

## 해양 가두리양식장 양식어류의 대량폐사에 대하여

한지도 · 이덕찬<sup>†</sup>

국립수산과학원 남해수산연구소 양식산업과

### A review of the mass-mortalities of sea-cage farm fishes

Jido Han and Deok-Chan Lee<sup>†</sup>

*Aquaculture Industry Research Division, South Sea Fisheries Research Institute,  
NIFS, Yeosu 59780, Korea*

The aquaculture industry has developed rapidly over the last three decades and is an important industry that supplies over 15% of humans' animal protein intake; therefore, there is a need to increase production to meet the continuous demand. The fish cage farms on the southern coast (Kyongsangnam-do and Jeollanam-do) of Korea are critical resources in aquaculture because they account for approximately 90% of the national total fish cage farms by water area ratio. However, the current aquaculture environment is being gradually affected by climate change, which is a global issue, and its effects are expected to intensify in the future. Therefore, it is urgently imperative to accurately evaluate the effects of climate change on South Korean aquaculture industries and to develop social and national strategies to minimize damage to the fishing industry. The damage to fish farmed in cage farms on the southern coast is increasing annually and the leading causes are high and low water temperature and red tides, which are directly or indirectly related to climate change. At present, global warming can provide opportunities for aquaculture industrialization of fish or other novel species, with economic implications. However, despite such opportunities, the influx of new species can also cause problems such as ecological disturbances, increase in the reproduction frequency of microalgae such as red tide, increase in disease incidence, and occurrence and periods of high water temperatures in summer. The scale of farmed fish mortality is increasing due to the complex effects of these factors. Increased damages due to fish mortality not only have severe economic impacts on the aquaculture industry, but the social costs of responding to the damage and follow-up measures also increase. Various active responses can reduce the mortality damage in fish farms such as improving the management skills in aquaculture, improved species breeding, efficient food management, disease prevention, proactive responses, and system-wide improvements. This review article analyzes the large-scale mortality cases occurring in fish cage farms on the southern coast of Korea and proposes measures to mitigate mortality and enhance responses to such scenarios.

**Key words:** sea-cage farm, mass-mortality, high water temperature, low water temperature, red tide

---

<sup>†</sup>Corresponding author: Deok-Chan Lee  
Tel: +82-61-690-8981, Fax: +82-61-685-9037  
E-mail: saranghase@korea.kr

## 서 론

지난 30년 동안 전세계 양식업은 매년 평균 8.6% 성장해왔으며, 인류의 식용으로 이용되고 있는 어류의 약 52%를 공급하는 중요한 공급처로 여겨지고 있다. 그러나 국제기구에서는 자연의 파괴, 수중 환경의 오염, 기후 변화에 대한 복원력 저하 등 전지구적 문제와 더불어 부실한 관리 역량, 전문 지식의 부족, 무책임한 관행 등과 이로 인한 질병 발생으로 양식업이 언제까지나 지속 가능한 산업이 아닐 수 있음을 경고함과 동시에 책임 있는 개발을 권고하고 있다(WWF, 2015; FAO, 2018 & 2020).

2020년 기준 우리나라의 어류 해상가두리 및 축제식 양식장 경영체 수는 각각 992개와 55개이며, 수면적은 각각 980,229m<sup>2</sup>와 608,570m<sup>2</sup>에 달한다(KOSIS, <http://kosis.kr>). 특히, 경남과 전남해역의 해상가두리 양식장 경영체 수와 수면적 비율은 전국 대비 각각 88.3% (876개)와 90.6% (887,934m<sup>2</sup>)를 차지하고 있어 어류 양식산업에서 차지하는 중요도가 매우 크다(Table 1). 그러나 2012년, 2016년, 2018년 및 2021년 여름철에 남해안에 위치한 어류 양식장에서 대량폐사가 발생하여 심각한 어업피

해를 입은 바 있다. 이 시기에 발생한 대량폐사는 양식생물의 생존에 영향을 미칠 수 있는 수온의 상승, 수온의 반복적이고 급격한 변동, 적조의 확산에 의한 직접 또는 간접적인 영향, 질병의 발생 등 다양한 스트레스 인자가 복합적으로 작용한 것으로 확인되었다(Lee *et al.*, 2002, 2013 & 2018; 국립수산과학원, 2014, 2016a & 2017a).

어류는 다양한 인자에 의하여 스트레스를 받고 있으며, 스트레스 인자에 적응하기 위한 생리적 반응을 나타낸다. 그러나 어류가 수용할 수 있는 스트레스의 한계치 이상에 장기간 방치되면 만성 스트레스에 의한 탈진상태(allostatic load)로 성장, 생식력, 질병 저항성 등이 저하되며 나아가 폐사에 이를 수 있다(Plumb, 1994; Schreck, 2000; Schreck *et al.*, 2000; Nardocci *et al.* 2014). 수생생물의 대량폐사는 해양환경의 급격한 변화나 유기물 또는 독성물질 등에 의한 환경오염으로 인해 발생하기도 하며, 수온 변동 또는 이와 연계한 용존산소와 수소이온 농도(pH)의 변화, 적조와 같은 조류 번성에 의한 용존산소 고갈, 분비 독소에 의한 기계적 및 생리적 장애 유발 등도 어류, 특히 양식생물의 생존과 건강에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Hartly, 1982; Plumb, 1994; Suh *et al.*, 1999; Lee

Table 1. Current status of the number and water area of fish cage and enclosure farms by region of 2020 (<http://kosis.kr>)

Type	Scale	Ulsan	Kangwon	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju	Total
Cage	case (No.)	1	3	95	0	388	14	488	2	992
	ratio (%)	0.1	0.3	9.6	0	39.1	1.4	49.2	0.3	100
	area (m <sup>2</sup> )	250	0	70,036	0	408,423	14,316	479,511	7,693	980,229
	ratio (%)	0	0	7.1	0	41.7	1.5	48.9	0.8	100
Enclosure	case (No.)	0	0	11	24	10	10	0	0	55
	ratio (%)	0	0	20.0	43.6	18.2	18.2	0	0	100
	area (m <sup>2</sup> )	0	0	71,700	345,338	186,514	5,018	0	0	608,570
	ratio (%)	0	0	11.8	56.7	30.6	0.8	0	0	100

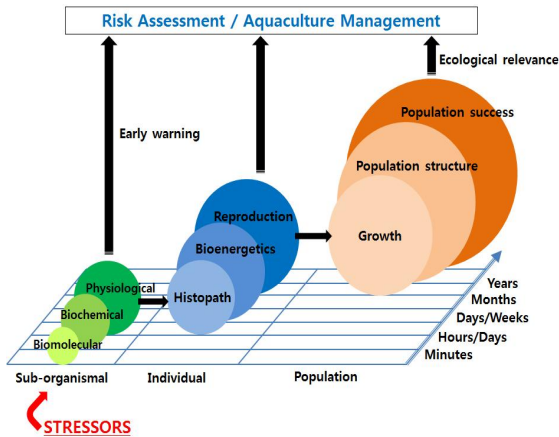


Fig. 1. The reaction stage of aquatic organisms under the influence of stressor.

et al., 2002; Schulte, 2014). 생물의 사육 중에 발생하는 스트레스는 수산생물에 단계적 반응을 유도하게 되는데 기관계 이하 단위 반응(sub-organismal response), 개체 단위 반응(individual response) 및 집단 단위 반응(population response)으로 영향이 확대된다(Fig. 1; Adams & Greeley, 2000). 이러한 기작을 질병 발생의 관점에서 본다면, 스트레스에 의하여 ① 세포와 조직의 염증(inflammation), 변성(degeneration), 회복과 재생(repair and regeneration), 종양형성(neoplasia), 유전적 교란(genetic derangement) 등 생체반응, ② 감염에 대한 면역성 저하, ③ 생리학, 생화학 및 행동학적 이상 등을 나타내는 것(Sindermann, 1984)과 연계하여 해석할 수 있을 것이다. 이상의 반응과 더불어 각 개체에서 조직학적 변화(histopathological change), 생체 에너지의 문제, 생식의 문제 등으로 나타나게 되며, 이러한 결과들은 집단의 구조와 구성에 영향을 미치게 된다. 수산생물의 내부 및 외부에 나타나는 다양한 변화의 결과는 수산생물의 피해, 나아가 폐사와 연관되므로 생체 변화를 유발하는 인자를 이해하는 것은 양식생물의 피해 예방에서 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

우리나라 남해안에서 발생한 어류의 대량폐사에 대한 조사 횟수는 해마다 늘어나는 추세이며, 수온 또는 수온과 관련한 원인 인자(고수온, 저수온, 적조)에 의한 피해 건수가 전체의 약 95%를

차지하고 있어 이에 대한 대응은 매우 중요하다 (Lee et al., 2018). 그러므로 본 총설에서는 수산생물에 피해를 일으키는 원인 인자의 발생, 특성, 영향 등에 대하여 검토하고 효율적인 수산양식 피해에 대한 대응 방향을 제시하고자 한다.

## 해수어류의 양식환경

우리나라 남해안에 위치한 어류양식장은 전 지구적인 문제(기후변화), 양식장 사육환경의 악화, 질병의 발생, 사료와 영양관리의 부실, 사육기술의 정체, 다양한 어종의 양식, 어류양식업에 대한 정부 정책의 변화, 어류 종묘 수급에 대한 대응, 양식업과 국민 레저 공간 사이의 충돌 등 다양한 문제에 직면하고 있을 뿐만 아니라 다양한 원인(고수온, 저수온, 적조, 빈산소수괴, 질병 등)에 의한 어업피해 가능성에 노출되어 있다(해양수산부·한국해양과학기술원, 2014; MAFRA, 2015; Lee et al., 2018; ME, 2020).

### 기후

지구의 온난화를 포함한 기후변화가 점진적으로 진행되고 있으며, 이는 공중보건과 사회의 중요한 위협 요인이 되고 있다(Stott et al., 2000; Epstein, 2001; Walther et al., 2002; Levitus et al., 2005; Kim et al., 2011; Wu et al., 2016; UNDRR, 2020). 한반도 주변 해역 또한 과거 수십년 동안 뚜렷한 온난화가 진행되었으며, 특히 1990년대 이후 해양 표층 수온의 증가 속도가 전지구 해양 평균의 3배 이상으로 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 예측된다. 더불어 이산화탄소의 증가와 산성화, 수온의 상승, 해수 혼합층의 변화, 영양염 공급의 변화 및 바람장의 변화 등에 의하여 변할 수 있는 우리나라 주변 해역의 일차생산력은 200~300 gCm<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup>로 전 세계 대륙붕 평균보다 높아서 어류양식업에 직·간접적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다(해양수산부·한국해양과학기술원, 2014; ME, 2020). 지구의 온난화가 현재 경제적 한계를 가지는 어종이나 새로운 종에 대한 양식 산업화에 기회를 제공하며, 수생생물의 성장률 향상에 기여하는 등 일부 긍정적인 측면의 존재한다. 그러나 질병 발생의 기회 제

공 확대, 새로운 종의 유입에 의한 생태계 교란과 이에 대응하기 위한 비용의 증가, 적조 등 미세조류의 번식 빈도 증가에 의한 인간생활과 식품안전성에 대한 위해 등의 심각한 문제를 발생시킬 수도 있다(Harvell *et al.*, 2002; Gubbins *et al.*, 2013; Berdalet *et al.*, 2015; Collins *et al.*, 2020). 뿐만 아니라 해양의 산성화 및 영양화의 심화, 용존산소량의 감소, 저염분 수괴의 발생 등 기후변화가 빠르게 진행되고 있으므로 양식산업과 질병의 발생 및 확산에 미칠 영향을 줄이기 위한 시스템과 전략이 필요하다(Walker & Mohan, 2009; MAFRA, 2015).

### 사육환경

어류의 성장을 위하여 공급하는 사료의 양은 어류 무게의 약 10배에 해당한다(Tsutsumi *et al.*, 1991; 배 등, 2012). 공급된 사료의 상당량은 어류에 의하여 소비되지 않고 용해성 또는 입자성 유기물이나 무기물로 가두리양식장 설치 해역의 수중 또는 주변 환경에 쌓이게 된다(Fig. 2; Brown *et al.*, 1987; Tsutsumi *et al.*, 1991; Hall *et al.*, 1990 & 1992; Holby & Hall, 1991 & 1994; Holmer & Kristensen, 1992; Kwon *et al.*, 2005). 유기물 퇴적은 호기성 미생물에 의한 산소의 대량 소비로 빈산소수괴를 형성시키며, 나아가 혐기성 미생물의 번성에 의하여 질소계 부산물(황화수소, 암모니아, 메탄 등)을 생성하여

어류의 건강에 나쁜 영향을 미친다(Reynolds & Haines, 1980; Gowen & Bradbury, 1987; Bagarinao, 1992; Hall *et al.*, 1992; Holmer & Kristensen, 1992; Pearson & Black, 2001; 국립수산과학원, 2009a; Vaquer-Sunyer & Duarte, 2010; Shin *et al.*, 2016).

남해안 가두리양식장 저층은 오랜 기간 동안의 어류양식 활동으로 인하여 퇴적층이 두껍게 쌓여 있으며, 이로 인한 산소소모율의 증가, 수질환경 조건(화학적산소요구량, chemical oxygen demand/COD; 산취발성황화물, acid volatile sulfide/AVS; 강열감량, ignition loss/IL)의 악화, 저서생물 분포상에 의한 N/C 비율(Nematode/Copepod ratio)의 상승 등 오염지표가 높게 나타나고 있다(Lee *et al.*, 2004; 국립수산과학원, 2010; Jang *et al.*, 2015; 한국해양수산개발원, 2018). 장기간 동안 운영되어 온 일부 양식장에서 가두리 저층으로부터 황화수소로 의심되는 공기 방울을 육안적으로 확인할 수도 있는데, 황화수소는 어류에 산화 스트레스를 유발하여 malondialdehyde(MDA)를 생성하고 지질변성을 유발하여 세포의 손상과 세포사를 초래하게 된다(Colby & Smith Jr., 1967; Smith Jr. *et al.*, 1976; Sreejai & Jaya, 2010). 그러나 넙치를 사육하는 육상수조 양식장에서 암모니아 또는 황화수소에 의한 일부 피해 사례를 제외하고는 가두리양식장에서 수질환경 인자가 직접적으로 작용하여 대량폐사를 일으키는 것에 대해 증명된 사례는 매우 드물다(국립수산과학원, 2001, 2006, 2007a, 2009b, 2010, 2011b, 2012, 2014, 2016a & 2017a; Lee *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2013).

