

Si 함량에 따른 Fe-Si 압분코어의 자기적 특성

장평우*

청주대학교 이공대학 IT학부, 충북 청주시 상당구 내덕동 36, 360-764

이봉한·최광보

(주)창성 중앙연구소, 인천시 남동구 남촌동 620-8, 남동공단 11-9, 405-100

(2010년 1월 28일 받음, 2010년 2월 12일 최종수정본 받음, 2010년 2월 12일 게재확정)

연자기 특성이 우수한 것으로 잘 알려진 Fe-6.5 % Si 합금을 분말로 제작하여 성형한 Fe-6.5 % Si 압분코어에서도 좋은 특성을 얻을 수 있는지를 확인하기 위해 Fe-3, 4.2 그리고 6.8 % Si 압분코어를 각각 제작하여 교류와 직류 자기특성, 미소경도 등을 분석하였다. 실리콘 함량이 증가할수록 와전류손실은 감소하나 이력손실은 증가하여 Fe-6.8 % Si에서 최소손실을 얻을 수 없었다. 또한 실리콘함량이 증가할수록 코어의 전기비저항과 분말입자의 미소경도는 지속적으로 증가하였으며 이 때문에 충진율은 감소하였다. B2와 DO₃상이 Fe-6.8 % Si 분말에서만 생성된 것을 확인할 수 있었으며, 6.8 % Si보다 낮은 실리콘 함량에서 코어 손실이 더 낮은 것을 절연체와 분말입자의 비저항 비율, 미소경도변화에 따른 충진율 저하와 반자장 효과 등으로 설명할 수 있었다.

주제어 : Fe-Si 압분코어, Fe-6.5 %Si, 실리콘 함량, 가공성, 코어손실

I. 서 론

실리콘을 3 wt% 이하로 함유하는 적층 실리콘강판은 변압기, 발전기 그리고 모터의 철심재료로 지금까지 널리 사용되고 있다. Fe-Si 합금에서 연자기특성이 가장 우수한 조성은 Fe-6.5 wt% Si인데, 이것은 자기변형이 거의 없고 결정이방성이 낮으며 비저항이 높은 특성에 기인한다[1]. 특히 실리콘 함량이 3%에서 6.5%로 증가함에 따라 비저항이 48 μΩcm에서 82 μΩcm로 증가해 와전류손실을 크게 낮출 수 있다 [2]. Fe-6.5 % Si 합금이 우수한 연자기특성을 가지고 있음에도 불구하고 대부분 3% 이하로 함량이 제한되는 것은 실리콘 함량이 2.5% 이상이 되면 연성이 급격히 악화되기 때문이다[3]. 이 때문에 4% 이상의 Si를 함유하는 Fe-Si 강판을 경제적인 방법으로 냉간압연하는 것이 불가능한 것으로 알려져 있다[4]. 하지만 근래에 에너지효율이 더욱 중요하게 되면서 손실이 적은 코어가 요구되는 분야가 많아져 Fe-(5~6.5%) Si 합금을 냉간가공하고자 기계적 그리고 미소구조를 분석한 연구가 다시 진행되었으나 만족스런 결과를 얻지 못하였다[5].

Fe-Si 분말을 압분코어로 제조하면 Fe-Si 합금의 낮은 가공성을 어느 정도 극복할 수 있다. 압분코어는 자성합금을 분말과 성형하는 공정을 거쳐 제조되며, 성형 전 분말표면에 절연층을 형성시킴으로써 와전류손실을 크게 낮출 수 있다. 압분코어는 주로 전원장치에 많이 사용되어 왔으며, 근래에는

하이브리드 자동차와 태양전지 전력조절장치 등에서도 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 Fe-Si 압분코어에서도 Si 함량이 6.5% 근처일 때 특성이 가장 좋을 수 있는지를 확인하고 Fe-Si 압분코어의 최적 조성을 추정하고자 하였다.

