

대형 수조에서 볼락 종묘 생산에 따른 수질 환경의 변화

오승용*, 노충환
한국해양연구원 해양자원연구본부

Changes of Water Quality During the Seed Production Period of Dark-banded Rockfish *Sebastes inermis* in Large Scale Tanks

Sung-Yong Oh* and Choong Hwan Noh

Marine Resources Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

An experiment was carried out to investigate changing of water quality during the seed production of dark-banded rockfish, *Sebastes inermis* in large scale tanks. Ten broodstock of dark-banded rockfish were held in three circular tanks (diameter 6.5 m; depth 2 m; water volume 50 ton) each (stocking density 0.061 kg/m³). During the experiment, the temperature ranged from 14.2 to 16.1°C. The fingerlings were fed with rotifers only during 1 to 9 days after parturition, rotifers with *Artemia nauplii* during 10 to 20 days after parturition, *Artemia nauplii* only during 21 to 35 days after parturition, *Artemia nauplii* with commercial diet during 36 to 80 days after parturition and commercial diet only during 81 to 85 days after parturition. Water quality (dissolved oxygen, pH, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, and PO₄³⁻-P) in rearing tanks measured every 5 days in long term monitoring investigation or every 2 hours in diurnal monitoring investigation. In 85 days after parturition, the body weight of fish grew up to 0.88 g and specific growth rate was 8.0%/day in body weight. In long term monitoring investigation, with the increase of the amount of supplied commercial diet, the concentration of dissolved oxygen (DO) and pH decreased, but the concentration of NH₄⁺-N (4.5 to 76.3 μM), NO₂⁻-N (0.02 to 0.06 μM), NO₃⁻-N (3.0 to 5.9 μM), and PO₄³⁻-P (0.41 to 0.59 μM) increased. In the diurnal monitoring investigation, the concentration of NH₄⁺-N showed great fluctuation and ranged from 3.0 to 9.1 μM when fed rotifers, 16.3 to 45.8 μM when fed *Artemia nauplii* and 36.5 to 120.1 μM when fed commercial diet. After daily feeding with each of feed, the amount of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and phosphorus (P) wastage were 7.0 g and 0.7 g when fed rotifers, 24.7 g and 0.7 g when fed *Artemia nauplii*, and 140.9 g and 2.2 g when fed commercial diet. The amount of DIN and phosphorous wastage during fed commercial diet was significantly higher than that of fed rotifer and *Artemia nauplii* (P<0.05). Results will provide valuable information for water quality management and culture of dark-banded rockfish in commercial seed production systems.

Keywords: *Sebastes inermis*, Water quality, Seed production, Nitrogen, Phosphorus

서 론

해산 어류 양식 산업은 많은 나라에서 급속히 발전하고 있으며, 사육 기술 또한 지속적으로 향상되고 있다. 우리나라 역시 넙치(*Olivaceus paralicthys*), 조피볼락(*Sebastes schlegeli*) 그리고 참돔(*Pagrus major*) 등 다양한 해산 어류의 양식이 활발히 이루어지고 있다.

양식 어류의 성장과 생존 그리고 주변 환경에 가장 큰 영향을 미치는 수질인자는 용존 산소, pH, 용존 무기 질소(NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N)와 PO₄³⁻-P이다. 낮은 용존 산소와 높은 암모

니아 농도는 어류에 스트레스를 유발하고 성장을 방해하며 질병으로 인한 대량 폐사가 발생한다(Thurston et al., 1981). NO₂⁻-N 역시 혈액 내 산소 전달을 방해하는 methemoglobin의 생성을 촉진하여 폐사를 유발할 수 있다(Qin et al., 2005). 고농도의 NO₃⁻-N 역시 어류의 면역 반응을 감소시켜 폐사율을 증가시킬 수 있으며(Hrubec et al., 1996), PO₄³⁻-P와 함께 부영양화(Russo and Thurston, 1991)의 원인이 되어 연안 수질오염을 유발한다.

이제까지 어류 사육에 따른 용존 산소 소비와 용존 무기 질소의 농도 변화에 대한 연구는 많이 이루어져 왔다(Cai and Summerfelt, 1992; Handy and Poxton, 1993). 이들 연구는 주로 실험실 규모로 실시되었으며, 상업적 규모에서 조사한 자료는 부족하다. 특히 해산어 종묘 생산을 위해 먹이로 이용되는

*Corresponding author: syoh@kordi.re.kr

로티퍼와 알테미아 그리고 배합 사료 공급에 따른 수질 변화에 대한 연구는 거의 없다.

블락(*Sebastes inermis*)은 최근에 대량 종묘 생산이 이루어진 해산 어종이다. 블락은 양식 대상 종으로서 뿐만 아니라 정착성이 강해 연안 자원 증대를 위한 방류 어종으로 매우 유망하다. 블락은 대량 종묘 생산이 이루어지기는 하였으나 안정적인 생산을 위한 수질에 대한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 실제 상업적 규모의 대형 탱크에서 블락 종묘 생산 과정에서 일어나는 수질 변화의 경향과 로티퍼와 알테미아 그리고 배합 사료 공급에 따른 일간 용존 산소, pH, 용존 무기 질소 그리고 PO₄³⁻-P의 변화를 조사함으로써 안정적인 사육 관리 기술 개발을 위한 기초 자료를 수집하였으며 아울러 주위 환경에 대한 질소와 인의 배출량을 조사하였다.

재료 및 방법

자어 생산

경남 통영시 소재 해상 시설에서 사육 중이던 출산 직전의 암컷 친어(평균 전장, 25.5±1.80 cm; 평균 체중, 363.3±100.63 g)를 원형 콘크리트 수조(6.5 m×2 m, 용량 50톤) 세 곳에 각각 10마리씩 수용한 후 출산을 유도하였다.

