

# Particle Separation Characteristics and Harvesting Efficiency of *Spirulina platensis* Using Micro-bubble

미세기포를 이용한 *Spirulina platensis*의 입자 부상분리 특성 및 수거효율

Gyu-Dong Gwak<sup>1</sup> · Mi-Sug Kim<sup>2</sup> · Dong-Heui Kwak<sup>3\*</sup>

곽규동<sup>1</sup> · 김미숙<sup>2</sup> · 곽동희<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Chonbuk University · <sup>2</sup>Korean Urban Regeneration Technology Institute · <sup>3</sup>Department of Environmental and Chemical Engineering, Seonam University

<sup>1</sup>전북대학교 환경공학과 · <sup>2</sup>(사)한국도시재생기술연구원 · <sup>3</sup>서남대학교 환경화학공학과

**Abstract :** Since algae had been issued an environmental problem, water blooms, deepened due to increase of retention water basin in Korea as well as a biomass resource for producing biofuel, this study conducted a series of experiments for *Spirulina platensis* using the flotation process with micro-bubble. To elevate utilization of collected-algae, this study focused on omitting or minimizing coagulant's doses as changing a cultivation period and condition affected on physical property change of algae. Two coagulants, PAC and Chitosan, were used to test the collecting rate of algae and the result found no difference between two rates. For flotation experiments without adding the coagulant, dried algae weight (passing 14 days after cultivation for 20 days) detected high separation efficiency 98.2 % and it (passing 7 days after long-term cultivation for 28 days) presented good separation efficiency 91.9 %. Chlorophyll's separation efficiency showed a similar tendency with the case of the dried algae weight. In endogeneity conditions, a light source and a carbon source were not considerably affected on the flotation separation efficiency. Thus, this study confirms that algae biomass may be collected without the coagulant during the endogeneity condition period after enough cultivation time, 3 weeks.

**Key words :** Algae, Harvesting, *Spirulina platensis*, Bubble, Flotation

**주제어 :** 조류, 수거, 스피루리나, 기포, 부상

## 1. 서론

기후변화와 국제유가 상승은 미래 대체에너지에 대한 수요시기를 앞당기고 있으며 이에 부응하여 세계 각국에서는 신재생에너지 연구개발에 박차를 가하고 있다. 장차 화석연료의 대안이 될 수 있는 에너지원의 하나는 바이오매스이며, 이 바이오매스 중 조류(algae)는 단위중량당 바이오연료 생산수율이 상대적으로 크게 높은 것으로 알

려져 있다. 그러나 바이오연료의 재료 중 조류의 생산수율이 타 재료에 비해 월등히 높음에도 불구하고 아직 차세대 에너지원으로 각광받지 못하고 있는 이유는 높은 생산비용에 있으며, 배양단계보다는 미세조류의 대용량 harvesting과정에서 비용발생이 크다. 아직은 효과적인 분리와 수확기술의 개발이 미진한 상황이며 이에 대한 연구개발이 활발히 전개되고 있다. 바이오연료 생산을 위한 미세조류의 배양기법 연구에 비하여 수거(harvesting)에 대한 연구는 상대적으로 미진한 상황이었다. 조류의 연구 개발은 주로 bio-

\* Received 23 September 2013, revised 12 October 2013, accepted 15 October 2013.

\* Corresponding author: Tel : +82-63-620-0223 E-mail : kwak124@hanmail.net

technology 관련 연구자와 기업에서 추진되어져 왔으며 이에 따라 조류의 배양과 유용물질의 추출에 대한 기술이 크게 향상되었으나, 미세조류의 입자분리와 수거에 관한 기술은 크게 개선되고 있지 못하다.

미세 조류의 수거기술로 적용되는 공정들은 원심분리, 침전, 부상, 여과, 막분리 등이 주류를 이루고 있으며, 조류입자의 분리에 대한 연구는 주로 수질공학자들에 의하여 녹조억제나 수처리를 위하여 수행되었고 유용한 물질의 분리를 위하여 분리공정이나 생물공학자들에 의하여 일부 조류의 입자제거에 대한 연구와 기술개발이 있었다. Sim(1988)은 원심분리, DAF(dissolved air flotation)와 드럼여과(drum filtration) 등을 비교 연구하였으며 원심분리는 높은 에너지 수요와 대용량의 시설확대 한계, DAF는 응집제의 독성유발과 활용가치 저해 그리고 여과는 느린 입자분리속도와 운전관리 한계 등의 문제점을 보고하였다. Xu 등(2010)이 수행한 연구에 의하면, 원심분리, 여과, 응집부상 등 수거 기술로 상용화된 공정들이 여전히 기술적 문제와 경제성 개선을 위한 노력이 필요하며, 전해응집(electro-flocculation)을 결합한 유도공기부상(dispersed-air flotation) 공정도 유용한 성과를 나타내었으나 금속이온의 처리와 운전관리상의 어려움 등 현실적인 문제도 나타나 적용상 과제를 안고 있다. 최근에는 미세조류의 수거연구에 Ross 등(2009)과 Zhang 등(2010)의 연구자들이 한외여과(ultra-filtration)를 적용하였으며 DAF(Elder, 2011)나 Foam Flotation(Barrut et al., 2013)과 같은 부상분리를 통하여 미세조류의 수거에 대한 연구를 수행하는 등 향후 조류 입자 분리효율 향상을 위한 연구개발이 한층 활발히 전개될 것으로 예상된다.

