

1970년대 이후 한국 연안의 적조 발생 변화

임월애* · 고우진** · 김경연*** · 박종우***†

* 국립수산과학원 기후변화연구과 연구관, ** 국립수산과학원 기후변화연구과 과장,

*** 국립수산과학원 기후변화연구과 연구사

Variation in Harmful Algal Blooms in Korean coastal waters since 1970

Weol-Ae Lim* · Woo-Jin Go** · Kyoung-Yeon Kim*** · Jong-Woo Park***†

* Principal Researcher, Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

** Director, Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

*** Researcher, Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약 : 국립수산과학원과 지역자치단체의 적조모니터링 결과를 바탕으로 해양환경 변동이 적조발생에 미치는 영향을 규명하였다. 1972년 적조 모니터링이 시작된 이후, 1980년대에서 1990년대까지 적조 발생은 지속적으로 증가를 하였으며, 1998년 109건의 최대 적조발생 이후 2010년대까지 감소 추세를 보이고 있다. 1970년대는 대부분 규조 적조가 발생하였으며, 1980년대에는 연안성 와편모조류가 주로 적조를 일으켰으며, 1993년 이후 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 지속적으로 발생하고 있다. 우리나라에서 수산피해를 일으킨 유해 적조생물은 3종이다. 1981년 진해만에서 *Karenia mikimotoi*에 의한 고밀도 적조가 발생하여 패류가 대량 폐사하였다. 1992년 통영해역에서 *Karenina* sp.에 의한 적조가 발생하여 양식어류를 폐사시켰으며, 1995년 *C. polykrikoides* 적조로 765억 원의 최대 규모의 수산피해가 발생한 이후 지속적으로 발생하고 있다. 연안해역의 영양염 농도는 1980년대에 가장 높았으며, 1990년 중반 이후 매우 감소하고 있다. 이러한 영양염 감소는 적조발생 감소를 잘 설명해 준다. 2016년 이후 30°C 이상의 여름 고수온이 나타나며 *C. polykrikoides*의 적조 발생 범위와 규모는 매우 감소하였다. 2016년 *K. mikimotoi* 적조가 전남 장흥~고흥 해역에 발생하였으며, *C. polykrikoides* 적조는 여수해역에만 발생하였다. 2017년은 *C. polykrikoides* 적조 발생이 없었으며, *Alexandrium affine* 적조가 전남 여수~경남 통영해역까지 발생하였다. 2018년은 평년에 비해 소규모 *C. polykrikoides* 적조가 발생하였다. 본 연구결과 우리나라 연안의 영양염 감소와 기후변화로 인한 고수온은 적조 발생에 영향을 주는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유해조류대발생, 영양염, 기후변화, 종천이, 코클로디니움, 와편모조류, 규조류

Abstract : Based on the results of harmful algal blooms (HABs) monitoring by the National Institute of Fisheries Science and local governments, the effects of changes in the marine environment on HABs are described. Since the beginning of HABs monitoring in 1972, they continued to increase from the 1980s to the 1990s. After the largest number of HAB incidents (109) in 1998; the trend declined until the 2010s. Most HABs in the 1970s were caused by diatoms. In the 1980s, coastal dinoflagellates caused HABs; *Cochlodinium polykrikoides* blooms have been occurring continuously since 1993. There are three HAB species that cause damage to fisheries in Korea. The high-density bloom of *Karenia mikimotoi* caused mass mortality in shellfish in Jinhae Bay in 1981. *Karenia* sp. blooms occurring around Tongyeong in 1992 killed aquaculture fish. Since the occurrence of the largest fisheries damage of KRW 76.6 billion in 1995 caused by *C. polykrikoides* blooms, they have been occurring continuously. The concentration of nutrients in coastal waters was the highest in the 1980s and has declined since the mid-1990s. This reduction in nutrient concentration is a good explanation for the decreasing number of HABs. Since 2016, a summer high water temperature of 30°C or more has appeared, and the range and scale of *C. polykrikoides* blooms have been greatly reduced. In 2016, *K. mikimotoi* blooms occurred around Wando, Jangheung and Goheung and small scale blooms of *C. polykrikoides* occurred around Yeosu. There were no *C. polykrikoides* blooms in 2017; however, *Alexandrium affine* blooms occurred from Yeosu to Tongyeong. There was a small-scale blooms of *C. polykrikoides* in 2018 compared to those in the previous years. Our results show that reduction in nutrients and the high water temperature owing to climate change are a good explanation for variation in HABs in Korean coastal waters.

Key Words : Harmful algal blooms (HABs), Nutrients, Climate change, Species succession, *Cochlodinium polykrikoides*, Dinoflagellates, Diatoms

* First Author : limwa@korea.kr, 051-720-2260

† Corresponding Author : cyanopark@korea.kr, 051-720-2261

1. 서론

전 세계적으로 발생하고 있는 적조현상은 지리적 영역이 확대되고, 발생기간이 길어지며, 고밀도 발생으로 양식산업에 큰 피해를 입히고 있다(Anderson et al, 2008; Wells et al., 2015). 우리나라는 1980년대 이후 경제발전을 위한 임해산업 발달로 연안 수질오염 문제가 심각해졌으며, 부영양화로 인한 적조가 빈번히 발생하였다(NFRDI, 1993b, Lee et al., 2013). 국립수산과학원에서는 어장환경조사의 일환으로 1972년부터 적조 모니터링을 실시하였으며, 1978년과 1981년 최초로 진해만에서 적조로 인한 어업피해가 발생하면서 국가 주도의 적조 모니터링이 시작되었다.

