[논문] 열처리공학회지, 제19권 제3호(2006)
J. of the Korean Society for Heat Treatment, *Vol. 19, No. 3, (2006) pp. 149~155*

SM45C강의 구상화 어닐링조건 최적화 연구

鄭 又 暢†
대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Optimization of Spheroidizing Annealing Conditions in SM45C Steel

Woo Chang Jeong†
School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-702, Korea

Abstract The effects of eight types of spheroidizing annealing conditions including annealing temperature, annealing time, cooling rate, and gas atmosphere in the annealing furnace on the microstructure were determined in SM45C steel which has been widely used for automotive parts. The well-developed spheroidized structure and minimum hardness were obtained when the steel was heat-treated 6 hours at 740°C, cooled to 710°C at a cooling rate of 24°C/h, and then kept for 7 hours at the 710°C followed by air cooling. In order to increase the productivity and to save the manufacturing cost, it is desirable to apply a faster cooling rate in the spheroidizing annealing. It was found that air cooling was the fastest cooling rate applicable to the SM45C steel. The steel heat treated in air showed the decarburized layer of about 110 μm in thickness at the surface of the specimen, resulting in serious problems in the quality of the quenched product.

(*Received April 26, 2006; accepted May 18, 2006*)

Key words: *Automotive parts, High carbon steel, SM45C steel, Spheroidizing annealing, Decarburization*

1. 서 론

기계 · 자동차 부품은 요구되는 특성을 만족시키기 위해 다양한 형태의 열처리를 필요로 한다. 가공성이나 성형성이 요구되는 부품은 연화 열처리를 실시한 후 부품으로 가공하거나 성형하며, 경도나 내마모성이 요구되는 부품은 최종 모양으로 가공한 후 다시 경화 열처리를 실시하게 된다[1]. 경도나 내마모성이 요구되는 부품의 경우 압연 혹은 단조작업과 구상화 어닐링을 수 차례 반복하여 원하는 형상으로 만든 후 담금질에 의해 최종 제품에 요구되는 경도를 부여하게 된다.

임가공 형태로 기계·자동차 부품을 열처리하는 회사들은 대부분 규모가 영세하고 기술력이 부족해 단순한 경험에 의존하여 품질관리를 하고 있으며, 열처리 인프라도 열악한 상태에 있다. 구상화 어닐링 조건이 부적절하면 경도가 높은 퍼얼라이트가 존재하여 단조 시 금형의 마모율이 높아지고 제품의 가공성이 나빠질 뿐 아니라 후 공정인 담금질 후 제품의 특성에도 영향을 미치게 된다. 일부 열처리업체에서는 환원성 분위기를 사용하지 않고 공기와 접촉되는 상태에서 구상화 어닐링을 실시하여 표면에 탈탄층이 발생 한 제품을 생산하는 경우도 있다. 구상화 어닐링은 50시간 정도 소요되는 공정이다. 열처리 사이클 중 품질에 영향을 주지 않으면서 생산성을 저하시키는 열처리 구간을 제거한다면 생산성 향상은 물론 에너지절감을 통해 원가절감도 동시에 추구할 수 있다.

본 연구에서는 영세한 열처리업체의 현황을 고려하여 구상화 어닐링된 제품의 품질과 생산성 향상을 목표로 자동차용 소재로 널리 사용되고 있는 SM45C강을 대상으로 가열온도, 구상화 어닐링조건, 냉각속도 및 열처리 분위기가스가 미세조직 및 경도에 미치는 영향을 조사하여 최적 열처리조건을 도출하고자 하였다.

