

◆특집◆ 구조물의 최적 설계 및 신뢰성 평가를 위한 재료 물성 측정 기술

체적 물성의 측정표준 - 인장 물성

이해무*, 방건웅**, 김시천***

Measurement Standards Relating to Tensile Properties of Bulk Materials

Hae Moo Lee* , Gun Woong Bahng** and Si Chun Kim***

Key Words : Tensile Test(인장시험), Yield Strength(항복강도), Ultimate Tensile Strength(인장강도), Stiffness(강성), Materials Metrology(재료측정학), Measurement Standards(측정표준), Proficiency Test(숙련도시험)

1. 서론

인장시험은 매우 오래 전부터 사용되어 온 재료시험 중의 하나로서, 기계류 부품 및 설비의 설계와 제작에 반드시 필요한 인장 특성을 평가하는, 기초적이고 중요한 역학적 시험 방법이다.

인장시험 외에도 일반적으로 많이 사용되는 역학적 시험으로는 경도 및 충격시험이 있다. 그렇지만 경도 물성이나 충격 물성이 설계에 직접 적용되는 예는 그리 많지 않으며 대부분의 경우 제품의 품질관리, 합금 개발시의 screening test 혹은 타 역학적 물성 예측 등에 사용된다. 반면에 인장 물성은 부품 및 설비의 설계에 직접 사용되기 때문에 인장시험의 중요성은 다른 시험과 비교가 되지 않는다.

그럼에도 불구하고 인장시험이 파괴인성시험이나 충격시험 등에 비하여 시험 방법이 간단하고 널리 보편화되어 있다는 이유만으로, 많은 시험자들이 시험의 정확도에 대해서는 관심을 두지 않은 채 시험을 하고 있는 것이 현실이다. 이러한 점은 외국의 경우에도 마찬가지인데, 일 예로 G7

국가들에 의해 주도되는 VAMAS(Versailles Project on Advanced Materials and Standards)의 Technical Working Area 17(극저온 구조재료)에서 주관한 극저온에서의 인장시험에 대한 순회비교시험(RRT, Round Robin Test)¹ 이 있다. 이에 따르면 참여기관 간 시험 오차가 매우 커 그 원인을 분석한 결과 시험기에 대한 교정이 제대로 이루어지지 않았던 것으로 밝혀졌으며, 교정 후 RRT 를 재수행한 결과 참여기관간에 좋은 일치성을 보였다. 이 RRT 에 참여한 기관이 세계적으로 명성이 높은 기관임을 감안할 때 국내의 상황은 훨씬 열악할 것이라 는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

따라서 국내에서의 인장 특성 측정 능력 제고를 위하여, 인장 물성 측정표준 기술 및 인장시험과 관련된 세계적 추세에 대해 소개하기로 한다.

2. 인장시험에 영향을 미치는 요인

인장시험에 영향을 미치는 요인으로는 시험기의 강성, 부하 속도, 온도, 시험편의 형상 및 크기, 시험편의 측정절 등이 있다. 일관된 측정 결과를 얻기 위해 대부분의 나라에서는 시험 방법을 규격화하여 사용하고 있으며 국가간에도 서로 규격을 합치시키기 위하여 많은 노력을 기울이고 있지만 아직도 미흡한 점이 없지는 않다. 여기에서는 이러한 점에 초점을 맞추어 기술하고자 한다.

* 한국표준과학연구원 환경·안전계측센터 강도평가그룹

Tel. 042-868-5381, Fax. 042-868-5635

Email hmlee@kriss.re.kr

금속재료의 역학적 특성 평가 및 표준화, 고온설비의 수명평가 기술에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 한국표준과학연구원 불질량표준부

*** 한국표준과학연구원 환경·안전계측센터

2.1 시험기의 강성

시험기의 제어 방식에 따라서는 시험기의 강성이 시험편에 실제로 걸리는 변형률 속도(strain rate)에 영향을 미칠 수 있다.

