

Influences of Magnetic Field on Injection Time of Ferrite Slurry

Jong-In Im,[†] Young-Jin Yook,^{***} and Young-Jin Lee^{*}

^{*}Simulation Center for Fine Ceramics/Electronic Device Team, KICET, Seoul 153-801, Korea

^{**}Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received July 14, 2006; Accepted October 27, 2006)

자기장이 페라이트 슬러리의 주입시간에 미치는 영향

임종인[†] · 육영진^{***} · 이영진^{*}

^{*}요업(세라믹)기술원 시뮬레이션센터/전자부품팀

^{**}한양대학교 세라믹공학과

(2006년 7월 14일 접수; 2006년 10월 27일 승인)

ABSTRACT

In this study, the influence of the magnetic field on ferrite slurry's injection time during the slurry forming process was investigated. The evaluation system of the slurry's injection time under the strong magnetic field was designed with FEM and manufactured. Studied parameters were the applied magnetic field, the input pressure of the slurry, and the supplying tube materials. As the results, the injection time was increased with the external magnetic field strength and rapidly decreased with increasing the input pressure of the slurry. Also the injection time was decreased when the supplying tube was manufactured with the magnetic material having the higher magnetic permeability than the ferrite.

Key words : Ferrite, Slurry forming process, FEM, Magnetic field, Injection time of the slurry

1. 서 론

페라이트(ferrite) 자석은 비산화물 자석에 비해 상대적으로 높은 보자력(coercive field) 특성 및 저렴한 가격 등 많은 장점을 보유하고 있어 산업용 각종 전자석모터, 스피커, 액츄에이터, 자기선별기, 발전기, 전자빔 조정자 등에 다양하게 응용되고 있다.^{1,2)}

페라이트 자석은 산화철 원료로부터 페라이트 분말을 제조하고, 건식성형 혹은 페라이트 슬러리를 이용한 습식성형 공정을 거쳐 제조한 성형체를 소결 및 착자하여 제조한다. 특히 산업체에서는 hexagonal 결정구조를 갖는 페라이트 입자를 c축 방향으로 배향시킴으로써 자기적 특성을 향상시키고자 10,000 gauss 이상의 고 자기장을 인가한 상태에서 건식 혹은 습식방법을 이용하여 페라이트 성형체를 제조하고 있다.³⁻⁷⁾ 그러나 성형중 인가한 고 자기장은 페라이트 입자가 성형물드로 공급되는 과정에도 많은 영향을 주는 것으로 예측이 되지만 지금까지 이에 대한 연구가 전혀 보고된 바 없다.

본 논문에서는 페라이트 습식성형 중 인가한 외부 자

기장이 페라이트 슬러리의 주입시간에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 고 자기장이 인가된 상태에서 페라이트 슬러리의 주입시간을 감소시킬 수 있는 방법에 대하여 조사하였다.

2. 자기장 인가 장치의 설계 및 제작

페라이트 슬러리의 주입시간에 자기장 세기가 미치는 영향을 분석하기 위해서는 고 자기장을 인가할 수 있는 장치를 설계하여 제작하여야 한다. 페라이트 슬러리의 주입시간 분석 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 슬러리 주입부, 슬러리 유동관, 자기장 인가부 등으로 구성된다.

페라이트 슬러리 주입시간 평가장치의 자기장 인가부를 설계하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 Maxwell 프로그램을 사용하였고, 슬러리 유동관에 10,000 gauss 이상의 고자기장을 공급할 수 있는 자기장 인가부의 최적 형상을 설계하였다. 자기장 인가부에 대한 유한요소모델은 Fig. 2와 같고, 자기회로부의 상·하부 요크(York)인 전기장관의 크기, 상·하부 코일의 회전 수, 입력 전류 등을 변화시켜 최적 자기회로를 설계하였다. 자기장 인가부의 코일 회전 수 변화에 따른 페라이트 슬러리에 인가되는 자기장 세기의 해석 결과를 나타낸 Fig. 3에서 알 수 있듯이, 자기회로부에 최대 9,000 gauss까지 공급할 수 있는

