

선박용 공기압축기 크랭크샤프트의 최적열처리 조건과 경제적 효과에 관한 연구

정 하 돈* · 김 윤 해**

Optimal Heat Treatment Condition and Economic Effects of the Crank Shaft for Marine Air-Compressor

H. D. Jung · Y. H. Kim

Key words : Ductile Cast Iron(구상흑연주철), Normalizing(노멀라이징), Crank Shaft(크랭크 샤프트), Pearlite(퍼얼라이트), Ferrite(페라이트), Optimal Heat Treatment(최적 열처리)

Abstract

Recently, the ductile cast iron is being used successfully to the parts for processing machinery, vessels and gear etc. This study is mainly concerned with the heat treatment for the specimens of crank shaft which are made of ductile cast iron. The results obtained are summarized as follows.

Comparing the mechanical properties of the specimens for the normalized ductile cast irons, the specimen heat treated at 550℃ was the best for crank shaft of air-compressor. After austenizing at 910℃, it was observed that the higher the reheating temperature is, the less tensile strength and the hardness became, which was supposedly attributed to the fact that the amount of pearlite.

Austenite matrix was reduced by reheating after normalizing, and that, as the reheating temperature went up, the pearlite generated was less and the distance between the pearlites were widened, at last made pearlite globular. In the comparison of crank shaft for air compressor made of ductile cast iron with that made by forged steel, the crank shaft made of ductile cast iron was superior in economical terms. And, ductile cast iron could be practically enough if only the elongation which was inferior mechanical property to forged steel, could be reinforced by increasing the diameter of crank pin when designing the crank shaft.

* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 98년 11월)

** 한국해양대학교 기계소재공학과

1. 서 론

구상흑연 주철은 조선기자재와 산업용 기계¹⁾의 부품 제작의 소재로서 많이 사용되고 있다. 특히 선박용 공기 압축기²⁾의 크랭크 샤프트(crank shaft), 밸브 시트(valve seat), 커넥팅로드(connecting rod) 등에 구상흑연주철이 많이 사용되는 이유는 주조성이 우수하고, 기계 가공성과 내마모성이 뛰어나는 뿐만 아니라, 내충격성도 우수하기 때문이다. 그리고, 일반 단조강에 비하여 가격이 저렴하기 때문에 경제적인 측면에서도 매우 우수하다. 이와 같은 장점이 있음에도 불구하고 사용 조건에 적절한 구상흑연 주철을 얻는 것은 매우 어렵다.

한편, 구상흑연주철을 강인화 시키는 방법으로는 합금원소첨가에 의한 방법³⁾과 열처리에 의한 방법⁴⁾이 있다. 구상흑연주철은 흑연이 구상으로 존재하므로 절삭성이 우수하고 강도와 경도가 비교적 높고 내마모성도 좋으나 연성 및 인성이 부족하므로 니켈(Ni), 몰리브덴(Mo), 구리(Cu)등의 합금원소를 첨가하여 기조직을 개선시킴으로써 우수한 강인성을 갖는 구상흑연주철을 제조하는 방법⁵⁾이 있다. 그러나 일반적으로 산업체에서는 주물에 합금을 첨가하는 방법보다는 열처리에 의한 기계적성질의 향상을 보다 더 선호하는 경향이 있으며 이러한 열처리 방법에는 어닐링(annealing), 노멀라이징(normalizing), 담금질(quenching), 템퍼링(tempering), 오스템퍼링(austempering)등이 있다. 이 중에서도 가장 대표적인 열처리 방법으로는 주조상태의 잔류응력을 없애고 연성을 증가시키기 위한 어닐링과 강도를 증가시키기 위한 담금질과 오스템퍼링 등이 있다. 특히, 오스템퍼링의 경우에는 미국과 핀란드등^{6),7)}에서 개발이 진행되어 퍼얼라이트(pearlite)기지의 구상흑연주철 및 강을 대체하게 되었으며 현재에도 연구가 활발히 진행되고는 있으나 선박용 공기압축기(air-compressor)의 부품으로 사용하기에는 너무 강도 및 경도가 높아 상대 마모재를 손상시킬 염려가 있으며, 또한 담금질의 경우에는 열처리 설비로 인해 기계제조업체에서 직접 수행하기가 쉽지 않다. 한편, 노멀라이징의 경우에는 비교적 열처리 방법이 간단할 뿐만 아니라 소형의 부품에서부터

