

해양산성화가 넙치의 초기발달에 미치는 영향: 현장 메조코즘 (mesocosm) 실험

심정희¹ · 권정노¹ · 박주면^{2,3,*} · 콧석남³

¹국립수산과학원 어장환경과, ²부경대학교 해양과학공동연구소,
³환경생태공학연구원

The Effect of Ocean Acidification on Early Growth of Juvenile Oliver Flounder (*Paralichthys olivaceus*): *in situ* Mesocosm Experiment

Jeong Hee Shim¹, Jung-no Kwon¹, Joo Myun Park^{2,3,*} and Seok Nam Kwak³

¹Marine Environment Research Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

²Korea Inter-University Institute of Ocean science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³Environ-Ecological Engineering Institute Co., Ltd., Busan 613-827 Korea

Abstract - An *in situ* mesocosm experiment was designed to investigate how exposure to ocean acidification by increased carbon dioxide affected the growth of juvenile oliver flounder (*Paralichthys olivaceus*). A total of 447 individuals were reared in the mesocosm experimental devices deployed at sandy-muddy bottom in the southern coast of East Sea for 43 days and divided into two groups: treatment group (223 individuals, 6.32 ± 0.75 cm, high-CO₂ environment) and control group (224 individuals, 6.34 ± 0.84 cm, natural CO₂ environment). The average values of pH and CO₂ concentration in the treatment device were 7.63 ± 0.13 and 1660 ± 540 μ atm, respectively, while those in the control device were 8.07 ± 0.05 and 514 ± 65 μ atm, respectively. There was no significant difference in mortality rate between treatment and control group, and the mortalities in two groups gradually decreased during the study period. But, the increase of size and weight of juvenile oliver flounder was higher in control group than treatment group, i.e., weight gain or growth rate was higher in control group. These results suggested that high CO₂ environments could have a significant negative influence on the early growth of juvenile oliver flounder.

Key words : ocean acidification, mesocosm, growth rate, juvenile, oliver flounder

서 론

해양산성화 (Ocean Acidification)는 화석연료(석탄, 석유 등) 사용으로 말미암은 이산화탄소가 해양으로 녹아

들어감으로 해양의 탄소계 (carbonate system)에 영향을 미쳐 그 결과 pH가 낮아지는 현상을 말한다. 현재 해양의 pH는 약 8.1로, 산업화 이전에 비해 0.1단위 낮아진 상태이며 IPCC 시나리오에 의하면 금세기 말에 대기 이산화탄소가 800~1000 ppm에 도달할 경우, 해양 pH는 지금보다 0.3~0.4 단위 더 낮아져 약 7.6~7.8에 도달할 것으로 예상하였다 (IPCC 2007). 이로 인해 해양에 서식

* Corresponding author: Joo Myun Park, Tel. 051-629-6565,
Fax. 051-629-6568, E-mail. joomyun@gmail.com

하는 생물들이 일차적으로 영향을 받을 것이므로, 이에 관한 연구가 2000년대부터 급격히 증가하고 있다(Gattuso and Hansson 2011).

어류를 대상으로 하는 해양산성화 연구는 2000년대에는 거의 없었으나, 최근 들어 다양한 분야에서 연구결과가 발표되고 있다. 전통적으로 어류(치어)의 성장률 및 생존율에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며, 후각기능을 비롯한 감각기능에 대한 연구, 부모세대효과에 대한 연구, 체내 탄산염이온 등의 생리기작에 대한 연구 등 그 영역이 확장되고 있다(Cooper *et al.* 2010; Munday *et al.* 2010; Baumann *et al.* 2012; Miller *et al.* 2012; Nilsson *et al.* 2012).

해양산성화는 해양생물의 생존, 탄산광물 형성, 성장, 발달 그리고 생물량에 영향을 미치며, 같은 분류군 중에서도 반응의 정도 및 양상이 다른 것으로 보고되고 있다(Doney *et al.* 2009). 특히, Kroeker *et al.* (2013)은 여러 종을 한 번에 실험하는 경우 해양산성화에 대한 반응이 매우 다르게 나타나기 때문에 실내에서 단일 종을 대상으로 한 결과는 해석에 각별한 주의가 필요하다고 하였다. 따라서 해양산성화에 대한 영향을 정밀하게 파악하기 위해서는 각 생물 종별, 성장단계별, 서식지별 등으로 세밀하게 파악할 필요가 있으며, 한편으론 실내 배양보다는 현장 메조코즘(mesocosm)규모의 실험으로 평가하는 것이 보다 더 현실적이라 할 수 있다.

메조코즘은 실제 자연환경을 재현한 중규모의 실험 시스템으로 생태계 반응을 통합적으로 이해하기 위해 군집 수준 규모의 실험을 수행한다. 따라서 메조코즘 실험은 기존의 개체군 수준의 실내 배양으로 단일 종에 대한 반응이나 영향 정도를 단편적으로 파악하는 단점을 해소하고, 군집 내에서 다른 종과의 되물림(feedback)으로 인한 영향, 군집 구조나 기능의 점진적 변화 등을 파악할 수 있는 장점이 있다. 해양산성화연구에서 메조코즘급의 실험은 식물플랑크톤, 박테리아 등의 하위영양단계 생물을 대상으로 수행한 사례가 있을 뿐(Engel *et al.* 2005; Kim *et al.* 2006; Allgaier *et al.* 2008; Riebesell *et al.* 2008), 패류 및 어류와 같은 상위영양단계 생물을 대상으로 수행된 경우는 거의 알려진 바가 없다. 이는 하위영양단계 생물에 미치는 환경요인은 비교적 단순하여 메조코즘 실험의 유지가 쉬운 반면, 상위영양단계 생물은 다양한 환경요인에 영향을 받으므로 해양산성화 영향만 단순히 파악하기 위한 실험환경 조성 및 유지의 어려움이 있었던 것으로 생각된다.