II. 실험방법

Fe-3, 4.2, 6.8 % Si 분말을 가스분무법으로 제조하여 직경 106 μm 이하로 체질하였다. 체질된 Fe-3, 4.2, 6.8 % Si 분말의 평균입도는 각각 57, 49, 55 μm이었고 입도분포도 거의 비슷하였다. 체질한 분말의 입자(grain)를 키우기 위해 1 × 10⁻⁵ Torr, 1000 °C에서 1시간 동안 진공열처리한 후 상온으로 냉각시켰다[6]. 계속해서 진공열처리된 분말을 900 °C, 고순도 (5 N) 질소분위기에서 2시간 열처리한 후 급냉시켰다. 열처리된 분말을 0.5%의 고체절연체(알루미늄과 활석으로 구성)와 혼합하여 1176 MPa의 압력으로 내경 7.6 mm, 외경 12.7 mm의 토로이드 코어로 성형한 후 800 °C에서 1시간 동안 고순도 질소분위기에서 열처리하였다. 이상의 실험과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 동일한 조성의 코어를 5개 제작하였다.

코어손실(P_{total})은 0.1 T, 50 kHz의 조건으로 Iwatsu SY-8232 교류 이력곡선 측정기로 측정하였으며, 와전류손실(P_e)은 코어손실에서 이력손실(P_h)을 차감해서 얻었다. 초기투자율과 직류증첩투자율은 100 kHz의 조건에서 각각 Agilent

*Tel: (043) 229-8553, E-mail: pwjang@cju.ac.kr

4294A와 4284 임피던스분석기를 이용하여 측정하였다. 코어의 비저항은 코어 상, 하단부를 은페이스트로 도포한 후 열처리하여 측정하였다.

분말의 미소경도는 Mitutoyo HM indenter에서 490.3 mN의 하중으로 측정하였다. 결정구조는 Philips X'Pert x-선 회절분석기에서 측정하였으며 회절강도를 높이기 위해 직경 25 μm 이하의 분말을 사용하였다. 충진율($d_{\text{core}}/d_{\text{bulk}}$)은 코어의 밀도(d_{core})를 Fe-Si 벌크 재료의 밀도(d_{bulk})로 나누어서 구했다.

III. 실험결과 및 고찰

Fe-6.5% Si 압분코어의 앞선 연구에서 분말과 코어를 각각 1000°C와 800°C에서 열처리하였을 경우 코어손실이 가장 낮았으며 이것은 낮은 이력손실에 기인하였다[7, 8]. 본 연구에서는 앞선 연구의 열처리조건을 모든 Fe-Si 분말과 코어에 적용하였다. Fig. 1은 실리콘 함량에 따른 코어손실, 이력손실 그리고 와전류손실의 변화를 나타낸 것이다. 모든 코어에서 이력 손실이 와전류손실보다 컸으며, 이력손실은 3%와 4.2% Si 함량에서 비슷한 값을 나타내고 Fe-6.8% Si 코어에서 증가하였다. 반면 와전류손실은 실리콘함량이 증가함에 따라 감소하여, 전체적인 코어손실은 4.2% 실리콘함량에서 가장 낮은 744 mW/cm³의 값을 나타내었다. 와전류손실이 Si 함량이 증가함에 따라 감소한 것은 분말입자의 비저항이 증가하였기 때문이다. 한편 이력손실이 3%와 4.2%에서 비슷하고 6.8%에서 증가한 것은 B2와 DO₃ 규척상의 생성과 관련이 있는 것으로 추정된다. Fig. 2는 Fe-Si 합금의 평형상태도 일부를 나타낸 것으로, 실리콘함량이 5.5 wt% 이상이면 규척-비규척 전이가 있으며 이것은 이전의 실험에서도 확인되었다[7]. 그러나 DO₃ 규척상은 스피노달 분해에 의해 생성되므로 광학현미경으로 관찰하는 것은 불가능하다. Fe-6.8%

