

고장력 냉연강판에서 미세조직에 대한 연속어닐링조건의 영향

정 우 창[†]

대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Effects of Continuous Annealing Parameters on Microstructures in a Cold-Rolled High Strength Steel

Woo Chang Jeong[†]

School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea

Abstract The effect of the annealing parameters on microstructures were examined in a cold-rolled high strength steel containing 0.1% C, 0.5% Si, 1.5% Mn, and 0.04% Nb. It was impossible to avoid martensite in the microstructure even though the continuous annealing parameters were controlled. This indicates that the alloying elements such as silicon and manganese contributing to manganese equivalent (Mn_{eq}) should be reduced to produce the ferrite-pearlite microstructure for the solid solution and precipitation hardened steel. It was found that a decrease in the rapid cooling temperature to 520°C was effective to change the microstructure from ferrite-martensite to ferrite-pearlite-martensite. Typical dual-phase properties exhibiting a low yield ratio and a continuous yielding behavior were obtained when the rapid cooling temperature was in the range of 680°C to 600°C. The critical volume fraction of martensite for the typical properties of dual-phase steel was about 11 percent.

(Received 28 May 2004; accepted 30 July 2004)

Key words: Cold-rolled sheet steel, High strength steel, Dual-phase steel, Precipitation hardened steel, Solid-solution hardened steel, Ferrite-martensite structure

1. 서 론

자동차 차체의 내·외판용에는 성형성이 우수한 인장강도 300~400 N/mm²급 냉연강판을 사용하고 있으며, 프런트 사이드 멤버 등 멤버류에는 440 N/mm² 이상, 범퍼보강재 등에는 590 N/mm² 이상, 도아보강재 등에는 780 N/mm² 이상의 고장력 냉연강판을 사용하고 있으나 자동차 경량화를 위해 꾸준히 고강도화되고 있다¹⁻⁵⁾. 최근에는 멤버류나 범퍼보강재, 도아보강재 등에 인장강도 1,200 N/mm²급의 초고장력 냉연강판을 적용하기도 한다⁶⁾. 성형성이 우수한 냉연강판은 0.003% 정도의 탄소를 함유하는 극저탄소강에 P, Mn 등의 합금원소를 첨가하여 강도를 높이고 Ti나 Nb 등의 탄화물형성원소를 첨가하여 성형성을 향상시킨다. 반면 자동차 보강재용 고장력 냉연강판은 프레스 성형성 보다는 강도의 향상에 중점을 두어 합금설계를 한다. 자동차의 보강재로 사용되고 있는 강판은 가공성이 크게 요구되지 않는 반면

충돌시 충격에너지를 흡수해야 하므로 내충격성이 요구된다. 일반적으로 충격강도는 판의 두께 및 항복강도의 함수로서 표시할 수 있다⁷⁾. 그러므로 내충격성이 요구되는 보강재용 재료는 항복강도가 높은 고품복비형 냉연강판이 적합하다.

보강재용 고장력 냉연강판을 제조하는 방법으로는 0.1% 내외의 저탄소강에 Si, Mn, P 등의 고용강화원소를 첨가하여 강화시키는 고용강화법^{8,9)}, 고용강화와 유사한 합금성분계에 Nb, Ti 등 강한 탄질화물 형성원소를 첨가시켜 미세 석출물의 석출강화를 이용하여 강도를 증가시킨 석출강화법^{8,9)}, 오스테나이트와 페라이트가 공존하는 2상 영역까지 가열한 후 급냉 함으로써 경질의 마르텐사이트를 다량 함유시켜 강화하는 복합조직(dual-phase)강화법, 냉간압연 후 회복현상이 발생하는 온도구간에서 열처리하여 고강도를 얻는 회복어닐링강화법^{10,11)} 등을 들 수 있다.