어·패류 양식산업이 집중적으로 이루어지는 남해안에서는 1993년부터 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생하여, 해류를 따라 동해안까지 확산되었으며, 1998년, 1999년과 2012년에는 전라북도 군산과 천수만해역에도 발생하였다. 1995년 764억이라는 최대 규모의 양식 피해가 발생했고(NFRDI, 1997; NFRDI, 1998), 이때부터 적조 예찰·예측과 피해저감 기술개발 등 적조 연구의 중요성이 인식되었다.

전 세계 과학자들은 기후변화는 해양플랑크톤 시스템에 영향을 미칠 것이며 적조발생 빈도와 심각도는 증가할 것으로 예상하고 있으나, 적조발생 기작에 대한 부족한 지식과 수온, 성층, 빛, 해양산성화와 강우 등 기본 데이터 부족으로 국지적인 연구만 수행되어 적조 변동에 대한 이해가 어렵다(Wells et al., 2015). 적조발생은 연안에서 기후변화와 부영양화로 인해 적조 발생해역이 확대되고 횡수도 증가되어 발생하고 있다(Gobler, 2020).

국립수산과학원의 정선해양관측 수온 자료(1968~)에 따르면 우리나라 해역의 표층수온이 상승하고 있는 것으로 나타났다(Seong et al., 2010; Han and Lee, 2020). 이와 같은 지속적인 수온상승은 해양생태계에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며, 실제로 제주와 동해남부해역에 시구아테라 어류독(Ciguatera toxin)을 일으키는 열대성 와편모조류가 출현하는 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2011; Shah et al., 2013). 일본은 2000년대 후반부터 대마도를 포함한 연안에서 열대 맹독성 *Alexandrium tamiyavanichii*의 출현이 보고되고 있어(Oh et al., 2009), 우리나라 연안에도 이 종의 출현 가능성이 매우 높을 것으로 보여 향후 강한 마비성패류독소의 발생이 우려된다.

최근 우리나라는 여름 폭염과 겨울 한파의 이상기상을 보이고 있으며, 특히, 2016년부터 이례적인 폭염으로 연안 수온이 30℃ 넘게 한 달 이상 지속되어 해양환경이 크게 변화하고 있으며, 적조 발생도 *C. polykrikoides* 이외에 자주 발생하지 않았던 *Alexandrium affine*, *Karenia mikimotoi*가 넓은 해역에서 발생했다(NIFS, 2017a; NIFS, 2018).

본 연구에서는 1970년대부터 현재까지 우리나라 연안에서 발생한 적조원인 중, 발생 횡수, 발생해역 등을 분석하고, 이러한 적조발생 특성을 영양염, 수온 등 해양환경 요소 변동과 비교하여 설명하고자 한다.

2. 자료 및 방법

국가 적조모니터링 체계는 “적조예찰·예보 및 피해방지에 관한 요령”에 의거 국립수산과학원과 각 지자체에서 관할해역에 대한 적조조사를 정기적으로 실시하고 수색변화가 발생하면 즉시 적조생물을 현미경으로 동정하고, 수온, 염분 등 해양환경을 조사하여 국립수산과학원 적조상황실로 통보하고 있다. 이를 근거로 국립수산과학원에서는 적조 생물의 특성(적조 종의 독성 유무, 수산피해를 일으키는 종), 출현 밀도, 발생 범위 등에 따라 양식생물에 미칠 영향을 분석하여 적조특보를 발령한다. 또한 적조발생 상황을 국립수산과학원 홈페이지(<http://www.nifs.go.kr>) 및 매년 발행되는 “한국연안의 적조발생” 정보지를 통해 제공하고 있다.

적조로 인한 피해액은 각 지자체에서 적조로 인해 피해가 발생한 어가의 어종별, 성장시기별 등 양식생물의 가치를 고려한 피해조사 결과를 근거로 해양수산부의 심의 확정된 금액을 말한다.

적조 발생 건수는 시·군·구 단위의 지자체(내륙인 충청북도를 제외한 모든 동·서·남해안에 위치한 모든 지자체)의 수산사무소에서 통보된 정보를 바탕으로 적조 종, 발생해역을 확인하여 발생 건수를 계수하였다. 같은 시·군·구에서 발생한 적조 종이더라도 다른 종으로 천이(succession)가 되었을 경우는 건수를 추가하여 계수하였다.

적조발생 기록은 규조류가 우점한 1970년대(1972~1980), 적조생물의 고밀도 발생에 의해 피해가 발생한 1980년대(1981~1990), *C. polykrikoides* 적조발생이 일어나 수산피해가 일어난 1990년대(1991~2000)와 *C. polykrikoides* 소강현상이 나타나기 시작한 2010년대(2011~2018)로 연대별로 나누어 적조 특성을 분석하였다. 각 연대별 적조발생 종에 따른 발생 건수를 계수하여 총 적조발생 중 상위 1% 이상을 차지하는 종을 주요출현 종으로 선정하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 적조 발생 특성

적조발생 기록을 분석한 결과, 각 연대별로 전체 적조발생 건수 중 1% 이상의 우점을 차지하는 적조생물의 순위를 Fig. 1에 나타내었다. 1970년대에는 14종의 적조생물에 의해 93건의 적조가 발생하였다. 이 중 총 발생 건수의 1% 이상을

1970년대 이후 한국 연안의 적조 발생 변화

차지하는 적조종은 규조류인 *Skeletonema costatum* (38%), *Chaetoceros* spp. (35%), *Nitzschia* spp. (9%), *Leptocylindrus danicus* (4.3%), *C. polykrikoides* (2.2%), *Eucampia zodiacus* (2.2%), *Prorocentrum micans* (2.2%), *Ceratium fusus* (1.1%) 등이었다.

