

용존규소농도의 변화가 하천 부착조류의 밀도와 우점율에 미치는 영향에 관한 연구

Effects on Density and Dominant rate of Periphyton by Variation of Dissolved Silicon Concentration

전경호

Kyoung-ho Jeon

일본동북대학대학원 토목공학과

(2009년9월24일 접수, 2009년 10월22일 채택)

Abstract

In this study, an artificial-waterway experiment was conducted, using an attachment plate, on which algae from Nanakita river was placed, to examine the influence exerted by the variation of the dissolved-silicon concentration on the river periphyton. As a result, the variation of the dissolved-silicon concentration was found to exert an influence on the density of the adhesion diatom, and the mole ratio limits of the silica were about $Si/P \approx 182$ and $Si/N \approx 16.4$ or less. Moreover, the mole ratio that is necessary for proliferation was found to be larger than the value of the oceanic algae. *Senedesmus* sp. and *Ankistrodesmus* sp., which used silica in adhesion chlorophyta, received the influence of the silicon concentration strongly, and the two were found to be superior in the environment, making silica a restriction factor.

Key words : dissolved silicon concentration, periphyton, diatom, codominant rate

주제어 : 용존 규소 농도, 부착조류, 규조류, 우점율

1. 서론

하천의 흐름방향에 따른 용존 규소 농도의 감소는 최근 많은 하천의 연구에서 보고되고 있다. 계절에 따른 변화는 물론 수십 년간의 시간에 걸친 하천에서의 용존 규소 농도의 변동이 파악되고 있다(原島, 2003; 井上 등, 2006). 계절 변화와 같이 비교적 짧은 시간의 변동을 관찰한 연구에서는 하천수 내 용존 규소 농도의 변동 경향이 여러 가지로 나타나지만(Edwards, 1974; Marker, 1975), 수십 년간의 긴 시간 스케일을 다룬 연구에서는 하천수내 용존 규소 농도가 감소하는 경향이 보고되고 있는 경우가 많다(Kimmerer,

2005; Fulweiler 등, 2005).

하천에서의 용존 규소의 감소 메커니즘으로서는, 우선 규조류 증식에 따른 용존 규소의 흡수를 들 수 있다. 규조류 증식에 의한 개체수의 증가와 용존 규소 농도 감소경향이 일치하는 결과가 여러 하천과 하구역에서 보고되고 있다(Kimmerer, 2005; Fulweiler 등, 2005; Wang 등, 1969; Humborg 등, 1997). 그러나, 용존 규소 농도가 규조류의 증식장애를 일으키는 레벨까지 저하한 경우는 보고되고 있지만(Fulweiler 등, 2005), 용존 규소 농도의 저하가 강바닥에 부착되어있는 부착조류등과 같은 하천 생태계에 영향 미치는 것을 확인한 사례는 보고되고 있지 않다.

* Corresponding author Tel:+82-22-795-7469, Fax:+82-22-, E-mail: doit21@empal.com(Jeon, K.)

하천의 유하 도중에 위치해 있는 호수나 댐과 같은 체류 지역은 증식된 규조류의 침강이 발생하고, 이로 인해 용존 규소의 침전장소가 된다고 하는 보고가 있다(原島, 2003; 井上 등, 2006). 이 밖에도 강우량의 감소나 여름철에 발생하는 유량 감소, 삼림에 의한 흡수로 인해 일시적인 하천 수내의 용존 규소 농도가 감소하는 경우도 보고되고 있다. 또, 하천 유량의 저하도 용존 규소 농도의 저하에 관계가 있는 것으로 생각되고 있다. 이와 같이 하천 유하과정에 있어서의 용존 규소 농도의 감소 요인은 여러 가지이지만, 가장 주된 원인으로서는 규조류에 의한 흡수를 들 수 있다(Fulweiler 등, 2005; Wang 등, 1969; Humborg 등, 1997).

