

합성 플라스틱의 생분해

송윤석¹, 이희욱¹, 이자현¹, 최한석¹, 최용수², 김승욱^{1*}

Biodegradation of Synthetic Plastics

Yoon Seok Song¹, Hee Uk Lee¹, Ja Hyun Lee¹, Han Suk Choi¹, Ung Su Choi², and Seung Wook Kim^{1*}

접수: 2012년 7월 30일 / 게재승인: 2012년 8월 21일
© 2012 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: Synthetic plastics are important in many branches of industry. Although synthetic plastics provide numerous benefits, they also cause a significant environmental pollution problem because of their non-readily-biodegradability. Biodegradation may provide solution to the problem, but not enough is known about the biodegradation mechanisms of synthetic plastics. This review has been written to provide an overview of the current state of synthetic plastics (polyethylene, polyurethane, nylon, polyvinyl alcohol) biodegradation. Several biodegradation mechanisms of a few selected synthetic plastics are also presented.

Keywords: plastic, biodegradation, microorganism, enzyme

1. 서론

물성이 다양하고, 가공이 용이한 플라스틱이라 불리는 고분자 물질은 계속되는 연구에 의하여 점차 유리, 금속, 종이, 목재, 석재 등과 같은 기존의 재료들을 대체하여 산업용 재료로부터 1회용 소모품에 이르기까지 다양한 용도로 사용되고 있고, 그 사용량이 증가되고 있다. 그러나, 사용된 플라스틱 폐기물의 처리는 소각 또는 매립에 의존하고 있는 실정

이고, 환경호르몬 누출과 맹독성 다이옥신 검출 폐기물의 불완전 연소에 의하여 토양, 하천, 대기 등의 심각한 환경오염 문제를 야기시키고 있다 [1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 생분해성 또는 생분괴성 플라스틱의 실용화 및 사용 의무화의 압력이 거세지면서 미국, 일본, 독일, 이탈리아 등 선진국에서는 다양한 플라스틱 제품에 생분해성 고분자 사용을 의무화 하는 등 생분해성 플라스틱의 실용화가 활발히 진행되고 있다 [2]. 하지만 생분해성 플라스틱은 제조 원가가 높고, 기존 합성 플라스틱들 보다 물성이 낮아 실제 산업적 적용이 어려운 실정이기 때문에 합성 플라스틱의 사용증가는 계속될 것이다 [3].

현재, 산업적으로 가장 많이 사용되는 합성 플라스틱은 polyethylene (PE), polyurethane (PUR), nylon, polyvinyl alcohol (PVA) 등이다 [4]. 이와 같은 합성 플라스틱의 분해 촉진 방법은 광분해, 열분해, 생분해 등과 이러한 방법들을 복합적으로 사용하는 복합분해가 있다 [5]. 광분해는 태양광의 자외선 (295 nm-400 nm)을 이용하여 고분자의 산화를 유도하고, 열분해는 고분자에 고온의 열을 가하여 물성을 변화시킨다. 마지막으로 생분해는 고분자가 호기적 또는 혐기적으로 미생물에 의해 분해되는 것이다. 이러한 분해방법들 중에서 가장 효율이 높은 것은 미생물에 의한 생분해이고, 최근 광 및 열분해는 생분해를 수행하기 전 생분해를 촉진하기 위한 전처리의 개념으로 이용되는 추세이다. 따라서, 본 논문은 2000년 이후부터 보고된 난분해성 합성 플라스틱인 PE, PUR, nylon, PVA의 생분해와 관련된 연구들을 정리하고, 그 분해 기작들을 주로 기술하려 한다.

2. 합성 플라스틱의 생분해 및 평가인자

합성 및 천연 플라스틱의 생분해는 박테리아와 곰팡이 같은

¹고려대학교 화공생명공학과

¹Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, 5 Ga, Anam-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-701, Korea
Tel: +82-2-3290-3300, Fax: +82-2-926-6102
e-mail: kimsw@korea.ac.kr

²한국과학기술연구원 도시에너지시스템연구단

²Center for Urban Energy Systems, KIST, Hwarang 14-gil 5, Seoul 136-791, Korea

미생물에 의해 이루어진다. 플라스틱으로 사용되는 다양한 고분자들은 분자량이 크기 때문에 용해도가 낮고, 미생물에 의한 생분해성 또한 낮다. 따라서, 미생물의 세포막 또는 세포

Table 1. List of different microorganisms reported to degrade different types of synthetic plastics

