

## 철계 비정질 합금 분말코아의 자기적 특성에 미치는 분말 제조방식의 영향

노태환\* · 최혁열

안동대학교 공과대학 신소재공학부, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2005년 2월 25일 받음, 2005년 6월 10일 최종수정본 받음)

철계 비정질 합금 리본을 분쇄한 뒤 상온 압축성형을 통하여 분말코아를 제조할 때 로터밀과 볼밀의 두 가지 분말제조 공정을 사용하여 만든 분말의 형상을 관찰하고, 또 이들을 이용한 분말코아의 자기적 및 전기적 특성과 미세구조를 조사하였다. 로터밀을 사용한 경우 실효투자율의 크기는 볼 밀링한 경우보다 낮았으나 이의 주파수 의존성 및 품질계수는 볼밀의 경우보다 우수하였으며 자심손실 또한 더 작았다. 한편 로터밀을 사용하여 만든 분말은 크기가 균일하고 가장자리는 강한 전단가공을 받아 완만한 곡선을 지닌 등축형을 이루고 있는 반면 볼밀을 사용한 경우는 크기가 상대적으로 불규칙하면서 작은 분말이 많고 가장자리는 날카로운 형상을 하고 있었다. 로터밀로 만든 분말코아의 낮은 투자율은 밀링시 심한 진단에 의해 발생하는 큰 내부응력의 축적에 기인하는 것으로 보여진다. 한편 로터 밀링을 통해 만든 분말코아의 경우 투자율은 상대적으로 낮지만 전기저항의 측정 및 미세구조의 관찰로부터 보다 양호한 절연상태가 확보되어 높은 주파수에 이르기까지 투자율이 유지되면서 적은 자심손실이 얻어진 것으로 판단되었다. 분말코아의 자기적 안정성을 나타내는 직류중첩특성 또한 로터밀의 경우가 볼 밀링한 경우보다 우수하였다.

**주제어** : 분말코아, 비정질 합금, 로터밀, 볼밀, 실효투자율, 자심손실, 직류중첩특성

### I. 서 론

과거 통신용 장하코일(loading coil)로 개발된 분말코아(compressed powder cores)가, 최근에는 반도체 소자의 발전과 함께 전자기기의 소형화 고성능화를 실현시키는 고기능성 자심으로서 노이즈 필터, 평활용 쇼크 코일, PFC(power factor correction) 회로부의 리액터 등으로 많이 사용되고 있다[1].

일반적으로 연자성 금속재료 분말에 전기절연체를 혼합한 다음 압축·성형하여 제조되는 분말코아는 자화곡선의 직선성이 높고, 다양한 크기의 외부 바이어스 자장이 인가되어도 자기적 포화가 일어나지 않는 범위가 넓고 투자율이 일정하며, 고주파 영역에서 낮은 와전류손실이 얻어지는 성질을 나타내어야 하므로, 이들 분말코아의 소재는 기본적으로 실효투자율이 높고 고주파손실이 적으면서 포화자속밀도가 크고 동작신호 자장에 대해 증분투자율이 커야 한다.

이러한 요구 특성에 대응하는 종래의 분말코아용 재료로는 카보닐 철분, Ni-Fe계 퍼멀로이 합금, Fe-Si-Al계 샌더스트 합금 등이 있는데, 최근에 연자성 신소재의 응용기술 개발 측면에서 철계 비정질 합금과 나노결정립 합금 또한 여기에 이용하고자 하는 연구가 추진되어 왔다[2-4].

비정질 합금은 제조원리상 빠른 냉각속도가 필요하므로 얇은 리본이나 분말 형상을 하며, 장범위의 원자배열 규칙성이 존재하지 않아 결정자기방성이 없고 전기비저항도 크다. 또

자벽이동을 방해하는 결정입계 및 기타 결정결함이 없어, 철계의 경우 큰 포화자속밀도를 가지면서 고 투자율과 저 보자력의 우수한 연자성과 낮은 교류손실 특성을 나타낸다.

한편 철계 나노결정립 합금은 통상 FeCuNbSiB계 비정질 합금 리본을 결정화 처리하여 만들며, 미세조직상 10 nm 정도의 크기를 가진  $\alpha$ -Fe(Si)상의 결정립과 Nb, B 등이 농축된 비정질 입계상으로 구성되어 있다. 이 합금은 대단히 작은 결정립 때문에 실효적 결정자기방성이 극소화되고, 포화 자기변형도 아주 낮으며 전기저항이 큰 입계 영역이 높은 부피분율로 존재하여 비정질 합금과 유사한 고 전기저항 특성을 가진다. 따라서 상당히 큰 포화자속밀도를 비롯하여 높은 투자율과 작은 보자력 그리고 낮은 고주파 자심손실의 성질을 나타낸다.

