

습성강하물 중의 오염물질의 농도와 부하 - 충북 청주시를 중심으로 -

The Concentrations and Loads of Pollutant in Wet Deposition in Cheongju

김진수* / 오승영** / 오광영** / 이종진***

김선종**** / 조재원*** / 간종범***** / 정구영*****

Kim, Jin Soo / Oh, Seung Young / Oh, Kwang Young / Lee, Jong Jin

Kim, Sun Jong / Cho, Jae Won / Khan, Jong Bum / Jeong, Gu Young

Abstract

The concentrations and loads of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD) in wet deposition were investigated at Chungbuk National University in Cheongju, Chungbuk. Event based precipitation samples were collected during 1998 to 2003. The precipitation-weighted mean concentrations of pollutants were 0.60 mg/L for TN, 0.014 mg/L for TP, and 4.8 mg/L for COD, which were smaller than its arithmetic mean concentrations by 26% for TN, 18% for TP, and 14% for COD. The concentrations of TN, TP, and COD significantly decreased with precipitation. Mean concentrations of pollutants in spring (March-May) were higher than in other seasons likely due to dust caused by wind erosion and sand-dust storms, pollen etc. Significant relationships were determined between TN and TP, and TN and COD. Annual loads of wet deposition averaged 7.9 kg/ha · yr for TN, 0.19 kg/ha · yr for TP, and 63.9 kg/ha · yr for COD, which are almost identical to the values of TN and TP but slightly higher than COD value reported in Japan.

Keywords : wet deposition load, total nitrogen, total phosphorus, precipitation-weighted mean concentration

요 지

충북 청주시에 위치한 충북대학교에서 강수에 따른 습성강하물 중의 TN, TP 및 COD의 농도와 오염부하를 조사하였다. 강수사상에 대한 샘플은 1998년에서 2003년까지 채집되었다. 오염물질의 강수량가중평균 농도는 TN이 0.60mg/L, TP가 0.014mg/L, COD는 4.8mg/L이었는데, 이는 각각의 산술평균보다 26, 18, 14% 작게 나타났다. TN, TP 및 COD의 농도는 강수량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 모든 수질항목은 봄에 가장 많이 나타났는데, 이는 풍식 및 황사에 의한 먼지, 꽃가루 등 때문으로 생각된다. 습성강하물의 평균 연간부하는 TN 7.9kg/ha · yr, TP 0.19kg/ha · yr, COD 63.9kg/ha · yr로 나타났는데, 이를 일본에서 보고된 각각의 연간부하와 비교하면 TN과 TP는 비슷했으나, COD는 약간 높게 나타났다.

핵심용어 : 습성강하물부하, 총질소, 총인, 강수량가중평균농도

- * 충북대학교 지역건설공학과 교수
Professor, Dept. of Rural Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763 (E-mail: jskim@cbnu.ac.kr)
- ** 충북대학교 농공학과 박사후 과정 수료
Graduate Student, Dept. of Agr. Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763
- *** 충북대학교 농공학과 석사과정 졸업
Former Graduate Student, Dept. of Agr. Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763
- **** 한국철도기술연구원, 연구원
Researcher, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 437-751
- ***** 충북대학교 농공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Agr. Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763

1. 서론

비점원오염의 발생원에는 대기강하물이 포함되며, 대기강하물의 오염부하는 크게 강우시 습성강하물(wet deposition, wetfall)에 의한 것과 비강우시의 건성강하물(dry deposition, dryfall)에 의한 것으로 나눌 수 있다. 대기강하물량은 일반적으로 유역으로부터의 NO_3^- 의 용탈에 큰 영향을 미치고 있고, 강수에 의한 수역으로의 질소 유입은 지역적인 기상 조건, 바람의 형태, 농업과 공업 지역에 대한 호소와 강의 위치 등에 따라 다르게 나타난다. 빈 영양 상태에 있는 하강암 암반의 산림 호소에서 강수는 주요한 질소 유입원으로 되어 있다(Likens *et al.*, 1977). 강수 중의 인은 토양침식에 의해 발생하는 먼지나 공업이나 도시에서 발생하는 오염물질로부터 기인한다.

