

〈Original article〉

## 오존 처리한 넙치 양식장 사육수의 수질과 미생물 변동

박성덕 · 김유희<sup>1</sup> · 박정환<sup>2</sup> · 김병기<sup>1,\*</sup>

강원도수산자원연구원, <sup>1</sup>강원도립대학교 해양양식식품과,  
<sup>2</sup>부경대학교 해양바이오신소재학과

### Changes in Water Quality and Bacterial Compositions in Culture Water of an Ozonated Flounder Farm

Seongdeok Park, You Hee Kim<sup>1</sup>, Jeonghwan Park<sup>2</sup> and Pyong-Kih Kim<sup>1,\*</sup>

Gangwon Province Fisheries Resources Institute, Gangneung 25435, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Aquaculture and Seafood, Gangwon State University,  
Gangneung 25425, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Marine Bio-Materials and Aquaculture, Pukyong National University,  
Busan 48547, Republic of Korea

**Abstract** - This study assessed the effect of ozone to control pathogenic bacteria in inlet water flowing to flounder farms, establishing operational parameters of ozonation at seawater conditions. Hydraulic retention time in a reaction pipeline after ozonation was fixed at 3 minutes in a flow through system. Concentrations of total residual oxidant (TRO) by ozonation were measured according to different ozonation intensities. The oxidant reduction potential (ORP), which is indirect but enables real-time measurement, was measured in relation to TRO values. TRO values were  $0.01 \pm 0.01 \text{ mg L}^{-1}$  at an ORP range of 320-410 mV,  $0.07 \pm 0.02 \text{ mg L}^{-1}$  at 600 mV, and  $0.16 \pm 0.03 \text{ mg L}^{-1}$  at 700 mV. A heterotrophic marine bacteria colony was reduced by 80.6-97.9%, showing the suppression effect of ozonation on total bacteria in inlet water. At an ORP range of 400-500 mV, colonies of heterotrophic marine bacteria, *Vibrio* spp., and gram negative bacteria were significantly reduced in outlet water from a culture tank with ongrowing flounder (230 g) at a stocking density of  $8 \text{ kg m}^{-2}$ . Especially, *Vibrio* spp. and gram negative bacteria were seldom found at 400-500 mV. The daily feeding rate was from over 0.7% to total body weight at 300-500 mV, showing better performance than that in the control. The pathogenic bacteria entering the flounder farm were effectively removed when the ORP range to 400 mV or less.

**Keywords** : flounder, TRO, ORP, ozone, disease prevention

## 서 론

넙치 (*Paralichthys olivaceus*)는 우리나라 양식생산량 1위를 차지하는 중요 어종이나 최근 연안역의 오염 등으로 어

류 질병이 만연하는 등의 어려움으로 생산량은 정체되고 있다. 이는 소비 부진이 한 원인일 수 있으나 고밀도 사육 및 양식 원수의 자가오염으로 인한 양식장 사육 환경의 악화로 발생하는 질병 감염이 주 원인으로 알려져 있다 (Cho *et al.* 2015). 넙치 양식 전 과정에서 나타나는 총폐사율은 42.1%, 백신접종 이후부터 출하까지의 육성단계 폐사율은 15.1% 등

\* Corresponding author: Pyong-Kih Kim, Tel. 033-660-8221,  
Fax. 033-660-8225, E-mail. pkkim@gw.ac.kr

으로, 양식하는 어류의 20~30%가 질병 감염으로 폐사하는 것으로 알려져 있다(NFRDI 2006; Cho *et al.* 2015). 국내에서는 세균성, 기생충성 및 바이러스성 질병 등 여러 병원체에 의해서 넙치 양식이 피해를 입고 있으며, 이 중 스쿠치카증, 연쇄구균증, 바이러스 출혈성 패혈증으로 인한 넙치 폐사 비율이 큰 것으로 나타났다(Oh *et al.* 1999; NFRDI 2006). 이에 대응하기 위하여 넙치 양식장에서는 순환율을 극단적으로 높이는 방법을 구사하고 있으나 생산경비를 늘리는 결과를 초래하고 있다. 따라서 규모 확대 및 고밀도 환경에 대응하고, 양식산업의 생산성 향상을 위해서는 양식용수 처리를 통한 병원성 미생물의 방역 및 통제가 필수적이다.

양식장의 병원성 미생물을 차단하기 위하여 다양한 방법이 이용되고 있으나, 주로 양식용수나 사육수를 오존, UV, 전기분해, 플라즈마 등과 같은 소독 장치를 주로 활용한다. 그러나 방역을 위한 장비 선정에는 병원성 미생물의 소독효과는 물론 장비의 가격이나 안전성 확보가 중요한 요인이 된다.

