

B첨가 고탄소강의 흑연화에 미치는 냉간압연의 영향

우기도 · 박영구 · 류재화* · 이창희** · 나종필***
 전북대학교 신소재공학부 · 신소재개발연구소
 * 포항종합제철 기술연구소
 **한국 원자력 연구소
 ***MK 전자(주)

The Effects of Cold Rolling on the Graphitization in Boron Addition High Carbon Steel

K. D. Woo, Y. K. Park, J. H. Ryu*, C. H. Lee** and J. P. Ra***

Faculty of Advanced Materials Engineering & Research Institute of Advanced Materials Development,
 Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea
 * POSCO Technical Lab., Pohang 790-784, Korea
 **Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon 305-606, Korea
 *** MK Electron Co., LTD., Yongin 449-810, Korea

ABSTRACT The graphitization is affected by the addition of small amount of the elements(such as Si, Al, Ni, B, Cr and Mn etc.) and the pre-treatment(such as cold rolling). Boron is well known element to accelerate the graphitization of cementite in high carbon steels. Also, cold rolling is known to accelerate the graphitization. But the graphitization nucleation mechanism by cold rolling is few reported. Therefore the effect of cold rolling in Fe-0.5%C-1.0%Si-0.47%Mn-0.005%B steel on the graphitization is investigated quantitatively using hardness test, optical microscope and scanning electron microscope, neutron induced microscopic radiography. The nucleation of graphite in cold-rolled Fe-0.5%C-1.0%Si-0.47%Mn-0.005%B steel is formed at void which is formed at pearlite/pearlite boundary by cold rolling. But the effect of cold rolling on graphitization in boron addition steel is more effective than that of no boron addition steel due to segregation of BN at void in boron addition steel.

Key words : High carbon steel, Graphitization, Cold rolling, FTE

1. 서 론

고탄소강은 강도 및 경도가 우수하나 소성가공성과 절삭가공성이 불량하여 사용에 제한을 받아왔다. 따라서 고탄소강을 성형전이나 가공전에 저강도, 고연성화하고 가공후에 초기의 강도와 경도를 회복할 수 있는 방법을 모색하게 되었다. 이 단점을 개선할 연구가 카와사키 제철소와 이스시마

제철소를 중심으로 진행되고 있으며 그 중 일부는 농기계용 경질재료와 선재재료로 실용화하고 있는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} 고탄소강의 흑연화 열처리 목적은 흑연화 어닐링에 의하여 펄라이트중의 시멘타이트를 흑연화시켜 강을 연화시키므로써 가공이 용이한 강을 만들어 가공후 오스테나이트화 처리후 퀴칭템퍼링 처리에 의하여 강인화시켜 목적하는 기계적 성질을 얻도록 하여 각종 재료

로서 사용케 하는데 있다. 고탄소강의 흑연화는 첨가원소 및 냉간가공등에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.²⁻¹¹⁾ Ni, Al, Si, B등의 원소는 흑연화를 촉진시키는 원소이며 Cr, Mn등은 흑연화를 억제시키는 원소로 알려져 있다.³⁻⁷⁾

본 연구에서는 흑연화가 용이한 B첨가강을 이용하여 고탄소 흑연강의 개발시에 적용 가능한 냉간압연 공정을 도입하여 냉간압연이 흑연화에 미치는 영향을 연구하고, 냉간압연시 흑연화의 기구를 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 합금은 Table 1과 같이 Fe-0.65%C-1.0%Si-0.5%Mn을 기본조성으로 하여 0.005%B을 첨가하였다. 합금의 제조는 전해철과 고순도 Mn, Si과 Fe-16%B 모합금 및 가탄제를 각각 일정한 조성으로 칭량하여 진공고주파 유도로의 질소 분위기에서 사각 금형에 주조하였고, 용해온도는 1600°C이며, 알루미늄 도가니를 사용하였다.