[†]Corresponding author : Jong-In Im

E-mail : jongin@kicet.re.kr

Tel : +82-2-3282-2491 Fax : +82-2-3282-7801

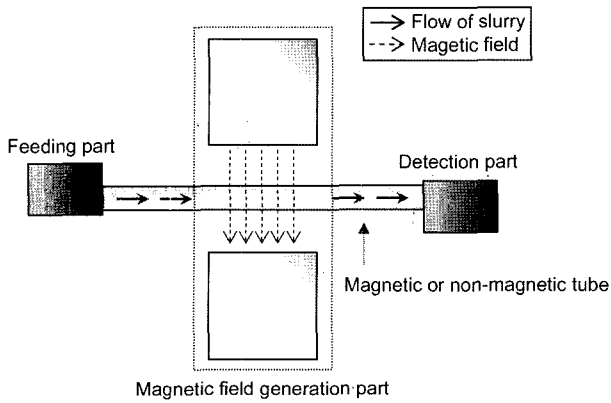


Fig. 1. Simplified model of the slurry's injection time evaluation system.

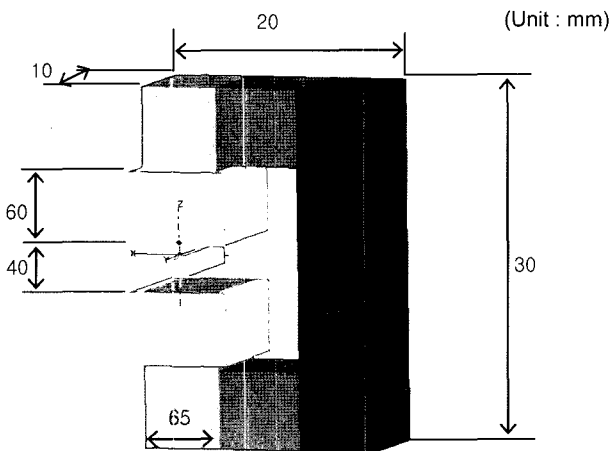


Fig. 2. Finite element model of the magnetic field generator.

것으로 분석되었다.

자기회로부의 설계결과를 이용하여 Fig. 4에 나타난 바와 같이 페라이트 슬러리 주입시간 평가장치를 제작하였다.

본 실험장치는 페라이트 슬러리 성형공정과 동일한 작업조건에서 실험이 가능하도록 제작되었고, 자기장 세기는 0에서 10,000 gauss까지 변경이 가능하며 슬러리 주입 압력은 0에서 5 kg/cm² 범위까지 조절 가능하다.

3. 실험 방법

슬러리의 유동특성은 다양한 방법으로 측정할 수 있지만, 자기장이 인가된 상태에서 고점도의 슬러리 유동특성을 기존의 점도측정 장비로 측정하는 것은 매우 어렵다. 그러나 본 연구와 같이 고점도 슬러리 주입시간 평가장치를 이용하여 자기장을 인가한 상태에서 슬러리 주입시간을 측정하게 되면, 외부 자기장이 슬러리의 유동특성에 미치는 영향을 간접적으로 파악할 수 있다.

