

공작기계용 서보전동기의 시리즈 설계 연구

이갑재<sup>(1)</sup>, 김기찬<sup>(1)</sup>, 권중록<sup>(1)</sup>, 이종찬<sup>(2)</sup>, 이 주<sup>(2)</sup>  
 (1)현대중공업, (2)한양대학교

A Study on the design of the servo motor for machine tools

K. J. Lee<sup>(1)</sup>, K. C. Kim<sup>(1)</sup>, J. R. Kwon<sup>(1)</sup>, J. C. Lee<sup>(2)</sup>, J. Lee<sup>(2)</sup>  
 (1)Hyundai Heavy Industries Co.,LTD., (2)Hanyang Univ.

**Abstract** - The use of permanent magnet motors have increased as controlled motors throughout the world. According to the development of magnetic materials and control technology, the motors are required to small size and compact design. Therefore it is introduced for servo motor to be contented with the characteristics of CNC machine tools in this paper. It is represented for the result of design, analysis, manufacture and test of the motor.

1. 서 론

공작기계 산업분야는 국가 경쟁력의 증추를 이루는 2차 산업의 핵심분야로서 최근 급속한 영역팽창과 함께 자동화산업의 근간을 이루고 있다. 공작기계의 기술적 모체는 기계 및 전기·전자기술을 종합한 메카트로닉스 기술이며, 메카트로닉스 기술은 컨트롤러기술, 센서기술, 인터페이스기술, 액추에이터 기술 및 소프트웨어 기술로 구성된다. 그 중에서 액추에이터 기술은 서보모터 응용 기술로써 공작기계 구성요소중 최하위 요소이나, 위치정밀도 및  $\mu\text{m}$  단위의 가공 정밀도 측면에서 보면 가장 중요한 핵심요소라 할 수 있겠다. 서보모터는 수년전까지 DC 서보모터가 산업분야의 대부분을 차지하였으나 제어기술 발달 및 유지보수 측면 때문에 AC 서보모터로 점진적인 대체가 이루어졌으며, 또한 산업용 기계 및 장치의 소형화 경향은 서보모터의 소형·경량화, 고기능, 고성능을 요구하고 있다.

그러나 관련 기반기술은 매우 취약하여 기술도입, 요소부품의 수입 등 주요기술은 해외 선진국의 기술에 대부분 의존하고 있다. 더구나 드라이브 및 상위 컨트롤러의 기술종속과 사용자의 요구에 의하여 서보모터는 대부분 선진사의 제품을 채용하고 있는 실정이므로 현대중공업에서는 원천기술을 확보하고자 수년간 전동기 설계기술을 개발하였다.

따라서 본 논문을 통하여 공작기계용 서보모터의 요구 특성을 고찰하고, 이에 따른 서보모터 시리즈 설계의 관점 및 설계와 특성해석 진행과정에 대하여 살펴보고자 한다. 또한 드라이브 운전특성을 고려하고, 최적의 영구자석 형상설계와 고정도 위치정밀도 성능실현을 위하여 유한요소법에 의한 특성해석을 진행할 것이다. 그리고 현대중공업에서 개발된 서보모터 시리즈 개발모델을 소개하며, 해석 및 시험대상 모델은 1.6kW 모델을 선정하였다.

2. 공작기계용 서보모터의 요구특성

2.1 공작기계용 서보모터 요구 특성

공작기계용 서보모터는 직선운동변환기구와 함께 선반과 머시닝센터의 축 이송용으로 사용되어 각종 기구부에 의해 회전운동을 직선운동으로 변환시킨다. 따라서 축 이송부의 질량, 속도, 가속도 및 직선운동변환장치에 의

