J Korean Soc Food Sci Nutr
33(6), 1056~1062(2004)

발포 폴리스티렌 용기로부터 증류수로의 저분자물질 이행

이동선[1†] · 송봉수[1] · 최진옥[1] · 박우포[2]

[1]경남대학교 식품생명공학부
[2]마산대학 식품영양과

Migration of Low Molecular Weight Substances from Expanded Polystyrene Cup to Aqueous Food Simulant

Dong Sun Lee[1†], Bong Su Song[1], Jin Ok Choi[1] and Woo Po Park[2]

[1]Division of Food Science and Biotechnology, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea
[2]Dept. of Food and Nutrition, Masan College, Masan 630-729, Korea

Abstract

Migration of low molecular weight components from expanded polystyrene (ESP) to distilled water was measured at different temperature conditions. Overall migration and specific monomer migration were measured. Diffusion model based on Fick's law was used to determine the apparent diffusion coefficients at various experimental conditions. The overall and specific migration levels were estimated to give some practical implications for regulatory guideline development and safe package design. Diffusion coefficients for overall migration in $KMnO_4$ oxidizable extractives and specific migration of styrene monomer from ESP at 60°C were 0.030 and 6.8×10^{-5} mm^2/h, respectively. Their temperature dependence could be explained by Arrhenius equation with respective activation energies of 80.5 and 98.6 kJ/mol. Experimental conditions ensuring desired migration level were suggested for reliable examination of migration from the packaging material. Some explanatory estimations of migrations were given for some typical conditions of potential usages.

Key words: migration, diffusion, polystyrene, styrene monomer, food simulant

서 론

폴리스티렌은 비결정성 수지로 벤젠과 에틸렌으로부터 합성한 에틸벤젠을 탈수소하여 스티렌으로 만든 후 중합하여 얻어진 폴리머이다(1,2). 스티렌의 단독중합체인 일반용 폴리스티렌, 중합시에 합성고무 등을 첨가한 내충격성 폴리스티렌, 발포제를 가한 발포폴리스티렌 등이 있다. 이 중에서도 발포폴리스티렌은 단열성, 내수성이 우수하여, 식품용 트레이, 일회용 도시락 및 반찬류의 포장용기뿐만 아니라 특히 인스탄트 라면 용기를 비롯하여, 즉석면이나 즉석 국류의 컵 등에 광범위하게 사용되고 있다.

이와 같이 폴리스티렌은 즉석, 가공식품의 증가와 함께 가볍고 사용하기에 편리한 기능뿐만 아니라 가격면에서 경쟁력을 가지므로 각종식품용 포장재로 이들 소재의 사용은 계속 증가할 것으로 전망된다. 더욱이 환경적인 부담이 큰 포장폐기물의 처리를 이유로 대체소재로의 전환 등이 시도되었으나, 폴리스티렌의 재활용 및 폐기분해 기술의 개발로 이들 문제 또한 해결될 전망이다. 이상과 같이 다종 다양하게 식품의 포장에 사용되고 있는 폴리스티렌은 styrene을 중합하여 얻어지는 것으로 그 과정에서 원료인 styrene monomer, dimer, trimer 등이 존재하고, 성형과정에서도 여러 가공보조제들이 첨가될 수 있다(1-4). 이러한 저분자량의 물질은 재질이 식품과 접촉했을 때 일부 식품으로 이행할 가능성이 있으며, 이로 인해 포장식품의 품질이 영향을 받을 수 있을 뿐 아니라 그 위생적 안전성도 위협받을 수 있다. 폴리스티렌으로부터 styrene monomer의 노출을 분석한 바에 의하면 식품에 존재하는 styrene monomer의 대부분이 포장에 기인한 것으로 나타났다(5). 폴리스티렌으로부터 styrene monomer의 이행은 상당한 양이 이루어지는 것으로 보고되었으며, 식품에서의 이취를 나타내는 농도는 조건에 따라 상당히 다르나 대체적으로 0.3 ppm 부근인 것으로 보고되고 있다(6). 우리나라에서는 Lee 등(3)과 Sung 등(4)이 용기면 폴리스티렌 포장에서의 잠재적 환경호르몬으로 지정된 styrene dimer, trimer의 잔류농도를 분석하고, 대표적 사용조건에서의 식품으로의 이행량을 분석한 바가 있다.

