

# 사용재 물성 평가를 위한 미소 시험편 크기에 따른 인장 특성 평가

허용학<sup>†</sup> · 김동일 · 김동진 · 이해무 · 박종서

한국표준과학연구원 삶의질표준부 에너지인프라연구단

(2008. 6. 24. 접수 / 2008. 9. 21. 채택)

## Measurement of Tensile Properties Dependent on the Small-Scaled Specimen Dimension for Evaluation of In-Service Materials Properties

Yong-Hak Huh<sup>†</sup> · Dong-Iel Kim · Dong-Jin Kim · Hae-Moo Lee · Jong-Seo Park

Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standards and Science

(Received June 24, 2008 / Accepted September 21, 2008)

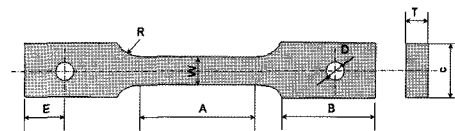
**Abstract** : To evaluate the mechanical properties of in-service materials, tensile properties measurement using small-scaled specimen has been carried out. Tensile testing specimens with various dimensions, including standard and sub-size specimen specified in ASTM and ISO and small-scaled specimen, were prepared. Tensile strain in small-scaled specimen was measured using micro-ESPI system set up in this study. This system was used in the specimen with the parallel length of 2 mm and in subsequently measuring the strain under tensile loading. From each type of tensile specimen, stress-strain curves were determined. The dimension effect of the tensile properties was investigated comparing the tensile results obtained from standard specimens and small-scaled specimens. It was shown that the tensile strength for the small-scaled specimen is lower by 15% than those for the standard specimen.

**Key Words** : small-scaled specimen, tensile testing, in-service materials, micro-ESPI(electronic speckle pattern interferometry)

### 1. 서론

발전 설비, 석유화학 플랜트 등을 포함한 산업 설비는 사용 환경에 의하여 구성 재료의 열화가 발생하게 되고, 이는 설비 요소체의 수명의 변화를 가져오게 된다. 이러한 설비에서 사용 환경의 불확실성으로 환경지배적인 구조물의 수명을 평가하는 주요한 문제는 현재의 상태를 어떻게 결정하고, 주어진 구조상태에서 신뢰성있고 효율적인 운영을 얼마나 지속하느냐, 그리고 수리 및 보수의 필요성을 평가하는가이다. 일반적으로 이러한 구조물에 필요한 정보를 분석하고 얻기 위해서 3단계 접근법에 의한 수명평가가 이루어진다<sup>1-3)</sup>. 첫 번째 수준 평가에서는 설계 기준과 작동 이력 혹은 문제가 될수 있는 요소의 파손 빈도수에 근거하여 계산한다. 이 계산에서는 잠재적인 손상에 대하여 시설물을 보호하게 된다. 수명 평가의 두 번째 수준에서는 구조물의 결함이나 표면 손상의 위치를 탐지하거나 평

가하는 전통적인 비파괴적 방법과 구조물의 표면 미세 조직의 변화와 변형을 분석하는 비파괴적인 방법으로 현장 검사를 포함한다. 세 번째 수준의 평가는 파괴적 시험을 통하여 실제 물성을 결정하고 좀더 세밀한 응력 해석과 균열 성장 해석을 실시하는 것이다. 이러한 파괴적인 시험은 일반적으로 운영 구조물로부터 상당히 큰 크기의 시험편의 채



Dimension (mm)	Specimen Type								
	Standard	Sub-size	Small-scale						
T	3	3	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1
W	12.5	6	0.5	12.5	6	1	0.5	0.5	0.5
R	12.5	6	3	6	6	3	3	3	3
A	57	32	2	32	4	2	4	2	2
B	50	30	5	30	30	5	5	5	5
C	20	10	5	20	10	5	5	5	5
D	-	-	1	-	-	1	1	1	1
E	-	-	2.5	-	-	2.5	2.5	2.5	2.5

Fig. 1. Shape and dimensions of tensile testing specimens used in this study.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed. yhhuh@kriss.re.kr

취를 필요로 하고 있어 이들 방법은 상당한 경비가 들고 다른 방법들이 충분한 정보를 제공하지 못하는 경우에만 사용된다. 그러나 사용 중 구조물 재료에 의한 시험에 의해서 구조물에 작용하는 손상의 범위를 실제 사용 수명으로 직접적 평가가 이루어질 수 있다.

