

고전압 전력케이블 절연체 응용을 위한 임팩트 폴리프로필렌 기반 3성분계 블렌드의 기계적 및 전기적 특성에 대한 연구

이성환*¹ · 김도균*¹ · 홍신기* · 한진아* · 한세원* · 이대호*[†] · 유승건*^{***†}

Mechanical and Electrical Properties of Impact Polypropylene Ternary Blends for High-Voltage Power Cable Insulation Applications

Seong Hwan Lee*¹, Do-Kyun Kim*¹, Shin-Ki Hong*, Jin Ah Han*, Se Won Han*,
Dae Ho Lee*[†], Seunggun Yu*^{***†}

ABSTRACT: Polypropylene (PP) has been received great attention as a next-generation high-voltage power cable insulation material that can replace cross-linked polyethylene (XLPE). However, the PP cannot be used alone as an insulation material because of its high elastic modulus and vulnerability to impact, and thus is mainly utilized as a form of a copolymer with rubber phases included in the polymerization step. In this paper, a soft PP-based blend was prepared through melt-mixing of impact PP, polyolefin elastomer, and propylene-ethylene random copolymer. The elastic modulus and impact strength of the blend could properly be decreased or increased, respectively, by introducing elastomeric phases. Furthermore, the blends showed a high storage modulus even at a temperature of 100°C or higher at which the XLPE loses its mechanical properties. In addition, the blend was found to be effective in suppressing the space charge compared to the pristine PP as well as XLPE.

초 록: 폴리프로필렌은 가교폴리에틸렌을 대체할 수 있는 차세대 고전압 전력케이블 절연체로서 큰 주목을 받고 있다. 하지만, 폴리프로필렌은 탄성률이 크고 충격에 취약하여 단독으로 절연체로 사용될 수 없고, 중합 단계에서 고무상이 혼재된 공중합체 형태로 주로 활용된다. 본 논문에서는 내충격성 폴리프로필렌, 폴리올레핀 탄성체, 그리고 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체의 용융 혼합을 통해 연성의 폴리프로필렌계 블렌드를 제조하였다. 폴리프로필렌 기재를 유지하면서도 다량의 탄성체 상들을 지니는 적정 비율의 3성분계 블렌드를 개발하였고, 탄성체 상들의 도입에 의해 폴리프로필렌의 탄성률을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 25도 및 -40도에서의 충격강도 및 연신율을 크게 증가시킬 수 있었다. 또한, 동적기계분석을 통해 가교폴리에틸렌이 기계적 물성을 손실하는 100도 이상의 온도에서도 3성분계 블렌드는 고체 형태를 유지할 수 있는 범위의 저장탄성률을 나타내었다. 뿐만 아니라, 3성분계 블렌드는 30 kV/mm의 직류 전압 인가 하에서 공간전하를 효과적으로 억제시키는데 유리한 것으로 나타났다.

Key Words: 폴리프로필렌(Polypropylene), 절연재료(Insulation materials), 블렌드(Blend), 충격강도(Impact strength), 공간전하(Space charge)

Received 27 May 2022, received in revised form 15 June 2022, accepted 17 June 2022

*Insulation Materials Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Electro-functional Materials Engineering, University of Science and Technology (UST)

[†]Corresponding authors (E-mail: neokatari@keri.re.kr, viola@keri.re.kr)

¹These authors are equally contributed.

1. 서 론

인류 생활 수준의 급격한 향상에 따라 전기 에너지 수요는 세계적으로 2050년까지 지속적으로 증가할 전망이다. 원활한 전력 공급을 위하여 신재생에너지의 개발과 국가 간 차세대 전력망 구축을 위한 송배전 기술들이 다시 큰 주목을 받고 있다[1-3]. 따라서, 전력 수요를 충족시키기 위한 용량 증대와 국가 간 장거리 전력 전송을 위해 고압 직류송전 케이블(High Voltage Direct Current (HVDC) power cable)의 도입이 필요한 실정이다[4,5]. 이러한 전력 케이블의 송전 용량 증가를 위해서는 더욱 높은 전압의 인가가 요구되며, 도체부의 저항에 의해 발생하는 열의 증가에 의해 케이블의 작동 온도가 증가되고 해당 온도 하에서 적절한 물성을 지니는 절연재료의 개발이 필요하다.

지난 수십 년 간, 기계적 유연성 및 전기적 내구성 뿐만 아니라 우수한 경제성과 가공성을 지니는 가교폴리에틸렌은 고전압 전력 케이블용 절연재료로서 널리 사용되어왔다[6-8]. 하지만, 이러한 가교폴리에틸렌의 최대 허용온도는 90도 이하로 제한되며, 따라서 용량 증대를 요구하는 차세대 전력 케이블의 절연재료로서 사용하기에는 한계를 지닌다[9]. 뿐만 아니라, 가교폴리에틸렌은 화학적으로 가교된 구조를 지니기 때문에 사용연한의 만료 또는 예기치 못한 파괴 등에 의해 수명이 다한 이후에 재사용이 불가능하다는 단점을 지닌다[10,11].

