

PHB(poly-β-hydroxy butyrate)계 생분해성 고분자

임 건 빈

1. 서론

우리 주변의 일상생활에서 널리 유용하게만 사용되어 왔던 합성 플라스틱 제품들이 자연계에서 쉽게 분해되지 않는 특성 때문에 오히려 토양과 하천의 오염 및 식물 성장 저해 등을 유발함으로써 심각한 환경문제로 등장하고 있다. 이러한 합성 플라스틱에 의한 공해문제의 근본원인은 이들이 토양이나 하천 등의 자연환경에서 생물체 및 효소에 의해서 분해되지 않는다는 점에 기인한다. 합성 플라스틱은 그 뛰어난 내구성 때문에 현대생활의 여러 소비재 및 특수분야에 널리 이용되어 왔고 그 사용량은 해마다 증가하는 추세에 있어 이러한 난분해성 합성 플라스틱의 사용량 증가는 필연적으로 폐기물의 축적이라는 결과를 초래할 것으로 여겨진다.

이러한 환경 문제해결을 해결하기 위한 대책의 하나로서 분해성 플라스틱의 개발이 절실히 요구되어 전세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. “분해성 플라스틱”에 대한 세부용어 정의 및 분해도 기준이 아직 세계적으로 통일되어 있지 않으나, 현재 포괄적인 의미로 사용되어지는 분해성 플라스틱에는 생분해성 플라스틱, 생분괴성 플라스틱, 광분괴성 플라스틱 등으로 대별되고 있다.

이들은 서로 물성, 분해정도 등에 차이가 있으나 각각의 고유한 특성으로 인하여 난분해성 플라스틱의 대체용으로 개발되고 있다. 이들중 완전히 분해되는 것으로 알려진 「PHB계 고분자」는 미생물에 의하여 생산되는 intracellular polyester로서 PHB(poly-β-hydroxybutyrate) 단원중합체, PHB/HV(hydroxy valerate) 공중합체 및 그 유사체인 PHAs(poly-β-hydroxy alkananoates) 등이 있다. 「PHB계 고분자」는 미생물이 만드는 천연 고분자 중에서 기존의 합성 고분자의 물성과 가장 유사한 고분자로서 특히 polypropylene과 polyester의 중간물성을 가지고 있는 것

으로 알려져 있다.

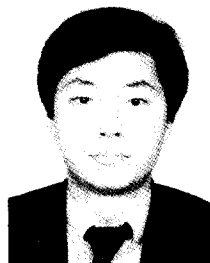
따라서 최근의 생물공학 기술의 진보와 함께 완전분해 및 우수한 물성을 갖는 「PIIB계 고분자」에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있으며 일부 국가에서는 실제 실용화가 이루어지고 있는 단계이다.

본고에서는 PHB계 고분자의 일반적인 특성과 개발현황 및 향후 개발방향 등에 대하여 서술하고자 하였다.

2. PHB계 고분자를 생합성하는 미생물

다수의 미생물들이 에너지 저장물질로서 PHB를 고분자를 사용하고 있다. 미생물은 탄소원이 풍부한 환경하에서 PHB를 생합성하여 체내에 저장하였다가 대사에 이용할 탄소원이 없어지면 축적된 PHB를 분해하여 생명활동의 에너지원으로 이용한다. 따라서 PHB는 동물의 지방과 식물의 전분과 같은 생리적 기능을 가진 물질이라 할 수 있다.

PHB계 고분자를 에너지 저장물질로 이용하는 미생물로 석박수소세균(*Alcaligenes*), 질소고정균(*Azotobacter*), 고초균(*Bacillus*), 메탄올 자화균(*Methylobacterium*), 토양균(*Pseudomonas*), 광합성세균(*Rhodospirillum*) 등



임건빈

1983	서울대학교 공과대학 공업화학학과 학사
1986	서울대학교 대학원 공업화학학과 석사
1993	서울대학교 대학원 공업화학학과 박사
1986~ 현재	고려화학실(주) 내분화학연구원, 대표이사

Biodegradable Polymer : PHB

고려합섬(주) 대덕화학연구소(Guhn-Been Yim, KOHAP Ltd. Dae-Duk Chemical R&D Institute, Hwa Am Dong 59-6, Yu Seong Gu, Tae Jeon, 305-348, Korea)

