역변태 오스테나이트와 가공유기 마르텐사이트의 2상 혼합조직을 갖는 스테인리스강의 기계적 성질과 감쇠능

Relationship Between Mechanical Properties and Damping Capacity in Stainless Steel with Two Phases of Reversed Austenite and Deformation Induced Martensite

남궁원* · 정목환** · 이향백*** · 김재남**** · 강창룡*****†

Won Namgung*, Mok-Hwan Jung**, Hyang-Beak Lee***, Jae-Nam Kim**** and
Chang-Young Kang*****†

(접수일 : 2012년 12월 12일, 수정일 : 2013년 03월 04일, 채택확정 : 2013년 03월 15일)

Abstract: This study was carried out to investigate the relationship between mechanical properties and damping capacity in high manganese austenitic stainless steel with two phase mixed structure of reversed austenite and deformation induced martensite. Reversed austenite of ultra-fine grain size less than $0.3\mu\text{m}$ was obtained by reversion treatment. Two phase structure of deformation induced martensite and reversed austenite was obtained by annealing treatment at range of $500^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ for various time in cold rolled high manganese austenite stainless steel. In stainless steel with two phase mixed structure of martensite and austenite, damping capacity decreased rapidly with the increasing hardness and strength. With the increasing elongation, damping capacity was increased rapidly and then, slowly increased.

Key Words : Reversed Austenite, Deformation Induced Martensite, Mixed Structure, Damping Capacity

1. 서 론

고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강은 오스테나이트계 스테인리스강이 갖는 가격이 높은 문제를 해결하기 위해 Ni와 Cr의 양을 낮추는 대신에 Mn을 많이 첨가하여 만든 강이다. 그러나 이강 또한 내식성, 인성, 가공성 등은 우수하지만 항복

강도가 낮아 여러 산업 분야에서 구조용 재료로서 다양하게 사용되지 못하고 있다. 때문에 가공에 의해 오스테나이트 조직을 마르텐사이트 조직으로 만든 다음 이를 어닐링(annealing)처리에 의해 오스테나이트 조직으로 역변태 시켜 역변태된 오스테나이트의 결정립을 미세화시킴으로써 강도를 높이려고 하는 연구¹⁻²⁾와 가공에 의해 생

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

**** 김재남 : 부경대학교 금속공학과

*** 이향백 : 부경대학교 금속공학과

** 정목환 : 부경대학교 금속공학과

* 남궁원 : 한국 폴리텍 VII 대학 울산캠퍼스 산업설비
자동화과

***** Chang-Yong Kang : Department of Metallurgical
Engineering, Pukyong National University

E-mail : metkcy@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6346

Mok-Hwan Jung, Jae-Nam Kim, Hyang-Beak Lee : Department
of Metallurgical Engineering, Pukyong National University

* Won Namgung : Korea Polytechnic VII Colleges

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	5.8	14.2	1.91	0.1	0.16

성된 마르텐사이트를 전부 오스테나이트로 역변태 시키지 않고 일부 잔류시켜 역변태 된 오스테나이트와 가공유기 마르텐사이트가 함께 존재하는 2상 혼합조직강으로 만들어 강도와 연성의 조합이 우수한 강을 제조하려는 연구들이 수행되어 왔다³⁾. 그러나 우수한 강도와 연성의 조합을 얻기 위해 마르텐사이트와 오스테나이트가 함께 존재하는 2상 혼합조직강으로 만들게 되면 오스테나이트계 스테인리스강이 갖는 감쇠능은 떨어질 것으로 예상되지만⁴⁾ 아직 가공유기 마르텐사이트와 역변태 된 미세립 오스테나이트가 함께 존재하고 있는 2상 혼합조직을 갖는 스테인리스강에서 기계적 성질과 감쇠능과의 관계를 연구한 논문은 찾아 볼 수 없다. 따라서 본 연구는 Cr과 Ni의 양을 낮추는 대신에 Mn이 많이 첨가되어 있는 스테인리스강에서 가공에 의해 오스테나이트조직을 마르텐사이트 조직으로 변태시킨 다음 이를 역변태처리 하여 가공유기 마르텐사이트와 역변태 된 미세립 오스테나이트가 함께 존재하는 2상 혼합조직으로 만든 후 기계적 성질과 감쇠능과의 상호관계를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

기존 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 Cr을 14%, Ni을 5% 정도로 낮추는 대신에 Mn이 6% 첨가된 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 스테인리스강을 70% 냉간압연 하여 오스테나이트 조직의 97%이상을 마르텐사이트 조직으로 변태시킨 다음 시료로 사용하였고, 그 조성을 Table 1에 나타내었다.

