

# 특 집

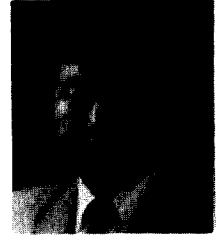
---

## Biopolymer의 개발동향

생분해성 신기능 고분자물질의 영역과 개발 동향	이용현
Biopolymer 생산공정의 개발	유영제
Pullulan	남희섭
식품관련 polysaccharide의 개발동향	이신영
<i>Bacillus</i> sp. 세균이 생산하는 Extracellular Polysaccharides	윤병대
새로운 생분해성 미생물 폴리에스터	윤성철
고점성 신규 생물고분자, Methylan	김정희 · 최준호

---

# 생분해성 신기능 고분자물질의 영역과 개발 동향



경북대학교 유전공학과 교수 이 용 현

과학기술의 진보는 천연 고분자물질을 대체하는 새로운 기능을 갖는 합성 플라스틱의 개발을 촉진시켰으며, 합성 플라스틱이 갖는 독특한 물성, 안정된 공급, 싼가격 그리고 제조 및 가공의 용이성 등의 장점으로 인해 천연소재의 한계와 제약으로부터 벗어날 수 있었고, 플라스틱을 중심으로 다양한 고분자물질이 개발되어 현대 과학문명의 한 특징중의 하나인 “플라스틱 문명”을 구축해 왔다고 할 수 있다.

그러나 대부분 현재 상품화되어 있는 플라스틱은 사용 후 분해되지 않고 반영구적이기 때문에 사용된 폐 플라스틱에 의한 환경오염문제가 심각한 사회문제 대두되고 있다. 따라서 사용시 편리성 및 내구성만을 비약적으로 향상시킨 합성 플라스틱을 대체할 수 있는, 사용후 붕괴 또는 분해되어 자연의 순환사이클로 흡수됨으로써 환경 오염의 문제를 배제할 수 있는 “생분해성 플라스틱” 내지는 좀더 넓은 의미인 “생분해성 고분자물질”이라는 새로운 기능을 가진 고분자물질에 대한 사회적인 요구가 급속히 높아가고 있다(1-4).

## 1. 생분해성 고분자물질의 영역

일반적으로 미생물이나 빛에 의해 썩거나 분해되는 고분자를 “생분해성고분자” 또는 협의로 “생분해성플라스틱”이라고 하는데, 현재 국제적으로도 용어정의나 분해도 평가방법 등이 통일되지 않는 가운데 각 개별국가에서는 독자적으로 분해성플라스틱에 대한 연구개발과 산업화가 추진되고 있다. 미국 등에서는 PE에 전분을 혼합시킨 생분괴성플라스틱도 생분해성고분자에 포함시키고 있으며, 또한 광분해성플라스틱도 생분해성고분자로 분류하는

경우도 있다. 일본에서는 70% 이상 분해되는 생분괴성플라스틱도 생분해성고분자로 하자는 의견도 있다. 이와같이 생분해성고분자란 용어의 범위에 대한 여러가지 정의가 나오고 있으며, 국제적으로 통일되지 않고 있다(4).

그동안 국내·외 관련 전문가들에 의해 발표된 여러가지 자료를 종합한 결과, 분해성고분자는 Table 1과 같이 ① 생분해성고분자, ② 생분괴성플라스틱, 그리고 ③ 광분해성플라스틱으로 크게 대별할 수 있게 된다(2, 3). 본고에서는 주로 미생물의 활동과 관련되는 생분해성고분자물질 및 생분괴성플라스틱을 중심으로 논술코쳐 한다.

## 2. 생분해성고분자물질

현재 생분해성고분자의 재료를 형성하고 있는 것은 미생물이 생산하는 플라스틱과 같은 특성을 갖는 생분해성플라스틱(bioplastics), 미생물생산 extracellular biopolymer, 미생물이 생산하는 lactic acid와 같은 biochemical을 합성원료로 한 생체적합성 신기능 고분자물질, 그리고 천연화합물을 원료로 한 생분해성고분자물질로 나눌 수 있다.

### 1) 미생물생산 Bioplastics

미생물생산 bioplastics은 미생물이 생산하는 플라스틱과 같은 기능을 갖는 biopolymer를 이용하는 것으로서, bioplastics은 poly- $\beta$ -hydroxybutyrate (PHB), PHB/PHV 등의 polyalkanoates인 intracellular 고분자가 대표적인 물질이다. PHB는 poly-hydroxyalkanoate(PHA)족의 일종인 천연 polyester로써 D-3-hydroxybutyric acid가 직선상으로 연결된 단일 중합체이며, 다양한 세균들이 세포내에 합성하는 에너지 저장물질로서 starch나 glycogen과 같은

Table 1. 생분해성 고분자물질의 영역과 용도.