| Plastics | Microorganism | Reference |
|----------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| Polyurethane | <i>Pestalotiopsis microspora</i> | [18] |
| | <i>Geomyces pannorum</i> | [16] |
| | <i>Phoma</i> spp. | |
| | <i>Geomyces pannorum</i> | [17] |
| | <i>Nectria gliocladioides</i> | |
| | <i>Penicillium ochrochloron</i> | |
| | <i>Bacillus subtilis</i> | [20] |
| | <i>Pseudomonas chlororaphis</i> | [21] |
| | <i>Alicyclophilus</i> spp. | [19] |
| | <i>Brevibacillus borstelensis</i> | [36] |
| | <i>Rhodococcus ruber</i> | [37] |
| | <i>Penicillium simplicissimum</i> YK | [9] |
| | <i>Brevibacillus borstelen</i> | [38] |
| <i>Penicillium frequentans</i> | [10] | |
| <i>Bacillus mycoides</i> | | |
| <i>Aspergillus niger</i> | [11] | |
| <i>Penicillium pinophilium</i> | | |
| Polyethylene | <i>Penicillium pinophilium</i> | [12] |
| | <i>Aspergillus niger</i> | |
| | <i>Cliocladium virens</i> | |
| | <i>Penicillium chrysosporium</i> | |
| Synthetic plastic | <i>Bacillus sphericus</i> | [13] |
| | <i>Bacillus cereus</i> | |
| | <i>Streptomyces</i> spp. | [14] |
| | <i>Pseudomonas</i> spp. | |
| | <i>Aspergillus nidulans</i> | |
| | <i>Aspergillus flavus</i> | |
| | <i>Staphylococcus</i> spp. | |
| | <i>Bacillus</i> spp. | |
| | <i>Pseudomonas</i> spp. | |
| | <i>Bacillus sphericus</i> | [27] |
| <i>Bacillus cereus</i> | | |
| <i>Vibrio furnisii</i> | | |
| <i>Brevundimonas vesicularis</i> | | |
| Nylon | <i>Geobacillus thermocatenulatus</i> | [28] |
| | <i>Trametes versicolor</i> | [26] |
| | <i>Pseudomonas</i> spp. | [25] |
| | <i>Fusarium solani</i> | [24] |
| | <i>Fusarium oxysporum</i> | |
| | <i>Clonostachys rosea</i> | |
| | <i>Sphingomonas</i> spp. | [40] |
| <i>Penicillium</i> spp. | [33] | |
| Polyvinyl alcohol | <i>Microbacterium barkeri</i> | [31] |
| | <i>Paenibacillus amylolyticus</i> | |
| | <i>Sphingopyxis</i> sp. PVA3 | [32] |
| | <i>Streptomyces venezuelae</i> | [34] |

벽을 통과하여 고분자가 분해되기 위해선 용해성이 있어야 한다. 효소에 의한 고분자의 분해는 세포 외로 분비된 효소와 세포 내 효소가 관여한다. 미생물의 세포 외 효소는 고분자를 oligomer, dimer, monomer로 분해하며, 이러한 과정을 해중합 (depolymerization)이라고 한다. 그 후, 이들이 미생물의 세포막 또는 세포벽을 통과하여 대사됨으로써 탄소원과 에너지원으로 사용되며, 이것을 무기화 (mineralization)라고 한다 [6]. 호기조건에서 최종산물은 biomass, CO₂, H₂O이고, 혐기조건에서는 biomass, CH₄, H₂S, CO₂, H₂O이다 [7]. 고분자의 생분해성에 영향을 주는 인자는 굉장히 다양하다. 그 대표적 인자들은 다음과 같다 [6].

- 생물적 요인: 세포 외 효소분비, 소수성 표면으로의 부착 정도, 바이오 계면활성제 등.
- 비생물적 요인: 온도 pH, 수분률, UV, 염도 등.
- 고분자의 특징: 소수성, 분자량, 기능기, 유연성, 결정화도, 입체규칙성, 고분자의 블렌드, 치환제, 공중합체, 가교, 가소제/첨가제 유·무 등.

플라스틱 생분해의 평가방법은 다양하다. 플라스틱 표면의 생물막 형성, SEM 및 AFM 분석에 의한 구멍과 균열 관찰, FTIR, DSC, NMR, XPS, XRD 분석을 통한 표면기능기 변화, 무게, 물질량, 인장강도 변화, CO₂ 발생량, halo zone 생성등이 생분해 평가를 위하여 이용된다 [5]. Table 1과 2는 위와 같은 평가방법들로부터 2000년부터 최근까지 합성 및 천연 플라스틱에 대한 생분해능이 있음이 보고된 미생물들의 분류이다.

2.1. Polyethylene의 생분해

PE는 매우 안정하고, ethylene 단량체들의 중합반응에 의하여 합성되는 고분자 물질이다. 또한, PE는 안정한 탄소-탄소 및 탄소-수소 결합, 높은 분자량, 산화 및 가수분해가 가능한 결합의 부재, 높은 소수성 때문에 미생물에 의한 생분해가 어려운 난점이 있다 [8]. 그러나 UV, 열, 강산과 같은 물리·화학적 전처리는 PE의 생분해 효율을 증가시킨다. 따라서, 이와 같은 전처리 과정이 반드시 필수적이다.

자낭균류들 (*Penicillium*, *simplicissimum*, *Penicillium frequentans*, *Penicillium pinophilum*, *Penicillium pinophilium*, *Penicillium chrysosporium*, *Aspergillus niger*)을 이용한 PE의 생분해가 활발히 진행되고 있다 [9-12]. 물리·화학적 전처리된 low-density PE (LDPE)와 high-density PE (HDPE)는 위와 같은 곰팡이들에 의해 분해되어 분자량, 무게, 결정도, 결정층 두께, 용해온도, 결정의 평균 크기가 감소하였고, 작은 결정의 함량이 증가하였다. 박테리아 또한 PE를 분해할 수 있다. Sudhakar 등은 전처리된 LDPE와 HDPE를 단일 탄소원으로 사용하여 *Bacillus sphericus*와 *Bacillus cereus*가 포함된 배양에서 1년간 분해를 수행하였다 [13]. FTIR 분석에서 carbonyl group이 증가하였고, LDPE와 HDPE의 무게, 인장강도, 결정도가 감소하였다. Usha 등은 방선균에 의한 PE 분해를 보고하였다 [14]. *Streptomyces* sp.는 6개월 동안 첨가된 PE를 약 46% 분해하였다.

