



양식장 배출수 수질관리를 위한 용존공기부상 공법의 운전 인자 영향 분석 Analysis of the operating factors of dissolved air flotation (DAF) process for effluent quality improvement from aquaculture rearing tank

기재홍¹ · 김형준² · 이주영³ · 한무영^{2*} · 강희웅⁴

Jaehong Ki¹ · Hyoungjun Kim² · Ju Young Lee³ · Moo-young Han^{2*} · Heewoong Gang⁴

1 현대건설 토목환경사업부, 2 서울대학교 건설환경공학부, 3 서울대학교 공학연구소, 4 국립수산물품질관리원

(2011년 10월 28일 접수; 2012년 2월 10일 수정; 2012년 2월 12일 채택)

Abstract

Pollutants in aquaculture system effluent mostly originated from solid wastes including uneaten feed and excreta of cultured species. In this research, DAF(Dissolved Air Flotation) unit is suggested as an integrated solid control unit especially as a form of IIBG(Inline Injection Bubble Generation) process in aquaculture system. Solid removal performance of DAF unit was examined under various operation and salinity conditions with turbidity and suspended solid. Solid waste removal efficiencies were found to be affected by operation conditions including saturator pressure, recycle ratio, coagulant concentration. Solid removal efficiency was higher under higher saturator pressure and recycle ratio under which condition larger number of bubbles is generated. Coagulant is thought to have important role in creating bubble-particle aggregate by showing better removal efficiency with higher concentration. However higher saline water showed less effectiveness in removing solids by DAF(IIBG). Application of DAF(IIBG) process also showed additional effect in phosphate removal and DO(Dissolved Oxygen) supply. Phosphate existed in polluted water was removed up to 46% after treatment, which is thought to attribute to aluminium phosphate precipitation. And DO concentration was found to increase over 50% of initial saturation concentration after the injection of micro-bubbles. Through experiments on solid removal from aquaculture effluent, DAF(IIBG) process is estimated to be effective solid control method. This property can help aquaculture system being installed and operated simply and effectively.

Keywords: aquaculture, dissolved air flotation, inline injection bubble generation, solid removal

키워드: 양식, 용존공기부상법, 기포발생장치, 고형물 제거

1. 서론

현재 국내 양식업을 통해 생산되는 어족자원의 양은 2010년 기준 약 1,355 톤으로 한해 국내 어족 자원 생산량의 약 43.5%를 담당하고 있다(농림수산 식품부, 2011). 그러나 제한된 양식용 수조 내 유기

오염물질 농축에 따른 수질 저하는 심각한 문제가 되고 있다. 그러므로 양식장 배출수의 수질을 효과적으로 개선해 줄 수 있는 기술의 필요성이 증가하고 있다.

양식용 수조 내에서 발생하는 수질 저하의 주요

* Corresponding author : 02-880-8915, myhan@snu.ac.kr

원인은 먹지 않은 사료 찌꺼기와 양식어들의 배설물이다. 이러한 오염물질들이 양식용 수조 내에서 분해되는 과정에서 용존 산소를 소비하고 영양염류(무기성 질소 및 인)를 배출하여 양식장 내 양식어 들 뿐만 아니라 이들이 배출되는 자연수계에도 악 영향을 주게 된다. 그러므로 고품 오염물의 제어는 양식장 배출수 수질관리에 있어 가장 중요하다 할 수 있다.

DAF(Dissolved-air-flotation)공정은 높은 압력으로 공기를 물에 충분히 용해시킨 후 이를 통해 발생하는 미세기포와 수중의 입자를 부착시켜 부력으로 제거하는 공정이다(한 등, 2007). 이 공정은 다양한 크기의 입자성 오염물질들을 비교적 좁은 공간에서 빠르게 제거가 가능하다는 장점으로 인해 점점 그 적용범위가 넓어지고 있다. DAF공정에서 미세기포와 입자의 부착은 이 둘간의 충돌에 의해 발생하게 되는데(Packham 등, 1972) 한(2001)은 미세기포와 입자 간 충돌 효율을 결정짓는 주요한 인자는 미세기포와 입자의 크기 및 그들 각각의 제타전위라고 보고하였다. 특히 한(2001)은 미세기포와 입자간의 크기가 비슷할 때 충돌효율이 가장 높다는 것을 규명하였으며 결과적으로 DAF공정 전처리에 있어 플록 형성 시간을 플록의 크기가 미세기포의 크기 범위인 30~50 μm 가 되도록 조절하는 것이 DAF 공정에서 입자제거에 유리하다고 제안하였다.

