

자동차용 폴리머 복합재료의 변형과 강도에 관한 연구

신재훈* · 임재규** · 박한주***

A study on deformation and strength of polymer composites using automobiles

Je-Hoon Shin, Jae-Kyoo Lim and Han-Ju Park

Key Words: Polypropylene(폴리프로필렌:PP), Double edged notch(DEN), Polarizing Microscope(편광현미경), load duration section(하중지속구간), stress whitening zone(응력백화영역)

Abstract

The effect of the temperature, the fatigue and the test speed on DEN(double edged notch) specimen which was made by the pp-rubber composites during fracture was stued. DEN specimen was made on PP-rubber composites through the injection molding. With increasing temperature the fracture strength is linearly decrease and the fracture energy is first increase by 0℃ and after that decrease. In the same temperature the fracture strength during increasing the notch radius is hardly increase. The fracture behaviour at low and high test speed is different entirely. At high test speed plastic region is small and fracture behaviour was seen to brittle fracture tendency. The deformation mechanism of polypropylene-rubber composites during fracture was studied by SEM fractography. A strong plastic deformation of the matrix material ahead of the notch/crack occured. The deformation seem to be enhanced by a thermal blunting of the notch/crack.

1. 서 론

폴리머 재료는 19세기 후반에 신재료로 개발된 이래 현재에 이르기까지 발전을 거듭하여 왔고[11], 근래에도 기계부품의 기어, 캠, 자동차부품의 범퍼, 스포일러, 기계 판넬, 라디에이터 그릴, 가스 탱크, 휠 커버, 펜더 등과 전기·전자제품, 토목·건축에 이르기까지 모든 산업에 사용되고 있으며 특히, 우주항공분야와 자동차 분

야의 경량화 추세에 따라 중요한 구조요소로 복합재료의 응용이 증가됨에 따라 많은 종류가 개발되고 있으며 그 사용량이 점차 증가하고 있다.[10] 신소재를 중심으로 한 재료기술의 발달로 많은 금속재료가 플라스틱으로 대체되고 있으며 높은 신뢰성이 요구되 의장, 기능부품에의 플라스틱화에 있어서 엔지니어링 플라스틱이 주목받고 있으며 그 중에서도 PP(polypropylene)와 ABS(acrylonitrile butadiene styrene)의 사용이 증가 추세에 있다. 특히, 자동차 분야의 활용 면에서 PP는 전체 열가소성수지 중에 42%에 달하는 가장 큰 수요를 나타내며, 주로 장식류, 범퍼와 같은 내·외장재료로 사용되고 있다.[10]

PP는 1957년 이태리의 Montedison사에 의해서 산업화된 이래 30여년에 걸쳐 촉매, 공정, 첨가제, 합금, 가공기술에 종사하는 여러 사람들에 의해 괄목할 만한 발전을 이룩하였다.[12] PP는

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 공과대학 기계공학부

*** 전북대학교 대학원

매우 흥미로운 기계적·열적 특성을 갖는 반결정 폴리머로 연화온도가 높은 편이며 인장강도, 굽힘강도, 강성은 크지만 인성 특히 노치인성은 엔지니어링 플라스틱으로 적용하기에 충분치 않다. PP에 인성을 증가시키기 위해서는 고무를 첨가한다. 고무를 첨가함으로써 탄성계수와 항복응력 같은 인장특성은 감소하지만 파괴인성은 증가한다.[3] 하지만 고무 첨가량이 많으면 도리어 다른 성질이 지나치게 나빠지므로 특성값들의 균형을 유지할 수 있는 적정량의 고무 첨가가 중요한 문제라고 할 수 있다.

