

# 316L 스테인리스강의 기계적 성질에 미치는 가공 열처리의 영향

## Effect of Thermomechanical Treatment on the Mechanical Properties of 316L Stainless Steel

강창룡\*† · 권민기\*

Chang-Yong Kang\*† and Min-Gi Kwoon\*

(접수일 : 2014년 02월 10일, 수정일 : 2014년 04월 03일, 채택확정 : 2014년 04월 06일)

**Abstract:** This study is to investigate the effect of thermo mechanical treatment on the mechanical properties of 316L stainless steel.  $\alpha'$  and  $\epsilon$ -martensite was formed by deformation. With increasing number of thermo mechanical treatment, volume fraction of martensite was increased rapidly, and then unchanged. With increasing number of thermo mechanical treatment, hardness and strength was increased rapidly, and then unchanged while elongation was decreased rapidly, and then unchanged. With increasing volume fraction of martensite formed by thermo mechanical treatment, hardness and strength was increased rapidly, elongation was decreased rapidly. Thus, hardness, strength and elongation of thermo mechanical treated 316L stainless steel was strongly affected by martensite formed by thermo mechanical treatment. Good combination of strength and elongation was obtained from thermomechanical treatment

**Key Words :** Alloys, Deformation, Mechanical Properties, Transmission Electron Microscopy(TEM)

### 1. 서 론

316L 스테인리스강은 가공성과 내식성이 우수하여 여러 산업분야에서 많이 사용되고 있지만 항복강도가 낮아 강도가 요구되는 구조제로서 사용에는 제한을 받고 있다. 따라서 강도를 높혀 사용범위를 확대할 필요성이 있다<sup>1-4)</sup>.

이러한 강에서 강도를 높일 수 있는 방법은 여러 방법을 생각할 수 있지만 가공에 의해 오스테나이트 조직을 마르텐사이트 조직으로 만든 다음 초 미세립 오스테나이트로 역변태 시켜 강도를 높이는 방법<sup>3)</sup>과 가공온도와 가공량을 달리하거나,

또는 가공에 의해 오스테나이트를 마르텐사이트로 만든 다음 온도와 시간을 달리하는 역변태처리 하여 오스테나이트와 마르텐사이트의 2상조직 강으로 만들어 강도와 연성의 우수한 조합을 얻는 방법 등이 이상적인 방법으로 알려지고 있다<sup>1,4)</sup>. 그러나 가공과 역변태 어닐링처리를 병행하는 가공열처리에 의해 오스테나이트와 마르텐사이트의 2상 조직으로 만들어 강도를 높이는 방법도 유용한 방법 될 것으로 판단된다<sup>5)</sup>.

지금까지 가공과 열처리가 병행되는 가공열처리에 관한 연구는 다양한 합금에서 많이 수행되어 왔다<sup>5,6)</sup>. 그러나 가공열처리를 반복적으로 행하

\*\*† 강창룡(교신저자) : 부경대학교, 금속공학과

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

\*권민기 : 부경대학교, 금속공학과

\*† Chang-Young Kang(corresponding author) : Department of

Metallurgical Engineering, Pukyong National University

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

\*Min-Gi Kwoon : Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University

Table 1 Chemical composition of specimen(wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.016	0.6	1.04	0.03	0.002	10.26	16.51	2.03	BaL.

여 제 특성을 연구한 논문은 많지 않고, 그나마 감쇠능과 형상 기억효과 등에 국한되어 있는 실정이다<sup>7)</sup>. 때문에 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 강에서 강도를 높이기 위한 가공열처리에 관한 연구가 필요함에 불구하고 아직 수행되지 않고 있다.

따라서 본 연구는 316L 스테인리스강에서 가공과 역변태 어닐링처리를 병행하는 가공열처리를 반복적으로 행한 다음 기계적 성질 변화를 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료

시료는 탄소량이 극히 적고 2% 이상의 Mo이 첨가되어 있는 316L 공시재를 구입하여 사용하였고, 화학 조성을 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 가공열처리

먼저 가공에 의해 오스테나이트의 약 20% 정도가 마르텐사이트로 변태되도록 약 16% 정도의 압연율로 냉간압연 하였고, 다음 700°C의 온도로 가열하여 냉간압연에 의해 생성된 마르텐사이트가 오스테나이트로 충분히 역변태 될 수 있도록 20분 유지 후 수냉하는 가공열처리를 하였다. 또한 이러한 가공과 역변태 어닐링처리의 2단계 과정을 한 사이클로 하여 최대 5 사이클 까지 가공열처리 하였다. 한편 여러 두께의 판재를 사용하여 필요한 사이클 수로 가공열처리한 후 시편의 두께는 1mm가 되도록 하였다.

