[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 13, No. 2 (2003)

자기적 방법에 의한 0.85% 탄소강의 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 성질 평가

변재원† · 권숙인*
고려대학교 공학기술연구소
*고려대학교 재료금속공학부

Evaluation of Microstructures and Mechanical Property of Variously Heat Treated 0.85% Carbon Steel by Magnetic Method

Jai Won Byeon† and S. I. Kwun*
Research Institute of Engineering and Technology, Korea University
*Division of Materials Science and Engineering, Korea University

(2003년 1월 15일 받음, 2003년 2월 7일 최종수정본 받음)

Abstract Microstructures and mechanical properties of variously heat treated 0.85% carbon steel(eutectoid steel) were evaluated by magnetic property measurements. Microstructural analysis (pearlite interlamellar spacing), measurement of mechanical properties(Rockwell hardness, yield stress, fracture stress) and magnetic properties(coercivity, remanence, hysteresis loss, saturation magnetization) were performed to clarify mutual relationships among these parameters. Water quenched specimens with martensite structure showed much higher coercivity and remanence than air cooled or furnace cooled specimens with pearlite structure. The linear dependence of coercivity and remanence on pearlite interlamellar spacing as well as on Rockwell hardness, yield stress and fracture stress was observed in the pearlitic steel. Hysteresis loss and saturation magnetization showed no distinct trend with pearlite interlamellar spacing.

Key words pearlite interlamellar spacing, microstructure, carbon steel, nondestructive evaluation, magnetic property

1. 서 론

최근 들어 철강재의 품질에 대한 신뢰도 향상의 필요성이 커지고 있다. 이에 따라 요구되는 물리적, 기계적 성질을 만족시키면서도 품질 관리에 대한 엄격화가 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해서는 철강재의 생산 과정에서 미세조직 및 기계적 성질에 대한 관리가 선행되어야 한다. 현재 철강재에서 요구되는 미세조직 및 기계적 성질은 최종 제품이 완성된 후 대표적인 시험편에 대해 파괴적인 방법으로 측정되고 있다. 파괴적인 시험 방법은 선택된 표본에 대해서만 측정이 이루어지며 공정 단계별 개개의 제품의 품질에 대해 실시간 제어가 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 철강재의 품질 관리 과정에서 비파괴 평가법을 도입해야될 필요성이 증대되고 있다.[1-5] 철강재의 미세조직 및 기계적 성질을 비파괴적으로 평가하기 위해 자기적 방법,[1-6] 초음파법[7-10] 등을 적용하고자하는 연구가 보고되고 있다. 특히 자기적 성질을 이용하는 방법은 강자성체인 철강재에서 그 적용성이 크다는 특징이 있다. Jiles[6]는 AISI 1000 탄소강에서 열처리 조건에 따른 자기적 성질의 변화를 보고하였다. Lo 등[1]은 MAE(magnetoacoustic emission)를 이용한 펄라이트 강(pearlitic steel)의 미세조직 평가에 관한 연구에서 자구의 거동에 대해 논의한 바 있다.

한편 펄라이트 조직을 갖는 0.85% 탄소강(공석강)은 우수한 강도 및 내마모 특성으로 인해 철로용 소재, 휠 등으로 사용될 수 있다. 펄라이트 강의 파단강도, 내마모성과 같은 기계적 성질은 미세조직 인자 중 특히 펄라이트 라멜라 층상간격(pearlite interlamellar spacing)에 크게 의존하는 것으로 알려져 있으며,[11,12] 용도에 적합한 펄라이트 라멜라 층상간격과 강도를 갖는 소재를 얻기 위해 다양한 열처리 공정이 적용되고 있다.

본 연구에서는 다양하게 열처리된 0.85% 탄소강의 미세조직 및 기계적 성질을 자기적 특성을 이용하여 비파괴적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 공석강을 항온변태열처리와 연속냉각열처리를 실시하여 다양한 미세조직을 갖는 시험편을 제작하였으며, 이에 대해 미세조직(펄라이트 라멜라 층상간격)과 기계적 성질(록크웰 경도, 항복강도, 파단강도) 그리고 자기적 성질(보자력, 잔류자화, 자기이력손실, 포화자화)을 측정하여 이들의 상관관계를 확인하였다.

