

사육수의 암모니아 농도가 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)의 성장과 혈액성분에 미치는 영향

박성덕 · 김병기¹ · 전중균*

강릉원주대학교 해양생물공학과, ¹강원도립대학 해양생명과학과

Effect of Ammonia Concentration in Rearing Water on Growth and Blood Components of the Parrotfish *Oplegnathus fasciatus*

Seongdeok Park, Pyong Kih Kim¹ and Joong-Kyun Jeon*

Department of Marine Biotechnology, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

¹Department of Marine Bio-Science, Gangwon Provincial College, Gangneung 210-804, Korea

This study investigated growth and hematological changes in parrotfish *Oplegnathus fasciatus* (~200 g/fish) reared under different total ammonia nitrogen (TAN) concentrations (0, 4, or 8 mg/L) for 6 weeks. Survival rates of parrotfish in all experimental groups did not significantly differ, as they were all ~100%. Although specific growth rate (SGR), weight gain, and daily feed intake in the high TAN concentration group (TAN8) were significantly lower than in the other two groups, there was no significant difference between the TAN4 group and the control group, (TAN0), indicating that parrotfish have a strong resistance to ammonia toxicity. As for temporal changes of the major blood components, cortisol increased as a result of stress caused by the high ammonia concentration in the TAN8 group. For this reason, the concentrations of energy sources such as glucose and total cholesterol were reduced. However, there was little difference among all experimental groups in concentrations of liver function glutamic oxaloacetic transaminase (GOT) and glutamic pyruvic transaminase (GPT), and nutrient factors, such as total protein and albumin.

Key words: *Oplegnathus fasciatus*, Parrotfish, Total ammonia nitrogen, Growth, Blood chemistry

서 론

총 암모니아성 질소(TAN, total ammonia nitrogen)는 양식 생물에 의해 배설되는 주요 질소 대사 산물이며(Colt and Armstrong, 1981; Foss et al., 2004), 수중 용존산소가 충분할 경우 어류의 생존과 생산성에 영향을 주는 첫 번째 제한요인이다(Park, 2005). 암모니아는 어체에 축적되어 유독성을 나타내는데(Randall and Wright, 1987; Paust et al., 2011), 단기 증상으로는 아가미 호흡의 증가, 불규칙한 움직임, 평형감 상실, 먹이 섭취의 감소(Meade, 1985; Russo and Thurston, 1991) 등이 나타날 수 있으며, 만성적으로 노출될 시에는 성장 감소(Lang et al., 1987), 중추신경계의 손상(McKenzie et al., 1993) 및 폐사에 이르게 된다(IP et al., 2001).

돌돔은 남해안에서 해상가두리와 육상 수조식으로 주로 양식

하고 있는 온수성 어류로, 적정 수온이 20℃ 이상이라서(Kim, 2011), 동절기 저수온에서는 생존율이 낮은 문제가 있기 때문에(Kang et al., 1998; Oh et al., 2006), 동절기에 돌돔의 생산성을 높이기 위해서 육상양식장에서는 가온을 실시하여 사육하기도 한다. 이럴 경우에는 에너지 비용이 경영상 부담이 될 수가 있으므로, 에너지 절약형 사육시스템의 도입이 필요한데, 순환여과시스템은 다양한 수처리 시설을 이용하여 물을 지속적으로 재사용하는 생산시스템으로 외부로 빠져나가는 열에너지를 최소화하여 난방 효율을 극대화시킬 수 있어(Suh et al., 2001), 돌돔의 육상 수조식 양성에서는 매우 적합한 시스템이다(Kim, 2011). 또한 환수를 최소한으로 조절함으로써 외부 환경에 대한 간섭을 적게 받을 수 있고 유입되는 질병의 원인을 사전에 차단할 수 있다는 장점이 있어 세계적으로도 관심을 모으고 있다(Van Rijn, 1996).

