

자연 환경에서의 생분해성 분석

Biodegradability Analysis in Natural Environment

이석연 | Seokeon Lee

FITI Testing & Research Institute,

Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungbuk 28115, Korea

E-mail: dltjrdjs@fiti.re.kr

1. 서론

석유 기반 플라스틱은 뛰어난 물리적 성질과 내구성, 가격 경쟁력 덕분에 사용이 급격히 증가했다. 특히, 최근 코로나19 팬데믹으로 인해 마스크, 일회용 식품 용기, 장갑 등의 사용이 급증하면서 그 소비량은 더욱 늘어났다. 그러나 환경 문제와 넷제로에 대한 관심이 높아지면서, 기업과 소비자들 사이에서 바이오 플라스틱에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 생분해성, 바이오매스 기반, 복합 분해성, 재활용이 가능한 다양한 고분자 플라스틱들이 개발되고 상용화되고 있다.¹ 그 중 생분해성 바이오 플라스틱은 자연 환경에서 미생물에 의해 스스로 분해되는 특성을 가지고 있어, 포장재, 농업 자재, 자동차 부품, 생체 내 재료, 토목 자재 등 여러 분야에서 활용되고 있다. 일반적인 플라스틱은 분해가 어려워 환경에 미치는 영향이 크지만, 생분해성 플라스틱은 특정 조건에서 미생물이나 효소의 작용을 받아 물과 이산화탄소로 완전히 분해될 수 있다.² 이는 환경에 미치는 부정적인 영향을 줄이고, 더욱 지속 가능한 소비를 가능하게 한다. 생분해성 플라스틱은 다양한 원료로 생산될 수 있으며, 주로 바이오매스 또는 화석 연료 기반 화합물을 원료로 사용한다.³ 천연 고분자로는 셀룰로오스, 펙틴, 리그닌, 키틴 등이 있으며, 이러한 천연 고분자들은 미생물에 의해 쉽게 분해된다. 또한, 미생물이 생성하는 고분자들인 PHB와 PHA도 중요한 생분해성 플라스틱 원료로, 주로 미생물 발효를 통해 생산된다. 또한, PCL, PGA 등과 같은 지방족 폴리에스터는 화학 합성을 통해 생산되는 생분해성 고분자로, 미생물 고분자에 비해 상대적으로 생산이 용이하고 물성 조절이 쉬워 상업적 용도로 널리 사용된다. 그 외에도 PLA와 같은 바이오매스를 원료로 합성된 플라스틱도 있으며, 이들 역시 재생 가능한 자원을 활용하여 지속 가능한 플라스틱 제품을 만들어낸다.⁴ 이처럼 생분해성 바이오 플라스틱은 여러 원료로부터 생산되며, 그 특성에 따라 다양한 응용 분야에서 사용되고 있다. 또한, 이를 평가하는 생분해성 시험법도 개발되어, 이러한 플라스틱이 실제 환경에서 얼마나 효과적으로 분해되는지를 측정할 수 있다. 생분해성 플라스틱의 발전은 환경 오염을 줄이고 지속 가능한 소비를 가능하게 하는 중요한 기술로 자리 잡고 있으며, 바이오매스를 활용한 고분자 연구 및 개발은 앞으로 더 큰 잠재력을 가질 것이다.

2. 본론

2.1 생분해성 평가 분류

일반적으로 생분해 특성을 평가하는 시험법은 현장 시험(field test), 모사 시험(simulation test) 및 실험실 시험(laboratory test)으로 나눌 수 있다.

Author



이석연

2008 충북대학교 농화학과 (학사)
2012 충북대학교 농화학과 (석사)
2018 충남대학교 환경소재공학 (박사)
2012-현재 (재)FITI 시험연구원

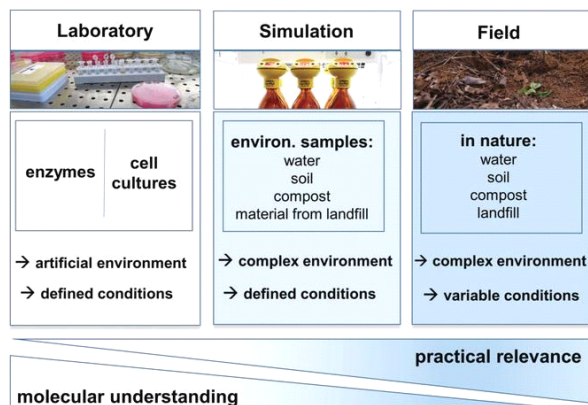


그림 1. 생분해도 평가 분류.

