

생분해성 고분자의 분해성 측정 및 평가방법 표준화 동향

신 평 균

한국과학기술연구원 수질환경연구센터

오늘날 우리 생활의 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있는 합성 플라스틱은 내구성, 견고함, 경량성등 플라스틱이 가지는 많은 장점들로 인하여 그 사용 분야가 계속 확장되고 있는 추세이다. 석유화학 원료로 부터 생산되는 합성 플라스틱은 가볍고 저렴한 가격으로 인하여 특히 포장지등의 일회용 용도로 많이 사용되어 왔다. 그러나 이들 일회용 플라스틱은 이들이 사용된 후 폐기되었을 때의 환경에의 영향등에 관해서는 거의 고려되지 않고 생산되고 소비되어 온 결과로 환경오염을 유발시키는 심각한 요인으로 주목받게 되었다. 왜냐하면 이들 플라스틱 폐기물들은 하천, 호수, 토양, 바다등의 자연 환경에서 오랜 기간동안 분해되지 않고 남아 있어 자연 생태계의 파손, 개펄지의 고갈등 큰 사회 문제를 야기하고 있다. 이로 인하여 정부에서는 일회용품들에 관한 사용을 규제하고 있는 실정이다.

플라스틱 폐기물의 환경에의 폐해로 인하여 여러가지의 해결책이 모색되고 있는데 그 중에서 플라스틱 재사용(recycle), 소각(incineration), 생분해성 플라스틱의 개발등이 주요 해결책으로 제시되고 있다. 이와는 별도로 플라스틱 폐기물의 양을 줄이기 위해 플라스틱 일회용품의 사용 제한, 비분해성 플라스틱 포장재의 사용 제한등이 여러나라에서 실시되고 있다. 플라스틱 폐기물의 처리를 위하여 어떠한 해결 방법이 최적인가에 관해서는 아직도 많은 논란이 있으나 결국은 앞에서 제시된 여러 해결방법이 적절히 조화되어 플라스틱 폐기물로 인해 야기되는 환경 오염의 문제를 해결해야 한다는 의견들이 점차 비등하고 있다.

생분해성 플라스틱은 앞에서 언급한 환경오염을 해결하는 환경 친화성 제품으로 각광을 받고 있어 이의 개발 역사는 짧지만 전세계적인 노력의 결과로 여러가지 재질과 물성의 생분해성 플라스틱이 개발되어 상품화되고 있다. 현재는 생분해성 플라스틱의 가격이 범용 플라스틱 보다 비싸 그 용도가 제한적이지만 제조 원가를 낮추고자 하는 노력이 지속되고 값싼 새로운 재질을 개발하려는 연구가 활발히 진행중이므로 생분해성 플라스틱에 의한 범용 플라스틱의 대체 범위는 점차 늘어날 전망이다. 국내에서도 초기에는 범용 플라스틱에 전분등 천연 고분자를 혼합하는 생분괴성의 포장재, 빛에 의해 분해가 촉진되는 광분해성 플라스틱 포장재등이 상용화 되어 있고 완전히 생분해되는 화학 합성 고분자 재료도 이미 몇종류 개

발되어 시판되고 있으며 보다 나은 제품을 개발하기 위한 기업들의 연구가 활발하다.

새로운 생분해성 플라스틱 물질을 개발하려는 많은 노력에도 불구하고 새로이 개발되거나 이미 상품화된 분해성 플라스틱들의 생분해도를 측정하여 생분해성을 평가할 수 있는 방법이 마련되어 있지 않아, 이들 생분해성 플라스틱 제품의 개발과 사용 및 관리에 많은 어려움이 있다. 실제로 현재 국내에서도 많은 회사들이 생분해성 플라스틱을 자체 생산하여 판매하고 있으나 이러한 평가방법의 부재로 이들 제품들에 대한 관리가 어렵고 일부 제품의 경우에는 실제로는 분해가 안되는 데도 분해성이라고 선전하여 소비자들에게 분해성 고분자 제품에 대한 그릇된 인식을 주어 결국에는 생분해성 고분자 자체가 소비자로부터 외면당할 가능성도 전혀 배제할 수 없다. 이러한 경우에 플라스틱 폐기물 처리를 위한 한가지 대안으로 제시되어 개발되는 생분해성 고분자 제품이 소비자들로 부터 외면당함으로 말미암아 플라스틱 폐기물 처리 문제 해결방법이 제한을 받게 될 수 있다.

