

## 보자력 측정에 의한 아공석강 및 공석강의 열처리에 따른 미세조직 평가

변재원 · 김정석\* · 권숙인\*,†

고려대학교 공학기술연구소  
\*고려대학교 재료공학부

## Characterization of Microstructures of Variously Heat Treated Hypoeutectoid and Eutectoid Steel by Magnetic Coercivity Measurement

Jai Won Byeon, C. S. Kim\* and S. I. Kwun\*,†

Research Institute of Engineering and Technology, Korea University  
\*Division of Materials Science and Engineering, Korea University

(2004년 7월 13일 받음, 2004년 8월 13일 최종수정본 받음)

**Abstract** The microstructures of variously heat treated hypoeutectoid(0.45% carbon) and eutectoid(0.85% carbon) steel were characterized by magnetic coercivity measurement. The effect of spheroidization of cementites on the coercivity was investigated for 0.45% carbon steel. In case of 0.85% carbon steel, microstructural parameters such as prior austenite grain size, phase and pearlite interlamellar spacing were measured along with coercivity to investigate the relationships between them. Prior austenite grain size had little effect on the measured coercivity. Coercivity was observed to be high in order of martensite, pearlite and ferrite phases. The linear decrease of coercivity with increasing pearlite interlamellar spacing was found. The effect of each microstructural factor on the coercivity and the potential of coercivity as a nondestructive evaluation parameter for assessing microstructures of steel products are discussed.

**Key words** magnetic coercivity, microstructure, carbon steel, nondestructive evaluation.

### 1. 서 론

일반적으로 열처리된 철강 소재에 대한 품질관리는 열처리 후 절단, 연마, 마운팅, 애칭 등의 단계를 거친 후 광학 현미경 또는 전자 현미경으로 조직을 관찰하는 방법을 쓰고 있다. 그러나 이러한 파괴적인 측정 방법은 시간, 인력 등의 측면에서 많은 경제적 손실을 초래한다. 또한 파괴적 분석 방법은 선택된 표본에 대해서만 검사가 이루어지며, 공정 단계별 실시간 제어가 어려운 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 철강재의 미세조직을 기준의 현미경 관찰과 같은 파괴적인 실험을 거치지 않고 비파괴평가 파라미터를 측정함으로써 간접적으로 미세조직을 평가하고자 하는 연구가 시도되고 있다.<sup>1-5)</sup>

철강재의 미세조직을 비파괴적으로 평가하기 위해 자기적 방법,<sup>1-3)</sup> 바크하우젠노이즈법,<sup>4)</sup> 초음파법<sup>5)</sup> 등의 방법을 적용하는 연구가 보고 되고 있다. 특히, 자기적 방법은 자기특성 파라미터(보자력, 잔류자화, 투자율 등)를 측정하여 재료 물성과의 상관관계를 구하는 방법으로서, 강자성체인 철강재에서 그 적용성이 크다는 특징이 있다.<sup>1-3)</sup>

본 연구에서는 아공석강과 공석강의 열처리에 따른 미세조직 변화를 보자력을 측정함으로써 간접적으로 평가하고자 하였다. 아공석강(0.45% 탄소강)에 대해 구상화 열처리를 하였으며, 이에 대해 보자력을 측정하여 구상화 열처리에 따른 미세조직 변화의 비파괴적 평가 가능성을 확인하였다. 공석강(0.85% 탄소강)에 대해서는 연속 냉각 열처리, 항온변태 열처리 및 구상화 열처리를 하여 다양한 미세조직(상, 구오스테나이트 결정립 크기, 펄라이트 라벨라 층상간격)을 갖는 시험편을 제작하였으며, 이들에 대해 보자력을 측정하여 미세조직 인자와의 상관관계를 고찰하였다. 또한 두 재료(0.45% 및 0.85% 탄소강)의 보자력을 비교함으로써 탄소 함량이 미치는 영향을 고찰하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1. 아공석강

구상화 열처리에 따른 시멘타이트의 변화가 보자력에 미치는 영향을 알아보기 하였다. 포항제철(주)에서 제조된 0.45% 탄소강을 사용하였으며 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 구상화 정도가 다른 시험편을 제

\*E-Mail : sookkwun@korea.ac.kr

**Table 1.** Chemical compositions of the hypoeutectoid and eutectoid steel used in this investigation.

material \ element	Fe (wt%)	C	Si	Mn	P	S
hypoeutectoid steel	bal.	0.457	0.20	0.70	0.03	0.035
eutectoid steel	bal.	0.855	0.21	0.51	0.01	0.006

