

식물체를 이용한 조류제어 현장 적용성 실험

임 병 진* · 김 상 훈 · 전 선 옥

(국립환경연구원 한강수질검사소)

Application of Various Plants as an Inhibitor of Algal Growth: Studies in Barge Enclosure and Artificially Eutrophicated Pond. Lim, Byung-Jin*, Sang-Hun kim and Sun-Ok Jun (NIER, Han River Water Quality Research Laboratory, Yangpyung 476-820, Korea)

Experiments have been carried out in barge enclosure near Bukhangang area and artificially eutrophicated pond. Applied plants are three terrestrial plants (Big cone pine, Pine needles and Ginkgo) and one aquatic plant (Water chestnut). In the experiment pond, applied plants are big cone pine, pine needles and ginkgo at the concentration of 0.5 g/l and water chestnut of 0.3 g/l. And it used pine needles at the concentration of 0.3 g/l in barge enclosure. The dominant species was *Microcystis aeruginosa*. Chlorophyll a concentration decreased to the extent of average 65% as compared with the beginning of experiment by the input of big cone pine and pine needles in artificially eutrophicated pond. But it was decreased to the extent of average 34% by the input of water chestnut. Especially, pine needles significantly inhibited the growth of algae from the early days in barge enclosure, it was declined at a rate of average 74%. It was proved that pine needles was the most inhibitory to the growth of algae at the treatment with 0.3~0.5 g/l. Ginkgo and water chestnut are needed more study. We purified that the dissolved phenolic compounds from the various plants can affect algal growth.

Key words : Algal control, Plants, Artificially eutrophicated pond, Barge enclosure

서 론

한강 등 4대강 수계 상수원 보호를 위해 수질보전 특별대책 지정, 환경기초시설 집중 투자 등 많은 노력과 호소수의 수질 개선을 위한 여러 방안이 제시된 바 있지만(류 등, 1998), 실제의 수질은 더욱 악화되어 상수원으로서의 비용부담이 증가되고 있다.

오염물질이 호소 내로 지속적으로 유입될 경우 조류 등의 일차생산자의 증식이 촉진되어 부영양화가 진행될 수 있다. 호수는 수도의 원수로 이용하는 경우가 많고 냄새 발생과 여과 장애가 문제가 되고 있다. 또한 수화 발생은 악취와 수질악화의 원인이 되고 물 이용의 큰

피해를 줄 수 있고 부영양화가 진행된다면 남조류 등 유해성 플랑크톤의 발생가능성이 높다. 따라서 호수내 조류 발생을 억제하기 위해 물리화학적, 생물학적 방법을 시도하여 왔다.

조류의 대량증식 제어방법에는 유역관리 방법으로 오염원이 호수로 유입하는 것을 차단하거나 고도 처리에 의한 영양염류의 유입량을 줄여 호수에서의 조류 발생을 제어하는 방법이 있으나 막대한 경비와 시간이 소요된다. 또한 이화학적 방법으로 화학살조제를 투여하여 조류를 침강 사멸시키는 방법이 있는데, 이 방법은 모든 조류를 제거함으로써 이들을 먹이로 하는 물고기에게까지 피해를 주며, 침전된 조류가 분해되면서 오염원으로 작용하고, 장기간의 사용이 살조제에 대한 조류의 내성이

* Corresponding author: Tel: 031) 772-7896, Fax: 031) 773-2268, E-mail: limnolim@hanmail.net

커지며, 살조제의 유해성분이 호수 내에 축적되어 생태계에 악영향 및 환경물질의 증가에 의한 논쟁의 여지가 있다.

따라서 근래에는 생태계내의 자연적 현상을 이용한 생물학적 방법이 관심이 집중되면서, 현재는 대형수생식물과 육상식물이 생산하는 증식 억제 화학물질 (allelopathy)을 통한 조류제어방법이 대두되고 있으며, 특히 많은 외국 연구자들에 의해 수중에서 분해되고 있는 보리짚이 조류증식을 제어한다는 사실을 현장 및 실험실 실험을 통하여 보고되었다 (Gibson *et al.*, 1990; Pillinger *et al.*, 1992; Barrett, 1994; Everall and Lees, 1997). 특히 보리짚이 조류의 성장을 저해한다는 사실의 발견은 호소에서 각종 조류제어기술에 대한 개념의 변화를 유도하였다. 그러나 조류제어 효과가 보리짚에서 방출된 물질에 의한 영향이라고 단정은 지었지만 (Gibson *et al.*, 1990), 이 물질이 미생물에 의한 작용으로 제어되는 것인지 식물자체의 화학물질에 의한 것인지에 대한 정확한 기작은 입증되지 못하였다. 특히 국내에서는 보리짚을 이용한 조류제어 실험은 전무하고 다만 최근에 Kang (1999)에 의해 국내에서 솔잎, 잣잎, 짚, 쭉, 부들 등 식물체 분해산물에 의한 조류 증식억제에 관한 연구가 진행된 바 있다. 식물체를 이용한 조류제어 효과에 관한 연구는 임 등 (2000a)이 팔당호 주위에 자생하는 애기마름, 갈대 등의 수생식물과, 은행잎, 잣잎 등의 육상식물을 이용해 실험실에서 조류제어효과를 비교하였으며, 특히 습체식물과 건체식물로 구분하여 실험함으로써 분해시간 경과에 따른 조류제어효과를 조사하였다. 이러한 실험실 실험의 결과를 토대로 현장에서 조류증식 제어 실험을 수행하여 팔당호 중 조류증식이 활발한 경안천 만입부 현장에서 식물체를 이용한 조류제어 가능성을 검토하였다 (임 등, 2000b). 본 연구에서는 이들 실험실 실험과 팔당호 현장 실험을 기초로 하여 조류 증식억제에 비교적 효과가 좋았던 육상식물인 잣잎, 솔잎, 은행잎과 수생식물인 애기마름 등 총 4종류의 식물체를 첨가하여 현장에 적용하는 실험을 하였다. 향후 골프장 등에 조성된 소규모 인공 연못 및 호소내 유입 부영양화된 소하천 등에 적용하기 위하여 인위적 인공부영양화실험지를 대상으로 조류제어 가능성을 검토하였다. 또한 호소내 조류 대발생에 대한 수면제어 기술의 일환으로 팔당호 인근 지점에서 바지선을 설치하여 바지선 내로 조류가 발생한 호수물을 유입시켜 식물체를 투입시켜 조류 증식을 억제하는 방식으로 실험을 하여 조류제어 최적 대상 식물체와 적정 농도 등을 산출하고자 연구하였다.

Table 1. Applied plants for inhibitory of algal growth.