생분해성 플라스틱의 생분해도 측정 및 평가 방법의 개발은 올바른 생분해도 측정방법과 생분해성에 대한 기준을 제시함으로써 새로운 분해성 고분자를 개발하는 과정에서 이들의 생분해도를 측정, 평가하여 경쟁력이 있고 적절한 용도의 환경 친화성 제품을 신속히 개발하는데 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 생분해성에 대한 정확하고 객관적인 평가는 환경 친화성 제품에 관한 정부의 감독과 규제에도 크게 기여할 것이다. 이러한 배경에서 각국에서는 생분해성 고분자의 분해성 평가 방법 및 규격의 개발에 힘을 기울이고 있다. 따라서 본고에서는 현재까지 진행중인 생분해성 플라스틱의 분해성 측정 및 평가 방법의 표준화 동향을 요약하고자 한다.

플라스틱 생분해의 정의

플라스틱의 생분해는 미생물이 분비하는 효소의 작용으로 플라스틱 물질이 붕괴되고 저분자화된 후(1차분해) 미생물이 이들 저분자를 흡수하여 대사작용을 한 후 최종적으로 미생물 균체와 이산화탄소, 메탄가스등을 생성하는(최종 분해) 전과정으로 구성된다. 이 중에서 플라스틱의 생분해는 최종분해가

지 진행된 정도를 생분해로 인정하려 하고 있다. 미국의 경우, ASTM(American Society for Testing and Materials)에서 발표한 분해성 플라스틱과 생분해성 플라스틱에 관한 용어의 정의는 다음과 같다[1].

- 분해성 플라스틱 : 일정기간동안 특정 환경조건에서 화학 구조가 상당히 변화되어 표준 시험방법으로 측정이 가능한 성질의 손실을 가져오도록 고안된 플라스틱

- 생분해성 플라스틱 : 박테리아, 곰팡이, 조류와 같은 천연 미생물의 작용으로 분해가 일어난 분해성 플라스틱

이 정의를 보면 생분해성에 대한 정의가 다소 모호할 수도 있으나 실제로 ASTM에서 제시하는 표준 시험방법은 앞에서 말한 이산화탄소, 메탄가스의 발생량을 측정하여 생분해 정도를 측정하게 되어 있으므로 결국은 위의 전과정을 반영한 것으로 생각할 수 있다.

생분해도 측정방법

고분자의 생분해도에 대하여 체계적으로 표준화된 시험 방법을 개발하기 위한 연구는 최근 5-6년 전부터 본격적으로 시행되었으나 그 이전에도 고분자의 생분해도 시험에 관해서는 몇몇 대학을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 이는 주로 플라스틱 제품들의 자연환경 조건에서 미생물의 공격에 대한 저항성을 측정하는 목적으로 평가가 시행되었다. 따라서 플라스틱 물질이 완전히 분해되는 여부를 측정하기 보다 미생물이나 미생물이 생산하는 효소들에 의해 고분자 재료의 물성과 외관에 어떠한 변화가 있는가를 측정하는 것이 보통이었다(2). 이를 위해서 자연계에 널리 퍼져있는 특성의 박테리아나 곰팡이들을 표준 미생물로 선정하여 이들이 평가시료를 탄소원으로 하여 생육이 가능한지를 관찰하거나, 이들과 함께 시료를 배양하였을 때 시료의 물성(인장강도, 연신율등)의 변화를 측정한다. 이 경우 곰팡이와 같이 분해능력이 활발한 미생물을 시료와 함께 배양하면서 이들에 의한 고분자 시료의 분해도를 FTIR(Fourier transformed infrared)과 DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 측정한다. 전자의 측정법을 통해서 고분자 물질의 미생물에 의한 화학적 조성의 변화를 알 수 있고 후자의 측정법으로는 고분자의 결정성의 변화를 감지할 수 있다. 이 평가법은 특성의 미생물이 고분자를 분해할 때 배양액중의 첨가물이 미치는 영향등을 결정하는 장점이 있으나 한, 두종류의 미생물만을 사용함으로써 고분자가 자연 환경에 노출되었을 때의 조건과 다르므로 생분해성 평가방법으로 적용하는데 한계가 있다.

효소를 이용하는 경우에는 amylase, lipase, cellulase, protease 등의 가수분해 효소를 시료와 함께 배양하여 고분자의 연결고리의 절단, 부산물의 생성, 말단기의 정량, 물리적 성질의 변화등을 관찰하여 분해성을 결정한다.