†E-mail : wcjeong@cu.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of SM45C steel

C	Si	Mn	P	S
0.42 - 0.48	0.15 - 0.35	0.60 - 0.90	≤ 0.03	≤ 0.035

2. 실험 방법

2.1 소재

본 연구에 사용된 강은 자동차용 소재로 널리 사용되고 있는 기계구조용 탄소강재인 SM45C 강이었다. 분석된 화학성분은 0.46% C, 0.22% Si, 0.75% Mn, 0.019% P, 0.013% S이었다. 업체에서 구상화 어닐링에 사용하는 SM45C강은 직경 35 mm의 봉상 형태이나 실험실 로에서 열처리를 할 때는 가로, 세로 및 두께를 각각 1 mm, 1 mm, 2 mm로 잘라 사용하였다. KS 규격[2]에 명시된 SM45C강의 화학성분 범위를 Table 1에 나타내었다.

2.2 최적 구상화 어닐링 조건 도출 시험

고탄소강과 합금강은 경도가 높기 때문에 단조나 압연 등의 소성가공을 하게 되면 빠르게 변형저항이 증가하여 금형이나 롤 마모가 따르게 된다. 따라서 단조나 압연등의 소성가공을 원하는 정도로 하기 위해서는 소재를 연화시켜야 하는데, 소재를 가장 연화시킬 수 있는 방법이 구상화 어닐링이다. 구상화 어닐링은 열연상태에서 생성된 층상의 퍼얼라이트를 구상화된 시멘타이트와 페라이트로 변화시켜 경도를 낮추는 열처리이다. 냉연코일이나 열연코일과 같이 하중이 큰 제품은 온도를 쉽게 변화시키는 것이 불가능 하기 때문에 A_1 온도 바로 아래에서 장시간 유지한 후 로냉시키는 방법을 주로 사용하고 있으나, 선재나 봉상의 소재는 A_1 온도 위에서 가열한 후 A_1 온도 이하로 냉각하여 다시 유지하는 방식을 사용하고 있다[3-4].

본 연구에서는 SM45C강의 구상화 어닐링조건에 따른 미세조직의 변화를 보기 위해 Fig. 1과 같이 열처리를 실시하였으며, 사용된 8가지 열처리 조건을 Table 2에 나타 내었다. 열처리는 선재나 봉상의 구상화 어닐링에 일반적으로 사용되는 방식인 스텝 냉각방식[3-4]을 사용하였다. 온도 T_1에서 t_1 시간 동안 유지한 후 A_1 바로 아래 온도인 T_2 온도 까지 냉각시켜 다시 t_2 시간동안 유지한 후 24°C/h의 냉각

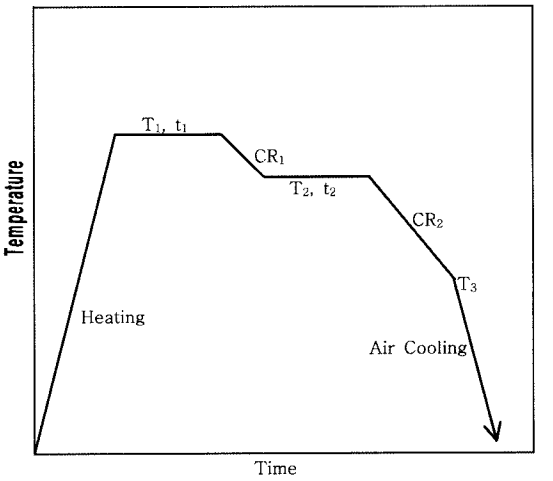

Fig. 1. Schematic representation of spheroidizing annealing cycles used in the study.

속도로 T_3 온도까지 냉각하였다. T_3 온도에 도달되면 공기 중에서 냉각하였다. 열처리 사이클 1~6이 여기에 해당된다. 또한 비교를 위해 A_1 이하에서 장시간 열처리 하는 방식으로도 열처리를 실시하였으며, 열처리 사이클 7, 8이 여기에 해당한다. SM45C강의 A_1 변태온도는 730°C 근처로 보고[5]되어 있다. 모든 열처리는 질소 분위기에서 수행되었다.

