Elastomers and Composites
Vol. 56, No. 4, pp. 217~222 (December 2021)

Print ISSN 2092-9676/Online ISSN 2288-7725
DOI: https://doi.org/10.7473/EC.2021.56.4.217

Note

A Fabrication and Antifogging Performance of Random Polypropylene Film Containing Monoglycerides as Antifogging Agent

Wan Jo[#], Jin Hwan Park, and Seok-Ho Hwang[†]

Materials Chemistry & Engineering Laboratory, Department of Polymer Science & Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi-do 16890, Republic of Korea

[#]Current Address: R&D Center, HDC Hyundai EP Co., Ltd., Seongnam, Gyeonggi-do 13556, Republic of Korea

(Received November 1, 2021, Revised November 22, 2021, Accepted November 22, 2021)

In this study, random polypropylene (rPP) was compounded with two of monoglycerides, namely, glyceryl monolaurate (GML) and glyceryl monostearate (GMS), as antifogging agents to improve its antifogging performance. rPP film samples were prepared by a film-casting method using a three-roll casting machine after melt blending through a twin screw extruder. With an increase in the monoglyceride content, the melt flow index for rPP films with GML and GMS increased, and their yield strength decreased. The incorporation of GMS in rPP was proven to be more effective in improving its physical properties than was rPP with GML. When GML and GMS were separately added to the rPP film at contents of more than 1 phr and more than 5 phr, respectively, the film exhibited antifogging performance.

Keywords: random polypropylene, monoglyceride, antifogging performance, compounding, film casting

Introduction

일반적으로 식품 포장용 포장재로 종이, 금속, 고분자 등의 소재들이 주로 사용되어져 왔다. 그 중에서 고분자가 가장 많이 사용되고 있는데 이는 재활용이 용이하며 가공성, 투명성이 우수하며 또한, 원하는 크기 및 두께로 원하는 성형이 가능하기 때문이다.[1,2] 또한, 고분자 소재는 저비중, 내충격성, 밀봉성, 유연성, 내구성, 베리어(barrier) 특성 등을 가지고 있기 때문에 다른 소재보다 식품 포장재에 더 적합하다.[3,4] 일반적으로 포장용 필름에 사용되는 고분자 소재로 polyethylene (PE), polypropylene (PP), ethylene vinylalcohol (EVOH) 등이 적용되고 있다.[5,6]

식품 포장재들 중에 20 μm 이하의 두께를 갖는 필름을 흔히 랩(wrap)이라고 칭하며, 대표적으로 polyvinyl chloride (PVC)계, polyolefin (PO)계 랩이 현재 상용화되어 사용되고 있다. PVC계 랩은 높은 신축성, 투명도, 방담 특성을 나타내어 식품 포장재로 널리 사용되고 있지만 폐기물로서 PVC계 랩을 소각 할 때, 유해가스 중 하나인 염소(chlorine)가 발생되어 환경오염을 유발할 수 있다.[7] PO계 랩은 polyethylene (PE)계 (LLDPE 또는 LDPE)를 많이 사용하는데, 그 이유는 PE계 수지는 polyolefin 수지들 중에서 용융강도(melt strength)가 상대적으로 높아 얇은 두께의 필름을 성형할 때 유리하기 때문이다. 하지만 내열성이 상대적으로 낮은 단점을 가지고 있어, 고온의 식품을 포장하는 포장재로 사용하는데 있어 한계가 있다.[8] 이러한 단점을 보완하기 위하여 다양한 고분자를 이용한 랩에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 여러 가지 고려되고 있는 고분자들 중에서 random polypropylene (rPP)계 랩은 높은 내열성을 갖고 있을 뿐만 아니라, 투명도 및 인장강도가 높아 랩으로 사용하기에 적합할 수 있으나, 일반적으로 김서림 방지(antifogging) 특성이 좋지 않아 식품 포장재로 사용이 제한될 수밖에 없다.

