

## 낙동강 수계에서 부유물질 침강속도

조규수 · 성진욱 · 박제철\*

금오공과대학교 환경공학과

(2011년 6월 20일 접수; 2011년 10월 26일 수정; 2011년 11월 21일 채택)

## Settling Velocity of Suspended Material in Nakdong River

Gyu-Soo Joe, Jin-Uk Seong, Je-Chul Park\*

Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

(Manuscript received 20 June, 2011; revised 26 October, 2011; accepted 21 November, 2011)

### Abstract

This study was conducted to identify the sedimentation quantity and settling velocity, sediment fundamental data that an important position of water quality management of Seston, POC, PP and PN in Nakdong river basin using a sediment traps to collect suspended material pollutants. Nakdong river basin is that average sedimentation quantity of seston, POC, PP and PN were 124~1,125 g/m<sup>2</sup>/d, 2,963~25,072, 26~347, 445~2,184 mg/m<sup>2</sup>/d, respectively. Settling velocity of Seston, POC, PP and PN were 17.0, 35.5, 8.7, 2.4 m/d. It was appeared that various results according to the river flow, weather and other environmental factors. There was no significant correlation, each suspended material pollutants. Sedimentation rates are likely to be overestimated because the flow is not considered to resuspended materials. Therefore diversification through continued monitoring is needed to be analyzed.

**Key Words** : Sedimentation quantity, Settling velocity, Seston, POC, PP, PN

### 1. 서론

수중 생태계는 물리·화학·생물학적으로 매우 복잡한 시스템으로 구성되어 있으며, 시·공간적으로 변화하는 특성을 지니고 있다. 따라서 수중생태계를 수학적으로 기술하고 수치해석법으로 풀어나가는 수질모델링 작업이 필수적이다.

이러한 수질모델링 작업은 수질항목, 매개변수, 반응계수 등 많은 초기 입력 자료에 대한 조사가 필요로 하며, 이러한 자료들은 지역에 따른 기후적 특성이 고려되어야 할 것이다. 특히 우리나라의 경우 몬순 기후

적 특성으로 여름철에 강우가 집중되고 있으며, 최근 들어 기후변화에 따른 강우패턴이 국지성 호우로 바뀌어 가고 있다. 따라서 기후적 특성이 다른 외국에서 사용되고 있는 수질모델은 우리나라의 현실에 부적합한 측면이 있으며, 외국의 자료를 그대로 인용하는 경우 많은 오류를 범하게 된다. 그러나 이제까지 국내 수질 모델링의 경우 반응계수의 실측한계로 인해 대부분 한 두 개의 반응계수를 이용하여 무리하게 모델을 보정하거나 현장 특성을 무시한 채 기존의 외국자료를 그대로 이용하고 있어 예측 결과의 신뢰도가 떨어지고 있다(국립환경과학원, 2006). 실제로 유기물질의 침강속도를 직접적으로 결정하기 위해 Stokes 법칙을 사용하는 모델은 많지 않다. 중요한 이유 중의 하나는 일반적으로 자연수가 대부분 난류인 반면 Stokes 법칙은 흐름이 층류일 것을 전제하고 있기 때문이다.

\*Corresponding author : Je-Chul Park, Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea  
Phone: +82-54-478-7633  
E-mail: pjcl963@kumoh.ac.kr

또한 식물성 플랑크톤과 같은 생명체는 배부의 공기 주머니를 이용하여 부력을 가질 수 있다. 그리고 이들의 침강속도는 생리학적 상태에 따라 매우 다양해 질 수 있다. 그리고 플록의 형성과 침전 작용은 Stokes 법칙을 직접적으로 적용하는데 어려움을 더해준다(서 등, 1999).