석출강화강은 강한 탄·질화물 형성원소인 Nb이나 Ti 등을 첨가하여 석출물을 석출시켜 강화시킨 강

[†]E-mail : wcjeong@mail.cu.ac.kr

로서 인장강도와 항복강도의 비로서 표시되는 항복비 (yield ratio)가 높은 특성을 가지고 있다. 고용강화나 석출강화형 고장력 냉연강판은 초기에는 배치어닐링(batch annealing) 방식을 이용하여 제조하였으나, 연속어닐링(continuous annealing) 기술의 발달에 힘입어 최근에는 대부분 연속어닐링방법을 적용하고 있다. 배치 어닐링법은 장시간 어닐링으로 인해 페라이트의 결정립성장은 물론 석출물의 조대화에 의해 강도를 증가시키기 어려운 문제점이 있는 반면 연속 어닐링법은 어닐링시간이 짧기 때문에 페라이트의 결정립 성장이 어렵고 석출물의 크기도 미세하게 조절할 수 있어 배치어닐링에 비해 합금원소량을 줄일 수 있으며 또한 재질을 균일하게 할 수 있다는 장점이 있다.

고용강화강이나 석출강화강은 0.1% 내외의 탄소와 경화능 향상원소인 Mn이나 Si 등이 다량으로 첨가되며, 얻어지는 조직은 페라이트와 퍼얼라이트의 혼합조직이다. 그러나 Mn이나 Si 등의 원소 첨가량이 많아지면 페라이트와 퍼얼라이트 조직에 마르텐사이트가 혼입되게 되므로 고용강화강이나 석출강화강의 특성이 달라지게 된다. 페라이트와 마르텐사이트로 구성되는 복합조직강(dual-phase steel)은 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태할 때 부피팽창에 의해 가동 전위(mobile dislocation)가 생성되므로 연속항복 거동을 나타내며 고용강화강이나 석출강화강에 비해 연성이 우수하고 항복비가 낮아 장출성형이 요구되는 다소 복잡한 형상의 자동차부품의 제조에 적절하다.

형상이 단순한 범퍼보강재는 성형성 보다는 내충격성이 요구되므로 항복강도가 높은 고향복비형 냉연강판이 적합하지만, Mn이나 Si 등의 합금원소 첨가량이 과다하면 마르텐사이트가 생성되어 항복비를 낮추기 때문에 내 충격성이 감소되게 된다. 따라서 Mn이나 Si같은 합금원소를 적절하게 첨가하여 페라이트와 마르텐사이트의 복합조직강이 제조되는 것을 피하고 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되는 혼합조직강을 제조하는 것이 부품특성을 향상시키면서 제조원가를 줄일 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 국산 승용

차의 범퍼보강재용 소재로 널리 사용 중인 0.1% 내외의 저탄소 Al-Killed강에 Mn과 Si를 각각 1.5%와 0.5% 첨가하고 석출경화를 위해 Nb를 0.04% 첨가한 강을 대상으로 미세조직의 형성에 미치는 어닐링조건에 영향을 조사하여 조직 내에 마르텐사이트가 생성될 수 있는 조건과 생성기구에 대해 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

시료강은 진공유도용해로에서 20 kg 용량의 마그네시아 도가니를 사용하여 용해하였다. 용해 소재는 전해철과 Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Nb 등의 합금철을 사용하였으며, 탈산을 위해 Al을 첨가하였다. Table 1에 습식분석 및 C, S 동시 분석기로 분석한 시료강의 화학조성 및 Andrews의 실험식¹²⁾에서 부터 구한 시료강의 A_1 , A_3 온도를 나타내었다.

용해·주조된 강괴는 주조조직을 파괴하기 위하여 두께 20 mm, 폭 180 mm, 길이 600 mm의 슬라브로 열간단조한 후 열간압연에 적당한 크기인 100 mm 길이로 절단하였다. 슬라브는 1250°C의 오스테나이트 단상영역에서 1시간 동안 가열하여 균질화 시킨후, 3회의 열간압연에 의해 2.5 mm 두께의 열연판으로 제조하였다. 마무리 열간압연온도는 900°C로 고정시켰으며, 열간압연 후 공냉하다가 620°C에 유지된 박스로에 장입하여 1시간 동안 유지시킨 후 로냉 하여 열연판의 코일링(coiling)을 재현하였다. 열간압연이 완료된 판은 표면의 스케일을 제거한 후 실험용 냉간압연기에서 압하율 55%로 1.2 mm의 두께까지 냉간압연하였다.

