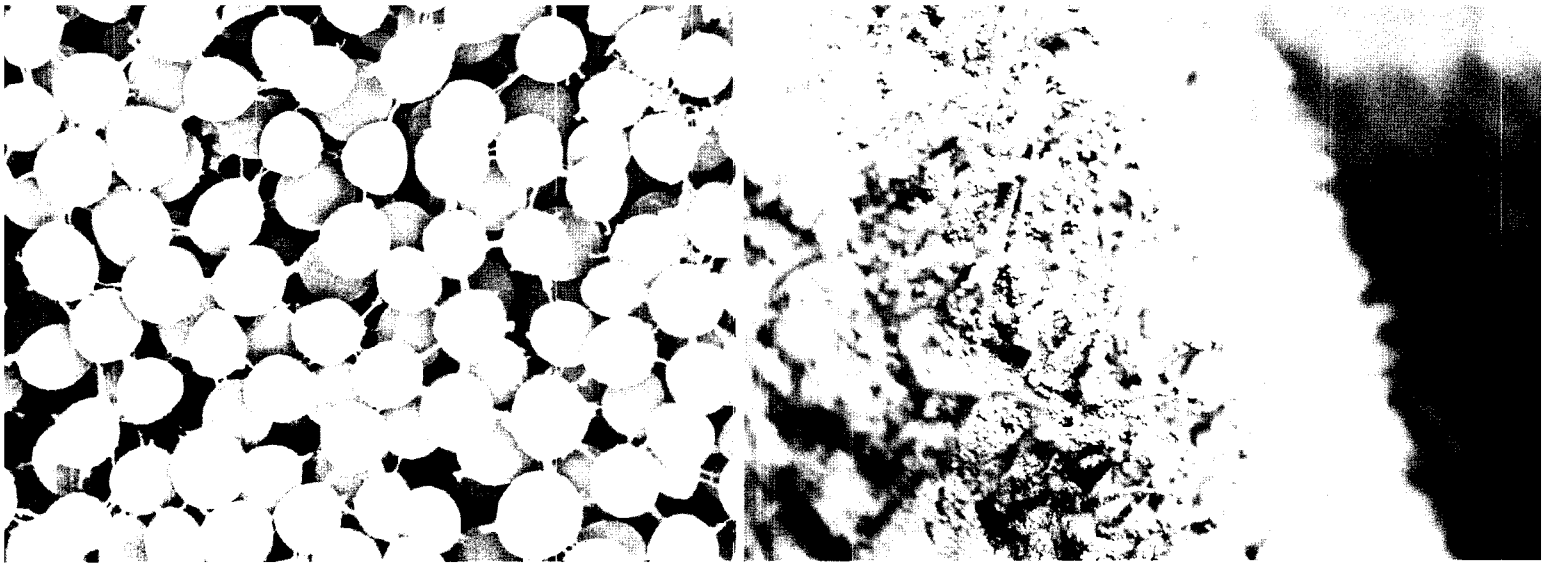

지의류의 특성과 생물소재로서 산업적 가치와 전망

허재선, 강형일 | 순천대학교 환경교육과

서 론

생물산업의 여러 분야 중에서 생물자원 유래 천연물 탐색 및 활용 분야는 최근 들어 위생, 환경 및 건강 등의 사회적 필요성 때문에 연구와 투자가 활성화되고 있다. 특히 신약, 생물농약, 새로운 기능성 천연물, 식품첨가제 등에 대한 산업체의 개발 요구가 증가하고 있으며 개발 성공 시 기대되는 수익성 창출효과가 일반 제조업에 비해 월등히 높아 거대 다국적 기업 뿐만 아니라 첨단 기술을 보유하고 있는 벤처기업들이 사활을 걸고 치열하게 경쟁하고 있는 실정이다. 시장 독점력과 수익창출력이 높은 새로운 제품 개발을 위해서 다양한 생물자원에 대한 생리활성 탐색 및 천연생리활성물질에 대한 독점적 권리 확보가 사업 성패의 관건이 되고 있으며, 따라서 자국뿐만 아니라 해외 생물자원에 대한 권리 선점 확보의 무한 경쟁이 전개되고 있는 실정이다. 생물산업의 경쟁력에 있어 중요한 것은 기존에 알려진 생물자원보다는 미연구 생물자원에 대한 탐색과 이들로부터 신규물질을 확보하는 것이 초기 투자 위험 부담은 높지만 전략적으로 사업화 성공 가능성이 높다. 지의류는 사업화에 필요한 자원 확보 기술면에서 많은 제약이 따라 현재까지도 사업화 성공 사례가 거의 없으며 기반 기술과 여건을 갖춘 상태에서는 사업화 개발 가능성이 매우 높은 생물자원이라 할 수 있다.

