

어류양식장 저질개선을 위한 과산화칼슘 투입에 의한 생태 환경변화 관찰

조대철·배환진¹⁾·권성현^{1)*}

순천향대학교 에너지환경공학과,

¹⁾경상대학교 해양과학대학 해양환경공학과 해양산업연구소

(2012년 5월 11일 접수; 2012년 7월 6일 수정; 2012년 8월 7일 채택)

A Study on Bioremediation of Fish Farm Sediment Using CaO₂ by Enhancement of Indigenous Microbial Activity

Daechul Cho, Hwan-Jin Bae¹⁾, Sung-Hyun Kwon^{1)*}

Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

¹⁾Department of Marine Environmental Engineering, Gyeongsang National University,

Institute of Marine Industry, Tongyeong 650-150, Korea

(Manuscript received 11 May, 2012; revised 6 July, 2012; accepted 7 August, 2012)

Abstract

The aim of this research is to enhance the bottom environment of Geoje fish farm that has been severely contaminated. Treatment of microbial agent and/or calcium oxide significantly changed that environment: in ignition loss, either treatment (25% or 21%) showed better than mixed treatment (13.2%). In COD, the oxygen releasing agent or mixed treatment reduced the index by more than 20%. In T-P and T-N, the effects of CaO₂ on them were overwhelming (50% or more) meanwhile that of the microbial agent on them was less than 20%. Also, CaO₂ influenced on the microbial flora: *Desulfobvibrio thermophilus*, a sulfate reducing bacterium decreased in number, considering the increase of pH and rise of redox potential. In contrast, *Pseudomonas sp.*, *Pseudoalteromonas sp.*, *Pseudomonas aeruginosa* were remarkably dominant over other species with mixed treatment as a PCA analysis confirmed it.

Key Words : Microbial agent, CaO₂, Bioremediation, Sediment, Oxidation reduction potential

1. 서론

날로 증가하고 있는 도시화 및 산업화의 영향으로 우리나라 연안 해역은 육상으로부터 많은 양의 오폐수가 유입되고 있으며 천해 양식어장의 밀식 증가로

양식어가 섭취하고 남은 양식사료와 양식생물의 배설물 등 침적 등으로 인해 자정능력의 범위를 넘는 부패성 유기물질이 퇴적층에 축적되고 있다. 특히 대부분의 양식장은 만을 중심으로 발달되어 왔기 때문에 양식생물의 배설물이나 사료 찌꺼기 등이 외양으로 확산되지 못하고 인근해역의 저층에 축적되기 쉬운 지형적인 특징을 지니고 있으므로 같은 장소에서 집약적으로 장기간 양식을 하게 되면 사료 찌꺼기나 양식생물 배설물이 바닥에 퇴적하게 되고 자정능력을 초과할 경우, 연안역의 중요한 오염원으로 작용하게

*Corresponding author : Sung-Hyun Kwon, Department of Marine Environmental Engineering and Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-150, Korea
Phone: +82-055-772-9132
E-mail: shkwon@gsnu.ac.kr

된다. 이러한 양식어장의 저질은 겨울철을 제외하고 년 중 빈산소 수괴의 형성으로 생물이 서식하기 어려운 환경이 조성되면서 침적된 부패성 유기물들은 대부분 세균에 의하여 분해되고, 그 부산물로서 황화수소, 암모니아, 인등이 양식어장역 내로 용출되어 산란을 위한 어류의 회유를 방해하고, 정착성 패류와 가두리 양식장 등의 유영력이 제한된 수산생물을 폐사시켜 생산성을 저하시키고 있다(NFRDI, 2003).