지금까지의 이러한 연구들에 근거하면, 유량이 비교적 작고 인위적으로 질소와 인의 부하가 큰 하천에서는 용존 규소의 결핍에 의한 부착조류 증식의 영향이 표면화되기 쉽다고 생각할 수 있다. 그러나, 하천의 부착조류에 미치는 영양염류비(Si:N:P)의 영향은 확실히 알려져 있지 않다. 하천 생태계에 있어서 규소는 조류의 주요한 영양원 중 하나이며, 부영양화에도 간접적으로 영향을 미치므로 용존 규소가 규조류에 미치는 영향을 규명하는 것은 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 용존 규소 농도의 변화가 하천에서의 부착조류 밀도와 우점율에 미치는 영향을 실험적으로 검토하여 하천에서의 부착 규조류 증식에 제한적으로 미치는 용존 규소 농도에 관해서 기초적 지식을 얻는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 하천 부착조류의 채취

실험에 사용할 부착조류를 채취하기 위해, 일본 미야기(Miyagi)현 센다이(Sendai)시를 가로지르는 나나키타(Nanakita)강에 부착조류 채취용 아크릴 부착판을 설치했다. 부착판 설치지점은 센다이(Sendai)시 가미야가리(Kamiyagari) 하수처리장의 방류지점에서 하류로 약 1km

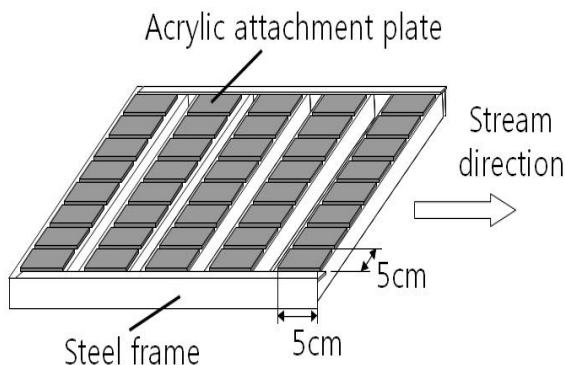


Fig. 1. Schematic diagram of acrylic attachment plate

떨어진 지점(북위:38.19' 57", 동경:140.357' 14")이며, 설치 당시의 조건은 수심이 약 30cm, 유속이 약 20cm/sec, 수온이 26°C이었다. 하천의 영양염류농도는 용존 규소가 14.1mg/L이었고, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N이 각각 0.22mg/L, 0.02mg/L, 0.53mg/L, PO₄-P가 0.08mg/L이었다. 100개의 아크릴 부착판(5×5cm)을 철제 앵글에 고정하고, 하천 바닥에 2주일간 고정시켜 실험에 사용할 조류를 부착시킨 뒤 수거했다. Fig. 1에 부착판의 개략도를 나타냈다.

2.2 실험장치 및 조건

실험을 위해서는 아크릴로 제작한 인공수로(길이 150cm×폭 5cm×깊이 4cm), 인공배양액 저류탱크(45L), 정량펌프(EYELA, RP-100), 광원(형광등)을 준비했다. Fig. 2에 실험장치를 나타냈다. 하천에서 2주일간 하천의 조류를 부착시킨 뒤 회수한 부착판을 각 인공수로에 15개씩 설치하고, 약 11cm/sec의 유속으로 인공배양액을 수로에 순환시켰다. 이 인공배양액의 교환주기는 3일에 1회씩으로 하였다. 실험조건은 수온 약 25°C, 조도 4000Lux(명, 암 조건 각각 12시간)를 유지했다.

2.3 인공배양액의 조성

인공배양액(30배 희석Detmer배양액+5ppm glucose+Na₂SiO₃·9H₂O)은 Redfield ratio(Si:N:P=16:16:1)를 고려해 Si 농도를 조절하면서 고농도, 중농도, 저농도의 3종류를 제작했다(田宮 등, 1965). 각각 2개씩의 인공수로에는 각각 같은 조건의 배양액을 흘려보내, 총 6개의 인공수로를 실험에 사용하였다. Table 1에는 제작한 인공배양액의 조성을, Table 2에는 각 라인의 영양염류 농도비를 나타냈다.

