

임펄스 착자요크 시스템의 온도특성에 관한 연구

백수현* 맹인재** 김용** 김필수*** 함증걸****

*동국대학교 전기공학과 ** 대림전문대 전기과 *** 충청전문대 전기과 **** 생산기술연구원

Temperature Characteristics of Impulsed Magnetizing Fixture System

S.H. Baek* I.J. Maeng* Y. Kim** P.S. Kim*** J.G. Ham****

* Dongguk Univ. ** Dae Rim Technical Col. *** Chungchoeng Col. **** KAITECH

ABSTRACT

In this paper, We found the thermal characteristic of impulsed magnetizing fixture system through the SPICE modeling and investigated the applied possibility in application aspects. As the detailed thermal characteristic of magnetizing fixture can be obtained, the efficient design of the magnetizing fixture which produce desired magnet will be possible using our thermal modeling.

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 modeling and experimental results are in close agreement.

1. 서론

현대산업사회가 발달함에 따라 영구자석의 사용도 급격히 증가하고 있으며, 영구자석의 생산시스템인 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템(Capacitor Discharge Impulse Magnetizer-Magnetizing Fixture System)에 대한 관심도 커지고 있는 실정이다. 이 시스템은 영구자석의 고성능화에 따라 사용되는 전원이 고전압, 대전류의 대용량이고 이러한 착자장치의 제작 및 시험에는 고가의 비용과 더불어 위험요소까지 내포하고 있으며, 더우기 다년간의 경험에 의하여 임펄스 착자기-착자요크 시스템이 설계되는 등 여러 문제가 되고 있다.¹⁻⁶⁾ 특히 임펄스 착자요크 시스템은 영구자석의 생산 품목 및 형태에 따라 고가의 제작비가 요구되며, 대량생산체제에 따른 반복착자가 급격한 온도상승 등을 유발시킴으로 이를 고려한 착자요크 시스템의 효율적 설계는 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 착자 시스템의 제작에 앞서 착자요크 시스템의 온도상승특성의 파악은 착자 시스템의 고장 및 수명단축 등의 문제를 크게 경감시킬 수 있는 가장 바람직한 방법이므로 이에 대한 정밀한 온도상승방법이 시급히 요구되고 있다.⁷⁻⁹⁾ 특히 SPICE 같은 각종 프로그램의 개발에 따라 열특성 산정방법에 이 프로그램을 도입하여 간단하고 용이하게 모델링하는 방법¹⁰⁻¹²⁾ 이 개발되고 있으며, 이러한 방법은 앞으로 더욱 확대될 전망이다.

따라서 본 연구에서는 임펄스 착자요크 시스템의 방전회로에서 온도상승이 발생할 수 있는 부분을 해석하고 그 적용모델을 제시하였으며, 특히 착자요크 저항이 온도상승의 주요인임을 입증하였다. 또한 자동차 에어 크리너용 직류 모터의 고정자 자석을 착자하는 요크를 시험대상으로 실측함으로써 우수한 특성을 얻었다.

2. 임펄스 착자요크 시스템

커패시터에 충전된 전원이 방전될 때 발생하는 대전류를 이용하여 강자계를 발생시켜 영구자석을 생산하는 임펄스 방전 착자기는 영구자석재질에 따른 방전전류 및 용도에 따른

착자요크의 형태에 따라 설계방법이 다르게 되며, 특히 착자요크 코일은 착자되는 자석의 재질 및 용도에 따라 굵기, 턴수 및 종류가 결정되므로 설계에서 매우 중요한 부분의 하나이다. 그림1은 커패시터 방전 착자회로를 등가회로화 한 것으로 방전스위치의 동작에 의하여 전압 V_0 로 충전된 커패시터뱅크 C 에서 대전류 I 가 착자요크 코일의 등가저항 R_f 및 등가 인덕턴스 L_f 에 흐르게 된다. 이 경우 Clamping Diode D 는 커패시터 전압이 부(負)로 떨어지는 것을 방지하여 단방향의 전류펄스가 흐르도록 하여 준다. 여기서 착자요크의 등가 임피던스 R_f 및 L_f 는 유한요소영역을 나타내고, R_i 및 L_i 는 유한요소영역 이외의 권선의 내부 임피던스를 나타내며, V_D 는 통전시 방전 스위치에 의한 전압강하이다. 본 연구에서는 방전 스위치로서 대용량 SCR을 사용하였다.

