

Heat Transfer Modeling and Characteristics Analysis of Impulsed Magnetizing Fixture

白壽鉉* · 金必洙**

(Soo-Hyun Baek · Pil-Soo Kim)

Abstract—In this paper, we found the improved SPICE heat transfer modeling of impulsed magnetizing fixture system and investigated temperature characteristics using the proposed model. As the detailed thermal characteristics of magnetizing fixture can be obtained, the efficient design of the impulsed magnetizing fixture which produce desired magnet will be possible using our heat transfer modeling. The knowledge of the temperature of the magnetizing fixture is very important to forecast the characteristics of the magnetizing circuits under different conditions. The capacitor voltage was not raised above 810[V] to protect the magnetizing fixture from excessive heating. The purpose of this work is to compute the temperature increasing for different magnetizing conditions. The method uses multi-lumped model with equivalent thermal resistance and thermal capacitance. The reliable results are obtained by using iron core fixture(stator magnet of air cleaner DC motor) coupled to a low-voltage magnetizer(charging voltage : 1000[V], capacitor : 3825[μ F]). The modeling and experimental results are in close agreement.

Key Words : Capacitor Discharge Impulse Magnetizer(커패시터 방전 임펄스 착자기), Impulsed Magnetizing Fixture System(임펄스 착자요크 시스템), SPICE Modeling(SPICE 모델링), Heat Transfer Modeling(열전달 모델링)

1. 서론

현대산업사회가 발달함에 따라 영구자석의 사용도 급격히 증가하고 있으며, 영구자석의 대량 생산시스템인 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템(Capacitor Discharge Impulse Magnetizer-Magnetizing Fixture System)에 대한 관심도 매우 커지고 있는 실정에 있다. 이 시스템은 영구자석의 고성능화에 따라 사용되는 전원이 고전압·대전류의 대용량이고 이러한 착자장치의 제작 및 시험에는 고가의 비용과 더불어

위험요소까지 내포하고 있으며,¹⁾ 더우기 경험에만 의존하여 임펄스 착자기-착자요크 시스템이 설계되는 등 여러 문제가 제기되고 있다.²⁾ 특히 착자요크는 영구자석의 생산 품목 및 형태에 따라 고가의 제작비가 요구되며, 대량생산체제에 따른 반복착자가 급격한 온도상승 등을 유발시키므로 이를 고려한 착자요크의 효율적 설계는 착자시스템에서 가장 중요하다고 할 수 있다.^{3) 4) 5)} 따라서 착자 시스템의 제작에 앞서 착자요크의 온도상승특성의 파악은 착자 시스템의 고장 및 수명단축 등의 문제를 크게 경감시킬 수 있는 가장 바람직한 방법이므로 이에 대한 정밀한 온도산정방법이 시급히 요구되고 있다.

한편, 열특성 관련 연구는 주로 70년대 중반에 반도체 소자를 중심으로 집중적으로 연구되기 시작하여 전력용 트랜지스터 등의 열특성 산정

*正會員 : 東國大 工大 電氣工學科 教授 · 王博

**正會員 : 忠淸專門大 電氣科 專任講師

接受日字 : 1993年 9月 16日

1次修正 : 1994年 12月 18日

2次修正 : 1994年 1月 17日

방법이 발표되었으며¹⁰⁾, 뒤이어 MOSFET의 동작 온도 산정방법이 80년대 중반에 진행되기 시작하였고¹²⁾ 90년대에는 다이리스터 등과 같은 대용량 전력용 반도체 소자의 열특성 산정방법이 연구되었으며,¹⁶⁾ 요즘에는 스테핑 모터와 같은 각종 전기기기의 과도 열특성에 대한 연구로 확장되는 추세에 있다.^{17,18)} 특히 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 같은 각종 패키지 프로그램의 개발에 따라 열특성 산정방법에 이 프로그램을 도입하여 간단하여 용이하게 모델링하는 방법^{11,12,18,19)}이 확대되고 있으며, 앞으로 전기에너지에 의하여 발생하는 모든 열원에 대한 해석도 가능하리라 본다.

