

## 적조생물의 구제

### 1. IOSP에 의한 적조생물의 응집제거

김성재 · 조규대\*

경상대학교 해양과학대학 해양환경공학과 · 해양산업연구소

\*부경대학교 해양학과

## Removal of Red Tide Organisms

### 1. Flocculation of Red Tide Organisms by Using IOSP

Sung-Jae KIM and Kyu-Dae CHO\*

Department of Marine Environmental Engineering and Institute of Marine Industry  
College of Marine Science, Gyeongsang National University Tongyeong,  
Gyeongnam, 650-160, Korea

\*Department of Oceanography, Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea

This study was to examine the physicochemical characteristics of coagulation reaction between ignited oyster shell powder (IOSP) and red tide organisms (RTO), and its feasibility, in developing a technology for the removal of RTO bloom in coastal sea. IOSP was made from oyster shell and its physicochemical characteristics were examined for particle size distribution, surface characteristic by scanning electron microscope, zeta potential, and alkalinity and pH variations in sea water. Two kinds of RTO that were used in this study, *Cylindrotheca closterium* and *Skeletonema costatum*, were sampled in Masan bay and were cultured in laboratory. Coagulation experiments were conducted using various concentrations of IOSP, RTO, and a jar tester. The supernatant and RTO culture solution were analyzed for pH, alkalinity, RTO cell number. IOSP showed positive zeta potentials of 11.1~50.1 mV at pH 6.2~12.7. A positive zeta potential of IOSP slowly decreased with decreasing pNa 4.0 to 2.0. When pNa reached zero, the zeta potential approached zero. When a pMg value was decreased, the positive zeta potential of IOSP increased until pMg 3.0 and decreased below pMg 3.0. IOSP showed 4.8 mV of positive zeta potential while RTO showed -9.2 mV of negative zeta potential in sea water. A positive-negative EDL (electrical double-layer) interaction occurred between Mg(OH)<sub>2</sub> adsorption layer of IOSP and RTO in sea water so that EDL attractive force always worked between them. Hence, their coagulation reaction occurred at primary minimum on which an extreme attractive force acted because of charge neutralization by Mg(OH)<sub>2</sub> adsorption layer of IOSP. As a result, the coagulation reaction was rapidly processed and was irreversible according to DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) theory. Removal rates of RTO were exponentially increased with increasing both IOSP concentration and G-value. The removal rates were steeply increased until 50 mg/l of IOSP and reached 100% at 400 mg/l of IOSP. Removal rates of RTO were 70.5, 70.5, 81.7, 85.3% for G-values of 1, 6, 29, 139 sec<sup>-1</sup> at IOSP 100 mg/l, respectively. This indicated that mixing (i.e., collision among particles) was very important for a coagulation reaction.

**Key words:** IOSP, RTO, Coagulation reaction, Mg(OH)<sub>2</sub> adsorption layer, Zeta potential, EDL interaction, EDL attractive force

## 서 론

산업화와 도시화로 인한 수질오염이 그 동안 연안에 누적되어 왔고 이들은 근래에 들어서 계속적으로 유입하는 육상오염물질과 함께 오염환 (pollution ring)을 형성하여 심각한 연안오염현상을 나타내고 있다. 현재 적조는 해를 거듭함에 따라 발생지역이 다변화하고 발생빈도가 많아지고 발생기간도 길어지며 장기화하는 추세로서 출현종도 무독성종에서 유독성종으로 바뀌고 있다. 이로 인하여 해마다 수산양식어업의 피해가 크게 발생하고 어장은 황폐화되고 있는 실정이다. 그러므로 현재 적조를 제거하고 발생을 억제시킬 수 있는 기술개발이 절실히 요구되고 있다.

해수를 포함하는 폐수에 생석회를 첨가하면 폐수의 pH가 증가하여 Mg(OH)<sub>2</sub> 침전물을 형성하는데, 여러 연구자들은 이러한 Mg(OH)<sub>2</sub> 침전물이 응집보조제의 역할을 한다는 것을 밝히고 있다 (Flentje, 1927; LeCompte, 1966; Marske et al., 1972). Mg(OH)<sub>2</sub>

침전물의 용해도는 전적으로 용액의 pH와 함수관계가 있고, pH가 10.2 이상으로 증가하면 용액중의 Mg<sup>2+</sup> 이온의 농도는 크게 감소하게 된다.

생석회를 응집제로 사용하여 폐수를 처리할 때 폐수중의 Mg<sup>2+</sup> 이온이 처리효율을 월등히 향상시켜 주며 (Flentje, 1927; LeCompte, 1966; Marske, 1972), 또한 부유 조류를 처리할 때 Mg<sup>2+</sup> 이온을 포함하는 쪽이 Ca<sup>2+</sup> 이온을 포함하는 쪽보다 더 효율적으로 처리된다고 보고하였다 (Wachs, 1969; Folkman and Wachs, 1973; Friedman et al., 1977). Black and Christman (1961)은 pH 9.8에서 Mg<sup>2+</sup> 이온은 CaCO<sub>3</sub> 입자의 표면에 흡착하여 negative zeta potential을 줄이거나 역전시킨다는 것을 보고하였고, Vuuren et al. (1967)은 생석회로 수처리를 할 때 Mg(OH)<sub>2</sub> 입자는 구조적으로 CaCO<sub>3</sub> 입자의 표면에 쉽게 흡착한다는 것을 보고하였다. Leentvaar and Rebbun (1982)은 하수를 생석회로 처리할 때 Mg(OH)<sub>2</sub> 입자가 CaCO<sub>3</sub> 입자보다 하수중의 총유기탄소를 효과적으