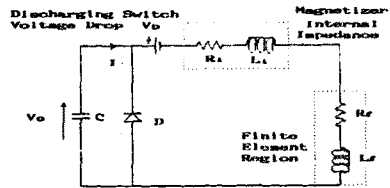


그림 1. 커패시터 방전 착자회로의 등가회로

그림1에서 대전류 I 가 순간적으로 방전될 때 방전회로의 여러 부분에 존재하는 임피던스에 의하여 열이 발생하며 이것은 온도상승의 요인이 되므로 이 문제의 해결은 착자요크 설계에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 그림1에서 방전전류에 의하여 온도상승이 발생할 수 있는 부분으로는 다음과 같은 세부분이 고려될 수 있다.

- Discharging Switch (SCR)
- Magnetizing Fixture (R_f)
- Clamping Diode (D)

여기서, 반도체 소자인 SCR 및 다이오드 D 에 비하여 착자요크는 방전전류 및 형상에 따라 온도상승의 정도가 가장 크므로 본 연구에서는 주로 착자요크에 의한 온도특성을 고찰하고자 한다.

3. 온도 특성 해석

3.1 방전 스위치용 SCR의 온도 특성 해석

고체물질에서의 일반적인 열전달식을 이용하여 반도체에 적용가능한 방전식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$P_D = \frac{\Delta T}{R_{\theta/jc}} \quad (1)$$

여기서, P_D 는 소비전력 [W], ΔT 는 열전달거리 L 에 대한 온도차로서, 예를들면 평균 반도체칩온도 T_J 와 케이스온도 T_C 사이의 차이이다. 또한 $R_{\theta JC}$ 는 소자 접점- 케이스의 열저항 [K/W]이다. 식(1)의 열저항 $R_{\theta JC}$ 는 열임피던스 $r_{\theta JC}(t)$ 를 이용할 경우 식(2)에 의하여 계산된다.

$$r_{\theta JC}(t) = R_{\theta JC} (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_{\theta}})) \quad (2)$$

여기서, τ_{θ} 는 반도체소자 접점-케이스의 열시정수이다. 식(1)의 소비전력 P_D 는 과도기간동안 손실되는 전력 P_0 로 대체될 수 있으며, 여기에는 $\Delta T(t) = P_0 \cdot r_{\theta JC}(t)$ 의 온도변화가 발생한다. 만약 P_0 가 상수가 아닐경우 일반적인 형태의 평균과도값 ΔT 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\Delta T = P_{avg}(t) \cdot r_{\theta JC}(t) \quad (3)$$

여기서, $P_{avg}(t)$ 는 시간 t 에서의 평균소비전력 [W]이다. 따라서 식(3)를 이용하여 소자의 평균소비전력을 구하고 제조업체에서 제공되는 열임피던스 $r_{\theta JC}(t)$ 를 구하여 소자의 온도를 구할 수 있다.

한편, 온도에 관한 SPICE 모델링 방법으로는 SCR의 애노우드 전류 I_A 와 애노우드-캐소우드 전압 V_{AC} 의 곱에 의하여 SCR의 소비전력을 구하고 여기에 열임피던스 $r_{\theta JC}(t)$ 를 곱하여 온도상승을 확인하였으며, SPICE 입력방법으로 테이블을 이용하였다. 또한 주변온도는 27[°C]를 기준으로 산정하였다. 표1은 SCR의 온도모델링에 관한 SPICE 입력화일을 나타낸 것으로 대상모델은 258RT180(일본 Inter Co.) SCR이며, 온도산정에 필요로 되는 파라미터를 상단에 함께 제시하였다.

