

지방족 폴리케톤과 스티렌-아크릴로니트릴 공중합체 간의 상용성에 관한 연구

박정연 · 손영곤^{*,†}

한국자동차연구원, *공주대학교 신소재공학부

(2026년 5월 14일 접수, 2026년 7월 10일 수정, 2026년 7월 20일 채택)

Study on Compatibility Between Aliphatic Polyketone and Poly(styrene-*r*-acrylonitrile)

Jungyeon Park and Younggon Son^{*,†}

Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

*Advanced Materials Science and Engineering, College of Engineering, Kongju National University,
Cheonan, Chungnam 31080, Korea

(Received May 14, 2026; Revised July 10, 2026; Accepted July 20, 2026)

초록: 지방족 폴리케톤(PK)과 아크릴로니트릴(AN) 함량이 45와 56 mol%인 두 종류의 poly(styrene-*r*-acrylonitrile) (SAN45, SAN56)을 용융 블렌딩하여 블렌드의 열적 특성, 기계적 물성, 형태학 및 가교 반응을 고찰하였다. AN 함량이 증가할수록 PK와 SAN의 상용성이 향상되었으며, PK/SAN56 블렌드는 PK/SAN45 블렌드보다 미세한 분산상 구조와 더 높은 충격강도를 나타냈다. PK/SAN56 블렌드는 혼련 시간이 증가함에 따라 미용해 성분과 충격강도가 증가하여 SAN56이 PK의 가교화를 촉진시키는 것 같은 결과를 얻었으나 혼련 토크 및 블렌드의 재용융 실험으로 실제로는 SAN56이 PK의 가교화를 억제한다는 것을 확인하였다. 이에 따라 고 AN 함량의 SAN을 PK에 소량 투입하면 PK의 물성 감소 없이 열안정성을 개선한다는 것을 확인하였다.

Abstract: Aliphatic polyketone (PK) was melt-blended with two types of poly(styrene-*r*-acrylonitrile) (SAN45 and SAN56) having different acrylonitrile (AN) contents, and the thermal properties, mechanical properties, morphology, and cross-linking behavior of the blends were investigated. Compatibility between PK and SAN improved with increasing AN content, and PK/SAN56 blends exhibited a finer dispersed-phase morphology and higher impact strength compared to PK/SAN45 blends. Although the increase in insoluble fraction and impact strength of PK/SAN56 blends with prolonged mixing time initially suggested that SAN56 promotes cross-linking of PK, mixing torque measurements and re-melting experiments confirmed that SAN56 in fact suppresses cross-linking of PK. Accordingly, it was found that the addition of a small amount of high-AN-content SAN to PK improves the thermal stability of PK without compromising its mechanical properties.

Keywords: aliphatic polyketone, styrene-acrylonitrile copolymer, cross-linking, miscibility, polymer blend.

서 론

지방족 폴리케톤(aliphatic polyketone, PK)은 일산화탄소(CO)와 알파-올레핀(α -olefin)의 공중합을 통해 합성되는 준결정성 고분자로서, 우수한 기계적 강도와 내열성, 그리고 뛰어난 화학적 안정성을 나타낸다. 특히 PK는 높은 결정화도와 균일한 분자 구조로 인해 금속 및 기타 엔지니어링 플라

스틱에 견줄 만한 성능을 보이며, 내마모성 및 내충격성 또한 우수하여 자동차, 전자, 산업용 부품 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 또한 PK는 비교적 친환경적인 합성 과정과 낮은 유해성으로 인해 지속가능한 소재로서의 잠재력도 높이 평가되고 있다.¹

그러나 PK는 몇 가지 단점들도 동시에 지닌다. 엔지니어링 플라스틱으로는 상대적으로 낮은 용융점으로 인해 고온 환경에서의 성능 한계가 존재하며, 용융 가공 시의 열적 안정성이 다른 고성능 엔지니어링 플라스틱에 비해 떨어지는 경향이 있다. 또한 강한 분자 간 상호작용으로 인해 연성(ductility) 확보에 어려움이 있어 충격 인성 개선이 필요하다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
sonyg@kongju.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-1601-7280
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

이러한 물성적 제약은 PK의 적용 범위를 더욱 넓히는 데 있어 중요한 장애 요인으로 작용한다.²

이러한 문제점을 극복하기 위한 방안으로, 다른 고분자 또는 기능성 첨가제와 혼합하여 PK계 고분자 블렌드를 개발하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 고분자 블렌드는 두 가지 이상의 폴리머가 상호 보완적인 특성을 부여할 수 있도록 설계함으로써, 단독 PK 고분자가 갖는 취약점을 보완하고 기계적 및 열적 물성을 동시에 향상시키는 효과적인 전략으로 평가된다.³⁻⁵ 특히 충격 강도, 열안정성 및 가공성을 개선하기 위한 다양한 PK계 고분자 블렌드 시스템이 제안되었으며, 이는 PK의 응용 분야의 확대 가능성을 보여주고 있다.

그간 연구된 PK계 고분자 블렌드 중에 가장 극적인 물성의 개선을 보여준 것은 PK/polyamide 6(PA6) 블렌드이다.⁶⁻¹¹ 여러 연구에서 PK와 PA6를 5:5로 혼합한 블렌드의 충격강도가 PK와 PA6의 조성 평균보다 최소 5배 이상 높은 것으로 관찰되었다. 일반적인 비상용성(incompatible) 블렌드의 물성은 조성 평균보다 훨씬 낮은 negative deviation을 보이는 것을 고려하면 이는 매우 특이한 결과이다.

