

## Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 비정질 합금의 초크 코어 특성에 미치는 열처리 효과

노태환 · 장완희

안동대학교 공과대학 재료공학부  
경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2000년 8월 21일 받음, 2000년 9월 25일 최종수정본 받음)

Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 비정질 합금을 스위칭 전원의 평활용 초크 코어로 사용하기 위한 최적 열처리 조건을 조사하였다. 코어의 모양은 자기경로 상에 공극을 넣지 않는 무공극형으로 하였으며, 보다 효과적으로 초크 코어 특성을 얻기 위해 산화 분위기 중에서 열처리하였다. 이 합금에서 가장 양호한 초크 코어 특성은 440 °C, 2시간의 열처리에 의하여 얻어졌으며, 그 때의 실효투자율은 180 정도로서 수 MHz의 높은 주파수 영역에 이르기까지 그 크기가 일정하게 유지되었다. 또 12 A까지의 직류 바이어스 전류 또는 8,000 A/m의 직류 바이어스 자장을 가하여도 실효투자율의 저하가 나타나지 않는 우수한 직류중첩 특성을 나타내었다. 그리고 교류 자심 손실도 종래의 초크 코어에 비해 상당히 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 열처리 조건하에서 비정질상은 미세한 α-Fe 결정상의 석출 입자를 포함하는 혼합상으로 변태하는데, 상기의 초크 코어 특성은 주로 이들 미세 결정 입자에 의해 효과적으로 자벽 이동이 억제되고 자구가 미세화 되는 것에 기인하는 것으로 생각되었다.

### I. 서 론

스위칭 전원의 출력부에 있어서 흘러나오는 직류 전류에 중첩되어 있는 교류 성분을 필터링 하는 역할을 가진 것이 평활용 초크 코어이다. 이 자기 코어는 통과하는 직류에 의해 쉽게 포화되지 않도록 포화자속밀도가 커야 하며 교류투자율도 적절한 수준에서 낮아야 한다. 자심 손실은 매우 작은 교류 성분에서 발생하므로 장치의 신뢰도 향상과 에너지 효율의 차원에서 가능한 한 낮은 것이 좋다. 이 때 현재의 스위칭 전원의 스위칭 주파수가 일반적으로 수 백 kHz에 이르고 있으므로 최소 수 백 kHz 이상 MHz 대에 이르기까지 넓은 주파수 범위에서 일정한 투자율 값을 가지는 것이 바람직하며 특히 출력부에 큰 직류가 흐르므로 상당한 크기의 직류 자장이 존재하는 데서 일정한 크기의 투자율을 유지하는 성질 즉 직류중첩 특성은 아주 중요하다.

종전 이와 같은 초크 코어 특성을 얻기 위해서는, 토로이드형 코어를 중간에서 절단하여 자기경로 상에 공극(air gap)을 만들어 주거나 또는 표면 절연 처리된 자성 분말을 압축 성형하여 자기 공극을 전 체적 내에 분산시킨 압분자심(dust core)의 형상으로 하였다. 그런데 최근에는 이와 같은 번거로운 공정을 거치지 않고 바로 비정질 리본 합금을 적절히 열처리하는 것만으로 적정 초크 코어 특성을 얻는 무공극형 초크 코어(non-gap choke cores)에 대한

연구가 진행되어 왔다. 예를 들어 Major 등[1]은 공극을 갖지 않은 부분결정화 처리된 비정질 합금 초크 코어의 직류 자장과 투자율 특성의 상관성을 조사하였으며, Shigeta 등[2]은 50 nm 크기의 결정립을 가지는 미세결정화 처리된 무공극형 비정질 초크 코어가 2,000 A/m의 직류 자장 하에서 100~150 정도의 일정 투자율을 가지고 있음을 보고한 바 있다. 또 최근 Noh 등[3]은 상용 철계 비정질 합금 Metglas 2605S3A(Fe<sub>76.5</sub>Cr<sub>2</sub>B<sub>16</sub>Si<sub>5</sub>C<sub>0.5</sub>)를 산화 분위기 중에서 열처리한 결과 비정질 상태에서 아주 양호한 초크 코어 특성이 얻어짐을 밝혔다.

