

연구노트

## 페트병 생수 중 아세트알데하이드와 포름알데하이드의 이행 분석

정의민<sup>1</sup> · 김동주 · 이근택\*  
강릉원주대학교 식품과학과, <sup>1</sup>하이트맥주

### Analysis of Acetaldehyde and Formaldehyde Migrated from Polyethylene Terephthalate Bottles into Mineral Water

Eui Min Jung<sup>1</sup>, Dong Ju Kim, and Keun Taik Lee\*  
Department of Food Science, Gangneung-Wonju National University  
<sup>1</sup>Hite Co., Ltd.

**Abstract** The objective of this study was to determine the extent to which acetaldehyde (AA) and formaldehyde (FA) migrated from polyethylene terephthalate (PET) bottles into mineral water during storage at 25 and 35°C for 240 days. Generally, AA and FA were observed to migrate more at 35°C than at 25°C. The amount of FA in the samples irradiated under UV lamps was higher than in those stored in the dark over the storage period and vice versa for AA. Using a triangular test, the sensory panels distinguished a difference between one sample and the other two mineral water samples that had been exposed to UV lamps after 60 days of storage at 35°C ( $p < 0.05$ ). At this time, FA and AA concentrations were measured at 267.4 and 515.3 µg/L, respectively. After 120 days, an independent mineral water sample from the other two samples in all treatments could be distinguished by the panel members at a significance level of  $p < 0.001$ .

**Keywords:** PET, analysis, migration, bottled water

### 서 론

Polyethylene terephthalate(PET)는 물리, 화학적 특성 및 기계적 강도가 우수하여 최근 사용이 증가하는 추세이다. 특히 식품분야에서는 PET 재질이 화학적으로 비활성이고 물리적 성질이 우수하여 다양한 식품 용기와 포장재로 사용되고 있다. 현재 생수는 보편적으로 PET병에 포장 유통되고 있는데 이와 관련하여 생수 품질에 대한 소비자들의 관심도 증가하고 있다.

생수용 PET병은 수지를 고온으로 용융시켜 사전성형물(pre-form)을 제조한 다음 열을 가하면서 사출블로우성형(injection blow moulding) 방식으로 제조된다. PET병 성형시 고온조건에 노출되고 제품이 높은 온도에 장기간 보관될 때 PET의 잔류 또는 분해물질들이 식품으로 이행할 가능성이 증대된다고 보고되었다(1,2). 생수는 역치(threshold value)가 낮은 식품류이므로 이러한 성분들이 낮은 농도로 이행되어도 off-flavor를 발생시켜 생수의 관능학적 품질에 큰 영향을 줄 수 있다. PET 생수병에서 이행되는 주된 물질은 aldehyde류로 알려져 있다(2,3). Aldehyde와 같은 휘발성물질은 포장된 식품에서 우선적으로 냄새와 같은 관능학적 품질에 영향을 미치게 되는데 특징적으로 달콤한 과일향과 플라스틱류의 냄새가 나며 생수에서는 약 20-40 µg/L의 매우 낮은

역치값을 갖는다(4). Acetaldehyde(AA)는 PET를 축중합하고 용융시킬 때 글리콜 말단에서 분해되어 생성되는 물질이며 PET 병으로부터 식품으로 이행되게 된다(5). Formaldehyde(FA)도 AA와 유사한 기작으로 PET재질에서 생성된다. 예를 들어 AA의 경우 PET 제품에서 6-24 µg/g의 수준으로 검출되었고, FA는 시중에 유통되고 있는 PET병에 포장된 생수에서 10.1-17.6 µg/g의 농도로 검출되었다는 보고가 있다(6). 탄산수의 경우 높은 탄산가스 압력으로 인하여 AA의 이행량을 증가시킨다고 보고되었다(2). AA는 생수뿐만 아니라 콜라와 같은 탄산음료의 냄새와 향에 영향을 주기도 한다(7). 그 외 물질로서 C<sub>4</sub>-C<sub>11</sub> 범위의 aldehyde류와 ketone류의 물질들이 이취의 원인이 되며, 이는 플라스틱폴리머의 산화로 인해 생성되는 물질이라고 보고되었다(8). 현재 시중에 유통되고 있는 생수는 상온이상의 온도에서 장기간 햇빛에 노출되기도 한다. 이로 인해 PET 재질의 광분해로 인하여 저급 휘발성물질 생성이 촉진된다(9). 특히 상온이상의 온도에서 햇빛에 노출된 생수의 경우 햇빛 중 자외선에 의해 라디칼기의 연쇄분해반응이 일어나 PET의 분해가 촉진되며, PET재질 내 올리고머와 첨가제가 확산과정을 통해 생수로 이행된다(10). Fechine 등(11)은 폴리올레핀 계열의 화이버나 필름이 자외선에 노출되었을 때 분해물질이 증가하는 경향을 보인다고 하였다.

