

고속으로 운전되는 영구자석형 동기전동기의 철손 및 풍손 해석

論 文
55B-10-4

Analysis on the Core Loss and Windage Loss in Permanent Magnet Synchronous Motor for High-Speed Application

張錫明* · 趙漢旭[†] · 高敬眞**
(Seok-Myeong Jang · Han-Wook Cho · Kyoung-Jin Ko)

Abstract - Recently, more attention has been paid to the development of high-speed permanent magnet (PM) synchronous motors, since they are conducive to high efficiency, high power density, small size, and low weight. In high-speed PM machines, core loss and windage loss form a larger proportion of the total losses than usual in conventional mid- or low speed machines. This article deals with the analysis on the core loss and windage loss in PM synchronous motor for high-speed application. Using the data information from a manufacturer and non-linear curve fitting, this paper investigates the magnetic behavior and its core losses in the stator core using the electrical steels. And, the windage loss is calculated according to the variation of the rotational speed, motor inner pressure and temperature.

Key Words : High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motors, Core Loss, Windage Loss

1. 서 론

최근 산업시스템이 다양해지고 에너지 절감요구가 높아짐에 따라 각종 전력변환 기기들의 고효율, 고효율, 고성능화는 필수적인 조건이 되고 있다. 따라서, 전력변환기의 손실과 이에 의한 열의 발생은 효율저하 뿐만 아니라 설계 자유도 저해 요소로 작용하므로, 저손실 소재 및 손실저감 방안에 대한 연구가 더욱 요구되고 있는 실정이다 [1]. 일반적으로 전기기기의 열원은 전기적 손실에 의한 것으로 동손과 철손으로 크게 나눌 수 있다. 동손은 전류의 저항손에 해당되며, 철손은 재질 자체의 자기이력 특성으로 인한 히스테리시스 손과 유도전류로 인한 손실인 와전류손으로 나눌 수가 있다. 또한, 공극 자속밀도의 비정현적 분포에 의한 회전자 손실, 그리고 기계적 손실로 존재하는 베어링 마찰손과 풍손으로 분류할 수 있다. 전기기기에 있어 손실은 기기의 운전 조건이나 효율 등을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 손실을 정밀하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다. 특히, 철손은 교류전력 장치에서 사용되는 철심에서 발생하는 열 손실의 근원이 되는 것으로, 교류 전력 장치의 설계 뿐만 아니라 효율 면에서도 중요한 비중을 차지하고 있다. 또한, 풍손은 초고속으로 운전되는 전기기에서 회전자 와전류 손실과 함께 회전자 열발생의 주원인이 되고, 속도가 높고 출

력이 큰 대형기에서 상대적으로 큰 값을 가지며, 회전자의 냉각이나 방열이 매우 까다로운 문제임을 감안할 때, 정량적인 특성의 예측이 매우 중요하다 [2]-[5]. 따라서, 본 논문에서는 20,000 rpm 급 이상의 고속으로 운전되는 영구자석형 동기 전동기의 성능평가의 기반이 되는 손실 중에서 철손과 풍손 특성의 해석을 주로 다루었다.

철손에 관한 연구는 최근 컴퓨터의 비약적 발달과 더불어 계산 및 해석에서의 비선형적인 자기특성을 수치해석적인 방법에 적용할 수 있게 되어 매우 활발히 진행되고 있다. 특히, 기존의 고전적인 철손 해석법은 경험적이고 실험적인 수식을 사용함과 더불어 각 손실 계수 값이 불명확하다는 단점을 가지므로, 철심의 재질 데이터를 직접 입력하여 고조파를 포함하는 철손을 계산하는 방법이 국·내외적으로 높은 연구 단계에 있다. 즉, 유한요소법과 같은 수치해석기법을 전력장치의 설계에 도입하게 되고, 교류 자기특성 데이터를 수치해석에서 다양하게 적용할 수 있게 됨에 따라 원하는 운전조건하에서의 철손해석이 가능하게 되었다. 그러나, 수치해석에 의해 정확한 현상을 표현하기 위해서는 두께 0.1mm~0.5mm의 전기강판을 모델링은 물론, 전동기 자체를 3차원 개체로 모델링하는 경우 Mesh의 분할 및 해석의 수행에 있어 방대한 계산기의 능력을 필요로 하게된다 [6],[7]. 따라서, 본 논문에서는 제작자에 의해 주어지는 철손데이터의 Curve fitting 과 철손 계수의 추정을 이용한 빠른 철손 계산을 수행할 수 있는 방안을 제안하였다. 추정된 철손 계수값과 수정된 철손식을 이용하여 기존의 고전적 철손해석법이 갖는 단점을 보완하는 해석적 기법을 제시하였다.

또한, 전동기 기계손의 일부인 풍손은, 일반적인 중저속 전동기에서 그 영향이 매우 작지만, 1-kHz 이상의 주파수 영역에서 운전되는 고속 회전기에서는 주파수의 제곱에 비

[†] 교신저자, 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士修了
E-mail : hwcho@cnu.ac.kr

* 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2006年 7月 25日

最終完了 : 2006年 9月 21日

례하는 특성을 보이므로, 이에 대한 정밀한 예측이 필요하다. 특히, 플라이휠 시스템과 같은 이상적 무손실-고속-고효율이 요구되는 시스템에서 풍손의 발생은 치명적이라 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 풍손을 속도-온도-기압과 관련시켜 해석하였다. 특히, 풍손의 해석을 위해 전동기 내부 유체(공기)의 흐름을 정의하고, 기체 입자간의 상호 관계를 표현하는 변수로서 뉴센 수(Knudsen Number, K_n)를 정의하였다. 또한, 유체와 기기 내부의 단순화된 해석모델을 정의하여 냉각, 진공의 효과에 따른 풍손의 정량적 해석결과 및 저감방안을 제시하였다.