지의류란 무엇인가

지의류(lichen)는 단세포 조류(algae, photobionts)와 곰팡이(fungi, mycobionts)가 공생체를 형성하여 살아가는 생명체로 세계적으로 약 20,000 종이 분포하고 있으며, 한대지방에서 열대지방, 심지어 사막과 극지방의 토양, 수피, 바위 등 다양한 환경에 분포하고 있다(Dorn and Oberlander 1981). 지의류를 형성하는 조류의 대부분은 녹조류(green alga)와 남조류(blue-green alga, 또는 cyanobacteria)로 광합성을 통해 생물의 탄소원과 에너지원을 제공하고, 곰팡이는 수분을 고착하여 조류의 광합성을 도와주는 역할을 하는 것으로 알려져

있다. 지의류는 생장속도가 매우 느린 공생체로서 공생체 간의 상호작용이 수분이나 온도와 같은 물리적 스트레스나 병원성 미생물과 같은 생물학적 스트레스에 대한 저항성을 높여 준다. 지의류는 대기오염에 극도로 민감하여 기후, 다른 식물간의 경쟁관계, 고착물질 등 자연 환경적인 요인에 따라 그 분포가 많은 영향을 받는다. 특히 지의류는 공생조류에 의해 광합성을 하여 하위 생산자로서의 역할을 담당하고 있을 뿐만 아니라 토양생성과정에도 밀접하게 관여하고 있어 천이단계에 있어 가장 선구자적인 역할을 하며 생태계를 유지하는데 있어 절대적인 공헌을 하는 구성원이기도 하다.

환경오염 지표종으로서 지의류

최근에는 산업과 도시의 발달로 인한 화석연료 사용으로 대기 중으로 배출된 오염물질과 산성비 등에 지의류는 큰 영향을 받는다. 특히 아황산가스나 수은 등의 오염물질은 지의류의 지의체를 직·간접적으로 고사시키거나, 지의류의 물질대사나 포자형성을 방해하는 등의 형태로 영향을 주어 결국에는 지의류의 소멸이나 감소를 초래하게 된다. 따라서 지의류는 간접적으로나마 환경오염정도를 알 수 있는 지표종으로 사용하기에 적합한 생물체이며 그 다양성과 출현빈도가 오염도에 대한 판단 자료로 활용될 수 있어서 대기오염과 중금속 오염에 대한 모니터링 소재로서 많은 연구가 이루어지고 있다(Carreras and Pignanta, 2002; Conti and Cecchetti, 2001). 지의류 성장과 분포에 영향을 미치는 대기 중의 주요 화학물질로는 SO_2, NO_2, F 등으로 이들은 대기 중으로 방출된 후 같은 형태로 남아있다. 두 번째 오염물질은 대기 중으로 운반되는 동안 1차 오염물질을 포함하는 화학반응으로부터 나타나는 것으로 오존(O_3), peroxyacetyl nitrate(PAN), 황산(H_2SO_4)과 질산(HNO_3)과 같은 산성비의 원인이 되는 성분 등을 들 수 있다. 이산화황은 화석연료의 연소 시 나타나는 부산물로, 자연에서의 평균농도는 0.28-2.8mg/m^{3}이지만 오염도에 따라 그 값이 200mg/m^{3}이상 상승하는 것으로 보고되고 있으며, 대부분의 지의류는 60mg/m^3 이상의 SO_2에 노출 시 생존하지 못하는 것으로 알려져 있다. 대기 중 NO_2의 주요 원천은 화석연료의 연소에서 비롯되며, 지의류 분포에 영향을 미치는 NOx의 역치(thresholds)가 정해져 이지 않지만 NOx와 다른 질소화합물이 산성비와 아산화물질의 성분이라는 점에서 많은 고찰이 필요한 부분이라 할 수 있다. F는 용광로, 벽돌공장, 유리제조공장, 그리고 비료공장 주위에서 지역적으로 나타나는 중요한 오염물질이며, 화산활동에 의하여 대량으로 방출되기도 한다(Richardson, 1992). 많은 지의류가 이 오염물질에 민감하며 일반적으로 30-70ppm 농도에서 지의류에 상당한 피해를 주기 시작하는 것으로 보고하고 있다(Gilbert, 1971; Perkins et al., 1980).