Table 2. List of different microorganisms reported to degrade different types of natural plastics

| Plastics | Microorganism | Reference |
|--|---|-----------|
| Poly (butylene succinate-co-butylene adipate) | <i>Streptomyces</i> spp. | [3] |
| | <i>Aspergillus fumigatus</i> | |
| | <i>Aspergillus versicolor</i> | [41] |
| | <i>Paecilomyces fumosoroseus</i> | |
| | <i>Penicillium digitatum</i> | |
| Natural plastic | <i>Fusarium solani</i> | [42] |
| | <i>Aspergillus</i> spp. | |
| | <i>Ochrobactrum anthropi</i> | |
| Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-mercaptopropionate) | <i>Schlegelella thermodepolymerans</i> | [43] |
| | <i>Pseudomonas indica</i> K2 | |
| Poly (3-hydroxybutyrate) | <i>Acidovorax</i> sp. TP4 | [44] |
| | <i>Schlegelella thermodepolymerans</i> | [45] |
| | <i>Flavimonas oryzihabitans</i> | |
| | <i>Corynebacterium pseudodiphtheriticum</i> | [46] |
| | <i>Micrococcus diversus</i> | |

2.2. Polyurethane의 생분해

PUR은 polyisocyanate와 분자 내 urethane 결합 (carbonate ester bond, -NHCOO-)을 가지는 polyol의 축합반응에 의하여 형성된 고분자 물질이고, 가구, 코팅, 건축재료, 섬유, 페인트 등의 생산에서 사용된다 [15]. PUR 내 ester 결합 (urethane bond)은 미생물들에 의하여 가수분해될 수 있다.

Cosgrove 등은 polyester PUR이 포함된 산성 및 중성 사양토 (sandy loam soil)에서 *Geomyces pannorum*과 *Phoma* sp.가 가장 지배적으로 존재하고, 두 사양토에서 polyester PUR의 인장강도가 약 95% 감소하였음을 보고하였다 [16]. 토양의 용수량 (water holding capacity)과 polyester PUR의 생분해 사이의 관계는 Barratt 등에 의하여 조사되었다 [17]. 용수량 20-80%의 토양은 polyester PUR의 인장강도를 약 60%까지 감소시켰지만, 15, 90, 100%의 토양에서는 polyester PUR의 인장강도 감소가 측정되지 않았고, 용수량 20-80%의 토양은 *Nectria gliocladioides*, *Penicillium ochrochloron*, *Geomyces pannorum*과 같은 곰팡이가 지배적이었다. 한편, 내생균류인 *Pestalotiopsis microspora*가 단일 탄소원으로 polyester PUR만을 사용하여 호기 및 혐기 두 조건 하에서 성장할 수 있다는 흥미로운 결과를 Russell 등이 보고하였다 [18]. Ocegüera-Cervantes 등은 polyester PUR 분해능이 있는 *Alicyclophilus* sp.를 분리하였다 [19]. Polyester PUR이 첨가된 배양에서 최대 세포농도는 17.8 mg/mL이었고, 배양액에서 esterase의 활성이 있음을 확인하였다. Polyester PUR의 분해를 위한 *Alicyclophilus* sp.의 활성은 polyester PUR의 IR spectrum 변화와 SEM 분석에 의한 표면 이미지 변화에 의하여 관찰하였으며, esterase 활성이 polyester PUR분해에 중요함을 강조하였다. Rowe 등은 토양의 인공적 닫힌 생태계 (mesocosm)에서 *Bacillus subtilis*를 분리 및 동정하여 세포성장속도론과 polyester PUR분해효소의 분리와 특성에 관한 연구를 수행하였다 [20]. 0.18-1.5 mg/mL의 polyester PUR이 첨가된 배양에서 최대 비성장속도는 0.76 h⁻¹, 포화 상수는 0.086 mg/mL이었다. *Bacillus subtilis*로부터 정제된 약 28 kDa의 polyester

PUR분해효소는 phenylmethylsulfonylfluoride (PMSF), adenylmethylsulfonylfluoride (AMSF), ethylenediamine-tetra acetic acid (EDTA), bromelain에 의하여 활성이 저해되지 않는 특성을 가지고 있다. 또한, *Pseudomonas chlororaphis*의 배양액에서 7.29 U/mL의 polyester PUR분해효소 활성이 측정되었다 [21]. *Candida rugosa*로부터 유래된 lipase 역시 polyester PUR을 분해할 수 있다 [22]. 2.5 g/L의 polyester PUR과 70 µg/mL의 lipase가 첨가된 pH 7.0의 반응액을 35°C에서 1시간 동안 반응을 수행한 결과, 약 70%의 polyester PUR이 분해되었다.

2.3. Nylon의 생분해

Nylon은 amide group이 반복적으로 연결된 고분자이고, 현재 nylon 6, 66, 12 등이 산업적으로 가장 많이 사용되고 있으며, 숫자는 반복단위의 탄소수를 의미한다 [8]. 지방족 polyester와 비교하여 nylon이 가진 생분해도는 매우 낮다. 이것은 nylon의 분자사슬 내 수소결합에 의하여 발생한 강한 분자간 응집력 때문인 것으로 여겨지고 있다 [23].

Hashimoto 등과 Yamano 등은 활성오니로부터 nylon 4를 분해할 수 있는 *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Clonostachys rosea*, *Pseudomonas* sp.를 분리하였다 [24,25]. 0.33 g의 nylon 4는 28일 후, 약 49%가 분해되었고, NMR 분석을 통하여 nylon 4의 반응 중간체인 γ -aminobutyric acid가 생성되는 것을 확인하였다. 또한, Chonde-Sonal 등과 Sudhakar 등은 담자균류인 *Trametes versicolor*와 해양 미생물인 *Bacillus cereus*, *Bacillus sphericus*, *Vibrio furnisii*, *Brevundimonas vesicularis*를 이용하여 nylon 6을 분해하였다 [26,27]. FTIR 분석에서 formamide, amide, methyl, aldehyde, carboxyl group들이 새롭게 생성됨으로써 nylon 6이 분해되었음을 확인하였고, 3개월 간의 분해에서 분자량은 31%, 무게는 2% 감소하였다. 앞서 언급한 해양 미생물은 Nylon 66도 분해하였고, 분자량과 무게는 각각 42%와 7% 감소하였다 [27]. 토양으로부터 분리된 *Geobacillus thermocatemulatus*는 nylon 12의 분해능을 가지고 있다 [28].