북미 Great Lake Basins에 있는 비점원오염에 관한 소위원회 PLUARG(Pollution from Land Use Activities Reference Group)(1978)는 Superior호로 들어간 연간 인(P) 부하량의 대부분은 대기강하물에 의한 것이라고 발표하였다. Whitall과 Paerl (2002)는 미국 North Carolina주의 Neuse하구에서의 질소 습성강하물의 시공간적 변화를 검토하였다. 일본에서 타부치(田淵)와 타카무라(高村)(1984)가 강수 중의 질소와 인의 농도 및 부하량의 특성을 발표하였고, 에비세(海老瀬)(1991)는 강수의 농도 및 부하량을 다년간에 걸쳐 실측하였다. 우리나라에서 박경렬과 김대선(1990)은 연속강우시 산성우의 이온농도 변화에 관한 조사를 수행하였는데, 강우량 5mm 간격으로 측정한 농도와 강우량의 상관관계는 초기 15mm까지 pH, SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ 이온은 강우량의 증가와 함께 감소하였으며, 전체적으로는 pH와 SO_4^{2-} 는 감소하나, NO_3^- 와 Cl^- 은 증가하는 경향을 나타낸다고 보고하였다. 또한, 김종갑과 田中(1998)는 대기 오염지역과 비오염지역에서의 강우의 이온 특성을 조사하였다.

강수시 오염물질의 강하물량은 유역으로부터의 유출부하에 큰 영향을 미치는 데, 우리나라에서 비점원오염 관리에서 중요시되는 오염물질(질소, 인, COD)의 농도와 부하에 대하여 측정하고 평가한 예는 미흡한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 충북 청주시를 중심으로 1998년부터 2003년까지 6년간에 걸쳐 측정한 습성강하물 중의 총질소(TN), 총인(TP) 및 COD_{Cr} 의 농도와 부하특성을 검토하여 비점원오염에

관한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 조사지구 및 방법

본 연구에서는 충청북도 청주시에 위치한 충북대학교(127°27'E, 36°37'N) 구내에서 1999년부터 2003년까지 77회의 강수사상에 대한 수질측정이 수행되었다. 청주시는 인구가 1998년의 56만명에서 2003년 62만명으로 증가한 중규모의 도시이며, 충북대학교는 시가지에 위치하나, 구내에는 비교적 많은 수목이 있어 도시 공원과 같은 환경이며, 주위 2km 이내에는 산림, 농지 등이 존재하고 있다.

강수량은 강수채집 지점에서 약 1.5km 떨어진 청주 기상대의 시강수량 자료를 이용하였다. 강수사상의 수질은 강수사상 전 기간 동안에 집수(集水)된 것의 평균값을 취하였는데, 77회의 강수사상 중 2회는 강설에 의한 것이었고, 그 외는 강우에 의한 것이었다. 강우는 그림 1과 같은 강우채취기를 주위 건물에 의한 영향을 받지 않는 지표면(표고 56 m) 위에 설치하여 집수하였고, 강설은 갈매기와 안에 있는 채취병을 제거한 후 겉통에 적설(積雪)된 것을 녹여 집수하였다. 모든 수질시료는 신속히 실험실로 가져와 4 °C 이하의 온도로 보존하였으며, 가능한 한 빠른 시일 내에 분석을 실시하였다. 수질분석은 T-N, T-P 및 COD의 3항목에 대해서 수행하였는데, T-N과 T-P는 수질오염공정시험법(환경부, 1997)에 의한 흡광광도법으로 분석하였고, COD_{Cr} 는 Standard Methods(American Public Health Association, 1995)에 의한 중크롬산칼륨($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)을 이용하여 분석하였다.

실험자료에 대한 통계분석은 SAS(1999)를 사용하여 이루어졌고, 두 인자간의 회귀식은 $p < 0.05$ 보다 작은 경우에 유의성이 있는 것으로 판단하였다.

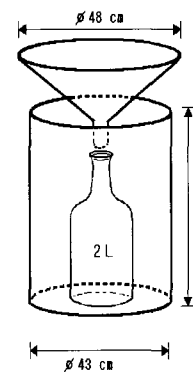


그림 1. 강우채취기

3. 결과 및 고찰

3.1 강수량 자료

1998년부터 2003년까지 수질측정이 실시된 77회 강수사상에 대한 기상자료를 정리하면 표 1과 같다. 강수사상의 평균값은 51.9mm, 최대값은 2002년 8월 6-8일의 269.5mm, 최소값은 강설인 2001년 1월 27일의 2.8mm를 나타냈다. 강수강도의 평균값은 3.2mm/h, 최대값은 1998년 8월 3일 6-7시의 48.5mm/h를 나타냈다. 강수지속시간의 평균값은 19시간, 최대값은 2000년 9월 13-15일의 63시간, 최소값은 2001년 7월 23일의 1시간을 나타냈다. 또한, 5일 선행강수의 평균값은 41.4mm이었고, 최대값은 278.5mm를 나타냈다.

3.2 강수농도의 평균 및 빈도분포

강수농도의 산술평균은 TN이 0.81mg/L, TP는 0.017mg/L, COD는 5.6mg/L이었으며, 강수량가중평균은 TN이 0.60mg/L, TP가 0.014mg/L, COD는 4.8mg/L로 각각 산술평균의 74%, 82%, 86%로 나타났다(표 2).