2.3. 냉각속도의 효과

SM45C강의 구상화 어닐링조건에 따른 미세조직의 변화를 분석한 후 구상화가 가장 잘되는 열처리 사이클 1을 선정하였다. 구상화 어닐링 사이클 1을 기본으로 Table 3과 같이 최종 냉각속도 변화시험을 실시하였다. 이 시험은 열처리 사이클의 냉각구간 중 야금학적으로 반응이 없는 구간을 느리게 냉각함으로서 발생되는 에너지 낭비 및 생산성을 저하시키는 구간을 제거하기 위해 실시하였다.

2.4. 분위기 가스에 따른 미세조직의 변화

탈탄 정도를 조사하기 위해 로 분위기를 질소 분위기와 공기 분위기로 변화시켜 SM45C강의 표면에 탈탄층이 생성되는 차이를 조사하였다.

2.5. 현미경조직 관찰 및 경도측정

열처리된 시편의 미세조직은 Nital(1~5 ml HNO_3 + 100 ml Alcohol)에 에칭한 후 다시 Picral(Picric

Table 2. Eight types of spheroidizing annealing conditions used in this study

Heat Cycle	Heating Rate (°C/hr)	T_1(°C) t_1(hr)	1st Cooling Rate CR_1(°C/h)	T_2(°C) t_2(hr)	2nd Cooling Rate CR_2(°C/h)	T_3 (°C)
1	140	740 6	24	710 7	24	550
2		740 6		710 3		
3		760 6		730 7		
4		770 6		720 7		
5		770 6		720 4		
6		780 6		750 7		
7		720 13		–	–	
8		720 9				

Table 3. Five types of spheroidizing annealing conditions to see the effect of 2nd cooling rate(CR2) on the microstructure in SM45C steel

Heat Cycle	Heating Rate (°C/hr)	T_1(°C) t_1(hr)	1st Cooling Rate CR_1(°C/h)	T_2(°C) t_2(hr)	2nd Cooling Rate CR_2(°C/h)	T_3 (°C)
1	140	740 6	24	710 7	24	25
2						550
3					100	25
4					Air Cooling	
5					Water Quenching	

acid 4 g + 100 ml Alcohol) 용액으로 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였다. 비커스(Vickers) 경도계를 사용하여 하중 1 kg에서 경도(Hv)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구상화 어닐링조건에 따른 미세조직의 변화

SM45C강에서 구상화 열처리 조건이 구상화 과정에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 2에 나타낸 8가지 열처리 사이클을 적용하였다. 열처리 사이클 1~6은 1차 가열온도(T_1)와 시간(t_1) 및 2차 가열온도(T_2)와 시간(t_2)을 변화시킨 것이며, 7~8은 A_1 변태 온도 이하에서 장시간 유지하는 구상화 어닐링 방법을 재현한 것이다. 각 조건의 열처리에서 생성된 미세조직과 경도값을 분석하여, 구상화가 가장 잘되는 조건을 도출하고자 하였다. Fig. 2에 8가지 열처리를 통해 얻은 조직사진을 나타내었다. SM45C 강의 A_1 변태온도는 730°C 근처로 보고[5]되어 있다.

Fig. 2(a)는 T_1과 t_1을 740°C와 6시간, T_2와 t_2를 710°C와 7시간으로 한 열처리 사이클 1에 따라 열처리하여 얻은 광학현미경 조직이다. SM45C강의 조직은 페라이트와 조대한 크기의 구상화 시멘타이트로 구성되어 있다. 비커스경도는 140으로 본 연구에서 적용한 8가지 열처리 조건 중 최저치로서, SM45C강의 구상화 어닐링조건으로 가장 적합한 조건에 해당된다.

