



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 2월
석사학위 논문

음향트래핑을 이용한 미세조류 분리에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

김성복

음향트래핑을 이용한 미세조류 분리에 관한 연구

A study on microalgae separation using acoustic trapping

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

김성복

음향트래핑을 이용한 미세조류 분리에 관한 연구

지도교수 정 상 화

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2014년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 성 복

김성복의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 규 태 印

위 원 조선대학교 교수 장 완 식 印

위 원 조선대학교 교수 정 상 화 印

2014년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	IV
LIST OF FIGURES	V
NOMENCLATURE	VII
ABSTRACT	IX
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 동향	4
제 3 절 연구 내용 및 방법	5
제 2 장 음향트래핑을 이용한 미세조류 분리	7
제 1 절 초음파를 이용한 미세조류 제어	7
1. 음향트래핑의 이론	7
2. 음향트래핑의 미세조류 분리	11
제 2 절 미세조류 분리 공진기 설계	13
1. 다층 공진 구조 설계	13
2. 가진 주파수 분석	14
3. 미세조류 분리 공정 설계	16
제 3 절 음향트래핑을 이용한 미세조류 분리	19
1. 미세조류 크기에 따른 분리	19
2. 입력전원 변화에 따른 분리	21

3. 미세조류 농도에 따른 분리	22
4. 유량변화에 따른 분리	23
제 3 장 실험계획법을 이용한 분리효율 분석	25
제 1 절 다윈배치법을 통한 미세조류 분리효율 분석	25
1. 다윈배치법을 통한 실험설계	25
2. 다윈배치법 분석	26
3. 다윈배치법을 통한 예측식의 구성	28
4. 다윈배치법의 추정과 검정	30
제 2 절 다중회귀모형을 통한 미세조류 분리효율 분석	32
1. 다중회귀모형을 통한 실험설계	32
2. 다중회귀모형을 통한 예측식의 구성	36
3. 다중회귀모형 분석	37
4. 다중회귀모형의 추정과 검정	38
제 3 절 공간 모델링에 따른 미세조류 분리 측정	40
1. 구분적 선형 상태 공간 모델링	40
2. 미세조류 분리효율 데이터 비교	43
제 4 장 초음파 분리 공진기 scale-up	46
제 5 장 결 론	49

참 고 문 헌 51

LIST OF TABLES

Table 1-1	Comparison of major energy specific resource	1
Table 1-2	Microalgae investment and development trends of major company	4
Table 2-1	Material properties	13
Table 2-2	Cell size of microalgae species	20
Table 3-1	Levels of parameters in the composite design	25
Table 3-2	Design matrices and test results	27
Table 3-3	ANOVA for the coefficients of plural array	27
Table 3-4	List of main effect and interaction for plural array	28
Table 3-5	Measurement efficiency of three sigma test	29
Table 3-6	Prediction efficiency of three sigma test	29
Table 3-7	Results of each test using the orthogonal array	33
Table 3-8	ANOVA analysis results for multiple regression model	37
Table 3-9	Measured values of experimental design	43

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1	A typical standing wave	8
Fig. 2-2	A typical traveling wave	8
Fig. 2-3	Progression of suspended particle aggregation in ultrasonic wave	10
Fig. 2-4	Mimetic diagram of particle aggregation by standing wave	12
Fig. 2-5	Forces acting on the particle	12
Fig. 2-6	Schematic diagram of ultrasonic separation chamber	13
Fig. 2-7	Acoustic impedance frequency curves of composite resonator	14
Fig. 2-8	Pressure distribution of multistory resonator structure	15
Fig. 2-9	Standing wave of suspension container	15
Fig. 2-10	Schematic diagram of perfusion cell culture using the ultrasonic wave	16
Fig. 2-11	Schematic diagram of microalgae separation using the ultrasonic wave	17
Fig. 2-12	Schematic diagram of ultrasonic separation system	18
Fig. 2-13	Radiation potential according to particle size	19
Fig. 2-14	Separation efficiency of microalgae species	20
Fig. 2-15	Separation efficiency according to acoustic power	21
Fig. 2-16	Separation efficiency according to cell concentration	22
Fig. 2-17	Flow rate of inlet and outlet pump	23
Fig. 2-18	Separation efficiency according to inlet-outlet pump speed	24
Fig. 3-1	Parity plot of measured efficiency vs. predicted efficiency by plural array before the revision	30

Fig. 3-2 Parity plot of measured efficiency vs. predicted efficiency by plural array after the revision 31

Fig. 3-3 Parity plot of measured efficiency vs. predicted efficiency by multiple regression analysis 39

Fig. 3-4 Separation model using three compartments, one inlet and tow outlets for filtrate and concentrate flow 40

Fig. 3-5 Cubic equation fitting of optical density and dry weight 44

Fig. 3-6 Comparison between experiment data and state equation data 45

Fig. 3-7 Comparison of separation efficiency : optical density, dry weight, state equation 45

Fig. 4-1 Pressure distribution of ultrasonic separation resonator scale-up model 47

Fig. 4-2 Pressure distribution of water layer in resonator scale-up model 47

Fig. 4-3 Particles movement in ultrasonic region 48

NOMENCLATURE

F_z	Axial component of the primary radiation force
F_P	Primary radiation force
F_S	Secondary radiation force
F_B	Bernoulli force
F_{pump}	Pump up force
F_b	Buoyancy
F_g	Gravity force
F_d	Drag force
V_0	Static particle volume
V_i	Volume of compartment resonator
E_{ac}	Acoustic energy density
κ_l	Wave number of the compression wave
G_ρ	Density acoustic contrast factors
G_β	Compressibility acoustic contrast factors
z	Axial distance from a pressure node
k	Unit vector in the axial direction
η	Viscosity of the suspending phase
r_c	Critical radius
v_w	Upward fluid velocity
v_{out}	Pump out velocity
v_{in}	Pump in velocity
ρ	Mass density
ρ_c	Density of cell

ρ_w	Density of water
g	Gravitational acceleration
Q_{out}	Outlet flow
Q_{in}	Inlet flow
Q_i	Flow rate in compartment resonator
$\hat{\Phi}_p$	Amplitudes of the progressive wave field's velocity potential
$\hat{\Phi}_s$	Amplitudes of the standing wave field's velocity potential
K_p	Acoustic contrast factor of the progressive wave
K_s	Acoustic contrast factor of the standing wave
λ_0	Wavelength
a	Particle radius
Y	Predicted response
X_i	Variables are the coded values of the parameters
b_0	Intercept term
b_i	Coefficients of the main effect for each variable
$b_{ij(i \neq j)}$	Coefficients of the interaction effect between the parameters
b_{ii}	Values of the square effects of the different parameters
S_i	Particle concentration in compartment resonator
α	Digital on/off switch parameter

ABSTRACT

A study on microalgae separation using acoustic trapping

Kim Sung Bok

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,
Graduate School of Chosun University

The amount of energy resources of oil, coal, natural gas used in the world was geometrically increased by industry development. Alternative energy development is studied in order to solve energy shortage phenomena. Microalgae as future energy and resource were received worldwide attention. Microalgae produced the industrial materials and reduced carbon dioxide through photosynthesis. Not only mass culture system but also harvest of large quantities is required to microalgae resources. The ultrasonic wave is sometimes used to separate microalgae.

In this study design and sound field analysis was carried out in order to accomplish ultrasonic wave separation processes. Resonator design was composed of a multilayer resonant structure. Excitation frequency was analysed by the sound field and waveform in the resonator was predicted. Characteristics of microalgae in the acoustic trapping were investigated by experiments. The experiment was conducted according to the size of particle, input power,

microalgae concentration, change of flow rate ratio. Three species of microalgae was experimented and the small particle size was the advantage of separation. The separation efficiency was increased at higher input power but thermal energy loss considered according to input power increases. The separation efficiency was increased at higher microalgae concentration but separation efficiency was decreased above a certain concentration. Flow rate was a great influence on the separation efficiency and the slow flow was advantage of separation efficiency.

In order to predict ultrasonic separation efficiency on the basis of experimental results, the statistical method and the spatial modeling were used. The plural array and the multiple regression model were used as the statistical method. Accuracy of the prediction equation was decided by estimation and test. The spatial modeling was set up an state equation for dynamic characteristics of ultrasonic wave separation dividing the resonator by three.

Ultrasonic separation scale-up resonator was designed to increase the processing capacity. Separation capability of microalgae was predicted through the sound field analysis for resonator design. The microalgae separation technology using ultrasonic wave according to experiment results and analysis results could be applied for the bulk harvest process.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

전 세계적으로 사용되는 에너지원인 석유, 석탄, 천연가스의 사용량은 산업이 발전함에 따라 기하급수적으로 증가하게 되었다. 이로 인하여 발생하는 이산화탄소가 이상기후현상의 발생원인으로 지목되고 있다^[1]. 주 에너지원인 화석연료의 고갈로 발생하는 에너지부족현상을 해결하기 위하여 대체에너지원을 개발하려는 연구가 수행되고 있고, 미래에너지 및 자원으로 미세조류가 관심을 받고 있다. 미세조류는 일반적으로 식물성 플랑크톤으로 분류하고, 광자가 영양 생물로써 광합성을 통하여 성장한다. 이 같은 특성으로 미세조류는 에너지 및 산업소재 생산, 온실가스저감이 모두 가능한 특징을 갖는 미래자원이다^[2]. Table 1-1은 주요 에너지 자원별 특징을 나타낸 것이다. 미세조류는 산업소재를 생산할 수 있으며, 광합성을 통해 성장하기 때문에 이산화탄소 저감이 가능하다. 그러나 현재 기존의 에너지원보다 경제성에서 부족하기 때문에 연구개발의 필요성이 대두되고 있다.

Table 1-1 Comparison of major energy specific resource^[3]

Division	Material industrial production	Greenhouse gas emissions	Reserve year	Economic time of guarantee
Microalgae	Possible	Low	Unlimited	2020
Oil	Possible	High	54	Present
Coal	Possible	High	112	Present
Nutral gas	Possible	Middle	64	Present
New clear power	Imposible	Low	79	Present
Light of the sun	Imposible	Low	Unlimited	2020
Wind power	Imposible	Low	Unlimited	Present

미세조류의 연구는 화학 분야, 에너지 분야, 환경 분야의 3대 분야를 중심으로 연구가 이루어질 전망이다. 화학 분야에서 미세조류는 다양한 유용물질을 생산할 수 있는 장점이 있고, 식품 분야를 중심으로 산업화가 되어있다. 그리고 바이오케미컬 및 바이오플라스틱 분야로 산업화가 확대될 전망이다. 에너지 분야에서 미세조류는 오일 생산성이 우수하기 때문에 석유계 디젤과 유사한 물성을 가진 바이오디젤을 생산할 수 있다. 환경 분야에서 미세조류의 성장 특징을 통한 이산화탄소 저감 및 폐수정화사업에 확대될 것이다^[2,3].

미세조류 배양방법은 1940년 이전에는 실험실 수준의 규모로 배양을 하였지만, 1940년대 후반에 미세조류의 옥외배양에 대한 실험이 시작되었다. 그 이후로 미세조류 대량배양방법이 연구되었다. 배양방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 처음으로 개방형 배양장치와 다음으로 밀폐형 배양장치이다^[4]. 개방형 배양장치는 인공적으로나 자연적으로 영양원 공급이 풍부하고 개방된 연못에서 배양한다. 연못의 형태는 저렴한 초기 설비투자과 운전비용으로 배양이 가능하다. 그러나 조류의 침전으로 인한 낮은 수율, 외부오염으로 인한 미세조류 생물량 및 종의 불안정성, 넓은 부지로 인해 발생하는 영양원 불균등 분포, 효과적인 빛의 전달이 되지 않는 것으로 인한 미세조류 생산성 저하 등의 문제점이 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있는 상태이다. 밀폐형 배양장치는 관형(tubular PBRs)과 판형(thin-panel PBRs)광생물반응기의 형태로 나뉜다. 밀폐형 배양장치는 빛, 기체전달, 배지의 공급 등을 효과적으로 제어하여 미세조류의 고농도 배양이 가능하다. 그리고 멸균을 통하여 오염을 방지할 수 있고, 공간에 제약을 받지 않고 설치가 가능하다. 그러나 미세조류를 장기간 배양할 때에는 미세조류가 반응기에 부착될 수 있으며 이로 인해 세척에 대한 어려움이 따를 수 있다^[5].

미세조류의 대량배양을 통하여 유용물질의 생산과정에서 해결되어야 할 과제 중 하나는 경제적인 수확방법의 개발이다. 대부분의 미세조류는 크기가 $30\mu\text{m}$ 이하이고, 배양액에서 농도가 낮으며 물의 밀도보다 약간 크기 때문에 분리하기 용이하지 않다. 미세조류의 종류 및 조류로부터 얻어질 유용물질의 용도에 따라 적합한 수확방법을 선택해야 한다^[6]. 일반적으로 배양된 조류의 수확은 막여과(membrane filtration), 응집(flocculation), 원심분리(centrifugation) 등의 방법이 있다. 그러나 기존의 수확방법은 대량수확에 어려움이 있다. 막여과는 미세조류의 크기가 작아 오염과 막히는 문제점이 발생하기 때문에 대량수확에 적합하지 못하며, 응집방법은

응집제와 기술자에 대한 비용이 많이 들고 넓은 공간을 필요로 하기 때문에 대량 수확이 어렵다. 또한 원심분리는 고속의 움직임으로 발생하는 기계적 문제와 높은 작동비용의 문제는 연속적으로 대량수확을 하는데 약점으로 작용된다^[7,8]. 미세조류의 대량수확은 낮은 비용을 들여 연속적으로 미세조류를 분리할 수 있어야하며, 이를 만족하는 방법으로 음향트래핑을 이용한 분리장치를 적용할 수 있다.

본 연구에서는 미세조류의 대량수확에 적용시킬 수 있는 방법으로 음향트래핑을 이용한 분리실험을 수행하였다. 음향트래핑 장치는 기존의 분리장치들 보다 소형제작이 가능하고 소모품을 필요로 하지 않는다. 음향트래핑은 유동중의 미세입자의 움직임을 제어할 수 있기 때문에 연속적으로 미세조류 분리가 가능하다. 음향트래핑을 이용한 미세조류 분리의 성능은 실험과 통계적 분석을 통하여 파악하였다.

제 2 절 연구 동향

전 세계는 미래에너지 산업으로 우주 태양열 발전, 고성능 차량용 전지, 유틸리티 저장기술, 탄소 포집 및 저장기술, 조류를 이용한 차세대 바이오연료 기술의 개발이 진척이 된다면 에너지 상황이 크게 변하게 될 것이라고 예측하고 있다^[5,6]. 조류를 이용한 차세대 바이오연료는 미세조류 개량, 고밀도 대량 배양기술, 대량수확 기술, 물질전환기술 등 핵심기술 개발이 필요하다. 미국에서는 100개 이상의 미세조류 관련기업 및 연구기관이 활동하고 있으며, 유럽과 일본 등은 기업을 중심으로 미세조류에 대한 기술개발 및 산업화를 진행 중이다^[2,3]. Table 1-2를 보면 미세조류 개량, 대량배양기술, 물질전환기술은 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 미세조류 개량과 대량배양기술, 물질전환기술은 연구가 많이 진행되어 있는 반면 일반적으로 이용되고 있는 수확기술은 대량으로 배양된 미세조류를 처리하기 곤란하다. 그렇기 때문에 미세조류 대량수확에 적절한 기술 연구 및 개발이 필요하다. 미세조류 대량수확방법의 적절한 기술로 초음파를 적용할 수 있다. 초음파의 음향 방사력(acoustic radiation force)은 입자를 움직여 액체와 분리시키며, 다량의 입자를 연속적으로 처리할 수 있는 장점이 있다^[9].

