The Korean Journal of Rheology,
Vol. 2, No. 1, June 1990, pp.79-86

〈연구논문〉

불포화 폴리에스터/폴리우레탄 IPN 구조를 가진 복합재료의 기계적 성질과 저수축 특성

여운길 · 김성철

한국과학기술원 화공과
(1990년 6월 11일 접수)

Mechanical Properties and Low-profile Characteristics of Composites with Unsaturated Polyester/Polyurethane IPN Structure

Un Gil Yeo and Sung Chul Kim

Department of Chemical Engineering, KAIST P.O. Box 131, Cheongryangri, Seoul, Korea
(Received June 11, 1990)

요 약

상업적으로 많이 이용되는 불포화 폴리에스터 섬유강화 복합재료에 내충격성을 향상시키고 수축성을 보완시킬 목적으로 폴리우레탄을 첨가하여 IPN(Interpenetrating Polymer Network) 구조를 갖는 matrix를 제조하였다. 폴리우레탄의 조성과 가교밀도를 변화시키면서 DMA(Dynamic Mechanical Analysis) 실험과 기계적 물성을 측정하였다. 실험결과 폴리우레탄의 조성이 증가할수록 가교밀도가 낮을수록 상분리가 일어나 폴리우레탄 domain이 형성되며 내충격성이 향상되었다. 가교간 분자량이 ($\bar{M}_c$)2840이고 폴리우레탄 함량이 20 wt%일 때가 내충격성을 향상시키는 최적 조건으로 관찰되었다. 이 때 인장강도는 13% 감소를 보인 반면에 내충격성은 22%의 증가를 나타내었다. PTMG(Poly(tetramethylene ether glycol))계 폴리우레탄이 PPG(Polypropylene glycol)계 폴리우레탄보다 내충격성이 높았다. 또한 성형품이 표면상태가 특별한 low-profile 첨가제 없이도 매끈한 면으로 향상되었다.

Abstract— The mechanical properties and low-profile characteristics of unsaturated polyester/polyurethane (UPE-PU) IPN materials as matrices of the fiber-reinforced composites were studied for the application of sheet molding compound (SMC) process. Improved impact strength was observed with increasing the content of polyurethane and lowering the crosslink density in the polyurethane network. Optimum condition for the UPE-PU IPN matrix was obtained when polyurethane content was 20% and $\bar{M}c$ was 2840. In this case, impact strength was increased 22% and tensile strength was decreased 13%. PTMG based polyurethane showed better impact strength than PPG based PU did. On increasing the content and $\bar{M}c$ of polyurethane the low-profile characteristics of the IPN matrices was improved.

Keywords: Unsaturated polyester/Polyurethane/IPN/Mechanical property/Low-profile

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 고강도의 섬유와 matrix 수지로 구성되는데 서로 경계면을 형성하여 각 구성요소만으로는 나타낼 수 없는 향상된 물성을 나타낸다 섬유는 섬유강화 복합재료의 주 구성요소로서 복합재료에 가해진 하중의 대부분을 견디는 작용을 한다. 또한 matrix는 복합재료의 인장 하중을 견디는데 있어서는 상대적으로 부차적인 역할을 하지만 in-plane shear 특성이나 interlamina shear 특성에(비틀림 강도, 휨강도, 충격강도) 중요한 역할을 하므로 matrix 수지의 선택이 매우 중요하다[1].

최근에는 epoxy나 불포화 폴리에스터와 같은 열경화성 수지가 상업적으로 많이 사용되고 있다. 특히 불포화 폴리에스터의 복합재료 성형품은 고강도와 치수안정성, 내약품성, 내후성와에 가볍다는 특성에서 우수함을 인정받고 있다. 그러나 불포화 폴리에스터계는 매우 brittle하여 충격강도를 보완하여야 할 필요성이 있다. 충격강도를 보완하는 방법 중 하나는 고무 특성을 갖는 반응성 고분자를 불포화 폴리에스터의 경화반응에 도입함으로써 내충격성을 개선시키는 것이다. 이 방법은 기본적으로 상호 침투하는 고분자 구조(Interpenetrating Polymer Network, IPN)의 응용이다.

IPN은 일반 고분자 blend와의 다른 몇 가지 특성을 갖는다. 일반고분자 blend의 경우 화합결합이 없는 단순한 두 고분자의 혼합물로서 계면접착강도가 낮은 단점이 있으며, 중합이 완결된 후에 혼합하므로 열가소성 고분자 물질의 경우에만 이용될 수 있다. 반면 IPN의 경우는 혼합한 후에 중합반응을 시키며, 각 조성물의 상호 침투와 가교 구조로 말미암아 상분리가 억제되고 균일한 혼합상태를 유지시켜 일반 blend 물보다 훨씬 높은 기계적 물성과 내약품성을 보여주고 있다.