한편, 잠재 자원으로 부각을 나타내고 있는 미세조류(micro-algae)는 주로 식량과 생물 사료 또는 생물학적 비료로 이용되어 왔으며, 대표적으로 *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nostoc*, *Aphanizomeno* 등이 생명공학분야에 성공

적으로 사용되고 있다 (Pulz and Gross, 2004). 다양한 미세조류 중에서 상대적으로 biomass 생산량이 많으며, 다른 종보다는 배양이 용이하다는 점 등을 고려하여 *Spirulina platensis*를 본 연구의 대상 미세조류로 선정하였다. 본 연구에서는 수거기술 중 콤팩트한 장치로 현장 적용성이 좋은 부상분리를 적용하여 조류생체를 수거함에 있어서 다양한 조건에서 일련의 부상분리 실험을 통하여 조류 입자의 분리 특성을 파악하고 수거 효율과 적절한 수거조건을 도출하고자 하였다. 수거된 조류매스의 활용성을 높이기 위하여 무기응집제인 PAC와 천연유기 응집제 키토산(chitosan)을 비교 하였고, 응집제 투입량을 줄이기 위한 실험으로 영양소와 탄소공급원의 차단 등을 통한 실험을 진행하였다.

## 2. 시료 및 연구 방법

### 2.1 시료

본 연구에서 실험재료로 선정한 *Spirulina*는 사상형의 단세포성 남세균(Cyanobacter)으로써 따뜻한 지역을 중심으로 아프리카, 아시아, 남아메리카, 유럽 등에서 서식하며, 알칼리성 환경에서 잘 증식한다(Fox, 1996). *Spirulina*는 60 ~ 70 %의 단백질, 풍부한 비타민을 함유하고, 불포화지방산인 GLA(gamma-linolenic acid)를 다량 함유하고 있어서 애완동물용 및 수산양식용 사료의 첨가제, 건강보조식품 등 다양한 분야에서 이용되고 있다(Walach, et al., 1987). 특히, 세포벽은 셀룰로스가 없으므로 산업적으로도 매우 유용한 것으로 알려지고 있다(Kim et al, 2006). Biomass에 이용되는 *Spirulina platensis*의 지질 함량은 4.0 ~ 16.6 % (dry weight), 단위면적당 biomass 생산량은 24 ~ 51 g/m<sup>2</sup>/day이었다. 이는 *Chlorella*의 0.02 ~ 7.70 g/m<sup>2</sup>/day, *Dunaliella* 0.12 ~ 0.34 g/m<sup>2</sup>/day 등 보다 많은 것이다. *Spirulina*의 생산량은 전 세계적으로 연간 약 3천 톤에 달하고 있고 대부분 상업적으로 생산되고 있다(Shi-

mamatsu, 2004).

본 실험에서 균주배양에 사용한 배지는 알칼리성 무기배지인 SOT 배지로, 조성은 다음 Table 1과 같이 SOT(Ogawa and Terui, 1970)를 각각 121 °C에서 15분간 멸균, 냉각시켜서 혼합 후 pH를 NaOH를 이용하여 9.0±0.1로 조절하여 사용하였다.

### 2.2 실험장치

실험에 사용한 biomass 수거용 부상컬럼은 1.5 l 용량(직경 7 cm, 높이 50 cm)의 투명 아크릴로 제작하였으며 여기에 공급되는 미세 기포는 스테인레스 재질의 saturator에서 5.0±0.1 atm의 압력으로 생성되는 포화수(milky water)를 주입하였다. 그리고 *Spirulina platensis*의 배양에 사용한 배양컬럼은 광생물반응기(photo-bioreactor)를 별도로 제작하여 가운데에 LED광원을 설치하고, 25±5 °C의 온도를 유지하기 위해서 온열기를 장치하였다. *Spirulina platensis*가 성장하는데 필요한 탄소원인 공기가 유입될 수 있게 밀폐하지 않았으며, 물의 흐름이 없어서 정체되어 오염되는 것을 방지하기 위해 마그네틱 바를 이용하여 30 rpm이하로 배양조 저부에서 혼합하였다.