작하기 위해 700°C에서 100시간까지 구상화 열처리를 행하였다. 이때 열처리는 염욕(KCl: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=1:1)에서 실시하였으며, 열처리후 표면 탈탄층을 제거한 후 시험편을 채취하였다. 시멘타이트 입자를 관찰하기 위해 5% 피크릴(picral) 용액으로 에칭 후 주사전자 현미경을 사용하여 관찰하였다. 영상분석기(Visus Image Analysis 2.0)를 이용하여 시멘타이트의 구상화율, 단위면적당 개수, 크기 및 형상비를 측정하였다. 이때 구상화 열처리에 의해 분절된 시멘타이트 입자의 크기는 타원형을 가정하여 장축과 단축의 길이를 측정한 후 등가 크기<sup>6)</sup>로 환산하였으며 분절되지 않은 편상의 시멘타이트(as-received)는 크기를 정량화하지 않았다. 구상화율<sup>7)</sup>은 형상비가 5:1 이하인 시멘타이트 입자의 면적분율로 정의하였다.

## 2.2. 공석강

포항제철(주)에서 제조된 두께 25 mm의 0.85% 탄소강을 사용하였으며 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에 사용된 공석강은 아공석강에 비해 탄소의 함량이 많으며, 이외의 원소의 함량은 거의 유사하다. Table 2에 나타낸 바와 같이 연속냉각 열처리, 항온변태 열처리 및 구상화 열처리를 행하여 다양한 미세조직을 갖는 시험편을 제작하고자 하였다. 수냉을 하여 마르텐사이트 조직을 얻었으며, 다양한 연속냉각 열처리(공냉 및 노냉) 및 항온변태열처리를 통해 펠라이트 라벨라 층상간격이 다른 펠라이트 조직을 얻었다. 이후 펠라이트 조직의 시험편을 700°C에서 150시간<sup>7)</sup> 동안 구상화 열처리를 함으로써 페라이트 조직의 시험편을 제작하였다. 오스테나이트화 온도는 850°C, 950°C, 1050°C, 1150°C로 다르게 하였으며 각각 A, B, C, D로 나타내었다. 항온변태온도는 600°C, 650°C, 700°C로 다르게 하였으며 각각 1, 2, 3으로 구분하였다. 냉각방법은 수냉, 공냉, 노냉으로 다르게 하였으며 각각 WQ, air, fur로 명명하였다. 구상화 열처리된 시험편은 sph로 표시 하였다. 펠라이트 조직에서의 층상 시멘타이트 및 페라이트 조직에서의 구상 시멘타이트 입자는 5% 피크랄 용액으로 에칭 후 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 마르텐사이트 조직과 페라이트 조직의 시험편은 3% 나이탈 용액으로 에칭 후 광학현미경으로 관찰하였다. 펠라이트 라벨라 층상간격은 진층상간격(true interlamellar spacing)을 측정할 수 있는 Underwood 법<sup>8)</sup>을 이용하여 구하였다.

## 2.3. 자기적 성질 측정

진동시료자속계(vibrating sample magnetometer, LakeShore사, 모델 735)를 이용하여 자기이력곡선(M-H 곡선)을 얻었으며 이로부터 보자력을 구하였다. 시편은 형상에 의한 이방성을 줄이기 위해 원기둥 모양(3.5Ø×7.0 mm)으로 하였으며, 보자력 측정시의 에러 범위는 ±0.3 Oe 이하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 0.45% 탄소강의 구상화 열처리에 따른 미세조직 및 보자력 변화

Fig. 1은 구상화 열처리 시간에 따른 시멘타이트 형상 변화를 보여주는 주사전자 현미경 사진이다. As-received 시험편(Fig. 1(a))은 시멘타이트가 층상으로 존재하는 펠라이트와 초정 페라이트의 혼합 조직이며, 구상화 열처리된 시험편(Fig. 1(b), (c), (d))은 페라이트 기지에 시멘타이트 입자가 분포하는 조직이다. 구상화 열처리 시간이 증가함에 따라 시멘타이트 입자의 형상은 구형으로 변하며, 개수는 감소하고 크기는 증가하는 경향을 볼 수 있다. 구상화 열처리 시간에 따른 미세조직(시멘타이트 입자의 크기, 개수, 형상비, 구상화율, 상) 및 보자력의 측정 결과를 종합하여 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2는 구상화 열처리 시간에 따른 보자력의 변화를 보여주고 있다. 구상화 열처리된 시험편들의 보자력(17.63~18.92 Oe)이 as-received 시험편의 보자력(20.83 Oe)에 비해 작게 나타났다. 다시 말해 시멘타이트가 층상으로 존재하는 펠라이트 조직(as-received)의 보자력이 구상화된 조직의 보자력보다 크게 나타났다. 그러나 구상화 열처리 된 시험편들은 열처리 시간이 증가함에 따라 보자력이 조금 감소하는 경향이 있었으나, 그 차이가 크지는 않았다.

