



## A Study on Magnetic Property Improvement of Rubber Magnets for Heat Loss Reduction of a Refrigerator

WonSool Ahn<sup>†</sup>, Haakil Lee, and Ji Soo Ha<sup>\*</sup>

*Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea*

*<sup>\*</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea*

(Received December 7, 2015, Revised December 16, 2015, Accepted December 23, 2015)

**Abstract:** For improving the heat loss of a refrigerator around door gasket, it is very important to reduce the amount of rubber magnet used, of which thermal conductivity is much higher than the plastics, and enhancing the magnetic properties of rubber magnet itself is crucial for this. In the present study, therefore, a relationship between the optimum conditions of rubber magnet fabrication process and raw material compositions in the ferrite powder/CPE binder compounds was investigated for finding a way to enhance the magnetic properties of rubber magnet. Magnetic attraction forces of a sample rubber magnet was measured as function of distance, and thermal properties of the sample ferrite powder/CPE binder compound were analyzed with TG/DTA thermal analyzer. As a results, a rubber magnet strip with enhanced magnetic properties was expected to be fabricated, of which raw material compound was prepared by compounding with higher ferrite magnetic powder concentration.

**Keywords:** refrigerator, heat loss reduction, rubber magnet, ferrite/CPE

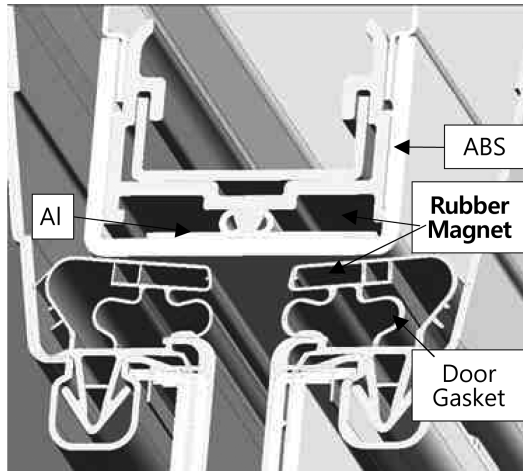
### Introduction

냉장고에서의 내부-외부 간의 온도 차이에 의하여 발생하는 열손실은 냉장고의 소비전력과 직결되어 있다. 냉장고의 계속 사용 기한이 일반적으로 10년 이상 지속되므로 소비전력을 줄이는 것은 냉장고 제품의 경쟁력을 향상시키는 커다란 요인이 된다고 볼 수 있다. 따라서 냉장고의 열손실을 줄이는 방법으로서 냉장 사이클을 최적화하는 방법이나 냉장고 본체의 단열 기능을 개선하는 등의 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>1-3</sup> 문이 닫혀 있는 냉장고 본체의 단열 손실은 크게 보아 냉장고 벽면을 통한 열손실과 냉장고 도어의 가스켓을 통한 열손실로 나눌 수 있다. 냉장고 벽면을 통한 단열 손실을 줄이기 위하여서는 일반적으로 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam, PUF)이 사용되고 있으나, 최근의 제품 고급화에 따른 단열손실을 더욱 낮추기 위하여 PUF 자체의 열전도 계수를 개선하거나,<sup>4,5</sup> PUF에 비해 열전도계수가 월등히 낮은 진공단열재(Vacuum Insulation Panel, VIP)가 보조재로 사용되기도 한다.<sup>6,7</sup> 한편, 냉장고 도어 가스켓을 통한 단열 손실은 전체 냉장고 열손실의 약 30%에 달하고 있으므로 이를 개선하기 위한 다양한 노력도 이루어지고 있다.<sup>2,3</sup> 전형적인 빌트인(built-in) 방식의 냉장고 도어 가스켓 주위의 형상은 Figure 1