Fig. 2(b)는 열처리 사이클 1의 조건 중 2차 가열시간을 7시간에서 3시간으로 단축 하여 열처리한 시편의 조직사진으로 열처리 사이클 2에 해당된다. 열

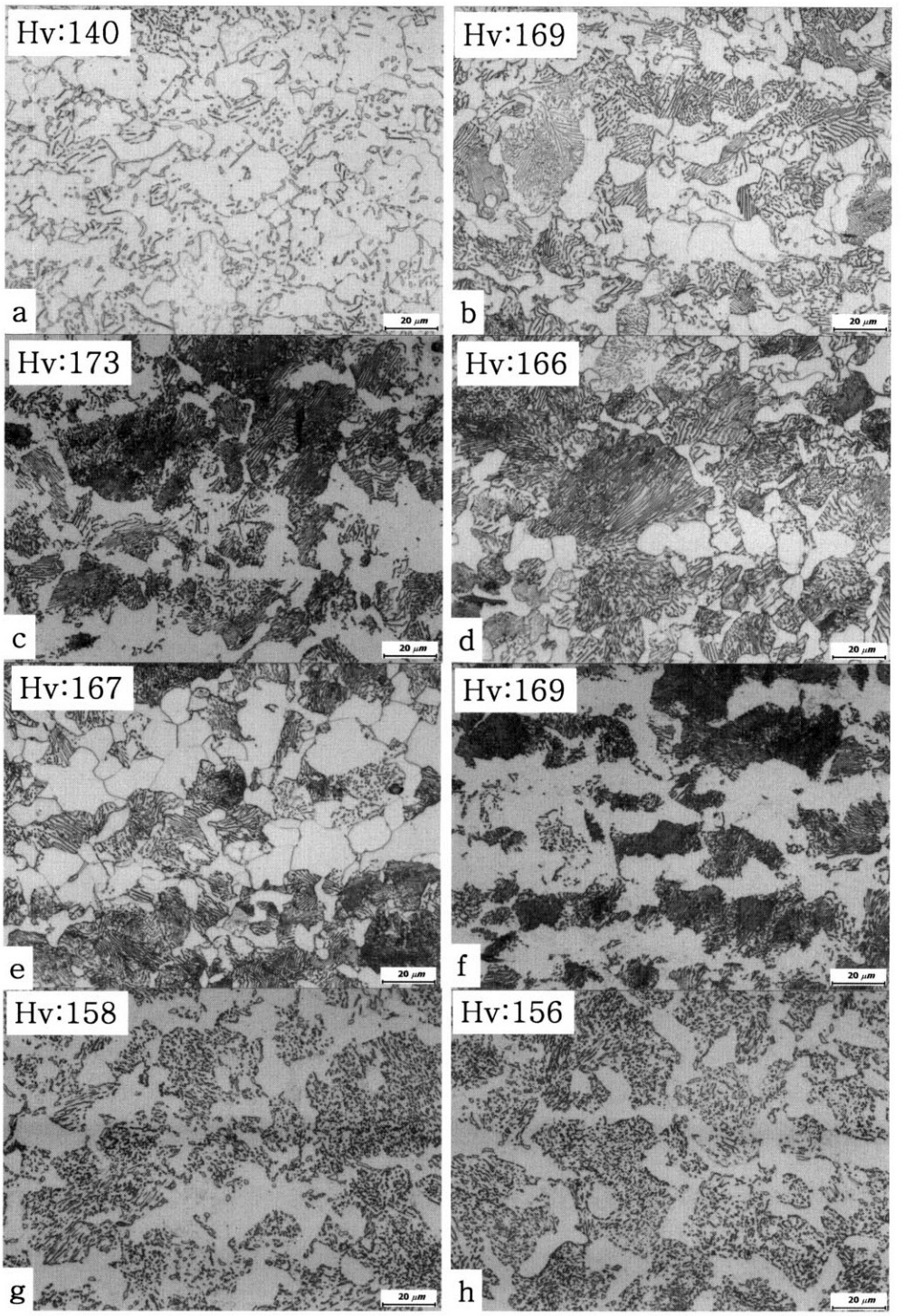

Fig. 2. Optical micrographs showing the effect of spheroidizing annealing conditions on microstructure in SM45C steel. (a) heat cycle 1, (b) heat cycle 2, (c) heat cycle 3, (d) heat cycle 4, (e) heat cycle 5, (f) heat cycle 6, (g) heat cycle 7, (h) heat cycle 8.

