

초음파에 의한 2중 수조에서의 조류제거효율에 관한 연구

심주현 · 서형준[†] · 권병대*

인하대학교 환경공학과 · *인천광역시 상수도사업본부

(2006년 7월 10일 접수, 2006년 12월 18일 채택)

Study on the Efficiency of Algae Removal Using Ultrasonic Waves in Double Cisterns

Joo-Hyun Sim · Hyung-Joon Seo[†] · Byung-Dae Kwon*

Department of Environmental Engineering, Inha University · *Waterworks Headquarters, Incheon Metropolitan City

ABSTRACT : This study examines algae removal and reduction using ultrasonic. Experiments were carried out on frequency: 28 kHz single-wave, 40 kHz multi-wave; intensity: 10, 15, 20, 25, 30 W/L; algae concentration: 500, 1000, 1700/mL; exposure time: 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 min. Also, We investigated algae removal and reduction in single cistern where raw water including algae was directly exposed to ultrasonic and in the double cisterns located in 4 cm from ultrasonic vibrator. The algae type used in this study was *Melosira* genus of *Bacillariophceae*. The *Bacillariophceae* is the representative algae which causes blockage of filter basin. Because of its resistance against oxidizers, it flows into the filter basin after sterilization. As a result of this study, the form of *Bacillariophceae* was completely destroyed and dissolved after the application of ultrasonic waves unlike the sterilization using oxidizers. Removal efficiency of algae using ultrasonic waves increased in proportion to intensity and exposure time of ultrasonic waves, and in double cisterns is better than single cistern.

Key Words : Drinking Water Treatment, Ultrasonic Wave, Algae, Double Cisterns

요약 : 본 연구에서는 초음파를 이용한 조류의 제거 및 저감에 대한 연구를 진행하였다. 본 실험은 주파수별(28 kHz의 단주파와 40 kHz의 다주파), 출력별(10, 15, 20, 25, 30 W/L), 조류 개체수별(500, 1000, 1700/mL)로 변화시켜가며, 노출시간 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20분에 따라 진행하였다. 또한, 초음파 발전기로부터 직접 초음파에 노출시키는 단일 수조와 초음파 발전기로부터 이격거리 4 cm를 두고 초음파에 노출시키는 2중 수조에 대한 실험도 진행하였다. 본 연구에서 사용된 조류의 종은 규조류(*Bacillariophceae*)중 *Melosira* 속이다. 규조류는 염소 등에 의한 산화제 처리 시 염소에 대한 저항성이 있어 조류가 살균처리 후 여과지까지 유입되어 여과지 폐색을 유발하는 대표적인 조류이다. 본 연구결과, 초음파 노출 후의 규조류는 산화제에 의한 살균처리와 달리 형태가 완전히 파괴되어 분해되었으며, 초음파의 출력과 노출시간에 비례하여 조류제거효율이 증가하였다. 또한, 2중 수조에서 더 좋은 조류제거효율을 나타냈다.

주제어 : 정수처리, 초음파, 조류, 2중 수조

1. 서론

조류가 많이 서식하는 원수를 처리하는 방법으로는 염소 소독,^{1,2)} 오존처리,³⁾ 약품응집⁴⁾ 및 황산동 주입⁵⁾ 등의 여러 가지 방법이 있다. 하지만, 염소소독은 비교적 간단하지만 THM (Trihalomethane)등을 생성할 가능성이 있으며, 오존처리는 비용이 고가이고 불완전한 처리로 인한 2차 오염 등의 문제점을 지니고 있다. 또한, 약품응집과 황산동 주입은 처리 약품에 의한 2차 오염 문제점이 발생하는 것으로 보고되고 있다.⁵⁾

그 결과 정수처리 기준을 만족하기 위해 더 많은 약품을 사용하므로 생산단가의 증가를 야기한다. 이러한 문제점 개

선을 위해 원수 유입부분에서 초음파를 이용하여 조류를 제거 및 저감시켜 정수생산을 향상시키고, 차후 정수장의 전처리용으로 초음파에 의한 정수공정 적용 방안을 제시하여 정수처리 공정을 개선함으로써, 정수장 운영의 효율성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