구분	종류	용도	예
생분해성 고분자	Bioplastic	· 의학용 재료, 분해성 포장재 PP 대체용 등	· PHB계
	Biopolymer	· 식품 및 화학제품 첨가제	· 다당류
	Biochemical 고분자 천연고분자	· 봉합사, 방출조절성 의약품, 생체적합성 의료용 등 · 생체적합성 의료용, 포장재 등	· PCL, PL, PG 등 · 천연다당류계 · Chitin계 · Oil유래계
생분괴성 플라스틱	전분등 첨가형	· Disposable diaper liners, Trash bag, Shopping bag, Mulch film	· PE + 전분
	지방족 Polyester 첨가형	· PCL과 각종 범용 수지 blend	· PE + PCL
광분해성 플라스틱	금속이온계 Polymer M/B 첨가형	· Mulch film Shopping bag 식품포장재	· PE + 금속 이온
	Vinyl-Ketone계 공중합물 M/B첨가형	· 낚시미끼통 cover, Paper coating, Tray, Grocery bags, Cups, Plates, Mulch film	· PS, PE, PP + Vinyl- Ketone계 공중합물
	Ethylene-CO계 공중합물 M/B첨가형	· Six-pack-connector ring	· PE + Ethyl- ene-CO계 공중합물

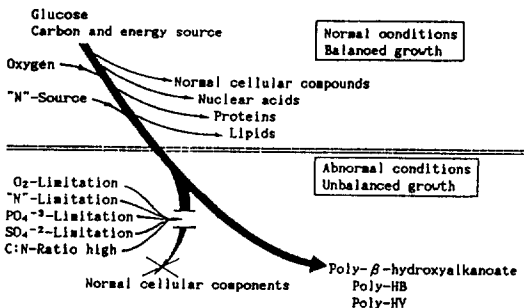


Fig. 1. 비정상적 생육조건과 세포내 에너지저장물질의 합성.

생물학적 기능을 가진다(1).

PHB는 Fig.1에서와 같이 대개 탄소원 이외의 다른 영양소원이 결핍될 때, 즉 불균형한 영양조건일 때 축적이 촉진된다. 미생물에 따라서 산소, 질소, 황, 인 혹은 칼륨 등의 영양소 제한시 PHB가 축적되는데, 특히 질소원이 제한되고 탄소와 에너지

원이 충분한 환경에서는 핵산과 단백질의 합성이 저해됨으로 동화된 탄소원의 대부분이 저장물질인 PHB로 전환된다. 그러나 외부 탄소원이 고갈되고 적당한 질소원이 제공된다면 세포내의 저장물질은 분해되어 핵산이나 단백질의 합성에 사용될 수 있다. PHB의 세포내 함량은 활발히 자라고 있는 세포에서는 비교적 낮고 성장단계에 있어서 정지기 초기에서 축적되기 시작한다(5, 6).

PHB의 특성과 용도는 Table 2와 같으며 bio-medical 분야, 의약품, 식품, 화장품, 그리고 공업용 등 여러분야에 응용되고 있다(1-4, 7, 8). 현재 연구가 진행중인 PHB 생산균주로는 *Alcaligenes eutrophus* 와 *Azobacter beijerinckii* 등이 있으며, 탄소원으로 glucose, fructose 등을 이용한 많은 연구결과가 보고되고 있다.

국내의 연구동향을 소개하면, 저자의 연구실에서는 메탄을 자화세균인 *Methylobacterium* sp. GL-10

Table 2. PHB의 적용분야 및 용도.

응용분야	특 성	용 도
Bio-medical분야	공기, 수분, 자외선에 대한 안정성 인체 무독성 생체조직과 융화성	수술용봉합사, 수술용 슝, 접골이음쇄 가재, 유화제 1회용 의료기, 부인위생용품 인공장기(인공신장, 인공폐) 항의혈성 생체고분자막(혈장, 체액 등의 여과와 투석) 인공피부
의약품 식품 화장품	서방성(controlled release) 무독성, 다공성 기체차단 효과 압전성 자외선 차단효과	약품전달수단(서서히 방출-효과의 극대화) 식품 포장용 필름 특수 포장재 압력감지장치 합성향료, 호르몬, 항생제, 의약품 등에 광학이성체 이용 다이어트 식품(포만감) sun screen용 cream류
공업용	생물분해성 PE, PP와 물리, 화학, 기계적 유사성	Polyester(PE) 대체용 Polypropylene(PP) 대체용

Table 3. 각국의 PHB 연구 및 생산기술 현황.