에 보이는 바와 같다. 가스켓의 내부에는 도어 밀착력을 향상시키기 위하여 고무 자석 스트립이 삽입되어 있고, 대응하는 반대 쪽 물리언(mullion)부에는 또 다른 고무자석이 장착되어 있다. 고무자석은 열전도도가 매우 크기 때문에 최근의 양문형 냉장고에는 물리언 부의 고무자석은 제거하고 그 대신에 얇은 철판을 사용함으로써 도어 밀착력은 그대로 유지하면서도 냉장고의 열손실은 개선하고 있는 실정이다. 냉장고 도어는 가스켓을 경계로 하여 내-외부를 차단하고 있으므로 고무자석과 같이 열전도도가 큰 재료를 가스켓에 사용하게 되면 도어 밀착력은 증대하게 되지만 상대적으로 열전도에 의한 에너지 소비도 증가하게 된다.<sup>1</sup>

한편, 냉장고의 도어 가스켓에 사용되는 고무자석은 이방성 페라이트 분말을 염소화 폴리에틸렌(Chlorinated Polyethylene, CPE) 등을 바인더로 사용하여 컴파운딩하여 스트립 형태로 압출한 뒤에 착자하여 만들어 낸다. CPE는 폴리에틸렌을 25~42%의 염소함량을 가지도록 처리하여 고무특성을 가지는 열가소성의 고분자로 개질한 것이며, 내화학성이 좋고 특히 저온 유연성이 좋기 때문에 냉장고용 도어용 고무자석의 바인더로 많이 사용된다.<sup>8,9</sup> 자성체 원료 분말은 일반적으로 철을 주성분으로 하며, 희토류(rare earth)계는 자력이 매우 뛰어나지만 가격이 지나치게 높아 일반적인 도어용 고무자석으로는 적당하지 않다. 철 성분에 바륨(Ba)이 도입되면 일반적인 등방성 페라이트 자석이 되며, 스트론튬(Sr)이 도입되면 자성

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: [wahn@kmu.ac.kr](mailto:wahn@kmu.ac.kr)



**Figure 1.** Schematic representation around door gasket of a typical built-in refrigerator.

이 개선된 이방성 페라이트 자석이 된다. 따라서 냉장고 도어의 자석은 동등한 사용량에서 상대적으로 높은 자기력을 나타내는 이방성 자석 분말을 사용하게 된다. 다만 이방성 자석 분말은 등방성 자석 분말에 비하여 가격이 2~3배 정도 비싼 단점이 있다.

본 연구에서는 열전도율이 큰 고무자석의 사용량을 저감하기 위하여 제일 먼저 해결해야 하는 고무자석의 자기 성능을 향상시킬 수 있는 방안으로서, 원료 컴파운드의 조성비 변화와 적정 제조공정의 상관 관계에 대하여 연구하고자 하였다.

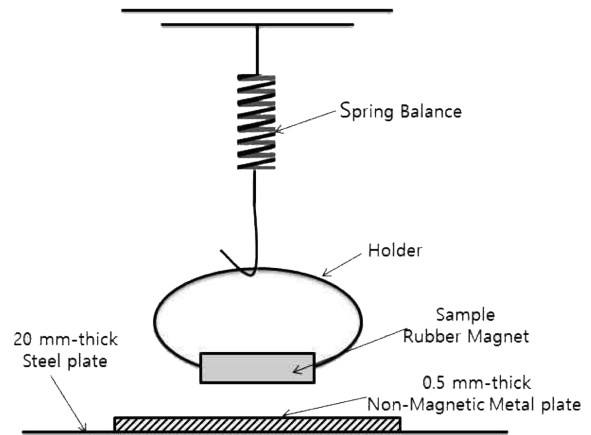
## Experimental

### 1. 실험재료

실험에 사용된 고무자석은 현재 국내에서 빌트인(built-in) 냉장고의 도어에 사용되는 상용 재료를 구하여 분석하고 기준으로 삼도록 하였다. 고무자석용 페라이트 분말은(ferrite powder)평균 입도  $15 \pm 5 \mu\text{m}$  크기의 이방성 산화철 분말인 스트론튬 페라이트(Sr-ferrite oxide powder)를 사용하였다. 바인더 재료로는 염소함유율  $30 \pm 1 \text{ wt}\%$ 인 염소화 폴리에틸렌(Chlorinated Polyethylene, CPE) CPE-130A (Xiangsheng Chemicals, China)를 사용하였다.

