# 수생식물에 미치는 탁수의 영향[1)]

조 강 현[2)]
인하대학교 자연과학대학 생명과학과

## 서 론

습지, 호소, 하천 등의 수생태계에서 관속식물에 속하는 수생식물(aquatic macrophyte)은 다양한 생태적 기능을 수행하고 있다. 즉 수생식물은 기초 생산자로서 상위 먹이사슬에 먹이를 공급하고 다른 생물에 서식처를 제공함으로써 수생태계의 생물다양성을 증진하는데 큰 역할을 하고 있다. 또한 수생식물은 수질을 정화하고 수변의 침식을 방지하는 등의 다양한 생태적 순기능을 수행하여 수생태계의 안정성을 높이고 있다.

최근 우리나라에서는 유역으로부터 유입되는 토사와 유기물에 의하여 호소와 하천에 탁수가 발생하여 물 이용성이 저하되고 수생태계의 건강성이 크게 감소되어 사회문제화 되고 있다. 탁수가 유입됨에 따라서 각종 수중 생물이 크게 영향을 받는데 특히 침수식물을 포함하는 수생식물은 탁수 유발 부유물질에 의하여 큰 영향을 받는다. 예를 들면 침수식물이 비교적 넓게 분포하는 팔당호에서 탁수 발생 후에 침수식물을 거의 관찰할 수 없는 현상이 최근 빈번히 발생하고 있다. 탁수는 부유물질에 의하여 수생식물에 직접적으로 영향을 미칠 수 있고, 물과 저토 환경에 변화를 일으켜서 수생식물에 간접적으로 영향을 미칠 수 있다.

여기에서는 침수식물을 중심으로 탁수가 수생식물에 미치는 영향을 살펴보고 이에 대한 수생식물의 생리생태적 반응과 탁수 환경에 미치는 수생식물의 능동적인 영향을 정리하고자 한다.

## 직접적인 탁수의 영향

침수식물에 대한 탁수의 영향은 부유물질이 식물체에 직접적으로 영향을 미치는 것과 부유물질에 의하여 다른 환경이 변화하여 식물체에 영향을 미치는 간접적인 영향으로 나눌 수 있다. 직접적인 영향은 수생식물의 경엽부에 탁수에 포함된 토사, 유기물 등과 같은 부유물질이 침강, 퇴적하여 식물에 영향을 미치는 것을 말한다.

침수식물의 경엽부에 부유물질이 침강되어 쌓이게 되면 잎 표면에서 빛 투과를 막아서 광합성이 저해되어 생장과 생존이 제한 받게 된다. 물에서 침수식물의 생장을 제한 요인으로서 가장 중요한 것이 빛 환경인데 잎 위에 쌓인 부유물질에 의하여 직접적으로 침수식물의 광합성이 저해된다.

1)Effects of Turbid Water on Aquatic Macrophytes
2)CHO, Kang-Hyun, Department of Biological Sciences, Inha University, 402-751, Korea, E-mail: khcho@inha.ac.kr

수생식물이 광합성을 수행하기 위해서는 이산화탄소가 필요하고 생장을 위하여 영양소가 공급되어야 한다. 침수식물은 수체에 녹아있는 중탄산($HCO_3^-$)을 흡수하여 광합성에 이용할 수 있는데 수생식물 표면에 부유물질이 덮으면 중탄산이 잎 표면으로 확산되는 것이 저해되어 식물이 중탄산을 흡수하는 것이 제한된다.

침수식물은 영양소를 주로 저토에서 뿌리를 통하여 흡수하지만, 일부는 수체에서 식물의 경엽부 표면을 통하여 영양소를 직접 흡수하기도 한다. 탁수에 포함된 부유물이 식물체에 쌓이게 되면 식물이 물로부터 영양소를 흡수하는 것이 방해되어 생장이 제한된다.