본 연구에서 사용한 *Spirulina platensis*의 배양컬럼과 미세기포 공급장치를 포함한 부상분리 실험장치 모식도는 다음의 Fig. 1과 같다.

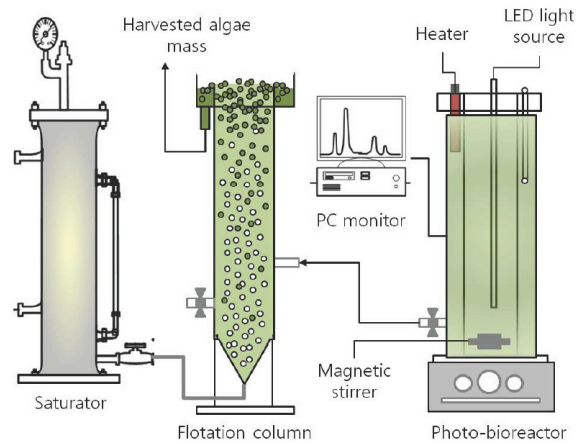


Fig. 1. Schematic diagram of cultivation column and air bubble supply device.

### 2.3 실험 및 분석방법

다음의 Fig. 2는 본 실험의 조건들을 나타낸 것으로, Run A에서는 배양일수 21일에 수행된 것으로 PAC( $Al_2O_3$  10%)와 키토산의 응집제 종류에 따라서 분류하였다. Run B에서는 21일을 초과하여 영양원을 차단한 상태에서 배양일의 경과에 따라 응집제를 주입하지 않고 조류매스 수거를 위한 부상분리를 실시하였으며, Case C에서는 광생물반응기의 개폐여부에 따라 응집제를 주입하지 않은 상태에서 수거율의 차이를 살펴보고자 실험을 진행하였다.

Table 2. Samples and operation conditions for algae mass harvesting

Cultivation period	7 days	14 days	21 days	28 days	Repetition	
Nutrient supply	SOT media	Nutrient limit				
Run A	PAC	-	-	A1	-	3
	Chitosan	-	-	A1	-	3
Run B : Without coagulant Open system	1	B1	-	-	-	12
	2	-	B2	-	-	12
	3	-	-	B3	-	14
	4	-	-	-	B4	4
Run C : Without coagulant	Open	-	-	C1	-	3
	Close	-	-	C2	-	3

Table 1. Composition of SOT media

NaHCO <sub>3</sub>	1680 mg	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	50 mg
NaNO <sub>3</sub>	250 mg	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100 mg
NaCl	100 mg	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	20 mg
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	4 mg	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	1 mg
Na <sub>2</sub> EDTA · 2H <sub>2</sub> O	8 mg	A5 metal solution <sup>1)</sup>	1 ml
Distilled water	99.9 ml		
<sup>1)</sup> A5 Trace-metals mix to 1 liter of distilled water add (Holm-Hansen, et al., 1954) :			
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86 g	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O <sup>1)</sup>	1.81 g
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.222 g	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.039 g
ZuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.079 g	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.0494 g

1) In the NIES-Collection, 250 mg MnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O is replaced by 217 mg MnSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O.

조류 매스의 수거율 측정에서 수거된 조류의 균체량은 분광 광도계 UV/Vis spectrophotometer (UVmini-1240, SHIMADZU)를 이용하여 520 nm에서 측정한 O.D.(optical density, 흡광도)값과 건조 균체량(Dry Cell Weight, DCW)의 상관관계식을 이용하여 계산하였다. 건조 균체량은 항량된 evaporating dish를 이용하여 균체를 105 °C에서 3시간 건조하여 그 무게를 측정하여 다음 식 (1)의 상관관계식을 산출하였다.

$$\text{Dry Cell Weight(g/L)} = 32.464 \times OD_{520} + 0.1394 \quad (1)$$

클로로필 측정은 본 연구에서 사용된 *Spirulina platensis*는 원심분리를 하면 쉽게 가라앉지 않고 균체의 완전한 분리가 어렵기 때문에 paper filter 여과를 통하여 균체를 분리하여 분석하는 Chen의 방법을 변형하여 사용한 김의 방법을 차용하였다(Kim et al, 2010). 10 ml 균체를 paper filter로 여과한 후 같은 양의 methanol을 첨가하였다. 그리고 60 °C에서 30 분간 추출한 다음, 0 °C에서 5분 동안 냉각하여 650 nm, 665 nm에서 흡광도를 측정하였고 아래와 같은 식 (2)에 대입하여 클로로필 함량을 계산하였다.

$$\text{Chlorophyll(mg/L)} = 25.5 \times OD_{650} + 4 \times OD_{665} \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수거율과 응집부상 특성

