

열간압연용 다합금계 백주철의 응고조직, 열처리조직 및 기계적성질에 관한 연구

류 성 곤

계명대학교 공과대학 재료공학과

A Study on the Solidification Structure, Heat-Treated Microstructure and Mechanical Property of Multi-Component White Cast Iron for Hot Forged Roller

Sung-Kon Yu

Dept. of Materials Engineering, Keimyung University, Taegu 704-701

(1998년 2월 19일 받음, 1998년 3월 11일 최종수정본 받음)

초 록 2.3%C-26%Cr-1%Ni-0.5%Mo 조성의 다합금계 고크롬백주철을 고주파유도용해로를 사용하여 주조한 후 응고조직, 열처리조직 및 기계적성질간의 상관관계를 연구하였다. 주방상태에서는 초정텐드라이트조직인 기지조직과 공정탄화물로 구성되어 있었으며 기지조직의 73%가 오스테나이트, 27%가 마르텐사이트조직이었다. 900°C에서 5시간동안 균질화열처리만 행한 시편의 경우, 기지조직은 거의 페라이트로 구성되어 있었으며 1100°C에서 불안정화열처리후 강제공냉시킨 시편의 경우, 유지시간에 따라 기지조직내의 잔류오스테나이트함량은 48.9~57.6%의 범위에 놓여 있었다. 주방상태 및 열처리시편 공히 마모량과 마모시간과의 관계가 직선적으로 얻어 졌는데 마모속도는 $2.77 \times 10^{-2} \sim 4.12 \times 10^{-2}$ mg/sec의 범위에 걸쳐 있었다. 주방상태의 시편이 내마모성이 가장 우수하였으며 균질화열처리만 행한 시편이 가장 열악하였다. 기지조직내 잔류오스테나이트함량의 비율이 높아짐에 따라 경도는 감소하였고 반면에 내마모성은 향상되었다. 이는 마찰마모시험시 접촉부위의 오스테나이트가 가공경화를 일으켜 마르텐사이트로 변태되었기 때문으로 사려된다.

Abstract Multi-component white cast iron of 2.3%C-26%Cr-1%Ni-0.5%Mo was prepared and heat-treated with three different methods(homogenizing, destabilizing followed by air hardening, homogenizing and austenitizing followed by air hardening) to obtain the specimens with different levels of retained austenite(V_r) in the matrix, and then the influence of the V_r on the abrasion wear resistance and the hardness were investigated. While the V_r were 73% in the as-cast specimen, most portion of the matrix were ferrite in the specimens homogenized at 900°C for 5hr. In the specimens destabilized at 1100°C and hardened by fan-air cooling, the V_r ranged from 48.9% to 57.6%, depending upon the holding time. Linear relationship between wear loss and wearing time was given in all the specimens, and the wear rate(R_w :mg/s) ranged from 2.77×10^{-2} to 4.12×10^{-2} . The lowest R_w , that is, the highest abrasion wear resistance, was obtained in the as-cast specimen and the lowest one in the homogenized specimen. The R_w decreased with an increase in the V_r , due to the transformation of retained austenite to martensite during wear test. While the range of micro-hardness was from 358 HV to 756 HV, that of macro-hardness was from 529 HV to 785 HV due to the presence of eutectic carbides. The highest macro and micro-hardness were obtained in the specimen heat-treated by homogenizing at 900°C for 5hr and austenitizing at 1050°C for 2hr followed by fan-air cooling. The as-cast specimen showed the lowest hardness because of the absence of secondary carbides and of very less martensite. Mutual relationship among R_w , V_r and hardness showed good correspondence.

1. 서 론

열간압연용을 사용하는 제철소에서는 제조기술의 향상과 제조비용의 저감등이 항상 요구되고 있다. 인건비 및 전력비를 제외하면 제조장치에 있어서 내마모부재의 소모는 열간압연재의 제조비용에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 내마모부재인 열간압연용은 내마모성이 우수해야 하며, 또한 잘 깨어지지 않아야 한다. 전자의 특성은 경도 및 마찰마모, 또 후자의 특성은 강도 및 인성과 관계가 있다. 이러한 기계적 특성에 주목하여, 예전에는 아다마이트(과공석 Ni

-Cr강)를 재료로 한 롤이 사용되어져 왔지만, 유럽에서 고경도의 M_7C_3 형 공정크롬탄화물을 정출시켜 우수한 내마모성을 갖는 다합금계고크롬백주철롤이 개발되어 종전의 과공석 Ni-Cr강을 대체하게 되었다. 다합금계고크롬백주철은 초정 및 공정으로 정출되는 탄화물이 기지조직중에 분산되어 있는 복합 재료로서 이 재료의 기계적 성질은 기지조직 및 탄화물의 형상과 분포 상태에 영향을 받기 때문에 정출탄화물과 기지조직의 형태를 제어할 필요가 있다. 통상 다합금계고크롬백주철에 있어서 기지조직의 제어는 균질화처리, 불안정화 열처리 및 austenitizing 열처리를 통하여

행하여지고 있다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 열간압연물의 재료로서 널리 사용되고 있는 2.3%C-26%Cr-1%Ni-0.5%Mo 조성의 다합금계고크롬백주철에 있어서 응고조직, 열처리조직 및 기계적 성질에 관한 상호영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 주조모형의 제작

모형은 aluminum을 사용하였으며 match plate형태로 만들어 시편의 상, 하 형상을 분리면의 양쪽에 붙였다. 수직탕구는 상형에, 탕구저는 하형에 그리고 탕도 및 탕구는 분할면에 각각 설치하였다.