로 흡착 제거한다는 것을 보고하였다. 이러한 결과들은  $Mg(OH)_2$  입자는 이 입자가 존재하는 용액의 전체 pH 영역에서 양전하를 띠고  $CaCO_3$  입자는 음전하를 띠는 사실과 일치하는 것이다 (Larson and Baswell, 1940; Black and Christman, 1961). 한편 Vrale (1978)와 Ferguson and Vrale (1984)은 생석회를 응집제로 사용하여 폐수중의 부유물질과 인산염을 제거할 때 폐수중에 부족한  $Mg^{2+}$  이온을 보충하기 위하여 해수를 사용할 것을 제안하였다.

Folkman and Wachs (1973)은 생석회를 응집제로  $Mg(OH)_2$  입자를 응집보조제로 사용하여 산화지 방류수중의 조류를 효과적으로 제거하고 그 결과를 보고하였다. Friedman et al. (1977)은 여러 가지 화학 응집제를 사용하여 산화지 방류수중의 조류를 제거하고 그 효과를 비교하였다. Tenney and Stumm (1965)은 여러 가지 화학 응집제를 사용하여 생물학적 폐수처리장의 처리수중의 활성오니를 응집 제거하고 그 효과를 비교하였다. Ayoub et al. (1986)은 생석회와 해수를 이용하여 산화지 방류수중의 조류를 제거하였다.

해양의 살아있는 적조생물입자는 친수성의 다양한 고분자 화합물로 구성된 표면을 가지고 있으며 이런 유기물은 수중에서 이온화되어 대부분의 pH 영역에서 음전하를 띠고 있고 물리화학적 관점에서 전기동력학적으로 안정하여 분산되어 있는 생물콜로이드 입자이다 (Ives, 1956; Tenney and Stumm, 1965). 그러므로 양전하를 띠고 있는  $Mg(OH)_2$  입자와 음전하를 띠고 있는 조류 입자 사이에는 양전하-음전하의 상호작용이 일어나므로 입자간 전 구간에서 EDL (electrical double-layer) attractive force가 작용하고 반면에  $CaCO_3$  입자와 조류 입자 사이에는 음전하-음전하의 상호작용이 일어나므로 입자간 전 구간에서 EDL repulsive force가 작용한다. 그러므로  $Mg(OH)_2$  입자와 조류 입자 사이에는 LVDW (London-van der Waals) attractive force와 함께 항상 인력만이 작용함으로  $CaCO_3$  입자보다 효과적으로 조류를 응집 제거할 수 있다.

본 연구는 해양의 적조생물을 제거하기 위한 기술을 개발하는 것으로서 IOSP (ignited oyster shell powder; 소성 굴 패각 분말)를 응집제로 사용하여 실시한 응집실험을 통하여 적조생물입자와 IOSP 입자 사이의 물리화학적인 응집특성을 구명하는 것이다.

## 재료 및 방법

본 연구에서 적조생물입자를 응집제거 하기 위하여 IOSP를 응집제로 사용하였다. IOSP는 현재 남해 연안지역에서 그 처리의 문제가 심각한 굴 패각을 가공하여 만들었다. IOSP의 제조는 ① 굴 패각을 수돗물을 이용하여 깨끗이 수세, ② 막자사발에서 분말 상태로 마쇄, ③ 마쇄한 분말을 증류수와 혼합한 후 400 mesh 체를 이용하여 거르고, ④ 거른 액을 증발접시를 이용하여 건조한 후, ⑤ 다시 막자사발에서 분말상태로 마쇄하여 OSP (oyster shell powder; 굴 패각 분말)를 제조하고, ⑥ OSP를 800°C 회화로에서 2시간 동안 소성하여 제조하였다. IOSP의 입도분포는 입도분석기 (Model 770 AccuSizer, Particle Sizing Systems, Inc., Santa Bar-

bara, U.S.A.)를 사용하여 측정하였다. IOSP의 금속성분은 X-ray 회절분석법에 의하여 측정하였다. IOSP, 황토입자, 점토 및 적조생물입자의 zeta potential은 제타미터 (Model 501 Laser Zee Meter, Pen Ken, Inc., U.S.A.)를 사용하여 측정하였다.

본 연구에 사용한 적조시료는 마산만에서 채집한 *Cylindrotheca closterium*과 *Skeletonema costatum*의 두가지 규조류의 배양액이며, 배양액의 성분은 Table 1과 같다. 배양액에 사용한 해수는 실제 해수를 0.45  $\mu m$  유리섬유여과지 (Millex<sup>®</sup>, Millipore Corporation, Bedford, MA, USA)를 이용하여 여과한 후 60°C에서 4시간 동안 멸균하여 사용하였다. 응집실험에 사용하기 직전의 배양액의 pH는 평균 9.53이고 적조생물입자의 수는 약 2,175,100 cell/ml이었다.

