

순환경제 관점에서 본 플라스틱 식품포장재 재활용의 안전성에 관한 고찰

김미경*

단국대학교 식품공학과

A Study on the Safety of Food Packaging Materials from the Perspective of the Circular Economy

MeeKyung Kim*

Department of Food Engineering, Dankook University

Abstract Advances in food packaging play an important role in keeping food manufacturing and food supply safe. Food packaging facilitates the storage, handling, transportation and preservation of food, and also contributes to the minimization of food waste. On the other hand, food packaging materials have high production volumes, short usage times, and accelerate the occurrence of environmental problems related to waste. The circular economy has already been introduced to pursue sustainability through resource conservation and recycling, and to reduce waste and carbon emissions. By activating an eco-friendly economic system that minimizes resource depletion and environmental pollution, reducing, reusing, recycling and redesigning the goals of the circular economy will reduce the impact of food packaging on the environment. This review focused on the safety aspects of recycled food packaging as recycling is currently considered an important means of packaging waste management. Assessing the safety of recycled packaging is very important because recycling can increase the levels of potentially hazardous chemicals in packaging and in the food after they are migrated. Various food packaging materials such as plastic, paper and cardboard, aluminum, steel, and multi-material multi-layers packaging are commonly used, but only the recycling safety of plastic food packaging materials, which is the most used and has a significant increase in post-use problem, is discussed in this review.

Keywords Circular economy, Food packaging, Recycling, Reduce, Safety

서 론

현대 사회에 새로운 패러다임으로 떠오른 순환경제(circular economy)는 그동안 추구해온 지속 가능한 성장과 생활환경 등을 보다 실천적 의미로 만들고 있다. 자원을 무분별하게 채취하여 대량 생산을 하고 자유로이 쓰고 버리는(take-make-dispose) 선형경제(linear economy)의 방만한 생산 및 소비 행태를 개선하여 자원 절약, 생산품 재사용, 폐기물 재활용을 실천하는 순환경제는 지구 환경 변화에 대처하고 건강한 생태계를 보전하기 위한 원동력으로 우리 모두가 추구해야 하는 경제사회의 윤리적 가치이다.

재료와 에너지에 대한 순환 흐름의 개념은 1966년 Kenneth E. Boulding의 저서, “The Economics of the Coming Spaceship Earth”에서 등장하였으며, 경제시스템이 제한된 자원 풀을 가진 생태계에 적합해야 할 필요성을 설명하였다¹⁾. 그러한 시스템에서는 소비로부터의 모든 산출물은 생산을 위한 투입물이 되기 위해 지속적으로 재활용 되어야 함을 강조하였다. “순환경제”라는 용어는 1988년 Allen V. Kneese의 “천연자원의 경제학(The Economics of Natural Resources)”에서 처음 등장하였으며²⁾, 그 후 추출, 생산 및 소비 단계의 폐기물이 투입물로 전환되는 경제시스템을 설명하는 데 사용하였다³⁾. 순환경제는 산업 시스템에서 원자재 및 에너지 투입량 감소, 폐기물 최소화와 같은 폐쇄 고리를 촉진하고 있다. 지난 몇 년 동안, 이 개념은 여러 국가에서 정책 결정의 중요 부분이 되었으며, 생산 분야에서 그 중요성이 커져 왔고 전 세계의 소비 및 폐기물 분야의 순환경제에서 실용적인 해법을 지향하도록 이끌어왔다⁴⁾.

*Corresponding Author: MeeKyung Kim
Dankook University, 119, Dandae-ro Cheonan-si, Chungnam 31116, Republic of Korea
Tel: *** - **** - ****
E-mail: jadekim12@dankook.ac.kr

감량(reduce), 재사용(reuse) 및 재활용(recycle)은 폐기물 관리의 중요한 3대 요소이다. 감량은 원자재 사용, 에너지 투입, 폐기물 생산의 최소화를 목표로 하며, 재사용은 제품 또는 구성 요소를 반복적으로 사용하는 것을 의미한다. 재활용은 주로 에너지, 자원, 배출량을 감소하고, 재료 사용으로 인한 환경 영향을 줄이고자 함이다. 감량 및 재사용이 더 친환경적인 요소이며, 완전 새 재료 대신 재활용 원료를 사용하는 것도 유익한 해결책으로 인식된다⁵⁾. 포장 폐기물과 관련하여 재사용 및 재활용은 사회적 변화를 의미하며, 경제적, 환경적 측면에서 모두 기대되는 혜택이다. 그러나 일부 유형의 재료만 반복적으로 재활용 및 재사용 할 수 있다. 사용 단계에서 점진적인 화학적 변화를 거치거나 제한된 재활용, 재활용이 거의 불가능한 재료의 경우도 재생 가능한 물질 자원(renewable material resources)으로서 순환경제에서는 유용하게 사용할 수 있을 것이다⁶⁾.

유럽 연합(European Union)은 2014년부터 순환경제에 대한 비전을 도입하였으며 2018년에는 재활용, 포장 폐기물 및 매립에 대한 새롭고 지속 가능한 모델로의 전환을 촉진하는 목표를 설정하였다. 2020년 3월, 유럽연합 집행위원회는 자원을 더 잘 관리하여 낭비를 줄이는 것을 목표로 하는 순환경제를 위한 실행 계획(New Circular Economy Action Plan)을 발표했으며, 2021년 2월 유럽연합 의회는 2050년까지 탄소 중립적이고 환경적으로 지속 가능하며 무독성이며 완전한 순환경제를 달성하기 위한 추가 조치를 요구하는 새로운 순환경제 실행 계획에 대한 결의안을 채택하였다. 이 실행 계획에는 2030년까지 더 엄격한 재활용 규정과 재료 사용 및 소비에 대한 구속력 있는 목표를 포함하고 있다⁷⁾.

식품포장 폐기물을 새로운 식품포장으로 재활용하려면 안

전 문제가 제기된다. 재활용 식품포장의 사용은 가능한 오염원의 제공뿐만 아니라 포장에서 식품으로 이행할 수 있는 화학물질의 종류 및 오염수준을 증가시켜 잠재적으로 인간의 건강에 영향을 미칠 수 있다^{8,9,10)}. 재활용 대상 물질이 염료, 첨가제 및 그 분해산물 등의 오염물질을 포함할 수 있고, 사용 또는 재활용 중에 품질이 저하될 수 있으며, 비의도적 첨가물질(non-intentionally added substances, NIAS) 등 재활용 과정에서 유입된 비식품 등급의 물질을 지닐 수 있으므로 재활용의 안전성을 확보함이 매우 중요하다.