본 연구는 경제성 어류 중 하나인 넙치 치어를 대상으로 현장 메조코즘 실험을 통하여 해양산성화로 인한

넙치 치어의 초기발달에 미치는 영향 정도를 파악하고 실험 장비의 효율성과 실험조건을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 실험장소

현장 메조코즘 실험을 위한 장소는 대상 어종인 넙치가 많이 어획되고 있는 해역을 우선적으로 고려하였다. 그리고 여러 가지 물리적인 환경, 실험을 위한 접근 용이성, 실험 장치의 설치 허가 여부 등을 고려하여 기장군 장안읍 임랑리와 월내리의 경계에 있는 선착장 부근 해역으로 선택하게 되었다(Fig. 1). 조사해역은 인근 어촌계에서 넙치를 주로 어획하는 곳이며, 현재 각 지자체에서 넙치 치어를 매년 방류하는 해역이기도 하다. 실험 장치를 설치한 곳은 넙치가 선호하는 사질 저질과 약간의 담수가 유입되는 곳으로 파랑이 강하지 않고 선착장 시설로 인해 접근하기가 용이하였다.

2. 실험장치

실험대상 어종인 넙치는 주로 해저 바닥에 서식하며 보호색을 띠는 특징이 있고, 산란기는 5~6월로 알려져 있다(Chyung 1977; Yamada *et al.* 1986; NFRDI 2004). 따라서 저서성 어류인 넙치의 생태적 특성에 맞추어 실험 장치를 바닥에 고정하는 방법을 선택하였다. 실험장치의 바닥은 2m×1m 크기이며, 윗부분은 원통을 반으로 자른 형태로 높이는 1m이며 따라서 전체 부피는 약 0.79 m³이었다. 실험구와 대조구는 10m 거리를 두고 해저면에 각각 설치하였으며, 내부에 이산화탄소 공급 장치 설치 유·무만 차별을 두었다. 어류의 먹이가 자유롭게 다닐 수 있게 실험장비 외부 면을 메쉬망으로 하였으며, 상부(333 μm)와 하부(10 mm)의 메쉬 크기는 달리하였다(Fig. 2(A)).

상부 333 μm의 메쉬망은 해수의 유동은 어느 정도 가능하나 이산화탄소(CO₂)가 바로 빠져나가지 못하게 제작하였다. 그리고 바닥으로부터 이산화탄소의 공급을 위하여 장비의 하부에 기포발생장치를 설치하였으며, 이산화탄소의 공급은 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 농도가 ~1500 ppm이 되도록 정량 주입(80~130 mL min⁻¹) 하였다(Fig. 2(B)). 이산화탄소 주입 후 잠수작업으로 이산화탄소가 잘 공급되는 것과 외부로 잘 빠져나가지 않는 것을 확인하였다. 실험구의 이산화탄소 농도를 설정한 기준은 IPCC(2007)에서 2100년도에 예상하



Fig. 1. A map showing the *in situ* mesocosm experiment station located at Jangan (Gijang) coastal area, East Coast of Korea.

는 최악의 대기 이산화탄소 농도 (~1500 ppm, 기후변화 시나리오 A1F1)이며, 여러 해양산성화실험에서 채택하는 농도 수준이다 (Munday *et al.* 2009; Frommel *et al.* 2012). 실험기간 동안 해양산성화환경이 잘 유지되었는지 검정하기 위하여, 4개의 탄소계 인자(총용존무기탄소, 총알칼리도, $f\text{CO}_2$, pH) 중 총알칼리도와 pH를 주기적으로 (2회/일, 간·만조시) 측정하였다 (Dickson *et al.* 2007). 이때 총알칼리도는 개방용기 적정법을 이용하여, Dr. Andrew G. Dickson (Scripps Institute of Oceanography, University of California, San Diego, U.S.A) 실험실에서 제작한 표준물질로 (reference materials) 검정하였다. 나머지 총용존무기탄소 (TCO_2 , total dissolved inorganic carbon)와 이산화탄소분압 ($f\text{CO}_2$, fugacity of carbon dioxide)은 pH와 총알칼리도 측정값으로 CO2SYS프로그램 (<http://cdiac.ornl.gov/ftp/co2sys>, Pierrot and Wallace 2006)에서 계산하였다. 한편, 현장에서 $f\text{CO}_2$ 측정 시스템 (NDIR840, LiCor, USA)으로 실험구의 이산화탄소농도를 일정기간 연속 관측하였으며, 위의 계산 값과 비교 검정하는데 활용하였다. 실험기간 연구지역의 수온과 염분변화는 CTD (SBE45, Sea-Bird Electronics, USA)로 연속 관측하였다.