Table 1-2 Microalgae investment and development trends of major company^[3]

Organization	Nation	Year	Collaborating company	Main substance
Exxonmobil	USA	2009	Synthetic genomics	biofuels development
BP	UK	2009	Marktech	biofuels development
Basf	Germany	2010	Solix	fine chemistry products development
Unilever	UK	2010	Solazyme	soap, hygienic goods
Hitachi plant	Japan	2010	Euglena	development of microalgae-based jet fuel
Monsanto	USA	2011	Sapphire energy	useful microalgae gene discovery

제 3 절 연구 내용 및 방법

미세조류의 대량수확을 하기위한 방안으로 초음파를 이용한 입자분리기술을 사용하였다. 초음파로 발생하는 음향 방사력은 미세한 입자를 움직일 수 있으며, 유체의 흐름 속에서 사용할 수 있기 때문에 연속적인 처리가 가능하다. 음원의 음향 방사 방향으로의 운동은 미세조류가 방사 음압에 의하여 움직이는 것을 의미한다^[10]. 초음파 분리실험은 유체의 흐름 속에서 미세조류를 모이게 하고, 미세조류의 움직임을 연구함으로써 분리효율을 알아보았다.

초음파의 음향 방사력을 이용한 입자제어기술은 전자기적, 광학적 특성보다 입자 크기, 입자밀도, 입자체적탄성률(particle bulk modulus) 등의 역학적 특성을 고려해야 한다. 음향장의 제어기법으로 대량의 입자를 동시에 처리할 수 있으며, 입자에 미치는 반응속도가 빠르다. 전자기 또는 광학적 방식일 때도 간섭이 발생하지 않기 때문에 기술을 독립적으로 응용할 수 있다. 입자제어기술은 입자의 분리, 포집, 집속, 정제, 여과, 응집 등 입자의 거동을 제어할 수 있는 기술이다^[11]. 대표적인 응용 분야로 정밀 환경 측정분야, 소재 및 화학 공정분야, 반도체 제조분야, 오염방지 기술 분야, 식품 및 보건의료 분야 등 응용범위가 다양하다.

미세입자의 움직임을 제어할 때 음파의 주파수는 가청주파수(20Hz~20kHz) 이상의 대역을 사용한다^[12]. 초음파 분리공정은 가청주파수 이상의 대역을 사용하므로 소음의 유발이 적고, 장비를 소형으로 만들기에 유리하다. 입자의 제어는 공진기 내부에 정재파가 형성되어 있을 때 가능하다. 정재파는 마디(node)와 파복(antinode)이 반복적으로 형성되는 파장이며, 미세조류에 정재파를 가하면 미세입자가 수직으로 배열되게 되며 이를 제어하여 적절하게 분리한다.

본 연구에서는 초음파로 발생하는 음향 방사력에 의하여 유체의 흐름 속에서 발생하는 미세조류의 움직임 및 분리효율에 대하여 알아보았다. 미세조류의 움직임을 파악하기 위해 공진기의 벽면에 창을 만들어 초음파 작동 시 공진기 내부에서 미세조류가 수직으로 배열되는 현상을 파악하였다. 초음파를 이용한 미세조류 분리공정의 특성을 파악하여 최대로 얻을 수 있는 분리효율을 알아보았다.

이와 같은 연구의 개념과 결과를 기술하기 위하여 다음과 같은 순서로 연구 결과를 설명하였다. 2장에서는 음향트래핑을 이용한 미세조류 분리 방법을 기술하였으며 음향트래핑의 이론, 공진기 설계 및 분리 공정 설계를 다루었다. 초음파를 이

용한 미세조류 분리 특성을 파악하기 위해 여러 변수를 설정하여 분리효율 변화에 대하여 알아보았다. 3장에서는 통계적 방법인 실험계획법을 이용한 분리효율 분석을 기술하였다. 실험계획법을 통하여 여러 실험 조건에서의 분리효율 예측하였고, 이를 실험값과 비교 및 검토하여 정확성을 판단하였다. 그리고 상태방정식을 통하여 초음파 분리 공정에서 얻어지는 미세조류의 수확량을 파악하고, 계산을 통한 초음파 분리공정 효율에 대한 예측의 정확성을 판단하였다. 4장에서는 scale-up을 통한 음향 필터 개발에 관한 설계를 기술하였다.

제 2 장 음향트래핑을 이용한 미세조류 분리

제 1 절 초음파를 이용한 미세조류 제어

1. 음향트래핑의 이론

초음파는 종파(longitudinal wave)와 횡파(transverse wave)로 나눌 수 있다. 종파는 파동의 진행방향에 대해 평행하고 횡파는 파동이 진행하는 방향에 수직이다. 시간에 따른 파동의 변화에 따라 정상파(standing wave)와 진행파(traveling wave)로 나눌 수 있다. 정상파는 Fig. 2-1과 같이 진동의 마디, 마루, 골의 위치가 고정되어 제자리에서 진동하는 단순조화운동을 한다. 진행파는 Fig. 2-2와 같이 임의의 방향으로 진행하는 운동을 한다^[13]. 진행파 두 개가 서로 반대방향으로 진행하는 같은 크기의 주파수와 파동이 중첩이 되면 정상파가 된다^[14]. 정상파를 발생시키는 방법으로 두 개의 트랜스듀서를 이용하여 발생시키는 방법과 트랜스듀서와 반사판을 이용하여 발생시키는 방법이 있다. 정상파의 특성은 파가 중첩되어 나타나는 현상으로 최대압력과 최소압력의 위상차가 발생하게 된다. 정상파의 위상차에 의해 생기는 구간들은 마디와 파복으로 구분한다. 마디는 반 파장 간격으로 생기고, 파복은 마디사이의 등거리 간격으로 생긴다.

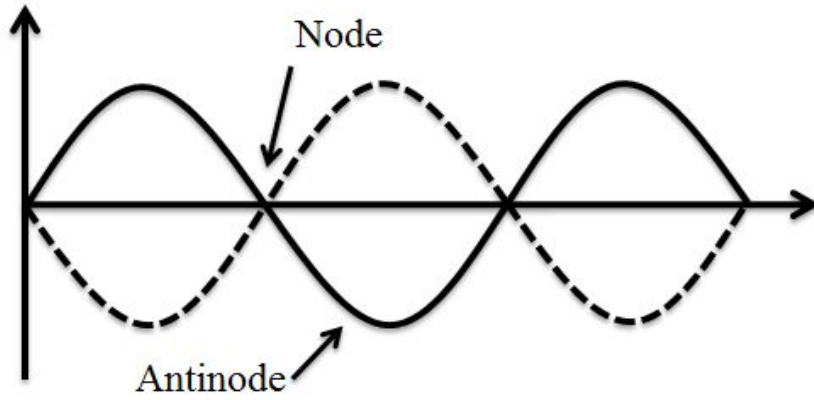


Fig. 2-1 A typical standing wave

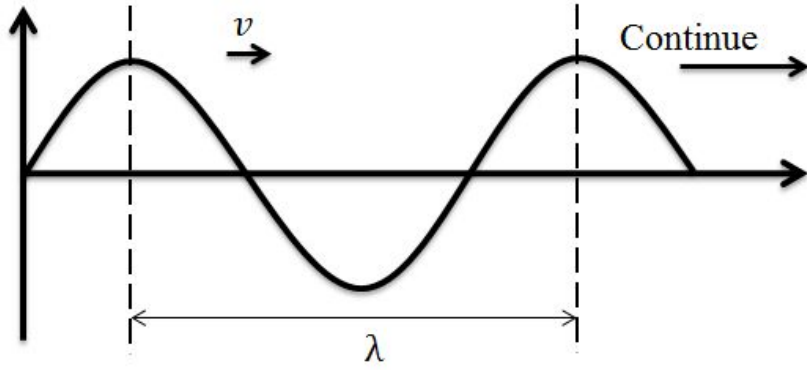


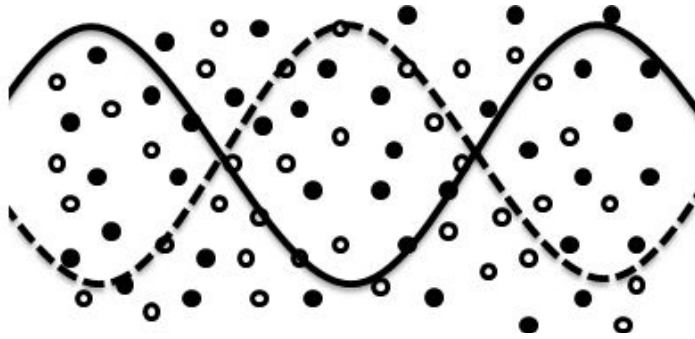
Fig. 2-2 A typical traveling wave

초음파의 힘은 파동의 영역에서 입자와의 상호작용으로 발생한다. 초음파가 발생하는 영역에서 입자들은 1차 복사력(primary radiation force)과 2차 복사력(secondary radiation force)을 받는다. 1차 복사력은 크기, 밀도, 압축성의 인자를 통하여 축 방향의 방사력을 입자에너지로 나타낼 수 있다. 식 (1)은 Gor'kov(1962)가 유체에서 발생하는 초음파의 마디와 파복에서 발생하는 입자에너지를 수식으로 표현하였다^[15]. 1차 복사력은 입자를 마디 또는 파복으로 이동시키는 힘을 갖고 있으며, Fig. 2-3 (a)에서 (b)의 형태로 만들 것이다. 미세입자의 움직임은 대비인자의 부호에 따라 미세입자가 마디로 움직일지 파복으로 움직일지 판단할 수 있다. 대비인자 G_ρ 와 G_β 가 양을 갖는 미세입자는 마디로 갈 것이고, 음을 갖는다면 미세입자는 파복으로 갈 것이다. 공진기 내부의 파장의 크기가 중요하기 때문에 압력과 속도의 크기는 축 방향으로 항상 일정하다고 가정하였다.

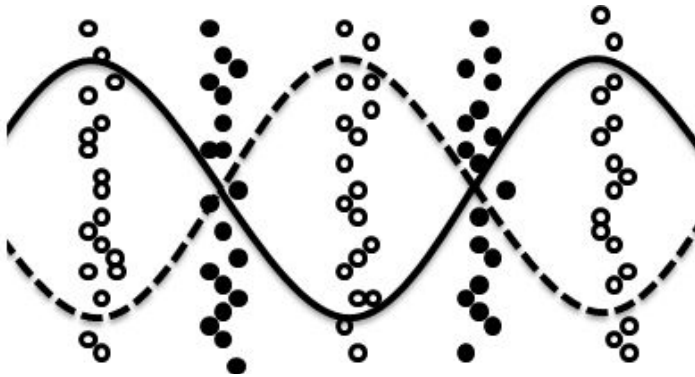
$$F_z = -V_0 E_{ac} \kappa_l (G_\rho + G_\beta) \sin(2\kappa_l z) k \quad (1)$$

여기서 V_0 는 정적입자의 크기를 나타낸다. E_{ac} 는 음향 에너지 밀도로 운동에너지와 위치에너지의 합이다. κ_l 은 종파의 파수로 $2\pi/\lambda$ 이다. G_ρ 는 밀도 대비인자이고, G_β 는 압축률 대비인자이다. z 는 압력마디의 거리이고, k 는 축방향의 단위벡터이다. 정상파는 $\sin(2\kappa_l z)$ 에 따라 공간적 의존성을 보인다^[16].

초음파의 2차 복사력은 Fig. 2-3 (c)에 나타난 것처럼 마디에 모인 입자들을 응집시키는 힘이다. 일정한 초음파 영역에서의 두 개 이상의 입자간 발생하는 2차 복사력은 압축성과 비압축성의 관계로 얻을 수 있다. 2차 복사력은 입자 간에 상호작용 힘으로 미세입자의 반경과 간격이 길어지는 것보다 파장의 길이가 길어지는 것을 피해야 한다. 입자들에 대한 상호작용은 노드평면에 일렬로 평행하는 곳에서 발생한다^[16,17]. 입자들 사이에 발생하는 상호작용은 인력과 척력으로써 정상파에 일직선상으로 발생한다. 정상파에서 입자간의 상호작용력은 음향장의 노드 또는 파복 내에 위치하는 입자들의 덩어리에서 일어난다. 상호작용력은 입자들이 가깝게 위치하고 있을 때 크게 발생한다.



(a) Particles are initially distributed in resonator



(b) Particles move to concentrate in the nodal point



(c) Particles forming clumps in the nodal point

Fig. 2-3 Progression of suspended particle aggregation in ultrasonic wave

2. 음향트래핑의 미세조류 분리

초음파의 1차 복사력과 2차 복사력으로 인해 공진기 내부에서 미세입자들은 응집하게 된다. 응집된 미세입자는 2차 복사력으로 인해 덩어리로 뭉쳐진다. 덩어리로 뭉쳐진 미세입자가 침전하게 되는데, Fig. 2-4에 나타낸 바와 같이 압력노드평면으로 모인 미세입자가 뭉치게 된다. 덩어리진 미세입자는 항력과 중력의 힘을 받게 되며 Fig. 2-5로 나타내었다. 덩어리로 뭉쳐진 미세입자가 받는 항력과 중력은 Stoke's 방정식으로 식 (2)와 식 (3)으로 정의한다^[18].

$$F_d = 6\pi\eta r_c v_w \quad (2)$$

$$F_g = \frac{4}{3}\pi r_c^3 (\rho_c - \rho_w)g \quad (3)$$

여기서 F_d 와 F_g 는 항력과 중력을 나타낸다. ρ_c 와 ρ_w 는 미세입자의 밀도와 물의 밀도이며, η 는 미세입자가 분포하는 유체의 점도이다. v_w 는 상향유속이고 g 는 중력 가속도이다. r_c 는 미세입자가 응집되어 침전하는 임계반경의 크기를 나타내며, 식 (4)로 나타낸바와 같이 계산하여 구한다.

$$r_c = \sqrt{\frac{9\eta v_w}{2(\rho_c - \rho_w)g}} \quad (4)$$

덩어리로 뭉쳐진 미세입자가 침전되려면 응집된 입자의 반경이 임계반경보다 커져 중력과 항력의 합이 커지면 침전하게 된다. 압력노드평면에 모인 미세입자가 덩어리로 뭉쳐지는 시간은 음향 방사력에 영향을 받는다. 만약, 미세입자가 음향 방사력 보다 강한 유속의 힘을 받게 된다면 초음파 영역에서 음향트래핑 현상은 발생하지 않을 것이다. 미세입자가 임계반경에 도달하는 시간은 미세입자 크기에 따라 다르며, 덩어리로 뭉쳐진 미세입자가 침전하기 위해서는 레이놀즈 수(Re)가 1보다 작아야 한다.

