論　　文

구상흑연주철의 강인화에 미치는 3상 혼합조직의 영향

*金　錫　元, **李　邦　植

The Effect of the Multi-phase (ferrite-bainite-martensite) on the Strengthening and Toughening in the Ductile Cast Iron

*Sug-Won Kim, **Bang-Sik Lee

Abstract

This study is aimed to investigate the effects of the multi-phase(ferrite-bainite-martensite) on the strengthening and toughening in ductile cast iron.

All the specimen were austenitized at eutectoid transformation temperature range($\alpha+\gamma$) for 1hr and austempered at 300℃ and 400℃ for various holding time, and then quenched in iced water for mlti - phase ($\alpha-B-M$).

When the volume fraction of martensite is below 15 %, excellent maximum fracture load can be obtained due to strengthening by the fine martensite, but, with increasing of volume fraction over 15 %, it was decreased drastically.

The martensite size became finer and the shape of it changed from bar to spherical type with increasing of austempering holding time.

The higher the austenitizing temperature is, the more preferential is the formation of austenite phase around the graphite nodules improving strength and toughness of austempered ductile cast iron.

1. 서　론

구상흑연주철은 화학성분을 조정한다든가 또는 열처리에 의해서 기지조직을 변화시켜 연성이 좋은 페라이트조직으로부터 높은강도와 내마모성이 있는 퍼얼라이트조직을 얻을 수 있어 현재 구조용 재료로서, 재질적인 면에서 신뢰를 얻고있는 재료이다. 그러나, 가혹한 조건 하에서 사용하기 위해서는 강도와 인성을 동시에 향상시키는 강인화처리가 더 연구되어야 한다.

구상흑연주철의 기지조직이 퍼얼라이트이면 강도는 높지만 연성, 인성이 저하되고 페라이트이면 연성, 인성은 높지만 반대로 강도는 저하된다. 그러므로 최근에는 구상흑연주철의 강도와 인성을 동시에 높일 수 있는 강인화처리에 대한 연구가 많이 행하여 지고 있다. 강인화 방법으로는 Ni, Mo등과 같은 합금원소를 첨가하는 방법[1-2]과 열처리 방법[3-5]이 있다.

강인화방법중 하나인 오스템퍼링방법은 기지조직을 퍼얼라이트와 마르텐사이트의 중간 성질을 가진 베이나이트 기지조직으로 강인화시키므로써 기계적성질을 개선시키는 것이다. 이와같이 구상흑연주철의 강인화 연구는 기지조직의 변태에 관한 문제를 집중적으로 연구하고 있다.

구상흑연주철의 오스템퍼링처리에 의해서 생성

* 전북대학교 공과대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Chonbok National University)
**전남대학교 공과대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Chonnam National University)

된 베이나이트조직은 엄밀히 말하면 잔류오스테나이트와 베이나이트의 2상혼합조직이라고 말할 수 있다. 지금까지 2상혼합조직에 관한 연구는 많이 행하여져왔고 2상혼합조직 가운데 페라이트-베이나이트 2상혼합조직의 기계적성질은 페라이트 및 페라이트-퍼얼라이트조직에 비해서 기계적성질이 양호하다는 연구[6]가 보고 되어 있지만 구상흑연주철의 3상혼합조직에 대해서는 연구 되여진 바가 없다.

본 연구에서는 먼저 페라이트화 처리한 시료를 ($\alpha+\gamma$)공존온도구역에서 오스테나이트화 시키고, 오스템퍼링온도에서 불완전 베이나이트변태 반응시간을 유지시킨 후 얼음물에 소입하여 3상(페라이트-베이나이트-마르텐사이트)의 구상흑연주철을 제조하고 이들 3상이 구상흑연주철의 강인화에 어떠한 영향을 미치는가를 연구 검토하였다.

2. 실험방법

2-1. 시편제작 및 열처리

시료는 고주파 유도로에서 대기용해하였으며 화학조성은 Table 1과 같다. 용해주조된 Y-block의 시편을 기계가공하여 7×10×55㎜의 충격시험편을 제작하였으며, 전조직이 페라이트가 되도록 Fig. 1과 같이 시편을 열처리 하였다. 또한 3상혼합조직을 얻기위해서 Fig. 2와 같이 ($\alpha+\gamma$)구역인 840℃ 및 860℃에서 1시간동안 유지시킨 후 하부 베이나이트 변태구역인 300℃와 상부 베이나이트 변태구역인 400℃에서 각각 0~3000초동안 유지한 후 급냉시켰다. 본 실험에 사용한 고온용 염욕은 $NaCl : BaCl_2 = 1 : 1$로 혼합하여 사용하였고 저온용 염욕[7]은 $KNO_3 : NaNO_3 = 1 : 1$로 혼합하여 사용하였다.

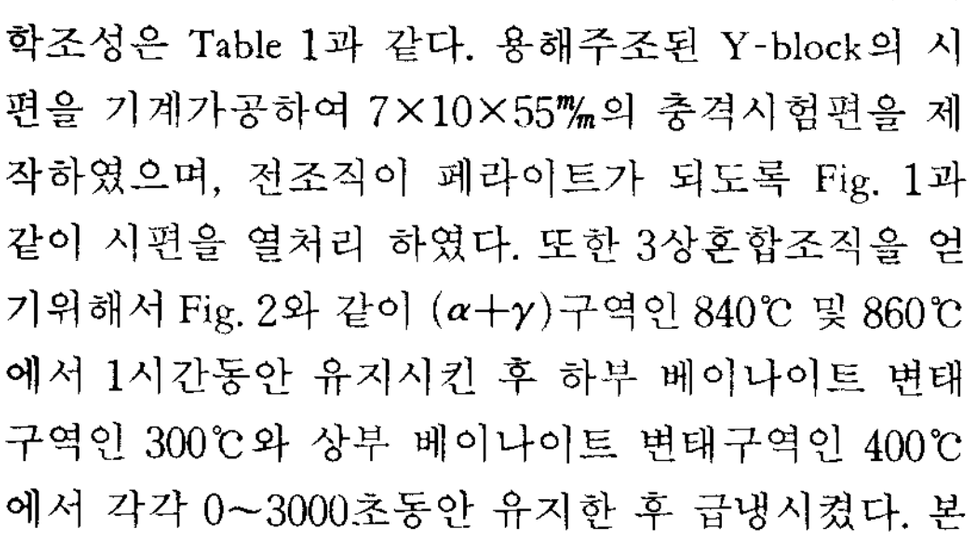

Fig. 1. Heat treatment cycle for ferritizing.

Table 1. Chemical composition of specimen.(Wt. %).

% / E	C	Si	Mn	P	S	Mg
%	3.57	2.74	0.21	0.021	0.014	0.042

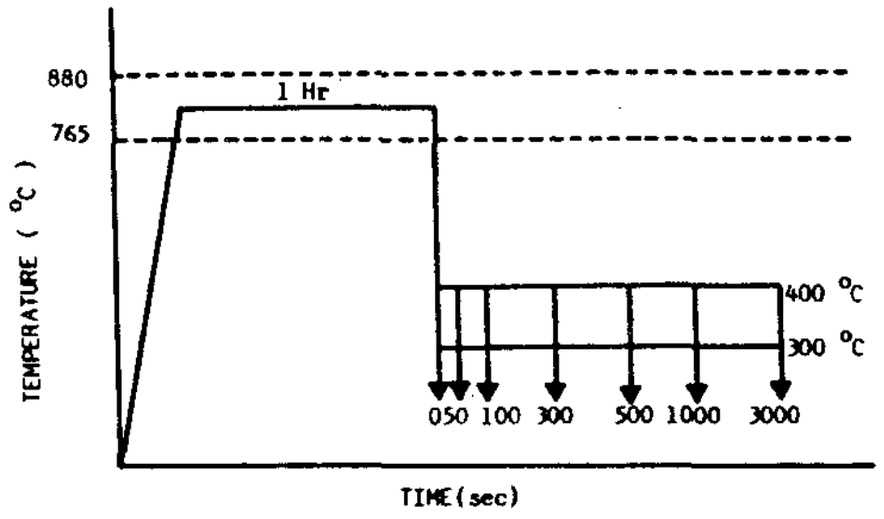

Fig. 2. Schematic diagram of heat treatment cycles for multi-phase(ferrite-bainite-martensite) matrix structure.

2-2. 조직관찰, 경도 및 상 분율측정

열처리된 시험편을 #200~#1200 연마지로 연마하였으며 다시 1㎛ 0.3 ㎛ 0.05 ㎛의 알루미나 분말로 연마하였다. 시편은 4% nital과 8% picral을 혼합하여 사용하였으며 조직은 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 3상을 관찰하기위해서 부식액 Lepera 용액[8]을 사용하였고 JEM-35type의 주사전자현미경을 이용하여 베이나이트의 형상(morphology)변화를 관찰하였다. 경도시험은 Vicker's 미소경도측정기를 이용하여 400배의 배율로 조직을 관찰하면서 각상의 경도를 5군데 측정 후 산술 평균값을 취하였다. 측정시의 하중은 100g이고 하중시간은 15초로 하였다.

각 시험편의 잔류 페라이트 베이나이트 및 마르텐사이트의 부피분율을 측정하기 위하여 조직사진을 이용하여 2500점을 기준으로해서 점집계방법[9]으로 5회 반복하여 그 평균값 을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 기지조직의 변화

Photo. 1은 주방상태의 시료를 Fig. 1과 같이 페라이트화 처리한 현미경 조직사진으로써 기지조직은 완전히 페라이트로 되었으며 이와같이 페라이트로

된 시료를 본 실험에서는 전조직(prior-structure)으로하여 사용하였다. 먼저 시료의 조직을 페라이트와 오스테나이트의 2상 혼합조직을 얻기 위하여 ($\alpha+\gamma$)구역인 840℃ 및 860℃의 염욕에서 1시간 유지한 후 즉시 수냉처리 하였다. 이때 얻어진 시편의 조직을 Photo. 2(A) 및 (B)에 나타내었다. 이때의

