
 논문

오스템퍼링 처리가 열간압연롤용 NICI재 및 DCI재의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향

金宰瑄 · 吳錫重 * · 劉國鍾 ** · Tirta Andy*** · 白應律 ***†

AVL 코리아(주), *현대제철(주), **동부제철(주), ***영남대학교 신소재공학부

The Effect of Austempering Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of NICI and DCI for Rolls Used in Hot Rolling Mill

Jae-Jin Kim, Seok-Jung Oh*, Kook-Jong Yoo**, Tirta Andy***, and Eung-Ryul Baek***†

AVL Korea, *Hyundai Steel Co., **Dongbu Steel Co.,

***School of Materials Science & Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, 712-749 Korea

Abstract

The effect of austempering treatment on mechanical properties of nodular indefinite chilled iron(NICI) and ductile cast iron(DCI) was investigated. In microstructural observation, matrix phase(pearlite and ferrite) was changed to ausferrite after austempering treatment both DCI and NICI. In case of NICI, decomposition of cementite(Fe_3C) during austempering treatment was induced. After austempering treatment, mechanical properties such as hardness, tensile strength and impact toughness was improved in NICI and DCI. The wear resistance is slightly decreased because of decomposition of cementite during austempering treatment in NICI but impact toughness and strength is dramatically increased.

Key words : Nodular indefinite chilled iron (NICI), Ductile cast iron (DCI), Austempered ductile iron (ADI), Austempering treatment.

(Received October 3, 2009 ; Accepted November 8, 2009)

1. 서 론

NICI(Nodular Indefinite Chilled Iron)재는 뛰어난 내마모성과 저렴한 가격으로 인해서 제철소의 열간 선재 조압연 롤재료로 현재까지 널리 상용되고 있으며, 미세조직은 부피분율로 15~30%의 시멘타이트, 2% 내외의 구상 흑연, 그리고 나머지는 퍼얼라이트상으로 구성되어 있다. 그간 조압연 롤의 사용수명 증가를 위해서 NICI재의 미세조직 중에서 시멘타이트 상의 양을 점진적으로 증가시켜 내마모성을 증가시켜왔으나, 이로 인한 연성의 저하(연신율 0.2% 이하)로 사용 중에 롤 표면에서의 크랙 발생량 증가와 심지어는 롤 절손 사고까지 간혹 일어나고 있다[1~3]. 그리고 선재 압연 제품의 고품질화를 위해서는 보다 저온에서의 강압화를 추구하고 있고 동시에 생산성 향상을 위한 고속압연기술을 개발하고 있어 점차 선재 조압연롤이 받게될 부하량은 증가하는 추세여서 내마모성과 인성이 보다 개선된 압연롤재의 개발[4,5]을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 CO_2 시형 주조법으로 제조된 NICI재에 오스템퍼링(austempering) 열처리를 적용함으로써 NICI재의 기계적 성질(인장강도, 충격흡수에너지, 경도값, 내마모성)의 변화를 살펴보고자 했다. 아울러 DCI(Ductile Cast Iron)재의 경우도

NICI재의 비교재료로서 동일한 조건의 오스템퍼링 열처리를 하여 오스템퍼링 처리가 DCI재의 기계적 특성에 미치는 영향을 함께 살펴 보았다. 오스템퍼링 열처리를 DCI재에 적용할 경우에는 강도, 경도, 충격인성, 내마모성 등을 동시에 향상시킬 수 있는 것으로 널리 알려져 있다[6~14]. 이는 DCI재의 미세조직 중에서 구상흑연상을 제외한 전체 기지조직을 구성하게 되는 퍼얼라이트상과 페라이트상이 존재한 영역을 오스템퍼링 열처리에 의해서 고인성의 오스페라이트(ausferrite: acicular ferrite + high carbon austenite)상으로 변태시킬 수 있기 때문이다[7,10,14].

