

극박방향성 규소강판 권자심 제작에 따른 응력과 열처리효과

김영학

부경대학교 전기공학과, 부산시 남구 용당동 산 100번지, 608-080

(1998년 5월 18일 받음, 1998년 8월 18일 최종수정본 받음)

본 연구는 극박 3%Si-Fe 방향성 규소강판을 권자심으로 사용하는 것을 목적으로 권자심의 곡률반경과 두께에 따른 탄성 및 소성변형과 같은 변형 상태를 조사하였으며, 응력제거 열처리 온도에 따른 권자심의 응력의 완화와 자기특성의 변화를 자구구조와 관련지어 검토하였다. 시료의 두께와 곡률반경에 대해 소성변형과 탄성변형의 경계가 간단한 식으로 얻어졌고, 실험치와 비교한 결과 일치하였다. 극박규소강판을 권자심으로 감은 직후에는 시료의 내표면에 도입된 응력에 의해 180° 자벽은 관찰되지 않고 메이즈 패턴의 자구구조가 관찰되었다. 열처리 온도가 600°C에서 응력이 완화되기 시작하며 자기특성도 회복하였고 권자심 내표면에 180° 자벽이 회복하였다. 그러나 900°C × 30 min.의 열처리를 하여도 권자심의 B₀는 스트립상의 값으로 회복하지만 탄성변형영역에 존재하는 시료에서조차도 H_c는 회복되지 않았다. 이는 내표면에 잔류하는 메이즈 패턴의 자구에 의한 것이라고 생각된다. 이 실험으로부터 극박 방향성 규소강판을 이용하여 권자심을 제작할 때 권자심에 극부적으로 도입되는 응력에 대한 대책이 매우 중요하다고 생각된다.

I. 서 론

극박 3%Si-Fe 방향성 규소강판[1]은 종래의 방향성 규소강판의 사용과는 달리 두께가 얇기 때문에 소형 권자심으로 이용이 가능하며 특히 손실이 매우 적어 수 kHz 대역의 리액터코어의 응용이 매우 주목받고 있다. 그러나 권자심은 스트립상의 형태를 어떤 곡률 반경을 가지고 감기 때문에 응력도입이 불가피하며 이로 인해 자기특성이 열화된다[2-4]. 또한 일정한 곡률 반경에 대해 감는 스트립의 두께가 두꺼워지면 소성변형의 정도가 커져 자기특성의 열화는 더욱 심해진다. 특히 방향성 규소강판의 경우, 자왜의 부호가 +이기 때문에 권자심의 내표면에 도입되는 압축력이 자기특성 열화에 근본 원인이 되며 열화된 자기특성을 회복시키기 위해 반드시 응력제거 열처리가 필요하다.

본 연구는 극박 3%Si-Fe 방향성 규소강판을 권자심으로 사용하는 것을 목적으로 권자심의 곡률반경과 두께에 따른 탄성 및 소성변형과 같은 변형 상태를 조사하였으며, 응력제거 열처리 온도에 따른 권자심의 응력의 완화와 자기특성의 변화를 자구구조와 관련지어 검토하였다.