폴리프로필렌은 기계적, 전기적, 열적 특성이 매우 뛰어나 뿐만 아니라 별도의 가교공정없이 제조가 가능하기 때문에 재활용이 가능하다는 장점을 지니며, 가교폴리에틸렌을 대체할 수 있는 차세대 친환경 고전압 전력케이블용 절연재료로서 큰 주목을 받고 있다[12-15]. 하지만, 순수한 폴리프로필렌은 고유의 강직성 및 매우 불량한 내충격성 때문에 단독으로 케이블 절연소재로서 사용되기 어렵다[16]. 따라서 연성의 탄성체들을 폴리프로필렌 상 내에 도입하여 유연성을 부여하기 위한 연구들이 학계 및 산업계에서 다양하게 수행되어왔다. 대표적으로, 중합 단계에서 프로필렌 및 에틸렌 단량체들을 동시 중합하여 폴리프로필렌 기재 내에 에틸렌-프로필렌 고무상을 매우 고르게 분산시킨 반응형 폴리프로필렌은 탄성률을 효과적으로 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라, 적절한 연신율을 지니므로써 실제 HVDC 케이블용 소재로서 주목을 받고 있다[17,18].

본 논문에서는 범용 폴리프로필렌 소재들 간 단순 용융 혼합 공정을 통해 유연성이 크게 개선된 전력 케이블용 폴리프로필렌 절연재료의 개발에 대해 보고한다. 이를 위해, 내충격성 폴리프로필렌, 폴리올레핀 탄성체, 그리고 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체를 용융 혼합하여 3성분계의 폴리프로필렌계 블렌드를 제조하였고, 이의 인장 특성(인장강도, 탄성률, 연신율), 온도에 따른 인장 특성 및 내충격성을 평가하였고 순수 폴리프로필렌 및 가교폴리에틸렌과 이

를 비교하였다. 또한, 고온에서의 신뢰성을 확인하기 위해 동적기계분석을 수행하였고, 고전압 하에서의 전하 축적 거동을 순수 폴리프로필렌 및 가교폴리에틸렌과 비교하여 고찰하였다.

2. 실 험

2.1 시편 준비

주어진 비율의 내충격성 폴리프로필렌(B330, SK Chemical), 폴리올레핀 탄성체(LC170, LG Chemical), 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체(Vistamaxx3000, Exxonmobil Chemical)의 펠렛을 200도로 예열된 배치 타입 믹서(W50EHT+ Plastograph EC, Brabender GmbH)에 투입한 후 15분 간 60 rpm으로 용융 혼합하여, 내충격성 폴리프로필렌/폴리올레핀 탄성체/프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체의 3성분계 블렌드를 제조하였다. 제조된 3성분계 블렌드는 200도로 예열된 프레스에서 5분간 15 MPa의 압력으로 성형 후 10도로 냉각된 프레스로 옮겨 15 MPa의 압력으로 가압하여 시트 형태의 시편을 제조하였다. 각 원료의 배합 비율에 따라서 시편의 이름을 결정하였으며, 예를 들어 내충격성 폴리프로필렌 60 wt%, 폴리올레핀 탄성체 30 wt%, 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체 10 wt%의 경우 631로 명명하였다. 비교를 위해, 가교폴리에틸렌은 저밀도폴리에틸렌을 다이키밀퍼옥사이드과 용융 혼합 후 130도에서 5분간 15 MPa의 압력으로 가열하여 가교시키는 것을 통해 얻어졌다. 파단면의 분석을 위해, 각 시편은 액체 질소 내에 일정 시간 동안 잠입하여 냉각 후 파단되고, 헵탄으로 그 표면을 에칭하여 폴리올레핀 탄성체 분산상들의 존재를 확인하였다.

2.2 특성 평가

블렌드 시편들의 인장강도, 탄성률, 연신율을 포함하는 인장 특성은 만능재료시험기(AGS-X, Shimadzu)를 사용하여 30 mm/min의 속도로 측정되었고, 20도 및 -40도에서의 IZOD 충격강도는 충격강도시험기(QM700L, QMESYS)를 사용하여 측정되었다. 각 시편들의 파단면은 전계주사현미경(S4800-HITACHI, HITACHI)을 사용하여 분석되었고, 온도에 따른 인장 특성은 만능재료시험기(WL2100, WITHLAB)를 사용하여 측정되었다. 온도에 따른 저장탄성률 및 손실계수는 동적기계분석기(Q80, TA Instruments)를 사용하여 -150도에서 약 130도까지 1 Hz의 주파수에서 측정되었다. 공간전하 분포는 펄스정전용력법을 통해 공간전하측정기(NISQUARE)를 사용하여 30 kV/mm의 전계 하에서 90분의 충전 및 10분의 방전 시간을 가지고 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