탁수에 포함된 토사 등의 무게가 나가는 부유물질이 경엽부에 쌓이게 되면 식물체의 무게가 증가하여 물리적인 피해를 입을 수 있다. 체내에 통기조직이 발달하여 있는 침수식물은 부력을 받아 물속에서 위쪽으로 뜰 수 있기 때문에 빛을 잘 이용할 수 있도록 적응되어 있다. 그러나 부유물질이 식물체에 쌓이게 되면 식물체의 무게가 증가하여 부력에 의한 부상력을 감소되어 수심이 깊은 곳으로 가라앉게 되고 이에 따라 빛 이용도가 감소하여 침수식물의 생장이 제한된다.

## 간접적인 탁수의 영향

### 수체 환경 변화에 따른 영향

1. 빛 환경의 변화

1) 광량의 변화

물속에서 생장하는 수생식물인 침수식물이 분포하는 수심 범위는 수압, 영양소 공급, 저토 조성, 난류 등의 환경요인이 제한적이지 않다면 주로 빛 이용도에 의하여 결정된다(Havens 2003). 수심에 따른 빛의 소멸은 물 자체의 흡광, 부유입자에 의한 흡광 및 용존물질에 의한 흡광의 3가지 요인에 의하여 영향을 받는다(Wetzel 1983). 그러므로 수심 $z$에서 광도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$I_z = I_0 e^{-z(\eta_w + \eta_p + \eta_c)}$$

여기에서 $I_z$는 수심 $z$에서의 광도, $I_0$는 수표면에서의 광도, $\eta_w$, $\eta_p$ 및 $\eta_c$는 각각 순수한 물, 부유입자 및 용존물질 색에 의하여 결정되는 소멸계수이다. 광소멸계수는 매우 맑은 호수의 경우 약 0.2까지 내려가지만, 홍수에 의하여 부유물질이 많이 함유된 탁수가 유입되는 저수지에서는 10 이상으로 높아진다(Wetzel 1983). 결국 탁수에 포함된 미사, 점토 및 유기물 등의 부유물질에 의하여 수체에서 수심에 따라서 광량이 급격하게 감소하고 이에 따라 침수식물의 생장이 제한된다.

2) 광질의 변화

수체에서 수심에 따라서 광량이 변할 뿐만 아니라 빛의 특성 즉 파장별 광도가 변한다. 앞에서 언급한 세가지 흡광 요소에 대한 수심 1 m 당의 흡광백분율로 나타낸 파장별 흡광 특성도 다르게 나타난다(그림 1). 자색과 청색의 단파장은 용존 유기물에 의하여 주로 흡수되고 적색과 적외선의 장파장은 주로 물 자체에 의하여 흡수된다. 반면에 부유물질에 의한 흡광 특성은 50 mg/*l* 이하의 저농도에서는 특정 파장에 특이적이지 않다. 그러나 50 mg/*l* 이상의 고농도의 부유물질에서는 청색이 적색보다 빨리 흡수된다(Otto and Enger 1960). 수체에서 적색광이 물 자체에 의하여 빠르게 흡수되기 때문에 수생식물이 광합성에 이용하는 적색광이 수체에서 제한받게 된다(Kirk 1985). 그러므로 수체에서 수생식물의 광합성은 청색광을 어느 정도 잘 이용하는가에 따라서 결정된다. 결국 수체에서 부유물질에 의하여 청색광이 많이 소멸되므로

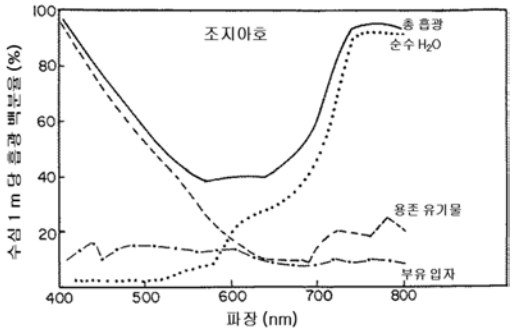


**그림 1.** 미국 Wisconsin의 George 호에서 수심에 따른 흡광 스펙트럼(James and Birge 1938).

탁수에서는 수초의 광합성이 크게 제한을 받아서 생장과 생존이 제한된다.