따라서 본 연구에서는 범용 패키지 프로그램인 SPICE를 이용하여 기존의 저항모델¹²⁾을 개선하여 임펄스 착자시스템의 착자요크에 적용할 수 있는 온도산정용 저항모델을 제시하였으며, 자동차 에어크리너 직류모터의 고정자 자석을 착자하는 착자요크를 시험대상으로 여러 특성을 고찰하였다.^{20, 24)} 특히 실제의 착자요크를 시험대상으로 반복착자에 따른 온도특성을 실측하여 SPICE 모델링 결과와 비교함으로써 그 우수성을 입증하였다.

2. 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템

그림 1은 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템을 나타낸다. 교류입력전원은 승압기를 통하여 고압으로 되고 브릿지 정류기를 통하여 적절한 크기의 직류로 변환된다. 이 직류는 초기에 SCR1의 턴온에 의하여 커패시터 뱅크 C_n에 그림과 같은 극성으로 충전이 완료되며, SCR2



그림 1 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템

Fig. 1 Capacitor discharge impulse magnetizer-magnetizing fixture system

의 턴온에 의하여 대용량의 방전전류가 순간적으로 착자기의 코일(등가부하R-L)에 흐르고 강자계가 발생되어 자석을 착자하게 된다. 여기서 착자요크코일은 착자되는 자석의 재질에 따라 굵기, 턴수 및 종류가 결정되므로 착자기 설계에서 매우 중요한 부분의 하나이다. 그림 2는 방전전류로 인하여 온도상승이 발생하는 방전회로를 등가회로화 한 것으로 R 및 L은 착자요크코일의 저항[ohm] 및 인덕턴스[mH]를 나타내며, C는 커패시턴스[μF]로서 그림과 같은 극성으로 충전되어 있다. 또한 R_d 및 L_d는 각각 방전회로의 권선저항 및 권선인덕턴스이다. 그림 2에서 온도상승요인으로 작용할 수 있는 부분은 다음이 세 부분이라 할 수 있다.

- Discharge Switch SCR2
- Recovery Diode D
- Load R-L

이 중 방전스위치 SCR2 및 다이오드 D부분은 온도상승정도가 그다지 크지 않은 반면, 착자코일의 저항 R은 영구자석재료가 직접 장착되는 부분으로 반복착자로 인한 온도상승이 매우 크다고 할 수 있으며,^{20,21)} 고가의 설비비가 필요로 되는 곳으로 가장 민감한 부위라 할 수 있다. 특히 고성능의 영구자석을 생산하기 위하여 방전전류의 크기가 더욱 커지게 되고 이에 따른 착자요크코일의 온도상승은 수명단축 등의 큰 문제를 발생시키므로 이에 대한 대책이 요구되고 있다. 본 연구에서는 온도상승시험을 위한 요크 모델로서 자동차 에어크리너 직류 모터의 고정자 자석을 착자할 수 있는 착자요크를 대상으로 하였다.

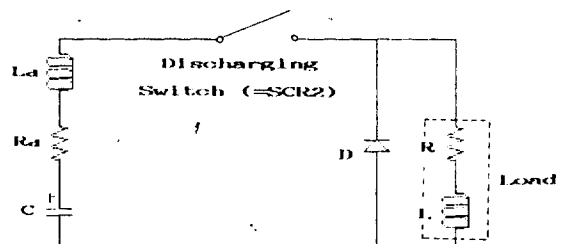


그림 2 방전 등가 회로

Fig. 2 Discharging equivalent circuit

3. 착자요크코일의 온도산정용 저항 모델링

커패시터 방전 임펄스 착자요크-착자요크 시스템에서 착자요크의 코일저항은 방전전류에 의한 온도상승으로 인하여 매우 큰 영향을 받을 뿐만 아니라 착자요크의 설계에도 중요한 고려사항이 된다. 특히 착자재료의 종류, 착자요크의 구조 및 형태 그리고 방전전류의 크기에 따라 온도상승의 변화가 다양하여서 착자요크의 수명에 극히 큰 영향을 주므로 그 중요성은 더욱 크다고 할 수 있다. 현재 착자요크가 견딜 수 있는 온도는 일반적으로 200[°C]미만이므로 주변 냉각시설의 정도를 고려하여 충전전압 및 착자회수가 결정되어야 한다.^{4,5)} 일반적으로 착자요크의 온도상승 관련식은 (1)과 같으며 오일러(Euler)에 의한 적분을 이용하여 계산된다.⁶⁾