오존( $O_3$ )은 불소 다음으로 강력한 산화력을 가지고 있어 양식용수의 소독에 널리 사용하고 있다. 이러한 산화력으로 양식용수의 소독, 질소 및 황화합물 같은 무기물질의 산화, 색도유발 물질 제거, 유기물질의 분해, 각종 병원균 사멸, 바이러스 불활성화 등의 수질개선 목적으로 널리 이용되고 있다(Hwang *et al.* 1991; Summerfelt and Hochheimer 1997). 그러나 오존을 기준 이상의 농도로 사용하면 양식 어류나 무척추동물은 물론, 수처리를 위한 생물학적 여과조의 여과세균에도 유독한 것으로 알려져 왔다. 양식어종

에 대한 오존 독성은 무지개송어(Wedemeyer *et al.* 1979; Morita *et al.* 1995; Ritola *et al.* 2002), 틸라피아(Paller and Heidinger 1980), 넙치(Reiser *et al.* 2010) 등에 대하여 보고되었다. 특히, 오존은 세포막에 손상을 주기 때문에 양식생물의 호흡과 삼투조절 작용에 악영향을 미친다고 보고되었다(Wedemeyer *et al.* 1979; Paller and Heidinger 1980; Richardson *et al.* 1983). 그러나 유입수나 순환 사육수 내 오존이나 오존으로부터 유래한 총잔류산화물(total residual oxidant; TRO)의 농도를 유의한 수준으로 낮게 유지시킬 수 있다면 양식장에서 발병하거나 증식하는 병원성 미생물을 적절한 수준 이하로 낮추는 데 적합한 방법이 될 수 있다.

따라서 본 연구는 유수식 양식장 시설 내로 유입되는 병원 미생물을 효과적으로 처리하기 위하여 오존 처리에 따른 산화환원전위(oxidation reduction potential; ORP)와 TRO 값의 상관관계를 정립하여 향후 오존의 운전 및 모니터링에 활용하고자 하였으며, 오존 처리의 유효성과 생물 안전성을 판단하고자 미생물 변화, 용존산소 및 사육 어류의 사료섭취량 변화를 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험 장치

본 연구는 Fig. 1과 같이 강원도립대학교 내 어류양식실험실에 있는 원형 PP수조(ø4.0 m×H 1.0 m)를 이용하여 유수

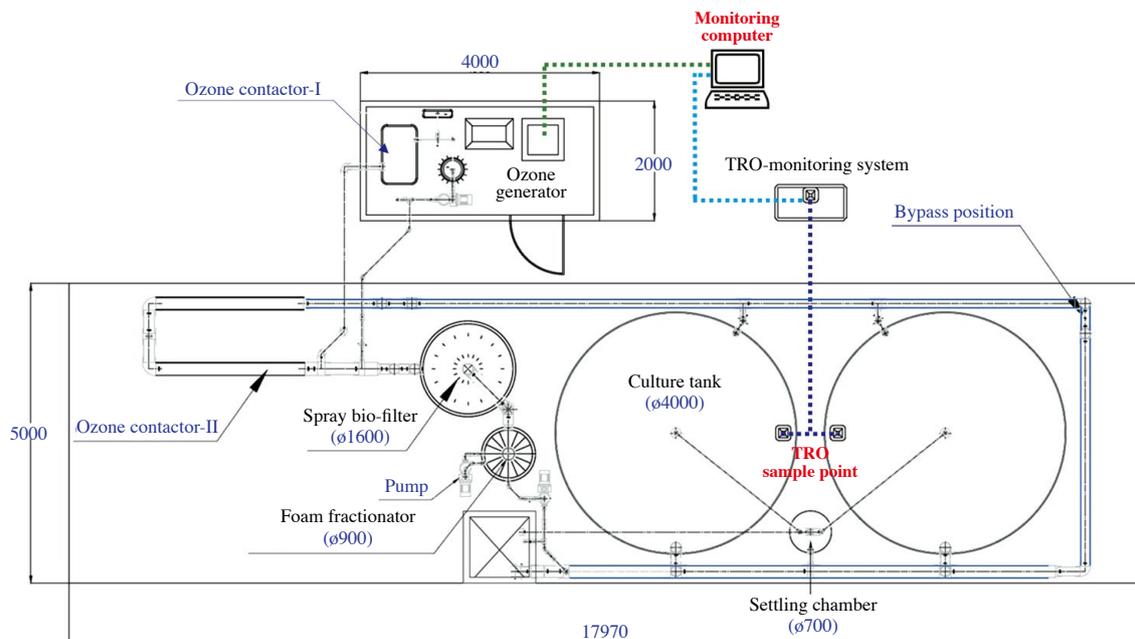


Fig. 1. Schematic diagram of an experimental flow-through system.

식으로 운전하면서 실험을 수행하였다. 오존 처리된 유입수는 오존 용해기와 오존 반응부를 거쳐 3분의 반응 시간을 가진 뒤 사육조로 유입되도록 설계하였다. 수조의 환수율은 일간 24회전을 유지하였다.

실험에 사용된 오존 처리 시스템은 산소 발생기(Oxus-7L, Korea), 오존발생기(OZN-100, Ozone Engineering, Korea), 용해기( $\phi 0.25 \times 1.0$  m, SUS316)와 냉각기(Daeil, Korea), 누출 오존센서(Ozone solution, USA), 용존 오존측정기(ATI Q45H, USA) 등으로 구성하였다.

