

압연 온도와 압연량이 다른 STS202의 탄성과 특성 Elastic Wave Properties of STS202 depending on Rolling Temperature and Rolling Degree

남기우* · 전현*** † · 이기식*** · 탁영준***

Ki-Woo Nam*, Hyun Jeon*** †, Ki-Sik Lee*** and Young-Joon Tak***

(Received 28 October 2020, Revision received 14 June 2021, Accepted 14 June 2021)

Abstract : In this study, high-cost Cr and Ni components of 202 austenitic stainless steel were reduced, low-cost Mn was added, and the amount of martensite and mechanical properties were evaluated according to rolling temperature and rolling degree. In addition, the acoustic wave generated by internal deformation during tension test was detected, and the dominant frequency according to the amount of martensite was investigated by wavelet analysis. Parts of the austenite were transformed into α' -martensite by rolling. More martensite was generated as the rolling degree was increased, and more martensite was generated as the rolling temperature decreased in the same rolling degree. The amount of martensite rapidly increased up to a rolling degree of 33%, and then gradually increased thereafter. In particular, the amount of martensite at rolling temperature of -196°C was similar after the rolling degree of 33%. Vickers hardness and tensile (yield) strength increased as the rolling temperature decreased and the rolling degree increased. The elongation decreased rapidly. The dominant frequency decreased after increasing as the rolling degree increased at each rolling temperature, and the highest value was shown at 33% of the rolling degree.

Key Words : Elastic wave, Rolling temperature, Rolling degree, Martensite

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스 강은 크롬 18%, 니켈 8% 이상 함유한 Fe-Cr-Ni계 합금이다. 오스테

나이트 조직인 합금은 상온에서 인성, 연성, 내식성이 우수하고, 비자성을 갖는다. 따라서 이 강은 많은 산업에 응용되고 있다.¹⁻³⁾ 그러나 오스테나이트계 스테인리스강은 상대적으로 고가인 Ni과 Cr 성분을 가지며, FCC의 결정구조이므로 항복강도

***† 전현(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4600-6822) : 교사, 포항제철공업고등학교
E-mail : hahahajh@daum.net, Tel : 054-279-4603
*남기우(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-7019-358X) : 교수, 부경대학교 재료공학과, 마린융합디자인공학과
***이기식(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-7810), 탁영준(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-8207) : POSCO

***† Hyun Jeon(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4600-6822) : Teacher, Pohang Jecheol Technical High School.
E-mail : hahahajh@daum.net, Tel : 054-279-4603
*Ki-Woo Nam(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-7019-358X) : Professor, Dept. Materials Science and Engineering and Dept. Marine Convergence Design Engineering, Pukyong National University.
**Ki-Sik Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-7810), Young-Joon Tak(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-8207) : POSCO.

가 낮아 구조용의 적용에 어려움이 되고 있다. 고가인 Ni과 Cr을 줄이고, 저가인 Mn을 첨가한 고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강을 개발하였으나, 기존 오스테나이트계 스테인리스강과 마찬가지로 항복강도가 낮아 항복강도 향상을 위한 많은 연구가 수행되었다.^{4,6)}

이러한 강들의 강도 향상법은 합금원소 첨가에 의한 고용강화가 있지만, 가격상승 및 용접성이 불량하므로 적절한 방법이 아니다. 결정립 미세화가 가장 합리적인 방법이라 판단된다.^{7,8)} 그러나 이러한 강은 대부분 냉각으로 마르텐사이트가 생성되는 Ms 온도가 극저온이므로 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는다. 그러므로 가열 및 냉각 공정에서 상변태가 없으므로 결정립 미세화에 따른 강인화도 어렵다. 그래서 오스테나이트는 압연가공으로 마르텐사이트로 변태시키고, 그 후 가열에 의하여 오스테나이트로 역변태시킴으로써 결정립 미세화시키고 있다.^{7,11)} 더불어 가공과 역변태하여 마르텐사이트와 오스테나이트의 2상 조직으로 강 인화하고 있다.^{12,13)}