펠라이트를 구성하는 편상의 시멘타이트는 구상화 열처리 시간이 증가함에 따라 분절(fragmentation), 구형화(spheroidization), 성장(growth)의 과정을 겪게 된다.<sup>7)</sup> 분절 단계는 편상의 시멘타이트가 타원상의 입자로 나누어지는 단계이다. 구형화 단계는 분절된 타원상의 시멘타이트 입자가 구상으로 변하는 단계로서, 시멘타이트의 형상비가 감소하면서 동시에 조대화가 일어난다. 성장 단계는 구형화가 완료된 시멘타이트 입자가 조대화 되는 단계이다. 본 재료에서 구상화 열처리 시간이 증가함에 따

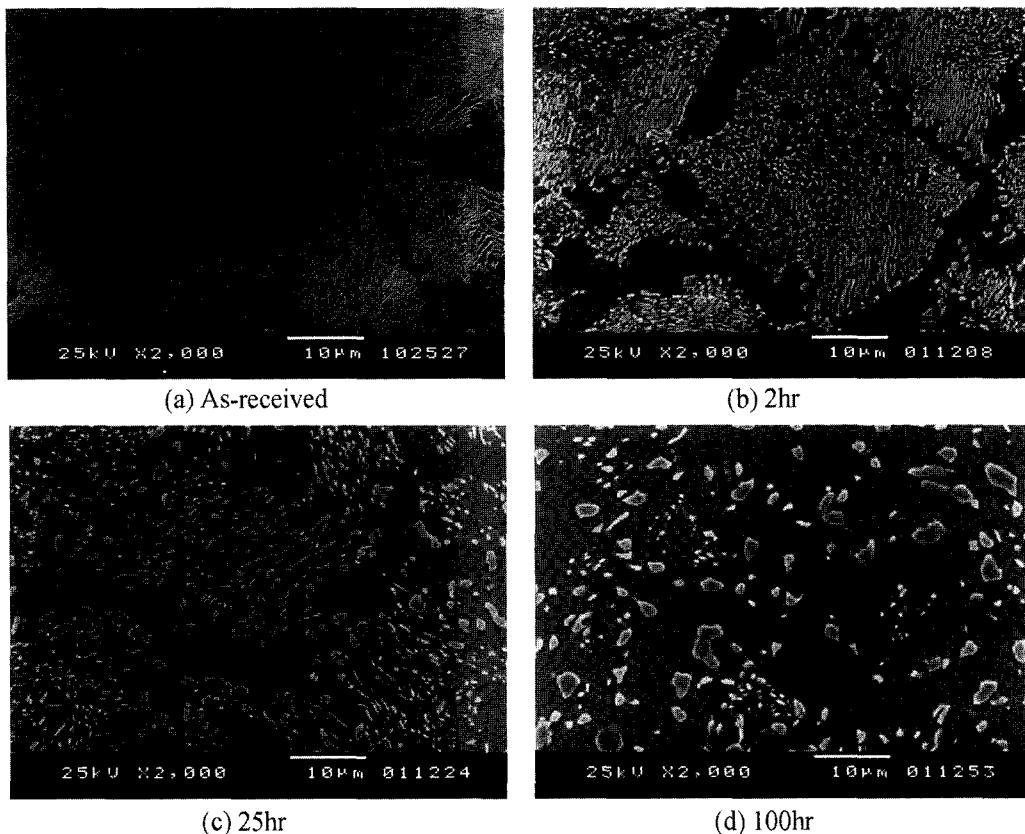


Fig. 1. Change of cementite morphology with spheroidization annealing time in 0.45% carbon steel.

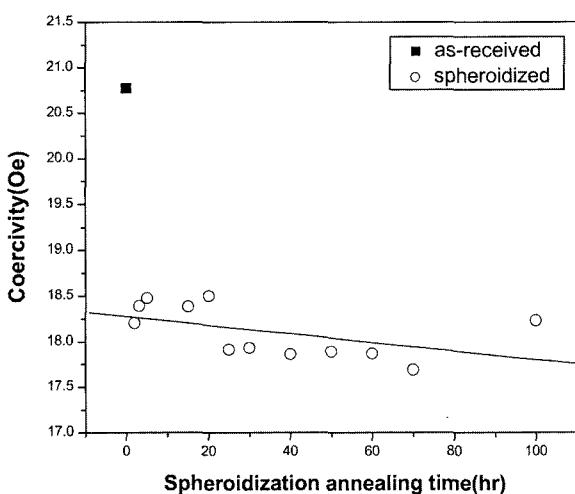


Fig. 2. Change of magnetic coercivity with spheroidization annealing time in 0.45% carbon steel.

라 시멘타이트의 구상화율, 크기, 개수, 형상비 등이 변하였음에도 (Table 2) 보자력은 크게 변하지 않는 것으로 볼 때, 구상화 열처리에 따른 시멘타이트의 변화를 보자력을 이용해 평가하기에는 부적절한 것으로 판단된다.