II. 실험방법

Table 1은 본 실험에서 사용한 시료의 크기를 나타낸

것이다. 각 시료의 모재는 고자속밀도를 가지는 3%Si-Fe 방향성 규소강판(상품명: Z-6H, 신일본제철: 두께 300 μm)[5]을 이용하였고 짧은 시간내 3차재결정을 완료시키기 위해 1250 °C × 10 hr의 불순물 제거 열처리 [6]를 하였다. 이 열처리로 인해 주로 Cu, Mn, Sn와 같은 인히비터로서 사용된 불순물이 제거되며 이 때문에 3차재결정립이 매우 빠른 시간내에 성장하게 된다. 이 불순물 열처리를 마친 모재를 직경 20 mm의 4단 압연기를 이용하여 각 시료의 두께로 압연한 후, 적외선 가열로(眞空理工(주)제품)를 이용하여 1250 °C × 10 min.의 고온 단시간의 열처리로 고자속밀도를 가지는 극박 규소강판을 제작하였다. 자기특성 측정에는 직류B-H Loop tracer(理研전자(주)제품, BHS-40)를 이용하였으며 800A/m자계를 인가하였을 때의 자속밀도 B₀와 그때의 보자력 H_c를 측정하였다. 이 표에서 시료#1-#12는 응력에 따른 시료의 변형을 조사하기 위해 사용하였고 이때 시료의 길이는 각 곡률반경을 한 번 감을 수 있는 길이로 하였다. #13-#18은 열처리 온도에 따른 자기특성 및 자구관찰에 이용되었다. Fig. 1은 권자심의 자구관찰에 사용된 시료대를 나타낸 것이다. 동적자구관찰에는 SEM(일본전자제품 JSM-840A, SM-MD140 TYPEcII)을 이용하였으며[7], 동적자구 관찰방법은 권자심의 여자주파수를 SEM의 주사주파수에 대해 작은 차를 가지도록 하여 관찰하는 방법[8]을 이용하였다.

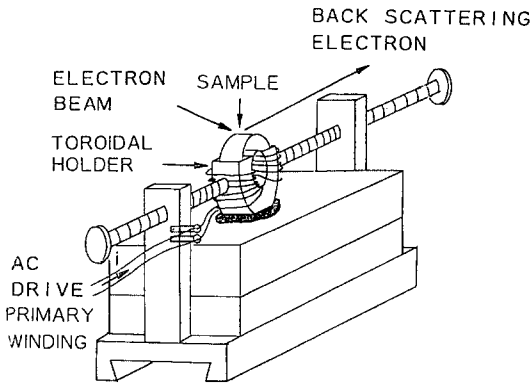


Fig. 1. Sample holder used for magnetic domain observation.

III. 권자심의 곡률반경과 응력

Fig. 2는 두께 d , 길이 L 의 스트립 형태의 시료를 곡률반경 R 로 굽힌 경우, 시료의 외측은 장력에 의해 늘어나고 내측은 압축력에 의해 줄어드는 형태를 나타낸 것이다. 곡률반경 R , 시료의 길이 L 과 각도 θ 와의 관계는 곡률반경 R 이 두께에 대해서 충분히 크면 (1)식으로 나타낼 수 있다.

$$R\theta = L \quad (1)$$

이때 시료의 외표면에 있어서의 길이 L_o 와 내표면에

Table 1. Samples used in the experiment

No.	t (μm)	b (mm)	L (mm)	Dm (mm)	s (mm^2)	wn (-)
#1	20	5.1	39	-	-	-
#2	36	5.1	39	-	-	-
#3	57	5.0	39	-	-	-
#4	80	5.3	39	-	-	-
#5	50	5.2	63	-	-	-
#6	64	5.2	63	-	-	-
#7	80	5.5	63	-	-	-
#8	100	5.0	63	-	-	-
#9	62	5.3	79	-	-	-
#10	78	5.3	79	-	-	-
#11	80	5.0	79	-	-	-
#12	100	5.0	79	-	-	-
#13	20	5.1	100	12.6	0.27	3
#14	36	5.1	100	12.4	0.45	3
#15	57	5.0	100	12.4	0.78	3
#16	80	5.3	100	12.3	1.03	3
#17	32	6.1	100	12.4	0.35	3
#18	36	5.0	100	11.9	0.45	3

t: thickness, b: width, L: length, Dm: mean diameter, s: cross section area, wn: number of wraps.

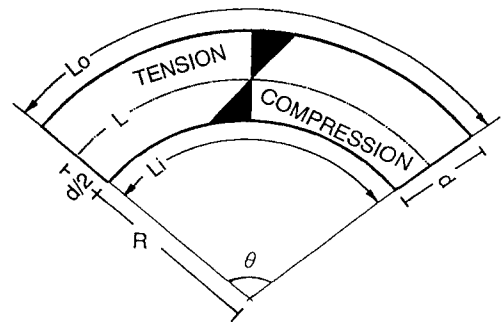


Fig. 2. Stress pattern applied by bending a strip.