사용 중 구조물로부터 파괴적 시험을 수행하기 위해서는 표준 시험편의 크기로 시험편을 제작하기 위해서는 사용 중 구조 재료의 상당한 양이 채취되어야 하는 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 사용 구조 재료의 소형을 채취하여 열적 기계적 손상을 야기하지 않도록 하고 이를 이용하여 소형 시험편을 제작하여 파괴 시험을 수행하는 기법이 개발중이고 일부는 개발되었다<sup>4,6)</sup>. 원자력 발전 설비에서는 조사에 따른 물성 변화를 측정하기 위하여 다양한 파괴적 시험을 위한 소형 시험편을 제작하여 조사시설과 같이 설치하여 주기적인 측정을 하고 있으며<sup>7)</sup>, 수송 기기에서는 작은 영역의 용접부 물성을 평가하기 위하여 소형 시험편이 제작되어지기도 하고 있다.

본 연구에서는 사용 가동중인 설비로부터 국부적인 재료를 채취함으로써 얻어지는 사용재 물성 측정에서의 신뢰성을 높이기 위하여 미소시험편을 이용한 인장 시험을 수행하여 그 크기 의존성을 평가하였다. 인장 표준 시험편과 다양한 크기의 미소 시험편을 이용하여 크기 효과를 조사하였고 미소 시험편에서 비접촉식으로 변형을 측정하기 위하여 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometric) 시스템을 사용하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험재료 및 시험편

본 시험에 사용한 재료는 구조용 강재로 많이 사용되고 있는 두께 20mm의 롤링한 판재 SS400이다. 본 연구에 사용한 SS400의 미세조직은 등방성의 페라이트 조직(흰색)과 퍼얼라이트조직(검은색)으로 구성되어 있다. 미세조직으로부터 ASTM E112-96에 규정된 Heyn 직선교차법(lineal Intercept method)<sup>8)</sup>에 따라 입자크기를 산정하였으며, 그 크기는 20 μm이었다.

Fig. 1은 본 시험에서 사용한 시험편의 크기를 나타내며, 시험편은 판형 시험편으로 ASTM과 ISO의 표준 시험 방법에 근거하여 시험편의 크기를 결정하였다. 미소시험 결과 기준을 확보하기 위하여 표

준 시험편의 크기와 작은 크기 표준 시험편을 제작하였으며, 미소 시험편의 두께와 너비 등의 영향을 보기 위하여 다양한 두께와 너비의 시험편으로 준비하였다. 표준 시험편과 작은 크기 표준 시험편의 두께는 3mm로 하였으며, 미소 시험편의 두께는 1, 0.5, 0.1mm의 세 종류를 선택하였다. 너비는 표준 시험편과 작은 크기 시험편에서는 12.5mm와 6mm를 각각 사용하였고, 미소 시험편에서는 12.5에서 0.5mm까지 범위내에 있도록 하였다. 표준 시험편과 작은 크기 표준 시험편 등의 그림부는 쇠기형 그림에서 시험할 수 있도록 설계하였고, 미소 시험편은 핀 구멍을 그림부에 설계하여 인장 하중이 편으로 전달하는 구조로 설계하였다.

### 2.2. 실험장치

표준 시험편과 작은 크기 표준 시험편은 재료시험기(SINTECH:하중최대 용량 30kN)를 사용하였으

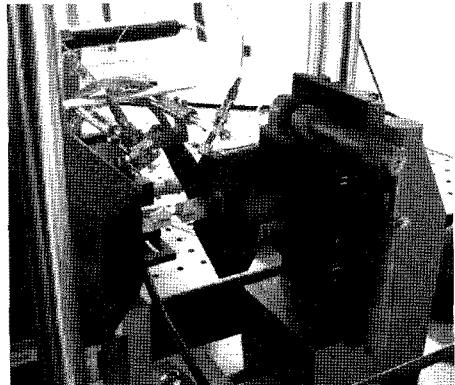


Fig. 2. Tensile testing system for small-scaled specimen.

