

부유황토에 의한 적조방제 연구

나기환 · 최우정* · 전영렬*

어장환경연구소 · *수산진흥원 남해수산연구소 통영분소

A Study on Red Tide Control with Loess Suspension

Gui-Hwan Na, Woo-Jeong Choi* and Young-Yull Chun*

Fisheries & Aquaculture Environment Laboratory, Koje 656-850, Korea

**Tongyoung Laboratory of South Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Agency, Tongyoung 651-940, Korea*

As one of the red tide control method, montmorillonite was used to eliminate the causative organisms in Korea and Japan. We assayed the loess to replace the montmorillonite because it distribute in large quantity and nearby the red tide occurrence in South Coast of Korea. By using the mixture of loess and coal ashes, we examined the decreasing level of nutrients such as ammonia and phosphate, the elimination of causative organisms as a chlorophyll a content, and the harmful effect on aquaculture organisms in cage culture farms.

Half of the ammonium and phosphate was adsorbed by the loess particles, but only 25% of ammonium was adsorbed by the coal ashes particles. In water column test, the particles of loess and coal ashes were settled down by 80% in 20 minutes, the red tide organisms was eliminated by 80% after 2 hours in 1,000 ppm of loess suspension, but the organisms were eliminated only 30% by the same concentration of coal ashes. The harmful test of fishes and invertbrates, we observed any other negative effects of test animals than a tint decoloration in yellowtail.

Key words : Red tide control, Loess suspension

서론

적조는 전세계적으로 산업발달과 인구가 집중된 온대, 열대의 리아스식 연안에서 자주 일어나고 있으며 오염이 심한 곳에서 주로 발생되고 있다 (박, 1982 ; Yoo & Lee, 1980 ; Dahl & Tangen, 1993).

우리나라의 경우 수산업상 중요한 위치를 차지하고 있는 진해만 뿐 아니라 전 연안에서 매년 적조의 발생이 간헐적으로 넓은 범위에 걸쳐 유독종에 의해 일어나 가두리 양식장에서 양성중인

어류폐사를 대규모로 일으키기도 하며 육상 수조식 양식장에서도 심각한 피해를 입히기도 하였다.

연안 양식이 활발한 일본의 경우에도 매년 우리나라보다 더욱 심각하여 전국적으로 발생하고 있으며 적조의 원인생물도 더욱 다양하며 피해 규모도 매우 방대하여 1972년 세토나이카이 동부에서 발생한 적조는 방어의 대량폐사를 일으켜 당시 17억엔의 사상 최대 피해를 기록했다(代田, 1987).

이러한 피해규모의 지속적인 증가로 선진각국

에서는 적조의 피해를 막기 위한 방제대책 방법이 여러가지로 강구되고 있다. 이러한 방법중 적조 생물 자체를 없애는 방법과 양식시설물을 안전해역으로 이동, 침하 또는 격리시키거나 양식물을 긴급 채취하여 피해를 저감시키는 방법이 있다.

적조생물 자체를 없애는 방법으로는 화학약품 살포(CuSO_4 , 유기화합물 등), 초음파 및 오존 처리법, 해면회수 및 침강법 중, 일본과 우리나라에서 점토를 사용하여(代田, 1977; 김, 1986) 적조생물을 흡착하여 침강시키고 또한 점토중의 알루미늄이온이 용출되어 적조생물의 세포를 파괴시키는 성질을 이용한 방법을 사용하였다. 일본에서는 점토가 어류에 해가 적고 점토용출액 중 특이한 유해물질이 없고 수질변화에 문제점이 없어 사용을 권고하고 있다. 우리나라에서도 경북 월성산과 영천산 점토로 실험한 결과 80% 이상의 제거효과가 인정되었으나, 적조가 자주 일어나는 남해안으로 수송과 보관, 적조현장에서의 살포가 현실적으로 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 남해안 적조발생 현장으로 점토 수송경비와 살포 등의 문제점을 해결하기 위해 경북 월성, 영천산 점토 대신 남해안 산야에 대량으로 매장되어 있는 황토와 일반 가정에서 난방으로 사용한 후 폐기물로 나오는 연탄재를 사용하였다. 연탄은 질 좋은 황토와 섞어 제조하게 되는데 사용후 폐기물로 나오는 연탄재는 매립시 비산 먼지와 많은 용적을 차지하게 되므로 이의 재활용을 위해 황토와 같이 적조생물에 대한 침강효과, 영양염 흡착여부 및 양식생물에 대한 피해를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 황토와 연탄재의 입도, 광물성분 분석