수생태계에서의 침강물질의 구성은 주로 내부에서 생성되는 생물기원의 동식물의 사체, 외부에서 유입되는 입자성 물질, 유기 및 무기의 영양염류 등이 있다. 이러한 침강물질은 그 자체가 오염물로 작용하기도 하며, 최종적으로 퇴적물의 형태로 저장된다. 퇴적물은 물이나 생물체보다 더 오랜 시간을 대표하기 때문에 중·장기적인 오염의 양상을 파악하는데 용이하며 퇴적물의 침강량 및 침강속도를 측정하여 퇴적물과 호소의 수질변화의 상관관계를 예측할 수 있다. 침강물질의 퇴적속도는 물리·화학·생물학적 특성에 따라 결정되며, 특히 호소의 경우에는 성층의 형성 유무, 체류시간, 혼합층의 깊이 등에 따라 침강특성이 달라진다(Kalff, 2002).

부유물질의 침강량 및 침강속도는 이러한 퇴적물의 기초자료 및 수질변화와의 상관관계를 예측할 수 있는 자료로 활용될 수 있다. 현재 국내에서 수질모델링 인자와 관련된 연구를 보면 영산강과 섬진강 수계의 유기인 및 유기질소 분해속도(자히들 등, 2008; 김 등, 2009), 금강 수계에서 유기탄소의 분해속도(장 등, 2008)에 관한 연구가 이루어져 주로 분해속도와 관련된 내용이였다. 그러나 국내 하천에서의 부유물질의 침강속도에 관한 연구는 다소 부족한 실정이며, 정수장에 요인으로서의 관점에서 조류의 침강특성에 관한 연구(이 등, 2002), 4대강수계 수질오염총량관리를 위한 수질예측모델인자 적용성 연구(국립환경과학원, 2008)가 이루어졌다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 수계의 대표지점을 대상으로 부유물질 포집용기를 설치하여 하천에서의 부유물질(Seston, POC, PP, PN)농도를 측정하였고, 이에 따른 부유물질의 침강량과 침강속도를 계산하여, 침강물질의 특성을 파악하여 기타권역에서 수행된 연구의 결과와 비교하고, 이를 바탕으로 낙동강 수계에서 부유물질에 대한 수질관리 목표 설정에 중요한 판단기준을 제공하며, 수질모델링의 매개변수 설

정에 중요한 자료로 활용되고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상지의 개요

본 연구 대상지인 낙동강은 강원도 태백시 함백산에서 발원하여 부산광역시 강서구까지 510.4 km를 흘러 남해로 유출된다. 유역면적은 23,669.3 km<sup>2</sup>이며, 유역 둘레는 1,091.1 km, 동서 폭은 약 180 km, 남북 길이는 약 120 km에 달한다(부산발전연구원, 2009). 또한 낙동강 수계는 안동, 구미, 대구, 부산 등의 대도시 생활권으로서 영남지역의 생활용수의 공급원이다. 조사지점은 하상의 경사가 완만하여 유속이 느린 낙동강 중·하류를 중심으로 달성(N1), 고령(N2), 대암(N3), 합천(N4), 낙본H(N5), 남지(N6), 신촌(N7), 하남(N8), 삼랑진(N9), 물금(N10), 구포(N11)의 하천본류 11 지점을 선정하였다(Fig. 1).

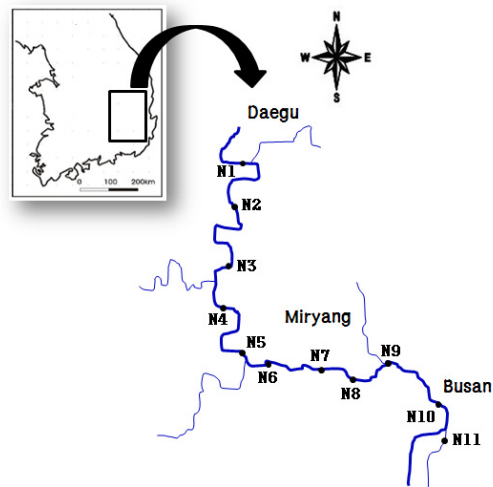


Fig. 1. Study area and the locations of survey sites.

