

고강도 오스테뮴퍼주강의 기계적성질에 미치는 열처리 영향

姜昌龍, 金孝政, 金翼水*, 文元振*, 李鍾男**, 朴成富**

釜慶大學校 工科大學 金屬工學科

* 名古屋大學 工學部

**대진메탈공업(주)

Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of High Strengths Austempered Cast Steel

C.Y.Kang, H.J.Kim, I.S.Kim*, W.J.Moon*, J.N.Lee**, S.B.Park**

Dept. of Metall. Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739

*Nagoya University, Japan

**Daejin Metal Inde. Co. Ltd., Kyongnam

Abstract

The study was investigated on the effect of austenitizing and austempering conditions on retained austenite amount and carbon contents in retained austenite and simultaneously the effect of these variation on hardness, tensile and impact properties.

A material of as-cast condition is composed of bull's eye structure with ferrite surrounding spheroidized graphite having about 5-10 μ m size and matrix structure of pearlite. Then, the contents of spheroidized graphite was about 5%. The retained austenite and carbon contents in the retained austenite were increased with the increasing of austenitizing and austempering temperatures, while the retained austenite showed the peak value and is decreased with increasing of austempering time. With increasing of austenitizing temperature, tensile strength, elongation and impact absorb energy increased and hardness was almost not changed, while with increasing of austempering temperature, tensile strength and hardness decreased, whereas elongation and impact absorb energy was increased. With increasing of retained austenite amount, the tensile strength is slowly decreased but elongation was increased with direct proportion. Also, Impact absorb energy is shown identity value until about 18%, but rapidly increased above it. Elongation and Impact absorb energy are strongly controlled by the amount of retained austenite, but tensile strength is affected with various factors such as retained austenite amount and bainitic morphology.

1. 서론

구상흑연주철을 오스테뮴퍼링처리하여 기지조직을 베이나이트로 변태시켜 제조하는 오스테뮴퍼주강 흑연주철은 단조강에 필적하는 높은 강도와 인성이 얻어질 뿐만 아니라, 복잡한 형상의 부품도 용이하게 제조 가능하여 자동차 및 산업기기 등

의 부품에 그 사용량이 증가되고 있다.¹⁾ 그러나 오스테뮴퍼주강흑연주철은 열처리 이전인 구상흑연주철에 10Vol% 정도의 흑연이 포함되어 있기 때문에 영률(Young's modulus)이 강보다 20% 정도 낮아²⁾ 박육 제품에서는 문제가 된다. 일반적으로 철계 주조재의 영율은 석출 흑연의 형상을 구형화하고, 그 양을 감소함으로써 개선

할 수 있지만, 흑연을 함유하지 않는 주강은 주조성이나 적삭성이 주철보다도 나빠지게 된다.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 오스테뮴퍼드구상흑연주철에 필적할만한 주조성과 적삭성을 지니면서 강도와 인성이 우수 할 뿐만 아니라 영율이 높고 내마모성이 뛰어나며 주강보다도 우수한 기계적성질을 갖는 새로운 주조재의 개발을 위해 소량의 구상흑연을 갖는 오스테뮴퍼드구상흑연주강(AGS = Austempered Spheroided Graphite Cast Steel)⁵⁶⁾을 착안하였고, 이 주조재의 개발을 위한 최적열처리조건을 얻기 위하여 열처리조건 변화에 따른 미세조직 변화를 정성 및 정량 조직학적으로 조사함과 동시에 이들 변화가 기계적성질에 미치는 영향을 계통적으로 조사하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1 시료 및 열처리

시료는 고주파 용해로에서 전해철, Fe-Si, Fe-Mn 및 주철 등을 사용하여 용해한 후, Y형블록 주형에 주입하여 잉곳(Ingot)을 얻은 다음, 시료로 사용하였다. 이때 사용된 시료의 최종 화학조성을 Table 1에 나타내며, 또한 이재료가 갖는 주방상태의 기계적성질을 Table 2에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of specimen(Wt.%)

C	Si	Mn	S	P
1.0	2.5	0.34	0.008	0.006

Table 2 Mechanical properties of specimen in as-cast

Tensile strengths (kg/ml)	Elongation (%)	Hardness (HRC)	Impact Value (J)
84	19	18	8

한편, 열처리는 시료를 880~920°C사이 여러 온도로 유지된 염욕에서 120분까지 유지시간을 달리하는 오스테나이트화처리를 한 다음 즉시 300

~380°C로 유지된 염욕중에 퀴칭하여 300분까지 시간을 달리하는 오스테뮴퍼링처리후 공냉하였다.

