

## 모터 설계를 위한 CAE 시스템 개발

최홍순\*, 장경운, 김덕근, 윤중석  
(주)코모텍 부설연구소

### A CAE System for Motor Design

Hong-soon Choi, Kyung-woon Chang, Deok-geun Kim, Joong-seok Yoon  
KOMOTEK Co.,Ltd.

**Abstract** - In this paper, a CAE system, MotorPro<sup>(TM)</sup>, is presented for motor design. It is composed of equivalent magnetic circuit method and finite element method. It provides fully automated finite element method that takes only a few seconds to a few minutes. Using this system, 18kw brushless DC motor is dealt as design example.

#### 1. 서 론

본 논문에서는 자기등가회로법[1][2][3]과 유한요소법[5][6]을 사용하여 모터를 해석 및 설계하는 CAE(Computer Aided Engineering) 시스템인 MotorPro<sup>(TM)</sup>에 관하여 설명한다. 기존의 모터 설계시스템은 다음과 같이 분류해 볼 수 있다.

- 1) 자기등가회로법에 의한 구현.
- 2) 유한요소법에 의한 구현.
- 3) 등가자기회로법에 의한 설계 후 상세해석은 유한요소법으로 검토.

1)번 시스템의 대표적인 프로그램은 영국 Infolytica Ltd.의 PC시리즈<sup>(TM)</sup>와 독일 Trimerics사의 Tesla<sup>(TM)</sup>가 있다. 이러한 시스템은 계산속도가 빠르고 다양한 출력값을 제공하는 반면, 전자기장의 분포된 정수를 집중 정수로 간략화하는 과정에서 여러 가정이 전제되어 있어 계산정도가 떨어지는 약점이 있다. 2)번 시스템으로는 Ansoft의 Maxwell<sup>(TM)</sup> 시리즈, Magsoft사의 Flux시리즈<sup>(TM)</sup>, Vector Fields사의 Opera시리즈<sup>(TM)</sup>가 있다 [4]. 이러한 제품들은 기기를 지배하는 맥스웰 전자기 방정식을 유한요소법으로 직접 풀이하는 방식으로 해석 정도는 우수하나 사용이 불편하고 입력과 계산시간이 많이 소요되어 설계도구로서 사용되기는 일반적으로 부적합하다. 3)번과 같은 해석 흐름은 최근의 일반적 추세이나, 1)번시스템과 2)번 시스템을 모두 구비해야 하고 각기 다른 사용법과 이론에 익숙하여야 한다. Ansoft의 RMXprt<sup>(TM)</sup>와 Infolytica의 PC시리즈<sup>(TM)</sup>는 유한요소 해석도구와의 일부 연계가 가능하도록 되어 있다. 이 도구에서는 유한요소해석을 위한 데이터파일을 출력하고 유한요소해석시스템을 자동 호출하도록 되어 있고, 유한요소해석 도구에서 추가적인 작업을 통해 상세해석이 가능하다.

MotorPro에서는 3)번 시스템에서 더 나아가서 두 가지 방법을 하나의 시스템에 집적하였으며, 특히 유한요소법을 자동화하여 모터 설계자가 유한요소에 대한 지식이 없이도 상세한 해석 결과를 바로 도출할 수 있도록 하였다. 본 시스템은 자기등가회로법에 의해 모터의 전반적인 특성과 각종 파라미터를 컴퓨터상에서 신속히 점검할 수 있고, 자동화된 유한요소법에 의해 세부적인 장분포의 관찰과 코깁토오크 파형, 역기전력 파형과 같은 분포정수의 관찰이 가능하다. 유한요소해석을 위해 기존의 상용패키지들은 전자기장과 유한요소에 대한 전

문지식을 설계자에게 요구하였으나 본 시스템은 최종 결과만을 설계자에게 제시함으로써 해석 과정을 단축시키고 설계의 질을 향상시킬 수 있게 되었다.

MotorPro에서는 모델의 입력을 간편화하기 위해 모터를 고정자와 회전자로 구분하고, 형상을 결정짓기 위한 최소한의 변수와 데이터베이스된 재질을 선택함으로써 입력을 완료한다. 이렇게 입력된 데이터는 자기등가회로모델과 유한요소모델로 자동 연결되어 각종 해석을 수행하게 된다.

