

論文

자동차 프론트엔드모듈 캐리어용 경량 복합소재의 고속인장 시험

강우종⁺, 김성태^{**}High Strain Rate Tensile Test of Composite Material
for Automotive Front End Module CarrierWoo-Jong Kang⁺, Sung-Tae Kim^{**}

ABSTRACT

High strain rate tensile tests were performed to measure the strain rate sensitivity of fiber reinforced composite material. The composite material was developed for the light weight design of an automotive FEM(front end module) carrier. Standard specimens for quasi-static tests of fiber reinforced composites can be found in ASTM D3039. However, in case of high strain rate tests, it was hard to find standard specimen shapes. In this study, three kinds of tensile specimens designed based on ASTM D638 were investigated to determine the adequate gauge width of tensile specimen for fiber reinforced composite. A drop tower type of high speed tensile apparatus was developed for strain rates of about 15/s and 100/s. Gauge width of 6mm, 8mm and 10mm were investigated. Test results showed the specimen of 8mm width was adequate for the high strain rate tensile tests of fiber reinforced composite. It was found the strength of the composite material increased as the strain rate increased.

초 록

경량복합소재의 고속인장시험을 수행하여 변형률속도에 따른 강도변화를 측정하고자 한다. 준 정적 시험인 경우 섬유강화 복합소재의 인장시험은 ASTM D3039에 따른 시편 형상이 사용되지만 고속 인장시험인 경우 표준화된 시편 형상에 대한 연구가 진행되어 있지 않다. 본 연구에서는 ASTM D638에 나타난 시편 형상을 기본으로 몇 가지 변형된 형태의 시편을 가지고 고속인장 시험을 수행하여 변형률 속도에 따른 경량복합소재의 강도 변화를 측정하였다. 낙하방식의 고속인장 시험기를 제작하여 변형률 속도 15/s, 100/s에서 시편의 형상에 따른 섬유강화 복합소재의 인장거동을 측정하였으며 시편의 폭이 6mm, 8mm, 10mm인 경우에 대하여 시험을 수행하였다. 측정 결과 시편의 폭이 8mm인 경우 섬유강화 복합소재의 강도를 정확하게 평가할 수 있는 것으로 나타났다.

Key Words : 복합소재(composite material), 변형률속도효과(strain rate effect), 고속인장(high speed tensile test), 프론트엔드 모듈(FEM, front end module)

1. 서 론

자동차의 경량화를 위하여 내·외장재에 PP(polypropylene), ABS(Acrylonitrile-butadiene-styrene) 등 고분자 소재가 활발히

적용되고 있으며[1] 최근에는 steel로 제작되어왔던 FEM(front end module) 캐리어(carrier)에도 섬유강화 복합소재를 적용하고자 하고 있다. 새로운 경량소재를 이용하여 부품을 개발할 경우 적용된 소재의 물성을 최대한 활용할 수 있는 설계기술

⁺ 경일대학교 기계자동차학부, 교신저자(E-mail:wjkang@kiu.ac.kr)

^{**} 엑시아 머티리얼스

과 생산기술이 요구된다. 최소한의 비용으로 최적의 목표성을 만족하기 위하여 CAE를 활용한 설계방법이 많이 사용되고 있으며 사용하중 조건에 대한 소재의 거동을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.[2]

FEM의 설계는 보행자보호 성능을 고려하여 수행되어야 하기 때문에 적용 소재가 보행자 충돌시 어떻게 거동하는지 알고 있어야 한다. 보행자보호 성능 평가 항목 중 시속 40km/h의 속도로 어퍼레그폼(upper legform) 또는 로어레그폼(lower legform)을 차량 전면부에 충돌시키는 시험은 FEM의 설계와 연관되기 때문에 약 100/s의 변형률 속도 범위 이내에서 FEM에 사용된 소재의 강도를 평가하기 위한 방법이 필요하게 된다[3].

