

## 초음파를 이용한 미세조류 응집에 관한 수치해석 연구

하지수<sup>†</sup> · 심성훈\* · 정상현\*

계명대학교 기계자동차공학과, \*한국기계연구원

(2016년 2월 19일 접수, 2016년 3월 16일 수정, 2016년 3월 21일 채택)

## A Numerical Study on the Agglomeration of Algae by the Ultrasonic Wave

Ji Soo Ha<sup>†</sup>, Sung Hun Shim\*, Sang Hyun Jung\*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University,

\*Korea Institute of Machinery and Materials

(Received 19 February 2016, Revised 16 March 2016, Accepted 21 March 2016)

### 요 약

미세조류를 이용하여 바이오 연료화 하는 연구가 청정에너지 및 대체에너지 개발에 따라 많이 이루어지고 있다. 미세조류를 바이오 연료로 이용하기 위해서는 미세조류에 대한 배양과 수확, 회수, 추출, 에너지 전환에 이르는 종합적인 기술개발이 필요한데 각 부분마다 바이오에너지 생산에 필요한 생산 비용이 가격 경쟁력 면에서 아직 문제점이 있다. 현재까지의 기술 개발은 주로 배양에 초점이 맞추어져 있으며 가격 경쟁력을 가지는 저비용의 응집, 수거, 탈수, 건조 및 연료 추출과정을 거치는 연료화 공정의 개발은 매우 미흡한 상태이다. 미세조류의 응집 수거는 미세조류가 물과 유사한 밀도로 물에서 분리하기가 어려운 물질이기 때문에 저비용으로 미세조류를 응집하고 수거하는 기술이 필요하다. 미세조류의 응집과 수거를 위해 초음파를 공정에 이용하는 하이브리드 방식의 공정은 기존 공정에 비하여 환경 위해 요소가 거의 없으며 저비용 고효율의 공정으로써 다음 세대의 에너지 공급원 확보를 위해 연구가 필요한 분야이다.

본 연구는 미세조류의 바이오연료로 추출하기 위한 전단계 공정으로 물에 부양된 미세조류를 효과적으로 응집하기 위해 초음파를 조사할 경우에 일어나는 유동과 미세조류 거동에 대한 메카니즘을 수치해석을 통해 규명함으로써 초음파를 이용한 미세조류 응집에 대한 최적 설계의 토대를 정립하는 것을 목적으로 수행하였다.

**주요어** : 미세조류, 초음파, 정재파, 유동 해석, 응집

**Abstract** - In spite of various merit of algae as biofuel, the production cost of algae is a considerable obstacle for commercialization. The concurrent development of essential technologies is needed for the cultivating, harvesting, extracting and energy transformation. The production cost of algae biofuel has still higher than that of the other commercial biofuel. The major research activity has been focused on the cultivating and the research of other processes has been done with relatively lower activity. It is difficult to separate the algae from water because of the similar magnitude of density each other. The agglomeration and extracting of algae with the hybrid technology using ultrasonic wave is rare effect of environmental hazard and also it is appropriate technology for the next generation energy resources.

The present research is investigated for the effective separation of algae from water with the ultrasonics wave. The aim of the present research is focused on the establishment of optimal design of algae agglomeration system. For this purpose, the computational fluid dynamic analysis has been conducted in the flow field with ultrasonic wave and algae flow to clarify the mechanism of algae separation by ultrasonic wave.

**Key words** : algae, ultrasonic, standing wave, computational fluid dynamic analysis, agglomeration

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Department of Mechanical and Automotive Engineering,

Keimyung University

Tel : 053-580-5919 E-mail : jisooa@kmu.ac.kr

## 1. 서론

미세녹조류는 CO<sub>2</sub>, 물 및 태양에너지만 있으면 강, 호수, 바닷물, 폐수, 어느 곳이든 성장할 수 있으며, 또한 비옥한 토양을 필요로 하지 않기 때문에 장소에 구애를 덜 받고 성장시킬 수 있다. 미세조류를 이용하여 바이오 연료화 하는 연구는 많이 이루어지고 있다<sup>[1-4]</sup>. 미세조류를 바이오 연료로 이용하기 위해서는 미세조류에 대한 배양과 수확, 회수, 추출, 에너지 전환에 이르는 각 생산 단계의 요소기술들의 동시적인 기술개발이 요구되고 있다. 기존의 녹조 바이오 연료화 공정은 광합성과 영양분을 이용하여 성장된 녹조를 물과 분리 후 탈수하여 기계적 또는 화학적 방법에 의하여 녹조의 지질을 추출하여 바이오 연료와 부산물을 생산하였다. 미세조류 바이오 연료화 공정에서 단위 생산량 당 전체 생산 단가에 대한 각각의 요소 공정에서 차지하는 비율은 배양공정이 약 40%, 수확공정이 약 25%, 그리고 지질 추출 공정이 약 25%의 비용이 소요되며, 추출된 지질의 정제 공정이 약 10%를 차지하고 있다.