따라서 본 연구에서는 NICI재의 경우는 시멘타이트상을 포함하고 있다는 점 이외에는 DCI재의 구성상인 구상흑연, 퍼얼라이트상, 페라이트상을 모두 포함하고 있기 때문에, 오스템퍼링 열처리를 통해서 기지조직 중에서 퍼얼라이트상 및 페라이트상이 존재하는 영역을 고인성의 오스페라이트상으로 변태시켜 NICI재의 기계적 성질을 향상시키고자 했다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제조 및 오스템퍼링 열처리

고철, 선철, Fe-Si-Mg(45wt.%Si-5wt.%Mg-50wt.%Fe)과 필

†E-mail : erbaek@yu.ac.kr

요한 합금 원소들을 첨가하여 도가니에 장입 후 고주파 대기 유도로서 용해하고, 용탕의 출탕온도는 1380~1400°C로 하여 CO₂ 사형에 주입하여 Y-block 시편을 제조하였다. Y-block 시편의 도면은 Fig. 1과 같다. 시편 1은 시멘타이트를 25% 석출시키기 위해 합금을 설계하여 제조한 NICI재를 제조한 것이고 시편 2는 DCI를 제조한 것이다. 시편의 성분 분석은 발광 분광분석기(Emission Spectrometer)를 사용하여 분석하였으며, 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다.

시편의 오스테퍼링 열처리는 870°C에서 1시간 오스테나이트(austenite)화 한 후 300°C 염욕로에서 1시간 동안 등온변태 후 공냉하였다.

2.2 미세 조직 관찰

미세 조직은 시편을 연마 후 에칭액(3% Nital)으로 수 초간 에칭시킨 미세 조직 관찰 시편을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 그리고 미세 조직을 구성하는 각 상들의 분율은 영상분석기(image analyzer)를 이용하여 분석하였다.

2.3 경도 시험

전체 경도값은 로크웰 C 스케일(Rockwell C scale)로 7회씩 측정한 후, 최고·최저 값을 제외한 나머지 5회의 평균값을 취했고, 미세 조직상들의 미세 경도는 Micro Vickers 경도기로 같은 방법으로 평균을 구했다. Micro Vickers 경도의 압입 시간은 15초, 압입 하중은 300 g이다.

2.4 인장 및 충격 시험

인장시험에 사용된 인장 시험기는 Instron 8516이며 분당 1 mm로 연신하였다. 시편은 ASTM E8M sub-size로 제작하였다. Fig. 2는 인장 시험에 사용된 판상 시편의 도면이다.

충격 시험은 Charpy 충격시험기를 사용하였으며, 시편의 크기는 Fig. 3에 나타내었다.

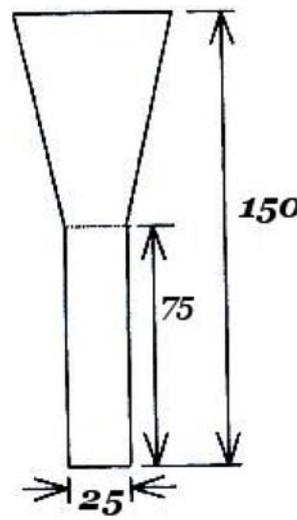
2.5 마모시험

마모 시험은 RWAT(Rubber Wheel Abrasive Tester)를 사용하였으며, 마모재로는 입자의 크기가 0.15~0.3 mm인 SiO₂를 사용하였고, 시험조건은 분당 회전수는 200rpm 이고, 하중은 20 Kg, 공급되는 모래량은 250~300 g/min, 시험 시간은 15분으로 하였다.

3. 실험 결과

3.1 미세조직

Fig. 4는 NICI재의 미세조직을 나타내는 것으로 Fig. 4(a),



(length: 110mm)

unit : mm

Fig. 1. Dimension of Y-block specimen.

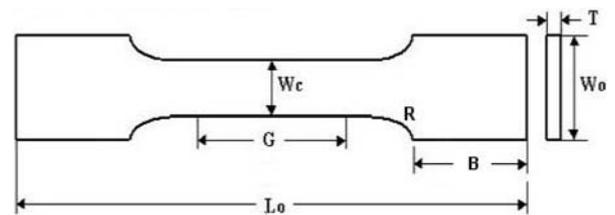


Fig. 2. ASTM E8M tensile specimen. Lo : 100, G : 25, Wc : 6, Wo : 10, T : 6, B : 28, R : 6 (mm)

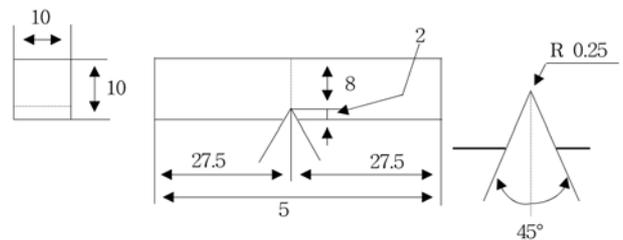


Fig. 3. Dimension of Charpy Impact Test Specimen (unit : mm).