주괴를 12mm두께로 절단한 후 편석을 제거하기 위하여 1100°C의 아르곤 분위기에서 1시간 균질화 처리후 3mm두께까지 열간압연하였으며, 실제조업 공정 조건과 맞추기 위하여 시편의 cooling온도를 600°C에서 1시간 유지 후 공랭하였다. 냉간압연량에 따른 흑연화과정을 조사하기 위하여 열간압연재를 각각 10%, 20%, 30%와 50%로 냉간압연하였다. 흑연화어닐링은 열간 및 냉간 압연재를 이용하여 680°C에서 1~50시간까지 실시하였다. 열간압연재와 냉간압연재의 조직관찰 및 흑연화처리시

시멘타이트의 흑연으로의 분해 거동을 조사하고자 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하였으며 화상분석기를 이용하여 흑연의 면적분율을 측정하였고, 로크웰 경도계를 이용하여 흑연화 과정에 따른 경도변화를 관찰하였다.

고용 B 및 B 화합물의 분포를 측정하기 위해 FTE(Fission Track Etching)법^{12,13)}을 이용하여 B의 분포를 측정하였다. 시험에 의해 조사량(Thermal neutron fluence)을 측정한 결과 4.5x10⁸(n/cm²·s)이었으며 총 조사량이 2x10¹³(n/cm²·s)로 되도록 조사시간을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 흑연화거동에 미치는 냉간압연의 영향

열연한 모든 시편은 결정립이 미세하였고 입계에 페라이트가 석출한 균일한 펄라이트 조직을 나타내었으며 B첨가량에 따른 광학 조직차이는 존재하지 않았다⁴⁾ 열간압연재에서 광학사진 상으로는 나타나지 않지만 많은 연구논문¹⁴⁻¹⁷⁾에 의하면 B이 N과 반응하여 BN가 다량 형성되어 있을 것으로 생각되며 이와같은 BN은 흑연화처리 및 경화열처리시 흑연화 및 경도변화에 각각 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 본 연구^{6,18)}에서는 FTE법에 의하여 B의 분포를 조사한 결과 B1시편에서 다량의 B이 불균일하게 분포하였으나 B0시편에서는 B의 존재를 확인할 수 없었다. 냉간압연량에 따른 흑연화 거동을 조사하기 위해 0.005%B을 첨가한 B1합금을 이용하여 냉간압연량에 따른 조직변화를 주사전자현미경으로 조사하였다(Fig.1). 열간압연재(0%CR:cold rolling)는 완전한 층상의 시

Table 1. Chemical composition of the specimens (mass%)

| Steels | C | Si | Mn | Al | P | S | B | N | Fe |
|--------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| B 0 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.002 | 0.001 | 0.007 | - | 0.002 | Bal. |
| B 1 | 0.50 | 0.99 | 0.47 | 0.004 | 0.001 | 0.007 | 0.005 | 0.002 | |

멘타이트로 된 펄라이트가 나타나며, 10% 및 20% 냉간압연재에서는 대부분 조대한 층상 시멘타이트로 된 펄라이트로 되어 있으나 일부 미세한 층상 시멘타이트도 관찰된다. 그러나 30%이상 냉간압연한 가공재(30%CR)의 경우는 층상 시멘타이트가 냉간압연에 의해 대부분 깨어져 미세한 층상 시멘타이트의 형태로 되었다. 따라서 열간압연재의 층상 시멘타이트를 미세화하기 위해서는 30%이상의 냉간압연이 필요하다.

Fig. 2는 0~50% 냉간압연후 680°C에서 2, 10, 24시간 흑연화처리한 시편의 광학사진을 나타낸 것으로, 열간압연재의 경우 흑연화의 진행속도가 늦고 24시간 흑연화 어닐링시 흑연이 불균일한 분포로 미량 생성되었고, 반면 10%이상 냉간압연시는 흑연화가 촉진되어, 10시간 어닐링에서도 미세한 흑연이 석출되었다. 24시간 흑연화 어닐링처리재는 약 2~5 μm 정도로 미세한 흑연립이 페라이트와 혼재한 조직을 나타내었다. 20% 이상 냉간압연재의 경우 흑연화가 10%냉간 압연재 보다 촉진되어 10시간에서도 다량의 흑연이 석출되었고 24시간 흑연화어닐링시 구상 시멘타이트는 거의 소멸되었으며 흑연립의 크기는 3~6 μm 내외로 10%냉간압연재 보다 조대하고 흑연은 가공 방향으로 성장하였으며 흑연 평균 크기는 길이가 10 μm 내외, 폭이 6 μm 내외였다. 24시간 흑연화 어닐링재에서는 흑연의 밀도가 10시간 어닐링처리재 보다 높았다. 흑연은 void나 균열된 입계에서 핵생성이 일어나 입

계를 따라 성장이 일어나기 때문에 구상이 아닌 편상형태로 되었다고 생각된다. 50%냉간 압연재의 경우 24시간 흑연화 어닐링처리시는 페라이트 입내의 시멘타이트가 분해되어 거의 관찰되지 않은 것으로 보아 흑연화가 대부분 일어난 것으로 사료된다.