### 영양 관리

어류는 탄수화물이나 식물성 단백질에 대한 이용률이 낮아 동물성 단백질, 특히 어분에 대한 요구량이 매우 높다(배 등, 2012). 뿐만 아니라 질병 저항성과 면역반응 증가에 비타민류, 미량원소, 단백질, 탄수화물, 지방류 등의 첨가가 필요하다(Blazer, 1992). 인위적인 환경에서 어류의 급격한 체중 증가를 위하여 집중적으로 먹이를 공급하면 영양성 질병이 발생할 수 있으며, 특정 영양성분의 결핍은 어류의 생산성을 저해하고 건강에 영향을 미칠 수 있다(Lovell, 1998; Oliva-Teles, 2012). 우리나라 가

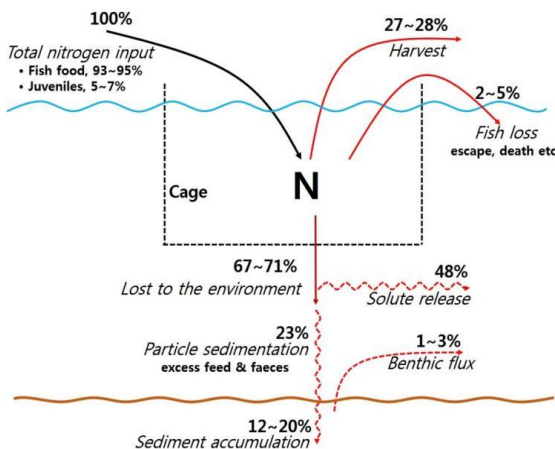


Fig. 2. Nitrogen mass balances in the cage farm constructed according to the flux and the accumulation methods (from Hall *et al.*, 1992).

두리양식장에서 많이 사용하는 생사료는 주로 등푸른 생선(고등어, 정어리, 까나리, 전갱이, 멸치 등)으로 수입량이 증가하고 있다(Chun, 2000; 한국해양수산개발원, 2014). 이들 어류에 많이 포함된 n-3 및 n-6 다중불포화지방산(polyunsaturated fatty acid, PUFA)은 세포막 기능(유동성과 투과성) 유지뿐만 아니라 대사기능의 다양성을 충족시키는 leukotrienes(LT)와 prostaglandins (PG)와 같은 eicosanoids의 형성에 영향을 미치므로 중요하게 인식되기도 하지만, 불포화지방산을 많이 함유한 먹이는 지질의 과산화에 의한 영양성 질병에 노출되기 쉽다(Bell *et al.*, 1986; Blazer, 1992; Lall, 2000; Chun, 2000; Bai *et al.*, 2012; Oliva-Teles, 2012). 즉, 지질의 과산화가 심한 먹이를 섭취한 어류는 세포막의 인지질 장애, 알데히드(aldehyde)에 의한 독성, 세로이드(ceroid) 축적 등에 의한 부작용이 발생하며, 스트레스 내성 저하, 복수증, 지느러미 부식, 마비증상, 심근염, 성장과 사료효율 감소, 폐사율 증가 등이 나타난다(Lee, 1993a & b; Chun, 2000; Bai *et al.*, 2012). 남해안의 가두리양식장은 아직까지 생사료와 동물성 어분에 대한 소비가 많으며 관리 또한 부실한 것으로 판단된다(not data). 가두리양식장에서 사용하는 생사료와 어분은 유통(구매, 운반, 보관 등)과 양식현장에서의 관리(습사료의 제작, 보관, 사료 공급 등) 과정에서 신선도가 저하될 수 있으며, 이는 영양성분 자체의 결핍에 의한 영향과 더불어 변성(變性, degeneration)에 의한 성장 저하, 질병 발생 증가, 폐사량 증가 등에 직·간접적으로 영향을 미치고 있는 것으로 생각된다.

### 사회적 제도

1950년대에 만들어진 수산분야의 모법인 ‘수산업법(법률 제295호, 1953.09.09. 공포)’은 경쟁원리의 배제, 방대하고 복잡한 내용, 일본식 어업관리제도의 정착 등의 주요 특징을 가지고 있어, 수산자원의 효율적 관리를 위하여 변화하는 해양법 질서에 부응하지 못하는 것으로 판단된다. 즉, 수산업법이 반세기 이상 수산업 분야의 규율이 되어왔으나 수산자원의 급격한 감소로 산업 존립의 위기를 맞고 있다는 것은 법의 문제, 규정 준수와 집행의 문제 또는 환경적 요인 등에 기인한다고 할 수

있다(차, 2005). 또한, 어업자 배려를 위한 경쟁원리의 배제로 인하여 신규 사업자의 진입이 어려우며, 규모의 경제를 달성하기 어려움은 물론 공공재산으로서의 친수공간(해양스포츠 및 레포츠 산업의 발전에 대한 욕구)에 대한 충돌이 발생하고 있다(해양경찰청, 2005; 한국해양수산개발원, 2002 & 2012). 이러한 일련의 문제점에 대한 대응 방안으로 지속적인 어장환경 보전을 위하여 도입된 어장정화사업의 시행(1986), 양식어장의 휴식(제7조)과 어장정화 및 정비(제10조)를 강제한 ‘어장관리법’의 제정(2001), 지속 가능한 양식어업 및 어업소득 증대를 비전으로 한 5년 단위의 ‘어장관리기본계획(2007년부터)’의 시행 등 다양한 제도와 정책을 도입하고 운용하고 있으나 수산업법 테두리 내에서 이루어지는 이러한 정책적 변화의 시도에 한계를 가지는 것은 분명해 보인다(2010, 한국해양수산개발원; Park and Park, 2016).

### 기타

남해안에 위치한 가두리양식장은 일반적으로 수심 20M 이내에 위치한 경우가 많으며, 시설 또한 노후화와 밀집화가 지속적으로 진행되었다(농림수산식품부, 2008). 이는 가두리양식장의 규모화와 자동화를 가로막는 한계로 작용할 뿐만 아니라 사육기술의 정체와 어종의 다변화를 가로막는 요인으로도 작용하고 있다. 이들 양식장은 환경오염과 자연재해에 자유롭지 못하며, 경쟁력 강화를 위한 집약적 사육으로 인하여 어류질병에 대한 노출가능성의 증가와 노동 강도가 악화되는 악순환이 반복되고 있다.

또한, 소비자 기준의 사업 전략 부재와 계절 사업이라는 개념이 아직 남아 있어 사업 및 품질 경쟁력에 대한 제고가 어려우며, 어업 생산 및 질병 관리에 대한 정보가 정확하지 않은 실정이다(한국해양수산개발원, 2002).

### 폐사의 발생과 경향

남해안의 가두리 및 육상수조식 양식장에서는 여러 어종이 사육되고 있을 뿐만 아니라 다양한 원인에 의하여 폐사가 발생하였다. 어업피해 발생

에 대한 원인조사에서 하나의 분명한 원인이 작용했을 경우도 일부 확인되지만, 일반적으로 여러 원인 인자가 복합적으로 관여하는 경우가 대부분이었다. 즉, 남해안 해산어류의 폐사는 여러 인자들의 복합적인 영향 또는 인자들 간의 인과관계나 상관관계에 의하여 발생하는 것이 대부분인 것으로 판단된다(국립수산과학원, 2001, 2006, 2007, 2009b, 2011a&b, 2012, 2013, 2014, 2016a & 2017a).

1998년 이후 우리나라 남해안에서 발생한 양식생물의 피해 사례는 증가하고 있는 추세이다(Lee *et al.*, 2018). 1998년부터 2016년까지 지자체에 의한 조사 요청은 총 145회에 달하였는데, 이 중 2012년부터 2016년까지 5년간의 조사 건수가 전체의 73.1%(106건)이었다. 이러한 분포는 양식수산물재해보험의 확대 때문으로 해석될 여지를 가지지만, 근래에 발생한 양식피해가 규모적으로 대형화하고 지구 온난화와 연계한 인자들의 복합적 영향으로 인해 계절별 피해 경향이 뚜렷해지기 때문으로 판단된다. 즉, 남해안에서 발생한 어류양식에서의 피해는 동절기(1~3월)와 하절기(7~10월)로 명확하게 구분되며, 피해 가구의 99.5% (1,438/1,445가구)가 이 두 시기에 나타났다. 겨울철에는 저수온과 영양의 문제가, 그리고 여름철에는 적조, 고수온, 고수온과 관련한 원인이 작용하였다(Fig. 3).

## 양식어류 대량폐사의 주요 원인

양식어류의 폐사는 다양한 스트레스 요인인 수질-수온, 염분 농도, 사육 밀도, 용존산소, supersaturation, suspended soils, 암모니아, 질산 및 아질산, carbon dioxide, chloride, 산도, 경도, pH, 중금속, 조류 농도, 살충제, electrocution 등에 의하여 직접 또는 간접적으로 영향을 받는다(Ishioka, 1980; Barton & Iwama, 1991; Anderson, 1996; Schreck, 2000; Brydges *et al.*, 2009; Ramsay *et al.*, 2009; Uribe *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2016a; Sopinka *et al.*, 2016; Werner *et al.*, 2021). 뿐만 아니라 어류는 자연적인 요인들, 즉 개체발생학적 성장에 따른 생리적 변화 과정, 서식지의 분포(담수, 해수, 기수 등)와 서식 방법, 수명의 차이, 에너지 분배에 대한 요구(성장, 성숙, 번식 등) 등에 의하여 특화된 면역 시스템을 가지므로 이들 또한 어업피해에 영향을 미치는 인자로 생각된다(Watts *et al.*, 2001; Bowden, 2008; Magnadottir, 2010; Uribe *et al.*, 2011).

어류가 다양한 환경변화에 의한 스트레스를 받으면 혈청 글루코스 농도, ALT 및 AST의 증가, 피부 점액세포의 과형성, 상피세포의 변형과 박리, 아가미 새판의 상피층 비대와 핵응축, 염세포의 과형성 등 다양한 생체 변화가 관찰된다(Philpott, 1980; Yang & Chun, 1991; Dumas *et al.*, 1992; Müller & Loyd, 1994; Chun, 2000; 전 등, 1995; Panta *et al.*,

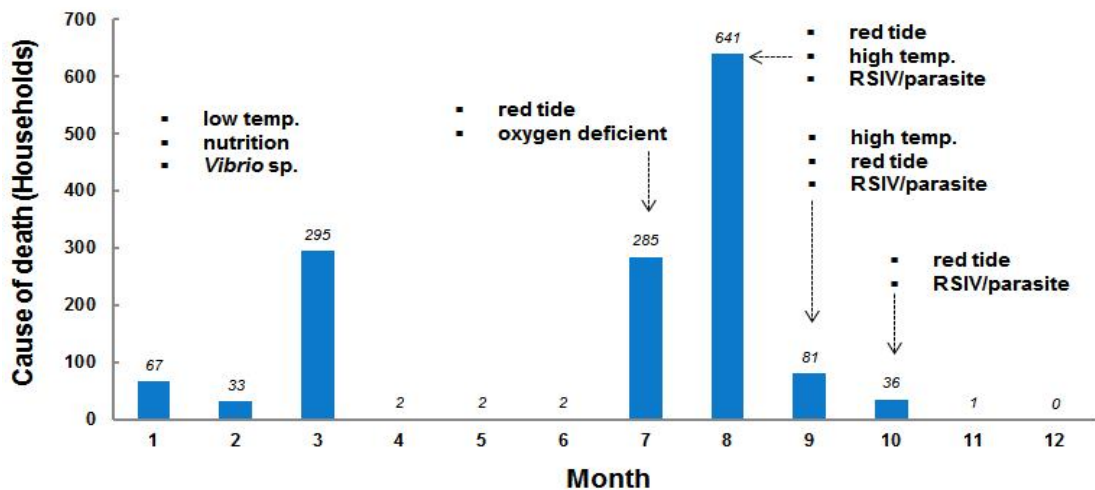


Fig. 3. Mortality tendency and main causes of cultured fish farms in southern coast (from Lee *et al.*, 2018).

2003; Oh & Park, 2011; Cho *et al.*, 2013; Ruiz-Picos *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016). 면역계와 면역반응에 있어서도 다양한 외부 인자(수온, 밝기, 수질, 염분, 사육밀도 및 다양한 스트레스 요인들)에 의하여 영향을 받으며(Ellsaesser & Clem, 1986; Watts *et al.*, 2001; Conte, 2004; Bowden, 2008; Ramsay *et al.*, 2009; Magnadottir, 2010; Uribe *et al.*, 2011; Ellis *et al.*, 2012; Martins *et al.*, 2012), 질병 감수성이 증가할 뿐만 아니라 생식능력의 변화 또는 저하가 나타나고 심할 경우 폐사에 이를 수 있다(Jones & Reynolds, 1997; Lee *et al.*, 2002 & 2013; Magnadóttir, 2006).

우리나라 남해안에서 발생하는 대량폐사의 원인은 대부분 자연재해 또는 자연재해가 원인으로 작용하는 경우가 대부분이다. 즉, 수온(고수온과 저수온), 적조, 질병 감염 등이 대량폐사의 주요 원인으로 작용하였다(Fig. 4).

### 수온

어류는 변온동물로 서식환경이 갖는 온도에 따라 체온이 변화하며, 일반적으로 주위 환경보다 0.5~1°C 정도 높은 체온을 유지한다. 그러므로 수온의 변화에 따라 체온을 적응시키기 위한 에너지 소모로 인해 항온동물보다 온도의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다(Fry, 1967; Kuroki, 1967; Le Morvan *et al.*, 1998; 배 등, 2012). 어류에서의 수온은 성장률, 생존율, 질병의 발생, 어류의 대사율, 영양소의 소화율, 호르몬 작용, 면역반응 등 생리 기능, 대사기능 및 면역능력에 영향을 미침과 동시

에 건강의 악화 원인으로 작용할 수 있다(Fry *et al.*, 1942; Cocking, 1959; Ishioka, 1980; Woo & Fung, 1980; Barton & Iwama, 1991; Cai & Summerfelt, 1992; Collazos *et al.*, 1995; Bowden, 2008; Choi *et al.*, 2010; López-Olmeda & Sánchez-Vázquez, 2011; 배 등, 2012; Jee *et al.*, 2015; Musa *et al.*, 2017). 또한, 일정 범위 내의 수온 변화에 대하여 항상성을 가지지만, 이 영역을 넘어서는 급격한 수온의 변화와 온도 폭의 변화는 어류 간(肝)에 생화학적 및 생리적 장애를 일으킬 뿐만 아니라 조직 내 산화성 스트레스(oxidative stress)를 일으킨다(Hoff & Westman, 1966; Davis & Parker, 1990; Parihar *et al.*, 1996; Abele *et al.*, 1998; Chang *et al.*, 2001; Lushchak & Bagnyukova, 2006; Bagnyukova *et al.*, 2007; Shin *et al.*, 2010; Simičič *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2016a&b).

### 1) 고수온

우리나라 여름철에 발생하는 남해안의 고수온 형성은 시기와 정도에는 다소 차이는 있으나 20°C 이하의 수온을 보이는 7월 말 이후부터 8월 중순까지 25°C 전후 또는 그 이상 급격히 증가하여 약 20일 정도 유지되는 경향을 보이는데, 이는 고온·고염인 쿠로시오난류의 지류인 대마난류에 의한 영향이 크다(Nitani, 1972; Lie *et al.*, 2000; Teague *et al.*, 2003).