(b)는 주방상태의 미세조직을 나타낸 것이고, Fig. 4(c), (d)는 오스테퍼링 처리후의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 4(a), (b)에 알 수 있듯이 NICI재의 주방 상태에서의 미세조직은 구상 흑연, 시멘타이트, 퍼얼라이트로 구성되어 있고, 각 상의 부피 비율은 구상 흑연 2%, 시멘타이트 25%, 퍼얼라이트 73%였다. Fig. 4(c), (d)에서 알 수 있듯이 오스테퍼링 열처리 후의 NICI

Table 1. Chemical compositions of NICI and DCI.

specimen	composition										
	CE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Mg
No.1(NICI)	4.0	3.13	2.62	0.05	0.059	0.009	0.01	0.0	0.003	0.02	0.04
No.2(DCI)	4.37	3.46	2.72	0.29	0.04	0.01	0.93	0.68	0.03	0.15	0.03

*CE: Carbon Equivalent

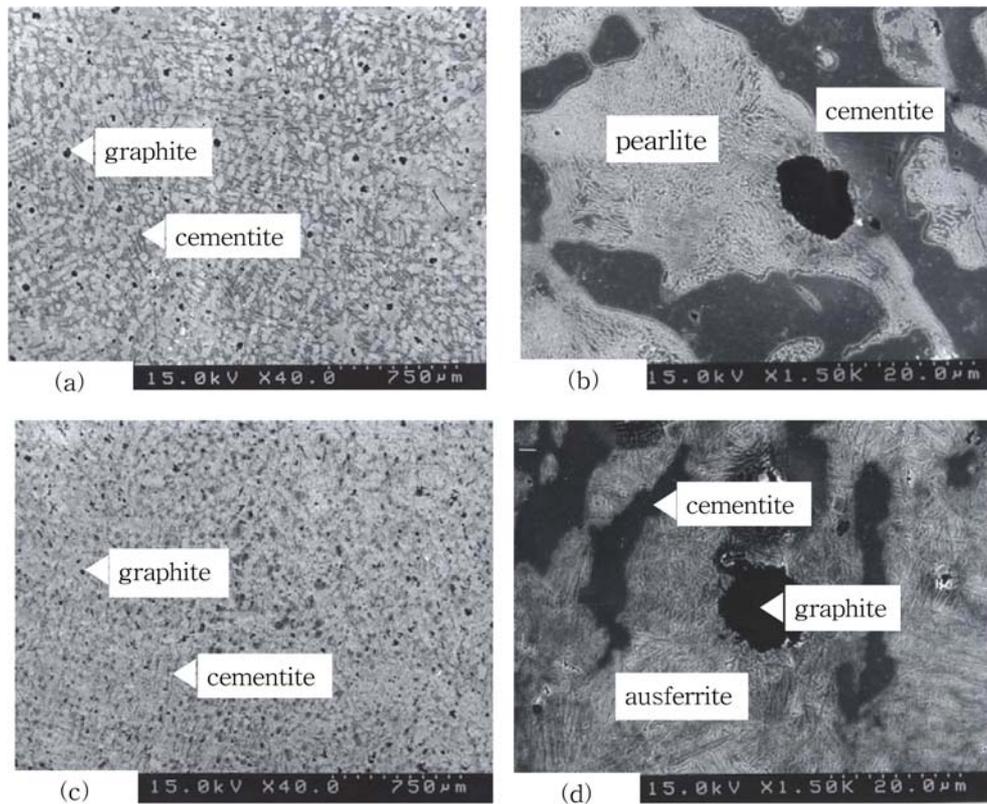


Fig. 4. SEM micrographs of specimen 1[NICI] (a), (b) as-cast, (c), (d) heat treated (austenitizing: 870°C, 1hr., tempering: 300°C, 1hr. in salt).

재의 미세조직은 구상 흑연, 시멘타이트, 오스페라이트로 이루어져 있으며, 부피분율은 구상 흑연 4.5%, 시멘타이트 11.5%, 그리고 잔류 오스테나이트상을 포함한 오스페라이트상은 84%였다. 여기서 미변태 잔류 오스테나이트상의 정량 분석은 이루어지지 않았다.