일반적으로 소재의 충격하중 조건에서의 거동 측정은 매우 짧은 시간에 발생한 시편의 변형거동을 측정해야하기 때문에 충격하중을 유도하기 위한 방법 및 신호를 측정하기 위한 방법 등이 정하중 조건에서보다 어렵게 된다. 소재의 고속 거동을 측정하기 위한 시험방법으로는 홉킨슨바 시험기, 유압식 및 낙하방식의 고속 시험기 등이 있으며, 수천/s의 변형률 속도 대역에서는 split Hopkinson bar 시험기를 사용하며 수 백/s이내의 변형률 속도대역에서는 낙하방식 또는 유압식 시험기를 사용하는 것이 일반적이다[4-5]. Split Hopkinson bar를 이용할 경우 시험 소재의 탄성계수를 고려하여 시험기 입력봉과 출력봉의 탄성계수를 결정하는 것이 필요하며 복합소재의 시험에는 나일론(nylon) 섬유를 이용한 탄성봉을 사용하기도 한다. Brown 등[6]은 낙하방식의 고속시험기를 이용하여 복합소재의 인장, 전단 및 압축시험을 수행하였으며 변형률 속도가 증가함에 따라 탄성계수와 소재의 강도가 증가함을 보였다. 반면 전단 고속하중에 대해서는 소재의 강도가 저하되는 것으로 보고하였다.

Kim 등 [7]은 중고속인장시험기를 이용하여 폴리프로필렌 (polypropylene)의 고속변형특성을 연구하였으며 이때 온도의 증가에 따른 소재의 열화 특성을 시험적으로 측정하였다.

Kang 등[8]은 낙하방식의 시험기를 이용하여 자동차용 범퍼에 사용되는 EPP(expanded polypropylene) 폼과 포장재로 사용되는 EPS(expanded polystyrene) 폼의 고속압축시험을 수행하였으며 변형률 속도에 따른 소재거동 및 에너지 흡수 특성에 관하여 연구하였다. 이와 같은 다양한 시험으로부터 구해진 복합소재의 거동을 유한요소 해석에 적용하기 위해서는 소재의 진응력-진변형률 관계를 알아야한다. 그러나 네킹 이후의 변형이 많이 진행되는 복합소재의 경우 채적이 일정하다는 조건에서 구한 진응력-진변형률 관계는 실제와 다를 수 있기 때문에 Arriaga 등[9]은 시험 결과로부터 해석적 방법으로 진응력-진변형률 선도를 구하였다.

준정적 인장 시험과는 달리 고속 인장의 경우에는 시험시편의 표준화가 진행되고 있는 상태로 steel 소재의 경우 ISO 26203에 의하면 홉킨슨 바 시험기 및 유압식 고속인장 시험에 대하여 표준화된 시험편을 찾아볼 수 있다. 복합소재의

고속인장시험에서도 steel 소재와 마찬가지로 고속시험시 나타날 수 있는 응력의 떨림을 줄이기 위한 시험장비의 요구조건 및 시편 형상이 중요하게 된다. SAE J2749에서는 시험장비가 갖춰야할 기본 성능 조건과 더불어 ASTM D638 및 ISO 527-1에 나타나는 준정적 인장시험편의 형상을 기본으로 업고자하는 변형률 속도에 적합한 시편의 길이에 대하여 설명하고 있다. 이때 주요한 고려사항은 해당 시험 속도에서 시편에 발생한 응력파가 10회 이상 왕복할 수 있는 조건의 시편을 선정하는 것이다. 그러나 시편 폭의 변화가 시험결과에 미치는 영향에 대해서는 논의하고 있지 않다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 섬유 매트릭스를 적층하여 만들어진 섬유강화 복합소재의 경우에는 소재의 강도를 정확히 평가할 수 있는 시편의 형상결정이 매우 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 섬유강화 경량복합소재의 고속인장시험을 수행하기 위하여 인장시험편의 형상을 결정하고자 하며, 이를 위하여 ASTM D638 type IV를 기본형상으로 하여 게이지부 폭을 6mm, 8mm, 10mm로 변화시킨 시편을 사용하여 고속인장 시험을 수행하였다. 고속인장시험에 사용된 시험기는 자유낙하방식의 충격시험기이며 시험 결과를 통하여 새롭게 개발된 섬유강화 경량복합소재의 변형률 속도에 따른 강도변화를 분석하였다.

