

Flocculation과 Dissolved Air Floatation을 이용한 미세조류 수확 최적화

권혁진¹, 정창규¹, 김남훈², 이진원^{1*}

Optimization of Microalgae Harvesting Using Flocculation and Dissolved Air Floatation

Hyuckjin Kwon¹, Changkyou Jung¹, NamHoon Kim², and Jinwon Lee^{1*}

접수: 2012년 3월 30일 / 게재승인: 2012년 4월 20일

© 2012 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: The harvesting of microalgae is a critical step that precedes biodiesel conversion. The most widely used harvesting technology is flocculation and floatation. In this study, the efficiency of the flocculants aluminum sulfate and poly aluminum chloride were evaluated for harvesting the alga *Dunaliella tertiolecta* in conjunction with dissolved air floatation. Using the jar test the optimum concentration range for aluminum sulfate was 1.0~1.5 g/L and for poly aluminium chloride, 1.5~2.0 g/L. The degree of coagulation was visualized by microscopy. Further analysis in combination with dissolved air floatation showed that the optimal concentration for aluminum sulfate was 1.1 g/L and for poly aluminum chloride, 1.6 g/L.

Keywords: Microalgae, Harvest, *Dunaliella*, Flocculation, Floatation, Dissolved air Floatation

1. 서론

전 세계적으로 소비되는 에너지의 대부분은 석유, 석탄, 천연 가스와 같은 화석연료에 의해 공급되고 있다. 그러나 채취

가능한 원유의 양은 한정되어 있으며, 화석연료 연소 시 발생하는 이산화탄소는 지구온난화의 주범으로 기후 변화라는 심각한 환경문제를 불러 일으켰다. 이에 따라 세계 각국에서는 화석연료를 대체할 biomass 소재를 이용한 대체 에너지 개발에 주력하고 있다 [1-3].

대체 에너지원 중 하나인 바이오 에너지의 경우 바이오 디젤, 바이오 에탄올, 바이오 가스로 나눌 수 있다. 바이오 디젤은 corn, canola, oil palm 또는 jatropha와 같은 옥상 식물을 바이오 매스로 이용하여 생산할 수 있다. 또한 3세대 에너지원인 미세조류도 높은 지질 함유량을 가지고 있어 바이오 디젤 생산을 위한 바이오 매스로 이용되어 지고 있다 [4]. 미세조류는 특성상 옥상 식물들에 비하여 면적당 생산수율이 높으며, 재배를 위한 경작지 및 배양하기까지 걸리는 시간이 짧다는 장점이 있다 [5-7]. 미세조류가 바이오 디젤로 전환되기 위해서는 수많은 공정들을 거쳐야만 한다. 먼저 미세조류를 대량으로 배양하고 배양액으로부터 조류만을 수확한다. 수확된 조류를 이용하여 지질을 추출하고 그 지질에서 바이오 디젤로 전환하는 과정을 거쳐 바이오 디젤을 생산한다. 수확은 바이오 디젤 생산에 있어 중요한 영향 인자이며 수확효율과 비용은 경제적으로 중요한 문제이다. 효율이 좋지 않은 수확 방법은 에너지원의 낭비뿐 아니라 환경오염에도 영향을 미친다 [8]. 미세조류의 수확 방법으로는 여과, 응집, 침전, 원심분리, dissolved air floatation (DAF)을 들 수 있다. 모든 수확 방법들은 현재 기술로는 많은 에너지가 필요하다. 단지 에너지가 많이 든다고 해서 수확효율 또한 좋은 것은 아니다. 여과법의 경우 시간이 지날수록 filter 자체의 fouling이 생기기 때문에 주기적으로 막을 교체해 주어야 한다. 침전법의 경우 들어가는 에너지 비용은 적으나 시간이 오래 걸리고 수확효율이 좋지 않다. 원심분리의 경우

¹서강대학교 화공생명공학과

¹Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Republic of Korea
Tel: +82-2-705-8919, Fax: +82-2-702-7926
e-mail: jinwonlee1@sogang.ac.kr

²세화고등학교

²Sehwa High School, Seoul 137-049, Republic of Korea

들어가는 사용되는 에너지 양이 많으며 유지비가 많이 들기 때문에 적합하지 못하다 [9,10].

