



냉간압연률이 다른 STS316L의 비커스경도에 관한 와이블분포 특성 Characteristics for Weibull Distribution of Vickers Hardness to Different Cold Rolled STS316L

최병철* · 강창룡** · 남기우*†

Byoung-Chul Choi*, Chang-Yong Kang** and Ki-Woo Nam***†

(Received 05 February 2019, Revision received 04 April 2019, Accepted 17 April 2019)

Abstract: This study evaluated the mechanical properties of cold rolled STS316L. Austenitic stainless steel was transformed into martensite by cold rolling, and the Vickers hardness was evaluated by stochastic properties by Weibull distribution analysis. With increasing cold rolling ratio, γ phase austenite decreased, but ϵ and α' phase martensite increased. The amount of martensite increased as the amount of cold rolling increased. With increasing cold rolling ratio, tensile and yield strength increased, but elongation decreased. Vickers hardness increased up to 184% as the cold rolling ratio increased. The Vickers hardness of the cold-rolled specimen is well matched by the Weibull distribution because it is expressed as a straight line in Weibull distribution probability. The fracture probability of 63.2% was 94.5-181.5% higher than that of the as-received specimen. As the cold rolling ratio increased, the shape parameters showed larger values and less variance.

Key Words : Different Cold rolling, Volume Fraction, Austenite, Martensite, Mechanical Properties

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 성형성, 내식성, 용접성 등 물성이 탁월하여 가장 많이 사용되는 대표적인 스테인리스강이다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강의 특징 중의 하나는 가공 시 상변태를 동반한다는 것이다.¹⁾ 304 오스테나이트

강을 사용하여, 변형의 종류와 변형률은 α' -마르텐사이트의 양에 강하게 영향을 미친다는 것을 증명하였으며,^{2,3)} 냉간 압연 중 스트립 주조물과 열간 압연 오스테나이트계 스테인리스 강 의 미세 구조 및 조직 변화를 연구하였다.^{4,5)} 또 오스테나이트계 스테인레스 강 의 변형 유기에 의한 $\gamma \rightarrow \alpha'$ -마르텐사이트 변태 및 기계적 물성에 관한 연구 변형률 속도의 영향, 오스테나이트계 스테인리스

*† 남기우(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-7019-358X>) : 교수, 부경대학교 재료공학과
 E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358
 *최병철(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-3553-3539>) : 대학원생, 부경대학교 재료공학과
 **강창룡(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-9420-0788>) : 교수, 부경대학교 금속공학과

*† Ki-Woo Nam Hong(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-7019-358X>) : Professor, Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.
 E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358
 *Byoung-Chul Choi(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-3553-3539>) : Graduate student, Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.
 **Chang-Yong Kang(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-9420-0788>) : Professor, Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University

강의 냉간 압연 및 어닐링 동안 조직 및 미세 조직을 연구하였다.⁵⁾ 특히 스테인리스강의 상변태는 감쇠능이 우수해진다는 연구가 있다.^{6,7)} 가공유기 마르텐사이트는 강도 및 연신율에 영향을 준다.⁸⁾

본 연구는 오스테나이트계 스테인리스강이 냉간압연에 의하여, 마르텐사이트로 상변태하는 성질을 이용하여, 냉간압연률에 따르는 기계적 성질을 평가하였다. 그리고 비커스경도는 와이블분포 해석으로 확률론적 특성을 평가하였다.⁹⁾

2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용 재료는 화학플랜트용 STS316L이다. 냉간압연률에 따르는 특성을 평가하기 위하여, 0, 17, 33, 50, 67 및 80% 압연하여 두께 1 mm로 하였다.

냉간압연에 의한 상분리를 측정하기 위하여, X선 회절시험을 실시하였다. 사용한 장치는 Ultima IV X-ray diffractometer이다. XRD 선도에서 α' 및 ϵ -마르텐사이트의 백분율을 구하였다.

인장시험은 만능 인장시험기(Oriental, OTV-10C)를 사용하여, 크로스헤드 속도 2 mm/min으로 실시하였다. 인장시험편은 KS 1호 시험편을 각 조건당 3개 사용하였다. 얻어진 응력-변형률 선도에서 공칭응력 및 공칭변형률을 구하였다.

조직은 냉간압연률이 유사한 결과를 인용하였으며, 파단면은 전자현미경(Hitachi, S-2700)을 사용하여 관찰하였다.

