



식품용 생분해성 합성수지제의 안전성 조사

윤희정* · 전종섭 · 김영수 · 박성희 · 송서현 · 구은정 · 채선영 · 이명진

경기도보건환경연구원 식품의약품연구부 첨가물분석팀

Investigation on the Safety of Biodegradable Synthetic Resins for Food

Hee-Jeong Yun*, Jong-Sup Jeon, Young-Su Kim, Sung-Hee Park, Seo-Hyeon Song,
Eun-Jung Ku, Sun-Young Chae, Myung-Jin Lee

Food Additives Analysis Team, Food and Drug Research Division,
Gyeonggi Province Institute of Health and Environment, Suwon, Korea

(Received January 8, 2024/Revised April 15, 2024/Accepted April 15, 2024)

ABSTRACT - In this study, we investigated the migration level of items specified in the Korean Standards and Specifications for Utensils, Containers, and Packages (Ministry of Food and Drug Safety Notification) for 50 utensils and hygiene products made of biodegradable resins. Our results revealed that one Polylactide (PLA) baby tableware contained 20 mg/L in consumption of potassium permanganate, exceeding the standard of 10 mg/L or less. In all other samples, formaldehyde, lead (Pb), and arsenic (As) levels could be considered very safe and remained below the standard. Moreover, we tested the PLA baby tablewares (n = 21) for migration into a food simulant (4% v/v acetic acid) upon repeated elution at 100°C for 30 min or UV irradiation for 2 h. We detected increased formaldehyde and As amounts at the repeated 100°C treatment for 30 min compared to those upon repeated UV irradiation. However, the migration level was markedly low under both conditions. Furthermore, the Estimated Daily Intake (EDI) calculated on an infant-to-child basis from the formaldehyde and As migration at 100°C for 30 min in the PLA sample was at the maximum value, i.e., 6.0×10^{-4} mg/kg b.w./day and 1.3×10^{-1} µg/kg b.w./day, corresponding to 0.40% and 10.42% of the Tolerable Daily Intake (TDI, 0.15 mg/kg b.w./day) and Provisional Tolerable Weekly Intake (PTWI, 9.0 µg/kg b.w./week), respectively. Therefore, in this study, we confirmed that biodegradable synthetic resins are safe to use for food.

Key words: Biodegradable resins, Baby tableware, PLA, Formaldehyde, Arsenic

화석 원료로 생산된 플라스틱 생산과 소비의 급격한 증가로 인해, 플라스틱을 소각할 때 발생하는 다이옥신 및 일산화탄소 등의 유해가스로 인해 지구온난화, 성층권 파괴 등 환경오염을 초래하기도 한다^{1,2)}.

이런 지구온난화로 인한 기상이변이 일상화되면서 기후 위기의 심각성이 대두되고, 소비자들은 제품의 구매에서 처분에 이르기까지 모든 소비행동이 환경에 영향을 미칠 수 있음을 인식하고 재활용품 활용, 친환경제품 구매 등을 통해 환경보호를 실천하고 있다³⁾.

재생 가능한 자원(renewable resources)에서 생산된 플라스틱을 ‘바이오 플라스틱’ 또는 ‘바이오 폴리머’라고 한다. European bioplastics에 의하면 ‘바이오 플라스틱’은 현재 명확하게 규정된 정의는 없지만 원료(천연물 및 석유 계열)에 제한없이 일정한 조건에서 미생물에 의해 완전히 분해되어 물, 이산화탄소, 퇴비 등으로 전환될 수 있는 ‘생분해성 플라스틱(biodegradable plastics)’과 옥수수, 사탕수수 등 식물에서 유래한 재생 가능한 자원인 바이오매스(biomass)를 원료로 이용한 ‘바이오매스 플라스틱(biomass-based plastics)’으로 구분할 수 있다. 생분해성 플라스틱은 ‘빠른 생분해’가 특징이지만, 바이오매스 플라스틱은 ‘탄소저감’을 목적으로 하고 있다^{4,6)}. 생분해성 플라스틱은 주로 ‘식품 접촉’이 이루어지는 포장지, 스푼, 빨대 등의 일회용품과, 생분해성 멀칭필름(농작물 재배시 경지토양의 표면을 덮어 지온상승, 수분유지 및 잡초방제 등을 목적으로 하는 플라스틱 필름 제품), 어망, 어구 등 회수가 어렵거나 유실 가능성이 높은 농어업 제품 등의 시장으로

*Correspondence to: Hee-Jeong Yun, Food Additives Analysis Team, Food and Drug Research Division, Gyeonggi Province Institute of Health and Environment, Suwon 16381, Korea
Tel: +82-31-8008-9681, Fax: +82-31-8008-9669
E-mail: hjyun712@gg.go.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

형성되어 있다⁷⁾.