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.0840>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Kor J Fish Aquat Sci 47(6) 840-846, December 2014

Received 28 November 2014; Revised 8 December 2014; Accepted 8 December 2014

*Corresponding author: Tel: +82. 33. 640. 2412 Fax: +82. 33. 640. 2955

E-mail address: jkjeon@gwnu.ac.kr

다만, 순환여과시스템은 양식 생물의 최적 성장을 위한 적절한 수질관리가 필요하므로, TAN과 같은 대사산물은 수중으로부터 신속하고 효과적으로 제거되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 돌돔을 순환여과시스템에 적용하여 생산하는데 필요한 TAN 농도 기준을 제시하고자 TAN 농도에 따른 돌돔의 성장과 혈액학적 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

사육시스템 및 수질

실험에는 Park et al. (2013)과 동일한 규격(총 수량 4,500 L)의 독립된 3개의 순환사육시스템을 활용하였고, 실험기간 중의 수온, 용존산소(DO, dissolved oxygen), 염분 및 pH 측정은 하루 두 차례(09:00, 17:00)의 사료 공급 30분 후에 다항목수질측정기(YSI 556MPS, USA)로 측정하였으며, TAN는 분광광도계(HACH DR 4000U, USA)로 매일 1회 측정하였다. 어류에게 유독한 비이온화 암모니아(NH₃, UIA)의 농도는 Johansson and Wedborg (1980)에 따라 계산하였으며, 실험기간 동안의 수질은 Table 1과 같다.

실험 어류 및 암모니아 주입

경상남도 통영의 가두리에서 사육중인 약 200 g의 돌돔을 구입하여 실험에 이용하였다. 수조(1.0 m×1.0 m×1.0 m) 별로 100마리씩(사육밀도 33 kg/m³) 3반복으로 수용하였고, 6주간 해산어류용 상품 사료(우성사료, 조단백 43.5±0.6%, 조지질 11.8±0.1%)를 일간 2회(09:00, 17:00) 만복 공급하였다. 용존 산소(DO)의 공급은 산소발생기(OXUS Aqua-7L, Korea)를 이용하여 포화도 80% 이상으로 유지하였고, 산소포화도는 휴대용 OxyGuard (OxyGuard A/S, Birkerød, Denmark) 로 매일 아침마다 측정하여 확인하였다.

실험 TAN 농도는 사전예비실험을 통하여 사료 섭취량이 정상시의 70% 이하로 떨어지는 약 8 mg/L를 기준으로 하여, 0 mg/L (대조구), 4 mg/L (TAN4) 및 8 mg/L (TAN8)의 3구간을 설정하였다.

그리고 시스템 내 암모니아의 주입은 별도의 150 L 암모니아 탱크에 NH₄Cl 수용액(TAN4는 10%, TAN8는 20%)을 넣고, 정량펌프(AX1-32-PFC-HWS-K, Korea)를 이용하여 시스

템의 sump에 90 mL/min 속도로 주입하였다. 암모니아 용액은 매일 새로 만들어 20:00에 탱크 청소 후 재주입하였으며, sump에 공급된 암모니아는 포말분리기와 여과조를 거쳐 사육수와 충분히 혼합된 후 사육수조로 들어가도록 설계하였다. 환수량은 7L/min으로 설정하여, 시스템 별 일간 약 2.2회의 환수가 되도록 하였다.

성장 및 혈액성분 조사

TAN 농도에 따른 돌돔의 성장을 조사하기 위해 실험 시작 전, 2주, 4주 및 6주 후에 돌돔을 계측하였고, 이때 실험구마다 15 마리씩(수조별 5마리) 총 45마리를 무작위로 선택하여 미부동맥에서 채혈하여 실험에 사용하였다. 혈액은 냉장고에서 3시간 방치하고 응고시킨 뒤 원심분리(3,000 rpm, 10 min)하여 상등부의 혈청(serum)을 분석에 이용하였다. 코티졸(cortisol) 분석은 Jeon et al. (2000)의 방법으로 하였으며, 총 단백질(total protein), 알부민(albumin), 포도당(glucose), 총 콜레스테롤(total cholesterol), glutamic oxaloacetic transaminase (GOT), glutamic pyruvic transaminase (GPT)는 Cobas Integra 800 analyzer (Roche Diagnostics, USA)로 측정하였다.

통계처리

본 실험에 대한 결과는 mean±S.D.로 나타내었고, SPSS ver. 10.0 프로그램을 사용해 ANOVA로 검증한 후, P<0.05 수준에서 Duncan's multiple range test로 유의성 비교를 하였다.