응집된 입자의 침전은 공진기 내부에서 중력과 항력의 합이 음향트래핑의 힘과

유속의 힘의 합보다 커야하며, 식 (5)의 조건을 만족해야 한다^[19].

$$F_P + F_S + F_B + F_{pump} + F_b < F_g + F_d \quad (5)$$

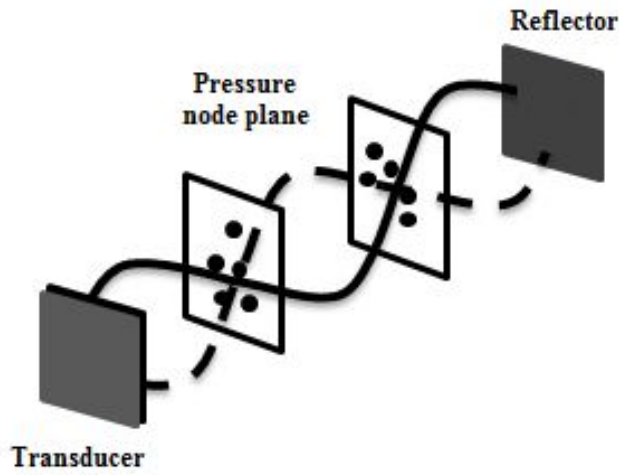


Fig. 2-4 Mimetic diagram of particle aggregation by standing wave

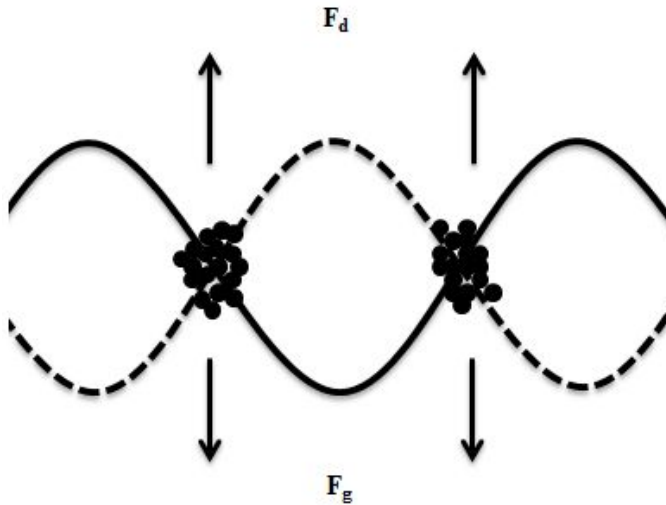


Fig. 2-5 Forces acting on the particle

제 2 절 미세조류 분리 공진기 설계

1. 다층 공진 구조 설계

유체에서 발생하는 정상파는 유체에서 노드평면 또는 파복평면에서 입자들을 응집하게 한다. 정상파는 유체흐름에서 입자를 움직이지 못하게 잡고 있거나 여과 및 응집시키는데 사용된다^[20]. 초음파 분리의 공진기 구조는 층 구조 형태로 위치하게 만들었다. 공진기의 층은 트랜스듀서, 큐벳, 유체, 반사판으로 구분한다. 공진기를 구성하는 물질의 성질은 Table 2-1에 나타내었다. 공진기는 다층공진구조로 Fig. 2-6에 나타낸바와 같이 층들을 평행하게 위치시킨다. 서로 평행하게 위치시킨 구조에서 트랜스듀서 작동 시 발생하는 파동과 반사판에서 반사되는 파동이 만나 정상파로 형성되게 해야 한다. 음향에너지는 집합층을 통해 유체층에 전달되며, 다층의 길이와 물질의 성질에 따라 정상파 형성에 영향을 준다^[21]. 다층공진구조의 반사판은 파장의 파복위치에 위치하도록 설계하였다.

Table 2-1 Material properties

Materials	PZT	Adhesive	Pyrex	Water
Density(kg/m ³)	7,500	2,000	2,226	1,000
Speed of Sound(m/s)	-	2,440	5,000	1,480

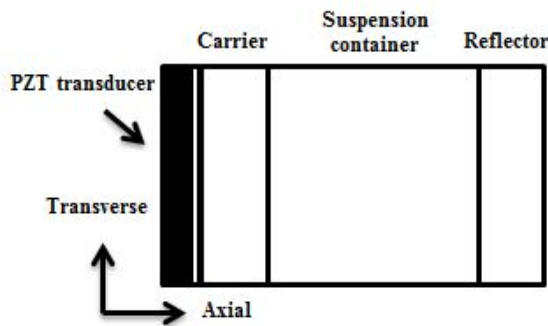


Fig. 2-6 Schematic diagram of ultrasonic separation chamber

2. 가진 주파수 분석

미세조류를 분리하기 위한 가진 주파수 대역을 분석하기 위해 COMSOL 프로그램을 이용하여 음향장해석(FDTD)을 하였다. 큐벳의 크기는 23mm×23mm×38mm로 하였으며, 반사판의 위치는 파장($\lambda \approx 700\mu\text{m}$)의 파복위치에 오도록 설계하였다. 다층공진구조에서 주파수 영역에 따른 임피던스 변화는 Fig. 2-7에 나타내었다. 임피던스는 레지스턴스와 리액턴스의 합으로 레지스턴스의 값은 0을 얻었고, 주파수에 따라 리액턴스는 실수부와 허수부로 형성되었다. 리액턴스의 실수부에서는 음압과 음속이 같은 위상을 보이며, 허수부에서는 90°의 위상차를 보인다^[22]. 임피던스의 반응성분인 리액턴스는 전기장으로 에너지를 축적하는 용량리액턴스를 의미하며, 허수부에서 가장 큰 리액턴스 값을 갖는 주파수 2.1MHz에서 실험을 하였다. 음향장해석 결과 공진기 내부에서 발생하는 저항은 일정하며 리액턴스가 주파수에 따라 영향을 받는 것을 확인하였다. 반사판에서 반사되는 파는 저항으로 인해 에너지가 손실되지만, 대부분의 에너지는 유체층으로 반사되게 된다^[23]. Fig. 2-8은 다층공진구조에서의 압력분포를 나타내었고, 유체층에서 발생하는 파장의 형태를 Fig. 2-9에 나타내었다.

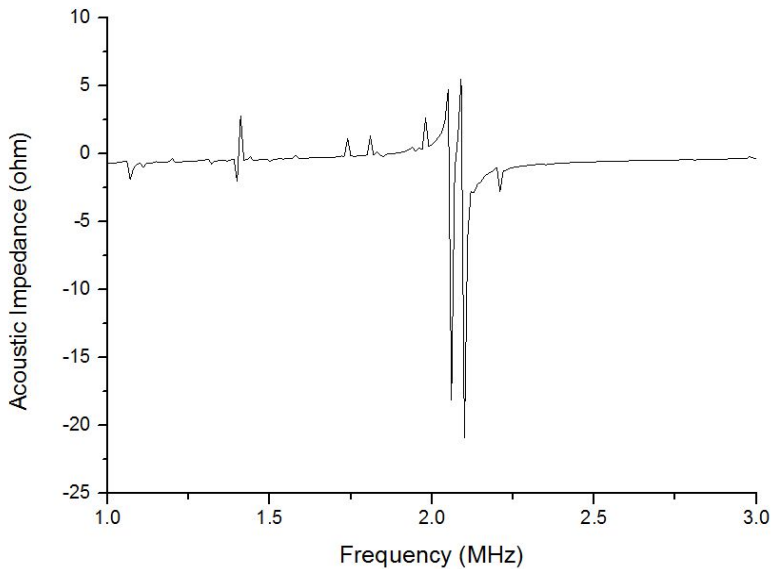


Fig. 2-7 Acoustic impedance frequency curves of composite resonator

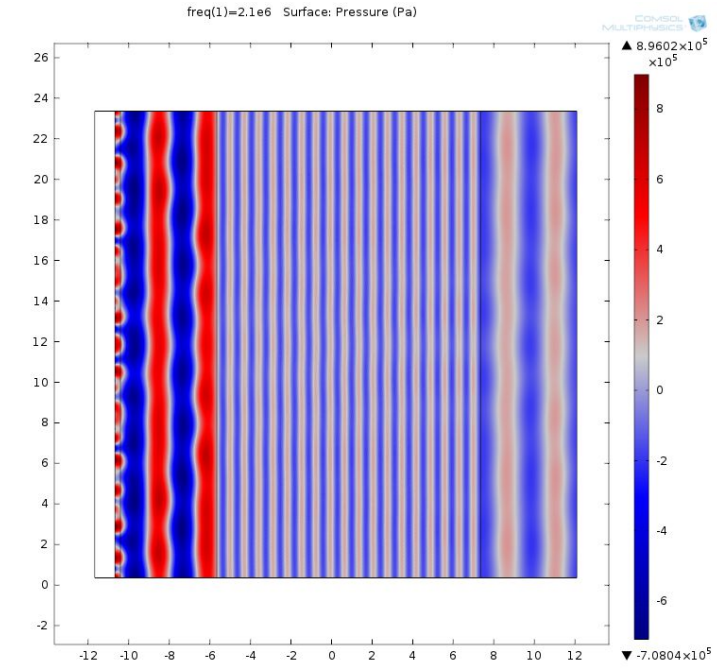


Fig. 2-8 Pressure distribution of multistory resonator structure

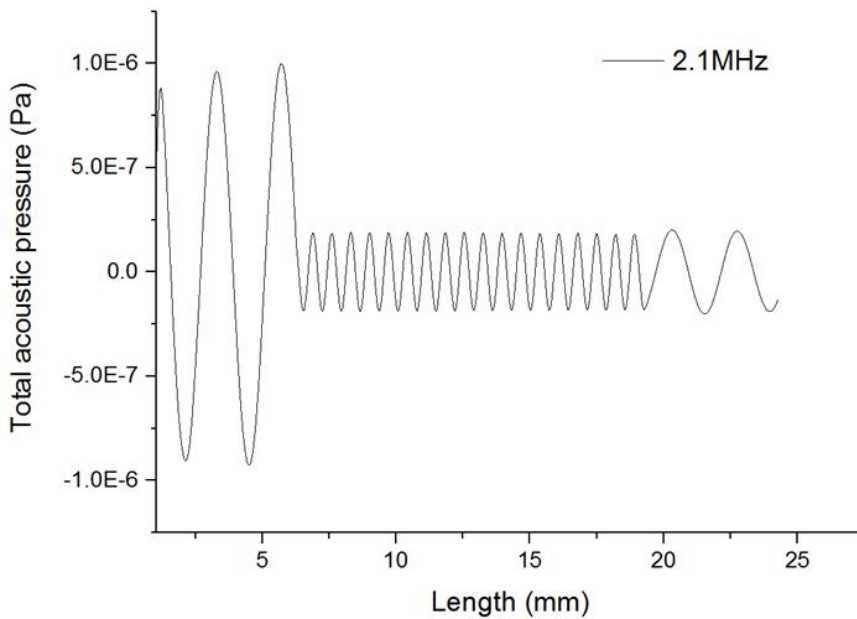


Fig. 2-9 Standing wave of suspension container

3. 미세조류 분리 공정 설계

초음파를 이용한 미세입자 분리에 관한 연구는 많이 진행되고 있으며, 초음파를 이용하여 혈액, 박테리아, 효모 등의 흐름을 조절하여 움직임을 제어하는 연구가 주로 진행되고 있다. 초음파 기술은 배양하는 종을 고농도로 배양하기 위한 기술인 관류배양으로 사용되고 있다. 이 방법은 성장한 세포들을 분리한 뒤 배양액을 교체 해주어 추가적으로 성장하게 하여 배양을 하는 방법이다. Fig. 2-10은 유체흐름방향을 다양하게 하여 사용할 수 있는 관류배양방법을 나타내었다. (a)는 초음파로 분리된 미세조류를 중간에 펌프를 이용하여 순환시키는 방식으로 배양하는 관류배양방법이고, (b)는 초음파로 분리된 미세입자를 침전시키는 방식으로 농도를 높이는 관류배양방법이다^[24]. 초음파를 이용한 미세조류 분리공정은 연속적인 유체흐름에서 미세조류를 분리하기 위하여 관류배양방법을 응용하여 Fig. 2-11에 나타난 바와 같은 방법으로 실험하였다.

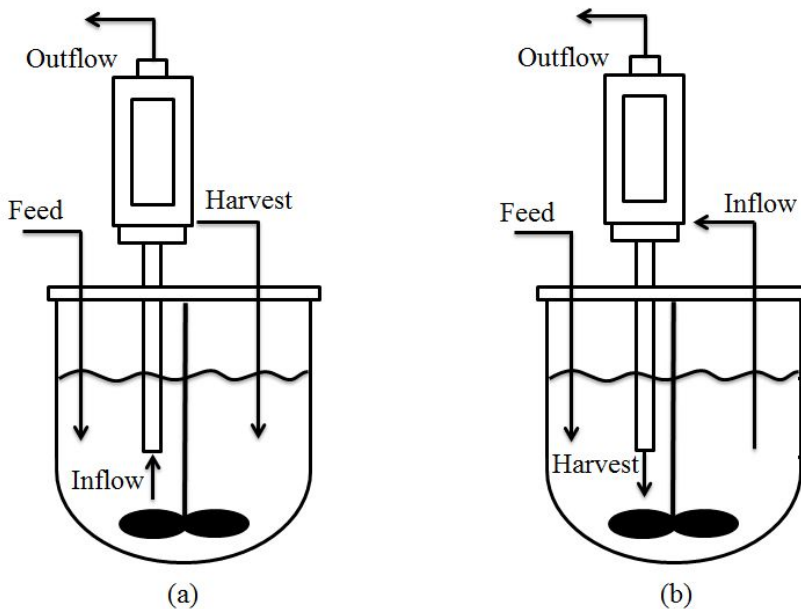


Fig. 2-10 Schematic diagram of perfusion cell culture using the ultrasonic wave^[24] : (a) the suspension is draw up the precipitate, (b) the suspension is pumped into the ultrasonic resonator just below

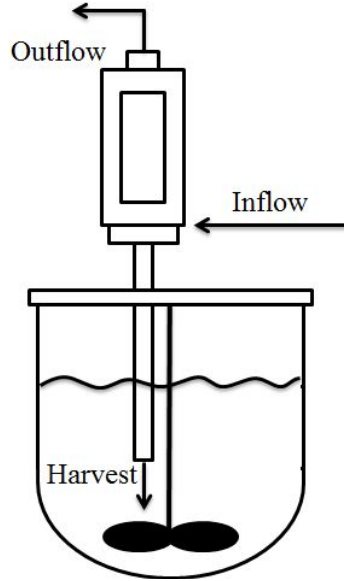


Fig. 2-11 Schematic diagram of microalgae separation using the ultrasonic wave^[24]

연속적으로 미세조류 분리를 하기 위하여 Fig. 2-12에 나타낸 바와 같은 장치를 이용하여 분리공정을 설계하였다. 공진기의 출구는 두 개로 하여 위쪽 출구는 미세조류를 여과한 유체를 아래쪽 출구는 응집된 미세조류를 수확하였다. 펌프는 두 개를 설치하여 공진기 내부의 유체흐름을 조절하였고, 응집된 미세조류는 유량비의 차를 이용하여 수확하였다. 앰프와 출구펌프에 컨트롤러를 설치하여 유출유량에 대해서 컨트롤을 하였다. 초음파 분리공정에 대한 분리효율은 식 (6)으로 구하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{out} \times v_{out}}{Q_{in} \times v_{in}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

여기서 Q_{in} 은 기존의 미세조류 농도이고, Q_{out} 은 초음파 분리공정을 거친 미세조류 농도이고, v_{in} 과 v_{out} 은 유입과 유출의 유량을 나타낸다. 초음파 분리공정의 분리효율은 유체의 흐름에 영향을 받기 때문에 유입과 유출의 유속을 고려하여 분리효율을 판단하였다. 실험은 Longer Pump(YZ1515x)로 유속을 조절하였고, Applikon Biosep 장비를 사용하여 분리실험을 수행하였다.