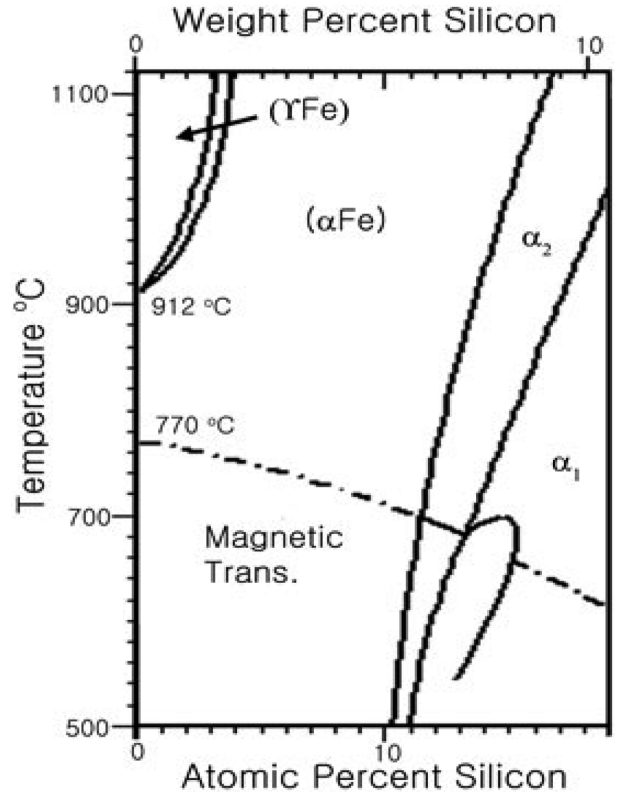


Fig. 2. A part of Fe-Si binary phase diagram.

Si 코어를 800°C에서 열처리하면 상자성을 띄는 B2 규척상이 조대화되어 자구의 움직임이 방해를 받으므로 Fe-6.8% Si 코어의 이력손실이 커진 것으로 생각된다[9, 10]. 한편 Fe-6.8% Si 합금의 이방성에너지가 아주 작기 때문에 작은 분말에서도 자구가 쉽게 생성될 수 있다[11].

압분코어에서 이웃한 분말입자와의 전기절연은 와전류 손실을 줄이기 위해 매우 중요하다. Fig. 3은 실리콘 함량에 따른 압분코어의 비저항과 투자율의 변화를 나타낸 것이다. 실리콘 함량이 증가함에 따라 비저항은 지속적으로 증가하나 투자율은 4.2% Si함량에서 최대값을 보인다. 본 실험에서 Fe-Si 압분코어의 비저항이 증가하는 원인을 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째는 앞에서 설명한 바와 같이 분말입자의 실리콘 함량이 증가함에 따른 비저항의 증가이다. 그런데 Fe-Si 벌크 합금의 비저항이 수십 $\mu\Omega\text{cm}$ 인 것을 감안하면 Fig. 3의 압분코어의 비저항은 벌크에 비해 수백만 배 이상 더 크므로 벌크합금의 비저항이 압분코어의 비저항을 결정하는 것은 아니다. 두 번째는 절연체의 비저항과 절연체가 분말입자표면에서 분포하는 양상의 변화이다. 본 연구에서 동일한 절연체와 공정을 사용했으므로 이러한 가능성은 제외된다. 마지막으로 이웃 분말입자와 물리적으로 접촉하고 있는 면적의 변화이다. 실리콘 함량이 높은 분말은 가공성이 낮으

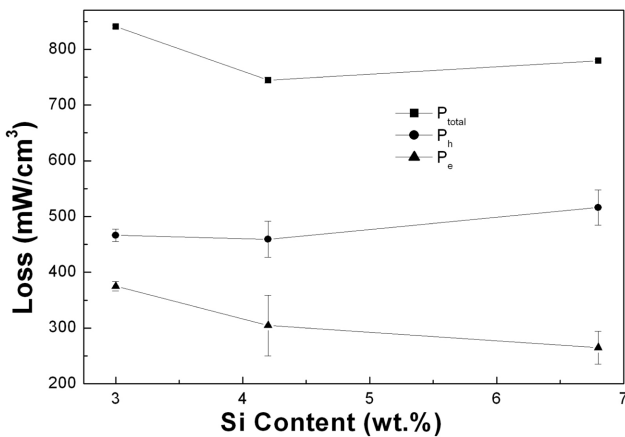


Fig. 1. Variations of total, hysteresis and eddy current loss of Fe-Si powder cores as a function of silicon content.