### 2.2. 조사 및 분석방법

부유물질 포집을 위해 포집용기(sediment trap)를 구경 약 5 cm, 길이는 30 cm로 제작하였다. 현장에 설치된 모습은 아래 Fig. 2와 같다. 설치기간은 기상조건과 용기 내 물리·화학·생물학적 변화가 빠르기 때문에 가능한 1일 간격으로 5일 정도가 적당할 것으로 판단되어(국립환경연구원, 2003) 현장상황에 최적화

하여 기간을 설정하였다. 본 조사 구역은 수심이 비교적 얇았기 때문에 수심별 포집은 수행하지 않았으며 하상바닥에 포집용기가 위치하도록 설치하였다. 조사 시기는 2004년에 총 4회(2, 4, 6, 9월)를 실시하였다. 강수량 자료(기상청, 2004)를 이용하여 조사지점이 위치한 대구, 합천, 밀양, 부산 지역의 강수량 데이터를 분석하였다.

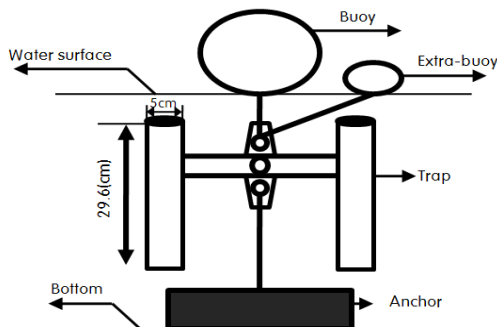


Fig. 2. Set up of sediment trap in water.

조사항목은 입자성 인(PP), 입자성 질소(PN), 총부유물질(Seston), 입자성 유기물(POC)를 선정하였으며, POC는 시료를 GF/F 유리섬유 여과지로 여과한 후 여과지를 CS analyzer (Leco-SC-444)를 이용하여 1,200℃ 고온에서 태워 그 함량을 분석하고 분석된 탄소함량을 mgC/L로 환산하였다. SS(Seston), PN과 PP의 경우 수질오염공정시험방법(환경부, 2005)에 따라 TN, DTN, TP, DTP를 분석하여 PN(TN-DTN), PP(TP-DTP)를 계산하였다. 분석 결과로부터 아래의 식을 이용하여 면적당 침강량을 계산하고, 침강속도를 산정하였다.

$$S = m / (A \times t) \tag{1}$$

여기서, S = 면적당 침강량(mg/m<sup>2</sup>/day)  
 m = trap 내의 침강물질의 양(mg)  
 A = 침강용기 상단면적(m<sup>2</sup>)  
 t = 설치기간(d)

식 (1)로부터 계산된 침강량과 수중의 농도를 대입하여 부유물질의 침강속도는 식 (2)로 산정하였다.

$$S = c \cdot v \tag{2}$$

여기서, S = 면적당 침강량(mg/m<sup>2</sup>/d)  
 c = 수중의 농도 (mg/m<sup>3</sup>)  
 v = 침강속도 (m/d)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 부유물질의 수중농도 및 단위 면적당 침강량 분석

