

Nano-S가 해양수질 및 저질에 미치는 영향에 관한 연구 1. 실내수조실험 결과

조현서 · 조천래 · 장영남^{1,†}
여수대학교, ¹한국지질자원연구원

The Effect on the Marine Water and Sediment Quality by the Use of Nano-S I. Result of Water Tank Experiment

Cho Chon-Rae, Cho Hyeon-Seo and Jang Young-Nam^{1,†}

¹Yosu Notional University, Korea Institute Geoscience and Mineral Resources

요 약

본 연구의 목적은 적조구제에 사용하기 위해 개발된 Nano-S를 해양에 이용함에 있어 Nano-S가 해양환경에 미치는 영향을 조사하는데 있다. 실험은 용적이 180L인 원형의 유수식 수조에서 이루어 졌다. 각각의 수조에는 14±1 cm의 니질의 퇴적물을 수조의 바닥에 깔고 해수가 수조를 흘러넘치도록 채웠다. 수조에 공급되는 해수의 양은 1일 1회 환수 되도록 하였으며, 일주일동안 수조를 안정화 시켰다. 다섯 개의 수조에 Nano-S 및 적토를 각각 0kg(대조구), 1kg(수조 A), 2kg(수조 B), 5kg(수조 C) and 10kg(수조 D)채웠으며 이러한 양은 저질의 단위면적(m²) 당 각각 0kg(대조구), 2.75kg(수조 A), 5.51kg(수조 B), 13.77kg(수조 C) and 27.55kg(수조 D)을 차지하였다. 실험은 총 30일 동안 진행했으며, 수질과 저질의 시료는 Nano-S 및 적토의 투입 1시간 전과 투입 후 1시간, 3시간, 6시간, 12시간 후와 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 15일, 30일후에 각각 채취하여 Nano-S의 투입전후의 수질과 저질의 변동을 분석하였다.

Abstract – The purpose of this study was to observe the effect on the marine environment by the use of Nano-S. Nano-S was made to apply to improve the red tide bloom. The experiment was performed at round tank with volume of 180 L. Each tank was filled with an aggravated sediment about 14±1 cm high and sea water. The water flow-rate of tank was established on the rate of 6.25 L/hr. Sea water level was fitted to 40 cm, therefore the filled water was about 150 L. The sediment was stabilized during one week. Then the Nano-S and the red mud were added into each tank 0 kg(control), 1 kg(tank A), 2 kg(tank B), 5 kg(tank C) and 10 kg(tank D) each other. The quantity was fulfilled with 0 kg(control), 2.75 kg(tank A), 5.51 kg(tank B), 13.77 kg(tank C) and 27.55 kg(tank D) per square meter of sediment. The experiment was performed during 30 days. Water and sediment samples were collected from each tanks on the before 1hour and after 1, 3, 6, 12 hour and 1st, 3th, 5th, 7th, 10th, 15th, 30th day of the experiment period. The change of water and sediment quality was analyzed before and after applying the Nano-S and the red mud.

Keywords: Nano-S, red mud(적토), Sediment quality(저질), Tank experiment(수조실험)

1. 서 론

1960년대 이후 양식기술의 발달로 연안 해역의 양식어장이 급격히 확대되고 있으며 현재 육상으로부터의 오염물질의 유입과 고밀도 양식 등의 영향으로 어장 환경이 악화되어 매년 적조 등이 발

생하는 등 어장의 노화현상과 함께 수산물의 생산성이 감소하는 실정에 있다(國立水産振興院 [1993]). 외국의 경우에는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 인근 연안환경에 오염이 되지 않는 양식 기술의 개발(Avnimeleech et al. [1981]; Shpiegl et al. [1993]), 양식장 저층의 유기물 분해 기작에 대한 연구(Blackburn et al. [1988]; Hall et al. [1990]; Karpar et al. [1988]) 등이 이루어지고 있다(심 등 [1997]). 국내에서는 연안해역의 저질악화의 영향에 의