국 명	업체 및 연구기관	연구 및 생산기술
영 국	Imperial Chemical Industries(ICI)	최초로 PHB를 상품화시킨 업체 포도당을 원료로 cell mass의 70% 축적 1,000 Metric ton/년 규모, 순도 95% PHB생산 3-HB와 3-HV의 공중합체 'PHBV(Biopol)' 시판(0-47% 3-HV)
미 국	MIT  James Madison 대학 W.R. Grace사	PHB 합성 gene의 <i>E. coli</i> 및 식물체로의 cloning 및 발현연구, 대사공학적 연구 PHB 합성 gene을 대장균에 cloning하여 80%이상의 PHB 획득 상업성타진을 위한 시험생산 연구중
일 본	Mitsubishi Rayon 동경공업대 나고야 대학 오사카 대학 ICI Japan	새로운 균주 이용 74%의 PHB 축적 값싼 4-butanediol 이용한 copolyester 생산 Methanol 이용한 PHB 고농도발효법 성공 Methanol과 NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> 이용 136g/L PHB 생산(66% PHB) 산업용 공장 건설중
서 독	Gottingen 대학교 Microbiology Institute	PHB 합성에 관여하는 3 유전자 cloning 발현에 관한 연구
오스트리아	btF(biotechnologische Forschungs gesellschaft)	<i>Alcaligenes lactus</i> 에서 변종분리 cell mass의 /80%까지 PHB축적 탄소원 : sucrose, 순도 99%의 PHB 500 Kg/week 생산(15,000L)
한 국	(주)고려합섬	Fructose syrup을 기질로 유가배양하여 cell mass의 78%까지 PHB축적 Copolyester 개발 및 응용에 관한 연구

을 새롭게 분리하여 PHB의 대량생산을 위한 기초적 연구를 수행하여, 세포건조중량의 40%까지 PHB를 축적하였다(9, 10). 또한 메탄올과 propionate를 기질로 배양할 때 copolyester인 poly-3HB/3HV

(PHBV, Biopol)가 축적됨을 발견하였고, 3HV의 함량이 약 23 mol%임을 확인한 바 있는데, 이와같은 메탄올 자화성세균을 이용한 copolymer 생산은 국내외를 통하여 얻어진 최초의 발견중의 하나이며

(11), 값싼 기질인 메탄올을 원료로 한 copolyester 생산에 관한 후속 연구를 수행하고 있다.

김정희 등은 *Methylobacterium organophilum*을 이용하여 메탄올을 기질로 하여 PHB의 축적조건을 조사한 연구에서 K<sup>+</sup> 이온이 결핍되었을 때 세포중량의 58.2%인 7.1g/L의 PHB를 얻었다고 한다(12). 유영제 등은 *Alcaligenes eutrophus* 균주를 이용하여 PHB 생산을 위한 발효 최적화에 관한 배양공학적인 기초 연구를 수행하였다(13).

PHB는 PHA족의 일종으로 이들 family 중 생체내 함량이 가장 높은 편이나 stiffness와 brittleness가 커서 실제 응용면에 있어 장애요인으로 작용된다. 따라서 좀더 부드러운 물성을 가진 다양한 종류의 polyester 개발이 필요하게 되었으며, ICI사는 3-hydroxybutyric acid와 3-hydroxyvalerate의 공중합체 (3-HB/3-HV)를 개발 "PHBV(Biopol)"이라는 상품명으로 시판하고 있다(14). 또한 일본 동경공업대 Doi 교수 4-hydroxybutyric acid를 기질로 하여 4-

hydroxybutyrate와 3-hydroxybutyrate가 공중합된 새로운 polyester(3HB/4HV)를 생산하였다(15, 16). 이와같은 copolyester의 생산균주로는 ICI사가 사용되고 있는 *Alcaligenes eutrophus*가 대표적이며 이외에 *Rhodospirillum rubrum*과 *Pseudomonas oleovorans*, 그리고 *Pseudomonas* sp. 등 다른 몇종의 세균의 이용가능성도 검토되고 있다.

현재 국내외에서 진행되고 있는 PHB의 산업화 현황을 살펴보면 Table 3과 같다. 영국의 ICI사는 PHB 생산균주로 *Alcaligenes eutrophus*를 이용하여 이차배양시 glucose나 유기산을 첨가하는 2단계배양법으로 균체 건조중량의 80%까지 PHB를 축적시켰으며, propionic acid와 glucose로부터 3-hydroxybutyric acid와 3-hydroxyvalerate의 공중합체를 개발 "PHBV(Biopol)"이라는 상품명으로 시판하고 있다(14).