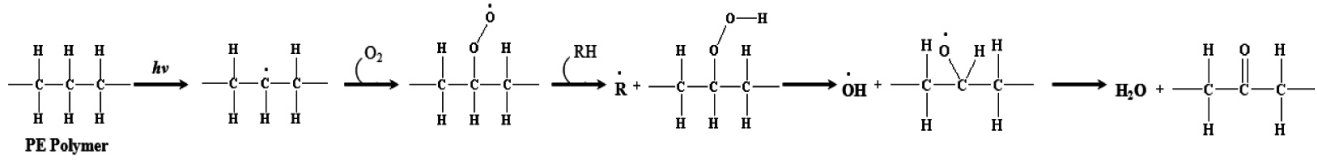


Fig. 1. Addition of carbonyl group through photooxidation of PE [35].

*G. thermocatenulatus*는 5 g/L의 nylon 12가 포함된 20일 간의 배양에서 분자량을 약 73% 감소시켰다.

2.4. Polyvinyl alcohol의 생분해

PVA는 탄소-탄소 결합에 의하여 연결된 vinyl polymer이고, vinyl acetate 단량체로부터 제조되며, 수용성이지만 열가소성의 특징을 가지고 있다 [29,30]. 또한, 높은 인장강도와 접착력의 특징을 가지기 때문에 필름 제조, 의학, 생명공학, 제지 및 요업산업 등에서 접착제, 코팅제 등으로 널리 사용되고 있다.

Choi 등은 *Microbacterium barkeri*와 *Paenibacillus anlyolyticus*를 혼합배양하여 배양 5일 후 초기농도 750 mg/L의 PVA를 42% 분해하였다고 보고하였다 [31]. Yamatsu 등은 염색공장 배수로의 활성오니로부터 단일 탄소원으로써 PVA가 첨가된 집적배양에서 PVA 분해능을 가진 *Sphingopyxis* sp. PVA3를 분리 및 동정하였다 [32]. 1% (w/v)의 PVA와 함께 *Sphingopyxis* sp. PVA3의 배양 6일 후, PVA의 90% 이상이 분해된 결과를 나타내었다. 또한, PVA의 hydroxyl group이 산화됨으로써 발생한 carbonyl group의 상당한 증가가 관찰되었고, PVA의 첨가에 의하여 과산화수소가 발생하였다. 이러한 결과들은 PVA oxidase에 의한 PVA의 산화에 의한 결과였다. Qian 등은 *Penicillium* 속 곰팡이에 의한 PVA 분해를 최초로 보고하였다 [33]. 직물공장의 활성오니로부터 분리된 *Penicillium* sp.는 0.5% (w/v)의 PVA를 단일 탄소원으로 사용하였을 때, 완전히 분해하는데 12일의 시간이 소요되었다. *Penicillium* sp.는 유도성의 PVA분해효소를 분비하고, 높은 PVA농도와 산소전달이 PVA분해효소를 합성하는데 중요한 인자이다. PVA가 포함된 *Penicillium* sp.의 배양에서 catalase의 합성이 증가한다. 이것은 PVA oxidase에 의한 PVA의 산화에 의하여 과산화수소가 생성되게 되는데 이것으로부터 세포손상을 방지하기 위하여 catalase의 합성이 증가된다. 또한, Zhang 등은 방선균에 의한 PVA분해효소 합성을 최소로 보고하였다 [34]. PVA로 오염된 토양에서 PVA를 탄소원으로 이용하는 방선균을 분리하였고, *Streptomyces venesuelae*로 동정하였다. *S. venesuelae*는 PVA를 단일 탄소원으로 사용하였을 때, 120 U/L의 PVA분해효소를 합성하였다. 그러나 glucose를 탄소원으로 사용하였을 때는 매우 낮은 12 U/L의 PVA분해효소를 합성하였다고 보고하였다.

3. 합성 플라스틱의 생분해 기작

난분해성 고분자의 생분해는 미생물이 가진 여러 가지 분해

기작이 서로 상호작용하여 복합적으로 일어난다. 여기에 대표적인 분해 기작 형태는 효소에 의한 산화와 가수분해이다. 이 두 가지 반응은 oxidase, dehydrogenase, esterase, hydrolase, depolymerase 등이 관여한다.

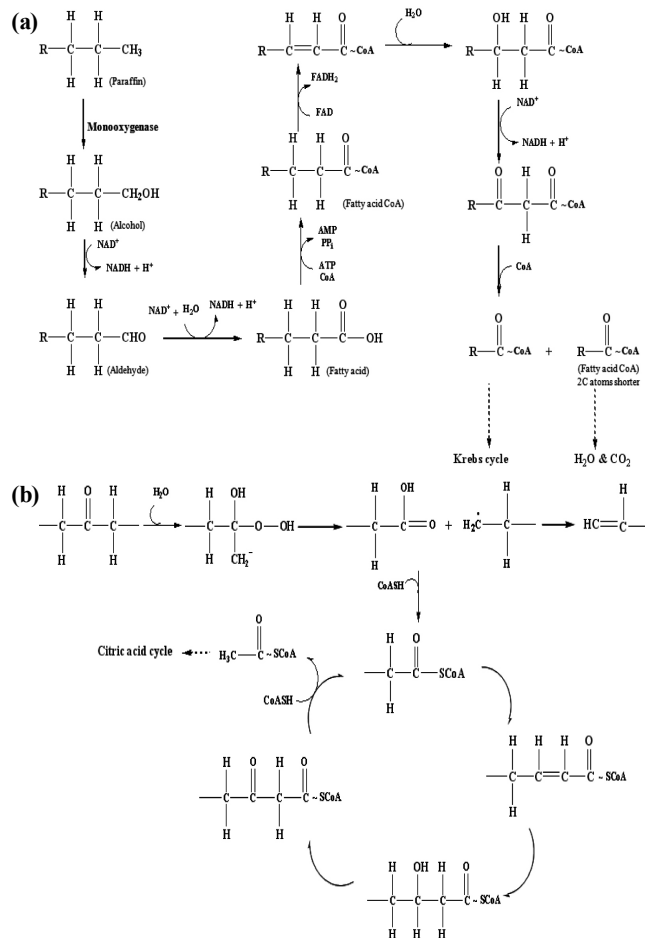


Fig. 2. Paraffin biodegradation mechanism (a) and proposed biodegradation mechanism of PE (b) [35].

