

분말 압연에 의해 제조된 퍼말로이(PB, PC)의 자성 특성

이동원 · 정형식

한국기계연구원 재료공정연구부

Magnetic Properties of Permalloy(PB, PC) Strips Fabricated by Powder Rolling Process

D. W. Lee and H. S. Chung

Korea Institute of Machinery and Materials, Materials Forming Lab.,

Changwon 641-010, Korea

(Received October 20, 1995)

ABSTRACT Two grades of Permalloy strips, Fe-45Ni(PB) and Fe-78Ni-4Mo-5Cu(PC) were fabricated by powder rolling process from elemental powder mixtures. The roll compacted green strips were sintered, homogenized, cold rolled with or without an intermediate annealing and finally heat treated to measure magnetic properties. For a given thickness reduction, rolling with an intermediate annealing was found more effective to achieve a full densification with no visible micropores and also to obtain better magnetic properties. Increasing the final rolling reduction also produced a marked improvement of the magnetic properties whereas the cooling rate during the final heat treatment has little effect in both grades. Addition of a small amount, 0.4% Mn slightly degraded the properties. As an overall, The PM strips produced via powder rolling yielded the similar soft magnetic properties to the corresponding commercial grades produced via wrought processing.

1. 서 론

Fe-Ni계 퍼말로이(Permalloy)는 자기헤드의 코어, 자기 차폐 및 시계 등의 부품에 널리 사용되는 연자성 재료(soft magnetic material)로써, 구조강 다음으로 널리 사용되는 자성합금이다.¹⁾ 퍼말로이는 니켈 조성 및 가공 열처리법에 따라 PA에서 PE급까지 여러 종류가 있으며, 이중 가장 수요가 많은 것은 PB급(Fe-45Ni) 및 PC급(Fe-78Ni-4Mo-5Cu)이고 다른 것은 수요가 특수용도에 한정되어 있다. PB 및 PC 급 조성이 많이 사용되는 이유는 연자성합금의 가장 중요한 특성인 높은 투자율(permeability)에 크게 영향을 주는 자기 이방성 상수(anisotropy constant, K_1)와 자왜상수(magnetostriction coefficient, λ_{111} 과 λ_{100})가 78 Ni 조성 부근에서 거의 영의 값을 갖으며, 45 Ni 조성 부근에서도 λ_{100} 이 거의 영의 값을 갖고 K_1 과 λ_{111} 이 그다지 크지 않기 때

문이다.²⁾ 현재 퍼말로이는 EI형 코어(core) 형태로 각종 변압기의 자심 재료로 상용 주파수(60 Hz)부터 수 kHz까지의 범위에서 적용되고 있으며, 주요한 요구 특성은 우수한 교류 투자율이다. 본 연구에서는 EI형 자심 재료를 목표로하여 PB 및 PC급 연자성 판재를 분말압연(powder rolling) 공정으로 제조하여 그 특성을 고찰하고자 하였다.³⁾ 분말압연이란 회전하는 두 롤(roll) 사이에 원료분말을 공급하여 두 롤의 압연력에 의해 성형판재를 제조한 후, 소결 및 냉간압연을 거쳐 진밀도의 최종 판재를 제조하는 공정이다. 이 공정은 일반적인 잉고트 판재제조 공법에 비해 용해 및 열간압연 공정을 생략할 수 있어 원가절감이 가능하고 고순도 및 고융점의 기능성 판재를 소량 다품종 형태로 생산할 수 있는 장점이 있기 때문에 용융법으로 제조가 어려운 특수용도 판재의 제조에 널리 응용된다.³⁾ 퍼말로이를 제조하는데 있어서 최종 자성특성에 영향을 주는 인자로는

합금조성, 냉간압연량, 중간 소둔온도 및 최종 열처리 후의 냉각속도 등을 고려할 수 있다. 용재재 퍼말로이에 대해서는 이러한 공정변수상의 연구가 오래 전부터 진척되어 왔으며, 특성 최적화를 위한 세부 공정은 대부분 확립된 상태이다. 그러나 분말압연 판재의 경우, 냉간압연시 재료는 압축성 변형 거동(compressive deformation)을 가지며, 또한 전체 압하량 및 냉연중 중간 소둔이 불충분할 경우 최종 판재에 미량의 기공이 잔류할 수 있으므로, 용재재에서 고려되는 각 변수의 효과를 절대적으로 적용할 수 없을 것이다. 일반적으로 용재재 퍼말로이 판재 제조 공정의 경우, 최종 냉간 압연량이 증가할 수록, 최종 열처리 후에 자화 용이면인 {100}〈001〉의 재결정 집합 조직(cube texture)이 발달되어 투자율이 향상되는 것으로 보고되어 있다.⁴⁾ 또한 최종 열처리 후에 600°C에서 300°C 영역에서의 냉각 속도가 증가하면 Ni₃Fe상과 가까운 조성의 규칙변태를 억제시켜 이방성 상수가 "0"으로 접근하여 보자력이 감소되고 투자율이 증가하는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 본 연구에서는 분말 압연 공정에 의해 제조된 퍼말로이 PB, PC급 최종 제품의 자성 특성을 고찰하고 중간 소둔, 최종 냉간 압연량 및 로냉 수준 범위에서의 냉각 속도에 대한 효과를 분석하여, 이 결과를 용재재 퍼말로이의 특성 및 JIS 규격⁶⁾과 비교 분석함으로써 분말 압연공정에 의한 퍼말로이 판재의 제조 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 원료 분말의 선정

EI 코아용 PB, PC급 퍼말로이의 높은 투자율을

위한 가장 중요한 요인은 제품의 순도이며, 이를 위해서는 초기 원료분말의 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 순도가 비교적 우수하며 성형성이 좋은 분무 철 분말(Hoegaanes ABC 100.30) 및 카보닐 니켈 분말(Inco 255)을 실험분말로 선정하였다. 또한 PC급의 경우에 있어서의 소량의 첨가원소인 Cu와 Mo 분말은 창성과 대한중석에서 제조된 분말을 이용하였다. 이때 Fe, Ni, Cu, Mo의 평균분말 크기는 각각 43, 1, 30, 10 μm이었다. 한편 첨가 원소인 Mn의 경우는 SCM사의 -325 mesh 분말을 구입 후 사용하였다.

