

생활계 폐합성수지 물질재활용 제품의 품질 안정성

Quality stability of material recycling product using plastic waste from households



강석표 Suk-Pyo Kang
우석대학교 건축학과 교수
E-mail : ksp0404@empal.com



김상진 Sang-Jin Kim
우석대학교 건설공학과 석사과정
E-mail : sjkim9701@naver.com



신창언 Chang-eon Shin
한국재생플라스틱제조업협동조합 이사장
E-mail : ckddjs1213@naver.com



이재술 Jae-Sul Lee
한국재생플라스틱협동조합 전무
E-mail : skylej1216@hanmail.net



김영식 Yeong-Sik Kim
한국재생플라스틱협동조합 팀장
E-mail : piero1070@naver.com

1. 머리말

전 세계적으로 자원의 채취에서 폐기로 이어지는 선형 경제구조를 순환경제(Circular economy)로 전환하는 정책이 추진되어지고 있다. 순환경제는 한정된 천연자원을 적게 사용하면서 지속가능한 성장을 이루고 환경 영향을 최소화하는 것을 목표로, 폐기물을 매립·소각 대신 재활용을 통해 경제에 환류하는 것을 의미한다. 우리나라의 경우에도 2010년 이후로 국내 폐합성수지의 발생량이 꾸준히 증가하여, 2016년에는 발생량이 710만 톤에 다다랐으며, 이중 가정이나 사업장에서 배출되는 생활계 폐기물이 약 260만 톤으로 무려 40% 가까이 된다. 이러한 엄청난 폐합성수지 양은 최근 폐기물 대란이나 쓰레기 산 혹은 폐기물 불법매립 등 많은 문제와 밀접한 연관이 있다. 결국 이러한 문제는 근본적으로 우리나라의 1인당 플라스틱/비닐의 생산 및 사용이 워낙 많은데다, 최근의 국제정세도 이러한 폐합성수지 문제를 악화시키는데 기여하였다. 즉, 최근까지 우리나라는 중국 등 다른 개도국에 재활용 가능한 폐기물(플라스틱 등) 상당량을 수출하였는데 중국이 자국의 환경문제를 이유로 폐기물 수입을 거부하여 수출 못한 폐합성수지가 국내에 그냥 적치되기 시작했다. 이러한 폐기물 중 일회용품 플라스틱이나 비닐 등이 상당 부분을 차지하고 있다.

폐합성수지를 재활용하는 방법으로는 일반적으로 물리적 선별 및 처리를 통한 물질회수, 연료화, 그리고 열이나 화학반응을 통한 유화환원이 있다. 일반적으로 폐합성수지 재활용에서 가장 중요한 것은 재활용 공정에 투입할 폐합성수지 재질 성상의 균일성 등이 매우 중요하다. 우선, 간단한 물리적 처리를 거쳐 재이용이 가능한 폐합성수지를 선별하여 원형 혹은 압축된 상태로 재활용하고 나머지 폐합성수지 중 일부는 보다 복잡한 물리적 처리(분쇄, 세척 및 열 용융 등)를 거쳐 일정한 형태 및 크기의 고품연료로 재활용된다. 포장용 플라스틱은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET), 폴리프로필렌(PP), 폴리스틸렌(PS), 폴리

염화비닐(PVC)과 같은 다양한 재질들이 병, 컵, 용기, 버블포장, 필름 등 다양한 제품에 적용되고 있다. 이러한 다양한 복합재질 생활계 폐합성수지의 물질재활용 확대를 위해서는 물질재활용 제품의 용도개발 및 이들의 품질 안정성 확보 노력이 필요하다.

따라서 본 특집 원고에서는 생활계 폐합성수지의 발생량 및 처리현황을 살펴보고 발생지역에 따른 생활계 폐합성수지의 혼입율 특성 및 이를 활용한 물질재활용 제품의 생산시기에 따른 품질특성을 비교 검토하였다.