지의류는 입자포획(particulate trapping), 이온교환(ion exchange), 세포외 전해물 흡착(extracellular electrolyte sorption), 가수분해(hydrolysis), 그리고 세포내 흡수(intracellular uptake) 등과 같은 다양한 기작으로 환경오염물질을 축적한다(Nieboer et al., 1978). 철, 티타늄, 알루미늄, 크롬 그리고 우라늄과 같은 다양한 원소의 입자들이 습하거나 건조한 상태에서 지의체에 박힐 수가 있다(Nieboer et al., 1978; Gough and Erdman, 1977). 지의류는 매우 효과적으로 납(Pb)을 축적할 수 있는 생물체이다. 납은 지의류의 음이온에 결합하여 세포외에 축적되며 수초(medulla)에 농축되며, 한번 결합된 납은 비나 바람에 의하여 쉽게 떨어지지 않는다. 지의류에 미치는 납의 독성효과는 매우 미미한 것으로 알려져 있으며 어떤 종은 약 2000 ppm의 납을 축적 할 수 있다(Lawrey and Hale, 1981). 니켈(Ni), 수은(Hg), 크롬(Cr)은 지의류 자체나 지의류 형성 조류 또는 곰팡이에 의해 쉽게 흡수되며, 각 중금속의 종류에 따라 대기에서 측정되는 양의 2배에서 수십 배에 이르는 정도까지 축적할 수 있는 것으로 알려져 있다(Lodenius and Laaksovirta, 1979; Schutte, 1977). 지의류는 종에 따라 오염물질에 대한 저항성 정도가 다르게 나타나며, 일반적으로 Hypogymnia physodes는 가장 많은 양의 납, 크롬과 니켈을 축적하는 것으로 알려져 있다. 이들 금속에 의한 지의류의 2차 대사과정에 미치는 영향으로 지의류에서만 볼 수 있는 물질인 physodic acid의 감소를 들 수 있다. 이러한 결과는 환경에 미치는 오염의 효과를 결정하는데 있어 physodic acid가 매우 민감한 생물지표가 될 수 있음을 제시해준다(Bialonska and Dayan, 2005). 일반적으로 자연환경보다 2배 이상 높은 고농도의 중금속으로 오염된 환경에서 살아갈 수 있는 지의류로는 Hypogymnia physodes, Lecanora dispersa, Lepraria incana, Xanthoria parietina 등을 들 수 있으며, 반면 거의 오염되지 않았거나 오염되지 않은 곳에서만 볼 수 있는 지의류로는 Degelia plumbea, Parmelia perlata,

Teleoschistes flavicans, Usnea subfloridana 등을 들 수 있다. 따라서 이들 지의류 분포와 분포 정도를 조사함으로써 대기 오염의 정도를 측정할 수 있는 것이다.