조사시기별 수중농도 및 단위 면적당 침강량을 Fig. 3에 나타내었다. Seston, POC, PP, PN의 수중 농도는 각각 7.0~40.0, 0.03~0.52, 0.011~0.139, 0.1~3.3 mg/L 범위로 나타났다. 계절적인 변화를 보면 Seston과 POC의 경우 간헐적인 강우가 많았던 4월 조사에서 가장 높은 농도로 나타났고, 전체적으로 강우기인 6, 9월 조사에서 높은 경향을 보였다. PP와 PN의 경우 갈수기인 2월 조사에서 가장 높은 농도로 나타났고, 나머지 조사에서는 거의 비슷한 농도 범위를 보였다. 조사 지점별 분포를 보면 Seston, POC, PP, PN 농도는 각각 하남(N8), 달성(N1), 구포(N11), 고령(N2) 지점에서 가장 높게 나타났고, 고령(N2), 합천(N4), 달성(N1), 달성(N1) 지점에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 전체적으로 각 항목마다 일정한 농도의 증감이 나타나지 않아, 뚜렷한 지역적 특성을 파악하기는 어렵지만, 상류지역인 달성(N1)에서 하류지역인 구포(N11)지점으로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보였다. Seston, POC, PP, PN의 단위면적당 침강량은 각각 124~1,125 g/m<sup>2</sup>/d, 2,963~25,072, 26~697, 445~2,184 mg/m<sup>2</sup>/d의 범위로 나타났다. 계절적인 변화를 보면 Seston과 PP의 경우 9월 조사에서 가장 많은 침강량을 보였고, 6월 조사에서 가장 적은 침강량을 보이는 것으로 조사되었다. POC와 PN의 경우 각각 4월과 2월 조사에서 가장 많은 침강량을 보였고, 공통적으로 9월 조사에서 가장 적은 침강량을 보이는 것으로 조사되었다. 조사 지점별 분포를 보면 Seston, POC, PP, PN의 단위면적당 침강량은 각각 낙본H(N5), 낙본H(N5), 고령(N2), 삼랑진(N9) 지점에서 가장 높게 나타났고, 구포(N11), 합천(N4), 달성(N1), 합천(N4) 지점에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 단위면적당 침강량의 특성은 농도의 특성에 비해 계절

Table 1. Precipitation of survey period

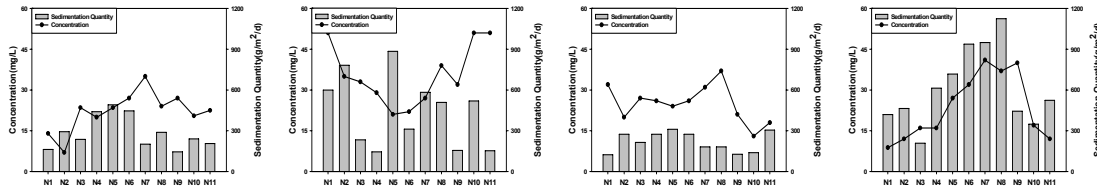
(Unit : mm)

Parameters	Month												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Mean	0.0	2.1	0.9	4.1	4.2	7.8	5.4	11.6	6.2	0.2	1.7	0.7	
Median	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Maximum	0.5	61.5	21.0	65.0	41.5	103.5	82.5	178.5	100.5	13.5	49.0	26.0	
Minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

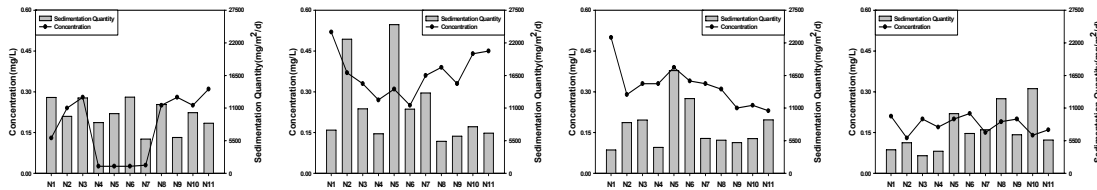
및 지역적 특성이 잘 나타나지 않았는데 이는 하천의 경우에는 유속에 따라 침강량이 크게 달라질 수 있고, 특히 기상변화에 영향을 받아 수체에 난류가 발생하여 침강량에 영향이 있는 것으로 판단된다. 따라

서 수체의 농도가 높다고 하여 반드시 단위면적당 침강량이 많지 않은 것을 조사 결과를 통해 확인할 수 있었다.