처리 사이클 2는 가열시간을 줄여 생산성을 향상시키고 에너지를 절감하여 제조원가를 낮추려는 목적에서 시도되었다. SM45C강의 미세조직은 페라이트와 구상화가 진행 중인 시멘타이트 그리고 층상의 퍼얼라이트로 구성되어 있음을 알 수 있다. 퍼얼라이트 중 층상의 시멘타이트가 두께가 얇아지면서 용해되어 구상화되어 가는 과정[6-7]임을 잘 보여주고 있다. 경도는 169로서 구상화 사이클 1에서 얻은 140보다 29나 증가하여 층상으로 남아 있는 시멘타이트의 경화효과를 잘 보여주고 있다. 가열시간을 3시간으로 단축하는 것은 SM45C강의 구상화에 부족한 시간이며, 2차 가열시간이 구상화에 매우 중요한 단계임을 알 수 있다. Fig. 2(c)는 1차 가열온도 및 유지시간을 760°C와 6시간, 2차 가열온도 및 유지시간을 730°C와 7시간으로 한 열처리 사이클 3에 따라 열처리하여 얻은 광학현미경 조직이다. 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있으나, 일부의 퍼얼라이트에서는 층상의 시멘타이트가 국부적으로 용해되어 구상화가 진행되고 있으나 사이클 2보다도 구상화 진행정도가 작음을 알 수 있다. 여기서 존재하는 퍼얼라이트는 모두 재생 퍼얼라이트(Regenerated Pearlite)로 판단된다. 재생 퍼얼라이트는 구상화 열처리 전 봉상의 시편에 존재하던 퍼얼라이트가 760°C에서 6시간 유지 하는 동안 모두 오스테나이트로 변태한 후 냉각과정에서 다시 퍼얼라이트로 변태된 것이다. 재생 퍼얼라이트는 2상 영역에서 가열온도가 너무 높거나 가열시간이 너무 길 경우에 시멘타이트가 모두 용해되므로, 냉각 시 탄소의 석출핵으로 작용하는 시멘타이트가 없을 경우에 생성된다. Fig. 2(c)와 Fig. 2(a) 및 (b)의 미세조직 비교로부터 가열온도가 높아지면 재생 퍼얼라이트의 생성을 촉진시켜 오히려 시멘타이트의 구상화 과정이 어렵게 됨을 알 수 있다. 구상화 반응이 극히 일부만 진행되었기 때문에 비커스 경도도 173으로 매우 높았다.

Fig. 2(d)는 1차 가열온도 및 유지시간을 770°C와 6시간, 2차 가열온도 및 유지시간을 720°C와 7시간으로 한 열처리 사이클 4에 따라 열처리하여 얻은 광학현미경 조직이다. 열처리 사이클 3보다 1차 가열온도를 높이고 2차 가열온도는 낮춘 경우이다. 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있으며, 경도도 166으로 높은 값을 나타내었다. 일부 구상화된 시멘타이트도 관찰되지만 그 양은 극히 적었으며, 대부분 퍼얼라이트로 구성되어 있다.

Fig. 2(e)는 열처리 사이클 4의 조건 중 2차 가열시간을 7시간에서 4시간으로 단축하여 열처리한 시편의 조직사진으로 열처리 사이클 5에 해당된다. 구상화가 별로 진행되지 않은 열처리 사이클 4보다도 가열시간이 짧기 때문에 예상한 바와 같이 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있으며 경도도 167로 높았다.

