

재생페트를 이용한 고단열 패키징 개발과 기존의 스티로폼 및 종이 박스와의 단열성능 비교

류재룡¹ · 육세원¹ · 갈승훈¹ · 신양재^{2*}

¹에임트 주식회사

²고려대학교 식품공학과

Development of High-insulation Packaging using Recycled PET and Comparison of Insulation Performance with Existing Styrofoam and Paper Boxes

Jae Ryong Ryu¹, Se Won Yook¹, Seung Hoon Kal¹, and YangJae Shin^{4*}

¹AIMT Corporation

²Korea University Department of Food Bioscience and Technology

Abstract Thermal insulation performance of new insulation packaging made of recycled PET nonwoven (thickness : 10 mm) was verified by conducting comparative experiment with an EPS box (thickness : 25 mm) and a double wall corrugated box (thickness : 7 mm). Three ice packs (300 g) were positioned 200 mm above the bottom inside each box, all of which are placed side by side and temperature change of 2 points (5mm under middle icepack and 130 mm under middle ice-pack) was recorded by data logger (GL-840, Graphtec) for 16 hours under the environment of 29°C. The new packaging box showed 75% higher insulation performance than the EPS box and 180% higher than the corrugated box. In order to figure out the reason for insulation performance difference among boxes, thermal conductivities of each box material were measured using heat flow meter (HFM436 lamda, Netzsch). U-value (thermal conductivity divided by thickness) of EPS was lower than recycled pet nonwoven by 57%, which seemed to be opposite to the result of insulation test of boxes. This was explained by high water vapor transmission rate of EPS (6 times higher than PET insulation) and air pocket effect of PET insulation.

Keywords Thermal insulation, Recycled PET nonwoven, EPS box and double wall corrugated box

서 론

1인 가구의 증가 및 효율과 편리함을 추구하는 현대인들의 성향 속에서, 신선식품 배송시장은 2015년 새벽배송의 등장과 함께 폭발적인 성장을 기록하고 있다. 오프라인 마켓의 역성장은 매년 큰 이슈가 되고 있고, 사소한 제품 하나까지 문 앞에 배송해 주는 문화가 당연하게 여겨지면서 온라인 배송 시장은 더욱 성장할 것으로 기대하고 있다¹⁾.

그러나 이러한 배송 문화의 성장과 더불어 플라스틱 포장재 과다사용이 사회적 문제로 떠오르고 있다. 간단한 식재료 1~2개만 주문해도 스티로폼박스, 보냉재, 에어캡, 포

장재 등 1회용품 4~5개가 함께 따라오게 된다. 이러한 쓰레기 문제로 인해 새벽배송 자체에 대한 거부감을 느끼는 소비자들도 점점 늘어나고 있는 상황이다²⁾. 이에 대한 각종 규제도 증가하고 있는 실정이다. 자원재활용법에 따라 현재 카페 매장 내에서는 1회용 플라스틱컵 사용이 금지되고 있으며, 모든 매장에서 1회용 비닐봉지 또는 종이봉투는 돈을 지불하고 구매해야 한다. 그리고 대형마트에서 자유포장 종이박스 사용도 2020년부터 금지될 예정이다^{3,4)}.

그러나 신선식품 배송에서 가장 큰 부분을 차지하는 스티로폼 박스에 대한 규제는 당분간 진행되지 못할 것으로 보인다. 스티로폼은 현재 연간 약 2만 5천톤이 생산되어 단열재와 포장재로 사용되고 있으나, 최근 중국의 폐플라스틱 수입금지 및 유가하락에 의한 잉고트 가격하락으로 재활용에 대한 수익성이 크게 감소하여 스티로폼이 수거 되더라도 이후 실제 재활용이 잘 이루어지고 있는지에 대해서는

*Corresponding Author : YangJae Shin
Korea University Department of Food Bioscience and Technology
Tel : +82-2-3290-4279, Fax : +82-2-927-5201
E-mail : shinyj5912@gmail.com

의문이 제기되고 있는 상황이다⁵⁾. 그럼에도 불구하고 스티로폼 박스를 계속 쓰는 이유는 성능과 가격 측면에서 마땅한 대체재가 없기 때문이다.