생물산업

고분자의 생분해성을 측정하기 위하여 널리 이용되는 또다른 방법은 토양매립에 의한 분해성 시험법이다. 이 경우에는 토양중에 시료를 매립하고 일정한 기간이 경과한 후에 시료를 회수하여 시료의 질량 변화, 물성 변화, 시료 표면에서의 토양 미생물 생육여부를 관찰하여 분해 정도를 평가한다. 특정 미생물이나 효소를 이용하는 평가방법이 그 평가 기간은 짧은 장점이 있으나 실제의 자연 환경을 반영하고 있다고 보기는 어려운 반면 토양 매립의 경우, 시료를 실제의 자연 환경에 노출시키므로 자연 환경에서의 분해정도를 정확히 평가하는 장점이 있다. 그러나 토양의 조건과 상태가 다양하여 어느 토양 환경을 표준으로 정할 것인가에 어려움이 많고 그로 인해 토양 매립의 경우 평가의 재현성이 가장 적은 것으로 알려지고 있다. 또한 토양매립의 경우 평가기간이 수개월에서 수년의 기간이 요구되므로 평가 기간이 길게 되는 단점도 있다.

한편 위에서 제시한 방법들은 그 성격상 실험실, 현장 모사, 현장으로 구분할 수 있는 데 위의 방법들을 포함한 여러 가지 시험방법을 이러한 단계로 구분하면 표 1과 같다. 일반적으로 실험실에서 수행하는 시험방법들은 잘 조절된 조건에서 측정이 가능하므로 재현성과 정량성이 우수하다. 그러나 위에서도 일부 언급한 바와 같이 시험결과가 실제 자연환경을 반영하는데 무리가 있다. 따라서 실험실 시험은 주로 시료의 궁극적인 생분해도를 측정하기 위해 실시된다. 반면에 현장 시험은 자연환경에서 직접 실시하므로 실제 자연환경에서의 생분해도를 측정할 수 있지만 정량성이나 재현성이 떨어지는 한계가 있다. 그러므로 현장 실험에서는 궁극적인 생분해도를 측정하기 보다 생분괴성을 주로 측정한다. 모사 시험의 경우에는 직접 현장 적용시험이 어려운 경우(예를 들어 매립지 환경)에 실험실에서 자연환경을 모사하여 시험을 진행하므로 실험실 시험의 한계를 보완하고자 실시한다.

표준화된 분해성 시험방법에 관한 연구를 가장 먼저 시작했고 가장 활발한 나라는 미국이다. ASTM(American Society for Testing and Materials)에 환경 분해성 플라스틱 소위원회를 두고 분해성 측정의 표준방법, 분해에 관한 용어의 정의등에 관한 연구가 진행중이다. 미국의 표준 방법 개발에 관한 기본 방향은 크게 분해성 시험환경(test environments), 시험방법(test

표 1. 생분해성 시험 단계별 시험방법

시험단계	Laboratory Test Systems	Simulation Tests	Field Tests
시험방법	- Enzyme assay - Clear-zone test - Sturm test - BMP test - Compost Test	soil Water(sea, fresh) Landfill Compost Anaerobic Digestion (Biogasification)	soil Water(sea, fresh) Landfill Compost Anaerobic Digestion (Biogasification)

표 2. 미국 ASTM의 생분해성 고분자 시험방법 표준화 현황

Laboratory Test Systmes	Simulation Tests	Field Tests
- D5209 (Sturm test)(3)	- D5929 (compost test, O ₂ 측정)(8)	-- D5437 (Marine exposure)(14)
- D5210 (BMP test)(4)	- D5512 (composting test)(9)	
- D5247 (특정미생물)(5)	- D5509 (composting test)(10)	
- D5271 (호기적, O ₂ 측정)(6)	- D5525 (landfill test)(11)	
- D5338 (Compost test)(7)	- D5526 (accelerated landfill test)(12)	
	- D5511 (biogasification test)(13)	

method), 환경영향평가(environmental fate)로 대별된다. 먼저 시험환경은 생분해의 경우 육상환경으로 퇴비화, 매립, 토양등이고, 수중환경으로 담수와 해양을 시험환경으로 고려하는 데 이는 플라스틱 물질이 도달할 수 있는 모든 자연 환경을 고려하는 것이다. 이러한 환경하에서 호기적, 혐기적 분해조건을 따르려 하고 있다. 시험방법의 표준화를 위해서는 시료의 기계적 성질(인장강도등), 화학적 성질(분자량, 반응기), 생물학적 성질(CO₂/CH₄) 등의 변화와 분해정도와의 관계를 나타내려 하고 있다. 환경영향평가는 육상과 수중에서의 분해 생성물의 환경에의 독성 여부를 결정하는 방법을 개발하는 것이다. 1996년 현재까지 14가지의 관련 사항에 대한 표준을 발표했고 다수를 표준으로의 인가를 위해 준비 중에 있는 것으로 알려지고 있다. 이미 발표된 것들 중 생분해성 관련 14가지 표준의 내용을 보면 생분해성 시험방법이 12가지, 환경 영향 1가지, 용어 정의 1가지로 구분할 수 있다. 이중 표준 시험방법 12가지를 그 성격에 따라 실험실 시험, 환경 모사 시험, 현장시험으로 구분하여 표 2에 정리하였다.