UPE-PU IPN은 1970년대 후반부터 연구되기 시작한 것으로 불포화 폴리에스터의 강도 및 내약품성 폴리우레탄의 내충격성을 IPN 기술을 이용하여 서로 보완시킴으로써 좋은 물성을 갖는 복합재료를 개발하여 반응사출성형(Reaction Injection Molding), SMC 등의 가공에 이용하고자 하는데 착안하고 있다.

1965년 Buckanll과 Smith는 brittle한 플라스틱 재료에 소량의 고무입자가 첨가될 때 강인성이 증가되는 현상을 Multiple crazing 이론에 의하여 설명하였다[4]. 이 이론에 의하면 고무입자는 craze들의 발생을 용이하게 할 뿐만 아니라, craze가 인접한 고무입자를 만나면 고무입자가 craze 선단부분의 응력을 임계치 이하로 낮추어 성장을 멈추게 한다. 그러나 분산된 입자의 탄성계수가 크면 craze 선단의 높은 응력을 완화시키지 못하고, 또한 고무입자간의 간격이 너무 가까우면 한번 발생한 craze가 아무런 제한 없이 계속 성장하여 crack으로 변하며, 결국 파괴에 이르게 된다. 따라서 강인성은 craze의 발생 정도에 의존하는 것이 아니라 발생한 craze의 크기를 임계치 이하로 유지시킬 수 있는 능력에 크게 좌우된다는 것이다. Multiple crazing 이론에 따르면 고무입자의 크기나 양은 강인성에 매우 중요한 요인이 된다.

불포화 폴리에스터 수지는 가교반응시 중합반응 수축을 보이는데, 이 때문에 강화제로 도입된 유리섬유가 성형품의 표면에 드러나게 되어 표면 처리가 필요하다[2, 3]. 중합반응 수축을 감소시키고 표면을 매끈하게 하기 위하여 열가소성 고분자로 혼합하는 것이 일반적인 방법이다. 이 때 열가성 고분자는 불포화 폴리에스터 수지가 중합반응을 일으킴에 따라 상분리가 진행되어 domain을 형성하며, 열팽창 과정을 통하여 중합반응 수축을 상쇄한다. 이로 인하여 불포화 폴리에스터가 강화된 후에도 성형품의 표면은 매끈하게 유지될 수 있다.

본 연구의 목적은 섬유강화 복합재료의 matrix로서 UPE-PU IPN 구조가 성형품의 기계적 물성에 미치는 영향과 폴리우레탄의 첨가에 의하여 불포화 폴리에스터 경화시 수축율을 감소시키는 low-profile 작용에 대하여 살펴보는 것이다.

2. 실 험

2.1. 시 료

실험에서 사용된 물질로서 불포화 폴리에스터는 38.6 wt%의 styrene monomer에 녹인 것으로 한국내쇼날 합성에서 제공한 MP-756을 사용하였다. 개시제로는 고온반응용 개시제 TBPB(t-buthyl peroxybenzoate)를 불포화 폴리에스터 수지 기준으로 1phr 사용하였다. 폴리우레탄의 반응물로서 PPG와 PTMG를 long diol로 하여 가교성분은 TMP(trimethylol propane), isocyanate 성분은 MDI(4,4'-diphenylmethane diisocyanate)를 사용하였다. PPG와 PTMG는 수분이 함유되어 있을 경우 MDI와 수분이 반응하여 CO_2를 발생시켜 성형품 내부에 기포를 만들므로 40℃에서 4시간 동안 2mmHg로 진공건조하였다. 충진제로서

Table 1. Materials

Destination	Description	Source
PPG	Poly (propylene glycol) ($\bar{M}w$ = 1000)	Korea Polyol
PTMG	Poly (tetramethylene ether glycol) ($\bar{M}w$ = 997)	du pont de Nemours
TMP	Trimethylol propane	Tokyo Kasei
MDI	4, 4'-diphenyl methane diisocyanate	Mitsui Nisso Urethane
UPE	Unsaturated Polyester (MP-756)	National Chem. Co.
	61.4% wt nonvolatile	National Chem. Co.
GF	Glass fiber (L = 0.6 in)	National Chem. Co.
$CaCO_3$	Calcium carbonate	National Chem. Co.
ZnSt	Zinc stearate	National Chem. Co.
MgO	Magnesium oxide	National Chem. Co.
TBPB	t-Butyl peroxybenzoate	National Chem. Co.

$CaCO_3$는 수분제거를 위해 고온처리된 것을 사용하였다. 내부 이형제로는 Zinc Stearate를 사용하여 경화반응이 끝난 후 mold로부터 성형품이 잘 떨어지도록 하였으며, thickner로는 MgO를 사용하여 불포화 폴리에스터의 말단 carboxyl기와 이온결합을 형성시킴으로써 혼합물의 점도를 높였다. 사용된 시약과 재료는 Table 1에 정리하였다.