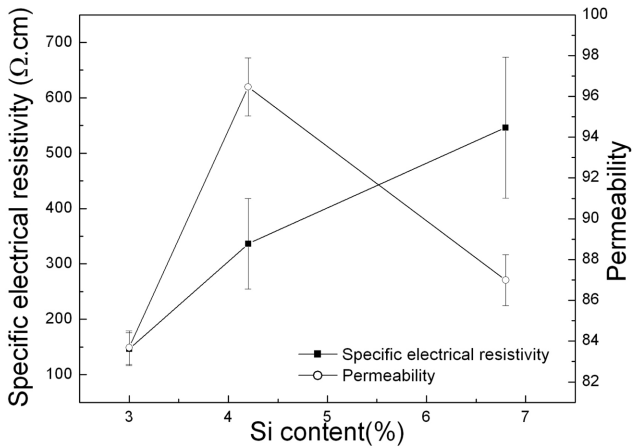


Fig. 3. Variations of electrical resistivity and permeability of Fe-Si powder cores as a function of silicon content.

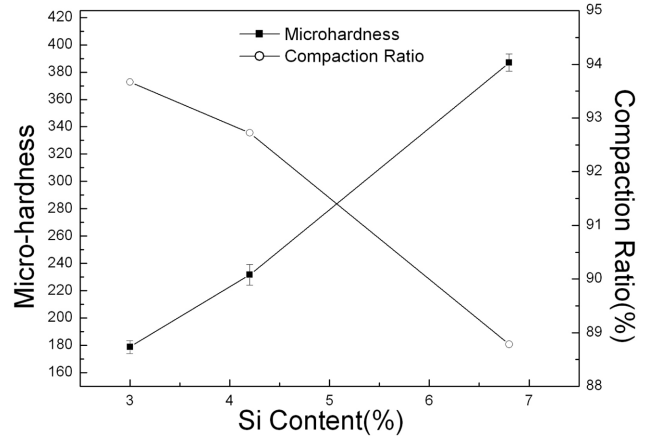


Fig. 4. Variations of micro-hardness and compaction ratio of the Fe-Si powder cores as a function of silicon content.

므로 성형할 때 압축이 잘 일어나지 않아 이웃 분말입자와의 접촉면적이 감소하여 입분코어의 비저항이 증가한다. Fe-Si 합금의 연신율은 실리콘 함량이 증가함에 따라 2.5 % Si 근처에서 급격히 감소하고 5 % Si 이상에서 연신율을 완전히

상실하는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 Fe-6.5 % Si 입분코어의 높은 비저항은 분말입자의 비저항 증가보다 분말의 가공성이 낮은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편 입분코어에 관한 이전의 수치해석 연구에서 절연체의 비저항이 분말입자의 비저항에 비해 10^5 배 이상이면 와전류