### 2.3 미세조직관찰

가공열처리 전 시료의 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였고, 냉간압연한 시료의 미세조직은 주사전자현미경과 투과전자현미경으로 관찰하였다. 또한 가공열처리한 시료의 미세조직은 투과전자현미경(Hitach, 200kV)으로 관찰하였다.

### 2.4 체적분율 측정

가공열처리에 따른 오스테나이트와 마르텐사이트 조직의 체적분율 변화는 Mo-K $\alpha$  특성 X선을 이용하여 20 ~ 100°의 범위를 2°/min. 속도로 회절시험(Rigaku D/Max-II A)하였을 때 얻은 회절선도로부터 각 상에 해당되는 피크의 상대 적분강도 값을 사용하여 구하였다<sup>8)</sup>.

### 2.5 기계적 성질 측정

가공열처리한 시료의 경도는 미소경도시험기를 사용하여 1Kg의 하중으로 5회 측정된 다음 평균하여 구하였다. 또한 인장성질은 가공열처리한 시료로부터 평행부 길이가 50mm 인 ASTM E-8의 규격을 따라 시험편을 제작한 다음 상온에서 cross head speed를 2mm/min 로 인장시험하여 구하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

Fig. 1은 316L 스테인리스강의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 쌍정 및 부분적으로 존재하는 오스테나이트 조직임을 알 수 있다.

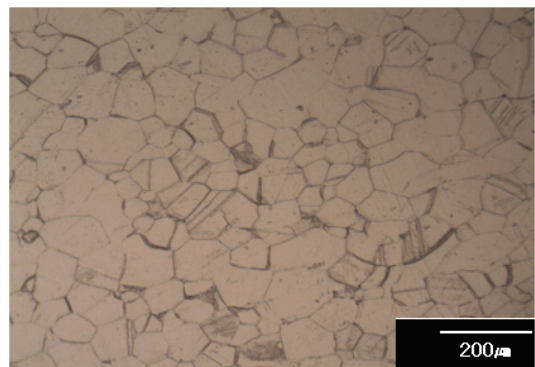


Fig. 1 Optical micrograph of 316L stainless steel

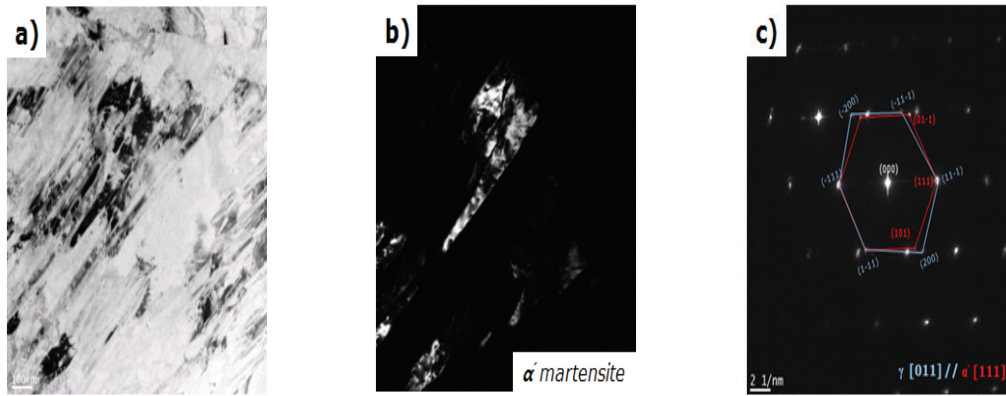


Fig. 2 TEM micrographs showing the microstructures of 16% cold rolled 316L stainless steel  
 a) Bright field b) Dark field c) SADP and Indexing of SADP

Fig. 2는 가공에 의해 생성된 마르텐사이트를 결정학적 분석에 의해 알아보기 위하여 16% 냉간 압연한 시료의 미세조직을 투과전자현미경에 의해 사진 a)는 명시야상, b)는 암시야상으로 나타낸 것이며, c)는 명시야 상의 제한시야 회절 패턴과 이를 분석하여 나타낸 것이다. 가공에 의해 오스테나이트의 일부가 마르텐사이트로 변태되고 있는 것을 알 수 있다.