김서림 방지 특성은 수증기가 물체 표면에 응결되지 않게 하는 특성을 말한다. 물이나 수증기가 랩 또는 포장재에 의해 식품 용기 내에 갇혀 있을 경우, 수증기가 이슬점(dew point) 온도 이하로 내려감에 따라 물체 표면에 응결되게 된다. 그 결과, 응결된 모습이 안개(fog) 현상처럼 보여 랩 또는 필름의 투명도를 저해시킨다. 식품 포장재용 필름의 김서림 방지 특성이 좋지 않을 때, 필름의 투명성 저하뿐만 아니라 물방울 생성으로 인한 신선 식품의 상품성 저하를 유발할 수 있기 때문에 식품 포장재로 사용이 제한될 수 있다.[9] 최근까지 식품 포장재에 김서림 방지 특성을 부여하기 위해서 여러 가지 방법들이 제안되어 적용되고 있으며, 대표적으로 γ-irradiation 처리 기술,[1] 저온 플라즈마 처리 기술[10] 김서림 방지제 코팅 방법[11] 등이 적용되고 있다. 식품 포장재용 필름에 김서림 방지 특성을 향상시키기 위한 전략으로 필름 표면을 친수성으로 만드는 것이 중요하며, 이렇게 형성된 친수성 표면에서는 물방

[†]Corresponding author E-mail: bach@dankook.ac.kr

울이 맺힐 때 넓게 퍼지는 경향으로 인해 필름의 투명도 저하를 크게 줄일 수 있다. 필름 표면에 친수성을 부여하는 방법으로 여러 가지 방법이 제안되고 있지만, 대표적으로 사용되는 방법은 김서림 방지제(antifogging agent)를 사용하는 것이다. 김서림 방지제는 친수성을 갖는 하이드록시(-OH)그룹 또는 카르복시(-COOH) 그룹과 소수성을 갖는 alkyl chain을 동시에 가지는 저분자량의 유기화합물들이 일반적이다.[12]

본 연구에서는 내열성을 가지는 rPP 기반 필름의 단점인 김서림 방지 특성을 보완하기 위하여 김서림 방지제로서 alkyl chain의 탄소 개수가 서로 다른 두 종류의 모노글리세라이드(monoglyceride)를 도입하였다.[13,14] rPP와 모노글리세라이드를 컴파운딩한 후, 필름 캐스팅 장비를 이용하여 랩용 필름을 제조하였고, 제조된 필름에 대해 적용된 두 종류의 모노글리세라이드 첨가량에 따른 김서림 방지 특성, 가공 특성, 기계적 물성 및 광학 특성을 평가하였다.

Experimental

1. 시약 및 재료

본 실험에 사용한 rPP 수지는 SK 지오센트릭사의 필름 압출용 제품 (상품명: Yuplene R362Y, 밀도=0.905 g/cm^3)이다. 모노글리세라이드는 glyceryl monostearate (GMS, Towrex Co., Korea)와 glyceryl monolaurate (GML, Towrex Co., Korea)를 정제없이 그대로 사용하였다.

2. rPP 컴파운딩

rPP 수지에 모노글리세라이드를 각각 1, 3, 5, 7, 9 phr 첨가하여 건식 블렌딩(dry blending)한 후, 동방향 이축 압출기(Model Alpha 25, Steer Engineering Co., India)을 이용하여 혼련 하였다. 이때, 배럴 온도는 공급 영역에서 140°C, 압축 영역에서 190°C, 이송 영역에서 200°C, 다이 온도는 200°C이었으며, 이축 압출기 스크루 속도는 300 rpm이었다. 사용한 이축 압출기의 스크루 내경은 25 mm이며 L/D비는 30이었다.

3. 캐스팅 필름(casting film) 제조

랩용 필름을 제조하기 위해 25 mm 일축 압출기에 장착된 3-Roll casting machine (Model LCR-300, Labtech Engineering Company Ltd., Thailand)을 이용하여 rPP 필름을 제조하였다. 압출기의 온도는 제1영역에서 50°C, 제2영역에서 230°C, 제3영역에서 230°C, 다이 온도는 230°C로 설정하였으며, 최종적으로 얻어진 필름 두께는 약 15 μm이었다.