2. 생활계 폐합성수지의 발생량 및 처리현황

2.1 폐기물 종류별 발생 및 처리현황

1) 발생현황

우리나라의 총 폐기물 발생량(지정폐기물 제외)은 [표 1]과 같으며, 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 2019년도 총 폐기물 발생량은 497,238톤/일로, 전년(446,102톤/일) 대비 약 11.5% 증가하였다. 폐기물 종류별 구성비는 건설폐기물 44.5%, 사업장배출시설계폐기물 40.7%, 생활계폐기물 11.7%, 지정폐기물 3.1% 순으로 나타나고 있으며 종류에 상관없이 증가하고 있다.

2) 처리현황

2019년도 폐기물의 처리 방법은 [표 2]와 같이 재활용의 비율이 86.6%로 가장 높게 나타났다. 2019년도 매립률은 6.1%로 전년(7.8%) 대비 1.7%p 감소하였으며, 소각률은 5.2%로 전년(5.9%) 대비 0.7%p 감소하였다.

[표 1] 연도별 폐기물 종류별 발생 추이

(단위: 톤/일, %)

구분		2014년	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년
총계	발생량	401,658	418,214	429,128	429,531	446,102	497,238
	전년대비 증감률	2.2	4.1	2.6	0.1	3.9	11.5
생활계 폐기물	발생량	49,915	51,247	53,772	53,490	56,035	57,961
	전년대비 증감률	2.4	2.7	4.9	-0.5	4.8	3.4
사업장 배출시설계 폐기물	발생량	153,189	155,305	162,129	164,874	167,727	202,619
	전년대비 증감률	3.2	1.4	4.4	1.7	1.7	20.8
건설 폐기물	발생량	185,382	198,260	199,444	196,262	206,951	221,102
	전년대비 증감률	1.0	6.9	0.6	-1.6	5.4	6.8
지정 폐기물	발생량	13,172	13,402	13,783	14,905	15,389	15,556
	전년대비 증감률						

1. 생활계폐기물은 생활폐기물, 사업장생활계폐기물, 공사장생활계폐기물을 모두 포함한 수치임
2. 지정폐기물은 사업장지정폐기물과 의료폐기물을 포함한 수치임

(출처: 환경부)

[표 2] 폐기물의 연도별 처리방법의 변화

(단위: 톤/일)

구분	2014년		2015년		2016년		2017년		2018년		2019년	
	발생량	%	발생량	%	발생량	%	발생량	%	발생량	%	발생량	%
총계	401,658	100.0	418,214	100.0	429,128	100.0	429,531	100.0	446,102	100.0	497,238	100.0
매립	37,906	9.4	37,800	9.0	37,942	8.8	35,524	8.3	34,648	7.8	30,514	6.1
소각	24,524	6.1	26,085	6.2	26,450	6.2	26,290	6.1	26,404	5.9	25,984	5.2
재활용	336,814	83.9	352,824	84.4	363,800	84.8	366,650	85.4	384,237	86.1	430,345	86.6
기타	2,414	0.6	1,505	0.4	936	0.2	1,067	0.2	813	0.2	10,395	2.1

(출처: 한국환경공단)

2.2 생활계 폐기물 종류별 발생 및 처리현황

1) 발생현황

2019년도 생활계폐기물 발생량은 [표 3]에 나타난 바와 같이 57,961톤/일(전년(56,035톤/일) 대비 3.4% 증가하였고, 총 폐기물 중 생활계폐기물의 점유율은 11.7%로 전년(12.6%) 대비 0.9%p 감소하였다.

2019년도 전체 생활계폐기물(57,961톤/일) 중 종량제 방식의 배출비율이 50.9%(29,508톤/일)이며, 재활용 가능자원 분리배출은 24.4%(14,139톤/일), 음식물류 폐기물은 24.7%(14,314톤/일)를 각각 차지하였다.

2) 처리방법 변화 추이

2019년도 생활계폐기물의 재활용률은 [표 4]에 나타난 바와 같이 59.7%, 기타 1.9%로 전년(62.0%) 대비 0.4%p 감소, 반면 소각률은 25.7%로 전년(24.6%) 대비 1.1%p 증가, 매립률은 12.7%로 전년(13.4%) 대비 0.7%p 감소하여 '14년 이후부터 감소추세를 보여지고 있다.