이전의 연구에 의하면 316L 스테인리스강을 가공하면 오스테나이트가  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트로 변태되고, 가공량이 증가함에 따라  $\epsilon$ -마르텐사이트 양은 증가하다 감소하고,  $\alpha'$ -마르텐사이트 양은 빠르게 증가하며, 기계적 성질은 주로  $\alpha'$ -마르

텐사이트에 지배된다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 본 연구에서도 가공열처리에 의해  $\alpha'$  및  $\epsilon$ -마르텐사이트가 생성되지만 주로  $\alpha'$ -마르텐사이트가 생성되기 때문에  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양이 극히 적을 뿐만 아니라  $\epsilon$ -마르텐사이트는 기계적 성질에도 크게 영향을 미치지 않아 두 마르텐사이트를 분리하여 조사하지는 않았다.

### 3.2 가공열처리에 따른 미세조직 변화

Fig. 3은 시료를 상온에서 16% 냉간압연한 다음 700°C에서 20분 역변태 어닐링처리 하는 가공 열처리를 1 및 5 사이클 처리한 시료의 미세조직을 투과전자현미경으로 나타낸 것이다. 두 시료가

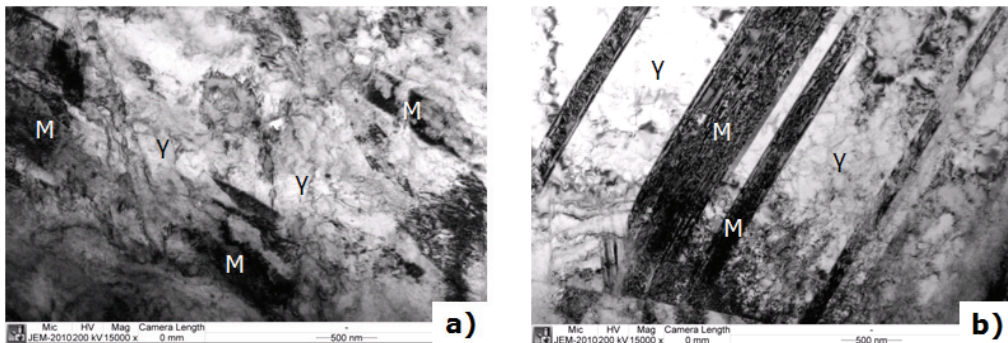


Fig. 3 TEM micrographs showing the effect of the number of thermomechanical treatments in 316L stainless steel a) 1-Cycle b) 5-Cycle

오스테나이트 조직에 가공열처리에 의해 생성된 마르텐사이트가 함께 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 가공열처리를 1 사이클 처리한 시료에 비해 5 사이클 처리한 시료가 마르텐사이트의 양이 많은 것을 알 수 있다.

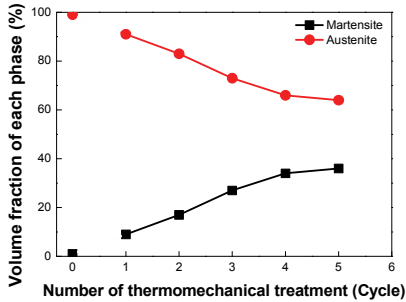


Fig. 4 Effect of the number of thermomechanical treatment on the volume fraction of each phase in 316L stainless steel

Fig. 4는 가공열처리 반복 사이클 수에 따른 오스테나이트와 마르텐사이트의 체적분을 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 가공열처리 사이클 수가 증가함에 따라 오스테나이트의 체적분율은 빠르게 감소하다가 반복 사이클 수가 4회 이상이 되면 큰 변화가 없는 것을 알 수 있고, 마르텐사이트의 체적분율은 반대경향을 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 가공열처리 사이클 수가 증가하면 가공열처리에 의해 생성되는 마르텐사이트의 양은 증가하고 있으며 이는 가공에 의해 생성된 마르텐사이트가 역변태처리에 의해 완전히 오스테나이트로 변태되지 않고 있을 뿐만 아니라, 가공열처리 사이클 수가 증가할수록 적층결함에 너지의 감소와 더불어 전위 등과 같은 마르텐사이트의 핵 생성 장소 수가 증가하여 마르텐사이트가 많이 생성되기 때문이라 판단된다<sup>7)</sup>.

