

Fe계 연자성 합금 분말의 고온 압연시 자성특성에 미치는 압연인자들의 영향

김휘준¹, 이주호¹, 이성호¹, 박은수², 허무영², 배정찬¹

Effect of rolling parameters on soft-magnetic properties during hot rolling of Fe-based soft magnetic alloy powders

H. J. Kim, J. H. Lee, S. H. Lee, E. S. Park, M. Y. Huh, J. C. Bae

Abstract

Iron-based soft magnetic materials are widely used as cores, such as transformer transformers, motors, and generators. Reducing losses generated from soft magnetic materials of these applications results in improving energy conversion efficiency. Recently, the new P/M soft magnetic material realized an energy loss of 68 W/kg with a drive magnetic flux of 1 T, at a frequency of 1 kHz, rivaling general-purpose electromagnetic steel sheet in the low frequency range of 200 Hz to 1 kHz.

In this research, the effect of rolling parameters on soft magnetic properties of Fe-based powder cores was investigated. The Fe-based soft magnetic plates were produced by the hot powder rolling process after both pure Fe and Fe-4%Si powders were canned, evacuated, and sealed in Cu can. The soft magnetic properties such as energy loss and coercive power were measured by B-H curve analyzer. The soft magnetic properties of rolled sheets were measured under conditions of a magnetic flux density of 1 T at a frequency of 200 kHz. It was found that rolling reduction ratio is the most effective parameter on reducing both energy loss and coercivity because of increasing aspect ratio with reduction ratio. By increasing aspect ratio from 1 to 9 through hot rolling of pure Fe powder, a significant loss reduction of one-third that of SPS sample was achieved.

Key Words: powder rolling, soft-magnetic property, aspect ratio, iron loss

1. 서론

최근 자동차 및 가전기기 등과 같은 산업분야에서 자동화 및 복합기능성을 추구하기 위해 전기구동 기기와 전기제어 기기의 사용이 현저히 증가하고 있다. 연자성 소재는 이들 기기의 코어를 형성하는 핵심소재로서 모터, 변압기, 센서 등과 같은 전자기 변환 부품의 고속, 고효율, 고효율을 실현하기 위해서 투자율, 자기손실 등과 같은 연자성 특성의 향상이 요구된다[1].

전기 기기의 코어에 사용되고 있는 대표적인 연자성 소재로는 철계 연자성 소재가 사용되고 있는데, 특히 실리콘을 첨가한 전기강판의 경우 변압기 등의 정자기에 사용되는 방향성 전기강판과 모터 등의 회전기에 사용되는 무방향성 전기강판으로 구분되어 널리 사용되고 있다. 그러나, 최근 분말야금 공정을 이용하여 연자성 분말 표면에 수지, 산화물, 유리질 등과 같은 절연물질을 코팅한 연자성 복합 분말(SMC, soft magnetic composite)의 상용화에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 실리콘 전기강판의 자기손실보다 낮은 68 W/kg (1 T 의 자속밀도, 1 KHz 의 주파수에서)의 연자성 복합분말의 연구결과가 보고되고 있다[2] [3].

그러나, 철계 분말소재의 압연에 의한 연자성 특성의 제어에 대한 체계적인 연구결과는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 Fe 계 연자성 분말에 대해 압하율, 압연온도 등의 열간압연 공정변수들이 자기손실 및 보자력 등의 연자성 특성에 미치는 영향을 고찰했다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 표 1 에서 보는 바와 같이 사용된 연자성 분말소재는 90 μm 이하의 크기를 갖는 순도 2N 의 Fe 분말 및 Si 4wt.% 함량의 Fe-Si 분말을 사용하였다. 분말을 구리 캔에 장입하여 230 $^{\circ}\text{C}$ 에서 진공배기 시킨 다음 밀봉하여 각각 700 $^{\circ}\text{C}$ 와 800 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도, 50%와 70%의 압하율의 조건으로 열간 압연하여 폭 50 mm, 길이 300 ~ 450 mm, 두께 1.5 ~ 3 mm의 판재를 제조하였다. 이때 사용된 압연롤의 직경은 300 mm, 압연롤의 속도는 20rpm 로 고정시켰다. 한편, aspect ratio 의 효과를 비교하기 위하여 Fe 분말 및 Fe-4%Si 분말을 각각 700 $^{\circ}\text{C}$ 와 800 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 플라즈마 방전 소결에 의해 직경 25 mm, 두께 5 mm의 디스크 성형체를 제조하였다[4].

