Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 15, No.6, pp. 97~102 November 2001 논문 15-6-14

통계적 방법을 이용한 선형 직류전동기의 최적설계

(Optimal Design of a Linear DC Motor using Statistc Method)

김성수* · 김동희** · 노채균**
(Sung-Soo Kim · Dong-Hee Kim · Chae-Kyun Ro)

요 약

본 논문은 구조가 간단하고, 고속, 고정밀 위치결정이 가능하기 때문에 OA 및 FA 시스템에 대한 적용이 급속히 확대되고 있는 선형직류전동기의 최적 설계에 관하여 제안하였다. 최적 설계 방법은 통계적 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 먼저, 2수준 요인실험계획법을 이용하여 목적함수에 대한 설계변수의 영향력을 분석하였으며, 다음으로 반응표면분석법을 이용하여 이들 인자의 최적치를 구하였다. 이 방법을 적용함으로써 짧은 시간과 낮은 비용으로 설계변수의 최적 값을 도출 할 수 있었다.

Abstract

This paper is concerned with optimal design of a linear DC motor which is spreading fast in OA and FA systems due to simplicity in structure, high-speed operation and high-precision positioning. The approach is based on the statistic method. In this study, firstly, we determine factors that affect significantly the objective function using 2-level factorial design. And then, the Response Surface Methodology was applied to optimize these factors. Through this application, design factors could be optimized within a short term and low experimental cost.

key words : LDM, Factorial Design, RSN, Optimal Design

1. 서 론

선형 전동기 중에서 선형 직류전동기는 다른 선형 전동기에 비해 소형, 경량화가 가능하고, 저속 및 고속의 운전이 용이하다. 또한 기계 가공정도보다는 엔코더 등과 같은 위치검출장치의 정도에 따라 위치결정정밀도가 좌우되므로 급가속 초정밀 위치결정 응용 분야에 적합하다. 선형 직류전동기의 종류는 이동자의 종류에 따라 코일 가동형과 자석 가동형으로 나누어진다. 본 연구에서 연구대상으로 선정한 선형 직류전동기는 추력의 증대를 위해 영구자석을 서로 마주 보게 배치한 양측식 고정자 사이를 공심형 코일이 이동하는 코일 가동형 구조이다.[1][2]

현재까지 선형 직류전동기의 추력에 관한 연구는 다수 보고 되고 있으며, 그 설계 방법 및 최적설계에 관한 연구도 다수 보고 되어 있다. 하지만 이러한 방법을 이용할 경우에는 최적 해를 얻기까지 많은 시간이 필요하다는 단점을 갖고 있다. 이를 극복하기 위해

* 정회원 : 영남대 대학원 전기공학과 박사과정 수료
E-mail : eagle67@dreamwiz.com
** 정회원 : 영남대 전자 · 정보공학부 교수
접수일자 : 2001년 9월 26일
1차심사일 : 2001년 9월 26일, 2차심사일 : 10월 20일
심사완료일 : 2001년 10월 29일

최근 들어 통계적 기법을 이용하여 전동기의 최적설계를 행한 연구 결과가 몇몇 문헌에서 보고되고 있다. 그 중에서 대표적인 방법으로써 반응표면분석법(Response Surface Methodology)을 들 수 있다. 반응표면분석법은 Box와 그의 동료들이 화학 공정과 이에 관련된 변수들 간의 관계를 조사하는 과정에서 시작된 방법으로써 하나 또는 둘 이상의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자의 집합과의 관계를 규명하는 데 사용하는 실험방법으로 반응변수를 최적화할 수 있는 인자의 조건을 찾는데 목적을 두고 있다[3][4][5][6].

본 논문에서는 반응표면분석법중에서 중심합성법(Central composite design)을 이용하여 정밀 위치결정용에 널리 사용되어 지고 있는 선형 직류전동기의 평균추력 20[N]을 만족하면서 최소 추력 리플을 목표로 하는 최적설계를 수행하였다.

