

〈단보〉

생분해성 로프를 이용한 대형 갈조류 감태의 이식

백재민·박성욱¹·황은경^{2*}국립수산과학원 중부내수면연구소, ¹국립수산과학원 수산공학과,²국립수산과학원 해조류바이오연구소

Afforestation of a Brown Alga, *Ecklonia cava* Kjellman using a Biodegradable Polybutylene Succinate

Jae Min Baik, Seong-Wook Park¹ and Eun Kyoung Hwang^{2*}

Central Regional Inland Fisheries Research Institute, Cheongpyeong 477-815, Korea,

Fisheries Engineering Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea,

²Seaweed Research Institute, NFRDI, Mokpo 530-831, Korea

Biodegradable polybutylene succinate (BPS) multifilament were designed to degrade upon disposal by the action of afforestation of *Ecklonia cava*. Matured thalli of *E. cava* were collected at Jeju for zoospore collection and the substrate for zoospores were BPS multifilament (12 mm, 500 Td/96). The materials were made as nets of 1 m² with a cross stripes of 10 cm. The unit biodegradable nets bearing germlings of *E. cava* was moved into Wando where the place is conducting intensive seaweed cultivation in Korea for 5 months of nursery culture until they grew to 10 cm in length after which the nets were transplanted into the sea bed at Jeju at a depth of 12 m and the algal growth was monitored from May 2007 to December 2008. This is the first instance of using the BPS materials for seaweed afforestation to avoid any environmental problems.

Key words: *Ecklonia cava*, Afforestation, Biodegradable polybutylene succinate (BPS)

서 론

생분해성 중합체 (biodegradable polymers)는 박테리아나 균류와 같은 미생물에 의해 쉽게 분해가 되며, 생물학적 과정을 통해 무기물로 순환된다 (Gross and Kalra, 2002). 이러한 생분해성 물질을 수산업 분야에 접목하게 된 것은, 1970년대 중반부터 수산업 분야에서 유행어업이라는 개념이 알려지게 된 이후 (Sheldon, 1975), 1980년대 후반부터는 바다에 떠다니는 그물로 인한 문제들이 과학자들 사이에서 크게 대두되기 (Matsuoka et al., 2005) 시작하였기 때문이다. 1995년에 국제식량기구는 이 유행어업을 수산업의 어획량에 심각하게 영향을 주는 하나의 요인으로 분석하였다. 이와 같은 국제적 상황에서 수산업에 있어서 유행어업을 방지하고, 해양생태계를 보호하기 위한 수단의 일환으로 최근 생분해성 polybutylene succinate 물질을 이용한 어구 및 다양한 수산자재의 개발이 시도되고 있다 (Park et al., 2007; Park and Bae, 2008).

해조류는 해양생태계에 있어 생산자로서의 역할 뿐만 아니라 연안에 서식하는 어패류의 산란장, 서식처 및 먹이 제공원으로 크게 기여하고 있으며, 이외에도 식용, 공업용 원료, 사료, 비료, 의약품 원료, 바이오에너지원 등으로 인간에게 폭넓게 이용되고 있다 (Dawes, 1998). 특히 어패류의 산란장과 서식처가 되는 대형 갈조류인 감태, 대항 및 모자반 등은 해중림 조성 대상으로 최근 크게 주목을 받고 있다. 그러나 대부분 이식시킨 성숙 업체에서 방출된 유주자와 수정란을 기질에

착생시키거나, 채묘시킨 종사를 인공기질에 감거나, 포자주머니를 설치하는 방법을 사용하기 때문에 이식 초기에 조식동물의 식해에 의해 생존율이 매우 낮아 식해에 대한 대책이 가장 큰 문제로 남아 있다 (Choi et al., 2002).