흔히들 시험기의 강성이 시험편의 강성보다 훨씬 크다고 알고 있다. 그러나 이는 잘못된 것으로서, 금속 재료에 대한 대부분의 인장시험에 있어서는 그 반대로 시험편의 강성이 시험기의 강성보다 훨씬 크다.²

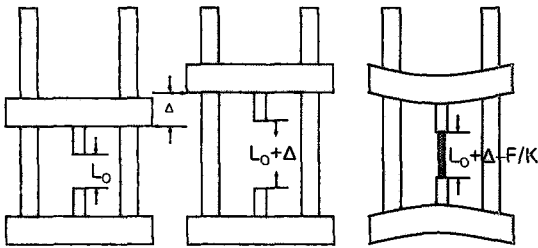


Fig. 1 Schematic illustrating crosshead displacement and elastic deflection in a tension testing machine

Fig. 1 에서와 같이 시험편이 설치되어 있지 않은 상태에서 크로스헤드가 움직인 거리를 크로스헤드 변위(동적 재료시험기의 경우 스트로크), Δ 로 정의하자. 그러면 시험편이 물린 상태에서 시험기를 구동시켰을 때에는 시험기 프레임, 시험편 물림 장치(grip), 로드셀(load cell), 시험편 물림부 등에서의 탄성 변형량(F/K , 여기에서 F 는 가한 힘, K 는 강성)과 시험편 평행부(L_0)에서의 변형량($\Delta - F/K$)의 합이 크로스헤드 변위, Δ 가 된다.

결국 크로스헤드를 일정한 속도로 움직일 경우(또는 스트로크 제어시)에는 사용 시험기의 강성에 따라 시험편에 실제로 가해지는 변형률 속도가 달라질 수 있다. 실제로 상항복강도나 하항복강도는 시험기의 강성이나 측정결과 같은 변수에 의존하며 시험 속도에도 큰 영향을 받는다.³ 이 때문에 널리 알려진 바와 같이 이들 특성을 정확히 평가하는 것이 어렵고 측정값의 흐트러짐도 크다.⁴

이와 같은 이유로 영국 등에서는 시험기의 강성 측정과 관련된 규격⁵ 을 제정하여 사용한 바 있으나 측정의 어려움 및 측정 관련 비용의 증대

등의 문제⁶ 로 현재 사용되고 있지는 않다.

그러나 측정된 물성의 상호 비교를 정확히 하기 위해서는 시험기의 강성을 측정 보고서에 밝혀야 하고, 동일한 변형률 속도가 시험편에 가해질 수 있는 방안이 강구되어야 하는 것으로 계속 주장⁶ 되고 있다.

2.2 시험기의 제어 방식

폐회로형 서보유압식 시험기(closed-loop servo hydraulic machine)의 제어 방식은 통상적으로 하중(또는 응력) 제어(load or stress control), 연신율계 제어(extensometer control), 스트로크(또는 크로스헤드) 제어(stroke or crosshead control)로 대별된다. 여기에서 연신율계 제어는 일반적으로 '변형률 제어(strain control)'로 부르고 있다. 그렇지만 최근의 시험기들은 PC 로 시험기 제어와 데이터 처리를 하는 경우가 많아, 연신율계(extensometer)로부터 얻는 신호가 아닌 스트로크 또는 크로스헤드 변위로부터 변형률(strain)을 어림잡아 계산하여 사용하는 경우도 있으며, 이 경우와 구별하기 위하여 ISO 에서 'extensometer control'이라는 용어를 사용하기 시작⁷ 하였기 때문에 이에 따른 것이다.