여기서 강수량가중평균은 각 강수사상에 대한 부하량(강수량 x 강수농도)의 합을 강수량의 합으로 나누어 구하였다. 따라서 습성강하물의 농도 및 부하는 산술평균을 이용하는 경우가 강수량가중평균을 이용하는 경우보다 과다로 산정될 것으로 생각된다. 일본에서 강수의 TN 농도는 강수량가중평균이 산술평균의 약 74-86%라고 보고되었다(田淵와 高村, 1984). 본 연구의 결과와 세계 각지에서 측정된 강수 농도를 비교하면 표 3과 같다. 조사지역의 강수의 TN 농도는 미국 Wisconsin주 Milwaukee시(Bannerman et al., 1983)이나 일본(國松과 須戸, 1994; 松尾 등, 1995)에서 측정된 값보다 낮았으며, TP 농도는 미국 Wisconsin주 Milwaukee시나 캐나다 Toronto시 북쪽 200km 지점(Dillon and Reid, 1981)에서 측정된 값과 비슷했으나, 일본에서의 측정값인 0.035-0.038mg/L보다는 낮게 나타났다. 한편, 한편 COD 농도는 연강수량이 1800mm인 일본 시마네현(島根縣) 마츠에(松江)시에서 측정된 값보다는 약간 높았으나, 연평균강수량이 1000mm 이하인 미국 Milwaukee시나 헝가리에서의 값보다는 낮게 나타났다.

표 1. 강수자료의 평균값, 최대값 및 최소값

구분	평균값	최대값	최소값
강수량 (mm)	51.9	269.5	2.8
강수강도(mm/hr)	3.2	48.5	0.0
강수지속시간(hr)	19	63	1
5일 선행강수(mm)	41.4	278.5	0.0

표 2. 강수농도의 평균값, 최대값 및 최소값

항목	표본개수	평균		최대값	최소값
		산술	강수량가중		
TN	76	0.81	0.60	4.44	0.08
TP	74	0.017	0.014	0.080	0.002
COD _{Cr}	73	5.6	4.8	31.9	0.1

표 3. 강수 중의 오염물질 농도

국가, 지역	추정기간	평균농도(mg/L)			인용문헌
		TN	TP	COD	
한국, 청주시	1998-2003	0.60	0.014	4.8	본 연구
일본, 시가현(滋賀縣) 쿠사즈(草津)시	1975-92 ^a	1.05	0.035	N/A	國松와 須戸, 1994
일본, 카스미가우라(霞ヶ浦) 호 주변	1978-79	1.2	N/A	N/A	高田, 1981
일본, 시마네현(島根縣) 마츠에(松江)시	N/A	1.03	0.038	2.9(4.3 ^b)	武田 등, 2001
미국, Wisconsin주, Milwaukee시	1996-99	0.9	0.015	7.0	Bannerman et al., 1983
캐나다, Toronto시 북쪽 200 km 지점	N/A	N/A	0.010-0.094	N/A	Dillon and Reid, 1981
헝가리, Balaton호 유역	N/A	1.0-7.0	0.0-0.5	9.0-16.0	Jolankai, 1983

a: 1982-89년은 결측, b: 1.5배하여 크롬법으로 환산한 값, N/A: 자료없음

표본 강수농도의 빈도분포를 보면, TN은 1mg/L 이하가 80%, TP는 0.02mg/L 이하가 73%, COD는 10mg/L 이하가 86%로 나타났다. 또한 최대빈도를 보면, TN은 0.0-0.5mg/L과 0.5-1.0mg/L에서 각각 40%, TP는 0.01-0.02mg/L에서 41%, COD는 0-5mg/L의 구간에서 43%를 나타냈다.

3.3 강수량과 강수농도와의 관계

강수사상에서의 강수량의 크기는 강수 중의 오염물질의 농도에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 강수량과

오염물질 농도의 관계를 보면, 강수량이 증가할수록 TN, TP 및 COD의 농도는 유의적으로 하강하는 경향을 나타냈는데, 결정계수(R^2)는 $TN > TP > COD$ 의 순으로 나타났다(그림 3). 이 결과는 오염물질의 농도가 강수량이 적을 때는 높고, 강수량이 많을 때에는 낮아질 것이라는 일반적인 견해와 일치하는 것으로 나타났다. 일본에서도 TN 농도와 강수량은 음의 상관관계($R = -0.44 \sim -0.63$)가 있는 것으로 보고되었다(田淵와 高村, 1984).

