

# 저류조에 의한 하수 수질개선효과에 관한 실험 연구

이종태\*, 송치홍\*\*, ○서홍준\*\*\*

## 1. 서론

강우초기에 집중되는 오탁부하량을 완화하기 위하여 유역의 출구에 저류조를 설치하여 호우시 도시하천의 수질악화를 완화하는 방안을 검토하였다.

저류조에서의 수질 변화를 분석하기 위하여 실험 대상지역으로 서울시 서대문구 남가좌 1 배수구역을 선정하고, 건기시 및 우기시의 유량과 수질을 측정하였으며 모형실험에 사용될 시료를 채취하였다. 수질실험은 환경오염공정시험법을 따랐다.

모형실험은 원통 침전기둥 및 입방형 침전조에 대하여 각각 실시하였다.

자연침강 정화저류조에서의 실험은 지체시간에 따른 오염성분의 변화(실험1)와 정체시간의 변화에 따른 영향(실험2)에 대하여 각각 실험을 각각 실시하였다.

각 수질 성분의 변화는 그 농도의 값과 더불어 저류 조기의 수질 농도에 대한 일정 지체(저류)시간 후의 수질농도의 비를 백분율로 표현한 제거율로 비교 평가하였다.

## 2. 원통 침전기둥에 의한 기초실험

침전기둥(settling column) 실험은 하수의 부유물 침강 및 수질 변화 특성을 파악하기 위한 가장 일반적인 실험이다(Metcalf 와 Eddy, Camp 등, 1979).

Randall 등(1982)은 침강에 의한 유출수의 제거에 대해 기술하여 저류시간에 따른 SS의 제거율, 타 오염물의 제거율 및 SS와 타 오염물의 상관성 등에 대해 연구하여 SS의 경우 48시간의 저류로 오염물의 약 90% 이상을 제거할 수 있으며, 그 외에 중금속 및 생화학적 오염물 역시 일부 제거할 수 있음을 보였다.

그러나 부유물의 침강은 침강속도 및 침강 깊이에 의하여 지배되므로 원통 기둥 침전조의 실험 결과를 실제 크기의 침전조에서의 제거효율 결정에 그대로 적용하는 것은 곤란하다. 따라서 침전기둥의 깊이는 실제 침전조의 규격을 고려한 시간과 길이에 대한 상사법칙을 적용하고 보정과정을 거침으로써 보다 실제적인 현상에 응용될 수 있겠다.

### 2.1 침전기둥과 실험 방법

침강기둥 실험장치는 직경 15cm, 높이 1.5m의 투명 아크릴 원통(약 26 l)에 30cm 간격으로 4개의 시료채취구를 부착하는 형식으로 제작하였다(그림 2.1)

침강시험을 위한 시료는 남가좌 1 배수구역의 합류지에서 채취하였다. 동일 지점에서 5회에 걸쳐 채취한 시료는 채취 즉시 연구실로 운반하여 실험하였다.

실험은 먼저 13개 각 수질 성분의 초기 농도를 측정하였으며, 침전관에 시료를 채운 후, 2, 6, 12, 24, 48 시간 등 5개의 각 침전시간에 따라 각각 시료를 원통기둥으로부터 30, 60, 90, 120cm 등 4개의 각 깊이별로 채취하여 분석하였다. 이와 같은 실험은 '96년 12월 19일, '97년 1월 9일, 1월 16일, 1월 19일, 2월 19일 등 5회에 걸쳐 반복 실험되었다.