일본의 경우에는 1990년 부터 통상상업성(MITI) 주관으로 분해성 고분자의 표준 시험방법 개발에 관한 소위원회를 두고 연구를 진행하고 있다. 일본의 경우에는 미국과는 달리 화합물질의 생분해도를 측정하는 MITI법을 보완한 표준 시험방법을 마련하여 JIS K 6950-1994(Plastics-Testing method for aerobic biodegradability by activated sludge)(15)으로 발표하였다. 이 방법의 특징은 미국의 ASTM D5271-92와 그 내용이 매우 유사한 데 호기적 조건에서 일본 각지에서 채집한 하수와 담수중의 미생물을 사용하여 이들 미생물이 화학 약품을 분해하는 과정에서 소모되는 산소량을 자동화된 장치(biometer, 일명 electrolytic respirometer)를 사용하여 측정하여 분해성을 결정하는 방법이다.

한편 최근 몇 년전부터는 국제표준기구인 ISO(International Standard Organization)에서 생분해성 플라스틱의 분해성 측정 방법에 관한 표준화가 진행중에 있다. 이는 ISO산하의 플라스틱관련 위원회인 기술위원회 61(TC61)의 하부위원회 5(SC5) 내의 한 작업팀(WG22)에서 담당하고 있는데 현재까지 3가지의 시험방법이 DIS(Draft for International Standard) 단계에 도달하였고 2가지가 CD(Committee Draft)단계에 있다. 일반적으로 새로운 표준안이 제안되면 이 안은 Work Item이라고 명명

된다. 이 Work Item에 대해 각 회원국 대표들의 의견을 들어 수정을 한 후 CD단계로의 진행 여부를 투표로 결정한다. CD 단계에서는 제안된 시험방법에 대해 세밀한 검토 작업이 이루어진다. 자발적으로 참여하는 여러국가의 연구기관에서 제안된 시험방법에 의거하여 시험을 실시하며 시험방법의 문제점을 검토한다(Ring test). 이 과정에서 문제점이 드러나면 이에 대한 토론을 거쳐 수정작업이 진행된다. 이후에 수정된 안에 대해 연례 모임에서 참가자들의 동의를 거쳐 DIS로 진행시킨다. 이 안을 전체 회원국들의 투표로 최종 단계인 FDIS로 진행시킨다. 이 단계를 통과하면 이제 부분적인 문구수정만을 거쳐 국제 표준으로 발표되게 된다. 현재까지 시험방법에 대한 국제 표준은 발표된 것은 없다. 각 단계에 있는 표준안들은 다음과 같다.

DIS 단계

- ISO/DIS 14851 Evaluation of the ultimate aerobic biodegradation of plastic materials in an aqueous medium -- Method by determining the oxygen demand in a closed respirometer
- ISO/DIS 14852 Evaluation of the ultimate aerobic biodegradation of plastic materials in an aqueous medium -- Method by analysis of released carbon dioxide
- ISO/DIS 14855 Evaluation of the ultimate aerobic biodegradability and disintegration of plastics under controlled composting conditions -- Method by analysis of released carbon dioxide

CD 단계

- ISO/CD 14853 Evaluation of ultimate anaerobic biodegradation of plastic materials in an aqueous system -- Method by analysis of carbon conversion to carbon dioxide and methane

New Work Item 단계

- ISO/TC61/SC5 N5025 Evaluation of the ultimate anaerobic biodegradability and disintegration of plastics under high-solid anaerobic digestion conditions
- ISO/TC61/SC5 N5026 Evaluation of the compostability and biological treatability of plastics -- Test scheme for final

acceptance (1998년 3월에 CD단계로 넘어감)

생분해도 평가

앞에서 제시된 여러가지 시험방법들은 특정 환경조건에서 고분자 시료의 생분해가 어떻게 진행되는지 측정하는 것에 국한된 것이고 실제로 이러한 분해도 측정 결과를 바탕으로 어떠한 고분자가 실제로 특정 자연환경에서 생분해성 제품으로 이용될 수 있는 지에 대한 평가할 수 있는 기준은 제외되어 있다. 따라서 생분해성 고분자 제품이 실제로 이용되기 위해서는 이러한 생분해도 측정 자료를 바탕으로 특정 자연환경에서의 적용에 대한 평가 기준(규격)이 제시되어야 한다. 예를 들어 화학약품의 경우, 쉽게 생분해되는 물질(readily biodegradable chemicals)은 활성오니를 이용하여 호기적 조건에서 생분해도를 측정할 경우, 28일 이내에 시료의 탄소중 최소 60% 이상이 이산화탄소로 전환되어야 하고 내재적인 생분해성 물질(inherently biodegradable chemicals)은 같은 조건에서 기간에 구애없이 최소 10% 이상의 전환이 요구된다.