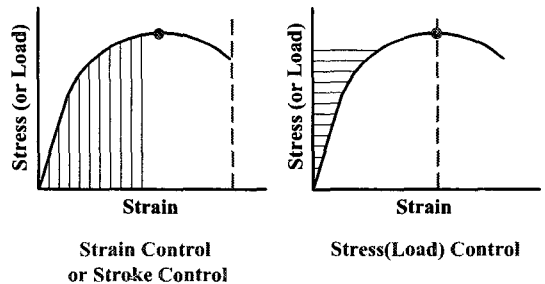


Fig. 2 Comparison of test control modes to determine stress-strain relations

Fig. 2 에 시험기 제어 방식의 개념도를 나타내었다. 즉 연신율계 제어는 시간에 따라 변형률이 일정하게 증가하도록 시험기를 구동시키는 방식이고, 하중(또는 응력) 제어는 시간에 따라 하중(또는 응력)이 일정하게 증가하도록 하는 방식이다.

연신율계 제어의 경우에는 하중이 극대점에 도달한 이후에도 그 이전과 마찬가지로 변형률이 일정하게 증가하며, 이에 따른 하중의 감소가 나타나다가 시험편이 파단된다. 반면에 하중 제어의

경우에는 극대점 이후 시험기의 움직임이 급격해져, 하중이 극대점에 이르게 됨과 거의 동시에 시험편의 파단이 일어나게 된다.

일반적인 인장시험의 경우 하중(또는 응력) 제어를 하는 경우는 드물다. 그러나 극저온에서 사용되는 초전도자석케이스와 같이 하중 제어 조건에서 사용되는 구조물의 경우에는 사용 재료에 대한 인장시험을 하중 제어로 하는 것이 타당하다.

그런데 극저온용 재료 대부분은 액체헬륨온도(4 K)에서 불연속 변형(discontinuous yielding)을 나타내며 이 때문에 Fig. 3⁸에서와 같이 시험기 제어 방식에 따라 응력-변형률 거동이 크게 다르게 나타난다.

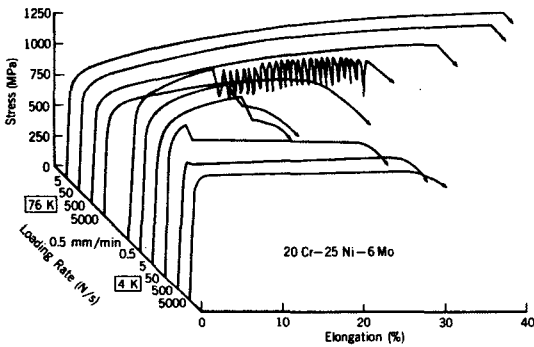


Fig. 3 Engineering stress-strain curves of alloy 20Cr-25Ni-6Mo at LHe and LN₂ temperatures⁸

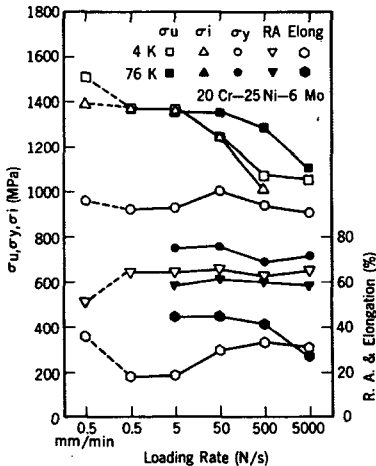


Fig. 4 Tensile properties of alloy 20Cr-25Ni-6Mo at LHe and LN₂ temperatures as a function of load rate⁸

그 결과로 20Cr-25Ni-6Mo 합금의 인장 특성은 Fig. 4 와 같이 정리되는데, 이 합금의 경우 동일한 하중 속도에서 액체질소온도에서의 인장강도는 액체헬륨온도에서의 인장강도와 같거나 오히려 더 높게 나타난다. 또 액체헬륨온도에서의 인장강도는 하중 제어의 경우가 스트로크 제어의 경우보다 항상 낮으며, 이는 하중 제어 조건 하에서 사용되는 극저온 구조물을 설계하거나 재질을 선택함에 있어서 문제를 야기시킬 수도 있는 것으로 보고⁸ 되었다.

