

저온 충격에 노출된 참돔 *Pagrus major* 치어의 임계 저 수온 및 행동 내성 반응

윤성진

한국해양과학기술원 울릉도·독도해양연구기지

Critical Low Temperature and Response of Behavioral Tolerance in Red Seabream *Pagrus major* fingerlings Exposed to Cold Shock

Sung Jin Yoon

Ulleungdo-Dokdo Ocean Science Station, Korea Institute of Science and Technology

요약 본 연구는 연속행동모니터링시스템(CBMS)을 사용하여 저온 충격에 노출된 참돔 *Pagrus major* 치어의 행동반응에 대한 임계 수온 및 행동 내성 반응을 규명하였다. 실험생물의 행동은 8.0~20.0℃ 수온구간에서 12시간과 24시간 마다 각각 2.0℃와 4.0℃씩 하강시키며 관찰하였다. 참돔 치어는 12.0℃ 이하로 수온이 하강한 경우 수온 노출시간과 변동 폭에 관계없이 유영활동이 감소하고 정지가 반복되는 불안정한 행동패턴이 관찰되었다. 또한 8.0~10.0℃ 수온에 노출된 생물의 유영능력은 급격히 저하되어 수조 바닥에서 머무르는 아치사 반응 행동을 보였다. 실험어류는 저 수온 스트레스 영향을 받아 생물의 50 %만 생존하였으며, 저온 충격(cold shock) 후 6시간 이내에 모든 개체가 사망하였다. 또한 행동지수(BI)는 급격히 감소하였으며 변이계수(CV)의 진폭변화는 타 수온보다 변동 폭이 큰 것으로 분석되었다($p < 0.05$). 참돔 치어의 저온 스트레스는 12.0℃를 경계로 촉진되며, 8.0~10.0℃의 저온 충격에 노출된 생물의 아치사 반응을 유발시키는 내성한계인 것으로 해석된다.

Abstract The critical low temperature and response of the behavioral tolerance of red sea bream *Pagrus major* fingerlings were determined using the continuous behavior monitoring system (CBMS). The behavior of the experimental organisms was observed by decreasing the water temperature by 2.0℃ and 4.0℃ every 12 hours and 24 hours in the range of 8.0-20.0℃. An unstable behavior pattern was observed in red seabream fingerlings exposed to water temperatures below 12.0℃, in which the swimming activity decreased and repeatedly stopped, regardless of the exposure time and water temperature fluctuation. The swimming ability of the organisms exposed to 8.0-10.0℃ decreased sharply, and the behavior of staying at the bottom of the test tank was observed. Only 50 % of the organisms survived due to the low-temperature stress, and all individuals died within six hours after the cold shock. In addition, the behavior index (BI) decreased rapidly, and the amplitude change of the coefficient of variation (CV) was found to have a greater variation than the other water temperatures ($p < 0.05$). Low-temperature stress of red sea bream is promoted at 12.0℃, and it is interpreted as the tolerance limit, which can induce a sublethal response of the organisms exposed to cold shock of 8.0-10.0℃.

Keywords : Cold Shock, Critical Low Temperature, Stress, Sublethal Response, Behavioral Tolerance, Red Seabream, CBMS

본 논문은 한국해양과학기술원 연구과제[PE99813]로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sung Jin Yoon(Korea Institute of Ocean Science & Technology)

email: sjyon@kiost.ac.kr

Received August 31, 2020

Revised October 5, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

수온은 양식생물의 산란, 에너지 대사활동, 유영 및 생존 등에 중요한 영향을 미칠 수 있다[1-3]. 특히 가두리 양식장과 같은 통제된 환경에서 임계온도한계(CTM: critical thermal limit, 이하 CTM) 이하로 수온이 하강하여 내성한계를 벗어나면 사육중인 생물은 급작스런 저온 충격(cold shock)으로 인해 대량 폐사가 유발되기도 한다[7].

예를 들어 돚류(sparidae)와 같은 온수성 어류는 비교적 넓은 수온 범위에서 정상적인 대사패턴을 유지할 수 있으나 급작스런 수온변화에 따른 어류의 반응 메커니즘은 더 이상 자발적 유영, 먹이 섭취와 같은 정상적인 신진대사를 유지하기에 충분하지 않다[8,9]. 이와 같은 환경에서 어류는 수온이 하강할수록 저온에 대한 적응능력이 더욱 떨어져 한계수준에 도달하는데, 이를 어류의 임계수온(critical temperature) 이라고 정의할 수 있다. 또한 급작스런 수온변화는 호흡, 신경 내분비 변화와 같은 스트레스 반응을 유발할 수 있으며[1,10], 어류는 임계수온 이하의 내성한계(tolerance limit)에 도달하면 먹이섭취, 호르몬 분비, 삼투작용 및 유영행동의 교란이 발생하여 결국 치사상태에 도달하게 된다[11-14].

자연에서 어류는 이러한 위협을 극복하기 위해 회피행동(예, 유영을 통해 또는 더 나은 수온을 이용하기 위해 깊숙이 들어가는 경우)을 할 수 있지만 양식장과 같은 통제된 환경에서는 자연에서와 같은 반응을 사용할 수 없기 때문에 수온변화에 따른 어류의 스트레스 반응을 미리 이해할 필요가 있다[15,16]. 특히 어린 치어는 성어와는 달리 수온변화에 민감할 것으로 예측되는데, 지금까지 어류의 초기 생활사 중 치어 단계에서 저온 충격에 따른 사전 스트레스 징후를 밝히기 위한 임계 수온 및 내성반응 연구는 거의 수행되지 않았다.

환경변화와 관련된 생물의 스트레스 반응은 생태독성 평가라는 고전적인 방법으로 연구되었으며[17,18], 최근에는 체내 단백질이나 호르몬, 특정 유전자의 변화를 규명하기 위한 방법[19,20]과 호흡생리 변화 및 행동패턴 분석기법이 도입되어 아치사 반응(sublethal response)과 같은 세밀한 생체-생리 변화 과정을 관찰할 수 있다[21-24]. 특히 행동관찰을 통한 접근 방법은 육안관찰, 거울 이미지, 모델링 및 비디오 재생 연구[25-28]가 수행되었으나 최근에는 생물의 움직임을 실시간으로 연속 관찰하고 장기간 동안 행동 자료를 수집하고 저장함으로써 생물의 스트레스와 아치사 반응까지 연속적으로 분석 가

능한 방법이 개발되었다[29].

