

## 낙동강 수계의 식물플랑크톤 침강속도

정유경 · 김범철<sup>†</sup> · 신명선 · 박주현<sup>\*</sup>

강원대학교 환경학과  
<sup>\*</sup>국립환경과학원

## Settling Velocity of Phytoplankton in the Nakdong-River

Jung, Yukyong · Bomchul Kim<sup>†</sup> · Myoungsun Shin · Ju-Hyun Park<sup>\*</sup>

Department of Environmental Science, Kangwon National University  
<sup>\*</sup>National Institute of Environmental Research

(Received 30 August 2007, Accepted 31 October 2007)

### Abstract

Settling velocity is one of major parameters determining algal biomass in water quality modeling. In this study, the settling velocity of phytoplankton was measured in reservoir and stream sites of the Nakdong River, Korea. Settling velocities of various phytoplankton species were determined by measuring algal cell biomass settled in a sedimentation cylinder. Mean settling velocities were 0.22 m day<sup>-1</sup> in reservoir sites and 0.33 m day<sup>-1</sup> in stream sites, which were relatively higher compared with other default values suggested by water quality models (e.g. 0.1 m day<sup>-1</sup> in CE-QUAL-W2). The lower settling velocity in reservoirs than in stream implies the adaptation of phytoplankton to low turbulence in lentic environments. Cyanobacteria showed lower settling velocity (0.2 m day<sup>-1</sup>) than diatoms (0.3 m day<sup>-1</sup>), and this phenomenon may have resulted from buoyancy mechanisms of cyanobacteria. Cell volume did not show a significant correlation with settling velocity in this study, implying that conformation factors of colonies or other factors had large effects on settling velocity of algal cells as well as cell size. The result of this study may suggest proper coefficients of settling velocity of phytoplankton in the calibration of water quality model.

**keywords** : Cyanobacteria, Diatom, Phytoplankton, Settling velocity, Stokes' Law

### 1. 서론

식물플랑크톤은 수체 내에서 광합성을 하기 위해 태양 에너지를 필요로 하는데 수심이 깊어질수록 적어지는 광량 때문에 식물플랑크톤의 생육이 제한된다. 그러므로 식물플랑크톤은 나뭇대로의 부유기작을 가지거나 운동성을 이용하여 유광대층(euphotic zone)의 상부에 머물 수 있는 능력이 있어야 한다(Horne et al., 1994; Wetzel, 2001). 그러나 식물플랑크톤의 원형질의 대부분은 물보다 밀도가 높으며 에너지 저장을 위한 물질들도 높은 밀도를 가진다. 일반적으로 담수 및 해양식물플랑크톤의 밀도는 약 1.05~1.20 정도이다(Reynolds, 1984). 따라서 운동성이나 특별한 부유기작이 없는 조류들은 중력의 지배를 받게 되며 필연적으로 물속에서 양의 침강속도를 가지게 된다.

식물플랑크톤의 침강속도는 수질모델링에서도 식물플랑크톤 생체량에 영향을 주는 요인으로서 중요한 계수이다(Thomas, 1985). 호수에서 식물플랑크톤의 증감을 좌우하는 요인은 성장, 침강, 사멸, 동물플랑크톤에 의한 피식 등

을 들 수 있는데 침강은 손실량 가운데에서 중요한 비중을 차지하는 요소이다. 일반적으로 사용되는 침강에 의한 식물플랑크톤의 손실량은 다음 식 (1)과 같이 침강속도의 함수로서 나타낸다.

$$S = -v(\partial A / \partial Z) \quad (1)$$

여기서

- S = 식물플랑크톤 침강손실량, g m<sup>-3</sup> sec<sup>-1</sup>
- v = 식물플랑크톤 침강속도, m sec<sup>-1</sup>
- A = 식물플랑크톤 밀도, g m<sup>-3</sup>
- Z = 수심, m

수질모델링에서 식물플랑크톤의 증감을 정확히 모의하기 위해서는 정확한 침강속도의 입력이 필요하다. 식물플랑크톤의 침강속도는 식물플랑크톤의 밀도, 크기, 형태, cell의 구성 물질, 그리고 물의 밀도와 점성, 기류의 흐름과 속도 등에 의해 영향을 받는다. 수중에서 입자의 침강속도는 Stokes의 식에 의해 입자의 크기와 밀도 자료로부터 추정할 수 있으나 식물플랑크톤의 형태는 대부분 구형이 아니며, 크기와 밀도가 일정하지 않으므로(Reynolds, 1984) 추

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
bkim@kangwon.ac.kr

정이 매우 어려운 실정이다. 뿐만 아니라 지역에 따른 군집특성도 크게 좌우할 수 있으므로 각 대상수역에서 직접 침강속도를 측정하는 것이 가장 바람직하다.