초음파에 의한 조류의 제거 및 저감방법은 초음파의 살균작용과 세척작용을 이용하여 조류의 세포조직을 단락 및 파괴시키는 것이다.⁵⁾ 즉, 초음파의 공동에 의한 조류제거 및 저감방법은 조류를 완전히 파괴하므로, 여과지 폐색현상을 방지하고, 머드 볼(mud ball)의 생성을 저감시켜 여과지의 여과 지속시간 연장 등의 효과가 있으므로 정수생산성이 증가할 것으로 예상된다.

본 연구는 초음파를 이용하여 조류 저감 및 제거 시 효율성을 증가시키기 위한 2중 수조(노출배관, 노출수조)의 영향에 관한 효율성을 알아보는 데 그 목적이 있다.

[†] Corresponding author
E-mail: hjseo@inha.ac.kr
Tel: 032-860-7505

Fax: 032-865-1425

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 가능한 한 정수장의 조건과 같은 조건에서 실험을 하고자 하였다. 따라서 시료는 인천광역시 상수도사업본부 수산정수사업소의 원수를 사용하여 실험을 하였으며, 추후 정수장에 설치할 것을 고려하여 실험의 과정 중 인위적인 대기압의 변화나, 수온의 변화는 주지 않고 실험을 하였다.

초음파 발생장치는 (주)한소닉테크 발전기 UG-300ST 28 kHz 단주파, UG-40-300M 40 kHz 다주파를 사용하였으며, 진동판 크기는 290 mm(L)×280 mm(W)×50 mm(H)였다. 그리고 초음파 발생기의 출력은 100~300 W(10 W/L~30 W/L)까지 변화를 주었다. 반응기 수조의 크기는 단일 수조의 경우 발전자 크기를 제외하면 약 24.5 L(25 cm×30 cm×33 cm)이고, 단일 수조 내부에 장치한 2중 수조는 약 0.3 L(9.8 cm×4.8 cm×6.6 cm)였다. 단일 수조와 2중 수조 모두 재질은 스테인리스 강이며 수조의 두께는 1 mm, 2중 수조는 진동자로부터 4 cm 이격거리를 두었으며, Fig. 1과 같다. 수조를 2개로 분리한 것은 초음파는 매질에 의한 속도가 다르므로 발전자로부터 별도의 노출배관 및 수조를 설치하였을 때 조류제거효율의 변화를 실험하기 위해 설치하였다. 초음파의 노출시간은 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20분이었으며, 시료량은 단일 수조의 경우 10 L이고, 2중 수조의 경우 단일 수조와 2중 수조를 합해 10 L였다.

실험시료의 수온은 12~18℃ 이었고, 실험조류는 규조류 *Melosira*, *Synedra*였다. 초음파 노출 후 조류제거 및 저감 개체 수는 *Melosira*를 기준으로 산출하였고, 조류 개체 수는 500/mL, 1000/mL, 1,700/mL이었다. 조류개체수 조사는 광학 현미경(OLYMPUS BX50) 및 Sedgwick-Rafter Counting Cell(50 mm×20 mm×1 mm)를 이용하여 100~200배의 저배율로 계수분류 하였으며, 상수도생물 및 댐 저수지의 조류사진집등을 참고하여 분류·동정하였다.⁶⁻⁸⁾ 주파수는 진동자와 발생기를 교체하여 변경하였으며, 출력변화는 초음파 발생기에서 변경시켰다.

