

다구찌 방법을 이용한 선형직류모터의 로버스트 설계

(Robust Design of a Linear DC Motor Using Taguchi Method)

김성수* · 정수진** · 리영훈** · 김동희*** · 노채균***

(Sung-Soo Kim · Soo-Jin Jung · Young-Hoon Lee · Dong-Hee Kim · Chae-Kyun Ro)

요 약

본 논문은 구조가 간단하고, 고속, 고정밀 위치결정이 가능하기 때문에 사무 자동화 및 공장자동화 시스템에 대한 적용이 급속히 확대되고 있는 선형직류모터의 로버스트 설계에 관하여 제안하였다.

로버스트 설계 방법은 다구찌 방법을 이용하였으며, 직교배열표를 이용하여 실험계획법을 수립하였다. 본 연구의 진행 과정은 먼저 중요 파라미터를 선정하였고, 다음으로 신호대 잡음(S/N)비를 적용하여 모터의 성능을 평가한 후, 변수의 최적 값을 결정하였다.

이 방법을 사용함으로써 짧은 시간 안에 로버스트 설계가 가능하였으며, 최종결과 모터의 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

Abstract

This paper is concerned with robust 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 Taguchi method, and utilizes the orthogonal array for design of experiments. In this study, first, the important factors are chosen at first, and then the concept of signal-to-noise(S/N) ratio is applied to evaluate the motor performance, and each value of the design parameters is determined.

This method is useful to robust design in a short time. As a result, the performance of the motor is improved.

1. 서 론

유한요소법과 같은 자계 해석 기술을 이용한 전기 기기의 설계는 설계 목적함수인 추력과 추력 리플을

만족하는 기기의 형상 및 치수 사양을 구하는 역 해석이 가능할 만큼 급속히 발전되어 왔다.

그러나, 최적형상을 구할 때 경험적으로 설계변수를 변화시켜 많은 모델에 대하여 자계 해석을 해야 하기 때문에 최종 결과를 얻기까지에는 많은 시간이 걸린다는 단점을 갖고 있다.

이를 해결하기 위해 최근 들어 통계적 기법으로써 실험계획법을 이용하여 최적화에 접근하고자 하는

* 정회원 : 영남대 대학원 전기공학과 박사과정 수료

** 정회원 : 영남대 대학원 석사과정 재학중

*** 정회원 : 영남대 전자·정보공학부 교수

접수일자 : 2001년 6월 4일

다구찌 방법을 이용한 선형직류모터의 로버스트 설계

노력이 이루어지고 있다. 그 중에서 대표적인 방법이 다구찌 방법이다.

다구찌 실험 계획법은 제품의 품질 향상을 위해 Dr, Taguchi에 의해 개발된 방법으로써 제품의 품질 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정한 후, 이들의 관계를 알아보기 위해 실험계획법을 수립하고, 이에 의거해 얻어진 데이터를 분석하여 제품의 품질개선 또는 품질향상을 위한 최적생산 조건을 찾아내는 방법이다.

전기분야에 대한 다구찌 방법의 적용 사례는 최근 들어 몇몇 문헌에서 볼 수 있다. S.X.Chen이 회전형 BLDC 모터의 코깅 토크 저감을 위한 최적설계를 다구찌 방법을 이용하였으며[1], Yen-shin Lai는 다구찌 방법을 적용하여 유도전동기의 직접토크제어에 관한 연구를 수행하여 다구찌 방법의 유효성을 입증하였다[2].

본 논문에서는 이미 그 효과가 입증된 다구찌 실험계획법과 FEM 해석 툴을 이용하여 FA 및 OA 설비의 정밀 위치결정용에 적합한 선형직류모터의 평균 추력의 최대화, 추력 리플의 최소화, 평균 추력 대 체적 비의 최대화를 만족하고, 온도변화에 따른 영구자석 재질 변화에 둔감한 로버스트 설계를 수행하였다.