유럽연합과 미국의 식품포장 규정에는 모든 재활용 및 첫 사용(virgin) 포장 재료에서 식품으로 이행 가능한 화학물질에 대해 동일한 수준의 안전성을 요구하고 있다. 유럽에서는 식품접촉물질(food contact material, FCM)에 사용하는 재활용 플라스틱은 특별히 플라스틱 재활용 규정(Plastics Recycling Regulation, EC 282/2008)에 따르도록 규정하고 있다^{11,12)}. 미국 식품의약품안전청(US FDA)은 식품접촉 플라스틱을 위한 재활용 과정을 사례별로 고려하고 있고, 플라스틱 재활용 업체가 그들의 재활용 과정에 대한 평가와 의견 등의 정보를 제출하도록 하고 있다¹³⁾. 한국은 기구 및 용기·포장용 합성수지체에 대하여 화학적 재활용만 허용되어 있었으나 물리적 재활용도 허용하기 위한 행정예고가 2021년 5월에 발표되었다¹⁴⁾. 합성수지체 재활용 기준 개선에 대한 주요 내용으로는 “1) 안전성이 입증된 재활용 합성수지의 식품용으로 허용 확대 필요 2) 식품용기의 식품 접촉면에 물리적 재활용 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET) 원료 사용을 인정하는 기준 마련 3) 안전한 재활용 합성수지 사용 및 국제적 추세와 조화될 수 있도록 기준 개선”이 포함되어있다. Table 1에 국가별 재활용 플라스틱 식품포장

Table 1. Recycled plastic food packaging regulations by country

구분	유럽연합	미국	한국
관련규정	- (EC) No 282/2008	- (21 CFR, Section 170 et seq., 174.5) - FDA, Guidance for Industry: Use of Recycled Plastics in Food Packaging: Chemistry Considerations	- 식품위생법 - 기구 및 용기·포장의 기준 및 규격
식품포장 허용범위	- 화학적 재활용 플라스틱 재질 - 공정 자투리 재활용 플라스틱 재질 - 다층구조의 중간층 재활용 플라스틱 - EFSA에서 승인한 공정으로 제조한 재활용 플라스틱	- 산업용 스크랩 재활용 플라스틱 - 화학적 재활용 플라스틱 - 다층구조에서 식품과 접촉하지 않는 부분 사용 - 물리적 재활용으로서 FDA가 오염 저감을 인정한 경우	- 화학적 재활용 플라스틱 - 신규 원료 자투리 재활용 플라스틱 - 다층구조에서 식품과 접촉 하지 않는 부분 사용
재활용 식품포장재 안전관리	- 승인·인정에 의한 Positive List 방식 적용 - PET에 대해 미지오염물질의 인체 노출입계값: 0.0025 µg/kg bw/day 적용	- 승인·인정에 의한 Positive List 방식 적용 - 오염물질관리 EDI: 1.5 µg/person/day (0.5 ppb 식이농도 이하)	- 승인·인정 제도 없음

*출처: 한국환경산업기술원 ‘재생플라스틱의 식품접촉용도 해외 기준’을 재구성.
인체노출입계값: EFSA 2011 Annual Report.
오염물질관리 EDI: US 21 CFR 170.39.
한국: 2022년 1월부터 식품용 용기·포장재 원료의 물리적 재활용을 허용 계획임.

재 관련 규정을 간략히 정리하였다.

재활용은 기본적으로 순환경제를 이루어내는 것과 관련되므로, 본 고찰에서는 플라스틱 식품포장재의 활용 가능성에 영향을 미치는 특성 및 재활용 물질의 안전성에 대하여 살펴보고자 하였다.

본 론

1. 식품포장재로 활용되는 플라스틱의 성질

플라스틱은 매우 다양하며 가장 일반적으로 사용되는 식품포장용 재료이다. 열경화성 플라스틱은 열을 가하여도 녹지 않는 비가역적 형태로 굳어진 중합체이다. 강하고 내구성이 있어 식품포장용이 아닌 자동차, 건설 산업에서 접착제 및 코팅으로 주로 사용된다. 열가소성 플라스틱은 높은 온도에서 액체처럼 녹았다가 낮은 온도에서는 원래 상태인 고체로 되돌아가는 중합체이다. 열가소성 플라스틱은 병, 식기류 및 플라스틱 필름과 같은 다양한 제품으로 쉽게 성형될 수 있으므로 식품포장에 매우 적합하다.

플라스틱 고분자의 물리적 특성과 사양을 해석하기 위해서는 분자량, 분자구조, 고분자 종류, 투명도 등의 주요 특성을 고려해야 한다. 열가소성 플라스틱은 다음과 같은 몇 가지 특성으로 인해 식품포장 분야에서 널리 활용되고 있다. 긴 사슬 분자, 생체 고분자 시스템 및 물을 포함할 수 있는 용매 용해도, 특정 강성이나 유연성을 소유, 반결정 구조 및 무형 결정 구조, 타 포장재에 비해 높은 발화성, 특정 온도와 압력하에서 흐를 수 있는 점도를 지닌 것이다. 일반적으로 고분자의 분자량은 포장 물질에 도움이 되는 물리적 특성을 위해 최소 25,000 g/mol 이상을 생성해야 한다¹⁵⁾. 뚜렷한 광택 정도는 포장에 대한 인식과 소비자의 관점을 바꿀 수 있으며, 포장은 가스와 빛의 침투를 제한하여 일부 식품의 유통 기한을 늘리는 데도 매우 중요하다. 식품포장재의 경우 편리성, 품질, 건강 및 안전에 대한 소비자의 욕구를 충족시키기 위해 포장 디자인 및 기능이 진화함에 따라 재료 과학 및 공학이 점점 더 중요한 역할을 하고 있다. 특정 용도를 위한 특정 재료를 선택하는 것은 재료 기능, 가공성, 가용성, 비용을 기반으로 여러 옵션을 사용할 수 있는 매우 복잡한 과정이다. 식품포장 응용 분야에 가장 적합한 재료를 결정하기 위해 고려해야 할 요소를 다음과 같이 분류하여 보았다^{15,16,17)}.

1.1. 물리적 특성

재료 및 공정 기술의 발전으로 포장 산업은 플라스틱의 전체 중량을 줄이는 경량 포장 재료를 선택하고 있다. 비용을 절감할 뿐만 아니라 생산 및 운송 중 에너지를 절약하여 지속 가능성을 향상시키고 재활용의 효율성을 높일 수 있기 때문이다. 사용되는 플라스틱의 비율을 줄이는 방법

모색에 따라 밀도 및 중량 감소 또는 경량화는 식품포장 업계에서 추구하는 방향이 되었다. 플라스틱과 관련하여 폴리프로필렌(PP)은 가장 낮은 밀도와 가장 가벼운 무게를 제공하며 PET와 같은 대체 포장에 비해 최대 17%의 무게 감소를 제공하기도 한다.

1.2. 기계적 특성

최종 제품의 전체 강도 및 강성에 중요한 재료의 기계적 특성 평가는 강도, 강성, 인성, 충격 등의 요소를 고려한다. 식품포장과 관련하여, 제품은 종종 며칠에서 몇 개월에 이르는 유통 기한이 필요하므로 원하는 저장 수명을 지원하기 위한 재료 또는 기계적 특성을 가진 재료를 선택하는 것이 중요하다. 포장 재료의 특성을 향상시키는 첨가제 및 충전제도 사용할 수 있다.

1.3. 열적 특성

저온, 상온 또는 고온에서 주요 기계적 성능 특성을 제공하는 재료에 대한 고려를 의미하는데 안정적인 식품포장과 관련하여 특히 중요하다. 전자레인지 사용을 위한 높은 열변형 또는 냉동을 위한 저온 충격 특성과 같은 특수 속성이 필요할 수 있다. 고열 조건을 견디도록 제작되지 않은 용기는 용기를 왜곡시키고 심각한 안전 문제를 야기하기에 충분할 수 있기에 플라스틱 용기를 전자레인지에 넣거나 뜨거운 액체를 붓는 것과 같이 일반적인 식품포장 재료의 온도 허용 오차를 이해하는 것이 중요하다. PP 재료는 온도 범위와 관련하여 최대 127°C의 높은 저항과 냉동고 적용의 호환성을 제공하는 광범위한 성능 선택을 제공한다.