이러한 시스템을 개발하기 위해 GUI를 활용한 형상 입력기, 자기등가회로법, 신뢰성과 O(N)의 발생속도를 갖는 유한요소발생기, 비선형 유한요소 해석기, 형상 및 재질 데이터 베이스, 모듈간의 상호인터페이스등을 개발하였다. 적용사례로서 스쿠가 있는 18Kw BLDC 모터의 설계를 예시한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 시스템의 구성

그림 1에 MotorPro의 전체적인 구성을 나타내었다. 전체를 컨트롤하는 모듈로서 MotorPro가 있고 그 밑에 각 모듈들이 위치하고 있다. 이 모듈들은 필요에 따라 MotorPro내에 통합되어 있거나 외부 라이브러리(DLL:Dynamic Link Library) 또는 별도의 수행파일 형태로 존재한다.

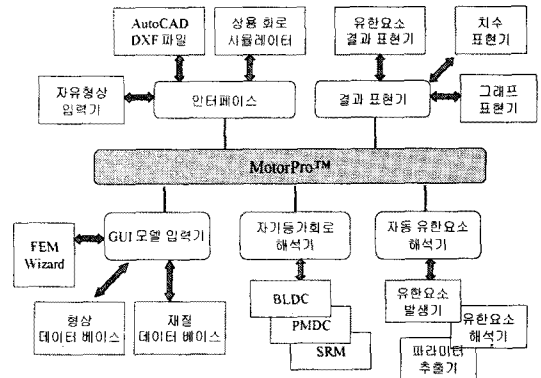


그림 1. MotorPro의 구성

##### 2.1.1 GUI 모델 입력기

여기서는 모터의 기본 형상을 고정자와 회전자로 나누어서 선택할 수 있고 그림 2에는 고정자의 슬롯과 티쓰의 선택하는 화면을 나타낸다. 먼저 슬롯의 형상을 선택한 후에 티쓰의 형상을 선택하고 각 부위의 세부 치수를 입력한다. 세부치수를 입력할 때는 화면상에 그 부위가 표시된다. 그림 3에는 재질 데이터 베이스중 자석을 선택하는 다이얼로그를 나타내었다. 여기서는 데이터베이

스에서 선택만이 가능하며, 데이터베이스의 편집은 별도의 프로그램에서 입력한다. 권선의 입력은 그림 4와 같으며 집중형, 분산형뿐만 아니라 사용자가 임의의 권선 형태를 입력할 수 있다.

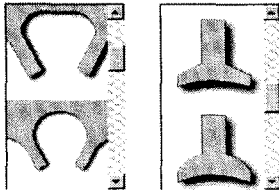


그림 2. 슬롯과 티쓰의 선택

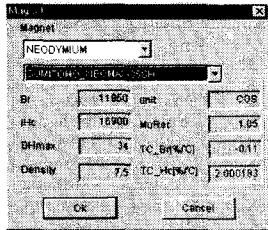


그림 3. 자석의 선택

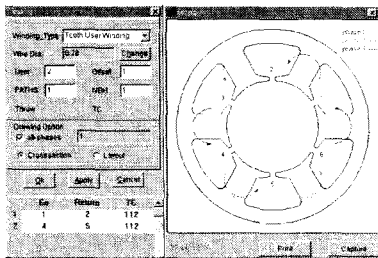


그림 4. 권선 입력

### 2.1.2 FEM Wizard

이 부분은 유한요소 입력을 간략화하기 위한 것으로서 계산하고자하는 분포 파라미터를 단지 체크만 해둠으로써 유한요소 해석을 수행할 수 있도록 한다. 하단의 Express를 선택하면 유한요소해석을 위한 각종 변수들이 기본설정값으로 대치되어 곧바로 해석에 들어간다. Custom일 경우 각 파라미터를 계산하기 위한 세부 정의가 가능하며 약간의 유한요소법에 대한 지식을 요구한다.

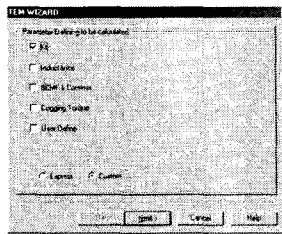


그림 5. FEM Wizard

### 2.1.3 자기등가회로법

형상과 권선등이 입력되면 바로 자기등가회로법에 의한 결과를 관찰할 수 있게된다. 자기등가회로법은 그림 6과 같이 자기적인 분포정수들을 집중화하여 등가적인 회로로 보고 해석을 수행하므로 계산속도가 매우 빠르

다.