2. 고속인장시험장치

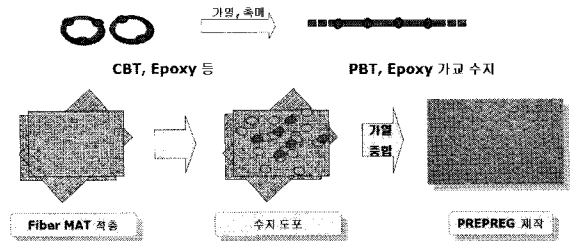


Fig. 1 Manufacturing process of fiber reinforced composite materials.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 임팩터(impactor)를 자유낙하시켜 시편하단부에 충격을 가하는 낙하방식의 시험기를 제작하여 소재의 고속인장 거동을 측정하였다. 시험기는 최대 5m/s의 충격속도로 시편을 변형시킬 수 있으며 낙하 질량은 15 ~ 100kg을 사용할 수 있도록 하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 시편은 로드셀과 가이드레일이 부착된 엔빌사이에 위치하게 되며 임팩터가 엔빌을 타격하여 인장 변형이 발생되도록 하였다. 시편의 고속 변형 중 발생한 하중과 변형량은 각각 로드셀 (load cell)과 최고 350kHz이상의 고속변위 측정이 가능한 레이저 변위계를 이용하였으며 고속샘플링이 가능한 데이터 계측장비를 사용하였다.

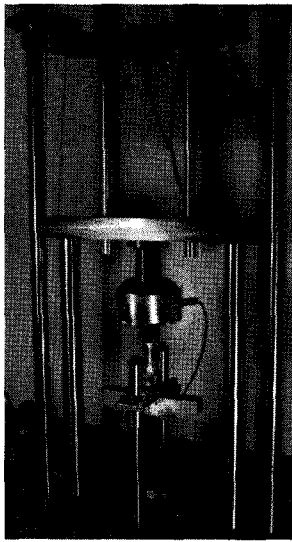


Fig. 2 Drop mass type apparatus developed for high strain rate tensile testings.

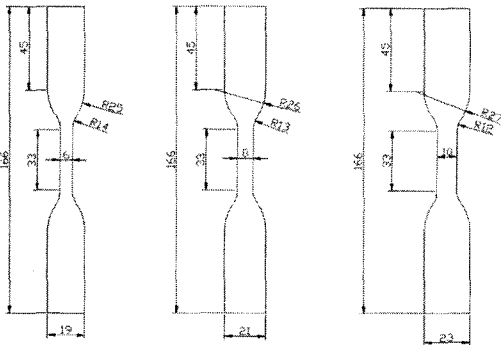


Fig. 3 Three types of tensile specimens used for high strain rate tests.

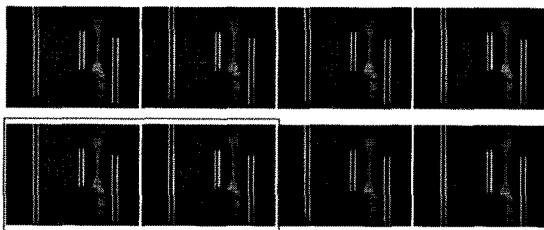


Fig. 4 Series of photos taken from a high speed camera.

고속인장시험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 ASTM D638(type IV)을 기본으로 하고 게이지부 폭이 6mm, 8mm, 10mm인 세 종류의 시험편을 제작하여 사용하였다. 시험편의 두께는 2.0t이다. Fig. 4는 고속카메라로 촬영된 시험장면이며 그림의 붉은색영역은 임팩터가 충격을 가한 후 시험편이

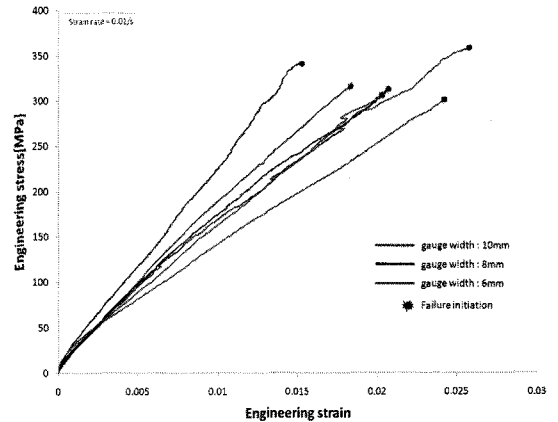


Fig. 5 Quasi-static test results with three types of specimens: strain was measured with an extensometer.