일본 동경공업대 Doi 교수 등은 ICI사와 같은 미생물인 *Alcaligenes eutrophus*를 이용하여 penta-

**Table 4.** 각종 미생물분비 polysaccharides의 종류.

종 류	생 산 균 주	특성 및 용도
<b>Neutral Polysaccharides</b>		
Fungal polymers		
Scleroglucan	<i>Sclerotium</i> sp.	용액상에서 고점도, 온도 및 pH안정성 우수 ; suspending, gelling or coating agent
Pullulan	<i>Aureobasidium pullulans</i>	용해성, pseudoplasticity, 무독성
Bacterial polymers		
Curdlan	<i>Alcaligenes faecalis</i>	가열시 gel형성 ; gelled food 첨가제
Dextrans	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	Plastic flow; as source for making dextran derivatives for pharmaceutical uses
Levan	<i>Aerobacter levanicum</i>	불용성, pharmaceutical uses
<b>Anionic Polysaccharides</b>		
<i>Arthobacter</i>	<i>Arthobacter viscosus</i>	고점도
Polysaccharides		높은 온도, pH 5-10에서 안정
Bacterial alginate	<i>Azotobacter vinelandii</i>	다양한 범위의 점도
Xanthan	<i>Xanthomonas campestris</i>	Ca <sup>2+</sup> 존재시 gel형성 ; textile, painting, 식품에 응용 고점도, pseudoplastic Galactomannan 존재시 gel 형성 산, 염기에 안정, 생분해성 ; oil well drilling, stabilizer food industry
Others	<i>Beijerinckia indica</i> <i>Erwinia tahitica</i> <i>Pseudomonas</i> sp.	

noic acid와 butyric acid로부터 3-HV의 함량이 0-95 mol%에 이르는 새로운 생합성법을 개발하였다(15, 16). 또한 기질을 4-hydroxybutyric acid를 세균에 공급하여 4-hydroxybutyrate와 3-hydroxybutyrate가 공중합된 새로운 polyester(3HB/4HV)를 생산하였으며, 그후 기질을 가격이 저렴한(\$ 2.25-3.0/Kg) 1,4-butanediol로 대체하여 생산가격을 \$ 6.75-7.0/Kg로 낮추는데 성공하였다(17).

오스트리아의 btF(biotechnologische Forschungsgesellschaft)는 *Alcaligenes lactus*에서 변종을 분리하고 PHB 생산에 사용하여 cell mass의 80%까지 PHB를 축적하는 결과를 얻었으며, 탄소원을 sucrose로 대체하여 생산가격을 상당히 낮출 수 있게 되었다. 또한 PHB 회수공정은 아주 간단하여 한번의 추출과 침전만으로도 99% 순도의 PHB를 얻고 있으며, 현재 1주일에 15,000 L fermentor에서 500 Kg의 PHB를 생산하고 있다(18).

국내의 경우 고려합섬(주)는 생분해성 bioplastic, PHB 개발에 성공 현재 자체소유의 pilot-plant를 이용하여 상업화를 위한 scale-up 연구와 함께 신제품을 생산하여 국내 및 일본의 여러업체와 공동으로 용도개발에 나서고 있는 것으로 알려졌다.

## 2) 미생물 생산 Extracellular Biopolymer

미생물의 세포밖으로 배출되는 점액성의 biopolymer인 extracellular polysaccharides가 이에 속하며, 대표적 예로는 xanthan gum, alginate, pullulan, curdlan, dextran, 그리고 levan 등을 들 수 있다. 이들은 여러 종류의 미생물에 의해 생산되는데, 지금까지 알려진 주요 extracellular polysaccharides의 종류 및 생산균주는 Table 4와 같다(19).

국내에서는 김정희 등은 메탄올자화성 *Methylobacterium organophilum*이 생산하는 고점성의 새로운 다당류인 Methylan에 관한 연구결과를 발표하고 있으며 그 후속연구가 기대된다(20). 윤병대 등은 새로운 물질을 분리하는 *Bacillus* sp.를 분리하여, 그 구조를 규명 중에 있으며, 이를 이용한 film 생산에 관한 연구를 수행하고 있다(21). 변시명 등은 *Aureobasidium pullulans*를 이용한 pullulan의 생산에 관한 기초적인 연구를 수행한 바 있다(22). 이신영 등은 biopolymer를 생산하는 알칼리 내성 *Bacillus* sp.를 분리하고 생산조건의 최적화에 관한 연구결과를 발표하였다(23).