680°C에서 24시간 흑연화처리한 열간압연재의 경우 B이 첨가된 고탄소강이지만 흑연이 소량 석출되었다. 그러나 냉간압연한 모든 합금에서 흑연은 입계에서 우선적으로 불균일 핵생성하여 성장하고 있으며, 페라이트 입내에서는 일부 흑연만 석출 및 성장하고 있다. 입내에 석출되어 있는 흑연은 末吉등⁸⁾에 의하면 흑연화 초기에 페라이트 입계와 아립계에 형성된 흑연이 페라이트 결정립의 성장에 의하여 페라이트 입내에 남게 되기 때문이라 하였으며 때로는 입내에 존재하는 시멘타이트의 균열, Al₂O₃, SiO₂ 및 MnO₂의 개재물의 균열 등에 의하여 이들 장소에서 흑연이 우선 핵생성되어 입내에 존재하게 된다고 생각된다. 반면 입계에 흑연이 대부분 존재하고 있는 것은 냉간압연에 따른 입계에서의 공극의 생성, B 및 BN 개재물의 입계편석⁹⁾ 등이 흑연의 핵생성 장소로 작용하기 때문이라 생각된다. 이들 냉간압연재에서 석출 및 성장한 흑연은 입자가 구형이 아니라 길게 연신된 형태로 나타나고 있으며 이런 형태의 흑연 생성 원인에 대해서는 고배율의 전자현미경으로 관찰하여 고찰할 필요가 있다.

Fig. 1. Microstructural changes in cold rolled Fe-0.5%C-0.99%Si-0.47%Mn-0.005%B steel.
a) 0% CR, b) 10% CR, c) 20% CR, d) 30% CR, e) 50% CR

Fig. 2. Microstructural changes in cold rolled Fe-0.5%C-0.99%Si-0.47%Mn-0.005%B steel annealed at 680°C for 2, 10 and 24hrs.

Table 2는 680°C에서 10시간 및 24시간 흑연화처리재의 냉간압연에 따른 흑연화율 및 잔류시멘타이트의 량을 나타낸 것으로 30%냉간압연재에서 24시간 흑연화어닐링시 가장 높은 흑연화율을 얻을 수 있었다. 24시간 흑연화 처리재에서 50%냉간압연한 경우 흑연화율이 10%와 20%냉간압연재의 흑연화율과 유사한 것으로 보아 30%이상의 냉간

압연에 의해 흑연화시간은 촉진되지만, 흑연화율은 30%와 거의 유사하였다. 열간압연재의 경우 24시간 흑연화어닐링 전후에서 흑연화가 시작되기 때문에 24시간까지 흑연화율은 극히 낮다.

시멘타이트량은 이론적으로 계산된 시멘타이트의 량보다 실험치가 높게 나타나고 있으나 어닐링 시간의 경과에 따라 시멘타이트의 분해의 과정을

이해하는데 도움이 되리라 생각된다. 또한 흑연화의 핵생성 및 성장은 시멘타이트 분해와 상호관계가 있으므로 시멘타이트량의 변화와 흑연량의 변화를 비교하였다. 그 결과 흑연화에 시멘타이트의 분해가 다소 영향을 미쳤으리라 생각되나 다른 인자들(void 존재, BN의 분포, 아립자 및 결정입도등)도 영향을 미치는 것으로 생각된다. Table 2에 의하면 시멘타이트의 면적분율의 변화가 열간압연재 및 30% 이하 냉간압연재의 경우에는 어닐링시간의 경과에 따라 냉간압연량의 증가에 대해 완만히 감소하나, 50%냉간압연재의 경우는 빠르게 시멘타이트의 분해되어 24시간 어닐링시에는 시멘타이트가 미량 존재하는 것으로 보아 시멘타이트가 대부분 분해되었음을 알 수 있다.

