

보론 첨가강의 경화기구에 따른 기계적 성질에 관한 연구 A Study on Fatigue strength by hardenability of Boron Addition Steel

이종형* , 유덕상** , 박신규***
Jong-Hyung Lee* , and Duck-Sang Yoo** , and Shin-Kyu Park***

<Abstract>

This research is for the relationship with heat treatment cooling temperature and the characteristic of Mechanical properties of Boron-Addition-Steel, the main material and SM25C steel, the sub material, structure viewing fractography, hardness test, tensile test and are carried out after the manufacturing small-specimen treated with heat of 750°C, 850°C, 1050°C. The influence to the Mechanical properties accompanied by AISI51B20, Boron-Addition-steel shows the following result.

1. The influence of heat treatment by the content of carbon-steel is dominant. Addition of boron results in strengthening structure effectively by segregation and improving over all mechanical characters such as good. It results from the increase of tenacity by the stability of inter granular with improvement of hardenability.

2. Boron-Addition-Steel exists in the form of martensite structure accompanied by the ferrite precipitation centering around grain boundary, and is improved to Hv 200.

3. The height of hardenability and fatigue stress the influence of heat results from crystal structure of martensite by difference of strength level in the structure of ferrite and doesn't have an effect on sensibility of temperature, and turns out to depend on production and growth of Matrix - structure - factor.

Key Words : Hardenability, Fatigue Strength, Grain Boundary, Initial Crack, Fractography

* 정회원, 금오공과대학교 기계공학부 교수, 工博
730-701 경북 구미시 신평동 188
E-mail leejh@knu.ac.kr

** 거창기능대학 메카트로닉스과 부교수
670-802 경남 거창군 거창읍 송정리 700
E-mail yds@kopo.or.kr

*** 대구기능대학
703-721 대구시 서구 평리5동 1495
E-mail psg@kopo.or.kr

* Prof, Faculty of Mech. Eng. Kumoh national
university of Technology
188 shinpyung-dong Kumi Kyungduk 730-701 Korea

** Prof, Faculty of Mechatronics. Geochang Polytechnic Collage
700 Songjungri Geochang-Eup Geochang-Gun Kyungnam
670-802 Korea

*** Daegu Polytechnic Collage
1495 Pyongri-5dong Seogu daegu 703-721 Korea

1. 서론

기계구조용으로 사용되는 크롬 몰리브덴강(SCM)이나 크롬강(SCR)의 대치 강재로 저탄소강에 소량의 보론을 첨가하여 우수한 경화능을 발휘하는 보론 첨가강은 국내 80년대 이후 건설 중장비의 내마모 부품이나 건설 현장에서 고장력 볼트 등으로 점차 널리 사용되어지고 있다.

Boron강의 경화능은 일반 합금강에 비해 매우 우수한 장점을 가지고 있는데 극히 극소량의 Boron 함량으로도 경화능에 매우 큰 영향을 보이며, 따라서 현재와 같이 합금 원소들의 가격이 증가하는 점을 감안할 때 그 중요성이 점점 커지고 있다.^(1,2) 또한 Boron강은 As-rolled 조건에서 낮은 경도값을 나타낸다. 그러나 매우 작은 Boron함량의 변화에 의해 강도의 특성이 현저하게 변화하므로 제강시 고도의 제어 기술이 요구되며 경화능 변수로서 Carbon 및 합금조성, Grain Size, Austenitizing 온도 등에 의해 Boron의 효과가 민감하게 변화되므로 세심한 주의가 필요하다.

일반적으로 냉간 압조용 선재는 탄소의 양이나 합금원소의 첨가 등에 따라 다르지만 기본적으로는 wire rod 제조 후 구상화 소둔처리 등의 열처리 등을 통하여 소재의 연성을 확보하는 것이 중요하다고 보고되고 있다.

보론의 B는 강 중에서 우수한 경화능을 가지게 되는데 이는 오스테나이트 중에 고용된 B가 결정립계에 몰려 오스테나이트 변태에 영향을 주기 때문이며, B는 O₂ 및 N₂ 와 친화력이 대단히 강해 Al, Ti, Zr 등을 첨가하여 충분히 탈산, 탈질소 처리를 해야 하는 것으로 알려져 있다.^(3,4,5)

연구소재인 보론 첨가강으로 사용되고 있는 강재인 탄소강은 저탄소, 중탄소, 고탄소강으로 구분 지을 수 있는데 저탄소강과 중탄소강이 보론 첨가강에 주로 쓰인다.

저탄소강의 경우 일반적으로 0.25% 미만의 탄소 함유량을 갖는다. 이 강은 마르텐사이트 열처리에 반응하지 않으며 소성경화에 의해 경화되는 특징이 있다.

미세구조는 페라이트와 펄라이트의 구조를 가지며 비교적 연하고 약하지만 우수한 연성과 인성을 갖는다.

중탄소강은 탄소의 함량이 0.25~0.6%인 탄소강을 말하고, 이 강도의 오스테나이트화의 급냉, 템퍼링 등의 열처리에 의해 기계적 성질을 향상시킨다. 이 강은 대부분 템퍼링 되어 사용되며 템퍼링된 마르텐사이트의 미세구조를 갖는다.

순 중탄소강은 경화능이 낮으며 따라서 매우 빠른 급냉 속도에 의해 매우 얇은 부위만이 열처리 효과를 갖는다. 크롬, 니켈, 몰리브덴의 첨가는 이들 열처리 효과를 증대시키며 다양한 강도와 연성의 조합을 보인다 할 수 있겠다.

이렇게 열처리된 합금은 저탄소강 비해 강하지만 연성과 인성은 떨어지며 응용분야는 열차의 바퀴와 철로, 기어, 크랭크축 이외의 기계부품, 고강도 구조재 등으로 고강도와 내마모성 및 인성이 요구되는 분야에 쓰여진다.

SM25C에 Boron의 첨가한 AISI 21B20제는 최근 고장력 볼트로 대량 사용되고 있으나 아직까지 파괴강도에 대한 보고가 거의 없는 관계로 연구소재의 데이터는 사용자로부터 많은 요구가 있는 형편이다.

본 연구에 있어서는 탄소강에서와 같이 열처리의 냉각온도 조건에 따라서 기계적 성질이 변화는 것과 같이 보론 첨가강에서는 어떠한 변화가 있는지 또 그 변화에 대한 역할을 규명하기 위해 AISI51B20제의 기초가 되는 SM25C강을 부재로 하여 각각의 냉각온도 변화에 따라 다양한 기계적 성질에 관한 시험을 행하고 재료에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 재료는 고장력 볼트로 사용되고 있는 AISI51B20제를 사용하였으며 또한 소재의 기초가 되는 SM25C강을 부재로 하였으며 이 시험편의 기계적 성질은 Table 1과 같고 화학성분은 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical Properties of Specimens

Symbol	Tensile Strength Mpa	Yield Point Mpa	Elongation (%)	Hardness (HV)
SM25C	451	275	28	147.6
51B20	592	442	43.3	164.2

Table 2 Chemical Composition of Specimens(wt.%)

Symbol	C	Si	Mn	P	S	B
SM25C	0.20	0.27	0.45	0.028	0.033	-
51B20	0.21	0.22	0.78	0.012	0.007	0.02

본 재인 보론 첨가강은 Table 2에서 살펴보는 바와 같이 탄소 0.21%를 주축으로 Mn을 SM25C인 0.45%보다 0.33% 많은 0.78%를 첨가하였고 기타 원소는 거의 SM25C와 같은 비율이다. 첨가원소는 경화능과 열처리 효과를 얻을 수 있으며 고용강화 효과로 인한 내피로성등이 향상된다.

