

Free Access

대규모 교란현상 후 형성된 대형갈조류 감태(*Ecklonia cava*) 개체군의 계절적 변동 및 회복 양상

김상일^{1,3} · 강윤희² · 김태훈² · 박상률^{1,*}

¹제주대학교 해양생명과학과

²제주대학교 지구해양과학과

³국립수산과학원 기후변화연구과

Recovery Pattern and Seasonal Dynamics of Kelp Species, *Ecklonia cava* Population Formed Following the Large-scale Disturbance

SANGIL KIM^{1,3}, YUN HEE KANG², TAE-HOON KIM² AND SANG RUL PARK^{1,*}

¹Estuarine & Coastal Ecology Laboratory, Department of Marine Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

²Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

³Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

대규모 교란현상 이후 형성된 대형갈조류 감태 개체군의 계절적 변동과 회복양상을 이해하기 위해서 감태의 형태학적 특성, 가입, 사망률, 밀도와 생물량을 2013년 6월부터 2015년 6월까지 조사하였다. 감태의 전체 길이, 가장 긴 측엽의 길이와 개체당 무게는 뚜렷한 계절적 경향성을 보였다. 줄기부의 길이는 겨울부터 봄까지 증가하였으나, 여름부터 가을까지는 변화가 없었다. 이러한 결과는 감태의 형태적 변화가 주로 엽상부의 변화에 의해 나타난다는 것을 의미한다. 감태의 성장은 수온이 15~18 °C인 겨울부터 봄까지 매우 활발하게 일어나지만, 20 °C 이상의 수온에서는 저해되는 것으로 나타났다. 가입은 실험이 진행되는 기간 동안 봄부터 여름에 걸쳐 매우 낮았다. 그러나 2015년 4월 생육밀도의 감소로 인해 감태의 피도가 매우 낮아진 시점에 대량의 가입이 발생하였으며, 이것은 감태의 가입이 계절적 요인 보다는 공간과 차광효과 같은 물리적 요인에 의해 조절된다는 것을 시사한다. 어린 개체는 부착기질의 불안정성으로 인해 매우 높은 사망률을 보였다. 태풍 ‘볼라벤’에 의한 교란 이후 34개월이 되는 2015년 6월에 이르러 개체군의 구조가 교란 이전 수준으로 회복되었다. 따라서 대규모 교란현상 이후 감태 개체군이 교란 이전의 개체군 구조로 회복되는 데에는 3년 이상의 시간이 소요되는 것으로 판단된다. 이 연구는 해중림을 구성하는 대형갈조류의 관리, 복원 및 보호 전략을 수립하는데 매우 귀중한 생태학적 자료를 제공할 것이다.

Seasonal dynamics of kelp forest-forming algae, *Ecklonia cava* population formed following the large-scale disturbance by Typhoon ‘Bolaven’ in August 2012 were investigated in Jeju Island, Korea. Morphological characteristics, recruits density, mortality rate, total density and biomass were monitored bimonthly from June 2013 to June 2015. Total and longest blade lengths, and individual weight of *E. cava* showed distinct seasonal trends. Stipe length increased from winter to spring, but did not show increase or reduced from summer to autumn. This indicates that morphological characteristics of *E. cava* are mainly affected by the change of blades. The optimal temperature for *E. cava* growth was about 15-18°C during winter to spring while the growths were inhibited at the water temperature above 20°C during summer. *E. cava* exhibited very low recruitment during spring-summer. However, high recruitment was observed on April 2015 when canopy cover was very low due to low density. This indicates that recruitment of *E. cava* was controlled not by seasonal effects but by physical factors such as canopy and space. The mortality rate of juvenile plants was highest due to their unstable settlement. By June 2015, 34 months after the disturbances, *E. cava* was almost recovered to the pre-disturbance population size structure. These results suggest that recovery of kelp forest following the large-scale disturbance requires a

considerable period of time (more than three years). This study should provide valuable ecological information on management, restoration and protection of kelp species.

Keywords: *Ecklonia cava*, Population dynamics, Population structure, Recruitment, Mortality, Recovery

서 론

해중림(kelp forest)은 대형갈조류로 구성된 해조 숲을 말하며 생산성이 높고, 다양한 해양생물들의 서식처와 산란장으로써 이용되어 종다양성이 매우 높은 온대 해역의 대표적인 저서생태계이다(Steneck *et al.*, 2002; Graham, 2004). 해중림을 구성하는 대형갈조류는 패류의 사료, 각종 화장품과 의약품의 원료로 널리 이용되고 있다(Vásquez *et al.*, 2014). 해중림의 생태학적 및 경제학적 중요성에도 불구하고, 최근 인간활동에 의한 해양환경오염, 기후변화와 외래종의 침입 등에 의해 해중림은 지속적으로 감소하고 있다(Steneck *et al.*, 2002; Nyberg and Wallentinus, 2005; Wernberg *et al.*, 2011). 따라서 해중림을 구성하는 대형갈조류의 생태적 기능과 변화를 감지하고, 이를 통한 해중림의 장기적인 변화 예측 모델을 개발하기 위해 주요 종의 개체군 동태(population dynamics)를 이해하는 것이 매우 중요한 과제로 대두되었다.

해조 개체군 동태는 성장, 생식, 가입과 사망을 통해서 예측할 수 있으며, 개체군의 생존, 가입과 사망은 주로 생육밀도로 나타낸다(Caswell, 1989). 개체군의 생물량과 형태적 특징은 개체군의 성장을 예측할 수 있는 매우 좋은 척도이다(Duarte and Ferreira, 1997). 특히, 다년생 해조류의 개체군 변동양상은 연령 또는 크기 구조 파악을 통해서 비교적 정확하게 예측할 수 있다(Arenas and Fernández, 2000; Rivera and Scrosati, 2006). 개체군 변동의 척도인 개체군의 생육밀도, 생물량과 형태적 특징은 주로 수중광량, 수온과 파도와 같은 환경적 요인에 의해서 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Schiel and Foster, 2006). 그러나, 한국 연안에 생육하는 대형갈조류의 주요 개체군과 환경적 요인과의 연관성에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다(Kang *et al.*, 2001; Kim and Yoo, 2003). 또한, 대부분의 개체군 변동에 관한 연구는 계절적 변동과 연간 변이를 반영할 수 없는 1년 이내의 기간 동안 진행되어서 개체군 동태를 해석하는데 심각한 오류를 범할 수 있다(Scrosati, 2001; Schiel and Foster, 2006; Sousa-Dias and Melo, 2008). 따라서 개체군 동태에 관한 연구는 이들에 대한 이해력과 예측력을 높이고 해당 종의 보존 및 복원 정책을 수립하기 위해서 장기적으로 진행되어야 한다(Dayton *et al.*, 1984; Terawaki *et al.*, 2001).