2.2 인장시험 및 열처리시험

냉간압연된 판재로부터 ASTM E23에 준한 subsizes(gauge length: 25 mm) 인장 시험편으로 가공한 후 인장시험은 Instron사의 만능인장시험기(Model 6025)를 사용하여 5 mm/min의 크로스헤드

Table 1. Chemical compositions of steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	N	Nb	A_1 (°C)	A_3 (°C)
0.098	0.53	1.49	0.02	0.006	0.051	0.006	0.039	722	860

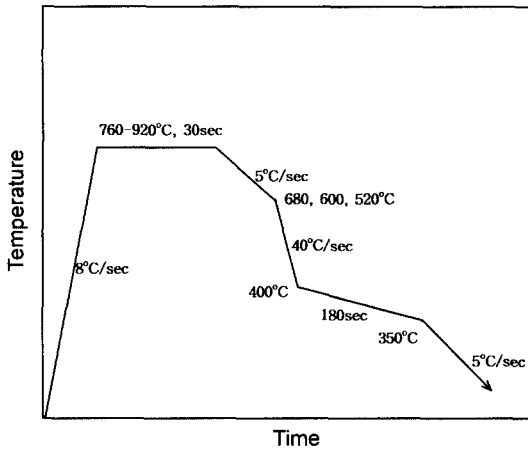


Fig. 1. Schematic representation of the annealing cycles.

이동속도로 시험하였으며, 압연방향과 인장시편의 장축이 일치하도록 하였다. 모든 인장시험은 연속어닐링한 후 조절압연을 하지 않고 열처리한 상태에서 행하였다.

시료의 열처리는 적외선 순간가열 방식의 연속어닐링재현시험기(일본 ULVAC사, 모델 CCT-Y8)를 사용하였다. 연속어닐링 사이클은 자동차용 고장력 냉연강판의 열처리에 사용하는 전형적인 사이클로서 8°C/sec로 가열, 760°C~920°C의 가열온도에서 30초간 유지, 680°C~520°C의 급냉개시온도까지 5°C/sec로 서냉, 40°C/sec로 400°C까지 급냉, 400°C~350°C까지 180초 동안 서냉한 후 최종 냉각하는 사이클로 구성된다. Fig. 1에 열처리 사이클을 도시하였다. 어닐링온도와 급냉개시온도의 효과를 조사하기 위해 어닐링온도를 760°C에서 920°C까지, 급냉개시온도를 680°C, 600°C 및 520°C로 각각 변화시켰다.

2.3 미세조직관찰

시료의 미세조직을 조사하기 위하여 압연방향으로 절단한 단면을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 부식액은 나이탈과 LePera 에칭액^{13, 14)}을 사용하였다. 나이탈에 부식할 때 페라이트는 연한 회색, 퍼얼라이트는 검은 색, 마르텐사이트는 진한 회색으로 관찰되며, LePera 부식액(1% Na₂S₂O₄ : 4% Picral = 1 : 1)에서는 페라이트가 회색, 마르텐사이트가 흰색, 퍼얼라이트는 검은 색으로 관찰된다. 어닐링판에 존재하는 마르텐사이트의 상 분율은 영상분석기

(Leitz사, 모델 TAS plus)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 어닐링온도에 따른 기계적성질과 미세조직 변화

Fig. 2에 급냉개시온도가 680°C인 경우 어닐링온도에 따른 기계적성질의 변화를 나타내었으며, 열연판 및 냉연판의 기계적성질도 함께 나타내었다. 열연판은 640 MPa의 인장강도와 560 MPa의 항복강도, 88%의 고풍복비를 나타내어 고풍강화 및 석출강화강에서 얻어지는 전형적인 기계적성질을 보여주었다. 어닐링온도가 증가하면 강도가 감소하고 연신율이 증가하는 연화현상을 나타내었으나 인장강도보다 항복강도의 감소 폭이 커서 항복비가 현저하게 감소하였다. 760~840°C에서 어닐링한 경우 2% 이상의 항복점연신율을 나타내었으나 880~920°C에서 어닐링한 경우에는 항복점연신율이 없는 연속항복거동을 나타내었다. 어닐링온도에 따른 기계적 성질의 변화를 이해하기 위해 광학 현미경으로 미세조직을 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 왼쪽은 나이탈에 부식한 것이고 오른쪽은 LePera 부