### 2. 샘플제작

고무자석 스트립의 성형 및 착자(magnetization)는 일관 공정이 갖추어진 (주)세계로의 도움을 얻어 수행하였다. 먼저 ferrite/binder = 90/10 wt% 되도록 정량하여 two-roll 믹서에서 pre-mixing한 후에 flake 상으로 분쇄한 뒤에 이축 스크류식압출기(twin-screw extruder)를 사용하여 재혼합 및 펠릿



**Figure 2.** Schematic representation of spring gauge set-up for measuring the magnetic attraction force of a sample rubber magnet.

(pellet)으로 제조하였다. 다음에 이를 단축 스크류식압출기(single-screw extruder)로 이송하여, 냉장고 가스켓 형상의 다이를 통하여 압출 속도  $\sim 10 \text{ m/min}$  되도록 연속적으로 압출하면서 냉각되도록 하고 상하 착자기를 거치면서 자석화하여 고무자석 스트립을 제조하도록 하였다.

만들어진 고무자석 샘플의 자력 성능은 냉장고 도어의 밀착력을 시험하는 흡인력 시험법에 의하여 측정하였다. 흡인력은 두께  $\times$  넓이  $\times$  길이 =  $2.5 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  되도록 절단하여 만든 고무자석 샘플에 대하여 Figure 2에 보이는 스프링 게이지를 사용하여 측정하였다.

### 3. 기기분석

고무자석 중의 원소를 판별하기 위하여서는 외부의 공인 기관에 의뢰하여 WD-XRF (Rigaku, ZSX-100e)를 사용하여 분석하였다. 시료 중의 스트론튬과 바륨의 상대적인 조성비로부터 사용된 페라이트 분말이 등방성인지 또는 이방성인지를 판별하였다.

샘플 고무자석의 열적 특성 및 조성비를 알아보기 위하여 Shimadzu TGA-50 TGA 열중량 분석기를 사용하여 공기 분위기 하에서  $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 의 승온속도로 상온에서  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 승온시키면서 온도변화에 따른 중량변화 곡선을 얻었다. 샘플의량은 약  $50 \text{ mg}$ 으로 하고 온도에 따른 중량 변화는 상대 비교를 위하여 백분율로 변환하여 표시하였다. 또한 중량감소에 의한 유기물 및 무기물의 조성비는 고무성분이 열화 분해되는 약  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지를 경계로 전체 무게 대한 비율로 계산하였다.

고농도의 페라이트 분말 도입에 따른 고무자석 샘플의 기계적 특성 변화를 측정하기 위하여서는 경성시험기사의 KST-05S UTM(universal testing machine)을 사용하여 ASTM D638의 시험법에 따라 변위 증가속도  $20 \text{ mm/min}$ 의 속도로 시험

하여 인장강도 및 연신율을 측정하였다.

### Results and Discussion

Table 1에는 사용된 샘플 고무자석의 WD-XRF에 의한 원소분석 결과를 나타내었다. 자석용 페라이트 자성체는 산화철( $Fe_2O_3$ )에 바륨(Ba) 또는 스트론튬(Sr)이 탄산염의 형태로 혼합된 것이며, 상대적인 조성비에 따라 바륨 성분이 상대적으로 많은 등방성 자석과 스트론튬 성분이 더 많은 이방성 자석용으로 분류된다. 따라서 Table 1의 분석 결과에서 알 수 있듯이 성분 중에 스트론튬이 상대적으로 더 많은 조성비를 차지하고 있으므로 이방성 페라이트 분말임을 알 수 있다. 냉장고의 열손실 저감을 감안할 때, 요구되는 도어 밀착력을 위한 자기특성에 비하여 열전도도가 높은 페라이트 분말은 사용량을 줄이는 것이 상대적으로 유리하며 따라서 이방성 페라이트 분말을 고무자석의 원료로 사용하는 것은 열손실 저감의 측면에서 보아 적절한 선택인 것으로 판단된다.