3주간 배양된 *Spirulina platensis*의 일부 시료를 취해 saturator 5.0±0.1 atm의 압력으로 분출된 미세기포를 주입하여 조류 매스를 부상 분리하였다. 응집제는 PAC 40 ppm을 주입하고 135 rpm(0.5 min)으로 급속혼합과 45 rpm(5 min)의 완속교반을 거친 후, 공기주입농도(air volume concentration, AVC)를 증가시키면서 실험을 실시하였다. 건조중량을 기준

으로 *Spirulina platensis*의 수거율은 1.0 L당 3.41 ~ 10.23 mg의 범위를 나타내었고 Chlorophyll은 1.0 L당 7.07 ~ 10.18 mg의 범위이었다. 전체적으로 분리효율은 27.9 % ~ 83.7 %의 범위이었으며 AVC 5.0 mL/L에서 75.7 %를 나타내었고 이후 입자분리 효율은 크게 증가하지는 않았다. 이 결과를 기초로 포화수(milky water) 주입량을 조절하여 AVC 5.0 mL/L를 기준으로 실험을 진행하였다.

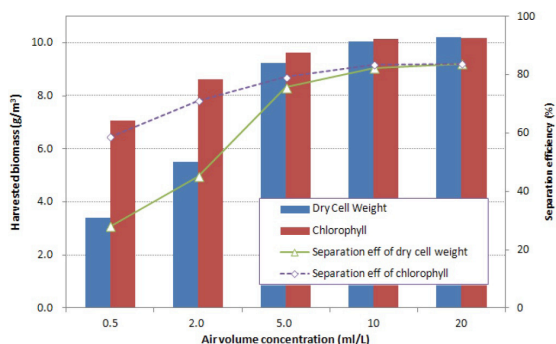


Fig. 2. Harvesting efficiency depending on air volume concentration for flotation column.

한편, *Spirulina platensis*의 고유 특성상 주간 명조건에서는 자체적으로 부상하는 경향을 가지며 반대로 야간 암조건에서는 침전하는 특성을 가지고 있다. 이에 따라 자체 부상에 의한 부분과 미세 기포와의 결합을 통한 부분을 구분하기 위하여 미세기포를 주입하고 기포층(bubble cloud)에 의해 빠르게 부상하는 2분간의 수거량만을 부상분리된 수거율로 산정하였다.

응집제 주입율에 따른 조류매스의 수거율은 다음의 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 응집제로 PAC를 사용할 경우 주입율 50 ppm 부근에서 가장 좋은 수거율을 보였으며 이 이상의 주입율에서는 수거율이 뚜렷하게 상승하지 않았다.

수거된 조류매스는 조류 종에 따라 다르지만 대체로 식물비료에서부터 동물사료뿐 아니라 산업 재료로서 화학공업, 의약 및 생명과학 분야까지 널리 사용되고 있다. 여기서 분리과정에서 주입된 응집제는 수거된 조류매스의 활용에 제

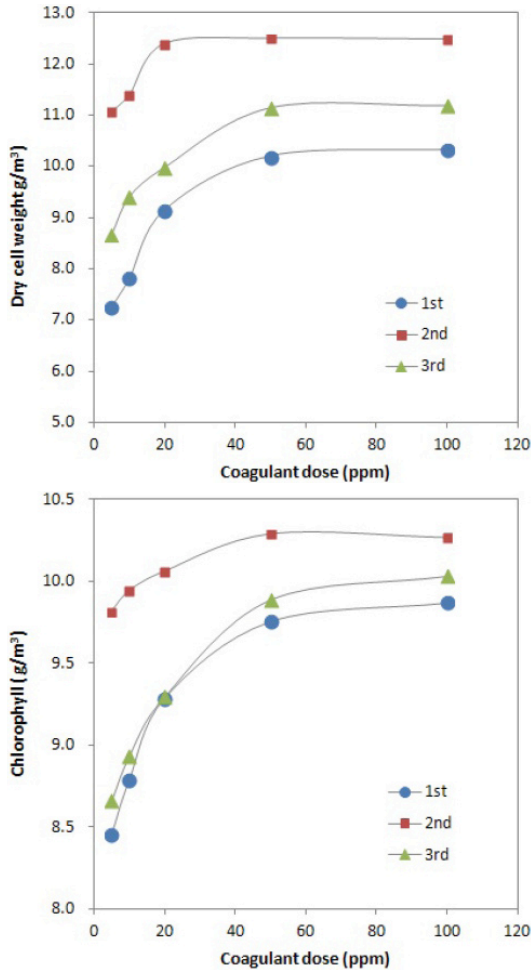


Fig. 3. Variation of harvesting efficiency depending on PAC dose (Run A).

