

스테인레스 제강분진을 함유한 순철 압분코어의 자기특성

김 상 원[†]

포항산업과학연구원 부품신소재연구센터 신금속연구팀

Magnetic Properties of Powdered Fe Cores Containing Stainless Steel-making Dusts

S. W. Kim[†]

New Materials & Components Research Center, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST)

(2004년 12월 1일 받음, 2005년 1월 10일 최종수정본 받음)

Abstract Effects of stainless steel-making dusts and binder content on compacting density(ρ) and magnetic properties were evaluated. Cores compacted with the mixture of pure Fe powders, 5 wt.% dusts and 0.25 wt.% binder showed good AC magnetic properties. For example, permeability(μ_a) and core loss(P) of the cores containing 5 wt.% dusts at 500 kHz were 62 and 4008 $\mu W/cm^3$, respectively. These properties are almost equivalent to those of competitor's products (i.e., Ancorsteel TC 80 produced by Höganäs Corp.). The powdered cores obtained from the present work are expected to apply for high-performance soft magnetic components such as normal mode choke filter and pulse transformer.

Key words powdered core, dusts, high frequency, permeability, core loss.

1. 서 론

매년 철강 생산공정에 따라 상이한 물리화학적 특성을 나타내는 분진(dust)이 막대한 량 발생하고 있는데, 거의 대부분은 재활용되나 일부는 매립 등으로 폐기되고 있다. 이중 금속이 주성분인 분진의 경우, 수습된 분진을 용융시켜 유가금속 잉곳(ingot)과 슬래그(slag)로 분리하고, 잉곳은 다시 원료로 사용하고 있다. 이러한 상황에서 저자는 기존의 분진 재활용법과 전혀 다른 측면에서 분진을 전자·전기부품인 자성코어(magnetic core)의 재료로 사용하고자 하는 연구를 진행하여 왔으며, 그 결과의 일부로 분진을 함유한 자성 소결코어(sintered core)를 높은 주파수의 응용 부품이 아닌 ABS(Anti-lock Brake System) 감지 시스템의 구성품, DC 모터의 고정자 등에 사용 가능함을 제시하였다.¹⁾ 일반적인 자성체의 경우, 저주파 영역에서의 자속밀도(B), 보자력(Hc), 투자율(μ_a) 등의 특성은 자벽이동(domain wall motion)을 포함한 자화과정에서 외부 자기장의 변화에 따라 충분히 추종하여 변화할 수 있으므로 대부분 양호하나, 고주파 영역에서는 자기장의 변화를 따르기가 곤란해지므로 손실이 급증하여 이러한 특성들이 저주파에 비하여 현저히 열화되는 문제점이 있다.^{2,6)} 이와 함께 통상의 분말야금법

으로 제조한 연자성 소결코어^{1,3,6)}는 재료의 내부에서 형성되는 와전류(eddy current)의 흐름을 억제할 수 있는 어떠한 장애물도 없으므로, 상용 주파수보다 높은 주파수 영역에서 활용하기에는 절대 부적합하다. 이에 최근 수요가 증가하고 있는 전원용 부품으로서의 자성코어는 적어도 25 kHz 이상의 고주파에서 사용되어야 함으로 저주파용 소결코어와 대별되는 압분코어(powdered core) 혹은 페라이트(ferrite)의 개발에 대한 연구가 활발하다. 특히, 스위칭 전원(switching mode power supply)은 전자·전기기기의 경박단소화 경향과 고효율화에 의한 에너지 절약의 관점에서 구동 주파수가 200 kHz를 초과하는 것도 있는데, 이와 같은 전원의 고주파화에 대응할 수 있는 부품으로써 normal mode choke filter용, pulse transformer용 및 inline filter용 자성코어의 개발이 관심의 대상이다.⁶⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 앞의 연구¹⁾에 이어, 철강산업에서 발생하는 분진중 철의 함량이 비교적 높은 스테인레스강(stainless steel, STS)의 제강공정에서 발생하는 분진이 직경 1 μm 에도 미치지 않는 미분입에 착안하여, 분진을 첨가한 압분코어를 제작하고 상용 주파수보다 훨씬 높은 주파수 영역에서 나타나는 자기적 특성을 조사함으로써 재료적 관점에서 또 다른 형태의 분진 재활용 가능성을 확인하고자 하였다.

