

# 운전조건을 고려한 전기자동차 구동용 IPMSM의 수치해석 기반의 제 특성 해석

|        |
|--------|
| 논 문    |
| 60-8-8 |

## Characteristic Analysis of IPMSM for Electric Vehicle Propulsion With Variable Operating Condition Based on Numerical Analysis

임 채 영\* · 정 상 용\*\* · 이 철 균†  
(Chae-Young Im · Sang-Yong Jung · Cheol-Gyun Lee)

**Abstract** - This Paper presents characteristic analysis in terms of interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicle propulsion using numerical analysis. Torque ripple analysis, thermal analysis, demagnetization analysis of permanent magnet and mechanical stress analysis with variable operating condition are presented. According to these characteristic analysis, both the performance of motor and possible problems during the operation are examined thoroughly in advance.

**Key Words** : Interior permanent magnet synchronous motor, Torque ripple, Permanent magnet demagnetization, Thermal analysis, Stress analysis

### 1. 서 론

본 논문에서는 전기자동차 구동용 매입형 영구자석 동기 전의 설계 단계에서 중요시되는 특성들에 대해 다루고자 한다. 첫 번째로 소음 및 진동을 야기할 수 있는 토크리플 특성이다. 차량 구동용 전동기는 운전 범위가 넓기 때문에 저속뿐만 아니라 고속 운전영역에서도 토크리플 특성이 고려되어야 하는데, 설계 시 이를 최소화해야 할 필요가 있다. 두 번째로 운전조건을 고려한 전동기 내부의 온도 특성이다. 차량 구동용 전동기는 운전 특성상 고속 고회전 운전을 요구하게 되는데, 이는 강판의 철손과 영구자석의 와류손, 코일의 동손을 크게 발생시킨다. 이러한 손실은 전동기의 열원으로 연결되고 온도상승의 원인이 되기 때문에 전동기의 손상을 가져올 수 있다. 따라서 전동기의 설계단계에서 열해석을 통해 충분한 분석이 이루어져야 한다. 이는 전동기의 성능을 예측하고 손상을 방지할 수 있는 중요한 지표가 된다. 세 번째로 전동기의 출력 성능을 저하시킬 수 있는 영구자석의 감자 특성이 있다. 영구자석은 재질에 따라 온도별 'B-H Curve' 및 불가역 감자 'knee point'가 다르기 때문에 설계 시 사용된 영구자석의 재질특성을 정확히 파악해야 한다. 또한 앞서 해석한 온도 상승 결과를 고려하여, 유한요소해석을 통해 영구자석의 안정성을 확보해야 한다. 마지막으로, 전동기의 회전자에 발생하는 응력특성이 있다. 전동기의 회전속도가 매우 높아지는 경우 자석을 지지하는 회전자의 부위가 원심력 및 전자기 가진력 등에 의한 응력에 의해 파괴

될 소지가 발생한다. 특히 고속 운전 시 전자기 가진력에 비해 매우 큰 값을 가지는 원심력에 대한 해석이 필요하고, 이에 대한 충분한 안전계수를 보장하는 회전자의 기계적 설계가 요구되어진다.

본 논문에서는 상기 특성들의 해석을 통해 설계한 전동기를 평가함으로써 전동기의 요구 성능조건의 만족여부를 판단하고자 한다.

### 2. 해석 모델 및 설계 사양

매입형 영구자석 전동기 해석 모델의 형상을 그림 1과 같이 나타내었다. 전동기는 8극 36슬롯의 구조이고, 회전자의 영구자석은 돌극비를 크게 하기 위해 2층 구조로 설계되었다.

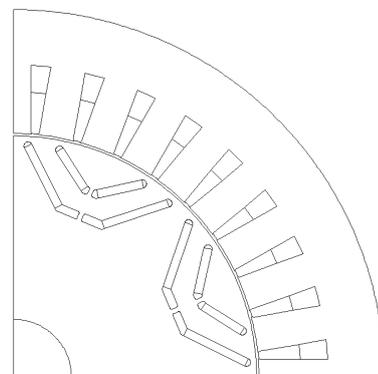


그림 1 매입형 영구자석 전동기의 해석 모델  
Fig. 1 Analysis model of IPMSM

\* 준 회원 : 동아대학교 전기공학과 석사과정  
\*\* 시니어회원 : 동아대학교 전기공학과 조교수  
† 교신저자, 정회원 : 동의대학교 전기공학과 교수  
E-mail : cglee@deu.ac.kr  
접수일자 : 2011년 6월 10일  
최종완료 : 2011년 6월 24일

매입형 영구자석 전동기는 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조로써, 토크는 영구자석에 의한 토크성분(Alignment Torque)과 d-q축 자기저항 차이에 의한 토크성분(Reluctance Torque)의 합으로 나타낼 수 있는 장점을 지닌다. 또한 매입된 영구자석의 자기적 특성이 공극과 유사하기 때문에 회전자 내부에 d-q축 인덕턴스 분포의 차이가 현저하게 나타난다. 이러한 돌극비(Saliency Ratio)에 비례하여 약계자 제어를 통해 광범위한 가변속 운전 특성을 가질 수 있다. 이렇듯 매입형 영구자석 전동기는 고출력 및 고속 운전이 가능하여 차량 구동용 전동기에 가장 적합한 타입이라 할 수 있다[1].

