매입형 영구자석 동기 전동기의 철손 해석

Iron Loss Analysis of the Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor

서장호* 이상엽* 정현교**

Seo, Jang-Ho Lee, Sang Yub Jung, Hyun-Kyo

ABSTRACT

To predict efficiency of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(IPMSM) and to cope with the demagnetization risk of permanent magnets used in the IPMSM, accurate iron analysis of the IPMSM is very important at the motor design stage. In this paper, we present the method to estimate the iron loss for the IPMSM considering the condition of field weakening control and harmonics of flux density waveform.

1. 서 론

최근 높은 효율과 광범위한 속도 영역에서의 약계자 운전 영역을 얻기 위해 회전자의 인덕턴스 분포 차이, 즉 큰 돌극성을 가지는 전동기의 응용 분야가 확대 되고 있다. 일반적으로 매입형 영구자석 전동기는 회전자 자속과 고정자 전류의 상호 작용 토크(Field Torque)와 자기 저항(Reluctance)의 차이에 의한 토크(Reluctance Torque)가 동시에 발생하여 높은 기동 토크를 가질 수 있으며, 또한 기저속도(정격속도)이상에서 속도에 비례하여 공극 자속의 크기를 줄이는 약계자 제어를 행하면 제한된 단자 전압과 단자 전류 하에서 전동기가 발생할 수 있는 광범위한 정출력 영역(=약계자 영역)을 확보할 수 있다.

하지만, 매입형 영구자석 전동기는 견인 전동기의 특성상 고속에서 높은 주파수 특성으로 인하여 철손이 많이 발생하여 회전자에 매입된 자석의 감자 위험이 높으며 효율저감의 위험성도 가진다. 또한 고속에서 구동할 때에 발생되는 철손양이 열원에서 차지하는 비중은 저속 구동상황보다 상대적으로 크다. 특히 회전자에서 발생하는 철손은 영구자석의 열감자문제와 직결되므로 정확히 계산되어야 한다. 전동기의 구동상황이 고려된 발열량을 계산하기 위해선, 전동기의 속도, 약계자 제어특성, 전류 위상각을 고려해야하며, 전동기 코어와 영구자석의 재질, 전동기 형상을 정확하게 반영하기위해선 비선형 자계 수치해석이 필수 조건이다.

따라서, 본 논문에서는 전동기의 정확한 발열량 계산을 위해 2차원 유한 요소법을 적용하여 차량용 견인전동기의 구동상황을 고려한 철손계산법을 제시한다.

* 서울대학교, 전기역학 연구실, 정회원

E-mail :jangho78@elecmech.snu.ac.kr, 1stonion@elecmech.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7262 FAX : (02)878-1452

** 서울대학교, 전기역학 연구실, 정회원

E-mail :hkjung@snu.ac.kr

2. 본 문

2.1 매입형 영구자석 전동기

매입형 영구자석 전동기는 효율(Efficiency), 속응성(Dynamic Performance), 그리고 파워 밀도(Power Density)등이 높은 영구 자석형 전동기의 특성과, 공극 방향에 대해 인덕턴스의 공간적인 비 대칭성 즉 돌극성을 가지고 있어 동기형 리럭턴스 토크(Synchronous Reluctance Motor)의 특성도 가진다.

또한 영구자석을 회전자 내부에 매입하여, 이를 통해 표면 부착형 영구자석 전동기에서 발생하는 고속 운전시의 기계적 취약성을 극복할 수 있으며, 자석이 회전자 내부에 있어 고정자 권선에서 발생하는 열의 영향을 직접적으로 받지 않아 보다 열악한 환경에서도 운전이 가능하다. 또한 유효 공극을 작게 할 수 있는 장점이 있어 전기자 반작용 효과가 현저하여 약계자 제어가 가능하며, 광범위한 운전 속도에서 일정 출력 운전 영역이 가능하다. 그림 1.에서는 매입형 영구자석동기전동기의 모델을 나타내었다. 돌극성을 최대한 키우기 위해 위와 같은 회전자 구조를 가지고, 인덕턴스가 작은 d축에 자석을 매입하여 d축 자속을 상쇄한다. 또한, 정현파에 가까운 역기전력 파형이 나오게 하기 위해 각 층마다 부분적으로 자석을 매입하고, 누설 자속을 줄이고 고속 운전 영역에서의 원심력에 의한 회전자 파손을 방지하기 위하여 브릿지(bridge) 길이를 작게 한다.