Table 1. Score distribution for each of the three behavioral variables applied to the behavior index calculation

Score	Factor	Distance (pixel)	Speed (pixel/sec)	Fractal dimension
0.00		0.00	0.00	0.00
0.10		0.40	4.00	0.20
0.20		0.80	8.00	0.40
0.40		1.60	16.00	0.80
0.50		2.00	20.00	1.00
0.60		2.40	24.00	1.20
0.70		2.80	28.00	1.40
0.80		4.00	35.00	1.60
1.20		5.00	40.00	1.70
2.00		6.00	45.00	1.80
4.00		7.00	50.00	1.90
6.00		8.00	55.00	2.00

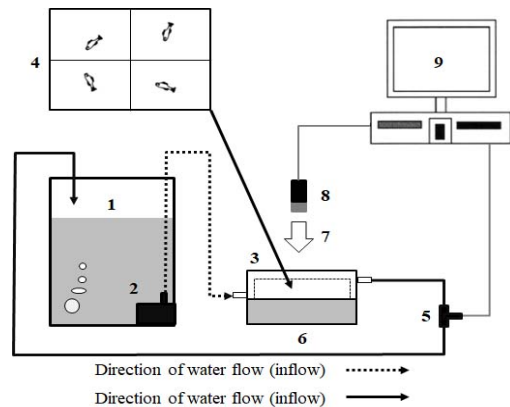


Fig. 1. Schematic (not to scale) of apparatus used to observe behavioral pattern in the test organisms. 1: reservoir container, 2: aqua pump, 3: water support chamber, 4: test chamber, 5: temperature sensor, 6: light emitting diode (LED), 7: camera tracking direction, 8: web-camera, 9: computer for data storage

이에 본 연구에서는 기 개발된 생물의 연속행동모니터링시스템(CBMS: Continuous Behavior Monitoring System 이하 CBMS)을 사용하여 저온 충격에 노출된 참돔 *Pagrus major* 치어의 행동반응에 대한 임계 수온 한계(Critical Temperature Limit) 범위와 저온 스트레스에 대한 참돔 치어의 내성한계를 규명함으로써 급작스런 저온 충격에 의한 양식생물의 피해를 최소화할 수 지표

자료를 확보하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험생물 관리 및 유지

본 연구에 이용된 참돔 치어는 2019년 3월 초에 올릉도 종묘 배양장에서 사육중인 개체들 중 200개체를 실험실 내 2톤 수조로 운반한 후 실험 전까지 유지하였다. 실험생물은 부화 후 50일이 지난 참돔 치어(전장 28.2±4.1 mm, 체중 0.38±0.14 gwwt)를 사용하였으며, 20.0±1.0℃ 수온, 32.0±1.0 psu 염분, pH 8.0±0.1 및 90 % 이상의 산소포화농도에서 실험 전까지 관리하였다. 먹이는 1일 2회 상업용 EP 사료(Otohime S1 Herame, Japan)를 공급하였으며, 조도는 실험실 환경(5000 Lux), 광주기는 12시간 조명과 12시간 무 조명(12h Lightness : 12h Darkness)을 유지하였다. 사육용수는 1.0 μm 필터를 사용하여 지수식(200 L/min)으로 공급하였으며, 수온, 염분, pH 및 산소포화농도는 수질측정기(YSI, 556MPS, USA)를 이용하여 매일 1회 측정하였다.

2.2 참돔 치어의 행동반응 모니터링

어류의 행동관찰은 카메라를 통해 투시된 실시간 배경영상을 추출한 후 현재의 프레임과 차 영상의 차이를 비교하는 기법을 이용하였다. 본 방법은 생물의 3가지 행동변수를 측정하여 활동성을 분석할 수 있으며 연속적인 행동추적이 가능하다. 어류의 행동을 관찰하기 위한 변수

는 생물의 유영거리, 유영속도, 및 프랙탈 차원 분석 값으로 구분되며, 각각의 변수는 0.05초 마다 측정되며, 10초 동안 모은 자료를 평균하여 제시해 준다.

생물의 유영거리와 속도는 pixel 단위를 사용하였다. 프랙탈 차원 분석은 box counting method를 사용하여 아래 식을 이용하였다.

$$N = \left(\frac{1}{r}\right)^D, D = \frac{\log N}{\log(1/r)}$$

여기서, N 은 궤적을 포함하고 있는 상자의 개수이고, r 은 축소율이다.

이 두 변수의 관계는 이중로그 그래프(log(1/r), logN)로 나타낼 때 선형관계가 된다. 궤적을 포함하고 있는 상자의 개수와 축적사이의 관계는 멱법칙(power law)이 적용되며, 멱함수(power function)의 지수가 프랙탈 차원이 된다. 궤적이 직선을 이루면 프랙탈 차원은 1이나 1에 가까운 값이 계산된다. 궤적이 면을 이룰 때는 2가 되고 측정되는 궤적에 대해서는 1과 2 사이 중간의 차원이 값이 계산된다. 본 연구에 적용된 지수 값은 생물의 유영거리(pixel), 속도(pixel/sec) 및 프랙탈 차원 값 등 총 3가지 행동변수를 이용하여 계산하였다. 행동지수(BI: behavior index, 이하 BI)는 행동변수마다 측정구간을 나누어 점수를 매긴 후 Table 1과 같이 최종적으로 3개의 변수가 조합된 하나의 지수를 산출하였다.