1.4. 화학적 특성

식품포장에서 재료의 화학적 특성을 고려한다는 것은 원하는 식품에 대해 화학적으로 안정한 재료를 선택하는 것을 의미한다. 산성이나 알칼리성이 높은 식품은 포장재에 따라 다르게 반응한다. 또한 포장은 다른 포장재와 접촉할 수 있는 가정용 화학물질에 대해 안정적이거나 반응성이 없어야 한다. 이러한 평가가 제품 및 포장에서 곰팡이, 박테리아, 바이러스 등과 같은 전염성 물질을 제거하거나 살균하기 위해 식품이 포장되기 전과 후에 포장 재료가 멸균 시스템을 한번 또는 여러번 통과하는 과정에서 이루어져야 한다. 따라서 포장 재료는 식품 및 멸균 요구 수준에 따라 습열, 건열, 조사와 같은 멸균 기술 및 과산화수소와 같은 화학적 방법을 견디면서 구조적 무결성을 유지해야 한다.

2. 플라스틱 식품포장재의 재활용

플라스틱 폐기물은 재활용, 다운사이클링 또는 화학빌딩 블록, 연료나 에너지의 생산을 통해 회수할 수 있다¹⁸⁾. 재

활용은 일반적으로 기계적 또는 화학적 방법에 의해 달성할 수 있다. 플라스틱의 기계적 재활용에는 세척, 분쇄, 재용해 및 재과립화 단계를 포함하며, 화학적 재활용 공정은 플라스틱을 단량체로 해중합하여 처음의 원료물질로 만든 후 다시 재중합에 사용하는 것이다. 화학적 재활용 방법에는 오염물질의 전이에 대해 우려하지 않아도 되나, 경제적 및 생태적으로는 지금의 화학적 재활용 공정의 대규모 적용은 한계가 있다^{19,20}. 따라서 여기서는 플라스틱 식품포장재를 위한 기계적 재활용 공정에서의 오염물질의 존재와 이행에 대해 살펴보았다.

2.1. 플라스틱 포장재 재활용 현황

유럽에서는 2015년에 거의 2,000만 톤의 플라스틱 포장재가 사용되었으며 현재, 한해 1,500만 톤의 플라스틱 폐기물이 발생하고 30% 이하가 재활용되고 있다²¹. 미국 환경보호청에 따르면 2018년 미국의 플라스틱 생산량은 3,570만 톤으로 이 중 8.7%만 재활용되었으며, 도시고형폐기물에서 연소된 플라스틱의 총량은 560만톤, 매립은 2,700만 톤으로 75% 이상을 차지하였다²². 일본의 경우 폐플라스틱 배출량이 900만 톤 정도이며, 회수된 폐플라스틱의 60%가 열적 재활용(thermal recycling), 20%가 원료 재활용(material recycling), 0.5%가 화학적 재활용(chemical recycling)으로 각각 처리되고 있다²³. 2016년을 기준으로 미국, 영국, 한국의 1인당 플라스틱 폐기물 발생량은 각각 105 kg, 99 kg, 88 kg을 기록하였다²⁴. 유엔 환경계획(UN Environment Programme)에서 작성한 글로벌 플라스틱 경제지표의 2017년 통계를 보면, 연간 매출 7500억 달러가 세계시장 규모이며 매년 95%의 플라스틱 포장재가 소모되고 플라스틱 폐기물의 9%만이 재활용되고 있다²⁵(Fig. 1).

PET, PP, 고밀도(HDPE) 및 저밀도(LDPE) 폴리에틸렌, 폴리스티렌(PS), 폴리염화비닐(PVC)등의 단일 고분자로 이

루어진 플라스틱 포장재는 열가소성 플라스틱으로 기계적 재활용이 가능하다. 반면에 다층 플라스틱은 잘 섞이지 않고 상용화제를 첨가해야 혼합될 수 있기에 비 식품 등급의 재료로 만들어져 사용되며 식품용 새 포장재로 재활용되지 않는다^{20,26}. 식품포장은 단기간 사용하면 종종 쓰레기가 된다. 재활용은 현재 식품포장이 환경에 미치는 영향을 줄이기 위한 한 가지 방안으로 논의되고 있다. 효율적인 수거 및 분리 과정은 성공적인 재활용을 위한 전제 조건이다²⁷. 그러나 재활용을 적용하여 재료를 폐쇄된 주기로 유지하고 새로운 식품포장재를 생산할 수 있는지 여부는 재료 유형에 따라 크게 달라진다. 안정성(stability), 색상 및 냄새와 같은 속성은 재활용 중에 변경될 수 있으며 재료가 오염물질의 이월을 허용하거나 공정에서 저하되는 경향이 있는 경우 화학적 안전성(chemical safety)이 손상될 수 있다. PET의 경우 확립된 재활용 공정이 존재한다^{28,29,30}. 그러나 식품과 접촉하여 사용하기에 안전한 재료를 생산하려면 버진재료를 추가 및 특별 조치가 필요하다. 대안으로, 재활용 물질이 식품과 직접 접촉하는 것은 차단막과 같은 적절한 조치로 방지할 수 있으나, 이는 다시 재활용에 영향을 미칠 수 있다^{31,32}.

2.2. 순환경제로 본 재활용 실천 노력

순환경제는 재활용 재료를 사용하여 만든 제품이 안전하고 규정을 준수하는 경우에만 작동한다. 식품포장재 산업은 신제품을 만들 때 재활용 재료를 사용하는 것과 관련하여 몇 가지 문제에 직면해 있는데, 이것은 새로운 플라스틱의 개발이 새로운 재활용 기술을 앞지르고 있다는 사실에서 비롯된다 할 수 있다. 수거 유형 및 재활용 기술에 따라 식품포장재의 순환경제 기여도가 달라지겠지만 유럽연합, 미국, 한국의 재활용 실천 노력을 간략히 살펴보았다.

유럽연합은 순환경제 촉진을 열망하지만 식품포장재 제조업체와 소비자에 대한 근본적 질문인 “재생 플라스틱을

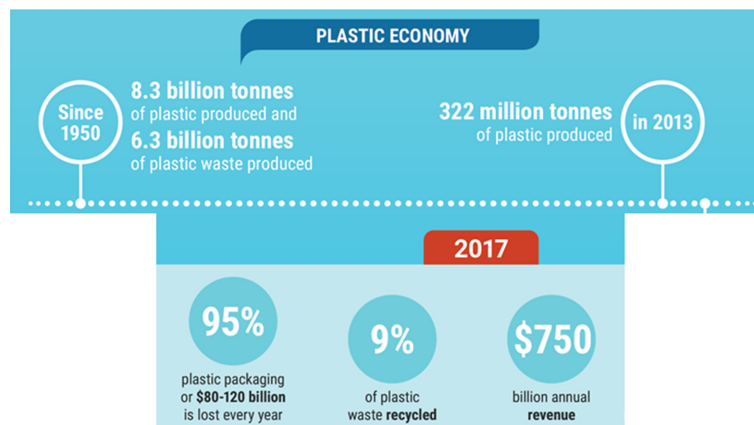


Fig. 1. Plastic economy in the world drafted by UN Environment Programme

*출처: UNEP Plastic Management Infographic을 재구성.

신뢰할 수 있습니까?”라는 의문을 가지고 있다. 플라스틱이 집합적으로 재활용되는 경우가 많다는 사실은 최종 재료가 오염될 수 있음을 의미한다. 결과는 흐리거나 변색된 플라스틱 또는 냄새가 나는 플라스틱과 같이 명백할 수 있지만 유전독성 불순물과 같이 감지할 수 없을 수도 있다. 이상적인 상황은 동일한 제품을 동일한 용도로 재활용하는 폐쇄형 재활용 루프이다. 이를 위해서는 플라스틱을 별도로 수거하는 재활용에 대한 다른 접근 방식이 필요하다³³⁾. 유럽 연합은 2015년 이후 자원사용 감축 노력을 꾸준히 해오고 있으며 온실가스 감축을 위해 탄소중립 2050을 선언하고 폐기물 발생 최소화 및 재활용 등으로 자원순환정책을 추진하고 있다. 구체적으로 virgin PET 사용을 줄이고 플라스틱 포장재의 회수율을 높여 재생원료, r-PET 사용이 확대 되도록 플라스틱 음료 포장재를 대상으로 ‘빈용기보증금제도’를 2018년에 도입하였다. 또한 「순환경제법」에 따른 「포장재 및 포장폐기물에 관한 지침」(EU/2018/852)에 따라 식품산업계는 플라스틱 음료 포장재 제조시 해당 제품의 라벨에 의무적으로 r-PET 함유율을 표시해야하며 식품 위생이나 소비자 안전을 위협하지 않는 범위에서 재활용이 가능한 포장재의 최소비용을 설정하고, 포장재의 재활용 비중을 높이도록 하고 있다³⁴⁾.

