

오스템퍼드 구상흑연 주철의 기계적 성질 및 파괴특성에 미치는 오스템퍼링 온도의 영향

강 창 룡 · 김 창 규

부산공업대학교 금속공학과

Effect of Austempering Temperature on the Mechanical Properties
and Fracture Characteristic of Austempered Ductile Cast Iron

C. Y. Kang and C. G. Kim

Department of Metallurgical Engineering, Pusan National University of Technology

ABSTRACT

This study was performed to investigation the effect of austempering temperature on the mechanical properties and fracture Characteristic of the ductile cast iron with contains Cu and Mo.

The obtained results of this study were as follows;

Microstructure of austempered ductile cast iron obtained by austempering were low bainite with some martensite at 250°C, mixture of low and upper bainite at 300°C and upper bainite at 350°C.

With increasing austempering temperature, yield strength, tensile strength and hardness decreased, while the elongation and impact absorption energy increased. With increasing austempering temperature, fracture toughness value increased and mainly controlled by bolume fraction of retained austenite.

The volume fraction of retained austenite increased and the fracture surface obtained fibrous and dimple with increasing austempering temperature.

1. 서 론

구상흑연 주철은 강에 가까운 높은 강도와 인성 및 양호한 절삭성등의 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라, 용점이 낮고 주조성이 양호하여 복잡한 형상의 주물도 제조가 용이하여 자동차부품에서 산업용 기기 부품등에 이르기 까지 폭넓게 사용되고 있다.^{1, 2)}

근년에 와서 재료의 고급화와 더불어 고강도, 고인성 및 내마모성등이 우수한 주철의 개발이 요구되어

지고 있고, 이러한 요구에 부응할 만한 주철재료로서 새롭게 개발된것이 주철중 가장 우수한 특성을 가진 구상흑연주철을 향은변태 열처리인 오스템퍼링(Austempering)처리를 하여 기지조직을 배이나이트(bainite)로 만든 오스템퍼드 구상흑연주철(Austempered Ductile Cast Iron, ADI)이다.

오스템퍼드 구상흑연주철은 기지조직이 배이나이트화 되어 있기 때문에 강도와 인성의 조합이 우수하고, 내마모성이 향상되어 최근에는 자동차의 링기어나 피

니언재료등에 채택되고 있을 뿐만 아니라 다른 부품에도 많은 채택이 될 것으로 판단되기 때문에 앞으로 그 수요는 더욱더 증가 할것으로 예상된다.^{3, 6)}

일본을 비롯한 선진각국에서는 1980년초부터 주철의 오스템퍼링에 관한 연구개발을 시작하여 실용화를 이루고 있는데 반하여 국내의 경우는 80년대 중반부터 오스템퍼드 구상흑연주철에 대한 소개가 시작되었지만 아직 실용화가 이루어 지지 않고 있는 실정이다.

지금까지의 오스템퍼드 구상흑연주철에 관한 연구를 살펴보면 열처리조건에 따른 기계적 성질변화^{7, 8)} 및 조직변화^{9, 10)}, 합금원소첨가의 영향¹¹⁾등에 관하여 주로 수행되어 왔으며 이들 연구결과에 의하면 오스템퍼드 구상흑연주철은 고장력강에 필적할 만한 우수한 특성을 지니고 있으며, 오스템퍼링처리후 형상이나 치수의 변화 및 균열, 표면산화등이 발생되지 않아 정밀 주조하거나 기계가공한 완제품을 열처리 할 수 있기 때문에 내마모성, 고강도 및 고인성 등이 요구되는 부품에 널리 사용될 수 있다고 보고되고 있다.¹²⁾

따라서 본 연구에서는 합금원소로서 Cu와 Mo을 첨가하여 구상 흑연주철을 제조한 후 오스템퍼링 처리를 할 때 오스템퍼링 처리 온도 변화가 미세조직, 기계적 성질 및 파괴특성 등에 미치는 영향을 체계적으로 조사하여 오스템퍼드 구상흑연주철의 제조에 관한 기초 자료를 얻고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시 료

본 실험에 사용된 시료는 용량이 100kg인 고주파유도용해로에서 주물용 선철과 강고철을 사용하여 용해

한 후 전기동과 Fe-Mo을 사용하여 소정의 목표성분을 만든 다음 미리예열하여 준비해둔 레이드에 출탕하면서 Fe-Si-Mg(5%)합금을 사용하여 샌드위치법으로 구상화 처리후 Fe-Si계 접종제로 후접종하여 Y 블럭형 (KSD 4302 A호) CO₂주형에 주입하여 얻었다.