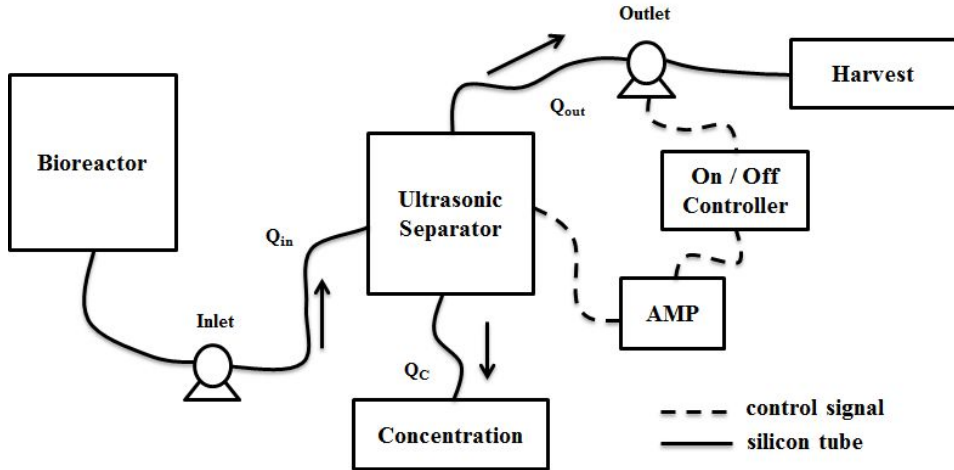


Fig. 2-12 Schematic diagram of ultrasonic separation system

제 3 절 음향트래핑을 이용한 미세조류 분리

1. 미세조류 크기에 따른 분리

미세조류를 움직이기 위해서 주파수, 입자의 크기, 밀도, 음속, 주기 등을 고려해야 한다. 미세조류의 분리는 초음파의 진행파와 정상파의 비를 이용하여 미세조류의 다양한 성질에 따라 음향 방사력이 미치는 힘을 알 수 있다. 식 (7)에 진행파와 정상파의 비를 나타내었다.

$$\frac{F_p}{F_s} = \frac{2\pi\rho(\kappa_l a)^6 K_p \widehat{\Phi}_p^2}{4\pi\rho(\kappa_l a)^3 K_s \widehat{\Phi}_s^2 \sin(2\kappa_l x)} \quad (7)$$

여기서 κ_l 는 파수, a 는 입자들의 반경, K_p 와 K_s 는 진행파와 정상파의 대비계수, $\widehat{\Phi}_p^2$ 와 $\widehat{\Phi}_s^2$ 는 진행파와 정상파의 속도 퍼텐셜을 나타낸다. 미세조류를 초음파 영역에 잡아 놓기 위해서는 정상파가 진행파보다 강한 힘을 가져야하고, $\kappa_l a \ll 1$ 이 되도록 해야 한다^[25]. 결국 음향 방사력에 의해서 입자분리를 하기 위한 조건은 $a \ll \lambda_0$ 를 만족시켜야한다. COMSOL 시뮬레이션을 통하여 입자크기가 커질수록 입자의 위치 에너지가 증가하는 경향을 파악하였고 Fig. 2-13에 나타내었다.

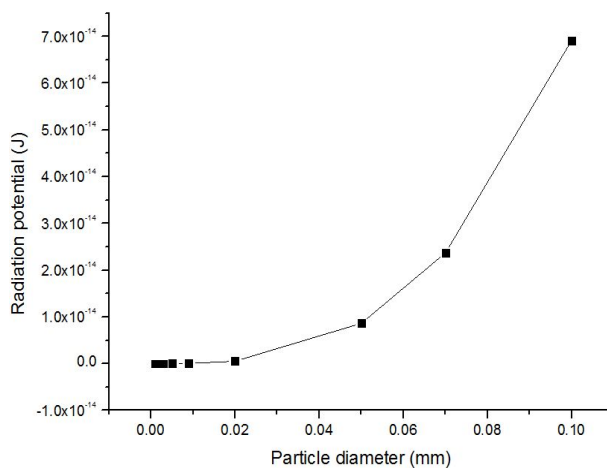


Fig. 2-13 Radiation potential according to particle size

입자크기가 다른 미세조류를 실험을 통하여 분리효율을 알아보았다. 미세조류의 종은 *Spirulina*, *Dunaliella*, *Chlorella* sp.를 사용하였다. 미세조류 중에 대한 입자 크기는 Table 2-2에 나타내었다. 실험 결과 Fig. 2-14에 나타낸 바와 같이 *Spirulina*와 *Dunaliella*는 83%이하의 효율을 보인 반면, *Chlorella* sp.의 경우 분리 효율이 94%로 높은 효율을 얻었다. 식 (7)과 COMSOL 시뮬레이션의 결과 동일한 초음파 영역에서는 입자의 크기가 작을수록 초음파를 이용한 분리 공정에 유리하는 것을 확인하였고, 실험 결과도 입자크기가 가장 작은 *Chlorella* sp.에서 효율이 높게 나타났다. *Spirulina*의 경우 원형의 세포형태가 아닌 섬유질 형태로 세포의 모양이 원형이 아니지만 *Dunaliella*보다 높은 분리공정 효율을 보였다.

Table 2-2 Cell size of microalgae species

Species	<i>Spirulina</i>	<i>Dunaliella</i>	<i>Chlorella</i> sp.
Size	with : 3~4 μ m length : 50~500 μ m (fiber)	6 μ m	3 μ m

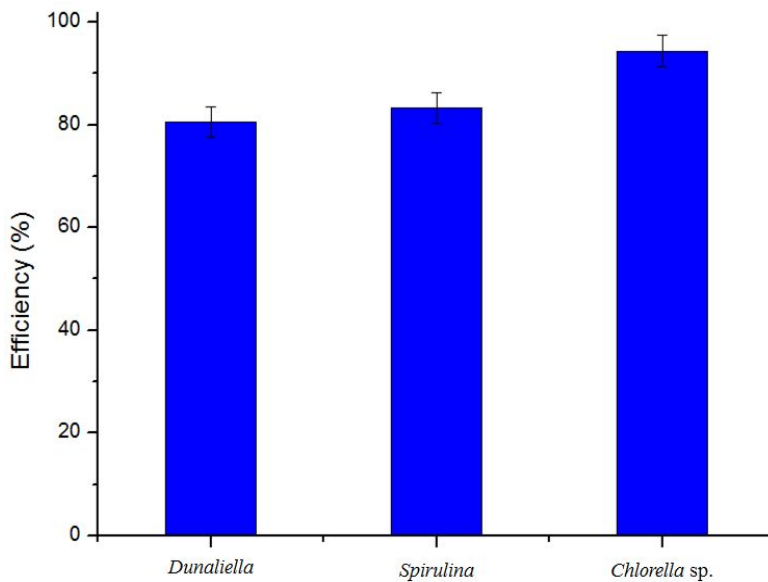


Fig. 2-14 Separation efficiency of microalgae species

2. 입력전원 변화에 따른 분리

초음파 분리공정에서 트랜스듀서의 입력전원의 변화가 분리효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 *Chlorella* sp.를 사용하여 알아보았다. 실험장치의 성능은 7W로 제한이 되어있어 입력전원을 최대 7W까지만 실험을 수행하였다. 실험 결과는 트랜스듀서의 입력전원을 증가시킬수록 미세조류의 분리효율이 증가하는 것을 알 수 있었고 Fig. 2-15로 나타내었다. 입력전원을 증가시킴에 따라 공진기내부에서 발생하는 정상파의 마루와 골의 위상차가 크게 형성되어 미세입자들을 노드평면으로 빨리 모이게 하기 때문에 분리효율이 증가하였다고 판단되었다. 그렇지만 입력전원을 높일수록 분리효율이 증가하는 것은 아니다. 입력전원을 높일수록 분리효율은 증가할 수 있지만 공진기 내부에 캐비테이션이 발생하여 분리효율이 나빠질 수 있다. 그리고 입력전원이 높아질수록 트랜스듀서에서 발생하는 열이 많아지게 되고, 이로 인하여 반사판에서 음향에너지가 열에너지로 전환되어 분리효율이 떨어지게 된다. 그렇기 때문에 트랜스듀서의 사양에 맞추어 입력전원을 조절해서 분리공정을 해야 한다.

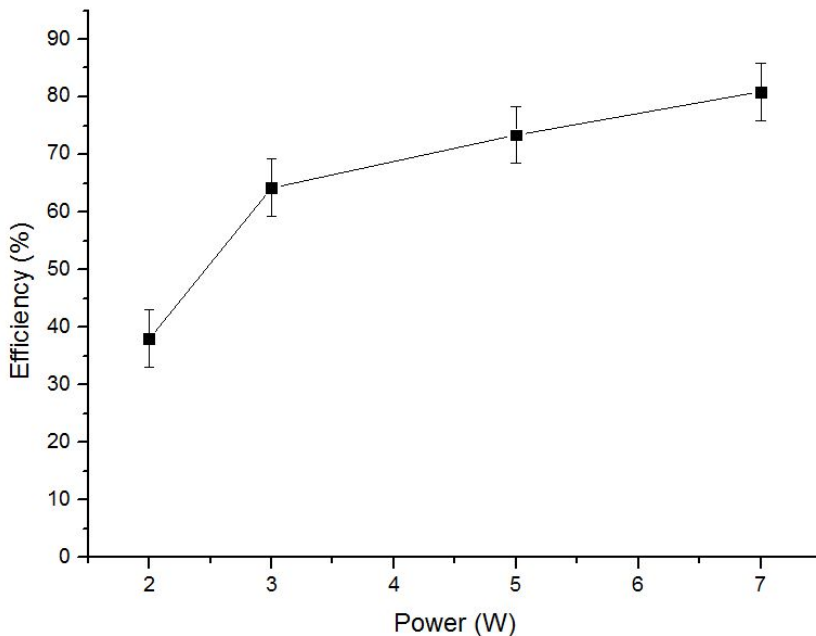


Fig. 2-15 Separation efficiency according to acoustic power

3. 미세조류 농도에 따른 분리

초음파 분리공정은 유체에 흩어져 있는 미세조류를 노드평면으로 이동시키고, 미세조류들 간에 발생하는 인력에 의해 입계반경까지 뭉쳐지는 시간은 입자크기에 따라 다르고 응집되어 침전되기까지의 시간은 미세조류 농도에 따라 다르다. 농도 변화에 따른 미세조류 분리효율은 *Chlorella* sp.로 측정하여 Fig. 2-16에 나타내었다. 미세조류의 농도가 낮을 경우에는 미세조류 입자가 노드평면으로 적게 모여 입자간 발생하는 인력이 부족하여 낮은 분리효율을 보였다. 미세조류 농도가 높아질수록 분리효율이 상승하였는데, 농도가 높아질수록 미세조류 입자들이 노드평면으로 많이 모여 입자간 발생하는 인력이 충분하기 때문에 높은 분리효율을 보였다. 실험을 통해 미세조류 농도 OD₆₈₀ 6.18에서 분리효율이 94.32%로 가장 높은 분리효율을 얻었다. 하지만, 미세조류 농도 OD₆₈₀ 6.2이상부터는 분리효율이 감소하였다. 농도가 높을수록 미세조류 입자가 응집되기 전에 유속에 의하여 밖으로 쏠려나가기도 하고, 초음파 영역에서 미세조류를 잡을 수 있는 양이 정해져 있기 때문에 고농도 미세조류를 분리할 때에는 기계적인 용량을 높여야 한다고 판단된다.

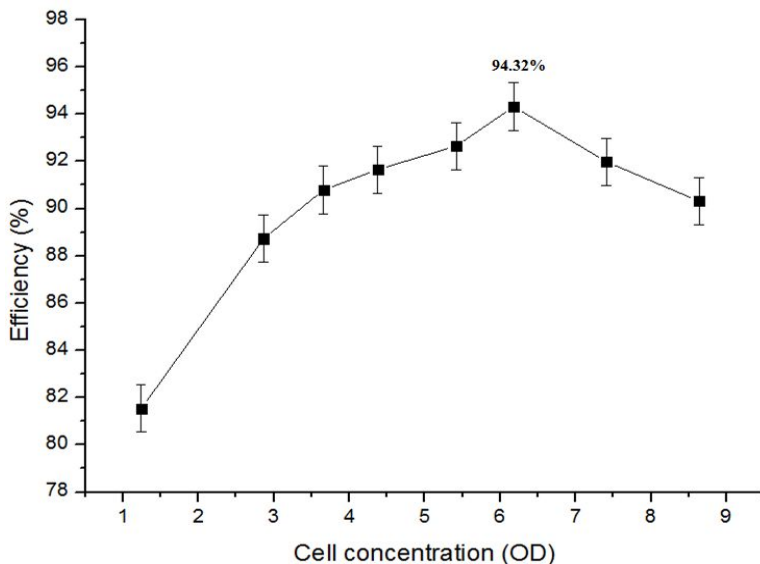


Fig. 2-16 Separation efficiency according to cell concentration

4. 유량변화에 따른 분리

미세조류 응집에 있어서 공진기 내부의 유속은 매우 중요하다. 유속이 빠르면 초음파 영역에서 응집되는 시간이 부족하고, 유속에 의해 미세조류가 밖으로 쏠려나가게 된다. *Chlorella* sp.를 이용한 실험을 통하여 공진기 내부의 유속변화에 따라 미세조류가 응집하는데 미치는 영향을 알아보았다. 각 펌프의 유입유량과 유출유량은 Fig. 2-17에 나타내었다. 각 펌프의 유입속도와 유출속도의 비를 잘 맞추지 못하면 유속의 차이로 인해 공진기 내부에 기포가 발생하게 된다. 발생된 기포는 응집된 미세조류 덩어리를 흐트러 놓기 때문에 기포가 발생되지 못하게 제어하여 실험을 해야 한다. 실험 결과 유량비가 0.89ml/s 이상이 되면 유량차이에 의해 기포가 발생하였다. 유량비에 따른 분리효율은 Fig. 2-18에 나타내었다. 유출되는 광학밀도(OD₆₈₀) 값은 유출속도에 많은 영향을 받으며, 펌프속도가 느려질수록 유출유량은 낮은 광학밀도 값을 얻을 수 있다. 실험을 통해 유량비가 0.74ml/s인 경우 고농도로 응집된 미세조류를 공진기에서 수확하였다. 유속이 느리면 공진기 내부의 부력이 작아지기 때문에 멎쳐진 미세조류 덩어리가 침전에 유리하게 된다. 초음파 분리공정에서 유속을 느리게 하고, 유량비를 0.74ml/s로 하여 높은 분리효율과 고농도로 응집된 미세조류를 얻었다.

