論　文

오스템퍼 처리한 구상흑연주철의 강인성에 미치는 전조직의 영향

金　錫　元*

The Effects of Se, CaCo And CaO Addition on the Ist Stage Graphitization of Malleable Cast Iron

Sug-Won Kim

ABSTRACT

Austempered ductile cast iron has been well known for their good toughness and strength. Generally these properties were improved by the various heat treatments and alloying elements.

In this study, the effects of prior heat treatment history(near ferrite, near pearlite, near martensite) on the toughness and strength of the austempered ductile cast iron were studied experimentally and theoretically.

All of the test specimens was austenitized at 900 °C for 1 h and austempered at 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, respectively.

The prior structure of near martensite in austempered ductile cast iron was not good in term of toughness and strength because the carbon content was apt to high in austenite during ausnitizing. It was found, on the other hand, that the ferrite matrix as prior structure had good combination of toughness and strenght.

The best tensile strength and good toughness were obtained at 300 °C, austemper in the prior structure of near ferrite, while 400 °C austemper in that of near pearlite and martensite.

1. 서　　론

1948년 Gagnebin 등이 편상흑연주철에 Mg를 첨가하여 편상흑연을 구상화 처리 시키므로써 편상흑연주철에 비하여 기계적 성질이 우수하고 다른 금속재료 보다 비교적 주조성이 양호하여 구조용재료로써 널리 사용되어 왔다.[1),2)]

그러나 주조기술의 향상과 함께 구조용 재료로써 재질적인 면에서 신뢰를 얻었지만 보다 가혹한 조건에서도 사용할 수 있는 구상흑연주철을 제조하기 위해서는 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 강인화 방법이 더 절실히 요구된다. 현재까지 구상화주철의 강인화방법으로는 합금원소 첨가에 의한 방법[3)]과 각종 열처리에 의한 강인화 방법등이 사용되어 왔다. 열처리 방법중의 하나는 기지조직이 2상혼합조직으로 되는 열처리를 실시하므로써 구상흑연주철의 강인성을 향상시킬 수 있다. 특히 근년 강인화 방법으로써 주목을 받고 있는 방법은 구상흑연주철의 austemper 처리 방법이고 그에 관한 많은 연구보고[4),5),6)]가 발표되었다.

본 실험은 우수한 강인성을 갖는 구상흑연주철을 얻기 위해서 실시하는 austemper 처리를 하기전에 초기조직을 near ferrite, near pearlite, near martensite로 하는 서로 다른 열처리 이력을 부여하여 이들의 전조직(prior microstructure)이 austempered structure의 기지조직의 강인성에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 실험적이고 이론적으로 연구 검토하였다.

* 全北大學校　工科大學　金屬科

2. 실험방법

2.1 시편제작

본 실험에 사용한 시료는 300 kg 용량의 고주파 용해로(1,000 Hz)에서 용해하였다. 흑연 구상화 처리는 Fe-Si-4.5%Mg 합금을 구상화제로써 1.3% 첨가하

여 샌드윗치법으로 하였다. 용탕은 구상화처리 후에 Fe-Si(75%보유율)으로 0.3% 후접종 처리하여 Y block 형상의 Co_2 주형(시료채취부 크기 : 40 × 60 × 200 ㎜)에 1,410℃에서 주입하였다. 시편 제작용 시료의 화학성분은 Table.1에 표시하였다.

Table.1 Chemical composition of specimen(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Mg	others
3.54	2.63	0.19	0.046	0.018	0.04	cu:0.017

2.2 열처리

열처리에 사용한 시편은 공시재료를 Sub-size의 인장시험편과 No-notch 충격 시험편으로 가공하여 사용하였고 인장시험편의 크기는 Fig.1.과 같다.

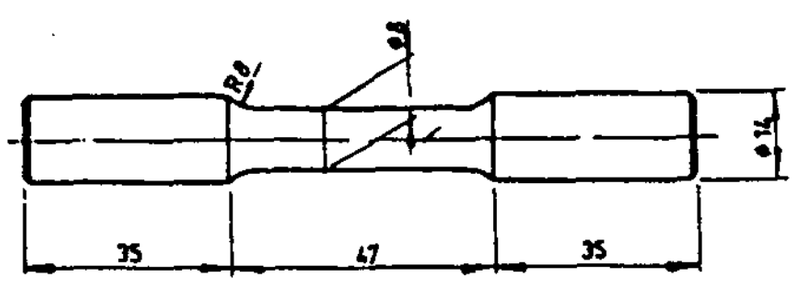


Fig 1. Dimensions of tensile test specimen (unit, ㎜)

austemper 처리시 될수 있는한 주조조직의 영향을 최소로 하기 위하여 900℃에서 가열 유지한 후 노냉하여 조직을 균질화 시킨 후 사용하였다. 시편의 전조직으로 Near ferrite, Near pearlite, Near martensite의 기지조직을 얻기 위해서 각각 Fig.2.와 같은 열처리 공정을 거쳐 전조직을 얻었으며 이 전조직은 Fig.3.과 같이 austemper 처리후 공냉 처리하였다. austenite 化는 관상로(Al_2O_3, Tube, 50 ㎜ϕ)에서 Ar gas 분위기로 실시하였고 항온변태처리는 염욕로에서 실시하였으며 사용한 염욕은 $NaNo_3$: KNo_3 = 1 : 1의 혼합염을 사용하였다.

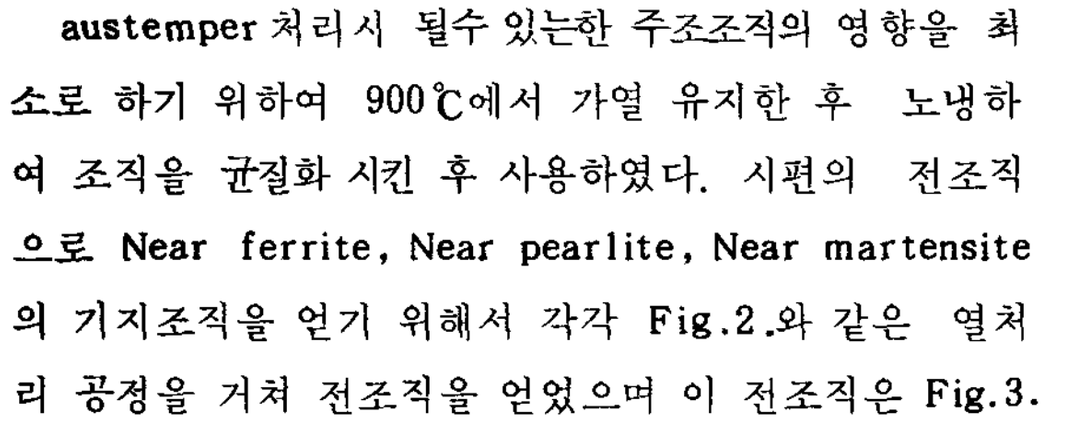


Fig 2. Heat treatment cycles to abtain prior micrstructures.