[†]E-Mail : swkim@rist.re.kr

2. 실험 방법

2.1 사용분말

Fig. 1은 사용한 순철 원료분말의 형상을 나타내는 것으로, 순도가 99.9% 이상이며 평균입도가 100 메쉬(149 μm)인 실험용 전해분말이다. Fig. 2는 복합 산화물구조를 가지는 STS 제강분진의 형상을 나타내며, 그 밖의 특성에 대해서는 참고문헌¹⁾에 언급되어 있다.

2.2 압분코아 제조 및 자기특성 평가

순철 원료분말에 0~30 wt.% 분진을 첨가한 혼합분말을 1.5 g씩 채서 각각의 압분코아 시편을 제작하였다. 내경, 외경이 각각 10.5 mm ϕ , 15.5 mm ϕ 인 금형을 사용하였으며, 단압식 유압프레스로 10 ton/cm²의 수직압력을 가하여 시편을 성형(compacting)하였다. 이때 결합 매개제(coupling agent)로 silane계 화합물(gamma aminopropyl triepoxy silane)을 사용하였으며, 사용 분말에 소량 첨가

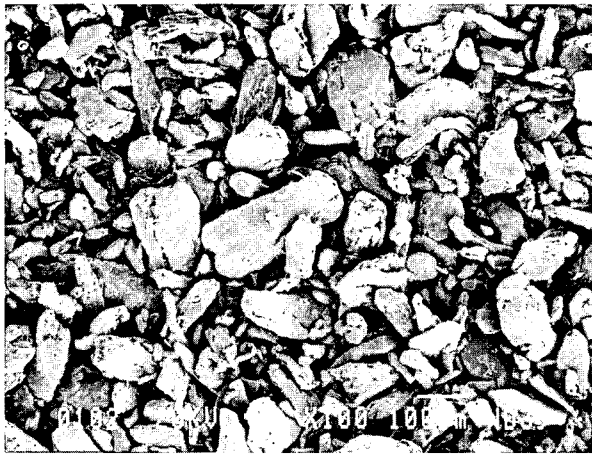


Fig. 1. SEM micrograph showing raw Fe powder.

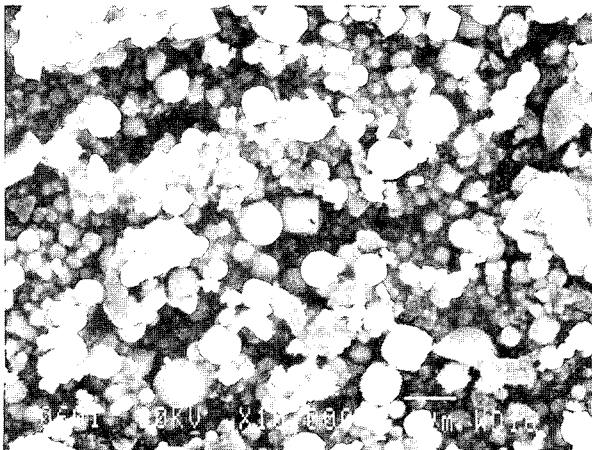


Fig. 2. SEM micrograph showing dust.

되기 때문에 분말 표면에서의 양호한 젖음성(wettability)과 분산성을 얻기 위하여 에칠 알콜을 용매로 사용하였다. 결합 촉진제가 코아 중량의 1 wt.%만큼 용해된 용액에 혼합분말을 함침시킨 후 에칠 알콜만 증발시켜 혼합분말의 표면에 coupling제가 잘 피복되도록 하였다. 그 후 결합제(binder)로서 수지(diglycidyl ether of bisphenol A)와 경화제(methyl-5-norbornene, 3-dicar-boxlic anhydride)를 10:9의 비율로 섞고 코아 중량의 0.25~2 wt.% 범위에서 혼합분말에 첨가하여 잘 혼합하였다. 성형시 분말과 몰드간의 마찰을 감소시키기 위하여 윤활제로 스테아린산 아연[Zn(C₁₈H₃₅O₂)]을 몰드 표면에 도포하였다. 성형이 완료된 후 150°C에서 1시간 경화처리(curing)를 실시함으로써 압분코아 시편의 제작을 완료하였다. 이와 같은 공정으로 제작된 코아 시편을 테프론 피복의 직경 0.35 mm 동선으로 각각 13회씩 1, 2차 권선하여 B-H analyzer (일본 Iwatsu사, model SY 8232)로 자속밀도(B), 보자력(Hc), 진폭비투자율(μ_a), 손실(P) 등 교류(AC) 자기특성을 측정하였다. 압분밀도(ρ)는 압분체의 치수와 중량으로 평가하였다. Fig. 3에 본 연구의 실험공정도를 나타낸다.

