

3 % 방향성 규소강판의 표면 선긋기에 의한 Barkhausen Noise에 관한 연구

박창만 · 이기암

단국대학교 자연과학대학 물리학과
충남 천안시 안서동 산 29, 330-714

황도근

상지대학교 자연과학대학 물리학과
강원도 원주시 우산동 산 41, 220-702

(1993년 11월 26일 받음, 1994년 6월 21일 최종수정본 받음)

두께가 0.30 mm, 0.27 mm인 3 % 방향성 규소강판에서 표면 선긋기의 간격(39 ~ 1.22 mm)과 집합조직(texture) 방향에 대한 선긋기 각도의 변화($90^\circ \sim 50^\circ$)에 따라 Barkhausen Noise를 측정하였다. 두께 0.27 mm의 시편에서 선긋기를 하지 않았을 때와 선긋기의 간격이 39 mm인 경우에 대체로 Barkhausen noise envelope는 두개의 peak 현상을 보였으며, 그 현상은 180° 자구벽(domain wall)이 생성과 소멸과정을 거칠 때 많은 activation energy가 필요함에 따른 것으로 설명할 수 있었다. 선긋기 횟수를 늘려감에 따라 즉 선긋기의 간격이 줄어들어 따라 Barkhausen noise envelope의 크기값이 감소하였지만, 선간격 9.75 mm부터는 감소현상이 둔화되는 것으로 나타났다. 이는 선긋기 횟수가 늘어남에 따라 선긋기 근처에서 180° 자구의 생성과 소멸이 쉽게 일어나기 때문에 Barkhausen Noise의 크기가 감소하는 것으로 설명할 수 있다. 이러한 현상은 0.30 mm의 시편에서도 유사하게 설명될 수 있었다. Barkhausen noise power는 선긋기 간격이 줄어들어 따라 감소하였으며, 각도변화에 따른 결과는 50° 근처에서 가장 적은 값을 보였다.

I. 서 론

강자성체가 외부의 자장에 의해서 자화될 때 그 자화는 연속적인 변화를 하는 것처럼 보이나, 미세한 관찰을 하여보면 불연속적인 변화를 볼 수 있는데, 이 불규칙한 자화의 변화를 탐측 코일로 측정된 신호를 Barkhausen Noise라고 한다[1]. 또한 이 Barkhausen noise는 자구의 형태와 자구벽의 운동에 밀접한 관련이 있는 것으로 연구되어왔다[2]. 이러한 Barkhausen noise 연구를 통하여 자심재료나 변압기에서의 철손을 보다 효과적으로 연구할 수 있으며 이에대한 물리적 설명과 철손의 감소는 경제적으로도 연구의 가치가 있다고 생각된다.

Williams와 Shockley는 3 % 규소강 단결정의 자화를 관측한 결과, 시료내에 있는 개재물(inclusion)들로부터 자구벽이 벗어나거나 접근할 때 탐측 코일로 유도되는 펄스전압을 관찰하였다[3]. Spinel ferrite내에서 자구벽의 입계면(grain boundary)과 다른 결정 불순물들과의 상호작용이 Lin등에 의해 관찰되었는데, 입계면과 결정 불순물들은 자구벽들의 움직임을 방해함으로써 반대방향의 자구생성(domain nucleation)의 역할을 한다. 그리고 Barkhausen 효과는 변형상태와 전위밀도, 입계크기, 집합조직 등 시편의 역학적 구조에 따라 변화한다[4].

현재 변압기에 가장 많이 사용되고 있는 3 % 방향성 규소강판은 변압기에서 항상 발생하는 철손을 줄이기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 두께를 감소시키거나, 규소성분을 증가시키거나, 방향성을 좋게하거나 하는 방법을 사용하고 있으며[5], 특히 요즘에는 규소강판에 미세한 선긋기를 가하여 자구의 구조를 미세화함으로써 철손의 값이 감소하는 것으로 발표되었다[6]. 규소강판에 대한 연구는 K. Arai에 의해 chemical etching에 의해 표면 선긋기방법[8]과 M. Komatsubara에 의한 국소적 인장에 의한 Barkhausen noise energy 조사[9], 또한 M. Yabumoto에 의한 규소강판 표면의 laser radiation와 chemical etching에 의한 철손감소에 관한 연구들이 발표되었다. 최근에는 열처리된 3 % 규소강판과 변형되지 않은 연강에서 측정된 Barkhausen noise envelope는 자화곡선의 무릎부근에서 두개의 peak가 나타났으며, 소성변형된 연강과 냉간 압연된 3 % 규소강과 permalloy의 경우 보자력 근처에서 하나의 peak가 발표되었다[10].