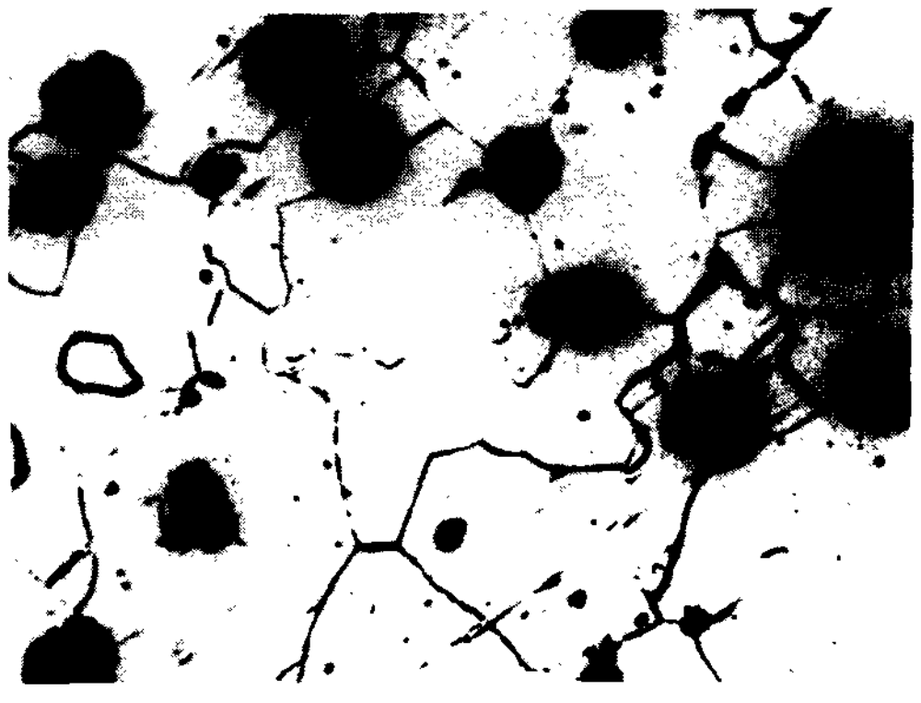

Photo 1. Optical microstructure of ferritic ductile cast iron. ×200

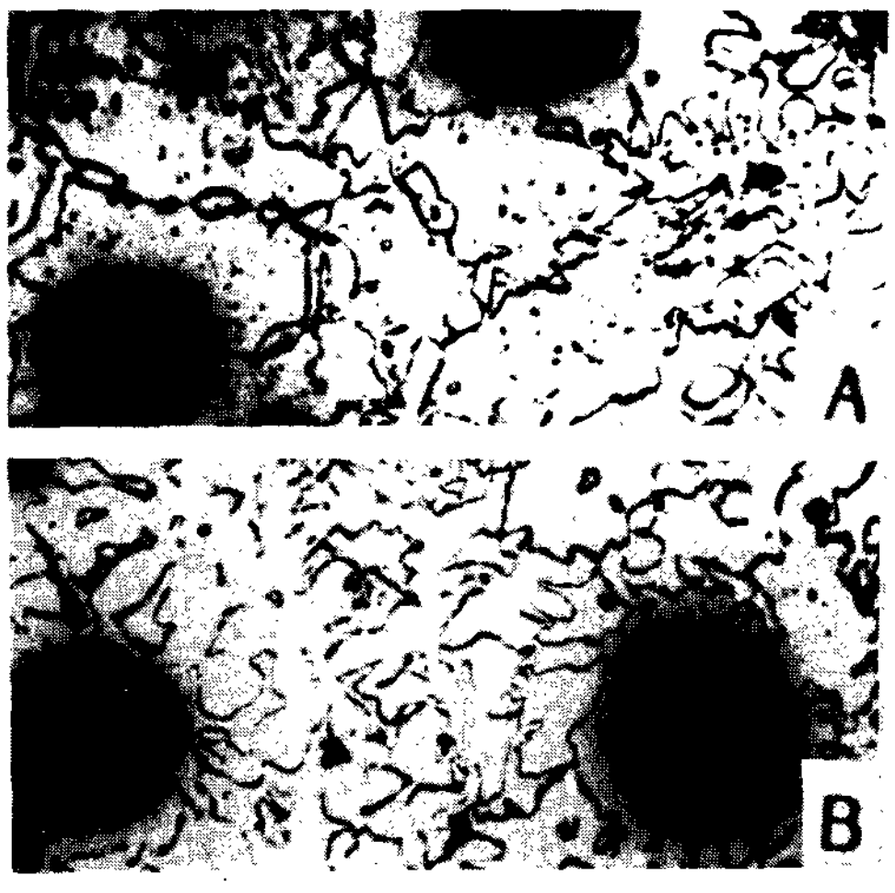

Photo 2. Microstructures of specimens quenched in ice water after 840℃(A) and 860℃(B) for 1hr. ×200

오스테나이트화 율은 840℃의 경우는 49%, 860℃의 경우는 62%로써 사진에서는 비교적 검게 나타난 부분이 오스테나이트(사진에서는 마르텐사이트로 변태되었음)이고 하얀 부분이 페라이트의 조직이다.

페라이트 기지조직의 시료를 ($\alpha+\gamma$)상 공존온도 구역으로 급속가열할때 오스테나이트화 온도 또는 가열속도에 따라서 오스테나이트상의 분포상태가 다르게 나타난다. 즉 Photo. 2에서와 같이 860℃로 가열되면 흑연 주위에 오스테나이트상이 석출하기 쉽게되고 840℃에서는 페라이트입계에 오스테나이트상이 석출하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 원인은 가열온도에 따른 탄소의 확산속도와 Si, Mn, C등 용질원소의 편석[10]에 의한 현상 때문이라고 생각한다.

Photo. 3은 시편의 조직을 3상혼합조직으로 얻기 위해서 840℃에서 1시간 가열한 후 400℃의 오스템퍼링온도에서 0～3000초의 서로 다른 시간을 유지하므로써 840℃에서 변태한 오스테나이트(49%)가 베이나이트 및 마르텐사이트로 변태된 조직을 나타낸 사진이다. Photo. 3(A)는 유지시간이 0초로써 페라이트와 마르텐사이트의 2상혼합조직이다. Photo. 3(B)는 50초동안 유지한 경우로서 오스테나이트가 일부 베이나이트로 변태되고 잔류오스테나이트는 급냉을 해주므로써 마르텐사이트로 된 3상(페라이트+마르텐사이트+오스테나이트) 혼합조직이다. 사진에서 검은 부분은 베이나이트이고 회색 부분은 페라이트, 비교적 흰 부분은 마르텐사이트조직이다. Photo. 3(C)는 100초 동안 오스템퍼링시킨 조직사진으로써 Photo. 3(B)의 조직 보다 베이나이트가 많이 생성되었고, 반대로 마르텐사이트는 적다. Photo. 3(D). (E) 및 (F)의 조직사진도 각각 500, 1000 및 3000초 동안 오스템퍼링한 후 얼음물에 급냉처리된 조직사진이다. 전체적으로 볼때 유지시간이 길어짐에 따라 베이나이트의 항온변태 반응이 증가되어 베이나이트의 부피분율은 증가되지만 마르텐사이트의 부피분율은 적어지게됨을 알 수 있다.

Photo. 4는 시편을 860℃에서 1시간동안 유지하여 페라이트를 오스테나이트로 변태시킨 후 상부 베이나이트 변태구역(400℃)에서 서로 다른 오스템퍼링시간을 유지한 후 급냉(水冷) 시켜 얻은 시편의 조직사진이다.

처음 Photo. 4(A)는 0초동안 유지시켰으므로 페라이트(38%)+마르텐사이트(62%)의2상 혼합조직의 사진이고 이때 흑연주위에 많은 마르텐사이트의 조직이 분포되어 있음을 알 수 있다. Photo. 4(B)는 400℃에서 50초동안 유지한 후 급냉시킨 조직사진으로써 3상(페라이트+베이나이트+마르텐사이트) 혼합조직이다. 마찬가지로 Photo. 4(C)～(F)까지의 사진은 유지시간의 변화에 따른 조직사진으로써 유지시간이 길어질수록 오스테나이트→마르텐사이트보다 오스테나이트→베이나이트의 변화가 이루어

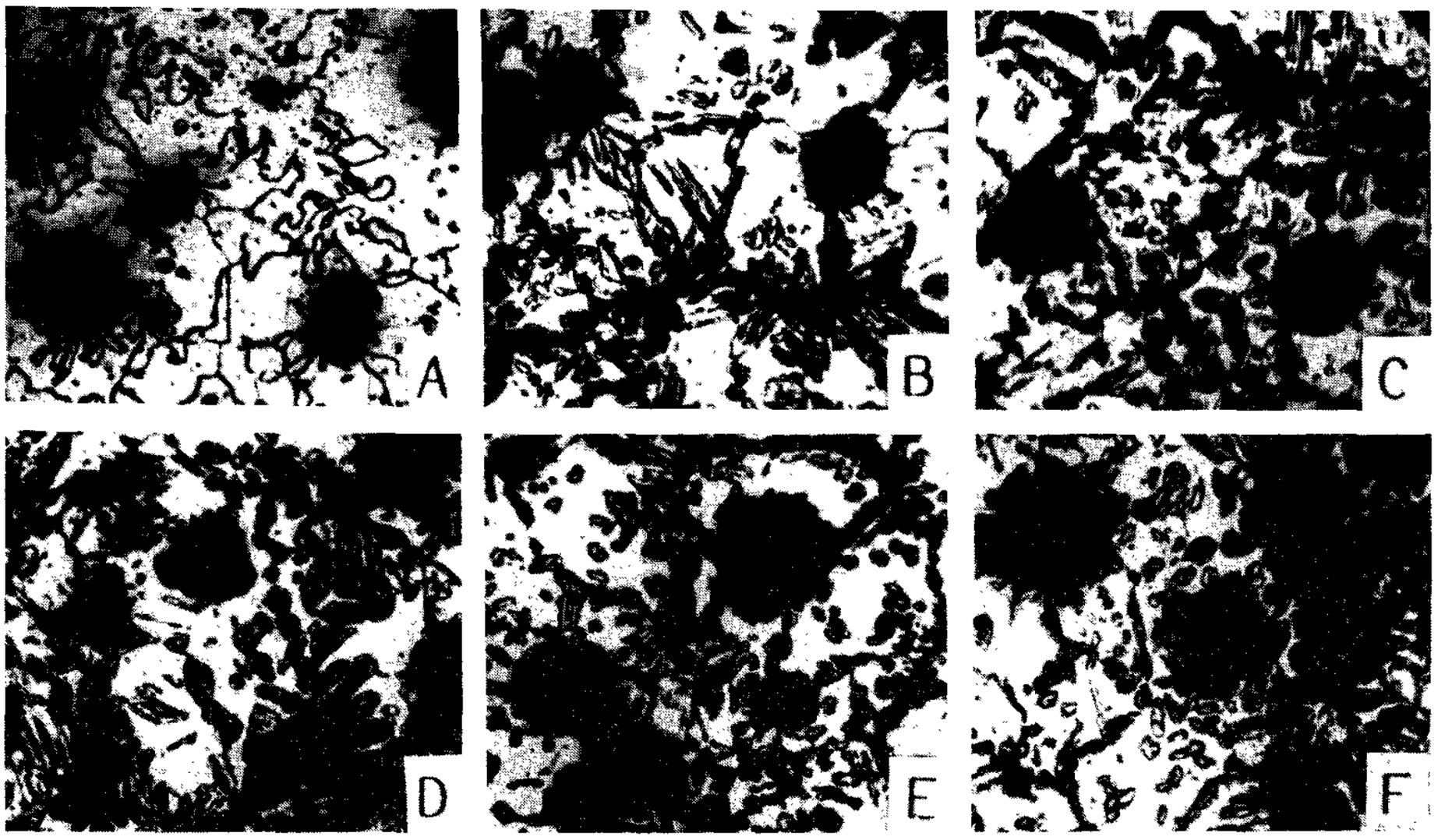

Photo 3. Microstructures of specimens austempered at 400℃ for various times after austenitizing at 840℃ for 1hr.
(A) 0sec (B) 50sec (C) 100sec (D) 500sec (E) 1000sec (F) 3000sec ×200