폐기물 처리주체별 처리 현황은 생활계폐기물은 공공처리 비율이 51.2%로 가장 높으며, 사업장폐기물은 위탁처리 비율이 86.2%로 가장 높은 비율을 나타내었다.

[표 3] 생활계폐기물의 연도별 성장 변화

(단위:톤/일)

구분		'14	'15	'16	'17	'18	'19
총계		49,915	51,247	53,772	53,490	56,035	57,961
종량제방식 등 혼합배출	소계	22,264	23,170	24,965	24,638	25,573	29,508
	폐지류	5,410	5,445	5,631	5,194	5,185	4,993
	폐합성수지류	3,370	3,739	4,312	4,601	4,884	7,430
	폐유리류	536	623	561	608	739	644
	폐금속류	392	448	434	400	931	450
	기타	12,556	12,915	14,027	13,835	13,834	15,991
재활용 가능자원 분리배출	소계	14,429	13,857	14,418	14,452	15,985	14,139
	폐지류	4,485	4,514	4,603	4,151	4,281	3,541
	폐합성수지류	2,668	2,654	2,960	3,563	3,964	3,583
	기타	7,276	6,689	6,855	6,738	7,740	7,015
음식물류 폐기물 분리배출	소계	13,222	14,220	14,389	14,400	14,477	14,314

(출처: 환경부)

[표 4] 생활계폐기물의 처리방법 변화 추이

(단위:톤/일)

구분	2014년		2015년		2016년		2017년		2018년		2019년	
	발생량	%	발생량	%	발생량	%	발생량	%	발생량	%	발생량	%
총계	49,915	100.0	51,247	100.0	53,772	100.0	53,490	100.0	56,035	100.0	57,961	100.0
매립	7,813	15.7	7,719	15.1	7,909	14.7	7,240	13.5	7,525	13.4	7,336	12.7
소각	12,648	25.3	13,176	25.7	13,610	25.3	13,318	24.9	13,763	24.6	14,919	25.7
재활용	29,454	59.0	30,352	59.2	32,253	60.0	32,932	61.6	34,747	62.0	34,613	59.7
기타	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,093	1.9

[표 5] 폐합성수지 발생 현황

구분	계	생활계		사업장* 배출시설계	건설폐기물
		종량제봉투	재활용품		
2019년	10,480,975톤 (100%)	2,711,950 (25.8%)	1,308,160 (12.4%)	5,874,310 (56.1%)	586,555 (5.6%)
2020년	11,010,000톤 (100%)	1,900,000 (17.3%)	2,510,000 (22.8%)	6,010,000 (54.6%)	590,000 (5.4%)

*사업장 배출시설계: 페플라스틱류 외에 폐섬유류, 폐합성고무류 포함
(출처: 최주섭, 대기업의 페플라스틱 재활용사업 진출 실태와 상생방안, 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 ('22.05.12))

[표 6] 폐합성수지 처리 현황

(단위: 천톤/년)

총계	재활용				소각	매립
	소계	물질재활용	고형연료화	시멘트 보조열원		
7,657	4,520 (59.0%)	1,394 (18.2%)	2,361 (30.8%)	765 (10.0%)	2,658 (34.7%)	365 (4.8%)

(출처: 최주섭, 대기업의 페플라스틱 재활용사업 진출 실태와 상생방안, 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 ('22.05.12))

2.3 생활계 폐합성수지의 발생량 및 처리현황

1) 발생량

생활계 폐합성수지의 발생량은 1인 가구의 증가에 따라 외식이나 가공식품을 구입하는 경향이 증가하였으며 또한, 인터넷 발달과 스마트폰의 보급 증가에 따라 온라인 쇼핑의 이용이 급증하였으며, 이러한 소비패턴의 변화로 식품의 일회용품의 사용증가와 인터넷쇼핑을 이용하였을 경우 제품의 포장 사용량 증가 등으로 폐합성수지의 발생량이 증가한 것으로 나타났다. [표 5]와 같이 2019년과 2020년 폐합성수지 발생량은 각각 10,480,975톤, 11,010,000톤으로 나타나며 생활계 폐기물 중 종량제봉투와 재활용품의 발생량은 전체 발생량의 약 39%로서 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