저자 등은 근래 이들 신소재 합금 중 철계 나노결정립 합금을 분말코아 재료로 이용하고자 하는 목적을 가지고 각종 열처리 조건, 제조 공정, 합금 조성, 절연 물질 등과 자기적 특성의 상관관계를 다각도로 조사하여 왔는데[5-9], 본 논문에서는 이들 연구를 기반으로 하여 상온 압축성형에 의하여 비정질 합금 분말코아를 제조할 수 있는 기초 공정조건에 대한 연구를 수행하였다.

지금까지 전세계적으로 비정질 합금 분말코아에 관해서는 많은 연구 내용이 보고되고 있는데, 거기에는 합금 조성 효과, 표면 전기절연 처리방법 및 바인딩 재료의 선정, 열처리 온도, 압축성형 조건 등에 관한 광범위한 기술적 데이터가 포함되어 있다[10-20].

그런데 비정질 합금 분말코아를 제조하기 위해서는 우선 비

\*Tel: (054) 820-5755, E-mail: thnoh@andong.ac.kr

정질 분말을 만들어야 하는데 이에는 급속응고 리본의 분쇄 법이나 분무법 등 여러 가지 방식이 이용되었다. 종전의 문헌을 조사해 보면 각종 상이한 분말 제조방법에 의해 만들어진 분말코아의 제반 특성은 다수 발표된 바 있으나, 이것이 코아의 미세구조나 특성 등에 미치는 영향에 대해 직접적으로 비교 분석한 예는 거의 없는 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 상용 FeSiB 비정질 합금 리본을 분쇄하여 상온 압축성형을 통해 분말코아를 만들 때, 볼 밀링과 로터 밀링의 두 가지 분말제조 방식이 분말 형상 및 분말코아의 미세구조와 자기적 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하고 그 결과를 비교 검토하였다. 특히 비정질 합금은 고 탄성 재료로서 압축성형이 어려운 바 여러 성형 조건의 개선과 함께 절연처리의 고도화 등에 의해 보다 우수한 코아 특성의 실현이 향후 가능할 것으로 여겨지나 여기서는 단지 리본 분쇄 방식의 효과 파악에만 주안점을 두어 연구를 수행하였다.

### II. 실험 방법

두께 약 20 μm의 Fe<sub>78</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>9</sub>(at%) 비정질 합금(Honeywell METGLAS®)을 석영관 내에 장입하고 400°C에서 1 시간 동안 진공 열처리한 다음, 상온의 질소 가스를 주입한 후 냉각시켰다. 이 때 사전에 이 합금의 열처리온도를 구하기 위해 시차주사열량계(NETZSCH DSC 200 PC)를 사용하여 4 K/min의 승온 속도로 가열하면서 결정화온도 등 열적 특성을 측정하였으며, 380~480°C의 범위에서 1 h 동안 소정의 온도에서 열처리한 뒤 Cu Kα 특성선을 사용한 X-선 회절기(Rigaku, RINT 2000)로 각 시료의 회절패턴을 구하여 미세 조직 변화를 조사하였다.

열처리된 합금은 다음과 같은 두 가지 다른 방법으로 분쇄하였는데, 먼저 로터밀(Fritsch Pulverisette-14)을 사용할 경우는 1100 rpm의 회전속도에서 0.5 mm 크기의 구멍을 가진 sieve ring으로 선분쇄한 후 0.08 mm의 sieve ring으로 3회에 걸쳐 2차 분쇄를 하였다. 두 번째로 유성형 볼밀(Fritsch Pulverisette-6)을 사용할 경우에는 볼/시료의 중량비를 12:1로 조정한 후, Ar 가스 분위기에서 4 h 동안 150 rpm의 회전속도로 분쇄하였으며, 밀링이 완료된 분말은 체(sieve)를 사용하여 여러 입도별로 분급하였다.

분급된 분말 중 125 μm 이하의 크기를 가지는 합금에 각각 폴리아미드 3 wt%와 0.3 wt%의 윤활제(본 연구에서는 zinc stearate를 사용함)를 첨가하고 잘 혼합한 뒤 15 ton/cm<sup>2</sup>의 압력으로 냉간 성형하여 외경 12 mm, 내경 7 mm, 높이 3.5 mm의 토로이드형 자심을 제작하였다. 그 후 응력제거를 위해 모든 성형체는 무유도 권선로에 장입한 후 고순도 질소 분위기에서 400°C로 1 h 동안 열처리하였다.

분말코아의 실효투자율과 품질계수 및 직류 바이어스 특성 등은 LCR 미터(Hioki 3531 Z Hitester, HP 4284A)로 측정하였으며, B-H analyzer(Iwatsu SY-8216)를 사용하여 자심손실 특성을 평가하였다. 이 때 투자율은 10 mOe의 자장 하에서 그리고 자심손실 특성은 0.1 T의 자기유도 조건에서 측정하였다. 또 분말코아의 전기저항을 코아의 높이 방향(즉 적층분말면의 수직방향)으로 정밀 저항계(Keithley 2000 Multimeter)를 이용하여 조사하였다.