오스테나이트는 변태 온도(Ms) 이하로 급냉하여 마르텐사이트를 얻을 수 있다. 그리고 Ms 온도와 압연가공으로 오스테나이트가 마르텐사이트로 바뀌는 변태 온도(Md) 사이의 가공에서도 얻을 수 있다. 이렇게 형성된 마르텐사이트는 가공유기 마르텐사이트라 부르고, 가공유기 마르텐사이트 변태라 한다.¹⁴⁻¹⁷⁾

그러나 상온에서 오스테나이트인 강은 대부분 Ms 온도가 극저온이므로, 가공으로 마르텐사이트 변태시키는 방법밖에 없다. 이들 강에서 압연 온도와 압연량에 따른 가공유기 마르텐사이트 변태 거동과 이러한 변태에 따른 기계적 성질 등을 연구하는 것이 이들 강의 사용범위 확대와 사용 중 안정성 확보 등의 측면에서 대단히 중요하다.

탄성파는 재료가 변형할 때, 내부 결함 에너지의 해방으로 발생한다. 에너지 해방에 의한 탄성파를 검출하여 해석하면 재료의 상태를 파악할 수 있다. 이것은 재료 내부의 변형이 발생하면 탄성파가 검출되므로 수동적인 비파괴평가법이다.¹⁸⁾ 탄성파를 발생원은 균열의 발생 및 진전, 쌍정 변

형, 슬립 변형, 결정립계의 재방위, 상변태 등의 국부적인 동적변화들이다.¹⁹⁻²³⁾ 이같이 탄성파는 적절한 분석으로 재료 내부의 결함 위치 및 구조적 성질 등을 파악할 수 있다. 오스테나이트는 압연가공으로 강도 및 강성을 증가시키는 마르텐사이트로 변태한다. 연성이 풍부한 오스테나이트와 강성이 풍부한 마르텐사이트는 재료의 변형에 따라서 파괴 거동이 다르게 나타난다. 따라서 파괴시에 나타나는 내부 거동은 다르다. 이와 같은 재료조직이 가지는 에너지에서 방출하는 탄성파인 탁월주파수의 연구가 필요하다.

본 연구는 202 오스테나이트계 스테인리스강의 생산 단가 저감을 위하여 고가인 Cr과 Ni 성분을 줄이고, 저가인 Mn을 첨가하였다. 202 오스테나이트 스테인리스강은 압연 온도와 압연량을 달리하여, 마르텐사이트 양을 다르게 생성하였다. 압연 온도 및 압연량이 다른 인장시험편에서 발생하는 탄성파를 검출하여, 시간-주파수 해석법으로 탁월주파수를 조사하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

재료는 크롬 18%와 니켈 8% 가지는 대표적인 304계 오스테나이트 스테인리스강에 비하여, 크롬 14%, 니켈 5%로 낮추고 비교적 저가인 망간 6% 정도 첨가한 고 Mn 오스테나이트 스테인리스강이다. 사용한 재료의 화학 조성은 Table 1에 나타낸다.

2.2 열처리 및 압연

재료는 1,200℃로 가열한 다음, 열간압연으로 두께 2 mm와 4.5 mm의 판재로 만들었다. 이 강은 산세 등의 과정을 거친 다음, 1,050℃ 진공로에서 30분 유지 후, 급랭하고 용체화 처리하여 오스테나이트 단상으로 만들었다. 그리고 재료는 -190℃, -50℃, 20℃, 50℃ 및 100℃의 온도에서 압연을 0~50%로 두께 2 mm 판재를 얻었다.

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt.%)

C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Mo	Co
0.06	0.01	0.08	0.6	6.2	5.8	14.2	1.91	0.1	0.16

2.3 미시 조직 관찰 및 마르텐사이트 측정

용체화 처리한 시험편, 용체화 후 압연 온도 및 압연량이 다른 시험편의 미시 조직 관찰은 금속 현미경으로 하였다. 압연 온도와 압연량의 변화에 따른 가공유기 마르텐사이트의 체적분율은 $Cu-K\alpha$ 특성 X-선을 이용하는 X-선 회절로 측정하였다. X-선 회절은 분당 2° 로 속도로 하였다. 마르텐사이트 체적분율은 회절 선도로부터 $(111)\gamma$, $(200)\alpha'$ 에 해당하는 피크의 상대 적분 강도 값으로 얻었다.