## 3) 생체적합성 Biochemical 고분자

생체적합성 biochemical 고분자란 발표기술에 의해 저가격으로 제조된 아미노산, 당 polyester 등의 원료로 고분자합성기술로 만들어진 미생물에 의하여 분해되는 고분자물질을 말한다. 이 biochemical 고분자는 미생물 생산고분자가 갖고 있는 기술적 어려운 점을 보완할 수 있고 기능의 조절이 용이하여 풍부한 변화를 부여할 수 있어 이상적인 생분해성 고분자로 평가되고 있다. 이와같은 biochemical 고분자에는 polycaprolactone(PCL), polyglycolic acid(PG), polylactic acid(PL), polyorthoester, phosphagene, polypeptide 등 많은 종류가 개발되었는데(24), 현재 이들 대부분은 가격이 상당히 고가이기 때문에 Table 5와 같은 의료용 재료 등 고부가가치제품에 한해 이용되고 있는 것으로 알려졌다(25).

국내 연구 현황은 KIST의 김영하 박사팀은 Polylactic acid(PL)와 Polyglycolic acid(PG)의 합성에 관한 수년간의 집중적인 연구를 수행하여, 초기 산업화단계에 이른 것으로 알려져 있다(24).

## 4) 천연고분자를 원료로 한 생분해성고분자

천연고분자를 원료로 한 생분해성고분자는 cellulose, hemicellulose, pectin, lignin 및 저장 탄수화물인 전분 등 식물에서 유래하는 것과 새우, 게 등의 껍질을 포함한 chitin 질을 기초로 한 동물 유래의 것들이 있다.

서독의 Battele사에서는 피마자유, oleic acid가 풍부한 해바라기유, 그리고 서독에서 실험적으로 재배된 식물인 *Euphorbia lathyris*로 만든 oil 등에서 유래된 식물성유를 이용한 플라스틱 합성기술에 대한 특허를 가지고 있다(26). 이 새로운 플라스틱은 현재 생산되는 유제품외의 유시장을 확장시킬 뿐만 아니라 포장재, 전기재료, 건축재료로서도 사용될 수 있다.

## 3. 생분괴성플라스틱 (전분 함유 생분해성플라스틱)

일반적으로 생분괴성플라스틱은 전분과 같은 자연적으로 분해되는 고분자물질을 polyethylene, polypropylene 및 polystyrene 등과 같은 플라스틱에 섞어서 만들어지는 것으로써, 여기에 분해가속제로써 각종 첨가제를 넣어 분해를 촉진시켜주는 것으로

**Table 5.** 의료용으로 응용되는 생체적합성 고분자의 대표적인 예.

생체적합성 고분자	특징 및 응용
Polyglycolic acid(PG)	임상사용이 가장 먼저 승인된 합성 생분해성 고분자
Poly-lactic acid(PL)	수술용 봉합사, drug-delivery system, 정형외과용 이식재료, 혈관이식 재료로 사용 조사중
Polycaprolactone(PCL)	PG나 PL보다 매우 느린 생분해속도를 나타내는 polyester 필름이나 포말형태로 인공피부로 사용됨. 이식재료나 피임제로서 제 1상 임상시험이 완료된 상태
Polydioxanone	흡수가능한 결찰용 클립으로서 「Absolok」 <sup>®</sup> 이라는 상품명으로 판매되고 있음.
Polyanhydrides	Drug-delivery system을 위해 특별히 고안된 표면부식 고분자 현재 뇌암 등의 치료를 위한 이식용 delivery system으로서의 제 3상 임상시험 진행중.
Polycyanoacrylates	Bioadhesive로 사용됨.
Polyorthoesters	Drug-delivery system을 위해 개발되어 탐색중인 고분자
Poly( $\gamma$ -ethylglutamate)	분해되는 봉합재료와 drug-delivery를 위해 조사 중 합성 polyamino acid에 기초하고 있음.
Pseudo-poly(amino acids)	일반적인 poly(amino acid)의 기본 골격에 nonamide 결합을 끼워 넣음으로써 얻어진 고분자군 Serine 및 hydroxyproline으로부터 나온 polyester와 tyrosine으로부터 나온 polyimi- nocarbonate가 보고 고강도의 정형외과용 이식재료, drug-delivery system 및 면역활성 보조제로의 응 용이 제안되었음.

