가정간편식 용기용 바이오매스 기반 발포구조체의 특성에 관한 연구

김인애¹ · 김수민¹ · Sadeghi Kambiz¹ · 한정구² · 황기섭³ · 권혁준³ · 김용수³ · 유승란⁴ · 서종철^{1*}

1연세대학교 패키징학과, 2(주)에이유, 3한국생산기술연구원, 4세계김치연구소

Characterization of Biomass-Based Foam Structures for Home-Meal-Replacement Containers

Inae Kim¹, Sumin Kim¹, Sadeghi Kambiz¹, Jeonggu Han², Kiseop Hwang³, Hyukjoon Kwon³, Yongsu Kim³, Seung Ran Yoo⁴, and Jongchul Seo^{1*}

¹Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Kangwon-do, 26493, Korea ²Corporation AU, 74 Samgye 3-gil, Cheongbuk-eup, Pyeongtaek, Gyeonggi-do 17800, Korea ³Korea Institute of Industrial Technology, 89 Daedaegi-gil, Admission-myeon, Seobuk-gu, Cheonan, Chungcheongnam-do, 31056, Korea ⁴World Institute of Kimchi, 86 Kimchi-ro, Nam-gu, Gwangju, 61755, Korea

Abstract A series of foamed plastic sheets containing biomass (as HMR container) were developed via different foaming process temperatures, and their density, porosity, WVTR, and pore morphology were evaluated. Thermal stability of samples during re-heating the food in oven, change in morphology, density, porosity, and WVTR were investigated using a simulated thermal shock process according to MIL-STD-883E assay. As such, the pore size of samples was generally increased with increasing temperature of the foaming process. It can be explained that as foaming temperature increased, the viscosity of molten resins and the repulsive force against pore expansion decreased. In addition, an increase in the thermal shock cycle reduced the pore size and WVTR, while density increased because high temperature treatment that softened the sheet matrix was followed by a low temperature incubation, which contracted the matrix, thereby changing the physical and morphological properties of samples. However, an insignificant change in density was observed and WVTR tended to be decreased, indicating that as-prepared foamed plastic sheets could be used as a high thermal stable container for HMR application. Therefore, it found that the properties of newly developed HMR containers containing biomass were dependent on the foaming process temperature. Moreover, to better understanding of these newly developed containers, further investigations dealing with foaming process temperature based on various food items and cooking conditions are needed.

Keywords Biomass-based, Porous material, Foaming process temperature, Thermal-shock

서 론

최근 가구 구성원 수의 감소, 고령화 및 여성 노동인구 증가 등의 사회적 변화에 따라 가정간편식(Home Meal Replacement, HMR)에 대한 관심과 수요가 증가되고 있다¹).

Tel : +82-, Fax : +82-E-mail : jcseo@yonsei.ac.kr 이러한 HMR 산업의 경쟁력을 확보하기 위한 가공 및 포 장기술의 개발이 요구되고 있으며²), 특히 온도, 수분, 산소 등과 같은 외부 환경으로부터 내부 식품의 품질을 보존할 수 있는 HMR 용기 소재 개발에 대한 관심이 대두되고 있 다. 대부분의 HMR은 용기 통째로 조리되는 과정을 거치기 때문에 이 과정에서 식품 본연의 형태와 맛, 영양을 유지시 키는 것뿐만 아니라 용기 자체의 안정성을 확보하는 것 또 한 중요하다. 이러한 HMR용 포장의 요구사항을 고려하였 을 때 적합한 용기의 재료 중 하나는 플라스틱 발포구조체 이다. 발포구조체는 미세한 구멍이 있는 다공질체를 의미하

^{*}Corresponding Author : Jongchul Seo

며, 발포공정을 통해 생성된 내부 공기층은 용기 전체의 단 열성을 높여 줄 뿐만 아니라 발포도가 증가할수록 열전도 도는 낮아지고 열 저항률은 높아지는 특성이 있다.