본 연구에서는 자동차용재로 사용될 PP-고무 복합재료의 노치 선단 반경의 크기에 따른 변형과 강도를 평가하고 그에 따른 파괴메커니즘을 밝히고자 한다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 PP와 고무를 혼합한 혼합물로 사출성형 하여 그림1.에서 보이는 시험편을 제작하였다. 시험편은 노치 선단에 반경(R) 0, 0.2, 0.5, 0.7, 1, 2, 10, 50mm의 라운드를 준 상태로 제작된 볼드에 혼합물을 녹여 사출한 다음 크기가 100×20×4mm인 시험편을 제작하였고 중심부의 단면은 10×4mm로 일정하며 노치 선단의 작은 반경이 커짐에 따라 증가하게 된다.

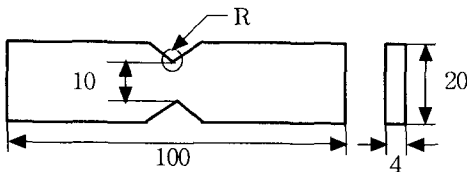


Fig.1 Dimensions of specimen(in mm)

2.2 실험조건

본 실험은 시험편에 인장하중과 반복하중을 가하여 이에 따른 강도 특성과 파면 양상을 관찰한다.

2.2 1. 인장실험

본 실험은 온도에 따른 노치 특성을 평가하기 위해서 -30, 0, 20, 50, 80℃의 온도범위로 나

누어 실험을 하였다. 각각의 온도범위에서 노치 선단의 반경이 0, 0.5, 1, 2mm인 시험편에 대해서 최대하중과 파괴에너지를 구한다. 여기서 파괴에너지는 P-δ선도에서 항복점을 지나 완전 파괴에 도달할 때까지의 면적으로 구한다. PP-고무 혼합물로 제작된 시험편은 온도에 따른 강도의 변화가 민감하므로 실내 온도를 일정하게 유지시켜 준다. 인장시험기의 하중속도는 2mm/min(저속)과 20mm/min(고속) 두 가지로 나누어서 실험을 했고, 고속의 경우에는 상온에서 만 평가했다. 인장시험에 사용한 시험기는 인스트론사에서 제작된 용량 15ton인 인장시험기를 이용했다.

2.2 2. 피로실험

노치에 따른 피로특성을 평가하기 위해서 노치 선단의 반경이 0, 0.5, 1, 2mm 네 가지로 나누어서 실험을 하였고, 10, 50mm의 경우에는 2mm와 인장특성들이 비슷하므로 본 실험에서 제외하였다. 응력비(stress ratio)는 0(0-tension), 주파수 10Hz로 피로실험을 하였다. 피로하중은 최대하중의 70%와 50% 범위에서 피로하중을 주었다. 이로 인한 파괴 에너지와 피로강도의 변화를 측정하였다. 여기서 피로강도는 10⁴사이클까지 반복하중을 가한 후 인장시험을 했을 때의 최대하중을 말한다. 피로시험에 사용한 시험기는 인스트론사에서 제작된 용량 2ton인 만능시험기를 사용하였다.

2.2 3. 파면관찰

PP-고무 복합재료는 온도(-30, 0, 20, 50, 80℃)나 피로(10⁴사이클) 그리고 시험속도(2mm/min, 20mm/min)에 따라서 약간씩 다른 파괴 양상을 보인다. 따라서 이러한 균열 성장 과정과 온도, 시험속도와와의 관계를 알아보기 위해 인장 및 피로시험을 행한 시험편의 파면을 편광현미경(polarizing microscope; Nikon Microphoto-SA/60H4)과 Image analysis(BMI)를 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장실험

3.1 1. 온도에 따른 노치의 영향

PP-고무 복합재료의 인장특성에 미치는 노치의 영향을 알아보기 위해서 노치 선단의 반경 (R)이 0, 0.2, 0.5, 0.7, 1, 2, 10mm인 시편을 -30, 0, 20, 50, 80°C에서 인장실험을 하였다. 상온에서 인장시험을 한 결과가 Fig.2에 나타내었다. Fig.2의 P- δ 선도에서 알 수 있는 바와 같이 노치 선단의 반경이 1mm를 전후하여 두 영역으로 나뉘는데 서로 비슷한 경향을 보인다. Fig.3은 노치 선단의 반경에 따른 최대하중과 파괴에너지의 변화를 나타낸 것이다. 파괴에너지는 노치 선단 반경이 1mm일 때까지 급격한 증가를 보여주며 이후 거의 변화를 보이지 않는다. 이것은 노치 선단의 반경 증가로 인한 노치효과의 감소로 기인한다.