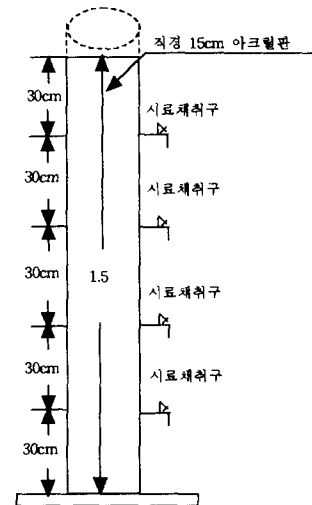


그림 2.1 침전기둥 모식도

### 2.2 실험결과 및 분석

- 
- \* 경기대학교 토목공학과 교수
  - \*\* 경호기술단 종합환경사업부
  - \*\*\* 경기대학교 토목공학과 석사과정

침전시간에 따른 각 오염물의 제거율은 각 오염성분마다 그 특성이 다양하게 나타났다. SS 및 BOD의 수심별, 지체시간별 평균제거율 곡선은 그림 2.2 및 2.3과 같다. 각 오염물의 저류시간별 제거율의 특성은 다음과 같다.

SS 및 BOD 등의 오염성분은 전반적으로 깊은 수심에 위치할수록 그 제거효율이 작아지는 경향을 보이고 있으며 이러한 경향은 지체시간이 약 6시간 이내일 경우 뚜렷하였다. 지체시간이 충분히 경과하면서 이러한 경향은 완화되었으며 이는 대부분의 굵은 입자들이 침강된 상태에서 미세입자들이 콜로이드성 부유를 함께 기인하는 것으로 판단된다.

또한 SS 및 BOD 등의 오염성분은 지체시간의 경과하면서 그 농도가 저하되는 제거효과를 보였으며 지체시간의 초기에 이러한 경향은 더욱 뚜렷하였으며 시간이 충분히 경과하면서 제거율의 증가는 미약하였다. 그림 2.2 및 2.3에서 SS는 저류시간 두시간 내에 전 오염물 농도의 70% 정도가 제거되어 무기물의 경우 저류시간 초기에 상당부분 제거됨을 알 수 있다. BOD의 제거효율은 61%~75%, 평균 69%로 비교적 일정한 제거효율을 나타냈다. COD는 그 제거효율이 64%~83%, 평균 72%로 나타났다. TN의 경우 그 제거효율이 20%~47%, 평균 40%의 제거율을 나타냈으며, TP의 경우에는 제거율이 17%~62%, 평균 32%의 제거율을 나타냈다.

한편 채취 원수에 따라 제거효율은 다소의 편차를 보여 SS(30cm 깊이)의 경우 그 제거효율이 70%~92%로 나타났다. 각 실험일자별 제거율이 큰 차이를 나타낸 것은 SS의 농도가 상대적으로 높은 경우, SS 내 무기물의 상대량이 높아 비교적 침전시간 초기에 무기물의 대부분이 제거되기 때문으로 판단된다. 이상의 실험결과로부터 SS는 약 2시간의 지체로 약 70%의 제거효율을 보임을 알 수 있었다. 따라서 약 2~6시간 정도의 저류만으로 오염물의 상당부분을 제거할 수 있으며, 만약 하수처리장에 유입되는 초기유출수를 일정시간 저류후 방류한다면 상당한 오염물의 제거효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다. 한편 COD 역시 48시간의 저류로 오염물의 상당부분을 제거할 수 있는 것으로 확인할 수 있었다. 그러나 TN 및 TP는 그다지 큰 제거효율을 나타내지 않았다.

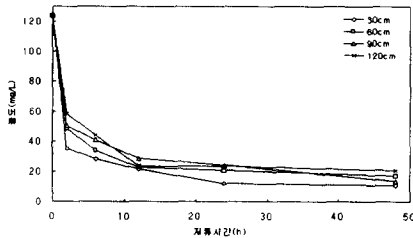


그림 2.2 저류시간에 따른 SS의 수심별 제거율곡선(평균)

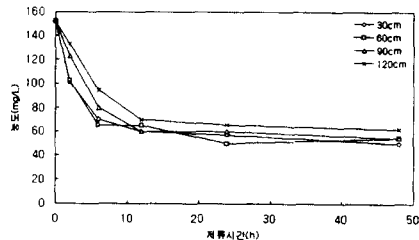


그림 2.3 저류시간에 따른 BOD의 수심별 제거율곡선(평균)

한편, 저류 초기 2시간내에서 급속히 이루어지는 오염물의 제거현상을 파악하기 위하여 20분 간격으로 20, 40, 60, 80, 100분의 지체시간에 대한 오염성분의 변화를 연속적으로 분석 추적하였다. 각 실험의 지체시간별, 수심별 평균제거율은 표 2.1과 같다.