DAF 공정에서는 미세기포를 주입하기 위해 3~5 atm의 높은 압력으로 가압된 가압수가 사용된다. 이 가압수를 처리조에 넣는 과정에서 유입부 주변에 강력한 난류를 발생시키게 되는데(박, 2003) 이러한 난류는 미세기포와 입자가 부착된 플록을 깨뜨려 처리 효율을 감소시키는 원인이 되기도 한다. 하지만 김(2007)은 이러한 난류의 수리학적 에너지를 효과적으로 이용한다면 별도의 플록 형성 공정이 포함되지 않아도 높은 탁도 처리 효율을 얻을 수 있음을 보였다. 그는 플록 형성 공정을 거치지 않고 응집제를 DAF 공정 내 혼화조에 직접 넣은

후 오직 높은 압력으로 유입되는 가압수로 인해 발생하는 난류만으로 탁질이 제거되는지에 대한 실험을 수행하였으며 실험 결과 높은 탁도 처리 효율을 얻을 수 있었다. 이는 가압수 유입으로 인해 발생하는 난류가 미세기포와 입자의 충돌을 유도하여 결과적으로 미세기포와 입자의 플록을 형성시키는 역할을 함을 의미한다. 또한 김(2009)은 DAF공정의 변법으로 미세기포가 포함된 가압수를 직접적으로 분사하여 별도의 플록 형성 공정 없이 입자들을 분리하는 IIBG(Inline injection bubble generator)를 개발하였으며 이를 침전물 제거에 적용하였다.

IIBG공법은 기존의 DAF공법에 비해 별도의 혼화 과정이 없고 응집제를 기포 발생 단계에서 주입함으로써 현장 적용에 있어 시설비 및 운영비를 절감할 수 있고 양식어에게 미치는 영향이 적다는 장점이 있다. 따라서 이를 이용한다면 양식장 배출수 수질을 보다 효과적으로 관리할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 양식장내 다양한 IIBG 공정 운전조건에 따른 최적의 운전조건을 도출하고 양식장 운영에 주로 발생하는 슬러지를 최적화된 IIBG 공정에 도입함으로써 효율적인 양식장 슬러지 처리 기술임을 보여주기 위한 연구이다

2. 연구 방법

2.1 원수의 제조

실제 양식장 유출수의 수질은 시간에 따라 변하게 되므로 운전 조건에 따른 처리 효율을 조사하기에는 적당하지 않다. 그러므로 양식장 유출수의 수질을 모의할 수 있는 인공 원수를 실험실에서 제조하여 사용하였다. 제조된 인공 원수의 수질 조건 및 제조 방법은 Table 1과 같다.

Table 1 Specific information of the synthetic water

Unit	Concentration	Ingredient	Amount
Fish feed	0.75 g/L	Fish feed	0.75 g/L
NH_4^+-N	15 mg/L	NH_4Cl	57 mg/L
NO_2^--N	10 mg/L	NaNO_2	49 mg/L
NO_3^--N	30 mg/L	KNO_3	216 mg/L
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	10 mg/L	KH_2PO_4	44 mg/L

2.2 Batch 실험

IIBG공정의 제거 실험은 1 L의 투명한 칼럼을 이용하여 수행되었다. 인공 원수는 1 L의 칼럼(내경: 5 cm, 높이: 51 cm)에 담았으며 그 후 퇴적층 형성을 위해 5분간의 침전시간을 가졌다. 그리고 기포와 물이 혼합된 가압수와 응집제를 고압에서 잘 혼합하여 이를 노즐을 통해 칼럼 하단부에 유입 시킴으로써 미세 기포를 발생시켰다. 3분의 분리시간 후 칼럼 바닥면에서 5 cm 떨어진 지점에서 처리된 인공 원수의 샘플링을 실시하였다. 이 실험의 개요도는 Fig. 1과 같다.