산이나 논밭에서 흔히 볼 수 있는 황토는 낙엽에 의해 부식토로 되어 미생물과 영양염이 풍부하고, 논밭의 황토는 농사를 지을 때 거름의 성분이 남아있게 되므로 표토에서 채취하지 않고 남해 연구소 통영분소 인근의 산자락에서 건축을 위해

정지작업 후 공기중에 노출이 오래되지 않은 곳을 택하여 1 m 깊이에서 절흠을 걷어내고 채취하여 실험에 사용하였다.

채취한 황토와 연탄재는 건조기에서 60°C 로 48 시간 건조하여 막자사발로 분쇄한 후 망목크기 $425 \mu\text{m}$ 체로 입자가 큰것은 버리고 나머지를 가지고 입도, 광물 분석을 하였다.

입도, 광물분석은 충남대학교 해양지질 연구실의 sedigraph 5000 ET (Micromeritics 사)를 사용하였으며, 시료에 X-선을 통과시켜 시간에 따라 농도의 변화를 무게로 환산하고 Stoke의 법칙에 따른 입자들의 침전속도를 이용하였으며, 시료의 광물성분 분석은 X-선 회절방법으로 분석하였으며 주사속도는 분당 4도로 하였다.

2. 황토와 연탄재 현탁액 효과조사

적조발생에 중요한 인자인 질소, 인이 황토와 연탄재를 현탁액으로 만들었을 때 이들이 입자에 흡착 또는 용출 여부에 대한 실험을 200 ml 플라스크에 1,000 ppm 농도로 교반하여 시간 별로 흡착 또는 용출량을 Strickland와 Parsons (1972)의 방법으로 암모니아와 인산을 분석하였다.

황토와 연탄재 현탁액에 의한 입자별 침전 실험은 현탁액 입자별 체류시간을 파악하고자 원통형 아크릴 수조($\phi 18 \text{ cm}$, 길이 80 cm)의 수심 16 cm 깊이에서 시간경과에 따라 현탁물을 50 ml 씩 평량한 비이커에 취하여 무게를 ppm으로 환산하여 침전정도를 비교하였다.

황토현탁액에 의한 적조생물 제거실험은 침전 실험에서 사용한 동일한 원통형 아크릴 수조를 사용하였다. 실험 당시 북만에서 적조가 일어난 현장수 60 l를 채수하여 실험실로 옮긴 후 황토현탁액을 만들어 적조생물이 황토입자에 의해 침전되는 양을 원통형 수조 깊이 16 cm에서 황토와 적조생물 혼합액 100 ml를 채수한 후, GFC 여과지로 여과하여 아세톤 추출방법에 따라 Chlorophyll a의 농도변화로 부터 적조생물의 침전특성을 추정하였다.

3. 현탁액에 대한 양식생물 영향조사

황토 및 연탄재 현탁액에 의한 양식생물 피해 영향조사는 남해수산연구소 통영분소 영운리 가두리 양식장에서 망목크기 60 μm의 테트론 천으로 1 m³ 크기로 제작하여 침하시킨 후 조류에 따라 황토가 흘러가 버리는 것을 막아 최대한 실험 가두리 안의 실험 대상 생물들이 황토현탁액의 영향을 받도록 설치하였다.

실험생물은 통영분소에서 관리하던 어류 4종(조피볼락, 넙치, 방어, 참돔)을 각각 10미씩 표, 저층에서 움직이면서 황토 현탁액을 교반하도록 동일 가두리에 수용하였으며, 인근 연안에서 양식중인 패류 4종(진주담치, 참굴, 진주조개, 우렁이)을 다른 한 가두리에 넣은 후 24시간 후의 피해 영향 조사를 육안적으로 실시하였다.

