

동일배열 폴리프로필렌/엘라스토머/나노충전제 복합체의 전력케이블 절연체로서의 사용 가능성에 대한 문헌적 고찰

변선희[†]

한국과학기술정보연구원

(2012년 3월 27일 접수 ; 2012년 4월 27일 수정 ; 2012년 6월 6일 채택)

A Review on IPP/Elastomer/Nanofiller Composites for the Possibility of Use as Power Cable Insulations

Sun-Ho Pyun[†]

Korea Institute of Science and Technology Information(KISTI),

66 Hoegiro, Dongdaemun-gu, Seoul 130-741, Korea

(Received March 27, 2012 ; Revised April 27, 2012 ; Accepted June 6, 2012)

요약 : 본 논문은 절연유 불포함 재활용 가능 전력케이블 절연체에 동일배열 폴리프로필렌(IPP) 기반 열가소성 폴리올레핀 엘라스토머(TPO) 나노복합체 사용 가능성을 문헌적으로 고찰한 리뷰논문이다. 2010년 IPP 기반 나노복합 유전체는 파워 커패시터 연구에서 유전손실을 제외한 고전압 특성이 크게 향상되었다. IPP 기반 TPO 나노복합체 사용 자동차 외장부품 연구에서는 나노충전제 최대 3 wt% 함유로 전력케이블 절연체의 필수특성인 저온 충격성을 비롯한 기계적 특성향상이 보고되었다. 특히 유전손실의 원천인 상용화제 사용의 최소화 기술이 보고되어, 3 wt% 이하 나노충전제 함유 IPP 기반 TPO의 전기적 특성조사가 필요하다.

주제어 : 전력케이블 절연체, 동일배열 폴리프로필렌, 열가소성 폴리올레핀 엘라스토머, 나노유전체, 절연내력, 저온충격성.

Abstract : For use as recyclable power cable insulations without dielectric oil, technology trends of IPP based thermoplastic polyolefin elastomer(TPO) nanocomposites were reviewed. In 2010 research results of IPP nanocomposite dielectrics for power capacitors showed promising high voltage properties except dielectric loss. Research of IPP based TPO nanocomposites for automotive exterior parts revealed considerable improvements of mechanical properties including impact strength, especially minimization of compatibilizer content, the origin of dielectric loss. A study on electrical properties of IPP based TPO nanocomposites containing a few weight percent of nanofillers for power cable insulations is suggested.

Keywords : *power cable insulation, isotactic polypropylene, thermoplastic polyolefin elastomer, polymer nanocomposite dielectrics, dielectric strength, impact strength.*

[†]주저자 (E-mail : sonbi@reseat.re.kr)

1. 서론

현재 전력케이블 절연체인 가교폴리에틸렌(XLPE)은 30년 이상 성공적으로 사용되어 왔다. 그러나 재활용이 안 되고 DC케이블에서 사용이 어려워 경제성 있는 고내열성 열가소성 수지로 대체가 바람직하다. 교대배열 폴리프로필렌(SPP)은 모든 특성이 XLPE보다 우수함이 입증되었으나[1], 원료 입수가 어려워 실용화되지 못하고 있다.

현 PP의 대부분인 가격 경쟁력 있는 동일배열 PP(IPP)는 강성이 너무 높아 EPR 등의 폴리올레핀 엘라스토머(POE)로 충격강도를 높인 임팩트 PP공중합체(ICP)가 응용에 따라 사용되고 있다. 일명 열가소성 올레핀 엘라스토머(TPO)이며 IPP와 POE가 서로 섞이지 않는 이중상 공중합체이다. 케이블 절연체로는 분산 등의 품질관리 상 반응기 내 TPO(R-TPO)가 바람직하다. 절연유가 소량 배합된 IPP 기반 R-TPO가 최고 22 kV급 전력케이블 절연체로 현재 개발/사용되고 있다[2]. 절연유가 함유 안된 친환경의 안정적인 고전압특성을 가진 재활용 가능한 저렴한 IPP 기반 TPO 절연체가 요구되고 있다.

2. 동일배열 폴리프로필렌(IPP) 기반 나노복합유전체에 대한 일반적 고찰

최근 polymer nanocomposite dielectrics (고분자 나노복합유전체)의 고전압 연구가 활발하다. 기계적 응력이 적게 걸리는 전력용 커패시터 분야는 물론, 포설시 구부림이나 저온 충격성 등 기계적 특성이 높게 요구되는 고전압 전력케이블 절연체에서 XLPE-나노 MgO, XLPE-나노실리카와 같은 성공사례가 유명하다 [5],[7]. 본 연구목적은 나노유전체기술 활용에 의한 IPP 기반 케이블 절연체의 안정적인 전기적 특성 확보 가능성 탐색이다. 연구순서는 첫째, 실리카나 점토와 같은 나노충전제 함유 IPP의 2원 나노복합유전체의 전기적 특성조사(엘라스토머 불포함)이다. 둘째, 나노충전제 함유 R-TPO (IPP/엘라스토머/나노충전제)의 3원 나노복합유전체에 대한 기계적 특성 위주의 문헌적 고찰이다. 고분자 기질 내 균일 분산된 무기 나노입자는 기질과 엄청나게 큰 비표면적을 갖