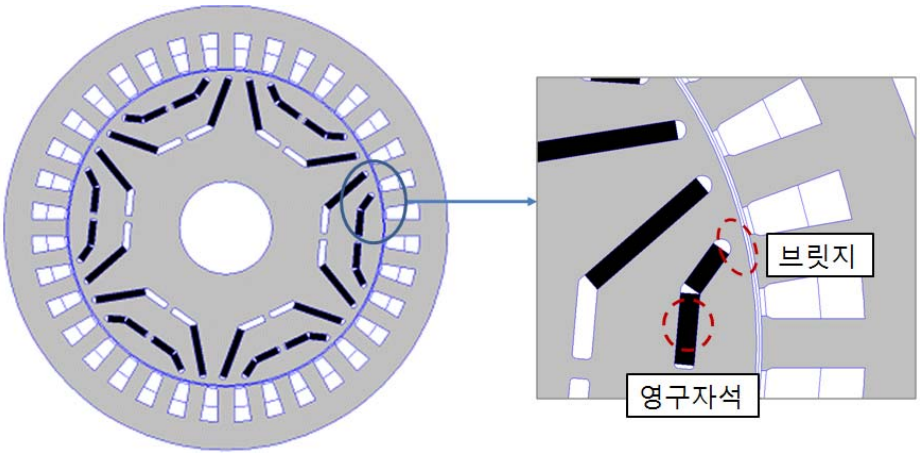

그림 1. 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 단면도

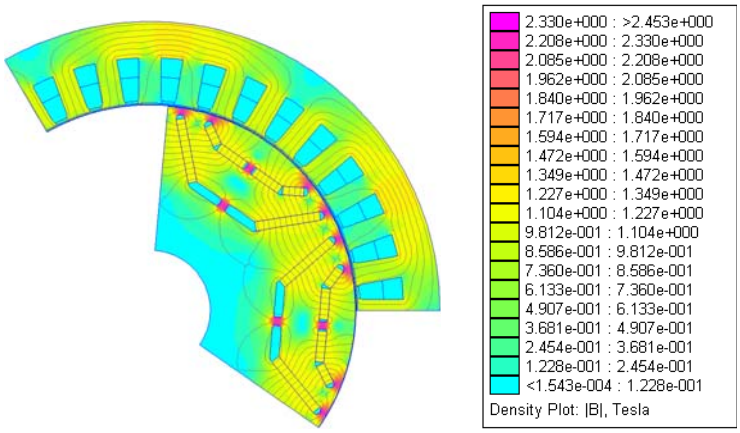

그림 2. 해석 모델의 자속밀도(flux density) 분포도

2.2 약계자 제어 특성을 고려한 전류 각도 추출

인버터에 의한 전동기 구동 시스템에서는 인버터의 용량 제한으로 인해 전동기의 입력 전압과 전류가 제한된다. 이로 인해 일정 토크 영역에서는 최대 토크가, 정출력 영역에서는 최대 허용 속도가 제한되게 된다. 특히 IPM의 경우 고속 운전 영역에서 일정 출력을 확보하기 위해서 약계자 제어가 필수적이며, 일반적으로 약계자 제어를 위한 제어기의 구성은 고정자 전압 방정식을 이용하고 이 때 역기전력 상수와 각 축 인덕턴스를 상수로 취급하였다. 하지만 자계 포화 영역에서 동작하는 IPM의 특성상 제어 정수들이 각 축 전류 조합에 따라 다른 값들을 보이게 되고, 또한 희토류 계열 자석의 특성이 온도 변화에 민감하기 때문에 현재는 온도와 각 축 전류 조합에 따른 제어 정수의 분포를 look-up table화하여 제어하고 있다.