현재 우리나라에서 해조류 대량양식 시설에 이용하고 있는 로프는 대부분 PP (Polypropylene) 로프로 (Sohn, 1993), 해조류를 채취한 이후 남은 로프는 육상으로 철거시켜야 하나 일부는 바다에 그대로 버려져 연안 환경에 저해요인으로 작용하기도 한다. 또한 해조류 바다숲 조성에 이용하는 방법중 생존율을 높이기 위한 이식 방법의 하나가 양식된 해조류 업체의 직접 이식법 (Largo and Ohno, 1993) 인데, 이때 PP로프가 함께 이식되며, 이러한 양식 업체의 직접 이식은 최근 정부의 바다숲 조성 정책과 함께 증가되는 추세에 있다.

따라서 이 연구에서는 대형 갈조류 감태의 이식을 보다 효율적이면서도 친환경적으로 수행하기 위해, 생분해성 폴리머의 일종인 BPS resin을 이용하여 multifilament로 제작된 생분해성 로프의 이용 가능성을 시험함으로써, 친환경적인 바다숲 조성 기법의 개발에 기여하고자 하였다.

재료 및 방법

생분해성 이식망 제작 및 인장력 측정

시험용 이식망 제작에 사용된 로프의 시료는 생분해성 polybutylene succinate (BPS) multifilament였다. BPS는 dicarboxylic acid류로서 succinic acid와 1,4-butanediol을 일정

*Corresponding author:ekhwang@nfrdi.go.kr

비율 혼합하여 에스테르화반응과 축중합반응을 거쳐 얻어진 중합물이며, 화학 구조는 Fig. 1과 같다. 시료는 2006년 5월 BPS resin을 이용하여 500Td/96으로 방사한 후 직경 12 ± 0.15 mm 의 로프로 제작되었다.

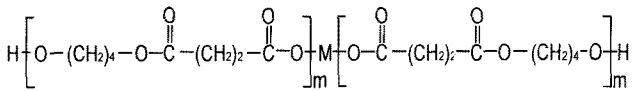


Fig. 1. The molecular structure of the biodegradable polybutylene succinate (BPS) polymer. M: multi-functional group with long chain. m: high degree of polymerization.

이식망 제작에 사용된 생분해성 로프의 강도 및 신장률 측정은 정속 인장식 장력계 (3345, Instron Co., USA)를 사용하여 KS K 0409(2006) 시험법으로 20회씩 측정하여 평균하였다. 시험시의 클램프 간격은 400mm, 인장속도는 400mm/min 였으며, 측정시 실내온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도는 $65 \pm 2\%$ 였다.

이식망 전처리

이식망은 BPS 로프를 사용하여 1m^2 의 그물모양 (격자간격 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$)으로 제작하였으며, 제작된 생분해성 이식망은 3일간 유수식 담수 수조에 담가 로프 표면에 부착된 불순물을 제거하였으며, 1주일간 그늘에서 자연건조 시킨 후 감태 유주자 채묘에 사용하였다.

유주자 채묘

감태 성숙 모조는 2006년 11월에 제주도 외도동 연안에서 채취하였다. 시료는 Ice box에 수용하여 실험실로 옮긴 즉시 멸균해수로 세척하여 부착물을 제거한 후 자낭반 부분만을 절취하여 실온보다 5°C 낮은 해수를 수용한 수조에 투입하여 유주자의 방출을 유도하였다 (Fig. 2A). 채묘는 유주자의 방출 여부를 현미경으로 확인한 후 생분해성 그물망 (BPS 이식망)을 4시간 동안 유주자액에 담가 유주자가 부착하도록 하였다. 감태 유주자가 착생된 생분해성 그물망은 0.5톤 수조에 옮겨 자연조건하에서 수조배양을 실시하였다. 수조배양 기간중 실내조도는 $20\text{--}60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 였으며, 수온은 $21\text{--}19^\circ\text{C}$ 및 염분 농도는 $31.6\text{--}30.7$ psu 범위였다. 배양용 수조는 지수식으로 air를 공급하여 유동을 주었으며, 감태 배우체가 수정하여 약 $100\mu\text{m}$ 엽장의 아포체로 자랄 때 까지 약 2개월 동안 실내 수조배양을 수행하였다. 배우체 및 아포체의 성장 확인은 채묘시 생분해 이식망과 함께 채묘에 사용한 생분해 그물의 단편을 현미경하에서 관찰하여 측정하였다.

