

저출력 초음파가 *Microcystis* sp. (Cyanobacteria)에 미치는 영향

박영미 · 권오창 · 박정원¹ · 정규영² · 이종은 · 서울원*

안동대학교 자연과학대학 생명과학과, ¹국립공원연구원
²안동대학교 자연과학대학 생약자원학과

Effects of Low Powered Ultrasonic Wave Exposure on *Microcystis* sp. (Cyanobacteria)

Young Mi Park, O Chang Kwon, Jung Won Park¹, Gyu Young Chung²,
Jong Eun Lee and Eul Won Seo*

Department of Biological Science, Andong National University, Andong 760-749, Korea

¹National Park Research Institute, Namwon 590-811, Korea

²Department of Medicinal Plant Resource, Andong National University, Andong 760-749, Korea

Abstract - This study aimed to investigate the effects of ultrasonic wave on colonial changes of *Microcystis* sp. causing water-bloom. The effects of frequency change and exposure time of ultrasonic wave on *Microcystis* sp. were also perceived by measuring the concentration of chlorophyll-*a*. The concentrations of chlorophyll-*a* showed a decreasing tendency in all experimental groups exposed to ultrasonic waves, especially the highest decrease at 70 kHz. Before exposed to ultrasonic wave, single cells of *Microcystis* sp. were observed in a form of colonies which were densely accumulated onto their mucilage layer. However, after one hour exposure to 70 kHz ultrasonic wave, the bonds of colonies were weakened and single cells were separated from the colonies. Moreover, the single cells of the colony were destroyed with the 5 hour exposure time at 70 kHz. As a result, we proposed that the frequency strength and the exposure time of ultrasonic wave might have effects in decrease of biomass of blue-green algae by reducing the concentration of chlorophyll-*a*, thereby changing and destroying forms of *Microcystis* sp. colonies.

Key words : ultrasonic wave, blue-green algae, chlorophyll-*a*, water-bloom, *Microcystis* sp.

서 론

경제 성장과 더불어 우리나라 대다수의 하천과 호수에서 부영양화 현상이 심화되기 시작하였으며 2000년대

에 들어 생활용수 및 농·공용수의 수원으로 사용되고 있는 다목적댐의 수질까지 악영향을 받게 되면서 수질 오염에 대한 문제점이 심각하게 대두되기 시작하였다. 호수나 하천 등의 부영양화는 1차 생산자인 식물플랑크톤의 대량 증식을 야기하는데, 우리나라는 최근 크고 작은 호소에서 심각한 적조현상과 녹조현상이 나타남에 따라 다목적댐과 저수지의 부영양화가 가시화되고 있다 (Park *et al.* 1992). 조류의 번식은 유기물의 추가 생성을

* Corresponding author: Eul Won Seo, Tel. 054-820-5462,
Fax. 054-820-7705, E-mail. ewseo@andong.ac.kr

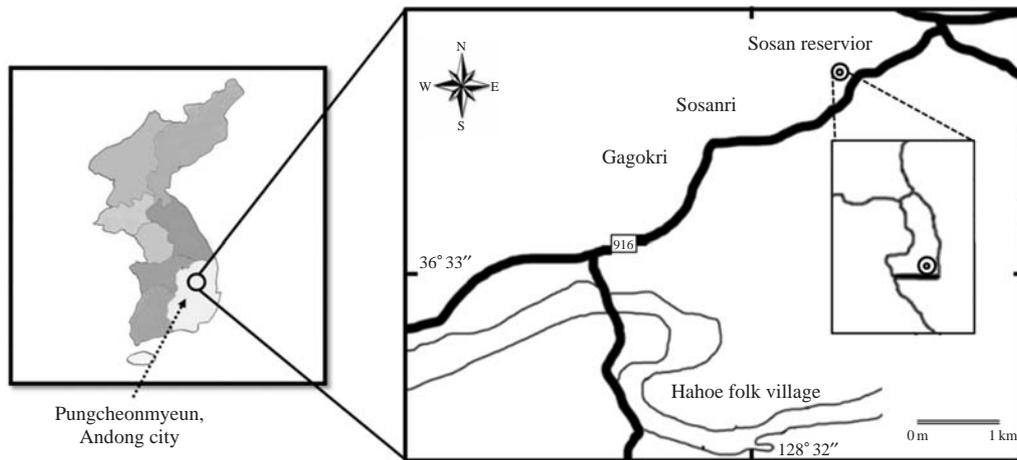


Fig. 1. Sampling site map for the survey of water quality and phytoplankton in the Sosan agricultural reservoir in Pungcheonmyeun, Andong city, Gyeongsangbukdo.

