

초음파 압력장에서 미세조류 응집 거동에 관한 비정상상태 수치해석 연구

하지수*[†] · 심성훈** · 정상현**

계명대학교 기계자동차공학과*, 한국기계연구원**

(2017년 1월 29일 접수, 2017년 9월 29일 수정, 2017년 10월 2일 채택)

A numerical study on the unsteady agglomeration behavior of algae in the ultrasonic wave pressure field

Ji Soo Ha*[†], Sung Hun Shim**, Sang Hyun Jung**

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University*,
Korea Institute of Machinery and Materials**

(Received 29 January 2017, Revised 29 September 2017, Accepted 2 October 2017)

요 약

미세조류를 바이오 연료로 전환하여 이용하기 위해서는 미세조류의 배양, 응집 수거, 바이오 지질 추출, 에너지 전환 등 여러 공정을 거친다. 각 부분 공정 마다 필요한 비용이 발생하며 이러한 비용을 합산하여 미세조류의 에너지화로의 생산 단가가 만들어진다. 미세조류의 생산비용은 기존의 바이오 연료에 비하여 아직 높은 수준이다. 각 공정에서 생산 비용을 저감하는 것이 미세조류의 바이오 연료로서 가격 경쟁력을 높이는 것이다. 미세조류의 응집 수거는 미세조류가 물과 유사한 밀도로 물에서 분리하기가 어려운 물질이기 때문에 저비용으로 미세조류를 응집하고 수거하는 기술이 필요하다. 미세조류의 응집과 수거를 위해 초음파를 이용하는 공정은 기존 공정에 비하여 환경 위해 요소가 거의 없으며 저비용 고효율의 공정으로써 연구가 필요한 분야이다.

본 연구는 미세조류를 응집 수거하는 방법으로 초음파를 조사할 때 일어나는 유동과 미세조류 거동에 대한 메카니즘을 수치해석을 통해 규명하고자 수행 하였다. 이를 위해 미세조류가 포함된 유체를 배관에 흐를 때 초음파 압력장에서 미세조류가 응집이 일어나는 현상을 비정상상태 유동해석으로 시간 변화에 따라 속도, 압력, 미세조류의 농도 변화를 관찰하여 초음파를 이용한 미세조류 응집에 대한 최적 설계의 토대를 정립하는 것을 목적으로 수행하였다.

주요어 : 미세조류, 초음파, 정재파, 비정상상태 유동 해석, 응집

Abstract - For the bio-fuel conversion of algae, several processes are needed including cultivating, agglomeration, extracting and conversion to the bio- fuel. The production cost for each process makes the total production cost of algae bio- fuel conversion. The production cost of algae bio-fuel has still higher than that of the other commercial bio-fuel. The reduction of production cost for each process enables the competitive price as a bio-fuel. It is difficult to separate the algae from water because of the similar magnitude of density each other. The agglomeration and extracting of algae 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 elucidation of algae behavior in the water with the ultrasonics wave. For this purpose, the unsteady computational fluid dynamic analysis has been conducted in the ultrasonic pressure field. The velocity, pressure and algae concentration changes with time have been analysed to clarify the mechanism of algae separation by ultrasonic wave.

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

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-53-580-5919 E-mail : jisooaha@kmu.ac.kr

1. 서론

현재 생산되고 있는 바이오연료의 1세대인 곡물류를 이용한 연료로 향후 기후변화로 인한 식량생산의 악화로 더 이상의 채산성을 기대하기는 어렵게 될 전망이다. 이에 비해 미세조류는 증식속도가 기존 원료 식물군에 비해 10-20배 빠르며, 곡물과 같이 타 이용 분야와 충돌하지 않으며, 지질의 함유율 등 연료로서 가진 장점으로 인하여 2030년대에 상업화의 높은 가능성을 가진 제3세대 에너지원으로 각광받고 있다. 녹조류는 자중의 60%에 근접하는 지질을 함유하고 있으며, 다른 바이오 원료에 비하여 연간 단위 면적당 50배 이상의 지질을 추출할 수 있음. 팜유의 경우 635gal/acre/year 이나 미세조류의 경우 20000gal/acre/year 약 50배 많고, 녹조의 종류에 따라서는 최고 100000 gal/acre/year 의 연료 생산이 가능하며 이는 일반 팜유에 비하여 역 150배 이상의 수율을 가지므로 녹조는 매우 효율적인 바이오 원료이다.