표 1은 해석 모델의 설계 사양을 나타낸다. 최대 출력은 120[kW]이고 최대 운전 속도는 12,000[rpm], 정격 운전 속도는 4,000[rpm]이다.

표 1 해석모델의 설계 사양

Table 1 Specification of analysis model

| 구분         | 사양                     |
|------------|------------------------|
| 극수 / 상수    | 8 / 3                  |
| 최대출력       | 120 [kW]               |
| 최대속도       | 12,000 [rpm]           |
| 정격속도       | 4,000 [rpm]            |
| 전류제한       | 700 [A <sub>pk</sub> ] |
| DC link 전압 | 550 [V <sub>dc</sub> ] |
| 냉각방식       | 수냉식                    |

### 3. 전동기의 토크리플 해석

#### 3.1 토크리플 저감의 필요성

매입형 영구자석 전동기는 릴럭턴스 토크 성분으로 인하여 토크리플이 크게 발생하는 단점이 있다. 이는 차량 구동시 소음 및 진동의 원인이 되며, 탑승자의 불안감을 야기할 수 있다[2]. 또한 전동기의 성능 저하를 유발할 수 있고 효율을 떨어뜨리는 원인이 되기도 한다. 따라서 설계 단계에서 토크리플을 최소화하기 위한 형상 설계가 필요하다. 특히 차량 구동용 전동기는 광범위한 운전범위를 가지기 때문에 저속뿐만 아니라 고속 운전영역에서도 토크리플 특성을 고려해한다.

#### 3.2 토크리플 저감 방법

전동기의 토크리플은 주로 회전자와 고정자의 형상에 큰

영향을 받는데, 특히 고정자의 슬롯 형상, 회전자의 영구자석과 자속장벽의 크기 및 매입위치 등에 기인 한다. 따라서 전동기의 구조적 설계 변수는 매우 다양하다고 할 수 있다. 하지만 고정자 권선이 분포권인 전동기의 경우 고정자의 슬롯 형상을 고정된 상태에서 회전자 내부에 매입된 영구자석의 형상만 변형시켜도 토크리플을 크게 저감시킬 수 있다. 그림 2는 회전자의 영구자석의 형상을 나타내고 있는데, 토크리플을 줄이기 위한 전동기의 형상 설계 변수로 자석 사이의 각도  $X_1$ ,  $X_2$ 를 지정하였다.

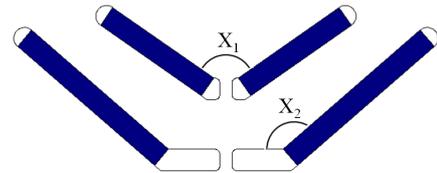


그림 2 전동기 형상 설계 변수

Fig. 2 Design variable of IPMSM structure

한편 전동기는 운전 속도에 따라 역기전력 및 인덕턴스의 크기가 변화하게 된다. 특히 약계자 제어 시를 전류의 크기 및 위상각이 달라지게 되는데, 이는 각 속도 영역에서 토크리플 특성이 다르게 나타나는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 운전속도를 고려하여 저속뿐만 아니라 고속 운전영역에서도 토크리플 저감하기 위한 형상설계에 대한 연구가 이루어졌다.

#### 3.3 토크리플 해석 결과

표 2는 상온 20[°C]에서 운전속도를 고려한 토크리플 해석결과이고, 표 3은 고온 120[°C]에서 운전속도를 고려한 토크리플 해석결과이다.

상온에서의 해석결과를 살펴보면, 정격 운전 속도인 4,000[rpm]에서는 해석모델 모두 평균토크가 목표토크인 286[Nm]을 만족하는 결과를 보이고 있으며, 토크리플은 해석모델 모두 5[%] 이내인 것을 확인할 수 있다. 하지만, 최대 운전 속도인 12,000[rpm]에서는 해석모델 모두 평균토크가 목표토크인 86[Nm]를 만족하고는 있지만, 초기 모델인 모델 1의 경우 토크리플이 11.61[%]의 결과를 보이고 있다. 고온에서의 해석결과를 살펴보면, 정격 운전 속도에서는 해석모델 모두 목표토크를 만족하고 있고, 토크리플 또한 5[%] 이내인 것을 확인할 수 있다. 하지만, 최대 운전 속도에서는 해석모델 모두 목표토크를 만족하고는 있지만, 초기 모델인 모델 1의 경우 토크리플이 13.09[%]의 결과를 보이고 있다.