B는 소입성을 향상시키는 특이한 원소로서 Mo, Cr의 함량이 낮아도 높은 경도를 얻게 된다.

AISI51B20 Melloy이가 제안한⁽⁶⁾ 30ppm이내인 20ppm을 첨가한 소재인데 이는 BN이 인발 가공 중에 석출되어 강도를 저해하므로 주의하여야 하기 때문이다. 열처리 냉각조건을 달리한 경도시험편과 인장시험편을 제작하여 각각 4종의 시험을 만들었으며 그 Process는 Fig.1과 같다.

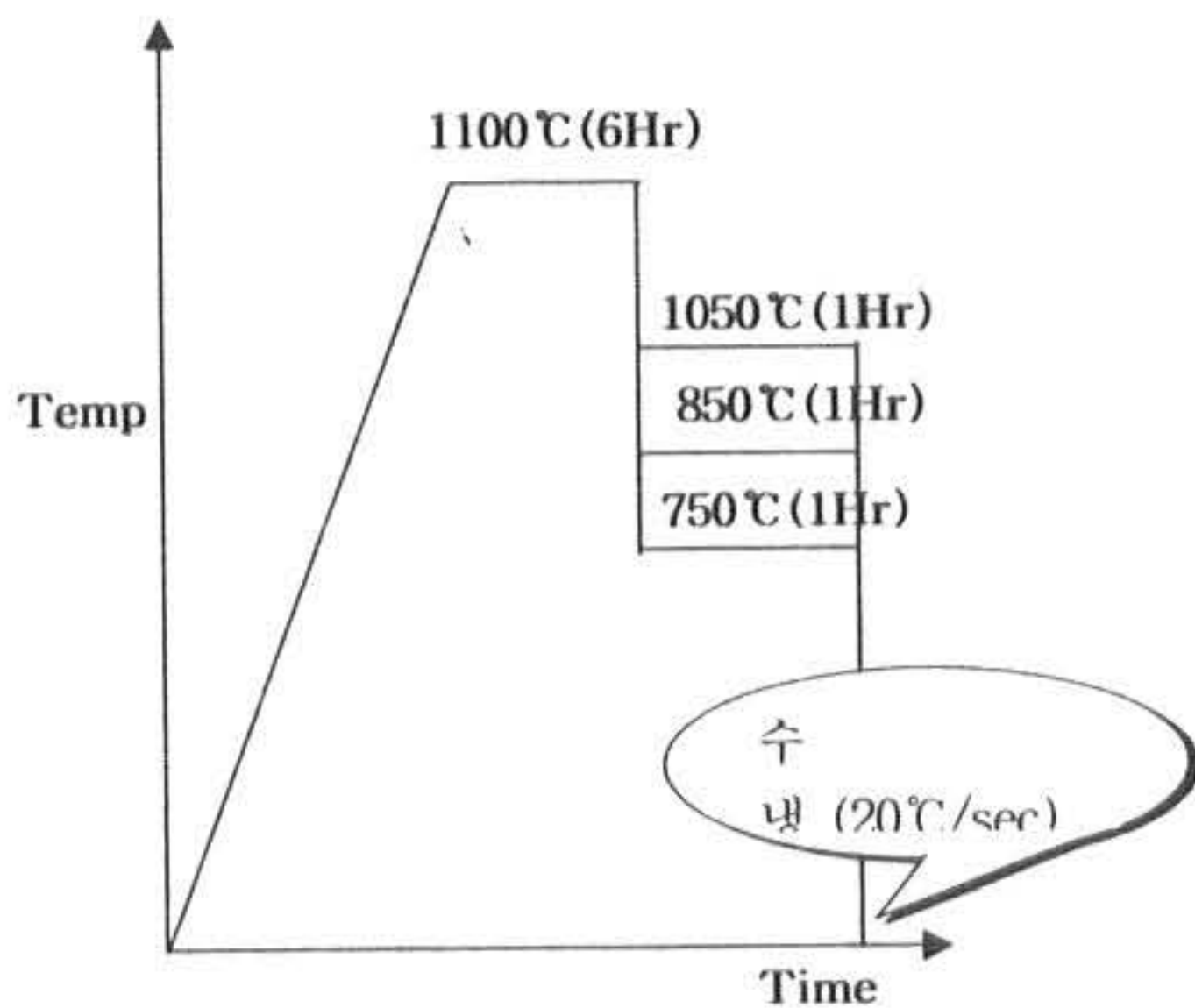


Fig. 1 Quenching process of specimens

또한 이들 시험편의 명칭을 편의상 A, B, C, D, E, F, G, H 라고 하였다.

열처리 냉각 Process에 따른 시험편은 Table 3과 같다.

Table 3 Name of Specimen series

Specimen	Rod	750℃ 냉각	850℃ 냉각	1050℃ 냉각
SM25C	A	C	E	G
AISI51B20	B	D	F	H

이들 시험편의 경도시험은 8종의 시험편을 시험편연마기로 사포(Sand Paper)4,200~#2,000dmfh로 연마한 후 래핑가공하여 경면 연마를 하였다.

조직관찰을 위해서 4% nital 용액에 5~10초 동안 부식시켜 각각 금속현미경에서 200배율로 외곽(Out Position)에서 중앙부(Middle Position)로 이동하면서 미세조직 촬영을 하였으며 경도시험은 단면 깊이별 측정을 위해 초기 외곽(Out Position)은 0.05로 시작하여 중앙(Middle Position)까지 10부위를 마이크로 비커스 경도시험을 행하였다.

인장시험편은 파단부 직경 ø8로 KS표준규격에 의해 CNC가공 하였으며 Instron Corporation Series IX Automated Material Testing System에서 각각 3회씩 측정하고 그 평균치를 구하여 경도 변화에 따른 기계적 강도와의 상관관계를 규명하고자 하였다.

3. 실험결과

3.1 미세조직 인자와 경도와의 관계

본 절에서는 기계적 성질인 경도의 영향에 미치는 보론 첨가강의 미세조직 의존성을 고찰하기 위해 먼저 각 Series의 금속현미경에 의해 거시적 관찰을 행하였는데 재료의 질량에 따른 냉각속도 변화를 고려하기 위해 외곽부와 중앙부로 각각 구분 관찰하였으며 Fig. 2는 각각의 조직 사진이다.

열처리 하기전 나이탈 4% 용액에 부식시킨 현미경 사진에서 외곽부와 중앙부 모든 탄소강과 같은 펄라이트와 페라이트부의 조직상을 Fig. 2의 B와 같이 잘 살펴 볼 수 있었다.