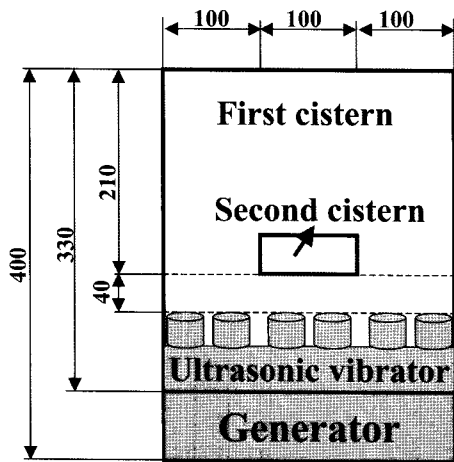


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental device with ultrasonic unit for removing and reducing algae. (Unit : mm)

3. 결과 및 고찰

3.1. 수조 단수 별 조류제거 및 저감

단일 수조 실험은 초음파 발전자위에 시료를 위치시켜 실험한 것으로, 정수장의 처리공정에 특별한 조작 없이 발전자를 설치할 경우와 같은 조건이다. 반면 2중 수조 실험은 정수장의 처리공정 효율을 증대하기 위해 수중수조(노출배관, 노출수조) 등의 조치를 할 경우의 실험이다.

3.1.1. 단일 수조실험

Fig. 2는 40 kHz, 단일 수조, 조류 개체수 1000/mL에서의 초음파 출력과 노출시간 변화에 따른 조류제거효율을 나타낸 것이다. 실험결과, 초음파 출력이 낮은(10~20 W/L) 상태에서는 노출시간이 15분이 되어도 조류제거효율이 매우 낮았으나 고출력 30 W/L 상태에서는 노출시간이 3분이 넘어서면서 효율이 증가하기 시작하였으며 이후부터 노출시간이 증가할수록 제거율이 증가하였다. 25 W/L 상태에서는 초음파 노출시간 7분 이후에서 효율이 증가한 후 노출시간이 증가할수록 제거율이 증가하였다. 30 W/L 출력에서 노출시간을 15분 이상 유지하여야 50% 이상의 효율을 얻을 수 있었다.

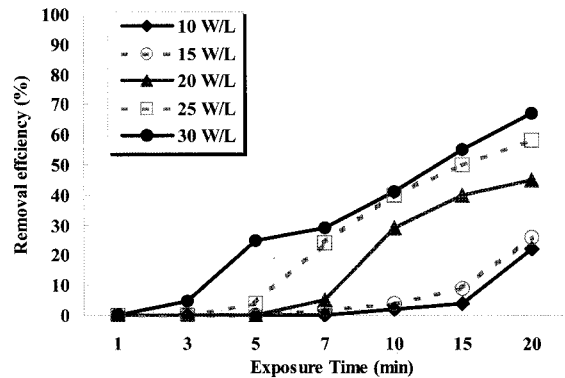


Fig. 2. Efficiency of algae removal with exposure time and intensity of ultrasonic(ultrasonic frequency : 40 kHz, algae population : 1000/mL, single cistern).

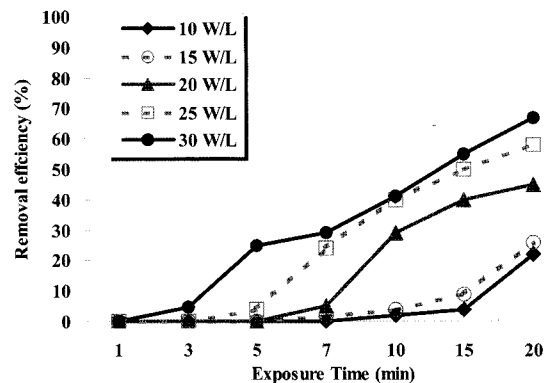


Fig. 3. Efficiency of algae removal with exposure time and intensity of ultrasonic(ultrasonic frequency : 28 kHz, algae population : 1000/mL, single cistern).