†E-Mail : byeonjw@hanmail.net

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 시료는 0.855 wt%의 탄소를 함유한 공석강(eutectoid steel)이며 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 첫째로 냉각속도가 자기적 성질에 미치는 영향을 알아보기 위해 냉각 방법은 수냉, 공냉, 노냉으로 다르게 하였으며 각각 WQ, air, fur로 명명하였다. 둘째로 펄라이트 라멜라 층상간격이 자기적 성질에 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 펄라이트 라멜라 층상간격을 갖는 시험편을 제작하고자 하였다. 오스테나이트화 온도, 항온변태온도 및 냉각속도에 따라 펄라이트 라멜라 층상간격이 변한다는 기존 연구[11,12]를 바탕으로 하여 Table 2에 나타낸 바와 같이 다양한 조건으로 열처리를 하였다. 오스테나이트화 온도는 850, 950, 1050, 1150°C로 다르게 하였으며 편의상 각각 A, B, C, D로 명명하였다. 항온변태온도는 1, 2로 구분하였으며 각각 600°C와 650°C를 의미한다. 미세조직은 3% 나이탈 용액으로 에칭 후 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 펄라이트 라멜라 층상간격은 진층상간격(true interlamellar spacing)을 측정할 수 있는 Underwood 법[13]을 이용하여 정량화 하였다. 또한 인장 시험을 행하여 항복강도 및 파단강도를 구하였으며 록크웰 경도는 C 스케일로 측정하였다.

진동시료자속계(vibrating sample magnetometer, LakeShore사, 모델 735)를 이용하여 자기이력곡선(M-H 곡선)을 얻었으며 이로부터 보자력, 잔류자화, 자기이력손실, 포화자화를 구하였다. 시편은 형상에 의한 이방성을 줄이기 위해 3.5Φ×7.0 mm의 원기둥 모양으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 성질의 변화

Fig. 1(a),(b),(c),(d)는 열처리 조건에 따른 대표적인 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰한 사진으로 모두 펄라이트 조직을 보여주고 있다. 펄라이트 조직은 α상(페라이트)과 탄화물인 Fe_3C(시멘타이트)가 교대로 이루어진 층상 라멜라 조직(lamellar structure)이다. Fig. 1(e)는 1050°C에서 오스테나이트화 열처리 후 수냉된 시험편의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진으로 마르텐사이트 조직을 보여주고 있다. 펄라이트 라멜라 층상간격, 파단강도, 자기적 성질(보자력, 잔류자화, 자기이력손실, 포화자화)의 측정 결과와 미세조직을 종합하여 Table 3에 나타내었다. 여기서 P와 M은 각각 펄라이트 조직과 마르텐사이트 조직을 의미한다. 수냉된 시험편은 모두 마르텐사이트 조직을 가지며 나머지 시험편은 모두 펄라이트 라멜라 층상간격이 다른 펄라이트 조직을 갖고 있다. 항온변태온도가 높을수록(C-1, C-2) 그리고 냉각속도가 느릴수록(C-air, C-fur) 펄라이트 라멜라 층상간격이 증가함을 알 수 있다. 본 재료의 열처리 조건에 따른 미세조직의 변화는 이전 연구[10]에서 고찰하였다. Fig. 2는 펄라이트 라멜라 층상간격에 따른 록크웰 경도, 항복강도 및 파단강도의 변화를 나타내고 있다. 펄라이트 라멜라 층상간격이 증가함에 따라 경도, 항복강도, 파단강도는 모두 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 펄라이트 강에서 파단강도와 같은 기계적 성질은 펄라이트 층상간격(S)의 1승에 반비례하는 것으로 알려져 있다.[11,12] 본 연구에서도 같은 경향을 보이고 있으며 선형회귀분석 결과 펄라이트 라멜라 층상간격과 록크웰 경

Table 1. Chemical composition of the eutectoid steel used in this research.

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S
wt%	bal.	0.855	0.209	0.51	0.013	0.006

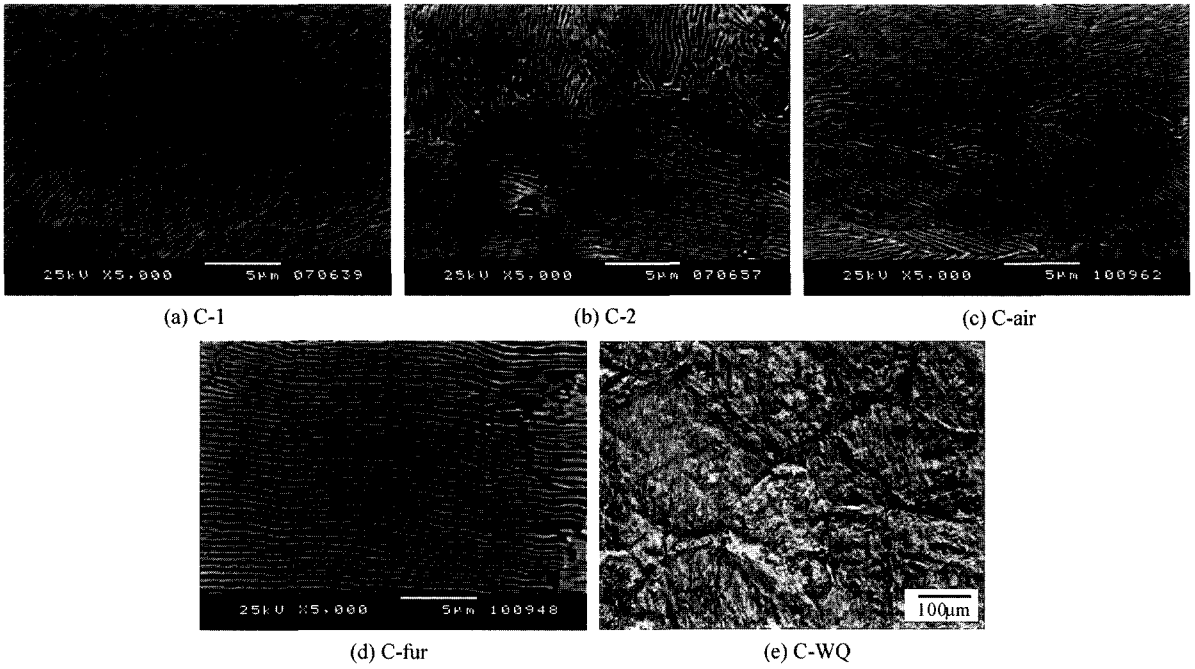
Table 2. Conditions of various heat treatment processes.