본 연구에서는 자구미세화의 여러 가지 방법 중에서 선긋기방법으로 규소강판에 인위적인 선긋기를 행하여 Barkhausen noise를 관찰하였으며, 이때 집합조직 방향([001] 결정방향)에 대해서 선긋기의 간격과 각도변화에

따른 선긋기를 하여 Barkhausen noise power 값도 측정하였다.

II. 실험 방법

본 실험에서 사용된 시편은 (110)[001] 3% 방향성 규소강판으로 포항제철에서 일반적으로 생산되는 제품이며 시편의 두께는 0.30 mm, 0.27 mm 두 가지를 사용하였다. 시편은 209.5 × 297.5 mm 크기의 원판을 각각 78 × 32 mm의 크기로 만들었으며, 이때 각각의 제작된 시편들은 선긋기를 하지 않은 초기상태에서 Barkhausen Noise 값을 측정한 후 실험에 들어갔다. 선긋기 방법은 Fig. 1에 나타냈으며 자세한 방법은 다음과 같다. 시편의

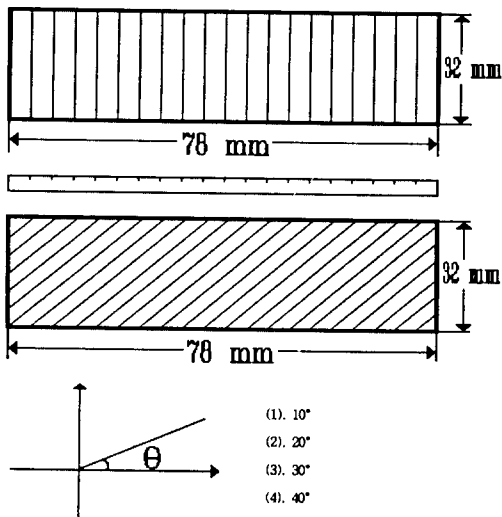


Fig. 1. Schematic diagram of the scratched specimen

집합조직 방향에 수직하게 중앙을 가르는 선을 긋고, 나머지 부분을 양분하는 순서로 선의 간격을 줄여나갔다. 선긋기에 가해지는 힘을 일정하게 유지하기 위해 고정된 칼날아래 시편을 두고 일정한 간격을 유지하여 잡아당기는 방법으로 하였다. 또한 시편의 집합조직 방향에 대해 각각 90°, 80°, 70°, 60°, 50°각도로 위의 선긋기 방법과 같이 시료를 제작하였다.

실험장치는 Fig. 2에서 보듯이 Function Generator (HP 8116A)는 $10^{-1} \sim 10^3$ 의 주파수를 갖는 삼각파를 발생하며 Power Amplifier로 삼각파를 10 ampere까지 전류를 증폭시켜 4000 turn 감긴 yoke에 보낸다. Barkhausen Noise를 시편의 중심에서 측정하는데 탐촉코일은 surface type과 encircling 두 가지가 있는데, 본

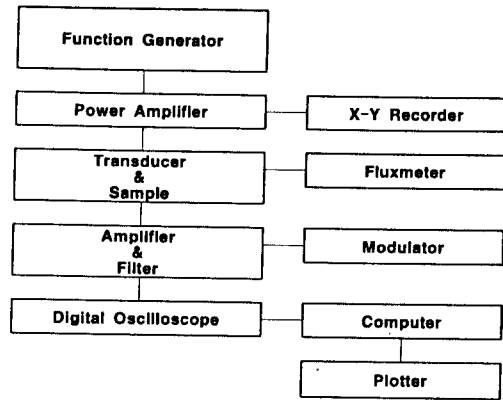


Fig. 2. A block diagram of the experimental equipments

실험에서는 surface type을 사용하였다. 탐촉코일에 의해 유도된 유도전압을 Lock-in Amplifier(HP SR530)를 통해 Digital Storage Oscilloscope로 조사하였다. surface type 탐촉코일의 형태는 Fig. 3과 같다.

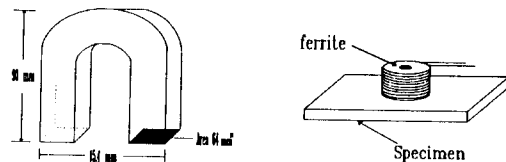


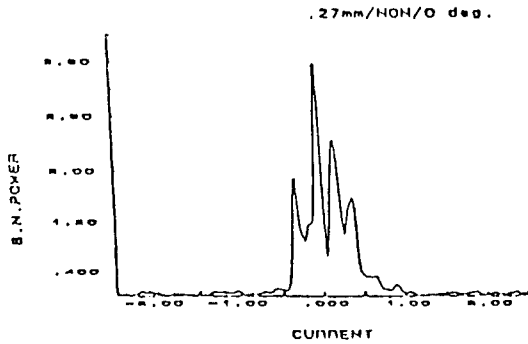
Fig. 3. Schematic diagram of the yoke and the pick-up coil to detect the Barkhausen noise

