

분말아금 공정에 의한 고규소강의 자성특성

임태홍\*, 정형식\*, 강원구\*\*, 정영호\*\*

\*한국기계연구소 소재성형실

\*\*한국전력공사 기술연구원

Magnetic properties of high silicon steel processed by powder metallurgy

Tai-Hong Yim\*, Hyungsik Chung\*, Won-Koo Kang\*\*, Young-Ho Chung\*\*

\* Korea Institute of Machinery and Metals

\*\* Korea Electric Power Corporation Research Center

Abstract

Soft magnetic silicon steels containing up to 6.5wt% of silicon were prepared by powder metallurgical processing and their magnetic properties were evaluated.

The magnetic properties of P/M silicon steels are similarly affected by the silicon addition as those of conventional ingot processed ones but are also significantly affected by density and interstitial impurities particularly oxygen content.

Magnetic flux density, B<sub>10</sub> and coercivity, H<sub>c</sub>, tends to decrease with silicon content whereas maximum permeability, μ<sub>m</sub>, decreases first and then increases rapidly above 5 wt% silicon. Increasing density also increases magnetic flux density and maximum permeability but reduces coercivity. The latter two properties are, however, affected more strongly with oxygen content.

1. 서론

분말아금 공정은 일반적으로 금속 분말을 기계적 압력에 의하여 성형한 후 성형체의 용융점 이하의 온도에서 소결하여 원하는 특성의 부품 혹은 재료를 제조하는 공정을 일컫으며 일반적으로 사용되는 용해 및 주단조 등의 공정에 의한 제조기술에 비해 기술적 및 경제적 이점으로 자동차 및 항공기용 부품, 기능성 재료, 고융점 재료 등의 제조에 널리 이용되고 있다.

규소강은 높은 포화자속밀도, 고부자율 등의 우수한 연자성 특성과 저렴한 가격으로 변압기 등의 철심 코어로서 가장 널리 사용되는 연자성 재료이다. 일반적으로 규소강에 있어 규소의 량이 증가하면 부자율, 비저항, 강도 등이 증가하고 철손, 보자력, 포화자속 밀도 및 연성이 저하되는 특징을 나타내며 규소 함량이 6.5 wt% 일때 부자율이 가장 크고 철손이 작아 자심 재료로서 최적의 자성 특성을 지니나 상온에서 소성능이 없어 상업화 되지 못하고 있다.<sup>1,2)</sup> 현재 상업용으로는 규소 함량이 4 wt% 이하의 규소강이 주로 사용되고 있다.

본 연구는 일반적인 용해 주조법으로는 생산이 어려운 고규소강판재를 분말아금법의 장점을 이용하여 제조한 후 6.5wt% Si-Fe를 주재료로한 고규소강의 자성 특성을 고찰하고 공정 및 불순 침입 원소가 연자성 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 분말압연 성형법과 Press에 의한 압축성형법에 의해 제조되었다.

분말압연 공정은 그림 1에서와 같이 금속 및 비금속 분말을 회전하는 롤 사이에 공급하여 판재를 성형한 후 소결 및 제압연 등의 과정을 거쳐 원하는 특성의 판재를 생산하는 공정이다.<sup>3)</sup> 본연구에서는 규소강 합금 판재를 제조하기 위하여 KOBE 300M 순철분말에 무게비로 6.5wt% 되게 순규소 분말을 혼합하고 여기에 표에 나타난 바와 같이 성형보조제를 넣고 종류별로 4종의 혼합 분말을 만든 뒤 Roll Gap 0.8mm, Roll Speed 1 r. p. m Feeding Angle 28° 의 분말압연 조건하에서 성형한 후 1300°C 에서 3분 소결하고 냉간압연하였다. 이후 600°C 회복이닐링 및 제압연을 6회 반복하여 최종 두께가 0.66mm-0.70mm 인 판재를 얻었다. 이 판재를 외경 45mm, 내경 33mm로 가공