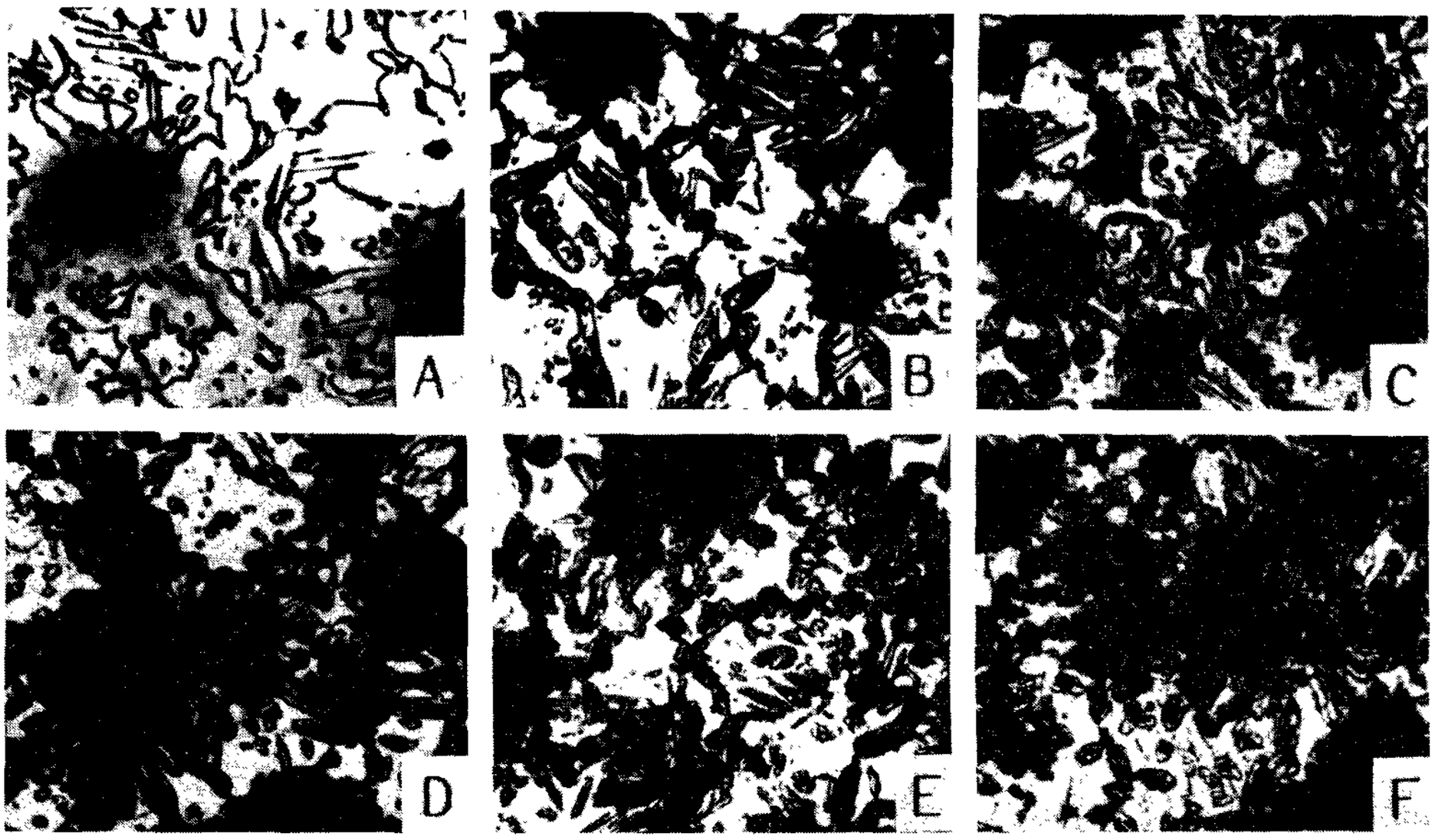

Photo 4. Microstructures of specimens austempered at 400℃ for various times after austenitizing at 860℃ for 1hr.
(A) 0sec (B) 50sec (C) 100sec (D) 500sec (E) 1000sec (F) 3000sec ×200

짐으로써 베이나이트량이 많기 때문에 점차 마르텐사이트는 적어짐을 알 수 있다.

Photo. 3 및 4에서 항온변태의 초기에는 마르텐사이트의 형상이 가늘고 끝이 뾰쪽한 봉상이며 크기는 조대화되었으나, 변태시간이 길어짐에 따라서 점차로 크기는 미세화되였고 구상으로 변화되었다. 이 원인은 항온변태시간이 증가함에 따라서 베이나이트량이 증가되고 변태전의 오스테나이트 결정립이 미세화되기 때문이라고 생각된다.

Photo. 5(A)는 840℃－300℃－50초 처리한 경우이며, Photo. 5(B)는 860℃－300℃－50초 오스템퍼링처리한 것이다. Photo. 5(A) 및 (B)에서 마르텐사이트의 부피분율은 각각 37.1% 및 27%이다. 사진에서 알 수 있는 바와같이 페라이트의 량은 Photo. 5(A)가 (B)의 경우보다 많이 나타나있고 또한 베이나이트량은 Photo. 3(B)가 (A)경우보다는 많다는 것을 알 수 있다.

Photo. 6은 오스테나이트화 온도와 항온변태 온도 변화에 따른 서로 다른 현미경 조직사진을 나타낸 것이다. 먼저 Photo. 6(A) 및 (B)는 페라이트의 부피분율은 같으나 항온변태온도가 다른 경우로서 상

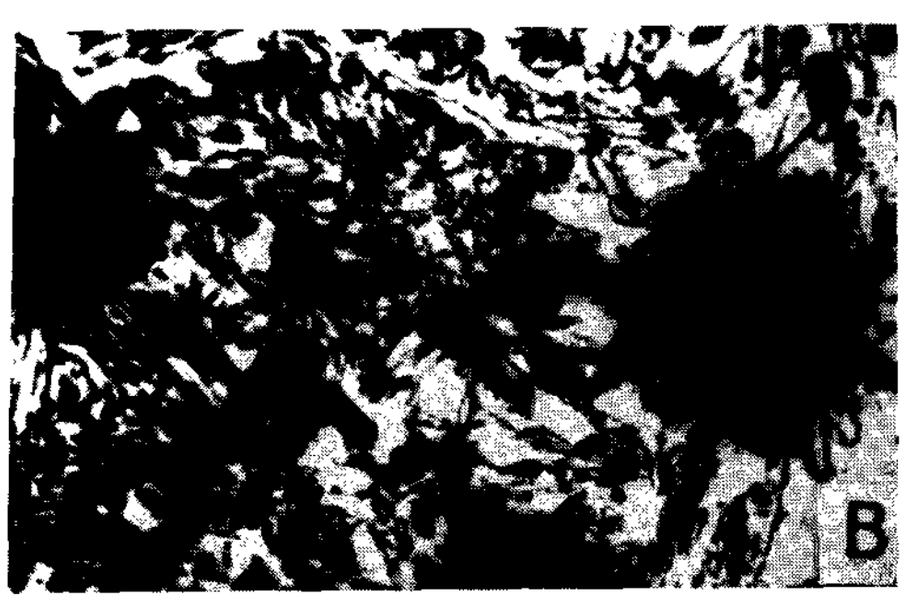

Photo 5. Microstructures of specimens austempered at 300℃ for 50sec after austenitizing at 840℃ (A), 860℃ (B) for 1hr respectively. ×400