포장재 물질의 분석방법에 있어서 aldehyde와 기타 휘발성물질은 분자량이 작고 비등점이 낮아 분리 및 분석이 쉽지 않은데, PET에서의 AA함량의 동정은 일반적으로 headspace gas chromatography(HS/GC)를 이용하여 이루어져 왔다(12). 반면 FA는 HS/GC법에서 가열에 의해 분해 생성되므로 HS/GC법에 의한 정확한 정량은 불가능하다고 보고되었다(13). 따라서 분석이 까다로운 휘발성물질은 2,4-dinitrophenylhydrazine(DNPH) 유도체화를 통해 분석하거나 HS-SPME(headspace-solid phase microextraction)

\*Corresponding author: Keun Taik Lee, Department of Food Science, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea  
Tel: 82-33-640-2333  
Fax: 82-33-647-4559  
E-mail: leekt@gwnu.ac.kr  
Received December 31, 2010; revised April 5, 2011;  
accepted May 17, 2011

기법을 통해 분석되고 있다. 최근 HS-SPME는 headspace법 보다 더 정교한 결과를 얻을 수 있는 방법으로 보고된 바 있다(14-16).

그러므로 본 연구에서는 PET병에 포장된 생수에서 PET 제조 공정을 통해 생성되는 aldehyde와 기타 휘발성물질을 분석하여 이취의 원인을 규명하고, 상온유통 및 자외선 노출 등 외부 환경적인 요소에 따른 PET병에 포장된 생수의 저장 중 품질 변화를 측정하고자 하였다. 따라서 이러한 연구를 통하여 생수 PET병의 적절한 생산 품질관리가 이루어지고 소비자들이 안전하고 고품질의 생수를 소비할 수 있는 기반이 조성될 수 있을 것으로 기대하였다.

## 재료 및 방법

### 실험재료

본 연구에서는 시중에 유통되고 있는 A, B, C 3개 회사의 500 mL 생수를 각각 수거한 후 FA와 AA의 함량을 분석하였다. 이러한 사전실험 과정에서 타 시료에 비하여 유의적으로 높게 나타난 B 시료를 택하여 제조회사로부터 PET병에 충전된 500 mL 생수 제품을 제공받아 공시시료로 하였다. 생수 시료는 제조일로부터 240일 동안 25와 35°C의 온도로 유지된 incubator(BI-1000M, Jeio Tech. Co., Ltd., Seoul, Korea)에서 저장되었다. 그리고 생수 시료가 햇볕에 노출되는 경우를 가상하여 자외선에 의한 영향을 살펴보기 위해 Table 1에 표시된 사양의 UV-lamp(TL8W/05, Hansung, Seoul, Korea)를 이용하여 25와 35°C의 온도로 각각 유지된 incubator에서 UV 조사 실험을 병행하였다. 또한 성형 공정에 따른 휘발성물질을 확인하기 위하여 국내 B음료회사 500 mL 용 생수병의 pre-form과 성형된 1.5 mL A(amorphous)-PET 용기를 공여 받아 사용하였다.

### 표준시약

PET에서 유래된 aldehyde류와 ketone류 분석을 위한 표준물질로서 2,4-dinitrophenylhydrazine mix, formaldehyde-2,4-dinitrophenylhydrazine와 acetaldehyde-2,4-dinitrophenylhydrazine을 Tokyo Chemical사(Tokyo, Japan)에서 구입하였다. Stock solution은 HPLC 용 acetonitrile을 이용하여 각각 1,000 µg/mL의 농도로 제조하여 냉장 보관하였다.

### 용매 및 시약

분석을 위해 사용된 sodium sulfate, trifluoroacetic acid, potassium carbonate와 dichloromethane은 Junsei Chemical사(Tokyo, Japan)에서 구입하였으며, acetonitrile은 Sigma-Aldrich사(Tokyo, Japan)에서 구입하였다. 모든 용매는 잔류농약 또는 PCB 분석용으로 사용하였다. Potassium carbonate는 사용 전 FA와 AA가 검출되지 않는 3차 증류수를 이용하여 0.2 g/mL의 농도로 제조하여 사용하였다. 이때 3차 증류수는 Milli-Q gradient A10(Millipore Co., Millford, MA, USA)으로 정제하여 사용하였다.

