

2[MVA] 배전용 몰드변압기의 글라스넷 형상 최적설계

(Optimum Design of Glass Net in 2[MVA] Mold Transformer)

전문호* · 김창엽**

(Mun-Ho Jeon · Chang-Eob Kim)

Abstract

In this paper, the optimum design of the glass net shape was studied to minimize the electric field of mold transformer. The glass net is used for reinforcement in structure between coils and epoxy, but it can cause to increase the electric field and the partial discharge. Therefore, the optimum design of glass net is required to minimize the electric field. In this paper, the objective function was approximated by using response surface method and then Zoom-in method was used for optimal design to minimize the electric field. The electric field was analysed using finite element method for each shape of glass nets.

Key Words : Glass-net, Electric Field, Response Surface Method, Zoom-in Method, FEM

1. 서 론

몰드변압기는 내부의 고압 및 저압 권선 주위에 전기적 특성이 우수한 에폭시 수지를 고진공으로 침투시키고 다시 그 위에 기계적 강도가 큰 에폭시 수지로 몰딩하는 방식이다. 몰드변압기에 사용되는 에폭시 수지는 열 경화시 가스발생과 반응수축이 적고, 기계적 전기적 특성이 우수하여 금속에 대한 접착성이 강하고 내열성, 내수성, 내진성이 우수한 장점이 있으나, 뇌 임펄스 전압에 취약한 단점을 가지고 있다[1-2].

몰드변압기는 철심과 권선을 기본구조로 형성된다.

권선은 에폭시 수지로 둘러싸여 있으며, 권선을 감기 위한 기계적 구조물인 글라스넷이 삽입된다. 글라스넷은 권선을 감기위한 구조적인 면에서 필요로 하지만 전계를 증가시키는 요소로 작용한다. 전계가 증가하면 부분방전 및 크랙이 발생할 가능성이 높아지기 때문에 글라스넷의 전계가 최소가 되는 최적설계가 필요하다. 본 논문에서는 반응표면법을 사용하여 목적함수를 근사화하고 여기에 Zoom-in법을 사용하여 글라스넷을 최적화 하였다. 또한 최적화된 글라스넷의 형상은 유한요소법을 이용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 3상 2[MVA] 배전용 몰드변압기의 해석

* 주저자 : 호서대학교 대학원 전기공학과 졸업

** 교신저자 : 호서대학교 전기공학과 교수

Tel : 041-540-5667, Fax : 041-540-5668

E-mail : cekim@hoseo.edu

접수일자 : 2010년 11월 9일

1차심사 : 2010년 11월 12일

심사완료 : 2010년 12월 8일

2[MVA] 배전용 몰드변압기의 글라스넷 형상 최적설계

모델이다. 해석은 1상만을 고려하였으며, 입력전압은 고압 22.9[kV], 저압 380[V]이다. 고압은 총 939턴으로 11개의 섹션으로 나누어져 있고, 저압은 총 9턴이 감겨져 있다[3]. 코일과 코일 사이에는 PET필름으로 절연되어져 있고, 에폭시로 몰딩되어 있다. 여기서 에폭시의 비유전율은 4.2, PET필름은 2.3이다. 그림 2는 이차원 전계해석 결과로 고압측 첫 번째 섹션과 에폭시 사이에서 최대 전계가 발생하였다. 그림 2 (a)는 글라스넷이 있는 경우, (b)는 글라스넷이 없는 경우의 해석결과로 최대전계는 각각 0.173[kV/mm], 0.304 [kV/mm]이며, 글라스넷이 없는 경우보다 있는 경우에 약 70[%] 가량 최대전계가 증가하는 것을 볼 수 있다.