결 과

TAN 농도에 따른 돌돔의 성장

TAN 농도에 따른 돌돔의 성장 결과를 Table 2에 나타내었다. 실험기간 동안 TAN 농도에 따른 생존율 차이는 없었다 (P>0.05). 최초 200 g 내외의 돌돔이 실험 종료 시점인 6주 후에는 대조구, TAN4 및 TAN8 실험구에서 각각 245.4±1.6, 242.4±6.7 및 238.5±5.3 g으로 성장하여 증중량은 TAN8 실험구가 대조구보다 유의하게 낮았다(P<0.05). 그리고 돌돔의 일간성장률은 TAN8 실험구가 대조구와 TAN4 실험구보다 유의하게 낮았고(P<0.05), 일간사료섭취율은 TAN4 및 TAN8 실험구가 대조구보다 유의하게 낮았으나(P<0.05), TAN4와

Table 1. Water environment for the experiment

	Water temp. (°C)	Dissolved oxygen (DO; mg/L)	Salinity(psu)	pH	Total ammonia nitrogen (TAN; mg/L)	Un-ionized ammonia (UIA; mg/L)
Control	22.17±2.34	7.57±0.45	32.37±0.61	8.09±0.61	0.08±0.06	0.004±0.003
TAN4	22.12±2.28	7.26±0.22	32.38±0.61	7.92±0.18	3.61±1.50	0.129±0.054
TAN8	22.07±2.15	7.39±0.31	32.44±0.64	7.82±0.19	8.07±2.85	0.231±0.081

TAN, total ammonia nitrogen; TAN4, TAN concentration of 4 mg/L; TAN8, TAN concentration of 8 mg/L.

TAN8 실험구 사이에는 차이가 없었다($P>0.05$).

TAN 노출에 따른 돌돔의 주요 혈액성분 변화

돌돔의 사육 중 주요 혈액성분의 변화는 Fig. 1과 같다. 우선, 스트레스 지표인 혈중 코티솔의 농도는 실험 시작 시 5.6 µg/dL 였으나, 대조구와 TAN4 실험구는 2주 후에 각각 1.8 µg/dL과 2.5 µg/dL로 차이가 없었고, 이런 경향은 4주와 6주 후에도 변함이 없었다. 그러나 TAN8 실험구에서는 2주 후에 10.2 µg/dL로 다른 두 실험구와 유의적인 차이를 보이면서 급상승했다가, 4주 후에도 비록 낮아지긴 했지만 여전히 두 실험구와 유의적인 차이를 보였고, 6주 후에는 1.2-1.5 µg/dL로 실험구간에 차이가 없었다.

주요 영양성분인 알부민의 농도는 실험 시작 시 1.0 g/dL에서 2주 후 0.8 g/dL수준으로 모든 실험구에서 낮아졌다가, 이후에는 증가경향을 보였다. 그리고 4주 후에는 0.9 g/dL 수준으로 증가하긴 했으나 실험구 간에 유의적인 차이를 보이지 않았고, 6주 후에는 TAN8 실험구에서 1.1 g/dL로 상승하여 대조구와 TAN4 실험구(0.9 g/dL)에 비해 유의적으로 높았다($P<0.05$). 그리고 총단백질의 변화 패턴도 이와 유사하였다.

또 다른 에너지원인 포도당 농도는 대조구에서는 실험 기간 동안 42-43 mg/dL로 큰 변화 폭을 보이지 않았으나, TAN4 실험

구는 23-36 mg/dL, TAN8 실험구에서는 10-32 mg/dL로 대조구에 비해 유의하게 낮았다. 총콜레스테롤 농도에서는 두 암모니아 실험구에서는 4주 후까지는 대조구에 비해 낮은 농도였으나, 6주 후에는 대조구와 차이를 보이지 않았다.

GPT 활성은 실험 시작 시 2.2 IU/L에서 2 주차에는 실험구 별로 2.2-3.0 IU/L 수준이었고, 4 주차에는 전반적으로 세 실험구 모두 약간 증가한 후 6 주차에는 다시 낮아지는 공통된 경향을 보였으며, 실험기간 중 실험구 간에 유의적인 차이는 없었다($P>0.05$). 그러나 GOT 활성은 6 주차에 고암모니아 실험구(TAN8)가 다른 두 실험구에 비해 유의적으로 높았다($P<0.05$).

고 찰

순환여과시스템은 주로 담수어류를 중심으로 발전되어 왔으며(Park, 2005), 특히 북유럽에서는 순환여과 양식을 뱀장어 양식에 도입하여 유럽에서의 뱀장어 총 생산량의 절반 이상을 담당하고 있다(FFI, 1996). 하지만 해수의 경우 염분으로 인한 질산화 효율의 감소로(Son et al., 2000) 대사산물인 TAN을 제거하기 위한 장비의 규모가 커야 하기 때문에 경제성이 떨어진다(Kim, 2011). 따라서 해수어류를 순환여과시스템을 이용하여 사육하려면 대상 어종의 TAN에 대한 내성 수준을 고려하여 수처리 장치의 규모를 설정하는 작업이 먼저 이루어져야만 한다.