Table 1. Constituents of Culture Solution for Red Tide Organisms (Diatom)

Materials	Concentration (mg/l)
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.0196
$ZnCl_2$	0.021
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	0.02
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	0.0036
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.0126
$Na_2EDTA$	4.36
$FeCl_3$	3.15
$NaNO_3$	75.0
$NaH_2PO_4 \cdot H_2O$	5.0
Tiamin · HCl	0.1
Biotin	0.0005
Vitamin B <sub>12</sub>	0.0005
$Na_2SiO_3$	15.0
Sea Water	1000 ml

응집실험은 6개의 500 ml의 비이커에 400 ml의 적조배양액을 각각 취한 후 IOSP를 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 800 mg/l의 농도가 되도록 넣고 jar tester를 사용하여 G-value 139 sec<sup>-1</sup>에서 45초간 급속교반, 1분간 완속교반을 한 후 1시간 동안 방치하였다. 1시간 후 상청액에 대하여 개체수, pH, alkalinity를 측정하였다. 적조생물의 개체수는 상청액 (上淸液) 4 ml를 취하여 규조류 고정액 (포르말린과 빙초산을 1:1로 혼합)으로 고정한 후 개체수를 토호마 혈구계수기를 이용하여 계수하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. IOSP의 물리화학적 특징

본 실험에 사용한 IOSP의 입도 분포는 Fig. 1과 같다. 입도 분포는 정규분포를 보여주는 하나의 peak로 나타났으며, IOSP의 평균 지름은 11.6  $\mu m$ 이고 변동계수는 60.1%이었다. Fig. 1에서 약 77%의 입자가 5.0~20.0  $\mu m$ 의 범위에 속하는 것을 알 수 있다.

IOSP의 금속성분을 분석한 결과는 98.3%가 칼슘 (Ca)으로써 생석회 (CaO)와 같은 성분이고 나머지 1.7%는 마그네슘 (Mg)이 0.3%, 염소 (Cl)가 0.7%, 규소 (Si)가 0.7%이었다. Fig. 2는 IOSP의

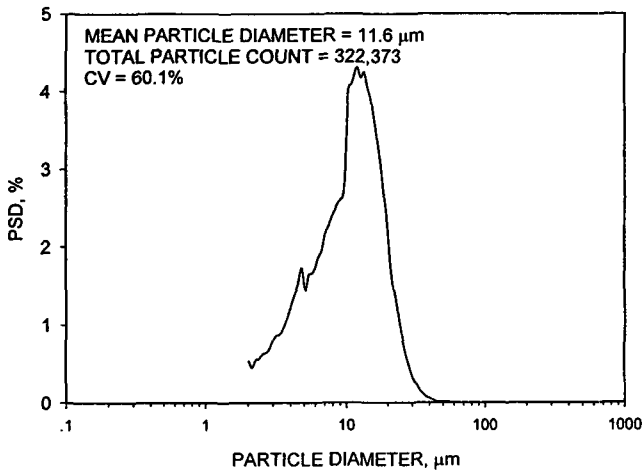


Fig. 1. Particle size distribution for IOSP.

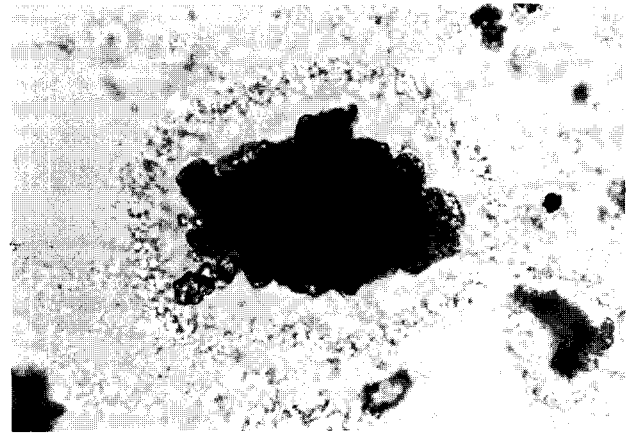


Fig. 3. Compound light microscope image of IOSP in sea water. Magnification is 400 times.

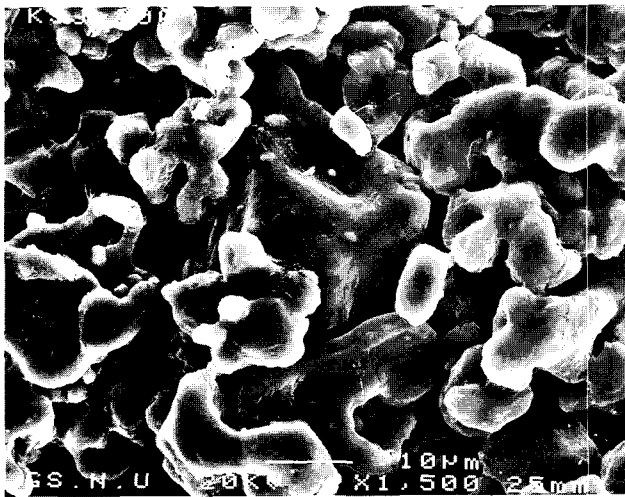


Fig. 2. Secondary electron image of IOSP by SEM. Magnification is 1,500 times.

전자현미경 (scanning electron microscope; SEM) 사진이다. 표면이 매끈한 부정형의 입자로 되어 있는 것을 알 수 있다. IOSP를 해수에 첨가하면 해수중의  $Mg^{2+}$  이온과 급속하게 반응하여 입자의 표면 주위에 점질성의  $Mg(OH)_2$  흡수층 (absorption layer)을 형성하여 응집 침전하고 해수의 pH를 10.0 정도까지 상승시켰다. Fig. 3은 IOSP와  $Mg(OH)_2$  흡수층을 보여주는 현미경 사진이다.