표 1. 분해성 플라스틱의 분류

분		製		構		主要商品 및 生産業體		開發 및 市販인 業體		
類		法		成						
분 해 성 플 라 스 틱	광분괴성	M/B첨가		PE,PS,PP+광산화제		싸이포렌-조양홍산		Ecolyte-Ecoplastics, Dow chemical, Ampacet, Princeton poly, lab. etc.		
	부분분해성	생분괴성	M/B첨가		PE,PS+개질전분		에코스타-강남산업		Ecostar-St. Lawrence, ADM, AMKO, Ferruzzi, Battelle	
		발효생산			미생물생산 폴리에스터		Biopol-IC.I사		PHB-bf, KOHAP etc.	
							PG,PLPG/PL,PCL		미, 일 개발단계, 물성보완 필요	
	완전분해성	생분괴성	화학합성	지방족 폴리에스터		비오노레-昭和高分子		JSP등, 일본내 시판중		
			천연물이용	천연고분자, 다당류		전분, 셀룰로스, 키틴등		개발단계, 물성보완 필요		
			천연고분자+변성PVA		마타비-노바몬트(이)		일본합성화학공업 개발중			

표 2. 각국의 난분해성 플라스틱 사용규제 사례

국 명	규 제 사 례
이 태 리	* 1991년 이후-쇼핑백, 플라스틱병에 생분해성 플라스틱사용을 의무화 * 1989년 7월 이후-염화비닐(PVC) 쇼핑백 사용을 전면 규제함 * 야채 box등 식품용기의 리사이클(recycle)을 의무화(1992년-40%이상) * 1989년 1월 이후-비분해성 쇼핑백 1매마다 100리라(약¥10) 과세 * 1989년 1월 이후-플라스틱 병에 대하여 10%의 매상세 과세
덴 마 크	* 플라스틱제 맥주병과 미네랄수 용기 등의 사용을 규제 * 포장용기 재료로 염화비닐(PVC)수지 사용규제 법안 마련중
스 위 스	* 염화비닐(PVC) 수지를 이용한 플라스틱병 및 철캔, 알루미늄 캔의 사용금지 검토중
오스트리아	* 폴리에스터(PET)병의 사용규제 및 알루미늄 캔의 사용금지 검토중 * 포장재 재료로서 염화비닐(PVC) 수지 사용규제 검토중
미 국	* 음료수용기에 분해성 플라스틱의 사용을 의무화 * 1987년부터 12개주-게란 카톤백, 생리용품, 일회용 귀저기등 각종 제품에 비분해성 플라스틱 사용을 금지함 * 캔맥주의 six-pack ring에 생분해성 소재(PHA)를 사용중
독 일	* 녹색당이 염화비닐(PVC) 수지 제품과 비분해성 포장재료의 사용규제를 강력히 요구 * 비분해성 음료수 용기사용에 대한 공탁금제 도입 추진 * 식품업계-비분해성 플라스틱제 용기에 대한 취급금지 표명 * 1989년 1월-코카콜라사의 폴리에스터(PET)용기 사용금지를 표명
한 국	(1992년 9월 환경처 고시 제1992-57호) -주요내용- * 난분해성 포장재의 사용금지-상품포장재로서 발포성 폴리스티렌의 사용금지 * 포장재질의 라미네이션(lamination) 또는 코팅(coating)재료로서 염화비닐(PVC)의 사용금지 * 상품판매시 재포장 또는 쇼핑백의 제공금지

표 3. 주요 PHB계 고분자 생산균주 및 축적율

생산균주	탄소원	배양방법	PHB 축적율(%)
Alcaligenes	Fructose	Fed-batch	70~80
Azotobacter	Glucose	Batch	65~75
Bacillus	Sucrose	Batch	40~50
Methylobacterium	Methanol	Fed-batch	55~65
Pseudomonas	Organic acid	Fed-batch	50~60
Rhodospirillum	CO ₂ gas	Batch	30~40

100여종 이상의 원핵 미생물이 알려져 있다. 그러나 이들 미생물들은 통상 자연계에서는 건조균체 중량의 10% 정도의 PHB만을 체내에 저장하고 있다. 하지만 발효장치를 사용하여 최적의 조건에서 미생물을 생육하면 건조균체 중량의 80~90%에 달하는 PHB계 고분자를 생산할 수가 있다.

