

4 계 스테인리스강 기계적 물성의 통계적 분석 Statistical Analysis for Mechanical Properties of 400-series stainless steels

*#김기풍¹

*#K. P. Kim(keepkim@kitech.re.kr)¹

¹ 한국생산기술연구원 마이크로금형팀

Key words : 400-series stainless steel, mechanical property, tensile test, forming limit diagram

1. 서론

STS304 와 같은 300 계 스테인리스강은 성형성과 내식성이 우수하여 기존에 전자 및 자동차 산업에서 많이 사용되고 있으나, 원소재인 니켈 가격의 상승으로 저가의 대체 소재를 적용한 부품 개발이 요구되고 있다. 400 계 스테인리스강은 Table 1 에서 볼 수 있듯이 니켈을 원소재로 사용하지 않아 300 계 스테인리스강에 비하여 가격이 낮아 300 계 스테인리스강의 대체소재로써 부각되어 자동차의 부품이나 세탁기, 식기세척기 등의 가전제품 부품에 적용이 확대되고 있다. 주방기기 및 가전 분야에서는 기존의 300 계 소재를 대체하여 원가를 절감하거나, 내식성이 낮은 소재를 스테인리스강으로 대체하여 고급화를 추구하고 있다. 자동차 분야에서는 환경 규제에 대처하고 내식성 확보를 위하여 배기계 부품 등에 적용이 확대되고 있다. 400 계 스테인리스강은 300 계 스테인리스강에 비하여 성형성 등이 열위이므로, 400 계 스테인리스강을 적용하는 부품 개발 및 소재의 적용 확대를 위해서는 400 계 스테인리스강의 기계적 물성에 관한 데이터 확보 및 성형성에 관한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 400 계 STS 강 의 기계적 물성과 성형한계를 도출하고 물성 간의 특성을 통계적으로 분석하였다. 400 계 STS 강 의 기계적 물성은 강종 및 두께의 변화를 고려하여 확보하였으며, 인장특성, 이방성 및 FLD(forming limit diagram)에 관하여 데이터베이스로 구축하였다. 구축된 400 계 STS 강 의 기계적 물성을 이용하여 인장 물성 및 성형한계 간의 상관성을 평가하였다.

Table 1 Chemical composition of 400-series stainless steels

강종	C	N	Si	Mn	P	S	Mo	Ti
409L	0.01%	0.01%	0.5%	0.3%	11%	-	-	0.2%
436L	0.01%	0.01%	0.2%	0.3%	18%	1%	-	0.3%
439	0.01%	0.01%	0.2%	0.3%	18%	-	-	0.4%

2. 기계적 물성 시험

인장 시험법은 소재의 기계적 물성 평가방법으로 가장 널리 이용되고 있는 시험 방법으로서 항복강도(yield strength; YS), 인장강도(tensile strength; TS), 연신률(elongation), 균일연신률(uniform elongation), 가공경화지수(strain hardening exponent; n) 및 소성이방성계수(plastic anisotropy ratio; r) 등의 기계적 성질을 얻을 수 있다. 본 논문에서 기계적 물성 측정 및 성형성 시험을 수행한 400 계 STS 강은 Table 1 과 같다. Table 1 의 3 종의 400 계 STS 강 의 인장시험을 수행하여 여러 인장값들을 얻었다. 3 종의 400 계 STS 강에 관한 인장 시험은 두께의 변화를 고려하여 수행하였다. 인장 시험을 수행한 시편은 JIS13B 규격으로 제작하였으며 압연 방향의 0도, 90도, 45도 방향으로 각각 3 개씩을 가지고 인장 시험과 소성이방성계수 측정시험을 수행하였다. 항복강도, 인장강도, 연신률 등을 측정할 때에는 인장 속도를 10 mm/min 로 하여 파단이 일어날 때까지 인장하였고, 소성이방성계수 측정을 위한 실험에서는 인장 속도를 20 mm/min 으로 하여 시편의 표점거리가 15% 늘어날 때까지 인장하

였다.

동일 강종이라도 두께에 따른 인장값의 차이가 존재하였다. Fig. 1 에는 3 종의 400 계 STS 강에 관한 인장 곡선을 나타내었고, 이들 곡선으로부터 항복강도, 인장강도, 연신률, 균일연신률 및 가공경화지수를 압연방향과 0도, 45도, 90도 방향으로 구하였다. 압연 방향의 0도, 90도, 45도 방향에 관하여 구한 소성이방성계수는 Fig 2 에 도시하였다. 대체로 압연방향과 90도 방향의 소성이방성계수의 값이 가장 크고, 45도 방향의 소성이방성계수의 값이 가장 작았다. 평균 소성이방성계수(\bar{r}), 평면이방성계수(Δ) 는 각 방향별로의 소성이방성계수로부터 계산하였다.