2.2 주형의 제작

주형은 pep-set을 이용하여 만들었으며 하나의 Y Block에서 50mm×50mm×5mm크기의 마모시편을 6개씩 얻었다.

2.3 합금설계

본 실험에 사용된 합금의 조성은 현재 열간압연물의 재료로서 널리 사용되고 있는 2.3%C-26%Cr-1%Ni-0.5%Mo의 다합금계고크롬백주철을 사용하였다.

2.4 용해작업

MgO로 lining된 15kg 용량의 고주파 유도용해로를 사용하여 용해작업을 행하였다. 계량된 장입재를 유도용해로에 장입하여 온도를 1650℃까지 승온시켜 용해시킨 후 예열된 ladle에 용융금속을 부어 1550℃에서 주형에 주입시키고 발열체를 뿌린 후 상온까지 그대로 냉각시켰다. 냉각 후 주형을 해체시켰으며 shot blaster를 사용하여 잔사를 제거시켰다. 사용된 장입재의 화학조성은 표 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of charge materials .

Charge Material	Chemical Composition(%)						
	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	Fe
Sorel Metal	4.35				0.009	0.18	bal
Steel Scrap	0.20				0.40	0.10	bal
Ferro-Cr	0.032	61.9				0.68	bal
Ferro-Mo	0.029		62.0			0.72	bal
Ni				100			

2.5 조직관찰

적당한 크기로 절단된 시편을 plastic coldmounting시킨 후 100, 320, 400, 600 mesh의 순서로 연마시켰으며 다시 0.3 μ m alumina powder로 미세 연마 후 Villela's reagent로 부식을 시켰다. 조직관찰은 광학 및 주사전자현미경을 사용하였다.

2.6 열처리

열처리는 세가지 방법으로 행하였는바 (1) 주방상태의 시편을 1100℃에서 2, 5, 8hr동안 각각 불안정화열처리후 fan air cooling을 실시한 것, (2) 주방상태의 시편을 900℃에서 5hr동안 균질화 시킨 후 다시 1100℃에서 2, 5, 8hr동안 각각 austenitizing 열처리후 fan air cooling을

실시한 것, (3) 주방상태의 시편을 900℃에서 5hr동안 균질화 시킨 후 다시 1050℃에서 2hr동안 austenitizing 열처리후 fan air cooling을 실시한 것으로 구분할 수 있다.

2.7 잔류오스테나이트의 측정

주방상태 및 열처리를 행한 시편의 잔류오스테나이트량은 X-선 회절장치를 이용하여 측정하였다. 시편을 100, 200, 400, 600mesh의 연마지로 연마한 후 0.3 μ m alumina powder로 최종연마를 행하였다. Mo-K α 선을 target로 사용했으며 사용조건은 표 2와 같다. 다합금계고크롬주철은 열류방향으로 지향성 응고를 하며 응고방향에 특성의 결정면이 배치되기 때문에 절단방향에 따라 γ (austenite), α (ferrite or martensite)의 결정면의 종류가 달라진다.^{2,3)} 잔류오스테나이트량은 γ 와 α 의 특정 결정면[예를 들면 γ (311), γ (220), α (200), α (220)]에서의 회절 X선 강도를 측정하기 때문에 그 측정치는 시료의 절단방향에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 이방성이 강한 시료의 γ 량 측정방법으로써 R.L Miller 및 C.Kim 등이 제안한 방법을 적용시켰다.^{4,5)} 즉 시료를 시료 holder내에서 회전시킴과 동시에 시료 holder와 X선의 회절면과의 교선을 축으로써 이동시켜 γ 및 α 의 평균 X선 강도를 측정하여 잔류오스테나이트량을 결정하였다.

Table 2. X-ray diffraction condition in the measurement of retained γ .

Parameter	Value	Parameter	Value
Acc Voltage (Kv)	50	Divergence Slit()	1
Prove Current (mA)	30	Goniometer Receiving Slit(mm)	1.5
Characteristic X-ray	Mo-K α	Scattering Slit(°)	1
Filter	Zr	Monochromator Receiving Slit(mm)	-
Gonio Speed (°/min)	0.5	Chart Speed (mm/min)	20
Time Constant(sec)	1	2 θ range(°)	24~24

2.8 마모시험

마모시험기의 개략적 구조도가 그림 1에 나타나 있다. 120 mesh의 SiC마모지가 감긴 마모륜에 하중을 1kg부과해 50mm×50mm×5mm 크기의 시편과 접촉시킨 후 시편은 왕복운동을 시키고 마모륜은 0.9°/sec의 속도로 360°회전(1 revolution)시킨 후 시편의 무게감소를 측정하였으며 이 작업을 8회 반복하였다. 마모감량의 측정은 0.1mg까지 측정가능한 정밀전자저울을 사용하였다.