현재 연안 어장환경의 침적된 저질 개선을 위해 여러 가지 방법이 시도되고 있으며 그중 물리적인 방법으로 오염된 퇴적물을 준설하여 저질의 유기물을 제거하고 있지만 이 방법은 많은 비용이 들고 준설된 퇴적물을 육지로 투기할 경우, 또 다른 환경문제를 야기시키며 황토, 수산화마그네슘, 제강슬래그, 생석회 살포등의 화학적인 처리 방법이 있지만(Murphy 등, 1990; Mohan 등, 2003) 2차적으로 생태계에 악영향을 줄 수 있다는 문제점이 따른다. 한편으로 해조류나 해초류의 이식, 미생물제제 등의 생물학적 방법 등이 활용되고 있으나 효과가 미비하거나 자연정화에 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서 경제적인 효율성과 생태계에 미치는 역할을 최소화할 수 있는 좀 더 과학적인 방법의 개발이 절실하다. 미국등 국외에서는 산소발생제(oxygen release compounds, ORC)를 사용함으로써 퇴적물 내에 산소를 공급하여 용존 산소량을 높여 혐기성의 퇴적물상태를 호기성으로 바꿔 생태학적인 환경을 조성하게 하는 생물정화기술이 적용되고 있다(Kao와 Borden, 1994; Vehagen 등, 1998). 이 기술의 적용은 대부분 지하수 및 하천의 오염정화를 목적으로 사용하고 있으나 광범위한 연안 및 해양퇴적물, 양식장 정화에 대하여 적용된 사례가 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 오염된 양식장 저질의 복원을 위하여 자연 생태계에서 유기물 분해자로서 중요한 역할을 하고 있는 유용 미생물과 함께 과산화칼슘계통의 산소발생제 처리에 따른 적용 가능성을 살펴보고, 전반적인 양식장 저질의 개선 효과를 연구하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 실험재료는 산소발생제와 유용

미생물을 이용하였다. 먼저 오염된 지역을 자연적 복원을 시킬 때 좀 더 시간을 줄이기 위해 호기성조건으로 환경을 조성시키는 방법 중 하나인 산소발생제(oxygen release compounds, ORC)는 장기배출물질로서 불용성이고, 물(H₂O)과 반응하여 calcium hydroxide (Ca(OH)₂)로 바뀌는데 이것은 퇴적층의 표면에 현탁액과 같은 비교적 안정한 상태로 유지하면서 인산염이 calcium peroxide 결정으로 스며들어 물의 투과를 억제하고, 그 영향으로 결정이 수화되는 비율이 제어됨으로써 산소가 장시간에 걸쳐 지속적으로 배출되는 특징이 있다(USEPA, 1994, 1998a; Kong 등, 1998).

유용 미생물제제(microbial agent)는 경남, 전남, 충남 연안의 저질에서 분리 한 450여종의 균주로부터 효소활성도가 뛰어난 *Bacillus sp.* 5종, *Streptomyces sp.* 4종, *Cellulomonas sp.* 1종, *Saccharomyces sp.* 1종과 함께 젖산생성능력이 뛰어난 *Lactobacillus sp.* ML-101 1종, 황화수소 및 암모니아 분해력이 뛰어난 *Rhodobacter sp.* 2종으로 구성된 M&M Bio사의 M-1001을 구입하여 실험 시, 산소발생제와 함께 대기 중의 수분과 접촉되지 않게 밀봉하여 사용하였다.

2.2. 시료채취

시료채취는 거제의 인근연안에 위치한 양식어장에서 채니기를 통하여 표층으로부터 10 cm 깊이의 퇴적물을 20 kg을 채취하여 실험실로 가져와 2 L부피의 반응조에 각각 1 kg씩 담았으며, 반응조의 설정조건은 화학적 변화 및 처리 효율성을 관찰하고자 자연상태의 대조구와 CaO₂, 미생물제제, CaO₂와 미생물제제를 혼합 투여한 4개의 반응조로 구성하였다. CaO₂와 미생물제제의 투여량은 퇴적토 1 kg에 대한 부피기준으로 5%씩 각각 투여하였으며 분석은 1주간 1회씩 총 5주 동안 실시하였고, 실험실 내에 상온하에서 하루 3회 교반하여 혐기화를 방지하고, 하루 1회 멸균된 여과해수로 수분을 공급하여 함수율을 60%로 연안저니의 조건과 유사하게 유지하였다.