인공수로 내에서의 용존 규소, 질소, 인의 변동을 보기 위해서, 수로의 출구로부터 50ml의 물을 매일 채수하여 각각

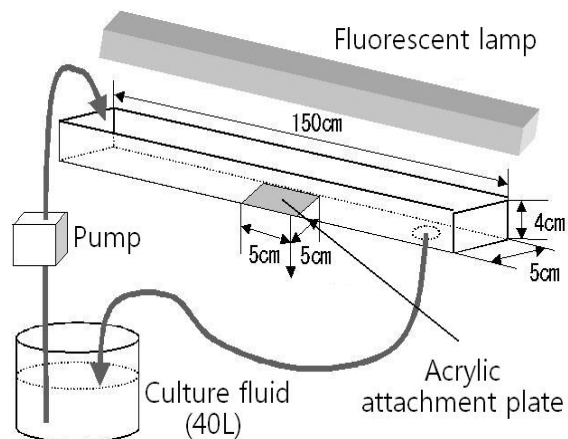


Fig. 2. Schematic diagram of waterway model

Table 1. Composition of a culture fluid

Compound	Concentration (mg/L)
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	1.8 / 45 / 91
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	6
K ₂ HPO ₄	0.4
MgSO ₄ ·7H ₂ O	8.3
KCl	8.3
FeCl·6H ₂ O	0.07
C ₆ H ₁₂ O ₆	5

Table 2. Mole ratio of Si, N, P in each experiment line

Concentration line	Si	N (NO ₃ -N)	P (PO ₄ -P)
Low	2 (0.18)	17 (0.72)	1 (0.1)
Middle	54 (4.50)	17 (0.72)	1 (0.1)
High	107 (9.10)	17 (0.72)	1 (0.1)

* Unit of parenthesis is mg/L

의 농도변화를 측정하였다. 용존 규소는 ICP 발광 분석법에 의한 플라즈마 발광분광 분석장치 ICP-MS (Instruments Inc., SPS-7800)를 이용해 측정하였고, 질소와 인은 Bran+Luebbe Inc., Traacs800을 이용해 측정했다. 인공 수로에 설치한 부착판에 부착된 조류는 8일 간격으로 2장씩 채취하였다. 부착판에서 부착조류를 떼어내기 위해서 칫솔을 이용하여 조류를 벗겨냈다. 부착조류는 생리식염수 (0.8% NaCl)로 씻어서 100ml 플라스틱 병에 넣은 뒤, 부착조류를 고정시키기 위해서 10% 중성 완충 포르말린 용액을 5ml 첨가했다. 그 후, 원심분리기를 이용해서 2000rpm으로 15분간 회전시켜 농축했다. 농축시킨 액의 일정량(0.02ml)을 현미경을 이용하여 부착조류의 분류동정과 조류 세포수를 측정했다(千葉 등, 1995; 廣瀬 등, 1997).

3. 결과 및 고찰

3.1 각 라인에서의 Si, N, P의 농도

각 라인에서의 실험기간 중 배양액 농도의 최소, 최대값과 평균값을 다음의 **Table 3**에 나타냈다. 처음 배양액 설정치인 **Table 2**의 값과 비교를 해보면, 최대값이 거의 비슷한 값을 나타냈다. 그러나, 한번 설치한 인공배양액은 3일간 인공수로를 순환하기 때문에 그 과정에서 부착조류의 흡수에 의해 농도가 저하하게 되어, 3일 후의 배양액 농도는 최초 설정치 보다 낮아지게 되었다. 그러나, N, P의 값은 고정시키고, Si의 농도를 변화시키며 부착조류의 변동을 파악하는 처음 실험의 목적은 적절히 제어된 것으로 판단된다. **Table**

Table 3. Average concentration of Si, N, P in each line (mg/L)

Concentration line	Si	N	P
Low	0.2 (0.10~0.22)	0.37 (0.15~0.67)	0.05 (0.02~0.10)
Middle	4.2 (3.90~4.50)	0.41 (0.21~0.66)	0.05 (0.02~0.10)
High	8.7 (8.20~9.35)	0.39 (0.14~0.63)	0.05 (0.02~0.10)

* Parenthesis is (minimum value ~ maximum value)

Table 4. Mole ratio of Si, N, P in each line

Concentration line	Si	N	P
Low	4.3	16.7	1
Middle	95	18.3	1
High	182	16.4	1

4에는 각각의 수로에서의 Si, N, P의 몰 비를 나타냈다.