2. 철 손

2.1 Steinmetz 식에 의한 철손 특성식

철손은 시변하는 자계에 의하여 철심의 재료적 성질에 의해 발생하는 손실이다. 그런데 철손에 대한 물리적 현상을 다룬 결과는 논문이나 문헌을 통해 제시되어 있지만, 철손의 복잡한 메커니즘에 대한 규명은 아직도 많은 연구가 필요하다. 일반적으로 철손에 관련된 정보는 자속밀도나 주파수에 따른 단위 철손으로 제조업체에 의해 표나 그래프로 제공된다. 하지만 제공된 표나 그래프에는 설계자가 원하는 자속 밀도나 주파수에 따른 단위 철손이 제공되지 않으므로 설계자들은 철손 계수를 구하여 설계자가 원하는 자속밀도와 주파수에서의 철손을 구하여야 한다.

일반적으로 철손(P_c)은 두 가지의 성분으로 분류되며, 이는 히스테리시스 손실 (P_h)과 와전류 손실 (P_e)이다. 여기서, 히스테리시스 손실은 자성재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇회 주회하는가의 문제이며, 이는 주파수 f 와 자속밀도 B^n 에 비례한다. 그리고, 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 도전성을 띤 재료의 기전력변화에 의한 와전류의 증가와 이에 따른 손실(V^2/R)에 기인하므로, f^2 과 B^2 에 각각 비례한다. 그러므로, 이상적인 정현파 자계의 크기와 주파수의 변화에 따른 철손식인 Steinmetz 식을 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \tag{1}$$

여기서, f 는 외부에서 인가되는 자계의 주파수, B 는 자속밀도, k_h 와 k_e 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수, n 은 Steinmetz 상수로 이들 값을 결정하는 것이 가장 중요하다. 즉, 이 계수들은 전기강판의 재료에 따라 크기가 매우 다르며, 주파수에 따라 그 크기가 비선형적으로 변하므로 그 예측이 매우 중요하다. 그리고, 히스테리시스 손실 성분은 재료내의 불순물 함유정도, 결정방위 또는 결정립의 크기에 지배를 받으며, 와전류 손실 성분은 강판의 전기저항, 판의 두께 또는 결정립의 크기에 각각 지배를 받는다 [8].

그러나 식 (1)은 철심 내의 자속밀도가 1T이상 되거나 높은 주파수 영역에서는 오차가 존재한다고 알려져 Y. Chen 은 식(2)와 같은 수정된 Steinmetz 식을 적용하여 철손을 계산한 바 있다 [9].

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B^{(a+bB)} + k_e f^2 B^2 \tag{2}$$

여기서, a 와 b 는 상수이다. 그런데, 앞서 언급된 히스테리시스 손실이나 와전류 손실 성분 외에 재료내부의 자구 폭이나 판에 미치는 장력에 의해 발생하는 이상 와전류손실 성분(P_a -Anomalous eddy current loss)이 존재하므로, 이를 고려하여 식(1)에 P_a 를 더하여 식(3)을 쓸 수 있다 [9].

$$P_c = P_h + P_e + P_a = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \tag{3}$$

여기서, k_a 는 이상 와전류손실 계수이다. 앞서 언급된 바와 같이, 전기기기나 전력 변환 기기들에서 일어나는 전기강판의 철손 계산의 문제는 결국 식(3)에서 계수 성분으로 존재하는 히스테리시스 손실 계수, 와전류 손실계수, 이상 와전류 손실계수 및 Steinmetz 상수의 결정으로 귀결되며, 이들의 정확한 적용을 통해 보다 정밀한 해석기법, 예를 들면 유한요소해석과 같은 수치해석기법에 적용되어 질 수 있다.

2.2 자속밀도-철손 곡선의 Curve Fitting 을 이용한 철손 해석법의 제안

설계단계에서 전기 강판의 선택은 강판의 제조사로부터 제공되는 철손데이터나 데이터 시트 등을 통해서 이루어진다. 이들 데이터의 대부분은 철손곡선을 통해 자속밀도 또는 주파수에 대한 히스테리시스, 와전류, 이상와전류 손실의 양을 제시한다. 따라서, 이상 와전류손실을 포함하지 않는 식(1)의 Steinmetz 방정식에 의한 철손의 고찰은 실험과 비

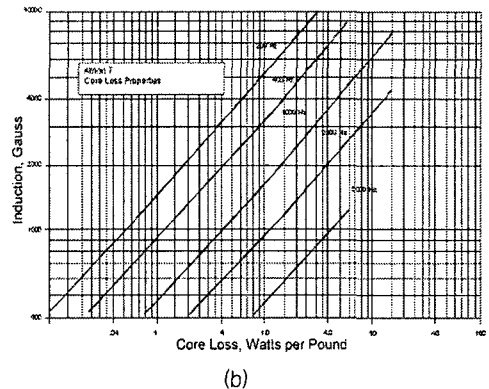
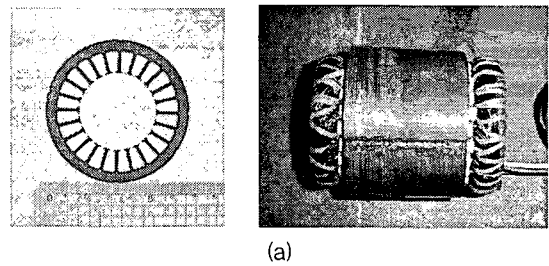


그림 1. (a)고정자 날장 및 적층 사진, (b)철손 데이터 Fig. 1. (a)A sheet of stator core, lamination and (b)core loss data of Arnon 7.