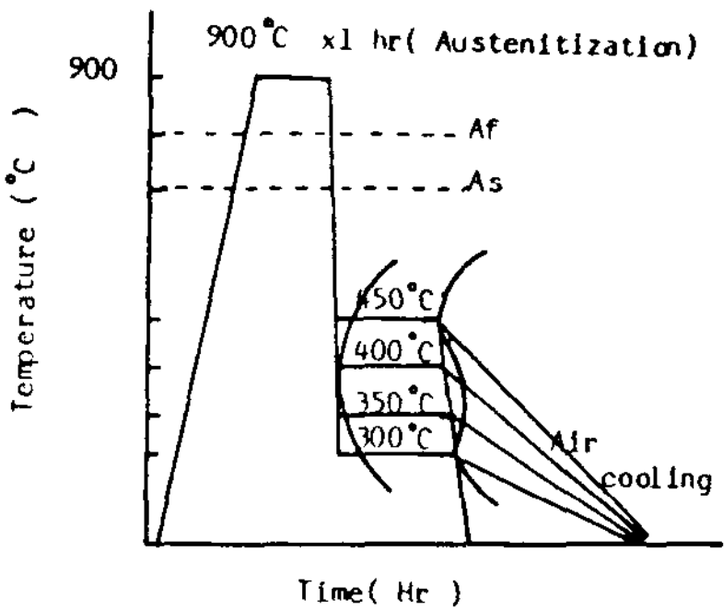


Fig 3. Cycle of austempered treatment.

2.3 충격시험, 인장강도, 경도시험

5 × 10 × 55 ㎜의 No-notch 형 시험편을 채취하여 얼음의 혼합물에 10분동안 침지하여 시험온도를 0℃로 기준하여 실시하였으며 인장강도는 인장시험기 경도시험은 마이크로 비커어스 경도시험기를 이용하였고 경도시험의 하중은 20 g으로 하여 5군데를 측정하여 산술 평균치로 하였다.

2.4 조직관찰

광학현미경을 이용하여 조직을 관찰하였고, 파단면을 고찰하기 위해서 SEM을 이용하였다.

2.5 X선 회절

잔류 austenite 량의 측정은 Co targer 을 사용하였고 austenite 량은 각 회전면의 적분강도를 구하여 계산하였으며 회절각 2θ는 85°~104°에서의 범위에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Austempered morpology 에 미치는 prior structures 의 영향

3.1.1 Near ferrite 조직의 영향

Photo 1.의 (a)의 현미경 사진은 Fig. 2(1)에 의한 열처리에 의하여 얻어진 ferrite가 기지조직을 지배하는 조직이다. 현미경 사진에서 볼 수 있는바와 같이 흑연과 흑연사이에 pearlite가 일부 존재하나 흑연주위는 거의 ferrite이고 ferrite의 결정입이 크게 나타나 있다. 이 전조직을 300℃, 350℃, 400℃, 450℃의 염욕에서 오스템퍼 처리한 조직사진을 photo 1의 (b), (c), (d), (e)에 나타냈다.