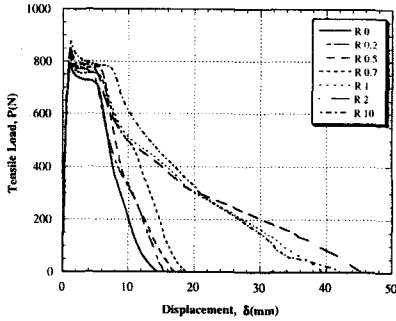


Fig.2 Tensile load versus displacement for the radius of notch tip at room temperature

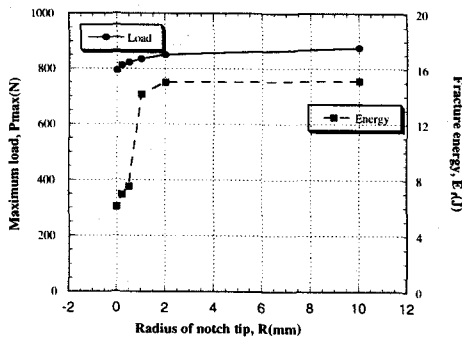


Fig.3 Relation between maximum load and fracture energy for the radius of notch tip at room temperature

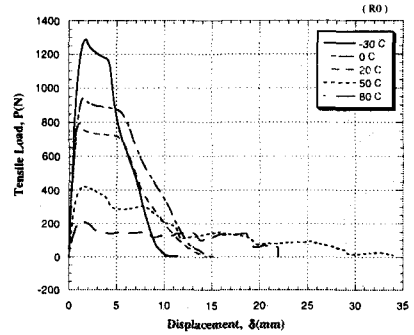


Fig.4 Tensile load versus displacement for various temperature at R0

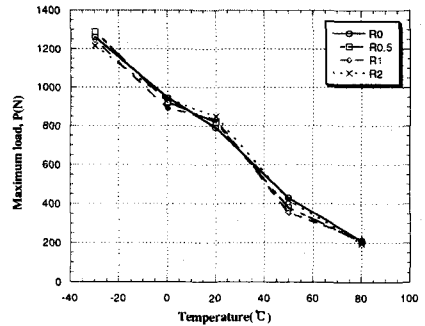


Fig.5 Maximum load versus temperature for the radius of notch tip

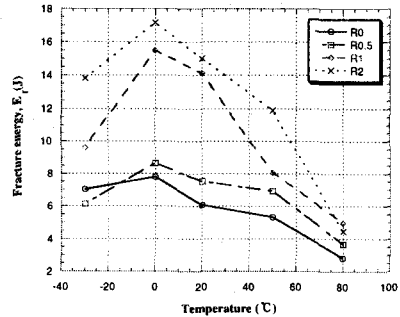


Fig.6 Fracture energy versus temperature for the radius of notch tip at various temperature

Fig.4는 R0인 시편의 온도에 따른 P- δ 선도를 나타내는데 최대하중점 이후 변곡점(두번째 피크점)까지를 하중지속구간(load duration section)이라고 명하고 이 구간에서 necking 현상이 일어나는 것으로 관찰되었다. 이 구간에서는