전사현미경으로 관찰해보면 세포내에 PHB계 고분자의 결정체가 가득찬 모습을 볼 수가 있다.

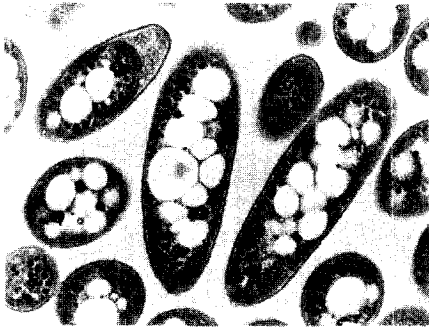


그림 1. PHB를 축적한 세균의 전자현미경(TEM) 촬영 사진.

미생물이 축적하는 전형적인 PHB계 고분자는 (R)-(-)형의 3-hydroxybutyrate(3HB) 단량체가 1만개 이상 결합된 높은 분자량의 광학활성 폴리에스터인 PHB이다. PHB는 1925년 파스테르 연구소의 M. Lemoigne에 의해서 거대 고초균인 *Bacillus megaterium*에서 처음 발견되었다.

1960년대에 들어 미생물이 생산하는 PHB계 고분자는 새로운 플라스틱으로서 주목받기 시작하여 PHB의 생합성, 분해, 구조, 물성, 생리학적 역할 등에 관한 다양한 연구가 진행되었고 특히, 1973년 이후 영국 Hull 대학의 Edwin A. Dawes에 의하여 많은 연구가 이루어졌다.

3. PHB의 생합성 경로

미생물은 당류, 유기산, 알콜, 이산화탄소 등 여러가지 탄소원으로부터 PHB계 고분자를 생합성한다. 이들 탄소원은 미생물 체내에서 여러 대사경로를 거쳐 Acetyl-CoA가 되는데 PHB는 이 Acetyl-CoA로부터 만들어지는 폴리에스터인 것이다.

잘 알려진 바와 같이 Acetyl-CoA는 중간 대사물질로서 구연산 회로(TCA cycle)에 도입되어 에너지(ATP) 생산과 아미노산 합성에 이용된다. 일단 미생물이 다량의 탄소원을 체내에 섭취하게 되면 필요 이상의 Acetyl-CoA가 축적되게 되는데 이 상황에서 미생물은 과다 생성된 Acetyl-CoA를 PHB로 변환하여 에너지 저장물질로서 체내에 축적하게 된다.

Acetyl-CoA로부터 PHB로 전환되는 대사경로에는 3종의 효소가 관여하는 것으로 알려져 있다. 먼저, Acetyl-CoA는 β -ketothiolase의 작용에 의해 이량화되어 Acetoacetyl-CoA로 환원되는데 이것이 단량체가 되어 마지막으로 Polymerase 작용으로 고 분자량의 폴리에스터가 합성되는 것이다.

미생물은 이용할 탄소원이 없어지면 체내에 축적된

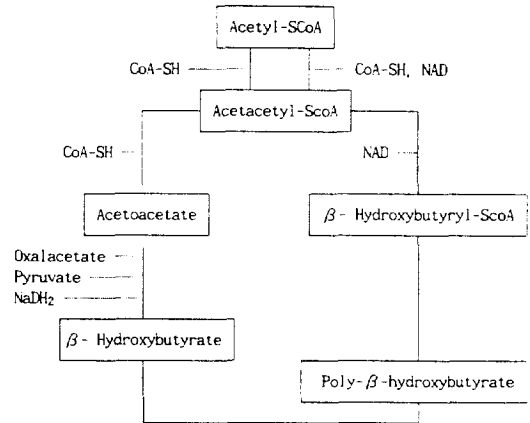


그림 2. PHB의 생합성 경로.

PHB를 분해하여 생명활동의 에너지원으로 이용한다. PHB가 에너지원으로 다시 이용되는 최초의 단계는 분해 효소인 Depolymerase에 의해서 2~20개 정도의 3HB 단량체로 된 Oligomer인데 Depolymerase는 세포질에 존재하는 Oligomer esterase에 의해서 (R)-(-)형의 3-hydroxybutyrate로 분해되어 Acetoacetic acid와 Acetoacetyl-CoA를 경유하여 Acetyl-CoA로 전환되는 것이다.