2.4 탄성과 검출

Fig. 1은 인장시험에서 발생하는 탄성과 검출 모식도이다. 탄성과 검출은 인장에서 발생하는 신호를 시험편의 중앙에서 일정 거리 떨어진 곳에 장착한 2개의 센서로 검출하였다.

탄성과 검출 장비는 NI PXIe-4480로 최대 6채널까지 지원되고, 샘플링 속도(Sampling rate)의 범위는 100 kHz~1.25 MHz이다. 광대역 센서는 100 kHz~1 MHz까지 탄성파를 검출할 수 있다. 검출된 탄성파는 28 dB 전치증폭기를 거쳐 증폭하였다. 탄성과 검출 센서는 시험편에 접촉이 잘 되도록 매질을 끌고루 도포하고, 고무줄로 묶었다. 노이즈 신호의 제거는 트리거 레벨(Trigger level) 0.04 V, 샘플링 속도 1 MHz, 샘플 수(Number of samples)는 2 M으로 하였다. 탄성파의 한 개의 데이터 수는 4,096개이고, 트리거 수는 512개이다. 검출된 신호는 제작한 랩뷰를 이용하여, 웨이블릿 분석하였다.

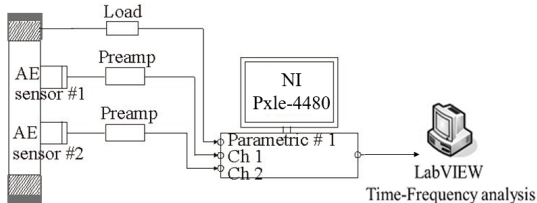


Fig. 1 Block diagram of experiment setup for elastic wave measurement

3. 결과 및 고찰

3.1 미시 조직

Fig. 2는 202 오스테나이트 스테인리스강의 미시 조직을 금속현미경으로 관찰한 것이다. 조직은 부분적으로 쌍정을 갖는 오스테나이트이고, 조직 관찰을 위한 연마 과정에서 생성된 마르텐사이트가 미량 관찰되었다. 이 조직은 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강을 나타낸다.

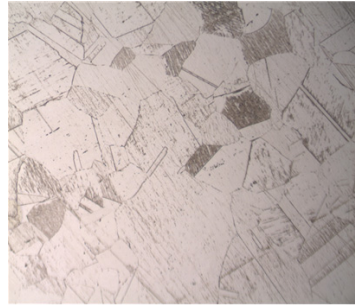


Fig. 2 Microstructure of 202 austenitic stainless steel ($\times 200$)

3.2 조직의 체적분률

Fig. 3은 202 오스테나이트계 스테인리스강의 압연 온도와 압연량이 미시조직변화에 미치는 영향을 조사한 것이다. 시험편은 다양한 온도에서 압연량을 달리하여 압연가공한 다음, 미시조직의

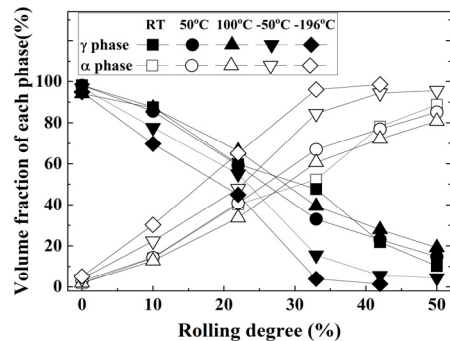


Fig. 3 Effect of rolling temperature and rolling degree on the volume fraction of each phase in 202 austenitic stainless steel

체적분을 변화를 조사하였다. 압연가공으로 오스테나이트 조직이 마르텐사이트로 변태되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 마르텐사이트는 압연량이 증가할수록 압연 온도가 낮을수록 동일 압연량에서 많이 만들어졌으며, 압연량 증가에 따라 더 많이 만들어졌다. 이와 같이 마르텐사이트는 압연

온도가 낮을수록 생성되는 양이 많다. 압연량 증가에 따라 많이 생성되는 이유는 압연 온도가 낮을수록 오스테나이트의 안정도가 낮아져서 마르텐사이트로 많은 양이 변태하기 때문이다.