1980년대에는 44종의 적조생물에 의해 514건의 적조가 발생하였다. 전체 발생한 적조 중 1% 이상을 차지하는 주요 발생 종은 21종으로 *S. costatum* (20%), *Karenia mikimotoi* (11%), *Heterosigma akashiwo* (9%), *Prorocentrum* spp. (7%), *Akashiwo sanguinea* (5%), *Prorocentrum minimum* (4.9%), *Ch. spp.* (4.9%), *Proro. micans* (4.3%), *Gymnodinium* sp. (3.5%), *C. polykrikoides* (3.5%), *Thalassiosira* sp. (2.9%), *Proro. dentatum* (1.8%) 등이었다.

1990년대는 60종의 적조생물에 의해 803건의 적조가 발생하였다. 1% 이상 주요 적조 발생 종은 21종으로 *C. polykrikoides* (16%), *H. akashiwo* (12%), *Ceratium furca* (10%), *S. costatum* (7%), *Noctiluca scintillans* (6%), *Prorocentrum* spp. (6%), *Ch. spp.* (4.2%), *Proro. minimum* (2.6%), *Eutreptiella gymnastica* (2.5%), *Myrionecta rubra* (= *Mesodinium rubrum*) (2.4%), *Proro. dentatum* (2.2%), *Thala. sp.* (2.1%), *Proro. triestium* (2.0%), *Gymnodinium* sp. (2.0%), *Proro. micans* (1.7%), *K. mikimotoi* (1.4%) 등이었다.

2000년대에는 58종의 적조생물에 의해 533건의 적조가 발생하였다. 1% 이상 주요 적조 발생 종은 22종으로 *C. polykrikoides* (23%), *H. akashiwo* (11%), *S. costatum* (6%), *A. sanguinea* (4.3%), *Proro. dentatum* (4.3%), *Proro. sp.* (4.3%), *Proro. minimum* (3.6%), *Ch. spp.* (3.4%), *Proro. triestium* (3.2%), *Pseudo-nitzschia pungens* (3.2%), *M. rubra* (2.8%), *E. gymnastica* (2.5%), *Thala. decipiens* (2.3%), *Gonyaulax polygramma* (1.9%), *Gym. sp.* (1.9%), *Ceratium* sp. (1.7%), *Proro. micans* (1.7%), *C. furca* (1.5%), *Chattonella antiqua* (1.5%) 등이었다.

2011년부터 2018년까지는 25종의 적조생물에 의해 244건의 적조가 발생하였다. 1% 이상 주요발생 종은 11종으로 *C. polykrikoides* (38%), *A. sanguinea* (10%), *Alexandrium* sp. (8.2%), *M. rubra* (7%), *K. mikimotoi* (8.1%), *H. akashiwo* (5.7%), *N. scintillans* (4.9%), *Proro. dentatum* (4.1%), *C. furca* (3.3%), *Proro. micans* (1.2%), *Lepto. danicus* (1.2%) 등이었다.

3.2 양식생물 피해를 일으키는 유해 적조

Cho(1979)는 1978년 진해만에서 *Ceratium fusus*에 의한 양식 굴의 폐사를 보고하였으나, 국가기관에 의한 공식적인 적조 피해를 일으키는 유해성 종은 1981년과 2016년 발생한 *K. mikimotoi*, 1992년 *Karenia* sp., 1993년부터 매년 발생하는 *C. polykrikoides* 적조 종에 한정된다(NIFS, 2017b).

우리나라에서 적조로 인한 최초 피해는 1981년 진해만에서 발생하였다. *K. mikimotoi*의 대량발생에 의해 해수 중 용존 산소 부족 현상으로 진주담치, 피조개 등의 패류가 집단