해 전동기에 요구되는 특성이 결정되어 진다. 공작기계의 위치이송장치는 중~고하중과 중속도가 주로 요구되며, 위치정도와 가속사양을 필요로 하는 이송용 모터로써 서보모터에 요구되는 일반적인 성능을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 저속의 속도 및 토크리플이 작고 제어성이 좋을 것
- 2) 고속에서 모터의 진동·소음이 작을 것
- 3) 기계의 열용력을 줄이기 위한 열적 안정성 유지
- 4) 가감속 성능이 우수할 것
- 5) 절삭유 등을 고려한 내환경성이 우수할 것
- 6) 축과 플레지면의 직각도 및 기계적 강도 유지할 것
- 7) 신뢰성이 높은 전동기 특성을 유지할 것

2.2 서보모터 운전영역 및 시리즈화 개념

2.2.1 특성곡선 및 운전영역

그림 1에는 서보모터의 운전특성곡선을 나타내었는데 절연 및 온도상승조건에 대하여 연속사용조건을 만족시키는 연속운전영역(OADF)과 전동기의 과부하성능 및 시스템의 가감속성능과 관련된 순시운전영역(O'A'D'F)으로 구분할 수 있다. 이러한 운전특성곡선은 전동기만의 특성보다는 Drive와 결합된 운전특성이므로 전동기의 선정시 Drive의 특성을 반드시 감안할 필요가 있다.

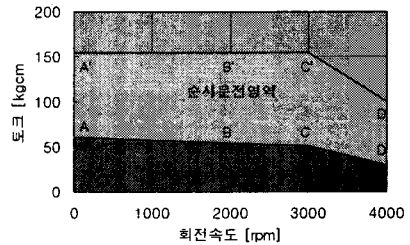


그림1. 서보모터 특성곡선

2.2.2 정격점에서의 설계요소

상기의 그림 1에서 정격 Point는 C점이며, 따라서 서보모터의 설계시 전동기 응용분야의 특성을 고려하여 정격점의 선정과 이 Point에서의 전동기 특성을 고려해야 한다. 설계시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 1) 입력전압 레벨을 고려한 정격전압의 결정(C점)
- 2) 순시운전영역을 고려한 전압레벨 고려(C'점)
- 3) 유기기전력 레벨의 설계(C점)
- 4) Drive 전압과 Power 용량을 고려한 정격점 선정
- 5) 응용특성 및 가속도를 고려한 설계
- 6) 제어특성, emf 등을 고려한 자석형상 및 권선설계

2.2.3 시리즈 설계의 개념

서보모터 프레임의 크기는 국제적인 표준화가 되어 있는지는 않으나, 대부분의 선진사의 제품은 기계적으로 호환이 될 수 있을 만큼 유사한 형태를 가지고 있다. 따라서 프레임의 크기가 결정되어 있는 경우의 시리즈화 방

향과 프레임 크기를 변경할 때의 특성에 대해 간략히 살펴보기로 하겠다.

### 1) 프레임과 길이가 동일한 경우의 시리즈 특성

전동기의 프레임이 같고 전동기 길이가 결정되어 있는 경우의 용량이 변화하는 설계의 경우는 상기 그림 1의 B와 C의 특성을 비교함으로써 이해될 수 있다. 정격점을 B점에서 C점으로 변경할 경우(전동기 용량의 증대)는 발생토크와 유효기전력 레벨 및 공급전압의 크기는 동등하게 되나 정격속도와 정격전류가 증가하게 되어 Drive의 Power 소자 용량을 증가시키는 특성을 나타내게 된다.

### 2) 프레임은 동일하고 길이를 증대시키는 경우

전동기의 길이를 증가시키는 시리즈 설계는 전동기 용량과 발생토크가 증가하게 되어 상기 그림 1의 경우보다 토크특성이 높게 된다. 예를 들면 그림 1의 연속운전 영역이 순시운전영역으로 증가되는 것을 생각할 수 있으며, 순시운전영역도 더 높게 증가하게 된다. 또한 Inertia가 Rotor 길이의 증가에 따른 중량의 증가에 비례하여 커지게 되며, 동일 길이의 Rotor에 대한 전동기 시리즈 설계는 1)의 내용과 동일하다.