본 연구에서는 상업적으로 가장 용이하게 제공받을 수 있으며 가격이 저렴한 철계 비정질 합금인 Honeywell(전 AlliedSignal)의 Metglas 2605TCA(Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>)를 사용하여 최근 저자 등[3]이 보고한 Metglas 2605S3A 합금의 경우와 마찬가지로 산화분위기에서 열처리할 때 나타나는 연자성 및 초크 코어 특성의 변화를 조사하였으며, 그 때의 최적 열처리 조건을 밝혔다.

### II. 실험방법

폭 5 mm의 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 리본 합금을 내경 21 mm의 동보빈에 감은 후 이를 300~600 °C의 온도 범위에서 0.5 l/min의 속도로 산소 가스를 흘리면서 열처리하였다. 이 때 어닐링 시간은 10분에서 240분까지 다양하게 변화시켰다.

열처리 후, 직류 자화 곡선을 DC 자기이력곡선 측정기 (Riken Denshi BHS-40)로 최대 800 A/m(10 Oe)의 자장을 가하면서 측정하였으며, 실효투자율과 이의 주파수 의존성 및 직류중첩 특성을 임피던스 분석기(Hewlett Packard 4192A)로 조사하였다. 이 때 투자율의 측정을 위해 가해 준 자장의 크기는 0.4 A/m(5 mOe)였다. 그리고 자심 손실의 측정에는 B-H 분석기(Iwatsu SY-8216)를 사용하였다.

열처리 후 미세 조직의 변화는 Cu K $\alpha$  특성선을 사용한 X선 회절 분석기(Rigaku RINT 2000)로 조사하였다.

### III. 결과 및 고찰

Fig. 1에는 각각 1, 100 및 650 kHz에서 측정된 실효투자율  $\mu_{eff}$ 의 어닐링 온도  $T_a$ 에 따른 변화를 나타내고 있다. 이 때 어닐링 시간  $t_a$ 는 2시간으로 하였다. 대략 400 °C 이하의 온도 범위에서는 열처리에 따라 투자율이 증가하며 주파수에 대한 큰 의존성을 나타내나, 그 이상의 어닐링 온도에서는 투자율이 저하하여 결국 100~200 정도의 값을 갖게 되며 주파수에 따른 변화가 거의 사라지게 된다.

원리적으로 평활용 초크 코어는 큰 직류 자장이 중첩되어도 쉽게 자기적 포화가 일어나지 않도록 수 백 이하의 적절하게 낮은 투자율을 가질 필요가 있다. 또 이들은 넓은 주파수 범위와 함께 통상 1 MHz가 넘는 주파수 범위에서 일정하게 투자율을 가질 것이 요구된다. 따라서

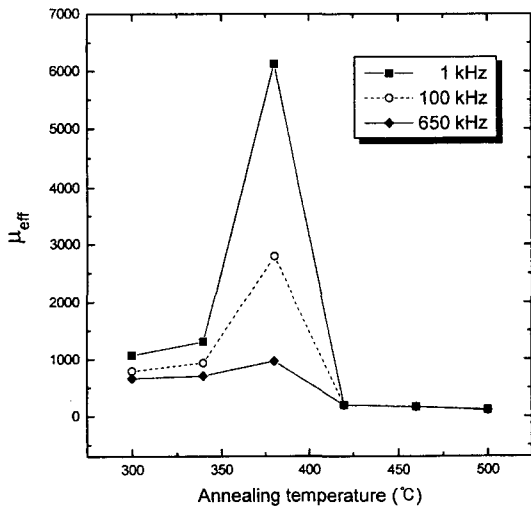


Fig. 1. Changes in effective permeability with annealing temperature for Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous alloys measured at 1, 100 and 650 kHz, which were annealed for 2 hrs.

Fig. 1에서의 결과로 본다면 초크 코어를 얻기 위한 적정 열처리 온도 범위는 420~430 °C 이상일 것으로 판단되나, 만일 500 °C 근방의 높은 온도가 되면 투자율이 아주 저하되는 문제점이 나타난다.