III. 결과 및 토의

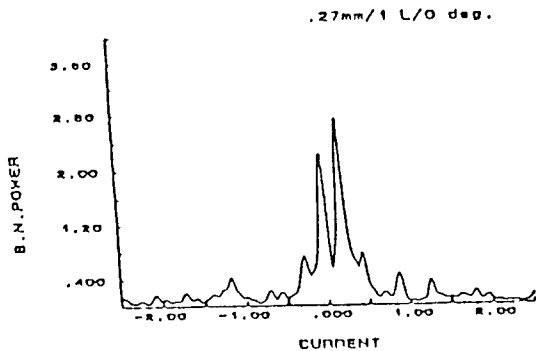
Fig. 4는 두께가 0.27 mm인 3% 규소강판의 [001] 집합조직 방향에 90° 방향으로 선긋기하여 Barkhausen noise envelope를 측정된 것이며, Fig. 4 (A)는 선긋기를 하지 않은 것을 나타낸다. 그림에서 1L, 3L, 7L, 15L은 선긋기 간격으로서 39 mm, 19.5 mm, 9.75 mm, 4.88 mm에 해당한다. 그림에서 보는바와 같이 선긋기를 하지 않은 규소강판의 경우 Barkhausen noise envelope의 peak가 처음에 4개 나타났으며, 선긋기의 횟수가 늘어남에 따라, 즉 선의 간격이 감소함에 따라 양쪽 peak들이 점차 사라지고 envelope의 크기도 서서히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5는 두께가 0.27 mm인 규소강판의 [001] 방향에 대해 80° 방향으로 선긋기한 실험 결과이다. 앞의 실험과

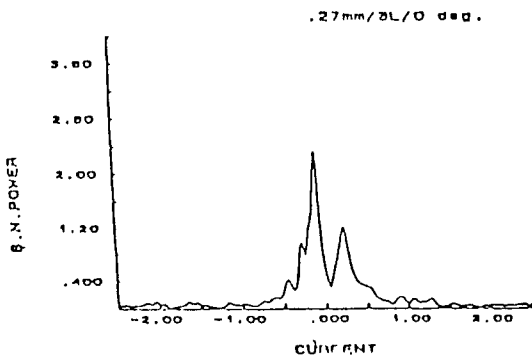
마찬가지로 선긋기의 횟수가 많아질수록 즉, 선의 간격이 감소할수록 Barkhausen noise envelope 값도 감소함을 알 수 있었다. 단지 선의 간격이 19.5 mm(3L) 이후에는 대체적으로 감소현상이 나타나지 않으며, 앞의 결과처럼 4개의 peak 대신 2개의 peak를 보이고 있다.



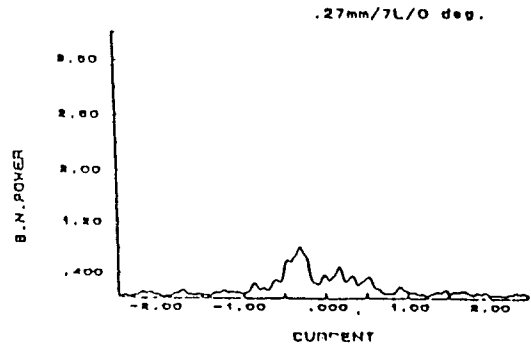
(A) none scratching



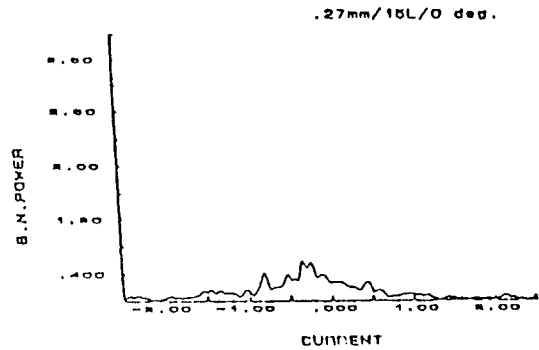
(B) line width 39 mm



(C) line width 19.5 mm



(D) line width 9.75 mm



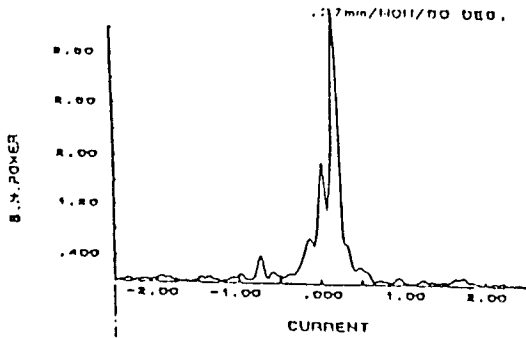
(E) line width 4.88 mm

Fig. 4. The rectified Barkhausen noise envelope for the scratched specimen in 90 direction with respect to texture in 0.27 mm Si-Fe