미국은 39개주에서, 생활폐기물에서 나오는 병, 각종 용기의 분류를 용이하게 하여 재활용율을 높이고자 수치식별 코드(Resin Identification Code, RIC) 표기를 관련법에 제정하였다. 특히 캘리포니아주는 플라스틱 포장재 재활용 법을 제정하여 운영하고 있는데, 자원순환 담당 기관인 CalRecycle에서는 이 법에 의거해 1987년부터 음료수병 재활용 프로그램을 운영하고 있으며, 2012년 폐기물 관리에 관한 AB 341을 통과시켜 2025년까지 75% 이상 폐기물 순환을 목표로 세웠다³⁵⁾.

한국은 최근 1인 가구의 증가로 일회용품의 사용량이 급격히 증가하고 있다. 1994년부터 「자원의 절약 및 재활용 촉진에 관한 법률」에 따라 일회용품 사용을 억제해왔고, 2018년 5월 「재활용 폐기물 관리 종합대책」 수립, 2019년 4월부터는 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률(약칭: 자원재활용법) 시행규칙」에 따라 일회용품 사용의 부분적 금지를 실천하고 있다. 한국 정부는 2021년 7월 14일 “탄소중립 추진기반 구축: 2030 국가 온실가스 감축목표”이행을 위한 한국판 뉴딜 2.0 추진계획을 발표하였다³⁶⁾. 환경부는 폐플라스틱 처리과정에서 발생하는 탄소저감을 위해 순환자원화 관련 규정을 정비하고 식품의약품안전처와 함께 분리배출된 투명 PET를 다시 식품용 용기·포장재로 재활용할 수 있도록 재활용정책 확대를 발표하였다. 이에 따라 현재 식품용 용기·포장재 원료의 재활용은 화학적 재활용만 허용하나 2022년 1월부터 PET, PEN(폴리에틸렌나프탈레이트) 재질뿐 아니라 모든 합성수지제를 대상으로 물리적 재활용

이 허용될 계획이다¹⁴⁾. 환경부는 수거, 선별, 재활용업체의 시설기준, 중간원료의 품질기준 등 식품용 용기에 사용하는 원료와 관련된 제반 기준을 포함하는 폐기물의 재활용 기준을 개정하여 물리적 재활용을 거친 재생원료 사용체계를 구축할 계획이다. 이러한 노력은 생산, 폐기, 재활용에 이르는 전과정에 순환경제가 도입되는 실천이라 할 수 있겠다.

3. 플라스틱 식품포장재 재활용에 대한 안전성 평가

3.1. 플라스틱 식품포장재의 오염 분류

식품포장은 제품의 품질에 큰 역할을 하므로 식품포장에서 발생할 수 있는 일반적인 오염은 내부오염, 외부 오염이 있으며 오염원을 제대로 파악함이 매우 중요하기에 물리적 오염, 화학적 오염, 미생물 오염으로 나누어 보았다^{37,38,39)}.

(1) 물리적 오염: 매우 다양한 실제 물체가 식품을 오염시킬 때 발생하며 매년 수백만 개의 식품이 소비자가 발견한 외부 오염물질로 인해 문제가 된다. 식품 산업은 소비자에게 도달하는 모든 최종 제품에 물리적 오염물질이 없는지 확인하기 위해 많은 예방조치를 취하고 있다. 식품포장에서 이물질을 방지하고 식별하는 기술이 빠르게 개선되어 식품포장의 물리적 오염물질의 수를 크게 줄이고 있다.

(2) 화학적 오염: 방제 제품에 의한 오염, 장비 유지보수에 사용되는 화학물질에 의한 오염, 2차 포장, 보관, 운송에 따른 오염물질, 제조 공정을 지원하기 위한 통제되지 않거나 식품에 부적합한 화학물질 등이 있다. 일반적인 화학적 오염은 식품이 포장재와 직접 접촉하기 때문에 발생하며, 이로 인해 일부 유해물질이 식품으로 이행하여 발생할 수 있다. 식품 생산, 포장 및 준비는 각 단계에서 식품에 오염물질이 침입할 가능성이 있어 화학적 오염의 잠재적 위험이 많다. 화학물질이 있어서는 안 되는 곳에 존재하거나 안전한 것으로 간주되는 것보다 많은 양이 존재하는 형태의 화학적 오염이 있으며 승인되지 않았거나 잘못된 첨가제를 사용하여 식품이 오염될 수도 있다.

(3) 미생물 오염: 박테리아, 효모, 곰팡이 및 바이러스와 같은 미생물의 의도하지 않은 유입을 말한다. 적절한 예방조치가 없으면 이러한 형태의 오염이 생산 공정의 모든 단계에서 발생할 수 있다. 해충은 제품에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며 항상 적절한 방제조치를 취해야 한다.

3.2. 재활용 플라스틱 관련 오염물질

오염물질 중 일부는 올리고머, 첨가제 및 분해산물과 같은 다양한 오염물질 그룹과 이전 사용 및 오용에서 파생된 화학물질이 재활용 플라스틱에 포함된 것으로 보고되었다^{40,41,42,43)}. 오염물질의 존재와 식별이 생산 및 재활용 공정, 사용 및 폐기물 관리 단계, 적용된 분석방법을 포함한 많은 요인에 따라 달라지기 때문에 오염물질의 무작위 분포를 반영하는 경우가 많다. 식품접촉물질에서 파생되었거나 식품

포장재용으로 의도된 재활용 플라스틱에서 발견된 일반적인 오염물질을 종류별로 간략히 정리하였다.

(1) 재활용 플라스틱 재료의 잠재적 오염물질: 맛, 향 및 냄새 화합물은 소비후(post-consumer) 플라스틱 포장의 일반적인 오염물질에 속하며 대부분 이전 사용 시 플라스틱과 접촉하여 발생한다. 통상적으로 재활용된 PET는 리모넨(limonene)과 γ -테르피넨(terpinene) 및 *p*-시멘(cymene)을 미량 함유하였다. 식품 등급 PET에서 검출되는 기타 화합물들은 구강 세정제, 개인위생 및 가정용 세제와 같은 비식품 용도에 사용된 소비후 PET의 오염으로부터 기인하였다. 방향제 및 향미 화합물인 리모넨(limonene, 3-카렌(carene), 베타미르센(beta-myrcene) 및 테르피놀렌(terpinolene)은 재활용품에서 검출되었지만 virgin HDPE에서는 검출되지 않았다⁴⁰). 청량음료는 일반적으로 PET로 판매되지만 방향제 및 향미 화합물로 인한 HDPE의 오염이 재활용품 수집 중 소비후 PET와 HDPE 병 간의 접촉으로 인해 발생할 수 있다⁴⁴).