2.9 경도측정

경도는 Vicker's 경도계를 사용하여 측정하였으며, macro 및 micro경도를 측정하였다. Macro경도는 30kg하중으로 기지조직 + (공정탄화물 및 2차탄화물)을 측정하였으며 micro경도는 100g의 하중으로 2차탄화물을 포함한

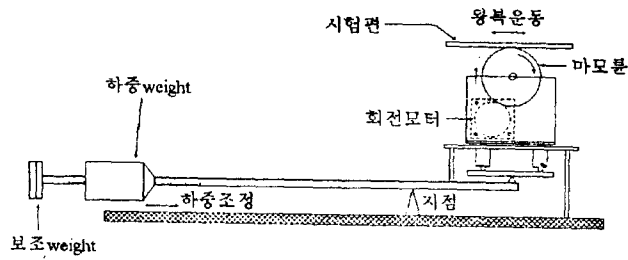


Fig. 1. A schematic drawing of abrasion wear tester .

기지조직만 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

3.1.1 탄화물 및 기지의 응고조직

2.3%C-26%Cr-1%Ni-0.5%Mo 조성의 주방상태 및 열처리 후의 조직사진이 사진 1~사진 3에 나타나 있다. 사진 1에서 보면 주방상태의 경우, 공정탄화물과 초정 dendrite의 기지조직으로 구성되어 있음을 알 수 있는데, 기지조직의 약 73% 정도는 잔류오스테나이트였으며 나머지 27%는 마르텐사이트조직이었다. 반면, 균질화열처리를 행한 시편의 경우 공정탄화물의 형상은 주방상태의 그것과 동

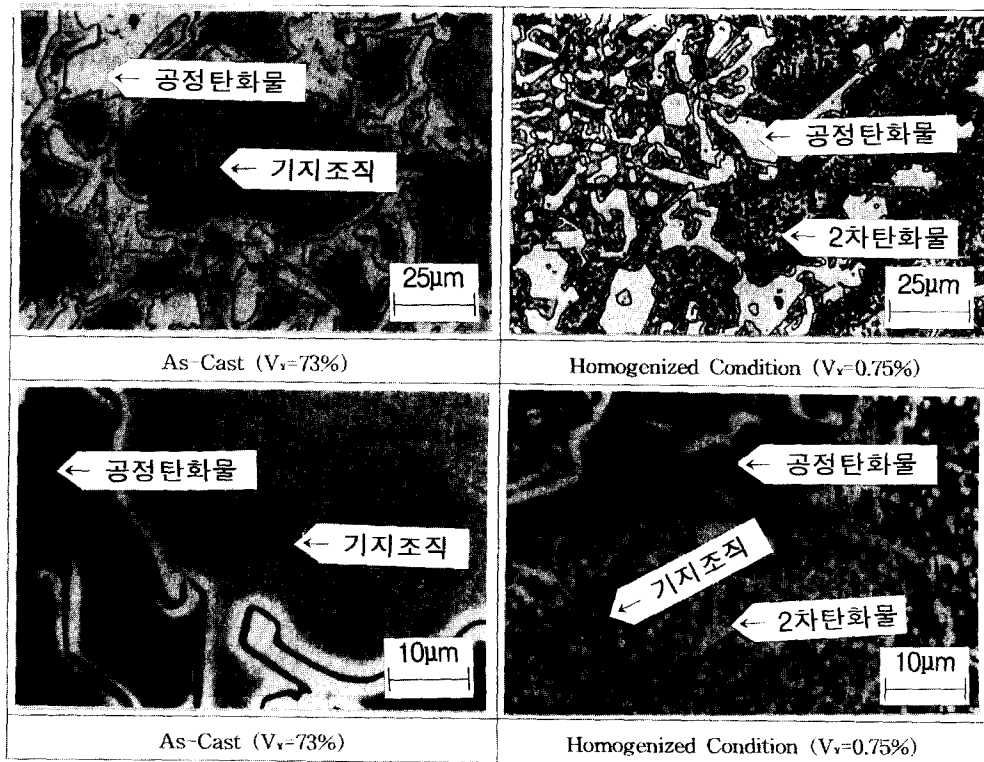


Photo. 1. Optical(top) and SEM(bottom) microstructures of as-cast and homogenized specimen .

일하였으나 기지조직은 거의 ferrite로 구성되어 있었으며 기지조직내에 미세한 2차탄화물이 관찰되었다. 또한 이 두 시편의 SEM 사진이 사진 1의 하단에 나타나 있다. 사진 2 및 3은 앞서 기술한 (1), (2) 및 (3)의 방법으로 열처리를 행한 경우에 있어서의 광학 및 SEM 사진을 보여주고 있다. 공통적으로 공정탄화물 및 미세한 2차탄화물이 존재하며, 1100℃에서 열처리를 행한 경우는 기지조직이 잔류오스테나이트 및 마르텐사이트로 구성되어 있었으나 1050℃의 경우 기지조직내의 잔류오스테나이트함량은 마르텐사이트 함량에 비해 무시할 정도로 작았다.

