

일축인장시험을 통한 투명교정장치용 고분자 소재의 역학적 특성 분석

정지영^{*,**}, 제태진^{*,**,#}, 전은채^{***,#}

^{*}한국기계연구원 나노공정연구실, ^{**}과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스 전공,
^{***}울산대학교 첨단소재공학부

Analysis of Mechanical Properties of Polymer Material for Clear Aligner using Uniaxial Tensile Test

Ji-Young Jeong^{*,**}, Tae-Jin Je^{*,**,#}, Eun-chaee Jeon^{***,#}

^{*}Dept. of Nanomanufacturing technology, Korea Institute of Machinery and Materials, Korea,

^{**}Dept. of Nanomechatronics, University of Science and Technology, Korea,

^{***}School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Korea

(Received 30 June 2018; received in revised form 2 July 2018; accepted 20 July 2018)

ABSTRACT

Clear aligners are popular in the field of dental orthodontic treatment because they offer a discreet alternative to braces due to their use of transparent materials. They are formed from flat transparent polymer materials by hot pressed molding. It is necessary to know the mechanical properties of the polymer materials to be able to form the exact shapes of the clear aligners. However, this information is not publicly available. In this study, we present a method to reliably measure the mechanical properties of clear aligner polymer materials and analyze the factors effecting these mechanical properties. First, we surveyed standards related to the mechanical properties of polymer materials to obtain reliable data. Consequently, ISO 527 was selected for use in this study because of the size and thickness of the flat transparent polymer material. The uniaxial tensile tester was constructed and it was verified whether displacement of a crosshead could be regarded as a displacement of gauge-length by optical analysis. Uniaxial tensile tests of three thicknesses from three different companies were performed and each engineering stress-strain curve was measured. Tensile strengths and elastic moduli were obtained by analysis of the stress-strain curves. The tensile strength and elastic modulus of ISO 527 was found to be approximately 50MPa and 2.3GPa, respectively. Both values showed material and thickness dependency.

Key Words : Clear Aligner(투명교정장치), Uniaxial Tensile Test(일축인장시험), Polymer Material(고분자소재)

1. 서 론

최근 외모에 대한 관심이 높아짐에 따라 치열교

정에 대한 관심도 증가하고 있다. 치열교정장치는 고정식 금속 브라켓장치, 치아 색과 유사한 세라믹 장치, 치아 뒷면에 설치하는 설측장치, 고분자소재를 이용한 투명교정장치가 사용되고 있다.^[1-2] 이 중 투명교정장치는 투명하기 때문에 심미성 기능이 뛰어나 청소년 및 성인들을 대상으로 새로운 치열교

Corresponding Author : jtj@kimm.re.kr, jeonec@ulsan.ac.kr

Tel: +82-42-868-7142, Fax: +82-42-868-7149

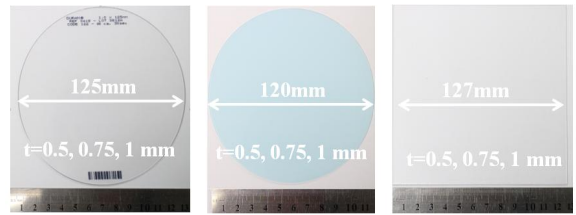
Tel: +82-52-712-8053, Fax: +82-52-712-8045

정시장을 형성하고 있다. 현재 국내 투명교정장치 시장은 외국의 선진사가 독점하고 있으며, 투명교정장치의 제작에 필요한 고분자 소재와 성형기 및 성형조건까지 일부 기업이 독점하여 자사의 것을 공급하고 있다. 이로 인해 교정자는 해외 선진사로부터 교정초기부터 종료까지 단계별로 제작된 투명교정장치를 한번에 수령한다.^[3] 그러나, 교정자마다 동일한 투명교정장치를 사용하여도 교정정도가 다르기 때문에 교정 중에 이미 제작된 투명교정장치가 착용되지 않는 문제가 발생할 수 있으며, 이럴 경우 이후 단계용으로 제작된 투명교정장치는 전량 폐기되어야 하는 문제점이 있다. 따라서 국내에서 교정진행상태를 지속적으로 조사하면서 투명교정장치를 직접 제작할 필요가 있다. 현재 투명디바이스 국산화는 소재는 기존의 것을 그대로 사용하고 성형기와 성형조건 최적화를 국내에서 수행하는 방향으로 진행 중이다. 이를 위해서는 외부에 공개가 되지 않고 있는 기존 소재의 역학특성에 대한 정보가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되는 투명교정장치의 고분자 소재 3가지에 대해 일축인장시험을 통하여 역학특성 분석을 수행하고자 하였으며, 변형률의 정확도를 높이기 위해 영상촬영기법을 사용하여 크로스헤드 이동거리와 표점거리 변위의 일치 여부를 검증하였다.