전 세계적으로 미세조류 바이오연료 연구는 미국을 대표주자로, 네덜란드, 독일, 프랑스 등 유럽 각지, 호주, 뉴질랜드, 중국, 일본, 대만 등에서 많이 하고 있다¹⁻³⁾. 특히 일본은 30년 전 미세조류 연구를 시작했다가 중단했는데, 최근 신에너지 및 산업기술개발기구(NEDO) 프로그램을 통해 다시 관련 연구가 활기를 띠고 있다. 또 중국은 은퇴한 해외 연구자나 교포 과학자를 유치해 미세조류를 연구하기 위한 대규모 단지를 곳곳에

조성하고 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 초음파¹⁶⁻⁸⁾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. 최근에는 초음파를 이용한 미세조류 응집에 관한 연구로 정상상태에서의 응집 메커니즘에 관한 연구도 이루어졌다⁹⁾.

본 연구는 미세조류 응집에 관한 초음파 효과의 수치해석에서 정상상태 연구에 이어 초음파 압력장이 있는 경우에 시간 변화에 따라 미세조류의 응집 거동이 어떻게 이루어지고 있는지에 대하여 수치해석을 통해 규명함으로써 초음파를 이용한 미세조류 응집에 메커니즘을 정립하는 것을 목적으로 하여 수행하였다.

2. 수치해석 방법

초음파 압력장 하에서 미세조류의 응집 거동을 살펴 보기 위하여 실험실 규모의 초음파 응집 장치에서 미

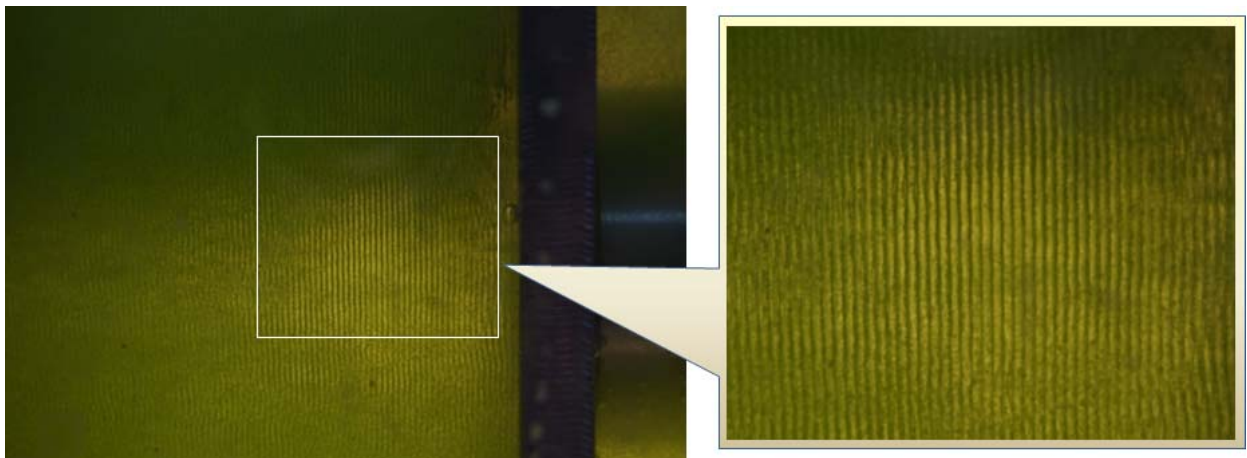


Fig. 1. Photograph of algae agglomeration with the ultrasonic standing wave

세조류의 응집을 확인하였다. Fig. 1에 초음파 압력장이 있을 때 미세조류가 정재파 압력 분포에 의하여 응집되는 것을 관찰한 사진을 나타내었다. 미세 녹조가 담긴 관의 양쪽 벽면에서 초음파를 조사하면 관의 내부에 정재파(Standing Wave)가 발생하고 정재파의 골에서 흘러 들어오는 미세 녹조가 쌓여서 응집되는 것을 관찰할 수 있다.

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

Fig. 1의 응집 실험에 사용한 실험 장치 형상의 관내에 대한 유동 수치해석을 위해 비정상상태 2차원 유체역학 지배방정식을 아래에 나타내었다.