	Common name	Scientific name	한국명
Aquatic plant	Water chestnut	<i>Trapa incisa</i>	애기마름
Terrestrial plants	Big cone pine	<i>Pinus koraiensis</i>	잣 나무
	Pine needles	<i>Pinus sylvestris</i>	소 나무
	Ginkgo	<i>Ginkgo biloba</i>	은행나무

재료 및 방법

1. 조사대상 및 재료

생물학적으로 조류증식 제어 실험을 수행하기 위해 경기도 양평군 소재 한강수질검사소내 인공실험지와 검사소 선착장 인근의 바지선에 현장실험조를 제작하여 남조류가 대발생한 호수물을 채운 후 팔당호 주변에서 자생하고 있는 육상식물 (잣잎, 솔잎, 은행잎) 3종과 수생식물 (애기마름) 1종을 각각 투여하여 투여량별 조류성장 제어 특성을 조사하였다.

조류제어에 이용한 식물은 팔당호 주변에서 자생하고 있는 식물체 (수생식물: 애기마름, 육상식물: 잣나무, 소나무, 은행나무) 잎들을 대상으로 실험하였는데 이는 임 등 (2000a)이 사용한 9가지 식물체 중 비교적 조류제어에 효율이 좋았던 식물체를 선정하여 실험하였다 (Table 1).

2. 조류제어 실험조건 및 식물체 투여량

육각형 모형의 콘크리트 수조 (300×600×200 cm)에 팔당호 호수물을 채운 후 (약 23 t) 인위적으로 영양원을 첨가하여 부영양화 시켜 남조류가 단 시간 내에 대량 증식할 수 있는 조건을 만들어 주었다. 식물체를 이용한 조류제어 현장 기술의 하나로 임 등 (2000a)의 실험결과를 토대로 현장에서 직접 적용하기 위해 남조류 증식이 활발한 검사소 인근 유역에서 2000. 7. 21~8. 10 (21일간) 1차 실험을 수행하였고 8월 23일~9월 14일 (23일간) 2차 실험을 수행하였다. 현장실험용 바지선은 가로 500 cm, 세로 500 cm인 규격으로 제작하였고 바지선 바닥은 천막으로 깊이가 약 250 cm 되게 차단시킨 후 남조류가 대 발생한 호수물로 채웠고 수심은 약 180 cm 정도로 유지시켰다. 조류억제 실험에 이용한 식물체들은 양파주머니 같은 망에 넣어 인공접촉실험여재를 만들어 현장실험 수조 안으로 물의 흐름에 맞추어 걸쳐놓았다. 또한 수조 안은 인공접촉여재와 조류의 접촉을 원활하게 하기 위해 가급적 자연상태의 호수에 맞추어 아주 약하게 폭기를 시켜 주었다.

식물체는 생체를 만 후 2~3일간 자연 건조시킨 후 실험조에 투여하였다. 투여량은 1차 실험에서는 육각실험조에 잣잎 (0.5 g/l), 솔잎 (0.5 g/l), 애기마름 (0.1 g/l)을 각각 투여하였고, 현장 바지선 실험조에는 은행잎 (0.2 g/l)을 투여하였다. 2차 실험에서는 육각실험조에 잣잎 (0.5 g/l), 은행잎 (0.5 g/l), 애기마름 (0.3 g/l)을 각각 투여하였고, 현장 바지선 실험조에는 솔잎 (0.3 g/l)을 투여하였다.

3. 식물체 추출물 성분 분석

식물체 추출물 성분분석은 기체크로마토그래피 질량분석기 (GC/Mass Model, KRATOS, England)를 이용하여 조류증식억제에 효과가 있는 잣잎, 솔잎, 은행잎, 애기마름 추출물을 대상으로 유기화합물 성분을 분석하였다.

4. 식물체 추출물 생태독성 시험

식물체를 이용한 조류 증식억제에 관한 실험시 실험대상수역 생태계에 미치는 영향을 파악하여 실제 호소 생태계에 안정적으로 적용할 수 있는 지를 검토하기 위하여 식물체 추출물 생태 독성 시험을 실시하였다. 시험생물로는 한강수질검사소에서 계대해서 사육 중인 공시생물인 큰 물벼룩 (*Daphnia magna*)을 대상으로 선정하였다. 물벼룩을 이용한 식물체 추출물 생태독성 시험은 독일공업규격 38412 L 30이나 OECD Guidelines for testing of chemicals 202법 등을 약간 변형하여 이용하였다 (임 등, 1996). 유영성 저해 판단은 시험용기를 15초간 천천히 움직여 보았을 때 촉각 (antenna)은 움직이나 유영하지 않는 것 또는 전혀 움직임을 보이지 않는 것으로 하였다.

결과 및 고찰

1. 실험실에서 식물체 투여량에 따른 조류제어 실험

1) 식물체 2.5 g/l 투여시 조류제어 효과

현장적용 실험 이전에 팔당호 주변에서 자생하는 육상식물인 솔잎, 잣잎, 은행잎과 수생식물인 애기마름을 대상으로 자연상태에서 1~2일 동안 건조시킨 후 식물체를 잘게 부순 후 2.5 g/l로 투여하여 10일간 실험하였다. 실험 대상 조류는 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 CB배지에 10^4 cells/ml 수준으로 접종시킨 후 대조구를 제외한 각각의 실험구에 육상식물 생체 2.5 g/l을 투여하여 10일간의 Chl-a 농도를 조사하였다. Chl-a로 조류증식억제 효율은 모든 식물체에서 대조구 대비 99%

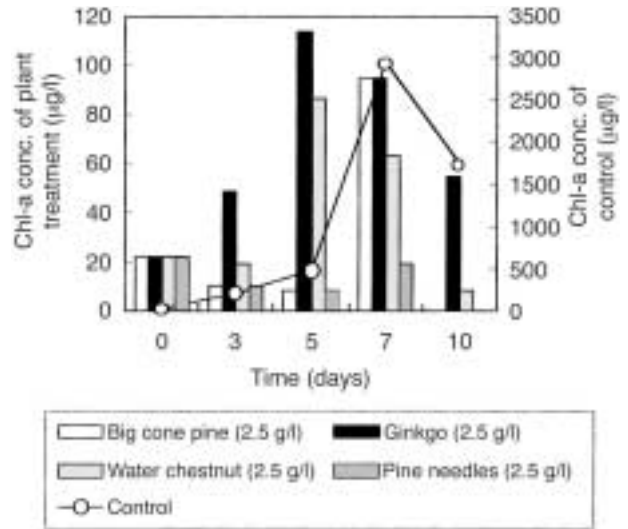


Fig. 1. Changes of chlorophyll a concentration of *Microcystis aeruginosa* with the input of plants (2.5 g/l).