2.2. 제 법

섬유강화 복합재료의 성형품은 압축성형법에 의하여 제조되었는데 성형품의 조성은 Table 2와 같다. 이는 상업용 SMC의 조성과 동일하며 실험변수로서 수지총량 기준으로 폴리우레탄의 조성을 변화시켰다. 제조방법은 먼저 조성비에 따라 각 물질을 혼합한 후 25℃에서 2시간 동안 hardening을 시켰다. 이 과정 동안 MgO와 불포화 폴리에스터의 말단기에 있는 carboxyl 그룹간에 이온결합이 생겨 혼합물의 점도가 증가되어 paste 상태에서 gel 상태가 되었다. 그 후 10×10×0.3 (cm) mold 판에 채운 후 일정한 압력을(8.5 ton) 가하여 130℃에서 15분간 경화시켰다. 실험은 폴리우레탄의 조성 변화와 가교밀도의 변화에 따라 행하였는데, 가교밀도는 TMP의 당량을 변화시킴으로써 조절하였다. 또한 폴리우레탄의 종류를 변화시켜 PPG를 사용한 복합재료와 PTMG를 사용한 것을 비교하였다. 폴리우레탄의 경화반응은 MDI가 반응성이 좋으므로 특별한 촉매를 사용하지 않고 열경화하여 제조하였다.

Table 2. Formulation of FRP

Material	Content	
Resin (UPE + PU)	100pbw	
$CaCO_3$	100pbw	
ZnSt	3pbw	
MgO	0.7pbw	
TBPB	1pbw	72%
GF		28%

*pbw = parts by weight

2.3. 시 험

만들어진 성형품은 기계적 물성조사와 상분리 상태를 알아 보기 위해 DMA 실험을 하였다. 기계적 물성조사는 인장강도와 충격강도를 보았으며, DMA는 Du Pont model을 사용하였다. 물성조사를 위해 시편제작은 ASTM 규격에 따라 하였으며 인장강도 시험은 Instron을 사용하여 인장속도를 5mm/min로 행하였다. 충격강도는 Yasuda Seikei Tester를 이용하여 조사하였다. DMA 시편은 1.5×7×2.2(mm)로 제작하였으며 가열속도는 10℃/min로 하였다. 성형품의 low-profile 특성조사를 위해 성형품 단면의 표면 profile에 대해 현미경(×75) 사진을 찍어 비교하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. PPG계 폴리우레탄의 함량과 가교밀도에 따른 기계적 물성 변화

Fig. 1, 2는 DMA에 의한 tanδ의 측정결과이다. Fig. 1은 PPG계 폴리우레탄을 이용한 IPN의 특성으로 불포화 폴리에스터의 Tg가 220℃ 근처로 관찰되었고, 폴리우레탄의 함량이 증가함에 따라 −20℃ 근처의 tanδ peak가 점차 커지고 낮은 온도로 이동함이 관찰되었다. 일반적으로 DMA 실험에 의해 알 수 있는 것은 고분자의 거동을 분자 범위에서 관찰할 수 있다는

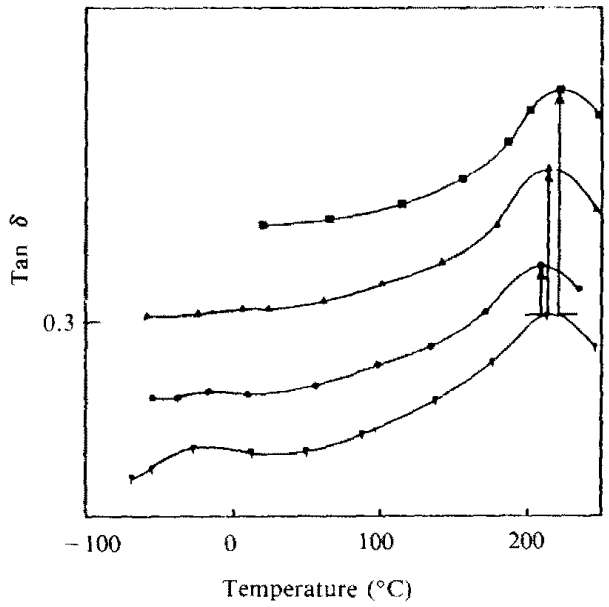

Fig. 1. Dissipation factor (tan δ) as a function of temperature for PPG based PU-UPE IPN matrix materials.
(■) UPE (▲) PU 10% (●) PU 20% (▽) PU 30%
(curves are shifted vertically to avoid overlapping)