대형주물에 이르기까지 폭넓게 이용할 수 있으며, 설비 또한 간단하다. 따라서 본 연구에서는 구상흑연 주철의 강인화를 위해 노멀라이징(normalizing)후 다양한 재가열 온도를 적용하여 주로 인장강도와 경도를 향상시키는 방법을 선택하였으며, 열처리 사이클에 따른 기계적 성질과 조직의 변화에 대한 연구를 중점적으로 실시하였다. 그리고 선박용 공기압축기 크랭크샤프트의 소재에 대한 경제성 검토도 함께 수행하였다.

2. 시험편의 제작 및 실험방법

2.1 구상흑연주철의 주조

구상흑연주철계 공기압축기용 크랭크샤프트는 선철, 고철, 회주철, Fe-Mg-Si합금을 혼합한 장입재료를 고주파전기로에서 용탕으로 만든 다음 용탕 온도의 강하를 고려하여 1,600℃까지 가열시킨 후 샌드위치법을 이용하여 래들(ladle)에서 구상화처리제와 교반하였으며 용탕의 온도가 1,370℃일 때 주형(mold)에 주입하였다. Fig.1에 용탕의 출탕 장면을 나타내었다.



Fig. 1 Photo of tapping

2.2 시험편의 제작

기계적 성질 시험용 시험편의 제작은 주물공장에서 제작된 공기압축기용 크랭크샤프트(crank shaft)에서 인장시험편⁸⁾을 기계 가공하여 열처리한 후 실험하였으며 실험에 사용된 시험편의 화학적

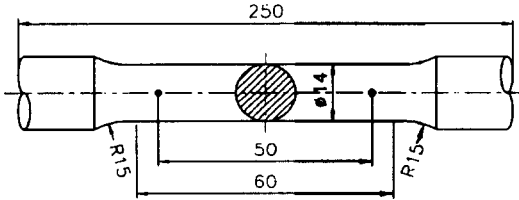


Fig. 2 Specimen configuration for tension test

Table 1 Chemical composition

Material	Compositions (wt. %)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ni	Cr
Ductile cast iron	3.54	2.83	0.58	0.03	0.009	0.50	0.03	-	-

Table 2 Mechanical properties

Material	σ_{UTS} (MPa)	δ (%)	H _{RB}
Ductile cast iron	547	2.2	91

σ_{UTS} : Ultimate Tensile Strength
 δ : Elongation

성분은 Table 1과 같다. 시편의 형상 및 규격은 Fig.2와 같으며 시편으로 사용된 주조상태의 구상흑연주철의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

2.3 실험방법

2.3.1 열처리 방법

구상흑연주철의 기계적 성질을 측정하기 위한 시험편은 모두 910℃에서 노멀라이징 하였으며, 30분간 항온유지하여 기지조직을 오스테나이트(austenite)화한 후 공냉하였다. 재가열 온도는 550℃, 600℃, 650℃, 700℃로 각각 가열한 후 30분간 항온 유지한 다음 모두 공냉하였다. 미세조직

을 관찰하기 위하여 인장시험편에서 조직시험편을 채취하였으며 시험편은 수지에 마운팅(mounting)하여 정밀 연마한 후 3% 질산과 에틸알콜을 혼합하여 만든 부식액으로 3초간 에칭(etching)하여 광학현미경으로 관찰 후 조직사진을 촬영하였다.

2.3.2 구상흑연주철의 구상화율

본 실험에서 사용된 시편의 구상흑연의 모습을 주사형 전자현미경으로 촬영하여 Fig.3에 나타내었다. 그리고, 흑연의 구상화율을 측정하기 위하여 일본공업규격⁹⁾의 현미경 조직사진에 의한 흑연구상화율은 83% 정도로 나타났다.