$$\Delta T(t') = \frac{\rho_v}{P_a \cdot C_h} \int_0^{t'} J^2 dt \quad (1)$$

- 여기서 $\Delta T(t')$: 온도상승[K]
- ρ_v : 도체의 전기저항[ohm·m]
- P_a : 도체의 밀도[kg·m⁻³]
- C_h : 열용량[J·kg⁻¹·K⁻¹]
- J : 전류밀도[A·m⁻²]

한편, SPICE등과 같은 대부분의 패키지 프로그램은 회로 모델링 과정에서 온도에 관하여 일정하게 고정되거나 무시되어서 다루어지므로 온도 변화가 심한 경우 시뮬레이션의 정확성은 매우 떨어지게 마련이었다. 이에 따라 대부분의 SPICE프로그램을 이용할 경우 과도해석기간에 각 소자의 온도변화를 고려하지 못하거나 과도적인 열특성을 내포하지 못하고 있다. 따라서 본 장에서는 착자요크의 코일저항에 있어서 과도해석기간에 순시적으로 온도특성이 고려될 수 있는 SPICE 저항모델을 제시하고자 한다.

일반적으로 표준 SPICE프로그램에서 저항모델은 식(2)와 같은 일정한 콘덕턴스로서 정의된다.

$$G = 1/R = I_R/V_R \quad (2)$$

여기서 G는 콘덕턴스[siemens]이며, R은 저항[ohm]이다. 또한 I_R은 전류[A], V_R은 전압[V]을 나타낸다.

식 (2)는 식 (3)을 이용하여 시뮬레이션 초기에 미리 설정된다.

$$R = R_0 \times (1 + T_{c1} \times (T_1 - T_0) + T_{c2} \times (T_1 - T_0)^2) \quad (3)$$

여기서 R₀ : 공칭저항[ohm]

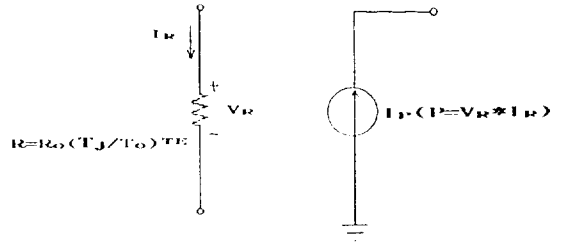


그림 3 열특성이 반영된 저항모델

Fig. 3 Resistor model with thermal characteristics

- T_{c1} 및 T_{c2} : 온도계수
- T₀ : 공칭온도[K]
- T₁ : 조정온도[K]

식 (2)의 콘덕턴스가 순시적으로 자동반복되어 조절되고 실제의 영향을 좀 더 반영할 수 있도록 하기 위하여 식 (4)와 같은 지수함수형태를 정의할 수 있다.¹²⁾

$$I_R = (1/R_0 \times (T/T_0)^{-TE}) \times V_R \quad (4)$$

여기서 T₁는 점점온도[K]이며 TE는 온도지수이다.

그림 3은 식 (4)의 열특성이 반영된 저항모델을 나타낸다.

식 (4)를 전압 V_R 및 점점온도 T에 관하여 미분형태로 변형하면 식 (5) 및 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{vR} = (d/dV_R)I_R = 1/R_0 \times (T/T_0)^{-TE} \quad (5)$$

$$g_{vT} = (d/dT)I_R = -TE \times V_R \times g_{vR} / T_1 \quad (6)$$

여기서 g_{vR}와 g_{vT}는 각각 전압 V_R에 대한 전류 I_R의 미분항 및 점점온도 T₁에 대한 전류 I_R의 미분항이다.