2.2. 성형, 소결 및 균질화

준비된 원료분말은 PB급(Fe-45w/oNi)과 PC급(Fe-78w/oNi-4w/oMo-5w/oCu)의 조성이 되도록 V형 분말 혼합기에서 30 rpm으로 30분 각각 균일하게 혼합 후 분말압연법으로 성형판재를 제조하였다. 이때 PB 및 PC급 기본 조성에 0.4w/oMn이 첨가된 성형 판재를 별도로 제조하였다. 분말 압연시 제조 가능한 최대의 성형 판재의 두께와 밀도는 분말의 형상과 유동도, 압연롤(roll)의 크기 및 롤의 표면조도 등 여러가지 요인에 의해서 결정된다. 당 연구팀이 보유하고 있는 분말압연기를 이용하여 충분한 예비 실험을 수행한 결과, 약 75% 정도의 상대밀도를 갖고 1.5~1.7 mm의 두께와 90 mm의 폭을 갖는 성형 판재의 제조가 가능하였다. 합금 조성별로 얻어진 각 성형판재는 1170°C의 수소 분위기 소결로에서 20분 소결한 다음, 원료 분말들이 충분히 확산하여 각각의 조성이 부위별로 균일하도록 1250°C에서 60시간 균질화 열처리하였다. 이때 충분한 균질화 여

Table 1. Process parameters for permalloy strips

시편	시편 No.	균질화 후 두께(mm)	1차압연 후 두께(mm)	중간소둔 (1 hr)	2차압연 후 두께(mm)	최종열처리(1100°C, 2 hr) 후 냉각속도
PB	PB-1	1.4	0.56(60%)	1000°C	0.22(60%)	1000°C/hr
	PB-2	1.4	0.35(75%)	—	—	1000°C/hr
	PB-M	1.7	0.85(50%)	1000°C	0.35(59%)	1000°C/hr
PC	PC-1	1.1	0.44(60%)	1000°C	0.18(60%)	100, 500, 1000°C/hr
					0.22(50%)	
					0.26(40%)	
PC-2	1.1	0.35(68%)	—	—	1000°C/hr	
PC-M	1.7	0.85(50%)	1000°C	0.35(59%)	1000°C/hr	

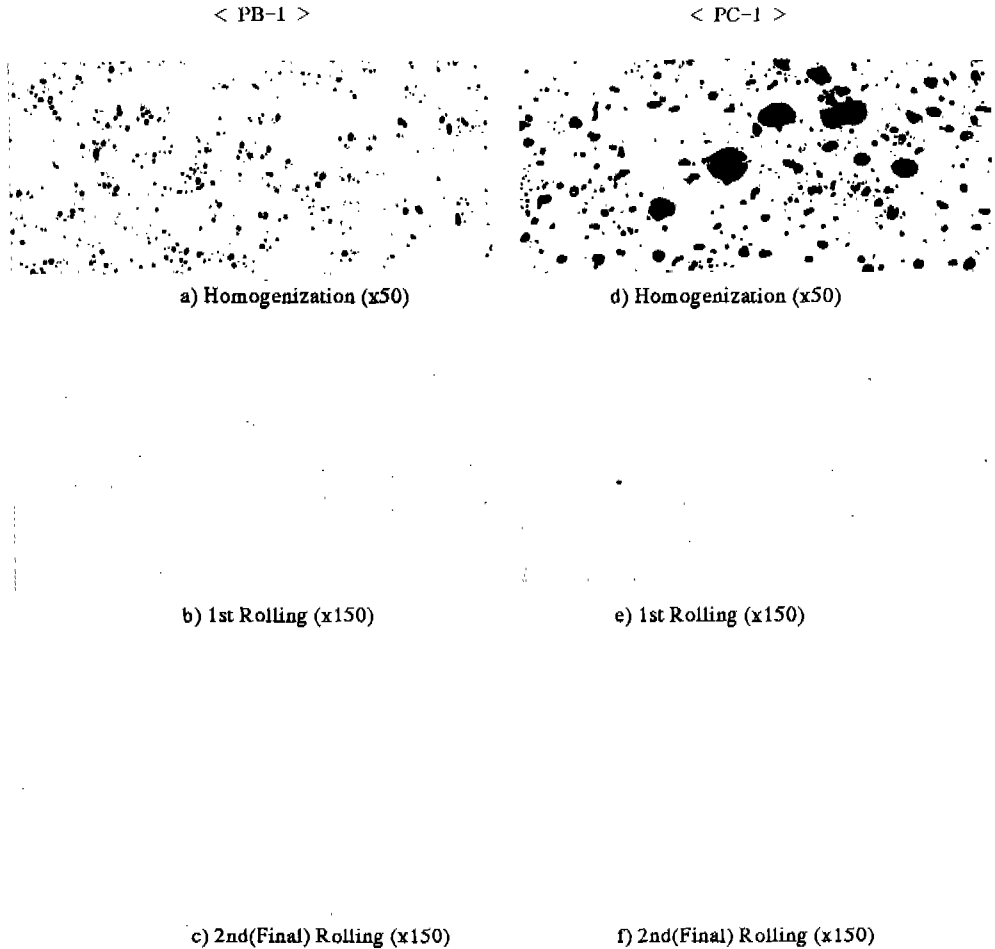


Fig. 1. OM of polished samples in PB-1 and PC-1 process.

부는 EPMA(Model: Noran Series 2)로 x500의 연마조직상에서 부위별로 무질서하게 약 10회 이상 점성분 분석을 수행하여, 각 성분의 오차 범위가 1% 이내인 것으로써 확인하였다.

2.3. 냉간압연 및 최종 열처리

일반적으로 냉간 압연중 중간소둔의 목적은 가공경화 효과를 제거하여 냉간 압연을 계속적으로 가 능케 하기 위하여 수행되는데, 분말 압연 판재의 경우는 냉간압연 후 형성되는 압착기공들을 구형화 시키거나 혹은 제거함으로써 밀도를 높히는 목적이 부가적으로 중요시된다. 본 연구에서는 표 1에서와 같이 균질화 판재를 1차 압연, 중간소둔, 2차 최종 압연 및 최종 열처리를 하여 최종 판재를 제조하는

공정을 기본적으로 선정하였다.

표 1의 시편명에서 PB-1, PC-1은 1차 압연, 중간소둔, 2차 압연을 거쳐 최종 열처리를 수행한 공정이고, PB-2, PC-2의 경우는 중간소둔을 생략한 공정이며, PB-M, PC-M의 경우는 PB-1, PC-1 공정과 거의 유사하지만 Mn이 0.4 w/o 첨가된 경우를 나타낸다. 최종 열처리 조건은 용재재 퍼말로이 PB, PC급에 대해서 일반적으로 적용되고 있는 1,100℃, 2시간으로 설정하였다.⁴⁾ 한편 PC-1 시편에 한해서는 최종 냉간 압하량을 40, 50, 60%로 변화시켰으며, 60% 최종 냉간 압연한 판재에 대해서는 열처리후 냉각속도를 노랭 속도 범위인 100, 500, 1000℃/hr로 각각 변화시켰다. 또한 냉간 압연량을 변화시킨 최종 판재에서는 재결정 집합조직의 발달 경향을 X-선

회절 분석 결과에서 F 인자(lotgering factor)로 정성 비교하였다.⁷⁾ 한편 각 공정별로 얻어진 판재에서는 정도, 미세조직, 밀도 및 불순성분(C, S, N, O)의 변화를 조사하였다.