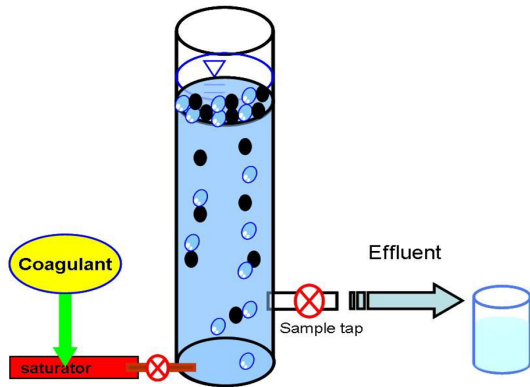


Fig 1 Schematic experiment setup of IIBG batch test

2.3 IIBG 운전 조건

IIBG공정의 처리 효율에 영향을 미치는 영향을 평가하기 위하여 포화기 내 압력, 응집제의 양, 순환율, 염도 조건을 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

포화기 내부 압력은 주입시키는 공기의 압력을 통해 조절하였다. 구체적으로 포화기 내 수돗물을 720 ml 넣은 후 공기 압축기를 통해 고압으로 압축된 공기를 주입하였다. 이 실험에서는 포화기 내 압력을 3 atm과 6 atm으로 조절하여 실험을 실시하였다.

포화기 내 주입되는 응집제의 양 또한 조절되었다. IIBG공정의 응집제로는 PAC (polyaluminum chloride, HiBPACS, 10.5% Al₂O₃, Samgoo

Chemical Co., Korea)를 이용하였으며 이는 압축된 공기를 주입하기 전 단계에 포화기 내부에 주입되었다. 이 실험에서는 Al₂O₃의 농도가 0, 6, 12 mg/L가 되도록 PAC의 양을 조절하였다.

순환율은 15%와 30%가 각각 적용되었다. 순환율은 각각 150 ml와 300 ml의 가압수를 제조 원수 칼럼에 넣는 방법으로 조절하였다. 또한 염도의 경우 각각 0‰과 35‰의 조건으로 실험을 하여 그 영향을 살펴보았다. 자세한 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental condition of IIBG operation

Saturator pressure (atm)	Recycle ratio (%)	Salinity (‰)	Coagulant dosage (ppm)
3	15	0	0
			6
			12
		35	0
			6
			12
	30	0	0
			6
			12
		35	0
			6
			12
6	15	0	0
			6
			12
		35	0
			6
			12
	30	0	0
			6
			12
		35	0
			6
			12

3. 실험 결과

3.1 포화기 내 압력과 응집제 양의 영향

미세기포가 용해된 가압수가 처리장치에 유입될 때 포화기의 압력은 BVC(bubble volume concentration)와 기포 크기에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(박, 2003). 그리고 이러한 기포의 물리적 특성은 처리 효율에 영향을 준다. Fig. 2는 포화기 압력 변

화에 따른 탁도와 SS 제거 효율의 변화를 보여주고 있다. 탁도 제거율을 살펴보면, 포화기 내 압력이 3 atm인 경우 응집제의 양이 0, 6, 12 mg/L로 증가해 감에 따라 처리 효율이 각각 19.4, 70, 70.9%로 나타난 반면 6 atm인 경우 처리 효율이 각각 48.5, 82.5, 90.7%로 3 atm일 때에 비해 항상 높게 나타났다. 이러한 경향성은 SS 제거 효율에서도 동일하게 나타난다. 따라서 본 실험에서 수행된 모든 응집제의 조건에서 높은 포화기 압력은 동일하게 높은 처리 효율을 보임을 알 수 있다.

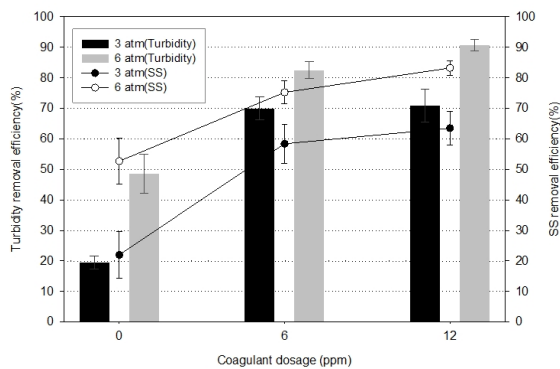


Figure 2 Effect of saturator pressure and coagulant dosage on turbidity and SS removal by IIBG(Recycle ratio: 30%)

박(2003)에 따르면 미세기포가 포함된 가압수가 유입될 때 생성되는 기포의 부피는 포화기의 압력이 2 atm에서 6 atm으로 증가함에 따라 증가한다고 알려져 있다. 헨리의 법칙에 따르면 높은 압력일수록 많은 양의 공기가 포화기 내 물에 용해되게 된다. 따라서 포화기 압력이 높을수록 많은 양의 미세기포가 발생하게 되는 것이다. 높은 포화기 압력은 기포의 크기 또한 작게 한다. 많은 기포의 부피와 작은 기포의 크기는 동일한 순환율 조건에서 더 많은 수의 기포를 생성하게 한다. 동일한 크기의 칼럼에서 더 많은 양의 기포를 발생시키는 것은 기포와 입자간의 충돌 효율을 상승시켜 결과적으로 제거가 잘 되도록 하는 효과가 있다. 그러므로 포화기 압력이 높을수록 좋은 처리 효율을 얻을 수

있게 된다.