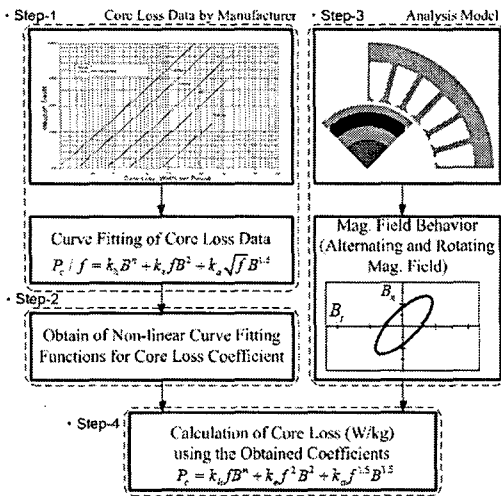


그림 2. 제안된 철손 해석 과정
Fig. 2. Proposed analysis procedure of core loss

교하여 정밀도가 낮다. 따라서, 본 연구에서는 식(3)에서 언급된 수정된 Steinmetz 식을 이용하여 고주파 응용에 적합한 미국의 Arnold Magnetic Technologies Corporation (이하 Arnold 사)의 Arnon 7 에 대하여 철손 데이터의 분석을 하였다. 그림 1(a)는 해석 대상 영구자석형 동기 전동기의 고정자 철심의 날장 및 적층된 코어 사진이다. 제작된 고정자는 24-슬롯, 외경이 65 mm이며 부록에 자세한 사양을 나타내었다. 그림 1(b)는 Arnold 사가 제공하는 Arnon 7의 주파수에 따른 단위 중량당 철손 데이터를 나타낸다. Arnold 사의 Arnon 시리즈 전기강판은 고주파수에서 철손이 매우 낮은 고성능 자성재료로, Arnon 7의 두께는 7 mil (0.127mm) 이다. 그리고, 표면코팅은 최소 0.000040 in (1 μm)에서 최대0.00015 in (3.8 μm)이며, 자체 절연성능은 최소 10 Ω-cm²/lam 이다. 해석대상 전동기는 정격출력 1-kW, 정격속도 28,000 rpm 을 갖는 고속 운전용 4-P 영구자석형 동기 전동기이며, 운전 기본 주파수는 약 1-kHz 에 이른다.

그림 2 는 본 논문에서 제안하는 철손 계산을 위한 해석 과정을 도시한 것이다. 그림에서 보여 지는 바와 같이 제안된 철손해석법은 다음의 5가지 순서를 따른다.

1-단계) 전기 강판의 철손 정보 분석을 통한 실제 철손 데이터의 재정렬

- 제작자에 의해 주어지는 철손 데이터를 재정렬하고, $B - P_c/f$ 의 함수로 도시한다.

2-단계) Curve fitting을 통한 주어진 주파수에 따른 철손 계수 함수 도출

- 1-단계에서 그려진 $B - P_c/f$ 의 함수를 Curve-fitting 하여 주파수-철손 그래프를 그리고, 비선형 함수를 정의하여 각각의 철손 계수 함수를 도출한다.

3-단계) 고정자 영역별 자계 거동분석을 통한 회전자계 및 교번자계 영역의 분리

- 제작자에 의해 주어지는 B-H 특성이 고려된 유한요소해석을 통해 전동기 철심 내 회전자계 및 교번자계 영역을 분리한다.

- 치, 요크 자속밀도는 이 단계에서 얻어진 자속밀도의 최대치를 적용한다.

4-단계) 체적 당 철손의 계산

- 앞서 수행된 1, 2, 3-단계에서 얻어진 데이터를 이용하여 체적 당 손실을 계산한다.
- 특히, 주파수에 대한 함수로 정의된 철손 계수에 의해 임의의 운전 주파수대에서 철손 계산이 매우 빠르게 수행될 수 있는 장점을 지닌다.
- 치, 요크 자속밀도는 3-단계에서 얻어진 자속밀도의 최대치를 일정하게 적용하므로, 부하시 전기자 자속에 의해 더해지는 자속밀도의 증분에 대한 고려가 어렵다.

그림 1(b)에 주어진 데이터를 이용하여 수정된 Steinmetz 방정식에서의 철손계수 산정을 보다 용이하게 하기 위해 식 (3)을 주파수 f 로 나누어 식(4)와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} P_c / f &= (P_h + P_e + P_a) / f \\ &= k_h B^n + k_e f B^2 + k_a \sqrt{f} B^{1.5} \end{aligned} \quad (4)$$

그림 3 부터 그림 7까지는 그림 1(b)에 주어진 재료의 철손 데이터를 이용하여 주어진 각각의 주파수에 대한 P_c/f 곡선을 나타낸다. 식(4)에서와 같이 P_c/f 가 자속밀도 B 의 함수로 나타내어져 있으며, 각각의 그림에서 실선은 그림 1에 주어진 데이터 상의 철손 곡선이고, 점선은 데이터 시트에 의해 주어지지 않은 주파수 영역 및 자속밀도 영역에서의 철손 데이터를 추정하기 위한 Curve fitting 곡선을 나타낸다. 그림에서 제작자에 의해 주어지는 철손 데이터는 200Hz에서 0.9T 까지, 400Hz에서 0.8T 까지, 1000Hz에서 0.6T 까지 등과 같이, 전동기의 실제 사용영역에서 주어지지 않으므로, 점선으로 표기된 Curve fitting 을 통한 미지 데이터의 추정이 요구된다. 특히, 본 논문에서 다루고자 하는 전동기의 경우 운전 주파수 영역이 약 1-kHz 부근이고, 최대 자속밀도가 1~1.4 T 이상임을 감안할 때, 이와 같은 데이터 재정렬 과정이 요구된다.

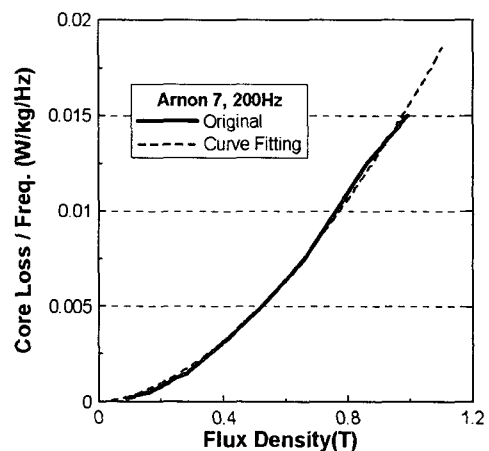


그림 3. 철손/주파수(P_c/f) 및 계수산정을 위한 Curve fitting 곡선 (@ 200Hz)

Fig. 3 Core loss/frequency and curve fitting plot for coefficient calculation (@ 200Hz)