## 2. Experiment I

양식원수의 오존 처리 효과를 알아보기 위하여 오존 주입량을  $0.3 \sim 3.0$  mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>의 범위로 주입하면서 ORP값을 기준으로 250 (자연해수), 290, 320, 350, 380, 410, 500, 600 및 700 mV로 9단계로 조절하였다. 각 단계별로 24시간씩 가동하면서 오존 처리후 양식 수조로 유입되기 직전의 사육수를 매 6시간 간격(4회/1일)으로 채수하여 오존 처리수의 잔류오존량, 총잔류산화물(TRO), 화학적산소요구량(Chemical oxygen demand; COD) 및 현탁고형물(suspended solids; SS)을 측정하였다. ORP 센서는 MR-1K (Nichia Sangyo, Japan)를 이용하였으며, 유입수의 ORP값 조절은 오존발생기와 연결된 WSO-100 (DIK, Korea)을 이용하였다. Ozone은 Indigo method로, TRO는 DPD method로 분광광도계(HACH DR 4000, USA)를 사용하여 현장에서 분석하였다. COD는 과망간산칼륨-알칼리법으로 측정하였고, SS는 유리섬유여과법(GF/C)으로 측정하였다.

평균 해수병으로 채수한 사육수의 총세균(heterotroph marine bacteria)은 Marine agar (Difco™ Marine agar 2216, Becton, France)를, *Vibrio* spp.는 TCBS agar (Difco™ TCBS agar 265020, Becton, France)를, 그램음성균(gram-negative bacteria)은 MacConkey agar (BBL™ MacConkey agar 211 387, Becton, France)를 사용하였고, 세부적인 부분은 Park *et al.* (2013)의 방법을 준용하여 실험하였다.

## 3. Experiment II

넙치 사육수의 오존 처리 효과를 조사하기 위하여 Fig. 1과 같은 원형 PP 사육조를 이용하여 유수식(flow through system)으로 운전하였다. 유수식 환경에서 오존을  $0.3 \sim 3.0$  mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>의 범위로 주입하면서 ORP 기준으로 200~300(자연해수), 300~400, 400~500, 500~600 및 600~700 mV 범위로 구획하여 각각 24시간씩 실험하였다. 실험에 사용된 넙치는 평균 체중 230 g 크기 450마리(사육밀도 8.0 kg m<sup>-2</sup>)를 사용하였다. 사료는 시판용 해산어류 사료(밀레니엄, 우성사

료)를 1일 2회로 나누어 만복(*ad libitum*) 공급하였다. 실험은 넙치를 사육하면서 유입수, 사육수 및 배출수의 수질과 배출수 미생물의 변화를 Exp. I과 같은 방법으로 조사하였고, 자연해수와 오존 처리 시 수조 내의 용존산소 변화를 연속적으로 조사하였으며, ORP 수준에 따른 넙치의 위해 반응을 조사하기 위하여 일간사료섭취율도 조사하였다. 총 암모니아성 질소는 salicylate-hypochlorite method, 아질산성 질소는 Diazotization Method로 연속흐름분석기(SAN<sup>++</sup> Continuous Flow Analyzer, Skalar, Holland)를 이용하여 측정하였다.

## 4. 통계처리

본 실험에 대한 결과는 mean  $\pm$  S.D.로 나타내었고, SPSS ver. 17.0 프로그램을 이용하여 유의성 검정을 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. Experiment I

유수식 양식장 양식원수의 오존 처리에 따른 수질 변화는 Table 1에 나타내었다. 양식장 시설 내로 들어오는 자연해수의 ORP는 250 mV를 나타내었으며, 해수 내 Ozone과 TRO는 검출되지 않았다. COD와 SS값은 원수 내에 들어있는 유기물질로 인해 각각  $0.62 \pm 0.11$  mg L<sup>-1</sup>와  $1.53 \pm 0.28$  mg L<sup>-1</sup>를 나타내었다. 오존 처리된 해수에서 잔류 오존은 빠른 반응성으로 인해 전 실험구에서 검출되지 않았으며, TRO는 ORP 290 mV까지는 검출되지 않았으나 320~410 mV까지  $0.01 \pm 0.01$  mg L<sup>-1</sup>가 검출되었으며, 600 mV와 700 mV에서 각각  $0.07 \pm 0.02$  mg L<sup>-1</sup>와  $0.16 \pm 0.03$  mg L<sup>-1</sup>가 검출되었다. 그러나 오존 처리로 인한 ORP값의 상승과 COD 및 SS의 농도에는 특별한 관계가 없는 것으로 조사되었다.

**Table 1.** Water qualities of ozone treated seawater in flow-through system with different ORP values

ORP <sup>1</sup> (mV)	Ozone (mg L <sup>-1</sup> )	TRO <sup>2</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	COD <sup>3</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	SS <sup>4</sup> (mg L <sup>-1</sup> )
250 <sup>5</sup>	0.00	0.00	$0.62 \pm 0.11$	$1.53 \pm 0.28$
290	0.00	0.00	$0.42 \pm 0.28$	$1.40 \pm 0.66$
320	0.00	$0.01 \pm 0.01$	$0.71 \pm 0.62$	$1.27 \pm 0.47$
350	0.00	$0.01 \pm 0.01$	$1.01 \pm 0.02$	$1.60 \pm 0.75$
380	0.00	$0.01 \pm 0.01$	$0.98 \pm 0.27$	$1.47 \pm 0.94$
410	0.00	$0.01 \pm 0.01$	$0.85 \pm 0.16$	$1.20 \pm 0.23$
500	0.00	$0.02 \pm 0.01$	$0.60 \pm 0.04$	$0.93 \pm 0.94$
600	0.00	$0.07 \pm 0.02$	$0.64 \pm 0.15$	$0.87 \pm 0.85$
700	0.00	$0.16 \pm 0.03$	$0.75 \pm 0.52$	$1.87 \pm 0.94$