이 경우 전류는 온도에 대해서 비선형함수가 되므로 반복시점의 선형화를 위하여 식 (7)과 같이 오프셋(offset)K_p가 포함된 형태로 정의할 수 있다. 이 경우 I_R은 전 전류이다.

$$I_R = g_{vR} \times V_R + g_{vT} \times T_1 + K_p \quad (7)$$

$$\text{여기서 } K_p = I_R - g_{vR} \times V_R - g_{vT} \times T_1 = TE \times V_R \times g_{vR} \quad (8)$$

또한 그림 3의 저항모델은 식 (9)와 같이 온도특성을 나타낼 수 있는 전류원이 필요로 되며, 이 전류원은 소비전력의 크기로 결정된다.

$$I_p = (V_R^2/R_0) \times (T/T_0)^{-TE} \quad (9)$$

지금까지의 과정이 완료되면 다음 반복을 위하여 전류-전압특성 및 온도특성이 식 (10) 및 식 (11)과 같이 계산되어야 한다.

$$g_{vR} = (d/dV_R)I_p = 2 \times V_R \times (1/R_0 \times (T/T_0)^{-TE}) \quad (10)$$

$$g_{vT} = (d/dT)I_p = -g_{vR} \times TE \times V_R^2 / T_1 \quad (11)$$

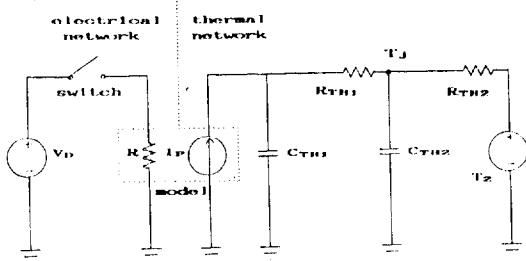


그림 4 제안한 SPICE 저항모델

Fig. 4 Proposed SPICE resistor model

여기서 g_{DV} 와 g_{DT} 는 각각 전압 V_R 에 대한 전류원 I_D 의 미분항 및 접점온도 T_J 에 대한 전류원 I_D 의 미분항이다.

따라서 반복과정을 통한 방정식의 일반적인 형태는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_T = g_{DV} \times V_R + g_{DT} \times T_J + K, \quad (12)$$

그림 4는 식 (4)~식 (12)의 이론을 이용하여 실제의 착자기 시스템에 적용한 구체적인 SPICE 저항 모델을 나타낸다. 전류원 I_D 는 착자요크의 저항 R 을 통하여 흐르는 방전전류 및 양단전압에 따른 순시소비전력으로 결정되며, 과도 열특성을 모델링하기 위하여 전기회로의 저항 및 커패시턴스에 각각 상응하는 열저항 및 열커패시턴스가 이중으로 결합되어 있다. 이 경우 열저항은 해당부분의 열도전율 및 형태로 결정되며, 열커패시턴스는 열용량 및 밀도에 의하여 결정된다. 특히 기존의 온도산정용 저항모델¹²⁾은 1단 열저항 및 열커패시턴스 구조로 인하여 실제의 형상에 따른 정확한 열적 표현에 어려움이 있는 반면, 본 제안모델은 착자요크코일에 피복된 절연물을 고려하여 열저항 및 열커패시턴스를 이중구조로 모델링하여 정확성을 높였다. 여기에는 주변 온도특성이 고려된 열원(전압원)이 함께 구성되어 있다. 그림 4의 회로동작은 다음과 같다. 직류전원 V_D 는 커패시터 뱅크 C_R 양단에 충전되는 전원을 지칭하며, 이 전원은 방전스위치 SCR2의 도통을 통하여 착자요크로 방전된다. 이때 착자요크 저항 R 에서 모소되는 순시소비전력과 상응하여 전류원 I_D 가 구동되고 이에 따라 접점 T_J 에 전류가 흐르게 되며, 이 전류는 열저항과 열커패시터를 통하여 흐르므로 전압에 상응하는 접점온도 T_J 는 이에 따라 순시적으로 변하게 된다. 본 연구의 경우 주변온도는 27[°C]를 기준으로 시뮬레이션되었다.