한편 한가지 주목할 사실은 오스텨퍼링 열처리에 의해서 오스페라이트상이 새로이 생성된 것 이외에 주방조직에서 존재했던 25%의 시멘타이트상이 11.5%로 감소하였으며, 흑연은 2%에서 4.5%로 증가했다는 사실이다. 870°C에서 1시간 동안 유지하는 오스테나이트화 도중에 고온에서 불안정한 시멘타이트상은 분해되면서 탄소성분이 일부는 오스테나이트상으로 고용되고 일부는 Fig. 4(c)에서 보이는 바와 같이 무수히 작은 검은 점으로 보여지는 흑연으로 정출된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 DCI재의 미세조직을 나타내는 것으로, Fig. 5(a)는 주방상태의 미세조직을 나타낸 것이고, Fig. 5(b), (c)는 오스텨퍼링 처리 후의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)를 살펴보면 페라이트, 페라이트, 구상 흑연으로 구성되어 있으며, 각 상의 부피 분율은 페라이트가 63%, 구상 흑연이 12%이고, 페라이트가 25%였다. 오스텨퍼링 처리 후의 미세조직인 Fig. 5(b), (c)를 살펴보면 구상 흑연이 12%이고, 1µm이내의 매우 미세한 시멘타이트 몇 개를 제외하고는 전부 미변태 잔류 오스테나이트상과 오스페라이트로 구성되어 있음을 알 수 있다.

3.2 경도

Table 2에 NICI재와 DCI재의 오스텨퍼링 처리 전·후의 로

크웰 경도값(HRC)을 나타내었다. NICI재의 경우에는 오스텨퍼링 열처리 전인 주방상태의 경도값은 HRC 47이었으며, 열처리 후에는 HRC 50.4로써 경도값이 HRC로 3.4 정도 증가하였다. 오스텨퍼링 열처리로 인해서 부피분율로 72%를 차지하는 페라이트상(Hv 350)이 보다 경도값이 높은 오스페라이트상(Hv 480)으로 바뀌었음에도 불구하고 경도값이 HRC로 3.4 정도 밖에 증가하지 못한 것은 고경도의 시멘타이트상(Hv 870 내외)의 양이 열처리로 인해서 25%에서 11.5%로 상당히 많이 줄어들었기 때문이다.

반면에 DCI재의 경우에는 오스텨퍼링 열처리 전인 주방상태에서는 HRC 19.7로 낮은 경도값을 보였으나 오스텨퍼링 열처리 후의 경도값은 HRC 49.3으로 2.5배 증가하였다. DCI재의 오스텨퍼링 열처리 후의 경도값의 급격한 상승은 순전히 경도값이 낮은 페라이트상 및 페라이트상이 경도값이 높은 오스페라이트상으로 많은 양이 대체되었기 때문이다.

3.3 인장 강도 및 충격인성

Table 2에 NICI재와 DCI재의 오스텨퍼링 처리 전·후 인장 강도값을 나타내었다. NICI재의 경우에는 오스텨퍼링 열처리를 한 결과 38 kg/mm²에서 64 kg/mm²로 증가되었으며, DCI재의 경우도 오스텨퍼링 열처리하기 전에는 73 kg/mm²이었으나 열처리 후에는 153 kg/mm²으로 상당히 증가하였다. NICI재와 DCI재 모두 오스텨퍼링 처리 후 인장강도가 2배 정도 증가된 것으로 보아서 오스텨퍼링 열처리가 이들 재료의 인장강도 개선에는 확실한 효과가 있음을 보여주었다.