고수온에 의한 가두리 양식어류(주로 조피볼락)의 대량폐사는 2012년 및 2016년에 통영을 중심으로 한 경남 일원 가두리양식장을 중심으로 발생한 바 있다. 사육 중이던 조피볼락은 26°C를 기점으로 폐사가 시작되었으며, 급격한 수온변화(1일 최대 수온변화 폭, 6.3°C)와 고수온, 질병(영양성질병, *Microcotyle sebastis*, 연쇄구균병, 비브리오병, 참돔 이리도바이러스병 등) 등의 원인이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 2012년에 발생한 조피볼락의 대량폐사는 7월 하순부터 8월 초순 사이에 나타난 급격한 수온변화 직후에 1차 대량폐사가 발생하였으며, 8월 중순의 고수온기 이후 2차 대량폐사가 발생하였다. 특히, 2차 대량폐사 발생 시기에 비브리오병(주로 *Vibrio harveyi*에 의한 감염)의 감염률이 높게 나타났다(Fig. 5; Lee *et al.*, 2013). 이러한 결과는 수온과 관련한 다양한 인자의 영향으로

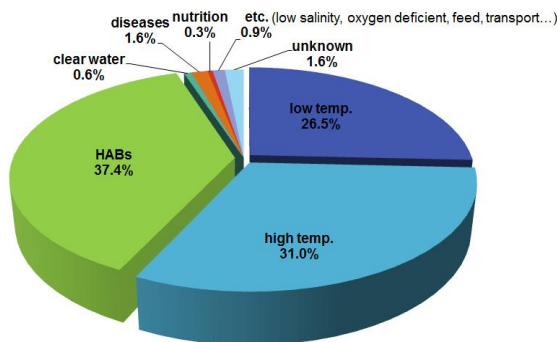


Fig. 4. Major impacts on mass mortality of cultured fish cultured fish in southern coast (from Lee *et al.*, 2018).

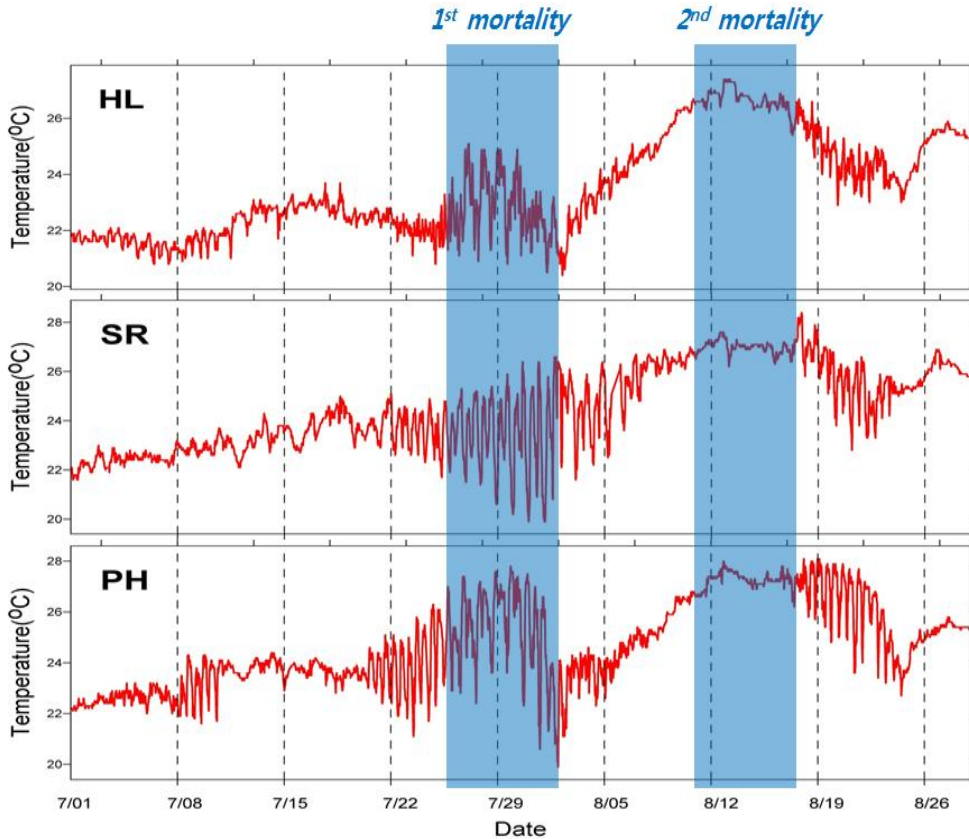


Fig. 5. Water temperature and fluctuations caused by mass mortality of Korean rockfish, *Sebastes schlegelii* in Tongyeong waters, Gyengnam in 2012 (HL, Haklim-ri, Sanyang-up; SR, Sirang-ri, Sanyang-up; PH, Poonghwa-ri, Sanyang-up). The first mass mortality occurs during a period of rapid change in water temperature, and the second mass mortality occurs during a period of high water temperature (from Lee *et al.*, 2013).

어류의 생리학적 및 면역학적 대응 능력이 저하되기 때문에 생각된다.

조피볼락은 우리나라 남해안의 가두리양식장에서 사육되고 있으나, 한편으로는 고수온에 의한 피해에 취약한 대표적인 어종이다. 조피볼락의 적정 사육수온은 12~21°C로, 수온 23°C 이상에서는 먹이섭취가 저하되고 25°C 이상에서는 생리기능이 현저히 떨어지며, 30°C를 생존 상한수온으로 판단하고 있다(Choi *et al.*, 2009; Jang, 2010; Do *et al.*, 2016; 국립수산물과학원, 2017b). 조피볼락에 대한 고수온의 영향은 치어보다는 성어에서 더욱 민감하게 작용하며(Tsuchida & Setoguma, 1997; Oh *et al.*, 2007), 고수온의 영향으로 인하여 에너지 대사 또는 생리적 반응과 관련한 아미노산, 지방산 및

특정 효소의 발현이 변화함은 물론 산소소비량과 대사량을 증가시켜 암모니아 배설물 증가와 이로 인한 영향을 강하게 받는다(Oh *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2019).

참돔, 돌돔, (점)농어, 넙치 등의 어류는 고수온으로 인한 직접적인 폐사 가능성은 낮지만 수온 상승에 따른 질병 감염 가능성이 높아진다. 즉, 수온이 상승함에 따라 참돔이리도바이러스, 에피텔리오시스티스(epitheliocystis organism, EPO), 연쇄구균(*Lactococcus garviae*, *Streptococcus iniae*, *S. parauberis* 및 *Streptococcus* sp.), 비브리오팀(*Vibrio harveyi*, *Vibrio* sp.), 활주세균, 섬모충(*Trichodina* sp.), 피부/아가미흡충(*Microcotyle sebastis*, *Dactylogyrus* sp., *Benedenia* sp., *Bivagina tai*), 물이류 등



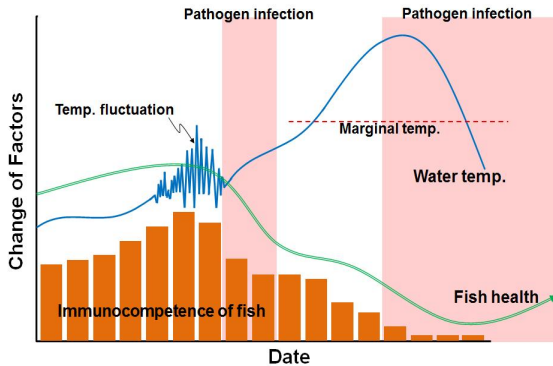


Fig. 6. Diagram showing the correlation between fish health and disease outbreaks due to high water temperature and water temperature fluctuations. High temperature and rapid changes in water temperature reduce the immune response and health of fish, and further lower the resistance to disease.

에 의한 감염이 증가하며, 변성 지질에 의한 영양성 질병(황지증, 등여웁병)의 진행 정도에 따라 감염성 질병의 감염 정도와 어류의 폐사에 영향을 미칠 수 있다(Choi *et al.*, 2009; Jun *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2015). 그러므로 고수온기 어류의 폐사는 과도한 수온의 일간 변화와 상승이 어류의 건강도를 떨어뜨려 병원체 감염에 대한 감수성을 높이는 일련의 과정이 상호 작용하는 것으로 판단된다(Fig. 6).

## 2) 저수온

우리나라 남해안의 일부 가두리양식장은 저수온에 의한 피해(동사 피해)가 반복적으로 발생하는 경향을 보이며, 대상 어종은 돔류(돔돔, 참돔, 감성돔), 쥐치류, 민어류, 농어류, 볼락류, 복어류, 능성어류 등 비교적 높은 수온을 좋아하는 어류이다. 동사 피해는 수심이 얇거나 담수 유입의 가능성이 높은 지형적 특성을 보이는 육지에서 가까운 곳에 위치한 양식장에서 나타나는 경우가 많았다. 즉, 가화천(남강), 섬진강, 탐진강의 영향을 받는 지역, 비교적 수심이 얇은 미륵도(통영) 서북측 연안과 돌산도(여수) 서남측 및 동측 연안, 많은 적설 후 낮은 냉수가 유입되는 한산도 일부 연안과 완도읍-신지(완도) 연안에 위치한 양식장에서 피해가 확인되었다(국립수산과학원, 2001, 2007, 2012,

2013 & 2014).

수심이 비교적 얇은 해역의 수온은 조류, 기온, 바람(북풍 또는 북서풍) 등에 의하여 영향을 많이 받는 것으로 판단되며, 이들 인자들이 복합적으로 작용할 때 어류의 대량폐사로 이어지는 경향을 보였다. 즉, 기온과 차가운 바람에 의한 급격한 수온 저하와 조류의 영향에 의한 반복적인 수온 급변이 순차적으로 또는 일시적으로 어류에 영향을 줌으로서 대량폐사를 일으키는 것으로 판단된다. 지형적으로 담수의 유입 및 그 가능성이 높은 해역에 위치한 어류양식장에 많은 적설량 이후 낮은 물이 유입되었을 때 어류의 대량폐사가 확인되었는데, 통영시 한산면 소재 양식장의 경우가 대표적이었다(Fig. 7).

적정 수온보다 낮은 수온은 어류의 혈구 및 세포 내 인지질에 영향을 미쳐 그 기능을 떨어뜨리며 더불어 어류의 면역계 활성을 저하시킨다(Cuchens & Clem, 1977; Elsaesser & Clem, 1986; Bly & Clem, 1991 & 1992; Le Morvan *et al.*, 1998). 또한, 어류의 면역반응과 관련한 생화학적 대사기능을 저하시킴으로 그 자체가 사망의 원인으로 작용할 수 있다(Park *et al.*, 2016a & b).

참돔은 10°C 이하로 내려가면 식욕이 현저히 떨어지며, 해수가 거의 정지 상태이면 수온이 5°C에서도 죽지 않는다. 그러나 해수의 유동이 심할 경우 7°C에서도 폐사가 나타날 수 있다(Woo & Parker, 1980; 유, 2000; Jang, 2010). 어류가 수용 가능한 점진적 수온의 변화보다는 급격한 수온변화 또는 변칙적이며 반복적인 수온 변화뿐만 아니라 저수온의 지속시간이 폐사에 영향을 미치는 것으로 보인다(Ishioka, 1980; Woo & Fung, 1980; Thomas *et al.*, 1986; 국립수산과학원, 2001, 2006, 2007a, 2009a, 2010, 2011, 2012, 2014, 2016a & 2017a; Choi *et al.*, 2008 & 2009; Lee *et al.*, 2013).

저수온에 노출된 어류는 직접적인 영향에 의한 어류의 대량폐사에만 한정적으로 작용하는 것이 아니라 2월 이후부터 점진적으로 수온이 상승하는 시기에 다양한 질병 감염에 대한 감수성이 높아지며, 장기적으로 폐사가 나타나는 것으로 판단된다. 저수온에 의하여 어류의 동맥혈이 냉각되어 열손실에 의한 체온 평형이 깨어지는 것은 물론, 먹이



Fig. 7. Example of damages caused by heavy snow (Hansan-do, Gyeongnam; 14-Jan-2013). Depending on the geographical characteristics, the inflow snow melted water (↑) concentrated in one place (affected area), and due to the influence of cold water, the cage farm in this area was severely damaged by cold water.

섭취 단절에 의하여 체내 에너지가 고갈되는데 이는 11월과 12월에 비하여 폐사가 발생하는 다음해 1월에 총단백질, 중성지방, 총콜레스테롤 등이 급격히 낮아지며, 생리장애에 의한 담즙 과다 생성과 녹간증 발생, 비브리오와 아가미흡충(*Bivagina tai*)에 의한 감염이 일어나는 것과 연관할 수 있다 (Menasveta, 1981; Procarione & King, 1993; Chun *et al.* 2002; Choi *et al.*, 2002 & 2008; Kang *et al.*, 2007). 또한, 저수온이 장기간 유지되면 수온상승기 저층 퇴적물의 분해증가로 인한 질소(암모니아, 아질산 포함) 산물의 증가로 피해 유발 가능성도 높는데, 어종과 상황에 따라 저수온에서 암모니아가 어류에 강한 독성으로 작용하며 해독 능력도 떨어질 수 있다(Reinbold & Pescitelli, 1982; Lewis Jr. & Morris, 1986; de Oliveira *et al.*, 2008; Barbieri & Bondioli, 2013; Yang *et al.*, 2016).

#### Harmful Algal Blooms, HABs

전세계적으로 식물성 및 동물성 플랑크톤의 과형성(Harmful Algal Blooms, HABs)에 의한 출현 빈도, 분포, 원인 종, 피해 등은 지속적으로 증가하고 있다(Conell & Coross, 1950; Grindle & Taylor, 1962; Subramanian & Purushothaman, 1985; Anderson, 1989 & 2005; Kim *et al.*, 2010; Al-Ghelani *et*

*al.*, 2005; 국립수산과학원, 2009b; Park *et al.*, 2013a; Lim *et al.*, 2020).

과거, 우리나라에서 발생한 HABs는 규조류인 *Akashiwo* sp., *Alexandrium* sp., *Chaetoceros* spp., *Chattonella* sp., *Pseudo-nitzschia* spp., *Scrippsiella trochoidea*, *Skeletonema costatum*, 와편모조류(dinoflagellates)인 *Ceratium furca*, *Cochlodinium polykroides*, *Gymnodinium* sp., *Gonyaulax* sp., *Karenia mikimotoi*, *Prorocentrum* spp., *Protoperidinium* spp. 등에 의한 것들이며, 특히, 1995년 이후의 통계에서 *C. polykroides*에 의한 어업피해가 심하였다(국립수산과학원, 2009b, 2014 & 2017; Park *et al.*, 2013a & b; Lim *et al.*, 2020).

HABs에 의한 피해는 적조생물이 분비하는 독소에 의한 피해와 고밀도 발생에 의한 용존산소 저하에 따른 직·간접적 영향으로 보여지는데, 전자의 경우는 *C. polykroides*에 의한 적조 피해가, 후자의 경우는 2009년 경북 포항, 울산 및 여수에 발생한 *Gonyaulax* sp.와 부산, 거제 및 마산만에 발생한 *S. trochoidea* 등에 의한 적조 피해가 예에 속한다. 어류에 대해 경제적 피해를 유발하는 주요 적조생물인 *C. polykroides*의 변성은 태풍, 조석 또는 그 이외의 환경변화에 의하여 수온약층이 사라진 후 발생하므로 해황과 밀접한 관련이 있으며, 최초 발생

은 나로도, 남해도, 통영 등 외해역에서 주로 발생하거나 7~8월에 외양수가 유입된 후 대량으로 발생하는 경향을 보이고 있다(Lee *et al.*, 2001; 국립수산과학원, 2009b). *C. polykrikoides*의 산소소모량은 광량이 낮을수록, 수심이 깊을수록 증가하는 경향을 보인다. 광량이 적을 때 적조생물의 호흡에 의한 산소소모율이 급격히 증가하며 농도가 높을수록 짧은 시간에 용존산소의 급격한 저하가 나타나는데 암조건에서 저층으로 가라앉아 산소를 소모하므로 오전 10시경 폐사 피해가 많다(Sweeney, 1984; Na *et al.*, 1997; Shim *et al.*, 2009).