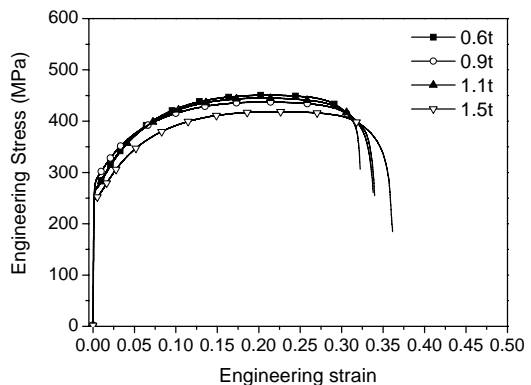
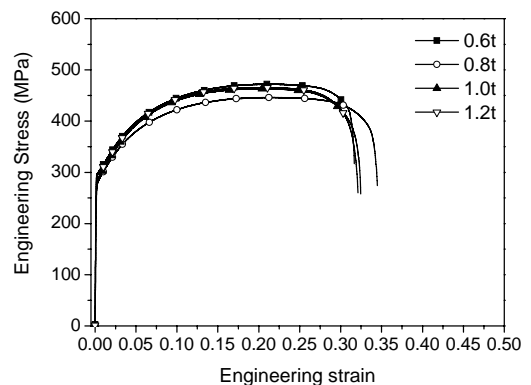
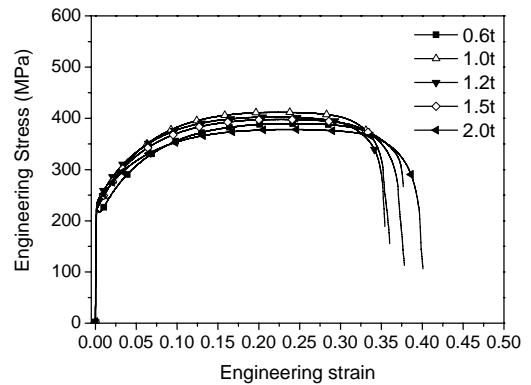


Fig. 1 Stress-strain curves of 400-series stainless steels: (a) STS409L; (B) STS436L; (C) STS439

Table 2 Results of correlation analysis for mechanical properties of 400-series stainless steels

		thic ness	T	elongation	uniform elongation	strain hardening e ponent	plastic anisotrop ratio
	correlation	-0.257					
	p-value	0.398					
T	correlation	-0.427	0.914				
	p-value	0.146	0.000				
elongation	correlation	0.528	-0.874	-0.976			
	p-value	0.064	0.000	0.000			
uniform elongation	correlation	0.234	-0.930	-0.935	0.933		
	p-value	0.441	0.000	0.000	0.000		
strain hardening e ponent	correlation	-0.086	-0.894	-0.686	0.624	0.810	
	p-value	0.779	0.000	0.010	0.023	0.001	
plastic anisotrop ratio -	correlation	-0.870	0.124	0.213	-0.339	-0.099	0.158
	p-value	0.000	0.687	0.485	0.258	0.748	0.606
F D	correlation	0.914	-0.263	-0.323	0.437	0.193	0.038
	p-value	0.000	0.386	0.281	0.135	0.528	0.902

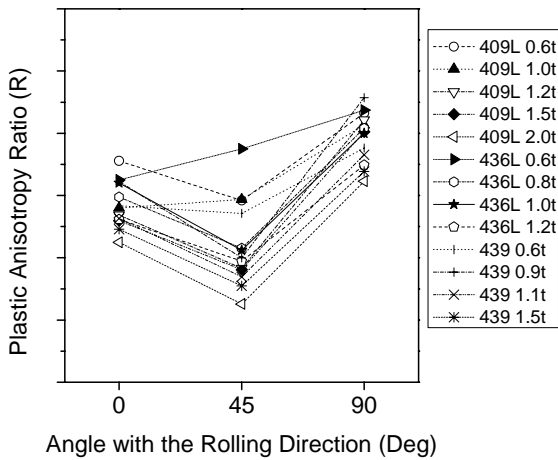


Fig. 2 Plastic anisotropy ratio with respect to the rolling directions for 400-series stainless steels

FLD는 3종의 STS강 한계변형률을 두께별로 측정하여 도출하였다. 전체적으로 강종 및 두께에 따른 FLC 형상의 차이는 크게 나타나지 않았으나 소재의 두께가 커질수록 성형한계는 상승하였다. 도출된 FLD 결과는 소재 두께 및 인장 특성과 평면변형에서의 성형 한계인 FLD₀와 관계를 통계적으로 조사하는데 활용하였다.