3.1. Polyethylene의 생분해 기작

PE의 생분해 기작은 고분자 사슬 내 carbonyl group의 생성에 의하여 시작된다. UV에 의한 PE의 광산화 (photooxidation)는 carbonyl group을 형성한다 [35]. Fig. 1에서 보는 바와 같이, UV 조사에 의해 radical이 형성되고, 산소가 첨가되어 과산화물이 형성됨으로써 결과적으로 고분자 내에 미생물 효소에 의한 분해가 가능한 carbonyl group이 형성된다. 그 이후의 생분해 기작은 paraffin의 생분해와 유사한 생물학적 산화작용에 의해 분해가 진행되는 것으로 여겨지고 있다.

그 이유는 PE와 paraffin은 탄소수 및 결합사슬 형태가 매우 유사하기 때문이다. Fig. 2는 규명된 paraffin의 생분해 기작과 제안된 PE의 생분해 기작이다 [35]. 광산화에 의해 형성된 carbonyl group은 monooxygenase에 의해 alcohol group으로 전환되고, alcohol group은 alcohol dehydrogenase에 의해 aldehyde group으로 산화된다. 이렇게 생성된 aldehyde group은 aldehyde dehydrogenase에 의해 지방산으로 전환되고, 최종적으로 β-산화 대사경로를 통해 분해가 이루어진다.

3.2. Polyurethane의 분해 기작

많은 문헌들에 따르면, polyester PUR은 박테리아, 곰팡이에 의한 생분해가 가능하지만, polyether PUR은 생분해가 어려운 것으로 알려져 있다. Fig. 3에 나타난 것 같이, polyester PUR의 생분해는 polyol 부분의 ester 결합에 효소가 작용하여 일어나지만, polyether PUR의 ether 결합에는 효소의 작용이 어렵다 [8]. Esterase는 polyester PUR의 ester 결합을 가수분해하여 diethylene glycol, adipic acid, trimethylol propane과 아직 밝혀지지 않은 산물들을 형성한다고 여겨지고 있다 (Fig. 4). 저분자량의 polyester PUR 분자 내 urethane 결합 또한 esterase에 의해 분해될 수 있다고 보고되었다. 하지만 고분자량의 polyester PUR에서는 esterase가 저분자화된 polyester PUR에 작용하는지 또는 고분자량의 polyester PUR에 직접 작용하는지는 아직 확실하지 않다.

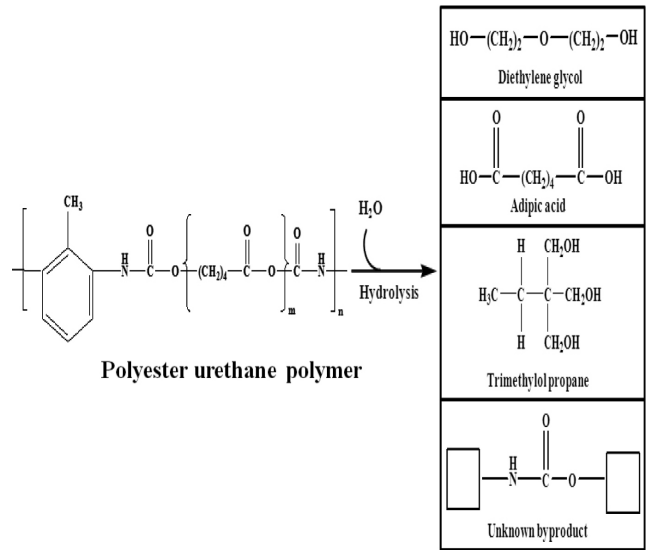


Fig. 4. Proposed biodegradation mechanism of polyester PUR [8].

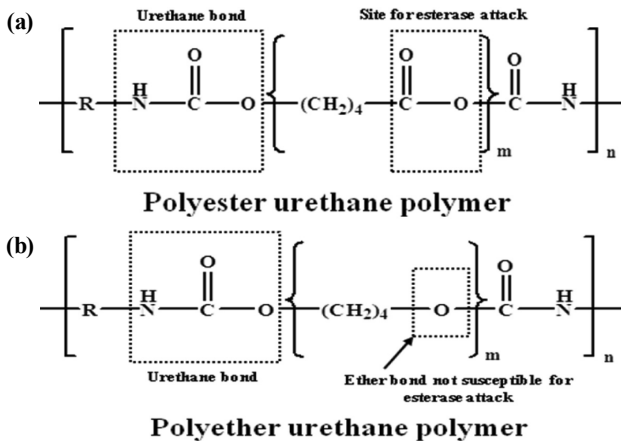


Fig. 3. Typical polyester PUR (a) and poly ether PUR (b) [8].

3.3. Nylon의 생분해 기작

Tomita 등은 *Geobacillus thermocatenulatus*를 이용하여 nylon 12를 분해하였고, Fig. 5(a)와 같이 박테리아에 의한 분해 기작을 제안하였다 [28]. nylon 12의 amide 결합은 효소에 의해 가수분해 되고, 12-amino dodecanoic acid를 생성한다. 그 이후의 산화과정은 12-amino dodecanoic acid를 carboxyl 산물과 단순 화합물로 분해한다. 한편, Nomura 등은 곰팡이에 의한 nylon 분해 기작을 제안하였다 (Fig. 5(b)) [47]. Nylon 분자 내 질소원자와 인접한 methylene group이 peroxidase에 의해 가장 먼저 산화되어 -CH- radical을 형성한다. 이후, radical은 단계적으로 산화가 진행됨으로써 formamide, amide, methyl, aldehyde group을 가진 다양한 분해산물들을 형성한다.

