

박용 디젤엔진 부품 크랭크샤프트의 기계적 성질에 미치는 열처리 공정의 영향

강 기 홍

현대중공업주식회사

Effect of Heat Treatment Processes on Mechanical Properties of Crankshafts in Marine Diesel Engine Use

Gie Hong Kang

Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

초 록 박용 디젤엔진 부품 크랭크샤프트의 기계적 성질에 미치는 화학 성분과 열처리 공정의 영향을 인장시험기, 경도시험기, 충격시험기와 광학현미경으로 조사 연구하였다. 시행된 4가지 열처리과정중 다음의 열처리 공정인 노말라이징→TR단조→퀵칭→템퍼링이 최적의 기계적 성질을 나타냈다. 이때 기계적 성질은 오스테나이트 결정입도 크기, 냉각 속도, 오스테나이트화 온도와 오스테나이트화 유지 시간에 의존하였다. 오스테나이트 결정입도는 TR단조 후의 초기 결정입도 크기에 의존하고, 냉각 속도는 C-곡선 Nose를 지나야 하고, 오스테나이트화 온도는 탄소 함량에 의존하고 그리고 오스테나이트화 유지 시간은 저어닐리즘에 의존하는 것으로 나타났다.

Abstract Effects of chemical composition and heat treatment processes on mechanical properties of crankshafts in marine diesel engine use have been studied with tensile machine, hardness tester, impact tester and optical microscope. The following heat treatment processes, normalizing→TR forging→quenching→tempering, show the best mechanical properties and microstructures among tried four different heat treatment processes. The mechanical properties depend on austenitizing grain size growing from the initial grain size after TR forging, cooling rate passing through the C-curve nose, austenitizing temperature deciding from the amount of carbon and austenitizing time calculating from the diameter of journal of crankshafts.

1. 서 론

박용 엔진 부품인 크랭크샤프트 단조품은 펄라이트-페라이트(pearlite-ferrite) 미세조직의 중탄소강으로 결정립이 균일하고 미세하여 강인한 성질을 갖고 있으며 템퍼링(tempering)에 의해 강도를 조정하여 인성을 향상시킬 수 있다. 이러한 이유로 주요 선박에서 요구하는 크랭크샤프트는 열처리 공정에 따른 제품에 대한 엄격한 심사후 승인을 받아 엔진 업체 또는 선박 업체에 공급될 수 있다¹⁾. 이와 같은 열처리 공정에 따른 주요 제품의 특성을 보면 노말라이징재는 조직의 균일화와 성분의 균질화를 얻을 수 있고 더블 노말라이징재는 1차시 고온열처리를 통하여 조직의

균일화가 이루어지고 2차시 저온열처리를 통하여 조직의 미세화가 이루어진다. 노말라이징-템퍼링재는 더욱 결정립을 미세화 하여 강인성을 더 향상시킬 수 있게 된다. 이는 크랭크샤프트의 특성상 요구되는 사항으로 선박에 탑재시 크랭크샤프트는 곡선 축으로 굽힌 하중과 비틀림 하중을 동시에 받기 때문에 인장 강도, 항복 강도, 연신율 및 단면 수축률이 좋아야 한다. 또한 선박 운행시, 특히 엔진 시동시 충격적인 하중이 작용하므로 충격에너지 값이 높아야 하며 이때 충격에너지값은 결정입도에 크게 의존한다. 또한 반복하중을 받기 때문에 피로 강도가 높아야 한다. 이때 파단은 인장 강도 이하에서 일어나며 10⁷회의 반복 하중에 견디는 최대 응력인 피로 한도는

항복 강도보다 낮은 값을 갖는다. 이때 피로 한도는 32kg/mm^2 이고 항복 강도는 39.7kg/mm^2 이다^{2,3)}. 이와 같은 크랭크샤프트의 특성상 요구되는 사항에 견딜 수 있는 기계적 성질을 얻기 위하여 다음과 같은 퀴칭-템퍼링 재를 생산할 수 있는 열처리 공정을 시행하여 최적의 열처리 공정을 찾는 조사 연구를 하였다.

즉, 다음과 같은 4가지 열처리 공정이 시도되었다.

- 1) 1차의 노말라이징→TR단조→2차의 노말라이징→퀴칭→템퍼링
- 2) 노말라이징→TR단조→퀴칭→템퍼링
- 3) TR단조→노말라이징→퀴칭→템퍼링
- 4) TR단조→퀴칭→템퍼링

위의 열처리 공정중 1)의 열처리 공정은 황삭가공된 환봉을 가스열처리로에서 일부분을 반복 열처리하여 TR단조후의 미세조직은 조대화된 결정입도가 나타났다. 반면에 가스열처리로 설비를 고주파 열처리로 설비로 바꾼 후 황삭가공된 환봉의 핀 부위만을 개별 열처리하여 TR단조후의 미세조직은 핀 부위는 조대화된 결정입도를, 저어널부위는 미세화된 결정입도를 나타내었다. 이와 같은 미세조직의 차이에도 불구하고 똑같은 공정을 시행한 크랭크샤프트의 기계적 성질은 핀과 저어널부위에서 차이가 나타났다. 특히 저어널부위의 경도값의 저하가 크게 나타났다. 이를 개선하기 위한 2), 3)과 4)는 새로 시도된 열처리 공정으로서 이중에서 가장 높은 경도값을 얻게 된 2)의 공정인 노말라이징→TR단조

→퀴칭→템퍼링공정에서 퀴칭전 오스테나이트화 온도와 유지 시간, 탄소함량과 크랭크샤프트 크기에 따라 기계적 성질인 인장 강도, 항복 강도, 연신율, 단면 수축률, 브리넬경도, 충격 강도와 미세조직을 조사 연구하였다.

2. 실험 방법

시험용 박용 엔진 부품인 크랭크샤프트는 표 1에서 보여주는 바와 같이 23/30 Type(저어널부위 지름 280mm, 핀 부위 지름 220mm)과 28/32 Type(저어널부위 지름 340mm, 핀 부위 지름 270mm)으로 B&W사 엔진 종류에 따라서 분류되며 실린더 수에 따라 5L, 6L, 7L, 8L, 9L 등으로 표시하며 열처리시 환봉무게는 2855~7270kg으로 다양하다. 사용된 잉곳트의 화학 성분은 표 2에 보여주는 바와 같다. 탄소강의 5대원소인 C, Si,

Table 1. Type and Weight of Crankshafts

Type	Weight(Kg)	
	Ingot	Round Bar
5L	23/30	4060
	28/32	6520
6L	23/30	4460
	28/32	7100
7L	23/30	4650
	28/32	7920
8L	23/30	5200
	28/32	8850
9L	23/30	-
	28/32	9220

Table 2. Chemical Composition.

Ingot charge number	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu
#1	0.46	0.29	0.76	0.025	0.011	0.23	0.25	0.06	0.04	0.15
#2	0.42	0.26	0.77	0.015	0.015	0.05	0.10	0.01	-	0.07

Mn, P, S의 성분 함량에 따라 charge #1과 charge #2로 2종류를 사용하였다. 경도에 미치는 화학 성분의 영향 이외에는 charge #2의 성분을 가진 잉곳트를 사용하였다. 크랭크샤프트의 제조 공정은 그림 1에 표시하였고 환봉단조후부터의 열처리 공정은 그림 2에

라서 다음과 같이 열처리 공정이 시행되었다.