결 과

1. 황토와 연탄재의 입도분석 및 광물분석

전조한 시료를 체로 걸른 황토와 연탄재의 입자특성을 알기 위해 X선 회절법에 의해 입도분석한 결과는 Fig. 1과 같다.

황토의 경우 중량비로 볼 때 주요 분획은 15.6-31.0 μm였으며 1.9 μm의 크기도 29-30%이었으나 연탄재의 경우는 주요 분획은 15.6-7.8 μm 크기가 가장 많고 1.9 μm 분획은 황토에 비해 적었다. 입자의 평균 크기는 황토는 4-5 μm이고 연탄재는 6 μm로 연탄재의 입자가 다소 크며, 중앙치는 황토가 7.8, 10 μm이고 연탄재가 10 μm로 표준편차가 매우 커 분급도가 불량하였으며, 황토는 장석의 풍화산물인 Gibbsite [Al(OH)₃]로 주로 구성되었으며 석영(Quartz)과

고령토(Kaolinite)가 부수광물로 구성되었다. 연탄재는 gibbsite, 석영, 침철석[goethite, FeO

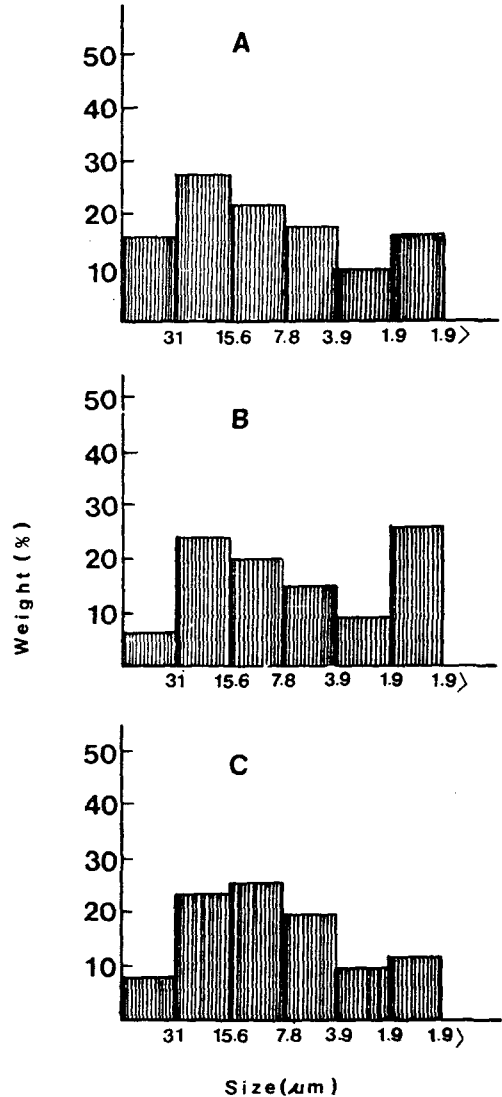


Fig. 1. Particle size analysis of loess (A, B) and coal ashes (C).

Table 1. Mean, Median and main composition of particle analysis

Materials	Mean (μm)	Median (μm)	Main composition of materials
Loess (A)	4.0	10.0	gibbsite, quartz, koalinite
Loess (B)	4.7	7.8	gibbsite, quartz
Coal ash (C)	6.1	10.0	gibbsite, quartz, goethite, vermiculite

(OH)], 점토광물의 일종인 vermiculite 등으로 광물성분이 다양하였다(Table 1).