### 3.2. 0.85% 탄소강의 열처리에 따른 미세조직 및 보자력

#### 3.2.1. 열처리에 따른 미세조직 변화

Fig. 3(a) 및 (b)는 1050°C에서 오스테나이트화 열처리 후 각각 공냉(C-air) 및 노냉(C-fur)된 시험편의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰한 사진으로 필라이트 조직을 보여주고 있다. Fig. 3(c)는 1050°C에서 오스테나이트화 열처리 후 수냉한 시험편의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진으로 마르텐사이트 조직을 보여주고 있다. Fig. 3(d)는 C-air 시험편을 700°C에서 150시간 동안 구상화 열처리한 시험편(C-air-sph)의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진으로 페라이트 기지에 시멘타이트 입자가 분포한 조직을 보여주고 있다.

미세조직(상, 필라이트 라벨라 층상간격, 구오스테나이트 결정립 크기, 페라이트 결정립 크기)과 보자력의 측정 결과를 종합하여 Table 3에 나타내었다. 구오스테나이트 결정립 크기는 오스테나이트화 온도가 850°C부터 1100°C 까지 증가함에 따라서 76 μm에서 242 μm까지 증가하였다. 수냉된 시험편은 모두 마르텐사이트 조직을 가진다. 항온변태 열처리 및 연속냉각 열처리(공냉 및 노냉)된 시험편은 모두 라벨라 층상간격(0.102 μm~0.213 μm)이 다

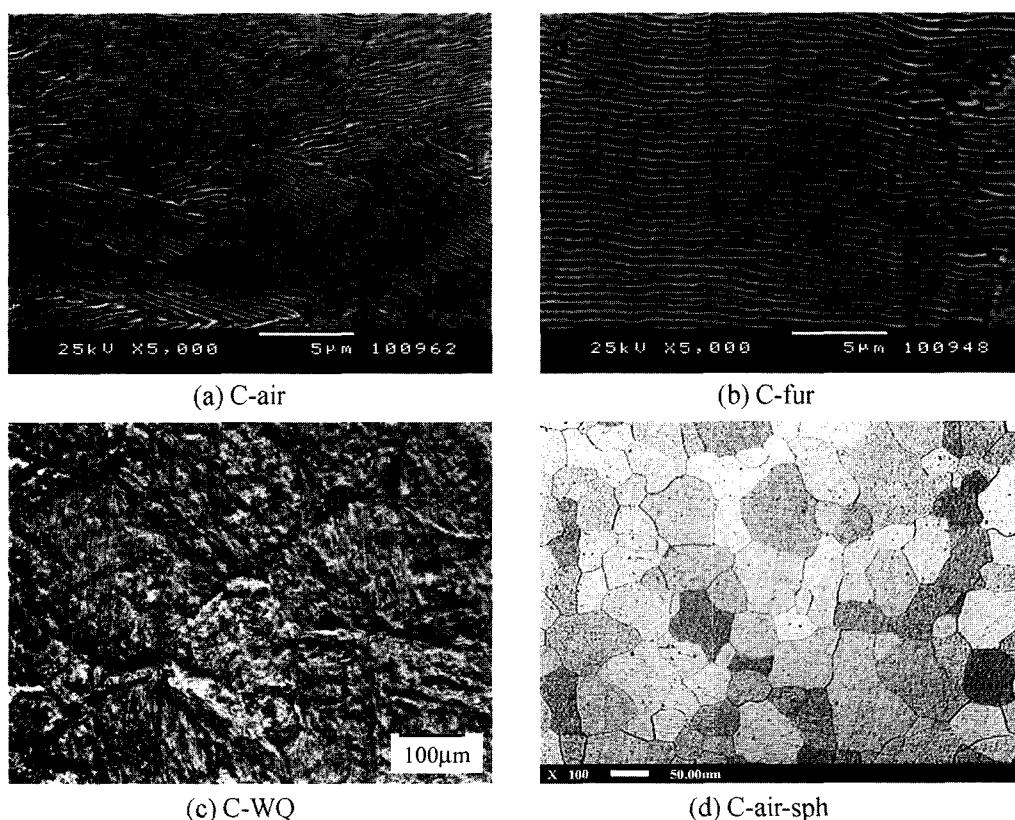
**Table 2.** Results of quantitative analyses for microstructural parameters and magnetic coercivity of spheroidization heat treated 0.45% carbon steel.