4. PHB 계열의 공중합체(PHB/PHV, PHB/4HB, PHB/PHA)

미생물이 생산하는 PHB는 3-hydroxybutyrate(3HB)가 직선상으로 연결된 단일 중합체로서 유연성이 부족하여 필름과 섬유로 가공하기 어려운 것이 단점이었다. 영국의 I. C. I. 사는 1980년대 새로운 배양방법 및 기질로서 각종 유기산(Propionic acid, Butyric acid, Valeric acid) 등을 이용하여 3HB(3-hydroxybutyrate)와 3HV(3-hydroxyvalerate)의 공중합체를 개발함으로써 유연성이 개선된 새로운 고분자를 만드는데 성공하였으며, 그 뒤를 이어 일본 동경공대의 Doi교수 등은 Valeric acid와 lactic acid를 이용하여 3HV의 함량을 95% 까지 높일 수 있는 방법을 개발하였다. 더우기, 4-hydroxybutyrate(4HB)를 탄소원으로 사용하여 완전히 새로운 형태의 3HB/4HB 공중합체를 제조하였는데 이 새로운 폴리에스터는 4HB의 조성이 증가함에 따라 유연성과 탄성이 증가되어 4HB가 40% 정도가 되면 고무와 같은 특성을 갖게 된다. 또한 값싼 1,4-butanediol을 탄소원으로 이용하여 연질에서 강질까지의 다양한 미생물 폴리에스터를 생산할 수 있는 방법도 개발하였다.

미국 M. I. T. 대학과 홀랜드의 Groningen 대학 등에서도 *Pseudomonas* 계열의 미생물을 이용하여 normal Alkane, Alkanoic acid, Alkanol, Alkanolol 등을 탄소원으로 하여

공중합체 종류	공중합체의 구조	특징
3HB/ 3HV	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \text{O} \qquad \text{CH}_3 \\ \qquad \parallel \qquad \\ \text{---}(\text{O}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{C})\text{---}(\text{O}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{C})\text{---} \\ \qquad \parallel \qquad \\ \text{3HB} \qquad \text{3HV} \end{array}$	$M_p = 130 \sim 160^\circ\text{C}$ 3HV: 0~99% 결정화도 낮음 유연성 있음 일회용 용기로 가공이 용이함
3HB/ 4HB	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \text{O} \qquad \qquad \qquad \text{O} \\ \qquad \parallel \qquad \qquad \qquad \parallel \\ \text{---}(\text{O}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{C})\text{---}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C})\text{---} \\ \qquad \parallel \qquad \qquad \qquad \parallel \\ \text{3HB} \qquad \qquad \qquad \text{4HB} \end{array}$	4HB: 40% 이상이면 고무와 같은 탄성체 폴리에틸렌과 유사한 물성 일본통산성: 어망과 낚시줄로 개발중
3HB/ PHA	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \text{O} \qquad \text{CH}_3 \\ \qquad \parallel \qquad \\ \text{---}(\text{O}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{C})\text{---}(\text{O}-\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{C})\text{---} \\ \qquad \parallel \qquad \\ \text{3HB} \qquad \qquad \text{PHA}(n=0\sim 8, m=0\sim 5) \end{array}$	주사슬 탄소수가 증가할수록 고무상태 주사슬 탄소수 증가할수록 폴리에틸렌과 유사 물성 필름가공 용이함

그림 3. PHB계열 공중합체의 구조 및 특성.

표 4. PHB계 고분자의 종류

Homopolymer계열	PHB(3HB)
PHB계열	3HB-co-3HV
	3HB-co-4HB
Copolymer계열	3HB-co-3HV-co-5HV
	3HB-co-3HV-co-4HB
PHA	PHA/E
PHA계열	PHB-co-PHA
	novel PHA

배양함으로써 PHB의 단량체인 3HB의 축적 탄소수가 더욱 길어진 새로운 형태의 미생물 폴리에스터를 개발한 것으로 보고되고 있다.