한편 각 실험의 제거율을 평균하여 작성한 SS의 등제거율곡선은 그림 2.4와 같으며 수심과 지체시간에 따른 부유물의 제거효율곡선을 연속적으로 도출하였다.

표 2.1 SS의 지체시간별, 수심별 평균 제거율

수심 (cm)	30cm		60cm		90cm		120cm		비고
	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	
지체 시간 (분)									
0	96.98	0	96.98	0	96.98	0	96.98	0	
20	78.56	19	81.46	16	82.43	15	88.25	9	
40	69.82	28	71.76	24	75.64	22	78.55	19	
60	58.19	40	62.07	36	66.92	31	68.86	29	
80	45.58	53	51.40	47	57.22	41	61.10	37	
100	34.91	64	41.70	57	47.52	51	49.46	49	

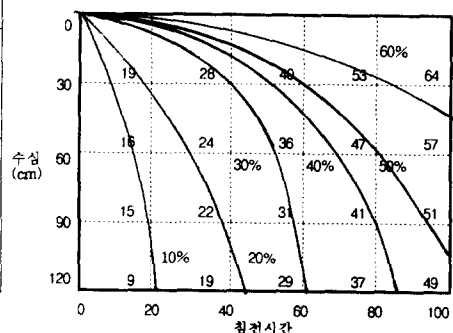


그림 2.4 등제거율곡선(평균)

### 3. 자연침강 정화 실험

#### 3.1 실험조건 및 계획

미환경보전국(1990)은 약 0.5 in. (12.7mm)의 강우로 비점오염원인 초기 쓸림 오염물인 노면에 존재하는 먼지 및 잡물의 90% 이상이 쓸려나간다고 기술하였다. 따라서 저류목표량은 호우중 발생하는 초기 쓸림오염물을 처리하기 위한 것으로 전유역에 약 10mm의 강우깊이를 처리할 수 있는 용량을 선택하였다. 따라서 남가좌 제 1 유역에서의 계획 저류량은 강우깊이 10mm에 전 유역의 면적(0.203km<sup>2</sup>)을 곱함으로써 2,030m<sup>3</sup>으로 결정하였으며 유역출구에 저류지를 설치하는 이동저류(移動貯溜, offsite storage)의 형식으로 하였다.

한편 저류조의 규격에 관한 연구로서 Biggers 등(1980)은 저류지의 폭과 길이의 비는 1:3~1:5 정도가 적합한 것으로 기술한 반면, 류희정 등(1995)은 침사지의 길이를 폭의 3~8배로 기술함으로써 저류지의 형상은 대체로 하수 이동방향을 길이로 하는 입방형이나 그 적정 규격에 대한 엄격한 한계는 현재로서는 확인하기 곤란하였다. 따라서 본 연구에서의 저류조는 그 소요용량과 기존 도로 지하공간의 활용을 제약조건으로 하는 입방형 저류조로서 폭×수심×길이 = 7.5m×7m×40m의 저류조를 계획하였다.

자연침강 정화법에 의한 오염물의 제거시험은 건기시/우기시의 하수에 대하여 각각 실시하였다.

각 오염성분의 지체시간별 제거효율을 분석하기 위하여 본 연구에서는 저류시간 0, 20, 40, 60, 80, 100분, 및 2, 6, 12, 24, 36, 48, 60, 72시간에서의 SS, BOD, COD, TP, TN 등의 농도를 각각 측정하였으며, 건기 및 우기시의 두 경우에 대하여 각각 반복 실험하였다. 이때 침전 속도 및 시간에 지배되는 SS는 Froude 상사율을 적용하였으며, 생화학적 변화과정에 영향을 크게 지배되는 기타 수질 성분들에 대해서는 상사율의 적용이 불가능하였다. 그러나 BOD, COD 등의 수질 성분들은 SS와 상관성을 가지므로 이들도 상사율의 영향을 크게 받는 것은 확실하나 현재로서는 이를 산정하는 연구성과는 마련되어 있지 못한 실정이다.