*C. polykrikoides*가 어류 아가미에 부착하면 2차 새변(lamellae)의 뒤틀림과 상피세포층의 박리, transport-related enzymes, carbonic anhydrase 및  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase의 활성 억제, 혈액 내 pH와 산소분압( $p\text{O}_2$ )의 저하, 아가미 점액을 과다 분비, 여체 내에 superoxide anion( $\text{O}_2^-$ )과 hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 등 활성산소(reactive oxygen species, ROS)의 과량 생성으로 어류 세포와 조직에 스트레스를 증가시킨다(Kim *et al.*, 1999, 2000 & 2002; Dorantes-Aranda *et al.*, 2009). *Chattonella* 종은 점액의 탈락, 아가미 손상에 의한 새엽의 이온수송 기능 저하, 활성산소 자극으로 생성된 다당류에 의한 점액세포 가스교환 능력 저하, 새변의 carbonic anhydrase 활성 감소, 새변 상피조직의 부종(edema)과 염세포(chloride cell)의 팽윤 등을 일으킨다(Doi *et al.*, 1981; Shimada *et al.*, 1982; Endo *et al.*, 1985; Toyoshima *et al.*, 1985; Ishimatsu *et al.*, 1996a & b). *Karenia mikimotoi* (formerly known as *Gymnodinium aureolum*)에 영향을 받은 어류와 무척추 동물은 괴사성 변성(necrotic degeneration), 상피세포의 박리 및 붕괴 등이 관찰된다(Roberts *et al.*, 1983; Mitchell & Rodger, 2007).

### 질병

질병은 ‘신체의 부분, 조직, 장기의 정상적 기능구조의 장애로 일어나는 일련의 특징적 증상을 가진 일정한 병적 과정(영한 의학사전, 아카데미서적)’으로 정의한다. 수산생물에서의 질병은 고밀도로 사육될 때 확산 가능성이 높으므로 양식산업에서 사육밀도는 매우 중요한 인자이다(Walker & Mohan, 2009). 숙주(어류) 기준에서 질병은 내인성

과 외인성 인자의 문제에 의하여 발생하며, 감염성 질병의 발생은 환경, 숙주 및 병원체의 상관관계로 해석(Snieszko diagram)할 수 있다(Snieszko, 1974). 그러므로 고수온, 저수온, HABs, 용존산소, 영양 등 남해안에서 문제가 되어 양식어류에 피해를 입히는 대부분의 인자는 ‘질병인자’로 해석될 수 있다.

### 1) 영양성 질병에 의한 피해

1998년부터 2016년까지 진행된 어업피해 조사에서 영양성 질병이 직접적인 폐사에 관여한 경우는 1% 미만으로 매우 낮았다. 그러나 가두리양식장에서 양성 중이거나 피해가 발생한 감성돔, 참돔, 농어, 조피볼락, 복어류 등의 간, 비장 및 신장 조직을 압인하여 현미경으로 관찰하였을 때 과도한 macrophage aggregates (MAs)가 쉽게 관찰되었다(Wolke, 1992; 국립수산과학원, 2001, 2007a, 2009a, 2011b, 2012, 2014, 2016a & 2017a). 이러한 증상은 체내 melanin, lipofuscin (or ceroid), hemosiderin 또는 다른 색소 물질의 집적(集積)에 의하여 나타나는 것으로 어류의 비장과 신장의 조혈조직 및 간에서 관찰되는 대식세포의 축적성 구조물이며, 어류의 오염 노출, 환경적 스트레스, 질병, 영양상태, 면역 및 대사에 대한 측정인자로 언급하고 있다(Blazer *et al.*, 1987; Wolke, 1992; Argius & Roberts, 2003). 특히, lipofuscin의 집적에 의한 ceroid는 과산화물가(peroxide value, POV)가 높은 산화사료를 투여할 때 또는 높은 불포화지방산과 비타민 E 섭취가 상대적으로 낮은 어류에서 형성(Fig. 8)되며, 영양 결핍, 세균이나 바이러스에 의한 감염 및 독성물질에 의한 장애 등의 질병 상황에서도 침착된다(Lee, 1993a & b; Argius and Roberts, 2003; Wang *et al.*, 2016).

불포화지방산의 산화에 의한 사료의 투여는 장애 자극을 주며 점액 분비량을 감소시킬 뿐만 아니라 알데히드 케톤(aldehyde ketone)을 형성하여 장상피세포를 자극하고 장염을 유발하며 간, 비장 및 신장 세포에 장애를 주어 병원체의 침입을 용이하게 한다. 또한, 어류에 과산화지질 함량 증가는 생체 세포막 지질을 산화시켜 세포 대사에 장애를 일으키며, aldehyde 독성에 의한 장상피의 재생 능력 저하, 비장과 신장 등에서의 세포분열 문제 발

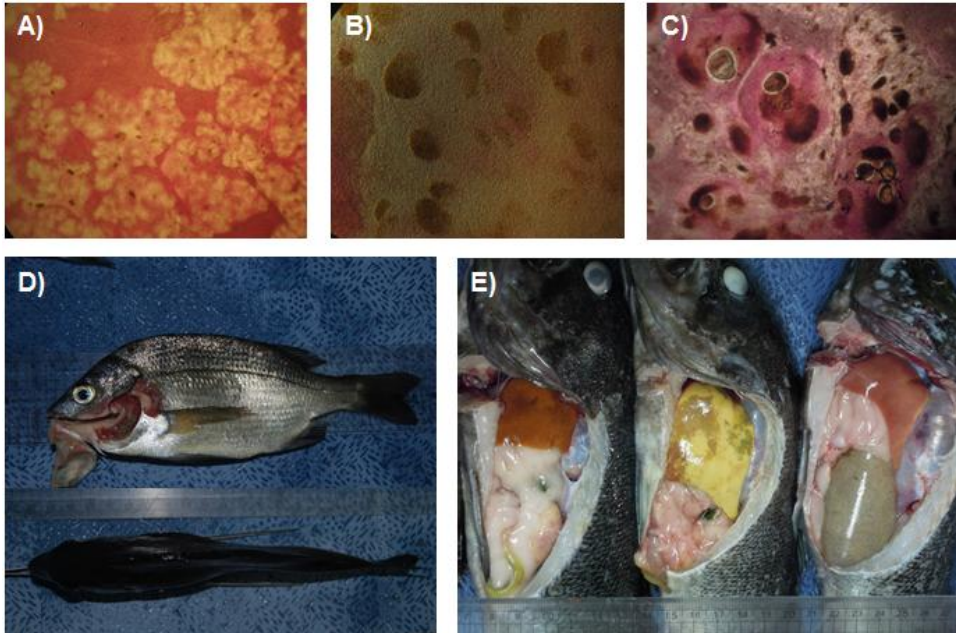


Fig. 8. Ceroidosis and diseases symptoms in farmed fish organs. A-C) Ceroidosis in the kidney, D) Myopathy in black sea bream, and E) Browning and yellowing of the liver in Korean rockfish.

생, 소화관 점막 내 지방조직의 병변 등을 보이게 된다(Chun, 2000). 특히, 어류는 인지질의 상대적 비율, 인지질의 지방산 조성, 인지질 분자 내 지방산 분포 등의 변화를 통하여 생체막 유동성을 조절하며, 이를 통하여 외부 수온변화에 대응하게 되므로 불포화지방산과 포화지방산 또는 이를 포함한 사료의 관리와 투여는 중요하다(Hazel & Carpenter, 1985; Bell *et al.*, 1986; Tacon, 1996; 배 등, 2012).

우리나라의 경우, 어획 감소와 계절에 따른 먹이용 어류의 공급 문제, 먹이 또는 사료에서의 적색어(분)의 사용 증가, 사료 및 먹이 보관의 부실 등이 원인으로 알데히드의 형성과 아미노산 결핍증, 탄수화물 과잉증 등과 연계되어 발생할 수 있다. 영양성 질병 단독에 의한 어류의 폐사는 급성적이지 않으나 환경적 인자 및 질병 인자가 결합되는 상황에서는 대량폐사가 쉽게 발생하며, 그 규모도 더욱 커지게 된다. 사료의 부패가 쉬운 여름철의 경우, 빈산소, 적조, 질병 등에 의한 폐사 가능성과 연계될 것으로 판단된다(국립수산과학원, 2001, 2007a, 2009b, 2011b, 2012, 2014, 2016a & 2017a).

## 2) 감염성 질병에 의한 피해

특정 생물종에서 대량폐사가 발생하게 되면 생물학적 질병에 의한 폐사 가능성을 가진다(Sindermann, 1984). 일반적으로 감염성 질병은 숙주와 기생체의 관계(host-parasite relationship)가 잘못되었을 때 그 결과로 나타나며, 환경적 변화 또한 발병 인자의 한 원인이다(Snieszko, 1974; Chun, 2000). 국내에서 전염성 질병이 주요 원인으로 작용한 어업피해는 viral nervous necrosis (VNN) 감염에 의한 능성어(sevenband grouper, *Epinephelus septemfasciatus*)와 홍민어(*Sciaenops ocellatus*) 치어 폐사, iridovirus에 의한 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)의 폐사, *Vibrio ordalii*에 의한 조피볼락(*Sebastes schlegelii*) 치어 폐사, viral hemorrhagic septicemia virus (VHS)에 의한 넙치(*Paralichthys olivaceus*)의 폐사 등을 들 수 있다(Jung & Oh, 2000; Sohn *et al.*, 1998 & 2000; Kim *et al.*, 2001; Oh *et al.*, 2002; Jeong & Jeong, 2008; Jang *et al.*, 2018). 감성돔의 알레라충, 조피볼락의 아가미흡충, 농어의 연쇄구균, 넙치의 에드워드와 연쇄구균, 해산어류의 비브리오팀과 활주세균 등도 대량폐사를 유발할 수는 있으나 이

들 병원체가 주요 인자로서 작용한 경우는 드물다. 1998년부터 2016년까지 어업 피해에 대한 원인조사에서 HABs나 고수온 시기 또는 이들 인자에 의하여 영향을 받은 이후에 비브리오균, 활주세균 또는 참돔이리도바이러스에 의한 피해 사례가 확인된 바 있다(국립수산과학원, 2001, 2007a, 2009b, 2011b, 2012, 2014, & 2017a; Kim *et al.*, 2013).

### 용존산소

용존산소 문제와 관련한 폐사는 정전, 배관 파손, 재난 등에 의한 사고, 빈산소수괴의 형성 등의 원인에 의하여 발생할 수 있다. 수중의 용존산소 결핍은 수산생물의 호흡과 생리대사에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 생존에도 영향을 미친다(Breitburg, 2002; Karim *et al.*, 2003; Min *et al.* 2013; Abdel-Tawwab *et al.*, 2019). 해수 순환이 잘되지 않는 내만에서는 여름철 표층수온의 상승에 의하여 수온 약층이 형성되고, 상/하층의 대류가 이루어지지 않아 저층 산소 고갈에 의한 수산생물의 대량폐사가 나타날 수 있다(Yang & Hong, 1988; Degobbi, 1989).

바닷물 속에서 살아가고 있는 동·식물은 호흡을 위하여 용존산소를 이용하게 되는데 정상적인 산소보다 현저하게 낮은 산소농도를 포함하고 있는 경우를 ‘빈산소’라고 한다. 빈산소수괴(hypoxia water mass) 혹은 무산소수괴(anoxic water mass)는 수중의 용존산소가 극히 부족한 물덩어리를 말하며, 전자의 경우에 해수 중 용존산소가 3.6 mg/L 이하일 때를, 후자의 경우에 해수 중 용존산소가 0.036 mg/L 이하일 때로 구분하기도 한다. 빈산소수괴의 형성은 경남의 진해만, 고성만, 자란만 및 북신만과 전남의 가막만 등에서 자주 나타나며, 이 해역에 위치한 가두리양식장 및 육상수조 양식장에서 발생하는 경향이 있다(국립수산과학원, 2009a).

어류의 호흡에 이용된 산소는 미토콘드리아에서의 ATP 생성, 세포 대사에 의한 노폐물을 배설, 먹이에 포함된 고에너지의 화학적 결합 등에 사용되며, 이를 바탕으로 생명 유지 활동, 소화, 성장, 번식 등을 수행하게 된다(Chech Jr., 1990). 산소소비량은 수온, 먹이 섭취량, 유영방식 등에 따라 차이가 나는데, 수온이 높을수록, 먹이 섭취가 많을수록, 유영하는 어류일수록, 어류의 크기가 작을수록

증가한다(Fonds & Veldhuis, 1973; Itazawa & Oikawa, 1983; Jo & Kim, 1999; Jung *et al.* 2014; Park *et al.*, 2017). 용존산소량이 일정 기준치 이하로 내려가면 대사율 감소, 먹이섭취 불량, 성장 부진, 질병 저항성 저하 등이 나타날 수 있다(배 등, 2012). 호흡을 통하여 체내로 들어온 산소는 체액성 및 세포성 면역반응을 조절하는 인자로서의 역할을 하게 되는데, 대식세포에 의한 호흡폭발(respiratory burst activity)과 혈액 내 항체역가의 조절에 관여한다(Watts *et al.*, 2001; Bowden, 2008; Uribe *et al.*, 2011).

### 기타

수온, HABs, 질병, 용존산소와 더불어 염분농도(저염분), handling, 사육수의 산성화, pH의 급격한 감소 등도 어류의 스트레스 인자로 이해할 수 있다. 1996년 여름 제주도 서쪽 해안에서 발생한 저염분에 의해 자연산 해양생물의 폐사가 발생한 예가 있다(Suh *et al.*, 1999). 어류는 체액의 유지를 위하여 능동적 조절(active regulation)이 필요하며, 일정한 체내 삼투압 유지를 위하여 수분, 세포 내 염류, 영양물질의 농도를 조절하고자 한다(Morgan & Iwama, 1991). 염분은 어종과 환경에 따라 다소 차이는 있으나 drinking rate, 물의 흡수량, 이온의 흡수와 배설 등에 영향을 미치게 된다. 어류의 사육관리와 이동 중에 발생하는 다양한 형태의 handling은 혈액의 성분 변화에 영향을 미치는데 glucose 농도, lactate 농도, tissue glycogen 농도, 혈청 triglyceride 농도 등의 심한 변동이 관찰된다(Morales, 2000). 사육수의 산성화는 체내 삼투압 조절에 장애 유발과 스트레스 인자로 작용하여 성장 저해 및 생존율 감소를 유발한다(Pörtner *et al.*, 1998; Moon *et al.*, 2017). pH의 급격한 감소는 아가미손상을 유발하며 이로 인하여 삼투압조절에 문제를 발생시키며, pH 수치의 변화는 혈액 내 lysozyme과 IgM 수치 등 면역 인자에 영향을 미치게 된다(Tomasso *et al.*, 1980).