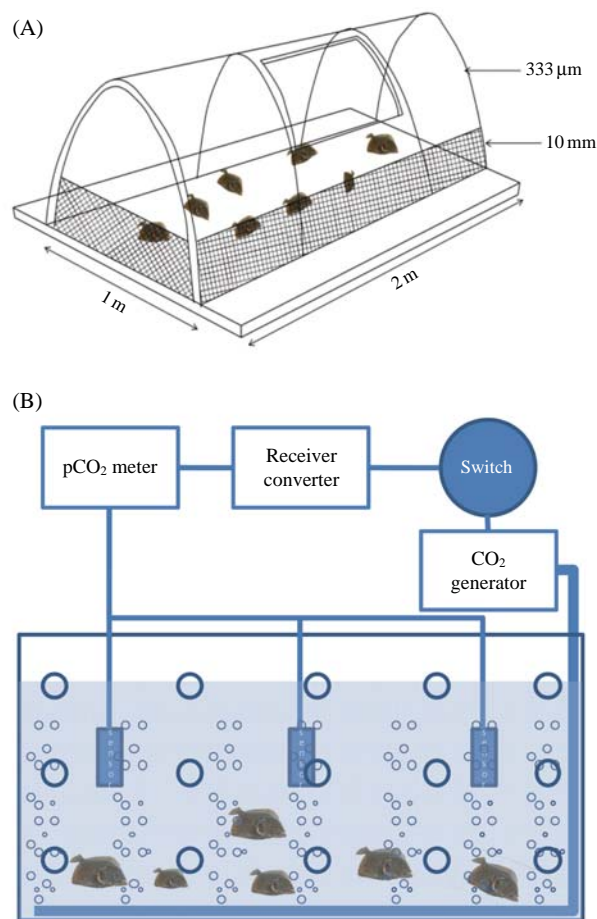


Fig. 2. Schematic diagram of rearing cage (A) and CO_2 generating system (B) for mesocosm experiment.

3. 시료분석 및 자료처리

넙치 치어는 실험군에 223개체, 대조군에 224개체를 수용하여, 약 43일 (2012년 10월 2일~11월 14일) 동안 배양하였다. 이때 장치 내 치어의 수용 밀도는 112마리 m^{-2} , 285마리 m^{-3} 였으며, 이는 넙치의 실내 사육 시 제시되는 기준 (전장 5~8 cm 경우, $230\sim440\text{마리 m}^{-2}$)보다 다소 낮았으나 먹이를 인위적으로 공급하지 않는 자연환경인 것을 고려하면 적절함 범위인 것으로 생각된다 (NFRDI 2006).

조사기간 동안 넙치의 전장 (cm TL)과 체중 (g)을 주기 (7일 간격)적으로 측정하고 성장률 (growth rate)도 파악하였다. 이때 전장은 버니어캘리퍼로 0.01 cm 단위까지 측정하였으며, 체중은 전자저울로 0.01 g까지 정밀하게 측정하였다. 실험군과 대조군 넙치의 성장률 분석은 최종적으로 생존한 개체들을 대상으로 측정하였다.

시간에 따른 넙치의 성장률 (specific growth rate, SGR)

은 Moran and Støttrup (2011)의 방법에 따라 다음 계산식을 이용하였다; $SGR = (exp^g - 1) \times 100$, $g = (\ln W_{T1} - \ln W_{T0}) / T1 - T0$. 이때, SGR은 일일 체중 증가률을 의미한다. 실험군과 대조군 사이에 넙치 치어의 시간변화와 성장에 따른 사망률과 성장률 차이를 분석하기 위하여 공분산 분석 (analysis of covariance, ANCOVA)을 실시하였다.

결 과

1. 환경특성

해양산성화 메조코즘 실험이 수행되는 동안 기장군 장안읍 주변 해역의 수온은 14~22°C의 범위를 보였으며,

10월 말에 $19 \pm 2^\circ\text{C}$ 범위에서 조사 후반(11월 중순)에는 $17 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 약 2°C 하강하였다. 염분은 조사기간 동안 32.2 ± 1.4 로 일정하게 유지되었으나, 10월 27일과 11월 11일에 내린 강우(각각 130 mm와 35 mm)로 인해 일시적으로 낮은 값을 나타내었다. 국가해양환경측정망에서 2004~2010년 동안 측정된 (국가해양환경정보통합시스템, <http://www.meis.go.kr>) 기장연안 표층수의 수온과 염분의 11월 평균(각각 $18.0 \pm 0.8^\circ\text{C}$, 33.24 ± 0.29)과 비교하였을 때, 수온은 유사한 범위였으며, 염분은 담수 영향으로 다소 낮았던 것으로 생각된다(Fig. 3(a)).

실험기간동안 메조코즘 실험군과 대조군에서 측정된 탄소계 인자 농도 변화를 비교하였다(Fig. 3(b~d)). 인위적인 조작을 하지 않았던 대조구의 pH는 평균 $8.07 \pm$