먹이 공급 및 자어 성장

자어 사육을 위해 출산 1일째부터 20일째까지 크로렐라(*Chlorella ellipsoidea*)를 사육수 ml 당 1.0~1.2×10⁷개체가 유지되도록 사육수에 첨가하였다. 자어가 성장함에 따라 로티퍼, 알테미아 그리고 배합 사료의 순서로 공급하였다(Table 1). 로티퍼는 사육수 ml 당 6~14개체를 유지하기 위해 출산 7일째까지 일간 평균 약 4×10⁹개체, 그 후 출산 13일째까지 일간 평균 약 10~14×10⁹개체 그리고 알테미아가 많이 공급되기 시작한 출산 14일째부터는 일간 평균 약 3~4.4×10⁹개체를 공급하였다. 알테미아는 사육수 ml당 0.5~2.4개체를 유지하기 위해 출산 10일째에 일간 평균 약 3.8×10⁸개체 공급하였으며, 이후 공급량을 증가시켜 출산 57일째에는 일간 평균 약 2.9×10⁹개체이었다. 배합 사료 공급량이 증가한 출산 65일째부터는 일간 평균 약 5×10⁸개체를 공급하였다. 배합 사료(크기, 300~1000 μm; 단백질, 55.0%; 인, 2.3%)는 출산 36일째에 일간 평균 약 0.5 kg을 공급하였으며,

이후 공급량을 증가시켜 실험이 끝나는 시점인 출산 85일째에 일간 평균 5.6 kg을 공급하였다.

성장 조사를 위해 출산 직후부터 5일 간격으로 전장과 체중을 측정하였으며, 출산 85일 후 전장과 체중에 대한 일간 성장률(specific growth rate, SGR)을 다음 식에 의해 구하였다.

Specific growth rate (%/day)

$$= (\ln \text{ Final X} - \ln \text{ Initial X}) \times 100 / \text{number of days}$$

X = weight or length

조사 기간 동안 수온은 14.2~16.1°C (평균 15.2±0.63°C)이었다. 용존 산소를 보충하기 위하여 순수 산소를 사용하였다. 환수량은 배합 사료 공급량이 증가함에 따라 증가시켰으며, 로티퍼, 알테미아 그리고 배합 사료만을 공급한 기간 동안의 일간 평균 환수량은 각각 50.9±4.49톤(0.9±0.07 회전/일), 51.9±8.19톤(0.9±0.13 회전/일) 그리고 124.2±19.17톤(2.1±0.32 회전/일)이었다.

수질 분석

출산 1일째부터 85일째까지 5일 간격으로 사육수 중의 용존 산소, pH, 용존 무기 질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN)와 PO₄³⁻-P의 농도 변화를 조사하였다. 또한 먹이 종류에 따른 하루 중 수질 변화를 조사하기 위하여 로티퍼는 출산 8일째, 알테미아는 출산 30일째 그리고 배합 사료는 출산 84일째에 사육수를 샘플하였다. 로티퍼는 사육수 ml당 9개체를 유지하기 위해 07시에 평균 6억개체, 11시와 17시에 각각 평균 2억개체씩 나누어 공급하였으며, 알테미아는 사육수 ml당 0.8개체를 유지하기 위해 7시에 평균 8,500만개체, 17시에 평균 1,500만개체를 공급하였다. 배합 사료는 1,000 μm 크기의 사료를 7시, 9시, 11시, 15시 그리고 17시에 각각 평균 1,175 g, 775 g, 950 g, 1,225 g 그리고 1,450 g을 공급하였다. 각 먹이 공급 직전부터 2시간 간격으로 24시간 동안 용존 산소, pH 변화를 조사하였으며, 같은 때에 사육수를 샘플하였다. 각 샘플들은 분석하기 전까지 -30°C 냉동고에 보관하였다.

용존 산소와 수온은 DO meter (OxyGuard Handy Atmosphere, Denmark)를 그리고 pH는 pH meter (Mettler Model: MP120, USA)를 이용하여 측정하였다.

Table 1. Feeding regime during the experimental periods

	Days after parturition									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Rotifer	_____									
Artemia nauplii	_____									
Commercial diet	_____									

환수량은 측정시마다 3회 이상 측정하여 그 평균값을 사용하였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 는 자동영양염분석기(Flow Injection Analysis; Model: QuickChem8000, USA)를 사용하여 분석하였다.

통계 처리

모든 통계 분석은 MINITAB 13 (Statistical Software, USA) 통계 프로그램을 사용하여 one-way ANOVA test를 실시하였다. 평균간 유의성은 Turkey's의 다중검정으로 검정하였다 ($P<0.05$).

결 과

성장

조사 기간 동안 자어의 성장을 조사한 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 출산 1일째 전장과 체중은 각각 5.8 ± 0.14 mm와 0.001 ± 0.0002 g이었다. 조사가 끝난 85일째에 전장은 36.6 ± 2.80 mm이었고, 체중은 0.88 ± 0.143 g이었다. 85일 동안 전장의 일간 성장률(SGR in total length)은 $2.2\pm 0.23\%$ /일 그리고 체중의 일간 성장률(SGR in body weight)은 $8.0\pm 0.63\%$ /일이었다.