2. 인장시험 표준규격 선정

투명교정장치 제작에 주로 사용되는 폴리머 소재들은 PETG(Polyethylene terephthalate glycol) 또는 PET(Polyethylene terephthalate)를 원소재로 사용한다.

그리고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 제조회사에 따라 원형 또는 사각형 형상을 하고 있으며 크기도 120mm~127mm 범위로 각각 다르다. 두께는 모든



(a) A company (b) B company (c) C company

Fig. 1 Polymer materials for clear aligners

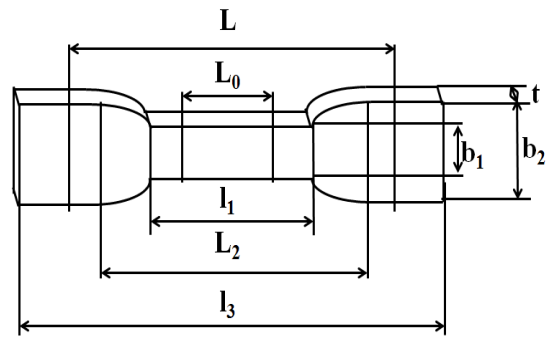


Fig. 2 A schematic diagram of specimen for uniaxial tensile test (h means thickness)

회사에서 0.5mm, 0.75mm, 1.0mm의 세 가지가 있다. 각 제품 별로 크기 두께가 다르기 때문에 모든 소재에 적용할 수 있는 공신력 있는 일축인장시험 관련한 표준규격 선정이 매우 중요하다.

일축인장시험에 주로 사용되는 표준 규격인 ISO (International Organization for Standardization) 규격과 ASTM (American Society for Testing and Materials) 규격들을 조사한 결과 PETG와 PET 폴리머 소재를 대상으로 하면서 투명교정장치용 제품들의 형상과 유사한 sheet 형상에 적용되는 규격으로 ASTM D638(Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic), ASTM D882(Standard Test Method for

Table 1 Candedated international and national standards of tensile test specimen of polymer materials for clear aligners

Standard	Type	Materials	Lo	L	l3	b1	b2	h
ASTM D638	IV	Rigid and non- rigid plastics	25	65	≥115	6	9.53	3.2
ASTM D882	-	sheet	100	100	100	5~25.4	-	≤1
ISO 527	5	sheet	25	80	≥115	6	25	≤1

Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting), ISO 527(Plastics -Determination of tensile properties)이 조사되었다. 각 규격 별로 요구되는 시편의 사양을 Table 1과 Fig. 2에 정리하였다.^[4-6] Table 1에서 보는 바와 같이 ASTM D638은 시편의 최소두께가 3.2mm이므로 본 논문에서 사용하는 소재들에 적용할 수 없다. 그리고 그립 간의 거리(L)가 작을수록 일축인장시험 중에 그립에서 시편이 미끄러지는 것을 방지할 수 있으므로 최종적으로 ISO 527 규격을 본 연구에 적용하기로 하였고 이에 맞게 일축인장시험 시편을 제작하였다.^[7]