2.3 변형률 속도

일반적으로 변형률 속도가 증가함에 따라 강도가 증가한다는 것은 잘 알려져 있다. 이 때문에 인장 시험 관련 규격^{3,9}에서는 시험 속도와 관련된 규정을 정하여 이에 따르도록 하고 있다.

예를 들면 철강의 항복 특성을 구할 때의 부하 속도에 대해서 ASTM E 8M에서는 1.15 MPa/s ~ 11.5 MPa/s로 규정하고 있다. 한편 ISO 6892에서는 상항복강도만을 구할 경우에는 6 MPa/s ~ 60 MPa/s로 규정하고 있으며, 하항복강도만을 구하거나 상/하항복강도 모두를 구할 때는 $2.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \sim 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 로 규정하고 있다.

그런데 (응력 속도) = (탄성계수) × (변형률 속도)이며, 철강의 경우 탄성계수는 약 200 GPa이므로 ISO의 규정인 $2.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \sim 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 는 50 MPa/s ~ 500 MPa/s에 해당된다. 즉 상항복강도만을 구할 때의 응력(또는 변형률) 속도와 상/하항복강도 모두를 구할 때의 응력(또는 변형률) 속도간에는 약 10 배의 속도 차이가 존재한다. 앞서 기술하였듯이 상항복강도는 변형률 속도에 매우 민감하다. 따라서 어떤 조건으로 시험하였는가에 따라 그 측정값이 크게 다르게 나타날 것이며 이는 큰 문제가 아닐 수 없을 것이다.

이렇게 한 규격 내에서도 비합리적인 사항이 지금까지 수정되지 않고 존속되어 왔다는 것이 이상하지만, 다행히 최근에 시험 속도와 관련하여 규정을 수정하려는 작업⁷이 ISO 내에서 이루어지고 있다. 이에 따르면 인장 시험은 연신율계 제어 하에서 $2.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \pm 20\%$ 의 변형률 속도로 하는 것을 추천하고 있다.

그렇지만 $2.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 는 철강의 경우 약 50 MPa/s에 해당되므로 아직도 ASTM 규격과 큰 차이가 있다. 또한 현재까지 보급된 시험기 중 많은

것이 연신율계 제어가 불가능할 것으로 판단되므로, 만약 ISO 규격이 연신율계 제어로만 인장 시험을 하도록 개정된다면 많은 시험기가 무용지물이 되어 그 경제적 손실이 만만치 않을 것이다. 물론 연신율계 제어로만 인장 시험을 한다고 하면 앞서 설명한 시험기의 강성 문제는 더 이상 복잡하게 논의할 필요가 없어진다는 긍정적인 면도 없지는 않다.

2.4 하중축 정렬과 편심

축피로시험과 같이 하중축 정렬이 시험 결과에 큰 영향을 미치는 경우에는 규격에서 이에 대한 규정을 정해 놓고 있다. 상온 인장시험의 경우 대부분 별도의 규정은 없으나 고온 인장시험의 경우 식 (1)로 주어지는 PB(percentage bending)가 10% 이내(ASTM 경우¹⁰)가 되도록 규정되어 있다.

$$PB = \pm \epsilon_B / \epsilon_0 \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기에서 ϵ_B 와 ϵ_0 는 각각 굽힘변형률과 축 변형률이다.

Fig. 5¹¹ 는 환봉 시험편에 3 개의 연신율계를 원주 방향으로 120° 간격으로 설치하였을 때 얻어지는 각각의 응력-변형률 곡선과, 이들을 평균한 곡선을 나타내고 있다. 비록 하중축 정렬이 완벽하다고 해도 시험편의 가공 상태, 시험편을 물릴 때 발생할 수 있는 편심 등의 문제로 시험편 내에는 불균일한 응력 분포가 발생할 수 있다. 이 같은 영향이 배제된 응력-변형률 곡선을 얻기 위하여 여러 개의 연신율계를 Fig. 6 와 같이 동시에 사용하기도 하는데, 이를 averaging extensometer system 이라 부른다.