또한 로버스트 설계를 통해 설계변수가 목적함수에 미치는 영향력을 분석하였으며, 예측된 최적 설계변수값을 적용하여 FEM 해석을 수행한 후 로버스트 설계의 효과를 검증하였다.

2. 선형직류모터의 구조

선형 모터란 회전모터의 회전자, 고정자 및 에어갭을 각각 직선적으로 전개하여 전기에너지를 직접 직선적인 운동에너지로 변환할 수 있는 직선 추력 발생장치이다. 회전모터와는 달리 복잡한 직선운동 변환장치가 불필요하며, 구조가 간단하고, 고장이 적으며, 신뢰성이 높다는 장점을 갖고 있으며, 최근 들어 전력전자 기술의 비약적인 발전에 힘입어 선형모터를 이용한 응용 분야가 확대됨에 따라 많은 연구가 이루어지고 있다[3].

선형 모터 중에서 선형직류모터는 다른 선형모터에 비해 소형, 경량이 가능하고, 저속 및 고속의 운전이 용이하며, 기계 가공정보보다는 엔코더 등과 같은 위치검출장치의 정도에 따라 위치결정정밀도가

좌우되므로 급가속 초정밀 위치결정응용 분야에 적합하다.

선형직류모터의 종류는 코일 가동형과 자석 가동형으로 나누어진다. 본 논문에서 사용된 선형직류모터의 구조는 코일가동형으로써 영구자석과 요크로 이루어진 양측식 고정자 사이를 공심형 코일이 이동하는 구조이며, 영구자석에 의해 발생된 자계와 가동자 코일에 흐르는 전류사이에서 작용하는 힘을 이용하게 된다. 본 논문에서는 Nd-Fe-B 계열 강자성체를 사용함으로써 공극의 자속밀도를 향상 시켰으며, 코일은 3상 Y결선을 사용하였다. 그리고 자극위치는 홀센서를 이용하여 검출하도록 하였다. 그리고 목표 사양은 정격 추력 30[N], 이송속도 2[m/s], 가속도 20[m/s²], 스트로크 30[cm]로 선정하였다.

그림 1에 본 연구에서 대상으로 한 선형직류모터의 구조를 나타내었다.

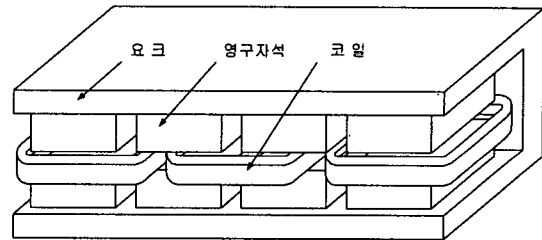


그림 1. 선형직류모터의 구조
Fig. 1. Structure of a linear DC motor

3. 다구찌 실험계획법

3.1 목적 함수 선정

본 논문에서 대상으로 한 선형직류모터는 정밀위치결정용에 적합한 모터이며 추력의 특성이 모터의 성능을 좌우한다고 할 수 있다[4]. 따라서 평균추력, 추력 리플, 그리고 평균추력 대 체적의 비를 목적함수로 선정하였다.

3.2 설계변수 선정

다구찌 실험계획법에서 사용하는 설계인자는 제어인자, 잠음인자, 신호인자를 들 수 있다.

본 논문에서는 정특성 분석을 위해 제어인자와 잠음인자만을 선택하였다. 제어인자로는 영구자석의 폭과 자극피치의 비(A), 코일의 폭과 자극피치의 비(B),

영구자석의 두께(C), 공극의 길이(D)를 선정하였으며, 인자의 수준수는 3수준으로 하였다. 잡음 인자로는 영구자석의 재질특성 변화를 선정하였으며[5], 수준수는 2수준으로 하였다. 그림 2에 설계인자를 나타내었다. 그리고 제어인자와 잡음인자를 제외한 설계변수들 중에서 자극의 피치는 18[mm]로 일정하게 하였으며, 요크의 두께는 요크에서의 포화를 고려하여 8[mm]로 선정하였다. 그리고 코일에 인가되는 전류는 2[A]로 제한을 두었다.