Fig. 4와 같은 그림에서 탁월한 주파수 성분을 구하여 Fig. 5에 나타낸다. 가장 높은 주파수는 탄성파 신호 Fig. 4(a)를 웨이블릿 해석한 결과, Fig. 4(c)의 웨이블릿에 의한 시간-주파수에 나타난 주파수 대역이 얻어졌고, 주파수 분석 Fig. 4(b)의 성분과 일치하였다. Fig. 4(b)의 주파수 대역은 Fig. 4(c)의 웨이블릿에 의한 시간-주파수에서 탁월한 주

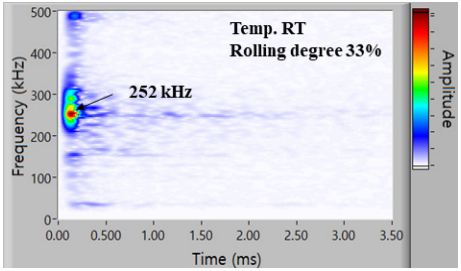
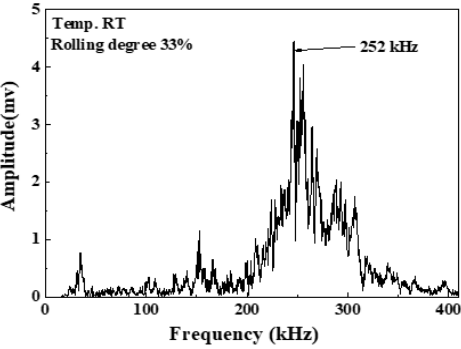
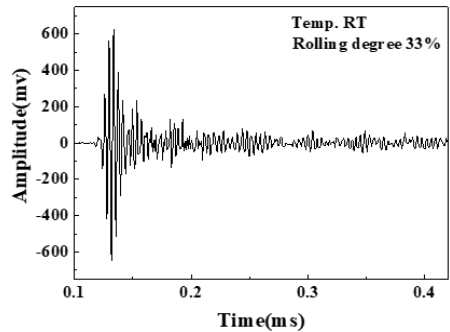
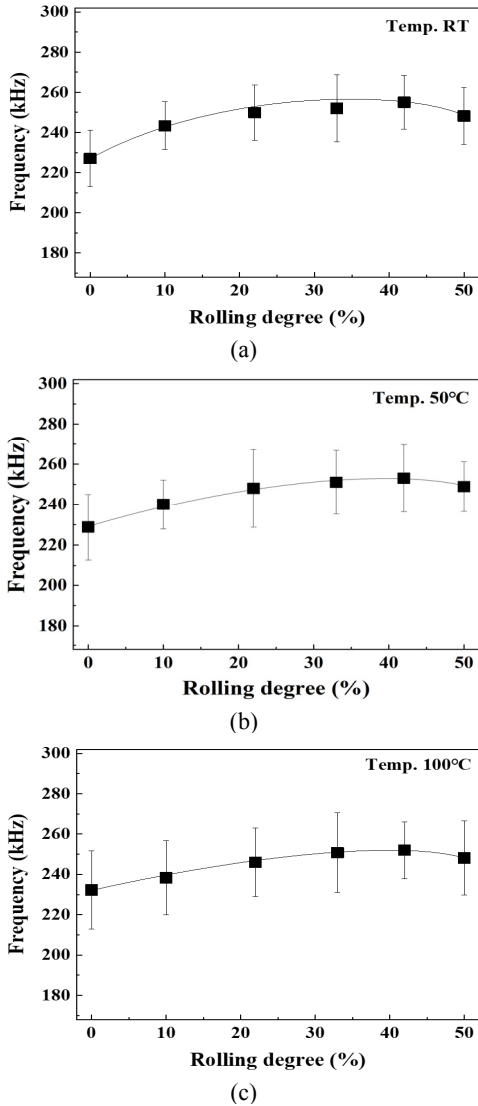
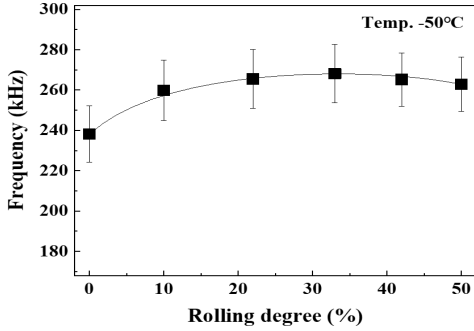
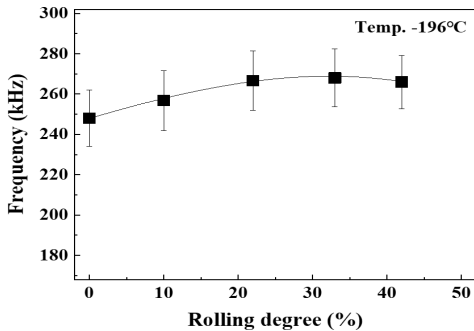