우리나라 연안에서 태풍은 생태계에 광범위하게 영향을 미치는 중요한 자연 교란현상이다. 최근의 기후변화모델에 의하면 강도가 센 태풍의 발생빈도가 점차적으로 증가하는 것으로 예측되고 있다(Easterling *et al.*, 2000; Meehl *et al.*, 2007). 태풍은 저서동물과 대형갈조류의 대량 사망을 유발하여 저서생물군집에 심각한 영향을 초래하며, 각 해양생물의 연령 또는 크기구조, 생육밀도, 가입양상과 해중림 먹이망의 변화를 일으키는 것으로 알려져 있다(Connell, 1978; Dayton *et al.*, 1992; Reed *et al.*, 2011). 대규모 교란 현상의 발생시기, 빈도와 강도는 해양저서생물 군집의 회복양상에 있어서 시-공간적으로 다른 영향을 미친다(Dayton *et al.*, 1992; Kim *et al.*, 2014). 태풍과 같은 대형 교란 현상에 의해서 파괴된 대형갈조류

개체군의 회복에는 가입이 가장 중요한 요인으로 알려져 있다(Deysher and Dean, 1986; Graham *et al.*, 1997). 해양생물의 가입은 예측 가능하게 주기적으로 발생할 수 있으나, 일부에서는 어떤 요인에 의해서 예측 불가능하고 일시적으로 대량 발생(stochastic event)할 수 있다(Levitt *et al.*, 2002; Schiel and Thompson, 2012). 또한, 가입 초기의 높은 사망률 때문에 교란현상 이후 개체군 재형성 과정 초기 단계부터 개체군 변화를 관찰하는 것이 매우 중요하다(Dudgeon and Petraitis, 2005). 이번 연구는 2012년 8월에 발생한 대형 태풍 '볼라벤'에 의해서 해중림의 주요 구성종인 감태(*Ecklonia cava* Kjellman) 개체군이 대부분 제거(< 1 individual m², personal observation)된 후, 6개월 이내에 대량의 가입이 발생하여 새롭게 형성된 개체군을 모니터링 하였다. 따라서 태풍 발생 후 형성된 감태 개체군의 변동 및 회복양상을 조사하는데 매우 좋은 기회라 할 수 있으며, 해중림의 관리와 보존전략을 수립하는데 과학적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 본다.

감태는 한국과 일본연안에서 해중림을 구성하는 대표적인 대형 갈조류로서 수심 5-15 m내외에 생육하는 다년생 해조종이며 전복의 사료나 각종 분야의 원료로 사용되어 자원으로서 가치와 수요가 증대되고 있다(Bolton and Anderson, 1994). 세계 각 국은 Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999 (호주), Acts of the Protection of the Fisheries Resources (일본), Kelp and Marine Aquatic Plant Laws (미국)와 같은 수산 자원 관리에 관한 법률을 제정하여 자연 해조 자원을 관리하고 있다. 한국도 Fisheries resources management Act (Act No. 13495)를 제정하여 보호대상 해조목록에 감태를 포함시켰으며, 연중 모조채취를 엄격하게 금지하고 있다. 감태는 중요한 보호대상 해조류임에도 불구하고, 한국 연안에서 감태 자연개체군의 보존과 관리를 위한 개체군 생태학적 연구는 거의 진행되지 않았다(Kang *et al.*, 2001). 따라서 본 연구의 목적은 제주도 연안에 생육하는 감태의 외부형태 및 개체군 구조의 계절적 변동을 조사하는 것이며, 특히 2012년 8월에 발생한 태풍 '볼라벤'에 의한 교란현상 후 형성된 개체군 구조의 계절적 변동을 통해 감태 군락의 회복양상을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

연구장소

이번 연구는 감태 군락이 발달한 제주도 서귀포시 문섬(33°13'38"N, 126°34'04"E)에서 2013년 6월부터 2015년 6월까지 2개월 간격으로 수행되었다(Fig. 1). 제주도는 쿠로시오난류의 지류인 대마난류의 영향과 지리적 위치 때문에 우리나라의 다른 해역에 비해 겨울철 평균 수온이 상대적으로 높으며(Rho and Kim, 1983; Min and Kim, 2006), 기후변화에 의한 수온상승이 두드러져 해양생태계 변화가 가장 빠르게 나타날 것으로 예상되고 있다(Takatsuki *et al.*, 2007). 또한, 제주도는 지리적으로 태풍의 진로에 위치하여 태풍에 의한 교란현상에 주기적으로 노출되어 있다(Kang *et al.*, 2005). 이번 연

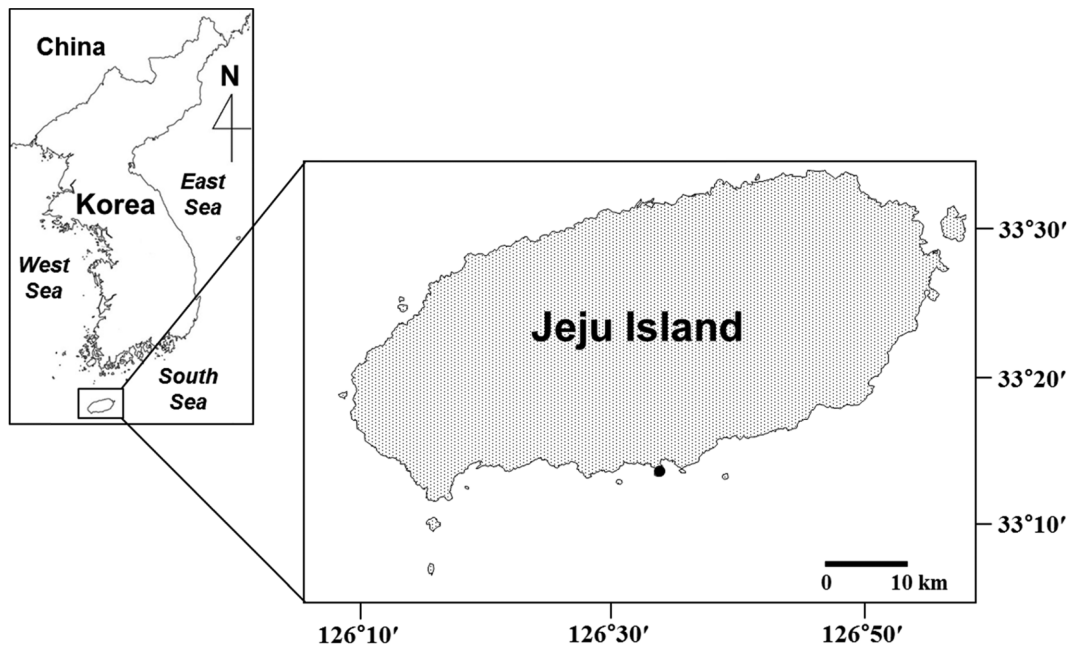


Fig. 1. Study site in Jeju Island, Korea.

구가 진행된 문섬은 제주도 서귀포항에서 남쪽으로 약 1 km 떨어진 본섬과 새끼섬으로 구성된 작은 무인도이며, 생태적 보전가치와 문화유산적 가치가 매우 높아 천연기념물 제421호 문섬 및 범섬 천연보호구역(문화재청 관보 제14556호, 2000), 생태계보전지역(해양수산부고시 제2002-85호, 2002)과 생물권보전지역(UNESCO, 2002)으로 설정되어 보호받고 있다. 문섬 주위는 저층의 수심이 15~80 m이고, 저층까지 90도에 가까운 암반 절벽으로 되어 있으며, 저층은 바위, 자갈, 굵은 모래와 죽은 폐각들로 구성되어 있다. 이 지역의 대표적인 대형갈조류인 감태는 수심 5~15 m 사이에 생육하고 있으며, 수심 10 m부근에서 생체량이 가장 높다(Ko *et al.*, 2008). 따라서 이번 연구는 생체량이 높은 수심 10 m에서 수행하였다.

이번 연구는 2012년 7월에 감태 개체군 구조를 파악하기 위해서 현장실험을 진행하던 중, 2012년 8월 태풍 ‘볼라벤’에 의해 감태 군락에 심각한 피해가 발생하였다. 따라서 감태 개체군의 회복 양상은 교란 현상 후 형성된 개체군 구조(2013년 6월이후)와 교란 전(2012년 7월) 개체군 구조를 비교하여 평가하였다.