2.2 역변태 처리

가공유기 마르텐사이트와 역변태 된 오스테나이트가 함께 존재하는 2상 혼합조직을 갖는 강을

만들기 위한 역변태처리는 냉간압연에 의해 97% 이상의 마르텐사이트 조직으로 된 시료를 500℃에서 700℃ 사이의 여러 온도에서 10분, 700℃의 온도에서 최대 10분 까지 시간을 달리하는 어닐링처리를 하였다.

2.3 미세조직 관찰

냉간압연한 시료의 미세조직은 광학현미경, 주사전자현미경 및 투과전자현미경(Hitach, 200kV)을 사용하여 관찰하였다. 또한 냉간가공한 다음 역변태처리한 시료의 미세조직도 투과전자현미경으로 관찰하였다.

2.4 X선 회절시험

냉간압연에 의해 생성된 마르텐사이트와 역변태처리 하였을 때 생성된 오스테나이트의 체적분율은 X-선 회절시험으로 측정 하였다. X-선 회절시험은 Cu-K α 선을 이용하여 2θ 를 $10^\circ \sim 80^\circ$ 범위로 정하여 $1^\circ/\text{min}$ 의 속도로 시험하였으며 이때 얻은 회절선도로부터 각 상의 상대 적분강도 값을 이용하여 체적분율을 구하였다⁵⁾.

2.5 기계적 성질 측정

70% 냉간가공한 시료를 ASTM E-8의 규격을 따라 시험편을 제작한 다음 여러 조건으로 어닐링처리하여 가공유기 마르텐사이트와 역변태된 오스테나이트의 2상 혼합조직강을 만든 다음 cross head speed를 2mm/min. 의 속도로 정하여 시험하였다. 또한 경도 시험은 역시 체적분율이 다른 미소경도 시험기를 사용하여 측정하였고, 경도 값은 5회 측정하여 평균해서 구하였다.

2.6 감쇠능 측정

감쇠능은 70% 냉간가공한 시료를 120mm × 0.9mm × 1.0mm 크기로 만든 다음 온도와 시간을 달리하는 어닐링처리에 의해 역변태된 오스테나

Fig. 1 Micrographs of 70% cold rolled high manganese austenitic stainless steel
a) Optical($\times 200$), b) Scanning electron microscope(SEM)

Fig. 2 TEM micrographs showing the deformation induced martensite in 70% cold rolled high manganese austenite stainless steel
a) Bright field image($\times 40k$) b) SADP and Indexing of SADP(BCC), $Z=[133]$

이트와 가공유기 마르텐사이트가 공존하는 2상 혼합조직으로 만든 다음 횡형 내부 마찰측정장치 (Internal friction measurement machine : 진공이화학, IFT-1500)를 이용하여 측정하였다. 이 방법은 진동을 가하는 전극과 진동을 검출하는 전극위에 시료를 2개의 평행한 세선으로 전극에 접촉되지 않게 배열한 다음, 진동을 가하는 전극으로 강제 진동시킨 후 자유 감쇠시켜 최종 감쇠 할 때까지의 파수를 측정하는 방법으로 대수 감쇠율($\delta=1/n \ln A_0/A_n$, 여기서 n : 파수, A_0 : 최초 파의 진폭, A_n : n 번째 파의 진폭)을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 Mn이 6% 첨가된 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 스테인리스강을 70% 냉간압연 하였을 때의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경으로 나타낸 것이다. 가공에 의해 오스테나이트 조직의 대부분이 마르텐사이트 조직으로 변태되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 주사전자현미경 사진(b)으로 부터 마르텐사이트가 표면기복을 일으키면서, 그리고 특정한 방향을 지니며 생성되고 있고, 일부는 서로 교차하면서 생성되어 있는 것을 알 수 있다⁶⁾. 한편 이 시료에서 측정된 가공에 의해 생성된 마르텐사이트의 양은 97%였다.