Fig. 4는 증류수의 pH를 12.7에서 4.5까지 감소시키면서 IOSP와 OSP의 zeta potential을 측정한 결과이다. IOSP는 pH=6.2~12.7에서 11.1~50.1 mV로서 IOSP의 입자가 완전히 용해될 때까지 positive zeta potential을 나타낸 반면 OSP는 pH=9.2, 11.9에서 각각 -42.5, -56.9 mV로서 negative zeta potential을 나타내었다. Fig. 5는 여러 가지 농도의 NaCl 용액 중에서 IOSP와 OSP의 zeta potential을 측정한 결과이다. 일반적으로  $Na^+$  이온은 indifferention으로서 EDL을 압축시키는 효과를 나타낸다 (Hunter, 1981;

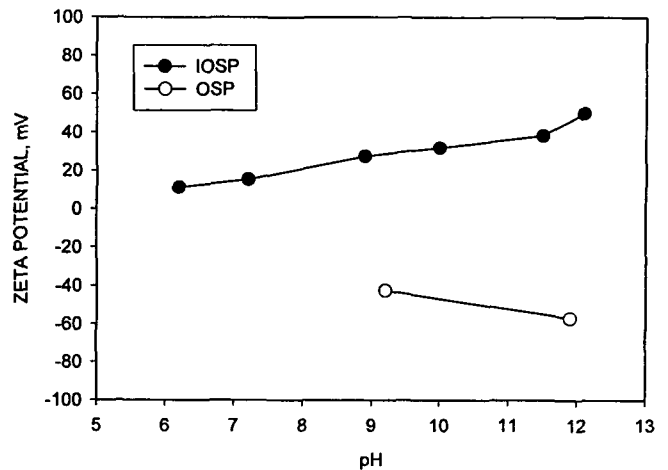


Fig. 4. Effects of pH on zeta potential for IOSP and OSP.

Tobiason, 1987; Kim, 1993).  $pNa=2.0\sim4.0$  ( $10^{-4}\sim10^{-2}$  M  $Na^+$ )에서 IOSP, OSP의 zeta potential은 거의 일정한 값을 나타내었으며, 이는 EDL의 압축에 영향을 미치지 않은 것을 의미하는 것이다. 한편  $pNa=0.0$  (1 M  $Na^+$ )에서 IOSP는 EDL이 매우 크게 압축되어 zeta potential이 거의 0.0 mV를 나타내었으나 OSP는 -25.4 mV의 여전히 높은 negative zeta potential을 나타내었다.  $pNa$  0의 IOSP에서 전하역전 (charge reversal)이 일어나지 않은 것은  $Na^+$  이온이 IOSP의 고정층 (fixed layer) 안으로 specific adsorption을 한 것이 아니고 단지 정전기적 인력에 의하여 결합하기 때문이다 (Hunter, 1981; Tobiason, 1987; Kim, 1993). Fig. 6은 여러 가지 농도의  $MgCl_2$  용액에서 IOSP의 zeta potential을 측정한 결과이다.  $Mg^{2+}$  이온은  $Na^+$  이온과는 달리 IOSP의 전단면 (plane of shear) 안쪽의 IOSP 표면기와 specific adsorption을 하는 것으로 생각된다 (Hohl et al., 1980; Hunter, 1981; Tobiason, 1987; Kim, 1993). 그래서 보다 용이하게 EDL를 압축시킬 수 있

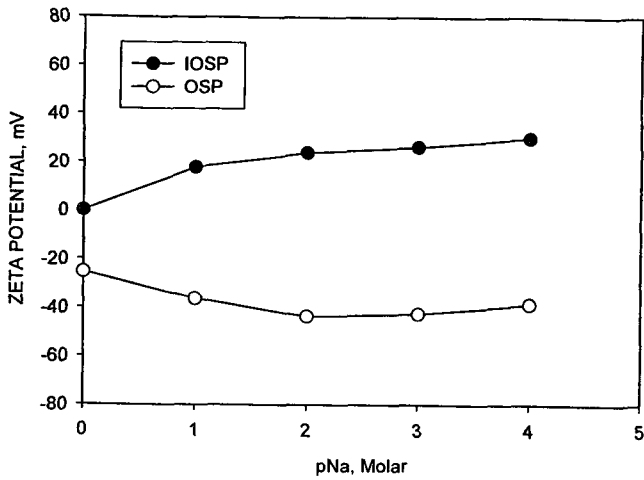


Fig. 5. Effects of sodium ion concentration on zeta potential for IOSP and OSP. A constant pH for IOSP and OSP is 11.5 and 9.2, respectively. Different pNa was maintained with NaCl.

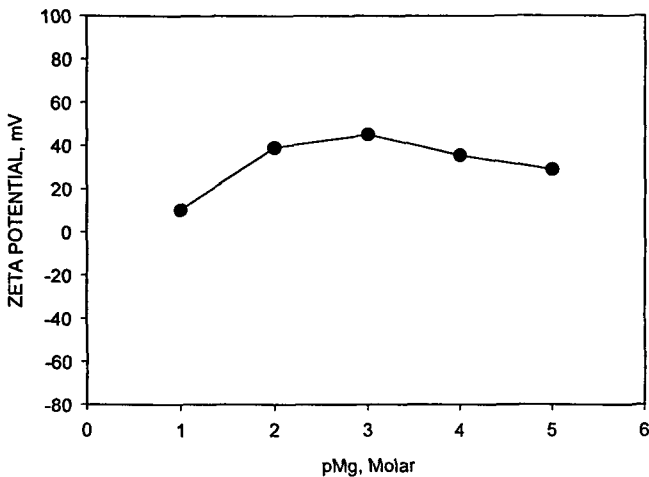


Fig. 6. Effects of magnesium ion concentration on zeta potential for IOSP. A constant pH for IOSP is 11.5. Different pMg was maintained with MgCl<sub>2</sub>.