있어서의 길이 L_i 는 식(1)을 이용하여 (2)식과 (3)식으로 구할 수 있다.

$$(R + d/2)\theta = L_o \quad (2)$$

$$(R - d/2)\theta = L_i \quad (3)$$

시료 전체의 탄성적 강도가 같다고 생각하면 압축력에 의한 시료의 내표면에 있어서 감소하는 길이나 장력에 의한 외표면에서 증가하는 길이는 같기 때문에 이것을 $|\Delta L|$ 로 한다. $|\Delta L|$ 은 식(1)-(3)으로부터 식(4)와 같이 구해진다.

$$|\Delta L| = \theta d/2 = (d/2) \times L/R \quad (4)$$

식(4)를 변형하면 식(5)와 같이 시료의 신축비율 $|\Delta L|/L$ 을 두께 d 와 곡률반경 R 과의 비로써 나타낼 수 있다.

$$|\Delta L|/L = (d/2)/R \quad (5)$$

한편 장력 또는 압축력에 의한 응력 $|\sigma|$ 와 시료의 길이 변화량과의 관계는 식 (6)으로 구해진다.

$$|\sigma| = E \times |\Delta L|/L \quad (6)$$

단, E 는 영률이다.

식(5)를 식(6)에 대입함에 의해 식(7)과 (8)이 얻어진다.

$$|\sigma| = E \times (d/2)/R \quad (7)$$

$$(d/2)/R = 2.7 \times 10^{-3} \quad (8)$$

식(7)은 두께 d 의 시료를 곡률반경 R 로 굽힌 경우, 시료 내표면에 인가되는 압축력 또는 시료 외표면의 장력의 크기 $|\sigma|$ 를 부여하는 식이다. 3%Si-Fe의 [001] 방향의 영률 $E(1.2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2)$ 과 항복응력(32 kg/mm^2)을 대입하면 식(8)과 같이 두께 d 의 시료를 곡률

반경 R로 감았을 때, 내표면 및 외표면에 있어서의 변형이 탄성변형 영역과 소성변형 영역의 어느 쪽으로 속하는가를 구분할 수 있는 직선식이 얻어진다.

IV. 결과 및 논의

Fig. 3은 각 두께의 시료를 곡률반경 6.2 mm, 10 mm, 12.5 mm로 하여 감은 후 원래 상태로 돌렸을 때 시료의 형태로부터 직경을 측정하는 것이다. 이때 시료가 탄성변형을 일으킬 경우 시료는 원래 형태대로 회복되고 이 때 곡률반경은 ∞ 가 된다. 한편 시료의 일부가 소성변형을 일으키면 시료는 굽게되어 곡률반경은 원래 감은 곡률반경 이상으로 된다. 이 그림으로부터 곡률반경이 6.2 mm에서는 36 μm , 10 mm에서는 50 μm , 12.5 mm에서는 63 μm 정도의 두께가 탄성변형과 소성변형의 경계가 되는 것으로 나타났다. Fig. 4는 (8) 식으로부터 구한 탄성변형과 소성변형의 경계가 되는 직선식과 Fig. 3에서 사용한 시료를 6.2 mm, 10 mm, 12.5 mm로 감을 때 속하게 되는 변형영역을 함께 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 탄성변형과 소성변형의 경계가 되는 시료의 두께와 그 계산치가 거의 일치하며 이 그림으로부터 어떤 곡률반경에서 탄성변형과 소성변형의 경계가 되는 시료의 두께를 대략 파악할 수가 있다.

#13-#16의 시료를 내경 12.4 mm(곡률반경 : 6.2 mm)의 열처리용 석영치구에 감아 넣어 열처리 시간을 30분으로 하여 열처리온도에 대한 권자심의 직경변화를 조사하였다. 이때 자심의 층간 절연은 하지 않았다.