heat treatment time (hr)	property	magnetic property		microstructure		
		coercivity (Oe)	spheroidization* (%)	cementite particle		
				mean equivalent size** ( $\mu\text{m}$ )	number/unit area( $\mu\text{m}^{-2}$ )	mean aspect ratio
0		20.83	•	•	•	•
2		18.48	83.0	0.30	0.74	2.55
3		18.72	87.8	0.32	0.66	2.46
5		18.92	87.0	0.32	0.61	2.32
15		18.43	94.0	0.38	0.35	2.09
20		18.42	95.0	0.38	0.35	2.20
25		18.24	97.4	0.41	0.33	2.10
30		18.51	97.7	0.42	0.32	1.90
40		17.86	99.0	0.48	0.22	1.92
50		17.89	99.0	0.46	0.21	1.96
60		17.87	99.0	0.47	0.19	1.94
70		17.69	97.3	0.49	0.18	2.01
100		18.23	99.0	0.58	0.11	1.94

P: pearlite, F: ferrite

spheroidization\*: area fraction of carbides under aspect ratio of 5:1<sup>7)</sup>

mean equivalent size\*\*: (2a+b)/6, (a: length of long axis, b: length of short axis)<sup>6)</sup>



**Fig. 3.** Typical micrographs of differently heat treated 0.85% carbon steel.

**Table 3.** Conditions of various heat treatment processes, resulting microstructures and measured magnetic coercivity of 0.85% carbon steel.

sample group	heat treatment condition					microstructure		magnetic property	
	AT (°C)	holding time (min.)	cooling mode or isothermal transformation temperature (°C)	holding time (min.)	spheroidization heat treatment	phase	PAGS	PIS(μm)/FGS(μm)	coercivity (Oe)
A-WQ	850	240	water quenching	.	.	M	76	.	33.87
B-WQ	950	15	water quenching	.	.	M	179	.	34.55
C-WQ	1050	15	water quenching	.	.	M	204	.	34.20
D-WQ	1150	15	water quenching	.	.	M	242	.	34.22
A-air	850	240	air cooling	.	.	P	76	0.102	23.65
A-fur	850	240	furnace cooling	.	.	P	76	0.160	21.50
B	950	15	690	10	.	P	179	0.117	23.01
C-air	1050	15	air cooling	.	.	P	204	0.132	22.42
C-fur	1050	15	furnace cooling	.	.	P	204	0.213	20.43
C-1	1050	15	600	10	.	P	204	0.145	22.32
C-2	1050	15	650	10	.	P	204	0.162	21.41
C-3	1050	15	700	10	.	P	204	0.191	21.22
D	1150	15	610	10	.	P	242	0.140	22.27
A-air-sph	850	240	air cooling	.	700°C/150hr	F	76	45	19.50
A-fur-sph	850	240	furnace cooling	.	700°C/150hr	F	76	56	17.94
B-sph	950	15	690	10	700°C/150hr	F	179	61	18.87
C-air-sph	1050	15	air cooling	.	700°C/150hr	F	204	47	18.43
C-fur-sph	1050	15	furnace cooling	.	700°C/150hr	F	204	60	18.25
C-1-sph	1050	15	600	10	700°C/150hr	F	204	61	17.97
C-2-sph	1050	15	650	10	700°C/150hr	F	204	55	18.68
C-3-sph	1050	15	700	10	700°C/150hr	F	204	50	18.75
D-sph	1100	15	610	10	700°C/150hr	F	242	61	18.36

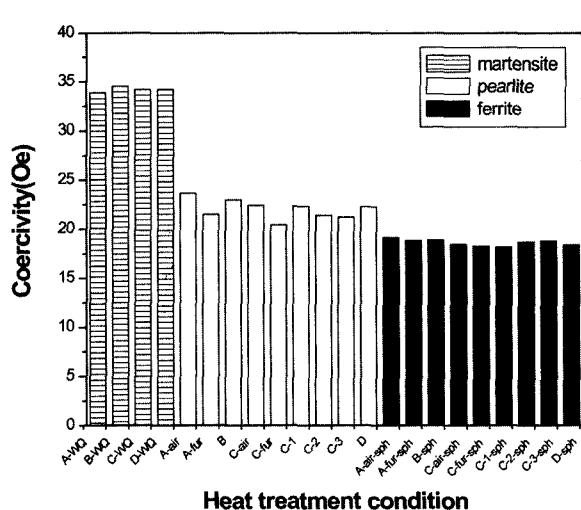
AT: austenitizing temperature, PAGS: prior austenite grain size, FGS: ferrite grain size,

PIS: pearlite interlamellar spacing, M: martensite, P: pearlite, F: ferrite

른 펠라이트 조직을 갖고 있다. 펠라이트 라멜라 층상간격은 항온변태온도가 높을수록(C-1, C-2, C-3) 또는 냉각속도가 느릴수록(A-air, A-fur/ C-air, C-fur) 증가하였다. 펠라이트 조직의 시험편을 구상화 열처리한 시험편들은, 시멘타이트 입자의 크기 및 분포가 조금씩 다르기는 하지만 모두 페라이트 기지에 구상의 시멘타이트 입자가 분포되어 있는 조직을 가졌다. 또한 구상화 열처리된 시험편의 페라이트 결정립 크기는 45 μm부터 65 μm 까지의 분포를 가졌다. 본 재료에서의 열처리에 따른 미세조직 변화 (Table 3)는 잘 알려진 이전의 결과들<sup>7,9,10)</sup>과 유사한 것이다.