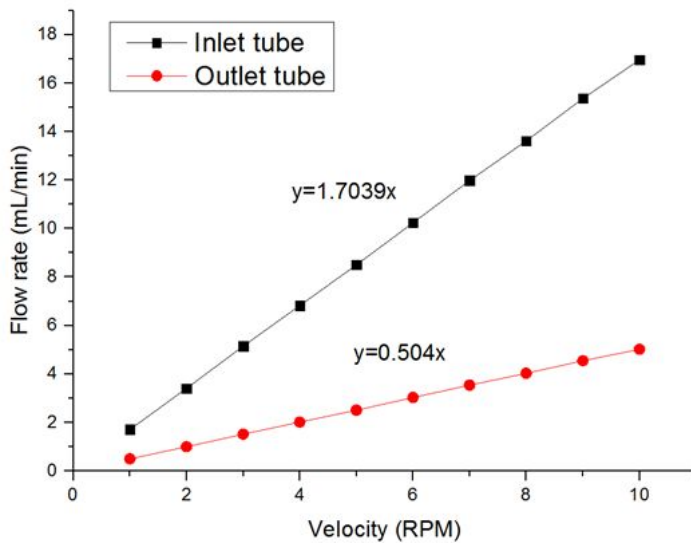


Fig. 2-17 Flow rate of inlet and outlet pump

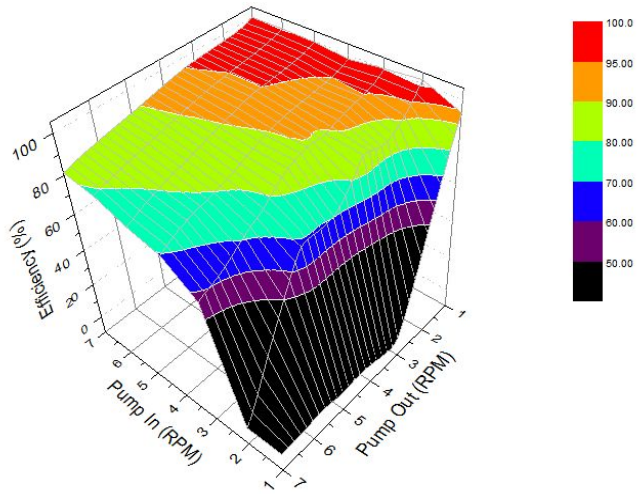


Fig. 2-18 Separation efficiency according to inlet-outlet pump speed

제 3 장 실험계획법을 이용한 분리효율 분석

제 1 절 다원배치법을 통한 미세조류 분리효율 분석

1. 다원배치법을 통한 실험설계

실험계획법(design of experiment)은 통계학적 해석기법을 기반으로 실험데이터 결과에서 변수의 영향력을 분석할 수 있다. 그 중 다원배치법은 범주수준의 독립변수가 두 개 이상일 경우에 각 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 분석하는데 쓰인다^[26]. 다원배치법의 분산분석에서는 각 독립변수가 종속변수에 독립적으로 영향을 미치는지 검증할 수 있을 뿐만 아니라, 독립변수들 간 교호작용이 종속변수에 미치는 영향을 검증한다.

실험은 *Chlorella* sp.를 이용하여 초음파 분리효율에 영향을 미치는 입력전원, 작동시간, 미세조류 농도, 유량비 네 개의 변수로 정하여 실험을 수행하였다. 각 변수의 수준은 두 수준으로 배치하였으며 Table 3-1에 나타내었다. 네 개의 변수에 대한 두 수준의 전조합실험시법을 통하여 총 실험횟수는 16가지의 배합실험으로 실시하였다^[27]. 실험에서는 각 변수간의 교호작용(interaction) 가운데 실험 결과에 미치는 영향이 미미한 교호작용은 오차항으로 풀링하였고, 주 효과(main effect)에서 교락(confounding)시켜 변수의 모든 경우에 대한 실험 결과를 예측할 수 있게 실험계획을 수립하였다.

Table 3-1 Levels of parameters in the composite design

Parameter	Unit	Factor	Low level	High level
Power	W	X_1	2	7
Run time	min	X_2	1	5
Microalgae concentration	OD ₆₈₀	X_3	0.948	7.668
ϕ_{out}/ϕ_{in}	-	X_4	0.1	0.75

2. 다원배치법 분석

초음파 분리효율을 예측하기 위하여 설정된 변수와 수준에 대한 실험 결과를 바탕으로 분산분석(analysis of variance)을 수행하였다. 다원배치법 분산분석은 각각의 독립변수들의 주 효과를 검증한 뒤, 독립변수들의 교호작용효과를 검증하였다. 교호작용의 효과가 통계적으로 유의미한 결과를 나타낸다면 교호작용의 효과는 각 독립변수의 주 효과의 해석에 영향을 준다. 만일 상호작용의 효과가 통계적으로 유의미하지 않다면 각 독립변수의 주 효과만 해석하면 된다. 데이터 분석에는 각 인자들의 주 효과뿐만 아니라 교호작용에 의한 영향까지도 효과적으로 분석할 수 있는 요인배치법을 사용하였다. Table 3-2는 실험을 통한 분리효율 결과를 나타내었으며, 이 결과를 바탕으로 분산분석을 수행하여 Table 3-3과 같이 분산분석표로 정리하였다. 분석 결과 세 가지 이상의 변수들 간의 교호작용에 의한 효과는 무시할 수 있을 만큼 작은 영향을 주어 세 가지 변수 이상의 교호작용에 의한 값은 오차로 간주하였다. 각 변수들 간의 교호작용은 두 변수들 사이에서의 영향만을 고려하였으며, 그 중에서도 작은 영향을 미치는 교호작용도 데이터 풀링(pooling)처리를 하여 분산분석을 수행하였다.

Table 3-2 Design matrices and test results

Test condition	Factor				Separation efficiency(%)
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	0	0	0	1	48.54
2	0	1	0	1	41.73
3	1	1	0	1	66.16
4	1	0	0	1	65.81
5	1	0	0	0	95.07
6	0	0	0	0	91.17
7	1	1	0	0	97.10
8	0	1	0	0	92.89
9	0	0	1	0	96.59
10	1	0	1	0	96.99
11	1	1	1	0	97.35
12	0	1	1	0	95.11
13	0	0	1	1	27.17
14	1	0	1	1	59.39
15	1	1	1	1	43.94
16	0	1	1	1	34.74

Table 3-3 ANOVA for the coefficients of plural array

Factor	Sum of squares	D.O.F	Mean squares	F-ratio
X_1	550.7236	1	550.7236	27.64273
X_2	8.570256	1	8.570256	0.43017
X_3	139.181	1	139.181	6.98598
X_4	8779.222	1	8779.222	440.65962
X_1X_2	11.74776	1	11.74776	0.58966
X_1X_4	327.3386	1	327.3386	16.43026
X_3X_4	278.9735	1	278.9735	14.00265
Error	159.38328	8	19.92291	
Total	10255.14			

3. 다원배치법을 통한 예측식의 구성

초음파를 이용한 미세조류 분리효율에 미치는 주 효과 및 교호작용의 영향은 Table 3-4로 정리하였다. 다원배치법을 이용한 통계적인 분석 결과를 바탕으로 미세조류 분리효율 예측은 식 (8)과 같이 구성하였다.

$$Y = 71.85938 + 5.866875X_1 - 0.73187X_2 - 2.94938X_3 - 23.4244X_4 - 0.85688X_1X_2 + 4.523125X_1X_4 - 4.17563X_3X_4 \quad (8)$$

각 항의 계수는 미세조류 분리효율을 증가시키거나 감소시키는 요인으로 변수들이 작용한다는 것을 알 수 있으며, 유량비의 영향을 많이 받는다는 분석 결과를 얻었다.

분석 결과를 바탕으로 실험을 통한 측정효율과 예측식을 통한 예측효율에 대하여 데이터의 경향과 무관한 데이터가 있는지를 판단을 하기 위하여 삼편차(three sigma)검정을 하였다. 측정효율의 삼편차검정은 Table 3-5에 예측효율의 삼편차검정은 Table 3-6에 나타내었다. 삼편차검정을 한 결과 데이터 모두 경향을 벗어나는 격리자(outlier)가 없는 것을 확인하였다. 격리자가 발견되지 않는 이유로 데이터의 분산의 크기가 크므로 넓은 범위의 데이터 값을 형성하기 때문에 격리데이터가 형성되지 않았다.

Table 3-4 List of main effect and interactions for plural array

Variable		Effect(%)
Mean		71.85938
Main effect	X_1	11.73375
	X_2	-1.46375
	X_3	-5.89875
	X_4	-46.8488
Interaction	X_1X_2	-1.71375
	X_1X_4	9.04625
	X_3X_4	-8.35125

Table 3-5 Measurement efficiency of three sigma test

Test condition	Measurement efficiency	$P(z_0)$	Three sigma
1	48.54	0.3233	2.8272
2	41.73	0.3752	1.9962
3	66.16	0.0879	6.5933
4	65.81	0.0930	6.5110
5	95.07	0.3099	3.0400
6	91.17	0.2671	3.7259
7	97.10	0.3302	2.7164
8	92.89	0.2852	3.4368
9	97.03	0.3295	2.7275
10	97.16	0.3308	2.7069
11	97.23	0.3315	2.6959
12	96.83	0.3276	2.7584
13	27.17	0.4559	0.7047
14	59.39	0.1842	5.0514
15	43.94	0.3571	2.2859
16	34.74	0.4218	1.2507

Table 3-6 Prediction efficiency of three sigma test

Test condition	Predict efficiency	$P(z_0)$	Three sigma
1	64.59	0.0275	7.5589
2	54.81	0.1238	6.0183
3	79.69	0.2463	4.0591
4	106.61	0.4574	0.6806
5	103.82	0.4465	0.8550
6	76.51	0.2047	4.7247
7	76.90	0.2099	4.6400
8	66.73	0.0608	7.0259
9	53.89	0.1375	5.7988
10	81.20	0.2649	3.7611
11	54.28	0.1318	5.8909
12	44.10	0.2694	3.6892
13	23.73	0.4380	0.9919
14	65.74	0.0455	7.2718
15	38.82	0.3275	2.7588
16	13.95	0.4727	0.4353

4. 다원배치법의 추정과 검정

다원배치법으로 구한 예측식의 분리효율과 실험을 통해 얻은 분리효율의 비교를 Fig. 3-1에 나타내었다. 두 개의 분리효율을 비교해본 결과 데이터 간 비교적 큰 오차를 나타내었다. 두 데이터 사이의 오차가 크기 때문에 두 데이터의 일치성을 판단하기 위하여 통계적 방법을 이용하여 검정하였다. 측정효율과 예측효율의 데이터 결과가 차이가 있는지를 확인하기 위하여 F분포를 이용하여 추정하였으며, 측정효율과 예측효율은 같은 분포를 갖는다고 가정하였고, 유의수준을 5%로 검정하였다. 두 데이터의 분포 값은 2.86으로, 데이터 분석 결과 검정통계량은 1.034로 얻었다. 두 데이터의 검정 결과 유의수준이 낮으므로 두 데이터는 서로 같은 분포를 보인다는 것을 확인하였다.

다원배치법으로 구한 예측효율과 실험을 통한 측정효율간의 정확성을 판단하기 위하여 통계적 방법인 두 조 모평균차를 통하여 정확성을 추정하였다. 먼저 가정은 측정효율이 예측효율보다 더 정확할 것이라고 판단하고 추정하였다. 추정의 검정은 t분포를 이용하였으며, 유의수준 5%의 값은 1.753이다. 두 조 모평균차의 검정통계량은 1.451로 유의수준 5%로 보다 낮기 때문에 측정효율이 예측효율보다 정확하다고 할 수 없다.

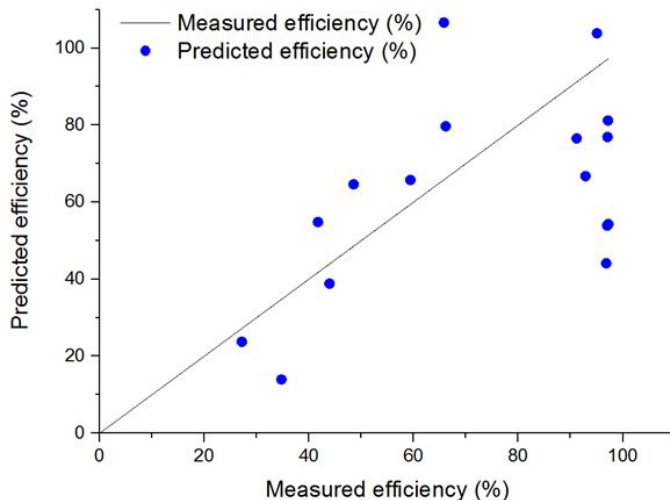


Fig. 3-1 Parity plot of measured efficiency vs. predicted efficiency by plural array before the revision

실험 결과 측정효율과 예측효율간의 편차가 높기 때문에 편차를 낮추기 위하여 데이터를 보정하였다. 보정방법은 두 데이터의 차이가 일정 이상 벗어나는 값은 격리데이터로 간주하였다. 격리자료를 처리하기 위하여 데이터 관리도를 이용하여 격리데이터를 판단하였다. 관리도로 구한 데이터의 범위(0, 28.105) 밖의 데이터는 격리자료로 간주하여 결과를 보정하였고, 네 개의 데이터를 제외하게 되었다. 보정 후의 측정효율과 예측효율의 비교를 Fig. 3-2에 나타내었다. 보정 결과 측정효율과 예측효율을 편차에 대하여 보정하기 전에는 표준편차가 25.26으로 데이터간의 변동이 크지만, 데이터 보정 후에는 표준편차가 15.27로 데이터간의 변동을 줄여 결과에 대한 신뢰성을 높였다.

예측식의 결과는 측정치와의 편차가 비교적 크게 발생한다는 것을 확인하였다. 편차가 큰 이유는 분리효율 예측식을 구성하기 위하여 데이터를 분석하는 방법으로 4인자 2수준 요인배치법을 사용하였기 때문이다. 4인자 2수준 요인배치법은 각 변수에 대한 수준의 개수를 두 개로 보는데, 이는 설정된 수준상태를 선형적으로 보았다는 것을 의미한다. 예측치의 결과가 측정치와 편차가 큰 이유는 분리효율에 미치는 변수가 선형이 아닌 비선형적으로 분리효율에 영향을 미치기 때문에 오차의 표준편차가 크다고 판단하였다.

