

고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적성질에 미치는 가공유기 마르텐사이트 변태의 영향

Effect of Deformation Induced Martensite Transformation on the Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steel with High Mn

허태영* · 한현성** · 이상희*** · 강창룡****†

T. Y. Hur*, H. S. Han**, S. H. Lee***, C. Y. Kang****†

(접수일 : 2011년 09월 16일, 수정일 : 2012년 03월 07일, 채택확정 : 2012년 03월 13일)

Key Words : Deformation Induced Martensite(가공유기 마르텐사이트), Austenitic Stainless Steel(오스테나이트계 스테인리스강), Volume Fraction of Martensite(마르텐사이트 체적분율), Stable of Austenite(오스테나이트 안정도)

Abstract : The effect of deformation induced martensite transformation on the mechanical properties in austenitic stainless steel with high Mn was studied. α' -martensite was formed by deformation in austenitic stainless steel with high Mn. Deformation induced α' -martensite was formed with surface relief by cold rolling. With the increase of deformation degree, volume fraction of deformation induced martensite was increased rapidly in early stage of deformation and then, increased slowly. With the increase of deformation degree, hardness and tensile strength were rapidly increased with linear relations, while elongation was rapidly decreased and then slowly decreased. Hardness, tensile strengths and elongation were influenced strongly by deformation induced martensite.

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 내식성, 가공성 등이 우수하여 여러 산업분야에서 많이 사용되고 있지만 항복강도가 낮은 단점이 있다. 때문에 마르텐사이트 조직을 이용하여 항복강도를 높이게 된다면 그 수요는 더욱더 크게 증가할 것이다. 이러한 강에서 강도 등과 같은 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 마르텐사이트 조직은 냉각에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하기 시작하는 온도인 Ms 이하로 급냉하는 방법으로 얻을 수 있지만, Ms 온도와 가공에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하는 온도인 Md 사이에서는 가공에 의해서도 얻을 수 있고, 이러한 마르텐사이트 변태를

가공유기 마르텐사이트 변태(deformation induced martensite transformation)라 한다^{1~2)}.

오스테나이트 조직을 갖는 강에서 가공유기 마르텐사이트 변태 거동은 그 재료가 갖는 오스테나이트의 안정도에 지배되고, 오스테나이트의 안정도는 화학 조성, 변형 온도에 주로 지배되지만 전 가공도, 결정립 크기 등에도 영향을 받는다고 알려져 있다^{3,4)}.

가공유기 마르텐사이트 변태에 관한 연구는 Cr과 Ni이 많이 첨가되어 있는 오스테나이트계 스테인리스강에 대해서는 많은 연구가 수행되어 왔다^{5,6)}. 그러나 이러한 오스테나이트계 스테인리스강의 가격을 낮추기 위해 Cr과 Ni의 양을 낮추는 대신에 가격이 낮은 Mn을 많이 첨가하면 Cr, Ni 및 Mn의 양이 달라지는데 기인되어 오스테나이트 조직의 안정도가 달라

****강창룡(교신저자) : 부경대학교 금속공학과
E-mail : metkcy@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6346

*허태영 : 현대중공업 산업기술연구소

**한현성 : 한국폴리텍 VII대학 동부산캠퍼스

***이상희 : 한국폴리텍 VII대학 부산캠퍼스

****C. Y. Kang(corresponding author) : Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University.
E-mail : metkcy@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6346

*T. Y. Hur : Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. LTD.

**H. S. Han : Busan Campus, Korea Polytechnics VII

***S. H. Lee : Dongbusan Campus, Korea Polytechnics VII

Table 1 Chemical composition of specimen(wt.%)

| C | S | P | Si | Mn | Ni | Cr | Cu | Mo | Co |
|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|
| 0.06 | 0.01 | 0.08 | 0.6 | 6.2 | 5.4 | 14.2 | 1.91 | 0.1 | 0.16 |

지게 되고 그 결과 가공유기 마르텐사이트 변태의 거동도 달라질 것으로 예상된다. 그러나 이러한 Mn이 많이 첨가된 오스테나이트계 스테인리스강에서 가공유기 마르텐사이트 변태 거동을 연구하고 이를 기계적성질과 상호 관련시켜 연구한 논문은 없다.