### 3.3 기계적 성질에 미치는 가공열처리의 영향

Fig. 5는 경도에 미치는 가공열처리 사이클 수의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 경도는 가공열처리 사이클 수가 증가함에 따라 빠르게 증가하다 가공열처리 사이클 수가 4회 이상이 되면 큰

변화가 없고 이러한 거동은 Fig. 4에서 나타낸 가공열처리에 따른 마르텐사이트 체적분을 변화와 비슷한 것을 알 수 있다.

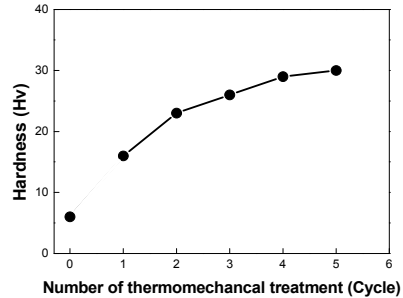


Fig. 5 Effect of the number of thermomechanical treatment on the hardness of 316L stainless steel

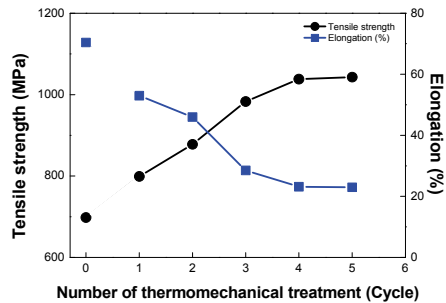


Fig. 6 Effect of the number of thermomechanical treatments on tensile properties of 316L stainless steel

Fig. 6은 인장성질에 미치는 가공열처리 사이클 수의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 가공열처리 사이클 수가 증가함에 따라 빠르게 인장강도는 증가하고 연신율은 감소하다 가공열처리 사이클 수가 4회 이상이 되면 인장강도와 연신율은 큰 변화가 없고 이러한 거동은 역시 Fig. 4의 가공열처리 사이클 수에 따른 마르텐사이트의 체적분을 변화와 비슷한 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 가공열처리 사이클 수가 증가할수록 경도와 강도가 증가하고 연신율이 감소하고 있으며, 이는 가공열처리 사이클 수가 증가할수록 경도와 인장성질에 영향을 미치는 전위 등

이 많아지는데도 영향을 받지만 주로 가공열처리에 의해 생성되는 마르텐사이트에 영향을 받기 때문이다<sup>9)</sup>. 또한 가공열처리를 반복하면 연신율이 50% 이상 감소하나 20% 이상을 나타내고, 강도는 35% 이상 높아져 1000MPa 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 가공열처리에 의해서도 우수한 강도와 연신율의 조합을 얻는 것이 가능하다는 것도 알 수 있다.

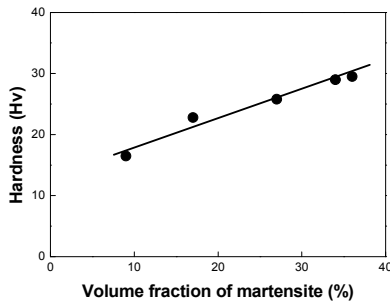


Fig. 7 Relationship between hardness and volume fraction of martensite in thermomechanical treated 316L stainless steel

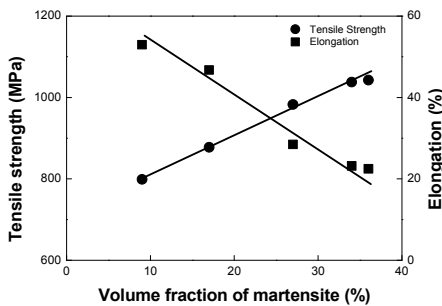


Fig. 8 Relationship between tensile properties and volume fraction of martensite in thermomechanical treated 316L stainless steel

Fig. 7은 가공열처리한 316L 스테인리스강의 경도와 가공열처리에 의해 생성된 마르텐사이트의 체적분율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 마르텐사이트 체적분율이 증가함에 따라 경도는 비례관계로 빠르게 증가하고 있다.