는 계면을 만들어 고분자 나노복합유전체는 독특한 전기적 특성을 나타낸다. 2010년 Li 등은 방대한 연구문헌으로부터 나노유전체 내 단기 절연파괴 및 장기적 기능상실을 고찰하여 보고했다[3]. 고분자 기질 내 나노입자의 균일분산은 어려워 기질의 점도 및 커플링제에 의한 충전제 표면처리가 중요하다.

나노복합유전체의 전기파괴(BD) 메커니즘은 아직 확실치 않지만, ①CBE(Coulomb Blockade Effect), ②공간전하모델 그리고 ③다심모델(Multi-layered core model)의 세 모델이 중요하다. ①CBE모델은 고분자 내 균일하게 분산된 나노입자의 쿨롱 정전기력에 의한 전자차단효과가 AC파괴강도를 개선한다. 이 모델은 나노급속입자 충전제에 적합하다. ②공간전하모델에선 축적된 동종/이종 극성전하가 전극에서 전계를 높이거나 줄인다. ③Tanaka 다심모델[4]은 나노입자 주위의 일정범위 내에 전자가 움직일 때 쿨롱정전기력에 의해 전자가 흩어져 에너지를 잃고 이동속도가 떨어져 파괴강도를 높인다. 이 모델은 나노산화물 입자와 고분자기질의 나노복합체에 적합하다.

고분자 나노복합유전체에서 순수고분자에 대한 단기파괴특성의 개선을 k는 Fig. 1에서와 같이 나노입자 함량 0.05~2 wt%에선 AC전압에서 현저하다. 나노충전제 효과가 총괄적으로 미미한 AC보다 DC에선 전기파괴 개선효과가 높다.

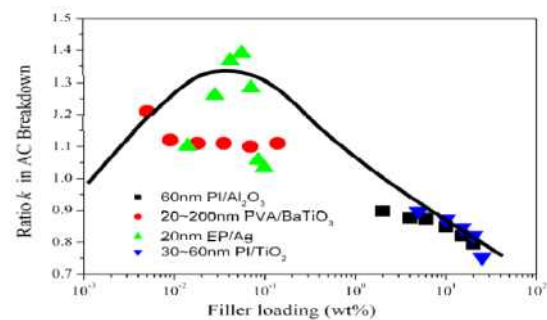


Fig. 1. The relation between ratio k and filler loading in AC field[3].

나노 및 마이크로 입자 첨가는 고분자의 전기노화저항을 개선하고 노화시간이 길어질수록 나노입자가 마이크로입자보다 우수함을 보여준다. Fig. 2는 고분자 나노복합유전체의 시간에 따른 기질 대비 PD(부분방전) 저항의 개선을 k

를 보인다. EP는 에폭시수지의 약칭이다. 요약하면 고분자 나노복합유전체에서 IPP의 예는 아직 안 보이지만, 여러 고분자 기질의 예에서 나노충전제의 전기적 성능개선 역할을 확실히 볼 수 있다.

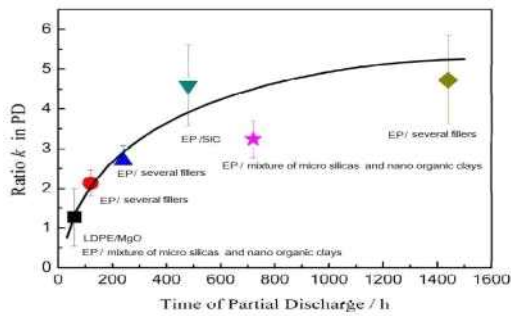


Fig. 2. Ratio k vs. time of PD discharge [3].

3. IPP 기반 나노 실리카 복합유전체

3.1. 열경화성수지 나노복합유전체

XLPE는 가교부산물에 의한 공간전하 발생/축적문제로 DC 시스템에 사용이 어려웠다. MgO 나노입자 첨가에 의한 해결, 이에 따른 최초의 250 kV DC 해저케이블 수주와 500 kV 급의 사내 개발을 일본의 J-Power Systems 사가 2010년 보고했다[5]. 유럽의 Borealis사는 약 150 kV까지 유기물 배합개선으로 해결한 실적을 보이고 있다[6].