지의류의 산업적 활용

지의류는 오래 전부터 약용, 식용, 장식용 재료로서 여러 나라에서 널리 이용되어왔으며(Crittenden et al., 1995; Richardson, 1988), 한국산 지의류의 산업적 활용관련 연구로는 Umbilicaria esculenta로부터 glucosidase inhibitor의 분리(Lee and Kim, 2000) 등이 있다. 지의류 곰팡이에서 관찰되는 2차 대사물질 합성 경로의 특이한 점은 acteyl-polymalonyl pathway가 운용된다는 것이다(그림 1). 일반 곰팡이는 주로 "shikimic acid pathway"나 "mevalonic acid pathway"에 의해 합성되며, 따라서 최종대사산물도 우리와 친숙한 pulvinic acid라든지 steroid, carotenoid 등이 만들어지지만, 지의류 형성 곰팡이는 일반 곰팡이와 전혀 다른 acetyl-polymalonyl pathway를 이용하여 대사물질을 생산하고 최종 대사산물도 depside, depsone, depsidone, dibenzofuran과 같이 일반 곰팡이에서는 찾아 볼 수 없는 물질들이 만들어 진다. 이러한 지의류물질들은 미생물이나 벌레와 같은 생물체들에 대한 화학적 방어기작으로 이용된다든지, 극한 환경에 적응하기 위한 다양한 생태적 적응을 위하여 합성되어지는 것으로 알려져 있다. 따라서 다양한 생리활성을 지니면서도 신규성과 희귀성이 높은 물질들을 지의류에서 찾아낼 수 있는 가능성이 매우 높다. 지의류 곰팡이 배양체는 특정 스트레스 조건하에서 새로운 물질을 합성할 수가 있으며, Graphis scripta var. pulverulenta에서 분리한 graphislactones (Tanahashi et al., 1997), Graphis scripta에서 분리한 graphenone (Miyagawa et al., 1994), and Graphis desquamescens에서 분리한 graphisquinone(Miyagawa et al., 1994) 등을 예로 들 수 있다. 이외에도, Cladonia cristatella에서 분리한 cristazarins (Yamamoto et al., 1996), Arthonia cinnabarina에서 분리한 isofuranonaphthoquinones(Yamamoto et al., 2002d), Baeomyces placophyllus에서 분리한 zearalenone 유도체(Yamamoto et al., 2002e) 그리고 Amygdalaria panaeola에서 분리한 isoquinolines(Kinoshita et al., 2003) 등이 있다(그림 2).

최근에 이들 지의류 곰팡이의 대사물질은 공생체인 조류와

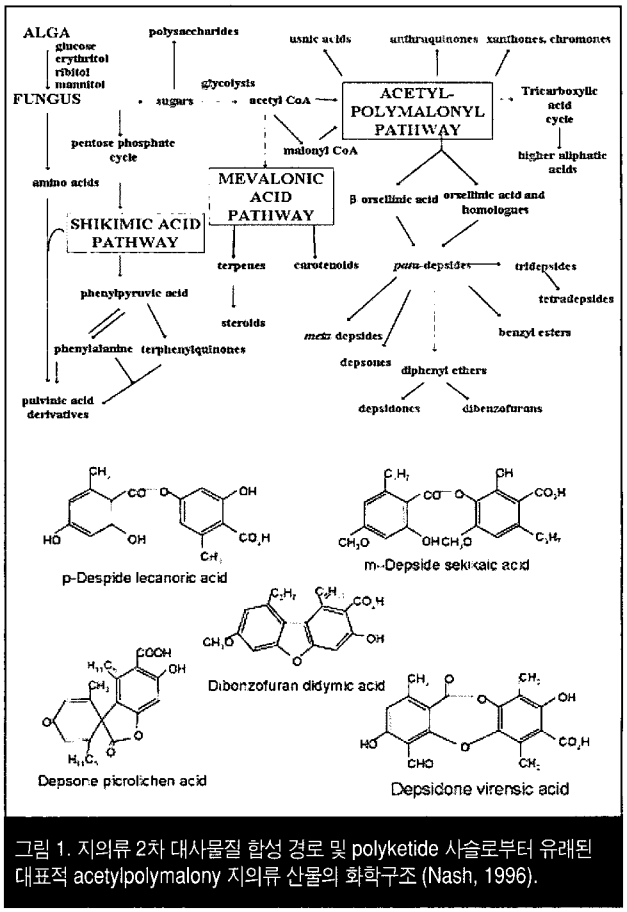

그림 1. 지의류 2차 대사물질 합성 경로 및 polyketide 사슬로부터 유래된 대표적 acetylpolymalony 지의류 산물의 화학구조 (Nash, 1996).