Table 3에서는 고탄소강의 가공성에는 시멘타이트의 흑연화 뿐만아니라 재결정된 페라이트의 결정립도 영향을 미치리라 생각되어 흑연어닐링 시

간에 따른 페라이트의 결정립 크기 변화를 측정하였다. 페라이트 결정립도는 가공도가 크게 증가되면 재결정이 재결정립이 미세화 되어함에도 불구하고 결정립 성장을 억제하는 미세한 시멘타이트의 부재로 50%냉간 가공재의 페라이트 결정립이 680°C에서 24시간 흑연화 어닐링시 30% 냉간압연재보다 오히려 성장되었음을 알 수 있다. 이것은 상기한 입계에 존재하는 시멘타이트의 소멸로 인한 입계 고착현상이 제거되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 3은 흑연립의 성장곡선을 나타낸 것으로 50%냉간압연한 경우 10시간 흑연화 어닐링에서도 흑연입자의 성장이 현저하였고 24시간까지는 성장속도가 다소 완만하였다. 그러나 10%~30%냉간압연재의 경우, 각각 24시간의 어닐링까지 흑연입자의 성장이 계속적으로 진행되고 있다. 그러나 24시간 이상 장시간 어닐링하면 흑연의 성장에 필요한

Table 2. Area fraction of cementite noudules in Fe-0.5%C-0.99%Si-0.47%Mn-0.005%B steel annealed at 680°C for 10 and 24hrs

| Def. Ratio(%) \ Time(hrs) | HR | 10%CR | 20%CR | 30%CR | 50%CR |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Cementite | | | | | |
| 10 | 6.54 | 6.20 | 6.00 | 5.85 | 5.25 |
| 24 | 4.65 | 3.63 | 3.64 | 3.82 | 0.19 |
| Graphite | | | | | |
| 10 | 0.15 | 0.21 | 0.50 | 0.65 | 0.71 |
| 24 | 0.22 | 1.02 | 1.07 | 1.51 | 1.12 |

*Def ratio : Deformation ratio(%), HR : Hot rolling, CR : Cold rolling

Table 3. Growth of ferrite grain in Fe-0.5%C-0.99%Si-0.47%Mn- 0.005%B steel annealed at 680°C

| Def. Ratio(%) \ Time(hrs) | 5 | 10 | 24 |
|---------------------------|-----|------|------|
| HR(0% cold rolling) | 5.5 | 6.5 | 8.0 |
| 10% cold rolling | 6.5 | 12.5 | 18.0 |
| 20% cold rolling | 6.5 | 12.0 | 17.5 |
| 30% cold rolling | 6.0 | 11.5 | 17.0 |
| 50% cold rolling | 6.0 | 11.0 | 22.0 |

시멘타이트가 소멸되므로 성장은 점차 완만하게 되어 평형을 이룰 것으로 생각된다.

3.2 냉간압연재의 흑연 핵생성 기구 규명

Fig. 4는 B이 첨가된 B1합금의 열간가공재(a)와 30% 냉간가공재(b) 및 B이 첨가되지 않은 30% 냉간가공재(c)의 입계 조직을 고배율 전자현미경 사진으로 나타낸 것이다. 열간가공재는 잘 발달된 라멜라 형태의 펄라이트를 나타내고 있으나 냉간가공을 30%한 냉간가공재는 펄라이트가 깨어져 미세화된 것을 알 수 있다.

30%냉간가공한 강(b)에서는 입계에 void(←)가 다

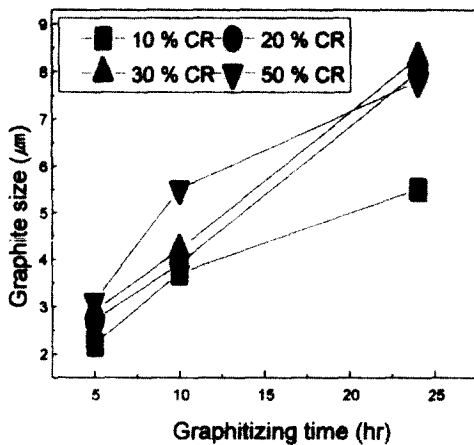


Fig. 3. Growth curves of graphite nodules in Fe-0.5%C-0.99% Si-0.47%Mn-0.005%B steel annealed at 680°C.