얻어진 Y블럭의 하부를 절단하여 인장, 충격 및 평면변형 파괴인성 시편(CT 시편)을 제작하여 실험하였다. 이때 얻어진 시료의 화학성분을 Table. 1에 나타내고 주방상태의 기지조직 분석 결과를 Table. 2에 나타낸다.

한편 이와같이 제작된 각 시험편의 오스템퍼링열처리는 Fig. 1와 같이 900°C에서 2시간 오스테나이트와 처리후 800°C까지 공냉한 다음 350°C, 300°C 및 250°C

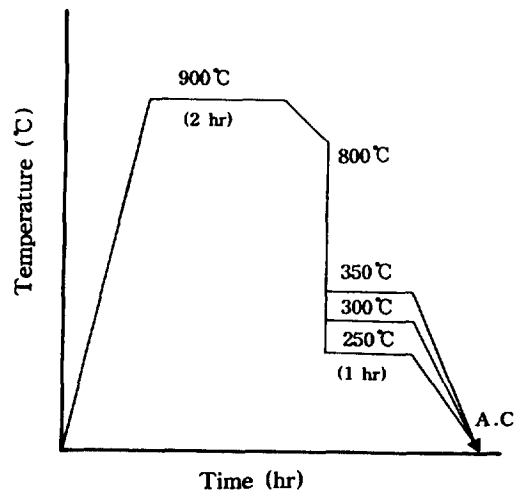


Fig. 1 Heat treatment cycle for austenitizing and austempering of ductile cast iron.

Table. 1 Chemical composition of Specimen.(wt.%)

T. C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Mo
3.48	2.54	0.21	0.02	0.009	0.022	0.72	0.23

Table. 2 Structure analysis of ductile cast iron matrix for as cast.

Ferrite (%)	Pearlite (%)	Graphite (%)	Average Diameter of Fraphite Nodule (mm)	Number of Graphite Nodule (#/mm ²)
20.8	67.12	12.08	0.0356	62

℃로 유지된 염용중에 신속히 투입하여 각각 1시간 동안 오스템퍼링 처리한 다음 공냉하였다.

2. 2 실험방법

구상흑연주철의 주방상태 및 오스템퍼링 처리한 후의 미세조직관찰은 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였고, 또한 파괴인성시험에 의해 파단된 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

기계적성질을 조사하기 위한 인장시험은 인장시험기(Shimadzu DCS 25T)에서 2mm/min.의 변형속도로 인장시험하여 인장성질을 구하였고, 충격시험은 샤르피(Charpy)형 충격 시험기(Amsler PW50K-ES21)를 사용하여 상온에서 실시하여 충격흡수에너지를 구하였으며 경도시험은 브리넬 경도 시험기를 사용하여 5회이상 측정된 다음 평균하여 구하였다.

한편 파괴인성 시험은 파괴인성시험편의 노치부 선단에 피로시험기(Share Western Co., DI 2500A. 10T)를 사용하여 10Hz 사인파로 1.3mm 미소크랙을 만든후 COD게이지를 부착하여 인장시험기(Instron 1334, 50T)로서 파단시켰고, 하중-균열 개구변위(P-COD)곡선은 증폭기를 통한 X-Y기록계를 사용하여 얻었고 ASTM E-399 규격에 따라 평면 변형 파괴인성치(K_{IC})를 구하였다.

또한 오스템퍼링 처리한 시료의 잔류오스테나이트량은 X-선 회절기(Rigaku, D-Max II A)에서 Mo-K α

선을 사용하여 30KV 25mA에서 0.5°/min. 속도로 주사하여 회절선도를 얻은 후 잔류오스테나이트와 페라이트(베이나이트)의 피크로부터 밀러법을 따라서 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 오스템퍼링 온도변화에 따른 미세조직 관찰

Cu와 Mo을 함유하는 구상흑연주철의 주방상태 조직과 여러온도에서 오스템퍼링 처리 하였을때 얻어진 미세조직을 광학현미경과 주사전자 현미경으로 조사하여 Photo. 1~4에 나타내었다.