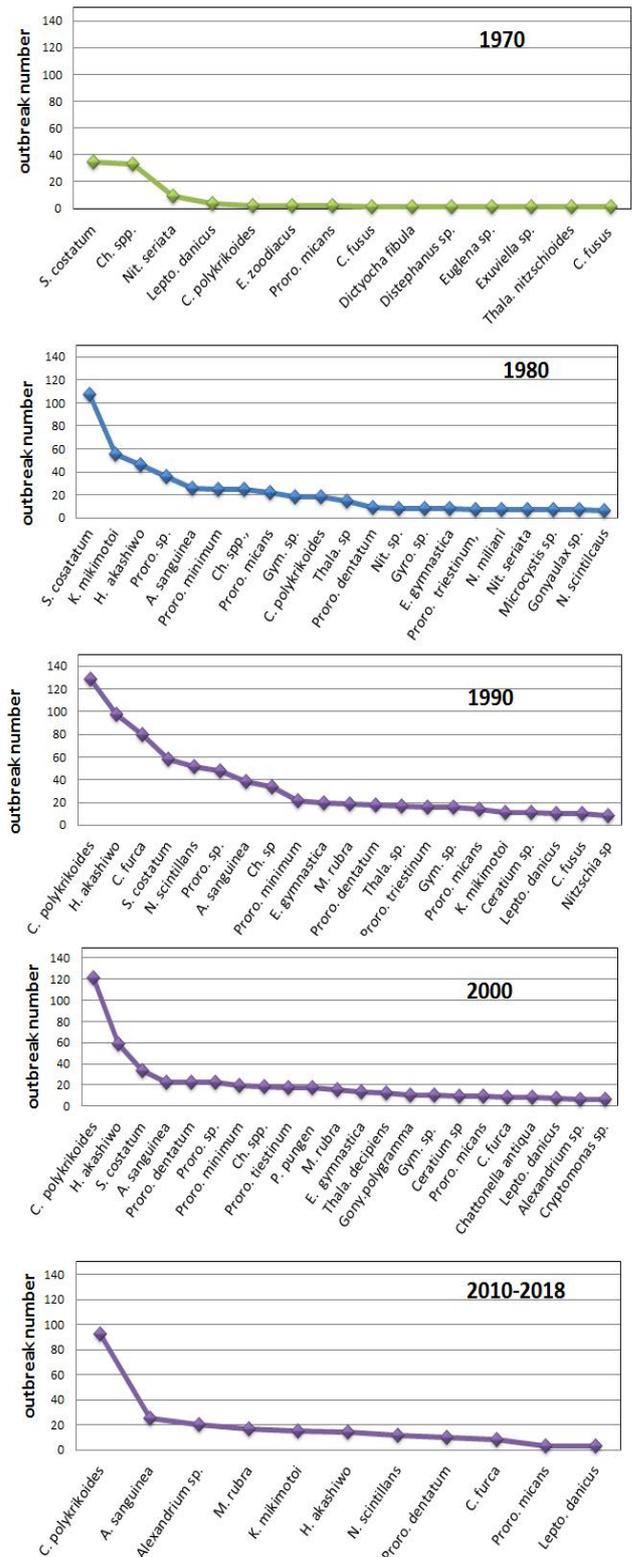


Fig. 1. The appearance rate (>1% of numerical abundance) of the major red tide species in each decades.

폐사하여 약 20억 원의 피해가 발생하였다. 두 번째 적조로 인한 피해는 1992년 8월 경상남도 통영해역에서 *Gyrodinium* sp.에 의해 적조가 발생하여, 양식어류가 집단 폐사하여 약 60억 원의 피해가 발생하였다. 이 종은 우리나라 및 세계적으로 발생 기록이 전혀 없어 신종 발생으로 기록하였으며 (NFRDI, 1993a), 이후 현재까지 재 발생하지 않아 정확한 종 분류가 되지 않고 있다. 그래서 1992년 당시 촬영되었던 전자현미경(SEM) 사진을 바탕으로 일본의 적조생물 분류전문가인 Iwataki Mitsunori 박사와 이종의 분류에 대해 논의한 결과 *Karenia* 속으로 재분류하게 되었으나(Fig. 2) 정확한 종명은 확인이 어려워 *Karenia* sp.로 재명명하기로 하고 Global HAB status Report Special issue Harmful Algae (East Asia)에 발표하였다(Sakamoto et al., 2020, In press).

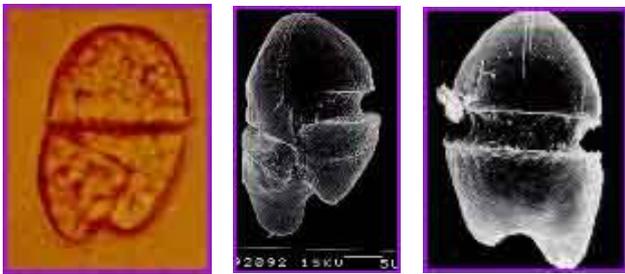


Fig. 2. Photos of Light microscopy (left) and scanning electron microscopy (middle and right) of *Karenia* sp.

1993년 *C. polykrikoides* 적조가 발생하여 피해를 일으키기 시작하였으며, 1995년 전라남도 완도에서 강원도 강릉까지 적조가 광역해역에 발생하였다. 이후, 2011년과 2017년을 제외하고는 소규모라도 매년 발생하고 있다.

Fig. 3에서는 1972년부터 기록된 적조 총 발생 건수와 피해액을 나타내었다. 적조 피해액은 1995년 764억으로 가장 높았고, 2013년 247억, 2003년 215억, 2007년 115억원의 순으로 발생했으며 그 이외 연도에는 100억 미만의 피해를 보였다. 이러한 피해의 감소는 1995년에 처음으로 발생한 대규모, 고밀도 적조에 원활한 대응을 못하였으며, 이후 황토살포 등 구제기술의 개발 등으로 피해가 감소하게 되었다. 그러나, 2007년과 2013년은 적조발생 기간이 50일 이상 지속 되고 최대 32,000~48,000 cells/mL의 고밀도로 발생하여 적조대응에 한계가 있었던 것으로 판단된다. Fig. 4는 *K. mikimotoi*, *K. sp.*, *C. polykrikoides* 3종의 유해성 적조생물(harmful HABs)의 적조 발생 건수와 규조류 및 연안성 와편모조류 등의 무해성 적조(harmless HABs)의 발생건수를 비교하여 나타내었다. 1998년 109건의 최대 적조 발생 건수를 기록한 이후 무해성 적조는 급격한 감소를 보이고 있으나, 상대적으로 유해성 적조의 발생은 증가하는 양상을 보인다.

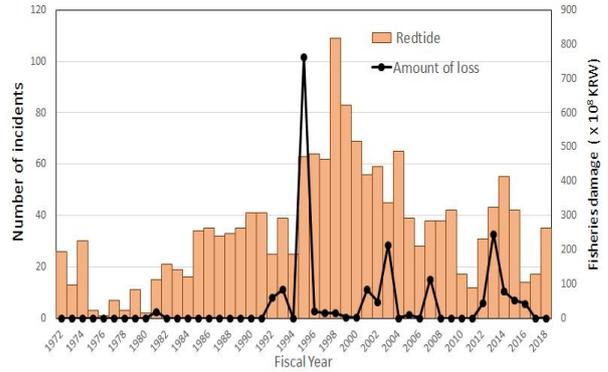


Fig. 3. The number of incidents and economic loss of fisheries due to red tide in Korean coastal waters since 1972.