3.1.2 잔류오스테나이트함량 (V_r)의 측정

주방상태 및 열처리후의 각 시편에 있어서 V_r가 표 3에 나타나 있다.

3.1.3 마모시험

3.1.3.1 마모시험의 결과

주방상태 및 열처리 후에 있어서 마모시험의 결과가 그림

Table 3. Measured values of retained austenite in the experiment.

Specimen Type	V _r (%)	Sample	V _r (%)
As-Cast	73	Homogenized	0.75
1100℃ -2hr-FAC	48.9	Homo+ (1100℃-2hr-FAC)	57.5
1100℃ -5hr-FAC	57.6	Homo+ (1100℃-5hr-FAC)	56.8
1100℃ -8hr-FAC	57.6	Homo+ (1100℃-8hr-FAC)	36.7
		Homo+ (1050℃-2hr-FAC)	0.3

2에 나타나 있다.

그림 2에 나타난 바와 같이 마모량과 마모시간과의 관계가 직선적임을 알 수 있다. 마모량과 마모시간이 직선적으로 변화할 경우에는 마모율 (R_w:mg/sec)을 사용하여 마모

의 정도를 비교하면 편리하며 이는 그림 2의 직선에 있어서 기울기에 해당된다. 그림 2에서 F의 경우 다른 시편에 비해 마모량이 특히 많음을 알 수 있는데, 이것은 다른 시편들의 기지조직이 잔류오스테나이트와 마르텐사이트로 구성되어 있음에 반하여 F시편의 경우 균질화처리만 행한 관계

로 대부분 ferrite로 구성되어 있기 때문이다.

3.1.4 경도의 측정

Vicker's 경도계를 사용하여 macro경도 및 micro경도를 측정한 결과가 표 4에 나타나 있다.

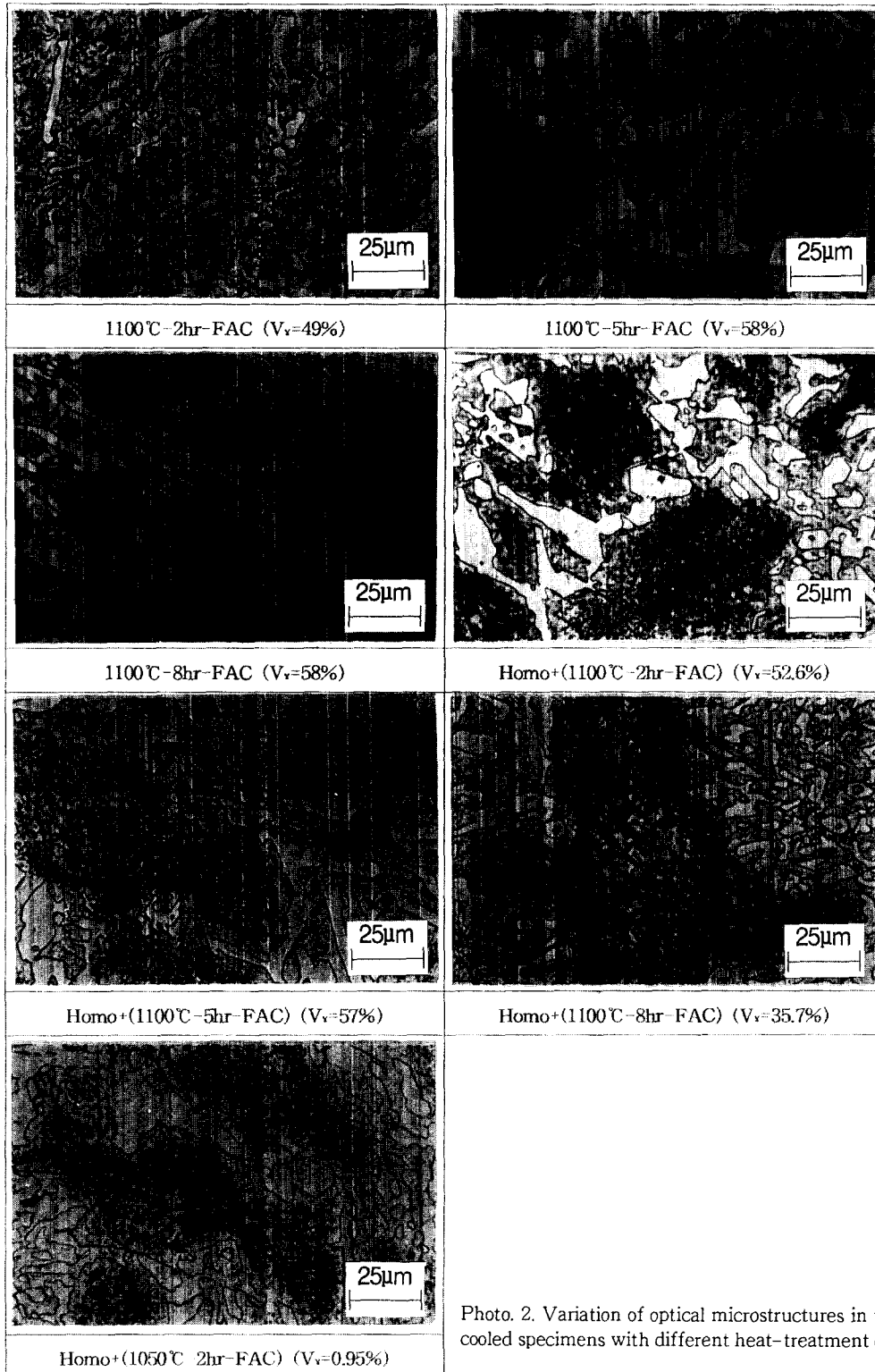


Photo. 2. Variation of optical microstructures in the forced air-cooled specimens with different heat-treatment conditions .