2. 목적함수 및 설계변수 선정

본 논문에서는 목적함수로써 평균 추력(Y1)과 추력 리플분(Y2)을 선정하여 목표 추력 20[N]에 대해 최소 추력 리플분을 만족하는 설계변수의 치수를 선정하였다. 설계변수로는 그림 1에 나타낸 바와 같이 영구자석의 폭(A), 코일의 폭(B), 영구자석의 두께(C), 코일의 높이(D)를 선정하였다. 또한 공극의 길이는 코일의 높이에 따라 변화시켰으며, 기계적 공극의 길이는 이동자의 몰딩과 기구적 간섭을 고려하여 2[mm]로 선정하였다. 그리고 자극의 피치는 18[mm]로 일정하게 하였으며, 요크의 두께는 요크에서의 포화를 고려하여 10[mm]로 선정하였다. 코일에 인가되는 전류는 2[A]로 제한을 두었다. 그리고 목표사양은 정격 추력 20[N], 이송속도 2[m/s], 가속도 2[G], 스트로크 50[cm]로 선정하였다.

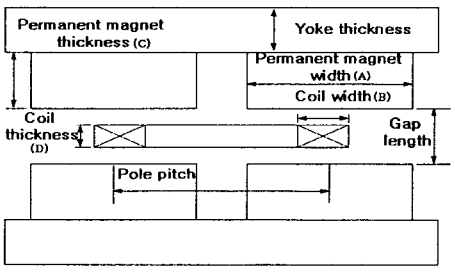


그림 1. 설계변수
Fig. 1. Design factors

3. 설계변수의 영향력 분석

다수의 요인이 있는 실험에서 요인들의 주효과와 상호효과를 조사할 경우 널리 사용되는 실험계획법으로써 요인설계(factorial design)법을 들 수 있다.[6]

본 논문에서는 네개의 설계변수를 가진 경우이므로 요인설계법 중에서 2^4 요인설계를 수행하였다.

실험 설계를 위하여 직접 선형 직류전동기를 제작하여 실험하는 데에는 많은 비용과 시간이 소모되기 때문에 일반적으로 수치해석방법을 이용하여 실험을 대신 하는 방법이 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 FEM(Finite element method) 해석을 이용하여 각각의 실험 모델에 관하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 데이터를 결과값으로 사용하였다. 해석 방법은 목적으로 하는 추력의 특성 변화를 분석하기 위해 해석모델에서 이동자인 코일부를 전기각 60도에 걸쳐 0.5[mm]씩 이동시킨 후 추력을 해석하였으며, 상 전환 방법은 홀 센서의 신호에 따른 3상 120도 도통 방법을 적용하였다.

총 16개의 실험 모델에 대한 해석만으로 독립변수의 주효과와 독립변수들간의 상호작용에 대한 영향력 분석이 가능하였으며, 영향력 분석에 요하는 시간과 경비를 최소화 할 수 있었다. 표 1에 2^4 요인설계표 및 결과를 나타내었다.

표 1. 2^4 요인설계표 및 실험 결과
Table 1. 2^4 Factorial Design Matrix and the Result of Experiment

Run No.	Factor				Object function	
	A	B	C	D	Fmean[N]	Fripple[N]
1	-1	-1	-1	-1	7.690	1.252
2	1	-1	-1	-1	8.802	1.100
3	-1	1	-1	-1	11.427	1.778
4	1	1	-1	-1	13.086	1.716
5	-1	-1	1	-1	9.056	1.430
6	1	-1	1	-1	10.412	1.240
7	-1	1	1	-1	13.453	2.057
8	1	1	1	-1	15.496	2.023
9	-1	-1	-1	1	12.751	1.972
10	1	-1	-1	1	14.562	1.839
11	-1	1	-1	1	18.984	2.865
12	1	1	-1	1	21.766	2.910
13	-1	-1	1	1	15.441	2.361
14	1	-1	1	1	17.701	2.271
15	-1	1	1	1	23.000	3.440
16	1	1	1	1	26.745	3.558

그리고 표 1의 결과에 대한 분산분석(Analysis of variance) 결과를 표 2와 표 3에 나타내었으며, 그림 2에 설계변수의 영향력을 도표로 나타내었다.