이상의 높은 증식억제 효율을 보였다. 임 등 (2000a)은 견적실험에서 대조구의 Chl-a 농도가 $802.6 \mu\text{g/l}$ 로 조류가 최대 성장된 5일째에 조류 증식 억제 효율을 보면 잣잎 98%, 은행잎 96%, 솔잎 95%의 순이라고 보고하였고, 대조구의 Chl-a 값이 $633.9 \mu\text{g/l}$ 인 7일째는 솔잎, 잣잎, 은행잎이 각각 98%를 나타내었다고 하였다. 또한 보리짚은 배지 1/당 7g을 투여하여 90%의 억제 효율을 보였던 Ridge and Pillinger (1996)의 연구결과에 비해 육상식물 습체는 배지 1/당 2.5g으로 투여했을 때 99% 이상의 높은 효율을 나타냄으로서 보다 적은 양으로 높은 억제효율을 나타내었다.

전반적인 조류 증식 억제 경향은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 대조구의 경우는 실험 초기 Chl-a의 농도가 $21.8 \mu\text{g/l}$ 이었으나 3일째는 초기농도의 9.5배인 $201.5 \mu\text{g/l}$ 로 조류가 증식하였다. 이후 5일째는 약 22배인 $470.1 \mu\text{g/l}$, 7일째는 실험초기농도 대비 최대증식을 하여 $2940.7 \mu\text{g/l}$ 로 무려 약 147배로 증식하였다. 10일 이후부터는 초기농도 대비 $1727.5 \mu\text{g/l}$ (약 82배 정도)로 자체적으로 감소하기 시작하였지만 여전히 높은 농도를 보였다.

각각 식물투여조의 조류증식 억제 경향을 살펴보면 잣잎과 솔잎 투여조는 Chl-a가 3일째 초기농도 대비 50% 감소하였고 5일째에는 약 60%가 감소한 $8.5 \mu\text{g/l}$ 로 최대 증식 억제 효과를 보여 두 식물체는 유사한 경향을 보였다. 그러나 이후 7일째에는 잣잎은 증식하다가 다시 9일째는 감소하는 경향을 보였지만 솔잎 투여조는

초기농도대비 꾸준한 감소 경향을 보였다. 애기마름과 은행잎 투여조는 솔잎과 잣잎 투여조에 비해 조류 저감 효과는 낮게 나타났다. 특히 은행잎 투여조는 대조구에 비해서는 조류 억제 효율은 양호하였지만 초기농도에 비하여 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 이는 투여된 식물체가 조류 증식을 억제하기보다는 오히려 조류 성장에 필요한 촉매 역할을 했을 것으로 사료된다.

2) 식물체 1.25 g/l 투여시 조류억제 효과

Chl-*a*로 조류 증식 억제 효율은 모든 식물체에서 2.5 g/l 투여와 마찬가지로 대조구 대비 99% 이상의 높은 증식 억제 효율을 보였다. 각각의 식물체 투여에 따른 조류증식 억제 효율 실험에서 솔잎과 잣잎 투여조는 3일째 초기농도 대비 50%의 감소 효율을 보여 2.5 g/l 투여와 마찬가지로의 결과를 보여 적은 양으로도 동일한 효율을 나타내었다 (Fig. 2). 그러나 솔잎 투여조는 2.5 g/l 투여시에는 지속적인 조류제어 효율을 보인 반면에 1.25 g/l 투여시에는 7일 이후 서서히 조류가 증식하기 시작하여 10일째는 다른 식물투여조에 비해 조류가 많이 증식하는 것으로 나타났다. 이와 반대로 잣잎 투여조는 조류를 지속적으로 감소시키는 것으로 나타났다. 결과적으로 보면 솔잎은 2.5 g/l 투여시 지속적인 효과를 보였고 잣잎은 1.25 g/l 투여가 더 효과적인 조류증식 억제 현상을 나타내었다. 애기마름 투여조는 2.5 g/l 투여시와 큰 차이를 보이지 않고 실험 초기에 저해 효과를 나타내었다. 그러나 은행잎 투여조는 2.5 g/l 투여에 비해 1.25 g/l 투여가 오히려 좋은 억제 효과를 보여 잣잎 투여와 마찬가지로 적은 양에서 양호한 증식 억제 효율을 보였다. 실험 초기에 증식억제 효율은 대상 식물체는 다르지만 Kang (1999)에 의한 연구 결과에서도 벚짚의 경우 초기에 더 효과적인 것과 일치하였다. 하지만 보리짚을 가지고 조류 증식 억제 실험을 한 많은 연구에서 (Harper and Lynch, 1985; Welch *et al.*, 1990; Barrett, 1994) 보리짚이 물에 잠긴지 최소한 1~2개월이 지난 후 효과를 보이는 결과와는 상반된 결과였다. 한편 임 등 (2000a)은 건체식물 (dry plant)은 습체식물 (wet plant)에 비해 배양초기부터 조류 증식억제 효과를 나타내어 조류증식 억제효과를 나타내는 시기가 빠름을 알 수 있었다고 보고하였다. 또한 식물체에서 조류 억제 물질은 미생물분해 작용으로 인해 용출되는데 (Barrett and Newman, 1993), 건체는 습체에 비해 미생물 분해 작용이 보다 빠르고 쉽게 진행되는 것도 하나의 원인으로 추정할 수 있다.

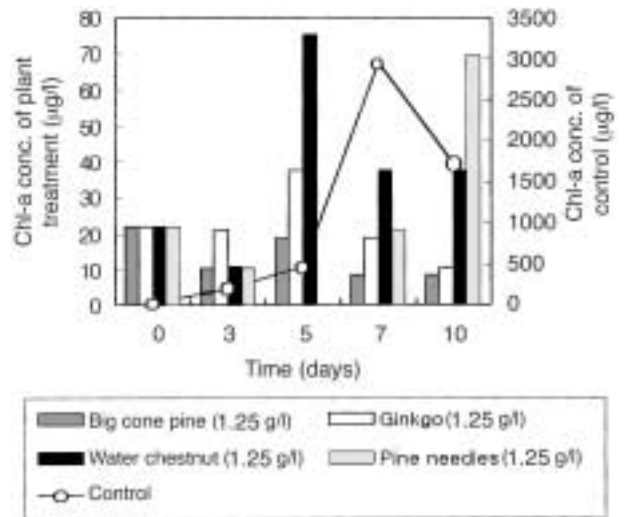


Fig. 2. Changes of chlorophyll *a* concentration of *Microcystis aeruginosa* with the input of plants (1.25 g/l).