또 주사전자현미경(Jeol JSM-6300)을 사용하여 분쇄방식에 따른 비정질 합금 분말형상의 변화 및 분말코아의 단면 미세 구조를 관찰하고, 아르키메데스 원리를 이용하여 코아의 밀도를 측정하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

철계 비정질 합금 리본은 일반적으로 대단히 강도가 크고 인성이 높아 급속응고 상태에서 바로 분쇄하여 분말을 만드는 것은 대단히 어려우나, 이들을 결정화온도 근방에서 일정 시간 열처리하면 구조완화에 의한 취화 현상이 발생하여 분쇄가 쉬워진다. 그러나 열처리 온도가 결정화온도에 너무 가까우면 가열 중 결정상이 출현할 수 있으며, 만약 어떤 결정상이라도 생기게 되면 대부분의 경우 자기적 특성이 크게 열화된다.

Fig. 1은 FeSiB 비정질 합금의 열분석 곡선이다. 이 그림의 450°C와 480°C 근방에서 각각 발열 피크의 시작점이 관찰되며 395°C에서는 하나의 흡열 피크가 보이는데, 전자의 두 발열 피크는 비정질상의 결정화에 그리고 후자의 흡열 피크는 자기 상전이에 각각 기인하는 것으로 생각된다.

한편 이 합금을 380~480°C의 범위에 있는 여러 온도에서

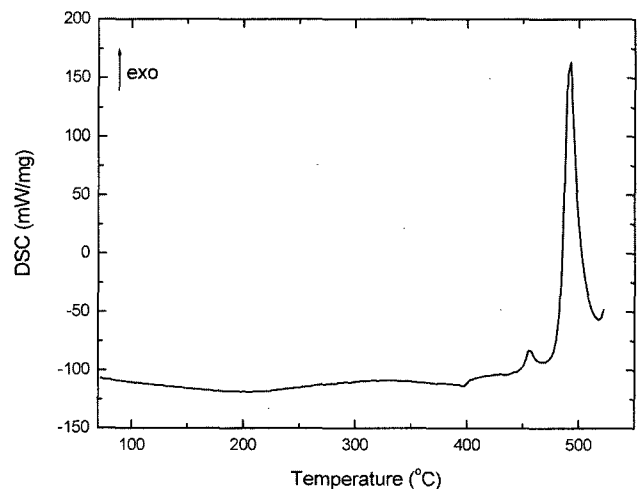


Fig. 1. DSC thermogram of FeSiB amorphous alloy. The sample was thermally scanned at the heating rate of 4 K/min in Ar atmosphere.

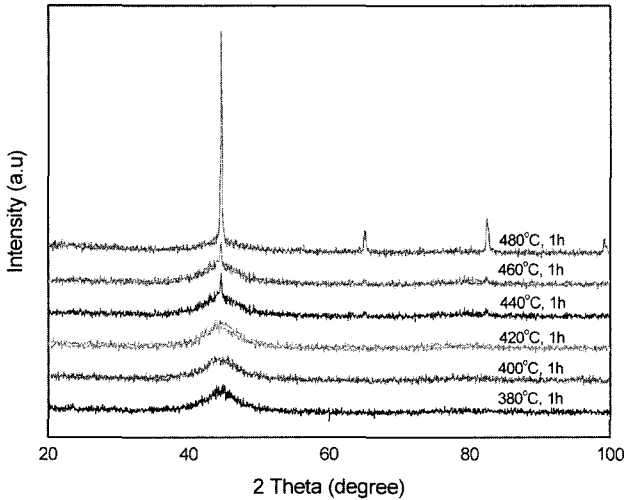


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of FeSiB amorphous alloys annealed for 1 h in the temperature range from 380 to 480°C.

1 h 동안 열처리한 후 각 시료의 X선 회절 곡선을 구해보면 Fig. 2와 같다. 이 그림에서 보면 420°C까지는 비정질상이 유지되나, 440°C가 되면 bcc  $\alpha$ -Fe 상으로의 결정화가 시작되고 480°C에서도 이러한 상변화가 계속되고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 Fig. 1의 두 발열 피크는 bcc  $\alpha$ -Fe 상의 생성에 기인하는 것으로 판단된다.

이상 Fig. 1과 Fig. 2의 데이터를 종합해 볼 때, 분쇄를 위한 열처리온도는 420°C 이하여야 하는데, 나중 분말을 압축성형한 후 응력완화 어닐링을 다시 하여야 하므로 그때의 비정질상을 유지하기 위한 열적 안정성을 고려하여 열처리온도를 400°C로 결정하였다.