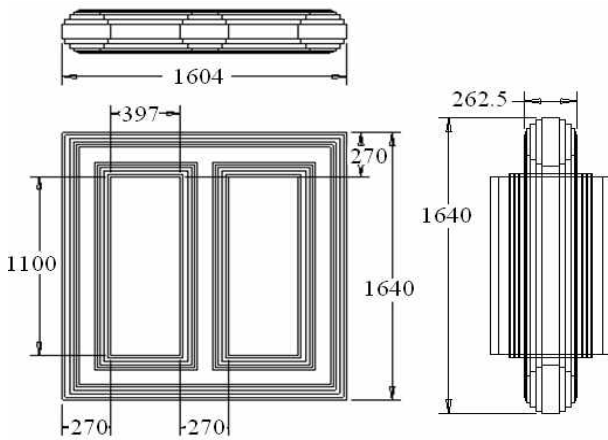


그림 1. 2[MVA] 몰드변압기 외형도
Fig. 1. Outline of 2[MVA] mold transformer

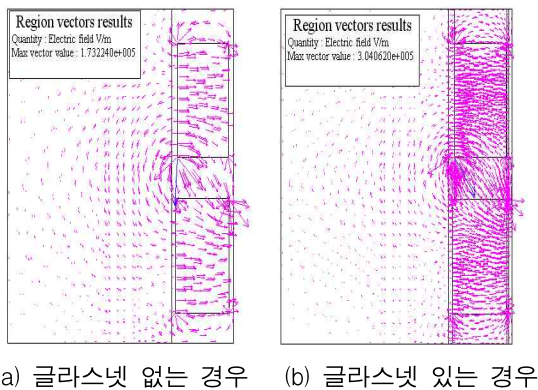
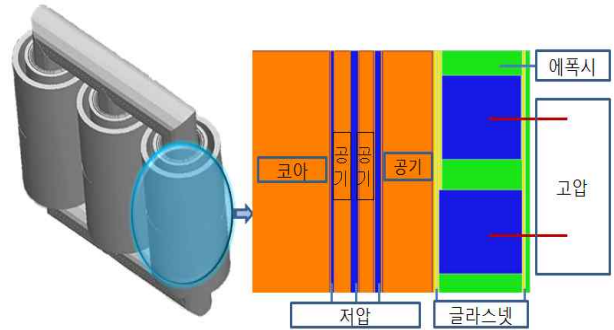
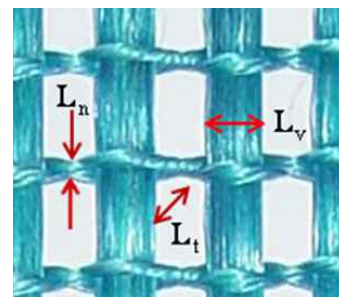


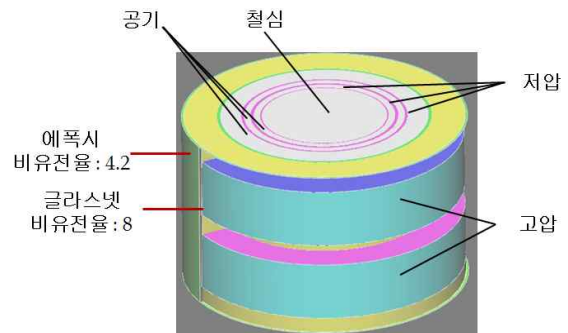
그림 2. 2차원 전계해석
Fig. 2. Analysis of electric field (2-d)



(a) 해석 모델



(b) 글라스넷



(c) 3-d 해석 모델

그림 3. 몰드변압기 해석모델과 글라스넷
Fig. 3. Mold transformer and glass net

그림 3 (a)는 몰드변압기 해석 모델이고, (b)는 글라스넷으로 고압코일의 안쪽과 바깥쪽에 감기게 된다. 글라스넷은 코일을 감을 때 발생하는 변형 및 절연을 위해 사용되며, 비유전율은 8이다. 글라스넷의 형상은 그물모양으로 이루어져 이차원의 경우 글라스넷의 정확한 형상을 구현하기 어렵기 때문에 삼차원 해석을 수행하였다. 여기서 L_n 은 폭, L_v 는 길이, L_t 는 두께를 나타낸다. 그림 3 (c)에 3차원 해석모델을 나타내었고,

결과는 그림 4에 나타내었다. 해석 결과 최대 전계는 0.294[kV/mm]로 이차원 해석과 같은 부분인 코일과 에폭시 사이에서 발생하였다.

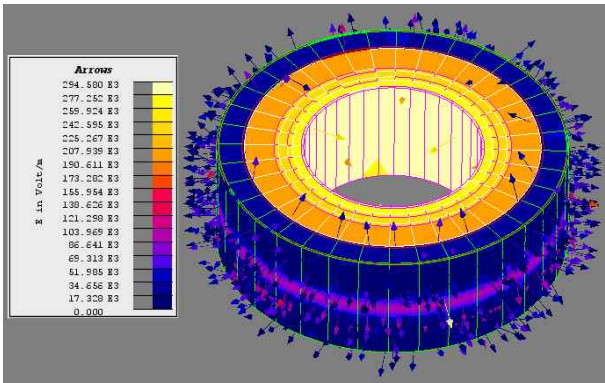


그림 4. 3차원 전계해석
Fig. 4. Analysis of electric field(3-d)