3) 식물체 혼합 투여시 조류억제 효과 (2.5 g/l)

식물체 혼합 투여 실험은 각각의 식물체를 혼합하여 투여할 경우 일반적으로 고려할 수 있는 상승작용의 효과를 검증하기 위해 수행하였다. 첫번째 실험조에는 솔잎과 은행잎을 혼합하여 2.5 g/l을 투여하였고 다른 실험조에는 금번 조류제어 실험 적용식물 4가지를 모두 혼합하여 2.5 g/l을 투여하였다.

조류 증식 억제 효율은 모든 식물체에서 각각의 식물체 투여와 마찬가지로 대조구 대비 99% 이상의 높은 증식 억제 효율을 보였다. 솔잎과 은행잎을 혼합하여 투여한 경우 실험 초기에는 3일째 초기농도대비 50%, 5일째에는 약 60%의 조류증식 억제 효과를 보였지만 7일째는 다시 급상승하다가 10일째 재차 감소하였다 (Fig. 3). 반면에 4종류 식물체 (잣잎, 솔잎, 은행잎, 애기마름) 모두를 혼합하여 투여했을 경우는 초기농도 대비 지수성장을 하다가 5일째 최대 증식을 하였고 이후 7일부터 서서히 감소시키는 하였으나 초기 농도에 비해 여전히 농도가 높았다. 따라서 식물체 혼합 투여에 따른 조류 억제 효과는 개별 식물체를 투여하는 것에 비해 증식 저해 효율이 떨어지는 것으로 사료된다.

세가지 실험을 종합해보면 식물체 2.5 g/l 투여시 조류 억제 효과는 솔잎과 잣잎 투여가 양호하였고 식물체 1.25 g/l 투여시 조류억제 효과는 잣잎이 가장 효과가 좋으면서 지속적으로 감소효과를 보였다. 대다수 식물체가 실험초기에 억제 효과가 좋았으나 잣잎 1.25 g/l 투여시에는 실험기간이 진행되면서 7일 이후에 조류억제가 더

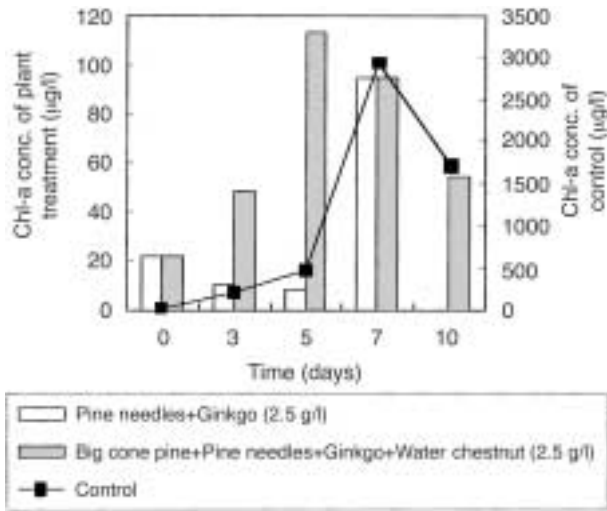


Fig. 3. Changes of chlorophyll *a* concentration of *Microcystis aeruginosa* with the input of mixed plants (2.5 g/l).

높게 나타났다. 은행잎은 2.5 g/l 투여시 보다는 식물체 1.25 g/l 투여시 즉 적은 양에서 조류증식을 억제하였다. 식물체 혼합투여는 개별 식물체 투여보다는 처리효과가 낮았다. 한편 각각의 식물들이 모두 높은 효율을 보이고는 있지만 일정한 시간이 지나면 역으로 조류를 과다 증식시키는 경향이 있었다. 이것은 조류 억제 화학 물질이 일정한 시기에만 활성이 나타나며 항상 조류에 억제 작용을 하는 것이 아니기 때문인 것으로 사료된다(Welch *et al.*, 1990). 또한 식물체는 조류를 사멸하기 보다는 조류 증식을 억제하는 능력을 갖고 있어 일정시간 지나 식물체 활성이 떨어지면 조류는 재 성장할 수 있다(Barrett and Newman, 1993).

2.1차 현장실험에서 조류증식억제 효과

남조류인 *Microcystis*가 우점하는 7월 21일~8월 10일 사이에 2~3일 동안 건조시킨 솔잎, 잣잎, 은행잎, 애기마름 등 4종의 전체식물을 대상으로 인공으로 부영양화를 유발시킨 육각실험지에서는 잣잎과 솔잎투여량은 0.5 g/l, 애기마름은 0.1 g/l, 현장 바지선 실험조에는 은행잎 0.2 g/l를 투여하여 조류 증식 억제 실험을 하였다. 식물체 투여에 의한 Chl-*a*의 저감효과를 살펴보면 초기 Chl-*a*의 농도는 각각 실험조별로 다르게 나타났는데 육각 실험조의 잣잎 투여조는 29.8 µg/l, 솔잎 투여조는 66.6 µg/l, 애기마름 투여조는 69.4 µg/l로 나타났고 현장 바지선 실험조는 92.6 µg/l로 높은 값을 보였다. 4종류

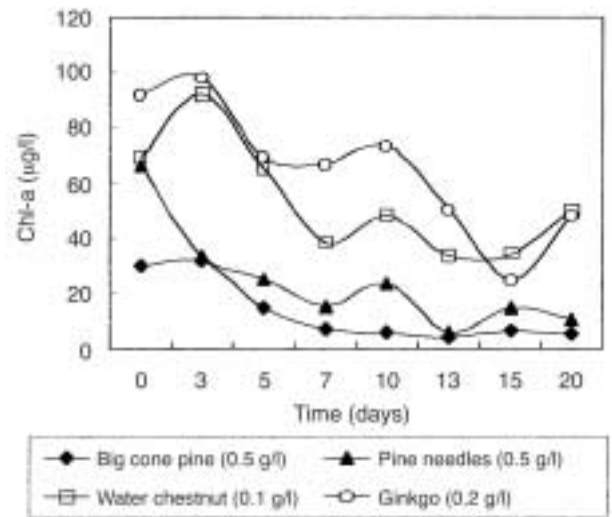


Fig. 4. Changes of chlorophyll *a* concentration by plant treatment from 21 July to 10 August 2000 in artificially eutrophicated pond (Big cone pine, Pine needles, Water chestnut) and barge enclosure (Ginkgo).

식물체 투여에 따른 처리는 초기 농도 대비 감소하는 경향을 보였다. 잣잎 투여조는 식물체 투여 3일째는 31.8 µg/l로 다소 상승하였으나 투여 5일째부터 감소하기 시작하여 실험 7일째부터는 Chl-*a* 농도가 6.8 µg/l로 크게 떨어지는 등 실험 21일째는 Chl-*a* 값이 5.5 µg/l까지 자체적으로 감소하였다. 솔잎 투여조는 실험 초기인 3일째부터 Chl-*a* 농도가 33.5 µg/l로 감소하기 시작하여 실험 10일까지는 큰 변화를 보이지 않다가 실험 13일째에 6.0 µg/l로 크게 감소하였다. 애기마름과 현장 바지선에서 적용한 은행잎 실험조는 초기농도에 비해 실험 7일째부터 처리효과가 나타나기는 하였으나 잣잎과 솔잎 투여조에 비해 조류 증식 억제 효과가 낮은 경향을 보였다(Fig. 4).