4. 특성분석

rPP 컴파운드의 유동특성 측정은 Melt Flow Indexer (Model: LMI5000, Dyisco Co., USA)를 이용 하였으며, ASTM D1238 법에 따라 190°C, 2.16 kg 조건하에서 측정하였다. 제조된 필름의 기계적 물성을 측정하기 위해, 인장시험기(Model: Instron 5584, Instron Inc., Germany)를 사용하였으며, ASTM D638법에 따라 300 mm/min 테스트 속도로 인장강도를 측정하였다. 인장시험을 위한 시편은 제조된 필름을 시편 성형기를 이용하여 ASTM D638 Type IV 기준으로 필름을 잘라서 사용하였다. 광투과도 측정은 UV-visible spectrometer (Model: Lambda 950, Perkin-Elmer Inc., USA)를 사용하였으며, 380-780 nm 파장 영역에서 투과도를 측정하고, 540 nm의 투과도 값을 각 필름의 광투과도로 비교하였다. 접촉각 측정은 Contact angle and surface tension analyzer (Model: Phoenix300, SEO Co., Ltd., Korea)을 사용하였다. 김서림 방지 특성은 국가표준(GB4455-2006)에 따라 수조 방법(hot fog test)을 사용하여 측정하였다. 약 50°C의 물 200 mL를 500 mL 비이커에 넣은 후 제조된 캐스팅 필름으로 비이커를 밀봉하였다. 수증기에 의해 필름 내부 표면에 수분이 응축되었을 때 응축 정도를 육안으로 관찰하고 동일한 해상도로 사진을 찍어 비교하였다.

Results and Discussion

저분자량의 유기화합물이 고분자량의 고분자와 혼련될 때 저분자량의 소재는 윤활제 역할을 수행할 수 있으며, 고분자의 용융 점도를 낮추는 현상이 일반적이다. 따라서 고분자 필름을 캐스팅 공정으로 제조하고자 할 때 고분자의 유동 특성이 필름의 품질에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 특히, 식품 포장재에 사용되는 랩의 일반적인 두께는 15 μm 이하이기 때문에, 이러한 얇은 필름을 가공하기 위해서는 사용될 소재의 유동 특성이 더 중요하다.[15,16] 본 연구에서 사용한 두 종류의 김서림 방지제 첨가량에 따른 rPP 컴파운드의 유동 특성을 MFI (melt flow index)값으로 측정하고, 그 값들을 Figure 1에 나타내었다. rPP 단독 MFI 값은 9 g/10 min이었고, rPP 컴파운드에 김서림 방지제의 함량이 증가할수록 MFI 값이 상승하였다. Figure 1에서 보는 바와 같이 alkyl chain이 상대적으로 긴 GMS의 첨가가 GML을 첨가한 rPP 컴파운드보다 MFI 값이 본 실험에서 적용한 모든 김서림 방지제 첨가 범위에서 낮은 것을 보여주고 있다. 분자량이 낮은 김서림 방지제의 첨가는 rPP 사슬 얽힘 내 윤활제 역할을 함으로서 고분자인 rPP의 용융점도를 낮추어 단위 시간당 흐른 양인 MFI값을 상승시키는 것으로 판단된다. 본 실험에서 사용한 김서림 방지제의 화학구조가 고분자 첨가제들 중 고분자 윤활제(lubricant)로 사용되고 있는 스테아린산(stearic acid)과 유사하기 때문에 김서림 방지제로 사용한 GMS와 GML도 고분자에 첨가되면 윤활제 특성을 쉽게 유추할 수 있다.[17] 또한, alkyl chain이 상

