

# 분전반 모선에 의해 발생하는 극저주파 자기장 저감을 위한 차폐판 최적 설계

論 文
58-1-10

## Optimum Design of a Shield Plate to minimize Extremely-Low-Frequency Magnetic Fields produced by Bus Bars

鄭起宇\*·崔洛善\*·金東勳<sup>†</sup>·張樂元\*\*·李東映\*\*\*

(Gi-Woo Jeung · Nak-Sun Choi · Dong-Hun Kim · Nakwon Jang · Dong-Young Lee)

**Abstract** - This paper deals with the optimal design of a shield plate in order to minimize Extremely-Low-Frequency(ELF) magnetic fields generated from three-phase bus bars. Combining an evolutionary strategy with a 3D finite element analysis tool, the main dimensions of the shield plate are sought out. The optimization procedure consists of two separated design stages to take into account all foreseen structures of the plate. In the first stage, the basic dimensions of the plate are optimized including the distance between the plate and the bus bars. Then the usefulness of the additional structures such as a slit and fillet is investigated in the second stage. Finally the optimum design of the shield plate is suggested from the viewpoint of the shielding effectiveness and manufacturing cost.

**Key Words** : Finite Element Method, Optimization, Evolutionary Strategy, Magnetic Shielding

### 1. 서 론

1979년 소아백혈병 발생 위험성과 극저주파(extremely-low-frequency) 자기장에 대한 상관관계를 추론하는 워디머(Wertheimer)와 리퍼(Leeper)의 논문 발표 이후에 극저주파 자기장에 관한 후속연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 인체에 미치는 영향에 관한 과학적인 근거가 명확하게 규명되지 않아 극저주파 자기장의 유해성 논란이 계속 되고 있다. 2005년 6월 세계보건기구(World Health Organization; 이하 WHO)는 극저주파 자기장에 대한 보호대책(protective measure)의 일환으로 전자파가 무해하다는 증거가 있을 때까지 사전 예방적 접근방법을 중간정책으로 채택하여 각 국가별로 극저주파 자기장 저감을 위한 조치를 취하도록 권고하고 있다. 이런 조치의 일환으로 이미 일부 선진 국가에서는 법으로 전자파 노출을 엄격히 제한하거나 자기장 발생원을 주거지로부터 최대한 이격하는 사전 예방적 정책을 채택하고 있다. 이와 같이 전 세계적으로 자기장에 관한 규정 강화로 자기장 차폐에 대한 중요성이 점차 증대되고 있는 실정이다[1],[2].

국내에서도 각 전력시설의 자기장 노출량 조사 및 인체에 미치는 자기장 영향 분석을 위한 연구가 수행되고 있을 뿐만 아니라, 사회적으로도 자기장 노출에 대한 관심이 점차 증대되고 있다. 발전소나 고압변전 시설의 경우에는 주거지역과

충분한 거리를 유지하고 있어 자기장의 영향이 극히 미약하나 현재 공장 및 일반 주거지역에 이미 설치된 각종 전력 장치 및 시설에 대한 극저주파 자기장 보호대책은 미흡한 실정이다. 특히 분전반 모선(bus bar)은 일반 가정 및 공장에서 사용하는 각종 전기기기 및 전력소자에 전원을 분배하는 장치로 공장 및 주거환경으로부터 가까운 곳에 위치하는 특성을 지닌다. 일반적으로 분전반에 흐르는 모선 대전류는 주위에 극저주파 자기장을 발생시키므로 WHO의 권장 안을 만족시켜야 하나, 공장 및 주거지역으로부터 충분한 이격거리를 고려하여 분전반을 설치하는 것은 장치의 특성상 현실적으로 불가능하다. 따라서 다양한 분전반 환경에서 사용이 가능하고 충분히 자기장을 감쇄시킬 수 있는 자기차폐에 대한 연구가 요구된다.