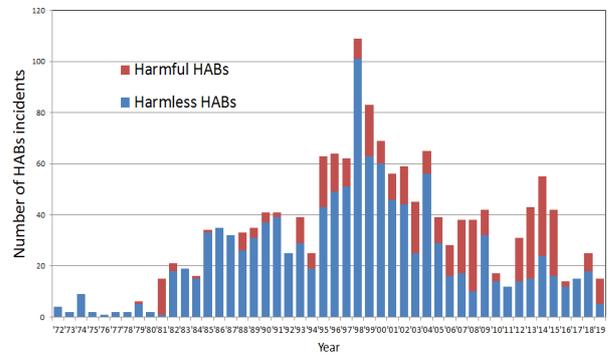


Fig. 4. The outbreak number of harmful HABs and harmless HABs in Korean coastal waters since 1972.

3.3 적조 발생과 영양염 변동

1970년대는 대부분이 강우 후 진해만 등 일부 반폐쇄성 내만에서 규조류에 의한 적조가 일주일 이내의 단기간 발생하였다. 1980년부터는 Fig. 1과 같이 규조류보다는 와편모조류에 의한 적조가 눈에 띄게 증가하기 시작하였으며, *K. mikimotoi*, *Proro. spp.*, *H. akashiwo*, *A. sanguinea*, *C. polykrikoides* 등의 와편모조류가 적조를 빈번히 일으켰다. *K. mikimotoi*는 1981년 경남 진해만에서 145,000 cells/mL 이상의 고밀도 발생하여 해수가 무산소화(anoxia) 되면서 저질의 피조개, 해수 중의 진주담치 등 패류의 대량 폐사를 일으켰다(NFRDI, 1993a). 이후 *K. mikimotoi*의 적조 발생은 매우 감소하였으나, 2016년 전남 완도~장흥~고흥해역에서 발생하여 전복양식장에 피해를 일으켰다. *Proro. spp.*과 *H. akashiwo*는 1980년대에서 1990년대까지 주요 적조발생 종이였으나 이후 감소하였다(Fig. 5). *A. sanguinea*, *N. scintillans*와 *M. rubra*는 2010년 이후 다시 출현하거나 출현이 증가된 종이다. *A. sanguinea*는 겨울(12월)에서 봄(5월)까지 진해만을 포함한 경남해역에서 주로 발생하여 1달 이상 장기간 지속된다.

1970년대 이후 한국 연안의 적조 발생 변화

적조발생 전·후의 직접적인 영양염 분석 자료는 없지만, 그 동안 국립수산과학원의 연안 해역 영양염 모니터링 자료를 근거로 발표된 논문과 비교하여 적조 변동을 이해할 수 있다.

1980년대 진해만은 우리나라의 어느 해역보다 오염이 매우 심각하여 용존무기질소(DIN; Dissolved Inorganic Nitrogen)는 22.8~125 μM 와 용존무기인(DIP: Dissolved Inorganic Phosphate)은 0.61~4.44 μM 로 높은 용존무기영양염은 잦은 식물플랑크톤의 대량 증식을 일으켰다(Park et al., 1988), 1990년대 이후 경남 통영을 포함한 남해동부해역은 양식산업의 발달로 많은 어·패류양식장이 운영됨으로써 DIN은 35 μM 이상으로 높게 나타났으며(NFRDI, 1993b), 여름 강우에 의해 육상으로부터의 질소원이 공급될 경우 식물플랑크톤이 대증식하는 환경이었다(Kang et al., 1999). 1990년 대 중반이후 연안의 영양염 농도가 감소하기 시작하여 2000년대에는 10 μM 이하로 나타났다(Kim et al., 2013). Kim et al.(2013)의 연구 의하면 2000년대 초 이후 우리나라 연안과 외해역의 용존무기영양염의 감소가 급격히 나타난다고 밝혔으며, 이로 인해 연안에서 주로 적조를 일으키는 규조류와 연안성 와편모조류인 *Proro. spp.*과 *H. akashiwo* 등의 종의 대량발생에는 부적합한 환경으로 Fig. 4와 같이 무해성 적조가 급격히 감소한 것으로 판단된다. 그러나 *C. polykrikoides* 적조 발생은 이들과는 반대로 뚜렷한 증가를 보인다(Fig. 5). *C. polykrikoides* 적조발생은 1970년대와 1980년대는 전체 발생 건수의 2.2%와 3.5%로 낮았으나, 1990년대부터 15.9%, 2000년대는 22.7%, 2010년대는 37.7%로 급격한 증가 양상을 보인다.

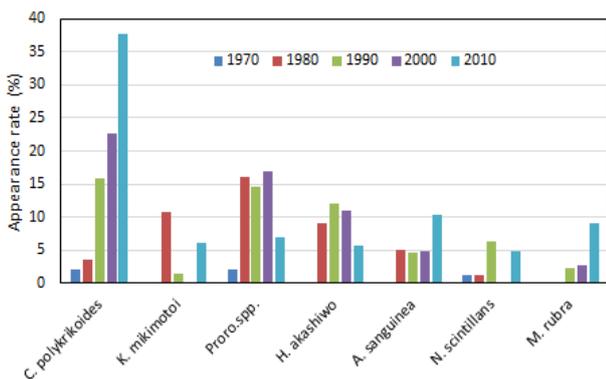


Fig. 5. Variation of the major HABs species causing HABs in each decades.