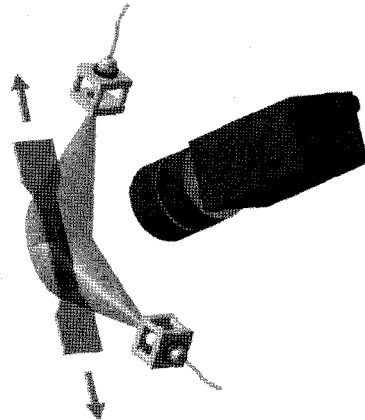


Fig. 3. Schematic diagram for in-plane tensile strain measurement by ESPI technique.

며, 2"와 1" 게이지 길이를 가지는 연신계를 사용하여 변형률을 측정하였다. 미소시험편은 Fig. 2에서 보여준 바와 같은 미소 인장 시험기(TYTRON; 최대하중용량 250N)를 사용하였다.

미소시험편에서의 인장 하중이 부가되는 동안 발생하는 인장 변형 측정은 시험의 강성과 시험부 길이의 제약성으로 인하여 기존의 연신계의 사용이 제한적이다. 이에 따라 본 연구에서는 비접촉식으로 미소 시험편에서 변형을 측정할 수 있는 마이크로 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) 시스템을 구축하였다.

Fig. 3은 본 시험에서 구축한 마이크로 ESPI 시스템을 이용한 시험편 변형 측정 모식도를 나타낸다. 본 연구에서 구축한 마이크로 ESPI 시스템은 간섭성이 우수한 He-Ne 레이저(파장 632.8nm)를 이용하였으며 광파이버를 이용하여 빔을 전달하였다. 광파이버를 통해 전달된 빔은 광분할기에 의해 5:5로 분리가 되었으며, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 볼록 렌즈(concave lens)를 통하여 레이저 빔을 확산하여 시편 전체에 빔이 조사되도록 하였다. 시편에서 난반사에 의해 간섭된 스펙클들은 CCD카메라의 수광 소자에 결상되도록 하였으며, 본 연구에서 개발된 실시간 이미지 획득 시스템(IPSG v3)에 의해 실시간 관측되도록 하였다. 실시간 이미지 획득 시스템(IPSG v3)에서는 하중 및 변형의 수준에 따른 스펙클 간섭 무늬를 하중 크기와 동기하여 연속적으로 측정하고, Visual C++6.0과 Measurement Studio를 이용하여 제작하였다<sup>9)</sup>.

본 연구에서 사용한 마이크로 ESPI는 레이저간섭을 이용하여 표면의 변형 정보를 측정하는 방법으로 본 연구에서 측정하는 면내 인장 변형은 트와이만-그린(Twyman-Green)간섭계를 기본으로 측정할 수 있도록 광학계를 구성하였다.

면내 간섭은 변형전과 변형후의 광로 변화에 의하여 발생하게 되며 이러한 광로 변화에 의한 위상차는 다음과 같은 관계에 의하여 결정된다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (1)$$

여기서  $\Delta\phi$ 는 두 레이저 빔의 위상차를,  $\lambda$ 는 레이저 파장,  $\theta$ 는 레이저빔과 측정면간의 경사 그리고  $d$ 는 간섭무늬 거리를 각각 나타낸다. 간섭무늬에서 줄무늬는  $\Delta\phi = 2\pi N$ 일 때 형성하게 되므로 면내 변위 간섭계에서의 측정하는 변위는 다음과 같

은 관계식으로 얻어지게 된다.