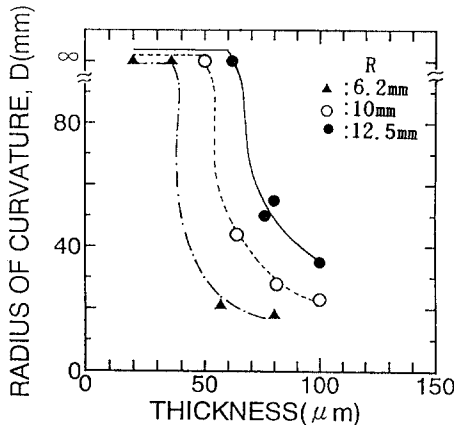


Fig. 3. Relation between the curvature of radius and thickness.

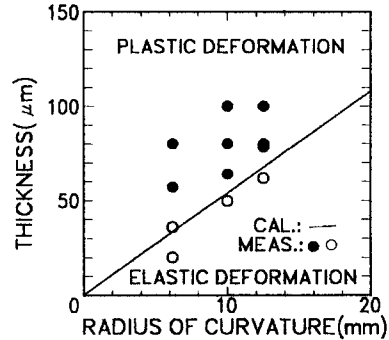


Fig. 4. Deformation region determined by curvature of radius and thickness.

시료 중 #13과 #14는 Fig. 3으로부터 탄성변형영역에 속하며, 시료 #15과 #16은 소성변형영역에 속한다. Fig. 5는 열처리 전후의 자심직경의 변화를 나타낸 것이다. D_0 는 목표로 하는 자심의 외경이고, 석영치구의 내경 12.4 mm와 같다. 각 온도에서 열처리 한 후, 석영치구로부터 자심을 끄집어내면 어떤 자심직경 D ($D \geq D_0$)로 된다. 이때, D 와 D_0 와의 비를 구하여 나타내었다. 이 비가 1로 되면 탄성적 응력이 거의 없어졌다는 기준이 된다. 또한 as-wound 상태에서는 시료를 석영치구에 감은 후, 열처리를 하지 않고 끄집어내었다. 시료 #13과 #14는 치구로부터 끄집어 내었을 때, 그 형태가 원래의 스트립 형태의 시료로 돌아오는 것으로 보아 Fig. 3에서 예상되는 바와 같이 탄성변형 ($D = \infty$, $D_0/D = 0$)이 일어났으며, #15과 #16의 시료는 어떤 일정한 직경값을 가지는 것으로부터 소성변형이 각각 주로 일어났다. 자심에 도입된 응력은 어느 시료도 600 $^{\circ}\text{C}$ 부터 완화되기 시작하였고 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 거의 응력완화가

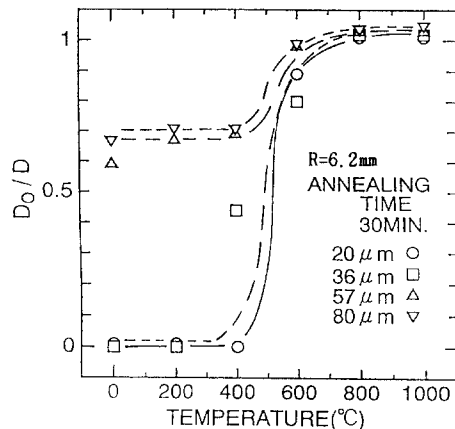


Fig. 5. Stress relief of wound cores by annealing.