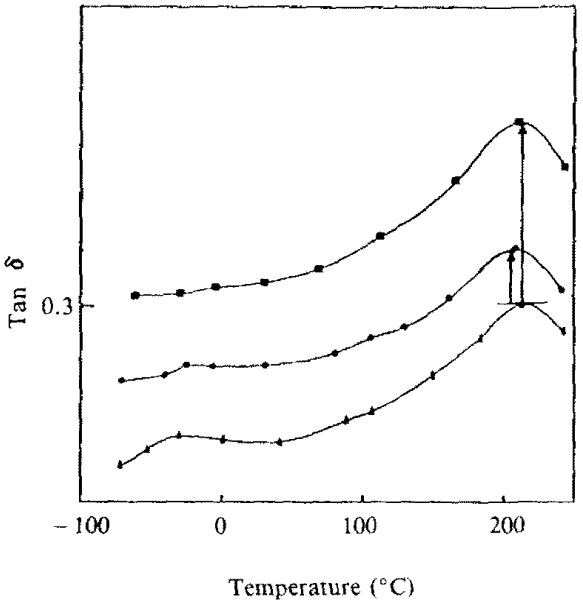

Fig. 2. Dissipation factor (tan δ) as a function of temperature for the PPG based PU 30%-UPE 70% IPN.
(■) $\bar{M}c = 960$ (●) $\bar{M}c = 1590$ (▲) $\bar{M}c = 2840$
(curves are shifted vertically to avoid overlapping)

것이다. 고무분자는 brittle 한 matrix 와 IPN 을 형성할 경우 matrix 에 의해 운동이 제한되므로 기존의 고무분자 Tg 보다 높게 측정되며 matrix 는 고무분자에 의해 운동이 자유로와져서 modulus 가 감소되며 Tg 가 낮게 측정된다. Fig. 1 에서 −20℃ 근처의 Tg 가 저온으로 이동된 것은 폴리우레탄 함량이 증가됨에 따라 상분리가 진행되어 폴리우레탄 domain 이 형성된 것으로 생각된다. 그러나 폴리우레탄을 matrix 에 첨가함에 따라 고온의 tanδ peak 가 200℃ 근처로 이동하여, 불포화 폴리에스터의 Tg 와 비교할 때 더 낮게 측정되었다. 이러한 결과는 matrix 내에서는 폴리우레탄 그물구조가 IPN 을 형성하였음을 나타낸다.

Fig. 2 는 폴리우레탄 함량이 30% 일 때 폴리우레탄의 가교밀도를 변화시키면서 tanδ 를 측정한 결과인데, 폴리우레탄의 가교간 분자량($\bar{M}_c$)이 증가함에 따라 modulus 가 감소되며 −20℃ 근처의 tanδ peak 가 저온으로 이동되었다. 그 이유는 폴리우레탄의 가교밀도가 증가될수록 IPN 구조가 치밀해져서 상분리가 억제되며 $\bar{M}_c$가 증가될수록 두 고분자간의 상용성이 나빠져 상분리가 일어나 폴리우레탄 domain 이 형성되기 때문이다. Fig. 2 에서 $\bar{M}_c$가 960 일 때 단일 peak 가 보이는 것은 분자단위의 혼합이 일어나 폴리우레탄 domain 이 형성되지 않았기 때문이다.

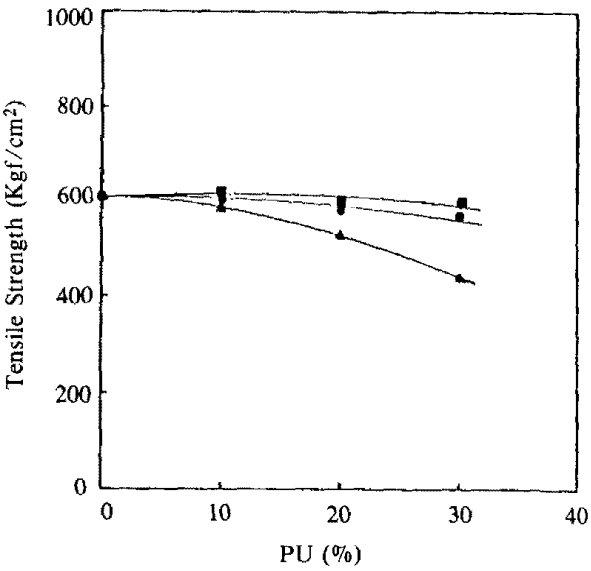

Fig. 3. Effect of PPG based PU content on tensile strength in PU-UPE IPN's
(■) $\bar{M}c = 960$ (●) $\bar{M}c = 1590$ (▲) $\bar{M}c = 2840$