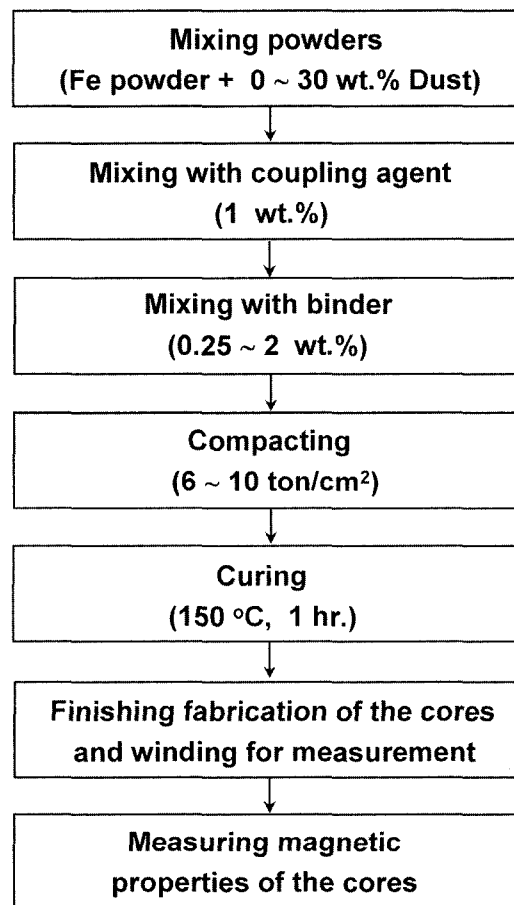


Fig. 3. Fabrication process of the powdered cores.

3. 결과 및 고찰

바인더량을 순 Fe 분말과 분진과의 혼합분말 (5, 10 wt.% 분진 첨가) 중량의 0.25~2 wt.%로 첨가한 시편에 대하여, 25 kHz의 주파수에서 시편의 자속밀도 Bm을 0.05 T로 고정했을 때 얻어진 보자력(Hc), 투자율(μ_a), 손실(P)과 압분밀도(ρ)의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 바인더량과 분진의 첨가량이 각각 0.25 wt.%에서 2 wt.%, 0 wt.%에서 10 wt.%로 증가함에 따라 Hc와 P는 증가, μ_a 는 감소하는 등 시편의 연자기 특성(soft magnetic property)은 감소하였으며, 특히 10 wt.%의 분진 첨가에서 1.0 wt.% 이상의 바인더가 첨가되면 상기의 측정조건으로 측정이 불가능할 정도로 열악한 특성을 나타내었다. 가장 양호한 자기특성이 나타난 0.25 wt.% 바인더량에서 5 wt.%의 분진을 첨가하면, 순 Fe 시편에 비하여 Hc는 0.67 Oe에서 0.78 Oe로 증가하며, μ_a 는 129에서 114로 감소하였다. 또한 바인더량이 0.25 wt.%에서 2 wt.%로 증