생물개체간의 생태-생리적 특성변화는 Fig. 1과 같이 실험수조를 4개의 행동 관찰 영역으로 구분하여 각각의 분할영역에서 개체의 행동자료를 수집한 후 이를 하나의 BI를 산출하는 방법(4+1 method)을 적용하였다. 어류

Table 2. Experimental conditions for measure the behavior response of the red seabream in the three temperature regimes. Seabream (n=200) measured 28.2±4.1mm (mean±SD) in total length and 0.38±0.14 gwwt in wet weight. Statistical values were computed for each batch from 17,279-37,248 data points measured. Test was measured in constant lightness and water temperature

	Constant condition	Exposure to temperature changes of ΔT=2.0℃/12h	Exposure to temperature changes of ΔT=4.0℃/24h
Real temperature range (℃)	19.9-20.2	8.0-22.0	8.1-20.4
Salinity (psu)	31.1-31.2	31.0-31.3	31.1-31.4
Oxygen saturation level (%)	90.0	90.0	90.0
Volume of test chamber (L)	11.5	11.5	11.5
Volume of test seawater (L)	7.5	7.5	7.5
Flow rate (ml min ⁻¹)	416.7	416.7	416.7
Duration (h) of the experiment	48.0-51.8	95.1-103.1	87.9-95.9
Number of points measured	17,279-18,406	34,251-37,248	31,669-34,549
Number of experiments	3	3	3
Total length (mm, mean±SD)	28.1±3.5	28.3±4.7	28.1±3.5
Wet weight (gwwt, mean±SD)	0.35±0.18	0.39±0.16	0.37±0.14
Total number of test animals	12	12	12

의 행동관찰은 실험수조 하부에 백색조명장치로써 발광 다이오드(light emitting diode, 3000 Lux)를 설치하고, 상부에는 웹 카메라를 설치하여 각각의 분할영역에서 움직이는 개체의 행동패턴을 추적하였다. 연속 행동 모니터링 시스템의 원리 및 상세 설명은 기 수행된 연구에 자세히 설명되어 있다[29,30].

저 수온 노출 실험기간 동안 염분은 31.5 ± 0.2 psu, pH 8.0 ± 0.1 , 산소포화도는 90 % 이상 유지하였다. 실험수온은 기본적으로 $8.0 \sim 20.0^\circ\text{C}$ 범위를 설정하였으며, 실험도중 생물이 사망한 경우 실험을 중단하였다. 실험시 수조 바닥에서 투영되는 LED 조명은 실험시간 내내 밝은 상태를 유지하였으며, 먹이는 생물의 행동, 성장 및 대사활동의 변화를 최소화하기 위하여 실험기간 내내 공급하지 않았다[31,32].

참돔 치어의 행동변화는 3가지 실험체계를 구성하여 관찰하였다. 첫 번째 실험은 20.0°C 수온에서 48시간 이상 수온변화 없이 안정된 상태(constant condition)에서 생물의 행동패턴을 관찰하였다. 두 번째, 실험생물은 20.0°C 에서 12시간 동안 노출시켰으며, 이후 12시간 마다 2.0°C 씩 수온을 하강시켰다($\Delta T=2.0^\circ\text{C}/12\text{h}$). 세 번째 실험은 20.0°C 에서 24시간 마다 4.0°C 씩 수온을 하강시켰다($\Delta T=4.0^\circ\text{C}/24\text{h}$).

참돔 치어의 행동반응 실험은 각각의 실험체계마다 Table 2과 같은 조건에서 수행하였다. 참돔의 행동은 행동추적프로그램을 이용하여 메인컴퓨터에서 실시간으로 추적하며, 실험결과는 모니터 상에서 직접 확인하였다. 또한 생물의 3가지 행동변수 및 BI는 텍스트 파일 형태로 자동 저장되어 차후 행동분석을 위한 자료로 사용하였다.

2.3 자료분석

실험생물의 행동분석은 2 % weighted smooth curve를 통해 분석하였다. BI의 주요 변동 패턴 분석은 데이터 중심을 통해 가장 적합한 부드러운 곡선을 그릴 수 있는 기중 최고-제곱 오차방법(weighted least-squares error method)을 사용하였다. 실험을 통해 산출된 값은 최적곡선으로 나타내었다[33]. 측정된 데이터 값으로부터 각각의 수온구간별 통계 값을 산출하였으며 통계 값은 평균 \pm 표준편차(mean \pm SD)로 계산하여 그래프로 나타내었다. 실험생물의 스트레스 반응 여부는 KaleidaGraphy 프로그램(KaleidaGraphy 3.52, Synergy Software, Germany)의 student's t-test를 통해 20.0°C 에서 수행된 BI와 각각의 수온 노출 자료를 비교하여 유의성을 검증하였다.

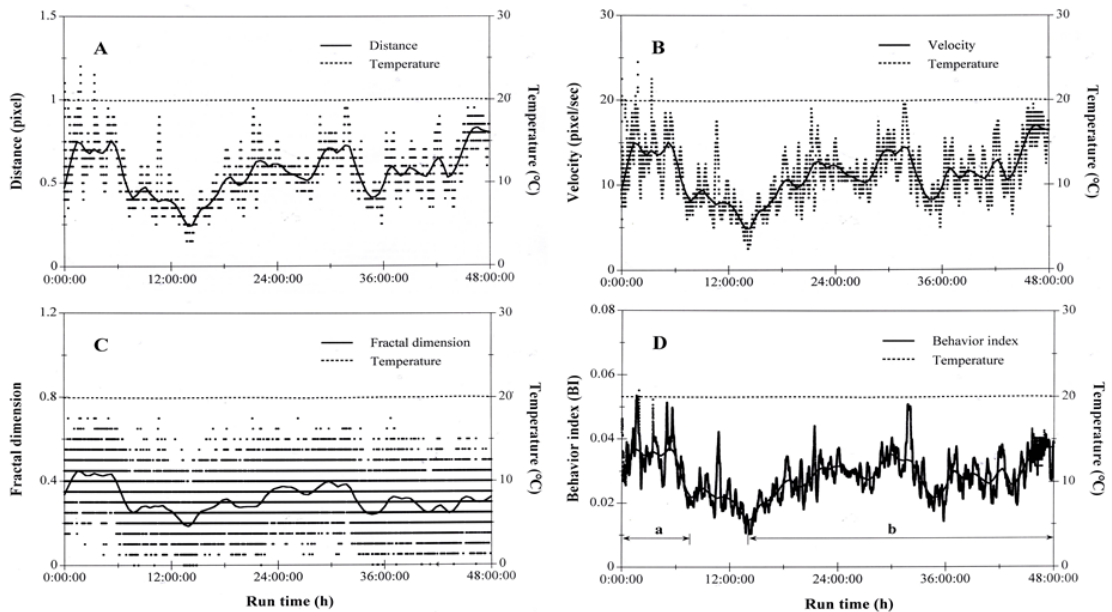


Fig. 2. Time series of the behavioral patterns of groups of 4 fasted seabream fingerlings during 48h. The experiments were conducted in constant lightness at $20.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ and over 90 % oxygen saturation level. Mean BI curves through the center of the data used a weighted smooth curve of 2 %