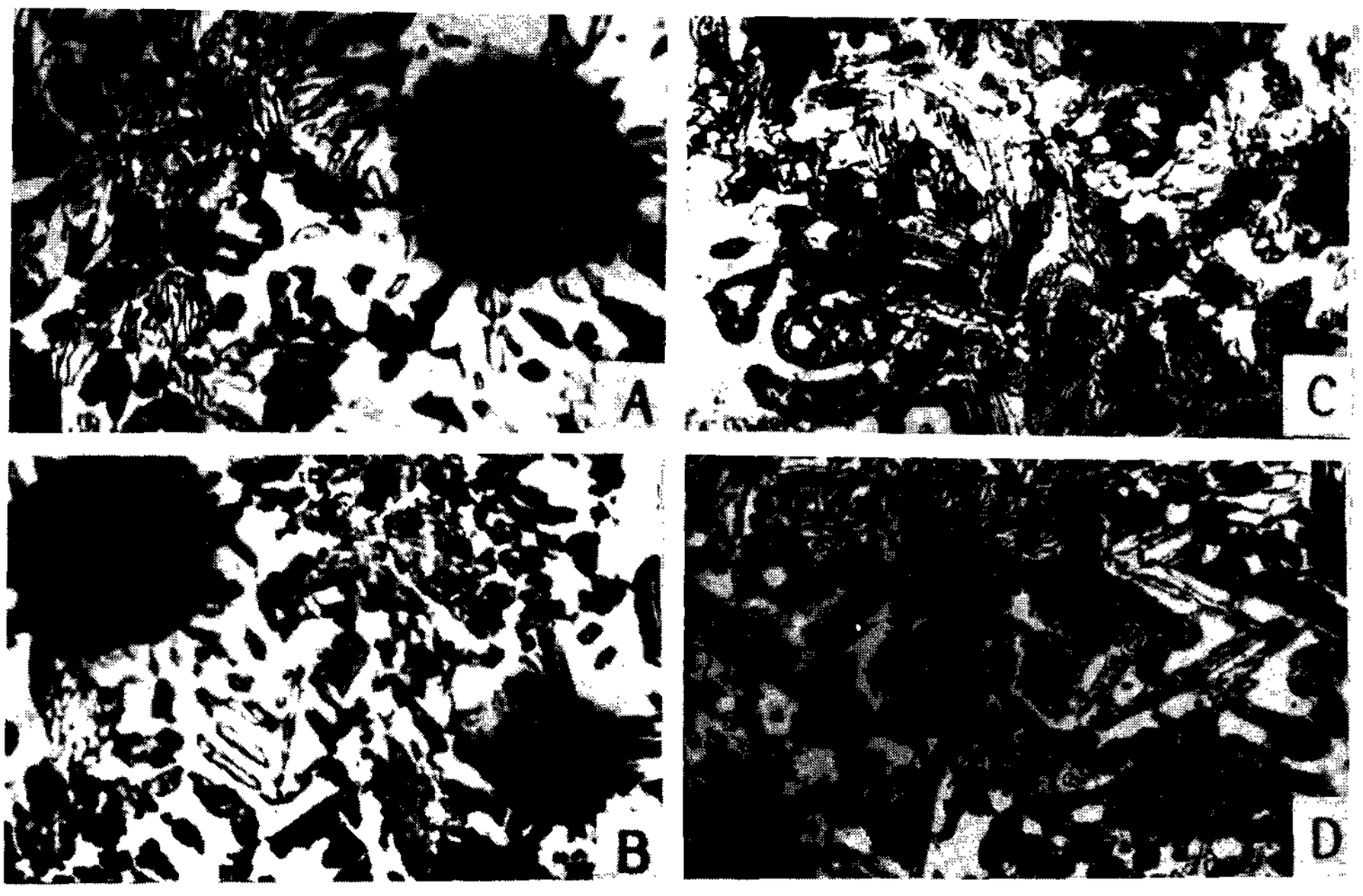

Photo 6. Microstructures of specimens at 300℃ (A, C), 400℃ (B, D) for 1000sec after austenitizing at 840℃ (A, B) and 860℃ (C, D) for 1hr.

A : 840℃ ×1hr－300℃ ×1000sec　　C : 860℃ ×1hr－300℃ ×1000sec

B : 840℃ ×1hr－400℃ ×1000sec　　D : 860℃ ×1hr－400℃ ×1000sec　　×400

부 베이나이트의 변태속도가 하부 베이나이트의 변태속도 보다 빠르기 때문에 300℃에서 항온변태시킨 경우, 즉 Photo. 6(A)보다 400℃에서 항온변태시킨 경우, 즉 Photo. 6(B)에서 베이나이트량이 많이 나타나있다. 이것은 상부 베이나이트영역이 하부 베이나이트영역 보다 온도가 높으므로 탄소의 확산속도를 증가시켜 베이나이트 변태속도를 빠르게 하기 때문이다. Photo. 6(C) 및 (D)는 오스테나이트화 온도가 보다 높은 860℃에서 오스테나이트화 시킨 것이고 그후 조건은 Photo. 6(A) 및(B)의 경우와 마찬가지이다. Photo. 6(C)는 Photo. 6(A)보다 페라이트량이 상당히 적게 나타나있다. 즉 Photo. 6(A)의 경우보다 Photo. 6(C)의 경우가 오스테나이트 온도가 높기 때문이다.

Photo. 7은 상부 및 하부 베이나이트의 주사전자현미경사진이다. 상부 변태구역에서는 하부 변태구역보다 베이나이트 변태속도가 빠르므로 Photo. 7(B)는 Photo. 7(A)보다 많은 베이나이트상을 나타내며 하부 베이나이트 상은 봉 및 침상이지만 상부 베이나이트 상은 입상(粒狀)의 모양으로 나타나 있다.

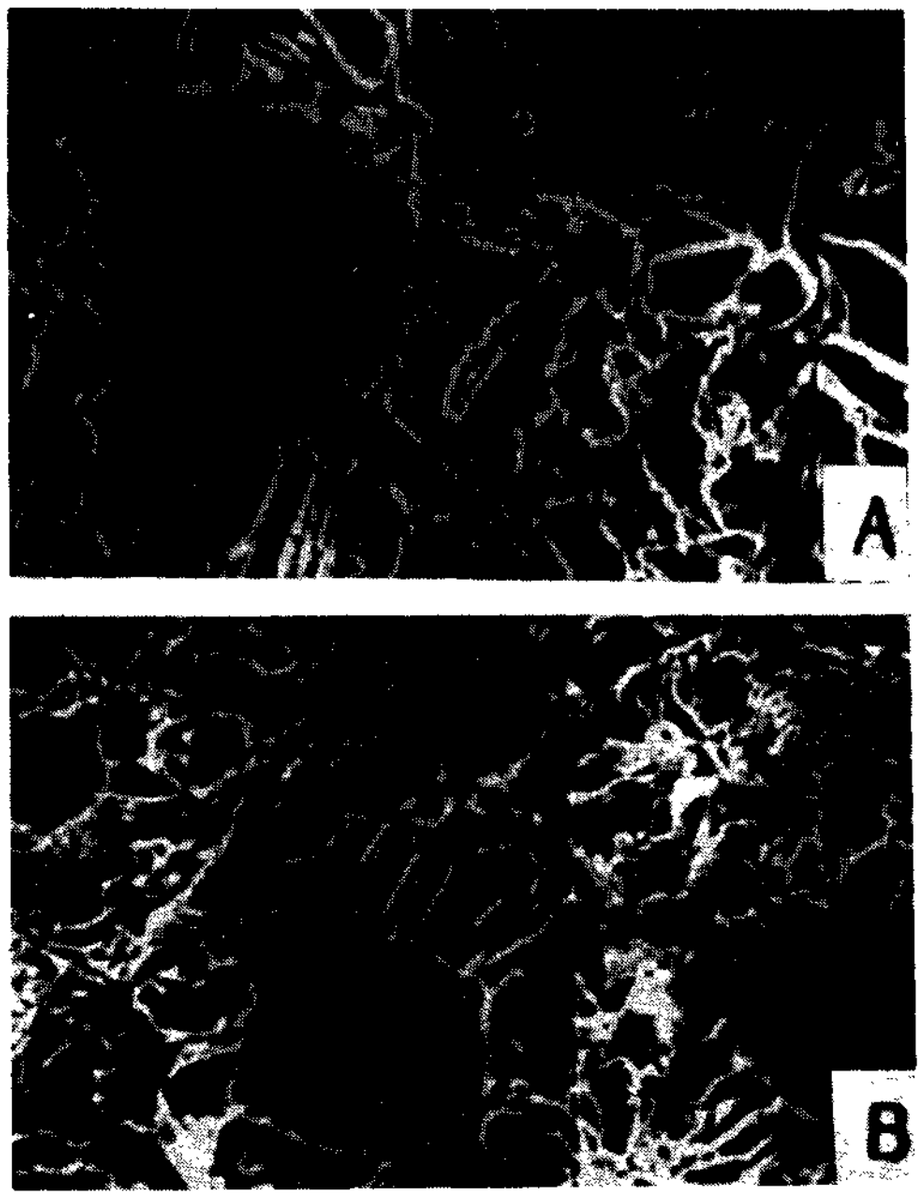

Photo 7. SEM of lower and upper bainite austempering at 300℃(A), 400℃(B) for 300sec after austempering at 860℃ for 1hr. ×1200

3-2. 충격에너지

오스테나이트화 및 베이나이트화 온도를 서로 변화시키고 오스템퍼링 시간을 0초에서 3000초까지 변화시켜서 얻은 페라이트-베이나이트-마르텐사이트 3상 혼합조직의 시편에서 충격에너지를 계장화된 Charpy시험기의 하중-변위곡선으로부터 구하였다.

본 실험에서 구한 충격치의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 어떤 조건에서도 항온변태 시간이 증가하면 증가할수록 충격치는 상승하였다. 즉, 항온변태 시간이 증가하면 베이나이트 변태량이 증가되고 오스테나이트에서 마르텐사이트 변태가 억제되므로 충격치는 증가된다고 생각한다.

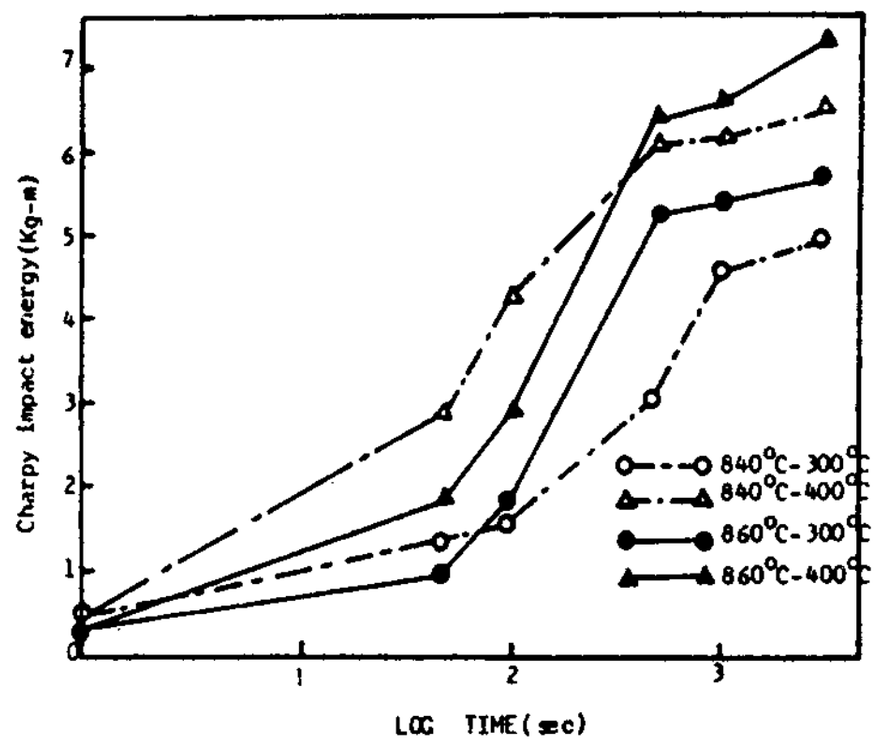

Fig. 3. Relationship between charpy impact energy and austempering conditions(sustempering temperature and holding time).