Zhou 등과 Zhai 등은 FTIR 및 Solid NMR 등의 결과로부터 PK의 -C=O와 PA6의 -NH- 사이의 수소 결합으로 인한 부분적 혼화성(partial miscibility)이 높은 충격강도의 원인이라 설명하였다.⁶⁻⁷ 그러나 우리는 이전의 연구에서 PA6 말단에 존재하는 -NH₂가 PK의 가교화를 촉진한 것이 PK/PA6의 높은 충격강도의 원인이라고 파악하였다.⁹⁻¹¹ 그 근거로 PA6 말단의 -NH₂를 산(acid)으로 치환한 end capped PA6(ePA6)를 PK와 블렌드한 경우 높은 충격강도를 나타내지 않았고, PK/PA6에서 관찰되는 가교화에 따른 겔 성분의 증가 및 점도 증가(믹싱 시간에 따른)가 PK/ePA6에서는 관찰되지 않았다.¹¹

또한 본 연구팀에서는 PK/poly(acrylonitrile-*r*-methyl methacrylate) (p(AN-*r*-MMA)) 블렌드의 특성에 관하여 연구하였다.¹² 이를 위해 다양한 공단량체 조성을 갖는 p(AN-*r*-MMA)를 합성하였고, 프로필렌 함량이 다른 두 종류의 PK와 용융 블렌딩하여 상용성(compatibility), 열적 특성, 기계적 물성을 분석한 결과 다음과 같은 사실을 확인하였다. p(AN-*r*-MMA)의 AN 함량이 증가할수록 PK와의 상용성이 향상되고 블렌드의 충격강도가 증가하였다. AN 함량이 높은 p(AN-*r*-MMA)를 혼합할수록 PK의 가교화가 증가하는 경향을 보이고, 이로 인해 블렌드의 충격강도가 더욱 높아지는 것으로 판단된다. 가교화된 PK는 p(AN-*r*-MMA)와 화학적 반응에 의해 결합되며, 가교 고분자는 상용화제 역할을 수행하여 분산상 크기를 감소시키고 충격강도를 크게 향상시켰다.

Lee 등은 PK와 poly(styrene-*r*-acrylonitrile)(SAN)과의 상용성에 관하여 연구하였다.¹³ 그들은 40 및 48 mol%의 아크릴로니트릴(AN)을 갖는 두 종류의 SAN을 사용하였다. PK/SAN 블렌드는 상 분리된 구조를 나타냈으며, PK/SAN48이 PK/SAN40보다 더 미세한 상의 크기를 보였다. 블렌드에서 SAN

의 유리전이온도(glass transition temperature, T_g)는 변하지 않았으나, PK 상의 T_g 는 PK/SAN48 블렌드의 경우 약 2 °C 정도 상승하였고 PK/SAN40 블렌드에서는 전혀 변하지 않았다. FTIR 분석 결과 블렌드에서 PK의 카르보닐 피크는 순수한 PK에 비해 높은 파수(wave number)로 이동하는 것으로 관찰되었는데, 피크 이동은 PK/SAN40 블렌드보다 PK/SAN48에서 더 컸다. 이 결과들은 SAN에서 AN 함량이 증가함에 따라 PK와 SAN 간의 상용성이 증가함을 나타낸다.

이상의 결과를 종합하면, PK는 PA6, p(AN-*r*-MMA) 및 SAN과 어느 정도 상용성이 있는 것으로 판단된다. 세 블렌드 모두에서 공통적으로 충격강도가 증가하였으나 파단신율의 증가는 거의 관찰되지 않았는데, 이는 상용성 향상보다 PK 가교화 촉진 효과가 더 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다. PA6, p(AN-*r*-MMA), SAN과 같이 질소 원소를 포함하는 고분자를 PK와 혼합하였을 때 시편의 색 변화 및 용매에 용해되지 않는 불용 성분 증가 등 가교화의 징후가 관찰되었으며, 고분자 내 질소 함량이 높을수록 이러한 경향은 더욱 뚜렷해졌다. 이전 연구에서는 40 및 48 mol%의 AN 함량을 갖는 SAN만이 사용되었는데 본 연구에서는 더 높은 AN 함량을 가지는 SAN을 사용하여 PK/SAN 블렌드의 특성을 더 심도 있게 고찰하고자 한다.

실 험

재료. 실험에 사용된 고분자는 지방족 폴리케톤(aliphatic polyketone, PK)과 poly(styrene-*r*-acrylonitrile) (SAN)이었다. 사용된 PK는 -ethylene-[C=O]-propylene-[C=O]- 구조의 terpolymer로 (주)효성에서 입수하였다. PK는 그레이드(grade) 명 330F로 ethylene/propylene/carbonyl mole ratio가 46.1/3.9/50, 용융점(melting temperature, T_m)이 222 °C였다. 아크릴로니트릴(acrylonitrile, AN), 스티렌(styrene, St), 2,2'-azobis(isobutyronitrile) (AIBN), 메탄올(methanol) 및 *N,N*-dimethylformamide(DMF)는 삼전순약(대한민국)에서 구입하였다. 단량체에 존재하는 중합금지제를 제거하기 위하여 activated alumina(삼전 순약)가 충전된 칼럼에 AN과 St를 흘려 중합금지제를 제거하였다. AIBN은 정제 없이 사용하였다.

SAN은 용액 중합(solution polymerization)으로 합성하여 사용하였다. 중합은 교반장치와 환류관을 부착한 4구 500 mL 반응기에서 수행하였다. 반응기는 오일 bath에 잠기게 하여 온도를 제어하였다. 반응기에 개시제인 AIBN과 용매인 DMF (200 g)를 넣고 진공 그리스로 접착 부분을 밀착시켰다. 오일 bath의 온도를 90 °C로 설정하고 30분간 질소 분위기에서 교반시켜 남아있는 수분과 공기를 제거한 후, 모노머(100 g)를 투입하여 반응을 개시하였다. 반응을 세 시간 유지한 후 반응기를 열고 반응 생성물을 과량의 메탄올에 침전시켜 반응을 종결시켰다. 침전된 SAN을 온풍 건조기에서 건조시킨 후 분

쇄하여 입자로 만들었다. SAN 입자를 진공 건조기(80°C)에서 하루 이상 건조하였다. 반응물의 AN 함량이 40 wt%(=56.7 mol%)와 60 wt%(=74.6 mol%)인 두 조성으로 중합을 진행하였다. 원소 분석기(Flash 2000™ Elemental Analyzer, Thermo Fisher Scientific(U.K.))로 합성된 SAN의 AN 함량을 분석한 결과 45 mol%와 56 mol%의 AN 함량을 가지는 SAN이 합성되었다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이후에 두 SAN을 SAN45와 SAN56으로 칭한다.