전력케이블에 사용되는 고분자 절연재료는 압출 가공 후

원활한 와인딩 뿐만 아니라 용이한 설치 작업을 위해 유연성을 지녀야 하기 때문에, 우수한 연신율과 낮은 탄성률을 지니는 것이 요구된다[19]. 따라서, 우리는 탄성체 상들을 적절히 배합한 폴리프로필렌 다성분계 블렌드를 제조하여, 폴리프로필렌의 강성을 줄이고 유연성을 유지할 수 있는 배합에 대해 연구하였다. 이를 위해, 에틸렌-프로필렌 고무 분산상을 지니는 내충격성 폴리프로필렌을 기재로써 활용하여, 에틸렌과 옥텐 간 공중합체로 구성된 폴리올레핀 탄성체와 에틸렌이 폴리프로필렌 내 랜덤하게 분포하는 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체를 각각 탄성체 상으로써 혼합한 블렌드를 제조하였고 이의 인장 특성을 평가하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 순수 폴리프로필렌은 약 31 MPa, 1059 MPa의 높은 인장강도 및 탄성률을 나타내었고, 급냉 조건 하에서 냉각되어 약 847%의 높은 연신율을 나타내었다. 반면, 가교폴리에틸렌은 약 10 MPa, 38 MPa의 매우 낮은 인장강도 및 탄성률과 약 539%의 연신율을 나타내었다. 이러한 폴리프로필렌의 높은 탄성률은 전력 케이블용 절연소재로써 사용되기에는 매우 높기 때문에, 이를 낮추기 위해 내충격성이 개선된 내충격성 폴리프로필렌을 기재로 사용하여, 이에 대해 폴리올레핀 탄성체와 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체를 탄성체를 부여하기 위한 이중의

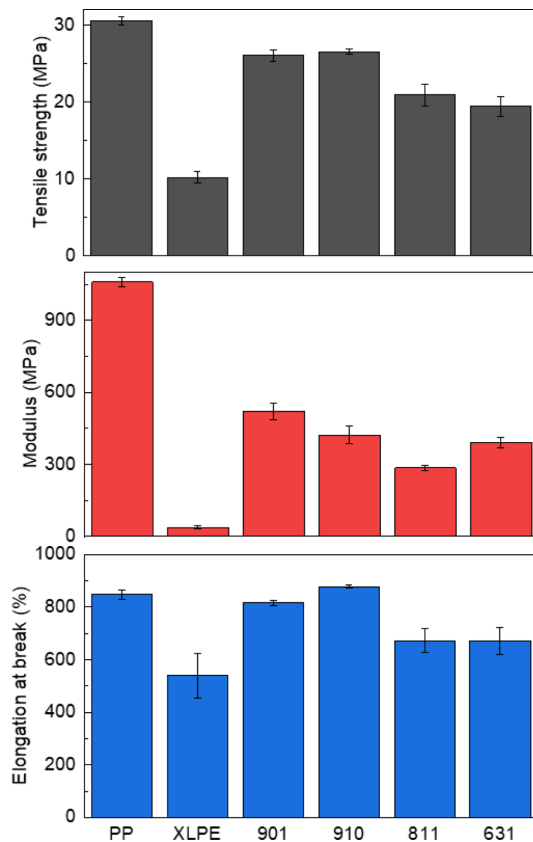


Fig. 1. Tensile strength, modulus, and elongation at break values of the PP, XLPE, 901, 910, 811, and 631 blend samples, respectively

상으로써 도입하였다. 폴리올레핀 탄성체 또는 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체가 내충격성 폴리프로필렌에 대해 10 wt% 혼합되었을 때, 인장강도는 일부 감소하지만, 연신율은 유지하는 반면, 탄성률을 약 550% 이하로 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 폴리올레핀 탄성체와 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체가 각각 10 wt%씩 동시에 혼합되었을 때, 탄성률이 감소하는 반면, 인장강도와 연신율이 모두 저하되었다. 나아가, 내충격성 폴리프로필렌의 함량을 60 wt%까지 감소시키고 폴리올레핀 탄성체를 30 wt%, 그리고 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체를 10 wt% 혼합하였을 때, 이들의 인장강도는 약 19 MPa, 탄성률은 약 390 MPa, 그리고 연신율은 약 670%를 나타내었다.

옥외에 설치되는 전력케이블은 외부 환경에 노출되기 쉽기 때문에, 예기치 못한 외부 물리적 충격에 대한 내충격성을 보유하여야 한다. 뿐만 아니라, 전력케이블이 설치되는 지역적 특성에 의해 매우 낮은 온도의 환경 하에서도 적절한 내충격성이 유지되어야 한다[20]. 따라서, 우리는 블렌드 시편들의 25도 및 -40도에서의 IZOD 내충격성을 평가하였다(Fig. 2).