#### 3.2 저류모형의 설계

저류조는 Froude 상사법칙에 의해 1/40로 축소 제작하였다. 수조에는 아무런 접촉매개체도 넣지 않았으며 방류구는 조의 하류부에 설치하였다. 조의 형상 및 제원은 그림 3.1과 같다.

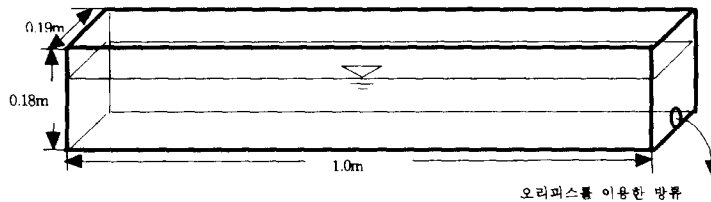


그림 3.1 저류실험을 위한 빈수조

이동저류시설은 하수(생활하수 및 강우초기의 유출수)를 배수계통의 적정위치로 유도한 후 이를 일정시간 지체시킨 후 방류하는 형식이며, 본 모형에서는 여러 지체시간에 대하여 수질 개선효과에 관한 실험을 실시하였다. 일반적으로 저류지가 완전히 비어있는 초기 단계에서 유입하는 하수는 일단 만수되는 상당시간 저류지에 정체하게 되며 홍수조절 및 수질개선의 효과를 고려하여 서서히 방류하게 된다. 따라서 지체시간은 배수가 없는 완전 정체시간( $t_1$ )을 의미하며, 방류시간은 수조의 물이 완전히 방류되는 시간( $t_2$ )을 의미한다. 따라서 저류조에서 하수의 근사적인 평균지체시간( $t$ )은  $\{t_1+(t_2/2)\}$ 로 표현할 수 있다.

한편, SS의 실험을 위한 지체시간은 축적을 1:√40으로 하여 원형에서의 시간 추정치 환산가능하며, 기타 각 오염성분에 관한 시간은 그 상사율의 영향을 산정하는 적절한 방법이 없으므로 모형에서의 시간을 사용하였다.

#### 3.3 오염성분의 제거율 실험(실험 1)

(1) 하수의 오염성분

본 실험은 자연 침강 정화저류조에서의 지체시간에 따른 오염 성분 및 제거 효율의 변화를 알아보기 위한 실험으로서 지체시간 0, 20, 40, 60, 80, 100분 및, 2, 6, 12, 24, 48시간 등의 11개의 시간에 대하여 우기 및 건기의 하수를 각각 채취하여 성분 분석실험을 실시하였다. 채취 시기는 해당 배수구역의 일 평균 수질에 대체로 해당하는 시각인 13:00시에 시료를 채취하였으며 우수의 경우는 강우 초기에 오염물이 집중되는 것을 감안하여 채취하였다.

초기 실험으로서 저류시간이 0인 각 오염물의 초기 농도는 다음의 표 3.1과 같다.

표 3.1 오염물 초기 농도

분석항목	SS	BOD	COD	TP	TN
실험	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)
건기(생활하수)	90.2	54.6	182	0.86	16.248
우기(우수)	257.9	192.4	710	2.25	24.11

건기시 실험은 1997년 7월 15일 13:00분에 현장에서 시료원수를 채취하여 ice box에 보관하여 실험실로 신속히 운반하고 실험을 즉시 실시하였다. 우기시 실험은 1997년 9월 2일 0:20분 강우 초기 유출이 발생하는 시기에 채수하였으며, 건기시 실험과 동일한 방법으로 운반 즉시 실험하였다.