미세조류의 바이오연료로서의 다양한 장점에도 불구하고, 높은 미세조류 생산 단가는 상용화에 큰 걸림돌로 작용하고 있으며, 아직 구체적이면서도 종합적인 기술 및 해결책은 명확히 제시되어 있지 않은 상태이다. 현재까지의 기술 개발은 주로 배양에 초점이 맞추어져 있으며 가격 경쟁력을 가지는 저비용의 응집, 수거, 탈수, 건조 및 연료 추출과정을 거치는 연료화 공정의 개발은 매우 미흡한 상태이다. 미세조류의 응집 수거는 미세조류가 물과 유사한 밀도로 물에서 분리하기가 어려운 물질이기 때문에 저비용으로 미세조류를 응집하고 수거하는 기술이 필요하다. 이를 위해 초음파<sup>[6-8]</sup>를 공정에 이용하는 하이브리드 방식의 응집 및 수거하는 공정은 기존 공정에 비하여 환경 위해 요소가 거의 없으며 저비용 고효율의 공정으로써 다음 세대의 에너지 공급원 확보를 위해 연구가 필요한 분야이다.

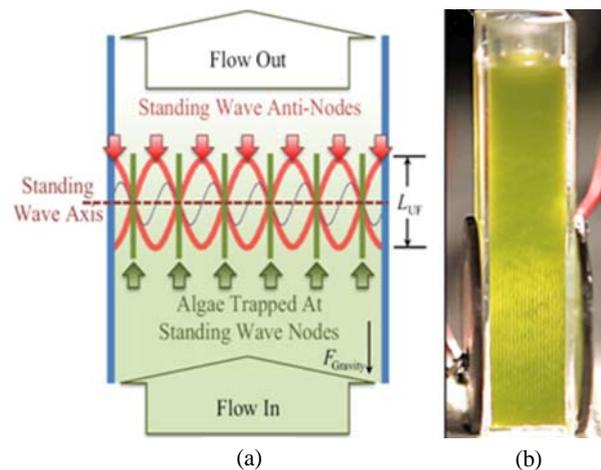
따라서 본 연구는 미세조류의 바이오연료로 추출하기 위한 전단계 공정으로 물에 부양된 미세조류를 효과적으로 응집하기 위해 초음파를 조사할 경우에 일어나는 유동과 미세조류 거동에 대한 메카니즘을 수치해석을 통해 규명함으로써 초음파를 이용한 미세조류 응집에 대한 최적 설계의 토대를 정립하는 것을 목적으로 수행하였다.

## 2. 수치해석 방법

초음파를 이용하여 미세조류의 응집을 수치적으로 해석하여 응집에 대한 메카니즘을 규명하기 전에 우선 실험실 규모의 초음파 응집 장치에서 미세조류의 응집을 확인하였다. Fig. 1에 이에 대한 실험 장치를 도시하고 실험 장치를 나타내었다. Fig. 1의 왼쪽(Fig. 1(a))은 실험 장치의 개요도이고 오른쪽(Fig. 1(b))은 실험 장치의 사진이다. 실험 장치 개요도에서 보면 미세 녹조가 담긴 관의 양쪽 벽면에서 초음파를 조사하면 관의 내부에 정재파(Standing Wave)가 발생하고 정재파의 골에서 흘러 들어오는 미세 녹조가 쌓여서 응집되는 것으로 묘사되어 있다. 이것을 확인하기 위한 실험 장치가 오른쪽에 있는데 오른쪽 사진의 양쪽에 원형 판 형태의 초음파 발생기가 장착되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 1(b)의 사진은 실제로 초음파를 조사한 경우의 사진인데 초음파 발생기 옆의 관 내부에 미세 녹조가 정재파의 골에 정렬해 있는 것을 관찰할 수 있다.