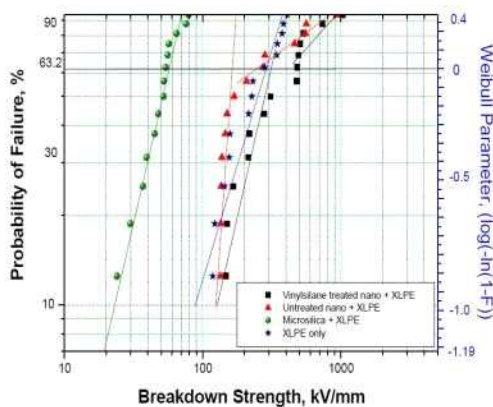


Fig. 3. Weibull plot for dielectric BD strength of XLPE with 5 wt% several silicas at 25°C [7].

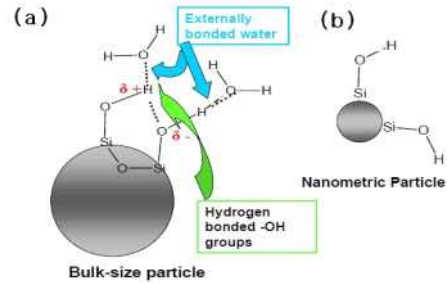


Fig. 4. Schematic of existence of hydrogen bonding depending on the size of silica particles[7].

2005년 Roy 등은 XLPE-실리카 복합유전체에서 나노실리카가 마이크로 실리카와 달리 XLPE의 전기특성을 향상함을 보고했다[7]. 실리카 입자표면의 실란처리는 실리카와 XLPE 사이에 강력한 공유결합을 일으켜 전기과피강도 등이 향상됨을 보여준다(Fig. 3). V-t 커브에서 전기과피시간은 나노실리카 함유 XLPE가 순수 XLPE의 100배 이상이다. 유전율 실효부 및 tan δ의 온도-주파수 특성은 모두 나노실리카 함유 시 순수 XLPE보다 낮아 마이크로 실리카 함유보다 우수하다. FTIR 스펙트럼 관찰 결과 마이크로 입자에서 대부분의 실란올기는 수소결합되어 극성발생이 추정된다. 나노입자 경우 표면결합 상 실란올기 사이가 멀어 수소결합이 어려워 유전특성이 양호하다(Fig. 4).

3.2. IPP-실리카 나노복합유전체

2003년 Garcia 등은 비닐실란 처리 실리카 입자를 실험용 슬러리상 반응기 내 핵산 속에서 MgCl₂ 담체와 Z-N 촉매를 사용하여 IPP와 제자리 중합했다[8]. 실리카 함량은 3 wt%, 실리카 입자크기는 ~10 nm 및 10 μm의 두 종류인데 중합 후 기질 내 양호한 분산을 SEM이 보였다. 마이크로 실리카는 촉매표면을 막아 반응속도를 저하시키나 나노실리카는 영향이 없고, 실리카는 수율에도 영향이 없었다.

소수성 IPP에 친수성 나노 충전제의 분산을 위해 용융블렌딩에 사용된 고가의 무수말레인산 그래프트 PP의 상용화제(PP-g-MA)는 미량의 수분 존재 시 산을 발생시켜 전기절연체의 유전손실률을 증가시킨다. 2010년 Takala 등은 상용화제 없이 입자크기 12 nm의 고순도

흡드 실리카를 사용한 IPP-실리카 나노복합유전체의 유전특성 및 PD저항 연구를 보고했다 [9]. 고전압 파워용 커패시터 연구인데 실리카 5 wt% 함유 IPP 나노복합유전체 컴파운드는 혼련압출기로 제조하고 시편두께는 11~23 μm 이었다. 실험결과 IPP 나노복합유전체의 AC 및 DC과피강도는 IPP보다 각각 19.9 및 52.3% 향상되었다. 정전용량은 온도상승에 따라 80°C까지 IPP와 이의 실리카 나노복합유전체가 같은 크기로 나란히 감소했다. $\tan \delta$ 는 IPP와 이의 실리카 나노복합유전체가 주파수 60 Hz 및 작동온도 90°C에서 값이 비슷했다. PD로 인한 표면침식속도는 시험전압 2~4 kV에서 IPP-실리카 나노복합유전체가 IPP보다 60배 느렸고, 평균과피시간은 IPP의 10배이었다. TEM 관찰에서 Fig. 5(a)와 같이 실리카가 IPP 기질에 잘 분산되어 이 나노복합유전체는 AC 및 DC용 파워 커패시터의 유전특성이 양호하다. 전기적 특성은 케이블 절연체에 유망해 보인다.