Fig. 4 Frequency characteristic obtained from elastic wave of rolling degree 33% at RT. (a) Waveform of elastic wave, (b) Frequency and (c) Time-frequency by WT



(d)



(e)

Fig. 5 Frequency characteristic of elastic wave according of rolling degree. (a) RT, (b) 50°C, (c) 100°C, (d) -50°C, (e) -196°C

파수(→표)로 나타났다. 이러한 주파수 성분은 돌발형 탄성과 신호의 성분이다.

Fig. 5는 다양한 온도(RT, 50°C, 100°C, -50°C, -196°C)에서 압연량(0, 10, 22, 33, 42 및 50%)이 다른 시험편의 인장시험에서 얻어진 탁월주파수를 나타내었다. 각 그림에서 종방향의 기호(↓)는 표준편차를 나타낸다. 탁월주파수는 각 압연 온도에서 압연량이 증가함에 따라서 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 탁월주파수는 압연량 33%에서 가장 높게 나타났다. 이것은 Fig. 3과 같이 마르텐사이트의 양은 압연량 33%까지는 급격하게 증가한 후, 완만하게 증가하였다. 특히 압연 온도 -196°C의 마르텐사이트의 양은 압연량 33% 이후는 비슷하게 나타났다. 많은 압연량은 마르텐사이트의 양이 증가하여, 항복강도가 증가하여 인장강도와 비슷해졌다. 많은 압연량은 시험편의 연성이 저하하고, 인장 시에 시험편 내부에

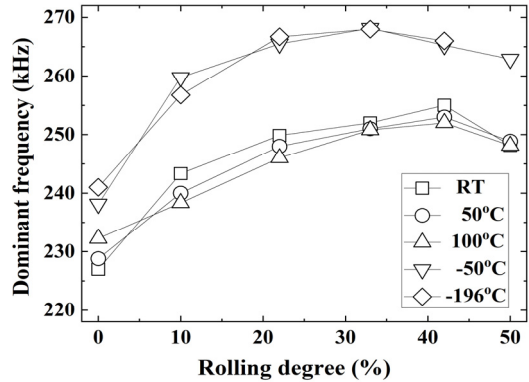


Fig. 6 Relationship between rolling degree and dominant frequency according of rolling temperature

많은 미시 결함이 형성되어 탄성파의 전달을 방해하여 탁월주파수가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 5의 탁월주파수를 압연량에 따라서 나타내었다. 탁월주파수는 압연 온도에 따라서 다르게 나타났다. 탁월주파수는 실온을 기준으로 (+)압연 온도에서 약간 감소하였으나, (-)압연 온도에서 높은 대역의 주파수를 나타내었다. 이것은 압연 온도에 따라서 생성되는 마르텐사이트의 양이 다르기 때문이라 판단된다. 따라서 탁월주파수는 동일한 압연량에서 압연 온도가 낮을수록 높은 주파수 대역을 나타내었다.