- 1) 1차의 노말라이징(880°C, 14Hr)→TR단조→2차의 노말라이징(880°C, 9Hr)→퀴칭(880°C, 6Hr)→템퍼링(600°C, 9Hr)
- 2) 노말라이징(880°C, 14Hr)→TR단조→퀴칭(920°C, 10Hr)→템퍼링(550°C, 6Hr)

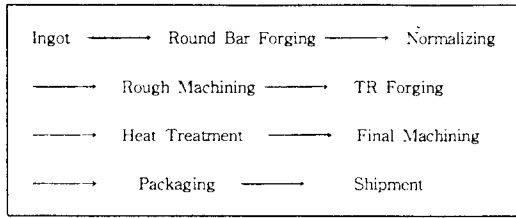


Fig. 1. Manufacturing Processes of TR Forged Crankshafts.

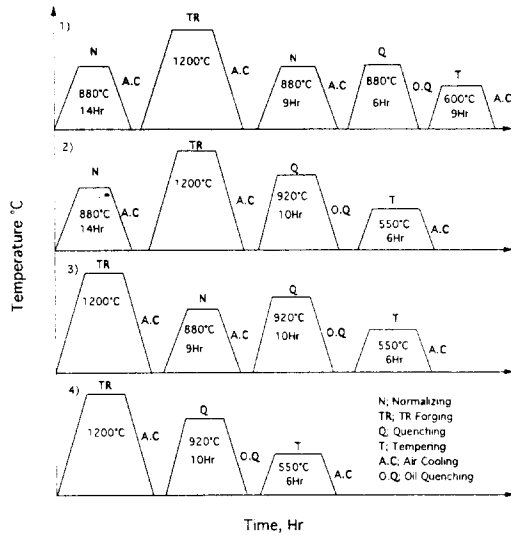


Fig. 2. Heat Treatment Processes.

3) TR단조→노말라이징(880°C, 9Hr)→켄칭(920°C, 10Hr)→템퍼링(550°C, 6Hr)

4) TR단조→켄칭(920°C, 10Hr)→템퍼링(550°C, 6Hr)

그리고 본 실험에서의 기계적 성질을 얻기 위해서 켄칭후의 크랭크샤프트의 핀(pin)과 저어널(journal)부위의 위치(Fig. 3)에 따라서 경도 시험을 하고, 그 밖의 기계적 성질과 미세조직은 구동부 후렌지쪽에서 시편을 채취하여 조사 관찰하였다. 그리고 2)의 공정인 노말라이징→TR단조→켄칭→템퍼링 열처리 공정에서는 켄칭에 앞선 최적 오스테나이트화(austenitizing) 온도는 880°C와 920°C로 시험을 하였다. 최적의 오스테나이트화 유지 시간을 위해 20/30 Type은 7, 8, 9시간으로, 28/32 Type은 9, 10시간으로 나누어 시험을 하였다. 그리고 크기의 대한 영향을 시험하기 위해서 5L 23/30 Type과 7L 23/30 Type을 사용하였다. 켄칭시 냉매재로는 삼원 열처리

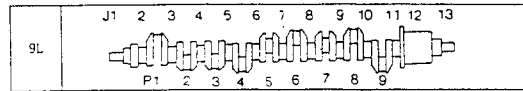


Fig. 3. Position Number of Crankshafts.

(주)에서 공급하는 Ucon 16±1%로 40분 이상 교반시설이 있는 욕조에 담근 후에 꺼냈다. 그리고 템퍼링은 550°C에서 6시간 유지시킨후에 공냉시켰다. 기계적 성질과 미세조직의 조사 관찰은 다음과 같이 시행하였다. 인장 시편은 JIS 4호 규격으로 제작하여 Shimadzu 만능시험기(Model-UH-F50A)로 인장 강도, 항복 강도, 연신율및 단면 수축률을 구하고, 충격 시편은 JIS 3호 5mm U-notch 규격으로 제작하여 충격시험기(Model-Tinius Olsen)로 충격에너지값을, 경도시험기(Model-Heung Jin)로 브리넬경도값을 그리고 광학현미경(Model-Nikon UFX-II)으로 펄라이트-페라이트 미세조직의 결정입도와 분포를 조사 관찰하였다. 그림 3에서 보여주는 바와 같이 실물 크랭크샤프트의 핀과 저어널 부위의 경도 시험은 켄칭 또는 템퍼링 열처리 공정이 끝나고 실온에서 연마한 후에 휴대용 경도기(Model-Equotip)를 사용하여 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 기계적 성질

3.1.1 화학 성분의 영향

탄소와 미소원소량이 다소 많은 charge #1 잉곳트와 탄소와 미소원소량이 다소 적은 charge #2잉곳트로 TR단조된 크랭크샤프트는 전술한 2)의 열처리 공정에 의해 오스테나이트화후 유냉시킨 뒤에 핀 부위와 저어널부위의 경도를 휴대용 경도기로 측정된 결과를 그림 4에 나타냈다. 이 그림은 TR단조 전에 열처리한 핀 부위와 열처리하지 않은 저어널부위의 경도가 탄소량에 따라서 크게 차이가 남을 보여주었다. 이때 핀과 저어널부위의 경도는 880°C에서 오스테나이트화 처리후 유냉시킨 charge #2의 경우는 경도 분포가 260±20HB 범주에 있고 같은 열처리를 한 charge #1의 경우에는는 경도 분포가 270±20HB 범주에 있다. 이 결과는 탄소량이 많을 수록 경도가 증가함을 보여주는 것이다. 그러

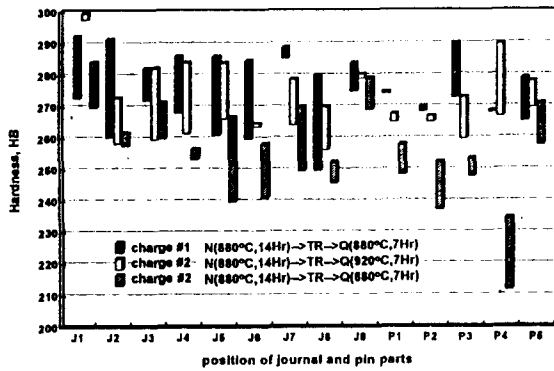


Fig. 4. Effect of Chemical Composition on Hardness.

나 charge #2의 경우에 오스테나이트화 온도를 920°C로 상향시키고나서 유냉시의 경도분포는 270±10HB범주에 있었다. 이는 탄소량이 같을 경우에 오스테나이트화 온도가 경도에 영향을 주는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 다음과 같이 일치한다. 즉, 탄소량에 따라서 오스테나이트화 온도 변화는 Fe-C 상태에서 찾을 수 있다. A₁선이 탄소량이 감소할수록 상승하며 이와 함께 경도에 영향을 미치는 오스테나이트화 온도도 상승하는 경향을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 핀과 저어널부위의 경도를 높이기 위해서 적절한 오스테나이트화 온도 선정은 탄소 함량을 고려하여야 한다.