Fig. 3 은 폴리우레탄 함량과 가교밀도에 따른 인장강도를 나타낸 것이다. 인장강도는 폴리우레탄 함량이 증가함에 따라 감소되는 특성을 나타내는데 $\bar{M}_c$가 클 때 더욱 큰 차이가 보이고 있다. 특히 $\bar{M}_c$가 2840 일 때는 폴리우레탄 함량이 30% 에서 최고 30% 의 인장강도의

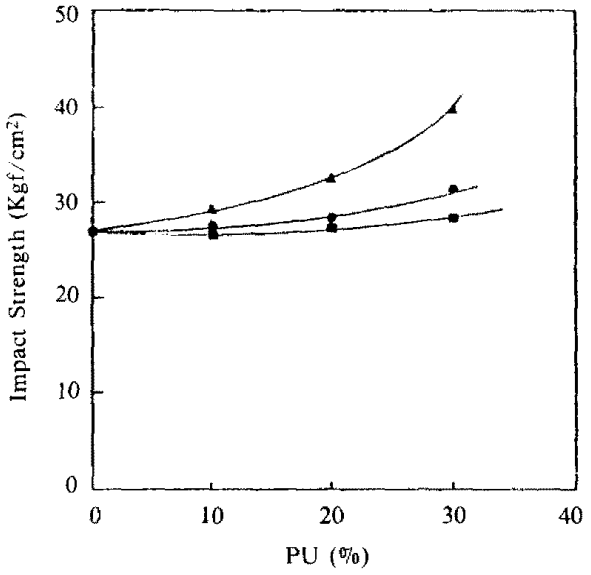

Fig. 4. Effect of PPG based PU content on impact strength in PU-UPE IPN's
(■) $\bar{M}c = 960$ (●) $\bar{M}c = 1590$ (▲) $\bar{M}c = 2840$

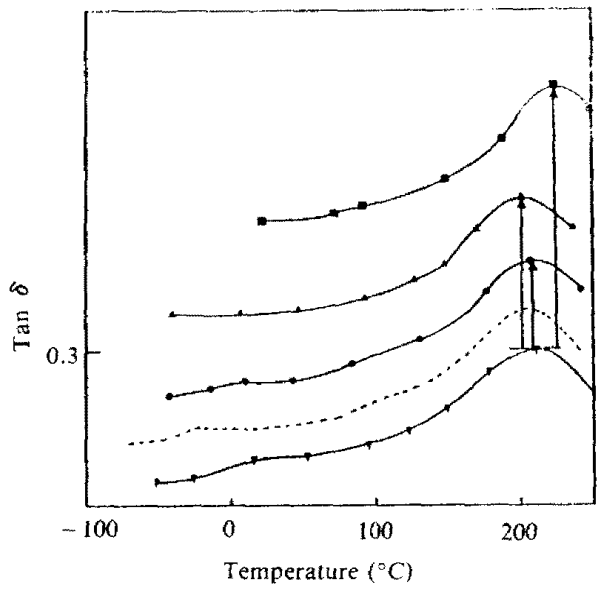

Fig. 5. Dissipation factor (tan δ) as a function of temperature for the PTMG based PU-UPE IPN matrix materials.
(■) UPE (▲) PU 10% (●) PU 20% (▼) PU 30%
dashed line: PPG-PU 30% /UPE 70% IPN for comparison
(curves are shifted vertically to avoid overlapping)

감소를 보이고 있다. 그러나 $\bar{M}_c$가 1590나 960일 때는 인장강도가 불포화 폴리에스터 복합재료보다 크게 떨어지지 않고 있음을 볼 수 있다. 이는 $\bar{M}_c$가 클수록 UPE-PU 간의 상용성이 떨어져 폴리우레탄 domain이 형성되며, 이에 따라 matrix가 유연성을 갖기 때문이다. 또한 $\bar{M}_c$가 작을수록 IPN 구조는 치밀해져서 불포화 폴리에스터가 연속상을 이루며 인장강도가 높은 것으로 생각된다.

Fig. 4는 복합재료의 내충격성을 측정한 결과로서 폴리우레탄의 함량과 가교밀도를 변화시켰다. 폴리우레탄의 함량이 증가할수록 복합재료의 내충격성은 향상되었는데 $\bar{M}_c$가 2840일 때 가장 큰 효과를 나타내었다. 특히 폴리우레탄 함량이 30%일 때 순수한 불포화 폴리에스터 복합재료의 내충격보다 50% 향상되었는데 이는 인장강도가 감소된 정도보다 크게 증가된 것으로 폴리우레탄이 impact modifier로서 사용될 수 있음을 보인다. 이러한 사실은 폴리우레탄이 불포화 폴리에스터 matrix에 domain을 형성함으로써, 충격이 가해질 때 폴리우레탄 입자가 응력 집중원으로 작용하여 입자 주위에 조그만 craze를 많이 발생시킴으로써 에너지를 분산시키기 때문이다.