3.2 Si농도가 부착조류밀도에 미치는 영향

각 라인에서의 총 부착조류의 밀도변화를 **Fig. 3**에 나타냈다. 실험 시작으로부터 실험 경과 24일째 까지는 중·고농도 라인에서 부착조류의 밀도가 거의 같았다. 그러나, 실험 경과 24일째 이후부터 고농도 라인에서는 그 이전과 같은 대수증식기로 보이는 증식을 계속한 것에 비해, 중농도 라인의 밀도증가는 둔화되었다. 저농도 라인은 전체적으로 중, 고농도 라인보다 밀도가 적었으며, 실험 경과 24일째까지 부착조류가 증가하였으나, 그 이후로는 거의 일정한 변화, 즉, 증식이 멈추어진 정상기로 보이는 상태가 되었다.

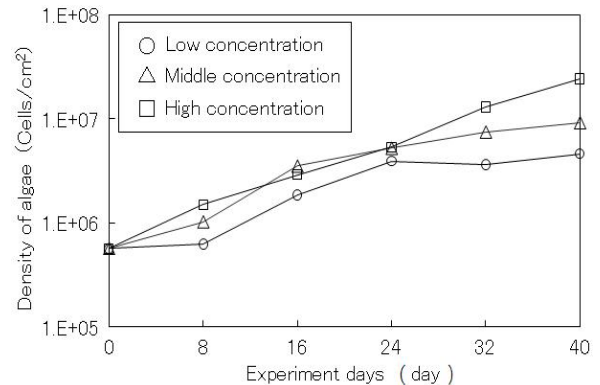


Fig. 3. Density change of attached algae in each concentration line

각 조류의 종류별 밀도변화를 Fig. 4에 나타냈다. 우선, 규조류의 시간 경과에 따른 밀도변화를 (a)에 나타냈다. 실험 시작으로부터 실험 경과 16일째까지는 중·고농도 라인에서 규조류의 밀도가 거의 같았다. 그러나, 실험 16일째 후부터는 고농도 라인의 규조류 밀도가 중농도 라인보다 높아졌다. 최종적으로 부착 규조류 밀도는 고농도, 중농도, 저농도 라인의 순서로 높았다. 다음으로, (b)에 나타난 녹조류의 경우, 실험 경과 16일째 후부터 중농도 라인에서의 녹조류 밀도가 고농도 라인보다 높게 나타났다. 한편, 실험기간 동안 저농도 라인에서의 녹조류 밀도는 거의 증가하지 않았다. 최종적으로 녹조류 밀도는, 중농도, 고농도, 저농도 라인의 순서로 높게 나타났다. 마지막으로 (c)에 나타난 남조류의 경우, 실험 시작으로부터 실험 경과 24일째까지의 모든 라인에서 남조류 밀도가 거의 같았다. 그러나, 실험 경과 24일째 후부터 고농도 라인에서의 남조류 밀도가 저·고농도 라인보다 높게 나타났다. 한편, 같은 시기 저·중농도 라인에서의 남조류 밀도는 증가하지 않았다.

본 실험 결과로부터 농도변화에 따른 규조류 밀도의 차이는 평균 Si농도가 4.2mg/L인 중농도 라인과 8.7mg/L의 고농도 라인에서의 차이가, Si농도가 0.2mg/L인 저농도 라인과 중농도 라인에서의 차이보다 적었고, Si농도의 제한은 고농도 라인에서의 조건인 Si/P≃182, Si/N≃16.4 이하의 물비인 것을 알 수 있었다.