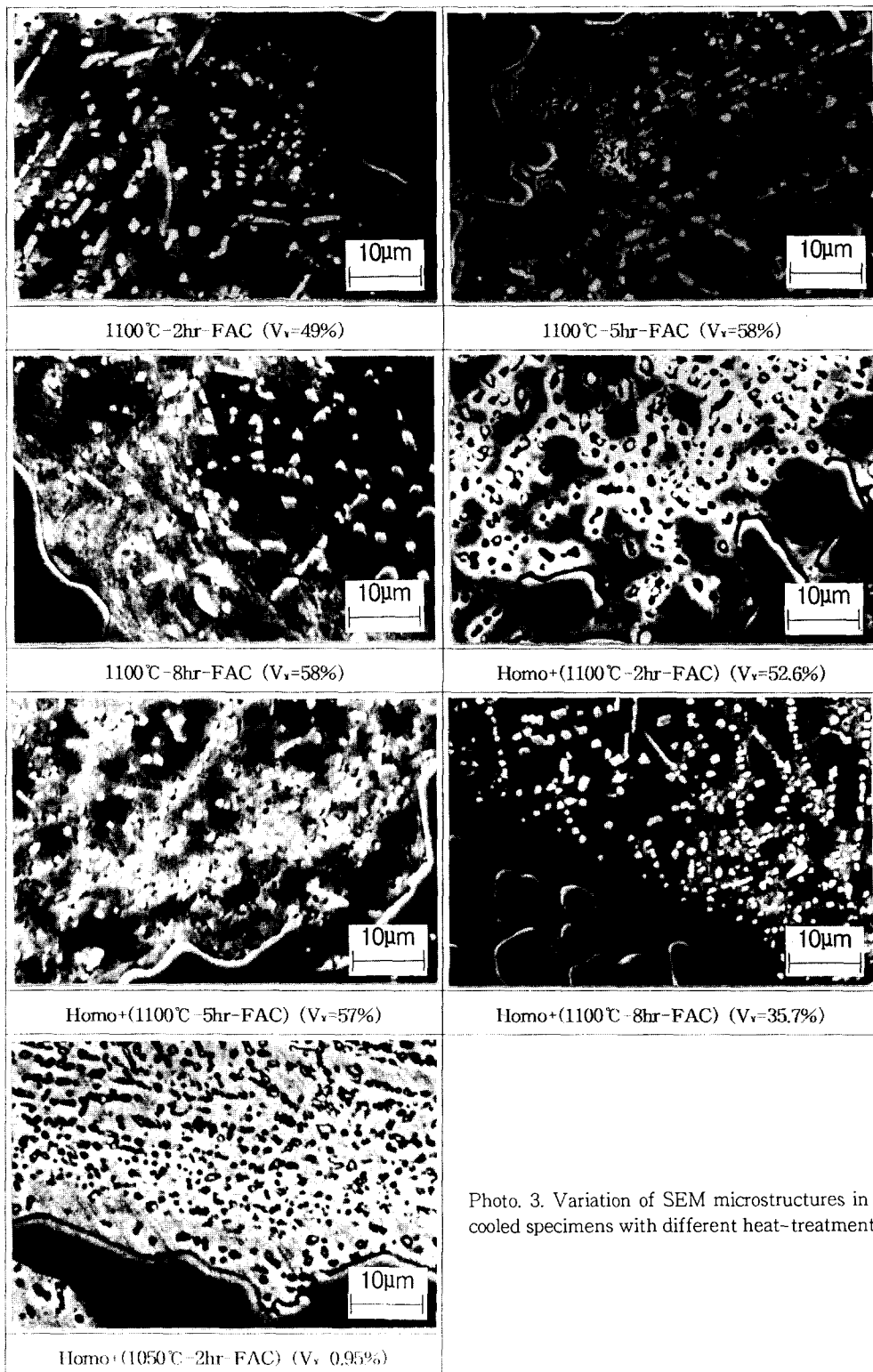


Photo. 3. Variation of SEM microstructures in the forced air-cooled specimens with different heat-treatment conditions .