위생당국에서는 포장식품의 안전성을 확보하기 위하여 재질시험 및 용출시험에 의하여 필요한 사항을 규제하고 있다. 따라서 여러 조건에서의 이행량을 평가하고 그로부터 안전

†Corresponding author. E-mail: dongsun@kyungnam.ac.kr
Phone: 82-55-249-2687, Fax: 82-55-249-2995

한 사용조건을 확립할 필요가 있으며, 또한 다양한 사용조건에서의 이행량을 예측할 필요가 있다. 포장식품의 품질관리 및 위생안전성 측면에서 식품포장재로부터의 각종 조건에 해당하는 저분자량 물질의 식품으로의 이행량과 이행속도를 측정할 수 있는 예측모델을 확립한다면, 각각의 실험적인 이행분석에 따르는 시간과 비용을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 식품특성에 따른 안전성을 고려한 이행물질의 조절이 가능할 것으로 본다. Brandsch 등(7) 및 O'Brien과 Cooper(8)는 수학적 이행모델을 사용하여 식품포장재의 이용조건 등을 설계할 수 있음을 보이고, 구체적인 예를 제시하였다. 특히 몇몇 연구자에 의하여 폴리스티렌으로부터 모사용액으로의 styrene monomer의 이행은 확산모델로 표현될 수 있는 것으로 보고된 바 있으며 몇 가지 조건에 대해서 그 확산계수 값이 측정되었다(9-11). 하지만 이러한 연구에서는 실험 조건의 선정과 결과의 해석에서 우리나라의 실정에 맞는 사용 및 규제와 직접 관련된 정보를 제공하고 있지는 않다. 폴리스티렌은 일정 부분 이행의 예측모델에 대한 연구가 이루어진 점에서 체계적인 이행모델을 확립하는 데 있어서 좋은 연구 대상이 되며, 아울러 최근에 여러 잠재적 위생문제가 부각된 바가 있어서, 이로부터의 이행에 대하여 예측모델을 연구하는 것은 앞으로의 이 분야 연구의 기초를 마련하는데 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 실제 실험 데이터를 근거로 발포 폴리스티렌으로부터 저분자 물질의 이행에 대한 수학적 예측모델을 확립하고, 이를 현실적인 포장조건으로 적용시켜 그 의미를 해석하고자 하였다.

재료 및 방법

발포 폴리스티렌 용기

발포 폴리스티렌 용기는 용량 부피 800 mL인 컵라면 용기(벽면 두께 1.93 mm)를 사용하였다. 용기의 형상은 아랫부분 직경 9 cm, 윗부분 직경 14 cm, 높이 10 cm이었다.

용출실험조건

발포 폴리스티렌(expanded polystyrene, EPS) 용기로부터의 이행을 측정하기 위하여 용기내에 777 mL의 증류수를 담고 윗부분을 알미늄 적층 플라스틱/종이 뚜껑으로 열접착하였다. 밀봉된 포장을 일정한 온도로 유지되는 항온기에 저장하면서 시간에 따라 필요한 시료를 꺼내어 포장을 개봉하고 용출용액을 취하여 증발잔류물, $KMnO_4$ 소비량과 styrene monomer의 농도를 측정하였다.

이행물질 분석방법

용출용액에서의 증발잔류물과 $KMnO_4$ 소비량의 측정은 식품공전의 기구 및 용기·포장의 기준·규격에서 규정된 방법을 따랐다(12). 폴리스티렌 용기 자체에 함유된 styrene 양을 분석하기 위해, 먼저 시료를 잘게 자른 다음 약 0.2 g을 정확히 측정하여 20 mL volumetric flask에 넣고, 내부표준물질로서 cyclopentanol을 dichloromethane에 녹여 1,000 ppm이 되도록 만든 용액 1 mL를 넣은 다음 dichloromethane으로 최종 정용하였다. Styrene monomer 표준품은 Supelco사 제조 5,000 μg/mL 용액을 dichloromethane으로 희석하여 사용하였다.

그리고 용출용액(distilled water)에 이행된 styrene monomer를 분석하기 위하여 이행된 용출용액을 rapid trace (Zymark사, Hopkinton, USA)를 사용하여 자동으로 추출농축하였다. 이때 사용한 column은 내부충전물(adsorbent) 양이 100 mg인 C_{18} SPE (International Sorbent Technology사, Ystrad Mynach, UK)를 사용하였다. Column 사용조건은 메탄올 5 mL를 5 mL/min으로 column을 conditioning한 다음 용출용매(시료) 8 mL을 1.5 mL/min 속도로 column에 loading 후 cyclohexane 1.5 mL을 1.0 mL/min 속도로 elution시켜 GC에 injection하였다(Table 1). 또한, styrene monomer 표준품(Supelco Co., USA)은 해당 용매로 희석하여 제조한 다음, 시료와 똑같은 조건으로 rapid trace를 사용하여 추출하였다.

확산계수의 결정

실용적 조건에서 포장의 한 면이 식품에 담겨있는 경우, 포장의 두께(부피)는 일반적으로 식품의 두께(부피)에 비하여 매우 작다. 따라서 제한된 포장이 무한히 큰 부피의 식품과 접촉하는 경우에 시간에 따른 이행의 양은 다음 식 (1)로 표현될 수 있다(9-11,13).

$$\frac{M_{f,t}}{M_{f,\infty}} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(\frac{-D_p(2n+1)^2\pi^2 t}{4 l^2}\right) \quad (1)$$

여기서 $M_{f,t}$는 시간 t에서의 이행량, $M_{f,\infty}$는 평형도달 후 이행량, D_p는 포장내에서의 확산계수($mm^2\ h^{-1}$), l은 포장두께(mm)이다.