가이식

감태 유주자가 착생된 생분해성 그물망은 2007년 1월에 전남 완도군 약산면 장용리의 시험어장으로 옮겨 5개월간 수심 2m의 연승시설에 부착하여, 가이식을 실시하였다 (Figs. 2B-D). 평균 엽장은 9.5cm 였다.

이식 및 성장 측정

생분해성 그물망은 2007년 5월에 제주도 제주시 외도동

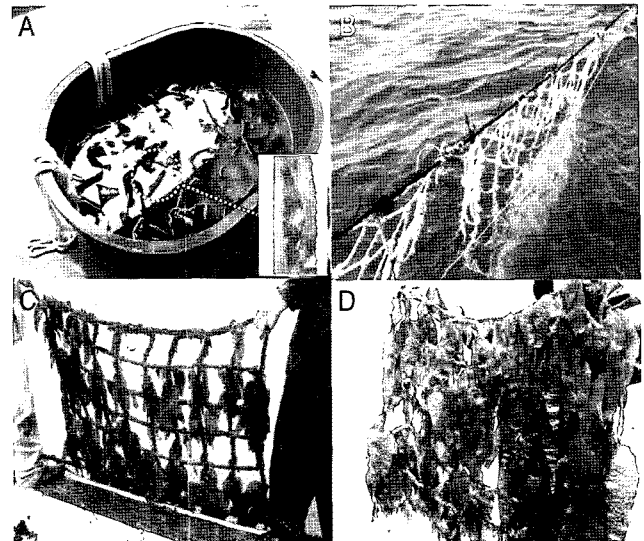


Fig. 2. Seeding and nursery culture of *Ecklonia cava* by biodegradable polybutylene succinate (BPS) multifilament. A: Zoospore seeding from the mature sorus. B: Nursery culture after 2 month culture indoor culture tank. C: Young thalli after 3 month nursery culture in situ. D: A unit of BPS net covered with young frond after 5 month nursery culture in situ.

연안 수심 12m의 인공 콘크리트 구조물에 이식시켰다. 이식된 감태의 성장 측정은 비파괴적 방법으로 SCUBA 다이빙에 의한 수중현장에서 감태의 엽장, 엽폭, 주지길이 및 포복지 길이를 측정하였다. 또한 이식망의 마모 정도는 로프의 미세 filament에서 나타나는 절단 유무로서 판단하였다. 이식 해역의 수중광량 및 수온은 이식망에 Hobo data logger (Hobo UA 002-64, USA) 및 수온센서 (Hobo UTBI-001, USA)를 부착시켜 2008년 1월부터 12월까지 모니터링하였다. 수온 및 광센서는 2개월 간격으로 새것으로 교체하여 데이터를 분석하였다.

결과 및 고찰

이식지역의 환경조건

감태가 이식된 해역의 일간 평균수온 및 수중광량의 변화는 Fig. 3과 같다. 일간 평균수온은 2월에 13.3°C 로 최저치를 보였으며, 8월에 27.0°C 로 최고치를 나타내었다. 일간 누적 수중광량은 $0.2\text{--}4.5 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 겨울철에 변화가 매우 심하였으나, 5-7월경에는 다른 시기보다 그 변화의 폭이 비교적 작은 것으로 나타났다. 감태류의 양식 과정중 감태의 성장에 직접적인 영향을 미치는 수중광량에 관하여 Hwang et al. (2009)은 곰피의 가이식 기간중에는 수심 2m (수중광량 $671 \pm 377 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 양성 기간중에는 수심 1.5m (수중광량 $925 \pm 340 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)가 적당하였다고 보고하였다. 이는 탁도가 높은 남해안 해역에서 연승 로프양식 기법을 이용한 결과로, 본 시험이 수행되었던 비교적 제주도 해역의 경우, 감태의 이식 수심인 12m 지역에서 수중광량은 $601 \pm 433 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 Hwang et al. (2009)이 보고한 곰피의 생육에 필요한 수중광량과 유사하였다.