고무입자들로 인한 공공의 형성과 합체로 인한 미소크랙이 발생하고 크랙이 진전되다가 시편 두께의 33%(R0의 경우) 정도 됐을 때 하중이 급격하게 감소한다. 온도가 증가할수록 강도는 줄어드는 반면 하중지속구간 이후 변형구간이 길어진다. Fig.5에서는 온도가 증가함에 따라 최대 하중이 선형적으로 감소한다. 온도가 -30°C 에서 80°C 까지 110°C 증가하는데 강도는 1200N에서 200N까지 1000N 정도의 감소를 보인다. 노치 선단의 반경 변화에 보다는 온도에 상당히 민감하게 반응하는 재료임을 알 수 있다. Fig.6은 온도의 증가에 따른 파괴에너지를 나타낸다. 저온부에서는 온도가 증가할수록 파괴에너지가 증가하다가 0°C 에서 최대값을 나타내고 이후 고온부로 갈수록 파괴에너지가 감소한다. 0°C 부근에서 노치 영향의 증가로 R0과 R2 사이에 파괴에너지 차이가 2배를 넘는다. 고온부로 갈수록 그 차이가 줄어들는데 이는 온도상승으로 인해 노치효과가 줄어들었기 때문이다.

3.1 2. Crosshead speed에 따른 노치의 영향

온도가 증가할수록 최대하중은 감소하고 소성영역은 온도로 인한 늘어짐 때문에 커지게 된다. 반면에 저온으로 갈수록 취성적인 경향을 가지게 된다. 시험속도를 20mm/min으로 증가했을 때 파괴양상은 저온에서와 비슷하다. Fig.7에서 보면 하중지속구간(load duration section) 이후에 소성영역이 없는 것을 볼 수 있다. 항복점을 지나면서 생긴 중심부의 미소크랙이 시험속도 증가로 인해 급격하게 크랙이 진전되고 파괴되기 때문에 이후 소성영역이 없다. 강도도 2mm/min에서 보다 약간 증가했다. Fig.8은 R1에서 하중과 파괴에너지가 최대값을 가진다. Fig.3과 비교할 때 파괴에너지가 15J에서 4J로 급격한 감소를 보이고 있다.

3.2 피로실험

3.2 1. 하중에 따른 노치의 영향

PP-고무 복합재료로 제작한 시편에 최대하중의 70%와 50% 범위에서 피로하중을 가했다. Fig.9는 10^4 cycles의 피로를 가했을 때 피로하중 값에 따른 파괴에너지와 최대하중값의 변화를 나타낸다. 노치 선단의 반경이 0.5mm에서 1mm로

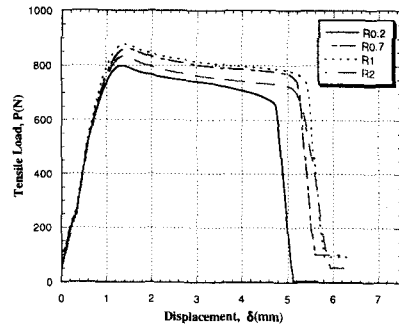


Fig.7 Tensile load versus displacement for the radius of notch tip at 20mm/min

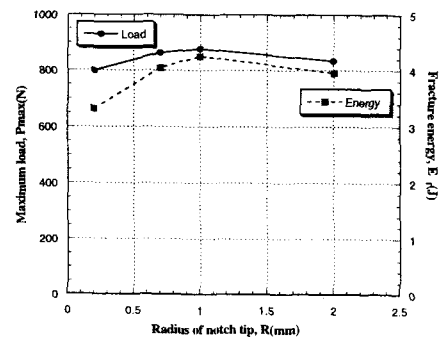


Fig.8 Maximum load and fracture energy versus radius of notch tip at 20mm/min

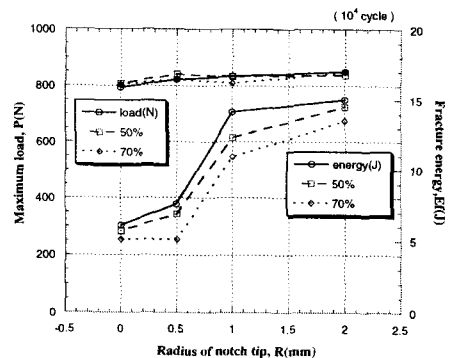


Fig.9 Maximum load and fracture energy versus radius of notch tip for 50% and 70% fatigue load at 10^4 cycles