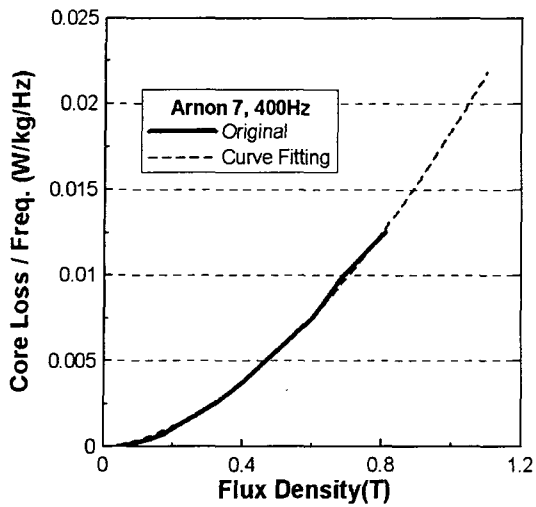


그림 4. 철손/주파수(P/f) 및 계수산정을 위한 Curve fitting 곡선 (@ 400Hz)

Fig. 4 Core loss/frequency and curve fitting plot for coefficient calculation (@ 400Hz)

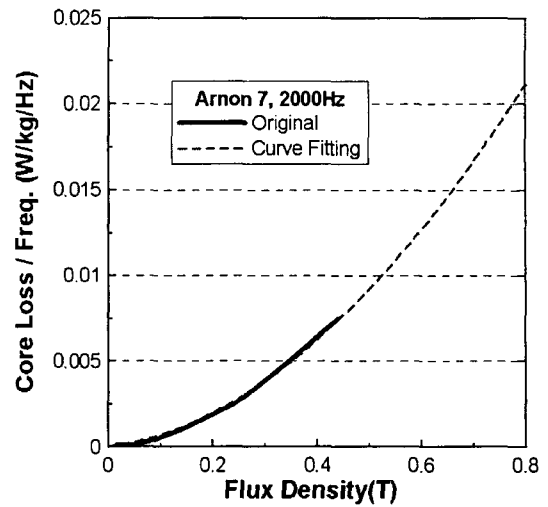


그림 6. 철손/주파수(P/f) 및 계수산정을 위한 Curve fitting 곡선 (@ 2000Hz)

Fig. 6 Core loss/frequency and curve fitting plot for coefficient calculation (@ 2000Hz)

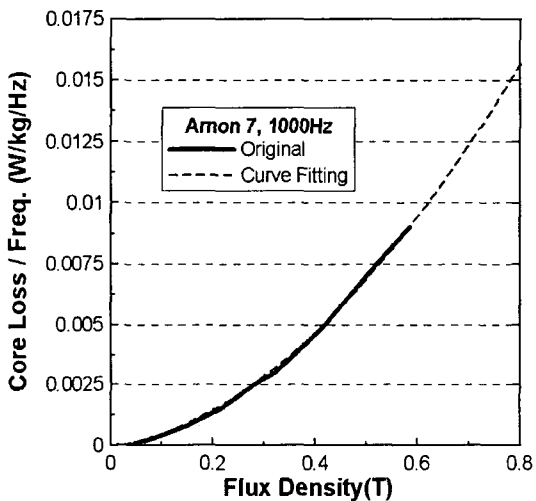


그림 5. 철손/주파수(P/f) 및 계수산정을 위한 Curve fitting 곡선 (@ 1000Hz)

Fig. 5 Core loss/frequency and curve fitting plot for coefficient calculation (@ 1000Hz)

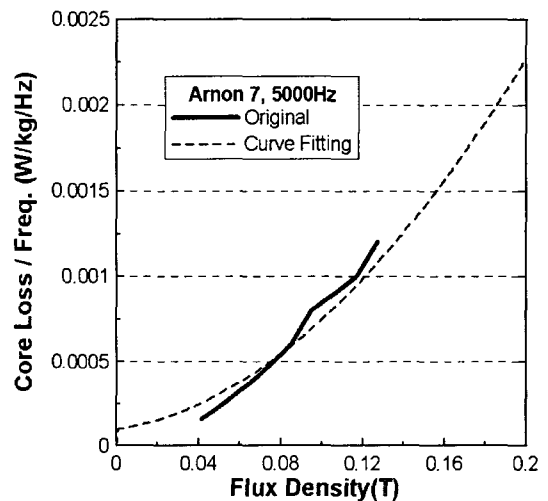


그림 7. 철손/주파수(P/f) 및 계수산정을 위한 Curve fitting 곡선 (@ 5000Hz)

Fig. 7 Core loss/frequency and curve fitting plot for coefficient calculation (@ 5000Hz)

그림 3부터 그림 7에 의해 식(4)에서 함수의 미지 계수로 주어지는 히스테리시스 손실 계수 k_h , 와전류 손실계수 k_e , 이상 와전류 손실계수 k_a , Steinmetz 상수 n 를 각각의 주파수에 대하여 구할 수 있다.

그림 8부터 그림 11 에서 굵은 실선은 그림 1(b)의 철손 데이터에 의해 구해지는 각각의 철손 계수들을 나타낸다.

또한, 미지의 주파수 영역에서의 철손 계수의 데이터를 추정하기 위한 Curve fitting 곡선을 가는 실선으로 나타내었다.

그림 3부터 그림 7과 그림 8부터 11을 통하여 도출된 비선형 감소 경향을 갖는 철손 계수들을 함수화하여 표 1 나타내었다.

이와 같은 철손계수들의 비선형 함수는 식(4)에 적용되어 전기기기의 속도 또는 운전 주파수에 따른 손실의 계산을 해석적으로 빠르게 수행할 수 있도록 해준다. 즉, 그림 1(b)와 같이 전기 강판의 제작자에 의해 주어지는 철손 데이터는 임의의 5개 주파수에서만 주파수-자속밀도에 대한 철손의 정보를 제공해 주지만, 실제적인 문제에서 Curve fitting 함수에 의한 각각의 철손에 관한 계수들의 정보는 넓은 주파수 대역에서 운전되는 전기기기의 철손을 파악할 수 있는 자료의 도출이 가능하게 된다.