2.3. 화학적 분석

화학적 분석방법으로 퇴적물의 pH와 ORP(oxidation reduction potential)는 (ORION model 210A, USA) 및 (Thermo 3 Star, USA)로 퇴적물로부터 전극을 통해 직접 측정하였으며 강열감량(Ignition Loss)은 습

식 퇴적물 10 g을 항량으로 건조시키고 550°C에서 강열한 후 무게 차이에 따른 강열감량을 계산하였다. COD(chemical oxygen demand)는 알칼리성 과망간산칼륨법으로 측정하였으며 T-N은 알칼리성 과황산칼륨으로 분해하여 질산성 질소로 산화시킨 후 카드뮴-구리 환원칼륨을 통과시켜 질산이온을 아질산이온으로 환원하여 비색 정량하여 543 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였다. T-P는 과황산칼륨으로 산화 분해하여 인산염(PO₄-P)형태로 변화시킨 다음 아스코르빈산 환원법으로 비색 정량하였으며 885 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였다. 흡광도 측정은 UV-1800 (Shimadzu, USA)로 분석하였으며 위의 실험법은 해양환경공정시험법(해양수산부, 2005)에 준하여 실시하였다.

2.4. 미생물군집 분석

미생물 군집분석은 Fast DNA[®] SPIN Kit for Soil (MpBio, USA)를 사용하여 DNA를 추출하여 PCR반응을 수행하였으며 1차 PCR은 primer 27F, 1492R을 이용하여 추출한 총 DNA중 16s rDNA를 PCR을 수행하여 확인하였고, 16s rDNA V3 region을 touch down-PCR을 수행하여 재 증폭 하였다. 이때 사용된 primer는 40개의 GC-clamp가 붙은 GC-341F을 이용하였으며 Bioneer Inc.(Daegwon, Korea)에서 주문·제작하여 사용하였다. PCR 반응조건은 95°C에서 5분간 초기 열처리 후, 95°C에서 30초 동안 변성시키고, annealing 온도는 초기에 65°C에서 시작하여 매 2 cycle마다 1°C씩 감소되도록 설정하고, 55°C가 되면 15 cycle을 더 수행하도록 하여 30초간 반응시키고 신장을 위하여 72°C에서 45초 반응 후 최종으로 72°C에서 10분간 처리하고 반응을 마쳤다. 반응을 마친 PCR 산물은 1% Agarose gel에서 전기영동을 수행하여 확인하였다. Touchdown-PCR을 수행하여 얻은 PCR산물은 정제한 뒤, Denaturing Gradient Gel Electrophoresis systems(C.B.S. SCIENTIFIC, USA)으로 DGGE를 수행하였다. Denaturing gradient gel상에서 위치가 다른 밴드로부터 DNA단편을 회수하고 각 밴드에서 회수한 DNA에 대하여 primer 341F와 518R을 가지고 PCR을 수행하여 재 증폭 하였다. 재 증폭 산물은 정제하여 cloning(Solgent, Korea) 후 염기서열을 분석

(Solgent, Korea)하였다. 이로부터 얻어진 염기서열 데이터들을 NCBI BLAST(Basic Local Alignment Search Tool) search를 통하여 가장 유사도가 높은 미생물 종을 밝혀내고 발표된 문헌을 통하여 그 특성들을 파악하였다. 그리고 미생물 군집의 유사성을 관찰하고자 SPSS 18.0(SPSS Inc, Chicago, IL USA)을 이용하여 주성분분석(Principal Components Analysis, PCA)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. CaO₂ 및 미생물제재의 단일혼합 처리에 따른 효율성 관찰

대조구와 처리구(단일·혼합처리)로 부터 퇴적토의 pH(수소이온농도) 및 ORP(산화·환원전위)의 변화를 관찰한 결과(Fig 1(a)), 전반적으로 CaO₂에 의한 영향이 두드러지게 나타났다. 먼저 pH의 경우, 단일