2.2 반응표면법과 Zoom-in을 이용한 글라스넷 최적설계

본 논문에서는 반응표면법과 Zoom-in을 이용하여 글라스넷을 최적설계 하였다. 반응표면법은 전체 설계공간에 걸쳐 있는 여러 변수 값들을 복합적으로 적용하여 어떤 반응에 영향을 주고 있을 때 이들의 입력과 출력의 대응관계를 근사적으로 표현하는 반응표면을 생성하여 새로운 입력에 대한 근사적 결과를 얻어내는 실험계획법이다[4]. 또한 반응표면법은 설계변수공간에서 제한된 개수의 표본점을 이용하여 목적함수를 보간하는 방법으로 다항식을 이용한 보간법 등 다른 방법에 비해 적은수의 표본점으로 목적함수를 보간 할 수 있다[5-6]. 설계변수 공간에서 목적함수가 보간되면 유전알고리즘 등 최적화 기법을 사용하여 목적함수를 최소로 하는 최적설계 해를 구할 수 있다. 그러나 이 결과는 데이터가 충분히 많은 경우에는 설계변수 공간 전역에서 목적함수가 적절히 보간되기 때문에 적절하지만, 실제 문제에서는 충분히 많은 표본 데이터를 확보하기가 어렵기 때문에 최소의 표본 데이터를 이용하여 최적설계를 구할 수 있는 전략이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 초기의 표본점을 정의하고 유한요소법을 이용하여 각각의 표본점을 계산

해 데이터를 구성하여 반응표면법에 사용하였다. 반응표면에 대하여 목적함수가 최소화 되는 최적설계를 한후, 이 최적설계점을 중심으로 설계변수 공간을 1/3로 줄인 범위에서 Zoom-in을 사용하여 새로운 표본점을 추가로 발생시켰다. 1/3로 줄어든 설계변수 범위에서 목적함수가 최소가 되는 해를 구하는 것을 반복 수행하였다. 여기서 해가 변하지 않을 때를 수렴한 것으로 간주하였다. 그림 5는 최적화 알고리즘의 흐름도이다.

반응표면을 표현하는 근사함수를 효과적이고 용이하게 구하는 방법을 실험계획법이라 하는데 중심합성법, 요인설계법, 회전계획법, box-behnken법 등이 있다[7-8]. 본 논문에서는 표본점을 생성하기 위해 중심합성법을 사용하였다. 중심합성법에 의해 생성되는 표본점의 수는 식 (1)과 같다.

$$N_s = 2^k + 2k + 1 \quad (1)$$

여기서 k 는 설계변수의 개수를 나타낸다. 본 논문에서 사용된 설계변수의 개수는 3개로 생성되는 표본점의 수는 15개이다. 그림 6은 설계변수가 2개인 경우에 생성되는 표본점을 나타낸 것으로 1차 초기 점에 의해 최적점이 발생하였을 때 Zoom-in을 사용하여 2차 초기 점을 발생시켰다.

설계변수는 글라스넷의 폭, 길이, 두께로 하였으며 제약조건으로는 글라스넷의 부피가 0.5[mm³]이하가 되도록 하였다. 또한 글라스넷의 두께는 인장강도 등을 고려하여 0.5[mm] 이상이 되도록 하였다. 초기 글라스넷의 폭, 길이, 두께는 각각 1.2[mm], 3.8[mm], 1.5[mm]이다. 목적함수는 글라스넷의 전계가 최소가 되도록 하였으며, 식 (2)에 글라스넷의 목적함수와 설계변수의 범위를 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수} &: \text{최소전계} \\ \text{변수} &: 0.5 \leq L_n \leq 2.0 \\ &: 2.0 \leq L_v \leq 6.0 \\ &: 0.5 \leq L_t \leq 1.5 \end{aligned} \quad (2)$$