3. 실험방법

Fig. 3 (a)는 투명교정장치용 소재의 역학특성 분석을 위해 본 연구에서 구축된 일축인장시험장비이다. 인장하중을 측정하기 위한 하중센서와 시편의 변형률을 측정하는 크로스헤드, 시편을 장착하는 두개의 그립 그리고 하중/변위 데이터를 기록하고 분석하는 컴퓨터로 구성되어 있다. 하중센서의 최대하중을 선정하기 위하여 ISO 527을 따르는 기존의 고분자소재 역학특성 연구를 참고하였다.^[8] 기존 논문에서는 일축인장시험에서 가장 높은 하중이 걸릴 때의 응력인 인장강도를 약 50MPa로 제시하였다. 본 연구에서 사용하기로 한 ISO 527 규격에서 제시하는 시편의 형상을 고려할 때 50MPa에 해당하는 최대하중은 약 30kgf이다. 따라서 안전율을 감안하여 최대 100kgf까지 측정할 수 있는 하중센서를 선정하였다. 크로스헤드의 최대 이동범위는 일반적으로 폴리머의 변형률이 큰 점을 감안하여 700mm로 선정하였다. 일반적으로 변형률을 정밀하게 측정하기 위해서는 표점거리(gauge length, L_0)의 변화만을 측정하여야 하기 때문에 시편에 extensometer를 부착하여야 한다.

본 연구에서 적용한 ISO 527 규격에서도 표점거리 변위를 통해 변형률을 계산하도록 규정되어 있다. 그러나 투명교정장치용 소재는 두께가 얇고 강성이 약해서 extensometer의 하중을 견디지 못하고 휘기때문에 크로스헤드가 움직인 거리를 통해 변형

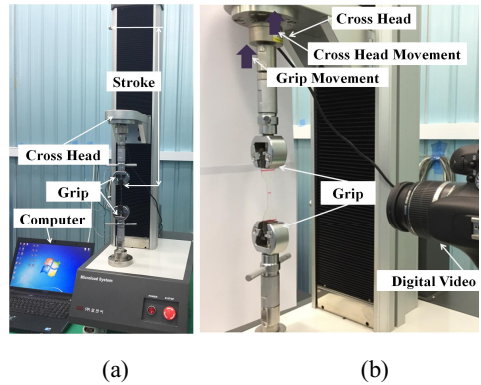


Fig. 3 (a) a uniaxial Tensile tester and (b) a verification method of strain accuracy using a camera

률을 측정하여야 한다. 그러나 크로스헤드가 움직인 거리는 표점거리 변위 이외에 그립의 변형이 포함될 수 있기 때문에 크로스헤드 이동 거리와 표점거리 변위의 일치여부를 꼭 검증하여야 한다. 이에 본 연구에서는 기존 연구^[9]를 참고하여 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 시편에 표점거리 시작점 및 끝점을 표시한 후 고화질 카메라를 사용하여 실시간으로 표점거리의 변화를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다.

다음으로 ISO 527 규격에서 정한 형상과 일치하는 A사, B사 그리고 C사의 소재의 일축인장시편을 다수 제작하였고 이들 시편들에 대한 일축인장시험을 실시하였다. 실험 조건은 ISO 527 규격에 따라 온도 $23\pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50\pm 10\%$, 시험반복횟수 5회 이상을 준수하였으며, 인장속도는 5mm/min 선정하여 시험을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 하중 및 크로스헤드 이동거리를 이용하여 응력 및 변형률을 계산하기 전에 크로스헤드 이동거리와 표점거리 변위의 일치여부를 검증하였고, 이를 반영하여 일축인장 시험 결과를 분석하였다.