물리화학적 환경요인

수중광량, 수온과 염분은 2013년 6월부터 2015년 4월까지 측정하였다. 수중광량과 수온은 연구가 진행된 수심 10 m의 감태 군락에서 HOBO 센서(HOBO Pendant temperature/light data logger, Onset Computer Corp., USA)를 설치하여 10분 간격으로 측정하였으며, 부착생물(fouling)에 의한 광량측정의 오차를 최소화 하기 위하여 HOBO 센서에 부착된 착생생물들을 2주 간격으로 제거하여 그 영향을 최소화하였다. 수중광량은 LI-193SA 광센서(LI-COR Inc., USA)와 LI-1400 기록계(LI-COR Inc., USA)를 이용해서 측정 단위를 변환시켰으며, 일일 광량(mol photons m⁻² d⁻¹)으로 나타내었다. HOBO 센서를 이용해 측정된 수온은 일일 평균값으로 나

타내었다. 해수 내 염분은 매 조사시기마다 YSI (YSI model 63, YSI incorporated, USA)를 이용하여 측정하였다.

실험 디자인 및 개체군 매개변수 측정

이번 연구는 문섬 북동쪽의 감태 개체군이 잘 발달된 수심 10 m에서 암반틈에 등산용 하켄을 고정하여 부이를 설치하였고, 이를 중심으로 직경 1.12 m의 원형 방형구(1 m²)를 4개 설치하였다. 방형구간의 간섭을 배제하기 위해 각 방형구는 5 m 간격을 두고 설치하였다. 감태 개체간의 구분은 고유번호가 부여된 아크릴판과 케이블타이를 이용해 영구방형구내에 생육하는 감태의 부착기(holdfast)에 고정하여 표시하였다. 부착기의 크기가 작은 개체들은 부드러운 flagging tape을 줄기부(stipe)에 묶어서 표시하고, 현장 실험모습을 스케치하여 현장과 개체들의 인식을 용이하게 하였다.

감태의 형태적 특징은 영구방형구내에 표시된 개체 중에서 줄기부 길이(stipe length)가 10 cm이상이고 측엽(lateral blade)이 발생하여 성체의 형태를 갖춘 개체들을 대상으로 조사하였다. 줄기부 길이, 측엽과 중앙엽(primary blade)중 가장 긴 엽상부의 길이(longest blade length)가 현장에서 측정되었다. 감태의 전체 길이(total length)는 줄기부와 가장 긴 엽상부 길이의 합으로 나타내었다. 개체당 무게(g wet wt.)는 파괴적인 채집으로 인한 개체군의 훼손을 방지하기 위해 전체 길이(X)와 개체당 무게(Y)와의 관계식[Y(g) = 0.033X^{2.02}]를 이용하여 추정하였다(Kang *et al.*, 2001).

감태의 생육밀도는 방형구 내에 고유번호가 부여된 모든 개체들의 수를 세었으며, 생물량(biomass)은 개체당 무게와 생육밀도를 이용해 추정하였다. 감태 개체군의 사망률은 고유번호가 지정된 개체들을 추적하여 매 조사시기 사이에 개체가 사망한 비율을 이용해 나타내었다. 개체의 사망은 개체가 기질에서 완전히 제거된 것, 부착기만 남아있는 것, 줄기부만 일부가 남아있으나 조직이 분해되고 있는 것을 기준으로 하였다. 개체군의 가입은 각 방형구 내에 고유

번호가 표시된 개체들을 제외한 새로 가입된 개체수를 계수하고 flagging tape으로 고유번호를 부여하였다. 체장(thallus height) 5 cm 이하의 어린 개체는 인식표에 의한 간섭으로 기질에서 탈락되어 사망률이 증가하였다. 따라서 실험적인 오류를 최소화하기 위해서 체장이 5 cm 이상인 개체들을 새로 가입된 것으로 가정하였다.

감태 개체군의 크기 구조는 Kirkman (1981)의 분류 기준을 토대로 감태의 생활사 단계와 줄기부의 길이를 기준에 추가하여 5개 등급으로 세분화하여 재분류하였다. 크기등급 R은 가입으로 정의된 크기의 개체들에 해당하고, J는 줄기부 길이가 3~10 cm 이내이고 측엽이 충분히 발달하기 전까지의 단계에 해당한다. 성체는 줄기부의 길이를 기준으로 A1-A3 세 단계로 세분화하였다. A1은 줄기부의 길이가 10~30 cm, A2는 줄기부의 길이가 30~50 cm이고 A3은 줄기부의 길이가 50 cm 이상인 개체로 최소 2-3년이상된 것을 말한다.

통계 분석

통계 분석 전, 모든 자료는 Shapiro-Wilk test와 Levene's test를 이용해 정규성(normality)과 등분산성(homogeneity of variance)을 각각 검정하였으며, 가정에 위배될 경우 log- 또는 arcsine-transformation 시킨 후 통계분석을 수행하였다. 형태적 특징, 생육밀도, 생물량, 가입밀도와 사망률의 조사시기별 차이와 크기 등급간 사망률의 차이는 one-way ANOVA를 이용하여 분석하였다. 분석 값이 유의할 경우 SNK (Student-Newman-Keuls)-test로 각 자료의 유의성을 검정하였다. 모든 통계 분석은 SPSS (version 20.0) 프로그램을 이용하였다.

결 과

물리적 환경요인

감태 군락의 수증광량은 뚜렷한 계절적 양상을 보이지 않았으며, 연구기간 동안 일일 평균 수증광량은 $5.6 \text{ mol photons m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 측정되었다(Fig. 2A). 수온은 뚜렷한 계절적 양상을 보였으며, 13.7~28.4 °C로 관찰되었다(Fig. 2B). 연평균 수온은 19.6 °C 이었으며, 월평균 최고 수온은 9월에, 최저수온은 3-4월에 나타났다. 염분 농도는 연중 거의 일정하였으나, 집중 호우가 빈번한 여름에는 약간 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2C). 연구기간 동안 연평균 염분 농도는 32.4 psu로 관찰되었다.

형태적 특징

감태의 전체 길이는 겨울부터 증가하여 봄에 최고값(2014년 4월 : 63.0 cm)을 보였으며, 가을(2013년 10월)과 겨울(2013년 12월과 2015년 2월)에 최저값(2013년 10월: 46.2 cm)을 보이는 뚜렷한 계절적 변이($P < 0.001$)를 나타내었다(Table 1). 줄기부 길이는 봄부터 가을(2013년 6-10월과 2014년 4-10월)까지 일정하게 유지 또는 감소하는 경향을 보였으나, 늦가을부터 이른 봄(2013년 10월부터 2014년 4월과 2014년 10월부터 2015년 4월)에 꾸준히 증가하는 현상을 보였다(Table 1). 가장 긴 엽상부의 길이와 개체당 무게는 전체 길이와 유사한 계절적 양상을 나타내었다. 가장 긴 엽상부의 길이는 2013년 6월과 2014년 4월에 각각 44.8과 42.6 cm로 가장 길었으며, 2015년 2월에 평균 24.7 cm로 가장 짧았다(Table 1). 개체당 무게는 2014년 4월에 147 g wet wt.로 가장 높았으며, 2013년 10-12월과 2015년 2월에 약 90 g wet wt.미만으로 가장 낮았다(Table 1).