따라서 본 연구는 기존 오스테나이트계 스테인리스강 보다 Cr과 Ni의 양이 적고, Mn의 양이 많은 오스테나이트계 스테인리스강에서 가공에 따른 마르텐사이트 변태거동과 이러한 가공유기 마르텐사이트 변태 거동이 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시료

실험에 사용된 시료는 18%Cr과 8%의 Ni을 갖는 오스테나이트계 스테인리스강에서 Cr의 양을 약 14%, Ni의 양을 약 5%로 낮추는 대신에 비교적 가격이 낮은 Mn이 약 6% 첨가된 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 스테인리스강으로서 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

다음, 시료는 1200 °C의 온도로 가열하여 소정시간 유지 한 다음 2~6.6 mm 사이의 여러 두께가 되도록 열간압연 하였다. 그 후 진공 열처리로를 사용하여 1050 °C에서 30분 유지 후 질소가스를 사용하여 급랭하는 고용화열처리 한 다음, 약 10%, 20%, 30%, 40%

50%, 60% 70%의 압연율로 냉간압연 하여 최종 2mm 두께의 판재로 만들어서 시료로 사용하였다.

2.2 미세조직관찰

용체화처리 한 시료와 용체화처리 한 다음 가공 양을 달리하여 냉간압연 한 시료의 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트 조직의 보다 상세한 관찰을 위해 주사 전자현미경과 투과 전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 이때 투과 전자현미경 관찰은 최종 냉간압연 한 시료를 박막으로 만든 후 jet연마 한 다음 투과 전자현미경(Hitach, 200kV)으로 관찰 하였다.

2.3 X선 회절 시험

가공 양을 달리한 냉간압연에 따른 미세조직의 정량적 변화는 Cu-K α 의 특성 X-선을 이용한 X-선 회절시험에 의해 측정 하였다. 이때 X-선 회절시험은 각 시료에 대해 20~100° 사이의 각도를 1°/min의 속도로 회절시험 하였고, 이때 얻은 회절선도로 부터 (111) γ 및 (200) α' 에 해당되는 회절피크의 상대 적분 강도 값을 이용하여⁷⁾ 오스테나이트와 α' -마르텐사이트 상의 체적분율을 측정하였다.

2.4 기계적 성질 측정

용체화처리 한 시료와 용체화처리 한 시료에서 가

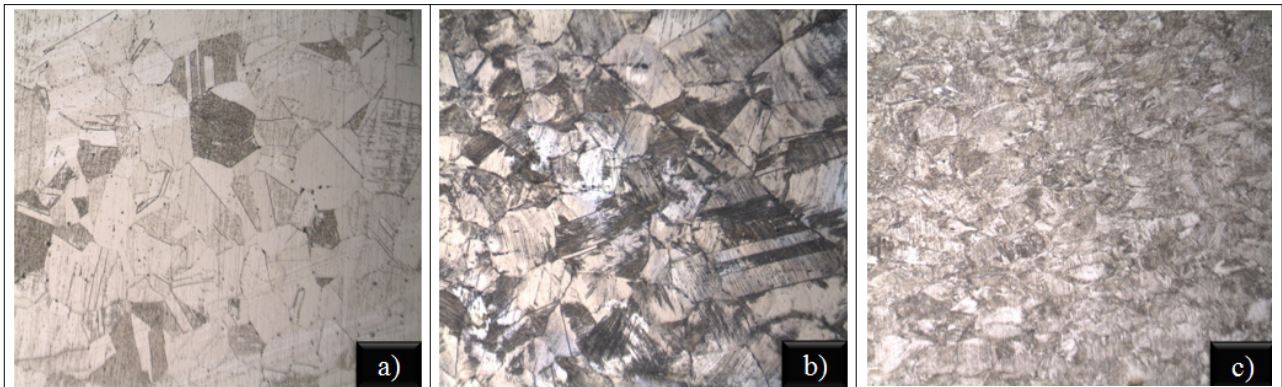


Photo. 1 Optical micrographs showing the effect of cold rolling in austenitic stainless steel with high Mn ($\times 200$)

a) cold rolling 0%

b) cold rolling 23%

c) cold rolling 48%

공 양을 달리하는 냉간압연 한 시료의 인장성질을 조사하기 위한 인장시험은 가공 양을 달리하여 냉간압연 한 시료로부터 방전가공에 의해 ASTM E-8의 규격으로 제작한 다음, 변형속도를 2mm/min.로 하여 시험하였다. 한편, 경도값을 측정하기 위한 경도시험은 미소 경도시험기를 사용하여 1 kg의 하중으로 시험하였고, 경도값은 5회 측정 한 다음 평균하였다.