4. 실험결과

4.1 변형률 정확도 평가

크로스헤드 이동거리와 표점거리 변위 간의 상관관계를 Fig. 4에 나타내었다. 두 데이터를 동기화

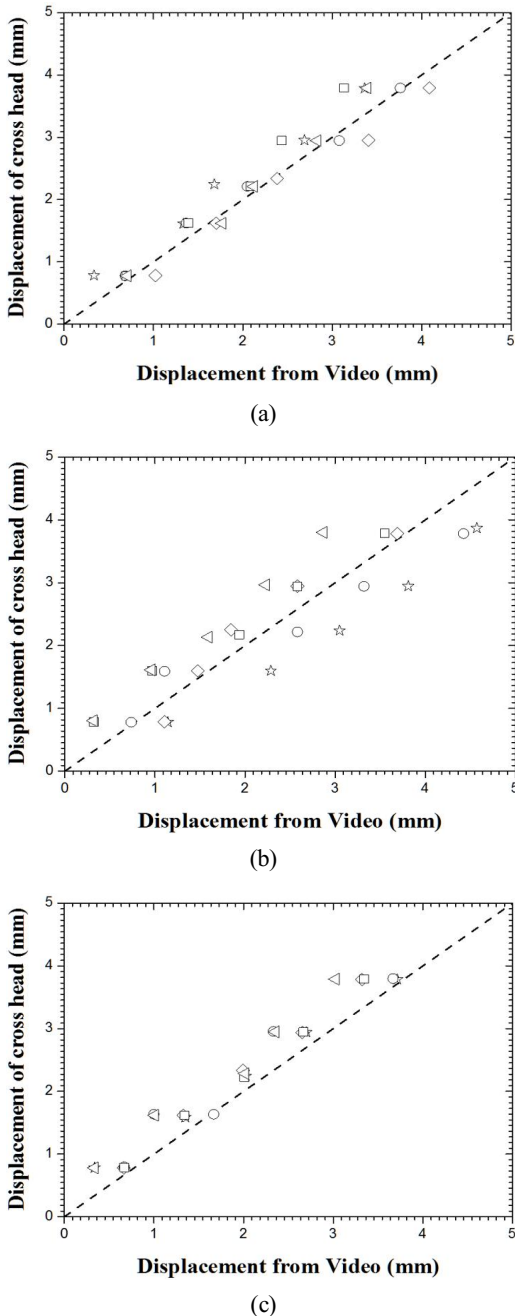


Fig. 4 Comparison of displacement of cross-head and displacement of gauge length from video in case of (a) 0.5mm thickness (b) 0.75mm thickness and (c) 1.0mm thickness

할 때 최대한 같은 시간의 데이터가 비교될 수 있도록 노력하였으나 실제적으로는 1초 이내의 차이가 발생할 수 있다. 그러나 만약 오차가 발생하더라도 그래프 전체가 X축의 음의 또는 양의 방향으로 이동하기 때문에 기울기는 변화가 없다. 따라서 각 그래프의 기울기가 1인 경우에는 크로스헤드 이동거리와 표점거리 변위가 같다고 판단할 수 있으며 만약 기울기가 1보다 유의미하게 크거나 작으면 그 기울기를 감안한 보정이 필요하다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 세 가지 회사의 각각 세 가지 두께(0.5, 0.75, 1.0mm)에 대해 기울기를 모두 측정한 결과 0.5mm에서는 1.035, 0.75mm에서는 0.952, 1.0mm에서는 1.033의 기울기가 나타났다. 0.75mm에서 기울기가 약간 1보다 작게 나왔으나 이는 일부 데이터의 산포에 의한 것으로 판단되며 그 외 두께에서는 모두 1과 매우 유사한 결과가 나왔으므로 크로스헤드 이동거리와 표점거리 변위는 동일한 것으로 판단하였다. 따라서 이후 변형률을 계산할 때 크로스헤드 이동거리를 표점거리 변위로 사용하였다.

4.2 역학특성 분석

일축인장시험에서 얻어지는 역학특성은 항복강도, 인장강도, 인장변형률, 탄성계수 등이다. 이를 얻기 위해서는 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같이 우선 응력(σ)과 변형률(ϵ)을 계산하여야 한다. 이때 F는 하중센서를 통해 측정된 하중이며, A는 초기시편면적으로 본 연구에서는 폭(b_1)*두께(t)에 해당된다. 이때 면적이 실제 면적이 아닌 초기 면적이기 때문에 응력은 공칭응력(engineering stress)가 된다. 또한 ΔL 은 크로스헤드 이동거리이며 L_0 은 초기 표점거리에 해당된다. 변형률 역시 면적의 변화를 고려하지 않았기 때문에 공칭변형률(engineering strain)이 된다. 이렇게 얻어진 공칭응력-공칭변형률 곡선을 Fig. 5에 나타내었다.