량 존재하는 개방구조로 되어 있으나 열간압연재(a) 및 B이 없는 냉간가공재(c)는 이런 개방구조의 입계를 관찰할 수가 없었다. 지배율에 의하면 냉간가공재(b), (c)에서 펄라이트 크기 및 분포는 큰 변화가 없었으나⁸⁾ 고배율에서는 펄라이트/펄라이트 계면의 조직이 B첨가 유무에 따라 크게 상이하였다. B첨가강은 이와같이 펄라이트/펄라이트 입계에서는 void가 연결되어 존재하지만 B 무첨가강은 void가 연결된 입계를 관찰할 수 없었다. 또한 B를 첨가하지 않은 강에서는 냉간 가공후에도 void가 입계에서 나타나지 않았다. 이와같은 현상은 B이나 BN의 입계편석과 냉간가공시 void생성과 깊은 관계가 있으리라 예측된다. 즉 가공시 상대적으로 저항이 큰 펄라이트/펄라이트 계면에서 B의 편석 및 B화합물이 존재시 냉간가공 동안 이곳에서 큰 응력이 집중되어 void가 나타나고 있다고 생각되며 펄라이트/페라이트, 페라이트/펄라이트 입계의 경우 페라이트가 상대적으로 연한 조직이므로 B화합물들이 존재하여도 압연시 큰 응력의 집중이 되지 않고 쉽게 소성변형 되기 때문에 입계에서 큰 void의 chain과 같은 결함이 나타나지 않는 것으로 생각된다. B이 첨가되지 않은 강에서는 가공을 하여도 이와같은 입계에 void가 연결되어 나타나지 않는 이유는 비록 펄라이트/펄라이트 입계라도 입계에 B이나 BN등이 편석되어 있지 않다면 냉간가공시 이와같은 void가 나타나지 않는 것으로 보아 B 및 BN등의 입계 편석이 void형성의 한 원인이 되었다고 사료된다.

Fig. 4. SEM micrographs of hot rolled and 30% cold rolled B1 steel.
a) Hot-rolled B1 steel, b) Cold-rolled B1 steel, c) Cold rolled B0 steel

를 따라 불안정하고 미세한 시멘타이트가 free carbon과 페라이트로 분해되고($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$) 이때 생성된 free carbon이 격자확산을 통해 입내에서 입계로 이동하여 입계에 도달하면 입계를 따라

Fig. 5는 냉간가공에 의해 생성된 펄라이트/펄라이트 입계의 void에서 흑연화어닐링시 흑연이 우선 석출 및 성장하는 것을 보여준다. 이것은 입계 쉽게 흑연 핵생성 장소로 이동하므로서 흑연이 용이하게 생성 및 성장된다고 사료된다. 2시간 흑연화어닐링에 의하여 void상에 흑연 rich 영역(\rightarrow)이 생성되며 5시간 흑연화어닐링에서는 이미 입계의 일부 void상에서 $5\mu\text{m}$ 정도의 흑연(\rightarrow)이 생성된 것이 확인되었다. 10시간 어닐링재에서는 다량의 흑연이 입계의 void상에 석출되어 입계를 따라 길게 연결된 chain모양으로 나타나며, 흑연의 크기는 폭 부분이 $5\sim 8\mu\text{m}$ 로 되었다. 아직도 잔류 미세 시멘타이트가 소량 존재하지만 흑연은 상당히 성장된 것을 볼 수 있다. 이와같이 void가 입계에 chain 형태로 나타나고 석출된 흑연의 모양도 전자현미경을 이용하여 확대하여 관찰하여 보면 입계를 따라 길게 입계를 따라 성장한 형태로 나타나며 분포 또한 불균일하였다. 24시간 열처리시 펄라이트가 거의 소멸된 것으로 보아 흑연화가 대부분 완료되었다고 할 수 있으며 흑연의 성장 방향은 압연방향 즉 void가 길게 연결된 방향과 잘 일치하였다.