그림 12 부터 그림 15 는 표 1 에 제시된 Curve Fitting 함수에 의해 구해진 철손 계수를 이용하여 Arnon 7의 단위 중량당 철손을 자속밀도-주파수 그래프로 나타낸 것이다.

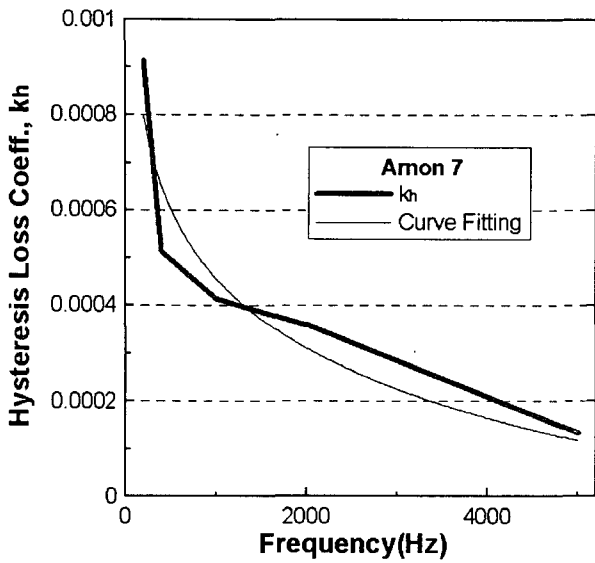


그림 8. 히스테리시스 손실계수 데이터 및 Curve Fitting 곡선
Fig. 8 Hysteresis loss coefficient and curve fitting function.

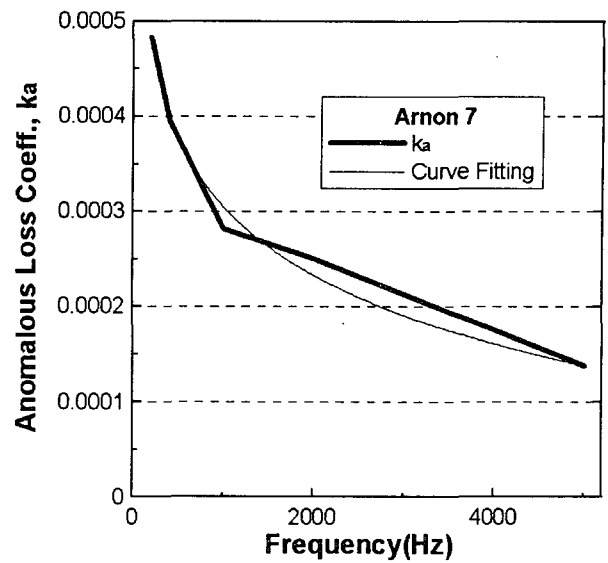


그림 10. 이상 와전류 손실계수 데이터 및 Curve Fitting 곡선
Fig. 10 Anomalous eddy current loss coefficient and curve fitting function.

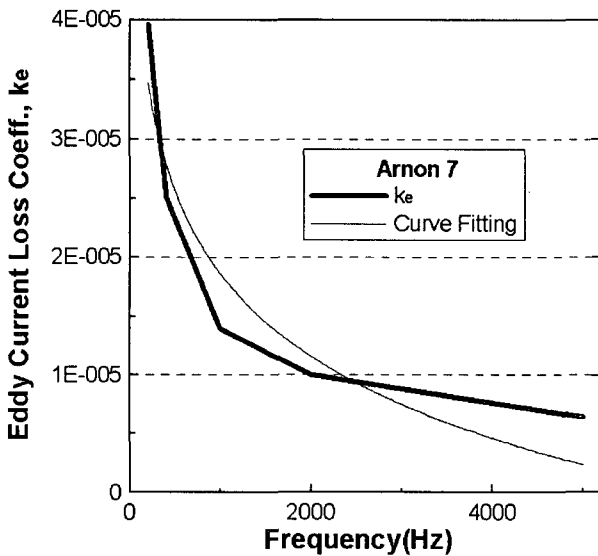


그림 9. 와전류 손실계수 데이터 및 Curve Fitting 곡선
Fig. 9 Eddy current loss coefficient and curve fitting function.

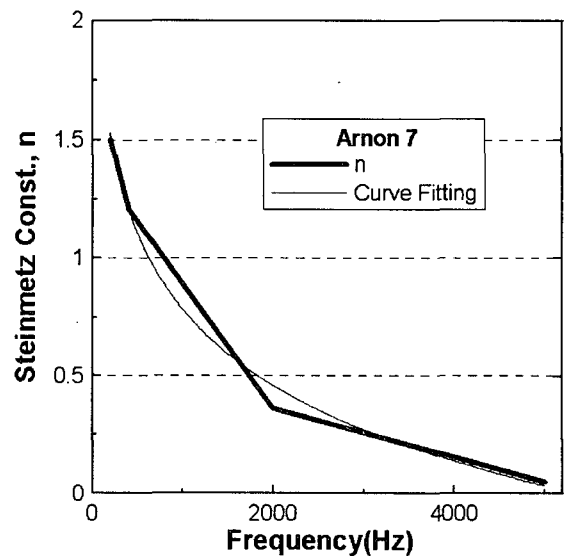


그림 11. Steinmetz 상수 n의 데이터 및 Curve Fitting 곡선
Fig. 11 Steinmetz constant n and curve fitting function.

그림에서 실선으로 표기된 실제 데이터(Original)와 잘 일치하며, 임의의 자속밀도 및 주파수 영역에서의 철손 계수의 결정이 용이하므로, 데이터 시트에 주어진 자속밀도 및 주파수 영역에서의 중량당 철손뿐만 아니라, 제작자에 의해 주어지지 않는 자속밀도 영역 및 주파수에서의 중량당 철손도 예측을 할 수 있다.

2.3 자계의 거동 분석

전동기 운전상태에서 전기장관 철심 내부에는 비정상적인 형태의 복잡한 자계 분포가 발생되고, 이러한 현상은 전동기의 철손을 더욱 증가시킨다 [1],[10],[11].