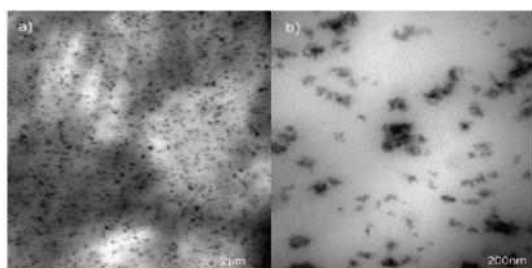


Fig. 5. TEM micrographs of ultra thin sections of the PP silica composite: (b) shows poor distribution of silicas[9].

2006년 Liu 등은 IPP 기반 에틸렌-옥텐 공중합체 엘라스토머(POE)의 TPO 블렌드에 기계적 강도를 위한 실리카 첨가 3원 나노복합체의 구조와 물성을 보고했다[10]. 실리카 분산에 상용화제 PP-g-MA를 사용했다. 첨가된 실리카의 상용화제로의 이행을 이용한 고무 고립으로 고무탄성이 유지되었다.

TPO-나노실리카 복합체의 탄성을, 충격 및 굽힘특성은 5 wt% 이하의 나노실리카 첨가로 증가된다. 실리카는 POE 외부에 머물고(Fig. 6), 실리카 함량증가에 따른 POE 분산상의 크기는 감소하고 최적점(2 wt%)이 존재한다(Fig.

7). 실란처리 나노실리카(mSiO_2)는 분산과 TPO의 충격강도를 높인다. POE 함량과 전기적 특성사이의 관계 연구가 필요하다.

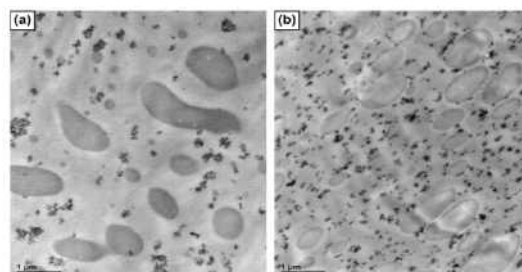


Fig. 6. TEM micrographs of (PP/PP-g-MAn)/POE 80/20 TPO composites: (a) 5 wt% SiO_2 ; (b) 5 wt% mSiO_2 [10].

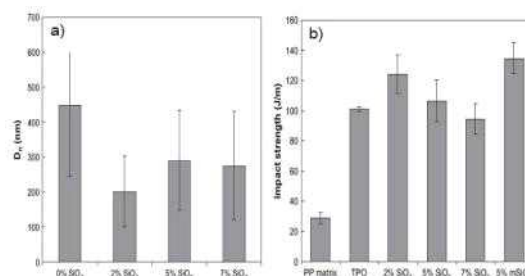


Fig. 7. (a): Number average diameter(D_n) of POE dispersed phase for (PP/PP-g-MA 90/10)/POE 80/20 composites as a function of SiO_2 content, (b): Notched Izod impact strength of TPOs of several SiO_2 of (a) and mSiO_2 [10].

3.3. IPP-나노점토 복합유전체(2원 구조)

친수성 MMT계 점토 층간에 소수성 고분자 삽입/분산을 위해 MMT 층간의 Na 양이온을 암모늄 양이온으로 치환하는 층간거리 확장의 유기화 처리가 필요하다. 이들 극성물질은 케이블 절연체의 유전특성을 해칠 수 있다. 자동차 부품연구에서 원가절감을 위해 고가의 상용화제 사용을 피하는 연구가 최근 활발하여 케이블 절연용 목적과 일치된다. 용융블렌딩법은 나노점토의 유기화처리 및 고가의 상용화제가 다량 필요하여 유전특성을 해칠 수 있다. 2002년

Dow Chemicals사가 메탈로센 촉매사용으로 IPP-나노점토 복합유전체 중합을 성공시켰다 [11].

2004년 Lee 등은 용융블렌딩에서 제자리 초음파처리 및 유기나노점토의 초임계 유체 내 초음파 전처리에 의해 상용화제를 5 wt%로 줄이는 IPP-나노점토의 분산법 연구를 보고했다 [12]. 저분자량 IPP에서 굽힘탄성율의 증가 및 분산성이 향상되었으나 고분자량 IPP에서는 효과가 미미했다. 상용화제 절감가능성이 확인되었지만 이미 실용화된 초음파처리법의 최적화가 필요하다[13].

2005년 Bamji 등은 IPP-점토 나노복합유전체의 단기 유전특성을 보고했다[14]. 잘 분산된 0~4 wt%의 유기점토 함유 IPP의 AC 및 DC 파괴강도, $\tan \delta$, 그리고 나노입자 함유 여부에 따른 공간전하 분포를 연구했다. 상용화제 (PP-*g*-MA), 유기점토 그리고 IPP를 용융혼합한 80 μm 두께로 전기적 특성을 측정했다. 결과에서 핵제인 유기나노점토는 구멍 수 증가 및 구멍 크기 축소를 광산란의 단파장이동으로 알았다. IPP에 유기나노점토 도입은 DC 파괴강도를 크게 향상시켰다(Fig. 8).