이런 연구의 일환으로 본 논문에서는 3상 모선으로부터 발생하는 극저주파 자기장을 최소화할 수 있는 최적의 차폐판 구조를 제안한다. 우선 그림 1과 같이 지하 분전반이 설치된 주거지를 연구모델로 선정하였다. 분전반 모선으로부터 발생하는 자기장은 1층 침실 바닥면에서 그림 2와 같은 자속밀도 분포를 나타내며 모선 바로 위쪽에서 가장 큰 자속밀도 분포 특성을 갖는다. 모선으로부터 1층 침실에 야기되는 자기장을 효과적으로 줄이기 위하여 알루미늄 재질의 상판, 측판으로 구성된 차폐판을 초기 설계모델로 설정하였다(그림 4 참조). 모선에서 발생하는 공간 자기장을 최소화하기 위한 최적의 차폐판 치수를 도출하기 위하여 확률론적 최적화기법인 진화알고리즘(evolutionary strategy)을 정밀 3차원 유한요소 해석이 가능한 상용 전자장 해석도구인 MagNet과 연계하였다[3]. 진화알고리즘의 특성 상 동시에 많은 설계변수를 설정하여 최적화 과정을 수행하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 그림 3에서 제시한 바와 같이 순차적인 2단계 설계과정을 통해, 차폐판의 최적 치수를 도출하였다[4],[5]. 1단계 설계 과정에서는 모선으로부터 차폐판의 위치 및 차폐판 구조를 결정하

\* 準會員 : 慶北大學校 電氣工學科 碩士課程

\*\* 正會員 : 海洋大學校 電氣工學科 助教授

\*\*\* 正會員 : 威德大學校 電氣工學科 教授

† 교신저자, 正會員 : 慶北大學校 電氣工學科 助教授 · 工博

E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr

接受日字 : 2008年 8月 14日

最終完了 : 2008年 11月 25日

는 6개의 설계변수에 대한 최적 치수를 결정하였다. 이를 바탕으로 2단계 설계 과정에서는 차폐판에 도입한 슬릿구조와 상/측판의 연결 부분에 적용된 라운딩(rounding) 형상에 대한 치수 최적화가 진행되었다. 최종적으로 사용한 재료량 및 가공성 등의 현실적인 제한 조건을 고려하여 모션으로부터 발생하는 극저주파 자기장 저감을 위한 최적의 차폐판 구조를 제시하였다.