2. 2 미세조직관찰

주방상태의 시료와 열처리가 완료된 시료의 미세조직 변화를 광학현미경과 주사전자현미경에 의해 관찰하였고, 오스테나이트화 후 오스테뮴퍼링 처리 한 다음 공냉한 시료내 존재하는 잔류오스테나이트는 시료를 박막법에 의해 제작한 다음 투과전자현미경(Hitach E 13-800)에서 가속전압 200kV로 관찰하였다.

2. 3 X선 회절시험

열처리가 완료된 시료의 잔류오스테나이트 및 잔류오스테나이트내 탄소농도 측정은 X선 회절 시험기에서 Co-K α 선을 이용하여 35kV, 17mA의 조건으로 회절시험하였을 때 얻은 회절선도로부터 구하였다. 이때 잔류오스테나이트의 양은 Miller법⁵⁷⁾을 따라 구하였고 잔류오스테나이트 내 탄소농도는 (311) γ 면에 대한 회절피크로부터 얻은 면간 거리를 이용하여 구하였다.

2. 4 기계적 성질 측정

주방상태의 시료와 열처리가 완료된 시료의 인장성질 변화는 시료를 JIS 3의 규격을 따라 제작하여 열처리한 다음 Cross head speed를 1mm/min로 정한후 인장시험하여 측정하였다. 또한 경도시험은 로크웰 경도시험기를 사용하여 1kg의 하중하에서 5회 측정한 후 평균하여 구하였고, 충격시험은 시료를 2mm노치 샤프피 충격시험편을 제작한 다음 열처리 후 상온에서 시험하여 충격흡수 에너지를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 미세조직 관찰

Fig. 1은 오스테뮴퍼링 이전 주방상태의 미세조직을 광학 및 주사전자현미경에 의해 나타낸 것이다. 이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 주방상태에서

Fig. 1 Micrographs showing the as cast structures of spheroidized graphite cast steel.
a) Optical microstructure b) SEM microstructure

는 구상흑연주철과 동일한 페일라이트(흑색층상)의 기지조직에 약 5~10 μ m 크기를 갖는 5%정도의 흑연이 구상화되어 있을 뿐만 아니라, 구상흑연 주위에 페라이트가 존재하고 있는 벌스아이(Bull's eye) 조직을 나타내고 있지만, 구상흑연주철에 비하여 구상화된 흑연 입자의 크기도 적고, 그 양도 현저하게 적음을 알 수 있다.

Fig. 2는 900 $^{\circ}$ C에서 오스테나이트화처리 후 온도를 변화시켜 오스템퍼링 하였을 때 얻은 미세조직 변화를 주사전자현미경에 의해 나타낸 것이다. 오스템퍼링 온도가 300 $^{\circ}$ C인 사진 a)에서는 주로 하부 베이나이트조직과 잔류오스테나이트가 존재하고 있는데 반하여, 340 $^{\circ}$ C인 b)에서는 상부베이

나이트 조직에 소량의 하부 베이나이트와 잔류오스테나이트가 공존하고 있고, 380 $^{\circ}$ C인 c)에서는 상부베이나이트조직과 잔류오스테나이트가 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 900 $^{\circ}$ C에서 오스테나이트화 한 다음 340 $^{\circ}$ C에서 오스템퍼링처리 후 공냉한 시료내 존재하고 있는 잔류오스테나이트를 투과전자현미경에 의해 나타낸 것이다. 잔류오스테나이트는 주로 이전 오스테나이트 입계 및 베이나이트 lath 사이에서 존재하고 있음을 알 수 있다. 지금까지 알려진 연구결과에 의하면 구상흑연주철을 오스테나이트화 후 오스템퍼링처리하면 오스테나이트 입계에서 핵생성된 베이나이트-페라이트가 오스테나이트

