

소성굴패각분말과 황토의 동시 사용에 의한 적조생물의 응집

김 성 재*

경상대학교 해양환경공학과 · 해양산업연구소

Flocculation of Red Tide Organisms in Sea Water by Using an Ignited Oyster Shell Powder and Loess Combination

Sung-Jae KIM*

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

This study determined the optimum dosage for coagulation reactions of red tide organisms (RTO) using a combination of ignited oyster shell powder (IOSP) and loess and examined the electrokinetic and rheological characteristics of their flocs. Two kinds of RTO, *Cylindrotheca closterium* and *Skeletonema costatum*, were sampled in Masan Bay and cultured in the laboratory. Coagulation experiments were conducted using various concentrations of IOSP, loess, IOSP+loess, RTO, and a jar tester. RTO cell numbers were counted for both the supernatant and RTO culture solution. The removal rates increased rapidly with increasing IOSP concentrations up to 50 mg/L and loess concentrations up to 800 mg/L. A removal rate of 100% was reached at 400 mg/L of IOSP and 6,400 mg/L of loess. The highest increment (16.7%) of the rates of coagulation reaction occurred using both IOSP and loess (50+200 mg/L) in comparison with IOSP alone. The rate of coagulation reaction using both IOSP and loess (50+200 mg/L), 90.6%, was similar to employing either IOSP of 150 mg/L or loess of 3,200 mg/L. All of the coagulation liquids for RTO, IOSP (200 mg/L), loess (200 mg/L), and IOSP+loess (200+200 mg/L) revealed non-Newtonian fluid properties and therefore their shear rate vs. shear stress curves were non-linear. The coagulation liquids revealed elastic body properties at a lower shear rate increasing in the following order: RTO, IOSP (200 mg/L), loess (200 mg/L), and IOSP+loess (200+200 mg/L). IOSP+loess (200+200 mg/L) especially demonstrated plastic flow properties at a lower shear rate.

Key words: RTO, IOSP+loess, EDL attractive force, LVDW attractive force, Coagulation reaction, Rheology

서 론

자연상태의 황토 (loess)는 주로 규소 (Si) 및 알루미늄 (Al)을 포함하는 각종 점토 (clay)와 불순물인 철 (Fe) 및 기타 미량금속으로 구성된 금속산화물로서 건조한 상태에서는 표면의 금속이온이 완전한 격자구조를 이루지 못하나 물속에서는 빈 격자구조에 물분자가 화학적 흡착반응으로 결합함으로써 표면수산기그룹 (surface hydroxyl group)을 형성한다 (Dzombak and Morel, 1987). 금속산화물의 표면과 물 사이의 계면 (interface)에서는 전형적인 산염기 반응이 일어나서 수중의 금속산화물의 표면에는 pH의 변화에 따라 산성단 (acidic site)과 염기성단 (basic site)이 형성된다. 따라서 금속산화물의 표면수산기그룹은 H^+ 이온을 결합하거나 방출할 수 있으므로 금속산화물의 표면은 용액의 pH에 따라서 양쪽 성표면전하 (amphoteric surface charge)를 띠게 된다 (Parks and DeBruyn, 1962). 금속산화물의 표면전하 (surface charge)의 극성과 크기는 용액의 H^+ 과 OH^- 이온의 농도에 의하여 결정되며, H^+ 과 OH^- 이온을 전하결정이온 (potential-determining ion)이라고 한다 (James and Parks, 1982).

해수를 포함하는 폐수에 생석회를 첨가하면 폐수의 pH가 증가하여 $Mg(OH)_2$ 응결물 (floc)을 형성하는데, 여러 연구자들은 이러한 $Mg(OH)_2$ 응결물이 응집보조제의 역할을 한다는 것을 밝히고 있다 (Flentje, 1927; LeCompte, 1966; Vrale, 1978). $Mg(OH)_2$ 응결물의 용해도는 전적으로 용액의 pH와 함수관계가 있고, pH가 10.2 이상으로 증가하면 용액중의 Mg^{2+} 이온의 농도는 크게 감소하게 된다. 생석회를 응집제로 사용하여 폐수를 처리할 때 폐수중의 Mg^{2+} 이온이 처리효율을 월등히 향상시켜 주며 (Flentje, 1927; LeCompte, 1966; Vrale, 1978), 또한 부유 조류를 처리할 때 Mg^{2+} 이온을 포함하는 쪽이 Ca^{2+} 이온을 포함하는 쪽보다 더 효율적으로 처리된다고 보고하였다 (Folkman and Wachs, 1973; Friedman et al., 1977). 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. Ayoub et al. (1986)은 생석회와 해수를 이용하여 산화지 방류수중의 조류를 제거하였다.

자연계에 존재하는 황토 (금속산화물)는 소수성 콜로이드 (hydrophobic colloid)의 성질을 가지며 반면에 해양의 살아있

*Corresponding author: sungjkim@gsnu.ac.kr

는 적조생물입자 (red tide organism: RTO)는 친수성의 다양한 고분자 화합물로 구성된 표면을 가지고 있고 이런 유기물은 수중에서 이온화되어 대부분의 pH 영역에서 음전하를 띠며, 해수와 거의 같은 비중을 가지고 전기동력학적으로 안정하여 분산되어 있는 생물콜로이드 입자이다 (Ives, 1956; Tenney and Stumm, 1965).