<sup>1</sup>Oxidation reduction potential; <sup>2</sup>Total residual oxidant; <sup>3</sup>Chemical oxygen demand; <sup>4</sup>Suspended solids; <sup>5</sup>Value of natural seawater

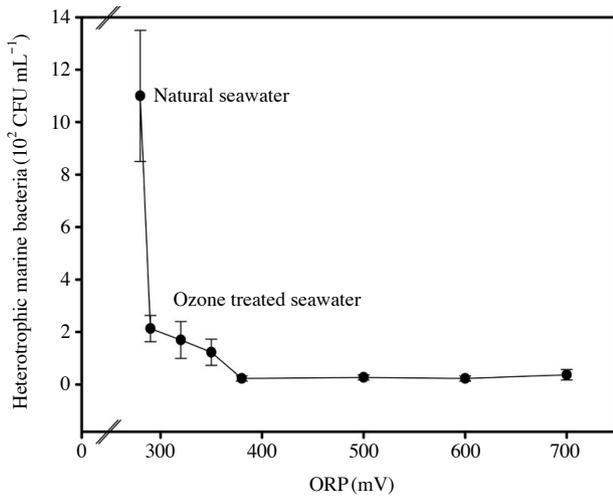


Fig. 2. Changes of heterotrophic marine bacteria number of ozone treated inflow water with different ORP ranges in flow-through system.

사육용수에 포함된 유기물들은 병원성 미생물이 잘 번식할 수 있도록 하는 기질로 작용하고 사육 생물의 아가미에 부착하여 점액 물질을 과도하게 분비하게 하여 사육생물의 건강에 해를 줄 수 있다(Braaten *et al.* 1986; Liltved and Cripps 1999). 또한 이러한 유기 고형물들은 순환여과시스템에서 생물학적 여과조에 축적되어 질산화 세균의 활성을 저하시켜, 수중 암모니아 등 질소성 화합물의 농도가 상승할 우려가 있어(Liao and Mayo 1974; Muir 1982), 어류를 양식함에 있어 수중에 이러한 유기물을 효과적이고 신속하게 제거하는 것이 수질관리에서 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

오존은 수중의 미세한 유기물 내 유기 탄소를 직접 산화시킴으로써 전체 시스템 내 탄소 부하량을 감소시킬 수 있으며, 용존 유기물이 서로 응집하도록 하여 여러 가지 고형물 제거 장치의 효율을 증가시킬 수 있다고 하였다(Summerfelt *et al.* 1997; Krumins *et al.* 2001). 그러나 오존 처리에 따른 사육용수의 유기물 제거 효율을 알아본 본 실험에서 COD와 SS 모두 ORP값에 따른 제거효율이 농도 의존적으로 명확하게 나타나지 않았다.

Fig. 2는 양식원수의 ORP 수준에 따른 유입수의 총세균수 변화를 나타내었다. 오존 처리전인 자연해수의 총세균수는  $11.0 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>을 나타내었으나 오존 처리한 뒤 총세균수는  $0.23 \sim 2.13 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>로 80.6~97.9%의 제거율을 나타내어 오존 처리를 통한 미생물 제거 효과는 분명한 것으로 보인다. 특히 ORP 380 mV에서  $0.23 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>를 보여 미생물 수가 현저히 감소하는 효과를 나타내었으며 그 이상의 ORP 범위에서도 낮은 미생물 수를 보였다. 대부분의 넙치 양식장은 자연 해수를 끌어들여 사용한 뒤 배

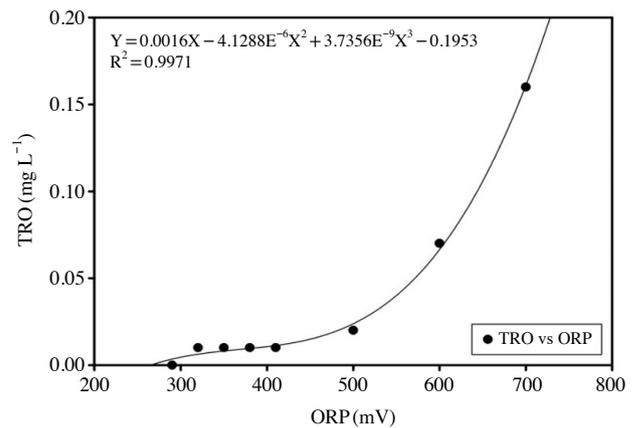


Fig. 3. Correlation between TRO and ORP by nonlinear regression analysis.

출시키는 유수식 양식 형태를 취하고 있다. 그러므로 양식장 외부의 자연에서 들어오는 병원 미생물이나 해적생물을 차단하거나 최소화하는 것이 방어의 기본이라 할 수 있다. Oh *et al.* (1999)에 따르면 해수에 들어있는 세균을 제거하기 위해서는 해수 중의 TRO값을 0.1 및 0.5 mg L<sup>-1</sup> 되도록 유지하였을 때 세균 제거율은 99%에서 99.9% 이상인 것으로 보고하였으며, 이러한 세균 제거율을 얻는 데 필요한 반응시간은 최소 3분에서 6분이 필요한 것으로 밝혔다. 또한 병원성 세균과 바이러스에 대한 조사에서도 소독에 필요한 가장 효과적인 TRO 농도와 시간도 같은 것으로 밝혔다. 본 연구에서도 오존 반응 시간을 3분으로 설정하여 Oh *et al.* (1999)과 동일한 결과를 보였다.