최근의 소비자들은 환경에 나쁜 영향을 덜 끼치는 제품을 사용하고자 하고 특히 자녀를 양육하는 부모들은 친환경 제품을 사용하는 경향이 커지고 있다. 특히 ‘생분해성’이라고 표기되어 있는 친환경 식품용 기구 및 위생용품을 유통매장에서 어렵지 않게 볼 수 있다.

식품의약품안전처에서는 ‘식품용 기구 및 용기·포장 공전’의 재질별 분류에 합성수지계 중 hydroxybutyl polyester (HBP), poly butylene adipate terephthalate (PBAT), polybutylenesuccinate (PBS), polybutylenesuccinate-adipate (PBSA), polylactide (PLA), poly (vinyl alcohol, PVA) 등 6개 재질을 식품용으로 사용 가능한 생분해성 수지로 구분하고 있으며⁸⁾ 생분해성 수지는 생분해성 플라스틱(합성수지계)과 동일한 것으로 판단된다. 생분해성 플라스틱도 일반 플라스틱과 같이 다양한 종류의 첨가제, 단량체, 분해산물 등을 포함하고 있어, 인체 유해성을 판단해야 하며 ‘식품용 기구 및 용기·포장 공전’의 해당 재질별 기준·규격에 적합한 경우에 한하여 식품용으로 사용이 가능하다²⁾.

Kim 등⁹⁾은 국내 유통 폴리락타이드(PLA) 식품용 기구 및 용기·포장의 중금속(납, 카드뮴, 비소) 이행량을 모니터링 하였으며 기준·규격을 초과하는 시료는 없다고 보고하였다. 또한 해당 연구에서 납, 카드뮴, 비소의 검출량은 매우 낮은 수준임을 나타냈다. 현재까지 생분해성 플라스틱의 유해물질에 관한 연구는 많이 이루어지지 않음을 문헌 조사를 통해 알 수 있었다.

이에 본 연구에서는 시중에 판매되는 생분해성 합성수지제로 만들어진 식품용 기구 및 위생용품을 대상으로 ‘식품용 기구 및 용기·포장 공전(식품의약품안전처 고시)’을 토대로 기준·규격을 검사하여 유통 제품의 안전성을 검토하고, 가정에서 흔히 이뤄지는 살균·소독 방법을 통해 노출되는 유해물질의 위해도 평가를 통한 안전성을 평가하여 생분해성 합성수지로 인한 인체영향을 평가하고 관련 기초자료를 제공하고자 한다.

Materials and Methods

실험재료

국내 대형할인매장, 도소매점 및 인터넷 등에 유통되는 생분해성 합성수지계 재질의 식품용 기구 및 용기와 위생용품 중 제조업체별, 재질별로 총 50개의 시료를 수거하였다. 이들 시료들은 제품의 표시사항에 ‘생분해성’이라고 기재되었거나 본 연구의 대상 합성수지계가 사용되어 있다고 기재가 된 제품이었다. 이 중 폴리락타이드(PLA) 재질은 45개였으며, 폴리부틸렌아디페이트테레프탈레이트(PBAT) 또는 부틸렌숙시네이트 공중합체(PBS)와 함께 함유된 폴리락타이드(PLA) 재질은 5개였다. 제품별 생산국을 살펴보면 국내 제조품이 35개이며, 수입 제품은 중국산 12개, 대만산 2개, 일본산 1개였다. 유형별로는 식품용 용기 34개(유아식기 22개, 식기 1개, 일회용 식기 11개), 위생용품 16개(일회용 컵, 포크, 숟가락, 나이프 및 빨대)였다. 품목별 시료 수거내역은 Table 1과 같다.