[†]Corresponding author: hscho@yosu.a.ac.kr

한 피해 현황에 대해서는 비교적 많이 연구되어 왔으나, 양식어장의 저질악화의 영향으로 인한 적조 발생에 대한 근본적인 억제대책 및 양식장의 효율적인 저질개선 방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다(김 [1993]). 저질 환경 개선을 위하여 준설했, 경운, 황토 살포, 석회 살포 등 여러 연구가 진행되어 왔지만, 그들의 효율성, 경제성, 적용성 등 생태계에 미치는 영향 등의 관점에 의해 현장에 사용하기는 다소의 문제점을 내포하고 있었다. 특히 수질 및 저질의 악화는 상호간에 밀접한 관련을 가지며 저질은 해양환경의 장기적인 영향을 나타내는 지표로서 저질환경의 악화는 수질에도 큰 영향을 미치며 저질 환경 개선에는 많은 시간, 노력 및 경비가 소요된다. 저질개선 물질을 이용한 저질개선 방법이 기 연구된 내용 중 저렴하고 작업이 용이하여 널리 사용되고 있다. 저질개선제로는 황토, 생석회, 소석회, 조개가루 등이 연구되었다(花岡 [1980]). 저질 개선제 중에서 황토의 경우 대량으로 살포될 경우 해저 표면을 뒤덮게 되므로 장기간에 걸쳐 해저 생태계에 영향을 일으킬 우려가 있고(나 [1996]; 배 [2000]), 석회계의 경우 pH변화와 자체 독성으로 피해가 발생할 수 있는 것으로 알려졌다(Duplinsky [1982]; 松村 [1990]; 岩下元 [1991]; 國立水産振興院 [1993]). 따라서, 이들의 문제점을 해결하여 저질환경을 효율적으로 개선하는 것이 무엇보다도 필요하며, 그 필요성에 따라 새롭게 개발된 Nano-S를 이용할 경우 해역의 저질환경 및 수질환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내수조 실험을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 Nano-S의 수질 및 저질 개선효과 실험

Nano-S의 수질 및 저질의 개선효과를 검토하기 위하여(Fig. 1) 과 같이 원형수조에 악화된 저질을 채우고 해수를 채워 7일간 안정화시킨 후 Nano-S 투여 전후의 수질 및 저질의 변동을 조사하여 수질 및 저질의 개선효과를 검토하였다. 실험에 사용한 수조의 크기는 밑면의 지름(BR) 65.0 cm, 윗면의 지름(SR) 75.0 cm, 높이가 50.0 cm인 원형의 수조로 수조의 용적은 약 180 ℓ 였으며, 수층은 40.0 cm로 하였고, 채운 해수의 용적은 150.2 ℓ 였다. 각 수조내에 악화된 저질을 저질층 높이(H)가 14±1 cm되게 채운 후 물을 채우고 7일간 안정화시켜 Nano-S를 투여하였다. 채운 저질의 표면적은 0.36 m², 채운 저질의 체적은 0.03 m³였다. Nano-S는 각 수조에 0 kg (대조구), 1 kg(수조 A), 2 kg(수조 B), 5 kg(수조 C), 10 kg(수조 D)으로 투여하였으며 이양은 저질의 단위면적(m²) 당 각각 0 kg(대조구), 2.75 kg(수조 A), 5.51 kg(수조 B), 13.77 kg(수조 C), 27.55 kg(수조 D)에 해당한다(Table 1). 실험은 수조의 해수가 1일 1회 환수 되도록 하는 유수식으로 하였으며, 수온은 18±1°C가 유지되도록 하였다. Nano-S를 투여한 후 수질과 저질에 미치는 영향을 검토하기 위한 시료는 수질은 저질 직상수(저질 10 cm 상층수)를 사용하였고, 저질은 아크릴재질의 환봉을 이용하여 표면적이 9.6 cm² 깊이가 10 cm크기의 양을 채취하여 사용하였다.

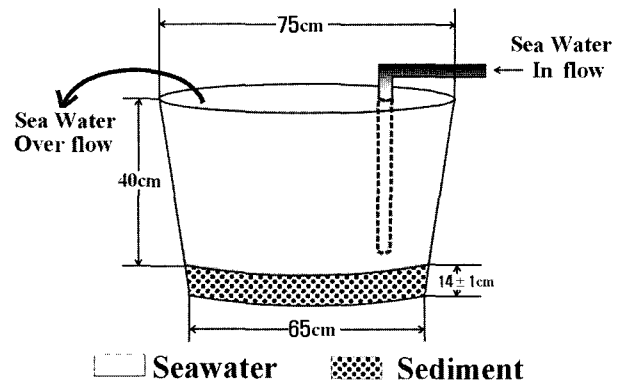


Fig. 1. Scheme of water flow-through experiment system.

Table 1. Experimental conditions for the Nano-S and Red mud

Tank	Dose (kg)	Unit dose* (kg/m ²)
Control	0	0
A	1	2.75
B	2	5.51
C	5	13.77
D	10	27.55

*Unit dose: Dose per unit area of sediment.

2.2 적토(red mud)의 수질 및 저질 개선효과 실험

적토의 수질 및 저질의 개선효과를 검토하기 위하여 Nano-S와 동일한 방법으로 (Fig. 1)과 같은 해수가 1일 1회 환수 되는 유수식의 원형수조를 사용하였다. 적토는 각 수조에 0 kg(대조구), 1 kg(수조 A), 2 kg(수조 B), 5 kg(수조 C), 10 kg(수조 D)으로 투여하였으며 이 양은 저질의 단위면적(m²)당 각각 0 kg(대조구), 2.75 kg(수조 A), 5.51 kg(수조 B), 13.77 kg(수조 C), 27.55 kg(수조 D)에 해당한다. 수온은 18±1°C가 유지되도록 하였다. 적토가 수질 및 저질에 미치는 영향은 Nano-S와 동일한 방법으로 평가하였다.