그림 1 분전반이 설치된 주거 환경  
Fig. 1 Residential environment with bus bars

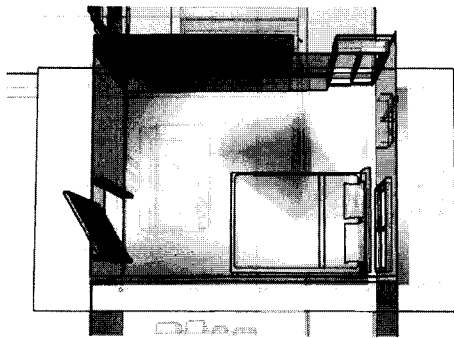


그림 2 1층 바닥 자기밀도 분포도  
Fig. 2 Magnetic flux density distribution on the 1st floor

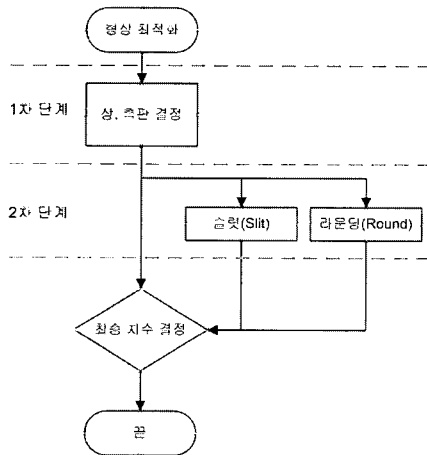


그림 3 최적 치수 설계 순서도  
Fig. 3 Flowchart of dimension optimization

## 2. 차폐판 최적 구조 설계

저주파 영역에서 공간상에 존재하는 자기장은 주로 전류에 의해 발생되며 이때 차폐판은 전류원과 측정점 사이에 삽입되어 자기장의 흐름을 변경하거나 감쇄시키는 원리를 이용하여 공간 자기장을 차폐시키는 역할을 하게 된다. 차폐판 재질은 자기장을 만드는 전류 흐름의 형태, 주파수 성분 및 차폐 목적에 따라 결정되며 동일 재질을 이용한 최상의 차폐 성능을 구현하기 위해서는 차폐판의 구조에 대한 최적설계가 요구된다. 일반적으로 밀폐된 공간에서는 철과 같은 높은 투자율을 가지는 재질을 사용하여 공간 자기장이 차폐판에 평행하게 흐르도록 자속의 흐름을 바꾸어 주는 것이 효과적이다. 반면, 개방된 공간에서는 알루미늄과 같은 높은 전도도를 가지는 물질을 사용하여 차폐판에 생성되는 와전류에 의한 2차 자기장을 이용하여 기존 공간 자기장 성분을 감쇄시키는 방식이 효과적이다[6]. 차폐판 삽입에 따른 차폐효과(shielding effectiveness: 이하 SE)는 공간상의 한 점에서 차폐 조건에 따라 변화는 자속밀도의 비를 통하여 식 (1)과 같이 정량적으로 표현된다[7-9].

$$SE = 20 \log_{10} \left[ \frac{B_0(x, y, z)}{B_{shielded}(x, y, z)} \right] \quad (1)$$

여기서,  $B_0$ 는 차폐판이 없는 경우의 자속밀도의 크기이며  $B_{shielded}$ 는 차폐판이 있는 경우의 자속밀도의 크기이다.

### 2.1 설계모델 정의

모션으로부터 생성되는 공간 자기장 분포를 정확히 예측하기 위해 차폐판, 모션, 인입선으로 구성된 3차원 유한요소 모델을 그림 4와 같이 구축하였다. 3차원 모델의 유한요소 해석은 2차원 모델에 비해 해석시간이 증가하지만, 차폐판의 3차원 구조 및 이에 대한 누설 자속의 영향을 함께 고려할 수 있어 해석 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있다[10].

유한요소 해석에 고려된 모델의 기하학적 대칭성을 고려하여 그림 4(a)와 같이 1/2 유한요소 모델을 사용하였다. 그림 4(b)의 모션에 3상 전류원을 인가하였으며 이때 전류의 최대치는 100 A로 설정하였다. 차폐판 재질로는 높은 투자율을 가지고 있어 넓은 범위 차폐에 적합한 알루미늄으로 선택하였다[6]. 고려된 모델은 845,000여개의 사면체요소로 분할되었으며 유한요소 해석결과와 정밀도를 높이기 위하여 2차 보간함수를 이용하였다. 해석에 소요된 시간은 요소분할 과정을 포함하여 Xeon 3.4 GHz Dual CPU을 장착한 고속연산기(work station)에서 10분이 소요되었다.

모션 중심으로부터 4 m 높이에 위치한 1층 침실 바닥면에서 자기장의 크기가 가장 높게 나타나는 위치( $x=0, y=5, z=0$ , 그림 5 참조)의 식 (1)에서 정의한 SE 값을 목적함수로 설정하고 이를 최대화하기 위한 차폐판 구조를 진화알고리즘을 사용하여 탐색하였다. 또한 설계 과정에서 차폐판의 무게를 최대 28 kg으로 제한하는 구속조건을 설정하여 최적화 과정에서 변경되는 차폐판의 크기 및 재료 사용을 제한하였다