Fig. 3은 400°C에서 1 h 동안 열처리한 후 로터밀과 볼밀

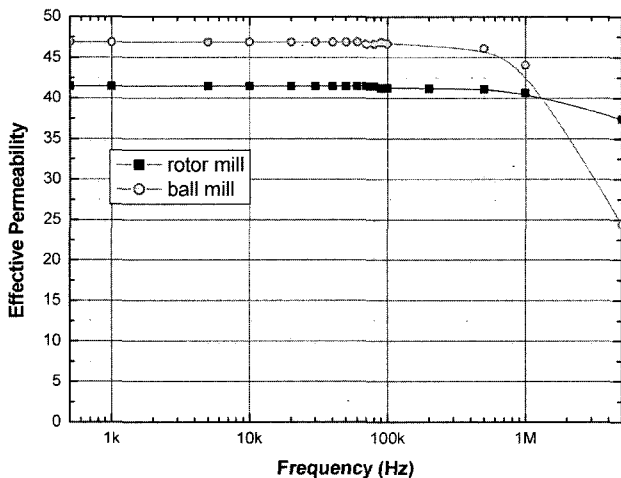


Fig. 3. Frequency dependence of effective permeability for powder cores produced by using different milling method, ball-milling or rotor-milling.

을 사용하여 분쇄한 비정질 합금 분말 중 125  $\mu$ m 이하의 크기를 가지는 것을 상온에서 압축성형한 다음 400°C에서 1 h 동안 재열처리한 분말코어의 주파수에 따른 실효투자율의 변화를 보여주고 있다. 종전의 나노 결정립 합금[5-9]과 달리 여기서 125  $\mu$ m 이하의 분말을 사용한 이유는 비정질 합금의 경우 성형성이 대단히 낮으므로 비교적 미세한 분말 이외에는 상온에서 압축성형이 되지 않았기 때문이다.

이 그림에서 두 가지 분쇄 방법을 사용한 경우의 투자율 크기와 주파수 의존성이 서로 다름을 볼 수 있는데, 투자율의 크기는 볼 밀링한 경우가 더 크나 주파수 의존성은 로터 밀을 이용한 때가 더 우수하였다. 즉 볼 밀링을 하면 47 정도의 실효 투자율이 얻어나 500 kHz를 넘어서면 급격하게 투자율이 저하된 반면, 로터 밀링을 한 경우는 42로 투자율이 낮으나 1 MHz에 이르기까지 투자율의 저하가 거의 없으며 5 MHz에서도 그 감소가 크지 않음을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 해석하기 위하여 위 두 가지 분쇄방법을 사용하여 제조한 분말의 형상 및 분말코어의 단면을 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 그 결과를 각각 Fig. 4, 5와 Fig. 6, 7에 나타내었다.

먼저 Fig. 4, 5의 분말 형상을 보면, 로터 밀링을 한 경우 분말의 크기가 상대적으로 대단히 균일하고 형상은 리본이 sieve ring의 미세구멍을 통과할 때 강한 전단 작용을 받아 가장자리가 완만한 곡선을 지닌 등축형을 이루고 있다. 반면 볼 밀링한 경우는 리본이 불과의 충격력에 의해 분쇄되므로 분말 크기가 불균일하며 상대적으로 작은 크기의 분말이 많고, 가장자리는 날카로운 형상을 하고 있으며 전체적으로 비등축형의 모양을 가지고 있다.

자성분말의 경우 일반적으로 분말 크기가 작을수록 투자율이 감소하고 보자력은 증가한다. 저자 등[5]은 철계 나노결정

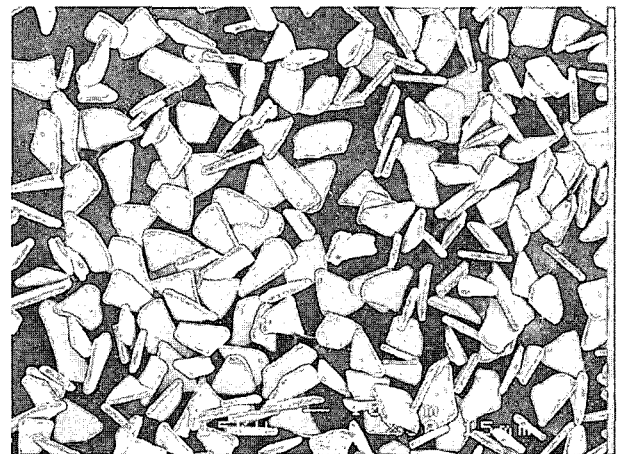


Fig. 4. Scanning electron micrograph of amorphous alloy powders prepared by rotor-milling (50 $\times$ ).