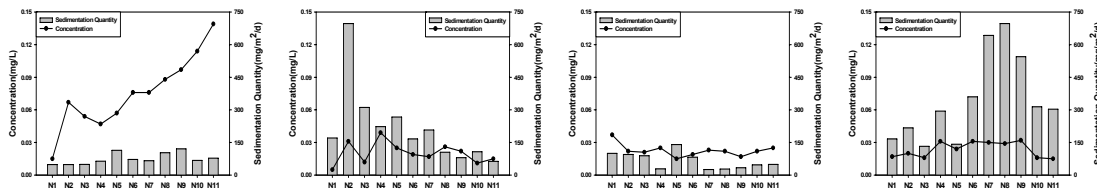
Seston



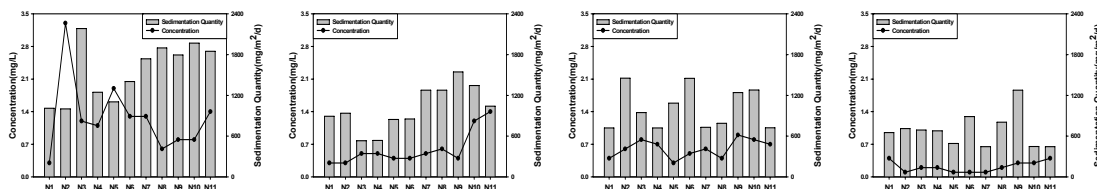
POC



PP



PN



2004, Feb.

2004, Apr.

2004, Jun.

2004, Sep

Fig. 3. Water concentration and sedimentation quantity of each material in Nakdong River.

3.2. 상관관계 분석결과

각 항목별 상관성을 알아보기 위한 수중농도 및 단위 면적당 침강량의 상관관계 결과는 다음과 같다 (Table 2). 낙동강 수계의 부유물질의 농도 간 상관관계는 PP-PN 항목에서 가장 높은 상관성을 보였지만 대체적으로 낮은 상관성을 보였고, 일부 항목사이에서는 음의 상관성을 보이는 경우도 있었다. 침강량의 상관관계는 Seston-POC 항목에서 0.700으로 상관성이 가장 높은 것으로 나타났고, 나머지 항목들 사이에서는 대체로 낮은 상관성을 보였고, 농도 간 상관관계와 마찬가지로 음의 상관성을 보이는 항목도 있는 것으로 조사되었다.

3.3. 부유물질의 침강속도

부유물질 침강속도의 지점별 평균 및 최대, 최소값을 Fig. 5에 나타내었다. Seston, POC, PP, PN의 평균 침강속도는 각각 17.0, 35.5, 8.7, 2.4 m/d로 POC의 침강속도가 가장 큰 것으로 조사되었다. Seston과 POC의 침강속도는 9월에 가장 높고(각각 29.0, 41.9 m/d), 6월에 낮아(각각 9.5, 25.4 m/d) 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났고, PP의 경우 강우가 많았던 4월과 9월(각각 14.5, 15.7 m/d)에 높고, 2월에 가장 낮은(1.4 m/d) 침강속도를 보였다. PN의 경우 9월에(4.1 m/d) 가장 높은 값으로 나타났으나, 다른 항목들에 비해 연중 변화는 크게 없는 것으로 조사되었다. 지점별 특징

Table 2. Correlation coefficients of each suspended material

Parameter	Seston		POC		PP		PN	
	Con.	Quan.	Con.	Quan.	Con.	Quan.	Con.	Quan.
Seston	1	1	-	-	-	-	-	-
POC	0.084	0.700*	1	1	-	-	-	-
PP	0.247	0.477	-0.267	0.257	1	1	-	-
PN	-0.605*	-0.311	-0.057	-0.073	0.431	0.260	1	1

(\* significant at 0.01, \* significant at 0.05)