표 2. 분산분석표 - 평균 추력
Table 2. ANOVA Table - Average thrust

인자	제곱합	자유도	평균제곱	F 값	F 검증
A	17.57759	1	17.57759	251.7956	< 0.0001
B	141.286	1	141.286	2023.895	< 0.0001
C	30.90623	1	30.90623	442.7259	< 0.0001
D	236.6026	1	236.6026	3389.288	< 0.0001
AB	0.851122	1	0.851122	12.19216	0.0174
AC	0.260021	1	0.260021	3.72475	0.1115
AD	1.224958	1	1.224958	17.54729	0.0086
BC	1.338377	1	1.338377	19.172	0.0072
BD	9.825392	1	9.825392	140.7469	< 0.0001
CD	3.433335	1	3.433335	49.18188	0.0009
E	0.3491230	5	0.0698246		

표 3. 분산분석표 - 리플 추력분
Table 3. ANOVA Table - Thrust ripple

인자	제곱합	자유도	평균제곱	F 값	F 검증
A	0.015563	1	0.015563	19.75622	0.0067
B	2.959587	1	2.959587	3757.069	< 0.0001
C	0.543568	1	0.543568	690.0361	< 0.0001
D	4.642511	1	4.642511	5893.47	< 0.0001
AB	0.024944	1	0.024944	31.66517	0.0025
AC	0.000705	1	0.000705	0.895171	0.3875
AD	0.008823	1	0.008823	11.19987	0.0204
BC	0.028092	1	0.028092	35.66131	0.0019
BD	0.197518	1	0.197518	250.7411	< 0.0001
E	0.003996	5	0.000799		

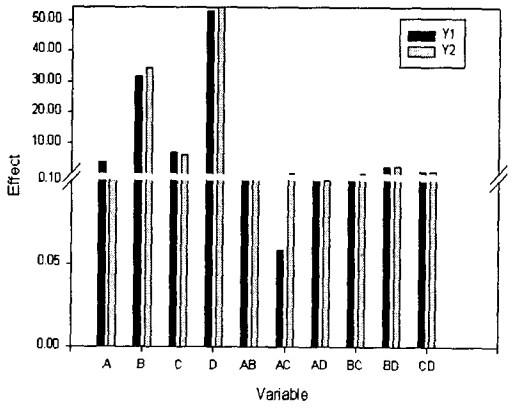


그림 2. 설계변수의 영향력
Fig. 2. Effects of design factors

분산분석결과 영구자석의 치수보다는 코일의 치수가 목적함수에 큰 영향력을 갖고 있는 것으로 나타났으며, 평균 추력과 추력 리플분을 동시에 고려할 경우, 본 논문에서 선정된 설계변수 모두가 목적함수에 유의한 인자임을 알 수 있다.

4. 설계치수 선정

본 논문에서는 설계변수의 영향력 분석을 통하여 선정된 설계변수를 이용하여 2차 다항 모형의 추정식을 구하였다. 이를 위해 반응표면분석법 중에서 일반적으로 가장 널리 사용되어지고 있는 중심합성법을 이용하여 실험계획을 수립하였다. 표 4에 중심합성설계표와 결과를 나타내었다.

표 4. 중심합성 설계표 및 실험 결과
Table 4. Central Composite Design Matrix and the Result of Experiment

Run	Factor				Object function	
No	A	B	C	D	Fmean[N]	Fripple[N]
1	-1	-1	-1	-1	12.204	1.797
2	1	-1	-1	-1	13.069	1.654
3	-1	1	-1	-1	14.811	2.195
4	1	1	-1	-1	15.892	2.059
5	-1	-1	1	-1	13.202	1.936
6	1	-1	1	-1	14.154	1.808
7	-1	1	1	-1	16.034	2.359
8	1	1	1	-1	17.193	2.243
9	-1	-1	-1	1	15.538	2.292
10	1	-1	-1	1	16.654	2.214
11	-1	1	-1	1	18.887	2.780
12	1	1	-1	1	20.254	2.709
13	-1	-1	1	1	16.920	2.488
14	1	-1	1	1	18.144	2.428
15	-1	1	1	1	20.563	3.019
16	1	1	1	1	22.072	2.980
17	-2	0	0	0	15.416	2.367
18	2	0	0	0	17.854	2.316
19	0	-2	0	0	13.849	1.913
20	0	2	0	0	20.469	2.854
21	0	0	-2	0	15.243	2.143
22	0	0	2	0	18.256	2.591
23	0	0	0	-2	12.196	1.632
24	0	0	0	2	20.770	2.894
25	0	0	0	0	17.259	2.382

그리고 식(1)과 식(2)에 표 4의 결과를 이용하여 구한 주효과, 상호작용, 주효과의 2차항으로 이루어진 이차 다항 모형의 추정식을 나타내었다.