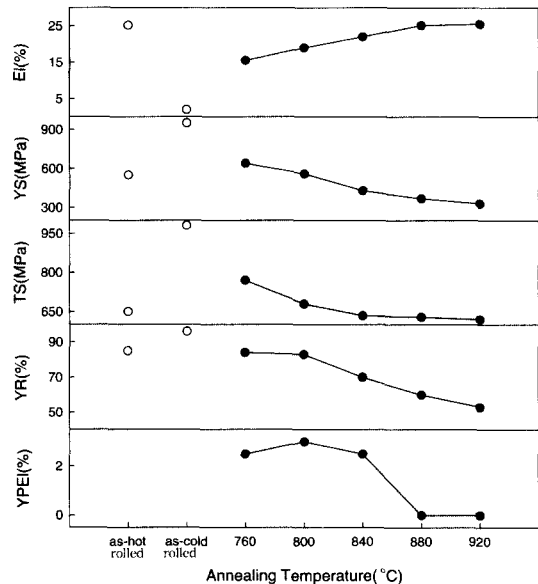


Fig. 2. Effect of annealing temperature on mechanical properties of a continuously annealed steel sheet. Rapid cooling temperature : 680°C.

Fig. 3. Optical micrographs showing the effect of annealing temperature on the microstructure. (a) and (b) 760°C, (c) and (d) 800°C, (e) and (f) 840°C, (g) and (h) 880°C, and (i) and (j) 920°C. Rapid cooling temperature : 680°C.

식액에 부식한 것이다.

760°C 어닐링재에서는 재결정이 완료된 페라이트의 결정립은 드물게 관찰되고 페라이트 결정립이 길게 연신된 형태로 냉간압연의 변형 흔적을 보여주었으며, 매우 미세한 크기의 마르텐사이트와 퍼얼라이트가 압연방향으로 줄지어 형성되어 있었다. 가열온도가 800°C로 증가하면 페라이트의 재결정이 현저하게 진행되었으나, 결정립의 크기가 미세하고 조대한 것이 흔재되어 존재하였다. 마르텐사이트는 양이 증가하고 동시에 크기도 조대하게 되었으나 압연방향을 따라 일렬로 배열되어 성장함을 알 수 있다. 마르텐사이트에 인접해서 검은 색으로 관찰되는 미세한 크기의 퍼얼라이트가 여전히 관찰되었다. 가열온도가 840°C로 증가하면 800°C 가열재에 비해 페라이트 결정립이 현저히 성장하였으나 조대한 결정립과 미세한 결정립이 함께 존재하였다. 어닐링온도가 880°C 이상으로 증가하면 페라이트 결정립이 균일하면서 현저하게 조대화 되었으며, 퍼얼라이트의 양이 감소함과 동시에 마르텐사이트도 크기가 조대화되고 양도 증가한 것을 알 수 있다. 880°C 이상의 고온 가열재에서는 마르텐사이트의 양이 증가하고 크기가 커졌으며 고온 어닐링 후에도 여전히 압연 방향을 따라 banded 조직이 관찰되고 있음을 알 수 있다. 이러한 banded 조직은 합금성분중 Mn 함량이 높은 경우, 응고시 Mn이 주상정 조직사이에 편석한 것에 기인한다. Banded 조직은 먼저 열연판에 나타나며, 열연판에 퍼얼라이트가 압연방향을 따라 형성된 후 냉간압연을 거쳐 2 상영역에서 가열하는 동안 퍼얼라이트가 용해된 자리에 오스테나이트가 생성되고 성장되었기 때문이다. 이러한 banded 조직은 강판의 재질에 좋지 않은 영향을 주기 때문에 적극 억제되어야 한다.