제조된 시험편의 미세구조 및 aspect ratio 의 조사를 위해 주사전자현미경 분석을 실시하였으며, 상분석을 위해 X선 회절분석, 그리고 자성특성을 측정하기 위해 B-H 분석을 수행했다.

Table 1. Experimental conditions for hot rolling of Fe-based powders

실험변수	분말조성(wt.%)		압연조건				SPS 온도	
			압연온도		압하율			
조건	Fe 분말 (Fe>99.0)	Fe-Si (Si:4.0)	700 $^{\circ}\text{C}$	800 $^{\circ}\text{C}$	50%	75%	700 $^{\circ}\text{C}$	800 $^{\circ}\text{C}$

3. 실험 결과

열간압연 또는 플라즈마 방전 소결에 의해 제조된 순철 또는 Fe-4%Si 판재의 자기손실 및 보자력은 그림 1 에서와 같이 다양한 변화를 나타내고 있어 압연 공정변수들의 조건에 따라 연자성 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

자속밀도 1 T, 주파수 200 Hz 의 조건에서 압연 공정조건에 따른 자기손실 및 보자력의 변화를 살펴보면, 약간의 경향 차이는 있으나 자기손실 및 보자력 모두 순철의 경우 Fe-4%Si 에 비해 변화가 심했는데, 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서 75 %의 압하율로 제조된 순철 압연판재의 자기손실이 50 W/kg 으로 가장 낮았으며, 이는 가장 낮은 보자력의 결과와도 일치하였다.

이와 같은 결과를 미세구조의 분석을 통해 살펴보면, 그림 2 에서 보는 바와 같이 순철 판재의 경우, 압하율이 증가할수록 압연방향(그림의 수직방향)으로 분말입자가 더욱 길게 연신되어 aspect ratio 가 높아지고 있음을 확인할 수 있다. 한편, Fe-4%Si 판재의 경우, 압하율이 증가해도 압연방향으로 연신은 거의 변화가 없으며 입자간 균열이 진행되고 있는 것이 관찰되었다. 플라즈마 방전 소결에 의해 제조된 성형체의 경우, 조성에 상관없이 미세한 균열이 발생하였으며, 일정 방향으로의 연신은 거의 없어 aspect ratio 는 거의 1에 근접하였다.

SEM 을 이용하여 열간압연 조건에 따라 제조된 판재의 압연방향으로의 aspect ratio 를 정리하면, 그림 3 에서 보는 바와 같이 압연온도가 높고, 압하율이 증가할수록 aspect ratio 는 1 에서 9 까지 증가하였으며, 순철분말을 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서 75 %의 압하율로 열간압연하여 제조된 판재의 aspect ratio 가 9 이상으로 가장 높았