Kim and Cho (2000)은 소성굴패각분말 (ignited oyster shell powder: IOSP)의 입자형태, 입도분포, zeta potential, 알칼리도 등을 조사 보고하였고, IOSP는 부정형의 입자로서 해수중에서 Mg(OH)₂ 응결물을 형성하여 표면에 양전하를 띤다고 보고하였다. Kim (1999, 2000)은 황토의 입자형태, 입도분포, zeta potential, 알칼리도 등을 조사 보고하였고, 황토는 부정형의 다공질성 입자로서 해수중에서 표면에 음전하를 띠며 pH의 변화에 따라서 양쪽성표면전하를 갖는 금속산화물의 특성을 나타낸다고 보고하였다.

해역에서 발생한 적조의 탁도는 대개 응집반응을 일으키기에는 매우 희박한 상태에 있다. 일반적으로 상수처리에서 낮은 탁도의 원수 (raw water)를 응집처리 할 때 응집보조제로서 벤토나이트 점토가 종종 사용되고 있고, 이것은 응집제의 양을 줄여줄 뿐만 아니라 floc의 강도와 침강특성을 개선시켜 주는 효과를 나타낸다 (Benefield et al., 1982).

그러므로 해수중에서 양전하를 띠고 있는 IOSP 입자와 음전하를 띠고 있는 조류 및 황토 입자 사이에는 양전하-음전하의 상호작용이 일어나므로 입자간 전 구간에서 전기동력학적 인력 (electrical double-layer attractive force: EDL attractive force) 뿐만 아니라 반발발스 인력 (London-van der Waals attractive force: LVDW attractive force)도 함께 작용함으로써 매우 빠르게 조류를 응집 제거할 수 있으며, 형성된 floc은 견고하고 침강성이 뛰어나므로 IOSP와 황토의 사용량을 크게 줄여줄 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 IOSP와 황토를 함께 사용하여 적조생물입자를 응집 제거할 때 응집반응의 전기동력학적 특성과 최적조건을 찾아내고, 응집물의 유변학적 특성 (rheological characteristics)을 검토하는 것이다.

재료 및 방법

본 연구에서 사용한 IOSP와 황토의 조제 및 물리화학적 인성질은 각각 앞서 발표된 논문 Kim and Cho (2000) 및 Kim (1999, 2000)에 기술되어 있다. 해수중에서 IOSP, OSP (oyster shell powder), 황토 분말 (loess) 및 적조생물입자 (RTO)의 zeta potential은 zeta meter (Model 501 Laser Zee Meter, Pen Ken, Inc., U.S.A.)를 사용하여 측정하였다.

본 연구에 사용한 적조시료는 마산만에서 채집한 규조류 *Cylindrotheca closterium*과 *Skeletonema costatum*을 대량 배양한 것이며, 배양액의 성분은 Table 1과 같다. 배양액은 실제 해수를 0.45 μm 유리섬유여과지 (Millex[®], Millipore Corp., USA)를 이용하여 여과한 후 60°C에서 4시간 동안 멸균하여

Table 1. Constituents of culture solution for red tide organism (diatom)

Materials	Concentration (mg/L)
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.0196
ZnCl ₂	0.021
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.02
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.0036
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.0126
Na ₂ EDTA	4.36
FeCl ₃	3.15
NaNO ₃	75.0
NaH ₂ PO ₄ ·H ₂ O	5.0
Thiamin·HCl	0.1
Biotin	0.0005
Vitamin B ₁₂	0.0005
Na ₂ SiO ₃	15.0
Sea Water	1000 mL

조제하였다. 응집실험에 사용하기 직전의 적조시료의 pH는 9.53이고 적조생물 (규조류)의 수는 약 2.18×10⁶ cells/mL이었다.

IOSP, 황토, IOSP+loess에 의한 응집실험은 6개의 500 mL의 비이커에 400 mL의 적조배양액을 각각 취한 후 IOSP는 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 800 mg/L, 황토는 0, 200, 400, 800, 1,600, 3,200, 6,400, 12,800 mg/L, IOSP+loess는 Table 2와 같이 더하고 jar tester를 사용하여 G-value 139 sec⁻¹에서 45초간 급속교반, 1분간 완속교반을 한 후 1시간 동안 방치하였다. 1시간 후 상등액 4 mL를 취하여 규조류 고정액 (포르말린과 빙초산을 1:1로 혼합)으로 고정한 후 개체수를 혈구계수기를 이용하여 계수하였다.

Table 2. Concentrations of IOSP+loess used for the coagulation experiment

Coagulants	Concentration (mg/L)	
	IOSP	Loess
IOSP+loess	-	-
"	0	200
"	0	400
IOSP+loess	50	0
"	50	200
"	50	400
IOSP+loess	100	0
"	100	200
"	100	400
IOSP+loess	150	0
"	150	200
"	150	400
IOSP+loess	200	0
"	200	200
"	200	400
IOSP+loess	400	0
"	400	200
"	400	400

2002년 8월 통영시 산양읍 곤리도 해역에서 IOSP+loess의 혼합용액을 사용하여 *Cochlodinium polykrikoides* 적조를 제거하는 현장실험을 실시하였다. 실험은 57 L의 수조 2개에 각각

적조발생 해역의 해수를 채우고, 한 수조에는 황토 100 mg/L 다른 수조에는 IOSP+loess 25+100 mg/L 농도가 되도록 IOSP와 황토를 첨가하고 젓기 막대로 약 30초 정도 젓은 후 정치하였다. 5분 후에 상청액을 취하여 해양환경공정시험방법(1998)에 따라서 Chlorophyll *a*를 측정하였다.