표준물질 및 시약

표준물질로 사용한 납, 비소는 AccuStandard (New Haven, CT, USA)사의 ICP instrument calibration standard (each 100 µg/mL)를 사용하였고, 포름알데히드 표준물질은 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)사의 certified reference material (CRM)으로 메탄올로 안정화한 수용액 (37.9±1.4%)을 사용하였다.

시약으로 2,4-DNPH (2,4-dinitrophenylhydrazine)은 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA), acetic acid는 FUJIFILM Wako pure chemical Corp. (Osaka, Japan), potassium permanganate standard solution은 DAEJUNG chemicals & metals Corp. (Busan, Korea)을 사용하였다. 증류수는 초순수제조기(Lab Tower EDI 30, Thermo Fisher Scientific, Germany)로 18.2 MΩ 수준으로 정제된 증류수를 사용하였다.

Table 1. The number of samples subjected to analysis by material of biodegradable synthetic resin

Material	Sample types	Domestic (n)	Import (n)	Number of samples
PLA	Baby tableware (Group 1)	21	1	22
	Bowl	-	1	1
	Container_disposable	4	5	9
	Tray_disposable	2	-	2
	Cup_disposable	4	-	4
	Fork, spoon, knife_disposable	1	3	4
	Straw_disposable	2	1	3
PLA+PBAT	Straw_disposable	1	2	3
PLA+PBS	Straw_disposable	-	2	2
Total		35	15	50

표준원액 및 표준용액의 조제

납, 비소 표준용액은 1,000 mg/L 상용표준품을 4% acetic acid로 희석하여 0.02-0.1 mg/L이 되도록 제조하여 사용하였다.

포름알데히드 표준용액은 4% acetic acid에 녹여 4 µg/mL 농도로 사용하였다.

시험용액의 조제

수거한 시료는 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 2-6 제질별 용출시험용액의 제조, 가. 합성수지제 용출시험용액의 조제에 따라 아래와 같이 용출하였다⁸⁾. 식품모사용재료는 4% acetic acid와 증류수를 사용하였으며, 액체를 채울 수 있는 경우에는 70°C로 가온한 4% acetic acid와 증류수를 시료면을 따라 5 mm 아래까지 가득 채우고, 액체를 채울 수 없는 경우에는 식품과 접촉하는 표면적 1 cm² 당 2 mL의 비율로 4% acetic acid 또는 증류수와 접촉시켜 70°C를 유지하면서 30분간 방치한 액을 시험용액으로 하였다. 또한 유아식기의 살균·소독 방법에 따른 유해물질 이행량 모니터링은 열탕소독과 자외선 소독으로 실험하였다. 열탕소독은 4% acetic acid를 100°C, 30분간 용출하는 것을 10회 반복하였고, 자외선 소독은 자외선 살균 소독기(CSD-H089, Cuchen, Seoul, Korea)를 사용하여 15W 살균램프로 2시간 조사한 후 4% acetic acid로 70°C, 30분간 10회 반복하여 용출하였다.

과망간산칼륨 소비량의 측정

과망간산칼륨 소비량의 측정은 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 2-7 과망간산칼륨소비량 시험법에 따라 시험하였다⁸⁾. 먼저 시험에 사용할 삼각플라스크의 세척을 위해 물 100 mL, 희석한 황산(1→3/황산 1 mL에 물을 가하여 3 mL로 만든 비율의 것) 5 mL 및 0.002 M 과망간산칼륨용액 5 mL를 넣고 5분간 끓인 후 액을 버리고 물로 씻어 냈다. 이 삼각플라스크에 시험용액 100 mL를 취하여 희석한 황산(1→3) 5 mL를 가하고 다시 0.002 M 과망간산칼륨용액 10 mL를 가하여 5분간 끓인 다음 가열을 중지하고 즉시 0.005 M 수산화나트륨용액 10 mL를 가하여 탈색시킨 후 0.002 M 과망간산칼륨용액으로 엷은 홍색이 없어지지 없어지지 않고 남을 때까지 적정하였다.

분석조건

모든 분석은 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 IV. 기구 및 용기·포장의 시험법, 2. 항목별 시험법에 따라 시험하였다⁸⁾.

납, 비소 분석은 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광기(ICP-OES, Optima 8300, PerkinElmer, USA) 모델에 S10 Autosampler를 장착하여 사용하였고 기기분석조건과 측정 파장은 Table 2에 요약하였다.