어닐링후의 조직 내에 퍼얼라이트와 마르텐사이트가 존재하는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 페라이트와 오스테나이트의 2 상영역이나 오스테나이트 단상영역에서 가열 하는 동안 퍼얼라이트가 완전히 용해된 후 생성된 오스테나이트가 급냉개시온도인 680°C까지 5°C/sec로 냉각하는 동안 페라이트로 변태되게 되며 공석 변태온도 이하에서는 일부 퍼얼라이트가 생성되게 된다. 그러나 급냉개시온도가 680°C로 상대적으로 고온이기 때문에 생성되는 퍼얼라이트의 양은 많지 않게 된다. 680°C까지 페라이트

나 퍼얼라이트로 변태되지 않고 남아있던 오스테나이트는 40°C/sec로 급속냉각되는 동안 마르텐사이트로 변태하게 된다. 그러나 어닐링온도가 760°C로 낮은 경우는 어닐링시간이 짧기 때문에 냉연판에 존재하던 퍼얼라이트가 오스테나이트로 완전히 역변태 되지 못하고 퍼얼라이트로 일부 잔존할 수 있다고 판단된다.

어닐링온도에 따른 미세조직 변화로부터 어닐링온도에 따른 기계적성질의 변화를 설명할 수 있다. 760°C 가열재는 가열온도가 낮아 일부 미재결정된 페라이트 결정립이 존재하여 강도가 높고 연신율이 다소 낮은 것으로 판단된다. 800°C와 840°C로 가열온도가 증가하면 재결정 페라이트 결정립의 수가 현저하게 증가하므로 강도가 크게 감소하고 연신율이 증가하게 된다. 가열온도가 840°C 이하로 낮은 경우에는 마르텐사이트가 일부 관찰되지만 양이 적기 때문에 항복비가 낮고 연속항복거동을 나타내는 복합조직강의 특성을 나타내지 못하고 페라이트와 퍼얼라이트 조직에 전형적인 높은 항복비, 불연속 항복거동등 고용·석출강화강의 특성을 나타내게 된다. 880°C와 920°C에서는 마르텐사이트의 양과 크기가 증가한 것에 따른 강도 상승보다는 페라이트 결정립이 균일하고 현저히 조대하여 얻어지는 강도 저하효과가 커서 전체적으로 약간 강도가 낮아 진 것으로 판단된다.

가열온도가 880°C 이상이 되면 항복점연신이 없는 연속항복거동을 나타내고 50~60%의 낮은 항복비를 나타내었다. 이러한 양상은 페라이트와 마르텐사이트로 구성되는 복합조직강 고유의 특성에 해당되는 것이다. 복합조직강의 항복강도가 낮고 항복점연신율이 나타나지 않는 것은 페라이트와 마르텐사이트의 계면에 인접한 페라이트 영역에 가동전위가 존재하기 때문이며, 페라이트는 인접한 마르텐사이트에 의해 구속되어 가공경화율이 증가하고 균일연신율도 높아지게 된다. 반면, 가열온도가 760°C~840°C에서는 약 2% 정도의 항복점연신율을 나타내었다. 이것은 조직이 페라이트와 퍼얼라이트 및 마르텐사이트로 구성되지만 마르텐사이트의 양이 복합조직강의 고유 특성을 만족시킬 만큼 많지 않기 때문에 페라이트와 퍼얼라이트의 조직에 영향을 받기 때문이다.

한편 어닐링온도에 따른 항복비의 변화를 보면 마르텐사이트의 양이 적고 페라이트의 재결정이 완전하게 일어나지 않은 온도인 760°C와 800°C에서는 80% 이

Table 2. Critical cooling rate for the typical properties of dual-phase steel and calculated Mn equivalent

Reference No.	Mn _{eq} (wt.%)	Calculated Mn _{eq} (wt.%)	Critical Cooling Rate (CR), (°C/sec)
15)	Mn+0.45Si+1.15Cr+2P	1.767	Log(CR) ≥ 5.36-2.36Mn _{eq}
16)	Mn+1.3Cr+2.67Mo	1.500	Log(CR) ≥ 3.95-1.73Mn _{eq}

상의 높은 항복비를 나타낸 반면 마르텐사이트의 양이 증가하는 840°C 이상으로 가열 온도가 증가하면 항복비가 약 50%까지 급격하게 감소하였다.