지금까지 해양과 담수의 식물플랑크톤의 침강속도 및 측정방법과 침강속도에 영향을 주는 인자에 관한 연구가 활발하게 이루어졌으며(Bienfang et al., 1977; Bienfang, 1979; Burns et al., 1980; Eppley et al., 1967; Harrison et al., 1986; Judit, 2003; Peperzak et al., 2003; Smayda, 1974; Titman et al., 1976; Waite et al., 1997, 2001), 정수 공정에서 응집장애와 여과지 폐색의 원인이 되는 규조류의 침강속도 연구도 이루어진 바 있다(이 등, 2002b). 그러나 대부분의 연구는 배양한 조류 세포를 사용하였으며, 현장시료를 대상으로 한 호수와 하천에서의 식물플랑크톤 침강속도에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

연구 대상 지점인 낙동강 수계는 유역 내에서 배출되는 다량의 질소와 인으로 인해 연중 담수조류가 번무하는 부영양화 상태를 보인다. 특히 낙동강 하류는 해마다 여름철에는 남세균의 꽃발생과 겨울철에는 규조류가 대량 발생하며, 정수처리에도 상당한 장애를 일으키고 있다(김, 2004; 신 등, 2002; 이 등, 2002a; 조 등, 1998a, 1998b; 허 등, 1995). 이처럼 낙동강 수계의 식물플랑크톤에 대한 연구는 부영양화 관리 등의 목적으로 많은 관심을 가지고 연구되었으나 대부분 영양염의 농도와 식물플랑크톤의 현존량에 편중되고 있다. 본 연구에서는 낙동강 수계의 식물플랑크톤의 침강속도를 측정하여 수질모델 계수로 사용할 수 있는 자료를 제시하고자 하였고, 하천과 호수의 식물플랑크톤 침강속도를 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 낙동강 수계에 위치한 4개 댐 앞 지점(안동, 합천, 진양, 낙동강 하구)과 하천의 본류 3개 지점(상주, 고령, 삼랑진)을 조사하였다(Fig. 1). 수질항목은 2003년 2월부터 9월까지 총 4회에 걸쳐 조사하였으며, 수온, 부유물질(suspended solids: SS), 엽록소 a(chlorophyll a), 총인(total phosphorus: TP), 총질소(total nitrogen: TN) 등의 항목을 측정하였다. 수온은 현장에서 전자온도계를 사용하여 측정하였고, SS는 시료를 GF/C 유리섬유필터로 여과하여 105°C에서 건조시킨 후의 여과지 무게 차이를 이용하여 측정하였다. TP는 persulfate로 분해한 후 ascorbic acid법으로 측정하였으며, TN은 카드뮴 환원법으로 측정하였다. Chlorophyll-a는 GF/C 유리섬유필터로 여과한 후 여과지를 냉동 보관하였다가 2주 이내에 90% acetone으로 추출하여 조직 분쇄기로 분쇄한 후 흡광광도법으로 측정하였다(APHA, 1998).

식물플랑크톤 침강속도 측정은 수질조사와 함께 4회 실시하였다. 침강속도 측정에는 메스실린더 내의 초기 식물플랑크톤 농도( $C_i$ ; cell  $mL^{-1}$ )와 일정시간 경과 후 침강된 식물플랑크톤량( $C_f$ )를 측정하는 방법을 사용하였다. 식물플랑크톤 시료는 채취 후 냉장보관하여 1일 이내에 침강속도를

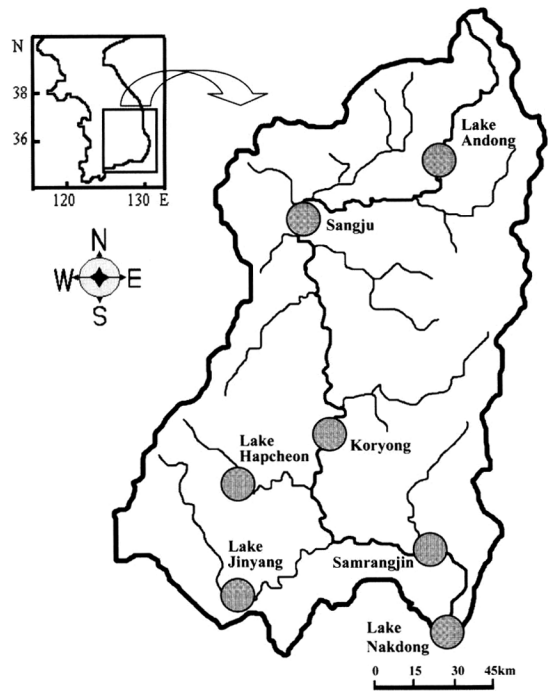


Fig. 1. A map showing the sampling stations in the Nakdong River.