포름알데히드 분석에는 HPLC (Acquity UPLC H-class, Waters, Milford, MA, USA)를 사용하였다. 분석용 컬럼은

Table 2. Analytical conditions of ICP-OES

Parameters	Condition	
RF power (W)	1500	
Gas flow (L/min)	Plasma	12
	Auxiliary	0.2
	Nebulizer	0.5
Analytical wavelength (nm)	Pb	220.353
	As	193.696

Table 3. Analytical conditions of HPLC

Parameters	Conditions
Column	Capcell pak C ₁₈ (4.6×150 mm, 5 µm)
Oven temperature	40°C
Detector	PDA ¹⁾ , 354 nm
Mobile phase	55% Acetonitrile
Flow rate	1.0 mL/min
Injection volume	10 µL

¹⁾ PDA: photodiode array.

Capcell pak C18 (Osaka Soda, Osaka, Japan)을 사용하였고, 기기분석조건과 측정파장은 Table 3과 같다.

통계적 분석

생분해성 합성수지제의 살균·소독 방법에 따른 모니터링 방법인 100°C, 30분 용출 및 자외선 조사 후 70°C, 30분 용출은 10회 반복하여 포름알데히드 및 납, 비소 용출량의 유의성을 확인하기 위해 SPSS version 25 (IBM, Armonk, NY, USA)를 사용하여 이원배치 반복측정 분산분석(Two-way Repeated Measure ANOVA)을 수행하였다.

안전성 평가

PLA 재료의 유아식기(n=22) 중 과망간산칼륨소비량이 기준초과한 유아식기 1건을 제외한 유아식기(n=21)에서 반복적인 열탕소독과 자외선 조사에 따른 포름알데히드 및 비소의 이행량 조사결과를 바탕으로 유아(만1-3세)가 하루 식이를 통해 체내 유입할 수 있는 일일추정섭취량(estimated daily intake, EDI)을 산출하고, 각각의 물질에 대한 인체 노출안전기준¹⁰⁻¹³⁾과 비교하여 안전성을 평가하였다. 일일 유아(만1-3세) 식품평균섭취량과 평균체중은 2021년 국민 건강영양조사 원시자료로 산출하였다¹⁴⁾.

Results and Discussion

분석법 검증

각각의 분석대상 물질의 표준용액을 분석장비를 사용하

Table 4. Limit of detection, limit of quantification, linearity and recovery results of analytical method for biodegradable synthetic resin

Compound	LOD ¹⁾ (mg/L)	LOQ ²⁾ (mg/L)	Linearity (R ²)	Recovery (average±RSD, %)
Formaldehyde	0.0046	0.0138	1.0000	105.67±0.75
Pb	0.0029	0.0089	0.9991	99.04±3.52
As	0.0019	0.0057	0.9999	101.89±3.45

¹⁾ LOD: $3.3 \times \sigma/S$, limit of detection.

²⁾ LOQ: $10 \times \sigma/S$, limit of quantification.

Table 5. Consumption of potassium permanganate in material of biodegradable synthetic resin

Material	Sample types	(N)	Consumption of potassium permanganate (mg/L)	
			Mean±SD	Min.-Max.
PLA	Baby tableware	22	1.50±4.15	0.06-19.91
	Bowl	1	1.11	1.11
	Container_disposable	9	0.52±0.20	0.25-0.85
	Tray_disposable	2	0.58±0.29	0.38-0.79
	Cup_disposable	4	0.26±0.17	0.00-0.35
	Fork, spoon, knife_disposable	4	0.79±0.24	0.51-1.04
	Straw_disposable	3	0.49±0.02	0.47-0.51
PLA+PBAT	Straw_disposable	3	0.44±0.23	0.19-0.63
PLA+PBS	Straw_disposable	2	0.38±0.13	0.28-0.47
Total		50	0.95±2.77	0.00-19.91

여 얻은 결과로 검량선을 작성하였고, 평균 0.999 이상의 결정계수(R^2) 값을 통하여 직선성을 확인하였다. 검출한계(limit of detection, LOD), 정량한계(limit of quantification, LOQ)는 측정값의 표준편차를 검량선 기울기로 나눈 값에 각각 3.3, 10배를 곱하여 산출하였고¹⁵⁾, 각각의 검출한계와 정량한계는 Table 4와 같다.