PK/SAN 블렌드 및 시편 제조: 80°C에서 24시간 이상 건조한 PK와 SAN을 함량 별로 dry-blend 후 배치 믹서(batch mixer)에서 7분간 용융 혼련하였다. 사용된 배치 믹서는 extensional batch mixer로 본 연구실에서 고안 제조된 장비이다. 작동 원리 및 사양은 참고 문헌에서 찾을 수 있다.¹⁴ 혼련 온도는 240°C였다. 혼련된 시료는 혼련기에 부착된 금형에 바로 사출 성형되어 물성 측정용 시편으로 제조하였다. 블렌드 code에 있는 숫자는 시료의 조성을 나타낸다. 예를 들어 PK/SAN(90/10)은 PK와 SAN이 무게 비 90/10로 혼합된 블렌드를 나타낸다.

특성분석. PK/SAN 블렌드의 Izod 충격 강도는 Qmesys 사(대한민국)의 QM700A pendulum impact tester를 이용하여 측정하였다(ASTM D256). 블렌드의 인장 시험은 만능재료시험기(QM100T, Qmesys)로 수행하였다. ASTM D638 규격을 따라 150×12.5×3 mm의 dog-bone 형태의 시편을 사용하였다. 합성된 두 SAN의 점도를 캐필러리 점도계(Capillary rheometer)를 사용하여 210°C에서 측정하였다. 사용된 점도계는 본 실험실에서 제작한 것으로 자세한 사양은 이전 연구에서 찾을 수 있다.¹⁵ 두 SAN의 점도가 비슷한 것으로 측정되었으며 이를 통해 합성된 두 SAN의 분자량이 비슷한 것으로 확인되었다.

충격 시편을 액체 질소에서 파단하였고 파단면을 백금 코팅하여 주사전자현미경(SEM, Tescan Mira3, Brno, Czech Republic)에서 블렌드의 형태학(morphology)을 관찰하였다. SEM 이미지에서 분산상의 평균 입경을 Image J 소프트웨어를 이용하여 측정하였다. 각 블렌드에서 100개 이상의 분산상 입자를 측정하였다. 시차 주사 열량 분석기(differential scanning calorimetry, DSC, TA Instruments Q20, Delaware, USA)를 사용하여 블렌드의 열적 특성을 관찰하였다. 8-10 mg의 시료를 질소 기류 하에서 250°C까지 온도를 올리고 5분간 유지하여 열 이력을 제거한 후 20°C/분의 속도로 -50°C 까지 냉각시키면서 냉각 곡선을 얻었다. -50°C에서 5분간 유지시킨 후 다시 20°C/분의 속도로 250°C까지 승온시키면서 승온곡선을 얻었다. 화학 구조 분석을 위하여 적외선 분광기(PerkinElmer FTIR Spectrum 2, Massachusetts, USA)를 이용하여 400-4000 cm⁻¹ 파수 범위에서 스캔 수 4로 분석하였다. PK의 가교화 및 이에 미치는 SAN의 영향을 관찰하기 위해 PK 및 PK/SAN 블렌드 0.03 g을 formic acid(FA, 삼전 순약) 10 cm³에 용해시켰다. 용액에 일부 녹지 않는 성분이 있었는데 우리는

이 물질을 PK가 가교화된 겔이라고 추정한다. 용액에 포함되어 있는 미용해 성분을 정성 여과지(filter paper, 현대 HD53-110, 대한민국)로 분리하였고 미용해 성분의 양을 측정하였다.

용액을 filter paper를 통과시킨 후 걸러진 물질의 무게를 측정하여 겔 함량을 측정하였다.

PK의 가교반응을 확인하기 위하여 PK 및 PK/SAN 블렌드를 260°C, 50 rpm에서 40분간 혼련하며 혼련 토크(mixing torque)를 측정하였다. 사용된 배치 믹서는 Haake사에서 제조된 모델명 PolyLab QC-3000으로 내부 부피는 310 cm³였다.

결과 및 토론

PK/SAN 블렌드의 열적 성질. PK와 SAN의 상용성을 알아보기 위하여 블렌드의 열적 특성을 DSC로 관찰하였고 heating thermogram과 열적 특성을 Figure 1과 Table S1에 나타냈다. PK, SAN45 및 SAN56의 T_g 는 각각 11.9, 104.5 및 105.5°C로 관찰되었다. 일반적으로 비혼화성 블렌드(immiscible blends)는 각 구성 고분자의 T_g 에 해당하는 두 개의 뚜렷한 T_g 를 나타내며, 유리전이 구간의 폭 또한 구성 고분자와 유사하다. 반면, 부분 혼화성 블렌드에서는 2개의 T_g 가 나타나는 것은 동일하지만 T_g 의 이동이 발생하고 유리전이 구간이 넓어진다.¹⁶ PK/SAN 블렌드에는 두 개의 T_g 들이 관찰되었다. SAN의 T_g 는 블렌드의 조성에 상관없이 일정한 반면 PK상의 T_g 는 SAN의 함량 증가에 따라 뚜렷하게 증가하였다. PK/SAN45에서는 PK 상의 T_g 는 증가 폭이 미미하였으나 PK/SAN56에서는 그 증가폭이 컸다. 또한 PK/SAN 블렌드에서 PK상의 유리전이 구간의 범위가 순수한 PK에 비해 넓어졌다.