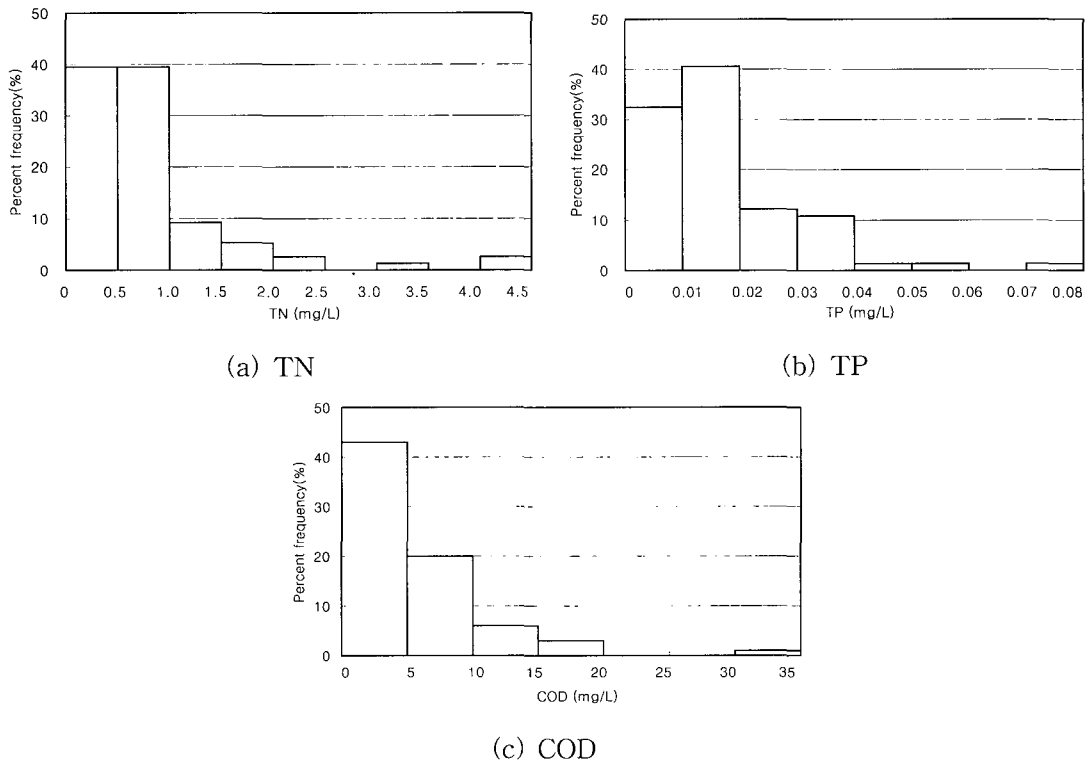


그림 2. 오염물질 농도의 빈도분포

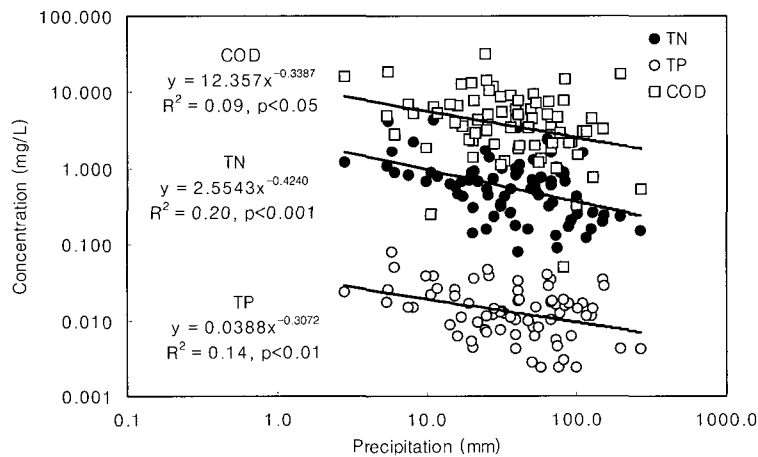


그림 3. 강수량과 농도와의 관계

3.4 선행강수와 강수농도와의 관계

선행강수가 후에 발생하는 강우사상의 수질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 선행강수의 지표로서 5일 선행강수량을 선정하여 이것과 강수 농도의 관계를 조사하였다. 5일 선행강수량이 작은 경우에는 농도의 차가 심하게 나타났으나, 5일 선행강수량이 큰 경우에는 농도의 차가 작게 나타났다(그림 4). 5일 선행강수량의 증가에 따른 TP 농도는 높은 상관관계를 보이지 않았으나 유의적($p < 0.05$)으로 하강하는 경향을 나타냈고, TN과 COD 농도는 유의적인 관계를 보이지 않았다. 따라서 입자성 성분이 높은 인(P)은 선행강수에 의해 어느 정도 씻겨 내려가는 것으로 생각된다.