베이나이트변태는 탄소의 확산에 의해 지배된다. 따라서 탄소확산의 활성화를 이루려면 어느 일정시간이 필요하게되고, 일단 탄소가 활성화되면 상당히 빠른 속도로 탄소의 이동이 일어난다. 즉, 50초 이후 500초 사이에서는 상당히 빠른 속도로 베이나이트량은 증가하게되고, 그 결과 충격치는 상당히 큰 폭으로 증가하였다. 반면 50초이하와 500초이상의 항온변태 유지시간에서는 탄소의 확산속도가 느려지므로써 충격치의 상승은 완만하여지게 된다. 또한 오스테나이트화 온도가 높고 베이나이트 항온변태 시간이 길어지게 되면 충격치는 증가하는데

그 이유는 오스테나이트화 온도의 증가로 인해서 흑연주위에 우선적으로 베이나이트 변태가 촉진되어 구상흑연주철의 파괴 기점으로 작용하는 흑연과 기지계면조직과의 결합강도를 크게 해주는 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

또한 상부 베이나이트 변태온도인 400℃와 하부 베이나이트 변태온도인 300℃의 충격치는 항상 상부 베이나이트 변태온도인 400℃에서 크게 나타났다. 이 현상은 탄소의 확산속도에 지배를 받는 베이나이트 변태속도에 관계되는 현상으로써, 300℃보다 400℃에서는 탄소의 확산속도를 증가시켜서 같은 량의 오스테나이트에서 베이나이트로 변태되는 량이 증가되므로 같은 항온유지시간에서도 400℃쪽이 전체적으로 충격인성이 증가되었다고 생각된다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와같이 항온유지시간이 짧을경우 오스테나이트화 온도가 낮은편이 충격치가 크게 나타나고 항온유지시간이 길어지면 그 반대의 현상을 보여준다. 오스테나이트화 온도가 높으면 기지조직중에 잔류페라이트 량이 적게되어 짧은 항온유지시간에서는 충격치가 적게 나타나지만 500초 이후의 긴 항온유지시간 이후에는 변태된 베이나이트와 마르텐사이트분율의 영향으로 오스테나이트화 온도가 높은편이 크게 나타난다.

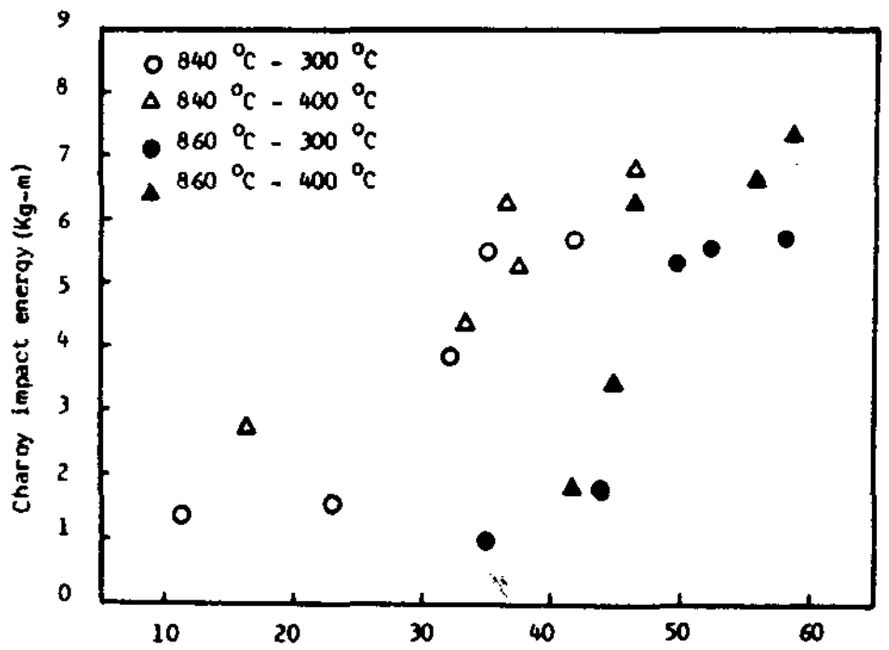

Fig. 4. Relationship between bainite volume fraction (%) and charpy impact energy (kg-m).

Fig. 4에 베이나이트량과 충격치와의 관계를 나타내었다. 베이나이트량과 충격치는 거의 정비례관계를 가지고 직선적으로 증가하였다.

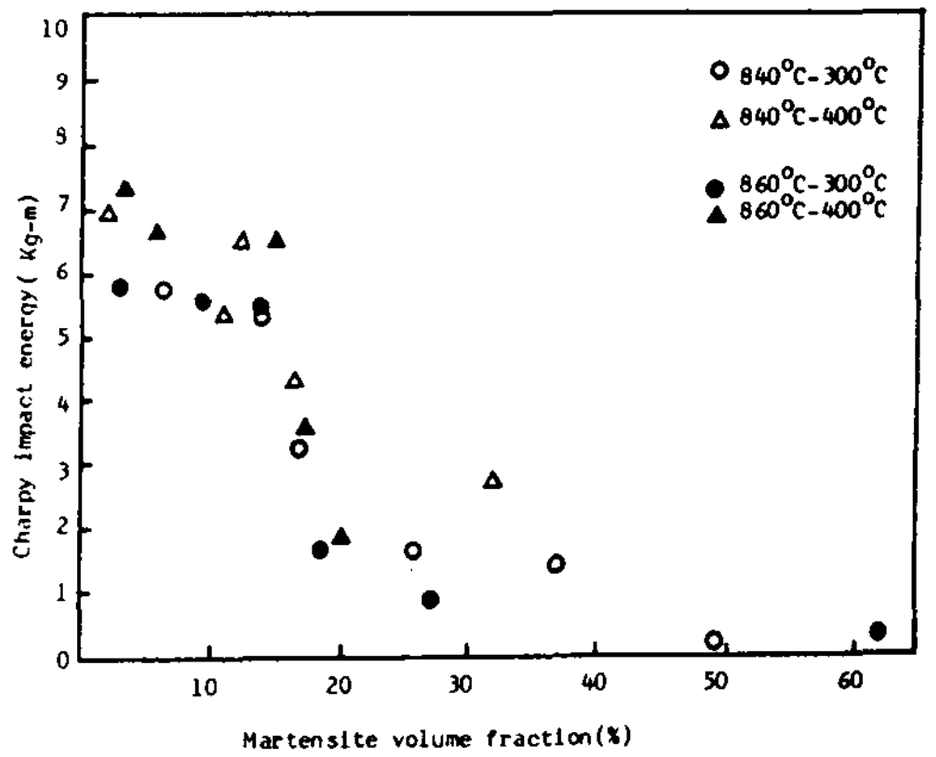

Fig. 5. Relationship between charpy impact energy (kg-m) and martensite volume fraction (%) due to various austempering conditions (austempering temperature and holding time)

Fig. 5에는 충격치와 제3상인 마르텐사이트량과의 상관관계를 나타내었다. 충격치는 마르텐사이트량에 따라서 직선적으로 감소하는 경향을 보이지는 않으나, 거의 15%의 마르텐사이트량까지는 비교적 높은 충격치를 나타내다가 15%이상에서는 급격히 낮은 충격인성치를 나타내준다. 15%이하의 적은 마르텐사이트량 범위에서는 300℃보다 400℃의 항온변태 처리한 편이 비교적 높은 충격치를 얻을 수 있었다. 그 이유는 3상혼합조직에서 가장 크게 인상을 지배하는것이 베이나이트이기 때문이다. 15%이하의 같은 베이나이트량을 갖는 3상혼합조직에서는 하부베이나이트보다 상부베이나이트쪽이 보다 높은 충격인성을 나타냈다.

3-3. 변형율

충격시험으로부터 재료의 변형율을 평가하는 방법으로써 시험 전후 시편의 단면 변형 변화를 조사하여 시험전의 시험편 폭(l_o)과 시험후의 최대폭(l_f)으로 다음과 같이 구할 수 있다.[11]

$$\delta\% = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100$$

[δ : 충격시편으로부터 얻어진 변형율]

본 실험에서 얻은 변형율의 변화를 Fig. 6에 표시하였다.

변형율은 충격인성과 상호관계가 있으므로써 오

스템퍼링 유지시간이 증가할수록 증가하고 있는것을 알 수 있다. 이것은 항온유지시간이 길어짐에 따라서 조직중에 베이나이트량이 많아지기 때문이라고 생각된다. 또한 500초 이하의 항온유지시간에서의 변형율은 ($\alpha+\gamma$)구역에서 오스테나이트화 후에 존재하는 잔류오스테나이트가 크게 영향을 주며, 더욱이 하부 베이나이트보다 상부베이나이트의 온도에서 보다 크게 나타났다. 상부 베이나이트가 하부 베이나이트보다 변형율이 크게 나타나는 원인은 300℃에서 형성된 베이나이트는 가늘고 긴 침상의 치밀한 조직으로 되어있으며 400℃의 오스템퍼링 온도에서는 조대한 우모상의 베이나이트가 되므로 변형율도 크게 나타난다.

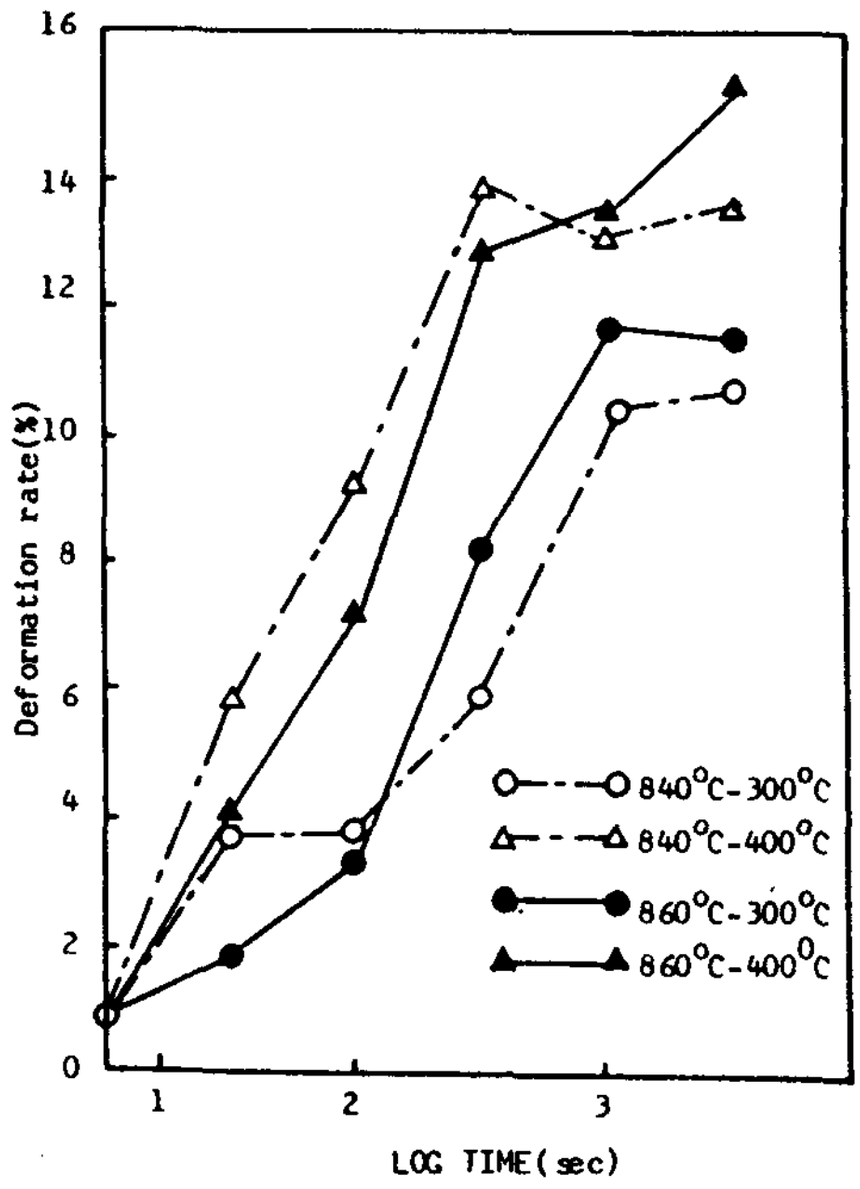

Fig. 6. Relationship between deformation rate(elongation) and various austempering conditions.