그런데, 이행의 진행이 적은 초기에 $M_{f,t}/M_{f,\infty}<0.6$인 경우에는 식 (1)은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$\frac{M_{f,t}}{M_{f,\infty}} = \frac{2}{l}\left(\frac{D_p t}{\pi}\right)^{0.5} \quad (2)$$

즉, $M_{f,t}/M_{f,\infty}$는 시간의 0.5승에 비례하며, 이를 그래프로 도시하면 기울기는 식 (2)에서 $\frac{2}{l}\left(\frac{D_p}{\pi}\right)^{0.5}$가 된다. 이러한

Table 1. Analysis conditions of gas chromatography for determination of styrene monomer

	Conditions
Equipment (GC-FID)	Agilent 6890 (Agilent, USA)
Column	HP-FFAP (Hewlett Packard, USA) 50 m×0.32 mm I.D.×0.50 μm film thickness
Carrier gas	N_2 (1.6 mL/min)
Oven temp	100°C (1 min) 3°C/min to 130°C
Injection temp	Splitless 230°C
Detection temp	250°C

관계에서 확산계수, D_p를 얻을 수 있다.

이행량이 상대적으로 많은 경우에는 이행의 초기에 식 (2)의 사용에 의하여 확산계수를 얻을 수 있으나, styrene monomer의 증류수로의 이행에서와 같이 이행량이 아주 적은 초기의 이행에서는 위의 식들에서 $M_{f,\infty}$를 포장재에 포함된 monomer의 양($M_{p,o}$)과 동일한 것으로 가정하고 필요한 계산을 할 수 있다. 즉, 식 (2)에서 $M_{f,\infty}=M_{p,o}$로 가정하면 식(3)이 얻어진다.

$$\frac{M_{f,t}}{M_{p,o}} = \frac{2}{l}\left(\frac{D_p t}{\pi}\right)^{0.5} \quad (3)$$

여기서 $M_{p,o}$는 초기에 포장재 내에 포함된 styrene monomer의 양이다.

위의 방정식들을 이용하여 이행 데이터를 해석하여 확산계수를 결정하였으며, 결정된 확산계수와 상황에 따른 적절한 수학적 모델 방정식과 결합하여 가능한 여러 조건에서 잠재적 이행물질의 양을 계산하였다.

아울러 여러 온도조건에서 구한 확산계수의 온도의존성을 Arrhenius 방정식, 식 (4)에 의하여 분석하였다.

$$D_p = D_{po} \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

여기서 E_a는 활성화에너지(J mol^{-1}), R은 기체상수(8.314 J K^{-1} mol^{-1}), T는 온도(K), D_{po}는 상수이다.

결과 및 고찰

총괄이행의 확산계수

증류수는 수용성 식품을 대표하는 모사식품으로 가장 많이 이용되는 용매이다(1,14). 수용성 식품으로의 이행가능성을 검토하기 위하여 측정된, EPS 용기로부터의 증류수로 용출된 총괄이행량을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 증류수로 용출된 증발잔류물도 측정을 하였으나, 그 양이 아주 작아서 온도 및 시간 조건에 따른 일관성 있는 데이터를 얻을 수 없었다. 11.4 g의 EPS 용기로부터 이행될 수 있는 최대 가능한 총괄 이행량($M_{f,\infty}$)은 1.1~1.3 mg으로 나타났으며, 이는 온도조건에 따라 약간 달랐다.

Fig. 1의 실험결과를 이행의 초기에 해당되는 $M_{f,t}/M_{f,\infty}$ <0.6이하에 대해서 식 (2)의 관계로 도시하면 Fig. 2의 결과를 얻을 수 있었다.

각 온도에서 얻어지는 기울기로부터 겉보기 확산계수를 얻었으며, 그 결과 60, 75, 85, 90°C에서 각각 0.030, 0.128, 0.261, 0.317 mm^2/h이었으며, 온도에 대한 관계를 도시하면 Fig. 3과 같다. 즉, 여러 온도조건에서의 총괄 이행의 확산계수는 Arrhenius 방정식(식 (4))에 의해 설명될 수 있었으며, 기울기로부터 확산의 온도의존성을 나타내는 활성화에너지 값을 구하면 80.5 kJ/mol로 나타났다. 이러한 온도의존성 값은 일반적인 플라스틱 포장재에서 저분자 물질의 확산에 대한 활성화 에너지 값인 86.9 kJ/mol과 비슷한 범위의 값이다(7,8).