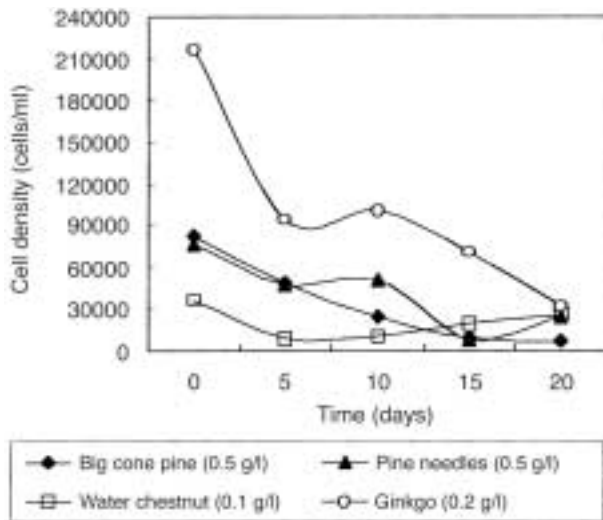
이는 잣잎과 솔잎에 비해 상대적으로 투여량이 낮은데 원인이 있을 수 있고 특히 은행잎 투여조는 실험 초기 남조류의 우점율이 100% 이상으로 처리하는데 다소 시간이 걸릴 수 있다고 생각된다. 초기 Chl-*a* 농도에 대한 증식 억제 효율을 살펴보면 잣잎, 솔잎, 애기마름 투여조는 실험 13일째에 각각 86%, 91%, 52%로 가장 큰 조류증식 억제 효과를 보였고, 은행잎 투여조는 실험 15일째에 73%의 효과를 보였다. 특히 은행잎 투여조는 초기 농도 대비 실험 7일째까지는 억제 효율이 25% 내외로 낮게 나타났으나 10일째부터 45% 이상의 효과를 보이기 시작하였다(Table 2).

Table 2. Inhibitory effect of blue-green algae according to the input of plants in experiment 1 (%).

Enclosure type	Plant materials	Amounts	Incubation time (days)						
			3	5	7	10	13	15	20
Artificial pond (Hexagon)	Big cone pine	0.5 g/l	—	51	77	81	86	78	82
	Pine needles	0.5 g/l	50	62	77	65	91	78	85
	Water chestnut	0.1 g/l	—	6	45	30	52	51	28
Barge	Ginkgo	0.2 g/l	—	25	27	20	45	73	48

Table 3. Inhibitory effect of blue-green algae according to the input of plants in experiment 1 (%).

Enclosure type	Plant materials	Amounts	Incubation time (days)			
			5	10	15	20
Artificial pond (Hexagon)	Big cone pine	0.5 g/l	41	71	89	91
	Pine needles	0.5 g/l	38	33	90	68
	Water chestnut	0.1 g/l	74	71	46	29
Barge	Ginkgo	0.2 g/l	56	53	67	85

**Fig 5.** Changes of cell density by plant treatment from 21 July to 10 August 2000 in artificially eutrophicated pond (Big cone pine, Pine needles, Water chestnut) and barge enclosure (Ginkgo).

식물체 투입에 따른 조류세포수의 변화도 전체적인 감소 경향은 Chl-*a* 농도 감소와 유사하였다. 애기마름 투입조는 실험 5일째 최대 감소하였으나 10일 이후 서서히 증가하기 시작하여 실험 초기 세포수 밀도에 거의 근접한 25,850 cells/ml를 나타내었다 (Fig. 5).

조류세포수 억제 효율은 잣잎과 솔잎 투입조는 Chl-*a* 농도 억제 효율과 유사하였으나 애기마름과 은행잎 투입조는 Chl-*a* 농도 억제 효율보다 다소 높은 각각 평균

55%, 66%의 높은 효과를 나타냈다. 특히 은행잎 투입조는 Chl-*a* 농도의 경우 실험 10일째까지는 25% 내외의 효율로 낮았지만 조류세포수로 보았을 때는 실험 10일째 53% 이상의 억제 효율을 나타내었다. 또한 애기마름과 은행잎 투입조는 낮은 투입량에 비해 더 높은 억제 효율을 보였다 (Table 3).

이는 조류종마다 Chl-*a*의 함유량이 각각 다르기 때문에 효율에 다소 차이가 있을 수 있고 현장은 단일 조류 배양이 아닌 여러 가지 조류종이 존재하기 때문에 이러한 차이점이 있는 것으로 사료된다. 또한 식물체마다 식물 분해하는 속도가 달라 서로 다른 조류종에 대한 식물 억제 화학물질에 반응하는 시간이 다르게 나타날 수도 있다 (Pillinger *et al.*, 1995).

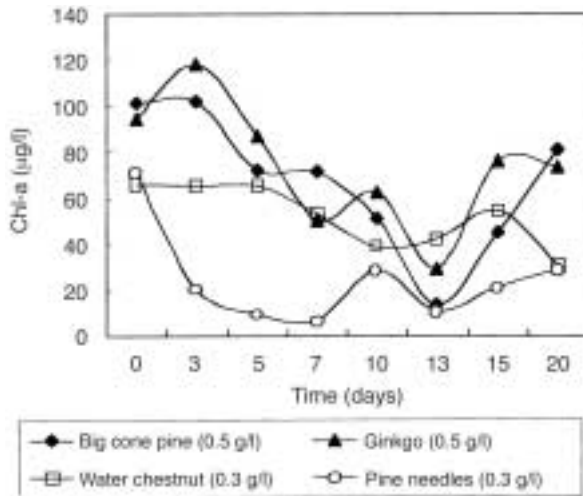
3. 2차 현장실험에서 조류 증식 억제 효과

2차 현장실험은 남조류인 *Microcystis*와 *Anabaena*가 우점하는 8월 23일~9월 14일 사이에 수행하였다. 인공으로 부영양화 육각실험지에서는 잣잎과 은행잎은 0.5 g/l씩, 애기마름은 0.3 g/l을 투입하였고, 현장 바지선 실험조에는 솔잎 0.3 g/l을 투입하여 조류 증식 억제 실험을 하였다.