3.1.2 크기(size)의 영향

23/30 Type엔진은 실린더 수에 따라 5L, 6L, 7L, 8L로 구별된다. 이와 같이 크기에 따라서 경도값의 변화를 보기 위하여 5L 23/30 Type과 7L 23/30 Type의 크랭크샤프트를 전술한 2)의 열처리 공정에 의거 열처리한 후에 경도에 미치는 크기의 영향을 비교 검토하였다. 그림 5에서 보여주는 바와 같이 실린더 수에 따라 핀과 저어널부위의 경도는 5L 23/30 Type이 270±10HB 범주에 있고, 7L 23/30 Type은 260±10HB 범주에 있다. 이는 전자의 무게가 2855kg이고 후자의 무게가 3534kg임을 감안할 때 퀴칭시 경도에 미치는 크기의 영향을 고려하여야 한다.

3.1.3 열처리 공정의 영향

크랭크샤프트의 열처리 공정을 다음과 같이 시행한 후의 저어널부위 경도를 휴대용 경도기로 측정된 결과이다(Fig. 6).

- 1) 1차의 노말라이징→TR단조→2차의 노말

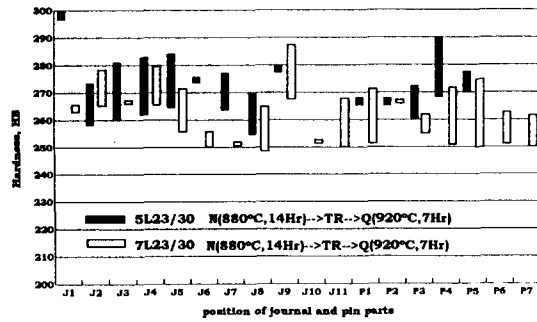


Fig. 5. Effect of Size on Hardness.

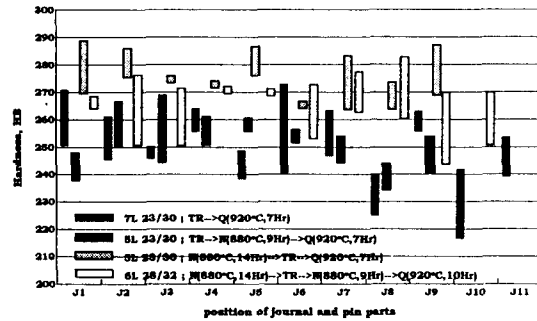


Fig. 6. Effect of Heat Treatment Processes on Hardness.

라이징→퀴칭후의 경도 값은 260±10HB 범주에 있고

- 2) 노말라이징→TR단조→퀴칭후의 경도 값은 280±15HB 범주에 있고
- 3) TR단조→노말라이징→퀴칭후의 경도 값은 250±15HB 범주에 있고
- 4) TR단조→퀴칭후의 경도 값은 250±20HB 범주에 있다.

이들 열처리 공정중에서 2)의 열처리 공정을 시행한 크랭크샤프트의 경도값이 가장 높고 분포가 고르게 나타났다. 이때의 노말라이징 온도와 시간은 각각 880°C와 14시간이고 퀴칭전 오스테나이트화 온도와 시간은 각각 920°C와 7시간이었다. 또한 3)과 4)의 열처리 공정중에서의 실물 절단시험편의 기계적 성질은 표 3에 보여 주고 있다. 그러나 확인된 경도값은 2)의 열처리 공정에서 얻은 경도값에 비해 30~40HB정도 낮게 나타났다. 따라서 최적의 경도값이 나타난 2)의 열처리 공정에 의한 템퍼링 열처리를 마친 후의 핀과 저어널부위의 상하 좌우 4축방향으로 측정된 평균 경도값은 그림 7에서 보여주는 바와 같이

Table 3. Effect of Heat Treatment Processes on Mechanical Properties.

Heat Treatment Processes		Mechanical Properties					
		Y.S (Kg/mm ²)	T.S (Kg/mm ²)	EL (%)	RA (%)	Hardness (HB)	IE (J)
After TR	Pin	590	859	9.0	12.4	235	4.9
	Journal	492	790	7.7	38.3	241	16
TR→N	Pin	339	669	22.5	41.6	187	25.8
	Journal	399	666	19.7	46.9	187	28.7
TR→Q	Pin	625	880	13.4	36.0	255	26.5
	Journal	628	881	14.0	37.1	241	23.2
TR→N→Q	Pin	623	883	15.1	40.5	241	27.1
	Journal	588	850	14.3	41.6	241	18.0

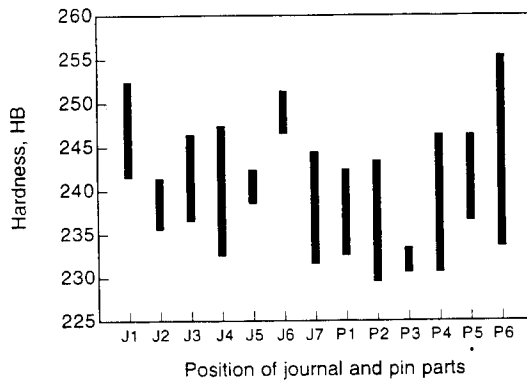
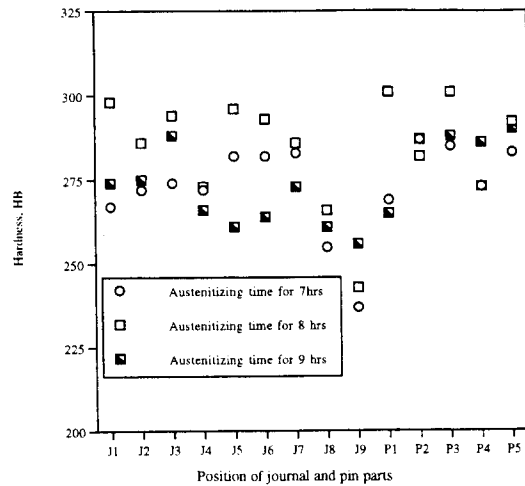


Fig. 7. Hardness of Crankshafts Finished Heat Treatment.

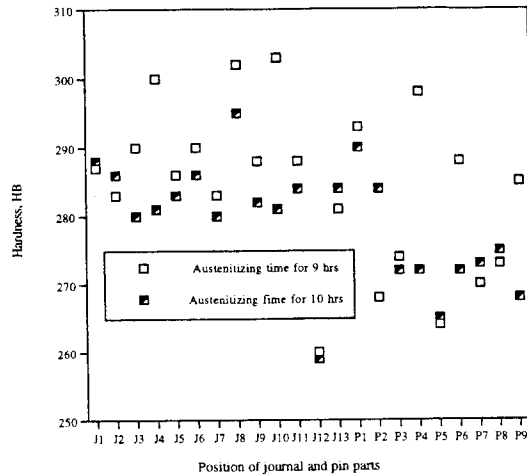
240±10HB 범주값을 보여준다. 그리고 구동부쪽의 후렌지부위를 절단한 시편의 측정된 기계적성질은 다음과 같다. 즉, 항복 강도 572kg/mm², 인장 강도 819kg/mm², 연신율 18.1%, 단면 수축률 49.0%, 브리넬경도 235HB, 충격 에너지 25.6J로 나타났다. 이 값은 본 크랭크샤프트의 기계적성질을 만족하는 값이다.