Fig. 6은 B 무첨가강을 30% 냉간압연후 680°C 에서 10시간 흑연화처리한 조직을 나타낸 것으로서 흑연이(\leftarrow) 소량 석출되었으나 B첨가 열간압연강(Fig.2, HR강) 보다는 흑연화가 촉진되었다. 그러나 B를 첨가한 냉간압연강(Fig. 5의 C) 보다는 흑연화가 크게 지연되었다. 이것은 B 무첨가강의 경우

Fig. 5. The nucleation of graphite at void location in grain boundary annealed at 680°C .
a) 2hrs, b) 5hrs, c) 10hrs, d) 24hrs

Fig. 6. SEM micrographs of cold rolled B0 steel annealed at 680°C for 10hrs.

않으므로 입계에서 핵생성이 지연되었기 때문으로 생각된다.

일반적으로 B은 입계에 주로 편석된다는 neutron radiography에 의한 연구결과가 보고 되어 있다^{13,19)}. 냉간가공시 B의 분포변화를 조사하기 위하여 neutron radiography시험을 하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 냉간가공에 의해 B의 분포에는 큰 영향을 미치지 않고 있는 것을 알 수 있다. B의 존재에 의하여 검은 반점(pits)이 불균일 분포로 나타나고 있으며 이 반점은 B의 편석 또는 BN의 존재에 의한 것으로 생각되며 이들이 흑연화 핵생성 장소로 작용한 것으로 사료된다.

Fig. 8은 B 첨가강의 냉간압연재의 흑연 핵생성 및 성장 기구를 모식도로 나타낸 것으로, B강을 냉간가공하면 펄라이트/펄라이트 계면의 B화합물이 존재하는 곳에 void가 생성되고 흑연화 어닐링 시 이 계면의 void상에서 흑연이 우선 석출되어 성장에 의해 주위의 흑연과 합체가 일어나게 되어 흑연이 chain형태로 된다고 사료된다. 이 때 void에서 흑연의 핵생성은 BN과 상호관계가 있을 것으로 사료된다. B이 냉간압연재의 흑연화에 어떻게 영향을 미치는 가를 고찰할 필요가 있으리라 생각된다. 왜냐하면 B 첨가강은 B 무첨가강에 비하여 냉간가공에 의하여 흑연화가 크게 촉진되었기 때문이다.

Fig. 7. Boron or boride distribution in boron addition steel annealed at 680°C for 24hrs after hot and cold rolling.
(a) Cold rolled steel,
(b) Hot rolled steel

입계에 B 또는 B화합물이 편석되지 않으므로써 냉간가공에 의해서 입계에 void가 생성되지 않고 또한 B 또는 B화합물인 BN이 입계에 존재하지

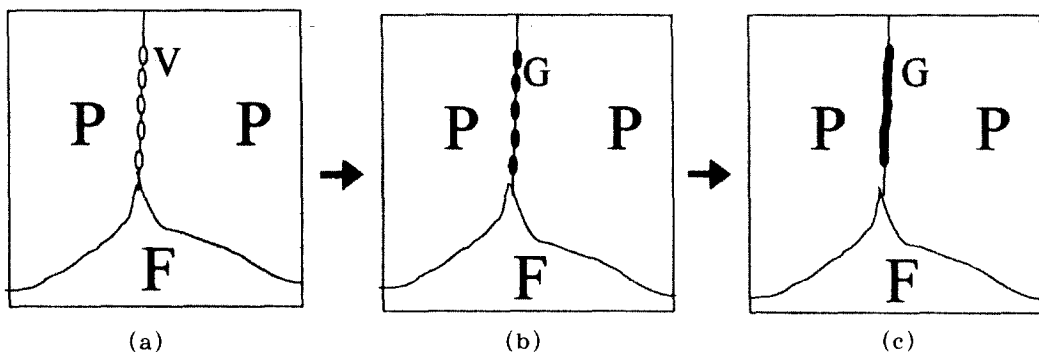


Fig. 8. Schematic diagrams of nucleation of graphite in cold rolled steel.
(a) Void chain formed by cold rolling process, (b) Nucleation of graphite at void located in pearlite/pearlite grain boundary, (c) Growth and coalescence of graphites at grain boundary.