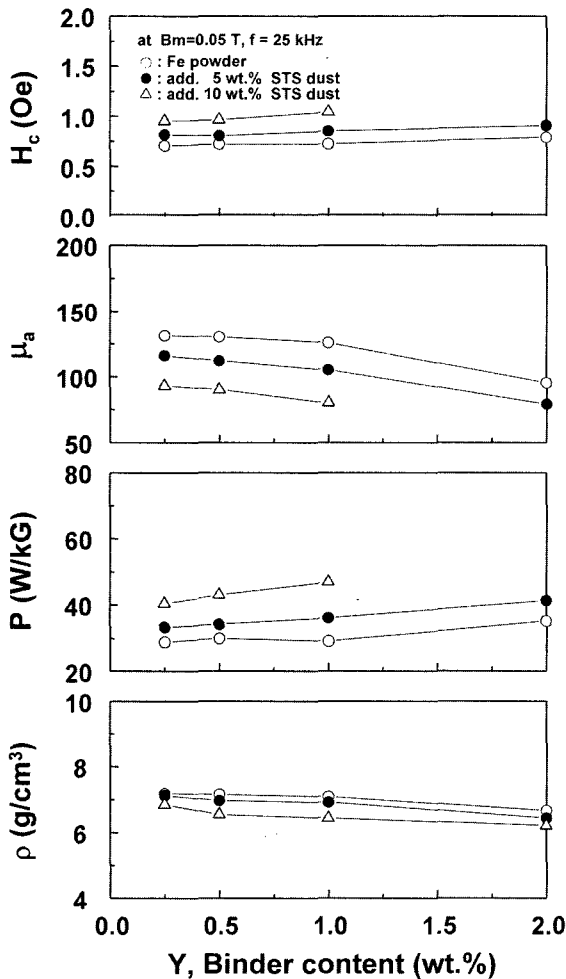


Fig. 4. Dependence of AC magnetic properties(Hc, μ_a , and P) measured at the frequency of 25 kHz in a magnetic induction of 0.05 T, and compacting density ρ on the binder content Y.

가할 때, 순 Fe 시편의 Hc는 0.67 Oe에서 0.79 Oe로 증가하며 μ_a 는 129에서 95로 감소하는 것으로 나타났다. 결국 압분코아의 연자기 특성에 미치는 분진 첨가량의 영향은 바인더의 첨가량에 비하여 상대적으로 적게 나타남으로서, 압분코아의 제작에 있어서 첨가되는 분진의 량보다 바인더량의 최적화가 중요함을 알 수 있었다. 한편, 분진첨가에 따른 자기특성의 열화는, 자기적으로 코아의 특성에 현저한 영향을 미치지 않는 분진¹⁾이 바인더에 현탁되어 단순히 바인더의 체적을 증가시키는 역할만함으로써 나타난 결과로 생각된다. 한편, 바인더량이 증가하거나 동일한 바인더량에서 분진의 첨가량이 증가하면 ρ 는 감소하였다. 동일한 중량이라 할지라도 밀도가 낮은 분진을 첨가한 압분코아 시편은 바인더를 매개로 단순한 물리적 접촉에 의하여 압착되었으므로 밀도가 감소하는 결과는 타당하다.

앞에서 언급한 바와 같이 스윗칭 전원의 사용 구동 주파수가 200 kHz가 넘는 것이 있으므로, 제작된 코아 시편 자기특성들의 주파수 의존성을 조사하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에는 가장 양호한 연자기 특성을 보인 0.25 wt.% 바인더 첨가 시편에 있어서, 각 시편의 자속밀도 Bm을 0.05 T로 고정하고 분진 첨가량 합

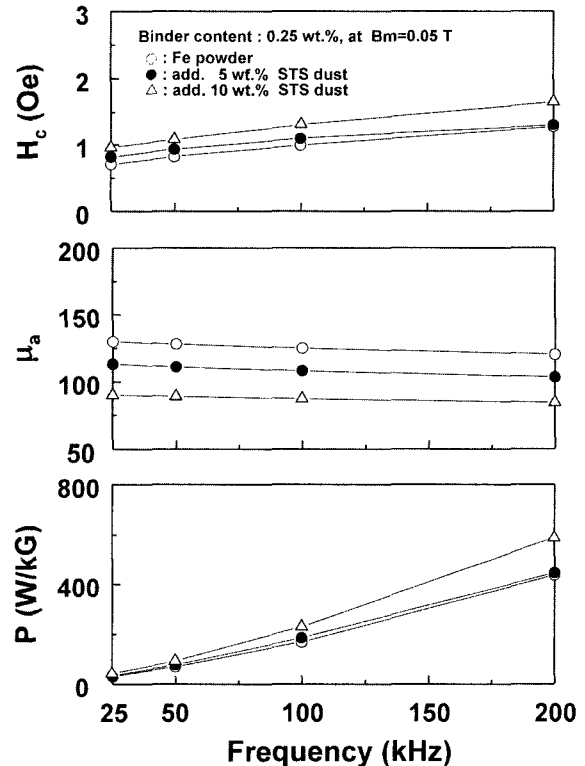


Fig. 5. Frequency dependence of AC magnetic properties(Hc, μ_a , and P) measured in a magnetic induction of 0.05 T on the dust content for the powdered cores containing 0.25 wt.% binder.