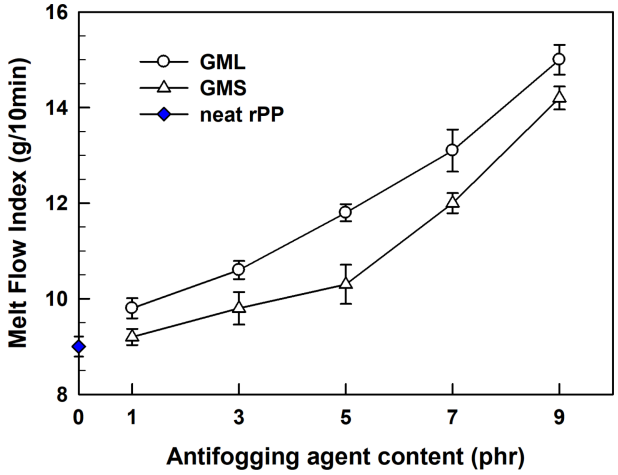

Figure 1. The melt flow index (MFI) for rPP compounds according to antifogging agent content.

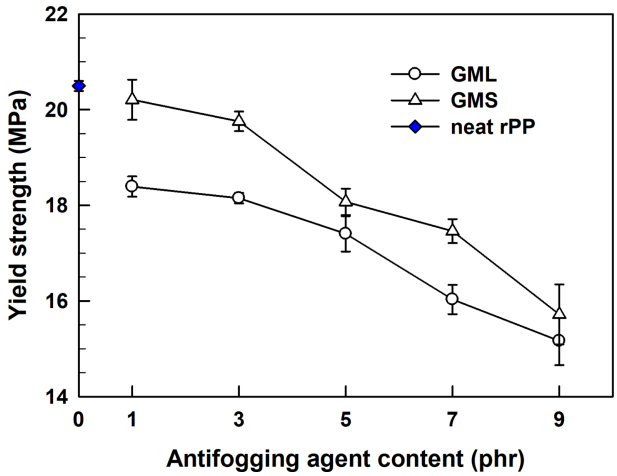

Figure 2. The yield strength for rPP compounds according to antifogging agent content.

대적으로 짧은 GML이 GMS 보다 rPP 사슬 내에서 윤활 역할을 보다 효과적으로 수행하여 rPP 컴파운드의 점도를 낮추어 rPP 컴파운드의 MFI값을 상승시키는 것으로 판단된다. 고분자의 MFI값이 너무 상승하게 되면 그들의 용융점도 및 용융강도가 낮아져 캐스팅 압출 성형기로 랩용 필름 성형할 때 필름 형성(제막)이 되지 않고 물처럼 흘러내리게 되며, 압출 성형기 실린더의 스크루에 의해 이송되지 않고 정체되어 필름이 형성이 안될 가능성이 높기 때문에 김서림 방지제 첨가량의 최적화가 반드시 진행되어야 한다. 본 연구에서 적용한 김서림 방지제 첨가량 9 phr일 때 rPP 컴파운드의 MFI값은 약 15 g/10 min이었으며, 모든 조성에서 캐스팅 압출 성형하여 15 μm 두께의 필름을 성공적으로 제조하였다.

일반적으로 랩핑(wrapping)을 할 때 랩용 필름이 가져야 할 중요한 기계적 물성들 중에 항복강도(yield strength)가 가장 중요한 평가항목이다.[18] 항복강도가 너무 낮으면 랩용 필름이 너무 쉽게 늘어나며 필름 폭이 수축되어 포장할 수 있는 식품의 넓이가 한정된다. 또한 랩핑 되어있는 상황에서 외력에 의해 쉽게 구멍이 발생할 수 있기 때문에, 랩핑한 후 필름 안정성이 낮아 포장 후의 구멍, 찢김 등의 포장 불량이 발생하게 된다. Figure 2에 김서림 방지제, GML와 GMS, 함량에 따른 항복강도의 변화를 나타냈다. 단독 rPP 수지는 약 20.5 MPa의 항복강도를 나타냈으며, 김서림 방지제의 함량이 증가할수록 rPP 컴파운드의 항복강도는 감소하였다. 이러한 현상은 저분자량의 김서림 방지제에 의해 rPP 고분자 사슬간의 인력을 약화시켜 항복강도를 낮아지게 하는 것으로 판단된다. GML 대비 alkyl chain의 길이가 보다 긴 GMS의 함량 증가에 따른 rPP 컴파운드의 항복강도 하락 폭이 작은 것을 확인하였다. 용융상태에서도 GMS가 rPP의 용융점도가 GML 첨가보다 낮은 결과를 보이듯이 고상 상태 하에서 GMS가 rPP 고분자 사슬 내에서 분자간 인력이 더 큰 결과에 의한 것으로 판단된다.