Fig. 2는 또한 탁도 제거율이 응집제 투입량에 영향을 받음을 보여준다. 실험 내 수행된 응집제 조건들 내에서 탁도 제거 효과는 포화기 내부 압력과는 상관없이 12 mg/L에서 가장 높게 나타났으며 포화기 내 압력이 높을 경우 탁도는 최대 90.7%, SS는 최대 83.2%까지 제거됨을 알 수 있다. 이것은 알루미늄 이온이 들어있는 응집제는 DAF공정 내에서 자연상태에서 음의 전하를 갖게 되는 기포와 입자의 표면 전하를 중화시켜주어 기포와 입자 플록이 더 잘 형성되도록 한다는 것을 말한다. 또한 본 실험을 수행한 응집제 농도 범위 내에서는 응집제 투입량이 많을수록 제거 효율은 더 좋게 나타남을 보여준다.

3.2 순환율의 영향

순환율은 DAF공정에서 처리 효율에 영향을 끼치는 주요한 인자 중 하나로 알려져 있다. Fig. 3은 순환율이 탁도와 SS 제거 효율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 순환율의 경우 순환율 15%와 30%에서 각각 88.2%와 90.2%로 2%의 작은 처리 효율 차이를 보였다. 하지만 탁도와 SS 제거 효율의 변화 추세를 볼 때 순환율이 높을수록 제거 효율이 좋아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 과거의 연구 결과와 동일하다(한 등, 2007; 김, 2009). 높은 순환율은 높은 부피 농도를 갖게 하며(박, 2003), 이는 많은 양의 기포가 발생함을 의미한다. 이는 곧 높은 탁도 및 SS 제거 효율을 가져오게 한다.

3.3 염도의 영향

양식장에서는 대상 어종에 따라 NaCl을 통해 염도 조절을 수행한다. 이 때 포함되는 NaCl이 부상공정에 미치는 영향을 알아보기 위해 염도 0%과 35%로 조절하며 탁도와 SS 제거 실험을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같다. 실험 결과 두 경우 모두 응집제 투입량이 증가함에 따라 제거 효율이

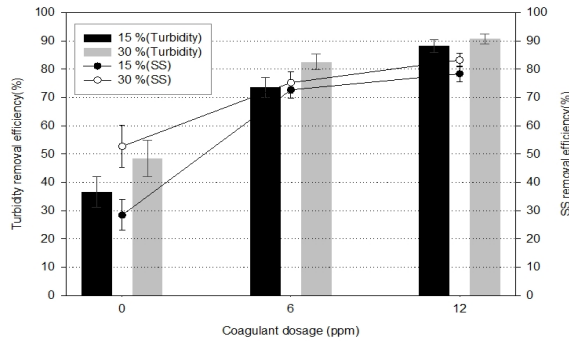


Fig 3 Effect of recycle ratio on turbidity removal by IIBG(Saturator pressure: 6 atm)

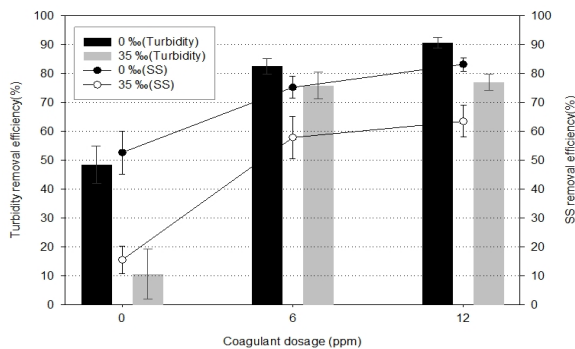


Fig 4 Effect of salinity on solid removal

향상되었다. 하지만 NaCl이 포함되지 않은 양식수의 경우 탁도 처리 효율이 각각의 응집제 조건에서 48.5, 82.5, 90.7%로 나타난 반면 NaCl이 포함된 양식수의 경우 처리 효율이 각각 10.7, 75.9, 77.0%로 모든 응집제 구간에서 처리 효율이 떨어지는 결과를 보였다. 이러한 경향성은 SS 제거 실험에서도 동일하게 나타났다.

