 일반적으로 오염 성분의 농도 및 부하량에 크게 영향을 미치는 특성인자로서는 지표면 오염물 축적에 관계되는 주요 변수들로서는 오염축적의 정도를 나타내는 오염축적계수와 오염축적지수 및 건기일수(식 (6)) 등이며, 강우로 인한 오염물 슬립량 및 오염농도를 산정하는 주요 변수들로서는 오염물 이송계수 및 이송지수(식 (12)) 등이다.



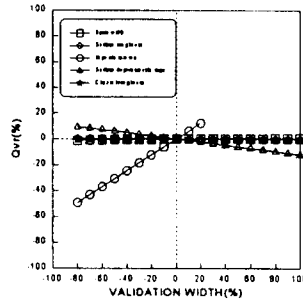
(a) 유출용적 (b) 침투유량
그림 6. 홍제천유역의 유출 민감도(97/5/12)

본 연구에서는 위의 각 영향 인자 중에서 ①오염축적계수(C_b), ②건기일수(D), ③이송계수(k), ④이송지수(s) 등을 검토대상인자로 선택하였다. 이어서 이들의 값을 각각 $\pm 10\%$ 씩 변화시켜 나가면서 최적치에 대한 편차의 정도를 먼저 침투농도비로서 표현하고 그 민감도를 분석하였으며 홍제천유역에서의 결과는 그림 8과 같으며, 남가좌유역의 결과는 그림 9와 같다. 홍제천에서 그림에서 볼 수 있는 바와같이 모든 변수들이

고르게 결과치에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 침투농도비에 가장 민감한 인자는 이송지수(s)였고 그 다음이 오염물 축적계수(C_b), 이송계수, 건기일수의 순이었다. 마찬가지로의 방법으로 이들 인자들이 각 오염성분의 부하량에 주는 민감도를 분석하였다. 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 오염부하량에 가장 큰 영향



(a) 유출농도



(b) 침투유량

그림 7. 남가좌유역의 유출 민감도(97/5/12)

을 주는 매개변수로는 이송지수(s), 그 다음이 오염물 축적계수 C_b , 이송계수, 건기일수의 순이었다. 이는 강우로 인한 오락부하량은 강우강도와 오염물질의 지표면 축적의 정도에 직접 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 남가좌유역에서는 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 변수들이 고르게 결과치에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 침투농도비에 가장 민감한 인자는 이송지수(s)였고 그 다음이 오염물 축적계수 C_b , 건기일수, 이송계수 순이었다. 오염성분의 부하량에 주는 민감도에서 오

염부하량에 가장 큰 영향을 주는 매개변수로는 오염물 축적계수 C_b , 건기일수, 이송계수, 이송지수 순이었다. 여기서 볼 때 홍제천과 남가좌유역에서 강우로 인한 유출물(r)과 이송지수(s)가 큰

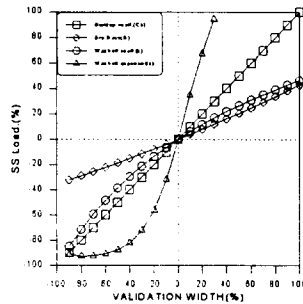
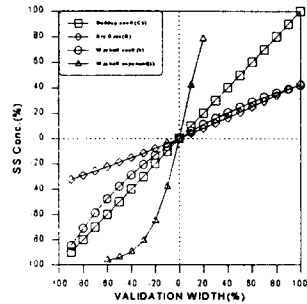


그림 8. 홍제천유역에서의 수질민감도(SS,97/5/12)

영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, 소유역인 남가좌배수구역에서는 오염물질의 지표면 축적의 도인 축적계수 (C_b) 및 건기일수가 직접 크게 영향을 주고 있음을 확인하였다. 이 결과는 이종태 등(1996)의 연구결과와 비교해 보면 오락부하량 민감도는 일치하나 침투농도 민감도면에서는 1996년 연구에서는 이송지수, 건기일수, 축적지수 등이 가장 민감하였으나, 본 연구 10개 사상을 종합 해본 결과 이송지수 (s)가 가장 민감한 인자로 분석되었다.

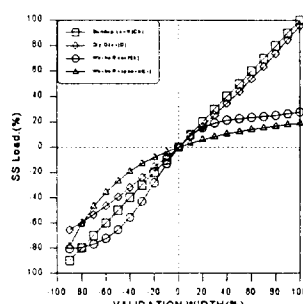
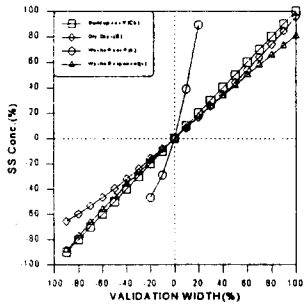


그림 9. 남가좌유역에서의 수질민감도(SS,97/9/2)

3. 결론

오락부하량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 이송지수(S)이며, 오염축적계수(C_b), 건기일수(D), 이송계수(K)의 순이었다. 홍제천 본류 및 소배수구역인 남가좌유역에서 SS, BOD, COD, TN, PO4-P 등의 각 수질성분에 대한 이송지수(s)는 1.2~3.6, 이송계수(K)는 0.002~0.05로 그 적정값이 추정되었다. 또한, 오염

물축적계수(C_b)는 수질성분에 따라 0.1~11.45의 큰범위를 나타내므로 그 최적적정값의 산정에는 앞으로의 더 많은 실측자료와 유역특성의 영향을 고려하여 보완 연구되어야 할것으로 판단된다.

4. 참고문헌

1. 이종태, 강태호(1997). "도시 배수유역의 유출-수질 특성인자의 민감도 분석." 한국수자원학회지 논문집, 제30권, 제1호, pp.83-93
2. Huber, W. C and Dickinson, R. E(1988)., "Storm Water Management Model : User's Manual(Ver 4.2)", E.P.A, pp 59-494
3. Stephan J. Nix(1993), "Urban Stormwater Modeling and Simulation", Lewis Publishers