

## 가공열처리에 의한 Fe-30%Ni-0.1%C 합금의 기계적성질 변화

안행근 · 김학신  
 전북대학교 공과대학 재료공학과

The Variation of Mechanical Properties by Thermomechanical Treatment  
 in Fe-30%Ni-0.1%C Alloy

H. K. Ahn, H. S. Kim  
 Dept. of Material Engineering, Chonbuk National University

### ABSTRACT

In order to compare mechanical properties of ausformed martensite with those of marformed martensite in Fe-30%Ni-0.1%C alloy and to investigate their strengthening mechanisms, ausformed martensite and marformed martensite were prepared by ausforming treatment and marforming treatment respectively. The microstructures were observed and the quantities of retained austenite, hardness, yield strength, ultimate tensile strength and elongation were examined.

The strength of ausformed martensite was mainly increased because of the lattice defects inherited from austenite. The ductility of ausformed martensite was constant at the rate of 7-8% by ductile matrix formation of the retained austenite in spite of the increase in strength. The strength of marformed martensite was increased by the increment in dislocation density, the crossing of transformation twin with deformation twin and the mutual crossing of deformation twin. The ductility of marformed martensite was slightly lower than that of ausformed martensite, but the strength of marformed martensite was prominently higher.

### 1. 서 론

합금강 강화법중에서 마르텐사이트 변태에 의한 강화법은 재료의 강도를 크게 증가시키지만 연성이 아주 적고 취약하여 열처리과정중 또는 사용중에 균열을 일

으키는 문제점이 있다. 그러므로 이와 같은 마르텐사이트 변태 열처리의 결점을 보완하기 위하여 강에 기계적인 가공과 열처리를 병용한 가공 열처리(thermo-mechanical treatment)를 실시함으로써 강을 강화시키면서 인성을 향상시키는 연구가 활발히 진행 되고

이다. 특히 이들 가공열처리 방법중 준안정 오스테나이트 영역에서 가공 후 마르텐사이트로 변태시키는 오스포오밍처리(ausforming treatment)와 오스테나이트를 마르텐사이트로 변태시켜 처너 마르텐사이트(virgin martensite)로 한 다음 이것을 가공하는 마르포오밍처리(marforming treatment)가 큰 인성의 손상 없이 현저한 강화를 가져오기 때문에 중요한 가공열처리방법으로 주목되고 있다.

이 가공열처리 방법은 1951년 Harvay<sup>1)</sup>에 의해서 오스포오드 마르텐사이트(ausformed martensite)가 발견된 이후 Schmatz<sup>2)</sup>와 五<sup>3)</sup> 등을 비롯한 많은 연구자들에 의하여 재료의 기계적성질 개선 및 그 강화 기구를 밝히기 위한 노력이 계속되어 왔다. 그러나 이들 연구의 대부분은 일정량(0.3wt%) 이상의 탄소를 함유한 강에 관한 것이고 탄소함량이 적은 저탄소강에 관한 연구는 상대적으로 매우 적은 실정이다. 鐵系 고탄소 마르텐사이트는 일반적으로 대단히 강한 반면에 취약한 결점이 있으나 저탄소 마르텐사이트는 비교적 양호한 인성을 가지므로 저탄소 합금강에 대한 가공열처리의 효과는 기계적성질 개선에 상당한 영향을 미칠 것으로 생각한다.

따라서 본 연구에서는 탄소함량이 0.1wt%인 Fe-30%Ni-0.1%C 합금을 냉간가공하여 얻은 디폼드 오스테나이트(deformed austenite), 오스포오밍처리하여 생성된 오스포오드 마르텐사이트 및 마르포오밍 처리하여 생성된 마르포오드 마르텐사이트(marformed martensite)의 현미경조직관찰, 잔류오스테나이트의 양, 경도, 강도 및 연성을 측정하여 이들의 기계적성질과 강화 효과를 비교 및 검토하고, 가능한 한 그 강화기구를 해명하고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 합금은 대기중에서 고주파유도로를 사용하여 원통형 금형에서 25kg 잉고트로 주조하였다. 본 연구에 사용된 합금의 화학조성 및 Ms점은 Table. 1에 나타내며, Ms점은 계단냉각에 의한 표면기복관찰법에 의하여 측정하였다.