앞에서 살펴 본 바와 같이 관내에 초음파를 조사하면 관내에 정재파가 형성되며 이 정재파의 영향으로 정재파의 골에 미세 녹조가 모이면서 모여진 미세 녹조는 응집이 일어난다. 이러한 현상을 수치 해석적으로 구현하여 이에 대한 분석을 통해 실험으로 살펴 본 응집에 대한 검정과 응집의 메카니즘을 규명하기로 한다.

Fig. 1(b)와 같은 실험 장치 형상의 관내에 대한 유동 수치해석을 위해 2차원 유체역학 지배방정식을 아래에



**Fig. 1.** Schematic diagram of standing wave generated by ultrasonic generator(a) and photograph of lab scale experimental apparatus with ultrasonic generator(b).

나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + S_{wave} \quad (2)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (3)$$

위에서 식 (1)은 연속방정식이고 식 (2)와 (3)은 각각 x 방향 운동량 방정식, y 방향 운동량 방정식이다. 일반적인 2차원 유체역학 방정식에서 변형하여 x 방향 운동량 방정식에서 초음파에 의해 만들어지는 정재파에 의해 만들어지는 주된 축방향 힘에 관한 생성항 ( $S_{wave}$ )을 추가 하였다.  $S_{wave}$ 는 다음과 같이 모델링하였다.

$$S_{wave} = S_{amp} \sin(2\pi \frac{x}{\lambda}) \quad (4)$$

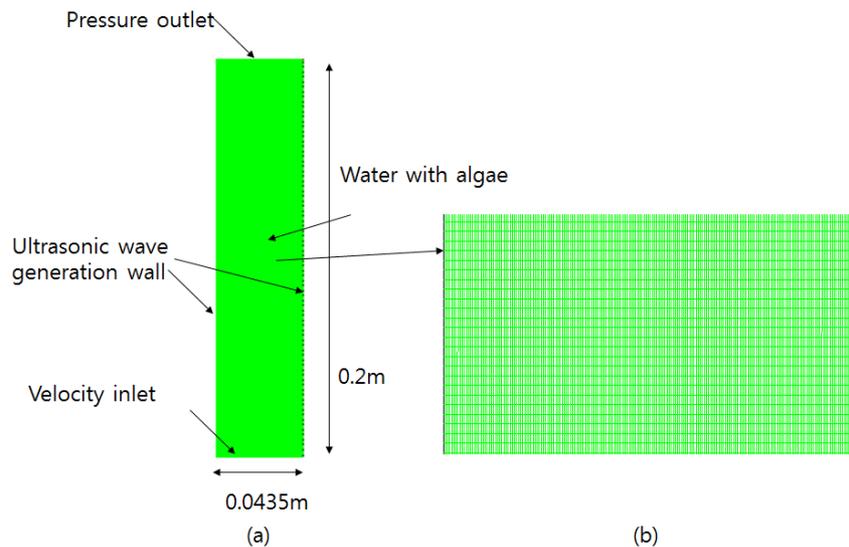
여기서  $S_{amp}$ 는  $S_{wave}$ 의 진폭이며 파장  $\lambda$ 는 다음과 같이 설정한다.

초음파 발생기에서 발생하는 음파의 주파수  $f$ 는 1MHz로 실험하여 이 주파수를 이용한다. 이 주파수에 따른 정재파가 관의 폭(43.5mm)에 형성된다. 물속에서 음파속도  $a$ 가 1483m/s이므로 음속과 파장( $\lambda$ ), 주파수( $f$ )의 관계식이

$$a = \lambda f \quad (5)$$

이므로 파장은  $\lambda = 1.383 \times 10^{-3} m$  이다. 관의 폭이 0.0435m이므로 관 수평 방향으로 정재파의 골이 약 30개 형성될 것으로 예측할 수 있다.  $S_{amp}$ 는 초음파 발생기의 파워에 비례하며 실험에서 5W인데 수치해석에서는 적절한 크기의 값인 30을 사용하였다.