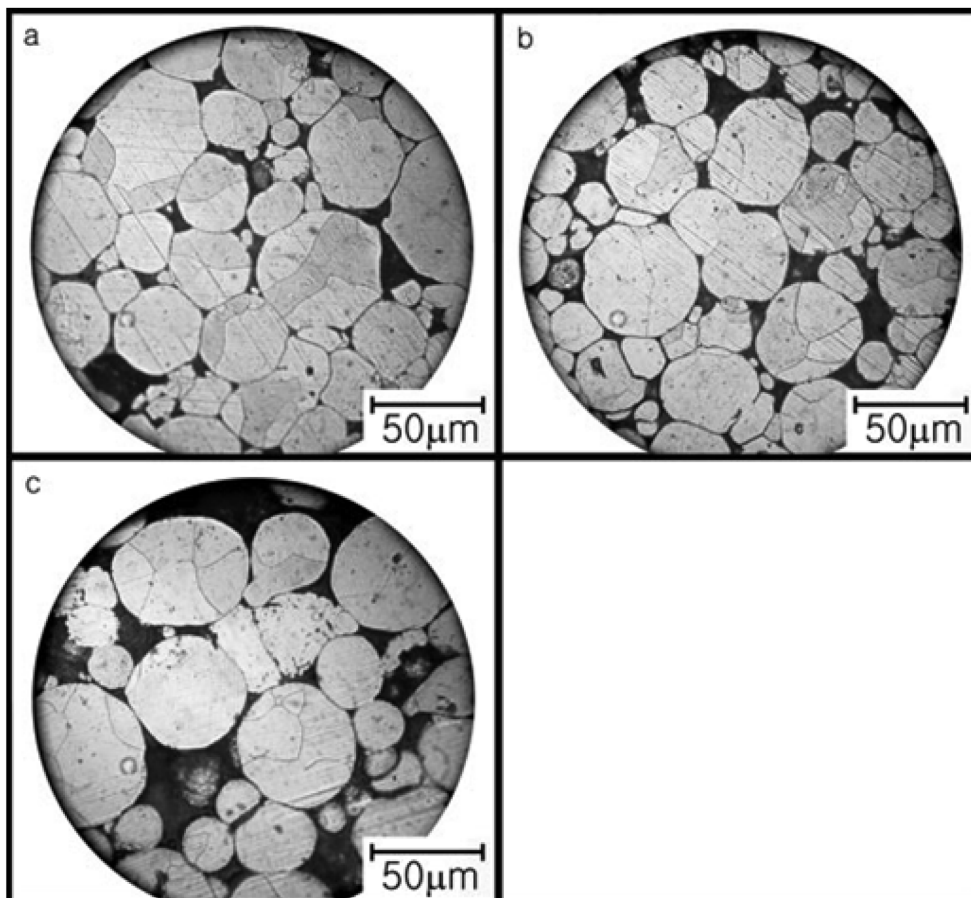


Fig. 5. Optical microscopic images of the Fe-3 % (a), 4.2 % (b), and 6.8 % Si (c) powder cores.

는 절연층을 건너 이웃 입자로 건너가지 않고 분말입자 내부에서 소용돌이 형태로 국한되었다[12]. 본 연구의 모든 Fe-Si 분말입자의 가공성이 동일하여 분말간의 접촉양상이 같다면 실리콘 함량이 증가할수록 와전류 손실은 감소하고 투자율은 계속 증가했을 것이다. 그러나 실제 실리콘 함량이 증가함에 따라 Fe-Si 분말입자의 가공성이 악화되므로 분말입자간 접촉면적이 감소한다. 접촉면적이 감소하면 자화의 크기가 연속적이지 못해 감자계수가 증가하므로 본 실험의 Fe-Si 압분코아 투자율은 감자계수와 와전류의 절충에 의해 결정된다.

Fe-Si 분말입자의 미소경도변화와 코어의 충진율 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 실리콘함량이 증가할수록 Fe-Si 분말입자의 미소경도는 증가하고 충진율은 감소하였다. 그리고 Fe-6.8% Si 분말의 미소경도와 충진율은 Fe-3, 4.2% Si분말입자의 미소경도값으로 외삽한 값보다 각각 더 크고 작다. 이와 같이 Fe-6.8% Si분말입자의 미소경도가 예측한 값보다 더 큰 것은 B2와 DO₃ 규칙상의 생성과 관계가 있다. B2 규칙상은 5.4% 이상의 실리콘을 함유한 Fe-Si 합금을 급냉 시켰을 때도 잘 생성된다[5].

실리콘을 많이 함유한 분말을 성형하는 것이 어렵다는 것을 Fig. 5의 압분코어의 단면 광학현미경 사진에서 잘 알 수 있다. Fe-3% Si 코어의 크고 작은 분말입자들은 모두 잘 변형되어 이웃 입자와의 접촉면적이 크게 되었음을 알 수 있다. Fe-4.2%Si 압분코어의 분말들은 Fe-3%Si 분말에 비해 약간 덜 변형된 것을 알 수 있다. 그러나 Fe-6.8%Si 코어의 분말들은 다른 두 분말보다 변형이 훨씬 덜 일어났으며, 이 때문에 코어의 비저항과 반자장계수가 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 6은 코어와 동일한 열처리 과정을 거친 Fe-Si 분말의 x-선 회절패턴을 나타낸 것이다. Fig. 6의 면지수는 DO₃상의 면지수를 기준으로 한 것이다. (111) 회절선은 DO₃상의 특성 회절선이고 (200)은 DO₃상과 B2상 모두에서 회절된다. Fe-3,