3.4. Polyvinyl alcohol의 생분해 기작

박테리아 효소에 의한 PVA의 분해 기작은 보고되었지만, 아직 정립되지 않았다. Shimao는 Fig. 6과 같은 PVA 분해 기작을 제안하였다 [29]. PVA 분자 내 hydroxyl group은 dehydrogenase 또는 oxidase에 의해 ketone group으로 산화되고, 이후 hydrolase 또는 aldolase에 의해 탄소-탄소 결합이 분해됨으로써 PVA는 생분해된다.

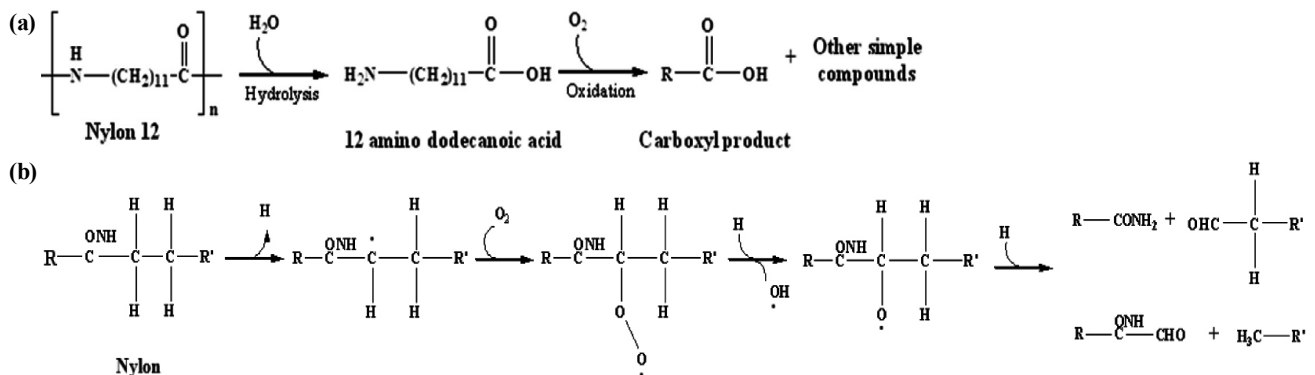


Fig. 5. Proposed mechanisms of nylon degradation by bacteria (a) and fungi (b) [28,47].

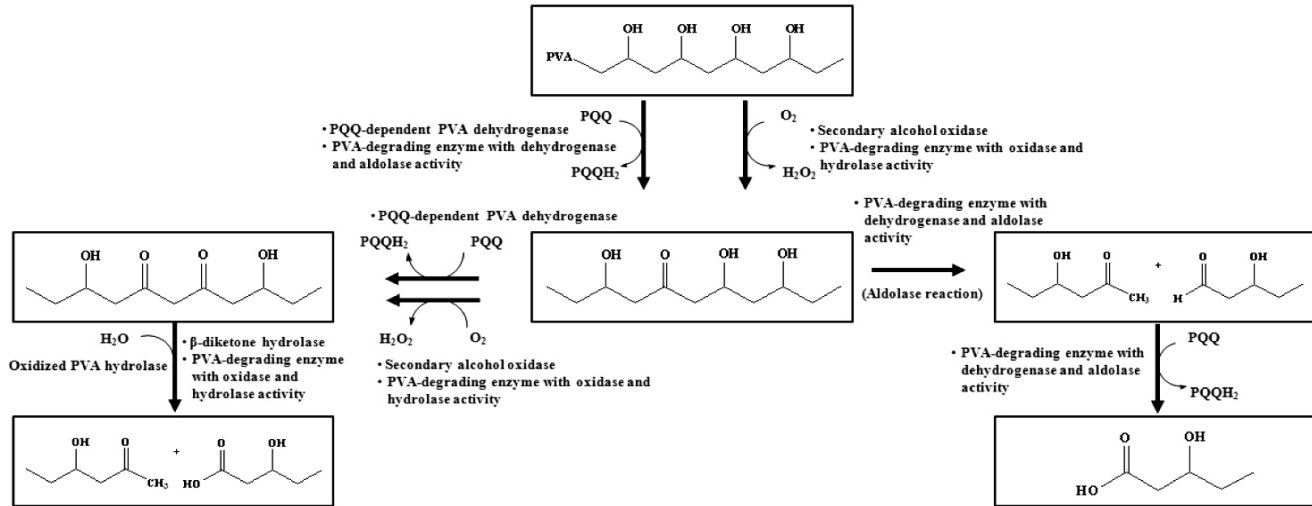


Fig. 6. Proposed mechanism for PVA degradation by various enzymes [29].

4. 결론

현재 환경적으로 문제가 더 큰 부분은 생분해성 플라스틱이 아닌 난분해성 플라스틱이다. 따라서, 본 논문은 산업적으로 가장 널리 사용되고 있는 합성 플라스틱인 PE, PUR, nylon, PVA의 생분해에 있어 각각의 미생물을 이용한 생분해 연구와 그 분해 기작에 초점을 맞추었다. 난분해성 플라스틱의 생분해에 관한 연구는 1980년대부터 활발히 진행되었지만, 현재의 기술수준은 난분해성 플라스틱의 생분해능을 가진 미생물들을 토양, 활성오니, 해수 및 담수 등에서 분리 및 동정하여 가능성을 판단하고 있고, 그 분해 기작 또한 명확히 규명되지 않은 수준에 그치고 있다. 최근에는 난분해성 고분자와 생분해성 고분자를 혼합하여 사용함으로써 생분해가 가능한 고분자임을 강조하고 있지만, 현재의 기술수준에서 이것은 그릇된 경향이다. 난분해성 플라스틱의 환경친화적 분해는 인류가 꼭 해결해야 하는 과제이다. 따라서, 무수히 다양한 미생물의 특성과 유전자 조작에 의하여 난분해성 플라스틱을 효율적으로 분해할 수 있는 미생물 개발에 관한 지속적인 연구가 진행되어야 당면한 환경문제를 경감시킬 수 있을 것이다.

