



ETFE 기반 불소수지의 열적 특성, 점도 거동 및 사출 성형 공정 적용성 평가

한덕현^a, 윤상민^a, 이성중^b, 김영균^{a,*}**Evaluation of Thermal Properties, Viscosity Behavior, and Injection Molding Applicability of ETFE-based Fluoropolymer**Deokhyun Han^a, Sangmin Yoon^a, Sungjung Lee^b, Youngkyun Kim^{a,*}^a Institute for Advanced Engineering Center for Advanced Materials & Processing^b Samil Flontech Co., Ltd.**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	11	June	2025
Revised	19	June	2025
Accepted	23	June	2025

Keywords:

ETFE-based fluoropolymer
Shear thinning and thickening
Injection molding
Viscosity analysis

ABSTRACT

This study investigates the high-temperature processability of an ETFE-based fluoropolymer (C-88AXP) through thermal, structural, and rheological analyses, along with injection molding trials. TG/DTA results revealed an endothermic peak at 249.4°C with minimal mass loss (<0.05%) up to 350°C, indicating excellent thermal stability. FT-IR analysis after heat treatment at 330°C showed spectral broadening and reduced transmittance, suggesting partial molecular degradation. Viscosity measurements between 270~330°C exhibited typical shear thinning behavior, with shear thickening observed at high shear rates. Among the tested molding conditions, 300°C produced the most stable molded specimens, with an average tensile strength of 38.2 MPa, consistent with material specifications. These findings suggest that 300°C is an optimal processing temperature for C-88AXP under moderate-speed injection molding, offering a valuable reference for high-temperature fluoropolymer processing.

1. 서론**1.1 ETFE 불소수지**

불소수지는 우수한 화학적 안정성, 내열성, 내후성, 낮은 표면 에너지 등의 특성을 보유하고 있으며^[1-3], 또한 반도체, 우주항공, 자동차, 식품 포장 등 다양한 산업 분야에서 고기능성 소재로 활용되고 있다^[3-5]. 특히 ethylene tetra fluoro ethylene(ETFE)는 기존의 PTFE 대비 뛰어난 가공성, 높은 인장강도, 우수한 내화학성과 자외선 저항성을 갖추고 있어, 고온 환경에서도 우수한 내구성을 요구하는 부품 및 필름 소재로 주목받고 있다^[6-8].

그러나 ETFE는 열적으로는 안정한 편이지만, 사출 성형 공정과

같은 고온의 용해 가공 환경에서는 유리전이(glass transition), 열 분해(thermal decomposition) 등의 열적 경계조건을 고려해야 하며, 이 조건들을 명확히 파악하지 않으면 실제 가공 중 성형 불량이나 품질 저하로 이어질 수 있다^[9,10]. 현재까지 ETFE의 고온 성형에 대한 산업적 수요는 지속적으로 증가하고 있으나, 실질적인 가공 한계 온도에 대한 열역학적 분석 및 화학적 안정성 평가, 그리고 이를 뒷받침하는 실제 성형 결과와의 연계 분석은 상대적으로 부족한 실정이다^[11,12].

특히 고분자 수지의 성형 공정 최적화에서 가장 중요한 요소 중 하나는 소재가 유동 가능한 적정 온도 범위를 설정하고, 그 범위 내에서 열적 안정성을 유지하면서도 물성 저하가 발생하지 않는

* Corresponding author. Tel.: +82-31-330-7434

E-mail address: kyk@iae.re.kr (Youngkyun Kim).

조건을 확보하는 것이다^[13-15]. 이를 위해서는 단순한 점도 특성이 나 열분석 결과뿐만 아니라, 실제 성형된 시편의 물성 평가와 외관 상태를 종합적으로 검토할 필요가 있다.

본 연구는 ETFE 기반 불소수지의 열적 특성(TG/DTA), 화학 구조 변화(FT-IR), 점도 특성, 그리고 실제 사출 성형 시편의 물성 및 외관 품질을 연계 분석하여, 산업 현장에서 활용 가능한 최적 사출 성형 온도를 제시하고자 한다. 특히 온도 변화에 따른 전단박화 현상, 열분해 경향, 수축률 변화 및 인장 특성의 변화를 정량적으로 비교함으로써, ETFE 불소수지의 고온 성형 안정성에 대한 실용적 지침을 마련하는 데 연구의 초점을 두었다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 ETFE(AGC, C-88AXP) 소재는, 시판 중인 반도체 공정에 사용되는 고순도 등급 불소수지이다. 공급된 펠릿 형태의 소재는 별도의 전처리 없이 그대로 사용하였다.