Fig. 2 SEM micrographs showing the effect of austempering temperature after austenitizing at 900 $^{\circ}$ C.
Austempering temp. : a) 300 $^{\circ}$ C b) 340 $^{\circ}$ C c) 380 $^{\circ}$ C

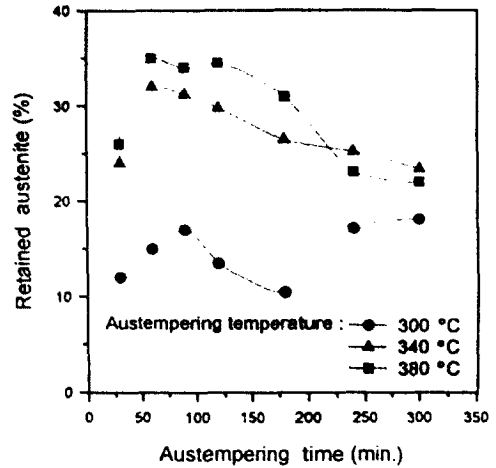


Fig. 3 TEM micrograph showing the morphology of the retained austenite obtained by austempering after austenitizing

Fig. 4 Effect of austempering time on the retained austenite obtained by austempering at various temperature after austenitizing at 900°C

트내로 성장해가면서 베이나이트-페라이트 주위의 오스테나이트로 탄소를 배출하기 때문에 그 영역에서의 탄소농도가 증가하는데 기인되어 오스테나이트의 안정도가 증가하여, 이후 변태되지 않고 오스테나이트로 잔류하기 때문에 잔류오스테나이트는 베이나이트 lath사이에서 생성된 다고 알려지고 있다.⁵⁹⁾ 그러나 구상흑연주강을 오스테나이트화처리 후 오스템퍼링 한 본 실험에서는 잔류오스테나이트가 베이나이트 lath사이 뿐만 아니라 이전 오스테나이트의 입계에서도 존재하고 있음을 알 수 있다.

3. 2 잔류오스테나이트 및 잔류오스테나이트내 탄소농도 변화

Fig. 4는 시료를 900°C에서 오스테나이트화 한 다음 여러 온도에서 오스템퍼링처리 후 공랭하였을 때 얻은 잔류오스테나이트의 변화를 나타낸 것이다. 오스템퍼링 온도가 증가할수록 잔류오스테나이트의 양은 많아지고, 오스템퍼링 시간이 길어짐에 따라 잔류오스테나이트의 양은 오스템퍼링 초기에는 증가하지만, 특정시간에서 최고값을

나타낸 후 감소하고 있다.

Fig. 5는 시료를 900°C에서 오스테나이트화 한 다음 여러 온도에서 오스템퍼링하였을 때 얻은 잔류오스테나이트내 탄소농도 변화를 나타낸 것이다. 잔류오스테나이트와 비슷하게 오스템퍼링 온도가 증가할수록 탄소농도가 증가하고 있고, 오스템퍼링 시간이 길어지면 오스템퍼링 초기에는 탄소농도가 급격히 증가하지만, 특정시간 이후에는 시간의 경과와 더불어 약간 낮아지는 경향을 나타내고 있지만 큰 차이는 나타나지 않고 있다.