잘 알려진 것처럼 매우 불량한 내충격성을 지니는 순수 폴리프로필렌의 25도에서의 충격강도는 약 2 kJ/m²로 나타났다. 반면, 가교폴리에틸렌은 매우 높은 내충격성을 지니기 때문에 해당 기기의 범위 내에서 충격강도의 측정이 불

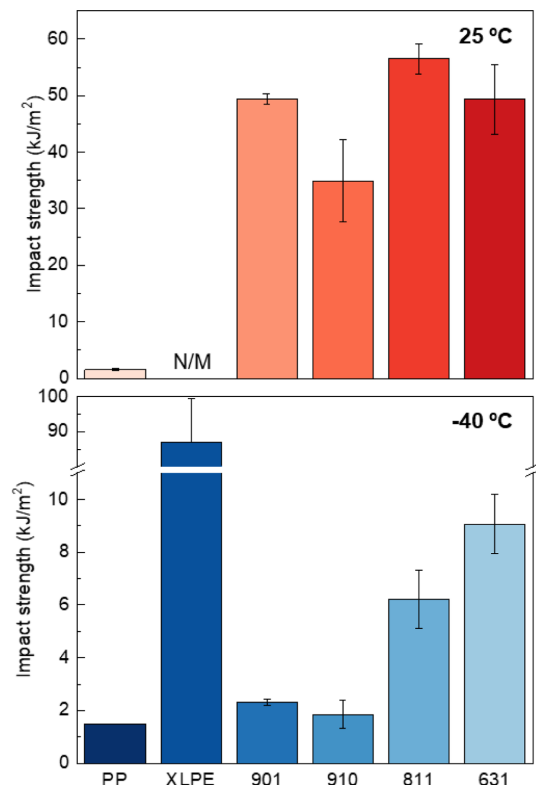


Fig. 2. IZOD impact strength values at 25 and -40 °C of the PP, XLPE, 901, 910, 811, and 631 blend samples, respectively

가능하였다. 한편, 내충격성 폴리프로필렌에 대해 프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체가 10 wt% 포함된 블렌드의 충격강도는 폴리올레핀 탄성체가 포함된 결과보다 높게 나타났고, 내충격성 폴리프로필렌의 함량을 80 wt%로 감소시켰을 때 그 충격강도는 약 56 kJ/m²까지 증가하였다. 하지만, 내충격성 폴리프로필렌을 60 wt%까지 더욱 감소시키고 폴리올레핀 탄성체를 30 wt%까지 증가시킨 블렌드의 충격강도는 증가된 편차를 가지고 약간 감소된 약 50 kJ/m²의 충격강도를 나타내었다.

이들의 -40도에서의 충격강도는 전체적으로 20도에서 측정된 그것보다 감소하였으며, 이는 고분자 분자쇄의 강성 증가에 기인한다. 가교폴리에틸렌의 충격강도는 -40도에서 측정이 가능하였고, 이는 약 87 kJ/m²의 값을 나타내며, 가교폴리에틸렌이 매우 낮은 온도에서도 유연성을 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 반면, 내충격성 폴리프로필렌에 탄성체 상이 10 wt% 혼합된 블렌드는 그 상의 종류에 상관없이 약 2 kJ/m² 수준의 매우 낮은 충격강도를 나타내었다. 내충격성 폴리프로필렌의 함량을 감소시키기에 따라 80 wt%일 때 그 값은 약 6 kJ/m²까지 증가하였고, 약 60 wt%까지 감소시켰을 때 충격강도는 약 9 kJ/m²까지 증가하는 것을 확인하였다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이, 내충격성 폴리프로필렌은 폴리프로필렌 기재 내에 수백 나노미터 크기의 에틸렌-프로필렌 고무상(Ethylene-propylene rubber, EPR)이 분산된 모폴로지를 나타내며, 이러한 고무 분산상에 의해 상온에서의 우수한 충격강도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이에 대해 폴리올레핀 탄성체 및 에틸렌-프로필렌 랜덤공중합체가 각각 30 wt%, 10 wt%의 함량을 가지고 동시에 혼합되었을 때, 폴리프로필렌 기재의 부피 분율이 감소하고 탄성체 상들의 분율이 증가하여 폴리프로필렌 기재가 간신히

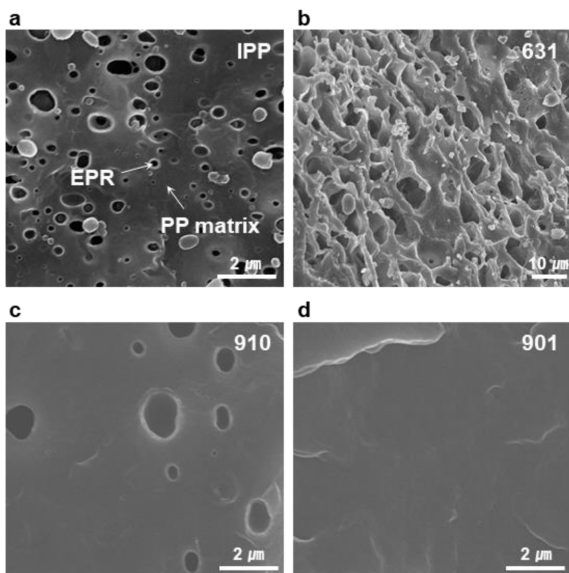


Fig. 3. SEM images of (a) impact-modified PP (IPP), (b) 631, (c) 910, and (d) 901 blend samples

유지될 수 있는 것으로 나타난다. 반면, 폴리올레핀 탄성체 또는 에틸렌-프로필렌 랜덤공중합체를 10 wt% 지니는 블렌드 시편의 경우, 충격을 흡수하기 위한 탄성체들이 적절하게 존재하지 않기 때문에 저온에서 불량한 충격강도를 나타내는 것으로 보여진다.