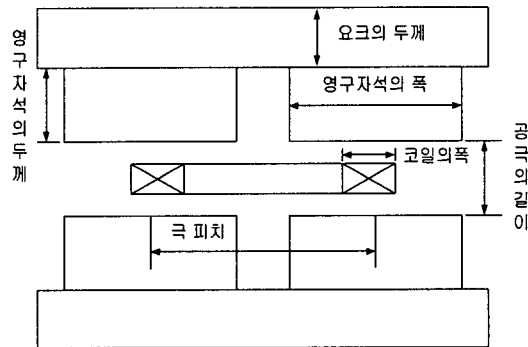


그림 2. 설계인자
Fig. 2. Design Factors

표 1에 본 논문에서 사용한 설계변수와 수준수, 그리고 목적함수를 나타내었다.

표 1. 설계변수와 수준수 및 목적함수
Table 1. Design variables, levels and the Objective Function

설계변수 및 목적함수		수준수
제어 인자	영구자석의 폭과 자극피치의 비(A)	3
	코일의 폭과 자극피치의 비(B)	3
	영구자석의 두께(C)	3
	공극의 길이(D)	3
잡음 인자	영구자석의 재질 특성(M)	2
목적 함수	평균 추력	/
	추력 리플	
	평균 추력 대 체적의 비	

3.3 직교배열표 구성

직교배열표는 실험계획법을 사용할 경우 인자의 수와 각 인자별 수준수에 따라 적합한 실험회수 및 실험조건을 배열한 표로서 이것을 사용할 경우 적은

실험의 수로서 최적의 값을 구할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

따라서 본 논문에서는 L9(3,4) 직교배열표를 이용하여 잡음인자를 고려할 경우 총 18번의 실험만으로 짧은 시간 안에 목적함수의 최적 값을 도출할 수 있도록 구성하였다.

표 2에 인자와 인자별 수준을 할당한 직교배열표를 나타내었다.

표 2. 직교배열표
Table 2. Orthogonal Array

실험 No.	제어인자				잡음인자	
	A	B	C	D	M0	M1
1	1	1	1	1	Y11	Y12
2	1	2	2	2	Y21	Y22
3	1	3	3	3	Y31	Y32
4	2	1	2	3	Y41	Y42
5	2	2	3	1	Y51	Y52
6	2	3	1	2	Y61	Y62
7	3	1	3	2	Y71	Y72
8	3	2	1	3	Y81	Y82
9	3	3	2	1	Y91	Y92

3.4 시뮬레이션

직교배열표를 이용하여 얻은 실험 회수는 총 18번으로써 이를 직접 제작하여 실험하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소모되기 때문에 일반적으로 수치해석방법을 이용하여 실험을 대신 하는 방법이 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 FEM 툴을 이용하여 각각의 실험 모델에 관하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 데이터를 결과 값으로 사용하였다.

시뮬레이션 방법은 목적으로 하는 추력의 특성 변화를 분석하기 위해 해석모델에서 이동자인 코일부를 0.3[mm] 이동시킨 후 추력을 해석하였으며, 상 전환 방법은 홀센서의 신호에 따라 3상 120도 도통 방법을 적용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 추력 및 추력 리플 특성

본 논문에서 연구 대상으로 한 선형직류모터의 추

다구찌 방법을 이용한 선형직류모터의 로버스트 설계

력 특성을 분석하기 위해 FEM 해석을 수행하였다. 그림 3에 해석모형을 나타내었으며, 그림 4에 이동변위에 따른 추력 특성을 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 상 전환 시 추력 특성에 리플 성분이 존재함을 알 수 있다.