3.1.4 오스테나이트화 온도와 시간의 영향

그림 8은 오스테나이트화 온도는 동일하고 유지 시간을 달리한 5L 23/30 Type과 9L 28/32 Type 크랭크샤프트 저어널부위의 경도값을 나타낸다. 이 시험 결과는 23/30 Type의 경우 오스테나이트화 시간은 7시간으로서 저어널 부위와 핀 부위의 경도값이 270±15HB 범주 안에 있고, 9L 28/32 Type의 경우는 오스테나이트화 시간이 10시간으로서 저어널 부위와 핀 부위의 경도 분포가 270±15HB 범



a) 5L 23/30 Type Crankshafts



b) 9L 28/32 Type Crankshafts

Fig. 8. Effect of Austenitizing Time on Hardness for a) 5L 23/30 Type and b) 9L 28/32 Type Crankshafts.

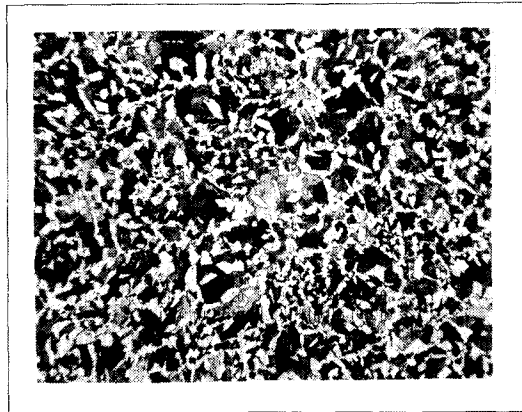
주 안에 있어, 경도값이 높고 핀과 저어널부위 사이의 경도값 차이도 작은 최적의 시간임

을 보여준다. 이때 오스테나이트화 온도는 Fe-C 상태도의 0.42% 탄소량의 $A_3(780^{\circ}\text{C})$ 보다 100°C 이상 높은 온도로 계산하였다. 이 계산된 온도는 시험 온도와 일치하였다. 유지 시간은 저어널의 지름을 기준으로 통상 25mm 당 1시간씩 계산하였다. 즉, 23/30 Type은 280mm이므로 유지 시간은 11.2시간이고, 28/32 Type은 340mm이므로 유지 시간은 13.6시간이었다. 그러나 실제 적용 시간은 각각 7시간과 10시간으로 이론값의 63%와 73%의 오스테나이트화 유지 시간을 나타내었다.

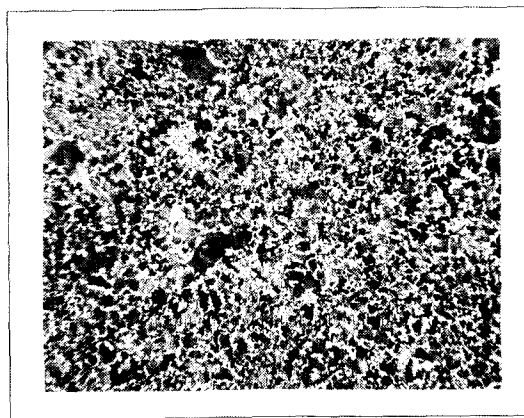
3.2 미세조직

3.2.1 열처리 공정의 영향

그림 9-a와 그림 9-b는 전술한 2)의 열처리 공정중에 잉곳트를 환봉 단조 후 시편의 미세조직과 환봉을 노말라이징하여 용체화 처리시킨 미세조직을 각각 보여준다. 이때 나타



a) Forged Round Bar ×100



b) Forged and Normalized Round Bar ×100

Fig. 9. Microstructures from a) Round Bar and b) Normalized Round Bar.

난 미세조직은 펄라이트(검은 색)-페라이트(흰색)의 혼합된 미세조직이며 후자의 결정입도는 전자의 결정입도와 비교시 더욱 미세화된 것으로 나타나 노말라이징 열처리는 용체화 처리로 성분의 균질화와 결정입도 미세화를 동반하는 것으로 나타났다.

전술한 3)과 4)의 열처리 공정중 퀴칭후의 미세조직과 기계적 성질을 그림 10과 표 3에 나타내었다. 그림 10-a는 TR단조후 핀 부위의 미세조직은 고주파 유도 가열로 사용으로 결정입도가 크게 조대화 되어 있고 저어널부위의 미세조직은 간접 열에 의하여 TR단조 전보다 다소 결정입도가 미세화 함을 보여준다. 이와 같은 미세조직의 차이에 의하여 단면 수축률은 전자가 12.4% 후자가 38.3%로, 충격에너지값은 전자가 4.9J로 후자가 16J로 결정입도가 작을수록 단면 수축률과 충격에너지 값이 향상됨을 알 수 있었다.

반면에 그림 10-b에서 보여주는 바와 같이 뒤이은 노말라이징 열처리는 미세조직에서 결정입도와 펄라이트-페라이트 분포가 비슷하며 또한 표 3에서 처럼 기계적 성질도 비슷한 양상을 보였다. 이는 조대화된 핀 부위와 미세화된 저어널부위를 가진 크랭크샤프트의 노말라이징은 미세조직과 기계적 성질의 차이가 없는 특징을 보여주었다.

그림 10-c는 노말라이징을 생략하고 퀴칭한 조대화된 핀 부위와 미세화된 저어널부위를 가진 크랭크샤프트의 미세조직이며 불균일한 결정입도를 보였다. 특히 모상 오스테나이트 결정입도가 큰 경우는 결정입계를 따라 생성된 미세한 초석 페라이트를 작은 경우는 혼합된 펄라이트와 페라이트의 작은 결정입자군을 볼 수 있었다. 특징은 전체적으로 미세조직은 불균일하고 핀 부위의 초석 페라이트 결정입도가 저어널부위에 비하여 약간 크고 양이 약간 많은 것으로 나타났다. 그러나 기계적 성질은 표 3에서 처럼 비슷한 양상을 핀과 저어널 부위에서 볼 수 있었다.

그림 10-d는 TR단조후 노말라이징과 퀴칭 열처리를 시행한 미세조직으로 노말라이징없는 퀴칭 열처리와 비슷한 양상을 보여주었다. 즉, 불균일한 결정입도와 혼합된 펄라이트와 페라이트의 작은 결정입도군을 보여준다. 또한 핀 부위와 저어널부위에 있어 펄라이트와

페라이트의 결정입도나 분포가 비슷한 양상을 나타내었다. 그리고 표 3에서 처럼 기계적 성질도 충격에너지값을 제외하고는 핀 부위와 저어널부위가 비슷한 양상을 보였다. 이와 같

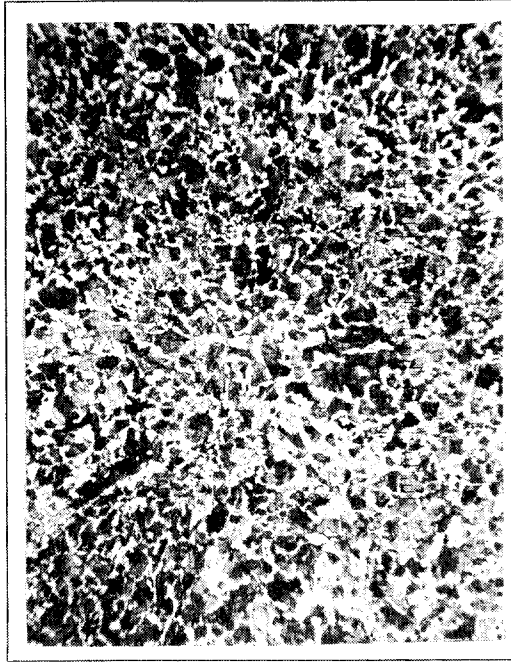
Pin Part

은 미세조직과 기계적 성질을 비교 검토한 결과로 볼 때 이는 퀴칭전의 핀과 저어널부위의 결정입도가 퀴칭후의 미세조직과 기계적성질에 큰 영향을 미치는 것으로 생각되었다. 따