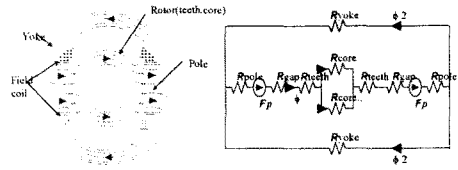


그림 6. 자기등가회로의 예

### 2.1.4 유한요소발생기

형상과 재질등이 입력되면 MotorPro는 유한요소해석을 수행할 수 있는 데, 우선 필요한 작업이 동일한 재질 또는 동일공간을 갖는 영역의 분할이다. MotorPro는 입력된 데이터로부터 그림 7과 같이 자동으로 영역을 추출해내는 기능을 갖고 있다. 그림 8에는 최소의 대칭성을 확보하는 모델부위를 추출해 내고 영역을 인식한 후에 유한요소까지 발생된 예이다. 그림 8에서 대칭을 이루는 두 면간에는 자동으로 주기경계조건이 부여되며 비선형해석을 위해 모터의 외부 영역까지 요소를 발생시킨 것이다. 최외곽과 최내곽에는 Dirichlet 경계조건이 자동으로 부여된다[9][10].

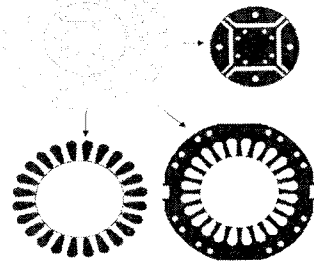


그림 7. 자동 영역 추출

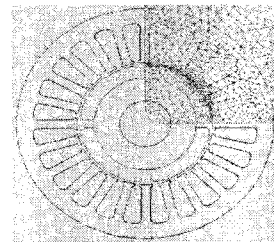


그림 8. 유한요소의 발생

요소생성 알고리즘은 드러니 삼각화법을 채택하였고, 형상의 복잡도에 따라 요소세분이 일어나는 기법을 개발하여 구현하였다. 요소발생에 소요되는 시간은 최종발생 절점의 개수에 비례하는 O(N)알고리즘을 구현하여 고속화를 달성하였다. 그림 9에 절점개수와 발생소요시간을 측정한 결과를 나타낸다.

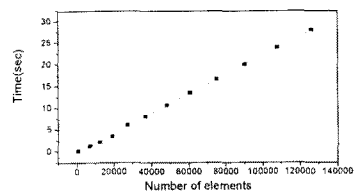


그림 9. 절점개수에 따른 요소발생시간 (펜티엄 266Mhz PC)

### 2.1.5 비선형 유한요소 해석기

요소발생기에서 생성된 요소 데이터를 입력받아 유한 요소 풀이를 직접 수행하는 모듈이다. 각 요소에 대한 정보를 전체행렬에 반영하고 이 행렬을 풀어내는 과정이다. 회전부위가 있는 경우 요소생성기로부터 회전부위의 절점쌍에 대한 정보를 추가로 받아 내부적으로 절점쌍간에 재연결을 행하여 회전각에 따른 해석을 한다. 회전각마다 요소를 재생성할 필요가 없으며, 해석 결과만이 따로 저장되는 방식이다.

### 2.1.6 데이터 베이스

그림 2,3,4에서 보듯이 형상과 자석, 강판, 와이어등 이 데이터 베이스화 되어 있어 모델 입력시에는 단지 선택하여 재질을 입력한다. 데이터베이스 관리기는 그림 1 에는 나와 있지 않으나 별도의 프로그램으로 제공된다.

### 2.1.7 내외간 인터페이스

AutoCAD의 DXF파일과의 입력 및 출력이 가능하며, 별도의 모듈로 제공되는 자유형상입력기 (Premodel<sup>TM</sup>)와의 인터페이스가 된다. Premodel은 유한요소해석을 위해 선분등으로 이루어지는 자유형상의 편집이 가능하며 및 재질과 경계조건을 자유롭게 변경할 수 있다. MotorPro는 상용회로 시뮬레이터인 Pspice<sup>TM</sup>, IsSpice<sup>TM</sup>, Matlab/Simulink<sup>TM</sup> 등의 모터 라이브러리를 생성시킬 수 있어, 회로 시뮬레이션을 할 수 있다.