응집방법의 경우 scale-up 하기가 쉽다는 장점은 있으나 aluminum 계열은 Alzheimer형 치매를 유발하는 것으로 알려져 있고 환경적인 문제도 있기 때문에 많은 양을 응집제를 사용할 수 없어 혼합된 방법으로 사용되어야만 한다 [11-13]. 따라서 적은 양의 응집제를 이용하여 응집된 미세조류들을 DAF를 이용하여 부상시키고 이를 수확하는 방법이 사용되는 에너지 비용에 비하여 수확효율이 가장 높다 [10].

본 연구에서는 응집방법과 DAF를 혼용하여 응집방법 단일로 사용되었을 때의 단점을 보완하고 좀더 친환경적인 수확 방법에 대하여 연구개발 하였다. 미세조류 *Dunaliella tertiolecta*의 경우 aluminum 계열에서 높은 응집효율을 보였다 [14]. 따라서 본 연구를 수행하는데 응집제는 aluminum 계열로 선택하였다. 연구를 수행하는데 있어서 현미경 측정을 통하여 시각적으로 응집이 일어남을 확인하였다. 이는 조류를 수확함에 있어 응집이 미치는 영향성을 확인하고자 함이다. 그리고 미세조류 배양액의 pH가 응집에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 통하여 응집방법과 DAF를 혼용한 최소한의 응집제를 이용하여 최적 응집농도 조건을 확립하고 이를 이용하여 수확 최적조건 또한 찾았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 미세조류 및 시약

실험에 사용된 미세조류 종류는 *Dunaliella tertiolecta* 이며, 인하대에서 배양된 배양액을 받아 실험을 진행하였다. 배양액의 농도는 Beer-Lambert 한계를 고려해서 배양액의 흡광도 (optical density 이하 OD로 표기)를 1 이하로 희석시킨 뒤 사용하였다.

사용한 응집제 종류로는 poly aluminum chloride (10%) 와 aluminum sulfate이며 poly aluminum chloride (10%)의 경우 (주)럭키이엔씨 (Lucky Environment & Chemical, Seoul, Korea)에서 제공 받아 사용하였고, aluminum sulfate의 경우 Sigma-Aldrich Korea (St. Louis, MO, USA) 제품을 구입하여 사용하였다.

2.2. 적정 응집 농도 선정 방법

적정 응집농도를 선출하기 위하여 보편적으로 폐수처리장에서 쓰는 방법인 jar test방법을 사용하였으며, 이를 실험실에 맞게끔 디자인 하여 실험을 진행하였다. 모든 실험은 상온 (25°C)에서 진행 하였으며, 500 mL 삼각플라스크에 500 mL 미세조류 배양액을 주입하였다. 실험은 왼쪽 플라스크부터 응집제의 농도가 증가하도록 응집제의 양을 변화시켜 주었다. 응집제를 첨가한 후 응집제가 배양액과 잘 섞일 수 있도록 교반속도 (agitation speed)를 1 min 동안 180 rpm으로 급속 교반을 하였으며, 이 후 응집제가 배양액과 반응이 일어날 수 있게끔 30 rpm에서 30 min 동안 완속 교반을 하였다.

교반이 끝난 후 pH를 측정하였으며 60 min 동안 침전시

켰다. 침전시키는 동안 최적의 농도를 선출하기 위해 10 min 마다 흡광도를 측정하였다.

2.3. 응집 정도 측정 방법

미세조류의 농도는 UV/vis spectrophotometer (Shimadzu BioSpec-mini, Japan)를 이용해서 Beer-Lambert의 법칙에 의하여 측정하였다. 응집 전 미세조류 배양액의 수면으로부터 3 cm 아래에서 상등액을 채취하여 UV/vis spectrophotometer를 이용해서 흡광도를 확인하였다. 그 후 jar test를 통해 교반이 끝난 미세조류 배양액을 응집제 첨가 전과 마찬가지로 수면으로부터 3 cm 아래 상등액을 채취한 후 UV/vis spectrophotometer를 이용해서 흡광도를 측정하였다. 측정된 응집 전, 후의 흡광도를 이용하여 미세조류의 농도를 결정하였다. 이 때, 미세조류 *Dunaliella tertiolecta*의 파장은 640 nm에서 흡광도를 측정하였고 흡광도와 미세조류 농도간의 선형적인 관계식에 의하여 농도로 환산한 후 응집 정도를 응집 효율로 정의 하여 다음과 같은 식에 의해서 계산하였다.