Table 2. Analyzed items and methods

Water	
pH	pH meter (HANNA instruments 8417)
Salinity	Salinometer (YSI 3200)
DO	Winkler-Azide
SS	GF/C weighting
COD	Alkaline Potassium Permanganate
T-N	Alkaline Potassium Persulfate oxidation
T-P	Alkaline Potassium Persulfate oxidation
NH ₄ ⁺ -N	Indophenol
NO ₂ ⁻ -N	Diazo
NO ₃ ⁻ -N	Cu-Cd reduction column
PO ₄ ³⁻ -P	Molybden blue
Si(OH) ₄ -Si	Molybden blue
Sediment	
IL	Ignition loss
COD	Alkaline Potassium Permanganate
AVS	Sulfur detection tube

2.3 분석방법

수질 분석은 일반항목으로 전 실험구에서 pH, 용존산소(DO), 부유물질(SS), 화학적 산소요구량(COD) 등과 영양염류인 암모니아성 질소(NH₄⁺-N), 아질산성 질소(NO₂⁻-N), 질산성 질소(NO₃⁻-N), 인산염 인(PO₄³⁻-P) 및 규소(Si(OH)₄-Si) 등을 분석하였으며 총인(TP) 및 총질소(TN)도 포함하였다. 분석은 해양환경공정시험방법(해양수산부, [2002]) 및 해양관측지침(일본기상협회, [1985])에 준하여 분석하였다. 저질 분석은 함수율(%), 강열감량(IL), 화학적 산소요구량(COD), 산 휘발성 황화물(AVS)을 분석하였으며, 해양환경공정시험방법(해양수산부, [2002])에 준하여 분석하였으며, 분석항목 및 분석방법을 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Nano-S의 수질 및 저질 개선효과

Nano-S를 각 수조당 1 kg, 2 kg, 5 kg, 10 kg를 투입하여 30일이 경과하는 동안의 수질변동과 저질변동을 조사한 결과를 수질은

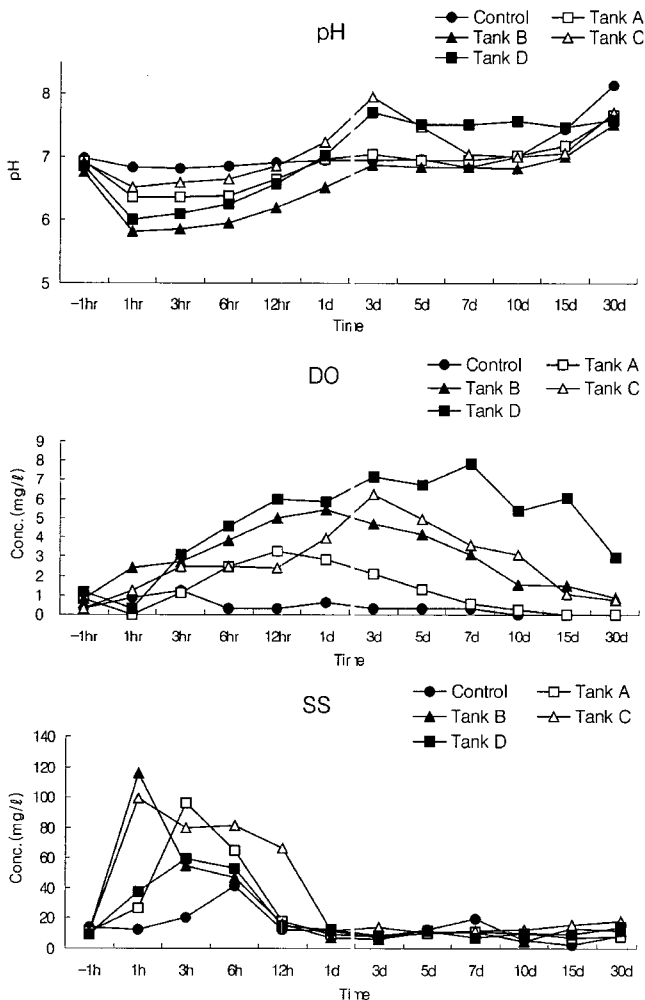


Fig. 2. Temporal variations of pH, DO and SS in seawater by a lump Nano-S.