$$- \sigma = F / A \quad \text{Eq. (1)}$$

$$- \epsilon = \Delta L / L_0 \quad \text{Eq. (2)}$$

우선 동일 사양의 소재에 대해 5회 이상 반복하

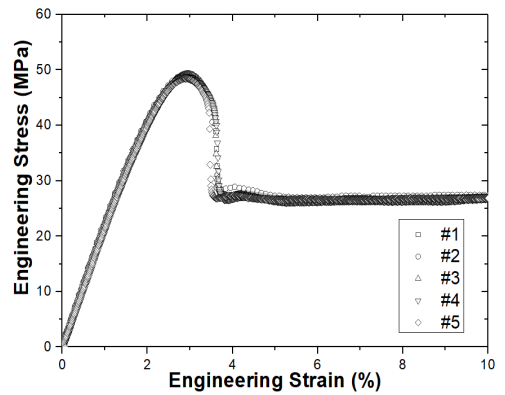
여 수행한 일축인장시험 결과들의 재현성을 확인하였다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 B사의 1.0mm 소재에서 최소 5회 이상의 재현성이 매우 높은 결과를 얻었으며 다른 소재의 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 9가지 모든 소재에서 응력값은 일부 다르지만 변형양상은 모두 유사한 경향을 나타내었다. 초기 탄성 변형 영역을 지나 항복점을 지나게 되면 응력이 급격히 감소하며 이후 완만하게 증가하였고 약 180~210%의 변형을 범위에서 파단이 발생하였다. 파단이 발생할 때의 응력이 항복점에서의 응력보다 항상 작았기 때문에 항복강도와 인장강도가 같게 되며 이러한 경우는 ISO 527 규격 상에 c type (Brittle-Ductile) 인장곡선으로 규정되어 있다. 본 연구에서는 인장강도로 표현하였다. 탄성계수는 ISO 527 규격에 따라 항복점 이전의 탄성영역에서 선형 최소자승회귀법(linear least-square regression)을 사용하여 구하였다. 이렇게 얻어진 인장강도와 탄성계수를 Table 2에 나타내었다.

인장강도는 약 47.6MPa~56.9MPa에 이르기까지 기존 연구에서와 유사하게 약 50MPa 내외로 나타났다. 회사 별로 보면 A사와 C사가 대체로 50MPa 이상으로 B사에 비해 약간 높은 값을 나타내었다.

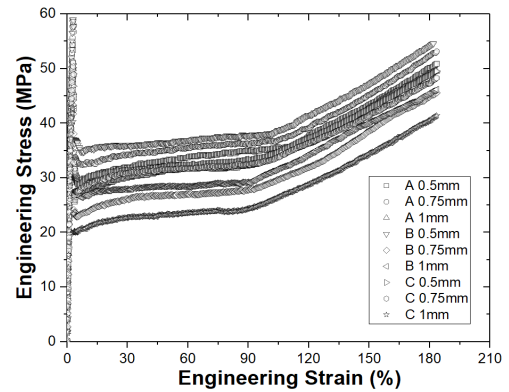
이는 A사와 C사의 제품은 PETG를 원소재로 사용하며 B사의 제품은 PET를 원소재로 사용하기 때문에 약간의 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 그리고 같은 회사 제품 내에서는 대체로 두께가 얇을수록 높은 인장강도를 나타내었다. 이는 두께가 얇을

Table 2 Measured mechanical properties of polymer for clear aliner

	Thickness (mm)	Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
A	0.5	55.9	2.33
	0.75	56.7	2.36
	1.0	50.1	2.19
B	0.5	56.9	2.51
	0.75	47.6	2.15
	1.0	48.8	2.13
C	0.5	52.2	2.30
	0.75	50.8	2.30
	1.0	49.5	2.19



(a)



(b)

Fig. 5 Engineering stress-engineering strain curves of (a) 1.0mm of B company and (b) all kinds of specimen