유발하는 피해를 초래할 뿐만 아니라 독성과 냄새를 가지는 남조류의 증식을 수반하는데 남조류의 번식은 유기물의 증가와 함께 부영양화의 주요 피해로 작용한다. 따라서 이러한 문제점을 야기하는 조류를 제거하기 위하여 일반적으로 염소 소독 (Hung *et al.* 1997; Choi *et al.* 2001)과 오존 처리 (Holzinger and Lütz 2006), 약품 응집 (Lee *et al.* 2004) 및 황산동 주입 (Chang 1993) 등의 방법이 이용되고 있다. 그러나 염소 소독은 THM (trihalomethane)과 같은 독성물질을 생성할 가능성이 높고, 오존을 처리하는 경우 높은 가격, 불완전한 처리로 인한 2차 오염 유발, 낮은 지속성 등의 문제점을 지니고 있다. 또한 약품 응집과 황산동 주입 방법은 처리 약품에 따라 2차 오염의 문제점이 발생되는 것으로 보고되고 있어 이러한 문제점을 해결하기 위한 대책이 시급한 실정이다 (Chang 1993).

초음파의 살균 작용과 세척 작용은 조류의 군집을 단락화하여 세포를 파괴하기 때문에 효율적으로 조류를 제거할 수 있으며 처리과정에 따라 독성물질은 생성되지 않기 때문에 2차 오염을 유발하지 않는다고 알려져 있다 (Chang 1993). Lee *et al.* (2001)은 남조류에 초음파를 노출시키면 광합성시스템의 손상을 유발하여 빠른 성장이 제어됨을 확인한 바 있으며, Ma *et al.* (2005)은 남조류의 독성물질인 microcystine이 초음파 영역에서 분해된다고 한 바 있다.

따라서 본 연구는 하천과 호수에서 녹조현상을 일으키고 있는 주요 생물 중 하나인 *Microcystis* sp.의 저감 및 제거를 위해 저출력 초음파 노출이 *Microcystis* sp. 군

체에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 시료 채취

본 실험에서 채수는 2009년 7월에서 8월까지 수화현상이 발생한 경상북도 안동시 풍산읍 소산리에 위치한 소산저수지의 표층 (0~30 cm)에서 매주 1회씩 1,000 mL의 멸균채수병을 이용하여 채수하였으며, 실험실로 운반 후 조류의 동정과 *Microcystis* sp.의 현존량 (cells mL⁻¹)의 분석을 위한 시료로 사용하였다 (Fig. 1). 이 중 *Microcystis* sp.의 현존량이 가장 높은 시점인 8월 6일에 채수된 시료는 조류 잔존을 분석에 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

저출력 초음파가 녹조현상을 일으키는 생물인 *Microcystis* sp.에 미치는 영향을 파악하기 위하여 우선 초음파 발생장치와 진동판을 제작하였다 (Hyun Dae Water Tech co., Ltd, Korea). 본 실험에 사용한 초음파 발생장치에서는 1.2 W의 저출력 초음파를 발생하도록 조절하였고, 각기 상이한 크기의 진동판을 사용하여 45 kHz, 50 kHz, 70 kHz 및 90 kHz의 주파수가 발생하도록 하였다. 진동판의 크기는 45 kHz와 50 kHz의 경우 지름 8 cm, 두께 3 cm, 70 kHz와 90 kHz의 경우 지름 6 cm, 두께 3 cm로 제작하였다 (Fig. 2A). 저출력 초음파가 *Microcystis* sp.에 미치는

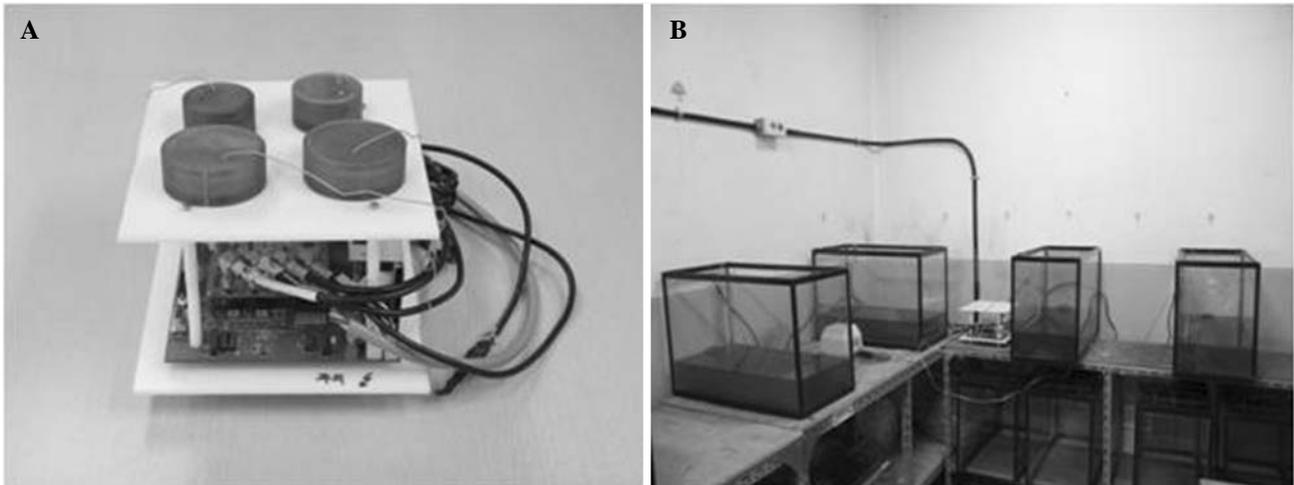


Fig. 2. A: The ultrasonic wave generating machine and the vibrant plates. The output power of the main body comes to 1.2 W and each of the four vibrant plate generates a frequency of 45 kHz, 50 kHz, 70 kHz and 90 kHz. B: Actual experimental view.