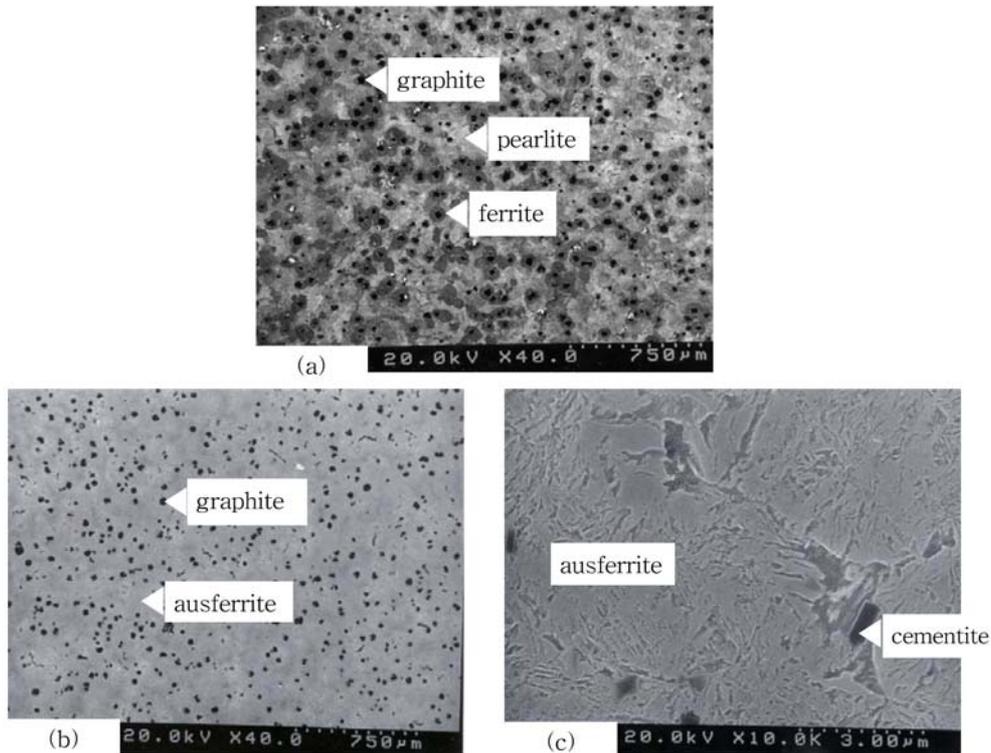


Fig. 5. SEM micrographs of specimen 2[DCI]. (a) as-cast (b), (c) heat treated(austenitizing: 870°C, 1hr., tempering: 300°C, 1hr. in salt).

Table 2. Mechanical properties of NICI and DCI.

specimen	mechanical properties				
		Tensile strength (kg/mm ²)	Toughness (10 ⁻³ J/mm ³)	Wear resistance (kJ/mm ³)	Hardness (HRc)
NICI	as cast	38	2.3	11.1	47
	heat treated	64	4	8.9	50.3
DCI	as cast	73	3.8	2.47	19.7
	heat treated	153	7.6	3.49	48.7

NICI재와 DCI재의 오스템퍼링 열처리 전·후의 충격흡수에너지값을 Table 2에서 살펴보면 NICI재는 오스템퍼링 열처리를 한 결과 2.3J에서 4.0J로 증가하였고, DCI재는 주방상태에서는 3.8J이었으나 오스템퍼링 열처리 후에는 7.6J로 증가하였다. NICI재와 DCI재 모두 오스템퍼링 처리 후 인장강도가 2배 정도 증가된 것과 유사하게 충격흡수에너지값 또한 2배 정도 증가하였다.

통상적으로 철강재료에 있어서 인장강도값이 증가하면 내충격 특성은 저하하는 것이 일반적인 현상이나, 알려진바와 같이 오스템퍼링 열처리가 DCI재에서 강도 및 충격인성을 동시에 개선시킨다는 사실과 마찬가지로 본 실험에서 사용된 NICI재의 경우에도 오스템퍼링 열처리가 강도 및 충격인성을 동시에 개선시킬 수 있음을 보여주고 있다.

3.4 내마모성

NICI재 와 DCI재의 오스템퍼링 열처리 전·후의 내마모성을 Table 2에 나타내었다. NICI재의 경우에는 오스템퍼링 열처리를 한 결과 내마모성이 11.1 km·N/mm³에서 8.9 km·N/mm³으

로 감소하였는데 반해서, DCI재의 경우에는 열처리를 한 결과 내마모성이 2.47 km·N/mm³에서 3.49 km·N/mm³로 증가하였다.

4. 고 찰

오스템퍼링 처리는 DCI재의 기지상인 페라이트, 퍼얼라이트를 오스페라이트로 바꾸는 열처리를 말하며, 오스템퍼링 열처리를 한 DCI재를 ADI(Austempered Ductile Iron)재라고 한다. 이러한 오스템퍼링 처리는 815-925°C에서 일정시간 동안 오스테나이트(austenitising) 처리함으로써 기지조직인 페라이트와 퍼얼라이트를 오스테나이트화 하고 250-550°C로 퀴칭 시킨 후, 이 온도에서 1-3시간 유지시켜 오스페라이트로 항온변태시키는 공정이다. DCI재의 경우 오스템퍼링 열처리를 함으로써 기지조직을 페라이트 및 펄라이트에서 오스페라이트로 변태시킴으로써 강도, 경도, 충격인성, 내마모성 등의 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 그러나 Table 2에서 살펴본 바와 같이 NICI재의 경우에는 기지상을 퍼얼라이트에서 오스페라이트로 변태시켜 강화시킬 수 있으나 다량 존재하는 시멘타이트의 분해를 초래