냉간가공하지 않은 B강은 680℃에서 24시간 흑연화 어닐링하여도 광학현미경으로는 흑연의 석출을 관찰 할수 없으나 고배율의 전자현미경에 의하여 발견된 흑연은 입계 및 입내에서 1 μ m크기 정도로 미세하였다.¹⁸⁾

4. 결 론

B를 첨가한 고탄소강의 흑연화에 미치는 냉간압연의 영향과 냉간압연재의 흑연핵생성 기구를 조사 분석한 결과는 아래와 같다.

1) B첨가 고탄소강의 시멘타이트의 흑연화는 간압연 도입으로 촉진되었다. 그러나 흑연화에 미치는 냉간압연의 영향은 B첨가 고탄소강이 B무첨냉가강에 비하여 현저하였다.

2) B이 첨가된 냉간압연강의 흑연 핵생성은 입계에서 chain형태의 void에서 일어나고 흑연은 압연방향으로 길게 연신된 형태를 갖는다. 그러나 B이 첨가되지 않은 탄소강에서는 냉간압연에 의하여 이와 같은 입계에 void가 나타나지 않았으며 흑연의 입계 석출도 현저히 억제되었다.

3) 흑연화처리 전에 냉간압연에 의하여 시멘타이트가 미세화되어 흑연화 어닐링에 의해 쉽게 흑연과 페라이트로 분해되고 그 결과 흑연의 성장이 촉진되었다.

후 기

이 논문은 1996년도 포항종합제철(주) 연구과제(96C043)의 연구비에 의해 연구한 결과의 일부로서 이에 감사드립니다. 또한 B분포 측정을 도와주신 한국 원자력 연구소 김현준 박사, 성백석 연구원에게도 감사드립니다.

참고문헌

1. Y. Kawabata et al : CAMP-ISIJ, 2(1989) 1820
2. Y. Kawabata et al : CAMP-ISIJ, 2(1989) 1822

3. "Encyclopedia of Materials Science and Engineering", Ed. by M. B. Bever, Pergamon Press, Oxford, (1986) 405
4. K. D. Woo, Y. K. Park, S. W. Kim and Y. C. Jin : "A Study of the Effects of Alloying, Elements on Graphitization in High Carbon Steel", POSCO Research Report(95K012), Chonbuk National Univ., (1996)
5. K. Fukui et al : CAMP-ISIJ, 7(1994) 817
6. K. D. Woo, Y. K. Park, S. W. Kim, Y. C. Jin, J. H. Ryu and J. P. Ra : J. Kor. Soc. for Heat Treatment, 11 (1998) 140
7. K. D. Woo, S. W. Kim, D. Y. Kim, Y. K. Park and J. H. Ryu : J. Kor. Soc. for Heat Treatment, 10 (1997) 101
8. H. Sueyoshi and K. Suenaga : J. Jpn. Inst. Metals, 42(1978) 676
9. A. Fujihira : J. Jpn. Inst. Metals, 44(1980) 15
10. A. Fujihira : J. Jpn. Inst. Metals, 43(1979) 640
11. K. Fukui et al : CAMP-ISIJ, 4(1991) 833
12. B. A. Thompson : Trans. Metall. Soc. AIME, 218(1960) 228
13. Z. En, N. Jurneav and M. M. Usanova, J. W. Ho, J. Jang and J. S. Brenizer : 18th Int. Conf. on Nuclea. Tracks in Soids, Cairo, 1-5 Sept., 1996.
14. B. Engl and J. Drewes : in Proc. Conf. "Technology of continuous annealed cold rolled sheet steels(ed., R. Pradhan) Warrendal, PA, Warrendale-AIME, (1985)
15. Y. Kawabata et al : CAMP-ISIJ, 3(1990) 751
16. T. Higashino et al : CAMP-ISIJ, 3(1990) 755
17. K. S. Bang and Y.H. Ann : J. Kor Inst. of Mat. & Mater., 34(1996) 52
18. K. D. Woo and Y. K. Park : "Graphitization Behavior of Fe-Si-Mn-B System and Fe-Ni-B System High Carbon Steel", POSCO Research Report(96C043), Chonbuk National Univ., (1997)