

論 文

구상흑연주철의 Bainite변태과정에서
Bainitic Ferrite의 형상변화

崔 奮 川

Morphological Variation of Bainitic Ferrite in Transformation Process of
Austempered Ductile Iron

Dap-Chun Choi

Abstract

The growth characteristics of bainite at early stage in the fast quenched spheroidal graphite cast irons containing 0.06%Mn and 0.45%Mn during austempering process, was investigated with optical and scanning electron microscope. The following results regarding the effects of Mn and isothermal heat treatment on the morphological variation of bainitic ferrite were obtained.

The morphology of bainite varies from acicular below 350°C to feather shape above 350°C. The period of isothermal treatment also affects the shape of bainite at the fixed temperature. At 350°C, bainite is bamboo leaf-like up to 200 secs of isothermal holding time and with further increasing time up to 300 secs, changes to a mixed structure consisting of both feather and bamboo leaf and, finally becomes all feather shape at 900 secs.

The morphology of bainitic ferrite formed at early stage of 300°C isothermal treatment is similar to that of bainitic ferrite formed at 250°C or 350°C with unbranched, linear ferrite. However, bainitic ferrite divides into branches with increasing isothermal treatment, which occurs more fast at 400°C than at 350°C

The difference in adding amount of Mn influences the morphology of bainitic ferrite in upper bainite. The bainitic ferrite with 0.45%Mn is observed to be more stable than that with 0.06%Mn, remaining unbranched for a longer period at the same temperature.

1. 서 론

오스템퍼링처리한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron: ADI)은 항온열처리온도와 베이나이트의 형상의 차이에 의해 상부베이나이트주철과 하부베이나이트주철로 크게 나눌 수 있고 어느 것이나 다른 열처리법으로는 얻기 어려운 극히 우수한 강인성을 갖고 있어 종래 주강이나 단조강으로 만들었던 기계나 자동차부품등에 그 용도가 확

대될 전망이다. ADI의 재료특성은 bainitic ferrite의 roughness, 잔류오스테나이트의 량, 분포 상태 및 탄소농도, 마르텐사이트의 분포상태등에 영향을 받고 이들 인자는 모재의 화학조성과 열처리조건에 의해 크게 변화하기 때문에 재질의 다양화에는 유리하나 안정성의 면에서 문제가 있다. 특히 Mn은 베이나이트변태를 지연시키는 작용이 있고, 공정응고시에 편석하여 공정세포경계부에 농도가 높아지므로 세포경계부에 미변태 오스

테나이트가 잔류하고¹⁻⁵⁾ 상부베이나이트재의 강인성 및 피삭성을 크게 저하^{2,3,6-9)} 시킨다. 또한 Mn은 베이나이트성장시에 bainitic ferrite와 오스테나이트사이에 재분배되고, 오스테나이트를 안정화하여 Ms점을 저하시키는 작용을 가지므로 베이나이트조직 및 잔류오스테나이트량에도 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이 때문에 저자등이 이미 발표한 보고서¹⁰⁾에서는 Mn함유량차이에 따른 베이나이트의 성장, bainitic ferrite의 roughness의 변화, 오스테나이트중의 탄소농도의 변화, 잔류오스테나이트량의 변화등을 조사하여 베이나이트변태과정에 미치는 Mn의 영향에 대해 보고하였다.

본 연구에서는 0.06%Mn 및 0.45%Mn을 함유한 구상흑연주철을 오스템퍼링처리 도중에 급랭하고 얻어진 시편을 광학현미경 및 주사전자현미경으로 초기 베이나이트조직의 성장과정을 관찰하여 bainitic ferrite의 형상변화에 미치는 Mn과 항온열처리조건에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

원료로 고순도선철, Fe-Si 및 Fe-Mn을 목표로하는 조성이 되도록 칭량한 다음 고주파유도로에서 용해하고 Fe-Si-Mg합금으로 구상화처리한 후 Fe-50%Si합금으로 접종하여 2 inch Y-block에 주조하였다. Table1은 시료의 화학조성, 흑연량 및 흑연립수를 나타낸다. 각 시료로부터 5X 10X 15mm크기의 시편을 만든다음 항온열처리조건의 영향을 조사하기 위하여 0.45%Mn을 함유한 시편 No. 2를 900℃로 유지된 염욕에서 3600초 유지하여 오스테나이트화한 후 250℃, 300℃, 350℃ 및 400℃의 염욕에서 각 시료당 10초로부터 1800초까지 경과후 얼음물에 급랭하였고, 상부베이나이트변태에 미치는 Mn량의 영향을 조사하

Table 1. Chemical composition, amount of graphite and nodule count of specimens

No.	CHEMICAL COMPOSITION, WT%				AMOUNT OF GRAPHITE, %	NODULE COUNT, / mm ²
	C	Si	Mn	Mg		
1	3.25	2.59	0.06	0.07	12.2	127
2	3.40	2.71	0.45	0.05	11.6	118

기위하여 0.06%Mn을 함유한 시편 No 1과 0.45%Mn을 함유한 시편 No 2를 동시에 900℃로 유지된 염욕에서 3600초 유지하여 오스테나이트화한 후 375℃ 및 425℃의 염욕에서 각각 10초로부터 1800초까지 경과후 얼음물에 급랭하고 그 결과를 상호 비교하였다. 각 오스템퍼링처리한 시편은 절단 및 연마하고 3% picral액으로 부식하여 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하여 항온열처리에 따르는 초기 베이나이트조직의 성장과정을 조사하고 전자현미경사진으로부터 bainitic ferrite의 형상변화를 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 베이나이트형상에대한 항온열처리조건의 영향