2. 황토입자에 의한 영양염 흡착

24시간 교반 중에 황토의 입자에 흡착되어 제거되는 영양염의 잔류농도의 변화는 Fig. 2, 3과 같다. 황토의 경우 암모니아와 인산흡착은 30분 내에 최초농도의 절반이상이 흡착되었으나

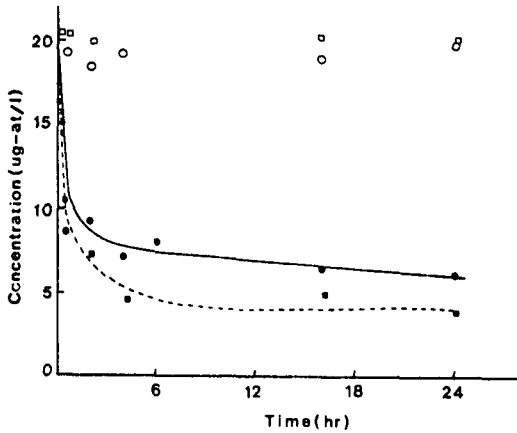


Fig. 2. Adsorption of ammonium nitrogen (—●—); control (○) and phosphate (···■···); control (■) with loess particles.

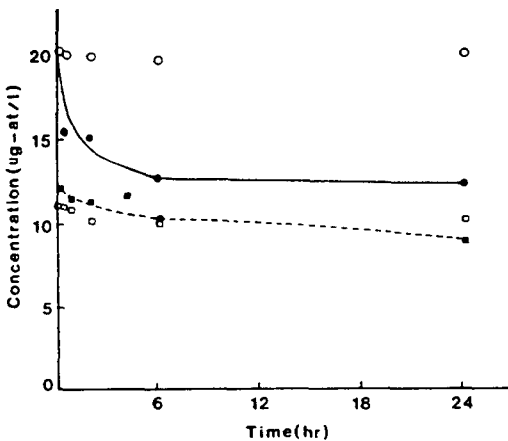


Fig. 3. Adsorption of ammonium nitrogen (—●—); control (○) and phosphate (···■···); control (■) with coal ashes particles.

(Fig. 2.), 연탄재는 인산의 경우 거의 변동이 없었으나, 암모니아는 25% 정도가 최초 30분 안에 흡착되었다. 24시간 후에 황토에 흡착되지 않은 잔류량은 인산, 암모니아의 경우 최초농도의 18%, 33%였으며, 연탄재에 흡착되지 않은 암모니아는 최초 농도의 61.5%이었고 인산염은 연탄재에 거의 흡착되지 않았다(Fig. 3.).

3. 황토현탁물의 침전성

영양염 흡착은 매질의 영양염농도와 입자의 체류시간에 따라 제거효율이 달라지고 양식생물에 대한 황토현탁액 자체의 피해도 예상되므로 수주실험으로 황토와 연탄재를 침전 실험한 결과는 Fig. 4와 같다.

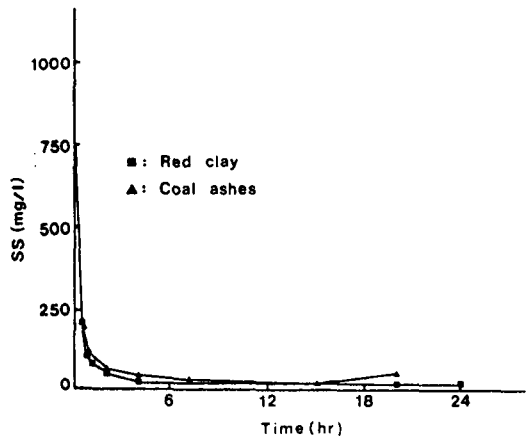


Fig. 4. Concentrate variation of loess and Coal ashes after suspension.

황토와 연탄재를 현탁액으로 만들어 수주에 넣은 후 20분이 지난 후에는 20.9%, 18.7%만 남게되고, 황토는 4시간 후에 2.7%, 연탄재는 4%만 잔류하고 대부분 침전되었다.

4. 황토와 연탄재 현탁액의 적조생물 제거

적조가 일어난 북만의 해수를 실험실로 옮겨 황토와 연탄재를 1.000으로 하여 적조생물의 제거효과를 아크릴 수주내의 Chlorophyll a의 변화량으로 표시한 결과는 Fig. 5와 같다.