비커스 경도는 비커스 경도기 (Mitutoyo Corporation)를 사용하여 2 kg 하중으로 22번 측정하였다. 경도의 신뢰성을 평가하기 위하여 와이블분포 해석을 실시하였다.¹⁰⁾ 데이터는 최고, 최저값을 제외하고 20개 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 냉간압연률에 따르는 상분리를 얻기 위하여, XRD에서 측정된 회절선도이다. 대표적으로 (a) 모재시험편과 (b) 80% 냉간압연시험편을 나타내었다.

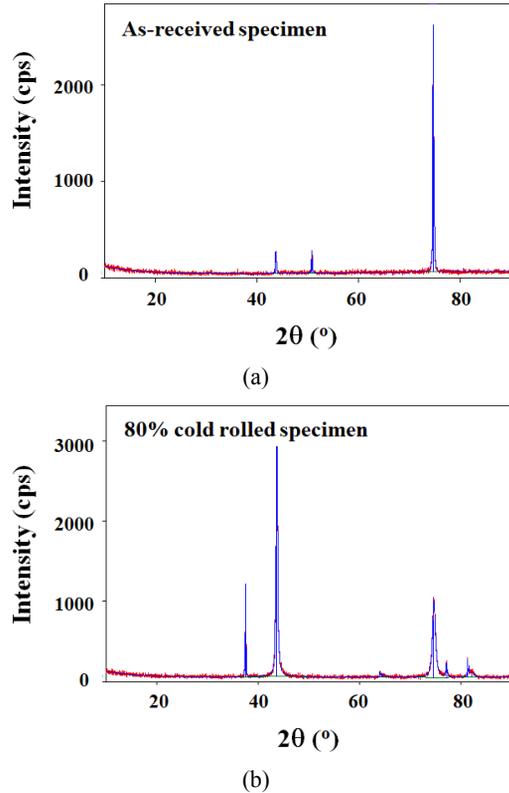


Fig. 1 Diffraction diagram measured by XRD. (a) As-received specimen, (b) 80% cold rolled specimen

Table 1 Volume fraction of phase from diffraction diagram of XRD

Rolling ratio (%)	V_{γ} (phase)	V_{ϵ} (phase)	$V_{\alpha'}$ (phase)
0	100	0	0
17	61	26	13
33	58	28	14
50	53	29	18
67	49	31	19
80	47	32	21

Table 1은 냉간압연률에 따르는 각 상분리를 나타낸다.

Fig. 2는 냉간압연률과 각 상분리의 관계를 나타낸다.

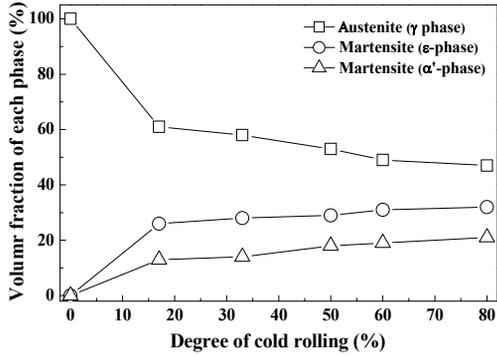


Fig. 2 Relationship between volume fraction of phase and degree of cold rolling

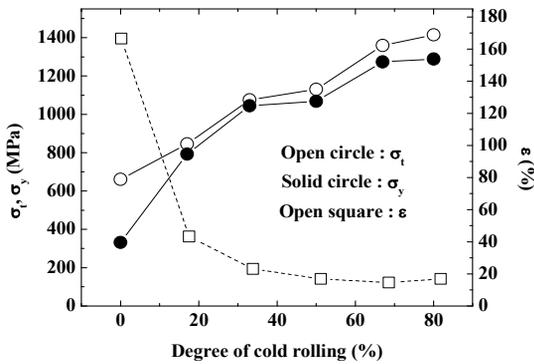
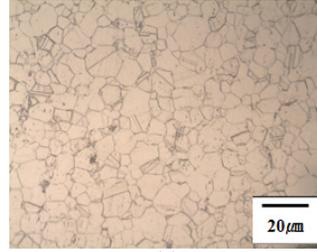


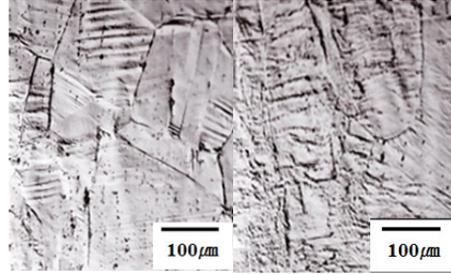
Fig. 3 Relationship between degree of cold rolling and mechanical properties

타낸다. 모재시험편은 오스테나이트 100%를 나타내었으나, 17% 냉간압연시험편은 오스테나이트가 61%로 감소하고, ε 및 α'-마르텐사이트로 각각 26% 및 13% 변태하였다. 이후, 오스테나이트는 완만하게 감소하고, ε 및 α'-마르텐사이트는 반대로 증가하였다. 80% 냉간압연시험편은 오스테나이트가 47%로 감소하고, ε 및 α'-마르텐사이트로 각각 32% 및 21% 변태하였다. 이와 같은 가공유기 마르텐사이트는 강도, 연신율 및 감쇠능에 영향을 미친다.