외부 자기장에 의한 페라이트 슬러리의 주입시간 변화를 측정하기 위해서는 자기장세기 및 슬러리 주입 압력

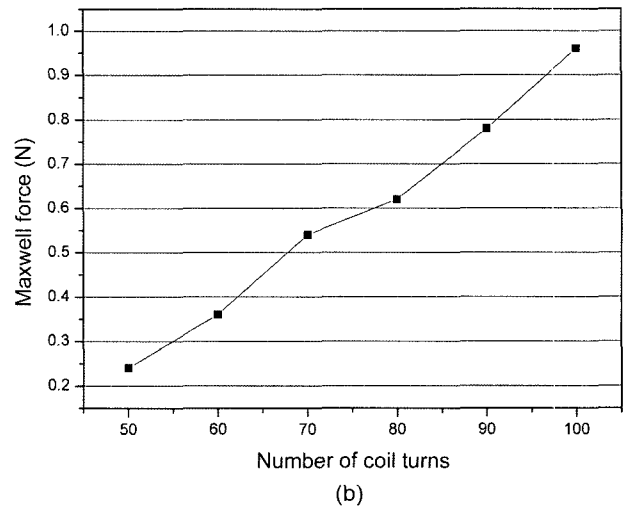
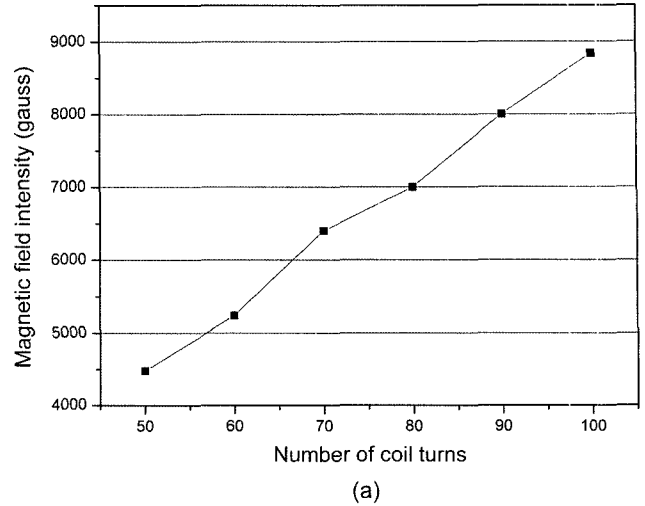


Fig. 3. Variations of (a) the magnetic field intensity and (b) the magnetic force at the ferrite slurry with the coil turns of the magnetic field generator.

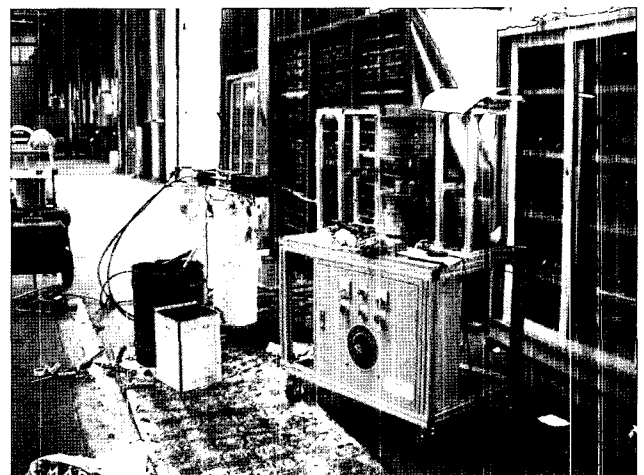


Fig. 4. Photograph of the experimental set-up.

을 변화시켜 일정량의 슬러리가 공급되는데 소요되는 시간을 측정하여야 한다. 이를 위해 슬러리 주입시간 평가 장치 및 공압 액츄에이터를 이용하여 슬러리 주입압력을 2.4 kg/cm^2 으로 고정하고, 인가 자기장을 0에서 6,000 gauss 까지 증가시키면서 슬러리 공급에 소요되는 주입시간을 측정하였다. 또한 슬러리 주입압력을 2.0부터 4.0 kg/cm^2 으로 변화시키면서 슬러리의 주입시간을 측정하였다. 그리고 슬러리 공급관의 재질이 슬러리 주입시간에 미치는 영향을 알아보기 위하여 비자성체관 및 자성체관인 경우에 대하여 자기장세기 및 슬러리 주입 압력을 변화시켜 동일한 실험을 반복하였다.