많은 연구자들^{1,10,11)}이 보고하고 있는바와 같이 일반적으로 베이나이트는 항온 변태온도의 저하에 따라 미세한 침상(針狀)조직으로 되나 어느 온도에서도 구상흑연의 주위로부터 공정세포경계로 향하여 성장하는 경향이 있다. 그리고 베이나이트는 크게 상부베이나이트와 하부베이나이트로 분류하고 약 350℃이상의 온도에서 오스테나이트결정립계로부터 래스(lath)상의 bainitic ferrite가 다발상으로 생성하고 광학현미경하에서는 깃털상으로 보이는 베이나이트를 상부베이나이트, 350℃이하에서 생성하고 판상(板狀)의 bainitic ferrite와 그 내부에 석출된 미세 탄화물입자로 된 베이나이트를 하부베이나이트로 정의¹²⁾하고 있다. 사진 1은 0.45%Mn을 함유한 시편 No 2에서 항온열처리조건의 변화에 따른 베이나이트의 형상변화를 보여주는 광학현미경사진이다. Photo 1에서 알 수 있는 바와같이 항온열처리온도가 300℃인 경우 베이나이트의 형상은 미세한 침상(다발상으로 생성된 판상의 bainitic ferrite군으로 생각됨.)이고 열처리시간이 100초에서 900초로 길어져도 약간 더 두터워 지는 느낌은 있으나 형상은 변화가 없음을 보여주고 있으며, 400℃인 경우 베이나이트의 형상은 깃털상이고 시간이 100초에서 900초로 경과하여도 형상의 변화는 크게 인식되지 않으나 350℃의 경우 열처리 시간이 100초에서는 죽엽상(竹葉狀, 굵은 침상)이고 900초에서는 일종의 깃털상을 보여주고 있음에 비해 300초에서는 죽엽상 베이나이트사이에 깃털상의

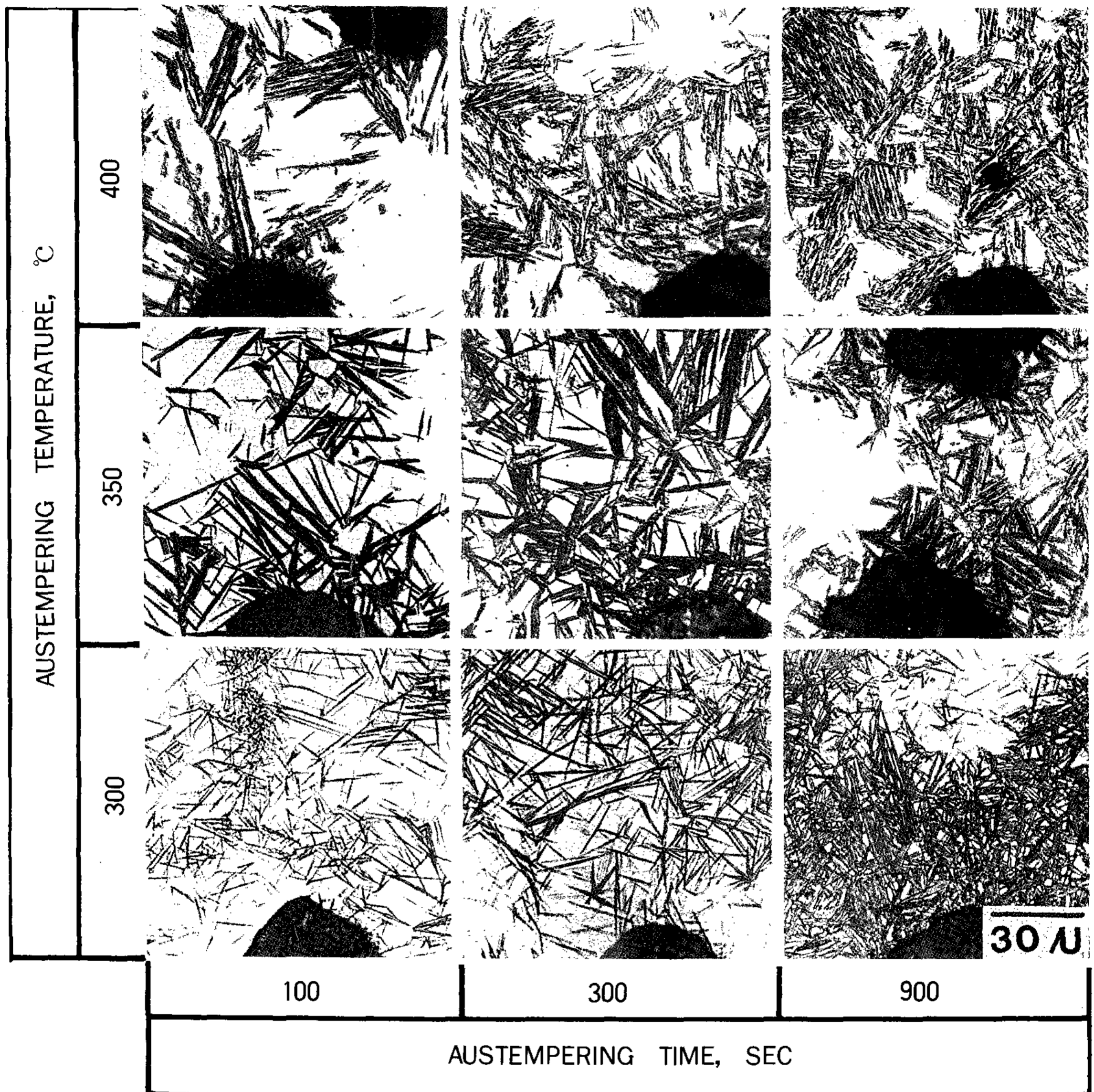


Photo 1. Morphological variation of bainite with austempering temperature and time in the specimen No, 2 containing 0.45%Mn.