## 양식피해 대응

우리나라 양식업은 노동집약적 생산, 소규모 자

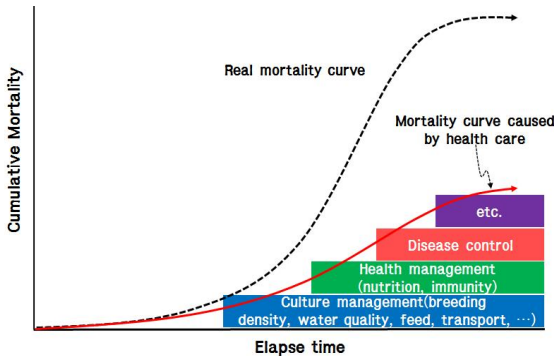


Fig. 9. Farm management to reduce damage in aquaculture. In order to reduce the mortality, it is necessary to comprehensively manage, culture and breeding, health, disease and other factors.

본, 자연자원의 과다 소모, 환경오염, 생태계 교란, 자연 의존적 양식 방법 등이 문제점으로 지적되고 있다(Ma *et al.*, 2015). 양식피해는 해양의 변화, 양식관리, 질병 관리 등의 문제에만 국한되어서 나타나는 것이 아니라 양식업의 문제점 또는 이와 연계한 다양한 영역에서 원인과 문제점을 찾을 수 있으므로 이들 각 영역의 문제, 즉, 양식생물의 사육 및 관리기술 향상, 효율적인 먹이 관리, 질병 차단과 능동적 대응, 제도 개선 등 종합적이고 복합적인 양식피해 대응이 이루어져야 한다(Fig. 9).

### 기후변화 대응

기후변화는 수온, 강수, 해양 산성화, 빈산소수괴의 확대, 해수면 상승 등의 영역에서 장기적으로 영향을 미치게 되며, 변화된 이들 인자에 의한 영향은 양식업 분야의 적응(適應, adaptation)하는 능력에 의하여 결정된다(FAO, 2018). 특히, 지구 온난화로 인한 수온 상승은 양식생산에 미치는 주요한 영향 중 하나로 간주된다(Idris *et al.*, 2014; Hamdan *et al.*, 2015). 기후변화에 의한 수온 상승은 전 지구적 문제로 어류양식의 입장에서는 변화된 현재의 상황에 빠르게 적응하여 피해를 최소화하는 노력이 필요하며, 이와 동시에 새로운 기회를 만들기 위한 다양한 방법을 고찰하여야 한다. 즉, 양식생물의 사육관리, 사료의 안정적 공급과 먹이 관리, 질병의 차단과 관리, 제도 개선 등 다양한 방법을 통하여 수온상승에 적응하여야 하며, 이러한 일

련의 과정은 장기적이고 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 여기에는 고수온에 적합한 어류(능성어, 불바리, 대왕범바리 등)의 사육에 대한 연구, 특정 시기에 또는 특정 시기를 피하여 사육하는 기술 개발, 빅데이터(big-data)를 활용한 기후변화 대응의 양식 방법 개발, 환경조절이 가능한 육상 기반 양식기술 개발 등의 확립을 포함하여야 한다.

### 사료관리

사료는 어류의 건강을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나이다. 전세계적으로 양어사료의 생산량은 계속 증가하고 있으나 양어사료의 원료인 단백질과 오일의 지속적 이용 가능성에 문제가 제기되고 있다(www.WATTAgNet.com; <https://climatefish.eu>). 그러므로 ‘좋은 사료’를 구입하여 적절하게 공급하여야 하는데 ① 단백질, 지방, 탄수화물, 무기질, 비타민 등 여러 가지 영양소가 골고루 함유되어 있고, ② 소화와 흡수가 잘되어야 하며, ③ 어류가 섭취했을 때 생리기능을 정상적으로 유지될 수 있어야 하는 조건을 충족하여야 한다. 즉, 영양소가 과다 또는 부족하거나 변질된 사료를 섭취하여 생리기능에 장애가 나타나는 것을 ‘영양성 질병’이라고 할 수 있다(Cho, 1983; Chun, 2000; Lall, 2000; Shafat & Karim, 2018). 특히, 가두리 양식어류에서 나타나기 쉬운 지방변성과 이로 인한 영향을 최소화하기 위하여 좋은 생사료의 구입도 중요하지만 이를 보관하는 것 또한 매우 중요하다. 양식어류의 지방변성을 줄이는 것은 장기간 소규모로 발생하는 폐사를 줄일 뿐만 아니라 고수온, 저수온, HABs 등의 영향에 의해 대량폐사 발생할 때 어류의 대응 능력을 높이므로서 폐사율을 낮출 수 있는 방안이 되기도 한다. 생사료는 -23℃ 이상의 온도에서 POV 값이 증가하므로 적당량 구매, 저온 보관, 냉동고에서 꺼낸 후 즉시 소비, 비타민 C와 E의 주기적 공급하는 등의 일상적인 관리를 통하여 사료의 변패와 변성을 최소화하여야 한다. 즉, 신선한 사료의 구매와 냉동 보관은 필수 요소이며, 가두리에서의 2차 가공(펠렛 등 가공) 후에도 빠른 소모를 통하여 사료변성이 일어나지 않도록 하여야 한다. 어류에 비타민 C 또는/와 E의 공급은 지질 산화의 방지와 산화에 의한 스트레스를 예방할 뿐만 아니

라 성장과 면역력 증강에도 유효하다(Blazer, 1992; Chun, 2000; Tocher, 2003; Wang *et al.*, 2016).

생사료의 보관은 산가(acid value, AV)와 과산화물가(peroxide value, POV) 생성에 영향을 미치므로, 어류에 장애를 일으키지 않는 범위에서 공급 사료에 대한 변화가 필요하다. 즉, 폐사율을 낮출 수 있는 전용 배합사료의 개발, 보관의 효율성을 높이는 방안 마련, 공급한 사료의 침강량을 최소화하여 어류양식 해역 내 환경오염을 줄이는 것 등이 장기적 안목에서 폐사율을 줄이는 방법이 될 수 있을 것이다(Kwon *et al.*, 2005; Dawood *et al.*, 2018; Jung *et al.*, 2020).

### 사육관리

온전한 사육관리는 양식어류에 대한 스트레스 최소화와 상통하며, 환경의 변화(지구 온난화), 지역, 어종, 크기, 사육 방법 등의 조건에 따라 달리 적용하여야 한다고 본다. 그러므로 양식생물의 일반적인 관리, 건강관리, 질병관리 및 기타 여러 가지 관련 사항을 아우르는 확장된 ‘관리’개념으로 접근하여야 하며, 이를 통하여 궁극적으로는 폐사 피해를 최소화하여 건강한 어류를 생산하는 것이다.

어류는 일반적으로 수온이 상승하면 산화스트레스(oxidative stress) 심화, 면역력 저하, 생존율 저하 등이 나타난다(Maule *et al.*, 1989; Lee *et al.*, 2002; Shin *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2015). 고수온과 저수온에 의한 가두리양식장 어류의 피해는 각각 여름철과 겨울철에 연례적으로 나타난 바 있다. 수온에 의한 지역적 및 시기적으로 특이한 경우는 여름철 동해안에 형성되는 냉수대(cold water mass)에 의한 영향을 들 수 있는데, 중저층수가 용승하여 표층 수온을 5°C 이상 낮추는 현상이다(Lee *et al.*, 1998; Choi, 2015; Yoon & Yang, 2016). 주로 6월 말에서 9월 초까지 불규칙적으로 나타나며, 특히 7월 말과 8월 중순에 출현 비율이 높다(Suh *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2019). 동해 남부 또는 남해 동부연안의 냉수대 형성은 북한한류의 남하(Lim & Chang, 1969; Lee, 2011), Tsushima current의 cyclonic circulation (Lee, 1978), 동한난류(East Korea Warm Current, EKWC)로 인한 baroclinic tilting (Lee

and Na, 1985), 부산-감포 해저연안의 지형 특성 (Lee & Na, 1985; Suh *et al.*, 2001), 남풍의 지속(Lee, 1983; Byun, 1989), 전체 해양수괴의 저수온 현상 (Suh *et al.*, 2001) 등 다양한 원인이 작용하는 것으로 알려져 있어 그 강도와 발생 경향을 쉽게 인지하기 어려우므로 거제도 동부지역부터 동해안에 분포한 넙치 육상수조양식장을 포함한 어류양식장은 이 시기에 냉해에 대한 적절한 대응이 필요하다.

어류양식장의 사육환경 내 수온, 용존산소, 염분 농도, pH 등의 변화는 일정 부분 상호 관련성과 역학에 의해 변화하므로 상시적 모니터링이 이루어져야 한다. 또한, 적조의 발생이 태풍, 조석, 그 외 환경인자에 의하여 수온약층이 소멸된 후 발생하는 경향(Lee *et al.*, 2001)을 보고하고 있다. 그러나 2013년 통영 연안의 적조 발생 시기에 강한 수온약층이 존재한 상황에서 적조의 확산 속도가 매우 빨랐는데(자료 제시하지 않음) 적조 발생과 확산에 대한 꾸준한 연구가 필요할 것이다.

### 질병관리

어류에 발생하는 질병은 어류 자체(유전, 품종, 성, 연령 등)에서 기인하는 문제, 환경이나 외부인자(수온, 용존산소, 염분 농도, 탁도, 오염물질, 영양의 과잉 또는 결핍 등)에서 기인하는 문제, 기생인자(바이러스, 세균, 기생충, 곰팡이 등)에 의한 문제 등에 의하며, 이들 인자들이 복합적으로 영향을 미치면 숙주의 질병 감수성은 증가한다(Austin & Austin, 1999; Egusa *et al.*, 2006). 일반적으로 1) 화학적·물리적으로 좋지 않은 사육 조건은 폐사의 중요한 인자이며, 2) 어류 개체가 스트레스를 받았을 때 기생인자에 의한 감염이 쉬워지고, 3) 개체의 잠재적 감염은 스트레스 받은 사육 집단에 쉽게 확산될 수 있기 때문이다(Snieszko, 1974; Sindermann, 1984). 그러므로 어류의 질병관리시스템을 갖추는데 있어 간과해서는 안 될 중요한 관점은 숙주, 사육환경, 그리고 기생인자에 대한 효율적 관리가 반드시 이루어져야 하며, 이를 통하여 어류에 영향을 미칠 수 있는 스트레스를 최소화하는 것이 중요하다.

산업의 발전과 국가 간 교류의 증가로 인하여 어류의 사육환경은 지속적으로 제한받고 있으며,

새로운 질병의 유입 가능성이 증대되고 있으므로 과거 개인적 영역에서 이루어지던 양식어류에 대한 질병관리가 지자체, 국가 또는 사회적 영역에 포함되거나 연계·연대하여 이루어지는 ‘질병관리 프로그램’으로 대응하여야 한다. 적합한 질병관리 프로그램의 운영에는 양식 대상이 되는 여러 어종에 대한 양식관리, 생리, 생태에 대한 정보뿐만 아니라 질병의 조사, 발생, 제어, 예방에 이르는 전주기적(全週期的) 정보와 더불어 기후, 유통(무역), 행정 등 사회적 요소가 유연하게 연계되는 것이 바람직한데, 북유럽의 연어 양식과 질병관리 프로그램 운영의 예에서 찾을 수 있다(Anderson, 1992). 그러나 우리나라 남해안에 위치한 대부분의 가두리양식장에서는 다양한 어류를 대상으로 복합 또는 혼합양식을 하고 있어 숙주 범위가 확대되거나 이종(異種) 숙주에 의한 교차감염 가능성이 높아질 수 있으므로 단일 어종을 대상으로 한 질병관리 프로그램은 적합하지 않다고 여겨진다. 그러므로 남해안 어류양식 시스템에 대한 객관적인 평가가 선행되어야 하며, 이를 기초로 한 적합한 질병관리 시스템의 마련이 필요할 것으로 사료된다.

### 제도의 개선

세계적인 주요 양식국가의 수산정책은 양식 수산물의 증대, 양식업의 규모화, 생태계 보호 및 복원, 환경보호 정책 등을 근간으로 하여 추진되고 있다(Christensen & Walters, 2005; 한국해양수산개발원, 2015). 우리나라 또한 지속 가능한 양식업, 어업소득 증대 및 어장환경 보전을 위하여 국가 중심의 어장정화사업(1986) 시행, 「어장관리법」 제정(2001), 어장관리 기본계획 등의 정책이 추진되었으나 획기적인 어업생산성 향상은 이루어지지 않았다고 보는 것이 일반적인 시각이며, 연안의 어업권 어업, 특히 양식업은 어장의 노후화, 영세화 및 과밀화, 낮은 수심에서의 사육, 정부 중심의 어장관리 등의 문제점을 가지고 있어 어업피해에 쉽게 노출될 수 있는 구조이므로 이를 개선하고 정리하는 규정과 제도의 정비가 필요할 것으로 사료된다(한국해양수산개발원, 2002, 2017 & 2018; 해양수산부, 2014; 차, 2005; Kwon *et al.*, 2005; 옥, 2010; 신, 2005 & 2020). 특히, ‘양식산업발전법(2020)’을

제정하여 미래의 발전 방향을 새로이 규정한다는 점에서는 큰 계기를 마련하였으나 기존 수산업법에 비해 차별성이 부족하고 양식산업 발전을 위한 구체적인 수단과 양식산업 구조 개편 등에 대한 방안이 부족하다는 의견 또한 존재한다(신, 2020; 신과 정, 2021).

### 기타

중국과 일본은 수산식품의 주요 수입국으로 수산업에 대한 기회를 제공할 수 있는 시장이며 협력 대상이다(방 등, 2009; 염, 2014). 그러나 중국으로부터 수입 또한 급격히 늘어나고 있어 시장 파악에 의한 양식품종의 선택, 품질 향상, 유망 양식종의 발굴과 육성 등이 꾸준히 이루어져야 한다(이, 2006; 주 등, 2007; 염, 2014). 즉, 경쟁력 지표가 뚜렷한 사육어종의 개발과 지속적 투자, 각 품종의 강점에 대한 정책적 역량 집중, 약점을 보완하는 정책, 전체 수산업 영역에 포함되는 주변 산업과의 역할분담을 통한 시너지 효과의 극대화, 지역별 특화 및 전문화, 경쟁력이 높은 어종에 대한 글로벌화가 요구된다(홍과 김, 2008).

양식시설의 첨단화 및 규모화는 양식수산물 시장의 선점과 지속가능한 산업을 위해서 뿐만 아니라 양식피해 대응에도 중요한 조건이므로 이를 뒷받침하는 노력이 필요하다. 나아가 첨단화 및 규모화의 경제 주체가 될 양식산업 관련 전문 인력 양성과 함께 이들을 적극적으로 활용할 수 있는 제도적 장치의 마련이 필요하다(한국해양수산개발원, 2015; 국회입법조사처, 2019).