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

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

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

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

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

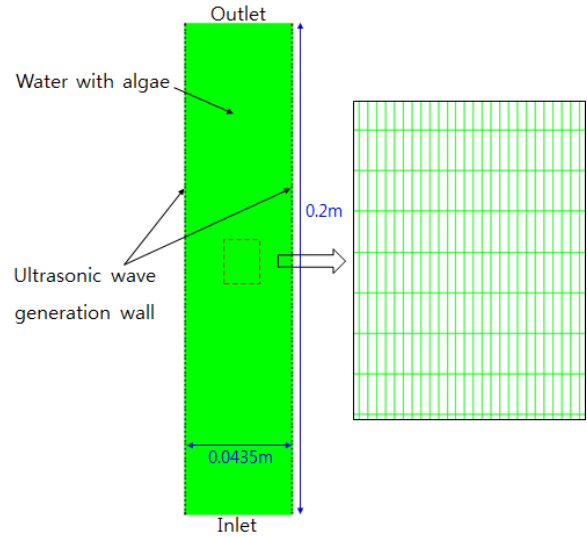


Fig. 2. Computational modeling for algae agglomeration analysis

여기서 S_{amp} 는 S_{wave} 의 진폭이며 파장 λ 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(λ), 주파수(f)의 관계식이

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

이므로 파장은 $\lambda = 1.383 \times 10^{-3} m$ 이다. 관의 폭 1이 0.0435m이므로 관 수평 방향으로 정재파의 골이 약 30개 형성될 것으로 예측할 수 있다. S_{amp} 는 초음파 발생기의 파워에 비례하며 본 연구의 수치해석에서는 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 0.01m/s의 속도로 유입되고 출구압력경계에서 나가는 것으로 하였다. 유입속도를 매우 작게 한 것은 횡 방향의 미세 녹조의 거동을 잘 관찰하기 위함이다. 미세녹조의 유입량은 0.01kg/s로 하였다. 본 연구에서 사용한 전산유체역학 해석 프로그램은 SIMPLE 알고리즘^[4]을 이용하는 상용 해석 코드인 Fluent ver. 14를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 시간 변화가 있는 비정상상태에서 관내에 초음파에 의한 정재파 압력장에서 미세녹조의 거동을 살펴보는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 전산유체 해석에서 시간 간격을 0.5초로 하여 해석을 수행하였다. 초음파의 주파수가 1MHz인데 이는 주기가 1×10^{-6} 초이다. 시간 간격 0.5초는 초음파 주기에 비하여 매우 큰 값인데 초음파 한주기 동안의 미세 녹조의 응집 거동을 살펴보는 것 보다 초음파 압력장은 짧은 시간 이내에 정재파를 형성하고 관내에 미세 녹조가 유입되어 응집이 일어나는 것은 초음파 한 주기 동안에 이루어지는 것이 아니라 초음파 압력장하에서 미세녹조가 유입이 되어 관내를 지나가면서 초음파 주기보다 긴 시간에 응집이 일어나는 것으로 판단되어 시간간격을 0.5초로 하였다.

Fig. 3에 초음파 압력장이 있는 경우에 관내에서 수평방향으로의 압력 변화를 나타내었다. Fig. 3의 결과는 비정상상태 해석의 결과가 아니라 정상상태, 즉 시간 변화가 없고 미세녹조가 흐르지 않을 경우의 해석 결과이다. 이는 J.S. Ha^[9]의 연구 결과에서 도출된 결과이며 본 연구의 비정상상태 해석에서도 적용되는 정재파 압력 분포를 보여주기 위해서 나타내었다. 정재파 압력 분포는 앞 절의 수치해석 방법에서 언급한 바

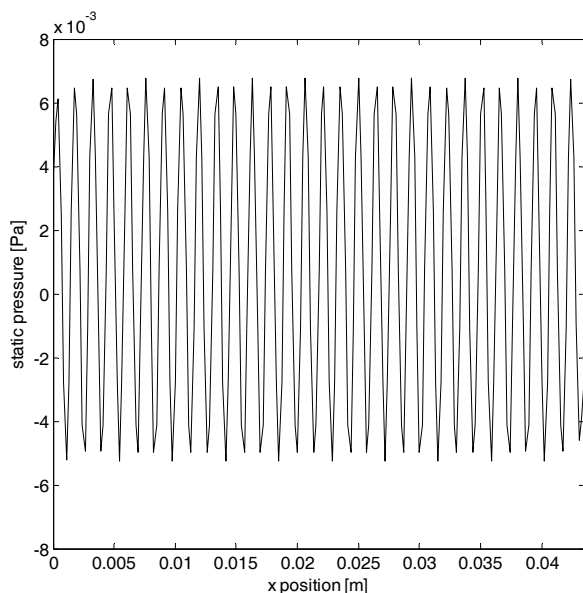


Fig. 3. Static pressure distribution with the ultrasonic standing wave along the horizontal axis (x:0~0.435m, y=0.1m)

와 같이 x 방향 운동량 방정식에 생성항으로 S_{wave} 를 식 (4)와 같이 적용하였기에 나타나는 결과이다.