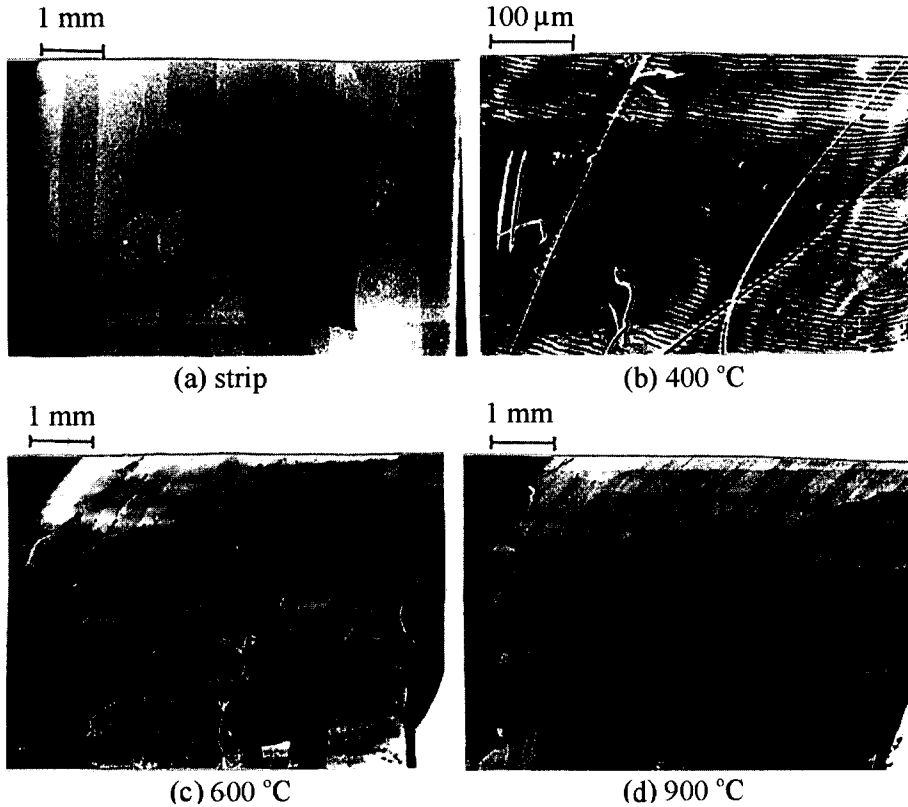


Fig. 6. Magnetic domain patterns at each annealing temperature.

완료되어 권자심의 형태를 유지하였다.

Fig. 6(a)는 #17의 시료를 스트립형태에서의 자구조를 나타낸 것이며 Fig. 6(b)-(d)는 스트립형태의 시료를 직경12 mm의 권자심 형태로 하여 자심 내측의 자구조를 응력제거 열처리의 온도에 대해 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에 나타내는 바와 같이 스트립 형태에서는 7장의 180° 자벽이 관찰되었다. 이 박대를 권자심으로 한 직후에는 자심의 내측 표면에서는 압축력에 의해 180° 자벽은 소멸되고 메이즈 패턴의 자구가 관찰되었다. 이와 같은 자구조의 변화의 원인은 자심의 내측에 도입되는 압축력에 의해 자기탄성 에너지가 증가하여 이것이 전 에너지를 증가시키기 위한 것[9]으로 생각된다. 이와 같은 패턴의 자구는 자벽이동을 어렵게 하여 자심손실을 증가시키는 원인으로 지적되고 있다[9]. 이 메이즈 패턴의 자구는 Fig. 6(b)에 나타내는 바와 같이 400 °C, 30분의 열처리 후에도 없어지지 않고 응력이 완화하기 시작하는 600 °C, 30분의 열처리에 의해 Fig.

6(c)에 나타내는 바와 같이 180° 자벽이 회복하였다. 응력완화가 완료하는 900 °C, 30분의 열처리 후에도 자심의 내측에는 주로 180° 자벽이 관찰되는 것은 변함이 없었다. 그러나 Fig. 6(c)와 (d)를 상세하게 보면 자심의 내측에는 장소에 따라 메이즈 패턴의 자구가 잔류하고

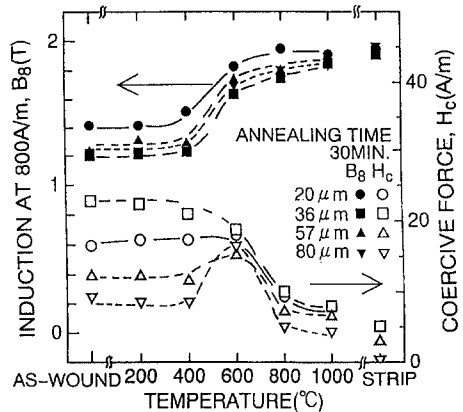


Fig. 7. B_s and H_c at each annealing temperature.