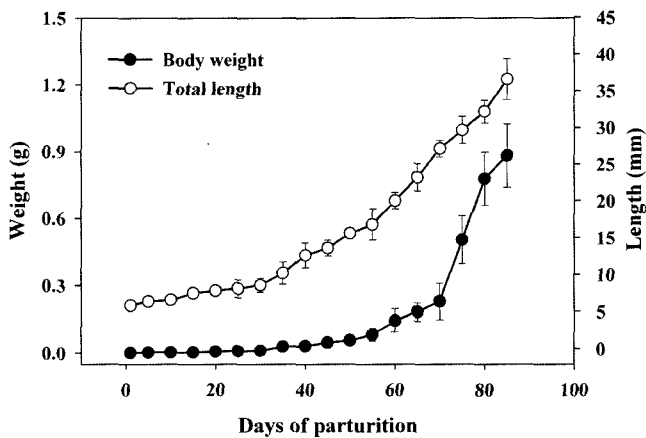


Fig. 1. Growth of dark-banded rockfish during the experimental periods (0-85 days after parturition).

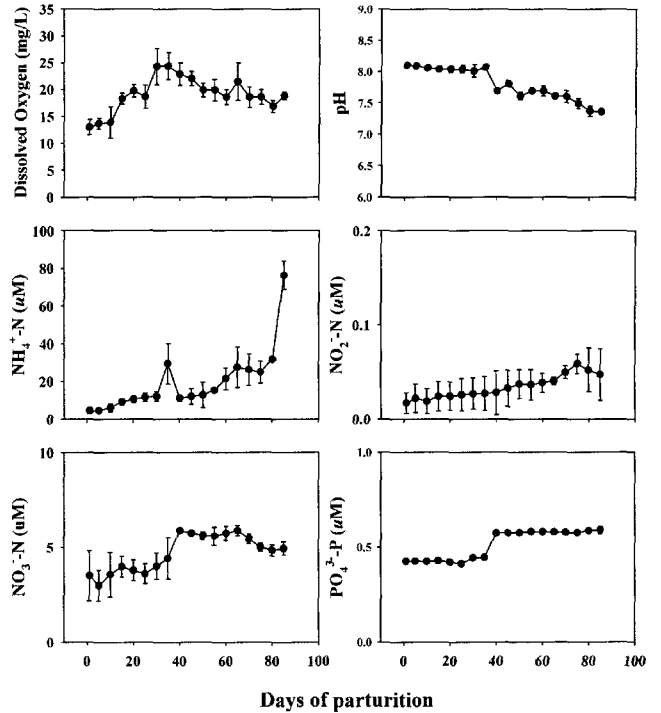


Fig. 2. Average concentration of dissolved oxygen, pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in dark-banded rockfish culture tanks during the experimental periods (0-85 days after parturition). Values are means \pm SD ($n=3$).

종묘 생산 기간 동안의 수질 변화

종묘 생산 기간 동안 사육수 내 용존 산소, pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 변화를 조사한 결과는 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다.

액체 산소를 공급한 사육수의 용존 산소 농도는 13.0~24.4 mg/L 범위였으며, 평균 19.1 ± 3.31 mg/L이었다. 사육수의 pH는 8.1~7.4 범위였으며, 평균 7.8 ± 0.26 이었다. 배합 사료를 공급하기 시작한 36일부터 85일까지 pH는 7.4~7.8(평균 7.6 ± 0.15)로서, 그 이전보다 유의하게 낮았다($P<0.05$).

사육수 내 용존 무기 질소는 각 먹이의 공급량이 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 4.5~76.3 μM 범위를 보였으며, 평균 19.3 ± 16.67 μM 이었다.

Table 2. Average concentration of pH, dissolved oxygen (DO), $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in dark-banded rockfish culture tanks in relation to feed type. Values are means \pm SD ($n=3$)

Feed type ¹	pH	DO	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
		(mg/L) ²				
R	8.1 ± 0.02^a	13.5 ± 0.48^c	5.2 ± 0.92^d	0.02 ± 0.003^b	3.3 ± 0.32^b	0.42 ± 0.001^b
R+A	8.0 ± 0.00^a	19.0 ± 1.03^{ab}	9.9 ± 0.95^c	0.02 ± 0.001^b	3.9 ± 0.14^b	0.42 ± 0.005^b
A	8.0 ± 0.03^a	22.4 ± 3.30^a	17.8 ± 10.17^{bc}	0.03 ± 0.001^b	4.0 ± 0.41^b	0.43 ± 0.018^b
A+C	7.6 ± 0.13^b	19.9 ± 1.94^a	20.4 ± 7.69^b	0.04 ± 0.010^a	5.5 ± 0.37^a	0.58 ± 0.004^a
C	7.4 ± 0.04^c	18.8 ± 0.70^b	76.3 ± 7.55^a	0.05 ± 0.027^a	4.9 ± 0.35^a	0.59 ± 0.018^a

¹R: rotifer, A: *Artemia* nauplii, C: commercial diet.

²Values with different superscripts within the same column are significantly different ($P<0.05$).

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 로티퍼만 공급한 9일 동안(출산 1~9일) 4.5~6.2 μM (평균 $5.2\pm 0.92 \mu\text{M}$) 범위였으며, 로티퍼와 알테미아를 함께 공급한 11일 동안(출산 10일~20일) 9.2~10.6 μM (평균 $9.9\pm 0.95 \mu\text{M}$) 범위였다. 알테미아만 공급한 15일 동안(출산 21일~35일) 11.6~29.5 μM (평균 $17.8\pm 10.17 \mu\text{M}$)이었다. 알테미아와 배합 사료를 함께 공급한 45일 동안(출산 35일~80일)은 11.2~31.7 μM (평균 $20.4\pm 7.69 \mu\text{M}$)이었고, 배합 사료만 공급한 85일째는 평균 $76.3\pm 7.55 \mu\text{M}$ 이었다. 따라서 먹이가 순차적으로 바뀔 때 따라 사육수 내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 유의하게 높아지는 것으로 조사되었다($P<0.05$).