최근 스티로폼 박스의 대안으로 종이박스가 떠오르고 있다. 그러나 종이 자체의 열전도율이 스티로폼 대비 높고 두께도 스티로폼 박스 대비 1/3 수준에 불과하므로 단열성능은 현저히 떨어질 수밖에 없다. 무엇보다 종이박스 안감에 알루미늄 코팅이 되어 있는 경우 재생이 어렵기 때문에 스티로폼 박스처럼 환경 문제를 야기할 가능성도 높다. 한편, 외국에서는 PLA나 양모처럼 생분해가 가능한 소재를 이용해 단열박스를 제작하고 있다. 그러나 아직 이러한 소재들은 단가가 스티로폼에 비해 크게 비싸므로, 배송비가 상대적으로 저렴한 국내에서 상용화되기에는 아직 상당한 어려움이 예상된다.

현존하는 소재 중 스티로폼을 대체할 수 있는 가장 적합한 소재는 섬유로 구성된 단열재이다. 스티로폼과 같은 발포공정을 거치는 소재 중 가성비로 스티로폼을 능가하는 소재는 없으며, 섬유로 단열재를 만드는 경우 별도의 금형이 필요 없어 개발에 있어 시간과 경제성이 높을 것으로 보고 있다. 또한 폐 플라스틱을 모아서 섬유를 제작하기도 용이하기 때문에 사회적인 자원 순환구조 생태계에도 충분히 기여할 수 있는 가능성이 있는 소재로 보여지고 있어, 이번 연구를 통해 한 번 사용된 페트 소재를 재생하여 섬유를 만들고, 그것을 가공한 페트 부직포를 이용해 신선식품 배송용 단열 포장재를 제작하고 이를 기존의 스티로폼 박스 및 종이 박스의 단열성능과 비교함으로써, 향후 신선식품 배송시장에서 재생 페트 단열 포장재의 사용 가능성을 평가하여 기존의 종이나 EPS를 대체할 새로운 단열 패키징으로 제시하고자 한다.

재료 및 실험방법

1. 재료

본 실험에서 사용한 재생 페트 단열 포장재는 재생 페트



Fig. 2. 재생 페트 단열 포장재 삽입 전 후의 박스 및 대조군 스티로폼 박스.

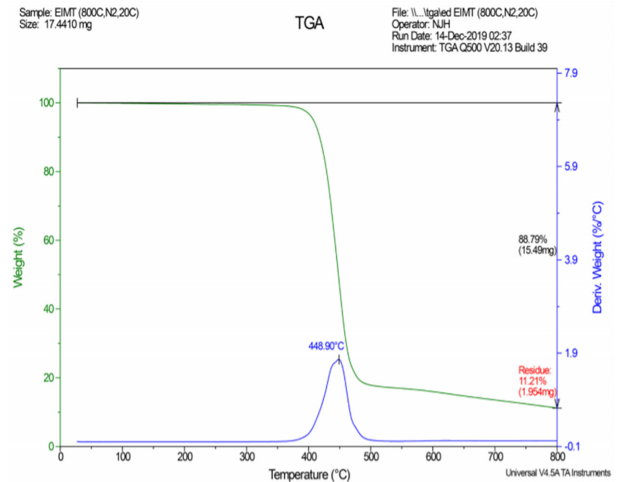


Fig. 1. 재생 페트의 물성 분석 (TGA 분석).