DLVO 이론에 따르면 이온화 강도가 높을수록 응집이 더 잘 일어나는 것으로 알려져 있다. 높은 이온화 강도는 입자들의 전기 이중층을 압축시킴으로써 입자간의 반발력을 줄여주기 때문이다. 따라서 이 이론에 따르면 염도 상승에 따라 기포와 입자간의 반발력 또한 줄어들게 되므로 기포와 입자의 충돌효율이 증가하여 제거 효율이 더 상승할 것이라 예측할 수 있다. 하지만 실험 결과는 반대로 나왔는데 그 이유는 염도의 추가가 이온화 강도 뿐만 아니라 입자의 표면 전하에도 영향을 주었기 때문

이다. 입자와 기포가 높은 염도의 수용액에 존재하는 경우 이들의 제타 전위는 이온화 강도로 인해 크게 감소하게 된다(Li 등, 1991). 알루미늄 이온을 금속염으로 하는 PAC의 경우 수용액 내에서 입자의 표면 전하를 양의 전하로 바꾸는 역할을 하게 된다. 따라서 이 응집제를 투입할 때 수용액의 염도가 높을 경우 그렇지 않은 경우보다 입자 및 기포들의 표면 전하는 더욱 큰 양의 전하를 띄게 된다. 이로 인해 입자와 기포들은 전하의 역전 현상으로 재안정화가 되며 이로 인해 이온화 강도 증가함에도 불구하고 제거 효율이 감소하게 된 것으로 보인다.

3.4 용존성 물질의 제거 효과

양식장에서 배출되는 하수에는 탁도유발물질 외에 사료나 양식어류의 배설물 등에서 나오는 용존성 물질들이 포함된다. 따라서 다양한 용존성 물질 중 실제 양식장에서 가장 문제가 되고 있는 용존성 무기 질소(NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-)와 무기 인(PO_4^{3-})을 대상으로 제거 실험을 수행하였다. Fig. 5는 다양한 순환율 및 응집제 농도에 따른 용존성 물질 제거 효율을 나타낸 것이다. 실험 결과 용존성 물질의 경우 인 이외에는 의미 있는 제거 효율을 얻을 수 없었다. 인의 제거 효율은 응집제의 투입량이 증가함에 따라 증가하였다. 인의 최고 제거율은 Al_2O_3 의 농도가 12 mg/L일 때 47%이다.

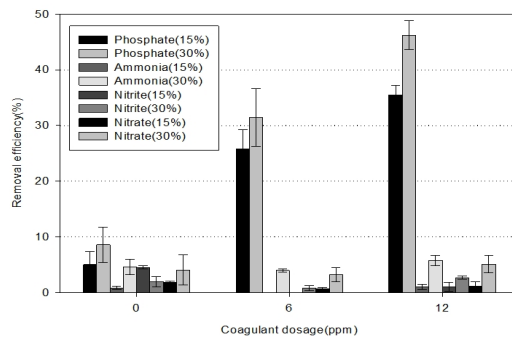


Fig 5 Removal of dissolved dosage substances by IIBG process (saturator pressure: 6 atm)

알루미늄은 인을 제거하는데 많이 사용되는 금속 이온 중 하나로 알루미늄 이온은 인산 이온과 반응하여 침전물을 형성하는 것으로 알려져 있다 (Tchobanoglous 등, 2004). 본 실험에서는 알루미늄 이온을 기반으로 한 응집제를 사용하였기 때문에 응집제에서 용출된 알루미늄 이온이 인의 침전을 유도한 것이라 생각된다. 이러한 침전으로 인해 용존된 무기 인은 불용화 되고 발생된 침전물은 기포와의 부착을 통해 수표면으로 운송되어 제거된 것이다. 인 제거의 효율이 응집제 투입량에 선형으로 비례하여 증가함은 이러한 설명을 뒷받침해준다.

3.5 DO 증가 효과

양식 시스템 내에서 DO 농도의 유지는 양식 어류의 생존에 매우 중요하다. 그러므로 양식장 내부에는 폭기 장비를 통해 산소가 항상 공급되도록 하고 있다. 이러한 폭기 장치는 일반적으로 공극이 있는 유출부를 통해 공기를 발생시켜 산소를 공급하는 역할을 한다. 하지만 미세기포를 이용해 탁도와 SS를 제어하는 IIBG 공정을 적용한다면 자연스럽게 양식수에 산소를 공급할 수 있다. Fig. 6은 미세기포 주입 후 변하는 DO의 농도를 측정하였다. Fig. 6과 같이 DO의 농도는 응집제에는 거의 영향을 받지 않으며 순환율에 따라 최대 55%까지 상승함을 알 수 있다.