영향은 *Microcystis* sp.의 현존량이 99.5%인 시점에 채수된 시료를 4개의 유리 수조 (30 cm × 60 cm × 45 cm)에 각기 20L씩 채운 후, 초음파 진동판을 주파수별로 유리수조에 부착하였고 (Fig. 2B), 5시간 동안 초음파를 조사하였다. 본 실험은 각기 다른 시기에 채수한 시료를 사용하여 5회 반복하여 실험을 실시하였다.

3. 조류의 관찰 및 동정

조류는 광학현미경 (Olympus BX50, Japan)과 현미경용 카메라 (Olympus DP-71, Japan)를 이용하여 관찰 및 사진촬영 하였으며, 한국담수조류도감 (Jeong 1993)을 참고하여 동정하였다. 또한 조류 표면의 초미세구조 변화는 주사전자현미경 (S-2500C, Hitachi, Japan)을 사용하여 관찰 하였다. 우선 초음파 조사를 실시한 시료는 2.5% glutaraldehyde (Ted Pella, Inc., USA)에서 2시간 동안 전고정하였다. 후고정은 1% osmium tetroxide (Ted Pella, inc., USA)에 1시간 실시하였고, 탈수 과정을 거친 후 동결건조기에서 완전히 건조하였고, 표면에 금 코팅을 실시한 후 관찰하였다.

4. 조류 잔존율 분석

조류의 잔존율을 조사하기 위하여 상하수도 표준 실험법 (APHA 2001)에 준하여 chlorophyll-*a*의 농도를 측정 하였다. 채수한 시료 200~300 mL를 유리섬유여과지 (47 mm)로 여과한 후 90% acetone으로 24시간 동안 색소를 추출한 다음 630, 645, 663, 750 nm에서 흡광도를

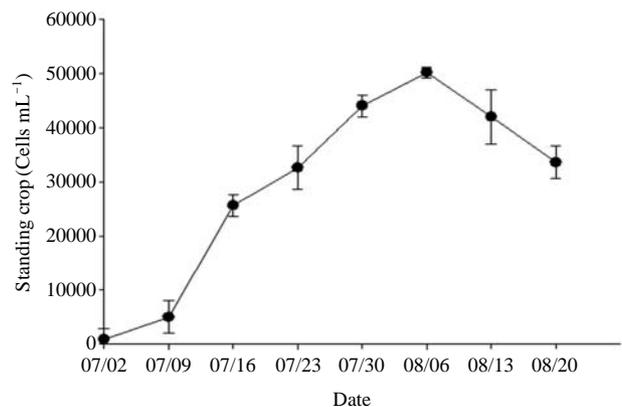


Fig. 3. Fluctuation of *Microcystis aeruginosa* standing crop collected in Sosan agricultural reservoir from July to August in 2009.

측정하였다. 실험 시작 전 chlorophyll-*a* 농도와 초음파 처리 후 시간 경과에 따른 chlorophyll-*a* 농도를 비교하여 조류의 제거율을 계산하였으며, 이를 역산하여 잔존율로 표시하였다.

5. 통계 분석

모든 실험은 독립적으로 5회 이상 반복적으로 실시하였으며 각 실험에서 얻어진 결과는 평균±표준편차로 나타내었다. 또한 통계처리는 SPSS (Ver. 18.0)을 사용하여 분석한 후 t-검정을 실시하여 분산과 평균의 동일성 여부를 검정하였으며, 분석결과는 일원분산분석 (one way ANOVA)에 의한 Duncan 검정을 실시하여 *p*값이 0.05

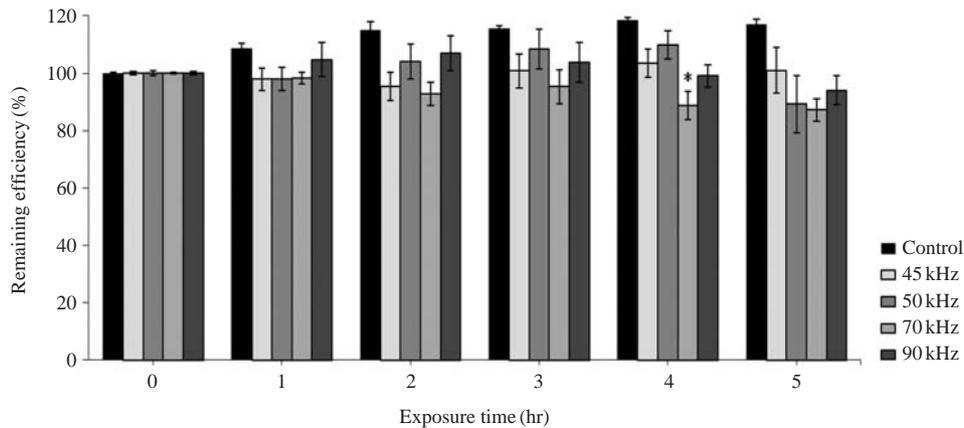


Fig. 4. Remaining efficiency of chlorophyll-*a* according to the exposure time and intensity of ultrasonic wave (control, 45 kHz, 50 kHz, 70 kHz and 90 kHz). The figures were provided as percentages by calculating the concentrations of chlorophyll-*a* before and after ultrasonic wave exposure. Each value represents the mean S.D. of 5 experiments. * $p < 0.05$ indicate significant difference between the control group and experimental group.