하지만, 최근 플라스틱 폐기물로 인한 환경오염이 날이 갈 수록 심각해지고 있다. 포장쓰레기가 다량 발생되는 것뿐만 아니라 기존의 석유 기반의 화학소재는 폐기 시 다량의 유 해물질을 방출시켜 인체와 환경에 악영향을 끼치는 문제가 있다. 이에 따라 유럽을 시작으로 국내에서도 2017년부터 '포장폐기물의 발생억제 등에 관한 업무처리지침'을 제정하 여 제3조(포장재질에 관한 기준 적용 대상제품의 범위), 제 4조(포장방법에 관한 기준 적용 대상제품의 범위)와 제5조 (포장재질 및 포장방법에 관한 검사명령) 등에 의해 포장재 범위를 강화하여 환경에 미치는 부정적인 영향을 최소화하 는 노력을 하고 있다³⁾. 이와 동시에 석유 기반 화학소재를 바이오 기반 화학소재로 전환하려는 움직임이 진행되고 있 으나⁴⁾, 바이오매스를 이용한 소재는 석유 기반 화학소재에 비해 차단성 및 기계적 물성이 낮으며⁵⁾ 응용 제품 개발의 어려움이 있어 HMR 용기로 아직 크게 상용화되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 바이오매스를 발포층으로 하며, 석 유계 플라스틱 사용량을 줄인 친환경적 HMR 용기 사용에 적합한 플라스틱 발포구조체를 제작하였다. 발포구조체는 3층 구조로서 외층은 폴리프로필렌(polypropylene, PP)로 구성하였으며 중층은 PP, 저밀도폴리에틸렌(Low density polyethylene, LDPE), 고밀도폴리에틸렌(High density polyethylene, HDPE)와 바이오매스, 발포제 및 기타 재료로 구성하여 공압출방법과 200~220°C의 발포공정 온도를 조 절하여 발포구조체를 제작하였다.

발포구조체의 발포공정 온도에 따른 기공의 형상, 기공에 따른 밀도변화, 공극의 분포 등의 물성 변화를 파악하기 위 하여 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM), 밀도계(Densimeter), 공극률(Porosity), 수분투과도(Water vapor transmission rate) 분석을 진행하였다⁶⁾. 또한 반복 사용에 따른 발포구조체 시트의 열적 안정성을 확인하기 위 해 MIL-STD 규격에 따라 열충격 시험을 진행하였으며, 열 충격 반복횟수에 따른 SEM, 밀도, 공극률, 수분투과도의 변화를 분석하였다.

재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에서는 발포구조체에 대한 발포온도의 영향을 살 펴보기 위하여 모든 시료를 외층/중층/외층의 두께 비가 12.5%/ 75%/12.5%인 3층 구조로 동일하게 제작하였다. 수지, 발포 제, 바이오매스 등 구성물질에 관한 것은 Table 1에 정리하 였다. 본 시료는 일반적인 발포구조체 제조공정과 같이 원 료 배합, 혼련, 발포, 압출, 냉각, 권취 공정을 거쳐 제작하 였으며, Table 2에서 나타낸 바와 같이 발포온도를 200°C, 210°C, 220°C로 설정하여 각각 A1, A2, A3로 명명하였다.

Туре		Materials and composition (wt %)		Remarks	
Upper layer (12.5%) Middle layer (75%)	Upper layer	РР	100	SIF 553/SFC 750 (Lotte Chemical Co.)	
	Middle layer	Compatibilizer	1	BIBP (PeroxanBIB-40GS, PERGAN GmbH Co., Germany) 1% + tale 99%	
		PP	30	SIF 553/SFC 750 (Lotte Chemical Co.)	
		HDPE	15	MI 6 (Hanwha Chemical Co.)	
		LDPE	15	MI 3 (Hanwha Chemical Co.)	
		Blowing agents	6	Azodicarbonamide 5% + inorganic blowing agent 15% + talc 35% + diatomite 25%	
Lower layver (12.5%)		Biomass composites	30	Biomass composites $50\% + CaO 25\% + CaCO_3$	
				24.75% + MA (Maleic Anhydride) 0.25%	
		Dispersant/ Lubricant	3	PE-Wax, Zn-st	
	Lower layer	PP	100	SIF 553/SFC 750 (Lotte Chemical Co.)	

Table 1. Structure and chemical composition of biomass-based form sheet

Table 2. Density, porosity, and water vapor transmission rate of form sheets prepared in different forming temperatures

Code	Forming temperature (°C)	density (g/ml)	Porosity (%)	WVTR (g/m ² /day)
A1	200	0.65 ± 0.03^{a}	67.2	0.90 ^a
A2	210	0.67 ± 0.02^{a}	52.3	0.45 ^b
A3	220	0.65 ± 0.03^{a}	78.1	0.86 ^c

Vol. 26, No. 2 (2020)

2.2. 실험 방법

2.2.1. 기공의 형상 분석 (SEM)

본 연구의 대상 시료의 발포온도 조절에 따른 기공의 형상 파악을 위해 SEM (Quanta FEG250, FEI Co. Ltd., Oregon, USA) 분석을 진행하였다. 발포구조체를 백금으로 코팅한 후 기공의 형상 변화를 표면과 단면으로 구분하여 분석하 였다.