외곽부와 중앙부의 미세조직이 달리 보이는 것은 인발 과정에서 재료의 깊이 차이에 따라 압하율과 결정성장속도가 달라 핵생성과 성장이 변화된 것으로 보여지며 중앙부로 갈수록 조직이 조대해 짐은 이를 뒷받침 해준다.⁽⁷⁾

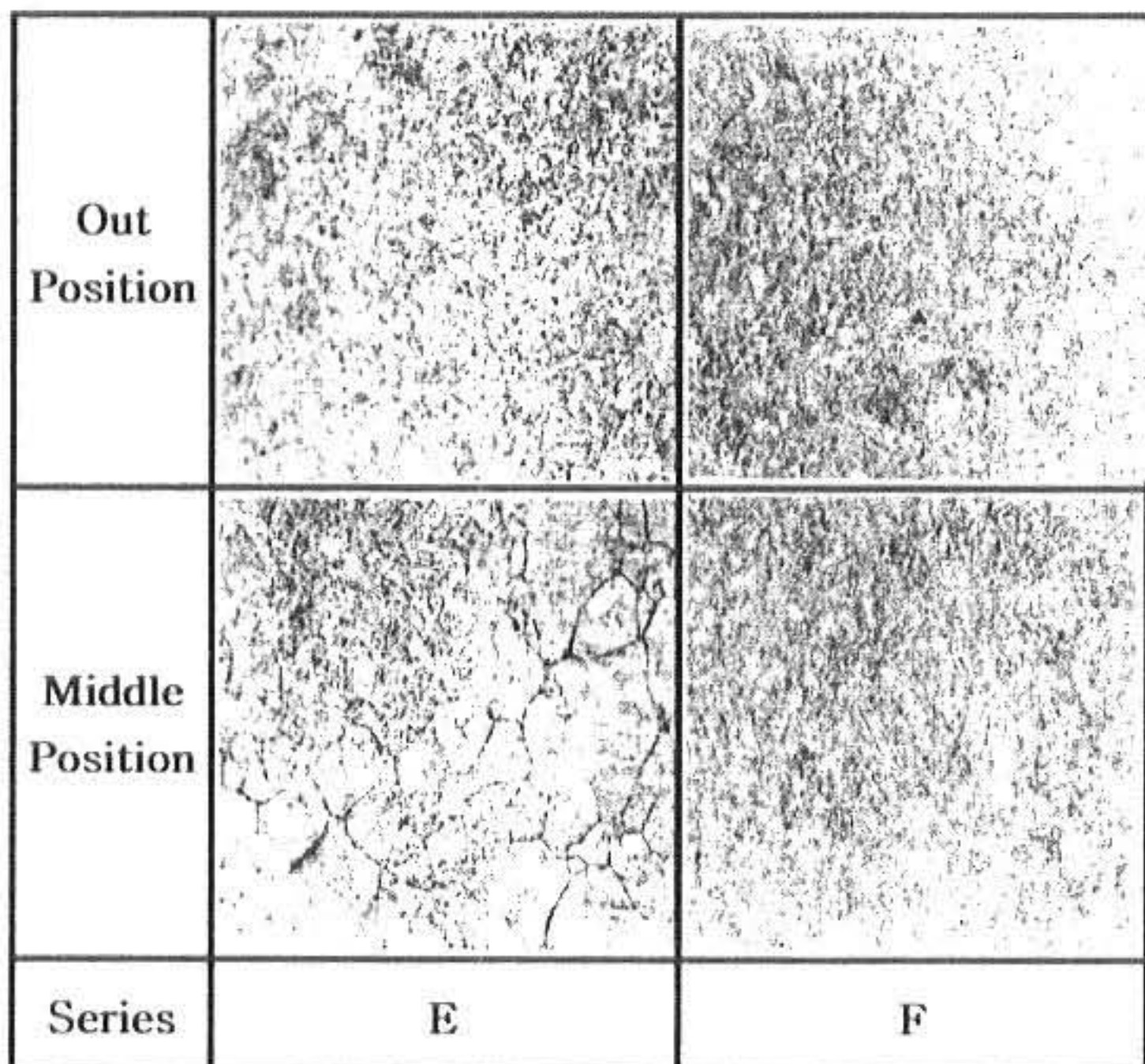
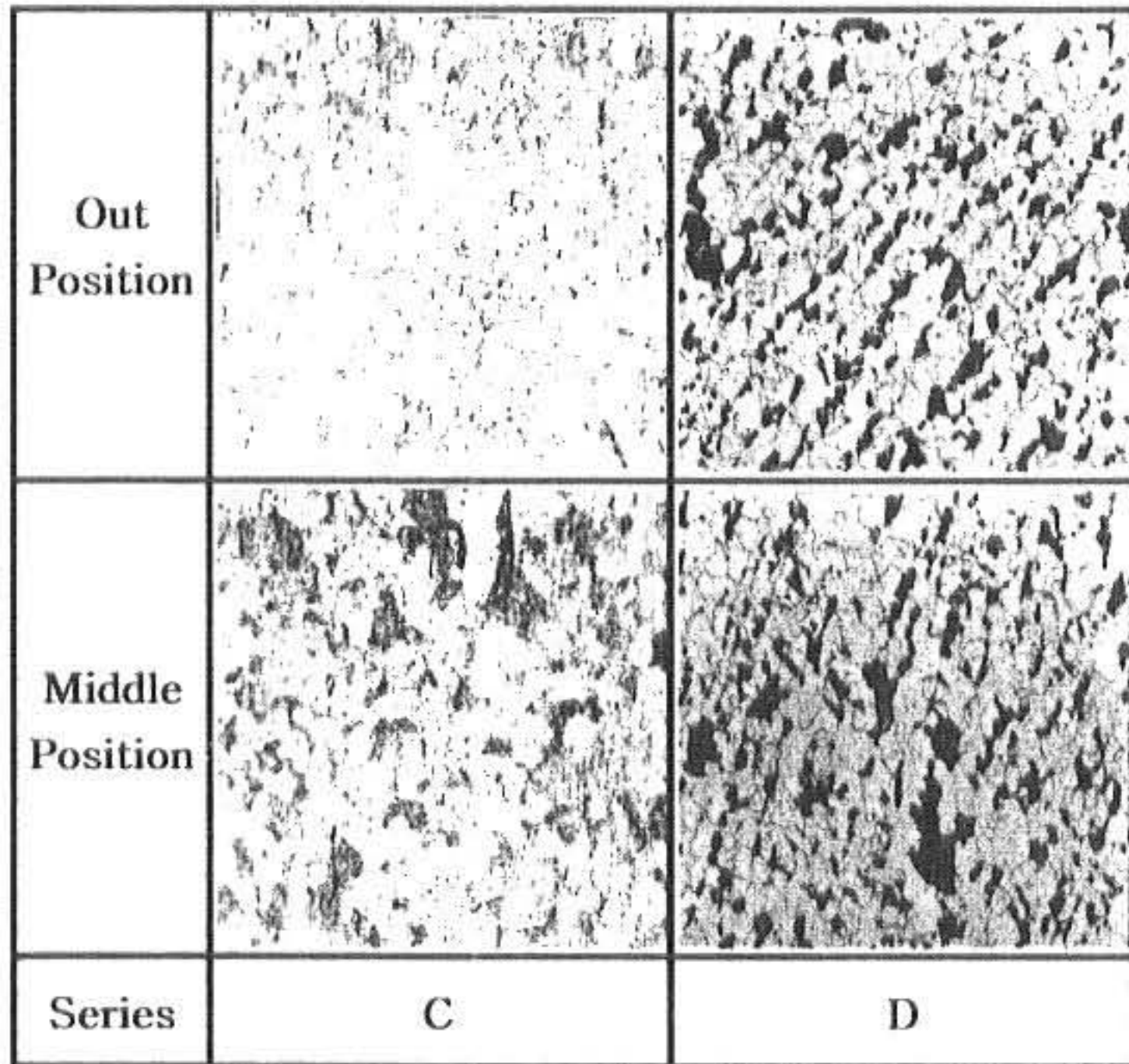
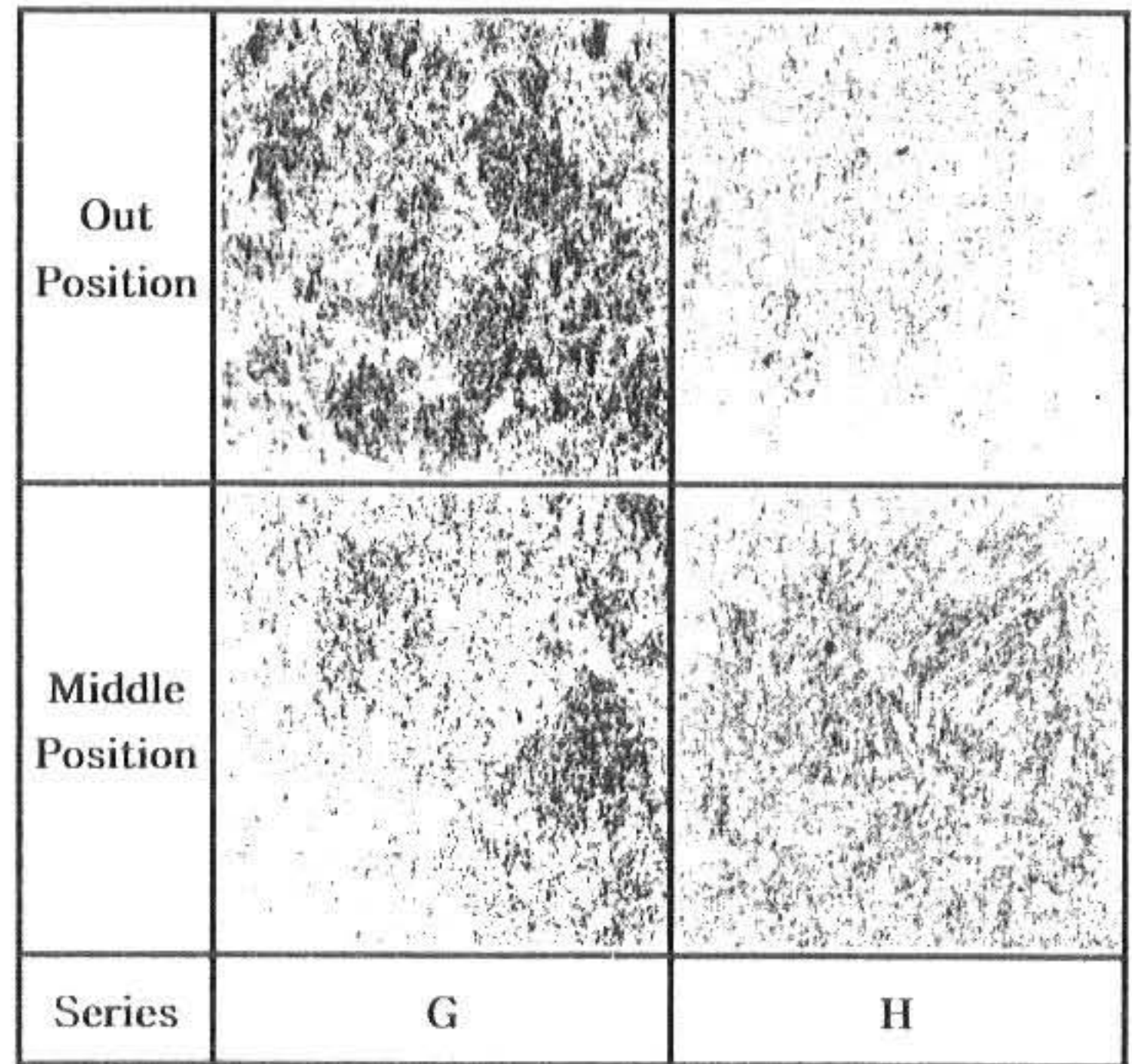
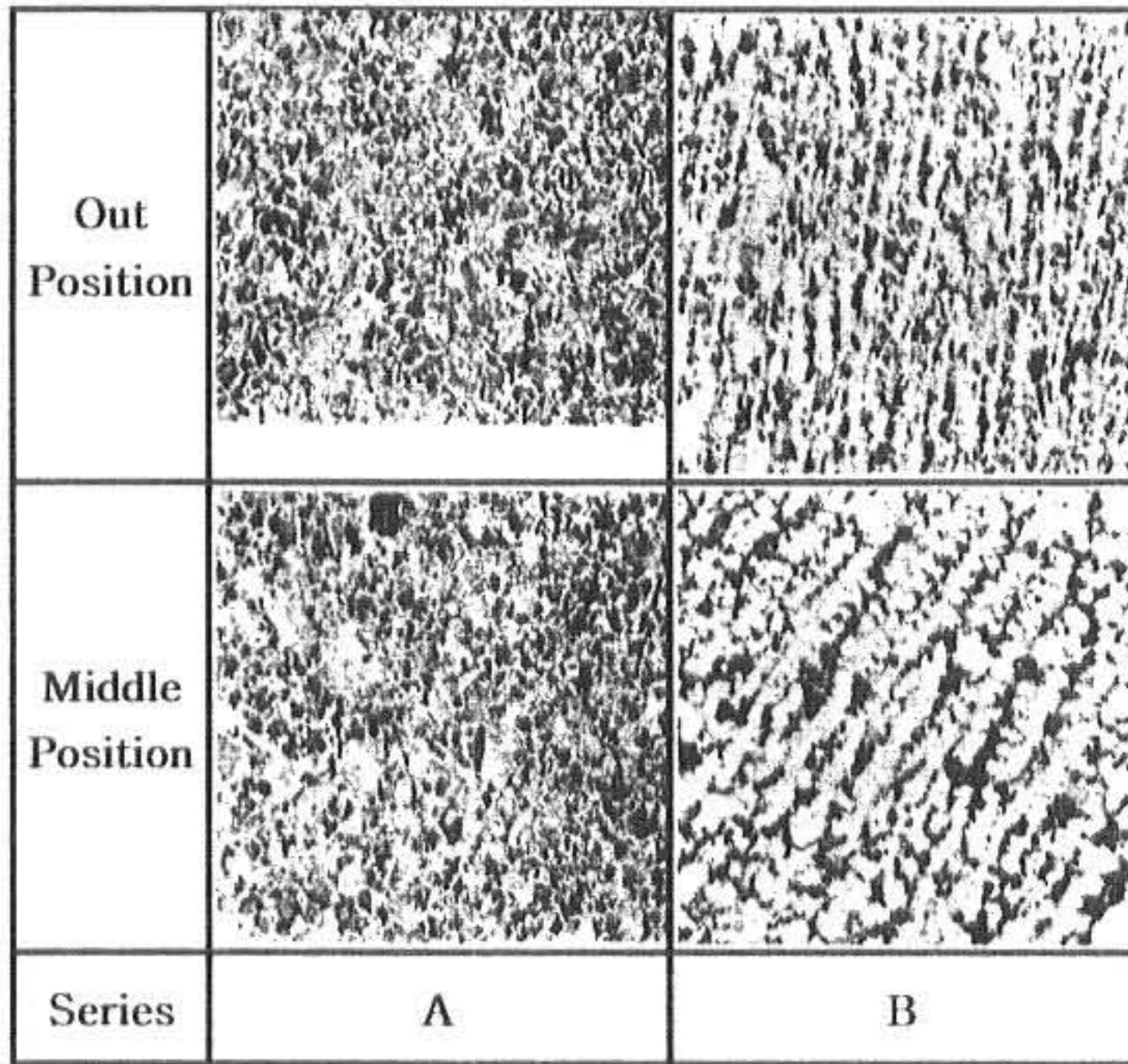