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 0.02~0.06 μM 범위를 보였으며, 평균 $0.03\pm 0.012 \mu\text{M}$ 이었다. 로티퍼만 공급한 9일 동안(출산 1일~9일)의 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 평균 $0.02\pm 0.003 \mu\text{M}$ 이었으며, 로티퍼와 알테미아를 함께 공급한 11일 동안(출산 10일~20일)은 평균 $0.02\pm 0.001 \mu\text{M}$ 이었다. 알테미아만 공급한 15일 동안(출산 21일~35일) $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 평균 $0.03\pm 0.001 \mu\text{M}$ 이었다. 알테미아와 배합 사료를 함께 공급한 45일 동안(출산 35일~80일)의 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 0.03~0.06 μM (평균 $0.04\pm 0.010 \mu\text{M}$)이었고, 배합 사료를 공급한 85일째는 평균 $0.05\pm 0.027 \mu\text{M}$ 이었다. 따라서 배합 사료를 공급하면서 사육수 내 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도가 이전에 비해 유의하게 높아졌다($P<0.05$).

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 3.0~5.9 μM 범위를 보였으며, 평균 $4.7\pm 0.97 \mu\text{M}$ 이었다. 로티퍼만 공급한 9일 동안(출산 1일~9일)은 3.0~3.6 μM (평균 $3.3\pm 0.32 \mu\text{M}$) 범위였으며, 로티퍼와 알테미아를 함께 공급한 11일 동안(출산 10일~20일)은 3.8~4.0 μM (평균 $3.9\pm 0.14 \mu\text{M}$) 범위였다. 알테미아만을 공급한 15일 동안(출산 21일~35일)은 3.6~4.4 μM (평균 $4.0\pm 0.41 \mu\text{M}$) 범위였다. 알테미아와 배합 사료를 함께 공급한 45일 동안(출산 35일~80일)은 4.8~5.9 μM (평균 $5.5\pm 0.37 \mu\text{M}$) 범위였고, 배합 사료를 공급한 출산 85일째는 평균 $4.9\pm 0.35 \mu\text{M}$ 으로 나타났다. 따라서 먹이가 순차적으로 바뀔 때 따라 사육수 내 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 유의하게 높아지는 경향을 보였다($P<0.05$).

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 0.41~0.59 μM 범위를 보였으며, 평균 $0.51\pm 0.078 \mu\text{M}$ 이었다. 로티퍼와 알테미아를 공급한 초기 35일 동안의 사육 수조 내 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 0.41~0.44 μM 범위로서 평균 $0.43\pm 0.011 \mu\text{M}$ 인 반면, 배합 사료를 공급한 36일 이후부터 85일까지는 0.57~0.59 μM 범위로서 평균 $0.58\pm 0.015 \mu\text{M}$ 를 보였다. 따라서 배합 사료를 공급하면서부터 사육수 내 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도가 그 이전에 비해 유의하게 높아졌다($P<0.05$).

일간 수질 변화

먹이 종류에 따른 일간 용존 산소 농도와 pH 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 로티퍼 공급에 따른 사육 수조 내 일간 용존 산소 농도는 19.8~20.8 mg/L의 범위를 보였고, 평균 $20.3\pm 1.60 \text{mg/L}$ 이었다. 용존 산소 농도는 7시에 로티퍼 공급이 이루어지고 난 뒤 감소하기 시작하여 11시 먹이 공급이 이루어지고 난 뒤 가장 낮은 $19.8\pm 1.42 \text{mg/L}$ 를 보였고, 17시에 먹이 공급을

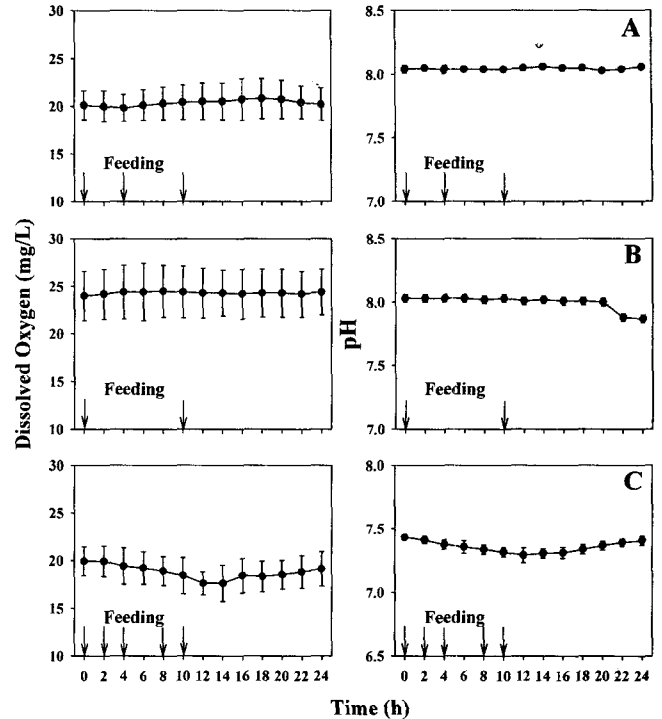


Fig. 3. Average diurnal changes of dissolved oxygen concentration and pH in dark-banded rockfish culture tanks. The fish were fed rotifers 3 times (A), *Artemia nauplii* 2 times (B), and commercial diet 5 times a day (C). Values are means \pm SD (n=3).

한 후 다음 날 7시까지 20.2~20.8 mg/L의 범위로서 큰 변화를 보이지 않았다. pH는 8.0~8.1의 범위를 보였고, 평균 8.1 ± 0.02 로서 로티퍼 공급과 상관없이 거의 일정한 수준을 보였다.