2[MVA] 배전용 몰드변압기의 글라스넷 형상 최적설계

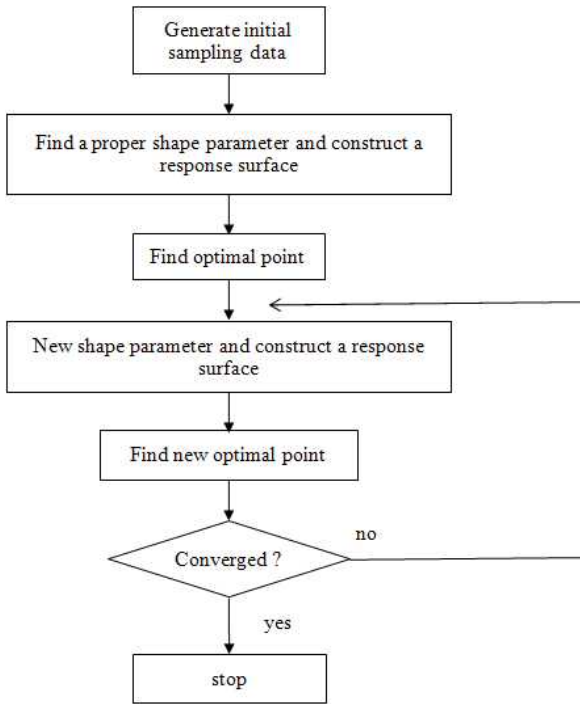


그림 5. 최적화 알고리즘 흐름도
Fig. 5. Flow chart of optimization algorithm

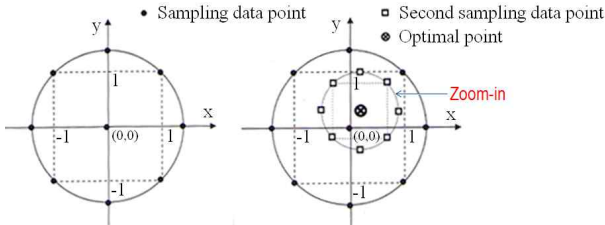


그림 6. 중심합성법에 의한 표본점
Fig. 6. Central composite design

2.3 해석결과

초기 변수의 범위에서 전계가 최소가 되는 해를 찾고, 그 해로부터 변수의 범위를 Zoom-in을 이용하여 해석한 결과 글라스넷의 폭, 길이, 두께는 각각 1.5[mm], 2.3[mm], 0.5[mm]로 0.257[kV/mm]의 전계값을 얻었다. 그림 7은 Zoom-in을 이용하여 해석한 설계변수의 변화로, 4번의 반복수행으로 설계변수가 변하지 않았다. 그림 8은 두께를 0.5[mm]로 두고 폭과 길이의 설계변수에 대한 반응표면을 나타낸 것이다.