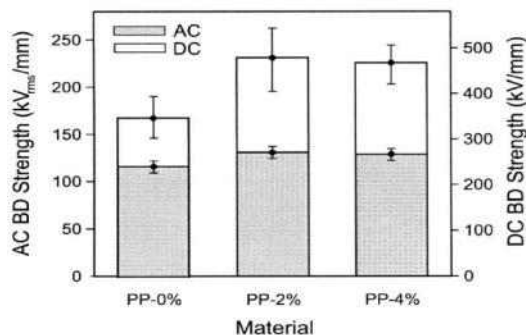


Fig. 8. AC and DC breakdown strength of PP with different contents of organic nanoclay particles [14].

공간전하가 나노충전체/고분자 기질 계면에서 트랩되어 파괴확률을 낮춘 것이다. 유기점토 2 wt% 함유 시 파괴강도가 가장 높았다. 나노점토 함유 복합유전체의 $\tan \delta$ 는 최고 IPP의 10배 이상되고 정전용량도 충전체 함량과 함께 약간 증가했다. AC 전계 2~30 kV/mm에서 충전하면 IPP 나노복합유전체 내 공간전하가 분포

되고 PEA법(펄스전기음향법)으로 측정가능하다. 나노점토 2% 함유 시 최고 전계 30 kV/mm에서도 공간전하가 가장 적었다.

2010년 Baniasadi 등은 IPP-점토 나노복합유전체 제조에서 상용화제 및 표면 개질제를 사용하지 않고 제자리 중합법과 용융블렌딩법의 특성을 비교했다[15]. 스�멕타이트 점토를 사용한 이중담체의 Z-N 촉매를 제조하여 점토 층간에 삽입했다. 프로필렌 기체 단량체의 제자리 삽입으로 IPP-점토 나노복합유전체를 중합했다. 특성에서 점토함량 증가 시 제자리 삽입중합법은 기계적 강도를 증가시키지만 신장율은 순수 IPP의 350%로부터 약 180%(점토함량 5%)로 감소했다. 노치충격강도는 4.5 kJ/m²(순수 IPP)으로부터 약 3.3 kJ/m²(점토함량 5%)로 감소하였다. 용융블렌딩 시 고농도 올리고머 압모늄염에 의한 개질점토법은 600%까지 신장율을 높이나 케이블 절연의 경우 유전손실이 우려된다. 엘라스토머 함유가 필요하다.

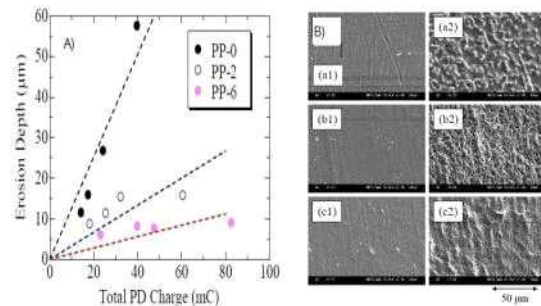


Fig. 9. PD resistance of IPP-nanoclay, A) erosion depth and level of PD charge, B) images of specimen-surfaces with nanoclay loading; (a) 0, (b) 2, (c) 6 wt%. Before and after PD degradation; suffix no. 1 and suffix no. 2 [16].

2010년 Tanaka 등은 IPP-나노점토 복합유전체에서 나노점토가 네 유전특성(유전율, 유전손실률, 공간전하축적, 부분방전)에 미치는 영향을 보고했다[16]. 상용화제는 16 wt%가 필요했다. 나노복합유전체의 유전율과 유전손실률은 순수 IPP에서와 달리 온도와 주파수 의존이 심했다. 유전율은 20°C를 넘으면 크게 증가하고, 유전손실률의 주파수 스펙트럼은 여러 온도에서 큰

피크를 보였다. 상용화제의 무수말레인산 존재가 가스크로마토그래피로 확인되었다. PD특성은 커패시터에서 표면침식 깊이로 평가하는데, 나노점토 함량증가에 따라 감소하여 최대 6 wt%에서 최소가 되었다. 이 때 PD저항이 순수 IPP의 9배가 되고 이를 확인하는 PD 열화 3시간 전후의 시료표면(가장 우수한 c2)을 비교해준다(Fig. 9).

3.4. IPP 기반 TPO의 점토 나노복합체 (3원 구조)

IPP 기반 TPO의 점토 나노복합체(나노 유전체 특성이 공인 안 되어 복합체임) 3원 구조는 유기점토의 분산을 위해 PP-g-MA와 같은 상용화제가 필요하고 엘라스토머로 EPR (EPDM), 또는 에틸렌-옥텐 공중합체(POE)의 도입으로 강성, 가열변형온도, 치수안정성 외 기계적 탄성이나 저온충격성이 개선되고 있다. 5 wt% 이하의 나노점토 함유에 의해 자동차 외장부품 등에서 20 wt% 이상의 탈크 함유 시보다 충격특성 등을 훨씬 높이고, 더욱 경량화, 경제성 등의 향상을 위한 연구가 활발하게 추진되고 있다.