### 3.2.2. 상(phase)에 따른 보자력의 변화

Fig. 4는 열처리 조건에 따른 보자력의 변화를 보여주고 있다. 수냉된 시험편의 보자력(33.87~34.55 Oe)은 항온변태 및 연속냉각 열처리된 시험편의 보자력(20.43~

**Fig. 4.** Change of coercivity with heat treatment conditions in 0.85% carbon steel.

23.01 Oe)보다 매우 크다. 또한 구상화 열처리된 시험편의 보자력은 17.97-19.50 Oe로 가장 작게 나타났다. 수냉된 시험편은 모두 마르텐사이트 조직이며, 항온변태 및 연속냉각 열처리된 시험편은 펠라이트 조직 그리고 구상화 열처리된 시험편은 페라이트 조직을 갖고 있다. 따라서 이는 마르텐사이트 조직, 펠라이트 조직, 페라이트 조직의 순서로 보자력이 큼을 의미하는 것이다.

보자력은 고착된 자구를 이동시키기 위해 추가적으로 필요한 인가자기장의 세기로, 재료 내에 존재하는 석출물, 개재물, 전위, 압계 등과 같은 미세조직적 결함과 응력장(residual microstress)은 자구의 이동을 방해함으로써 보자력의 증가를 초래할 수 있다.<sup>11)</sup> 공석강의 전형적인 마르滕사이트 조직은 래쓰(lath)와 판(plate) 마르滕사이트가 혼합되어 있는 조직으로 전위밀도가 약  $10^{12}/\text{cm}^2$  정도로 매우 높다.<sup>7)</sup> 전위는 주변의 격자를 변형(distort) 시킴으로써 전위선 주변에 응력장을 형성하며 이에 의해 자구가 고착됨으로써 보자력이 크게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 마르滕사이트 조직은 과포화 탄소를 많이 함유하고 있다. 탄소 원자는 침입형 원자 자리의 크기보다 크기 때문에 격자 변형을 초래하고 이로 인한 내부 응력의 증가도 자구의 고착(즉, 큰 보자력)의 한 원인이 될 수 있을 것으로 생각된다.

구상화 열처리된 조직은 페라이트 기지에 시멘타이트가 구상의 입자 형태로 분포하는 조직으로, 이를 시험편에서의 보자력은 주로 시멘타이트 입자에 의한 자구의 고착에 기인된 것으로 보인다. 한편 펠라이트 조직의 시험편이 페라이트 조직(구상화된 조직)의 시험편보다 보자력이 큰 것으로 보아, 판상의 시멘타이트가 입자 형태의 시멘타이트보다 더 강하게 자구를 고착시키는 것으로 보인다.

**3.2.3 펠라이트 라멜라 충상간격과 보자력의 상관관계**

Fig. 4에서 보인 바와 같이 펠라이트 조직의 시험편은 열처리 조건에 따라 보자력이 넓은 범위에 걸쳐 분포한다. 펠라이트는 열처리 조건에 따라 다양한 라멜라 충상간격을 갖게 되며, 이에 따라 각 시험편에서의 보자력의 차이가 크게 나타나는 것으로 보인다. Fig. 5는 펠라이트 조직을 갖는 시험편에서 라멜라 충상간격에 따른 보자력의 변화를 보여주고 있으며, 이들 사이에는 반비례하는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉 펠라이트 라멜라 충상간격이 좁을수록 보자력이 크게 나타났다.

펠라이트 조직은 페라이트와 판상의 탄화물인 시멘타이트가 교대로 이루어진 충상 라멜라 조직이다. Lo 등<sup>12)</sup>과 Hetherington 등<sup>13)</sup>은 로렌츠 현미경(Lorenz microscope)을 이용하여 펠라이트 조직을 갖는 강에서의 자구의 거동을 관찰하였으며, 이 연구에서 펠라이트를 구성하는 충상 시멘타이트가 효과적인 자구의 고착 사이트(site)로 작용함을 보고한 바 있다. 이러한 자구의 고착

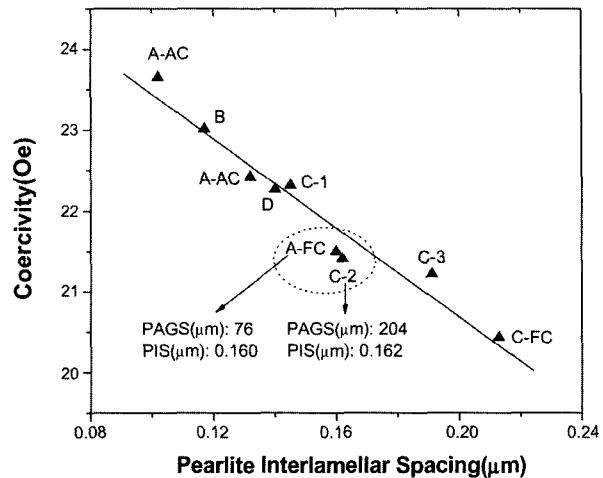


Fig. 5. Magnetic coercivity as a function of pearlite interlamellar spacing in 0.85% carbon steel.