Journal Part

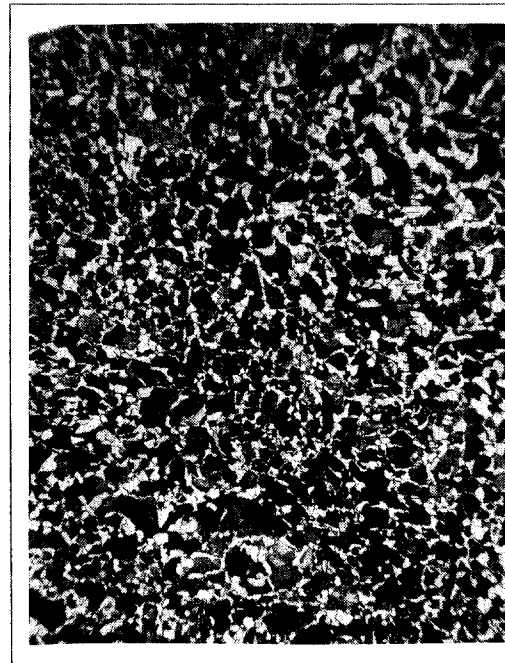


×100

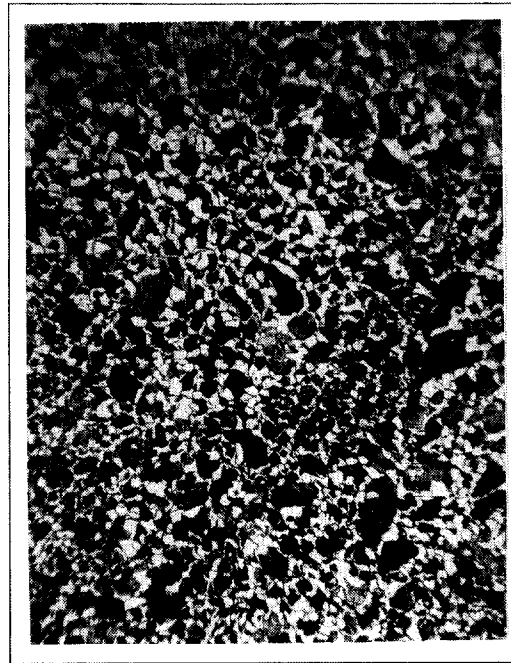


×100

a) Forged Round Bar → TR Forging



×100

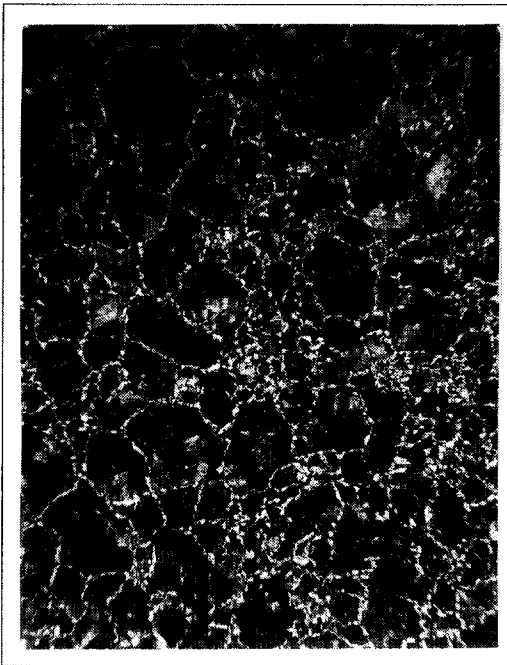
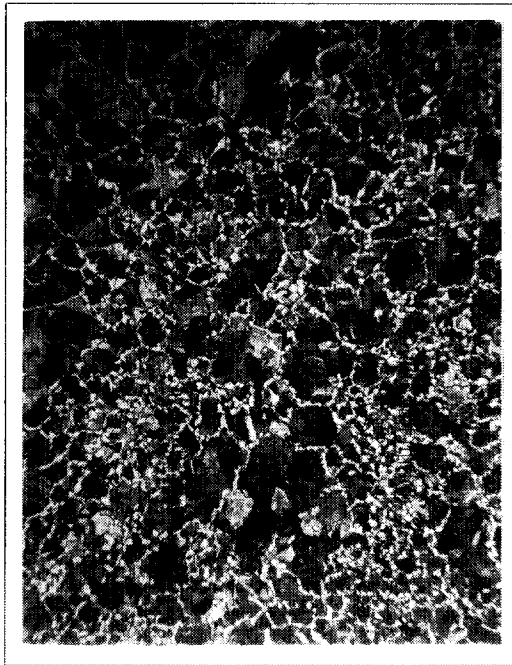


×100

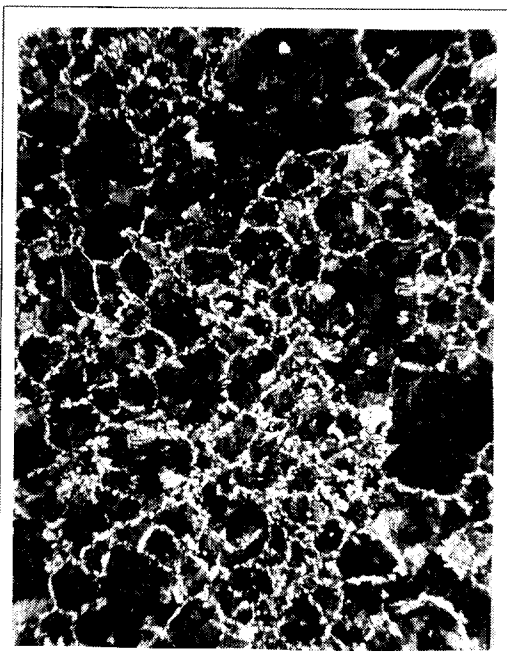
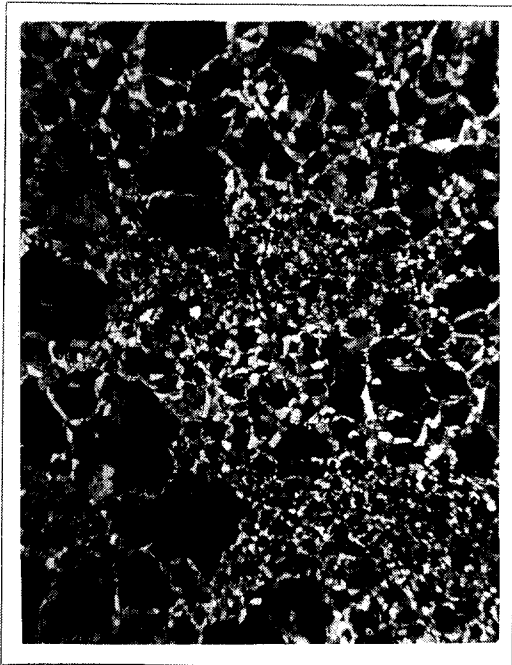
b) Forged Round Bar → TR Forging → Normalizing

Pin Part

Journal Part



c) Forged Round Bar → TR Forging → Quenching



d) Forged Round Bar → TR Forging → Normalizing → Quenching

Fig. 10. Microstructures of Pin and Journal Parts by Different Heat Treatment Processes.