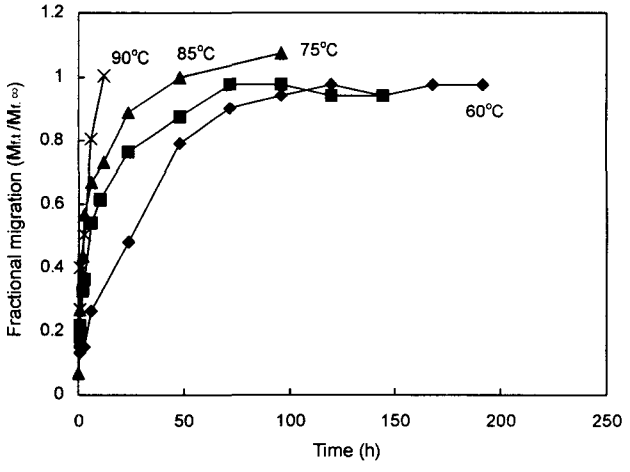

Fig. 1. Overall migration of soluble organic material from expanded polystyrene measured as $KMnO_4$ oxidizable matter. Food simulant was distilled water in single side contact.

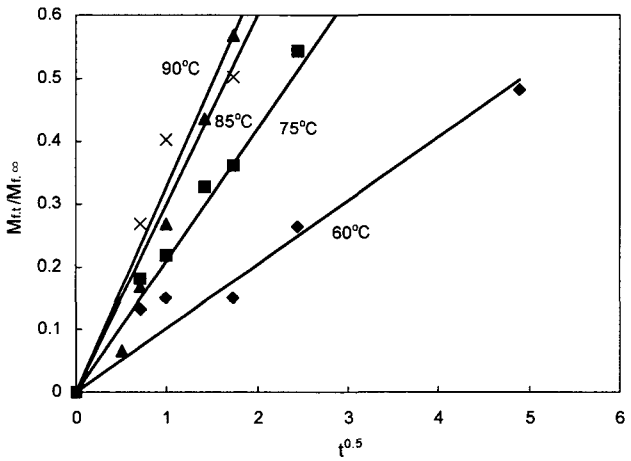

Fig. 2. $M_{f,t}/M_{f,\infty}$ vs. $t^{0.5}$ for overall migration from EPS cup to water.

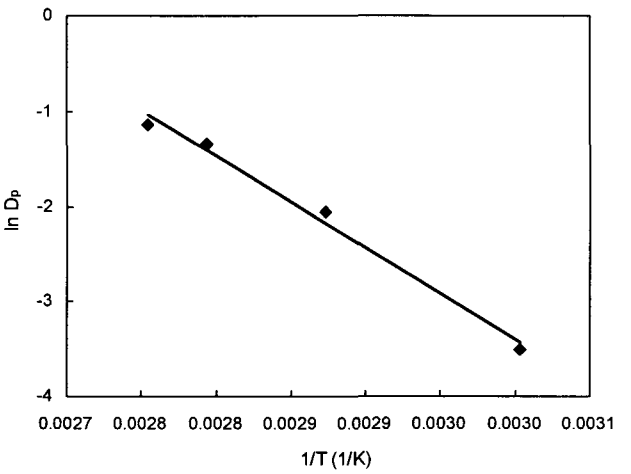

Fig. 3. Temperature dependence of overall migration from EPS to water.

Styrene monomer 이행의 확산계수

Fig. 4에서는 Table 1에 제시된 실험조건에 의하여 GC에서 얻어진 styrene(ST) monomer의 대표적 분석 chromatogram을 보여주고 있다. ESP 용기 및 용기로부터 용출된 수용액에 존재하는 ST monomer를 분리하여 분석할 수 있었다. 이 실험에 사용한 EPS에서의 styrene monomer의 잔류농도는 678 μg/g으로 측정되었으며, 이는 식품공전에 규정된 잔존 한계허용치 1000 ppm보다 낮은 값이었다. Fig. 5에서 보듯이 EPS 컵으로부터 styrene monomer의 증류수로의 이행은 매우 낮은 농도로 진행되었다. 이는 styrene monomer가 소수성으로서 수분에 잘 녹지 않는 특성에 기인하는 것으로 추정되며, 이것은 이미 많은 연구자에 의하여 확인된