2.4. 자성특성 평가

최종 냉간 압연판재를 외경 45 mm, 내경 33 mm로 가공 후 최종 열처리를 수행하여 얻어진 링시편에 직경 1 mm 동선으로 1차 코일을 100회, 직경 0.5 mm의 동선으로 2차 코일을 100회씩 각각 감은 다음 교류 B-H Meter(Model: Hewlett Packad, MMS 4001)에서 자성 특성을 측정하였다. 이때 주파수는 1000 Hz로 고정하였고, 재료의 최대 자속 밀도가 PB, PC급에서 각각 1 Tesla 및 0.6 Tesla가 되도록 인가자장을 조절하여, 손실(AC loss), 투자율(permeability, μ), 보자력(coercivity, Hc) 및 각형비(square-ness, Br/Bm)를 측정하였다. 한편 PB, PC급의 교류 자성 특성에 있어서 낮은 보자력 및 손실은 높은 투자율을 위한 종속적인 특성으로써, 최종 교류 자성 특성은 B-H Meter에서의 측정법 이외에 재료의 임피던스(impedence) 값을 이용한 실효비 투자율(μ_{eff} : effective permeability)로 자주 비교된다.

실효비 투자율의 기본식은 다음과 같다.⁸⁾

$$\mu_{\text{eff}} = [L/W] \times [D \times l_m^2 / N^2] \times [1/\mu_0]$$

여기서 μ_{eff} : 실효비 투자율

L : 임피던스(Henry)

W : 시편 중량(g)

l_m : 평균 자로 거리(외경 45 mm, 내경 33 mm의 경우 $l_m = 122.5$ mm)

N : 권수(=100)

μ_0 : 진공투자율(=1.2566×10⁻⁸ Henry/m)

PB, PC급에 있어서의 실효비투자율은 JIS 2531 규격에 정해져 있으며, 국내외의 많은 업체에서는 이 규격치를 참조하고 있는 실정으로 본 연구에서는 이의 사양과 개발품의 특성치를 비교하기 위하여 임피던스 측정기(model: Hewlett Packad 4194A)로 실효비 투자율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세조직 관찰

표 1의 각 공정별로 얻어진 판재에서 미세조직을 연마상태와 부식상태로 나누어 조사하였는데, 이때 PB-1과 PB-M 및 PC-1과 PC-M은 서로 거의 유사한 공정이기 때문에 PB-1, PB-2 및 PC-1, PC-2 공정에 대해서만 각각 관찰하였다. 그림 1은 PB-1과 PC-1 공정에 있어서 각 공정별 연마조직을 나타낸다.

균질화 상태에서는 상당량의 잔류기공이 존재함을 알 수 있으며 기공의 형상을 볼 때, PC의 경우가 PB 경우에 비해 상대적으로 크기가 크며 분포도는 작다. 이는 철분말에 비해 미세한 니켈 분말을 많이 함유한 PC 판재에 있어서 소결 및 균질화 열처리시 치밀화가 빠르고 Ostwald Ripening이 일어났기 때문으로 생각할 수 있다. 이러한 균질화 판재는 1차 및 2차 냉간 압연을 거쳐 기공이 거의 소멸된 상태를 볼 수 있으며, 실제로 SEM을 이용하여 2차 압연 및 최종 열처리 후의 연마조직을 부위별로 관찰한 결과 잔류 미세 기공은 거의 관찰되지 않았다. 그림 2의 부식조직에서 관찰되는 바와 같이 균질화 상태에서 존재하는 잔류기공들은 60%의 1차 압연에 의해 길게 늘어진 압착기공 형태로 변형하며, 이러한 압착기공은 소둔처리에 의하여 대부분 확산 접합되고, 소둔 후 잔류하는 미량의 기공들은 2차 압연 및 최종 열처리에 의해 같은 방법으로 소멸되어감을 알 수 있다. 결국 분말압연 판재의 조밀화는 냉간압연에 의해 압착된 기공이 소둔시 소멸되는 과정의 반복으로 진행됨을 알 수 있다.

피말로의 우수한 투자율은 재료내에 개개의 자구(domain)가 인가자장에 의해 특정한 배열로 용이하게 운동하는 성향에 따라 결정되는데, 만약 자구내에 기공과 같은 결함이 존재할 경우는 결함 주변의 유한한 영역에 인가자장과 반대로 작용하는 유도역자구를 형성시켜(internal magnetic pole effect) 투자율을 저하시키게 된다.⁸⁾ 이런 측면에서 볼 때 PB-2 및 PC-2 공정의 경우는 PB-1, PC-1 공정과 비교하여 중간소둔이 생략되었을 뿐만 아니라 전체 압연량도 상대적으로 작았기 때문에 최종 판재에는 약간의 기공이 잔류할 가능성이 크며, 이는 자성특성을 저하시킬 수 있다. 그림 3은 PB-2 및 PC-2 공정에 있어서의 미세조직을 나타내는데, 냉연 후의 부식조직에서는 PB-1, PC-1 공정과 비교하여 상대적으로 많은 압착기공이 존재함을 볼 수 있다. 이러한