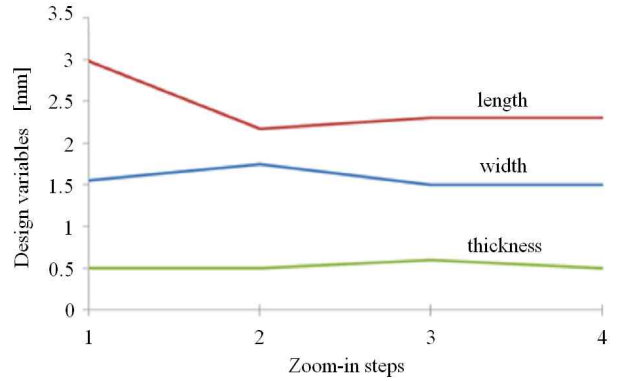


그림 7. Zoom-in에 의한 설계변수
Fig. 7. Design variables vs. Zoom-in steps

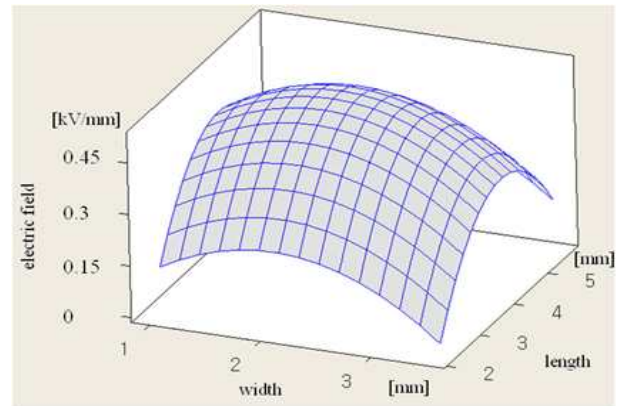


그림 8. 설계변수에 따른 반응표면
Fig. 8. Response surface of design variables

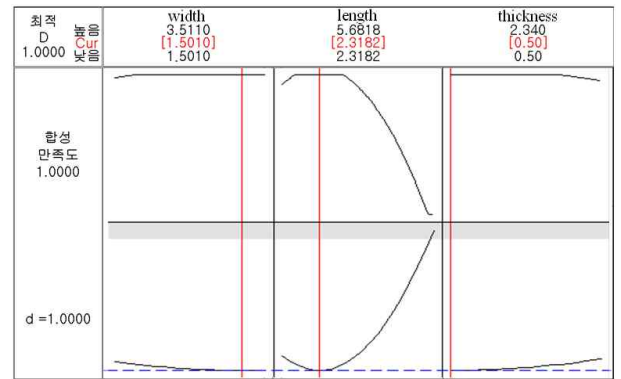


그림 9. 설계변수에 따른 반응최적화
Fig. 9. Response optimization of design variables

그림 9에서 d는 최소화 할수록 좋은 반응변수에 대한 개별만족도이다. 반응변수가 목표값에 가까울수록

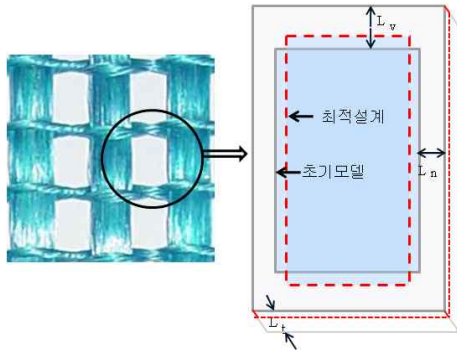


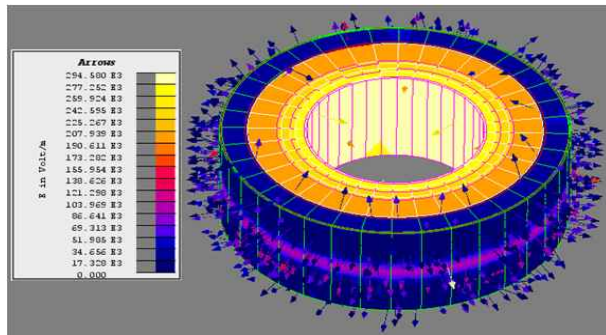
그림 10. 최적설계된 글라스넷 형상
Fig. 10. Optimum design of glass net

개별 만족도는 1이 되고, 반응변수가 큰 수에 가까울수록 개별만족도 d는 0이 된다. 그림 9에서 개별만족도는 1이므로 합성된 만족도 역시 1이 된다. 반응최적화 결과 글라스넷의 폭, 길이, 두께는 각각 1.5[mm], 2.3[mm], 0.5[mm]로 나타났다. 그림 10은 최적설계된

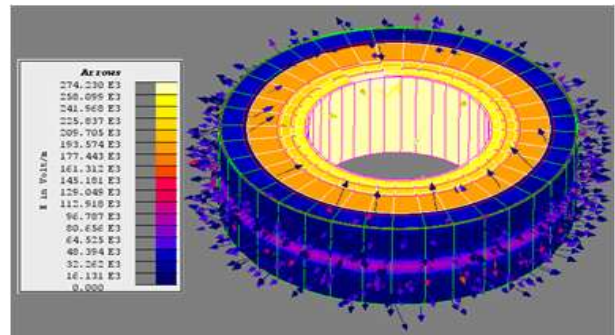
글라스넷 형상을 나타낸 것이고, 그림 11은 글라스넷 형상에 대한 초기모델과 반응표면법과 Zoom-in을 사용한 결과를 해석한 것이다. 표 1은 글라스넷 설계변수 범위가 Zoom-in에 의해 변화한 해석결과로, 초기모델과 최적모델은 각각 0.294[kV/mm], 0.257[kV/mm]로 최대전계에서 약 10[%] 감소하였다.

표 1. 글라스넷 설계변수와 전계
Table 1. Optimizing variables of glass net and electric field

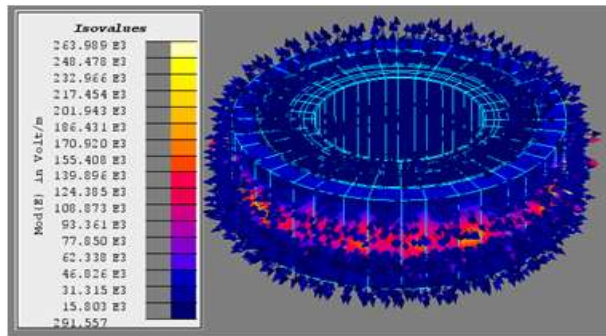
| 모델 | 설계변수([mm]) | | | 전계 ([kV/mm]) |
|----------|------------|------|-----|-----------------|
| | 길이 | 폭 | 두께 | |
| 초기모델 | 1.2 | 3.8 | 3 | 0.294 |
| 최적설계(1차) | 1.55 | 2.98 | 0.5 | 0.274 |
| 최적설계(2차) | 1.75 | 2.17 | 0.5 | 0.264 |
| 최적설계(최종) | 1.5 | 2.3 | 0.5 | 0.257 |