Fig. 2(f)는 1차 가열온도 및 유지시간을 780°C와 6시간, 2차 가열온도 및 유지시간을 750°C와 7시간으로 한 열처리 사이클 6에 따라 열처리하여 얻은 광학현미경 조직이다. 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있으며, 결과적으로 경도도 169로 높은 값을 나타내었다. 2차 가열온도인 750°C가 A_1 온도 이상에 해당되므로, 이 경우 퍼얼라이트는 모두 재생 퍼얼라이트로 판단된다. 퍼얼라이트는 층상간격이 작아 진한 색으로 관찰되는데 이것은 구상화가 거의 진행되지 못한 것을 의미한다.

일반적으로 코일형태의 판재에 적용되는 구상화 어닐링은 A_1 온도 이하에서 장시간 유지한 후 로냉하는 방식이다. 본 연구에서 사용되는 제품은 선재 형태이지만, 판재에 적용되는 구상화 어닐링 조건이 구상화 과정에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 2(g)는 720°C에서 13시간동안 유지한 후 550°C까지 24°C/h로 서냉하다가 550°C 에서 공냉하여 얻은 조직으로, 열처리 사이클 7에 해당된다. 일부 층상의 시멘타이트가 잔존하지만, 대부분 구상화 시멘타이트 형태를 나타내었다. 열처리 사이클 1에 비해 구상화 시멘타이트의 성장이 일어나지 않아 미세하고 조밀하게 분포되어 있다. 따라서 경도 값이 158로 다소 높은 값을 나타내었다.

Fig. 2(h)의 조직은 구상화 열처리 7의 조건 중 가열유지시간을 13시간에서 9시간으로 단축하여 열처리한 시편의 조건으로 열처리 사이클 8에 해당되며, 조직과 경도는 열처리 사이클 7과 유사하였다.

Fig. 2(g)와 (h)로부터, A_1온도 이하에서 장시간 가열하여 조직을 구상화시키고 경도를 낮추기 위해서는 가열시간을 13시간보다 훨씬 더 길게 열처리해야 하므로 열처리 시간 측면에서 스텝 냉각방식이 유리하다고 판단된다.