### 3) 프레임의 크기를 증대시키는 경우

이 경우는 전동기의 용량 및 토크, Inertia 등이 많이 증가되어 부하의 요구에 따라 시리즈 설계가 이루어진다. 물론 상기 2)와 더불어 부하특성에 대응하는 정격점의 유효기전력과 전압레벨은 유사하게 설정하여야 하며, 전동기의 Inertia 및 Drive 특성을 고려하여야 한다.

## 3. 서보모터 설계 및 해석

### 3.1 서보모터 전기설계 및 특성해석 개요

장하분배, 0<sup>th</sup> 등 이미 확립된 방법을 이용하여 모터 설계를 행하여, 설계결과에 대하여 특성해석을 얼마나 정확하게 수행하느냐에 따라 특성에 적합한 모터설계가 이루어졌는지 판가를 된다. 최근의 모터설계 경향은 기초설계, 특성해석(등가자기회로법 or 유한요소법), 최적화 알고리즘을 적용한 설계변수 변경, 반복적인 특성해석을 통한 최적 설계변수의 선정을 행하는 연구가 활발하게 진행되어 설계시간 단축, 제품의 신뢰성 확보, 초기 금형비 절감 등의 효과를 보이고 있다.

서보모터의 주요 설계요소로서는 영구자석 및 방향성 자석의 선정, 정현파 유효기전력을 얻을 수 있는 영구자석의 설계, 감자영향을 고려한 자석두께의 결정, 착자기술, 권선의 점적용 향상, 코깅토크 및 토크리플 저감, 용도에 따른 저관성화 설계, 저소음·저진동 설계 등이다. 최적의 동작기계용 서보모터의 설계 및 해석과정은 다음의 그림 2와 같다.

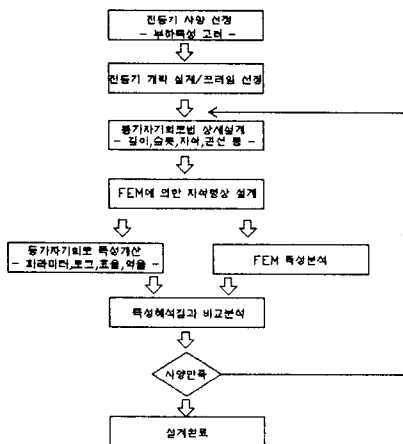


그림 2. 설계 및 해석 Flow Chart

### 3.2 유한요소법에 의한 특성해석 결과

현대중공업에서 개발한 서보모터를 등가자기회로법으로 설계한 결과를 이용하여 유한요소법으로 해석하였으며, 회전자 표면자속과 공극자속밀도 분포, 토크계산결과에 따라 자석의 형상을 변경하여 재설계하는 방향으로 연구를 진행하였다. 본 논문에는 최종 설계된 서보모터 1.6kW에 대한 유한요소법 해석결과를 나타내었다.

기본설계된 모터사양을 유한요소법을 이용하여 해석하기 위한 요소분할도를 그림 3에 나타내었으며, 분할된 요소수는 8280개, 절점수는 4200개이다. 해석 정도를 높이기 위하여 공극주위의 요소를 세밀하게 발생시켰으며, 6극 모터이므로 대칭성을 감안하여 1/6 모델로 해석하였고, 반경방향의 경계면은 반주기 경계조건을 적용하고 원주상의 경계면에 대해서는 Dirichlet 경계조건을 적용하였다.

그림 4는 고정자 철심이 존재하지 않고 회전자의 개방된 자기회로를 유한요소법으로 해석한 회전자의 표면자속밀도이고, 그림 5는 회전자의 표면자속밀도를 Gauss 메터로 측정된 결과이다. 표면자속밀도의 측정시 Gauss 메터 센서의 측정위치가 동심원에 수직방향으로 정확하게 측정하기 어렵고, 유한요소 모델링시 자석의 자기특성치(평균 ± 5% 편차)의 오차로 인해 자속밀도 값을 직접 비교하기에는 어려운 점이 있다. 그러나 자석의 이방성 및 자석형상에 따른 표면자속밀도 분포를 고려한다면 설계의 중요한 요소로써 고려될 수 있으리라 생각된다.