소재의 열적 특성을 분석하기 위해 TG/DTA장비(NETZSCH, STA449F5)를 이용하여 분석하였다. 72.57 mg의 시료를 알루미늄 도가니에 담아, 질소 분위기 하에서 10°C/min의 승온 속도로 상온부터 350°C까지 가열하며 열중량 변화와 열에 의한 상변화를 동시에 분석하였다.

또한 소재의 고온에서의 화학 구조의 변화를 확인하기 위해 FT-IR(Thermo Fisher Scientific, Nicolet is50)장비를 이용하여 분석하였다. 330°C에서 1시간 열처리한 시료를 대상으로 ATR (attenuated total reflectance) 방식으로 측정하였으며, wavenumber range는 4,000~400 cm^{-1} 로 설정하였다. 분해능은 0.09 cm^{-1} , 반복 스캔(32 scans)을 통해 스펙트럼의 신뢰성을 확보하였다.

소재 유리전이 온도 이후의 점도 거동은 회전형 레오미터 (Anton Paar, MCR 302)를 이용하여 분석하였다. 분석은 270°C, 300°C, 330°C의 세 가지 온도 조건에서 수행하였으며, 각 온도 별로 회전 속도를 변화시키며 전단율에 따른 점도를 측정하였다. 이를 통해 온도 및 전단율 변화에 따른 전단박화 특성을 확인하였다.

성형은 사출장비(Woojin Plaimm, NE80)를 사용하여 동일한 금형 조건 하에 270°C, 300°C, 330°C의 노즐부 온도에서 각각 수행하였다. 성형에 이용한 장비를 Fig. 1에 나타내었다. 금형 온도, 보압, 냉각 시간은 고정하여 성형 변수 중 온도만을 비교 분석하였다. 성형 시편은 ASTM D638 I형 규격에 맞춰 인장 시험용으로 제작하였으며, ASTM D638-22 기준에 따라 만능재료시험기 (DaeKyung Tech & Tester, DTU-900 MHN)를 사용하여 실온에서 인장 시험을 수행하였다.



Fig. 1 Injection molding machine used in this study (Woojin Plaimm, NE80)

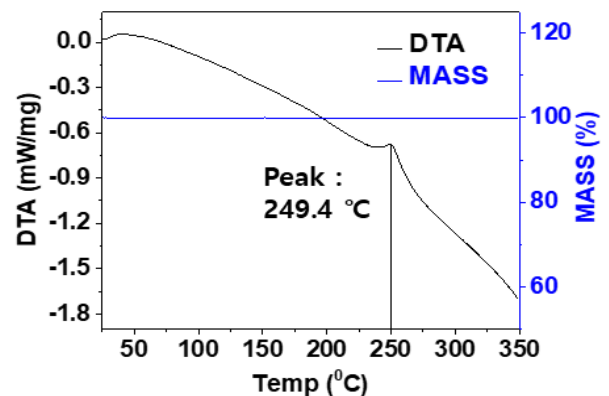


Fig. 2 TG/DTA result of ETFE-based fluoropolymer showing a thermal peak at 249.4°C with negligible mass loss

3. 결과 및 고찰

ETFE 기반 불소수지 C-88AXP의 열적 거동을 평가하기 위해 TG/DTA 분석을 수행하였다. 일반적으로 ETFE 소재의 유리전이 온도(Tg)는 약 75~85°C 범위로 보고되나, 본 시험에서 사용된 C-88AXP는 고온용 특성이 강화된 등급으로, 해당 온도 구간에서는 뚜렷한 열적 전이가 관찰되지 않았다.

한편, DTA 곡선에서는 약 249.4°C에서 뚜렷한 흡열 피크가 나타났다(Fig. 2), 이는 재료의 결정성 구조가 완전히 용융되기 전, 일정 부분 구조가 해체되거나 연화되는 softening 또는 사전 용융(pre-melting) 과정에 기인한 것으로 판단된다.