IOSP 200 mg/L, 황토 200 mg/L과 그 혼합물을 이용하여 실시한 적조생물입자의 응집반응의 응집액 (floc)에 대한 유변학적 특성을 검토하기 위하여 레올리지를 측정하였다. 측정장치는 couette type rotational rheometer (Rheolab MC 20, Physica Co., Germany)를 사용하였다. 장치의 cup radius는 13.56 mm, bob radius 12.5 mm, 간격은 1.06 mm이다. bob의 회전으로 인하여 주어진 shear stress는 전압으로 전환되고 이어서 컴퓨터에 의하여 계산된 후 기록계 (recorder)에 의하여 기록되어 진다. 본 연구에서 측정온도 18°C, 0-500 sec⁻¹의 범위에서 shear stress vs. shear rate와 viscosity vs. shear rate를 측정하였다.

결과 및 고찰

해수중에서 IOSP, 황토, 적조생물입자 사이의 전기동력학적 특성

Fig. 1은 IOSP, OSP, 황토 분말 (loess) 및 적조생물입자 (RTO) 등에 대하여 해수중의 zeta potential을 측정한 결과를 보여주고 있다. 해수중에서 IOSP는 4.8 mV의 positive zeta potential을 나타낸 반면, OSP, 황토, 적조생물입자는 각각 -30.7, -12.1, -9.2 mV의 negative zeta potential을 나타내었다. 특히 OSP는 해수중에서 비교적 큰 negative zeta potential을 나타내었다.

Fig. 2는 해수중에서 상호 접근하는 IOSP의 Mg(OH)₂ 응결물과 적조생물입자 및 황토입자 사이의 interaction energy를 계산하고 그 변동을 보여준다. 해수중에서 IOSP의 Mg(OH)₂ 응결물과 적조생물입자 및 황토입자 사이에는 positive-negative

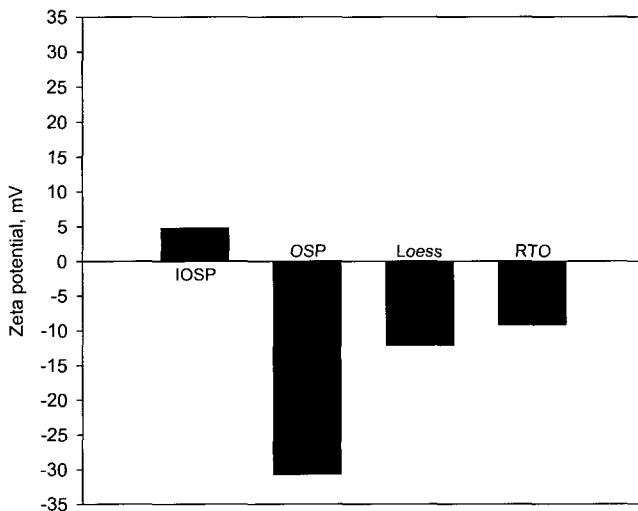


Fig. 1. Zeta potentials for IOSP, OSP, loess, and RTO in sea water.

EDL 반응이 일어나므로 이들 사이에는 항상 EDL attractive force가 작용하게 되고, IOSP-loess 사이에서 작용하는 EDL attractive force가 IOSP-RTO 사이에서 작용하는 힘보다 다소 큰 값을 나타내고 있다. Folkman and Wachs (1973)와 Israelachvili (1982)에 의하면 두 입자 사이에 작용하는 인력은 어떤 중간점에서 최대값을 나타내게 된다.

Fig. 2에서 LVDW attractive force가 EDL attractive force보다 접근하는 두 입자 사이에서 먼저 작용함으로써 total interaction energy와 LVDW attractive force가 동일한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 동시에 계속 접근함에 따라 Mg(OH)₂ 응결물에 의한 전하중화 (charge neutralization)로 인하여 입자 상호간의 응집반응은 극단적 인력이 작용하는 primary minimum에서 일어나고 DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) 이론에 따라 응집반응은 비가역적이 된다 (Overbeek, 1952; Israelachvili, 1982).

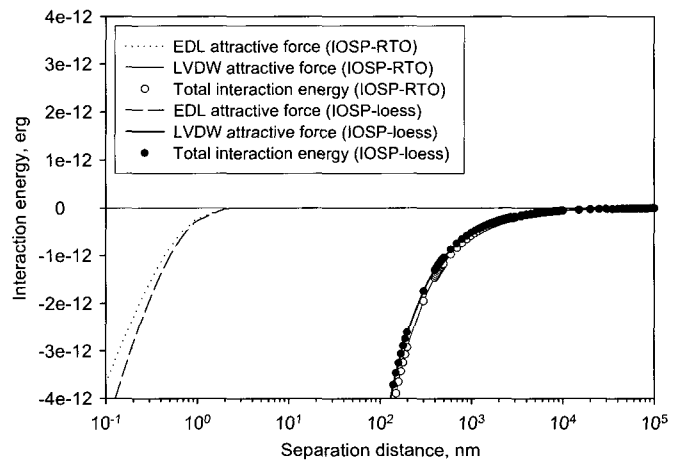


Fig. 2. Interaction energy profiles for IOSP-RTO and IOSP-loess approaching each other in sea water. The zeta potentials are 4.8 mV for IOSP, -9.2 mV for RTO, and -12.1 mV for loess in sea water. Hamaker constant is 5×10^{-13} erg.