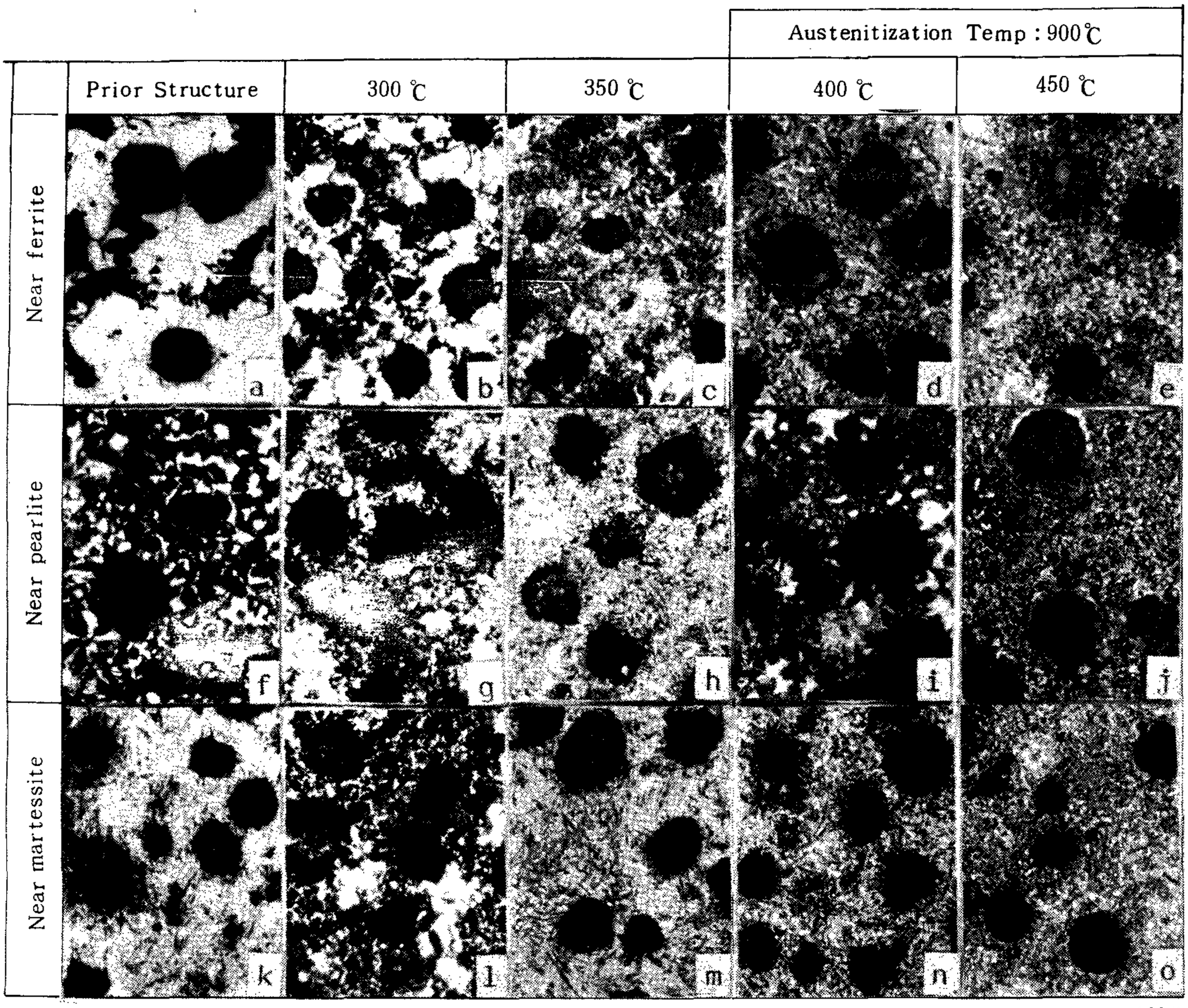


Photo 1. Microstructures of austempered ductile cast iron and Prior microstructure (a, f, k.)
(a : Near ferrite, f : Near pearlite, k : Near martensite)

300℃의 austemper 처리 온도에서 전조직에서 나타난 흑연주위의 bull's eye 조직이 탄소의 농도가 낮은 흑연과 흑연 사이에 침상의 bainite가 석출되어 있고 결정입 크기는 훨씬 미세하였다.

아와 같이 bainite가 ferrite의 입계에 다량 석출되어 있는 것은 전조직을 austenite화 시킬때 austenite 상이 ferrite 입계에 다량 석출된 상태에서 항온변태가 일어나 pearlite → austenite → bainite의 변태과정을 거쳐 결정입계나 공정 cell 영역에 미세한 bainite 상이 석출되어 있기 때문이다. 350℃에서는 300℃에서 나타난 침상의 bainite가 어느 정도 둔화되었고 X-선시험 결과 잔류 anstenite가 증가되었다. 400℃에서는 bainite가 조대화되어서 우모상의 상부 bainite상이 존재하고 450℃에서는 troostite로 변태된 현미경 조직사진이다. 특히, 전조직에서는 ferrite의 결정입도가 크고 austemper 처리후에는 점차로 적어져 있음을 알 수 있다. 그 원인은 전조직을 재가열하여 austenite화 처리를 한후 낮은 온도에서 항온변태처리하므로 결정의 성장이 억제됨으로 결정입도가 미세화되어 있다.

3.1.2 Near pearlite 조직의 영향

Fig. 2(2)에 의한 열처리에 의하여 얻어진 near pearlite의 전조직을 photo 1.의 (f)에 나타냈다. 사진에서 보는 바와 같이 미 변태 ferrite가 균일하고 미

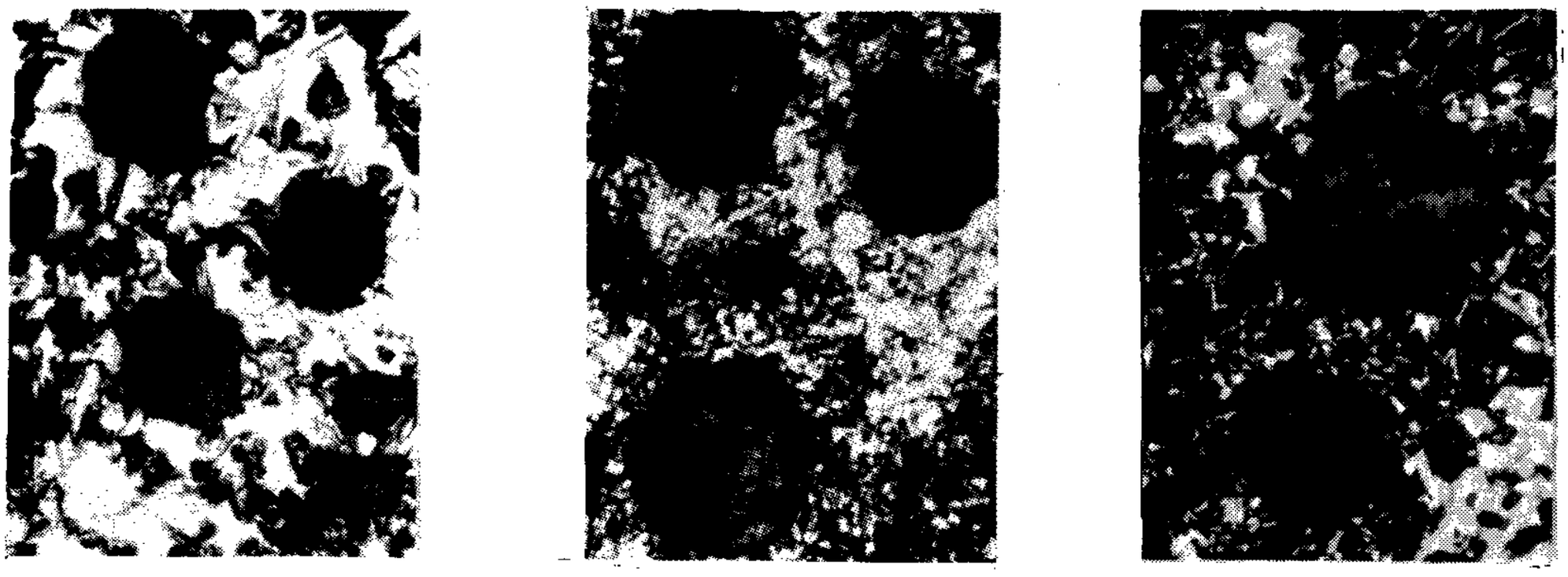
세하게 기지조직에 분산되어 있다. 기지조직이 near pearlite인 전조직을 여러 온도에서 austemper 처리하여 얻어진 현미경 조직을 photo.1의 (g), (h), (i),(j)에 나타내었다. pearlite는 austenite화 시킬때 ferrite보다 pearlite내의 Fe_3C의 열적 불안정으로 cementite의 빠른 용해와 빠른 탄소의 확산에 의하여 austenite화가 일어난다. 또한 cementite의 층간 간격이 극히 좁기 때문에 탄소의 확산거리가 짧아 austenite가 빠르게 진행[7]되기 때문에 동일한 온도에서 ferrite보다 충분한 austenite화가 이루어지고 austenite상중의 탄소의 평균 고용한이 ferrite보다 크므로 300℃에서는 충분한 austemper처리 효과를 기대하지 못한다. 그러므로 ferrite보다 좀더 높은 온도인 350℃에서 아주 미세한 침상인 bainite를 볼 수있고 충분한 탄소의 확산에 의해서 300℃에서도 near ferrite조직에서 보다 전면에 bainite가 많이 석출되어 있다. 또한 잔류austenite량도 300℃에서는 잔류하지 않던 것이 350℃에서는 약 5%정도의 잔류austenite가 있음을 X-ray회절 시험으로 알 수 있었다.