4. 실험방법 및 결과 검토

4.1 실험방법 및 착자요크

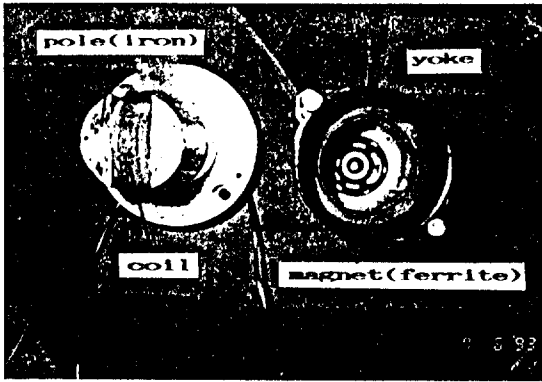
본 연구에서 이용된 착자요크는 그림 5와 같이 자동차 에어크리너 직류 모터용 고정자 자석을 착자하는 요크로서 1.6[mm] 나동선이 32[회] 감겨 있으며, 에폭시 몰딩된 것이다. 그림 5(a)와 그림 5(b)는 각각 착자요크의 실제 형상 및 구조적 형태를 나타낸 것이다. 또한 그림 5(c)는 착자요크의 단면을 나타낸 것이다. 이 요크코일 내부에 열전대가 부착되어 착자에 따른 온도특성이 Tektronics Co.의 측정시스템(2510 Test Lab.)의 입력모듈을 통하여 입력되며, 모니터 및 플로터 등의 출력장치를 통하여 출력되게 된다. 이때의 요크코일의 저항은 $R=0.024[\text{ohm}]$, 요크코일의 인덕턴스는 $L=0.1251[\text{mH}]$ 이다.

4.2 착자요크코일 저항의 온도특성

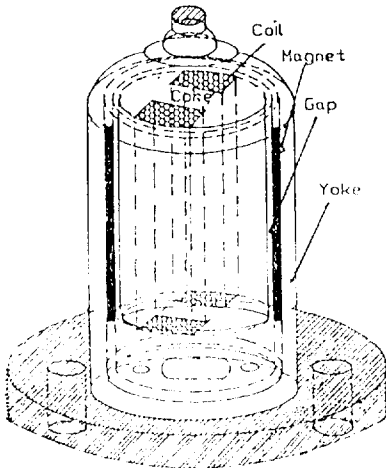
그림 4의 저항모델을 적용하여 착자요크코일에서 발생하는 온도특성을 산정하면 그림 6 및 그림 7과 같으며, 이때의 커패시터 용량은 3825[μF], 주변온도는 27[°C]를 기준으로 하였다. 또한 그림 6(a) 및 그림 7(a)의 실측의 경우에서 샘플링 주기는 20[ms]로 하였다.

그림 6(a)는 약 2.7[sec] 간격으로 40[sec]동안 1회 연속착자시 충전전압을 305[V], 507[V] 및 607[V]로 가변시켰을 경우의 온도변화를 실측한 것으로 충전전압 305[V]의 경우 최종 약 42.7[°C]로서 기준온도보다 15.7[°C]가 상승하는 것을 알 수 있으며, 충전전압 507[V]의 경우는 최종 약 70.4[°C]로서 43.4[°C] 정도 상승, 충전전압 607[V]의 경우는 최종 약 86[°C]로서 59[°C] 정도 상승하는 것을 알 수 있다. 따라서 충전전압의 정도에 따라 온도의 상승정도를 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 SPICE 모델링 결과로서 충전전압 305[V]의 경우 최종 43.3[°C], 충전전압 507[V]의 경우 최종 69.06[°C], 충전전압 607[V]의 경우 최종 85.74[°C]로서 실측치와 각각 0.6[°C], 1.34[°C] 및 0.26[°C]의 오차를 나타내어 거의 일치되는 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

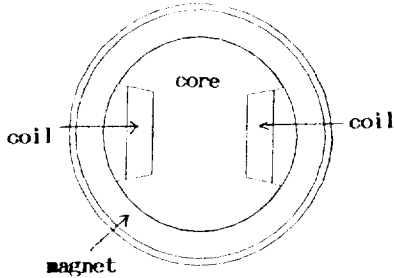
또한 그림 7(a)는 충전전압 810[V]에서 60[sec] 동안에 반복 착자수를 변화시켰을 경우의 온도특성을 실측한 것으로 그림 7(b)의 SPICE 모델링 결과와 유사한 특성을 나타내고 있다. 표 1은 그림 7의 결과를 비교한 것으로서 실측의