Fig. 2에 전산유체역학 해석을 위한 형상과 격자 모양을 나타내었다. 관의 폭은 0.0435m, 높이는 0.2m로 하였고 전체 격자 개수는 약 40000개를 이용하였다. 그림에서 입구속도경계에서는 0.001m/s의 속도로 유입되고 출구압력경계에서 나가는 것으로 하였다. 유입속도를 매우 작게 한 것은 횡 방향의 미세 녹조의 거동을 잘 관찰하기 위함이다. 또한 유입되는 것이 없으면 수치해석상에서 미세 녹조의 흐름을 관찰할 수 없기 때문이다. 본 연구에서 사용한 전산유체역학 해석 프로그램은 SIMPLE 알고리즘<sup>[4]</sup>을 이용하여 수립시키는 상용 해석 코드인 Fluent ver. 14를 사용하였다.



**Fig. 2.** Computational modeling for algae agglomeration analysis. (a) overall configuration of modeling and (b) detail mesh shape.

### 3. 결과 및 고찰

이 절에서는 제 2 절에서 설명한 관 형상 내에 초음파를 조사할 경우에 미세 녹조의 거동을 살펴 보기로 한다. 우선 미세 녹조가 없이 순수한 물이 관내에 있을 때 초음파를 조사한 경우의 관 내부 속도 및 압력 변화를 살펴보기로 한다. 이에 관한 유동해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 속도 분포를 나타내었다. 속도 분포를 살펴보면 일반적인 관내 층류 유동의 속도 분포를 보여주고 있다. 즉 입구에서 균일한 속도가 후류로 가면서 벽면의 효과로 가운데에서 속도가 크게 나타나는 전형적인 Hagen-Poiseuille 유동을 보여주고 있다.

압력 분포는 Fig. 3(b)에 나타내었는데 초음파 조사에 의한 압력 변화를 잘 보여주고 있다. 앞 절의 수치 해석 방법에서 언급한 바와 같이 x 방향 운동량 방정식에 생성항으로  $S_{wave}$ 를 식 (4)와 같이 적용하였기에 나타나는 결과이다. Fig. 4에  $y=0.1m$  위치에서 수평 방향으로의 압력 변화를 그래프로 나타내었다. 여기에서도 명확히 정재파 압력 분포를 확인할 수 있다.

미세 녹조를 입구속도경계에서 유동속도 0.001m/s에 0.01kg/s으로 물의 흐름과 같이 흐르게 하고 초음파를 조사하지 않았을 때의 유동속도, 압력, 녹조 농도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 일반적인 관내 유동 속도 분포를 보여주고 있으며 Fig. 5(b)는 초음파 조사를 하지 않은 경우이므로 일반적인 관내 유동에서 압력 변화를 보여주고 있다. Fig. 5(c)는 미세 녹조의 분포를 보여주고 있는데 관내에서 거의 균일한 농도 분포를 보여주고 있다.

미세 녹조를 앞에서 검토한 경우와 같이 velocity

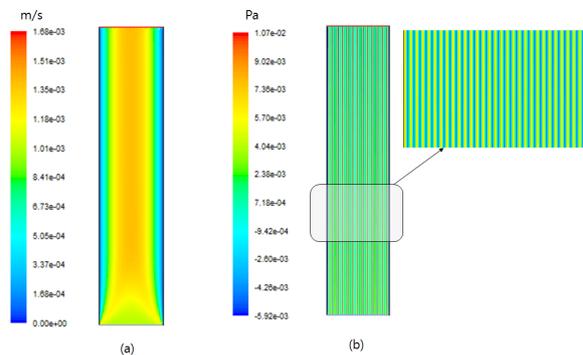


Fig. 3. Velocity and pressure contours for the case without algae flow. (a) velocity contour and (b) pressure contour.

inlet에서 유동속도 0.001m/s에 0.01kg/s으로 물의 흐름과 같이 흐르게 하고 초음파를 조사했을 때의 유동속도, 압력, 녹조 농도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 Fig. 5(a)에서 관찰한 일반적인 관내 유동속도 분포에서 약간 다른 양상을 보여주고 있지만 전체적으로 균일한 속도 분포를 보여주고 있다. Fig. 6(b)와 6(b')는 초음파 조사를 한 경우이므로 초음파 압력 변화에 따른 주기적인 정재파 형태의 압력 변화를 관찰할 수 있다. Fig. 6(c)와 6(c')는 미세 녹조의 분포를 보여주고 있는데 초음파 조사에 의한 정재파의 영향을 받아 정재파의 골에서 미세 녹조가 결집 되는 것을 관찰할 수 있다. 이로부터 초음파를 조사하면 미