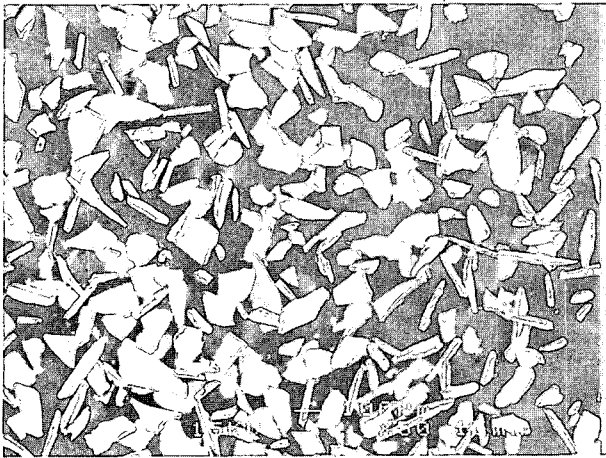


Fig. 5. Scanning electron micrograph of amorphous alloy powders prepared by ball-milling (50×).

합금 분말코아에서도 이러한 경향을 이미 확인한 바 있는데, Fig. 4, 5를 보면 분말의 평균 크기가 로터 밀링한 경우보다 상대적으로 작음에도 불구하고 투자율은 더 높게 나오고 있다. 더구나 볼 밀링한 경우 분말형상이 로터 밀링보다 비등축형이고 더 복잡하여 이 또한 투자율을 낮추는 결과를 가져와야 할 것으로 생각된다.

한편 자기코아의 투자율은 거기에 포함된 자성분말의 분율(즉 유효 단면적)에도 의존하므로, Fig. 6, 7에서 제시한 바와 같이 주사전자현미경으로 코아의 단면적을 관찰하고 또 밀도를 측정하여 보았다. 이 그림에서 보면 로터밀로 만든 분말을 사용한 코아가 볼 밀링한 분말을 사용한 경우보다 자성분말의 분율이 더 높은 것으로 관찰되며, 실제 밀도 측정의 결과 전자의 경우 4.915 g/cm<sup>3</sup>인데 대하여 후자는 4.723 g/cm<sup>3</sup>로 약 4%가 더 큰 것으로 확인되었다.

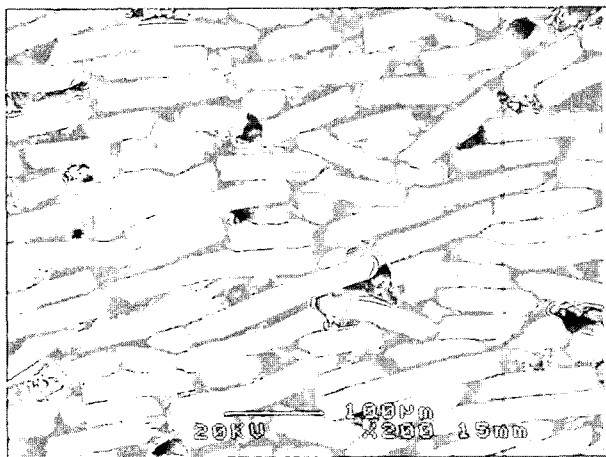


Fig. 6. Scanning electron micrograph of powder core made from rotor-milled amorphous powders (200×).

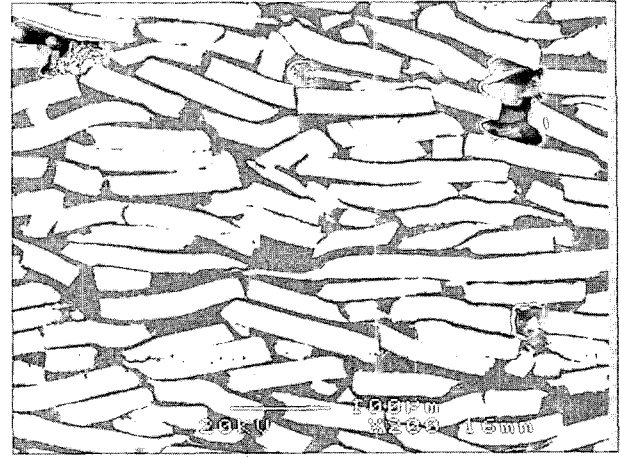


Fig. 7. Scanning electron micrograph of powder core made from ball-milled amorphous powders (200×).