$$\text{Flocculation efficiency (\%)} = (1 - A / B) \times 100$$

여기서 A: 응집 후 수면으로부터 3 cm 아래에 있는 상등액의 미세조류 농도, B: 응집 전 수면으로부터 3 cm 아래에 있는 상등액의 미세조류 농도

2.4. Dissolves air floatation (DAF) 방법

DAF 방법을 이용한 수확 방법은 본 연구실에서 (주)대원코리아에 직접 주문 제작하여 만든 lab scale의 DAF를 이용하여 실험을 실시 하였다. DAF의 모든 재질은 해수에 대하여 내구성이 강한 sus316L로 제작 하였으며, 해수가 닿지 않는 부분은 sus304로 제작하였다. tank의 용량은 최고 3 L, 압력은 6 atm까지 견딜 수 있게 제작 하였다. 제작 시 관의 내경은 1 mm로 하였으며 사용된 재질은 sus304와 sus316L이다.

2.5. 현미경 관찰 및 pH 측정 방법

현미경 관찰은 서강대학교 기계공학과 nanobio system & manipulation 연구실에 있는 microscope (Olympus ix71, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 가장 낮은 배율에서 초점을 잡고 점차적으로 배율을 확대해 나가 최종적으로 400배율로 미세조류를 측정하였다. pH측정은 pH meter (Mettler-Toledo InPro 3030, Swiss)를 이용하여 측정하였다. pH meter 기 사용에 앞서 먼저 calibration을 잡아 주어 실험의 신뢰성을 높였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Jar test를 이용한 최적농도 선출

미세조류 *Dunaliella tertiolecta* 배양액에서 aluminum sulfate 경우 0.5, 1, 1.5, 2 g/L를 첨가 하여 주었으며, poly aluminum chloride (10%) 경우 0.5, 1, 2, 4 g/L를 첨가해 주었다. aluminum sulfate 경우 Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 0.5 g/L를

넣어 주었을 때부터 응집이 잘 일어났으며 1 g/L를 넣어 주었을 때 가장 좋은 응집 효율을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. Table 1의 결과값과 같이 1.5 g/L와 2.0 g/L를 넣어 주었을 때는 aluminum sulfate의 적정 pH (5.5~8.5)를 벗어나기 때문에 응집효율이 최대치에 비해서 현저히 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 1. The pH during the jar test with aluminum sulfate

Type	Injection concentration	Jar test 1 st	Jar test 2 nd	Jar test 3 rd
	g/L	pH	pH	pH
Al ₂ (SO ₄) ₃ (Aluminum sulfate)	2.0	4.31	4.25	4.26
	1.5	4.58	4.36	4.34
	1.0	5.5	5.14	5.7
	0.5	6.34	6.13	6.21

Table 2. Dissolved air flotation by aluminum sulfate

Type	Injection concentration	Flotation
	g/L	g/L
Al ₂ (SO ₄) ₃ (aluminum sulfate)	1.5	2.58 ± 0.06
	1.3	3.14 ± 0.07
	1.2	3.22 ± 0.02
	1.1	3.53 ± 0.1
	1.0	2.53 ± 0.08