있는 것이 관찰되었다.

Fig. 7은 800A/m자계를 인가했을 때 자속밀도 B_s 와 보자력 H_c 의 응력제거 열처리온도에 대한 회복상태를 나타낸 것이다. as-wound에서는 자심의 내측에 도입되는 압축력에 의해 메이즈 패턴의 자구가 형성되기 때문에 자기특성이 열화된다. 180° 자벽의 회복과 탄성응력의 완화가 시작하는 600 °C부근으로부터 자기특성도 회복하여 온도 900~1000 °C에서 B_s , H_c 모두 거의 일정치에 이르렀다. 그러나 B_s 는 스트립상의 값으로 거의 회복하지만 H_c 는 #13과 #14와 같이 탄성영역에 존재하는 시료에서조차도 스트립 형태의 H_c 값으로 회복되지 않았다. 이 원인으로서 탄성영역에 존재하는 권자심에 있어서도 국부적으로 도입되는 응력은 응력제거 열처리에 도 제거되지 않고 자심의 내측에 일부 잔류하는 메이즈패턴의 자구로 남기 때문에 의한 것으로 생각된다. 또한 Fig. 6의 자구관찰로부터 스트립상 태에서는 7장(자구폭 0.87 mm)의 자벽수가 존재하였으나 권자심으로 하여 열처리한 후에는 자벽수가 27장(자구폭 0.23 mm)으로 4배 가까이 증가하였다. 이와 같은 자벽수의 증가는 다른 시료를 이용해 동일한 실험을 반복하여도 응력제거 열처리 후의 권자심의 열소자 상태에서의 자벽수는 스트립 상태의 자벽수보다도 2~4배 이상 증가하였다. 그러나 극박 규소강판의 경우, 자구폭은 자구세분화를 위한 폭방향의 스크래치나 결정립의 제어를 하지 않고 제작하는 경우 약 1 mm 전후의 값을 가진다[10].

Fig. 8은 #18의 시료를 이용하여 교류로 여자하였을

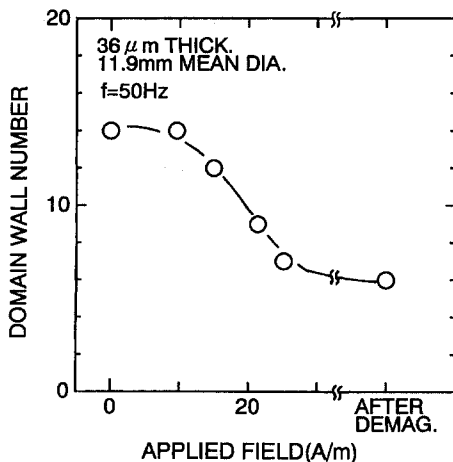


Fig. 8. Decrease of domain wall numbers according to applied field.

때 응력제거 열처리 직후의 열소자 상태의 자벽수가 인가자계에 의해 감소하는 것을 나타낸 것이다. 이때 자벽수는 자심의 외표면에서 관찰한 것이며 인가자계의 주파수는 50Hz였다. Fig. 9은 Fig. 8의 실험을 SEM으로 관찰한 동적자구사진이다. Fig. 9(a)는 응력제거 열처리 직후의 열소자상태이고 Fig. 9(b)는 9.6A/m, Fig. 9(c)는 15.0A/m, Fig. 9(d)는 21.4A/m, Fig. 9(e)는 25.1 A/m의 자계를 인가한 상태이며, Fig. 9(f)는 잔류자화상태이다. 열소자상태에서 14장(자구폭 0.36 mm)의 자벽은 인가자계의 증가에 따라 감소하였으며 인가자계를 보자력의 5배까지 인가한 후 잔류자화상태로 돌아왔을 때는 자벽수가 6장(자구폭 0.83 mm)까지 감소하여 스트립 형태의 자벽수와 거의 일치하였다. 또 자계의 인가시간에 따른 변화를 보기 위해 교류자계를 5분간 유지한 후 자벽수의 변화모양을 관찰하였지만 시간 변화에 대한 자벽수의 변화는 보이지 않았다. 이로부터 열소자 상태의 자벽수는 국부적으로 도입되는 응력의 잔류에 의해 스트립형태의 자벽수보다 많이 발생하는 것으로 생각되며 자계를 인가하여 잔류자화 상태로 돌아왔을 때는 시료전체의 에너지 상태에 의해 자벽수가 결정되어 원래 스트립상태의 자벽수로 회복된다고 생각된다.