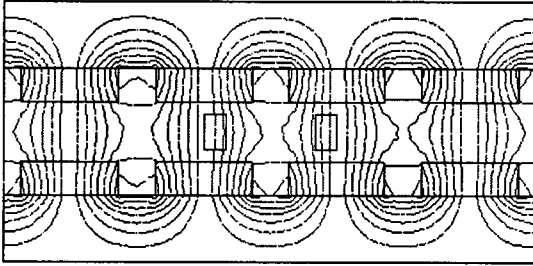


그림 3. 해석 모델
Fig. 3. Analyzed Model

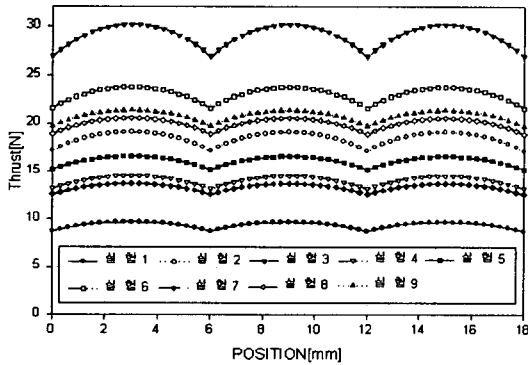


그림 4. 이동변위에 따른 추력특성
Fig. 4. Thrust according to the positions

4.2 S/N 비 분석 및 예측

로버스트 설계란 제품의 성능변동이 잡음인자에 둔감한 설계인자의 조합을 찾아내기 위한 실험계획을 의미한다. 다구찌 방법에서는 개선을 위한 정도를 나타내는 척도로써 S/N 비를 사용하고 있다. S/N 비의 정의는 식(1)과 같다.

$$S/N \text{ 비} = \frac{\text{신호의 힘}}{\text{잡음의 힘}} \quad (1)$$

S/N 비가 높은 경우일수록 제품의 성능변동이 잡

음인자에 둔감한 최적조건임을 나타내며, 제품의 특성에 따라서 S/N 비는 다양하게 정의된다.

제품의 특성에 대한 종류는 망소특성, 망대특성, 그리고 망목특성으로 구분된다.

아래 식 (2),(3),(4)에 망소,망목,망대특성인 경우의 S/N 비 공식을 나타내었다.

망소특성인 경우 :

$$SN = -10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \quad (2)$$

망대특성인 경우 :

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3)$$

망목특성인 경우 :

$$SN = 10 \log_{10} \frac{-2}{s^2} \quad (4)$$

여기서, n 은 실험 결과 값의 개수

y_i 는 실험 결과 값

\bar{y} 는 평균치를 나타내는 산술평균

s^2 은 분산의 추정치

를 뜻한다.

본 논문에서 사용한 목적함수의 특성을 표 3에 나타내었다.

표 3. 목적함수의 특성
Table 3. Characteristics of the objective functions

목적함수	특성
추력 리플	망소특성
평균 추력	망대특성
평균 추력 대 체적의 비	망대특성

그리고 위 목적함수에 대한 S/N 비 분석결과를 그림 5, 6, 7에 나타내었다.

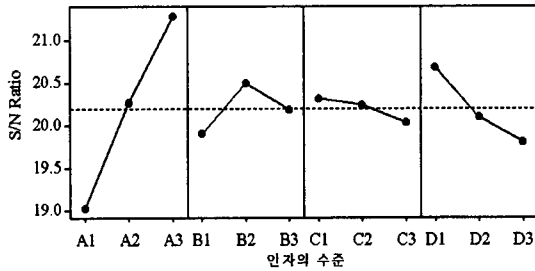


그림 5. 추력리플 S/N비에 대한 주효과 그래프
Fig. 5. Main effect plots for the thrust ripple S/N ratios

추력리플에 영향을 미치는 인자는 A인자가 가장 컸으며 다음으로 D, B, C 순 이었다. 그리고 C 인자는 영향력이 아주 작은 것을 알 수 있다. 최적조건으로 예측된 인자의 수준수는 각각 A인자가 3수준, D 인자는 1수준, 그리고 B인자는 2수준, C 인자는 1 수준으로 나타났다.