오존과 해수의 반응을 통하여 정량적으로 생성되는 TRO 농도와 ORP 측정값을 상호 비교하고자 비선형성 회귀분석으로 관계성을 검증한 결과는 Fig. 3과 같다. TRO 농도 대비 ORP 측정값은 등간격으로 증가하지 않았으며 ORP 400 mV 이후에는 TRO 농도에 비하여 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다. 반면 생물 사육에 적용할 수 있는 농도인 TRO 0~0.05 mg L<sup>-1</sup>의 구간에서는 ORP값을 이용한 TRO값의 분리능이 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, 추후 양식에서 오존을 산업적으로 널리 이용하기 위해서는 ORP 측정정보보다는 TRO값을 이용하여 총산화물의 농도를 모니터링 하는 것이 더욱 유용할 것으로 판단된다.

## 2. Experiment II

넙치를 사육하면서 오존 처리수를 사용하여 사육수와 배출수의 수질 환경을 조사하였다. 오존을 0.3~3.0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>의 범위로 주입하면서 ORP값을 500~600 mV 이상으로 유지한 실험구의 유입수에서 오존이 0.01 mg L<sup>-1</sup>로 검출되었

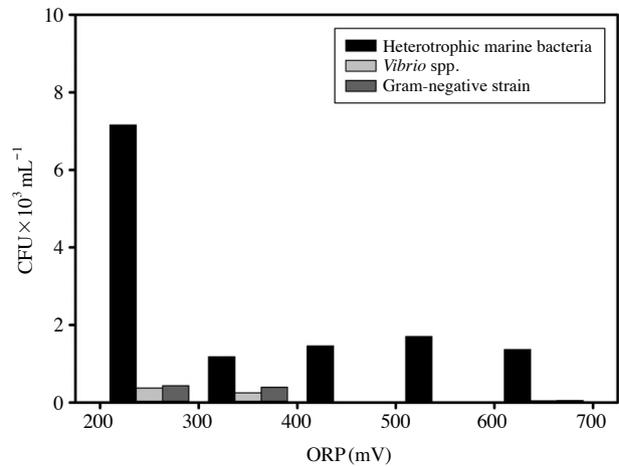
**Table 2.** Water qualities of ozone treated seawater in flow-through system of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) with different ORP values

ORP <sup>1</sup> values		Ozone (mg L <sup>-1</sup> )	TRO <sup>2</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	COD <sup>3</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	SS <sup>4</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	Ammonia-N (mg L <sup>-1</sup> )	Nitrite-N (mg L <sup>-1</sup> )
250 <sup>5</sup>	Influent water	0.00	0.00	0.28±0.17	1.20±0.48	0.031±0.001	0.002±0.000
	Rearing water	0.00	0.00	0.48±0.06	1.65±0.97	0.038±0.004	0.003±0.001
	Effluent water	0.00	0.00	1.22±0.31	1.95±0.54	0.061±0.016	0.003±0.000
300~400	Influent water	0.00	0.02±0.03	0.24±0.26	1.89±1.15	0.008±0.008	0.005±0.005
	Rearing water	0.00	0.00	0.98±0.53	1.90±0.41	0.026±0.031	0.005±0.004
	Effluent water	0.00	0.00	0.95±0.27	2.50±0.88	0.045±0.047	0.005±0.003
400~500	Influent water	0.00	0.05±0.01	0.82±0.77	1.43±0.73	0.000	0.010±0.002
	Rearing water	0.00	0.00	1.42±0.61	1.87±0.55	0.035±0.004	0.010±0.002
	Effluent water	0.00	0.00	1.04±0.59	1.31±0.94	0.091±0.010	0.010±0.003
500~600	Influent water	0.01±0.01	0.07±0.01	0.53±0.14	1.93±0.30	0.001±0.001	0.011±0.002
	Rearing water	0.00	0.00	1.39±0.11	1.75±0.83	0.061±0.069	0.012±0.002
	Effluent water	0.00	0.00	2.12±0.43	2.25±1.51	0.117±0.010	0.013±0.002
600~700	Influent water	0.01±0.01	0.07±0.01	0.42±0.17	1.80±1.04	0.000	0.010±0.001
	Rearing water	0.00	0.00	0.89±0.39	1.60±0.91	0.036±0.006	0.008±0.003
	Effluent water	0.00	0.00	1.21±0.13	1.70±0.60	0.062±0.023	0.008±0.004

<sup>1</sup>Oxidation reduction potential; <sup>2</sup>Total residual oxidant; <sup>3</sup>Chemical oxygen demand; <sup>4</sup>Suspended solids; <sup>5</sup>Value of natural seawater