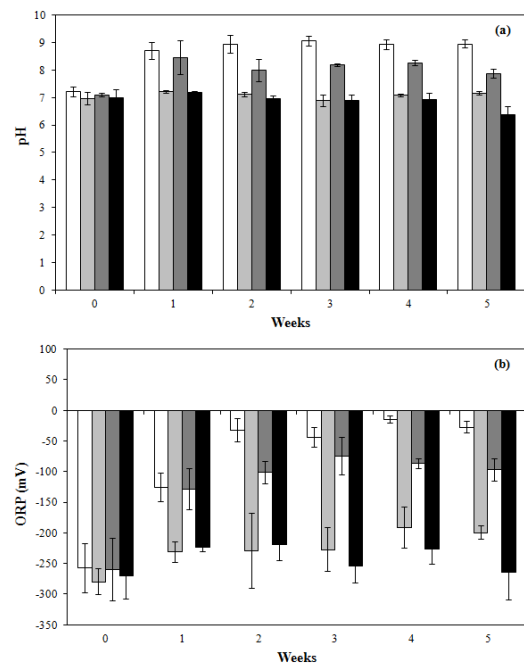


Fig. 1. Changes of pH(a) and ORP(b) on Geoje fish farm sampling sites when chemically treated and microbially treated or microbially plus chemically treated for 5 weeks: data measured in triplet biweekly. □: CaO₂ ■: microbial agent ▣: CaO₂ plus microbial agent ▤: control

처리구(CaO₂)에서는 5주가 경과함에도 pH 9이상 수준을 유지하는 것으로 나타났으며 CaO₂와 유용미생물을 혼합 시에는 pH 9이상 증가하다가 차츰 낮아지는 것을 관찰 할 수 있었다. 마찬가지로 ORP의 경우에도 대조구와 처리구의 초기 ORP 수치는 -192.2 mV ~ -257.3 mV의 넓은 범위로 환원환경임을 알 수 있었으며 5주간 모니터링 한 결과, 대체적으로 단일처리구(CaO₂)에서의 산화·환원 전위가 5주 경과 시에 평균 -218.33 mV에서 -22.5 mV로 단일 처리구(Microbial agent)와 혼합 처리구(CaO₂ plus microbial agent)에 비해 양의 값으로 상승폭이 가장 크게 나타나 호기적 환경으로의 전환이 크게 나타난 것으로 판단된다. 반면에 대조구의 ORP는 -240.50 mV에서 -272.11 mV로 시간이 경과함에 따라 더욱 환원환경이 됨을 관찰할 수 있었다. 따라서 CaO₂가 퇴적물내의 전위 상승에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

CaO₂ 및 미생물제제 처리에 의한 강열감량의 변화는 대조구를 제외하고 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 처리전의 강열감량은 평균 50.33%로 주요 남해안의 당항만(12.7%, IL), 칠천만(14.1%, IL), 고현만(14.5%, IL)보다 약 4배 이상의 높은 수치를 보였으며 처리효율은 단일 처리구(CaO₂ & microbial agent)가 각각 21.5%, 24.5%로 혼합 처리구(CaO₂ plus microbial agent, 13.0%)에 비해 우수하였다.

퇴적토의 유기물 함량의 지표인 COD를 측정 한 결과, Fig 2(b)에서 처리전의 COD농도는 16.88 mg/g-dry로 당항만(23.4 mg/g-dry, COD), 고현만(29.0 mg/g-dry, COD)보다는 낮게 나타났다. COD의 경우, CaO₂에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으며 시간의 경과(5주)에 따른 단일 처리구(14.7 mg/g.dry에서 11.83 mg/g.dry, CaO₂)와 혼합 처리구(17.54 mg/g.dry에서 13.0 mg/g.dry, CaO₂ plus Microbial agent)의 효율이 각각 19.5%, 25.9%로 단일 처리구(17.2 mg/g.dry에서 16.33 mg/g.dry, Microbial agent) 5.1%에 비해 약 4배 가량 차이가 났으며 이는 CaO₂가 COD감소에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

따라서 위의 실험결과로 볼 때, 산소발생제를 처리함으로써 퇴적물 내에 호기적 여건(산화·환원 전위 상승 및 산소공급)을 조성하고 유기물 분해능이 높은 토착미생물의 성장을 유도함으로써 유기물 분해를 촉진