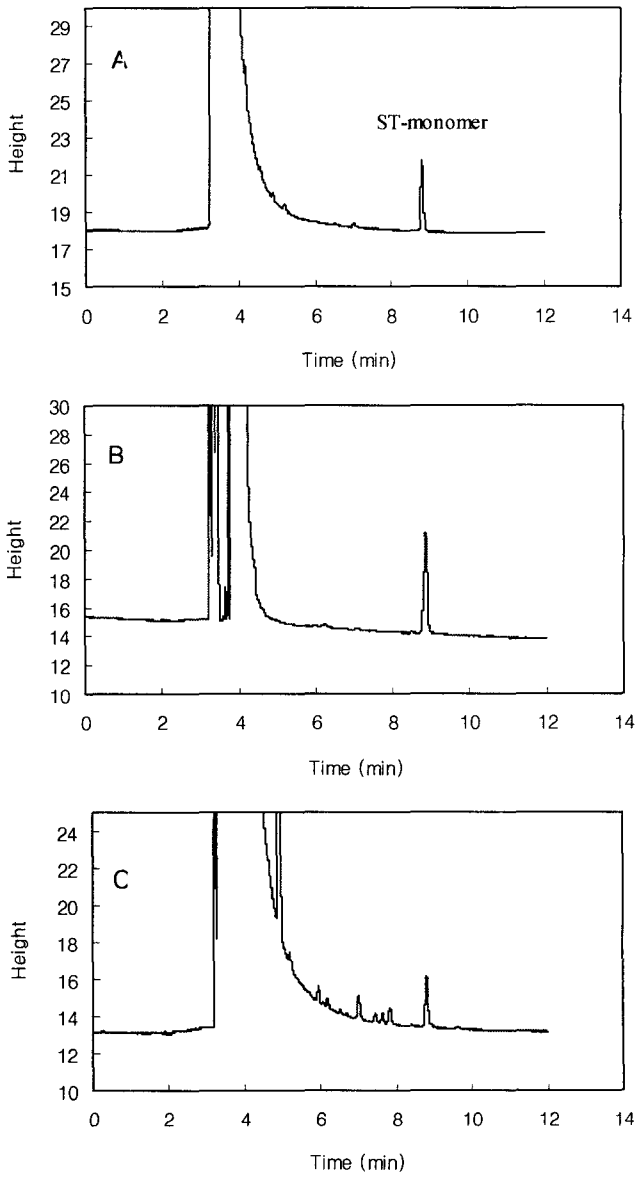

Fig. 4. GC-FID chromatograms for ST-monomer.
(A) standard solution, (B) polystyrene product and (C) simulant solution migrated from expanded polystyrene.

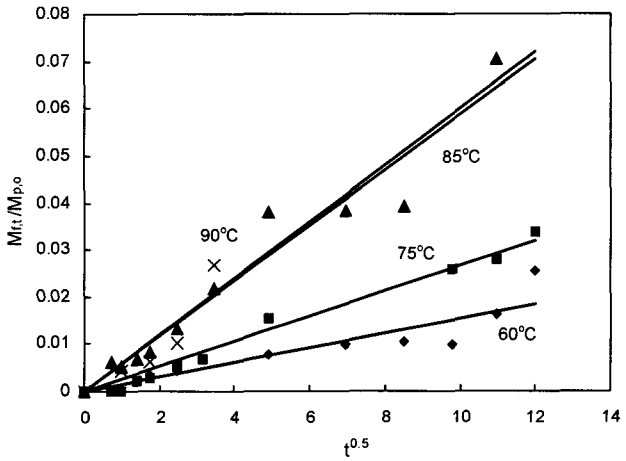

Fig. 5. $M_{f,t}/M_{p,o}$ vs. $t^{0.5}$ of styrene monomer migrated from 11.4 g EPS cup to 777 mL of water (single side contact).

바이다(10,11). 초기 함유량 대비 이행된 monomer의 양을 $t^{0.5}$에 대한 관계로 나타낸 결과, 직선적인 관계가 얻어졌고 (Fig. 5), 이로부터 온도조건별 확산계수를 계산할 수 있었다. 높은 온도에서는 직선적 관계의 결정계수가 약간 낮아지는데, 이에는 ST monomer의 휘발성에 약간 영향을 받은 것으로도 생각된다.

즉, 60, 75, 85, 90°C에서의 확산계수 값은 각각 6.80×10^{-6}, 2.05×10^{-5}, 1.01×10^{-4}, 1.05×10^{-4} mm^2/h였으며(Fig. 6), 이 값들은 Lickly 등(11)이 cooking oil로의 확산이행을 보고한 66°C 기준 $2.5\sim4.8\times10^{-9}$ cm^2/s에 비해서는 상당히 낮은 값의 범위이다. 이는 styrene monomer가 소수성으로서 EPS 컵이 수용액과 접촉될 때에는 잘 용출되지 않으며, 즉, 분배계수에서 수용액에서의 농도가 낮은데 기인하는 것으로 해석된다. 이러한 경향은 Murphy 등(10)이 cooking oil 및 8% ethanol과 접촉된 일반 폴리스티렌에서의 styrene monomer의 확산계수를 측정한 상황에서도 동일하게 관찰된 바가 있다. Fig. 6의 기울기로부터 계산된 확산의 온도의존성 pa-