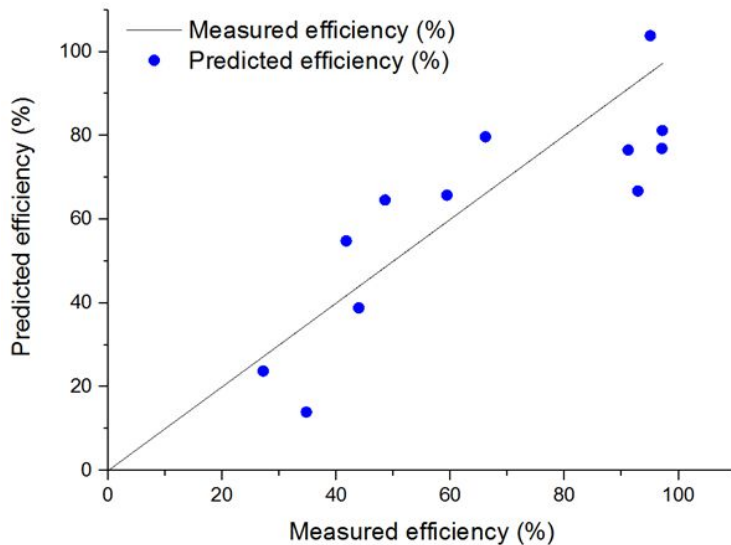


Fig. 3-2 Parity plot of measured efficiency vs. predicted efficiency by plural array after the revision

제 2 절 다중회귀모형을 통한 미세조류 분리효율 분석

1. 다중회귀모형을 통한 실험설계

회귀분석은 특정 변수 값의 변화와 다른 변수 값의 변화가 가지는 수학적 선형의 함수식을 파악함으로써 변수들의 상호관계를 추론할 수 있고, 변수들에 대하여 추정된 함수식을 회귀식이라고 한다. 회귀모형식을 통하여 독립변수의 변화가 종속변수의 변화와 어떤 영향을 미치는지, 영향을 준다면 어느 변수의 변화가 원인이 되고 어느 변수의 변화가 결과적으로 영향을 미치는지에 관한 것을 분석한다. 회귀분석은 인과관계가 아닌 단순한 변수 사이의 관계의 밀접도만을 조사하는 상관분석과는 차이가 있다. 회귀분석은 본질적으로 인과관계가 있는 독립변수와 종속변수 사이의 함수식을 분석대상으로 삼는다^[28]. 회귀분석으로 구한 함수식은 독립변수의 값을 기초로 종속변수의 값을 추정 또는 예측한다. 회귀모형은 데이터 결과 예측뿐만 아니라 변수들이 미치는 영향력을 파악할 수 있고, 실험의 타당성 여부를 검토하는데 쓰인다.

초음파를 이용한 미세조류 분리는 *Chlorella* sp.를 사용하였다. 실험에 대한 변수는 다원배치법과 동일하게 네 개로 정하였다. 독립변수가 네 개이므로 다중회귀모형으로 구성하였다. 미세조류 분리효율 분석을 위한 실험은 변수의 조합을 고려하여 총 61가지의 방법으로 실험을 하였고, 실험 결과를 정리하여 Table 3-7에 나타내었다.

Table 3-7 Results of each test using the orthogonal array

Exp.	Power (W)	Run time (min)	Stop time (sec)	Pump in (ml/min)	Pump out (ml/min)	Original OD ₆₈₀	Filtered OD ₆₈₀	Separation efficiency(%)
1	7	3	10	1.7039	0.504	5.419	1.347	92.65
2	7	3	10	1.7039	0.504	6.18	1.187	94.32
3	7	3	10	1.7039	0.504	6.165	1.227	94.11
4	7	3	10	3.4078	1.008	6.165	1.782	91.45
5	7	3	10	5.1117	1.512	6.165	2.381	88.58
6	7	3	10	6.8156	2.016	6.165	2.802	86.56
7	7	3	10	8.5195	2.52	6.165	3.068	85.28
8	7	3	10	10.2234	3.024	6.165	3.722	82.14
9	7	3	10	11.9273	3.528	6.165	4.007	80.77
10	7	3	10	1.7039	1.008	6.758	1.756	84.63
11	7	3	10	5.1117	0.504	6.758	1.333	98.06
12	7	3	10	6.8156	3.528	6.758	4.212	67.74
13	7	3	10	8.5195	2.52	6.758	3.297	85.57
14	7	3	10	8.5195	3.528	6.758	4.158	74.52
15	7	3	10	10.2234	2.016	6.758	2.642	92.29
16	7	3	10	11.9273	1.512	6.758	2.204	95.87
17	7	3	10	1.7039	0.504	6.409	1.28	94.09
18	7	3	10	3.4078	0.6552	6.409	1.37	95.89
19	7	3	10	3.4078	1.512	6.409	1.775	87.71

20	7	3	10	3.4078	2.52	6.409	2.748	68.29
21	7	3	10	5.1117	0.6048	6.409	1.11	97.95
22	7	3	10	5.1117	1.512	6.409	2.293	89.42
23	7	3	10	5.1117	2.52	6.409	3.01	76.85
24	7	3	10	5.1117	3.528	6.409	3.954	57.42
25	7	3	10	6.8156	1.512	6.409	2.178	92.46
26	7	3	10	6.8156	2.52	6.409	3.137	81.90
27	7	3	10	6.8156	3.528	6.409	3.781	69.46
28	7	3	10	8.5195	1.512	6.409	1.923	94.67
29	7	3	10	8.5195	2.52	6.409	3.183	85.31
30	7	3	10	8.5195	3.528	6.409	4.158	73.13
31	7	3	10	10.2234	1.512	6.409	2.311	94.67
32	7	3	10	10.2234	2.52	6.409	3.185	87.75
33	7	3	10	10.2234	3.528	6.409	3.91	78.95
34	7	3	10	11.9273	1.512	6.409	2.183	95.68
35	7	3	10	11.9273	2.52	6.409	3.345	88.97
36	7	3	10	11.9273	3.528	6.409	4.083	81.16
37	2	1	10	5.1117	0.504	7.578	2.922	96.20
38	7	1	10	5.1117	0.504	7.578	2.475	96.78
39	7	5	10	5.1117	0.504	7.698	1.966	97.48
40	2	5	10	5.1117	0.504	7.698	5.151	93.40

41	2	1	10	1.7039	1.26	7.698	7.552	27.45
42	7	1	10	1.7039	1.26	7.698	4.876	53.16
43	7	5	10	1.7039	1.26	7.698	5.813	44.16
44	2	5	10	1.7039	1.26	7.698	6.767	35.00
45	2	1	10	1.7039	1.26	0.948	0.767	40.17
46	2	5	10	1.7039	1.26	0.948	0.747	41.73
47	7	5	10	1.7039	1.26	0.948	0.454	64.59
48	7	1	10	1.7039	1.26	0.948	0.523	59.20
49	7	1	10	5.1117	0.504	0.948	0.474	95.07
50	2	1	10	5.1117	0.504	0.948	0.849	91.17
51	7	5	10	5.1117	0.504	0.948	0.279	97.10
52	2	5	10	5.1117	0.504	0.948	0.862	91.03
53	2	1	10	5.1117	0.504	7.73	2.327	97.03
54	7	1	10	5.1117	0.504	7.73	2.228	97.16
55	7	5	10	5.1117	0.504	7.73	2.171	97.23
56	2	5	10	5.1117	0.504	7.73	2.487	96.83
57	7	1	10	1.7039	1.26	0.983	0.366	72.47
58	7	1	10	1.7039	1.26	8.2845	3.831	65.80
59	2	1	10	1.7039	1.26	1.141	0.665	56.90
60	7	5	10	1.7039	1.26	1.141	0.498	67.72
61	2	5	10	5.1117	0.504	1.141	0.609	94.74

2. 다중회귀모형을 통한 예측식의 구성

다중회귀모형의 분석을 위해서 종속변수에 관계가 있는 독립변수와의 함수식을 식 (9)와 같이 구성하였다. 함수식은 최소자승법에 의해 제공항이 구성되어 있으며, 각 변수들의 변화에 대하여 최적공정조건(optimal response condition)을 예측할 수 있게 해준다.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 b_{ij} X_i X_j + \sum_{ii=1}^4 b_{ii} X_i^2 \quad (9)$$

여기서 Y 는 분리효율이고, X_i 는 각각에 대한 독립변수를 나타낸다. b 는 다중회귀모형의 계수로서 b_0 는 초기항이고, b_i 는 독립변수의 계수이고, b_{ij} 는 독립변수들 간의 상호작용의 계수이고, b_{ii} 는 독립변수 제공항의 계수이다.

변수조합에 의해 실험 결과를 다중회귀모형의 함수식에 피팅(fitting)을 하였으며, 식 (10)과 같이 각 변수에 대한 계수 값을 얻을 수 있다. 계수 값은 미세조류 분리효율에 미치는 변수들의 영향을 나타낸다. 변수들 중에서 영향을 많이 주는 것은 유량비로 미세조류 분리효율에 직접적으로 연관이 있는 것으로 분석 결과를 얻었다.

$$\begin{aligned} y = & 94.10244 - 0.53571X_1 + 5.77767X_2 + 1.65654X_3 - 25.67644X_4 \\ & - 0.06278X_1X_2 - 0.00365X_1X_3 + 1.92956X_1X_4 - 0.0936X_2X_3 \\ & - 0.51382X_2X_4 - 0.95405X_3X_4 + 0.03804X_1^2 - 0.80093X_2^2 \\ & - 0.08499X_3^2 + 0.72282X_4^2 \end{aligned} \quad (10)$$

3. 다중회귀모형 분석

ANOVA분석은 데이터의 평균값 간의 편차제곱합의 크기의 비율을 가지고 표준 분포에서 어느 정도의 차이를 보이는지를 결정지을 수 있다. 다중회귀모형의 회귀 변수에 대한 실험요인변량의 크기의 비율을 확인하기 위하여 ANOVA 분석을 하였고 Table 3-8에 나타내었다. 다중회귀모형의 함수식은 실험 결과를 32번의 피팅을 하여 예측식을 구하였다.

직교배열표의 실험값을 가지고 구한 예측식의 ANOVA 분석으로 얻은 결정계수는 0.8984로 약 90%의 정확성을 보인다는 것을 확인하였다. 그리고 다중회귀모형의 회귀변수 15개가 예측 결과에 미치는 영향을 알기 위하여 p값을 분석하였다. 분석 결과 p값은 0에 가깝게 얻을 수 있었으며, 15개의 변수가 예측 결과에 서로 다른 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Table 3-8 ANOVA analysis results for multiple regression model

Factor	D.O.F	Sum of squares	Mean square	F-value	P-value
Regression	15	420229.96	28015.33	866.72	0
Residual	46	1486.87	32.32		
Total	61	421716.83			

4. 다중회귀모형의 추정과 검정

통계적 방법인 다중회귀분석모형의 예측을 통한 분리효율과 실험을 통해 얻은 분리효율의 비교를 Fig. 3-3에 나타내었다. 비교 결과 예측효율이 측정효율에 거의 일치하는 분포를 보였다. 측정효율과 예측효율의 일치하는 정도를 검정하기 위하여 통계적 방법을 사용하였다.

예측효율과 측정효율의 데이터가 서로 다른 분포를 보이는지 확인하기 위하여 검정방법으로 F분포를 사용하여 검정하였다. 검정을 위한 가정은 두 데이터의 분산이 서로 다르지 않다고 가정하였다. 유의수준은 5%로 검정하였다. F분포는 1.67이고, 검정통계량은 1.084로 얻었다. 검정 결과를 바탕으로 두 데이터의 분산이 서로 같다는 것을 통계적 방법으로 확인하였다.

측정효율과 예측효율의 정확성을 판단하기 위하여 통계적인 방법인 두 조 모평균차를 이용하여 검정하였다. 검정을 위한 가정은 측정효율이 예측효율보다 더 정확하다고 가정하였고, 유의수준은 5%로 검정하였다. 검정 결과 두 조 모평균차의 검정통계량이 유의수준에 있으므로, 측정효율이 예측효율보다 정확하다고 할 수 없다는 것을 통계적 방법으로 확인하였다. 두 효율간의 편차에 대한 표준편차는 4.98로 낮은 편차를 보였으며, 두 데이터의 결과가 비슷하다는 것을 확인하였다. 변수의 수준을 비선형적으로 분석하였기 때문에 두 효율이 비슷한 결과를 보였으며, 보다 정확한 예측값의 결과를 얻었다.

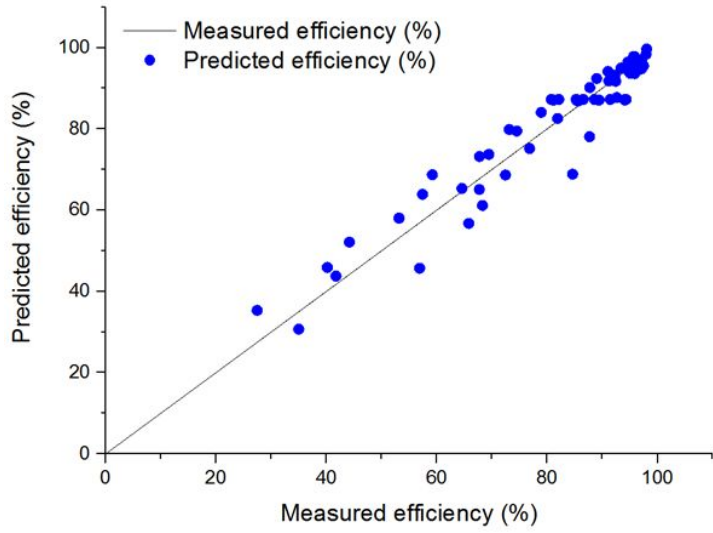


Fig. 3-3 Parity plot of measured efficiency vs. predicted efficiency by multiple regression analysis

제 3 절 공간 모델링에 따른 미세조류 분리 측정

1. 구분적 선형 상태 공간 모델링

초음파 분리 시스템의 특성을 파악하기 위해 적절한 기초 모델 컨트롤 디자인이 필요하다. 실험의 구성을 Fig. 3-4와 같이 동역학적 모델로 나타내었다. 초음파 분리 시스템의 적절한 동적 모델을 구성하기 위해 공진기의 챔버를 세 부분으로 나누었다^[29]. 첫 번째 부분은 챔버의 윗부분으로 초음파로 미세조류를 걸러낸 용액을 빼내는 부분이다. 두 번째 부분은 아랫부분으로 응집된 미세조류 덩어리가 침전되어 밖으로 나오는 부분이다. 세 번째 부분은 초음파 영역으로 미세조류를 음향 방사력으로 분리시키는 부분이다. 미세조류 분리시스템의 상태변수는 챔버 부분의 미세조류 농도, 부피, 유량, 반응상수, on/off 스위치로 구분하였다. 공진기는 한쪽의 입구와 두 개의 출구로 구성하였다. 펌프는 두 개로 입구와 출구에 위치하며, Q_1 의 유량과 Q_{in} 의 유량을 조절한다. 다른 한쪽의 출구 Q_{out} 은 Q_1 과 Q_{in} 의 유량비의 차이로 응집된 미세조류를 수확한다. 그리고 Q_1 의 펌프는 초음파 작동과 동일하게 작동시키기 위하여 on/off 컨트롤을 설치하여 제어하였다.