(a) Photograph of 2-pole magnetizing fixture



(b) Shape of 2-pole magnetizing fixture

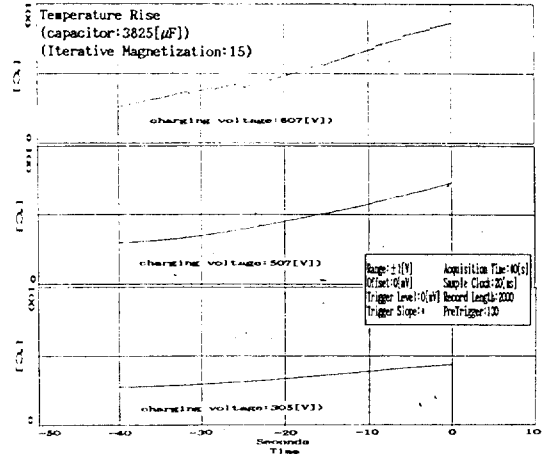


(c) Cross-section of 2-pole magnetizing fixture

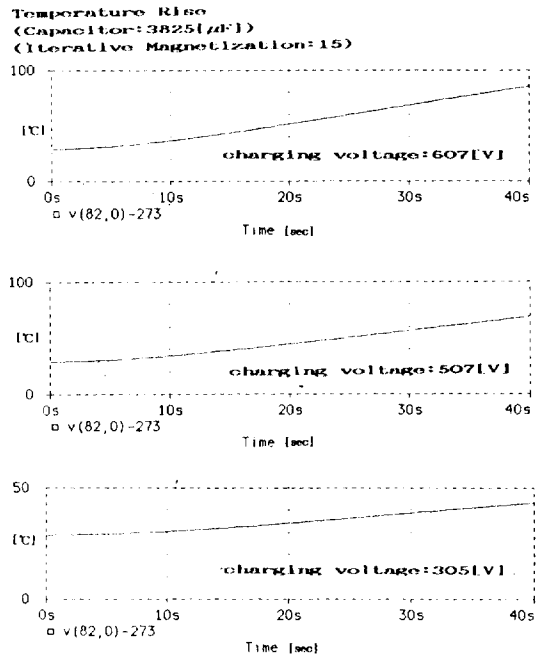
그림 5 2극 찾아요크(에어크리너 직류모터의 고정자 자석용)

Fig. 5 2-pole magnetizing fixture(stator magnet of air cleaner DC motor)

경우 2회 착자시 최종온도는 48.2[°C], 5회 착자시 최종온도는 75.4[°C], 10회 착자시 최종온도는 129.5[°C], 14회 착자시 최종온도는 167.5[°C]로서 모델링 결과와 거의 일치되는 특성을