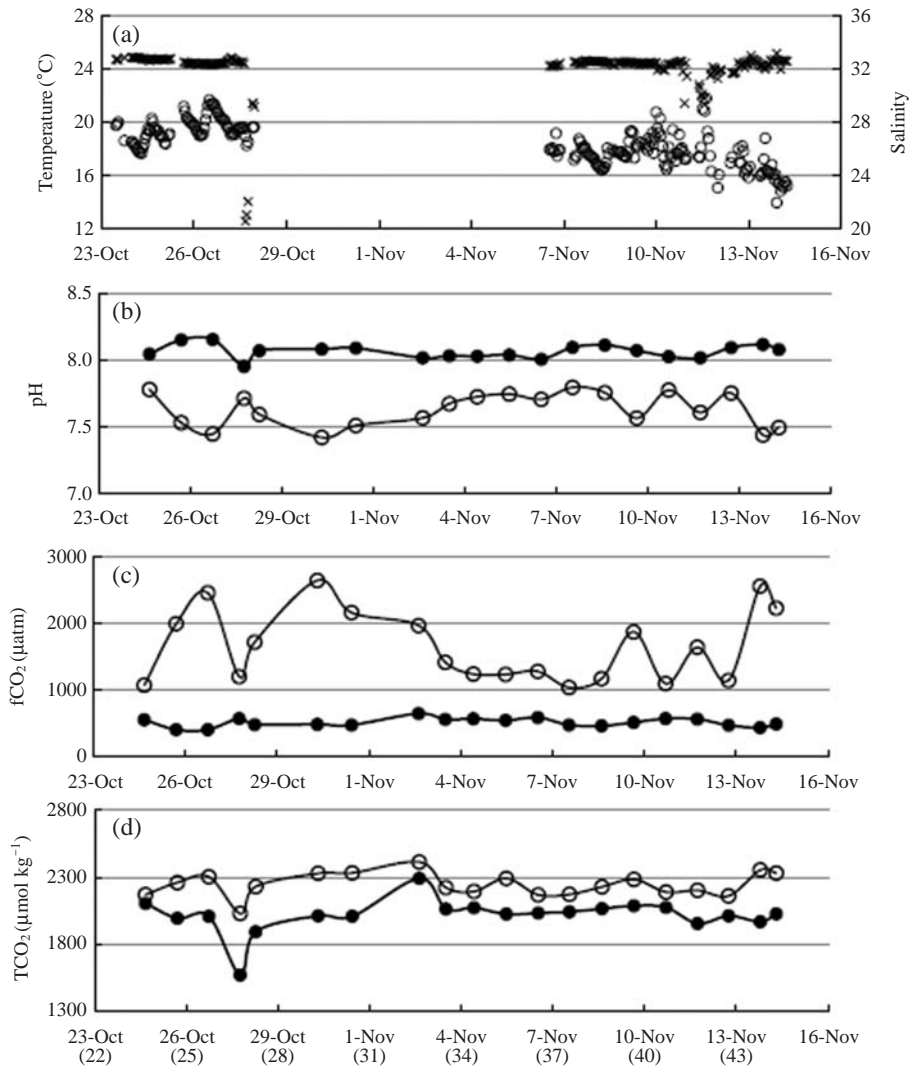


Fig. 3. Temporal variations of (a) temperature (open circle) & salinity (x), (b) pH, (c) fCO₂ and (d) TCO₂ (total dissolved inorganic carbon). Open circles are control group and closed circles are treatment group in (b)~(d).

0.05, 이산화탄소 ($f\text{CO}_2$)는 평균 $514 \pm 65 \mu\text{atm}$, 총용존무기탄소는 평균 $2015.3 \pm 130.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 였으며 실험기간 동안 비교적 일정하게 유지되었다. 일반적으로 동해 연안의 탄소계 인자 분포수준과 비교를 하였을 때, pH의 경우 기장연안의 계절변화 범위(11월 표층수 평균 8.07 ± 0.17 , 국가해양환경정보통합시스템, <http://www.meis.go.kr>)와 매우 유사하였다. 동해 연안에서 이산화탄소와 총용존무기탄소를 측정할 경우가 많지 않아서 직접 비교는 힘들지만, Shim *et al.* (2012)이 기장 해조류 양식장에서 2011년 7월에 관측결과보다 각각 $100 \mu\text{atm}$, $15 \sim 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 높게 나타났다. 관측시기와 수심 등의 차이를 감안한다면, 이 정도는 연안환경에서 충분히 재현될 수 있는 수준으로 생각된다. 따라서 대조구에서 관측된 해양 탄소계 분포는 기장 연안의 일반적인 수준의 범주로 유지되었던 것으로 생각된다.

한편, 해양산성화환경을 유지하기 위해 $1000 \sim 1500 \text{ ppm}$ 의 이산화탄소 ($80 \sim 130 \text{ mL min}^{-1}$)를 지속적으로 주입했던 실험군의 pH는 평균 7.63 ± 0.13 , 이산화탄소 ($f\text{CO}_2$)는 평균 $1660 \pm 540 \mu\text{atm}$, 총용존무기탄소는 평균 $2243.7 \pm 88.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 로, 대조구에 비해 그 변화폭이 컸다. 또한 산성화 수준도 원하던 농도보다 다소 높게 유지되었다. 이는 현장의 메조코즘환경에서 이산화탄소를 일정하게 유지하는 것이 실내보다는 다소 어려운 점이 있으며, 주변 환경의 영향이 복합적으로 작용하였던 것으로 생각된다. 특히, 많은 비가 내렸던 10월 27일은 주변 육상으로부터 유입된 담수 및 강우로 인해 pH와 이산화탄소 모두 영향을 받았던 것으로 생각된다. 이처럼 의도하지 않은 주변 환경 변화로 실험 유지의 어려움이 있었지만, 대조구와 실험구사이의 탄소계 인자(이산화탄소 분압과 총용존무기탄소, pH)는 뚜렷한 차이를 보여, 해양산성화 영향 분석을 위한 실험 조건은 잘 유지된 것으로 판단된다.

2. 넙치의 사망률

조사기간 동안 넙치 치어의 생존 개체수를 살펴보면 (Table 1), 10월 2일부터 실험을 실시하여 7일 후 생존하였던 개체수는 실험군이 178개체, 대조군이 168개체로 약 75~80% 생존하였다. 실험 경과 14일 후 생존한 개체는 실험군이 73개체, 대조군이 118개체로 실험군에서는 약 33%가 생존하였으며 대조군에서는 53%가 생존하여, 산성화환경에 노출된 실험군보다 대조구에서 생존율이 월등히 높았다 (Fig. 4). 그러나 21일 후에는 실험군과 대조군의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 실험

Table 1. Alive number of individuals in each day

Group	Day						
	0	7	14	21	28	35	43
Treatment	223	178	73	25	20	17	14
Control	224	168	118	24	19	17	15
Total	447	346	191	49	39	34	29

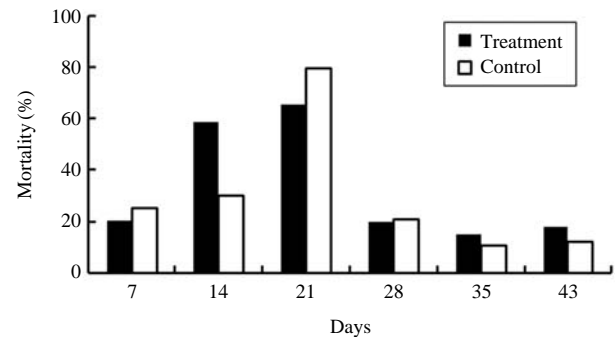


Fig. 4. Daily variations in mortality (%) between treatment and control group.