Fig. 7은 마르텐사이트량과 변형율과의 관계를 나타낸 것이다. 어느 경우에도 마르텐사이트량이 15%까지는 변형율이 서서히 감소하다가 15%이상에서는 크게 감소함을 나타내고 있다. 변형특성에 미치는 잔류페라이트와 베이나이트 영향은 크지만 마르텐사이트의 영향은 부피분율이 15%이내에서는 큰 영향을 미치지 못하나 15%이상으로 증가되면 크게 영향을 나타낸다.

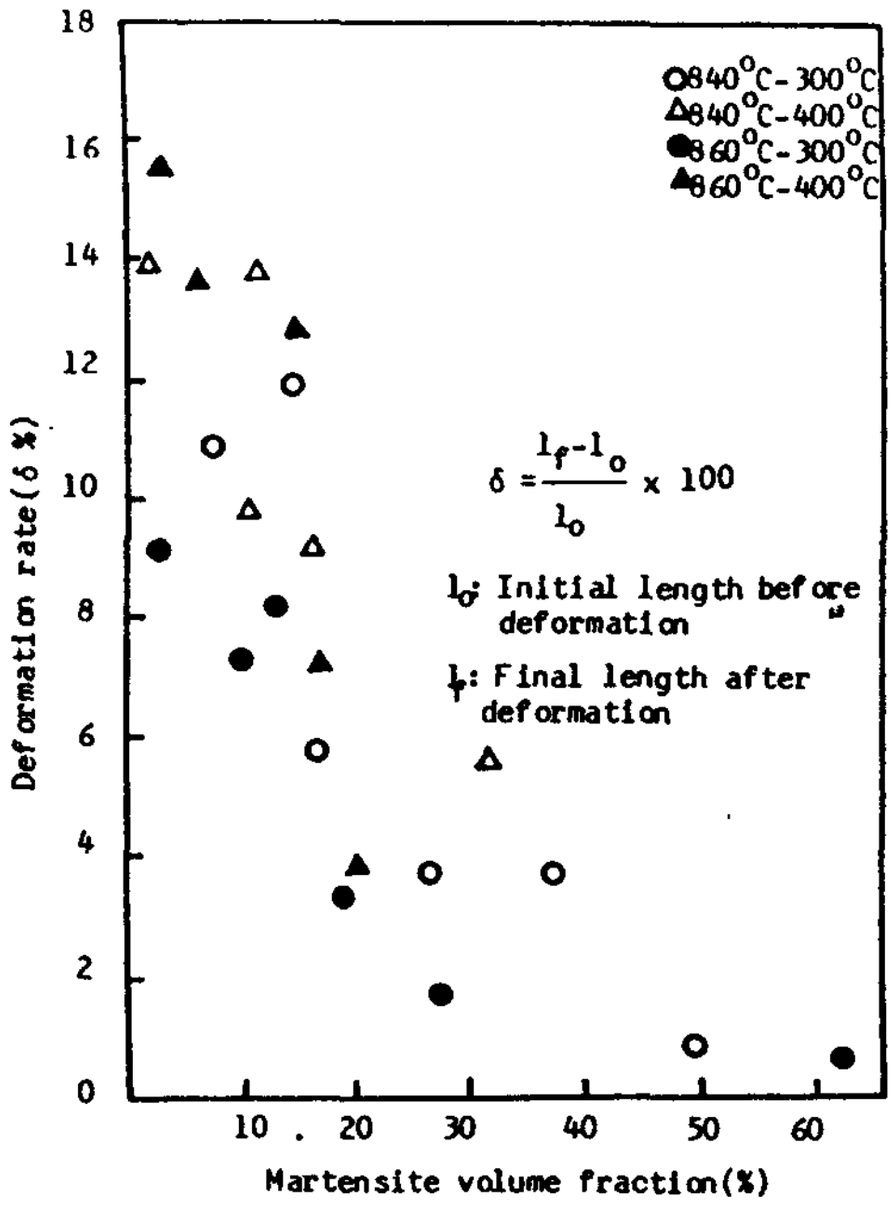

Fig. 7. Relationship between deformation rate (%) and martensite volume fraction due to various austempering conditions.

3-4. 최대하중에 대한 3상의 영향

Fig. 8은 본 실험에서 사용한 계장화 Charpy시험기로부터 구한 하중-변위곡선의 일예이다. Fig. 8의 (A) 및 (B)로 표시한 곡선은 오스테나이트화 온도의 의존성을 보여주는 것인데, 오스테나이트화의 온도에 따라서 최대하중은 서로 크게 차이가 없어 보이나 변위와 충격에너지는 서로 다르다. 그리고 (C) 및 (D) 곡선은 오스테나이트화 온도는 같지만 상부 및 하부의 베이나이트일때 최대하중, 변위 및 충격에너지는 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 충격인성은 시료가 최대파단하중에 도달하는데까지 흡수된 균열전파에너지로 구분하여 해석할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 구분할 수 있을 정도의 균열전파과정에 흡수된 균열전파에너지가 거의 나타나지 않았다.

Fig. 9은 베이나이트의 변태시간에 따른 최대파괴하중의 변화를 비교한 것이다. 최대파괴하중은 베이나이트 변태시간이 증가함에 따라 증가하였다. 100초이하의 같은 베이나이트 변태시간에서는 오스테나이트화 온도에 따라서 최대파괴하중은 변화를 나타내지 않았지만 그 이상의 베이나이트 변태시간에서는 오스테나이트화 온도가 높은것은 낮은것보

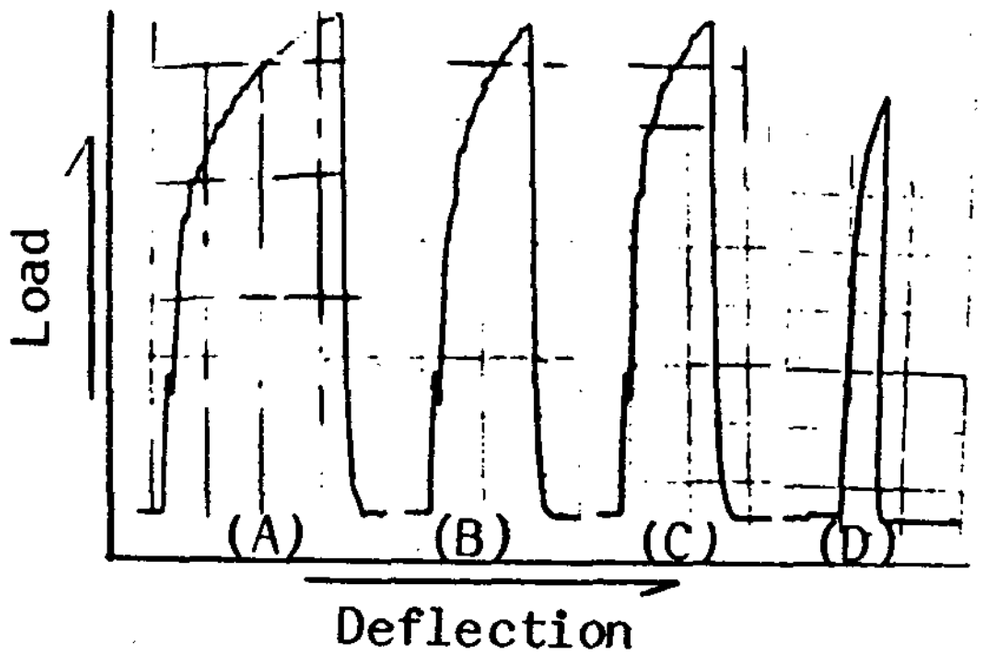

Fig. 8. Typical load-deflection curves of specimens austempered at various temperature in the $(\alpha+\gamma)$ range.
a) 860°C-400°C-3000 sec
b) 840°C-400°C-3000 sec
c) 840°C-400°C-500 sec
d) 840°C-300°C-100 sec

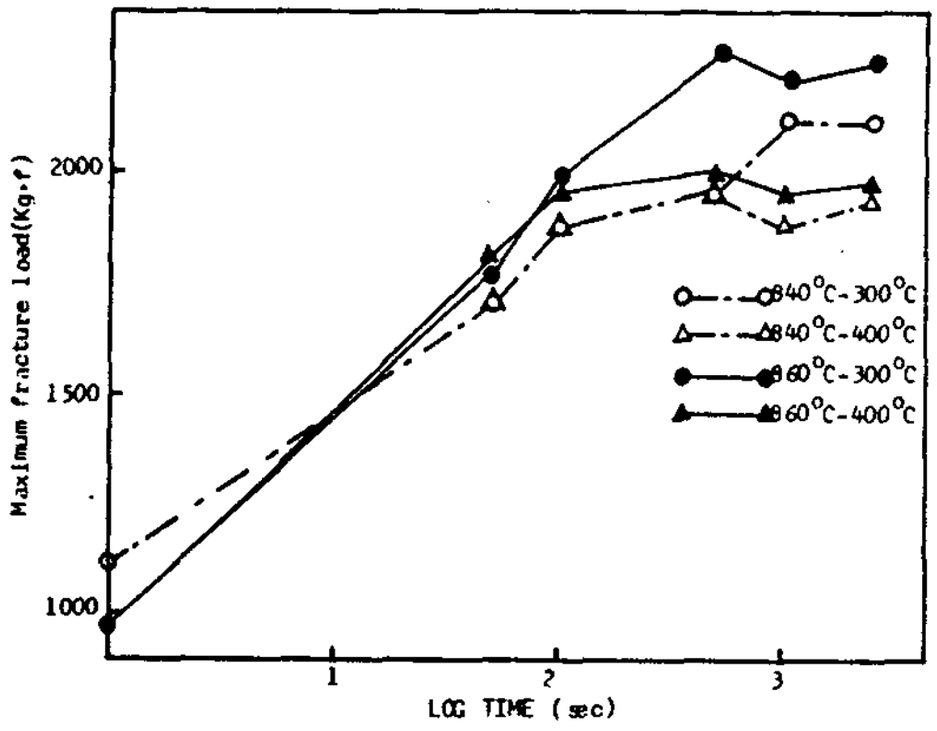

Fig. 9. Relationship between maximum fracture load and various austempering conditions(austempering temperature and holding time).