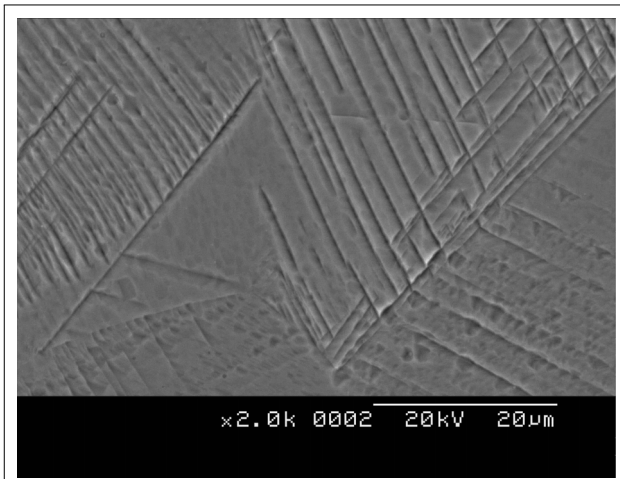


Photo. 2 SEM micrographs showing the deformation induced martensite in 23% cold rolled austenitic stainless steel with high Mn

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Photo. 1은 Cr과 Ni를 낮추는 대신에 Mn을 많이

첨가한 오스테나이트계 스테인리스강의 용체화처리 한 시료 및 용체화처리 후 가공 양을 달리하여 압연 한 시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 용체화처리 한 시료의 사진 a)에서는 오스테나이트 조직 내 쌍정이 존재하고 있는 전형적인 오스테나이트계 스테인리스강이 갖는 조직에 조직관찰을 위한 연마에 의해 생성된 것으로 추정되는 마르텐사이트가 소량 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 23% 압연한 사진 b)와 48% 압연한 사진 c)에서는 가공에 의해 오스테나이트 조직의 일부가 마르텐사이트 조직으로 가공유기변태 되는데 기인되어 오스테나이트 조직에 가공유기변태 된 마르텐사이트 조직이 함께 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 가공 양이 많아질수록 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트의 양이 많아지고 있는 것을 알 수 있다.

Photo. 2는 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트 조직을 상세히 알아보기 위하여 용체화처리 한 다음 23% 냉간압연 한 시료의 미세조직을 주사 전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 마르텐사이트 조직이 표면기복을 일으키면서 생성되어 있는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 마르텐사이트가 특정한 방향성을 지니면서 생성되거나, 서로 교차하여 생성되어 있는 것도 알 수 있다.

Photo. 3은 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트 조직을 결정학적 분석에 의해 알아보기 위하여 용체화처리 한 다음 상온에서 23% 냉간가공 한 시료의 미세조직을 투과 전자현미경에 의해 나타낸 것이다. 여기서 a)는 가공에 의해 생성된 마르텐사이트를 명시