이와 같이 분말의 크기, 형상과 코아 단면적의 관찰 및 밀도측정 결과로부터, 볼 밀링을 한 경우가 로터 밀링을 한 경우보다 더 낮은 투자율을 나타낼 것으로 예상되나 본 실험 결과는 그 반대로 얻어지고 있다. 이러한 경향은 과거 나노 결정 합금의 경우에서도 저차 등[8]에 의하여 관찰된 바 있는 것으로서, 이 결과는 이들 분말의 제조과정에 축적되는 내부응력과 관련이 있는 것으로 믿어진다. 즉 로터 밀링의 경우 아주 강한 전단력이 분말제조 과정 중에 작용하게 되므로 이로 인하여 축적된 큰 잔류응력이 이 합금의 자기변형(철계 비정질 연자성 합금의 경우 포화자기변형이 대략 20×10<sup>-6</sup> 정도로 큼)과 작용하여 투자율이 저하되는 것으로 보여진다. 잘 알려져 있는 사실이지만, 자벽이동에 의해 얻어지는 연자성 재료의 초투자율  $\mu_s$ 는

$$\mu_s \propto \frac{M_s^2}{\lambda_s \sigma}$$

의 관계에 있다[21]. 여기서  $M_s$ 는 포화자화,  $\lambda_s$ 는 포화자기변형 그리고  $\sigma$ 는 존재하는 응력의 크기이다.

한편 Fig. 3에서 투자율의 주파수 의존성은 투자율이 낮을 수록 높은 주파수 대역까지 그 값이 유지되는 일반적인 경향을 따르고 있는데, 자성 분말간 전기적 절연상태가 주파수의 의존성에 영향을 줄 수도 있으므로 두 종류의 코아의 전기저항을 측정해 본 결과 로터 밀링을 한 경우 47.1 Ω이 그리고 볼 밀링한 경우는 41.6 Ω의 값이 관찰되어 로터 밀링한 시료의 경우 이러한 고 전기저항 특성이 보다 우수한 주파수 의존성을 가져오는 한 원인이 되었을 수도 있을 것으로 믿어진다.

이와 같이 로터 밀링을 한 경우 보다 높은 전기저항이 얻어지는 이유는 현재 단정적으로 말하기 어려우나, Fig. 6에서

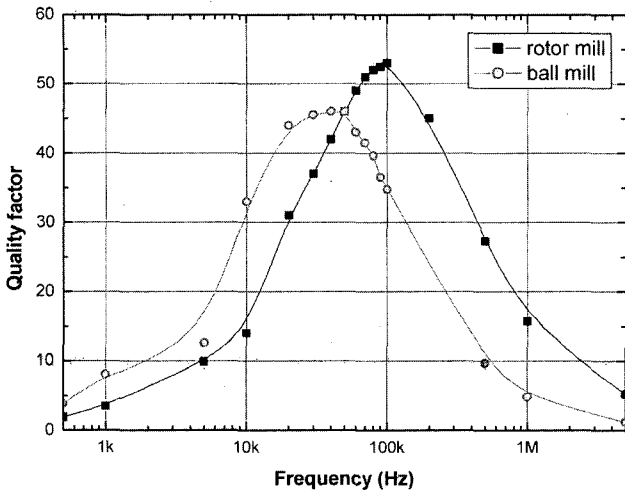


Fig. 8. Frequency dependence of quality factor for powder cores produced by using different milling method, ball-milling or rotor-milling.

보면 자성분말 사이에 반복적인 전단에 의해 생긴 것으로 추측되는 미분이 다수 분포하여 이들이 자성분말간의 절연성을 높여주고 있는 것으로 보여진다. 반대로 볼 밀링을 한 Fig. 7 에서는 이러한 미분이 거의 관찰되지 않는다.

Fig. 8은 상기 두 가지 다른 방법으로 만들어진 분말을 사용한 분말코어의 주파수에 따른 품질계수의 변화를 보여주고 있다. 볼밀로 제조된 분말을 사용한 코어의 경우 40 kHz에서 46의 최대값을 나타내고 있는 반면, 로터밀에 의한 것은 100 kHz에서 53의 최고치를 보여주고 있다. 이와 같이 로터밀로 제조된 압분자심이 더 높은 주파수 대역에서 더 큰 품질계수를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이로부터 로터밀을 사용했을 때가 볼밀의 경우보다 고주파에 이르기까지 보다 적은

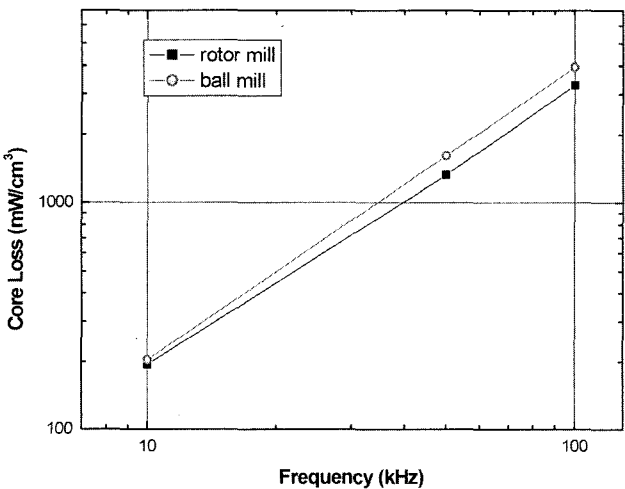


Fig. 9. Frequency dependence of core loss for powder cores produced by using different milling method, ball-milling or rotor-milling.