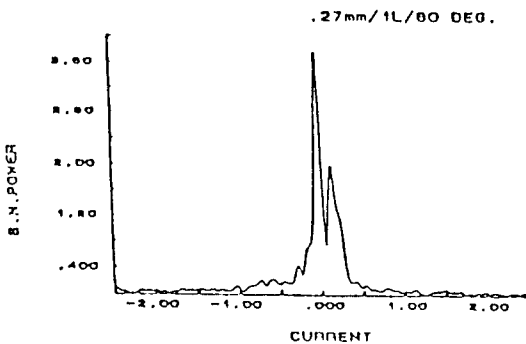
Fig. 6은 두께가 0.27 mm의 규소강판의 [001] 방향에 대해 50° 방향으로 선긋기 간격을 39 mm에서 2.44 mm 까지 한 실험 결과이다. 선긋기하지 않은 시편의 경우 2개의 peak가 생겼으나 점차 단일 peak로 변화한 후 선긋기의 간격이 감소함에 따라 Barkhausen noise envelope의 크기가 감소함을 알 수 있었다. 이 경우에도 선의 간격이 19.5 mm 이후에는 감소현상이 둔화됨을 알 수 있다.

앞의 결과에 의하면 선긋기를 하지 않은 경우나 1번 선긋기를 한 경우 Barkhausen noise envelope의 peak 형태가 대체로 2 peak의 형태를 보이고 있는데, Fig. 4의 경우에는 4개의 peak 형태가 나타났다. 방향성 규소강판에서 Barkhausen noise envelope의 2 peak 또는 4 peak 현상은 시편이 자화시 자기이력곡선의 knee 부분에서 일어나는 180° 자구와 zig-zag 형태의 자구의 생성과

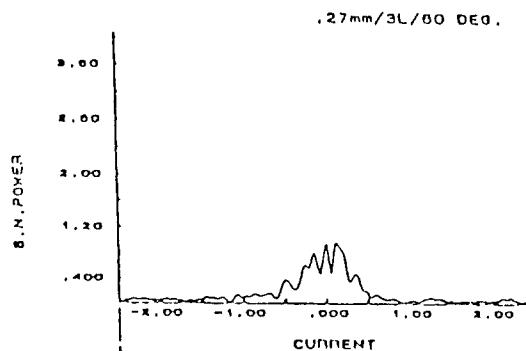
소멸에 의해 발생하는 것으로 고려되고 있다[11]. 자기이력곡선에서 외부자장이 최대로 걸리면 자구는 모두 한 방향을 이루며, 이때는 자구사이의 자구벽이 시편의 양쪽 모서리 부분이나 위아래 표면, 입계면, 결함이 있는 부분 외에는 거의 존재하지 않는다. 자장을 서서히 감소시킴에