Lee 등은 PK/SAN40과 PK/SAN48의 DSC 관측 결과 PK 상의 T_g 가 2°C 정도 증가함을 관찰하였다.¹³ 그들의 연구 결과에서는 PK/SAN40과 PK/SAN48에서 PK 상의 T_g 차이는 관찰하지 못하였고 두 블렌드 모두 비슷한 정도의 T_g 증가만을 관찰하였다. 블렌드의 기계적 특성 및 형태학 관찰을 통하여 PK/SAN48의 상용성이 PK/SAN40보다 약간 높다는 것을 발견하였고 SAN의 아크릴로니트릴(AN) 함량이 높을수록 PK와 상용성이 증가한다고 결론 내렸다. 본 연구에서는 Lee 등의 연구 결과에서 사용된 SAN보다 더 높은 AN 함량을 가지는 SAN을 사용했고 그들의 결과와 본 연구의 결과를 종합해보면 SAN에서 AN 함량이 증가할수록 PK상의 T_g 가 증가한다는 것을 명확하게 알 수 있다. 이러한 결과는 PK의 비정질 성분이 SAN과 부분적으로 상용성을 가진다는 것을 의미한다.

PK/SAN 블렌드에서 PK 상의 ΔH_m 과 T_m 도 SAN의 함량 및 AN 함량에 영향을 받았다. PK 상의 T_m 은 블렌드의 SAN 함량 증가에 따라 꾸준히 낮아졌는데 PK/SAN45에 비해 PK/

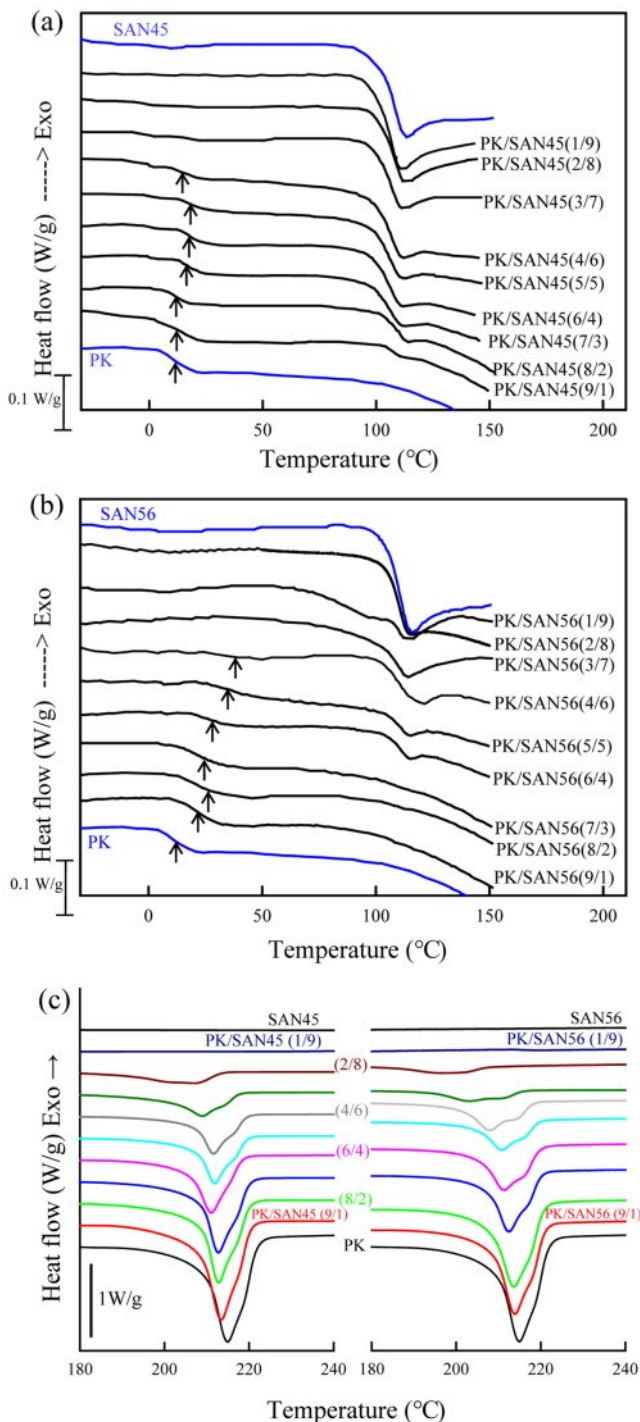


Figure 1. DSC heating thermograms of PK/SAN blends: (a) thermogram of T_g region for PK/SAN45; (b) thermogram of T_g region for PK/SAN56; (c) thermogram of melting region.

SAN56이 그 감소 폭이 더 컸다. Figure 2에 조성에 따른 용융 엔탈피(ΔH_m)를 나타냈다. PK/SAN45 블렌드에서 PK의 ΔH_m 은 조성 평균에서 크게 벗어나지 않았다. 반면 PK/SAN56

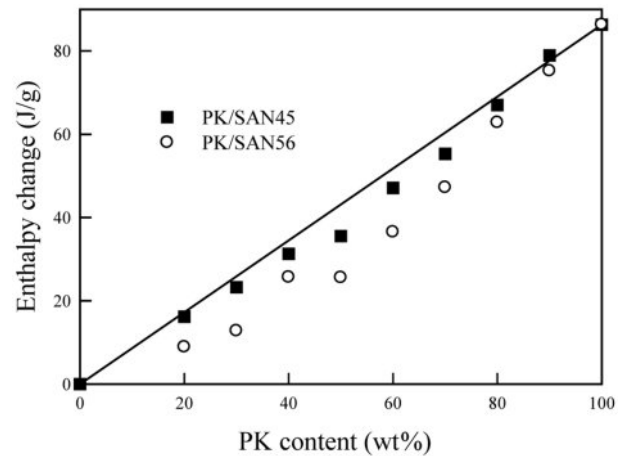


Figure 2. Heat of fusion (ΔH_m) for PK/SAN blends as a function of PK content.

블렌드에서 PK의 ΔH_m 은 조성 평균 보다 현저히 낮았다. 이는 SAN과의 혼합으로 인해 PK 결정화가 영향을 받았음을 의미한다. 상용성 결정-비정질 블렌드의 경우 T_m 과 용융 엔탈피(ΔH_m)가 현저히 감소하는 것으로 보고되어 있다.¹⁷ SAN의 혼합에 따른 PK의 T_g , T_m 및 ΔH_m 변화는 PK와 SAN가 상용성이 있는 것으로 해석된다.