Figure 3에는 고무자석을 제조하는 일반적인 공정을 나타낸다. 그림에서 보듯이 원료 자성체 분말을 고무 바인더와 컴파운딩하여 칩(chip)으로 만드는 공정, 정해진 형태의 스트립 형태로 압출하는 공정, 착자하는 공정의 일관공정으로 이루어져 있고, 착자가 끝난 스트립은 적절한 크기로 재단되어 가스켓에 삽입하게 된다. 이 들 단위 공정 중에서 투입된 펠릿을 용융물로 녹여 압출하는 데 필요한 열은 고농도로 혼합된 페라이트와 압출기 스크류 간의 마찰열을 이용하게 된다. 한편 그림에서와 같은 공정을 이용하는 본 실험에서는 적정 용융

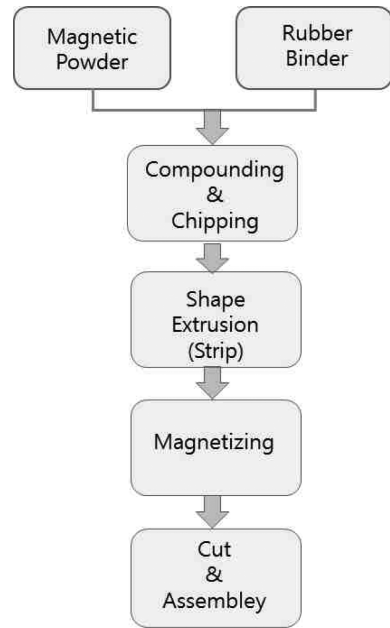


Figure 3. Schematic representation of fabrication process for rubber magnets.

점도를 가지는 다이에서의 스트립 압출속도 10 m/min의 조건에서 스크류 온도는 약 160 °C로 측정되었다. 이와 같은 사실로 부터 컴파운드 펠릿 중의 페라이트 조성비와 압출속도는 밀접한 상관관계를 가지고 있으며, 원료 컴파운드 조성비에 따라 같은 토출속도에서도 스크류의 온도가 변하게 된다는 것을 알 수 있다.

Figure 4에는 위에서의 제조공정을 거쳐 제조된 샘플 고무자석의 거리에 따른 흡인력을 시험한 결과를 나타내었다. 흡인력은 Figure 2에 나타낸 바와 같은 스프링 저울을 이용하여 두께 × 넓이 × 길이 = 2.5 mm × 9 mm × 25 mm 되도록 절단하여 만든 고무자석 샘플에 대하여 바닥의 철판으로부터의 거리에 따른 인력으로 나타내었다. 그림에서 보듯이 샘플 고무자석의 흡인력은 철판으로부터 멀어짐에 따라  $f = 8.0 +$

Table 1. Results of WD-XRF analysis for the sample rubber magnet

No.	Element	Mass%
1	B	3.83
2	C	15.30
3	O	29.50
4	Na	0.25
5	Mg	0.35
6	Al	0.23
7	Si	0.31
8	P	0.04
9	S	0.06
10	Cl	1.80
11	K	0.04
12	Ca	0.16
13	Mn	0.10
14	Fe	41.70
15	Zn	0.04
16	Sr	4.84
17	Ba	1.45
Total		100.00

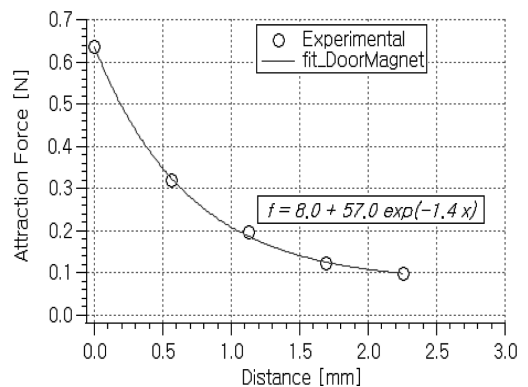


Figure 4. Magnetic attraction forces of sample rubber magnets as a function of distance from the bottom steel-plate.