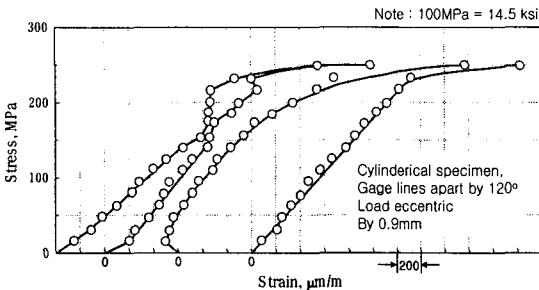


Fig. 5 Effect of eccentric load on strain¹¹

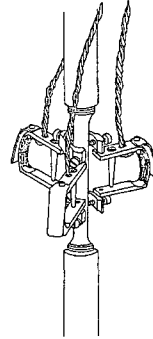


Fig. 6 Averaging extensometer system

3. 숙련도 시험

각 시험 기관에서 수행하는 시험이 제대로 이루어지고 있는가를 평가하기 위한 것이 숙련도 시험(proficiency test)이다. 급속 인장시험에 대한 숙련도 시험은 우리나라의 경우 한국교정시험기관인 정기구(KOLAS; Korea Laboratory Accreditation Scheme)를 중심으로 실시¹² 되고 있으며, 미국 ASTM 의 경우¹³에도 매년 2 회씩 실시 중에 있다.

그런데 앞서 언급한 바와 같이 많은 시험자들이 시험의 정확도에 대해 별로 관심을 두지 않고 타성적으로 시험을 하고 있고, 이는 숙련도 시험 결과가 이상값(outlier)을 나타내는 단초를 제공하게 된다.

그러나 더 큰 문제는 숙련도 시험이 측정 전문 기관과 연계되어 이루어지지 않고 있기 때문에 숙련도 시험 자체에 대한 의구심을 떨칠 수 없는 경우도 있으며 그 예¹⁴를 들면 다음과 같다.

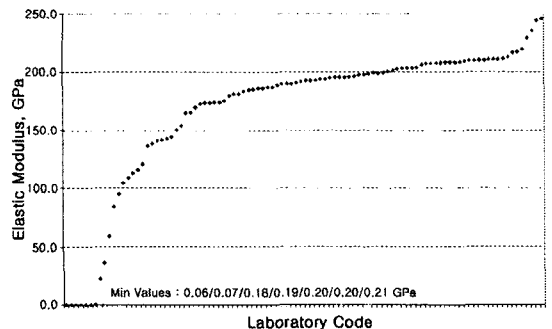


Fig. 7 An example of proficiency test results - Tensile test of metallic materials at ambient temperature¹⁴

Fig. 7 은 페라이트계 강의 인장 곡선으로부터 얻은 초기 직선 기울기 즉 탄성계수를 나타낸 것이다. 이 숙련도 시험 결과 보고서에서는 탄성계수에 대한 평가를 하지 않았다고 밝히고 있으나, 철강의 탄성계수는 약 200 GPa 이므로 많은 기관의 결과가 유효하지 못함을 알 수 있다.

큰 문제점은 부정확한 탄성계수 측정 자체 보다는 이 탄성계수를 이용해 측정한 0.2% 오프셋 항복강도에 있다. 즉 잘못된 탄성계수를 측정한 기관 중의 상당수에서 보고한 0.2% 오프셋 항복강도가 이상값(outlier)을 나타내지 않았다는 점이다. 이는 Fig. 8 에서와 같이 탄성계수에 의한 영향을 별로 받지 않는 재료 즉 가공경화가 잘 일어나지 않는 재질을 선택해 숙련도 시험에 사용하였음이 분명하며, 만약 가공경화가 큰 재질을 사용해 숙련도 시험을 했다면 많은 기관이 불만족스런 결과를 얻었을 것이라 예상된다.