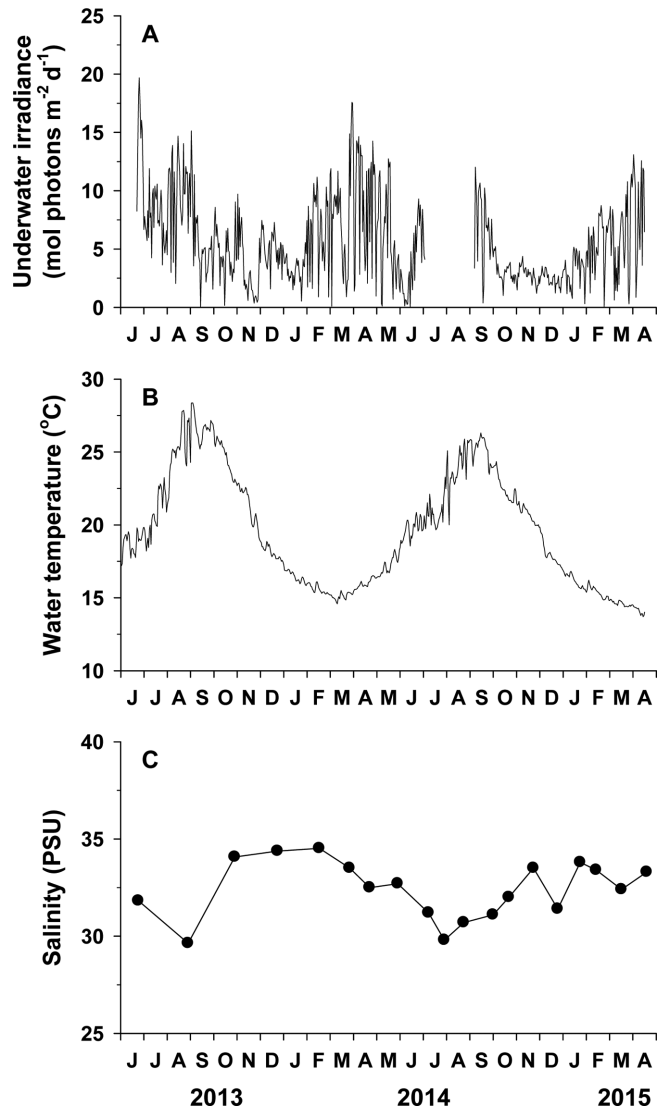


Fig. 2. Daily underwater photon flux density (PFD; A), water temperature (B), and salinity (C) at a water depth of 10 m at the study site in Jeju Island from June 2013 to April 2015.

가입과 사망률

전체연구기간에서 감태 개체군의 가입은 봄부터 여름에 걸쳐 단위면적당 1개체 미만의 매우 미약한 수준으로 발생하였다. 그러나 2015년 4월에 감태의 가입이 집중적으로 발생하여 가입밀도는 단위면적당 52개체로 나타났다(Table 1). 감태 개체군의 사망률은 시간에 따른 유의한 변이($P < 0.001$)를 보였으며, 2013년 8-10월에 21~35%, 그리고 2015년 6월에 68%로 매우 높았다(Table 1). 그러나 이 시기를 제외한 나머지 연구 기간에 측정된 사망률은 10%내 외였다. 또한, 감태 개체군의 사망률은 개체의 크기에 따라서 유의한 차이($P < 0.001$)를 보였으며, 등급 R과 J에 해당하는 어린 개체들의 사망률이 성체보다 매우 높았다(Fig. 3).

생육밀도와 생물량

감태의 생육밀도는 계절적 변이를 보이지 않았으나 조사시기에 따른 유의한 차이($P < 0.001$)를 보였다. 생육밀도는 2013년 6월과

Table 1. Morphological characteristics, recruit density, mortality rate, total biomass and density for *Ecklonia cava* at Munseom in Jeju Island, Korea from June 2013 to June 2015. Values are means \pm SE (n=6-48 for morphological characteristics and n=4 for recruit density, mortality rate, total biomass and density). With each zone, means with the same letter are not significantly different among sampling times (SNK test, $P < 0.05$).

Date	Total length (mm)	Stipe length (mm)	Longest blade length (mm)	Individual weight (g wet weight ind ⁻¹)	Recruit density (individuals m ⁻²)	Mortality rate (%)	Total biomass (g wet weight m ⁻²)	Total density (individuals m ⁻²)
2013								
June	596.7 \pm 25.1 ^{ab}	149.0 \pm 20.0 ^{ab}	447.7 \pm 18.8 ^e	128.7 \pm 11.1 ^{ab}	-	-	1064.6 \pm 79.2 ^{ab}	63.3 \pm 10.7 ^c
August	534.8 \pm 31.6 ^{ab}	149.0 \pm 20.0 ^{ab}	385.8 \pm 22.7 ^{bcde}	104.1 \pm 12.4 ^{ab}	2.3 \pm 0.8 ^a	20.7 \pm 1.3 ^a	1050.9 \pm 52.8 ^{ab}	52.5 \pm 9.2 ^{bc}
October	462.2 \pm 47.7 ^a	126.2 \pm 12.8 ^a	336.0 \pm 42.9 ^{abcd}	79.5 \pm 15.9 ^a	0.5 \pm 0.5 ^a	35.4 \pm 2.0 ^b	658.4 \pm 26.9 ^a	34.5 \pm 6.0 ^{abc}
December	469.8 \pm 19.7 ^a	150.0 \pm 12.8 ^{ab}	319.8 \pm 17.7 ^{abc}	80.1 \pm 6.5 ^a	0.0 \pm 0.0 ^a	11.5 \pm 1.5 ^a	1022.2 \pm 144.8 ^{ab}	30.8 \pm 5.6 ^{abc}
2014								
February	563.5 \pm 20.9 ^{ab}	179.9 \pm 11.4 ^{ab}	383.5 \pm 17.1 ^{bcde}	119.2 \pm 9.2 ^{ab}	0.0 \pm 0.0 ^a	9.4 \pm 2.8 ^a	1752.8 \pm 339.3 ^{ab}	27.8 \pm 5.1 ^{ab}
April	629.7 \pm 17.7 ^b	203.4 \pm 12.1 ^{ab}	426.3 \pm 12.9 ^{de}	147.5 \pm 8.3 ^b	0.5 \pm 0.5 ^a	5.4 \pm 3.4 ^a	2382.8 \pm 530.1 ^b	26.5 \pm 4.2 ^{ab}
June	604.2 \pm 19.3 ^{ab}	205.2 \pm 13.0 ^{ab}	399.0 \pm 15.4 ^{cde}	136.7 \pm 8.7 ^{ab}	0.3 \pm 0.3 ^a	12.6 \pm 3.0 ^a	2040.5 \pm 415.7 ^b	23.5 \pm 4.1 ^{ab}
August	565.7 \pm 18.0 ^{ab}	205.9 \pm 14.3 ^{ab}	359.8 \pm 9.9 ^{bcde}	119.0 \pm 7.6 ^{ab}	0.5 \pm 0.5 ^a	12.5 \pm 5.5 ^a	1530.7 \pm 341.1 ^{ab}	20.8 \pm 2.5 ^a
October	535.7 \pm 19.9 ^{ab}	204.8 \pm 13.8 ^{ab}	330.9 \pm 11.6 ^{abcd}	108.1 \pm 8.3 ^{ab}	0.3 \pm 0.3 ^a	11.1 \pm 2.6 ^a	1279.7 \pm 383.8 ^{ab}	18.8 \pm 2.7 ^a
December	516.3 \pm 21.2 ^{ab}	215.8 \pm 15.0 ^{ab}	300.5 \pm 11.3 ^{ab}	101.1 \pm 8.4 ^{ab}	0.0 \pm 0.0 ^a	10.9 \pm 4.0 ^a	1120.6 \pm 335.7 ^{ab}	16.5 \pm 2.0 ^a
2015								
February	483.9 \pm 20.5 ^{ab}	236.6 \pm 16.2 ^b	247.3 \pm 10.0 ^a	89.2 \pm 7.2 ^{ab}	0.0 \pm 0.0 ^a	11.4 \pm 5.0 ^a	985.1 \pm 309.6 ^{ab}	14.8 \pm 2.4 ^a
April	590.5 \pm 24.9 ^{ab}	244.5 \pm 17.4 ^b	346.0 \pm 12.5 ^{bcd}	133.5 \pm 10.6 ^{ab}	52.3 \pm 17.6 ^b	7.1 \pm 3.3 ^a	1447.9 \pm 454.2 ^{ab}	66.0 \pm 16.2 ^c
June	613.9 \pm 29.3 ^{ab}	249.1 \pm 18.3 ^b	364.8 \pm 15.7 ^{bcde}	147.1 \pm 12.6 ^b	9.0 \pm 5.9 ^a	68.5 \pm 9.5 ^c	1550.3 \pm 493.0 ^{ab}	28.3 \pm 10.8 ^{ab}