알테미아 공급에 따른 사육 수조 내 일간 용존 산소 농도는 24.0~24.5 mg/L의 범위를 보였고, 평균 $24.3\pm 2.59 \text{mg/L}$ 로서 알테미아 공급과 상관없이 사육 수조 내 용존 산소 농도는 거의 일정하게 유지되었다. pH는 7.9~8.0의 범위를 보였고, 평균 8.0 ± 0.03 이었다. 사육 수조 내 pH는 알테미아 공급이 이루어진 7시부터 17시까지 평균 8.0 ± 0.03 로서 거의 일정한 값을 보였으나, 17시 이후부터 낮아지기 시작하여 초기 먹이 공급 후 24시간째에 평균 7.9 ± 0.03 까지 감소하였다.

배합 사료 공급에 따른 사육 수조 내 일간 용존 산소 농도는 17.6~19.9 mg/L 범위를 보였고, 평균 $18.8\pm 1.73 \text{mg/L}$ 로서 로티퍼와 알테미아 공급 시기와 비교해 가장 낮게 유지되었으며 높은 변화 폭을 보였다. 배합 사료 공급이 이루어진 7시부터 17시까지 사육 수조 내 용존 산소 농도는 지속적으로 감소하여 19시와 21시에 가장 낮은 $17.6\pm 1.62 \text{mg/L}$ 를 보인 이후 점차적으로 상승하여 초기 먹이 공급 후 24시간째에 $19.1\pm 1.83 \text{mg/L}$ 로 높아졌다. pH는 7.3~7.4의 범위를 보였고, 평균 7.4 ± 0.04 로서 로티퍼와 알테미아 공급 시기에 비해 가장 낮은 pH 범위를 보였다. 배합 사료 공급이 이루어진 7시부터 17시까지 pH는 지속적으로 낮아져 19시에 가장 낮은 7.3 ± 0.06 을 보인 다음 점차적으로 상승하여 24시에 7.4 ± 0.04 로 회복되었다.

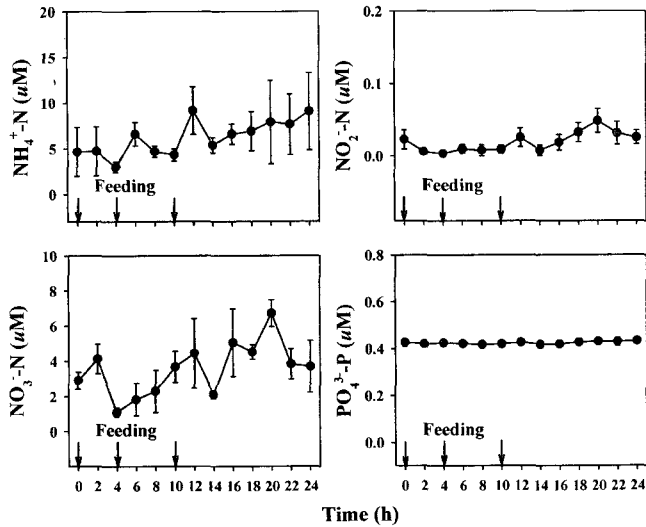


Fig. 4. Average diurnal changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations in dark-banded rockfish culture tanks when the fish were fed rotifers. The fish were fed 3 times a day (07:00, 11:00 and 17:00). Values are means \pm SD (n=3).

로티퍼 공급에 따른 사육 수조 내 일간 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 변화는 Fig. 4에 나타내었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 3.0~9.1 μM 범위를 보였고 평균 $6.2\pm 2.10 \mu\text{M}$ 이었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 로티퍼 공급 후 상승하는 경향을 보였으며, 로티퍼를 최종 공급한 후인 19시에 가장 높은 $9.2\pm 2.63 \mu\text{M}$ 의 농도를 보였다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 0.003~0.048 μM 범위를 보였고 평균 $0.02\pm 0.013 \mu\text{M}$ 이었다. 최초 로티퍼 공급 20시간 후 $0.05\pm 0.017 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였다. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 1.1~6.7 μM 범위를 보였고 평균 $3.6\pm 1.51 \mu\text{M}$ 이었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도와 마찬가지로 로티퍼 공급 후 상승하는 경향을 보였으며, 최초 로티퍼 공급 20시간 후 $6.7\pm 0.76 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였다. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 0.42~0.43 μM 범위를 보였고 평균 $0.42\pm 0.008 \mu\text{M}$ 로서 로티퍼 공급에 따른 일간 큰 변화는 보이지 않았다.

알테미아 공급에 따른 사육 수조 내 일간 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 변화는 Fig. 5에 나타내었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 16.3~45.8 μM 범위를 보였고 평균 $29.5\pm 8.35 \mu\text{M}$ 이었다. 로티퍼 공급 때와 마찬가지로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 알테미아 공급 직후 상승하는 경향을 보였으며, 최초 알테미아를 공급한 뒤 22시간 후 $45.8\pm 6.60 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 0.01~0.05 μM 범위를 보였고 평균 $0.03\pm 0.016 \mu\text{M}$ 이었다. 최초 알테미아 공급 2시간 후 $0.05\pm 0.021 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였다. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 2.8~6.0 μM 범위를 보였고 평균 $4.4\pm 1.09 \mu\text{M}$ 로서, 로티퍼 공급 때와 같이 알테미아 공급 후 높아지는 경향을 보였다. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 0.42~0.48 μM 범위를 보였고 평균 $0.44\pm 0.013 \mu\text{M}$ 로서 알테미아 공급에 따른 일간 큰 변화는 보이지 않았으나, 점차 높아지는 경향을 보였다.