Fig. 3은 해수중에서 상호 접근하는 황토입자와 적조생물입자 사이에 작용하는 interaction energy를 계산하고 그 변동을 보여준다. 해수에서 황토입자와 적조생물입자의 zeta potential은 각각 -12.1, -9.2 mV이고, EDL의 두께는 약 0.4 nm로 극히 얇은 상태이다. 이런 상태에서 두 입자가 상호 접근할 경우 모든 간격에서 LVDW attractive force의 절대값이 EDL repulsive force의 절대값보다 항상 큰 값을 나타낸다. 이는 해수에 포함된 고농도의 염류 농도 (Na⁺ 이온 약 0.5 M, Mg²⁺ 이온 약 0.05 M 등)로 인하여 황토입자와 적조생물입자의 EDL의 두께가 극히 얇게 압축되어 EDL repulsive force가 거의 존재하지 않기 때문이다. Fig. 3에서 황토입자와 적조생물입자가 계속 접근함에 따라 EDL repulsive force가 작용하게 되고 이것은 LVDW attractive force에 대한 어느 정도의 감소현상으로 나타나게 될 것이다.

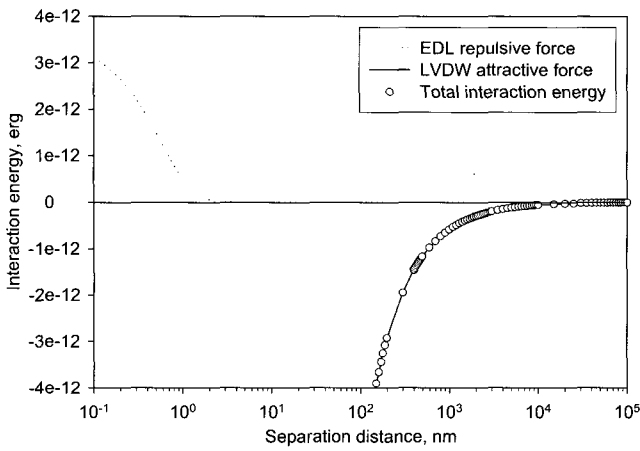


Fig. 3. Interaction energy profiles for loess and RTO approaching each other in sea water. The zeta potentials are -12.1 mV for loess and -9.2 mV for RTO in sea water. Hamaker constant is 5×10^{-13} erg.

이상의 조건에서 IOSP-RTO, IOSP-loess 상호간에 있어서 각 입자 자체의 EDL을 재편성하는데 소요되는 시간 (the relaxation time of electrical double-layer)과 각 입자 자체의 표면전하량을 재조정하는데 소요되는 시간 (the time for the Stern layer adjustment)이 EDL repulsive force가 작용하는 황토 입자와 적조생물입자 사이보다 크게 단축됨으로써 응집반응은 매우 신속하게 일어나게 된다 (Overbeek, 1977; Lyklema and van Leeuwen, 1982).

적조생물입자의 응집특성

여러 가지 IOSP의 농도에 대한 적조생물입자의 응집제거 효율은 Fig. 4에 나타나 있다. IOSP의 농도 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 800 mg/L에서 각각 0.0, 73.9, 85.3, 91.3, 96.4, 99.6, 99.8, 100%의 적조생물이 응집 제거되었다. 적조생물입자의 응집제거 효율은 IOSP의 농도가 증가함에 따라서 지수함수적으로 증가하였다 ($Y=53.81X^{0.1}$, $R^2=0.9868$, $0 \leq X \leq 500$). 즉 IOSP의 농도 50-200 mg/L에서 급격한 증가를 보이다가 IOSP의 농도가 계속 증가함에 따라서 점점 완만한 증가를 나타내었다. IOSP 400 mg/L에서 거의 100%의 적조생물입자가 응집 제거되었다.

Fig. 5는 여러 가지 황토의 농도에 대한 적조생물입자의 응집제거 효율을 보여주고 있다. 황토의 농도 0, 200, 400, 800, 1,600, 3,200, 6,400, 12,800 mg/L에서 각각 0.0, 59.9, 72.0, 78.1, 84.4, 92.4, 98.2, 100%의 적조생물이 응집 제거되었다. 적조생물입자의 응집제거 효율은 황토의 농도가 증가함에 따라서 지수함수적으로 증가하였다 ($Y=36.04X^{0.11}$, $R^2=0.9906$, $0 \leq X \leq 11,000$). 즉 200-800 mg/L의 비교적 낮은 황토 농도에서 급격한 증가를 보이다가 황토의 농도가 계속 증가함에 따라서 점점 완만한 증가를 나타내었다. 적조생물은 황토 6,400 mg/L에서 거의 100% 응집 제거되었다.