파손되기 직전까지의 장면을 나타내고 있다. 고속인장 시험의 경우 시험편에 기계적 방식의 신률계를 직접 장착하고 시험하는 것이 불가능하기 때문에 시험하단부의 변위를 레이저 센서를 이용하여 측정 후 시험의 변형률을 계산하게 된다. SAE J2749에는 다양한 변위측정 방식에 따른 소재의 변형률 계산에 대하여 소개하고 있다.

3. 시험 결과

Fig. 5는 준정적 인장시험으로 얻어진 공칭응력-공칭변형률 선도를 나타내고 있으며 검은색 마크는 시험의 파단이 발생한 지점을 의미한다. 시험별로 시험 결과의 편차가 나타나고 있으며 특히 응력-변형률 선도의 기울기가 편차를 보이고 있다. 시험 폭의 변화에 따른 평균 파단강도는 10mm 시험의 경우 다른 시험 폭에 비하여 약 5% 정도 낮게 나타나고 있으나 시험 편차의 수준에 비추어 볼 때 큰 의미가 있는 것으로 보이지는 않는다. 파단 연신률은 6mm 시험이 크게 나타나고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 준정적 인장시험의 결과를 신률계(extensometer)의 신호가 아닌 시험기 LVDT의 변위신호를 이용하여 변형률을 계산한 것이다. 고속인장시험의 경우 신률계의 장착이 불가능하기 때문에 준정적시험과 고속시험을 동일 변형률 측정 조건에서 비교하기 위해 필요하게 된다. LVDT로 측정된 경우 시험 게이지부 이외의 부분에서 발생한 변형이 게이지부 변형에 더해지기 때문에 변형률이 크게 나타나게 된다. 고속인장시험에서도 유사한 경향이 나타나기 때문에 시험 게이지부의 변형률을 획득하기 위해서는 유한요소해석을 통한 변형률 보정이 필요할 것으로 보인다.

Fig. 7은 100/s의 고속인장 시험시 측정된 변형률 속도를 나타내고 있다. 충격이 가해진 순간 변형률 속도가 급격히 상승하게 되며 평균적으로 100/s의 변형률 속도를 보이고 있다.

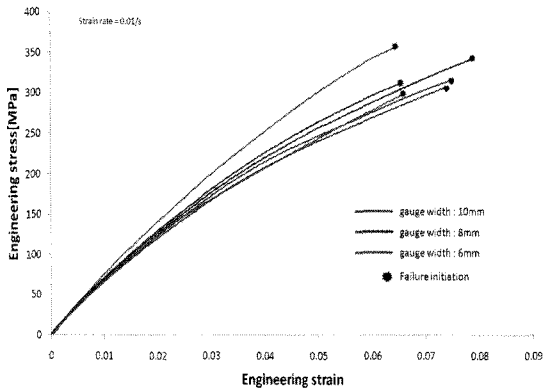


Fig. 6 Quasi-static test results with three types of specimens: strain was measured with LVDT.

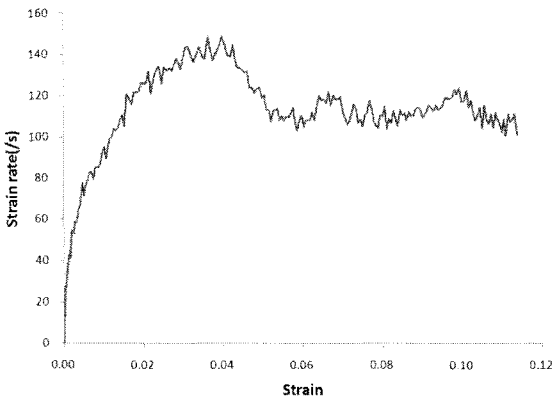


Fig. 7 Variation of strain rate w.r.t strain.