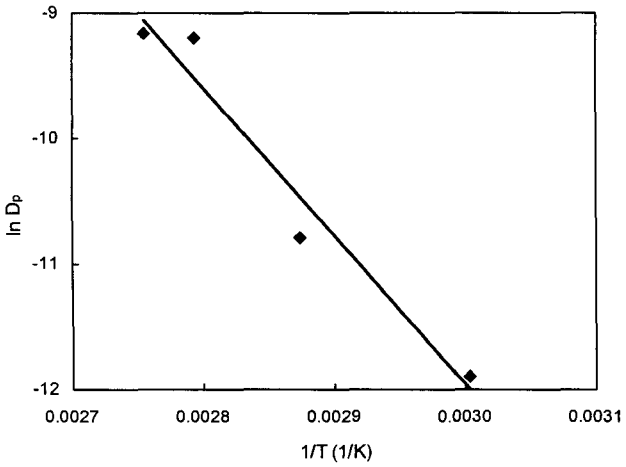

Fig. 6. Arrhenius plot of styrene monomer migration from EPS to water.

rameter인 활성화에너지는 98.6 kJ/mol로 나타났다(식 (4)). Lickly 등(11)도 EPS로부터 cooking oil로의 확산이행은 Arrhenius 방정식으로 설명될 수 있음을 보인 바 있다.

발포 폴리스티렌 용기에서 용출실험조건 및 이행범위의 검토

본 연구로부터 얻어진 조건별 확산계수를 이용하여 폴리스티렌 포장재 사용에 있어서의 안전성 문제와 포장재의 품질관리를 위한 법규적인 여러 조건을 검토하는데 적용할 수 있는 기초 자료로서 현실적인 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 현재의 식품공전에서 규정되는 용출시간과 온도 등을 검토하고, 몇 가지 사용조건에서 총괄이행 및 styrene monomer 이행을 예측하여 그 의미를 고찰하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 라면용 발포 스티렌 용기에서는 $KMnO_4$ 소비량으로 측정된 최대 총괄 이행량의 범위는 스티렌 용기 재질 무게 당 0.13 mg/g의 범위로 평가되었으며, 이 조건에서 현재 사용되고 있는 라면 용기조건별 최대 용출 가능량은 Table 2와 같았다. 즉, 용기재질에 존재하는 모든 유기물이 포장된 수용성 식품으로 용출되어 나온다고 가정하고 최대 이행가능량을 계산하였다. 결국 포장재에 있는 $KMnO_4$ 산화 가능한 유기물의 최대이행은 용기무게에 대한 담길 수 있는 액체 식품의 양에 의해 결정되게 된다. Table 2에서 보면 현재 사용되는 용기로부터 이루어질 수 있는 최대 이행량은 3.5 mg/L로서 이는 허용기준치 10 mg/L에는 현저히 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Table 2에서의 결과로 평가할 때에는 식품공전에서의 이행물질의 $KMnO_4$ 소비량의 규정을 충분히 만족하지만, 총괄이행으로 용출될 수 있는 유기물의 농도가 높은 발포 스티렌 용기가 있다면, 허용한도를 초과할 수도 있을 것이다. 따라서 이러한 경우를 감안하여 발포 폴리스티렌 용기에서 수용성 식품이 포장된 경우 총괄이행의 범위를 측정하는 실험조건을 결정할 필요가 있는 것으로 생각되었다. 즉, 식품포장재의 위생성을 점검하는 용출실험조건이 이행가능물질의 용출을 충분히 얻을 수 있는 조건인가를 한번 점검해 볼 필요는 있을 것으로 생각된다. 특히 즉석 라면용기의 경우는 고온에 노출되는 특징을 가지고 있으므로 여타 상온보관 목적인 식품포장용기와는 그 목적과 특성이 현저히 다르기 때문에 더욱 그러하다.

따라서 앞에서 얻어진 확산계수를 가지고 식 (1)에 의하여 전체 평형이행량의 50% 및 90%에 이르는 시간을 계산한 결과는 Fig. 7과 같았다. 스티렌 용기 재질의 두께가 두꺼울수록 용출에 오랜 시간이 걸리지만, 일반적인 조건인 두께 2 mm의 경우에 평형이행량의 50%에 이르는 시간을 보면 40 °C에서 155시간, 60°C에서 24시간, 80°C에서 4.7시간으로 나타났다. 이러한 결과를 우리나라 식품공전에서 보편적으로 사용하는 60°C에서 30분의 용출조건과 비교하면(12), 식품공전의 용출조건은 충분한 용출을 얻기에는 부족한 것으로 판단된다. 이에 비하면 유럽에서 많이 사용하는 40°C에서 10일 혹은 70°C에서 2시간의 조건은 보다 많은 용출의 정도를 기대할 수 있는 것으로 평가된다(14,15). 아울러 미국에서는 실제적인 사용온도조건에서 10일까지 용출하는 조건을 채택하기도 하는데, 이는 보다 많은 양의 용출을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