미만일 때 유의한 것으로 간주하였다.

결과 및 고찰

1. 녹조 발생 생물의 현황

본 연구는 수화현상을 유발하는 생물의 분포를 알아보기 위하여 각 조사 지점 내의 녹조 발생 생물의 현황을 알아보았다. 조사 기간 중 채집된 담수 조류 가운데 남조강 (Cyanophyceae)인 *Microcystis aeruginosa*는 수화현상으로 인하여 7월 중순부터 현존량이 증가하기 시작하였다. 8월에는 *Microcystis aeruginosa*가 50,120 cells mL⁻¹로 조사되어 전체 조사된 조류의 99.5%에 해당되는 현존량을 나타내었다 (Fig. 3).

Microcystis (cyanobacteria) 속은 전 세계의 부영양화된 수역에서 수화현상을 일으키는 가장 대표적인 식물플랑크톤이며, Ko *et al.* (2006)에 의하면 하계 수화현상 시 본 속이 전체 조류의 88%를 차지하였다고 보고하였다. 본 연구 결과에서도 수화현상과 밀접하게 관련된 조류는 *Microcystis* 속이었고 수화현상이 절정에 이른 8월에 99.5%로 조사되어 앞선 연구 결과 보다 더 많은 비율을 차지하는 것으로 확인되었다.

2. 주파수에 따른 조류제거 실험

채집된 조류에 초음파를 처리하지 않은 대조구와 초음파를 주파수별 (45 kHz, 50 kHz, 70 kHz, 90 kHz)로 5시간 동안 처리한 실험군을 설정하였다. 이 후 1시간 간격

으로 chlorophyll-*a*의 농도 변화를 측정하여 녹조류에 영향을 미치는 초음파 주파수를 조사하였다 (Fig. 4). 조류 잔존률 분석을 위해 세포 현존량 (cells mL⁻¹)을 이용하지 않고 chlorophyll-*a*의 농도 (mg L⁻¹)를 이용한 것은 실험에 사용된 조류인 *Microcystis* sp.의 경우 군체를 형성하고 있어 이차원적인 현미경 상으로 개체수를 파악하기 힘들고, 초음파 처리 후 엽록체가 파괴되어도 세포벽을 유지하고 있어 세포 현존량을 정확히 파악하기 힘들다. 따라서 주파수에 따른 조류제거 실험은 chlorophyll-*a*의 농도를 이용하여 계산하였다.

초음파를 처리하지 않은 대조구의 경우 chlorophyll-*a*의 농도가 16.9% 증가하였는데, 이는 녹조 생물이 세포 분열을 통한 생물량의 증가로 인해 chlorophyll-*a*의 농도가 증가한 것으로 판단된다. 각 주파수별 chlorophyll-*a*의 잔존율을 분석한 결과 45 kHz에서 chlorophyll-*a*의 농도가 2시간까지 감소하였으나, 2시간 이후부터 증가하기 시작하여 5시간 이후 chlorophyll-*a*의 농도가 1.04% 증가하였고, 50 kHz의 경우 4시간까지 chlorophyll-*a*의 농도가 꾸준히 증가하는 경향을 보였으나, 4시간 이후 급격히 감소하여 chlorophyll-*a*의 농도가 10.76% 감소하였다. 그리고 70 kHz의 경우 chlorophyll-*a*의 농도가 비교적 일정하게 감소하는 경향을 보여 5시간 이후 chlorophyll-*a*의 농도가 12.85% 감소하였다. 90 kHz의 경우 3시간까지 chlorophyll-*a*의 농도가 증가하였으나, 3시간 이후부터 감소하기 시작하여 chlorophyll-*a*의 농도가 5.95%가 감소하였다. 따라서 본 연구에서 가장 많은 chlorophyll-*a*의 제거율을 보인 주파수는 10.76%를 제거한 50 kHz와 12.85%를 제거한 70 kHz로 나타났다. 이 중 70 kHz