2) 처리현황

폐합성수지 처리현황은 [표 6]에 나타난 바와 같이 발생량 7,657,000톤 중 재활용량은 4,520,000톤(59%), 소각 2,658,000톤(34.7%), 매립 365,000톤(4.8%)으로 나타났다. 이 중 처리

율이 높은 소각은 폐합성수지를 처리하는데 가장 유해한 방법이며, 소각시 다이옥신, 푸란, 납, 수은, 산성가스, 입자 물질 등의 독성 물질을 방출하고 노동자와 인근의 지역사회 및 저소득층은 독성 물질, 재 오염된 수자원으로 인한 건강 위험에 가장 많이 노출된다. 또한 100톤의 폐합성수지를 소각함으로써 인체 1.4톤의 이산화탄소가 발생하며, 합성수지 생산 및 소비가 현재 계획대로 성장한다면 2100년까지 약 2,870억 톤의 이산화탄소가 발생할 것으로 나타나고 있다. 이러한 이유로 폐합성수지를 매립하는 경우도 있지만 매립하는 방법마저도 더 이상의 양을 수용할 수 없이 가득 차 포화 직전으로 나타났다.

3. 발생지역별 생활계 폐합성수지의 구성비 현황조사

3.1 실험방법

생활계 폐합성수지 물질재활용 제품의 품질에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 원료로서 사용하는 생활계 폐합성수



(a) 가정에서 발생하는 폐합성수지



(b) 재활용 합성수지



(c) 금속 재료



(d) 이물질

그림 1. 폐합성수지의 분류

지의 지역별 혼입률 변화를 우선적으로 검토하고자 하였다. 본 현황조사에 적용한 충북 충주 소재 E사업장에 2020년 6월 중 반입되는 생활계 폐합성수지를 대상으로 하였다. 충북 청주시, 충북 충주시, 충남 서산시, 경기도 광주시, 서울특별시 강북구, 강원 춘천시의 총 6개 지역에서 발생하는 생활계 폐합성수지를 샘플로 채취하였다. 사업장 반입시 1,000×1,000×2,000 mm 단위로 묶어서 들어온 생활계 폐합성수지를 5.0kg씩 총 5회 샘플로 채취하였다. 각 지역별 각각 5개의 샘플을 재활용 가능 폐플라스틱, 금속류(철, 비철금속류 등), 수분, 기타(종이, 고무, 우레탄 등)로 구분하여 인력선별한 후 중량을 측정하였다. 샘플을 분류한 사례를 <그림 1>에 나타내었다.

3.2 실험결과

발생지역별 생활계 폐합성수지의 구성비 변화를 <그림 2>에 나타내었다. 6개 발생지역 평균 구성비는 재생가능한 플라스틱이 78.19%, 수분 9.45%, 금속류 7.42%, 기타 이물질이 4.94%로서 분리배출에 의해 선별되었지만 평균 20% 이상의 재생불가능한 이물질이 혼입되어 있는 것으로 나타났다. 이물질 중에서는 수분 > 금속류 > 기타 이물질 순으로 많이 혼입되어 있었다. 20% 이상의 재활용 불가능한 이물질이 혼입되어 있는 생활계 폐합성수지는 재활용 공정에서 선별되지 못하면 재활용 제품의 품질에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 국내 포장폐기물 재활용 기술 및 사업 측면에서 살펴본 연구에