부직포(중량: 400GSM, 원사 : 6D/64mm, Bowoo, Korea)에 투명 페트 필름(두께: 12 μ m, KOLON, KOREA)을 위, 아래로 합지한 후 500 mm \times 1595 mm와 360 mm \times 1500 mm의 크기로 재단하여 제작하였다. 재생 페트 단열 포장재가 삽입되는 종이박스는 A급 골판지로 제작되었고 사이즈는 외경 기준으로 495 mm \times 370 mm \times 365 mm였다. 종이박스에 재생 페트 단열 포장재가 삽입된 후의 내경 사이즈는 470 mm \times 345 mm \times 340 mm였으며, 내용적은 55.1 L였다. 재생 페트는 물병 등 음료용으로 사용된 페트병을 수거하여 분쇄하고 세척된 플레이크(Flakes)를 용융 압출하여 섬유사로 만들고 이를 적층한 후 투명 페트 필름으로 고주파 실링함으로써 전체 제품을 페트로 단일재질화 하여 재활용이 용이하게 하였다. Fig. 1은 재생 페트의 물성을 분석한 데이터이다. TGA(TA, USA) 분석을 보면 페트가 88.8%이며, 재활용 과정에서 잔류한 불순물은 11.2%로 다소 높게 나타난 것을 사용하였다.

대조군 스티로폼 박스는 외경 기준으로 495 mm \times

365 mm × 355 mm 크기의 것을 사용하였으며 두께는 25 mm, 내용적은 42.2 L였다. 대조군 종이 박스는 AB골 골판지로 제작되었고 사이즈는 내경 기준으로 460 mm × 330 mm × 320 mm였으며, 내용적은 48.6 L였다.

Fig. 2는 재생 페트 단일 포장재가 삽입되기 전 후의 박스와 대조군으로 사용한 스티로폼 박스를 보여준다.

일반적으로 박스의 dimension과 내용적에 따라 같은 재질이라도 단열성능이 크게 차이가 발생한다. 박스 안에서 1개의 냉매가 냉기를 전달할 수 있는 공간은 한정되어 있으므로 박스의 내용적이 커질수록 단열성능은 불리해질 수밖에 없다. 따라서 정확한 실험을 위해서는 내경 기준으로 완벽히 동일한 dimension을 갖는 대조군 박스를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 그러한 박스를 구하기 위해서는 별도의 금형을 제작해야 하는 등 비용과 시간이 많이 소요된다. 따라서 이번 실험에서는 시중에 파는 박스들 (스티로폼 박스, 종이박스) 중에서 최대한 재생 페트 단일 포장재가 삽입된 박스와 비슷한 내용적을 갖는 것들을 선정하였다. 대조군 박스의 내용적이 더 작기 때문에 만약 이번 실험을 통해 재생페트 단일 포장재가 적용된 박스의 단열성능이 더 우수한 것으로 판정되면, 실제 동일한 크기의 박스와 비교 시 더 우수한 단열성능을 갖는다고 말할 수 있을 것으로 판단하였다.

2. 실험 방법

1) 박스 단열성능 측정

박스의 단열성능이 좋을수록 아이스팩의 냉기는 더 오래 유지된다. 따라서 아이스팩의 냉기가 도달하는 지점을 온도 측정 포인트로 선정하고, 데이터로거(GL-840, Graphtec)를 이용하여 시간에 따른 온도변화를 관찰하였다. 먼저 420 mm × 290 mm × 200 mm 크기의 테이블 형태 지그를 제작하고 각각의 단열박스에 삽입한 뒤, 지그 위에 젤타입 아이스팩 (300g, Picok, Korea) 3개를 나란히 위치시켰다. 첫번째 온도 측정 포인트는 지그의 정중앙으로부터 하단으