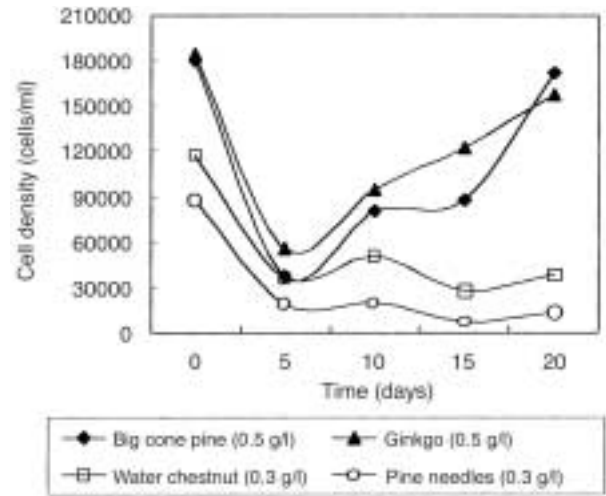
초기 Chl-*a*의 농도는 육각실험조의 잣잎 투입조는 101.5 µg/l, 은행잎 투입조는 94.4 µg/l로 1차 실험에 비해 Chl-*a*의 농도가 매우 높았으며, 애기마름 투입조는 65.9 µg/l로 비슷하였고 현장 바지선 실험조는 70.7 µg/l로 1차 실험에 비해 다소 낮은 값을 보였다. 4종류 식물체 투입에 따른 처리는 1차 실험과 유사하게 초기 농도 대

Table 4. Inhibitory effect of blue-green algae according to the input of plants in experiment 2 (%).

Enclosure type	Plant materials	Amounts	Incubation time (days)						
			3	5	7	10	13	15	20
Artificial pond (Hexagon)	Big cone pine	0.5 g/l	—	29	30	50	87	56	20
	Ginkgo	0.5 g/l	—	7	47	34	69	19	22
	Water chestnut	0.3 g/l	1	1	20	41	36	18	54
Barge	Pine needles	0.3 g/l	71	86	90	60	85	70	59

**Fig. 6.** Changes of chlorophyll *a* concentration by plant treatment from 23 August to 14 September 2000 in artificially eutrophicated pond (Big cone pine, Ginkgo, Water chestnut) and barge enclosure (Pine needles).

비 감소하는 경향을 보였다. 잣잎 투여조는 식물체 투여 3일째는 101.9 µg/l로 거의 변화가 없었고 투여 5일째부터 감소하기 시작하여 실험 10일째는 Chl-*a* 농도가 50.9 µg/l로 50% 크게 떨어지는 등 실험 13일째는 Chl-*a* 값이 13.6 µg/l까지 감소하였다. 은행잎 투여조는 실험 초기인 3일째는 Chl-*a* 농도가 118.4 µg/l로 증가하였으나 실험 5일째부터는 감소하여 실험 13일째는 29.1 µg/l로 크게 감소하였다. 애기마름 투여조는 실험 5일째까지 거의 변화가 없다가 실험 7일째부터 감소하여 10일째는 38.8 µg/l로 감소하였고 이후 실험 20일째까지는 큰 변화 없이 증감을 반복하였다. 현장 바지선에서 적용한 솔잎 실험조는 실험 초기부터 크게 감소하여 실험 7일째에는 7.1 µg/l로 크게 감소하였다. 10일 이후부터는 다시 증가하면서 실험 종료일까지 증감을 반복하기는 했으나 실험 초기농도에는 크게 못 미쳐 잣잎, 은행잎, 애기마름 투여조에 비해 조류 증식 억제 효과가 크게 나타났다

**Fig. 7.** Changes of cell density by plant treatment from 23 August to 14 September 2000 in artificially eutrophicated pond (Big cone pine, Ginkgo, Water chestnut) and barge enclosure (Pine needles).

(Fig. 6). 이는 잣잎, 솔잎, 애기마름 실험조에 비해 현장 바지선에서 실험하는 특성상 외부 기상조건과 환경조건의 영향이 상대적으로 크게 나타난 데 원인이 있을 수 있다고 사료된다.

초기 Chl-*a* 농도에 대한 증식 억제 효율을 살펴보면 잣잎, 솔잎 투여조는 실험 13일째에 각각 87%, 69%로 가장 큰 조류증식 억제 효과를 보였고, 애기마름 투여조는 실험 10일째와 20일째에 각각 41%, 55%로 잣잎과 솔잎 투여에 비해 조류 증식 억제 효과가 낮았다. 특히 현장 바지선 실험조인 솔잎 투여조는 초기 농도 대비 실험 초기부터 크게 감소하여 7일째는 억제 효율이 90% 정도로 높은 억제 효율을 보였고 실험기간 중 약 60~80% 정도의 조류 증식 억제 효과를 나타내었다 (Table 4).

식물체 투여에 따른 조류세포수의 변화도 전체적인 감소 경향은 Chl-*a* 농도 감소와 유사하였다. 잣잎 투여조는 실험 5일째 최대 감소하였으나 10일 이후 서서

Table 5. Inhibitory effect of blue-green algae according to the input of plants in experiment 2 (%).

Enclosure type	Plant materials	Amounts	Incubation time (days)			
			5	10	15	20
Artificial pond (Hexagon)	Big cone pine	0.5 g/l	79	55	51	5
	Ginkgo	0.5 g/l	70	49	34	14
	Water chestnut	0.3 g/l	69	57	76	67
Barge	Pine needles	0.3 g/l	78	78	92	85

Table 6. The contents of microcystin variants of the bloom samples dominated with *Microcystis* after treatment with various plants.

Materials	Microcystin variants (µg/g)			Total
	MC-RR	MC-YR	MC-LR	
Control	57.0	71.8	139.9	268.7
Big cone pine	45.4	1.7	-	47.1
Ginkgo	67.8	239.3	-	307.1
Water chestnut	26.9	-	-	26.9
Pine needles	43.3	-	-	43.3

히 증가하기 시작하여 실험 초기 세포수 밀도에 거의 근접한 171,880 cells/ml를 나타내었다 (Fig. 7).

조류세포수 억제 효율을 평균적으로 보았을 때 잣잎과 은행잎 투여조는 각각 48%, 42%의 억제 효과를 나타냈다. 애기마름 투여조는 잣잎과 은행잎보다는 높은 67%를 나타내었고 특히 솔잎 투여조는 Chl-*a* 농도의 경우 실험 5일째 92%의 억제효율을 보이는 등 평균 83% 내외로 조류 증식억제 효과가 좋게 나타났다. 또한 솔잎은 1차 실험 투여량 0.5 g/l에 비하여 2차 실험에서는 0.3 g/l로 낮았지만 더 높은 억제 효율을 보였다 (Table 5).