(2) 비의도적 부산물 올리고머: 올리고머는 약 10개 이하 소수의 단량체가 중합된 화합물로, 플라스틱 합성 과정에서 비의도적 부산물로 생성되기도 한다. 고분자물질 사용 및 재활용 중에 생성될 수도 있으며 출처에 관계없이 올리고머는 재활용 물질에 존재하여 식품으로 이행할 수 있다. 선형 및 고리형 PET 올리고머는 재활용 PET에서 검출되며 di- 및 trimers가 주요 종이다^{45,46}). 특히 저분자량 PP의 경우 재활용 후 올리고머로 추정되는 물질의 이행 속도가 증가함이 관찰되었다. 버진 PS는 재활용 물질보다 더 높은 농도의 스티렌 단량체와 이량체를 함유하였는데, 스티렌에 산소가 결합된 유도체인 아세토펜과 벤즈알데히드는 버진 PS 보다 재활용 시료에서 상대적으로 더 많이 발견되었다⁴⁷).

(3) 첨가제 및 그 분해산물: 첨가제는 최종 제품의 외관 및 성능뿐만 아니라 생산 공정을 개선함으로써 플라스틱 고분자에서 다양한 기능을 수행한다. 유럽에서는 600여종의 물질이 플라스틱 식품포장재에 대한 첨가제 및 고분자 생산 보조제로 승인되었다⁴⁸). UV 안정제 및 항산화제는 사용 중에 분해되도록 만들기에 제품재료의 잠재적인 오염물질의 수가 증가하기도 한다. 첨가제는 일반적으로 재활용 중 기능 손실을 보상하기 위해 대체되는 반면 잔류첨가제 및 분해산물이 플라스틱 재료에 남을 수 있다. 재활용 플라스틱에서 검출된 많은 오염물질의 발생원을 밝혀내긴 어렵지만, 환경에 널리 산재하거나 폐기물 관리 중 교차오염으로 설명될 수 있다.

프탈레이트 또는 UV 안정제와 같은 첨가제, 비식품 플라스틱에서 파생된 오염물질 및 난연제, 식품포장의 부적절한 사용으로 인한 용매, 소비자의 오용에서 발생하는 교차오염 등으로 인한 오염물질은 최종 사용 시기를 관리하는데 매우 중요하다. Keresztes 등의 연구에 의하면, 버진 PET 병의 물 시료에서는 diisobutyl phthalate (DiBP), dibutyl

phthalate (DBP) 및 benzyl butyl phthalate (BBP)가 존재하지 않는 것으로 나타났으나, 재활용 함량이 20~30%인 PET 병의 물 시료에서는 bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), DiBP, DBP, BBP가 검출되었다⁴⁹). 일반적으로 PET의 첨가제로 필요하지 않은 프탈레이트 가스제가 재활용 재료에 포함된 이유는 명확하지 않은데, 다른 고분자 유형에서 유래한 불규칙한 외부 오염물질로 소비후 PET에 유입될 수 있는 것으로 추측되었다^{50,51}). HDPE 및 PP의 경우 일부 첨가제는 반복 재활용 중에 이행 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 재활용 폴리에틸렌에서 안정제 Irgafos 168, Irganox 1010 및 Chimasorb 944의 더 높은 이행 수준은 각 재활용 단계에서 이러한 화학물질을 추가했기 때문으로 설명되었다⁵²).

(4) 비식품 등급 플라스틱 및 소비자의 오용으로 인한 오염물질: 유럽 시장에서 수거한 검은색 플라스틱 식품포장재 시료에서 브롬화 난연제(brominated flame retardants, BFRs)가 측정된 것은 폐전기전자제품(waste electric and electronic equipment, WEEE)에서 파생된 플라스틱이 식품포장재로 재활용됨을 나타내고 있는데, 이는 FCM 규정(EC 10/2011; EC 282/2008)을 준수하지 않거나, 불법 WEEE에서 파생된 기타 비식품 등급 물질인 것으로 추정되었다⁵³). 또한 소비자가 비식품 품목이나 액체를 저장하는 데 사용한 플라스틱 병이 재활용 될 경우 플라스틱에 흡수되어있던 화학물질이 재활용 흐름에 들어갈 수 있다⁵⁴). 오염물질의 예로는 2-methoxynaphthalene(액체 섬유유연제에서 파생됨), 황산 화합물(식품에서 파생됨) 및 퓨젤 오일(fusel oil: 알코올 발효의 부산물로 여러 고급 알코올의 혼합물)이 포함된 에탄올(가정에서 증류한 알코올에서 파생됨) 등이 보고되어있다.

(5) 무기 원소: PET 합성에서 촉매로 사용되는 안티몬은 일반적으로 재활용 PET와 버진 PET 모두에서 이행된다. 규소, 칼슘, 나트륨, 철, 마그네슘, 알루미늄 및 아연은 재활용된 PET 시료에서 이행되었지만 매우 보편적으로 산재되어있는 이러한 원소의 오염원은 명확하지 않다⁴¹). Whitt 등의 연구에서는 재활용 PET로 만든 식품포장 품목 200개 중 29개에 카드뮴, 크롬, 니켈, 안티몬 및 납이 포함되어 있었다. 29개의 PET 시료 중 22개는 중금속이 물과 5% 수성 시트르산으로 이행되는지를 시험하였는데, 카드뮴, 납 또는 안티몬의 이행은 측정되지 않았고 대부분의 시료에서 크롬 및 니켈이 검출 가능한 수준 이상으로 5% 수성 시트르산으로 이행되었다^{55,56}).

3.3. 재활용 공정의 안전성 평가

기계적으로 재활용된 플라스틱을 식품과 접촉하는 경우에는 고분자 및 첨가제의 분해산물뿐만 아니라 소비자의 이전 사용 및 오용으로 인한 부수적인 오염물질, 폐기물 처리로 인한 교차오염 및 환경오염 물질이 포함될 수 있으므로 각별한 주의가 필요하다. 또한, 식품 등급이 아닌 동일한

유형의 고분자도 재활용 과정의 흐름에 유입되어 오염의 수준을 높일 수 있다. 따라서 오염수준을 줄이기 위한 추가 세척 단계를 포함하는 플라스틱 식품포장재에 대한 고도의 분류 및 기계적 재활용 공정, 예를 들어, 고온 배양, 진공 또는 불활성 가스 처리 또는 유해하지 않은 화학물질로 표면 처리 등이 이미 확립되어있다⁵⁷⁾. 초임계 이산화탄소를 사용한 추출은 소비후 플라스틱 폐기물의 정화를 위한 또 다른 선택이다⁵⁸⁾. 이러한 작업은 화학적 오염을 인체 건강에 위협을 초래하지 않는 수준으로 줄이는 것을 목표로 한다. 위험 평가는 일반적으로 투입물의 품질, 오염물질을 제거하기 위한 재활용 공정의 효율성, 재활용 플라스틱의 용도를 고려하여 이루어진다.

유럽식품안전청(European Food Safety Authority, EFSA)은 PET 재활용 공정의 안전성 평가 기준을 존재 가능한 미지 오염물질에 대한 인체노출 임계값($0.0025 \mu\text{g}/\text{kg body weight}/\text{day}$)으로 한다³⁷⁾. 재활용 공정의 효율성과 재활용 제품의 품질은 주로 플라스틱의 물리화학적 특성, 공정 조건, 투입되는 플라스틱 폐기물의 순도에 따라 달라진다. PET 음료병의 재활용은 PET의 상대적으로 높은 불활성, 고온에 대한 내성, 식품접촉 등급 PET에 대한 수집 시스템이 확립되었다⁵⁷⁾. 지난 25년 동안 수십 가지의 병 PET 재활용 공정이 개발되었으나 다른 플라스틱의 재활용은 식품포장의 총량에 크게 기여하지만 훨씬 덜 확립되어 있는 실정이다.