정출력 운전 영역은 전동기의 속도가 일정 토크 운전영역의 최대 속도(기저속도)이상으로 증가할 경우, 전동기의 출력전압이 단자 전압 이상으로 증가하는 영역이다. 이때는 약계자 제어(Flux weakening control)를 이용하여 출력 전압을 단자 전압 수준으로 유지하여야 한다. 정출력 운전 영역에서 전동기의 속도는 인버터가 공급할 수 있는 최대 전류 Imax와 최대전압 Vmax에 의하여 동시에 제한된다. 일정 토크 영역에서는 전류 제한조건만 고려하면 되지만 일정 출력 영역에서는 전류와 전압이 동시에 제한된다. 그림 3는 IPMSM의 속도에 따른 전압궤적과 전류궤적을 나타낸다. 단, 전압 타원 중심이 전류 궤적 바깥에 존재하였을 경우에 최대 입력 전류를 사용한 약계자 제어방식이다.

그림 4에서는 그림 3에서와 같이 약계자 운전 시 전동기의 능력곡선을 나타낸다.

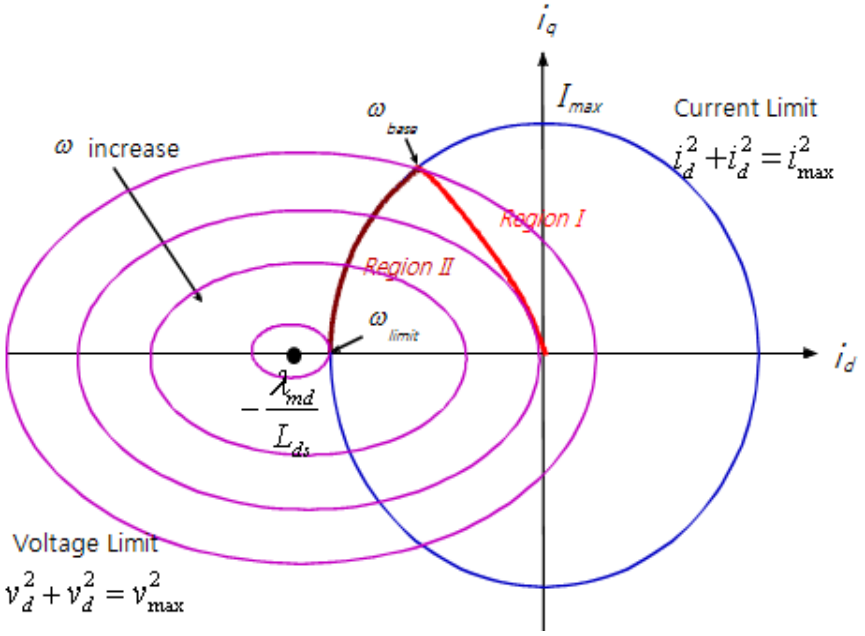

그림 3. IPMSM 의 속도에 따른 전압 궤적과 전류 궤적

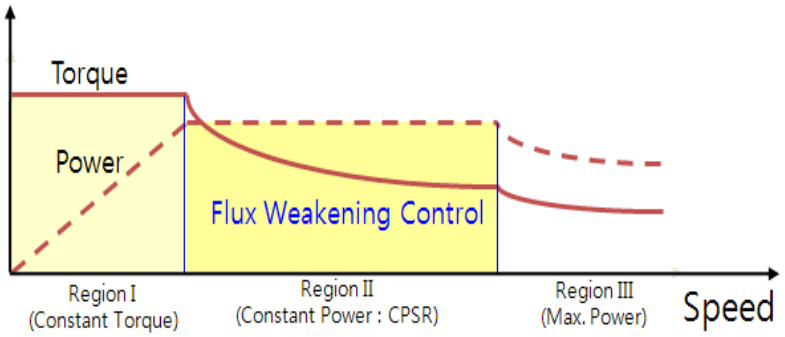

그림 4. IPMSM의 능력 곡선

정출력 운전 영역에서 설계안의 최대 출력 조건 만족 여부를 판별하는 방법을 그림 5에 나타내었다. 전압 타원 중심이 최대 입력 전류 궤적 바깥에 존재한다면, 전 전류 영역에 대한 수치해석 없이 최대 전류를 이용하여 능력 곡선을 간단하게 추출 가능하며 속도에 따른 토크, 출력, 전류 제어 각도를 빠르게 계산할 수 있다. 모터에 인가하는 최대 전류 Imax를 0도에서 90도까지 전류 각을 일정 간격으로 분할한다. 전동기의 최대 속도가 정 출력 운전 최대속도(ωmax)를 넘어서거나 전류 각 이 90도에 도달할 때까지 속도를 증가시키면서 주어진 전압제한에서 최대토크를 계산한다. 이와 같은 과정을 반복하면, 주어진 속도에서 최대 토크, 전류 각, 출력을 동시에 계산할 수 있다.