생분해성 합성수지재 재질별 모니터링 분석

과망간산칼륨 소비량

과망간산칼륨 소비량의 측정은 시험용액 중에 함유되어 있는 산화되기 쉬운 물질의 양을 측정하는 것으로서 총 이행량과 관계가 깊다. 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 기준·규격은 10 mg/L 이하로 규정되어 있으며⁸⁾ 본 실험의 결과가 기준치를 초과하는 것은 PLA 재질의 유아식기 1건(19.91 mg/L)이었고, 그 외 시료에서는 적합함을 확인하였다(Table 5). 기준치를 초과한 PLA 재질의 유아식기는 70°C로 가온한 물로 용출하는 과정에서 변형과 균열이 발생되었으며, 이 과정에서 유기물이 용출되어 과망간산칼륨소비량이 증가한 것으로 생각된다.

포름알데히드 이행량

포름알데히드의 분석은 현행 「식품용 기구 및 용기·포장

공전」 시험방법에 따라 식품모사용매로 4% acetic acid을 사용하여 각각 70°C에서 30분간 용출하고, 공전의 포름알데히드 시험법으로 전처리하여 평균 이행량은 0.013 ±0.010 mg/L, 최대 이행량은 0.030 mg/L로 기준·규격(4 mg/L 이하) 대비 매우 낮은 수준이었다(Table 6).

납, 비소 이행량

생분해성 합성수지재 중 PLA 재질이 포함된 모든 시료에서 70°C로 용출한 경우 납, 비소의 이행량이 정량한계(납: 0.0089 mg/L, 비소: 0.0057 mg/L) 이하로 나타났다.

테레프탈산, 이소프탈산, 1,4-부탄디올 이행량

생분해성 합성수지재 중 PBAT가 포함된 재질에서 테레프탈산과 이소프탈산, 1,4-부탄디올은 모두 불검출로 나타났다. 또한 PBS가 포함된 시료에서도 1,4-부탄디올은 모두 불검출로 나타났다.

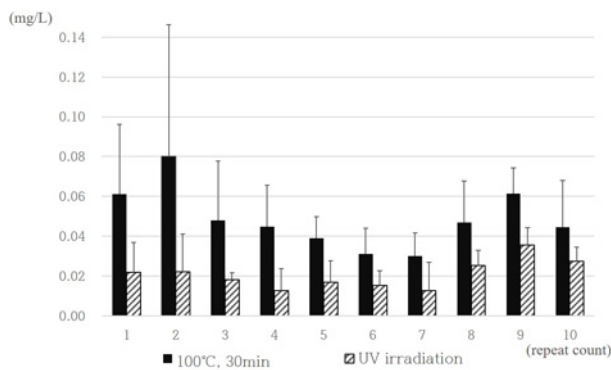
생분해성 합성수지재 중 PLA 재질의 유아식기의 살균·소독 방법에 따른 모니터링 분석

유통되고 있는 생분해성 합성수지재를 원료로 하는 제품 중 일회용품을 제외한 가장 많은 비중을 차지하는 제품은 유아식기류였다. 유아식기를 사용할 때 소비자가 살균과 소독에 민감한 점을 고려하여, 현행 「식품용 기구

Table 6. Formaldehyde concentrations in material of biodegradable synthetic resin

Material	Sample types	(N)	Formaldehyde concentrations (mg/L)	
			Mean±SD	Min.-Max.
PLA	Baby tableware	22	0.010±0.010	N.D. ¹⁾ -0.028
	Bowl	1	0.020	0.020
	Container_disposable	9	0.012±0.012	N.D. ¹⁾ -0.030
	Tray_disposable	2	0.024±0.003	0.022-0.026
	Cup_disposable	4	0.024±0.003	0.021-0.027
	Fork, spoon, knife_disposable	4	0.026±0.002	0.023-0.028
	Straw_disposable	3	0.010±0.009	N.D.-0.015
PLA+PBAT	Straw_disposable	3	0.005±0.009	N.D.-0.015
PLA+PBS	Straw_disposable	2	0.014±0.001	0.014-0.015
Total		50	0.013±0.010	N.D.-0.030