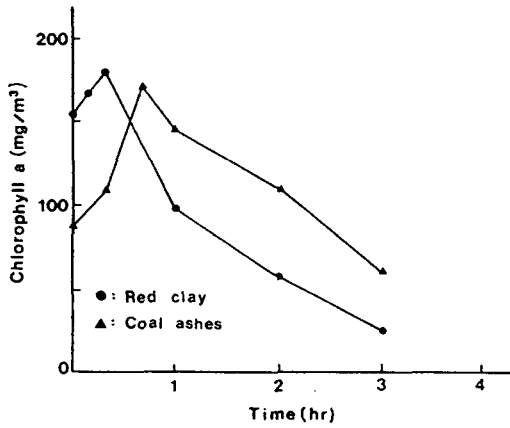


Fig. 5. Variation of chlorophyll a after suspending loess and coal ashes in 1,000 ppm.

황토의 경우 초기에 Chlorophyll a는 154.6 mg/m³에서 20분까지는 점차 증가하다가 다시 감소하였으며 연탄재는 초기 Chlorophyll a 농도 88.1 mg/m³에서 점차 증가하여 1 시간 후에 최대 농도를 나타내었고, 그 후 점차 감소하여 4시간 후에 황토현탁액에서 Chlorophyll a는 초기농도의 17.5%만 잔류하였고, 연탄재는 69.1%가 잔류하였다.

적조가 일어난 북만의 현장 실험에서 황토와 연탄재를 뿌린 후 입자 및 적조생물의 출입을 방지하기 위해 표면적 1 m², 깊이 1.5 m의 테트론 천으로 둘러싼 실험장치를 만들어 황토 및 연탄재 적량을 투입하여 전체농도가 500 ppm 및 1,000이 되게하여 실험한 결과는 Fig. 6과 같다.

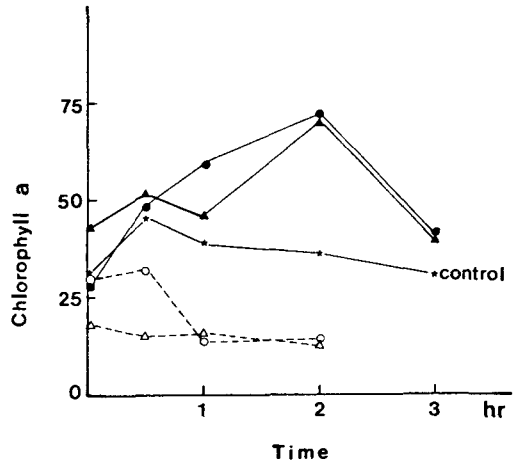


Fig. 6. Variation of chlorophyll a in loess (●) and coal ashes (▲) in 500 g/m² (—) and 1,000 g/m²(.....) in field experiment.

황토, 연탄재의 경우 500 ppm의 농도에서는 2시간까지 덩어리가 만들어진 후 침전하여 감소하였고, 1,000 ppm의 농도에서는 현탁액 투입 직후부터 감소하기 시작하였다.

5. 황토현탁액이 양식생물에 미치는 영향

황토의 침전실험과 적조생물의 제거능력등을 고려하여 현장에서 1,000 ppm의 황토를 살포하여 테트론천 안에 방어, 농어, 넙치, 참돔 4종의 어류와 진주담치, 굴, 진주조개, 우렁%이 4종의 무척추동물을 24시간 수용하여 생존율을 조사한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Survival rate after suspension of loess and coal ashes in 1,000 ppm for 24 hour

Species	Test number	Mean length (cm)	Mean weight (g)	Survival rate (%)
<i>Sebastes schlegeli</i>	10	12.8	43	100
<i>Seriola quinqueradiata</i>	10	24.6	227	100
<i>Paralichthys olivaceus</i>	10	26.5	270	100
<i>Chrysophrys major</i>	10	12.5	44	100
<i>Mytilus edulis</i>	20	4.3	8	100
<i>Crassostrea gigas</i>	20	6.5	29	100
<i>Pinctada fucata</i>	20	5.8	17	100
<i>Halocynthia roretzi</i>	10	7.8	120	100

어류는 각각 10미씩 수용하였고, 패류는 20미씩 수용하여 관찰결과 방어의 체색이 퇴색된 것을 제외하고 폐사등의 이상현상은 볼 수 없었다.