Fig. 2 Photographs of Series

즉 급속의 단위체적중에 생성한 결정 핵의 수, 핵 발생속도를 N , 결정이 성장하는 속도를 G 로 나타내고 크기 S 와의 관계는 $S=F(G/N)$ 로 나타낼 수 있다. 이는 결정립의 대소는 결정성장속도 G 에 비례하고 핵 발생속도 N 에 반비례한다. 이 관계는 과냉 정도여하에 따라 변화하는데 급냉하면 결정립이 미세화하고 서서히 냉각하면 급냉의 경우와 비교해서 큰 결정이 된다.⁽⁸⁾

열처리의 경화능을 살펴보기 위해 행한 열처리 온도는 Andrews의 식에 따라 A_{C3} 점은 831.2°C 이고 A_{C1} 점은 717.7°C 이지만 1100°C 에서 가열하여 서냉시키면 보론이 입계에⁽⁹⁾ 편석하여 페라이트 핵생성을 지연시키므로 페라이트는 생성되지 않기에

본 실험에서는 경화능과의 관련성에 연관하여 급냉처리하였는데 750°C 에서는 경화능이 나타나지 않는 일반 페라이트와 퍼얼라이트의 조직만 보였으며 외각에서 희게 보여지는(약 0.1mm) 부분은 탈탄층으로 추정된다. 따라서 이 부위의 경도값은 상대적으로 낮을 것이 확실하다.