이 원인은 300℃에서는 anstenite가 항온변태를 통해서 충분히 bainite변태가 일어났고 350℃에서는 bainite변태 시간이 길기 때문에 불완전 항온변태가 일어나 잔류 austenite량이 많이 잔류한다고 생각된다.

400℃ austemper처리에서도 상기와 같은 이유로써 미 변태 austenite가 잔류하고 기지조직에 상부 bainite가 많이 존재하고 전조직에서 나타났던 bainite사이에 미세하게 섞여 있던 ferrite가 어느 정도 균일하게 분산 석출해 있다.

3.1.3 Near martensite의 영향

photo 1.의 (K)는 Fig.2의 (3)과 같이 열처리하여 얻은 near martensite의 조직사진이다. Fig.2.의 (3)의 열처리는 1,100℃에서 고온 균질화처리를 하여 austenite상태에서 수냉하여 얻은 조직이므로 흑연주위가 미세하고 또한 흑연으로부터 공정 cell boundary로 갈수록 침상의 martensite가 발달해 있다. 이 전조직을 각 온도로 austemper처리한 조직사진을 photo 1.의 (l), (m), (n), (o)에 나타냈다. ferrite나 pearlite보다 martensite가 열적 불안정이 제일 큰 조직이므로 이 두 조직보다 훨씬 빠르게 austenite화가 되어 austenite에 고용되는 평균 고용탄소가 증가되어 300℃ austemper처리된 사진에서 알 수 있는 바와 같이 near martensite를 얻기 위해서 고온(1,100℃)으로 처리하였기 때문에 온도가 강하함에 따라서 흑연의 embryo가 다른 조직보다 응집, 조대화되지 않아 2차흑연 입자로 되어 흑연의 크기가 작고 흑연의 수가 많은 것을 알 수 있다. 그리고 흑연과 흑연사이에 ferrite와 bainite가 혼존되어 있다. 350℃에서 austemper하면 잔류austenite와 ferrite와 bainite의 3상이 공존해 있음을 알 수 있고 가장 가늘고 침상의 하부 bainite가 나타나 있다. 400℃에서의 austemper시에는 약간의 침상의 bainite형태가 둔화되어 나타났다. 흑연 주위에 변태조직이 각각 전조직에 의해서 어떻게 변화 되는지를 고찰하기 위해서 photo 1.의 (B), (g), (l)을 확대하여 photo 2.의 (a), (b), (C)에 나타내었다. 여기서 알 수 있는 것은 austenite화 온도가 높으면 높을수록 흑연 주위에 austenite화가 일어나 austenite가 우선 석출하게 되고 낮으면 낮을수록 ferrite입계, 즉, 흑연과 흑연사이에서 austenite 화가 일어남을 알 수 있다. 이것은 austenite화 온도에 따라서 austenite상의 우선 석출장소가 서로 다르다[7]는 이론과 일치하고 있다. 즉, austenite화는 먼저 ferrite입계로부터 시작되어 점차로 흑연주위로 석출된다는 것이다. 본 실험에서도 near ferrite, near pearlite, near martensite의 순서로 austenite화가 일어나기 쉬운 관계로 결국 near ferrite의 전조직에서 흑연과 흑연사이, 즉, ferrite입계에 많이 austenite상이 석출되어 있고 near martensite쪽이 ferrite입계에는 물론 흑연 주위에 많은 austenite상이 석출되어 austemper시 bainite변태가 일어나 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 bainite의 분포양상이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. martensite 전조직이 austeniue화가 쉬운 원인은 martensite의 전조직을 얻기 위해서 급냉처리하면 조직내에 탄소원자가 확산할 수 있는 충분한 시간이 없으므로 그대로 martensite격자에 남아 있어 실온 또는 저온에서는 안정하고 425℃이상으로 가열되면 쉽게 탄소를 배출한다. 그러므로 ferrite나 pearlite보다 쉽게 austenite화 된다고 생각된다.