베이나이트가 생성하여 존재하고 있음을 알 수 있다. Photo2는 상기 결과를 더욱 명확히 하기 위해 항온열처리시간 300초에서 항온열처리온도가 300℃, 350℃ 및 400℃인 경우의 베이나이트형상의 차이를 보여주는 고배율(X1000) 광학현미경 사진이다. 여기서 Photo, 2-A는 300℃, Photo 2-B는 350℃, 사진2-C는 400℃에서의 조직으로 300℃에서는 침상, 400℃에서는 깃털상이나

350℃에서는 Photo 2-B중 a로표시된 죽엽상의 베이나이트와 b로 표시된 깃털상과 유사한 형상의 베이나이트가 혼재하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Photo 3은 항온열처리온도 350℃에서 죽엽상 베이나이트만이 존재하는 200초와 죽엽상과 깃털상의 베이나이트가 혼재하는 300초에서의 베이나이트형상을 비교한 전자현미경사진으로 a로 표시된 것은 죽엽상, b로 표시된 것은 깃털상으로

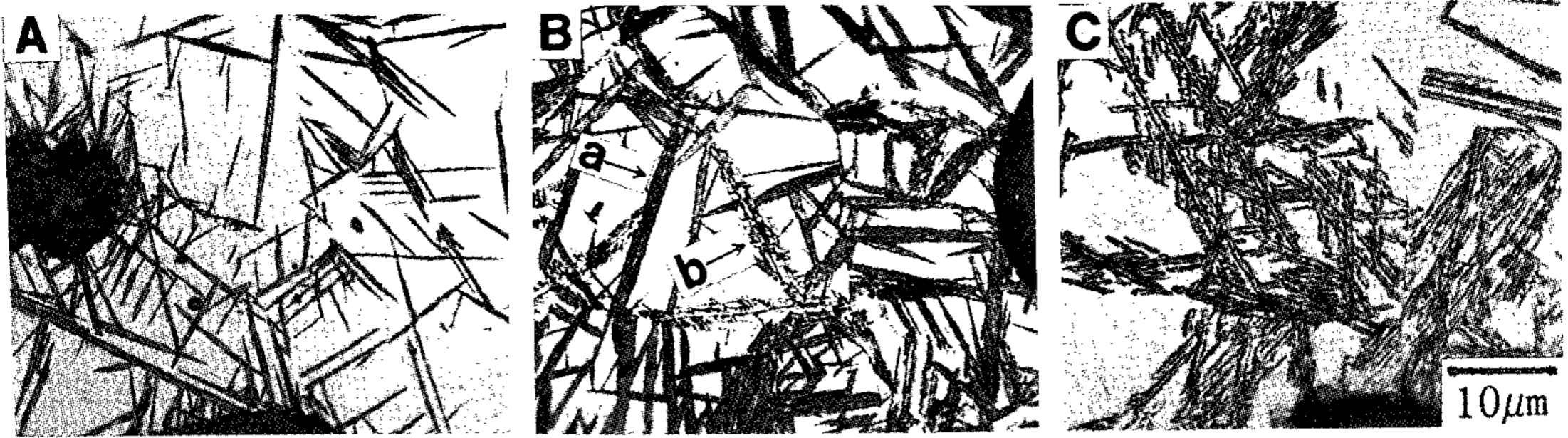


Photo 2. Optical micrographs of bainite in the specimen No. 2 containing 0.45%Mn austempered for 300sec at(A) 300°C, (B) 350°C, and (C)400°C.

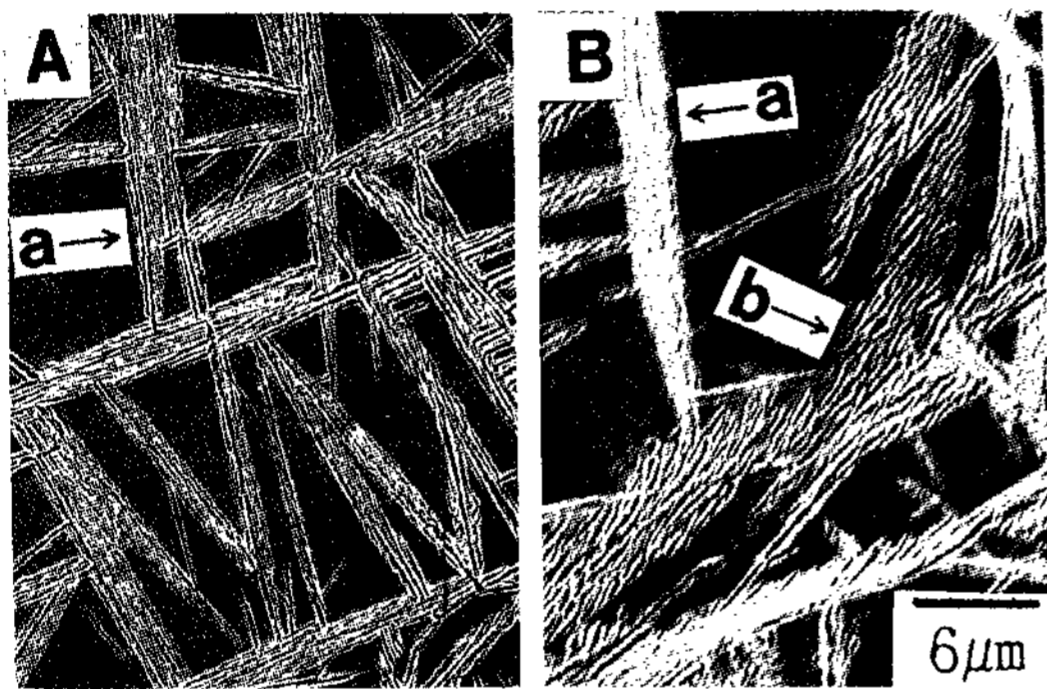


Photo 3. Scanning electron micrographs of bainite in the specimen No. 2 containing 0.45%Mn austempered at 350°C for (A) 200sec, and (B) 300sec-

보이는 베이나이트를 나타내며 형상에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 본 결과와 베이나이트의 형상은 350°C 이상에서는 깃털상의 상부베이나이트가, 이하에서는 침상의 하부베이나이트가 생성한다는 기 발표된 결과와 잘 일치하고 있다. 그러나 350°C의 경우는 상술한 바와 같이 200초까지는 전부 죽엽상이나, 300초에서는 죽엽상과 깃털상이 혼재하며 900초에서는 전부 깃털상으로 되어 항온열처리시간의 장단에 따라 존재하는 베이나이트의 형상이 변화함을 알 수 있으며 300초에서 갑자기 깃털상의 베이나이트가 생성되어 죽엽상의 베이나이트와 혼재하는 원인에 대해서는 추후 연구해야 할 과제로 생각된다.