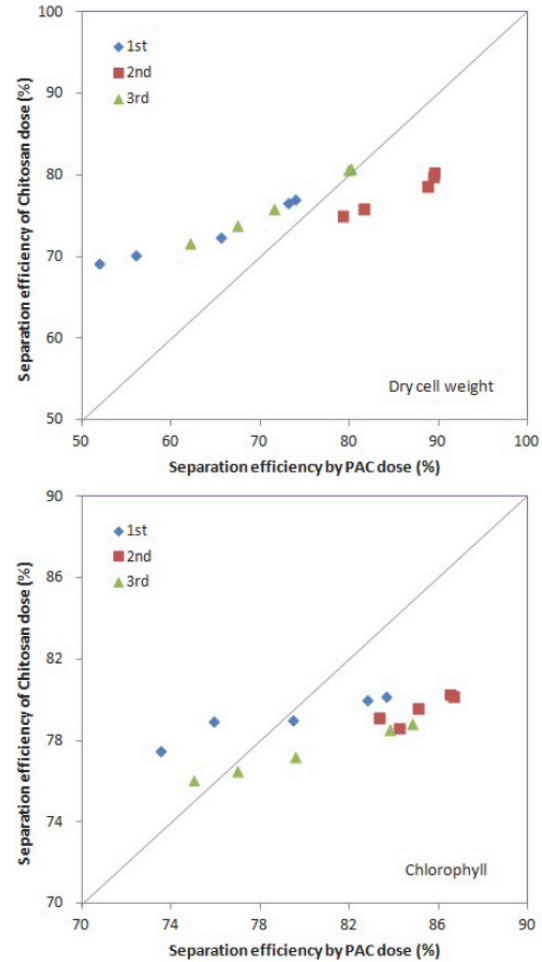


Fig. 4. Comparison of harvesting efficiency between PAC and chitosan (Run A).

약을 가져오게 된다. 본 절에서는 PAC와 같은 무기응집제의 사용에 의한 제한을 피하기 위하여 유기응집제를 사용할 경우를 감안하여, PAC와 키토산의 주입율에 따른 수거율을 비교하여 보았다.

일반적으로 두 독립변수간 동일한 외부 영향 인자의 단순 비교를 위하여 Yuden 도표를 사용하는데(Berthouex et al, 2001), Fig. 4는 PAC와 키토산의 응집제 주입율 변화에 따른 수거율을 나타내고 있다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 5.0 ppm ~ 100 ppm의 주입율 범위에서 두가지 응집제의 수거율은 상호 큰 차이를 보이지 않았으며 실험 차수별로 그리고 건조중량

과 Chlorophyll 항목별로 약간 다른 양상을 나타내었다. 전반적으로 분리효율이 가장 좋을 때와 가장 낮을 때의 변화 폭이 키토산보다 PAC가 더 크게 나타났다. 또한 응집제의 주입 농도가 낮은 경우 PAC보다 키토산의 부상분리 효율이 더 좋았으며 높은 주입율 농도에서 PAC의 수거율이 좋게 나타나는 현상을 보였다. Cheong (2010)에 따르면, 이는 키토산이 아미노기를 가지고 있으므로 수용액 중에서 양이온성의 전하를 가지는 전해질이 되어 높은 pH 상태에서 음전하를 가지는 *Spirulina platensis*에 흡착하기 때문에 상대적으로 낮은 pH 상태에서 응집하는 PAC보다 키토산이 더 나은 응집 효율을

보이는 현상으로 생각된다. 또한 Pernitsky와 Edzwald(2003)에 따르면 PAC와 같은 무기응집제는 pH의 영향을 상대적으로 많이 받아 높은 pH 영역에서는 키토산이 PAC보다 처리효율면에서 유리할 수 있다. 결국 수거된 조류의 이용 목적과 배양상태에 따라 사용하는 응집제의 종류를 선택하는 것이 바람직하며, 대상 조류 종류와 배양액의 농도와 pH, 이화학적 성질에 따라 반응특성은 크게 달라질 수 있으므로 단순히 수거율을 기준으로 응집제 선택을 위한 무기응집제나 유기응집제의 단순 효율 평가는 크게 의미가 없을 것으로 여겨진다.

### 3.2 배양기간에 따른 분리특성

조류매스의 수거에서 주입되는 응집제는 수거된 조류가 산업적 원료로써 제한을 가져오므로 가능한 한 응집제를 주입하지 않거나 최소화하는 것이 중요하다. 생물학적 입자는 통상 성장단계별로 입자의 물성이 변화하여 플록을 형성하고 표면특성이 달라져 기포와의 부착효율도 변하게 된다(Jung et al., 2006). 본 연구에서는 PAC나 키토산과 같은 응집제를 넣지 않은 상태에서 *Spirulina platensis*의 부상분리가 어느 시기에 나타나는지를 알아보기 위하여 배양일수에 따라 부상분리 특성변화를 조사하였다. *Spirulina platensis*의 최소 배양일수는 7일에서 10일인데, 장기배양했을 때 균체수 감소나 건조균체량 감소 등의 상태 변화가 21일부터 일어난다(Kim et al., 2006).