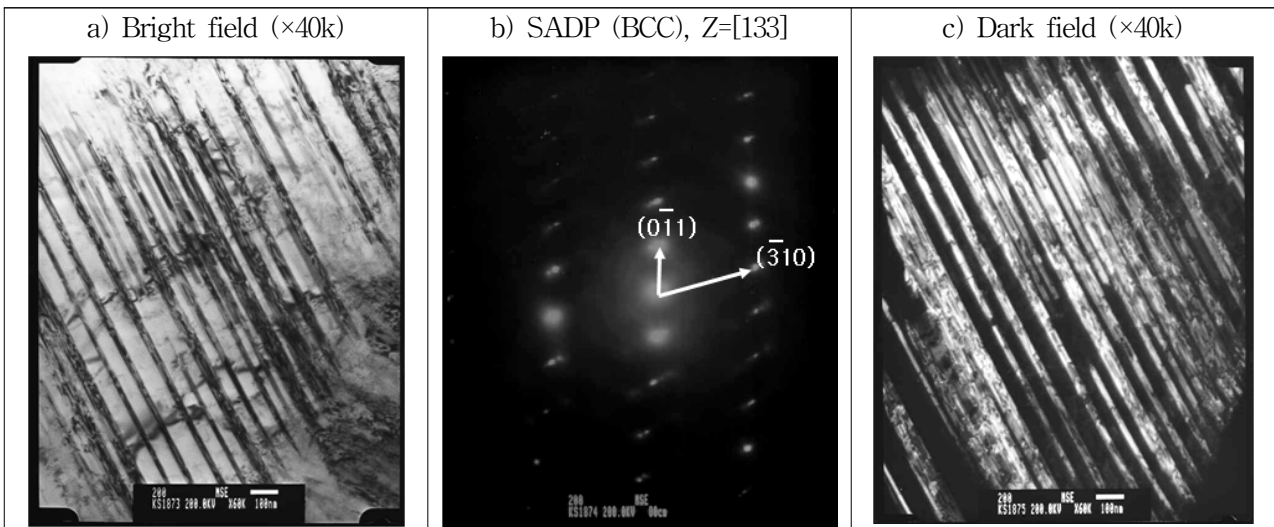


Photo. 3 TEM micrographs showing the deformation induced martensite in 23% cold rolled high Mn austenitic stainless steel

야상으로 나타난 것이고, b)는 명시야상으로 나타난 상의 제한시야 회절패턴(SADP)과 이를 분석하여 나타난 것이며, c)는 명시야상으로 나타난 마르텐사이트 상을 암시야상으로 나타난 것이다. 사진 b)의 제한시야 원자 회절패턴을 분석하여 나타난 결과로부터 가공에 의해 α' -마르텐사이트 조직이 방향성을 띄면서 생성되어 있는 것을 알 수 있다.

3.2 가공유기 마르텐사이트변태와 기계적성질에 미치는 가공의 영향

Fig. 1은 Cr 과 Ni을 낮추는 대신에 Mn이 많이 첨가된 오스테나이트계 스테인리스강의 가공유기 마르텐사이트 변태거동을 알아보기 위하여 시료를 상온에서 가공 양을 달리하여 냉간압연 하였을 때 생성된 마르텐사이트의 양을 조사하여 나타난 것이다.

가공 양이 증가함에 따라 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 빠르게 증가하다 가공도가 크게 높아지면 서서히 증가하는 거동을 나타내고 있다. 이와 같은 이유는 변형과 더불어 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 빠르게 변태되지만, 가공 양이 많아지게 되면 오스테나이트 조직의 대부분이 마르텐사이트 조직으로 변태되어 더 이상 가공 양이 증가하여도 가공유기 생성되는 마르텐사이트가 많아지지 않기 때문이다. 한편, 약 냉간압연을 70% 하면 대부분의 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되고 있는 것을 알 수 있다.

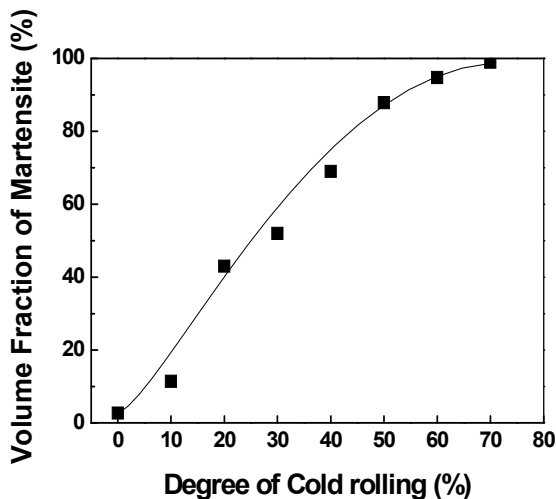


Fig. 1. Effect of degree of cold rolling on the volume fraction of deformation induced martensite in austenitic stainless steel with high Mn