3. 기계적 물성의 통계적 분석

두께 및 인장값들 사이의 관계는 먼저 그래프로 분석하였다. 분석 결과는 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에 볼 수 있는 것처럼 두께, 인장값들 간에는 서로 양의 상관관계나 음의 상관관계가 있기도 하고 상관관계가 크게 나타나지 않는 것도 있다. 인장값들 사이의 관계들은 일반적으로 알려져 있는 이론과 일치하여 나타났다. 항복강도와 인장강도는 양의 상관관계를 보였으며 연신률과 균일연신률도 가공경화지수와 양의 상관관계로 나타나 소성 불안정이론과 일치하는 것으로 나타났다. 반면에 항복강도와 인장강도는 연신률이나 균일연신률과 음의 상관관계를 갖는 것으로 나타나 강도가 높은 소재는 대체로 연신률이 낮다는 개념과 일치하였다. 성형성 향상에 많은 영향을 주는 가공경화지수도 소재 강도와는 음의 상관관계를 보여 연질 소재의 적용이 부재의 성형성을 향상시킨다는 것을 통계적으로 알 수 있었다. 평균 소성이방성계수(\bar{r})는 두께가 두꺼울수록 작아지는 것으로 나타나 딥드로잉(deep drawing) 가공성은 두께가 얇을수록 우수한 것으로 평가되었다. \bar{r} 와 n 은 상관성이 크게 없는 것으로 나타났고 연신율과 \bar{r} 사이의 비교에서는 직접적인 상관성이 나타나지 않았으나, 연신율과 n 간에 약한 양의 상관관계가 존재하였다. FLD₀는 두께와 양의 상관관계로 나타나 두께가 높아질수록 성형한계가 우

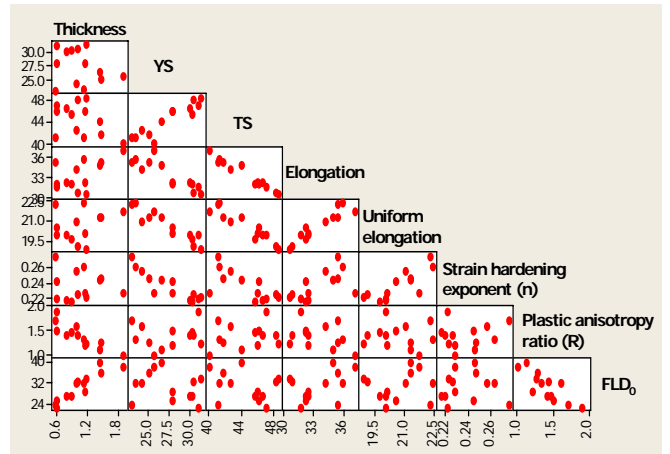


Fig. 3 Matrix plot of mechanical properties for 400-series stainless steels

수하다는 것을 알 수 있었고, \bar{r} 와는 음의 상관관계로 나타나서 소성이방성계수가 높은 소재는 평면변형률(plane strain) 변형이 발생하는 경우에는 적합하지 않다는 것을 알 수 있었다.

그래프 분석을 통한 두께 및 인장값들 간의 상관관계는 상관분석을 통한 수치로도 확인할 수 있다. 두께 및 인장값들 간의 상관분석 결과는 Table 2에 정리하였다. 그래프 분석 결과에서 양의 상관관계가 있는 경우에는 상관계수가 양의 값으로 나타났으며, 음의 상관관계가 있는 경우에는 음의 상관계수의 값이 음으로 나타났다. 특히 그래프에서 뚜렷하게 상관성을 볼 수 있는 경우에는 p 값이 0에 가깝게 나타나 그래프 분석의 결과를 수치로 재확인 할 수 있었다.

4. 결론

자동차 및 가전의 부품 개발에서 400계 스테인리스강의 적용 확대를 위하여 기계적 물성과 성형한계를 도출하고 기계적 물성 간의 상관성을 분석하였다. 특히 성형한계와 인장물성간의 상관성을 분석하였고, 이 결과는 프레스 가공으로 생산되는 400계 스테인리스강 적용 부품 개발에 적극 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 전기찬, 박관금속의 성형 -이론과 실제-, 반도출판사, 1993.
2. Hosford, W. F., and Caddell, R. M., Metal Forming (2nd ed.). Practice Hall International, 1993.