PK/SAN 블렌드의 형태학 및 기계적 성질. PK/SAN 블렌드의 형태학을 SEM으로 관찰하였다. 그중 SAN 함량이 30과 50 wt%인 블렌드의 SEM 사진을 Figure 3에 나타냈다.

에칭 처리를 하지 않은 시편(Figure 3의 좌측 이미지)에서는 분산상인 SAN을 뚜렷하게 식별하기 어려웠다. 전체적으로 비교적 균일한 형태를 보이며, PK와 SAN이 한 상을 이루는 것처럼 관찰되었다. 그러나 SAN을 선택적으로 제거한 이후에는 두 상이 명확히 구분되는 상 분리 구조가 확인되었다.

이와 유사한 형태학적 거동은 PK/p(AN-*r*-MMA), PK/SAN 및 PK/PA6 블렌드에 대한 이전 연구에서도 보고된 바 있다.^{9,10,12} 해당 블렌드들 역시 분산상을 제거하지 않은 상태에서는 두 상을 명확하게 구분하기 어려웠다. 이는 시편을 파단하여 단면을 관찰하는 과정에서 균열이 상의 계면을 따라 진행되지 않고, 분산상을 관통하는 경로로 전파되었기 때문으로 해석된다. 일반적으로 비상용 블렌드의 경우 계면 접착력이 낮아 파단이 주로 계면을 따라 발생하는 경향이 있다. 그러나 PK/SAN, PK/PA6 및 PK/p(AN-*r*-MMA) 블렌드에서는 상대적으로 높은 계면 접착력이 형성되어, 균열이 계면을 따라 진행하기 보다는 minor phase 내부를 통과하여 전파된 것으로 판단된다.

분산상의 평균 크기를 측정된 결과를 SEM 사진 옆에 나타냈다. SAN56이 SAN45에 비해 PK 연속상 안에서 훨씬 작은 크기의 분산상을 이루었고 두 SAN의 점도가 비슷한 것으로 측정되었다(Figure S1). 이로부터 AN 함량이 증가할수록 SAN과 PK의 상용성이 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

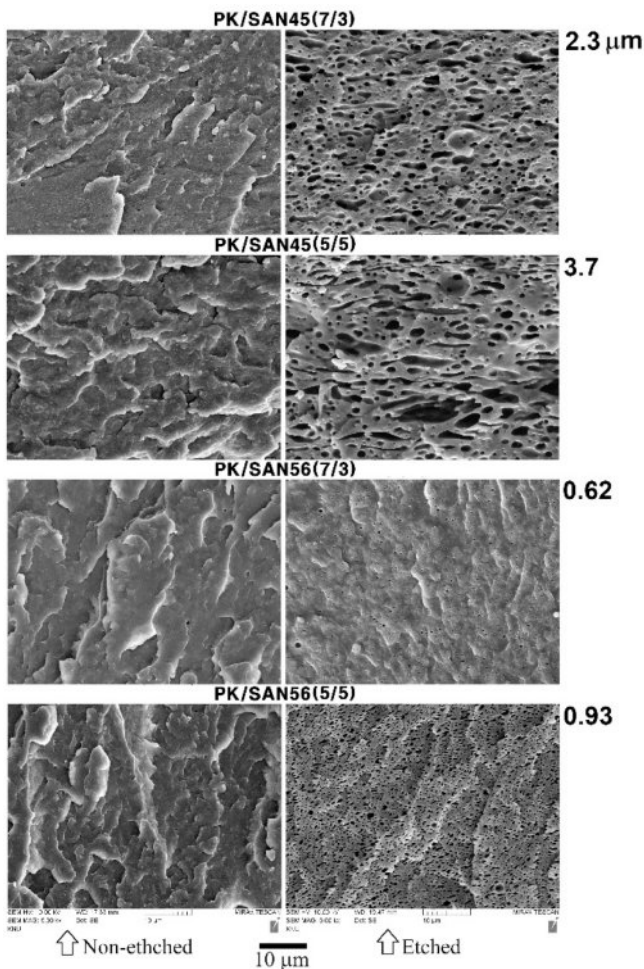


Figure 3. SEM micrographs of PK/SAN blends.

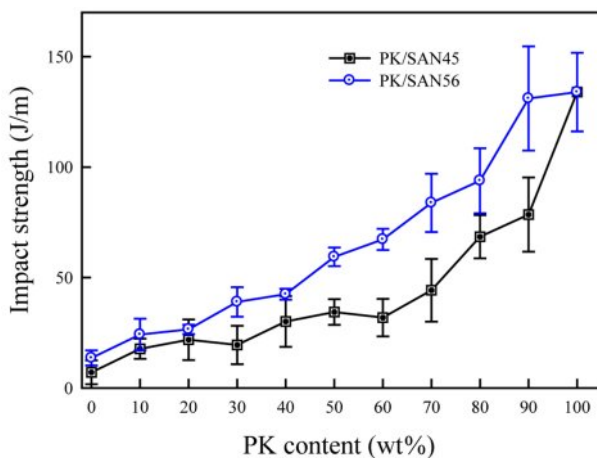


Figure 4. Izod impact strength of PK/SAN blends.

Figure 4에 PK/SAN 블렌드의 충격강도를 나타냈다. PK/SAN 블렌드의 충격강도는 전 조성에서 negative deviation을 보였다. 그러나 PK/SAN56 블렌드는 일반적인 비상용성 블

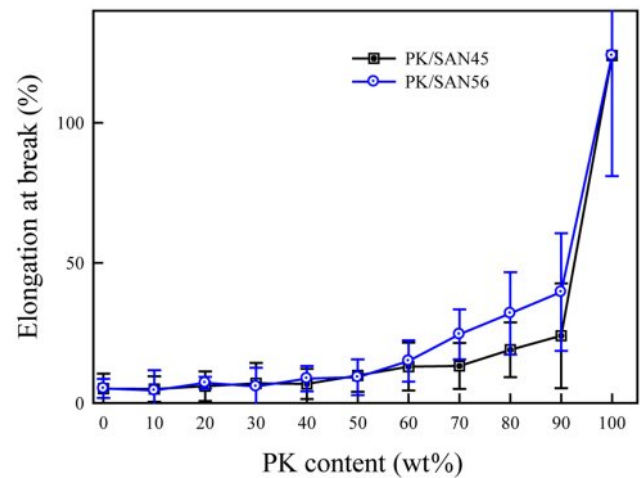


Figure 5. Elongation-at-break of PK/SAN blends.