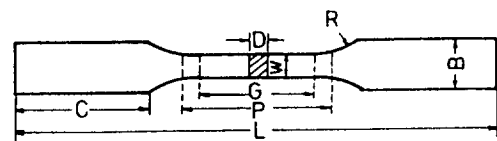
25kg 잉고트는 길이 방향으로 4등분한 다음에 4각봉으로 단조한 후 열간압연하였다. 합금 중 성분의 편석, 단조 및 압연의 영향을 제거하기 위하여 Ar가스

**Table 1.** Chemical composition of used alloy(wt%).

C	Ni	Si	P	S	Mn	Fe	Ms(°C)
0.098	30.18	0.011	0.003	0.0017	Tr.	Bal.	-42

분위기의 머플로에서 1100°C로 10hr동안 유지한 후 상온에 수냉시켜 균질화처리한 다음, 연삭에 의하여 가열 및 소입도중에 일어날 수 있는 표면산화 및 탈탄층을 제거함과 동시에 냉간가공에 의하여 시편의 최종 두께가 1.0mm가 되도록 시편의 두께를 가공도별(0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%)로 조절하였다. 용체화 처리는 Ar 가스분위기의 튜브형 머플로에서 930°C로 1/2hr 유지한 후 20°C의 소금물에 수냉시켜 균일한 오스테나이트 조직으로 만들었다.

이들 오스테나이트 조직 시료 중 일부는 상온에서 6종류의 가공도로 압연하여 디폼드오스테나이트로 한 후 이중 일부는 다시 액체질소(-196°C)중에 1hr동안 유지시켜 오스포오드 마르텐사이트 조직으로 하였다. 또 일부의 오스테나이트 조직 시료는 액체질소 중에 1hr동안 유지시켜 처너 마르텐사이트로 한 다음 상온에서 6종류의 가공도로 압연하여 마르포오드 마르텐사이트 조직으로 하였다. 각종 가공도의 디폼드 오스테나이트, 오스포오드 마르텐사이트 및 마르포오드 마르텐사이트의 인장시편은 Fig. 1과 같이 제작하였다. 현미경조직 시편은 10% Nital로 부식시킨 후 가공도에 따른 조직의 변화를 관찰하였고, intercept method에 의해 오리지날 오스테나이트(original austenite)의 grain size를 측정하였다. 또 오스포오드 마르텐사이트와 마르포오드 마르텐사이트의 잔류 오스테나이트의 양을 측정하기 위하여 X선 회절시험을 하였으며, 가공도에 따른 경도(HR<sub>n</sub>)를 측정하고, Instron 인장시험기(Model No. 1128)에서 1mm/min의 strain



G : 25      P : 30      W : 6.25      D : 10  
R : 15      C : 62      B : 10      L : 160

**Fig. 1.** Dimension of tensile specimen(mm).

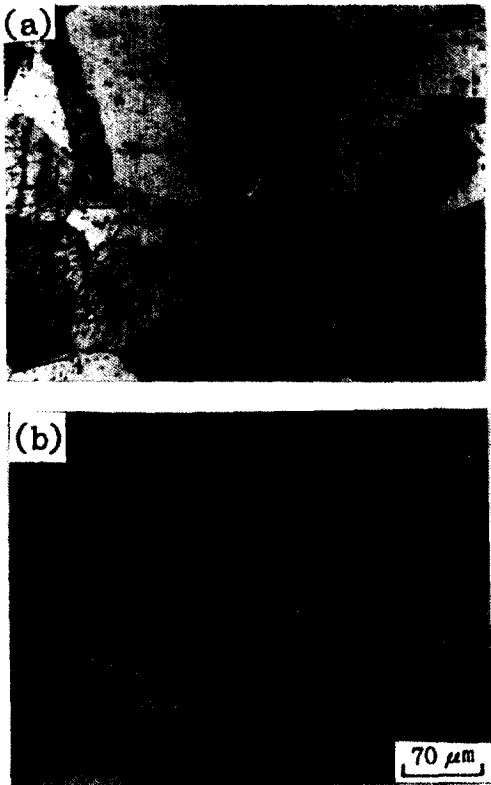
rate로 인장시험을 실시하여 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3. 1. 현미경 조직