Photo. 1은 구상흑연주철의 주방상태의 조직을 나타낸 것으로서 구상흑연 주위에 소량의 페라이트가 존재하고 있는 퍼얼라이트 기지조직으로 된 불즈아이(bullseye)조직으로 이루어진 전형적인 구상흑연주철조직임을 알 수 있다. Photo. 2는 구상흑연주철을 250℃에서 오스템퍼링 처리하였을때 얻어진 조직으로서, 다소의 마르텐사이트를 갖는 베이나이트 페라이트와 소량의 잔류오스테나이트 조직으로 이루어져 있고, 오스템퍼링 처리온도가 300℃인 Photo. 3에서는 Photo. 2의 경우와 비슷하게 베이타이트 페라이트와 잔류오스테나이트가 존재하고 있지만 잔류오스테나이트의 양이 Photo. 2에서보다는 더 많이 존재하고 있음을 알 수 있다. 350℃에서 오스템퍼링 처리한 Photo. 4에서는 베이나

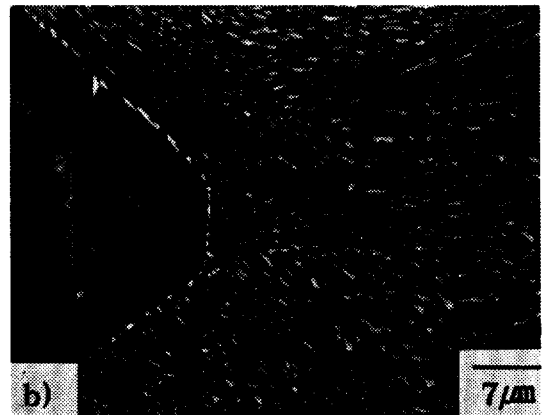


Photo. 1 Microstructure of Cu-Mo ductile cast iron

a) Optical Micrograph b) SEM

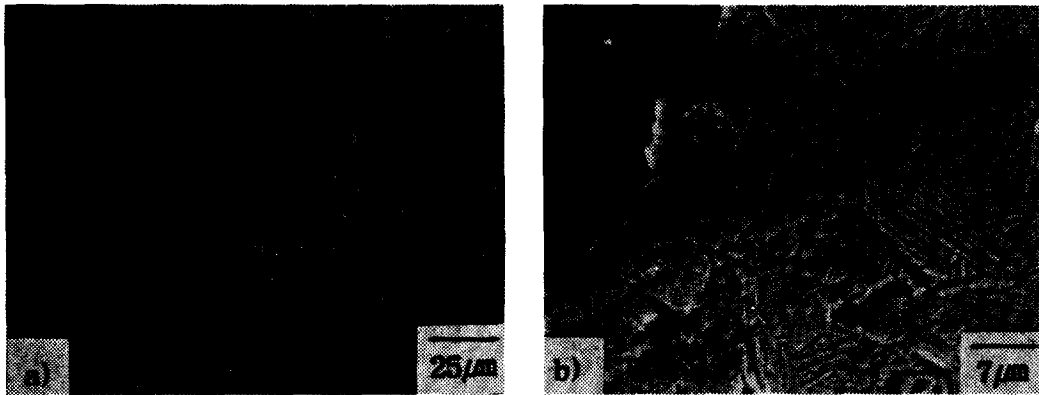


Photo. 2 Microstructure obtained by austempering at 250°C in Cu-Mo ductile cast iron.
a) Optical Micrograph b) SEM

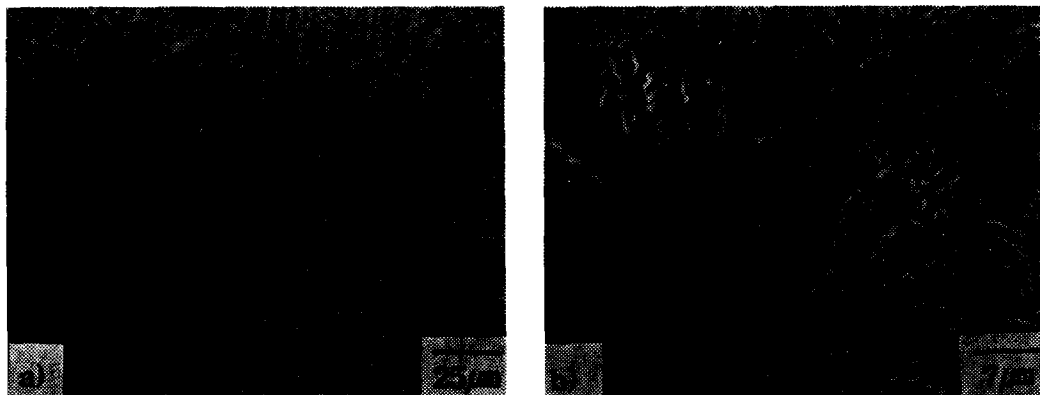


Photo. 3 Microstructure obtained by austempering at 300°C in Cu-Mo ductile cast iron.
a) Optical Micrograph b) SEM