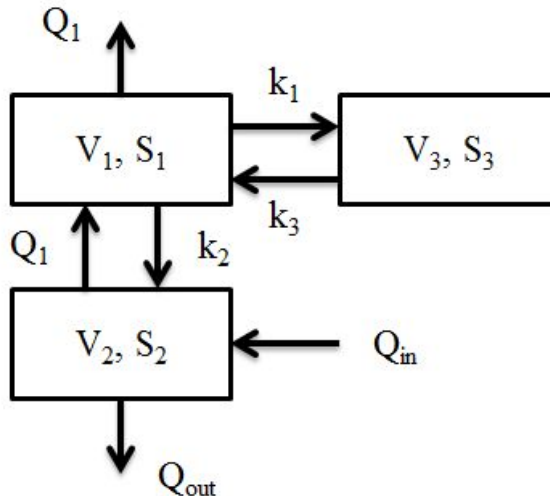


Fig. 3-4 Separation model using three compartments, one inlet and two outlets for filtrate and concentrate flows

시스템의 상태변수를 고려하여 식 (11,12,13)을 세울 수 있으며, 공진기의 세 부분에 대한 미세조류 질량을 구하였다.

$$V_1 \frac{dS_1}{dt} = Q_1 S_2 - Q_1 S_1 - \alpha k_1 S_1 V_1 + (1 - \alpha) k_3 S_3 V_3 - \frac{k_2 S_1 V_1}{Q_1 + k_4} \quad (11)$$

$$V_2 \frac{dS_2}{dt} = Q_{in} S_{in} - Q_{out} S_2 - Q_1 S_2 + \frac{k_2 S_1 V_1}{Q_1 + k_4} \quad (12)$$

$$V_3 \frac{dS_3}{dt} = \alpha k_1 S_1 V_1 - (1 - \alpha) k_3 S_3 V_3 \quad (13)$$

여기서 V 는 공진기 세 부분의 부피이고, S 는 공진기 세 부분의 농도이고, Q 는 유량을 나타내고, k 는 반응상수를 나타내며 α 는 on/off 컨트롤 변수를 나타낸다. 식 (11)은 초음파로 미세조류가 걸러진 용액 부분으로 펌프 유량에 의해 응집된 미세조류를 끌어 올리는 유량, 미세조류가 걸러진 용액을 밖으로 빼내는 유량, 초음파의 작동이 on/off 상태를 고려한 분리 결과, 초음파로 인한 응집반응을 나타낸 식이다. 식 (12)는 응집된 미세조류 덩어리가 침전되는 곳으로 미세조류의 유입유량에 따라 미세조류가 응집 되어 밖으로 나가는 유량, 미세조류가 걸러진 용액이 유출되는 유량, 초음파로 인해 발생하는 응집반응에 대하여 나타낸 식이다. 식 (13)은 초음파 영역에서 미세조류가 분리되는 곳으로 초음파의 작동이 on/off 상태를 고려한 분리 결과를 나타낸 식이다.

위 식을 가지고 미세조류 농도가 초음파 분리시스템의 출력이라고 한다면 식 (14)와 같이 일반적인 상태 공간 형태의 모델에 관한 식을 세울 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Q_1 S_2}{V_1} - \frac{Q_1 S_1}{V_1} - \alpha k_1 S_1 + \frac{(1 - \alpha) k_3 S_3 V_3}{V_1} - \frac{k_2 S_1}{Q_1 + k_4} \\ \frac{Q_{in} S_{in}}{V_2} - \frac{Q_{out} S_2}{V_2} - \frac{Q_1 S_2}{V_2} + \frac{k_2 S_1 V_1}{V_2 (Q_1 + k_4)} \\ \frac{\alpha k_1 S_1 V_1}{V_3} - (1 - \alpha) k_3 S_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

미세조류 농도가 정상상태로 움직인다고 가정한다면 전달계수 k_1 , k_{2on} , k_4 를 계산할 수 있으며, 식 (15,16,17)으로 나타내었다.

$$k_1 = -\frac{Q_{1on}(S_{1on} - S_2)}{S_{1on}V_1} - \frac{(Q_{1on}S_2 + Q_{outon}S_2 - Q_{in}S_{in})}{S_{1on}V_1} \quad (15)$$

$$k_{2on} = \frac{Q_{1on}(Q_{1on}S_2 + Q_{outon}S_2 - Q_{in}S_{in})}{S_{1on}V_1} \quad (16)$$

$$k_4 = \frac{k_{2on}S_{1off}V_1}{Q_{outoff}S_2 - Q_{in}S_{in}} \quad (17)$$

여기서 k_1 은 챔버의 첫 번째와 세 번째 부분에서 발생하는 전달계수이고, k_2 는 챔버의 첫 번째와 두 번째 부분에서 발생하는 미세조류 응집계수로 on/off 상태에 따라 값이 달라지며, k_4 는 챔버의 첫 번째와 세 번째 부분에서 발생하는 난류 또는 확산으로 생기는 손실계수를 의미한다. k_3 는 챔버의 세 번째에서 첫 번째 부분으로 미세조류가 역방향으로 가는 역전달 계수를 의미하며, 초음파가 작동하는 동안 입자의 유출이 발생하지만 미세조류의 농도가 균일하게 분포한다고 가정하고 약 1.2의 값을 갖는다고 하였다. 초음파의 작동이 off 상태인 응집계수는 $k_{2off} = k_{3off}Q_2$ 으로 계산한다.

분리효율을 판단하기 위해서 초음파로 인해 분리된 미세조류의 중량값을 계산해야 한다. 초음파의 작동 사이클에 따른 미세조류 질량에 대한 분리 값은 식 (18)로 구한다.

$$\Delta m = m_c - m_f = \int_0^{t_{cycle}} (Q_2(t)S_2(t) - Q_1(t)S_1(t)) dt \quad (18)$$

2. 미세조류 분리 데이터 비교

초음파를 이용한 미세조류 분리 공정효율을 통계적 방법이 아닌 구분적 선형 상태 공간 모델링을 설계하여 초음파 분리공정의 미세조류의 수확량을 예측하였다. 구분적 선형 상태 공간 모델링은 공진기 내부의 동특성을 파악하여 세 부분으로 나누어 놓았으며, 상태방정식을 계산하여 실험변수 조합에 따른 분리공정의 분리효율 및 수확량을 예측하였다. 초음파 분리공정에 상태방정식을 적용하기 위해 실험은 *Chlorella* sp.를 사용하였고, 입력전원은 7W, 정지시간은 10초로 동일하게 하였다. 상태방정식은 실험 결과를 바탕으로 미세조류의 수확량을 계산하였고, 실험을 수행한 결과는 Table 3-9에 정리하여 나타내었다.

미세조류 분리실험을 수행하여 얻은 미세조류 농도는 스펙트로 포토미터를 사용하여 광학밀도로 측정하였기 때문에 초음파 분리공정으로 얻는 수확량을 계산할 수 없었다. 분리공정의 수확량을 계산하기 위하여 미세조류 농도에 대한 건조중량을 구하였으며, 건조중량을 얻기 위하여 미세조류 농도 변화에 따른 필터링을 한 뒤 하루정도 건조기에서 60℃로 건조시켜 건조중량을 측정하였다. 미세조류 농도 변화에 따라 건조중량을 구해본 결과 미세조류 농도가 높아질수록 크게 증가하였다. 미세조류 농도에 따른 건조중량의 변화는 Fig. 3-5에 나타내었다. 광학밀도와 건조중량 관계는 3차 다항식을 사용하여 추세선을 구하였다.

Table 3-9 Measured values of experimental design

Exp.	Run time (min)	Pump in (ml/min)	Pump out (ml/min)	Original OD ₆₈₀	Filtered OD ₆₈₀	Concentration OD ₆₈₀	Efficiency (%)
1	5	1.704	1.26	7.698	5.813	24.32	44.16
2	3	5.112	3.528	6.409	3.954	13.185	57.42
3	3	3.408	2.52	6.758	3.063	14.598	66.48
4	3	10.2	3.528	6.409	3.91	7.923	78.95
5	3	11.928	2.52	6.409	3.345	7.737	88.97
6	3	11.928	1.512	6.409	2.183	7.274	95.68

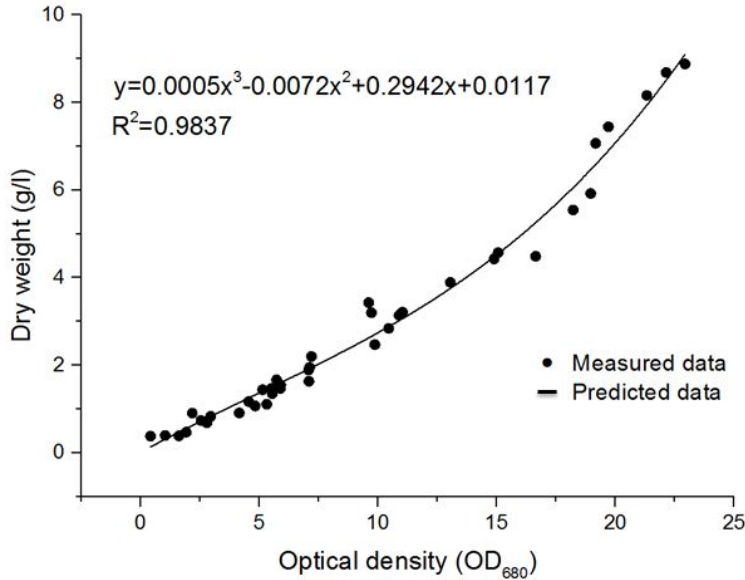


Fig. 3-5 Cubic equation fitting of optical density and dry weight

초음파 분리공정의 변수조합을 각각 다르게 실험한 여섯 개의 데이터를 상태방정식을 통하여 미세조류 분리 수확량을 계산하였다. 계산을 통한 수확량의 예측의 정확성을 판단하기 위해서 실험 결과와 비교를 하였다. 비교하는 결과는 초음파로 미세조류가 여과된 액체에서의 수확량과 응집된 액체에서의 수확량을 비교하였다. 실험 결과와 계산 결과에 대한 수확량의 비교 결과는 Fig. 3-6에 나타내었다. 농도가 낮은 곳에서의 수확량은 비슷한 결과를 얻을 수 있었고, 농도가 높은 곳에서의 수확량의 결과는 많은 차이를 보였다. 고농도로 응축된 미세조류의 액체를 측정할 때 회석을 하여 측정을 하게 되며, 회석으로 인해 발생하는 오차와 실험측정의 부정확성이 오차를 크게 발생시키는 것으로 판단하였다.

초음파 분리공정의 분리효율은 광학밀도, 건조중량, 상태방정식 계산으로 구한 분리효율에 대하여 비교하였다. 세 가지의 분리효율은 Fig. 3-7에 나타내었다. 광학밀도로 측정된 결과를 건조중량으로 바꾸어 비교한 결과 분리효율에 있어서 서로 비슷한 결과를 보였으며, 상태방정식 계산으로 예측한 결과도 비슷한 분리효율의 예측 결과를 얻었다. 공진기에서의 미세조류 응집영향을 고려하여 고농도 미세조류를 정확하게 측정할 수 있다면, 상태방정식 계산을 통하여 변수조합에 따른 초음파 분리공정의 분리효율과 수확량을 효과적으로 예측할 수 있다고 판단된다.

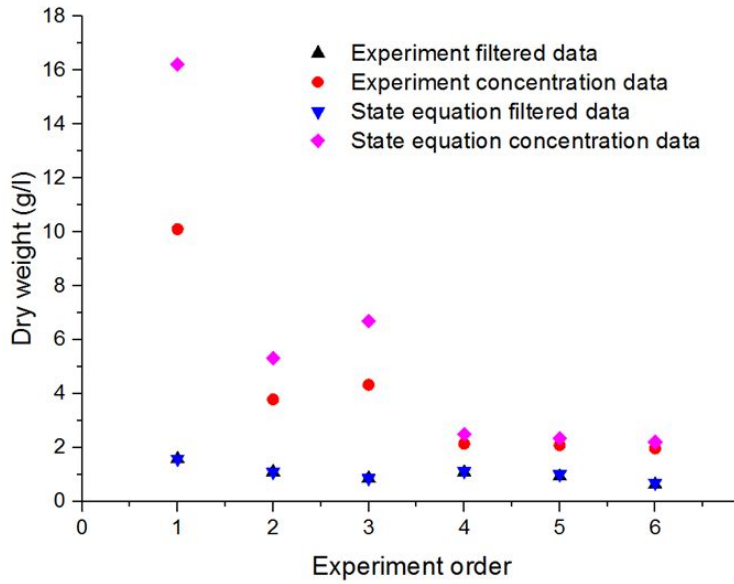


Fig. 3-6 Comparison between experiment data and state equation data

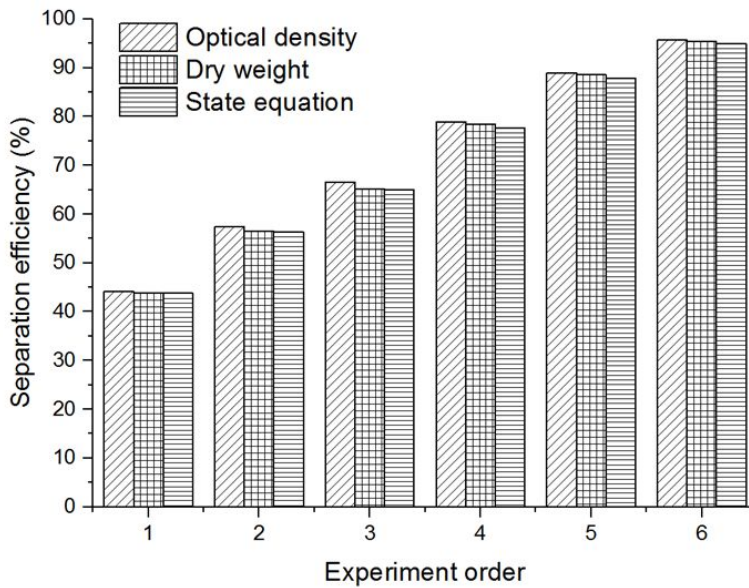


Fig. 3-7 Comparison of separation efficiency : optical density, dry weight, state equation

제 4 장 초음파 분리 공진기 scale-up

기존의 초음파 분리 공진기의 처리용량보다 늘리기 위하여 큐벳의 크기를 늘려 처리용량을 증가시키기로 하였다. 초음파 분리 공진기 scale-up 설계에 있어서 중요한 점은 트랜스듀서에서 발생하는 파장이 반사판에서 반사되어 공진기 내부에서 정상파가 형성되도록 설계하는 것이다^[30]. 큐벳의 크기는 37mm×37mm×58mm로 기존의 큐벳보다 용량을 약 4배 정도 크게 하였고, 파장에 대하여 반사판이 파복의 위치에 오도록 설계하였다. 늘어난 용량만큼 유량을 높이기 위하여 입·출구의 반경을 넓게 설계하였다. 초음파를 발생시킬 경우 PZT에 진동을 가하게 되고, 진동에 의해 PZT에 열이 발생하게 된다^[31]. 열이 발생하면 PZT의 성능이 떨어지기 때문에 열을 식혀주기 위해 공기순환통로를 만들어 열을 순환시켰다. 정밀한 실험을 하기 위하여 초음파 분리 공진기에 전해연마($Ra < 0.8\mu m$)로 처리를 하여 표면을 매끄럽게 하였다.

용량을 늘려 설계한 초음파 분리 공진기에서 발생하는 현상을 알아보기 위하여 음향장해석을 수행하였다. 다층공진구조형태는 기존의 형태와 동일하며 큐벳의 재질은 pyrex와 비슷한 성질을 지닌 quartz로 제작하였고, 작동 주파수는 동일하게 하였다. 음향장해석을 수행하여 다층공진구조에서 형성되는 파의 형태는 Fig. 4-1에 나타내었다. 그 결과 다층공진구조의 유체층에서 정상파가 형성되었다.