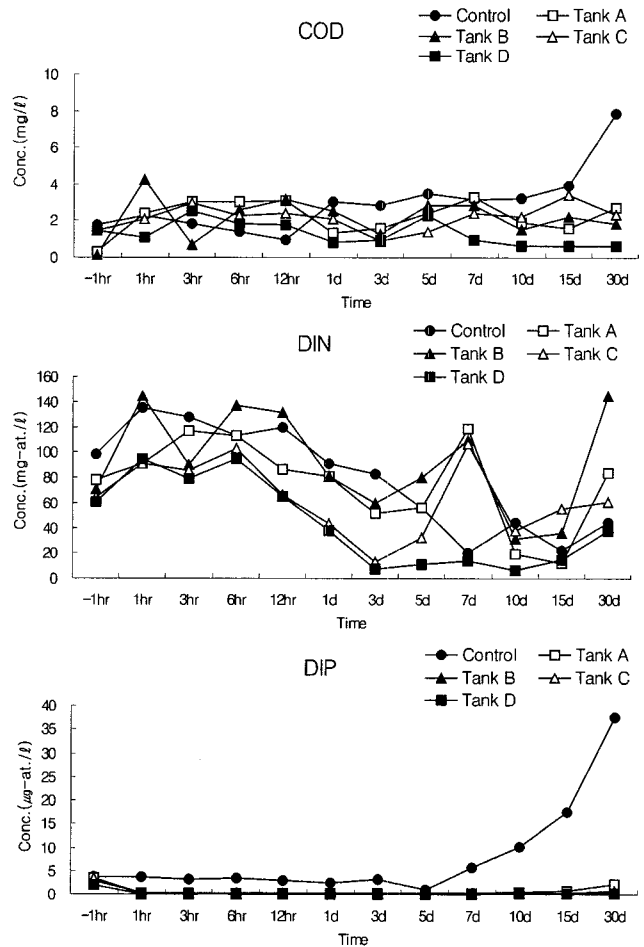


Fig. 3. Temporal variations of COD, DIN and DIP in seawater by a lump Nano-S.

(Fig. 2)와 (Fig. 3)에 나타내었고, 저질은 (Fig. 6)에 나타내었다. 수질환경의 개선효과를 파악하기 위하여 실험수조의 저질 상부 10 cm에서 채수한 시료로 Nano-S 투입 1시간 전과 Nano-S 투입 후 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 15일, 30일에 각각 변동사항을 측정하였다. pH는 투입 전에 비해 투입 후에 약간 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 1일이 지난 후 투입전의 상태를 회복하였고 10 kg을 투입한 수조 D는 30일까지 안정한 상태로 유지하였으며, 30일에 도달했을 때 모든 실험구에서 pH가 상승하는 변동을 보였다. 용존산소(DO)의 경우 Nano-S 투입시점에서부터 Nano-S의 양에 비례하여 계속 상승하는 결과를 나타냈다. 1 kg을 넣은 수조 A는 12시간 후, 2 kg을 넣은 수조 B는 1일 후, 5 kg을 넣은 수조 C는 3일 후, 10 kg을 넣은 수조 D는 약 7일 후부터 각각 감소하는 경향을 나타내었다. 화학적 산소요구량(COD)은 Nano-S투입 전후에 거의 변동이 없었으나 15일이 지난 후 대조구에서 크게 증가하였으나 Nano-S를 투입했던 다른 실험구에서는 변동이 없었다. 영양염류 중 암모니아성 질소는 전 실험구에서 6시간 후까지는 증가하는 경향을 보였으나 이후에 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 10일 이후 조금씩 증가하는 양상을 보이니 실험구

별 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 아질산성 질소는 3일 이후에 증가하는 경향을 보이며, 질산성 질소는 초기에 높은 증가와 감소의 경향이 나타나지만 투입된 Nano-S와의 관계는 구별되지 않았다. 규산염의 경우 투입한 초기에 농도에 비례하여 증가하는 경향을 보이지만 1일 이후 역전되어 Nano-S를 투입한 수조는 저농도로 안정하게 유지되는 효과를 나타내었으며 대조구에서는 상당히 높은 농도로 검출되었다. 인산염의 경우 대조구를 제외한 모든 실험구에서 안정적으로 농도를 유지하는 효과를 나타냈으며, 대조구의 경우 5일 이후에 급격한 농도의 증가를 나타냈다. Nano-S가 저질환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험수조에 저질 단위면적당(m²) 각각 0 kg(대조구), 2.75 kg(수조 A), 5.51 kg(수조 B), 13.77 kg(수조 C), 27.55 kg(수조 D)의 Nano-S를 투입 1시간 전과 투입 후 1시간, 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 15일, 30일 후에 저질을 채취한 후 투입 전후의 저질개선효과를 평가하였다. 강열감량(IL)은 투입 전후에 유의적인 증감을 나타내지 않았으며, H₂S의 경우에도 같은 현상을 나타내었다. 화학적산소요구량(COD)은 Nano-S 투입 직후부터 대체로 증가하는 경향을 보이거나 1일 이후 전반적으로

감소하였으나 5일 후를 기준으로 전체적으로 다시 증감하는 경향을 나타내었다. 다른 실험구와 비교하여 단위면적당(m²) 27.55 kg을 투입한 수조 D에서는 5일 이후 안정적인 값을 유지하는 것으로 관찰 되었다.