3.2. 폴리우레탄 종류에 따른 IPN 복합재료의 물성 비교

본 실험에서는 PPG를 long diol로서 사용한 폴리우레탄과 PTMG를 사용한 폴리우레탄을 impact modifier로 하여 불포화 폴리에스터와 IPN을 형성시켜 물성 변화를 살펴보았다.

Fig. 5는 PTMG계 PU의 함량에 따른 DMA 실험결과이다. Fig. 1과 같은 경향을 보이는데 폴리우레탄의 함량이 증가할수록 tanδ peak는 두개로 나뉘어져 상분리가 일어남을 보인다. matrix의 Tg인 고온의 tanδ 거동을 살펴보면 폴리우레탄이 첨가된 IPN의 경우 약 200℃ 근처에서 나타남을 볼 수 있다. Fig. 5에서 점선으로 된 곡선은 PPG계 PU의 M_c가 1590일 때 30%에서 측정된 tanδ이다. PPG계 PU IPN의 matrix에 대한 Tg가 180℃ 근처에서 측정 되었는데, PTMG계 PU 30%의 IPN matrix에 대한 Tg와 비교하면 약 10℃의 Tg 이동이 있음을 알 수 있었다. 이는 PTMG계 PU가 PPG계 PU보다 상용성이 좋지 않아서 상분리가 잘 일어남을 나타낸다.

Fig. 6은 PTMG계 PU를 사용한 복합재료와 PPG계 PU를 사용한 복합재료의 인장강도를 나타낸 것으로 폴리우레탄 함량에 따른 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 폴리우레탄 함량이 20%까지 PTMG계 PU의 인장강도가 PPG-PU의 강도보다 높게 나타났으며, PTMG-PU의 경우 순수한 불포화 폴리에스터 복합재료보다 더 큰 인장강도를 보였다. 이러

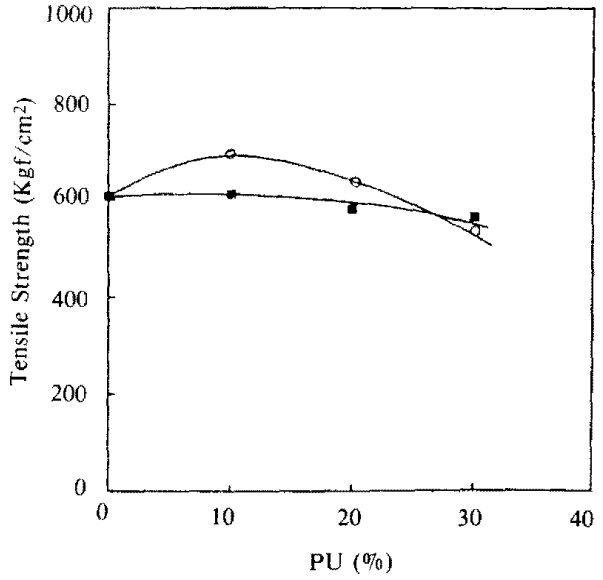

Fig. 6. Comparison of the tensile strength between IPN composites using PPG based PU and PTMG based PU ($\bar{M}c = 1590$) in PU-UPN's.
(■) PPG based PU (○) PTMG based PU

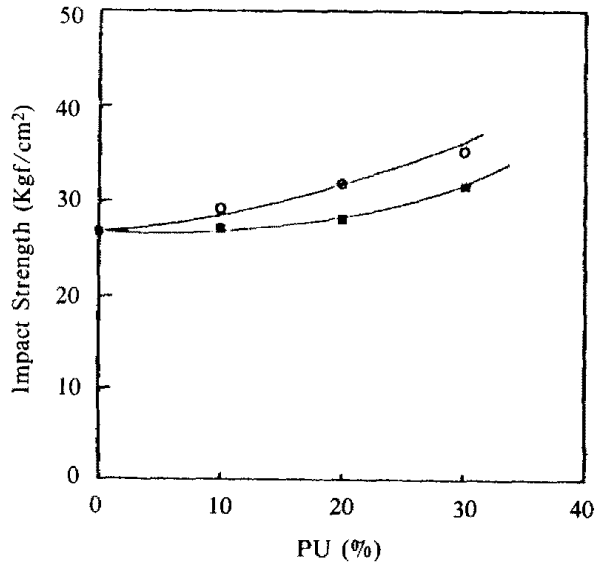

Fig. 7. Comparison of the impact strength between IPN composites using PPG based PU and PTMG based PU ($\bar{M}c = 1590$) in PU-UPN's.
(■) PPG based PU (○) PTMG based PU

한 현상은 가끔 특정 IPN에서 볼 수 있는 것으로 상승효과(synergistic effect)로 볼 수 있다.