Fig.3과 같은 정재파 압력장에서 미세녹조를 유입할 때의 속도분포 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 수치해석 방법에서 언급하였듯이 비정상상태 해석에서 시간간격은 $dt=0.5$ 초이다. Fig. 4에는 2.5초 간격으로 속도분포를 나타내었다. Fig. 4를 살펴보면 유입 시작 후 약 20초에 유동 출구에 도달하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 유입속도가 0.01m/s이고 관의 길이가 0.2m이므로 0.2m에 도달하는 시간은 20초임으로 유동 해석에서 나타나는 유동 출구 도달 시간이 타당하다는 것을 보여주고 있다. 미세녹조의 존재로 말미암아 유입 초기부터 유속의 분포는 유동 교란이 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 교란은 20초일 때의 속도 분포에서 살펴보면 관 폭의 높이까지 교란되다가 그 이후에 다소 교란 정도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

초음파 압력장에서 미세녹조가 흐를 때 시간 변화에 따른 압력 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 미세녹조가 없고 정상상태 해석에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 $y=0.1$ m 위치에서 삼각함수와 같은 정재파 압력 변화를 관찰할 수 있는데 미세녹조가 흐를 경우, 미세녹조가 통과하기 전에는 압력 변화가 정재파와 같은 분포를 보여 주고 있지만 미세 녹조가 통과하면 미세녹조의 교란으로 삼각함수 형태의 정재파 분포가 파괴되는 것을 알 수 있다.

초음파 압력장에서 미세녹조가 흐를 경우 삼각함수 형태의 정재파 분포는 교란되지만 미세 녹조의 응집에는 어떠한가를 Fig. 6에 미세녹조의 농도 분포에서 관찰하기로 한다. 미세녹조의 농도는 유입구 초기에 균일한 농도 분포로 들어온다. 응집 배관에 초음파에 의한 정재파 압력장이 형성 되어 있어서 2.5초 이후에는 이의 영향을 받아 미세녹조의 농도가 응집이 시작되고 있음을 알 수 있다. 미세녹조가 배관의 끝부분에 도달하는 20초에서 미세녹조 농도 분포를 보면 속도 분포에서 관찰한 것과 같이 유입구에서 배관의 관 폭 높이 정도 이후에는 초음파 압력장의 영향을 받아 미세녹조의 응집이 정재파 형태로 일어나는 것을 관찰할 수 있다.

배관의 중간 부분인 $y=0.1$ m 위치에서 수평방향으로의 속도, 압력 및 농도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 속도 분포(Fig. 7(a))를 보면 미세녹조의 영향으로 일반적으로 예상되는 배관내의 속도 분포인 가운데 부분에서 가장 큰 속도 분포를 가지는 것과 다르게 속도 분포가 다소 교란이 있는 것을 확인할 수 있다. 압력분포