2.2.2. 밀도 분석

제조한 발포구조체의 밀도는 각 시료 당 동일한 크기의 측정 시료 5개를 제작하여 측정한 후 그 평균값을 계산하 였다. 이때 아르키메데스 원리의 밀도계(Densimeter) (MD-300S, Alfa Mirage Co. Ltd., Osaka, Japan)를 사용하여 밀도를 측정하였다⁷⁾.

2.2.3. 공극률 분석

제조한 발포구조체 시료의 공극률을 확인하기 위해 수은 흡착법의 Porosimeter (PM33GT, Quantachrome Co., Graz, Austria)를 사용하여 측정하였다⁸⁾. 수은흡착법은 수은의 Non-wetting 한 성질을 이용하여 다공성 시료의 특성을 분 석하는 방법으로, 시료에 압력을 가하여 기공에 수은을 채 운 후 공극률 측정이 진행된다. 주입된 수은의 양으로부터 시료의 공극률, 기공의 크기, 표면적, 겉보기 밀도 등을 측 정하고, 이를 통해 기공의 크기와 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다⁹⁾.

2.2.4. 수분투과도 분석

일반적으로 식품 용기의 수분투과도(Water Vapor Transmission Rate, WVTR)는 공극률이 높아질수록 증가하므로 ¹⁰⁾ 수분투과도를 측정하여 시료의 발포온도에 따른 기공변 화의 상관성을 분석하였다. WVTR (7001 Water Vapor Permeation Analyzer, Systech Illinois Ltd., Denves, USA) 를 사용하여 온도 37.8°C, RH 90% 조건에서 진행하였으 며, bypass time은 120분, purge는 1로 설정하였다¹¹⁾. 모 든 시료는 4회 반복측정하여 그 평균값을 계산하였다.

2.2.5. 열충격에 따른 물성변화 분석

발포구조체의 열충격에 따른 물성변화는 MIL-STD-883E를 참고하여 발포온도가 210°C인 A2 시료를 사용하였다. 저온 부는 -10°C인 가정용 냉장고의 냉동실 (SR-3734, Samsung Electronics Co., Suwon, South Korea), 고온부는 110°C인 대류식 오븐 (JSOF-150, JS Research Inc., Kongju, South Korea)을 각각 사용하였다. 저온부와 고온부에서 시편의 유 지시간(dwelling time)은 120초로 설정하였으며 고온부에서 저온부, 저온부에서 고온부로의 이동시간(transfer time)은 10초 이내로 설정하여 실험을 진행하였다. 또한, 열충격의 반복횟수에 따른 특성변화를 확인하기 위하여 반복횟수를 0, 1, 5, 10, 20회로 설정하였으며, 각 시료를 cycle-0, cycle-1, cycle-5, cycle-10, cycle-20로 명명하였다. 정해진 조건 에서 시료에 열충격을 가한 후 기공의 형상과 밀도, 공극률 을 측정하였으며, 수분투과도의 경우 메탈마스크를 사용하 여 측정하였다.

2.2.6. 통계분석

모든 분석 결과는 평균값과 표준편차로 나타내었으며, 통 계분석은 SPSS Statistics(SPSS 25 for Windows, SPSS Inc., Illinois, USA)를 이용하여 일원배치분산분석 (ANOVA) test와 Duncan's multiple range test를 통해서(p<0.05) 시 료의 평균값 별 유의적 차이를 검정하였다.

결과 및 고찰

3.1. SEM 분석

본 연구의 발포구조체는 기공의 크기, 개수, 분포에 따라 열전도율, 밀도, 공극률, 수분투과도 등이 달라지므로 기공 의 형상을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 발포구조 체의 발포온도에 따른 기공의 변화를 확인하기 위하여 SEM 분석을 진행하였으며, 그 결과는 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 모든 시료의 표면 상태는 온도의 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으며, 이는 발포 된 중층이 외층 PP와 공압출되면서 표면에 대하여 수직으 로 압력을 받기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 단면의 경 우 온도 의존성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

시트의 절단면의 기공 크기는 A3 시료가 가장 크며, A3 시료의 기공 수는 A1 시료에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 발포온도가 높아질수록 대체적으로 기공의 크기 가 증가하며 기공의 수는 감소하는 것을 나타낸다. 내층에 사용한 발포제의 비율은 모두 동일하므로 초기 생성되는 기 공 수 및 분포는 모두 유사하나, 발포온도가 증가할수록 용 융 수지의 점도가 감소하여¹²⁾ 기공 팽창에 대한 반발력이 약해짐에 따라¹³⁾ 기공의 크기가 증가한 것으로 생각된다. 또 한 계속해서 팽창한 기공은 발포가스에 대한 압력을 견디지 못하고 터지게 되어 기공 수가 감소한 것으로 사료된다¹⁴⁾.