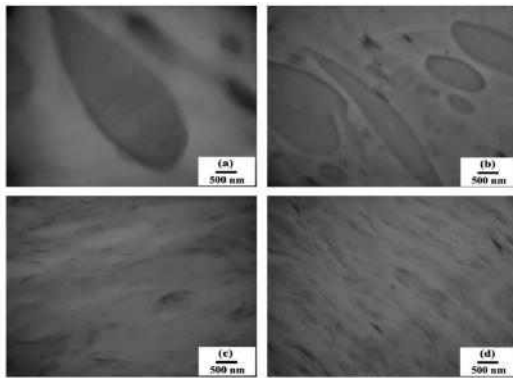


Fig. 10. Nanoclay contents of IPP/elastomer/MB nanocomposite and morphology of elastomer particles: Nanoclay contents: (a) 0, (b) 1, (c) 2.8, (d) 6.8 wt%, TEM images of TD to the flow of injection [17].

상기 연구 중 2005년 Lee 등의 케이블 절연체에 응용 가능한 대표적 보고가 있다[17]. 유

기점토와 상용화제의 마스터배치(MB)를 일차로 컴파운딩 한다. MB와 IPP 그리고 엘라스토머의 이차 컴파운딩은 연속 이축압출기를 이용했다. 점토/상용화제 비율은 동일비율로 유지했다. 결과는 Fig. 10의 TEM 상과 같이 점토함량 증가 시 고무입자크기가 줄었다 (최대 점토함량 6.8 wt%에서 고무입자 크기 1 μm 이하). AFM 상에서도 고무입자 크기가 줄고 중횡비도 줄었다.

실은 노치 아이조드 충격강도(ASTM D256)는 고무 40 wt%에서 MMT 없을 때 400 J/m로부터 MMT 1 wt%에서 최고 780 J/m로 증가했는데 고무입자 크기 감소 및 입자간 거리 감소에 기인한다(Fig. 11).

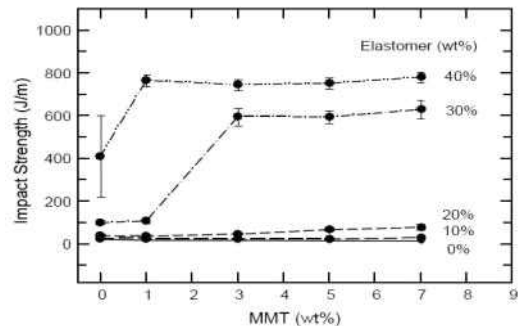


Fig. 11. Effect of MMT and elastomer contents on notched impact strength of PP/elastomer/masterbatch(MB) nano-composites [17].

MMT 함량 1~2 wt%에서 엘라스토머 입자 크기 1 μm 이 보인다(Fig. 12). 신장율은 MMT 함량증가에 따라 감소하지만 1 wt%에선 MMT 도입 전과 같은 400%를 보인다. 고무고립 효과 덕이다. MMT 증량 시 IPP/고무/MB 나노복합체의 인장강도, 굽힘탄성율은 증가하지만 고무함량 증가에 따라 증가율은 감소한다. 상용화제가 존재하므로 전기적 특성평가 연구가 필요하다.

A. Hassan 등은 2006년 EPR 대신 POE 20 wt%와, 점토 및 상용화제 각 6.0 wt%의 IPP 나노복합체를 제조했다. 이의 아이조드 충격강도가 POE 도입 전의 6.2 kJ/m²으로부터 17.8 kJ/m²으로 향상함을 보고했다[18]. 탄성율, 인장강도, 굽힘탄성율 등의 저하는 POE의 결사때문이지만 케이블 절연에는 긍정적이고 SEM

은 POE의 IPP 내 균일한 분산을 보였다.

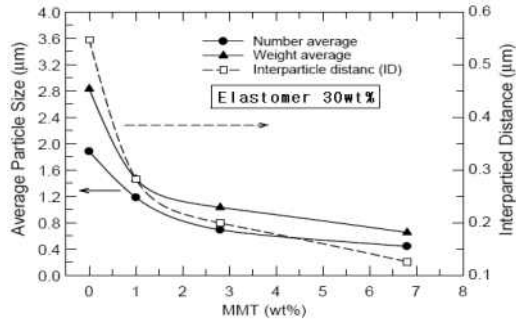


Fig. 12. The effect of MMT levels on the apparent elastomer particle sizes and interparticle distance of PP/elastomer/MB nanocomposites [17].