그러나 위에 제시된 측정방법에는 이러한 생분해성 고분자를 분류할 수 있는 기준이 제시되어 있지 않다. 따라서 측정방법을 개발함과 아울러 평가 기준을 마련하는 작업들도 진행되어 왔다. 이 작업은 주로 퇴비화 가능(compostable)의 경우에 한정되어 있는 데 이는 퇴비화가 유기성 폐기물 처리의 중요한 하부구조로 유럽을 중심으로 자리잡아 가고 있으므로 폐기되는 생분해성 고분자 제품도 이러한 폐기물 처리방법으로 처리하고자 하는 이유 때문이다. 현재 유럽에서는 퇴비화가능 제품에 부여하는 OK-Compost(16)라는 label이 있고 독일에서는 DIN 54900(16)으로 퇴비화 규격이 거의 승인단계에 있으며 미국에서는 ASTM 산하 Institute for Standard Research(ISR)에서 지난 5년간 퇴비화 가능의 규격에 대한 연구를 진행하여 최근 그 결과를 발표하였다(17). 또한 유럽에서는 포장재의 퇴비화에 의한 자원회수 측면에서 퇴비화 기준을 마련중에 있다(16). 본 란에서는 이 네가지에 대해 더 상세히 기술하고자 한다.

OK-Compost

'OK-Compost'는 벨기에의 측정, 검사, 인증을 전문으로 하는 국제적인 비영리 기관인 AIB-VINCOTTE INTER(AVI)와 생물학적 고형 폐기물 처리 전문회사인 Organic Waste Systems(OWS)와 공동으로 퇴비화에 관하여 인증해주는 국제적인 '퇴비화 라벨'이다. 이 퇴비화 라벨을 부여하기 위한 평가 프로그램의 개관은 그림 1과 같다.

Level 1 : 생분해 한 물질이 퇴비화 가능(compostable)으로 판정되기 위해서는 초기의 호기적, 혐기적 공정 이후 완전히 생분해되어야 한다. 이것은 표준 퇴비화 (조절된 퇴비화 시험), 표준 토양 시험(토양 접촉 시험), 표준 생물학적 기체화의 생물산업

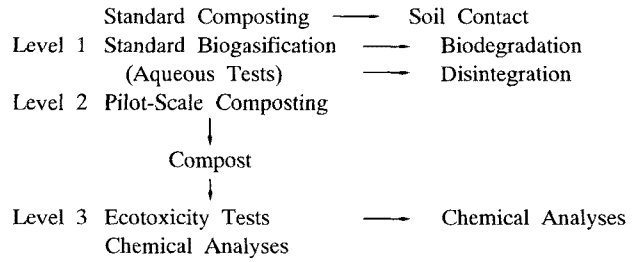


그림 1. 퇴비화가능성을 위한 다양한 시험법 개관.

3가지 시험으로 평가된다. 이들 3가지 시험의 특징은 다음과 같다.

① 표준 퇴비화

- 시험방법 : ASTM D 5338-92를 기본으로함.
- 특징 : 건조된 호기적 조건에서 시험물질의 생분해, 무기질화를 아주 정밀하게 측정할 수 있음.
- 내용 : 시험물질을 안정화된 퇴비 접종원과 혼합하여 정지된 상태에서 산소, 온도, 수분함량등이 최적화된 조건에서 반응기 내에서 활발하게 퇴비화 진행. 이산화탄소 발생량을 연속적으로 측정하여 시험물질의 탄소중 이산화탄소로 전환된 정도로 생분해도 결정

• 기간 : 45일

② 표준 토양 시험

- 내용 : 퇴비화 시험후 남은 잔유물과 시험물질의 잔유물을 생물학적 활성이 활발한 토양과 혼합하여 추가의 무기질화나 이산화탄소로의 전환을 측정함. 이는 최종 분해를 측정할 수 있음.