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin\theta} \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 면내 변위 간섭계는 관측면의 각도와 관계없이 조사 각도와 레이저 파장에 의해서만 변위가 결정된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 인장 곡선

본 연구에서는 미소시험편 인장 시험 기술의 유효성을 검증하기 위한 기준으로 표준 시험편(standard specimen) 혹은 준 표준 시험편(sub-size specimen)에 의한 결과를 사용하였다. 표준 시험편과 준 표준 시험편의 두께는 3mm이고 너비는 각각 12.5mm와 6mm이다. Fig. 4는 표준 시험편에서 얻어진 전형적인 인장 응력-변형률 곡선이다.

표준 시험편과 준 표준 시험편은 0.5mm/s의 인장 속도로 변위제어로 시험을 수행하여 얻었다. Fig. 4에서 보여준 바와 같이 SS400은 상 하 항복점(upper yielding strength, lower yielding strength)을 보이고 있다. 상항복점과 하항복 강도는 각각 275.7MPa과 283MPa로 비교적 큰 차이를 보이지 않고 있다. 인장 강도는 461.2MPa로 SS400은 비교적 큰 연신을 보이고 있다.

#### 3.2. 미소 시험편 인장 시험

미소시험편은 사용중인 설비로부터 사용재를 채

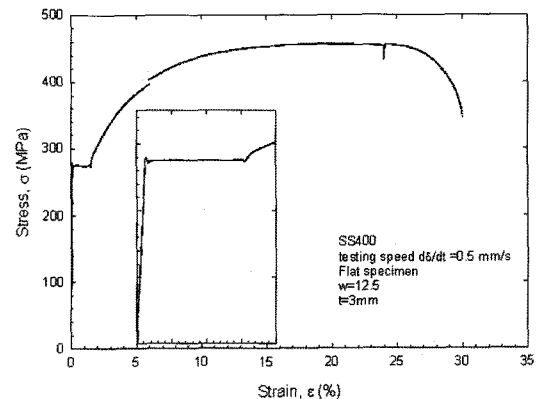


Fig. 4. Typical tensile stress-strain curve obtained from standard specimen for SS400.

취하여 사용재의 물성을 측정하거나 작은 용접부위의 물성 특성을 얻기 위하여 사용할 수 있도록 고안되어 있다. 따라서 실 사용재로부터 채취할 수 있는 재료의 크기는 제한적이기 때문에 가능한 작은 크기의 시험편으로 신뢰할 수 있는 시험 결과를 얻는 것이 중요하다. 이에 따라 미소시험편의 시험편 크기의 영향은 이러한 시험결과 유효성을 검증하는데 매우 의미가 있어 본 연구에서는 다양한 크기를 가지는 시험편을 이용하여 인장 시험을 수행하였다.

본 연구에 사용한 미소 시험편의 제원은 Fig. 1에 도시한 바와 같으며, 두께는 1, 0.5, 0.1mm 세 종류이고, 너비는 0.5, 1mm이었다. 너비의 효과를 비교하기 위하여 두께 0.5mm와 너비 6mm와 12.5mm인 시험편을 같이 준비하였다. 준비된 시험편은 미소 인장 시험기(최대하중용량: 250N)에서 시험하였고 시험은 변위제어로 0.05mm/s의 속도로 수행하였다. 미소 시험편의 인장 변형은 본 연구에서 개발한 마이크로 ESPI 시스템을 사용하였다.

Fig. 5는 미소 시험편의 너비의 영향을 나타낸다. 두께가 1, 0.5mm인 미소 시험편의 너비는 6, 1, 0.5mm인 시험편을 비교하였으며, Fig. 5에 점선으로 표시한 표준 기준의 범위는 표준 시험편과 준 표준 시험편의 시험결과이다. Fig. 5에 표시한 시험결과와 표시(마크)는 각 조건에서 3개의 시험편으로부터 얻어진 결과의 평균을 의미하고 오차 바는 그 분산을 나타낸다. Fig. 5에서 보여주고 있는 바와 같이 너비가 6mm인 미소시험편의 결과는 표준 시험편의 결과 거의 동일하나 시험편의 너비가 작아질수록 다소 차이를 보이고 있다. 특히 1mm의 너비 시험편의 결과는 비교적 제일 큰 차이를 보이고