3. 결과

3.1 안정된 환경에서 참돔 치어의 행동반응

Fig 2는 일정한 조도(3000 Lux)와 수온(20.0±0.1℃)에서 참돔 치어의 유영거리, 속도, 프랙탈 차원 값 및 BI 결과를 나타내었다. 실험생물의 활동량은 행동관찰수조에 입식한 후 초기 7.5시간 동안 일시적으로 증가하였는데, 유영거리는 1.20 pixel, 유영속도는 24.5 pixel/sec, 프랙탈 차원 값은 0.70으로 산출되었다. BI는 수조 입식 후 0.055까지 일시적으로 상승하였고, 시간이 경과함에 따라 감소하였다. 반복실험 기간(48.0~51.3시간) 동안 참돔 치어는 초기 일시적 활동량 증가 후 실험생물이 수조환경에 적응하는 기간은 최소 12시간 소요되는 것으로 분석되었다.

3.2 12시간 수온하강 실험

Fig 3은 20.0℃부터 8.0℃까지 12시간 마다 수온을 하강시키며 참돔 치어의 행동패턴을 관찰한 결과이다. 20.0~14.0℃ 구간에서 49.4시간 동안 BI의 진폭은 0.007~0.017(0.010±0.001) 사이에서 증감을 반복하였으며, 생물은 수조 내에서 안정된 유영행동을 보였다.

Fig. 3D의 (b)에서 보는 바와 같이 14.0℃ 이하 수온구간에서 BI는 0.008~0.029(0.015±0.005)로 급격히 증가하였으며, 최대 정점(peak)은 13.4℃에서 관찰되었다. 10.6~8.6℃ 수온구간 노출 후 BI는 서서히 감소하였으며, 18.9시간 동안 유영 및 활동성이 급격하게 위축되어 저 수온 스트레스에 대한 내성이 약화되었다. 이 시기에 실험생물은 대부분 유영행동 없이 수조 바닥에 머무는 아치사 반응이 관찰되었으며, 실험개체의 50 %가 사망하였다. Fig. 3D의 (c)는 8.6℃ 이하 저 수온이 6시간 동안 지속되면서 100 % 사망한 결과를 나타내고 있다.

3.3 24시간 수온하강 실험

Fig. 4는 24시간마다 4.0℃씩 수온을 하강시키면서 행동패턴을 관찰한 결과를 보여주고 있다. Fig. 4D에 나타난 바와 같이 참돔 치어의 BI는 0~0.061(0.016±0.011)로 산출되었으며, 반복적인 진폭변화를 보였다. Fig. 4D의 (a)와 (b) 구간에서 보는 바와 같이 BI 진폭은 16.0℃까지 안정된 패턴을 보였으나 실험시작 41.6시간 후 일시적으로 최대 정점(0.061)에 도달하였고, 12.0℃까지 증감을 반복하였다. BI는 11.4℃ 부근에서 두 번째 정점(0.031)에 도달한 후 9.2℃까지 6.4시간

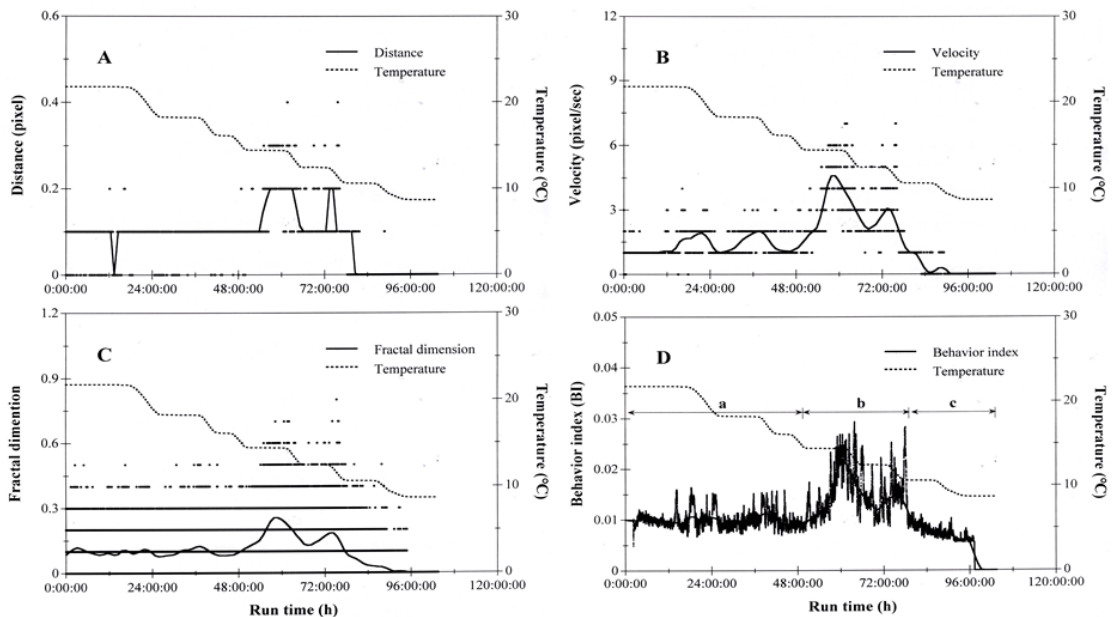


Fig. 3. Changes of behavioral Index of groups of 4 fasted seabream fingerlings, which were subjected to temperature decreases from about 20.0 to 8.0℃ ($\Delta T=2\text{℃}/12\text{h}$). Mean BI curves through the center of the data used a weighted smooth curve of 2%. Dotted line boxes indicate the water temperature range that shows the stress responses of test animals exposed to low water temperature