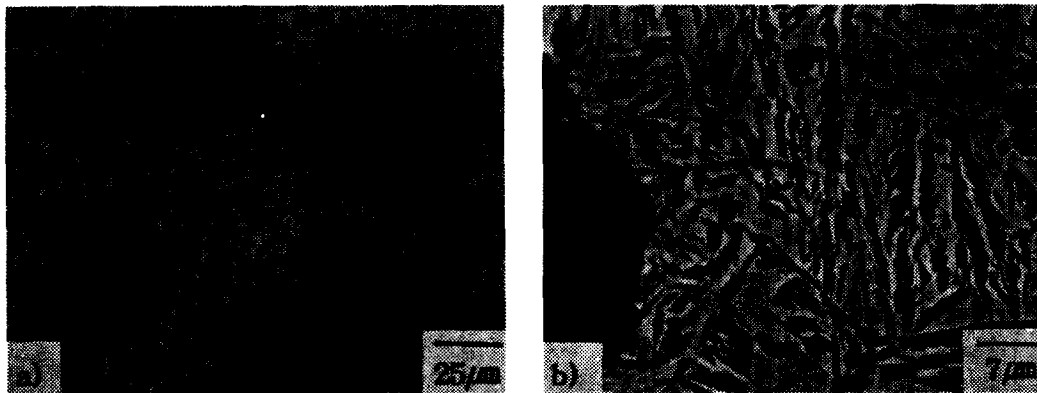


Photo. 4 Microstructure obtained by austempering at 350°C in Cu-Mo ductile cast iron.
a) Optical Micrograph b) SEM

이틱 페라이트의 lath가 더욱더 넓어지고 또한 길어지고 있고, 베이나이트 페라이트와 잔류오스테나이트의 간격이 더욱 넓어진 상부 베이나이트 조직과 잔류오스테나이트 조직으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

이상의 현미경 조직관찰에서 알 수 있는 바와 같이 오스테퍼링처리에 의해 구상흑연주철의 기지조직인 퍼얼라이트 조직이 베이나이트 조직으로 변태되어짐을 알 수 있고 오스테퍼링처리온도가 증가할수록 잔류오스테나이트량이 많아지고 있음을 알 수 있다. 또한 250°C에서 오스테퍼링처리를 할 경우에는 하부베이나이트가 생성되고, 300°C에서 오스테퍼링처리를 하면 하부베이나이트와 상부베이나이트가 혼합된 조직이 생성되고 있으며, 오스테퍼링처리온도가 350°C가 되면 상부베이나이트가 생성되어지고 있음을 알 수 있다.

이와같이 오스테퍼링 처리온도가 달라짐에 따라 변태 생성되는 기지조직이 달라지는데 기인되어 기계적 성질도 달라질것으로 예상되어 오스테퍼링 처리온도 변화에 따른 기계적 성질을 조사하였다.

3. 2 기계적 성질에 미치는 오스테퍼링 온도의 영향

이전의 현미경조직 사진에서 알 수 있는바와 같이 Cu와 Mo가 첨가된 구상흑연주철의 조직이 오스테퍼링 처리 온도에 따라 달라지고 있고, 이러한 조직변화가 기계적 성질 및 파괴특성에도 영향을 미칠것으로 사료되어 인장시험, 경도시험, 충격시험을 통하여 기계적성질에 미치는 오스테퍼링 온도의 영향을 조사하였다.

Fig. 2는 Cu와 Mo가 첨가된 구상흑연주철의 주방상태 및 오스테퍼링처리를 하였을때 오스테퍼링 처리 온도에 따른 인장성질 변화를 나타낸 것이다. 오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 인장강도와 항복강도는 감소하고 있는데 반하여 연신율은 증가하고 있다. 또한 주방상태보다 오스테퍼링 처리를 실시한 경우가 인장강도, 항복강도 및 연신율 모두 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와같이 주방상태보다도 오스테퍼링처리를 행하게 되면 인장강도, 항복강도 및 연신율이 증가하는 이유는, 오스테퍼링처리에 의해 기지조직이 베이나이트로 변태되어 강도와 연성의 조합이 개선되어지기 때문이며, 오스테퍼링 온도가 증가함에 따라 인장강도 및 항복강도가 감소하고 연신율이 증가하는 이유는 오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 변태 생성되는 베이나이트 페라이트의 lath가 길어지면서 잔

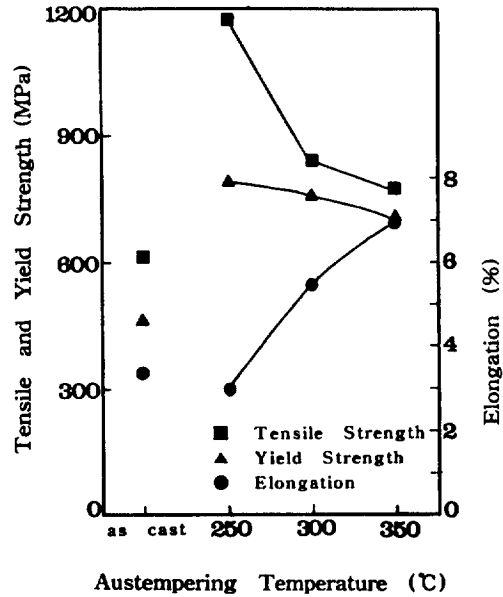


Fig. 2 Effect of austempering temperature on the tensile properties in Cu-Mo ductile cast iron.