3) 빛에 대한 생리생태 반응

빛에 대한 식물의 광합성 반응을 최대 광합성에 도달하는 최소 광도(광합성 포화광도)와 광합성량과 호흡량이 같은 광보상점의 2가지 지표로서 나타낼 수 있다. 특히 탁수에 의하여 빛이 제한된 수체에서는 저광 조건에서 높은 광합성 능력을 가진 침수식물이 생존에 유리하다. 태풍, 홍수, 준설 등에 의하여 탁수가 발생하는 호수에서 이러한 저광 환경이 조성된다. 결국 광 보상점이 침수식물의 최대분포수심을 결정한다.

침수식물의 광도에 따른 광합성량을 비교한 실험에서 검정말, 어항마름, 이삭물수세미 및 붕어마름의 광합성 포화광도는 비슷하였으나, 광보상점은 검정말<이삭물수세미≒붕어마름<어항마름의 순서이었다(Van *et al.* 1976). 결국 검정말이 탁도가 높은 낮은 광도에서도 다른 식물에 비하여 생물량을 높게 유지할 수 있다.

탁수에서 침수식물의 생리생태적 반응은 다양하다. 탁수의 저광조건에서 침수식물이 형태는 독특하게 나타난다. *Egeria densa*은 탁수에서 부유물질이 증가함에 따라서 가지의 분지수가 감소하고 뿌리 발달도 저해되었다(Tanner *et al.* 1994). 또한 탁도가 높은 수체에서는 경엽부 신장이 촉진되어 줄기의 아래쪽 잎은 고사하고 수면 가까이에 잎이 드리워지는 수관(canopy)을 빠르게 형성한다(Goldsborough and Kemp 1988). 저광 조건에서는 침수식물의 광합성 기관에 변화가 초래되는데 수체의 탁도가 증가함에 따라서 잎의 엽록소 함량이 증가한다(Goldsborough and Kemp 1988).

4) 수생식물의 분포 최대수심의 변화

침수식물이 분포할 수 있는 최대 수심은 식물종의 특성에 따라서 달라질 수 있다. 현재까지 알려진 침수식물이 분포하는 최대수심은 New York의 George 호에서 *Elodea canadensis*의 수심 12 m(Sheldon and Boylen 1977) 혹은 페루의 Titicaca 호에서 가래속 *Potamogetonn strictus*의 수심 11 m(Tutin 1940)이다. 수심에 따라서 빛 환경이 크게 달라지므로 결국 수체의 탁도가 침수식물의 최대 분포수심을 결정하는 주요인이 된다.

쇠털골속 *Eleocharis acicularis*, 수염가래속 *Lobelia dortmanna*, 골풀속 *Juncus pelocarpus*, 큰고추풀속 *Gratiola aurea*과에 속하는 로제트 형(rosulate, 저토에 붙어서 방석 모양으로 자라는 성장형)의 침수식물은 주로 수심 2 m 이내의 얕은 물가에 분포한다. 일반적으로 이 식물은 물의 탁도보다는 저토 환경과 같은 다른 환경 요인에 의하여 분포수심이 제한된다(Davis and Brinson 1980).

깨끗한 민물에 분포하는 가래속 *Potamogeton praelongus*을 비롯한 *P. robbinsii*, *P. zosteriformis*, *P. amplifolius* 및 *P. gramineus*는 대체로 최대 분포수심이 매우 깊으며, 낮은 광도에서 잘 견디므로 부유물질이 많은 탁수에서도 생존할 수 있을 것으로 기대된다(Davis and Brinson 1980). 반면에 나자스말

속 *Najas flexilis*는 가래속에 비하여 넓은 세키 수심의 범위에 분포하여 세키 수심이 증가함에 따라서 최대 분포수심이 증가는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다.