담수성 규조류 및 해양성 규조류의 원소조성비에 관한 기존의 연구에 의하면 담수성 규조류인 *Stephanodiscus carconensis*의 Si/P 비는 약 190으로(Nagai 등, 2001), 해양성 규조류인 *Skeletonema costatum*과 *Ditylum brightwellii*의 Si/P비인 5.8~18.3 및 9.2~13보다 최소 10 배 이상 높았고, Si/N비에 있어서도 담수성 조류인 *Stephanodiscus carconensis*는 약 14정도로, 해양성 조류인 *Skeletonema costatum*과 *Ditylum brightwellii*의 Si/N비인 1.1~1.3 및 1.05~1.08 보다 높아, 상대적으로 다량의 Si를 필요로 하는 것을 알 수 있었다(Kamatani, 1969; Strickland 등, 1969). 이와 같이 담수성, 해수성 플랑크톤의 필요 원소조성비가 다른 것과 이번 실험의 결과로부터 담수성 부착규조류에 있어서도 다량의 Si가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

부착녹조류의 밀도에 관해서는, 다른 라인보다 중농도 라인에서 높아지는 것이 특징이었다. 특히 *Senedasmus* sp.와 *Ankistrodesmus* sp.의 증가가 전체의 녹조류밀도에 영향을 끼쳤고, 실험 경과 24일째 시점에서의 각각의 밀도는 6.4×10^5 cell/cm², 4.0×10^5 cell/cm²이었다. 이와 같은 녹조류의 특징적인 증식은 Si이용성에 기인하는 것으로 생각되고, 이것은 다음의 3.2 Si농도가 부착 조류의 우점율에 미치는

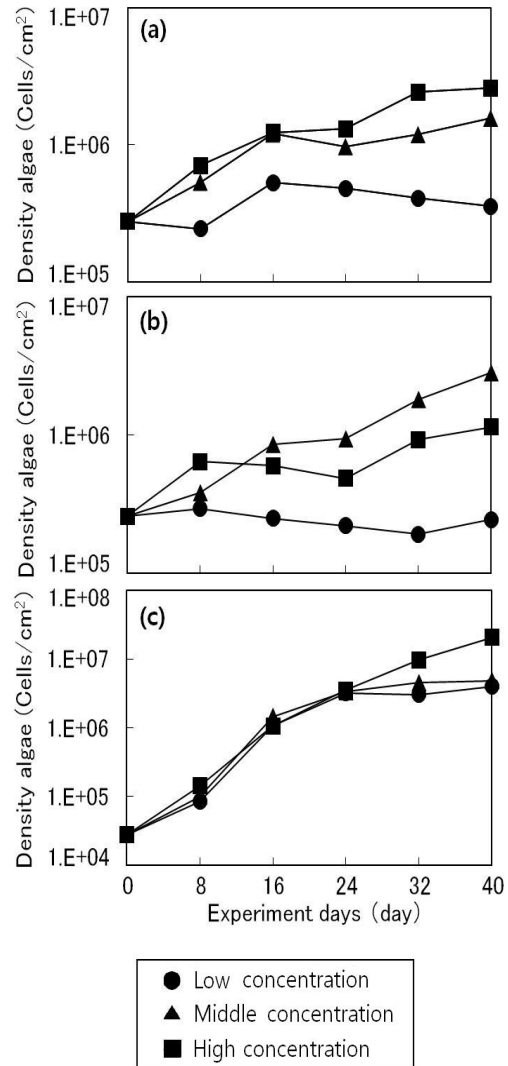


Fig. 4. Density change of attached algae according to kind (a) diatom, (b) chlorophyta, (c) cyanobacteria

영향에서 고찰했다.

부착남조류의 밀도에 관해서는, 본 연구 결과에서는 Si농도의 영향이 없는 것으로 판단된다. 하지만, 극한적인 환경, 예를들면, 온천과 같은 지역에서 규조류화된 남조류는 전 세계에서 발견되고 있어(Konhauser 등, 2001), 특수한 환경에서는 남조류도 Si의 영향을 받는 것이 보고되고 있다.