Fig. 2는 대체적으로 적정 열처리 온도로 생각되는 440 °C에서 어닐링 시간을 10분에서 4시간까지 변화시키면서 열처리한 시료의 실효투자율의 주파수 의존성을 나타내고 있다. 1시간 이하에서 열처리한 경우에는 수 십 kHz 또는 백 kHz 정도의 주파수에서 투자율이 낮아지면서 주파수에 따라 크게 변화하는 성질을 나타내고 있다. 이에 반해 2시간 이상의 열처리에서는 수 MHz의 영역에 이르기까지 일정한 투자율을 유지한다. 결국 Fig. 1과 Fig. 2의 결과로부터 양호한 초크 코어 특성을 얻기 위해서는 440~450 °C의 온도에서 2시간 이상의 긴 열처리가 필요하다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 3은 440 °C에서 열처리시 어닐링 시간에 따른 직류 자기이력곡선의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 자장 H축의 스케일은 최대인가 자장 값이 800 A/m(10 Oe)이고 자속 밀도 B는 원점으로부터 전체 축의 길이가 2 T(20 kG)이다. 이력곡선의 모양은 어닐링 시간의 증가와 함께 고투자율 재료에서 나타나는 전형적인 고각형성 루프 모양으로부터 점차 옆으로 누는 형상으로 변화하며, 그와 함께 보자력이 증가하면서 투자율이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

여기서 열처리 시간의 증가에 따라 처음부터 보자력이 증가하는 모습은 최근 Noh 등[3, 4]이 발표한 Fe<sub>76.5</sub>Cr<sub>2</sub>B<sub>16</sub>Si<sub>5</sub>C<sub>0.5</sub> 합금의 거동과는 전혀 다른 것으로서, 이 합금

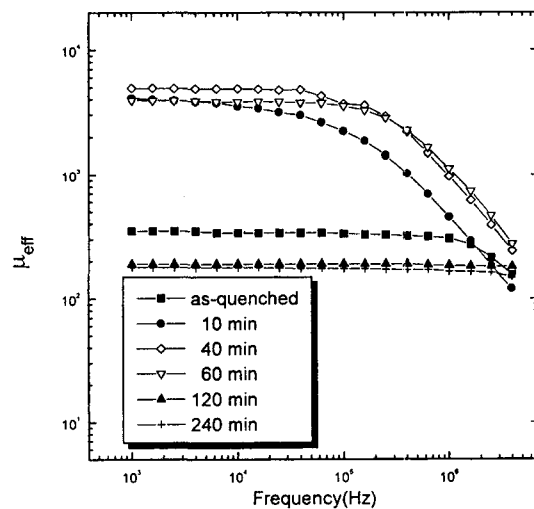


Fig. 2. Changes in effective permeability with frequency in Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous alloys annealed at 440 °C for various times.

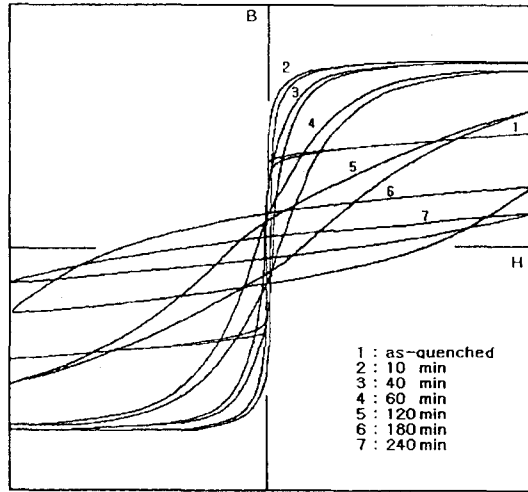


Fig. 3. DC magnetic hysteresis loops of Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous alloys annealed at 440 °C for various times.

은 양호한 초크 코어 특성을 얻는 조건의 범위 내에서는 산화 분위기 중 열처리에 따라 별다른 보자력의 증가 없이 자기이력곡선만 누워 가는 모양을 나타내었다[3, 4]. 이에 따라 Fe<sub>76.5</sub>Cr<sub>2</sub>B<sub>16</sub>Si<sub>5</sub>C<sub>0.5</sub> 합금에서는 산소분위기 중에서 열처리를 할 경우 비정질 상태가 유지되는 가운데 표면 산화막이 생성되고, 이러한 피막의 형성으로 발생하는 내부 응력과 자기변형과의 상호작용에 의해 리본면의 수직 방향으로 유도자기이방성이 생기는 것으로 해석되었으며, 이와 함께 아주 효과적으로 주 자화 모드가 회전 자화로 바뀌고 있는 것으로 추정되었다[3].