rPP 수지에 GML과 GMS 첨가량에 따른 김서림 방지 특성을 평가하여 Table 1에 나타내었다. 우선 국가표준인 수조 방법에서 김서림에 대한 육안 판별에 필요한 표준을 Figure 3에 나타내었다. 김서림 방지 특성이 잘 나타나는 표준(C)는 비이커 밑면에 놓아둔 글자가 선명하게 보이는 상태로 하였고, 표준(B)처럼 글자가 흐릿하게 보이면 중간으로, 표준(A)처럼 글자가 잘 보이지 않을 경우로 김서림 방지 특성이 낮은 것으로 삼아 육안판별을 진행하였다. 3-롤 캐스팅 압출 성형기로 제조된 rPP 랩 필름을 수조 방법에 따라 상온에서 방치한 시간에 따른 김서림 방지 특성을 관찰하였다. 랩 필름 제조 후 상온에서 6 시간이 경과하였을 때, GML과 GMS 첨가 전조성에서 모두 김서림 방지 특성이 나오지 않았다. 이러한 결과는 김서림 방지제로 첨가한 모노글리세라이드가 김서림 방지 특성이 발현되기 위해서는 김서림 방지제가 rPP 필름내에서 표면으로 마이그레이션(migration)되어 표면에 위치해야 하는데, 필름 제조 후 상온에서 6 시간 경과 필름에서는 김서림 방지제의 마이그레이션 정도가 상대적으로 낮아 김서림 방지 특성이 발현되지 않은 것으로 판단된다.[19] Table 1에서 보는바와 같이 GML 김서림 방지제를 첨가한 경우, 필름을 제조한 후 상온에서 24시간 이상 방치한 필름은 김서림 방지제 전 조성, 1-9 phr에서 모두 김서림 방지 특성이 발현되었다. 반면에

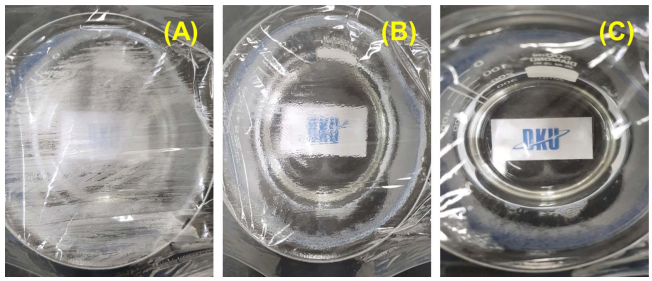

Figure 3. Photographic image of different grades given to the film after a hot fog test: (A) Poor, (B) Fair, and (C) Good.

Table 1. Performance Record for the Hot Fog Test: Appearance Rating Based on Figure 3 from A to C at Different Intervals

Agent	Aging time (hr)	Antifogging agent content (phr)					
		0	1	3	5	7	9
GML	6	A	A	A	A	A	A
	24	A	C	C	C	C	C
	72	A	C	C	C	C	C
	96	A	C	C	C	C	C
GMS	6	A	A	A	A	A	A
	24	A	A	B	C	C	C
	72	A	B	B	C	C	C
	96	A	B	B	C	C	C

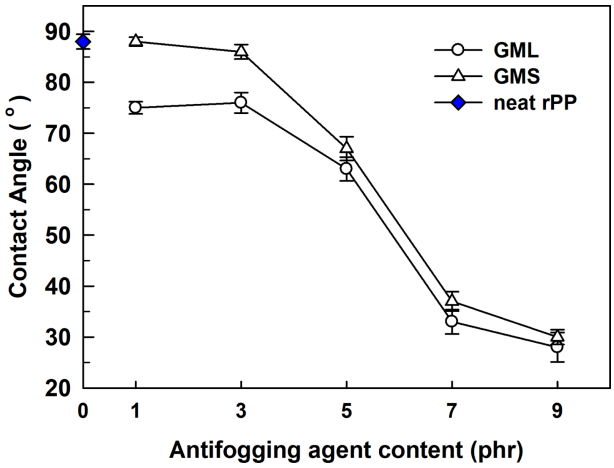

Figure 4. The contact angle behavior for rPP compound film according to antifogging agent content.