따라서, 본 논문에서는 토크리플 저감을 위한 형상 설계를 수행하였고, 최종 설계 안인 모델 4를 도출 하였다. 최대 운전 속도인 12,000[rpm]에서 결과를 살펴보면, 상온 조건에서는 토크리플이 5.68[%]로 모델 1에 비해 약 51[%] 저감하였고, 고온 조건에서는 5.66[%]로 모델 1에 비해 약 56[%] 저감한 결과를 얻을 수 있었다.

표 2 상온 [20℃]에서의 토크리플 해석 결과 비교

Table 2 Torque ripple analysis results comparison at room temperature [20℃]

| 구분                             |              | 상온 [20℃] |        |        |        |
|--------------------------------|--------------|----------|--------|--------|--------|
| Model                          |              | 1        | 2      | 3      | 4      |
| X <sub>1</sub> /X <sub>2</sub> |              | 80/130   | 92/130 | 80/136 | 92/136 |
| 4,000 rpm                      | average [Nm] | 293.99   | 296.95 | 286.46 | 292.79 |
|                                | max [Nm]     | 299.28   | 300.86 | 291.68 | 298.03 |
|                                | min [Nm]     | 290.40   | 293.29 | 279.83 | 286.53 |
|                                | pk-pk [Nm]   | 8.89     | 7.56   | 11.85  | 11.50  |
|                                | ripple [%]   | 3.02     | 2.55   | 4.14   | 3.93   |
| 12,000 rpm                     | average [Nm] | 91.01    | 91.19  | 90.65  | 91.69  |
|                                | max [Nm]     | 96.72    | 95.86  | 94.15  | 94.58  |
|                                | min [Nm]     | 86.15    | 87.03  | 87.55  | 89.38  |
|                                | pk-pk [Nm]   | 10.57    | 8.82   | 6.60   | 5.21   |
|                                | ripple [%]   | 11.61    | 9.67   | 7.28   | 5.68   |

표 3 고온 [120℃]에서의 토크리플 해석 결과 비교

Table 3 Torque ripple analysis results comparison high temperature [120℃]

| 구분                             |              | 고온 [120℃] |        |        |        |
|--------------------------------|--------------|-----------|--------|--------|--------|
| Model                          |              | 1         | 2      | 3      | 4      |
| X <sub>1</sub> /X <sub>2</sub> |              | 80/130    | 92/130 | 80/136 | 92/136 |
| 4,000 rpm                      | average [Nm] | 294.98    | 297.35 | 287.64 | 292.30 |
|                                | max [Nm]     | 300.73    | 302.63 | 293.52 | 297.56 |
|                                | min [Nm]     | 290.46    | 292.86 | 280.40 | 287.24 |
|                                | pk-pk [Nm]   | 10.27     | 9.76   | 13.13  | 10.32  |
|                                | ripple [%]   | 3.48      | 3.28   | 4.56   | 3.53   |
| 12,000 rpm                     | average [Nm] | 91.03     | 91.16  | 90.82  | 91.70  |
|                                | max [Nm]     | 97.39     | 96.21  | 94.94  | 94.43  |
|                                | min [Nm]     | 85.47     | 86.95  | 86.78  | 89.24  |
|                                | pk-pk [Nm]   | 11.92     | 9.26   | 8.16   | 5.19   |
|                                | ripple [%]   | 13.09     | 10.16  | 8.99   | 5.66   |

## 4. 전동기의 열 해석

### 4.1 열 해석의 필요성

영구자석 전동기에서 권선절연물의 수명, 과부하의 한계, 영구자석의 감자 및 출력 등은 온도에 영향을 받기 때문에 전동기의 온도를 정확하게 해석하는 것은 전동기의 성능을 예측할 수 있는 중요한 지표라 할 수 있다. 또한 최근 추세가 소형경량화 및 고성능의 전동기를 필요로 하고 있으므로 냉각성능의 향상은 곧 이러한 요구조건을 충족하는 데에 필수 요소가 된다.

열전달 해석은 한 영역에서 다른 영역으로 열에너지의 이동을 뜻하며, 전도, 대류, 복사의 요소를 고려한 해석이 필요하다. 해석 기법에는 등가회로방법과 수치해석 기법인 유한요소해석 등이 있다. 열 등가회로방법은 옴의 법칙과 푸리에 법칙 사이의 수학적 유사성을 이용하여 전도, 대류, 복사의 요소를 각각 열 저항으로 대체하여 등가모델화 한 후 해석하는 기법이며, 유한요소해석은 자체해석과 열계 해석 사이의 지배방정식을 이용하여 정식화를 통해 해석하는 기법이다.

본 논문에서는 운전 조건을 고려한 다양한 해석이 필요함에 따라 해석시간이 빠른 열 등가회로법을 이용한 열 해석을 수행하였다.