### 생수의 자외선 노출 저장 실험

공시시료로서 PET병에 담겨진 생수를 제조회사로부터 당일 수거하여 25와 35°C로 각각 유지된 incubator에서 암소 보관 또는 자외선 조사하면서 90일간 저장실험을 하였다. 본 실험은 Mutsuga 등(13)의 방법에 따라 수행되었다. 이때 사용된 자외선 조사용 UV-lamp는 햇빛과 가장 유사한 자외선을 시뮬레이션하기 위해 UV-A 선을 사용하였으며 세부사항은 Table 1과 같다.

**Table 1. Specifications of the UV lamp used for irradiation of PET bottled water**

UV type	Size (mm)		Form	Lamp current (A)	UV output (W)
	Length	Caliber			
A	288.3	16	pipe	0.15	1.0

**Table 2. Conditions of HPLC for the analysis of formaldehyde and acetaldehyde**

Model	Agilent 1100 Series
Column	Zorbax ODS (C18) (250 mm×4.6 mm×5 µm)
Column oven	50°C
Mobile phase	A: acetonitrile, B: water
Flow rate	1.0 mL/min
Gradient	55% (A)-18 min-80% (A)-3 min-100% (A)
Injection volume	10 µL
Detection	UV at 360 nm

### 생수에서의 formaldehyde와 acetaldehyde의 전처리 방법

25와 35°C의 온도에서 각각 저장된 생수 시료 100 mL를 취한 후 DNPH/hydrochloric acid(1 mg/mL) 5 mL를 가하여 실온에서 1 시간 동안 유도체화 하였다. Potassium carbonate 3.7 g을 천천히 넣은 후 dichloromethane 25 mL를 가한 다음 분별 깔때기를 사용하여 dichloromethane층과 물층을 분리하였다. 물층은 dichloromethane 25 mL를 2번 가해준 후, 분별 깔때기를 통해 dichloromethane층과 물층을 분리하였다. 이와 같이 분리된 두 dichloromethane층을 합쳐 sodium sulfate로 수분을 제거하고 rotary evaporate를 통해 농축시켰다. 여기에 acetonitrile 2 mL를 가하여 시험용액으로 사용하였다.

### HPLC를 이용한 formaldehyde와 acetaldehyde의 정성 및 정량분석

미리 제조된 유도체화 solution의 FA와 AA의 분석에 사용한 HPLC(Agilent 1100 series, Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA)의 조건은 Table 2와 같다. 기존 Mutsuga 등(13)의 방법은 많은 시료를 사용하는 경우 늦은 retention time(RT)을 가지는 물질, 즉 올리고머나 기타 성분들이 다음 시료의 분석에 장애가 되었다. 따라서 이동상 흐름을 isocratic에서 gradient 방식으로 변경하였으며, 후반에 이동상의 유속을 높여 기타 물질을 배출시켜 다음 시료분석에 영향을 미치지 않도록 conditioning시키는 방법으로 분석하였다.

### 관능평가

관능평가는 저장기간에 따른 각각의 시료와 대조군을 대상으로 훈련된 23명의 관능요원에 의해 3점 차이 식별법을 이용하여 평가하였다. 관능검사요원은 후각에 민감하며 관능검사 경험이 있는 패널을 선발하여 이들에게 생수의 관능검사에 대한 사전교육을 실시한 후 평가에 참여토록 하였다. 생수의 관능학적 품질은 각 실험일에 25와 35°C에 저장되었던 생수시료 1개와 제조일로부터 냉장보관시킨 제품 2개를 테이블에 제시하여 차이나는 시료를 구분하는 3점 검사법에 의한 차이 식별법으로 평가하였다. 평가내용은 총 4개 군에서 각각 25와 35°C의 온도에 저장되었던 500 mL 생수를 찾아 표시하도록 하였고, 차이 식별이 가능한 경우 그 이유와 발생한 이취에 대해 기술하도록 하였다. 유의적 차