(a) Near ferrite　　(b) Near pearlite　　(c) Near martensite

Photo 2. Microstructure of 300℃ austempered ductile cast iron

3.2 충격인성

전조직이 충격인성에 미치는 영향을 Fig.4.에 나타냈다. austemper 온도가 상승함에 따라서 모든 전조직에서도 충격인성이 증가하다가 450℃의 austemper 시에는 급격히 저하된 결과를 나타내고 있다. 충격인성이 급격히 저하되는 원인은 austenite 상태로부터 450℃에서 austemper 처리를 하므로써 우모상의 상부 bainite와 troostite가 많이 석출하여 응력집중이 생기기 쉽기 때문에 인성이 급격히 저하된다고 생각한다. 그러나 350, 400℃에서 충격인성이 높은 것은 austenite 상중의 고용탄소량이 약 0.4%보다 낮은 경우 석출된 bainite 상중에 연성 bainite가 흑연 주위에 다량 석출분포되어 충격인성을 향상시킨다.[8] 또한 300℃에서 인성이 저하되어 있는 것은 하부 bainite가 많을수록 ferrite 상이 bainite상 때문에 연속성이 없어 ferrite가 변형되는 것이 억제되어 인성이 저하되기 때문이다. 전체적인 충격인성을 고찰하면 near ferrite의 전조직보다 near pearlite, near martensite는 전조직을 얻기 위해서 냉각될때 냉각속도가 상당히 크므로 austenite에 고용되어 있는 탄소가 기지조직 중에 탄화물로 고용 또는 석출되어 있다가 다시 재 가열하여 austenite화 시킬때 탄화물이 미세한 2차흑연 입자로써 분해되여서 공정 cell 영역이나 결정입계쪽으로 흑연의 성장[9]이 일어나 균열의 전파속도가 크게되므로[10] 전반적으로 near ferrite 쪽이 충격인성이 좋다고 생각된다. 본 실험에서도 일부 탄화물이나 불순물 원소(P, S등)가 austenite 입계나 공정 cell 경계에 잔류 또는 편석하고 있는 원인[11]때문이라고 생각된다. 일반적으로 near ferrite, near pearlite, near martensite의 전조직 순으로 austenite화 시에 austenite의 결정입도는 미세화되어 충격인성이 증가되어야 함에도 불구하고 반대로 저하되는 것을 알 수 있는데 이것은 austenite 결정입의 미세화에 따라 충격인성이 향상된다는 보통의 금속재료의 일반적인 현상과는 다르다. 동일한 현상으로 조직이 좀 더 미세화된 near martensite보다 near pearlite, near ferrite의 전조직 순으로 충격인성이 크게 나타났다. 이 원인은 탄소의 포화도가 높은 순서로 즉, near martensite, near pearlite, near ferrite를 다시 가열하여 austemper 처리할 시 austenite → bainite 변태에서 많은 미세한 2차흑연 입자가 결정입계나 matrix에 석출 분포하여 취화현상의 영향이 austenite의 입자 미세화보다 충격인성에 더욱 현저하게 영향을 주기 때문이라고 생각된다. near ferrite는 350℃ austemper 온도에서 최대의 충격치를 나타낸다. 이 원인은 현미경 조직에서 알 수 있는 바와 같이 아주 미세한 조직의 bainite와 ferrite 의 혼합조직으로 침상의 bainite가 약간 둔화되었고 약간 정도의 잔류 austenite의 잔류로 인한 martensite의 유기변태에 의한 것이라고 생각된다. 그러나 near pearlite와 near martensite는 near ferrite보다 400℃의 austemper 온도에서 최고의 인성을 나타낸다. 이 원인은 austenite 중에 고용되어 있는 탄소가 증가하면

M_s점이 낮아져 350 ℃보다 400 ℃부근에서 austenite →하부 bainite 변태가 일어나기 때문이다.

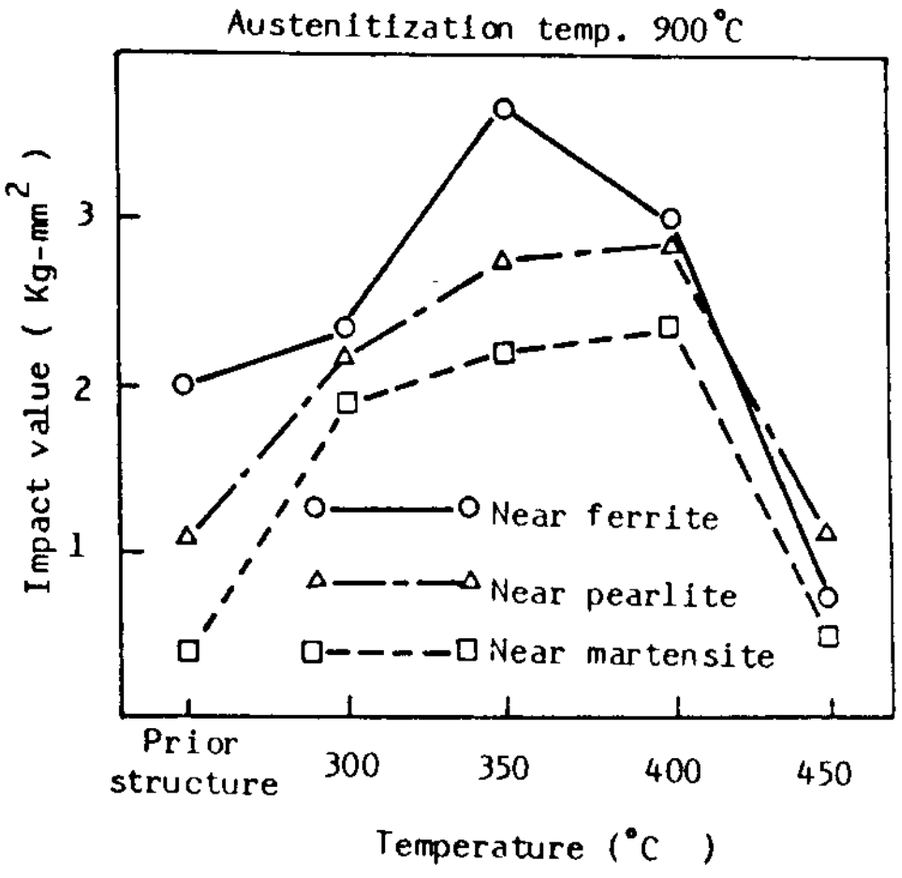


Fig 4. The effects of prior structures on impact Value in austempered ductile cast iron.

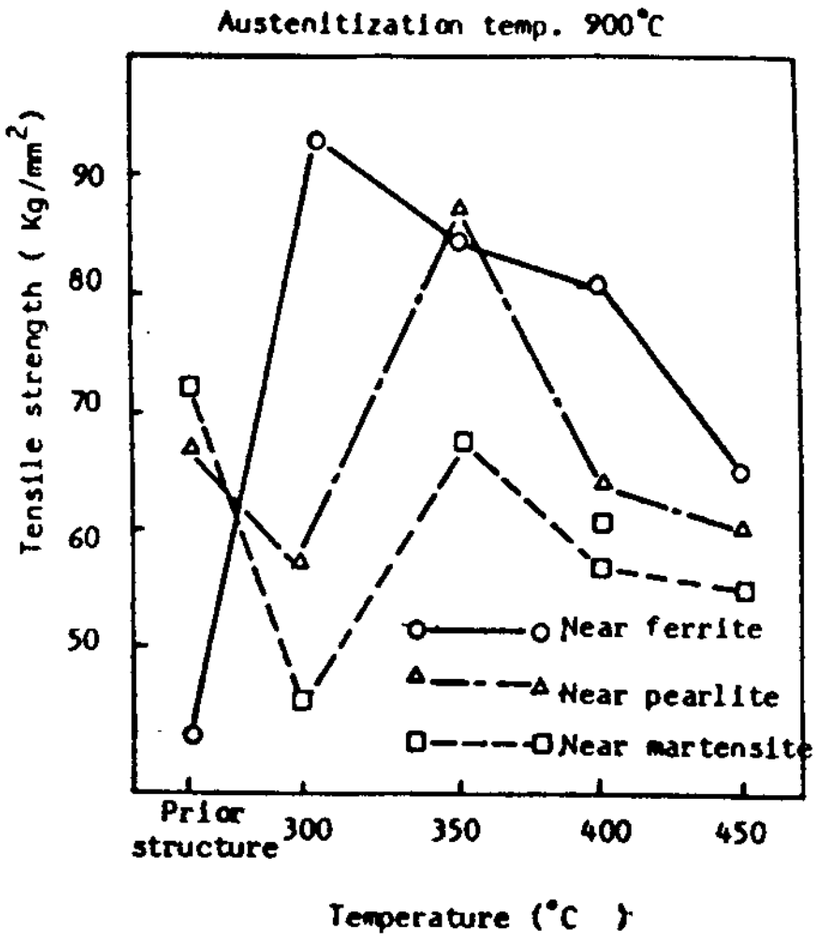


Fig 5. The effects of prior structures on tensile strenght in austempered ductile cast iron.