sample group	austenitizing temperature (°C)	holding time(min.)	cooling mode or isothermal transformation temperature (°C)	holding time(min.)
A-WQ	850	240	water quenching	·
B-WQ	950	15	water quenching	·
C-WQ	1050	15	water quenching	·
D-WQ	1150	15	water quenching	·
B	950	15	690	10
C-air	1050	15	air cooling	·
C-fur	1050	15	furnace cooling	·
C-1	1050	15	600	10
C-2	1050	15	650	10
D	1150	15	610	10

Table 3. Quantitative analysis for microstructural parameters, fracture stress and magnetic properties of differently heat treated eutectoid steel.

sample group	pearlite interlamellar spacing (μm)	fracture stress (MPa)	coercivity (Oe)	remanence (emu/g)	hysteresis loss ($\times 10^4$ erg/g)	saturation magnetization (emu/g)	microstructure
A-WQ	-	-	33.87	0.881	2.65	199.6	M
B-WQ	-	-	34.55	0.912	2.81	198.8	M
C-WQ	-	-	34.20	0.880	2.70	198.1	M
D-WQ	-	-	34.22	0.898	2.76	198.8	M
B	0.117	938	23.01	0.599	2.38	197.7	P
C-air	0.132	890	22.42	0.595	2.33	197.7	P
C-fur	0.213	742	20.43	0.523	1.76	197.7	P
C-1	0.145	901	22.32	0.585	2.10	198.1	P
C-2	0.162	863	21.41	0.566	2.06	198.4	P
D	0.140	878	22.27	0.585	1.83	198.1	P

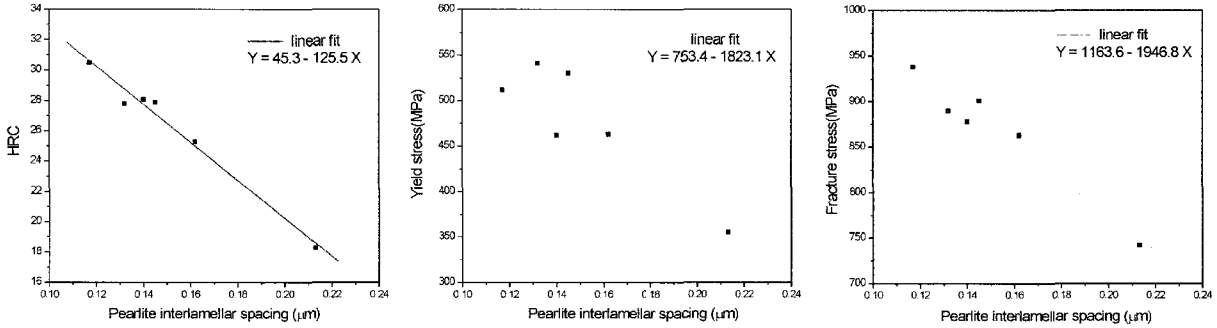
M: martensite P: pearlite



(a) C-1 (b) C-2 (c) C-air

(d) C-fur (e) C-WQ

Fig. 1. Typical scanning electron micrographs of differently heat treated specimens showing various pearlite lamellar structures((a) to (d)), and optical micrograph showing martensite structure of the water quenched specimen((e)).



(a) Rockwell hardness (b) Yield stress (c) Fracture stress

Fig. 2. Change of mechanical properties with pearlite interlamellar spacing.