상기의 결과들로부터, 30 wt%의 폴리올레핀 탄성체 및 10 wt%의 에틸렌-프로필렌 랜덤공중합체를 가지는 3성분계 블렌드 시편이 적절한 인장 특성과 저온에서의 우수한 내충격성을 나타내는 것으로 판단되어, 이의 온도에 따른 기계적 특성을 순수 폴리프로필렌 및 가교폴리에틸렌과 비교하여 추가적으로 평가하였다.

-40도, -20도 그리고 25도에서 측정된 인장강도, 탄성률 및 연신율을 Fig. 4에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 순수 폴리프로필렌의 인장강도 및 탄성률은 25도에서 보다 낮은 온도에서 증가된 값들을 나타내었고, 가교폴리에틸렌과 블렌드 시편의 값들도 마찬가지로 온도 감소에 따라 증가하였다. -40도에서, 순수 폴리프로필렌은 약 1500 MPa의 매우 높은 탄성률을 나타내었고, 가교폴리에틸렌은 약 700 MPa, 그리고 블렌드 시편은 약 1200 MPa으로 순수 폴리프로필렌보다는 낮은 탄성률을 나타내었다. 한편, 상온에서 약 847%의 연신율을 나타내는 순수 폴리프로필렌은 그 온도가 -20도까지 감소하였을 때 약 5% 수준으로 급격한 감소를 나타내었고, 이는 약 10도 근처의 유리전이온도 이하에서의 운동성 감소에 기인하는 것으로 보

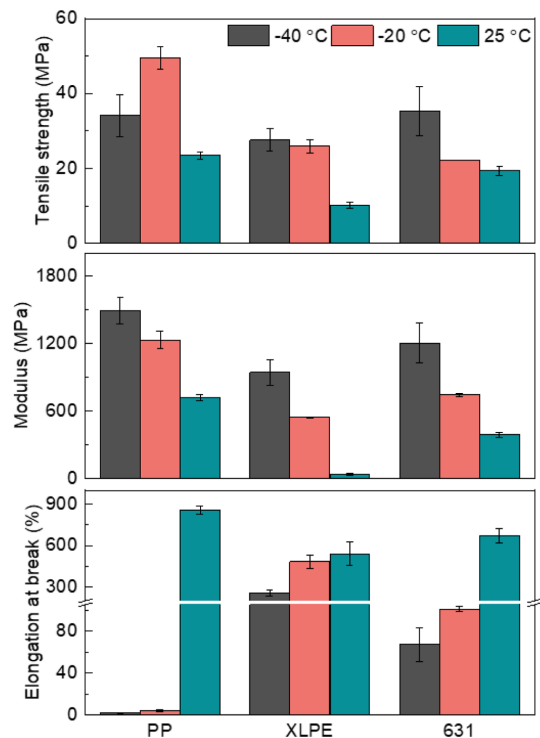


Fig. 4. Tensile strength, modulus, and elongation at break values at 25, -20 and -40 °C of PP, XLPE, and 631 blend sample

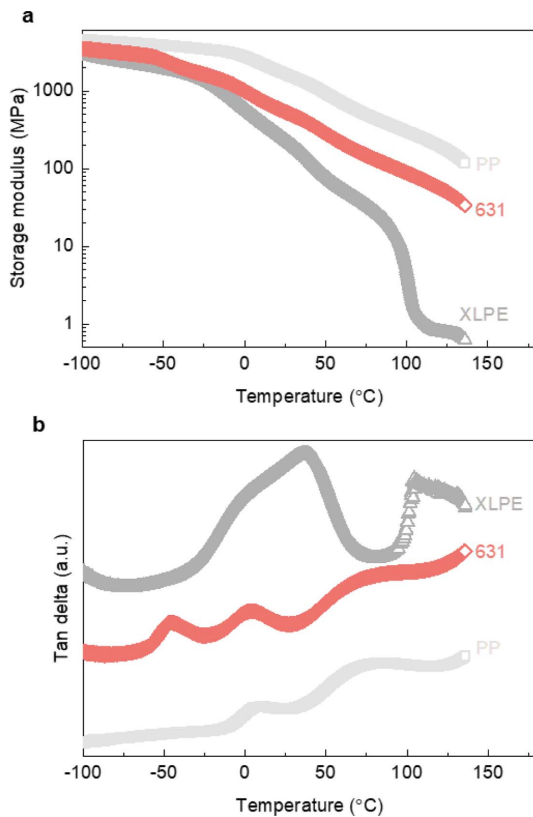


Fig. 5. (a) Storage modulus and (b) tan delta of the PP, XLPE, and 631 blend sample as a function of temperature