Fig. 2는 Cr과 Ni의 양이 적고, Mn의 양이 많은 오스테나이트계 스테인리스강을 냉간압연 할 때 생성되는 마르텐사이트를 알아보기 위하여 용체화처리 한 시료와 용체화처리 한 시료를 상온에서 20% 및 48% 냉간압연 한 다음 X선 회절시험 하였을 때 얻은 회절선도를 분석하여 나타난 것이다. 용체화처리 한 시료의 a)에서는 오스테나이트 조직의 피크만 존재하고 있는데 반하여, 냉간압연 한 b)와 c)에서는 냉간가공에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태 되는데 기인되어 오스테나이트 조직의 피크 외 α' -마르텐사이트 조직의 피크도 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 가공 양이 많아짐에 따라 오스테나이트 조직의 피크강도는 적어지고 있는데 반하여 α' -마르텐사이트 조직의 피크강도는 커지고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 가공 양에 관계없이 가공에 의해 α' -마르텐사이트가 생성되고 있는 것을 알 수 있고, 또한 가공 양이 많아질수록 α' -마르텐사이트가 많이 생성되고 있는 것을 알 수 있다.

상온에서 준안정 오스테나이트조직을 갖는 강을 가공하게 되면 가공유기 생성되는 마르텐사이트는 오스테나이트의 안정도에 따라 달라지지만 일반적으로 α' -마르텐사이트와 ϵ 마르텐사이트가 함께 생성되는 것으로 알려져 있다^{3,5)}. 그러나 Cr, Ni의 양을 낮추는

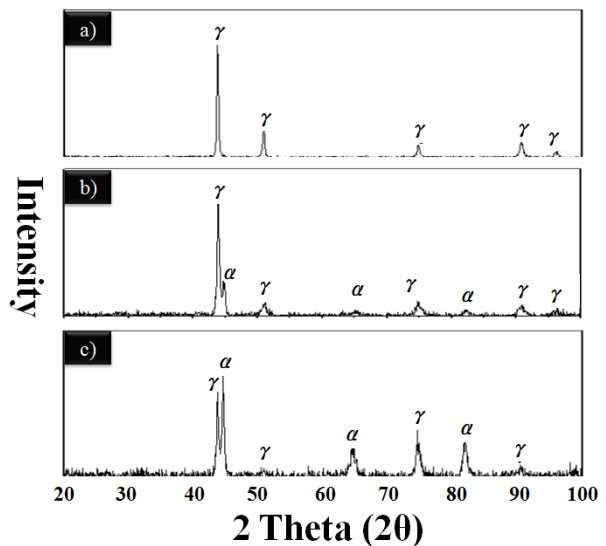


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of cold rolled austenitic stainless steel with high Mn
 a) 0% cold rolling
 b) 20% cold rolling
 c) 48% cold rolling

대신에 Mn이 많이 첨가된 본 시료에서는 ϵ 마르텐사이트는 생성되지 않고 α' -마르텐사이트만 생성되고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 본 시료에서 처럼 Ni를 5%, Cr을 14%로 낮추는 대신에 Mn을 6%로 많이 첨가하게 되면 가공에 의해 α' -마르텐사이트 및 ϵ 마르텐사이트가 모두 생성된다고 알려진⁵⁾ 오스테나이트계 스테인리스강 보다도 Ms점이 낮아지게 되어 오스테나이트 조직의 안정도가 높아지게 된다. 따라서 오스테나이트의 안정도가 높아지면 냉간가공에 의해 ϵ 마르텐사이트의 생성이 어려워지기 때문이라 판단된다^{5,8)}

Fig. 3은 경도에 미치는 가공의 영향을 알아보기 위하여 시료를 압연 양을 달리 하여 다음 냉간압연한 다음 경도값을 조사하여 나타낸 것이다. 가공 양이 증가함에 따라 경도값은 직선적인 비례관계로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 가공 양이 증가함에 따라 경도가 급격히 증가하는 주된 이유는 가공 양이 증가함에 따라 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 증가하는데 기인되기 때문이라 판단된다⁸⁾. Fig. 4은 냉간압연 양의 변화에 따른 인장강도와 연신율의 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 가공 양이 증가함에 따라 인장강도는 경도와 동일한 거동으로 직 선적인 비례관로 증가하고 있는데 반하여, 연신율은 가공 양이 적은 영역에서는 빠르게 감소하지만, 가공양이 40% 이상이 되면 서서히 감소하는 거동을 나타내고 있다. 이와 같이 가공양이 증가함에 따라 인장강도가 급격하게 상승하고 연신율이 빠르게 감소하는 이유 역시 가공에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되는데 주로 기인된다고 판단된다⁸⁾.