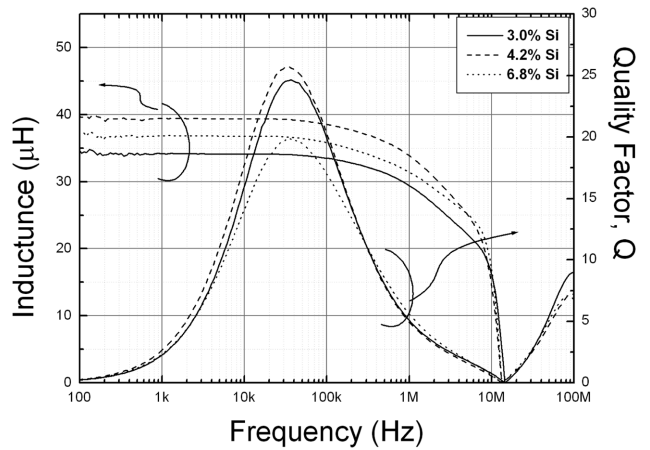


Fig. 7. Variations of inductance and quality factor of the Fe-Si cores as a function of frequency.

4.2% Si 분말에서 규칙상의 회절선을 관찰할 수 없었으나 Fe-6.8%Si 분말에서 (111)과 (200) 회절선을 모두 관찰할 수 있었다. 그러나 Fe-6.8%Si 분말에서도 DO₃와 B2 규칙상의 다른 회절선은 관측할 수 없었다.

Fig. 7은 주파수에 따른 Fe-Si 코어의 인덕턴스와 품질계수를 나타낸 것이다. 인덕턴스는 약 40 kHz까지 변화하지 않고 이후 감소하기 시작한다. 모든 주파수 영역에서 Fe-4.2% Si 코어의 인덕턴스가 가장 높았다. 10 MHz에서 모든 코어의 인덕턴스가 15 μH 이상이며 이것은 페라이트 코어의 인덕턴스보다 더 높다. 품질계수는 Fe-4.2% Si 코어가 가장 높았으며 34 kHz에서 가장 높은 값을 보였다.

Fig. 8은 직류중첩 특성인 기자력변화에 따른 코어의 인덕턴스 변화를 나타낸 것이다. Fe-6.8% Si의 직류중첩 인덕턴스는 다른 두 코어에 비해 낮았으며, 150 A-T 이하의 기자

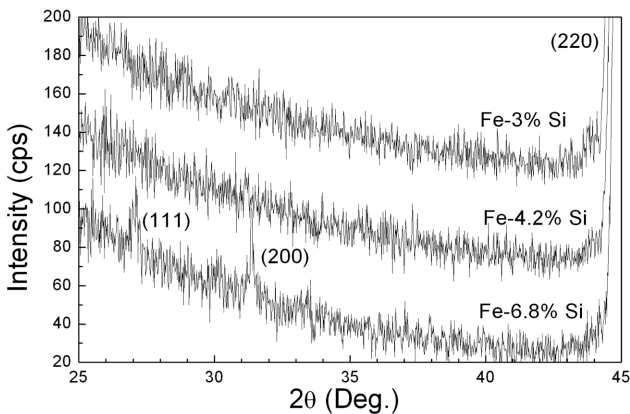


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the Fe-3%, 4.2%, and 6.8% Si powder.

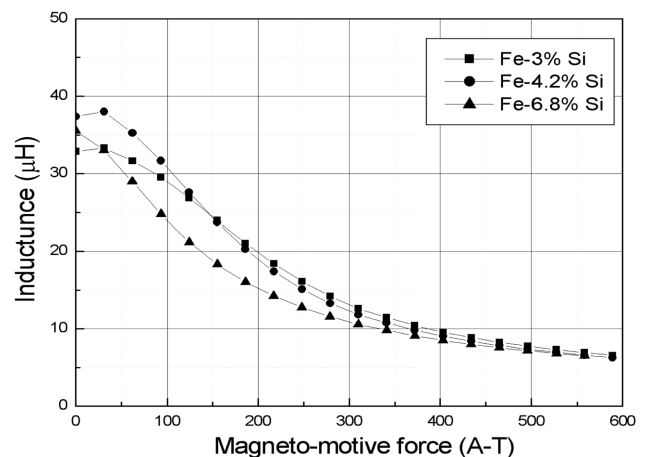


Fig. 8. Variation of inductance of the Fe-Si cores as a function of magneto-motive force.