## (2) 지체시간과 제거효율

지체시간별 각 오염물의 제거효율은 지체시간의 경과와 더불어 증가하는 경향을 보였으며 SS의 경우 모형에서의 지체시간 약 6시간(원형시간; 약 38시간)에 이르면 60% 상당의 제거효율을 보여주었다(그림 3.2). 이 효율은 높이 30cm 원통기둥 실험에서 약 지체시간 약 60분에 해당하는 값으로서 수조의 깊이가 7m인 본 저류조의 경우에는 동일 입경의 SS가 침강에 요하는 시간은 그만큼 길어지기 때문인 것으로 판단된다.

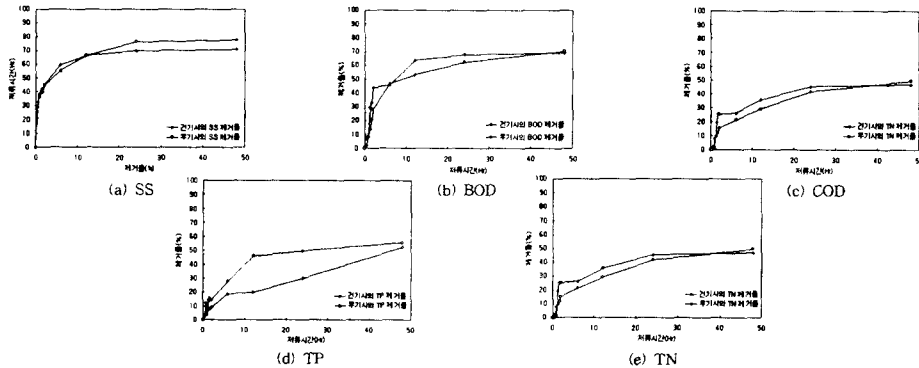


그림 3.2 각 오염물의 제거율곡선(자연침강)

한편, 우기시의 SS 제거율은 그림 3.2와 같이 건기시보다 더 높은 제거율을 나타냈는바 이는 SS 중 흙먼지 등의 무기물의 비율이 상대적으로 유기물보다 높기 때문이다. 흙먼지 등의 무기물은 입자의 비중이 커 침전시간 초기에 상당부분 제거되며 따라서 전체적인 제거율을 비교해 보면 상대적으로 무기물의 농도가 높은 호우시의 시료가 더 높은 제거율을 나타냈다. BOD 및 COD는 SS와 상관성이 있어 저류시간 초기에는 건기 및 우기시 제거율의 변동이 심하지만 48시간 저류후에는 모두 우기시의 제거율이 건기시보다 높게 측정되었다. 한편 TP 및 TN은 최대제거율이 모두 60% 미만으로 건기 및 우기시 모두 그 제거율이 낮았다.

## 3.4 정체 및 방류시간을 고려한 제거효율 실험(실험 2)

정체시간이 오염성분의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각 정체시간별 방류시간에 따른 변화를 SS를 중심으로 실험을 실시하고 그 결과를 비교하였다.

즉, 원형에서의 정체시간을 0, 2, 4, 8 시간의 4가지 경우(CASE I, II, III, IV)로 각각 구분하고 각 경우별 방류시간별 수질 성분의 변화를 건기 및 우기에 대하여 실험하였다.

SS의 지체시간별 제거율은 표 3.2와 같으며 동일 지체시간의 경우에 정체시간이 길수록 그 제거율이 높아짐을 보여주고 있다.