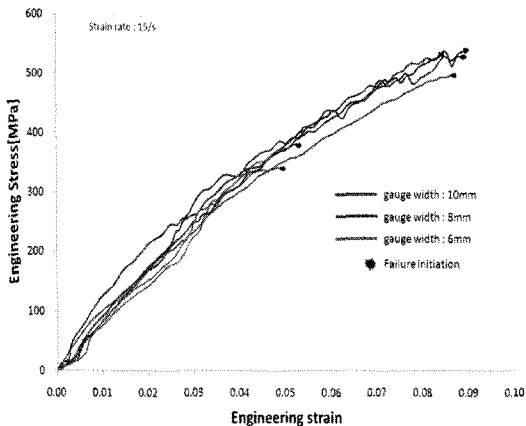


Fig. 8 Stress-strain curves acquired with three types of specimens at strain rate of 15/s.

고속인장시험의 경우 이와 같이 변형률속도가 가속화된 후 일정해지는 양상을 보이게 되며 시험 변형률속도는 평균값을 취하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 고속인장시험으로부터 얻어진

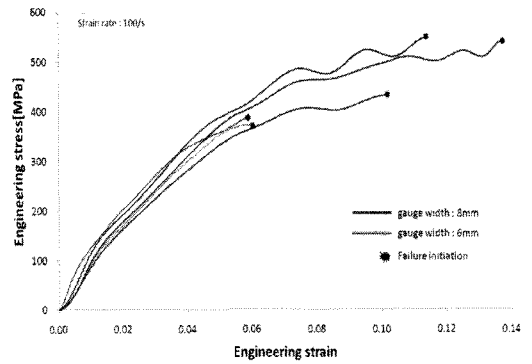


Fig. 9 Stress-strain curves acquired with two types of specimens at strain rate of 100/s.

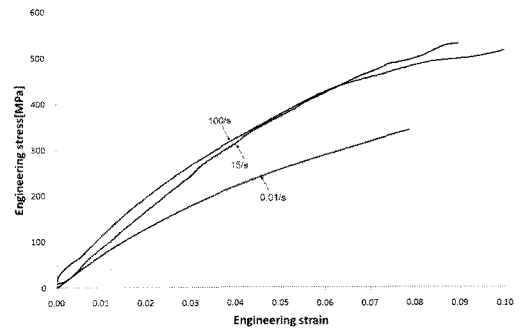


Fig. 10 Stress-strain curves of fiber reinforced composite materials at the indicated strain rates.

공칭응력-공칭변형률 선도를 나타내고 있다. Fig. 8은 시편의 변형률 속도가 약 15/s인 경우에 해당하며 Fig. 9는 변형률 속도 약 100/s에 해당하는 시험 결과이다. 고속의 경우 응력의 떨림이 관찰되고 있으며 해석에 사용하고자 할 경우 진동을 제거하기 위한 데이터 처리가 필요할 것으로 생각된다. 시편 폭이 10mm인 경우 100/s에서는 그림에서의 미끄러짐으로 인하여 시험이 진행되지 않았다.

Fig. 8의 경우에 나타난 바와 같이 고속인장시험에서도 10mm 폭의 시편을 사용할 경우 파단강도가 낮게 나타나고 있다. 시편 폭 6mm의 경우 준 정적 시험 결과와는 다르게 8mm와 10mm 시편에 비하여 파단이 일찍 발생하는 것으로 나타났다. 변형률 속도가 100/s인 경우에도 이와 같은 경향이 나타나는 것을 알 수 있으며 섬유강화 복합소재의 정확한 강도 평가를 위해서는 ASTM D638의 6mm 폭 시편보다는 8mm 시편 폭을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

시편의 파단은 복합소재 내에 함유된 섬유가 손상을 받으면서 점진적으로 발생하게 되는데 6mm 시편의 경우 충격에 의한 섬유 손상이 다른 경우에 비하여 빠르게 진행되어 급속한 시편의 파단을 발생시키기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 10은 시편 폭 8mm의 시험 결과를 기준으로 시험에 사용된 섬유강화 복합소재의 응력-변형률 선도를 변형률 속