그런데 Fig. 3의 경우는 열처리 시간의 증가와 함께 보자력이 현저히 증가하고 있는데, 이는 전형적으로 비정질상이 결정화되고 있을 때 나타나는 거동이다. Fig. 4는 양호한 초크 코어 특성이 나타나는 440 °C, 2시간의 열처리 조건에서 얻어지는 미세 조직의 변화를 X선 회절로 조사한 것으로서 Fig. 3의 결과로부터 추정되는 바와 같이 이 조건에서는 이미 비정질 단상을 유지하지 못하고 α-Fe 상으로의 상변화를 나타내는 (110) 회절 피크가 나타나고 있다. 그런데 이 때 회절곡선 상에서 비정질의 특징인 브로드 피크의 윤곽이 상당히 남아 있는 것으로 보아 비정질 모상에 α-Fe의 결정상이 석출 분산되어 있는 미세 혼합조직 상태에 있는 것으로 볼 수 있다. 결국 Fig. 3에서 어닐링 시간의 증가에 따라 보자력이 커지고 이력곡선이 누우면서 투자율이 낮아지는 현상은 α-Fe 입자의 미세 석출에 따라 자벽 이동이 억제되면서 일어나는 것으로 판단되며, 그 결과 주 자화 모드도 넓은 자장의 범위에 걸쳐 회전

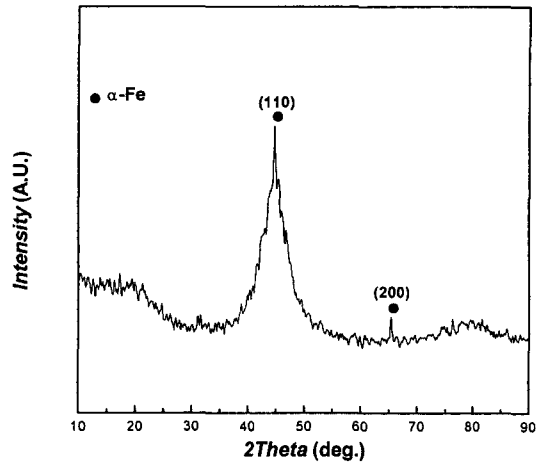


Fig. 4. X-ray diffraction pattern of Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous alloy annealed at 440 °C for 2 hrs.

자화로 바뀔 것으로 생각된다.

그러면 여기서 왜 Fe<sub>76.5</sub>Cr<sub>2</sub>B<sub>16</sub>Si<sub>5</sub>C<sub>0.5</sub> 합금과 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 합금의 열처리 거동이 서로 달라 후자의 경우 표면 산화에 의한 이력곡선의 경사 현상이 뚜렷하게 관찰되지 않는가 하는 의문이 생기나 현재로서는 그 이유를 명확하게 제시하기가 어렵고, 다만 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 합금의 경우 열적 안정성이 Fe<sub>76.5</sub>Cr<sub>2</sub>B<sub>16</sub>Si<sub>5</sub>C<sub>0.5</sub> 합금에 비해 좀 낮으므로(결정화 온도가 수십도 정도 낮음) 표면 산화에 의한 효과보다 결정화 현상에 따른 효과가 좀 더 빠르게 그리고 현저하게 나타나는 것이 아닌가 추측된다.

Fig. 5는 440 °C에서 어닐링 시간을 변화시키면서 열처리한 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 비정질합금의 자심 손실을 유도 자속 0.1 T, 주파수 100 kHz의 조건에서 측정하여 보여주고 있다. 어닐링 시간의 증대와 함께 자심 손실은 점차 감소하여 2 시간에서 최저치를 나타내고 있으며 그 값은 대략 26 W/kg 정도가 된다. 이 값은 이미 보고되어 있는 상용 비정질 초크 코어의 손실 값 40 W/kg[5]이나 철 압분 자심[6]의 경우보다도 상당히 작은 것이다. 이러한 낮은 자심 손실 값은 기본적으로 비정질상의 우수한 연자성과 함께 미세 결정상의 석출로 인하여 효과적으로 자벽 이동의 억제 및 자구 미세화가 얻어지면서 거시적 기술 자화 과정에서 마이크로 와전류 손실 등이 감소하는 것에 기인하는 것으로 생각된다. 어닐링 시간이 3시간 이상일 때의 자심 손실의 급격한 증가는 결정화의 진전에 따른 시료 전체의 결정자기이방성의 증가 및 이에 수반한 보자력의 증대 그리고 이에 따른 이력 손실의 증대에 기인할 것이다.