2.3.3 기계적 성질 시험방법

Fig.2와 같은 인장시험편을 제작한 뒤 재가열 온도에 따른 인장강도의 변화를 알아보기 위하여 만능 재료 시험기(SHIMADZU, AG-25 Ton)를 이용하여 크로스헤드 속도 3mm/sec로 실험을 행하였다. 시험편의 재가열 온도에 따른 경도의 변화는 로크웰 경도기를 사용하여 스케일 B(H_{RB})로 각각 10회 이상 측정하여 최소값과 최대값을 제외한 평균값을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열처리에 따른 미세조직의 변화

구상흑연주철의 기지조직을 오스테나이트화하기 위한 온도의 범위는 재료의 화학적 성분함유량에 따라 다르지만 구상흑연주철의 경우 일반적으로 850℃~950℃가 적당하다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 그

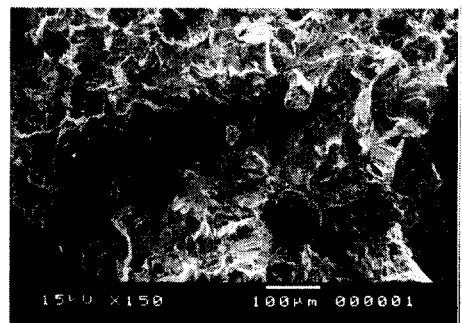
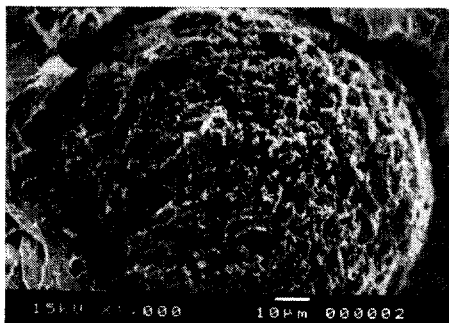


Fig. 3 SEM photos of nodular graphite

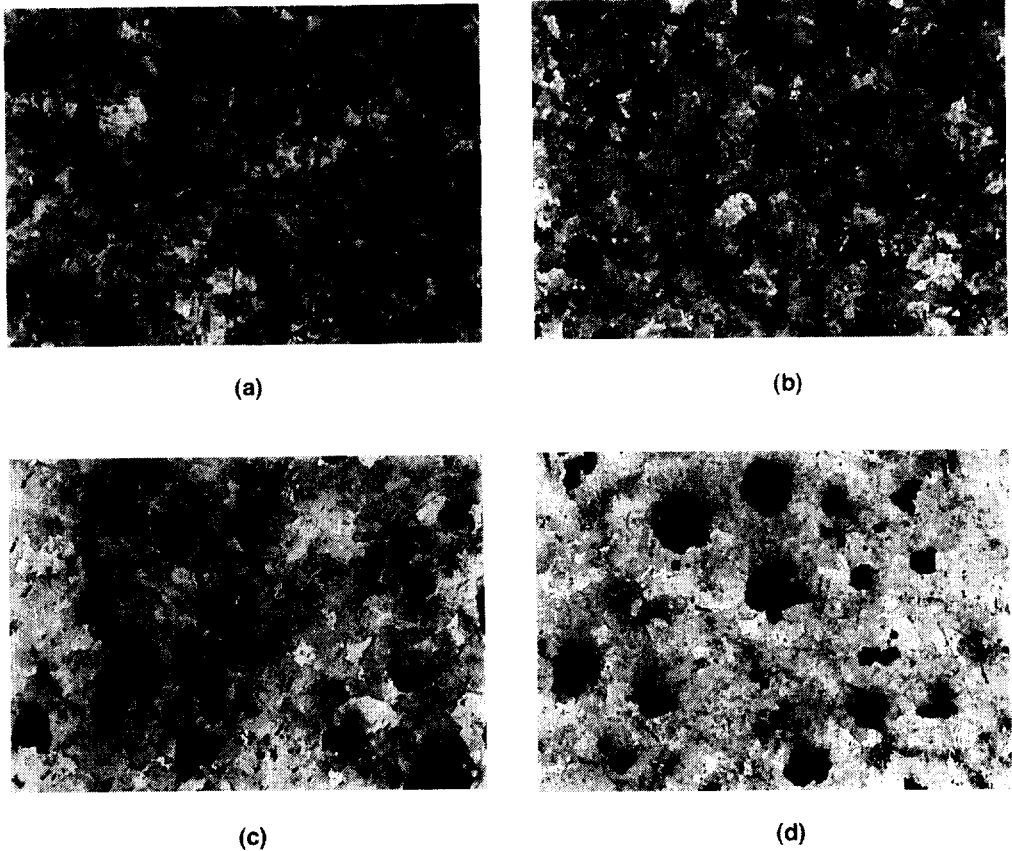


Fig. 4 Effect of reheating temperature on microstructures
 a) 550°C b) 600°C c) 650°C d) 700°C