또한 25~350°C 범위 내에서의 질량 변화는 0.05% 미만으로 나타났다(Fig. 2), 이는 C-88AXP 소재가 고온에서도 안정적인 열적 특성을 나타냄을 의미한다. 이러한 특성은 고온 사출 성형 공정에 본 소재를 적용하는 데 있어 구조적으로 안정적인 것으로 분석되었다.

330°C에서 열처리한 ETFE 기반 불소수지의 FT-IR 분석 결과, 표면 색상 변화에 따라 상이한 스펙트럼 특성이 나타났으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

열처리 후에도 흰색을 유지한 부위에서는 1,130~1,270 cm^{-1} 의 C-F stretching과 970~1,100 cm^{-1} 의 C-C 및 C-H 진동 등 ETFE

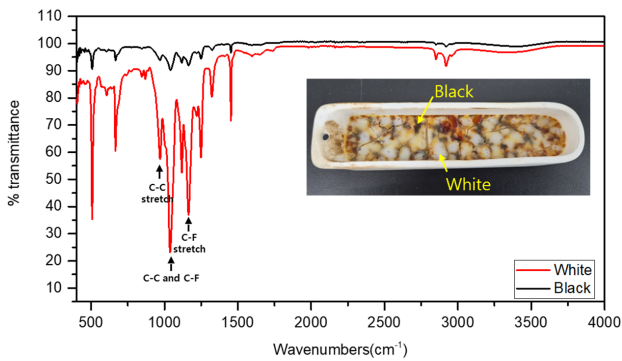


Fig. 3 FT-IR spectra of ETFE-based fluoropolymer after 330°C heat treatment

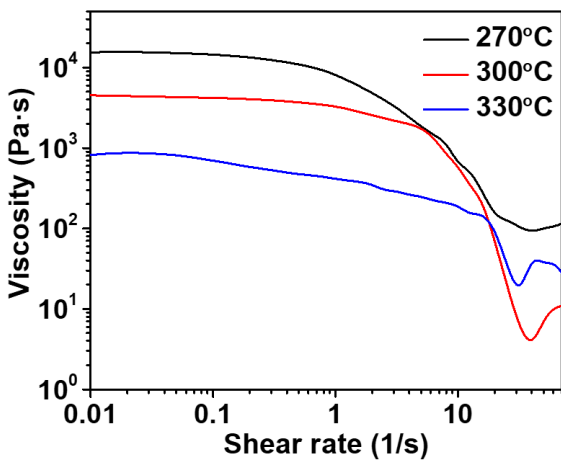


Fig. 4 Viscosity-shear rate curves of ETFE-based fluoropolymer at 270°C, 300°C, and 330°C

고유 피크가 명확하게 유지되었고, 전반적인 transmittance도 75~85% 수준으로 높게 나타났다. 이는 결정성이 보존된 고분자 사슬 구조가 유지되고 있으며, 열적 손상이 미미함을 나타낸다.

겉게 변한 부위에서는 전 영역에서 transmittance 감소와 피크 broadening이 관찰되었다. 특히, 1,130 cm^{-1} 부근의 peak는 흰색 시료보다 약 24% 낮게 관찰되었으며, 980~1,000 cm^{-1} 구간에서도 약 15%의 흡수 증가가 확인되었다. 이는 C-F 및 C-C 결합의 열적 분해 및 비정질화를 나타낸다.

Peak 면적 비교 결과, 흰색 부위는 각 진동 영역에서 검은 부위보다 큰 값을 나타내었다. C-F 진동의 면적은 흰색 부위가 4,786.1, 검은 부위가 646.4 였으며, C-C- 및 C-H 진동도 흰색 부위가 5,448.1, 검은 부위가 765.6으로 확인되었다. 이러한 차이는 흰색 부위가 상대적으로 구조 손상이 적고, 주요 작용기가 잘 유지되고 있음을 보여준다. ETFE가 고온 열처리 시 구조적 안정성을 일부 상실할 수 있음을 나타내며, 특히 불소계 결합이 약한 영역에서 우선적으로 열화가 발생할 수 있음을 나타낸다^[9]. 또한 흰색에서 검은색으로의 색상 변화는 고온에서의 열분해로 인한 탄소 잔류물

형성으로 해석된다. 따라서 330°C 이상의 고온 조건에서 가공할 경우, 열적 영향을 최소화하기 위한 공정 제어가 필요하다.