평균 추력의 추정식 :

$$\begin{aligned} Y1 = & -25.33622 + 2.07684*A + 1.29200*B \\ & + 1.07739*C + 0.87111*D - 0.080958*A^2 \\ & - 0.20473*B^2 - 0.15365*C^2 - 0.22011*D^2 \\ & + 0.079927*AB + 0.017294*AC \\ & + 0.048308*AD + 0.13305*BC \\ & + 0.40260*BD + 0.11001*CD \end{aligned} \quad (1)$$

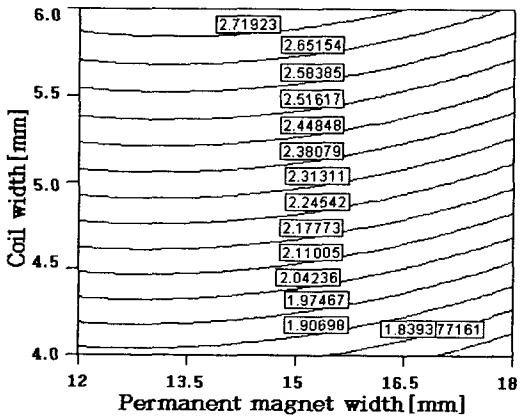
추력 리플분의 추정식 :

$$\begin{aligned} Y2 = & -1.02369 + 0.076344*A + 0.21962*B \\ & - 0.030032*C + 0.12430*D - 0.006620*A^2 \\ & - 0.017892*B^2 - 0.008608*C^2 \\ & - 0.034541*D^2 + 0.003921*AB \\ & + 0.003511*AC + 0.011481*AD \\ & + 0.019247*BC + 0.050478*BD \\ & + 0.017364*CD \end{aligned} \quad (2)$$

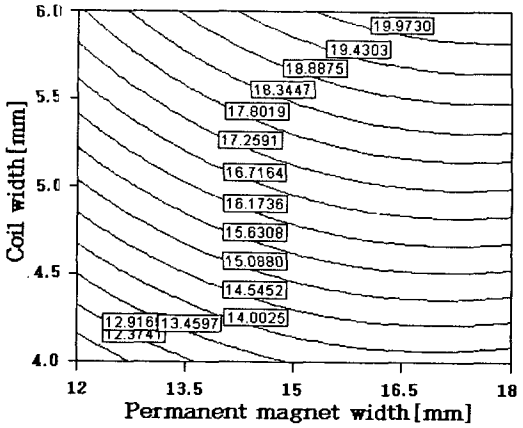
그리고 위 추정식의 유의성을 검증하기 위하여 보정된 결정계수를 구하였다. 구한 결과는 평균 추력 추정식은 0.9969, 추력 리플분 추정식은 0.9920으로써 앞서 구한 이차 다항 모형이 적절함을 확인할 수 있다.

위 추정식을 이용하여 설계변수의 조합에 대한 목적함수의 값을 contour 그래프로 나타내었다.

그림 3에 영구자석의 폭과 코일의 폭에 대한 목적함수의 contour 그래프를 나타내었다.



(a) 추력 리플에 대한 contour 그래프
(a) Contours of thrust ripple



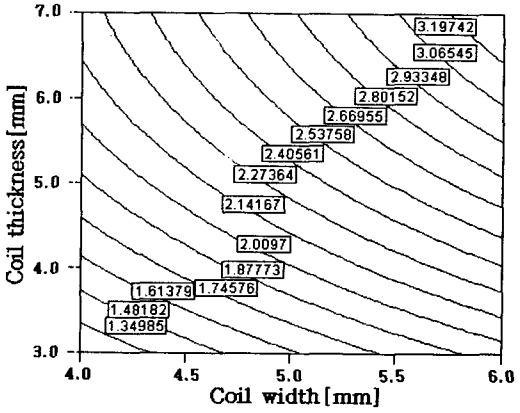
(b) 평균 추력에 대한 contour 그래프
(b) Contours of average thrust

그림 3. 반응표면분석법에 의한 Contour 그래프
(C : 5.5 [mm], D = 5 [mm])
Fig. 3. Contour graph by RSM
(C : 5.5 [mm], D = 5 [mm])