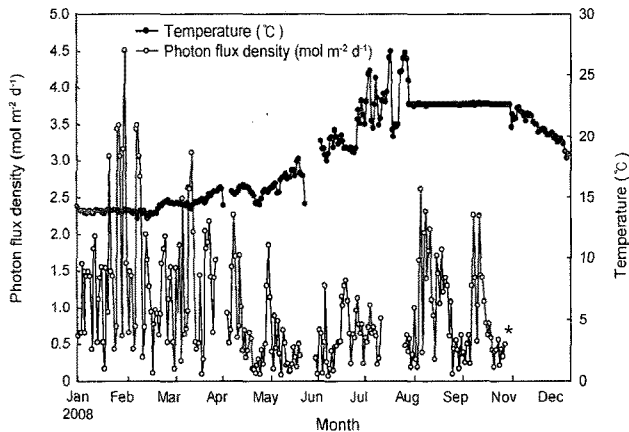


Fig. 3. Fluctuations of seawater temperature and underwater irradiance between January and December 2008 at the experimental site in Jeju, Korea. Temperature and light intensity were monitored by UTBI-001 and Hobo UA 002-64 sensor (USA) on the transplantation rope of *Ecklonia cava* in the experimental site. Light intensity (lumens ft²) measured using Hobo data logger was converted to photon flux density ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) by concurrent quantum measurements using an LI-1400 data logger and an LI 193SA (LI-COR, Inc.). Daily photon flux density ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) was calculated as the summation of quantum flux over each 24h period. Those temperature and irradiance sensor were bimonthly changed. * Sensor malfunctioned and lost data.

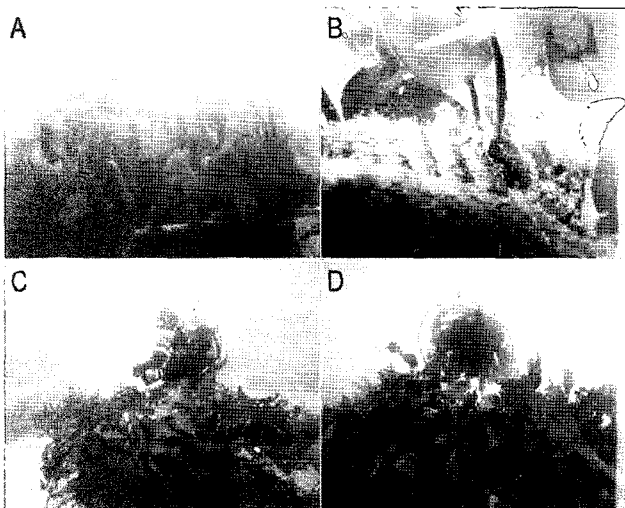


Fig. 4. *Ecklonia cava* with biodegradable polybutylene succinate (BPS) multifilament net transplanted at 12m depth of Jeju, May 2007. A: Young thalli after one month of transplatanon at June 2007. B: Holdfast of *E. cava* grows on the BPS net successively after 2 months of transplatanon. C,D: Adult thalli after 11 and 15 months of transplatanon.

생분해성 로프를 이용하여 이식된 감태의 성장

본 연구에서는 2007년 5월에 제주도 외도동 수심 12m 저점으로 이식된 감태 엽체는 Fig. 4와 같이 이식환경에 적응하여 정상적으로 생육하였다. 이식된 감태 엽체의 생장은 Table 1과 같이 2007년 7월까지 지속적인 엽체의 길이생장이 이루어

져 15.2±5.7 cm 였으나 수온의 증가에 따라 8-10월에는 10.9±3.3~14.5±7.2 cm로 평균엽장이 감소하였다. 이러한 경향은 2008년의 경우에도 유사하여, 6월까지 지속적인 길이생장이 이루어져 최대 37.3±11.0 cm까지 자랐다가 8월 이후에는 수온의 영향으로 엽체의 길이생장이 감소하다가 수온이 하강하는 10월부터 다시 길이생장이 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 생분해성 그물망을 이용한 이식 감태의 길이생장은 가을에서 다음해 봄까지 지속적인 증가 경향을 나타내었는데, 이는 Hwang et al. (2009)에서 나타난 곰피의 성장 패턴과 유사한 경향을 보였다.