수로 25~200 kHz의 주파수에서 얻어진 H_c , μ_a 및 P 의 변화를 나타내었다. 주파수 증가에 따라 H_c 와 P 는 증가하고 μ_a 가 감소하여 연자기 특성은 전반적으로 열악해지며, 특히 P 는 100 kHz를 경계로 기울기가 다소 바뀌어 증가하는 양상을 보이고 있다. 25 kHz에서 200 kHz로 주파수가 증가하면, 순 Fe 시편의 H_c 는 0.67 Oe에서 1.28 Oe로 증가하고, μ_a 는 129에서 119로 감소하는 반면, 10 wt.% 분진첨가 시편에서는 0.93 Oe에서 1.59 Oe로 증가, μ_a 는 91에서 85 정도로 감소하여 변화의 정도가 감소함을 알 수 있다. 또한 Fig. 6과 같이, 분진 첨가량에 따른 25 kHz에서의 μ_a 에 대한 200 kHz에서의 μ_a 비는, 분진 첨가량이 많고 바인더량이 감소할수록 증가하여 고주파화에 따른 μ_a 의 감소량이 작아지는 효과를 확인할 수 있었다. 이 결과는 25 kHz에서 5 wt.% 분진첨가 시편의 μ_a 가 순 Fe 시편에 비하여 12% 밖에 작지 않은 114를 나타내므로, 200 kHz보다 더 높은 고주파 영역에서는 순 Fe 시편의 μ_a 에 근접하는 값을 나타내게 되어 오히려 양호하게 될 가능성이 있음을 시사한다. 또한, 일반적으로 코아에 가해지는 교류 자기장의 주파수가 증가할 때 손실의 급증으로 인한 자체 발열로 코아의 기능이 곤란하게 된다는 측면에서 의미있다. 고주파에서의 P 는 전체 자기특성을 결정짓는 중요한 인자가 되므로, 자기이력 손실(hysteresis loss, P_h)과 와전류 손실(eddy current loss, P_e)^{2,6)}을 분리하여 바인더와 분진의 첨가량이 미치는 영향에 대하여 조사하였다. Fig. 7에는 P_h 와 P_e 를 분리하기 전에 얻어진 시편의 P 를 바인더와 분진의 첨가량 함수로 주파수에 대하여 나타내었다. Fig. 5와 유사하게 주파수 증가에 따라 P 는 증가하며 100 kHz 부근에서 크게 증가하고 있다. 그림에서 100 kHz를 경계로 그 이하에서는 바인더량이 작을수록 P 가 작으나, 그 이상에서는 바인더량이 많을수록 P 가 작아져 그 특성이 양호한 것으로 나타나는 현상이 주목된다. 그 원인은 P 가 P_h 와 P_e 로 분리되어 측정된 Fig. 8의 결과로 설명이 가능하다. 즉, P_h 는 주파수가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있으며 바인더량이 증가할수록 현저해짐에 반하여, P_e 는 바인더량이 작을수록 현저해지며 100 kHz까지 직선적 변화를 보이고 그 이상에서 급격히 증가하고 있다. 또한 바인더량이 작을수록 P 중 P_e 가 P_h 보다 지배적이고, 바인더량이 많아지면 P_h 가 P_e 보다 지배적으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 P_h 는 자벽이동과 같은 자화과정을 방해하는 기공, 결합, 불순물 등이 존재하였을 때 크게 증가하며, P_e 는 입경의 크기, 시편의 두께 등과도 관계가 있으나, 와전류의 흐름이 용이할 때 크게 증가한다.²⁾ 따라서, 동일 조건에서 바인더량만을 변수로 했을 때 바인더량이 증가할수록 분말 입자를 피복하는 바인더의 두께가 두꺼워질 것이므로 불순물로서의 역할이 증대되어 P_h 는 증가하였지만 동시