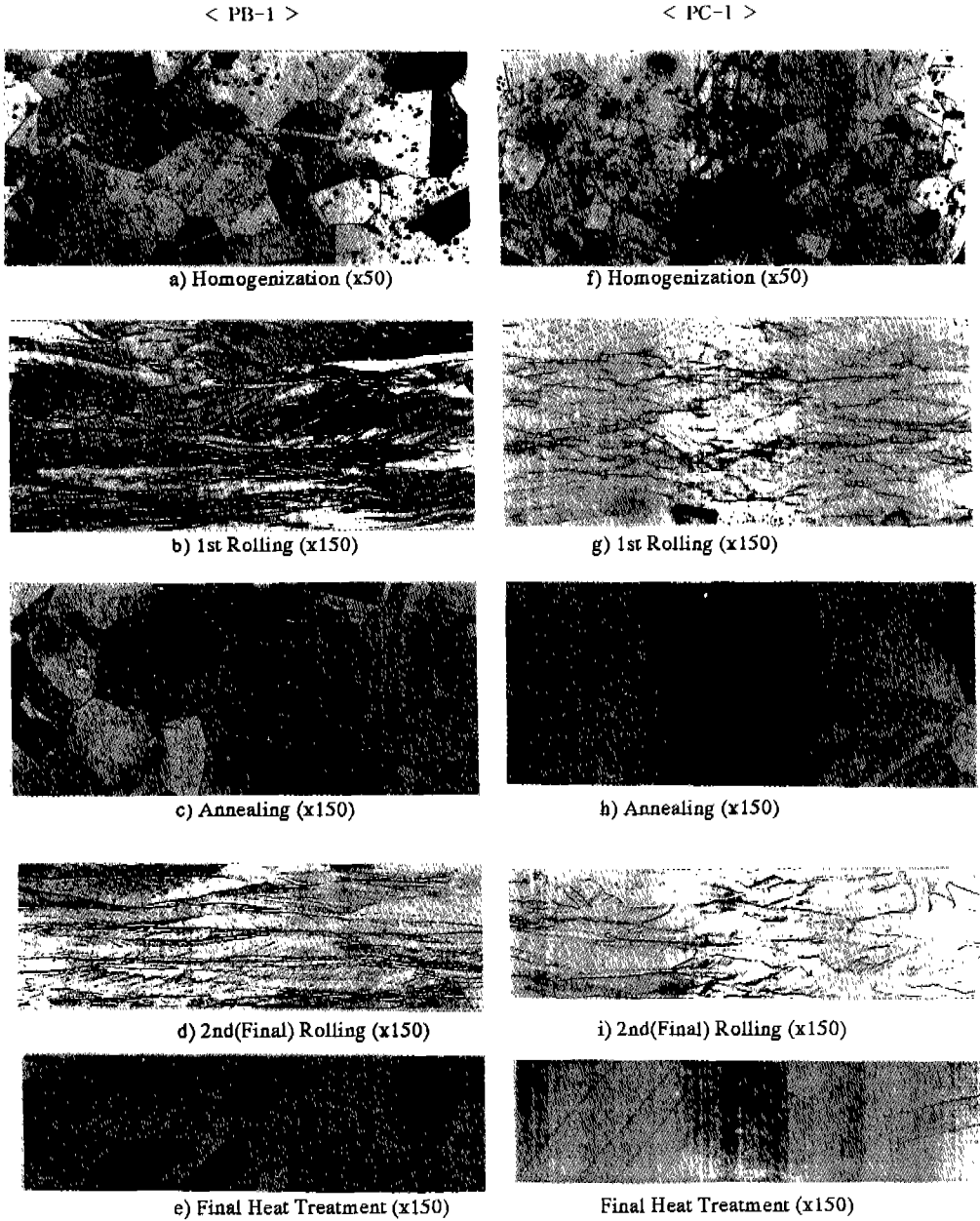


Fig. 2. OM of etched samples in PB-1 and PC-1 process.

압착 기공은 열처리 후의 부식조직을 볼 때, 최종 열처리시 대부분 제거된 것으로 보여지나 최종 열처리 후의 연마조직상에서 미세기공의 존재 유무를 SEM으로 조사한 결과 그림 4에서와 같은 잔류기공이 부위별로 소량 존재함이 확인되었다. 즉 완전한 진밀도 판재를 얻기 위한 전체 냉간 압하량은 약

75~80% 정도가 필요하며, 이때 중간 소둔은 압착 기공을 더욱 효과적으로 제거하는 측면에서 필요하다고 판단된다.

한편 최종 열처리 후의 결정립 크기를 살펴보면 PB-1 및 PB-2 공정 및 PC-2에 있어서 약 150 μm를 나타내며, PC-1의 경우는 약 300 μm 이상으로 크게

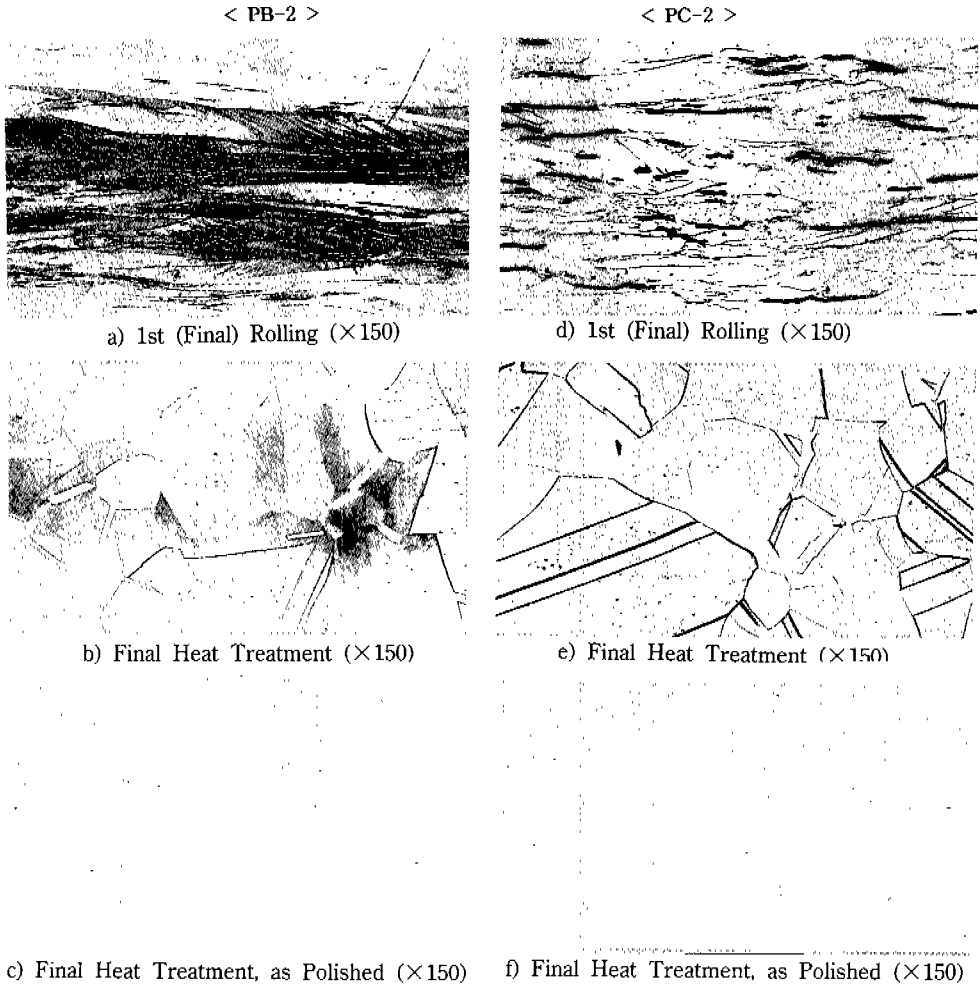


Fig. 3. OM of final samples in PB-2 and PC-2 process.

나타나고 있다. 결정립 크기는 기공의 소멸과 밀접한 관련이 있다고 판단되며 PB-1 및 PB-2의 경우 니켈 함량이 적어 중간 소둔의 유무에 관계없이 미세 기공이 잔류하고, PC-1의 경우도 역시 중간 소둔이 생략된 관계로 미세 기공이 잔류하여 최종 열처리시 입자성장을 억제한 것으로 판단된다. 일반적으로 연자성 재료의 경우 결정립이 클수록 자화가 용이하여 투자율 등의 연자성 특성이 향상되어진다고 알려져 있으나, 일부 연구 논문에 의하면 퍼말로이에서 한 개의 자구 크기는 약 30~60 μm 이고, 한 개의 결정립에 2~3개의 자구가 존재할 경우에 자구운동이 가장 용이하여, 우수한 투자율 특성을 가지는 것으로 보고된 바 있다.⁹⁾ 본 실험결과에서 PB-1, PC-1이

PB-2, PC-2의 경우보다 낮은 투자율을 나타내는 것은 이와 같은 결정립 크기 효과도 일부 고려될 수 있으나, PB-1과 PB-2의 경우에 거의 유사한 결정립 크기를 가지면서도 특성의 차이가 큰 점(그림 11 참조)을 감안할 때 최종 자성 특성에는 기공의 영향이 더욱 크게 작용한 것으로 판단할 수 있다.