표 3.2 SS의 정체시간과 제거율

정체시간 원형(hr (모형,min)	방류시간 원형(모형)	지체시간 원형(모형)	SS(건기)		SS(우기)	
			농도 (mg/l)	제거율 (%)	농도 (mg/l)	제거율 (%)
0(0)	0(0)	0(0)	90.2	0.0	257.9	0.0
0(0) CASE I	4(36)	2(18)	49.9	44.7	106.3	58.8
	8(72)	4(36)	47.1	47.8	97.2	62.3
	12(108)	6(54)	41.4	54.1	96.9	62.4
2(18) CASE II	4(36)	4(36)	46.4	48.6	96.8	62.5
	8(72)	6(54)	41.3	54.2	80.3	68.9
	12(108)	8(72)	35.3	60.9	69.3	73.1
4(36) CASE III	4(36)	6(54)	39.6	56.1	79.6	69.1
	8(72)	8(72)	33.8	62.5	68.3	73.5
	12(108)	10(90)	31.4	65.2	60.0	76.7
8(54) CASE IV	4(36)	8(72)	34.3	62.0	56.4	78.1
	8(72)	10(90)	29.8	67.0	54.4	78.9
	12(108)	12(108)	29.1	67.7	52.3	79.7

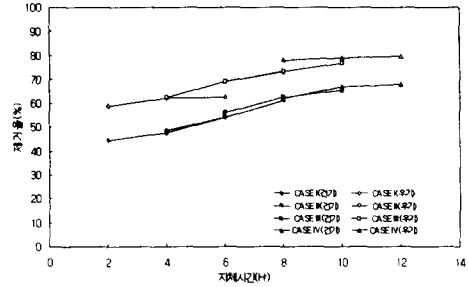


그림 3.3 SS의 정체시간과 제거율(자연침강)

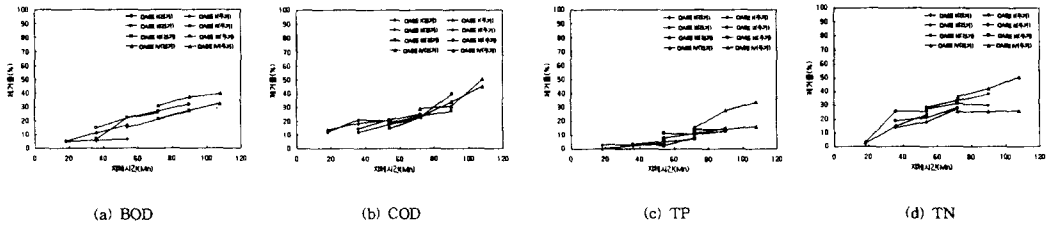


그림 3.4 정체시간의 변화에 따른 각 CASE별 제거율곡선 (자연침강)

표 3.3 각 오염성분의 정체시간과 제거율

정체 시간 (분)	방류 시간 (분)	지체 시간 (분)	BOD(건기)		COD(건기)		TP(건기)		TN(건기)		COD(우기)		TP(우기)		TN(우기)			
			농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)	농도 (mg/ℓ)	제거율 (%)		
0	0	0	54.6	0.0	182	0.0	0.86	0.0	16.248	0.0	0	0	192.4	0.0	710	0.0	2.25	0.0
0 CASE I	36	18	52.0	4.8	160	12.1	0.86	0.0	15.730	3.2	36	18	182.3	5.3	613	13.7	2.19	2.7
	72	36	51.2	6.2	144	20.9	0.84	2.3	12.033	25.9	72	36	170.6	11.3	580	18.3	2.19	2.7
	108	54	50.9	6.8	145	20.3	0.83	3.5	12.025	26.0	108	54	159.7	17.0	563	20.7	2.16	4.0
18 CASE II	36	36	50.8	7.0	160	12.1	0.83	3.5	13.964	13.9	36	36	163.2	15.2	606	14.6	2.17	3.6
	72	54	42.6	22.0	150	17.6	0.84	2.3	13.310	18.1	72	54	150.3	21.9	562	20.8	2.12	5.8
	108	72	40.3	26.2	140	23.1	0.79	8.1	11.763	27.8	108	72	142.8	25.8	533	24.9	2.09	7.1
36 CASE III	36	54	46.2	15.4	155	14.8	0.76	11.6	11.783	27.5	36	54	149.6	22.2	573	19.3	2.07	8.0
	72	72	42.9	21.4	140	23.1	0.77	10.5	11.122	31.5	72	72	140.6	26.9	540	23.9	2.00	11.0
	108	90	39.7	27.3	110	39.6	0.75	12.8	11.330	30.3	108	90	130.4	32.2	516	27.3	1.92	14.7
54 CASE IV	36	72	42.8	21.6	140	23.1	0.74	14.0	12.100	25.6	36	72	132.6	31.1	503	29.2	1.90	15.6
	72	90	39.6	27.5	120	34.1	0.74	14.0	12.099	25.4	72	90	120.3	37.5	492	30.7	1.62	28.0
	108	108	36.7	32.8	100	45.1	0.72	16.3	11.974	26.3	108	108	116.2	39.6	352	50.4	1.49	33.8