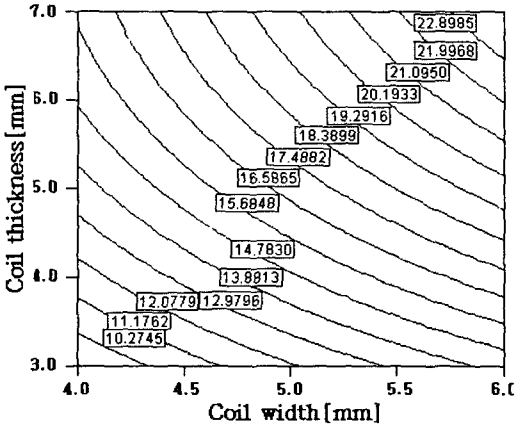
그림 3에 나타난 바와 같이 영구자석의 두께와 코일의 높이를 각각 5.5[mm], 5[mm]로 고정시켰을 경우, 영구자석의 폭과 코일의 폭에 대한 목적함수의 값은 평균 추력이 11.88[N]~20.23[N], 추력 리플 1.86[N]~2.66[N]의 범위로 나타났다.

그림 4에 코일의 폭과 코일의 높이에 대한 목적함수의 contour 그래프를 나타내었다.

그림 4에 나타낸 바와 같이 영구자석의 폭과 영구자석의 두께를 각각 15[mm], 5.5[mm]로 고정시켰을 때 코일의 폭과 코일의 높이에 대한 평균 추력은 9.3728[N]~23.8002[N], 추력 리플은 1.2178[N]~

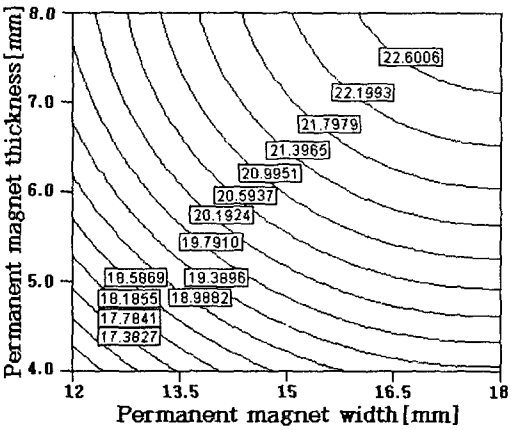


(a) 추력 리플에 대한 contour 그래프
(a) Contours of thrust ripple



(b) 평균 추력에 대한 contour 그래프
(b) Contours of average thrust

그림 4. 반응표면분석법에 의한 Contour 그래프
(A : 15 [mm], C : 5.5 [mm])
Fig. 4. Contour graph by RSM
(A : 15 [mm], C : 5.5 [mm])



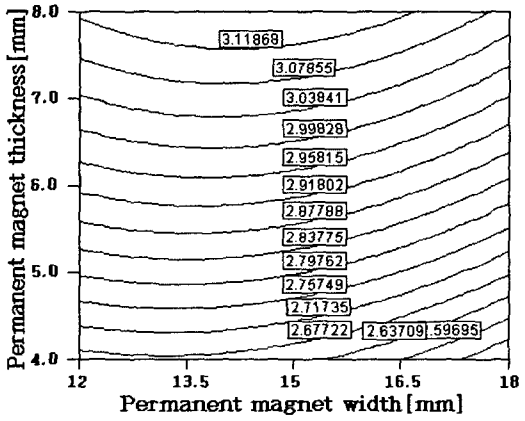
(b) 평균 추력에 대한 contour 그래프
(b) Contours of average thrust

그림 5. 반응표면분석법에 의한 Contour 그래프
(B : 6 [mm], D : 5 [mm])
Fig. 5. Contour graph of RSM
(B : 6 [mm], D : 5 [mm])

3.3293[N]의 범위로 나타났다.

그림 5에 영구자석의 폭과 영구자석의 높이에 대한 목적함수의 contour 그래프를 나타내었다.

그림 5에 나타낸 바와 같이 코일의 폭과 코일의 높이를 각각 6[mm], 5[mm]로 고정시켰을 때 영구자석의 폭과 영구자석의 높이에 대한 평균 추력은 15.9682[N]~22.1713[N], 추력 리플은 2.57613[N]~3.1544[N]의 범위로 나타났다.