으며 표면전하를 역전시킬 수 있다. specific adsorption의 기작은 본 실험의 결과로부터 결정할 수는 없다. Mg<sup>2+</sup> 이온이 IOSP의 표면기와 specific adsorption을 하면 EDL은 압축되고 PDI (potential determining ion)는 보다 용이하게 IOSP 표면기와 반응할 뿐만 아니라 동시에 surface potential을 일정하게 유지해야 하므로 PDI 흡착반응은 더욱 강력하게 일어나게 된다 (Hunter, 1981; Kim, 1993). 그러므로 Fig. 6에서 Mg<sup>2+</sup> 이온의 농도가 증가함에 따라 positive zeta potential이 증가하다가 pMg=3.0 (10<sup>-3</sup> M Mg<sup>2+</sup>)에서 감소하는 결과를 나타내었다.

Fig. 7은 IOSP, OSP, 황토 분말 (LOESS) 및 적조 배양액 (red tide organisms; RTO) 등에 대하여 해수중의 zeta potential을 측정된 결과를 보여주고 있다. IOSP를 제외한 입자들은 negative

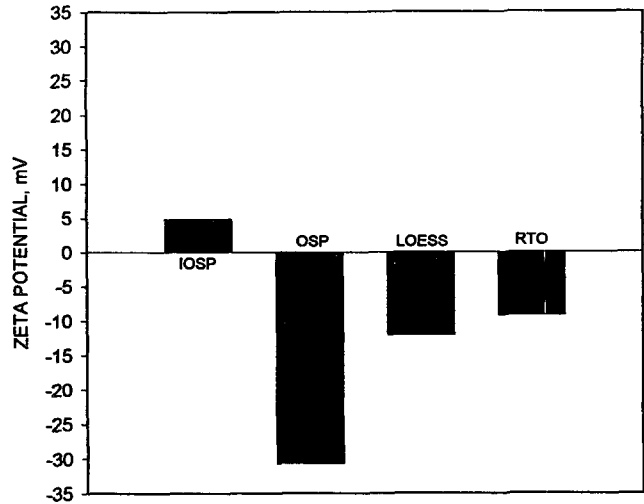


Fig. 7. Zeta potentials for IOSP, OSP, LOESS, and RTO in sea water.

zeta potential을 나타내었고, 특히 OSP는 해수중에서 비교적 큰 -30.7 mV의 negative zeta potential을 나타내었다.

Fig. 8은 pH의 변화에 따른 OSP와 IOSP에 의한 해수의 alkalinity 변화를 나타낸 것이다. IOSP는 pH가 감소함에 따라 지속적으로 용해하여 OH<sup>-</sup> 이온을 방출하는 이온화 표면 (ionizable surface)을 가진 강력한 alkalinity 제공물질이며, 나타내는 총 alkalinity의 약 80%가 phenolphthalein alkalinity에 해당하였다.

### 2. IOSP에 의한 응집반응의 특징

Fig. 9는 여러 가지 IOSP의 농도에 대한 적조생물입자의 응집 제거 효율을 보여주는 것이며, Fig. 10은 IOSP에 의하여 적조생물이 응집 제거된 모습을 보여주는 사진이다. IOSP의 농도 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 800 mg/l에서 각각 73.9, 85.3, 91.3,

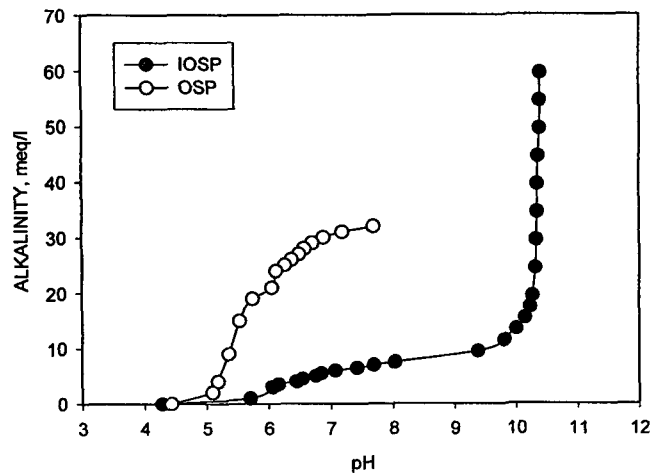


Fig. 8. Variations of the alkalinity of sea water by IOSP and OSP for pH changes.

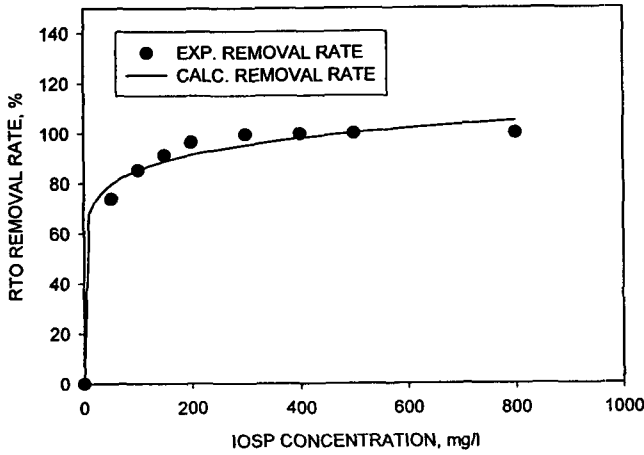


Fig. 9. RTO removal rates for various IOSP concentrations.