로 5 mm 떨어진 지점을 선정하였고, 두번째 포인트는 지그의 정중앙으로부터 하단으로 13 cm 떨어진 지점을 선정하였다. 아이스팩의 냉기는 아래 방향으로 퍼지면서 내려오므로 아이스팩보다 높이 위치한 곳은 냉기를 거의 받지 못하게 된다. 따라서 이번 실험에서는 아이스팩 상단부 지점은 온도 측정 포인트에서 제외하였다. 각 온도 측정 포인트에 써모커플(T-type, AWG28, Teflon, SANE Calibration, Korea)을 위치시킨 후 데이터로거에 연결하여 실시간으로 온도 데이터를 기록할 수 있도록 하였다. (30초당 1회) 각 단열박스의 뚜껑을 테이프로 밀봉하고 온도가 29도로 유지되는 방 안에 방치시킨 후 온도기록을 시작하였다. 재현성 확인을 위해 페트 단일재 박스는 10회, 스티로폼 박스는 2회, 종이 박스는 4회 반복실험 하였다.

2) 각 소재의 열전도율 측정

박스의 단열성능은 박스 소재의 열전도율과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 소재의 열전도율이 낮을수록 외부에서 들어오는 열을 더 효과적으로 차단할 수 있고 박스의 단열성능은 향상된다. 실제로 소재의 열전도율과 박스의 단열성능 간의 상관관계를 확인하기 위해 각 소재 - 재생 페트 단일재(두께: 10 mm), 스티로폼(두께: 25 mm), AB골 골판지(두께: 7 mm)를 300 mm × 300 mm 사이즈로 재단하고 Heat flow meter를 이용해 열전도율을 측정하였다. 상판의 온도는 38°C, 하판의 온도는 10°C로 유지하였으며, 실험실 환경은 25°C로 유지하였다.

추가로 최근 단일 박스로 많이 사용되고 있는 honeycomb 구조의 종이(두께: 15 mm)에 대해서도 열전도율을 측정하였다.

Fig. 3은 각 박스의 소재들과 HFM을 이용하여 열전도율 측정하는 것을 보여주고 있다. 왼쪽 상단부터 시계방향으로 honeycomb 종이, AB골 골판지, 재생 페트 단일재, 스티로폼이다. 우측사진은 Heat flow meter(HFM436 lamda, Netzsch)이다.



Fig. 3. 각 박스 소재 및 열전도율 측정 모습.

결과 및 고찰

1. 박스 간 단열성능 비교 분석

각 박스의 측정 포인트의 실시간 온도 그래프를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

아이스팩과의 거리가 가까운 측정 포인트 1 지점에서는 실험 후 초기 5시간까지는 3종류의 박스 모두 비슷한 온도 그래프를 나타냈다. 처음 10여분은 외부에서 박스 내부로 열기가 들어오기 시작하는 단계로, 아이스팩의 냉기가 더 큰 영향을 주게 되어 온도가 0~5도씨로 떨어지게 된다. 그 이후에는 외부에서 들어오는 열기와 아이스팩으로부터 받

는 냉기가 균형을 이뤄 온도가 약 8~12도씨 부근에서 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 5시간이 지난 시점부터 종이박스의 온도 그래프가 급격하게 상승하는데 이는 아이스팩의 상변화가 완료되어 아이스팩이 가진 잠열을 모두 소비한 것으로 보여진다.

종이박스가 5시간 소요되는데 비해 스티로폼 박스는 약 8시간 지난 시점부터, 재생 페트 단열재가 적용된 박스는 약 14시간 지난 시점부터 온도가 상승하기 시작하였다. 아이스팩의 상변화를 일으키는 driving force는 외부로부터 들어오는 열이며, 단위 시간 동안 더 많은 열이 들어올수록 driving force가 커져 상변화가 더 빠르게 일어났다. 즉, 중