류오스테나이트량이 많아지고, 또한 오스테퍼링 처리 온도가 증가할 수록 베이나이트 페라이트가 생성될때 성장하는 베이나이트 페라이트로 부터 다량의 탄소가 베이나이트 페라이트 사이에 있는 오스테나이트로 확산해 감으로서 오스테나이트내 탄소의 농도가 높아지는데 기인되어 오스테나이트의 안정화가 되기 때문이라고 사료된다.^{6, 13)}

Fig. 3은 구상흑연주철의 주방상태와 오스테퍼링 처리 하였을때 오스테퍼링 처리온도에 따른 경도변화 및 충격흡수에너지 변화를 나타낸 것이다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 오스테퍼링 처리 온도가 증가함에 따라 경도값은 감소하고 충격흡수에너지는 증가하고 있다. 또한 주방상태 보다는 오스테퍼링처리에 의해 경도값과 충격흡수에너지가 나타나고 있다.

이와같이 오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 경도값이 낮아지고 충격흡수에너지가 증가하는 이유는 오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 잔류오스테나이트량이 증가할 뿐만 아니라, 베이나이트 페라이트 사이에 존재하고 있는 잔류오스테나이트의 안정도가 증가하는데 기인된다고 사료된다.¹³⁾

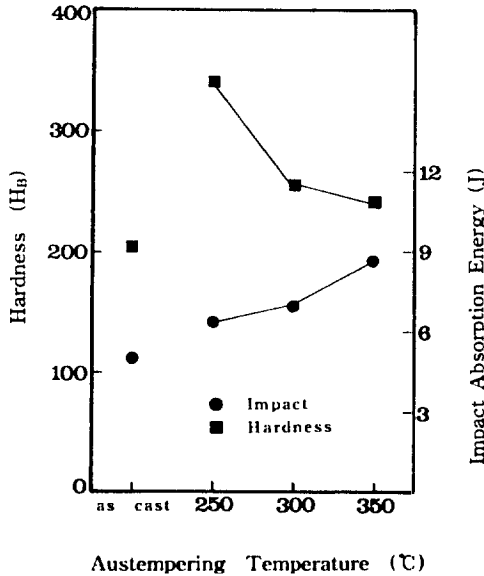


Fig. 3 Effect of austempering temperature on the hardness and impact absorption energy Cu-Mo ductile cast iron.

3.3 파괴특성에 미치는 오스테퍼링 온도의 영향

Fig. 4는 구상흑연주철의 주방상태와 오스테퍼링 처리된 시험편을 파괴인성시험 하였을때 얻어진 하중-크랙 개구변위 곡선을 나타낸 것이고 Table. 3은 파괴인성시험에 의해 얻어진 결과를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 오스테퍼링 처리온도가 각각 다른 시험편으로부터 최대 하중을 측정하여 초기단계의 선형구역 기울기보다 5% 낮은 기울기의 직선과 선도의 교점에서 하중값(Pa)을 구한후 이때 계산된 파괴인성 응력강도계수(K_Q)가 모두 ASTM 또는 Irwin⁽⁴⁾의 평면변형파괴조건(P_{MAX}/P_Q<1.1)을 만족시키고 있었기 때문에 평면변형파괴인성치(K_{IC})를 얻었다. Fig. 4와 Table. 3의 결과로 부터 오스테퍼링온도가 증가할수록 파괴인성치가 증가함을 알 수 있고 주방상태보다는 오스테퍼링 처리한 경우가 더 높은 파괴인성치를 나타내고 있다.