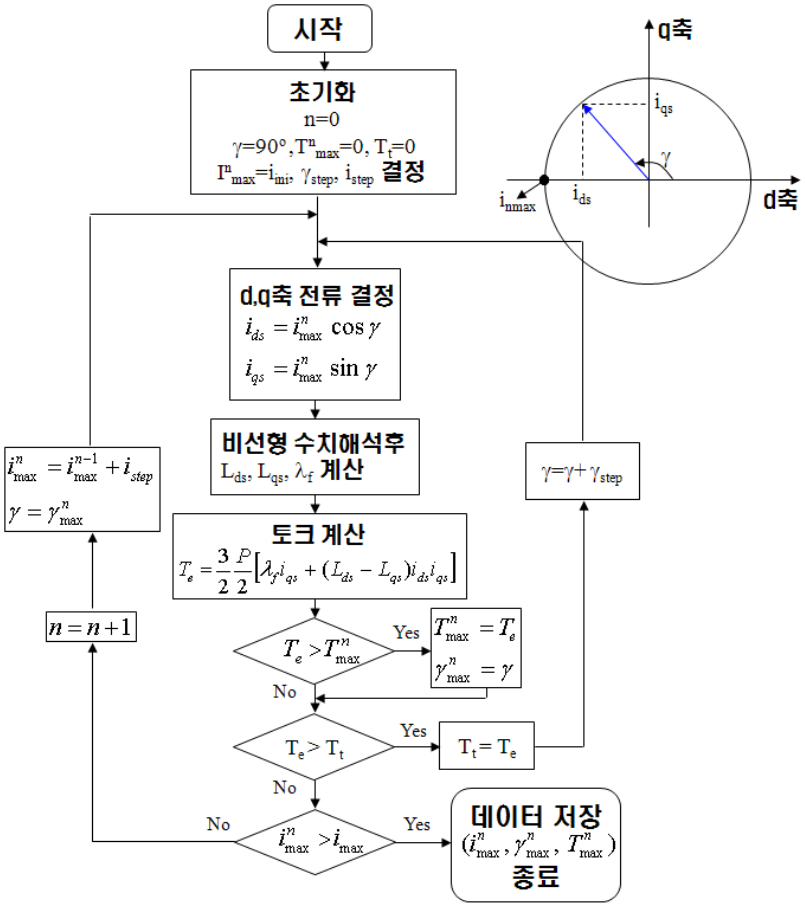

그림 5. 정출력 운전 영역 능력곡선 추출 방법

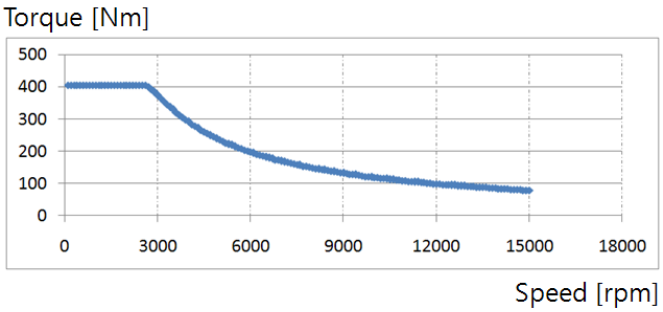

그림 6. 해석 모델의 토크 곡선

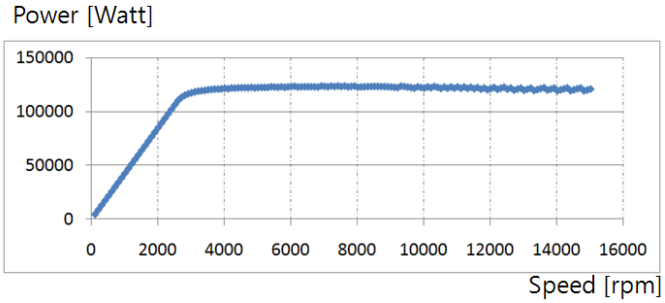

그림 7. 해석 모델의 출력 곡선

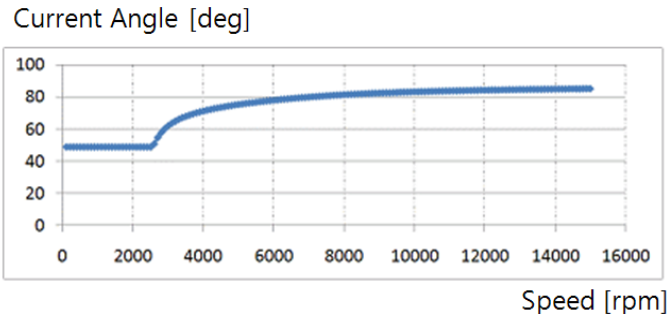

그림 8. 해석 모델의 전류 각

앞에서 제시한 견인전동기를 앞에서 제시한 방법을 이용하여 최고속도 15000[rpm]까지 토크, 출력, 전류 각을 추출하였다. 계산한 결과를 그림 6,7,8에 제시하였다.

2.3 견인 전동기의 철손 해석

2차원 유한요소를 이용하여 전동기의 철손해석을 수행하려면, 여러 가지 단계를 거쳐야 한다. 해석 영역의 각 요소에서 자속밀도 파형을 추출하여 철손을 계산하기 때문에, 회전자가 움직여도 회전자와 고정자 영역의 요소 정보는 그대로 유지해야만 한다. 