Nakdong River Basin

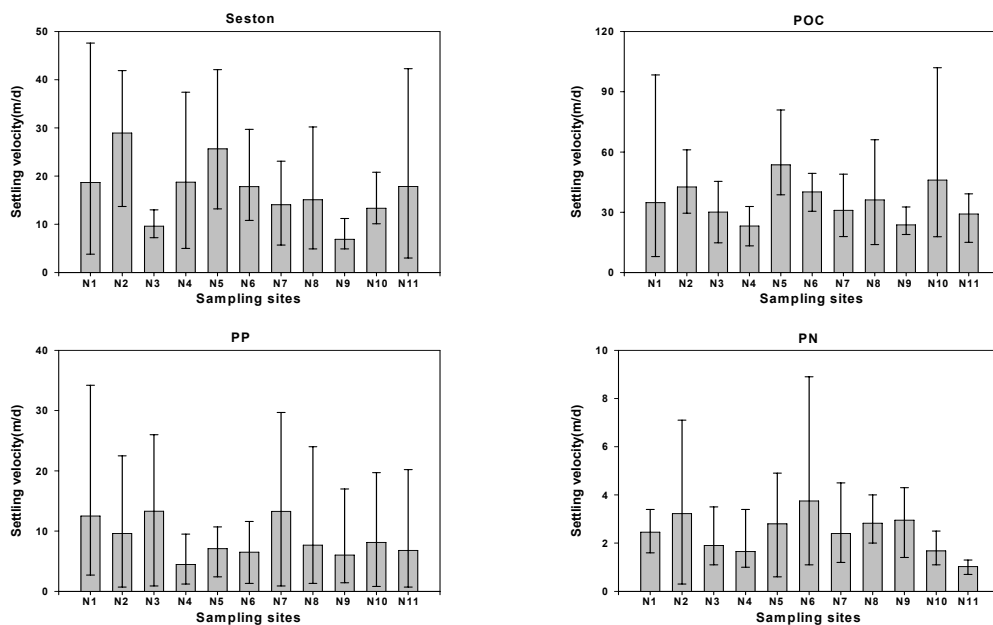


Fig. 5. Settling velocity of suspended pollutants.

**Table 3.** Comparison of settling velocity with previous study

	Settling velocity(m/d)				
	Reference(국립환경과학원, 2008)				This study (Nakdong Riv.)
	Han Riv.	Geum Riv.	Yongsan Riv.	Seomjin Riv.	
Seston	0.21~7.05	2.50~113.50	0.50~132.50	1.40~36.40	3.00~47.60
POC	0.04~5.92	1.20~16.80	1.10~18.00	1.10~21.20	7.90~102.00
PN	0.01~8.59	0.60~12.00	0.80~15.30	0.30~10.00	0.30~8.90
PP	0.06~8.23	1.10~38.60	1.00~58.60	0.60~65.70	0.70~34.2

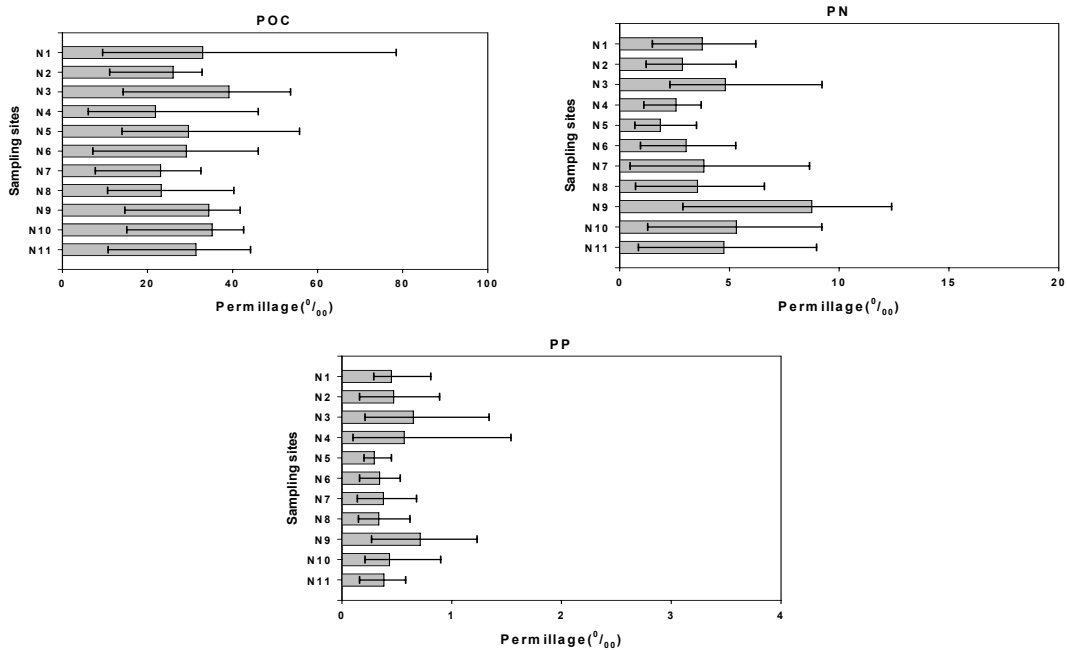
은 수중농도와 단위 면적당 침강량과 마찬가지로 각 항목별로 뚜렷한 특징이 없이 다양한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 향후 지속적인 모니터링을 통해 추가적인 데이터 확보와 다각적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