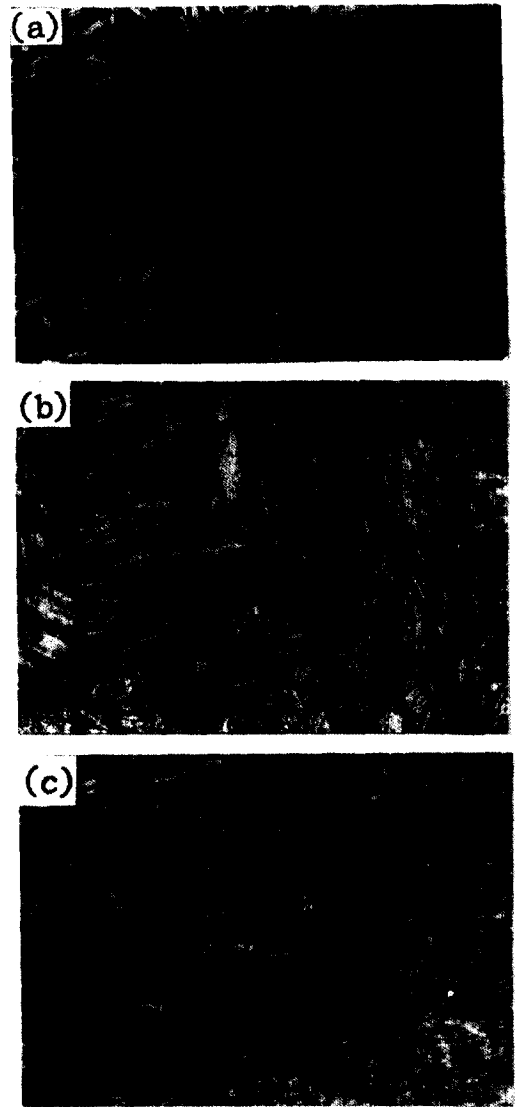
Photo. 1은 오리지날 오스테나이트(가공도 0%)와 디폼드 오스테나이트(가공도 74%)의 현미경조직을 나타낸다. (a)의 오리지날 오스테나이트는 grain size가 약  $95\mu$ 의 균일한 오스테나이트 조직이며, (b)의 가공도 74% 디폼드 오스테나이트 조직에서는 오스테나이트 grain이 압연 방향으로 길게 연신되어 있는 것을 볼 수 있다.

오리지날 오스테나이트 및 각종 가공도로 냉간압연



**Photo. 1.** Microstructures of original austenite and deformed austenite in Fe-30%Ni-0.1%C alloy.  
 (a) Original austenite  
 (b) 74% Deformed austenite

한 디폼드 오스테나이트 조직시편을 액체질소에 심냉처리(sub-zero treatment)하여 마르텐사이트로 변태시킨 처너 마르텐사이트 및 오스포움드 마르텐사이트의 현미경 조직은 photo. 2에 나타낸다. photo. 2(a)의 舊變形이 없는 처너 마르텐사이트는 뚜렷한 midrib을 가지는 전형적인 plate martensite이며, 이들 plate는



**Photo. 2.** Microstructures of virgin martensite and ausformed martensite by ausforming treatment in Fe-30%Ni-0.1%C alloy.  
 (a) Virgin martensite  
 (b) 43%      (c) 74%

서로 불규칙한 방향으로 형성되어 있고 그 크기의 분포도 매우 크다. 오스포오밍 처리시, 가공도가 증가함에 따라 martensite plate의 크기가 미세화하는 것은 일반적인 양상으로서 잘 알려진 사실이다. 본 연구에 사용된 합금에서도 가공도의 증가와 더불어 martensite plate의 미세화가 뚜렷하여 압연방향으로 연신되어 있다.