5. PHB계 고분자의 물성 및 용도

PHB계 세포내에서 생합성되는 에너지 저장물질로서 동물과 식물의 글리코겐이나 전분과 같은 생리학적 기능을 가진 천연고분자 물질이면서도 합성 고분자와 비교하여 거의 손색이 없는 물성을 지니고 있다. PHB homopolymer에 비해 3HV를 포함하는 3HB/3HV 공중합체는 결정화도

표 5. PHB의 물리적 특성 비교

항목	PHB	3HBV (10%)	3HBV (20%)	PP
Crystalline melting point(°C)	175	165	145	176
Crystallinity(%)	80	40	20	70
Molecular weight (Daltons)	500,000			200,000
Glass transition temperature	15			-10
Density(g/cm³)	1.25			0.905
Flexural modulus (GPa)	4.0			1.7
Tensile strength (MPa)	40			38
Extension to brake(%)	8	20	100	400
Ultraviolet resistance	good			poor
Solvent resistance	poor			good

표 6. PHB계 고분자의 응용분야 및 용도

응용분야	특성	용도
Bio-medical 분야	생체무독성, 생체조직과 융화성, 생체내 분해성 공기, 수분, 고습습성, 자외선에 대한 안정성	수술용 봉합사, 수술용 솜, 접골가네, 유화제, 인공장기(폐, 피부, 신장) 일회용 의료기, 부인위생용품, 항의형성 생체고분자막(혈액, 체액 등의 여과와 투석)
의약품	서방성(controlled release), 무독성	약물전달수단(인체내 D, D, S)
식품	기체차단효과 광학활성, 압전성	식품포장재료, 특수 포장재료
화장품	자외선 차단효과	압전소자, 광학이성체 분리용 칼럼 충전제 자외선 차단용 화장품 소재
농수산업	생분해성, 무독성	어망 및 낚시줄 농업용 필름, 종자용 pot
공업용	생분해성 PET, PP와 유사성	폴리에스터와 폴리프로필렌의 대체용

가 낮고 유연성이 증가되어 더욱 합성플라스틱의 물성과 유사하게 된다.

또한, PHB계 고분자는 인체에 무독성이며 생체조직과 융화성이 있어 수술용 봉합사, 수술용 솜, 접골 이음새 등의 의료용품에 사용되어 질 수 있으며, 서방성을 이용한 약물 전달수단(D, D, S), 압전성을 이용한 압전소자, 광학활성을 이용한 이성체 분리용 칼럼충진제, 무독성을 이용한 식품 포장재료 등 기존의 합성플라스틱이 갖지 못한 다양한 분야에 대한 응용 가능성도 지닌 천연 폴리에스터이다.

6. PHB계 고분자의 물성 및 용도

미생물에 의해서 생산된 PHB는 다시 자연계에서 미생물에 의해 탄산가스와 물로 완전히 분해되는데 Doi 등은 토양에서 분리한 *A. fecalis*라는 균주에서 정제해 낸 PHB Depolymerase를 이용하여 미생물 폴리에스터의 생분해 속도를 조사하였는데 4HB 공중합체를 포함한 PHB/4HB 공중합체 필름이 가장 분해속도가 빨랐으며, 그 다음이 순수 PHB 필름이었고, 3HV를 포함하는 PHB/PHV 공중합체가 가장 분해속도가 늦음을 확인하였다. 토양내에서 PHB의 분해 기작은 토양 미생물이 분비하는 Depolymerase나 Esterase 등의 효소의 작용에 의해서 뿐만 아니라 가수분해 작용에 의해서도 분해가 일어남이 확인되었는데

표 7. PHB계 고분자의 생분해성

Environment	Period for dissolution of a 1mm thick film(weeks)	Average rate of surface corrosion per weeks(μm)	Period for 100% weight loss of 50μm thick packaging films(weeks)
Anaerobic sewage	6	100	0.5
Estuarine sediment	40	10	5
Aerobic sewage	60	7	7
Soil at 25°C	75	5	10
Sea water at 15°C	350	1	50

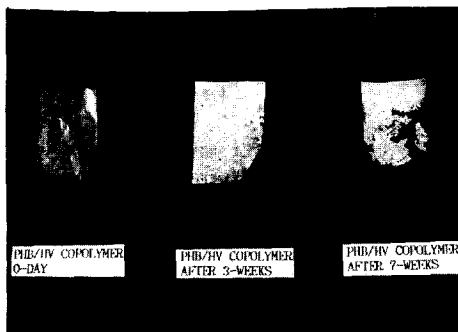


그림 4. PHB계 고분자 bottle과 film의 분해도(토양, 25°C).