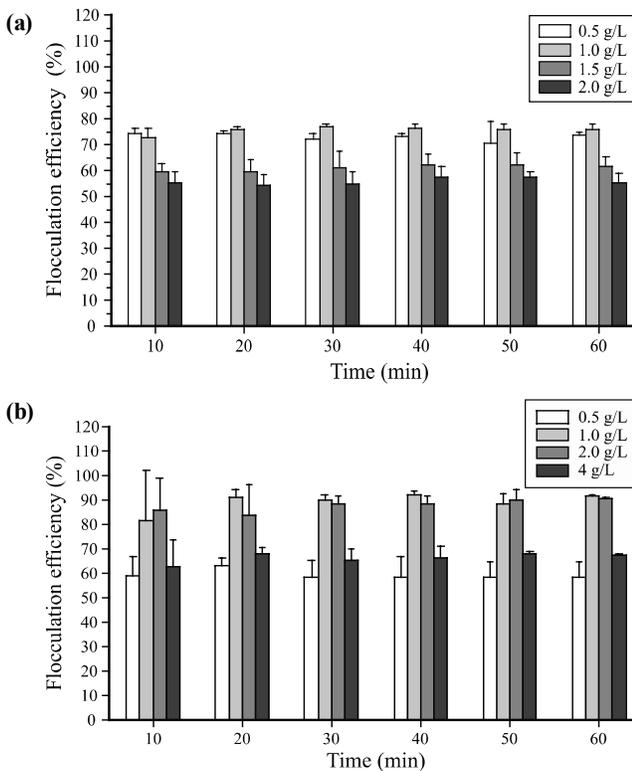


Fig. 1. Flocculation efficiency of aluminum sulfate and poly aluminum chloride (10%) using *Dunaliella tertiolecta* and the jar test (a) aluminum sulfate, (b) poly aluminum chloride (10%).

Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 poly aluminum chloride (10%)

경우 0.5 g/L에서는 넣어 준 응집제의 양이 적어 응집이 잘 일어나지 않으나 1.0~2.0 g/L에서 응집이 잘 일어난다는 것을 확인할 수 있었다. Table 3의 결과값과 같이 4 g/L를 넣어 주었을 때 응집제의 pH가 적정범위 (5~9)를 벗어나기 때문에 재 분산이 일어나고 응집효율 또한 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 3. The pH during the jar test with poly aluminum chloride (10%)

Type	Injection concentration	Jar test 1 st	Jar test 2 nd	Jar test 3 rd
	g/L	pH	pH	pH
P.A.C. (Poly Aluminum Chloride)	4.0	4.84	4.80	4.78
	2.0	6.15	6.16	5.98
	1.0	6.79	6.79	6.60
	0.5	7.51	7.51	7.30

Table 4. Dissolved air flotation by poly aluminum chloride (10%)

Type	Injection concentration	Flotation
	g/L	g/L
P.A.C. (Poly Aluminum Chloride)	2.0	3.77 ± 0.22
	1.8	3.69 ± 0.21
	1.6	4.27 ± 0.31
	1.4	3.21 ± 0.08
	1.2	2.38 ± 0.14
	1.0	2.09 ± 0.11

이를 바탕으로 pH가 응집에 미치는 영향에 대해서 추가적인 실험과 DAF를 이용하여 최적농도 선출에 대한 추가적인 실험을 진행하였다. 모든 실험은 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 3회 이상 반복 실시하였다.

3.2. pH에 따른 미세조류 응집 영향 확인

응집제 aluminum sulfate의 경우 Table 1에서와 같이 0.5~1.0 g/L를 넣어 주었을 때는 적정 pH사이에 있는 것을 확인 할 수 있었으며, 1.5~2 g/L를 넣어 주었을 때 적정 pH범위를 벗어나 재 분산이 일어나면서 응집효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 응집제 poly aluminum chloride (10%)의 경우 Table 3을 보면 알 수 있듯이 0.5~2g/L를 넣어 주었을 때는 pH범위가 적정 범위에 있는 것을 확인할 수 있었다. 0.5 g/L를 넣어 주었을 때는 pH범위는 적정 범위 내에 있으나 응집제의 양이 적기 때문에 응집 효율이 좋지 않았다. 하지만 1~2 g/L사이에서는 높은 응집효율을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 4 g/L를 넣어주었을 때는 pH 범위가 적정 범위를 벗어나기 때문에 재 분산이 일어나 응집효율이 다시 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 pH가 미세조류 응집에 있어 중요한 영향인자라는 결론을 내릴 수 있었다.

3.3. DAF를 이용한 최적농도 선출

앞서 실험한 jar test를 통하여 얻어진 aluminum sulfate와 poly aluminum chloride (10%)의 적정 농도를 DAF를 이

용하여 실험한 결과 aluminum sulfate의 경우 Fig. 1(a)에서와 같이 1.0~1.5 g/L사이에서 가장 좋은 응집효율을 보였기 때문에 1.0~1.5 g/L사이에서의 응집제 농도의 최적 값이 있다고 추정하고 DAF를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험은 Table 2와 같이 응집제의 양을 0.1 g씩 늘어나가면서 진행하였다. 응집제의 양을 1.1 g/L를 넣어 주었을 때 가장 좋은 수확효율을 보였으며 그 후 농도에서는 점점 수확효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 1(b)에서와 같이 poly aluminum chloride (10%) 같은 경우 1.0~2.0 g/L에서 가장 좋은 응집효율을 보였기 때문에 그 사이 값을 최대값이 존재할 것 이라 추정하고 사이 값에 대하여 DAF실험을 실시하였다. 응집제 poly aluminum chloride (10%)의 경우 Table 4와 같이 응집제의 양을 0.2 g씩 첨가하면서 실험을 진행 하였으며, 1.6 g/L를 넣어 주었을 때까지는 수확효율이 증가하다가 1.8 g/L 넣어 주었을 때부터는 수확효율이 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