주철의 파괴인성에 관한 연구를 수행한 Smith⁽⁵⁾와 Gundlach⁽¹⁾등에 의하면 페라이트-퍼얼라이트기지 또는 템퍼링된 마르텐사이트기지 조직을 갖는 구상흑연주철보다 오스테퍼링 처리된 구상흑연주철의 강도와

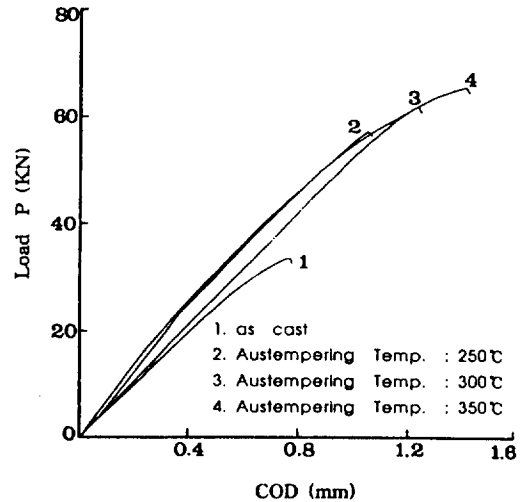


Fig. 4 Relationship between load and opening displacement test record in Cu-Mo ductile cast iron.

연성의 조합이 훨씬 더 우수하기 때문에 파괴인성치가 높다고 보고하고 있다.

본 실험에서도 주방상태보다는 오스테퍼링처리한 경우와 오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 파괴인성치가 증가하는 이유는 오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 잔류오스테나이트의 량이 증가함과 더불어 오스테나이트의 안정도가 증가하는데 기인되어 강도와 연성의 조합이 우수하게 되어 파괴인성치가 높아진다고 사료된다.

Fig. 5는 오스테퍼링 처리한 시험편의 충격흡수에너지와 파괴인성값과의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 충격흡수에너지와 파괴인성값 사이에는 거의 직선적인 비례관계가 성립되고 있다.

3.4 잔류오스테나이트와 파괴특성과의 관계

앞의 연구 결과에서 오스테퍼링 처리온도가 달라짐에 따라 변태 생성되는 조직(주로 잔류오스테나이트)이 달라져서 기계적 성질 및 파괴특성이 변화됨을 알 수 있었다. 이러한 파괴특성이 변화되는 것은 주로 잔류오스테나이트에 기인되는 것으로 예상되어 잔류오스테나이트와 파괴특성과의 관계를 조사하였다.

Fig. 6은 Cu와 Mo가 첨가된 구상흑연주철을 여러 온도에서 오스테퍼링처리를 한 후 X선 회절시험 하였

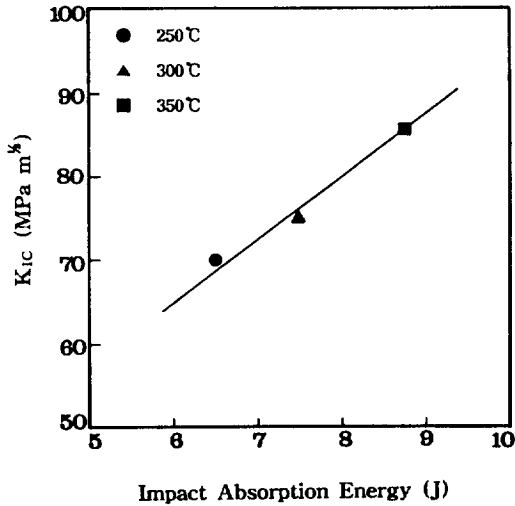


Fig. 5 Relationship between fracture toughness and impact absorption energy of ductile cast iron.

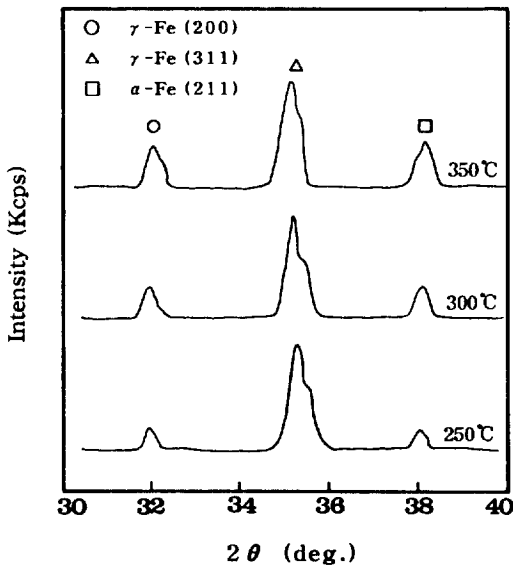


Fig. 6 X-Ray diffraction patterns obtained by austempered at various temperature in Cu-Mo ductile cast iron.

올때 얻어진 회절선도를 나타낸 것이다.