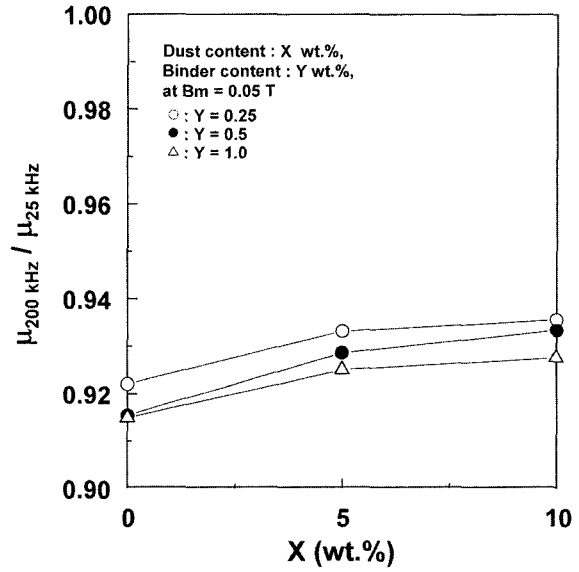


Fig. 6. Variation of permeability ratio $\mu_{200\text{ kHz}}/\mu_{25\text{ kHz}}$ with the dust content X and the binder content Y.

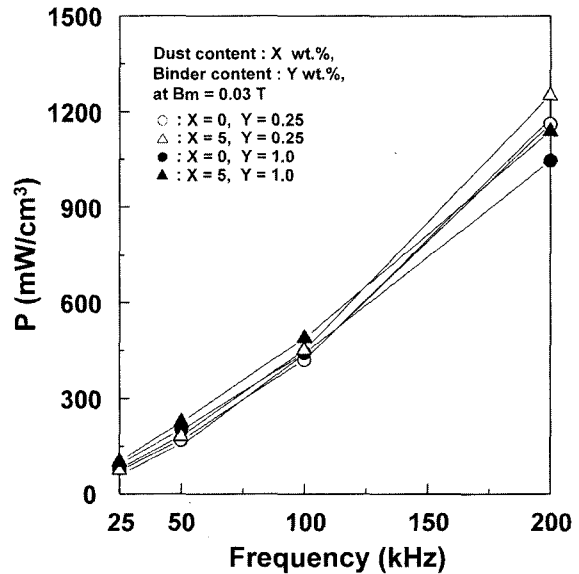


Fig. 7. Variation of core loss P with the frequency.

에 와전류 흐름의 차단 효과도 증대되어 P_e 는 상대적으로 감소하였던 것이다. 이와 같은 이유로 Fig. 7에 나타난 바와 같이 100 kHz 이상에서 바인더량에 따라 P 가 역전된 것은, 바인더량이 작을 때 P_h 에 대한 P_e 의 급격한 증가에 기인한 것임을 알 수 있다. 한편, 20~200 kHz의 주파수 영역에서 본 연구의 의도대로 분진첨가에 따른 μ_a 의 증가 및 P 의 감소효과가 나타나지 않은 것은, Fig. 8과 같이 P 에 대한 P_e 의 영향이 P_h 에 비하여 현저히 크지 않고 바인더량이 많은 경우 오히려 P_h 가 크게