GMS를 첨가한 경우, 필름을 제조한 후 상온에서 24시간 이상 방치한 필름은 김서림 방지제 첨가량이 5 phr 이상일 때 김서림 방지 특성이 발현되는 것을 확인하였다. 이러한 경향은 GML이 GMS에 비해 alkyl chain의 길이가 짧고 더 낮은 분자량을 갖기 때문에 rPP 필름 내에서 마이그레이션 하기에 좀 더 용이하게 이루어질 수 있기 때문에 더 적은 함량에서 또는 더 빠른 시간 내에 김서림 방지 특성을 발현한 것으로 판단된다. 이러한 현상을 확인하기 위해 각 필름에 대한 접촉각 측정을 수행하였으며 그 결과를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4에서 보는바와 같이 접촉각 결과에서도 GML을 포함한 필름이 GMS를 함유한 필름에 비해 김서림 방지제의 전조성에서 낮은 접촉각 결과를 보여주고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 김서림 방지제가 rPP 필름의 표면으로 마이그레이션 되어야 김서림 방지 특성이 발현하는 것을 확인하였다. 하지만 과도한 양의 김서림 방지제가 마이그레이션이 될 경우, rPP 필름 표면에 blooming 현상이 발생하여 필름의 투명도를 저해하게 된다(Figure 5). 따라서, 본 연구에서 필름 제조 후 특정 조건에서 방치한 시간에 따른 필름의 투명도를 hazemeter를 이용하여 측정하였고 Figure 6에

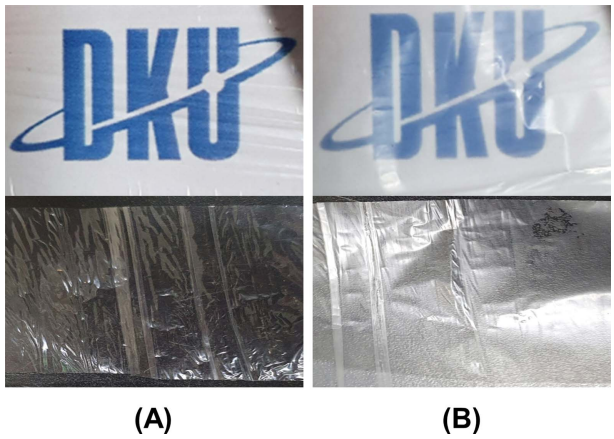

Figure 5. The images of two different films with and without antifogging agent: (A) only rPP film and (B) rPP film with monoglyceride.