ETFE 기반 불소수지의 고온 가공성 평가를 위해 270°C, 300°C, 330°C에서의 점도-전단속도 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 전체 온도 구간에서 공통적으로 전단 박화(shear thinning) 거동이 관찰되었으며, 온도 상승에 따라 전단 점도가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 일반적인 고분자 유변학 특성과 일치하며, 고온에서의 사출 성형에 유리한 유동 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

270°C 조건에서는 0.01~1 s^{-1} 구간에서 점도가 10^4 Pa·s 수준으로 유지되다가 고속 영역에서 급격히 저하되는 반면, 330°C 조건에서는 전체 전단속도 영역에서 10^3 Pa·s 이하로 낮은 점도 값을 나타냈다. 특히 300°C와 330°C 사이에서는 온도 증가에 따른 점도 저하가 급격히 나타나며, 이는 공정 조건에 따라 유동성 확보와 열적 안정성 간의 균형을 고려한 최적 가공 조건 설정이 필요함을 의미한다.

또한, 세 온도 조건 모두에서 shear rate가 약 20 s^{-1} 이상의 고속 전단 영역에 진입할 때 점도의 반동이 관찰되었으며, 이는 전단 농화(shear thickening) 경향을 나타낸다. 특히 300°C에서는 이러한 농화 거동이 보다 빠르게 시작되는 특성이 관찰되었다. 전단 농화는 분자 간의 상호작용, 결정성 구조의 부분적 회복 혹은 유동 경계 내 불균일성 등에 기인할 수 있으며, 고속 유동이 요구되는 사출 성형 공정에서 유동 안정성에 영향을 줄 수 있다.

이러한 점도 특성은 동일 온도 조건에서 수행한 사출 성형 실험과의 비교를 통해, 소재의 점도 거동과 실제 가공성과의 상관관계를 정량적으로 비교하는 데 유용하다. 특히 점도 특성은 성형품의 충전성, 표면 품질, 변형 발생 등과 밀접하게 관련되므로, 사출 성형 실험 시 해당 온도의 결과와 같이 비교 하였다.

사출 성형 조건에 따른 가공성과 형상 품질을 평가하기 위해 노즐부 온도 270°C, 300°C, 330°C에서 인장시험편 성형하였으며, 이에 대한 샘플 모습과 결합 부분을 Fig. 5에 나타내었다. 각 온도 조건에 따라 유동성 및 성형성 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 이는 앞선 점도 및 TG/DTA, FT-IR 분석 결과와 일관된 경향을 보였다.

270°C 조건에서는 점도가 높아 충전성이 저하되었으며, 이로 인해 시편 내 수축 및 변형이 발생하였다. Fig. 5(a)에서 확인되는 바와 같이, 시편은 중심부가 함몰되고 휘어진 형태로 나타났으며, 금형 충전 불완전 및 응고 수축에 의한 형상 왜곡이 주요 원인으로 판단된다. 또한 샘플의 형상 완결성이 부족하여 인장시험을 진행할 수 없었다.

300°C 조건에서는 가장 안정적인 성형 결과가 얻어졌다. 시편은 몰드 내 형상을 정밀하게 충전하였으며, 노즐부 게이트 처리도 수월하여 규격에 부합하는 인장시험편이 확보되었다. 육안상 수축,

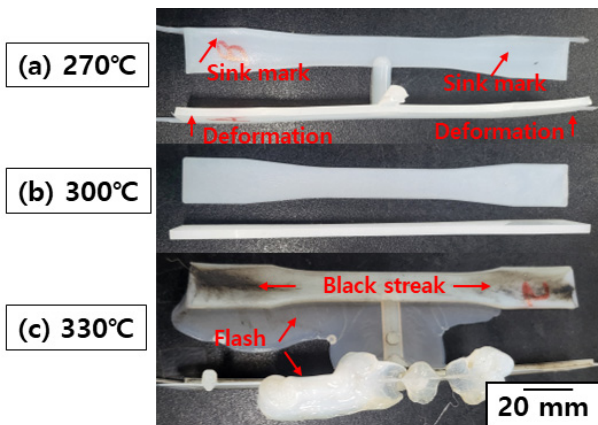


Fig. 5 Injection-molded tensile specimens at nozzle temperature : (a) 270°C, (b) 300°C, and (c) 330°C