4. 결과 및 고찰

페라이트 슬러리에 인가되는 자기장세기 및 주입압력

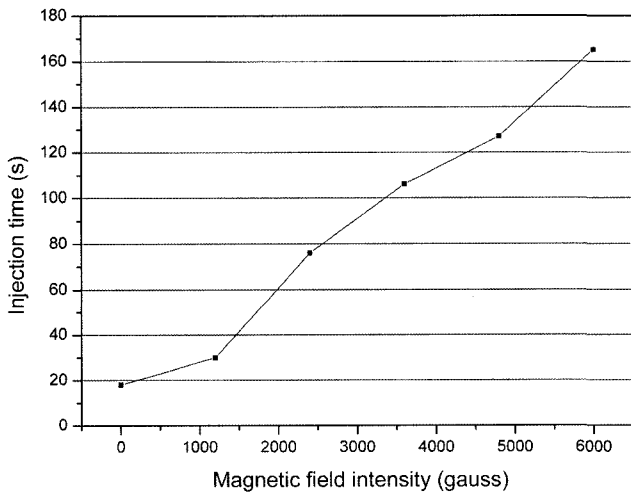


Fig. 5. Dependence of the injection time of the ferrite slurry on the applying magnetic field intensity.

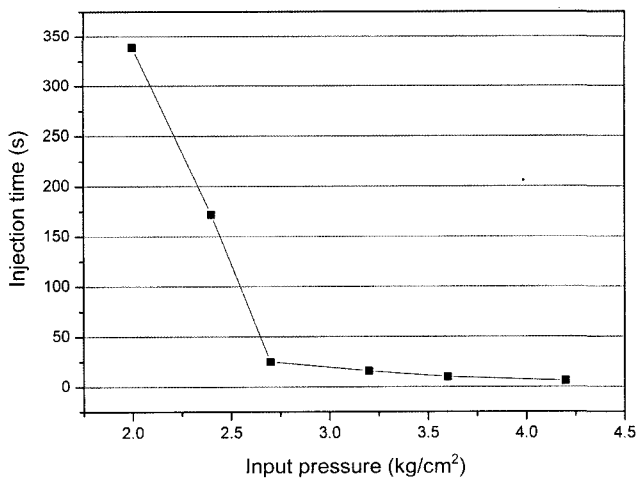


Fig. 6. Dependence of the injection time of the ferrite slurry on the input pressure.

변화에 따라 슬러리 공급에 소요되는 시간변화를 측정하고, 그 결과를 각각 Figs. 5 및 6에 나타내었다. Fig. 5의 결과는, 주입압력이 2.5 kg/cm^2 일 때, 외부 자기장 세기 변화에 따른 슬러리 공급에 소요되는 주입시간을 측정한 결과이고, 자기장의 세기를 8,000 gauss로 고정하고 주입압력을 $2.0\sim 4.0 \text{ kg/cm}^2$ 까지 증가시키면서 슬러리 공급에 소요되는 주입시간을 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 외부 자기장이 인가되지 않은 경우, 슬러리 공급에 약 18초 정도가 소요되었으나, 약 6,000 gauss의 외부 자기장이 인가된 경우, 슬러리가 공급되기 까지 약 165초 정도 소요되었다. 즉, 외부 자기장 인가에 의하여 슬러리 주입시간이 약 9배 가까이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 자기장 세기가 증가하게 되면, 자성체인 페라이트 슬러리의 이동방향에 수직된 방향으로 구속하는 맥스웰 전자기력이 커져서 슬러리 주입을 방해하는 것으로 분석된다. 이러한 결과는 슬러리 주입이 자기장에 의해 큰 영향을 받고 있음을 나타낸 것으로, 외부 자기장 세기가 커질수록 슬러리 주입이 어려워지고, 아주 높은 자기장에서는 슬러리의 공급이 아주 힘들게 될 것이라고 추측할 수 있다. 그러나 슬러리 주입압력이 2.0 kg/cm^2 에서 4.0 kg/cm^2 로 증가하게 되면, 슬러리 유동 소요시간은 339초에서 6초로 지수함수적으로 감소한다(Fig. 6 참조). 이 결과로부터 일정한 자기장 세기에서 슬러리 주입 압력을 증가시킬 경우, 슬러리 공급을 방해하는 맥스웰 전자기력을 상쇄시켜 슬러리 주입시간을 단축시킬 수 있다고 판단된다.