3. 2 Bainitic ferrite의 형상에대한 항온열처리조건 의 영향

Photo 4는 항온열처리조건에 따른 0.45%Mn을 함유한 시편 No 2의 bainitic ferrite의 형상변화를 보여주는 주사전자현미경사진이다. Photo 4에서 알 수 있는 바와 같이 250°C 및 300°C에서는 항온열처리시간의 장단에 관계없이 페라이트의 형상은 선상(線狀, 연마면에서는 선상으로 관찰되나 입체적으로는 판상으로 생각됨.)이나 350°C의 경우 열처리시간이 60초에서는 분지(分枝)안된 선상페라이트임에 비해 100초에서는 페라이트의 한쪽끝단에서 분지가 일어나고 200초로 시간이 길어짐에 따라 페라이트의 중심도 분지화되며 300초에서는 완전히 분지화되었음을 알 수 있다. 400°C의 경우 60초에서는 페라이트의 양쪽 끝단만 분지되어 있으나 100초이상에서는 전체가 분지되고 그 정도는 시간이 길어짐에 따라 더 심해지고 형상도 불규칙해지고 있다. 이상의 결과를 검토해보면 항온열처리온도가 350°C 이상 일지라도 베이나이트변태 초기에는 250°C 및 300°C에서 존재하는 페라이트형상과 유사한 분지안된 페라이트가 존재하며 이러한 페라이트는 항온 열처리온도가 높을수록 더 빠른 시간에 분지화됨을 알 수 있다.

3. 3 Bainitic Ferrite의 형상에대한 Mn의 영향

Photo 5는 375°C 및 425°C에서 항온열처리시 항온열처리시간에 따른 0.06%Mn을 함유한 No 1과 0.45%Mn을 함유한 시편 No 2의 bainitic ferrite의 형상을 보여주는 전자현미경사진이다.

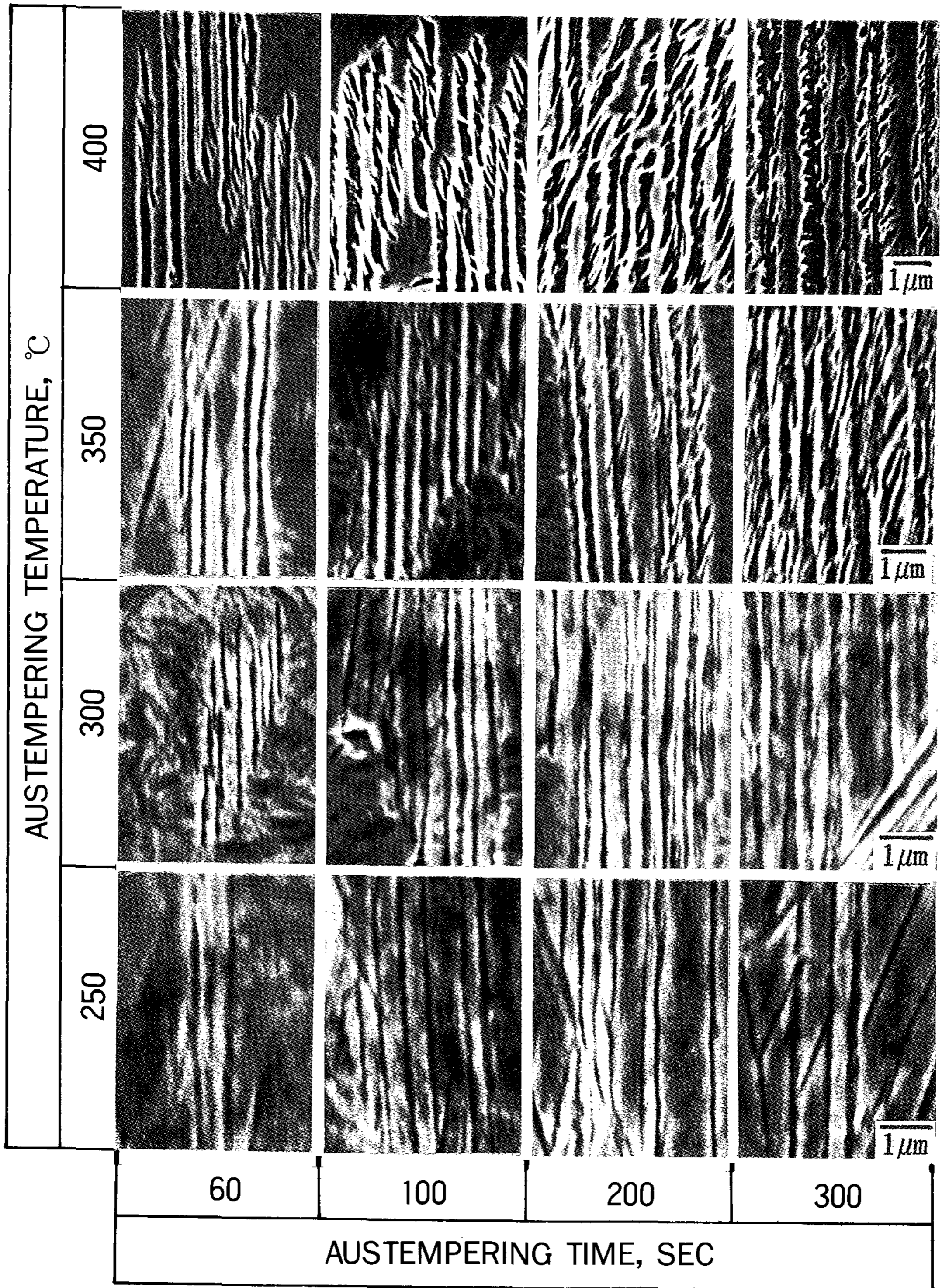


Photo 4. Morphological variation of bainitic ferrite with austempering temperature and time in the specimen No. 2 containing 0.45%Mn.