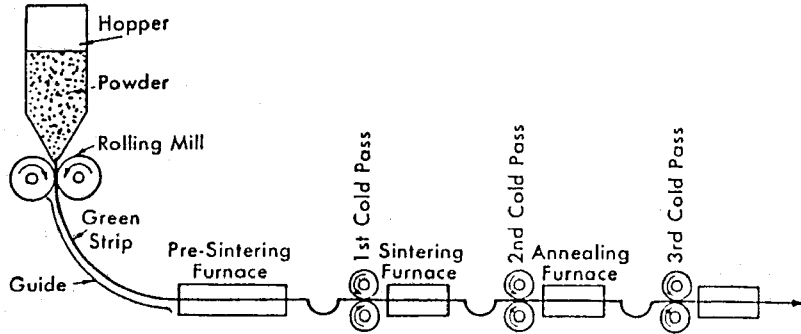


그림 1. 분말압연에 의한 판재생산공정에

표1. 분말법에 의한 6.5Si-Fe 판재의 성형보조제 및 소결조건, 최종 판재두께

시편번호	성형보조제	소결온도 (°C)	소결시간 (분)	최종판재 두께 (mm)
1	Methocell + H <sub>2</sub> O	1300	3	0.69
2	H <sub>2</sub> O	1300	3	0.70
3	환원 Si 분말 + 석유	1300	3	0.66
4	C + 석유	1300	3	0.70

한 후 1300 °C , 4 시간 10<sup>-5</sup> Torr 진공분위기로 소결 및 균질화 시켰다. 이렇게 하여 얻어진 시편을 3개씩 적층하여 B-H Meter 로 직류 자기 특성을 측정하였으며 성분 분석하고 광학조직을 관찰하였다.

압축성형은 200Ton Press를 이용하였으며 순철 분말과 순규소 분말 또는 합금철 분말로 규소함량이 6.5wt% 가 되게 구성된 혼합 분말을 외경 45mm, 내경 33mm, 두께 3mm의 링 시편으로 성형하였다. 성형밀도는 이론밀도의 70 ± 1%이었다. 이 성형시편을 1300°C , 36시간 10<sup>-5</sup> Torr 진공분위기로 소결 및 균질화 시켰다. 표2에 원료 Si 분말 종류와 소결밀도를 실었다. 직류자성 특성은 B-H Meter로 측정하였으며 성분분석과 광학조직을 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림2는 압축성형 후 진공에서 1300°C 36시간 소결한 링 시편의 규소함량에 따른 직류 자성 특성의 변화이다. 외부자장 10 Oe 에서의 자속밀도인 B<sub>10</sub>과 보자력 H<sub>c</sub>는 규소함량이 증가함에 따라 감소함으로써 용해주조법에 의한 Bulk 제와 동일한 경향을 보인다. 최대 투자율 특성은 규소함량이 증가함에 따라 감소하다 규소함량 5wt% 이후 급격히 증가하고 있다. 규소함량에 따른 자성특성의 변화 경향은 분말법에 의한 것과 일반 용해주조법에 의한 Bulk 제와 유사하다.

표2 압축 성형한 6.5wt% Si-Fe 시편의 소결후 밀도 및 성분 (wt%)

시편번호	Si-Source	소결밀도 (%)	Si	C	S	N <sub>2</sub> (ppm)	O <sub>2</sub> (ppm)
R1	Si 분말	92.7	6.67	0.007	0.002	0.5	1882
R2	Ferro-Si 분말	87.9	6.79	0.015	0.001	3	2260
R3	Si 분말 + 0.3%C	97.5	6.64	0.006	0.002	0.5	431

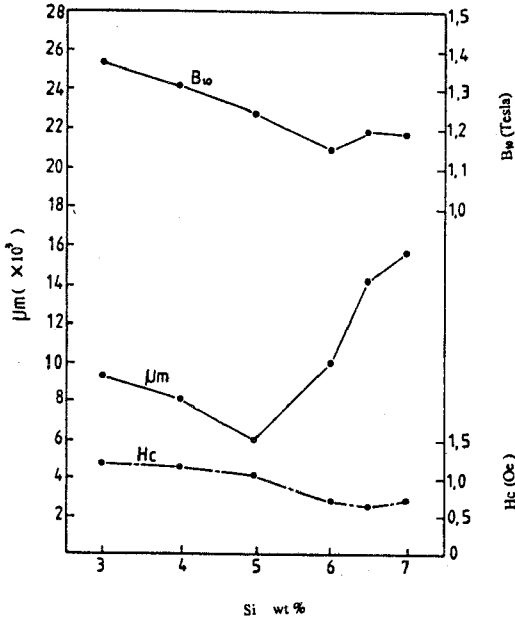


그림 2. 외경 45mm, 내경 33mm, 두께 3mm로 압축 성형하고 10<sup>-5</sup> Torr 진공도에서 1300°C, 36시간 열처리한 링 시편의 규소함량에 따른 자성특성변화