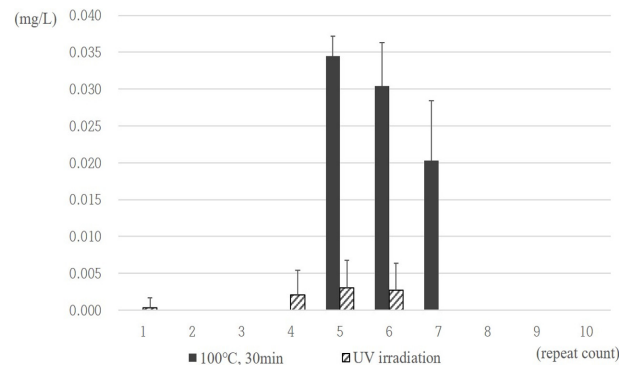
¹⁾N.D. is not detected or a value below the LOQ.

**Fig. 1.** Comparison of formaldehyde concentrations by migration conditions in polylactide samples (n=21).

및 용기포장 공진」에 정해져 있는 용출규격 시험 외에 실제 가정에서 이용하는 살균·소독 방법에 따라 이행량의 변화를 조사하였다. PLA 유아식기를 열탕소독과 자외선 소독, 두 그룹으로 나누고 포름알데히드와 납, 비소 이행량을 반복실험으로 확인하였다. 열탕소독은 100°C 30분간 용출시험으로 대체하여 10회 반복하였고, 자외선 소독은 자외선 살균 소독기를 사용하여 15W 살균램프로 2시간 조사한 후 70°C 30분간 10회 반복하여 용출하였다.

포름알데히드 반복 용출 이행량

100°C 30분간 반복 용출한 포름알데히드의 최대 이행구간은 2회차이며, 2회차 평균 이행량은 0.080±0.067 mg/L 이었으며, 자외선 조사 후 70°C 30분간 반복 용출한 경우 최대 이행구간은 9회차이고 평균 이행량은 0.035±0.009 mg/L 이었다. Fig. 1에 나타난 것처럼 두 그룹에서 반복 횟수에 따른 이행량의 변화는 증가와 감소 후 다시 증가와 감소하는 경향을 보였다. 이는 반복적인 용출에 의해 PLA 재

**Fig. 2.** Comparison of as concentrations by migration conditions in polylactide samples (n=21).

질의 물리적 변화가 포름알데히드의 이행량에 영향을 준 것으로 생각된다. 또한 자외선 조사 후 70°C 30분간 반복 용출한 조건과 비교하여 100°C 30분간 반복 용출조건에서 포름알데히드 이행량이 많음을 확인하였고, 그룹간 반복 횟수에 따른 이행량에 유의미한 차이가 있음을 확인하였다(Fig. 1). 위와 같은 결과는 PLA 재질이 자외선보다는 열에 더 민감한 특성 때문인 것으로 보인다. 100°C 30분간 반복 용출한 결과도 기준·규격(4 mg/L 이하) 대비 매우 낮은 수준임을 확인하였다.

비소 반복 용출 이행량

100°C 30분간 반복 용출한 비소의 최대 이행구간은 5회차이며, 5회차 평균 이행량은 0.034±0.003 mg/L 이었으며, 자외선 조사 후 70°C 30분간 반복 용출한 경우 최대 이행구간도 5회차이며 평균 이행량은 0.003±0.004 mg/L 이었다. 두 그룹에서 반복 횟수에 따른 이행량의 변화는 5회차까지 증가 후 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한 100°C

Table 7. Estimated daily intake and risk of Formaldehyde from polylactide as baby tableware

Substance	Migration conditions	CF	f _T	M ¹⁾ _{max.} (mg/L)	EDI (mg/kg b.w./day)	% TDI ²⁾
Formaldehyde	100°C, 30 min	0.05	1	0.1792	6.0×10 ⁻⁴	0.40
	UV irradiation	0.05	1	0.0562	2.0×10 ⁻⁴	0.13

¹⁾ M: migration concentration.

²⁾ Formaldehyde TDI: 0.15 mg/kg b.w./day (WHO, 2004).

Table 8. Estimated daily intake and risk of As from polylactide as baby tableware

Substance	Migration conditions	CF	f _T	M ¹⁾ _{max.} (µg/L)	EDI (µg/kg b.w./day)	%PTWI ²⁾
As	100°C, 30 min	0.05	1	40.0	1.3×10 ⁻¹	10.42
	UV irradiation	0.05	1	8.8	3.0×10 ⁻²	2.29

¹⁾ M: migration concentration.