Fig. 3는 냉간압연률과 인장강도, 항복강도 및 연신율의 관계를 나타낸다. 인장강도는 냉간압연률이 증가함에 따라서 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 인장강도는 모재시험편(0%)보다 각각



(a)



(b)

(c)

Fig. 4 Optical micrograph of STS316L according to degree of cold rolling. (a) As-received specimen, (b) 20% cold rolled specimen, (c) 65% cold rolled specimen

28%, 63%, 71%, 106% 및 114% 증가하였다. 또한 항복강도는 인장강도와 다르게 이차원적으로 증가하였다. 항복강도는 모재시험편(0%)보다 각각 139%, 215%, 222%, 284% 및 288% 증가하였다. 반면 연신율은 17% 냉간압연시험편에서 급격하게 감소하고, 그 후는 냉간 압연률이 증가함에 따라서 약간씩 감소하였다. 연신율은 모재시험편(0%)보다 각각 74%, 86%, 90%, 91% 및 90% 감소하였다. 이것은 냉간가공에 의하여, 마르텐사이트로 변태함에 따라서 강성이 증가한 것이 원인이라 판단된다.

Fig. 4는 Kwon 등⁷⁾의 연구인 STS316L에서 얻어진 모재시험편 조직과 냉간압연시험편(20%, 65%) 조직을 본 연구에 사용한 냉간압연시험편과 비교하기 나타낸 것이다. 본 연구에 사용한 17% 및 67% 냉간압연시험편과 비슷한 조직이다. (a) 모재시험편(0%)은 쌍정들이 존재하고 있는 오스테나이트 단상 조직으로 되어 있는 것을 알 수 있다. (b)와 (c)는 냉간가공에 의하여 생성되는 마르텐사이트 조직을 조사하기 위하여 용체화처리 후

20% 및 65% 냉간압연시험편의 미세조직을 나타낸 것이다. 냉간압연에 의하여 오스테나이트의 일부가 마르텐사이트로 변태되어 오스테나이트와 마르텐사이트가 함께 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이때 생성되는 마르텐사이트 조직은 표면기복을 일으키면서 방향성을 지니고, 일부는 교차하면서 생성되고¹¹⁾ 있는 것을 알 수 있고, 가공량이 많아질수록 가공에 의하여 생성되는 마르텐사이트의 양이 많아지고 있는 알 수 있다.

Fig. 5는 냉간압연률에 따르는 파단면의 전자현미경 사진을 나타낸다. (a)는 모재시험편, (b)는 17% 냉간압연시험편, (c)는 33% 냉간압연시험편, (d)는 50% 냉간압연시험편, (e)는 67% 냉간압연시험편, (f)는 80% 냉간압연시험편을 나타낸다. 파단

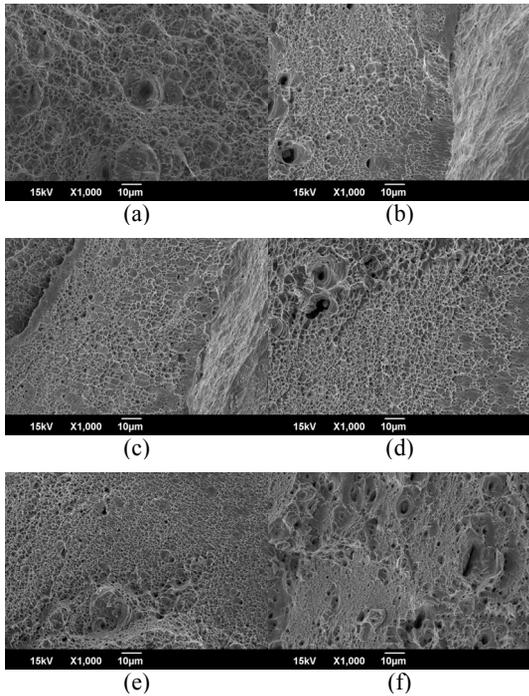


Fig. 5 SEM photograph of fracture surface according to degree of cold rolling. (a) As-received specimen, (b) 17% cold rolled specimen, (c) 33% cold rolled specimen, (d) 50% cold rolled specimen, (e) 67% cold rolled specimen, (f) 80% cold rolled specimen

면은 전체적으로 딩플을 나타내고 있으며, 냉간압연률이 증가할수록 딩플이 작아지는 경향을 나타내었다. 또한 80% 냉간압연시험편은 강성이 증가하여, 움푹패임과 찢김이 나타났다.