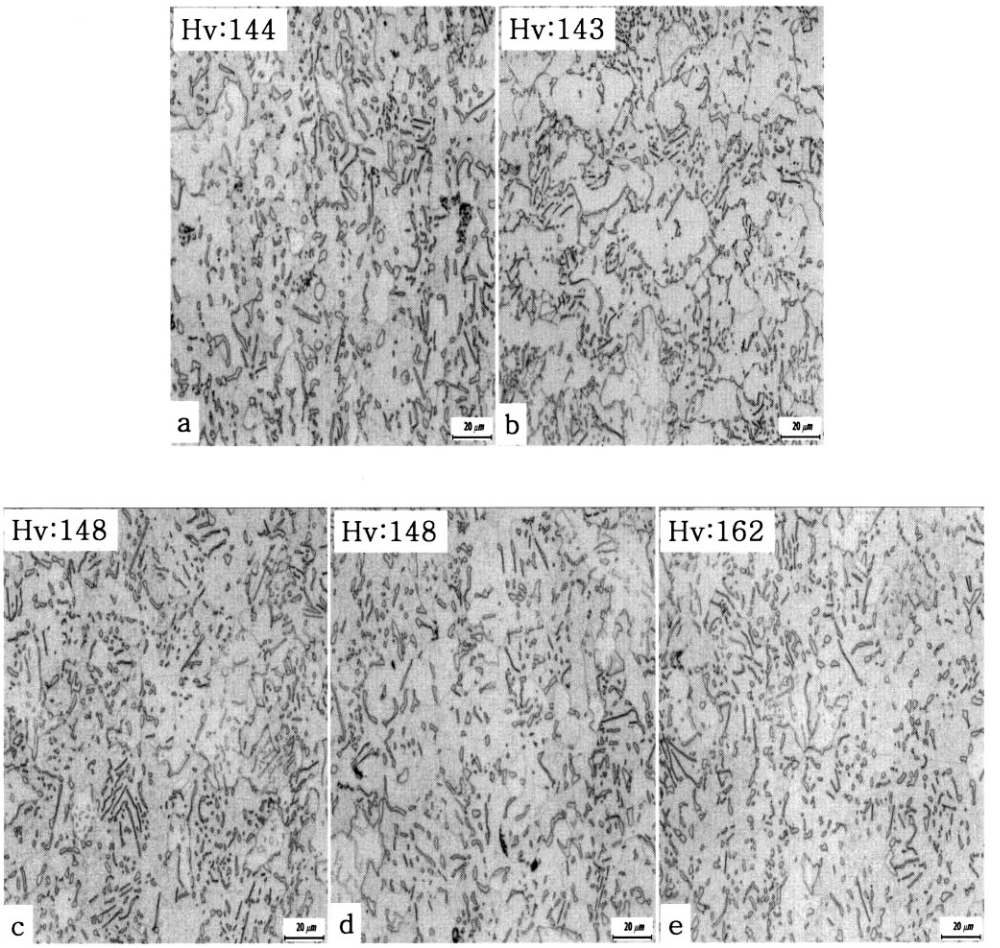

Fig. 3. Optical micrographs showing the effect of final cooling rate(CR_2) on microstructure in SM45C steel. (a) 24°C/h (T_3: 25°C), (b) 24°C/h(T_3: 550°C), (c) 100°C/h, (d) air cooling, and (e) water quenching.

3.2. 냉각속도에 따른 미세조직의 변화

구상화 어닐링 사이클 중 냉각시간이 길어지면 생산성이 저하되고 에너지소비가 증가하게 된다. 따라서 구상화 어닐링과정에 큰 영향이 없거나 표면특성에 문제가 없는 제품의 경우 냉각속도를 빨리할수록 유리하게 된다. 최종 냉각속도가 구상화 어닐링조직에 미치는 영향을 조사하여 생산성을 높이고 에너지를 절감할 수 있는 최적 냉각속도를 도출하기 위해 Table 3과 같은 사이클로 열처리 시험을 실시하였다.

SM45C강의 미세조직에 미치는 냉각속도의 효과를 보여주는 광학현미경 조직사진을 Fig. 3에 나타내었다. 냉각속도에 관계없이 모든 조직은 페라이트와 구상화 시멘타이트로 구성되어 있으며, 냉각속도에 따른 조직적 차이는 없었다. 냉각속도가 증가하면 페라이트의 고용탄소량이 평형 고용 탄소량보다 증가하게 되므로, 냉각속도가 빠를수록 페라이트의 고용경화 효과에 의해 전체 경도는 증가할 것으로 판단된다. 그러나 24°C/h에서 공냉까지 냉각속도가 증가해도 비커스 경도는 143-148의 범위로 변화가 거의 없었으며, 이는 이 정도의 냉각속도 변화에서는 고용탄소양 차이가 크지 않음을 의미한다. 반면, 수냉한 경우는 경도가 162로 크게 높아졌다. 이는 A_1 온도 이하인 710°C에서 유지하는 동안 페라이트에 고용된 약 0.02%의 탄소가 수냉 후 과포화 상태로 고용되어 페라이트의 경도가 높아 진 것에 기인한다.