3.2. 순도, 밀도 및 경도측정 결과

그림 5와 6에는 PB-1 및 PC-1 공정에 있어서 공정별로 측정된 C, S, N, O 성분 및 밀도 변화를 나타낸다. 그림 5에서 볼 때 불순성분인 C, S, N, O는 소결 후 약 48시간의 환원성 균질화에 의해 약 0.002 w/o 이하의 C, S와 약 20 ppm 이하의 N, O

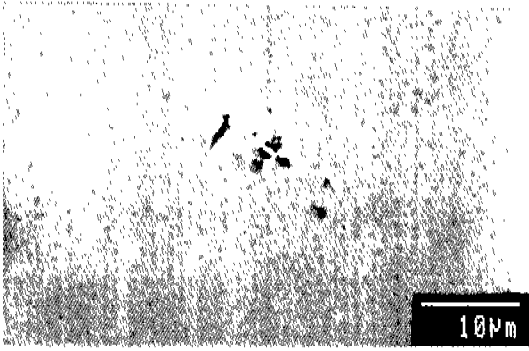


Fig. 4. Typical SEM microstructure of PC-2 sample.

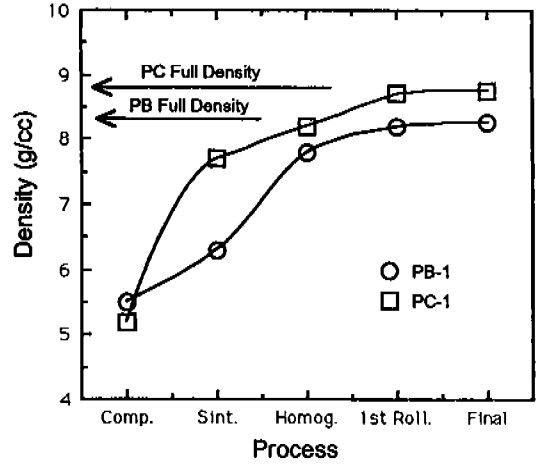


Fig. 6. Change of density according to the each process.

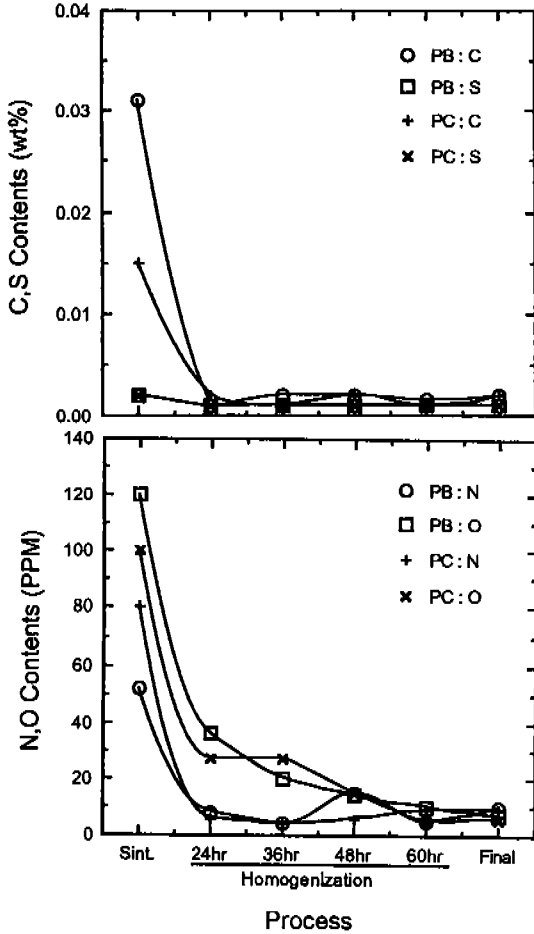


Fig. 5. C, S, N, O contents of final samples according to the each process.

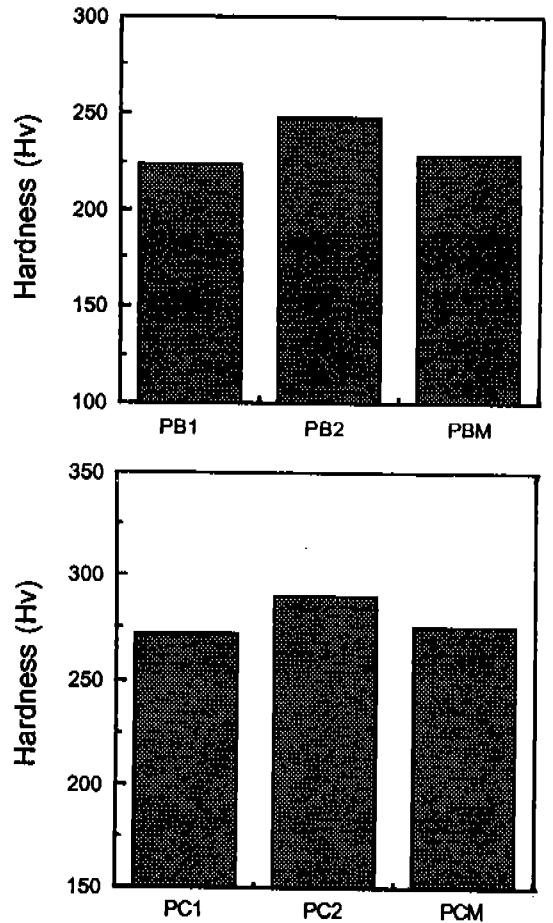


Fig. 7. Vickers hardness values of each process strip.

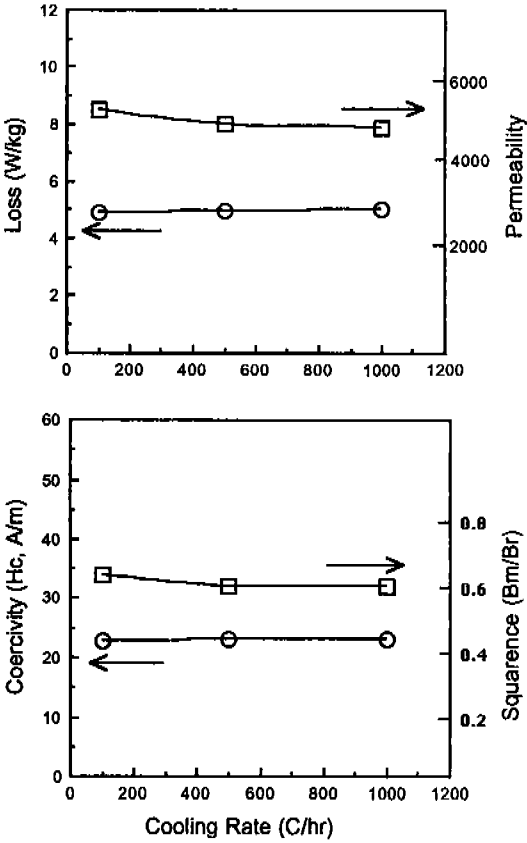


Fig. 8. Magnetic properties with different cooling rates in PC-1 samples.