입자의 움직임을 예측하기 위하여 유체층에 형성된 음압의 분포를 음향장해석을 수행하였고 결과는 Fig. 4-2에 나타내었다. 유체에 형성된 음압분포의 영향으로 인한 입자의 움직임을 해석하였고 결과는 Fig. 4-3에 나타내었다. 입자들은 압력의 차이에 의해서 움직임을 보였고, 입자들이 노드점으로 일렬로 모이는 것을 확인하였다.

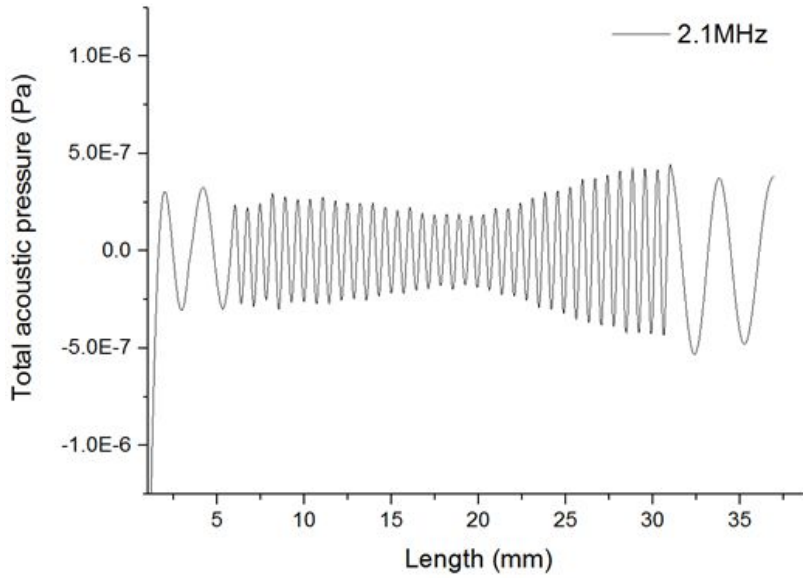


Fig. 4-1 Pressure distribution of ultrasonic separation resonator scale-up model

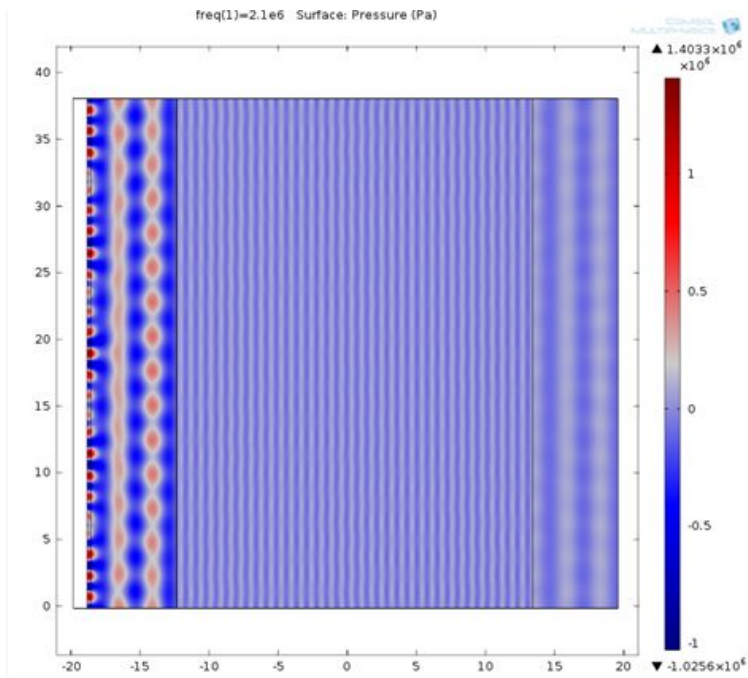


Fig. 4-2 Pressure distribution of water layer in resonator scale-up model

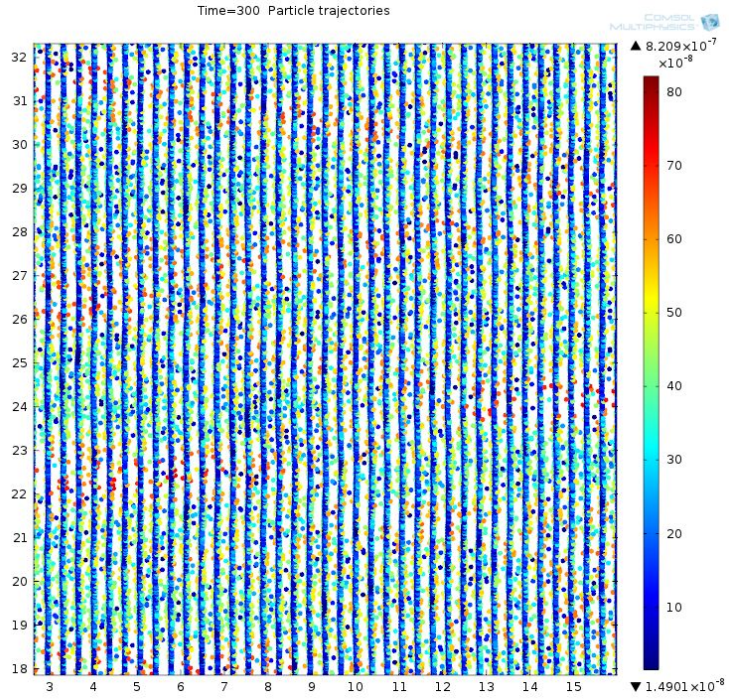


Fig. 4-3 Particles movement in ultrasonic region

제 5 장 결 론

본 연구에서는 음향트래핑에 의하여 미세조류를 액체의 유동에서 분리하는 공정을 설계하였다. 변수의 조합에 따른 미세조류 분리효율을 측정하였으며, 초음파와 분리공정의 효율을 예측하였다. 초음파를 이용한 미세조류 분리의 동특성을 예측하기 위해 미세조류가 응집되어 분리되는 원리를 이론을 통하여 파악하였다. 음향장해석을 통해 다층공진구조에서 가진 주파수에 따른 공진기 내부의 파동과 음압을 예측하였고, 실험 결과를 바탕으로 통계적 방법을 이용하여 초음파를 이용한 분리효율을 검증하였다.

1. 다층공진구조의 층들은 서로 평행하게 위치시키고, 트랜스듀서의 파동과 반사판에서 반사되는 파동이 만나 정상파가 형성되도록 반사판 위치를 파장의 파복에 위치시킨다. 다층공진구조의 가진 주파수는 음향장해석 결과를 바탕으로 에너지가 가장 큰 2.1MHz의 주파수를 사용하였으며, 음향 방사력을 이용한 입자분리조건은 $a \ll \lambda_0$ 를 만족해야 한다.

2. 음향 방사력을 이용한 초음파 분리는 입자크기가 작을수록 분리효율에 유리하다. 입력전원 변화에 따른 실험 결과 입력전원이 증가할수록 분리효율이 증가한다. 하지만 입력전원이 증가할수록 열이 발생하여 분리효율이 떨어지는 것을 고려해야 한다. 미세조류의 농도에 따른 실험 결과 OD₆₈₀ 6.2이상부터 분리효율이 감소하게 되는데, 이는 높은 농도에서는 미세조류가 미처 응집되지 못하고 밖으로 빠져나가기 때문이었다. 유속은 분리효율에 많은 영향을 미치며, 실험을 통해 유량비가 0.74ml/s에서 고농도로 응집된 미세조류와 높은 분리효율을 얻었다.

3. 통계적 방법으로 분석한 분리효율의 예측식은 실험 결과를 바탕으로 분석하였고, 4인자 2수준 요인배치법으로 구한 예측효율과 측정효율과의 차이에 대한 표준편차는 25.26으로 나타났으며, 보정을 거쳐 표준편차를 15.27로 낮출 수 있었다. 다중회귀분석의 예측효율과 측정효율의 차이에 대한 표준편차는 4.98로 낮은 표준편차를 가졌다.

4. 초음파 분리효율을 광학밀도, 건조중량, 상태방정식으로 구한 결과 서로 비슷한 결과를 나타내었다. 건조중량의 추세식과 상태방정식을 이용하여 수확량을 비교한 결과 높은 농도의 미세조류 수확량 예측은 차이가 많이 발생하였으나, 낮은 농도의 미세조류 수확량 예측은 정확하였다.

5. 미세조류의 분리용량을 높이기 위해 다층공진구조의 용량을 약 4배 정도 크게 하여 디자인하였고, 음향장해석 결과 다층공진구조에서 정상파 발생을 확인하였다. 미세조류의 움직임은 음향장해석을 통해 노드점에 모이는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Gi-Don Sung, Jin-Seok Lee, Jun-Pyu Lee, Mi-seon Kim, Sun-Cheol Park, "Carbon dioxide fixation by microalgae photosynthesis," The Korean Solar Energy Society, Vol. 95, pp. 82-87, 1995
2. Ju Oh, Ju-Shin Oh, "Future Resource of Microalgae," Technical Articles, Vol. 61, No. 2, pp. 85-90, 2013
3. Seong-Je Joe, "미래의 자원으로 각광받는 미세조류," SERI 경영 노트 제170호, 2012
4. Paul Chen, Min Min, Yifeng Chen, Liang Wang, Yecong Li, Qin Chen, Chenguang Wang, Yiqin Wan, Xiaoquan Wang, Yanling Cheng, Shaobo Deng, Kevin Hennessy, Xiangyang Lin, Yuhuan Liu, Yingkuan Wang, Blanca Martinez, Roger Ruan, "Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach," Int J Agric & Biol Eng, Vol. 2, No. 4, pp. 1-30, 2009
5. Cheol-Gyun Lee, "미세조류의 대양배양," Biotechnology Industry, Vol. 12, No. 4, pp. 22-29, 1999
6. Hee-Mock Oh, "미세조류 바이오매스의 연료화 연구개발 현황 및 전망," New & Information for chemical engineers, Vol. 29, No. 3, pp. 355-360, 2011
7. Rouke Bosma, Wim A. van Spronsen, Johannes Tramper and René H. Wijffels, "Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae", Journal of Applied Phycology, Vol. 15, pp. 143-153, 2003
8. Jeremy J. Hawkes and W. Terence Coakley, "A continuous flow ultrasonic cell-filtering method," Enzyme and Microbial Technology, Vol. 19, pp. 57-62, 1996
9. Seung-hyeon Cho, A. K. M. Ariful Haque Siddique, Dae-Cheol Seo, "초음파

- 를 이용한 미세채널 내 유동중 이중 미세입자 분리," KSME autumn symposium, pp. 89-90, 2010
10. Cheol-Ho Kim, "A Study on the Motion of the Levitated Object in Ultrasonic Near-field Acoustic Levitation," Korea Advanced Institute of Science and Technology Doctoral Thesis, 2007
 11. Seung-hyeon Cho, "초음파 이용 입자분리 및 제어기술," noise & vibrate, Vol. 18, No. 5, pp. 14-19, 2008
 12. J. Nilsson, M. Evander, B. Hammarström, T. Laurell, "Analytica Chimica Acta," Analytica Chimica Acta, No. 649, pp. 141-157, 2009
 13. Gwang-Ho Ahn, Sung-Won Kang, Jae-Hwan Ahn, I-Tae Kim, Eun-Ju Park, Yeong-Seop Lee, "정재파를 이용한 입자분리에 관한 연구," Proceedings of the Korean Environmental sciences Society Conference, Vol. 21, No. 21, pp. 526-527, 2012
 14. Nyborg, W. L., "Ultrasound: Its Applications in Medicine and Biology," Elsevier, pp. 1-76, 1978
 15. J. F. Spengler and W. T. Coakley, "Microstreaming Effects on Particle Concentration in an Ultrasonic Standing Wave," AIChE Journal, Vol. 49, No. 11, pp. 2773-2782, 2003
 16. Martin Gröschl, "Ultrasonic Separation of Suspended Particles-Part I: Fundamentals," ACUSTICA·acta acustica, Vol. 84, pp. 432-447, 1998
 17. Steven Murray Woodside, "Spatial Distribution of Acoustic Forces on Particles: Implications for Particle Separation and Resonator Design," University of British Columbia, The faculty of graduate studies, 1998
 18. Steven M. Woodside and James M. Piret, "Acoustic Force Distribution in Resonators for Ultrasonic Particle Separation," AIChE Journal, Vol. 44, No. 9, pp. 1976-1984, 1998

19. R.J. Townsend, M. Hill, N.R. Harris, N.M. White, "Modelling of particle paths passing through an ultrasonic standing wave," ELSEVIER Ultrasonics, Vol. 42, pp. 319-324, 2004
20. Martyn Hill, Yijun Shen, Jeremy J. Hawkes, "Modelling of layered resonators for ultrasonic separation," Ultrasonics, Vol. 40, pp. 385-392, 2002
21. Jongbum Seo, "Primary Radiation Force to Ultrasound Contrast Agents in Propagating and Standing Acoustic Field." The Acoustical Society of Korea, Vol. 28, No. 1E, pp. 1-8, 2009
22. Ruibin Liu, Kasia A. Harasiewicz, and F. Stuart Foster, "Interdigital Pair Bonding for High Frequency(20-50MHz) Ultrasonic Composite Transducers," IEEE Transacts on Ultrasonics, Vol. 28, No. 1, pp. 299-306, 2001
23. Bin Li, Jeong Ho You and Yong-Joe Kim, "Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator," Smart Materials and Structures, Vol. 22, pp. 1-9, 2013
24. W. Terence Coakley, "Ultrasonic separations in analytical bioechnology," TIBTECH, Vol. 15, pp. 506-511, 1997
25. S. Radel, A. J. McLoughlin, W. T. Coakley, M. Gröschl and E. Benes, "Behaviour of Suspended Particles in Water-Rich Ethanol Mixtures Irradiated with an Ultrasonic Standing Wave," WCU 2003, pp. 1639-1645, 2003
26. Yong-Dae Park, Won-Ho Yang, Seong-Pil Heo, Gi-Deuk Seong, "A Study on the Axial Stiffness Prediction of Stand Using Analysis of Variance," KSME collection of dissertations A, Vol. 25, No. 1, pp. 127-134, 2001
27. Mun-Hwan Lee, "A Study on the Optimization of the Mix Proportions of High Strength Concrete Fire-Resistant Reinforcement Using Orthogonal Array Table," Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 21, No. 2, pp. 179-186, 2009

28. Yu-Jae Lee, "Testing Main Effects in Interactive Multiple Regression." Business Administration Research, Vol. 23, No. 4, pp. 183-210, 1994
29. H.J. Cappon, L.A. Stefanova, K.J. Keesman, "Concentration based flow control in acoustic separation of suspensions," Separation and Purification Technology, Vol. 103, pp. 321-327, 2013
30. Marco Aurélio B. Andrade, Nicolas Pérez Alvarez, Flávio Buiochi, Carlos Negreira, Julio Cezar Adamowski, "Analysis of 1-3 Piezocomposite and Homogeneous Piezoelectric Rings for Power Ultrasonic Transducers," ABCM, Vol. 31, NO. 4, pp. 312-318, 2009
31. Martin Wiklund, "Acoustofluidics 12: Biocompatibility and cell viability in microfluidic acoustic resonators," Lab Chip, Vol. 12, pp. 2018-2028, 2012