은 시멘타이트와 페라이트 계면에서의 결정학적 방위의 불일치(lattice misfit)에 의해 생성된 응력장<sup>14)</sup> 때문인 것으로 생각된다. 펠라이트 라멜라 충상간격이 좁다는 것은 자구를 고착시킬 수 있는 사이트인 계면이 더 많다는 것을 의미하며, 다시 말해 라멜라 충상간격이 좁을수록 자구를 고착시킬 수 있는 확률이 증가함(즉, 보자력의 증가)을 의미하는 것이다.

### 3.2.4 결정립 크기가 보자력에 미치는 영향

Table 3에서 보인 것처럼 보자력과 구오스테나이트 결정립 크기 사이에는 특별한 상관관계를 확인할 수 없었다. 펠라이트 라멜라 충상간격(PIS: pearlite interlamellar spacing)은 거의 유사하지만 구오스테나이트 결정립 크기(PAGS: prior austenite grain size)가 서로 다른 두 시험편(A-FC(PAGS: 76 μm, PIS: 0.160 μm), C-2(PAGS: 204 μm, PIS: 0.162 μm))을 비교해볼 때, 이들의 보자력이 거의 유사함을 알 수 있다(Table 3, Fig. 5). 이러한 결과는 구오스테나이트 결정립 크기가 0.85% 탄소강의 보자력에 큰 영향을 미치지 않음을 의미하는 것이다.

탄소강에서의 결정립 크기와 자기적 성질의 상관관계에 대해서 상반되는 보고<sup>15-20)</sup>가 있다. 극저탄소강<sup>15-17)</sup>에서는 결정립계가 자구를 고착시키는 주요 사이트가 되기 때문에 자기적 성질이 결정립 크기에 크게 의존한다고 보고되고 있다. 이에 반해, 다량의 탄소를 함유한 탄소강<sup>18-20)</sup>에서는 결정립 크기가 자기적 성질에 큰 영향을 미치지 않는다는 보고들이 있다. Jiles<sup>18)</sup>는 탄소함량이 0.2% 이상인 강에서는 탄화물이 자기적 성질을 결정하는 주요 인자이기 때문에, 결정립 크기는 자기적 성질에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다. Nakai 등<sup>19)</sup>은 0.38% 탄소강에서 자기적 성질은 탄화물 크기에 의존하지만, 구오스테나이트 결정립 크기에는 의존하지 않는다고 보고

하였다. 기존에 보고된 극저탄소강<sup>18-20)</sup>과 고탄소강<sup>15-17)</sup>에서의 결과를 비교해 볼 때, 자기적 성질을 결정하는 주는 미세조직 인자는 탄소 함량에 크게 의존하는 것으로 생각된다. 다시 말해 극저탄소강에서는 결정립 크기가 자기적 성질을 지배하는 주요 인자이나, 고탄소강에서는 탄화물이 자기적 성질을 지배하는 주요 인자이기 때문에 결정립 크기가 자기적 성질에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. Table 3과 Fig. 5에서 보여준 것처럼 본 연구 결과에서는 보자력과 결정립(구오스테나이트 결정립 및 페라이트 결정립) 크기 사이에 특별한 상관관계를 발견할 수 없었으며, 이러한 결과 또한 본 재료에서의 탄소량(0.85%)이 많아 탄화물에 의한 영향이 지배적이었기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

### 3.2.5 탄소 함량이 보자력에 미치는 영향

Fig. 6은 두 재료(0.45% 탄소강, 0.85% 탄소강)의 보자력의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 구상화된 시멘타이트 조직을 갖는 경우, 0.85% 탄소강의 보자력(17.94-19.50 Oe)이 0.45% 탄소강(17.63-18.92 Oe)에 비해 크게 나타났다. 페라이트 조직의 경우도 0.45% 탄소강은 20.83 Oe(as-received)인데 비해 0.85% 탄소강은 20.43-23.65 Oe 사이의 값을 나타내었다. 0.45% 탄소강의 페라이트 조직 시험편(as-received)과 유사한 페라이트 라멜라 층상간격을 갖는 0.85% 탄소강의 시험편(C-1)의 보자력을 비교한 결과(0.45%: 20.83 Oe, 0.85%: 22.32 Oe), 0.85% 강의 값이 더 크게 나타났다. 탄소 함량에 따른 보자력의 차이는 탄화물(시멘타이트)의 양의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 탄소량이 많을수록 시멘타이트의 양이 많아지며, 이는 곧 자구의 고착 사이트가 많아짐을 의미한다. 따라서 탄소량이 많은 0.85% 시험편이 0.45%