미국식품의약청(US FDA)은 식품접촉 포장재에 대한 재활용 소재 사용을 규정하고 있고 연방 식품, 약물, 화장품 관리법(Federal Food, Drugs, Cosmetics Act)에 따라 식품과 포장재의 접촉 안전성을 규정하고 있다. 재활용 과정에서 각 오염물질이 재활용 플라스틱에서 식품으로 이행하여 식이 농도가 0.5 ppb를 초과하지 않아 일일추정섭취량(estimated daily intake, EDI)이 $1.5 \mu\text{g}/\text{person}/\text{day}$ (21 CFR 170.39)가 되도록한다⁵⁹⁾. FDA는 새로운 과학적 정보가 우려를 제기하는 경우 임계값 수준을 재검토 한다. “식품포장에 재활용 플라스틱 사용시 고려 사항” 가이드라인에 따르면 식품접촉 포장재에는 제한된 유형의 재활용 플라스틱 원료만이 허용되며 해당 물질의 순도는 별도의 시험을 거쳐야 한다⁶⁰⁾. 제조업체가 식품접촉 포장재에 재활용 플라스틱을 사용하고자 FDA의 승인을 요청하는 경우, 다음의 정보들을 제출해야 한다. ① 재활용 플라스틱의 출처, 재활용의 전 과정 및 오염방지에 대한 정보 ② 재활용의 전 과정에서 오염물질 제거를 위해 수행된 모든 시험결과 ③ 플라스틱의 사용 조건에 대한 설명(예: 의도된 사용 온도, 플라스틱이 접촉하게 될 식품의 유형, 접촉 기간, 식품접촉 플라스틱을 반복적 또는 일회용 사용여부 등에 대한 정보).

한국은 재활용 플라스틱의 안전성 확보를 위해 다음과 같은 기준을 제시하고 있다. (1) 기구 및 용기·포장 제조·가공 시 기준 및 규격에 적합한 원재료로부터 발생한 자투리 등

공정 부산물은 불순물 등이 오염되지 않도록 위생적으로 관리된 경우 사용할 수 있다. (2) 기구 및 용기·포장 제조·가공 시 식품과 직접 접촉하지 않는 부분에는 재활용 합성수지를 사용할 수 있다. 다만, 유해물질이 이행되어 식품에 혼입될 우려가 없도록 제조되어야 한다. (3) 기구 및 용기·포장 제조·가공 시 식품과 직접 접촉하는 부분에 다음의 어느 하나에 해당되는 경우에는 재활용 합성수지를 사용할 수 있다; ① 가열·화학반응 등에 의해 원료물질 등으로 분해하고 정제한 후, 이를 다시 중합(화학적 재생, chemical recycling)한 경우 ② 물리적으로 재생된 폴리에틸테레프탈레이트(PET) 재질의 재활용 합성수지로서, 기구 및 용기·포장에 사용되는 재활용 합성수지제 기준에 적합하다고 인정되는 경우. 이 경우 재활용 공정 중 사용하는 원료(플레이크 등)는 「폐기물관리법」 등에 따라 환경부 장관이 식품용 재활용 원료로 인정한 것이어야 한다¹⁴⁾.

재활용 공정의 안전성 평가에서 추가적인 우려는 의도하지 않은 물질(NIAS)의 출현이다. GMP(Good Manufacturing Practices)는 버린 플라스틱을 만들 때 의도적으로 추가된 물질이 안전 한도 내로 유지되도록 할 수 있지만, 의도하지 않은 재사용과 비효율적인 재활용 기술로 인해 원자재가 이미 무의식적으로 오염된 경우 GMP를 따르는 것은 도움이 되지 않을 수 있다. 유럽연합은 NIAS를 “사용된 물질의 불순물 또는 생산 공정 중에 형성된 반응 중간체 또는 분해 또는 반응 생성물의 불순물”로 정의한다⁴⁸⁾. NIAS는 출발 물질의 불순물, 화학반응의 산물, 제조, 수명 또는 재활용 과정에서 생성된 분해산물 등 다양한 출처에서 발생할 수 있으므로 안전성 평가를 하기 어렵지만 적절한 단계에서 평가할 수 있는 관련 연구 및 관리 방안이 필요한 실정이다.

결론

기존 경제시스템에서 식품포장은 일반적으로 일회용으로 설계되어 비교적 짧은 기간 후에 폐기되었다. 순환경제의 주요 목표 중 하나인 재료 투입량의 감량은 식품포장의 총량을 줄이기 위해 제안되었다. 순환경제의 목표를 달성하기 위해 포장재의 재사용이 권장되지만 식품포장재의 경우 재사용은 상업적으로 재충전 가능하고 세척 가능한 용기에만 제한적으로 가능하다. 많은 국가에서 다양한 포장재에 대해 재활용을 시행하여 폐기물의 양과 관련 환경 영향을 줄여나가고 있으나 다양한 유형의 포장 폐기물에 대한 더 높은 양적 재활용 목표가 필요하고 재활용 재료의 품질 및 추가 사용에 대한 사양 제한이 필요하다. 또한 재활용 재료를 원래 용도로 사용할지 아니면 기능이 저하되어 반복적인 재활용을 방해할 수 있어 다른 용도로만 사용할 수 있는지 여부는 여전히 논의가 필요하며 다운사이클링이 순환경제

의 목표와 일치하는지는 명확한 검토가 필요하다.

식품포장재는 인간 건강과 환경 영향에 대한 평가를 결합하는 것이 이상적이다. 수명주기평가(Life Cycle Assessment, LCA)와 같은 도구는 다양한 유형의 식품포장이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 비교하기 위해 적용되었다. 그러나 LCA는 전통적으로 제품 사용과 관련된 화학물질에 대한 인체 노출을 고려하지 않았다. 장기적으로, 재활용 식품포장재의 화학적 안전성은 재활용 흐름에 들어가는 모든 물질의 유해물질을 단계적으로 제거하고 신중하게 대체함으로써 개선될 수 있다. 어떤 경우든 일반적이고 무작위적인 오염물질을 제거하기 위한 재활용 공정의 세척 효율성은 철저히 특성화되어야 하며 단기적인 다양한 활동보다 효율적인 재활용 시스템과 식품포장의 지속 가능한 사용에 기여할 수 있어야 한다.

식품 보존 및 운송과 같은 주요 기능과 포장의 안전을 염두에 두고 축소 및 재사용의 개념도 재고할 수 있다. 제철 식품의 생산 및 현지 소비를 유도하고, 상점은 포장이 없는 다양한 유형의 식품을 제공하며 고객이 이상적으로 재사용 가능한 포장을 가져오는 실천 노력이 필요하다. 재사용은 또한 여러 장소에서 반환 및 재충전할 수 있는 몇 개의 표준화된 용기를 사용하는 예치 방식을 통해 강력하게 촉진되어 운송 거리를 줄일 수 있다. 포장 재설계는 포장 개발 중에 수명 주료를 이미 고려한 경우 감량, 재사용 또는 재활용에 크게 기여할 수 있다. 순환경제에서 지속 가능한 식품포장은 상충되는 목표를 고려하고 식품 및 포장 제조업체, 재활용업체, 의사 결정자, 시민사회 및 소비자를 포함한 모든 이해 관계자를 포함하는 노력을 결합해야만 달성할 수 있다.