57.0  $e^{-1.4x}$  수식에 의해 지수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 고무자석과 바탕이 되는 철판과의 거리가 도어의 흡인력을 결정하는 가장 중요한 인자이며, 이를 최소한으로 만드는 것이 상대적인 흡인력을 크게 할 수 있는 관건임을 나타낸다. 일반적으로 냉장고 도어에서 고무자석은 가스켓 내부에 장착되므로 철판-자석 간의 거리는 가스켓의 두께 뿐 만 아니라 물리언부의 자석이나 철판을 덮고 있는 ABS의 두께 등도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 Figure 4에서의 결과는 냉장고 도어에 필요한 밀착력을 만족하기 위하여서는 가스켓의 두께나 ABS의 두께를 포함하여 가스켓 주위의 디자인을 매우 정밀하게 고려하여야 할 필요가 있음을 보여 준다. 이러한 디자인 개선과 관련하여 발표된 시뮬레이션 연구의 결과로부터 냉장고의 전체 열손실을 약 17%까지 저감할 수 있음을 감안하면, 열전도성이 높은 고무자석의 사용량 저감은 반드시 해결해야 할 문제점이라 할 수 있다.<sup>10</sup>

한편 고무자석의 사용량을 저감하는 데에는 고무자석 자체의 자기성능을 향상시키는 문제가 먼저 해결되어야 한다. 고무자석의 자기 성능은 바인더를 포함하는 고무자석의 단위 체적당의 페라이트 농도에 의하여 가장 크게 좌우되므로 원료 컴파운드에서 최대한 고농도의 페라이트 조성비를 갖도록 하는 것이 필요하다. 그러나 앞에서 기술한 바와 같이 원료 컴파운드에서의 고농도 페라이트는 성형 공정에 직접 영향을 미치게 되므로 농도 증가에 따른 원료조성물의 온도 영향을 고찰하는 것이 중요한 것으로 생각된다.

Figure 5에는 샘플 고무자석의 기계적 특성을 시험하기 위한 UTM 시험 결과를 나타낸다. ASTM D638의 시험법에 따른 시험결과로서 항복 인장강도 3.92 MPa 및 연신율 110%의 값을 얻었다. 이는 고농도로 혼입된 페라이트 분말에 의하여 바인더로 사용된 CPE의 인장강도 ~9.0 MPa 및 연신율 ~800%에 비하여 인장강도는 약 1/2, 연신율은 약 1/8로 감소된 값을 보이는 것이다. 그러나 초기 30% 정도의 연신 변형 이후에도 약 90% 이상의 연신율을 나타냄으로서 실질적인 유연성을 보이고 있으며, 이는 현재의 90% 보다도 더 높은 고농도 페라이트 조성비를 가지는 원료 컴파운드의 제조에 대한

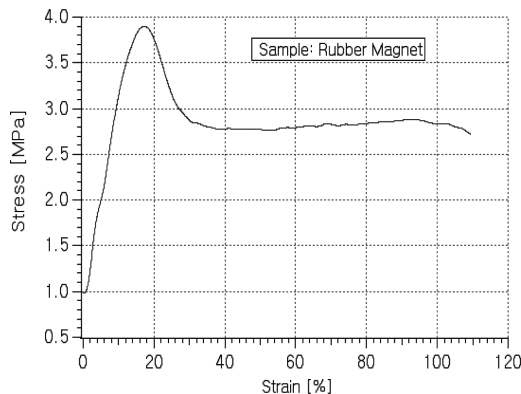


Figure 5. UTM result of the sample rubber magnet.