Fig. 2는 70% 냉간가공한 시료의 미세조직을 투과전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것으로 사진 a)는 명시야 상, b)는 명시야 상의 제한시야 회절패턴(SADP)과 이를 분석하여 나타낸 것이다. BCC 결정구조를 갖는 밴드 형상의 α' -마르텐사이트가 생성되어 있는 것을 알 수 있다⁶⁾.

Fig. 3은 70% 냉간가공한 시료를 600℃와 650℃에서 10min. 어닐링처리 하였을 때의 미세조직을 투과전자현미경으로 나타낸 것이다. 두 시료 모두 냉간가공에 의해 생성된 α' -마르텐사이트 내에서 300nm 크기 이하의 역변태된 오스테나이트가 존재하고 있는 2상 혼합조직으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3 TEM micrographs showing the reversed austenite obtained by annealing treatment at 600°C and 650°C for 10min. in 70% cold rolled high manganese austenitic stainless steel
a) 600°C b) 650°C

Fig. 4 TEM micrographs showing the reversed austenite obtained by annealing treatment at 700°C for 5min. and 10min. in 70% cold rolled high manganese austenitic stainless steel
a) 5min. b) 10min.

Fig. 4는 70% 냉간가공한 시료를 700°C에서 5분 및 10분 어닐링처리 하였을 때의 미세조직을 투과전자현미경으로 나타낸 것이다. 700°C에서 5분 어닐링처리한 시료에서는 크기가 300nm 보다 작은 역변태 된 오스테나이트가 가공에 의해 생성된 α' - 마르텐사이트 내 존재하고 2상 혼합조직으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 10분 어닐링처리 한 시료에서는 가공에 의해 생성된 마르텐사이트가 전부 오스테나이트 조직으로 변태되는데 기인되어 300nm 보다 크기가 작은 오스테나이트 단상 조직으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

3.2 역변태 거동

Fig. 5는 역변태 거동에 미치는 어닐링처리 온도의 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 냉간압연에 의해 97% 이상의 마르텐사이트 조직으로 되어 있는 시료를 500°C에서 700°C사이의 여러 온도에서 10분 어닐링처리 하였을 때 두 상의 체적분을 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 어닐링처리 온도가 높아짐에 따라 역변태 되는 오스테나이트의 양이 빠르게 증가하고 이에 기인되어 마르텐사이트의 양은 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 Effect of annealing temperature on the volume fraction of deformation induced martensite and reversed austenite in 70% cold rolled high manganese austenitic stainless steel

Fig. 6 Effect of annealing time on the volume fraction of deformation induced martensite and reversed austenite in 70% cold rolled high manganese austenitic stainless steel

Fig. 6은 역변태거동에 미치는 어닐링처리 시간의 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 700°C에서 시간을 달리하여 어닐링처리 하였을 때 두상의 체적분율을 조사하여 나타낸 것이다. 어닐링처리 시간의 증가와 함께 역변태되는 오스테나이트의 양은 빠르게 증가하고, 이에 기인되어 마르텐사이트의 양은 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 700°C에서 10분 어닐링처리 하면 마르텐사이트의 대부분이 오스테나이트로 변태되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 Relationship between of hardness and internal friction of stainless steel with two phases of austenite and martensite

이상의 결과로부터 가공에 의해 생성된 마르텐사이트 조직을 갖는 고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강을 500°C에서 700°C 사이의 온도에서 적절한 시간 어닐링처리 하게 되면 역변태된 오스테나이트와 가공유기 마르텐사이트가 공존하는 2상 혼합조직강을 만드는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