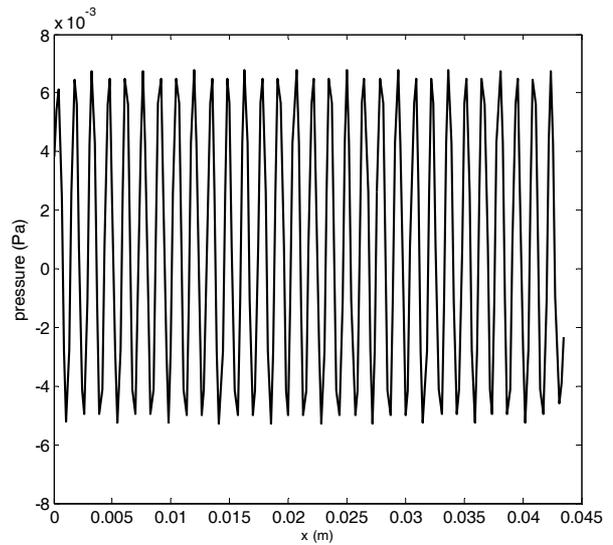


Fig. 4. Pressure distribution along the horizontal axis.(x:0~0.435m, y=0.1m)

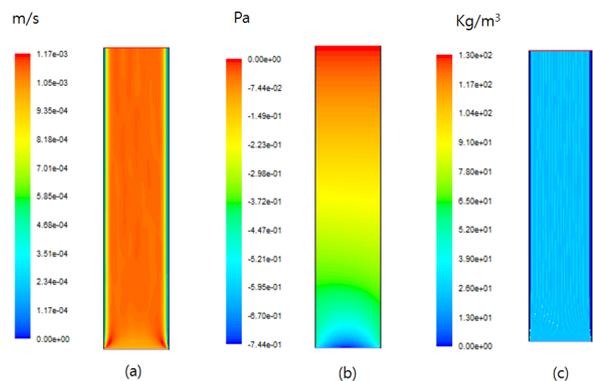
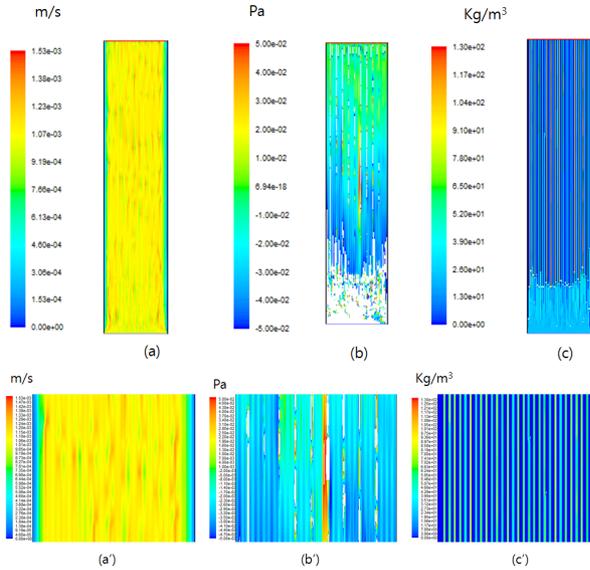
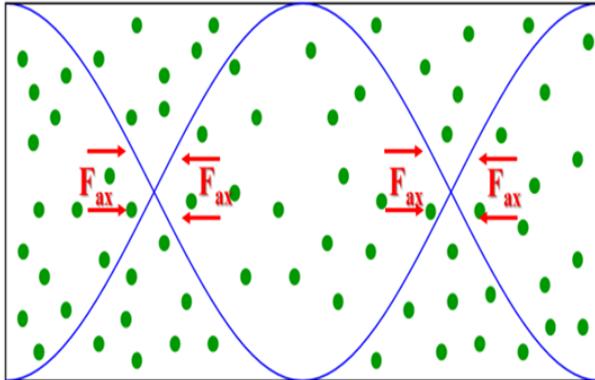


Fig. 5. Velocity, pressure and algae contours for the case with algae flow and without ultrasonic generation. (a) velocity contour, (b) pressure contour and (c) algae concentration.



**Fig. 6.** Velocity, pressure and algae contours for the case with algae flow and with ultrasonic generation. (a) velocity contour, (b) pressure contour and (c) algae concentration, (a') detail velocity contour, (b') detail pressure contour and (c') detail algae concentration.