먹이를 통해 아미노산 형태로 공급되는 질소는 아미노산과 단백질의 합성에 필수적인 성분이지만(Chin et al., 1998), 어류는 체내 흡수되고 남은 단백질과 체내 조직 단백질의 이화과정을 통해 최종적인 질소대사산물로 암모니아를 배설하게 된다(Forster and Glodstein, 1969). 이렇게 배설된 암모니아는 독성이 있어, 조직의 구조와 기능, 혈액 성장, 삼투압 조절, 내병성, 성장, 번식에 심각한 영향을 미치기도 하여 생산성을 크게 감소시키는 주된 원인이 되며(Russo, 1985; Jeney et al., 1992), 특히 산소포화도가 낮으면 독성은 더욱 크게 발현되는 것이 보고되고 있다(Thurston et al., 1981; Wajsbroet et al., 1991). 그래서 본 실험은 산소포화도를 80% 이상으로 유지시키면서 고농도 암모니아가 어류의 성장에 미치는 영향을 보고자 한 것이다.

수중 암모니아(TAN)에는 이온화되지 않은 암모니아(NH₃, UIA)와 암모늄 이온(NH₄⁺)의 두 가지 형태가 존재하는데(Bower and Bidwell, 1978), 이 중에서 어류에게 해로운 것은 이온화되지 않은 암모니아이다. 본 연구에서 TAN4 및 TAN8 실험구의 UIA농도는 각각 0.13 및 0.23 mg/L인데(Table 1 참조), 이 농도는 여러 어류의 성장이나 건강에 부정적인 영향을 나타낼 정도로 높은 수준이며, 이와 같은 고암모니아 농도에 노출시켜 어류 성장에 미치는 영향을 조사한 연구는 매우 부족하다(Foss et al., 2009). 그러나 환경 내성은 종이나 성장 단계에 따라 다르기 때문에 확인할 필요가 있을 것이라 여겨진다.

본 실험에서는 200 g 내외의 돌돔을 6 주간 사육하였더니, TAN8 실험구는 대조구와 비교하여 평균 증중량, 증중률, 일간 성장률 및 일간사료섭취율 등 전반적인 성장지표가 모두 유의

Table 2. Growth performance of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* reared with 3 different total ammonia nitrogen TAN concentrations for 6 weeks

	TAN concentrations		
	Control	TAN4 ^a	TAN8 ^b
Initial mean weight (g)	203.8±3.7	202.4±1.6	205.7±2.8
Survival (%)	100	99.7±0.6	100
Mean weight gain (g/fish)	41.56±2.10 ^a	40.02±5.09 ^{ab}	32.86±2.54 ^b
Weight gain (%) ¹	20.41±1.40 ^a	19.77±2.36 ^{ab}	15.97±1.02 ^b
Specific growth rate (%/day) ²	0.53±0.03 ^a	0.50±0.01 ^a	0.46±0.06 ^b
Daily feed intake (%/day) ³	2.51±0.02 ^a	2.27±0.04 ^b	2.27±0.03 ^b

Values in each row with the different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

¹100×(final mean weight– initial mean weight)/initial mean weight.

²(loge final weight - loge initial weight) ×100/days.

³Feed intake (day matter)×100/[(initial fish weight+final fish weight+dead fish weight)×days fed/2].

⁴Total ammonia nitrogen concentration of 4 mg/L.

⁵Total ammonia nitrogen concentration of 8 mg/L.