많은 침수식물은 세키 수심과 최대 분포수심 사이에 대체로 직선적 상관관계를 보이고 있다. 이러한 침수식물은 대부분 광분포종(cosmopolitan)이다(Davis and Brinson 1980). 솔잎가래(*Potamogeton pectinatus*)는 세키 투명도 0.9-5.7 m의 넓은 범위에서 생육하는데(McCombie and Wile 1971), 이처럼 탁도가 높은 곳에서도 이 식물이 생존할 수 있는 것은 이 식물이 바늘 모양의 잎을 가져서 미사가 잎 위에 쌓이지 않기 때문이다(Schiemer and Prosser 1976). 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*)은 세키 수심 5 m 이하에서 다른 식물보다 더 깊은 곳까지 분포한다.

이밖에 이삭물수세미(*Myriophyllum spicatum*), 나사말속 *Vallisneria americana*, 나자스말속 *Najas guadalupensis* 및 가래속 *Potamogeton* subsection Perfoliati은 수심 6-7 m에서 최대 분포수심이 더 이상 증가하지 않는데, 이들 식물에서는 빛보다는 수압에 의하여 최대 분포수심이 결정되는 것으로 파악된다(Davis and Brinson 1980).

2. 수체의 화학적 특성의 변화

탁수를 유발하는 부유물질에 함유, 부착 혹은 흡착된 다양한 화학물질에 의하여 수체의 화학적 특성이 변화되고 이에 따라서 수생식물의 생장에 영향이 미칠 수 있다. 유입되는 부유물질에 의하여 수체의 pH가 변화하면 침수식물의 광합성과 생장에 직간접적인 영향을 미친다. pH가 변화하면 직접적으로 식물체로의 영양소 흡수에 영향을 미치며 간접적으로는 인, 중탄산 및 기타 영양소 이용도에 변화가 유발된다. 또한 부유물질에 중금속 등의 독성물질이 함유된 경우에 이에 의하여 직접적으로 침수식물의 생장이 억제될 수 있다.

**저토 환경 변화에 따른 영향**

탁수를 유발하는 부유물질은 침강 퇴적되어 저토의 물리화학적 환경에 변화를 일으켜서 수생식물의 생장에 간접적으로 영향을 미칠 수 있다. 미세한 토사 입자가 저토에 퇴적되면 저토의 입경분포가 변화하고 이에 따라서 저토의 산화환원상태가 변화할 수 있고 저토의 영양소 이용도에 영향을 미칠 수 있다. 특히 미세한 입경의 토사가 퇴적되면 저토의 산소 공급이 불량하여 환원상태의 무산소상태가 초래되어 침수식물 뿌리의 호흡이 감소하고 영양소 흡수가 제한되어 침수식물의 생장에 큰 영향을 미칠 수 있다(Wetzel 1983). 대부분의 침수식물은 줄기나 잎을 통하여 수체로부터 영양소를 흡수하기보다는 뿌리를 통하여 저토로부터 대부분의 영양소를 흡수하므로 탁수 유발 부유물질에 함유된 영양소와 독성물질이 저토로 퇴적되면 이러한 물질에 의하여 침수식물 생장에 간접적으로 영향을 미치게 된다.

**다른 생물의 변화에 따른 영향**

탁수가 수체에서 다른 생물에 영향을 미쳐서 먹이사슬나 경쟁 관계에 의하여 수생식물에 영향이 나타날 수 있다. 즉 수생식물을 먹이로 하는 상위 영양단계의 생물인 저서동물, 어류 등이 탁수에 의하여 영향을 받으면 먹이사슬의 관계에 의하여 수생식물에 영향이 나타날 수 있다.