**Fig. 7.** Schematic sketch of agglomeration of algae by the axial force.

세 녹조의 결집이 잘 이루지는 것을 확인 할 수 있다. 초음파를 조사하여 관내의 미세 녹조가 초음파에 의해 만들어지는 정재파의 골에서 응집이 되는 것을 도식적으로 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 살펴보면 관내에 균일하게 분포된 미세 녹조가 초음파로 만들어진 정재파의 영향으로 형성된 주된 축방향,  $F_{ax}$ 에 의해 균일하게 분포된 미세 녹조를 정재파의 골로 이동 시키는 것을 볼 수 있다. 이러한 메카니즘으로 물과 거의 유사한 밀도를 가지는 미세녹조를 정재파의 골로 모이

게 만들 수 있다. 이렇게 응집된 미세조류는 서로 결집되어 덩어리로 뭉치게 된 후 중력에 의해 침전되게 되어 미세조류를 쉽게 분리 수거할 수 있다.

## 4. 결론

초음파를 이용하여 미세조류를 응집 침전 시키는 장치를 설계하기 위하여 실험실 규모의 초음파 응집 장치에서 미세조류의 응집을 확인하였는데 이에 관한 유동 수치해석을 수행하여 초음파 조사에 의해 미세 조류가 결집되는 메카니즘을 규명하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 실험실 규모의 초음파를 이용한 응집 장치에서 초음파의 정재파에 의한 결집을 확인 하였고 이에 관한 유동장 지배방정식을 다음과 같이 정립 하였다.

$$S_{wave} = S_{amp} \sin(2\pi \frac{x}{\lambda})$$

$$a = \lambda f$$

- 2) 위의 지배방정식을 이용한 유동 수치해석을 수행하였는데 초음파 조사가 있으며 미세 녹조를 흐르게 하지 않은 유동장의 경우 속도 분포는 일반적인 관내 유동장 형태를 보여주고 있었고 압력 분포는 초음파 정재파의 영향으로 수평 방향으로 압력이 소밀 형태를 잘 보여 주었다.
- 3) 초음파를 조사하지 않고 미세 녹조를 흘려보냈을 때는 속도장은 일반적인 관내 유동장 형태를 보여 주었고 관내에서 미세 녹조의 농도 분포도 거의 균일한 것을 관찰할 수 있었다.
- 4) 초음파를 조사하고 미세 녹조를 흘려보냈을 때는 속도장은 일반적인 관내 유동장 형태를 보여 주었고 관내에서 압력 변화는 초음파에 의한 정재파 형태를 잘 관찰할 수 있었다. 그리고 미세 녹조의 농도 분포도 정재파의 영향으로 정재파의 골에서 미세 녹조가 결집 되는 것을 관찰할 수 있었다. 이로서 본 연구의 유동장과 초음파 정재파에 대한 모델링이 미세 녹조의 결집에 대한 메카니즘을 잘 구현하는 것을 알 수 있다. 이러한 것을 이용하여 초음파 조사에 의한 미세 녹조 응집 장치의 설계에 이용할 수 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 연구 결과입니다.

## References

1. Neelma Munir et. al, "Harvesting and processing of microalgae biomass fraction for biodiesel production (A Review)", Sci, Tech. and Dev., Vol. 32, No. 3, 235-243, (2013).
2. John J. Milledge, Sonia Heaven, "A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production", Rev Environ Sci Biotechnol, Vol. 12, 165-178, (2013).
3. Jae-Yon Lee, et. al., "Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae", Bioresource Technology, Vol. 101, 75-77, (2010).
4. S.V. Patankar, "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", 126-131, (1980).
5. B.R. Munson, et al., "*Fluid Mechanics*", 329-416, (2013).
6. J.J. Harkes, et al., "Microparticle manipulation in millimetre scale ultrasonic standing wave chambers", Ultrasonic, Vol. 36, No. 9, 52-65, (2002).
7. B. Hosten, "Ultrasonic wave generation by time-gated microwaves", J. of Acoustic Society of America, Vol. 104, No. 2, 38-45, (1998).
8. L. Zou, et. al., "Experimental investigation of an in-duct orifice with bias flow under medium and high level acoustic excitation", Int. Journal of Spray and Combustion Dynamics, Vol. 6, No. 3, 267-292, (2014).