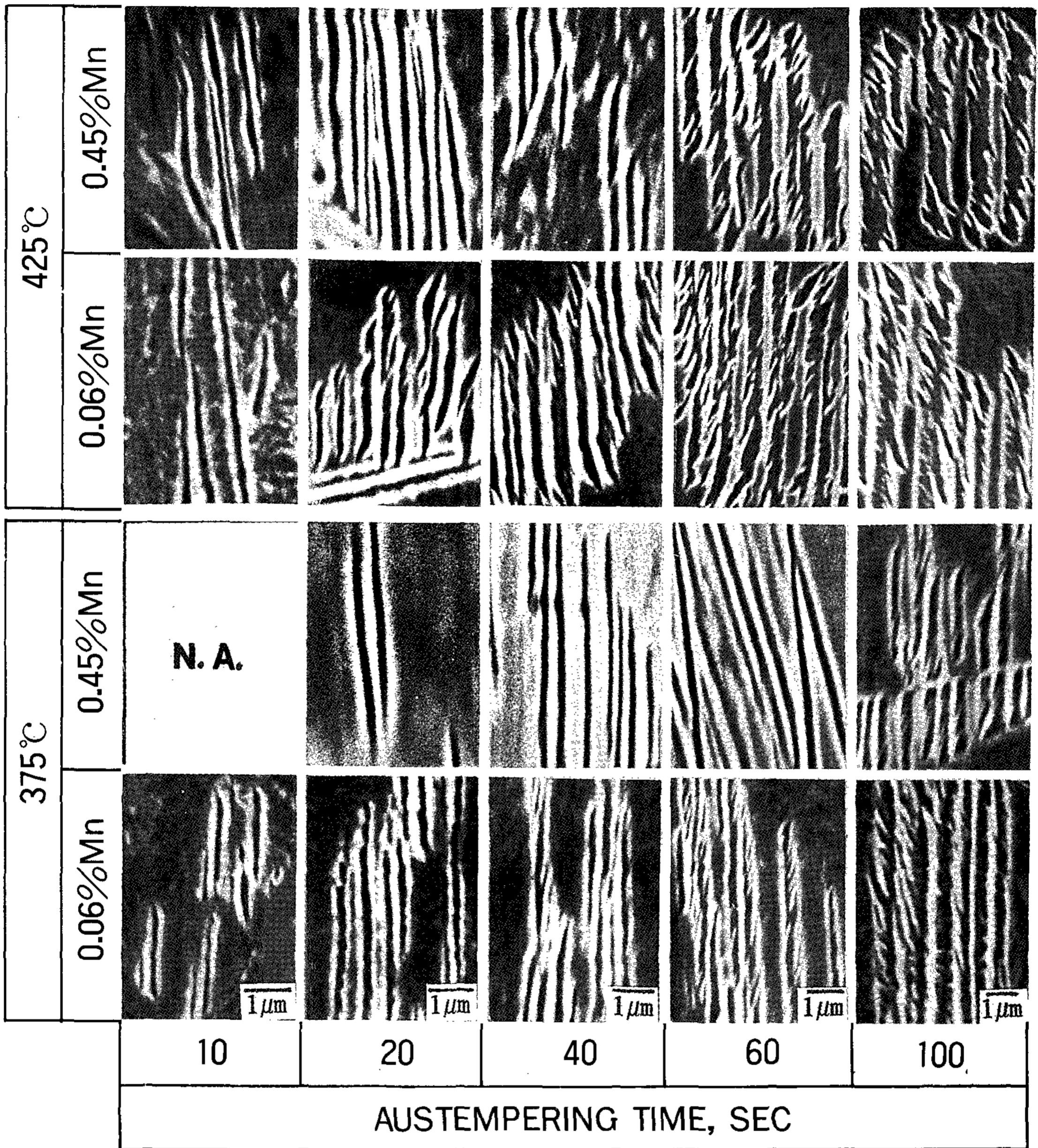


Photo 5. Morphological variation of bainitic ferrite with austempering time in the specimen No.1 containing 0.06%Mn and No. 2 containing 0.45%Mn.

Photo 5에서 알 수 있는 바와 같이 375°C에서는 0.06%Mn의 경우 10초 및 20초에서는 분지안된 선상페라이트이나 40초에서는 페라이트의 한쪽끝단에서 분지가 일어나고 60초에서는 양쪽끝단 및 중심부까지 분지화되며 100초에서는 완전히 분지화되었음에 비하여 0.45%Mn의 경우 10초에서는

bainitic ferrite가 존재치 않으며 20초, 40초 60초에서는 전혀 분지안된 선상페라이트를, 100초에서는 분지된 페라이트를 보여주고 있다. 그리고 425°C에서는 0.06%Mn의 경우 10초에서는 분지안된 선상페라이트를 보여 주나 20초에서는 페라이트의 한쪽끝단에서, 40초에서는 양끝단이 분지

되고 60초 및 100초에서는 중심까지 완전히 분지되어 있음에 비하여 0.45%Mn의 경우 10초, 20초, 및 40초에서는 분지안된 선상페라이트나 60초에서는 양끝단이, 100초에서는 중심까지 완전히 분지되어 있다. 이상의 결과로부터 베이나이트변

TYPE	I	II	III	IV
SHAPE				
SHAPE COEFFICIENT	3	2	1	0

Fig. 1. Schematic diagram illustrating the relation between typical shape of bainitic ferrite and shape coefficient.