3.2 적토(red mud)의 수질 및 저질 개선효과

적토를 각 수조당 1 kg, 2 kg, 5 kg, 10 kg를 투입하여 30일이 경과하는 동안의 수질변동과 저질변동을 조사한 결과를 수질은 (Fig. 4)와 (Fig. 5)에 나타내었고, 저질은 (Fig. 7)에 나타내었다. 수질환경의 개선효과를 파악하기 위하여 실험수조의 저질 상부 10 cm에서 채수한 시료로 적토투여 1시간 전과 적토 투입 후 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 15일, 30일에 각각 변동사항을 측정하였다. pH는 적토의 투입 전에 비해 투입 후에 투입되어지는 양에 비례하여 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이후 소폭으로 감소하는 경향을 보이며, 3일 이후 30일까지 안정한 상태를 나타냈다. 염분의 경우 투입한 적토의 양과 상관없이 약 33~34% 범위내에서 안정적으로 유지됨을 관찰할 수 있었으며, 전 실험 기간에 걸쳐 0.5% 정도 상승하는 경향을 관찰할 수 있었다. 용존산소(DO)의 경우 실험구별 유의한 경향을 나타내지 않았으나 투입량

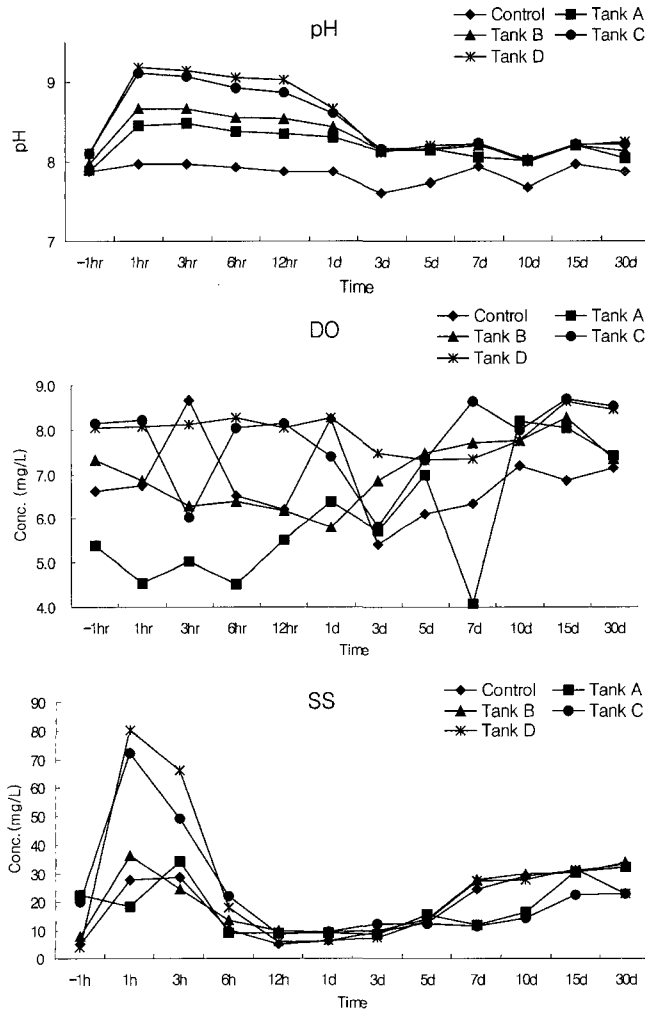


Fig. 4. Temporal variations of pH, SS and DO in seawater by a lump red mud.