그림 3은 압축성형후 진공에서 36시간 소결한 규소함량 6.5wt%인 링 시편의 원료 Si 분말의 종류별 직류 자성특성의 변화이다. 외부자장 10Oe에서의 자속밀도는 R2, R1, R3 시편순으로 증가하며 소결후 상대밀도는 87.9, 92.7, 97.5%로서 그림4에서 보는 바와 같이 R2, R1, R3 시편순으로 잔류기공이 작음을 알 수 있다. 그런데 철, 규소철 등 연자성 소결체의 포화자속 밀도는 소결 밀도에 비례한다고<sup>4,5)</sup> 알려져 있고 R1, R2, R3 시편의 자속밀도 B<sub>10</sub>의 차이는 이와같이 소결밀도 차에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 투자율 특성과 보자력 특성은 조직과 불순물에 민감하다.<sup>2,4-6)</sup> R3, R1, R2 시편순으로 최대투자율이 낮고 보자력이 높은 것은 표2에서와 같이 소결 시편에 C, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 등 불순 침입 원소량과 잔류기공량의 차에 기인한다고 생각된다.

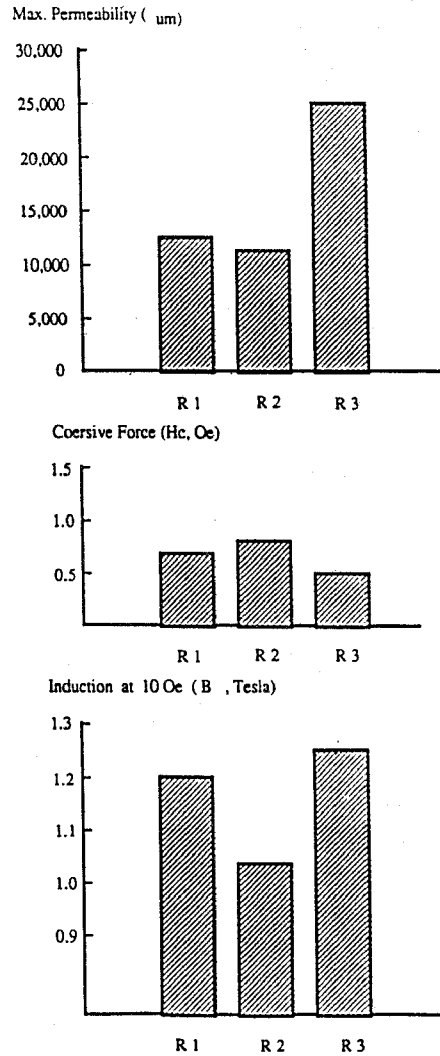


그림3. 10<sup>-5</sup> Torr 진공도에서 1300°C, 36시간 소결 및 균질화한 6.5wt%Si-Fe 링 시편의 자성특성 (R1: Si 분말사용 R2: Ferro-Si 분말사용 R3: Si 분말 사용, 0.3% C첨가)

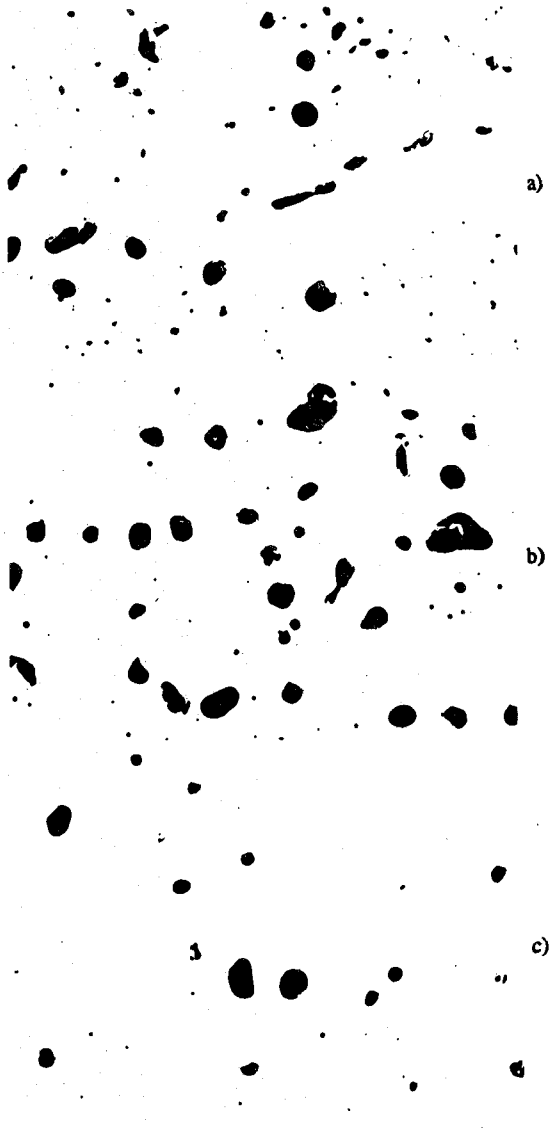


그림 4.  $10^{-5}$  Torr 진공도에 1300°C, 36시간 소결 및 균질화한 6.5wt% Si-Fe 합 시편의 기공사진 (X100)  
 a) R1: Si 분말사용 b) R2: Ferro-Si 분말사용  
 c) R3: Si 분말 +0.3% C 분말 사용