Fig. 6은 여러 가지 농도의 IOSP+loess에 대한 적조생물입

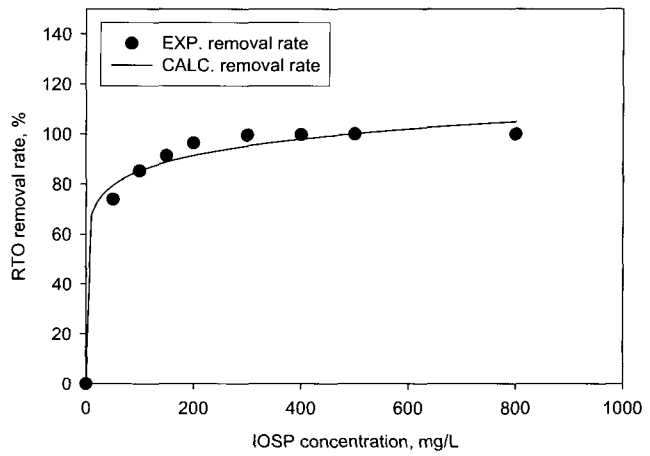


Fig. 4. RTO removal rates for various IOSP concentrations.

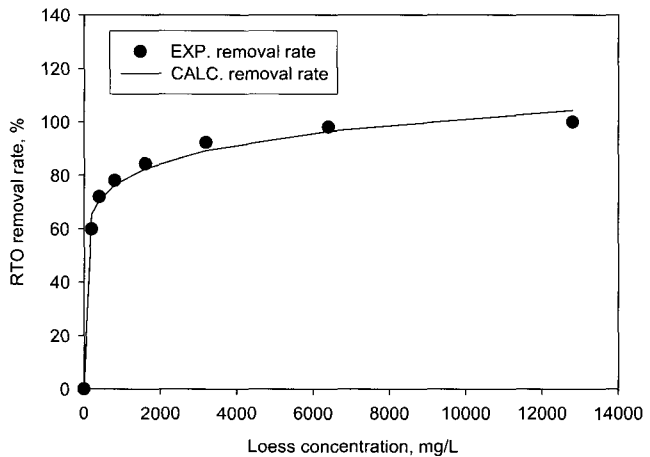


Fig. 5. RTO removal rates for various loess concentrations.

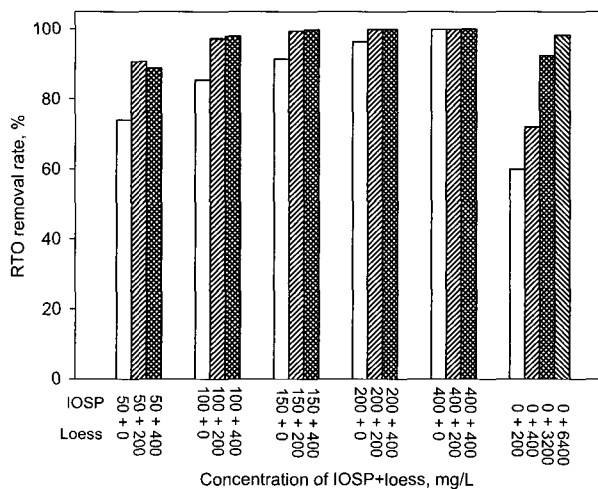


Fig. 6. RTO removal rates for various concentrations of IOSP+loess.

자의 응집제거효율을 보여주고 있다. Table 3은 IOSP와 황토를 동시에 사용할 경우와 IOSP를 단독으로 사용할 경우의 응집제거효율을 비교한 것이다. Table 4는 IOSP와 황토를 동시에 사용할 경우와 황토를 단독으로 사용할 경우의 응집제거효율을 비교한 것이다.

Fig. 6과 Table 3에서 IOSP (50-400 mg/L)를 단독으로 사용한 경우에 비하여 IOSP+loess를 사용한 경우가 응집제거효율이 0-16.7% 증가하였고, 가장 큰 증가율은 IOSP+loess 50+200 mg/L (응집제거효율 90.6%)에서 나타났다. IOSP를 단독으로 사용하여 이와 거의 동일한 응집제거효율 (91.3%)을 얻기 위해서는 3배 정도 높은 농도인 150 mg/L를 사용해야 한다. 만약 황토를 단독으로 사용하여 거의 동일한 응집제거효율 (92.4%)을 얻기 위해서는 3,200 mg/L이라는 고농도의 황토를 사용해야 한다. 각각의 IOSP 농도와 함께 사용한 황토의 농도 200, 400 mg/L 사이에는 응집제거효율의 차이가 거의 나타나지 않았다. IOSP의 농도가 증가함에 따라 IOSP 단독 사용에 대한 IOSP+loess의 응집제거효율의 증가는 계속 감소하다가 IOSP+loess 400+200 mg/L에서 0이 되었다. 즉 IOSP의 농도가 증가함에 따라 황토는 응집제거효율의 증가에 큰 영향을 미치지 못하였다.