배양일수에 따른 부상분리 효율을 살펴보기 위하여 배양일수를 달리하여 일련의 실험을 실시하였다. 실험은 영양소의 공급이 있는 배양컬럼에서 7일, 14일, 21일, 28일 경과한 시료를 분취하여 영양소 공급이 없는 상태에서 시간 경과에 따라 미세기포를 주입하여 부상분리를 실시하였다. 시료는 단계별로 성장한 *Spirulina platensis*를 분취후 내생호흡 상태가 되는 경과시간을 35까지 연장하여 실험을 실시하였다.

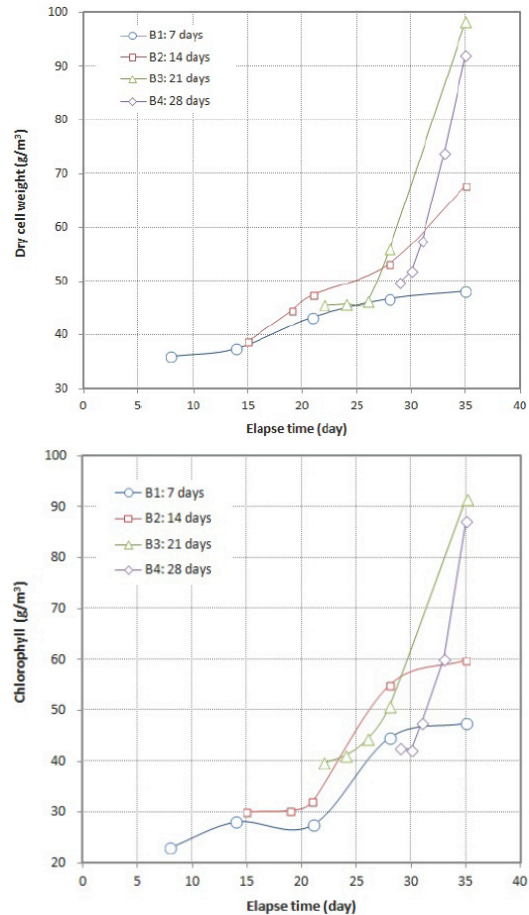


Fig. 5. Harvesting efficiency in terms of elapse time without nutrients supply (Run B).

영양소의 공급이 없는 내생상태의 경과시간에 따라 각 시료별로 다른 분리특성을 나타내었다. 건조균체량을 살펴보면, 다음의 Fig. 5와 같이 7일간 배양한 시료(B1)의 경우는 36.1% ~ 48.1%의 범위를 나타내었고 14일 배양한 시료(B2)는 38.8% ~ 67.8%의 범위로 비교적 저조한 분리효율을 나타내었다. 반면, 21일 배양한 시료(B3)는 분취한 초기에는 45.6 ~ 46.3%의 분리효율이었지만, 7일 경과시기는 55.9%, 14일 경과일에서는 98.2%의 높은 분리효율을 보였다. 그리고 28일로 장기간 배양한 시료(B4)는 분취 초기에는 49.7 ~ 57.5%의 분리효율을 보였지만, 5일 경과일에는 73.9%, 7일 경과일에는 91.9%의 양호한 분리효율을 나타내었다.

클로로필의 분리 효율도 건조균체량과 유사한 경향을 보였으며, 7일과 14일 경과시료는 비교적 낮은 분리효율을 보인 반면, 21일경과 시료(B3)는 분취후 초기단계에서는 39.8 ~ 44.4 % 였지만, 경과일수 7일 50.8 %, 14일에는 91.5 % 의 높은 분리효율을 나타내었다. 28일로 장기간 배양한 시료(B4)의 경우도 초기 기간에는 42.7 ~ 47.7 % 분리 효율을 보였지만, 5일 60.2 %, 7일 87.2 %의 양호한 분리 효율을 나타내었다. 공통적으로 분취후 초기단계에서 낮은 분리효율을 보인 이유는 배양 배지에 남아있는 영양분 등이 소량 잔류하여 *Spirulina platensis*의 생장이 며칠간 유지된데에서 기인된 것으로 여겨진다. 특히, 7일과 14일에 분취한 시료에서는 *Spirulina platensis*의 생장이 충분하지 않아 기포와의 결합이 원활히 이루어지지 않은 원인으로 판단되며, 다른 문헌에서도 언급되어진 3 주간의 배양기간이 지난후부터는 영양소 공급이 없는 조건에서 내생기간의 경과에 따라 분리 효율이 증가되는 경향을 뚜렷하게 보여주었다. 아울러 1주일을 더 연장하여 배양한 28일 시료(B4)에서는 내생상태의 경과시간에 따라 부상분리 효율을 빠르게 개선되었다. 이상과 같이 충분한 정도의 배양이 이루어진 후 내생상태의 기간 경과에 따라 응집체의 주입 없이 조류매스의 수거가 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만 35일 이상의 긴 배양기간은 배양기 용량과 운전동력비 소모 등을 유발하기 때문에 향후 조류의 생리특성을 비롯한 다양한 요소를 고려하여 보다 짧은 배양기간으로 응집체의 소요량을 최소화할 수 있는 후속 연구가 요구된다. 아울러 조류의 배양기간 및 영양소공급이 경과시간에 따라 세포표면의 제타전위와 같은 조류세포의 물성 변화에서 야기되었을 것으로 예상되며 향후 이 부분에 대한 세밀한 측정분석도 필요하다고 본다.