농도로 최소화되어 이 수치는 최종 압연공정까지 거의 그대로 유지됨을 알 수 있었다.

한편 그림 6에서 균질화 판재는 60%의 1차 압하량에 의해 거의 진밀도로 접근함을 볼 수 있지만, 측정 오차 및 내부의 극히 작은 잔류기공을 고려할 경우 완전한 진밀도를 얻기 위해서는 약 75~80% 이상의 전체 압하량이 필요할 것으로 판단된다. PB, PC의 밀도변화를 볼 경우 공정에 따라 증가 경향이 거의 유사하지만, PC의 경우는 상대적으로 소결시 급격한 밀도 증가를 볼 수 있는데 이는 미세한 니켈 분말을 많이 함유하여 소결이 촉진되었기 때문이다. 표 2에는 최종 냉간 압연 후의 판재에 있어서 불순 성분(C, S, N, O) 및 Mn 성분을 상용 용재재에서의 측정치와 비교하였다. 전체적으로 볼때 S의 경우를 제외하면 분말 압연품의 순도가 상용품보다 더욱 우수함을 볼 수 있으며, 특히 상용품 PC의 탄소농

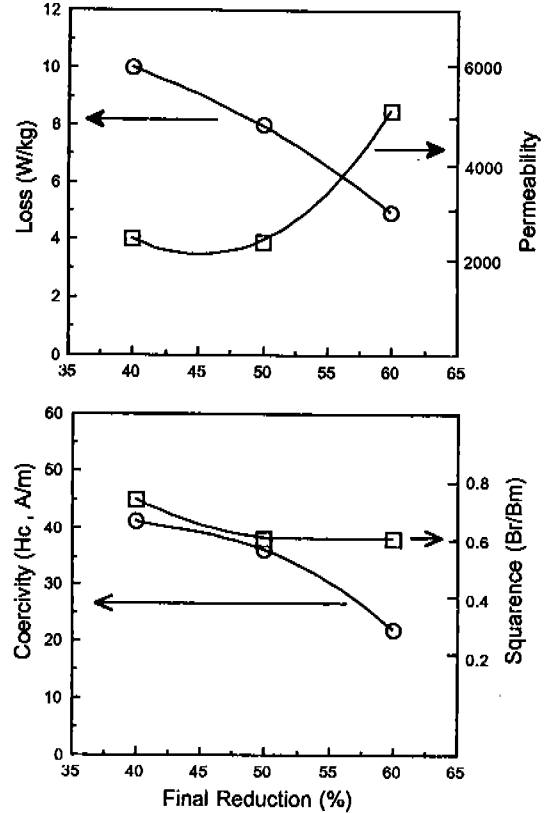


Fig. 9. Magnetic properties with different reduction amounts in PC-1 samples.

도는 0.023 w/o로 개발품(0.002 w/o)에 비해 약 10배 가량 높게 측정되었다. 통상 C, S, N, O 불순원자는 투자율을 감소시키는데, 이는 불순 원자에 의한 결정 격자의 국부 변형이 자구벽(domain wall)의 운동을 방해하기 때문이다. 결과적으로 최종 판재의 순도면에서는 분말압연품이 더욱 양호한 상태를 나타내고 있으며, 이에 따른 자성특성의 향상이 기대된다. 최종 압연상태의 퍼말로이는 원하는 형태로 절단가공된 후 열처리하여 사용되는데 이때 양호한 가공성을 갖기 위해서는 어느 정도의 경도가 요구된다. 일반적으로 금속판재를 절단가공(stamping 또는 slitting) 할 때 판재의 경도가 낮을 경우 가공성이 저하되어 절단부위에 burr가 생성되는데, 이를 방지하기 위한 최소 경도는 약 200 Hv 이상으로 알려져 있다. 그림 7에는 최종 냉간 압연 판재에 있어서의 경도 측정 결과를 나타내었으며, 공정별로 약간의 차이는 있지

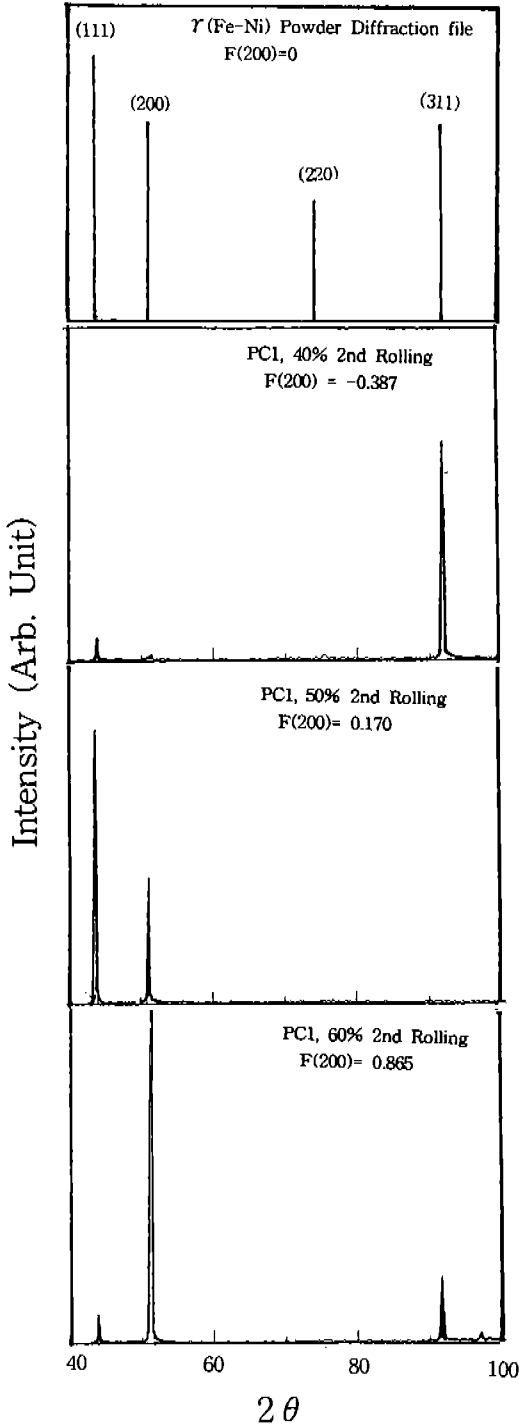


Fig. 10. Diffraction patterns with different amount of final reduction in PC-1 samples.

만 대체적으로 PB는 220~250 Hv, PC는 270~300 Hv 범위내에서 측정되었다.

3.3. 자성 특성평가 결과

PC-1 공정에 있어서 최종 냉각속도 변화에 따른 자성특성평가 결과를 그림 8에 나타내었다.