도, 항복강도, 파단강도 사이에는 각각 식 (1), (2), (3)과 같은 상관관계가 존재하였다.

$$HRC = 45.3 + 125.5 * S \quad (1)$$

$$YS = 753.4 - 1823.1 * S \quad (2)$$

$$FS = 1163.6 - 1946.8 * S \quad (3)$$

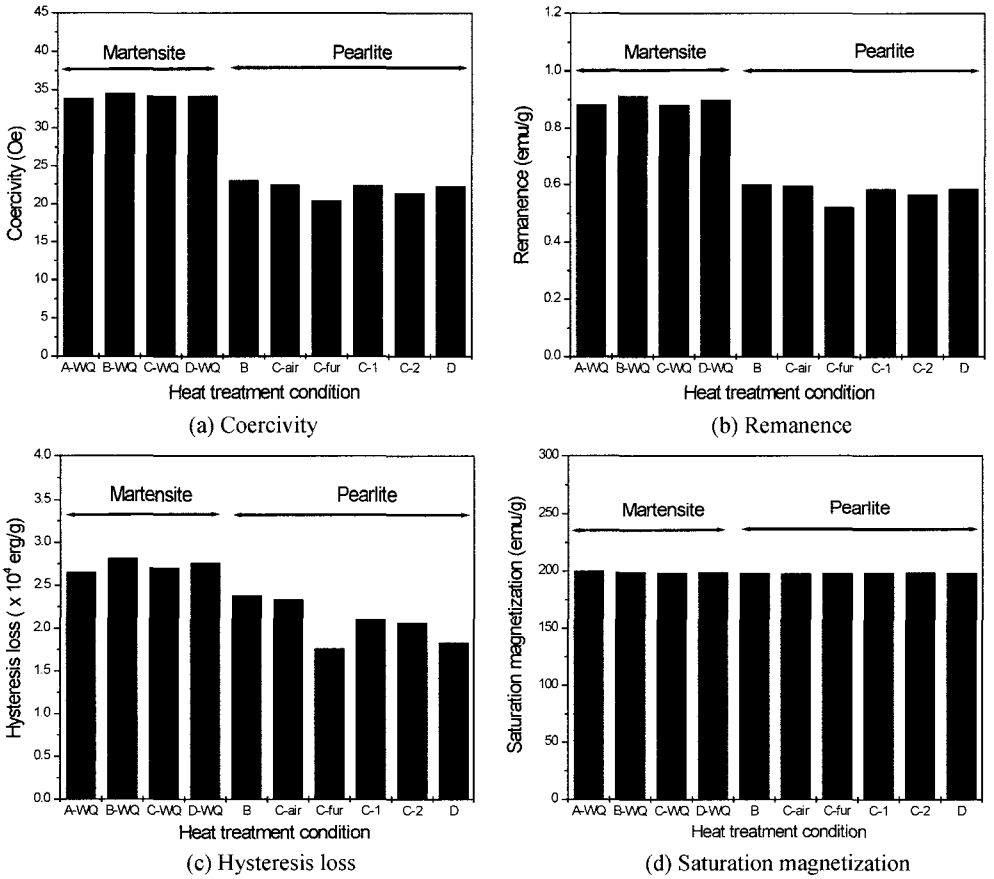
여기서, HRC는 록크웰 경도, YS는 항복강도(MPa), FS는 파단강도(MPa) 그리고 S는 펄라이트 라멜라 층상 간격으로 단위는 μm이다.

3.2. 냉각속도에 따른 자기적 성질의 변화

Fig. 3(a)는 열처리 조건에 따른 보자력의 변화를 보여주고 있다. 수냉된 시험편의 보자력은 33.87~34.55 Oe 정도로 공냉 및 노냉된 시험편의 보자력(20.43~23.01 Oe)보다 매우 크다. 수냉된 시험편은 모두 마르텐사이트 조직이며 공냉 및 노냉된 시험편은 모두 펄라이트 조직이다. 따라서 미세조직적으로 볼 때 마르텐사이트 조직이 펄라이트 조직보다 보자력이 크다고 할 수 있다. 강자성체의 자화는 자벽이동과 자구회전에 의해 일어난다. 특히 자화곡선의 무릎(knee)까지는 자벽의 이동이 주된 과정이며, 물리적으로는 자벽의 이동을 방해받는 정도에 따라서 보자력의 크기가 결정된다고 할 수 있다. 재료 내에 존재하는 석출물, 개재물, 전위 등과 같은 미세조직적 결함은 자벽의 이동을 방해하여 자구의 고착 현상을 초래할 수 있다.[14] 마르텐사이트 조직은 결정립 내에 패킷(packet)과 래쓰(lath)와 같은 하부조직을 가지며 또한 과포화 탄소를 많이 함유하고 있는 전위밀도가 높은 조직이다.[15] 따라서 이들 하부조직과 내부의 미세조직적 결함들로 인한 자구 고착 효과가 클 것으로 추측되며 이로 인해 보자력이 높게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 3(b)는 열처리 조건에 따른 잔류자화의 변화를 나타내었다. 수냉된 시험편의 잔류자화는 0.880~0.912 emu/g 정도로 공냉 및 노냉된 시험편의 잔류자화(0.523~0.586 emu/g)보다 매우 큼을 알 수 있다. 보자력과 유사하게 마르텐사이트 조직이 펄라이트 조직보다 잔류자화가 큰 것으로 보여지나, 아직까지 잔류자화의 차이에 대한 이유는 명확하지 않다.