침강속도에 대한 국내에서 조사된 선행 연구결과와 본 연구에서 조사된 침강속도를 비교하였다(Table 3). 전체적으로 국내 주요 하천에서 조사된 침강속도와 비슷한 범위로 나타났고, 대체로 한강 보다는 다소 높고, 금강, 영산강, 섬진강 보다는 약간 낮은 경향을 보였다. POC 침강속도의 경우는 본 연구의 조사 대상 지인 낙동강 수계에서 다른 수계보다 높게 나타났다.

본 연구에서 측정된 PN과 PP의 침강속도는 외국의 기존 수질모델링(QUAL2E)에서 제시한 0.001~0.1보다 약 10~100배 이상 높은 것으로 조사되었는데, 이는 기저농도가 외국의 하천보다 높은 가능성, 유역의 특성이 다를 가능성 또한 하천의 자연 상태에서는 재부유에 의해 침강량이 감소하는데 반해 본 연구에서는 재부유양이 고려되지 않고 모두 측정되었기 때문에 침강량과 침강속도가 과대평가 되었을 가능성이 있을 것으로 판단된다.

**3.4. Seston에서의 POC, PN, PP의 함량 분석**

부유물질(Seston)에서 POC, PN, PP의 함량의 평균 및 최대, 최소값을 Fig. 6에 나타내었다. 낙동강 수계



**Fig. 6.** Permillage of PP, PN and POC to Seston.

의 전체 부유물(Seston)중 POC, PN, PP의 함량은 각각 13.39~38.92, 1.39~6.53, 0.31~0.60 %로 나타났다. Algae 기원의 내부생산 유기물은 유기탄소함유율이 높으며, 유입 고형물은 토양의 침식으로부터 유래하므로 현저하게 낮은 유기탄소 함유율을 나타내는 것으로 알려져 있다(Steven, 1997). 본 연구에서는 2월(38.92 %)에 유기탄소의 함량이 가장 높게 나타났는데 이는 강우량이 적어 하천이 정체되고 내부생산량이 많아지면서 침강량과 침강속도가 증가한 것으로 판단된다. 반면에 강우가 비교적 잦고 유량이 많았던 9월(13.39 %)에 가장 낮게 나타났는데, 이는 강우량이 증가함에 따라 빠른 유속에 의해 조류에 의한 내부생산이 줄어든 결과로 보이며, 각 지점별 POC, PN, PP의 함량은 4회 조사 모두 하천의 하류에서 비교적 높은 경향을 보이는 것으로 조사되었다.

#### 4. 결론

낙동강 수계의 부유(입자성)물질에 대한 수질관리 목표 설정에 중요한 판단기준을 제공하고, 수질모델링의 매개변수 설정에 중요한 자료로 활용하고자, Seston, POC, PP, PN의 수중농도와, 단위 면적당 침강량, 침강속도 등을 조사하였다. 총 4회의 조사에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수중농도 및 단위 면적당 침강량은 Seston, POC의 경우 전체적으로 강우기에(6월) 높은 농도로 나타났고, PP, PN은 갈수기(2월)에 더 높은 농도를 보였다. 대체적으로 상류지역 보다 하류지역에서 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다. 단위 면적당 침강량은 수중농도가 높은 강우기에 반드시 높은 값을 보이지 않는 것으로 나타나 유속이나 수체의 난류로 인해 침강량이 크게 달라질 수 있는 것으로 판단된다.