이와 같이 오스템퍼링 시간이 길어짐에 따라 잔류오스테나이트 및 잔류오스테나이트내 탄소농도가 증가하다 감소하는 이유는 高橋利夫 등⁶⁰⁾에 의하면 오스템퍼드구상흑연주철에서는 구상흑연주철을 오스템퍼링처리하면 잔류오스테나이트로 탄소가 확산하는 단계와 탄소농도가 높아진 잔류오스테나이트가 분해하여 탄화물 또는 2차 흑연이 석출하는 단계로 분리된다고 보고하고 있고, 또한 전자의 반응에서 충분한 양의 탄소가 확산해 가면 잔류오스테나이트가 안정화하고 동시에 후반의 분해반응 시작이 억제되면 그 안에 안정화된 오스테나이트가 오스템퍼링 후 오스테나이트

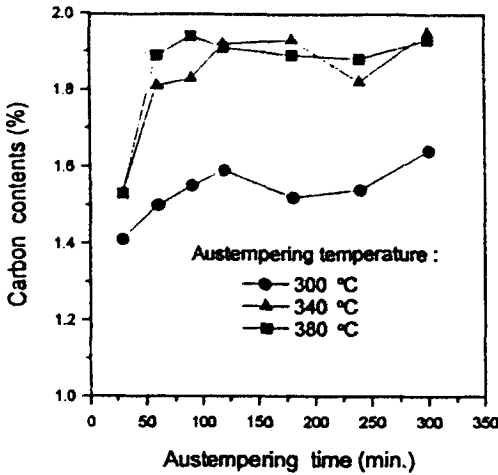


Fig. 5 Effect of austempering time on the carbon contents in retained austenite obtained by austempering at various temperature after austenitizing at 900°C

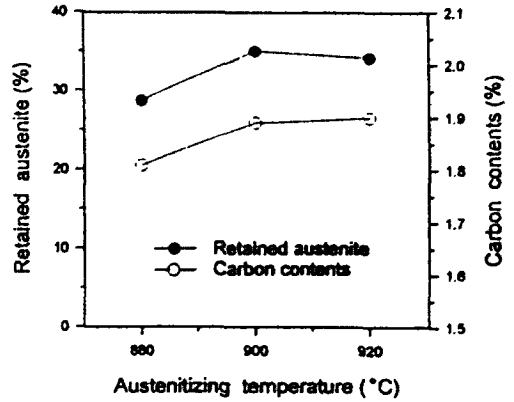


Fig. 6 Effect of austenitizing temperature on the retained austenite and carbon contents obtained by austempering at 340°C after austenitizing at various temperature

트로 잔류하게 된다고 보고하고 있다. 본 실험에서도 오스테퍼링 초기단계에서는 이전 오스테나이트가 베이나이트-페라이트로 변태하면서 탄소를 미변태된 오스테나이트영역으로 확산시키기 때문에 미변태된 오스테나이트내 탄소농도가 높아지고 그 결과 오스테나이트의 안정도가 증가하여 잔류오스테나이트의 양이 증가할뿐만 아니라 잔류오스테나이트내 탄소농도가 높아진다고 생각된다. 그러나 오스테퍼링 시간이 길어지면 탄소농도가 높아진 오스테나이트가 분해하여 베이나이트-페라이트내 또는 입계 등에서 탄소가 탄화물로 석출되기 때문에 상대적으로 오스테나이트내의 탄소농도가 낮아지게 되는데 기인되어 잔류오스테나이트의 양이 적어질 뿐만 아니라 잔류오스테나이트내 탄소농도도 낮아진다고 생각된다.

Fig. 6은 시료를 여러 온도에서 오스테나이트화 처리 후 340°C에서 오스테퍼링하였을 때 얻은 잔류오스테나이트와 잔류오스테나이트내 탄소농도 변화를 나타낸 것이다. 오스테나이트화 온도가 증가함에 따라 잔류오스테나이트와 잔류오스테나이트내 탄소농도는 증가하지만, 900°C 이상의 온도에서는 큰 변화가 없이 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 오스테나이트

화처리를 900°C에서 1시간 하게되면 시료내 존재하는 대부분의 탄화물이 충분히 용해되어 고용이 완료되기 때문에 오스테나이트화 온도가 900°C 이상이 되어도 큰 변화가 나타나지 않는다고 생각된다.