두께 70μm의 폴리에스터 필름의 경우, 가수분해 작용은 P(3HB)와 3HV 공중합체가 약 100일정도 지난 후 분자량의 저하가 일어나기 시작한 반면, 4HB 공중합체는 20~30일 정도로 지난 후에 분자량의 저하를 보이기 시작하여 4HB의 함량이 증가할수록 생분해속도가 빨라짐을 확인하였다.

필자의 실험실에서도 PHB계 고분자로 bottle 및 film 등 다양한 형태로 성형하여, 토양내에서 매몰실험을 해 본 결과, 3주 경과 후부터 bottle과 film의 표면에 미생물이 번식하기 시작하면서 부분적으로 분해되어 형태가 사라지기 시작하였고 3개월 경과 후에는 형체가 완전히 분해되는 것을 확인할 수 있었다.

7. 개발동향 및 산업화 추세

생분해성 고분자로서 PHB의 응용가능성을 가장 먼저 인식한 영국의 I.C.I.사는 70년대 후반부터 연구에 착수하여 80년대 초 PHB 단일 중합체 개발을 완료하고, 80년대 중반에는 물성이 더욱 개량된 PHB/PHV 공중합체를 개발하여 현재, Bio product만을 전문으로 하는 자회사인 ZENECA를 통해 "Biopol"이라는 상품명으로 전세계에 시판중에 있으며 매년 생산량을 증대시켜 유럽 및 일본 등지의 고분자 가공 전문업체들과 다양한 용도 개발을 하고 있는 것으로 알려져 있으며 독일과 일본에서는 Biopol을 이용한 화장품 용기, 일회용 생활용품 등이 현재 시판되고 있다.

ICI는 1995년부터 연간 5,000 MT 규모의 생산을 목표로 현재 생산 설비의 증설을 추진하고 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 규모로 생산될 시 현재의 가격보다 1/10로 낮아져 더 넓은 범위에서 이용될 수 있을 것으로 전망되고 있다. ICI사의 생산공정은 현재 *Alcaligenes eutrophus*를 생산 균주로, 포도당 및 propionic acid를 기질로하여 Biopol을 생산하고 있으며 고생산성 균주 탐색 및 용도개발을 위하여 영국 및 유럽의 여러대학과 공동으로 연구 수행중인 것으로 알려져 있다.

오스트리아의 btF(biotechnologische Forschungs gesellschaft)사는 *Alcaligenes latus*의 변이종을 이용하여 pilot 규모에서 일부 생산하였으나 최근 특허 및 회사운영상의 문제로 인하여 생산이 중단된 것으로 알려져 있다.

한편 일본의 경우도 PHB계 고분자 개발 및 용도개발이 활발히 이루어지고 있으며 일부 회사에서는 상품화하여 시판하고 있다. 새로운 고분자 개발로서는 일본 이화학연구소의 Doi박사 등에 의하여 개발된 공중합체(3HB/4HB, 3HB/4HB/5HV)가 주목되고 있다.

국가적으로도 일본의 경우 통산청, 수산청이 주도가 되어 연구를 추진하고 있으며 산업계도 약 100여개사의 관련 기업들이 조합을 결성하여 생분해도 기준시험 방법 설정,