2011년 Su 등은 상용화제 대신에 용융고분자에 침투력이 좋은 초임계탄산가스를 분산가공조제로 사용했다. 이를 이용하여 IPP/POE/점토(100/10/4 중량부)의 TPO 나노복합체를 용융블렌딩하여 미세구조와 기계적 특성연구를 보고했다[19]. 이 결과는 상용화제보다 우수한 분산과 충격저항, 신장율 등을 보였다. 연속식 컴파운딩 가공 중에 가압 초임계 유체를 직접 첨가한 것이다. X선회절(XRD), 전자현미경 그리고 유변학적으로 평가했는데, 대부분의 점토가 POE 주위에 존재했다. Fig. 13은 XRD 패턴인데 상용화제 사용이 sc-CO₂ 사용보다 더 피크가 강해 후자의 분산이 더 균일함을 보인다.

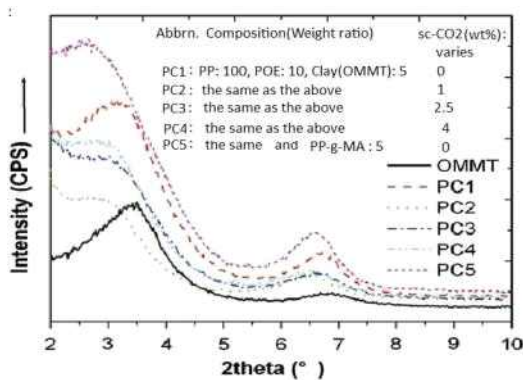


Fig. 13. XRD pattern for primary clay and ternary nanocomposites prepared by different methods [19].

4. 국내 기술동향

국내에선 아직 나노충전제에 의한 고분자 나노복합유전체(2원구조)의 절연체를 위한 전기적 특성연구가 미진하다. 최근 하이브리드카의 핵심부품인 배터리 경량화 개발에 전기적 특성이 우수한 3.5 µm 두께의 박막용 내열성 PP(주로 IPP)가 수입되고 있다. 초고전압 케이블절연용 XLPE-나노 MgO의 나노복합유전체가 일본에서 성공된 후 2010년 윤재훈, 임기조의 “HVDC용 나노복합 XLPE의 기술동향 및 절연 성능 평가” 연구가 보이고 있다. 국내 IPP 기반의 열가소성 올레핀 엘라스토머에 나노충전제를 도입한 3원구조의 고전압절연용 재료연구는 외국에서와 마찬가지로 국내에서 시도가 보이지 않고 있다.

5. 결론

현재 재활용이 어려운 가교폴리에틸렌(XLPE)의 대체로 고내열성이며 경제적인 동일배열 폴리프로필렌(IPP) 기반의 열가소성 올레핀 엘라스토머(TPO)가 22 kV급 전력케이블에 일부 사용되고 있다. 압출 공정에 절연유가 주입되는 기술이다.

- [1] 절연유가 함유 안 된 친환경적이고, 안정적인 고전압특성 확보를 위해 절연체에 나노유전체 기술의 활용가능성을 고찰했다.
- [2] 2010년 파워 커패시터 연구(엘라스토머가 함유 안 된)에서 IPP 기반 나노복합유전체(2원구조)는 유전손실을 제외한 고전압 특성(파괴강도 및 부분방전 등)의 상당한 향상을 보였다.
- [3] 케이블은 커패시터와 달리 저온 충격성 등 기계적 응력이 상당히 요구되어 비슷한 특성이 요구되는 IPP 기반 TPO 나노복합체(3원구조)로 구성되는 자동차 외장부품 연구의 최신 결과를 고찰하였다. 기존 탈크 함유보다 더 높은 경량화와 경제성, 그리고 내충격성을 지향하는 자동차용 나노복합체 연구에서 나노충전제 최대 3 wt% 함유로 내충격성 등의 기계적 특성향상, 모폴로지 및 물성 사이의 관계연구가 크게 진척되었다.