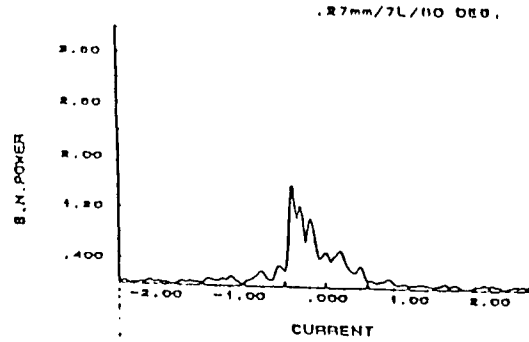
(A) none scratching



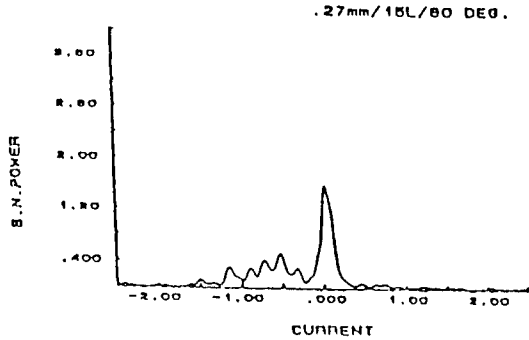
(B) line width 39 mm



(C) line width 19.5 mm



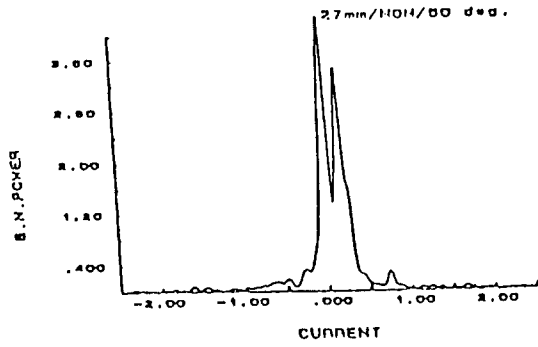
(D) line width 9.75 mm



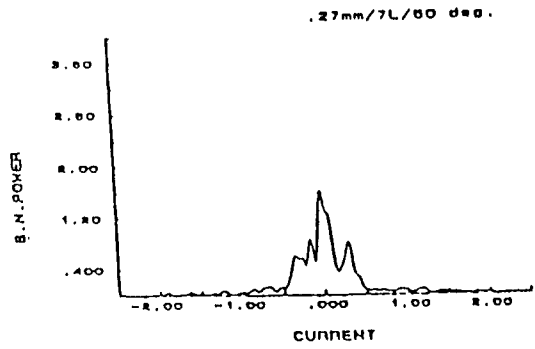
(E) line width 4.88 mm

Fig. 5. The rectified Barkhausen noise envelope for the scratched specimen in 80 direction with respect to texture in 0.27 mm Si-Fe

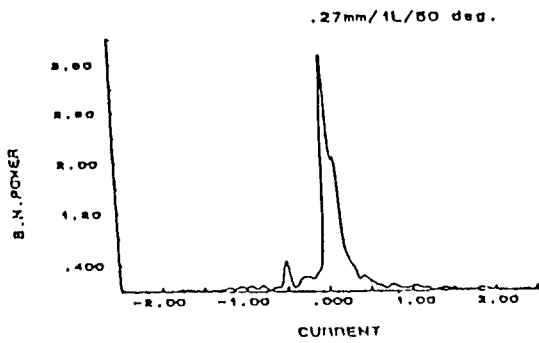
따라 시편의 이런 부분에 있던 reverse spike domain, 즉 자화된 방향이 외부자장과 반대 방향인 뾰족한 모양의 자구들이 빠르게 성장하여 bar 형태의 폭이 좁고 긴 모양의 180° 자구가 외부자장의 방향에 반대가 되도록 생성된다. 방향성 규소강판의 경우 이 180° 자구생성이 급격히 일어나며 그에 따라 자기전속의 변화가 심해서 Barkhausen noise가 많이 발생한다. 또한 그 반대로 180° 자구의 소멸과정에서도 Barkhausen noise가 많이 발생한다 [11]. 방향성 규소강판은 외부의 장력에 따라 자구의 모양이 복잡해지기도 한다. 집합조직 방향과 장력의 방향이 다를 경우 자구는 180° 자구외에 약 55° 정도 기울어진 zig-zag 자구가 발생하여 매우 복잡한 형태가 된다. 이 경우 자화에 따른 Barkhausen noise를 측정할 경우에는 peak의 형태가 2개의 peak대신 여러 peak가 발생할 수



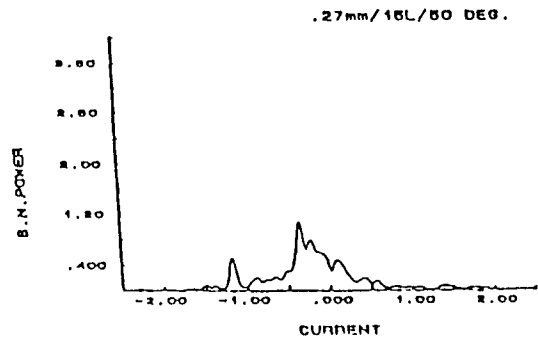
(A) none scratching



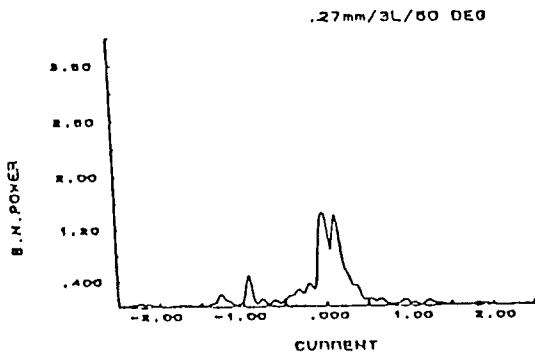
(D) line width 9.75 mm



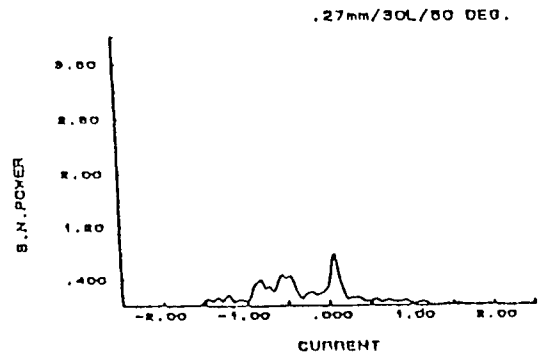
(B) line width 39 mm



(E) line width 4.88 mm



(C) line width 19.5 mm



(F) line width 2.44 mm

Fig. 6. The rectified Barkhausen noise envelope for the scratched specimen in 50 direction with respect to texture in 0.27 mm Si-Fe

있다. 그러므로 Fig. 5, 6의 2 peak현상은 180° 자구의 생성과 소멸로서 설명할 수 있는데 반하여, Fig. 4의 경

우는 잔류응력에 의해 시편내에 zig-zag 자구의 생성으로 다른 결과가 나타난 것으로 생각된다.