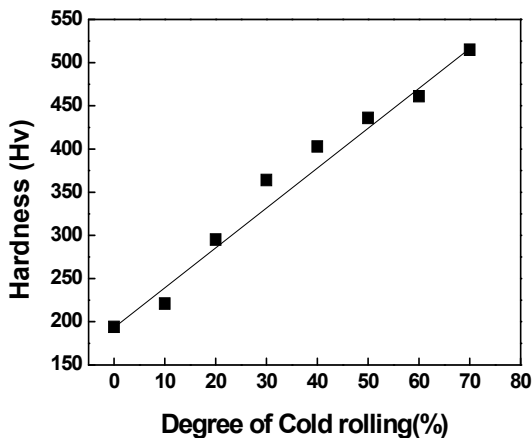


Fig. 3. Effect of degree of cold rolling on the hardness in austenitic stainless steel with high Mn

3.3 기계적성질에 미치는 마르텐사이트의 영향

Fig. 5는 경도에 미치는 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 영향을 알아보기 위하여 시료를 상온에서 가공 양을 달리하여 압연한 시료에서 얻은 경도 값과 마르텐사이트의 양과의 관계를 나타낸 것이다. 마르텐사이트의 양이 증가할수록 경도는 직선적인 비례관계로 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

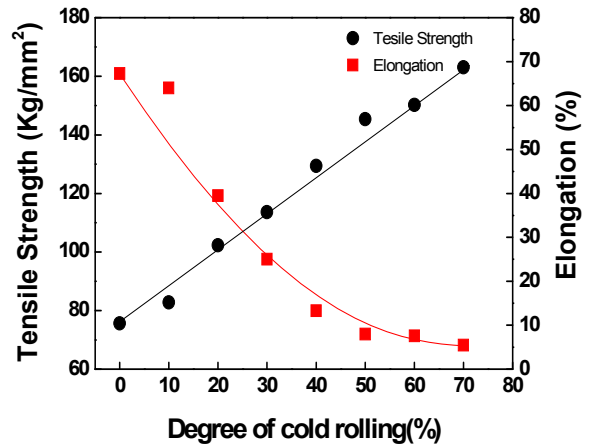


Fig. 4. Effect of degree of cold rolling on the tensile properties in austenitic stainless steel with high Mn

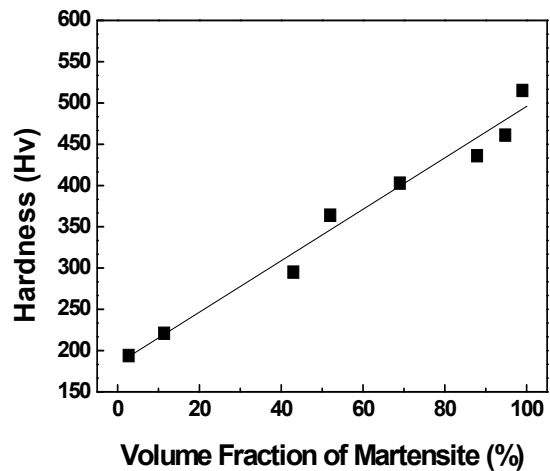


Fig. 5. Relationship between volume fraction of martensite and hardness in austenitic stainless steel with high Mn

Fig. 6는 인장성질에 미치는 마르텐사이트의 영향을 알아보기 위하여 가공 양을 달리하여 냉간압연한 시료에서 얻은 인장성질과 마르텐사이트 양과의 관계를 나타낸 것이다. 인장강도는 마르텐사이트의 양이 증가함에 따라 직선적인 비례관계로 증가하고 있는데 반하여 연신율은 마르텐사이트의 양이 증가함에 따라

빠르게 감소하다가 마르텐사이트의 양이 약 70%를 넘어서면 서서히 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

5) 경도, 인장강도 및 연신율은 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트 조직에 크게 지배되었다.