있으며, 표준 기준값에 비하여 약 6%의 차이를 보이고 있다. 너비가 0.5mm인 미소시험편에서의 항복 강도는 표준 시험편의 항복 강도의 하한계에 있으며, 인장 강도는 다소의 산란(scatter)가 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 미소시험편의 두께 영향을 보이고 있다. 두께는 3, 1, 0.5, 0.1mm인 시험편의 결과를 비교하였다. 두께 0.5mm의 항복 강도와 인장 강도는 다소 큰 산란을 보이고 있으며, 두께 0.5mm까지 미소 시험편의 인장 강도와 항복 강도는 비교적 표준 시험편의 값과 비슷한 결과를 보이고 있다. 그러나 두께 0.1mm인 미소시험편의 인장 강도는 표준 시험편의 결과에 비해 결과는 15.5% 정도 낮게 측정되고 있다. 본 시험의 결과에서 보여주듯이 두께의 영향은 두께 0.1mm인 시험편에서 명확히 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 두께에 대한 인장 강도의 천이에 대한 정보를 알기 위해서는 좀더 세밀한 실험계획으로 다양한 두께를 가진 미소 시험편을 이용하여 측정할 필요가 있다. 특히 0.5mm 두께의 미소시험편의 결과는 다소 큰 산란을 보이고 있어 이에 대한 추후 실험적 규명이 요하고 있다. 일반적으로 미소 시험편 특히 두께가 얇은 시험편을 준비하기 위해서는 가공에 세심한 주의가 요한다. 추후 실험 계획에서는 이러한 영향에 대한 고찰도 요구된다.

Fig. 7은 미소 시험편의 단면적에 대한 인장강도와 항복 강도의 영향을 나타낸 것이다. 표준 시험편과 작은 크기 표준 시험편에서 얻어진 강도 데이터는 비교적 일치된 결과를 보이고 있다. 이에 반하여 미소 시험편에서 얻어진 강도는 단면적의 감소에 따라 다소의 차이를 보이고 있다. 그러나 전

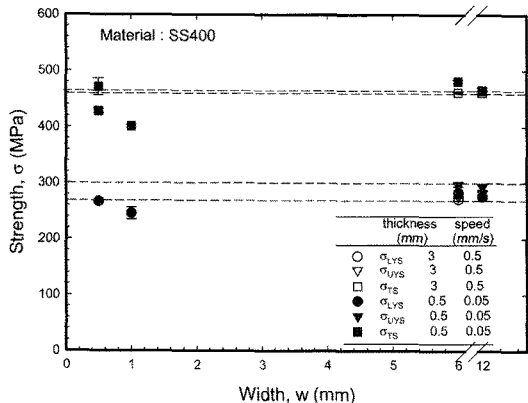


Fig. 5. Effect of width of the small-scaled specimen on tensile properties.

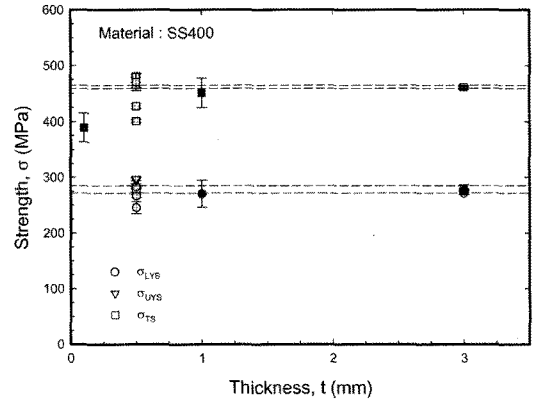


Fig. 6. Effect of the thickness of the small-scaled specimen on tensile properties.

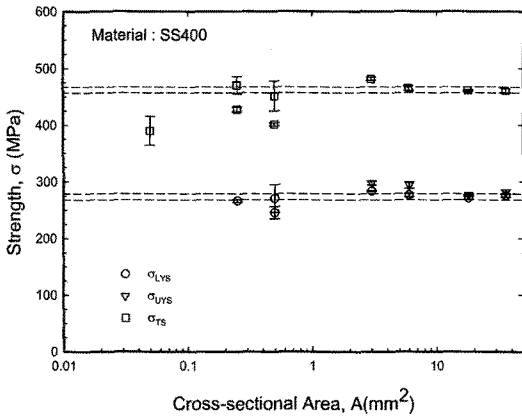


Fig. 7. Effect of the cross-sectional area of the small-scaled specimen on tensile properties.