Photo. 3은 오리지날 오스테나이트를 액체 질소 중에 심냉처리하여 변태된 처너 마르텐사이트를 상온에서 각종 가공도로 냉간압연하여 마르포오밍 처리한 마르포오밍드 마르텐사이트 조직 사진이다. Photo.3(a)에 나타낸 가공도 13%의 조직에서는 조직상의 변화가 크게 나타나지 않지만 (b)의 가공도 43%에서는 midrib을 가지는 plate내에서 변형쌍정조직이 관찰되며, 연신된 martensite plate가 방향성을 가지고 가공의 방향으로 배열되어 있다. (c)의 가공도 74%에서는 심한 변형으로 인하여 martensite plate가 매우 크게 왜곡되어 있고, 또 변형쌍정이 강화에 기여함으로써 강도가 현저히 증가할 것으로 예상된다.

### 3. 2. 잔류 오스테나이트의 양

각종 가공도의 오스포오밍드 마르텐사이트 조직에 대하여 Co-K $\alpha$ 선을 사용한 X선 회절시험에 의해 얻은 (220) $\gamma$  및 (211) $\alpha$ 의 회절 peak로 부터 적분강도를 구하고 Miller<sup>4)</sup>의 식  $V\gamma = 1.4I\gamma / I\alpha + 1.4I\gamma$ 에 의하여 잔류 오스테나이트의 양을 계산하여 Table 2에 나타냈다. 여기서  $V\gamma$ 은 오스테나이트와 마르텐사이트 혼합조직에서 오스테나이트의 체적분율( $V\gamma + V\alpha = 1$ ),  $I\gamma$ 는 (220) $\gamma$  회절선의 적분강도,  $I\alpha$ 는 (211) $\alpha$  회절선의 적분강도이다.

Table 2에서 가공도가 증가할수록 잔류 오스테나이트 양이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 가공에 의하여 母相 오스테나이트의 전위밀도가 증가하여 결국 전단변태인 마르텐사이트 변태가 어렵게 되기 때문이라고 생각된다<sup>5)</sup>. 본 연구에서 마르텐사이트 결정입계에 도입된 잔류 오스테나이트는 延性基地(ductile matrix)를 형성함으로써 보다 좋은 연성을 가지는데 기여할 것으로 예상된다<sup>6)</sup>. 마르포오밍드 마르텐사이트의 잔류 오스테나이트의 양은 가공도에 따라 거의 변화가 없으므로 처너 마르텐사이트 즉, 가공도 0% 마르포오

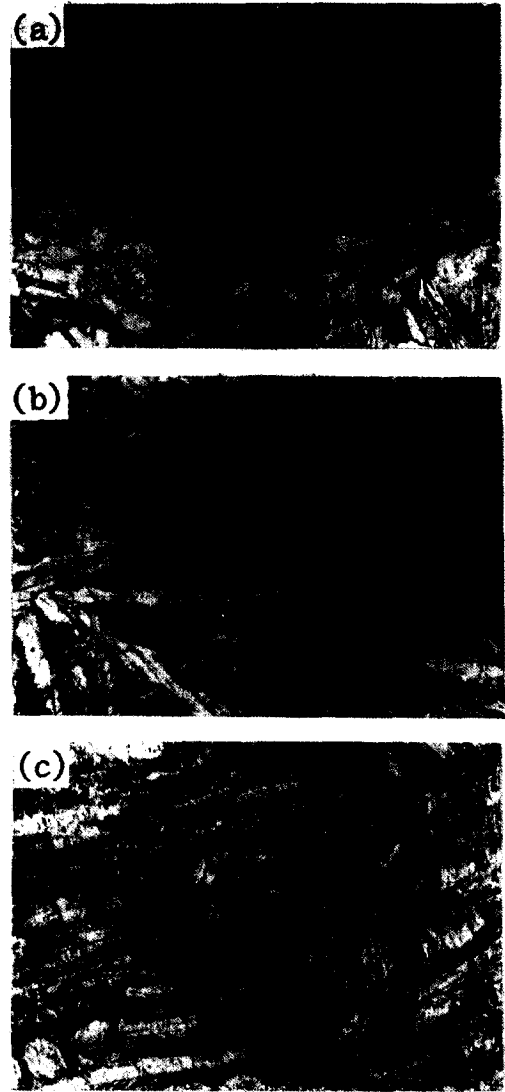


Photo. 3. Microstructures of marformed martensite by marforming treatment in Fe-30%-Ni-0.1%C alloy.  
(a) 13% (b) 43% (c) 74%

드 마르텐사이트의 잔류 오스테나이트의 양(11.5%)에 일치한다.