### 4.2 열전달

#### 4.2.1 전도 열전달

열에너지는 상호간에 온도차가 있어야 가능하며 항상 고온에서 저온으로 에너지가 전달된다. 두 물체의 온도가 같게 되면 열전달은 정지한다. 세 가지 열전달 방법 중 전도(conduction)는 입자간의 상호작용에 의해 에너지가 많은 입자에서 에너지가 적은 입자로 전달된다. 전도는 고체, 액체, 기체 모두 일어나며, 전도에 의한 열전달율은 물체의 형상, 두께, 재질 및 물체를 통한 온도차에 따라 다르게 나타나는데, Fourier 열전도 법칙에 의해 식 (1)로 표현된다 [3].

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 열전달률[kW/m<sup>2</sup>],  $k$ 는 물질의 열전도 계수 [kW/(m℃)]이며,  $\frac{dT}{dx}$ 는 온도구배[℃/m],  $A$ 는 열전달 방향에 수직인 면적이다.

#### 4.2.2 대류 열전달

대류(convection)는 고체 면과 유동하는 인접한 유체 사이에 발생하는 열전달이며, 복합적인 요소로 인하여 열전달율을 산출하는데 많은 어려움이 따른다. 대류 열전달율은 Newton의 냉각 법칙에 의해 식 (2)와 같이 표현한다[4].

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

여기서,  $h$ 는 대류 열전달 계수,  $A_s$ 는 대류 열전달이 발생하는 면적,  $T_s$ 는 물체 표면온도, 그리고  $T_\infty$ 는 표면에서 충분히 멀리 떨어진 곳의 유체온도이다.

### 4.2.3 복사 열전달

복사(radiation)는 물질이 원자나 분자의 구조가 변하면서 전자파 또는 광자의 형태로 방출하는 에너지 전달이다[3]. 전도나 대류와는 달리 복사 열전달은 중간 매개체가 필요 없으며, 복사 열전달율은 Stefan-Boltzmann 법칙에 의해 식 (3)으로 표현한다.

$$Q_{emit} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 표면의 방사율이며, 그 범위는  $0 \leq \epsilon \leq 1$ 이며,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $A_s$ 는 복사 열전달이 발생하는 면적,  $T_s$ 는 물체 표면온도,  $T_{surr}$ 은  $T_s$ 보다 훨씬 큰 표면의 온도이다.

### 4.2.4 열 전달 등가회로

열 해석을 하기 위한 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

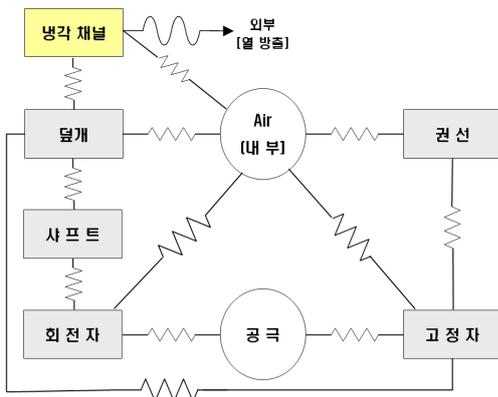


그림 3 열 저항 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit of thermal resistance

열 해석을 하기 위한 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

먼저, 열해석을 수행하기 위해서는 열전도 저항을 구해야 한다. 이러한 열전도 저항은 물질과 물질사이에서 열이 전달되는 정도를 나타내는 것으로 식 (4)로 나타낸다.

$$R = \frac{d}{A\lambda} [k/W] \quad (4)$$

여기서,  $A$ 는 열을 전달하기 위한 면적[m<sup>2</sup>],  $d$ 는 두 물체간의 거리[m],  $\lambda$ 는 열전도계수[W/m·°C]를 나타낸다. 또한 운전상태에서 고정자와 회전자 사이의 열 전달계수는 다음과 같이 식 (5)으로 나타낸다.

$$h = \frac{6.6 \nu r^{0.67}}{10^5 \lg^{0.33}} \quad (5)$$

여기서  $\nu r$ 은 회전속도(m/s),  $\lg$ 는 공극의 길이를 나타낸다.

### 4.3 열 해석 결과

표 4는 전동기의 정격시간에 따른 온도 해석 결과를 나타내고 있다. 여기서 정격시간은 전동기의 냉각방식과 운전속도에 기인하게 된다. 본 논문의 해석 모델은 강제 수냉식의 냉각방식을 가지며, 12,000[rpm]까지의 가변속 운전 범위를 가지는 전동기이다. 따라서 정확한 열 해석을 위해서는 수냉식의 냉각조건을 고려하고, 정격시간에 기인하는 운전속도에서 다양한 열 해석 파라미터의 산정이 필요하다. 특히, 전동기의 약제자 제어 운전 구간에서는 동작 주파수와 인가되는 전류의 크기 및 위상각이 운전 속도별로 변화하기 때문에 동손과 철손, 영구자석의 와류손 등의 정확한 해석이 필요하다.