(a) 추력 리플에 대한 contour 그래프
(a) Contours of thrust ripple

위의 결과를 이용하여 목표 추력 20[N]을 만족하는 설계변수의 값을 선정하였다. 먼저, 영구자석의 폭과 두께는 평균 추력과 리플 추력분에 그다지 큰 영향력을 갖고 있지 않으며, 선형직류전동기의 제작상의 문제와 가격, 부피, 공극에서의 자속 밀도 분포 등을 고려하여 영구자석의 폭은 15[mm], 영구자석의 두께는 5.5[mm]로 선정하였다. 다음에 코일의 폭과 코일의 높이는 그림 4에 나타낸 바와 같이 목표 추력을 만족하는 범위 내에서 추력 리플을 최소화하기 위해 코일의 폭은 5.97[mm], 코일의 높이는 5.1[mm]로 선정하였다. 최종적으로 선정한 설계변수의 치수를 이용하여 이차 다항 모형의 추정식으로부터 평균 추력과 추력 리플을 계산한 결과 평균 추력은 20[N], 추력 리플은 2.79[N]으로 나타났다. 이것은 실측치와 가장 근사한 것으로 알려져 있는 FEM 해석을 이용한 결과치 19.885[N], 2.759[N]과 비교할 때 평균 추력은 약 0.57[%], 추력 리플은 약 1.1[%] 오차를 가진 값으로써 추정식의 타당성을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 통계적 방법 중에서 반응표면분석법을 이용하여 40[W]급 선형직류전동기의 최적설계를 수행하였다. 2수준 요인설계을 통하여 계획된 16개의 모델을 해석함으로써 목적함수에 미치는 설계

인자의 영향력을 분석할 수 있었으며, 중심합성법을 이용하여 목적함수를 만족하는 설계인자의 최적 조건을 짧은 시간과 낮은 비용으로 도출할 수 있었다. 본 논문에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 영구자석의 폭과 영구자석의 두께는 코일의 폭과 코일의 두께에 비하여 평균 추력과 추력 리플에 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

(2) 반응표면분석법에 근거한 목적함수의 추정식을 이용하여 목적함수의 contour 그래프를 구한 후, 목표 추력을 만족하는 설계변수의 치수를 선정하였다.

(3) 영구자석의 폭과 두께는 선형직류전동기의 제작성과 가격, 부피, 공극에서의 자속밀도 분포 등을 고려하여 각각 15[mm], 5.5[mm]로 선정하였다.

(4) 코일의 폭과 높이는 contour 그래프에서 알 수 있듯이 목적함수를 만족하는 범위 내에서 공극의 길이를 최소화하는 치수인 5.97[mm]와 5.1[mm]로 선정하였다.

참 고 문 헌

[1] 山田一, "長ストロクをもった薄型リニア直流モータの最適設計",T.IIEJapan.,, Vol.116-D, No. 4, 1996.

[2] H.Wakiwaka, S.senoh, "Smoother Thrust on Multi-polar Type Linear DC Motor", IEEE Trans. on Mag., Vol.33, No.5, SEP 1997.

[3] F. Gillon, P. Brochet, "Optimisaion of a Brushless Permanent-Magnet Motor whth the Experimental Design Method", IEEE Trans. on Mag.,Vol.34,No.5, SEP 1998.

[4] F. Gillon, P. Brochet, "Screening and Response Surface Method Applied to the Numerical Optimization of Electromagnetic Devices",IEEE Trans. on Mag., Vol.36, No.4, July 2000.

[5] S. X. Chen, T. S. Low, and B. Bruhl, "The Robust Design Approach for Reducing Cogging Torque in Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Mag., Vol.34, No.4, July 1998.

[6] Raymond H.Myers, Douglas C.Montgomery., "Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments", Wiley series in probability and statistics.

◇ 저자소개 ◇

김 성 수(金成修)
1967년 6월 7일 생. 1990년 영남대 전기공학과 졸업 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~1998년(주)삼익LMS 기술연구소 근무, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

김 동 희(金東熙)
1950년 11월 20일 생. 1973년 영남대 전기공학과 졸업 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 국립 Kobe 대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 2000년~2001년 국립 Kyushu 대학 교환교수, 한국조명·전기설비학회 학술위원, 현재 영남대 공대 전자·정보공학부 교수.

노 채 균(盧采均)
1938년 10월 7일 생. 1961년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 영남대 전기공학과 졸업(박사). 1982년~1983년 미국 켄터기 주립대학 교환교수. 현재 영남대 공대 전자·정보 공학부 교수.