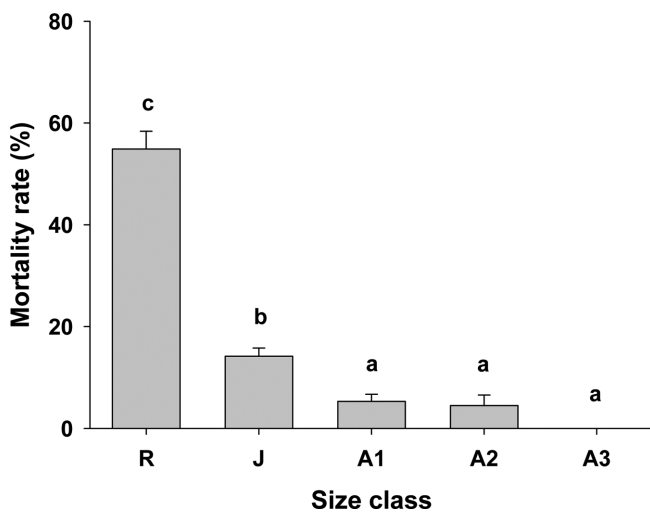


Fig. 3. Size-specific mortality rates of *Ecklonia cava* at Munseom in Jeju Island from June 2013 to June 2015. Size class R is a recruit; J is a juvenile plant and stipe length is from 3 cm to 10 cm; A1, A2 and A3 are adult plants, A1: 10 \leq stipe length < 30 cm, A2: 30 \leq stipe length < 50 cm, A3: 50 cm \leq stipe length. Data are means \pm SE (n=4). Values with the same letter are not significantly ($P < 0.05$) different among size classes.

2015년 4월에 각각 단위면적당 63개체와 66개체로 가장 높았으며, 2015년 2월에 단위면적당 약 15개체로 가장 낮은 생육밀도를 보였다(Table 1). 생육밀도와 달리 감태의 생물량은 뚜렷한 계절적 변이($P < 0.01$)를 보였다. 생물량은 겨울부터 증가하여 봄에 최대값에 도달하였으며, 여름부터 가을까지 감소하였다. 생물량은 2014년 4월에 단위면적당 2383 g wet wt.로 가장 높았으며, 2014년 10월에 가장 낮은 값(658 g wet wt. m⁻²)을 나타내었다. 연구기간 동안 평균 생물량은 1376 g wet wt. m⁻²로 측정되었다(Table 1).

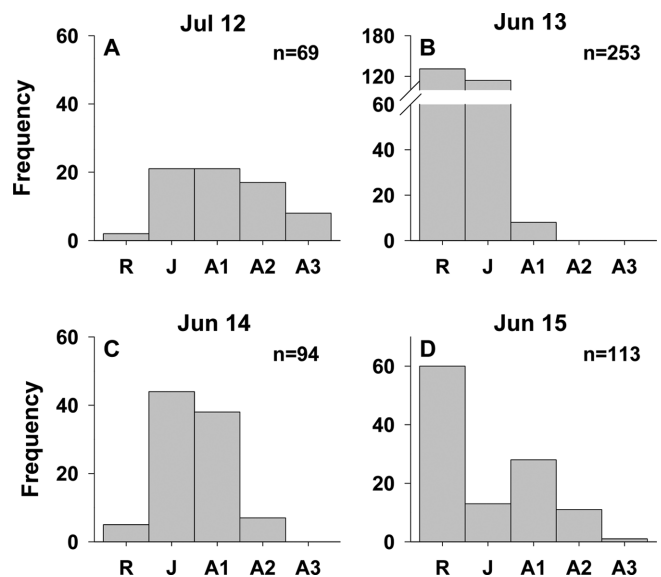


Fig. 4. Size-frequency histograms for *Ecklonia cava* at Munseom, Jeju Island from July 2012 (before typhoon 'Bolaven') to June 2015. Size class R is a recruit; J is a juvenile plant and stipe length is from 3 cm to 10 cm; A1, A2 and A3 are adult plants, A1: 10 \leq stipe length < 30 cm, A2: 30 \leq stipe length < 50 cm, A3: 50 cm \leq stipe length. The numbers of individuals (n) in each sample are given at the top right corner of figure.

개체군 크기 구조

감태 개체군의 크기 구조는 어린 개체의 비율이 높은 개체군 형성 초기단계, 개체군 성숙 단계, 가입에 의한 개체군 재형성과정으로 구분되었다. 2012년 8월에 발생한 태풍 '볼라벤' 이전 개체군 구조는 비교적 정구분포에 가까운 형태를 나타내었는데, 어린 개체인 J등급과 성체에 해당하는 A1과 A2등급의 비율이 전체 개체군의 85.5%를 차지하였다(Fig. 4A). 그러나 태풍에 의한 교란 발생 후, 대규모의

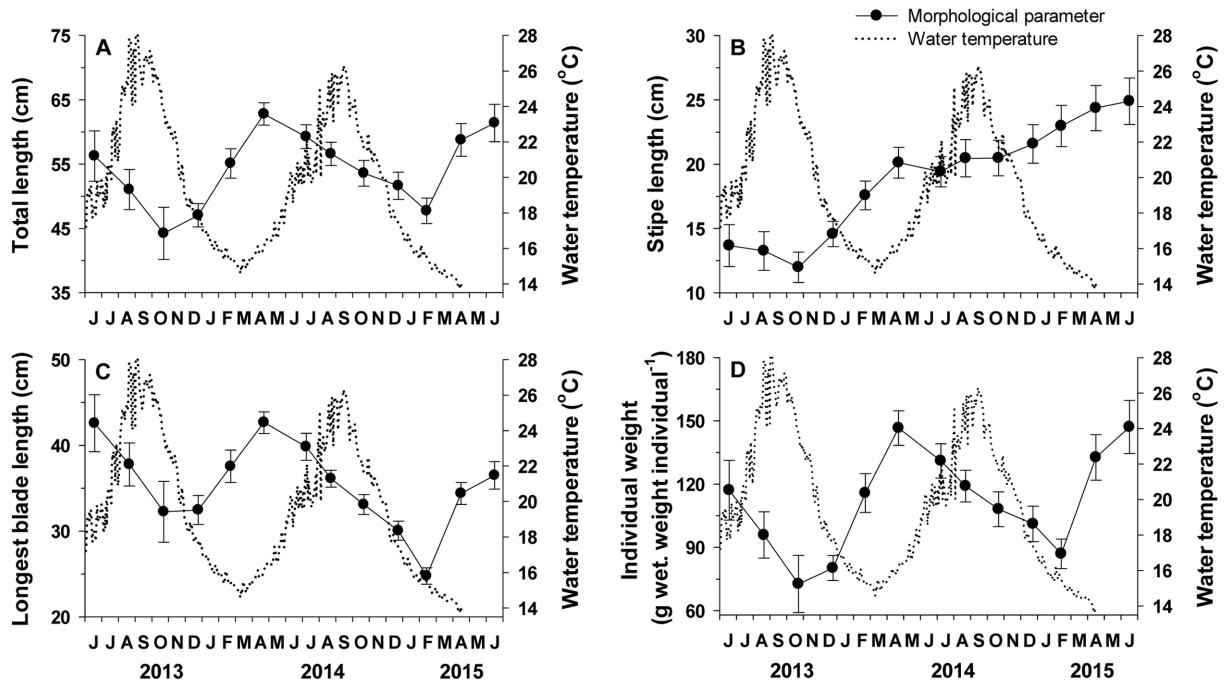


Fig. 5. *Ecklonia cava*. Seasonal changes of adult sporophyte in water temperature and total length (A), stipe length (B), longest blade length (C) and individual weight (D) at Munseom in Jeju Island from June 2013 to June 2015. Data are means \pm SE (n=6-48).