표1. SCR의 온도모델링을 위한 SPICE 입력화일

```

Rth=0.11[K/W], tau=40[usec], Tenv=27[C]
Fixture Constants(R=0.024[ohm], L=0.1251[mH])
***** Calculation of SCR Junction temperature *****
=====
opint 501 0 value=(v(*)+i(*)^2)
cop 501 502 timeg
cop 502 503 iu ic=0
opint 0 503 0 502 imog
onave 505 0 value=(v(503)+i(503)^2)/timeg+1n)
ra 505 0 1k
et 510 0 value=((v(505)+i(505)^2)*77)
rt 510 0 1k
erjcsin 520 0 table (time)=
*(4.50001,2.499e-5) (4.50002,4.9987e-5)
*(4.50005,1.2492e-4) (4.5001,2.4986e-4)
*(4.5002,4.9872e-4) (4.5005,1.2422e-3)
*(4.501,2.485e-3) (4.502,4.877e-3) (4.505,0.01175)
*(4.51,0.02211) (4.52,0.03934) (4.55,0.07134)
*(4.6,0.09178) (4.7,0.09932) (5.0,0.09999)
rrjc 520 0 1k
=====

```

3-2 Clamping Diode D의 온도 특성 해석

다이오드의 온도의존성을 그림2와 같이 SPICE 내장모델의 다이오드 전류 및 커패시턴스로 표현된다. 이 경우 다이오드 전류 I_D 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$I_D = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_D}{N \cdot V_T - I}\right) \quad (4)$$

여기서, I_S 는 포화전류, V_T 는 Thermal Voltage를 나타내며 각각 식(5)와 식(6)과 같이 표현된다. 또한 V_D 는 접점 양단의 전압을 나타낸다.

$$I_S = I_{S0} \cdot \left(\frac{T_J}{T_0}\right)^{\frac{X_I}{N}} \cdot \exp\left\{\left(\frac{T_J}{T_0 - 1}\right) \cdot \frac{E_G}{N \cdot V_T}\right\} \quad (5)$$

$$V_T = K \frac{T_J}{q} \quad (6)$$

여기서, T_J 및 T_0 는 각각 접점온도 및 공칭온도를 나타낸다.

이 경우 다이오드의 소모전력 IP 는 식(7)과 같다.

$$IP = \frac{V_{RS}^2}{RS} + I_D \cdot V_D \quad (7)$$

여기서 RS 는 직렬저항이며 VR 는 그 양단의 전압이다.

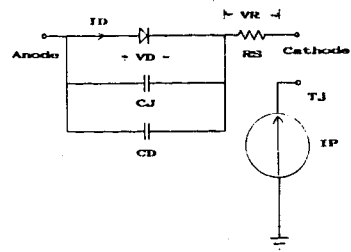


그림2. 온도 산정용 다이오드 모델

3.3 착자코일 저항의 R의 온도 특성 해석

일반적으로 표준 SPICE 프로그램에서 저항모델은 식(8)과 같은 일정한 콘덕턴스로서 정의된다.¹¹⁾

$$IR = \left(\frac{1}{R}\right) \cdot VR \quad (8)$$

여기서 R 은 저항이며, IR 은 전류, VR 은 전압을 나타낸다.

식(8)은 식(9)를 이용하여 시뮬레이션 초기에 미리 설정된다.

$$R = R_0 \cdot (1 + TC1 \cdot (T1 - T0) + TC2 \cdot (T1 - T0)^2) \quad (9)$$

여기서, R_0 : 공칭전압, $TC1$ 및 $TC2$: 온도계수, T_0 : 공칭온도, $T1$: 조정온도

식(8)의 콘덕턴스가 순시적으로 자동반복되어 조절되어 실제의 영향을 좀 더 반영할 수 있도록하기 위하여 식(10)과 같은 지수함수를 정의할 수 있다.

$$IR = \left(\frac{1}{R_0}\right) \cdot \left(\frac{T_J}{T_0}\right)^{-TE} \cdot VR \quad (10)$$

여기서 T_J 는 접점온도이며 TE 는 온도지수이다.

이 경우 저항의 소비전력 IP 는 식(11)과 같이 나타낸다. 그림2는 식(7)이 반영된 새로운 저항모델을 나타낸다.

$$IP = \left(\frac{V_{RS}^2}{R_0}\right) \cdot \left(\frac{T_J}{T_0}\right)^{-TE} \quad (11)$$

그림3은 식(10)의 온도특성이 반영된 저항 모델을 나타낸다.