표 1. Steinmetz식[식(4)]을 만족하는 철손 계수 함수
Table 1. Core loss coefficient functions satisfying the Steinmetz Equation[Eq.(4)].

Function : $Y = A \ln(X) + B$			
Coefficients	A	B	X
k_h	-2.1146E-4	1.9180E-3	Frequency, f
k_e	-1.0056E-5	8.8026E-5	
k_a	-1.0410E-4	1.0241E-3	
n	-0.4643	3.9889	

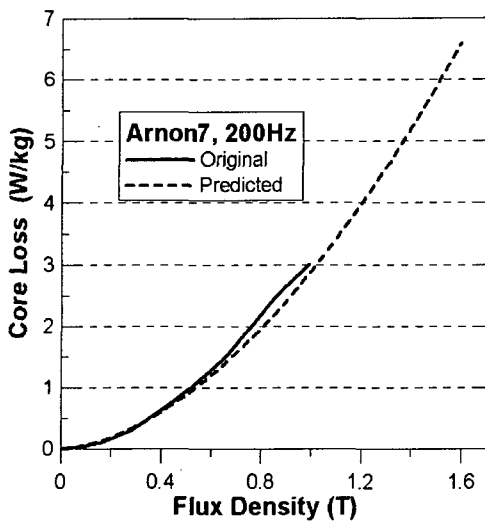


그림 12. 철손 계산 결과 (@ 200 Hz)
 Fig. 12 Result of Core loss (@ 200 Hz)

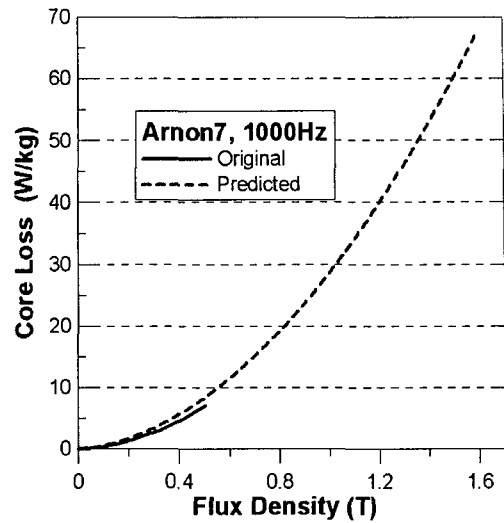


그림 14. 철손 계산 결과 (@ 1000 Hz)
 Fig. 14 Result of Core loss (@ 1000 Hz)

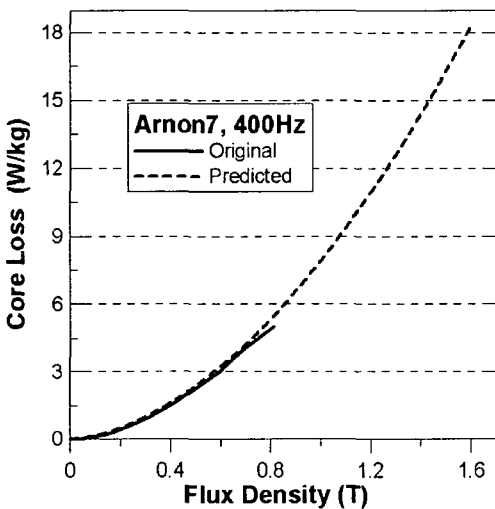


그림 13. 철손 계산 결과 (@ 400 Hz)
 Fig. 13 Result of Core loss (@ 400 Hz)

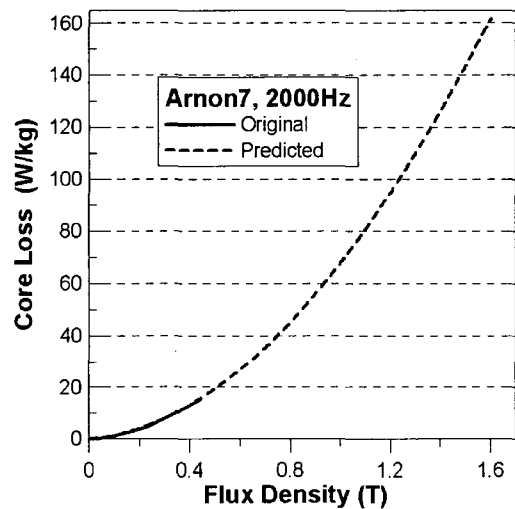


그림 15. 철손 계산 결과 (@ 2000 Hz)
 Fig. 15 Result of Core loss (@ 2000 Hz)

이는 고정자 영역의 자계 특성의 거동에 따라 철손의 발생률이 달라짐을 의미하며, 고정자 슬롯리플 및 인버터 구동 시 발생하는 고조파 자계에 의한 고정자 철심내 자속밀도의 왜형이 철손의 증가를 가져오게 됨을 말한다. 본 절에서는 인버터가 고려되지 않은 무부하 상태에서 전동기가 임의의 속도로 회전할 때, 철심 내부에서 발생하는 자계의 거동을 분석하였고, 치와 요크의 각 위치를 회전자계 영역과 교번자계 영역을 나누어 철손의 계산에 고려하였다.

그림 16은 회전자 위치에 따른 자계 변화를 관측한 4지점의 위치를 표기한 것이다. 고정자에서의 치 끝부분, 치 중앙 부분, 치-요크 사이의 경계부분, 요크 중앙 부분에서 각각 자속밀도의 수직성분과 수평성분을 계산하였다. 그림 17은 전동기의 무부하 회전 조건에서 앞서 언급된 4지점에서 발생하는 회전자 위치에 따른 자속밀도의 공간적 변화를 나타낸다. 여기서, 자속밀도의 궤적(Loci)은 시간의 변화에 따른 반경방향 성분과 접선방향 성분의 자속밀도 분포를 시간을

매개변수로 하나의 그래프로 처리한 리사주(Lissajous) 파형이다 [1],[6].

