

해중립 조성을 위한 생분해성 PBS 로프의 제조 및 응용

박성욱·황은경*·배재현

국립수산과학원 수산공학과, *국립수산과학원 해조류연구센터

서 론

오늘날 수산업에서 사용되고 있는 대부분의 어망 및 로프의 자재는 Polyamide (PA), Polyethylene (PE) 및 Polypropylene (PP) 등 방향족 고분자 물질로 제작되고 있어 내구성이 우수하지만 사용기간이 5년 이상일 것으로 기대되는 것은 그리 많지 않다. 더구나 인건비의 상승으로 기존 어구를 수리, 수선하는 것보다 신 제품으로 교체하여 사용하는 것이 비용측면에서 절약할 수 있기 때문에, 이들 제품의 수명은 점점 짧아지고 있는데 비해 그 소비량 증가로 해양생태계 및 환경오염 문제를 야기시키고 있다. 어업활동 중 어구유실로 인해 발생하는 유령어업의 문제는 1970년대 중반부터 과학자들 사이에서 그 피해를 인식하기 시작하였으며(Sheldonm 1975), 1995년 국제식량기구에서는 유령어업이 수산자원에 심각한 영향을 주는 요인으로 추정하였다. 해조류 양식업에 있어서의 PP로프에 의한 피해도 점점 심각해지고 있다. 미역, 다시마, 김 등 해조류 양식에 사용되는 로프의 소비량은 매년 증가하고 있는 반면 회수되지 않고 양식장에 버려지는 양이 점점 많아지고 있다. 또한 갯녹음 해역을 복원하기 위한 수단의 일환으로 PP로프에 해조류 유주자를 채묘시킨 후 바다에 시설하고 있다(Lim et al., 2007). 이러한 PP로프는 해조류가 해저 암반에 착생된 후 수중 폐기물로 남아 있게 된다. 이는 폐기된 방향족 고분자 합성섬유가 해수 중에서 생물체 및 효소작용에 의해 분해되지 않는다는 것이 그 근본원인이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로 최근 생분해성 PBS 물질을 이용한 단일섬유를 방사하여 자망 및 통발용 그물감으로 개발되고 있다(Park et al., 2007a; 2007b; Park and Bae, 2008).

이 연구에서는 환경친화적인 해조장 조성을 위해 PBS 물질을 이용하여 복합섬유를 방사하여 물리적 특성을 분석하고, 로프로 제작하여 대형갈조류인 감태(*Ecklonia cava*)의 유주자를 채묘시킨 후 제주연안에 이식 실험하였으며, 그 실용 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

방사 및 물성 분석 실험에 사용된 시료는 (주)이래화학에서 생산하는 복합섬유용 PBS 칩(grade 4560J)을 사용하였고, 칩의 물성은 Table 1에 나타내었다. 방사공정은 Fig. 1과 같이 수분 함량이 0.0005%미만으로 건조된 칩이 방사기에서 용융되어 압력에 의하여 spinning nozzle을 통해 대기중으로 압출된다. 압출된 filament는 20℃의 cooling air에 의해 즉시 냉각시킨 후 3단 연신과정을 통해 5배로 연신하여 권취하였으며, 이 때의 방사조건은 Table 2에 나타내었다. 방사된 multifilament는 500Td/96였다.

방사된 multifilament의 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±2℃, 상대습도는 65±2%였다.

Table 1. Characteristics of polybutylene succinate chip

| Item | M _n | M _w | Melting index (g/10min.) | Melting temperature(°C) |
|-------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------------|
| 4560J | 50,000 | 200,000 | 20 | 115 |

M_n : number-average molecular weight
M_w : weight-average molecular weight.

Table 2. Spinning conditions of polybutylene succinate multifilaments

| | |
|------------------------------|---------|
| Spinning temperature(°C) | 220 |
| Nozzle dimensions(mm, holes) | 0.5, 96 |
| Air temperature(°C) | 20 |
| Take-up velocities(m/min) | 2500 |

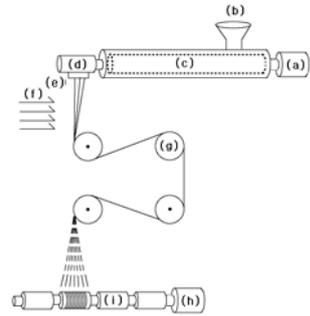


Fig. 1. Schematic diagram of direct draw pinning system.