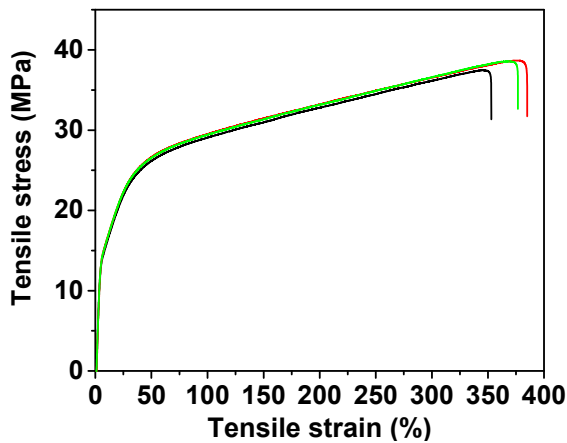


Fig. 6 Injection-molded nozzle temperature at 300°C sample tensile strength

변형, 표면 결함이 관찰되지 않았으며, 앞서 점도 특성에서 나타난 적절한 유동성과 열 안정성의 균형이 실제 성형 품질로도 확인되었다. 해당 조건에서 성형된 시편의 인장시험 결과, 평균 최대 인장 하중은 38.2 ± 0.7 MPa로 나타났으며(Fig. 6), 이는 기본 소재 물 성치에 부합하는 수준이다. 파단 형태 또한 일관되었으며, 시편 간 물성 편차가 적어 공정 안정성 역시 확보된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 300°C 조건이 유동성, 성형성, 물성 안정성 측면에서 균형을 갖춘 조건임을 보여준다.

반면, 330°C 조건에서는 점도가 과도하게 저하되면서 재료가 몰드 외부로 흘러나오는 현상이 발생하였으며, 일부 시편 표면에서는 탄화된 흔적도 관찰되었다. 이는 과도한 유동성으로 인한 금형 내부 압력 제어 실패와 열 열화 가능성을 시사하며, 고온 성형 시의 공정 안정성 한계를 보여준다. 또한 시편의 형상 완결성이 부족하고 표면 탄화가 심하여 인장시험은 생략하였다.

이러한 결과는 앞선 유변학적 분석에서 확인된 전단 박화와 점도 저하 특성과도 일치하며, 사출 성형 공정에서 적정 성형 온도

범위의 중요성을 강조한다. 특히 고속 사출이 아닌 일반 속도 조건 하에서는 300°C가 유동성, 열 안정성, 성형품 품질 확보 측면에서 가장 적절한 조건으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 사출 성형 공정 적용을 위한 ETFE 기반 불소수지(C-88AXP)의 열적 안정성, 구조 변화, 유변학적 특성 및 실제 사출 성형성과를 분석하였다. TG/DTA 분석 결과, 249.4°C에서의 흡열 반응은 결정성 구조의 연화 또는 사전 용융 현상에 기인한 것으로 해석되었으며, 350°C까지의 질량 손실이 0.05% 미만으로 나타나 소재의 우수한 열적 안정성을 확인하였다.

330°C에서의 FT-IR 분석에서는 표면 색상 변화와 함께 피크 broadening 및 transmittance 저하가 나타났으며, 이는 고온 노출 시 구조적 열화가 진행될 수 있음을 시사하였다. 이러한 결과는 고온에서의 가공 시 열 손상 관리가 필요함을 보여준다.

점도 분석에서는 전형적인 전단 박화(shear thinning) 거동과 함께, 고속 전단 영역에서 전단 농화(shear thickening) 경향이 나타났다. 특히 300°C 조건에서 박화가 조기에 발생하는 경향이 관찰되었으며, 이는 고속 유동 조건에서 유동 안정성에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 전단 박화 및 점도 저하 경향은 사출 성형 공정 중 충전성과 형상 품질에 직접적인 영향을 미치는 요소로 분석되었다.

사출 성형 결과, 300°C 조건에서 형상 안정성과 기계적 특성 모두 양호한 시편이 확보되었으며, 인장시험 결과 평균 최대 인장 강도 38.2 ± 0.7 MPa로 소재 기준 물성과 부합하였다. 반면 270°C에서는 충전 부족 및 수축, 330°C에서는 과도한 유동 및 표면 탄화로 인해 성형성이 저하되었다.

결과적으로, C-88AXP 불소수지의 사출 성형 조건 중 노출부 온도 300°C는 열 안정성, 유동성, 성형성, 물성 확보 측면에서 가장 균형 잡힌 조건으로 판단되며, 표준 사출 성형 속도 범위에서 안정적인 공정 조건으로 활용될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부 중소기업기술혁신개발사업(시장확대형)의 지원에 의한 연구임[RS-2023-00281217].