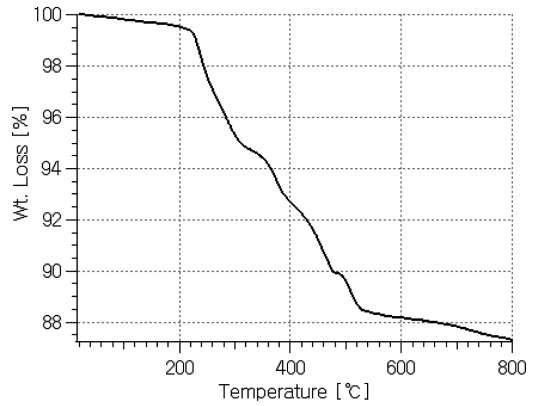


Figure 6. TGA result of the sample rubber magnet.

가능성을 나타내는 것이라 볼 수 있다.

Figure 6에는 제조된 고무자석 샘플의 열중량 분석(TGA) 결과를 나타낸다. 그림에서 잘 알 수 있듯이 바인더 고무는 약 220 °C에서부터 열분해되기 시작하여 550 °C의 온도에서 완전히 분해되며 이후 800 °C에 이르기까지 12% 정도 무게 감소가 일어난다. 이러한 실험 결과로부터 본 연구에서의 고무자석은 페라이트 분말/바인더의 조성비가 중량비로 약 89/11로 나타나며 이는 샘플 제조 시에 정량한 값과 유사한 것으로서 제조공정을 거치는 동안에 재료 조성비의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

Figure 7에는 바인더 재료인 염소화 폴리에틸렌(CPE)의 DTA 열분해 곡선을 나타낸다. 그림에서 보듯이 샘플의 중량 감소가 일어나는 220 °C에서부터 발열 분해되기 시작하여 550 °C에 이르기까지 복합적인 반응기구에 의한 분해 패턴을 형성하면서 열분해가 일어나는 것을 알 수 있다. 한편 고무자석 제조 공정조건에서의 온도 조건과 CPE의 실제적인 열분해 온도 시작온도인 220 °C를 비교하여 살펴보면, 실제 고무자석 스트립의 성형 공정에서 160 °C의 온도는 너무 낮은 성형온도임을 알 수 있다. 한편 성형 온도가 높아지면 용융물의 점도는 낮아지며 압출속도는 좀 더 빨라질 수 있다. 그러나 일관 공정에 따른 여러 주변 조건으로 인하여 스트립 성형물에

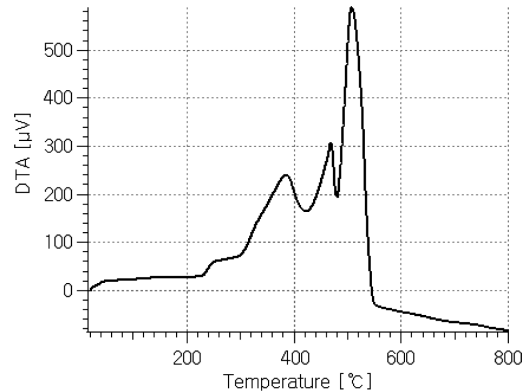


Figure 7. DTA result of the sample rubber magnet.



대하여 약 10 m/min의 압출 속도를 적정조건으로 했을 때, 원료 컴파운드에서의 페라이트 농도 증가에 따른 용융물의 점도 증가는 압출기에서의 성형 온도를 현재의 160 °C 보다 더 높은 180~200 °C로 셋팅함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단되며 이로부터 자기 특성이 더 향상된 고무자석을 제조할 수 있음을 알 수 있다.

## Conclusions

냉장고 도어 부위에서의 열손실 개선을 위하여서는 열전도율이 큰 고무자석의 사용량을 줄이는 것이 관건이며, 이를 위해서는 고무자석 자체의 자기 성능을 개선하는 것이 가장 중요한 문제가 된다. 본 연구에서는 이방성 페라이트 분말/CPE 바인더수지 복합체에서의 원료조성비와 적정 제조공정과의 상관관계에 대하여 연구하여 고무자석의 자기 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 도출하고자 하였다. 연구의 결과로서 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

1) 페라이트와 스크류의 마찰열을 이용하는 단축 스크류식 압출기에서, 이방성 ferrite/CPE binder = 90/10 wt%의 조성비를 가지는 원료 컴파운드를 사용한 스트립형 고무자석의 압출속도 10 m/min에서의 압출기 온도는 약 160 °C로 측정되었다.