해석결과를 살펴보면, 10[sec] 정격과 60[sec] 정격에서는 온도 상승이 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 기동 시 운전조건으로 단시간 정격에 해당하기 때문이다. 주 운전영역인 40[min] 정격을 살펴보면, 온도가 단시간 정격에 비해 대체적으로 많이 올라간 것을 볼 수 있다. 특히, 온도 상승이 가장 두드러지는 부분은 코일 엔드부로 138[°C]까지 올라가는 것을 확인 할 수 있다. 또한 40[min] 정격에 해당하는 조건으로 60[min]까지 해석을 해본 결과, 역시 코일 엔드부 온도 상승이 가장 컸으며 153[°C]까지 올라가는 것을 확인하였다. 하지만 본 설계에 사용된 코일부의 최대 절연등급은 H중으로 최대 허용 온도는 180[°C]이므로 충분히 안전하게 설계되었다고 할 수 있다.

표 4 열 해석 결과  
Table 4 Results of thermal analysis

| 구분         | 코일    |       | 고정자   |       | 회전자  |      |
|------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|            | 내부    | 엔드    | 치     | 요크    | 코어   | 자석   |
| 정격         |       |       |       |       |      |      |
| 10sec [°C] | 64.3  | 67.7  | 56.4  | 55.2  | 55.0 | 55.0 |
| 60sec [°C] | 61.8  | 64.6  | 60.4  | 56.9  | 55.2 | 55.1 |
| 40min [°C] | 123.9 | 138.6 | 119.5 | 107.1 | 93.2 | 94.3 |

## 5. 전동기의 영구자석 감자 해석

### 5.1 영구자석 감자 해석의 필요성

매입형 영구자석 전동기는 계자 자속이 외부 전원에 의존하지 않고 회전자의 영구자석에 의해 공급되기 때문에 효율 및 출력 밀도가 타 전동기에 비해 월등히 높다. 특히 차량 구동용 매입형 영구자석 전동기의 영구자석은 높은 에너지 밀도를 가지는 희토류 계열의 자석이 많이 사용되고 있다.

하지만 영구자석의 이러한 장점에도 불구하고, 자기적인 특성이 저감되는 불가역 감자 특성을 가지는 단점이 존재한다[5]. 이는 영구자석의 본래 재료의 특성을 부분적으로 잃어버리는 현상이라 할 수 있으며, 전동기의 출력 및 성능을

저하시키는 원인이 될 수 있다.

영구자석의 불가역 감자에 영향을 미치는 요소는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 입력단의 전기자 전류에 의한 영구자석의 자화방향에 대해 역방향으로 작용하는 자속성분에 의한 감자효과이며, 두 번째는 영구자석 내부의 도전율로 인해 발생하는 내부 전류로부터 자체적인 온도 상승이 발생하는 고온 불가역 감자 효과이다[6][7].

본 논문에서는 이러한 감자작용을 예방하기 위해 설계 시 사용된 영구자석의 재질 특성을 정확히 파악하고, 설계 단계에서 유한요소 해석을 통해 충분한 안정성을 확보하고자 한다.



그림 5 영구자석 감자 해석 부위

Fig. 5 Demagnetization analysis region of PM

### 5.2 영구자석 감자 해석 방법

그림 4는 본 설계에 사용된 영구자석의 온도별 감자 특성 곡선을 나타내고 있다. 이러한 영구자석의 감자 특성은 'B-H Curve'의 2, 3 상한에서 표현되며, 이는 영구자석의 동작 특성을 해석하는데 중요한 의미를 가진다. 그림 4를 살펴보면, 영구자석의 불가역 감자 'knee point'가 상온20[°C]에서는 -2.0[T], 고온[120°C]에서는 -0.4[T]로 형성되는 것을 알 수 있다. 온도가 높아지면서 잔류자속밀도가 일정 비율로 감소하는 고온 감자 특성을 가지며 온도에 따른 잔류자속 밀도의 감소율은 회토티 계열의 경우 약 -0.1[%/°C]를 갖는다.

따라서 본 논문에서는 온도 조건을 고려하고, 영구자석의 감자현상이 가장 두드러지는 최대출력의 정격속도와 최대속도에서 특성해석을 수행하였다.

그림 5에 표시된 부위는 회전자의 철심에서 자기적 포화가 가장 심하게 발생하는 부위로 영구자석의 감자 현상이 가장 두드러지는 부위라 할 수 있다. 해석부위에 해당하는 영구자석의 자속밀도와 자계의 세기는 전동기의 동작점에 따라 식 (6)과 (7)로 나타낼 수 있다.