References

- [1] Ebnesajjad, S., 2015, Fluoroplastics, Volume 1: Non-Melt Processible Fluoroplastics(2nd Edition), William Andrew,

- Elsevier, USA, <https://doi.org/10.1016/C2012-0-05997-2>.
- [6] Harper, C. A., 2006, Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Properties and Performance (1st Edition), McGraw-Hill, New York.
- [7] Hougham, G., Cassidy, P. E., Johns, K., Davidson, T., 1999, Fluoropolymers 2 : Properties, Springer, New York, <https://doi.org/10.1007/b114560>.
- [8] Ebnesajjad, S., 2002, Fluoroplastics, Volume 2: Melt Processible Fluoroplastics(1st Edition), William Andrew, Elsevier, USA.
- [9] Extrand, C. W., 2003, The Use of Fluoropolymers to Protect Semiconductor Materials, J. of Fluorine Chem., 122:1 121-124, [https://doi.org/10.1016/S0022-1139\(03\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1139(03)00103-9).
- [10] Ebnesajjad, S., 2013, Introduction to Fluoropolymers, William Andrew, Elsevier, USA, <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06184-4>.
- [11] Hu, J., Chen, W. J., Luo, R., Zhao, B., Sun, R., 2014, Uniaxial Cyclic Tensile Mechanical Properties of Ethylene Tetrafluoroethylene (ETFE) Foils, Construction & Building Materials, 63 311-319, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.075>.
- [12] Lopez, G., 2021, High-Performance Polymers for Aeronautic Wires Insulation: Current Uses and Future Prospects, Recent Prog. Mater., 3:1 005, <http://doi.org/10.21926/rpm.2101005>.
- [13] Kotera, S., Yamaguchi, M., 2014, Rheological Characterization on Thermal Degradation of Ethylene-Tetrafluoroethylene Copolymer, J. Fluor. Chem., 166 117-121, <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2014.07.020>.
- [14] Chen, X.-Y., Yuan, W.-Z., Zhao, J., Yang, L., Li, H., Li, L., Zhang, Y., 2012, Thermal-Mechanical Stability of Ethylene Tetrafluoroethylene Alternating Copolymer, and Modification Thereof, J. Polym. Res., 19 9820, <https://doi.org/10.1007/s10965-011-9820-2>.
- [15] Lamnatou, C., Moreno, A., Chemisana, D., Reitsma, F., Clariá, F., 2018, Ethylene Tetrafluoroethylene (ETFE) Material: Critical Issues and Applications With Emphasis on Buildings, Renew. Sustain. Energy Rev., 82:3 2186-2201, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.072>.
- [16] Surholt, F., Uhlemann, J., Stranghöner, N., 2022, Temperature and Strain Rate Effects on the Uniaxial Tensile Behaviour of ETFE Foils, Polymers, 14:15 3156, <https://doi.org/10.3390/polym14153156>.
- [17] Colin, X., Verdu, J., 2006, Polymer Degradation During Processing, C. R. Chimie, 9:11-12 1380-1395, <https://doi.org/10.1016/j.crci.2006.06.004>.
- [18] Choi, M. S., 2012, Influence of Process Parameters on the Breathable Film Strength of Polymer Extrusion, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 21:4 625-632, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.4.625>.
- [19] Ha, Y. W., Chong, T. H., Lee, B. J., 2002, Injection Moulding of Polyetherimide Axi-Symmetric Elements, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 11:6 68-74, <<https://koreascience.kr/article/JAKO200211921476061.view?orgId=anpor&hide=br eadcrumb,journalinfo>>.



Deokhyun Han

Senior Researcher in Institute for Advanced Engineering. His research interest is Materials Process.
E-mail: hankani@iae.re.kr



Sangmin Yoon

Senior Researcher in Institute for Advanced Engineering. His research interest is Materials Process.
E-mail: sm.yoon@iae.re.kr



Sungjung Lee

CEO in Samil Frontech. His research interest is Polymer Manufacturing.
E-mail: sjlee@superflon.com



Youngkyun Kim

Principal Researcher in Institute for Advanced Engineering. His research interest is Materials Process.
E-mail: kyk@iae.re.kr