## 요 약

지난 30년간 전세계 양식업은 비약적으로 발전하였다. 양식업은 인간이 요구하는 동물성 단백질 섭취량의 15% 이상을 공급하는 중요한 산업이므로 수요 충족을 위하여 어류와 수산생물의 지속적인 생산 증가가 필요하다. 우리나라 남해안(경남과 전남)에 위치한 어류 가두리양식장 수면적 비율은 전국 대비 약 90%로 어류 양식업의 측면에서는 매우 중요한 곳이다. 그러나 최근의 양식환경은 전지구적 문제인 기후변화에 의한 영향을 점진적으로



받고 있으며, 이러한 영향이 더욱 심화될 것으로 예측되고 있다. 그러므로 지금의 시점에서 기후변화가 우리나라 산업계, 특히 양식산업에 미칠 영향을 정확히 평가하여야 할 시점일 뿐만 아니라 나아가 어업피해를 최소화하기 위한 사회적 및 국가적 전략이 필요하다. 남해안 가두리양식장에서 양식되는 어류의 피해는 해마다 늘어나고 있는데 주요 피해의 원인 인자는 기후변화와 직·간접적으로 관련이 있는 고수온, 저수온 및 적조의 발생 등으로 알려져 있다. 현재의 시점에서 지구 온난화는 경제적 한계를 가지는 어종이나 새로운 종에 대한 양식산업화의 기회를 제공할 수 있다. 그러나 이러한 긍정적인 기회의 존재에도 불구하고 새로운 종의 유입에 의한 생태 교란, 적조 등 미세조류의 번식빈도 증가, 질병 발생 기회의 증가, 여름철 고수온 발생 및 기간의 장기화 등 부정적인 문제가 발생하며, 이러한 원인들의 복합적인 영향으로 인해 양식어류의 폐사 규모와 사례가 증가하고 있다. 어류의 폐사 피해의 증가는 양식산업계에 심각한 경제적 영향을 줄 뿐만 아니라 피해 대응과 후속 조치를 위한 사회적 비용 또한 증가하게 된다. 그러므로 어류양식장에서 발생하는 폐사 피해는 원인 인자들에 대한 적극적이고 능동적인 대응으로 줄일 수 있으며, 양식생물의 사육 및 관리기술 향상, 효율적인 먹이 관리, 질병 차단과 능동적 대응, 제도 개선 등 다양한 영역에서 이루어져야 한다. 본 총설에서는 우리나라 남해안에 위치한 어류 가두리양식장에서 발생한 대량폐사 사례를 분석하고 폐사 원인에 대한 대응 능력을 향상시키기 위한 방안을 제시하고자 하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 시험연구사업(R202018)의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

### References

Abdel-Tawwab, M., Monier, M.N., Hoseinifar, S.H. and Faggio, C.: Fish response to hypoxia stress: growth, physiologic and immunological biomarkers. *Fish Physiol. Biochem.*, 45:997-1013, 2019.

Abele, D., Burlando, B., Viarengo, A. and Pörtner, H.O.: Exposure to elevated temperature and hydrogen peroxide elicits oxidative stress and antioxidant response in the Antarctic intertidal limpet *Nacella concinna*. *Comp. Biochem. Physiol. B*, 120:425-435, 1998.

Adams, S.M. and Greeley, M.S.: Ecotoxicological indicators of water quality: using multi-response indicators to assess the health of aquatic ecosystems. *Water Air and Soil Pollution*, 123:103-115, 2000.

Al-Ghelani, H.M., AlKindi, A.Y.A., Amer, S. and Al-Akhzami, Y.K.: Harmful algal blooms: physiology, behavior, population dynamics and global impacts – A Review. *Sultan Qaboos University Journal for Science*, 10:1-30, 2005.

Anderson, D.M.: The ecology and oceanography of harmful algal blooms, multidisciplinary approaches to research and management. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO, Paris, 2005.

Anderson, D.M.: Toxic algal blooms and red tides: a global perspective. In *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, pp.11-16, ed., Okai-chi, T., Anderson, D.M. and Nemoto, T., Elsevier, 1989.

Anderson, D.P.: Environmental factors in fish health: Immunological aspects. In *The fish immune system: Organism, pathogen, and environment*, pp.289-310, ed., Iwama, G, and Nakanishi, T., Academic Press London, UK, 1996.

Anderson, D.P.: Immunostimulants, adjuvants, and vaccines to aquaculture. *Ann. Rev. Fish Dis.*, 2:281-307, 1992.

Anderson, P.G., Taylor, B.R. and Balch, G.C.: Quantifying the effects of sediment release on fish and their habitats. *Fisheries and Oceans, Canada, Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2346.

Arguis, C. and Roberts, R.J.: Melano-macrophage centers and their role in fish pathology. *J. Fish Dis.*, 26:499-509, 2003.

Austin, B. and Austin, D.A.: *Bacterial Fish Pathogens. Disease of farmed and wild fish*, 3rd ed., Springer, Praxis Publishing Ltd., 1999.

Bagarinao, T.: Sulfide as an environmental factor and toxicant: tolerance and adaptations in aquatic organisms. *Aquat. Toxicol.*, 24:21-62, 1992.

Bagnyukova, T., Lushchak, O., Storey, K.B. and Lushchak, V.: Oxidative stress and antioxidant defense response by goldfish tissue to acute change of temper-

- ature from 3 to 23°C. J. Therm. Biol., 32:227-234, 2007.
- Barton, B.A. and Iwama, G.K.: Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of corticosteroids. Ann. Rev. Fish Dis., 1:3-26, 1991.
- Bell, M.V., Henderson, R.J. and Sargent, J.R.: The role of polyunsaturated fatty acids in fish. Comp. Biochem. Physiol. Part B: Comp. Biochem., 83:711-719, 1986.
- Berdalet, E., Fleming, L.E., Gowen, R., Davidson, K., Hess, P., Backer, L.C., Moore, S.T., Hoagland P. and Enevoldsen, H.: Marine harmful algal blooms, human health and wellbeing: challenges and opportunities in the 21<sup>st</sup> century. J. Mar. Biol. Assoc. U.K., 2015(author manuscript).
- Blazer, V.S.: Nutrition and disease resistance in fish. Ann. Rev. Fish Dis., 1:309-323, 1992.
- Blazer, V.S., Wolke, R.E., Brown, J. and Powell, C.A.: Piscine macrophage aggregate parameters as health monitors: effect of age, sex, relative weight, season and site quality in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Aquat. Toxicol., 10:199-215, 1987.
- Bly, J.E. and Clem, L.W.: Temperature-mediated processes in teleost immunity: In vivo low temperature immunisation does not induce tolerance in channel catfish. Fish Shellfish Immunol., 1:229-231, 1991.
- Bly, J.E. and Clem, L.W.: Temperature and teleost immune functions. Fish Shellfish Immunol., 2:159-171, 1992.
- Bowden, T.J.: Modulation of the immune system of fish by their environment. Fish Shellfish Immunol., 25: 373-383, 2008.
- Breitburg, D.: Effects of hypoxia, and the balance between hypoxia and enrichment, on coastal fishes and fisheries. Estuaries, 25:767-781, 2002.
- Brown, J.R., Gowen, R.J. and McLusky, D.S.: The effect of salmon farming on the benthos of a Scottish sea loch. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 109:39-51, 1987.
- Brydges, N.M., Boulcot, P., Ellis, T. and Braithwaite, V.A.: Quantifying stress responses induced by different handling methods in three species of fish. Appl. Anim. Behav. Sci., 116:295-301, 2009.
- Byun, S.K.: Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect. J. Oceanol. Soc. Korea, 24:121-131, 1989.
- Cai, Y. and Summerfelt, R.C.: Effects of temperature and size on oxygen consumption and ammonia excretion by walleye. Aquaculture, 104:127-138, 1992.
- Cha, C.P.: A study on requirement for reformation of Fisheries Act in Korea. Korean Soc. Mar. Eng. (conference proceedings), 82-84, 2005.
- Chang, Y.J., Hur, J.W., Lim, H.K. and Lee, J.K.: Stress in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) and fat cod (*Hexagrammos otakii*) by the sudden drop and rise of water temperature. J. Korean Fish. Sci., 34: 91-97, 2001.
- Cho, C.Y.: Nutrition and fish health. In A guide to integrated fish health management in the Great Lakes Basin (Special publication 83-2), pp.63-74, ed., Meyer, F.P., Warren, J.W. and Carey, T.G., Great Lakes Fisheries Commission, Michigan, USA, 1983.
- Choi, H.S., Jee, B.Y., Cho, M.Y. and Park, M.A.: Monitoring of pathogens on the cultured Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* in the marine cages farms of south sea area from 2006 to 2008. J. Fish Pathol., 23:27-35, 2010.
- Choi, H.S., Jung, S.H., Hur, Y.B. and Yang, J.Y.: Study on the Winter Mass Mortality of red sea bream, *Pagrus major* in South sea area. J. Fish Pathol., 21:35-43, 2008.
- Choi, H.S., Myoung, J.I., Park, M.A. and Cho, M.Y.: A study on the summer mortality of Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* in Korea. J. Fish Pathol., 22: 155-162, 2009.
- Choi, H.S., Park, S.R. and Jung, C.G.: Biochemical analysis of blood serum from wintering seabream with green liver syndrome. J. Fish Pathol., 15:43-48, 2002.
- Choi, Y.K.: Upwelling in the southwest region of the East Sea in July, 2013. J. Korean Soc. Fish. Technol., 51:212-220, 2015.
- Christensen, V. and Walters, C.J.: Using ecosystem modeling for fisheries management: Where are we? ICES CM 2005/M:19, 2005.
- Chun, S.K.: Diseases of farmed fish - Marine fish, pp.11-24, Susansinbosa, 2000.
- Chun, S.K., Lee, W.L., Kang, H.G. and Huh, M.D.: Morphological studies on the liver of mullet, *Mugil cephalus*, with green liver syndrome. Natl. Acad. Sci. ROK, 41:149-175, 2002.
- Cocking, A.W.: The effects of high temperatures on roach (*Rutilus rutilus*). I. The effects of constant high temperatures. J. Exp. Biol., 36: 203-215, 1959.
- Collazos, M.E., Barriga, C. and Ortega, E.: Effect of high summer temperatures upon granulocyte phagocytic function of the tench (*Tinca tinca*, L.). Comp. Immun. Microbiol. Infect. Dis., 18:115-121, 1995.
- Collins, C., Bresnan, E., Brown, L., Falconer, L., Guild-

- er, J., Jones, L., Kennerley, A., Malham, S., Murray, A. and Stanley, M.: Impacts of climate change on aquaculture. MCCIP Science Review 2020, 2020.
- Connell, C.C. and Cross, J.B.: Mass mortality of fish associated with the protozoan *Gonyaulax* in the Gulf of Mexico. *Science*, 112:359-363, 1950.
- Conte, F.S.: Stress and the welfare of cultured fish. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 86: 205-223, 2004.
- Cuchens, M.A. and Clem, A.W.: Phylogeny of lymphocyte heterogeneity: II. Differential effects of temperature on fish T-like and B-like cells. *Fish Shellfish Immunol.*, 34:219-230, 1977.
- Davis, K.B. and Parker, N.C.: Physiological stress in striped bass: Effect of acclimation temperature. *Aquaculture*, 91:349-358, 1990.
- Dawood, M.A.O., Koshio, S. and Esteban, M.A.: Beneficial roles of feed additives as immunostimulants in aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture*, 10: 950-974, 2018.
- Degobbis, D.: Increased eutrophication of the northern Adriatic sea: Second act. *Mar. Pollut. Bull.*, 20:452-457, 1989.
- de Oliveira, S.R., de Souza, R.T.Y.B., Nunes, É. da S.S., de Carvalho, C.S.M., de Menezes, G.C., Marcon, J.L., Akifumi Ono, R.R.E. and Affonso, E.G.: Tolerance to temperature, pH, ammonia and nitrite in cardinal tetra, *Paracheirodon axelrodi*, an amazonia ornamental fish. *ACTA Amazonica*, 38:773-780, 2008.
- Doi, A., Hatase, O., Shimada, M., Murakami, T.H. and Okaichi, T.: Ultrastructure changes in gill epithelia of a yellowtail *Seriola quinqueradiata*, exposed to sea bloom. *Cell Struct. Funct.*, 6:375-383, 1981.
- Dorantes-Aranda, J.J., Garcia-de la Parra, L.M., Alonso-Rodriguez, R., Morquecho, L. and Voltolina, D.: Toxic effect of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* on the spotted rose snapper *Lutjanus guttatus*. *Environ. Toxicol.*, 25:319-326, 2009.
- Egusa, S., Wakabayashi, H. and Muroga, K.: Infectious and parasitic diseases of fish and shellfish. Life Science Publishing Co, Seoul, 2006.
- Ellis, T., Yildiz, H.Y., López-Olmeda, J., Spedicato, M. T., Tort, L., Øverli, Ø. and Martins, C.I.M.: Cortisol and finfish welfare. *Fish Physiol. Biochem.*, 38:163-188, 2012.
- Elsaesser, C.F. and Clem, L.W.: Haematological and immunological changes in channel catfish stressed by handling and transport. *J. Fish Biol.*, 28:511-521, 1986.
- Endo, M., Sakai, T. and Kuroki, A.: Histological and histopathological changes in the gills of the yellow-tail *Seriola quinqueradiata* exposed to the Raphidiphycean flagellate *Chattonella marina*. *Mar. Biol.*, 87:193-197, 1985.
- Epstein, P.R.: Climate change and emerging infectious diseases. *Microb. Infect.*, 3:747-754, 2001.
- FAO: Impacts of climate change of fisheries and aquaculture. Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options, 2018.
- FAO: The state of world fisheries and aquaculture. 2020.
- Fonds, M. and Veldhuis, C.: The oxygen consumption of four *Pomatoschistus* species (Pisces, Gobiidae) in relation to water temperature. *Netherlands J. Sea Res.*, 7:376-386, 1973.
- Fry, F.E.J., Brett, J.R. and Clawson, G.H.: Lethal limits of temperature for young goldfish. *Rev. Can. Biol.*, 1:50-56, 1942.
- Fry, F.E.J.: Responses of vertebrate poikilotherms to temperature. In *Thermobiology*, pp.375-409, ed., Ross, A.H., Academic press, New York, 1967.
- Gowen, R.J. and Bradbury, N.B.: The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review. *Ocean Mar. Biol. Ann. Rev.*, 25:563-575, 1987.
- Grindle, J.R. and Taylor, F.J.R.: Red water and mass-mortality of fish near Cape Town. *Nature*, 195:1324, 1962.
- Gubbins, M., Bricknell, I. and Service, M.: Impacts of climate change on aquaculture. MCCIP Science Review 2013, 318-327, 2013.
- Hall, P.O.J., Anderson, L.G., Holby, O., Kollberg, S. and Samuelson, M.O.: Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. I. Carbon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61:61-73, 1990.
- Hall, P.O.J., Holby, O., Kollberg, S. and Samuelsson, M.-O.: Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. IV. Nitrogen. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 89:81-91, 1992.
- Hamdan, R., Othman, A. and Kari, F.: Climate change effects on aquaculture production performance in Malaysia: an environmental analysis. *Int. J. Bus. Soc.*, 16:364-385, 2015.
- Hartly, J.P.: Methods for monitoring offshore macrobenthos. *Mar. Pollut. Bull.*, 13:150-154, 1982.
- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S. and Samuel, M.D.: Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*, 296:2158-2162, 2002.
- Hazel, J.R. and Carpenter, R.: Rapid changes in the phospholipid composition of gill membranes during