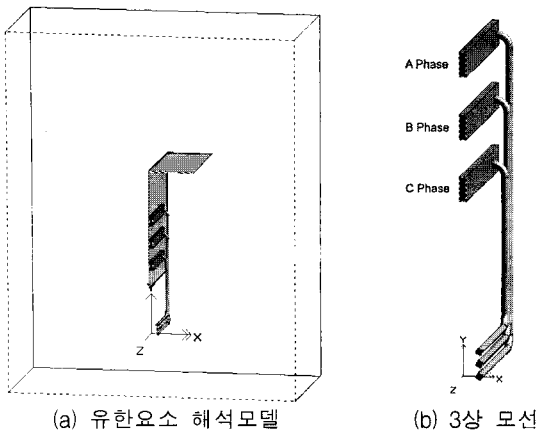


그림 4 모선 해석모델  
Fig. 4 Bus bar model

표 1 설계 변수 초기값

Table 1 Initial values imposed on design variables

설계 변수		초기 치수(1단계)
측판	FlyH	500 mm
	ShieldH	1300 mm
	ShieldW	5 mm
	ShieldZ	1000 mm
상판	CoverL	500 mm
	두께, 폭	측판 동일
Dis		35 mm

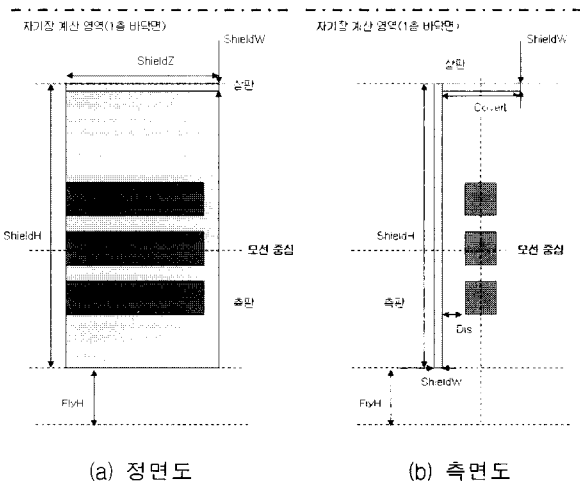


그림 5 설계 변수 정의  
Fig. 5 Definition of design variables

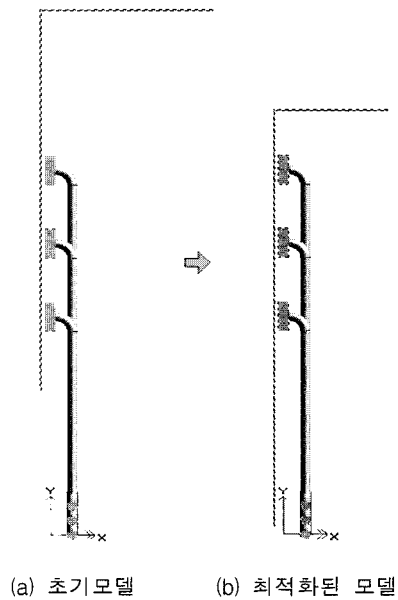


그림 6 1단계 설계를 통한 차폐판 구조 비교  
Fig. 6 Comparison of shield plate before and after optimization at the first design stage

2.2 차폐판 최적 치수 도출을 위한 1단계 설계

차폐판 최적 치수 도출을 위한 1단계 설계과정에서는 그림 5에서와 같이 차폐판 구조를 결정하는 주요치수인 ShieldH, ShieldW, ShieldZ, CoverL와 더불어 차폐판과 모선과의 상대위치를 결정하는 FlyH와 Dis 등의 총 6개의 변수를 설계변수로 정의하였다. 표 1은 설계변수에 지정한 초기 치수를 나타내며 진화알고리즘에 의한 반복설계 과정에서 설계 변수는 정수 값만 할당되도록 제약조건을 부여하였다.