Fig. 6은 냉간압연률에 따르는 STS316강의 비커스경도를 나타낸다. 파단면을 전자현미경으로 관찰한 것이다. 그림 중에는 표준편차도 나타내었다. 비커스경도는 냉간압연률의 증가에 따라서 증가하는 것을 알 수 있다. 17% 냉간압연시험편은 급격하게 증가하였으며, 0% 모재시험편보다 94% 증가하였다. 그 후는 완만하게 선형적으로 증가하였지만, 각각 108%, 127%, 162%, 184%의 정도 증가가 나타났다. 이와 같이 변동하는 정도 해석의 편의성과 최약링크 가설을 고려하여, 다음과 같은 2-파라미터 와이블 분포를 적용하여 와이블 통계 해석을 실시하였다.^{10,12)}

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

여기서 α 는 확률변수의 변동성을 의미하는 형상 파라미터(shape parameter)로서, 커지면 통계적 분산이 작아지므로 신뢰성이 높아진다. β 는 63.2% 확률에서 특성수명을 나타내는 척도 파라미터(scale parameter)이다.

Fig. 7은 냉간압연시험편의 비커스 경도 데이터를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 냉간압연시험편의 비커스 경도는 확률지상에서 직선으로 표현되고 있으므로 와이블 확률분포에 잘 따르고 있다.

또한 비커스 경도에 대한 해석결과를 Table 2에 나타낸다. Table 2는 산술통계에 의한 평균(Mean), 편차(standard deviation: STD) 및 변동계수(coefficient of variation: COV)도 함께 나타내었다.

냉간압연시험편의 형상파라미터는 모재시험편에 비하여 10~97% 크게 나타나 경도의 분산이 작음을 알 수 있다. 척도파라미터는 94.5~181.5% 증가하여, 파괴확률 63.2%에서 급격하게 경도가 증가하였다. 즉, 17%, 33% 및 50% 냉간압연시험편의 형상파라미터는 모재시험편의 정도보다 각각 94.5%, 107.5% 및 126.9% 증가하였다. 더구나 냉

Table 2 The estimated Weibull parameters from different cold rolled STS316 specimen

Rolling ratio (%)	Shape parameter	scale parameter	StD/Mean/COV
0	27.03	16.8	7.159/157.8/0.0454
17	29.62	312.7	12.34/307.3/0.0401
33	33.13	333.6	12.06/328.3/0.0367
50	34.81	364.8	12.28/359.3/0.0342
67	42.98	418.9	11.73/413.8/0.0283
80	53.36	452.6	10.15/448.1/0.0226

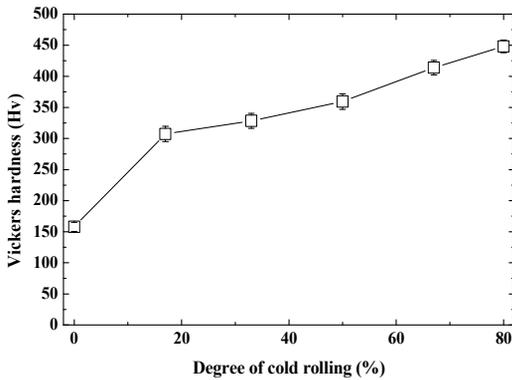


Fig. 6 Vickers hardness from cold rolled specimens

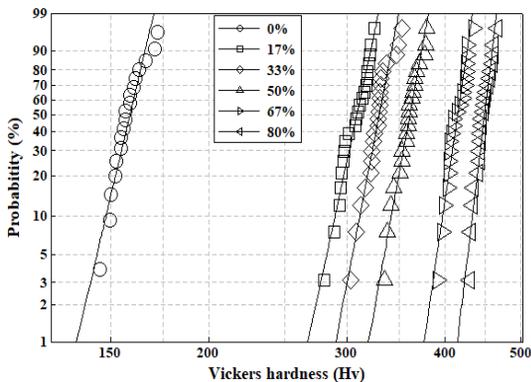


Fig. 7 Weibull plot of Vickers hardness from specimens with degree of different cold rolling

간압연률이 더욱 증가한 67% 및 80% 냉간압연시험편은 160.5% 및 181.5% 증가하여, 압연률이 증가할수록 척도파라미터는 증가하였다. 또한 형상파라미터도 압연률이 증가할수록 크게 나타나, 경도가 증가함과 동시에 분산은 적게 나타났다. 변동계수 또한 작은 것으로 나타났다. 이와 같이 STS316L은 냉간압연률의 증가에 의하여 특성수명이 증가하였으며, 경도의 분산이 작았다.