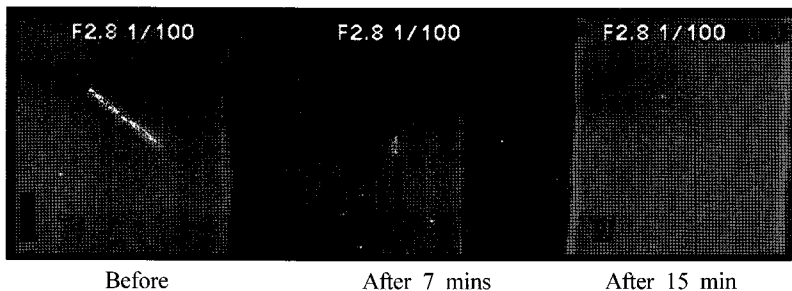


Fig. 4. Photograph of algae(*Merosira*) with exposure time of ultrasonic.

Fig. 3은 28 kHz, 단일 수조, 개체수 1000/mL에서의 초음파 출력과 노출시간 변화에 따른 조류제거효율을 나타낸 것이다. 실험결과, 미미하지만 초음파 출력에 따라 효율이 증가하는 결과를 보였다. 또한, 초음파 노출시간 3분 이후에서 효율이 증가하기 시작하였으며, 25 W/L 이상 고출력에서는 노출시간을 20분 이상 유지하여야 50%의 효율을 얻을 수 있었다.

Fig. 2와 3의 결과를 종합해보면, 초음파는 출력과 노출시간에 비례하여 효율이 증대하는 것을 볼 수 있다. 또한 노출 3분 이후부터 제거율이 증가하였는데, 이는 조류세포가 파괴되는 노출시간대가 형성되기 때문으로 아래 Fig. 4의 노출시간에 따른 조류변화를 통해서 쉽게 알 수 있다.

Fig. 4는 초음파 28 kHz, 20 W/L의 출력으로 노출시간대별 규조류 *Melosira*속 파괴 현상을 나타낸 것으로 좌측의 검은 짧은 선은 Counting Cell의 격자선이며, 내부에 있는 것이 규조류 *Melosira*속이다. 28 kHz, 20 W/L 출력의 초음파에 7분 정도 노출 후 조류의 형상은 대부분 파괴되었으며, 15분 노출 후에는 조류의 형상이 사라졌다.

위와 같은 결과는 20 μm 길이의 규조류 *Melosira* 1개의 개체가 3분 정도에서 10μm 2개로 분리되면 개체수 산출에는 2개로 산출된 후 5분 정도에서 5 μm 2개 등으로 분리되면 분리된 개체수로 계속 산출되었다가 초음파의 지속적인 노출로 급격히 미세 개체로 파괴되는 노출시간대가 형성되기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 즉 초음파의 노출시간 5분 이하에서는 조류의 단락과 파괴가 이루어지고 이후 시간에서는 단락되는 개체보다 파괴되는 개체가 지속적으로 발생하다가, 이후 15분 정도의 시간대에서는 파괴될 조류의 개체수가 급격히 감소하여 제거되는 것으로 생각할 수 있다.

3.1.2. 2중 수조 실험

Fig. 5는 40 kHz, 2중 수조, 조류 개체수 1000/mL에서의 초음파 출력과 노출시간 변화에 따른 조류제거효율을 나타낸 것이다. 실험결과, 초음파의 출력이 낮은(10~20 W/L) 상태에서는 초음파 노출시간 5분 이후부터 효율이 증가하였다. 10 W/L에서 20분 정도 노출하면 50% 정도 조류제거효율이 나타났다. 15 W/L 출력에서는 노출시간 10분 이후 증가율이 상대적으로 크게 증가한 후 20분 노출하면 80% 조류제거효율이 나타났다. 20 W/L 이상에서는 출력 차이에 따라 차이는 있으나 15분 이상 노출할 경우 80% 이상의 효율을 보였으며, 20분 이상 노출하면 90% 이상의 효율을 보였다.