이상의 결과로부터 급냉개시온도를 680°C로 하는 경우 페라이트의 재결정이 완료되고 동시에 항복비가 높은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되는 조직을 얻는 것이 불가능함을 알 수 있었다. 가열온도가 840°C 이하에서는 페라이트, 퍼얼라이트 및 마르텐사이트로 구성되는 조직을 얻을 수 있으나 마르텐사이트가 존재하였고 또 균일하고 재결정이 완료된 페라이트 결정립을 얻을 수 없어 연신율이 낮아지는 문제가 있었다. 반면에 가열온도가 880°C 이상으로 증가하면 일부 퍼얼라이트가 존재하지만 주로 페라이트와 마르텐사이트의 복합조직으로 되어 항복비가 낮아 졌다.

Table 2에 武智弘¹⁵⁾과 橋口 등¹⁶⁾이 제시한 Mn 당량(Mn_{eq})식과 복합조직강의 특성을 얻기 위한 필요한 최소 냉각속도인 임계냉각속도식, 그리고 본 연구에 사용한 시료강에 대해 계산된 Mn 당량값을 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이 본 연구에 사용된 시료강의 Mn 당량은 武智弘¹⁵⁾이 제안한 식으로 계산하면 1.767, 橋口 등¹⁶⁾이 제안한 식으로 계산하면 1.50으로서 자동차용 강판의 연속어닐링(continuous annealing)에 사용되는 냉각속도인 20~50°C/sec에 대해 武智弘¹⁵⁾식과 橋口¹⁶⁾식으로 계산한 Mn 당량값인 1.55~1.67과 1.3~1.48 보다 높았다. 따라서 본 연구에서 사용한 시료강은 Mn 당량이 다소 높게 설계되어 있어 조직 내에 마르텐사이트가 불가피하게 생성된다고 판단된다.

이상에서 언급한 바와 같이 본 연구에 사용한 강은 Mn 당량 항상 원소인 Mn이나 Si 함량이 높아 고온 어닐링시 페라이트와 마르텐사이트로 구성되는 복합조직강의 특성을 나타내고, 또한 불균일한 banded 조직이 발생하는 등의 문제가 발생되므로 Mn이나 Si양이 보다 낮은 합금성분계를 사용하든지

아니면 연속어닐링조건을 바꾸어 주어야 한다.

3.2 급냉개시온도에 따른 미세조직 변화

어닐링조건에 따른 미세조직 변화를 통해 항복비가 높은 페라이트와 퍼얼라이트의 조직을 얻을 수 있는지 조사하기 위해 급냉개시온도가 미세조직에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 4와 5는 급냉개시온도를 600°C와 520°C로 낮추어 어닐링온도에 따른 미세조직 변화를 광학현미경으로 관찰한 것이다.

급냉개시온도가 600°C인 경우 어닐링온도에 따른 미세조직변화는 Fig. 3에 나타난 680°C 급냉개시온도재의 어닐링온도에 따른 미세조직변화가 거의 일치하였다. 이 결과는 760~920°C에서 가열한 후 600°C까지 5°C/sec로 서냉하는 구간에서 오스테나이트가 공석변태 하는 양이 680°C까지 냉각한 경우와 큰 차이가 없음을 의미한다. 반면에 급냉개시온도가 520°C로 낮아지면 어닐링온도에 따른 미세조직의 변화가 680°C나 600°C 급냉개시온도재에 비해 큰 차이를 나타내었다. 모든 어닐링온도에서 680°C나 600°C 급냉개시온도재에 비해 존재하는 마르텐사이트의 양이 현저하게 감소하였으며 대신 퍼얼라이트의 양이 증가하였다. 이것은 급냉개시온도가 520°C로 낮아지면 공석변태를 일으킬 시간적 여유가 많아지기 때문이다.