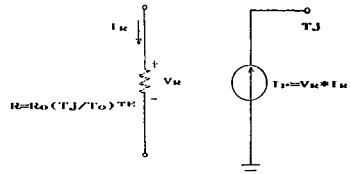


그림3. 온도산정용 저항모델

4. 온도 특성 고찰

4-1 방전스위치용 SCR의 온도특성

그림4는 자동차용 에어 크리너 직류 모터의 고정자 자석을 착자하는 요크(동가 저항 $R=0.024[\text{ohm}]$, 동가 인덕턴스 $L=0.1251[\text{mH}]$)를 대상으로 방전시켰을 경우의 방전스위치용 SCR의 온도특성을 나타낸 것이다. 이 경우 커패시터 용량은 $3825[\mu F]$, 충전전압 $810[V]$ 에서 시뮬레이션 되었다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 SCR의 게이트 전압을 나타내며, 그림4(c)는 열임피던스를 나타낸 것이다. 또한 그림4(d)와 (e)는 각각 소모전력 및 상승온도를 나타낸 것으로, $68[W]$ 의 소모 전력으로 약 $6.5[^\circ C]$ 의 온도상승이 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서는 대용량 SCR을 사용한 관계로 온도상승의 정도는 그다지 크지 않으나 고성능 연구자석의 생산을 위하여 방전 전류가 커질 경우에는 적절한 크기의 방열판 부착을 통하여 발생된 열을 방출시켜야 한다.

4-2. Clamping Diode D의 온도특성

그림5는 4.1항과 같은 조건으로 그림2의 다이오드 모델을 이용하여 Clamping Diode의 온도 특성을 나타낸 것이다. 그림5(a)는 방전전압을 나타내며, 그림5(b) 및 (c)는 각각 방전전류 및 상승온도를 나타낸 것이다. 이 경우 약 710[A]의 방전전류로 인하여 약 10.1[°C]의 온도상승이 발생함을 알 수 있다. 본 연구의 경우 시험 모델은 Motorola Co.의 MR752를 이용하였다.

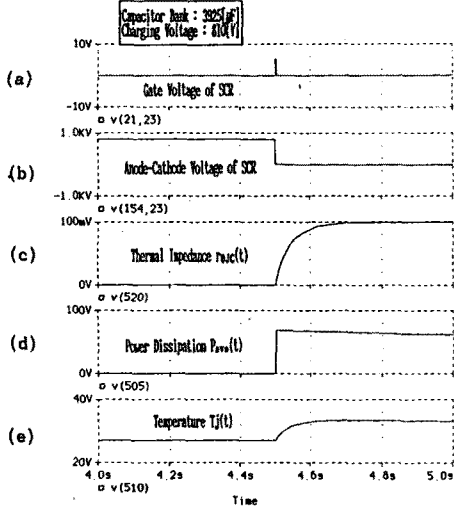


그림4. 방전스위치용 SCR의 온도특성

4.3 착자코일 저항 R의 온도 특성 해석

그림6은 역시 4.1항과 같이 커패시터 용량 3825[μF], 충전 전압 810[V]에서 60[sec]동안 연속 14회 착자시의 착자코일의 온도상승을 나타낸 것이다. 그림6(a)의 경우는 시뮬레이션 파형을 나타내며, 그림6(b)는 실측의 경우를 나타낸다. 그림6(a)의 경우 14회의 연속 착자에 따른 방전전류를 알 수 있으며, 이에 따라 최종 163[°C]에 이르러 실측의 170[°C]와 약 7[°C]의 오차를 나타내는 것을 알 수 있다. 본 연구의 경우 착자코일의 한계온도인 200[°C]를 고려하여 실측하였다.

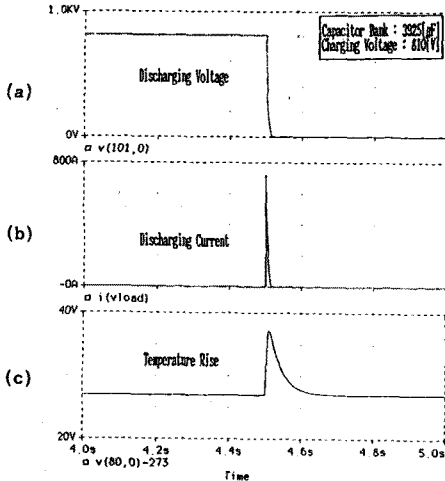


그림5. Clamping Diode D의 온도 특성

그림6(a)의 시뮬레이션의 경우, 온도파형이 맥동하는 이유는 착자코일의 온도가 열전대로 전달되는 과정의 모델링이 R-C회로 2단계로 되어 있는 관계로 중, 방전 특성으로 인한 맥동이라 생각된다. 따라서 실측치에 더욱 가까운 결과를 얻기 위해서는 중간 매개체의 재료에 따른 R-C회로를 더