태초기에서의 bainitic ferrite의 형상은 Mn 및 항온열처리온도가 영향을 미치는 것으로 사료된다. 즉 항온열처리온도의 영향을 보면 Mn함유 유무에 관계없이 375℃가 425℃에 비해 페라이트가 분지안된 선상으로 존재하는 시간이 더 길며, 동일온도에서는 Mn함유량이 0.45%인 경우가 0.06%인 경우보다 분지안된 상태로 페라이트가 존재하는 시간이 더 길었다. 이는 전술한 바와 같이 항온열처리온도의 차이에 의한 베이나이트변태 개시시간의 차이, Mn첨가에 의한 베이나이트변태의 지연 즉 변태개시시간이 장시간측으로 이동됨에 기인한 것으로 생각된다. 이상의 결과를 정량화하기 위하여 Fig.1에 나타낸바와 같이 대표적인 bainitic ferrite의 형상을 I, II, III, IV로 분류하고 각각의 형상에 형상계수를 3, 2, 1, 0으로 부여하였다. Fig 2와 Fig 3은 항온열처리온도 375℃와 425℃에서 Mn함유량과 항온열처리시간의 변화에 따른 bainitic ferrite의 형상분포를 조사한 결과

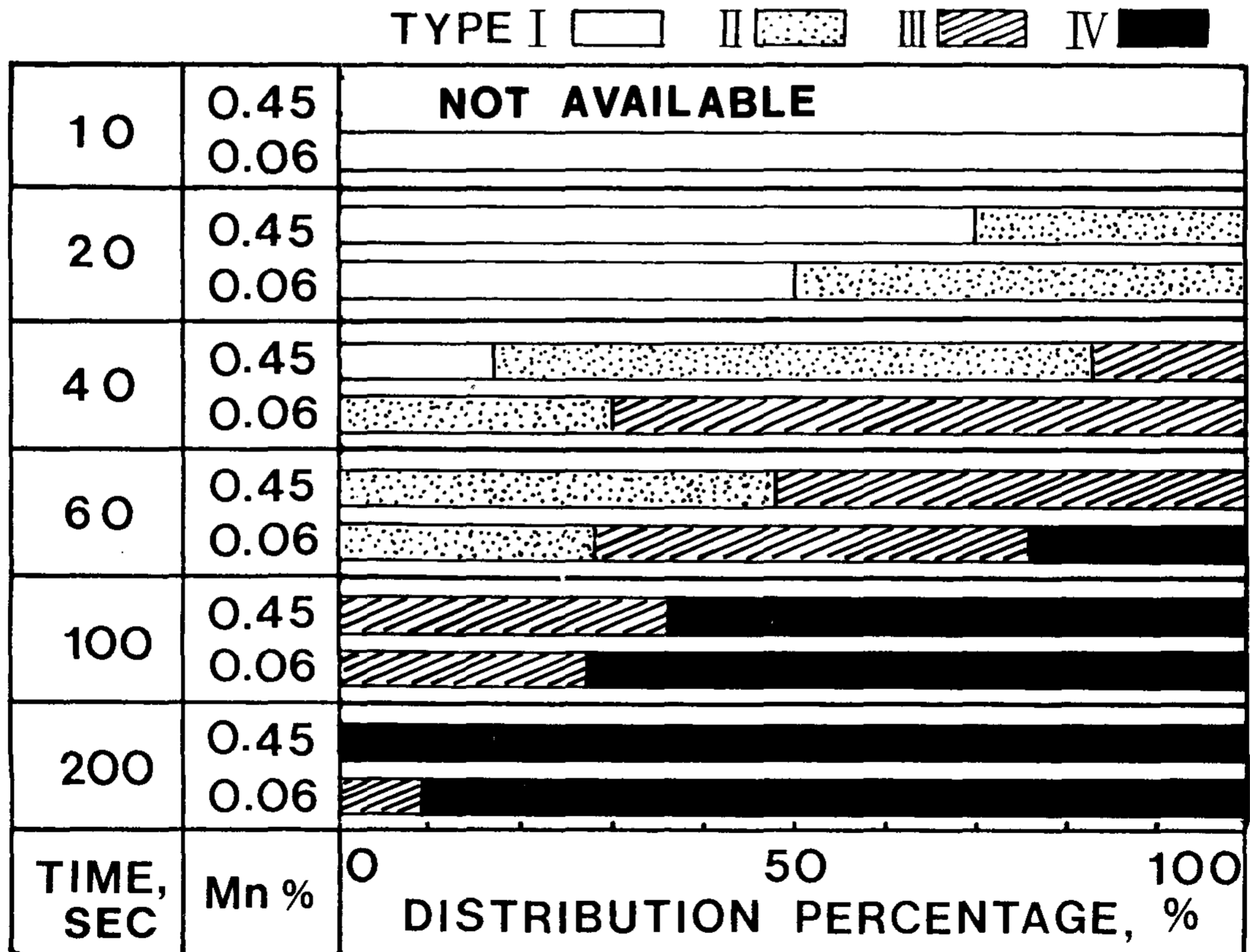


Fig. 2. Effect of Mn content isothermal heat treatment time at 375℃ on the morphological distribution of bainitic ferrite.