오스테퍼링 처리온도가 높아질 수록 (200) 및 (311) γ -Fe의 회절피크 강도가 높아지고 피크의 폭이

넓어지는 것으로 보아 잔류오스테나이트량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 실제 이 회절선도로 부터 구한 잔류오스테나이트량은 오스테퍼링 온도가 250°C인 경우는 약 20%, 300°C인 경우에는 약 30%, 350°C인 경우는 약 43%로 오스테퍼링 처리온도가 높아짐에 따라 증가하였다.

Fig. 7은 잔류오스테나이트량과 파괴인성치를 오스테퍼링 처리온도에 따라 나타낸 그림이다.

오스테퍼링 처리온도가 증가함에 따라 잔류오스테나이트와 파괴인성치가 증가하고 있음을 알 수 있다.

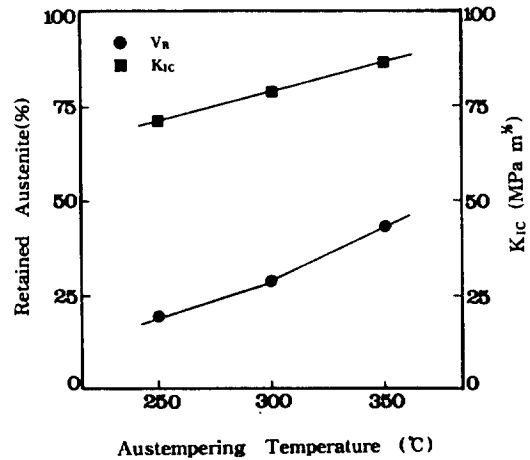


Fig. 7 Relationship between retained austenite and fracture toughness of Cu-Mo ductile cast iron.

이러한 실험결과로부터 오스테퍼링 처리온도가 높아짐에 따라 충격흡수에너지가 증가하고, 파괴인성치가 높아지는 원인은 잔류오스테나이트에 주로 지배되고 있음을 알 수 있다.

Photo. 5는 Cu와 Mo가 첨가된 구상흑연주철의 주방상태와 오스테퍼링처리한 시료를 파괴인성시험하였을때 파단된 면을 나타내는 주사전자현미경 사진이다.

사진 a)는 주방상태 시료의 파단면을 나타낸 것으로 river pattern의 벽개파면 양상을 나타내고 있으며 오스테퍼링온도가 250°C인 사진 b)에서는 의사벽개 (Quasi Cleavage)파면에 섬유상 파면이 약간 혼합된 형상을 나타내고 있다. 오스테퍼링 처리온도가 300°C와 350°C인 사진 c)와 d)에서는 구상흑연 주변에 약간의 섬유상과 덤플(dimple)상이 혼합된 연성파면을

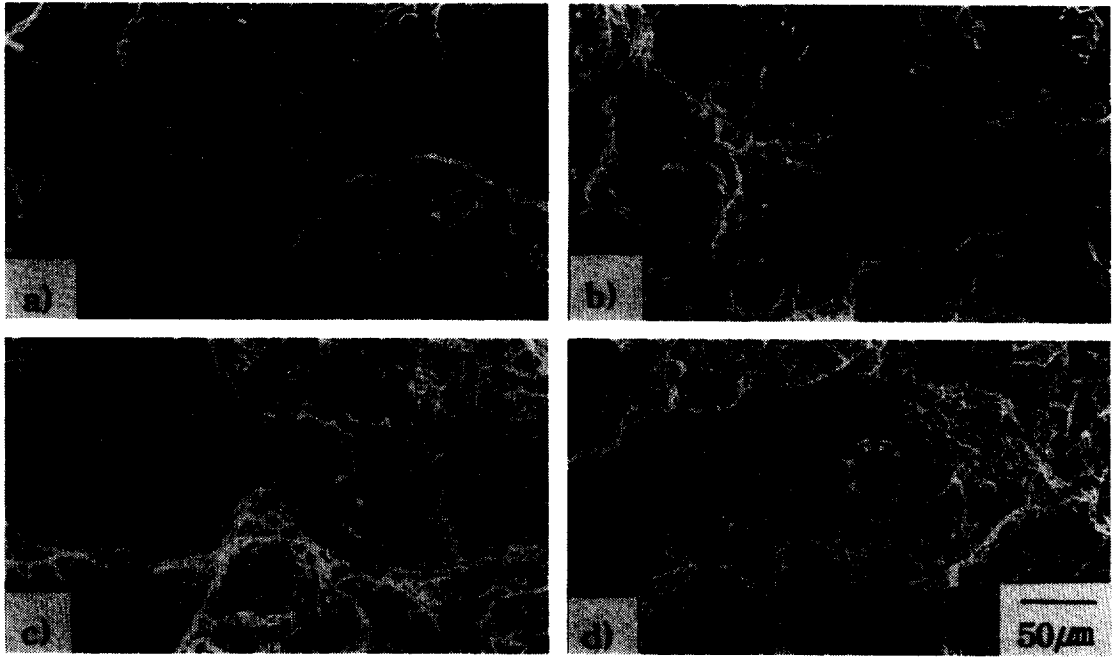


Photo. 5 SEM Micrographs of fracture surface in Cu-Mo ductile cast iron.