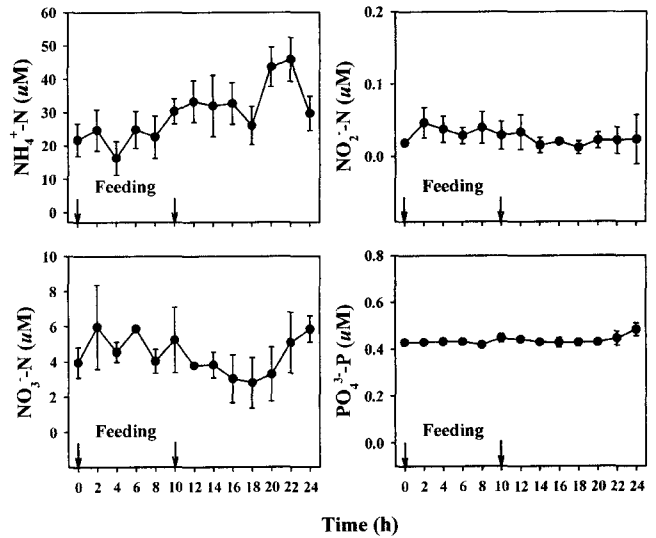


Fig. 5. Average diurnal changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations in dark-banded rockfish culture tanks when the fish were fed *Artemia* nauplii. The fish were fed 2 times a day (07:00 and 17:00). Values are means \pm SD (n=3).

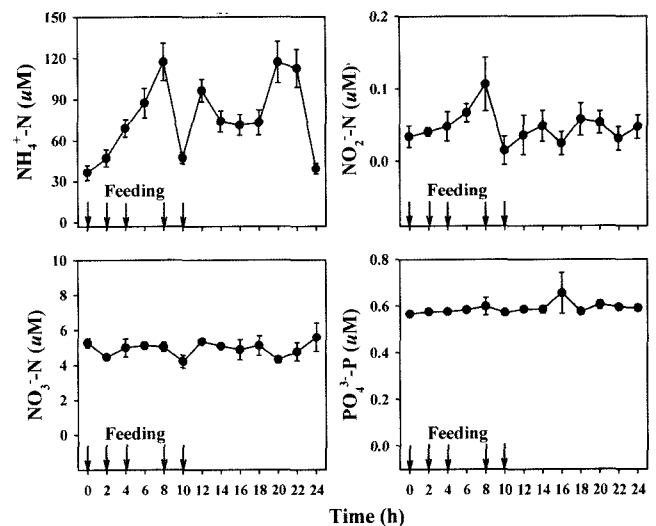


Fig. 6. Average diurnal changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations in dark-banded rockfish culture tanks when the fish were fed commercial diet. The fish were fed 5 times a day (07:00, 09:00, 11:00 15:00 and 17:00). Values are means \pm SD (n=3).

배합 사료 공급에 따른 사육 수조 내 일간 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 변화는 Fig. 6에 나타내었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 36.5~120.1 μM 범위를 보였고 평균 $76.1\pm 29.11 \mu\text{M}$ 이었다. 초기 세 번의 배합 사료 공급이 이루어지는 동안 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 급속히 상승하였고, 최초 먹이 공급 8시간 후 $120.1\pm 15.11 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였으며 이후 15시와 17시에 배합 사료 공급이 이루어진 후 다시 상승하였다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 0.02~0.11 μM 범위를 보였고 평균 $0.05\pm 0.023 \mu\text{M}$ 이었다. 최초 배합 사료 공급 8시간 후 $0.11\pm 0.037 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도

Table 3. Dissolved inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$) and phosphorus wastage when the dark-banded rockfish were fed rotifers, *Artemia nauplii* and commercial diet

Feed type ¹	Mean concentration (mg/L)		Water exchange rate (ton/day)	Wastage (g/day)	
	DIN	P		DIN ²	P ²
R	0.14±0.043	0.01±0.001	50.9±4.49	7.0±2.20 ^c	0.7±0.05 ^b
A	0.48±0.116	0.01±0.001	51.9±8.19	24.7±6.71 ^b	0.7±0.09 ^b
C	1.14±0.402	0.02±0.001	124.2±19.17	140.9±50.38 ^a	2.2±0.21 ^a

¹R: rotifer, A: *Artemia nauplii*, C: commercial diet.

²Values with different superscripts within the same column are significantly different ($P < 0.05$).

를 보였고 이후 배합 사료 공급 후 다시 상승하는 경향을 보였다. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 농도는 4.2~5.6 μM 범위를 보였고 평균 $4.9 \pm 0.35 \mu\text{M}$ 이었다. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 농도는 0.57~0.66 μM 범위를 보였고 평균 $0.59 \pm 0.018 \mu\text{M}$ 로서 배합 사료 공급에 따른 일간 큰 변화는 보이지 않았으나, 높아지는 경향을 보였다.

일간 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 농도 변화에 따라 배출되는 용존 무기 질소와 인 양을 Table 3에 나타내었다. 로티퍼, 알테미아 그리고 배합 사료 공급에 따라 사육 수조 내 평균 DIN 농도는 각각 0.14 mg/L (9.79 μM), 0.48 mg/L (33.93 μM) 그리고 1.14 mg/L (81.04 μM)로 나타났으며, 이때 배출되는 용존 질소량은 7.0 g/일, 24.7 g/일 그리고 140.9 g/일로서 각 먹이 종류별 유의적인 차이를 보였으며, 배합 사료 공급 시기에 가장 많은 배출량을 보였다($P < 0.05$). 인 배출량 역시 배합 사료 공급 시기에 가장 많은 양을 보였으나($P < 0.05$), 로티퍼와 알테미아 공급 시기 사이에는 유의적인 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$).

고 찰

사육 수조 내 수질 요인(용존 산소, pH, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)의 농도는 먹이의 종류와 양의 변화 그리고 환수량에 따라 달라졌다.