위에서 압연량 33%는 압연 온도에 관계없이 탁월주파수 대역이 가장 높게 나타났다. Fig. 7은 대표적으로 압연 온도 -50°C에서 압연량 33%의 인장시험편에서 얻어진 탄성파의 파형, 주파수 및 웨이블릿에 의한 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 7에서 (a)는 탄성파 신호의 파형, (b)는 주파수, (c)는 웨이블릿에 의한 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 7과 같은 그림에서 압연온도에 따른 탁월주파수 성분을 구하였다. 가장 높은 주파수는 탄성파 신호 Fig. 7(a)를 웨이블릿 해석한 결과, Fig. 7(c)의 웨이블릿에 의한 시간-주파수에 나타난 주파수 대역이 얻어졌고, 주파수 분석 Fig. 7의 성분과 일치하였다. Fig. 7(b)의 주파수 대역은 Fig. 7(c)의 웨이블릿에 의한 시간-주파수에서 탁월 주

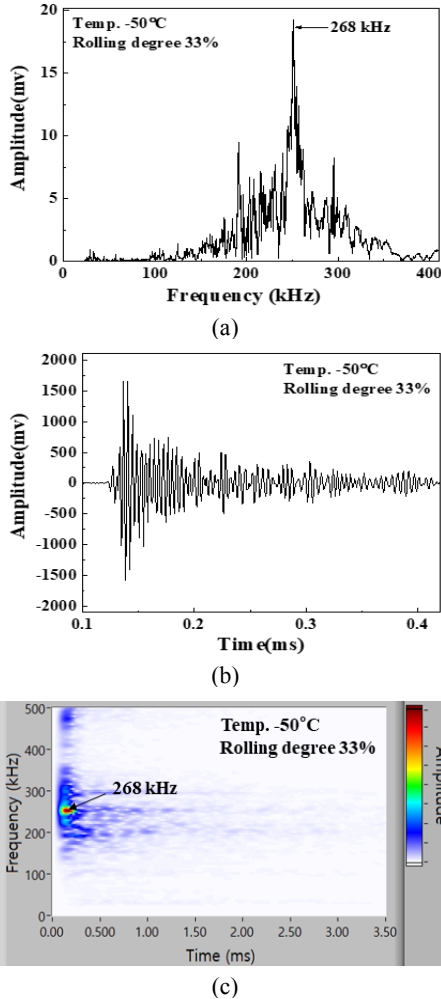


Fig. 7 Frequency characteristic obtained from elastic wave of rolling degree 33% at rolling temperature -50°C. (a) Waveform of elastic wave, (b) Frequency and (c) Time-frequency by WT

파수(→표)로 나타났다. 웨이블릿 해석 결과를 압연 온도에 따라서 탁월주파수 특성 성분을 조사한 것이 Fig. 8이다.

Fig. 8은 다양한 온도(RT, 50°C, 100°C, -50°C, -196°C)에서 압연량 33%의 인장시험편에서 얻어진 탁월주파수를 나타낸다. 탁월주파수는 압연 온도 -50°C 및 -196°C에서 268 kHz로 비슷하게 나타났으며, 압연 온도 RT, 50°C 및 100°C에서

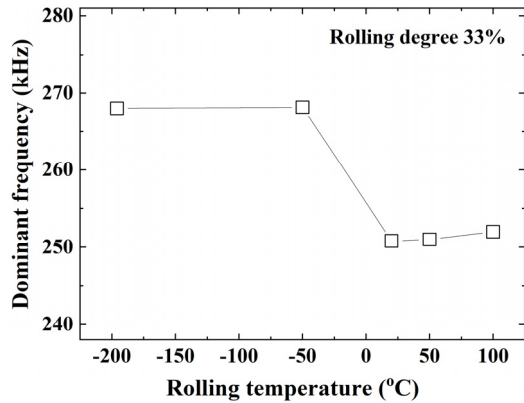


Fig. 8 Dominant frequency according of rolling temperature at rolling degree 33%

250~252 kHz로 비슷하였다. 이와 같이 탁월주파수는 동일한 압연량에서 압연 온도에 따라서 다르게 나타났다. 이것은 마르텐사이트의 량에 의존하는 것이라 판단된다.