V. 결 론

본 연구는 극박 3%Si-Fe 방향성 규소강판을 권자심으로 응용하는 것을 목적으로 하여 권자심을 제작할 때 곡률반경과 두께에 따른 탄성변형과 소성변형과 같은 변형 상태를 조사하였으며, 응력제거 열처리온도에 따른 권자심의 응력완화와 자기특성의 변화를 자구구조와 관련지어 검토하였다. 이하에 본 실험에서 얻어진 결론을 나타내었다.

1. 시료의 두께와 곡률반경에 대해 소성변형과 탄성변형의 경계가 간단한 식으로 얻어졌고, 실험치와 비교한 결과 거의 일치하였다.
2. 스트립상태의 극박규소강판을 권자심으로 감은 직후 시료 내표면에 도입되는 응력에 의해 180° 자벽은 관찰되지 않고 메이즈 패턴의 자구구조가 관찰되었다.
3. 열처리온도가 600 °C에서 응력이 완화되기 시작하여 이에 따라 자기특성도 회복하기 시작하였으며 이 때 권자심 내표면에 180° 자벽이 회복되었다 그러나 900 °C×30 min.의 열처리를 하여도 권자심의 B_s 는 스

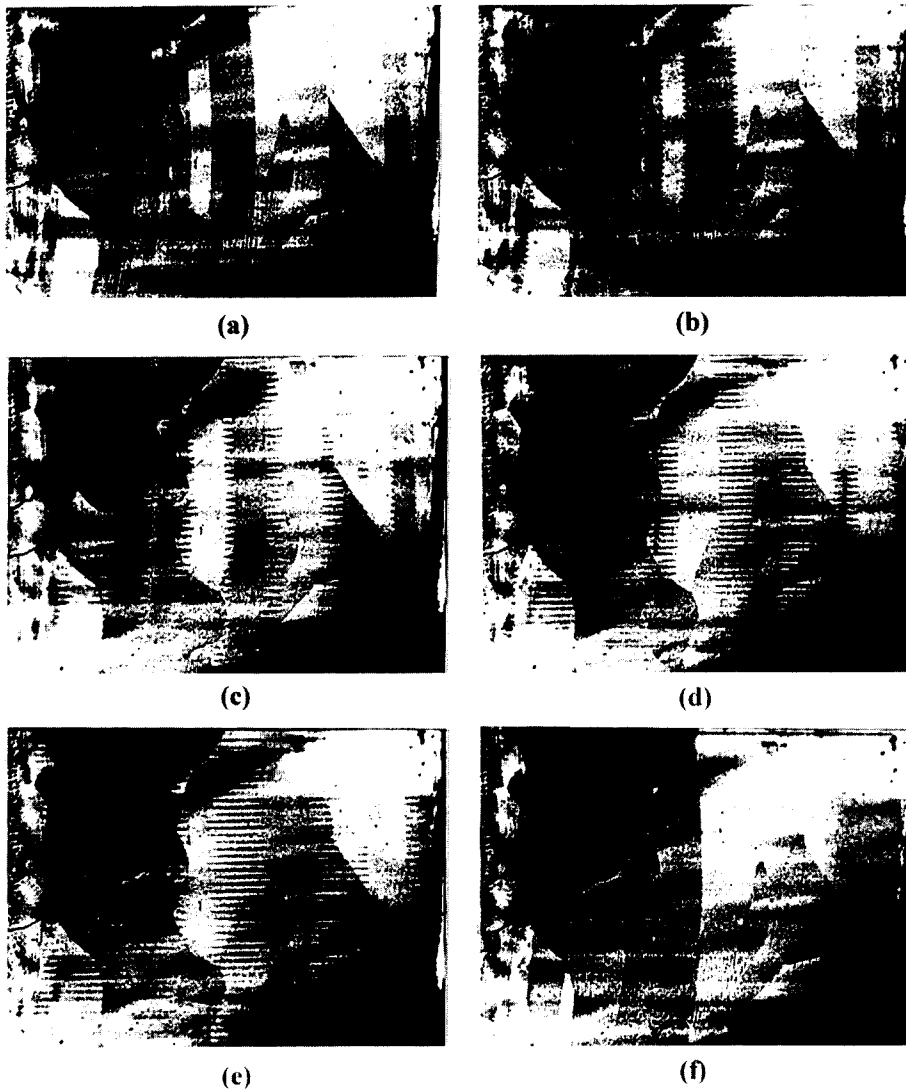


Fig. 9. Dynamic domain patterns, (a) thermal demagnetized state, (b) $H_m = 9.6A/m$, (c) $H_m = 15.0A/m$, (d) $H_m = 21.4A/m$, (e) $H_m = 25.1A/m$, (f) residual state after applied saturation field.

트립상의 값으로 회복하지만 H_c 는 회복되지 않았다. 이는 내표면에 잔류하는 메이즈 패턴의 자구에 의한 것 이라고 생각된다.

4. 응력제거 열처리를 한 후에 관찰된 매우 많이 발생된 자벽수는 교류자계의 인가에 의해 감소하여 잔류자화 상태로 되었을때 거의 스트립상태의 자벽수로 되었다.

위의 실험 결과에 따라 극박 방향성 규소강판을 이용하여 권자심을 설계할 때 권자심에 국부적으로 도입되는 응력에 대한 대책이 매우 중요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] K. I. Arai and K. Ishiyama : J. Appl. Phys. **64**, 5352 (1988).
- [2] J. D. Livingston : Phys. Stat. Sol. (a) **56**, 637 (1979)
- [3] W. Jillek and A. Hubert : J. Magn. Magn. Mater **19**, 365 (1980).
- [4] H. Pftzner and K. Futschik, Y. Luo : IEEE Trans. Magn. **18**, 1499 (1982).
- [5] S. Taguchi and T. Yamamoto and A. Sakakura : IEEE Trans. Magn. **10**, 123 (1974).