글로벌 트렌드인 ESG (Environment, Social, Governance)는 가장 먼저 친환경이 기업 경영의 중요한 지표이다. 포장재, 특히 플라스틱 식품포장재의 사용은 글로벌 식품산업의 필수불가결의 요소가 되었으나 탈플라스틱을 추진하고자 하는 다양한 형태의 움직임이 시작되었다. 우리나라에서도 효율적 자원사용을 위한 소통의 장으로 산업계·학계·연구기관·정부기관이 함께하는 대한민국 친환경 패키징 포럼이 개최되고 있다. 2020년 11월 18~19일에 「포장 폐기물 감축을 통한 자원순환경제 구축(Circular Economy thru Packaging Waste Zero)」이란 주제로, 2021년 11월 3~4일에 「지속 가능한 순환경제를 위한 그린 패키징(Green Packaging for a Sustainable Circular Economy)」이란 주제로 포럼이 개최되어 글로벌 환경문제에 직면한 폐기물의 자원순환에 선도할 협력방안과 산·학·연·관의 각기 다른 입장에서 해결해야 할 일들에 대하여 논의하였다. ESG 경영을 통한 포장재의 재활용과 지속 가능성에 초점을 맞추며 매우 다양하고 현실적인 해결책 모색이 논의되었고 적극적 정보교류로 자원사용에 대한 미래산업이 창출되고 있음을 감지할 수 있었

다. 더하여, 식품포장의 안전성 확보를 위한 기술, 평가방법 등의 심도있는 논의도 포럼에 포함되기를 기대하여 본다.

수거 유형 및 재활용 기술에 따라 식품포장에 사용되는 재활용 플라스틱에는 다양한 플라스틱 유형이 포함되어 현재 개별 분석 없이는 각 제품의 플라스틱을 식별하는 것이 거의 불가능한 실정이다. 재활용된 재료로 만든 플라스틱, 재료 및 식품과 접촉하는 물품과 같은 규정이 세밀하게 정립되고 관련 규정을 준수하여 소비자가 재생 플라스틱을 신뢰할 수 있는 순환경제가 보다 빠르게 촉진되어 우리 사회에 자리잡기를 열망하는 바이다.

요 약

식품포장의 발전은 식품 제조 및 식품 공급을 안전하게 유지하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 식품포장은 식품의 보관, 취급, 운송 및 보존을 용이하게 하며 음식물 쓰레기를 최소화하는데도 기여하고 있다. 반면에 식품포장재는 생산량이 많고 사용 시간이 짧고 폐기물 관리 및 쓰레기와 관련된 환경문제 발생을 가속시키고 있으므로, 포장 기술은 식품 보호와 에너지 및 재료 비용, 환경사회적 의식 고양, 그리고 오염물질 및 도시고형폐기물 처리에 대한 엄격한 규제 등의 문제와 균형을 이루며 발전되어야 한다. 자원의 절약과 재활용을 통해 지속가능성을 추구하며 폐기물 생성 및 탄소배출을 줄이는 순환경제(Circular Economy)가 이미 도입되었다. 자원고갈과 환경오염을 최대한으로 줄이는 친환경 경제시스템을 활성화하여 감량, 재사용, 재활용, 재설계로 순환경제의 목표를 실천하면 식품포장이 환경에 미치는 영향도 줄일 수 있을 것이다. 이 고찰에서는, 재활용이 현재 포장 폐기물을 관리하는 중요한 수단으로 여겨지기 때문에 재활용 식품포장의 안전성 측면에 중점을 두어 설명하였다. 재활용은 잠재적으로 위험한 화학물질이 포장재에서 또는 식품으로 이행된 후의 그 수준을 증가시킬 수 있으므로 재활용 포장재의 안전성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 플라스틱, 종이 및 판지, 알루미늄, 강철 및 다중 재료 다층 포장 등 다양한 식품포장 재료가 일반적으로 사용되나 여기서는 가장 사용 비중이 크고 사용 후 문제가 심각하게 증가되고 있는 플라스틱 식품포장재의 재활용 안전성에 대해서만 고찰하였다.

참고문헌

1. Boulding, K.E. 1966. The Economics of the Coming Spaceship Earth. American Economic Review, Vol. 56, No. 1/2, March 1, 1966: 1-13. http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding_SpaceshipEarth.pdf
2. Kneese, A. 1988 The Economics of Natural Resources. Population and Development Review. 14: 281-309. doi:10.2307/

2808100. JSTOR 2808100.
- Pearce, D.W. and Turner, R.K. 1990. Economics natural resources and the environment. Financial Times Press. www.pearson.com. Retrieved 2021-10-07.
 - European Environment Agency. 2016. Circular Economy in Europe - Developing the Knowledge Base. EEA Report 2/ 2016.
 - Grosso, M., Niero, M. and Rigamonti, L. 2017. Circular economy, permanent materials and limitations to recycling: where do we stand and what is the way forward? Waste Manag. Res. 35(8): 793-794.
 - Conte, F., Dinkel, F., Kägi, T. and Heim, T. 2014. Permanent materials. Carbotech Final Report. https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/Final_PeM_Report_Carbotech.pdf. (Accessed 19 December 2017).
 - European Commission, Brussels, 11.3.2020 COM(2020) 98 Final. Communication from The Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions. A New Circular Economy Action Plan, For a Cleaner and More Competitive Europe.
 - Muncke, J., Backhaus, T., Geueke, B., Maffini, M.V., Martin, O.V., Myers, J.P., Soto, A.M., Trasande, L., Trier, X. and Scheringer, M. 2017. Scientific challenges in the risk assessment of food contact materials. Environ. Health Perspect. 125(9).
 - Pivnenko, K., Eriksen, M.K., Martin-Fernandez, J.A., Eriksson, E. and Astrup, T.F. 2016. Recycling of plastic waste: presence of phthalates in plastics from households and industry. Waste Manag. 54: 44-52.
 - Vapenka, L., Vavrous, A., Votavova, L., Kejlova, K., Dobias, J. and Sosnovcova, J. 2016. Contaminants in the paper-based food packaging materials used in the Czech Republic. J. Food Nutr. Res. 55(4): 361-373.
 - EC Commission Regulation No 282/2008 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri%CELEX:32008R0282>.
 - EC 1935/2004. Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri%CELEX:32004R1935>.
 - US 21 CFR 170.3(i), Food additives, general provisions, definitions. https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID%4c2a97f757ed27ea971578bb742f0f8b&mc%4true&node%4se21.3.170_13&rgn%4div8.
 - 식품의약품안전처 2021년 5월 28일. 공고 제2021-234호. 기구 및 용기·포장의 기준 및 규격 일부개정고시(안) 행정예고.
 - Products Pack. Physical Properties of Plastic Packaging Systems. <https://www.products-pack.com/physical-properties-of-plastic-packaging-systems/>
 - Impact Consumer Products Group. October 13th, 2020. 10 Factors that effect material selection for barrier food packaging. <https://blog.icpg.co/10-factors-that-effect-material-selection-for-barrier-food-packaging-materials>.
 - Joanne and Steffanie's Plastics Web Site. 2007. Classification of plastics. Archived from the original on 2007-12-15.
 - Ignatyev, I.A., Thielemans, W. and Vander Beke, B. 2014. Recycling of polymer: a review. ChemSusChem 7: 1579-1593.
 - Geyer, B., Lorenz, G. and Kandelbauer, A. 2016. Recycling of poly(ethylene terephthalate)- a review focusing on chemical methods. Express Polym. Lett. 10 (7): 559-586.
 - Ragaert, K., Delva, L. and Van Geem, K. 2017. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Manag. 69: 24-58.
 - Plastics Europe. 2016. Plastics - the Facts. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20161014113313-plastics_the_facts_2016_final_version.pdf
 - US EPA. Plastics: Material-Specific Data. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>
 - Ministry of the Environment, Japan 2018. Japan's resource circulation policy for plastics.
 - Law, K.L., Starr, N., Siegler, T.R. Jambeck, J.R. Mallos, N.J. and Leonard G.H. 2020. The United States' contribution of plastic waste to land and ocean. Sci. Adv., 6(44): eabd0288.
 - UN Environment Programme. Plastic Management Infographic. CleanSeas_final_ Infographic.pdf. <https://www.unep.org/resources/report/plastic-management-infographic>
 - Hopewell, J., Dvorak, R. and Kosior, E. 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B, 364 (1526): 2115-2126.
 - Ko, E., Shim, W., Lee, H., Kang, W., Shin, J., Kwon, O. and Kim J. 2018. The current status of recycling process and problems of recycling according to the packaging waste of Korea. Korean J Packag Sci & Tech 24(2): 65~71.
 - Al-Sabagh, A.M., Yehia, F.Z., Eshaq, Gh., Rabie, A.M. and ElMetwally, A.E. 2016. Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. Egypt J. Petroleum, 25: 53-64.
 - Raheem, A.B., Noor, Z.Z., Hassan, A., Hamid, M.K.Abd., Samsudin, S.A. and Sabeen, A.H. 2019. Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. J. Cleaner Production 225: 1052-1064.
 - Joo, M., Suh, S.U., Lee, K.E. and Oh, J.Y. 2020. Study on the market conditions and quality evaluation methods of post-consumer recycled polyethylene terephthalate (PCR PET) flake. Korean J Packag Sci & Tech 26(1): 41~46.
 - Achilias, D.S., Antonakou, E., Roupakias, C., Megalokonomos, P. and Lappas, A. 2008. Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes. Global NEST J. 10 (1): 114-122.
 - Curtzwiler, G., Vorst, K., Danes, J.E., Auras, R. and Singh, J. 2011. Effect of recycled poly(ethylene terephthalate) content on properties of extruded poly(ethyleneterephthalate) sheets. J. Plast. Film Sheet 27: 65-86.
 - European Commission, 2019. B-1049 Brussels. A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions.
 - EU Directive 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste.
 - CalRecycle. 2013. Update on AB 341. Legislative Report,