3. 3 열처리 조건변화가 기계적성질에 미치는 영향

Fig. 7은 오스테퍼링 이전 오스테나이트화 온도 변화가 경도, 충격 및 인장성질에 미치는 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 오스테나이트화 온도가 증가할수록 인장강도는 증가하고 있는데 반하여 연신율은 900°C까지는 약간 증가하지만, 그 이상의 온도에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이와같이 오스테나이트화 온도가 증가할수록 인장강도가 증가하는 이유는 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 오스테나이트화 온도가 증가하면 잔류오스테나이트내 탄소농도가 증가하게되고, 그 결과 탄소농도가 높아진 잔류오스테나이트가 인장변형에 의해 강도가 높은 마르텐사이트로 가공유기변태되기 때문¹⁰⁾이라고 생각되며, 연신율이 900°C까지 약간 증가하다 큰 변화가 없는 이유는, 900°C까지는 Trip거동을 나타내는 잔류오스테나

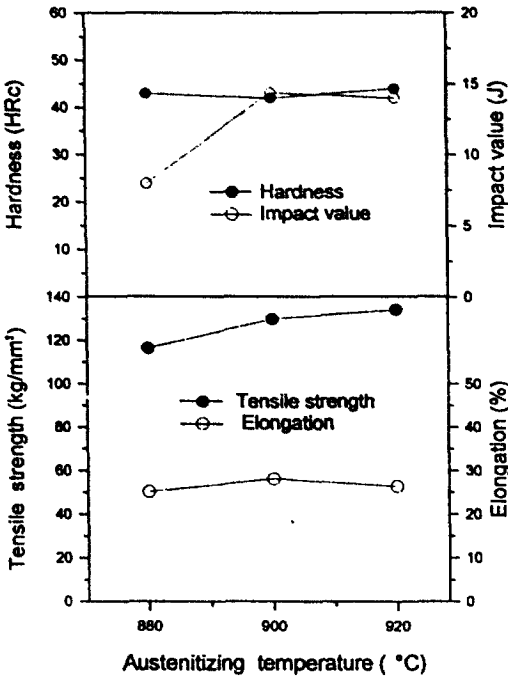


Fig. 7 Effect of austenitizing temperature on the tensile properties, hardness and impact value obtained by austempering at 340°C after austenitizing at various temperature

이트의 양이 증가하는데 기인되어¹⁰⁾ 연신율이 증가하지만, 그 이상의 온도에서는 잔류오스테나이트의 양이 크게 변화가 없기 때문에 연신율도 큰 변화가 없는 것으로 생각된다. 한편, 오스테퍼링 온도가 증가할수록 경도값은 큰 변화가 없지만, 충격흡수에너지가 900°C까지는 급격히 증가하다 그 이상의 온도가 되면 큰 변화가 없는 이유는 Kang 등¹¹⁾은, 오스테퍼링한 구상흑연주철의 파괴 인성은 잔류오스테나이트의 양에 강하게 지배된다고 보고하고 있는데, 본 실험에서도 Fig. 6의 결과로부터 알 수 있듯이 오스테나이트화 온도변화에 따른 잔류오스테나이트의 변화가 충격흡수 에너지값의 변화와 동일한 거동을 나타내고 있는 것으로부터, 충격흡수에너지값은 잔류오스테나이트에 지배되어 잔류오스테나이트의 양이 증가하기 때문에 증가한다고 생각된다.

Fig. 8은 시료를 900°C에서 오스테나이트화 후

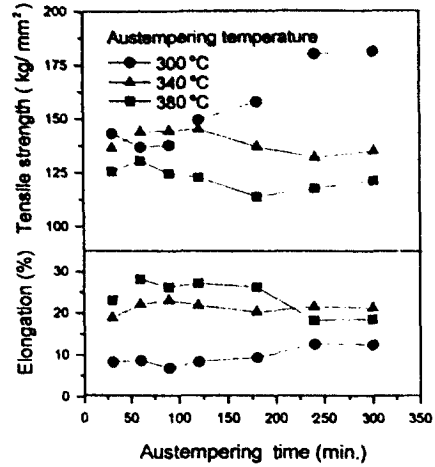


Fig. 8 Effect of austempering time on the tensile properties obtained by austempering at various temperature after austenitizing at 900°C