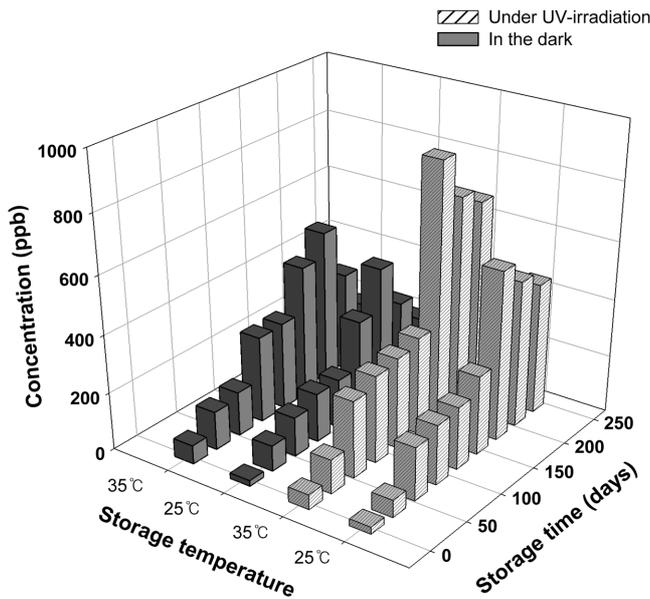


Fig. 1. Changes in the formaldehyde concentration according to storage time and temperature, and UV irradiation of mineral water packed in the PET bottle and stored up to 240 days.

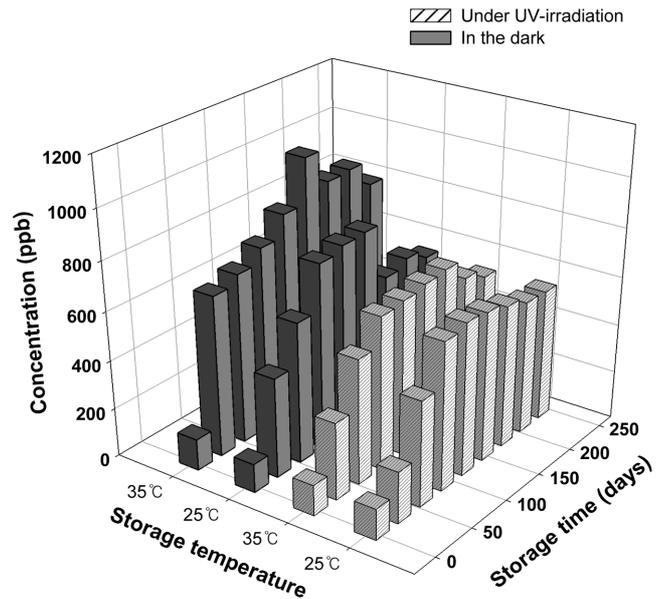


Fig. 2. Changes in the acetaldehyde concentration according to storage time and temperature, and UV irradiation of mineral water packed in the PET bottle and stored up to 240 days.

이는 KS H ISO 4120 3점 검사법에 보고된 유의차 정답수표를 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### PET 병에 포장된 생수 저장 시 FA와 AA 함량 변화

시중에 유통되고 있는 3개 회사의 생수들을 수거하여 분석한 결과 발견된 물질은 크게 AA, FA, 그리고 acetone 3가지였다. 이때 발견된 acetone의 함량은 매우 미미하거나 불검출 수준이어서 본 실험에서는 AA와 FA 이행량에 대하여만 조사되었다. Villberg와 Veijanen(17)에 따르면 PET 병에서 이행되어 생수 품질에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 carbonyl 화합물이라고 하여 본 연구에서 확인된 바를 뒷받침하였다. Fig. 1과 2는 PET병 생수의 저장기간과 온도에 따른 FA와 AA 함량 변화를 나타낸 것으로 실험군 모두 농도가 가장 낮은 0일차부터 농도가 점차 증가하여 FA는 180일차에서, AA는 120일차부터 180일차 사이에 가장 높은 함량을 나타내었다.