호소에서 수생식물은 부착조류나 식물플랑크톤과 경쟁적인 관계에 놓일 수 있다. 탁수에 의하여 조류에 영향이 나타나면 경쟁관계에 있는 수생식물이 간접적인 영향을 받는다. 강한 바람이나 홍수에 의하여 수생식

물이 우점하는 생태계에서 탁도가 높고 조류가 우점하는 생태계로 변화할 수 있다(Scheffer *et al.* 1993; Breukers *et al.* 1997). 탁수에 의하여 침수식물에 생존에 필요한 광도가 점차 감소하면 식물플랑크톤이나 부착조류가 증가하기도 한다(Giesen *et al.* 1990; Dennison *et al.* 1993). 또한 탁수에 의하여 동물플랑크톤의 생장이 억제되면 먹이사슬에 따라서 식물플랑크톤이 번성하고 이와 경쟁관계에 있는 수생식물의 생장이 억제될 수 있다.

## 탁수에 대한 수생식물의 내성

탁수가 침수식물에 미치는 영향은 식물종에 따라서 다르며 이에 따라서 침수식물의 탁도내성지수(turbidity tolerance index)를 산정할 수 있다. Davis and Brinson(1980)은 침수식물의 분포 수심과 세키 수심의 자료를 수집하여, 세키 수심이 2.5 m 이하인 곳에서 세키 수심에 대한 침수식물의 분포최대수심의 비율로서 탁도내성지수를 산출하였다(표 1). 즉 세키 수심이 2.5 m 이하인 곳에서 이보다 깊은 곳에서 침수식물이 분포한다면 이 침수식물이 탁도에 내성이 있다고 판단하는 것이다. 즉 침수식물의 탁도내성지수가 클수록 탁수 조건에서 생존할 수 있는 적응력이 크다고 할 수 있다.

쇠털골속 *Eleocharis acicularis*는 분포 수심이 세키 투명도와는 관계가 없어서 탁도내성지수가 낮으며, *Elodea canadensis*는 수심 10 m 이상 깊은 곳에서도 생존이 가능함에도 불구하고 탁도에 매우 민감하다. 반면에 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*), 나사말속 *Vallisneria americana*, 나자스말속 *Najas guadalupensis* 및 솔잎가래(*Potamogeton pectinatus*)의 탁도내성지수는 매우 높았다.

특히 솔잎가래는 바늘잎을 가지고 있어서 부유물질이 잎에 침강하기가 어려워서, 부유물질이 축적되기 쉬운 넓은 잎을 가진 침수식물이 정착하기 어려운 곳에서도 정착이 가능하다. 한편 잘게 나누진 깃털 모양의 잎을 가진 이삭물수세미(*Myriophyllum spicatum*)이 솔잎가래보다 퇴적물로 쉽게 덮히게 되어 탁수에 약하다(Schiemer and Prosser 1976). 이삭물수세미는 미사 퇴적에 의하여 식물체 무게가 증가하여 성장이 저해되고 분포도 한정된다.

**표 1.** 세키 수심이 2.5 m 이하인 곳에서 세키 수심에 대한 침수식물의 분포최대수심의 비율로 표시한 침수식물의 탁도내성지수(Davis and Brinson 1980)

| 침수식물 종류 | 세키 수심 2.5 m 이하의 생태계 수* | 조사된 총 생태계 수* | 탁도내성지수 |
|---|---|---|---|
| *Potamogeton praelongus* | 0 | 11 | 0 |
| *Eleocharis acicularis* | 2 | 7 | 0.5 |
| *Elodea canadensis* | 7 | 14 | 1.1 |
| *Potamogeton* subs. *Perfoliati* | 9 | 17 | 1.5 |
| *Najas flexilis* | 3 | 11 | 1.7 |
| *Myriophyllum spicatum* | 11 | 40 | 1.7 |
| *Potamogeton pectinatus* | 9 | 22 | 2.0 |
| *Najas guadalupensis* | 5 | 6 | 2.2 |
| *Vallisneria americana* | 6 | 17 | 2.4 |
| *Ceratophyllum demersum* | 2 | 11 | 2.8 |

*Davis and Brinson(1980)이 집계한 침수식물의 분포수심 자료에서 조사된 생태계.