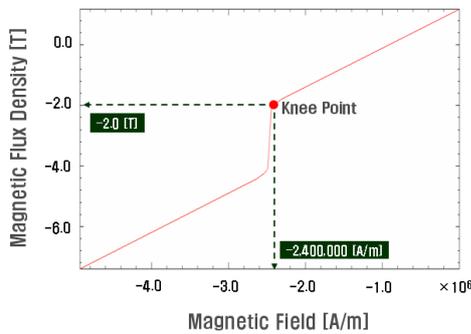
$$B_m = B_x \times \cos((sa + ang) + \pi/180) + B_y \times \sin((sa + ang) + \pi/180) \quad (6)$$

$$H_m = H_x \times \cos((sa + ang) + \pi/180) + H_y \times \sin((sa + ang) + \pi/180) \quad (7)$$

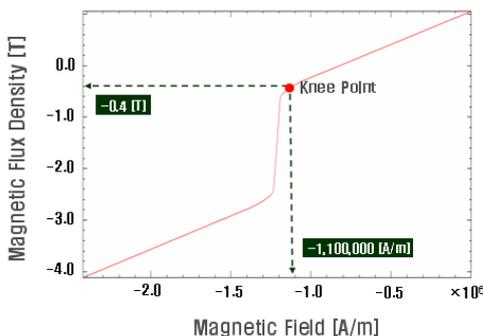
여기서,  $B_x, H_x$ 는  $x$ 축 방향 자속밀도와 자계의 세기,  $B_y, H_y$ 는  $y$ 축 방향 자속밀도와 자계의 세기,  $sa$ 는 영구자석의 초기자화 방향,  $ang$ 은 전동기의 동작점에 따라 변화하는 회전 각도를 의미한다.

따라서, 영구자석의 동작점을 나타내는 퍼미언스 계수  $P_c$ 는 식 (8)으로 나타낼 수 있다.

$$P_c = \frac{B_m}{H_m} \quad (8)$$



(a) 상온 20[°C]에서의 영구자석 'B-H' 곡선



(b) 고온 120[°C]에서의 영구자석 'B-H' 곡선

그림 4 영구자석 'B-H' 곡선

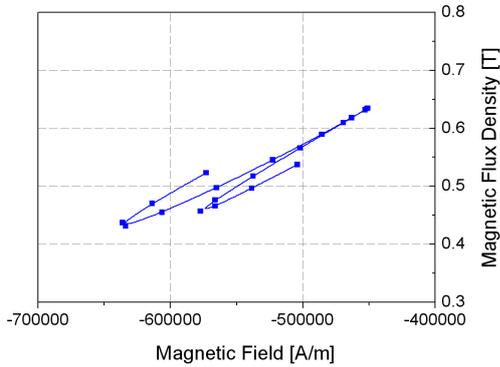
Fig. 4 Demagnetization curve of PM

### 5.3 영구자석 감자 해석 결과

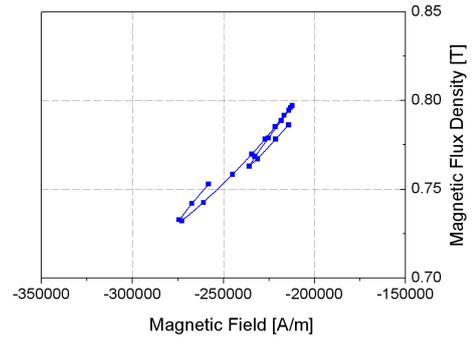
영구자석의 감자 해석을 위한 온도 조건은 상온 20[°C]와 고온 [120°C]로 선정하였다. 이는 앞서 해석한 온도 특성 결과 표 4에서 회전자 내부의 영구자석의 온도가 최대 94.3[°C]까지 올라가는 40[min] 정격 조건을 반영한 것이다. 운전 조건은 앞서 언급한바와 같이 최대 출력에서의 정격속도와 최대속도를 기준으로 해석을 수행하였다.

그림 6은 상온에서 영구자석의 운전 동작점을 나타내고 있다. 이는 영구자석의 감자 해석 결과를 나타내는 그래프라 할 수 있다. 결과를 살펴보면, 정격속도인 4,000[rpm]에서는 자속밀도의 최소값이 0.4[T]에서 형성되고, 최대 속도인 12,000[rpm]에서는 0.8[T]에서 형성되는 것을 확인할 수 있다. 앞서 설계 시 사용된 영구자석의 상온에서 불가역 감자

'knee point'는  $-2.0[T]$ 로 불가역 감자에 대해서는 안정적이라 할 수 있다.



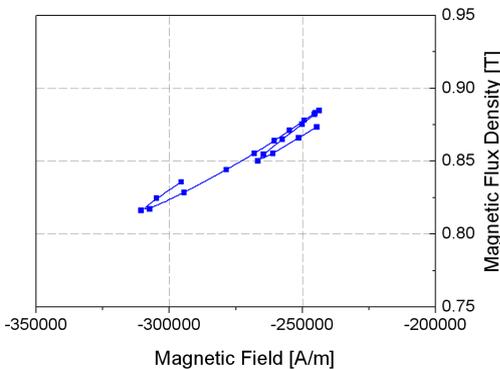
(a) 4,000[rpm]에서의 영구자석 감자 해석 결과



(b) 12,000[rpm]에서의 해석 결과

그림 7 고온  $120[^\circ C]$ 에서 영구자석의 감자 해석 결과

Fig. 7 Results of demagnetization analysis at high temperature ( $120^\circ C$ )