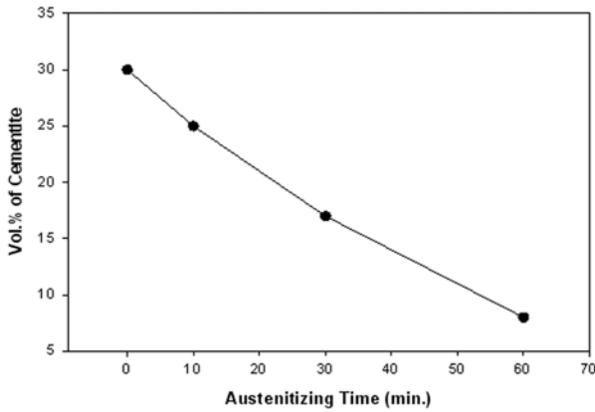


Fig. 6. Volume fraction of cementite of NICI (30Vol.% Fe₃C as cast specimen) according to austenitising treatment time at 900°C.

하여 내마모성이 저하되었다. 오스템퍼링 열처리를 한 NICI재를 선재 조압연료재로 적용할 경우에는 강도 및 충격인성이 기존의 NICI재에 비해서 개선됨에 따라 롤 사용중에 발생하는 열피로크랙에 대한 저항성은 상당히 개선될 것으로 판단되나 내마모성의 저하는 롤 마모량의 증대로 이어져 롤 사용 수명의 단축이 예상될 수 있는 문제점을 안고 있다.

오스템퍼링 열처리가 시멘타이트의 분해에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 주방상태에서 시멘타이트상의 분율이 30%인 NICI재를 900°C의 박스로 내에서 각각 10분, 30분, 60분 유지시킨 후 상온으로 공냉시킨 후 시멘타이트 부피분율의 변화를 살펴본 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 900°C에서 유지 시간이 10분, 30분, 60분이 지남에 따라 NICI재의 미세조직 중에 존재하는 시멘타이트 부피분율의 변화는 초기 30%에서 25%, 17%, 8%로 급격히 감소함을 확인할 수 있었다. 고온에서의 시멘타이트상의 분해의 경우에는 시멘타이트상의 크기 및 형태, 주위 구성상 등에 따라 다소 다르게 나타나지만 DCI재에 있어서는 900°C에서는 3시간 이내에 분해되며, 970°C 정도에서 가장 빨리 분해되는 것으로 알려져 있다[15].

따라서 오스템퍼링 열처리를 한 NICI재를 선재 조압연료재로 적용하고자 할 경우에는 목표하는 시멘타이트상의 부피분율을 확보하기 위해서는 열처리 중에 분해되어 없어질 시멘타이트상의 양을 고려하여 NICI재를 주조하거나 열처리 공정 조건을

조정할 필요성이 있다. 그리고 열처리 중에 정출되는 흑연은 압연료재의 사용 중 압연재와의 소착특성 및 균열크랙 전파성 등에 많은 영향을 미치므로 이들 상들에 대한 향후 보다 심도 있는 미세조직 제어연구의 필요성이 있는 것으로 판단된다.

한편 Table 2에서 살펴보았듯이 NICI재를 오스템퍼링 처리를 함으로써 인장강도는 38 kg/mm²에서 64 kg/mm²로 증가하였고, 충격흡수에너지는 2.3J에서 4J로 증가하였다. NICI재의 경우 인장강도, 충격인성, 그리고 경도값의 증가는 기지조직의 대부분을 차지하는 퍼얼라이트상이 열처리 후 오스페라이트상으로 변태한 것과 밀접한 관련이 있다. Fig. 7은 NICI재의 오스템퍼링 열처리 전·후의 충격시험 후 파단면을 보여주는 사진이다. Fig. 7(a)는 NICI재의 오스템퍼링 처리 전 파단면의 모습을 보여주는 것으로 파단면의 거의 대부분이 벽개파괴 양상을 보여주고 있다. 이는 기지조직 중에 존재하는 다량의 시멘타이트상 뿐만 아니라 퍼얼라이트상 또한 심한 소성변형 없이 벽개파괴 양상으로 파단이 일어났음을 의미한다. 그러나 오스템퍼링 열처리를 한 NICI재의 충격 파단면을 나타내는 Fig. 7(b)를 살펴보면 일부 지역의 벽개 파단면 뿐만 아니라 심한 소성변형을 야기한 딴플 파단면 또한 다수 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 소성변형을 동반한 딴플 파단면의 경우는 미분태 잔류오스테나이트상 및 오스페라이트상에서 발생된 것으로 판단되며, 이들 상이 퍼얼라이트상에 비해서 보다 풍부한 연성을 가지고 있음을 보여준다.