3.2. 밀도 분석

일반적으로 발포에 의해 형성된 공기층은 시편의 부피증 가와 동시에 밀도를 감소하게 하고, 이로 인해 발포 시트의 단열특성을 증가시킬 수 있다¹⁵⁾. 이러한 특성을 분석하기 위하여 발포온도를 달리한 발포시트의 밀도측정을 진행하 였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 발포구조체 A2 시료의 밀도가 상대적으로 높은 값을 나타내었으나, 발포시 트는 0.65~0.67 g/ml의 범위의 값을 나타내었다. 이는 통계



Fig. 1. Top and fractured SEM images of form sheets prepared in different forming temperatures.

적으로 유의차가 없는 수준으로, 발포구조체의 밀도에 대한 발포온도의 의존성은 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

3.3. 공극률 분석

발포온도에 따른 발포구조체 시편의 기공 변화를 분석하 기 위하여 공극률 측정을 진행하였으며 결과는 Table 2에 나타내었다. 공극률(Porosity)이란 시편 또는 재료의 전체 부피 중에서 공극이 차지하는 부피의 비를 백분율로 나타 낸 것으로, 공극률을 n, 고체 부분만의 부피를 Vs, 공극을 포함한 전체의 부피를 V라고 할 때, n=(V - V_s)/V × 100(%)로 구할 수 있다.¹⁶⁾ 전체 공극률(Total Porosity)은 입자 간 공극률(Interparticle porosity)과 입자 내 공극률 (Intraparticle porosity)의 업으로 나타낸다. 이때, 입자 간 공극률은 기공의 크기가 5~1100 µm에 해당되는 공극률을 의미하고, 입자 내 공극률은 기공의 크기가 5 µm 이하에 해 당되는 입자 내의 기공을 의미한다¹⁷⁾. 발포공정 온도를 다르게 하였을 때 각 시료의 전체 공극 률은 A1, A2, A3 시료가 각각 67.2%, 52.3%, 78.1%로, SEM과 밀도 분석의 결과와 유사한 경향성을 나타내고 있 는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 일반적으로 복 합 고분자는 온도가 증가할수록 용융 수지의 공극률이 증 가하는 경향이 있으며, 본 연구의 SEM 분석 결과에서 기 술한 바와 같이 발포온도를 높게 할수록 발포효율이 증가 하기 때문인 것으로 사료된다.

3.4. 수분투과도 분석

앞서 기술한 SEM, 밀도, 공극률 분석을 통한 결과를 바 탕으로 발포구조체의 발포온도에 따른 기공의 변화가 용기 의 차단성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수분투과도 분 석을 진행하였으며, 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 시 료의 수분투과도 측정 결과, A1, A2, A3는 각각 0.9 g/m²/ day, 0.45g/m²/day, 0.86g/m²/day 값을 보이며, 이는 공극률 측정 결과로 예측한 결과와 다른 경향을 보이고 있다.

일반적으로 공극의 존재는 물질의 투과를 가능하게 하며, 공극률이 증가함에 따라 수분투과도도 증가하지만¹⁸, 단순 공극률 뿐만 아니라 기공 간의 각도와 기하학적 구도 또한 투과도에 큰 영향을 미친다. 즉, 공극률이 높더라도 기공의 구도에 의해 수분투과도가 감소할 수 있다¹⁹. 따라서 발포 공정 중 온도를 증가하였을 경우 기공의 크기 및 개수가 변화하여 공극률이 증가하였지만, 발포층의 내부 기공 간의 구도가 달라짐에 따라 수분투과도는 감소한 것으로 판단되 며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3.5. 열충격 시험 분석

HMR 식품은 대부분 냉동실에서 보관되었다가 용기 통 째로 조리되는 특징이 있기 때문에 갑작스러운 열 변화에



Fig. 2. Top and fractured SEM images of form sheets with different test number of thermal shock.