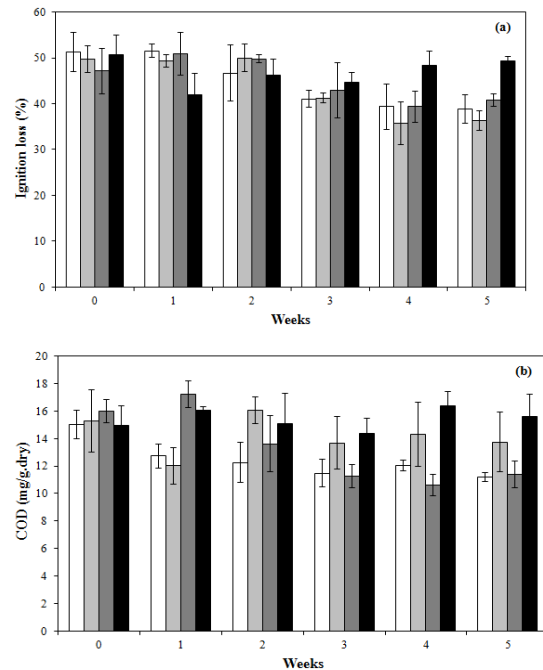


Fig. 2. Changes of ignition loss(a) and COD(b) on Geogje fish farm sampling sites when chemically treated and microbially treated or microbially plus chemically treated for 5 weeks: data measured in triplet biweekly. □: CaO₂ ■: microbial agent ▒: CaO₂ plus microbial agent ■: control

시켜 COD농도를 감소시킨 것으로 사료된다. 따라서 산소발생제를 유용미생물과 접목시켜 오염된 연안저질 및 퇴적물에 적용 시, 오염된 저질을 개선시키는데 보다 효과적일 것으로 판단된다.

총 질소(T-N)농도 변화를 관찰한 결과, Fig 3(a)과 같이 자연토의 평균 총 질소는 2.16 mg/g로 당항만(2.38 mg/g, T-N), 고현만(2.50 mg/g, T-N)에 비해 근사한 수치를 보였다. 전체적으로 대조구와 처리구에서 시간의 경과에 따른 차츰 감소하는 경향을 보였으며 단일 처리구(CaO₂)의 T-N 제거율이 47.6%(2.25 mg/g에서 1.18 mg/g)로 단일 처리구(microbial agent); 9.5%, 혼합 처리구(CaO₂ plus microbial agent); 20%보다 우수함을 관찰할 수 있었다. 총 인(T-P)의 경우, Fig 3(b)과 같이 자연토의 평균 총 인은 평균 0.61 mg/g으로 당항만(1.73 mg/g, T-P), 고현만(1.07 mg/g, TP)에 비해 상당히 낮은 수치를 보였으며 대조구와

단일 처리구(microbial agent)는 시간의 경과에 따른 큰 변화를 보이지 않았다. 반면에 단일 처리구(0.614 mg/g에서 0.233 mg/g, CaO₂)와 혼합 처리구(0.602 mg/g에서 0.371 mg/g, CaO₂ plus microbial agent)는 T-P감소가 아주 높게 나타났다. 따라서 T-N과 T-P는 산소발생제 처리에 따른 감소 경향을 보였으며 이는 산소공급에 따른 호기성미생물의 성장을 촉진시켜 퇴적물내 질소 제거 및 인을 불용화 시킨 것으로 판단된다.

질소 제거는 산소공급에 따른 질산화 과정을 통한 수중으로의 질산염 용출로 사료된다. 한편 인의 경우 적조 발생과 같은 부영양화에 제한인자로 작용하기 때문에 인의 제거는 부영양화의 방지 측면에서 중요한 요소로 이러한 인 제거는 오염된 퇴적물내에서 시간이 경과함에 따라 유기물 분해에 따른 산소소모가 증가하여 혐기적 상태로 진행됨에 따라 퇴적물의 산

화·환원 값이 낮아져서, 퇴적물 표면에 붙어 있으면서 안정한 구조를 취하던 다원자가 금속 이온들이 환원 상태에서 인과의 결합이 깨어지면서 인이 용출되는 것으로 알려져 있다(Bernhoff, 1974). 또한 용존되어 있는 인의 경우, 산소발생제(CaO₂)가 가수분해 시 생성되는 Ca(OH)₂의 표면에 흡착되어 제거되거나 Ca²⁺ 이온과 Ca(OH)₂이 PO₄⁻³과 H₃PO₄와 각각 결합하여 인의 용출을 만들어 제거시키므로 산소발생제에 따른 인 제거와 함께 미생물제제의 유용미생물을 활성화 시킴으로서 인 제거 효과가 증대된 것으로 사료된다.