이상의 결과에서 SM45C강을 2차 가열한 후 냉각

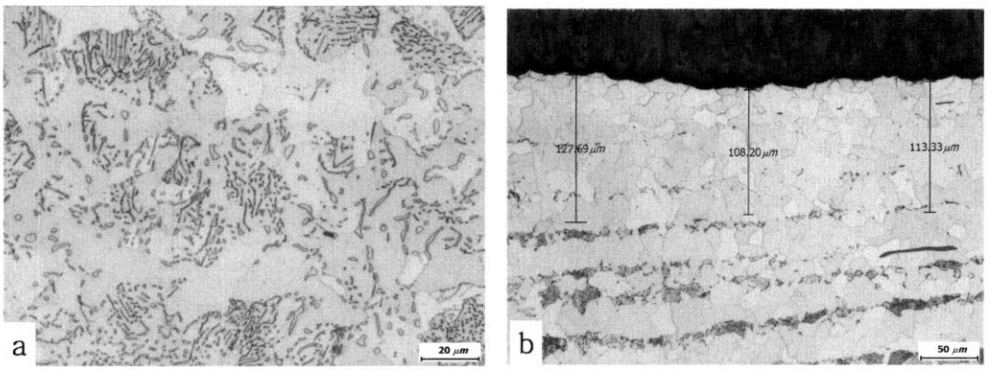

Fig. 4. Optical micrographs showing the effect of furnace atmosphere on microstructure in SM45C steel. (a) N_2 and (b) air.

속도를 공냉까지 높여도 낮은 경도 값을 유지할 수 있으므로, 공냉이라는 빠른 냉각을 적용하면 생산성을 높이고 에너지 낭비를 막을 수 있음을 알 수 있다.

3.3 분위기 가스에 따른 미세조직의 변화

영세한 일부 구상화 어닐링 업체들은 환원성 분위기를 사용하지 않고 공기 중에서 구상화 어닐링을 실시하고 있다. 이 경우 표면에 탈탄층이 발생되어 후속 공정인 담금질 후 제품의 품질에 영향을 미칠 수 있다. 열처리로의 분위기를 질소분위기와 공기분위기로 변화시켜 SM45C강의 표면에 탈탄층이 생성되는 차이를 조사하였다.

Fig. 4는 SM45C강을 질소와 공기 분위기에서 각각 열처리하여 표면근처의 조직을 촬영한 광학현미경 사진이다. 공기 중 열처리 시편은 환원 분위기를 사용하지 않고 공기 중에서 열처리하는 열처리회사의 실제 열처리로에 장입하여 열처리한 것이다. 표면으로 부터 약 110 μm(약 0.11 mm) 정도의 두께 층이 완전히 탈탄되어 페라이트 단상으로 구성되어 있으며, 중심부 조직도 구상화가 전혀 일어나지 않고 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있음을 알 수 있다. 반면에 질소분위기에서 실험실에서 열처리한 조직에서는 탈탄층이 존재하지 않았다.

4. 결 론

자동차용 소재로 널리 사용되고 있는 SM45C 강을 대상으로 가열온도, 구상화 어닐링 조건, 냉각속도 및 열처리 분위기 가스에 따른 미세조직과 경도 변화를 조사한 열처리 조건 최적화 연구를 통해 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 적용된 8가지 구상화 열처리 조건 중에서 740°C에서 6시간 동안 유지한 후 24°C/h로 서서히 냉각하여 다시 710°C에서 7시간 동안 유지한 후 공냉하는 것이 최적 구상화 어닐링 조건으로 판단된다.

2. 최종 냉각속도를 24°C/h에서 공냉까지 증가시켜도 미세조직과 경도에 큰 차이를 나타내지 않으므로, 열처리 시간을 단축시키기 위해 공냉을 적용하는 것이 바람직하다.

3. SM45C강을 공기 중에서 열처리하면 표면에 약 110 μm 정도의 탈탄층이 생성 되었다.

참고문헌

1. K. E. Theining, Steel and its Heat Treatment, 2nd Ed. Butterworth & Co., (1984).
2. KS 핸드북, 2004 철강 I, KS D3752, KSA 한국표준협회, (2004) 1037.
3. D. Hemandez-Silva, R. D. Morales and J. G. Cabanas-Moreno, ISIJ Inter. 32 (1992), 1297.
4. 鋼の熱處理, 日本鐵鋼協會, (1985).
5. 유재화, 포스코 연구결과보고서, 포스코, (1996).
6. Y. L. Tian and W. Kraft, Met. Trans., 18A (1987) 1359.
7. 金子, 福井, 材料科學, 29 (1992) 285.