²⁾ Inorganic As PTWI: 9.0 µg/kg b.w./week (MFDS, 2022).

30분간 반복 용출조건에서 비소 이행량이 더 많음을 확인하였으나, 기준·규격(0.1 mg/L 이하) 대비 매우 낮은 수준임을 확인하였다. 그룹간 반복횟수에 따른 이행량에 유의미한 차이도 있음을 확인하였다(Fig. 2). PLA 재질이 자외선보다 열에 약한 특성으로 열탕소독보다 자외선 소독이 더 안전하였고, 세척 및 소독 횟수가 증가할수록 비소의 이행량은 감소하므로 일상생활 속에서 반복적으로 사용할 경우, 비소의 검출량과 위해도는 크게 줄어들 것으로 예측된다¹⁶⁾.

한편 납의 경우 10회 반복 용출시험에서 두 그룹 모두에서 불검출이었다.

이행물질의 안전성 평가

안전성평가는 본 연구를 통한 이행량 조사 결과를 바탕으로 일일추정섭취량(EDI)을 구하고, 인체노출안전기준 자료 대비 포름알데히드 및 비소의 위해도(%)를 산출하였다. 인체노출안전기준은 포름알데히드의 경우 WHO의 일일섭취한계량(tolerable daily intake, TDI) 0.150 mg/kg b.w./day^{10,11)}을 이용하였고, 비소의 경우는 식품의약품안전처의 2022 국내 인체노출안전기준에서 제시한 무기비소 잠정주간섭취허용량(provisional tolerable weekly intake, PTWI) 9.0 µg/kg b.w./week^{12,13)}을 사용하였다. 소비계수(consumption factor, CF)는 미국 FDA의 CF값¹⁷⁾을 인용하여 0.05를 적용하였고, 식품유형분배계수(f_T)는 식품모사용매로 4% acetic acid만을 사용하였으므로 1을 적용하였다.

포름알데히드 안전성 평가

포름알데히드의 일일추정섭취량과 위해도(%TDI)를 구한 결과는 Table 7과 같다. 유아(만1-3세)에서 포름알데히드의 일일추정섭취량은 100°C, 30분 용출조건과 자외선 조사조건에서, 각각 최대 6.0×10⁻⁴ mg/kg b.w./day와 2.0×10⁻⁴ mg/

kg b.w./day로 산출되었고, WHO의 포름알데히드 TDI 값인 0.15 mg/kg b.w./day와 비교하여 위해도(%TDI)는 각각 0.40%, 0.13%로 나타나 매우 낮은 수준임을 확인하였다.

비소 안전성 평가

비소의 일일추정섭취량(EDI)과 위해도(%PTWI) 값을 구한 결과는 Table 8과 같다. 비소의 일일추정섭취량은 100°C, 30분 용출조건과 자외선 조사, 두 조건 모두 유아(만 1-3세)에서 각각 최대 1.3×10⁻¹ µg/kg b.w./day, 3.0×10⁻² µg/kg b.w./day로 산출되었고, 식품의약품안전처의 2022 국내 인체노출안전기준에서 제시한 무기비소 PTWI 값인 9.0 µg/kg b.w./week와 비교하여 위해도(%PTWI)를 평가한 결과는 10.42%, 2.29%로 낮은 수준임을 확인하였다. 따라서 PLA로부터 이행될 수 있는 비소는 안전한 수준으로 판단된다¹³⁾.

따라서 국내 유통되는 식품용 기구 및 용기포장 및 위생용품에 사용되는 생분해성 합성수지계 중 이행물질의 이행 및 노출에 대한 우려는 낮은 것으로 판단되며, 안전한 수준으로 관리되고 있음을 확인하였다.