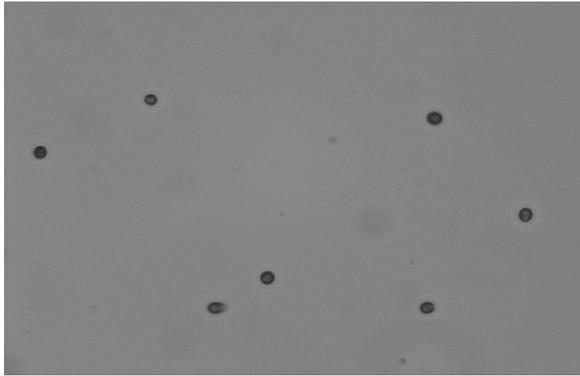


Fig. 2. Microscopic pictures of the *Dunaliella tertiolecta*.

이를 토대로 응집제 aluminum sulfate 의 경우 1.1 g/L일 때가 최적 농도 값이며, 응집제 PAC의 경우 1.6 g/L일 때가 최적 농도 값이라는 결론을 내릴 수 있었다. 이 후 현미경을 통하여 응집 정도를 시각적으로 관찰해 보았다.

3.4. 현미경을 통한 미세조류 응집 확인

미세조류 *Dunaliella tertiolecta*는 일반적으로 8~12 μm 의 size를 갖기 때문에 현미경을 통하여 응집 정도를 관찰할 수 있었다. 현미경 관찰은 우선 jar test결과를 토대로 측정하였고, 후에 DAF 실험과정을 통하여 얻어진 데이터에 기초하여 측정을 실시하였다. DAF 결과를 통하여 얻어진 최적의 응집농도를 관찰함에 앞서 jar test 했던 농도로 먼저 관찰하였다.

Fig. 3은 응집제 aluminum sulfate를 사용한 jar test결과에 대한 현미경 사진이다. Fig. 3(a)는 응집제 aluminum sulfate의 양을 1.0 g/L 넣어 주었으며 응집제 주변으로 조류들이 많이 뭉쳐있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)는 응집제 aluminum sulfate의 양을 1.5 g/L 넣어 주었으며 뭉쳐있던 조류 덩어리들이 재분산이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 응집과 분산이 일어났던 1.0~1.5 g/L사이에서 현미경 관찰을 하였다.

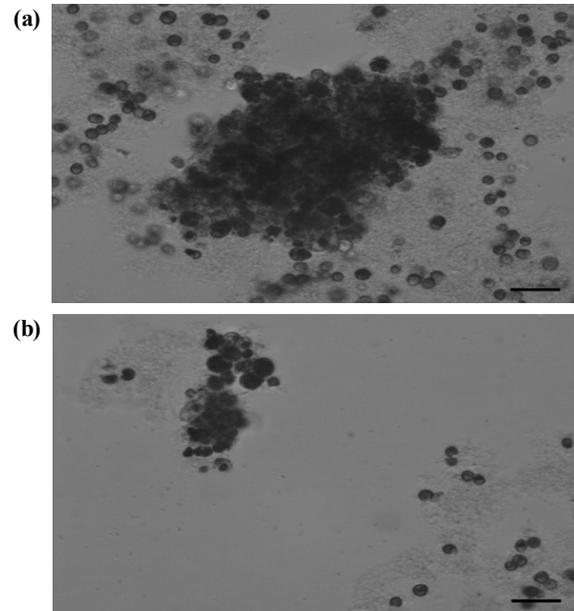


Fig. 3. Micrograph showing the effect of various concentrations of aluminum sulfate during the jar (a), 1.0 g/L (c), and 1.5 g/L.