종료 시까지 6~10% 생존율을 나타내었다.

넙치 치어의 생존율 변화에서도 보았듯이, 사망률은 실험 14일 전후로 큰 변화가 있었다 (Fig. 4). 실험 14일경에 순간 사망률과 누적 사망률이 대조군은 29.8%와 47.3%였으며 실험군은 각각 59.0%와 67.3%로 산성화환경에 노출된 치어의 사망률이 유의하게 높은 것으로 나타났다. 그러나 실험 3주째에 대조군에서 사망률이 79.7%로 급격히 상승하여 누적 사망율이 약 90%로 결국 실험군과 비슷한 수준으로 높아졌으며, 이후에는 두 개체군에서 큰 차이가 없었다.

3. 넙치의 평균전장 및 체중변화

조사기간 동안 넙치 치어의 평균전장의 변화를 살펴보면 (Fig. 5(A)), 실험군 넙치 치어는 초기에는 $6.32 \pm 0.56 \text{ cm TL}$ 에서 43일 후 $6.42 \pm 0.55 \text{ cm TL}$ 로 약 0.1 cm 증가하였다. 실험 초기부터 35일 경과하는 동안 일주일에 약 0.01~0.02 cm 증가하다가 마지막 주에 0.04 cm로 가장 많이 성장하였다. 한편 대조군 넙치 치어는 초기에는 $6.34 \pm 0.95 \text{ cm TL}$ 에서 43일 후 $6.69 \pm 0.65 \text{ cm TL}$ 로 약 0.35 cm 증가하여 실험군보다 약 4배 더 증가하였다. 대조군의 치어는 실험 초부터 실험구보다 빠르게 성장하였으며, 일주일 평균 성장률은 약 0.06 cm이었다.

조사기간 동안 평균체중의 변화를 살펴보면 (Fig. 5(B)),

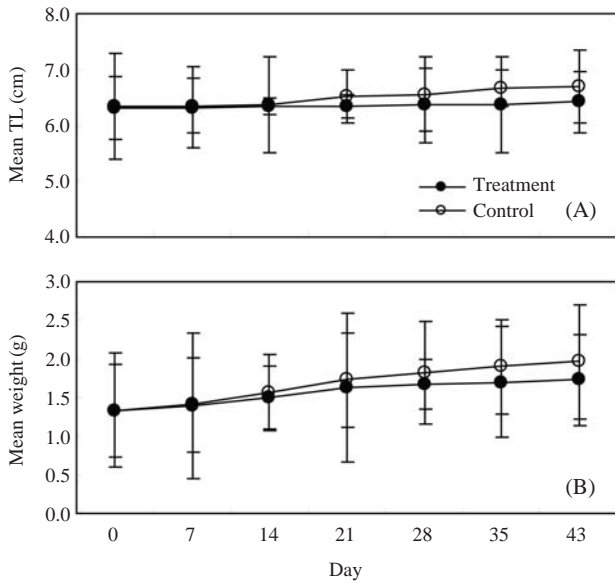


Fig. 5. Daily variations in mean total length (TL) and body wet weight between treatment and control group.

실험군 넙치 치어는 초기에는 1.33 ± 0.60 g이었으며, 43일 후 1.73 ± 0.59 g으로 약 0.4 g 증가하였다. 실험 초기에는 일주일에 약 0.06~0.10 g 증가하다가 후반으로 갈수록 증가율이 감소(0.03 g week^{-1})하는 경향을 보였다. 한편 대조군 넙치 치어는 초기에 1.33 ± 0.74 g이었으며, 43일 후 1.96 ± 0.73 g으로 약 0.63 g 증가하여, 대조군보다 1.5배 더 증가하였다. 대조군 치어는 실험 초기에 일주일에 0.10~0.17 g 증가하였으며, 실험 후반에는 증가율이 감소하는 경향을 보여 일주일동안 평균 약 0.1 g 증가하였다.

4. 넙치의 체중 성장률

실험기간 동안 생존 개체에 대한 성장률(SGR)은 실험군과 대조군 모두 초기에 성장률이 높았으나, 시간이 지남에 따라 성장률이 점점 감소하는 경향을 나타내었고, 다음과 같은 회귀식을 나타내었다; 실험군 $y=1.733 - 0.039x$ ($R^2=0.849$), 대조군 $y=2.111 - 0.042x$ ($R^2=0.952$) (Fig. 6(A)). 그리고 전반적인 성장률은 대조군에서 더 높은 값을 나타내었으나, 실험군과 대조군에서 체중 증가에 따른 회귀식의 기울기는 유의한 차이를 나타내지 않았다(ANCOVA, $P > 0.05$).