국문요약

유통 중인 생분해성 합성수지로 만들어진 식품용 기구 및 위생용품 50건을 대상으로 ‘식품용 기구 및 용기·포장 공전’의 기준·규격을 검사하였다. PLA 재질의 유아식기 1건에서 ‘과망간산칼륨소비량’이 20 mg/L로 기준치(10 mg/L 이하)를 초과하였고, 그 외 모든 시료에서는 포름알데히드, 납, 비소 등이 기준·규격 이하로 안전한 수준이었다. 또한 가정에서 유아식기를 소독하는 방법의 안전성을 조사하기 위해, PLA 재질의 유아식기(n=21)에서 반복적인 열탕소독과 자외선 조사에 따른 이행량의 변화를 조사하

였다. 반복적인 열탕소독이 자외선 조사에 비해 포름알데히드와 비소의 이행량이 많았으나, 이행량은 매우 낮은 수준이었다. 그리고 유아(만 1-3세) 기준으로 계산한 포름알데히드와 비소의 일일추정섭취량(EDI)은 최대 6.0×10^{-4} mg/kg b.w./day 및 1.3×10^{-1} µg/kg b.w./day였으며, 이는 일일섭취한계량(TDI, 0.15 mg/kg b.w./day) 및 잠정주간섭취허용량(PTWI, 9.0 µg/kg b.w./week)의 0.40% 및 10.42%로 낮은 수준임을 확인하였다. 따라서 현 국내에서 유통되고 있는 식품용 생분해성 합성수지제는 안전한 수준임을 확인하였다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Hee-Jeong Yun <https://orcid.org/0000-0002-1972-1145>
 Jong-Sup Jeon <https://orcid.org/0000-0001-7636-2508>
 Young-Su Kim <https://orcid.org/0000-0001-9626-5449>
 Sung-Hee Park <https://orcid.org/0000-0001-6251-1648>
 Seo-Hyeon Song <https://orcid.org/0000-0003-2852-2778>
 Eun-Jung Ku <https://orcid.org/0000-0002-7893-8811>
 Sun-Young Chae <https://orcid.org/0000-0001-8062-9666>
 Myung-Jin Lee <https://orcid.org/0000-0002-4881-7672>

References

- National Institute of Food and Drug Safety Evaluation (NIFDS), (2024, March 25). Understanding food utensils, containers and packages made of biodegradable resin! Retrieved from https://www.nifds.go.kr/brd/m_11/view.do?seq=10949
- Wikipedia, (2024, March 25). Biodegradable plastic. Retrieved from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Biodegradable_plastic&oldid=1188439840
- Suh, M.S., Eum, S.W., Son, E.J., A study on promotion of sustainable environment-friendly consumption behavior of consumers. *J. Consum. Stud.*, **28**, 65-93 (2017).
- Kim J.W., Chei K.Y., Trends in the green bioplastics industry for sustainability. *Bio Economy Brief*, **160**, 1-8 (2022).
- Park, J.H., Hong, M.Y., Bioplastics. *KISTEP Brief*, **28**, 1-40 (2022).
- European Bioplastics, (2024, March 25). What are bioplastics? Retrieved from <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>.
- Han, J.W., Kim, D.H., Jeon, H.Y., Gu, J.M., Kim, H.S., Trends in biodegradable plastic carbon circulation technology and standard certification. *KEIT Issue Review*, **23-08**, 28-54 (2023).
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2022. Standards and specifications for utensils, containers and packages, Cheongju, Korea.
- Kim, H.U., Park, S.Y., Jo, Y.E., Park, Y.C., Park, S.J., Kim, M.H., Monitoring of heavy metals migrated from polylactide(PLA) food contact materials in Korea. *J. Food Hyg. Saf.*, **33**, 102-109 (2018).
- National Institute of Food and Drug Safety Evaluation (NIFDS), 2018. Safety assessment on migration of hazard elements in food packaging, Cheongju, Korea.
- National Institute of Food and Drug Safety Evaluation (NIFDS), 2022. Formaldehyde integration risk assessment, Cheongju, Korea.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2022. Safety standards for human exposure in Korea, Cheongju, Korea.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2021. Five types of heavy metal integration risk assessment, Cheongju, Korea.
- Korea Centers for Disease Control and Prevention (KCDC), The eighth Korea national health & nutrition examination Survey (KNHANES), Cheongju, Korea (2021).
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2021. Guidelines for validation and verification of test methods for quality control of testing inspection agencies in the food and drug field, Cheongju, Korea.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2017. Study on the materials migrated from kitchen utensils during repeated use, Cheongju, Korea, pp. 88-101.
- U.S. Food and Drug Administration (FDA), Guidance for industry: Preparation of premarket substances (Chemistry recommendations), College Park, MD, USA (2007).