그림 6에는 자속의 벡터성분과 공극자속밀도의 공간분포를 나타내었으며, 공극자속밀도는 슬롯의 영향을 받고 있으나 정현적인 공간분포를 하고 있음을 알 수 있다. 본 개발품은 표면부착형 동기모터(SPM)로써 정현파 전류로 구동되므로 공극자속밀도와 유효기전력이 정현파가 되도록 영구자석의 형상을 설계하면 토크리플이 최소화되는 특성을 가지고 있으므로 설계의 중요한 요소이다.

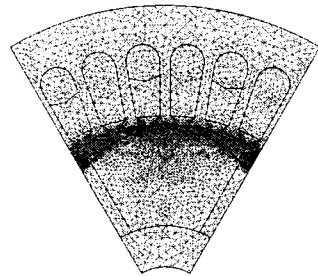


그림 3. 해석모델(서보모터 1.6kW) 요소분할도

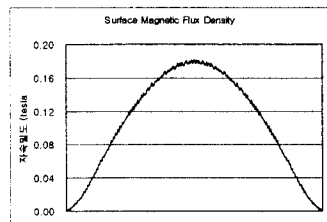


그림 4. 회전자 표면자속밀도

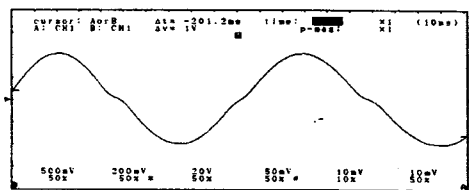
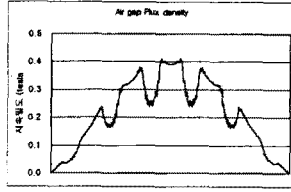
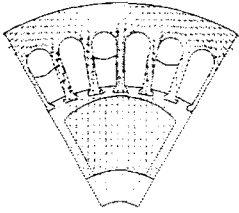


그림 5 회전자 표면자속밀도 측정



(a) 자속분포 (b) 공극자속

그림 6 자속분포도 및 공극자속  
 그림 7은 Stator 권선을 개방시키고 Rotor를 3000rpm으로 회전시킬 때 각 상에 유기된 유기기전력을 FEM에 의하여 구한 결과이다. 유기기전력 파형은 토크맥동 등 서보모터로서의 성능을 결정하는 중요한 설계요소로써, 그림 9의 실험치(Eab:1000rpm)와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림8은 코깅토크 해석결과로써 정격토크에 대하여 최대 코깅토크가 0.14%로 나타나며, 이는 선진사의 정밀급 서보모터의 코깅토크 비율을 0.5% Max로 설계하는 것을 감안하면 본 논문에 제시된 제품은 정밀위치제어용 전동기로서 아주 좋은 성능을 만족시키리라 예상된다.

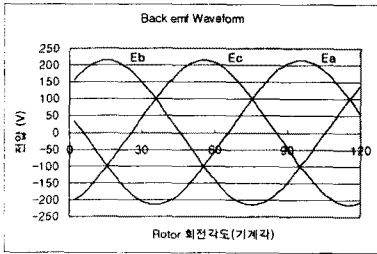


그림 7 유기기전력 계산 결과

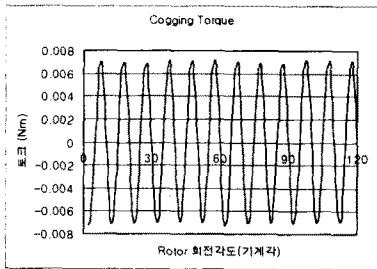


그림 8 코깅토크 계산 결과

유한요소법에 의한 정격전류 및 토크계산 결과는 3.49[A], 48.91[kgcm]로써 시험결과인 3.48[A], 51.9[kgcm]와 유사한 결과를 얻었다.