### 3.3 내생 성장시기의 반응기 조건

앞에서 조류세포의 표면물성 변화를 유발하

는 기인된 것으로 여겨지는 조류세포의 내생성장 시기의 조건으로 영양소의 공급뿐 아니라 광원, 탄소원 등의 주된 조건을 들 수 있다. 본 절에서는 내생상태의 경과에서 LED 광원의 공급 여부와 반응기 상부개폐에 따른 탄소원 차단여부 등이 *Spirulina platensis*의 부상분리효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 실험은 21일 배양한 시료(B3와 동일한 시료)를 취하여 2주간 광원과 탄소원의 공급 또는 차단여부를 조건별로 구분하여 실시하였다. 실험 결과 다음의 Fig. 6에 나타난 것처럼 내생상태에서는 광원의 공급 여부와 반응기의 개폐를 통한 탄소원의 차단여부가 부상분리 효율에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

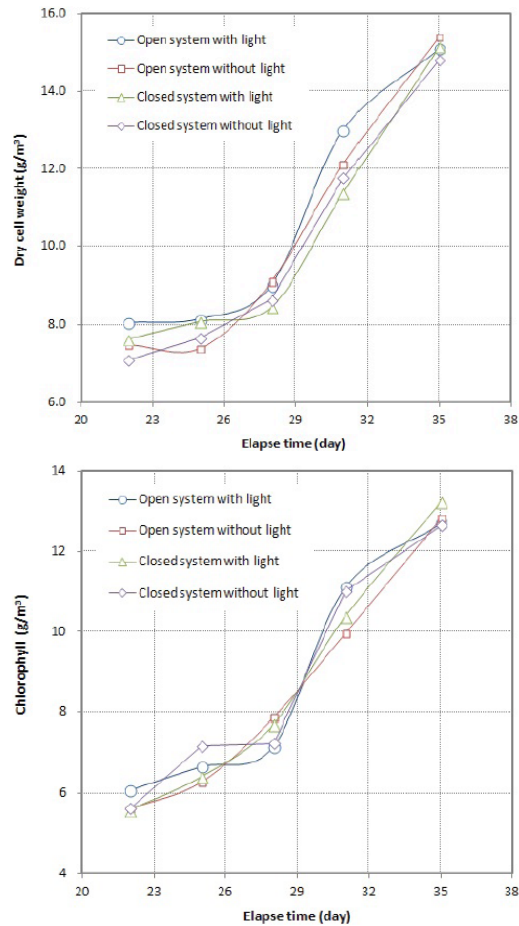


Fig. 6. Harvesting efficiency of algae mass depending on light source and open/closed reactor in terms of elapse time (Run C).

#### 4. 결론

우리나라의 정체수역 증가에 따른 녹조 심화와 바이오연료의 공급원으로 부각되고 있는 미세조류의 이용을 목적으로 본 연구에서는 *Spirulina platensis*를 대상으로 미세기포를 이용하여 일련의 부상분리 실험을 실시하였다. 특히 수거된 조류의 활용성을 높이고자 조류입자의 물성변화에 영향을 미치는 배양기간과 조건을 변화시켜 응집제를 생략하거나 최소화시키는데에 연구의 주안점을 두었으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 3주간 배양된 *Spirulina platensis*의 시료를 PAC 40 ppm, 공기주입농도 5.0 mL/L에서 건조균체량은 1.0 L당 3.41 ~ 10.23 mg의 수거 범위를 나타내었고 클로로필은 1.0 L당 7.07 ~ 10.18 mg을 수거할 수 있었다.
2. 응집제로써 PAC와 키토산의 응집제 주입을 변화에 따른 수거율은 두 가지 응집제에서 상호 큰 차이를 보이지 않았으며 전반적으로 분리효율의 변화 폭이 키토산보다 PAC가 더 크게 나타났다.
3. 응집제를 주입하지 않고 실시한 부상분리 실험에서 배양기간을 단계별로 달리하여 채취한 시료는 영양소의 공급이 없는 내생상태의 경과시간에 따라 다소 다른 분리특성을 나타내었다. 건조균체량은 21일 배양한 시료가 14일 경과한 후 98.2 %의 높은 분리 효율을 보였으며 28일 장기 배양한 시료도 7일 경과 후에 91.9 %의 양호한 분리 효율을 나타내었다. 클로로필의 분리 효율도 건조균체량과 유사한 경향을 보였다.
4. 광원과 탄소원의 공급 또는 차단여부가 미치는 영향을 확인하고자 실시한 본 실험에서는 내생상태에서 광원의 공급여부와 반응기의 개폐를 통한 탄소원의 차단여부가 부상분리 효율에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