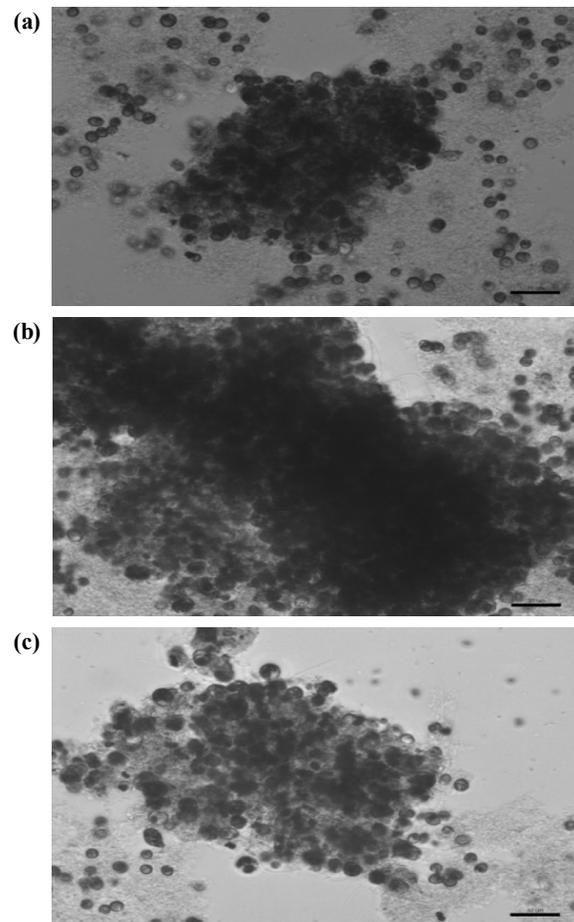


Fig. 4. Micrograph showing the optimal concentration range of aluminum sulfate using *Dunaliella tertiolecta*, the jar test and dissolved air flotation (a), 1.0 g/L (b), 1.1 g/L (c), 1.2 g/L (d), and 1.3 g/L.

Fig. 4(a)는 응집제 aluminum sulfate를 1.0 g/L 넣어 주었으며 응집제 주변으로 조류들이 둘러붙어 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4(b)는 응집제 aluminum sulfate를 1.1 g/L 넣어 주었으며 가장 조류들이 가장 많이 응집되어 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4(c)는 응집제 aluminum sulfate를 1.2 g/L 넣어 주었으며 1.1 g/L를 넣어 주었을 때와 비교하여 재분산이 일어났음을 확인할 수 있었다. Fig. 4(d)는 응집제 aluminum sulfate를 1.3 g/L 넣어주었으며 점점 더 재분산이 일어남을 확인할 수 있었다. 이 후의 농도에서는 더욱 재분산이 일어남을 확인할 수 있었다.

이 결과와 Table 2의 결과값을 이용하여 응집제 aluminum sulfate의 최적농도는 1.1 g/L라는 결과를 내릴 수 있었다.

앞선 방법과 마찬가지로 응집에 poly aluminum chloride (10%)에 대한 현미경 관찰을 실시하였다. Fig. 5는 jar test를 실시하였을 때의 농도를 가지고 현미경 관찰을 하였다. Fig. 5(a)는 응집제 poly aluminum chloride (10%)를 1.0 g/L 넣어 주었을 때의 사진으로 응집덩어리가 생긴 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5(b)는 응집제 poly aluminum chloride (10%)를 2.0 g/L 넣어 주었을 때의 사진으로 Fig. 5(b)에 비하여 재분산이 일어났음을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 응집효율이 가장 좋았던 1.0~2.0 g/L사이에서 현미경 관찰을 하였다.

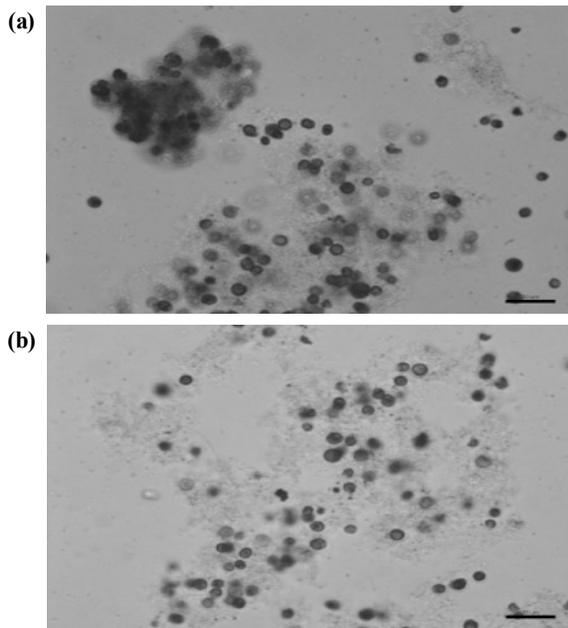


Fig. 5. Micrograph showing the effect of various concentrations of poly aluminum chloride (10%) during the jar (a), 1.0 g/L (b), and 2.0 g/L.