**Table 6.** 생분괴성 플라스틱의 생산기술 현황.

업 체 명	생 산 현 황
St. Lawrence 사 (캐나다)	옥수수전분(silane 표면처리, 수분 1%)을 PE에 첨가. 스위스 Roxx사와 공동개발 Ecostar-plus M/B 시판 옥수수전분 함유된 Ecostar M/B 시판
ADM(미국)	1970년 영국의 Griffin으로부터 특허권 획득 무처리전분, 자동산화제 첨가한 M/B Poly-Grade 판매
Ampacet 사 (미국)	ADM사로부터 특허권 획득 전분함유된 M/B Poly-Grade II, 전분 및 유기금속 complex가 첨가된 생-광분해성 플라스틱인 Poly-Grade III 판매
Agri-Tec 사 (미국)	USDA로부터 특허권 획득 PE, EAA에 40-60%의 gelatin화된 전분을 혼합한 분해성수지
Warner-Lambert (미국)	Capsule 형성도중 발견된 거의 전분으로 구성된 완전분해성 플라스틱 개발 전분과 물로 높은 압력하에서 injection moulding에 의해 성형 'Novon' 100 million lb/년의 생산, 의료용 gelatin capsule을 대체하여 사용
Novamont 사	옥수수전분과 산화형태의 합성고분자가 혼합 Thermoplastic과비슷하여 injection moulding, film blowing, extrusion 및 thermoform- ing이 가능 의학적이고 외과적 용도, packaging container, 건조식품용 필름 등 분야에 판매 'Mater-Bi' 5,000톤/년 생산
Ferruzzi 사 (이탈리아)	전분관련물질 50% 혼합하여 만든 생분괴성플라스틱생산 Mechanical 성질이 우수하고 여러 분야에서 응용가능

알려졌다. 이와같은 방법으로 만들어지는 생분괴성 플라스틱은 현재 미국과 이탈리아에서 활발히 연구 개발되고 있으며, 그 산업적 활용이 다른 분해성플라스틱에 비하여 신속히 진행되고 있다.

현재 미국에서는 PE에 전분을 적게는 6%에서 많게는 90%까지 섞는 생분괴성플라스틱이 실용화되고 있는데, 이는 잉여농산물의 이용과 석유자원의 절약이라는 측면에서 기대가 크다(27, 28). 이와같은 전분을 충전한 생분괴성플라스틱은 완전한 분해성을 갖는 것은 아니지만, 현재 미국, 캐나다 등지의 대학연구기관이나 민간기업에서는 사회적 필요와 정부 및 지방자치단체의 법적 규제에 대한 대응책으로서 연구개발과 그 산업화를 가속화시켜 쓰레기주머니나 쇼핑백 이외의 각종 일회용품에도 그 실용화를 확산시킬 움직임을 보이고 있다.

그러나 정확한 분해시기의 제어방법과 2차 잔유물의 유무에 대한 논란이 지속되고 있어 향후 이 분야에 대한 분해도 평가방법이나 용어정의가 국제적으로 통일되어야 할 것이며, 아울러 현재의 생산가격을 더 낮출 수 있어야만 그 용도개발은 물론 실용화를 앞당길 수 있을 것이다.

현재 세계적으로 전분충전 플라스틱에 관한 연구 및 산업화현황을 요약하면 Table 6과 같다(4, 29, 30). 특히 최근에는 미국의 Warner-Lambert사의 연구진은 거의 전분으로 구성된 플라스틱을 개발하였으며 "Novon"이라는 상품명으로 판매하고 있다(29). 이탈리아의 Ferruzzi사는 전분관련물질 50%를 혼합하여 만든 생분괴성 플라스틱을 상품화하였으며, Novamont사는 thermoplastics과 비슷하여 injection moulding, film blowing, extrusion 및 thermoforming이 가능한 "Mater-Bi"를 상품화하였다(30). 이 밖에도 현재 미국에서는 corn belt에 위치한 Iowa 주립대학, Missouri 대학 및 Illinois 대학 등에서 Corn Grower's Association의 funding하에 전분충전 분해성플라스틱에 대해 활발한 연구를 진행하고 있다.

국내의 경우 선일포도당(주)은 최근 한양대 임승순 교수팀과 공동으로 전분과 기존의 플라스틱원료를 혼합하여 1-6개월안에 분해가 되는 썩는 플라스틱 개발에 성공하여 92년부터 일반에게 보급할 계획이다(31). 강남산업(주)에서는 실용화가 가능한 캐나다 St. Lawrence사 제품의 전분함유 polyethyle계의

생분괴성 플라스틱인 Ecostar을 수입하여 상품포장용 film으로 가공하여 신세계백화점에 공급함으로써 일반 소비대중이 국내 최초로 생분해성플라스틱을 사용하기 시작하였다. 또한 합성수지가공업체인 화성인코는 전분성분의 특수첨가제를 수입, PE, PP 등에 혼합하여 비닐하우스, 쓰레기수거, 식품포장용으로 쓰이는 비닐타입의 생분괴성플라스틱을 생산하고 있다.