### 3.3 서보모터 시험결과 및 개발품

#### 3.3.1 서보모터 시험결과

서보모터 1.6kW의 유기기전력 측정결과(1000rpm)를 그림9에 나타내었고, Dynamometer에 정격부하를 인가하여 측정한 특성결과를 표 1에 표시하였으며, 설계 및 특성해석결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

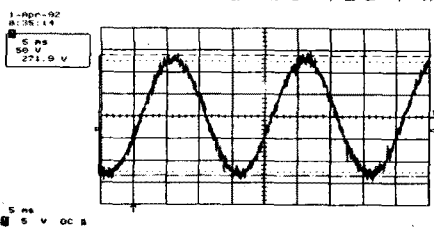


그림 9 유기기전력 측정결과

표 1. 특성시험 결과표

구분	단위	1.6kW
속도 $n_{rated}$	rpm	3000
토크 $M_{rated}(S_1-100)$	Nm	5.09
전류 $I_{rated}$	A	3.48
전압 $V_{rated}$	V	291
토크상수 $K_T$	Nm/A	1.54
유기전압상수 $K_E$	V/krpm	90.9
고정자 상저항 $R_{Str}$	$\Omega$	2.07
선간 인덕턴스	mH	20.3

#### 3.3.2 서보모터 개발품

현대중공업에서 공작기계용으로 개발한 서보모터의 사양 및 사진을 다음의 표 2와 그림 9에 나타내었다.

표 2. 서보모터 개발품 사양

항목 \ 모델	211A	212D	212C	212A	213C	213B	311C	311B	311A
정격토크(kgcm)	26	55	48.7	51.9	85	85	117	102	105
스토크토크(kgcm)	30	60	60	60	90	90	130	130	130
정격속도(rpm)	3000	1500	2000	3000	2000	2500	2000	2500	3000
최대속도(rpm)	4000	2700	3100	4400	2800	3300	2600	3200	4500
정격전류(Arms)	1.94	2.27	2.32	3.48	3.6	4.2	4.58	4.9	7.1
극수/절연/진동계급	6극/ F종/ V15								

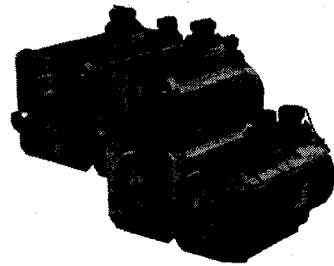


그림 9. 서보모터 개발품 사진

### 3. 결 론

본 논문에서는 정밀위치제어용 전동기로 각광을 받고 있는 서보모터에 대한 공작기계 적용과 시리즈설계 및 해석에 관한 연구결과를 소개하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 서보모터 설계요소로는 부하 및 운전특성, 자석형상설계 및 토크리플 저감설계 등이며, 효과적이고 고정밀도의 서보모터를 설계하기 위해서는 운전특성을 고려한 전동기 특성해석의 중요성을 인식할 수 있었다. 또한 소형·고출력 및 고성능 전동기의 요구에 따라 영구자석형 전동기의 응용분야가 점진적으로 확대되고 있으며, 본 연구내용이 영구자석형 전동기의 설계 및 해석에 참고자료가 될 것으로 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

- 1) 大川光吉, "フェフライ磁石回轉機の設計", 総合電子出版社, 1984
- 2) 大川光吉, "永久磁石磁氣回路の設計・特性計算法 I", 総合電子リサーチ, 1986
- 3) 大川光吉, "永久磁石磁氣回路の設計・特性計算法 II", 総合電子リサーチ, 1987
- 4) T.J.E. Miller "Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives", 1989
- 5) P. Pillay, R. Krishnan, " Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous DC Motors for Servo Drives", Conf. of IAS Annual Meeting, pp.380-390, 1987.
- 6) 川村昭, "ブラシレスサーボモータと選び方, 使い方", 総合電子出版社, 1986.
- 7) 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1986