C. polykrikoides 적조는 용존무기영양염을 선호하는 연안성 와편모조류의 적조발생과는 다른 기작으로 발생한다고 앞선 연구결과에서 설명되고 있다. 아열대성 *C. polykrikoides* 은 대마난류를 따라 우리나라에 유입되어 연안수와의 전선

역에서 성장·증식하며(Lim et al., 2002; Lim, 2004; Lee, 2008; Onitsuka et al., 2010), 이후, 경쟁 식물플랑크톤, 해류, 조석과 바람, 강우, 태풍 등 기상에 의해 매우 가변적으로 발생하여 이동·확산된다(Lim et al., 2003; Lim et al., 2009). 이러한 *C. polykrikoides* 적조 발생 기작은 외부유입설과 연안 휴면포자 발아설에서 많은 논쟁이 있어왔다. Li et al.(2015)은 우리나라 연안에서 *C. polykrikoides* 휴면포자를 발견하였으며, Park et al.(2016)은 *C. polykrikoides* 적조가 발생하였던 서해 천수만, 남해안의 전남 고흥, 여수, 경남 남해, 통영 거제 및 동해남부 연안 155개 정점에서 real-time RT-PCR기법으로 해제된 적조 물 중의 *C. polykrikoides* 휴면포자를 탐색하여 3% 미만의 정점에서만 휴면포자가 출현함을 밝혀 휴면포자에서의 대규모 적조발생은 어렵다는 것을 설명하였다.

2000년대의 여름 날씨의 특징은 집중 호우와 잦은 태풍이 내습했으며, 강우의 영향으로 연안에서 활발한 규조류가 증식함으로써, 경쟁생물로서 *C. polykrikoides* 성장을 억제하였다. 외해에 머물던 *C. polykrikoides* 적조는 규조류 소멸 뒤 *C. polykrikoides*이 다시 증식함으로써 장기간 발생할 수 있었다(Lim et al., 2002). 식물플랑크톤은 성장을 위해 용존무기영양염을 흡수하는 것으로 알려져 있으나, 용존무기영양염이 제한될 경우 부족한 영양염을 보충하기 위해 해수 중에 존재하는 다양한 유기영양염을 가수분해하여 이용이 가능하다(Wheeler et al., 1974; Kwon et al., 2013). 특히, *C. polykrikoides*의 경우에도 용존무기영양염 이외의 다양한 형태의 유기 질소 및 인 화합물을 성장에 이용 가능한 것으로 알려져 있다(Kwon et al., 2014). *C. polykrikoides* 적조는 용존무기영양염의 농도가 매우 낮고 용존유기영양염의 농도가 높은 환경에서 발생한다(Kim et al., 2006; Lee and Kim, 2007; Kwon et al., 2018; Kwon et al., 2019). 여름 장마 후 규조류의 증식은 와편모조류인 *C. polykrikoides*의 성장을 억제하나, 규조류의 사멸은 용존유기영양염 농도 증가와 관련이 있다.

3.4 적조 발생과 수온변동

기상청 “2019년 이상기후보고서”에 의하면 한반도의 폭염 일수가 2000년대보다 2010년대에 50% 증가해 온난화 경향이 뚜렷해진다고 밝혔다. 해양에서는 2016년 이후 폭염으로 인한 연안에서 30℃ 이상의 고수온 현상은 양식생물의 대량 폐사를 일으켰으며, *C. polykrikoides* 적조 발생에도 큰 영향을 미친 것으로 나타났다(NIFS, 2017a; NIFS, 2018; NIFS, 2020). 실제로 2016년 이후 *C. polykrikoides* 적조 발생은 그 세력과 발생범위가 감소하고 있다. 2016년 전라남도 장흥~고흥 해역 *K. mikimotoi* 적조와 고흥~여수까지 *C. polykrikoides* 적조 동시에 발생하였다. 2017년은 전남 여수~경남 통영해역까지 *A. affine* 적조가 광범위하게 발생하였으나 *C. polykrikoides*

적조는 발생하지 않았다. Kim et al.(2001)은 실험실 배양 실험을 통해 *C. polykrikoides*은 수온 23~25℃가 최적 성장 수온임을 밝혔으며, Lee et al.(2010)은 국립수산과학원의 적조발생 정보를 분석한 결과 *C. polykrikoides* 적조는 약 25~26℃에서 발생함을 밝혔다. 최근 기후변화의 영향으로 2016년부터 연안의 고수온으로 양식생물 폐사가 발생하고 있어 국립수산과학원에서 2017년부터 고수온 특보를 발령하고 있다.

해양의 기초생산자인 적조생물은 해양환경 변화에 가장 민감하게 반응할 가능성이 높으므로 지속적 모니터링이 필요하다. 또한 수온상승으로 인한 열대성 적조생물의 유입은 양식생물 뿐 아니라 어·패류독소 발생을 일으킬 가능성이 매우 크므로 이러한 적조생물의 변동을 분석하여 앞으로 나타날 유해·유독성 적조 발생을 예측하고 그 피해를 최소화할 수 있는 대응 방안을 찾아야 할 것이다.

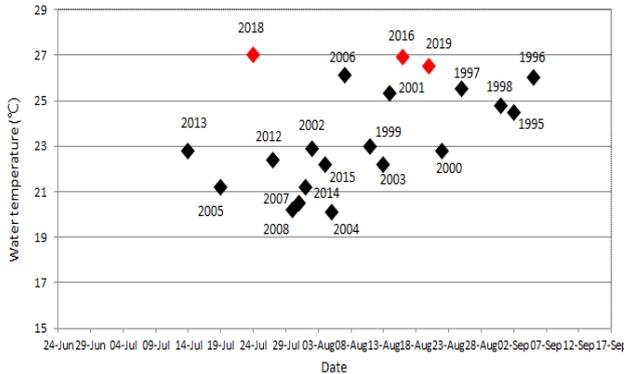


Fig. 6. The first outbreak date of *C. polykrikoides* blooms and its water temperature since 1995.

Fig. 6은 적조가 최초로 발생한 날짜와 수온을 나타낸 것으로 적조가 발생하지 않았던 2017년을 제외하고 2016년 이후 적조발생은 27℃ 부근에서 시작되어 27~30℃에서 지속되었다. 25℃이상에서 적조가 발생하였던 1996, 1997, 2006, 2016, 2018, 2019년은 적조의 지속일과 규모가 평년에 비해 크지 않았다(NIFS, 2020). *C. polykrikoides*의 성장 호적 수온인 23~26℃의 보다 높은 수온에서는 *C. polykrikoides*의 성장이 저해되어 대규모 적조가 발생하지 못하는 것으로 판단된다.