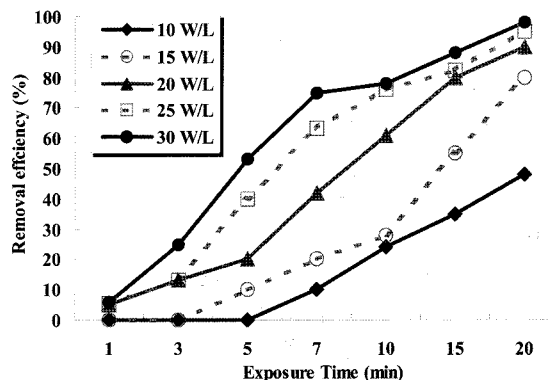


Fig. 5. Efficiency of algae removal with exposure time and intensity of ultrasonic(ultrasonic frequency : 40 kHz, algae population : 1000/mL, double cistern).

Fig. 6은 28 kHz, 2중 수조, 조류 개체수 1000/mL에서의 초음파 출력과 노출시간 변화에 따른 조류제거효율을 나타내고 있다. 실험결과, 초음파 출력이 증가함에 따라 다소 효율이 증가하는 결과를 보였다. 또한, 초음파 노출시간 5~7분에서 효율이 상대적으로 증가하였으며, 출력과 노출시간을 증가할수록 효율이 증가하였다. 이는 앞서 설명한 초기시간에서의 조류단락에 의한 조류수 증가현상이 5분 이후부터는 제거현상이 단락현상보다 크게 나타나기 때문이다. 초음파 출력 20~30 W/L에서 노출시간을 15분 이상 유지하면 90% 이상 조류제거효율을 보였으며, 저출력 10 W/L와 고출력 30 W/L의 효율 차이가 동일한 시간대에서는 최대 23%p 내외로 비교적 적었다.

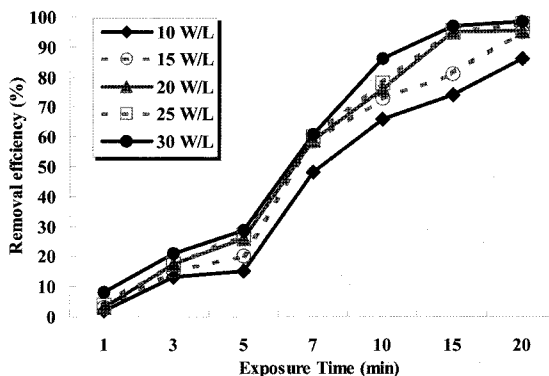


Fig. 6. Efficiency of algae removal with exposure time and intensity of ultrasonic(ultrasonic frequency : 28 kHz, algae population : 1000/mL, double cistern).

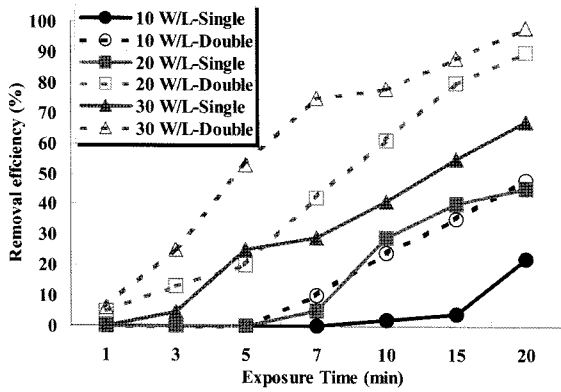


Fig. 7. Efficiency of algae removal with exposure time of ultrasonic and number of cistern(ultrasonic frequency : 40 kHz, algae population : 1000/mL).

3.1.3. 수조단수별 비교 실험결과

Fig. 7은 주파수 40 kHz, 개체수 1000/mL에서의 수조 단수 변화에 따른 제거효율을 나타내었다. 단일 수조에 비하여 2중 수조의 효율이 전 구간에서 단일 수조에 비하여 노출시간이 증가할수록 초음파의 조류제거효율이 양호하게 나타났다. 단일 수조 30 W/L는 노출시간 20분이 경과하여도 조류 제거효율이 60%에 머물렀으나, 2중 수조 30 W/L는 노출시간 20분에는 90% 이상 효율이 나타났다.