될 때 파괴에너지가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있고, 최대하중은 완만한 증가를 보인다. 피로

를 가지지 않은 값을 나타내는 실선과 비교할 때 최대하중은 변화가 적는데 파괴에너지의 변화가 크다. 이것은 Fig.10에서 피로를 가지지 않은 파괴에너지와 70%와 50% 범위에서 파괴하중을 가했을 때 파괴에너지와의 차이값을 파괴에너지 감소율(decrease ratio)로 나타냈다. 파괴에너지 감소율이 피로하중이 70%일 때가 50%일 때보다 2배 이상 높고 R1에서 최대값을 나타낸다. 파괴에너지 감소율이 높다는 말은 피로에 대한 민감도가 높다고도 말할 수 있다.

3.3 2. P-N 곡선

노치에 따른 피로특성을 평가하기 위해서 하중(P)과 피로 사이클수와의 관계로 나타냈다. Fig.11에서 보면 R0, R0.5와 R1, R2가 서로 비슷한 경향을 띠고 있다. 노치로 인한 피로강도의 감소가 노치반경이 작을수록 심하고 피로한도에 도달할 때 차이는 R2의 경우 50% 피로강도에서 R0의 20% 피로강도로 30%의 큰 차이를 보이고 있다.

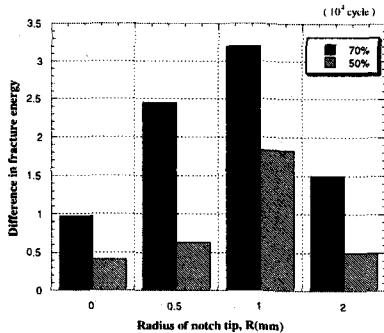


Fig.10 Decrease ratio of fracture energy for 50% and 70% fatigue load at 10^4 cycles

3.3 파면관찰

피로파괴는 노치 부근에서 파괴가 시작되어 중심부에서 최종적으로 파단되며 취성파괴의 형태를 나타내며, 하중속도를 20mm/min으로 높여서 인장실험을 한 경우 중심부에서 크랙이 발생하여 바깥쪽으로 갑작스럽게 확산되면서 컵-컵의 파면 형태를 가진다. Fig.12는 -30°C , 0°C , 20°C 에서 사출성형시 게이트에 가까운 쪽에 파단 양상을 나타낸다. R0과 R0.5의 경우에 노치효과가 크게 작용함을 그림으로 알 수 있다. Fig.13(a)의

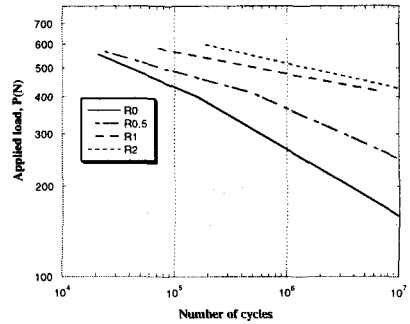


Fig.11 Applied load(P) versus number of cycles for the radius of notch tip

경우 중심부의 크랙으로 파단된 이후에도 표면층의 영향으로 상당히 늘어진 형상을 볼 수 있다. 이는 사출 성형시 생기는 중심과 표층과의 유동속도 배향성의 차이 때문에 결과 속이 특성이 서로 다르기 때문일 것으로 추측된다. (b)와 (c)는 하중이 가해질 경우 공공(void)의 발생으로 인한 내부와 표층의 분리와 온도로 인한 결합이 계속적으로 반복되는 것으로 예상된다. Fig.14는 인장하중을 가해 파단된 시편을 길이방향으로 절단한 파면이다. 크랙 선단에서 미소 공공의 밀도가 높고, 중심부로 갈수록 밀도가 줄어든다. 육안으로 관찰되는 크랙 주위가 하얗게 변하는 응력백화영역(stress whitening zone)은 미소 공공(void)의 밀도와 밀접한 관련이 있다.