Fig. 6은 680°C, 600°C 및 520°C의 급냉개시온도재에 대해 어닐링온도에 따른 마르텐사이트의 양을 영상분석기로 측정된 결과이다. LePera 부식액으로 부식시키면 마르텐사이트가 흰색으로 선명하게 부식되기 때문에 영상분석기를 이용하여 마르텐사이트의 부피 분율을 측정할 수 있었다. 급냉개시온도가 600°C와 680°C인 경우에는 모든 어닐링온도에 걸쳐 마르텐사이트의 부피 분율에 별 차이를 나타내지 않았다. 그러나 급냉개시온도가 520°C로 낮아지면 마르텐사이트의 부피분율이 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 한편 어닐링온도에 따른 페라이트의 재결정과정이나 페라이트 결정립의 성장 과정, banded 조직

Fig. 4. Optical micrographs showing the effect of annealing temperature on the microstructure. (a) and (b) 760°C, (c) and (d) 800°C, (e) and (f) 840°C, (g) and (h) 880°C, and (i) and (j) 920°C. Rapid cooling temperature : 600°C.

Fig. 5. Optical micrographs showing the effect of annealing temperature on the microstructure. (a) and (b) 760°C, (c) and (d) 800°C, (e) and (f) 840°C, (g) and (h) 880°C, and (i) and (j) 920°C. Rapid cooling temperature : 520°C.

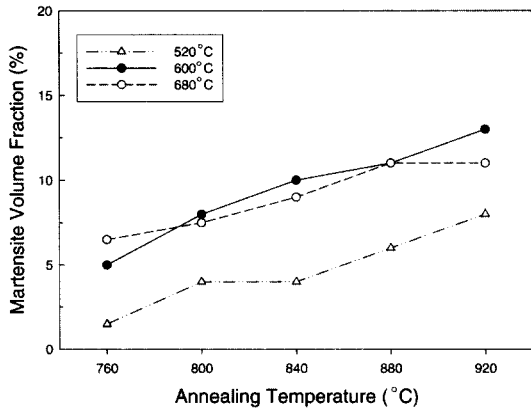


Fig. 6. Dependence of martensite volume fraction on annealing temperature and rapid cooling temperature.

양상 등은 급냉개시온도의 영향을 받지 않았다.

3.3 급냉개시온도에 따른 기계적성질 변화

Fig. 7에 어닐링온도에 따른 기계적성질의 변화를

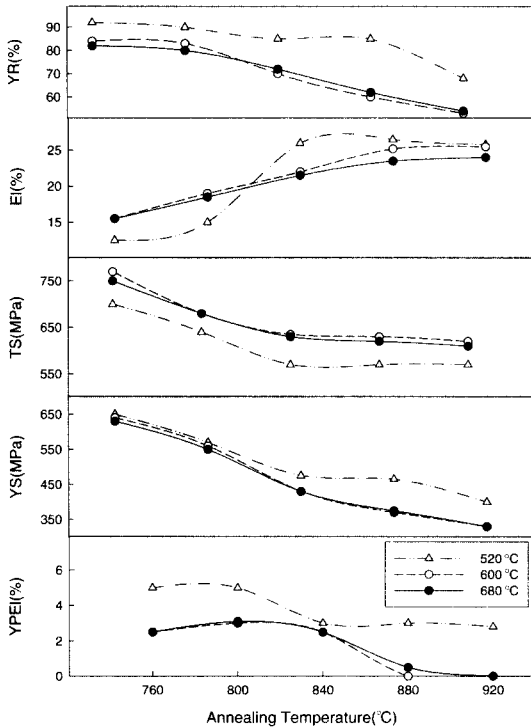


Fig. 7. Effect of annealing temperature and rapid cooling temperature on mechanical properties of a continuously annealed steel sheet.

680°C, 600°C 및 520°C의 세 가지 급냉개시온도에 대해 함께 나타내었다.

급냉개시온도가 680°C와 600°C인 경우 어닐링온도에 따른 기계적성질 변화는 거의 같은 양상을 나타내어 어닐링온도에 따른 미세조직의 변화 결과와 잘 일치하고 있다. 반면 520°C에서 급냉을 개시한 시료는 680°C와 600°C 급냉개시재에 비해 모든 어닐링온도에서 항복강도가 높고 인장강도가 낮아 항복비가 높았으며 연신율이 높았다. 이 결과는 미세조직으로 부터 잘 설명될 수 있다. Fig. 6으로 부터 급냉 개시온도가 680°C와 600°C인 경우에 비해 520°C로 낮아지면 마르텐사이트의 부피분율이 현저하게 감소됨을 알 수 있으며, 이 결과 인장강도가 감소하게 된다. 또한 520°C의 급냉개시온도에서 항복강도가 증가하고 항복점연신율이 나타나는 것은 마르텐사이트의 부피 분율이 복합조직강의 특성을 나타내기 위해 필요한 양보다 적고 대신 퍼얼라이트의 양이 증가했기 때문이다. 680°C와 600°C 급냉개시재에서도 복합조직강의 특성을 나타내는 최소 마르텐사이트 양보다 적은 840°C 이하의 가열온도에서 불연속항복거동을 나타낸 반면 마르텐사이트의 양이 증가한 880°C 이상이 되면 연속항복거동을 나타내었다.