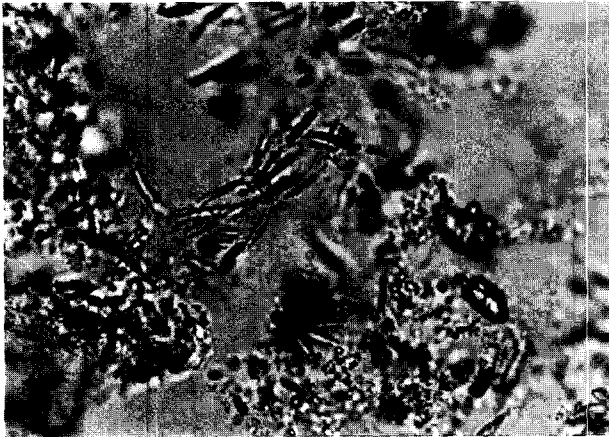


Fig. 10. Compound light microscope image of RTO coagulated by IOSP in sea water. Magnification is 400 times.

96.4, 99.6, 99.8, 100%의 적조생물이 응집 제거되었다. 적조생물입자의 응집제거 효율은 IOSP의 농도가 증가함에 따라서 지수함수적으로 증가하였다 ( $Y=53.81 \times X^{0.1}$ ;  $R^2=0.9868$ ). 즉 IOSP의 농도 50~200 mg/l에서 급격한 증가를 보이다가 IOSP의 농도가 계속 증가함에 따라서 점점 완만한 증가를 나타내었다.

Fig. 11은 여러 가지 농도의 IOSP를 사용하여 적조배양액의 응집실험을 한 후 상청액(上淸液)에 대하여 pH, alkalinity를 조사한 결과이다. Fig. 11에서 IOSP의 농도가 증가함에 따라 pH와 phenolphthalein alkalinity는 급격하게 증가한 후 거의 일률적으로 감소한 반면 methyl orange alkalinity는 계속 감소하였고, 두 경우 모두 IOSP 400 mg/l에서 평형상태에 도달하였다. phenolphthalein alkalinity는 400 mg/l보다 낮은 IOSP 농도에서 침전되지 않고 상청액(上淸液)중에 남아있는  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  등의 미세입자들에 의하여 일어난 것이며, methyl orange alkalinity는 IOSP의 농도가 증가함에 따라  $\text{HCO}_3^-$  이온이  $\text{CO}_3^{2-}$  이온으로 바뀌기 때문이다 (Benfield et al., 1982; Benfield and Mor-

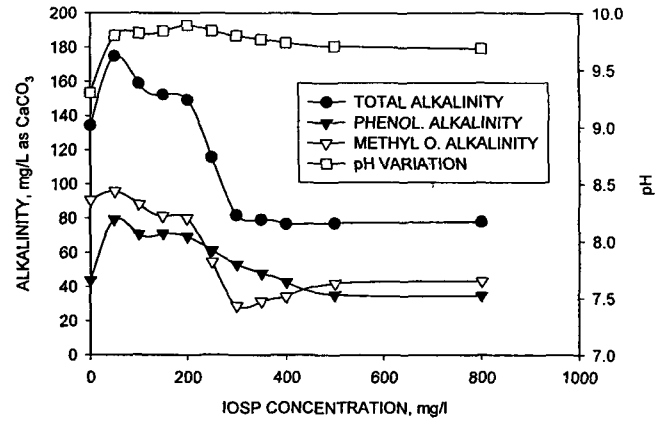


Fig. 11. Variations of pH and alkalinity for effluents of coagulation reaction using various IOSP concentrations.

gan, 1990). IOSP는 응집반응이 일어나는 동안 적조배양액중의 phenolphthalein alkalinity을 거의 소모하지 않으며, 응집 침전은 IOSP 400 mg/l 이상에서 거의 완전히 일어났음을 알 수 있다.

Fig. 12에서와 같이 해수중에서 IOSP의  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  흡수층과 적조생물입자 사이에는 positive-negative EDL 반응이 일어나므로 이들 둘 사이에는 항상 전기동력학적 인력(EDL attractive force)이 작용하고, 이 인력은 두 입자 사이의 어떤 중간점에서 최대값을 나타낸다(Folkman and Wachs, 1973; Israelachvili, 1982). 동시에  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  흡수층에 의한 전하중화로 인하여 입자 상호간의 응집반응은 극단적 인력이 작용하는 primary minimum에서 일어나고 DLVO(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) 이론에 따라 응집반응은 비가역적이다(Overbeek, 1952; Israelachvili, 1992). IOSP와 적조생물입자 사이의 반응에서는 각 입자 자체의 EDL을 재편성하는데 소요되는 시간(the relaxation time of electrical double-