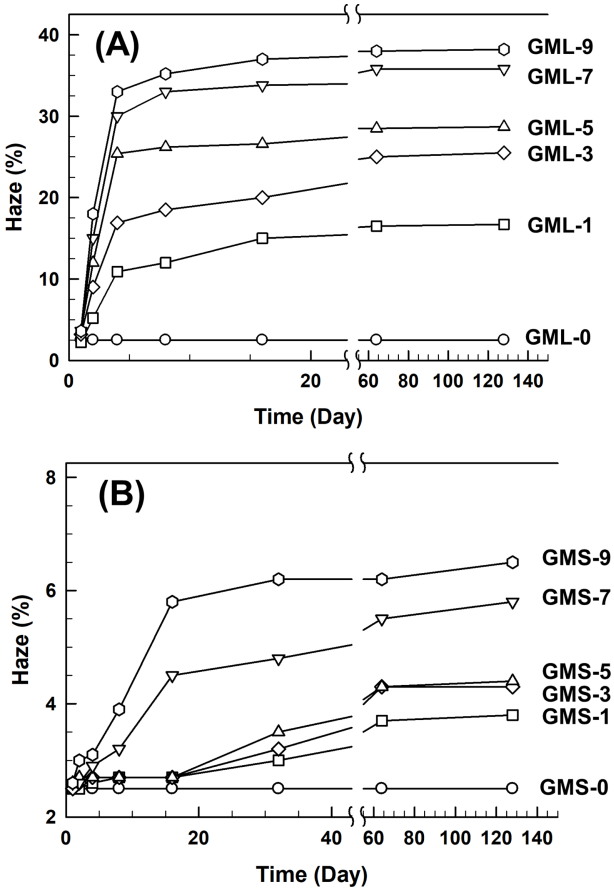

Figure 6. The haze of rPP compound film according to antifogging agent content and aging time: (A) GML and (B) GMS.

나타내었다. 캐스팅 압출 성형기로 필름을 제조한 후 필름을 항온항습(23°C, 50% RH) 조건하에서 128일까지 방치하면서 필름 haze 변화를 측정하였다. rPP 필름 내 GML 첨가량이 증가할수록 haze 값이 증가하였으며, 전 조성에서 모두 필름 성형 후 1일차에서 8일차까지 급격한 haze값 변화 거동이 나타

내고 8일차 이후부터 약 128일까지 haze값 변화가 거의 탐지되지 않는 것을 확인하였다. 반면에 rPP 필름내 GMS 첨가량의 증가에 상관없이 haze값의 큰 차이를 보이지 않았으며, GMS 함량 7 phr 이상일 경우, 8일 이후부터 16일차까지 haze값이 크게 변화 후 일정한 haze값을 유지하였다. GMS 함량이 7 phr 미만일 경우, 16일차까지 haze값의 큰 변화가 없었지만 32일차 이후부터 64일차 때 haze값이 약간 변화 후 일정하게 유지되었다. 일반적으로 식품 포장용 랩 필름은 매우 투명해야하기 때문에 haze값이 10% 이하로 유지되어야 한다. GML은 전 조성에서 하루가 지나면서 rPP 필름 표면으로 마이그레이션 되어 필름의 haze값이 높아짐에 따라 투명도가 좋지 않게 되어 상품성이 떨어지는 결과를 나타내었으며, GMS는 모든 조성에서 약 128일까지 haze값이 10% 이하로 측정되기 때문에 식품 포장용 필름의 투명도에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