### 3. 3. 디폼드 오스테나이트, 오스포오밍드 마르텐사이트, 마르포오밍드 마르텐사이트의 경도 변화

디폼드 오스테나이트, 오스포오밍드 마르텐사이트, 마르포오밍드 마르텐사이트의 가공도에 따른 경도 변화를

Fig. 2에 나타낸다. 가공도에 따른 디폼드 오스테나이트의 경도변화는 가공에 의한 전위밀도의 증가로 일반적인 가공경화곡선을 나타내고 있으며, 특히 가공도 29%까지 경도의 상승이 현저하여 오리지날 오스테나이트의 경도보다 약 34%(HR<sub>B</sub>22) 증가하였고, 가공도 74%에서 약 71%(HR<sub>B</sub> 46)의 경도상승을 보이고 있다.

오스포움드 마르텐사이트의 경도변화는 디폼드 오스테나이트의 경도상승에 비하여 완만하게 증가하며, 가공도 74%에서 처녀 마르텐사이트의 경도보다 단지 약 18%(HR<sub>B</sub> 18)의 증가를 나타낸다. 특히 가공도 13~28%에서 경도의 증가가 매우 완만한 것은 가공에 의한 잔류 오스테나이트의 안정화로 인하여 다량의 잔류 오스테나이트가 존재하기 때문이라고 생각한다.

마르포움드 마르텐사이트의 가공도에 따른 경도변화는 가공도 43% 이하에서는 오스포움드 마르텐사이트의 경도상승과 비슷한 양상을 나타내나, 가공도 43% 이상에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 이것은 가공도 43% 이상에서는 상승된 전위밀도에 부가하여 변태쌍정과 변형쌍정의 교차, 변형쌍정의 상호교차로 인한 교차부의 경화 등에 기인하는 것으로 생각된다.

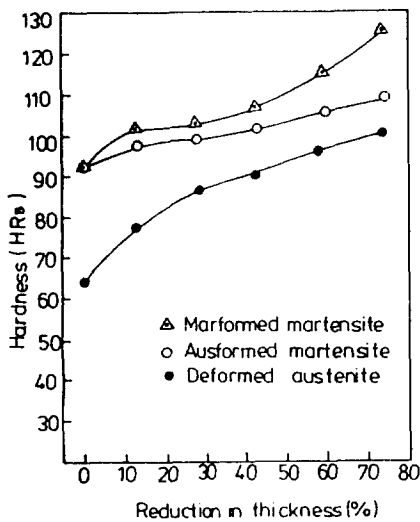


Fig. 2. Effect of deformation degrees on the hardness of deformed austenite, ausformed martensite and marformed martensite in Fe-30%Ni-0.1% C alloy.

### 3. 4. 강도와 연성

디폼드 오스테나이트, 오스포움드 마르텐사이트 및 마르포움드 마르텐사이트 조직 시편의 인장시험결과로부터 각종 가공도에 따른 항복강도 및 인장강도의 변화를 각각 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타낸다. 디폼드 오스테나이트의 항복 강도는 가공경화합금에서 널리 알려진 바와 같이 가공도에 따라 직선적으로 증가하며, 특히 가공도 13% 이하에서 강도가 급격히 상승하고 있어서 가공경화 현상이 가공의 초기에 현저하다는 것을 알 수 있다.

오스포움드 마르텐사이트의 강도는 가공도의 증가와 더불어 거의 직선적으로 증가하고 있다. 가공도는 28% 부근에서 강도의 상승이 완만한 이유는 Table 2에 나타낸 바와 같이 다량의 잔류 오스테나이트가 존재하기 때문이다. 오스포오밍에 의한 오스포움드 마르텐사이트의 강화기구중 가장 유력하다고 생각되는 강화기구는 martensite plate의 미세화, 가공 오스테나이트 중의 탄화물 석출, 오스테나이트중의 격자결함도입의 3가지로 요약할 수 있다. martensite plate의 미세화 설은 오스테나이트를 가공하면 가공도의 증가에 따라