20 W/L에서는 노출시간이 15분일 경우 75%, 노출시간 20분에서는 80% 이상의 효율을 보이며, 노출시간 15분 이후에서는 30 W/L의 출력과 큰 차이가 없었다. 따라서 노출시간이 15분 이상 충분한 경우 20 W/L를 설치하는 것이 경제적 일 것으로 사료된다.

Fig. 8은 주파수 28 kHz, 개체수 1000/mL에서의 수조 단수 변화에 따른 제거효율을 나타낸 것이다. 단일 수조에 비하여 2중 수조의 효율이 전 구간에서 단일 수조에 비하여 양호하게 나타났다. 2중 수조는 5분 이후 구간에서 효율이 급격히 증가한 후 노출시간에 비례하여 증가한 후 15분 이후에는 제거율이 90% 이상 도달하였다. 28 kHz 에서 조류의 제거율을 증가시키기 위해서는 수조 구조를 2중으로 한 후 노출시간을 7~10분 정도 유지하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

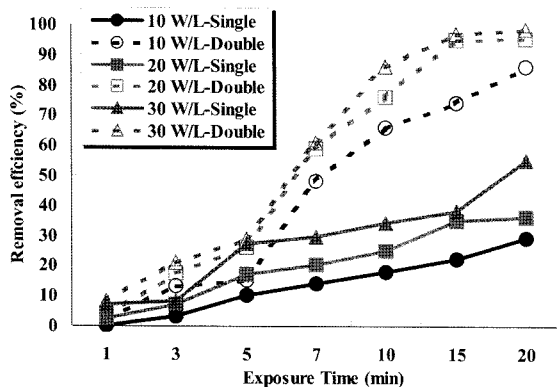


Fig. 8. Efficiency of algae removal with exposure time of ultrasonic and number of cistern(ultrasonic frequency : 28 kHz, algae population : 1000/mL).

위 두 실험결과(Fig. 7과 8)를 보면 주파수와 출력에 관계 없이 2중 수조에서 효율이 좋은 것을 알 수 있었다. 초음파는 기계적인 진동파로서 매질에 따라 속도가 달라진다. 그 전파속도는 공기 중에서는 약 340 m/s, 물에서는 약 1500 m/s 이고, 철재인 경우 약 5,000 m/s로 물성이 단단할수록 속도가 증가하는 특성을 가지고 있다.⁹⁾ 따라서, 발진기에서 발진된 초음파가 수중에서 1,500 m/s로 발진된 초음파가 근거리 4 cm에 있는 스테인리스 강의 2중 수조를 5,000 m/s로 통과하면서 2차 발진이 발생하였기 때문이다. 이로 인해 2중 수조에서의 조류제거효율이 단일 수조에 비해 높은 제거효율을 보이는 것으로 사료된다.

3.2. 주파수에 따른 조류제거 실험결과

주파수에 따른 2중 수조, 조류개체수 1000/mL에 대한 실험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 저출력인 10 W/L에서는 40 kHz는 5분 이후 조류 제거 효율이 증가하기 시작하였다. 10, 20 W/L에서는 28 kHz가 40 kHz에 비하여 노출시간 전 구간에서 10~20% 정도 양호한 효율을 나타내고 있다. 고출력인 30 W/L에서는 노출시간 5~7분에서 40 kHz가 28 kHz 보다 효율이 좋았으나, 노출시간 10~15분 구간에서는 28 kHz가 효율이 양호하였다.