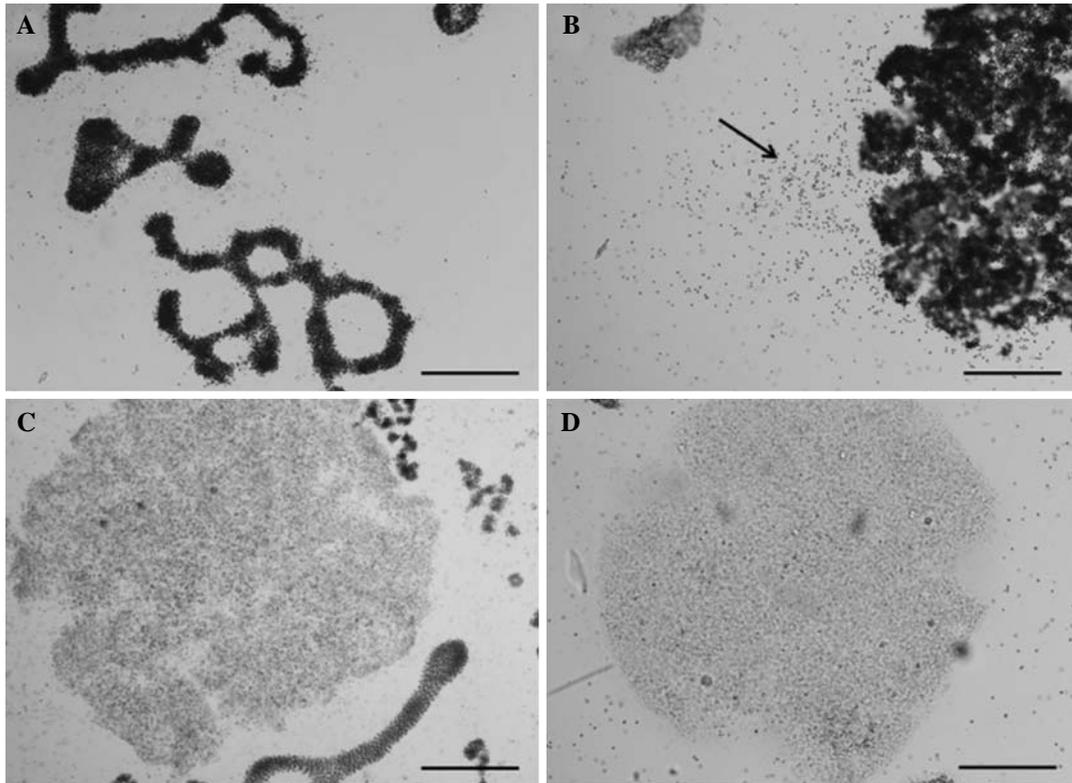


Fig. 5. Disassembled *Microcystis* sp. colony by ultrasonic wave (70 kHz) on the basis of time. A: Small cells in *Microcystis* sp. colony are distributed in the slime layer of gelatin for 0 hr (Control), B: Cells in the colony are dispersed densely. The arrow in the cells indicates detached cells from the colony for 1 hr, C: Gas vesicles are destroyed and the colonies are shown in gray for 2 hr, D: Gray cells which are detached from the colony are shown in opaque white for 3 hr. Scale bar=50 μ m.

는 다른 주파수에 비해 chlorophyll-*a*의 농도를 일정하게 감소시키고 있어 수화현상을 일으키는 *Microcystis* sp.를 제거하는 데 가장 효과적인 초음파 주파수 영역으로 조사되었다. Guangming *et al.* (2006)은 chlorophyll-*a*의 농도가 초음파 노출 초기에 크게 감소하고, 일정 시간이 지나면서 안정화 되어 감소하지 않는 것으로 보고하였고, Lee *et al.* (2008)은 초음파의 주파수(28 kHz, 40 kHz)와 전력(40 W, 80 W, 120 W)의 비교실험에서 주파수는 공동의 크기가 작고 파동의 간격이 큰 28 kHz에서 조류 제거 효율이 높고, 전력이 높은 조건일 때에 chlorophyll-*a*의 제거 효율이 높다고 보고한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 저주파가 아닌 70 kHz에서 chlorophyll-*a*의 농도의 감소가 가장 크게 나타났는데 이는 초음파의 전력(W) 차이로 인한 결과로 판단된다. 그러나 70 kHz 영역의 주파수가 세포의 사멸과 손상 및 불활성화에 따라 유리된 chlorophyll-*a* 농도와 체내 잔여 농도에 대한 정보는 차후 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 또한 본 실험은 수조 내에서 수행되었으므로 초음파의 반사효과가 chlorophyll-*a* 제거에 어느 정도 작용했을 것

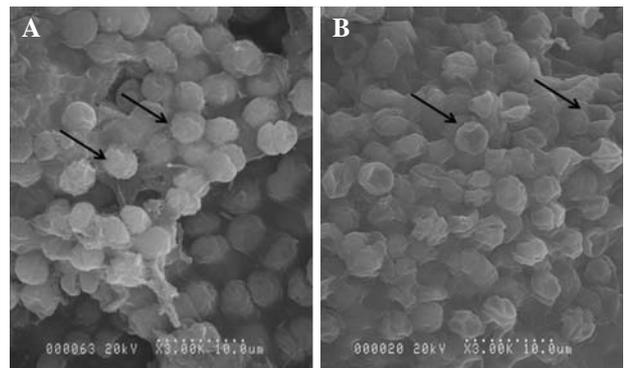


Fig. 6. The scanning electron microscopic observation of *Microcystis* sp. colonies destroyed by 70 kHz ultrasonic wave. A: Control group of *Microcystis* sp. Colony (arrow: normal cells), B: Experimental group of *Microcystis* sp. colony exposed to ultrasonic wave for 5 hr (arrow: destroyed cells by exposed to ultrasonic wave), Scale bar=10.0 μ m.