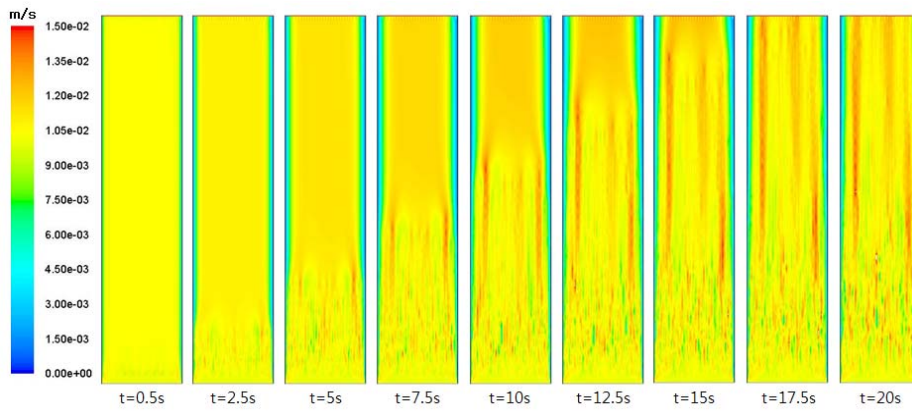


Fig. 4. Velocity contours at several time steps

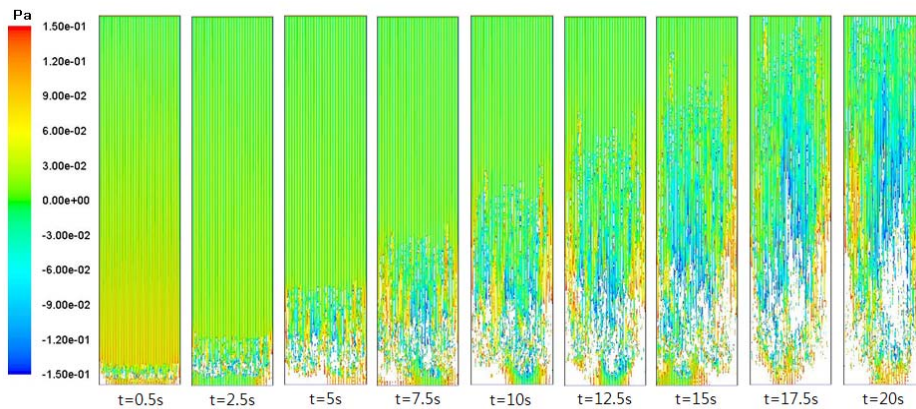


Fig. 5. Static pressure contours at several time steps

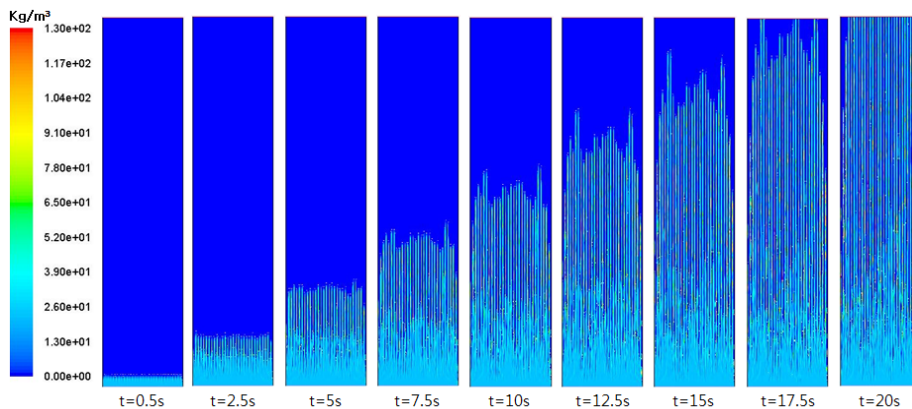


Fig. 6. Algae concentration contours at several time steps

(Fig 7(b))를 보면 Fig. 3에서와 같이 삼각함수와 같은 정재파 압력분포가 아니라 미세조류의 유입에 따라 양의 방향으로 크게 증가하거나 감소하는 현상도 관찰된다. 전체적으로는 초음파에 의한 정재파 압력변화 양

상을 보여주고 있다. 미세조류의 분포(Fig. 7(c))를 보면 Fig. 6에서 관찰한 것과 같이 초음파의 영향으로 정재파 압력 변화에 따라 미세조류가 응집이 일어나는 농도 분포를 잘 보여주고 있다.