앞에서 관찰된 결과로 미루어 볼 때 PTMG계 PU가 PPG계 PU보다 복합재료의 유연성을 높이며 상분리로 인하여 내충격성을 향상시킬 것으로 예상되었다. Fig. 7은 이러한 예상결과와 일치한다. PTMG계 PU의 경우 폴리우레탄 함량이 30%일 때 내충격성이 37% 증가되었으나 PPG계 PU의 경우 14%만 증가되었을 뿐이다. 또한 인장강도를 적절히 유지시키면서 내충격성을 향상시킬 수 있는 것으로 생각되는 20%에서는 PPG계 PU의 경우 내충격성을 거의 향상시키지 못하였으나 PTMG계 PU의 경우 15% 정도 향상됨이 관찰되었다. 따라서 PTMG계 PU가 PPG계 PU보다 우수한 impact modifier로서 사용될 수 있다고 여겨진다.

3.3. Low-profile 특성

Fig. 8, 9, 10은 복합재료 성형품의 단면을 현미경(×75) 사진으로 찍은 것이다. Fig. 8, 9의 경우 폴리우레탄의 함량에 따른 성형품의 표면상태를 나타낸 것인데, PPG계 PU와 PTMG계 PU 모두 폴리우레탄의 함량이 증가할수록 표면상태가 향상되었다. 그 이유는 불포

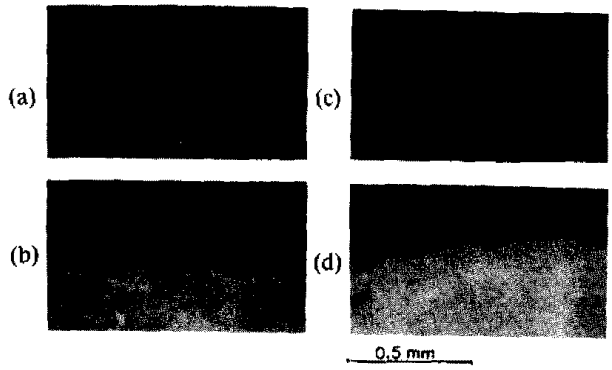

Fig. 8. Surface profile characteristics of IPN composites with varying PPG based PU content ($\bar{M}c = 960$).
(a) UPE (b) PU 20% (c) PU 10% (d) PU 30%

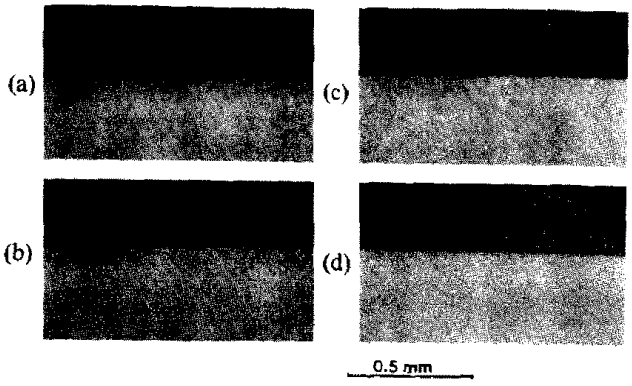

Fig. 9. Surface profile characteristics of IPN composites with varying PTMG based PU content ($\bar{M}c = 1590$).
(a) UPE (b) PU 20% (c) PU 10% (d) PU 30%

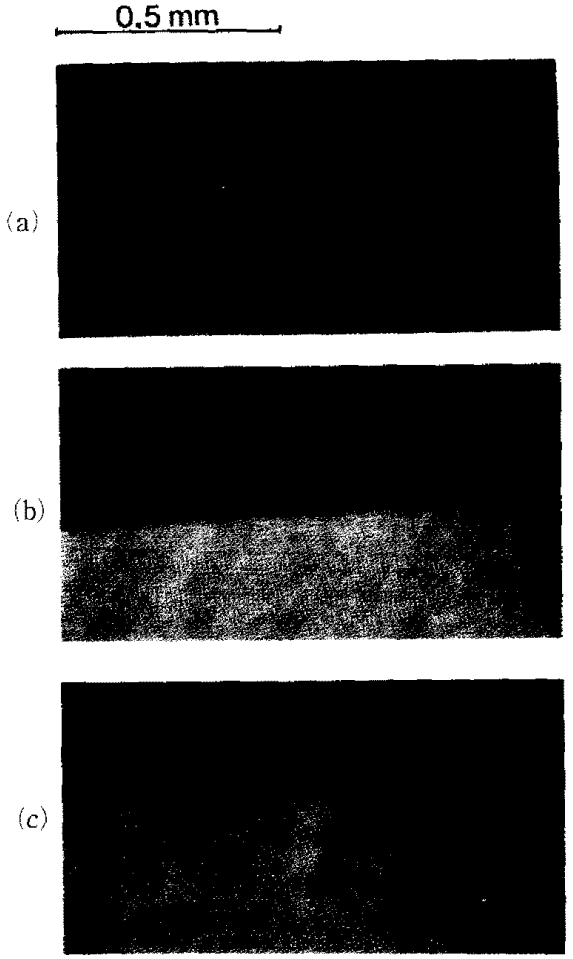

Fig. 10. Surface profile characteristics of IPN composites with varying $\bar{M}c$. (PU = 10 wt %)
(a) $\bar{M}c$ = 960 (b) $\bar{M}c$ = 1590 (c) $\bar{M}c$ = 2840