수록 전체 부피 대비 표면의 비율이 높아지기 때문에 발생하는 ‘표면구속효과’에 의한 것으로 판단된다. 또는 소재 성형 시 얇은 두께로 인해 급격한 온도 변화가 발생하여 압축잔류응력이 발생하였을 가능성도 있다. 표면에 압축잔류응력이 발생하면 강도 값이 소재 본연의 값보다 더 높게 측정된다. 두께에 따른 강도 값의 변화 원인은 다양한 가능성이 존재하며 이는 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. 탄성계수는 약 2.13GPa에서 2.51GPa에 이르기까지 약 2.3GPa 내외의 값을 나타내었다. 인장강도와 마찬가지로 A사와 C사가 유사한 값을 나타내었고 B사는 A사와 C사에 비해 약간 낮은 값을 나타내었다. 이때 0.5mm만 다른 경향을 갖는 것도 인장

강도와 동일하였다. 이 원인도 앞서 인장강도와 마찬가지로 소재의 차이로 판단된다. 두께에 따른 탄성계수 값도 두께가 얇을수록 높게 나타났다. 탄성계수도 결국 응력을 변형률로 나눈 값이기 때문에 항복변형률이 유사할 경우에 항복강도 (이 소재의 경우에는 인장강도) 값이 높을수록 탄성계수가 높게 된다. 따라서 두께에 따른 인장강도와 탄성계수의 변화가 동일하게 나타난 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 투명교정장치에 사용되는 고분자 소재의 역학특성 분석을 수행하기 위하여 역학특성 분석 방법을 확립하고 전용장비를 구축하였으며 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 투명교정장치용 고분자 소재의 얇은 두께와 제한된 크기를 고려할 때 ISO 527 규격을 사용하여 역학특성을 분석할 수 있다.
2. 변형률은 표점거리 변위를 측정하는 것이 원칙이나 이를 측정하기 어려울 때는 영상장치를 통해 크로스헤드 이동거리와 표점거리 변위의 상관관계를 사전에 분석하여 크로스헤드 이동거리를 사용하여 변형률을 구할 수 있다.
3. 투명교정장치용 고분자소재의 인장강도는 약 50MPa 내외 그리고 탄성계수는 약 2.3GPa 내외의 값을 가진다.
4. PETG로 제작된 고분자소재가 PET에 비해 약간 높은 인장강도와 탄성계수를 가졌으며, 두 소재 모두 두께가 얇을수록 높은 인장강도와 탄성계수를 갖는 두께의존성을 갖는다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부의 산업핵심기술개발사업의 일환인 “SLS 기반 하이브리드형 3D프린팅 기술을 이용한 개인맞춤형 메디컬 디바이스(치아교정장치 및 임플란트)의 디지털 쾌속금형기술 개발, No. 10049237)”의 지원에 의한 것입니다.

REFERENCES

1. Daniela, F., Fernanda, C., Candice B. D., Jonas, C. J., “Esthetic perception and economic value of orthodontic appliances by lay Brazilian adults,” Dental Press Journal of Orthodontics, Vol. 17, No. 5, pp. 103-106, 2012.
2. Shim, J. H., Yun, W. S., Ko, T. J., “Successful Examples of 3D Printing Technology-based Start-up Enterprises,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp.104-110, 2016.
3. Vijay, R. N., Pooja, C., “Invisalign : The invisible braces,” International Journal of Contemporary Dentistry, Vol. 1, No. 2, pp. 54-57, 2010.
4. Plastics--Determination of tensile properties--Part 1: General principles, International Organization for Standardization, pp. 1-23, 2012.
5. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, American Society for Testing and Materials, pp.1-17, 2014.
6. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, American Society for Testing and Materials, pp.1-12, 2012.
7. Plastics--Determination of tensile properties--Part 3: Test conditions for films and sheets, International Organization for Standardization, pp. 1-5, 1995.
8. Kang, Y. G., Lee, T. W., Shin G. S., “The Influence of Experiment Variables on 3D printing using ABS Resin,” Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 94-101, 2017.
9. Tung, S. H., Shih, M. H., Kuo, J. C., "Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing," Optics and Lasers in Engineering, Volume 48, Issue. 5, pp. 636-638, 2010.