고 찰

적조방지대책은 주로 적조발생의 근본원인을 제거하는 적조발생 방지대책과 적조발생 후에 양식물을 적조해역 밖으로 대피시키거나 적조생물을 직접 구제하는 적조피해 방지대책으로 크게 나눌 수 있다(김, 1987).

처음의 발생방지대책은 부영양화되고 연안 폐쇄수역에 적조가 자주 발생하므로 생활하수, 공단폐수로부터 유출되는 유기, 무기물의 연안 유입을 차단하는 것이 최선책이나 이는 장기간의 노력과 경비가 투자되어야 한다(박, 1987).

다음의 피해방지대책은 황산동 살포등에 의한 화학약품살포법, 초음파로 적조생물을 파괴하는 초음파처리법, 점토나 고분자 화합물을 사용하여 적조생물을 침전시키는 침전법, 적조생물을 먹이로 하는 섬모충류나 갑각류등을 이용하는 Biocontrol법 등이 있으나, 대부분 실험실 규모에서 시행되었고 실제 현장적용에는 많은 문제점이 있다(김, 1987).

이 중 침전법의 점토살포는 일본의 경우 실내의 실험에서 그 효과가 인정되었고, 해면에 뿌려서도 처음의 탁도가 증가하는 것 외에 어류에 나쁜 영향이 적고 해양오염방지법상 유해물질의 용출 및 수질변화에 문제점이 없어 사용을 권고하고 있으며, 실제 현장에 적용시 70% 이상의 구제효과와 어류피해가 없다는 설문조사 결과로(代田, 1987)볼 때 사용이 가능하다. 우리나라에서도 경북 월성산 점토 2,500 ppm 수용액을 뿌린 후 30분 안에 *Prorocentrum* 적조에서 80%를 제거함으로써 그 효과를 인정하였다(김, 1986).

본 실내 실험에서 사용한 황토와 연탄재의 적조생물 침전 기작은 황토의 경우 20분에 입자와 적조생물이 흡착되어(coagulation) 덩어리가 최대로 커지면서 침강되어 1시간 후에는 크게

감소한 반면 연탄재의 경우에는 40분에 최대로 되다가 감소하는 경향으로 볼 때 황토 보다는 천천히 침강되는 것으로 보인다. 현장실험에서도 황토나 연탄재의 농도가 적조생물의 침전에 가장 큰 영향을 주고 살포한 농도가 높을 수록 곧바로 적조생물의 침전이 일어나 적조생물과 응집 침전하는 능력은 황토가 연탄재보다 큰 것으로 나타났다. 한편 이러한 경향은 김(1995)이 황성굴 패각과 황토를 이용하여 적조생물을 응집제거한 실험에서도 동일한 결과를 얻었다.

적조생물의 침전을 위해 대량으로 황토를 살포했을 경우에는 침전된 적조생물의 부패에 따라 2차 오염이 일어날 수 있으나 代田(1977)에 의하면 점토성분중 알루미늄 이온이 적조생물을 파괴하므로 많은 양의 적조생물이 해저에 침전되더라도 부패하지 않고 황토의 산화철에 의해 곧바로 산화과정을 거치는 것으로 판단된다.

적조생물의 침전과 함께 황토의 영양염 흡착 기능은 적조생물의 번무에 필수적인 영양염의 공급을 억제하는 기능에서 볼 때 대단히 중요한 역할을 하는 것으로 보인다. Johnstone (1992)에 의하면 Australia, Darling강에서 1,000 Km에 달하는 남조류, *Nodularia spumigna*, 대번무의 발생 설명에서도 지각의 침식에 의해 이동되는 세사(fine silt)가 인의 결합 장소가 되어 인을 이동시키는 역할을 하나 댐에 의해 세사의 이동이 정지되어 퇴적된 강에서 대규모 담수적조의 발생원인을 추정하였다. 이러한 점으로 볼때 암모니아나 인을 흡착하는 황토는 영양염의 공급을 조절하는 완충제의 역할을 하는 것으로 생각된다.