성장에 따른 성장률을 살펴보기 위하여 평균 체중에 대하여 성장률을 도식화 하였다(Fig. 6(B)). 실험군과 대조군 모두 체중 증가에 따라 성장률은 감소하는 경향을

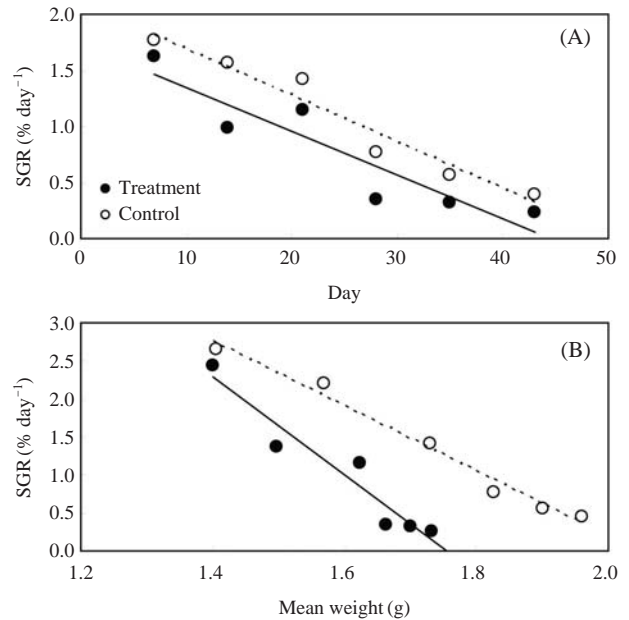


Fig. 6. Daily variations in specific growth rate (SGR), and relationships between mean body weight and SGR, between treatment and control group.

나타내었고 다음과 같은 회귀식을 나타내었다; 실험군 $y=11.285 - 6.429x$ ($R^2=0.929$), 대조군 $y=8.792 - 4.300x$ ($R^2=0.982$). 실험군과 대조군에서 체중 증가에 따른 회귀식의 기울기는 유의한 차이를 나타내었다(ANCOVA, $P < 0.05$). 즉, 실험군에서 성장(체중 증가)함에 따라 더 낮은 성장률을 나타낼 수 있었다.

고 찰

본 연구에서는 해양산성화가 넙치 치어의 초기 성장에 미치는 영향을 현장 메조코즘 실험으로 파악하고, 이를 통해 현장 메조코즘 실험의 적절성과 장치의 효율성을 평가하고자 하였다.

현장 메조코즘 실험동안 넙치는 실험군 및 대조군 모두 시간의 경과에 따라 생존 개체수가 줄어들었다. 실험 시작후 14일 경과 시까지는 대조군보다 실험군의 사망률이 높아 유의한 차이를 보였으나, 그 이후 14~21일 시기 대조군의 순간 사망률이 급격히 증가하여 실험군과 유의한 차이를 관찰 할 수 없었다. 넙치의 전장 및 체중의 변화는 시간이 경과하면서 실험군 및 대조군 모두 서서히 증가하였다. 초기에는 실험군과 대조군에서 거의 차이가 없었지만, 시간이 경과되면서 대조군의 성장정도

가 빠르게 나타났다. 이는 본 연구의 메조코즘에서 구현된 산성화환경이 치어의 성장률에 영향을 미치는 것을 의미한다. 어류의 유생이나 치어에 대한 산성화 영향은 실내 실험결과로 몇 차례 보고된 바가 있다. Moran and Støttrup (2011)은 북대서양 대구 (*Gadus morhua*)를 100 ppm, 380 ppm, 850 ppm 이산화탄소 농도 조건에서 55일간 노출시켰을 때, 이산화탄소 농도가 증가함에 따라 북대서양 대구의 초기 성장이 현저히 감소하였다고 하였으며, Frommel *et al.* (2012)도 대서양 대구 (*Gadus morhua*)의 유생을 이산화탄소 380~1800 ppm, 그리고 연안 용승역에서 관측되는 수준인 4200 ppm에서 7주간 배양한 결과, 이산화탄소 분압이 높은 환경에 노출된 대구 유생의 장기 손상을 보고하였다. 이는 대구의 유생시기 중 산-염기 평형을 조절하는 능력이 없는 단계에서 나타났으며, 조직 손상의 강도는 이산화탄소의 농도가 높아짐에 따라 더 심하게 나타난 것으로 보고하였다. Baumann *et al.* (2012)은 기수역 어류 (*Menidia beryllina*)를 대상으로 이산화탄소 농도 400~1000 ppm 범위에 노출하였을 때, 400 ppm에 비해 1000 ppm에 노출된 개체의 생존율 및 체장이 각각 74%, 18% 감소한 것을 관찰하였으며, 높은 이산화탄소 농도에 노출된 개체에서 휘거나 곱슬거리는 형태의 유생이 더 많았다고 하였다. 이처럼 이산화탄소가 높은 환경은 어류의 성장에 분명히 영향을 미치는 것으로 많이 보고되고 있으며, 단순한 성장 지연보다 장기손상, 형태적 변형 등의 생존에 치명적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 해양산성화의 어떤 현상이 ($[H^+]$ 이 많은? 또는 $[HCO_3^-]$ 이 많은?) 어류 체내 어떤 기작을 통해 영향을 미치는지 잘 알려져 있지 않다. Ishimatsu *et al.* (2005, 2008)은 높은 이산화탄소의 환경에서 높아진 산 조절 비용과 아가미에 물을 통과시키기 위한 증가된 유영 속도 때문에 어류의 신진대사는 더 높아지고 그 결과로 인해 어류의 성장에 영향을 미칠 것이라고 제안한 바 있다. 그러나 일부연구에서는 해양산성화로 인해 어류의 이석이나 성장률이 오히려 증가한다는 연구결과 (Checkley *et al.* 2009; Munday *et al.* 2009)도 있으며, 어류의 체내 (중)탄산염이온 순환이 해양의 탄산염광물 분포에 크게 기여한다는 의견도 있다 (Cooper *et al.* 2010).