## 탁수가 수생식물 군집 구조에 미치는 영향

단기적인 교란에 의한 침수식물 군집이 변화는 것의 대표적인 사례는 수체에 부유물이 부하되는 탁수 교란이다. Tennessee의 Reelfoot 호에서 1945년 6월에 홍수에 의하여 주변 경사지가 침식되어 막대한 양의 토사가 호수로 유입되는 교란이 발생하였다(Steenis 1947). 이곳에서 탁수 발생의 직후에 침수식물 군집은 크게 감소하였다. 교란 이전에 우점종이었던 붕어마름은 탁수에 의하여 감소하였는데 이는 붕어마름이 뿌리가 저토에 박혀있지 않은 경우가 많아서 급류에 약한 것도 하나의 원인으로 생각된다. 그러나 붕어마름은 다음해부터 급속히 회복되었다. 솔잎가래는 교란 시에도 비교적 풍부하게 남아 있었고 교란 후에 크게 번성하였다. 탁수 교란 후 나자말속(*Najas guadalupensis*)과 실말도 특정 수역에서 성장이 촉진되었고 초생달말(*Zannichellia palustri*)도 급속히 확대되었다. 전반적으로 Reelfoot 호에서 탁수 발생에 따라서 침수식물의 과우점종이 제거됨에 따라서 침수식물의 다양성이 증가되었다.

## 수생식물이 탁수 환경에 미치는 영향

이미 살펴 본 바와 같이 침수식물은 탁수에 영향을 받지만, 능동적으로 침수식물이 수체에 영향을 미쳐서 탁수 환경에 변화를 가져 올 수 있다. 즉 수생식물은 물의 흐름을 방해하여 유속을 감소시킴으로써 부유물질의 침강을 촉진하고 저토로부터 부유물이 재부유(resuspension)되는 것이 억제되어 탁도가 감소하게 된다(그림 2의 B). 또한 탁도가 감소되면 빛 조건이 개선되고 유속에 의한 직접적인 물리적 교란도 감소하여 수생식물의 생장을 촉진하는 양성 되먹임 조절이 일어나게 된다. 그러나 탁도가 증가하여 수생식물의 생장이 저해되면 유속이 증가하고 저토로부터 부유물질이 재부유되어 더욱 탁도가 증가하고 이에 따라 수생식물이 더욱 감소하는 음성 되먹인 조절이 일어나기도 한다(그림 2의 A).

결국 침수식물은 유속을 저감하고 저토를 안정화시켜서 호소에서 맑은 물 상태를 유지하는데 기여한다(Rip *et al.* 2006). 이는 침수식물이 부유입자의 퇴적을 촉진하고(Madsen *et al.* 2001; Horppila and Nurminen, 2003), 저토의 재현탁을 감소하기 때문이다(Van den