실험결과, 고출력의 운영에 지장이 없고 노출시간 7분 이내의 비교적 짧은 노출로 고효율을 얻기 위해서는 40 kHz를 설치하고, 초음파 노출시간 10분 이상 노출할 여유가 있고 조류제거효율 80% 이상의 효과를 필요할 경우 28 kHz 설비를 설치하는 것이 효과적이다. 이런 결과는 공동의 크기가 2~3 μm, 파동의 간격이 35 mm인 28 kHz의 경우가 공동의 크기가 1~2 μm, 파동의 간격이 15 mm인 40 kHz 보다 강력하기 때문인 것으로 사료된다.¹⁰⁾

3.3. 개체수별 조류제거 실험결과

Fig. 10은 28 kHz의 2중 수조에서 개체수별 조류제거효율을 나타낸 것이다. 10 W/L와 30 W/L의 조류제거효율 증가율의 차이가 미약하였으며 노출시간의 증가에 따라 조류제거효율이 증가하였다. 노출시간 20분에 10 W/L는 80%, 30 W/L는 90% 정도의 조류제거효율을 나타내었다.

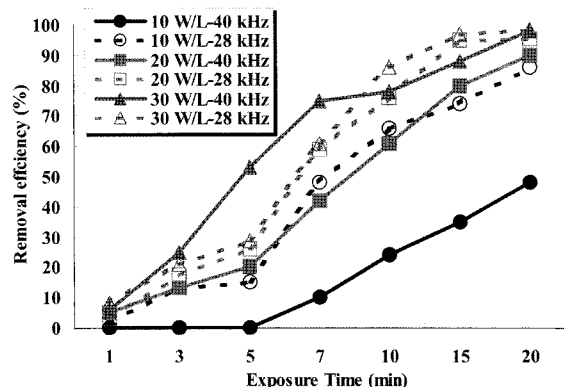


Fig. 9. Efficiency of algae removal with exposure time of ultrasonic and frequency(algae population : 1000/mL, double cistern).

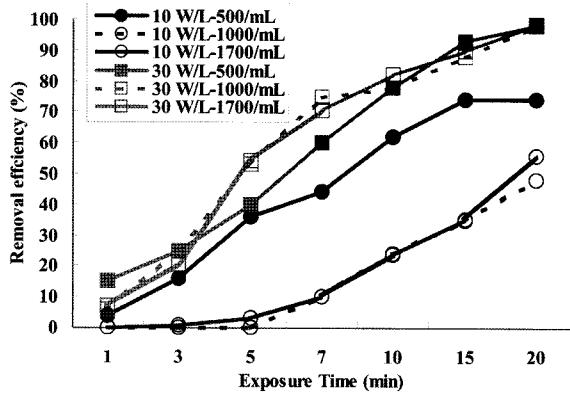


Fig. 10. Efficiency of algae removal with exposure time and algae population (ultrasonic frequency : 28 kHz, double cistern).

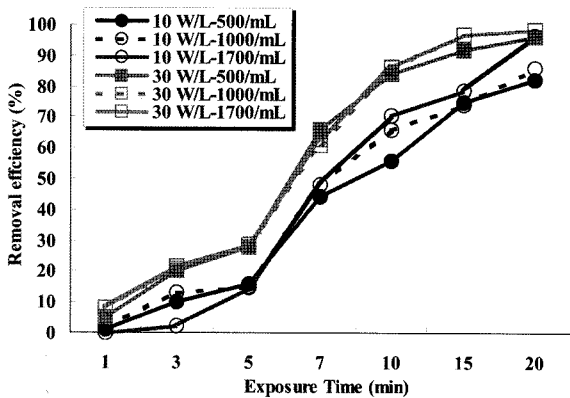


Fig. 11. Efficiency of algae removal with exposure time and algae population (ultrasonic frequency : 40 kHz, double cistern).

초음파 28 kHz 설비에 2중 수조 등 적절한 효율 증대의 설비를 설치할 경우는 출력의 차이에 의한 초음파의 효율 차이가 작으므로 고효율 설비보다는 저출력의 설비를 이용하고 초음파 노출시간 7~10분을 유지하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

Fig. 11은 40 kHz의 2중 수조에서의 개체수별 조류제거 효율을 나타내고 있다. 실험결과, 10 W/L와 30 W/L의 조류 제거효율은 큰 차이를 보였다. 저출력 10 W/L의 증가율이 비교적 낮았고 노출시간 20분에 45% 정도의 낮은 효율을 나타냈다. 30 W/L는 노출시간 20분에 개체수와 관계없이 90% 이상의 조류제거효율을 나타내었다. 상기 비교 결과 40 kHz의 설비는 고효율로 운전하는 것이 더 좋은 효율을 나타내며, 고효율의 초음파 설비에 초음파 노출시간 7분 이상 유지하는 것이 운전 효율성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 10과 11을 종합해보면 개체수 변화는 큰 영향을 보이지 않는다.