측정하였다. 시료는 실온에서 방치하여 온도가 실온과 동일하게 상승한 후 혼합하여 사용하였다. 침강시간은 일반적인 식물플랑크톤의 침강속도를 고려하여 전체의 1/2 정도가 침강할 것으로 예상되는 시간으로 정하였다. 비중이 물보다 큰 식물플랑크톤은 완전히 정지해 있는 침강조 표면 지점부터 바닥으로 수직으로만 독립 침강하고 바닥에 가라앉은 식물플랑크톤은 다시 부유하지 않는다고 가정하였다. 초기 식물플랑크톤 농도를 구하기 위해 초기시료를 500 mL 취하여 Lugol's solution을 넣어 고정하여 초기밀도( $C_i$ ) 측정에 사용하였다. 같은 시료를 높이 34.5 cm, 용량 1 L의 메스실린더에 넣고 움직임이 없는 상태에서 5시간을 침강시켰다. 상층의 물은 제거하고 하층 300 mL를 취하여 Lugol's solution을 넣어 고정하고 침강 후 하층의 밀도( $C_f$ )를 측정하였다. 고정한 시료는 하루 동안 암상태에서 침강시킨 후 사이펀을 이용하여 농축시켰다. 농축한 시료의 세포밀도는 광학현미경( $\times 300$ ) 아래에서 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 계수하였으며 3회 이상 반복 계수하여 평균값을 제시하였다. 식물플랑크톤 체적은(cell volume) 식물플랑크톤 종의 가로, 세로 길이를 측정하여 Keller 등(1980)이 제시한 공식으로 구하였다.

침강속도는 각 지점에서 우점하는 식물플랑크톤을 대상으로 측정하였다. 식물플랑크톤이 침강속도  $v$ 로 일정시간( $t$ ) 동안 침강하게 되면 5시간 후에는 상층부 높이  $h_1$ 의 공간에는 식물플랑크톤이 없는 상태가 되며, 시간에 따라  $h_1$ 의 경계면은 계속 하강하고 침강한 세포는 하층에 축적된다. 5시간 경과 후 하층부에서 채취한 시료의 높이와 농도를 측정하고 다음 식 (2)에 의해 침강속도( $v$ )를 구하였다(이 등, 2002b).

$$v \text{ (m day}^{-1}\text{)} = \frac{(C_f - C_i) h_f}{C_i t} \quad (2)$$

v = 침강속도(m day<sup>-1</sup>)

C<sub>i</sub> = 메스실린더 내의 초기 식물플랑크톤 밀도(cell L<sup>-1</sup>)

C<sub>f</sub> = t 시간 경과 후 하층부의 식물플랑크톤 밀도(cell L<sup>-1</sup>)

h<sub>f</sub> = 하층부 침강시료의 채취 높이(m)

t = 침강 시킨 시간(day)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 일반 수질 현황

낙동강 수계의 수질을 호수와 하천으로 구분하여 살펴보면, 수온은 4.6~24.9°C의 범위로 호수와 하천에 차이가 없

었다. 부유물 농도(SS)는 호수와 하천 모두 9월에 최대치(3.6~103.5 mg L<sup>-1</sup>)를 보였으며, 2월에 최소농도(3.0~22.5 mg L<sup>-1</sup>)를 나타내었다. 호수에서 부유물 농도는 평균 12.5 (±18.6) mg L<sup>-1</sup>였으며, 낙동강의 최하류에 위치한 낙동호가 가장 높은 농도(12.8 mg L<sup>-1</sup> 이상)를 보였다. 상류에 위치한 안동호는 6.4 mg L<sup>-1</sup> 이하, 합천호는 4.8 mg L<sup>-1</sup> 이하의 낮은 농도를 보였으며, 진양호는 0.8~17.6 mg L<sup>-1</sup>의 농도 범위를 보였다. 하천에서의 SS는 평균 42.0(± 32.7) mg L<sup>-1</sup>로서 호수보다 높은 농도를 보였다(t-test, p<0.01).

식물플랑크톤의 엽록소 a 농도는 조사기간 동안 1.8~90.0 μg L<sup>-1</sup>의 범위를 보였으며 호수와 하천의 현존량은 유의적 차이를 보이지 않았다(t-test, p>0.05). 안동호가 가장 낮은 현존량(6.6 μg L<sup>-1</sup> 이하)을 보였으며 2월에 낙동호의 식물플랑크톤 현존량이 90.0 μg L<sup>-1</sup>로서 가장 높았다. TN은 고