표3에 분말압연에 의한 6.5 %Si 규소강 편재를 진공에서 1300 °C 4시간 균질화한 시편의 자성특성과 불순 침입 원소의 양을 비교하였다. 모든 시편에서  $B_{10}$ 은 12000 G 전후로 비슷하며 이는 제압연 과정에 의해 상대밀도가 모두 이론밀도에 가까워져 서로 비슷해졌기 때문이다. 반면 보자력 특성과 최대부자율 특성은 3번 시편이 우수하다. 침입 원소중 C,N 량이 비슷하지만 산소농도에서 차이가 나므로 이같은 보자력 및 부자율 특성의 차이는 산소농도의 차이에 기인된 것으로 판단된다. 지금까지 산소는 질소나 탄소에 비해 자성특성에 미치는 영향이 적은 것으로 알려져 있으나 본 실험에 의하면 산소는 분말법에 의한 규소강의 보자력 및 부자율 특성에 상당한 영향을 증을 알 수 있다. 한편 3번 시편에서 산소농도가 낮은 것은 환원 실리콘 분말을 사용함으로써 원로 분말 상태에서 산소함량이 낮았기 때문이며 4번 시편에서 산소농도가 낮은 것은 탄소분말이 열처리시 일산화 탄소 혹은 이산화탄소로 반응되며 환원 작용을 했기 때문으로 사료된다. 압축성형시편 R3의 산소농도가 작은 것도 같은 이유인 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

이상 분말야금법 중 압축성형 및 분말압연 성형법에 의한 6.5wt%Si-Fe를 주로 사용한 고규소강의 자성특성 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분말법에 의한 규소강은 규소함량이 증가할수록 자속밀도와 보자력은 감소하고 최대부자율은 서서히 감소하여 규소함량 5wt% 이상에서 7wt%까지는 급격히 상승한다.
- 2) 분말법에 의한 고규소강의 자속밀도는 소결밀도에 직접적인 영향을 받는다.
- 3) 소결 및 균질화한 고규소강에 잔류하는 산소는 보자력을 증가시키고 부자율을 감소시킴으로써 질소, 탄소와 마찬가지로 분말법에 의한 규소강의 연자성 특성을 해친다.
- 4) 소량 첨가된 탄소는 소결 및 균질화 열처리에서 환원 작용하여 산소 농도를 낮춤으로써 보자력 및 최대부자율 특성을 향상시킨다.

표3. 분말압연법에 의한 6.5wt% Si-Fe 합금 편재의 자성특성과 산소농도 (ppm), 질소농도 (ppm) 그리고 탄소농도(wt%)

시편번호	$\mu$ m	Hc(Oe)	$B_{10}$ (G)	O <sub>2</sub> (ppm)	N <sub>2</sub> (ppm)	C (wt%)
1	8000	0.60	12200	3076	1	0.008
2	8300	0.60	12000	3737	2	0.008
3	11800	0.47	12140	1715	4	0.012
4	11100	0.46	10700	1800	2	0.006

이 연구는 한국전력공사에서 지원된 연구비에 의해 한국전력공사 기술 연구원과 한국기계연구소에서 공동으로 수행하였다.

### 참고문헌

- 1) R.M. Bozorth : "Ferromagnetism", D. Van Nostrand Comp., Inc. Princeton, New Jersey (1963) 67-95
- 2) 田口悟 : 電磁鋼板, 新日本 製鐵 株式会社 (1979) 17-44
- 3) 정형식, 임태홍 : 제1회 분말야금 심포지움, 대한금속학회 (1989) 125-138
- 4) G.M. Sturgeon : Powder Metallurgy 2 (1979) 75-87
- 5) G. Jangg, M. Drozda, H. Daminger, H. Wibbeler and W. Schatz : The International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology, 20, 4 (1984) 287-300
- 6) J. Kaczmar and B. Weglinski : The Int. J. of Powder Metallurgy and Powder Technology, 18, 1 (1982) 25-35