4. 결론

조류를 제거하기 위한 방법으로는 염소·오존 등과 같은

산화제 처리가 일반적으로 사용되고 있다. 하지만, 산화제 처리의 경우, 소독부산물 등의 2차 오염이 발생하고 있다.

따라서 2차 오염의 발생 가능성이 적으며 비교적 처리가 간단하고 효과적인 방법과 대안을 연구할 목적으로 초음파에 의한 조류제거 및 저감 방법을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험 결과, 초음파에 의해 조류를 제거할 수 있었으며, 개체수와 관계없이 초음파로 인해 생성된 공동의 크기보다 큰 구조체는 노출시간과 출력에 비례하여 파괴되었다.
- 2) 초음파로 생성되는 공동에 의한 조류 제거는 조류형상의 파괴였다. 산화제를 사용하여 조류를 처리하는 경우 조류의 사체가 형태를 유지하고 있어 처리 후 침전 및 여과지로 유입되는 사례가 있으나, 초음파 처리 시 조류의 형상이 파괴 및 분쇄되었다. 즉 정수처리공정 적용 시 조류에 의한 침전물 저감 및 여과지 폐색 문제가 줄어들 수 있다.
- 3) 초음파 출력과 노출시간에 비례하여 조류 제거 효율이 증가하였으며, 초음파를 대상 시료에 직접 노출하는 것보다, 초음파 발전부 주위에 별도의 노출수조(2중 수조)를 설치하여 초음파를 노출하는 것이 조류의 제거에 효과적이었다.
- 4) 노출시간이 7분 이내에서 고효율을 얻기 위해서는 40 KHz의 고효율을 사용하는 것이 효율적이며, 10분 이상의 노출시간이 가능한 경우는 28 KHz 설비를 사용하는 것이 효율적이었다. 또한, 유입된 조류의 개체수 변화에는 큰 영향을 보이지 않았다.

사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

1. Huang, J., Wang, L., Ren, N., Liu, X. L., Sun, R. F., and Yang, G., "Disinfection effect of chlorine dioxide on viruses, algae and animal planktons in water," *Water Res.*, **31**(3), 455~460(1997).
2. 최일환, 김선규, 김학철, 김순홍, "염소처리에 의한 남조류 *Microcystins* 제거 특성," *대한환경공학회지*, **23**(6), 903~910(2001).
3. Holzinger, A. and Lütz, C., "Algae and UV irradiation: Effects on ultrastructure and related metabolic functions," *Micron*, **37**(3), 190~207(2006).
4. 이철희, 이세한, 오카다미쯔마사, "정수처리에 있어서 철-실리카 무기고분자 응집제를 이용한 조류 및 *Cryptosporidium*의 제거," *대한환경공학회지*, **26**(8), 876~882(2004).
5. 장부규, 충격 및 초음파에 의한 조류제거, 동아대학교 대학원 박사학위논문, pp. 7~8(1992).
6. 수자원연구소, 댐 저수지의 조류사진집, 1판, 아카데미서적, 서울, pp. 8~12(2000).

7. 이현동, 이의신, 서규태, 상수도의 생물, 1판, 진리탐구, 서울, pp. 20~24(1996).
8. 인천광역시 수연구실, 조류도감, 인천광역시 상수도사업본부(1998).
9. 이종락, 초음파와 그 사용법 ; 초음파센서·초음파 모터, 1판, 세화, 서울, pp. 28~35(1997).
10. HANSONIC, Ultrasonic Generator & Transducer, HANSONIC TECH(1991).