850°C 에서는 외곽은 마르텐사이트 조직이며 중앙부쪽에는 침상조직이 함께 보였다. 1050°C 에서는 크게 차이가 나타나지 않았으나 마르텐사이트 조직이 850°C 의 것보다 미세조직이었다.

경도실험의 결과는 Micro Vickers Hardness Test Future Tech10. FM7에 의해 Table 4에 나타내었고 Fig. 3은 각각 Series의 경도 차이를 보여준다.

Table 4 Variation of Micro Vickers Hardness AISI51B20 and SM25C

Distance (mm)		0.05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Avg
ROD	SM25C(A)	120.3	126.9	129.4	156.1	157.1	156.6	159.2	154.2	156.1	159.8	147.6
	AISI51B20(B)	158.2	180.6	181.2	186.2	156.3	152.0	153.2	156.8	159.0	158.4	164.2
750℃	SM25C(C)	195.1	195.6	180.6	213.8	175.8	186.6	190.4	171.8	233.6	196.5	194.0
	AISI51B20(D)	179.3	192.2	193.6	192.5	193.6	192.9	191.1	192.2	191.4	192.9	194.0
850℃	SM25C(E)	181.2	173.3	192.5	189.0	193.6	250.2	237.4	220.7	170.6	179.9	198.8
	AISI51B20(F)	398.7	401.9	385.2	381.2	374.3	373.3	362.0	363.8	369.5	362.9	377.3
1050℃	SM25C(G)	168.5	190.4	260.6	253.9	243.9	322.9	323.7	260.6	233.6	203.0	246.0
	AISI51B20(H)	380.2	388.2	394.5	378.2	374.3	373.3	377.2	377.3	374.5	375.1	379.3

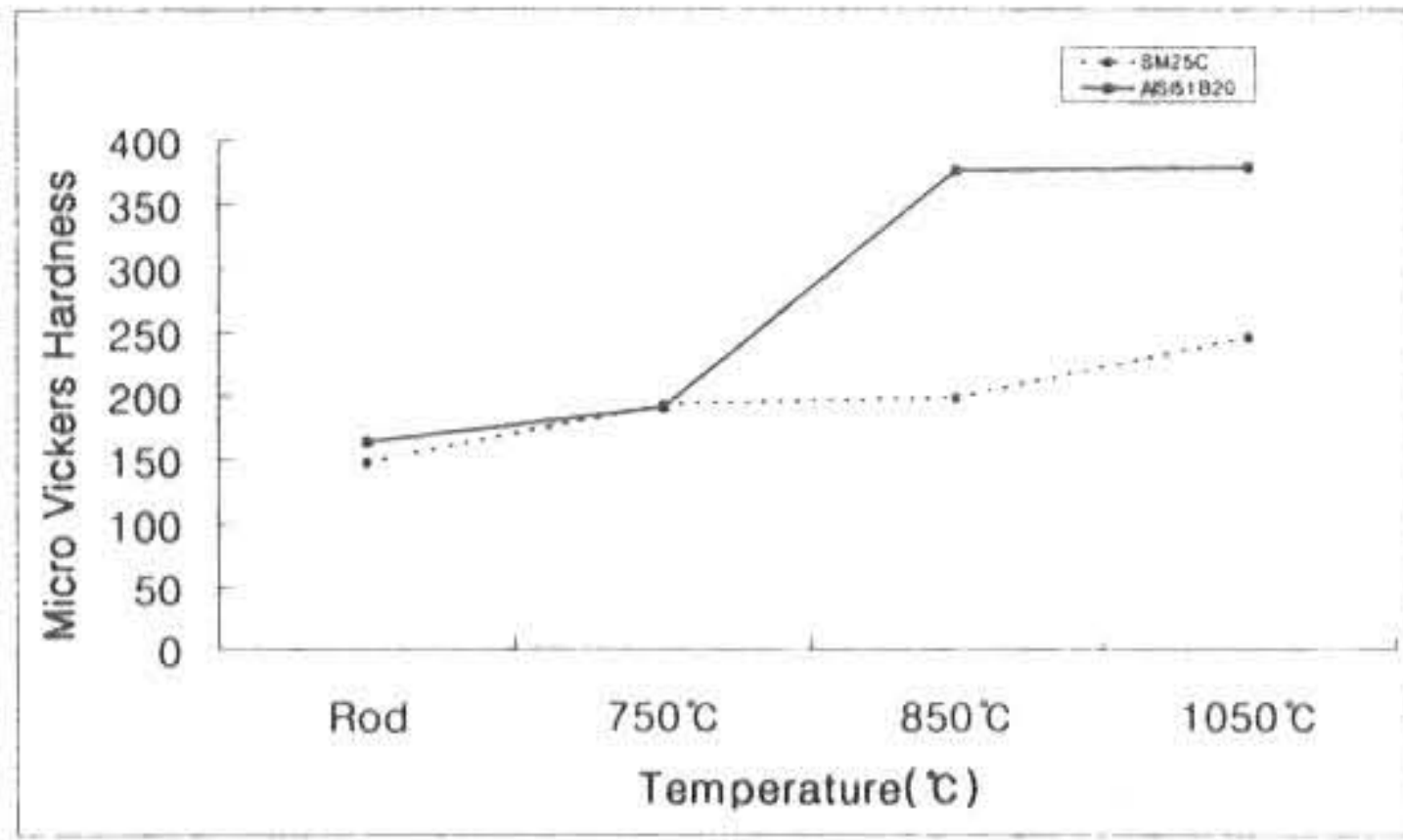


Fig. 3 Variation of Micro Vickers Hardness and Temperature

750℃에서 조직 및 파편을 관찰한 결과 입자가 미세하였다. 담금질시 거의 마르텐사이트로 변태가 일어나는데 보론은 거의 미량이므로 탄소량이 변한다. 따라서 기계적 성질에 크게 좌우하는 것을 거의 탄소일 것이다. 일반적으로 사용되는 51B20재의 열처리는 담금질 890℃, 뜨임 30~400℃ 요구 경도는 담금질시 HRC 30~42 뜨임시 HRC 34~35이다.

각각의 단면 깊이별 경도값은 Fig. 3와 같이 850℃와 1050℃에서는 경도값의 변화가 거의 없다. 이는 보론이 일정값 이상의 경화능에 계속 작용하는 것이 아니고 탄소량에 의존하는 것 같다. 온도에 따른 깊이별 경도 변화 추이를 보면 Rod 소재는 Fig. 4와 같이 표면부쪽 길이 약 3mm까지 경도값이 더욱 높았다. 이는 역시 인발가공 중 가공경화의 영향으로 보여진다. 담금질 변화가 없는 750℃ 재료에서는 표면

0.1mm까지 Hv13값 정도로 낮았고 깊이별 경도값 변화는 없었다.