3.5 계절별 강수농도

계절을 봄(3-5월), 여름(6-9월), 가을(9-11월) 및 겨울(11-2월)로 구분하여 강수농도를 비교하였는데, 겨울 샘플 중 2개는 강설에 의한 것이었다. TN, TP 및 COD의 강수량가중평균농도는 모두 봄에 가장 높고, TN 농도는 가을, TP 농도는 겨울, COD 농도는 여름에 가장 낮게 나타났다(표 4). 강수농도가 봄이 다른 계절

보다 높게 나타나는 것은 풍식(風蝕)이나 황사에 의한 먼지, 꽃가루 등 때문으로 생각된다. 농업지역으로부터 발생하는 먼지는 겨울처럼 토양이 눈으로 덮여 있는 시기나 여름과 같이 담수(湛水)되어 토양수분이 많은 시기보다 봄과 같이 기후가 따뜻하고 토양수분이 적은 시기에 많이 발생한다. 일본 카스미가우라(霞ヶ浦) 유역에서도 TP 농도는 봄과 여름에 높고 가을과 겨울에는 낮아지는 것으로 보고되었다(安部, 1984).

3.6 경년변화

강수농도는 연별로 변화하여 TN 농도는 0.39-0.90mg/L, TP농도는 0.009-0.021mg/L, COD 농도는 2.76-6.76mg/L를 나타냈다(표 5). 농도의 최대값과 최소값은 수질항목에 따라 연도별로 달리 나타났는데, 최대값의 경우, TN은 1999년, TP는 2000년, COD는 1998년에 나타났고, 최소값의 경우, TN은 2002년, TP는 1998년, COD는 2003년으로 나타났다. TN이 2002년에 낮게 나타난 것은 최대강수량(269.5mm)를 보인 강수사상에서 낮은 농도(0.15mg/L)를 나타냈기 때문으로 생각되며, COD가 2003년에 낮은 농도를 보인 것은 잦은 강수 때문으로 생각된다.

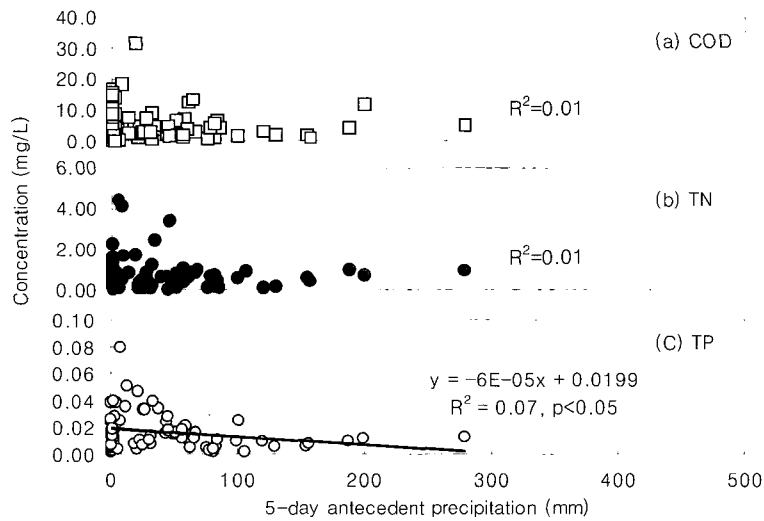


그림 4. 5일 선행강수량과 강수농도와의 관계

표 4. 계절별 평균 강수농도의 비교

계절	표본갯수			강수량가중평균농도(mg/L)		
	TN	TP	COD	TN	TP	COD
봄	9	7	9	0.85	0.018	11.25
여름	53	53	49	0.62	0.014	3.27
가을	11	11	12	0.35	0.016	8.41
겨울	3	3	3	0.80	0.012	5.52