Fig. 1은 PET병 생수의 장기저장 중 저장기간과 온도에 따른 FA의 함량 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 볼 때 FA 함량은 25°C에서보다는 35°C에서, 암실에 보관되었던 시료에서보다는 자외선 조사되었던 시료들에서 높게 나오는 경향을 보였다. 즉, 자외선이 조사되지 않은 25°C 암실에서 저장한 생수에서의 FA 함량은 최저 19.7  $\mu\text{g/L}$ , 최고 472.8  $\mu\text{g/L}$ 이었으며 180일까지 FA 함량이 증가한 후 감소하였다. 그리고 35°C 암실에서 저장한 생수에서의 FA함량은 최저 64.5  $\mu\text{g/L}$ , 최고 540.4  $\mu\text{g/L}$ 이었으며 180일까지 증가한 후 감소하였다. 자외선을 조사하며 25°C에서 저장한 생수에서의 FA농도는 최저 4.4  $\mu\text{g/L}$ , 최고 586.4  $\mu\text{g/L}$  수준이었다. 그리고 자외선이 조사된 35°C에서 보관되었던 생수에서의 FA는 최저 51.7  $\mu\text{g/L}$ , 최고 890.6  $\mu\text{g/L}$ 로서 암실에서와 마찬가지로 180일차 생수에서 가장 높게 증가한 후 감소하였다. 하지만 180일차 이전의 FA의 증가율은 암실에서보다 컸던 것으로 확인되었다.

Fig. 2는 PET병 생수에서 저장기간과 온도에 따른 AA의 함량

변화를 나타낸 것으로, 저장기간 중 AA 함량은 온도가 높은 조건에서 더 높게 나타났다. 하지만 조사된 FA 함량변화와는 달리 자외선 조사가 이루어진 시료에서 암실에서 보관되었던 시료보다 낮게 나타나는 경향을 보였다. 자외선이 조사되지 않은 25와 35°C 암실에서의 AA 함량은 각각 117.9-792.8  $\mu\text{g/L}$ , 129.3-1,024.6  $\mu\text{g/L}$  범위이었다. AA 함량은 두 시료 군에서 150일차에 최고치에 이르렀으며 이후 감소하기 시작하였다. 그리고 자외선이 조사된 25와 35°C에 보관되었던 생수시료들에서의 AA 함량은 각각 120일차에 629.5  $\mu\text{g/L}$ 와 180일차에 663.8  $\mu\text{g/L}$ 로 최고치를 나타냈으며 이후 AA의 함량이 감소하기 시작하였다.

종합적으로 AA와 FA 함량이 저장 중 일정 기간 동안 증가하는 경향을 보이는 것은 PET 용기로부터 확산에 의한 이행량 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 즉, PET병을 제조 후 폴리머의 열분해 과정을 거쳐 pre-form이 블로우 성형된 직후 재질 내에 분해물질의 농도가 가장 높게 나타나며, 그 후 생수와 접촉하는 동안 PET병으로부터 생수로 AA와 FA 같은 물질의 이행이 증가되는 것으로 판단된다(1). 그리고 AA와 FA 함량이 25°C에서보다 35°C 시료들에서 높게 나타난 것은 높은 온도에서 이행속도가 증가함에 기인하는 것으로 사료된다. 그러나 FA와 AA 함량이 각각 180일과 120-180일 경과 후부터 감소하는 것은 PET용기로부터의 이행속도가 점차 감소하는 대신 포장용기를 통한 유실과 자체 분해 등의 요인에 기인하는 것으로 추측된다.

한편 FA 결과와는 달리 AA 함량은 자외선이 조사된 군에서보다 암실에서 보관된 군에서 더 높게 나타나는 경향을 보였다. 그 이유로는 자외선으로 인한 aldehyde류의 산화가 AA에서와는 달리 FA에서는 크게 일어나지 않은 것으로 판단된다. FA의 경우 PET 폴리머 사슬 말단에서 분해되는 것이 아니라 폴리머 내부의 잔기에 의하여 형성된다고 보고된 바 있다(18). 즉, 자외선을 통한 라디칼 연쇄 반응은 내부 사슬 분해를 촉진시키므로 FA의 경우에는 자외선에 의한 반응성이 AA보다 크게 나타났을 것으로 추측된다(19).