체적으로 표준 기준 강도에 비하여 상대적으로 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 단면적 0.05mm<sup>2</sup>에서는 비교적 큰 차이를 보이고 있다.

#### 4. 결론

다양한 미소 인장 시험편을 제작하여 미소 인장 시험편에 의한 강도의 시험편 크기 의존성을 실험적으로 고찰하였다. 이러한 소형 시험편에 의한 강도 평가는 사용재의 평가에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있어 소형 시험편에 의한 인장 강도의 신뢰성 평가는 산업 설비의 건전성 평가에 매우 의미있다고 할 수 있다.

미소 시험편에서 인장 변형을 측정하기 위하여 마이크로 ESPI 시스템을 사용하였으며, 이는 시험편 평행부 길이가 2mm인 시험편에서 인장 하중의 부가동안 인장 변형을 연속적으로 측정할 수 있도록 구성하였다. 미소 인장 시험편의 크기 영향을 조사하기 위하여 미소 인장 시험편과 표준 인장 시험편을 사용하여 상호 비교하였으며, 두께 3, 1, 0.5, 0.1mm 그리고 너비 12.5, 6, 1, 0.5인 각 조합의 인장 시험편을 사용하였다. 0.5mm인 시험편에서는 다소의 분산이 크게 나타났으며, 두께 0.1mm의 미소 인장 시험편은 표준 기준치에 비하여 약 15%의 작게 측정되고 있었다. 또한 시험편의 너비가 작은 시험편에서의 강도는 표준 시험편의 강도에 비하여 다소의 산란이 있었으나, 비슷하게 나타나고 있었

다. 또한 인장강도는 시험편의 단면적의 변화에 대해 그리 크게 나타나지 않았으나, 단면적이 0.05mm<sup>2</sup>에서는 비교적 큰 차이를 보였다.

**감사의 글 :** 본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호 : 2007- M-CC23-P-09-1-000).

#### 참고문헌

- 1) J. Douglas, “High value for condition Assessment”, EPRI Journal, Vol. 21, pp. 26 ~34, 1996.
- 2) R.D. Townsend, “Procedures used by Central Electricity Generating Board for component life assessment”, Proceeding. of Conference on Refurbishment and Life Extension of Steam Plant. Pp 223229. London: Institution of Mechanical Engineers, pp. 223 ~235, 1987.
- 3) J.D. Parker and L.H. Bisbee, “Monitoring in-service changes in materials properties”, Proc Instn. Mechanic. Engrs. Vol. 206, pp. 209 ~216, 1992.
- 4) D. Mercaldi and J. Parker, “Material sampling for rotor evaluation”, EPRI Conference “Assessment of turbine generators”, Charlotte (North Carolina), 1989.
- 5) V. Bicego, M. Certo, C. Sanpietri, F. Bregani, “Non destructive material creep damage evaluation in service exposed components: ENEL experience”, Presented at EPRI-workshop, “NDE for Damage Assessment”, 6-7 Oct., 1997.
- 6) A. Garzillo, C. Guardamagna, L. Moscotti, L. Ranzani, “A technique for the residual life assessment of high temperature components based on creep rupture testing on welded miniature specimens”, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 66, pp. 223 ~232 1996.
- 7) D.G. Doran; Test Volume Considerations for an IFMIF; IEA-WG Report, Washington State University, 1993.
- 8) ASTM E112-96, “Standard method for determining average grain size”
- 9) Y.H. Huh, D.I. Kim, D.J. Kim, P. Park, C.D. Kee and J.H. Park, “Application of micro-ESPI technique for measurement of micro-tensile properties”, Key Eng. Materials Vol. 270, pp. 744 ~749, 2004.