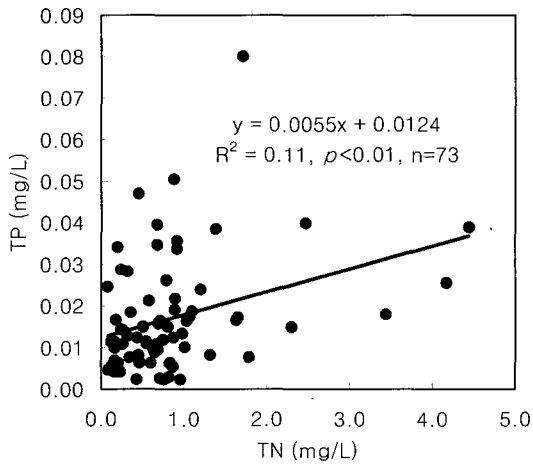
표 5. 1998-2003년의 연별 강수량가중평균농도

연도	강수량 (mm)	표본갯수			강수량가중평균농도(mg/L)		
		TN	TP	COD	TN	TP	COD
1998	1640.2	19	16	17	0.61	0.009	6.76
1999	1326.5	13	13	13	0.90	0.014	6.00
2000	1357.6	10	10	10	0.54	0.021	4.72
2001	784.1	14	15	14	0.67	0.017	3.63
2002	1281.8	9	9	9	0.39	0.011	3.78
2003	1581.8	11	11	10	0.51	0.018	2.76

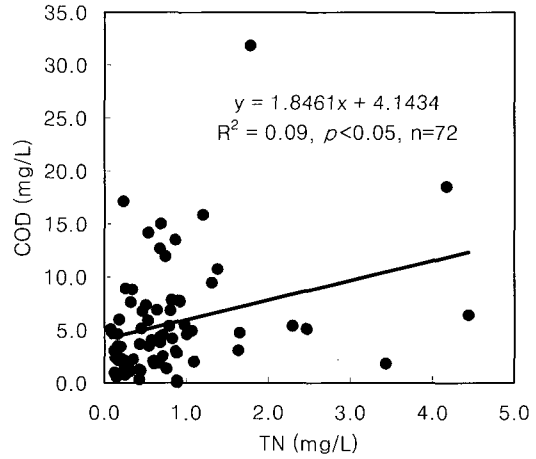
3.7 성분간의 상관관계

측정한 TN, TP 및 COD 농도의 상관관계를 보면 TN과 TP, TN과 COD는 각각 유의수준 0.01과 0.05에서 상관관계가 있는 것으로 나타났으나, TP와 COD는

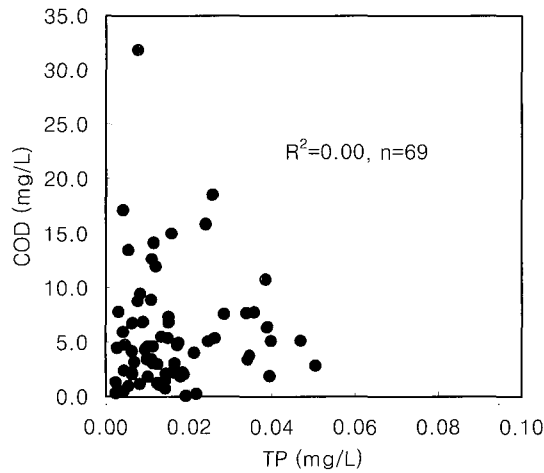
상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다(그림 5). 한편, 일본 이바라기(茨城) 대학에서 측정한 결과에서는 TN과 TP는 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났으나, TN과 COD는 비교적 높은 상관관계($R=0.61$)가 있는 것으로 보고되었다(田淵와 高村, 1984).



(a) TN과 TP의 관계



(b) TN과 COD의 관계



(c) TP과 COD의 관계

그림 5. 각 성분과의 관계

3.8 강수량과 습성강하물 부하의 관계

강수사상에 대한 습성강하물 부하(강수부하라고도 함)는 강수량에 강수농도를 곱하여 구했다. TN, TP 및 COD에 대한 습성강하물 부하는 강수량과 고도의 유의 수준($p < 0.001$)에서 상관관계를 보여, 강수량의 증가에 따라 완만히 증가하는 것으로 나타났다(그림 6). 지수식의 지수는 0.58-0.70으로 모두 1보다 작게 나타났다.

3.9 습성강하물의 연간부하

습성강하물 연간부하의 범위는 TN 5.0-12.0kg/ha·yr, TP 0.13-0.29kg/ha·yr, COD 28.5-110.8kg/ha·yr로 나타났고, 평균값은 TN 7.9kg/ha·yr, TP 0.19kg/ha·yr, COD 63.9kg/ha·yr로 나타났다(표 6). 연강수량이 784.1mm로 가장 적었던 2001년에 TP와 COD의 연간부하는 가장 낮게 나타났다. 일반적으로 대기로부터 영양물질의 강하물량은 극지방에서는 적고, 온대 기후이며 영양염류가 많은 토양의 농업지역에서는 많은 데(Kalff, 2002), 본 연구의 결과와 세계 각지에서 측정된 습성강하물의 연간부하를 비교하면 표 7과 같다. 조사