다 크게 나타났다. 이 원인은 잔류페라이트+오스테나이트의 변태시 높은 온도에서는 낮은 온도보다 오스테나이트에 고용되는 탄소량보다 변태베이나이트에 탄소량이 많이 고용되였기 때문이라고 생각된다. 그러나 충격에너지는 변형율과 같이 오스테나이트화 온도의 의존성은 크게 나타나지 않는다. 다시말하면 베이나이트의 분포상태는 기지조직의 변형율에는 크게 영향을 주지만 변형응력에는 크게 영향을 주지 못한다. 또한 하부 베이나이트가 상부 베이나이트보다 높은 최대파괴하중을 나타내었다. 그 이유는 하부 베이나이트는 상부 베이나이트보다 치밀한 조직이기 때문이다.

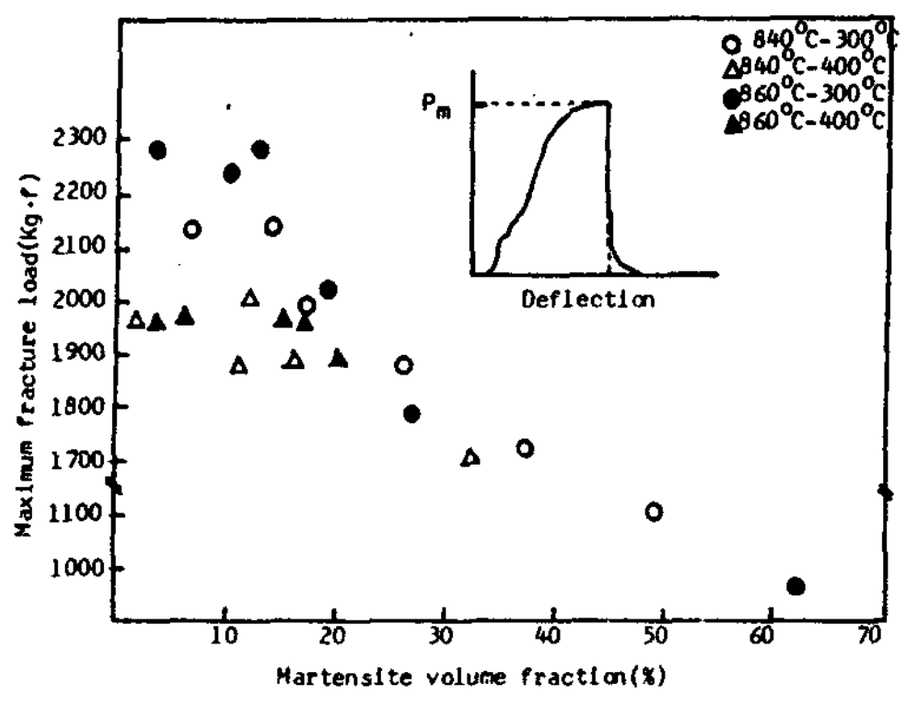

Fig. 10. Relationship between maximum fraction load (kg. f) and martensite volume fraction(%).

Fig. 10은 마르텐사이트가 최대파괴하중에 어떤 영향을 주는지를 나타내는 그림이다. 마르텐사이트량이 15%이하에서는 베이나이트량에 크게 영향을 받기 때문에 큰 변화가 없으나, 마르텐사이트량이 15%이상에서는 베이나이트의 파괴인성의 영향은 마르텐사이트가 둔화시키므로써 크게 저하하고 있다. 이것은 베이나이트가 마르텐사이트보다 파괴인성이 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 11은 충격, 최대파괴하중과의 상호관계를 고찰하기 위하여 나타낸 충격에너지와 최대파괴하중의 상관관계를 나타낸 그림이다. 본 실험에 사용한 시료의 3상혼합조직의 구상흑연주철에서 최대하중과 충격에너지를 같이 개선하기 위해서는 860℃에서 오스테나이트화 후 하부 베이나이트 변태온도에서 변태된 3상혼합조직이 제일 효과적이었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와같이 낮은 충격에너지값에 대하여서는 최대하중은 상당한 차이를 보이지만 충격에너지값이 어느 정도에 이르면 최대하중값은 큰 변화를 나타내지 않는다. 그 이유는 3상혼합조직중에 마르텐사이트가 15%이하의 적은 부피분율을 갖는 조직에서는 마르텐사이트가 어느 정도 기지조직의 강인화에 기여하기 때문이라고 생각된다.

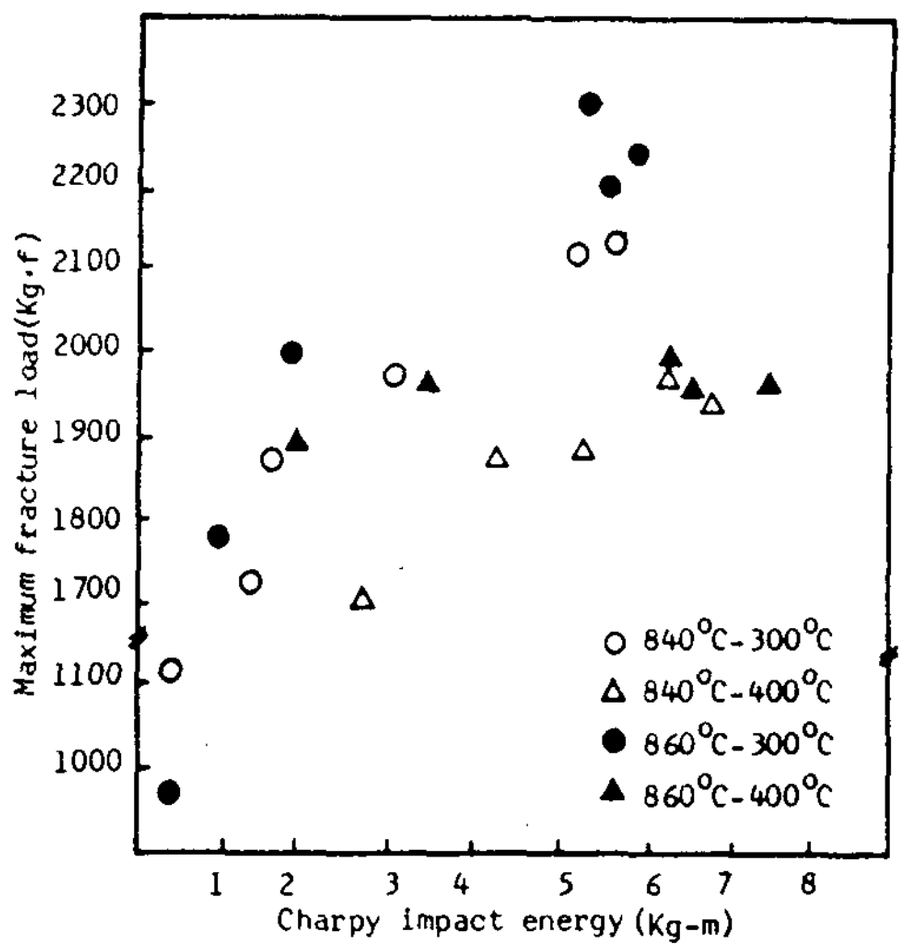

Fig. 11. Relationship between maximum fracture load and charpy impact energy(kg-m).

3-5. 경도에 미치는 3상혼합조직의 영향

페라이트중에 제2상인 베이나이트와 제3상인 마르텐사이트의 혼합비율에 따라서 어떻게 경도가 달라지는지를 Fig. 12에 나타내었다. 베이나이트의 변태시간이 적을수록 경도가 크게 나타나고 그후는 점차 낮은 경도값을 나타냈다. 즉, 베이나이트 변태시간이 적으면 마르텐사이트량이 많게되어 높은 경도값을 나타내나, 베이나이트 변태시간이 길어지면 마르텐사이트 변태량이 적게되고 전체적으로 베이나이트로 변태되었기 때문에 기지조직의 경도는 저하된 것으로 생각된다. 경도값도 오스테나이트화 온도에 따라서 서로 다르게 나타나 860℃에서 비교적 높은 경도값을 나타내고 있다. 그 원인은 오스테나이트화시 높은온도에서는 오스테나이트에 고용되는 탄소의 량은 증가되므로 결국 보다 높은 탄소를 고용하고 있는 오스테나이트로부터 변태된 마르텐사이트 및 베이나이트는 높은 경도값을 나타내게 된다. 또한 같은 오스테나이트화 온도라도 상부 베이나이트 온도에서는 하부 베이나이트 변태온도에서보다 낮게 나타나 있다. 이것은 상, 하부 베이나이트가 서로 다른 조직이기 때문이다. Fig. 13은 경도값에 미치는 제3상인 마르텐사이트의 영향을 보여준다. 그림에서도 같은 마르텐사이트량에서 상부보다 하부 베이나이트 온도에서 높은 경도값을 보여 주고있다.

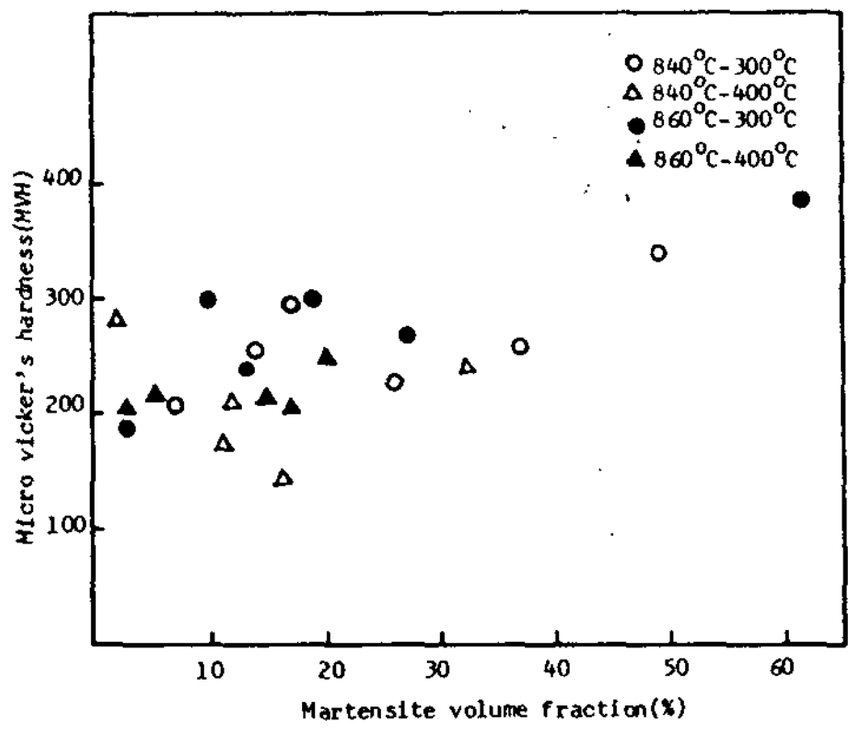

Fig. 13. Relationship between micro vicker's hardness and martensite volume fraction(%).