리고, 낮은 오스테나이트화 온도가 오스테나이트 중의 탄소량이 균일하게 될 때까지 장시간을 요하고 높은 오스테나이트화 온도는 오스테나이트 결정립이 조대화 하여 기계적 성질을 저하시키기 때문에, 본 실험에서는 중간 온도인 910°C로 30분간 항온유지 하였다. Fig.4에 재가열 온도에 따른 조직의 변화를 나타내었다. 노멀라이징에 의해 생성된 오스테나이트는 재가열에 의해 A₁변태점 이하부터 오스테나이트 입계에서 페라이트(ferrite)와 세멘타이트(Fe₃C)가 상호 층간격을 이루는 층상 퍼얼라이트가 생성되며, 이는 재가열 온도가 높을수록 페라이트의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 아울러 퍼얼라이트와 페라이트의 변화에 대하여 Fig.5에 나타내었으며, 재가열 온도가 높아짐에 따라 퍼얼라이트의 양이 감소함을 알 수 있으며, 층

상퍼얼라이트의 간격도 점차 넓어지는 것을 알 수 있다.

Fig.6에는 동일시편의 면적분율을 나타내었다. 퍼얼라이트의 면적분율은 금속현미경에 디지털 카메라(digital camera)를 장착하여 촬영한 이미지 화일(image file)을 이용하여 동일면적에 대하여 면적분포율을 측정하였다. 그 결과, 재가열 온도가 높아짐에 따라 퍼얼라이트의 면적이 감소하는 것을 알 수 있었다.

3.2 기계적 성질변화

Fig.7에 열처리전의 인장강도와 재가열온도에 따른 인장강도의 변화를 나타내었으며, Fig.8과 Fig.9에 재가열온도에 따른 연신율과 경도의 변화를 각각 나타내었다. 910°C로 오스테나이트화 한