으나, 사육수와 배출수에서는 검출되지 않았다. TRO는 오존이 주입되는 모든 실험구의 유입수에서 검출되었으며, ORP 기준으로 200~300 (자연해수), 300~400, 400~500, 500~600 및 600~700 mV 범위에서 각각 0.02, 0.05, 0.07, 0.07 mg L<sup>-1</sup>의 농도를 보였으나 사육수와 배출수에서는 오존과 마찬가지로 검출되지 않았다. 수중 암모니아성 질소는 대조구 유입수에서 0.031 mg L<sup>-1</sup> 농도였으나 ORP 400~500 mV 실험구 이상의 유입수에서 대부분이 제거되는 것으로 나타났다. 그러나 COD, SS 및 아질산성 질소는 오존 처리에 따른 명확한 제거효과가 없었다(Table 2). TRO는 물속의 세균을 사멸하는 데 아주 우수한 역할을 하지만, 과도하게 존재할 경우 사육생물의 스트레스 유발, 대사활동 및 생존에 영향을 줄 수 있다(Kim *et al.* 1999; Reiser *et al.* 2011; Park *et al.* 2013). 틸라피아(*Oreochromis niloticus*)를 사육하는 해수 순환여과 시설에서 TRO를 0.15 mg L<sup>-1</sup>까지 장기간 노출시켜도 질산화세균에 유해한 영향은 없었다고 하였으며, TRO가 들어 있는 모든 실험구, 즉 오존 처리된 해수로 운전되는 생물여과조의 질산화세균이 오존 처리하지 않은 해수를 사용한 실험구의 것보다 활성이 촉진된다는 보고도 있다(Schroeder *et al.* 2015). 또한 양식생물을 안전하고 건강하게 사육하는 데 적당한 TRO 농도는 0.1 mg L<sup>-1</sup> 이하일 때라고 하였다(Reiser *et al.* 2010; Schroeder *et al.* 2010; Reiser *et al.* 2011). 그러나 본 실험에서 ORP 600 mV 이하에서 TRO 최대 농도는 0.07 mg L<sup>-1</sup>로 나타나 생물에 단기적으로는 안정적인 수준으로 나타났다.

넙치의 대사산물과 함께 시스템 외부로 배출되는 배출



**Fig. 4.** Bacteria number of effluent water of 230 g olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) culture tank in flow-through system with different ORP values.

수를 대상으로 조사한 미생물의 변화를 Fig. 4에 제시하였다. 오존 처리하지 않은 해수인 ORP 250 mV의 배출수의 총 세균수는  $7.16 \times 10^3$  CFU mL<sup>-1</sup>이었으나, ORP 300~400 mV에서  $1.18 \times 10^3$  CFU mL<sup>-1</sup>로 약 83%의 총 세균수 감소가 있었다. 병원성을 나타내는 비브리오는 ORP 250 mV에서  $3.74 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>이었으나, ORP 300~400 mV에서  $2.50 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>로 감소하였고, ORP 400~500 mV에서는  $0.08 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>로 약 97%가 감소하였다. 에드워드균 등을 포함하고 있는 그램 음성균의 경우 ORP 250 mV에서  $4.32 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>이었으나, ORP 300~400 mV에서

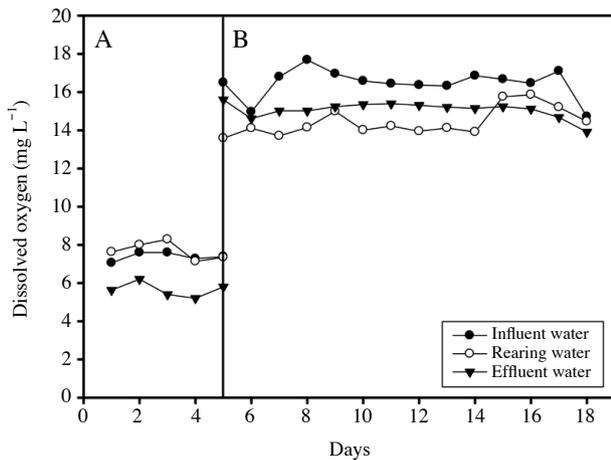


Fig. 5. Changes of dissolved oxygen in rearing tank with and without injected ozone (A: Before injected O<sub>3</sub>, B: After injected O<sub>3</sub>).

$3.95 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>로 감소하였으나, ORP 400~500 mV에서  $0.03 \times 10^2$  CFU mL<sup>-1</sup>로 약 99%가 감소하였다.

양식어류가 있는 상태(사육밀도 8.0 kg m<sup>-2</sup>)에서 사육수에 오존을 주입하고 용존산소량의 변화를 조사하였다(Fig. 5). 오존 무처리에서는 유입수, 사육수조 내 그리고 배출수의 용존산소량은 각각  $7.39 \pm 0.23$  mg L<sup>-1</sup>,  $7.68 \pm 0.47$  mg L<sup>-1</sup> 및  $5.65 \pm 0.38$  mg L<sup>-1</sup>을 나타내었다. 반면, 오존 처리에서는 용존산소량은 각각  $16.46 \pm 0.77$  mg L<sup>-1</sup>,  $14.43 \pm 0.73$  mg L<sup>-1</sup> 및  $15.06 \pm 0.42$  mg L<sup>-1</sup>를 나타내었다. 오존이 수중에 주입되면 접촉하는 물질과 빠르게 반응하여 산화시키면서 최종적으로 수중에 산소 분자를 전달함으로써 수중의 용존산소 전달 효율을 개선하는 것으로 알려져 있으며(Summerfelt *et al.* 1997), 본 실험에서도 오존을 처리하면 유입수와 배출수의 용존산소량이 각각 2.2배 및 2.6배 정도 높아지는 것으로 나타났다.