하지만, 생성된 요소를 가지고 회전자를 움직이게 되면, 요소가 일그러지게 되어 해석을 할 수 없으며, 회전자가 움직일 때 마다 요소를 생성하게 되면 요소정보를 잃게 된다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하고자, 무빙밴드기법을 이용하였다. 무빙밴드기법(Moving band method)는 회전자가 이동하여도 공극의 요소에서 노드의 정보만 바꾸어 요소의 재생성 없이 간단하게 요소의 정보를 그대로 유지하면서 회전자의 움직임을 구현할 수 있다.

그림 9에서는 회전자를 일정간격(0.1) 이동하여도 요소의 형상을 그대로 유지하면서 전동기가 회전하는 모습을 보여주고 있다. 그림 10은 무빙밴드기법을 이용하였을 경우와 회

전시마다 요소를 재분할 하였을 경우의 역기전력 파형을 비교한 그림이다. 무빙밴드기법을 이용하였을 경우 역기전력 파형이 상당히 실제 파형과 유사함을 알 수 있다.

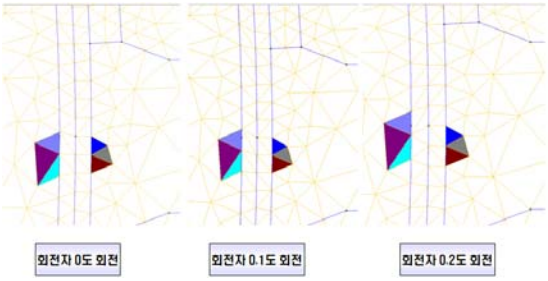

그림 9. 무빙밴드기법.