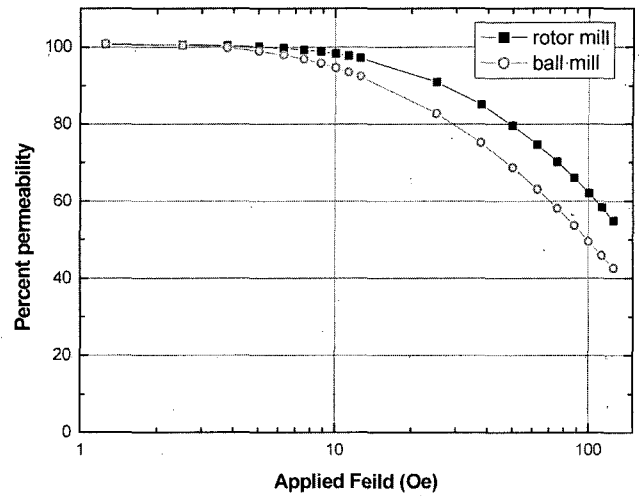


Fig. 10. Variation of percent permeability with applied dc field for powder cores produced by using different milling method, ball-milling or rotor-milling.

자심손실을 나타내리라고 예측되는 바 Fig. 9의 결과에서 확인된다.

Fig. 9에서 로터밀로 만든 분말코어가 측정 주파수 범위에서 언제나 볼밀의 경우보다 자심손실이 낮게 나타나고 있는데, 이를 Fig. 3과 비교해 보면 로터 밀링을 통해 만든 분말코어의 경우 비록 투자율은 낮지만 고 전기저항 등의 조건에 의해 높은 주파수에 이르기까지 자심손실이 감소한 것으로 생각된다.

한편 분말코어의 자기적 안정성을 나타내는 직류중첩특성은 Fig. 10의 퍼센트 투자율의 자장의존성으로 표현될 수 있는바 로터밀의 경우 10, 50, 100 Oe에서 각각 98, 80, 62%의 값을 나타내고 있는데 비하여 볼밀은 85, 68, 49%를 보여주어, 로터밀의 경우가 볼밀보다 상당히 더 우수한 것으로 관찰되었다. 이는 Fig. 3에서와 같이 로터밀로 만든 분말코어의 투자율이 낮음으로 인하여 외부에서 직류 자장이 가해지더라도 자기적 포화가 잘 일어나지 않는데 기인하는 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

상은 압축성형을 통하여 철계 비정질 합금 분말코어를 제조할 때, 로터밀과 볼밀의 두 가지 다른 분말제조 공정을 적용하여 얻어지는 자기적 특성, 분말형상과 코어 미세구조의 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 급냉상태의 비정질 합금 리본을 400°C에서 1h 동안 열처리한 뒤, 로터밀을 사용하여 분말을 제조한 경우 그 크기가 대단히 균일하고 형상은 sieve ring의 미세구멍을 통과할 때 강한 전단 작용을 받아 가장자리가 완만한 곡선을 지

닌 등축형을 이루고 있었다. 반면 불밀을 사용한 경우는 분말 크기가 불균일하며 상대적으로 보다 미세한 것이 많고, 가장자리는 날카로운 형상을 하고 있으며 전체적으로 비등축적인 모양을 하고 있었다.

(2) 분말코아의 실효투자율은 불 밀링한 경우가 더 크나 주파수 의존성은 로터밀을 이용한 때가 더 우수하였다. 즉 불 밀링을 하면 47 정도의 실효투자율이 얻어지면서 500 kHz를 넘어서면 급격하게 저하된 반면, 로터 밀링을 한 경우는 42 정도로 투자율이 낮아지나 1 MHz에 이르기까지 변화가 거의 없으며 5 MHz에서도 그 감소가 크지 않았다.

품질계수는 불밀로 제조된 분말을 사용한 코아보다 로터밀을 이용했을 때가 더 높은 주파수 대역에서 더 큰 품질계수를 나타내었고, 자심손실은 로터밀로 만든 분말코아가 불밀의 경우보다 낮게 나타났다.

분말코아의 자기적 안정성을 나타내는 직류중첩특성은 로터밀의 경우가 불밀의 경우보다 우수하였으며, 이는 로터밀로 만든 분말코아의 투자율이 낮아 외부에서 직류 자장이 가해지더라도 자기적 포화가 잘 일어나지 않는데 기인하는 것으로 생각되었다.

(3) 로터밀로 만든 분말코아의 낮은 실효투자율은 분말의 제조과정에서 일어나는 강한 전단 작용과 관련이 있는 것으로 사료되는 바, 이 때 발생된 큰 내부 응력이 투자율을 떨어뜨리는 것으로 보여진다.