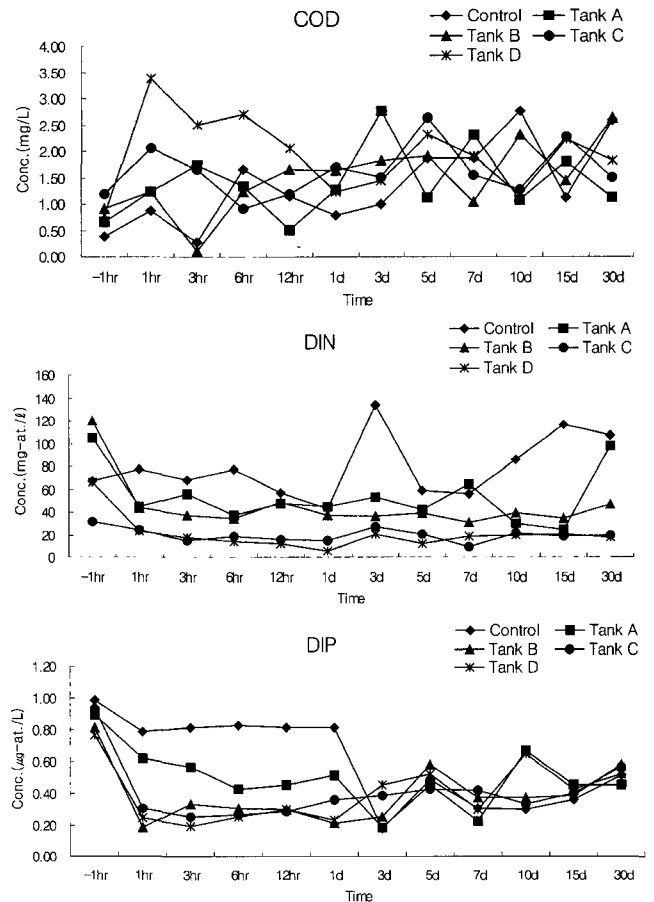


Fig. 5. Temporal variations of COD, DIN and DIP in seawater by a lump red mud.

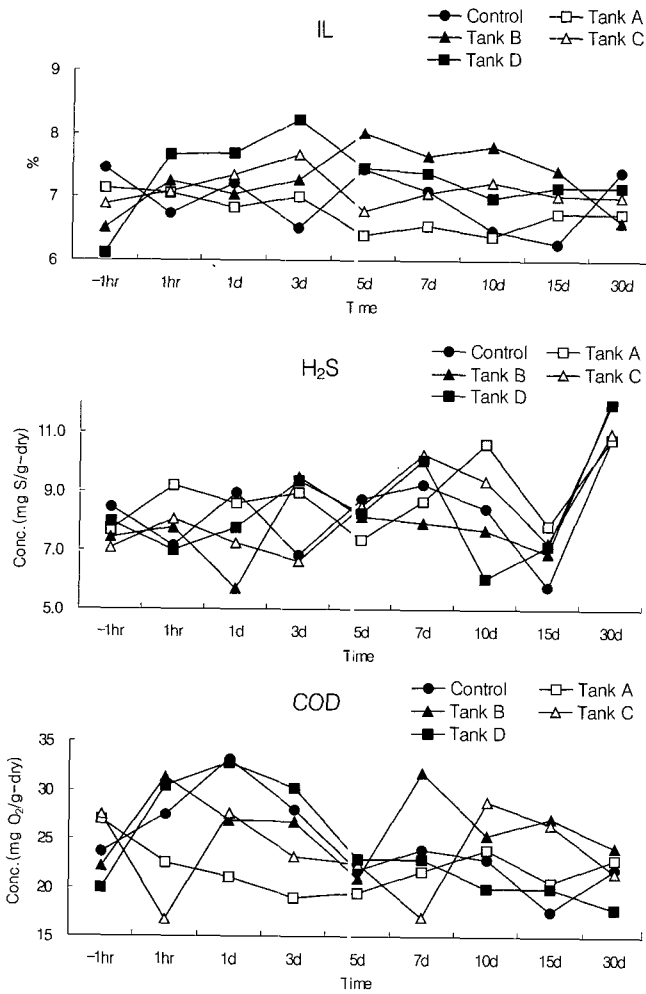


Fig. 6. Temporal variations of IL, H₂S and COD in sediment by a lump Nano-S.

을 5 kg과 10 kg으로 조절했던 수조 C와 수조 D에서 평균값보다 높은 값을 유지하였다. 대조구를 비롯한 1 kg과 2 kg을 투입했던 수조 A, 수조 B의 경우 투여전과 유사한 값을 나타내었다. 해수의 화학적 산소요구량(COD)은 적토투여 후 투여한 양에 비례하여 높아졌다가 점차 낮아지는 경향을 보이며, 1일 후 투여 전 값을 나타내었다. 이후 실험구별 유의한 차이점은 나타나지 않았다. 영양염류 중 암모니아성 질소는 투입량이 5 kg(수조 C), 10 kg(수조 D)에서는 20 µg-at./l 후의 값으로 일정하게 나타났고, 0 kg(대조구), 1 kg(수조 A), 2 kg(수조 B)를 투입한 실험구에서는 40 µg-at./l 전후의 값을 보이며 3일 이후 대조구에서는 높은 상승을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 아질산성 질소는 투여직후 전 실험구에서 약간 낮아지는 경향을 보이며, 전 기간에 걸쳐 안정하게 유지되나 대조구의 경우 1일 이후에 다른 실험구에 비해 급격히 증가하는 경향이 관찰되었다. 질산성 질소의 경우 대조구는 약 20 µg-at./l 전후의 값을 나타내었으나, 적토를 투여한 전 실험구에서 2 µg-at./l 이하의 값으로 떨어지며 투여 후 1일까지 안정한 상태로 유지되었다. 투여 3일 후 전체적으로 상승하는 결과를 보였으나 이후 30일 까