4. 결론

냉간압연에 의하여 압연률을 달리한 STS316L 강을 사용하여, 비커스경도를 평가하였다. 비커스경도는 와이블분포 해석으로 확률론적 특성을 평가하였다.

1) 냉간압연률이 증가함에 따라서 γ 상 오스테나이트가 감소하고, ϵ 과 α' 상 마르텐사이트가 증가하였다. 또한 마르텐사이트의 양은 냉간가공량이 많아질수록 많아졌다.

2) 냉간압연률이 증가함에 따라서 인장 및 항복강도는 증가하고, 연신률 및 단면 수축률은 감소하였다.

3) 비커스경도는 냉간압연률의 증가에 따라서 최대 184% 증가하였다. 냉간압연시험편의 비커스경도는 와이블분포 확률에서 직선으로 표현되고 있으므로 와이블 확률분포를 잘 따르고 있다. 63.2%의 파괴확률은 모재시험편보다 94.5~181.5% 증가하였다. 형상파라미터는 압연률이 증가할수록 크게 나타나, 분산이 적게 나타났다.

Author contributions

K. W. Nam; Conceptualization. C. Y. Kang; Data curation. B. C. Choi; Funding acquisition & Investigation, Data curation.

References

1. J. A. Venables, 1962, "The martensite transformation in stainless steel", The

- Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics, Vol. 7, pp. 35-44. (DOI:10.1080/14786436208201856)
2. L. Bracke, L. Kestens and J. Penning, 2007, "Transformation mechanism of α' -martensite in an austenitic Fe - Mn - C - N alloy", Scripta Materialia, Vol. 57, No. 5, pp. 385-388. (DOI:10.1016/j.scriptamat.2007.05.003)
 3. S. E. Haghighi, H. B. Lu, G. Y. Jian, G. H. Cao, D. Habibi and L. C. Zhang, 2015, "Effect of α' martensite on the microstructure and mechanical properties of beta-type Ti - Fe - Ta alloys", Materials & Design, Vol. 76, No. 5, pp. 47-54. (DOI:10.1016/j.matdes.2015.03.028)
 4. C. Donadille, R. Valle, P. Dervin and R. Penelle, 1989, "Development of texture and microstructure during cold-rolling and annealing of F.C.C. alloys: Example of an austenitic stainless steel", Acta Metallurgica, Vol. 37, No. 6, pp. 1547-1571. (DOI:https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90123-5)
 5. D. Raabe, 1997, "Texture and microstructure evolution during cold rolling of a strip cast and of a hot rolled austenitic stainless steel", Acta Materialia, Vol. 45, No. 3, pp. 1137-1151. (DOI:10.1016/S1359-6454(96)00222-4)
 6. C. Y. Kang and M. K. Kwon, 2014, "Effect of Thermomechanical Treatment on the Mechanical Properties of 316L Stainless Steel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 100-105.
 7. M. K. Kwon and C. Y. Kang, 2014, "Correlation between Tensile Properties and Damping Capacity of 316L Stainless Steel", Kor. J. Mater. Res., Vol. 24, No. 1, pp. 1-5.
 8. S. D. Antolovich and B. Singh, 1971, "On the toughness increment associated with the austenite to martensite phase transformation in TRIP steels", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 2, No. 8, pp. 2135-2141.
 9. K. W. Nam, S. D. Cho, S. J. Kim and S. H. Ahn, 2017, "A study on Weibull Probability Statistics Characteristics for Vickers Hardness of Degraded Stainless Steel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 79-85.
 10. W. Weibull, 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", ASME J. Applied Mech., Vol. 18, pp. 293-297.
 11. T. Y. Hur, J. P. Wang and C. Y. Kang, 2011, "Effect of Grain Size on the Deformation Induced Martensite Transformation and Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steel with High Amount of Mn", Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 24, No. 5, pp. 271-276.
 12. T. Sakai, 1992, "Statistical Properties of Material Strength", YouKenDo, Japan, pp. 33-158.