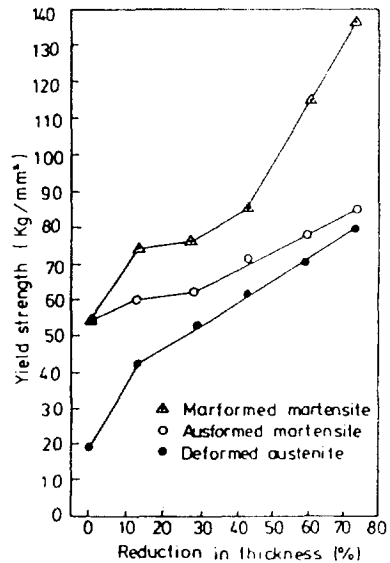
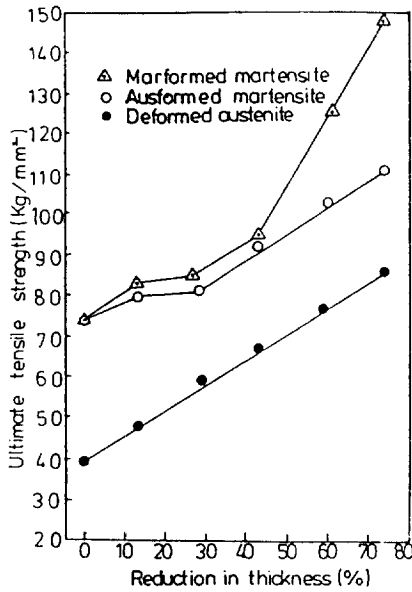


Fig. 3. Effect of deformation on the yield strength of deformed austenite, ausformed martensite and marformed martensite in Fe-30%Ni-0.1% C alloy.



**Fig. 4.** Effect of deformation degrees on the ultimate tensile strength of deformed austenite, ausformed martensite and marformed martensite in Fe-30%Ni-0.1%C alloy.

**Table 2.** Amount of retained austenite calculated from X-ray diffraction pattern.

Deformation degree (%)	0	13	28	43	60	74
Retained austenite (%)	11.5	13.0	17.5	18.7	20.2	22.9

서 변태 후에 martensite plate의 미세화가 일어나며 이것이 강화의 원인이라는 것이다<sup>7)</sup>. 본 연구에서도 photo. 2에서 보는 바와 같이 가공도가 증가함에 따라 martensite plate의 미세화가 일어나서 이것으로 오스포움드 마르텐사이트의 강화에 일부 기여하였을 것으로 생각된다. 가공 오스테나이트 중의 탄화물 석출설은 오스테나이트가 가공될 때, 예를 들어  $M_6C_{23}$ 과 같은 탄화물이 석출하고 이것이 마르텐사이트에 계승되어 전위의 이동을 방해함으로써 강도 상승을 가져온다고 생각하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 탄소 함량이 0.1wt%로 낮을 뿐만 아니라, 오스테나이트를 상온에서 가공하였기 때문에 가공중 오스테나이트 기지에 탄화물의 석출은 일어날 수 없다고 생각한다. 따라서 탄

화물 석출설은 본 연구에 사용된 합금의 오스포움드 마르텐사이트의 강화를 설명하는데 타당치 못하다. 단지 0.1wt%C의 함유로 인한 탄소의 고용 효과는 강화에 기여할 것으로 생각 된다. 오스테나이트 중의 격자 결함 도입설은 오스테나이트의 변형도중에 발생한 결함 즉 tangled 전위와 전위포, 적층결함, 점결함 등이 마르텐사이트로의 변태시 탄화물에 의한 pinning 없이도 마르텐사이트로의 계승이 쉽게 이루어진다는 것이다<sup>8)</sup>. 본 연구에서도 오스테나이트의 냉간가공시 발생한 여러가지 결함이 마르텐사이트로 도입되어 오스포움드 마르텐사이트의 강도상승에 크게 기여하였을 것으로 생각된다.

마르포움드 마르텐사이트의 강도는 가공도 13~43%에서는 전체적인 강도증가에 비하여 그 증가가 완만하지만 가공도 43% 이상에서 현저히 상승한다.