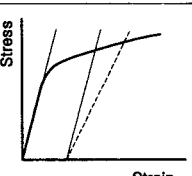
Material	Low Work hardening	High Work hardening
Stress-Strain Curve		
Effect of Elastic Modulus Accuracy on 0.2% Offset Yield Strength	Negligible	Dominant

Fig. 8 Effect of elastic modulus accuracy on 0.2% offset yield strength

4. 재료측정학 표준

이상에서 살펴본 바와 같이 시험이 간단하고 더 이상 관련된 연구가 필요 없을 것으로 생각되는 인장 시험만해도 시험을 정확히 하기 위해서는 아직도 여러 가지로 미흡한 점이 많다. 게다가 최근 들어 논의가 활발히 되고 있는 측정불확도 (measurement uncertainty)를 제대로 평가하기 위해서는 더욱 그러하다.

뿐만 아니라 인장 시험을 연신올게 제어로만

하도록 ISO 규격이 개정되면 기존에 보급된 많은 시험기를 사용하지 못하게 되므로, 이것이 바람직하지 않다면 시험기의 강성에 의한 영향을 심도 있게 연구하여 대안을 도출하여야 할 것이다. 또한 숙련도 시험이나 시험기의 정밀정확도 관리를 위한 인장용 표준기준물(CRM; certified reference material)인 인장기준편을 개발하여 보급하기 위해서는, 시험에 영향을 미치는 모든 인자가 고려된 공칭값 부여 방안이 수립되어야 할 것이다. 이와 같이 그 동안 간과되어 오던, 재료측정학 표준 (standards in materials metrology)과 관련된 여러 가지 문제가 산재해 있다.

이와 같은 문제를 해결하고자 하는 공감대가 전세계적으로 형성되어, 우리나라를 비롯한 여러 나라의 주요 국가측정표준기관을 중심으로 한 여러 활동이 진행 중에 있다. 그 예로서 APMP (Asian· Pacific Metrology Program, 아시아· 태평양 계측학 협력기구)에서는 “Ad-hoc Working Group on Materials Metrology”가 구성되어 운영 중에 있으며, 그 활동의 일환으로 우리나라 주도하에 인장시험에 대한 비교순회시험이 진행 중에 있다. 이와 함께 CIPM(Comite International des Poids et Measures, 국제도량형위원회) 산하의 “재료측정학 자문위원회(CCMM)”의 설립도 병행 추진되고 있다.

Fig. 9 는 구상 중인 재료측정학 표준과 관련된 소급성 체계(traceability chain)를 나타내고 있다.

5. 결론

인장 시험은 기계류 부품 및 설비의 설계와 제작에 반드시 필요한 인장 특성을 평가하는 기초적이고 중요한 역학적 시험 방법이므로, 인장 특성 측정 능력 제고를 위한 많은 관심이 필요하다.

이를 뒷받침하기 위해서는 국가측정표준기관에서는 재료측정학 자문위원회(CCMM)의 설립을 적극 추진하고, 재료측정학 표준과 관련된 국가간 상호 연구를 활성화하여 재료 물성의 측정 정확도를 향상시킴으로써 구조물의 정밀 설계 및 신뢰성 평가를 위한 기반을 구축하여야 할 것이다.

이와 함께 산업체, 연구기관 및 대학교에서는 비록 늘 하던 시험이라 할지라도 항상 시험에 대한 정확도에 관심을 두고 시험에 임하여야 할 것이다. 또한 숙련도 시험 등에 능동적으로 참여하여 시험의 정확도가 지속적으로 유지되는지, 만약

문제가 있다면 어떠한 부분을 개선해야 하는지 항상 고민하고 부단히 노력을 하여야만 우리나라 소재 및 기계류 관련 산업이 일층 발전할 것이다.