3.3 Si농도가 부착조류 우점율에 미치는 영향

Fig. 5에는 부착조류의 우점율을 나타냈다. 하천에서 부착판에 처음 조류를 부착시켜 인공수로에 설치할 시점의 조류 구성은, 규조류, 녹조류, 남조류의 점유율이 각각 약 49%, 46%, 5% 였다. 하천에 있어서의 Si, N, P의 농도는 각각

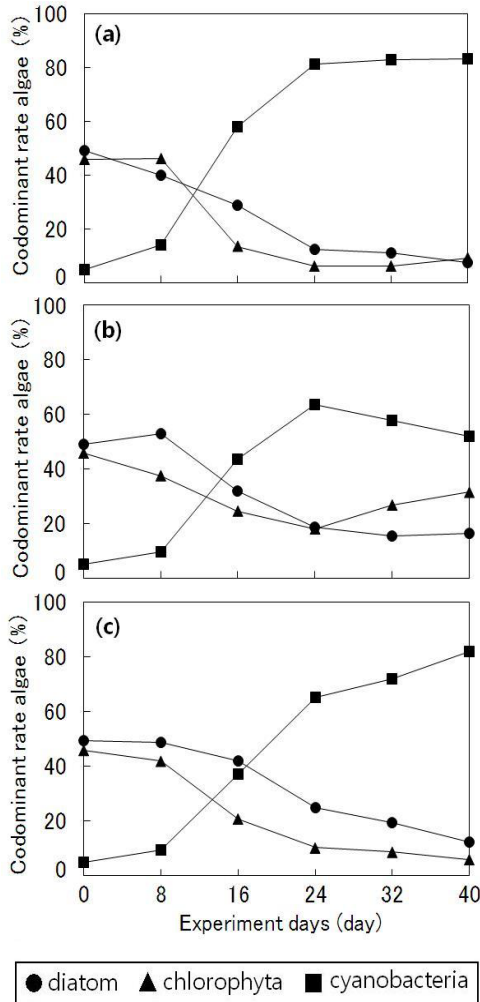


Fig. 5. Codominant rate of attached algae in each concentration line after 40 days
(a) Low, (b) Middle, (c) High concentration line

Table 5. Algae codominant rate in each concentration line after 40 days

Concentration line	Diatom	Chlorophyta	Cyanobacteria
Low	8 %	5 %	87 %
Middle	17 %	31 %	52 %
High	12 %	6 %	82 %

14.1, 0.72, 0.08mg/L (mole ratio=176:9:1)이었으며, Table 4에 나타난 본 실험의 고농도 라인과 비슷한 농도임에도 불구하고, 우점종의 교대가 일어났다.

그 이유는 본 실험의 고농도 라인에서의 Si 농도가 8.7mg/L로서, 실제 하천의 부착관 설치 지점의 Si 농도인 14.1mg/L

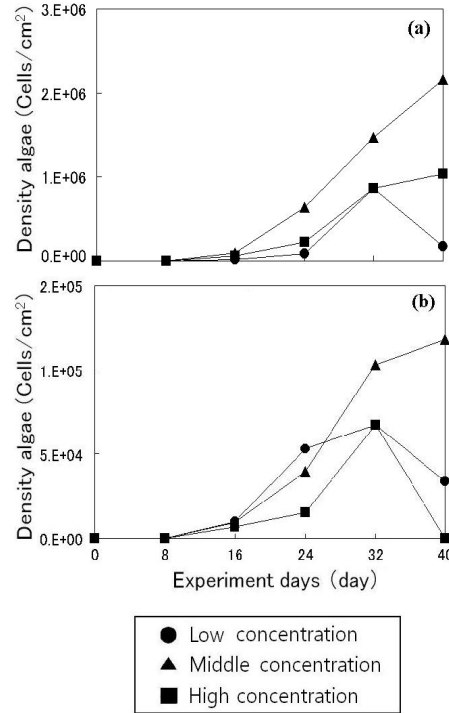


Fig. 6. Change in attached chlorophyta in each concentration line
(a) *Senedesmus sp.*, (b) *Ankistrodesmus sp.*

보다 약 1.6배 정도 낮기 때문인 것으로 판단된다. 그것은 Si/P비 뿐만이 아니라 Si 농도 자체가 영향을 끼친 것으로 판단된다. 배양액의 미네랄성분이 식물플랑크톤의 증식에 미치는 영향에 대한 기존의 연구에서는 규조류인 *Nitzschia sp.*는 Si 농도가 15.8mg/L에 다다르면 최대증식을 하고, 같은 규조류인 *Fragilaria crotonensis*의 최적 Si 농도는 15.8~18.3mg/L이라고 보고되고 있다(Chu, 1942).