• 기간 : 6개월

③ 표준 생물학적 기체화

- 시험방법 : ASTM D 5511-94(High Solids Anaerobic Digestion Test)
- 특징 : 가속화된 건조상태의 혐기적 발효이며 이 조건에서 시험물질의 생분해 또는 무기질화를 매우 정밀하게 측정

• 내용 :

- 소량의 시료를 pH, 영양분, buffer 용량, 휘발성 유기산, NH-N, 기타 물리 화학적 인자를 포함하고 다양한 혐기성 미생물이 존재하여 최적 발효 조건을 마련하는 다량의 접종원과 혼합한다. 생분해는 시료의 고체 탄소가 기체탄소(메탄과 이산화탄소)로 전환된 비율로 결정

- 위의 시험후 남은 잔유물을 ASTM D 5338-92에 나타난 방법대로 퇴비 접종원과 습윤질량비로 1:1로 섞어 10일간 58°C와 함수율 40-55%에서 퇴비화를 실시한다. 생분해는 D 5338에 의거하여 기록

• 기간 : 혐기적 15일+호기적 10일

④ 평가기준

표준 퇴비화와 토양 접촉 시험 이후 또는 표준 퇴비화 시험

이후 무기질화가 90% 이상인 물질은 완전 생분해성임.

표준 생물학적 기체화 시험 이후 무기질화 비율은 표준 퇴비화 이후 만큼 되어야 함. 무기질화 비율이 낮으면 표준 생물학적 기체화 시험 이후 토양 접촉 시험을 수행하여 완전 생분해성을 보여야 함.

이와 달리 완전 생분해성은 ISO/TC6 N4902/639와 ISO/TC6 N4902/636 draft에 의거한 수용액 상에서의 호기적 시험으로 측정하고 예시할 수 있음.

Level 2 : 붕괴 붕괴 정도를 평가하기 위해 기술적 규모 (tech-scale)의 퇴비화 시험과 체(sieve)분리 시험을 수행함

• 원리

① 기술적 규모의 퇴비화 시험은 실제의 완전한 퇴비화 공정을 최대한도로 모사함. 가능하면 시료는 15×15 cm로 절단. 시료를 신선하고 전처리된 도시 고형 폐기물의 유기성분과 0.5-1.0% 비율로 혼합하여 200 l 규모의 보존된 퇴비화 반응조에 투입하고 퇴비화 진행. 실제 규모의 퇴비화처럼, 점종과 온도 상승이 즉각적으로 발생. 온도 58°C 이상으로 최소한 2주간 이상 지속되어야 시험이 적절한 것으로 간주함. 자연적 퇴비화는 공기의 흐름과 수분 함량으로 조절됨. 온도와 배출가스를 정기적으로 측정. 퇴비화 공정은 완전히 안정화된 퇴비가 얻어질 때까지 지속(3개월).

② 퇴비화가 완료되면 퇴비를 10 mm 이상의 체로 침. 붕괴는 수작업으로 매우 정밀하게 평가함. 가능하면 습량, 건량 기준의 물질 수지 산정. 퇴비는 물리, 화학적 분석이나 생태 독성 시험에 사용할 수 있음.

• 기간 : 3개월

• 평가기준 : 퇴비화 가능으로 판정받기 위해서는 10 mm 이상 되는 시료가 초기 질량의 5% 이하일 것.

Level 3. 퇴비의 품질 퇴비화 가능으로 판정되기 위해서는 시료가 퇴비의 품질에 어떠한 부정적인 영향도 주어서는 안됨. 이는 화학 분석과 생태 독성 시험으로 측정.

① 화학 분석

• 시험방법 : German Bundesgütegemeinschaft Kompost

• 내용 : 중금속(Pb, Cr, Ni, Zn, Cd, Cu, Hg), pH, 퇴비 속성도, 총고형물(TS), 휘발성 고형물(VS), 염분, 부피 질량의 분석과 암모니아성 질소 함량 측정. 이 결과를 시료를 넣지 않은 대조군 퇴비(blank compost)와 비교.

② 생체독성 시험

4가지의 생체독성 시험을 1개월간 시행함.

• 단자엽 식물(monocotyledon plant) : German Bundesgütegemeinschaft Kompost의 방법을 바탕으로 퇴비와 표준 토양 복합체에서 여름 보리의 발아와 성장.

• 복자엽 식물(dicotyledon plant) : German Bundesgütegemeinschaft Kompost의 방법을 바탕으로 순수 퇴비에서 양갓냉이(water cress, *Lepidium sativum*)의 발아와 성장.

• 육상 동물의 독성 : OECD 207에 비견되는 퇴비와 토양 복합체에서 2주간의 지렁이의 생존 시험.