(a) main motor (b) hopper
(c) screw (d) gear motor (e) spinning nozzle
(f) cooling air (g) roller
(h) bobbin motor (i) bobbin(take-up)

PBS 로프망 제작 및 유주자 채묘 PBS 로프망은 500Td/96을 이용하여 직경 12±0.15mm의 로프를 제작한 후 가로, 세로 각각 1m(망목의 크기 20cm)되게 제작되었다. 제작된 PBS 로프망은 3일간 유수식 담수 수조에 담가 로프 표면에 부착된 불순물을 제거하였으며, 1주일간 그늘에서 자연 건조시킨 후 감태 유주자 채묘에 사용하였다. 감태 성숙 모조는 2006년 11월에 제주도 외도동 연

안에서 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 PBS 로프망을 4시간 동안 유주자액에 담가 유주자가 부착하도록 하였다. 감태 유주자가 착생된 PBS 로프망은 0.5톤 수조에 옮겨 자연조건하에서 수조배양을 실시하였다. 수조배양 기간중 실내조도는 20-60 μmol m⁻² s⁻¹ 였으며, 수온은 21-19°C 및 염분농도는 31.6-30.7 psu 범위였다. 배양용 수조는 지수식으로 air를 공급하여 유동을 주었으며, 감태 배우체가 수정하여 약 100μm 엽장의 아포체로 자랄 때까지 약 2개월 동안 실내 수조배양을 수행하였다. 배우체 및 아포체의 생장 확인은 채묘시 PBS 로프망과 함께 채묘에 사용된 PBS 로프의 단편을 현미경하에서 관찰하여 측정하였다.



Fig. 2. Seeding and nursery culture of *Ecklonia cava* by polybutylene succinate (PBS) rope net.

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 PBS net covered with young frond after 5 month nursery culture *in situ*.

가이식 감태 유주자가 착생된 PBS 로프망은 2007년 1월에 전남 완도군 약산면 장용리의 시험어장으로 옮겨 5개월간 수심 2m의 연승시설에 부착하여, 평균 엽장 9.5cm에 도달할 때까지 가이식을 실시하였다(Fig. 2B-D).

이식 및 생장 측정 PBS 로프망은 2007년 5월에 제주도 제주시 외도동 연안으로 이식하여 수심 12m의 인공 콘크리트 구조물에 부착시켰다. 이식된 감태의 생장 측정은 비파괴적 방법으로 SCUBA 다이빙에 의한 수중현장에서 감태의 엽장, 엽폭, 주지길이를 측정하였다. 또한 로프망의 분해 정도 및 변화를 수중에서 육안적으로 관찰하였다. 이식 해역의 수중광량 및 수온은 로프망에 Hobo data logger (Hobo UA 002-64, USA) 및 수온센서 (Hobo UTBI-001, USA)를 부착시켜 2008년 1월부터 12월까지 모니터링되었다. 수온 및 광센서는 2개월 간격으로 새것으로 교체하여 데이터를 분석하였다.

결과 및 고찰

이식지역의 환경조건 생분해성 PBS 로프망을 이용하여 감태가 이식된 해역의 일간 평균수온 및 수중광량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 일간 평균수온은 2월에 13.3℃로 최저치를 보였으며, 8월에 27.0℃로 최고치를 나타내었다. 일간 누적 수중광량은 0.2-4.5 mol m⁻² d⁻¹로 겨울철에 변화가 매우 심하였으나, 5~7월경에는 다른 시기보다 그 변화의 폭이 비교적 작은 것으로 나타났다. 감태류의 양식 과정중 감태의 생장에 직접적인 영향을 미치는 수중광량에 관하여 Hwang et al. (2009)은 곱피의 가이식 기간중에는 수심 2m (수중광량 671±377 μmol m⁻² s⁻¹), 양성 기간중에는 수심 1.5m (수중광량 925±340 μmol m⁻² s⁻¹)가 적당하였다고 보고하였다. 이는 탁도가 높은 남해안 해역에서 연승 로프양식 기법을 이용한 결과로, 본 시험이 수행되었던 비교적 탁도가 낮고 투명도가 높은 제주도 해역의 경우, 감태의 이식 수심인 12m 지역에서의 수중광량은 601±433 μmol m⁻² s⁻¹로 Hwang et al., (2009)이 보고한 곱피의 생육에 필요한 수중광량과 거의 유사한 수준인 것으로 평가되었다.