렌드에서 관찰되는 정도의 강한 negative deviation을 보이지는 않았다. SAN과 PK는 혼화성(miscibility)을 보이지는 않았지만 PK/SAN56이 PK/SAN45 보다 더 적은 negative deviation을 나타내는 것으로 보아 AN 함량이 높을수록 SAN과 PK의 상용성(compatibility)이 높아지는 것으로 보인다.

Figure 5에 PK/SAN의 파단 신율을 나타냈다. 충격강도의 결과와는 달리 파단 신율은 강한 negative deviation을 나타냈다. 파단 신율이 124% 인 PK에 10%의 SAN을 혼합하면 블렌드의 파단 신율이 급격히 감소하여 40% 이하가 되었다. 충격 강도 결과와 마찬가지로 PK/SAN56이 PK/SAN45 보다 높은 파단 신율을 보였고 더 적은 negative deviation을 나타냈다.

PK의 가교 반응. 우리는 이전의 연구에서 PA6나 p(AN-*r*-MMA)를 PK에 블렌드하였을 때 PK의 가교화가 증가한다 것을 관찰하였다.^{11,12} AN 함량이 높은 p(AN-*r*-MMA)를 혼합할수록 PK의 가교화가 가속화된다는 것을 시편의 색변화, FTIR, 용해되지 않는 겔성분의 증가, 혼련 시간(mixing time)에 따른 점도 증가 등으로 확인한 바 있다. PK/PA6의 경우에도 말단이 -NH₂ 인 PA6가 말단이 acid로 치환된 PA6보다 PK의 가교화를 증가시킨다는 것을 관찰하였다.

PA6나 p(AN-*r*-MMA) 모두 질소를 포함하는 고분자이기 때문에 본 연구의 SAN이 PK의 가교화를 증가시키는지 확인하기 위하여 PK/SAN(9/1) 블렌드의 혼련 시간에 따른 충격강도와 미용해 성분의 양을 측정하였고 그 결과를 Figure 6에 나타냈다. PK/SAN 블렌드를 FA에 용해시키면 일부 블렌드에서 겔과 같은 미용해 성분(insoluble fraction)을 볼 수 있었는데 이 미용해 성분은 가교된 PK로 추정된다. Figure 7에는 해당 시료의 사진을 나타냈다. PK/SAN45는 혼련 시간에 따른 충격 강도 및 미용해 성분의 변화가 거의 없었지만 PK/SAN56 블렌드는 혼련 시간이 증가함에 따라 충격 강도와 미

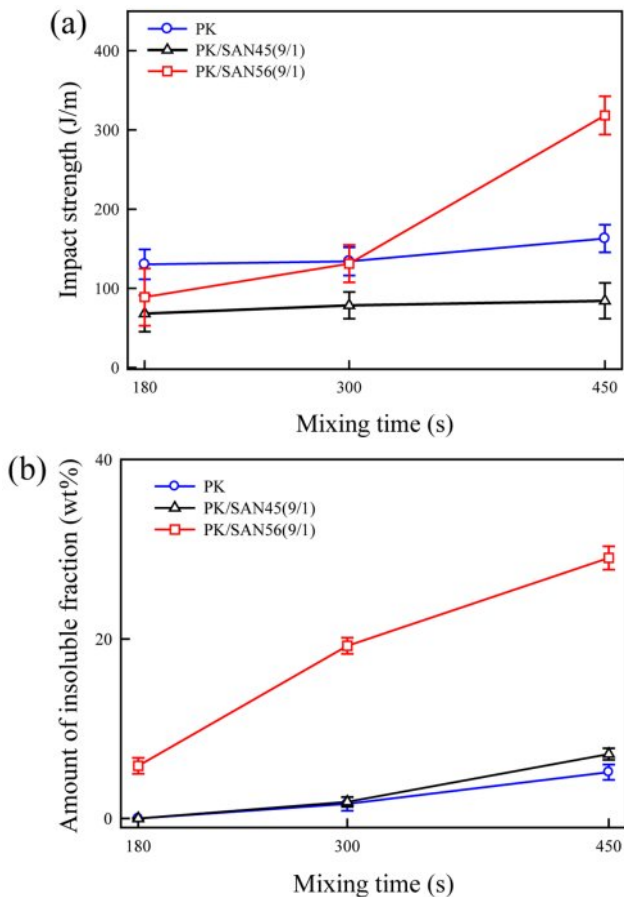


Figure 6. Izod impact strength: (a) amount of insoluble fraction; (b) of PK/SAN (9/1) blends as a function of mixing time.

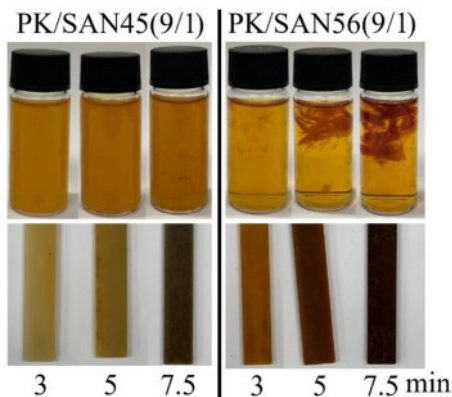


Figure 7. Photos of PK/SAN specimens and their solution in FA.

용해 성분이 증가하고 시편의 색은 점점 진한 갈색으로 바뀌었다. SAN56이 PK의 가교를 증가시킬 때 가능한 실험 결과이다.