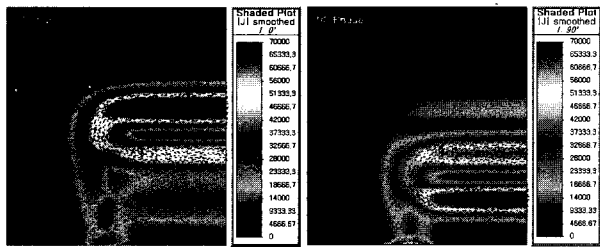
1단계 설계를 통해 도출된 최종 차폐판의 구조는 초기 구조에 비해 차폐판이 모선에 가까워지고 아래로 이동하여 인입선까지 감싸는 형태를 취한다. 그림 6에서 초기 차폐판 구조와 최적설계 후 차폐판 구조 변화를 비교 나타내었다. 최적화 된 차폐판의 차폐효과는 13.97 dB로 초기 차폐판의 차폐효과 보다 약 3 dB 정도 개선되었다. 또한 차폐판 무게도 2.42 kg 감소하여 초기 차폐판에 비해 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 최적설계 후 설계변수 및 차폐판의 주요 성능 변화에 대한 상세한 수치는 표 2에 제시하였다.

표 2 1단계 설계를 통한 차폐판 치수 및 성능 비교

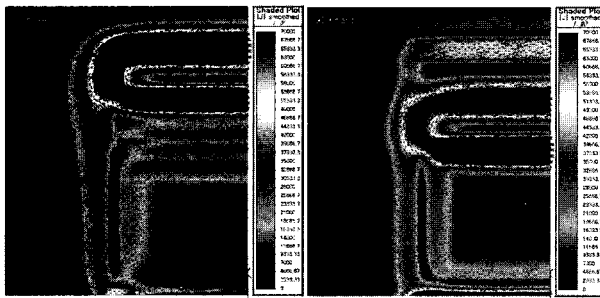
Table 2 Dimension and performance changes of shield plate through the first design stage

		차폐 전	초기 치수	1 단계
설계변수 (mm)	FlyH	-	500	25
	ShieldH	-	1300	1430
	ShieldW	-	5	4
	ShieldZ	-	1000	1210
	Dis	-	35	10
	CoverL	-	500	330
무게(kg)		-	25.48	23.06
rms  B (μT)		0.0841	0.0257	0.0168
SE(dB)		-	10.31	13.97

표 2에서 볼 수 있듯이 초기 차폐판에 비해 1단계 최적설계 후 가장 큰 특징은 차폐판의 위치가 모션쪽으로 이동하면서 전체적으로 상판 길이의 감소와 더불어 측판 길이 증가에 있다. 이러한 상판 및 측판의 길이 변화는 다음 두 가지 요인에서 비롯된 것으로 판단된다. 첫째, 상판이 모션쪽에 가까워지면서 상판에 발생된 와전류 차폐효과가 기존 구조에 비해 향상 되었다. 둘째, 초기 차폐판이 높게 위치되어 있어 측판 하단부에서 인입선에 대한 와전류 차폐현상이 적게 나타났는데 최적설계 후 측판 하단부의 길이가 증가하여 차폐효과가 증대되었다. 이러한 현상은 최적설계 전·후 측판에서 발생하는 와전류 분포특성 비교를 나타내는 그림 7에서 확인할 수 있다.