Fig. 6은 440°C에서 2시간 동안 어닐링한 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>

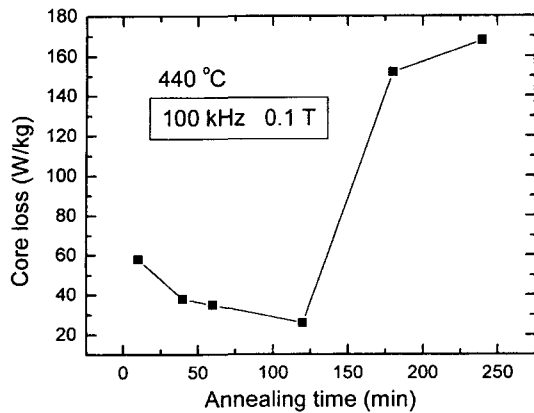


Fig. 5. Magnetic core loss under 0.1 T and 100 kHz as a function of annealing time for  $Fe_{78}Si_9B_{13}$  amorphous alloys annealed at 440 °C.

비정질 합금의 실효투자율의 직류 바이어스 전류의 증가에 따른 변화 거동을 나타낸 것으로, 이 때 투자율의 측정 주파수는 15, 40, 100 및 650 kHz의 네 종류로 하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 직류 바이어스 전류가 수 십 mA에서 10 A 이상에 이르기까지 실효투자율은 전 주파수 조건에서 180 정도를 일정하게 유지하였다. 비슷한 투자율을 가지는 종래의 초크 코어의 경우 일반적으로 수 A 이상의 전류를 흘려주면 투자율이 저하하기 시작하는데 [6], 이에 비하면 이 합금은 대단히 좋은 직류중첩 특성을 지니는 것으로 평가될 수 있다.

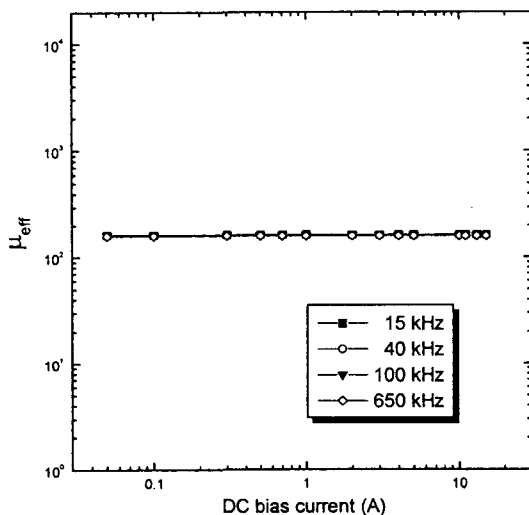


Fig. 6. Effective permeability as a function of DC bias current in  $Fe_{78}Si_9B_{13}$  amorphous alloys annealed at 440 °C for 2 hrs under the frequency of 15, 40, 100 and 650 kHz.

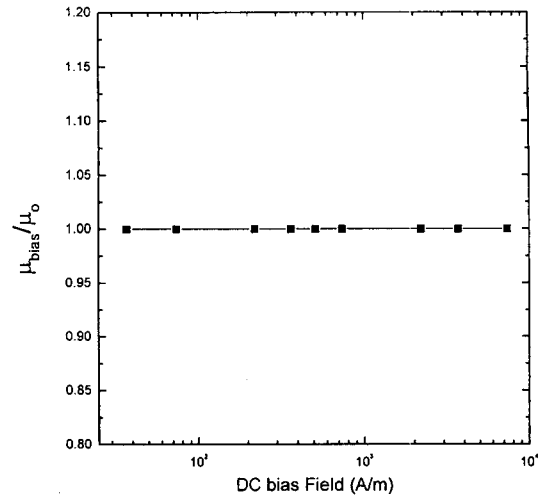


Fig. 7. Percent permeability as a function of DC bias magnetic field in  $Fe_{78}Si_9B_{13}$  amorphous alloys annealed at 440 °C for 2 hrs.