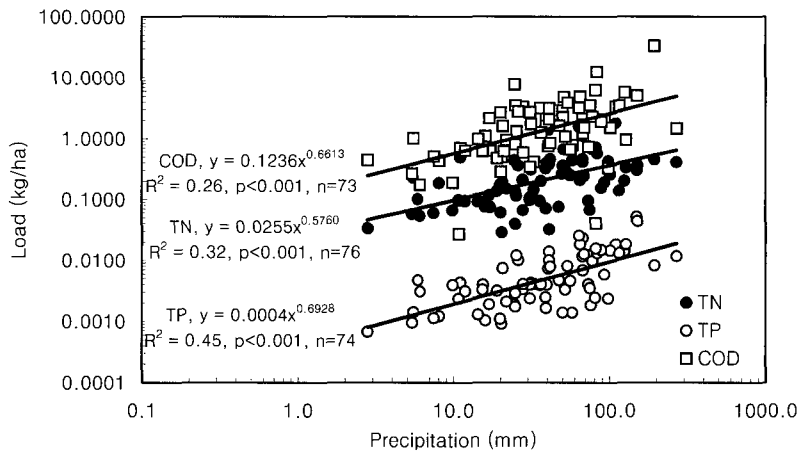


그림 6. 강수량과 부하와의 관계

표 6. 1998-2003년의 습성강하물 연간부하

연도	강수량(mm)	연간부하(kg/ha·yr)		
		TN	TP	COD
1998	1640.2	10.0	0.14	110.8
1999	1326.5	12.0	0.18	79.6
2000	1357.6	7.3	0.29	64.0
2001	784.1	5.2	0.13	28.5
2002	1281.8	5.0	0.14	48.5
2003	1581.8	8.1	0.29	43.7
평균	1328.7	7.9	0.19	63.9

표 7. 습성강하물 연간부하의 비교

국가, 지역	측정기간	연간부하(kg/ha·yr)			참고문헌
		TN	TP	COD	
한국, 청주시	1998-2003	5.0-12.0	0.13-0.29	28.5-110.8	본 연구
일본	N/A	4.6-17.2	0.06-0.58	18.8-41.6 (28.2-61.4 ^a)	日本水環境學會 1992
일본, 카스미가우라(霞ヶ浦) 호 주변	1978-1979	12.1	N/A	N/A	高田, 1981
미국	N/A	5.6-10	0.05-0.1	N/A	Ritter, 1988
미국, North Carolina	1996-1999	9.6	N/A	N/A	Whitall and Paerl, 2001
미국, Great Lake 인접지역	N/A	3.0-3.5	N/A	N/A	Chapin and Uttormark, 1973
헝가리, Balaton 호 유역	N/A	1.2-28	N/A	124	Jolankai, 1983

a: 1.5 배하여 크롬법으로 환산한 값, N/A: 자료없음

지역의 TN 부하는 일본(日本水環境學會, 1992), 미국(Ritter, 1988)이나 Hungary(Jolankai, 1983)에서의 값과 비슷하게 나타났고, Great Lake 주변지역에서의 값(Chapin and Uttormark, 1973)보다는 높게 나타났다. TP 부하는 일본(日本水環境學會, 1992)에서의 값과는 비슷하게 나타났으나, 미국(Ritter, 1988)에서의 값보다는 높게 나타났다. 한편, COD 부하는 농도가 낮았던 일본(日本水環境學會, 1992)에서의 값보다는 약간 높게 나타났으나, 높은 농도를 보인 헝가리(Jolankai, 1983)에서의 값보다는 낮게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 충청북도 청주시에서 위치한 충북대학교 구 내에서 1998-2003년간 77회의 강수사상을 대상으로 습성 강하물 중의 TN, TP 및 COD의 농도와 부하 특성을 검토하였는데, 여기서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

1. 강수량가중평균은 TN이 0.60mg/L, TP가 0.014 mg/L, COD는 4.8mg/L로 각각 산술평균의 74, 82, 86%로 나타나, TN, TP 및 COD의 농도와 부하량은 산술평균을 이용하는 경우가 강수량가중평균의 경우보다 과다로 산정될 것으로 추정된다.
2. TP 농도는 선행강수량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 데, 이는 입자성 성분이 강한 인이 선행강수에 의하여 씻겨 내려가기 때문으로 생각된다.
3. TN, TP 및 COD의 강수농도는 모두 봄에 가장 높게 나타났는데, 이는 풍식 및 황사에 의한 먼지, 꽃가루 등 때문으로 생각된다.
4. TN과 TP 농도, TN과 COD 농도와의 관계를 직선식으로 나타낸 경우, 유의적인 상관관계가 있는 것으로 나타났으나, TP와 COD 농도는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다.
5. 습성강하물의 연간부하는 TN 5.0-12.0kg/ha·yr, TP 0.13-0.29kg/ha·yr, COD 28.5-110.8kg/ha·yr로 나타났는데, 이를 일본에서의 값과 비교하면 TN과 TP는 비슷하고, COD는 약간 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 주로 강수사상 전체기간 동안의 TN, TP 및 COD의 농도와 부하량을 대상으로 하였으나, 향후 습성강하물의 농도나 부하량의 시간적 변화, 암모니아성 질소, 질산성질소, 인산성 인과 같은 각 성분에 대한 검토도 필요할 것으로 생각된다. 또한, 습성강하물의 pH는 조사지구에서 비교적 가까운 대전시나 충청북도 괴산군에서 2002년 평균 5.0-5.1(환경부, 2003)를 나타