도에 대하여 나타낸 것이다. 고속에서의 응력의 떨림을 데이터 처리를 통하여 완화시킨 결과이다. 준 정적 시험 결과에 비하여 변형률 속도가 15/s로 증가하였을 경우 변형률 0.05를 기준으로 살펴보면 강도가 약 1.48배 증가한 것으로 나타났으며 15/s에서 100/s로 속도 증가시 약 4.6% 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 변형률 약 0.05이후에는 100/s의 강도가 15/s 보다 낮은 것으로 나타났으며 충격속도가 증가할 경우 소재내의 섬유 손상이 일찍 발생하여 점진적으로 전파되었기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 변형률 속도에 따른 섬유강화 복합소재의 고속인장시험을 수행하여 소재의 변형률속도 15/s 및 100/s에 대한 강도를 측정하였다. 고속인장 시험은 낙하방식의 시험기를 개발 사용하였으며 준 정적 시험결과와 비교를 통하여 변형률 속도 효과를 분석하였다. 섬유강화 복합소재 고속인장시험의 경우 표준화된 시험편이 없기 때문에 ASTM D638 type IV를 기준으로 시험편 게이 지부의 폭이 6mm, 8mm, 10mm 인 경우에 대하여 시험을 수행하였으며, 이 중 8mm 폭의 시험편이 섬유강화 복합소재의 강도를 평가하는데 적합한 것으로 나타났다. 시험에 사용된 복합소재의 경우 준정적인 경우에 비하여 100/s로 변형률 속도가 증가할 경우 약 1.48배정도 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 소재의 충격특성을 고려한 제품설계에는 변형률속도 효과를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010년도 경일대학교 신입교원 정착연구지원과 지식경제부의 산업원천기술개발사업의 연구지원으로 수행된 결과이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Park S.J., Lee K.S., Kim Y.S. and Kim J.S., "A Study on the Tensile Properties of Plastics used in Automotive Instrument Panel at High Strain Rates under High and Low Temperature Environments," 한국자동차공학회 추계 학술대회 논문집 3호, 2006, pp. 1930-1934.
- 2) Arriaga A, Pagaldai R., Zaldua A.M., Chrysostomou A. and O'Brien M., "Impact testing and simulation of a polypropylene component. Correlation with strain rate sensitive constitutive models in ANSYS and LS-DYNA," *Polymer Testing*, Vol. 29, Issue 2, 2010, pp. 170-180.
- 3) Ha D.Y., Lee K.W., Ahn B.J., Lee D.H., "Analysis of Lower Legform Pedestrian Protection Considering High Strain-rate Effects," 한국자동차공학회 정기 학술대회 논문집, 2010, pp. 2211-2213.
- 4) Hosur M.V., Alexander J., Vaidya U.K., Jeelani S., "High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites," *Composite Structures*, Vol. 52, Issues 3-4, 2001, pp. 405-417.
- 5) Hosur M.V., Adya M., Vaidya U.K., Mayer A. and Jeelania S., "Effect of stitching and weave architecture on the high strain rate compression response of affordable woven carbon/epoxy composites," *Composite Structures*, Vol. 59, Issue 4, 2003, pp. 507-523.
- 6) Brown K.A., Brooks R. and Warrior N.A., "The static and high strain rate behaviour of a commingled E-glass/polypropylene woven fabric composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, Issue 2, 2010, pp. 272-283.
- 7) Kim J.S., Huh H., Lee K.W., Ha D.Y., Yeo T.J. and Park S.J., "Evaluation of dynamic tensile characteristics of polypropylene with temperature variation," *International Journal of Automotive technology*, Vol. 7, No. 5, 2006, pp. 571-577.
- 8) 강우종, 전성식, 이인혁, 최선웅, 민제홍, 이상혁, 배봉국, "EPS Foam의 변형률속도효과에 대한 연구," 한국복합재료 학회지, 제23권 제3호, 2010, pp. 64-68.
- 9) Arriaga A., Lazkano J.M., Pagaldai R., Zaldua A.M., Hernandez R. Atxurra R. and Chrysostomou A., "Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS," *Polymer Testing*, Vol. 26, Issue 3, 2007, pp. 284-305.