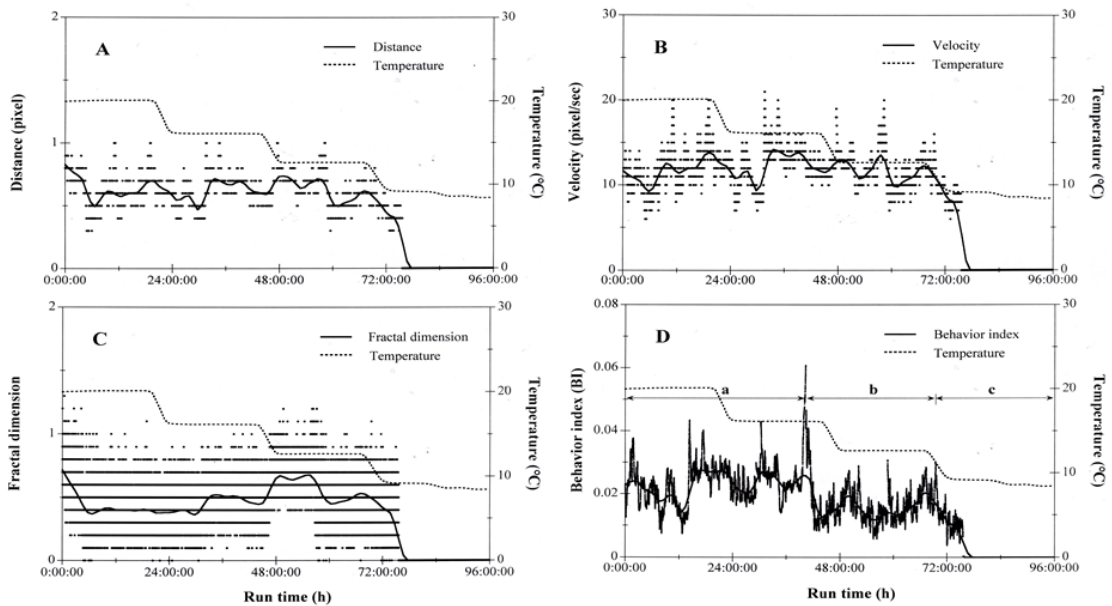


Fig. 4. Changes of behavioral Index of groups of 4 fasted seabream fingerlings, which were subjected to temperature decreases from about 20.0 to 8.0°C ($\Delta T=4^{\circ}\text{C}/24\text{h}$). Mean BI curves through the center of the data used a weighted smooth curve of 2%. Dotted line boxes indicate the water temperature range that shows the stress responses of test animals exposed to low water temperature

동안 감소하였다. 또한 Fig. 4D의 (c)에 나타난 바와 같이 9.2~8.5°C 수온에 노출된 후 생물의 활동성은 급격히 위축되었는데, 유영능력 저하 및 정지한 상태로 수조 바닥에서 머무르는 아치사 반응 행동을 보였으며, 저 수온 스트레스에 대한 내성이 악화되어 생물의 50%가 사망하였다. 참돔 치어는 8.5°C 이하 저온에 지속적으로 노출되면서 실험 개체의 100%가 사망하였다.

3.4 수온구간별 참돔 치어의 행동지수 비교

Fig. 5A에서 보는 바와 같이 $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}/12\text{h}$ 실험에서 수온구간별 평균 BI는 20.0°C 수온에서 0.012~0.013(± 0.004), 14.0°C와 12.0°C 구간에서는 진폭의 차이는 있으나 0.015(± 0.005)로 분석되었다. 10.0°C 구간의 BI는 0.013 \pm 0.008로 다소 낮은 경향을 보였으며, 8.0°C로 수온을 하강시킨 후 0.003 \pm 0.004로 급격히 감소하였다. Fig. 5B는 $\Delta T=4.0^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ 실험에서 분석된 결과를 나타내고 있다. 20.0°C와 16.0°C 수온에서 참돔의 평균 BI는 유사한 값을 보였으며, 12.0°C 이하 저 수온 환경에서는 뚜렷하게 감소하였다. 12.0°C 구간의 BI는 0.016 \pm 0.005로 소폭 차이를 보였으며, 8.0°C에서는 0.002 \pm 0.004로 급격하게 감소하였다.

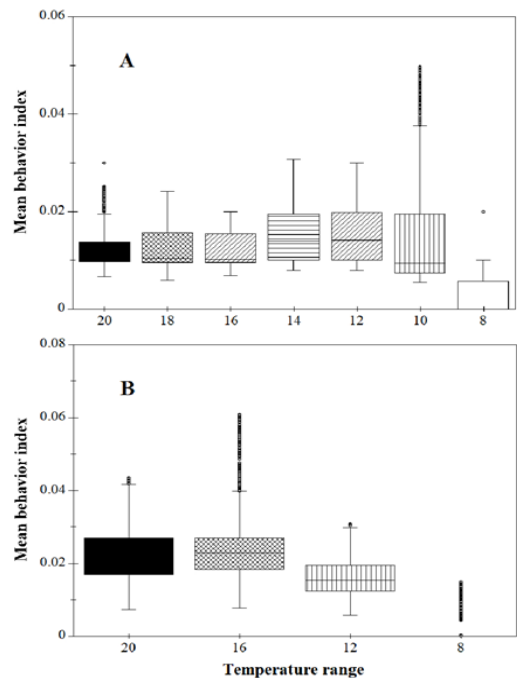


Fig. 5. Comparison of mean BI of red seabream *Pagrus major* fingerlings by each experimental regime at different temperature

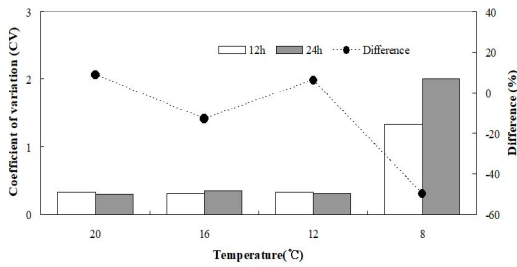


Fig. 6. Comparison of the coefficient of variation in the behavior index of experimental organisms by exposure time according to the drop in water temperature