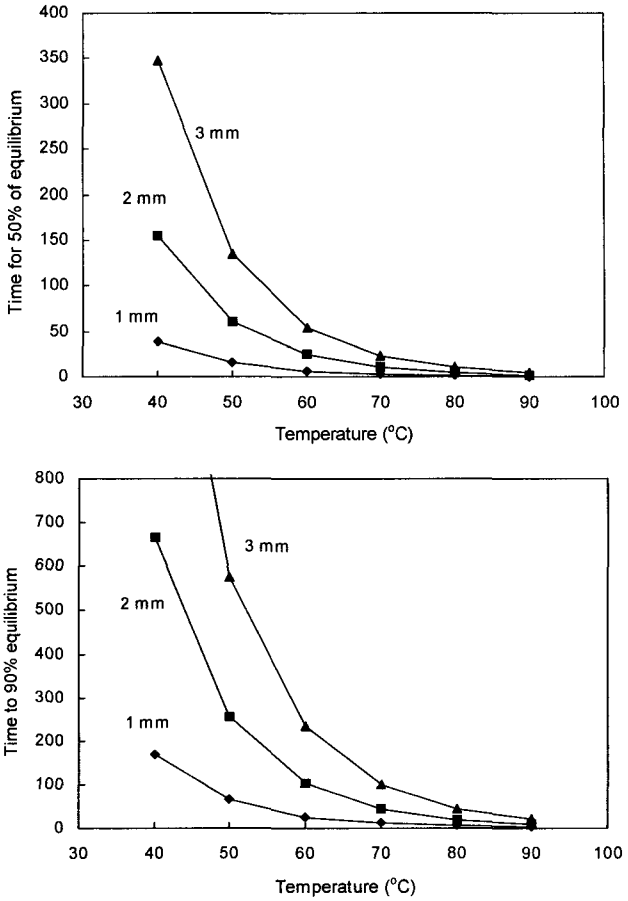

Fig. 7. Time to reach certain degree of overall migration from EPS of different thicknesses to water.
Container conditions are for container 2 in Table 2.

Styrene monomer는 포장재로부터 식품으로 이행될 때,

Table 2. Maximally attainable overall migration from expanded PS container

Container	Weight (g)	Fill volume (mL)	Upper diameter for food contact (cm)	Lower diameter for food contact (cm)	Fill height (cm)	Surface area for food contact (cm^2)	Maximum $KMnO_4$ oxidizable extractives (mg/L)
1	11.0	615	11.7	8.8	7.3	295	2.4
2	7.6	281	8.8	6.4	5.9	173	3.5
3	10.4	598	16.1	10.9	5.0	306	2.3

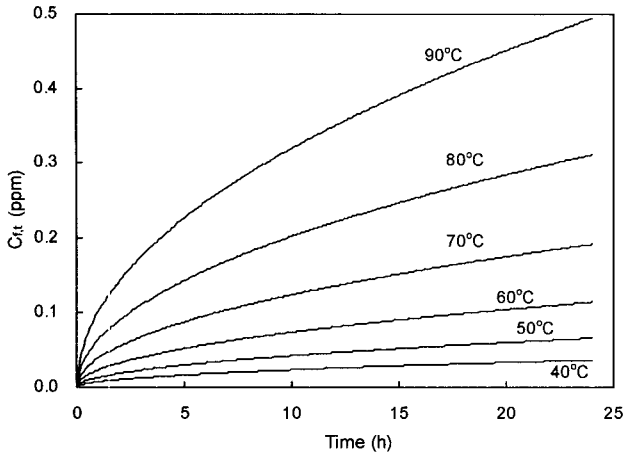

Fig. 8. Estimated styrene monomer migration from EPS container to aqueous food.
Container conditions are for the container 2 with 2 mm wall thickness in Table 2.

위생적인 위해를 주지는 않지만 식품에 이미나 이취를 줄 수 있는 것으로 알려져 있다(6). 따라서 폴리스티렌 용기로부터 styrene monomer의 이행은 중요한 의미를 가지고 일정한 수준이하로 제어될 필요가 있다. 우선 발포 폴리스티렌 용기로부터 수용액으로의 식 (3)의 관계를 이용하여 ($M_{f,t}/M_{p,o}$)를 구한 다음, 식 (5)를 이용하여 styrene monomer의 이행을 분석한 결과는 Fig. 8과 같다.

$$C_{f,t}=\left(\frac{C_{p,o}\,\rho_p A_p\,l}{\rho_f V_f}\right)\left(\frac{M_{f,t}}{M_{p,o}}\right) \quad (5)$$

여기서 $C_{p,o}$는 플라스틱 포장재 내에 초기에 존재하는 이행물질의 양(mg/kg), ρ_p는 포장재의 밀도, A_p는 포장의 표면적, l은 포장의 두께, ρ_f는 포장식품의 밀도, V_f은 식품의 부피이다.