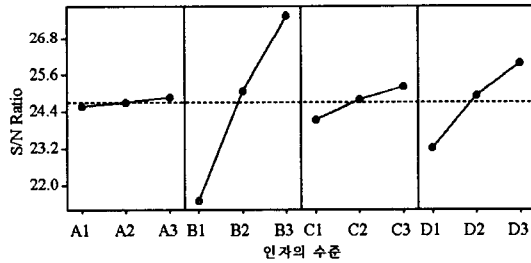


그림 6. 평균추력 S/N비에 대한 주효과 그래프
Fig. 6. Main effect plots for the average thrust S/N ratios

평균추력에 대한 인자의 영향은 B, D, C, A 인자 순이며 최적조건으로 예측된 인자의 수준수는 모두 3수준으로 나타났다.

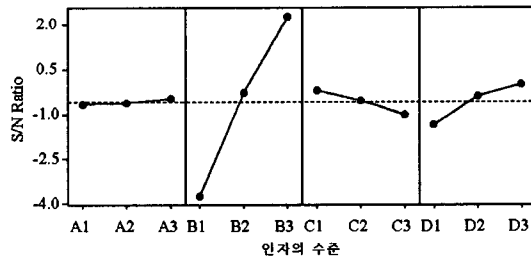


그림 7. 평균추력대 체적비의 S/N 비에 대한 주효과 그래프
Fig. 7. Main effect plots for the thrust-to-cubic ratio S/N ratios

평균추력 대 체적의 비에 대한 인자의 영향은 B, D, C, A 인자 순이며 예측된 최적조건은 B 인자가 3 수준, D 인자가 3수준, C 인자가 1수준, A 인자가 3 수준으로 나타났다.

표 4에 직교배열표에서 선정한 설계모델의 해석결과를 나타내었으며, 표 5에 최적조건으로 선정된 모델의 S/N 비의 예측결과를 나타내었다.

표 4. 선정된 모델의 해석 결과
Table 4. Analysis results of each model

설계 모델	추력리플 [%]		S/N 비 [dB]	평균추력 [N]		S/N 비 [dB]	평균추력대 체적비 [N/mm]		S/N 비 [dB]
	M 0	M 1		M 0	M 1		M 0	M 1	
1	10.493	10.486	19.59	8.342	9.214	18.83	0.556	0.614	-4.68
2	10.566	10.574	19.51	16.478	18.198	24.74	0.890	0.983	-0.60
3	11.574	11.575	18.72	25.932	28.661	28.68	1.178	1.302	1.83
4	10.162	10.155	19.86	14.400	13.861	22.99	0.720	0.693	-3.02
5	8.823	8.822	21.08	14.333	15.920	23.57	0.757	0.837	-2.00
6	9.446	9.440	20.49	20.538	22.689	26.66	1.244	1.375	2.30
7	8.974	8.979	20.93	11.858	13.113	21.89	0.578	0.639	-4.34
8	8.410	8.407	21.50	17.849	19.718	25.44	0.991	1.095	0.33
9	7.951	7.950	21.99	18.580	20.520	25.79	1.083	1.207	1.18

표 5. 예측
Table 5. Prediction

목적 함수	예측 결과				
	A인자	B인자	C인자	D인자	S/N비 [dB]
추력리플	수준 3	수준 2	수준 1	수준 1	22.19
	순위 1	순위 3	순위 4	순위 2	
평균추력	수준 3	수준 3	수준 3	수준 3	29.45
	순위 4	순위 1	순위 3	순위 2	
평균추력대 체적비	수준 3	수준 3	수준 1	수준 3	3.35
	순위 4	순위 1	순위 3	순위 2	

4.3 예측 결과 검증

S/N비 분석을 통해 얻어진 최적조건을 이용하여 FEM 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 이용하여 S/N 비 값을 구한 후, 예측 결과의 타당성을 검증하였다. 검증 결과, S/N 비 값은 추력리플 최소화를 위한 설계시 23.03[dB], 평균추력 최대화를 위한 설계

다구찌 방법을 이용한 선형직류모터의 로버스트 설계

시 29.54[dB], 평균추력대 체적 비 최대화를 위한 설계시 3.27[dB]으로 나타났으며, 이것으로부터 예측 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 마지막으로 표 6에 최적조건으로 선정된 설계변수의 수준수를 이용한 로버스트 설계의 해석 결과를 나타내었다.