여러온도에서 오스테퍼링하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 나타낸 것이다. 오스테퍼링 온도가 높을수록 인장강도는 낮고 연신율은 높게 나타나고 있다. 이와같은 이유는 Fig. 4에서 알 수 있는 바와같이 오스테퍼링 온도가 높아지면 잔류오스테나이트의 양이 증가하기 때문에 인장강도는 낮고 연신율은 높게 나타난다고 생각된다.

Fig. 9는 오스테퍼링 온도변화가 경도값에 미치는 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 오스테퍼링 온도가 증가할수록 경도값은 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와같이 오스테퍼링 온도가 증가할수록 경도값이 낮은 이유는 오스테퍼링 온도가 높아질수록 잔류오스테나이트의 양이 많아지기 때문에 상대적으로 경도값이 낮아진다고 생각된다.

Fig. 10은 오스테퍼링 온도변화가 충격흡수에너지값에 미치는 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 오스테퍼링 온도가 증가할수록 충격흡수에너지값은 높아지고, 또한 300°C에서 오스테퍼링한 시료의 경우는 오스테퍼링 시간이 길어짐에 따라 약간 증가하다 감소하는 경향을 나타내고 있지만, 340 및 380°C에서 오스테퍼링한 경우는 오스테퍼링 초기에는 시간의 경과와 더불어 충격흡수에너지

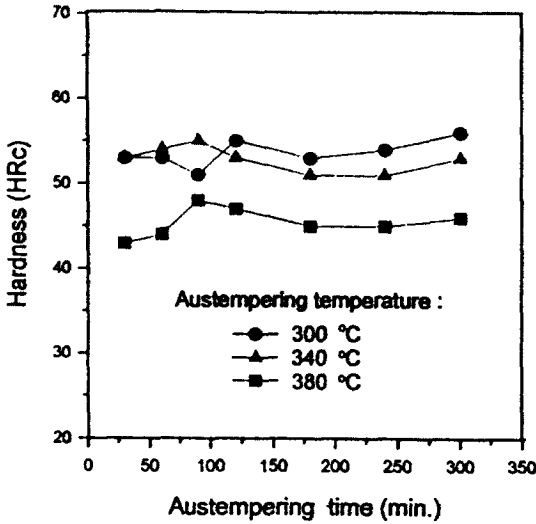


Fig. 9 Effect of austempering time on the hardness obtained by austempering at various temperature after austenitizing at 900°C

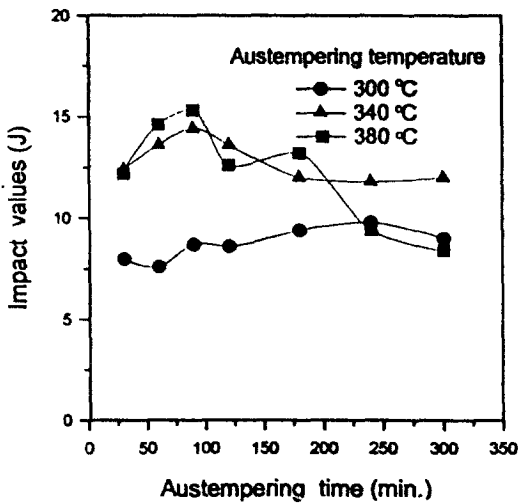


Fig. 10 Effect of austempering time on the impact values obtained by austempering at various temperature after austenitizing at 900°C

지값이 급격히 증가하다 90분 이상에서는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 이유는 Fig.4의 잔류오스테나이트 변화와 Fig. 10의 충격흡수에너지 변화가 오스테퍼링시간 변화에 따라 동일한

거동을 나타내고 있는 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 잔류오스테나이트는 기지조직인 배이나이트보다도 인성이 높을뿐만 아니라, 충격시험에 의해 마르텐사이트로 변태하는 Trip거동을 나타내기 때문에 충격흡수에너지값이 잔류오스테나이트에 강하게 지배되기 때문이라 생각된다. 따라서 충격흡수에너지값은 오스테퍼링 초기에는 증가하지만 시간의 증가와 더불어 최고값을 나타낸 후 감소하게 된다.