Fig. 8은 가공열처리한 316L 스테인리스강의 인장성질과 가공열처리에 의해 생성된 마르텐사이

트 체적분율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 비례관계로 강도는 증가하고, 연신율은 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 가공열처리한 316L 스테인리스강의 경도, 강도 및 연신율은 가공열처리에 의해 도입된 전위 등에도 영향을 받고 있지만 주로 가공열처리에 의해 생성된 마르텐사이트에 지배되고 있다는 것을 알 수 있다<sup>9)</sup>.

#### 4. 결 론

316L 스테인리스강의 기계적 성질에 미치는 가공과 역변태 어닐링처리를 병행하는 가공열처리의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 가공열처리에 의해 마르텐사이트가 생성되고, 가공열처리 사이클 수가 증가할수록 마르텐사이트 양은 빠르게 증가하다 사이클 수가 4회 이상이 되면 큰 변화가 없었다.
- 2) 가공열처리 사이클 수가 증가함에 따라 빠르게 경도, 강도는 증가하고, 연신율은 감소하지만 사이클 수가 4회 이상이 되면 경도, 강도 및 연신율은 크게 변화되지 않았다.
- 3) 가공열처리에 의해 생성된 마르텐사이트의 양이 증가함에 따라 빠르게 경도와 강도는 증가하고, 연신율은 감소하였다. 따라서 가공열처리한 316L스테인리스강의 경도와 인장성질은 주로 가공열처리에 의해 생성된 마르텐사이트에 지배되었다.
- 4) 가공열처리에 의해서도 우수한 강도와 연신율의 조합을 얻는 것이 가능하다.

#### Reference

1. Y. H. Kim, Y. S. Ahn, H. Y. Jeong, C. Y. Kang, B. H. Jeong, C. G. Kim, 1995, "Mechanical properties of ultrafine grain( $\alpha'$ + $\gamma$ ) two phase stainless steel", J. Kor. Inst. Met & Mater. Vol.33, p.42.

2. Y. K. Lee and O. J. Kwon, 1993, "Effect of alloying elements on the reverse transformation behavior from martensite to austenite in metastable austenitic Fe-Cr-Ni steel", J. Kor. Inst. Met & Mater. Vol.31, p.208.
3. Y. H. Kim, Y. S. Ahn, H. Y. Jeong, C. Y. Kang, B. H. Jeong, C. Y. Kim, 1995, "Strengthening of metastable austenitic stainless steel by reversion treatment", J. Kor. Inst. Met & Mater, Vol.33, p.1431.
4. Y. H. Kim, C. Y. Kang, 2013, "Tensile properties of high Mn austenitic stainless steel with two phase of martensite and austenite", J. of Ocean Eng. and Tech., Vol. 27. p.2287.
5. R. A. Shakoor, F. Ahnrad Khalid, 2009, "Thermomechanical behavior of Fe-Mn-Se-Cr-Ni shape memory alloys modified with samarium", Mater. Sci. Eng. A, Vol.499, pp.411-414.
6. G. H. Kim, Y. Nishimuro, Y. Watanabe, H. Sato, Y. Nishino, H. R. Jung, C. Y. Kang, I. S. Kim, 2009, "Effect of  $\epsilon$ -martensite and dislocation behavior by thermo-mechanical treatment on Fe-Cr-Mn damping alloy", Mater. Sci. Eng. A, Vol.521, p.368.
7. D. L. Engelberg, R. C. Newman and T. J. Morrow, 2008, "Effect of thermomechanical process history on grain boundary control in an austenitic stainless steel", Vol.59, pp.554-557.
8. R. L. Miller, 1964, "A rapid X-ray method for the determination of retained austenite", Trans. ASM, Vol.57, p.892.
9. D. W. Son, J. M. Lee, H. J. Kim, K. W. Nam, K. S. Park and C. Y. Kang, 2006, "Effect of microstructure in austenitic 316L stainless steel on the strength and damping capacity", J. of ocean Eng. and Tech, Vol. 20, p.1s.