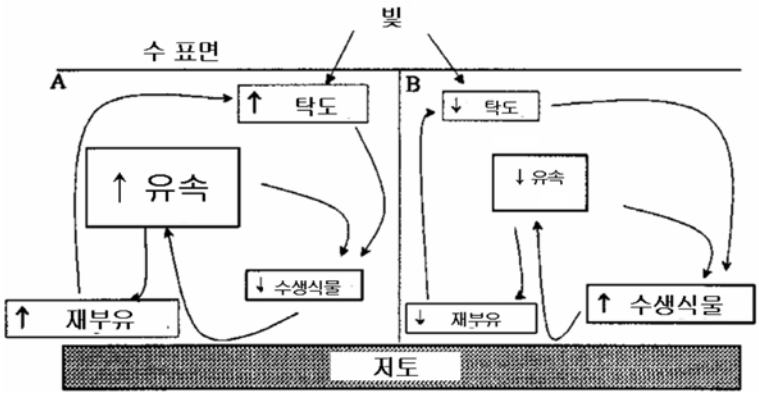


**그림 2.** 수생식물과 탁수와의 관계를 나타내는 모식도. 대형수생식물이 쇠퇴한 경우(A)와 번성한 경우(B) (Madson *et al.* 2001).

Berg *et al*. 1998). 침수식물 뿐만 아니라 애기부들과 같은 정수식물에서도 저토의 재부유를 방지하여 투명한 물 상태를 유지하는데 기여할 수 있다(Horppila and Nurminen 2001). 더욱이 침수식물은 동물플랑크톤의 은신처를 제공하고, 식물플랑크톤에 대한 타감물질을 분비하여 식물플랑크톤의 생장을 억제하여 맑은 물 상태를 유지하는 양성 되먹임 제어를 하기도 한다(Jackson 2003; Appelgren and Mattila 2005).

## 결 론

탁수가 수생식물에 미치는 영향을 종합하면 표 2와 같다. 침수식물에 대한 탁수의 영향은 부유물질이 식물체에 직접적으로 영향을 미치는 것과 부유물질에 의하여 다른 환경이 변화하여 식물체에 영향을 미치는 간접적인 영향으로 분류할 수 있다. 직접적인 영향은 식물체의 경엽부에 토사 등의 부유물질이 침강, 퇴적하여 식물에 영향을 미치는 것이다. 이렇게 경엽부에 부유물질이 침강되면 입 표면에서 빛 투과를 막아서 광합성이 저해되고, 기체와 영양소 교환을 저해하게 된다. 또한 경엽부에 부유물질이 쌓여서 무게가 증가하여 물리적인 피해를 입을 수 있다.

**표 2.** 탁수가 수생식물에 미치는 영향

| | |
|---|---|
| I. **직접적 영향** | 1. **식물 표면에 토사 침강**<br>빛 투과 저해로 광합성 감소<br>기체 및 영양소 교환 방해<br>식물체 중량 증가로 물리적 피해 |
| II. **간접적 영향** | 1. **수체 특성 변화**<br>빛 투과 저해로 광합성 감소<br>부유물질에 의한 수체에 영양소 혹은 독성물질 공급<br>2. **저토 특성 변화**<br>저토 입경 분포의 변화<br>부유물질에 의한 저토에 영양소 혹은 독성물질 공급<br>3. **다른 생물의 변화**<br>식물플랑크톤과의 경쟁관계에 의한 영향<br>상위 먹이사슬 생물과의 영양 관계에 의한 영향 |

부유물질의 간접적인 영향은 수체, 저토 및 다른 먹이사슬의 생물에 영향을 미칠 수 있다. 수체에서는 부유물질에 의하여 탁도가 증가하여 침수식물의 광합성이 저해되고 부유물질에 포함된 영양소 혹은 독성물질에 의하여 식물이 영향을 받는다. 저토에서는 부유물질 퇴적되어 저토의 특성이 바뀌고 저토에서 영양소 혹은 독성물질이 식물 뿌리에 영향을 미칠 수 있다. 부유물질이 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 초식 어류 등에 영향을 미쳐서 경쟁 등의 종간관계와 먹이사슬에서의 연쇄 영향으로 침수식물에 간접적인 영향이 나타날 수 있다.

이상에서 살펴본 수생식물에 미치는 다양한 탁수의 영향 중에서 광조건 악화에 의한 광합성 저해가 수생식물에서 가장 중요한 생리적 반응으로 파악된다. 일단 수생태계에서 탁수에 의하여 수생식물의 생장과 생존이 제한되면 수생식물의 다양한 생태계 기능이 상실되어 수생태계 안정성이 감소한다.

## 참고문헌

Appelgren, K. and J. Mattila. 2005. Variation in vegetation communities in shallow bays of the northern Baltic Sea. Aquat. Bot. 83: 1-13.