850℃와 1050℃에서는 표면부만 약간 경도값이 높고 중앙부로 갈수록 떨어졌다. 이 역시 냉각속도에 기인한 것으로 보여지며 보론이 직접적인 경화능에 관계하였다고는 보지 않는다.

Fig. 5와 Fig. 6에 각각 경도값을 나타내었다.

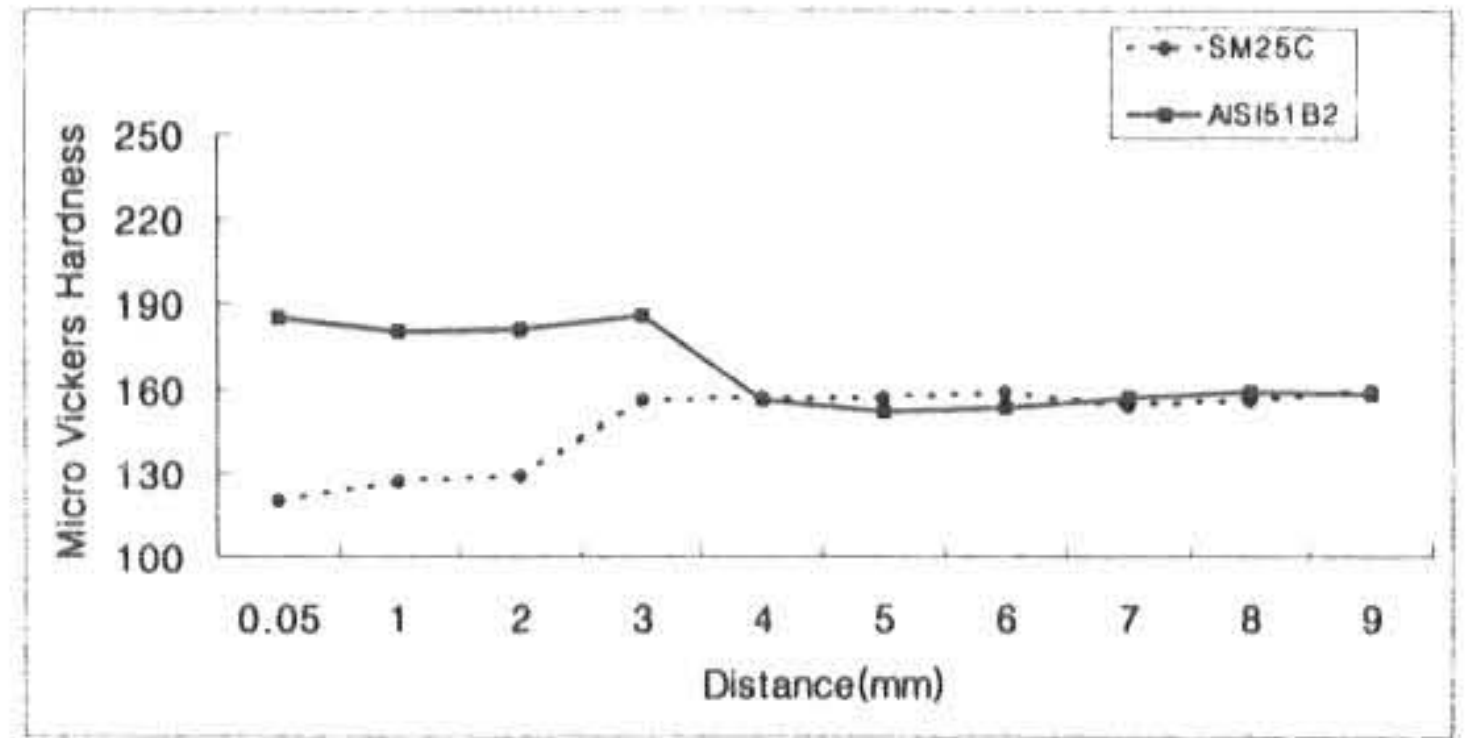


Fig. 4 Micro Vickers Hardness of inner face(ROD)

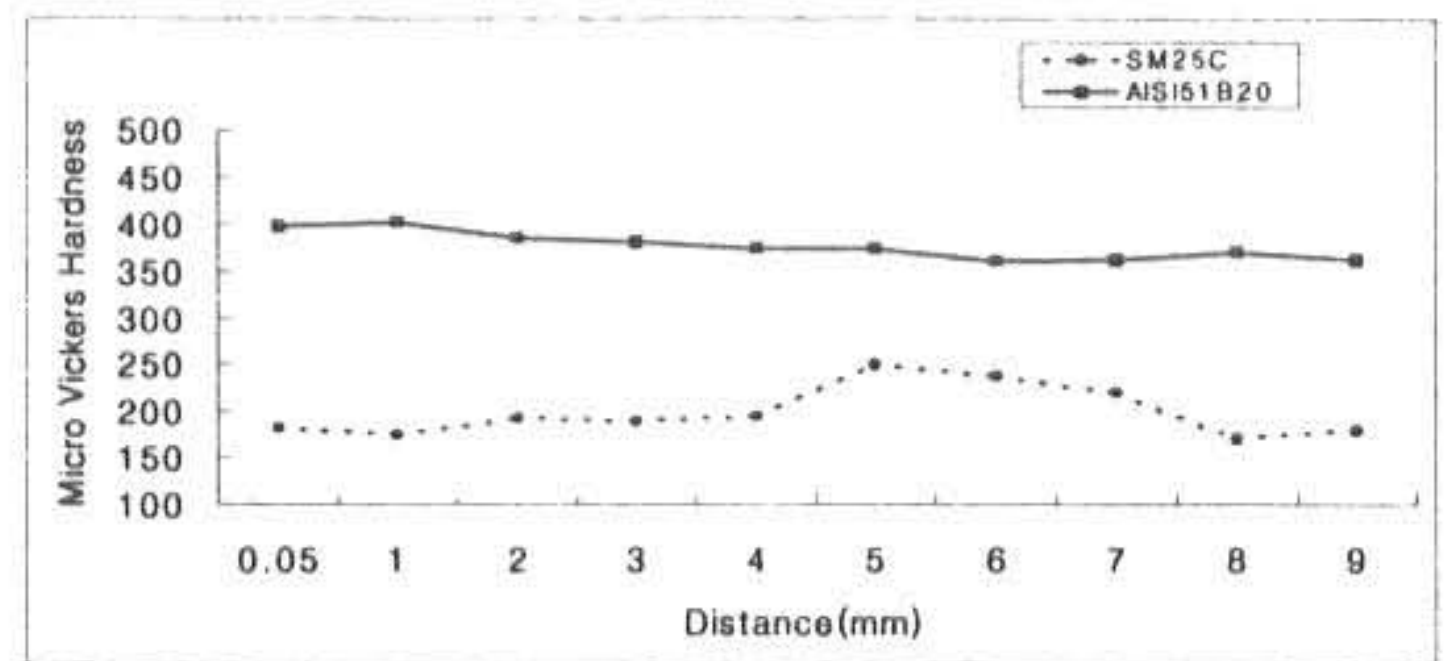


Fig. 5 Micro Vickers Hardness of inner face (850℃)