현장 시험의 경우 생분해성 고분자를 자연환경에서 직접 시험(토양에 매립, 호수나 강에 침지 또는 full-scale 퇴비화 공정 처리 등)하므로 실제 분해 환경에서 생분해 특성을 평가할 수 있다.⁵ 그러나 이러한 방법은 분해 환경조건(온도, 습도, pH 등)을 제어할 수 없어 재현성이 떨어지며, 생분해 과정을 모니터링하는 분석기법의 한계 때문에 주로 생분해에 의한 중량감소 또는 표면변화 정도만을 측정할 수 있다. 또한 생분해에 의해 발생하는 잔류물이나 중간생성물에 대한 분석이 어려워, 단순한 물리적인 붕괴(disintegration) 특성만을 파악하는 현장 시험만으로는 미생물에 의한 궁극적인 생분해가 발생하는 지에 대한 평가가 불가능하다.⁶

모사 시험은 이러한 단점을 보완하기 위해 실제 퇴비, 토양, 해수 등의 분해환경을 모사한 조건에서 생분해도를 평가하는 방법이다. 이 방법은 현장 시험과 유사하지만, 생분해 환경(온도, 습도, pH 등)을 조절하여 일정한 조건을 유지할 수 있다. 또한 잔류물이나 중간생성물, CO₂ 발생량 및 O₂ 소비량을 정량적으로 분석할 수 있으며, 경우에 따라 시험시간을 단축하기 위하여, 영양분을 첨가하여 미생물의 활동성을 증가시켜 생분해를 가속화하기도 한다.

실험실 시험은 재현성이 가장 좋은 시험법으로, 규정된 인위적인 환경에서 특정 고분자의 생분해에 효과적인 미생물(한종 또는 복합된 미생물 균주)을 접종하여 평가를 한다. 이 경우 특정 미생물의 활성도를 최적화한 조건으로 시험하기 때문에, 실제 현장에서 발생하는 생분해 속도보다 빨리 생분해가 진행될 수 있다. 따라서 이러한 방법은 생분해 고분자의 분해 메커니즘에 대한 기초 연구에는 효과적이지만 실제 자연환경에서의 분해속도를 파악하기에는 한계가 있다. 자연 환경의 생분해도 시험은 토양조건과 해양조건으로 구분할 수 있으며, 이는 분해 메커니즘에 따라 시험을 선택할 수 있다.

2.2 자연환경 모사 생분해성 분석 규격

자연환경 모사에서의 생분해성 분석은 토양과 해양으로

표 1. 자연환경 모사 생분해 시험 규격

시험 규격	조건	측정방법
ISO 17556:2019	Soil	CO ₂ , BOD, DIC
ASTM D 5988-18	Soil	CO ₂
EN 17033:2018	Soil	CO ₂ , BOD
ASTM D 6691-24	Seawater	CO ₂ , BOD
ISO 18830:2016	seawater/sediment	BOD
ISO 19679:2016	seawater/sediment	CO ₂
ISO 22404:2019	marine/ sediment	CO ₂
ISO 23977-1:2020	Seawater	CO ₂
ISO 23977-2:2020	Seawater	BOD

나눌 수 있으며 시험 규격은 표 1과 같다.

2.3 토양환경에서의 생분해성 분석

일반토양에서의 생분해 시험법은 시험물질이 토양 내 미생물 활동에 의해 분해되는 정도를 평가하며 생분해도를 평가하는 방법은 EN17033:2018, ISO 17556:2019, ASTM D 5988-18 규격이 있으며 가장 일반적으로 적용되는 생분해성 평가 규격은 ISO 17556이다. 규격의 제시 조건은 표 2와 같다.

접종원(자연토양, 인공토양)으로는 자연토양의 경우 들, 산, 밭 등의 표층에서 채취한 5 mm 이하의 토양을 사용하며 인공토양의 경우 규사, 점토, 자연토양, 숙성퇴비를 혼합하여 사용한다. 이때 접종원은 pH, 최대수분 보유 능력, C/N 비 등을 조절하여 시험 물질을 혼합하여 25 °C 챔버에서 진행 시킨다.⁷ 생분해도 측정은 이산화탄소 발생량 또는 산소 소비량으로 측정한다. 이산화탄소 발생량은 그림 2와 같은 장비를 사용하여 측정할 수 있으며 적정법에 의한 이산화탄소 측정은 다음과 같다.

CO₂가 흡수기 용기에 들어가면 다음과 같은 방식으로 반응을 한다.