Fig. 7은 직류중첩 특성을 퍼센트 투자율의 직류 자장에 대한 의존성으로 나타내 본 것이다. 여기서 퍼센트 투자율이란 바이어스 자장이 걸려 있지 않을 때의 실효투자율 ( $\mu_0$ )에 대한 직류 바이어스 자장 하에서의 실효투자율 ( $\mu_{bias}$ ) 크기의 비를 가리킨다. 이 그림에서 퍼센트 투자율은 거의 1의 값을 나타내며, 대략 8,000 A/m의 자장이 걸릴 때까지도 변화하지 않고 있음을 보여준다. 이들 결과는 Fig. 6과 함께 이 합금이 우수한 초크 코어 재료로 응용 가능성이 있음을 나타내는 것이다.

#### IV. 결 론

상용 철계 비정질 합금 Metglas 2605TCA( $Fe_{78}Si_9B_{13}$ )을 평활용 초크 코어로 응용하기 위한 기초 연구로서 산화 분위기 중에서 이 합금을 300~600 °C의 온도범위에서 10~240 분간 열처리한 후 제반 자기적 특성을 조사, 분석하였다.

이 합금은 440 °C, 2시간의 열처리에 의해 가장 양호한 초크 코어 특성이 얻어졌으며, 그 때의 실효 투자율은 180 정도로서 수 MHz의 주파수 영역에 이르기까지 투자율이 일정하게 유지되는 성질을 나타내었다. 그리고 12 A의 직류 바이어스 전류 및 8,000 A/m의 직류 바이어스 자장이 가해져도 투자율 값이 저하되지 않는 우수한 직류중첩 특성을 보였다. 그리고 100 kHz, 0.1 T의 측정 조건에서 26 W/kg 정도 되는 낮은 자심 손실이 얻어졌다.

이상과 같은 우수한 초크 코어 특성은 비정질상 내에서

미세한  $\alpha$ -Fe 결정상이 석출하였을 때 얻어졌는데, 이들 입자의 존재에 의하여 자벽 이동의 억제, 자구 미세화 및 주자화 모드의 변화 등의 제반 현상이 나타나 이와 같은 쇼크 코어 특성이 실현되는 것으로 생각되었다.

### 참 고 문 헌

[1] R. V. Major, T. M. Jasco and K. J. Cruickshank, IEEE

Trans. Magn. **20**, 1415(1984).

[2] M. Shigeta and A. Kajita, Proc. 6th International Conference on Ferrite, Tokyo and Kyoto(1992) pp. 1243-1246.

[3] T. H. Noh and W. H. Jang, IEEE Trans. Magn. **35**, 3388(1999).

[4] 장완희, 안동대학교 석사학위 논문(1998) pp. 29-31.

[5] Honeywell, Catalogue of Amorphous Metals(2000).

[6] Micrometals, Inc., Catalogue of Iron Powder Cores (2000).

## Effects of Heat Treatment on Choke Core Properties in Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> Amorphous Alloys

Tae-Hwan Noh and Wan-Hee Jang

*School of Materials Science & Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea*

(Received 21 August 2000, in final form 25 September 2000)

With the object of developing a non-gap choke core, effects of annealing in oxygen atmosphere on magnetic properties for Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous alloy were investigated. After annealing for 2 hrs at 440 °C, optimum magnetic properties for choke core were obtained, where the effective permeability was 180 and was almost constant up to several MHz, and the decrease in permeability upon large DC bias current of 12 A or DC bias magnetic field of 8,000 A/m was very little. Moreover the AC magnetic loss was very low as compared to the conventional choke cores. Upon the optimum annealing, the magnetic hysteresis loop was inclined accompanying the increase of coercive force and the appearance of fine crystallites of  $\alpha$ -Fe phase. The good choke core properties was considered to be due to the suppression of domain boundary motion and domain refinement by the crystallites.