3.2 고찰

3.2.1 열처리시간과 잔류오스테나이트함량 (V_v) 과의 관계

열처리시간과 V_v의 관계가 그림 3 및 4에 나타나 있다. 그림 3에서 살펴보면 주방상태에서 V_v가 약 73% 정도인데 반하여 1100°C에서 2시간 불안정화열처리를 행하였을

경우 48.9%로 감소한 것을 알 수 있다. 그 이유는, 주방상태의 경우 응고후 냉각속도가 빠르기 때문에 C 및 Cr과 같은 원소들이 탄화물로서 전부 석출되지 못하고 기지조직내에 고용되어 있기 때문에 V_v가 높게 나타난 반면, 1100°C에서 불안정화열처리를 행함에 따라 기지조직내에 고용되어 있던 C 및 Cr이 2차탄화물로서 석출되므로 Ms점이 상

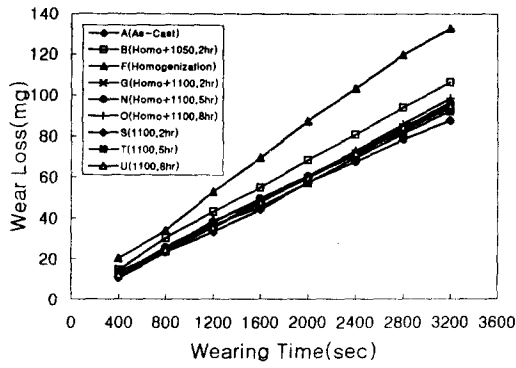


Fig. 2. The relationship between wearing time and wear loss.

Table 4. Vicker's hardness of 2.3C-26Cr-1Ni-0.5Mo cast iron.

	Hardness(HV)	
	Macro	Micro
As-Cast	529.4	358
Homogenized	656	641
1100-2hr-FAC	629	490
1100-5hr-FAC	637	531
1100-8hr-FAC	656	532
Homo+(1050-2hr-FAC)	785	756
Homo+(1100-2hr-FAC)	652	575
Homo+(1100-5hr-FAC)	669	518
Homo+(1100-8hr-FAC)	726	583

승하여 V_r 가 감소한 것으로 사려된다.^{6,7)} 그리고 2시간에서 5시간 및 8시간으로 유지시간이 증가하여도 V_r 의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 불안정화열처리온도가 높기 때문에 2시간에서 고용된 원소들이 이미 평형농도에 다다른 것으로 사려된다. 그림 4는 균질화열처리를 한 후 다시 1100℃에서 2, 5, 8hr동안 각각 austenitizing 열처리를 행한 시편의 V_r 를 나타내고 있다. 균질화열처리만 행한 경우에 있어서는 V_r 가 0.75%로 나타났는데 이것은 균질화열처리시 냉각속도가 느리기 때문에 C 및 Cr이 탄화물로서 거의 대부분 석출하여 기지조직이 ferrite로 구성되어 있기 때문이다. 그 후 1100℃에서 austenitizing 열처리를 다시 행하여 주면 석출되었던 2차탄화물이 기지조직내에

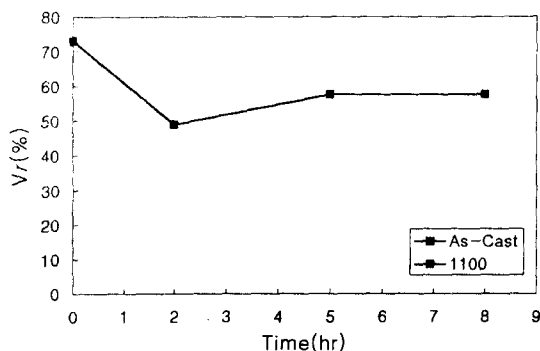


Fig. 3. The relationship between holding time and volume fraction of retained austenite in the heat-treatment method(1).

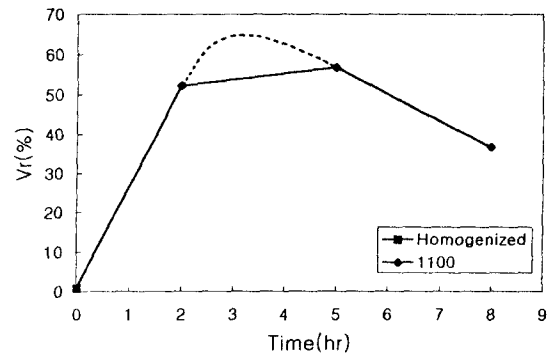


Fig. 4. The relationship between holding time and volume fraction of retained austenite in the heat-treatment method(2).

일부 재용해되며 fan air cooling을 행함에 따라 기지조직의 약 57.5% 정도가 잔류오스테나이트로 존재하게 된다. 그 이후 5시간까지 V_r 가 약간의 증가를 보인 후 다시 감소하였는데 이것은 그림 4에 점선으로 표시된 바와 같이 관성의 법칙으로 유지시간의 증가에 따라 2차탄화물의 기지조직내 고용량이 평형농도를 초과하여 최대점에 도달한 후 다시 감소함에 따른 영향으로 여겨진다.