감사

본 연구는 환경부의 “차세대에코이노베이션기술개발사업 (환경산업선진화기술개발사업)”으로 지원받은 과제입니다.

References

- Yun, Y. H. and S. D. Yoon (2008) Preparation and physical properties of biodegradable films using starch and PVA. *J. Adv. Eng. Tech.* 1: 173-177.
- Chung, M. S., W. H. Lee, Y. S. You, H. Y. Kim, and K. M. Park (2003) Manufacturing multi-degradable food packaging films and their degradability. *Korean J. Food Sci. Technol.* 35: 877-883.
- Kim, M. N., S. H. Lee, W. G. Kim, and H. Y. Weon (2007) Screening of microorganisms with high poly (butylenes succinate-co-butylene adipate)-degrading activity. *Korean J. Environ. Biol.* 25: 267-272.
- Leja, K. and G. Lewandowica (2010) Polymer biodegradation and biodegradable polymers- a review. *Pol. J. Environ. Stud.* 19: 255-266.
- Krzan, A., S. Hemjinda, S. Miertus, A. Corti, and E. Chiellini (2006) Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics. *Polym. Degrad. Stabil.* 91: 2819-2833.
- Mohan, S. K. and T. Srivastava (2010) Microbial deterioration and degradation of polymeric materials. *J. Biochem. Tech.* 2: 210-215.
- Gu, J. D. (2003) Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 52: 69-91.
- Gautam, R., A. S. Bassi, and E. K. Yanful (2007) A review of biodegradation of synthetic plastic and foams. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 141: 85-108.
- Yamada-Onodera, K., H. Mukumoto, Y. Katsuyaya, A. Saiganji, and Y. Tani (2001) Degradation of polyethylene by fungus, *Penicillium simplicissimum* YK. *Polym. Degrad. Stabil.* 72: 323-327.
- Seneviratne, G., N. S. Tennakoon, M. L. M. A. W. Weerasekara, and K. A. Nandasena (2006) Polyethylene biodegradation by a developed *Penicillium-Bacillus* biofilm. *Curr. Sci.* 90: 1-10.
- Volke-Sepúlveda, T., G. Saucedo-Castañeda, M. Gutiérrez-Rojas, A. Manzur, and E. Favela-Torres (2002) Thermally treated low density polyethylene biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger*. *J. Appl. Polym. Sci.* 83: 305-314.
- Manzur, A., M. Limón-González, and E. Favela-Torres (2004) Biodegradation of physicochemically treated LDPE by a consortium of filamentous fungi. *J. Appl. Polym. Sci.* 92: 265-271.
- Sudhakar, M., M. Doble, P. S. Murthy, and R. Venkatesan (2008) Marine microbe-mediated biodegradation of low- and high-density polyethylenes. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 61: 203-213.
- Usha, R., T. Sangeetha, and M. Palaniswamy (2011) Screening of polyethylene degrading microorganisms from garbage soil. *Libyan Agric. Res. Cen. J. Intl.* 2: 200-204.