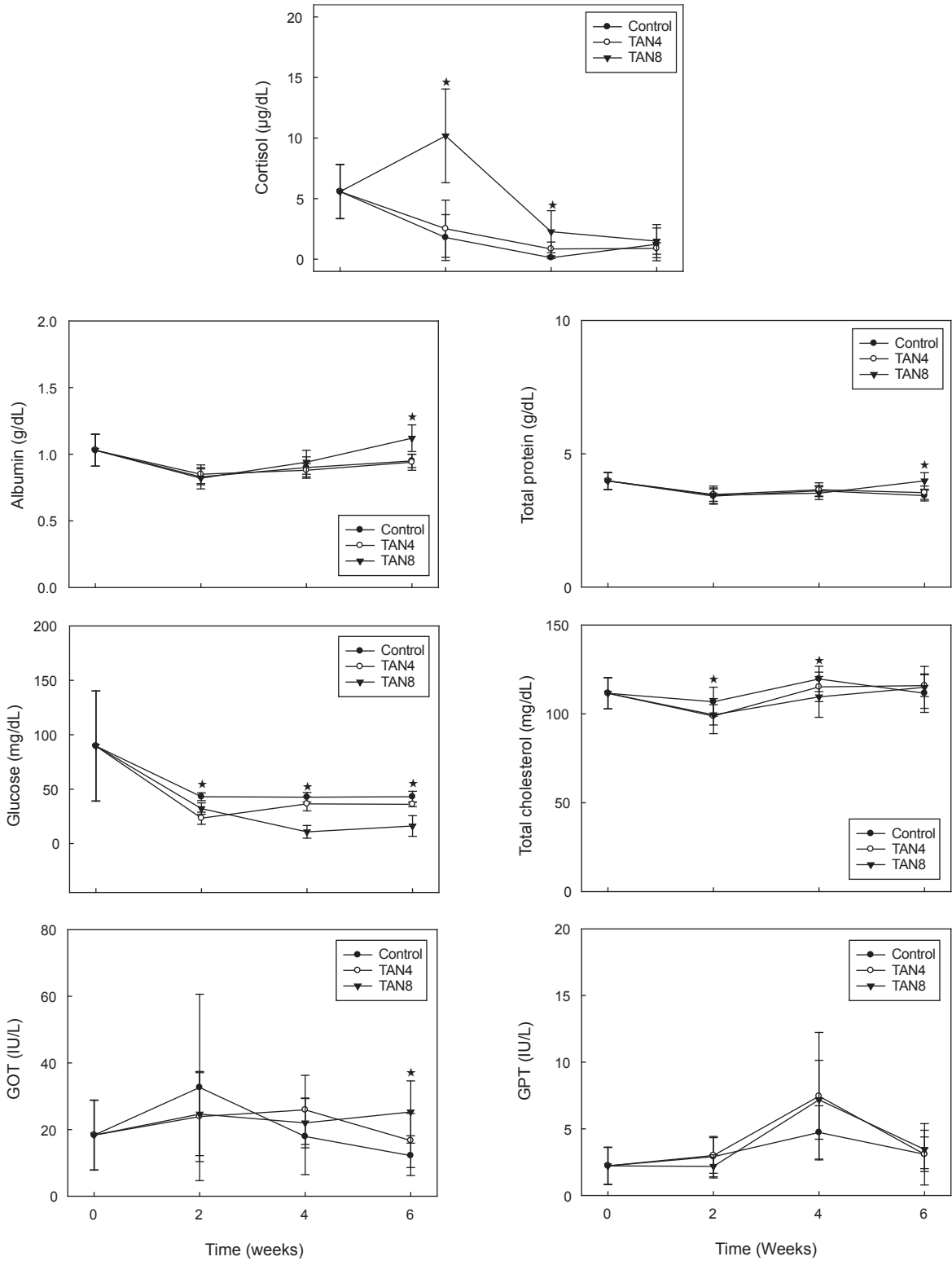


Fig. 1. Fluctuations of some serum components of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* according to total ammonia nitrogen (TAN) concentrations. TAN4, TAN concentration of 4 mg/L; TAN8, TAN concentration of 8 mg/L ($P < 0.05$). GOT, glutamic oxaloacetic transaminase; GPT, glutamic pyruvic transaminase.