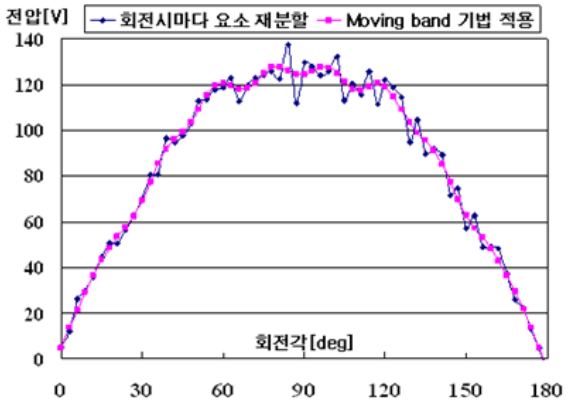

그림 10. 무빙밴드기법을 이용한 역기전력 파형 추출.

철손해석을 하려면 전동기의 동작 주파수의 철손 데이터를 이용하여 임의의 자속밀도 값에 대한 손실이 필요하다. 본 논문에서는 엡스타인(Epstein)시험을 이용한 철손 커브를 이용하여 철손 데이터 커브를 함수화 한 후, 임의의 자속밀도 크기 및 주파수를 보간법(interpolation)을 이용하여 추정하고 철손 해석에 활용하였다. 그림 11에서는 전동기에 사용된 35H230 전기강판의 10000 [Hz]까지의 철손 데이터커브를 나타내었다.

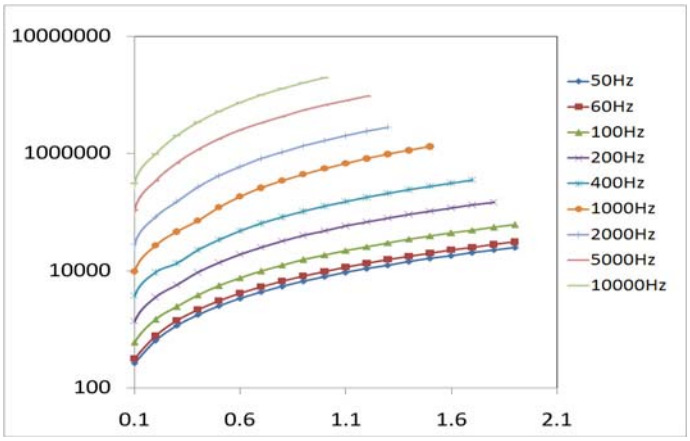

그림 11. 35H230 전기 강판 철손커브

무빙 밴드기법을 적용한 요소의 자속밀도 파형을 가지고 퓨리에 변환(FFT)을 하면 고조파 성분에 의한 철손을 계산할 수 있다. 그림 12에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 고조파 철손해석을 위한 제시를 보여준다[1]. 그림 13에서는 해석모델의 15000[rpm]에서의 약계자 제어 운전 시, 철손 분포를 보여준다. 회전자 표면에서 상당한 손실이 발생함을 알 수 있다.