이와 같이 페라이트 슬러리의 주입시간은 슬러리 공급관에 인가한 자기장 세기 및 슬러리의 주입압력에 의해 크게 영향을 받는다. 하지만, 슬러리 주입시간을 단축시키기 위하여 주입 압력을 증가시킬 경우, 짧은 공급시간 때문에 페라이트 성형체들 사이의 충전 특성 및 페라이트 입자 배향성에 나쁜 영향을 미쳐 제품 불량 발생 가능성이 있어 과도하게 주입 압력을 증가시키기는 현실적으로 어려움이 많다.

일반적으로 자기장은 고투자율 재료로 집중되는 특성이 있으므로 슬러리 공급관의 재질특성이 유동특성에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 Table 1 및 Fig. 7에 나타내었다. Table 1의 결과는 비자성체 재료 및 약 8,000

Table 1. Simulated Results of the Applied Magnetic Field Characteristics at the Ferrite Slurry Changed with the Tube Materials (Input Current 30A/60 Coil Turns)

| Supplying tube material | Non-magnetic | Strong magnetic ¹⁾ |
|-------------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Magnetic field intensity (gauss) | 5286 | 612 |
| Maxwell force ($\times 10^{-3}$ N) | 374 | 90 |

¹⁾Relative Magnetic Permeability : 8,000

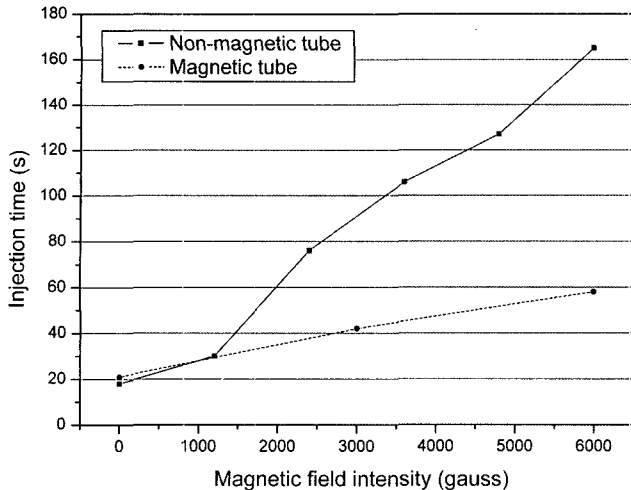


Fig. 7. Influence of the supplying tube materials on the slurry's injection time.

정도의 높은 상대투자율을 갖는 자성체 관을 슬러리 공급관으로 사용한 경우에 대하여 페라이트 슬러리에 걸리는 자기장세기 및 전자기력을 해석한 결과이다. 그리고 슬러리 공급관 재질변경이 슬러리 공급에 소요되는 시간 변화를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