4. 식물체 처리후 남조류 독소 감소 효과

Table 6은 인공 부영양화 실험지 및 현장 바지선 실험조에서 식물체 투여 실험 후 최종 시료를 채취하여 남조류 독소 분석을 한 결과이다. 임 등 (2000b)이 보고한 실험실 실험과 비교하여 보면 MC-RR의 감소는 유사하나 은행잎 투여조에서 임 등 (2000b)은 MC-YR이 전혀 검출되지 않았다고 하였으나 금번 현장 실험에서는 MC-YR이 크게 증가하여 다소 다른 결과를 나타내었다. 특히 microcystin 중 독성이 가장 강한 MC-LR은 대조구에서 크게 증가하였으나 식물체 투여조에서는 전혀 검출되지 않아 대조구 대비 큰 처리효과를 보였다.

식물체 투여 실험 후 독소량 제거 효율을 보면 모든 식물체 투여조에서 마크로시스틴 중 독성이 가장 강한 MC-LR은 100% 제거효과를 나타내었고 총 독소량도

은행잎 투여조를 제외하고는 80% 이상 제거 효과를 보였다. 임 등 (2000b)은 습체 (wet plants) 실험에서는 MC-LR은 대조구의 독소량 31.9 µg/g에 비해 애기마름 88%, 잣잎 85%, 솔잎 66%, 은행잎 32%순으로 효과를 나타냈으며, 전체실험에서는 대조구의 독소량이 185.8 µg/g로 애기마름과 은행잎이 각각 95%, 솔잎 91%, 잣잎 9%의 효과를 보였다고 하여 금번 실험과는 다른 양상을 보였다. 그러나 총 독소량은 습체와 전체실험 두 가지 모두 애기마름이 87% 이상의 높은 효율을 보여 비슷한 결과를 나타내었다.

5. 식물체 추출물 성분 분석

각 식물체 별 추출물에 대한 물질분석 결과를 보게 되면 잣잎은 Phenol, 2-Methoxy-phenol, Benzoic acid, 4-(4-hydroxyphenyl)-2-Butanone, 4-hydroxy-alpha-methyl-benzenepropanol, Phosphoric acid 등 5개 물질, 은행잎은 2-Methoxy-phenol, Phosphoric acid 등 2개 물질, 애기마름은 2-Methoxy-phenol, 3-Methoxy-phenol, 2-methyl-propanoic acid, Phosphoric acid 등 4개 물질, 그리고 솔잎은 Benzoic acid, Phosphoric acid, 2-methyl-propanoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-benzaldehyde 등 4개 물질이 검출되었다. 솔잎의 추출물에서 phenolic과 benzoic acids가 조류 성장에 있어 증식억제 화합물로 알려졌다 (Olmsted and Rice, 1970; Rasmussen and Einhellung, 1977; Rice *et al.*, 1980). 수생식물 또한 조류 성장을 억제하는 화합물질을 방출하고 (Houzuki *et al.*, 1960), 부들은 phenolic acids를 생성한다고 한다 (Aliotta *et al.*, 1996). 본 실험에서의 식물체내 유기화합물을 분석시 잣잎과 솔잎에서 조류세포에 효과가 있는 페놀화합물과 benzoic acid가 검출되어 조류 증식억제 효과는 식물에서 용출되어 나오는 화합물들에 의한 것임을 간접적으로 추정할 수 있었다. 한편 임 등 (2000b)은 애기마름에서는 4-(4-hydroxyphenyl)-2-butanone과 2, 4-bis (1, 1-dimethylethyl)-phenol, P-CYMEN-8-OL이 검출되었고, 잣잎은 애기마름에서 검

Table 7. Results of toxicity test of *Daphnia magna* with the input of plant extracts.

Plants	Concentration (g/l)	Water chestnut			Big cone pine			Pine needles			Ginkgo		
		1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Survival rate (%)	12 hrs	100	100	100	100	100	100	100	100	70	100	20	0
	24 hrs	100	100	100	100	100	90	100	20	0	100	0	0
	48 hrs	100	100	100	100	100	60	100	0	0	100	0	0
	96 hrs	100	100	100	100	100	60	100	0	0	100	0	0

출된 것과 동일하게 2, 4-bis (1, 1-dimethylethyl)-phenol 이 검출되었다고 보고한 바 있다.

6. 식물체 추출물 생태독성 시험

생태독성 시험은 동일 시험 수조를 3개씩 만들어 시험에 대한 정확도를 높였고 시험물질의 농도는 4종류의 식물체 (애기마름, 잣잎, 솔잎, 은행잎)를 대상으로 농도가 1, 5, 10 g/l가 되도록 조제하여 사용하였으며 대조구로는 물벼룩 배양액을 이용하였다. 시험시간은 12, 24, 48, 96 시간으로 구분하여 각각의 시간별 생존율을 구하였다. Table 7은 애기마름, 잣잎, 솔잎, 은행잎을 추출하여 1, 5, 10 g/l가 되도록 조제하여 조제액에 물벼룩을 넣어 시험한 결과이다. 4종류의 식물체 1 g/l 시험액에서는 물벼룩이 100% 생존하였고 애기마름 시험액은 모든 농도에서 물벼룩 유영성에 전혀 영향을 주지 않았다. 잣잎 시험액은 5 g/l에서 100% 생존하였으나 10 g/l 시험액에서는 시험 시작 후 12시간까지는 100%의 생존율을 보였지만 24시간째는 90%, 48시간과 96시간째는 60% 이상의 생존율을 보였다. 솔잎 시험액 5 g/l에서는 잣잎 시험액과 마찬가지로 12시간째까지는 100%의 생존율을 보였는데 24시간째에 물벼룩이 급격히 사망하여 20%만 생존하다가 48시간과 96시간째에는 모든 시험개체가 사멸되었다. 솔잎 시험액 10 g/l의 경우는 12시간째에는 70%의 생존율을 보였는데 24시간, 48시간, 96시간은 모든 개체가 전멸하였다. 은행잎 시험액 5 g/l에서는 시험 시작 후 12시간째에는 단 20%의 생존율을 보이다가 24시간째 이후로는 사멸하였다. 한편 은행잎 시험액 10 g/l에서는 모든 시험개체가 사멸하였다. 물벼룩 생태독성 시험 결과 모든 조제 시험액에서 애기마름 추출액만이 안정적이었고 5 g/l 시험액에서는 잣잎이 물벼룩 유영에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 따라서 식물체 투여시 잣잎은 5 g/l 이하, 솔잎과 은행잎은 3 g/l 이내로 투여하는 것이 바람직하다고 본다. Street (1979)는 조류성장 억제제를 위해 짚을 사용하였는데 환경에 영향을 미치지 않았고 오히려 무척추동물의 개체가 풍부하여져 물고기의

성장에 도움을 주었다고 보고하였다.