(a) Measured values

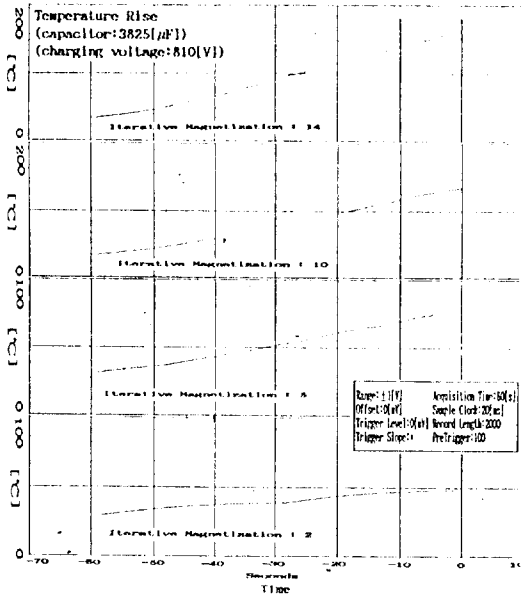


(b) Modeling values

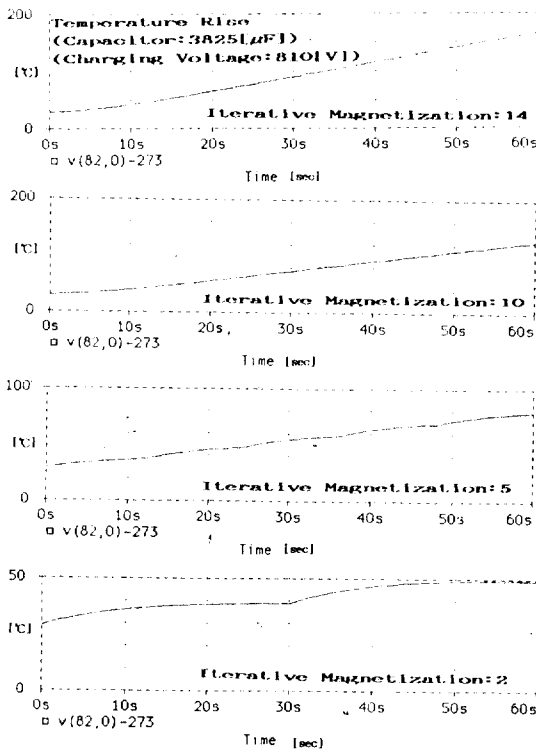
그림 6 충전전압을 변화시킨 경우의 온도특성

Fig. 6 Temperature characteristics in case of increasing charging voltage

알 수 있다. 특히 2회 착자시 장시간의 착자간격으로 발생된 열이 방출되어 온도상승이 지연되는 것을 알 수 있으며, 14회 착자시에는 착자요크의 절연체 한계온도인 200[°C]에 가까워지므로 이를 고려하여 충전전압, 착자횟수 및 냉각방법 등을 결정하여야 한다.



(a) Measured values



(b) Modeling values

그림 7 착자횟수를 변화시킨 경우의 온도특성
 Fig. 7 Temperature characteristics in case of increasing magnetization number

표 1 그림 7의 실측치와 모델링 결과의 비교
 Table 1 Comparison of measured values and modeling values of Fig.7

착자시간 : 60 [sec], 충전전압 : 810[V], 커패시터 용량 : 3825[μF]

착자횟수[회]	최 종 온 도 [℃]		
	실 측 결 과	모 델 링 결 과	오 차
2	48.2	49.2	1.0
5	75.4	78.9	3.5
10	129.5	126.5	3.0
14	167.5	164.3	3.2

5. 결 론

본 연구에서는 SPICE 프로그램을 이용하여 착자요크의 온도특성 고찰이 가능한 개선된 SPICE 저항모델을 제시하고 이 모델을 커패시터 방전 임펄스 착자요크에 적용하여 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

첫째, 본 SPICE 저항모델을 착자회로의 착자횟수 및 충전전압에 따른 온도변화에 이용하여 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

둘째, 기존의 경험에 의한 착자요크 설계시 소요되던 시간 및 비용을 절약할 수 있으리라 보며, 본 방법을 다른 종류의 착자요크에도 손쉽게 적용할 수 있으리라 판단된다. 또한 착자요크의 온도특성 해석시 기존의 설계 데이터를 참고로 하여 본 방법을 이용할 경우 착자요크의 효율적 설계에 큰 도움이 되리라 본다.

셋째, 반복착자에 따른 온도의 상승정도를 파악함으로써 영구자석의 대량생산을 위한 착자시스템 설계시 주변 냉각시설의 최적설계에 참고가 되리라 보며, 이와 병행하여 본 열전달 모델링을 보위·개선함으로써 좀더 정확한 온도특성 파악이 가능하리라 본다.