3.2.2 열처리시간과 경도와와의 관계

주방상태의 시편을 1100℃에서 다시 불안정화열처리를 행한 경우에 있어서 열처리시간과 경도와와의 관계를 살펴보면 그림 5와 같다. 그림 5의 경우, 주방상태에서 불안정화열처리를 행함에 따라 경도의 상승을 나타내고 있는데 이것은 주방상태에서 약 73% 정도인 V_r 가 불안정화열처리로 인하여 약 50% 정도로 감소하고 감소된 잔류오스테나이트의 일부가 마르텐사이트로 변태하여 경도상승을 초래한 것으로 사려된다. 또한 2차탄화물의 석출 역시 경도상승의 또 다른 원인으로 여겨진다. 유지시간의 변화에 따라 macro 및 micro hardness는 그다지 큰 변화를 보이지 않았는데 그 이유는 그림 3에 나타난 바와 같이 잔류오스테나이트의 함량이 시간에 따라 일정하고 또한 2차탄화물의 석출량도 2시간 유지하는 변화하지 않기 때문으로 사려된다. 또한 macro hardness가 micro hardness에 비해 높은 것은 경도가 높은 공정탄화물이 macro hardness측정시 포함되었기 때문이다. 그림 6의 경우는 균질화열처리를 행한 후

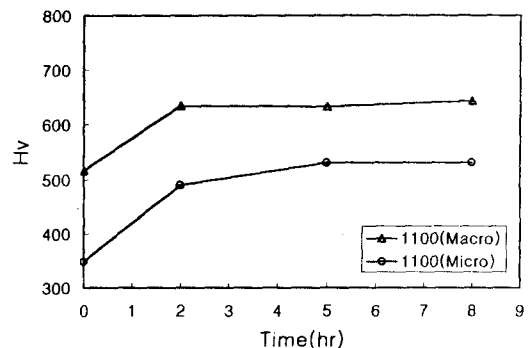


Fig. 5. The relationship between holding time and hardness in the heat treatment method(1).

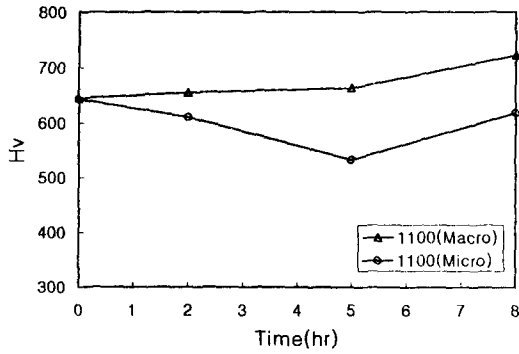


Fig. 6. The relationship between holding time and hardness in the heat treatment method(2).

austenitizing 열처리를 행한 것으로서 micro hardness의 경우 5시간까지 감소하다가 다시 증가하는 양상을 보여주고 있다. 이는 그림 4에서 보듯이 균질화된 시편을 austenitizing 시킴에 따라 이미 석출된 2차탄화물들이 기지조직내 다시 고용되어 그 함량이 줄어들었다가 관성의 법칙으로 다시 석출되어 micro hardness향상에 기여하기 때문으로 사려된다. 반면 macro hardness의 경우 공정탄화물의 함량이 경도증가에 중추적역할을 하기 때문에 5시간까지는 별 변화가 없다가 그 후 기지조직내의 2차탄화물 및 마르텐사이트의 영향으로 약간의 증가세를 나타내는 것으로 여겨진다.

3.2.3 잔류오스테나이트함량 (V_r), 경도 (HV) 및 마모 속도 (Rw) 의 관계

주방상태 및 열처리후의 각 시편에 있어서 V_r와 macro hardness의 관계를 살펴보면 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는 바와 같이 전체적으로 V_r의 증가에 따라 경도가 감소하고 있음을 알 수 있는데 이것은 오스테나이트가 마르텐사이트에 비해 비교적 연성조직이기 때문으로 사려된다. 주방상태 및 열처리 후의 각 시편에 있어서 V_r와 Rw와의 관계를 살펴보면 그림 8과 같다. 그림 8에서 살펴보면 V_r가 증가함에 따라 Rw가 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 내마모성이 증가하고 있음을 의미한다. 이것은 마찰마모시험시 비교적 연성조직인 오스테나이트조직이 SiC마모지와의 마찰로 말미암아 마르텐사이트조직으로 변태하여 내마모성이

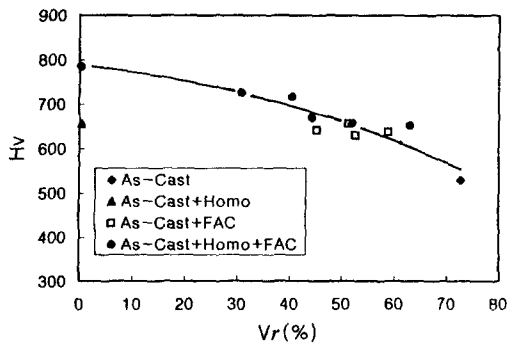


Fig. 7. The relationship between volume fraction of retained austenite and hardness.

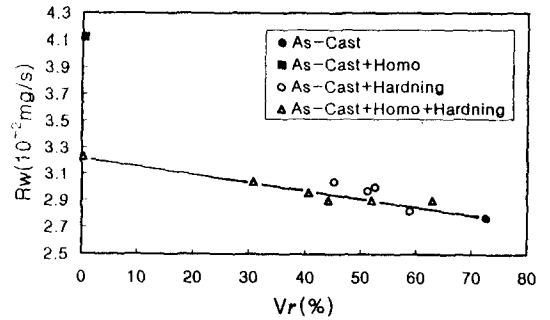


Fig. 8. The relationship between volume fraction of retained austenite and wear rate.