적 요

인공부영양화 실험지에서 조류를 대량 증식 시켜 초기세포수의 농도가 10^4 cells/ml가 되게 한 후 잣잎, 솔잎, 은행잎은 각각 0.5 g/l를 투여하였고 애기마름은 0.3 g/l를 투여하여 조류제어 효과를 실험하였다. 그리고 북한강 인근의 바지선에 현장 조류제어 실험조를 설치하여 남조류 (*Microcystis*)가 최대 증식할 때 솔잎은 0.3 g/l를 투여하여 조류제어 실험을 수행하였다. 인공실험지에서는 잣잎과 솔잎은 Chl-*a*와 조류세포수 모두 평균 65%의 억제 효율을 보여 비교적 양호한 효과를 나타내었다. 그러나 은행잎은 Chl-*a*는 33%, 조류세포수는 55%로 잣잎과 솔잎에 비하여 조류제어 효과가 다소 감소하였다. 애기마름도 0.1 g/l와 0.3 g/l로 투여량과는 거의 상관없이 Chl-*a*는 34%, 조류세포수는 55~67%의 조류 증식 억제 효과를 보였다. 현장 실험조에서는 초기 Chl-*a*농도는 70~90 μ g/l로 비교적 높은 농도를 보였으며 우점조류는 남조류인 *Microcystis*이었다. 솔잎은 Chl-*a*로 보았을 때는 74%, 조류세포수는 83%의 조류제어효과를 보였다. 은행잎은 Chl-*a*로 보았을 때는 40%, 조류세포수는 65%로 솔잎 투여에 비해서는 조류 증식억제 효과가 감소하였다. 식물체를 이용한 조류제어실험 결과 솔잎이 현장에서 조류제어 효과가 가장 좋은 것으로 분석되었고 투여량은 0.3 g/l가 이상적이며 다음이 잣잎 0.5 g/l가 비교적 양호한 효과를 보였다. 솔잎 투여량은 0.3 g/l에서 70~80%의 조류제어 효과를 나타내었고 독소량도 80% 이상 제거되었다. 한편 은행잎과 애기마름은 조류제어 효과는 있는 것으로 추정되나 투여량은 추가적으로 실험을 더 수행해야 결정할 수 있을 것으로 본다. 식물체내 유기화합물 분석결과 조류제어에 효과가 있는 페놀 성분이 검출되었고 식물체 생태독성시험 결과 식물체 투여량은 1~5 g/l가 적정한 것으로 분석되었다.

인 용 문 헌

- 류재근 등. 1998. 팔당호 수질관리 특별대책 수립을 위한 오염 저감기술. 국립환경연구원. 175pp.
- 임병진, 박수영, 변명섭, 이철우, 임은숙, 윤승모. 1996. 수질오염 조기 감시를 위한 물벼룩독성경보장치 활용. 한국육수학회지 **29**: 119-131.
- 임병진, 정원화, 변명섭, 전선옥. 2000a. 식물체를 이용한 조류 증식억제 효과. 한국육수학회지 **33**: 136-144.
- 임병진, 정원화, 전선옥. 2000b. 경안천 현장실험조에서 식물체를 이용한 조류 증식억제. 한국육수학회지 **33**: 304-310.
- Aliotta, G., M.D. Greca, P. Monaco, G. Pinto, A. Pollio, and L. Previtera. 1996. Potential allelochemicals from aquatic weeds: Their action on microalgae. In *Allelopathy: Field observations and methodology*. Eds. S. S. Narwal and P. Tauro, Scientific Publishres, Jodhpur. pp. 243-254.
- Barrett, P.R.F. and J.R. Newman. 1993. The control of algae with barley straw. PIRA Conf. Proceedings straw-avaluable raw material. pp. 41-58.
- Barrett, P.R.F. 1994. Field and laboratory experiments on the effects of barley straw on algae. 1994 BCPC monograph No. 59: Comparing glasshouse and field pesticide performance II. pp. 191-200.
- Everall, N.C. and D.R. Lees, 1997. The identification and significance of chemicals released from decomposing barley straw during reservoir algal control. *Wat. Res.* **31**: 614-620.
- Gibson, M.T., I.M. Welch, P.R.F. Barrett, and I. Ridge. 1990. Barley straw as an inhibitor of algal growth II: Laboratory studies. *J. applied Phycol.* **2**: 241-248.
- Harper, S.H.T. and J.M. Lynch. 1985. Colonization and decomposition of straw by fungi. *Trans. Br. mycol. Soc.* **85**: 655-661.
- Hozuki, K., R. Okanishi, and H. Sugawara. 1960. Studies on the antagonistic relationship between phytoplankton and rooted aquatic plants. *Jap. J. Limnol.* **21**: 124-130. cited in Control of algal growth by macrophytes and macrophyte-extracted bioactive compounds. Nakai, S., M. Hosomi, M. Okada and A. Murakami, 1996. *Water Sci. and Technol.* **34**: 221-235.
- Kang, P.G. 1999. Effects of the leachates from Decaying plants on the algal growth. M.S. Thesis. Kangweon National University. 88pp.
- Olmsted, C.E. and E.L. Rice. 1970. Relative effects of known plant inhibitors or species from first two stages of old-field succession. *Southwestern Nat.* **15**: 165-173.
- Pilinger, J.M., J.A Cooper, I. Ridge, and P.R.F. Barrett. 1992. Barley straw as an inhibitor of algal growth III: the role of fungal decomposition. *J. applied Phycol.* **4**: 353-355.
- Pillinger, J.M., I. Gilmour, and I. Ridge. 1995. Comparison of antialgal activity of brown-rotted and white-rotted wood and in situ analysis of lignin. *J. Chem. Ecol.* **21**: 1113-1125.
- Rasmussen, J.A. and F.A. Einhellig. 1977. Synergistic inhibitory effects of *p*-coumaric and ferulic acids on germination and growth of grain sorghum. *J. Chem. Ecol.* **3**: 197-205.
- Rice, E.L., C.H. Lin, and C.Y. Huang. 1980. Effects of decaying rice straw on growth and nitrogen fixation of a blue-green alga. *Bot. bull. Acad. Sinica.* **21**: 111-117.
- Ridge, I. and J.M. Pillinger. 1996. Toward understanding the nature of algal inhibitors from barley straw. *Hydrobiologia* **340**: 301-305.
- Street, M. 1979. The importance of invertebrates and straw. *Game Conservancy Ann. Rev.* **11**: 34-38
- Welch, I.M., P.R.F. Barrett, and I. Ridge. 1990. Barley straw as an inhibitor of algal growth I: studies in the Chesterfield Canal. *J. applied Phycol.* **2**: 231-239.

(Received 11 Apr. 2002, Manuscript accepted 31 May 2002)