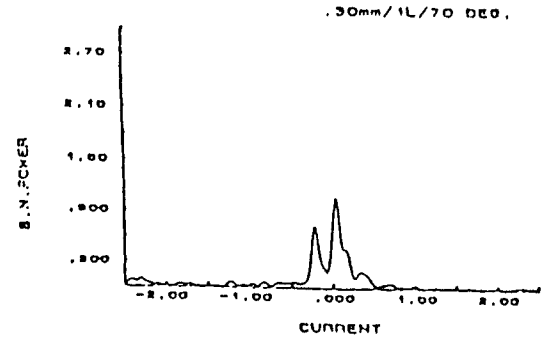
선의 간격이 줄어들수록 따라 Barkhausen noise envelope의 peak가 감소하는데 이 현상은 선긋기한 부분에서 180° 자구 생성의 기본이 되는 reverse spike domain이 많이 발생하므로 자화과정중에 180° 자구의 생성과 소멸이 쉬워지며, 그에 따라 선긋기를 하지 않은 경우에 비하여 단위시간당 자화 변화율이 감소하여 Barkhausen noise의 크기가 감소한다. 그 결과로서 선긋기의 간격을 4.88 mm, 2.44 mm로 한 시편의 경우 모두 peak의 크기가 현저히 감소하였으며, 선긋기에 의한 장력에 의해 자구의 모양이 많이 복잡해짐에 따라 envelope의 형태도 매우 복잡해졌다. 또한 선긋기에 의해 180° 자구의 폭이 감소함에 따라 각 자구벽이 움직이는 영역이 축소되고, 그에 따라 자구벽의 움직임이 감소함에 따라 단위시간당 자화 변화율값이 감소될 것으로 생각한다. 즉 시편 전체적으로는 자화되는 총 값은 선긋기의 여부에 관계없이 같지만 Barkhausen noise는 단위 시간당 자속 변화값에 관계하므로 자벽의 속도감소는 Barkhausen noise envelope의 크기 감소를 유발할 것으로 생각한다. 선긋기의 각도에 다른 결과를 보면 90° 경우보다 80°나 50° 경우 Barkhausen noise envelope의 형태가 매우 복잡하고 peak의 크기도 큼을 알 수 있다. 이는 선긋기를 할 때 장력이 인가되며, 그에 따라 집합조직 방향에 대해 기울어진 각도로 인가되면 시편에 zig-zag의 자구가 발생되어 자화에 따른 자구벽의 운동이 매우 복잡할 것으로 생각된다. 그에 따라 Barkhausen noise envelope이 선긋기의 간격이 감소함에 따라 복잡한 형태를 이루며 크기에서 약간의 감소현상만 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 7은 두께가 0.30 mm의 규소강판에 선긋기한 실험 결과이다. 전반적인 결과는 선긋기의 횟수를 늘려감에 따라 0.27 mm의 3% 방향성 규소강판에서의 마찬가지로 peak의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 7L, 15L, 30L의 경우 전반적인 peak의 감소현상은 별 차이가 없었다. 따라서 선긋기를 많이 한다고 Barkhausen noise가 감소한다고는 고려할 수 없고, 어느 적절한 간격이 존재하는 것으로 생각된다.

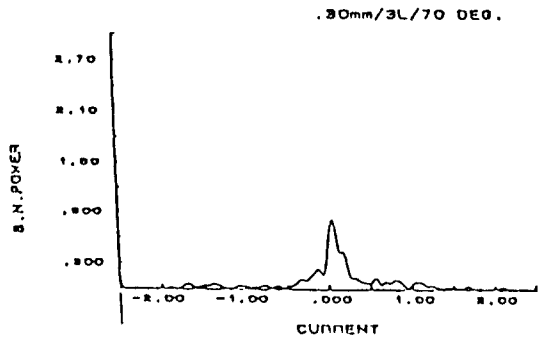
Fig. 8은 두께가 0.27 mm인 3% 방향성 규소강판에서 선긋기 각도와 간격에 따른 Barkhausen noise power의 그림이다. 선의 간격이 줄어들수록 따라 Barkhausen noise power값도 감소함을 알 수 있었다. 이것은 선긋기 횟수에 따라 자구가 미세화 되어지며 자기 손실이 줄어드는 것으로 알려진 결과와 일치한다.