DCI재와 NICI재의 마모시험 결과를 살펴보면 DCI재의 경우에는 오스템퍼링 처리를 한 결과 내마모성이 2.47 km·N/mm³에서 3.49 km·N/mm³로 증가하였다. 이는 오스템퍼링 처리 후 경도값이 2.5배 증가하였기 때문에 내마모성이 개선된 것은 내마모성은 재료의 경도값에 비례한다는 굽힘마모이론[16]에 따라 설명되어질 수 있다. 그러나 NICI재의 경우에는 열처리 후 경도값이 DCI재 만큼 크게 증가하지는 못했지만 HRC로 3.4 정도 증가했음에도 불구하고 내마모성은 오히려 감소했다. 이러한 현상은 NICI재의 경우에는 DCI재와는 달리 미세조직 중에 고경도값을 가지는 시멘타이트상을 가지고 있기 때문에 DCI재와는 다른 마모거동을 가지기 때문이다. 즉 DCI재의 경우에는 열처리 전·후의 미세조직 중에서 경도값이 제일 높아 내마모성에 일차적으로 기여하는 상은 각각 퍼얼라이트상과 오스페라이트상이다. 따라서 열처리로 인해서 퍼얼라이트상이 보다 경도

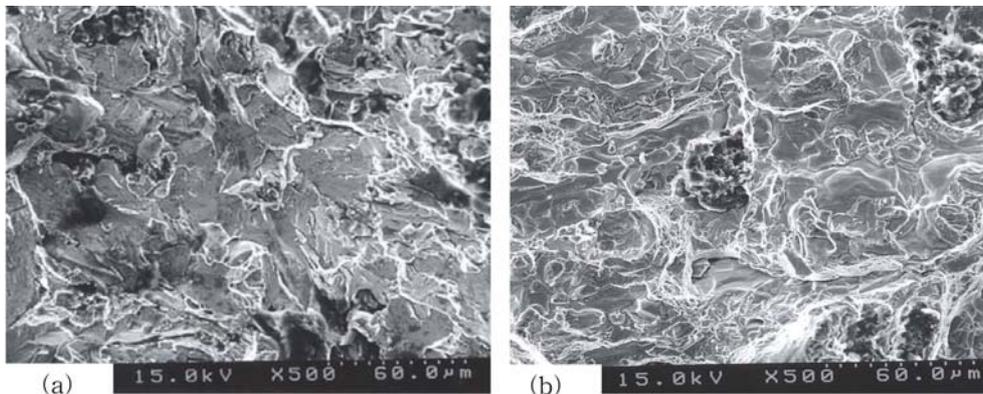


Fig. 7. Fractographs of the impact specimens of NICI. (a) as cast, (b) heat treated (austenitizing: 870°C, 1hr., tempering: 300°C, 1hr. in salt).

값이 높은 상(오스테라이트)으로 바뀌었기 때문에 내마모성은 증가하였다. 이에 반해서 NICI재의 경우에는 열처리 전·후의 미세조직 중에서 경도값이 제일 높아 내마모성에 일차적으로 기여하는 상은 각각 동일한 시멘타이트상이다. 따라서 시멘타이트상의 부피분율이 열처리로 인해서 급격히 줄어들어 따라서 오스테라이트상으로 인한 시편 전체의 경도값이 다소 증가했음에도 불구하고 내마모성은 감소한 것으로 나타난 것으로 판단된다.