4. 결론

본 연구는 202 오스테나이트계 스테인리스강의 고가인 Cr과 Ni 성분을 줄이고, 저가의 Mn을 첨가하고, 압연 온도와 압연량을 달리하여 마르텐사이트 생성을 다르게 하였다. 인장 시에 내부 변형으로 발생하는 탄성파를 검출하여, 웨이블릿 해석으로 마르텐사이트 생성량에 따르는 탁월주파수를 조사하였다.

1) 오스테나이트 조직의 일부는 냉간 가공으로 α'-마르텐사이트 조직으로 변태하였다. 마르텐사이트는 압연량이 많을수록 많이 생성되었으며, 동일 압연량에서 압연 온도가 낮을수록 많이 생성되었다.

2) 마르텐사이트의 양은 압연량 33%까지는 급격하게 증가한 후, 완만하게 증가하였다. 특히 압연 온도 -196°C의 마르텐사이트의 양은 압연량 33% 이후는 비슷하게 나타났다.

3) 탁월주파수는 각 압연 온도에서 압연량이 증가함에 따라서 증가하다가 감소하는 것으로 나타났으며, 압연량 33%에서 가장 높은 값을 나타내

었다.

4) 탁월주파수는 실온을 기준으로 (+) 압연 온도에서 약간 감소하였으나, (-) 압연 온도에서 높은 대역의 주파수를 나타내었다.

5) 압연량 33% 시험편의 탁월주파수는 압연 온도 -50℃ 및 -196℃에서 268 kHz로 비슷하게 나타났으며, 압연 온도 RT, 50℃ 및 100℃에서도 250~252 kHz로 비슷하였다. 이같이 탁월주파수는 동일한 압연량에서 압연 온도(+/-) 따라서 다르게 나타났다.

Author contributions

K. W. Nam; Writing-review & editing. H. Jeon; Investigation & Methodology. K. S. Lee; Conceptualization. Y. J. Tak; Resources.

References

1. H. M. Cobb, 2010, "The History of Stainless Steel", Materials Park, OH: ASM International, ISBN 9781615030118.
2. D. Peckner and I. M. Bernstein, 1977, "Handbook of Stainless Steels", McGraw Hill, ISBN 9780070491472.
3. P. Lacombe, B. Baroux and G. Beranger, 1990, "Les Aciers Inoxydables", Les Editions de Physique, ISBN 2-86883-142-7.
4. S. Rajasekhara, P. J. Ferreira, L. P. Karjalainen and A. Kyröläinen, 2007, "Hall-Petch Behavior in Ultra-Fine-Grained AISI 301LN Stainless Steel", Metall. Mater. Trans., Vol. 38, pp. 1202-1210.
(<https://doi.org/10.1007/s11661-007-9143-4>)
5. F. Forouzan, A. Najafzadeh, A. Kermanpur, A. Hedayati and R. Surkialibad, 2010, "Production of nano/submicron grained AISI 304L stainless steel through the martensite reversion process", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, pp. 7334-7339.
(<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.002>)
6. A. S. Hamada, A. P. Kisko, P. Sahu and L. P. Karjalainen, 2015, "Enhancement of mechanical properties of a TRIP-aided austenitic stainless steel by controlled reversion annealing", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 628, pp. 154-159.
(<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.042>)
7. N. Nakada, N. Hirakawa, T. Tsuchiyama and S. Takaki, 2007, "Grain refinement of nickel-free high nitrogen austenitic stainless steel by reversion of eutectoid structure", Scripta Materialia, Vol. 57, pp. 153-156.
(<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.03.022>)
8. M. Naghizadeh and H. Mirzadeh, 2016, "Microstructural Evolutions During Annealing of Plastically Deformed AISI 304 Austenitic Stainless Steel: Martensite Reversion, Grain Refinement, Recrystallization, and Grain Growth", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 47, pp. 4210-4216.
(<https://doi.org/10.1007/s11661-016-3589-1>)
9. M. Shirdel, H. Mirzadeh and M. H. Parsa, 2015, "Nano/ultrafine grained austenitic stainless steel through the formation and reversion of deformation-induced martensite: Mechanisms, microstructures, mechanical properties, and TRIP effect", Materials Characterization, Vol. 103, pp. 150-161.
(<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.03.031>)
10. M. Naghizadeh and H. Mirzadeh, 2018, "Microstructural Evolutions During Reversion Annealing of Cold-Rolled AISI 316 Austenitic Stainless Steel", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 49, pp. 2248-2256.
(<https://doi.org/10.1007/s11661-018-4583-6>)
11. M. Moallemi, A. Najafzadeh, A. Kermanpur and A. Rezaee, 2011, "Effect of reversion annealing on the formation of nano/ultrafine grained structure in 201 austenitic stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 530, pp. 378-381.