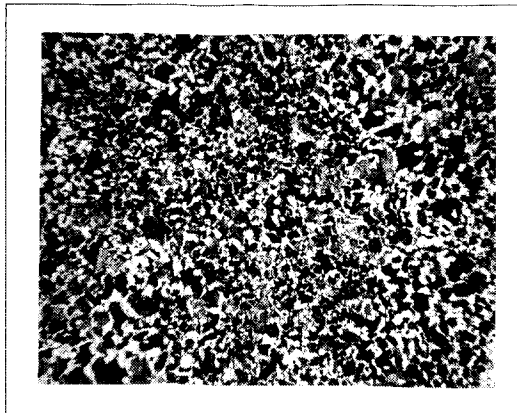
라서 전술한 2)의 열처리공정은 퀴칭전 결정입도를 만족시켜주는 공정으로 판단되었다.

다음 단계로 퀴칭전 오스테나이트화 온도가 미세 조직과 결정입도에 미치는 영향에 대한

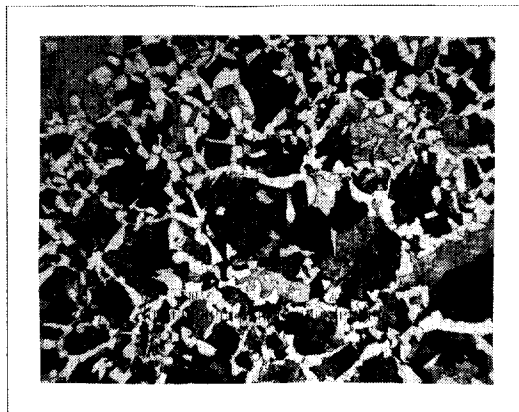
조사를 위해 오일퀴칭 대신 공냉시킨 뒤의 크랭크샤프트 저어널부위 미세조직을 조사 관찰하였다. 저어널부위의 결정성장이 오스테나이트화 온도에 따라서 어떻게 성장하는지를 그

림 11에서 볼 수 있다. 즉 그림 11-a는 오스테나이트화 온도가 900°C이고 유지 시간은 10시간으로 결정입도는 TR단조 전의 입도(그림 9-b)에 비하여 약간 조대화 되었으나 펄라이트 결정입도와 페라이트 결정입도는 비슷한 양상을 보였다. 그림 11-b는 오스테나이트화 온도가 950°C이고 유지 시간은 10시간으로 TR단조 전의 결정입도에 비하여 크게 조대화 되었고 펄라이트 결정입도는 페라이트 결정입도와 비교시 상대적으로 컸다.

TR단조후의 핀 부위의 미세조직을 표면부와 중심부에 따라서 관찰하였다. 그림 12는 핀 부위의 미세조직으로 a) 표면부와 b) 중앙부의 결정입도를 보여주며 전자가 후자에 비하여 결정입도가 작고 후자는 결정입계를 따라서 초석페라이트가 석출되어 있다. 이때 핀 부위의 표면부 미세조직인 그림 12-a와 저어널부위의 미세조직인 그림 11-b를 비교

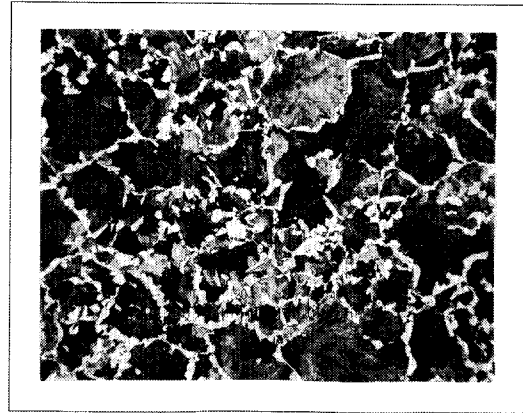


a) Austenitized at 900°C for 10 Hr ×100

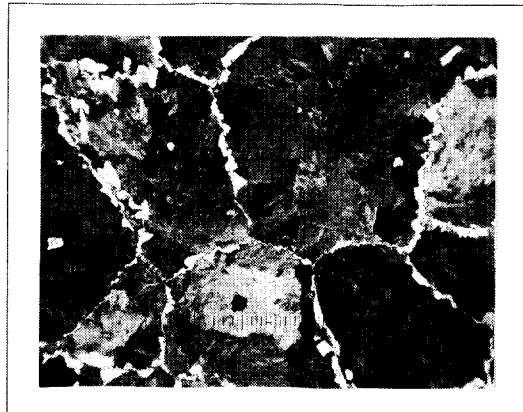


b) Austenitized at 950°C for 10 Hr ×100

Fig. 11. Grain Growth after Austenitizing.

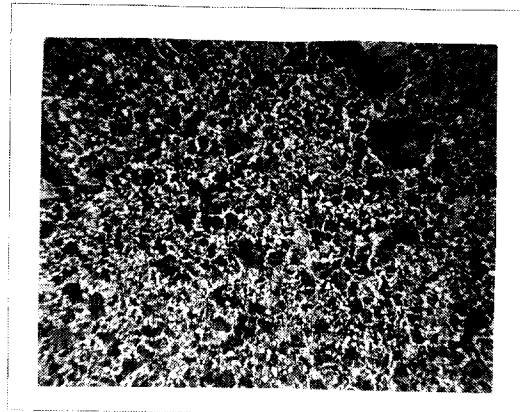


a) Surface ×100



b) Center ×100

Fig. 12. Microstructures of Pin Part after Normalized at 880°C for 14Hr and TR Forged.



×100

Fig. 13. Microstructures after Quenched at 920°C for 10Hr and Tempered at 550°C for 6Hr.

하면 펄라이트와 페라이트의 결정입도 크기와 결정입도 분포가 비슷한 양상을 보여준다. 이와 같은 미세조직을 얻기 위해서 2)의 열처리 공정의 퀴칭온도 오스테나이트화 열처리 온도를 900°C와 950°C의 중간 온도인 920°C로 하였다.

마지막 단계로서 저어닐리움에 따른 오스테나이트화 온도의 유지 시간에 관한 영향을 조사 관찰하였다. 그림 8에서 보여주는 바와 같이 핀과 저어닐부위의 경도값의 차이를 최소화한 7시간(23/30 Type)과 10시간(28/32 Type 경우)은 최적의 유지 시간임을 보여 주었다. 이러한 오스테나이트화 온도와 유지 시간 후에 퀴칭을 하고 난 뒤의 미세조직과 뒤이은 템퍼링후(550°C에서 6시간 유지후 공냉처리)의 저어닐부위의 미세조직은 그림 13에서 처럼 같다. 이때의 미세조직은 결정입도가 균일하고 초석 페라이트가 모상 오스테나이트 결정입계를 따라서 석출되어 있다. 그러나 퀴칭후와 템퍼링후의 미세조직 차이를 광학 현미경으로 구별할 수가 없었다. 반면에 기계적 성질은 템퍼링전후에 차이가 있었다.