- Statewide strategies to achieve the 75 percent goal by 2020. <https://www.calrecycle.ca.gov>
36. 대한민국 관계부처 합동. 2021년 7월 14일. 한국판 뉴딜 2.0, file:///C:/Users/user/Downloads/R2107565-1%20(1).pdf
 37. EFSA. 2011. Scientific Opinion on the criteria to be used for safety evaluation of a mechanical recycling process to produce recycled PET intended to be used for manufacture of materials and articles in contact with food. *EFSA J.* 9(7): 2184. <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/2184>
 38. Rather, I.A., Koh, W.Y., Paek, W.K. and Lim, J. 2017. The Sources of chemical contaminants in food and their health implications. *Frontiers in Pharmacology* 8: 830.
 39. Canadian Institute of Food Safety. Food safety and the types of food contamination. May 16, 2019. <https://www.foodsafety.ca/blog/food-safety-and-types-food-contamination>.
 40. Camacho, W., Karlsson, S. 2000. Quality-determination of recycled plastic packaging waste by identification of contaminants by GCeMS after microwave assisted extraction (MAE). *Polym. Degrad. Stabil.* 71(1): 123-134.
 41. Dutra, C., Pezo, D., Freire, M.T.D., Nerin, C. and Reyes, F.G.R. 2011. Determination of volatile organic compounds in recycled polyethylene terephthalate and highdensity polyethylene by headspace solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry to evaluate the efficiency of recycling processes. *J. Chromatogr. A* 1218(10): 1319-1330.
 42. Nerin, C., Albinana, J., Philo, M.R., Castle, L., Raffael, B. and Simoneau, C. 2003. Evaluation of some screening methods for the analysis of contaminants in recycled polyethylene terephthalate flakes. *Food Addit. Contam.* 20(7): 668-677.
 43. Geueke, B., Groh, K. and Muncke, J. 2018. Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *J. Cleaner Production* 193: 491-505.
 44. Welle, F. 2005. Post-consumer contamination in high-density polyethylene (HDPE) milk bottles and the design of a bottle-to-bottle recycling process. *Food Addit. Contam.* 22(10): 999-1011.
 45. Bentayeb, K., Batlle, R., Romero, J. and Nerin, C. 2007. UPLC-MS as a powerful technique for screening the nonvolatile contaminants in recycled PET. *Anal. Bioanal. Chem.* 388: 1031-1038.
 46. Lopez, M.D.C., Pernas, A.I.A., Lopez, M.J.A., Latorre, A.L., Vilariño, J.M.L. and Rodríguez, M.V.G. 2014. Assessing changes on poly(ethylene terephthalate) properties after recycling: mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material. *Mater. Chem. Phys.* 147(3): 884-894.
 47. Vilaplana, F., Ribes-Greus, A. and Karlsson, S. 2007. Analytical strategies for the quality assessment of recycled high-impact polystyrene: a combination of thermal analysis, vibrational spectroscopy, and chromatography. *Anal. Chim. Acta* 604(1): 18-28.
 48. EU Commission Regulation (EU) No 10/2011. 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?qid%41511423737824&uri%4CELEX:32011R0010>.
 49. Keresztes, S., Tatar, E., Czegeny, Z., Zaray, G. and Mihucz, V.G. 2013. Study on the leaching of phthalates from polyethylene terephthalate bottles into mineral water. *Sci. Total Environ.* 458: 451-458.
 50. Enneking, P.A. 2006. Phthalates not in plastic food packaging. *Environ. Health Perspect.* 114(2): A89-A90.
 51. Franz, R., Mauer, A. and Welle, F. 2004. European survey on post-consumer poly(-ethylene terephthalate) (PET) materials to determine contamination levels and maximum consumer exposure from food packages made from recycled PET. *Food Addit. Contam.* 21(3): 265-286.
 52. Coulier, L., Orbons, H.G.M. and Rijk, R. 2007. Analytical protocol to study the food safety of (multiple-)recycled high-density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) crates: influence of recycling on the migration and formation of degradation products. *Polym. Degrad. Stabil.* 92(11): 2016-2025.
 53. Puype, F., Samsonek, J., Knoop, J., Egelkraut-Holtus, M. and Ortlieb, M. 2015. Evidence of waste electrical and electronic equipment (WEEE) relevant substances in polymeric food-contact articles sold on the European market. *Food Addit. Contam. A.* 32(3): 410-426.
 54. Widen, H., Leufven, A. and Nielsen, T. 2005. Identification of chemicals, possibly originating from misuse of refillable PET bottles, responsible for consumer complaints about off-odours in water and soft drinks. *Food Addit. Contam.* 22(7): 681-692.
 55. Whitt, M., Vorst, K., Brown, W., Baker, S. and Gorman, L. 2013. Survey of heavy metal contamination in recycled polyethylene terephthalate used for food packaging. *J. Plast. Film Sheet* 29(2): 163-173.
 56. Whitt, M., Brown, W., Danes, J.E. and Vorst, K.L. 2016. Migration of heavy metals from recycled polyethylene terephthalate during storage and microwave heating. *J. Plast. Film Sheet* 32(2): 189-207.
 57. Welle, F. 2011. Twenty years of PET bottle to bottle recycling - an overview. *Resour. Conserv. Recycl.* 55(11): 865-875.
 58. Anouar, B.S., Guinot, C., Ruiz, J.C., Charton, F., Dole, P., Joly, C. and Yvan, C. 2015. Purification of post-consumer polyolefins via supercritical CO₂ extraction for the recycling in food contact applications. *J. Supercrit. Fluids* 98: 25-32.
 59. US FDA. 2006. 21CFR170.39. Title 21—Food and Drugs, subchapter b - Food for human consumption. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=170.39>
 60. US FDA, 2006. Guidance for Industry: Use of recycled plastics in food packaging: Chemistry considerations. <https://www.fda.gov/media/150792/download>