이처럼 해양산성화에 대한 생물, 특히 산-염기 조절 능력이 있는 어류는 그 반응이 일관되지 않고 복잡적으로 나타난다. 앞서도 언급하였지만, 이의 원인으로 어류의 종별 특성 (반응에 대한 민감도)과 다른 개체와의 상호관계, 성장에 필요한 다양한 환경요인 등을 들 수 있다. 따라서 해양산성화의 영향을 정확하게 평가하기 위

해서는 종별 특성을 감안한 실험 설계와 메조코즘과 같은 군집수준의 실험 규모, 성장에 저해되지 않는 적합한 환경유지 등이 수반되어야 할 것이다.

일반적으로 어류와 같은 변온동물은 수온 변화가 생리적으로 많은 영향을 미친다 (Wootton 1992). 넙치의 난 발생 및 자치어의 성장과 생존에도 수온이 중요한 환경요인 으로 알려져 있으며 (Yoon *et al.* 2007; Oh *et al.* 2012), 서식처 이동에도 영향을 미친다 (Yamada *et al.* 1986). 넙치는 수온이 낮아지면 수심이 깊은 해역으로 이동하여 성장하다가 수온이 높아지면 연안 해역으로 다시 이동한다고 알려져 있다 (Yamada *et al.* 1986). 특히, 대부분의 개체가 산란을 위하여 연안역으로 이동하여 산란을 하고, 어린 치어들은 수온이 높은 연안 해역에서 성장하게 된다. 본 연구기간 동안, 실험 초기 수온은 넙치 사육의 적정 수온범위 (18~24°C, NFRDI 2006)였으나, 실험이 경과될수록 계절적인 영향으로 수온이 점점 하강하여 실험 종료 시에는 적정 수온보다 1~2°C 낮았다. 또한 수온과 더불어 자연환경에서 어류의 생존에 필수적인 환경은 먹이생물 분포라 할 수 있다. 실험장치 내의 넙치 밀도 (112마리 m^{-2})는 일반적인 양식 사육밀도 (400마리 m^{-2}) 보다는 낮지만 자연환경에서 경험할 수 있는 밀도보다는 높을 것이다. 따라서 실험 장치의 메쉬망을 통해 유입되는 먹이생물량 수준을 직접 측정하진 못하였으나, 실험 개체수를 만족시킬 만한 수준은 아닐 것으로 추정된다. 특히 넙치 치어가 주로 먹는 작은 크기의 갑각류 (crustacean) 및 갯지렁이류 (polychaetes)의 출현량이 조사 시기에 낮은 것으로 알려져 있다 (Huh *et al.* 2010). 결국, 현장 메조코즘에서 조성된 환경 중 수온과 먹이생물 분포가 넙치의 성장률과 사망률에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 특히, 실험 2~3주 시기에 높은 생존율을 보이던 대조군에서 갑자기 사망률이 높아진 것은 먹이생물의 부족이나 서식밀도 및 환경으로 인한 스트레스 증가 등이 원인이었던 것으로 생각된다. 따라서 현장 메조코즘 실험을 장기적으로 실시할 때 계절적인 환경변화 (수온, 서식생물분포 등) 및 지리적인 여건 (담수유입, 오염물질 유입 등) 등을 세밀하게 고려할 필요가 있다.

결론적으로 본 연구에서 넙치 치어의 이산화탄소의 영향에 따른 메조코즘 실험 결과는 해양에서 이산화탄소 증가로 인한 해양산성화가 넙치 치어의 초기 성장에 영향을 미칠 수 있다는 가능성을 제시해 주었다. 그리고 현장 메조코즘 실험을 장기적으로 수행할 경우, 주변 환경의 계절적 변화나 생물상 변화 등을 고려하면 보다 더 의미있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