형성된 BaCO₃는 불용성이며 침전된다. 용액에 남아

표 2. 토양 생분해 시험 조건

구분	내용	
접종원	자연토양/인공토양	
시험온도	20 ~ 28 °C	
pH	6 ~ 8	
수분 함량 (%)	50 ~ 55	
측정방법	CO ₂	BOD
측정방법에 따른 시료양(200 g 당)	2,500 mg	200 mg

있는 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 의 양은 다음 화학 반응에 따라 10 mL를 HCl로 적정하여 결정한다.



식 (1)과 (2)에서 HCl 2 mmol을 적정할 때마다 CO_2 1 mmol이 생성됨을 알 수 있다. 즉, 생성된 CO_2 의 mmol 수는 식(3)을 사용하여 도출된다.

$$\text{mmol CO}_2 = \frac{\text{mmol HCl}}{2}$$

사용된 HCl의 normality는 0.05 N이다. mmol을 대입하면 다음과 같다.

$$\text{mmol CO}_2 = \frac{(0.05 \text{ N}) \times (\text{mL of HCl})}{2}$$

mg CO_2 로 변환하려면 해당 값에 CO_2 의 분자량인 44를 곱해야 한다.

$$\begin{aligned} \text{mgCO}_2 &= \frac{[(0.05) \times \text{mL titrated}]}{2} \times 44 \\ &= 1.1 \text{ mL of HCl titrated} \end{aligned}$$

이처럼 적정에 의해 계산된 이산화탄소 발생량으로부터 생분해도(D_t)는 다음과 같이 계산하며 사용할 수 있다.

$$D_t = \frac{(\text{CO}_2)_T - (\text{CO}_2)_B}{\text{ThCO}_2} \times 100$$

여기서, $(\text{CO}_2)_T$ 는 시험 물질이 담긴 토양 용기로부터 발생한 이산화탄소의 누적량(g), $(\text{CO}_2)_B$ 는 시험 물질 없이 접종원만 있는 용기로부터 발생한 이산화탄소의 누적량 평균(g), ThCO_2 는 용기 속 시험 물질에 의해 발생할 수 있는 이론적 이산화탄소의 양(g)을 각각 나타낸다. ThCO_2 는 토양에 첨가된 시험 물질 중 총 건조 고형분의 양 $M_{\text{TOT}}(\text{g})$ 및 시험물질의 총 건조 고형분에 포함된 유기탄소의 비율 $C_{\text{TOT}}(\text{g/g})$ 로부터 다음과 같이 계산한다. 이때 44는 이산화탄소의 분자량, 12는 탄소의 원자량이다.

$$\text{ThCO}_2 = M_{\text{TOT}} \times C_{\text{TOT}} \times \frac{44}{12}$$

2.4 해양환경에서의 생분해성 분석

해양에서의 생분해 시험법은 시험물질이 접종원 내 미생물 활동에 의해 분해되는 정도를 평가하며 생분해도를 평가하는 방법은 해양에서의 노출 환경에 따라 저서계 ISO 18830:2016, ISO 19679:2016, ASTM D 7991-15, 하부심해 저서대 ISO 22404:2019, ASTM D7473-12, 표영대 ISO 23977-1, -2:2020, ASTM D 6691-2024 규격으로 측정할 수 있다. 접종원은 자연해수, 퇴적물, 인공해수가 있으며 자연해수의 경우 국내 동해, 서해, 남해 어디든 무관하지만 수집날짜, 깊이, 탁도, 염도, 유기탄소, 질소, pH를 기록해야 하며 민물과 바닷물의 경계지인 기수지역의 접종원은 사용하지 않는다. 퇴적물의 경우 일반적으로 저서계의 퇴적물을 주로 사용하며 인공해수의 경우 ISO 18830:2016, ISO 19679:2016, ISO 22404:2019, ASTM D 6691-2024의 시험법에서 적용이 가능하다. 해외 인증에서 공통적으로 사용하는 규격은 ASTM D 6691-24 이다. 규격의 제시 조건은 표 3과 같다.