Table 3. Comparison of coagulation rate for the case of using IOSP+loess with that for the case of using IOSP only

(A)		(B)		(A-B)
Conc. of IOSP+loess (mg/L)	Coag. rates (%)	Conc. of IOSP (mg/L)	Coag. rates (%)	Increment of Coag. rate by using IOSP+loess (%)
50+200	90.6	50	73.9	16.7
50+400	88.7	50	73.9	14.8
100+200	97.2	100	85.3	11.9
100+400	97.8	100	85.3	12.5
150+200	99.3	150	91.3	8.0
150+400	99.6	150	91.3	8.3
200+200	99.8	200	96.4	3.4
200+400	99.8	200	96.4	3.4
400+200	99.8	400	99.8	0.0
400+400	99.9	400	99.8	0.1

Fig. 6과 Table 4에서 황토 (200, 400 mg/L)를 단독으로 사용한 경우에 비하여 IOSP+loess를 사용한 경우가 응집제거효율이 16.7-39.9% 증가하였다. 가장 큰 증가율은 IOSP+loess 200+200, 400+200 mg/L에서 나타났다. 한편 Fig. 6에서 황토를 단독으로 사용하여 거의 동일한 응집제거효율 (98.2%)을 얻기 위해서는 6,400 mg/L이라는 고농도의 황토를 사용해야 한다는 것을 알 수 있다. 모든 IOSP+loess의 경우에서 황토의 농도에는 상관없이 해수 중에서 양전하를 띠는 IOSP의 농도에 따라 응집효율이 변화하였다.

결론적으로 IOSP와 황토를 함께 사용하는 경우 응집의 driving force는 해수중에서 양전하를 띠는 IOSP에 의하여 주로 제공되고 황토는 낮은 IOSP 농도 (50 mg/L)에서 응집효율

Table 4. Comparison of coagulation rate for the case of using IOSP+loess with that for the case of using loess only

(A)		(B)		(A-B)
Conc. of IOSP+loess (mg/L)	Coag. rates (%)	Conc. of loess (mg/L)	Coag. rates (%)	Increment of Coag. rate by using IOSP+loess (%)
50+200	90.6	200	59.9	30.7
50+400	88.7	400	72.0	16.7
100+200	97.2	200	59.9	37.3
100+400	97.8	400	72.0	25.8
150+200	99.3	200	59.9	39.4
150+400	99.6	400	72.0	27.6
200+200	99.8	200	59.9	39.9
200+400	99.8	400	72.0	27.8
400+200	99.8	200	59.9	39.9
400+400	99.9	400	72.0	27.9

을 증가시키는 보조작용을 나타내었다. 즉 IOSP의 농도가 증가함에 따라 황토는 응집제거효율의 증가에 큰 영향을 미치지 못하였다.

Cochlodinium polykrikoides에 대한 적용

Fig 7은 적조발생 해역의 Chlorophyll *a* 농도와 황토 및 IOSP+loess로 처리한 후의 상청액 중에 남아있는 Chlorophyll *a* 농도를 보여주고 있다. Fig. 8은 IOSP+loess에 의하여 *Cochlodinium polykrikoides*의 응집 제거된 모습을 보여준다.

Fig. 7에서 황토 100 mg/L를 사용한 경우에 59.2%의 응집제거효율을 나타내었고, IOSP+loess 25+100 mg/L를 사용한 경우에 98.6%의 응집제거효율을 나타내었다. 즉 황토 100 mg/L에 IOSP를 25 mg/L 첨가함으로써 응집제거효율이 39.4% 정도 증가하였다. 이는 Fig. 6과 Table 4에서 IOSP+loess 50+200 mg/L를 사용하여 규조류 (*Cylindrotheca closterium*과 *Skeletonema costatum*)를 응집 제거한 경우 (제거효율: 90.6%, 증가율: 30.7%)보다 높은 제거효율과 증가율을 보여주고 있다.

응집물의 유변학적 특성

Fig. 9(A)는 IOSP 200 mg/L, 황토 200 mg/L과 그 혼합물을 이용하여 실시한 적조생물입자의 응집반응의 응집액에 대한 shear rate vs. shear stress를, Fig. 9(B)는 shear rate vs. viscosity를 나타내는 그래프이다.

Fig. 9(A)에서 측정된 shear stress는 0-140 dynes/cm²을 나타내며, 모든 응집액이 non-Newton 유체 (non-Newtonian fluid)의 특징을 보여주고 있다. 엄밀히 말해서 점도계수 (viscosity)는 Newton 유체 (Newtonian fluid)에 대해서만 의미를 가지며, 이 경우 점도계수는 shear rate vs. shear stress 그래프의 기울기가 된다. non-Newton 유체의 shear rate vs. shear stress 그래프는 일반적으로 비선형 (non-linear)을 나타내며, 그것의 기울기는 모든 shear rate 값에 따라서 변화한다 (Hiemenz, 1977). Fig. 9(A)에서 그래프 위의 임의의 점의 겉보기 점도 (apparent viscosity)는 그 점에서 기울기를 나타내는 각도의 tangent 값이