표 8. PHB 고분자의 세계적 연구개발 동향

국 명	구 분	기 관 명	연구 Group	연구 개발 현황
영 국	기 업 체	I.C.I.사	Dr. Byrom	* BIOPOL이란 상품명으로 생산중, 현재 300t/yr→600t/yr로 Capa'up 추진중 1995년 이후 5,000t/yr로 증설계획, 용도개발 위해 각국에 Sample로 시판중
	대학연구소	Hull 대학	Prof. Dawes	* 초기 I.C.I.사의 BIOPOL 개발에 참여함, I.C.I.사의 신규 PHA 개발 Project에 참여중
일 본	기 업 체	三菱化成 등		* Doi박사와 공동으로 PHB/PHA 공중합체 개발에 성공, 제법 특허 다수 보유함
		西武백화점 具印社 등 (20여개 업체)		* I.C.I.社의 BIOPOL 수지를 이용한 용도개발 추진중 →일회용 면도기, 선물용 포장재료, 화장품, 샴푸용기로 시판중 * I.C.I.-Japan 통한 sample 공급(1990년-10분)
	연구기관	理化學研究所	Dr. Doi	* 일본 수산청의 국제과제로서 PHB/PHA 공중합체 생산기술 개발 및 어망, 낚시줄로의 용도개발과 생분해성 플라스틱 평가기준 마련중
		나고야 大學 오사카 大學	Prof. Yamane Prof. Suzuki	* Methanol을 원료로 이용한 PHB 고농도 발효법에 성공(136 g/L PHB) * 1,4-butandiol 이용한 PHB/4HB 공중합체 생산기술 개발중
독 일	대학연구소	Georg-August大	Dr. Steinbuechel	* 독일 정부의 국제과제로서 PHB 생산균주 개량 및 PHA 생산기술 개발 추진중
		Hannover大	Prof. Lafferty	* PHB의 제조 cost-down을 위한 저가원료 이용 가능한 균주 개량 연구중
	기업체	Wella社 등		* I.C.I.社의 BIOPOL수지를 이용 화장품 용기 및 샴푸용기로 개발, 사용함
오스트리아	기업체	btF社		* 500 kg/週 PHB를 생산하였으나, 최근 특허분쟁등 회사운영상의 문제로 생산 중단
미 국	대학연구소	M.I.T.	Dr. Sinskey	* PHB 및 PHA 생산을 위한 균주개량을 위해 유전자 조작기술 개발 중
		James-Madison大	Dr. Dennis	* PHB 대량생산을 위해 대장균을 이용하는 유전자 조작법 및 생산 공정 개발중
		Cen.-Inov. Tech		* 저가원료를 이용한 PHB 생산기술 개발을 위해 유당(Whey)폐액 이용법 개발중
	기업체			* 다수의 업체에서 용도개발 추진중이며, 캔맥주 Six-pack ring에 BIOPOL 사용중
스 위 스	대학연구소	스위스 국립공대	Prof. Witholt	* 제조원료 COST-DOWN 위해 탄화수소를 이용한 novel PHA 생산 기술 개발중
러 시 아	연구기관소	과학아카데미	Dr. Trotsenko	* 저가원료인 메탄올을 이용하여 PHB를 생산하기 위한 연구 진행 중
네 들 란 드	대학연구소	Croningen大	Dr. Wynberg	* PHB 물성을 개량한 novel PHA 탐색 및 생산기술 개발중
캐 나 다	대학연구소	McGill大	Dr. Ramsay	* PHB 및 신규 PHA 개발 위한 균주개량 연구 및 생산기술 개발중

공동 용도개발 등의 활발한 연구를 추진하고 있다.

이외에도 미국, 유럽 등의 많은 대학, 연구소에서 새로운 구조의 PHB계 고분자 합성, 새로운 생산균주의 탐색, 유전자 재조합균을 이용한 생산, 식물체를 이용한 생산

등에 관한 연구 및 화학합성에 의한 완전 생분해성 고분자의 개발 연구가 활발히 이루어지고 있으며 매년 보고건수가 급격히 증가하고 있다.

한편 국내에서도 최근 새롭게 관심이 고조되어 많은 대

표 9. 현재 시판중인 완전분해성 플라스틱의 종류

상품명	개발업체	구 성	생산기술	단 가	생산 Capa'	장 단 점	비 고
BIOPOL	(英) I.C.I.社	미생물생산 폴리에스터	발효생산	<1990년> ¥6,000~7,000/kg <1992년> ¥3,500/kg *5ton이상구입시 ¥1,000/kg가감	300t/yr →600t/yr Capa' up ↑	*생분해성 우수 (1년~2년 : 완전 분해) *물성우수 *제조 cost가 높다 *제조공정별 분성 변화 가능성	I.C.I.社 '95년 이후 →5,000t/yr Capa' up 예정
마타비	(伊) 노바몬트 (日) 日本合成 化學工業	옥수수전분 + 변성 PVA	천연분 + 화학합성	¥800/kg *일본국산화시기 '94년~500/kg	5,000t/yr →25,999t/yr Capa' up ↑	*물성 불완전 *완전분해 불확실 *분해속도가 느림 (1년 54%) *용도개발 분야가 한정적	일본현상화학공업 (이) 노바몬트사에 서 수입, 판매중
비오노레	(日) 昭和 高分子	지방족 폴리에스터	화학합성	시제품 생산중 *'93년 9월 ¥1,000/kg	'93년 9월 3,000t/yr plant 지능 예정	*물성 불완전 *추매의 농도가 높음 *제조 cost가 높다 *용도개발 분야가 한정적 *내열성이 없음	내열성 강화후에 개 매중