Fig. 6는 실험생물의 평균 BI와 표준편차 자료를 바탕으로 산출된 수온구간별 변이계수(CV: coefficient of variation, 이하 CV)를 보여주고 있다. 12시간 노출실험 결과 CV는 12.0°C 보다 높은 수온에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 8.0°C 노출구간에서는 1.33으로 급격하게 증가하였다. 24시간 노출 실험결과도 유사한 경향을 보였는데 12.0~20.0°C 구간의 CV는 0.30~0.35 범위로 큰 차이를 보이지 않았으나 8.0°C 구간에서는 2.00로 타 수온구간과 큰 차이를 보였다. 24시간 실험결과 8.0~10.0°C 저 수온환경에 CV의 변동 폭은 타 수온구간보다 큰 것으로 분석되었다($p < 0.05$).

4. 결론

CBMS를 이용하여 생물 고유의 행동패턴을 관찰한 결과 참돔 치어의 BI는 실험초기 일시적으로 증가하는 비정상적인 행동패턴을 보였다. 이와 같은 행동은 조피볼락 (*Sebastes schlegelii*)의 호흡 패턴과 송사리(*Oryzias latipes*)의 초기 행동에서도 관찰되었는데, 이는 운반 및 수조환경 적응과정에서 나타나는 handling에 의한 생물의 일시적 스트레스 반응 결과로 해석되었다[22,29]. 본 연구에서 참돔 치어의 입식 초기 행동은 수조환경에 적응하기 위한 행동반응으로 판단되었다. 또한 반복실험을 통해 산출된 참돔 치어의 초기 적응 시간은 평균 12시간 가량 소요되는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 20.0°C에서 8.0°C까지 수온을 하강시키며 참돔 치어의 행동패턴을 관찰한 결과 $\Delta T=2.0^\circ\text{C}/12\text{h}$ 실험에서 생물의 활동성은 13.4°C에서 행동지수가 최대 정점(peak)에 도달한 후 10.5°C 수온까지 높은 수준을 유지하였다. 일부 연구에서 gilthead sea bream은 수온

이 떨어지면 냉기로 유발된 공복, 열 스트레스 및 대사기능 저하와 같은 세 가지 직접적인 영향을 받으며, 이를 유발시키는 임계 수온은 12.0~13.0°C 범위인 것으로 제안하였다[34]. 또한 참돔 치어는 10.0°C에서 저 수온 충격에 의한 스트레스로 인해 정상적인 행동패턴이 교란되어 유영활동 없이 수조 바닥에 머무는 행동을 보였다. 이와 같은 반응은 본 종이 저온 환경에서 체내 에너지를 보존하여 생존 시간을 연장시키려는 생존 전략으로 해석된다[35]. 본 연구에서 10.0°C에서 8.0°C로 수온이 하강하면 참돔 치어는 저 수온에 대한 내성 한계에 도달하여 사망하는 개체가 발생하였는데, 이는 8.0~10.0°C 수온구간이 저온 충격에 노출된 참돔 치어의 아치사 반응을 유발시키는 행동 내성 한계인 것으로 판단된다. $\Delta T=4.0^\circ\text{C}/24\text{h}$ 실험결과 12.0°C 이하 수온에 노출된 참돔 치어의 낮은 BI는 12.0°C가 생물의 먹이섭취에 적합한 수온 임계값으로 보고된 결과와 일치하였다[12].

참돔 성어는 저 수온에 대한 폐사 임계수온이 5.0~9.1°C 범위이며[36,37], 수온이 완만하게 8.0°C로 떨어지면서 폐사는 나타나지 않으나 수온이 심하게 변하면 7.0°C 정도에서 폐사한다고 보고되었다[38]. 이와 같이 어류의 임계수온 및 내성한계 반응은 수온온도로부터의 수온변동 폭과 저온 노출시간에 영향을 받아 대사조절능력을 잃는 것으로 판단되었다.

본 연구에서 9.2~8.5°C 수온에 노출된 후 참돔 치어의 활동성은 급격히 위축되었으며, 8.5°C 이하 수온에 지속적으로 노출되면서 실험 개체의 100 %가 사망하였다. 수온하강에 따른 어류의 먹이 섭취 행동의 감소는 저 수온 충격에 의한 스트레스의 첫 징후이다[39]. 통제된 조건 하에서 돔류는 수온이 20.0°C에서 8.0°C로 하강하면 무기력 증세가 뚜렷하게 관찰되며, 바닥에 머무는 행동을 보였다[34,40]. 냉수(cold water)는 어류의 운동 기능 장애, 평형 조절 부족, 시냅스 전달 억제에 의한 신경 기능 장애 및 내인성 리듬 활성의 상실 등 열에 대한 종의 내성(thermal tolerance)을 변화시킨다[41]. 이에 참돔과 같은 온수성 어종은 동계 한파 발생으로 인해 저 수온 환경에 장기간 노출된다면 대량 폐사가 발생하여 양식 산업에 큰 피해를 줄 것으로 판단된다. 수온구간별 CV는 8.0~10.0°C 구간에서 노출수온과 관계없이 타 수온보다 변동 폭이 큰 것으로 분석되었다($p < 0.05$). 이와 같이 저온 충격에 대한 참돔 치어의 행동반응은 수온 편차와 노출 지속시간에 따라 큰 차이를 보이며, 결과적으로 정상적인 생리대사활성을 방해하는 원인 제공을 하는 것으로 판단된다. 또한 12.0°C 수온 이하의 급작스럽게 수온 하

강은 저온 충격으로 인한 참돔 치어의 행동 교란현상이 시작되며, 정상적인 유영활동 및 먹이섭취 행동 변화를 자극하는 임계점의 역할을 할 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로 참돔 치어의 저온 충격은 12.0℃ 경계로 촉진되며, 8.0~10.0℃의 수온구간은 참돔 치어의 행동에 대한 아치사 반응을 유발하는 내성한계인 것으로 파악된다. 이와 같은 결과는 양식 어류의 동계 폐사원인 규명 및 저온 충격에 의한 어린 치어의 치사율을 감소시킴으로써 양식생물의 생산량 증가에 기여할 수 있는 자료로서 활용 가치가 높은 것으로 판단된다.