#### 4. 분해성 평가방법 및 분해성플라스틱의 규격제정

현재까지 이용되고 있는 분해성플라스틱의 분해성 평가방법으로는 효소, 토양, 그리고 미생물에 의한 분해성평가방법이 있다(31). 효소에 의한 분해성 평가방법은 amylase, cellulase, 그리고 protease 등 가수분해 효소의 작용결과 플라스틱의 일부가 저분자화하여 반응액 중으로 용출되어 나오는 것을 정량하는 방법이며, 분해성플라스틱의 개발을 위한 분자설계에 적합한 방법으로 평가되고 있다.

토양에 의한 평가방법은 실제로 자연환경에서의 분해성을 중시한 평가방법으로, 구미에서 주로 이용되고 있다. 그러나 이 방법은 야외토양 중 매물 시험, 바다속 침지시험, 그리고 일정한 토양을 혼합하여 항온실에서 유지하는 pot 시험법 등이 개발되고 있으나, 평가하는 시간이 매우 길고, 재현성이 낮으며, 또 분해생성물의 정량성을 평가할 수 없기 때문에 정확한 분해기구 규명에는 적합하지 않다.

미생물에 의한 분해성평가방법은 오래전부터 플라스틱 재료의 곰팡이 저항성 시험에 널리 이용되어 온 방법으로, fungi, *Actinomycetes*, *Bacillus* 등의 microorganism을 이용하여 플라스틱을 분해시킬 때 중량감소, 현미경관찰, 분자량감소, 그리고 물성저하 등을 분석하여 평가하며, 화학구조가 다른 여러가지 플라스틱 재료의 분해성을 일차적으로 탐색하여 조사하는데 적합한 방법이다. 특히 ASTM G-21에서는 플라스틱 필름의 분해성 평가의 시험 fungi로서 토양중에 가장 일반적으로 발견되는 다섯가지를 제시하고 있는데 *Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Chaetomium globosum*, *Gliocladium vireus*, *Aureobasidium pullulans* 등이며, 이들은 미생물 중 비교적 쉽게 육안으로 판별이 가능하고 위험성도



적어서 널리 받아들여지고 있다.

국내에서는 생분해성평가방법에 관한 연구가 시작되었고, 최근 한국화학연구소 고분자실의 이해방 박사팀은 PE/Starch, EVA/Starch 및 PVC/Starch 블랜드의 환경분해성에 관한 연구를 진행중이며, 공업진흥청 국립공업기술원 고분자화학과에서도 생분해성플라스틱의 표준화에 관한 연구를 수행 중에 있다.

이와같이 분해성의 평가방법에 대해서는 완전히 정립되지 않은채 이에 관한 많은 연구가 현재 진행되고 있다. 목적에 맞는 분해성플라스틱을 개발하기 위해서는 분해기작을 규명하고, 그 분해정도를 정확히 평가함으로써, 분자나 재료를 설계하여 합성 또는 가공하여야 하기 때문에 분해성 평가방법의 확립은 매우 중요한 과제라고 할 수 있다.

### 5. 결 론

생분해성플라스틱은 지구환경보존이라는 사회적 요구와 21세기 과학기술의 기초연구 발전이 접목되어 등장하였으나, 그 종류 및 기능이 제한되어 있어 기존의 플라스틱을 완전히 대체할 수 있는 단계는 아니며, 따라서 폐플라스틱에 의한 환경오염 문제를 완전히 해결할 수 있는 수준은 아니다. 그러나 환경오염을 경감시키는 차원에서 미국을 비롯한 구미 선진국에서는 점차 분해성플라스틱에 대한 의무규정의 입법화가 진행되고 있다. 이와같은 추세에 발맞추어 국내에서는 학계·연구기관, 그리고 관심기업에서 연구 개발 및 산업화를 서두르고 있지만, 아직 충분한 준비가 되어 있지 않고, 또한 산업화의 전망이 뚜렷하지 않아 관망하고 있는 형편이다.