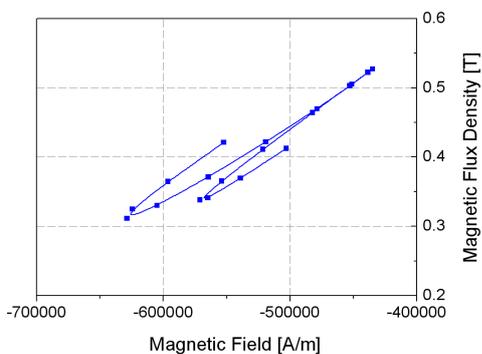


(b) 12,000[rpm]에서의 영구자석 감자 해석 결과

그림 6 상온  $20[^\circ C]$ 에서 영구자석의 감자 해석 결과

Fig. 6 Results of demagnetization analysis at room temperature ( $20^\circ C$ )

그림 7은 고온에서 영구자석의 감자 해석 결과이다. 정격 속도에서는 자속밀도의 최소값이  $0.3[T]$ 에서 형성되고, 최대 속도에서는  $0.7[T]$ 에서 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 고온에서의 불가역 감자 'knee point'는  $-0.4[T]$ 로 고온 역시 불가역 감자에 대해 안정적이라고 할 수 있다.



(a) 4,000[rpm]에서의 영구자석 감자 해석 결과

## 6. 전동기의 응력 해석

### 6.1 응력 해석의 필요성

본 논문의 대상 모델인 매입형 영구자석 동기전동기는 높은 기동 토크와 더불어 넓은 속도 영역의 구동 성능이 요구된다. 따라서 높은 기동 토크를 발생시키기 위해서 회전자 내의 브리지와 센터포스트의 두께를 가능한 축소시키는 것이 유리하지만 고속 영역에서의 영구자석의 비산이나 회전자의 파손을 방지할 수 있을 정도의 두께를 유지하여야 한다. 일반적으로 매입형 영구자석 동기전동기가 고속에서 유리하다고 알려져 있는데 이는 회전자의 자석이 표면부착형 영구자석 전동기처럼 전동기 외부에 부착되는 것이 아니라 전동기 내부에 삽입되어 회전자 철심의 특정부위에 의해 기계적으로 보호되기 때문이다. 그러나 전동기의 구동 속도가 매우 높아지는 경우에는 매입형 영구자석 전동기의 자석을 지지하는 회전자의 부위가 원심력 및 전자기 가진력 등에 의한 응력에 의해 파괴될 소지가 발생한다. 특히 고속 구동 시 전자기 가진력에 비해 매우 큰 값을 가지는 원심력에 대한 해석이 필요하며 충분한 안전계수를 보장하는 회전자의 기계적 설계가 요구되어 진다.

### 6.2 응력 해석 방법

본 논문에서는 원심력에 의한 인장응력과 전단응력을 중심으로 매입형 영구자석 전동기의 응력해석을 수행하였다. 다층 매입형 영구자석 전동기는 전력전자 분야의 발전과 영구자석 성능의 향상으로 약계자 제어를 통하여 넓은 운전속도 범위에서 고효율, 고출력 밀도도 갖게 되었다. 그러나 매입형 영구자석 전동기는 구조상 회전자의 형상이 고속에서 원심력에 의해 제한을 받는 단점이 존재하게 된다. 그래서 전자기적 특성 해석과 더불어 원심력에 의한 응력 해석이 설계 단계에서 고려되어야 한다.

원심력은 전단응력 및 인장응력, 굽힘 응력과 관련이 있으며, 물질별 질량과 각속도  $\omega$ , 그리고 각 요소의 무게중심과 회전자의 원점과의 거리  $r_n$  성분과 관련이 있다. 이러한 원심력과 관련된 성분들은 각각의 요소에 적용된다.

본 논문에서는 각 요소별 질량  $M$ 을 물질별 밀도  $\rho$ 와 부피를 이용해 구하였다. 응력 특성을 해석하고자 하는 영역  $A$ 를 그림 8과 같이 정한 후, 영역을 한정 짓는  $A$ 에 해당하는 절점의 좌표와 절점 수, 그리고 요소 수는 제안된 프로그램에서 얻어진다. 그런 후, 이 정보들을 가지고 각각의 요소들에 작용하는 면적과 원심력을 축방향의 길이  $l$ 과 함께 계산한다. 즉, 기존의 전자기적 특성 해석을 위한 요소 정보와 절점 정보들을 가지고 전체  $A$ 영역에 있는 각 요소가 받는 각각의 힘들을 합산하여 계산하는 것이다. 응력해석의 수치해석 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \sum_{n=1}^N (\rho \times A_n \times l \times r_n \times \omega^2) \quad (9)$$

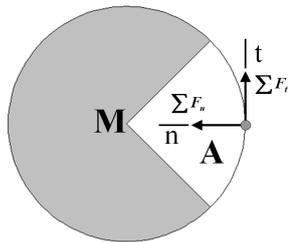


그림 8 응력 해석 부위  
Fig. 8 Region of stress analysis

### 6.3 응력 해석 결과

본 논문에서 해석 모델의 회전자 철심 재질은 35PN230이다. 철심 제조사의 제원을 보면 인장강도가 570[Mpa]이고, 항복점이 450[Mpa]이다.