4. 고 찰

4.1 기계적 성질

4.1.1 화학 성분의 영향

크랭크샤프트재인 중탄소강은 펄라이트와 페라이트의 혼합된 미세조직으로 기계적 성질에 미치는 화학 성분의 영향에 관해서 고찰하고자 한다.

페라이트내에 고용될 수 있는 첨가 원소로는 Al, Cr, Mn, Ni, Si, V 등이 있다^{4,5)}. 그러나 크랭크샤프트에 함유된 이들 원소 중에서 Mn과 Ni이 영향력이 크다. 왜냐하면 Mn은 페라이트내의 고용한도가 10%로 강도를 높여 주는 원소이며, Ni은 고용한도가 25~30%로 인성을 높여 주는 원소이기 때문이다. 또한 C은 페라이트내의 고용한도가 0.025%뿐으로 오히려 페라이트내의 탄화물로서 기계적 성질에 영향을 줄 수 있다. 이밖에 Cr이 탄화물로 페라이트내에 존재할 수 있으나 내식성과 고온강도를 높여 주어³⁾ 본 제품의 기계적 성질과는 무관하다고 여겨진다. 그러므로 본 제품에서는 C과 Mn이 강도 향상을 위해서 그리고 Ni이 인성 향상을 위해서 필요한 원소라고 생각된다. 표 2의 화학 성분을 가진 Charge #1(0.46%C 함유)과 Charge #2(0.42%C 함

유)로 단조된 크랭크샤프트를 그림 4에서 처럼 880°C에서 7시간 유지후 퀴칭한 경도값의 영향으로 볼 때 전자의 경우에서 저어닐부위의 경도가 후자의 경우보다 높은 것은 이와 같은 탄화물 때문이라 생각된다. 이는 탄소량에 따라서 경도값이 증가하는 것과 일치한다.

4.1.2 열처리 공정의 영향

TR단조시 환봉 일부분의 반복열처리를 동반한 가스 열처리로 설비 사용 시에 조대화된 결정립을 보여준 대신에 환봉 핀 부위의 열처리를 고주파 열처리로 설비로 바꾼 후에는 핀 부위는 조대화된 결정립을, 저어닐부위는 미세화된 결정립을 보여주었다. 이와 같은 미세조직은 핀과 저어닐부위의 기계적성질 차이를 보였으며 특히 저어닐부위의 경도하락이 심하였다. 이와 같은 경도 하락을 보상하기 위한 열처리 공정의 영향을 고찰한 내용은 다음과 같다.

먼저 기존의 열처리 공정에서 나타난 공정별 미세조직을 통하여 기계적 성질과의 관계를 검토하였다. 즉, 1차의 노말라이징→TR단조→2차의 노말라이징→퀴칭시에 나타난 공정별 미세조직의 특성은 1차 노말라이징후 미세조직의 결정입도 균일화와 미세화 및 성분의 균질화가 나타났다(Fig. 9). 이후 핀 부위가 열후의 TR단조로 핀 부위는 급격한 결정입도 조대화가 그림 12-a에서 보여주는 바와 같이 일어났고 저어닐부위는 결정입도의 미세화가 일어나서 핀과 저어닐부위의 결정입도 차이를 나타내었다. 이러한 현상은 2차의 노말라이징에서도 미세화된 저어닐부위는 더욱 미세화 되어 퀴칭후에 작은 결정입도는 입계부위(grain boundaries), 구석진부위(corners)와 칼날부위(edges)를 따라서 페라이트가 핵생성되고 오스테나이트 조직으로 탄소확산이 일어나서 성장이 용이하여 펄라이트와 페라이트의 부피비율이 비슷한 양상을 보여준다. 반면에 핀 부위는 모상 오스테나이트 결정입도의 조대화에 따라 초석 페라이트가 핵생성되어 성장할 수 있는 곳은 결정입계와 결정 내부이나 본 시편의 미세조직은 결정입계를 따라서 형성되어 있다⁶⁾. 이와 같이 서로 다른 초석 페라이트의 형성 때문에 핀과 저어닐부위의 경도값에 차이가 있으며 본 실험결과와 일치한다. 이와 같은 핀(조대화한 결정립)과 저어닐부위(미세화된 결정립)의 경도 차이(결정입도 차이)를 해소하기 위한 유일한 열처리

공정은 노말라이징→TR단조→퀵칭이었다. 전술한 열처리 공정의 TR단조 직후까지는 변화가 없으나 2차의 노말라이징을 배제한 후에 퀵칭된 시험편의 미세조직은 그림 13에서 보여주는 바와 같이 오스테나이트화 결정입도는 작고 균일하며 또한 오스테나이트 결정입계를 따라서 석출된 페라이트의 입도도 작고 양도 잘 분포되어 있다. 이때의 경도값은 그림 6에서 보여주는 바와 같이 270HB 이상이다. 이는 이미 보고된 냉각곡선을 따라서 나타나는 경도값 274HB와 거의 일치하였다⁷⁾. 그림 13은 템퍼링이 끝난 후의 미세조직이나 퀵칭후의 미세조직과는 구별하기 어렵다. 왜냐하면 마르텐사이트 조직의 템퍼링과 달리 펄라이트-페라이트 미세조직은 펄라이트내의 세멘타이트의 구상화 또는 페라이트내의 고용화가 일어날 수 있으나 이러한 현상은 광학현미경으로 구별이 되지 못하기 때문이다⁸⁾. 그러나 템퍼링에 의한 연화 현상은 미세조직에 의해서 구별이 어렵지만 기계적인 성질 시험에 의해서 강도와 경도는 하락하고, 연신율, 단면 수축률과 충격에너지값은 증가하는 것을 볼 수 있었다.

전술한 2가지 열처리 공정 이외에 공정을 단축하여 경제성과 작업의 편리성을 얻고자 시도된 2가지 열처리 공정의 고찰 내용은 다음과 같다.

환봉단조후 노말라이징없이 곧바로 TR단조→노말라이징→퀵칭한 열처리 공정에서 TR단조후, 핀과 저어널부위의 미세조직은 그림 10-a에서 보여주는 바와 같다. 노말라이징처리후 TR단조한 경우(Fig. 12-a)와 비교시 핀부위의 결정입도가 상대적으로 컸다. 또한 핀과 저어널 부위의 결정입도 크기의 차이도 상당히 컸다. 그러나 노말라이징후에 미세조직은 핀과 저어널부위에서는 구별하기 어렵고 펄라이트와 페라이트의 결정입도와 분포도 비슷하며 기계적 성질도 비슷하였다(표 3). 그러나 퀵칭후의 미세조직은 모상 오스테나이트화 결정입도 크기도 불균일하고 모상 오스테나이트 결정입도가 큰 경우는 결정입계를 따라서 페라이트가 석출되었고, 작은 경우는 페라이트와 펄라이트의 혼합된 결정입도균이 형성되어 있다. 이러한 현상은 핀과 저어널 부위의 경도 차이에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났으나 표 3에서 보여주는 충격에너지값은 펄라이트와 페라이트의 작은 결정입도균이

모여 있는 핀 부위의 충격에너지값이 높은 것을 보여주며 이는 결정입도가 작을수록 충격에너지값이 높은 것과 일치하였다.