- thermal acclimation of the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. J. Comp. Physiol. B, 155:597-602, 1985.
- Hoff, J.G. and Westman, J.R.: The temperature tolerances of three species of marine fishes. J. Mar. Res., 24:131-140, 1966.
- Holby, O. and Hall, P.O.J.: Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus. Mar. Ecol. Prog. Ser., 70:263-272, 1991.
- Holby, O. and Hall, P.O.J.: Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. III. Silicon. Aquaculture, 120:305-318, 1994.
- Holmer, M. and Kristensen, E.: Impact of marine fish cage farming on metabolism and sulfate reduction of underlying sediments. Mar. Ecol. Prog. Ser., 80: 191-201, 1992.
- Idris, K., Azman, A., D'Silva, J.L., Man, N. and Shaffril, H.A.M.: Environmental challenges on aquaculture rearing in Malaysia: the views of brackish-water cage entrepreneurs in Malaysia. Life Sci. J., 11:509-513, 2014.
- Ishimatsu, A., Oda, T., Yoshida, M. and Ozaki, M.: Oxygen radicals are probably involved in the mortality of yellowtail by *Chattonella marina*. Fish. Sci., 62: 836-837, 1996a.
- Ishimatsu, A., Sameshima, M., Tamura, A. and Oda, T.: Histological analysis of the mechanisms of *Chattonella*-induced hypoxemia in yellowtail. Fish. Sci., 62:50-58, 1996b.
- Ishioka, H.: Stress reactions in the marine fish. I. Stress reactions induced by temperature change. Bull. Jpn. Sci. Fish., 46:523-532, 1980.
- Itazawa, Y. and Oikawa, S.: A quantitative interpretation of the metabolism-size relationship in animals. Experientia, 42:152-153, 1983.
- Jang, K.N.: Fish Aquaculture, pp.17-57, SamKoang Press, Seoul, 2010.
- Jang, M.S., Kim, J.O., Oh, M.J. and Kim, W.S.: Study on the tendency of viral hemorrhagic septicemia virus (VHS) detection in Korea from 2001 to 2016 based on reported case. J. Fish Pathol., 31:49-55, 2018.
- Jang, Y.L., Lee, H.J., Moon, H.B., Lee, W.C., Kim, H.C. and Kim G.B.: Marine environmental characteristics in the coastal area surrounding Tongyeong cage-fish farms. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 18: 74-80, 2014.
- Jee, B.Y., Do, Y.H., Min, B.H., Park, M.S., Hwang, H.G., Myeong, J.I. and Cho, J.K.: Changes of blood parameters in Korean rockfish *Sebastes schlegeli* subjected to acute hypoxia at different water temperatures. Korean J. Environ. Biol., 33:412-418, 2015.
- Jeong, J.B. and Jeong, H.D.: Pathogenicity of iridovirus against marine fish and its detection in culturing seawater. J. Kor. Fish. Soc., 41:20-25, 2008.
- Jones, J.C. and Reynolds, J.D.: Effects of pollution on reproductive behaviour of fish. Rev. Fish Biol. Fish., 7:463-491, 1997.
- Jun, L.J., Jeong, J.B., Kim, J.H., Nam, J.H., Shin, K.W., Kim, J.K., Kang, J.C. and Jeong, H.D.: Influence of temperature shifts on the onset and development of red sea bream iridoviral disease in rock bream *Oplegnathus fasciatus*. Dis. Aquat. Org., 84:201-208, 2009.
- Jung, J.Y., Kim, S., Kim, K., Lee, B.J., Kim, K.W. and Han, H.S.: Feed and disease at olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) farms in Korea. Fishes 5, 21:1-13, 2020.
- Jung, M.H., Jung, S.J., Vinay, T.N., Nikapitiya, C., Kim, J.O., Lee, J.H., Lee, J. and Oh, M.J.: Effects of water temperature on mortality in *Megalocytivirus*-infected rock bream *Oplegnathus fasciatus* (Temminck et Schlegel) and development of protective immunity. J. Fish Dis., 38:729-737, 2015.
- Jung, S.J. and Oh, M.J.: Iridovirus-like infection associated with high mortalities of striped beakperch, *Oplegnathus fasciatus* (Temminck et Schlegel), in southern coastal areas of the Korean peninsula. J. Fish Pathol., 23:223-226, 2000.
- Kang, D.Y., Kang, H.W., Kim, G.H., Cho, K.C. and Kim, H.C.: Effect of cold shock on the physiological responses of the cultured mullet, *Mugil haematocheilus* in winter. J. Kor. Fish. Soc., 40:226-233, 2007.
- Karim, M.R., Sekine, M., Higuchi, T., Imai, T. and Ukita, M.: Simulation of fish behavior and mortality in hypoxic water in an enclosed bay. Ecol. Modelling, 159:27-42, 2003.
- Kim, C.S., Lee, S.G., Kim, H.G. and Jung, J.: Reactive oxygen species as causative agent in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. J. Plankton Res., 21:2105-2115, 1999.
- Kim, C.S., Lee, S.G. and Kim, H.G.: Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 254:131-141, 2000.
- Kim, C.S., Jee, B.Y. and Bae, H.M.: Structural alterations in the gill of the red sea bream, *Pagrus major*, exposed to the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. J. Fish Sci. Tech., 5:75-78, 2002.

- Kim, J.D., Kim, S.R., Jung, S.J., Kim, Y.J., Jung, T.S., Choi, T.J., Park, S.W. and Oh, M.J.: Occurrence of viral nervous necrosis (VNN) in red drum (*Sciaenops ocellatus*) larvae. J. Fish Pathol., 14:91-95, 2001.
- Kim, J.H., Lee, K.J., Suzuki, T., Kang, Y.S., Kim, P.H., Song, K.C. and Lee, T.S.: Seasonal variability of lipophilic shellfish toxins in bivalves and waters, and abundance of *Dinophysis* spp. in Jinhae Bay, Korea. J. Shellfish Res., 29:1061-1067, 2010.
- Kim, J.Y., Han, I.S., Ahn, J.S. and Park, M.H.: Long-term trend analysis of cold water along the Eastern coast of South Korea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 25:581-588, 2019.
- Kim, S.J., Woo, S.H., Kim, B.K. and Hur, S.D.: Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years. Ocean Polar Res., 33:281-290, 2011.
- Kim, S.H., Kim, J.H., Park, M.A., Hwang, S.D. and Kang, J.C.: The Toxic effects of ammonia exposure on antioxidant and immune responses in Rockfish, *Sebastes schlegeli* during thermal stress. Environ. Toxicol. Pharmacol., 40:954-959, 2015.
- Kim, W.S., Kim, S.R., Park, M.A., Lee, J.S., Avunje, S., Kim, D.H. and Oh, M.J.: Changes in fish viral disease outbreaks in the coastal area of Korea due to increasing water temperature, an impact of climate change. Kor. J. Fish. Aquat. Sci., 46:582-588, 2013.
- KOSIS: <http://kosis.kr>
- Kuroki, T.: Thermal stimulation in fish. Bull. Jpn. Soc. Fish., 33:263-275, 1967.
- Kwon, J.N., Jung, R.H., Kang, Y.S., An, K.H. and Lee, W.C.: Environmental management of marine cage fish farm using numerical modelling. J. Korean Soc. Oceanogr., 10:181-195, 2005.
- Lall, S.P.: Nutrition and health of fish. In Avances en nutrición acuícola V, pp.13-23, ed., Cruz-Suárez, L.E., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Olvera-Novoa, M.A. and Civera-Cerecedo, R., Memorias V Symposium Internacional de Nutrición Acuicola, Yucatán, Mexico, 2000.
- Lee, C.H.: The development ceroidosis in cultured flounder. J. Fish Pathol., 6:143-161, 1993a.
- Lee, C.H.: Prophylaxis of ceroidosis in cultured flounder, *Paralichthys olivaceus*. J. Fish Pathol., 6:177-189, 1993b.
- Lee, D.C., Kim, D.H., Kim, S.M., Kang, M.S., Hong, M.J., Kim, H.J. and Park, S.I.: Effects of stress induced by change of water temperature on the non-specific defense mechanism in cultured olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. J. Fish. Pathol., 15:65-75, 2002.
- Lee, D.C., Park, Y.C., Jeon, C.Y., Yang, J.Y., Hur, Y.B., Kim, J.W. and Cho, K.C.: A report on the 2012 mass summer mortalities of black rockfish, *Sebastes schlegeli* in the Southeast Sea, Korea. J. Fish. Pathol., 26:173-183, 2013.
- Lee, D.C., Won, K.M., Park, M.A., Choi, H.S. and Jung, S.H.: An analysis of mass mortalities in aquaculture fish farms on the southern coast in Korea. Ocean Pollar Res., 33:1-16, 2018.
- Lee, D.K., Kwon, J.I. and Hahn, S.B.: The wind effect on the cold water formation near Gampo-Ulgi Coast. J. Korean Fish. Soc., 31:359-371, 1998.
- Lee, J.C. and Na, J.Y.: Structure of upwelling off the southeast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 20:6-19, 1985.
- Lee, J.C.: Upwelling-response of the cold water off Haewundae in summer. J. Korean Soc. Oceanogr., 16:206-211, 2011.
- Lee, J.C.: Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. J. Oceanol. Soc. Korea., 18:149-160, 1983.
- Lee, Y.S., Park, Y.T., Kim, Y.S., Kim, K.Y., Park, J.S., Go, W.J., Jo, Y.J. and Park, S.Y.: Countermeasure and outbreak mechanism of *Cochlodinium polykrikoides* red tide I. Environmental characteristics on outbreak and disappearance of *C. polykrikoides* bloom. J. Korean Soc. Oceanogr., 4:259-264, 2001.
- Le Morvan, C., Troutaud, D. and Deschaux, P.: Differential effects of temperature on specific and nonspecific immune defences in fish. J. Expt. Biol., 201:165-168, 1998.
- Levitus, S., Antonov, J. and Boyer, T.: Warming of the world ocean, 1955-2003. Geophys. Res. Lett., 32: L0260, 2005.
- Lewis Jr., W.M. and Morris, D.P.: Toxicity of Nitrite to Fish: A Review. Trans. Am. Fish. Soc., 115:183-195, 1986.
- Lim, D.B. and Chang, S.: On the cold water mass in the Korea Strait. J. Oceanol. Soc. Korea, 4:71-82, 1969.
- Lim, W.A., Go, W.J., Kim, K.Y. and Park, J.W.: Variation in harmful algal blooms in Korea coastal waters since 1970. J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 26:523-530, 2020.

- López-Olmeda, J.F. and Sánchez-Vázquez, F.J.: Thermal biology of zebrafish (*Danio rerio*). *J. Therm. Biol.*, 36:91-104, 2011.
- Lovell, T.: Nutrition and fish health. In: Nutrition and feeding of fish, pp.115-122, 2nd ed., Springer, Boston, 1998.
- Lushchak, V. and Bagnyukova, T.: Temperature increase results in oxidative stress in goldfish tissue. 2. Antioxidant and associated enzymes. *Comp. Biochem. Physiol. C*, 143:36-41, 2006.
- MAFRA: Impact analysis of climate change of agriculture, forestry, fisheries and food sectors and establishing model of impact assessment. pp.191-202, 2015.
- Magnadóttir, B.: Immunological control of fish diseases. *Mar. Biotechnol.*, 12:361-379, 2010.
- Magnadóttir, B.: Innate immunity of fish (overview). *Fish Shellfish Immunol.*, 20:137-151, 2006.
- Martins, D.A., Roche, F., Martínez-Rodríguez, G., Bell, G., Morais, S., Castanheira, F., Bandarra, N., Coutinho, J., Yúfera, M. and Conceição, E.C.: Teleost fish larvae adapt to dietary arachidonic acid supply through modulation of the expression of lipid metabolism and stress response genes. *British J. Nutrition*, 108:864-874, 2011.
- Maule, A.G., Tripp, R.A., Kaattari, S.L. and Schreck, C.B.: Stress alters immune function and disease resistance in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *J. Endocrinol.*, 120:135-142, 1989.
- ME (Ministry of Environment): Korean climate change assessment report 2020. pp.187-219, 2020.
- Menasveta, P.: Lethal temperature of marine fishes of the Gulf of Thailand. *Fish Biol.*, 18:603-607, 1981.
- Min, B.H., Park, M.S., Myeong, J.I. and Hwang, H.K.: Physiological stress responses in black seabream *Acanthopagrus schlegelii* subjected to acute hypoxia. *Kor. J. Fish Aquat. Sci.*, 46:819-826, 2013.
- Mitchell, S. and Rodger, H.: Pathology of wild and cultured fish affected by a *Karenia mikimotoi* bloom in Ireland, 2005. *Bull. Eur. Ass. Fish Pathol.*, 27:39-42, 2007.
- Moon, H.N., Park, J.H., Park, C.M., Namgung, J., Kim, K.H. and Yeo, I.K.: Physiological responses of gray mullet *Mugil cephalus* to low-pH water. *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, 50:153-159, 2017.
- Moraes, G.: Metabolic impact of handling on *Pseudoplatystoma coruscans*, a widespread teleost fish. In *Stress in fish, New directions*, pp.89-100, ed., Barton, B., Pottinger, T., Iwama, G. and MacKinlay, D., International Congress on the Biology of Fish, 2000.
- Morgan, J.P. and Iwama, G.K.: Effects of salinity on growth, metabolism, and ion regulation in juvenile rainbow trout and steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) and fall chinook salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 48:2083-2094, 1991.
- Müller, R. and Loyd, R.: Sublethal and chronic effects of pollution on freshwater fish. p.371, Oxford: Blackwell Science Ltd., 1994.
- Musa, N., Ramly, H.R., Abdul Manaf, M.T., Razzak, L.A. and Musa N.: High temperature impairs physiological responses in red hybrid tilapia: effects on cortisol and its regulation. *AACL Bioflux*, 10:1297-1308, 2017.
- Nardocci, G., Navarro, C., Cortés, P.P., Imarai, M., Montoya, M., Valenzuela, B., Jara, P., Acuña-Castillo, C. and Fernández, R.: Neuroendocrine mechanisms for immune system regulation during stress in fish. *Fish Shellfish Immunol.*, 40:531-538, 2014.
- Oh, M.J., Jung, S.J., Kim, S.R., Rajendran, K.V., Kim, Y.J., Choi, T.J., Kim, H.R. and Kim, J.D.: A fish nodavirus associated with mass mortality in hatchery-reared red drum, *Sciaenops ocellatus*. *Aquaculture*, 211:1-7, 2002.
- Oh, S.Y., Noh, C.H., Myoung, J.I. and Jo, J.Y.: Effects of water temperature and body weight on oxygen consumption rate of black rockfish, *Sebastes schlegelii*. *Korean J. Ichthyol.*, 19:1-7, 2007.
- Oliva-Teles, A.: Nutrition and health of aquaculture fish. *J. Fish Dis.*, 35:83-108, 2012.
- Parihar, M.S., Dubey, A.K., Faveri, T. and Prakash, P.: Changes in lipid peroxidation, superoxide dismutase activity, ascorbic acid and phospholipids content in liver of freshwater catfish *Heteropneustes fossilis* exposed to elevated temperature. *J. Therm. Biol.*, 21:23-330, 1996.
- Park, J., Jeong, H.J., Yoo, Y.D. and Yoon, E.Y.: Mixotrophic dinoflagellate red tides in Korean waters: Distribution and ecophysiology. *Harmful Algae*, 30s: s28-s40, 2013a.
- Park, J.Y., Han, K.H., Cho, J.K., Kim, K.M., Son, M.H., Park, J.M. and Kang, H.W.: Survival rate and hematological responses with temperature changes of red spotted grouper, *Epinephelus akaara* in South Korea. *Dev. Reprod.*, 20:103-112, 2016a.
- Park, J.Y., Park, J.M., Hong, C.K., Kim, K.M. and Cho, J.K.: Physiological and biochemical response of blood on low temperature stress in sevenband grouper, *Epinephelus septemfasciatus*. *Korean J. Ichthyol.*