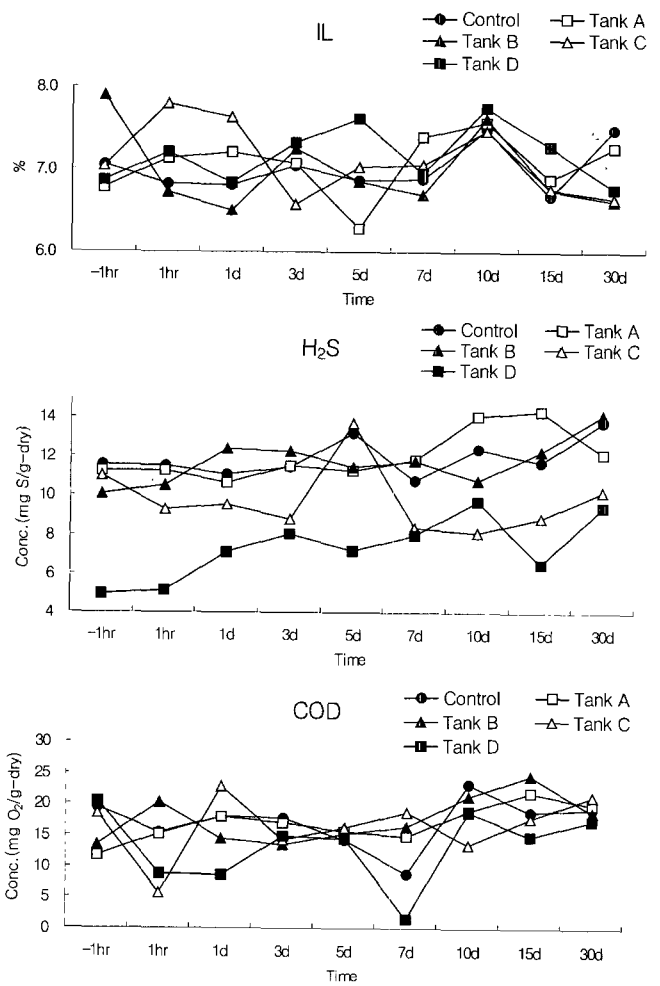


Fig. 7. Temporal variations of IL, H₂S and COD in sediment by a lump red mud.

지 안정한 상태를 유지하였다. 규산염의 경우 적토를 투입한 실험구에서 대조구에 비해 12시간 후 까지 감소하는 경향을 보였다. 이후 3일을 제외한 전 기간동안 대조구에 비해 낮은 농도를 나타내었다. 인산염의 경우 대조구를 제외한 모든 실험구에서 농도가 감소하는 경향을 보였으며, 24시간 후까지 안정적으로 농도를 유지하는 효과를 나타냈으나, 3일 후부터는 뚜렷한 차이점을 나타내지 않았다. 수질 황화수소(H₂S)의 경우 투여 전후에 유의적인 증감을 나타내지 않았다. 적토의 저질환경 개선효과를 파악하기 위하여 실험수조에 저질 단위면적당(m²) 각각 0 kg(대조구), 2.75 kg(수조A), 5.51 kg(수조B), 13.77 kg(수조C), 27.55 kg(수조D)의 적토를 투여한 후 1시간, 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 15일, 30일 후에 저질을 채취하여 투여 전후의 저질개선효과를 평가하였다. 강알감량(IL)은 투여 전후에 7%값을 전후로 분포하며, 유의적인 증감을 나타내지 않았으며, H₂S의 경우 13.77 kg(수조 C), 27.55 kg(수조 D)의 적토를 투여한 실험구에서 낮은 농도로 유지되는 현상을 나타내었다. 화학적 산소요구량(COD)은 적토 투여 전후에 유의적인 증감을 나타내지 않았다.

4. 결 론

유수식 수조 실험장치를 설치하여 Nano-S를 농도 구간별로 투여하여 수질 및 저질환경에 미치는 영향을 조사한 결과, Nano-S를 투여한 실험구에서 Nano-S를 투여하지 않은 대조구에 비해 1일 경과 후 전반적으로 수질 및 저질 개선효과가 나타났으며 투여량이 많은 실험구에서 그 효과가 다소 크게 나타났다. Nano-S의 경우 DO가 투여한 Nano-S의 양에 비례하여 높은 농도로 유지됨을 확인할 수 있었다. 저질 COD의 경우 투입 후 다소 증가하는 경향을 보였으나 10 kg을 투여한 수조D에서는 30일까지 안정한 값을 유지하였다. 특히 인산염의 제거효과는 매우 탁월하였다.