**Table 1.** Water quality characteristics of lake and stream sites in the Nakdong River (김 등, 2003)

Sites	Temp. (°C)	SS (mg L <sup>-1</sup> )	Chl.a (μg L <sup>-1</sup> )	TN (mg L <sup>-1</sup> )	TP (μg L <sup>-1</sup> )	
Lake Andong	Feb.	4.6	3.0	1.9	4.5	46
	Apr.	13.6	4.0	1.8	4.8	13
	Jun.	23.6	6.4	6.6	4.1	24
	Sep.	22.7	4.0	6.4	2.5	22
	Mean	-	4.4	4.2	4.0	26
Lake Hapcheon	Feb.	7.3	3.0	3.7	4.4	23
	Apr.	14.9	1.6	4.7	4.4	17
	Jun.	23.8	4.8	20.7	4.3	131
	Sep.	23.5	3.6	6.3	2.7	31
	Mean	-	3.3	8.9	15.8	202
Lake Jinyang	Feb.	6.2	8.5	3.3	4.7	16
	Apr.	18.4	0.8	3.7	4.2	16
	Jun.	24.9	14.4	27.7	4.1	61
	Sep.	24.5	17.6	16.9	3.2	44
	Mean	-	10.3	12.9	4.1	34
Lake Nakdong	Feb.	7.0	18.0	90	5.5	150
	Apr.	16.1	12.8	17.8	4.9	86
	Jun.	22.0	18.8	7.5	4.7	90
	Sep.	20.0	78.0	6.0	3.2	38
	Mean	-	31.9	30.3	4.6	91
St. Sangju	Feb.	7.5	18.5	2	5.4	46
	Apr.	13.0	8.5	4.8	5.3	52
	Jun.	21.5	18.8	1.3	4.7	60
	Sep.	19.8	58.8	4.5	3.6	203
	Mean	-	26.2	3.2	4.8	90
St. Koryung	Feb.	6.7	22.5	12.6	9.8	183
	Apr.	14.2	43.6	21.0	9.0	112
	Jun.	14.2	65.6	6.0	8.5	154
	Sep.	19.8	94.7	3.5	4.9	258
	Mean	-	56.6	10.8	8.1	177
St. Samrangjin	Feb.	6.3	21.0	54.9	9.8	121
	Apr.	15.2	5.2	23.9	9.0	134
	Jun.	15.2	43.2	3.9	8.5	159
	Sep.	21.0	103.5	-	4.9	316
	Mean	-	43.2	20.7	8.1	183

령과 삼랑진에서 평균  $8.1 \text{ mgN L}^{-1}$ 로서 호수( $4.1 \pm 0.8 \text{ mgN L}^{-1}$ )보다 높은 농도를 보여 대구시의 영향이 매우 크다는 것을 시사하고 있다.

우리나라 주요 인공호에서는 제한영양소가 인이브로(김 등, 2004, 2007; 박 등, 1992; 신 등, 2003a, 2003b; 최 등, 2003) 낙동강수계에서도 총인은 식물플랑크톤의 증감에 가장 큰 영향을 미치는 요인일 것으로 예상되는데 호수지점에서는 TP가  $13 \sim 150 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 평균 농도가  $51(\pm 43) \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 부영양호의 수준을 보였다. TP는 계절에 따라 큰 변동이 없었으나 2월에 낙동호에서 높은 농도를 보였다( $150 \mu\text{g L}^{-1}$ ). 하천의 경우 평균  $150(\pm 82) \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도를 보였으며 호수보다 높았다(t-test,  $p < 0.01$ ). TP의 종적분포 역시 TN의 종적분포와 동일하게 상류의 호수(안동, 합천, 진양호 평균  $37 \mu\text{g L}^{-1}$ )에 비하여 중하류의 하천지점인 고령과 삼랑진에서 높은 농도( $180 \mu\text{g L}^{-1}$ )를 보였다. 계절적 변동을 보면 TP는 9월에 가장 높은 농도를 보였다(Table 1). 이 시기는 태풍의 영향으로 낙동강 수계의 유량이 크게 증가한 시기로 하수에 기인하는 질소를 희석하는 효과가 있었으나 인의 경우에는 강우시 비점오염원의 유출이 증가한 것으로 사료된다.

### 3.2. 식물플랑크톤 침강속도

낙동강 수계에서 우점하는 식물플랑크톤을 대상으로 침강속도를 구한 결과  $0.01 \sim 4.0 \text{ m day}^{-1}$ 를 범위를 보였으며, 평균은  $0.3 \text{ m day}^{-1}$ ( $n=74$ )였다. 조사기간 동안 가장 높은 침강 속도를 보인 곳은 하천 지점인 고령( $1.1 \text{ m day}^{-1}$ )이었으며 평균 침강속도가 가장 낮은 곳은 진양호( $0.19 \text{ m day}^{-1}$ )였다(Table 2). 본 연구에서 낙동강 수계 저수지와 하천의 우점종은 대부분 규조류였으며, 여름철에만 남세균이 우점종이었다(Table 3).