2) 제조된 두께 × 넓이 × 길이 = 2.5 × 9 × 25 mm인 샘플 고무자석의 흡인력은  $f = 8.0 + 57.0 e^{-1.4x}$ 의 수식에 따라 지수적으로 감소하는 것으로 나타났다.

3) 샘플 고무자석의 UTM 시험결과로서 항복 인장강도 3.92 MPa 및 연신율 110%로서, 바인더로 사용된 CPE의 인장강도 ~9.0 MPa 및 연신율 ~800%에 비하여 인장강도는 약 1/2, 연신율은 약 1/8로 감소된 값을 나타내었다.

4) 샘플 고무자석의 TGA 분석 결과로서 온도 약 220~550 °C 구간에서 CPE 바인더가 분해되지만 페라이트/바인더 중량비는 89/11로서 초기의 90/10인 원래 조성비와 거의 유사한 값을 보여줌으로서 제조공정에 따른 원료물질의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

5) CPE 바인더의 DTA 결과와 고무자석의 제조공정을 비교하여 분석한 결과로서, 적정 압출 속도에서 압출기의 온도를 약 180~200 °C까지 압출 온도를 더 높게 설정하는 것이 가능함을 알아내었다. 이로부터 성형온도 증가에 따른 용융물

의 점도 감소는 상대적으로 더욱 고농도 페라이트 원료 컴파운드를 사용함으로써 상쇄시킬 수 있으며, 이러한 상관 관계를 이용하여 자기 특성이 좀 더 개선된 고무자석을 제조할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

1. J. K. Park, "Optimization of Heat Insulation System for a Household Refrigerator", *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **15**(2), 95 (2003).
2. J. S. Ha, K. S. Jung, T. K. Kim, K. H. Kim, and S. R. Kim, "The Effect of Gasket Shape on Heat Loss Reduction in a Refrigeration", *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **21**(5), 305 (2009).
3. J. S. Ha, "A Study on the Unsteady Temperature Characteristics at the Refrigerator Gasket", *J. Energy Eng.*, **21**(2), 136 (2009).
4. R. E. Skochdopole, "The Thermal Conductivity of Foam Plastics", *Eng. Prog.*, **57**(10), 57 (1961).
5. A. Biedermann, C. Kudoke, A. Merten, E. Minogue, U. Rotermund, H.-P. Ebert, U. Heinemann, J. Fricke, and H. Seifert, "Analysis of Heat Transfer Mechanisms in Polyurethane Rigid Foam", *J. Cell. Plast.*, **37**, 467 (2001).
6. J. S. Kwon, C. H. Jang, H. Jung, and T. H. Song, "Effective Thermal Conductivity of Various Filling Materials for Vacuum Insulation Panels", *Int. J. Heat Mass Trans.*, **52**, 5525 (2009).
7. X. Wang, N. Walliman, R. Ogden, and C. Kendrick, "VIP and Their Applications in Buildings: A Review", *Constr. Mater.*, **160**, 145 (2007).
8. Z. Osawa, K. Kawaguchi, M. Iwata, and H. Harada, "Effect of Polymer Matrices on Magnetic Properties of Plastic Magnets", *J. Mater. Sci.*, **23**, 2637 (1988).
9. G. R. Marchand, "Chlorinated Polyethylene" in *Polymeric Materials Encyclopedia*, ed. J. C. Salamone, *CRC Press*, vol. **2**, 1234 (1996).
10. J. S. Ha and W. Ahn, "A Study on Heat Loss Reduction of a Refrigerator by Thermal Conductivity Change and Partial Removal of Rubber Magnet", *J. Energy Eng.*, **23**(4), 240 (2014).