냈으나 이에 대한 검토도 요망된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 김종갑, 田中淳一 (1998). 대기오염지역과 비오염지역 강우의 이온특성, **한국생태학회지**, 21(3), pp. 195-201.
- 박경렬, 김대선 (1990). 연속강우시 산성우의 이온 농도 변화에 관한 조사 연구, **한국환경위생학회지**, 16(2), pp. 11-20.
- 환경부 (1997). **수질오염공정시험방법**, pp. 199-209.
- 환경부 (2003). **대기환경연보(2003)**, pp. 57-58.
- 高田和男 (1981). 雨水の分析、環境科學研究報告(霞ヶ浦とその周辺の生態系動態) B93-R12-2.
- 國松孝男, 須戸幹 (1994). 大氣降下物による窒素、リンの供給とその變動, **環境技術**, 23(7), 10-713.
- 武田育郎 (2001). 水と水質環境の基礎知識, Ohmsha, pp. 124-125.
- 安部喜也 (1984). 霞ヶ浦流域における大氣中からの栄養塩の降下物およびその経年變動について、**國立公害研究所報告**, 20, pp. 27-42.
- 日本水環境學會 (1992). 湖沼水質保全對策效果検証基礎調査、環境廳委託業務結果報告書
- 田淵俊雄, 高村義親, 鈴木誠治 (1979). 雨と雪の中の窒素とリン, 水溫の研究, 23(1), pp. 13-22
- 田淵俊雄, 高村義親 (1984). 集水域からの窒素、リンの流出, 東京大學出版會, pp. 1-20.
- American Public Health Association (1995). *Standard Methods for the Water and Wastewater Examination*, 19th ed., Washington, D. C.
- Bannerman R., Baun, K., Hughes, P. and Graczyk, D. (1983). *Nationalwide Urban Runoff Program, Milwaukee, Wisconsin: Evaluation of Urban Non-point Source Pollution Management in Milwaukee County, Wisconsin*, Wisconsin Department of Natural Resources, Madison; Environmental Protection Agency, Chicago, Region V; Contract EPA-P-005432-01-5; available from Technical Information Service, Springfield, VA.
- Chapin, J.D. and Uttormark, P. D. (1973). *Atmospheric Contributions of Nitrogen and Phosphorus*, Tech. Rep. Wat. Resources Ctr. Univ. Wis. 73-2 pp. 35.

- Dillon, P.J. and Reid, R. A. (1981). Input of biologically available phosphorus by precipitation to Pre-cambrian lakes. In: Eisenreich, S. (ed), *Atmospheric pollutants in natural waters*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan.
- Jolankai, G. (1983). Modeling of nonpoint source pollution. In: Jorgensen, S. E. (ed) *Application of Ecological Loading in Environment Management*. Amsterdam, Elsevier, pp. 283-395.
- Kalff, J. (2002). *Limnology*, Prentice Hall, pp. 113-114.
- Likens, G. E., Bormann, F. H., Pierce, R. S., Eaton, J. S., and Johnson, N. M., (1977). *Biochemistry of a Forested Ecosystem*, Springer-Verlag, New York.
- PLUARG(Pollution from Land Use Activities Reference Group) (1977). *Evaluation of remedial measures to control non-point sources of water pollution in the Great Lakes basin*, International Joint Commission, Washington, DC, pp. 115.
- Ritter, W. F. (1988). Reducing impact of nonpoint pollution from agriculture: a review, *J. Environ. Sci. Health*, 25, pp. 821.
- SAS Institute (1999). *The SAS system for Windows*. Version 8. Release 8.1. SAS Inst., Cary, N.
- Whitall, D. R. and Paerl, H. W. (2001). Spatiotemporal variability of wet atmospheric nitrogen deposition to the Neuse River Estuary, North Carolina, *J. of Environmental Quality*, 30, pp. 1508-1515.
- (논문번호:04-56/접수:2004.05.31/심사완료:2004.10.15)