가입으로 인해서 2013년 6월에 R과 J등급의 어린 개체들이 전체 개체군의 96.8%를 차지하였다(Fig. 4B). 태풍 발생 22개월후, 2014년 6월에 A1등급의 개체가 전체 개체군의 40%를 차지하였으며, 줄기부 길이가 30 cm 이상되는 개체(A2등급)가 처음으로 관찰되었다(Fig. 4C). 태풍 발생 34개월후, 2015년 6월에 가장 큰 등급에 해당하는 A3등급의 개체가 관찰되었으며, 이 시기에 가입현상으로 R등급의 개체가 전체 개체군의 53%를 차지하였다(Fig. 4D).

감태 성장과 수온과의 관계

감태의 전체 길이, 가장 긴 엽상부의 길이, 줄기부 길이와 개체당 무게는 수온이 15~18 °C일 때 가장 높은 값을 보였다(Fig. 5). 수온이 20 °C 이상일 때, 전체 길이, 가장 긴 엽상부의 길이와 개체당 무게는 급격하게 감소하였으나(Fig. 5A, C, D), 줄기부 길이는 일시적으로 성장이 멈추는 것으로 나타났다(Fig. 5B).

고 찰

형태적 특징

감태의 전체 길이, 가장 긴 엽상부의 길이와 개체당 무게는 뚜렷한 계절적 변동을 보였으며, 이러한 결과는 수온의 변화 양상과 관련이 있는 것으로 사료된다. 이번 연구 결과는 감태가 속해 있는 다시마목(Laminariales) 내 다른 종들의 변동 양상과 매우 유사하였으며(Yokohama *et al.*, 1987; Kim and Yoo, 2003; Rothman *et al.*, 2006), 이는 수온이 해조 성장에 매우 중요한 영향을 미치는 물리적 요인이라는 것을 암시한다(Graham and Wilcox, 2000). Mabin *et al.*(2013)은 오스트레일리아 남부에 생육하고 있는 *E. radiata*의 성장에 최적 수온은 16~22 °C라고 발표했다. 그러나 20 °C 이상의

수온은 *E. radiata*의 성장에 부정적인 영향을 미치며, 감태의 성장과 측엽의 수는 22 °C이상의 수온조건에서 멈추거나 감소한다(Hatcher *et al.*, 1987; Haroun *et al.*, 1989). 이번 연구에서 감태의 성장에 최적 수온은 15~18 °C이었으며, 수온이 20 °C보다 높아지는 6월 말부터 뚜렷하게 성장이 감소하는 것으로 나타났다. 엽상부의 잎이 탈락되는 끝녹음 현상은 7월부터 중앙엽의 말단 부위에서 시작되었다. 또한, 엽상부에서 자낭반(sorus)이 형성되고 포자가 방출되는 8~10월에 측엽은 찢어지거나 탈락하였다. 이러한 현상은 엽상부의 길이 변화에 매우 큰 영향을 미쳤고, 형태적 변화를 일으켰다. Yokohama *et al.*(1987)은 감태의 생산성은 생식에 의한 엽상부(blade) 탈락 현상과 관련이 있다고 하였다. 일본의 Nabeta Bay에서 감태 엽상부의 길이와 무게는 생식 후에 급격히 감소하였다(Haroun *et al.*, 1989). 그러나 줄기부 길이는 수온의 변화와 관계없이 지속적으로 성장하고 있었다. 따라서 감태의 형태적 변화는 생식과 수온의 영향을 받는 엽상부의 변화에 의한 것으로 사료된다.

개체군 동태

해중립을 구성하는 대형갈조류(e.g. *Pterygophora californica*, *Laminaria* species, *Macrocystis pyrifera*, *Ecklonia* species)의 가입은 해양저서생태계가 유지되는데 매우 중요한 요소로 작용한다(Schiel and Foster, 2006). 일반적으로 다시마목(Laminariales)에 속하는 대형갈조류의 가입은 계절적인 영향보다는 어떤 요인에 의해서 일시적으로 대량 발생(stochastic event)하는 양상을 보인다(Graham *et al.*, 1997; Levitt *et al.*, 2002; Rothman *et al.*, 2006; Schiel and Thompson, 2012). 대규모 교란 현상은 대형갈조류인 *Macrocystis integrifolia*, *Lessonia trabeculata*와 *Desmarestia ligulata*의 가입에 영향을 미치는 것으로 알려졌다(Edwards, 1998; Vega *et al.*, 2005).

이번 연구 결과도 기존의 연구 결과와 매우 유사하였다. 태풍에 의한 교란 현상 1년 후, 새로 형성된 개체군에서 포자를 지닌 자낭반이 형성된 A1 등급에 해당하는 개체가 다수 관찰되었으며, 포자 방출에 의해 엽상부의 탈락 현상이 관찰되었다. 그러나 현장에서 가입은 봄과 여름에 걸쳐 매우 미미한 수준으로 관찰되었으며, 뚜렷한 계절적인 변동도 보이지 않았다. 감태의 생육밀도가 감소하던 중, 성체의 생육밀도가 가장 낮은 2015년 4월에 감태의 가입이 집중적 발생하였다. 이러한 현상은 제주도 위미의 감태 개체군에서도 관찰되었으며, 가입은 봄부터 가을에 걸쳐 주로 가입 공간이 확보된 곳에서 집중적으로 발생하였다(Sung, 2010). 따라서, 이번 결과는 가입이 계절적인 영향보다는 성체에 의한 차광효과(canopy effect)나 초식작용과 같은 다른 요인에 의해서 좌우된다는 것을 시사한다(Tegner *et al.*, 1995; Carnell and Keough, 2014).

대형갈조류의 가입에 영향을 주는 주요 요인은 수온, 수중광량, 영양염 농도 및 착생 공간과 같은 물리화학적 환경 요인과 초식작용, 포자 또는 접합자가 착생에 필요한 시간과 같은 생물학적 요인이 있다(Deysher and Dean, 1986; Tegner *et al.*, 1995; Reed *et al.*, 2004). 특히, 둘 이상의 물리화학적 환경 요인이 동시에 작용할 때, 이 요인들은 가입에 결정적인 영향을 미칠 수 있다(Rothman *et al.*, 2006). 감태의 생활사 단계에서 배우체(gametophyte)는 매우 적은 광량 조건하에서 발달이 진행되지만, 포자체(sporophyte) 발달은 일정 수준 이상의 광량이 요구된다(Maegawa *et al.*, 1987). 이번 연구에서 감태의 생육밀도는 꾸준히 감소하여 2015년 2월에 가장 낮았고, 엽상부 길이도 가장 짧아졌다. 성체의 발달로 인해 감소한 광량 조건이 배우체 발달에는 유리하겠지만, 포자체 발달에는 부정적인 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 결과적으로 성체에 의한 차광효과는 생육 밀도의 감소로 인해 급격하게 감소하였으며(Carnell and Keough, 2014), 이는 포자체의 착생에 필요한 공간과 성장에 필요한 빛을 공급할 수 있었다(Reed and Foster, 1984; Carnell and Keough, 2014). 또한, 이 시기에는 감태의 성장이 활발하여, 포자체의 착생과 생존율에 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 따라서 감소된 차광효과, 착생 공간 확보와 최적 성장 조건이 2015년 4월에 발생한 가입에 결정적으로 작용했을 것으로 사료된다.