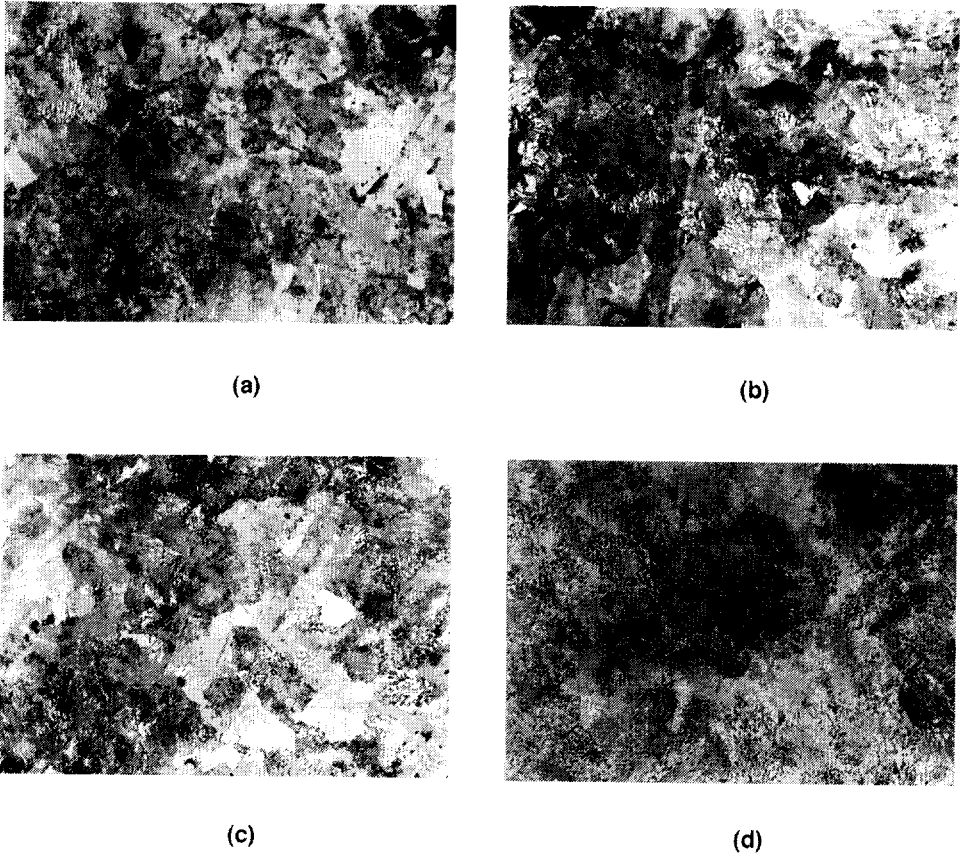


Fig. 5 The change of microstructures of pearlite and ferrite
 a) 550℃ b) 600℃ c) 650℃ d) 700℃

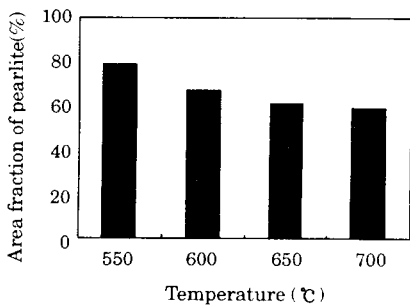


Fig. 6 Effect of reheating temperature on fraction of pearlite area

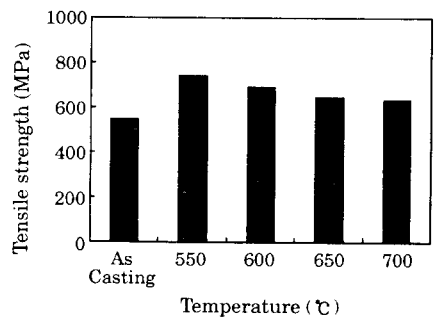


Fig. 7 Effect of heat treatment condition on tensile strength

후 재가열 온도에 따른 인장강도는 온도가 높을수록 저하하는 것을 알 수 있는데, 이는 1차 열처리 후의 기지조직인 오스테나이트가 재가열에 의해 그 양이 점차 감소하게 되고 재가열 온도가 높을수록

생성되는 퍼얼라이트의 양이 감소하기 때문이라고 생각되며, 아울러 퍼얼라이트의 총간격 또한 재가열 온도가 증가할수록 넓어지면서 그 형상이 구상 퍼얼라이트(globular pearlite)로 되기 때문

이라고 생각된다. 따라서, 본 실험에서 구상흑연주철이 최적의 기계적 성질을 나타내는 열처리 온도는 910℃에서 오스테나이트화 하여 공냉한 뒤 재가열 온도를 550℃로 하는 것이 공기압축기용 크

랭크샤프트로선 적합하다는 것을 알았다. Fig.10에 인장시험후의 파단면을 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 재가열 온도가 증가할수록

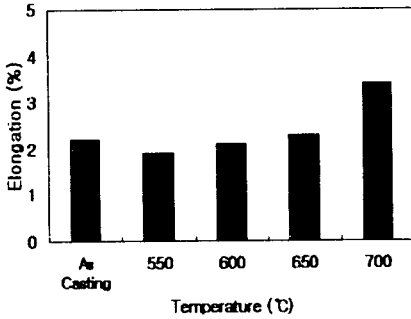


Fig. 8 Effect of heat treatment condition on elongation

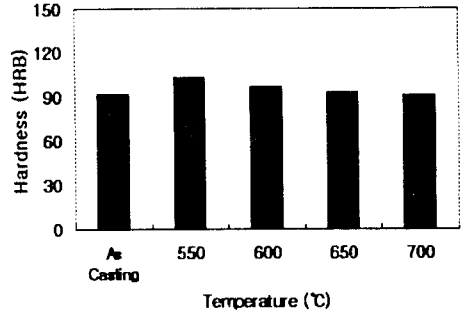


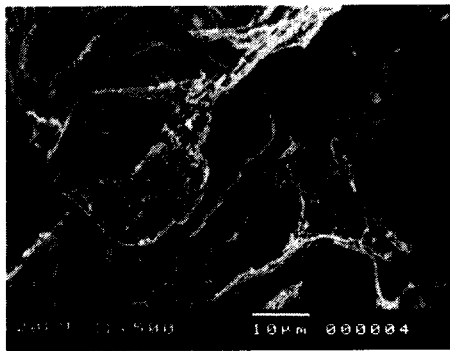
Fig. 9 Effect of heat treatment condition on hardness



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 SEM photos for fracture surface of the tensile specimen with reheating temperature
a) 550℃ b) 600℃ c) 650℃ d) 700℃

그 파면의 양상은 취성파괴에서 조금씩 연성파괴로 천이하는 것을 알 수 있으며, 이는 연신율의 증가 때문이라고 생각된다.