Table 1. Growth of *Ecklonia cava* after transplantation using biodegradable polybutylene succinate (BPS) multifilament net between May 2007 and December 2008*

Month	Growth				Months after transplanta-tion	Degrada-bility of BPS rope**
	Length (cm)	Width (cm)	Stipe length (cm)	Length of the largest holdfast (cm)		
May 2007	9.2±1.5	3.0±0.2	0.9±0.2	0.5±0.2	0	-
July	15.2±5.7	5.8±1.4	2.4±2.2	1.5±0.7	2	-
August	14.5±7.2	6.1±2.3	2.2±1.4	2.5±1.1	3	-
October	10.9±3.3	6.4±3.7	1.8±1.1	3.5±1.2	5	-
February 2008	23.5±9.2	4.6±0.7	5.5±3.4	3.5±1.4	9	-
April	31.7±8.6	5.9±0.8	7.4±4.2	3.7±1.7	11	-
June	37.3±11.0	6.5±0.6	9.7±4.5	3.8±1.4	13	-
August	35.0±8.3	6.3±0.6	10.4±5.4	4.0±1.7	15	D
October	34.4±8.1	5.4±1.4	8.8±1.7	4.1±2.2	17	D, L
December	48.2±10.2	6.0±1.2	12.5±1.5	4.2±2.4	19	D, L

* Values are mean±s.d.

** -: not observed, D: few part of the rope were degradable, L: lost *E. cava* thalli

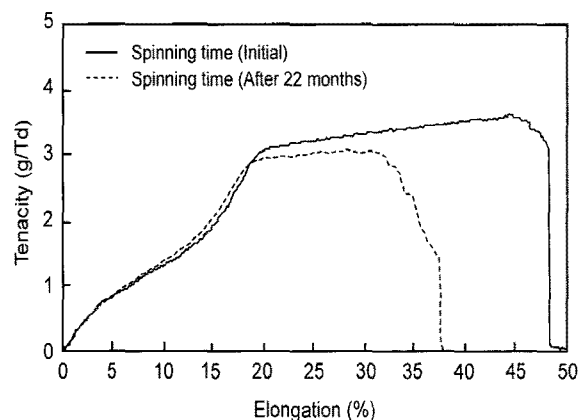


Fig. 5. Tenacity and elongation rate of the biodegradable polybutylene succinate (BPS) multifilament rope. The tenacity measured by tensiometer (3345, Instron Co., USA) under 400mm/min of tensile velocity, 20±2 °C of temperature and 65±2% of humidity.

이식 5개월 후인 2008년 10월에는 감태의 포복지 최대길이 가 3.5 ± 1.2 cm로 자라 (Table 1), 이식 로프를 벗어나 인접한 기질까지 방사상으로 뻗어나가는 것이 관찰되었으며, 이식 15개월 후인 2008년 8월에는 감태 포복지 길이가 4.0 ± 1.7 cm에 도달하여 기질에 견고히 부착하였다. 이식 15개월 이후부터는 생분해성 그물망의 일부 filament가 마모되어 끊어져 있는 것이 확인되었다 (Table 1). 본 실험결과 감태의 채묘 및 가이식에 소요된 기간은 7개월, 그리고 이식 후 포복지에 의한 착생까지 소요된 기간은 15개월로 나타났다.