적으로 낮았지만($P < 0.05$), TAN4에서는 일간사료섭취율을 제외하고는 대조구와 유의적인 차이를 보이지 않았다($P < 0.05$). 이와 관련해서, Paust et al. (2011)는 약 52 g의 Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*)을 대상으로 UIA 농도 0.06, 0.12 및 0.17 mg/L에서 100 일간 사육하였더니, 일간성장률이 0.06 mg/L에서는 대조구와 차이가 없었지만, 0.12 mg/L에서는 6 주차까지 대조구보다 성장률이 낮았으나 7 주차 이후에는 대조구와 유사한 성장률을 보였고, 0.17 mg/L에서는 10 주차 이후 대조구와 유사한 수준의 성장률을 보고하였다. 본 연구(Fig. 2)에서도 실험 초기인 2 주차에는 대조구와 TAN4의 일간성장률이 0.40-0.46%/day로 유사하였고, 이후 6 주차에도 두 실험구는 유사한 성장패턴을 보였던 것에 비해, TAN8 실험구는 실험 초기부터 종료하기까지 다른 두 실험구와는 유의적인 차이를 보이며 일간성장률이 낮았다. 다만, 일간성장률의 차이는 실험 기간이 길어지면서 점차 작아지는 경향을 보였다(Fig. 2). 이들 결과는 고농도 암모니아에서는 성장에 미치는 영향이 크다는 것을 보여주는데, 이와 관련하여, 본 연구에서 TAN4 실험구의 UIA 농도와 유사한 수준인 0.12 mg/L 정도에서도 성장 감소가 일어난다는 것은 dover sole (*Solea solea*), turbot (*Scophthalmus maximus*) (Alderson, 1979), spotted wolffish (*Anarhichas minor*) (Foss et al., 2003), Atlantic cod (*Gadus morhua*) (Foss et al., 2004), European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) (Lemarié et al., 2004), gilthead sea bream (*Sparus aurata*) (Wajsbrot et al., 1993), Senegalese sole (*Solea senegalensis*) (Pinto et al., 2007) 등 여러 해산어류에서도 확인되고 있다. 그런데 본 연구에서는 고농도의 암모니아는 돌돔의 성장에 직접적으로 영향을 미쳤지만, TAN4 실험구의 성장지표가 대조구와 비교하여 유의적인 차이가 없었던 것은 암모니아 독성에 대해 돌

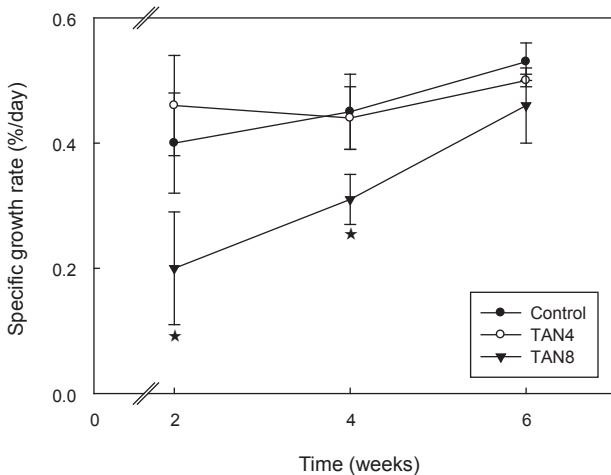


Fig. 2. Fluctuations of specific growth rate of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* according to total ammonia nitrogen (TAN) concentrations. TAN4, TAN concentration of 4 mg/L; TAN8, TAN concentration of 8 mg/L ($P < 0.05$).

돔이 다른 어류들에 비해 내성이 강하다는 것을 보여주는 것이라 여겨진다.

한편, 다른 동물(Selye, 1973)과 마찬가지로, 어류도 스트레스를 받으면 강도나 지속시간에 따라 신경계 및 내분비계가 자극되어 코티졸 등이 과다 분비되고, 이로 인해 삼투질 농도(Avella et al., 1991)나 포도당 및 콜레스테롤과 같은 에너지원 성분도 영향을 받는다는 것이 잘 알려져 있다(Schreck, 1981; Waring et al., 1992).

본 실험에서는 급작스런 스트레스 환경에 노출된 돌돔이 순간적으로 혈중 코티졸의 농도가 11 $\mu\text{g/dL}$ 까지 상승하다가 시간이 흐르면서 2 $\mu\text{g/dL}$ 수준으로 하강하여 안정되었는데, 이런 결과는 Biswas et al. (2008)의 보고와도 잘 일치한다. 그리고 이 결과는 고암모니아 농도가 초기에는 돌돔에게 큰 스트레스로 작용하지만, 돌돔은 고암모니아 환경에 잘 적응하고 있음을 보여준다. 한편, 에너지원으로 사용되는 포도당과 총콜레스테롤의 혈중 농도가 모두 감소하는 경향을 보였고, 특히 포도당 농도에서 감소가 높은 것은, 호흡을 위한 아가미 운동 등으로 많은 에너지를 사용하면서 고갈된 것이 아닐까 여겨진다(Lang et al., 1987). 이와 관련하여, Remen et al. (2008)도 고농도 암모니아(0.115-0.120 UIA mg/L)에 노출시킨 juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*)에서 포도당 농도가 감소했다고 보고하였고, 본 실험과 유사한 결과를 보였다.