- a) as cast b) 250°C austempered
c) 300°C austempered d) 350°C austempered

나타내고 있다.

구상흑연주철에서 기지조직이 오스텝퍼링에 의해 균일한 베이나이트와 잔류오스테나이트로 되면 시편내에서 파괴균열의 전파가 일정한 톱니모양의 요철을 형성하며 전파되기 때문에 시편내 균열이 생성되어도 전파속도가 지연되어 파단면은 섬유상과 덩플상으로 나타나고 파괴인성치가 증가한다고 알려지고 있다.^{16, 17)}

본 실험에서도 주방상태 보다는 오스텝퍼링처리를 실시하거나 또한 오스텝퍼링 처리온도가 증가함에 따라 연신율이 증가하고 충격흡수에너지 및 파괴인성치가 증가하는것은 기지조직이 베이나이트로 변태되면서 강도와 연성의 조합이 우수하여질 뿐만 아니라, 잔류오스테나이트량이 증가되므로서 시편내의 파괴균열전파가 요철모양을 형성하면서 진행되기 때문에 균열의 전파속도가 지연되어 지는데 있다고 사료된다.

4. 결 론

Cu 및 Mo가 첨가된 구상흑연주철을 제조한 후 여러온도에서 오스텝퍼링 처리를 실시하였을 때 오스텝

퍼링 처리온도가 기계적 성질 및 파괴특성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 오스텝퍼링 처리된 구상흑연주철의 현미경조직은 오스텝퍼링 온도가 250°C인 경우에는 미소량의 마르텐사이트를 갖는 하부베이나이트가 나타나고, 300°C인 경우에는 상부베이나이트와 하부베이나이트가 혼합된 조직이 나타나며, 350°C인 경우에는 상부베이나이트 조직이 나타났다.

2) 오스텝퍼링 온도가 증가할수록 항복강도, 인장강도 및 경도값은 감소하고 있는데 반하여 연신율 및 충격흡수에너지는 증가하였다.

3) 파괴인성치는 오스텝퍼링처리 온도가 증가할수록 증가하였고, 주로 잔류오스테나이트량에 지배되었다.

4) 오스텝퍼링 처리온도가 증가할수록 잔류오스테나이트량은 증가하였고, 또한 파단면은 섬유상과 덩플상이 혼합된 연성파면을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. R. B. Gundlach and J. F. Janowak : Metal Progress, 5(1985), 92.
2. T. Kobayashi and H. Yamamoto : Metallurgical Trans., Vol. 19A(1988), 319.
3. J. Lincoln : 2nd International Conference on ADI, Univ. of Michigan, (1986), 381.
4. D. J. Moore, T. N. Rouns and K. B. Rundman : Trans. Am. Soc. Met., Vol. 4, No. 1(1985), 7.
5. R. C. Voigt, C. R. Loper : Trans. Am. Soc. Met., (1986), 91.
6. J. F. Janowak and R. B. Gundlach : AFS Trans, Vol. 91(1983), 377.
7. 址谷慎郎等 : 鑄物, 58, 12(1986), 885.
8. R. C. Voigt, J. F. Janowak and Y. J. Park : AFS Trans., Vol. 93, 19A(1965), 453.
9. 小林俊郎, 新家光廣住, 山本浩喜 : 鑄物, 58, 4, (1986), 287.
10. R. C. Voigt and C. R. Loper : Mat. Rec. Soc. Symp. Proc., Vol. 34(1985).
11. 小林俊郎等 : 鑄物, 58, 2, (1986), 128.
12. R. C. Voigt and G. N. J. Gilbert : The British foundry, Vol. 12(1986), 489.
13. K. Rundman, T. Rouns, W. Dubensky, D. More : 2nd International Conference on ADI AFS, Univ. of Michigan, Racknam School (1986), 157.
14. G. R. Irwin : Fracture Dynamic : Fractureing of Metals : ASM Pulb., (1948), 147.
15. J. Simth, L. Brown, and H. L. Marcus : Trans. AFS, 88(1980), 427.
16. G. Sandoz, H. Bishop and W. Pellini : Trans, ASM, 46(1954), 418.
17. R. C. Voigt, H. Dhane and L. Eidoky : 2nd international Conference on ADI, Univ. of Michigan, (1986), 327.