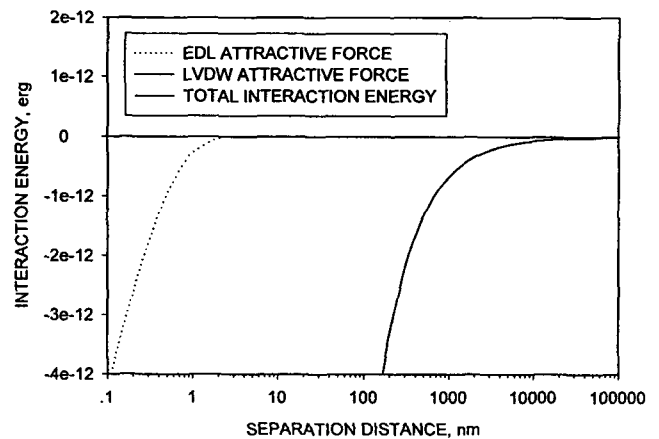


Fig. 12. Interaction energy profiles for IOSP and RTO approaching each other in sea water. The zeta potentials are 4.8 mV for IOSP and -9.2 mV for RTO in sea water. Hamaker constant is  $5 \times 10^{-13}$  erg.

layer)과 각 입자 자체의 표면전하량 (surface charge)을 재조정하는데 소요되는 시간 (the time for the Stern layer adjustment)을 EDL repulsive force가 작용하는 황토입자와 적조생물입자의 경우보다 크게 단축시켜 응집반응을 매우 신속하게 일어나게 한다 (Overbeek, 1977; Lyklema and van Leeuwen, 1982; Kim, 1993).

G-value 1, 6, 29, 139 sec<sup>-1</sup>에서 IOSP 100 mg/ℓ을 사용한 적조 배양액의 응집실험 결과를 Fig. 13에 나타내었다. G-value가 증가함에 따라 적조생물입자의 응집제거 효율이 각각 70.5, 70.5, 81.7, 85.3%로 증가하였다. 이로써 응집반응에서는 입자간 충분한 충돌이 일어날 수 있도록 교반하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

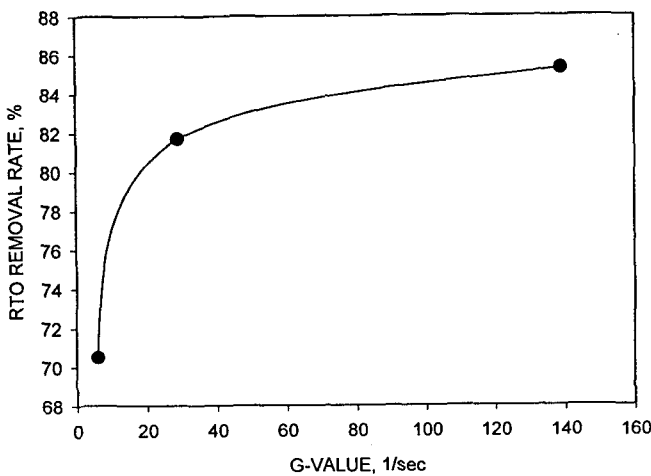


Fig. 13. RTO removal rates for various G-values. IOSP concentration is 100 mg/ℓ.

요 약

IOSP를 이용하여 적조생물입자에 대한 응집실험을 한 결과는 다음과 같다.

본 실험에 사용한 IOSP의 평균 지름은 11.6 μm이고, 약 77%의 입자가 5.0~20.0 μm의 범위에 속하며 변동계수는 60.1%이었다. IOSP의 금속성분을 분석한 결과는 98%가 칼슘으로서 생석회 (CaO)와 같은 성분이었다. IOSP의 전자현미경 사진을 분석한 결과 표면이 매끈한 부정형의 입자로 되어 있었다. IOSP에 해수를 첨가하면 해수중의 Mg<sup>2+</sup> 이온과 급속하게 반응하여 입자의 표면 주위에 점질성의 Mg(OH)<sub>2</sub> 흡수층 (absorption layer)을 형성하여 응집 침전하고 해수의 pH를 10.0 정도까지 상승시켰다.

IOSP는 pH=6.2~12.7에서 11.1~50.1 mV로서 IOSP의 입자가 완전히 용해될 때까지 positive zeta potential을 나타낸 반면 OSP는 pH=9.2, 11.9에서 각각 -42.5, -56.9 mV로서 negative zeta potential을 나타내었다. pNa=2.0~4.0 (10<sup>-4</sup>~10<sup>-2</sup> M Na<sup>+</sup>)에서 IOSP, OSP의 zeta potential은 거의 일정한 값을 나타내었으나 pNa=0.0 (1 M Na<sup>+</sup>)에서는 IOSP의 EDL이 매우 크게 압축되어 zeta potential은 거의 0.0 mV를 나타내었고 OSP는 -25.4 mV의

여전히 높은 negative zeta potential을 나타내었다. IOSP는 Mg<sup>2+</sup> 이온의 농도가 증가함에 따라 positive zeta potential이 증가하다가 pMg=3.0 (10<sup>-3</sup> M Mg<sup>2+</sup>)에서 감소하는 결과를 나타내었다. 해수중에서 IOSP는 4.8 mV의 positive zeta potential을 나타내었고, OSP와 RTO는 각각 -30.7 mV, -9.2 mV의 negative zeta potential을 나타내었다.

해수중에서 IOSP의 Mg(OH)<sub>2</sub> 흡수층과 적조생물입자 사이에는 positive-negative EDL 반응이 일어나서 이들 둘 사이에는 항상 전기동력학적 인력이 작용하고, 동시에 Mg(OH)<sub>2</sub> 흡수층에 의한 전하중화로 인하여 입자 상호간의 응집반응은 극단적 인력이 작용하는 primary minimum에서 일어나고, DLVO 이론에 따라 응집 반응은 비가역적이며 매우 신속하게 일어났다.