상온에서 치너 마르텐사이트를 가공하면 가공도의 증가에 따라 마르포움드 마르텐사이트의 강도가 상승하는데, 이것은 일반적인 가공경화합금의 냉간가공에 의한 가공경화 현상과 비슷하다. Kanji ono 및 Koppenall<sup>11)</sup>에 의해 주장된 전위밀도 증가에 의한 강화설은 마르텐사이트를 가공하면 전위밀도가 증가하여 강화된다는 것이다. 이때 전위밀도는 10%의 가공도에서  $10^{11}/cm^2$ 이고, 50% 가공에 의하여  $10^{12}/cm^2$  정도의 전위밀도로 되어 포화치에 도달하며, 80% 가공도에서는 그 이상의 증가가 없다고 하였다. 田村今男<sup>9)</sup> 등의 쌍정균교차설에 의하면 변태쌍정이 존재하는 마르텐사이트로 인하여 그만큼 쌍정경계가 증가하며, 쌍정이 상호 충돌할 경우, 이 쌍정이 교차할 수 있는 경우와 교차할 수 없는 경우가 있다. 교차할 수 있는 경우는 이 교차부에 多重雙晶(multiple twin)을 일으켜서 상당히 많은 응력을 집중시키고, 또 교차할 수 없는 경우에는 이 교차부에서 그 이상의 변형이 불가능한 것을 의미하며 그 부분에 강력한 응력이 작용하는 것이다. 그러므로 이와 같은 교차부는 결정적인 변형의 장애가 된다고 하였다. Bevis 및 Rowland<sup>10)</sup>에 의한 martensite plate의 미세화설은 가공으로 인하여 martensite plate가 미세화되며 이것이 강화의 원인이라고 하였으나, 본 연구에 의하면 상온가공으로 인하여 스립과 왜곡은 일어나나 marformed martensite plate의 미세화는 일어나지 않았으므로 martensite plate의 미세화설은 타당치 못하다.

결국, 본 연구에 있어서 마르포옴드 마르텐사이트의 강도증가는 가공도 43% 이하에서는 주로 전위밀도 증가에 의한 가공경화 현상으로 강도가 증가하며, 가공도 40% 정도에서 전위밀도는 거의 포화치에 도달한다고 생각된다. 또한 가공도 43% 이상에서의 급격한 강도상승은 이미 상승된 전위밀도에 부가하여 전위의 상호작용, martensite plate의 왜곡 및 쌍정균의 교차 등 복합적인 인자에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 디폼드 오스테나이트, 오스포옴드 마르텐사이트 및 마르포옴드 마르텐사이트의 가공도에 따른 연신율의 변화이다. 디폼드 오스테나이트의 연신율은 가공도의 증가에 따른 강도의 상승과는 반대로 가공도의 증가와 더불어 약 5.5%까지 현저하게 감소하고, 오스포옴드 마르텐사이트의 연신율은 가공도의 증가에 따른 강도상승에도 불구하고 약 7% 정도로 일정하여 가공도 45% 이상에서는 디폼드 오스테나이트의 연신율보다 오히려 더 크다. 이와 같은 현상은 잔류 오스테나이트의 연성기저 형성에 기인하는 것으로 생각할 수 있으나, 友田陽<sup>12)</sup> 등은 가공한 오스테나이트를 마르텐사이트로 변태시킴으로써 슬립이 용이한 새로운 슬립계의 발생 및 전단변태의 우선 방향의 존재 등이 연성파괴를 지배하는 void의 발생 및 성장에 어떠한 영향을 미치게 되며, 이로 인하여 오스포옴드 마르텐사

이트의 연성이 저하하지 않을 수 있다고 제안한 바 있다. 마르포옴드 마르텐사이트의 연신율은 오스포옴드 마르텐사이트의 연신율보다 약간 낮지만, 현저한 강도 증가에도 불구하고 8%에서 5%까지 매우 미소하게 저하하면서 일정치에 이른다.