3.3 인장특성 및 경도에 미치는 전조직의 영향

인장강도에 미치는 전조직의 영향은 Fig. 5에 표시하였다. near ferrite, near pearlite, near martensite가 지배하는 각각의 전조직이 900℃의 austenite화 온도에서 열적 불안정성이 큰 martensite, pearlite, ferrite순으로 austenite화가 이루어져 전조직의 기지중에 강제 고용되어 있는 탄소의 석출에 의해 생기는 제 2 차 흑연입자가 석출되기 때문에 전반적으로 인장강도가 near ferrite, near pearlite near martensite 전조직 순으로 Fig.5.에서 알 수있는 바와 같이 동일 austemper 온도에서도 저하되었다. 300 ℃에서 near ferrite의 전조직은 하부 침상의 미세한 bainite 조직으로 조밀한 ferrite + bainite의 2 상 혼합조직이 되어 있어서 균열 발생의 주요부분인 공정 cell boundary나 흑연과 기지조직 경계로써 공정 cell boundary에 있는 연성의 bainite는 먼저 ferrite의 변형을 억제해 주고 흑연과 기지조직인 ferrite의 결합강도가 크므로 큰 인장특성을 나타낸다. 반면, near pearlite, near martensite는 300 ℃ austemper에서 큰 폭으로 인장강도가 저하되어 있다.이 원인은 300 ℃ austemper 처리시 공정 cell grain boundary나 기지조직내에 탄화물이 석출되어 나타나는 temper 취성의 영향과 흑연과 기지조직과의 결합강도가 저하되기 때문이라고 생각된다. 금속재료에서 일반적으로 인성이 증가하면 강도가 저하되지만 본 실험의 ADI (Austempered DCI)는 최적 조건에서 강도와 인성이 함께 향상된다. 특히 near ferrite전조직에서는 near perlite, near martensite 보다 300 ℃ austemper에서 거의 2배 이상의 인장강도가 상승함에도 불구하고 충격인성을 저하되지 않고 오히려 약간 상승하는 것은 austemper 처리에 의해 나타난 ferrite + bainite의 2상 혼합조직의 특성이다. 인장특성중에 near pearlite, near martensite가 지배하는 전조직으로써 최고의 인장강도는 350 ℃ austemper온도에서 제일 우수하였다. 이는 현미경조직에서도 알 수 있는 바와 같이 치밀한 하부 bainite의 변태에 의한 것으로 생각된다. 특히, bainite가 많이 변태되어 있는 것은 near pearlite, near martensite의 350 ℃의 austemper의 인장특성이 우수한 것은 고온변태에 균열이 발생하기 쉬운 흑연주위를 bainite변태로 인하여 기지조직을 강인화 함으로써 인장강도가 좋다고 생각된다. Fig.6.은 연신율, Fig. 7은 경도에 미치는 전조직의 영향을 나타냈다. 연신율은 인장강도의 특성과 마찬가지의 분포를 나타냈으며 경도분포는 near ferrite 전조직이 제일 낮은 경도치를 나타냈고 제일 높은 경도치는 350℃에서 austemper 처리한 near martensite의 전조직에서 나타났다.

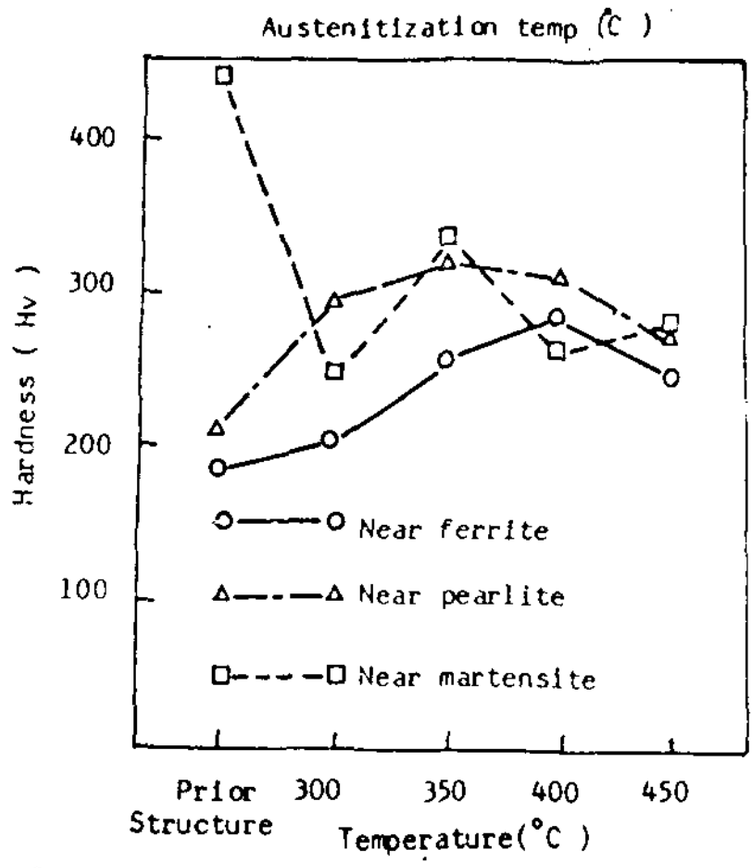


Fig 6. The effects of prior structures on hardness (Hv) in austempered DCI.