여진다[21]. 반면, 가교폴리에틸렌은 -40도까지의 온도 감소에도 불구하고 약 300% 수준의 매우 뛰어난 연신율을 나타내었다. 한편, 블렌드 시편은 폴리프로필렌 기재로 구성되어 있음에도 불구하고 -40도에서 약 70%에 가까운 연신율을 나타내며, 비록 가교폴리에틸렌에 비해 낮은 값이지만 순수 폴리프로필렌에 비하여 월등히 증가한 값으로써, 탄성체 상들의 존재가 폴리프로필렌의 저온 특성 개선에 효과적임을 나타내었다.

폴리프로필렌을 기반으로 하는 고전압 전력케이블의 상시운전온도는 110도에 달하는 것으로 알려져 있다[22]. 따라서, 해당 절연소재들의 고온에서의 기계적 특성을 확인하는 것은 신뢰성 확보를 위해 중요한 역할을 한다. 이를 위해, 우리는 동적기계시험을 통하여, 시편들의 온도에 따른 저장 탄성률 및 손실 계수의 변화를 확인하였다(Fig. 5).

가장 큰 강직도를 가지는 순수 폴리프로필렌은 -100도에서 130도까지 모든 온도 영역에서 가장 큰 저장탄성률을 나타내었고, 130도의 온도에서도 약 100 MPa의 매우 높은 저장탄성률을 나타내었다. 반면, 연성의 가교폴리에틸렌은 온도 증가에 따라 저장탄성률이 급격히 하락하여, 약 100도의 온도에서 그 값이 1 MPa까지 감소하였으며, 즉 가교폴리에틸렌을 절연소재로서 사용하였을 때, 약 100도 이상에서는 외형을 유지하기 힘든 것으로 보여진다. 반면, 3성분

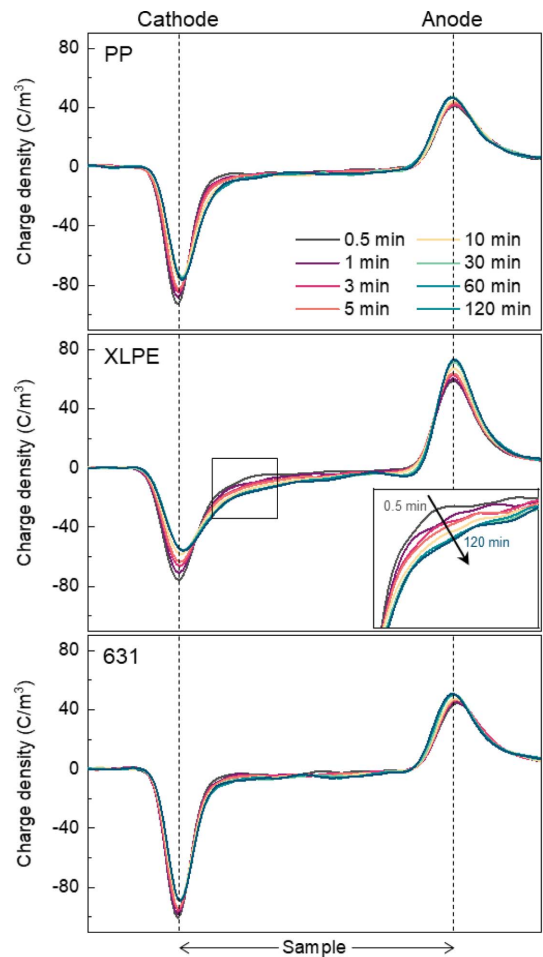


Fig. 6. Space charge distribution of PP, XLPE, and 631 blend sample

계 블렌드 시편은 전체 온도 범위 내에서 순수 폴리프로필렌과 가교폴리에틸렌 사이의 저장탄성률을 나타내며, 가교폴리에틸렌과 같은 급격한 감소없이 폴리프로필렌과 매우 유사한 기울기를 가진다. 비록, 130도의 온도에서 순수 폴리프로필렌에 비하여 감소된 저장탄성률을 나타내었으나, 여전히 약 30 MPa에 가까운 값을 나타내며, 고온에서도 기계적 특성의 유지를 위해 가교폴리에틸렌에 비해 이점을 지니는 것으로 판단된다. 각 온도 구간에서의 저장탄성률 감소 기울기의 변화는 손실계수로부터 예측되는 전이온도를 통해 비교될 수 있다. 예를 들어, 순수 폴리프로필렌의 경우, 약 10도 근처에서 유리전이온도가 나타나고, 따라서 저장탄성률의 감소 기울기 변화가 발생한다. 또한, 가교폴리에틸렌의 경우, 약 100도 근처에서 비정상적 피크 변화가 관찰되고 이는 가교폴리에틸렌의 용융에 의한 것이며, 따라서 저장탄성률이 급격히 감소되는 것을 알 수 있다. 반면, 블렌드 시편의 경우, 30 wt%에 달하는 폴리올레핀 탄성체 및 에틸렌-프로필렌 고무상의 존재에 의해, 약 -50도 근처에서의 유리전이온도가 나타나며, 그에 의해 저장탄성률

감소 기울기 변화가 나타나는 것으로 보여진다[23]. 또한, 이러한 매우 낮은 유리전이온도에 의해 블렌드 시편의 저온에서의 우수한 충격강도가 구현될 수 있는 것으로 판단된다.