• 수상 동물 시험 : ASTM E1440-91의 방법에 의거한 2가지 담수종의 생존 시험. 물벼룩 *Brachionus calyciflorus*와 소갑각류 *Thamnocephalus platyurus*의 퇴비 추출물에서의 생존 시험. 이 결과를 시료를 넣지 않은 대조군 퇴비(blank compost)와 비교.

③ 평가 기준

퇴비화 가능으로 판정되기 위해서는 시료가 퇴비의 품질에 어떠한 위해적인 영향을 주어서는 안됨. 이는 대조군 퇴비와 비교하여 심각한 부정적인 차이가 없어야 함을 의미한다. 화학 분석과 생태 독성 시험으로 측정.

미국 ASTM/ISR의 퇴비화 연구

앞에서도 언급한 바와 같이 ASTM산하의 ISR에서 지난 5년간의 퇴비화 규격을 위한 연구 결과를 1996년 11월경에 발표하였으나 이것이 규격으로 제정될 것인지에 대한 것은 확실하지 않다. 현재 이 발표된 연구 결과를 신청중에 있으므로 본 보고서에서는 이미 학회등에서 발표된 자료를 바탕으로 미국의 퇴비화 규격에 관해 서술하고자 한다.

퇴비화 과정과 퇴비를 토양에 적용하였을 때 생분해성 고분자의 거동을 이해하기 위해서는 퇴비화 과정중 시료의 물리, 화학적 안정성, 완전 생분해성등이 결정되어야 한다. 이 과정은 선발심사 단계(screening-level) 평가와 pilot과 현장 규모의 퇴비화 시스템에서의 확인연구(confirmatory studies)로 구성되어 있다. 시료의 퇴비를 적용한 토양에서의 거동을 살피기 위해 유사한 접근법이 필요하다. 양자의 경우, 난분해성의 잔유물이나 중간 생성물이 발생하는 지를 결정한다. 이를 위해 다음과 같은 고분자물질의 퇴비화 가능성을 평가하기 위한 일련의 시험 전략을 마련하였다.

선발심사 단계 이 단계에서는 고분자 시료의 "타고난(inherent)" 분해도를 결정한다. 재현성과 정확성을 기할 수 있도록 잘 규정된 실험실 조건에서 실험을 진행한다. 이 결과가 반드시 실제 폐기환경에서의 생분해도를 반영하지는 않는다. Sturm 시험과 퇴비 이산화 탄소 시험법을 이용해 시료의 생분해도를 측정한다.

확인단계 1(실험실과 pilot 규모 시험) "실제적인" 분해도를 결정한다. 잘 규정된 실험실 규모나 pilot규모의 조건에서 실험을 실시한다. 시료가 "실제환경" 조건에서 분해되는지 예측할 수 있는 자료를 얻도록 실험을 구성한다.

확인단계 2(현장규모 시험) 고형 폐기물 처리(퇴비화 시설)와 육상 환경에서의 현장(*in situ*) 생분해도를 결정한다. 현장 분해도는 시료나 난분해성 중간 생성물 또는 잔유물이 환경에 부정적인 영향을 줄 정도로 축적되지 않음을 보이기 위함이다.

독일의 DIN Draft 54900

독일의 경우 DIN 54900의 초안이 마련되었는데 그 주요 사항은 아래와 같다.

- ① Part 1. 일반적 정보
 - 표준의 작성
- ② Part 2. 화학 분석
 - 휘발성 고형물 : 최소 50%
 - 유독성 물질(중금속과 dioxins) : 퇴비 기준의 30% 이내
- ③ Part 3. 실험실 시험에서 완전 생분해도의 결정
 - 성분 함량 1% 이상의 모든 유기물에 적용가능
 - 함량 1-5%의 성분은 분리해서 시험할 것
 - 시험 기간 : 6개월
 - 분해도는 생물학적 산소요구량(BOD)와 이론적 산소요구량(ThOD)의 비, 이산화탄소 무기질화, 또는 탄소 수지를 바탕으로 결정
 - 가장 적은 성분이 최소 60% 이상 분해될 것
- ④ Part 4. 실제 조건에서의 퇴비화 가능성의 시험과 퇴비의 품질
 - 저급과 고급 기술(low-tech and high-tech)의 2단계에서 공장 규모의 시험
 - 시료의 농도 : 1%의 조각 또는 필름+9% 분말(500 m 이하)
 - 기간 : 10-15주, 그물로된 백에 넣어 투입
 - 2 mm이상의 체로 걸름 : 총고형물 기준 최대 0.5%(실제적으로 75-80%가 붕괴되어야 함)
 - 모든 퇴비 분석이 RAL GZ 251조건을 만족할 것
- ⑤ Part 5. 생태독성 시험
 - 여름 보리를 이용한 발아와 성장 시험
 - 양갓냉이의 발아와 성장 시험
 - 지렁이 독성 시험
 - 물벼룩 독성 시험