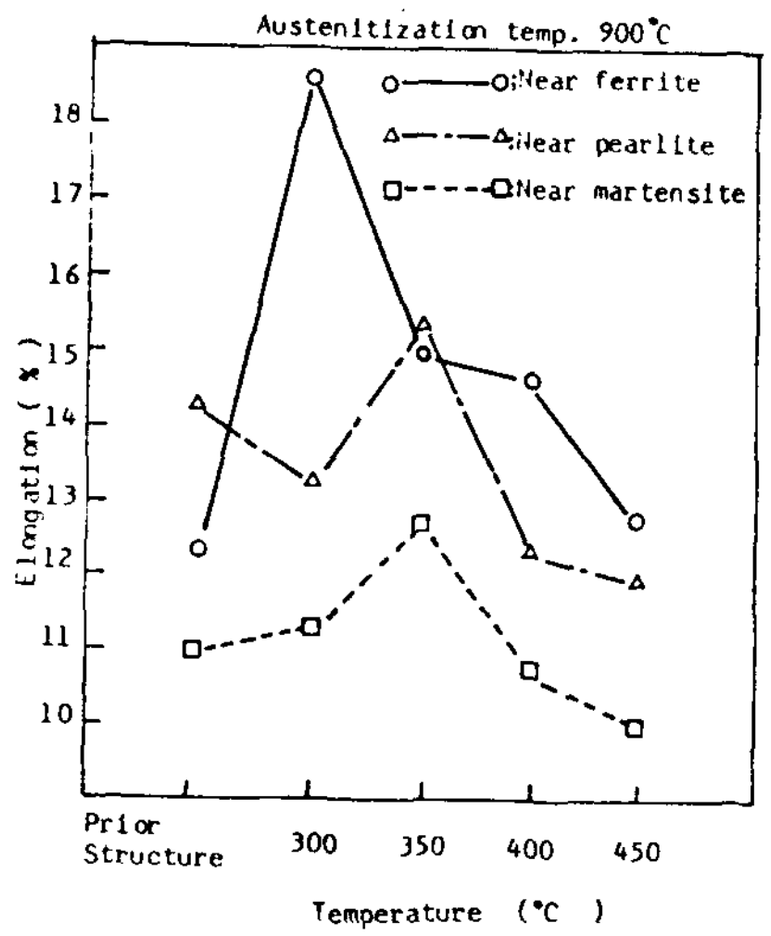


Fig 7. The effects of prior structures on elongation% in austempered ductile cast iron.

3.4 잔류 austenite에 미치는 전조직의 영향

일반적으로 austenite에 고용탄소량이 0.6%이상 되면 잔류 austenite가 생기는데[12] 이 원인은 가열중에 austenite에 탄소량이 증가하면 M_s점이 낮아지기 때문에 잔류 austenite가 생기며 이때 M_s점은 H.T. Augus[12]에 의하면 다음 식으로 계산된다.

$$M_s℃ = 500 - 300 \times \%C - 33 \times \%Mn - 22 \times \%Cr - 7 \times \%Ni - 11 \times \%Si - 11 \times \%Mo$$

본 실험에 사용한 전조직의 near ferrite, near pearlite, near martensite를 austemper하기 위해서 900℃에서 재 가열했을때 near martensite, near pearlite, near ferrite 순서로 Austenite화가 일어나면서 동시에 고용탄소량이 증가하므로 같은 온도에서 austemper하면 잔류 austenite는 near ferrite보다, near pearlite, near martensite순서로 증가된다. 이 결과는 Fig 8에 나타낸 것과 잘 일치하고 있다. Fig 8에서 알수 있는바와 같이 전조직이 near ferrite, near pearlite, near martensite순으로 잔류 austenite량이 증가하였는데 이 현상은 상기에서 이론적으로 설명하였다. 또한 각각의 austemper 온도에 따라서 Fig 8에서 알수 있는 바 잔류 austemper량이 다르다.

이 원인은 austenite → bainite 변태는 300℃, 450℃에서는 완전한 항온변태로 인해서 잔류 austenite는 없지만 350℃, 400℃ austemper에서는 불완전한 항온변태가 이루어져 미변태된 austenite가 잔류하게 된 것이며 더욱 350℃ austemper가 400℃ austemper보다 더 많은 잔류 austenite가 존재한다고 생각된다. 이러한 잔류 austenite가 강인성에는 어느 정도 영향을 주는지는 확인할 수 없었으나 응력 유기 martensite변태를 일으켜 얼마만큼의 강인화에 기여하였을 것으로 생각된다.