Breukers, C. P. M., E. M. Van Dam and S. A. De Jong. 1997. Lake Volkerak-Zoom: a lake shifting from the clear to the turbid state. Hydrobiol. 342/343: 367-376.

Davis, G. J. and M. M. Brinson. 1980. Response of Submersed Vascular Plant Communities to Eenvironmental Change. U.S. Fish and Wildlife Service. Kearneysville, West Virginia.

Dennison, W. C., R. L. Orth, K. A. Moore, J. C.

Stevenson, V. Carter, S. Kollar, P. W. Bergstrom and R. A. Batiuk, 1993. Assessing water quality with submerged aquatic vegetation. BioSci. 43: 86-94.

Giesen, W. B. J. T., M. M. Katwijk and C. Hartog. 1990. Eelgrass condition and turbidity in the Dutch Wadden Sea. Aquat. Bot. 37: 71-85.

Goldsborough, W. J. and W. M. Kemp. 1988. Light Responses of a submersed macrophyte: Implications for survival in turbid tidal waters. Ecol. 69: 1775-1786.

Havens, K. E. 2003. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake. Hydrobiol. 493: 173-186.

Horppila, J. and L. Nurminen. 2003. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland). Water Res. 37: 4468-4474.

Horppila, J. and L. Nurminen. 2001. The effect of an emergent macrophyte (*Typha angustifolia*) on sediment resuspension in a shallow north temperate lake. Freshwater Biol. 36: 1447-1455.

Jackson, L. J. 2003. Macrophyte-dominated and turbid states of shallow lakes: Evidence from Alberta Lakes. Ecosystems 6: 213-223.

James, H. R. and E. A. Birge. 1938. A laboratory study of the absorption of light by lake waters. Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett. 31: 1-154.

Kirk, I. T. 0. 1986. Light and Fhotosvnthesis in Aquatic Ecosystgms. Cambridge University Press, New York.

Madsen, J. D., P. A. Chambers, W. F. James, E. W. Koch and D. F. Westlake. 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. Hydrobiol. 444: 71-84.

Otto, N. E. and P. F. Enger. 1960. Some Effects of Suspended Sediment on Growth of Submersed Pondweeds. Gen. Lab. Rep. No. Gen-27. U.S. Dept. Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

Scheffer, M., H. S. Hosper, M. L. Meijer, B. Moss and E. Jeppesen. 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. Trends Ecol. Evol. 8: 275-279.

Schiemer, F. and M. Prosser. 1976. Distribution and biomass of submerged macrophytes in Neusiedlersee. Aquatic Bot. 2: 289-307.

Sheldon, R. B. and C. W. Boylen. 1977. Maximum depth inhabited by aquatic vascular plants. Amer. Midl. Nat. 97: 248-254.

Steenis, J. H. 1947. Recent changes in the marsh and aquatic plant status at Reelfoot. Lake. J. Acad. Sci. 22: 22-27.

Tanner, C. C., J. S. Clayton and R. D. S. Wells. 1993. Effects of suspended solids on the establishment and growth of *Egeria densa*. Aquat. Bot. 45: 299-310.

Tutin, T. G. 1940. The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937 under the Leadership of Mr. H. Cary Gilson, M.A. X. The macrophytic vegetation of the lake. Trans. Linn. Soc. Lond., 3rd Ser. 1: 161-189.

Van den Berg, M. S., H. Coops, M.-L. Meijer, M. Scheffer and J. Simons. 1998. Clear water associated with a dense *Chara* vegetation in the shallow and turbid Lake Veluwemeer, The Netherlands. In: Jeppesen, E., Sondergaard, M., Christoffersen, K. (Eds.), The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes. Springer-Verlag, New York.

Van, T. K., W. T. Haller and G. Bowes. 1976. Comparison of the photosynthetic characteristics of three submersed aquatic plants. Plant Physiol. 58: 761-768.

Wetzel, R. G. 1983. Limnology. Saunders College Publishing, Philadelphia.