앞으로 본 연구를 기초로 하여 광범위한 수효가 예상되는 고성능의 극소형 회토류 자석을 착자하기 위한 착자요크 설계시 극소형 착자요크의 급격한 온도상승 등의 문제해결을 위한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] T. Nakata and N.Takahashi, "Numerical Analysis of Transient Magnetic Field in a Capacitor-Discharge Impulse Magnetizer," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, No.5, 1986

- [2] 中田高義, 他, “有限要素法によるパルス着磁機の過渡磁界解析”, 日本電氣學會回轉機研究會, RM-85-57(1985)
- [3] T. Nakata, et al, “Numerical Design Method for Magnetizer,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials 41, pp.418-420, 1984.
- [4] J. Kelly and E. Furlani, “The Optimization of Multipole Magnetizing Fixtures for High-energy Magnet,” J. Appl. Phys. 67(3), 1, 1990.
- [5] J. Kelly Lee, “The Analysis of a Magnetizing Fixture for a Multipole Nd-Fe-B Magnet,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 5, 1988.
- [6] G. W. Jewell, et al, “Simulation of Capacitor Discharge Magnetisation,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 26, No. 5, 1990.
- [7] Soo-Hyun Baek, Pill-Soo Kim, Tae-Bin Im, “Computer Simulation of a Capacitor Impulse Discharging Circuit,” International Symposium on Power Electronics(ISPE), 1992.
- [8] 백수현, 윤수봉, 김필수, “커패시터 방전 임펄스 착자기회로와 페라이트 자석의 착자 특성,” 1992년도 대한전기학회 하계학술회의 논문집, 1992.
- [9] 백수현, 김필수 등 “커패시터 방전 임펄스 착자기 및 착자요크 시스템의 정수산정에 관한 연구,” 동국대학교 대학원 연구논문집 제22집, pp.361-376, 1992.
- [10] D.L.Blackburn, et al, “Thermal characterization of power transistors,” IEEE Trans. on Elec. Dev., Vol. ED-23, No.8, pp.831-838, August 1976.
- [11] D.L.Blackburn, et al, “Power MOSFET Temperature Measurements,” 13th Annual IEEE PESC, pp.400-407, 1982.
- [12] R.S.Vogelsong, et al, “Simulation of Thermal Effects in Electrical Systems,” Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), pp.353-356, 1989.
- [13] E.Lu and G. Bronner, “Computer-Aided Methods of Determining Thyristor Thermal Transients,” IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.5, No.4, pp.616-623, 1990.
- [14] Steve Clemente, “Transient Thermal Response of Power Semiconductors to Short Power Pulses,” EPE, Vol. 2, pp. 434-438, 1991.
- [15] CH.Schaeffer, et al, “Thermal Simulation in Power Electronics,” APEC, pp.780-784, 1992.
- [16] J.McGloin and D. Sdrulla, “Estimating the Temperature Rise of Power MOSFETs during the UIS Test,” APEC, pp.448-453, 1992.
- [17] R. Le Doeuff and J. Robert, Modelling and Control of Electrical Machines : New Trends, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1991.
- [18] G.Karady and A. Mansoor, “Computer Model for Transient Voltage Suppressors,” APEC, pp.491-497, 1993.
- [19] Soo-Hyun Baek, Pill-Soo Kim, “Design and Analysis of Capacitor Discharge Impulse Magnetizer-Magnetizing Fixture System,” The 5th International Energy Conference (ENERGEX'93), 1993. 10.
- [20] 백수현, 김필수, 박영호, 함중걸, “영구자석 착자회로의 온도모델링,” 1993년도 대한전기학회 전력전자연구회 논문집, 1993.5.
- [21] 백수현, 김필수 등, “임펄스 착자요크 시스템의 온도특성에 관한 연구,” 1993년도 대한전기학회 하계학술회의 논문집(B), pp. 1098-1100, 1993.7.
- [22] J.G.Kassakian, et al, Principles of Power Electronics, Addison-Wesley, 1991, pp.693-712.
- [23] R.K.Sugandhi and K.K.Sugandhi, Thyristor Theory and Applications, John Wiley and Sons, New York, 1981, pp.25-32.
- [24] 백수현, 김필수 등, “온도특성을 고려한 착자회로 및 요크의 특성해석,” 1993년도 대한전기학회 추계학술회의 논문집, 1993.11.

저 자 소 개

백수현(白壽鉉)

전기학회 논문지 제43권 2호 참조.

김필수(金必洙)

전기학회 논문지 제43권 2호 참조.