식물플랑크톤 침강속도는 식물플랑크톤의 종이나 군집에 따라 차이가 있다(Wetzel, 2001). 본 연구에서도 식물플랑크톤 군집에 따른 침강속도를 비교한 결과, 남세균(평균  $0.2 \text{ m day}^{-1}$ )이 우점하는 군집이 규조류가 우점하는 군집(평균  $0.3 \text{ m day}^{-1}$ )보다 더 작은 침강속도를 나타냈다(t-test,  $p < 0.05$ ). 기존의 연구보고들을 보면 조류의 침강속도가 조사자에 따라서  $0.01 \sim 4.0 \text{ m day}^{-1}$ 의 넓은 변이폭을 보이는 것으로 나타났다(Cole et al., 1995). 본 연구의 결과는  $0.02 \sim 1.1 \text{ m day}^{-1}$ 의 범위를 보여 문헌에 제시된 기존의 연구보고와 비슷한 범위를 보였다. 종간의 차이에 있어서도 다른 연구에서 식물플랑크톤 군집의 침강속도를 비교한 결

**Table 2.** The range and mean of phytoplankton settling velocities in the Nakdong River (n is the number of species examined)

Sites	Settling velocity ( $\text{m day}^{-1}$ )		Species n	
	Range	Mean $\pm$ SD		
Lake sites	Andong	0.12 ~ 0.52	0.26( $\pm$ 0.13)	10
	Hapcheon	0.02 ~ 0.74	0.23( $\pm$ 0.23)	12
	Jinyang	0.03 ~ 0.59	0.19( $\pm$ 0.18)	8
	Nakdong	0.10 ~ 0.40	0.22( $\pm$ 0.08)	8
	Total	0.03 ~ 0.74	0.22( $\pm$ 0.17)	30
Stream sites	Sangju	0.02 ~ 0.93	0.30( $\pm$ 0.29)	7
	Koryung	0.05 ~ 1.10	0.39( $\pm$ 0.27)	11
	Samrangjin	0.03 ~ 0.67	0.30( $\pm$ 0.22)	9
	Total	0.02 ~ 1.10	0.33( $\pm$ 0.25)	48

**Table 4.** Comparison with phytoplankton settling velocities reported by other study

Algal type	Settling velocity ( $\text{m day}^{-1}$ )	References
Mixed phytoplankton community	0.01 ~ 4.0	Baca et al., 1976
Cyanobacteria	0.10 ~ 0.11	Collins et al., 1983
Diatoms	0.02 ~ 14.7	
Mixed phytoplankton community	0.02 ~ 1.1	This study
Cyanobacteria	0.02 ~ 0.3	
Diatoms	0.03 ~ 1.1	

과 본 연구와 마찬가지로 남세균보다 규조류가 높은 침강속도를 보이는 것을 확인하였다(Table 4).

### 3.3. 호수와 하천의 식물플랑크톤 침강속도 비교

본 연구에서 측정된 식물플랑크톤 침강속도를 호수와 하천으로 구분하여 비교한 결과 유의적인 차이를 보였다(t-test,  $p < 0.01$ ). 호수의 경우  $0.02 \sim 0.7 \text{ m day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 합천호에서 최소 침강속도( $0.02 \text{ m day}^{-1}$ )와 최대 침강속도( $0.7 \text{ m day}^{-1}$ )를 보였고 평균은  $0.2 \text{ m day}^{-1}$ 였다. 하천에서는 침강속도가  $0.02 \sim 1.1 \text{ m day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며 평균  $0.3 \text{ m day}^{-1}$ 로서 호수보다 더 큰 것으로 나타났다(t-test,  $p < 0.05$ )(Table 2). 호수 간의 식물플랑크톤의 침강속도는 유의적인 차이가 없었으며(ANOVA,  $F_{3,38} = 0.262$ ,  $p = 0.852$ ), 이는 하천지점에서도 마찬가지였다(ANOVA,  $F_{2,29} = 0.385$ ,  $p = 0.684$ ).

**Table 3.** Dominant group of phytoplankton in the Nakdong River

Site	Feb.	Apr.	Jun.	Sep.
Lake sites	Andong	Diatoms	Diatoms	Cyanobacteria
	Hapcheon	Diatoms	Diatoms	Greens
	Jinyang	Diatoms	Diatoms	Diatoms
	Nakdong	Diatoms	Diatoms	Cyanobacteria
Stream sites	Sangju	Diatoms	Diatoms	Cyanobacteria
	Koryung	Diatoms	Diatoms	etc.
	Samrangjin	Diatoms	Diatoms	etc.