- 28:1-8, 2016b.
- Park, S.Y. and Park, C.H.: An analysis on the factors affecting aquaculture farmers' necessity of aquafarm management system. *JFMSE*, 28:984-993, 2016.
- Pearson, T.H. and Black, K.D.: The environmental impacts of marine fish cage culture. In *Environmental Impacts of Aquaculture*, pp.1-31, ed., Black, K.D., Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, 2001.
- Philpott, C.W.: Tubular system membranes of teleost chloride cells: Osmotic response and transport sites. *Am. J. Physiol.*, 238:171-184, 1980.
- Plumb, J.A.: Health maintenance of cultured fishes: Principal microbial diseases. pp.3-29, CRC Press, 1994.
- Pörtner, H.O., Reipschläger, A. and Heisler, N.: Acid-base regulation, metabolism and energetics in *Sipunculus mudus* as a function of ambient carbon dioxide level. *J. Exp. Biol.*, 201:43-55, 1998.
- Procarione, L.S. and King, T.L.: Upper and lower temperature tolerance limits for juvenile red drums from Texas and South Carolina. *J. Aquat. Anim. Health*, 5:208-212, 1993.
- Ramsay, J.M., Feist, G.W., Varga, Z.M., Westerfield, M., Kent, M.L. and Schreck, C.B.: Whole-body cortisol response of zebrafish to acute net handling stress. *Aquaculture*, 297:157-162, 2009.
- Reinbold, K.A. and Pescitelli, S.M.: Effects of cold temperature on toxicity of ammonia to rainbow trout, bluegills, and fathead minnows (Aquatic Ecology Technical Report, Contract 68-01-5832/B). Illinois Natural History Survey, 1982.
- Reynolds, F.A. and Haines, T.A.: Effects of chronic exposure to hydrogen sulphide on newly hatched brown trout *Salmo trutta* L. *Environ. Pollut. (Series A)*, 22: 11-17, 1980.
- Roberts, R.J., Bullock, A.M., Turners, M. and Jones, K.: Mortalities of *Salmo gairdneri* exposed to cultures of *Gymnodinium aureolum*. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 63:741-743, 1983.
- Schreck, C.B.: Accumulation and long-term effects of stress in fish. In *The biology of animal stress*, pp. 147-158, ed., Moberg, G. and Mench, J., CABI Publishing, Wallingford, 2000.
- Schreck, C.B., Lerner, D., Seals, C., Stahl, T., Davis, L., Oosterhout, G. and Congleton, J.B.: Interaction of stress, pathogens and development on the behavior of teleosts. In *Stress in fish (Symposium proceedings)*. International Congress on the Biology of Fish, pp.1-3, ed., Barton, B., Pottinger, T., Iwama, G. and MacKinlay, D., University of Aberdeen, Scotland, 2000.
- Schulte, P.M.: What is environmental stress? Insights from fish living in a variable environment. *J. Expt. Biol.*, 217:23-34, 2014.
- Shefat, S.H.T. and Karim, M.A.: Nutritional diseases of fish in aquaculture and their management: A review. *ACTA Sci. Pharm. Sci.*, 2:50-58, 2018.
- Shim, J.M., Lee, C., Lee, Y.H. and Kim, B.S.: Response of oxygen consumption and gill tissue of fish exposed to red tide organism *Cochlodinium polykrioides*. *J. Environ. Sci.*, 18:1283-1289, 2009.
- Shimada, M., Murakami, T.H., Doi, A., Abe, S., Okaichi, T. and Watanabe, M.: A morphological and histochemical study on gill primary lamellae of the teleost, *Seriola quinqueradiata*, exposed to sea bloom. *Acta Histochem. Cytochem.*, 15:497-507, 1982.
- Simčič, T., Jesenšek, D. and Brancelj, A.: Effects of increased temperature on metabolic activity and oxidative stress in the first life stages of marble trout (*Salmo marmoratus*). *Fish Physiol. Biochem.*, 41: 1005-1014, 2015.
- Shin, H.S., An, K.W., Kim, N.N. and Choi, C.Y.: Antioxidant defenses and physiological changes in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) in response to oxidative stress induced by elevated water temperature. *Korean J. Ichthyol.*, 22:1-8, 2010.
- Shin, K.W., Kim, S.H., Kim, J.H., Hwang, S.D. and Kang, J.C.: Toxic effects of ammonia exposure on growth performance, hematological parameters, and plasma components in rockfish, *Sebastes schlegelii*, during thermal stress. *Fish Aquat. Sci.*, 19:44, 2016.
- Sindermann, C.J.: Disease in marine aquaculture. *Helgoländer Meeresunters.*, 37:505-532, 1984.
- Snieszko, S.F.: The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. *J. Fish Biol.*, 6:197-208, 1974.
- Sohn, S.G., Choi, D.L., Do, J.W., Hwang, J.Y. and Park, J.W.: Mass mortalities of cultured striped beakperch, *Oplegnathus fasciatus* by iridoviral infection. *J. Fish Pathol.*, 13:121-127, 2000.
- Sohn, S.G., Park, M.A., Oh, M.J. and Chun, S.G.: A fish nodavirus isolated from cultured sevenband grouper, *Epinephelus septemfasciatus*. *J. Fish Pathol.*, 11:97-104, 1998.
- Song, M., Zhao, J., Wen, H.S., Li, Y., Li, J.P., Li, L.M. and Tao, Y.X.: The impact of acute thermal stress on the metabolism of the black rockfish (*Sebastes schlegelii*). *PLOS ONE*, 24:1-23, 2019.
- Sopinka, N.M., Donaldson, M.R., O'Connor, C.M., Suski,

- C.D. and Cooke, S.T.: Stress indicators in fish. In *Biology of stress in fish*, Vol. 35, pp.405-462, ed., Schreck, C.B., Anthony, L.T., Farrell, P. and Brauner, C.J., Elsevier, 2016.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Mitchell, J.F.B. and Jenkins, G.J.: External control of 20<sup>th</sup> century temperature by natural and anthropogenic forcing. *Science*, 290:2133-2137, 2000.
- Subramanian, A. and Purushothaman, A.: Mass mortality of fish and invertebrates associated with a bloom of *Hemidiscus hardmannianus* (Bacillariophyceae) in Parangipettiai (southern India). *Limnol. Oceanogr.*, 30:910-911, 1985.
- Suh, H.L., Cho, Y.K., Soh, H.Y. and Kim, D.H.: The mass mortality of macrobenthic animals in Cheju Island: A possible role of physical oceanographic factor. *Korean J. Environ. Biol.*, 17:175-182, 1998.
- Suh, Y.S., Jang, L.H. and Hwang, J.D.: Temporal and spatial variations of the cold waters occurring in the Eastern Coast of the Korean Peninsula in summer season. *J. Korean Fish. Soc.*, 34:435-444, 2001.
- Sweeney, B.M.: Circadian rhythmicity in dinoflagellates, *Dinoflagellates*. pp.343-364, Academic Press, 1984.
- Tacon, A.G.: Lipid nutritional pathology in farmed fish. *Arch. Tierernahr.*, 49:33-39, 1996.
- Teague, W.J., Jacobs, G.A., Ko, D.S., Tang, T.Y., Chang, K.I. and Suk, M.S.: Connectivity of the Taiwan, Cheju, and Korea straits. *Continental Shelf Research*, 23:63-77, 2003.
- Tocher, D.R.: Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. *Rev. Fish Sci.*, 11:107-184, 2003.
- Tomasso, J.R., Davis, K.B. and Parker, N.C.: Plasma corticosteroid and electrolyte dynamics of hybrid striped bass (white bass × striped bass) during netting and hauling. *Proceed World Mariculture Soc.*, 11:303-310, 1980.
- Toyoshima, T., Shimada, M., Okaichi, T. and Murakami, T.H.: Ultrastructural alterations on chloride cells of the yellowtail *Seriola quinqueradiata*, following exposure to the red tide species *Chattonella antiqua*. *Mar. Biol.*, 88:101-108, 1985.
- Tsuchida, S. and Setoguma, T.: Temperature responses of young Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegeli*. *Nip. Sui. Gak.*, 63:317-325, 1997.
- Tsutumi H, Kikuch T, Tanaka M, Higashi T, Imasaka K and Miyazaki M. 1991. Benthic faunal succession in a cove organically polluted by fish farming. *Mar. Poll. Bull.*, 23:233-238.
- UNDRR: Human cost of disasters. An overview of the last 20 years (2000-2019), 2020.
- Uribe, C., Folch, H., Enriquez, R. and Moran, G.: Innate and adaptive immunity in teleost fish: a review. *Vet. Med.*, 56:486-503, 2011.
- Vaquer-Sunyer, R. and Duarte, C.M.: Sulfide exposure accelerates hypoxia-driven mortality. *Limnol. Oceanogr.*, 55:1075-1082, 2010.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O. and Bairlein, F.: Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416:389-395, 2002.
- Walker, P.J. and Mohan, C.V.: Viral disease emergence in shrimp aquaculture: origins, impact and the effectiveness of health management strategies. *Reviews in Aquaculture*, 1:125-154, 2009.
- Wang, K., Wang, E., Qin, Z., Zhou, Z., Geng, Y. and Chen, D.: Effects of dietary vitamin E deficiency on systematic pathological changes and oxidative stress in fish. *Oncotarget*, 7:83868-83879, 2016.
- Watts, M., Munday, B.L. and Burke, C.M.: Immune responses of teleost fish. *Australian Vet. J.*, 79:570-574, 2001.
- Werner, I., Schneeweiss, A., Segner, H. and Junghans, M.: Environmental risk of pesticides for fish in small- and medium-sized streams of Switzerland. *Toxic 9*, 79:2-15, 2021.
- Wolke, R.E.: Piscine macrophage aggregates: A review. *Ann. Rev. Fish Dis.*, 1:91-108, 1992.
- Woo, N.Y.S. and Fung, A.C.Y.: Studies on the biology of the red sea bream *Chrysophrys major*. I. Temperature tolerance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 3:121-124, 1980.
- Wu, X., Lu, Y., Zhou, S., Chen, L. and Xu, B.: Impact of climate change on human infectious disease: Empirical evidence and human adaptation. *Environ. Int.*, 86:14-23, 2016.
- WWF: Living blue planet report (<http://ocean.panda.org>), 2015
- Yang, D.B. and Hong, J.S.: On the biogeochemical characteristics of surface sediments in Chinhae bay in September 1983. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 21:195-205, 1988.
- Yoon, S. and Yang, H.: Study on the temporal and spatial variation in cold water zone in the East Sea using satellite data. *Korean J. Remote Sensing*, 32:703-719, 2016.
- 국립수산과학원: 한국 남해안 양식생물 피해조사 보고서(1997-2000년), 2001.



- 국립수산과학원: 남해안 양식생물 폐사원인 조사 보고서(2001-2006년), 2007.
- 국립수산과학원: 한국 연안의 빈산소 수괴, pp.3-93, 2009.
- 국립수산과학원: 경남연안 2007~2008 양식생물 폐사원인 조사 및 코클로디니움 적조발생 현황, 2009.
- 국립수산과학원: 가두리양식어장관리방안 연구, 2011a.
- 국립수산과학원: 남서해안 양식생물 폐사원인 조사 보고서(2007-2010년), 2011b.
- 국립수산과학원: 경남연안 2009-2011 양식생물 폐사원인 조사 보고서, 2012.
- 국립수산과학원: 남서해안 양식생물 폐사원인 조사 보고서(2011-2013년), 2014.
- 국립수산과학원: 남서해안 양식생물 폐사원인 조사 보고서(2014-2016년), 2016a.
- 국립수산과학원: 양식생물 폐사동향 및 활수산물 수송 현황 조사, 2016b.
- 국립수산과학원: 전남권역 가두리 양식어류 질병 예방 및 관리방안, 2016c.
- 국립수산과학원: 남서해안 양식생물 폐사원인 조사 보고서(2016년), 2017a.
- 국립수산과학원: 조피볼락 양식 표준 지침서, 2017b.
- 국회입법조사처: 스마트 양식산업의 현황과 향후과제. NARS 현안분석, pp. 1-22, 2019.
- 한국해양개발원: 대중국 수산물 수출확대방안(I)-지역별, 계층별(고소득층 대상) 마케팅 전략을 중심으로, 2007.
- 한국해양수산개발원: 미래 수산업·어촌 발전을 위한 정책방향 연구. pp.79-82, 2017.
- 한국해양수산개발원: 양식어장 환경개선 방안에 관한 연구. pp.109-145, 2018.
- 한국해양수산개발원: 양어용 배합사료 사용 의무화 추진 방안. pp.8-14, 2014.
- 한국해양수산개발원: 새로운 수산업 개념 정립 방안. 2015.
- 한국해양수산개발원: 첨단양식기술의 산업화 연구. pp.1-83, 2015.
- 한국해양수산개발원: 한국 수산업의 선진 산업화 전략 연구. pp.51-79, 2010.
- 한국해양수산개발원: 해중레저 활성화를 위한 정책 방안 연구. pp.133-139, 2012.
- 해양수산부·한국해양과학기술원: 한국해양환경 평가보고서. pp.19-43/pp. 79-104, 2014.
- 해양수산부: 어장관리체계 및 제도개선 방안 연구. pp. 173-300, 2014.
- 방인철, 배평암, 윤덕현: 중국과 동남아시아의 수산물생산 및 유통현황. 농어업·농어촌특별대책위원회, pp.70-76, 2009.
- 배승철, 강용진, 고수홍, 구자완, 김강웅, 김규일, 김영철, 박건준, 박건현, 박홍식, 배준영, 유광열, 유진형, 윤용현, 윤현호, 이경준, 이상민, 이승형, 이정열, 이종윤, 이준호, 이진혁, 임성률, 장해경, 정관식, 최세민, 황남용. 어류의 영양소 대사와 사료. 부경대학교 출판부, 2012.
- 신용민: 지속적 어업을 위한 자원·환경보전적 양식어업의 전개 방향. 수산경영론집, 36:27-49, 2005.
- 신용민: ‘양식산업발전법’제정의 의의와 문제점 분석. 수산경영론집, 51:1-17, 2020.
- 신용민, 정겨운: 어업관리수단으로서의 어업권 제도의 의의와 개편 필요성. 수산해양교육학회, 33:144-157, 2021.
- 염목설: 한중 양식수산업의 경쟁전략과제에 관한 연구. 배재대학교 대학원, 석사학위논문, pp.82-103, 2014.
- 이경주: 한국-중국간 수산물 무역의 협력증진 및 활성화에 관한 연구. 인하대학교 대학원, 석사학위논문, pp.8-11, 2006.
- 홍현표, 김봉대: 한국양식산업의 경쟁력 분석(한국해양수산개발원). 2008년도 춘계학술대회 및 심포지엄집, pp.85-101, 2008.

Manuscript Received : Nov 03, 2021

Revised : Dec 06, 2021

Accepted : May 04, 2022