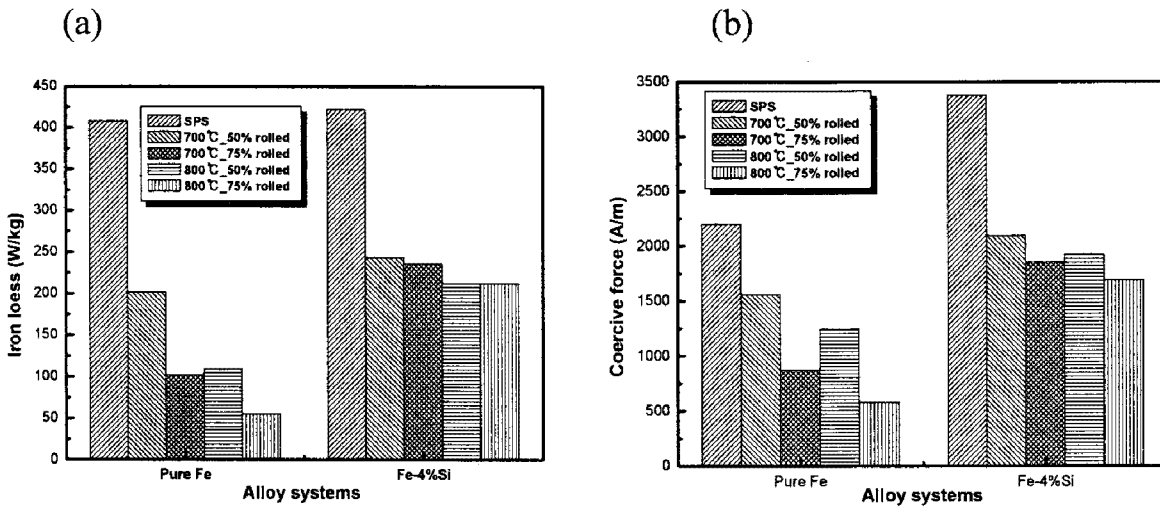


Fig. 1. Variation of (a) iron loss and (b) coercive force in Fe-based specimens consolidated by hot rolling or spark plasma sintering with consolidation parameters.

다. 이 결과는 동일한 판재에서 가장 낮은 자기손실 및 보자력의 결과와 일치하고 있으며, 따라서, 연자성 철계 분말의 열간압연에서 공정변수 중 압하율이 연자성 특성에 가장 큰 영향을 주었는데, 이는 압하율이 증가할수록 aspect ratio가 증가하는 것과 밀접한 관계가 있다고 사료된다. 결국, 열간압연 공정변수를 최적화할 경우, 플라즈마 방전 소결한 시험편에 비해 자기손실이 1/3로 감소된 연자성 판재를 제조할 수 있었다.