앞에서 언급했듯이 냉각속도는 고온에서의 $\gamma(\text{Fe-Ni})$ 상이 냉각중 규칙변태를 일으켜 이방성 상수에 영향을 주는 것과 관련하여 고려된다. PC급에 있어서 냉각 속도가 $100,000^\circ\text{C/hr}$ 에서부터 1°C/hr 까지 감소할 때 이방성 상수는 1×10^{-3} ergs/cc에서 -30×10^{-3} ergs/cc까지 감소되며, 이방성 상수를 "0"으로 할 수 있는 임계 냉각 속도는 약 $20,000^\circ\text{C/hr}$ 로 보고되고 있다.⁶⁾ 한편 이의 자료를 근거로 할 때 본 실험에서 선정된 1000°C/hr 에서부터 100°C/hr 의 범위의 경우는 임계 냉각속도에 비해 매우 느린 상태임을 알 수 있다. 즉 그림 8의 결과를 볼 때 로냉으로 변화시킬 수 있는 냉각 속도 범위에서는 자기적 특성의 큰 변화가 관찰되지 않음을 알 수 있었다. 그림 9에는 PC-1 판재에 있어서 최종 냉간 압연량의 변화에 따른 자성 특성 결과를 나타내었다.

최종 압연량이 증가할 때 투자율이 증가하고 손실과 보자력이 감소하는 것은, 압연량 증가에 의한 내부 미세 기공의 감소 효과가 기본적으로 고려될 수 있지만, 이와 병행하여 최종 열처리시 재결정 구동력의 증가로 인한 자화 용이면인 재결정 집합조직 {100}의 발달이 다른 주요한 요인으로 생각된다. 이러한 예측을 확인하기 위하여 수행한 X선 분석결과를 그림 10에 나타내었는데, 압하량이 증가할수록 자화 용이 면인 (200)의 상대적인 X선 강도가 증가하였음을 알 수 있었다.

그림 10에서 F는 특정 결정면의 집합성을 정성적으로 예측할 수 있는 인자로서 기본식은 다음과 같다.

$$F = \frac{P - P_0}{1 - P_0}$$

$$P = \frac{\sum I(\text{임의면})}{\sum I(hkl)}$$

여기서 I는 X선 강도이고, P_0 는 집합성이 전혀없는 분말 회절자료에서의 계산치이다. 즉 $F(\text{임의면})$ 가 "-1"일 경우는 그면이 전혀 없는 상태이고, "0"일

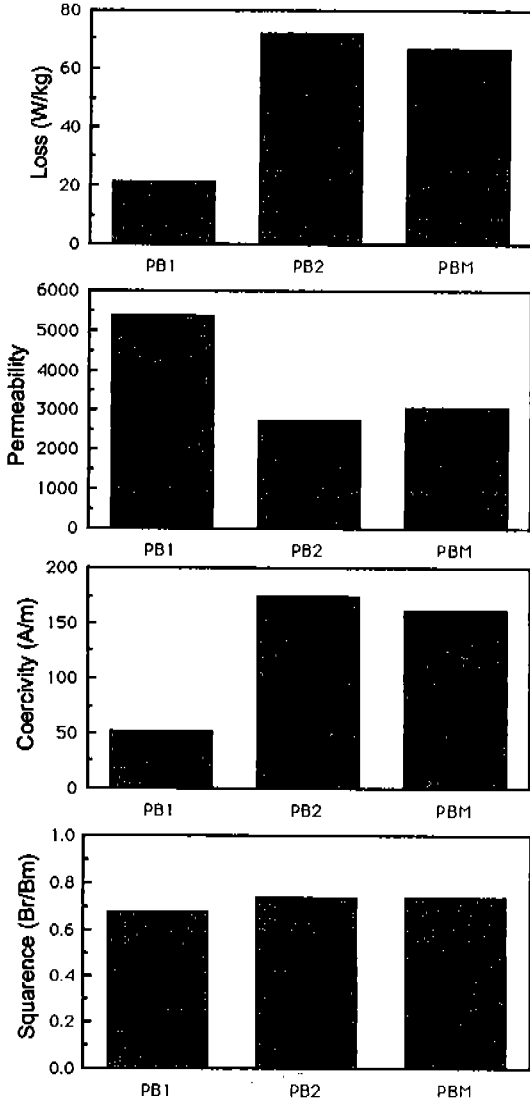


Fig. 11. Magnetic properties according to each process in PB samples.

경우는 집합성이 전혀없는 상태이며, "1"일 경우는 다른 면은 전혀 없고 오직 그면만이 존재할 경우를 나타낸다. 즉 최종 압하량이 40%에서 60%로 증가할수록 F 인자는 -0.387에서 0.865로 크게 증가하였음을 알 수 있었고 이러한 현상이 자기적 특성을 향상시킨 것으로 생각되었다. 그림 11과 12는 각 제조공정에 있어서의 자성특성 평가 결과이다.

PB-1, PB-2 및 PB-M의 투자율은 각각 5,400, 2,500, 3,000 수준으로 측정되었으며 PC-1, PC-2 및

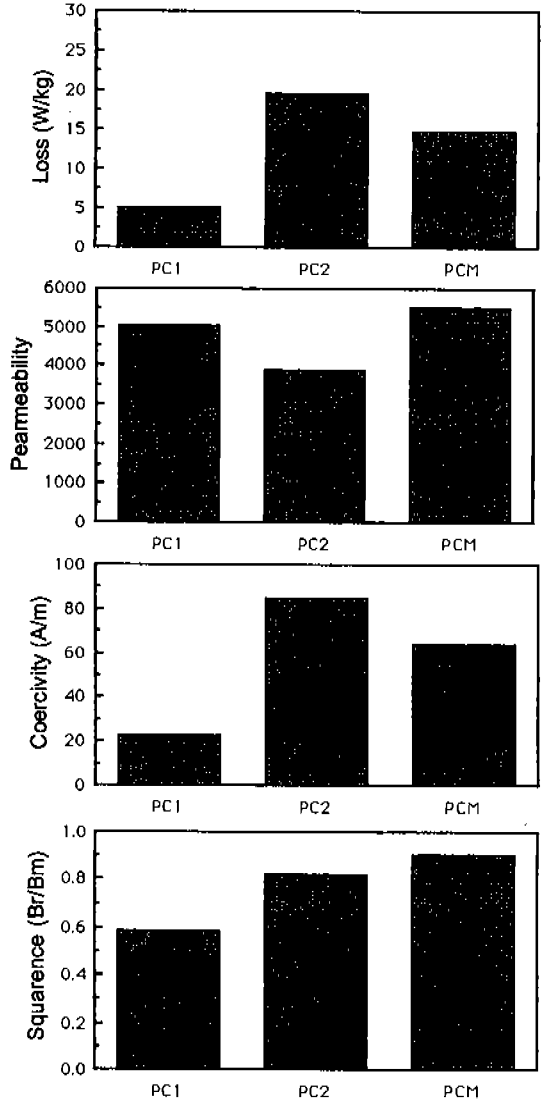


Fig. 12. Magnetic properties according to each process in PC samples.