건기시 및 우기시 TSS의 각 CASE별 제거율 곡선은 그림 3.3과 같다. 이 SS 제거율 곡선에서 보여주는 바와 같이 전반적으로 지체시간이 길수록 제거율은 증가하는 경향을 보여 주었으며, 동일지체시간의 경우 방류시간보다는 정체시간이 클수록 제거율이 높아짐을 알 수 있다. 또한 여기에서도 SS의 초기농도가 높은 우기의 경우에서 높은 제거율을 나타냈는데, 무기물성분이 유기물성분보다 많이 함유되었기 때문으로 판단된다.

한편 SS을 제외한 각 오염성분의 정체시간의 변화에 따른 성분 농도의 변화를 실험하였 으며 그 결과는 표 3.3과 같다. 각 오염물의 정체시간 CASE 별 제거효율곡선은 그림 3.4와 같다.

BOD의 경우 동일한 지체시간에 대해 정체시간이 더 긴 경우가 전반적으로 높은 제거율 을 나타냈다. COD 역시 지체시간이 긴 경우에 높은 제거율을 나타냈다. 그러나 TP 및 TN

은 이와 같은 경향이 미약하게 나타났다.

상기의 실험으로부터 오염물이 조내에서 방류시 제거되는 것보다 일정시간 정체시키는 것이 더 높은 제거효율을 나타냄을 알 수 있다.

#### 4. 결론

도시 홍수량의 증가와 도시하천 수질의 악화를 완화시키기 위하여 배수체계에 저류지를 설치하는 방안을 서울 남가좌 배수구역을 중심으로 검토하였다. 본 연구를 통하여 현재 운영되고 있는 각 유수지를 활용하거나, 소 배수구역의 출구에 소형저류지를 설치함으로써 침투 유출량과 오염물의 경감 등을 도모할 수 있음을 확인할 수 있었다.

(1) 침전기동 실험에서, SS는 2시간의 저류로 상부에서 오염물의 60~70%, 24시간 저류에 의해 오염물의 90% 이상을 제거할 수 있었다. 그러나 TP 및 TN 등의 제거율은 상대적으로 낮았다. 또한 본 연구성과와 Randall의 결과와는 적용 하수의 수질이 다름에도 불구하고 비교적 일치하는 결과를 나타냈다.

(2) 저류시간의 변화에 따른 각 오염물의 제거율은 전반적으로 저류 시간의 증가에 따라 제거율의 증가를 보여주었으며, 초기 농도가 높은 우기시의 오염물 제거율이 초기 농도가 낮은 건기시 오염물 제거율보다 전체적으로 높았다. 이러한 경우는 특히 저류초기에 뚜렷하게 나타났다.

(3) 동일한 정체시간에 대해 각각 다른 정체시간과 방류시간을 적용할 경우 일정량을 지속적으로 방류하는 것보다는 일정시간 조내에서 정체 후 방류하는 것이 비교적 더 높은 제거율을 얻을 수 있었으나 그 차이는 비교적 작았다.

#### 5. 참고문헌

1. 이시진(1996), 기흥 하수종말처리시설 기본 및 실시설계를 위한 수질분석 및 생분해성실험 보고서, 경기대학교 환경문제연구소
2. 류희정(1994) 등, 위생공학, 신광문화사