한편 로터 밀링을 통해 만든 분말코아의 경우 비록 투자율은 낮지만 고 전기저항 특성으로 인해 높은 주파수에 이르기까지 낮은 자심손실이 얻어지고 보다 우수한 투자율의 주파수 의존성도 나타난 것으로 추정되었다.

### 감사의 글

이 논문은 2003학년도 안동대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

[1] A. Goldman, Handbook of Modern Ferromagnetic Materials,

Kluwer Academic Publishers, Boston (1999), pp. 183~205, 391~423.

[2] M. Manivel Raja, N. Ponpandian, B. Majumdar, A. Narayanasamy, and K. Chattopadhyay, Mater. Sci. Eng., **A304-306**, 1062(2001).

[3] H. Xu, K. Y. He, Y. Q. Qiu, Z. J. Wang, W. Feng, Y. D. Dong, X. S. Xiao, and Q. Wang, Mater. Sci. Eng., **A286**, 197(2000).

[4] V. Léger, C. Ramiarinjaona, R. Barrué, and R. Lebourgeois, J. Mag. Mater., **191**, 169(1999).

[5] G. H. Kim, T. H. Noh, G. B. Choi, and K. Y. Kim, J. Appl. Phys., **93**(10), 7211(2003).

[6] T. H. Noh, H. Y. Choi, and S. J. Ahn, J. Kor. Mag. Soc., **14**(1), 7(2004).

[7] T. H. Noh, and H. Y. Choi, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **42**(6) 501(2004).

[8] H. Y. Choi, S. J. Ahn, and T. H. Noh, Phys. Stat. Sol. (a), **201**(8), 1879(2004).

[9] T. H. Noh and H. Y. Choi, J. Kor. Mag. Soc., **14**(5), 186(2004).

[10] R. Ray, United States Patent 4353737, Oct. 12(1982).

[11] 澤孝雄, 日本公開特許公報(A)昭61-154014 (1986).

[12] M. Shigeta, A. Kajita, I. Hirai, and T. Choh, United States Patent 5252148, Oct. 12(1993)

[13] 猪俣浩一郎, 日本公開特許公報(A)昭59-179729(1984).

[14] 八木正昭, 河合徹, 遠藤功, 大塚勇, 日本公開特許公報(A)特開平11-256202(1999).

[15] I. Otsuka, T. Kawai, A. Shintani, H. Yamamoto, and I. Endo, European Patent Application, EP 1 083 580 A2(2001).

[16] 山口紀繁, 日本公開特許公報(A)昭62-22410(1987).

[17] 김규진, 대한민국 공개특허공보(A) 공개번호 10-2001-0025557(2001).

[18] 大塚勇, 遠藤功, 越本秀生, 山本裕史, 奥野良誠, 吉野正規, 深見壽孝, 八木正昭, 日本應用磁氣學會誌, **21**, 617(1997).

[19] M. Yagi, I. Endo, I. Otsuka, H. Yamamoto, R. Okuno, H. Koshimoto, and A. Shintani, J. Mag. Mater., **215-216**, 284(2000).

[20] H. Chang, P. Yao, D. Huang, and S. Hsu, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 80, Science and Technology of Rapidly Quenched Alloys (edited by M. Tenhover, W. L. Johnson and L. E. Tanner), Materials Research Society, Pittsburgh, 423(1987).

[21] S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism (2nd edition), Oxford University Press, New York, (1997) p. 484.

## **Effects of the Powder Preparation Method on the Magnetic Properties of Fe-based Amorphous Alloy Powder Cores**

**T. H. Noh\* and H. Y. Choi**

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

(Received 25 February 2005, in final form 10 June 2005)

In the fabrication process of Fe-based amorphous alloy powder cores by pulverization of the melt-spun ribbons and cold compaction, the effects of powder preparation method on the magnetic & electric properties, powder shapes and microstructure of cores have been investigated. The powder cores made by using rotor mill showed low effective permeability as compared to the cores prepared by ball milling. However the frequency dependence and quality factor properties were superior in the case of rotor-milling. Further the powders prepared by rotor mill had homogeneous and round shapes through strong shearing in the sieve ring, while the ball milled powders were inhomogeneous and relatively small. The lower permeability of the powder cores fabricated with rotor mill was considered to be due to the high internal stress occurred by very intensive shearing. Moreover the powder cores produced by rotor-milling showed lower core loss and good frequency dependence of effective permeability possibly due to the higher electrical insulation between magnetic particles. The dc bias property of the powder cores made by rotor-milling was better than the one by ball-milling.

**Key words :** powder cores, amorphous alloy, rotor mill, ball mill, effective permeability, core loss, dc bias property