3. 4 인장 및 충격심질에 미치는 잔류오스테나이트의 영향

Fig. 11은 시료를 900°C에서 오스테나이트화 후 여러온도에서 오스테퍼링 한 시료를 인장시험 하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 잔류오스테나이트에 대해 나타낸 것이다. 잔류오스테나이트의 양이 증가함에 따라 인장강도는 서서히 낮아지고 있는데 반하여, 연신율은 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 시료내 잔류오스테나이트 양이 증가하면, 잔류오스테나이트는 기지조직을 이루고 있는 배이나이트 조직보다 강도가 낮기 때문에 상대적으로 인장강도는 낮아지기

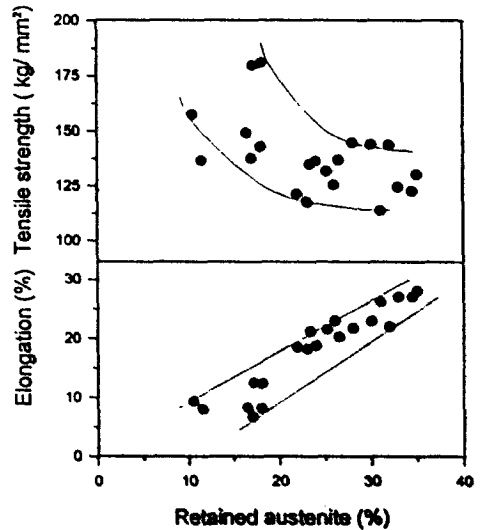


Fig. 11 Relationship between tensile properties and retained austenite of austempered spheroided graphite cast steel

되지만 연신율은 잔류오스테나이트가 인장변형시 마르텐사이트로 변환하는 Trip거동을 나타내기 때문에 증가하게 된다.¹³⁾ 또한 인장강도가 직선적인 비례관계로 감소하고 있지 않은 이유는 인장강도는 잔류오스테나이트의 기지조직인 베이나이트 조직에도 크게 영향을 받기 때문이다. 따라서 이 결과로부터 오스템퍼구상흑연주강의 인장성질은 잔류오스테나이트에 강하게 지배되고 있지만 인장강도 보다는 주로 연신율에 강하게 지배하고 있음을 알 수 있다.¹⁴⁾

Fig. 12는 시료를 900°C에서 오스테나이트화 한 다음 여러온도에서 오스템퍼링후 충격시험하였을 때 얻은 충격흡수에너지값을 잔류오스테나이트에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 충격흡수에너지값은 잔류오스테나이트의 양이 약 18%까지는 큰 변화가 없이 비교적 일정한 값을 나타내지만, 18% 이상이 되면 직선적인 비례관계로 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 잔류오스테나이트의 양이 적은 경우에는 충격성질에 그다지 영향을 미치지 않게 되지만, 잔류오스테나이트 양이 특정량 이상이 되면 충격성질에 큰 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.^{6,15)} 이 결과로부터 오스템퍼구상흑연주강의 충격흡수에너지값도 잔류오스테나이트

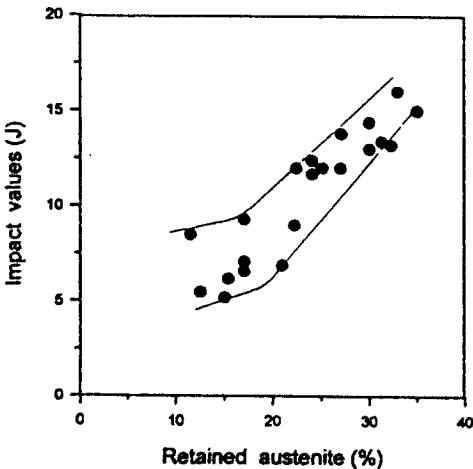


Fig. 12 Relationship between Impact values and retained austenite of austempered spheroided graphite cast steel

의 양이 18% 이상이 되면 잔류오스테나이트에 강하게 지배되고 있음을 알 수 있다.