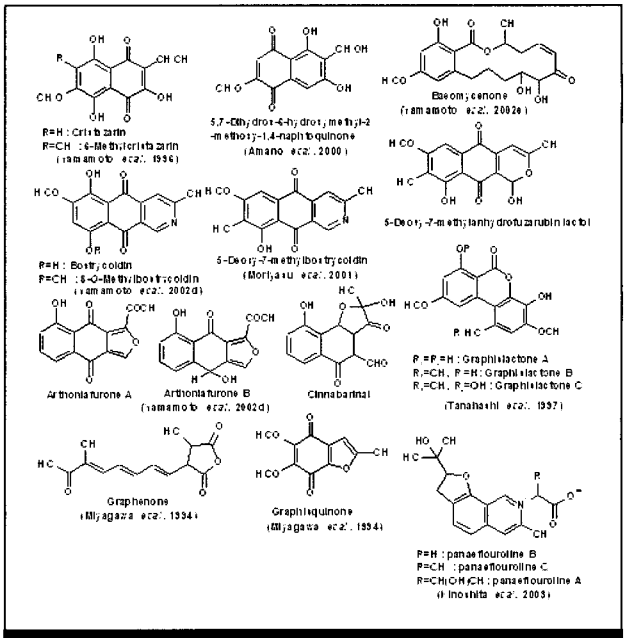

그림 2. 지의류형성 곰팡이 배양체로부터 분리한 새로운 2차 대사산물

표 1. 지의류로부터 분리한 산물 (Huneck and Yoshimura, 1996)

Lichen	Lichen substances from:			
	Intact lichen	Mycobiont	Lichen culture	Literature
Anaptychia hypoleuca	Atranorin Chloroatranorin Norstictic acid Salazinic acid Zeorin	- - - - Zeorin	+ + + + +	Ejiri and Shibata(1974)
Baeomyces rufus	Constictic acid Cryptostictic acid norstictic acid Stictic acid	Ergosterol Triglyceride		Renner and Gerstner(1982)
Caloplaca ferruginea	7-Chloroemodin Emodic acid Emodin Fallacinal Parietin	7-Chloroemodin		Renner and Gerstner(1978a)
Cladonia crispata	Squamatic acid	Squamatic acid		Ejiri and Shibata (1975)
Cladonia graciliformis	Bellidiflorin Rhodocladonic acid Squamatic acid Usnic acid	Bellidiflorin		Ejiri et al.(1975)
Lecanora dispersa	2,7-Dichloroliche-xanthone	Pannarin Dechloropannarin		Leuckert et al. (1990a)
Lecanora rupicola	Atranorin Chloroatranorin Roccellic acid Sordidone Thiophanic acid	Eugenitin Eugenitol Roccellic acid Sordidone		Fox and Huneck (1969)
Ramalina crassa	Salazinic acid Sterol *Usnic acid*	Salazinic acid Sterol *Usnic acid*		Kurokawa(1971)
Ramalina siliquosa	Atranorin Protocetraric acid Salazinic acid (+)-Usnic acid	4-o-Demethylbarbatic acid		Hamada and Ueno(1987) Hamada(1989)
Ramalina yasudae	Evernic acid Salazinic acid Usnic acid	Protocetaric acid		Yamamoto(1985)
Stereocaulon curtatum	Atranorin Lecanoric acid Miriquidic acid	Lecanoric acid		Hamada and Ueno(1990)
Usnea diffracta	Usnic acid		Usnic acid	Yamamoto(1990)
Usnea flexilis	Usnic acid	Protocetraric acid Salazinic acid	Protocetraric acid Salazinic acid	Yoshimura et al.(1989)
Usnea longissima	Usnic acid	Usnic acid		
Usnea rubescens	Evernic acid Salazinic acid Usnic acid		Usnic acid	Yamamoto(1990) Yamamoto(1985)
Xanthoria mandschuria	Erythroglaucin Erythroglaucin acid Parietin	Erythroglaucin Erythroglaucin acid Parietin		Nakano et al.(1972)
Xanthoria fallax	Atranorin Fallacinal Parietin Teloschistin	Emodin Erythroglaucin Erythroglaucincarboxylic acid *Fallacinal* Fallacinol Parietin		Nakano et al. (1972)