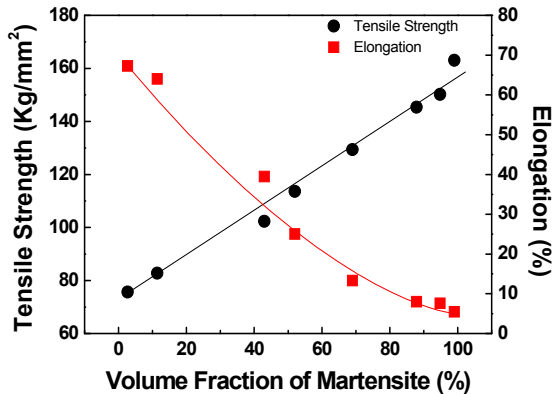


Fig. 6 Relationship between volume fraction of martensite and tensile properties in austenitic stainless steel with high Mn

이상의 실험 결과로부터 Cr과 Ni의 양을 낮추는 대신 Mn이 많이 첨가된 오스테나이트계 스테인리스강에서도 경도 및 인장성질은 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트 조직에 크게 지배되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이전의 결과인 Fig. 3과 4에서 가공도가 증가함에 따라 경도와 인장강도가 급격히 증가하는 이유는 가공 양이 증가하게 되면 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 많아지기 때문이라 판단된다⁸⁾.

4. 결 론

Mn이 많이 첨가된 오스테나이트계 스테인리스강에서 가공유기 마르텐사이트 변태거동과 기계적 성질과의 관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 냉간가공에 의해 α'-마르텐사이트가 생성 되었다.
- 2) 냉간가공에 의해 생성되는 α'-마르텐사이트 조직은 표면기복을 일으키면서 생성되었다. 또한 α'-마르텐사이트는 특정한 방향을 지니면서 생성되거나, 서로 교차하면서 생성되었다.
- 3) 가공 양이 증가함에 따라 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양은 빠른 속도로 증가하다 가공 양이 크게 많아지면 서서히 증가하였다
- 4) 가공 양이 증가함에 따라 경도 및 인장강도는 직선적으로 빠르게 증가하는데 반하여, 연신율은 변형의 초기에는 빠르게 감소하지만 변형 양이 많아지면 서서히 감소하였다.

참고 문헌

1. H. C. Fiedler, B. L. Averbach and M. Cohen, 1954, " The Effect of Deformation on The Martensitic Transformation in Austenitic Stainless Steels", TRANS. OF THE ASM, 47,P.267
2. C. Y. Kang, J. H. Um, H. J. Kim, J. H. Sung, 2007, " The Effect of Grain Size on the Damping Capacity of Fe-26Mn-2Al", The Korea Soci. for Power System Eng., V.11, N.1, pp.115-120
3. H. Nakatsu and S. Takaki, 1996, "Effect of Grain Size in Fe-Mn Alloy on ε Martensitic Transformation and Their Mechanical Properties", J. Japan Inst. Metal, V.60, N.2, P.141
4. C. Y. Kang, J. H. Sung, 1992, "Effect of Deformation Temperature and Manganese Contents on the Tensile Properties of Fe-Cr-Ni-Mn Duplex Stainless Steel", Korean Soci. Heat Treatment, V.16, N.1, pp.187-197
5. D. W. Son, J. H. Kim, I. S. Kim, K. Miyahara, J. H. sung, C. Y. Kang, 2004, " Effect of ε Martensite on the Damping Capacity of Austenite Stainless Steel", Korea J. of Met. & Mater., V.42, N.8, pp.621-625
6. K. Raj, J. S. Kumar, K. A. Padmanabhan, 1999, " Martensitic transformation and plastic Flow in metastable 2.5 wt.% nickel austenitic stainless steel sheets", Materials Letters, 38, P.386
7. K. K. Jee, J. H. Han, W. Y. Jang, 2004, "Measurement of volume fraction of ε martensite in Fe-Mn based alloys", Mat. Scien. and Enge., A 378, p. 319
8. D. W. Son, J. H. Kim, J. M. Lee, I. S. Kim, H. C. Kim and C. Y. Kang, 2004, "Effect of Microstructure on the Damping Capacity and Tensile Properties of Fe-Al-Mn", The Korea Soci. for Power System Eng., V.8, N.4, pp.18-22