양식장 환경지표의 최종 증감(최대 효과 처리법)을 Table 1에 정리하였다. C는 ORC처리, M은 미생물, C+M은 복합처리를 나타낸다.

Table 1. Changes in primary environmental indices through the bio-treatments

	0 week	5th week	max. reduction(%)	treatment
ignition loss (%)	49.79	36.24	27.2 %	M
COD (mg/g, dry)	16.0	11.39	28.8 %	C+M
T-N (mg/g)	2.187	1.137	48.0 %	C
T-P (mg/g)	0.604	0.231	61.7 %	C

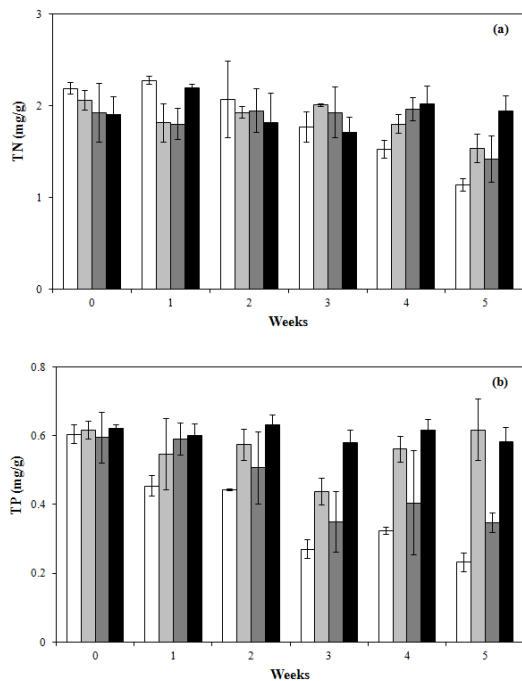


Fig. 3. Changes of total nitrogen(a) and total phosphorus(b) on Geoje fish farm sampling sites when chemically treated and microbially treated or microbially plus chemically treated for 5 weeks: data measured in triplet biweekly. □: CaO₂ ■: microbial agent ■: CaO₂ plus microbial agent ■: control

3.2. CaO₂ 및 미생물제제 단일혼합 처리에 따른 미생물 군집변화

현장에서의 군집변화를 PCR-DGGE기법으로 분석하였다. 일반적으로 PCR-DGGE법은 조건변화에 따른 미생물군집의 변화를 시각화하고 조건변화에 따라 사라지거나 새롭게 등장하는 미생물종을 파악하기 위하여 사용된다. DGGE상에 나타나는 각 band는 서로 다른 16s rDNA 염기서열을 가지는 미생물종이며, 특정 미생물종이 증가할수록 특정 band의 명도 또한 증가하게 된다. 염기서열 분석결과를 토대로 Genebank의 BLAST search database를 이용하여 16s rDNA의 sequence를 alignment한 결과 Table 2에 나타내었다. 그 결과, *Roseobacter sp.*(band no.1)는 대조구(A)와 단일 처리구(B, C)에서는 발견되나 혼합 처리구(D)에서는 중

의 개체수가 줄어들었다. *Desulfovibrio thermophilus* (band no. 2)는 황산염 환원균으로 CaO₂가 적용된 단일 처리구(B)와 혼합 처리구(D)에서는 종의 개체수가 감소함을 알 수 있었다.