생분해성 로프를 이용하여 이식된 감태의 생장 해조류는 해양생태계에 있어 생산자로서의 역할 뿐만 아니라 연안에 서식하는 어패류의 산란장, 서식처 및 먹이 제공원으로써 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, 대황 및 모자반 등의 해중림 조성은 바다숲의 조성의 대상으로 최근 크게 주목을 받고 있다. 그러나 대부분 이식시킨 성숙 엽체에서 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). 따라서 포자 단계에서 채묘된 종사를 기질에 부착시키는 것 보다는 어느 정도 자란 엽체를 이식하는 것이 보다 높은 해조류의 생존율과 환경 적응력을 갖도록 하는데 도움이 된다.

해조류 엽체의 이식을 위해 양식시설에 주로 사용되는 PP (Polypropylene) 로프 등을 이용하여 해조류 종사를 부착시키는 방법을 이용할 수 있겠으나 해조류가 자라서 부착기가 기질에 부착하게 되면 초기의 PP 로프는 오히려 해조류의 견고한 부착을 방해하거나 탈락을 조장하는 대상으로 변할 뿐만 아니라 폐기물로 방치되어 해조류의 서식공간을 점유하게 된다. 그러므로 해조류의 초기 부착 기질이 되는 로프는 해조류가 기질에 완전히 착생할 때까지 착생을 위한 보조역할을 하고 그 이후에는 자연스럽게 분해되도록 하는 것이 해조류를 이용한 친환경적인 바다숲 조성의 이상적인 하나의 형태일 것이다.

본 연구에서는 2007년 5월에 제주시 외도동 수심 12m 지점으로 이식된 감태 엽체는 Fig. 4와 같이 이식환경에 적응하여 정상적으로 생육하였다. 이식된 감태 엽체의 생장은 Table 1과 같이

2007년 7월까지 지속적인 엽체의 길이생장이 이루어졌으나 수온의 증가에 따라 8-10월에는 엽체의 길이생장이 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 감태의 이식 및 생육은 매우 건전한 결과를 보였다. 그리고 2008년 12월 조사에서는 생분해성 그물망의 일부가 분해되고 있는 것이 확인되었고, 그물망의 분해와 함께 감태 엽체의 일부 탈락도 확인되었다. 이러한 결과는 감태의 채묘, 가이식 및 이식 후 착생에 소요되는 전 기간을 약 22개월로 본다면 생분해성 로프 (12mm, PBS multifilament, 500 Td/96)가 감태 채묘 후 약 22개월 이후 서서히 분해가 진행되더라도 감태의 이식에는 아무런 문제가 되지 않는다는 것을 의미한다 하겠다.

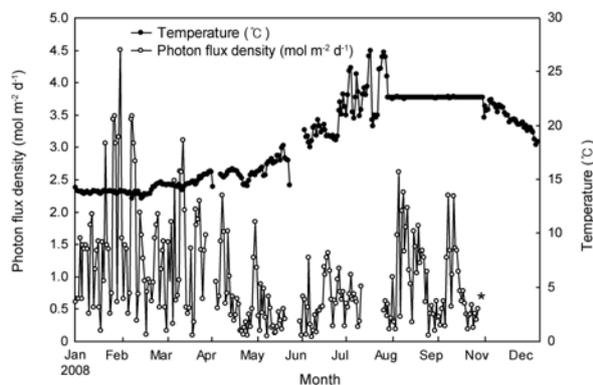


Fig. 3. Fluctuations of seawater temperature and underwater irradiance between January and December 2008 at the experimental site in Jeju, Korea.



Fig. 4. *Ecklonia cava* with biodegradable polybutylene succinate (PBS) multifilament net transplanted at 12m depth of Jeju, May 2007.

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

참고문헌

- Choi, C.G., H.G. Kim and C.H. Sohn. 2002. Effect of transplantation of *Ecklonia stolonifera* Okamura with adhesive glue. J. Korean Fish. Soc., 35, 608-613.
- Dawes, C.J. 1998. Marine botany. John Wiley and Sons, Inc. N.Y. 480pp.
- Gross, R.A. and B. Kalra. 2002. Biodegradable polymers for the environment. Science, 297, 803-807.