용존 산소 농도는 순수 산소 사용으로 포화 농도 보다 높게 유지되었으나, 먹이 생물(로티퍼, 알테미아)의 양이 줄고 배합 사료의 공급량이 증가하면서 감소하는 경향을 보였다. pH 역시 배합 사료 공급량이 증가할수록 감소하여 사육수가 산성화되는 경향을 보였다. 본 실험 기간 중에는 불락 종묘 생산 시작 40 일 후부터 용존산소와 pH가 감소하기 시작하였는데, 이것은 사육 수조 내 불락 생체량 및 배합 사료 공급량의 증가에 따라 사육 생물의 호흡과 이산화탄소의 생성 그리고 배설 사료 찌꺼기에 의해 암모니아와 같은 대사산물로 인한 산소 소모량의 증가와 유기물의 산화 작용에 의한 것으로 생각된다. 특히 pH는 0.6 이상 감소하는 결과를 보였기 때문에 배합 사료 공급 시기 동안 적절한 pH 관리가 필요할 것으로 사료된다. 이와 유사하게 Person-Le Ruyet et al. (1997) 역시 터봇의 생체량 및 먹이 공급량의 증가가 시스템 내 용존 산소와 pH가 감소한다고 보고한 바 있다.

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 농도 역시 먹이 생물과 배합 사료의 공급량이 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 Sumagaysay and Lourdes San Diego (2003)의 연구와 유사하였다. 이 결과는 성장 단계별 불락 자치어의 먹이 섭취율 및 이용 효율 그리고 먹이 공급량과 공급된 각 먹이의 영양적 차이와 특성뿐만 아니라 환수를 등과 같은 사육 조건에 따라 달라진 것으로 생각된다. 일반적으로 어류는 성장함에 따라 먹이 이용 효율은 감소하지만(Lovell, 1989) 이와 같은 자치어기에는 먹이에 대한 섭취 능력에 따라 생존율 및 성장률 향상을 기대할 수 있으며 이것에 따라 먹이 이용 효율이 달라진다. 이와 아울러 Aragão et al. (2004)은 로티퍼와 알테미아의 단백질 함량은 영양 강화 및 절식에 따라 각각 28.0~37.1%와 29.6~38.5%로 보고하고 있어 본 실험에 이용된 배합 사료(55.0%)에 비해 낮은 것으로 나타났다. 따라서 배합 사료 공급 시기에 사육 생물의 배설에 의한 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 농도가 높아지는 것으로 생각되며, 이와 같이 먹이 내 단백질 함량이 높을수록 많은 양의 암모니아를 배설하는 것은 여러 연구자들에 의해 보고되어 왔다(Brunty et al., 1997; Cai et al., 1996). 그리고 로티퍼와 알테미아와 같은 먹이 생물은 살아있는 상태로 장시간 사육 수조 내 유지가 가능한 반면 배합 사료는 사육 생물이 먹지 않고 허실될 경우 분해되어 빠른 시간 내 오염을 유발할 가능성이 높은 특성을 지닌다. 따라서 배합 사료의 공급이 많아질수록 사육 수조 내 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 농도가 높아지고 이와 아울러 미생물의 분해 작용에 따라 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 농도가 함께 상승하는 것으로 생각되며, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 농도 역시 같은 원인으로 상승하는 것으로 사료된다. 특히, 40일 전후에 나타난 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 농도 변화는 배합 사료 공급량 증가에 따라 사육 생물의 배설량 증가와 허실된 사료에 의해 급격한 증가를 보인 것으로 생각되며, 이후 환수량 증가와 사육 수조 내 미생물의 분해 작용에 의해 감소한 것으로 사료된다. 이와 동시에 나타난 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 그리고 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 농도 역시 같은 원인으로 상승하는 것으로 생각되며, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 농도에 비해 급격한 상승폭은 보이지 않아 종묘 생산 기간 중 가장 주의해야 할 용존 무기 질소 화합물로 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 인 것으로 생각된다.

사육 수조 내 일간 수질 요인의 변화는 먹이의 종류와 공급에 따라 크게 영향을 받았다. 사육 수조 내 용존 산소와 pH 농도는 로티퍼와 알테미아 공급의 경우 큰 일간 변화를 보이지

않았다. 그러나 배합 사료의 경우 먹이 공급 후 용존 산소 감소와 pH 하락 폭이 컸으며, 로티퍼와 알테미아 공급 시기보다 낮게 유지되었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 역시 배합 사료 공급 시기에 큰 일간 변화를 보였다. 그러나 로티퍼와 알테미아 그리고 배합 사료에 상관없이 먹이 공급 직후 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 상승하는 결과를 보였으며, 이는 다른 연구 결과와 일치하였다(Oh et al., 2004; Dosdat et al., 1996). 일간 수질 변화에서도 역시 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 가장 큰 증가와 변화폭을 보여 각각의 먹이 공급 조건에 따른 환수 및 적정 먹이 공급 방법이 개발되어야 할 것으로 생각된다.

종묘 생산 기간 동안 각 먹이 종류에 따라 배출되는 용존 무기 질소와 인의 양은 배합 사료 공급 기간 동안이 유의적으로 높은 것으로 나타났다. 이것은 앞서 말한 바와 같이 먹이의 특성과 사육 생물의 성장 단계별 이용 효율 그리고 공급된 먹이량에 따라 달라진 것으로 생각된다. 그러나 실제 종묘 생산 시설에서 각 먹이 공급 기간 동안 배출되는 질소 및 인 양은 고형 노폐물이 포함되어 있기 때문에 더 많을 것으로 생각된다. 본 실험 결과 나타난 상업적 규모의 불락 생산 시스템 내 수질 요인들의 변화 패턴 및 배출량은 해산어 종묘의 안정적인 생산을 위한 시스템 내 수질 및 사육 관리 그리고 처리 시스템 개발을 위한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