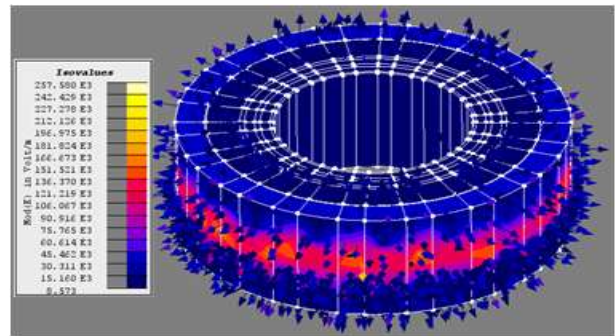
(a) 초기모델



(b) 최적설계(1차)



(c) 최적설계(2차)



(d) 최적설계 모델

그림 11. 초기모델 및 최적설계 모델에 대한 전계해석
Fig. 11. Electric field analysis of initial and optimized design

3. 결 론

본 논문은 몰드변압기의 글라스넷에 의해 증가하는 전계를 줄이기 위한 글라스넷의 최적설계를 제안하였다. 반응표면법과 Zoom-in을 사용하여 글라스넷의 형상을 최적설계하였고, 설계된 글라스넷은 유한요소 전자기 해석 프로그램인 flux-3d를 사용하여 검증하였다. 전계감소를 위해 글라스넷의 폭, 길이, 두께를 변수로 하여 반응표면법과 Zoom-in을 사용한 결과 기존 모델의 경우보다 최적설계된 모델에서 약 10[%]의 전계를 감소시킬 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2006년 호서대학교 학술연구조성비로 수행된 결과임.

References

- [1] Linden W.Pierce, "Specifying and Loading Cast-Resin Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.29, no.3, pp.590-599, 1993.
- [2] 장성규, 정용기, 광희로, "지하철 변전실용 진공주형형 몰드변압기의 난연성 확인에 관한 연구", 조명 전기설비학회논문지, vol.12, no.2, pp.99-107, 1998.
- [3] 김창업, 전문호, 이석원, "2[MVA] 몰드변압기 절연물내 기포 영향을 고려한 전계해석", 한국조명전기설비학회논문지, vol.24, no.4, pp.177-184, 2010.
- [4] 박정선, 전용성, 임종빈, "중심합성법에 의한 구조최적화에서 회귀함수변화의 영향", 한국항공전자학회지, vol.33, no.1, pp.26-32, 2005.

- [5] Chang-Eob Kim, Mun-Ho Jeon, Dong-Hun Kim, "Optimum Design of BLDC Motor for Cogging Torque Minimization Using Genetic Algorithm and Response Surface Method", KIEE Journal of Electrical Engineering & Technology, vol.1, no.4, pp.466-471, 2006.
- [6] Sang-Joon Han, Se-Hee Lee, Joon-Ho Lee, and Li-Han Park, "Nanometer-Scale electric Field Analysis by Sub-Window Zooming-In Technique", IEEE transactions on Magnetics, vol.40, no.2, pp.1378-1381, 2004.
- [7] X.K.Gao, T.S.Low, Z.J.Liu, and S.X.Chen, "Robust Design for Torque Optimization Using Response Surface Methodology", IEEE Transaction on Magnetics, vol.38, no.2, pp.1141-1144, 2002.
- [8] Frederic Gillon and Pascal Brochet, "Screening and Response Surface Method Applied to the Numerical Optimization of Electromagnetic Devices", IEEE Transaction on Magnetics, vol.36, no.4, pp.1163-1167, 2000.

◆ 저자소개 ◆



전문호(全汶鎬)

1976년 12월 11일생. 2002년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).



김창업(金昌業)

1960년 1월 1일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성중공업기술연구소 책임연구원. 2001년 8월~2010년 8월 Duke

University Visiting Ccholar. 1997년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.