전력케이블에 직류 고전압이 지속적으로 인가될 때, 절연체 내부에 공간전하가 축적되어 절연파괴가 발생할 수 있다. 이에 따라, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 각 시편들의 펄스정전용력법을 통해 30 kV/mm의 전계 하에서 충전 시 공간전하 축적 거동을 분석하였다.

순수 폴리프로필렌은 전계 하에서 상대적으로 적은 양의 공간전하가 축적되는 것을 알 수 있었고, 시간이 지남에 따라 부극성 전극 부근에 음전하가 점차 축적되어가는 것을 알 수 있었다. 반면, 가교폴리에틸렌은 전하 주입 초기부터 부극성 전극 부근에 많은 양의 음전하가 축적되었고 시간이 증가함에 따라 그 축적량이 증가할 뿐만 아니라, 중앙부 및 정극성 전극 부근에서의 이종 전하들이 발생하며 다수의 공간전하가 축적되는 것으로 나타났다. 이는 가교폴리에틸렌 내 가교부산물 등의 불순물에 의한 영향으로 보여진다. 한편, 블렌드 시편의 경우, 가교폴리에틸렌 뿐만 아니라 순수 폴리프로필렌보다 적은 양의 공간전하가 축적되는 것으로 보여지며, 시간이 지남에 따라 부극성 전극 부근에 음전하가 축적되나, 그 양은 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 폴리프로필렌에 효과적으로 유연성을 부여하기 위해 내충격성 폴리프로필렌/폴리올레핀 탄성체/프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체의 용융 혼합을 통해 탄성체 분산상들을 폴리프로필렌 기재 내에 다수 보유한 3성분계 블렌드에 대해 보고하였다. 탄성체 분산상들의 도입에 의해 폴리프로필렌의 탄성률 및 연신율이 제어될 수 있었고, 적정 비율의 폴리올레핀 탄성체/프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체를 폴리프로필렌과 혼합하는 것을 통해 25도 뿐만 아니라 -40도의 낮은 온도에서도 충격강도가 개선될 수 있음이 확인되었다. 나아가, 내충격성 폴리프로필렌/폴리올레핀 탄성체/프로필렌-에틸렌 랜덤공중합체는 0도 이하의 온도에서도 순수 폴리프로필렌에 비해 월등히 향상된 연신율을 나타내었으며, 100도 이상의 고온에서도 고체의 형태를 유지할 수 있는 고온 내구성을 나타내었다. 또한, 3성분계 블렌드는 우수한 공간전하 축적 억제 능력을 나타내었으며, 이는 3성분계 블렌드가 가교폴리에틸렌 뿐만 아니라 순수 폴리프로필렌에 비해서도 우수한 것으로 전기적 특성을 지니는 것을 의미한다. 결과적으로, 3성분계 블렌드는 가교폴리에틸렌과 비교하여 비록 유연성이 부족하지만, 고온에서 크게 개선된 기계적 안정성을 나타낼 수 있고, 나아가 공간전하의 억제에 유리한 구조를 지니므로써, 미래의 HVDC 전력케이블 절연체로써의 잠재력을 지닐 것으로 보여진다.

후 기

본 연구는 한국전기연구원 중점추진연구사업(22A01003)의 지원을 통해 수행한 연구 결과입니다.