오존 처리수로 사육하였을 때 넙치에 미치는 안전성을 평가하기 위하여 일간사료섭취율을 조사한 결과 오존 처리하지 않은 자연해수의 일간사료섭취율은  $0.71 \pm 0.10\%$ 를 나타내었으며, 오존 처리수의 일간사료섭취율은 0.57~0.77% 범위를 나타내었다(Fig. 6). 오존 처리한 ORP 300~500 mV 범위에서 사육한 넙치의 일간사료섭취율이 비처리구인 자연해수로 키웠을 때보다 오히려 높게 나타났다. 그러나 ORP 500 mV 이상의 실험구에서는 자연해수보다 낮은 일간사료섭취율을 보였다. Park *et al.* (2013)은 감성돔을 대상으로 공급사료 kg당 20 g의 오존을 주입하면서 45일간 사육실험 한 결과 대조구와 오존 처리구 모두 98% 이상의 생존율을 보였으며, 사료계수에 큰 차이가 없는 것으로 나타나, 단기 실험한 본 연구와는 차이가 있었다.

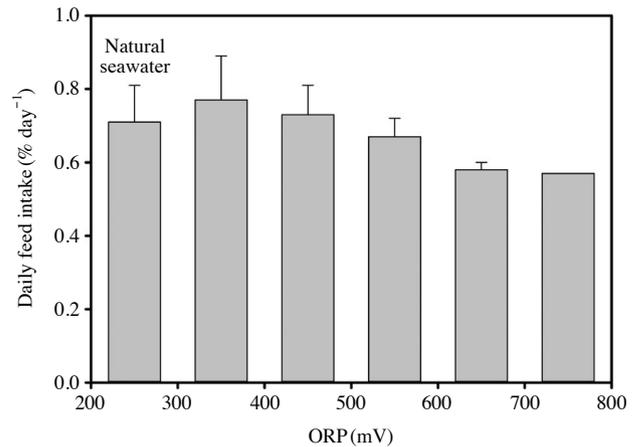


Fig. 6. Changes of daily feed intake for olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) with different ORP values.

최근에는 양식 생산물에 항생제나 각종 약품을 사용하지 않는 유기양식(organic aquaculture)에 관심이 집중되고 있으며 이러한 생산품을 지속적으로 생산하여 높은 수익을 얻기 위해서는 양식장의 병원성 미생물의 수를 매우 낮게 안정적으로 관리할 수 있어야 한다. 양식생물질병은 양식생물을 생산하는 모든 단계에서 발생할 수 있고, 사육수조의 대형화 및 고밀도 사육을 지향하는 최근의 산업적 경향을 반영하기 위해서는 안정된 수질 관리뿐만 아니라 질병을 근원적으로 관리할 수 있는 방안을 찾는 노력은 매우 중요하다. 이에 오존은 광범위한 산화 작용, 빠른 반응 속도, 산소 보충 등의 효과 때문에 다양한 목적으로 해양 생물 생산 산업 적용에 시도되고 있다(Summerfelt *et al.* 1997). 본 연구에서 오존 처리한 해수는 수중 미생물의 80% 이상을 제거하는 것으로 조사되었으나, COD나 SS로 대변되는 수중 유기물의 산화 효과는 크게 나타나지 않았다. Tango and Gagnon (2003)은 오존은 수중의 암모니아와 반응하게 되면 암모니아를 질소 가스 형태로 전환함으로써 수중으로부터 암모니아를 일부 제거할 수 있다고 하였다. 이번 실험에서도 오존 처리에 따라 유입수의 암모니아 저감 효과를 확인할 수 있었으나, 암모니아의 산화물인 아질산의 감소 효과는 확인할 수 없었다. 또한 오존 처리로 인해 ORP값이 상승할수록 배출수의 미생물 감소효과를 확인할 수 있었다. 따라서 오존의 수중 반응성은 고형 유기물보다는 미생물이나 용존되어 있는 암모니아성 질소에 먼저 산화반응을 일으키는 것으로 여겨진다. 결과적으로 넙치 양식장의 병원성 미생물을 안정적으로 유지하기 위해서는 유입수의 ORP를 400 mV 수준으로 유지시켜주는 것이 적절한 것으로 판단되나 추후 장기적인 사육 실험을 통해 생물 안정성에 대한 세밀한 조사가 필요하리라 생각된다.

## 적 요

본 연구는 넙치 양식장 시설 내로 유입되는 병원 미생물을 효과적으로 관리하기 위한 오존 처리 기준을 마련하고자 수행되었다. 우수식 환경에서 오존 주입량을 0.3~3.0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>의 범위로 주입하면서 3분의 반응시간을 가진 후 ORP 320~410 mV에서 TRO가 0.01±0.01 mg L<sup>-1</sup>가 검출되었으며, 600 mV와 700 mV에서 0.07±0.02 mg L<sup>-1</sup>와 0.16±0.03 mg L<sup>-1</sup>가 검출되었다. 오존 처리에 따라 총세균수는 80.6~97.9%의 제거율을 나타내어 오존 처리를 통한 미생물 제거 효과는 분명하게 나타났다. 230 g 넙치를 8.0 kg m<sup>-2</sup> 밀도로 사육한 300~400 mV 실험구에서는 총세균수는 가장 낮은 값을 보였다. 특히 400~500 mV에서 *Vibrio* spp.와 그램 음성균은 거의 검출되지 않았다. 일간사료섭취율은 300~500 mV에서 0.7% 이상을 나타내어 대조구인 자연해수보다 감소하지 않아 부작용이 적은 것으로 나타났다. 넙치 양식장으로 유입되는 병원 미생물은 유입수의 ORP 400 mV 수준에서 효율적으로 제거되는 것으로 조사되었다.