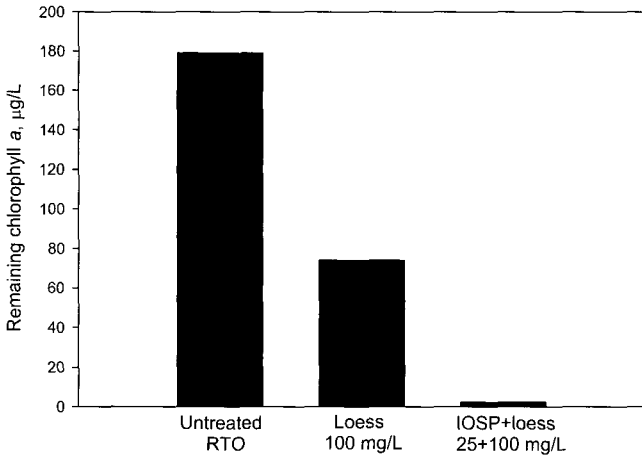


Fig. 7. Remaining chlorophyll *a* in the RTO (*Cochlodinium polykrikoides*) solution after coagulating by using loess and IOSP+loess.

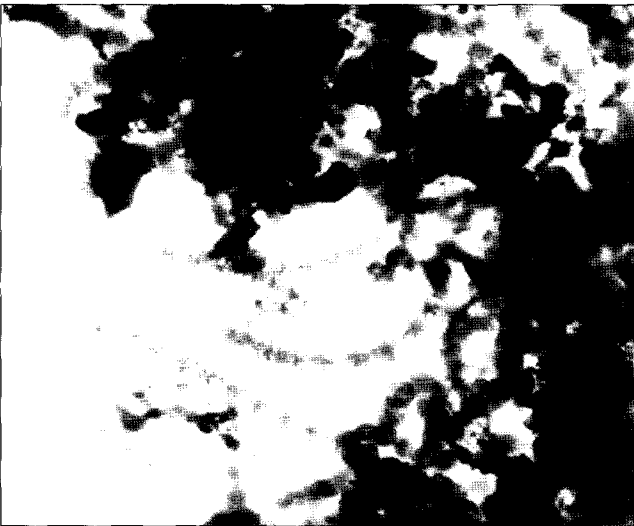


Fig. 8. Microphotographic image of *Cochlodinium polykrikoides* coagulated by using IOSP+loess in sea water. Magnification is 400 times.

된다 (Hiemenz, 1977). Fig. 9(A)에서 IOSP 200 mg/L과 적조 생물입자의 경우는 shear rate가 증가함에 따라 걸보기 점도가 점점 감소하다가 높은 shear rate에서 거의 0을 나타내었다. 황토 200 mg/L의 경우는 낮은 shear rate의 한 값에서 다소 증가된 shear stress 값, 즉 항복치 (yield value)를 나타내기 시작함으로써 그 점에서의 걸보기 점도가 급격히 증가하다가 점점 감소하는 현상을 나타내었다. IOSP+loess 200+200 mg/L의 경우는 이러한 현상이 더욱 분명하여 걸보기 점도가 거의 무한히 증가하다가 급격히 감소하는 현상을 나타냄으로써 낮은 shear rate에서 항복치를 가지는 탄성체 (elastic body)의 특징을 뚜렷이 보여주었다. 이는 황토와 같은 고도로 비정형의 입자 (unsymmetrical particle)가 낮은 농도일 경우

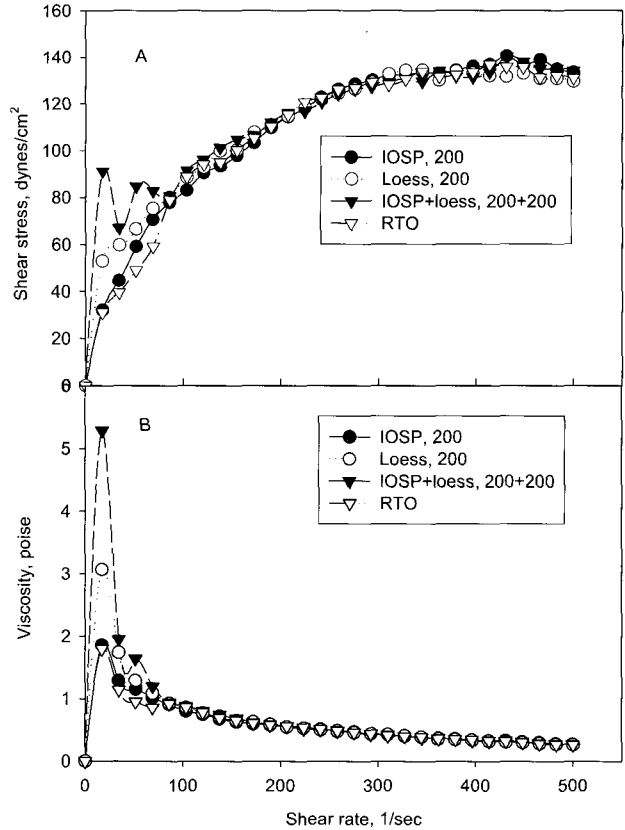


Fig. 9. Shear rate versus shear stress (A) and viscosity (B) for IOSP+loess concentrations and RTO.

volume-filling network를 구성하고, 입자의 간극 사이에 용액 (여기서는 해수와 $Mg(OH)_2$ 응결물)이 끼어 움직이지 않는 상태로 되면서 gel화하고 이것이 낮은 shear rate에서 탄성체의 특징을 나타내기 때문이다 (Hiemenz, 1977). Fig. 9(A)에서 모든 경우 낮은 shear rate에서 서로 다른 걸보기 점도를 나타내다가 shear rate가 증가함에 따라 걸보기 점도는 점점 동일해지면서 감소하다가 shear rate 약 300 sec^{-1} 이상에서 0이 되었다.