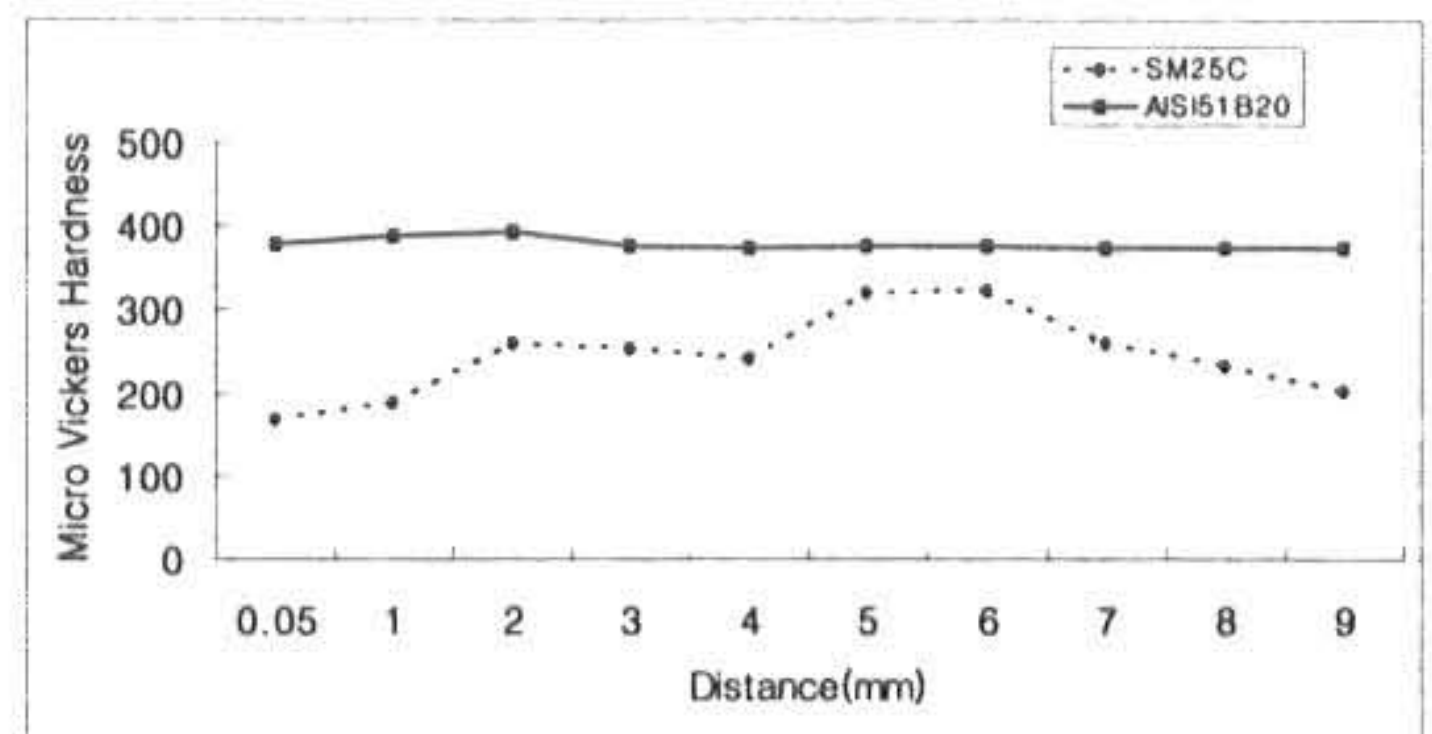


Fig. 6 Micro Vickers Hardness of inner face (1050℃)

3.2 인장강도와 기지조직의 역할

보론 첨가량의 인장시험 결과 최대 인장강도는 Table 5와 같이 592Mpa, 941Mpa, 1064Mpa, 1234Mpa로 높은 온도에서 퀴칭한 것일수록 인

장강도는 높았다.

Fig. 7는 최대 인장강도와 항복강도를 인장시험 비교한 그림인데 보고된 내용이 부재인 SM25C는 많으므로 B, D, F, H, Series만 조사하였다.

연신율은 원소재는 43.3%였으나 열처리 온도 증가에 따라 각각 16.6%, 19.3% 20.4%로 증가하는 특징을 보였다.

항복 강도의 경우는 특이하게도 Table 5와 같이 B Serise는 442Mpa, D Serise는 527Map, F Series는 613Mpa, H Series는 626Mpa로 1050℃에서만 오히려 낮아지는 경향을 보였다.

Table 5 Tensile Strength and Yield Strength(MPa)

Series	AR (SM25C) (B)	750MQ (D)	850MQ (F)	1050MQ (H)
Tensile Strength	592	941	1064	1234
Yield Strength	442	527	613	626

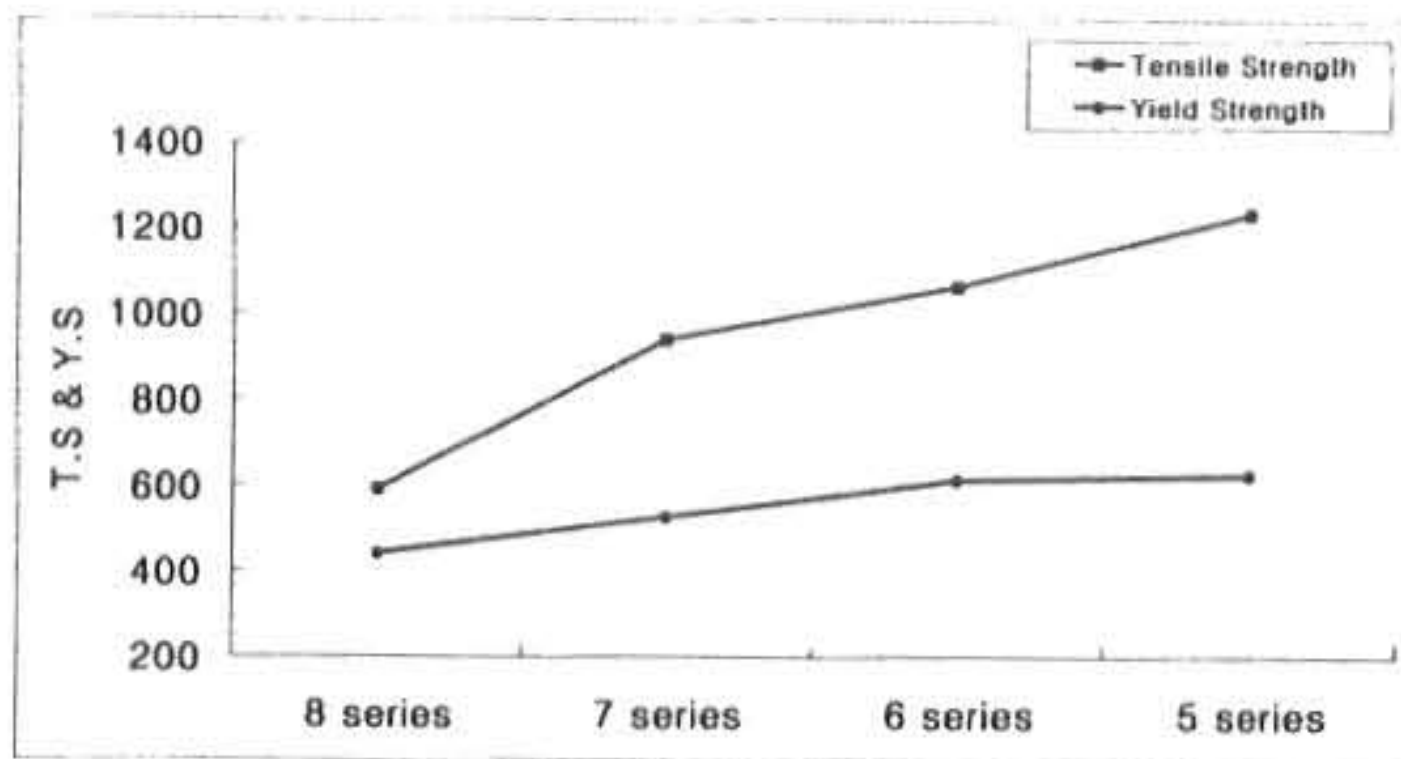


Fig. 7 Tensile strength and Yield strength value

이로서 보론을 첨가한 SM25C강은 Boron이 항복강도에는 온도 변화에 별 영향을 미치지 않았으나 연신율로 큰 차이를 보이지 않는 것을 보아 보론의 첨가로 인해 SM25C강에 마르텐사이트외에 생길 수 있는 여러 조직들의 생성을 방해하여⁽¹⁰⁾ 경화능을 향상시킨 결과로 보여지며 보론의 첨가가 온도 변화에 따라 오히려 증가하는 것은 900℃이상의 고온에서 보론이 석출되어 원래의 연성을 회복한 것이 아닐까 보여진다.⁽¹¹⁾ Boron의 경화능 기구에서 살펴본 바와 같이 보론이 오오스테나이트 결정경계에 원자상태로 편석하여⁽¹²⁾ 자유에너지를 낮추어 페라이트의 핵생성을 감소시켜 경화능이 향