력에서는 Fe-4.2 % Si 코어가, 그 이상의 기자력에서는 Fe-3 % Si 코어의 인덕턴스가 높았다. Fig. 8의 변화로부터 실리콘 함량이 감소할수록 직류중첩 특성은 개선되는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

Fe-3, 4.2, 6.8 % Si 압분코어를 제작하여 각 코어의 특성을 조사하였다. 실리콘 함량이 증가할수록 와전류손실은 감소하였으나 이력손실은 증가하여 최소 코어손실은 Fe-6.8 % Si 코어에서 얻을 수 없었다. 또한 실리콘 함량이 증가할수록 코어의 전기비저항과 분말입자의 미소경도는 지속적으로 증가하였으며 이 때문에 충진율은 감소하였다. B2와 DO₃상이 Fe-6.8 % Si 분말에서만 생성된 것을 확인할 수 있었으며, 6.8 % Si보다 낮은 실리콘 함량에서 코어손실이 더 작은 절연체와 분말입자의 비저항 비율, 미소경도변화에 따른 충진율 저하와 반자장효과 등으로 설명할 수 있었다.

참고문헌

[1] M.F. Littmann, IEEE Trans. Magn., 7(1), 48 (1971).

- [2] K. I. Arai and K. Ishiyama, J. Magn. Magn. Mater., **133**, 233 (1994).
- [3] Richard M. Bozorth, Ferromagnetism, D. Van Nostrand Company, Inc. Princeton, New Jersey (1959) p. 77.
- [4] Y. Sato, T. Sato, and Y. Okazakil, Mater. Sci. Eng., **99**, 73 (1988).
- [5] J. S. Shin, J. S. Bae, H. J. Kim, H. M. Lee, T. D. Lee, E. J. Lavernia, and Z. H. Lee, Mater. Sci. Eng., A, **407**, 282 (2005).
- [6] T. K. Lee, G. H. Kim, G. B. Choi, I. B. Jeong, K. Y. Kim, and P. W. Jang, Materials Science Forum, **534-536**, 1321 (2007).
- [7] P. Jang, B. Lee, and G. Choi, J. Appl. Phys., **103**, 07E743 (2008).
- [8] P. Jang, B. Lee, and G. Choi, Phys., Stat. Sol.(a), **204**, 4108 (2007).
- [9] X. F. Bi, Y. Tanaka, K. Sato, K. I. Arai, K. Ishiyama, and Y. Yamashiro, IEEE Trans. Magn., **32**(5), 4818 (1996).
- [10] K. Narita and M. Enokizono, IEEE Trans. Magn., **15**(1), 911 (1979).
- [11] S. Takemoto and T. Saito, Abstracts of Autumn Meeting of Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 210 (2007).
- [12] P. Jang and B. Lee, IEEE Trans. Magn., **45**(6), 2781 (2009).

Variation of Magnetic Properties of Fe-Si Compressed Cores with Si Content

Pyungwoo Jang*

Division of Information Technology, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

Bonghan Lee and Gwangbo Choi

R&D Center, Changsung Corp., Namdong Industrial Area, Incheon 405-100, Korea

(Received 28 January 2010, Received in final form 12 February 2010, Accepted 12 February 2010)

Fe-3, 4.2 and 6.8 % Si compressed cores were fabricated, and then electrical resistivity, AC and DC magnetic properties, micro-hardness, and other properties were analyzed in order to know whether best soft magnetic properties could be also obtained in an Fe-Si compressed core with the well-known composition of Fe-6.5 % Si. With increasing the silicon content, eddy current loss and hysteresis loss decreased and increased, respectively, so that a minimum total loss was not obtained in the well-known Fe-6.8 % Si cores, but obtained in the Fe-4.2 % Si cores. Also electrical resistivity of the cores and hardness of the particles increased monotonously with silicon content so that compaction ratio of the cores decreased. B2 and DO₃ ordered phase could be observed only in Fe-6.8 % Si powder. A minimum loss and highest permeability of the Fe-4.2 % Si cores can be explained by the ratio of specific electrical resistivity of insulator to that of magnetic particles, micro-hardness, compaction ratio and demagnetization coefficient of the Fe-Si powder particles with silicon content.

Keywords : Fe-Si powder, compressed cores, Fe-6.5 % Si, micro-hardness, core loss, eddy current, ordered phase