이상의 결과로부터 연속항복거동과 낮은 항복비 등 전형적인 복합조직강의 특성을 나타내기 위해 필요한 최소 마르텐사이트의 양은 약 11% 정도로 판단된다.

4. 결 론

0.1% C-0.5% Si-1.5% Mn-0.04% Nb를 함유하는 Al-killed강을 대상으로 미세조직의 형성에 미치는 어닐링조건의 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 미세조직이 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되고 항복비가 높은 고용 및 석출경화강을 제조하기 위해서는 Mn 당량에 기여하는 원소인 Mn이나 Si 첨가량을 줄이거나 어닐링 조건중 급냉개시온도를 낮추어 주어야 한다.

2. 급냉개시온도를 680°C와 600°C로 한 경우 항복비가 낮고 연속항복거동을 나타내는 복합조직강이 얻어졌다.

3. 연속어닐링조건중 급냉개시온도를 520°C로 낮추어 주면 마르텐사이트의 생성을 억제하고 대신 퍼얼라이트의 양을 증가시켜 항복비가 증가하였으나 마르텐사이트의 생성을 완전히 억제하는 것은 불가능하였다.
4. 연속항복거동과 낮은 항복비를 나타내는 복합조 직강 고유의 특성을 나타내기 위해 필요한 최소 마르텐사이트의 양은 약 11%이었다.

참고문헌

1. 박성호, 김재성, 한수식, 자동차 경량화를 위한 소재 및 가공기술, 제 12회 철강기술심포지엄 논문집, 대한금속재료학회, (2003) 11.
2. 고팡문, 노재홍, 정경훈, 유기준, 자동차 경량화를 위한 소재 및 가공기술, 제 12회 철강기술심포지엄 논문집, 대한금속재료학회, (2003) 81.
3. 최병조, 전현철, 진광근, 차체 경량화 기술의 현재와 미래, 제 10회 철강기술 심포지엄 논문집, 대한금속재료학회, (2001) 111.
4. 김억조, 차체 경량화 기술의 현재와 미래, 제 10회 철강기술심포지엄 논문집, 대한금속재료학회, (2001) 37.
5. 정우창, 열처리공학회지, **17** (2004) 78.
6. E. G. Opbroek, 자동차 경량화를 위한 소재 및 가공기술, 제 12회 철강기술 심포지엄 논문집, 대한금속재료학회, (2003) 30.
7. S. Satoh and S. Yamazaki, Trans. ISIJ, **21** (1981) 772.
8. R. R. Pradhan, Proceedings of A Symposium on Metallurgy of Continuous-Annealed Sheet Steel, B. L. Bramfitt and P. L. Mangonon, Jr, Eds, TMS-AIME, PA, (1982) 203.
9. S. R. Goodman and A. R. Chaudhry, Proceedings of A Symposium on Metallurgy of Continuous-Annealed Sheet Steel, B. L. Bramfitt and P. L. Mangonon, Jr, Eds, TMS-AIME, PA, (1982) 229.
10. 高橋政司, 鐵と鋼, **68** (1982) 1348.
11. P. B. Lake and J. J. Grenawalt, SAE Paper 770163.
12. K. W. Andrews, J. iron and Steel Inst., **203** (1965) 721.
13. F. S. LePera, J. Metals, March, (1980) 38.
14. F. S. LePera, Metallography, **12** (1979) 262.
15. 武智弘, 塑性と加工, **21** (1980) 872
16. 橋口耕一, 西田捻, 加藤俊之, 田中智夫, 川崎製鐵技報, **11** (1979) 68.