## 사 사

본 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(육상 넙치 양식장 생산성 향상을 위한 오존 고도산화 활용 기법 개발).

## REFERENCES

- Braaten BT, PP Jacobsen and K Maroni. 1986. Risk from self-pollution in aquaculture evaluation and consequences. pp. 139-165. In *Efficiency in Aquaculture Production: Disease and Control*. Proceedings, The 3<sup>rd</sup> International Conference on Aquafarming 'Aquacultura 86' (Grimaldi E and H Rosenthal eds.). Verona, Italy.
- Cho MY, HJ Ha, JG Min, TJ Kim, BY Jee, SH Park, SD Hwang, KI Kim, YH Jang and MA Park. 2015. Improvement and assessment criteria on disease control level in olive flounder aquaculture farms. *J. Fish. Mar. Sci. Edu.* 27:1646-1655.
- Hwang SY, GS Lee and BS Kim. 1991. A study on the ozonation of organic materials in sewage and waste water. *Kor. J. Sanit.* 6:103-108.
- Kim HY, MJ Oh and SJ Jung. 1999. Acute toxicity ozone on survival and physiological conditions of olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *J. Fish Pathol.* 12:32-41.
- Krumins V, J Ebeling and F Wheaton. 2001. Part-day ozonation for nitrogen and organic carbon control in recirculation aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 24:231-241.
- Liao PB and RD Mayo. 1974. Intensified fish culture combining water reconditioning with pollution abatement. *Aquaculture* 170:215-227.
- Liltved H and SJ Cripps. 1999. Removal of particle-associated bacteria by prefiltration and ultraviolet irradiation. *Aquac. Res.* 30:445-450.
- Morita J, T Suzuki, S Kimura, A Hara and K Takama. 1995. Effect of low level ozone exposure on the serum TBA-reactive substance (TBA-RS) level and superoxide dismutase and catalase in rainbow trout. *Fish. Sci.* 61:890-891.
- Muir JF. 1982. Recirculated water system in aquaculture. pp. 357-447. In *Recent Advances in Aquaculture* (Muir JF and RJ Roberts eds.). Westview Press, Boulder Co.
- NFRDI. 2006. Standard manual of olive flounder culture. National Fisheries Research and Development Institute, Busan. p. 192.
- Oh MJ, HY Kim and HS Cho. 1999. Disinfection of culture water supply by ozonation I. Susceptibility of some fish-pathogenic bacteria isolated from culture marine fish. *J. Fish Pathol.* 12:42-48.
- Paller MH and RC Heidinger. 1980. Mechanisms of delayed ozone toxicity to bluegill *Lepomis macrochirus* (Rafinesque). *Environmental Pollution Series A-Ecological and Biological* 22:226-239.
- Park J, PK Kim, T Lim and HV Daniels. 2013. Ozonation in seawater recirculating systems for black seabream *Acanthopagrus schlegelii* (Bleeker): Effects of solids, bacteria, water clarity, and color. *Aquac. Eng.* 55:1-8.
- Reiser S, JP Schroeder, S Wuertz, W Kloas and R Hanel. 2010. Histological and Physiological alterations in juvenile turbot (*Psetta maxima* L.) exposed to sublethal concentrations of ozone-produced oxidants in ozonated seawater. *Aquaculture* 307:157-164.
- Reiser S, S Wuertz, JP Schroeder, W Kloas and R Hanel. 2011. Risks of seawater ozonation in recirculation aquaculture-effects of oxidative stress on animal welfare of juvenile turbot (*Psetta maxima* L.). *Aquat. Toxicol.* 105:508-517.
- Richardson LB, DT Burton, RM Block and AM Stavola. 1983. Lethal and sublethal exposure and recovery effects of ozone-produced oxidants on adult white perch (*Morone americana* Gmerlin). *Water Res.* 17:205-213.
- Ritola O, LD Peters, DR Livingstone and P Lindstrom-Seppa. 2002. Effects of *in vitro* exposure to ozone and/or hyperoxia on superoxide dismutase, catalase, glutathione and lipid peroxidation in red blood cells and plasma of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquac. Res.* 33:165-175.
- Schroeder JP, A Gartner, U Waller and R Hanel. 2010. The tox-

- icity of ozone-produced oxidants to the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 305:6–11.
- Schroeder JP, SF Klatt, M Schlachter, Y Zablotzki and S Keutr. 2015. Impact of ozonation and residual ozone-produced oxidants on the nitrification performance of moving-bed biofilters from marine. *Aquac. Eng.* 65:27–36.
- Summerfelt ST and JN Hochheimer. 1997. Review of ozone processes and applications as an oxidizing agent in aquaculture. *Prog. Fish-Cult.* 59:94–105.
- Summerfelt ST, JA Hankins, AW Weber and MD Durant. 1997. Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system: II. Effects on microscreen filtration and water quality. *Aquaculture* 158:57–67.
- Tango M and GA Gagnon. 2003. Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems. *Aquac. Eng.* 29:125–137.
- Wedemeyer GA, NC Nelson and WI Yasutake. 1979. Physiological and biochemical aspects of ozone toxicity to rainbow-trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 605–614.

Received: 25 September 2017

Revised: 19 March 2018

Revision accepted: 19 March 2018