단일 및 혼합처리에 따른 DGGE band profile를 비교해보면(Fig. 4), CaO₂와 미생물제재를 단일 · 혼합 처리 시 대조구에 비해 band 수(미생물 종)가 증감함을 알 수 있었다. 또한 band 2와 같이 *Desulfovibrio thermophilus*는 미생물제재 처리구 및 대조구에서만 관찰된 종으로 CaO₂가 적용된 반응조에서는 관찰되지 않아 CaO₂의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 흥미로운 점은 CaO₂와 미생물제재를 혼합 처리한 반응조로부터 band 4, 5, 6, 7, 8의 density가 다른 처리구에 비해 아주 뚜렷하게 나타났으며 이들은 *Pseudomonas sp.*, *Pseudoalteromonas sp.*, *Pseudomonas aeruginosa*와 같은 종으로 호기적 조건에서 성장하며 유기물 분해 능력이 뛰어난 종들로 알려져 있다.

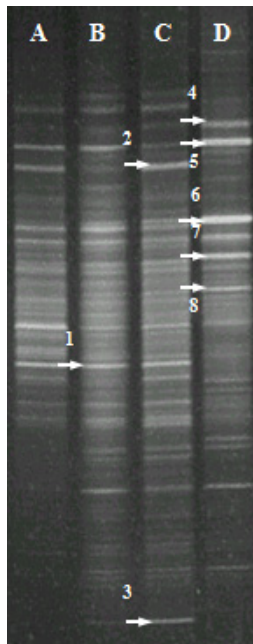


Fig. 4. Microbial flora analysis of Geoje fish farm samples treated by single dose or by combined doses: (A) control (no treatment at initial time); (B) CaO₂ (treatment after 5 week); (C) microbial agent (treatment after 5 week); (D) CaO₂ plus microbial agent (treatment after 5 week).

Table 2. Base sequences of 16s rDNA read from DGGE bands

DGGE band	NCBI accession no.	description	identity (%)
1	AJ542657	<i>Roseobacter sp.</i>	98%
2	F9078681	<i>Desulfovibrio thermophilus</i>	99%
3	AJ199372	<i>bacillus sp.</i>	95%
4	X53855	<i>Rhodobacter sphaeroides</i>	93%
5	JF460833	<i>pseudomonas sp.</i>	98%
6	EU169507	<i>Pseudoalteromonas sp.</i>	95%
7	KCTC2513	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	95%
8	DSM11031	<i>Bacillus vallismortis</i>	94%

3.3. 미생물 군집의 유사성 관찰

PCA분석은 DGGE band profile(Fig. 4)로부터 각각의 band 위치와 명도를 수치화하여 SPSS 18.0 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA)를 통하여 분석하였다(Fig. 5). CaO₂ 및 유용 미생물을 처리 시에 DGGE band의 위치 및 명도를 수치화 하였고, 그 값들을 이용하여 DGGE band profile의 유사성을 시각화하기 위한 주성분분석(PCA)을 실시하였다. CaO₂ 및 유용 미생물을 단일 및 혼합 처리 시 처리구(B, C, D)는 대조구(A)와 비교하여 서로 분산되어 나타났으며 단일 처리구인 B(CaO₂)와 C(microbial agent)는 서로 유사한 군집을 형성한 반면 혼합 처리구인 D(CaO₂+microbial agent)는 단일 처리구(B, C)에 비해 서로 상반된 군집이 형성된 것으로 나타났다(Fig. 5). 그리고 CaO₂ 및 미생물제재 단일 처리구의 군집은 비슷한 개체군이나 혼합처리구와는 큰 차이를 보였으며 이는 CaO₂에 의한 호기성미생물의 개체수 증감에 기여한 것으로 예상할 수 있다.

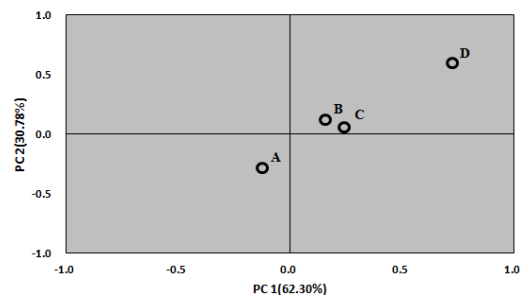


Fig. 5. Similarity test for microbial flora after microbial or microbial plus chemical treatment: (A) control (no treatment at initial time); (B) CaO₂ (treatment after 5 week); (C) microbial agent (treatment after 5 week); (D) CaO₂ plus microbial agent (treatment after 5 week).