본 연구는 상업적 규모의 대형 탱크에서 불락 종묘 생산 기간 동안 사육 시스템 내 일어나는 수질 환경 변화를 알아보았다. 3개의 원형 수조(지름 6.5 m, 높이 2 m, 수량 50톤)에 불락 친어를 10마리씩(평균 무게 363.3 g, 수용밀도 0.061 kg/m³) 수용하여 종묘 생산을 하였으며, 실험 기간 동안 수온은 14.2~16.1°C를 유지하였다. 먹이는 출산 1일부터 9일까지 로티퍼만, 출산 10일부터 20일까지 로티퍼와 알테미아를 병행하여, 출산 21일부터 35일까지 알테미아만, 출산 36일부터 80일까지 알테미아와 배합 사료를 병행하여 그리고 출산 81일부터 조사가 끝난 85일까지 배합사료만 공급하였다. 종묘 생산 기간 동안과 각 먹이 공급에 따른 일간 수질 변화를 조사하기 위하여 용존 산소, pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 조사하였다. 불락 치어는 85일령에 0.88 g까지 성장하였고, 체중의 일간 성장률은 8.0%/일이었다. 배합 사료 공급량이 많아질수록 사육수의 평균 용존 산소(24.4~13.0 mg/L)와 pH (8.1~7.4) 농도는 감소하였고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (4.5~76.3 μM), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (0.02~0.06 μM), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (3.0~5.9 μM), 그리고 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (0.41~0.59 μM) 농도는 지속적으로 증가하였다. 일간 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도 변화가 가장 컸으며, 로티퍼의 경우 3.0 μM에서 9.1 μM까지, 알테미아 경우 16.3 μM에서 45.8 μM까지, 그리고 배합 사료 공급시에는 36.5 μM에서 120.1 μM까지 상승하였다. 일간 수질 변화에 따른 용존 무기 질소(로티퍼; 7.0 g/일, 알테미아; 24.7 g/일, 배

합 사료; 140.9 g/일)와 인(로티퍼; 0.7 g/일, 알테미아; 0.7 g/일, 배합 사료; 2.2 g/일) 배출량은 배합 사료 공급 시기에 유의적으로 높았다(P<0.05). 이와 같은 결과는 상업적 불락 대량 종묘 시설에서 사육 시스템 내 수질 및 사육 관리를 위한 중요한 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-07)인 “경남 연안의 불락 자원증대 및 양식생산성 향상 연구”와 해양수산부의 연구 용역 과제인 “통영해역의 바다목장화 개발 연구”의 일부 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Aragão, C., L. E. C. Conceição, M. T. Dinis and H. J. Fyhn, 2004. Amino acid pools of rotifers and *Artemia* under different conditions: nutritional implications for fish larvae. *Aquaculture*, 234, 429–445.
- Brunty, J. L., R. A. Bucklin, J. Davis, C. D. Baird and R. A. Nordstedt, 1997. The influence of feed protein intake on tilapia ammonia production. *Aquacult. Eng.*, 16, 161–166.
- Cai, Y. J. and R. C. Summerfelt, 1992. Effects of temperature and size on oxygen consumption and ammonia excretion in wall-eye. *Aquaculture*, 104, 127–138.
- Cai, Y. J., J. Wermerskirchen and I. R. Adelman, 1996. Ammonia excretion rate indicates dietary protein adequacy for fish. *Prog. Fish-Cult.*, 58, 124–127.
- Dosdat, A., F. Servais, R. Metailler, C. Huelvan and E. Desbruyeres, 1996. Comparison of nitrogen losses in five teleost fish species. *Aquaculture*, 141, 107–127.
- Handy, R. D. and M. G. Poxton, 1993. Nitrogen pollution in mariculture: toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 3, 205–241.
- Hrubec, T. C., S. A. Smith and J. L. Robertson, 1996. Nitrate Toxicity: A Potential Problem of Recirculating System. pp. 41–48. (in) G. S. Libey and M. B. Timmons (ed.), *Proceedings from the Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture Conference*. July 19–21, 1996. Roanoke, Virginia.
- Lovell, T., 1989. *Nutrition and Feeding of Fish*. Van Nostrand Reinhold, New York, 260 pp.
- Oh, S. Y., C. H. Noh, K. P. Hong and J. M. Kim, 2004. Total ammonia nitrogen excretion rates and feces production rates as an index for comparing efficiency of dietary protein utilization of offsprings from selected Korean strain, cultured Japanese strain and their intraspecific hybrid strain of juvenile red sea bream, *Pagrus major*. *Ocean & Polar Res.*, 26, 415–423.
- Person-Le Ruyet, J., R. Galland, A. Le Roux and H. Chartois, 1997. Chronic ammonia toxicity in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*). *Aquaculture*, 154, 155–171.
- Qin, G., C. C. Liu, N. H. Richman and J. E. T. Moncur, 2005. *Aquaculture wastewater treatment and reuse by wind-driven*

- reverse osmosis membrane technology: a pilot study on Coconut Island, Hawaii. *Aquacult. Eng.*, 32, 365–378.
- Russo, R. C. and R. V. Thurston, 1991. Toxicity of ammonia, nitrite, and nitrate to fishes. *Aquacult. Water Qual.*, 1, 58–89.
- Sumagaysay, N. S. and M. Lourdes San Diego, 2003. Water quality and holding capacity of intensive and semi-intensive milkfish (*Chanos chanos*) ponds. *Aquaculture*, 219, 413–429.
- Thurston, R. V., R. C. Russo and G. A. Vinogradov, 1981. Ammonia toxicity of fishes: effect of pH on the toxicity of the un-ionized ammonia species. *Environ. Sci. Technol.*, 15, 837–840.
-
- 원고접수 : 2005년 11월 30일
수정본 수리 : 2006년 1월 13일