References

- [1] T. J. Bowden, "Modulation of the immune system of fish by their environment". *Fish & Shellfish Immunology*, Vol.25, No.4, pp.373-383, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2008.03.017>
- [2] B. Basurco, A. Lovatelli, B. García, "Current status of Sparidae aquaculture", In: M. A. Pavlidis, C. C. Mylonas (eds) *Spadidae-biology and aquaculture of gilthead sea bream and other species*, Blackwell Publishing, 2011, pp.1-50.
- [3] A. M. Azab, M. A. Mousa, N. A. Khalil, H. M. M. Khalaf-Allah, R. T. M. Mabrouk, "Effect of temperature and salinity on larval growth of the gilthead seabream, *Sparus aurata*" *International Journal of Environmental Science and Engineering*, Vol.6, pp.35-46, 2005.
- [4] D. Debnath, A. K. Pal, N. P. Sahy, K. Baruah, S. Yengkokpam, T. Das, S. Manush, "Thermal tolerance and metabolic activity of yellowtail catfish *Pangasius pangasius* (Hamilton) advanced fingerlings with emphasis on their culture potential", *Aquaculture*, Vol.258, No.1-4, pp.606-610, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.04.037>
- [5] M. Kir, M. C. Sunar, B. C. Altındağ, "Thermal tolerance and preferred temperature range of juvenile meagre acclimated to four temperature". *Journal of Thermal Biology*, Vol.65, pp.125-129, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.itherbio.2017.02.018>
- [6] K. J. Oyen, S. Giri, M. E. Dillon, "Altitudinal variation in bumble bee (*Bombus*) critical thermal limits", *Journal of Thermal Biology*, Vol.59, pp.52-57, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.itherbio.2016.04.015>
- [7] H. K. Hwang, K. I. Park, S. W. Park, M. S. Choi, E. O. Kim, J. W. Do, B. S. Oh, "Physiological response of juvenile red sea bream *Pagrus major* exposed to low temperature shock", *Bulletin of European Association of Fish Pathologists*, Vol.32, No.1, pp.34-40, 2002.
- [8] L. S. Procarione, T. L. King, "Upper and lower temperature tolerance limits for juvenile red drums from Texas and South California", *Journal of Aquatic Animal Health*, Vol.5, No.3, pp.208-212, 1993.
- [9] L. Tort, J. Rotllant, C. Liarte, L. Acerete, A. Hernández, S. Ceulemans, P. Coutteau, F. Padrós, "Effect of temperature decrease on feeding rates, immune indicators and histopathological changes of gilthead sea bream *Sparus aurata* fed with an experimental diet", *Aquaculture*, Vol.229, No.1-4, pp.55-65, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00403-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00403-4)
- [10] W. S. Kim, S. J. Yoon, J. M. Kim, J. W. Gil, T. W. Lee, "Effects of temperature changes on the endogenous rhythm of oxygen consumption in the Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*", *Fisheries Science*, Vol.71, pp.471-478, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2005.00990.x>
- [11] A. Ibarz, M. Beltrán, J. Fernández-Borràs, M. A. Gallardo, J. Sánchez, J. Blasco, "Alteration in lipids metabolism and use of energy depots of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) at low temperature", *Aquaculture*, Vol.262, No.2-4, pp.470-480, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.008>
- [12] M. Remen, "Effect of temperature on the metabolism, behaviour and oxygen requirements of *Sparus aurata*" *Aquaculture Environment Interactions*, Vol.7, No.2, pp.115-123, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3354/aei00141>
- [13] T. A. Ellis, J. A. Buckel, J. E. Hightower, S. J. Poland, "Relating cold tolerance to winterkill for spotted seatrout at its northern latitudinal limits", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol.490, pp.42-51, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.010>
- [14] Y. K. Shin, Y. D. Kim, W. J. Kim, "Survival and Physiological Responses of Red Sea Bream *Pagrus major* with Decreasing Sea Water Temperature", *Korea Journal of Ichthyology*, Vol.30, No.3, pp.131-136, 2018. DOI: <https://doi.org/10.35399/ISK.30.3.1>
- [15] Á. M. Gallardo, M. Sala-Rabanal, A. Ibarz, F. Padrós, J. Blasco, J. Fernández-Borràs, J. Sánchez, "Functional alterations associated with "winter syndrome" in gilthead sea bream (*Sparus aurata*)", *Aquaculture*, Vol.223, No.1-4, pp.15-27, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00164-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00164-9)
- [16] G. Barnabé, "Rearing bass and gilthead sea bream", In: G. Barnabé (ed) *Aquaculture*, vol.2, Ellis Horwood, London, pp.647-686, 1990.
- [17] J. Forget, J. F. Pavillon, M. R. Menasria, G. Bocquené, "Mortality and LC50 values for several stages of the marine copepod *Tigriopus brevicornis* (Müller) exposed to the metals arsenic and cadmium and the pesticides atrazine, carbofuran, dichlorvos, and malathion", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol.40, pp.239-244, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1006/eesa.1998.1686>