국내 식품위생법상 안전성 차원에서 PET제 용기 포장재 중 FA

**Table 3. Triangular sensory test according to storage time of PET stored mineral water**

Storage (day)	Storage	Wrong answer	Correct answer	Frequency	Significant level (%)
1	25/dark	18	10	28	-
	35/dark	14	14	28	-
	25/UV	22	6	28	-
	35/UV	18	10	28	-
30	25/dark	14	8	22	-
	35/dark	11	11	22	-
	25/UV	15	7	22	-
	35/UV	12	10	22	-
60	25/dark	19	5	24	-
	35/dark	13	11	24	-
	25/UV	16	8	24	-
	35/UV	11	13	24	5
90	25/dark	13	10	23	-
	35/dark	8	15	23	1
	25/UV	12	11	23	-
	35/UV	1	16	23	0.1
120	25/dark	4	20	24	0.1
	35/dark	1	23	24	0.1
	25/UV	2	22	24	0.1
	35/UV	1	23	24	0.1
150	25/dark	3	20	24	0.1
	35/dark	1	23	24	0.1
	25/UV	2	22	24	0.1
	35/UV	1	23	24	0.1
180	25/dark	3	21	24	0.1
	35/dark	1	23	24	0.1
	25/UV	1	22	24	0.1
	35/UV	1	23	24	0.1
210	25/dark	2	22	24	0.1
	35/dark	0	24	24	0.1
	25/UV	2	22	24	0.1
	35/UV	0	24	24	0.1
240	25/dark	1	23	24	0.1
	35/dark	0	24	24	0.1
	25/UV	1	23	24	0.1
	35/UV	0	24	24	0.1

와 AA 재질기준과 용출기준은 설정되어 있지 않은 상태이다. 그러나 유럽연합에서의 AA와 FA의 기준치인 6 ppm(mg/kg food)과 15 ppm(mg/kg food)(20)을 근거로 판단하면 본 실험에서 조사된 모든 생수군에서의 FA와 AA의 이행량은 매우 낮은 수준으로 확인되었다. 그러나 FA와 AA는 유럽연합 기준치보다 100배 이하의 함량수준에서도 생수의 관능학적 품질에 영향을 미칠 수 있을 만큼 역치가 낮은 물질이다. 따라서 생수가 장기간 실온 이상에 노출되거나 또는 제조과정 중 여러 가지 요인으로 인하여 생수병에 잔존한 경우 이러한 물질들이 저장 중 생수에 이행됨으로서 관능학적 품질에 영향을 미칠 가능성은 충분할 것으로 판단되었다.

**관능검사**

Fig. 1에 나타난 바와 같이 AA는 60일 이후 모든 군에서 크게 급증하였다. Table 3의 결과와 같이 관능검사 패널들은 35°C 온도에서 60일간 자외선 조사된 생수 군에서 최초로 대조군 생수와의 차이를 식별하기 시작하였다( $p < 0.05$ ). 암실에 보관되었던 시료들은 35°C 시료들의 경우 90일 이후( $p < 0.01$ ), 그리고 25°C 시료들의 경우 120일 이후( $p < 0.001$ )부터 대조군 시료와의 차이가 식별되었다. 120일 이상 저장되었던 시료들은 모든 군에서 이상 시료와 대조군 시료와의 차이가 식별되었다( $p < 0.001$ ). 이는 PET 병으로부터 aldehyde류 휘발성 물질들이 생수시료에서 관능학적으로 역치이상의 농도로 존재하였음을 의미한다. 이와 같은 결과를 기준으로 판단한다면 생수가 상온이라 할 수 있는 25°C 이상의 온도에서 120일 이상 저장 유통된다면 암실 보관일지라도 이취로 인한 품질저하가 야기될 수 있는 상태에 이르는 것으로 사료된다.

**요 약**

본 연구에서는 PET병에 포장된 생수의 제조공정 및 유통과정 중 온도 및 자외선과 같은 외부요인에 의하여 PET병에서 생수로 이행될 수 있는 휘발성 물질에 의한 생수 품질 또는 안전성을 검증하고자 하였다. PET 생수의 25와 35°C 저장 중 FA와 AA 함량은 점차 증가하는 경향을 보이다가 180일과 120-180일 후부터 각각 감소되기 시작하였다. PET병 생수는 35°C에서 자외선이 조사되는 상태로 저장 시 60일 후부터 대조군 생수와 차이가 식별되기 시작하였다. 이 때 FA와 AA의 농도는 각각 267.4 µg/L와 515.3 µg/L이었다. 120일 이후에는 저장 온도와 자외선 조사 여부에 상관없이 모든 시료군에서 패널들이 대조군 생수와의 차이를 식별하였다. 본 연구를 통하여 PET병에 포장된 생수를 자외선에 노출시키거나 고온에서 장기간 저장할 경우 FA나 AA의 증가가 초래되며 이로 인하여 생수의 품질이 저하된다는 것이 확인되었다. 따라서 PET병 생수의 관능학적 및 위생학적 품질을 높이기 위해서는 제조공정, 특히 성형과정 중 고열에 대한 노출을 줄이고 제조된 PET병 또는 생수의 유통시 저장 온도가 되도록 낮게 유지하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