2) 각 항목별 농도 및 침강량 사이의 상관관계 분석 결과 낙동강 수계에서 농도는 PP-PN, 침강량은 Seston-POC에서 상관성이 가장 높았지만, 대체적으로 낮은 상관성을 보였고, 일부 항목사이에서는 음의 상관성을 보였다.

3) 침강속도는 POC>Seston>PP>PN 순으로, Seston의 경우 대체적으로 강우가 많은 시기에 침강속도가 높은 경향을 보였지만, 나머지 항목들은 조사시기에

따라 다양한 결과를 나타내었다. 또한 지점별 조사결과도 조사시기에 대한 결과와 마찬가지로 뚜렷한 특징 없이 상·하류에서 다양한 결과를 보였다. 특히 PN과 PP의 침강속도는 외국의 기존 수질모델링(QUAL2E)에서 제시한 계수보다 약 10~100배 이상 높은 것으로 나타났다.

4) Seston에서 POC, PN, PP의 함량 분석결과, POC>PN>PP의 순으로 Seston에서 차지하는 비율이 높은 것으로 조사되었다. 특히 POC의 경우 대체로 강우기에 낮은 함량을 보였는데, 이는 강우량이 증가함에 따라 빠른 유속에 의해 조류에 의한 내부생산이 줄어든 결과로 판단되며, 하류지역에서 POC의 함량이 상대적으로 높은 것으로 조사되었다.

조사된 결과를 종합해 보면, 수중농도, 단위 면적당 침강량, 침강속도, 각 항목별 함량 분석결과와 하천의 유속, 기상변화, 기타 환경적 요인에 따라 다양한 결과를 보였고, 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 또한 외국의 수질모델링에서 사용되는 계수와 많은 차이를 보이는 것으로 나타났는데, 이는 기저농도가 외국의 하천보다 높을 가능성, 유역의 특성이 다를 가능성 또한 하천의 자연 상태에서는 재부유에 의해 침강량이 감소하는데 반해 본 연구에서는 재부유양이 고려되지 않고 모두 측정되었기 때문에 침강량과 침강속도가 과대평가 되었을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 이러한 제한사항들을 고려한 침강속도의 측정방법의 개발이 필요하며, 지속적인 모니터링을 통하여 국내의 환경에 적합한 계수를 도출해야 할 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- 국립환경연구원, 2003, 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사.
- 국립환경과학원, 2006, 금강수계 수중생태계 수질모델인자 조사.
- 국립환경과학원, 2008, 4대강수계 수질오염총량관리를 위한 수질예측모델인자 적용성 연구.
- 기상청, 2004, 기상월보.
- 김지혜, 김범철, 신명선, 김재구, 정성민, 이윤경, 박주현, 2009, 영산강과 섬진강 수계의 질소 분포와 유기질소 분해속도, 2009, 한국물환경학회지, 25(1), 142-150.

- 부산발전연구원, 2009, 낙동강 백서.
- 서동일, 박석순, 이영수, 김경섭, 황병기, 1999, 수질모델링, 동화기술.
- 이주동, 최상준, 김영훈, 김한순, 이정호, 2002, 담수구조류의 침전거동 -침강속도 측정을 중심으로-, 한국물환경학회지, 18(6), 683-692.
- 자히들 이슬람, 김범철, 한지선, 김재구, 정유경, 정성민, 신명선, 박주현, 2008, 국내 영산강과 섬진강의 유기인 분해속도, 한국물환경학회지, 24(3), 354-364.
- 장창원, 김재구, 김동환, 김범철, 박주현, 2008, 금강수계에서 수중 유기탄소의 분포와 분해속도, 한국물환경학회지, 24(2), 174-179.
- 환경부, 2005, 수질오염공정시험방법.
- Kalff, J., 2002, Limnology, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Steven, C. C., 1997, Surface water quality modeling, Waveland Press.