V 결론

구상흑연주강을 오스테나이트화 및 오스템퍼링 조건을 변화시켜 열처리 한 후 미세조직 및 잔류오스테나이트와 잔류오스테나이트내 탄소농도변화를 조사함과 동시에 이들 변화가 경도, 인장강도 및 충격성질에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주방상태의 재료는 퍼얼라이트의 기지조직에 약 5-10 μ m 크기의 구상흑연 주위에 페라이트가 존재하는 벌스아이 조직으로 이루어져 있고, 이때 구상흑연의 량은 5% 정도였다.
- 2) 잔류오스테나이트 및 잔류오스테나이트내 탄소농도는 오스테나이트화 및 오스템퍼링 온도가 증가할수록 증가하는데 반하여, 오스템퍼링 시간이 길어지면 잔류오스테나이트는 증가하다 최대 값을 나타낸 후 감소하였다.
- 3) 오스테나이트화 온도가 증가할수록 인장강도, 연신율 및 충격흡수에너지 값은 증가하였고 경도 값은 큰 변화가 없지만, 오스템퍼링 온도가 증가할수록 인장강도, 경도값은 낮아지는데 반하여 연신율과 충격흡수에너지값은 증가하였다.
- 4) 잔류오스테나이트 양이 증가할수록 인장강도는 서서히 감소하는데 반하여, 연신율은 직선적으로 증가하였다. 또한 충격흡수에너지값은 잔류오스테나이트의 양이 약 18%까지는 변화가 없이 일정한 값을 나타내지만 그 이상이 되면 직선적인 관계로 급격히 증가하였다.
- 5) 연신율과 충격흡수에너지값은 잔류오스테나이트에 강하게 지배되고 있는데 반하여, 인장강도는 잔류오스테나이트의 기지조직인 베이나이트 등에도 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 1997년도 산학협동재단 및 대진메탈공업(주) 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과 일부분이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) D. J. Moore, T. N. Rouns and K. B. Rundman : Trans. Am. Soc. Met., Vol. 4, No. 1(1985) 7.
- 2) 千田昭夫 : 鑄鐵造 と 熱處理, 12(1981) 1.
- 3) 石原安興 : 鑄物, 58(1986), 823.
- 4) 井川臺他, 臺多新男, 章川陵次, 新山莫輔, 松本弘 : 球狀黑鉛鐵の 基礎と應用, (1992), 66.
- 5) T. Takamashi : Material Japan, 34, 7(1995), pp. 10.
- 6) 高橋利夫, 多田周二, 河部刊産 : 鑄物, 65, 8(1993), 615.
- 7) R. L. Miller : Trans. ASM, 57(1964), 892.
- 8) R. F. Hehemann, in Ref. 13, pp. 397~432.
- 9) R. F. Hehemann, K. R. Kinsman and H. I. Aaranson : Met. Trans., 3(1972), 1077.
- 10) 강창룡, 성장현 : 열처리공학회지, 3, 2(1990) pp. 20
- 11) 강창룡, 박준호, 김창규 : 한국주조공학회지, 15, 12(1995), 288.
- 12) 上田淑完, 瀧田光楸, 生田浩之 : 鑄物, 57(1985), 775.
- 13) G. R. Speich, in Decomposition of Austenite by Diffusional Processes, V. F. Zackay and H. I. Aaronson, Eds., Interscience publishers, New York, 1962, pp. 353~366.
- 14) 이문용 : Trip형 고장력 강판의 인장성질 및 점용접성, 석사학위 논문, (1997).
- 15) W. L. Bradley, M. N. Srinivasan : International Materials Reviews, Vol. 35, N. 3(1990), 129.