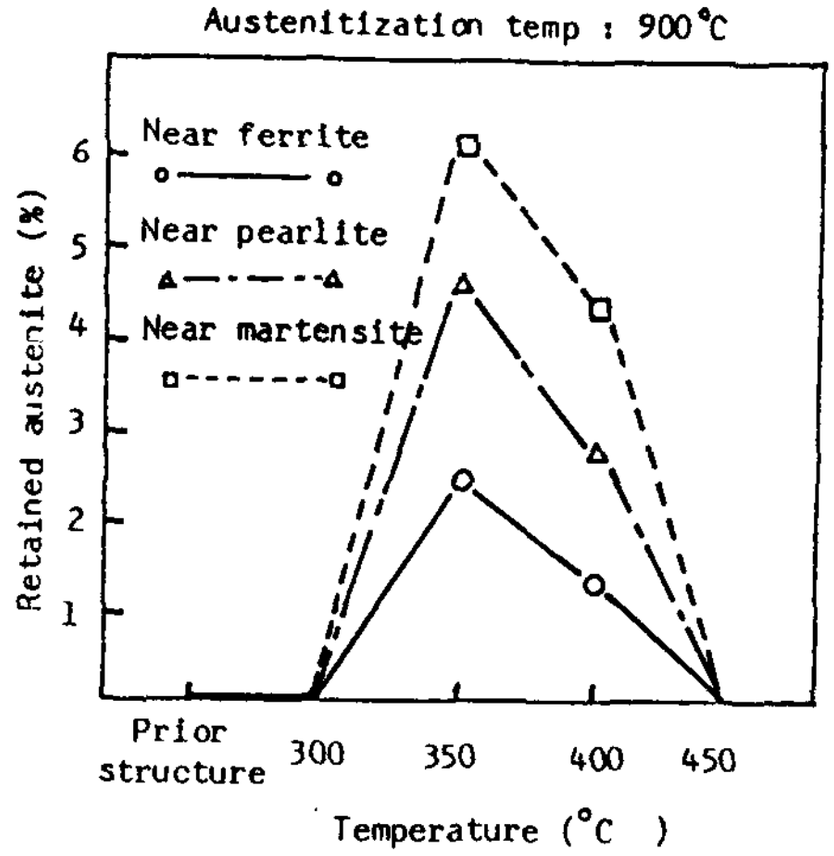
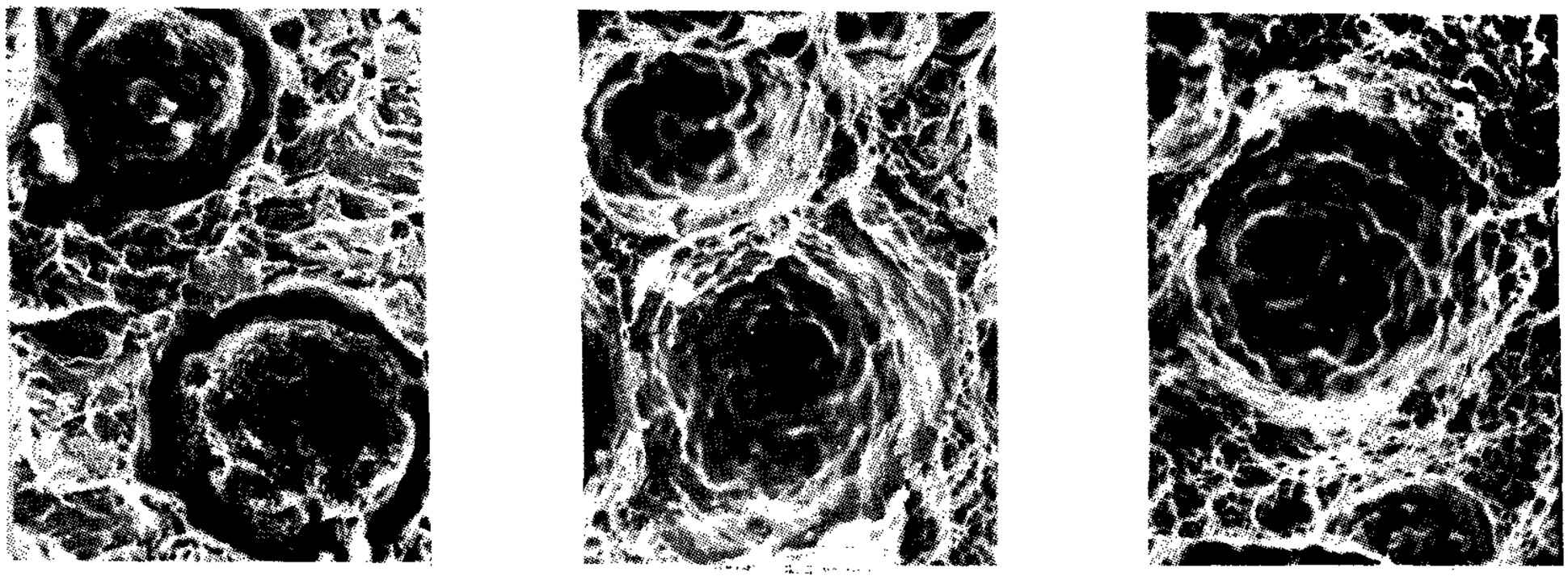


Fig 8. The effects of prior structures on retained austenite% in austempered ductile cast iron.

3.5 파단면 관찰

photo 3.은 300℃ austemper처리된 전조직들의 충격 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 파단면의 사진이다. (a)는 near Ferrite (b) near pearlite (c) near



(a) Near ferrite (b) Near pearlite (c) Near martensite

Photo 3. Fractograph (SEM) of 300℃ austempered DCI

martensite의 각각의 전조직 파단면의 SEM사진이다.

사진에서 알 수 있는 바와 같이 충격 인성이 제일 크게 나타난 (a)는 구상흑연을 중심으로 하여 미세한 dimple pattern의 양상을 보이며 (b)는 dimple pattern이면서 river pattern도 보인다.

제일 충격인성이 낮은 (c)는 dimple pattern보다 river pattern의 quasi-cleavage 파단의 형태이고 특히 near martensite는 다른 두 전조직에서 볼 수 없는 흑연과 기지조직 경계에서 균열이 먼저 일어난 것을 보아서 흑연과 기지조직과의 결합강도가 낮아서 가장 적은 충격인성을 나타내는 것으로 생각된다

4. 결 론

austemper처리한 구상흑연주철의 강인성에 전조직이 어떠한 영향이 미치는지를 실험을 통해서 얻은 결과는 다음과 같다.

1) near ferrite의 전조직에서는 300℃, near pearlite, near martensite의 전조직에서는 350℃에서 austemper처리시 최대의 인장강도를 얻을 수 있었다.

2) near pearlite, near martensite의 전조직에서는 400℃에서 최대의 충격인성을 나타내고 near ferrite 전조직에서는 350℃ austemper에서 최대치를 얻을 수 있었다.

3) 우수한 강인성을 얻기 위해서는 near ferrite 전조직으로써 350℃ austemper에서 큰 인장강도의 저하없이 높은 충격인성을 얻을 수 있었다.

4) austenite는 전조직이 near martesite일때 제일 먼저 일어나고 near pearlite, near ferrite 순서로 austenite화가 일어난다.

5) 잔류 austenite 량은 다른 전조직보다 near martensite 전조직을 350℃ austemper처리시에 제일 많이 잔류한다.

참 고 문 헌

1. A.P.G agnebin : Iron age, 163 (1949), JAN, 30.
2. 小林 ; 鑄鍛造 47 (1975), 9. 7.
3. G.J.Cox ; Foundry Trade Journal 137 (1974), 11, 741.
4. Liecence Information GGG 100BA(Germanite), Japanese-European Projects Trade & Liecence Agency. Dusseldorf, (1981) Dec.
6. Kim. S.W. ; JUJO Vol 5 (1985), 12, 66-73.
7. 上田, 和出 ; 鐵と鋼 64 (1977), 9, 1, 572.
8. 上田, 和出 ; 鑄物 51 (1979), 8, 484.
9. R.C.Voigt, C. R.Lopper ; Trans 90 (1982), 239.
10. 西, 小林, 青山 ; 鑄物 50 (1978), 4, 223.
11. 青山, 横井, 小林 ; 鑄物 56 (1984), 7, 416, 417.
12. H.T.Augus : 'Physical and engineering properties of cast iron (1966), (Butterwarths) 368.