15. Shah, A. A., F. Hasan, A. Hameed, and S. Ahmed (2008) Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnol. Adv.* 226: 246-265.
16. Cosgrove, L., P. L. McGeechan, G. D. Robson, and P. S. Handley (2007) Fungal communities associated with degradation of polyester polyurethane in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 73: 5817-5824.
17. Barratt, S. R., A. R. Ennos, M. Greenhalgh, G. D. Robson, and P. S. Handley (2003) Fungi are the predominant micro-organisms responsible for degradation of soil-buried polyester polyurethane over a range of soil water holding capacities. *J. Appl. Microbiol.* 95: 78-85.
18. Jonathan, R. R., J. Huang, P. Anand, K. Kucera, A. G. Sandoval, K. W. Dantzler, D. Hickman, J. Jee, F. M. Kimovec, D. Koppstein, D. H. Marks, P. A. Mittermiller, S. J. Núñez, M. Santiago, M. A. Townes, M. Vishnevetsky, N. E. Williams, M. P. N. Vargas, L. A. Boulanger, C. Bascom-Slack, and S. A. Strobel (2011) Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 77: 6076-6084.
19. Ocegüera-Cervantes, A., A. Carrillo-García, N. López, S. Bolaños-Núñez, M. J. Cruz-Gómez, C. Wachter, and H. Loza-Tavera (2007) Characterization of the polyurethanolytic activity of two *Alicyclophilus* sp. Strains able to degrade polyurethane and *N*-methylpyrrolidone. *Appl. Environ. Microbiol.* 73: 6214-6223.
20. Rowe, L. and G. T. Howard (2002) Growth of *Bacillus subtilis* on polyurethane and the purification and characterization of a polyurethanase-lipase enzyme. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 50: 33-40.
21. Howard, G. T., J. Vicknair, and R. I. Mackie (2001) Sensitive plate assay for screening and detection of bacterial polyurethanase activity. *Lett. Appl. Microbiol.* 32: 211-214.
22. Gautam, R., A. S. Bassi, and E. K. Yanful (2007) *Candida rugosa* lipase-catalyzed polyurethane degradation in aqueous medium. *Biotechnol. Lett.* 29: 1081-1086.
23. Negoso, S. (2000) Biodegradation of nylon oligomers. *Apply Microbiol. Biotechnol.* 54: 461-466.
24. Hashimoto, K., M. Sudo, K. Ohta, T. Sugimura, H. Yamada, and T. Aoki (2002) Biodegradation of nylon4 and its blend with nylon6. *J. Appl. Polym. Sci.* 86: 2307-2311.
25. Yamano, N., A. Nakayama, N. Kawasaki, N. Yamamoto, and S. Aiba (2008) Mechanism and characterization of polyamide 4 degradation by *Pseudomonas* sp.. *J. Polym. Environ.* 16: 141-146.
26. Chonde, S. G., S. G. Chonde, P. R. Bhosale, D. B. Nakade, and P. D. Raut (2012) Studies on degradation of synthetic polymer nylon 6 by fungus *Trametes versicolor* NCIM 1086. *Int. J. Environ. Sci.* 2: 2435-2442.
27. Sudhakar, M., C. Priyadarshini, M. Doble, P. S. Murthy, and R. Venkatesan (2007) Marine bacteria mediated degradation of nylon 66 and 6. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 60: 144-151.
28. Tomita, K., N. Ikeda, and A. Ueno (2003) Isolation and characterization of a thermophilic bacterium, *Geobacillus thermocatenulatus*, degrading nylon 12 and nylon 66. *Biotechnol. Lett.* 25: 1743-1746.
29. Shima, M. (2001) Biodegradation of plastics. *Curr. Opin. Biotechnol.* 12: 242-247.
30. Flieger, M., M. Kantorová, A. Prell, T. Řezanka, and J. Votruba (2003) Biodegradable plastics from renewable sources. *Folia Microbiol.* 48: 27-44.
31. Choi, K., C. Park, S. Kim, W. Lyoo, S. H. Lee, and J. Lee (2004) Polyvinyl alcohol degradation by *Microbacterium barkeri* KCCM 10507 and *Paenibacillus amylolyticus* KCCM 10508 in dyeing wastewater. *J. Microbiol. Biotechnol.* 14: 1009-1013.
32. Yamatsu, A., R. Matsumi, H. Atomi, and T. Imanaka (2006) Isolation and characterization of a novel poly (vinyl alcohol)-degrading bacterium, *Sphingopyxis* sp. PVA3. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 72: 804-811.
33. Qian, D., G. Du, and J. Chen (2004) Isolation and culture characterization of a new polyvinyl alcohol-degrading strain: *Penicillium* sp. WSH02-21. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 20: 587-591.
34. Zhang, Y., Y. Li, W. Shen, D. Liu, and J. Chen (2006) A new strain, *Streptomyces venezuelae* GY1, producing a poly (vinyl alcohol)-degrading enzyme. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 22: 625-628.
35. Albertsson, A. C., S. O. Andersson, and S. Karlsson (1987) The mechanism of biodegradation of polyethylene. *Polym. Degrad. Stabil.* 18: 73-87.
36. Hadad, D., S. Gersh, and A. Sivan (2005) Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *J. Appl. Microbiol.* 98: 1093-1100.
37. Sivan, A., A. R. Thompson, and V. Pavlov (2006) Biofilm development of the polyethylene degrading bacterium *Rhodococcus ruber*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 72: 346-352.
38. Arutchelvi, J., M. Sudhakar, A. Arkatkar, M. Doble, S. Bhaduri, and P. V. Uppara (2008) Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Indian J. Biotechnol.* 7: 9-22.
39. Nanda, S., S. S. Sahu, and J. Abraham (2010) Studies on the biodegradation of natural and synthetic polyethylene by *Pseudomonas* spp.. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* 14: 57-60.
40. Kawai, F. and X. Hu (2009) Biochemistry of microbial polyvinyl alcohol degradation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 84: 227-237.
41. Zhao, J. H., X. Q. Wang, J. Zeng, G. Yang, F. H. Shi, and Q. Yan (2005) Biodegradation of poly (butylenes succinate-co-butylene adipate) by *Aspergillus versicolor*. *Polym. Degrad. Stabil.* 90: 173-179.
42. Kim, M. N. (2004) Soil microorganism degrading polycaprolactone. *Korean J. Environ. Biol.* 22: 400-404.
43. Elbanna, K., T. Lütke-Eversloh, D. Jendrossek, H. Luftmann, and A. Strinüchel (2004) Studies on the biodegradability of polythioester copolymers and homopolymers by polyhydroxyalkanoate (PHA)-degrading bacteria and PHA depolymerases. *Arch. Microbiol.* 182: 212-225.
44. Wang, Y., Y. Inagawa, T. Saito, K. Kasuya, Y. Doi, and Y. Inoue (2002) Enzymatic hydrolysis of bacterial poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxypropionate) s by poly (3-hydroxyalkanoate) depolymerase from *Acidovorax* Sp. TP4. *Biomacromolecules* 3: 828-834.
45. Romen, F., S. Reinhardt, and D. Jendrossek (2004) Thermotolerant poly (3-hydroxybutyrate)-degrading bacteria from hot compost and characterization of the PHB depolymerase of *Schlegelella* sp. KB1a. *Arch. Microbiol.* 182: 157-164.
46. Lee, A. R. and M. N. Kim (2000) Biodegradation characteristics of poly-3-hydroxybutyrate, sky-green[®] and Mater-Bi[®] by soil bacteria. *Kor. J. Microbiol.* 36: 299-305.
47. Nomura, N., T. Deguchi, Y. Shigeno-Akutsu, T. Nakajima-Kambe, and T. Nakahara (2001) Gene structures and catalytic mechanisms of microbial enzymes able to biodegrade the synthetic solid polymers nylon and polyester polyurethane. *Biotechnol. Genet. Eng. Rev.* 18: 125-147.