그림 9는 해석 모델의 12,000[rpm] 회전자 응력 분포 양상을 나타내고 있다. 회전자 가장 안쪽 비 자성체의 센터포스트에서 최대 응력이 발생하며 128[Mpa]로 계산되었다. 이는 철심의 항복점을 기준으로 안전계수가 3.51에 해당하는 수치이다. 일반적인 기기에서는 약 1.3~1.5 정도의 안전 계수가 적절하다고 알려져 있기 때문에, 본 해석모델은 최고 속도에서 파손 없이 동작이 가능함을 알 수 있다.

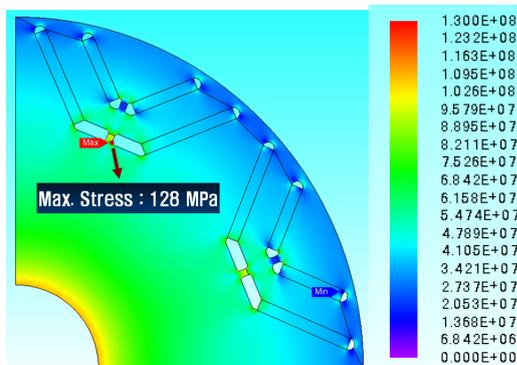


그림 9 응력해석 결과  
Fig. 9 Result of Stress analysis

### 3. 결 론

본 논문에서는 설계한 전동기를 검증하고자 수치해석을 기반으로 매입형 영구자석 전동기의 토크리플과 열, 영구자석 감자, 회전자 응력 특성에 대해 고찰 하였다.

해석 결과, 토크리플이 저속 운전 뿐 아니라 고속운전 영역에서도 크게 저감된 결과를 얻을 수 있었고, 온도 특성은 코일 엔드부에서 가장 두드러지게 증가하는데 최대 138[°C]까지 상승 하는 것을 확인하였으며, 코일의 절연등급을 고려했을 때 안전하다는 것을 알 수 있었다. 영구자석 감자 해석 및 응력 해석 결과를 살펴보면, 불가역 감자 및 파손에 대한 우려가 없음을 확인하였다.

이러한 특성 해석들은 전동기의 성능 뿐 아니라 제품의 신뢰성을 확보하는데 필수적인 요소라 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년도 동의대학교 교내연구비에 의해 수행된 연구결과임(2009AA161).

### 참 고 문 헌

- [1] S. Y. Kwak, J. K. Kim and H. K. Jung, "Characteristic analysis of multi layer-buried magnet synchronous motor using fixed permeability method," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 20, pp. 54.
- [2] Bo Guan, Yifan Zhao, Yifan, "Torque Ripple Minimization in Interior PM Machines using FEM and Multiple Reference Frames". Industrial Electronics and Applications, pp.1-6, May. 2006.
- [3] M.Necati Ozisik, "Heat Transfer a Basic Approach", McGraw-Hill Publishing Company, 1990
- [4] Adrian Bejan, "Heat Transfer", Wiley Inter Science, 1993
- [5] Ki-Chan Kim, Seung-Bin Lim, Dae-Hyun Koo, and Ju Lee. "The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization", IEEE Trans on Magnetics, Vol. 42, Bo. 10, pp. 3485-3497, October 2006
- [6] W.Fengxiang, Z.Wenpeng, Z.Ming, W.Baoguo, "Design consideration of high-speed PM generator for micro tubines." Powercon 2002. International Conference on, vol.1, pp.158-162, Oct. 2002
- [7] C.Mi, M.Filippa, W.Liu, R.Ma, "Analytical method for predicting the air-gap flux of interiou-type permanent magnet machines," IEEE Trans. Magn. vol. 40, pp. 50-57 Jan. 2004.

저 자 소 개



**임 채 영 (林 采 英)**

2010년 동아대학교 전기공학과 졸업  
공학사, 2011년~현재 동아대학교 대학원  
전기공학과 석사과정



**정 상 용 (鄭 相 龍)**

2003년 서울대학교 대학원 전기공학과  
졸업, 공학박사, 2003년~2006년 현대자동  
차 연구개발본부 선임연구원, 2006년~현  
재 동아대학교 전기공학과 조교수



**이 철 균 (李 哲 均)**

1998년 서울대학교 대학원 전기공학과  
졸업, 공학박사, 1999년~현재 동의대학교  
전기공학과 교수