**문 헌**

- Villain F, Coudane J, Vert M. Thermal degradation of polyethylene terephthalate: Study of polymer stabilization. Polym. Degrad. Stabil. 49: 393-397 (1995)
- Dabrowska A, Borecz A, Nawrocki J. Aldehyde contamination of mineral water stored in PET bottles. Food Addit. Contam. 20: 1170-1177 (2003)
- Erwender J, Franz R, Mauer A, Welle F. Determination of the migration of acetaldehyde from PET bottles into non-carbonated and carbonated mineral water. Deut. Lebensm-Rundsch. 6: 215-221 (2003)
- Nijssen B, Kamperman T, Jetten J. Acetaldehyde in mineral water stored in polyethylene terephthalate (PET) bottles: Odour threshold and quantification. Packag. Technol. Sci. 9: 175-185 (1996)
- ILSI. Report on packaging materials: 1. Polyethylene terephthalate (PET) for food packaging applications. International Life Sciences Institute, Seoul, Korea. pp. 5-6 (2000)
- Dong M, DiEdwardo AH, Zitomer F. Determination of residual acetaldehyde in polyethylene terephthalate bottles. J. Chromatogr. Sci. 18: 242-246 (1980)
- Ashby R. Migration from polyethylene terephthalate under all

- conditions of use. *Food Addit. Contam.* 5: 485-492 (1998)
8. Bravo A, Hotchkiss JH, Acree TE. Identification of odor-active compounds resulting from thermal oxidation of polyethylene. *J. Agr. Food Chem.* 40: 1881-1885 (1992)
  9. Begley TH, Biles JE, Cunningham C. Migration of a UV stabilizer from polyethylene terephthalate (PET) into food simulants. *Food Addit. Contam.* 21: 1007-1014 (2004)
  10. Zhu Z, Kelley MJ. IR spectroscopic investigation of the effect of deep UV irradiation on PET films. *Polymer* 46: 8883-8891 (2005)
  11. Fechine GJM, Rabello MS, Souto-Maior RM. The effect of ultraviolet stabilizers on the photodegradation of poly(ethylene terephthalate). *Polym. Degrad. Stabil.* 75: 153-159 (2002)
  12. Wyatt MD. Semi-automation of head space GC as applied to determination of acetaldehyde in polyethylene terephthalate beverage bottles. *J. Chromatogr. Sci.* 21: 508-511 (1983)
  13. Mutsuga M, Tojima T, Kawamura Y, Tanamoto A. Survey of formaldehyde, acetaldehyde and oligomers in polyethylene terephthalate food-packaging materials. *Food Addit. Contam.* 22: 783-789 (2005)
  14. Lores M, Llompарт M, Gonzalez-García R, Gonzalez-Barreiro C, Cela R. On-fibre photodegradation studies of polychlorinated biphenyls using SPME-GC-MS-MS: A new approach. *Chemosphere* 47: 607-615 (2002)
  15. Schnable JG, Dussert B, Suffet IH, Hertz CD. Comparison of quarter-hourly on-line dynamic headspace analysis to purge-and-trap analysis of varying volatile organic compounds in drinking water sources. *J. Chromatogr. A* 513: 47-54 (1990)
  16. Maria L, Ken L, Merv F. Headspace solid-phase microextraction for the determination of volatile and semi-volatile pollutants in water and air. *J. Chromatogr. A* 824: 53-61 (1998)
  17. Villberg K, Veijanen A. Identification of off-flavor compounds in high-density polyethylene (HDPE) with different amounts of absents. *Polym. Eng. Sci.* 38: 922-925 (1998)
  18. Kishan CK. A novel approach for studying the thermal degradation, and for estimating the rate of acetaldehyde generation by the chain scission mechanism in ethylene glycol based polyesters and copolyesters. *Polym. Degrad. Stabil.* 67: 91-99 (2000)
  19. Somjate P, Virote B. Preparation and characterization of amine-functionalized SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> films for formaldehyde degradation. *Appl. Surf. Sci.* 255: 9311-9315 (2009)
  20. EC. Commission Directive 2002/72/EC relating to plastic materials and articles intended to come into contact with foodstuffs. *Official J. Eur. Commun.* L220 (2002)