으로 판단되나 반사효과에 대해서는 연구의 부재로 그 영향에 대해서는 정확하게 판단할 수 없었다.

3. 초음파가 *Microcystis* sp.에 미치는 영향

초음파를 처리하기 전 *Microcystis* sp.의 군체를 광학현미경으로 관찰한 결과 세포는 점액질에 의해 조밀하게 뭉쳐져 있으며, 군체에서 각 세포의 세포간 간격은 거의 없고 세포 내에 있는 가스소포에 의해 군체가 검은색을 띠고 있는 것으로 나타났다(Fig. 5A). 그러나 70 kHz의 초음파 조사 1시간 이후에는 각 단세포가 군체에서 결속력이 약화되어 군체로부터 떨어져 나가는 것이 관찰되었고(Fig. 5B), 2시간 이후 부터는 군체 내 *Microcystis* sp. 세포들의 변형된 형태가 관찰되었다(Fig. 5C). 초음파 조사 3시간 후부터는 불규칙하게 일그러지는 세포 파괴현상이 나타나고 세포 내 물질이 용출됨에 따라 세포가 불투명한 흰색을 띠는 것이 관찰되었다(Fig. 5D). 실험이 종료된 5시간 이후에 관찰된 대부분의 *Microcystis* sp.의 군체는 해체되어 있었고, 각각의 세포 또한 불투명한 흰색을 띠고 있었다. *Microcystis* sp.의 군체를 주사전자현미경으로 관찰한 결과 초음파를 처리하기 전

의 대부분의 세포들은 일정한 크기로 원형을 유지하고 있으며, 세포와 세포 사이에 점액성 물질로 보이는 물질이 세포 주위를 둘러싸고 있는 형태를 보였다. 그러나 초음파를 조사한 5시간에는 세포가 일그러지거나 깨어진 형태가 관찰되기 시작하고 세포와 세포 사이에 관찰되었던 점액성 물질은 거의 관찰되지 않았고, 각 세포들은 불규칙하게 뭉쳐져 있었다(Fig. 6). 이러한 결과는 광학현미경 관찰에서의 결과와 유사하게 초음파의 노출 시간이 경과함에 따라 세포의 파괴된 형태가 관찰되었다.

Microcystis sp.는 점액성 물질 내에 작은 세포가 고르게 분포하고 있는 군체의 형태로 나타나며, 각 세포는 점액성 물질 내에 분포하기 때문에 구형을 유지한다. 그러나 군체가 노쇠하면 대체로 모양이 불규칙해지며, 군체에 구멍이 나면서 세포가 파괴되어 생장이 억제된다(Linda *et al.* 2009). 그리고 각 세포는 점액성 물질 내에 서로 밀집되어 분포하므로 개체수 산정이 어렵기 때문에 초음파를 이용하여 점액성 물질을 파괴하여 각 세포수를 산정하기도 한다(Xie *et al.* 2002). 최근 연구에 따르면 *Micro-*