그림에서와 같이, 고정자 치 영역에서 치 중앙 부분은 치의 양쪽 끝부분에 비해 반경방향 성분이 주성분이다. 이는 고정자 자화의 방향이 공간적으로는 크게 회전하지 않고, 주로 한 방향으로 크기만 바뀌는 교번자계가 주로 발생하는 영역임을 의미한다. 반면 치와 요크가 인접하는 치-요크 경계부분과 치 끝부분, 요크 영역에서는 타원형의 자계가 주로 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 회전자계가 주로 발생하는 영역임을 의미한다.

하경호 외- 는 매입형 영구자석형 동기 전동기의 철손 계산에 대한 연구에서 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하기 위한 척도로 축비에 대한 정의를 내린 바 있다 [1]. 즉, 한 주기 동안의 자속밀도 궤적에서 최대치 자속밀도와 최소치의 비율인 축비가 0.1 보다 작으면 교번자계, 0.1 보다 크면 회전자계 영역으로 정의한 바 있으며, 본 연구에서 자

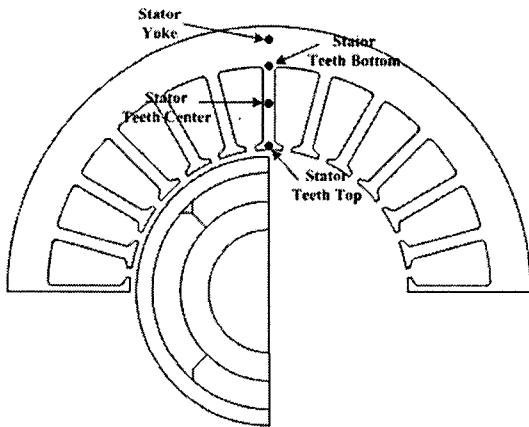


그림 16. 자속 밀도 분석 위치
Fig. 16. Analysis position of flux density.

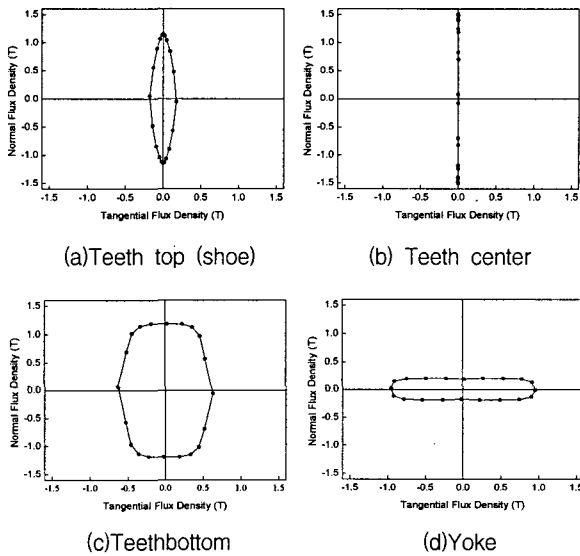


그림 17. 고정자 자속 밀도의 궤적
Fig. 17. Loci of magnetic flux density at the stator core.

계 거동의 회전자계 및 교번자계의 구분에 적용하였다. 그리고, 손대락 외- 는 철손 해석 및 측정 기술개발에 관한 연구에서 철심 내 B_{max} 가 같은 경우 회전자계 영역의 철손 발생이 교번자계 영역에서 철손 발생의 100% 이상 증가함을 실험을 통해 규명한 바 있다 [5]. 따라서, 본 논문에서는 제안된 철심 데이터의 Curve fitting 을 이용한 철손의 계산에서 하경호 외- 와 손대락 외- 가 발표한 연구결과를 이용하여 철손의 계산에 적용하였다.

그림 18 은 그림 17의 자계 거동 분석을 통해 얻어진, 축비가 0.1 보다 크게 나타나는 회전자계 영역을 보여준다. 해석적 방법만으로 회전자계 및 교번자계의 구분은 불가능하므로, 여러 위치에서 유한요소해석을 통해 빗금으로 나타난 영역과 같은 회전자계 영역을 정의하였다. 또한, 회전자계 영역에서는 교번자계 상태에서 계산된 철손의 100%를 증분하여 철손을 계산 하였으며, 속도에 따른 주파수의 변화와 무관하게 그림 18과 같이 일정한 면적으로 정의하였다.

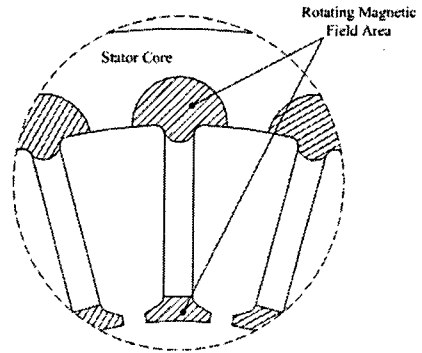


그림 18. 교번자계 및 회전자계 발생 영역
Fig. 18. Alternating and rotating magnetic field region.

2.4 철손 계산 결과

그림 19는 본 논문에서 제안된 철손 해석 방법에 의하여 식(4)에 의해 얻어진 해석 결과와 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSOFT사의 Maxwell 해석 결과와의 속도-철손 특성 비교를 나타낸다. 유한요소해석에 적용된 Arnon 7의 재질 데이터가 2.2절에서 구해진 각각의 철손계수와 동일하므로, 이론적으로 중량당 손실 값의 동일하여야 하나 약간의 오차를 보이는 이유는 회전자계 발생 영역의 정의가 고정자 전 영역에 걸친 자계의 거동 해석이 이루어지지 않아 정밀하게 고려되지 못했고, 전기자 전류의 증가에 따라 고정자 철심내 자속밀도가 증가함에도 불구하고, 본 논문에서는 무부하 치, 요크 자속밀도의 최대치만을 적용하여 계산했기 때문으로 사료된다.

그러나, 그림 19에서 해석 결과의 경향이 유한요소해석 결과와 속도에 따른 변화 경향이 같고, 정격속도에서 오차율이 20 % 이내 이므로, 본 논문에서 제안한 방법인 수정된 철손식과 자속밀도-철손곡선의 Curve Fitting을 이용한 철손 해석 방법에 의해, 초기 설계시 비교적 신뢰성 있고 빠른 철손 해석 결과를 얻을 수 있는 방법으로 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 사료된다.