대형갈조류의 사망률은 어린 개체에서 높게 관찰되며, 초식작용, 파도에 의한 물리적 교란, 수온 상승과 해수 내 영양염 결핍을 동반하는 엘니뇨 현상 등이 사망률의 주요 요인이 된다(Ebeling *et al.*, 1985; Tegner *et al.*, 1995; Schiel and Foster, 2006). 이번 연구에서 초기(2013년 8~10월)에 관찰된 사망률은 20.7~35.4%로 매우 높았으며, 이는 R과 J등급에 해당하는 어린 개체들의 높은 사망률에 기인한다. 어린 개체들의 높은 사망률은 두 가지 요인의 복합적인 효과에 의해서 발생한 것으로 추측된다. 감태는 암반기질 외에 다른 해조류 또는 고착성 동물 위에 착생하기도 하는데, 이번 연구에서 어린 개체들의 약 20%가 암반 외에 불안정한 기질(해조류, 분홍멍게)에 부착되었다. 그러나 암반 외에 부착된 개체들은 기질에서 대부분 탈락하여(S. Kim, personal observation), 2013년 8~10월과 2015년 6월에 사망률이 증가하였다. 또한, 어린 개체들은 파도에 견디는 힘이 약하기 때문에 파도와 같은 물리적인 교란이 어린 개체의 높은 사망률의 원인이 될 수 있다(Thomsen *et al.*, 2004). 이번 연구가 진행되던 중, 감태 군락은 2013년 8~10월(제15호 ‘콩레이’와 제24호 ‘다나스’)과 2015년 5월에 발생한 태풍(제6호 ‘노을’)의

직·간접적인 영향을 받았으며, 이로 인해 부착이 불완전한 어린 개체의 탈락이 크게 증가하였다. 따라서, 이번 연구는 파도와 같은 물리적 교란과 불완전한 착생이 동시에 작용하여 감태 사망률에 복합적인 효과를 일으켰으며, 이 요인들이 감태 개체군 변동에 중요한 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다.

개체군 구조의 변동과 회복 양상

대형 갈조류의 개체군 구조는 태풍과 같이 짧은 기간 동안 발생하는 대규모의 사망으로 인해서 변화될 수 있다(Dayton *et al.*, 1992; Graham *et al.*, 1997). 이번 연구가 진행된 문섬의 감태 개체군은 2012년 8월 태풍 ‘볼라벤’ 발생 전까지 중간 크기 등급의 개체가 다수를 차지하는 매우 안정적인 정규분포를 띠고 있었다. 그러나 태풍 ‘볼라벤’에 의한 성체들의 사망과 어린 개체들의 대량 가입으로 2013년 6월에 개체군 구조는 왼쪽으로 치우치는 정적편포(positive skewness)가 되었다. 2014년 6월에 개체군 구조는 어린 개체들의 빠른 성장과 높은 사망률로 인해 전체 개체군에서 A1등급의 비율이 높은 정규분포에 가까운 모양을 띠었다. 2015년 6월에 50 cm 이상 되는 줄기부류 가진 개체들이 출현했으며, 대규모의 가입에 의해 생식과 가입이 동시에 진행되는 안정적인 개체군 구조가 되었다. 이러한 개체군 구조의 변화는 다른 대형갈조류에서도 유사하게 나타나며, 새로운 개체의 성공적인 가입 여부가 개체군의 유지에 중요한 요인이 된다는 것을 의미한다(Dayton *et al.*, 1984; Ang, 1991).

태풍과 같은 대규모 교란현상 후, 대형갈조류가 안정적인 개체군 구조를 형성하는데 걸리는 시간은 짧게는 수개월, 길게는 10년 이상이 소요된다(Reed *et al.*, 2006). 이번 연구에서 감태 가입은 태풍 ‘볼라벤’ 직후 발생하였으며, 중간 크기 등급의 개체는 교란 현상 후 22개월 내에 나타났다. 줄기부 길이가 50 cm가 넘는 가장 큰 등급에 해당하는 개체들은 약 34개월 후에 출현하였으며, 아울러 많은 양의 가입이 다시 발생하여 비로소 교란 전의 안정적인 개체군 구조를 이루게 되었다. 이번 결과는 제주도에 생육하는 감태 개체군이 대규모 교란 현상 후 원래의 개체군 구조로 회복되는데 약 3년 정도의 시간이 소요된다는 것을 시사한다.

사 사

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌(References)

- Ang, P.O., 1991. Age- and size-dependent growth and mortality in a population of *Fucus distichus*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **78**: 173–187.
- Arenas, F. and C. Fernández, 2000. Size structure and dynamics in a population of *Sargassum muticum* (Phaeophyceae). J. Phycol., **36**: 1012–1020.
- Bolton, J.J. and R.J. Anderson, 1994. *Ecklonia*. In: Biology of economic algae, edited by Akatsuka, I., SPB Academic Publishing, The Hague, pp. 385–406.
- Carnell, P. and M. Keough, 2014. Spatially variable synergistic effects of disturbance and additional nutrients on kelp recruitment and recovery. Oecologia, **175**: 409–416.