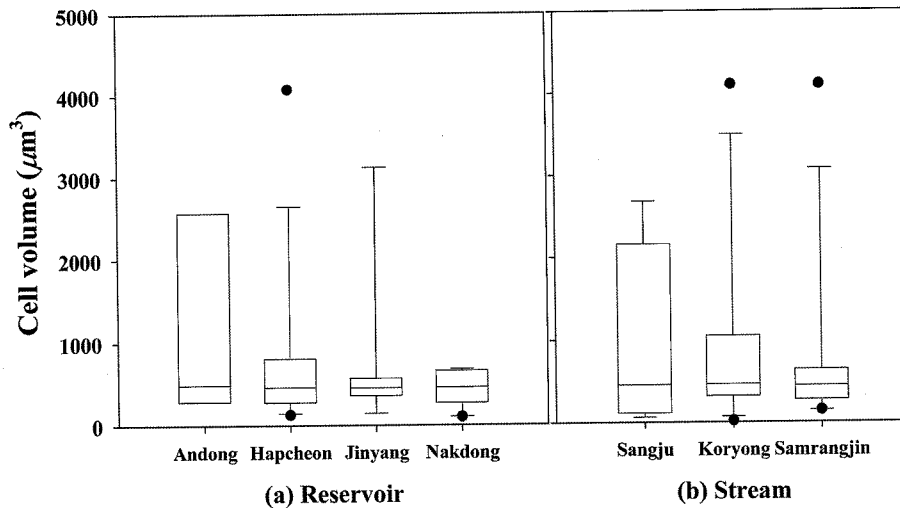


Fig. 2. The distribution of phytoplankton cell volume ( $\mu\text{m}^3$ ) of the (a) reservoirs and (b) streams in the Nakdong River.

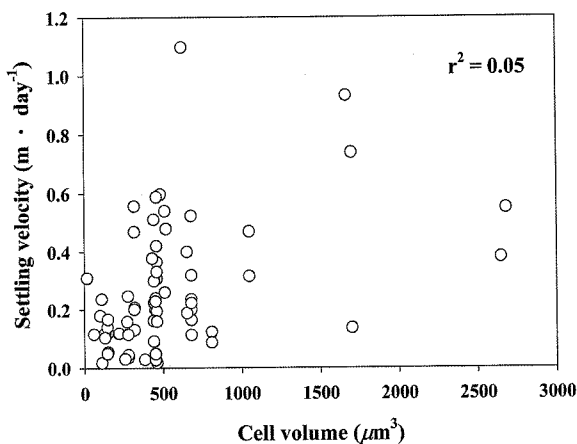


Fig. 3. The relationships between settling velocity ( $\text{m day}^{-1}$ ) and cell volume ( $\mu\text{m}^3$ ).

Stokes의 식에 따르면 입자의 크기가 클수록 침강속도는 증가하므로 본 연구에서는 식물플랑크톤 세포체적(cell volume:  $\mu\text{m}^3$ )을 측정하여 침강속도와와의 관계를 분석하였다(Fig. 2). 식물플랑크톤 침강속도와 세포크기의 상관관계를 분석한 결과 상관성이 낮아 유의적이지 않은 것으로 나타났다(Fig. 3,  $r^2=0.05$ ). 호수와 하천 사이에는 식물플랑크톤의 세포크기에 유의적인 차이가 없었으며, 각 지점 간의 차이도 없었다(ANOVA,  $p=0.835$ ).

#### 4. 결론

본 연구에서 낙동강 수계에서 우점하는 식물플랑크톤을 대상으로 침강속도를 측정한 결과 낙동강 수계에서의 식물플랑크톤 침강속도는  $0.3 \text{ m day}^{-1}$ 로서 CE-QUAL-W2 모델에서 default로 사용하는  $0.1 \text{ m day}^{-1}$ 보다 높은 것으로 나타났다(Cole et al., 1995). 식물플랑크톤 종류별로 침강속도의 차이가 있었는데, 규조류가 남세균보다 높은 침강속도를 보였다. 이는 남세균이 세포 내에 기포(gas vacuole)와 같은 적극적인 부유 기작을 가지고 있기 때문에 침강에 대한 저

항이 규조류보다 컸기 때문으로 사료된다(Walsby et al., 1995).

본 연구에서 낙동강 수계의 호수와 하천을 구분하여 비교한 결과 식물플랑크톤 침강속도는 유의적인 차이가 있었다. Stokes의 법칙에 따르면 침강속도는 입자의 지름이 클수록 커진다. 본 연구에서 지점별 식물플랑크톤 세포 크기와 침강속도를 비교하였으나, 호수와 하천에서 식물플랑크톤 세포크기의 유의적 차이는 없었다. 그럼에도 호수와 하천에서 식물플랑크톤의 침강속도가 유의적인 차이를 보인 것은 낙동강 수계에서 식물플랑크톤의 침강속도를 결정하는 요인이 세포의 크기 이외에도 많음을 시사한다. 우점종 가운데에는 긴 사상체를 형성하는 종류가 많이 있었으며, 이 경우 침강속도 측정에 구형물체의 침강속도를 추정하는 Stokes의 법칙을 적용하는 것은 적절하지 않을 것이다. 즉, 직경과 밀도 등의 요인보다는 콜로니의 형태요인이 더 중요한 결정인자가 될 수 있다(Judit et al., 2003).