유럽의 퇴비화 평가기준(CEN; 유럽 표준화 기구)

- ① 시료의 성격
 - 휘발성 고형물(VS, 유기물)이 전체 고형물(TS)의 50% 이상일 것
 - 중금속 등의 유해물질 : 퇴비 기준의 50% 이하
- ② 생분해
 - 성분 함량이 1% 이상인 모든 유기물에 적용
 - 기간 : 6개월(토양 시험은 2년)
 - 무기질화 : 포장재는 90% 이상, 성분별로는 최소 60% 이상
- ③ 붕괴
 - 기간 : 12주
 - 최초 건조 질량의 최대 10%만이 2 mm이상의 크기일 것
- ④ 퇴비 품질
 - 화학 분석 : 국가나 전유럽의 기준 만족
 - 생태 독성 : 아무 심각한 부정적 효과 없을 것

생물산업

- ⑤ 기타 : 혐기적 생물학적 가스화
 - 생분해 : 2개월간 최소한 50%
 - 붕괴 : 혐기와 호기적 처리 5주간 이후 최초 건조 질량의 최대 10%만이 2 mm이상의 크기일 것

결 언

지금까지 외국에서 진행중인 플라스틱의 생분해도 시험방법 및 규격화 동향에 대해 살펴보았다. 이를 종합해 보면 생분해도 시험(측정)방법은 상당한 표준화가 이루어졌고 규격화 작업은 아직은 퇴비화가능성에 대해서 제한적으로 진행되고 있지만 점차 다른 규격에 대해서도 확대될 전망이다. 우리나라에서는 환경부에서 지원하는 선도기술개발사업에서 시험방법과 규격화에 대한 연구가 진행되고 있는데 98년 말에는 이에 대한 연구결과가 도출될 예정이다. 현재 우리나라에서는 퇴비화 뿐만 아니라 토양 매립, 매립지 매립에 대해서 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

1. ASTM D0883-92, 1992. "Standard definition of terms-degradable plastic, biodegradable plastic, photodegradable plastic, hydrolytically degradable plastic, oxidatively degradable plastic" Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
2. ASTM G 21-70, 1989. "Determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
3. ASTM D5209-92, 1992. "Standard test method for determining the aerobic biodegradation of plastic materials in the presence of municipal sewage sludge", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
4. ASTM D5210-91, 1991. "Standard test method for determining the anaerobic biodegradation of plastic materials in the presence of municipal sewage sludge", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
5. ASTM D5247-91, 1991. "Standard test method for determining the aerobic biodegradability of degradable plastics by specific microorganisms", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
6. ASTM D5271-92, 1992. "Standard test method for assessing the aerobic biodegradation of plastic materials in a activated-sludge-wastewater- treatment system", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.

7. ASTM D5338-92, 1992. "Standard test method for determining the aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
8. ASTM D5929-96, 1996. "Standard test method for determining the biodegradability of materials exposed to municipal solid waste composting conditions by compost respirometry", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
9. ASTM D 5512-94, 1994. "Standard practice for exposing plastics to a simulated compost environment using an externally heated reactor" Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
10. ASTM D5509-94, 1994. "Standard practice for exposing plastics to a simulated compost environment", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
11. ASTM D 5525-94a, 1994. "Standard practice for exposing plastics to a simulated active landfill environment" Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
12. ASTM D 5526-94, 1994. "Test method for determining anaerobic biodegradation of plastic materials under accelerated landfill conditions", Annual Book of ASTM Standards, Vol.08.03. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
13. ASTM D 5511-94, 1994. "Determining anaerobic biodegradation of plastic materials under high-solids anaerobic-digestion conditions", Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
14. ASTM D 5437-93, 1993. "Weathering of plastics under marine floating exposure" Annual Book of ASTM Standards, Vol.08.03. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
15. JIS K6950-1994, 1994. "Plastics- Testing method for aerobic biodegradability by activated sludge", 일본규격협회.
16. Bruno De Wilde, 1996. "European standards on pilot-scale and industrial-scale composting tests for bioplastics : A state of affairs" in the paper presented at the 5th Annual Meeting of the Bio/Environmentally Degradable Polymer Society, September22-25, Nashville, Tennessee, USA.
17. Charles A. Pettigrew, 1996. "Testing the degradability of polymeric materials in solid waste" ASTM Standardization News, September, pp 32-35.