적조생물입자의 응집제거 효율은 IOSP의 농도 50 mg/ℓ까지 급격한 증가를 보이다가 IOSP의 농도가 계속 증가함에 따라서 점점 완만한 증가를 나타내었다. 즉 IOSP의 농도가 증가함에 따라서 지수함수적으로 증가하였다 (Y=53.81×X<sup>0.1</sup>; R<sup>2</sup>=0.9868). 응집 침전은 IOSP 400 mg/ℓ 이상에서 거의 완전히 일어났다.

IOSP 100 mg/ℓ을 사용하고 G-value를 1, 6, 29, 139 sec<sup>-1</sup>로 단계적으로 증가시키면서 응집 실험을 한 결과 적조생물입자의 응집제거 효율이 각각 70.5, 70.5, 81.7, 85.3%로 증가하였다. 이는 응집 반응에서 입자간 충분한 충돌이 일어날 수 있도록 교반하는 것이 매우 중요함을 나타내 주는 것이다.

감사의 글

이 연구는 1995년도 부경대학교 해양산업개발연구소의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Ayoub, G.M., S.I. Lee and B. Koopman. 1986. Seawater induced algal flocculation. *Water Research*, 20(10), 1265~1271.

Benefield, L.D., J.F. Judkins, Jr. and B.L. Weand. 1982. *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, New Jersey, 225 pp.

Benefield, L.D. and J.M. Morgan. 1990. Chemical precipitation. In *Water Quality and Treatment*, F.W. Pontius, ed., American Water Works Association, McGraw-Hill, New York, pp. 641~708.

Black, A.P. and R.F. Christman. 1961. Electrophoretic studies of sludge particles produced in lime-soda softening. *J. American Water Works Association*, 53, 737~747.

Ferguson, J.F. and L. Vrale. 1984. Chemical aspects of the lime seawater process. *J. WPCF*, 56, 355~363.

Flentje, M.E. 1927. Calcium reclamation by excess time treatment of effluent. *J. American Water Works Association*, 17, 253 pp.

Folkman, Y. and A.M. Wachs. 1973. Removal of algae from stabilization pond effluents by lime treatment. *Water Research*, 7, 419~435.

Friedman, A.A., D.A. Peaks and R.L. Nichols. 1977. Algae separation from oxidation pond effluents. *J. WPCF*, 49, 111~119.

Hohl, H., L. Sigg and W. Stumm. 1980. Characterization of surface

- chemical properties of oxides in natural waters: the role of specific adsorption in determining the surface charge. In *Particulates in Water*, M.C. Kavanaugh and J.O. Leckie, eds., Advances in Chemistry Series, 189, American Chemical Society, pp. 1~31.
- Hunter, R.J. 1981. *Zeta Potential in Colloid Science*. Academic Press, London, 233 pp.
- Israelachvili, J.N. 1982. Forces between surfaces in liquids. *Advances in Colloid and Interface Science*, 16, 31~47.
- Ives, K.J. 1956. Electrokinetic phenomena of planktonic algae. *Proc. Soc. Water Treat. Exam.* 5, 41~58.
- Kim, S.J. 1993. Factors Influencing Colloidal Particle Transport in Porous Media. Ph.D. Dissertation, Auburn University, Auburn, pp. 185~199, 68.
- Larson, T.E. and A.M. Buswell. 1940. Theoretical limits of the lime-soda method of water softening. *Ind. Engng Chem.*, 32, 130 pp.
- LeCompte, A.R. 1966. Water reclamation by excess lime treatment of effluent. *TAPPI*, 49, 121A pp.
- Leentvaar, J. and M. Rebhun. 1982. Effect of magnesium and calcium precipitation on coagulation-flocculation with lime. *Water Research*, 16, 655~662.
- Lyklema, J. and H.P. van Leeuwen. 1982. Dynamic properties of the AgI solution interface: implications for colloid stability. *Advances in Colloid and Interface Science*, 16, 127~137.
- Marske, D.M., D.R. Evans and K.L. Hansen. 1972. High quality treatment of combined municipal, fruit and vegetable processing wastes. presented at the 45th Annual Conference of the Water Pollution Control Federation, Atlanta, Georgia.
- Overbeek, J.Th.G. 1952. Electrochemistry of the double layer. In *Irreversible Systems*, H.R. Kruyt, ed., Elsevier Publishing Co., Amsterdam, pp. 115~193.
- Overbeek, J.Th.G. 1977. Recent developments in the understanding of colloid stability. *J. Colloid and Interface Science*, 1, 431~445.
- Tenney, M.W. and W. Stumm. 1965. Chemical flocculation of microorganisms in biological waste treatment. *J. WPCF*, 37, 1370~1388.
- Tobiason, J.E. 1987. Physicochemical Aspects of Particle Deposition in Porous Media. Ph.D. Dissertation, Johns Hopkins University, Baltimore, pp. 121~144.
- Vrale, L. 1978. Chemical precipitation of wastewater with lime and seawater. *Prog. Wat. Technol.*, 10, 645~656.
- Vuuren, L.R.J. van, D.J. Stander, M.R. Henzen, P.G.J. Meiring and S. H.V. van Blerk. 1967. Advanced purification of sewage works effluent using a combined system of lime softening and flotation. *Water Research* 1, 463~474.
- Wachs, A.M. 1969. In development in water quality research. *Proc. Jerusalem Internat. Conf. Water Qual. & Pollut. Res.*, 116 pp.

---

2000년 7월 28일 접수

2000년 9월 23일 수리