Code	Density (g/ml)	Porosity (%)	WVTR (g/m ² /day)
cycle-0	0.63 ± 0.002^a	56.8	2.53 ^a
cycle-1	0.67 ± 0.013^a	53.3	2.86 ^b
cycle-5	0.67 ± 0.017^a	51.4	2.88°
cycle-10	0.68 ± 0.006^a	57.4	2.02 ^d
cycle-20	0.67 ± 0.014^{a}	18.5	1.45 ^e

Table 3. Change in density and water vapor transmission rate of form sheets with different test number of thermal shock

대하여 안정성은 매우 중요한 물성이다. 따라서 열충격 (thermal shock)에 따른 해당 시료의 특성변화를 분석하기 위해 열충격 시험을 진행하였다. MIL-STD-883E 규격을 참고하여 A2 시료를 대상으로 열충격 반복횟수에 따른 기 공 형상, 밀도, 공극률, 수분투과도 변화를 분석하였고, 그 결과를 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다.

Fig. 2의 SEM 결과를 보면 반복횟수를 거듭할수록 기공 의 크기가 대체적으로 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 고분자 복합재는 열충격의 반복횟수가 증가할 수록 층간 전단강도(Interlaminar shear strength, ILSS)가 감소하는 경향이 있으며²⁰⁾ 열충격 과정에서 고온에 의해 시 료가 연화된 상태에서 바로 저온을 가함으로써 시료가 수 축되었고 이를 반복적으로 진행하였기 때문에 기공의 크기 가 감소한 것으로 사료된다.

밀도의 경우 열충격을 가하지 않은 시료는 0.63 g/ml인 반면 열충격을 가한 시료들은 0.67 g/ml~0.68 g/ml으로 증가 하였다. 이는 SEM의 결과에서 언급한 바와 같이 열충격을 반복할수록 기공의 크기가 감소했기 때문에 밀도가 증가한 것으로 판단된다.

공극률의 경우 cycle-0, cycle-1, cycle-5, cycle-10 시료는 51.4%에서 57.4% 사이의 값을 나타내고 있는 반면, cycle-20 시료는 18.5%로 급격히 낮아진 것을 확인할 수 있다. 이는 SEM의 결과에서 알 수 있듯이 기공의 크기 변화로 인한 것으로 사료된다.

수분투과도 측정 결과 cycle-0, cycle-1, cycle-5 시료는 2.53 g/m²/day에서 2.88 g/m²/day 사이의 수치를 나타내고 있는 반면, cycle-10과 cycle-20 시료는 2.02 g/m²/day와 1.45 g/m²/day로 크게 감소하였다. 이를 통해 열충격 횟수를 10회 이상 거듭할수록 기공의 크기와 기공 간 구도가 변화 함에 따라 공극률이 감소하면서 시료의 수분투과도에 영향 을 미친 것을 확인할 수 있다.

위 분석 결과를 통해 열충격 후 밀도는 증가하였으나 통 계적으로 유의한 차이는 없으며, 공극률과 수분투과도는 열 충격 횟수를 10회 이상 반복한 경우 감소한 것을 확인할 수 있다. 따라서 소비자의 제품 사용을 고려하였을 때 해당 발포구조체는 HMR 용기로서 열적 안정성이 있다고 판단 할 수 있다.

요 약

바이오매스가 포함된 발포구조체의 발포온도에 따른 SEM, 밀도, 공극률, 수분투과도 측정을 통해 특성 변화를 분석하였으며, 소비자가 해당 용기를 사용할 때의 열적 안 정성을 확인하기 위해 MIL-STD규격에 따라 열충격 처리 의 영향을 분석하였다.

측정 결과 발포온도가 증가할수록 대체로 기공의 크기는 증가하고 기공의 수는 감소하여 밀도는 통계적으로 유의한 차이가 없음을 확인하였다. 또한 공극률과 수분투과도 측정 결과는 서로 다른 경향성을 보이고 있는데 이는 기공의 크 기와 수, 기공 간의 구도가 변화하였기 때문인 것으로 사료 되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

열충격 시험 결과, 열충격 반복횟수를 거듭할수록 기공의 크기가 감소하면서 밀도는 증가하고 공극률과 수분투과도는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 시료에 고온을 가함 으로써 시료가 연화되었고, 연화된 상태의 시료에 곧바로 저 온을 가하여 시료가 수축되면서 기공의 크기와 구도가 변화 하였기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 밀도의 경우 통계 적으로 유의한 차이가 없었으며 수분투과도의 경우 수치가 감소하는 경향을 확인할 수 있었으므로 해당 발포구조체로 제작된 HMR 용기는 열적 안정성이 있다고 판단할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 농림수산식품기술기획평가원 에 의해 이루어진 것임(no. iPET815002).