부영양화가 심각하지 않았던 1970년대는 규조류에 의한 적조가 발생하였으며, 육상에서의 오염원의 유입으로 부영양화가 심해졌던 1980년대부터는 연안성 와편모조류의 적조발생이 빈번히 나타났다. 그러나 1990년대 중반이후 연안의 영양염의 농도는 급격히 감소하였으며(Kim et al., 2013), 일부 패류양식이 많은 남해안 일부 내만해역에서는 빈영양상태가 심각하게 발생하여 패류의 비만이 저조하였다(Choi et al., 1997). 1993년 이후 여름은 *C. polykrikoides* 적조가 거의 매년 지속적으로 발생했으나, 2016년 고수온 시작 이후 적조 발생 범위와 밀도 등이 약화되고, 다른 와편모조류와 혼재되어 출현하거나 발생을 하지 않고 있다.

이와 같이 우리나라 적조 발생은 영양염과 기후변화에 의한 기상 및 해양환경 요소에 의해 변화하고 있다. 세계 많은 학자들은 향후 기후변화는 더욱 가속화 될 것으로 예상하고 있으며, 이에 따른 해양생태계의 변화는 필연적일 것이다.

사 사

본 논문은 국립수산과학원에서 수행하고 있는 “적조에 대한 예보 및 피해대응 연구(R2020040)”의 결과입니다.

References

- [1] Anderson, D. M., J. M. Burkholder, W. P. Cochlan, P. M. Glibert, C. J. Gobler, C. A. Heil, R. M. Kudela, M. L. Parsons, J. E. J. Rensel, D. W. Townsend, V. Trainer, and G. A. Vargo(2008), Harmful algal blooms and eutrophication: Examining linkages from selected coastal regions of the United States, Harmful Algae, Vol. 8, pp. 39-53.
- [2] Cho, C. H.(1979), Mass mortalities of oyster due to red tide in Jinhae Bay 1978, Bull. Korean Fish. Soc., Vol. 12, No. 1, pp. 27-33.
- [3] Choi, W. J., Y. Y. Chun, J. H. Park, and Y. C. Park(1997), The influence of environmental characteristics on the fatness of pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Hansan-Koje Bay, J. Korean Fish. Soc. Vol. 30, No. 5, pp. 794-803.
- [4] Gobler, C. J.(2020), Climate change and harmful algal blooms: Insights and perspective, Harmful Algae, Vol. 91, 101731.
- [5] Han, I. S. and J. S. Lee(2020), Change the annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean peninsula, Korean Soc. Mar. Environ. Saf., Vol. 26, No 3, pp. 233-241.
- [6] Kang, C. K., P. J. Kim, W. C. Lee, and P. Y. Lee(1999), Nutrients and phytoplankton blooms in the Southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the coastal bay systems, J. Oceanol. Soc. Kor., Vol. 34, No. 2, pp. 86-94.
- [7] Kim, G., Y. W. Lee, D. H. Joung, K. R. Kim, and K. Kim(2006), Real-time monitoring of nutrients concentrations and red-tide outbreaks in the southern sea of Korea, Geophysical Research Letters, Vol. 33, L13607.