- [4] 특히 내충격성 향상을 위한 고무입자 크기 최소화(1 μm 이하) 기술, 무엇보다도 유전손실 및 고비용의 원천인 상용화제 사용을 최소화 할 수 있는 나노충전제 분산기술(초임계 탄산가스 사용 등)이 보고되었다. 전기적 특성은 보고되지 않았으므로 3 wt% 이하 나노충전제 함유 IPP 기반 TPO의 전력 케이블용 전기특성조사가 필요하다.
- [5] 품질관리 상 용융블렌드 방식보다 반응기 내 열가소성 올레핀 엘라스토머(R-TPO)제법이 유리하다. 절연유를 사용하지 않는 축차중합공정의 절연재가 Borealis사에 의해 중고전압용으로 특허를 얻고 있다[20, 21]. 응력백화 문제 해결을 위한 배합제, 전기과피강도를 140 kV/mm로 향상시키기 위한 메탈로센 촉매 사용 등이 주장되고 있으나 아직 실용화는 안 보이고 있다. IPP용 Z-N 촉매 사용수지의 공통된 단점인 촉매잔사함량 및 큰 결정크기가 관련 있을 것이다. 이미 나노충전제(실리카 및 점토)를 담체로 활용한 촉매 사용 IPP-충전제의 나노복합 유전체(2원 구조)의 긍정적 기초 종합실험은 보고되었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 교육과학기술부 과학기술 진흥기금으로 수행하는 「2011ReSEAT 프로그램」에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. T. Takahashi and H. Miyata, Development of the New Polymer Insulating Materials for HVDC Cable", *IEEE Transactions on Power Delivery*, **7**, 1053 (1992).
2. S. Belli and G. Perego, P-Laser: Break-through in Power Cable Systems, *ISEI*, **1** (2010).
3. S. Li, Short-term Breakdown and Long-term Failure in Nanodielectrics: A Review, *IEEE TDEI*, **17**, 1523 (2010).
4. T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse, and Y. Ohki, Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics, *IEEE TDEI*, **12**, 669 (2005).
5. Y. Murata and M. Kanaoka, Development History of HVDC Extruded Cable with Nanocomposite Material, *8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 460 (2006).
6. Borealis AG, Polyethylene LE4253, Crosslinkable Insulation Compound (for solid dielectric HVDC cables). K. Johannesson and A. Gustafsson, HVDC Light Cables for Long Distance Grid Connection, *European Offshore Wind Conference*, **1** (2009).
7. M. Roy, J.K. Nelson and C. W. Reed, Polymer Nanocomposite Dielectrics- The role of the Interface, *IEEE TDEI*, **12**, 1273 (2005).
8. M. Garcia and W. E. Van Zyl, Novel Preparation of Hybrid Polypropylene/Silica Nanocomposites in a Slurry-phase Polymerisation Reactor, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **42**, 3750 (2003).
9. M. Takala, Dielectric Properties and Partial Discharge Endurance of PP-Silica Nanocomposite, *IEEE TDEI*, **17**, 1259 (2010).
10. Y. Liu and M. Kontopoulou, The Structure and Physical Properties of Polypropylene and Thermoplastic Olefin Nanocomposites Containing Nanosilica, *Polymer*, **47**, 7731 (2006).
11. T. Sun and J. M. Garces, High-Performance Polypropylene-Clay Nanocomposites by In-situ Polymerization with Metallocene/Clay Catalysts, *Adv. Mater.*, **14**, 128 (2002).
12. E. C. Lee, D. F. Milewski, and R. J. Baird, Exfoliation and Dispersion Enhancement in Polypropylene Nanocomposites by In-Situ Melt Phase Ultrasonication, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1773 (2004).

13. A. I. Isayev, Rishi Kumar, and Todd M. Lewis, Ultrasound Assisted Twin-screw Extrusion of Polymer- Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes, *Polymer*, **50**, 250 (2009).
14. S. S. Bamji, M. Abou-Dakka, A. T. Bulinski, L. Ultracki, and K. Cole, Dielectric Properties of Polypropylene Containing Nano-Particles, *Annual Report CEIDP*, 166 (2005).
15. H. Baniasadi, Investigation of In Situ Prepared Polypropylene/clay Nanocomposites Properties and Comparing to Melt Blending Method, *Materials and Design*, **31**, 76 (2010).
16. T. Tanaka and N. Fuse, Comparison of nano-structurisation Effects in Polypropylene among Four Typical Dielectric Properties, *IEEE TDEI*, **17**, 671 (2010).
17. Hyuk-soo Lee, P. D. Fasulo and D. R. Pau, Thermoplastic Olefin Elastomer Based Nanocomposites, Part 1. Morphology and Mechanical Properties, *Polymer*, **46**, 11673 (2005).
18. A. Hassan and J. W. Lim, Rubber-toughened Polypropylene Nanocomposite : Effect of Polyethylene Octene Copolymer on Mechanical Properties and Phase Morphology, *JAPS*, **99**, 3441 (2006).
19. Feng-hua Su and Y. Zho, Micro-structure and Mechanical Properties of PP/POE/Clay Ternary Nano Composites Prepared by Melt Blending Using Supercritical Carbon Dioxide as a Processing Aid, *Composite Part B: Engineering*, **42**, 421 (2011).
20. Borealis Technology OY, Cable Layer on Polypropylene Basis with High Electrical Breakdown Strength, WO20080006531.
21. Borealis AG, Alpha-nucleated Polypropylene for Power Cable Insulation, WO20100076242.