이상의 결과로부터 주목하여야 할 점은 오스포옴드 마르텐사이트와 마르포옴드 마르텐사이트는 똑같이 가공도에 따른 강도의 상승에도 불구하고 연성이 일정치 이하로 감소하지 않으며, 특히 마르포옴드 마르텐사이트의 경우가 오스포옴드 마르텐사이트보다 연성은 1~2% 적지만 강도의 상승이 월등하다는 것이다.

## 5. 결 론

Fe-30%Ni-0.1% C 합금에 있어서 오스포옴드 마르텐사이트와 마르포옴드 마르텐사이트의 현미경조직 관찰, 잔류 오스테나이트, 경도, 강도 및 연성을 측정하여 상호 비교한 결과는 다음과 같다.

1) 오스포옴드 마르텐사이트의 강도는 마르텐사이트 변태시 오스테나이트로부터의 격자결합의 도입, martensite plate의 미세화에 의하여 상승되었으며, 오스포옴드 마르텐사이트의 연성은 가공도에 따라 증가된 잔류 오스테나이트의 연성기저 형성에 의하여 강도 상승에 불구하고 7~8%로 거의 일정하다.

2) 마르포옴드 마르텐사이트의 강도는 가공에 의한 전위밀도 상승에 의하여 증가하며, 특히 변태쌍정과 변형쌍정의 교차, 변형쌍정의 상호교차로 인한 교차부의 강화로 인하여 강도가 급격히 상승한다. 마르포옴드 마르텐사이트의 연성은 가공에 따른 현저한 강도 상승에도 불구하고 5~6%로 거의 일정하다.

3) 마르포옴드 마르텐사이트의 연성은 오스포옴드 마르텐사이트의 연성보다 1~2% 정도 낮지만 강도는 오스포옴드 마르텐사이트보다 현저히 높다. 따라서 Fe-30%Ni-0.1% C 합금에 대한 기계적 성질의 개선은 오스포옴처리보다는 마르포옴 처리에 의한 강화방법을 채택함이 바람직하다.

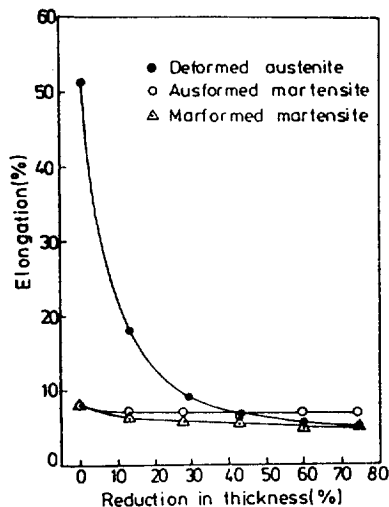


Fig. 5. Effect of deformation degrees on the elongation of deformed austenite, ausformed martensite and marformed martensite in Fe-30%Ni-0.1% C alloy.

## 참고문헌

1. R. F. Harvey : Iron Age. 168(1951) Dec. 27, P20.

2. D. J. Schmatz and V. F. Zackay : Trans. ASM, Vol. 51(1959), P229.
3. 五弓勇雄, 木原諄二, 岸輝雄 : 日本金屬學會誌 (1967), 第31卷, P1176.
4. R. L. Miller : Trans. ASM, Vol. 57(1964), P892.
5. 崔鍾述, 朱珽菟, 大韓金屬學會誌, 第17卷 第2號, 1979. 4, P121.
6. Sun-Keun Hwang, Sun-Gho Jin and J. W. Morris : Met. trans. A., Vol. 6A(1975), P2015.
7. D. J. Schmatz and V. F. Zackay : Trans. ASM, Vol. 52(1960), P346.
8. T. Maki and C. M. Wayman : Met. Trans. A., Vol. 7A(1976), P1511.
9. 田村令男, 吉村博文, 岩崎宜博, 茨本正雄 : 日本金屬學會誌, 28 (1964), P820.
10. M. Bevis, P. C. Rowland and A. F. Acton : Trans. Met., Soc AIME, Vol. 242(1968), P1555.
11. Kanji ono and T. J. Koppenall : Met. Trans., Vol. 5(1974), P739.
12. 友田陽, 田名部菊次郎, 黒木 剛司郎, 田村令男 : 日本金屬學會誌(1977), 第41卷, P313.