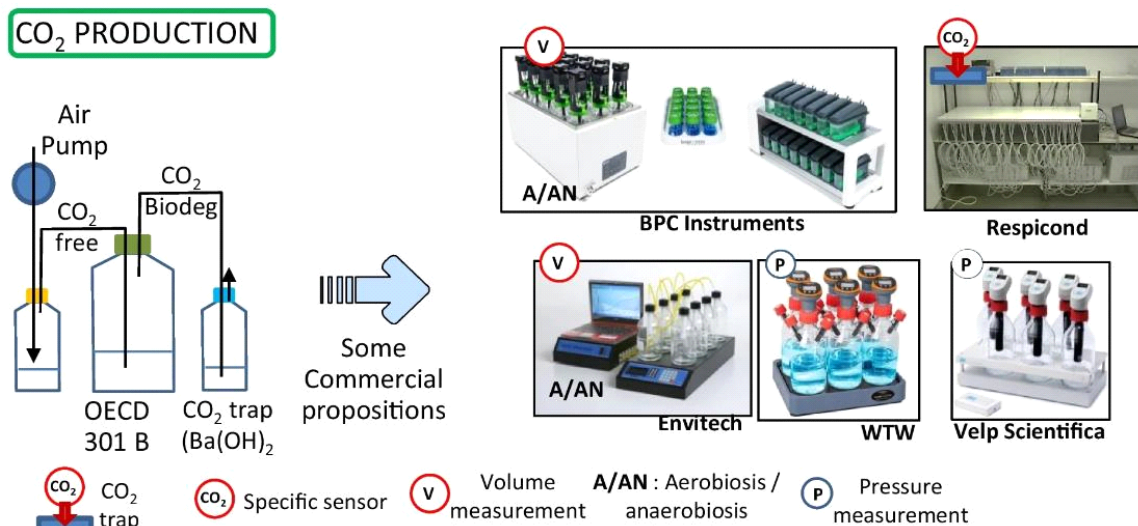


그림 2. 이산화탄소 발생량 측정 장비.

표 3. 해양 생분해 시험 조건

구분	내용
검종원	자연해수/인공해수
시험온도	30 ℃
반응조 볼륨	125 ~ 500 mL
측정방법	CO ₂ , BOD
측정방법에 따른 시료양(164 mL 당)	32 mg

생분해도 측정은 이산화탄소 발생량 또는 산소소비량으로 측정한다. 산소소비량은 그림 3과 같은 장비를 사용하여 측정할 수 있으며 산소소비량으로 생분해도의 측정은 다음과 같다. 플라스틱 시료가 분해되며 발생하는 이산화탄소는 흡수제에 흡수된다. 산소 소비(BOD)는 호흡기 플라스크의 가스 부피를 일정하게 유지하는 데 필요한 산소의 양을 측정함으로써, 또는 측정되는 부피 또는 압력의 변화를 측정함으로써(또는 이 두 가지의 조합으로) 결정된다. 호흡계 유형에 대해 제조업체가 제공한 방법을 사용하여 각 플라스크의 산소소비량 값을 읽는다. 산소소비량 측정은 생분해의 수준은 BOD를 ThOD와 비교하여 백분율로 표시된다. 다음과 같은 방정식을 사용하여 테스트 물질의 특정 생화학적 산소 요구량(BOD_S)을 계산한다.⁸

$$BOD_S = \frac{BOD_t - BOD_{Bt}}{\rho_T}$$

여기서 BOD_S는 특정 BOD(시험물질 g당 mg), BOD_t는 측정된 산소 소비량(mg)을 시험 토양의 양(kg)으로 나누어 계산한 시간 *t*에서의 시험물질을 포함하는 플라스크 F_T의 BOD, BOD_{Bt}는 시간 *t*에서 대조 플라스크 F_B의 BOD이며

플라스크 F_T의 반응 혼합물에 있는 시험물질의 농도이다. 위 식을 사용하여 특정 생화학적 산소요구량 대 이론상 산소 요구량의 비율로 생분해 백분율(*D*)을 계산한다.

$$D_t = \frac{BOD_S}{ThOD} \times 100$$

물질 Fc의 BOD 및 생분해율(%)을 위 식과 같이 계산할 수 있다.

3. 결론

생분해는 자연 환경에서 물질을 분해하는 중요한 생물학적 과정으로, 유기물질의 자연적인 분해가 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화하고, 지속 가능한 환경 관리에 기여한다. 이를 통해 자연환경에서의 오염 물질 축적을 방지하고, 생태계의 건강을 유지하는 데 중요한 역할을 한다. 자연환경에서의 생분해는 다양한 환경 조건에 따라 다르게 진행된다. 호기성, 혐기성, 그리고 산소와 영양소의 농도 차이가 있는 여러 환경에서 미생물들의 분해 활동이 달라지므로, 생분해 속도와 효율성은 환경에 따라 크게 변동한다. 이러한 차이를 정확히 이해하고 평가하는 것은 물질의 생분해 가능성을 예측하고 오염을 관리하는 데 필수적이다. 자연환경에서의 생분해 시험법은 실험실에서의 조건을 재현하여 유기물의 분해 정도를 평가하는 데 사용된다. 호기성 및 혐기성 생분해, 반감기 측정, 미생물 군집 분석 등 다양한 방법을 통해 생분해 속도와 효율성을 측정하고, 이 데이터를 바탕으로 환경 오염 물질의 관리 방안을 제시할 수 있다.