PK의 가교가 진행됨에 따라 충격강도, 미용해성분이 증가하고 시편 색이 진한 갈색으로 바뀌는 현상은 이전의 PK/PA6

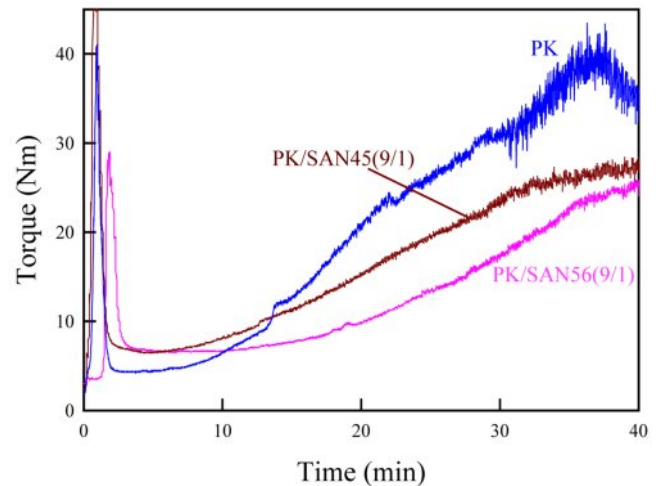


Figure 8. Mixing torque of PK and PK/SAN blends compounded in an internal batch mixer at 260 °C and 50 rpm.

및 PK/p(AN-*r*-MMA)에서도 관찰된 결과이다. 그러나 매우 중요한 차이가 있었는데 혼련 시 점도의 변화였다.

Figure 8에 혼련시 토크의 변화를 나타냈다. 우리는 이전의 연구에서 PK/PA6와 PK/p(AN-*r*-MMA) 혼련시 혼련 토크가 시간에 따라 증가하였고 블렌드의 토크가 PK만을 가공했을 때의 토크보다 훨씬 큰 것을 관찰하였다. 그러나 이 연구에서는 PK에 SAN을 혼련시 시간에 따라 색은 점점 진해졌지만 혼련 토크는 PK만을 가공했을 때의 토크보다 약간 낮았다. PK/SAN56의 혼련 토크가 PK/SAN45의 혼련 토크보다 더 낮았다. Internal batch mixer에서 40분간 가공 후 시료의 상태를 보면 PK만을 가공한 경우 많은 양의 기공들이 형성된 흔적을 볼 수 있었다. 가공 과정에 반응에 의해 기체가 발생한 것 같이 많은 기공들이 형성되어 있었다. 또한 이 시료를 다시 압축 성형하면 PK만을 40분 가공한 경우 melting이 원활하게 이루어 지지 않은 것을 확인할 수 있었다. 반면 SAN을 혼합한 블렌드는 시료의 색은 검게 변했지만 기공의 형성은

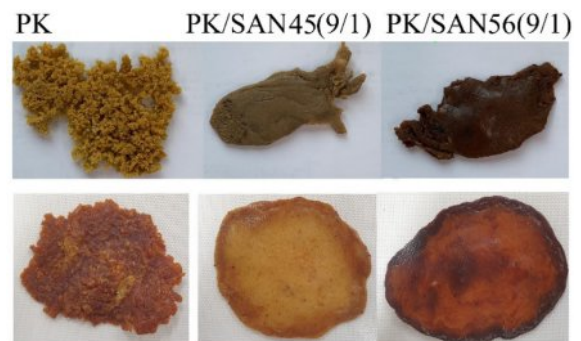


Figure 9. Specimens processed in an internal batch mixer for 40 minutes at 240 °C (top) and compression-molded 240 °C after melt mixing (bottom).

거의 없었고 압축 성형도 잘되는 것으로 보아 오히려 PK의 가교화가 억제되는 것처럼 보인다(Figure 9).

PK/SAN45 블렌드가 혼련 시간에 따라 색이 점점 어두워지고 충격강도와 미용해 성분이 증가하지 않는 것은 SAN의 $-C\equiv N$ 기로 인한 변색으로 설명이 가능하지만 PK/SAN56 블렌드의 충격강도와 미용해 성분이 시간에 따라 증가하는 것은 PK의 가교 이외에는 설명하기가 어렵다. 이 실험 결과 간의 불일치는 현재로는 그 원인을 알 수는 없다. SAN에 존재하는 AN과 PK의 카르보닐의 상호 작용으로 PK의 카르보닐간의 가교화를 억제해주는 것으로 추측된다. 혼련 시간에 따라 충격강도가 증가하는 것과 미용해 성분이 증가하는 이유는 후속 연구가 필요하다. 정확한 이유는 모르지만 다음과 같은 가능성은 생각할 수 있다. SAN의 $-C\equiv N$ 기가 PK의 카르보닐기와의 쌍극자-쌍극자 상호작용을 통해 PK 가교 반응의 활성화 에너지를 낮추는 동시에, SAN 자체가 가교 반응의 일부 경로를 차단하는 역할을 할 수 있다. 이로 인해 완전한 3차원 가교 네트워크 형성은 억제되면서도 국소적인 구조 변화로 인한 미용해 성분은 일부 형성될 수 있다. 또한 SAN56의 높은 AN 함량으로 인한 PK와의 부분 혼화성이 계면 면적을 증가시켜, 이 영역에서의 국소적인 물리적 얽힘(physical entanglement)이 증가하여 미용해 성분처럼 거동할 수 있다.

이 연구에서는 AN 함량이 높은 SAN56을 PK에 소량 투입하는 경우 충격강도는 감소하지 않고 PK의 열안정성(고온에서 가교로 인한 변성)을 개선시킬 수 있음을 확인한 것에 의미가 있다고 생각한다.

결 론

PK에 AN 함량이 다른 두 종류의 SAN(SAN45, SAN56)을 용융 혼련하여 블렌드를 제조하였고 상용성, 열적 특성, 기계적 물성 및 가교 반응을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

AN 함량이 증가할수록 PK와 SAN의 상용성이 향상되었다. PK/SAN56 블렌드는 PK/SAN45 블렌드보다 더 미세한 분산상 구조를 보였고, DSC 분석에서 PK의 T_g 가 SAN56 함량 증가에 따라 뚜렷이 상승하였다.