참고문헌

- 1. Kim, Y. 2017. Trends in markets for home meal replacements. Food Sci. Ind. 50(1): 57-66.
- Yu, A., Choi, Y.S., Hong, J.S. and Choi, H.D. 2017. Development of home meal replacement products by food processing and packaging technology. Food Sci. Ind. 50(3): 39-50.
- 3. Park, J. 2018. Review and prospects on the waste regulation in international law perspective. Yonsei Law Assoc. 32: 1-22.
- Lee, H., Kwak, K.H. and Kim, J.K. 2012. Synthesis and characterization of bio-elastomer based on vegetable oils. Elast. Compos. 47(1): 30-35.
- Luzi, F., Torre, L., Kenny, J.M. and Puglia, D. 2019. Bio-and fossil-based polymeric blends and nanocomposites for packaging: Structure–property relationship. Materials. 12(3); 471.
- Lowell, S., Shields, J.E., Thomas, M.A. and Thommes, M. 2012. Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density (Vol. 16): Springer Science & Business Media.
- Abdullah, W.R.W., Zakaria, A., Hashim, M., Rahman, M.M. and Ghazali, M.S.M. (2016). Stability of ZnO-Pr₆O₁₁-Cr₂O₃

varistor ceramics against electrical degradation. Materials Science Forum. 846:115-125.

- Mei, H., Yan, Y., Huang, W., Jin, Z., Xu, Y. and Cheng, L. 2020. Optimizing combustion performance by controlling density of the highly permeable SiC fiber porous media. Ceram. Int. 46(8): 12386-12392.
- Hyväluoma, J., Raiskinmäki, P., Jäsberg, A., Koponen, A., Kataja, M. and Timonen, J. 2004. Evaluation of a lattice-Boltzmann method for mercury intrusion porosimetry simulations. Fut. Gen. Comp. Sys. 20(6): 1003-1011.
- Xu, R., Xia, H., He, W., Li, Z., Zhao, J., Liu, B., Wang, Y., Lei, Q., Kong, Y. and Bai, Y. 2016. Controlled water vapor transmission rate promotes wound-healing via wound reepithelialization and contraction enhancement. Sci. Rep. 6: 24596.
- Curtzwiler, G, Vorst, K., Palmer, S. and Brown, J. 2008. Characterization of current environmentally-friendly films. J. Plast. Film Sheet. 24(3-4): 213-226.
- Plazek, D.J. 1965. Temperature dependence of the viscoelastic behavior of polystyrene. J. Phys. Chem. 69(10): 3480-3487.
- Kong, Y., Seo, S., Kim, J. and Suhr, D. 2005. Characteristics of porous ceramics depending on water content of the water glass and heat treatment temperature. J. Korean Ceram. Soc. 42(10): 691-697.

- Yue, P., Feng, J.J., Bertelo, C.A. and Hu, H.H. 2007. An arbitrary Lagrangian–Eulerian method for simulating bubble growth in polymer foaming. J. Comput. Phy. 226(2): 2229-2249.
- Kume, S., Yamada, I., Watari, K., Harada, I. and Mitsuishi, K. 2009. High thermal conductivity AIN filler for polymer/ ceramics composites. J. American Ceram. Soc. 92: S153-S156.
- Joardder, M.U., Karim, A., Kumar, C. and Brown, R.J. 2015. Porosity: establishing the relationship between drying parameters and dried food quality: Springer.
- Stanley-Wood, N. and Johansson, M. 1980. Variation of intraand inter-particle porosity with degree of compaction. Analyst. 105(1256): 1104-1112.
- Yesil, Y. and Bhat, G.S. 2017. Porosity and barrier properties of polyethylene meltblown nonwovens. The J. Text. Inst. 108(6): 1035-1040.
- Graton, L.C. and Fraser, H. 1935. Systematic packing of spheres: with particular relation to porosity and permeability. The Journal of Geology. 43(8, Part 1). 785-909.
- Ray, B. 2005. Thermal shock and thermal fatigue on delamination of glass-fiber-reinforced polymeric composites. J. Reinf. Plast.Compos. 24(1): 111-116.
- 투고: 2020.07.27 / 심사완료: 2020.08.10 / 게재확정: 2020.08.19