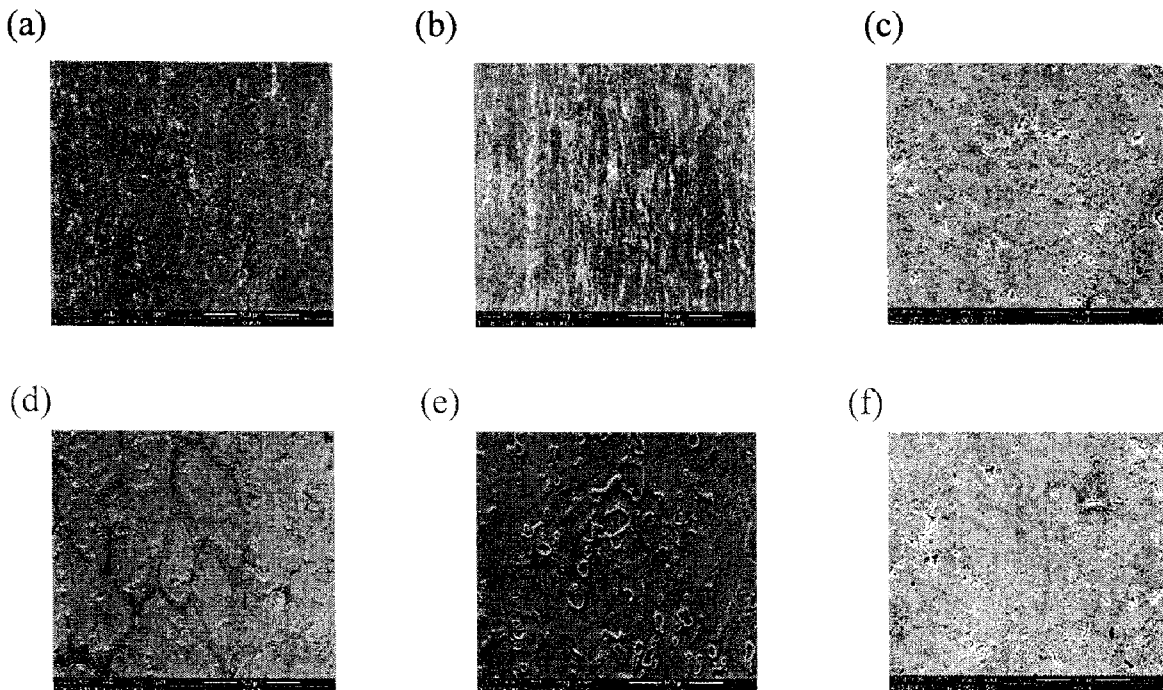


Fig. 2. Variation of microstructure of Fe-based plates consolidated by hot rolling or SPS at 800°C: (a) 50% rolled pure Fe sheet, (b) 75% rolled pure Fe sheet, (c) spark plasma sintered pure Fe specimen, (d) 50% rolled Fe-4%Si sheet, (e) 75% rolled Fe-4%Si sheet, and (f) spark plasma sintered Fe-4%Si specimen.

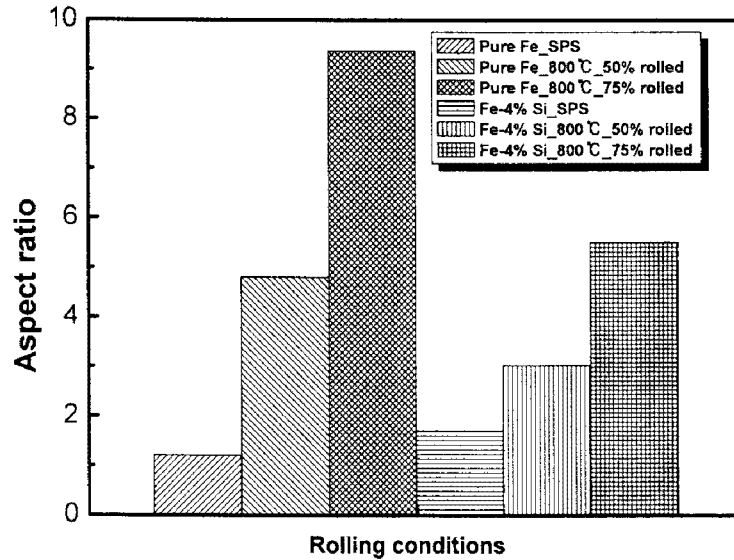


Fig. 3. The variation of aspect ratio in Fe-based specimens consolidated by hot rolling or spark plasma sintering with consolidation conditions.

4. 결 론

본 연구에서는 순 Fe, Fe-4%Si 분말에 대해 압하율, 압연온도 등의 열간압연 공정변수들이 자기손실 및 보자력 등의 연자성 특성에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압하율 및 압연온도가 증가할수록 자속밀도 1 T, 주파수 200 Hz의 조건에서 보자력은 감소하고, 자기손실이 증가하였으며, 열간압연의 공정변수 중 압하율이 연자성 특성에 가장 큰 영향을 주었다.

(2) 압하율이 증가할수록 열간압연 판재의 aspect ratio가 증가하였으며, aspect ratio가 1에서 9로 증가할 경우, 플라즈마 방전 소결한 시험편에 비해 자기손실이 1/3로 감소하였다.

참 고 문 헌

- [1] K. Asaka, C. Ishihara, Hitachi Powdered Metals Tech. Rep., 4, 3 (2005).
- [2] T. Maeda, H. Toyoda, N. Igarashi, K. Hirose, K. Mimura, T. Nishioka and A. Ikegaya, SEI tech. review, 60, 3(2005)
- [3] S. Kenichi, G. Satoshi, and U. Satoshi, JFE Tech. Rep., 6, 1 (2005).
- [4] E. S. Park, H. G. Kang, J. C. Lee, M. Y. Huh, H. J. Kim, J. C. Bae, J. Mater. Process. Technol. 187-188, 783 (2007).