(a) 초기 차폐판



(b) 최적설계 후 차폐판

그림 7 측판상의 와전류 분포 비교  
Fig. 7 Eddy current distributions on the side plate

2.3 슬릿 및 라운딩을 고려한 2단계 설계

1단계에서 도출된 차폐판의 최적 치수를 바탕으로 2단계에서는 설계변수로 측판에 슬릿(가로, 세로 치수 2개), 상판과 측판 사이 연결 부위에 라운딩(라운딩 중심좌표 2개) 적용 및 상판의 이동 등을 각각 설계변수로 지정하였다. 이러한 설계변수의 변화는 차폐판에 생성되는 와전류 흐름에 변화를 주어 차폐효과가 보다 개선된 차폐판 구조를 찾기 위한 것으로 1단계 결과를 토대로 그림 8와 같이 4개의 기본 구조를 설정하였다. 고려된 4가지 기본구조를 바탕으로 각 경우에 따라 진화알고리즘을 적용하여 치수 최적화 작업을 추가적으로 진행하였다. 2단계 설계에 사용된 기본 차폐판 구조의 특징은 표 3에 정리하였고 이로부터 도출된 치수 최적화 결과는 표 4에 제시하였다.

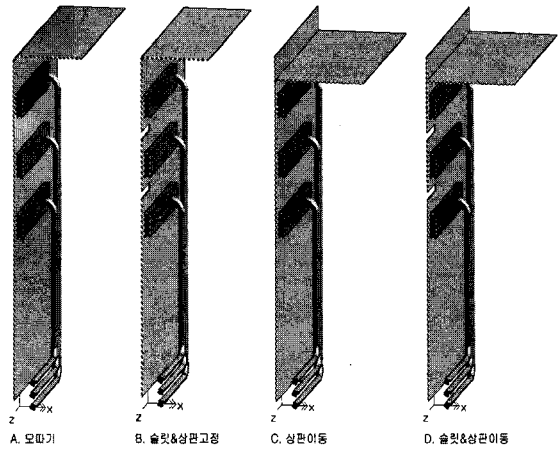


그림 8 2단계 설계에 적용한 차폐판 기본 구조  
Fig. 8 Basic structures of shield plates considered at the second design stage

표 3 고려된 차폐판 기본 구조 특징  
Table 3 Distinction between the basic plate structures considered

2단계 설계	구조 특징
A. 라운딩	상/측판 사이 라운딩을 주어 각진 연결 부위 제거
B. 슬릿&상판고정	상판 위치 고정된 상태에서 측판에 슬릿 추가
C. 상판이동	슬릿 추가 없이 상판 이동
D. 슬릿&상판이동	측판에 슬릿 추가 및 상판 이동

표 4 2단계 설계최적화 결과  
Table 4 Results of the second design optimization

2단계 설계	rms  B  (μT)	SE (dB)	무게 (kg)
A. 라운딩 (rounding)	0.0174	13.69	23.92
B. 슬릿&상판고정	0.0166	14.11	22.91
C. 상판이동	0.0167	14.03	24.61
D. 슬릿&상판이동	0.0162	14.30	23.57

2단계 설계를 통하여 도출된 결과 중에서 “A. 라운딩”과 “C. 상판이동”은 1단계 설계와 비교해 볼 때 차폐효과는 비슷하지만 차폐판 무게가 증가하여 효율성이 떨어진다. “B. 슬릿&상판고정”은 1단계 설계보다 차폐판의 무게가 0.15 kg 감소하여 다른 최적화 결과에 비해 무게 면에서 가장 우수하며 또한 차폐효과도 0.14 dB로 다소 개선되었다. 마지막으로 “D. 슬릿&상판이동”은 차폐효과가 14.30 dB로 1단계 설

계에 비해 0.33 dB 개선되어 가장 우수한 차폐효과를 나타내지만 무게는 0.51 kg 증가하였다. 2단계 설계에서 도출된 결과 중에서 “B. 슬릿&상판고정”과 “D. 슬릿&상판이동”이 1단계 설계에 비해 우수한 차폐 특성을 가지고 있지만 개선 정도가 최대 0.33 dB로 크지 않다. 특히 “D. 슬릿&상판이동”의 경우는 무게가 다소 증가하여 전체적인 개선 효과는 미미하고 복잡해진 구조로 인하여 제작비용 상승이 예상된다.