마지막으로 시도된 TR단조→퀵칭 열처리 공정은 가장 단순한 공정으로 퀵칭후의 핀과 저어널 부위의 미세조직 차이는 표 3에서 보여주는 바와 같이 기계적 성질에 변화를 주지 못한 것으로 나타났다. 후술한 2가지 열처리 공정은 모상 오스테나이트 결정입도의 불균일로 인한 펄라이트와 페라이트 결정입도균형성으로 전술한 열처리 공정에서 얻은 경도값보다 낮은 값을 얻은 것으로 생각되며 본 크랭크샤프트 열처리 공정에 적합하지 않은 것으로 나타났다.

4.2 미세조직

4.2.1 열처리 공정의 영향

열처리 공정 중에 퀵칭전, 오스테나이트화 온도는 펄라이트와 페라이트 미세조직의 결정입도와 구성비를 결정하므로 매우 중요하다^{9~13)}. 오스테나이트화 온도와 결정입도의 관계는 결정입도가 미세화한 경우에 어떤 온도 구간에서 갑자기 결정입도가 성장하고, 결정입도가 조대화한 경우는 온도가 상승할 때 일정한 성장 속도를 유지하고 있다⁹⁾. 이와 같은 현상은 크랭크샤프트 제작 공정중 TR단조 전에 핀을 가열하기 때문에 핀과 저어널부위의 결정입도 차이가 나타나며 이는 오스테나이트화 온도와 시간에 따라서 작아질 수 있으며 이러한 차이의 해소는 오스테나이트화 전의 결정입도 크기와 냉각 속도에 의존하며 또한 퀵칭후의 기계적 성질에 영향을 미친다. 본 실험에서 이러한 현상이 밝혀졌다. 즉, 1차의 노말라이징→TR단조→2차의 노말라이징→퀵칭, 노말라이징→TR단조→퀵칭, TR단조→퀵칭, TR단조→노말라이징→퀵칭의 4가지 열처리 공정에서 보여주는 퀵칭전 핀과 저어널부위의 결정입도 크기는 서로 다르다. 따라서 퀵칭전의 핀과 저어널부위의 결정입도 크기는 퀵칭후 기계적 성질을 결정하는데 중요한 인자라 생각된다. 다음의 실험 결과에서 보여주듯이 그림 11-a와 그림 11-b의 미세 조직은 오스테나이트화 온도와 결정입도 크기와 관계 보여준다. 900°C와 950°C에서 유지한 후 서냉하여 미세 조직을 보면 전자의 온도에서는 결정 성장이 느리고 후자의 온도에서는 결정 성장이 빨리 일어난 것을 확인할 수 있었다. 900°C에서 결정입도가 ASTM#7~8정도

이고 950°C인 곳에서 결정입도가 ASTM#2~3인 미세조직과 TR단조 직후의 핀 부위의 결정입도 크기를(Fig. 12-a) 비교하여 볼 때 본 크랭크샤프트 핀과 저어널부위의 적절한 결정입도를 추정할 수 있었다. 다음으로 초기 결정입도 크기의 중요성과 함께 냉각속도는 C-곡선의 Nose를 지나야 한다. 이때 펄라이트-페라이트 혼합 조직을 갖는 핀과 저어널부위의 경도값은 270HB로 보고된 값과 일치한다⁷⁾. 그리고 오스테나이트화 온도는 탄소량에 의존하며 탄소 함량이 0.46%일 때는 880°C, 탄소 함량이 0.42%일 때는 920°C로 A₃온도보다 100°C 상향시킨 온도가 적절한 것으로 나타났으며 이는 A₃온도가 탄소량 증가에 따라서 감소하는 것과 일치하는 경향을 보였다. 끝으로 오스테나이트화 유지 시간은 크랭크샤프트의 저어널 지름에 의존하는 것으로 나타났다. 따라서 본 크랭크샤프트의 기계적 성질을 결정하는 미세조직을 위한 주요 인자는 결정입도 크기, 냉각 속도, 오스테나이트화 온도와 유지 시간에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

TR단조시 환봉 핀 부위만의 개별 열처리를 위한 고주파 열처리로 설비로 바꾼 후에 퀴칭 전 미세조직은 핀 부위는 조대화된 결정립을 저어널부위는 미세화된 결정립을 보였다. 이와 같은 미세조직의 차이를 해소하기 위한 실험결과는 다음과 같은 결론을 얻었다. 가장 적합한 열처리 공정은 노말라이징→TR단조→퀴칭→템퍼링공정이었다. 그리고 기계적 성질에 영향을 주는 인자는 TR단조 후, 퀴칭시의 오스테나이트 결정입도, 냉각 속도, 오스테나이트화 온도와 유지 시간이며 본 크랭크샤프트의 기계적 성질을 만족하기 위한 값은 다음과 같았다.

1) 핀과 저어널부위의 결정입도 크기는 전자가 ASTM# 2~3이고, 후자가 ASTM# 7~8이었다.

2) 냉각 속도는 냉각곡선이 C-곡선 Nose를 지날 시 경도값 270HB를 얻을 때와 일치하였다.

3) 오스테나이트화 온도는 A₃온도를 100°C 상회하는 온도로 탄소 함량에 증가에 따라서 하락하는 경향을 나타냈다. 즉, 0.42%일 때 920°C이고, 0.46%일 때 880°C를 나타내었다.

4) 오스테나이트화 유지 시간은 크랭크샤프트의 지름에 의존하였으며 23/30 Type은 7시간, 28/32 Type은 10시간이 적합하였다.

참 고 문 헌

1. 한국 선급, 선급및 강선 규칙 2편 재료및 용접, P44, 한국 선급 협회 대전(1994)
2. M. Nishihara and Y. Fukui, Fatigue Properties of full Scale Forged and Cast Steel Crankshafts, PP27, Kobe Steel Limited, Japan(1978)
3. B&W Specification for Forged Crankshafts A/S S44SY
4. Albert G. Guy, Physical Metallurgy for Engineers, PP253 Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Reading, Massachusetts (1962)
5. Robert M. Brick, Robert B. Gordon, Arthur Phillips, Structure and Properties of Alloys, 3rd. Ed. PP245, McGraw-Hill Book Company, New York(1965)
6. D.A. Porter, K.E. Easterling, Phase Transformations in Metals and Alloys, PP322, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., New York(1981)
7. 윤일성역, 금속 열처리 기술 편람 편집위원회편, 금속 열처리, 기술 편람 부록 1, P4 기전 연구사 서울(1976)
8. Edgar C. Bain, Harold W. Paxton, Alloying Elements in Steels, 2nd Ed., PP283, ASM Materials Park, Ohio 44073 (1966)
9. Leonard E. Samuels Optical Microscopy of Carbon Steels, PP279 ASM Metals Park, Ohio 44073(1980)
10. George Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, pp 164 ASM Metals Park, Ohio 44073 (1979)
11. Edgar C. Bain, Harold W. Paxton, Alloying Elements in Steels, 2nd Ed., PP119, ASM Materials Park, Ohio 44073 (1966)
12. A. Preece, J. Nutting and A. Hartley, J. Iron Steel Inst., 164, 37(1950)
13. O.O. Miller, Trans. Amer. Soc. Metals, 43, 260(1951)