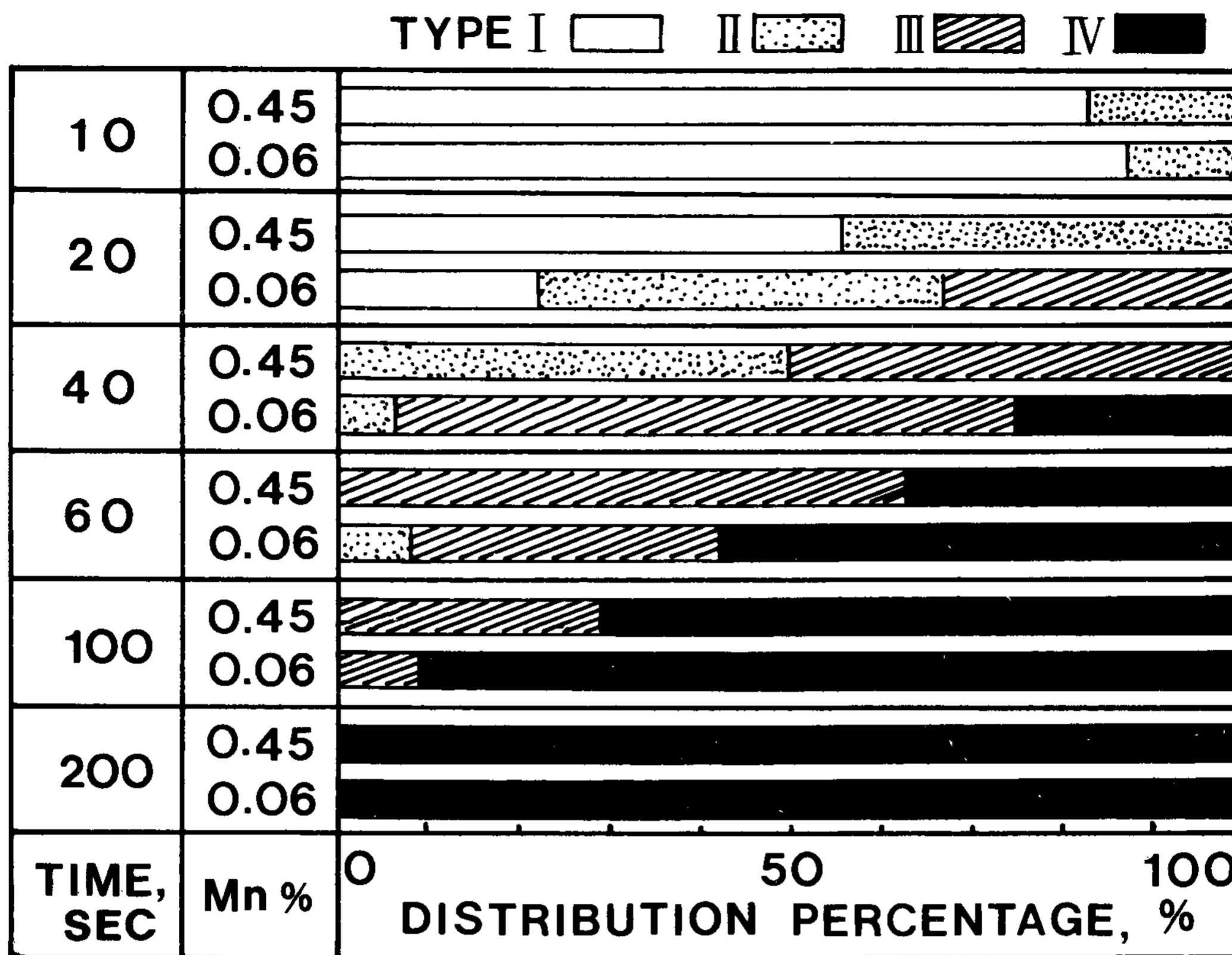


Fig. 3. Effect of Mn content and isothermal heat treatment time at 425°C on the morphological distribution of bainitic ferrite.

를 보여주고 있다. 375°C에서 페라이트의 형상분포를 보여주는 Fig. 2에서보면 전술한 Photo 5에서와 같이 전반적으로 0.45%Mn의 경우가 0.06%Mn에 비해 페라이트의 변태개시시간이 늦어지며, 동일 열처리시간에서 혼재하고 있는 페라이트의 형상을 보면 전반적으로 0.06%Mn의 경우가 0.45%Mn에 비해 덜분지된 모양을 나타낸다. 즉 10초에서는 0.45%Mn의 경우 페라이트가 존재하지 않고 있으나 0.06%Mn에서는 I형의 페라이트가 생성되어 있고 20초에서는 0.45%Mn 및 0.06%Mn 모두 I형과 II형이 혼재하고 있으나 0.06%Mn이 0.45%Mn에 비해 II형의 양이 더 많음을 알 수 있다. 40초에서는 0.45%Mn의 경우 I형, II형 및 III형이 공존하고 있음에 비해 0.06%Mn의 경우 II형과 III형이 공존하고 있으며 I형은 존재하지 않는다. 60초에서는 0.45%Mn의 경우 II형과 III형이 혼재하고 있으며,

0.06%Mn의 경우 II, III 및 IV형이 혼재하고 있고 처음으로 IV형이 나오고 있다. 100초에서는 0.06 및 0.45%Mn 모두 III형과 IV형이 공존하며 200초에서는 0.45%Mn의 경우 전부 IV형으로, 0.06%Mn의 경우 거의 전부가 IV형으로 변화된다. 그리고 425°C에서도 Fig. 3에 나타난 바와 같이 ferrite의 생성개시시간과 완료시간에 차이는 있으나 Mn함유량에 따라 현격한 차이가 인지되며 375°C의 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 4는 이상의 결과를 Fig. 1에 나타난 바와 같이 형상계수화하여 열처리온도와 Mn함유량을 달리했을 때 열처리시간의 변화에 따른 형상계수의 변화를 나타낸다. Fig. 4에서 보면 전술한 사진 및 그림에서 설명한 바와 같이 열처리온도의 차이와 Mn함유량이 형상계수에 미치는 영향이 명확함을 알 수 있다. 즉 열처리시간이 길어짐에 따라 형상계수는 열처리온도 및 Mn함유 유무에