Fig. 3(c)는 열처리 조건에 따른 자기이력손실의 변화를 보여주고 있다. 자기이력손실은 수냉된 시험편의 경우 2.65×10^4~2.81×10^4 erg/g 정도의 값을 가지며, 나머지 시험편(공냉, 노냉)은 1.73×10^4~2.38×10^4 erg/g 정도의 값을 갖는다. 수냉된 시험편에서의 값이 나머지 시험편보다 크게 나타났으나 그 차이는 보자력 및 잔류자화에 비해 뚜렷하지는 않다. Fig. 3(d)는 열처리 조건에 따른 포화자화의 변화를 나타내고 있다. 포화자화는 열처리 조건에 관계없이 197.7~199.6 emu/g 정도로 거의



(a) Coercivity (b) Remanence

(c) Hysteresis loss (d) Saturation magnetization

Fig. 3. Change of magnetic properties with heat treatment conditions.

비슷한 값을 갖고 있으며, 열처리 조건에 따른 미세조직 변화에 민감하게 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 보자력과 잔류자화는 냉각속도에 따른 미세조직 변화(펄라이트 조직 또는 마르텐사이트 조직)에 민감한 영향을 받았으며, 따라서 철강재의 상(phase)을 구분하는데 활용이 가능할 것으로 생각된다.

3.3. 펄라이트 라멜라 층상간격에 따른 자기적 성질의 변화

Fig. 4(a), (b)는 펄라이트 조직을 갖는 시험편(공냉 및 노냉된 시험편)에서 펄라이트 라멜라 층상간격에 따른 보자력 및 잔류자화의 변화를 보여주고 있으며, 이들 사이에는 선형적으로 반비례하는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉 펄라이트 라멜라 층상간격이 좁을수록 보자력 및 잔류자화가 크다. Fig. 4(c), (d)는 라멜라 층상간격의 변화에 따른 자기이력손실 및 포화자화의 변화를 나타내고 있다. 펄라이트 라멜라 층상간격이 증가할수록 자기이력손실은 감소하는 듯하나 그 상관계수(correlation coefficient, R)는 0.76으로 낮기 때문에 펄라이트 라멜라 층상간격을 평가하기에는 효과적이지 못할 것으로 판단된다. 포화자화는 펄라이트 층상간격과 상관관계가 거의 나타나지 않았다(Fig. 4(d)). Lo 등[1]은 펄라이트를 구성하는 층상 시멘타이트는 자구의 고착 사이트(site)로 작용함을 보고한 바 있다. 펄라이트 라멜라 층상간격이 좁다는 것은 자구를 고착시킬 수 있는 사이트인 층상 시멘타이트의 수가 더 많다는 것을 의미한다. 다시 말해 라멜라 층상간격이 좁을 수록 자구를 고착시킬 수 있는 확률이 증가함을 의미하는 것이다. 선형회귀 분석 결과 이들 사이에는 다음과 같은 상관관계가 존재하였다.

$$H_c = 26.0 - 26.8 * S \quad (4)$$

$$M_r = 0.70 - 0.83 * S \quad (5)$$

여기서, H_c, M_r, S는 각각 보자력(Oe), 잔류자화(emu/g), 펄라이트 라멜라 층상간격(μm)이다.

3.4. 자기적 성질을 이용한 펄라이트 강의 강도 평가

펄라이트 조직을 갖는 공석강은 펄라이트 라멜라 층상간격에 의해 기계적 성질이 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.[11,12] 따라서 펄라이트 라멜라 층상간격의 변화에 민감한 비파괴평가 파라미터를 적용하면 기계적 성질과 비파괴평가 파라미터 사이에 양호한 상관관계를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 5(a), (b)는 각각 보자력 및 잔류자화와 록크웰 경도와의 상관관계를 보여주고 있다. 선형회귀분석 결과 이들 사이에는 다음과 같은 상관관계가 나타났다.