화 폴리에스터만 사용한 복합재료는 경화반응 중 수축이 심하게 일어나 표면이 고르지 못하지만 폴리우레탄을 첨가한 경우에는 폴리우레탄이 domain을 형성하여 경화반응 중 열팽창을 함으로써 성형품의 표면상태를 일정하게 유지시키기 때문이다. Fig. 8, 9에서는 PTMG계 PU와 PPG계 PU의 low-profile 특성의 차이점을 구별할 수 없었다. 그 이유는 low-profile 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는 방법도 없었고, 여러경의 배율을 높이는데 어려움이 있었기 때문이다. Fig. 10은 폴리우레탄의 함량이 10%로 일정할 때 $\bar{M}_c$가 증가할수록 표면상태가 향상됨을 보인다. 이는 폴리우레탄의 $\bar{M}_c$가 증가할수록 matrix내 폴리우레탄 domain이 형성되어 불포화 폴리에스터의 중합수축을 열팽창으로써 보완하여 주기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 matrix로서 UPE-PU IPN 구조가 성형품의 기계적 물성에 미치는 영향과 폴리우레탄의 low-profile 특성에 대하여 살펴보았다.

(1) 폴리우레탄의 함량과 $\bar{M}_c$ 변화에 따른 물성 변화.

폴리우레탄의 함량과 $\bar{M}_c$를 변화시켜 UPE-PU IPN의 상호혼합도를 조절할 수 있었다. 그 결과로 두 물질의 상용성을 변화시켜 폴리우레탄 domain의 형성을 조절함으로써 물성 변화를 관찰하였다. PPG계 PU를 impact modifier로 사용한 경우 인장강도를 적게 감소시키고 내충격성을 적절히 향상시키는 최적 조건으로, $\bar{M}_c$가 2840이며 폴리우레탄 함량이 20% 정도일 때로 관찰되었다. 이 때 인장강도는 불포화 폴리에스터 복합재료에 비해 13% 정도 감소되었지만 충격강도는 22% 향상됨을 보였다.

(2) PTMG계 PU와 PPG계 PU의 물성 비교.

PTMG계 PU와 PPG계 PU간의 물성 비교에서는 PTMG계 PU가 PPG계 PU보다 우수한 물성을 보였는데, DMA 실험에 의하여 PTMG계 PU의 경우 IPN matrix 내에서 적절한 크기의 domain을 형성함으로써 우수한 내충격성을 나타내는 것으로 관찰되었다. 폴리우레탄의 함량이 30%일 때 PPG계 PU의 경우 14% 정도의 내충격성이 향상되었지만 PTMG계 PU의 경우 37%의 내충격성이 향상되었다. 또한 PTMG계 PU는 인장강도에 있어서 상승효과가 일어나 20% 함량에서는 순수한 불포화 폴리에스터의 강도보다 높게 관찰되었다.

(3) low-profile 측정

본 실험에 사용된 IPN matrix는 특별한 low-profile 첨가제없이 폴리우레탄의 가교밀도와 함량을 조절함으로써 표면상태를 향상시킬 수 있었다. 폴리우레탄 함량을 증가시키거나 $\bar{M}_c$를 증가시킴에 따라 폴리우레탄이 domain을 형성하였으며 이에 따라 성형품의 표면이 매끈하게 재조되었다. 그러나 PTMG계 PU와 PPG계 PU간의 low-profile 작용에 대한 차이는 관찰할 수 없었다.

참고문헌

1. P.K. Mallick, "Fiber-reinforced composites", 1st ed.,

Marcell Dekker, Inc., (1988).
2. Robert Burn, "Plastics, Engineering Series", Vol. 2, 1st ed., Marcell Dekker, Inc., (1983).
3. K.E. Atkins, S.P.I. Reinforced Thermost Press Molding Committee Meeting, *St. Lowis, Nov.*, **28**, (1973).
4. C.B. Bucknall and R.R. Smith, *Polymer*, **6**, 437 (1965).
5. J.H. Kim & S.C. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 1243 (1987).
6. J.H. Kim, & S.C. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 1252 (1987).