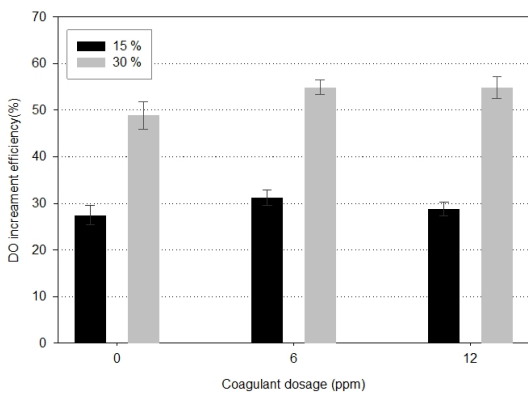


Fig 6 DO increment by IIBG process

4. 결론

본 연구에서는 IIBG공정의 운전 조건에 따른 양식장 배출수 내 고형 오염물의 처리 효율을 살펴보았다. 또한 IIBG공정을 양식수 처리에 적용하였을 때 나타날 수 있는 부가적인 효과에 대해 분석하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 포화기 내 압력, 응집제의 양, 순환율 등의 운전 조건에 따른 양식장 배출수의 처리 효율을 실험한 결과 기포의 크기가 작고 전체 양이 많게 하도록 하는 조건에서 처리 효율이 올라감을 확인하였다. 그리고 탁도 제거 효과는 최적 조건에서 90% 이상까지 도달함을 알 수 있었다. 따라서 IIBG공정은 운전 조건을 최적화 한다면 양식장 유출수 내 있는 높은 탁도 및 SS를 높은 처리 효율로 제거할 수 있는 효율적인 대안 중 하나로 판단된다.

2. 양식장 배출수 내 포함될 수 있는 염도의 영향을 알아보기 위해 실험을 수행한 결과 염도가 높을 때 처리효율이 떨어지는 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 결과의 원인은 염도의 추가가 입자의 표면 전하에 영향을 주어 입자 제타전위의 역전 및 재안정화 현상을 유도하였기 때문이라 판단된다.

3. IIBG 공법이 기타 양식장에 줄 수 있는 부가적인 영향에 대한 조사를 위해 영양염류 제거 효과를 조사하였다. 그 결과 무기 질소 성분의 경우 거의 제거 효과가 없었지만 무기 인 성분의 경우 알루미늄 이온의 영향으로 인해 제거가 가능함을 확인하였다.

4. IIBG공정의 양식수 내 산소 공급 효과를 알아보기 위해 DO 농도를 측정하였다. 결과 미세기포로 인한 넓은 기체-액체간의 접촉면적과 높은 기포 내부 압력으로 인해 산소가 효율적으로 양식수에 공급되어 최대 55%까지 상승함을 확인할 수 있었다. 이러한 효과는 양식장 유지 관리에 도움을 줄 수 있는 것이라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

- 김용하 (2009) 맞춤형기포를 이용한 퇴적오나의 현장제거, 석사졸업논문, 서울대학교
- 김하룡 (2007) DAF 공정에서 적정 응집 방법의 선택, 석사 졸업논문, 서울대학교
- 박용효 (2003) 용존공기부상공정에서 압력의 영향, 석사졸업 논문, 서울대학교
- 한무영, 김충일, 박성원 (2007) 플록과 기포의 크기가 DAF 공정의 효율에 미치는 영향, 한국수처리학회지, 15(1), pp. 11-16
- 한무영, 김충일, 박성원, 김하룡, 이관우, 유해운 (2007) DAF에서 맞춤형 기포크기 제조장치의 개발과 응용, 한국수처리학회지, 15(2), pp. 13-23
- 농림수산식품부 (2011) 농림수산식품 주요 통계, pp. 416.
- Han, M.Y. (2001) Modelling of DAF: the effect of particle and bubble characteristics, Journal of water supply: Research and technology-AQUA, 51(1), pp. 27-34
- Li, C., Somasundaran, P. (1991) Reversal of bubble charge in multivalent inorganic salt solution-Effect of aluminum, Journal of colloids and interface science, 148(2), pp. 587-591
- Packham R.F., Richards, W.N. (1972) Water clarification by flotation-1, Water research association, November.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. (2004) Wastewater engineering, treatment and reuse 4th edition, Mcgraw Hill.