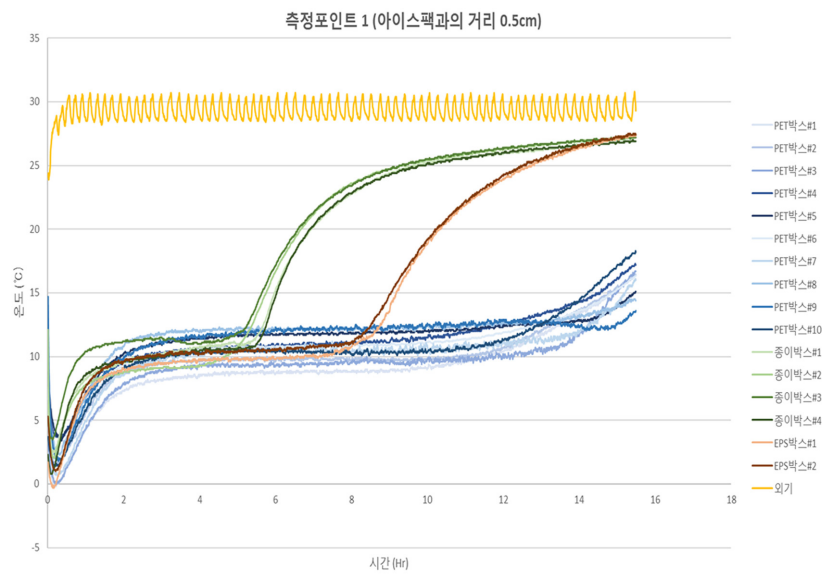


Fig. 5. 시간에 따른 측정포인트1의 온도변화 그래프

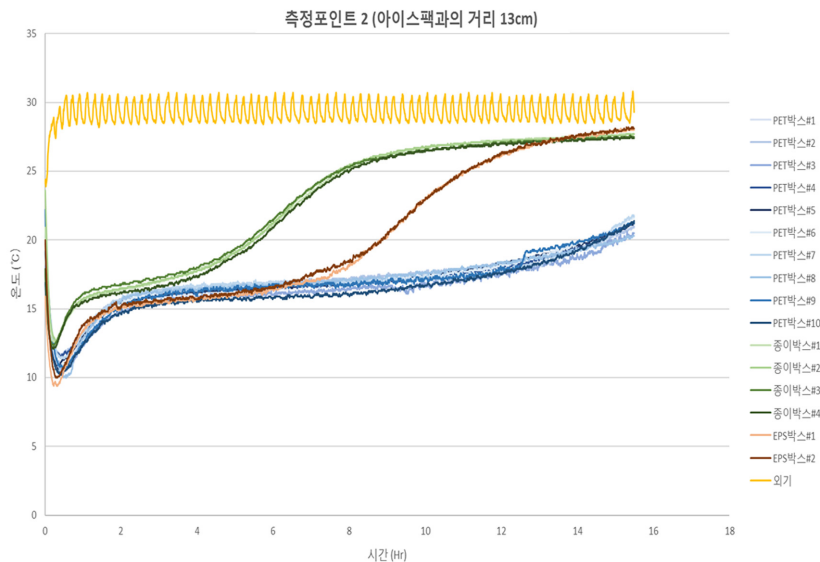


Fig. 5. 시간에 따른 측정포인트2의 온도변화 그래프.

이박스에서 단위 시간 동안 가장 많은 열이 외부로부터 들어왔고, 재생 페트 단열재가 적용된 박스에서 가장 적은 열이 들어왔음을 알 수 있었다.

외부 온도가 세 박스 모두 동일하였으므로 외부로부터 들어오는 열의 양은 순전히 박스의 단열성능에 의해서 결정된다고 할 수 있다. 또한, 박스 안에 아이스팩과 지그를 제외한 어떠한 다른 내용물을 넣지 않았기 때문에 온도에 영향을 주는 변수는 오로지 아이스팩의 잠열과 열용량, 외부에서 들어오는 열량이다. 이러한 점을 바탕으로 볼 때, 박스의 단열성능은 재생 페트 단열재가 적용된 박스가 가장 우수하고 스티로폼 박스, 종이 박스 순으로 낮아진다는 결론을 내릴 수 있었다.