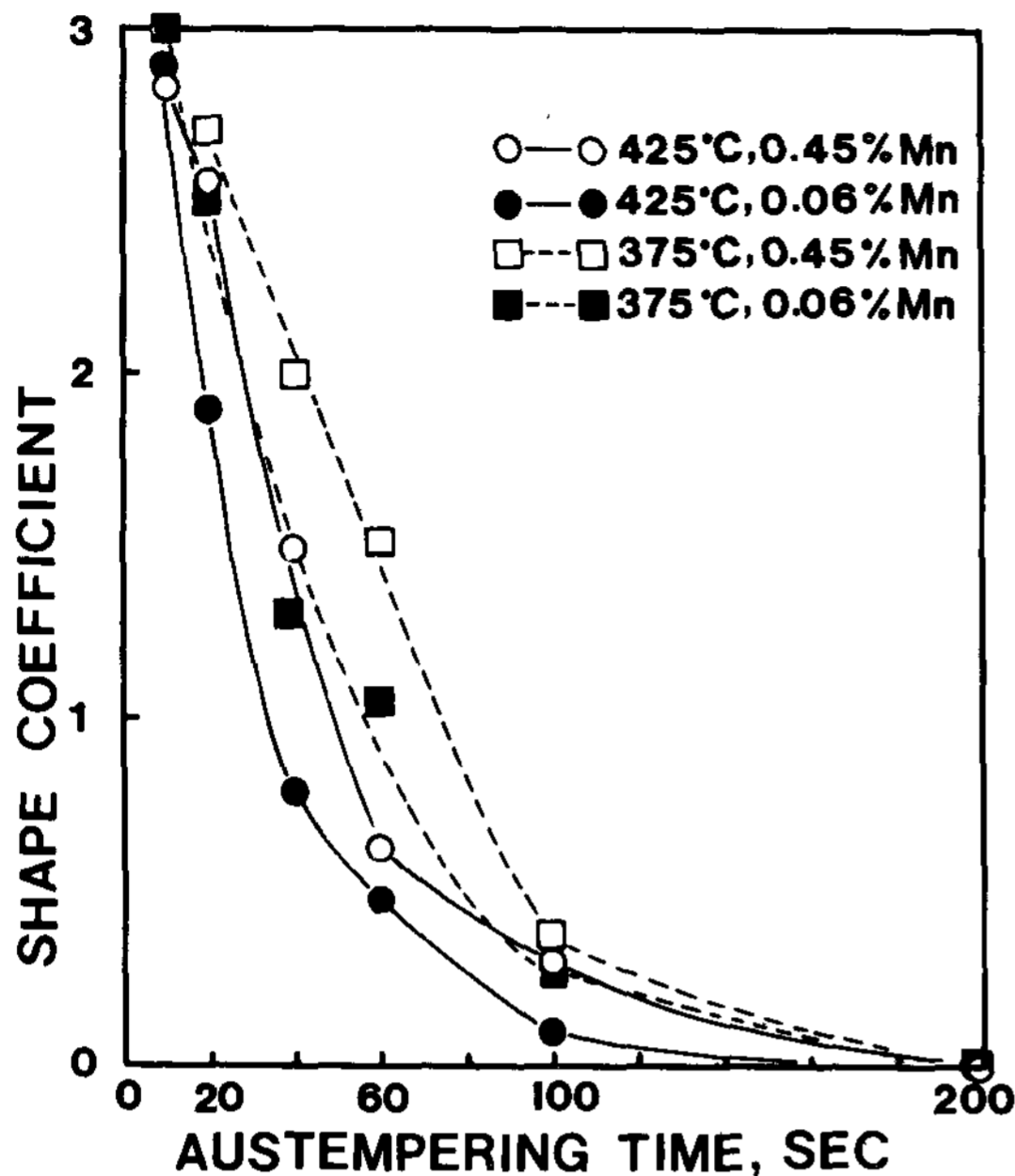


Fig 4. Influence of Mn content, austempering temperature and time on change of shape coefficient.

관계없이 저하하며, 형상은 초기의 선상(판상)으로부터 분지된 형상으로 변화함을 보여주고 있다. 여기서 열처리온도의 영향을 보면 동일조성에서는 375°C의 편이 425°C보다 형상계수의 변화가 더 완만하였으며 동일온도에서 Mn함유량의 영향을 보면 0.45%Mn의 경우가 0.06%Mn에 비해 형상계수의 변화가 적어 페라이트의 분지화가 더 늦음을 알 수 있다.

4. 결론

0.06%Mn 및 0.45%Mn을 함유한 구상흑연주철을 오스템퍼링처리 도중에 급랭하여 얻어진 각 시편의 초기 베이나이트조직의 성장과정을 광학 및 주사전자현미경으로 관찰하여 bainitic ferrite의 형상변화에 미치는 Mn과 항온열처리조건의 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 베이나이트의 형상은 350°C를 기준으로 이

이상에서는 깃털상, 이하에서는 침상을 나타내나 350°C의 경우는 200초까지는 전부 죽엽상(굵은 침상)이고 300초에서는 죽엽상과 깃털상이 혼재하며 900초에서는 전부 깃털상으로 되어 항온열처리시간의 장단에 따라 형상이 변화한다.

2) Bainitic ferrite의 형상은 항온열처리온도가 350°C이상일지라도 베이나이트변태초기에는 250°C 및 300°C에서 존재하는 bainitic ferrite형상과 유사한 분지안된 선상페라이트가 존재하며 항온열처리시간이 길어짐에 따라 분지화되나 350°C보다는 400°C에서 더 빠르게 일어난다.

3) 상부베이나이트에서 bainitic ferrite의 형상에 대한 Mn의 영향은 동일온도에서는 0.45%Mn의 경우가 0.06%Mn에 비해 분지안된 상태로 선상페라이트가 존재하는 시간이 더 길다.

참 고 문 헌

1. 柳澤 平, 矢野哲夫, 福原宏之 : 熱處理, 28 (1988)314
2. D. J. Moore, T. N. Rouns and K. B. Rundman : AFS Trans., 95(1987)765
3. M. Gagne : AFS Trans., 93(1985)801
4. D. J. Moore, T. N. Rouns, K. B. Rundman : J of Heat Treating, 4(1985) 7
5. T. N. Rouns, K. B. Rundman and D. M. Moore : AFS Trans., 92(1984)815
6. B. Faucher, K. C. Wang : AFS Trans., 95 (1987)127
7. E. Drazil, B. Barta, E. Munsterova, L. Stransky and A. Huvar : AFS Inter. Cast Metals Journal, 7-No.2(1982) 52
8. 鹽川 忠 : 鑄物, 56(1984) 362
9. V. Dranglates, H. G. Boese : Proc. 2nd International Conference on ADI, Ann Arbor(1986) 247
10. 崔 奮川, 柿原眞一, 大城柱作 : 鑄物, 63 (1991) 136
11. 大城柱作, 澤本 章, 樋渡淳一 : 鑄物, 60 (1988) 233
12. 大森靖也 : 鐵と鋼, 65(1979) 126