3.3 감쇠능과 기계적 성질과의 관계

Fig. 7은 어닐링처리에 의해 생성된 역변태 오스테나이트와 가공에 의해 생성된 가공유기 마르텐사이트가 함께 존재하고 있는 2상 혼합조직을 갖는 강의 경도와 감쇠능과의 관계를 알아보기 위하여 냉간압연에 의해 97% 이상의 마르텐사이트 조직을 갖는 고 Mn 오스테나이트강을 500°C에서 700°C 사이의 온도에서 10분, 700°C에서 최대 10분까지 시간을 달리하는 어닐링처리한 다음 경도와 대수 감쇠율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 경도가 증가함에 따라 감쇠능은 비례관계로 빠르게 낮아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 2상 혼합조직을 갖는 고 Mn 스테인리스강의 인장강도와 감쇠능과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 경도와 마찬가지로 인장강도가 증가함에 따라 감쇠능이 비례관계로 빠르게 낮아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 Relationship between tensile strength and internal friction of stainless steel with two phases of austenite and martensite

Fig. 9 Relationship between elongation and internal friction of stainless steel with two phases of austenite and martensite

이상의 결과로부터 역변태 오스테나이트와 가공유기 마르텐사이트의 2상 혼합조직을 갖는 강에서 경도와 강도가 증가하면 감쇠능은 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 가공에 의해 생성된 마르텐사이트는 많은 전위들과 같은 결함을 지니고 있어 경도와 강도가 높다. 따라서 마르텐사이트의 양이 많아질수록 경도와 강도는 높아진다. 그러나 마르텐사이트의 양이 많아지면 전위들이 많아지기 때문에 전위들의 반응이나 상호작용에 의해 전위 이동을 방해하는

장애물이 많아지게 되어 전위의 이동이 어렵게 되는데 기인되어 감쇠능은 낮아진다고 판단된다(4-7).

Fig. 9는 2상 혼합조직을 갖는 고 Mn스테인리스강의 연신율과 감쇠능과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 연신율이 증가함에 따라 감쇠능은 빠르게 증가하다 서서히 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 오스테나이트 조직은 마르텐사이트 보다 강도는 낮지만, 연신율과 감쇠능은 높다^{4,7)}. 따라서 오스테나이트의 양이 많아짐에 따라 연신율이 높아지고 그 결과 감쇠능도 높아진다고 판단된다.

4. 결 론

가공유기 마르텐사이트와 역변태 오스테나이트가 함께 존재하고 있는 2상 혼합조직을 갖는 고 Mn 오스테나이트계 스테인리스강에서 기계적 성질과 감쇠능의 관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 역변태처리에 의해 $0.3\mu\text{m}$ 크기 이하의 초 미세립 오스테나이트 조직이 얻어졌다.
2. 가공유기 마르텐사이트와 역변태 오스테나이트가 함께 존재하는 2상 혼합조직은 500°C 에서 700°C 사이의 온도에서 시간을 달리하는 어닐링처리에 의해 얻어졌다.
3. 감쇠능은 경도와 강도가 증가함에 따라 비례관계로 빠르게 감소하였다.
4. 감쇠능은 연신율의 증가와 더불어 빠르게 증가하다 연신율이 특정 값 이상이 되면 서서히 증가하였다.

참고문헌

1. T. Y. Hur, 2012, "Effect of Deformation Induced Martensite Transformation on the Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steel with High Mn", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, pp. 51-56.

2. Y. H. Kim et al., 1995, "Strengthening of Metastable Austenitic Stainless Steels by Reversion Treatment" J. of the Met. and Mate., Vol. 33, pp. 1431-1436
3. Y. H. Kim et al., 1995, "Mechanical Properties of Ultrafine (α' + γ) Two Phase Stainless Steel", J. of the Inst. of Met. & Mater., Vol. 33, pp. 1431-1437.
4. T. Y. Hur et al, 2010, "Effect of Microstructure on the Damping Capacity of 12Cr Martensitic Heat-resisting Steel", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, pp. 78-83.
5. K. K. Jee et al., 2004, "Measurement of volume fraction ϵ martensite in Fe-Mn base alloys", Mate. Scie. and Engineering A 378, pp. 319-322
6. K. P. Staudhammer et al, 1983, "Nucleation and Evolution of Strain Induced Martensitic Embryos and Substructure in Stainless Steel", Acta Metal., Vol. 31, pp. 267-274
7. R. D. Adams and M. A. O. Fox, 1973, "Principal mechanism of damping in material", J. of the Iron and Steel Institute, 211, pp. 37-43