측정포인트 2에서도 1과 비슷한 경향을 관찰할 수 있었다. 다만, 아이스팩과의 거리가 1보다 더 멀어 아이스팩으로부터 받는 냉기의 영향은 감소하고 외부로부터 들어오는 열기의 영향을 더 많이 받은 것으로 보인다. 따라서 전반적인 온도는 포인트 1보다 약 5°C 높게 유지되는 것을 볼 수 있었다.

2. 열전도율과 단열성능 간 상관관계 고찰

단열성능의 차이를 판단하기 위해 각 소재의 열전도율을 Heat flow meter(HFM436 lamda, Netzsch)를 통해 실험하였고 이를 Table 1에 나타내었다.

열전도율은 소재 자체의 고유 성질이고 열관류율은 열전도율을 두께로 나눈 값이다. 열관류율이 낮을수록 열전달은 느리게 일어나고 단열성능은 좋아진다. Table 1에서 보면 열관류율은 스티로폼이 가장 낮고 재생 페트 단열재, Honeycomb 골판지, AB골 골판지 순으로 증가한다. 이는 앞에서 살펴본 박스의 단열성능과 모순되는 결과이다. 열관류율 측면에서만 보면 스티로폼 박스의 단열성능이 재생 페트 단열재 성능보다 좋아야 한다. 이에 대해서는 3가지 해석이 가능할 것으로 보인다.

첫번째로 기밀성이다. 스티로폼의 water vapor permeability는 약 $2E-11 \text{ mol/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ 로 알려져 있다⁶⁾. 스티로폼의 두께가 25 mm임을 감안하면 스티로폼의 water vapor permeance는 약 $100 \text{ g/m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{atm}$ 이 된다. 30°C 환경에서 수증기 분압이 약 0.042 atm이고, 실험에 사용한 스티로폼 박스의 내면적이 약 0.74 m^2 이므로 하루에 스티로폼 박스

안으로 약 40 g의 수증기가 들어오는 것이다. 반면, PET의 water vapor permeability는 약 $5.8E-14 \text{ g/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ 로 알려져 있고⁷⁾ PET 필름의 두께(12 μm)와 실험조건을 감안하면 하루에 약 6.6g의 수증기가 내부로 들어오게 된다. 이는 스티로폼 박스의 17%에 불과한 것이다. 더욱이 PET 단열 포장재 바깥에 종이박스가 있으므로 실제로 들어오는 수증기의 양은 더 적다고 볼 수 있다. 스티로폼 박스의 water vapor permeability가 높은 이유는 스티로폼이 미세한 발포 셀들로 이루어져 있는 다공성 구조를 하고 있어 이 셀들 사이로 공기나 수증기의 흐름이 용이하기 때문이다. Water vapor permeability가 좋다는 의미는 곧 기밀성이 낮다는 의미로 볼 수 있다. 기밀은 단열성능에서 아주 중요한 요소로 작용하는데, 아무리 좋은 단열재를 사용하고 단열벽을 두껍게 만들어도 미세한 leak를 통해 외부의 냉기 혹은 열기가 들어오면 단열효과는 현저하게 감소할 수밖에 없다. 건축 시공 시 창호의 기밀성을 높이기 위해 기밀테이프를 붙이고 실리콘 처리를 하는 것도 이러한 이유 때문이다. Kraus의 연구에 따르면⁸⁾ air change rate per hour (ACH)가 4.50에서 0.60으로 감소함에 따라 난방에너지 사용량이 26.41 kWh/(m².a)에서 23.96 kWh/(m².a)로 감소하였다.

재생 페트 단열재 박스가 스티로폼 박스보다 우세한 단열성능을 보인 두번째 이유는 다음과 같다. 스티로폼의 water vapor permeability가 좋다는 것은 그만큼 물을 잘 흡수한다는 것을 의미한다. 그리고 스티로폼 내부에 수분이 채워지므로 인해서 열전도율이 증가하게 되는데, 이는 물의 열전도율(600 mW/m·K)이 공기의 열전도율(25 mW/m·K)보다 훨씬 크기 때문이다. Szodrai의 연구에 의하면⁹⁾ EPS의 수분함량이 0%에서 15%로 증가함에 따라 열전도율이 44 mW/mK에서 약 51 mW/mK로 16% 증가한다고 하였다.