식물플랑크톤의 침강속도는 수체에서 그 종의 생존여부를 결정할 수 있는 중요한 요인이다. 침강속도와 피식속도 등의 손실율이 성장률을 초과하면 그 종은 현존량이 감소하여 소멸하게 된다. 일반적으로 하천은 유속이 빠르므로 난류(turbulence)가 강하며, 부유물질의 재부상을 용이하게 하므로 침강속도가 큰 종도 증식이 가능하다. 그러나 난류가 약한 호수에서는 침강속도가 큰 종은 생존할 수가 없다. 따라서 호수에서 생존하는 식물플랑크톤은 적응의 결과로서 하천에 비해 침강속도가 작을 것으로 예상할 수 있는데 본 연구의 결과는 이러한 추론과 일치한다.

일반적으로 체류시간이 긴 호수에서 서식하는 식물플랑크톤은 침강이 성장을 저해하는 큰 요인이므로 침강속도를 감소시키기 위한 적응이 필요하지만, 부착조류는 수심이 얇은 곳에서 부착하여 서식하므로 침강속도를 감소시키기 위한 적응이 필요하지 않다. 부영양 하천에서는 부착조류의 현존량이 높은 곳이 많다(Welch et al., 1989). 낙동강에서도 하천의 수심이 얇은 곳에는 높은 밀도의 부착조류 군집이 형성되어 있으며 여기에서 이탈된 조류세포가 플랑크톤

군집에 포함될 수 있다. 이들 조류는 침강속도가 플랑크톤 성 조류에 비해 더 높을 것으로 예상된다. 본 연구에서도 하천의 조류 침강속도가 호수의 조류보다 더 큰 것으로 나타났다. 침강속도가 높은 하천의 조류가 호수로 유입한다면 곧 바로 침강하여 호수표층으로부터 제거될 것이다. 따라서 동일한 생체량의 조류 밀도를 가질지라도 침강속도에 따라 호수에서의 영향이 크게 달라질 수 있다.