Fig. 9는 두께가 0.30 mm 3% 방향성 규소강판에서 선긋기 각도와 간격에 따른 Barkhausen noise power의 그림이다. 앞 결과 마찬가지로 선의 간격이 감소함에 따

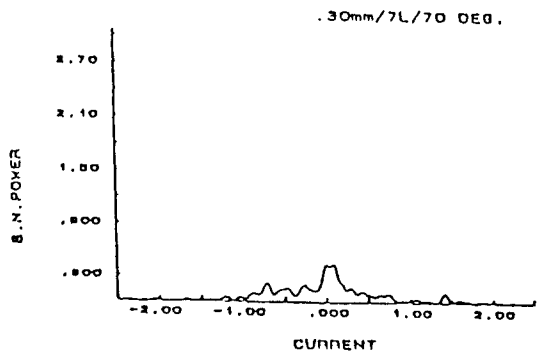
라 power의 값이 감소한다. 또한 그림에서 보듯이 각도가 60°, 70°, 80° 일 때는 완전한 기울기를 보이나 각도가 50°일 경우는 현저한 Barkhausen noise power의 감소를 볼 수 있었다. 이 결과는 Fig. 8에서 선긋기의 각도가 50° 일 경우에도 현저한 감소현상을 보였는데 그 이유를



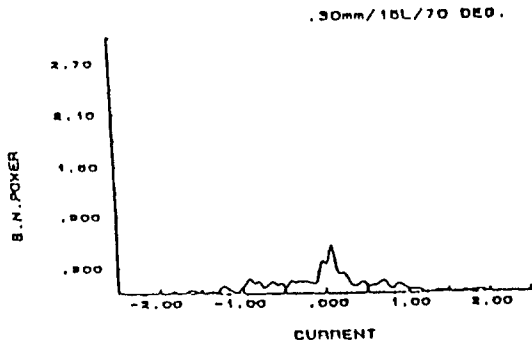
(A) line width 39 mm



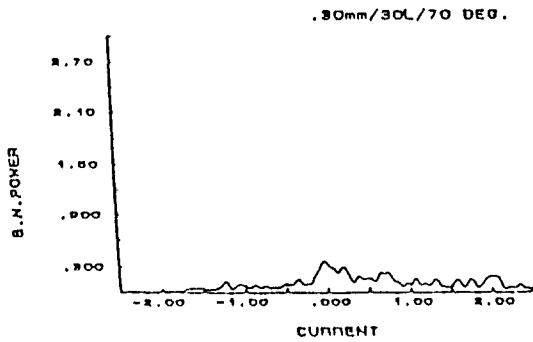
(B) line width 19.5 mm



(C) line width 9.75 mm



(D) line width 4.88 mm



(E) line width 2.44 mm

Fig. 7. The rectified Barkhausen noise envelope for the scratched specimen in 70 direction with respect to texture in 0.03 mm Si-Fe

적절히 설명할 수는 없으나 일반적으로 집합조직 방향과 다른 방향으로 외부자장이나 외부장력이 가해질 때 집합조직 방향에 55° 기운 zig-zag자구가 발생한다. 그에 따라 50° 근처에서의 Barkhausen noise power 감소현상은 이 zig-zag자구의 발생과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 두께가 0.27 mm와 0.30 mm의 방향성 규소강판을 이용하여 선긋기의 간격(39 mm ~ 1.22 mm), 집합조직 방향에 대한 선긋기의 각도(90° ~ 50°)의 변화에 따라 Barkhausen noise envelope과 power를 측정하였다. 0.27 mm의 실험에서는 선긋기를 하지 않

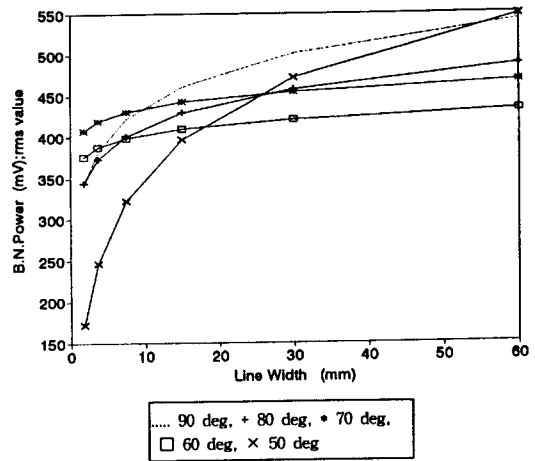


Fig. 8. The dependence of Barkhausen noise power on line width at various scratching angle(90° ~ 50°) in 0.27 mm 3 % Si-Fe