해양에서 이산화탄소 증가에 따른 해양산성화가 넙치 치어의 성장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 현장 메조코즘 실험을 실시하였다. 동해 남부에 위치한 기장군 장안읍의 사질저질에서 실험군(이산화탄소 주입)과 대조군의 실험장비를 설치하여 43일 동안 총 447개체(실험군 223개체, 대조군 224개체)를 대상으로 실시하였다. 실험군의 pH는 평균 7.63 ± 0.13 , 이산화탄소($f\text{CO}_2$)농도는 평균 $1660 \pm 540 \mu\text{atm}$ 로 2100년도에 예상되는 수준으로(IPCC 2007) 유지하였으며, 대조군은 현재 기장군 장안읍 해역의 해양환경으로 유지하였다. 실험기간동안 사망률은 실험군과 대조군 사이에서 큰 차이를 나타내지 않았고 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 넙치 치어의 체장과 체중은 대조군에서 더 큰 증가양상을 나타내어, 그 결과 대조군에서 더 큰 성장률(specific growth rate)을 보였다. 결론적으로 본 연구는 해양에서 이산화탄소 농도의 증가는 넙치 치어의 초기 성장에 영향을 줄 수 있는 가능성을 제시하였다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원(RP-2013-ME-096)의 지원으로 수행되었습니다. 부산시 기장군 임랑 현장조사에 도움을 주신 임랑어촌계 및 관계자 여러분께 감사드립니다. 이 논문을 검토하시고 조언을 해주신 심사위원들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Allgaier M, U Riebesell, M Vogt, R Thyrrhaug and HP Grossart. 2008. Coupling of heterotrophic bacteria to phytoplankton bloom development at different $p\text{CO}_2$ levels: a mesocosm study. *Biogeosciences* 5:1007-1022.
- Baumann HB, SC Talmage and CJ Gobler. 2012. Reduced early life growth and survival in a fish in direct response to increased carbon dioxide. *Nature Clim. Change* 2:38-41.
- Checkley Jr. DM, AG Dickson, M Takahashi, A Radich, N Eisenkolb and R Asch. 2009. Elevated CO_2 Enhances Otolith Growth Young Fish. *Science* 324:1683.
- Chyung MK. 1977, The fishes of Korea. Ilji-sa, Seoul, Korea 727pp.
- Cooper CA, JM Whittamore and RW Wilson. 2010. Ca^{2+} -driven intestinal HCO_3^- secretion and CaCO_3 precipitation in the European flounder in vivo: influences on acid-base regulation and blood gas transport. *Am. J. Physiol.* 298:870-876.
- Dickson AG, CL Sabine and JR Christian. 2007. Guide to best practices for ocean CO_2 measurements. PICES Special Publication 3, 191pp.
- Doney SC, WM Balch, VJ Fabry and RA Feely. 2009. Ocean acidification: a critical emerging problem for the ocean sciences. *Oceanography* 22:16-25.
- Engel A, I Zondervan, K Aerts, L Beaufort, A Benthien, L Chou, B Delille, JP Gattuso, J Harlay, C Heemann, L Hoffman, S Jacquet, J Nejstgaard, MD Pizay, E Rochelle-Newall, U Schneider, A Terbrueggen and U Riebesell. 2005. Testing the direct effect of CO_2 concentration on a bloom of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* in mesocosm experiments. *Limnol. Oceanogr.* 50:493-507.
- Frommel AY, R Maneja, D Lowe, AM Malzahn, AJ Geffen, A Folkvord, U Piatkowski, TBH Reusch and C Clemmesen. 2012. Severe tissue damage in Atlantic cod larvae under increasing ocean acidification. *Nature Clim. Change* 2:42-46.
- Gattuso JP and L Hansson. 2011. Ocean Acidification. Oxford University Press, pp.1-20.
- Huh SH, DJ Lee, HG Choo, JM Park and GW Beack. 2010. Feeding habits of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) collected from coastal waters off Taean, Korea. *Kor. J. Fish. Aquatic Sci.* 43:756-759.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The physical science basis. pp.996. In Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon S ed.). Cambridge University Press. Cambridge UK.
- Ishimatsu A, H Masahiro and T Kikkawa. 2008. Fishes in high- CO_2 , acidified oceans. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 373:295-302.
- Ishimatsu A, M Hayashi, KS Lee, T Kikkawa and J Kita. 2005. Physiological effects on fishes in a high- CO_2 world. *J. Geophysical Res.* 110:C09S09.
- Kim JM, K Lee, K Shin, JH Kang, HW Lee, M Kim, PG Jang and MC Jang. 2006. The effect of seawater CO_2 concentration on growth of a natural phytoplankton assemblage in a controlled mesocosm experiment. *Limnol. Oceanogr.* 51: 1629-1636.
- Kroeker KJ, RL Kordas, R Crim, IE Hendriks, L Ramajo, GS Singh, CM Duarte and JP Gattuso. 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Glob. Change Biol.* 19:1884-1896.
- Miller GM, SA Watson, JM Donelson, MI McCormick and PL Munday. 2012. Parental environment mediates impacts of

- increased carbon dioxide on a coral reef fish. *Nature Clim. Change* 2:858-861.
- Moran D and JG Støttrup. 2011. The effect of carbon dioxide on growth of juvenile Atlantic cod *Gadus morhua* L. *Aquat. Toxicol.* 102:34-30.
- Munday PL, DL Dixson, MI McCormick, M Meekan, MCO Ferrari and DP Chivers. 2010. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 107:12930-12934.
- Munday PL, JM Donelson, DL Dixson and GGK Endo. 2009. Effects of ocean acidification on the early life history of a tropical marine fish. *Proc. R. Soc. B* 276:3275-3283.
- NFRDI. 2004. Commercial Fishes of the Coastal & Offshore Waters in Korea. *Natl. Fish. Res. Dev. Inst. Busan, Korea* 333pp.
- NFRDI. 2006. Standard manual of olive flounder culture. p.20-60.
- Nilsson GE, DL Dixson, P Domenici, MI McCormick, C Sørensen, SA Watson and PL Munday. 2012. Near-future carbon dioxide levels alter fish behaviour by interfering with neurotransmitter function. *Nature Clim. Change* 2:201-204.
- Oh SY, YS Jang, HS Park, YU Choi and CK Kim. 2012. The influence of water temperature and body weight on metabolic rate of olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Ocean Polar Res.* 34:93-99.
- Pierrot DEL and DWR Wallace. 2006. MS Excel program developed for CO₂ System calculations. ORNL/CDIAC-105, Oak Ridge, Tennessee, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy.
- Riebesell U, RGJ Bellerby, HP Grossart and F Thingstad. 2008. Mesocosm CO₂ perturbation studies: from organism to community level. *Biogeosciences* 5:1157-1164.
- Shim JH, DJ Kang, IS Han, JN Kwon and YH Lee. 2012. Real-time monitoring of environmental properties at seaweed farm and a simple model for CO₂ budget. 「The Sea」 *J. Kor. Soc. Oceanogr.* 17:243-251.
- Wootton RJ. 1992. *Fish Ecology*. Chapman and Hall, New York, USA, p.212.
- Yamada U, M Tagwa, S Kishida and K Honjo. 1986. *Fishes of the east China sea and the yellow sea*. Seikai Reg. Fish. Res. Lab. Seikai, Japan, 501pp.
- Yoon SJ, DH Kim, HG Hwang, GC Song and YC Kim. 2007. Effects of water temperature, stocking density and feeding frequency on survival and growth in the oblong rockfish *Sebastes oblongus* larvae. *Kor. J. Ichthyol.* 19:1-7.

Received: 31 October 2013

Revised: 18 November 2013

Revision accepted: 18 November 2013