로버스트 설계시 모터의 성능과 S/N 비 값이 표 4의 해석모델에 비해 향상되었음을 알 수 있다.

표 6. 로버스트 설계의 해석 결과
Table 6. Analysis results of robust design

목적 함수	추력 리플 [%]		평균 추력 [N]		평균추력대 체적비 [N/nm]	
	M 0	M 1	M 0	M 1	M 0	M 1
추력 리플	7.052	7.051	14.222	14.571	0.948	0.971
평균 추력	9.457	9.456	29.655	30.393	1.347	1.381
평균 추력대 체적비	8.826	8.829	25.926	26.561	1.440	1.475

5. 결론

본 논문에서는 다구찌 실험계획법과 FEM 해석틀을 결합하여 선형직류모터의 로버스트 설계를 수행하였다. 짧은 시간 안에 목적함수에 미치는 설계인자의 영향력을 분석할 수 있었으며, 영구자석의 재질 변화에 둔감하고 모터의 성능을 극대화 시키기 위한 설계변수의 최적조건을 도출 할 수 있었다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 추력리플을 최소화하기 위해서는 공극의 길이를 작게 하여 공극에서의 자속밀도 분포를 균일하게 할 필요가 있다. 그리고 영구자석의 폭과 코일의 폭은 각각 3수준과 2수준인 경우 추력리플이 최소화됨을 알 수 있었다.

(2) 평균추력과 추력대 체적비를 최대화하기 위해서는 코일의 폭과 높이를 크게 하여 코일의 AT을 크게 할 필요가 있다. 최적조건으로 선정된 코일의 폭과 공극의 길이는 모두 3수준으로 나타났다.

(3) 최적조건으로 선정된 설계변수의 치수를 이용하여 모터의 특성 해석을 수행하였으며, 해석결과 모터의 성능이 향상됨을 확인하였다.

(4) 다구찌 방법의 핵심인 로버스트 설계를 수렴함으로써 영구자석의 재질 변화에 대해 성능변화가 적은 모터의 설계가 가능하였다.

참고 문헌

- (1) H.T.Wang, Z.J.Liu, S.X.Chen, J.P.Yang, "Application of Taguchi Method to Robust Design of BLDC Motor Performance", IEEE Trans on Magnetics, Vol.35, No.5, SEP 1999.
- (2) Yen-Shin Lai, Juo-Chiun Lin, and Jennshing Jersey Wang, "Direct Torque Control Induction Motor Drives with Self-Commissioning Based on Taguchi Methodology", IEEE Trans on Power Electron, Vol.15, No.6, Nov 2000.
- (3) 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.IEEJapan, Vol.116-D, No. 4, '96.
- (4) H.Wakiwaka, S.sench, "Smoother Thrust on Multi - polar Type Linear DC Motor", IEEE Trans on Mag, Vol.33, No.5, SEP 1997.
- (5) Tomy Sebastian, "Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of PM Motors Using NdFeB Magnets", IEEE Trans on Ind Applica, Vol 31, No.2, Mar, 1995.

◇ 저자 소개 ◇

김 성 수 (金成修)

1967년 6월 7일생. 1990년 영남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

정 수 진 (鄭壽鎭)

1974년 9월 25일생. 2000년 경일대 전기공학과 졸업. 2001년 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.

리 영 훈 (李映勳)

1975년 1월 1일생. 2001년 경일대 전기공학과 졸업. 2001년 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.

김 동 희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe 대학 졸업(공학). 1987년~1989년 한국전기 연구소 전력전자 연구부장. 현재 영남대 공대 전자·정보공학부 교수.

노 채 균 (盧采均)

1938년 10월 7일생. 1961년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 영남대 전기공학과 졸업(공학). 1982년~1983년 미국 쉐넬러 주립대학 교환교수. 현재 영남대 공대 전자·정보공학부 교수.