Fig. 9(B)에서 적조생물입자, IOSP, 황토, IOSP+loess 등에 대한 유체의 유변학적 특징을 더욱 분명히 알 수 있다. 낮은 shear rate에서 적조생물입자, IOSP 200 mg/L, 황토 200 mg/L, IOSP+ loess 200+200 mg/L의 순서로 점도가 급격히 증가하다가 감소하는 현상 (탄성체의 성질)을 나타내었고, shear rate 약 90 sec^{-1} 부터 동일한 점도를 나타내면서 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 모든 경우의 용액은 낮은 shear rate에서 탄성체의 성질을 나타내다가 shear rate를 증가함에 따라 더욱 연화 (loose)하여 걸보기 점도가 점점 감소하는 shear rate thixotropy 성질을 나타내었다 (Hiemenz, 1977; Cho, 1985). 특히 IOSP+loess 200+200 mg/L의 경우는 낮은 shear rate에서 소성유동 (plastic flow)의 성질을 뚜렷이 나타내었다. 그러므로 IOSP와 황토를 함께 사용하는 것이 각각을 단독으로 사용하는 것보다 응집력을 더욱 높여줌으로써 응집제거효율, floc의 강도, floc

의 침강성 등을 크게 향상시켜 해양에서 적조생물을 효과적으로 응집 제거시킬 수 있게 할 뿐만 아니라 응집반응에 필요한 IOSP와 황토의 양을 크게 줄일 수 있게 해 준다.

참 고 문 헌

- Ayoub, G.M., S.I. Lee and B. Koopman. 1985. Seawater induced algal flocculation. *Wat. Res.*, 20, 1265-1271.
- Benefield, L.D., J.F. Judkins, Jr. and B.L. Weand. 1982. *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 211-238.
- Cho, H.C. 1985. *Rheology*. Daehan Printing & Publishing Co., Ltd, Seoul, pp. 90-98. (in Korean)
- Dzombak, D.A. and F.M.M. Morel. 1987. Adsorption of inorganic pollutants in aquatic systems. *J. Hydraulic Eng.*, 113, 430-475.
- Ferguson, J.F. and L. Vrale. 1984. Chemical aspects of the lime seawater process. *J. Wat. Pollut. Cont. Fed.*, 56, 355-363.
- Flentje, M.E. 1927. Calcium reclamation by excess lime treatment of effluent. *J. Am. Wat. Works Ass.*, 17, pp. 253.
- Folkman, Y. and A.M. Wachs. 1973. Removal of algae from stabilization pond effluents by lime treatment. *Wat. Res.*, 7, 419-435.
- Friedman, A.A., D.A. Peaks and R.L. Nichols. 1977. Algae separation from oxidation pond effluents. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 49, 111-119.
- Hiemenz, J.A. 1977. Principles of colloid and surface chemistry. In: *Undergraduate Chemistry*, Vol. 4, J.J. Lagowski, ed. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 445-447.
- Israelachvili, J.N. 1982. Forces between surfaces in liquids. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 16, 31-47.
- Ives, K.J. 1956. Electrokinetic phenomena of planktonic algae. *Proc. Soc. Wat. Treat. Exam.* 5, 41-58.
- James, R.O. and G.A. Parks. 1982. Characterization of aqueous colloids by their electrical double-layer and intrinsic surface chemical properties. In: *Surface and Colloid Science*, Vol. 12, E. Matijevic, ed., Wiley, New York, pp. 119-216.
- Kim, S.J. 1999. Settling characteristics of natural loess particles in seawater. *J. Kor. Fish. Soc.*, 32, 706-712. (in Korean)
- Kim, S.J. 2000. Removal of red tide organisms: 2. Flocculation of red tide organisms by using loess. *J. Kor. Fish. Soc.*, 33, 455-462. (in Korean)
- Kim, S.J. and K.D. Cho. 2000. Removal of red tide organisms: 1. Flocculation of red tide organisms by using IOSP. *J. Kor. Fish. Soc.*, 33, 448-454. (in Korean)
- LeCompte, A.R. 1966. Water reclamation by excess lime treatment of effluent. *TAPPI*, 49, 121-124.
- Lyklema, J. and H.P. van Leeuwen. 1982. Dynamic properties of the AgI solution interface: implications for colloid stability. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 16, 127-137.
- 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 Interface Sci.*, 1, 431-445.
- Parks, G.A. and P.L. DeBruyn. 1962. The zero point of charge of oxides. *J. Phy. Chem.*, 66, 967-973.
- Standard Experiment Methods for Marine Environments. Issue No. 1998-4, Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, pp. 249-252. (in Korean)
- Tenney, M.W. and W. Stumm. 1965. Chemical flocculation of microorganisms in biological waste treatment. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 37, 1370-1388.
- Vrale, L. 1978. Chemical precipitation of wastewater with lime and seawater. *Prog. Wat. Technol.*, 10, 645-656.

2003년 6월 10일 접수
2003년 12월 11일 수리