상되어야 하나 800℃에서는 MCB 또는 MB로 900℃의 고온과 가공경화 중에서 BN이 석출된다는 이론에 기인한 것이다.

4. 고찰

4.1 SM25C강과 AISI51B20강의 경화능

Fig. 3은 각 소재의 열처리 온도에 따른 비커스 경도시험값을 비교한 그림인데 보론 첨가강이 경화능 향상 온도만 750℃를 기준으로 급격히 상승하여 0.21% 탄소강의 오스테나이트 경계구역인 850℃를 전후로 하여 경화능의 최대치인 Hv400을 보였고 1050℃까지 거의 같은 값을 보였으며 이는 Ac₃₂₁ 변태점보다 20~30℃ 높은 온도로 항온변태도(Isothermal Transformation Diagram)곡선과 잘 비교되었다. SM25C 경화능의 효과는 보론보다 Hv값 200 정도 낮았다.

0.21% C강에 20ppm의 보론을 첨가하고 약간의 다른 원소를 첨가한 AISI51B20재는 일반 탄소강의 열처리 온도와 같은 구역에서 우수한 경화능을 보였으며 단면 깊이별 경도값의 차이도 일반 소재나 탄소강의 그것과 같이 내외부의 냉각온도의 차에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다

4.2 미세조직

광학현미경으로 SM25C강과 AISI51B20소재의 조직 사진에서 보는 바와 같이 SM25C강에서 마르텐사이트 중간 중간에 다소 Ferrite가 존재하여 나타나고 있으며 이는 급냉시 오스테나이트 온도구간에서 잔류 오스테나이트 부분이 생겨나 시멘타이트와 페라이트로 분해하기 때문에 결정경계를 중심으로 Ferrite 석출을 수반하는 것으로 보여진다. 그러나 AISI51B20 소재에서는 Ferrite상이 거의 사라졌다. 대부분 α 마르텐사이트 형태를 가지고 있으며 이는 Boron이 경화능의 향상에 크게 기여한 것으로 보인다.

AISI51B20재의 중앙부 광학사진에서 침상 마르텐사이트조직이 보이는 것은 마르텐사이트 변태시 원자격자간 이격으로 인한 내부 응력증가나 무확산변태에 의한 체적변화의 차이로 생긴 조직으로 보여진다.

4.3 피로파괴에 미치는 경화능과 피로저항성의 관계

피로한도의 기구는 아직까지 완전히 해명되고 있지 않지만 피로한도 이하의 응력에서도 슬립대가 발생되어 있고 미시균열이 관찰되는 경우도 있다고 보고 되고있다. 따라서 피로한도는 미시균열의 진전 한계응력을 의미하는 것이라 생각한다. 피로한도의 값은 부하형식에 따라 다르고, 회전굽힘 피로한도, 인장압축피로한도, 반복비틀림 피로한도 등이 있는데 이들 사이에는 비례적인 관계가 있다고 본다.

즉 어떠한 부하 형식에 대한 피로한도가 높을수록 다른 부하 형식에 대한 피로한도도 높은 경향이 있다. 이를 확인하기 위해 각 소재의 경화열처리에 따른 인장강도와 경도와의 관계를 살펴보면 회전굽힘 피로시험에서도 같은 경향임을 확인할 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 경도와 인장강도와의 관계를 살펴본 결과 경화능의 결과와 같이 850℃, 1050℃에서 최대 인장강도가 각각 1064Mpa, 1234Mpa로 나타나 정역적인 관계가 성립되었다. 이로서 Boron첨가강의 피로 성질이 초기 균열영역뿐 아니라 성장영역에서도 피로저항성이 우수할 것으로 보이며 경화능에 따른 피로저항성도 커질 것으로 판단된다.

5. 결 론

보론 첨가강재인 AISI51B20과 SM25C강의 열처리 냉각조건을 달리한 8종의 시험편을 제조하여 그것에 대한 경도와 강도시험을 행하고 기계적 성질을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경도값의 변화에 크게 기여하는 것은 탄소 함량에 따라 보론의 조직강화 효과가 지배적이며 재현성이 부족하기는 하나 열처리 조건과 환경에 민감한 결과를 보였다.
- (2) 보론 첨가강은 급냉시 결정경계를 중심으로 Ferrite 석출을 수반하여 α마르텐사이트 조직으로 존재하였으며 Hv값 200정도로 경화능이 우수하였다.
- (3) 열의 영향에 미치는 경화능과 피로강도의 고저는 대체로 페라이트 조직에서 강도 레벨의 차이에 따른 마르텐사이트의 결정조직에 기인하는 것으로 보여지며 온도의 민감성에는 별 영향을 미치지 않고 기지조직 결정핵의 발생과 성장에 따르는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 한국과학재단 지정 금오공과대학교 전자부품산업 고품질화 및 공정자동화연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- 1) 지용권, 침탄기어용 보론첨가강에 대한 연구, 삼성중공업, pp. 55-59, 1990.
- 2) 박일부, 조수연, 이웅열, 냉간압조용 Boron첨가강의 구상화 열처리시 구상화 및 기계적 성질에 관한 연구, 산업기술교육훈련학회지, 제4권, 제1호, 2월 pp. 59-67, 1990.
- 3) 윤명진, 이경모, 구조용 탄소강의 표면결합 크기가 피로강도에 미치는 영향평가, 경일대학교, pp. 97-102, 1997.
- 4) Boron강의 성질 및 특성, 동보 제강주식회사, 1994.
- 5) 이종형 외2의 보론 첨가강(SISI51B20)의 피로 특성에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제18권, 제11호, pp. 174-177, 2001.
- 6) G. F. Melloy, P. R. Slimmom and P.P.Podgursky "Met. Trans."4 pp. 2279, 1973.
- 7) H. Inagaki : Proc. 6th Int. Conf. on 'Textures of Materials', Vol 1, pp.149, 1981.
- 8) H. Inagaki : Proc. 5th Int. Conf. on 'Textures of Materials', Vol 2, pp.157, 1978
- 9) H. Nisitani and I. Takeo, "Significance of Initiation, Propagation and Closure of Micro cracks in High Cycle Fatigue of Ductile Metals", End. Fract. Mech, Vol. 15, No. 3-4, pp. 445-456, 1981
- 10) T. Yutori, R. Ogawa : R. Hudd : Proc. 4th Int. Conf. on 'Textures of Materials', pp. 245, 1975.
- 11) I. Tamura : Trans. ISIJ, Vol 27, pp.763, 1987.
- 12) B. Mintz, W. B. Morrison, P. P. Moris : Proc. 4th Int. Conf. on of 'Textures Materials', pp.224, 1975.