적토를 Nano-S의 경우와 동일한 방법으로 실험하여 수질 및 저질환경에 미치는 영향을 조사한 결과, 투여 후 1일 경과 시까지 대조구에 비하여 pH의 증가가 뚜렷하게 나타났으며 용존 무기질소 중 암모니아성 질소에 대한 용출 억제 효과가 고농도 투여 실험구에서 나타났다. 다른 항목에 대한 영향은 Nano-S의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 그렇지만 인산염의 제거효과는 Nano-S보다 낮은 결과를 보였다. 적토의 경우 Nano-S에 비해 상대적으로 낮은 저질용출억제 효과가 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 자원재활용기술개발사업단의 후원으로 수행된 연구결과의 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 국립수산진흥원, 1993, 養殖漁場 底質改善 技術開發, 農林水産部 特定 研究 課題 報告書, 317.
- [2] 김도희, 2002, “영양염 용출 측정에 관한 고찰” 한국환경과학회지, 제11권(제12호), 1333-1337.
- [3] 김홍진, 1993, 被覆物質에 의한 底質로부터 有機物 및 營養鹽類 溶出抑制效果, 부산수산대학교 이학석사학위논문, 50.
- [4] 나기환, 1996, 적조방제용 황토 효과와 영향. 수산계, 61, 32-37.
- [5] 배헌민, 김창숙, 김필근, 황진욱, 2002, “황토의 적조구제효율 증진 기술 및 생태계 영향 연구”, Proceeding of the 3rd International Symposium on “HARMFUL ALGAL BLOOMS & CONTROL”, 66-84.
- [6] 배헌민, 김창숙, 윤성중, 김숙양, 2000, “황토의 적조구제 효

과 및 전해수 혼합에 의한 새로운 적조구제 기술”, Proceeding of the Inter-state Symposium on “HARMFUL ALGAL BLOOMS & CLAYS”, 86-99.

- [7] 배헌민, 조용철, 김창숙, 윤성중, 김숙양, 2000, 적조생물 및 피해저감 기술 연구, II. 황토살포가 양식생물에게 미치는 영향. 수진사업 보고서, 381-400.
- [8] 심정희, 강영철, 최진우, 1997, “남해안 통영지역 가두리 양식장 해수 퇴적물 경계면에서의 chemical fluxes”, 한국해양학회지, 2(2), 151-159.
- [9] 오현근, 2003, 어장환경 개선제를 이용한 저질 개선 효과에 관한 연구, 이학석사학위논문, 여수대학교.
- [10] 이재성, 김기현, 유준, 이필용, 정래홍, 이원찬, 한정희, 이용화, 2004, “해상 어류 가두리양식장의 환경영향평가: II. 가두리 양식장 퇴적물의 산소-황화수소 경계면에서 황화수소의 산화율 및 무산소 퇴적층에서 황산염 환원을 추정”, 한국해양학회지(바다), Vol. 9, No. 2, 64-72.
- [11] 이재성, 정래홍, 김기현, 권정노, 이원찬, 이필용, 구준호, 최우정, 2004, “해상 어류 가두리양식장의 환경영향평가: I. 퇴적물 산소소모율 및 저서동물을 이용한 유기물 오염영향권 추정 및 유기탄소 순환”, 한국해양학회지(바다), Vol. 9, No. 1, 30-39.
- [12] 이필용, 최우정, 강창근, 이원찬, 김평중, 허승, 1999, “연안어장 자가오염 연구”, 수진사업보고서, 305-313.
- [13] 해양수산부, 2002. 해양환경공정시험방법.
- [14] 松村俊介, 1990, 底質水質改良制としての石灰, 養殖漁場における石灰撒布效果. Gypsum & Lime, 229, 109-112.
- [15] 日本氣象協會編, 1985, 海洋觀測指針.
- [16] 日本水産資源保護協會編, 1980, 新編水質汚濁調査指針, 恒星社厚生閣, 東京.
- [17] 花岡 資, 1980, 赤潮に關する近年の知見と研究の問題点 水産研究業書 33, 石崎.書店, 東京, 191-208.
- [18] Duplinsky, P. D. 1982, Sperm motility of northern pike and chain pickerel at various pH values. Trans. Am. Fish. Soc, 111, 768-771.
- [19] Hall, Per O. J., L. G. Anderson, O. Holby, S. Kollberg and M.-O. 1990, Samuelsson, Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. I. Carbon. Mar. Ecol. Prog. Ser., 6, 61-73.
- [20] Shpigel, M., A. Neori, Van Iperen, J. and H. Gordin, 1993, A proposed model for “Environmentally Clean” land-based culture of fish, bivalves and seaweeds. Aquaculture, 117, 115-128.

2005년 4월 22일 원고접수

2005년 8월 16일 수정본 채택