현재 분해성플라스틱을 개발하여 산업화를 준비하고 있는 몇몇 업체들은 분해성플라스틱 가격이 대체로 기존의 플라스틱 원가에 비해 1.6-4.0배가량 높은 선에서 책정되어야만 채산성이 맞다고 예측하고 있다. 하지만 국내시장은 아직 비분해성플라스틱에 비해 생산가가 더 높은 분해성플라스틱을 사용할 수 있을만큼 제반여건이 성숙되어 있지 못한 것이 사실이다. 따라서 관련업계에서는 외국에서의 경우와 같이 환경보전이라는 대 전제하에 국가적 차원의 규제조치가 뒤따라 주어야한다고 주장하고 있다. 반면 일부에서는 아직 국내 기술수준은 미미

하여 분해성 플라스틱 사용을 의무화할 경우 일반 국민에게 부담이 될 수 밖에 없다고 주장하고 있다. 즉 현재로서는 분해성플라스틱이 실용화될 수 있도록 기술수준을 향상시키고 그 생산가를 낮추도록 노력하는 것이 급선무라는 주장이다.

그러나 분해성플라스틱에 대한 연구개발과 산업화는 물론 그 실용화가 점차적으로 확산되고 있는 세계적인 추세를 감안하고, 국민대중의 환경문제에 대한 점증하는 관심을 반영하여, 관련기업들은 기술수준의 향상, 생산가의 저하, 그리고 새로운 용도 개발을 모색하는 등 많은 노력이 필요하리라 본다. 아울러 과학기술처, 상공부, 환경처 등 정부당국에서도 학계, 연구계 및 민간기업의 생분해성고분자물질에 대한 연구 개발활동을 국책적으로 지원함으로써 신소재로서의 각종 생분해성플라스틱의 확보와 이에 따른 환경보존의 결실을 맺을 수 있도록 다각적인 정책 지원방안을 추진해 나가야 하리라 본다.

### 참고문헌

1. 이용현, 유전공학, **26**, 48, 1989.
2. 이용현, 유전공학, **35**, 44, 1991.
3. 이용현, 고분자과학과 기술, **2**, 319-331, 1991.
4. 연정희, 월간 플라스틱사이언스, p. 6, 9월호, 1990.
5. R.M. Lafferty, B. Korsatko, and W. Korsato, *Biotechnology* (H.J. Rehm ed.), Vol. 6b, p. 135, Verlag-Chemie, Berlin, 1988.
6. Holmes, P.A., *Phys. Technol.*, **16**, 32, 1985.
7. 유전공학 News Letter, 제 335호, 한국유전공학 연구조합, 1990.
8. 플라테크(주), 월간 플라스틱성형기술, p. 138, 7월호, 1990.
9. 송미연, 이호재, 이용현, 산업미생물학회지, **18**, 273, 1990.
10. 이호재, 이용현, 한국생물공학회지, **6**, 35, 1991.
11. 이호재, 박진서, 이용현, 산업미생물학회지, **19**, 94, 1991.
12. 최준호, 김정희, 다니엘 르보, 산업미생물학회지, **17**, 392, 1989.
13. 이용우, 유영제, 산업미생물학회지, **19**, 186, 1991.
14. 안광덕, *Polymer(Korea)*, **11**, 378, 1987.
15. 이동호, Y. Doi, and K. Soga, *Polymer(Korea)*,

- 12, 129, 1988.
16. Y. Doi, *Microbial Polyesters*, VCH Publishers, New York, 1990.
  17. 유전공학 News Letter, 제 340호, 한국유전공학 연구조합, 1990.
  18. 유전공학 News Letter, 제 403호, 한국유전공학 연구조합, 1991.
  19. Sutherland, I.W., *Biotechnology* (H. Dellweg ed.), Vol. 3, p. 533, Verlag-Chemie, Berlin, 1983.
  20. 최준호, 김정희, *생물화공*, 5, 75, 1991.
  21. 윤병대, 이 경, 박찬선, 안종석, 민태익, 한국산업미생물학회 1991년도 춘계학술발표대회논문 초록, p. 21, 한국산업미생물학회, 4월 26-27일, 1991.
  22. 신용철, 이현수, 변시명, *생물화공*, 4, 48, 1990.
  23. 이신영, 이범수, 이근억, *한국식품과학회지*, 23, 167, 1991.
  24. 김영하, *생물화공*, 4, 2, 1990.
  25. 박숙진, *신기술*, 5, 34, 1991.
  26. 유전공학 News Letter, 제 360호, 한국유전공학 연구조합, 1990.
  27. Griffin, G.J.L., US Patent, 4, 016,117, 1977.
  28. Otey, F.H., US Patent, 3,949,145, 1976.
  29. Anonymous, *Modern Plastics*, 13, March, 1991.
  30. 유전공학 News Letter, 제 377호, 한국유전공학 연구조합, 1990.
  31. 임승순, 월간 플라스틱성형기술, p. 242, 10월호, 1990.