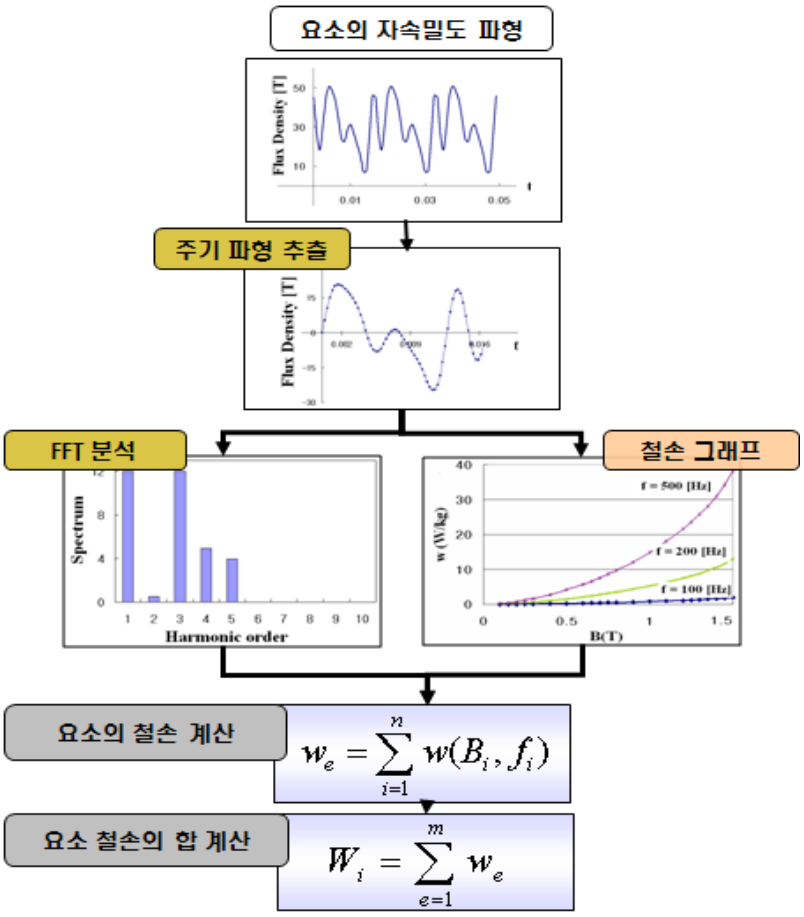

그림 12. FFT를 이용한 고조파 철손 해석 기법

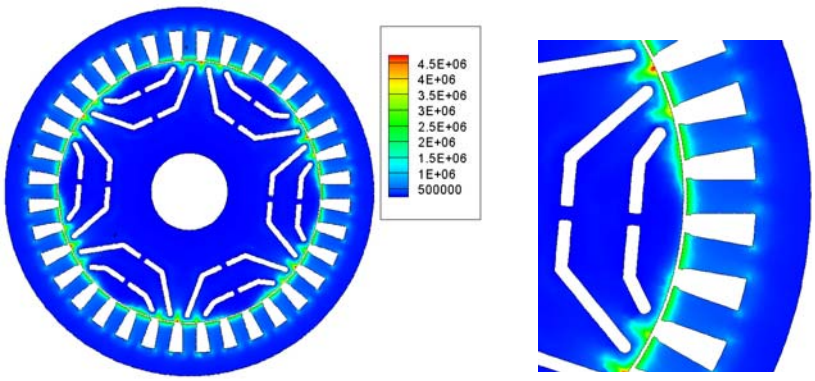

그림 13. 해석 모델의 철손 분포 (15000rpm)

3. 결론

본 논문에서는 자석밀도 파형의 고조파 성분 및 전동기의 약계자 제어 특성을 고려한 철손해석 기법을 제시하였다. 함수화된 전기강판의 철손 데이터(최고 1만 헤르쯔)커브와 무빙 밴드기법을 적용한 자속밀도 파형을 이용하여 철손해석을 수행하였다. 해석 결과, 고속운전시 (15000[rpm]) 회전자 부분에서도 많은 양의 철손이 발생함을 알 수 있었다. 따라서, 매입형 영구자석 전동기를 고속에서 운전하게 되면 회전자 철손으로 인해 전동기 효율 저감 및 영구자석의 감자위험에 직면할 수 있으므로 전동기 설계 시 각별한 주의가 필요하다. 또한 약계자 제어 시, 영구자석의 감자를 막기 위한 회전자 냉각 시스템의 설계에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

4. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. H. Nam, K. H. Ha, J. J. Lee, J. P. Hong, and G. H. Kang(2003), "A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples" IEEE Trans. Magn., Vol.39, No.3, pp.1472-475.