슬러리 공급관을 비자성체에서 고투자율의 자성체 재질로 변경한 경우, 내부 페라이트 슬러리에 걸리는 자기장세기는 약 1/8 이하로 감소하고, 맥스웰 전자기력도 약 1/4 정도로 감소하는 것으로 해석되었다(Table 1 참조). 또한 슬러리 공급관 재질변화에 따른 슬러리 유동특성 측정결과를 나타낸 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 비자성체 및 자성체를 사용한 경우 모두 자기장의 세기가 커질수록 슬러리가 유동에 소요되는 시간은 증가하는 경향성을 나타내었다. 그러나 비자성체 및 자성체 재료의 공급관을 사용하는 경우, 자기장의 세기를 0부터 6,000 gauss까지 증가시킬 때 슬러리 유동에 소요되는 시간은 각각 165초 및 58초로 큰 차이를 보였다. 이 결과로부터 비자성체 재료 대신 고 자기적 특성을 지닌 재료를 공급관으로 사용하는 경우, 6,000 gauss의 고자기장을 인가한 상태에서 페라이트 슬러리의 주입시간이 1/3 정도 감소됨을 알 수 있었다. 실제 ferrite 슬러리 성형공정에 인가되는 자기장세기는 12,000 gauss 정도이고, 국부적으로 자기장의 구배가 있는 것을 감안하면 슬러리 공급관 재질을 변경할 경우, 페라이트 성형체의 특성에 영향을 주지 않고, 슬러리 주입 시간을 많이 감소시킬 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 페라이트 슬러리 성형 중 인가한 외부

자기장이 슬러리 주입시간에 미치는 영향을 분석하여 슬러리 공급을 개선할 수 있는 방법에 대하여 조사하였다. 이를 위하여 슬러리 주입시간 평가장치를 설계하여 제작하고, 자기장 세기 및 주입 압력, 슬러리 공급관 재질변화에 따른 페라이트 슬러리의 주입시간을 분석하였다. 이 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자기장의 세기가 증가함에 따라 페라이트 입자에 작용하는 전자기력이 증가하여, 주입압력이 2.5 kg/cm^2 일 때 자기장이 0에서 6,000 gauss로 증가함에 따라 공급에 소요되는 시간이 약 9배 정도 증가한다.

2. 슬러리 주입 압력이 증가함에 따라 자기장에 의한 전자기력 영향이 감소하고, 슬러리 공급특성이 향상되어 주입시간이 급격하게 감소한다.

3. 고 투자율의 자성체 재질로 슬러리 공급관을 변경할 경우, 페라이트 슬러리로 집중되던 자기장이 분산되어 슬러리 공급특성이 향상되고, 외부 자기장인 6,000 gauss인 경우 슬러리 주입시간이 약 1/3정도 단축된다.

본 연구의 결과, 페라이트 유동특성은 외부 인가 자기장에 의하여 감소하지만 주입 압력 및 공급관의 재질변경에 의하여 개선됨을 알 수 있다. 그리고 페라이트 성형 제품의 품질 및 불량률 등을 고려할 때 주입압력 변경은 한계가 있고, 페라이트 보다 고 투자율을 갖는 자성체로 공급관을 구성하여 외부 자기장의 영향을 최소화 하는 것이 슬러리 주입시간을 단축시키는 효율적인 방안으로 나타났다.

REFERENCES

1. D. C. Jiles, "Recent Advances and Future Directions in Magnetic Materials," *Acta Materialia*, **51** 5907-39 (2003).
2. C. J. Yang, "P/M Magnets and their Applications," *J. Kor. Powder Metallurgy Institute*, **4** [1] 75-82 (1997).
3. A. L. Stuijts, G. W. Rathenau, and G. H. Weber, "Ferroxdure II and III : Anisotropic Permanent Magnet Materials," *Philips Tech. Rev.*, **16** 141-80 (1954).
4. A. L. Stuijts and H. P. J. Wijn, "Crystal-Oriented Ferroxdure," *Philips Tech. Rev.*, **19** 157-75 (1977).
5. C. A. M. van den Broek and A. L. Stuijts, "Ferroxdure," *Philips Tech. Rev.*, **37** 157-75 (1977).
6. F. Toussaint, D. Bouvard, P. Tenaud, and E. Di Marcello, "Experimental and Numerical Analysis of the Deformation of Ferrite Segments during Sintering," *J. Mater. Processing Tech.*, **147** 72-8 (2004).
7. N. Takahashi, T. Nakata, Suhartono, and H. Morishige, "Investigation of a Model to Verify Software for 3-D Static Force Calculation," *IEEE Transactions on Magnetics*, **30** [5] 3483-86 (1994).