5. 결 론

DCI재에 강도, 경도, 충격인성, 내마모성 등의 기계적 성질을 향상시키기 위하여 적용되어온 오스템퍼링 열처리를 NICI재에 도입하여 NICI재의 기계적 특성에는 어떤 영향을 미치는지 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) NICI재를 오스템퍼링 처리를 함으로써 인장강도와 충격인성은 기조직 중의 일부인 페얼라이트상이 오스테라이트상으로 변태되고 시멘타이트상의 일부가 분해됨에 따라 각각 38 kg/mm²에서 64 kg/mm²로, 2.3J에서 4.0J로 증가하였다. 그러나 내마모성은 기조직의 대부분을 차지하는 페얼라이트상이 고경도인 오스테라이트상으로 변태되어 경화되었다고는 하나 내마모성에 결정적인 역할을 하는 시멘타이트상의 분해가 일어나 11.1 km·N/mm³에서 8.9 km·N/mm³으로 오히려 감소하였다. 그리고 경도값은 고경도 시멘타이트상이 분해되어 탄화물의 양이 25%에서 11.5%로 줄어들었음에도 불구하고 기조직의 대부분을 차지하는 페얼라이트상(Hv 350)이 고경도인 오스테라이트상(Hv 480)으로 변태됨에 따라 HRC 47에서 HRC 50.4로 증가하였다.

2) 비교재로 사용한 DCI재를 오스템퍼링 처리를 한 경우 오스템퍼링 열처리로 인해 기조직의 대부분을 차지하는 페얼라이트상 및 페라이트상이 대부분 오스테라이트상으로 변태됨에 따라 인장강도는 73 kg/mm²에서 153 kg/mm²으로, 충격흡수에너지는 3.8J에서 7.6J로, 내마모성은 2.47 km·N/mm³에서 3.49 km·N/mm³로, 경도값은 HRC 19.7에서 49.3으로 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 POSCO(주)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. Spuzic, K.N. Strafford, C. Subramanian and G. Savage: Wear, "Wear of hot rolling mill rolls: an overview, Wear". 176, (1994) 261-271
- [2] S. E. Lundberg and T. Gustafsson: J. Mat. Process. Technol., "The Influence of Rolling Temperature on Roll Wear, "Investigated in a New High Temperature Test Rig". 42, (1994) 239-291
- [3] S. E. Lundberg: Steel Research, "Evaluation of deterioration mechanisms and roll life different roll materials", 64, (1993) 597-603
- [4] M. Shimizu, O. Shitamura, S. Matsuo, T. Kamata, and Y. Kondo: ISIJ Int., "Development of High Performance New Composite Roll", 32, issue: 11, (1992) 1244-1249
- [5] D. Suh, S. Lee, Y. Koo and H. C. Lee, Metallurgical and Materials Transactions A, 27A, (1996) 3149
- [6] ASM Specialty Handbook, Cast Irons(eds., J. R. Davis), ASM international, Material Park (1996) 192
- [7] A. S. Hamid Ali and R. Elliott: Materials Science and Technology, "Influence of Austenitizing Temperature on Austempering of an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron. I. Austempering Kinetics and the Processing Window", 12, 12 (1996) 1021-1031.
- [8] A. S. Hamid Ali and R. Elliott: Materials Science and Technology, "Influence of Austenitising Temperature on Austempering of an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron. II. Mechanical Properties" 13, (1997) 24-30
- [9] J. Mallia, M. Grech, and R. E. Smallman: Materials Science and Technology, "Effect of Silicon Content on Transformation Kinetics of Austempered Ductile Iron" 14, 5, (1998) 452-460
- [10] N. Darwish and R. Elliot: Materials Science and Technology, "Austempering of low manganese ductile irons, Part 1: Processing window" 9, (1993) 572-585
- [11] N. Darwish and R. Elliot: Materials Science and Technology, Austempering of low manganese ductile irons, Part II: Influence of austenitising temperature" 9, (1993) 586-602
- [12] N. Darwish and R. Elliot: Materials Science and Technology, "Austempering of low manganese ductile irons Part 3 Variation of mechanical properties with heat treatment conditions" 9, (1993) 882-889
- [13] A. S. Hamid Ali, K. I. Uzlov, N. Darwish and R. Elliot: Materials Science and Technology, "Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 4: Relationship Between Mechanical Properties and Microstructure" 10, (1994) 35-40
- [14] H. Bayati and Elliot: Materials Science and Technology, "Austempering Process in High Manganese Alloyed Ductile Cast Iron", 11, 2, (1995) 118-129
- [15] N. K. Datta and N. N. Engel: AFS Transaction, 74, (1985) 267
- [16] A. D. Sarkar: Int. Series in Materials Science and Technology, 18, Pergamon Press, (1976) 71