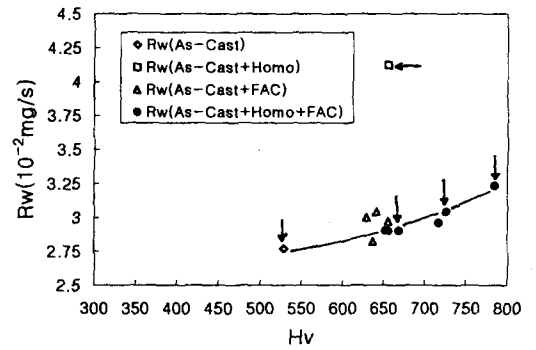


Fig. 9. The relationship between macro hardness and wear rate.

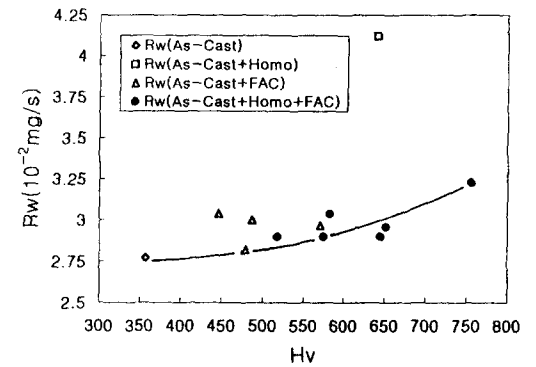


Fig. 10. The relationship of micro hardness and wear rate.

증가한 것으로 X-선 회절을 통해서도 증명되었다. 앞서 기술한 열처리조건에 따라 제작된 시편에 있어서 Rw와 macro 및 micro hardness의 관계를 살펴보면 그림 9 및 10과 같다.

그림 9를 살펴보면 경도가 증가할수록 마모속도 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 9에 '↓'로 표시된 부분을 왼쪽에서 부터 살펴보면 잔류오스테나이트함량이 각각 73%, 56.7%, 36.8%, 0.3%로서 V_r가 많은쪽이 경도가 낮으며 또한 Rw도 낮게 나타나 있음을 알 수 있다. 즉 V_r가 적어질수록 macro hardness는 크게 나타났으며 비례적으로 Rw 또한 크게 나타났다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 오스테나이트가 비교적 연성조직이기 때문에 V_r가 많을 경우 경도값은 낮게 나타나고 있으며 또한 마모시험을 행했을 경우 이 오스테나이트조직이 가공마르텐사이트조직으로 변태

하여 마모성능이 좋게 나타난 것으로 사려된다. '←'로 표시된 시편의 경우 다른 시편과는 상이한 성질을 나타내고 있는데, 이는 다른 시편들이 잔류오스테나이트 및 마르텐사이트로 구성되어 있는데 반하여 이 시편은 균질화열처리만 행한 시편으로서 기지조직이 대부분 ferrite로 구성되어 있기 때문이다. 그림 10에서 보듯이 micro hardness와 R_w 와의 관계의 경우에 있어서도 그림 9와 유사한 형태를 띄고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) 주방상태시편의 경우 기지조직은 73%의 잔류오스테나이트와 27%의 마르텐사이트로 구성되어 있었다.
- 2) 균질화열처리만 행한 시편의 경우 미세한 2차탄화물이 기지조직내에 석출됨에 따라 잔류오스테나이트량은 0.75% 정도이고 나머지는 ferrite로 구성되어 있었다.
- 3) 모든 시편에 있어서 마모시간과 마모량과의 관계는 직선적으로 나타났다.
- 4) macro 및 micro hardness는 잔류오스테나이트량의 증가에 따라 감소하였다.
- 5) 마모속도 (R_w)는 경도의 증가에 따라 증가하였다.
- 6) 마모속도는 마모시험시 오스테나이트가 마르텐사이트로 변화됨에 따라 감소하였다.

감사의 글

1. 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었습니다
2. 이 논문의 실험을 하는데 있어서 X-선 회절장치, 마모시험장치 등의 사용에 협조해 주신 일본 Kurume National College of Technology의 Matsubara교수님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. M.Kuwano, K.Ogi and A.Sawamoto, IMONO, **63** (7), 613, (1991)
2. Y.Matsubara, N.Sasaguri, Y.Honda, H.Q.Wu and M.Hashimoto IMONO, **66** (11), 815, (1994)
3. H.Q.Wu, N.Sasaguri, M.Hashimoto and Y. Matsubara, IMONO, **67** (1), 49, (1995)
4. R.L.Miller, ASM TRANS, **61**, 592, (1968)
5. C.Kim, HEAT TREATING, **2** (3), 43, (1979)
6. C.P.Tong, T.Suzuki and T.Umeda, IMONO, **62** (2), 130, (1990)
7. C.P.Tong, T.Suzuki and T.Umeda, IMONO, **62** (5), 344, (1990)