3.3 구상흑연주철과 단조강의 경제성 비교

Table 3에는 본실험을 통하여 얻은 결과를 적용하여 선박용 공기압축기에서 사용되고 있는 단조강과 구상흑연주철제 크랭크샤프트(crank shaft)의 경제성을 비교하였다. Table 3에서도 알 수 있는 바와 같이 대량생산을 위한 재질선택에 있어서는 단조강을 사용하는 것이 우수한 측면이 있으나, 소량 다품종 생산방식을 이용하는 중소기업에서는 주조방식이 상당히 경제적인 것을 알 수 있다. 그리고, 기계적 성질의 경우에도 노멀라이징과 재가열을 이용하여 열처리를 함으로써 인장강도와 경도는 단조강보다 우수한 결과를 얻을 수 있었으며, 단조강에 비해 현저히 부족한 연신율은 설계시 보완해 주면 되리라 생각된다.

Table 3 Comparison of characteristics between forged steel and ductile cast iron

Material		Forged steel (SF60)	Ductile cast iron (FCD500)
Mechanical properties	Tensile strength	60 (kg/mm ²)	69 (kg/mm ²)
	Hardness	170~200HB	256 HB
	Elongation	20 %	2.1 %
Design	Material factor	Apply to 0.98	Apply to 0.77
	Crank pin diameter	Min. 40 mm	Min. 45 mm
Manufacturing expense	Unit price	₩ 31,600/ea	₩ 25,200/ea
	Necessity of metal mold	○	×
	Fundmental unit	1,000 ea/Lot	Unlimit of quantity

3.4 구상흑연주철과 단조강을 이용한 강도계산의 차이

조선기자재 부품 및 장비들은 각국에서 정하는 공업규격외에도 선급협회의 승인을 받아야 하므로 재료의 선정에도 상당히 엄격하며, 공기압축기의 크랭크샤프트도 각국의 선급에서 제시하는 강도계산을 이용하여 최소한의 설계치수 이상이 되

어야만 승인을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 독일선급규격(Germanischer Lloyd)¹⁴⁾의 강도계산식을 이용하여 단조강 크랭크샤프트와 구상흑연주철 크랭크샤프트를 비교하였다.

$$d_k = 0.126 \times \sqrt[3]{D^2 \times P_e \times C_1 \times C_w \times (2H + f \times L)}$$

강도계산에 사용되는 계수들은 다음과 같다.

d_k : 크랭크 샤프트 핀 최소직경(mm)

D^2 : 공기압축기의 실린더 직경(mm)

P_e : 최종 토출 공기압력(kg/cm²)

C_1 : 실린더 수에 대한 상수

C_w : 재질계수(material factor)

H : 행정길이(stroke)

f : 실린더 배열각도에 의한 계수

L : 메인베어링간의 거리(mm)

계산에 사용된 구상흑연주철은 일본공업규격에서 명명한 인장강도가 60kg/mm²인 FCD600을 적용해 주었으며, 계산결과는 다음과 같다. 이때 적용해준 재질계수는 인장강도와 관련이 있는 재질계수 0.77을 적용하였다.

$$d_k = 0.126 \times 326.97 = 41.2\phi$$

계산에 사용된 단조강은 인장강도가 구상흑연주철과 동일한 SF60을 이용하였으며, 이때 재질계수는 0.98을 적용하였고, 그 결과는 다음과 같다.

$$d_k = 0.126 \times 301.72 = 38.02\phi$$

앞의 계산결과에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 인장강도를 지닌 주물과 단조강을 이용할 경우 재질계수의 차이로 인하여 구상흑연주철이 약 3mm 정도 더 두께를 유지해 주어야 하는 것을 알 수 있다. 이는 낮은 강도를 가지는 주물로 본 연구결과에서 얻은 열처리를 적용해 줄 경우 보완이 가능하리라 생각된다.