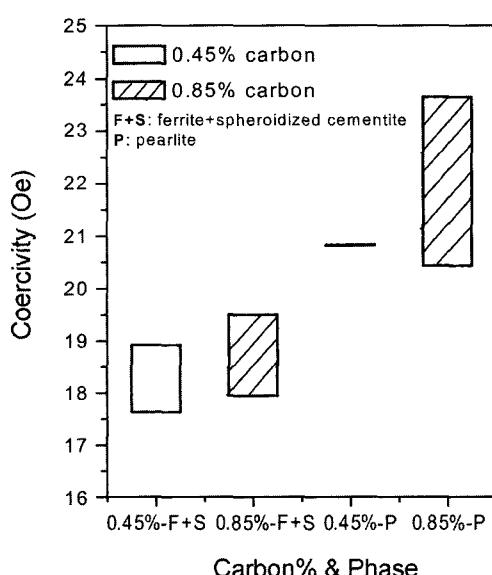


Fig. 6. Comparison of magnetic coercivity between 0.45% and 0.85% carbon steel.

시험편에 비해 보자력이 크게 나타나는 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

보자력을 측정하여 0.45% 탄소강과 0.85% 탄소강의 열처리에 따른 미세조직을 평가하고자하는 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 0.45% 탄소강에서 보자력은 구상화 열처리 시간에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 구상화 열처리에 따른 시멘타이트의 변화를 평가하기에 부적절한 비교평가 파라미터인 것으로 판단된다.

(2) 0.85% 탄소강에서 마르텐사이트, 페라이트, 페라이트 조직의 순서로 보자력이 크게 나타났다. 따라서 보자력은 철강재의 상(phase)을 구분하는데 이용 될 수 있음을 보여주었다.

(3) 구오스테나이트 결정립 크기의 차이는 0.85% 탄소강의 보자력에 큰 영향을 미치지 않았다. 0.85% 탄소강의 페라이트 라멜라 층상간격은 보자력과 선형적으로 반비례하는 관계를 나타내었다. 또한, 탄소량이 많은 0.85% 탄소강의 보자력이 0.45% 탄소강에 비해 크게 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2002년도 고려대학교 교내 Post-Doc. 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- J. W. Byeon and S. I. Kwun, Mater. Trans., **44**, 2184 (2003).
- J. W. Byeon and S. I. Kwun, Mater. Lett., **58**, 94 (2004).
- I. Altpeter, J. Nondestruct. Eval., **15**(2), 45 (1996).
- J. W. Byeon and S. I. Kwun, Phys. Stat. Sol. B, **241**(7), 1756 (2004).
- S. I. Kwun, S. T. Hong and W. Y. Choo, J. Mater. Sci. Lett., **19**, 1453 (2000).
- K. M. Vedula and R. W. Heckel, Metall. Trans., **1**, 9 (1970).
- G. Krauss, Steels: Heat Treatment and Processing Principles, p.67, Materials Park, Ohio, (1995).
- E. Underwood, Quantitative Stereology, p.56, Addison-Wesley, New York, (1972).
- J. H. Hyzark and I. M. Bernstein, Metall. Trans., **7A**, 1217 (1976).
- A. R. Marder and B. L. Bramfitt, Metall. Trans., **7A**, 365 (1976).
- B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., p.317, Addison-Wesley, New York, (1972).
- C. C. H. Lo, J. P. Jakubovics and C. B. Scruby, J. Appl. Phys., **81**(8), 4069 (1997).
- M. G. Hetherington, J. P. Jakubovics, J. A. Szpunar and B. K. Tanner, Phil. Mag., **56B**, 561 (1987).

14. B. L. Bramfitt and A. R. Marder, Mater. Charact., **39**, 199 (1997).
15. S. Yamaura, Y. Furuya and T. Watanabe, Acta Mater., **49**, 3019 (2001).
16. H. Sakamoto, M. Okada and M. Homma, IEEE Trans. Magn., **23**, 2236 (1987).
17. D. W. Kim and D. Kwon, J. Magn. Magn. Mater., **257**, 175 (2003).
18. D. C. Jiles, J. Phys. D **21**, 1186 (1988).
19. N. Nakai, Y. Furuya and M. Obata, Mater. Trans., JIM, **30**, 197 (1989).
20. H. Kwun and G. L. Burkhardt, J. Appl. Phys., **61**, 1576 (1987).