본 실험을 통하여 3주 정도의 충분한 배양이 이루어진 뒤 내생상태의 기간 경과에 따라 응집제의 주입 없이 조류매스의 수거가 가능함을 확인할 수 있었다. 한편 장기간의 배양은 대용량의 배양기와 운전동력비 소모 등을 유발하기 때문에 향후 조류의 생리특성을 비롯한 다양한 요소를 고려하여 보다 짧은 배양기간으로 응집제의 소요량을 최소화할 수 있는 후속 연구가 요구된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2012R1A1A4A01010342)입니다.

#### 참고문헌

- Barrut, B., Blancheton, J.P., Muller-Feuga, A., René, F., arváez, C., Champagne, J.-Y., and Grasmick, A. (2013), Separation efficiency of a vacuum gas lift for microalgae harvesting, *Bioresource Technology*, **128**, pp.235 - .240.
- Berthouex, P. M. Brown, L. C., Berthouet, M., (2001), *Statistics for Environmental Engineers* 2nd Edition, CRC.
- Cheong, C. J. (2010), Research Papers : Evaluation of Chitosan Application as an Alternative Coagulant of Aluminium Containing Coagulants in Water Treatment Processes, *Journal of Chitin and Chitosan*, **15**(1), pp.24-28.
- Elder, A. R. (2011), Optimization of Dissolved Air Flotation for Algal Harvesting at the Logan, Utah Wastewater Treatment Plant, Thesis of Master of Science, Utah State University, 2011
- Fox R.D. (1996), *Spirulina production and potential*. Edisud, Aixen-Provence, France.
- Holm-Hansen, O., Gerloff, G. C., Skoog, F. (1954), Cobalt as an essential element for blue-green algae. *Physiol. Planta.*, **7**, pp.665-675.



- Jung, H. J., Lee, J. W., Choi, D. Y., Kim, S. J., and Kwak, D. H. (2006), Flotation efficiency of activated sludge flocs using population balance model in dissolved air flotation, *Korean J. Chem. Eng.*, **23**(2), pp. 271-278.
- Kim, C.J., Jung, Y.H., Choi, K.G., Park, Y.H., Ahn, C.Y., and Oh, H.M. (2006), Optimization of Outdoor Cultivation of *Spirulina platensis* and Control of Contaminant Organisms, *Algae*, **21**(1), pp.133-139.
- Kim, Y.M., Kim, J.Y., Lee, S.M., Ha, J.M., Kwon, T.H., and Lee, J.H. (2010), Carbon dioxide fixation using *Spirulina platensis* NIES 39 in polyethylene bag, *Appl. Chem. Eng.*, **21**, pp.271.
- Ogawa, T., Terui, G. (1970), Studies on the growth of *Spirulina platensis*. (I) On the pure culture of *Spirulina platensis*. *J. Ferment. Technol.*, **48**, pp.361-367.
- Pernitsky, D.J. and Edzwald, J.K (2003), Solubility of poly aluminium coagulants, *Journal of Water Supply : AQUA*, **52**, pp.395-406.
- Pulz, O., Gross, W., (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **65**, pp.635-648
- Ross O. Youngs, Inc and Algae Venture Systems, (2009), *Harvesting, Dewatering, and Drying Technology*, Property of Univenture, Inc.
- Shimamatsu H. (2004), Mass production of *Spirulina*, an edible microalga. *Hydrobiologia*, **512**, pp.39-44.
- Sim, T. (1988) Comparison of centrifugation, dissolved air flotation and drum filtration techniques for harvesting sewage-grown algae, *Biomass*, **16**(1), pp.51-62
- Walach M.R., Bazin M. and Pirt J. (1987), Computer control of carbon-nitrogen ratio in *Spirulina platensis*. *Biotechnol. Bioengineer.*, **29**, pp.520-528.
- Xu Ling, Feng Wang, Hua-Zhong Li, Zan-Min Hu, Chen Guo, Chun-Zhao Liu, (2010) Development of an efficient electroflocculation technology integrated with dispersed-air flotation for harvesting microalgae, *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, **85**(11), pp.1504-1507
- Zhang X., Hu, Q., Sommerfeld, M., Puruhito, E., Chen, Y. (2010) Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes., *Bioresource Technology*, **101**(2), pp.730-735