PK/SAN56 블렌드는 혼련 시간 증가에 따라 충격강도와 FA 불용 성분이 증가하였으며 시편 색이 갈색으로 변하였다. 이는 SAN56이 PK의 가교화를 촉진할 때 예상되는 결과이다. 그러나 PK/SAN 블렌드의 혼련 토크는 SAN의 투입에 따라 감소하였고 고온에서 장시간 혼련하여 가교화된 PK는 재가공시 용융이 어려웠으나, SAN을 소량 혼합한 블렌드는 같은 조건에서 가공 후 재가공 하였을 때 용융이 되었다. 이로부터 SAN은 PK의 가교를 억제한다는 것을 알 수 있었다. PK에 소량의 SAN56을 첨가하는 경우 충격강도의 큰 손실 없이 PK의 열안정성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글: 이 논문은 2026년 국립공주대학교 학술연구 지원사업의 연구 지원에 의하여 연구되었음.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

Supporting Information: 이 연구에서 사용된 고분자 및 고분자 블렌드의 열적성질과 SAN45 및 SAN56의 용융점도 데이터는 다음 사이트에서 얻을 수 있습니다(<http://journal.polymer-korea.or.kr>).

참 고 문 헌

- Markarian, J. Unique Properties Drive the Polyketone Revival. *Compounding World* [Online], 2016, March, 15-22. <http://www.compoundingworld.com> (accessed September 9, in 2026).
- Yang, Y.; Li, S.-Y.; Bao, R.-Y.; Liu, Z.-Y.; Yang, M.-B.; Tan, C.-B.; Yang, W. Progress in Polyketone Materials: Blends and Composites. *Polym. Int.* **2018**, 67, 1478-1487.
- Patel, R.; Trivedi, R.; Raj, M.; Raj, L. Preparation and Characterization of Chitosan/LDPE Polymeric Blends Compatibilized with LDPE-g-MA. *J. Polym. Res.* **2025**, 32, 36.
- Morgado, G. F. M.; de Moura, N. K.; Martins, E. F.; Escanio, C. A.; Backes, E. H.; Marini, J.; Passador, F. R. Effect of Blend Ratio on Thermal, Mechanical, and Shape Memory Properties of Poly(lactic acid)/Thermoplastic Polyurethane Bio-Blends. *J. Polym. Res.* **2022**, 29, 533.
- Dadashi, P.; Soltani, E.; Elhamnia, M.; Hashemi Motlagh, G. Decoupling Interfacial Compatibilization and Chain Extension in Polymer Blends Using Rheology: PBAT/EVOH with MDI. *J. Polym. Res.* **2025**, 32, 32.
- Zhou, Y. C.; Li, S. Y.; Yang, Y.; Bao, R. Y.; Liu, Z. Y.; Yang, M. B.; Yang, W. Morphologies, Interfacial Interaction and Mechanical Performance of Super-Tough Nanostructured PK/PA6 Blends. *Polym. Test.* **2020**, 91, 106777.
- Zhai, Y.; Luo, Y.; Wang, X.; Zhang, C.; Deng, P.; Chen, H.; Zhang, R.; Bao, R.; Zhou, Y.; Yang, M.; Yang, W. Understanding the Molecular Origin of the Superior Toughness of Polyamide 6/Polyketone Blends by Solid State NMR Spectroscopy. *Polymer* **2022**, 259, 125324.
- Asano, A.; Nishioka, M.; Takahashi, Y.; Kato, A.; Hikasa, S.; Iwabuki, H.; Nagata, K.; Sato, H.; Hasegawa, T.; Sawabe, H.; Arao, M.; Suda, T.; Isoda, A.; Mukai, M.; Ishikawa, D.; Izumi, T. High Impact Properties of Polyketone/Polyamide-6 Alloys Induced by Characteristic Morphology and Water Absorption. *Macromolecules* **2009**, 42, 9506-9514.
- Kwon, H. G.; Hwang, T. G.; Kim, D. H.; Son, Y. G. Study on the Effect of Chemical Reaction between Component Polymers and Gelation on the Physical Properties of Aliphatic Polyketone/Polyamide 6 Blends. *Polym. Korea* **2021**, 45, 748-756.
- Kwon, H. G.; Park, J.; Kim, N.; Lee, S.; Shim, J.; Lee, M.; Son, Y. High Impact Strength of Aliphatic Polyketone/Polyamide 6

- Blends Induced by a Chemical Reaction. *J. Elastomers Plast.* **2023**, 55, 492-510.
11. Park, J.; Son, Y. Effect of Cross-Linking Reaction on the Mechanical Properties of Aliphatic Polyketone/Polyamide 6 Blend. *J. Polym. Res.* **2026**, 33, 124.
 12. Park, J.; Son, Y. Study on Compatibility of Aliphatic Polyketone/Poly(acrylonitrile-*r*-methyl methacrylate) Blend. *Polym. Korea* **2025**, 49, 810-817.
 13. Lee, H. C.; Son, Y.; Lee, S. Study of Compatibility Between Aliphatic Polyketone Terpolymer and Poly(styrene-*r*-acrylonitrile). *J. Appl. Polym. Sci.* **2020**, 137, 48743.
 14. Son, Y. Development of a Novel Microcompounder for Polymer Blends and Nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* **2009**, 112, 609-619.
 15. Lee, H.-Y.; Kim, D. H.; Son, Y. Anomalous Rheological Behavior of Polyethylene Melts in the Gross Melt Fracture Regime in the Capillary Extrusion. *Polymer* **2006**, 47, 3929-3934.
 16. Lodge, T. P.; McLeish, T. C. B. Self-Concentrations and Effective Glass Transition Temperatures in Polymer Blends. *Macromolecules* **2000**, 33, 5278-5284.
 17. Safari, M.; Otaegi, I.; Aramburu, N.; Wang, Y.; Liu, G.; Dong, X.; Wang, D.; Guerrica-Echevarria, G.; Müller, A. J. Composition Dependent Miscibility in the Crystalline State of Polyamide 6/Polyamide 4,10 Blends: From Single to Double Crystalline Blends. *Polymer* **2021**, 221, 123637.
- 출판자 공지사항:** 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.