PC-M의 경우는 5,000, 3,700, 5,500 가량으로 측정되었다. 또한 보자력과 손실의 경우는 PB-1, PC-1 공정의 경우가 PB-2, PB-M 및 PC-2, PC-M 공정에 비해 낮게 측정되었다. 전체적으로 볼 때 PB-1, PC-1 공정에 의한 판재가 PB-2, PC-2의 경우보다 우수한 자성 특성을 나타내며 이는 그림 3의 미세조직 관찰 결과에서 밝혀진 재료 내부의 잔류 미세 기공의 효과로 생각된다. 일반적으로 Mn은 퍼말로이의 냉간 압연성을 향상시키기 위해 첨가되는데 그림 11, 12

에서 PB-M과 PC-M의 자성 특성이 PB-1과 PC-1에 비해 상대적으로 저조한 이유는 비자성 합금 원소인 Mn 첨가 효과로 판단되었다. Mn은 주기율표상에서 강자성 원소인 Fe, Co, Ni과 같은 계열에 속해 있다. Fe, Co, Ni이 강자성 특성을 갖는 이유는 최외각 전자를 모두 채우지 않은 3d 전자군의 스핀 및 궤도운동 및 인접 원자들의 전자와의 상호 교환에 의한 높은 교환력(Exchange Force)을 갖기 때문으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 이때 Ni, Co, Fe의 원자당 3d 전자수(e/a)는 각각 8, 9, 10이고 Mn의 e/a는 7이다. 즉 이러한 관점에서 Mn이 Fe와 Ni 대신 대치될 경우 강자성 특성을 유발하는 평균 3d 전자수의 감소가 재료 전체의 자기적 특성을 저하시킨 것으로 예상되었다. 한편 각형비는 연자성체에 있어서 손실, 투자율 및 보자력에 비하여 그 중요성이 상대적으로 적은 특성으로써, 각형비에 영향을 주는 주요한 요인은 자왜(magnetostriction)로 알려져 있다.¹¹⁾ 인가 자장에 의해 배열된 자구의 특정한 자화방향(magnetizing vector)은 인가자장이 영(zero)이 될 때까지 이방성효과에 의해 그 배열을 유지하여 자화량을 보존하게 되는데, 이때 자왜 효과가 이방성 효과보다 크게 되면 인가 자장이 "0"이 될 때 자화보존을

방해하므로 각형비가 감소된다. 그림 11과 12에 있어서 각형비를 관찰하여 볼 때 PB급의 경우는 각 공정에 따라 약 0.7 수준으로 거의 일정하며, PC급의 경우는 PC-1, PC-2, PC-M의 공정에 따라 약 0.6, 0.8, 0.9순으로 증가하였다. 이러한 현상의 원인에 대해서는 현재 정확히 규명되지 않고 있으며, 실제로 각형비에 영향을 주는 자왜 측정 등의 방법을 통하여 이해되어야 할 것이다. 한편 표 3에는 대표적인 분말 압연 개발품의 실효비 투자율을 JIS 규격 및 국내 사용업체에서의 사양과 비교하여 나타내었다. PB 및 PC급에 있어서 사용 주파수 300 Hz 및 1000 Hz 하에서 실효비 투자율의 JIS 규격은, PB의 경우 각각 3000 이상과 2200 이상이고, PC의 경우 각각 1000 이상, 4000 이상이다. 한편 파악된 국내의 상용품의 사양은 JIS 규격보다 다소 높음을 알 수 있고 이 수치는 본 개발품의 PB-M, PC-2의 특성과 거의 유사함을 알 수 있었다. 한편 각각의 주파수에서 PB-1의 경우의 실효비 투자율은 7,766과 5,449이고, PC-1의 경우는 18,826과 9,226로써 가장 우수하게 측정되었다. 이상의 자성 특성 결과를 검토하여 볼 때 분말 압연 공정을 적용하여, Mn을 첨가하지 않고 냉간 압연 및 중간 소둔 공정을 적절히 조절할 경우 우수한 특성의 제품 제조가 가능할 것으로 판단된다.

Table 2. C, S, N, O contents of PB-1, PC-1 and commercial samples

		wt%			ppm	
		Mn	C	S	N	O
PB	PB-1	~	0.003	<0.001	12	7
	Commercial	0.55	0.006	<0.001	45	30
PC	PC-1	-	0.002	<0.001	10	6
	Commercial	0.47	0.023	<0.001	53	49

4. 결 론

분말압연 공정으로 제조한 퍼말로이의 자성특성 평가를 수행하였으며, 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 분말압연으로 성형, 소결된 퍼말로이 판재를 진밀도 수준으로 제조하기 위한 전체 압하율은 약 75~80% 이상이며, 잔류 기공을 효과적으로 제거

Table 3. Effective permeability of powder rolled strips compared with JIS and commercial specifications

	PB Permalloy		PC Permalloy	
	300 Hz	1000 Hz	300 Hz	1000 Hz
JIS 2531	3,000 이상	2,200 이상	10,000 이상	4,000 이상
Comm. Spec.(국내 H사)	4,000~5,000	2,000~3,000	9,600~12,000	3,500~4,600
Comm. Spec.(국외 T사)	5,200	2,600	-	-
PB-1, PC-1	7,766	5,449	18,826	9,266
PB-2, PC-2	6,703	2,766	11,160	5,704
PB-M, PC-M	4,557	2,417	5,434	2,383

참 고 문 헌

하기 위해서는 냉간 압연과 중간 소둔을 적절히 배합하는 것이 필요하다.

2) 분말 압연에 의해 제조된 퍼말로이의 자성 특성은 잔류 기공과 최종 압하율에 따른 집합조직의 발달에 영향을 받으며, 잔류기공량이 적을수록 그리고 {100} 집합조직이 발달할수록 자성 특성은 향상되어진다.

3) 최종 열처리 후의 냉각속도가 100~1000°C/hr의 범위에서, 냉각속도의 변화에 따라 자성특성의 변화는 거의 관찰되지 않았다.

4) 분말압연으로 제조된 퍼말로이의 실효비 투자율(300 Hz 기준)은 PB에서 7766, PC에서 18,826으로 측정되었으며, 이는 JIS 규격 및 용재재 판재에서의 사양에 비해 약 150% 수준으로 우수하게 측정되었다. 분말 압연품의 자성특성이 우수한 가장 주요한 이유는 고순도 원료 분말의 사용에 의한 제품 순도의 우수성이 가장 주요한 원인으로 사료되었다.

1. Bozorth: Ferromagnetism (1951) 68
2. R. C. Hall: J. Appl. Phys., **30** (1959) 816
3. R. K. Dube: International Materials Reviews, **35** (5) (1991) 253
4. T. Akimolate: J. Mater. Sci., **21** (1986) 2403
5. Bozorth: Rev. Mod. Phys., **25** (1953) 42
6. JIS C-2531, (1978)
7. J. M. Yoo, K. Mukherjee: Physica, **C222** (1994) 24
8. L. J. Dijkstra: Physical Review, **79**(6) (1950) 979
9. G. Ban: J. of Magnetism and Magnetic Materials, **41** (1984) 282
10. B. D. Cullity: Introduction to Magnetic Materials, Addison Wesley Pub. Co. (1972) 131
11. A. P. Greifer: IEEE Trans. on Magnetics, MAG-5, **4** (1971) 617