생분해성 로프의 물성변화

생분해성 로프의 방사 초기 BPS의 물성은 절단강도가 3.5g/Td 였으며, 이때의 신장률은 36%였다. 그러나 로프를 22개월 경과시킨 시점에서의 절단강도와 신장률은 각각 3.0g/Td , 32%로 방사 초기에 비하여 크게 감소한 것으로 나타났다 (Fig. 5). 즉, 생분해성 로프의 내구성을 고려한다면 로프의 직경이 본 실험에서 사용된 12mm 보다 작은 10mm의 BPS는 해수중에서의 내구연한이 12mm BPS 보다 더 짧을 것으로 사료된다. 따라서 해중림 조성용 해조류의 부착 자재는 본 실험에서 사용된 생분해성로프 (12mm, BPS multifilament, 500 Td/96)와 유사한 유연성을 가지면서도 직경은 가늘고, 내구성을 보다 향상시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

생분해성 폴리머의 분해를 일으키는 요인은 박테리아나 균류와 같은 미생물의 작용 (Gross and Kalra, 2002), 이 외에도 광 (Wang et al., 2004; Kim et al., 2000; Lee et al., 2001; Park and Bae, 2008)에 의해서도 분해가 이루어지게 되므로, 앞으로 이러한 생분해성 로프를 바다숲 조성에 직접 상용화 또는 보편화하기 위해서는 해수 중에서의 생분해성 로프의 내구성 및 내구력뿐만 아니라 다양한 해양 미생물 또는 박테리아, 수중광에 의한 성장 변화에 대한 다양한 실험이 수반되어야 할 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 국립수산물과학원 (RP-2009-RE-001)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- Choi CG, Kim HG and Sohn CH. 2002. Effect of transplantation of *Ecklonia stolonifera* Okamura with adhesive glue. J Korean Fish Soc 35, 608-613.
- Dawes CJ. 1998. Marine botany. John Wiley and Sons, Inc NY, 480pp.
- Gross RA and Kalra B. 2002. Biodegradable polymers for the environment. Science 297, 803-807.
- Hwang EK, Baek JM and Park CS. 2009. The mass cultivation of *Ecklonia stolonifera* Okamura as a summer feed for the abalone industry in Korea. J Appl Phycol 21, 585-590.
- Kim TH, Kim KH, Kim JO and Jeong EC. 2000. Resistance to weathering with materials for fisheries facilities-photodegradation mechanisms of netting twines for fisheries facility. J Korean Soc Fish Tech 36, 45-53.
- KSK 0409. 2006. Test method for breaking force and elongation at break of yarn: single-end method. Korean Standard Association, 1-6.
- Largo DB and Ohno M. 1993. Constructing an artificial seaweed bed. In: Seaweed cultivation and marine ranching. Ohno M and Chritchley AT, eds. JICA, Tokyo, 113-130.
- Lee SJ, Sur SH, Hong KM, Shin YS, Jang SH, Kim BS and Shin BY. 2001. A study on the degradability and mechanical properties of aliphatic and aliphatic/aromatic polyester composites. J Korean Ind Eng Chem 12, 868-876.
- Matsuoka T, Nakashima T and Nagasawa N. 2005. A review of ghost fishing: scientific approaches to evaluation and solutions. Fish Sci 71, 691-702.
- Park SW and Bae JH. 2008. Weatherability of biodegradable polybutylene succinate (BPS) monofilaments. J Korean Soc Fish Tech 44, 265-272.
- Park SW, Park CD, Bae JH and Lim JH. 2007. Catching efficiency and development of the biodegradable monofilament gill net for snow crab, *Chionoecetes opilio*. J Korean Soc Fish Tech 43, 28-37.
- Sheldon WW. 1975. Trap contribution of losses in the American lobster fishery. Fish Bull 73, 449-451.
- Sohn CH. 1993. *Porphyra*, *Undaria* and *Hizikia* cultivation in Korea. Korean J Phycol 8, 207-216.
- Wang YZ, Yang KK, Wang ZL, Zhou Q, Zheng CY and Chen ZF. 2004. Agricultural application and environmental degradation of photo-biodegradable polyethylene mulching films. J Polymers and Environ 12, 7-10.

2009년 3월 23일 접수

2009년 5월 13일 수정

2009년 10월 1일 수리