Fig. 6(a)는 응집제 poly aluminum chloride (10%)를 1.0 g/L 넣어 주었을 때의 사진으로 응집제 주변으로 조금씩 조류들이 달라붙는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(b)는 응집제 poly aluminum chloride (10%)를 1.6 g/L를 넣어 주었을 때의 사진으로 가장 응집이 많이 일어났음을 확인할 수 있었다. Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 응집제 poly aluminum chloride (10%)를 각각 1.8, 2.0 g/L를 넣어 주었을 때 사진으로 Fig. 6(c)에

비하여 재분산이 일어났음을 확인할 수 있었다.

이 결과와 Table 4의 결과값을 비교해 보았을 때 응집제 poly aluminum chloride (10%)의 최적농도는 1.6 g/L라는 결론을 내릴 수 있었다.

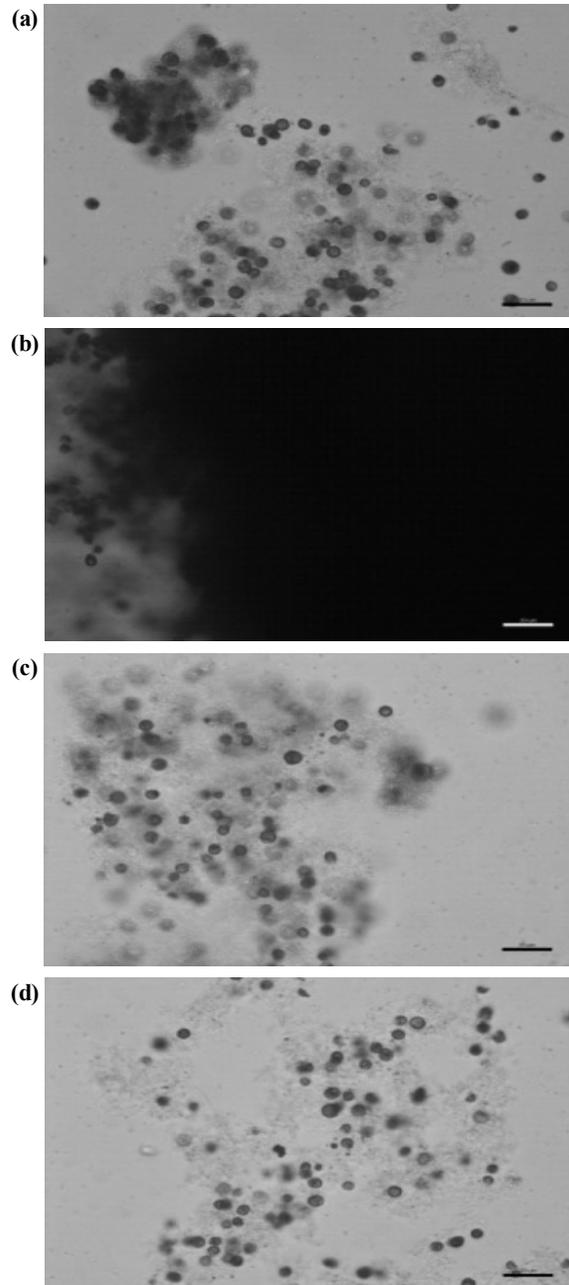


Fig. 6. Micrograph showing the optimal concentration range of poly aluminum chloride (10%) using *Dunaliella tertiolecta*, the jar test and dissolved air floatation (a), 1.0 g/L (b), 1.6 g/L (c), 1.8 g/L (d), and 2.0 g/L.