- Caswell, H., 1989. Matrix population models: construction, analysis, and interpretation. Sinauer, Sunderland, Massachusetts, p. 328.
- Connell, J.H., 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, **199**: 1302–1310.
- Dayton, P.K., V. Currie, T. Gerrodette, B.D. Keller, R. Rosenthal and D.V. Tresca, 1984. Patch dynamics and stability of some California kelp communities. *Ecol. Monogr.*, **54**: 253–289.
- Dayton, P.K., M.J. Tegner, R.E. Parnell and P.B. Edwards, 1992. Temporal and spatial patterns of disturbance and recovery in a kelp forest community. *Ecol. Monogr.*, **62**: 421–445.
- Deyssher, L.E. and T.A. Dean, 1986. In situ recruitment of sporophytes of the giant kelp, *Macrocystis pyrifera* (L.) C.A. Agardh: effects of physical factors. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **103**: 41–63.
- Duarte, P. and J.G. Ferreira, 1997. A model for the simulation of macroalgal population dynamics and productivity. *Ecol. Model.*, **98**: 199–214.
- Dudgeon, S. and P.S. Petraitis, 2005. First year demography of the foundation species, *Ascophyllum nodosum*, and its community implications. *Oikos*, **109**: 405–415.
- Easterling, D.R., G.A. Meehl, C. Parmesan, S.A. Changnon, T.R. Karl and L.O. Mearns, 2000. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, **289**: 2068–2074.
- Ebeling, A.W., D.R. Laur and R.J. Rowley, 1985. Severe storm disturbances and reversal of community structure in a southern California kelp forest. *Mar. Biol.*, **84**: 287–294.
- Edwards, M.S., 1998. Effects of long-term kelp canopy exclusion on the abundance of the annual alga *Desmarestia ligulata* (Light F). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **228**: 309–326.
- Graham, M.H., 2004. Effects of local deforestation on the diversity and structure of southern California giant kelp forest food webs. *Ecosystems*, **7**: 341–357.
- Graham, M.H., C. Harrold, S. Lisin, K. Light, J.M. Watanabe and M.S. Foster, 1997. Population dynamics of giant kelp *Macrocystis pyrifera* along a wave exposure gradient. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **148**: 269–279.
- Graham, L.E. and L.W. Wilcox, 2000. *Algae*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 640 pp.
- Haroun, R., Y. Yokohama and Y. Aruga, 1989. Annual growth cycle of the brown alga *Ecklonia cava* in central Japan. *Sci. Mar.*, **53**: 349–356.
- Hatcher, B.G., H. Kirkman and W.F. Wood, 1987. Growth of the kelp *Ecklonia radiata* near the northern limit of its range in Western Australia. *Mar. Biol.*, **95**: 63–73.
- Kang, D-H., J.I. Song and K-S. Choi, 2005. Image analysis of typhoon impacts on soft coral community at Munseom in Jeju, Korea. *Ocean. Polar. Res.*, **27**: 25–34.
- Kang, R.S., K.S. Won, K.P. Hong and J.M. Kim, 2001. Population studies on the kelp *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* in Dokdo, Korea. *Algae*, **16**: 209–215.
- Kim, N.G. and J.S. Yoo, 2003. Structure and function of submarine forest 2. Population dynamics of *Ecklonia stolonifera* as a submarine forest-forming component. *Algae*, **18**: 295–300.
- Kim, S., Y.H. Kang, C.J. Choi, N.-I. Won, I.-S. Seo, H.J. Lee, S. Jung and S.R. Park, 2014. Effects of intensity and seasonal timing of disturbances on a rocky intertidal benthic community on the southern coast of Korea. *Ecol. Res.*, **29**: 421–431.
- Kirkman, H., 1981. The first year in the life history and the survival of the juvenile marine macrophyte, *Ecklonia radiata* (Turn.) J. Agardh. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **55**: 243–254.
- Ko, Y.W., G.H. Sung, C.H. Yi, H.H. Kim, D.M. Choi, Y.D. Ko, W.J. Lee, H-B. Koh, J.H. Oak, I.K. Chung and J.H. Kim, 2008. Temporal variations of seaweed biomass in Korean coasts: Munseom, Jeju Island. *Algae*, **23**: 295–300.
- Levitt, G.J., R.J. Anderson, C.J.T. Boothroyd and F.A. Kemp, 2002. The effects of kelp harvesting on its regrowth and the understorey benthic community at Danger Point, South Africa, and a new method of harvesting kelp fronds. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, **24**: 71–85.
- Mabin, C.J., P.E. Gribben, A.M. Fischer and J.T. Wright, 2013. Variation in the morphology, reproduction and development of the habitat-forming kelp *Ecklonia radiata* with changing temperature and nutrients. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **483**: 117–131.
- Maegawa, M., Y. Yokohama and Y. Aruga, 1987. Critical light conditions for young *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* with reference to photosynthesis. *Hydrobiologia*, **151/152**: 447–445.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.C. Zhao, 2007. Global climate projections. In: *Climate change 2007: The Physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 747–845.
- Min H.S. and C.-H. Kim, 2006. Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface temperature in Korea. *Ocean. Polar. Res.*, **28**: 415–423.
- Nyberg, C.D. and I. Wallentinus, 2005. Can species traits be used to predict marine macroalgal introduction? *Biol. Invasion.*, **12**: 3081–3092.
- Reed, D.C. and M.S. Foster, 1984. The effects of canopy shading on algal recruitment and growth in a giant kelp forest. *Ecology*, **65**: 937–948.
- Reed, D.C., B.R. Kinlan, P.T. Raimondi, L. Washburn, B. Gaylord and P.T. Drake, 2006. A metapopulation perspective on patch dynamics and connectivity of giant kelp. In: *Marine metapopulations*, edited by Kritzer, J.P. and P.F. Sale. Academic Press, San Diego, pp. 353–386.
- Reed, D.C., A. Rassweiler, M.H. Carr, K.C. Cavanaugh, D.P. Malone and D.A. Siegel, 2011. Wave disturbance overwhelms top-down and bottom-up control of primary production in California kelp forests. *Ecology*, **92**: 2108–2116.
- Reed, D.C., S.C. Schroeter and P.T. Raimondi, 2004. Spore supply and habitat availability as sources of recruitment limitation in the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyceae). *J. Phycol.*, **40**: 275–284.
- Rho, H.K. and K. Kim, 1983. Variations of sea surface temperature between Jeju and Mogpo and between Jeju and Wando. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **18**: 64–72.
- Rivera, M. and R. Scrosati, 2006. Population dynamics of *Sargassum lapazeanum* (Fucales, Phaeophyta) from the Gulf of California,

- Mexico. *Phycologia*, **45**: 178–189.
- Rothman, M.D., R.J. Anderson and A.J. Smit, 2006. The effects of harvesting of the South African kelp (*Ecklonia maxima*) on kelp population structure, growth rate and recruitment. *J. Appl. Phycol.*, **18**: 335–341.
- Schiel, D.R. and M.S. Foster, 2006. The population biology of large brown seaweeds: ecological consequences of multiphase life histories in dynamic coastal environments. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **37**: 343–372.
- Schiel, D.R. and G.A. Thompson, 2012. Demography and population biology of the invasive kelp *Undaria pinnatifida* on shallow reefs in southern New Zealand. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **434**: 25–33.
- Serosati, R., 2001. Population dynamics of *Caulerpa sertularioides* (Chlorophyta: Bryopsidales) from Baja California, Mexico, during El Niño and La Niña years. *J. Mar. Biol. Assoc. UK.*, **81**: 721–726.
- Sousa-Dias, A. and R.A. Melo, 2008. Long-term abundance patterns of macroalgae in relation to environmental variables in the Tagus Estuary (Portugal). *Estuar. Coast. Shelf. S.*, **76**: 21–28.
- Steneck, R.S., M.H. Graham, B.J. Bourque, D. Corbett, J.M. Erlandson, J.A. Estes and M.J. Tegner, 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Env. Conserv.*, **29**: 436–459.
- Sung, K.H., 2010. Population study of *Ecklonia cava* Kjellman in Jeju Island, Korea. M.S. Thesis, Sungkyunkwan University, Suwon, 49 pp.
- Takatsuki, Y., N. Kuraga, T. Shiga, N. Bunki, H. Inoue, H. Fujiwara and M. Ariyoshi, 2007. Long-term trends in sea surface temperature adjacent to Japan. *Sokko. Jiho.* **74**: S33–S87.
- Tegner, M.J., P.K. Dayton, P.B. Edwards and K.L. Riser, 1995. Sea urchin cavitation of giant kelp (*Macrocystis pyrifera* C. Agardh) holdfasts and its effects on kelp mortality across a large California forest. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **191**: 83–99.
- Terawaki, T., H. Hasegawa, S. Arai and M. Ohno, 2001. Management-free techniques for restoration of *Eisenia* and *Ecklonia* beds along the central Pacific coast of Japan. *J. Appl. Phycol.*, **13**: 13–17.
- Thomsen, M.S., T. Wernberg and G.A. Kendrick, 2004. The effect of thallus size, life stage, aggregation, wave exposure and substratum conditions on the forces required to break or dislodge the small kelp *Ecklonia radiata*. *Bot. Mar.*, **47**: 454–460.
- Vásquez, J.A., S. Zuñiga, F. Tala, N. Piaget, D.C. Rodríguez and J.M.A. Vega, 2014. Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem. *J. Appl. Phycol.*, **26**: 1081–1088.
- Vega, J.M.A., J.A. Vásquez and A.H. Buschmann, 2005. Population biology of the subtidal kelps *Macrocystis integrifolia* and *Lessonia trabeculata* (Laminariales, Phaeophyceae) in an upwelling ecosystem of northern Chile: interannual variability and El Niño 1997–1998. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, **78**: 33–50.
- Wernberg, T., B.D. Russell, P.J. Moore, S.D. Ling, D.A. Smale, A. Campbell, M.A. Coleman, P.D. Steinberg, G.A. Kendrick and S.D. Connell, 2011. Impacts of climate change in a global hotspot for temperate marine biodiversity and ocean warming. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **400**: 7–16.
- Yokohama, Y., J. Tanaka and M. Chihara, 1987. Productivity of the *Ecklonia cava* community in a bay of Izu Peninsula on the Pacific Coast of Japan. *Bot. Mag. Tokyo.*, **100**: 129–141.

2015년 10월 30일 원고접수

2016년 1월 31일 수정본 접수

2016년 6월 20일 수정본 채택

담당편집위원: 김동성