이들 결과를 정리하면, 고농도(TAN8)의 암모니아 환경은 어류의 성장에 영향을 미칠 뿐 아니라, 혈액 성분의 농도에도 영향을 미치는 등, 전반적으로 돌돔에게 부정적인 영향을 미치지만 시간 경과에 따라 다소 적응하는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 해양수산부가 지원하는 강원씨그랜트 사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Alderson R. 1979. The effect of ammonia on the growth of juvenile Dover sole, *Solea solea* (L.) and turbot, *Scophthalmus maximus* (L.). *Aquaculture* 17, 291-309.
- Avella M, Schreck CB and Prunet P. 1991. Plasma prolactin and cortisol concentrations of stressed coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) in freshwater. *Gen Comp Endocrinol* 81, 21-27.
- Biswas AK, Seoka M, Ueno K, Yong ASK, Biswas BK, Kim YS, Takii K and Kumai H. 2008. Growth performance and physiological responses in striped knifejaw, *Oplegnathus fasciatus*, held under different photoperiods. *Aquaculture* 279, 42-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.04.007>.
- Bower CE and Bidwell JP. 1978. Ionization of ammonia in seawater effects of temperature, pH and salinity. *J Fish Res Bd*

- Can 35, 1012-1016.
- Chin P, Shin YK, Kim HG, Lee JS and Kim HS. 1998. Biological study on the increment of survival rate during early life cycle in the rockfish, *Sebastes schlegeli* (Telostei: Scorpaenidae) I. Effects of ammonia on survival and growth of the larvae and juveniles stage. Kor J Ichthyol 10, 98-105.
- Colt J and Armstrong. 1981. Nitrogen toxicity to crustacean, fish and Mollusca. In: Proceeding of the Bio-engineering Symposium for Fish Culture. Allen LJ and Kinney EC, eds. America Fisheries Society, Bethesda, MD, U.S.A., 34-37.
- Forster RP and Goldstein L. 1969. Formation of excretory product. In: Fish Physiology. Hoar WE and Randall DJ, eds. Academic Press, New York, U.S.A., 313-345.
- Foss A, Evensen TH, Vollen T and Øiestad V. 2003. Effects of chronic ammonia exposure on growth and food conversion efficiency in juvenile spotted wolffish. Aquaculture 228, 215-224. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00276-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00276-X).
- Foss A, Siikavuopio TH, Sæther BS and Evensen TH. 2004. Effect of chronic ammonia exposure on growth in juvenile Atlantic cod. Aquaculture 237, 179-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.03.013>.
- Foss A, Imsland AK, Roth B, Schram E and Stefansson SO. 2009. Effects of chronic and periodic exposure to ammonia on growth and blood physiology in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*). Aquaculture 296, 45-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.07.013>.
- FFI. 1996. Inter Eascann eel farm is the first in Ireland. Fish Farming International 23, 3.
- Ip YK, Lim CB, Chew SF, Wilson JM and Randall DJ. 2001. Partial amino acid catabolism leading to the formation of alanine in *Periophthalmadon schlosseri* (mudskipper): a strategy that facilitates the use of amino acids as an energy source during locomotory on land. J Exp Biol 204, 1615-1624.
- Jeney G, Nemesok J, Jeney Z and Olah J. 1992. Acute effect of sublethal ammonia concentrations on common carp (*Cyprinus carpio* L.) II. Effect of ammonia on blood plasma transaminases (GOT, GPT), GIDH enzyme activity and ATP value. Aquaculture 104, 149-156.
- Jeon JK, Kim PK, Park YJ, Myoung JG and Kim JM. 2000. Changes of serum cortisol concentration and stress responses in coho salmon (*corhynchus kisutch*) to netting. J Kor Fish Soc 33, 115-118.
- Johansson O and Wedborg MG. 1980. The ammonia-ammonium equilibrium in seawater at temperatures between 5 and 25 degrees C. J Chem Soc 9, 37-44.
- Kang YJ, Lee SM, Hwang HK and Bai SC. 1998. Optimum dietary protein and lipid levels on growth in parrot Fish (*Oplegnathus fasciatus*). J Aquacult 11, 1-10.
- Kim PK. 2011. Effects of stocking density and dissolved oxygen concentration on the growth and hematology of the parrot fish *Oplegnathus fasciatus* in a recirculationg aquaculture system (RAS). Kor J Fish Aquat Sci 44, 747-752. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0747>.
- Lang T, Peters G, Hoffmann R and Meyer E. 1987. Experimental investigations on the toxicity of ammonia-effects on ventilation frequency, growth, epidermal mucous cells, and gill structure of rainbow-trout *Salmo gairdneri*. Dis Aquat Ogr 3, 159-165.
- Lemarié G, Dosdat A, Covès D, Dutto G, Gasset G and P.-Le Ruyet, J. 2004. Effect of chronic ammonia exposure on growth of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Aquaculture 229, 479-491. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00392-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00392-2).
- McKenzie DJ, Randall DJ, Lin H and Aota S. 1993. Effects of changes in plasma pH, CO₂ and ammonia on ventilation in trout. Fish Physiol Biochem 10, 507-515.
- Meade JW. 1985. Allowable ammonia for fish culture. Prog Fish Cult 3, 135-145.
- Oh SY, Noh CH, Kang RS and Myoung JG. 2006. Effects of water temperature and photoperiod on the oxygen consumption rate of fasted juvenile parrot fish, *Oplegnathus fasciatus*. Ocean and Polar Res 28, 407-413.
- Park J. 2005. Design and performance of pilot recirculating aquaculture system for abalone *Haliotis discus hannai*. Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Park J, Kim PK, Lim T and Daniels HV. 2013. Ozonation seawater recirculating system for black seabream *Acanthopagrus schlegelii* (Bleeker): Effects on solids, bacteria, water clarity, and color. Aquacult Eng 55, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.01.002>.
- Paust LO, Foss A and Imsland AK. 2011. Effects of chronic and periodic exposure to ammonia on growth, food conversion efficiency and blood physiology in juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.). Aquaculture 315, 400-406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.03.008>.
- Pinto W, Arago C, Soares F, Dinis MT and Conceicao LEC. 2007. Growth, stress response and free amino acid levels in Senegalese sole (*Solea senegalensis* Kaup 1858) chronically exposed to exogenous ammonia. Aquac Res 38, 1198-1204. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01788.x>.
- Randall DJ and Wright PA. 1987. Ammonia distribution and excretion in fish. Fish Physiol Biochem 3, 107-120.
- Russo RC. 1985. Ammonia, nitrite and nitrate. In: Fundamentals of Aquatic Toxicology. Hemisphere Publishing. Rand GM and Petrocelli SR, eds. Washington DC, U.S.A., 455-471.
- Russo RC and Turston RV. 1991. Toxicity of ammonia, nitrite and nitrate to fishes. Aquaculture and water quality. Brune E and Tomasso JR. eds. Advances in World Aquaculture. Vol. 3. The World Aquaculture Society. Louisiana, U.S.A., 58-89.
- Remen M, Imsland AK, Stefansson SO, Jonassen TM and Foss A. 2008. Interactive effects of ammonia and oxygen