### 2.1.8 결과 표현기

자기등가회로법에 의해 해석된 각종 설계치수를 표현할 수 있는 치수 표현기와 유한요소 결과의 관찰 및 필요 분포정수를 추출하는 유한요소 결과 표현기가 있다. 이와 별도로 전용화된 그래프 표현 출력기가 있어 각종 데이터를 그래프화 할 수 있고, FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 고조파 성분등을 관찰할 수 있다.

### 2.2 18kw BLDC 모터 적용 사례

(주)코모텍에서 개발중인 모터의 적용 사례를 예시한다.

표 1. 모터의 설계 사양

정격	출력[KW]	18
	입력전압[Vrms]	450
	속도[rpm]	230
	토크[Nm]	750
형상	S/T 외경[mm]	400
	자석	NdFeB
	Coil Spec	1.2×2, 32T, 4병렬

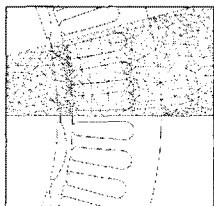


그림 10. 요소망

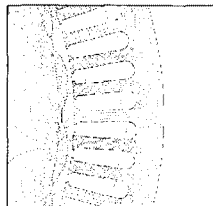


그림 11. 자속 분포

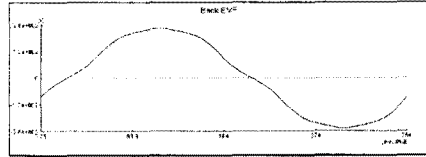


그림 12. 역기전력 파형 - 스큐가 없을 때

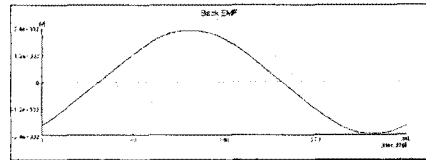


그림 13. 역기전력 파형 - 스큐 고려

표 1에는 모터의 설계 사양에 대해 표시하였고, 그림 10에는 대칭성이 고려되어 자동으로 발생된 요소망이, 그림 11에는 자속분포도를 나타내었다. MotorPro의 스큐 고려기능[11]을 이용하여 스큐가 없을 때와 있을 때의 역기전력 파형을 그림 11,12에 각각 나타내었다. 스큐를 고려하였을 때 정현파에 가까운 역기전력 파형을 얻을 수 있음을 관찰할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 모터설계를 위해 개발된 CAE 소프트웨어인 MotorPro의 기능과 구조에 대해 소개하였고 이를 이용하여 BLDC 모터에 적용한 결과, 유용한 결과를 도출할 수 있음을 보였다. 향후 적용가능한 모델을 확대하고, 전력전자 회로의 시뮬레이션 기능을 내장할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J. R. Hendershot and T.J.E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Magna Physics Pub., 1994
- [2] 김덕근, 페라이트 자석 직류전동기의 최적치수 설계에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교 1992.
- [3] 윤중석, 자극형상 최적화에 의한 표면부착 영구자석형 교류서보모터의 최적설계, 박사학위논문, 서울대학교 1993.
- [4] 이기식, 최홍순, "산업용 소프트웨어의 분석", 전기학회지, 제 45권, 2호, pp. 25-31, 1996년 2월.
- [5] 최홍순, "전기계의 FEM 소프트웨어의 구조", 월간 전자제어계측 & 인터페이스, pp. 134-137, 1997년 7월.
- [6] C. F. Parker, J. K. Sykulski, S. C. Taylor and C. S. Biddlecombe, "Parametric Environment for EM Computer Aided Design", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 32, No. 3, pp. 1433-1436, 1996.
- [7] 최홍순, 한송엽, "스페이스 매핑과 유한요소 해석에 의한 IPM형 모터 설계", 전기기기연구회 2000년 춘계학술대회 논문집, 2000
- [8] 최홍순, 한송엽, "자기회로법과 유한요소법을 결합한 전기기기 설계", 대한전기학회 1999년 추계학술대회 논문집, 1999
- [9] H.S. Choi and etc, "An Adaptive Mesh Generator based on Nodal Errors", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 36, No. 4, pp. 1619-1622, 2000.
- [10] 최홍순, 스페이스 매핑과 매개변수 유한요소 해석에 의한 전기기기 설계, 박사학위논문, 서울대학교 2000.
- [11] MotorPro<sup>TM</sup>, (주)코모텍, 경기도 성남시 중원구 상대원동 223-12, 2001