실제로 가두리양식 어장에 황토를 살포한 적조생물 방제 현장실험은 경남 남해 미조연안의 가두리 양식장에서 1995년 10월에 *Cochlodinium* 적조가 대량 발생했을 때 테트론 천을 이용한 실험에서 1 ml 당 15,000 개체이었던 것이 황토현탁액 살포후 1 ml 당 30개체로 감소되어 현장적용이 가능하였으며 대형 뗏목에 황토를 대량으로 싣고 선박자체의 냉각수를 황토위에 흘리면서 뗏목을 끌고 다니면 미세한 황토현탁

액만이 20 m 이상 해면 전체로 퍼져 적조생물을 침강시키게 되어 어민들이 적조현장에서 그것도 적조발생 초기 단계에 실제적으로 사용할 수 있는 방법으로 사료된다.

요 약

적조방제 대책의 하나로 우리나라와 일본에서 점토를 적조발생해역에 뿌려 적조방제 효과가 인정된 점토 대신 남해안에 널리 분포, 매장되어 있는 황토와 난방 후 폐기물인 황토를 섞어 만든 연탄재를 사용하여 실내와 가두리 양식장에서 적조생물 발생에 필수적인 영양염(암모니아, 인산)의 흡착여부, 적조생물 제거 및 양식생물의 피해여부를 실험하였다.

영양염 흡착제거 실험에서 부유황토의 경우 암모니아와 인산은 황토 입자들과 접촉후 30분 이내에 최초 농도의 절반이 황토입자에 부착 흡수된 반면 연탄재에는 암모니아만 최초 농도의 25% 만 흡수되었고 인산은 흡수되지 않았다.

실내수주 실험에서 1,000 ppm 농도의 황토, 연탄재 현탁액은 20분 후에 80%가 침전되었으며, 적조생물은 황토현탁액에서 2시간 후에 80%가 침전 제거된 반면, 연탄재에서는 30%만 제거되어 자연산 황토가 소성과정을 거친 연탄재보다 영양염 제거능력과 적조생물 제거능력이 좋았으며, 양식생물 피해도 발견되지 않아, 적조현장에서 점토대신 황토를 살포하여도 더 효과적으로 적조를 방제할 수 있는 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구비를 지원해 준 월해재단과 입도분석을 하여준 충남대학교 해양학과 박 수철 교수께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Dahl, E. and K. Tangen, 1993. 25 years experience with *Gyrodinium aureolum* in Norwegian waters. In : Toxic phytoplankton blooms in the sea, T. J. Smayda and Y. Shimizu, eds. (Elsevier, Netherlands). 15-21.
- Johnstone, P. 1992. Blue-green algae in Australia. Harmful Algae News, UNESCO IOC Newsletter No. 3, 6.
- Strickland, J. D. H. and A. Parsons, 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd ed.
- Yoo, K. I. and J. H. Lee, 1980. Environmental studies of the Jinhae Bay. Ecological succession of phytoplankton population, 1974-1980. J. Oceanol. Soc. Kor., 15 : 100-107.
- 김성재, 1995. 활성 굴 패각 분말과 황토에 의한 적조생물의 응집제거. 부산수대 해양산업개발연구소. 1995 국내학술 발표회 초록집, pp. 94.
- 김학균, 1986. 적조와 편모조의 생태학적 연구. *L. Proocentrum Triestinum*, Schiller의 증식과 구제. 수진연구보고, 39 : 1-6.
- 김학균, 1987. 적조피해와 방제대책. 적조 및 어장보전에 관한 심포지엄, 수산진흥원, 115-128.
- 박주석, 1982. 진해만 적조의 특성과 환경변화. 수진연구보고, 28 : 115-188.
- 박주석, 1987. 적조발생 상황의 변천과 대책. 적조 및 어장보전에 관한 심포지엄, 수산진흥원, 7-17.
- 水産廳, 1983. 赤潮對策 技術開發 manual集. 水産廳 研究部 漁場保全果, 赤潮對策技術開發成果集, 3 : 33.
- 代田昭彦, 1977. 赤潮防止策(特集). 海洋汚染. 産業と環境 6 : 37-42.
- 代田昭彦, 1987. 日本における 赤潮發生と 對策研究の 經緯と 現狀. 적조 및 어장보전에 관한 심포지엄, 수산진흥원, 129-163.