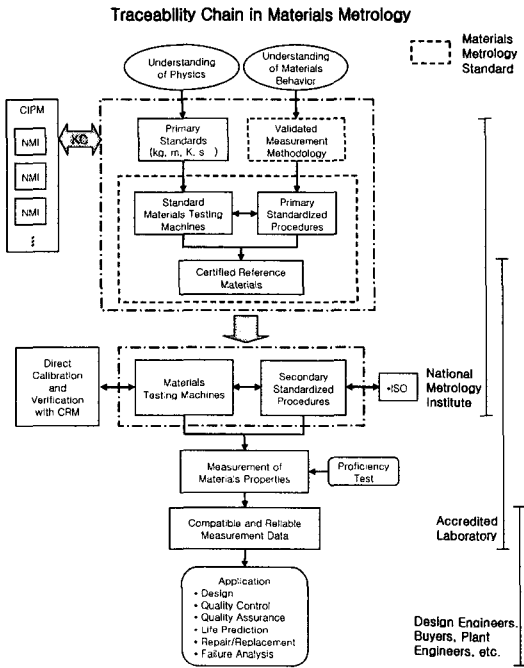


Fig. 9 Traceability chain in materials metrology

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발과제인 ‘소재물성 표준화 기술개발’ 및 한국표준과학연구원 2004년도 기관고유사업인 ‘재료평가표준 확립 및 유지’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Ogata, T., Nagai, K. and Ishikawa, K., "VAMAS Tests of Structural Materials at Liquid Helium Temperature," *Advances in Cryogenic Engineering – Materials*, Vol. 40B, pp. 1191 - 1198, 1994.
- Gillis, P. P. and Grass, T. S., "Effect of Strain Rate on Flow Properties," *Metals Handbook*, Vol. 8, American Society for Metals, pp. 38 - 46, 1985.

- ASTM E 8M-01, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]," American Society for Testing and Materials, 2003.
- Loveday, M. S., "Towards a Tensile Reference Material," *Harmonization of Testing Practice for High Temperature Materials*, Edited by M. S. Loveday and T. B. Gibbons, pp. 111 - 153, 1992.
- BS 4759 : 1971, "Method for Determination of K-Value of a Tensile Testing System," British Standards Institution, 1971.(discontinued)
- Wozniack, Jan and Jakob, Miloslav, "Effect of the Frame Stiffness and Testing Conditions on the Results of Tensile Tests," Document ISO/TC 164/SC 1 N 479 rev 1, 2002.
- "Proposals of Modifications of EN 10002-1:2001 Agreed by the WG1 at the Meeting on the 2003-09-26 in Paris," Document ISO/TC 164/SC 1 N 502, 2003.
- Lee, H. M., Reed, R. P. and Han, J. K., "Load-Controlled Tensile Tests of Austenitic Steels at 4 K," *Advances in Cryogenic Engineering – Materials*, Vol. 36B, pp. 1273 - 1282, 1990.
- ISO 6892:1998, "Metallic Materials – Tensile Testing at Ambient Temperature," International Organization for Standardization, 1998.
- ASTM E 21-92, "Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials," American Society for Testing and Materials, 2003.
- Davis, Harmer E., Troxell, George Earl and Hauck, George F. W., *The Testing of Engineering Materials*, 4th Ed. McGraw-Hill Book Company, p. 144, 1982.
- KOLAS PT 2003-6, "숙련도 시험 결과 보고서 (인장시험편)," 한국교정시험기관인정기구, 2004
- Bradley, David, "ASTM Proficiency Testing Programs – Statistical Quality Assurance Tools for Laboratories," *Standardization News*, American Society for Testing and Materials, March 2004.
- "Proficiency Test – Metallic Materials: Tensile Testing at Ambient Temperature (Tensile Test Metallic Materials, TTM 2002)," Organized by IfEP(Institut für Eignungsprüfung), December 2002.