REFERENCES

- Hertem, D.V., and Ghandhari, M., "Multi-terminal VSC HVDC for the European Supergrid: Obstacles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, 2010, pp. 3156-3163.
- Pierri, E., Binder, O., Hemdan, N.G.A., and Kurrat, M., "Challenges and Opportunities for a European HVDC Grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, 2017, pp. 427-456.
- Itiki, R., Manjrekar, M., Santo, S.G.D., and Machado, L.F.M., "Technical Feasibility of Japan-Taiwan-Philippines HVdc Interconnector to the Asia Pacific Super Grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 133, 2020, pp. 110161.
- Pourrahimi, A.M., Kumara, S., Palmieri, F., Yu, L., Lund, A., Hammarstrom, T., Hagstrand, P.-O., Scheblykin, I.G., Fabiani, D., Xu, X., and Muller, C., "Repurposing Poly(3-hexylthiophene) as a Conductivity-reducing Additive for Polyethylene-based High-voltage Insulation," *Advanced Materials*, Vol. 33, 2021, pp. 2100714.
- Long, W., and Nilsson, S., "HVDC Transmission: Yesterday and Today," *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, 2007, pp. 22-31.
- Ouyang, Y., Pourrahimi, A.M., Ostergren, I., Mellqvist, M., Anevall, J., Soroudi, A., Lund, A., Xu, X., Gkourmpis, T., Hagstrand, P.-O., and Muller, C., "Highly Insulating Thermoplastic Blends Comprising a Styrenic Copolymer for Direct-current Power Cable Insulation," *High Voltage*, Vol. 7, 2022, pp. 251-259.
- Mauri, M., Hofmann, A.I., Gomez-Heincke, D., Kumara, S., Pourrahimi, A.M., Ouyang, Y., Hagstrand, P.-O., Gkourmpis, T., Xu, X., Prieto, O., and Muller, C., "Click Chemistry-type Crosslinking of a Low-conductivity Polyethylene Copolymer Ternary Blend for Power Cable Insulation," *Polymer International*, Vol. 69, 2020, pp. 404-412.
- Vahedy, V., "Polymer Insulated High Voltage Cables," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 22, 2006, pp. 13-18.
- Su, Y., Liu, Y., and Zhong, L., "Evaluation of Voltage Endurance Characteristics for New and Aged XLPE Cable Insulation by Electrical Treeing Test," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 26, 2019, pp. 72-80.
- Meng, P., Zhou, Y., Yuan, C., Li, Q., Liu, J., Wang, H., Hu, J., and He, J., "Comparisons of Different Polypropylene Copolymers as Potential Recyclable HVDC Cable Insulation Materials," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 26, 2019, pp. 674-680.
- Yu, S., Park, C., Hong, S.M., and Koo, C.M., "Thermal Conduction Behaviors of Chemically Cross-linked High-density Polyethylenes," *Thermochemica Acta*, Vol. 583, 2014, pp. 67-71.
- Jha, J.-W., Yan, H.-D., Li, W.-K., and Dang, J.-M., "Morphology and Crystalline-phase-dependent Electrical Insulating Proper-

- ties in Tailored Polypropylene for HVDC Cables,” *Applied Physics Letters*, Vol. 109, 2016, pp. 222902.
13. Yu, S., Lee, S.H., Han, J.A., Ahn, M.S., Park, H., Han, S.W., and Lee, D.H., “Insulative Ethylene-propylene Copolymer-nanostructured Polypropylene for High-voltage Cable Insulation Applications,” *Polymer*, Vol. 202, 2020, pp. 122674.
 14. Lee, D.W., Park, S.B., and Song, J.I., “Study on Mechanical Properties and Flame Retardancy of Polypropylene Based Self-reinforced Composites,” *Composites Research*, Vol. 30, 2017, pp. 223-228.
 15. Adnan, M., Abdul-Malek, Z., Lau, K.Y., and Tahir, M., “Polypropylene-based Nanocomposites for HVDC Cable Insulation,” *IET Nanodielectrics*, Vol. 4, 2021, pp. 84-97.
 16. Hong, S.-K., Lee, S.H., Han, J.A., Ahn, M.S., Park, H., Han, S.W., Lee, D.H., and Yu, S., “Polypropylene-based Soft Ternary Blends for Power Cable Insulation at Low-to-high Temperature,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 139, 2022, pp. 51619.
 17. Lee, S.-M., Kim, D.-J., Han, I.-S., and Kim, H.-S., “Study of the Compressive Behavior of Polypropylene-low Glass Fiber Compound and Thermoplastic Olefin under High Strain Rate,” *Composites Research*, Vol. 35, 2022, pp. 38-41.
 18. Pires, M., Mauler, R.S., and Liberman, S.A., “Structural Characterization of Reactor Blends of Polypropylene and Ethylene-propylene Rubber,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 92, 2004, pp. 2155-2162.
 19. Belli, S., Perego, G., Bareggi, A., Caimi, L., Donazzi, F., and Zaccone, E., “P-lase: Breakthrough in Power Cable Systems,” 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, USA, June 2010, pp. 1-5.
 20. Zhang, L., Wu, W., Xu, Y., and Zhou, Y., “Enhancement of Low-temperature Brittleness of Isotactic Polypropylene Filled with Thermoplastic Elastomer for HVDC Cables,” 2021 Electrical Insulation Conference (EIC), Denver, USA, June 2021, pp. 301-304.
 21. Wal, A., Mulder, J.J., and Gaymans, R.J., “Fracture of Polypropylene: The Effect of Crystallinity,” *Polymer*, Vol. 39, 1998, pp. 5477-5481.
 22. Huang, X., Zhang, J., Jiang, P., and Tanaka T., “Material Progress Toward Recyclable Insulation of Power Cables Part 2: Polypropylene-based Thermoplastic Materials,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 36, 2020, pp. 8-18.
 23. Premphet, K., and Horanont, P., “Phase Structure of Ternary Polypropylene/elastomer/filler Composites: Effect of Elastomer Polarity,” *Polymer*, Vol. 41, 2000, pp. 9283-9290.