$$HRC = 4.55 * H_c - 73.7, \quad (R = 0.98) \quad (6)$$

$$HRC = 149.0 * M_r - 73.7, \quad (R = 0.98) \quad (7)$$

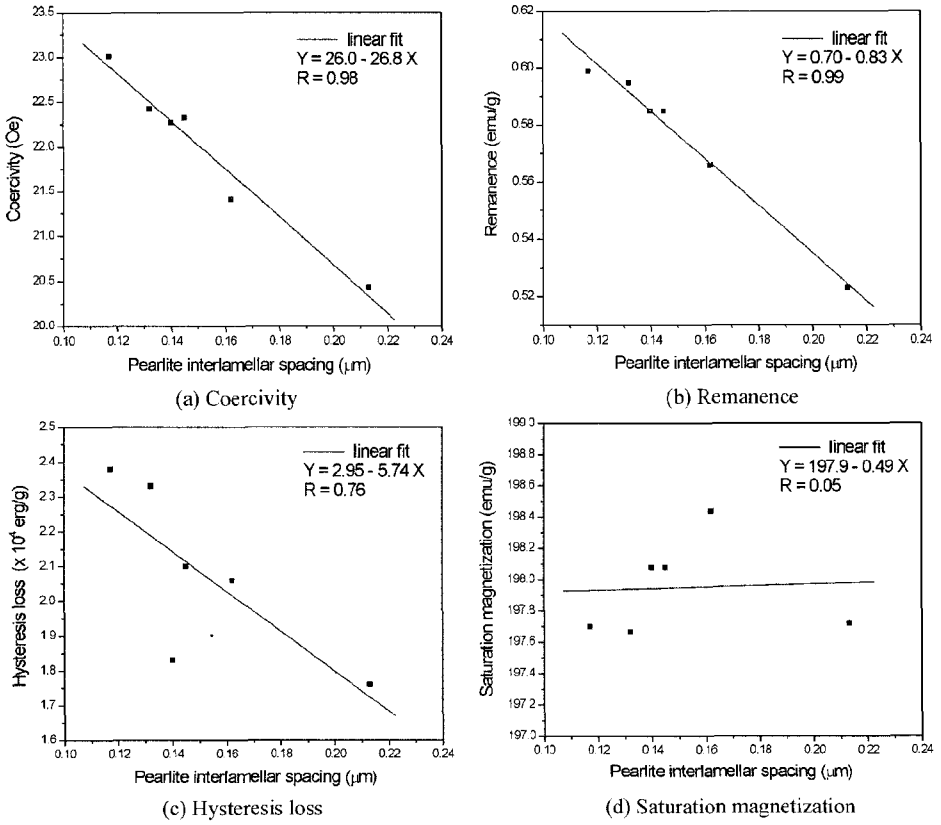


Fig. 4. Change of magnetic properties with pearlite interlamellar spacing.

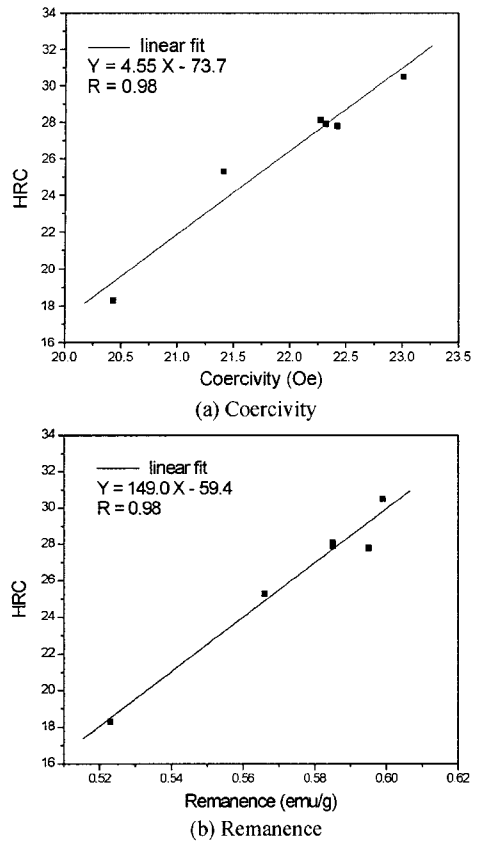


Fig. 5. Correlations between Rockwell hardness and magnetic properties.