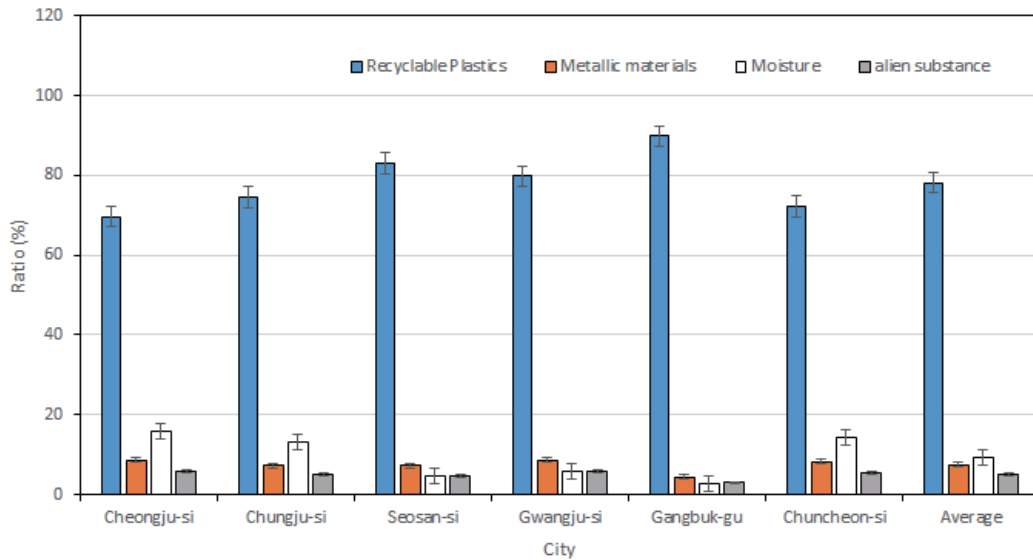


그림 2. 발생지역별 생활계 폐합성수지의 구성현황

서는 국내 재활용업체의 영세성을 주된 문제로 지적하였다. 또한 기존 연구자료에 의하면 물질재활용을 위해서는 폐합성수지를 포함한 재활용품을 수집·선별하여야 하는데, 이에 드는 비용이 재활용품으로 판매되어 얻는 수익의 약 4배 이상(2015년 기준)인 것으로 보고하고 있다. 따라서 국내 영세 재활용업체들은 비용이 많이 소요되는 수집 선별에 소홀해질 수 밖에 없고, 이로 인하여 물질재활용 품질이 저하되고 고부가가치 재활용 확대에 장애요소가 되고 있다.

생활계 폐합성수지 중 재생가능한 플라스틱의 혼입율은 청주시에서 69.7%, 충주시에서 74.52%, 서산시에서 83.08%, 광주에서 79.33%, 강북구에서 89.85%, 춘천시에서 72.16%를 나타내고 있어 서울 강북구가 가장 높았으며 충북 청주시가 가장 낮은 것으로 나타났다. 생활계 폐합성수지 중 금속류 이물질의 혼입율은 청주시에서 8.63%, 충주시에서 7.30%, 서산시에서 7.32%, 광주에서 8.69%, 강북구에서 4.33%, 춘천시에서 8.22%를 나타내고 있어 경기도 광주시가 가장 높았으며 서울 강북구가 가장 낮은 것으로 나타났다. 생활

계 폐합성수지 중 기타 이물질의 혼입율은 청주시에서 5.82%, 충주시에서 4.93%, 서산시에서 4.75%, 광주에서 5.74%, 강북구에서 2.96%, 춘천시에서 5.42%를 나타내고 있어 경기도 광주시가 가장 높았으며 서울 강북구가 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 생활계 폐합성수지 중 수분의 혼입율은 청주시에서 15.84%, 충주시에서 7.30%, 서산시에서 7.32%, 광주에서 8.69%, 강북구에서 4.33%, 춘천시에서 8.22%를 나타내고 있어 경기도 광주시가 가장 높았으며 서울 강북구가 가장 낮은 것으로 나타났다.

동일한 지역에서 반입되는 생활계 폐합성수지의 구성비율은 큰 차이를 나타내고 있지는 않았으나 지역별 생활계 폐합성수지의 구성비율은 상대적으로 크게 나타났다. 또한 구성요소별 표준편차는 재활용가능 플라스틱이 7.13, 수분이 5.23, 금속류 1.57, 기타 이물질 1.14로서 구성비율이 클수록 표준편차가 증가하였지만 상대적으로 수분의 표준편차가 큰 것으로 나타났다. 반면에 금속류 및 기타 이물질의 표준편차가 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