- [8] Kim, H. C., C. K. Lee, S. G. Lee, and H. G. Kim(2001), Physico-chemical factors on the growth of *Cochlodinium polykrikoides* and nutrient utilization, J. Korean Fish. Soc. Vol. 34, No. 5, pp. 445-456.
- [9] Kim, H. S., W. H. Yih, J. H. Kim, G. M. Myung, and H. J. Jeong(2011), Abundance of epiphytic dinoflagellates from coastal waters off Jeju Island, Korea during Autumn 2009. Ocean Science Journal. Vol. 146, pp. 205-209.
- [10] Kim, T. W., K. T. Lee, C. K. Lee, H. D. Jeong, Y. S. Suh, W. A. Lim, K. Y. Kim, and H. J. Jeong(2013), Interannual nutrient dynamic in Korean coastal waters. Harmful Algae, Vol. 30S, pp. S15-S27.
- [11] Kwon, H. K., G. Kim, Y. Hsn, J. Seo, W. A. Lim, J. W. Park, T. G. Park, and I. S. Han(2019), Tracing the sources of nutrients fueling dinoflagellate red tides occurring along the coast of Korea using radium isotopes. Scientific Reports, Vol. 9, 15319.
- [12] Kwon, H. K., G. Kim, W. A. Lim, and J. W. Park(2018), In-situ production of humic-like fluorescent dissolved organic matter during *Cochlodinium polykrikoides* blooms. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 203, pp. 119-126.
- [13] Kwon, H. K., H. J. Kim, H. S. Yang, and S. J. Oh(2014), The importance of dissolved organic nutrients on the interspecific competition between the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* and diatom *Skeletonema* sp. J. Korean Soc. Oceanogr., 19, pp. 232-242.
- [14] Kwon, H. K., J. A. Park, H. S. Yang, and S. J. Oh(2013), Dominance and survival strategy of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* and *Alexandrium catenella* under dissolved inorganic nitrogen-limited conditions. J. Korean Soc. Mar. Environ. Ener., Vol. 16, pp. 25-35.
- [15] Lee, C. K., T. G. Park, Y. T. Park, and W. A. Lim(2013), Monitoring and trends in harmful algal blooms and red tides in Korean coastal waters, with emphasis on *Cochlodinium polykrikoides*. Harmful Algae, Vol. 30S, pp. S3-S14.
- [16] Lee, D. K.(2008), *Cochlodinium polykrikoides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea, Harmful Algae, Vol. 7, pp. 318-323.
- [17] Lee, M. O., J. H. Choi, and I. H. Park(2010), Outbreak conditions for *Cochlodinium polykrikoides* blooms in southern coastal waters of Korea. Marine Environmental Research, Vol. 79, pp. 227-238.
- [18] Lee, Y. W. and G. Kim(2007), Linking groundwater-borne nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 71, pp. 309-317.
- [19] Li, Z., M. S. Han, K. Matsuoka, S. Y. Kim, and H. H. Shin(2015), Identification of the resting cysts of *Cochlodinium polykrikoides*. Margalef (Diniphyceae, Gymnodiniales) in Korean coastal sediments, J. phycol., Vol. 51, pp. 204-210.
- [20] Lim, W. A.(2004), Studies on the initiation of *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the southern waters of Korea, Ph.D thesis, Pusan National University, p. 119.
- [21] Lim, W. A., C. K. Jang, S. Y. Kim, S. G. Lee, H. G. Kim and I. K. Chung(2003), Short-term changes of community structure of phytoplankton in summer around Namhae Island of Korea, Algae, Vol. 18, No. 1, pp. 49-58.
- [22] Lim, W. A., C. S. Jung, C. K. Lee, Y. C. Cho, S. G. Lee, H. G. Kim, and I. K. Chung(2002), The outbreak, maintenance, and decline of the red tide dominated by *Cochlodinium polykrikoides* in the coastal waters off southern Korea from August to October, 2000, 「The Sea」 J. Oceanol. Soc. Kor., Vol. 7, No. 2, pp. 68-77.
- [23] Lim, W. A., Y. S. Lee, and J. G. Park(2009), Characteristic of *Cochlodinium polykrikoides* bloom in southeast coastal waters of Korea, 2008, 「The Sea」 J. Oceanol. Soc. Kor., Vol. 14, No. 3, pp. 155-162.
- [24] NFRDI(1993a), Illustrations of phytoplanktons responsible for the blooms in Korean coastal waters, National Fisheries Research & Development Institute, p. 97.
- [25] NFRDI(1993b), Study on the phenomena of coastal eutrophication and red tide, National Fisheries Research & Development Institute, p. 292.
- [26] NFRDI(1997), Harmful Algal Blooms in the Southern coastal waters of Korea in 1995, National Fisheries Research & Development Institute, p. 191.
- [27] NFRDI(1998), Recent Red tides in Korean Coastal waters, National Fisheries Research & Development Institute, p. 292.
- [28] NIFS(2017a), Harmful algal blooms in the Korean coastal waters in 2016, National Institute of Fisheries Science, p. 86.
- [29] NIFS(2017b), The history of Marine environment research, National Institute of Fisheries Science, pp. 241-267.
- [30] NIFS(2018), Harmful algal blooms in the Korean coastal waters in 2017-2018, National Institute of Fisheries Science, p. 124.
- [31] NIFS(2020), Harmful algal blooms in the Korean coastal waters in 2019, National Institute of Fisheries Science, pp. 21.

- [32] Oh, S. J., Y. Matsuyama, S. Nagai, S. Itakura, Y. H. Yoon, and H. S. Yang(2009), Comparative study on the PSP component and toxicity produced by *Alexandrium tamiyavanichii* (Dinophyceae) strains occurring in Japanese coastal water. Harmful Algae, Vol. 8, pp. 362-368.
- [33] Onitsuka, G., K. Miyahara, N. Hirose, S. Watanabe, H. Semura, R. Hori, T. Nishikawa, K. Miyaji, and M. Yamaguchi(2010), Large-scale transport of *Cochlodinium polykrikoides* blooms by the Tsushima Warm current in the southwest Sea of Japan, Harmful Algae, Vol. 9, pp. 390-397.
- [34] Park, J. S., H. G. Kim, and S. K. Lee(1988), Red tide occurrence and succession of its causative organisms in Jinhae Bay, Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, Vol. 41, pp. 1-26.
- [35] Park, T. G., J. J. Kim, W. J. Kim, and K. M. Won(2016), Development of real-time RT-PCR for detecting viable *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) cysts in sediment, Harmful Algae, Vol. 60, pp. 36-44.
- [36] Sakamoto, S., W. A. Lim, D. Lu, X. Dai, T. Orlova, and M. Iwataki(2020), Harmful algal blooms and associated fisheries damage in East Asia: current status and trends in China, Japan, Korea, and Russia, Harmful Algae, in press.
- [37] Seong, K. T., J. D. Hwang, I. S. Han, W. J. Go, Y. S. Suh, and J. Y. Lee(2010), Characteristic for long-term trends of temperature in the Korean waters. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., Vol. 16, No. 4, pp. 353-360.
- [38] Shah, M. M. R., S. J. An, and J. B. Lee(2013), Seasonal abundance of epiphytic dinoflagellates around coastal waters of Jeju Island, Korea. J. Mar. Sci. and Tech., Vol. 21, pp. 156-165.
- [39] Wells, M., V. Trainer, T. J. Smayda, B. S. O.Karlson, C. G. Trick, R. M. Kudela, A. Ishikawa, S. Bernard, A. Wulff, D. M. Anderson, and W. P. Cochlan(2015), Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future. Harmful Algae, Vol. 49, pp. 68-93.
- [40] Wheeler, P. A., B. B. North, and G. C. Stephens(1974), Amino acid uptake by marine phytoplankters. Limnol. Oceanogr., Vol. 19, pp. 249-259.

Received : 2020. 07. 02.

Revised : 2020. 07. 29. (1st)

: 2020. 08. 21. (2nd)

Accepted : 2020. 08. 28.