2.4 차폐판 최적 치수 선정

1, 2 단계 최적설계를 통해 구한 차폐판의 무게 및 차폐 효과 비교를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 각 그림에서 모션 모델 표기는 첫 번째 숫자가 설계단계를, 두 번째 영문자는 2단계에서 고려된 차폐판 추가 구조를 의미한다. 기사술한 바와 같이 2단계 설계에서 고려한 추가 차폐판 구조 설계는 다소 복잡한 구조에 따른 제작비 상승에 비해 차폐 특성 개선 효과는 미비하므로 최적 차폐판 구조로는 1단계 설계결과가 가장 적합하다고 판단된다.

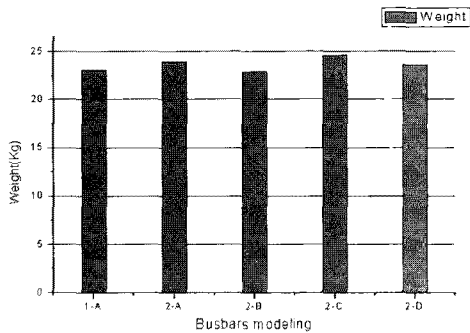


그림 9 차폐판 무게 비교  
Fig. 9 Comparison of plate weight

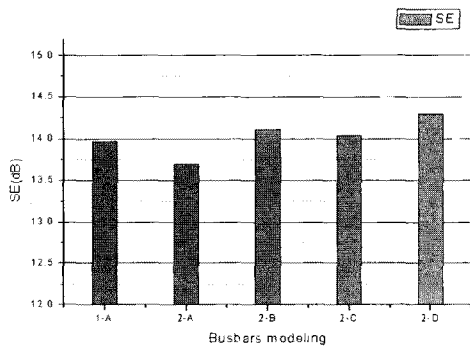
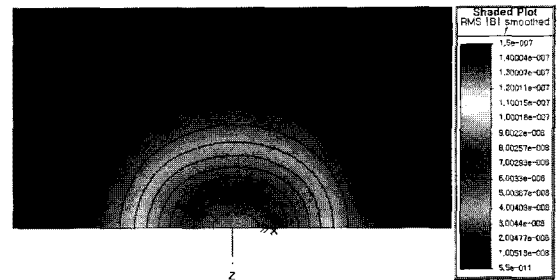
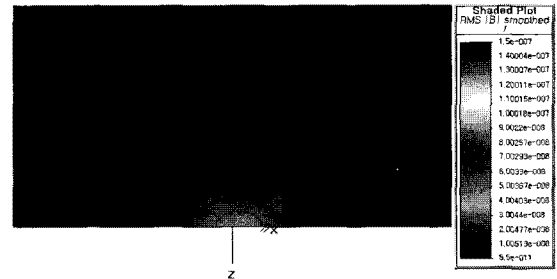


그림 10 차폐효과 비교  
Fig. 10 Comparison of Shielding effectiveness

최종 선정된 차폐판을 적용하여 1층 침실의 바닥면에서 나타나는 자속밀도 실효치 크기 분포를 그림 11에 나타내었다. 차폐 전(그림 11(a))과 차폐 후(그림 11(b))의 자속밀도 분포도를 통해 최종 차폐판에 의해 차폐효과를 확인할 수 있다. 최종 차폐판의 사양은 2.2절에 있는 그림 6(b)와 표 2에서 언급된 1단계 최적설계 결과와 동일하다.