4. 결론

오염이 심화된 양식어장으로부터 CaO₂ 및 유용미생물을 적용시켜 관찰한 결과, CaO₂ 처리에 의한 유기물(COD)과 영양염류(T-N, T-P)의 제거효율이 높게 나타났다. 강열감량의 경우, 제거효율이 단일 처리구에서 높았으며, COD는 CaO₂가 적용 시, 미생물제재보다 약 4배에 가까운 정화효과를 보임을 알 수 있었다. 이것은 저질 내 미생물은 유기물을 분해 시 산소 소비가 극심하게 진행되는데 산소발생제(CaO₂)의 산소공급에 의하여 유기물을 분해하는 호기성 미생물의 성장과 더불어 유기물 분해시간을 단축시킨 결과로 판단된다. T-N과 T-P의 경우에도 pH 및 ORP(산화환원전위)의 상승을 유발하는 CaO₂에 의해 제거효과가 우수하였으나 혼합 처리시에는 다소 미흡한 것으로 나타났다. 특히, 높은 인 제거율은 산소발생제의 처리로부터 인의 흡착으로 인한 것과 침전물의 형성으로 침전됨에 따라 제거될 뿐만 아니라 호기성 미생물의 인의 섭취와 관련된 것으로 사료된다.

단일 및 혼합처리에 따른 미생물 군집변화에서도 CaO₂처리에 따른 H₂S를 유발하는 *Desulfobvibrio thermophilus*와 같은 황산염 환원균의 생성억제를 확인할 수 있었으며 미생물제재와의 혼합처리를 통한 *Pseudomonas sp.*, *Pseudoalteromonas sp.*, *Pseudomonas aeruginosa*와 같은 유기물 분해능력이 뛰어난 종들의 증가를 확인할 수 있었다. 또한 PCA 분석 결과에서도 알 수 있었듯이 이러한 생·화학적 처리를 통해 양식장 미세생물의 군집의 변화를 크게 변화시키지 않으면서 토착미생물의 활성을 유도함으로써 산소발생제와 미생물제재 사용에 따른 안정성 여부를 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- Bernhoff, R., 1974, The role of lime and dolomite in the treatment of municipal wastewater, International Lime Conference, Berlin, 12, 98-105.
- Kao, C. M., Borden, R. C., 1994, Enhanced aerobic bioremediation of a gasoline-contaminated aquifer by oxygen releasing barriers. Hydrocarbon Bioremediation, Lewis Publishing, Boca Raton Florida, 11(2), 262-266.
- Kong, S. H., Richard, J. W., Choi, J. H., 1998, Treatment of petroleum-contaminated soils using iron mineral catalyzed hydrogen peroxide, Elsevier Science Giannis, 6(4), 299-308.
- National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI), 2003, Studies on the development of remediation technologies for the polluted sediment in aged aquaculture grounds, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 91, 231-219.
- Mohan, R. K., Brown, M. P., Barnes, C. R., 2000, Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments. Applied Ocean Research, 22, 85-93.
- Murphy, T. P., Hall, K. G., Northcote, T. G., 1988, Lime treatment of a hardwater lake to reduce eutrophication, Lake and Reservoir Mgmt., 42(6), 51-62.
- Murphy, T. P., Prepas, E. E., 1990, Lime treatment of hardwater lakes to reduce eutrophication, Veth. Internat. Verein Limnol., 24(2), 327-334.
- Mysona, E. S., Hughes, W. D., 1999, Remediation of BTEX in groundwater with LNAPL using oxygen releasing materials(ORM), in: *In Situ* bioremediation of petroleum hydrocarbon and Other Organic Compounds. Battelle Press, Columbus Ohio, 34, 283-288.
- USEPA, 1998, National conference management and treatment of contaminated sediments, EPA/725/R-98/001, 144.
- Vehagen, I. J., Wetzstein, D. W., Bruner, D. R., Hudak, C. I., 1998, Enhancing dissolved oxygen to remEDIATE vinyl chloride in ground water, Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon and Other Organic Compounds. Battelle Press, Columbus Ohio, 27-32.