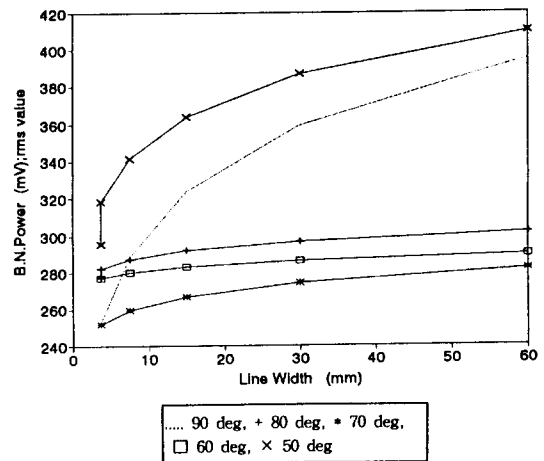


Fig. 9. The dependence of Barkhausen noise power on line width at various scratching angle(90° ~ 50°) in 0.33 mm 3 % Si-Fe

은 경우와 선간격이 39 mm (1L) 인 경우에는 대체로 Barkhausen noise envelope에서 두개의 peak 현상을 보였으며, 그 현상은 180° 자구의 생성과 소멸과정을 진행하는데 있어서 많은 activation energy가 필요하므로 인하여 강한 2개의 peak 현상이 나타나는 것으로 설명할 수 있었다. 단지 90° 선긋기 시편에서의 4 peak 현상은 잔류응력에 의한 zig-zag자구 발생에 의한 것으로 고려하고 있다. 선긋기 횟수를 늘려감에 따라서 peak값이 감소하지만 선의 간격이 19.5 mm부터는 더 이상의 큰 변화는

일어나지 않았다. 이것은 선긋기 근처에서 180° 자구의 생성과 소멸이 쉽게 일어나기 때문에 Barkhausen noise의 크기가 감소하는 것으로 설명하였다. 이 현상은 0.30 mm에서도 설명할 수 있었다. Barkhausen noise power는 선긋기 간격이 좁아짐에 따라 감소하였고, 각도변화에 따른 결과는 50° 근처에서 가장 적은 값을 보였다.

감사의 글

본 실험을 위하여 시편을 지원해주신 산업기술연구소 특수강 연구부의 “우종수” 실장님께 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] Barkhausen, H, Phys. Z. **20**, 402, (1919)
- [2] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-wesley (1972)
- [3] Phys. Rev. 75 (1949)
- [4] Karjalainen, M. Moilanen, IEEE Trans. on **MAG.-11**, 514 (1980)
- [5] 우종수 “The 5TH PHYSICS SYMPOSIUM ON MAGNETIC MATERIALS AND APPLICATION”
- [6] N. Takahashi, Y. Ushigami, M. Yabumoto, Y. Suga IEEE Trans. on **MAG. 22**, No. 5 (1986)
- [7] M. Yabumoto, H. Kobayashi, T. Nozawa, K. Hirose and N. Takahashi IEEE Trans. on **MAG. 23**, No. 5 (1987)
- [8] K. Arai, H. Mogi and K. Ishiyama IEEE Trans. on **MAG. 26**, No. 5 (1990)
- [9] M. Komatsubara, J. L. Porteseil IEEE Trans on **MAG. 22**, No. 5 (1986)
- [10] 황도근 “강자성체에서 바크하우젠 노이즈에 관한 연구” 1988 KAIST 학위청구논문
- [11] Zayakoba V A, Dragoshanskiy Yu N, Zhakov S V and Filippov B N 1977 Phys. Met. Met, **43**, 979

Effect of surface scratching on Barkhausen Noise in 3% Silicon Steel

C. M. Park, K. A. Lee

Department of Physics, Dankook University, Chonan 330-714

D. G. Hwang

Department of Physics, Sangji University, Wonju 220-702

(Received 26 November 1993, in final form 26 May 1994)

The Barkhausen noise was measured as the change of line width(39 ~ 1.22 mm) and scratching angle(90° ~ 50°) with respect of rolling direction in grain-oriented 3% Si-Fe of 0.30 and 0.27 mm thickness. The two peak phenomena of the noise envelope observed for non-scratching and scratching of line width 39 mm was explained by large activation energy during 180° domain wall nucleation and annihilation processes. The amplitudes of the noise envelopes were decreased as the decrement of scratching line width, but did not almost changed below line width of 9.75 mm. It was explained that the decrease in the envelope with increasing scratching number is associated with lower activation energy of 180° domain nucleation and annihilation in the vicinity of the scratching area. The noise power was decreased as narrower line width. The dependence of the power on the scratching angle was sharpest decreased at the 50 angle.