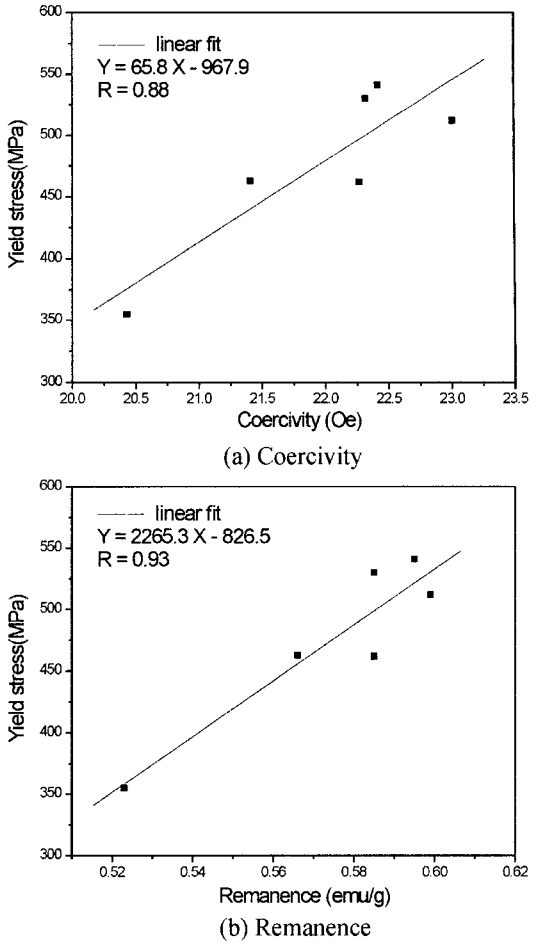


Fig. 6. Correlations between yield stress and magnetic properties.

Fig. 6(a), (b)는 각각 보자력 및 잔류자화와 항복강도와의 상관관계를 나타내고 있다. 선형회귀분석 결과 식은 다음과 같다.

$$YS = 65.8 * H_c - 967.9, \quad (R = 0.88) \tag{8}$$

$$YS = 2265.3 * M_r - 826.5, \quad (R = 0.93) \tag{9}$$

Fig. 7(a), (b)는 각각 보자력 및 잔류자화와 파단강도와의 상관관계를 나타내고 있으며 선형회귀분석 결과 이들 사이에는 아래와 같은 상관관계가 나타났다.

$$FS = 70.3 * H_c - 676.8, \quad (R = 0.96) \tag{10}$$

$$FS = 2309.6 * M_r - 460.5, \quad (R = 0.97) \tag{11}$$

이에 따라 비파괴평가 파라미터인 보자력과 잔류자화를 측정함으로써 펄라이트 강의 기계적 성질을 평가할 수 있는 가능성을 확인하였으며 향후에 더 많은 실험 데이터에 대한 통계적 분석이 필요할 것으로 보인다. Fig. 8은 펄라이트 조직을 갖는 공석강에서 미세조직 인자(펄라이트 라멜라 층상간격)과 기계적 성질(경도, 강도) 그리고 비파괴평가 파라미터인 보자력과의 상관관계를 모식도로 나타낸 것으로 이들 사이에는 다음과 같은 상관관계가 존재한다.

STEP I : 미세조직과 기계적성질의 상관관계(Fig. 2)

공석강의 기계적 성질(경도, 강도)는 주로 펄라이트 라멜라 층상간격에 의해 좌우된다. 즉, 펄라이트 라멜라 층상간격이 좁을 수록 강도는 증가한다.

STEP II : 미세조직과 비파괴평가 파라미터의 상관관계(Fig. 4)

펄라이트를 구성하는 시멘타이트는 자구의 이동을 방해하며[1], 펄라이트 라멜라 층상간격이 좁을수록 시멘타이트에 자구가 고착될 확률을 높임으로써 보자력이 증가된다.

STEP III : 기계적 성질과 비파괴평가 파라미터의 상관관계(Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7)

STEP I과 STEP II의 결과를 미세조직 인자인 펄라이트 라멜라 층상간격을 공통 인자로 하여 연결시킴으로써 기계적 성질과 비파괴평가 파라미터의 상관관계를 구할 수 있다. 또한 비파괴평가 파라미터(보자력)의 변화는 기계적 성질를 직접적으로 좌우하는 미세조직 인자(펄라이트 라멜라 층상간격)의 변화를 검출한 결과이므로 기계적 성질과 좋은 상관관계를 나타내는 것으로 생각된다.