4. 생산시기별 물질재활용 제품의 품질사례

4.1 실험방법

생활계 폐합성수지 물질재활용 제품의 품질에 대한 안정성 확보를 위해서 최종 물질 재활용 제품의 시기별 품질특성을 검토하였다. 본 논문에 적용한 충북 충주소재 E사업장의 물질재활용 공정에 의하여 생산된 물질재활용 제품을 대상으로 하였다. 생산 시기는 2020년 2월, 3월, 4월, 5월에 생산된 제품에서 시험용 샘플을 제작하였으며, 품질항목으로서 인장강도, 신율, 밀도, 회분을 각 생산 시기별 3회 측정하였다. 인장강도 및 신율을 측정된 샘플을 이용하여 밀도 및 회분을 측정하였다.

4.2 실험결과

생산시기별 물질재활용 제품의 품질 변화를 <그림 3>에 나

타내었다. 4개월 간 물질재활용 제품의 평균 인장강도는 12.33 MPa, 평균 연신율은 5.94 %, 밀도는 1.35 g/cm³, 회분은 3.66 %인 것으로 나타났다. 열가소성수지인 플라스틱 소재를 질량 기준으로 원료의 60 % 이상 사용하고 필요에 따라 보강제, 충전제 등을 넣어 사출 또는 압출방법으로 성형한 재활용 플라스틱 지주받침에 대한 규정 GR M 3084(재활용 플라스틱 지주받침)에서 요구하는 인장강도, 밀도, 회분의 기준치를 복합재질 혼합 폐합성수지를 100 % 사용하여 만족시킬 수 있었다.

인장강도는 2월에 9.37 MPa, 3월에 11.01 MPa, 4월에 14.29 MPa, 5월에 13.01 MPa로서 최소 8.46 MPa, 최대 16.01 MPa, 분산 5.15, 표준편차 2.27인 것으로 나타났다. 이는 GR M 3084(재활용 플라스틱 지주받침)에서 요구하는 인장강도 11.0 MPa 이상을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 연신율은 2월에 4.67 %, 3월에 7.33 %, 4월에 6.44 %, 5월에 5.48 %로서 최소 3.33 %, 최대 9.33 %, 분산 3.59, 표준편차 1.9인 것으로 나타났다. 밀도는 2월에 1.88 g/cm³, 3월에 1.57 g/cm³, 4