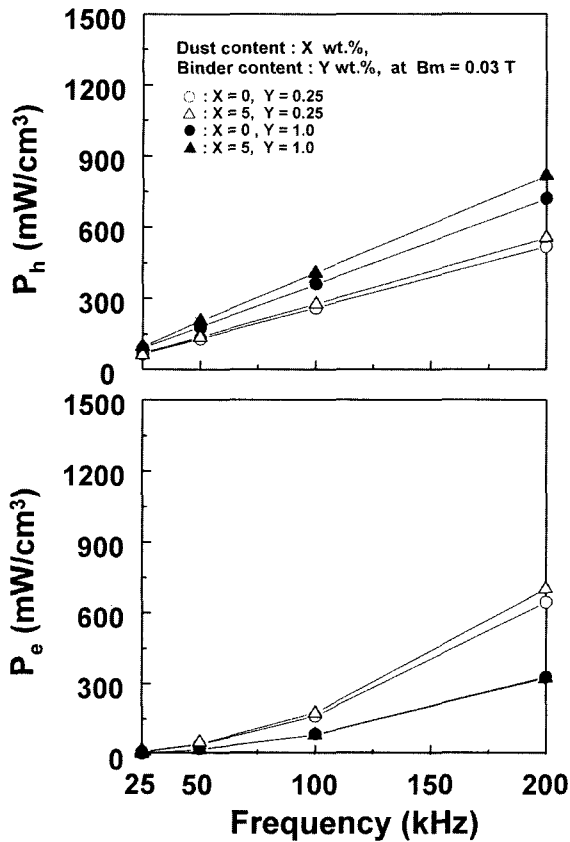


Fig. 8. Variation of hysteresis loss P_h and eddy current loss P_e with the frequency.

나타난 사실로 판단할 때, 현재의 측정 주파수 범위가 분진첨가의 효과를 나타내기에는 충분히 높지 않았을 가능성이 있음을 알 수 있다. 이 사실을 확인하기 위하여, 각 시편에 대한 200 kHz 이상에서의 μ_a 와 P의 변화를 조사하였다. Fig. 9에는 본 연구의 순 Fe 및 5 wt.% 분진첨가 코아 시편의 최대 500 kHz 주파수 영역에서 얻어진 μ_a 변화를 전자기 부품에의 응용을 위해 개발한 Höganäs사의 제품인 Ancorsteel TC 80, Ancorsteel SC 100 압분코아⁶⁾의 특성과 비교하여 나타내었고, Fig. 10에는 P의 주파수 특성을 Ancorsteel TC 80에 대한 결과⁶⁾와 함께 나타내었다. 정확한 비교를 위하여 Höganäs사의 측정조건인 $B_m = 0.001$ T로 하여 동일하게 측정하였다. 그러나 Höganäs사 제품의 크기 및 제조공정변수 등이 본 연구와 동일하지 않아 직접 비교하기에는 무리가 있었지만, 200 kHz 이상의 주파수에서 본 연구의 압분코아 제조공정으로 제작된 순 Fe 및 5 wt.% 분진첨가 시편의 μ_a 는 60~70 정도로 Ancorsteel SC 100보다는 현저하게 높고, Ancorsteel TC 80에 비해서는 다소 높게 나타났다. 한편, P는 10 kHz 이하에서는 높지만 500 kHz에서는 $4000 \mu W/cm^3$ 정도였으며 그 이상의 주파수 영역에서도 대동소이한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 특

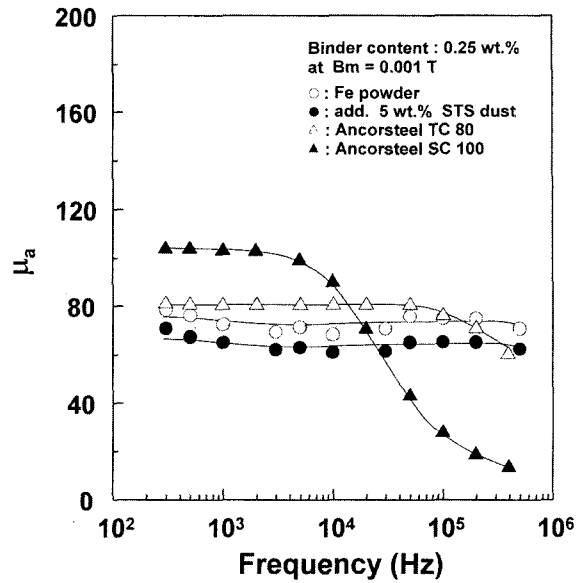


Fig. 9. Comparison of permeabilities μ_a obtained from the present work and the powdered Fe cores produced by Höganäs Corp..