각 라인에서 40일간의 인공수로 실험을 마친 후, 조류의 우점율을 Table 5에 나타냈다. 이 결과를 보면, 3라인 모두 남조류의 우점율이 높게 나타났다. 이 중, 중농도 라인에서는 남조류의 우점율이 제일 높았으나, 다른 농도의 라인에 비해 녹조류의 우점율이 상대적으로 높고, 남조류의 우점율이 낮게 나타난 것이 특징적이었다. 그 원인으로는 *Senedesmus sp.* 나 *Ankistrodesmus sp.* 등 Si를 이용해서 증식하는 녹조류가 중농도 라인에서 증식한 것을 들 수 있다. Fig. 6에 녹조류인 *Senedesmus sp.*와 *Ankistrodesmus sp.* 밀도의 경일 변화를 나타냈다.

Fig. 6(a)를 보면, 실험 시작으로부터 16일째까지는 전 라인에서 *Senedesmus sp.* 밀도의 변화가 보이지 않았으나, 16일째 이후부터는 전 라인의 *Senedesmus sp.*의 밀도

가 증가했다. 저·고농도 라인에서는 32일째까지는 *Senedesmus* sp. 개체수의 변동이 거의 같았다. 그러나, 32일째 이후부터는 *Senedesmus* sp.의 밀도가 저농도 라인에서 감소하고, 고농도 라인에서는 약간 증가했다. 한편, 중농도 라인에서는 16일째 이후부터 *Senedesmus* sp.의 개체수가 급격하게 증가했다.

Fig. 6(b)에 나타난 결과를 보면, *Ankistrodesmus* sp.도 (a)의 *Senedesmus* sp.와 거의 같은 경향으로 나타났다. 그 이유는 담수성 식물 플랑크톤인 *Ankistrodesmus falcatus*의 증식에 대한 Si의 최저 필요농도가 이 실험의 중농도 라인의 Si농도조건인 4.5mg/L와 거의 같은 4.57mg/L이기 때문인 것으로 판단된다(Rodhe, 1948). 또, *Senedesmus* sp.의 경우에는 세포벽에 Si가 있는 것이 보고되었으며, 이들 조류는 Si를 이용하는 녹조류인 것이 보고되고 있다(Stahelin 등, 1975).

결과적으로, 본 실험의 수로조건에서는 기본적으로 남조류가 우점종이 되었으나, 중농도 라인에서 남조류의 우점율이 저하한 것은 녹조류의 우점율이 높았기 때문이고, 중농도 라인과 고농도 라인의 우점율의 차는 Si를 흡수하기 위한 규조류와 녹조류의 경쟁에서 중농도 라인은 Si를 흡수하는 녹조류에 유리하게 작용한 것으로 판단된다. 한편, 중농도 라인과 저농도 라인을 비교하면, 저농도 라인은 Si의 제한에 의해 규조류의 증식이 억제되어, 녹조류와 남조류의 경쟁에서 남조류가 유리했던 것에 비해서, 중농도 라인에서는 Si를 이용하는 녹조류의 증식이 비교적 활발해서, 녹조류와 남조류의 Si를 흡수하는 경쟁에 있어서, Si를 이용하는 녹조류가 유리했던 것으로 판단된다. 즉, 실험 조건에 있어서 Si/P비 뿐만 아니라, Si농도도 부착 규조류의 증식에 명확한 영향을 주며, 규조류와 Si를 이용하는 녹조류의 경쟁, Si를 이용하는 녹조류와 남조류의 경쟁을 통해서, 부착 조류상에 복잡한 영향을 주는 것이 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 용존 규소농도의 변화가 하천의 부착조류에 미치는 영향을 실험적으로 검토하기 위해서 실제 하천에서 부착관에 부착시킨 부착조류를 이용하여 인공수로실험을 실시하였다. 그 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 용존 규소의 농도는 부착 규조류 밀도에 큰 영향을 주고, 규소 농도의 제한은 Si/P \approx 182, Si/N \approx 16.4 이하의 물비이며, 해양성 조류에 비해 그 값이 큰 것으로 나타났다. 또, 밀도뿐만 아니라 종류에 대해서도 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다.
- 2) 부착 녹조류 중에서도 규소를 이용하는 녹조류인

Senedesmus sp.와 *Ankistrodesmus* sp. 등은 규소 농도의 영향을 크게 받고, 규소가 규조류의 증식에 제한적으로 작용하는 환경에서 우점화 할 가능성이 있는 것을 알 수 있었다.