침강속도는 호수수질모델링에서 식물플랑크톤의 증감을 결정하는 중요한 요인이다. CE-QUAL-W2 모델의 경우, 10개의 식물플랑크톤 종별로 침강속도를 설정할 수 있으나 그 외의 호수수질모델은 종간의 침강속도 차이를 고려하지 않는다. 현재 대부분의 호수수질모델에서는 식물플랑크톤의 침강속도는 식물플랑크톤 종이나 크기에 상관없이 일정한 값이 주어지는데 본 연구에 의하면 식물플랑크톤의 침강속도는 지점 간 변이가 매우 컸다. 그러므로 더 정확한 모델 보정을 위해서는 각 지역의 계절적 식물플랑크톤 군집특성에 따라 다른 침강속도를 적용해야 할 것이며, 앞으로 더 많은 침강속도에 대한 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- 김범철 외 15명, 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사, 국립환경연구원 (2003).
- 김범철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구, 국내 호수의 제한 영양소와 하수처리장 방류수 인기준 강화의 필요성, *한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 512-517 (2007).
- 김용재, 낙동강 중 하류의 식물플랑크톤 군집의 월 변화, *Algae*, **19**(4), pp. 329-337 (2004).
- 김호섭, 황순진, 부영양 저수지에서 식물플랑크톤 성장에 대한 제한영양염과 질소/인 비의 영향, *한국유수학회지*, **37**(1), pp. 36-46 (2004).
- 박해경, 이문호, 유재근, AGP spike test에 의한 국내 대형벌레의 조류성장 제한 영양염의 추정, *한국물환경학회지*, **8**(3), pp. 159-166 (1992).
- 신성교, 백경훈, 송미경, 낙동강 중 하류에서 클로로필 a 최대농도 출현지역 평가, *한국유수학회지*, **35**(1), pp. 21-27 (2002).
- 신재기, 이옥희, 조경제, 진양호와 남강의 수질에 대한 Algal growth potential test(AGPT) 적용, *한국유수학회지*, **36**(1), pp. 57-65 (2003a).
- 신재기, 황순진, 평택호와 유역 하천에서 조류성장잠재력 측정, *한국유수학회지*, **36**(2), pp. 172-180 (2003b).
- 이정호, 권경남, 양상용, 낙동강의 식물플랑크톤 군집의 계절 변화, *Algae*, **17**(4), pp. 267-273 (2002a).
- 이주동, 최상준, 김영훈, 김한순, 이정호, 담수 구조류 침전 거동 침강속도 측정을 중심으로, *한국물환경학회지*, **18**(6), pp. 683-692 (2002b).
- 조경제, 신재기, 낙동강 주요 담수조류의 성장 및 영양염 반포화 계수, *Algae*, **13**(2), pp. 235-240 (1998a).
- 조경제, 신재기, 낙동강 하류에서 동 하계 무기 N, P 영양염류와 식물플랑크톤의 동태, *한국유수학회지*, **31**(1), pp. 67-75 (1998b).
- 최광현, 황순진, 김호섭, 한명수, 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화, *한국유수학회지*, **36**(2), pp. 139-149 (2003).
- 허우명, 김범철, 황길순, 최광순, 박원규, 낙동강 수계의 인, 질소 및 Chl.a 농도 분포, *한국유수학회지*, **28**(2), pp. 175-181 (1995).
- APHA, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed. (1998).
- Baca, R. G. and Arnett, R. C., *A Limnological Model for Eutrophic Lakes and Impoundments*, Battelee, Inc., Pacific Northwest Laboratories, Richland, Washington (1976).
- Bienfang, P., Laws, E. and Johnson, W., Phytoplankton sinking rate determination: technical and theoretical aspects, an improved methodology, *J. Exp. Mar. Biol. Eco.*, **30**, pp. 283-300 (1977).
- Bienfang, P., A new phytoplankton sinking rate method suitable for field use, *Deep-Sea Research*, **26**(6A), pp. 719-729 (1979).
- Burns, N. M. and Rosa, F., In situ measurement of settling velocity of organic carbon particles and 10 species of phytoplankton, *Limnol. Oceanogr.*, **25**, pp. 855-864 (1980).
- Cole, T. and Buchak, E. M., CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, *Version 2.0 User Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS 39180-6199 (1995).
- Collins, C. D. and Wlosinski, J. H., *Coefficients for use in the U.S. Army Corps of Engineers reservoir model, CE-QUAL-R1, Technical Report E-83-15*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS (1983).
- Eppley, R. W., Holmes, R. W. and Strickland, J. D. H., Sinking rates of marine phytoplankton measured with a fluorometer, *J. Exp. Mar. Biol. Eco.*, **1**, pp. 191-208 (1967).
- Harrison, P. J., Turpin, D. H. and Bienfang, P. K., Sinking as a factor affecting phytoplankton species succession: the use of selective loss semi-continuous cultures, *J. Exp. Mar. Biol. Eco.*, **99**, pp. 19-30 (1986).
- Horne, A. J. and Goldman, C. R., *Limnology*, McGraw-Hill Inc, NY (1994).
- Judit, P., Eva, S. and Zsuzsanna, R., Sinking properties of some phytoplankton shapes and the relation of form resistance to morphological diversity of plankton-an experimental study, *Hydrobiologia*, **500**, pp. 243-257 (2003).
- Kellar, P. E., Paulson, S. A. and Paulson, L. J., *Methods for biological, chemical and physical analyses in reservoirs*, Tech. Rep. Lake Mead Limnological Res. Center, UNLV, NV (1980).
- Peperzak, L., Colijn, F., Koeman, R., Gieskes, W. W. C. and Joordens, J. C. A., Phytoplankton sinking rates in the Rhine region of freshwater influence, *J. Plankton Res.*, **25**(4), pp. 365-383 (2003).
- Reynolds, C. S., *The ecology of freshwater phytoplankton*, Cambridge University Press, NY (1984).
- Smayda, T. J., Some Experiments on the Sinking characteristics of two freshwater diatoms, *Limnol. Oceanogr.*, **19**(4), pp. 628-635 (1974).
- Thomas, O. B. Jr, *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling*, 2nd ed., E.P.A., pp. 281-345 (1985).
- Titman, D. and Kilham, P., Sinking in freshwater phytoplankton

- : some ecological implications of cell nutrient status and physical mixing processes, *Limnol. Oceanogr.*, **21**(3), pp. 109-117 (1976).
- Walsby, A. E., Hayes, P. K., and Boje, R., The gas vesicles, buoyancy and vertical distribution of cyanobacteria in the Baltic sea, *Eur. J. Phycol.*, **30**(20), pp. 87-94 (1995).
- Waite, A., Fisher, A., Thompson, P. A. and Harrison, P. J., Sinking rate versus cell volume relationships illuminate sinking rate control mechanisms in marine diatoms, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **157**, pp. 97-108 (1997).
- Waite, A. M. and Nodder, S. D., The effect of in situ iron addition of the sinking rates and export flux of Southern Ocean diatoms, *Deep-Sea Research II*, **48**, pp. 2635-2654 (2001).
- Welch, E. B., Horner, R. R. and Patmont, C. R., Prediction of nuisance periphytic biomass: a management approach, *Water Res.*, **23**, pp. 401-405 (1989).
- Wetzel, R. G., *Limnology: lake and river ecosystems*, Academic press, NY (2001).