학과 기업체들이 연구를 하고 있으며, 주로 *Alcaligenes* 및 *Methylobacterium*균에 의한 PHB 및 PHB/HV 수치생산의 기초 연구 단계이다. 그러나 일부 기업체에서는 PHB, PHB/HV 이외에 새로운 물성을 갖는 PHV가 개발되어 용도개발을 추진중이며, 당 연구소에서는 PHA계 biopolymer 개발의 선두주자로서 이미 biopolymer의 배양 및 생산기술, 추출, 정제기술 부문에 대하여 다수의 특허출원 및 등록이 완료된 상태이며 biopolymer의 조기 상업화를 위하여 새로운 생산 및 정제, 추출공정연구 등을 통하여 생산비용 절감에 주력하고 있다. 또한 생분해성 플라스틱 제품을 생산하기 위하여 김과운등 및 기존 석유화학계열의 범용수지와와의 블렌드 연구 등 다양한 biopolymer 가공기술 연구를 활발히 진행중에 있으며 현재 건설중인 Semi commercial plant가 완공되는 1994년 하반기부터는 국내에 수지를 일부 공급할 수 있을 것으로 보인다.

8. 향후 개발 과제 및 전망

난분해성 합성 플라스틱에 의한 환경오염 방지와 기존의 석유 화학 제품의 대체 물질이라는 면에서 최근 크게 관심을 모으고 있는 PHB계 고분자는 실용화에 있어 아직 많은 문제점이 남아 있다. 현재의 생산 기술 수준과 제한된 용도로서 대량생산 체제를 갖추는 것이 아직 경제성이 없어 일부 한정된 용도로만 공급되고 있으며, 그 가격 또한 기존 합성 플라스틱에 비하여 매우 높은 실정이다. 그러나 유럽과 일본을 중심으로 현재 넓은 범위에서 용도개발이 이루어

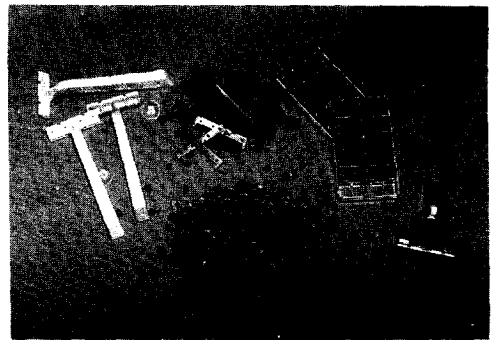


그림 5. PHB계 고분자로 성형된 제품.

어지고 있어 수지의 수요가 확대될시 현재의 가격보다 크게 낮아질 수 있을 것으로 기대되고 있다. 또한, 고생산성 균주의 개발, 새로운 저가원료의 탐색, 고농도 배양기술, 새로운 물성의 공중합체 생산기술 탐색 등의 기술개발이 대체할 수 있는 시기는 예상외로 빨라질 수 있을 것이다.

한편 국내의 연구 개발 동향도 용도 범위가 한정되어 있는 PHB 단일 중합체 및 외국 기업의 기본 특허와 관련있는 PHB/HV 공중합체 위주의 수지개발보다는 새로운 구조 및 물성을 갖는 공중합체의 개발과 다양한 분야에서의 용도개발이 요구된다.

참 고 문 헌

1. *Biotechnology*, 6b, 136 (1988).
2. D. Byrom, *TIBTECH*, 5, 461 (1987).
3. Y. Doi, *Bioindustry*, 5, 5 (1988).
4. *Plastic Science*, August, 5 (1990).
5. *Plastic Science*, September, 75 (1990).
6. *Plastic Science*, January, 144 (1991).
7. International Symposium on Bacterial Polyhydroxyalkanoates ISBP'92.
8. 윤성철, *미생물과 산업*, 18, 47 (1992).
9. 고분자의 개발과 응용, 제1회 생분해성 고분자 연구회 심포지움, 1991.
10. 대한민국 특허청, 특허공보 제2346호, 207210 (1991).
11. 3rd International Scientific Workshop on BIODEGRADABLE PLASTICS AND POLYMERS 1993.