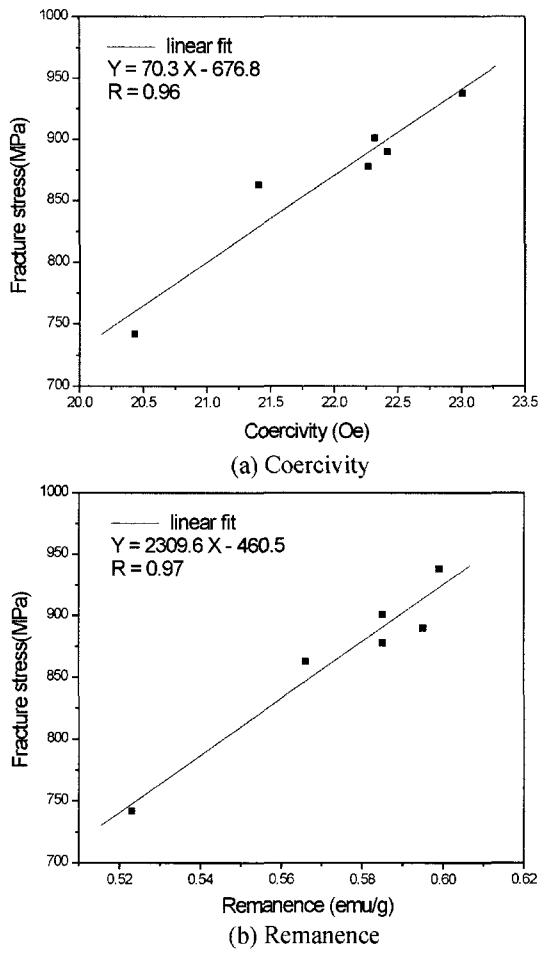


Fig. 7. Correlations between fracture stress and magnetic properties.

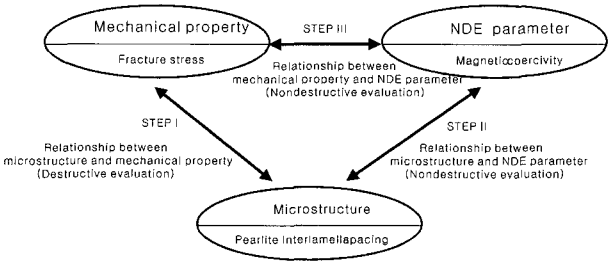


Fig. 8. Interrelationship between the mechanical property, microstructure and the NDE parameter.

4. 결 론

자기적 성질을 측정하여 0.85% 탄소강(공석강)의 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 성질을 평가하고자하는 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수냉된 시험편(마르텐사이트 조직)이 공냉 및 노냉된 경우(펄라이트 조직)보다 보자력 및 잔류자화 값이 크게 나타났다. 즉, 보자력과 잔류자화는 냉각속도에 따른 미세조직 변화(펄 라이트 조직 또는 마르텐사이트 조직의 형성)에 민감한 영향을 받았다. 또한 보자력과 잔류자 화는 철강재의 상(phase)을 구분하는데 이용 될 수 있음을 보여주었다.

(2) 공냉 및 노냉된 시험편에서 보자력 및 잔류자화는 모두 펄라이트 층상간격과 선형적으로 반비례하는 상관관계를 나타내었다.

(3) 펄라이트 조직을 갖는 공석강의 록크웰 경도 및 파단강도는 보자력 및 잔류자화와 다음과 같은 선형적 상관관계가 있었다.

$$HRC = 4.55 * S - 73.7$$

$$HRC = 149.0 * M_r - 59.4$$

$$FS = 70.3 * H_c - 676.8$$

$$FS = 2309.6 * M_r - 460.5$$

공석강의 펄라이트 층상간격과 이에 따른 기계적 성질을 비파괴평가 파라미터인 보자력 및 잔류자화를 측정함으로써 평가할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 고려대학교 교내 Post-Doc. 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. C. C. H. Lo, J. P. Jakubovics and C. B. Scruby, J. Appl. Phys., **81**(8), 4069 (1997).
2. V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar and Baldev Raj, J. Magn. Magn. Mater., **171**, 179 (1997).
3. C. C. H. Lo, J. P. Jakubovics and C. B. Scruby, IEEE Transactions on Magnetics, **33**(5), 4035 (1997).
4. I. Altpeter, J. Nondestr. Eval., **15**(2), 45 (1996).
5. Jai Won Byeon, J. S. Kim and S. I. Kwun, in Abstract Book of 2002 ASNT Spring Conference and 11th Annual Research Symposium(Portland, Oregon, March 2002), The American Society for Nondestructive Testing, Inc., Ohio, USA, p.36, (2002).
6. D. C. Jiles, J. Phys. D., **21**, 1186 (1988).
7. R. Prasad and S. Kumar, British J. NDT, **33**(10), 506 (1991).
8. S. I. Kwun, S. T. Hong and W. Y. Choo, J. Mater. Sci. Letters **19**, 1453 (2000).
9. J. S. Kim, J. W. Byeon, S. I. Kwun and U. S. Park, J. Kor. Inst. Met. Mater., **39**(5), 493 (2001).
10. J. S. Kim, J. W. Byeon, S. I. Kwun, S. S. Lee and B. Y. Ahan, J. Kor. Soc. Heat Treat., **14**(1), 22 (2001).
11. J. H. Hyzark and I. M. Bernstein, Metall. Trans. **7A**, 1217 (1976).
12. A. R. Marder and B. L. Bramfitt, Metall. Trans., **7A**, 365 (1976).
13. E. Underwood, Quantitative Stereology, p. 56, Addison-Wesley, New York, (1972).
14. B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., p. 317, Addison-Wesley, New York, (1972).
15. G. Krauss, Steels: Heat Treatment and Processing Principles, p. 67, Materials Park, Ohio, (1995).