세번째 이유는 재생 페트 단열재 내부에 생기는 air pocket 효과이다. 재생 페트 부직포는 섬유상 구조를 하고 있어 내부에 많은 양의 공기를 담아둘 수 있다. 특히, 재생 페트 부직포 위, 아래로 기체 차단성이 PS나 종이류에 비해 매우 높은 페트 필름이 합치되어 있어 외부로의 공기 흐름이 차단하기 때문이다. 앞에서 언급했듯이 공기의 열전도율은 25 mW/m·K로 상당히 낮기 때문에 단열재 내부에 생긴 air pocket이 단열력을 향상시키는 역할을 한 것으로 판단된다.

Table 1. 각 박스 소재의 열전도율과 열관류율

소재	두께 (mm)	열전도율 (mW/m·k)	열관류율 (W/m ² ·K)
재생 페트 단열재	10	34.8	3.48
스티로폼	25	37.7	1.51
AB골 골판지	7	46.2	6.60
Honeycomb	15	72.8	4.85

결 론

재생 페트 단열재가 적용된 박스와 스티로폼 박스, AB골 골판지 박스 간 단열성능 비교실험을 진행하였고, 재생 페트 단열재 박스의 단열성능이 스티로폼 박스보다 약 75%, 종이 박스보다 약 180% 더 우수한 것으로 나타났다. 각 소재의 열전도율을 측정된 결과 스티로폼의 열관류율이 가

장 낮아 박스의 단열성능과 모순된 결과를 보여주었는데, 이는 스티로폼 박스의 기밀성이 떨어지고 물을 잘 흡수함으로써 스티로폼의 열전도율 상승이 일어났고, 재생 페트 단열재 내부에 생긴 air pocket이 단열 측면에서 긍정적인 효과를 주었기 때문으로 설명하였다.

향후 신선식품 배송시장이 커짐에 따라 스티로폼 박스의 과다사용 및 폐기 문제는 끊임없이 제기될 것이다. 이런 상황에서 재활용 소재를 활용하여 만든 친환경 재생 페트 단열재는 높은 단열성능과 저렴한 가격을 바탕으로 스티로폼 박스의 훌륭한 대체재로 작용할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 한국농촌경제연구원. 2018 농소모 활동보고서. 2018.12.
2. 한국건강생활환경시험연구원. 2019. 택배 유통포장 폐기물 감량화 방안 연구, 한국포장학회. 25(2): 23-29.
3. 서울경제, “장례식장도 일회용 컵수저 금지...2022년까지 일회용품 35% 줄인다”, 2019.11.22 기사.
4. 동아일보, “마트서 종이상자 자율포장 ‘금지 내년 1월 그대로 시행’”, 2019.12.02 기사.
5. kbs뉴스, “스티로폼을 어이할꼬?”, 2016.04.26 기사.
6. J.F. Straube, K. Ueno, and C.J. Schumacher, Measure Guideline: Internal Insulation of Masonry Walls. Energy Efficiency & Renewable Energy, Washington DC, USA, 2012.
7. L. Bastarrachea, S. Dhawan, S. S. Sablani. 2011. Engineering Properties of Polymeric-Based Antimicrobial Films for Food Packaging. Food Eng Rev. 3:79-93.
8. M. Kraus, D. Kubečková. 2015. Airtightness of Energy Efficient Buildings. VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering.
9. F. Szodrai, Á. Lakatos. 2014. MEASUREMENTS OF THE THERMAL CONDUCTIVITIES OF SOME COMMONLY USED INSULATING MATERIALS AFTER WETTING. Environmental Engineering and Management Journal. 13(11). 2881-2886.

투고: 2019.12.10 / 심사완료: 2019.12.27 / 게재확정: 2019.12.30