Conclusion

본 연구에서는 식품 포장용 랩 rPP 필름의 김서림 방지 특성을 개선하기 위하여 김서림 방지제로 GML과 GMS를 동방향 이축 압출기를 이용하여 혼련한 후 캐스팅 압출 성형기로 필름을 제조하였다. 김서림 방지제 함량에 따른 유동, 물성, 김서림 방지 특성을 측정하여 분석하였다. 저분자의 계열의 김서림 방지제(GML, GMS)의 함량이 높아질수록 MFI 값이 커지며 유동이 상승하는 것을 확인하였으며, 항복강도가 하락하는 결과를 확인하였다. 긴 alkyl chain을 가지고 있는 GMS가 GML에 비해 물성에 영향을 적게 미치는 것을 확인할 수 있었다. 김서림 방지 특성은 GML이 GMS 보다 낮은 함량(1 phr)부터 김서림 방지 특성을 나타냈고, GMS는 5 phr 이상 적용 시 충분한 김서림 방지 특성을 보였다. 하지만, 항온항습(23°C, 50% RH) 기준 GML은 너무 많은 양의 첨가제가 마이그레이션되어 필름의 투명도를 떨어뜨리게 되어 사용하는데 적합하지 않았으나, GMS는 5 phr 이상 적용 시에도 마이그레이션에 의한 투명도의 변화가 매우 낮아, 장기안정성을 갖는 투명한 식품 포장용 필름에 사용이 적합하다는 것을 알게 되었다. 따라서, 기존 LDPE, LLDPE 대비 높은 내열성을 갖는 rPP 필름을 제조하고 높은 김서림 방지 특성으로 인해 식품 포장용 및 산업의 다방면으로 응용 적용이 가능할 것으로 예상된다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부의 “소재부품기술개발사업” (태양광 모듈용 고투과 열가소성 탄성소재, 과제번호: 20012770)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Y. C. Han, S. Lee, B. H. Ahn, S. W. Oh, and Y. S. Kang, “Preparation of anti-fogging low density polyethylene film by using γ-irradiation”, *Sens. Actuators B Chem.*, **126**, 266 (2007).
2. C. Guang-Liang, Z. Xu, H. Jun, S. Xiao-Lei, C. Zhi-Li, X. Fei, and S. Massey, “Three different low-temperature plasma-based methods for hydrophilicity improvement of polyethylene films at atmospheric pressure”, *Chin. Phys. B*, **22**, 115206 (2013).
3. K. W. McMillin, “Where is MAP going A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat”, *Meat Sci.*, **80**, 43 (2008).
4. K. Marsh and B. Bugusu, “Food packaging-roles, materials, and environmental issues”, *J. Food Sci.*, **72**, R39 (2007).
5. R. Coles, D. McDowell, and M. J. Kirwan, “Food Packaging Technology”, CRC Press LLC. Boca Raton, 2003.
6. S. Ebnesajjad, “Plastic films in food packaging: materials, technology and applications”, William Andrew. Waltham, 2013.
7. J. E. Brown and M. M. Birky, “Phosgene in the thermal decomposition products of poly (Vinyl Chloride): generation, detection and measurement”, *J. Anal. Toxicol.*, **4**, 166 (1980).
8. A. C. Chang, L. Tau, A. Hiltner, and E. Baer, “Structure of blown film from blends of polyethylene and high melt strength polypropylene”, *Polymer*, **43**, 4923 (2002).
9. J. Markarian, “Additives in food packaging”, *Plast. Addit. Compd.*, **4**, 16 (2002).
10. M. Ataeefard, S. Moradian, M. Mirabedini, M. Ebrahimi, and S. Asiaban, “Surface properties of low density polyethylene upon low-temperature plasma treatment with various gases”, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **28**, 377 (2008).
11. E. Karbassi, A. Asadinezhad, M. Lehocký, P. Humpolíček, A. Vesel, I. Novák, and P. Sáha, “Antibacterial performance of alginic acid coating on polyethylene film”, *Int. J. Mol. Sci.*, **15**, 14684 (2014).
12. P. Wagner, “Anti-fog additives give clear advantage”, *Plast. Addit. Compd.*, **3**, 18 (2001).
13. N. Juvonen, “Improved Antifog Properties for Polyethylene Sealable Lids”, Master’s Thesis. Tampere University of Technology, Tampere, Finland (2017).
14. J. Rosen-Kligvasser, R. Y. Suckeveriene, R. Tchoudakov, and M. Narkis, “A novel methodology for controlled migration of antifog from thin polyolefin films”, *Polym. Eng. Sci.*, **54**, 2023 (2014).
15. G. Lamberti, V. Brucato, and G. Titomanlio, “Orientation and crystallinity in film casting of polypropylene”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 1981 (2002).

16. H. Kometani, T. Matsumura, T. Suga, and T. Kanai, "Experimental and theoretical analyses of film casting process", *J. Polym. Eng.*, **27**, 1 (2007).
17. L. Dai, X. Wang, J. Zhang, F. Wang, R. Ou, and Y. Song, "Effects of lubricants on the rheological and mechanical properties of wood flour/polypropylene composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 47667 (2019).
18. M.-J. Khalaj, H. Ahmadi, R. Lesankhosh, and G. Khalaj, "Study of physical and mechanical properties of polypropylene nanocomposites for food packaging applications: Nanoclay modified with iron nanoparticles", *Trends Food Sci. Technol.*, **51**, 41 (2016).
19. K. Shlosman, J. Rosen-Kligvasser, R. Sukeveriene, R. Tchoudakov, and M. Narkis, "Novel antifog modification for controlled migration and prolonged wetting of LLDPE thin films", *Eur. Polym. J.*, **90**, 220 (2017).