- 3) 부착조류의 증식에 미치는 영향에는 Si/P비 뿐만 아니라, Si농도도 명확한 영향을 주며, 규소를 이용하는 규조류와 녹조류의 경쟁, 규소를 이용하는 녹조류와 남조류의 경쟁을 통해서, 규소 농도는 부착 조류상에 복잡한 영향을 주는 것이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 일본 하천환경관리재단의 하천에서의 규산 등 무기 용존물질의 유출구조에 관한 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Chu, S.P.(1942) The influence of the mineral composition of the medium on the growth of plankton algae. I. Methods and culture media. *J.Ecol.*, vol. 30, pp. 284-325
2. Edwards, A. M. C. (1974) Silicon depletions in some Norfolk rivers, *Freshwater Biology*, vol. 4, pp.267-274.
3. Fulweiler, R. W. and S. W. Nixon (2005) Terrestrial vegetation and the seasonal cycle of dissolved silica in a southern New England coastal river, *Biogeochemistry*, vol. 74, pp.115-130.
4. Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu and B. V. Bodungen (1997): Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, vol. 386, pp.385-388.
5. Kamatani A. (1969) : Regeneration of inorganic nutrients from diatom decomposition. *J. Oceangr. Soc. Jpn.* vol. 25, pp.63-74
6. Kimmerer, W. (2005) Long-term changes in apparent uptake of silica in the San Francisco estuary. *Limnology and Oceanography*, vol. 50, pp. 793-798.
7. Konhauser, K.O., Phoenix, V.R., Bottrell, S.H., et al . (2001) : *sedimentology*, vol. 48, pp.415-433.
8. Marker, A. F. H. (1975) The Benthic algae of some streams in southern England, *Freshwater Biol.*,343-358.
9. Masahiro Nagai , Masahito Sugiyama , Toshitaka Hori (2001) : Environmental chemistry of river and lakes , PartVII . Fractiionation by calculation of suspended

- particulate matter in Lake Biwa into three types of particles of different origins. *Jpn. Limnology*, **vol.2**, pp.147-155.
10. Staehelin, L.A., Pickett-Heaps, J. D. (1975): The ultrastructure of *Scenedesmus* (Chlorophyceae). I. Species with the "reticulate" or "warted" type of ornamental layer. *J. Phycol.*, **vol. 11**, pp.163-185
 11. Strickland J. D. H., Holm-Hansen O, Eppley R. W. and Linn R. J. (1969): The use of a deep tank plankton ecology. I. Studies of the growth and composition of phytoplankton crops at low nutrient levels. *Oceanogr.* **vol. 23-34**
 12. Wang, W. and R. L. Evans. (1969) Variation of silica and diatoms in a stream. *Limnology and Oceanography*. **vol. 14**, pp. 941-944
 13. W.Rodhe(1948): Environmental requirements of fresh-water plankton algae. *Symb. Bot. Uppsal.* **vol. 10.**, pp.1-149
 14. 井上 直也, 赤木 右 (2006): 多摩川におけるケイ素収支にあたるダムおよび下水処理場の影響, *地球化学*, **40**, 137-145.
 15. 千葉 光雄, 須藤 隆一, 小島 貞男 (1995): *環境微生物図鑑*, 758pp. (株)講談社
 16. 田宮 博, 渡辺 篤 (1965): *藻類実験法*, 69, 南江堂出版
 17. 原島 省 (2003): 陸水域におけるシリカ欠損と海域生態系の変質, *水環境学会誌*, **26**, 621-625.
 18. 廣瀬 弘幸, 山岩 高旺 (1997): *日本淡水藻類図鑑*, 993pp. (株)内田老鶴圃