자연환경에서의 생분해 연구는 앞으로도 중요한 환경 문제 해결을 위한 기초 자료로 계속해서 발전할 것이다. 특히, 기후

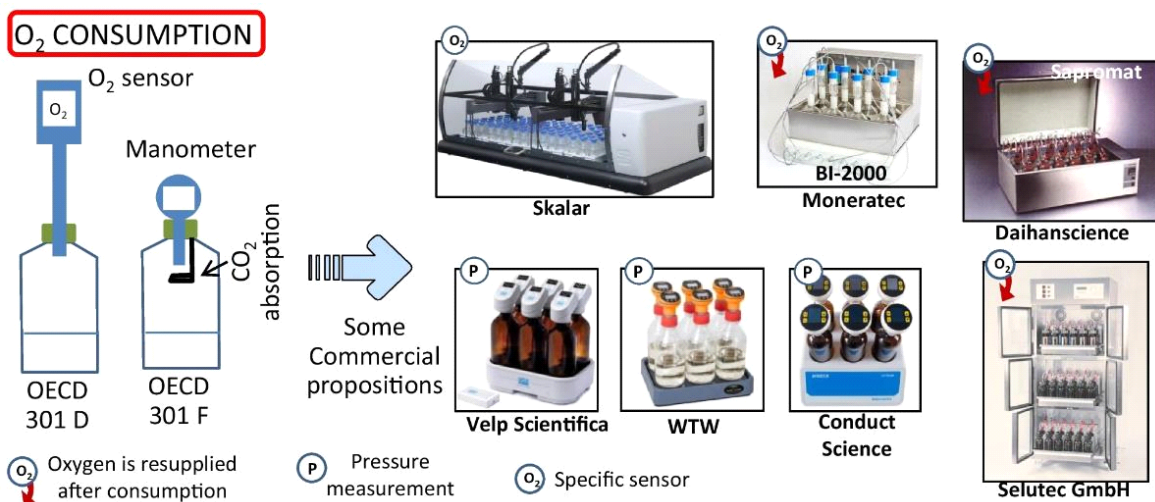


그림 3. 산소소비량 측정장비.

변화, 해양 오염, 플라스틱 오염 문제 등 다양한 환경 문제와 관련하여, 유기물의 분해 메커니즘을 심층적으로 이해하고, 이를 해결할 수 있는 생물학적, 생화학적 기술들이 더욱 중요해질 것이다. 또한, 미생물 군집의 분해 능력을 활용한 오염물질 정화 기술 개발과, 생분해가 늦은 물질을 대상으로 한 개선 방법 연구도 중요한 연구 분야가 될 것이다.

결론적으로, 자연환경에서의 생분해는 환경 오염 물질을 관리하고, 지속 가능한 생태계 유지와 기후 변화 대응을 위한 핵심적인 요소이다. 생분해 과정을 정확히 이해하고 평가하는 것은 환경 보호와 활용 가능성을 높이는 데 중요한 역할을 하며, 미래 환경 정책의 기초가 될 것이다.

참고문헌

1. R. C. Hale and B. Song, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 7034 (2020).
2. R. E. J. Schnurr, V. Alboiu, M. Chaudhary, R. A. Corbett, M. E. Quanz, K. Sankar, H. S. Srain, V. Thavarajah, D. Xanthos, and T. R. Walker, *Mar. Pollut. Bull.*, **137**, 157 (2018).
3. Y. Zhang, S. Xu, H. Fu, J. Lee, J. Su, K.-C. Hwang, J. A. Rogers, and Y. Huang, *Soft Matter*, **9**, 8062 (2013).
4. D. Xanthos and T. R. Walker, *Mar. Pollut. Bull.*, **118**, 17 (2017).
5. D. Gilead and R. Ennis, in *Proc. Symp. Biodgr. Plast.*, SPI, Washington, DC, 1987, p 37.
6. D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, and M. Barlaz, *Philos. Trans. R. Soc., B*, **364**, 1985 (2009).
7. ISO 17556, 2019, Plastics – Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved, Edition 3 (2019).
8. ASTM D 6691–2024–Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Marine Environment by a Defined Microbial Consortium or Natural Sea Water Inoculum, Annual Book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.