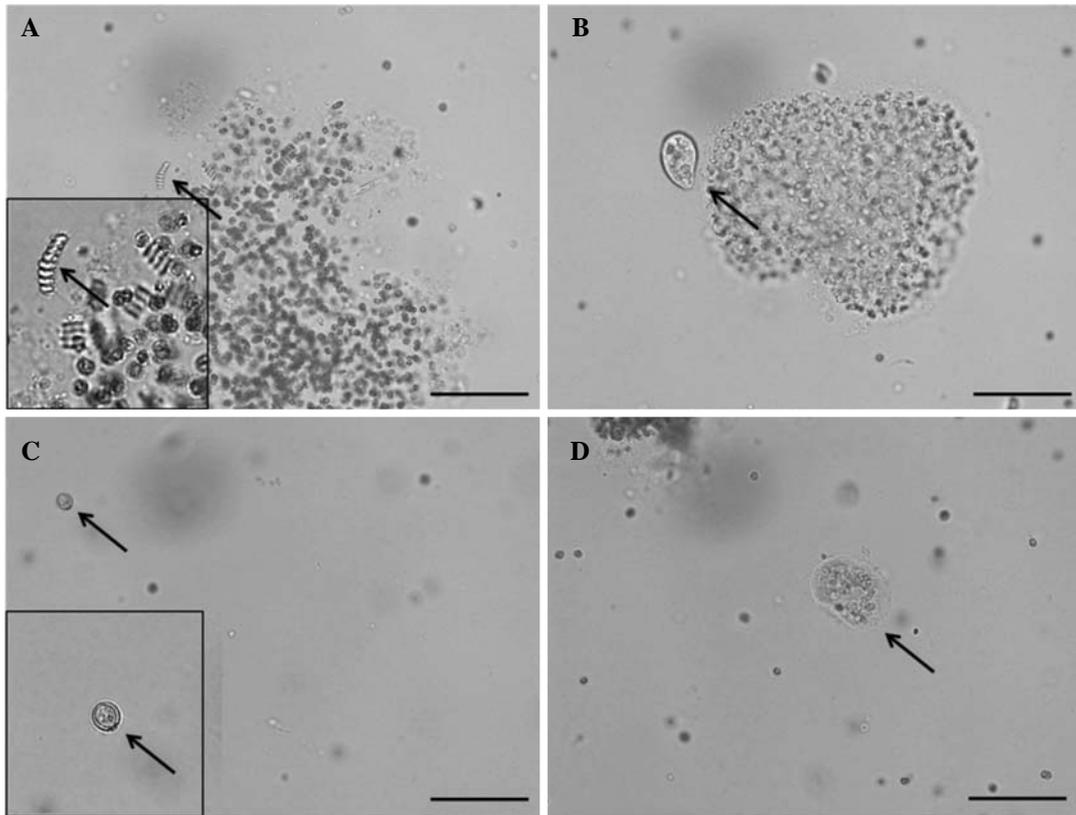


Fig. 7. The living phytoplankton and zooplankton around the destroyed cyanobacteria after applying 70 kHz ultrasonic wave are observed. Square blocks in A and C are enlarged arrow parts. A: The arrow indicates *Scenedesmus* sp. of phytoplankton, B: The arrow indicates *Entosiphon* sp. of zooplankton, C: The arrow indicates *Trachelomonas* sp. of phytoplankton, D: The arrow indicates *Litonotus* sp. of zooplankton, Scale bar=50 μ m.

cystis sp.의 세포에는 가스소포가 세포 내에 있고 아주 단단하여 팽압에 의해 잘 파괴되지 않으며 (Visser *et al.* 2005) 짧은 시간 동안 초음파를 조사 했을 때에는 세포막의 파괴 없이 군체를 해체시키지만, 처리시간이 길어질수록 세포막을 파괴시켜 세포 내 유기물질의 용출이 증가한다고 알려져 있다 (Tiehm *et al.* 2001). 본 연구에서도 초음파 처리는 *Microcystis* sp.가 군체로부터 세포를 분리시키고 세포막의 파괴로 세포 내 유기물질의 용출을 증가시켜 크기와 형태에 변화를 유발하기 때문에 동물성 플랑크톤의 먹이 섭식을 가능하게 할 것으로 생각된다. 초음파를 조사한 직후 각 단세포가 군체에서 결속력이 약화되어 군체로부터 떨어져 나갔으며, 세포들의 형태가 깨지거나 일그러지는 현상이 관찰되었다. 따라서 초음파는 노출 초기에 조류의 단락이 주로 일어나며 시간이 경과함에 따라 파괴가 일어나는 것으로 확인되었다.

4. 초음파가 기타 동·식물성 플랑크톤에 미치는 영향

초음파가 *Microcystis* sp. 외에 다른 수중 미시생물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 70kHz의 초음파를 동·식물성 플랑크톤에 조사해 보았다. 연구 결과 식물성 플랑크톤인 녹조류 *Scenedesmus* sp.와 유글레나류 *Trachelomonas* sp. 및 동물성 플랑크톤인 *Entosiphon* sp.와 *Litonotus* sp.의 형태적 변화 및 운동성에 영향을 미치지 않아 *Microcystis* sp. 외에 다른 수중 미시생물에는 부정적인 영향을 주지 않는 것으로 나타났다 (Fig. 7). 기존의 연구를 살펴보면 초음파를 이용한 남조류의 성장 저해 실험 결과, 현존량과 chlorophyll-*a*가 뚜렷하게 감소하고, 다른 식물플랑크톤과 비교하여 선택적으로 감소된다고 알려져 있다 (Ahn *et al.* 2003). Ko *et al.* (2006)은 소규모의 부영양화된 연못에서 초음파 조사에 따른 식물플랑크톤의 성장 저해효과를 살펴본 결과 남세균은 3~22배, 규조류와 녹조류 등에서 0.9~1.3배 정도의 성장 저해 효율을 보여 초음파는 진핵성 플랑크톤보다는 원핵성 플랑크톤에 더 큰 영향을 준다고 보고한 바 있다.

일반적으로 고출력 고주파의 경우, 제거 대상 생물뿐만 아니라 수계의 타생물에게도 부정적인 영향을 주며, 고비용 및 저효율성으로 인해 현장 적용의 문제가 있다. 반면 본 연구에서 적용한 저출력 고주파는 제거 대상 생물에게만 영향을 주기 때문에 매우 실용적이고, 지속적으로 사용할 경우 녹조 발생 생물의 파괴, 군체의 분리에 의한 타생물의 섭식 가능 등을 고려할 때 현장의 활용도가 매우 높을 것으로 생각되며 차후 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 그리

고 본 실험에 사용된 저출력 초음파 장치의 경우 소형의 기기이므로 소형 농업용저수지 경우 저수지의 가장 자리에 수 개의 장치를 설치하거나 대형 저수지는 조류 차단막을 설치한 후 수 개의 장치를 설치하여 운영한다면 기기의 효율성이 매우 증대될 것으로 기대된다.