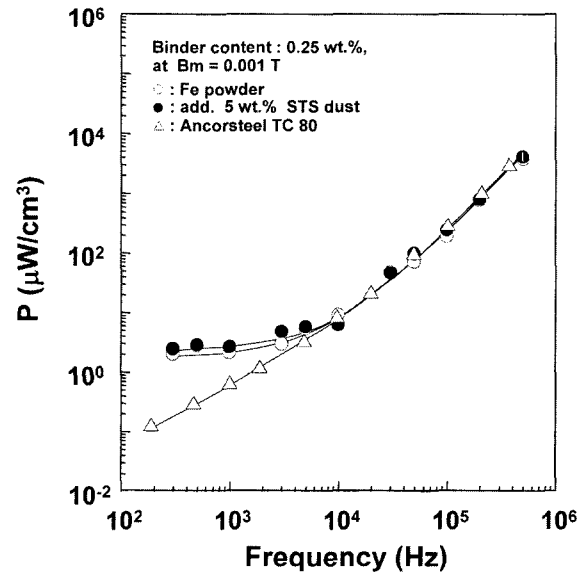


Fig. 10. Comparison of core losses P of obtained from the present work and the powdered Fe cores produced by Höganäs Corp..

히, 5 wt.%의 분진이 첨가된 상태에서도 위와 같이 우수한 연자기 특성을 나타내는 것은 매우 흥미로운데, 이는 바인더에 혼합된 분진의 분말표면 피복이 와전류 손실 억제에 보다 효과적으로 작용하는데 기인한 것으로 판단된다.

이상의 결과를 정리하면, 압분코아의 재료로서 5 wt.% 정도의 스테인레스 제강분진을 첨가하는 것은, 불순물의

양 혹은 제조공정의 미소한 차이에도 민감하게 변화하는 코아의 연자기 특성에 큰 영향을 주지 않을 뿐만 아니라, 오히려 고주파 영역에서의 자기특성 향상에 보다 효과적인 것으로 나타나, 분진을 재활용할 수 있는 또 다른 가능성이 확인되었다.

4. 결 론

스테인레스 제강분진을 함유한 순철 압분코아의 자기 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압분코아의 고주파 자기특성에 미치는 분진 첨가량의 영향은, 바인더의 첨가량에 비하여 상대적으로 적게 나타나, 압분코아의 제작에 있어서 분진의 양보다 바인더량의 최적화가 요구되었다.
- 2) 압분코아의 고주파 자기특성은 분진의 첨가량이 많고 바인더의 양이 감소할 수록 양호해졌다.
- 3) 압분코아의 고주파 자기특성중에서 손실은 바인더량이 작을수록 와전류 손실이 자기이력 손실보다 지배적이고, 바인더량이 많아지면 자기이력 손실이 와전류 손실보다 지배적으로 작용하였다.
- 4) 압분코아의 고주파 자기특성에서의 분진첨가 효과

는 200 kHz 이상의 주파수에서 나타났으며, 투자율과 손실특성은 순 Fe 코아에 필적한 값이 얻어졌다.

- 5) 압분코아의 재료로서 5 wt.% 정도의 스테인레스 제강분진을 첨가하는 것은 고주파 영역에서의 연자기 특성 향상에 보다 효과적인 것으로 나타나, 분진을 기존과 다른 용도로 재활용할 수 있는 가능성이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. S. W. Kim, J. Kor. Mag. Soc., 11(3), 114 (2001).
2. K. Z. Oota, Jikikougaku no kiso, p. 304, Ktoritsu publishing Co., Tokyo (1987).
3. Japan patent published application No. Sho 52-32809.
4. Japan patent published application No. Sho 62-103343.
5. Japan patent published application No. Hei 2-57615.
6. K. S. Narsimhan, Digest of Soft Magnetic Materials 96, Gorham/Intertech Consulting, San Francisco (1996).
7. P. Jansson, Digest of Soft Magnetic Materials 96, Gorham/Intertech Consulting, San Francisco (1996).
8. K. Grohs. Narsimhan, Digest of Soft Magnetic Materials 96, Gorham/Intertech Consulting, San Francisco (1996).
9. K. S. Harata, Denshigijutsu, 3, 9 (1994).
10. Y. H. Sugatani, Denshigijutsu, 3, 78 (1995).
11. Y. K. Sato, Denshigijutsu, 3, 89 (1995).