용기조건으로는 Table 2에서의 container 2의 용기 조건에서 벽 두께 2 mm인 상황에서 분석하였다. 그리고 초기 styrene monomer의 함유농도는 식품공전상의 styrene monomer의 재질규격상 한계인 1000 ppm으로 가정하였다. 당연히 온도가 높은 조건에서 이행이 빠르며, 이취를 느낄 수 있는 한계인 0.3 ppm으로 용출되는 시간을 보면 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C에서 각각 68일, 21일, 7일, 59시간, 22시간, 9시간으로 나타났다. 이러한 온도와 시간 조건은 라면을 가열하고 섭취하는 시간보다 훨씬 긴 점을 고려한다면, 용기 라면의 가열조리 섭취가 styrene monomer에 의한 이취유발 등을 일으키지는 않을 것으로 판단된다. 따라서 식품공전의 styrene monomer의 재질규격은 관련 포장재에 의한 식품포장에서 이의 용출에 관련된 품질 관리면에서도 충분하고 적절한 것으로 여겨진다.

요 약

발포 폴리스티렌으로부터 증류수로의 잠재적 저분자 물질의 이행을 측정하고 수학적 모델을 이용하여 이행속도를 분석하고 예측하고자 하였다. 총괄 이행의 지표로 사용되는 $KMnO_4$ 소비량, 증발잔류물 등과 특정 이행으로는 styrene monomer를 측정하였다. Fick의 법칙을 사용하여 폴리스티렌으로부터의 이행과 확산에 대한 정량적 모델을 확립하고, 온도 및 용매조건에 따른 확산계수를 구하였다. 이로부터 다양한 사용조건에 대한 이행량을 예측하고, 현실적인 의미를 제시하였다. 발포 폴리스티렌으로부터의 증류수로의 이행물질로서 $KMnO_4$ 소비량, styrene monomer의 이행은 60°C에서 각각 0.030 mm^2/h과 6.8×10^{-5} mm^2/h의 값을 보였다. 온도의존성을 나타내는 활성화에너지 값은 $KMnO_4$ 소비량, styrene monomer에 대해 각각 80.5 kJ/mol 및 98.6 kJ/mol로 나타났다. 이행량 측정에서 적절한 이행의 정도를 얻을 수 있는 실험조건을 제시하고, 몇 가지 예상조건에 대해서 styrene monomer의 이행거동을 예측 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 부산지방식품의약품안전청 용역연구개발사업(관리번호 03172-기본사-952, 예측모델을 이용한 폴리스티렌포장재로부터 저분자물질 이행에 관한 연구)에 의하여 수행된 연구결과의 일부로서 이에 감사드립니다.

문 헌

1. Park MH, Lee DS, Lee KH. 2002. *Food packaging*. Hyeonsoel Publishing, Daegu. p 97-431.
2. Hernandez RJ, Selke SEM, Culter JD. 2000. *Plastics packaging*. Hanser Publishers, Munich. p 109-110.
3. Lee KH, Jang YM, Kwak IS, Yoo SS, Kim KM, Choi BH, Lee CW. 1999. Analysis of styrene dimer and trimer in cup noodle containers. *Korean J Food Sci Technol* 31: 931-937.
4. Sung JH, Kwon K, Lee KH. 2000. A method for analysis of styrene dimer and trimer in foods and containers. *Korean J Food Sci Technol* 32: 1234-1243.
5. Tang W, Hemm I, Eisenbrand G. 2000. Estimation of human exposure to styrene and ethylbenzene. *Toxicology* 144: 39-50.
6. Baner AL. 2000. Case study: Styrene monomer migration into dairy products in single serve portion packs. In *Plastic packaging materials for food*. Piringer OG, Baner AL, eds. Wiley-VCH, Weinheim. p 427-443.
7. Brandsch J, Mercea P, Ruetter M, Tosa V, Piringer O. 2002. Migration modelling as a tool for quality assurance of food packaging. *Food Add Contam* 19 (suppl.): 29-41.
8. O'Brien A, Cooper I. 2002. Practical experience in the use of mathematical models to predict migration of additives from food-contact polymers. *Food Add Contam* 19 (supplement): 63-72.
9. Miltz J, Rosen-Doody V. 1985. Migration of styrene monomer from polystyrene packaging materials into food simulants. *J Food Process Preserv* 8: 151-161.
10. Murphy PG, MacDonald DA, Lickly TD. 1992. Styrene migration from general purpose and high-impact polystyrene into food-simulating solvents. *Food Chem Toxicol* 30: 225-232.

11. Lickly TD, Lehr KM, Welsh GC. 1995. Migration of styrene from polystyrene foam food-contact articles. *Food Chem Toxicol* 33: 475-481.
12. Korean Food and Drug Administration. 2003. *Food code*. Seoul.
13. Piringer O. 2000. Transport equations and their solutions. In *Plastic packaging materials for food*. Piringer OG, Baner AL, eds. Wiley-VCH, Weinheim. p 183-219.
14. Robertson GL. 1992. *Food packaging*. Marcel Dekker, New York. p 622-662.
15. 茂木幸夫. 1994. 食品包裝の衛生法規. 株式會社 日報, 東京. p 85-121.

(2004년 2월 24일 접수; 2004년 6월 2일 채택)