- [18] T. P. Hurst, B. H. Key, P. A. Ryan, M. D. Brown, "Sublethal effects of mosquito larvicides on swimming performance of larviorous fish *Melanotaenia duboulayi* (Atheriniformes: Melanotaeniidae)", *Journal of Economic Entomology*, Vol.100, No.1, pp.61-65, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1093/je/100.1.61>
- [19] E. E. Fountoulaki, M. N. Alexis, I. Nengas, "Protein and energy requirements of gilthead bream (*Sparus aurata* L.) fingerlings: Preliminary results", In: D. Montero, B. Basurco, I. Nengas, M. Alexis, M. Izquierdo (eds). Mediterranean fish nutrition. Zaragoza: CIHEAM, pp.19-26, 2005.
- [20] M. K. Sabullah, S. A. Ahmad, M. Y. Shukor, A. J. Gansau, M. A. Syed, M. R. Sulaiman, N. A. Shamaan, "Heavy metal biomarker: Fish behavior, cellular alteration, enzymatic reaction and proteomics approaches", *International Food Research Journal*, Vol.22, No.2, pp.435-454, 2015.
<http://www.ifri.upm.edu.my>
- [21] W. J. Rowland, "Studying visual cues in fish behavior: a review of ethological techniques", *Environmental Biology of Fishes*, Vol.56, pp.285-305, 1999.
- [22] S. J. Yoon, C. K. Kim, J. G. Myoung, W. S. Kim, "Comparison of oxygen consumption patterns between wild and cultured black rockfish *Sebastes schlegelii*", *Fisheries Science*, Vol.69, No.1, pp.43-49, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2003.00586.x>
- [23] S. Fukuda, I. J. Kang, J. Moroishi, A. Nakamura, "The application of entropy for detecting behavioral responses in Japanese medaka (*Oryzias latipes*) exposed to different toxicants", *Environmental Toxicology*, Vol.25, No.5, pp.446-455, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1002/tox.20589>
- [24] J. Chevalier, E. Harscoet, M. Keller, P. Pandard, J. Cachot, M. Grote, "Exploration of *Daphnia* behavioral effect profiles induced by a broad range of toxicants with different modes of action", *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol.34, No.8, pp.1760-1769, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.2979>
- [25] R. M. Ross, W. F. Krise, L. A. Redell, M. Bennett, "Effect of dissolved carbon dioxide on the physiology and behavior of fish in artificial streams", *Environmental Toxicology*, Vol.16, No.1, pp.84-95, 2001.
- [26] Z. Ren, J. Zha, M. Ma, Z. Wang, Gerhardt A. "The early warning of aquatic organophosphorus pesticide contamination by on-line monitoring behavioral changes of *Daphnia magna*" *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.134, No.1-3, pp.373-383, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9629-y>
- [27] B. Niu, G. Li, F. Peng, J. Wu, L. Zhang, Z. Li, "Survey of fish behavior analysis by computer vision", *Journal of Aquaculture Research & Development*, Vol.9, No.5, pp.1-15, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000534>
- [28] F. Yuan, Y. Huang, X. Chen, E. Cheng, "A Biological sensor system using computer vision for water quality monitoring", *IEEE Access*, Vol.6, pp.61535-61546, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876336>
- [29] S. J. Yoon, G. S. Park, "Toxicity and behavioral changes of medaka (*Oryzias latipes*) by brine exposure", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol.16, No.1, pp.39-51, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.7850/jkso.2011.16.1.039>
- [30] I. S. Kwak, T. S. Chon, H. M. Jang, N. Chung, J. S. Kim., S. C. Koh, S. K. Lee, Y. S. Kim, "Pattern recognition of the movement tracks of medaka (*Oryzias latipes*) in response to sub-lethal treatments of an insecticide by using artificial neural networks", *Environmental Pollution*, Vol.120, pp.671-681, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00183-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00183-5)
- [31] J. Widdows, A. J. S. Hawkins, "Partitioning of rate of heat dissipation by *Mytilus edulis* into maintenance, feeding and growth components", *Physiological Zoology*, Vol.62, pp.764-784, 1989.
DOI: <https://doi.org/10.1086/physzool.62.3.30157926>
- [32] W. S. Kim, S. J. Yoon, H. T. Moon, T. W. Lee, "Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*", *Marine Ecology Progress Series*, Vol.243, pp.209-216, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.3354/meps243209>
- [33] W. S. Kim, S. J. Yoon, J. W. Kim, J. A. Lee, T. W. Lee, "Metabolic response under different salinity and temperature conditions for glass eel *Anguilla japonica*", *Marine Biology*, Vol.149, pp.1209-1215, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0293-5>
- [34] A. Ibarz, F. Padrós, M. Á. Gallardo, F. Fernández-Borrás, J. Blasco, L. Tort, "Low-temperature challenges to gilthead sea bream culture: review of cold-induced alterations and 'Winter Syndrome'", *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, Vol.20, pp.539-556, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1007/S11160-010-9159-5>
- [35] L. J. Chapman, D. J. McKenzie, DJ, "Behavioural responses and ecological consequences", In: J. G. Richards, A. P. Farrell, C. J. Brauner (eds) *Fish physiology*, Vol.27, hypoxia, Elsevier, London, pp.26-79, 2019.
- [36] T. Ford, T. L. Beitinger, "Temperature tolerance in the goldfish, *Carassius auratus*", *Journal of Thermal Biology*, Vol.30, No.2, pp.147-152, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.09.004>
- [37] R. S. Dalvi, A. K. Pal, L. R. Tiwari, T. Das, K. Baruah, "Thermal tolerance and oxygen consumption rates of the catfish *Horabagrus brachysoma* (Günther) acclimated to different temperatures", *Aquaculture*, Vol.295, No.1-2, pp.116-119, 2009.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.06.034>

- [38] S. K. Yoo, Mariculture, p.626, Guduk Publishing Co., Korea, 2000, pp.570-590.
- [39] J. M. Elliot, "Tolerance and resistance to thermal stress in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*", *Freshwater Biology*, Vol.25, No.1, pp.61-70, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1991.tb00473.x>
- [40] M. Sala-Rabanal, J. Sánchez, A. Ibarz, J. Fernández, J. Blasco, M. A. Gallardo, "Effects of low temperatures and fasting on hematologic and plasma biochemical profiles of gilthead sea bream (*Sparus aurata*)", *Fish Physiology and Biochemistry*, Vol.29, pp.105-115, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:FISH.0000035904.16686.b6>
- [41] H. S. Choi, S. H. Jung, Y. B. Hur, J. Y. Yang, "Study on the winter mass mortality of red sea bream, *Pagrus major* in South sea area", *Journal of fish Pathology*, Vol.21, No.1, pp.35-43, 2008.

윤 성 진(Sung Jin Yoon)

[정회원]



- 1988년 8월 : 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 충남대학교 해양학과 (이학박사)
- 2015년 12월 ~ 2020년 2월 : 한국해양과학기술원 선임연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

〈관심분야〉

해양생물 생태-생리학, 실시간 원격 모니터링