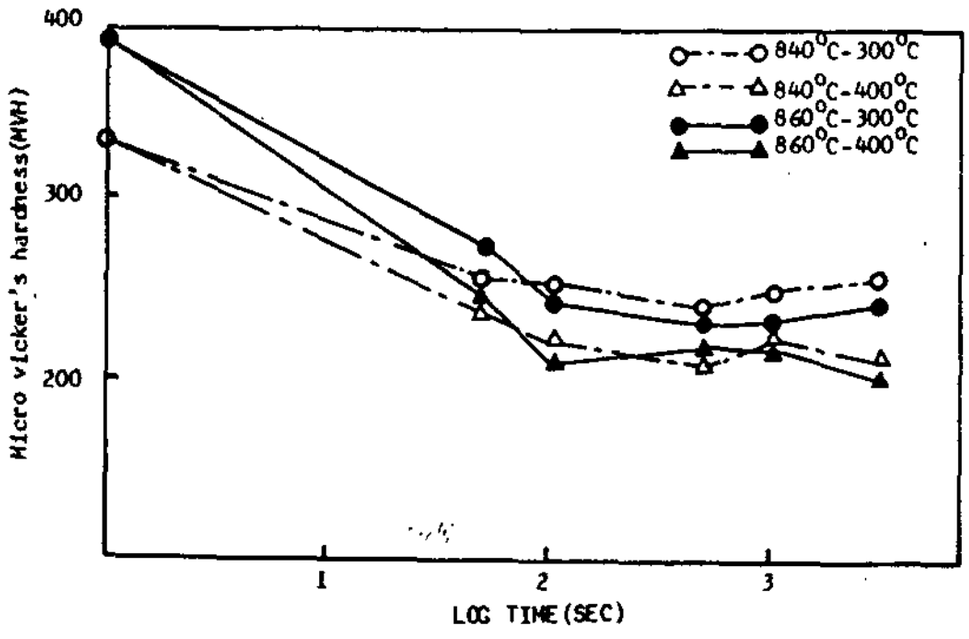

Fig. 12. Relationship between micro vicker's hardness and various austempering conditions(austempering temperature and holding time).

3-6. 파단면 관찰

충격 파단면의 주사전자현미경사진을 Photo. 8에 나타내었다. Photo. 8 (A) 및 (B)는 오스테나이트화 온도와 오스템퍼링온도는 같으나 베이나이트변태 유지시간이 다른경우, 즉 50초와 100초인 시편에서 파단면을 관찰한 것으로서, Photo. 8(A)는 파단면이 군데군데 약간의 dimple은 보이지만 river pattern의 quasi-cleavage파단의 형태가 많이 나타나있고 Photo. 8(B)는 river pattern과 dimple pattern이 혼존하여 보

인다. 이 차이는 베이나이트 의 변태량이 100초 오스템퍼링한 경우가 많기 때문이다. Photo. 8(C)와 (D)는 오스테나이트화 온도는 같으나 서로 다른 상, 하부 베이나이트 변태온도에서 500초동안 항온변태시킨 경우의 파단면을 보여주고 있다. Photo. 8(D)는 Photo. 8(C)보다 많은 베이나이트의 변태로 인해서 흑연과 기지조직과의 결합강도가 크기 때문에 보다 많은 dimple이 보이고 river pattern은 거의 볼 수 없기 때문이라고 생각한다.

미세화되었으며 마르텐사이트 형태는 봉상에서 구상으로 변화되였다.

② 마르텐사이트의 부피분율이 약 15%이하일때 최대파괴하중은 크게 나타나지만 그 이상으로 증가됨에 따라 급격하게 저하되었다.

③ 860℃－300℃－500초의 오스템퍼링조건에서 우수한 충격에너지와 최대파괴하중값을 얻을 수 있었으며 그때의 3상의 부피분율은 페라이트(38%)－베이나이트(49%)－마르텐사이트(13%)이었다.

④ 상온에서 충격치, 변형율은 오스테나이트화 온도가 높을수록 크게 나타났으며 이는 오스테나이트가 흑연 주위에 생성되므로 흑연과 기지조직 사이의 결합강도를 증가시켜 주기 때문이다.

⑤ 항온변태 시간이 증가할수록 충격에너지, 변형율은 크게 증가하였으며 최대파괴하중은 초기에는 변화가 크지만 500초이상에서는 큰 변화를 나타내지 않았다.

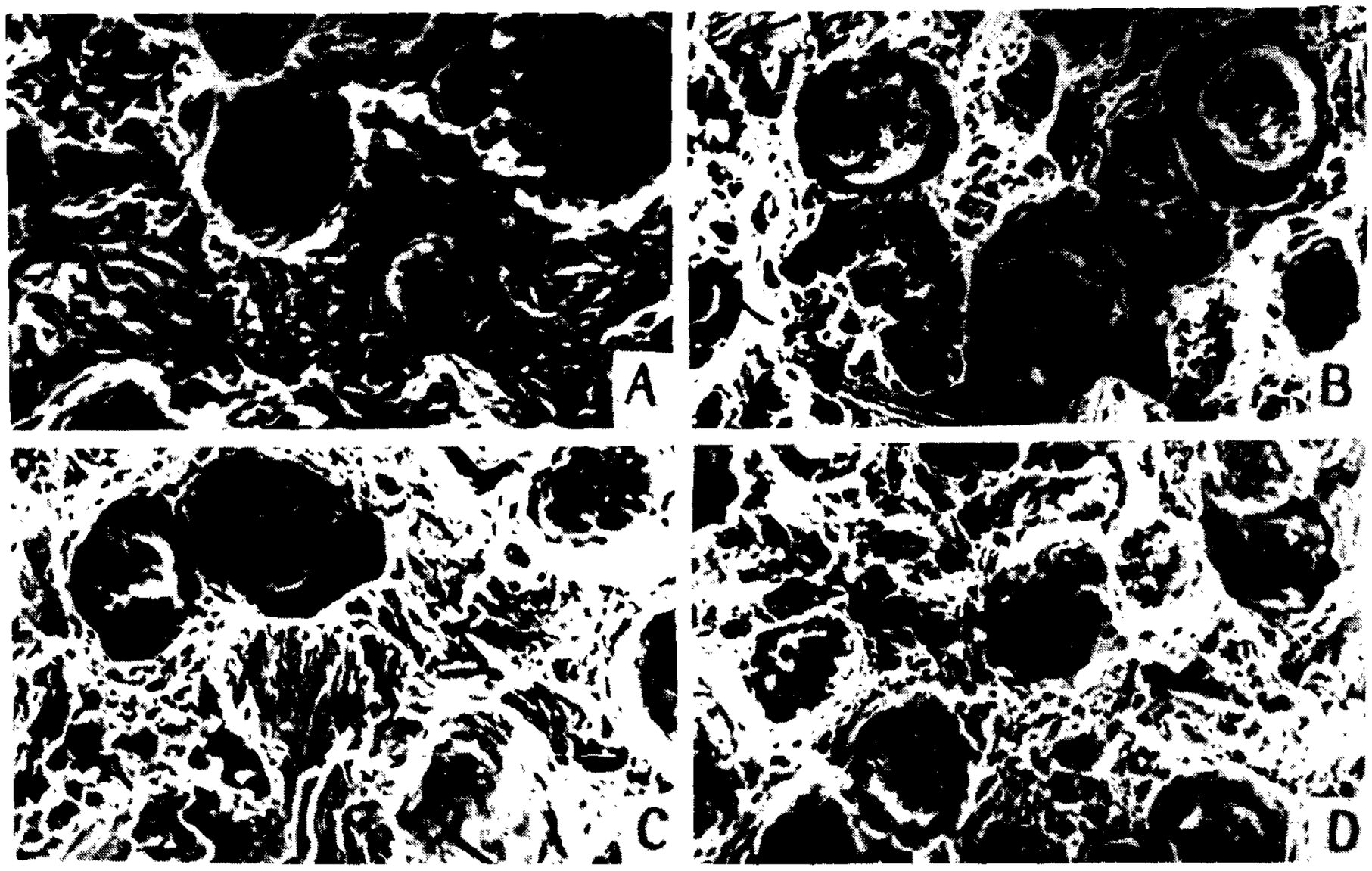

Photo 8. SEM of fractograph of specimen.

A : 840℃－300 C×50sec　　C : 860℃－300 C×500sec

B : 840℃－300 C×100sec　　D : 860℃－400 C×500sec　　×600

4. 결론

페라이트화 처리한 구상흑연주철을 $(\alpha+\gamma)$공존온도구역에서 오스테나이트화 시킨 후 오스템퍼링 온도에서 불완전 베이나이트변태 반응을 시켜 얻은 3상(페라이트－베이나이트－마르텐사이트)이 구상흑연주철의 강인화에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 항온변태시간이 증가할수로 마르텐사이트의 부피분율은 감소하고 마르텐사이트의 크기는

참고문헌

1. G.J.Cox ; Foundry Trade Journal, 134(1974) 714
2. N.K. Datta, N.W.Eugel ; AFS Trans., 8(1960) 569
3. 青山, 横井, 小林 ; 鑄物, Vol. 58, No. 3(1986) 48
4. 小林, 橘敬 ; 日本金屬學會誌, 45(1981), 155
5. M. Johnson ; AFS Trans., 85(1977) 117
6. 知出, 陸信, 上田 ; 鑄物, Vol. 55, No. 1(1983) 13
7. Eric A, Brandes Smithells ; Metals Reference Book, sixth edition, ASM(1972) 9~49.
8. F.S. Lepera ; Metallography,12(1979) 263
9. E. Underwood ; Quantitative Stereology, Addison-Wesley, (1970)23
10. 田中, 井川 ; 鑄物, Vol. 47, No. 12(1975) 947
11. O. Pawelski, V. Gopinathan, K. E. Hagedorn ; Arch. *Eisenhuttenwes., Vol. 51, No. 10(1980) 435*