따라서 본 연구 적용한 70kHz의 초음파는 *Microcystis* sp. 군체의 해체와 단일 세포의 형태적 변화를 야기하여 성장을 억제하거나 세포의 파괴를 유도하여 녹조를 유발하는 조류의 제거에 효율적으로 적용할 가능성을 제시해주고 있다.

적 요

본 연구는 초음파의 주파수별 노출 시간이 녹조현상을 일으키는 *Microcystis* sp.의 군체에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 각 조사 지점 내의 녹조 생물은 남조강 (Cyanophyceae)인 *Microcystis* sp.가 전체 조류의 약 99.5%를 차지하였다. 초음파의 노출에 따른 녹조류의 chlorophyll-*a* 농도를 분석해보면 노출시간이 길어짐에 따라 점차적으로 감소하였으며, 특히 70 kHz의 주파수 영역에서 녹조 생물이 세포분열을 통한 생물량의 증가를 억제하는 데 효과적인 것으로 조사되었다. 초음파에 노출되기 전 *Microcystis* sp.는 단세포가 점액성 물질에 조밀하게 쌓여 있는 군체의 형태로 관찰되었으나 70kHz 초음파에 노출된 후 *Microcystis* sp.의 군체의 결속이 약화되고 세포가 군체에서 떨어져 나가는 것으로 나타났다. 또한 초음파는 동·식물성 플랑크톤의 형태적 변화와 운동성에 영향을 미치지 않아 다른 수중 미생물에는 부정적인 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 초음파는 *Microcystis* sp.의 군체와 형태적 변화를 유발하고 세포를 파괴시켜 녹조현상을 일으키는 조류의 생물량을 감소시키는 데 효과적으로 작용할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Ahn CY, MH Park, SH Joung, HS Kim, KY Jang and HM Oh. 2003. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation : laboratory and enclosure studies. *Environ. Sci. Technol.* 37:3031-3037.
- APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and wastewater, American public health association. 21st eds., APHA-AWWA-WEF. Washington, DC.
- Chang BK. 1993. Study on the removal of the algae by the shock

- and ultrasonic waves. Donga University. Busan, Korea.
- Choi IH, SG Kim, HC Kim and SH Kim. 2001. Removal characteristics of microcystins by chlorination. *J. of KSEE*. 23: 903-910.
- Guangming Z, P Zhang, B Wang and H Liu. 2006. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa*. *Ultrason. Sonochem.* 13:446-450.
- Holzinger A and C Lütz. 2006. Algae and UV irradiation : effects on ultrastructure and related metabolic functions. *Micron* 37:190-207.
- Hung J, L Wang, N Ren, XL Liu, RF Sun and G Yang. 1997. Disinfection effect of chlorine dioxide on viruses, algae and animal planktons in water. *Wat. Res.* 31:455-460.
- Jeong J. 1993. Illustration of the freshwater algae of Korea. pp. 496. Academy Publ. Co., Seoul.
- Ko SR, CY Ahn, SH Joung, HS Kim and HM Oh. 2006. Change of phytoplankton community by ultrasonication in eutrophic ponds. *Korean J. Environ. Biol.* 24:221-229.
- Lee CH, SH Lee and M Okada. 2004. Removal algae and cryptosporidium in drinking water treatment by polysilicato-iron coagulant. *J. of KESS.* 26:876-882.
- Lee TJ, K Nakano and M Matsumura. 2001. Ultrasonic irradiation for blue green algae bloom control. *Environ. Technol.* 22:83-390.
- Lee YD, EI Cho and BK Kang. 2008. Removal of algae in pond water of golf course by ultrasound. *J. Kor. Soc. W. Sci. Technol.* 16:65-72.
- Linda EG, JM Graham and LW Wilcox. 2009. *Algae*. pp. 115. 2th eds., Pearson Education. New York.
- Ma B, Y Chen, H Hao, M Wu, B Wang, H Lv and G Zhang. 2005. Influence of ultrasonic field on microcystins produced by bloom-forming algae. *Colloids and Surfaces B. Bio-interfaces* 41:197-201.
- Park HK, SU Cheon, SI Park, MH Lee and KJ Ryu. 1992. Seasonal succession of phytoplankton in some artificial lakes of Korea. *J. KSWPRC.* 8:150-158.
- Tiehm A, K Nickel, M Zellhorn and U Neis. 2001. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Wat. Res.* 35:2003-2009.
- Visser PM, BW Idelings, LR Mur and AE Walsby. 2005. The ecophysiology of the harmful cyanobacterium *Microcystis*. *Aquat. Ecol. Ser.* 3:109-142.
- Xie L, P Xie, S Li, H tang and H Liu. 2002. The low TN : TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? *Water Res.* 37:2073-2080.

Received: 3 December 2012

Revised: 29 May 2013

Revision accepted: 29 May 2013