4. 결 론

이상과 같이 본 연구에서는 구상흑연 주철의 강인화를 위해 다양한 열처리 사이클을 실시하여 선

박용 공기압축기 크랭크샤프트의 재질로서 중요한 소재조건인 인장강도와 경도를 향상시키는 방법을 중점적으로 연구하였으며, 노멀라이징과 재가열온도에 따른 기계적 성질과 조직의 변화에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노멀라이징한 구상흑연주철의 최적의 기계적 성질을 나타내는 열처리 온도는 910℃에서 구상흑연주철의 기지조직을 오스테나이트화 한 뒤 재가열온도 550℃로 열처리해주는 것이 인장강도와 경도가 가장 높은 것을 알았다.
2. 경도에 있어서는 재가열 온도가 높아질수록 감소하는 경향을 볼 수 있었으며, 경도와 밀접한 관계가 있는 응착저항이 감소하게 되므로 내마모성을 요구하는 부품에는 재가열 온도를 낮게 해주는 것이 좋으며, 본 실험에서는 550℃에서 가장 경도가 높게 나타나 내마모성이 우수하리라고 생각된다.
3. 910℃로 오스테나이트화 한 후 재가열 온도에 따른 인장강도는 온도가 높을수록 저하하는 것을 알 수 있는 데, 이는 1차 열처리후의 기지조직인 오스테나이트가 재가열에 의해 그 양이 점차 감소하게 되고 재가열 온도가 높을수록 생성되는 퍼얼라이트의 양이 감소하기 때문이라고 생각되며, 아울러 퍼얼라이트의 층간격 또한 재가열 온도가 증가할수록 넓어지면서 그 형상이 구상 퍼얼라이트(globular pearlite)로 되기 때문이라고 생각된다.
4. 구상흑연주철과 단조강으로 제작하는 공기압축기용 크랭크샤프트의 경제성을 비교해본 결과 경제적인 측면에서 구상흑연주철제 크랭크샤프트가 우수함을 알 수 있었으며, 단조강과 비교하여 부족한 기계적 성질인 연신율은 크랭크샤프트의 강도계산시 크랭크핀(crank pin)의 직경을 보완해주면 충분히 사용가능한 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 (주)종합해사의 도움에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Allen G. Gray, Metal Progress, 10, pp.83, 1971.
- 2) 김윤해, 정하돈, 배창원, 最新空氣壓(理論,實務), 삼원출판사, pp.71~75, 1997.
- 3) E. Dorazil and B. Barta, "High-Strength Bainitic Ductile Cast Iron", AFS Trans., 6, pp.54~61, 1982.
- 4) 畑田光晴, 上田倣完, "鑄鐵の熱處理に關する最近の話題", 熱處理, 第27卷, 第5號, pp.310~315, 1987.
- 5) P. A. Morton, "Austempering A 1.6 % Ni - 0.3 % Mo Ductile Iron for Maximim Toughness", Climax Molybdenum Co., Report L-194-67, pp.1~11, 1983.
- 6) H. Jansen, Meehanite-ADI, 53rd International Meehanite Conference, Report No. E1437, pp.1~12, 1988.
- 7) M. Johansson, Austenitic-Bainitic Ductile Iron, AFS Trans., 85, pp.117~122, 1977.
- 8) 日本工業規格, 金屬材料引張試驗片, JIS Z 2201, 1997.
- 9) 日本工業規格, 球狀黑鉛鑄鐵, JIS G 5502, 1997.
- 10) S. Shepperson and C. Allen, The Abrasive Wear Behavior of Austempered Spheroidal Cast Iron, Wear, pp.271~287, 1988.
- 11) Germanischer Lloyd, Section 2. Internal Combustion Engine and Air compressor, 1997.

저 자 소 개



정하돈(鄭煥敦)

1950년 8월 14일생. 1973년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 1987년~현재(주)종합해사 상무이사. 1999년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사)



김윤해(金允海)

1961년 6월 19일생. 1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사). 1990년 일본 도쿠시마대학 대학원 졸업(공학석사). 1993년 일본 큐슈대학 대학원 졸업(공학박사). 1993년~현재 한국해양대학교 기계소재공학과 부교수. 1997년~1998년 미국 국립표준연구소 초청 연구교수