- (<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.099>)
12. P. Hedström, T. S. Han, U. Lienert, J. Almer and M. Odén, 2010, "Load partitioning between single bulk grains in a two-phase duplex stainless steel during tensile loading", *Acta Materialia*, Vol. 58, pp. 734-744. (<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.09.053>)
 13. Y. H. Kim, J. H. Kim, T. H. Hwang, J. Y. Lee and C. Y. Kang, 2015, "Effect of austenite on mechanical properties in high manganese austenitic stainless steel with two phase of martensite and austenite", *Metals and Materials International*, Vol. 21, pp. 485-489. (<https://doi.org/10.1007/s12540-015-4480-0>)
 14. X. F. Fang and W. Dahl, 1991, "Strain hardening and transformation mechanism of deformation-induced martensite transformation in metastable austenitic", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 141, pp. 189-198. ([https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90769-J](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90769-J))
 15. G. Tan and Y. Liu, 2004, "Comparative study of deformation-induced martensite stabilisation via martensite reorientation and stress-induced martensitic transformation in NiTi", *Intermetallics*, Vol. 12, pp. 373-381. (<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2003.11.008>)
 16. A. Das, S. Sivaprasad, M. Ghosh, P. C. Chakraborti and S. Tarafder, 2008, "Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 486, pp. 283-286. (<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.005>)
 17. M. Shirdel, H. Mirzadeh and M. H. Parsa, 2015, "Nano/ultrafine grained austenitic stainless steel through the formation and reversion of deformation-induced martensite: Mechanisms, mechanical properties, and TRIP effect", *Materials Characterization*, Vol. 103, pp. 150-161. (<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.03.031>)
 18. T. Jayakumar, 2001, "Encyclopedia of Materials : Science and Technology, NDT Techniques: Acoustic Emission", *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, pp. 6001-6003.
 19. K. Ono, 1978, "Acoustic emission arising from plastic deformation and fracture", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64 (1978), S174. (<https://doi.org/10.1121/1.2004028>)
 20. T. M. Roberts and M. Talebzadeh, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Propagation", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, pp. 695-712. ([https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00064-0))
 21. W. A. Megid, M. A. Chainey, P. Lebrun and D. R. Hay, 2019, "Monitoring fatigue cracks on eyebars of steel bridges using acoustic emission: A case study", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 211, pp. 198-208. (<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.02.022>)
 22. K. W. Nam, B. S. Kim, J. W. Kim, D. J. Son and B. C. Choi, 2020, "Damping Capacity and Natural Frequency of STS316L Steel according to Degree of Cold Rolling and Different Thickness", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, pp. 11-17. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.1.011>)
 23. K. W. Nam, K. S. Lee and K. Y. Kim, 2020, "Elastic Wave Characteristics of STS316L with Degree of Different Cold Rolling", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, pp. 11-16. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.4.011>)