표 2. 순천대학교 한국지의류연구센터에 확보되어 있는 지의류형성 곰팡이 현황

(2007. 02. 01 기준)

Lichen-forming fungi	Korea	South	pole Europe	Japan	China	total
Identified	46	16	28	2	43	135
total	214	21	28	2	132	397
Stored sample at deep freezer	3,652	426	137	95	1,528	5,838

는 독립적으로 생산된다는 것이 밝혀지고 있으며, 상당수의 대사산물은 아직 동정되지 않고 있는 신물질이기도 하다 (Yoshimura et al., 1994). 생리활성물질로서 이들 대사산물은 Bacillus subtilis, Propionibacterium acnes 그리고 Staphylococcus aureus와 같은 박테리아와 Penicillium 그리고 Trichothecium과 같은 식물병원성 곰팡이의 성장을 억제하는 것으로 알려져 있다(Varita, 1973; Yamamoto et al., 1993). 지의류 곰팡이인 Acarospora fuscata, Arthonia cinnabarina, Cladia aggregata, Dibaeis absoluta, Haematomma puniceum, Ramalina exilis, Stereocaulon sorediiferum 그리고 Xanthoria elegans가 대표적 목재 부식 곰팡이인 Trametes versicolor과 Fomitopsis palustris의 성장을 억제하는 것으로 보고되고 있다(Varita, 1973). 또한 Protousnea를 비롯한 여러 종의 지의류가 멜라닌 색소 합성에 관련된 tyrosinase의 활성을 억제하는 물질을 생산하는 것으로 보고되고 있다(Behera and Makhija., 2002). Phenol oxidases의 일종인 tyrosinase는 멜라닌 생합성 경로에서 tyrosine으로부터 dopaquinone을 형성하는데 있어 촉매역할을 하는 효소로, ascorbate, arbutin 그리고 kojic acid와 같은 tyrosinase 억제제들과 더불어 화장용 미백제로서 사용되어 왔다는 점에서 관련 산업에서 지의류의 활용가능성은 크다고 할 수 있다.

결언 및 전망

생물 다양성 협약에 의한 자국의 유용한 생물자원 보호 및 확보는 앞으로 치열할 수밖에 없고, 아직 국내 지의류에 대한 연구가 매우 열악하다는 점에서 지의류에 대한 지속적인 연구가 이루어진다면, 매우 흥미로운 과학적 연구자료 외에 체계적인 지의류에 대한 정보를 제공해줄 수 있을 것이다. 항산화제, 항암제, 면역조절제, 항바이러스제, 치매치료제, 방향제로서 개발할 수 있는 물질을 생산할 수 있는 다양한 종류의 지의류가 발견됨에 따라 전 세계적으로 이에 대한 연구는 매우 광범위하고 심도 있게 진행되어 질 것으로 전망된다. 지의류 생물소재에 대한 국내연구는 2002년 순천대학교 한국지의류센터를 중심으로 지의류 생물자원확보가 꾸준히 이루어져, 뚜렷한 연구 성과와 함께 연구인프라를 구축함으로써 미래 바이오산업 발전에 있어 국가동력의 한 축을 담당할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 한국지의류연구센터에는 국내외 지의류로부터 분리하여 확보하고 있는 지의류형성 곰팡이 균주가 약 400여 종에 이르고 있으며<표 2>, 이들 균주 중에는 전 세계적으로 한국지의류센터만이 보유하고 있는 균주가 36종으로 그 가치가 매우 높다.

[감사의 글]
이 논문은 과학기술부의 지원에 의하여 연구되었음(M1-0219-14-0002).