- on growth and physiological status of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture* 274, 292-299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.032>.
- Schreck CB. 1981. Stress and compensation in teleostean fishes : responses to social and physical factors. In *Stress in Fish*. Pickering AS, ed. Academic Press, London, U.K., 295-321.
- Selye H. 1973. The evolution of the stress concepts. *American Scientist* 61, 692-699.
- Son MH, Jeon IG, Cho KC and Kim KS. 2000. Ammonia removal rate on ammonia loading rates in seawater filtering system using rotating biological contactor (RBC). *J Kor Fish Soc* 33, 367-372.
- Suh KH, Kim BJ and Jeon IG. 2001. Design and Development of Integrated Recirculating Aquaculture System. *J Kor Fish Soc* 34, 70-76.
- Thurston R, Russo RC and Vinogradov GA. 1981. Ammonia toxicity to fishes - effect of pH on the toxicity of the unionized ammonia species. *Environ Sci Technol* 15, 837-840.
- Van Rijn J. 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture - A review. *Aquaculture* 139, 181-201.
- Wajsbrodt N, Gasith A, Krom MD and Popper DM. 1991. Acute toxicity of ammonia to juvenile gilthead seabream *Sparus aurata* under reduced oxygen levels. *Aquaculture* 92, 277-288.
- Wajsbrodt N, Gasith A, Diamant A and Popper DM. 1993. Chronic toxicity of ammonia to juvenile gilthead seabream *Sparus aurata* and related histopathological effects. *J Fish Biol* 42, 321-328.
- Waring CP, Stagg RM and Poxton MG. 1992. The effects of handling on flounder (*Platichthys flesus* L.) and Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *J Fish Biol* 41, 131-144.