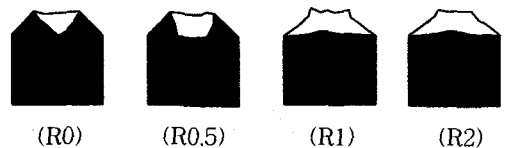


Fig.12 Schematic diagram of failure plane for the radius of notch tip at -30°C , 0°C , 20°C



(c)



Fig.13 Fractural photograph for R2 at 20°C, 50°C, 80°C

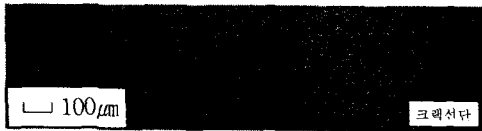


Fig.14 Microscope obtain by cutting the specimen with length direction after tensile failure

4. 결론

본 연구는 노치로 인한 영향을 평가하기 위해서 온도와 피로하중 그리고 하중 속도에 대해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1>온도에 대한 노치의 영향이 R1을 중심으로 두 부류로 나뉜다. 온도 증가로 최대하중은 선형적으로 감소하고 파괴에너지는 0°C 부근에서 최대값을 가지며 최대하중은 노치의 크기에 상관없이 비슷한 값을 가진다.

2>하중속도를 20mm/min으로 했을 때 2mr./min과 비교해서 대략 70%의 파괴에너지가 감소했으며 R1에서 최대값을 가진다.

3>최대하중의 50%와 70%에서 피로를 가하지 않을 시편과의 파괴에너지 감소율이 두 배 이상 차이가 났으며 R1에서 감소율이 최대이다. R0.5에서 R1로 갈 때 파괴에너지가 100%가량 증가했으며 최대하중은 큰 차이가 없다.

4>P-N 곡선에서도 R1이상부터 피로강도 값이 현저하게 증가되었다.

연구결과 PP-고무 복합재료로 제작된 시험편의 노치 선단의 반경(R)은 1mm 이상일 때 모든 특성값이 우수하게 평가되었다.

후 기

“이 논문은 1999년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었음“

- (1) P. K. Mallick, S. Newman, "Composite Materials Technology", 1990, pp.103-148
- (2) A. van der Wal, J. J. Mulder, J. Oderkerk and R. J. Gaymans, "Polypropylene-rubber blends: 1.The effect of the matrix properties on the impact behavior", Polymer, Vol.39 No.26, 1998, pp.6781-6787
- (3) A. van der Wal, R. J. Gaymans, "Polypropylene - rubber blends: 5.Deformation mechanism during fracture", Polymer, Vol.40, 1999, pp.6067-6075
- (4) Z. Bartczak, A. S. Argon, R. E. Cohen, M. Weinberg, "Toughness mechanism in semi-crystalline polymer blends: I.High-density polyethylene toughened with rubbers", Polymer, Vol.40, 1999, pp.2331-2346
- (5) G. Wildes, H. Keskkula, D.R. Raul, "Fracture characterization of PC/ABS blends: effect of reactive compatibilization, ABS type and rubber concentration", polymer, Vol.40, 1999, 7087-7107
- (6) 차상환, 강태진, 김종섭, "폴리에스테르 코드 브레이드와 고무에 의한 복합재료에 관한 연구(I)", 한국섬유공학회지, 제32권 제7호, 1995, pp.672-678
- (7) 임재규, 박한주, 김연직, "단섬유강화 PP복합재료의 강도특성에 미치는 환경영향 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제5호, 1999, PP.772-779
- (8) 임기철, "PP신제품 동향과 그 응용", 고분자과학과 기술, 제4권 2호, 1993, pp.98-103
- (9) Donald R. Askeland, "재료과학과 공학", 사이텍미디어, 1999, pp.501-540
- (10) Polymer Science and Technology, Vol.6 No.4, 1995
- (11) 最新 Plastic材料, 大光書林, 1990, pp.3-5
- (12) 最新 플라스틱技術, 日本플라스틱技術協會, 大阪市立工業研究所 共編, 성안당