- [6] K. Ishiyama, K. I. Arai and T. Honda : J. Appl. Phys. **70**, 221 (1993).

- [7] D. J. Fathers, J. P. Jakuvovics, D. C. Joy, D. E. Newbury and H. Yakowitz : Phys. Stat. Sol. **22**, 609 (1974).
[8] Y. H. Kim and K. I. Arai : Journal of Korean Magnetic Society **5**, 885 (1995).
[9] A. J. Moses : J. Mater. Sci. **38**, 217 (1974).
[10] K. I. Arai, K. Ishiyama and H. Mogi : IEEE Trans. Magn. **25**, 3949 (1989).

Annealing Effect and Stress for Ultra-Thin 3%Si-Fe Strip Wound Cores

Young- Hak Kim

*Department of Electrical Engineering, Pukyong National University
#100 San, YongDang-Dong, Nam-Ku, Pusan 608-739, Korea*

(Received 18 May 1998, in final form 18 August 1998)

Magnetic domain structure and static magnetic properties were investigated in the ultra thin 3%Si-Fe strip wound cores when the strips were wound and annealed to relief the stress. The elastic and plastic deformation due to the radius of curvature was also investigated for the cores. At the as-wound state, the maze pattern domain structure was generated on the concave surface of the core and 180° domain wall was recovered by annealing 600 °C×30 min. After annealed by 900 °C×30 min, H_c of the strip-wound cores was not reached to the H_c of strip even at the cores of elastic deformation region. It is necessary to relief the local stress remained in the core when the cores were manufactured for the application of ultra-thin 3%Si-Fe strip.