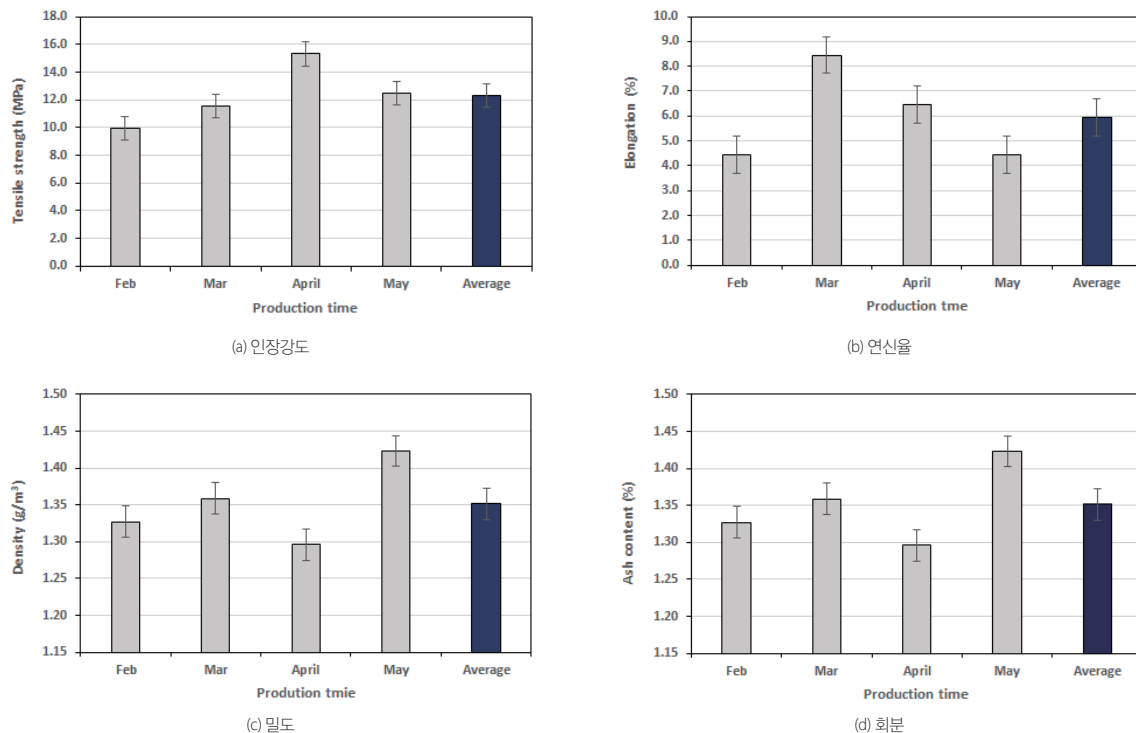


그림 3. 재활용 제품의 물성

월에 1.33 g/cm^3 , 5월에 1.41 g/cm^3 로서 최소 1.21 g/cm^3 , 최대 1.49 g/cm^3 , 분산 0.01, 표준편차 0.10인 것으로 나타났다. 이는 GR M 3084(재활용 플라스틱 지주받침)에서 요구하는 밀도 0.90 g/cm^3 이상을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 회분은 2월에 6.23%, 3월에 7.61%, 4월에 7.68%, 5월에 10.84%로서 최소 4.62%, 최대 13.14%, 분산 8.59, 표준편차 2.71인 것으로 나타났다. 이는 GR M 3084(재활용 플라스틱 지주받침)에서 요구하는 회분 20.0% 이하를 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 특히 회분의 변동성이 큰 것은 생활계 폐합성수지에 혼입되어 있는 이물질 선별의 영향이 컸기 때문으로 사료된다.

5. 맺음말

다양한 복합재질 생활계 폐합성수지의 물질재활용 확대를 위해서는 물질재활용 제품의 용도개발 및 이들의 품질 안정성 확보 노력이 필요하다. 본 특집 원고에서는 생활계 폐합성수지

의 발생량 및 처리현황을 살펴보고 물질재활용 제품의 품질에 대한 안정성을 확보하기 위한 기초 데이터를 소개하였다.

2020년 폐합성수지 발생량은 11,010,000톤 중 종량제 봉투와 재활용품으로 발생하는 생활계에서 약 40% 발생하고 있다. 이와 같이 발생하는 폐합성수지는 59.0%가 재활용되고 있다. 물질재활용하기 위하여 반입되는 생활계 폐합성수지의 구성비율을 실태조사한 결과 재활용 가능한 폐합성수지가 64.5~90.4%로서 발생 도시별로 큰 차이를 보이고 있다. 또한 4개월간 생산시기별 물질재활용 제품의 평균 인장강도는 12.33MPa, 평균 연신율은 5.94%, 평균 밀도는 1.35 g/m^3 , 평균 회분은 3.66%으로서 생산시기에 따라서 품질이 다양하게 나타나고 있다. 이와 같이 폐합성수지를 고부가가치의 물질재활용으로 재활용 확대를 위해서는 용도 개발에 대한 지속적인 관심이 필요하며, 원료가 다양하게 반입됨으로써 품질에 영향을 미치기 때문에 안정적인 품질확보를 위한 고민이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Choi J.S.(2022), The Actual Situation of Large Corporations Entering the Waste Plastic Recycling Industry and Plan for Win-win Growth, Proceedings of the 2022 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, 494 (in Korean)
2. Choi Y., Choi H.J., Rhee S.H.(2018), Current Status and Improvements on Management of Plastic Waste in Korea, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 27(4), 3~15 (in Korean)
3. Dhawan R., Bisht B.M.S., Kumar R., Kumari S., Dhawana S.K.(2019), Recycling of Plastic Waste into Tiles with Reduced Flammability and Improved Tensile Strength, Process Safety and Environmental Protection, 124, 299-307

담당 편집위원 : 김규용(충남대학교)