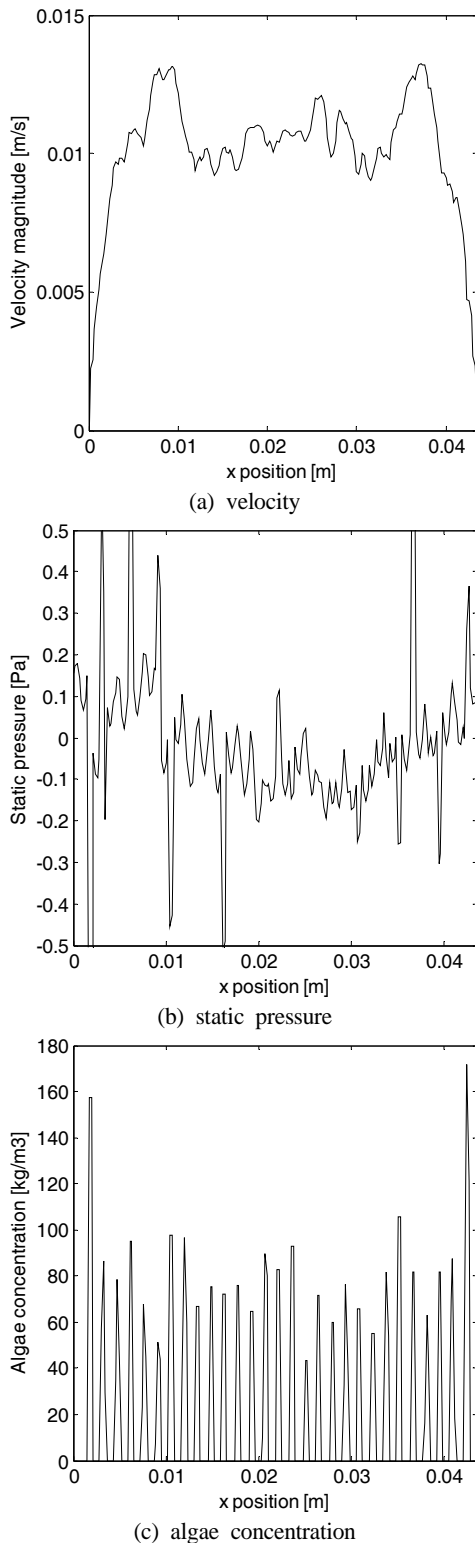


Fig. 7. Velocity, static pressure and algae concentration distribution along the horizontal axis at $y=0.1\text{m}$ and 20sec after algae injection starting time

4. 결론

초음파 압력장이 있는 배관에서 정재파 압력장의 영향을 받아 미세녹조가 응집되는 현상을 규명하기 위해 연구를 수행하였다. 이를 위해 비정상상태 유동해석을 수행하였으며 시간 변화에 따른 유속, 압력, 미세녹조의 농도의 분포 변화를 관찰하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

미세녹조가 유입되지 않을 때는 배관 내에는 초음파의 영향으로 삼각함수 형태의 정재파 압력장이 형성되었다. 미세녹조가 유입되면 속도 분포는 시간 변화에 따라 미세녹조의 유입으로 교란이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 유입속도에서는 20초 지나면서 유입된 물과 미세녹조가 배관 출구에 도달하였고 미세녹조의 유입구 부근 교란은 배관 폭 높이까지 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.

미세녹조가 유입되면 속도 분포에서와 같이 압력 분포도 미세녹조의 영향으로 교란이 일어나서 미세녹조가 지나가지 않는 곳은 정재파 압력장이 유지되지만 미세녹조가 지나가면 정재파 압력장이 교란되어 나타났다. 정재파 형태는 아니지만 골과 마루 형태는 유지하는 것을 확인하였다.

미세녹조 농도 분포는 유입구 초기에는 균일한 농도 분포를 유지하다가 배관 폭 높이가 이후에는 초음파 압력장에서 골과 마루가 형성되는 것의 영향을 받아서 미세녹조가 응집이 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 연구 결과입니다.

Reference

1. Neelma Munir et. al., 2013, Harvesting and processing of microalgae biomass fraction for bio-diesel production (A Review), Sci, Tech. and Dev., Vol. 32, No. 3, pp. 235-243
2. John J. Milledge, Sonia Heaven, 2013, A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production, Rev Environ Sci Biotechnol, Vol. 12, pp. 165-178

3. Jae-Yon Lee, et. al., 2010, Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae, *Bioresource Technology*, Vol. 101, pp. 75-77
4. S.V. Patankar, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, pp. 126-131
5. B.R. Munson, et. al., 2013, *Fluid Mechanics*, pp. 329-416
6. J.J. Harkes, et al., 2002, Microparticle manipulation in millimetre scale ultrasonic standing wave chambers, *Ultrasonic*, Vol. 36, No. 9, pp. 52-65
7. B. Hosten, 1998, Ultrasonic wave generation by time-gated microwaves, *J. of Acoustic Society of America*, Vol. 104, No. 2, pp. 38-45
8. L. Zou, et. al., 2014, 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, pp. 267-292
9. Ji Soo Ha, et. al., 2016, A numerical study on the agglomeration of algae by the ultrasonic wave, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 23-28