4. 결론

미세조류 *Dunaliella tertiolecta*는 응집제 poly aluminum

chloride (10%)를 넣어 주었을 경우 jar test를 통하여 적정 응집농도 범위가 1.0~2.0 g/L라는 것을 알 수 있었다. 이를 이용하여 dissolved air floatation과 현미경 사진을 이용하여 최적농도가 1.6 g/L라는 결론과 적정 pH인 pH (5~9)가 아닌 범위 내에서는 응집효율이 떨어진다는 결론을 내릴 수 있었다.

응집제 aluminum sulfate 경우 jar test를 통하여 0.5~1.0 g/L 일 때 적정 응집농도 범위를 확인 하였고, 이를 통하여 dissolved air floatation과 현미경 관찰을 통하여 최적농도가 1.1 g/L라는 결론을 내릴 수 있었다. 응집제 poly aluminum chloride (10%)와 마찬가지로 적정 pH범위를 지나게 되면 응집효율 또한 현저하게 떨어진다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해서 응집제 aluminum sulfate와 aluminum chloride (10%)의 최적농도를 선출 할 수 있었으며, 조류의 특성상 적정 pH범위가 아닌 농도에서는 응집효율 또한 현저히 떨어진다는 사실을 확인할 수 있었다. 적정 농도와 최적 pH에서의 조류 응집은 수확 시 많은 양의 조류를 얻을 수 있기 때문에 이는 바로 산업적인 바이오 디젤의 생산성과 연계 될 것이라 기대한다.

감사

본 연구는 국토해양부 소관 해양생명공학기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Brennan, L. and P. Owende (2010) Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 14: 557-577.
- Sharif Hossain, A. B. M. and A. Salleh (2008) Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *Am. J. Biochem. Biotech.* 4: 250-254.
- Szklo, A. and R. Schaeffer (2006) Alternative energy sources or integrated alternative energy systems? Oil as a modern lance of peleus for the energy transition. *Energy.* 31: 2513-2522.
- Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.* 25: 294-306.
- Raja, R., S. Hemaiswarya, N. A. Kumar, S. Sridhar, and R. Rengasamy (2008) A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Crit. Rev. Microbiol.* 34: 77-88.
- Lee, A. K., D. M. Lewis, and P. J. Ashman (2009) Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel. *J. Appl. Phycol.* 21: 559-567.
- Dismukes, C. G., D. Carrieri, N. Bennette, G. M. Ananyev, and M. C. Posewitz (2008) Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels. *Curr. Opin. Biotechnol.* 19: 235-240.
- Somasundaran, P. and T. Hubbard (2006) *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*. 2nd ed., pp. 2588-2591. CRC Press, Taylor & Francis Group, NY, USA.
- Uduman, N., Y. Qi, M. K. Danquah, G. M. Forde, and A. Hoadley (2010) Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *J. Renew. Sustain. Energy* 2: 012701.
- Kurane, R. and H. Matsuyama (1994) Production of a bioflocculant by mixed culture. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 58: 1589-1594.
- Patil, S. V., C. D. Patil, B. K. Salunke, R. B. Salunkhe, G. A. Bathe, and D. M. Patil (2011) Studies on characterization of bioflocculant exopolysaccharide of *Azotobacter indicus* and its potential for wastewater treatment. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 163: 463-472.
- Salehzadeh, H. and S. A. Shojaosadati (2002) Isolation and characterization of a bioflocculant produced by *Bacillus firmus*. *Biotechnol. Lett.* 24: 35-40.
- Kwon, D. Y., C. K. Jung, K. B. Park, C. G. Lee, and J. W. Lee (2011) Flocculation characteristics of microalgae using chemical flocculants. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* 26: 143-150.
- Mercer, P. and R. E. Armenta (2011) Developments in oil extraction from microalgae. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 113: 539-547.
- Levin, G. V., J. R. Clendenning, A. Gibor, and F. D. Bogar (1961) Harvesting of Algae by Froth Floatation. *Resources Research, Inc.*, Washington, D. C. USA.
- Dongheui, K. (2009) Removal of algae and organic compounds by dissolves air floatation process. *J. Adv. Eng. Technol.* 2: 201-205.
- Tripathy, T. and B. R. De (2006) Flocculation: A new way to treat the waste water. *J. Phys. Sci.* 10: 93-127.
- Grima, E. M., E. H. Belarbi, F. G. A. Fernandez, A. R. Medina, and Y. Chisti (2003) Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol. Adv.* 20: 491-515.