욱 많은 다단 형태로 설계되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 임펄스 착자코일 시스템의 방전회로에서 온도상승요인을 관찰하고 해석방법을 제시하였으며, SPICE 프로그램에 적용하여 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

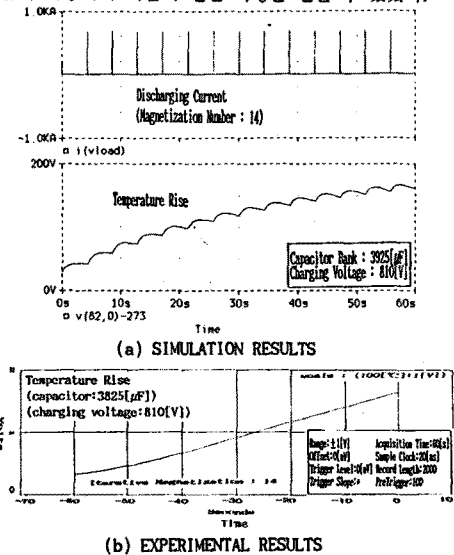


그림6. 착자코일 저항 R의 온도 특성

1. 임펄스 착자회로의 방전회로에서 발생할 수 있는 온도상승요인을 모두 관찰하였다. 이 중 임펄스 착자코일이 가장 큰 온도상승 요인임을 확인할 수 있었다.
2. 임펄스 착자코일의 온도상승은 실측치와 비교함으로써 본 모델의 우수성이 입증되었다.
3. 본 착자코일의 반도체 소자에 적용된 해석방법은 다른 반도체 소자에도 확대적용할 수 있으리라 본다.
4. 앞으로 다극착자에 의한 요크설계에 적용 가능한 온도해석이 개발되어야 한다고 본다.

참고 문헌

- [1] 中田高義, 他, "有限要素法によるパルス着磁器の過渡磁界解析", 日本電氣學會回轉機研究會 RM-85-57(1985).
- [2] 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.
- [3] T.Nakata, et al, "Numerical Design Method for Magnetizers", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 41, P418-420, 1984.
- [4] G.W.Jewell, et al, "Simulation of Capacitor Discharge Magnetisation", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.26, No.5, 1990.
- [5] Soo-Hyun Back, Pill-Soo Kim and Tae-Bin Im, "Computer Simulation of Capacitor Impulse Discharging Circuit", ISPE'92, April 9-11, 1992.
- [6] 백수현, 윤수봉, 김필수, "커패시터 방전 임펄스 착자기회로와 페라이트 자석의 착자특성", 1992년도 대한전기학회 하계학술회의 논문집, 1992.
- [7] J.Kelly and E.Furlani, "The Optimization of Multipole Magnetizing Fixtures for High-energy Magnet", J. Appl.Phys. 67(3), 1, 1990.
- [8] 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.
- [9] 백수현, 김필수 등, "커패시터 방전 임펄스 착자기 및 착자코일 시스템의 정수산정에 관한 연구", 동국대학교 대학원 연구논문집 제22집, pp.361-376, 1992.
- [10] D.L. Blackburn, et al, "Power MOSFET Temperature Measurements", 13th Annual IEEE PESC, pp.400-407, 1982.
- [11] R.S Vogelsong, et al, "Simulation of Thermal Effects in Electrical Systems", APEC, pp.353-356, 1989.
- [12] G.Karady and A.Mansoor, "Computer Model for Transient Voltage Suppressors", APEC, pp.491-497, 1993.
- [13] 백수현, 김필수, 박영호, 함중걸, "연구자석 착자기회로의 온도모델링", 1993년도 대한전기학회 전력전자연구회 논문집, 1993.5.