(a) 차폐 전



(b) 차폐 후

그림 11 자속밀도 실효치 분포 비교

Fig. 11 Magnetic flux density distribution in terms of rem value

3. 결 론

본 논문에서는 지하나 반지하에 설치된 분전반 모션에서 발생하는 극저주파 자기장을 억제하기 위하여 진화 알고리즘과 정밀 3차원 유한요소 해석도구를 이용하여 차폐판을 설계하였다. 차폐판 구조 설계의 모든 요소를 고려하기 위하여 2단계로 나누어 치수 최적설계가 수행되었다. 1, 2단계 설계결과를 바탕으로 차폐판의 무게, 제작의 용이성 등의 경제적인 요인과 차폐효과를 함께 고려하여 최적 차폐판 구조를 제시하였다. 본 연구를 통해 제시된 최종 차폐판은 초기 모델에 비해 3 dB 이상 차폐효과가 향상되었으며 구조가 단순하여 기존 분전반에 추가 설치가 용이한 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구결과는 날로 극저주파 전자기장에 대한 규제와 관심이 증대되고 있는 상황에서 이에 대한 기초 연구자료를 유익하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-068)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] 전인수, 김한나, “고압송전선로 전자파에 대한 노출범위 설정 방안.” 한국환경정책평가연구원, 한국환경정책평가연구원 연구보고서 KEI (연구보고서2006/RE-20), pp.1-208, Dec. 2006  
[2] 김윤신 외, “고압 송전선로 주변에 위치한 초등학교 학

생들의 극저주파 자기장 노출량 예측 모델에 관한 연구.” 한국환경보건학회, 한국환경보건학회지 韓國環境保健學會誌 第32卷 第5號, pp.506-514, Oct, 2006

- [3] MagNet User's Manual, Infolytica Corporation, 2008
- [4] Fogel, D.B, "An introduction to simulated evolutionary optimization", IEEE Trans. on Volume 5, pp3-14 Issue 1, Jan. 1994
- [5] Fogel, D.B, "What is evolutionary computation?", Spectrum, IEEE Volume 37, Issue 2, pp26, 28-32, Feb. 2000
- [6] Lennart Hasselgren, Jorma Luomi, "Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies", IEEE Trans. on Volume 37, pp.409-420, Aug. 1995
- [7] Munir H. Nayfeh, Morton K. Brussel, "Electricity and magnetism", University of Illinois at Urbana-Champaign, April. 1985
- [8] Bhag Guru, Huseyin Hiziroglu, "Electromagnetic Field Theory Fundamentals, 2nd Edition", Cambridge university, 2004.
- [9] Schulz, R.B., Plantz, V.C., Brush, D.R, "Shielding Theory and Practice", IEEE Trans. on Volume 30, pp.187-201, Aug. 1988
- [10] Salinas, E, "Shielding of power frequency magnetic fields from a three phase system of bus bars", IEEE International, Magnetics Conference, pp.DF10-DF10, 1999.

## 저 자 소 개



### 정 기 우 (鄭 起 宇)

1979년 7월 11일생. 2005년 경북대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 동대학원 경북대 전자전기컴퓨터공학부 석사과정  
E-mail : jeunggw@ee.knu.ac.kr



### 최 낙 선 (崔 洛 善)

1979년 2월 15일생. 2006년 경북대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 동대학원 경북대 전자전기컴퓨터공학부 석사과정  
E-mail : nschoi@knu.ac.kr



### 김 동 훈 (金 東 勳)

1968년 2월 26일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기동학과 졸업(공학박사), 1998.3~2001.2 LG전자 디지털어플라이언스 연구소 선임연구원, 2001.3~2002.2 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 연구교수, 2002.3~2002.8 기초전력원 특별연구원, 2002.9~2004.2 영국 Southampton 대학 ECS Research Fellow, 2004.3~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수  
Tel : 053-950-5603  
Fax : 053-940-8503  
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr



### 장 낙 원 (張 樂 元)

1967년 11월 7일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1992~1995년 삼성전자 AMLCD 사업부. 1999~2003년 삼성전자 반도체연구소. 2003년 9월~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수



### 이 동 영 (李 東 映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1990년 서울대학교 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 삼성반도체통신(주) 사원, 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원, 1997년~현재 위덕대학교 전기공학과 부교수  
Tel : 054-760-1300  
Fax : 053-760-1075  
E-mail : dyyi@uu.ac.kr