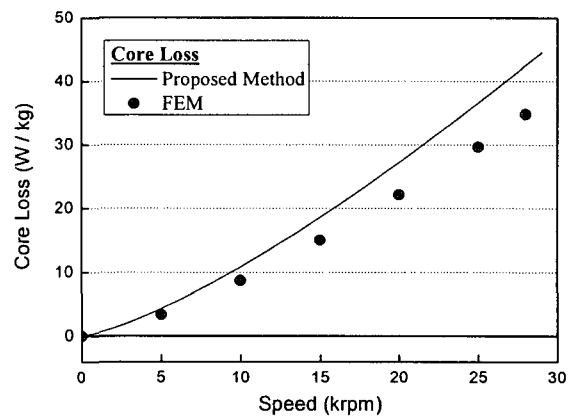


그림 19. 속도에 따른 철손 특성
Fig. 19. Core loss characteristics according to the speed

3. 풍 손

3.1 풍 손 특성식

풍손은 고정자 적층 코어 또는 하우징과 회전자 면 사이의 공극을 채우고 있는 공기-기체 분자의 충돌에 의한 마찰로 발생하는 기계적 손실을 일컫는다. 중저속으로 운전되는 기기에서는 풍손의 영향을 거의 무시해도 무방하나, 초고속 또는 고속으로 운전되는 기기에서는 풍손이 주파수의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에, 반드시 고려해야 한다. 더구나, 풍손은 기계적으로 유체와의 마찰면이 되는 원통면의 면적, 축방향 디스크 면의 면적과 회전자의 반경에 비례 또는 제곱에 비례하므로, 수백 kW 이상의 고속 회전기에서는 그 영향이 매우 크다[12]-[14].

기기 내에서 유체(공기분자)의 흐름 형태는 압력과 회전자와 고정자 사이의 마찰면에 따라 달라진다. 이는, 기체와 입자간의 상호관계를 뉴센 수(Knudsen Number, Kn) 로 표현 될 수 있는 데, 뉴센 수는 평균자유행로에 입자의 반경을 나눈 무차원 변수이다. 뉴센 수는 식(5)와 같으며, 표 2는 입자의 유동영역을 뉴센 수로서 구분한 것이다.

$$K_n = \frac{\lambda}{L_g} \tag{5}$$

여기서, K_n 은 뉴센 수, L_g 는 마찰면 사이의 거리, λ 는 기체 분자의 평균자유행로이며 식(6)과 같다.

$$\lambda = \frac{3.1 \times 10^{-5} T^2}{(T+110.4)P} \tag{6}$$

여기서, P : pressure (Pascals)
T : temperature (Kelvin)

풍손의 계산은 앞서 언급한 바와 같이 유체의 흐름, 유체 접촉면 사이의 거리, 접촉 면적 등과 밀접한 관계가 있으며, 원통 접촉면과 디스크 접촉면에서의 풍손, P_{wind-c} 와 P_{wind-d} 는 각각 식(7), (8)과 같다[13],[14].

$$P_{wind-c} = P \left(\sqrt{\frac{2\pi}{RT}} \right) L \omega^2 a^3 \left(\frac{2K_n}{1+2K_n} \right) : \text{Cylindrical Surface} \tag{7}$$

$$P_{wind-d} = \frac{P}{2} \left(\sqrt{\frac{2\pi}{RT}} \right) \omega^2 a^4 \left(\frac{2K_n}{1+2K_n} \right) : \text{Disk Surface} \tag{8}$$

여기서, R : gas constant (J/(kg*K)) [air : 287]
L : axial length (m)
 ω : angular velocity (rad/sec)
a : radius (m)

표 2. 뉴센 수
Table 2. Knudsen Number, Kn

Knudsen Number	유체 흐름 영역
0 < Kn < 0.1	연속 영역 (Continuum Regime)
0.1 < Kn < 20	미끄럼 흐름 영역 (Slip Flow Regime)
20 < Kn	자유 분자 운동 영역 (Free Molecular Regime)

3.2 풍 손 특성 해석

일반적으로 통풍구가 존재하는 기계적 구조에서 전동기의 내부 기압을 1-기압으로 가정하여 풍손을 계산한다. 따라서, 본 논문에서는 실제 해석모델과 동일한 조건에서 통풍구가 존재 할 때 1-기압 하에서 전동기 내부의 최대 온도 120°C 에서 원통 접촉면 손실과 디스크 접촉면 손실을 각각 구하여 속도에 따른 총 풍손을 해석하였다. 또한, 전동기 내부 온도의 냉각 여부에 따른 풍손의 증감을 파악하기 위하여 온도에 따른 풍손의 변화를 예측하였고, 진공상태에 따른 손실을 해석함으로써 고속 회전형 전기기에서의 풍손 저감 방안을 위한 자료를 제시하게 되었다.

풍손의 계산은 식(7), 식(8)로 주어지는 것처럼 회전체의 원통 접촉면, 디스크 접촉면과 하우징 마찰면 사이의 기계적 구조를 모델링 해야 하는데, 본 논문에서는 해석모델 고속 영구자석형 동기 전동기에 대하여, 복잡한 구조의 기기 내부의 유체 접촉면간 길이를 단순화 하여 해석하기 위해 그림 20의 풍손 해석 모델을 정의 하였다. 또한, 식(7)과 식(8)을 사용하여 그림 20에 표기되어 있는 각 유체 접촉면 및 영역에서의 풍손 계산을 위한 파라미터를 얻은 결과는 표 3과 같다.

그림 21은 전동기 내부 기압이 1-기압 상태라 가정하였을 때, 식(7), 식(8)에 의한 풍손 해석 결과를 나타낸다. 대부분의 풍손 발생은 약 94.2% 정도가 원통 접촉면에서 주로 발생하며, 디스크 접촉면에서 약 5.78 %가 발생함을 볼 수 있다. 또한, 상대적으로 간극 거리가 짧은 공극에서 대부분의 손실이 발생하므로, 공극의 길이가 풍손에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 전동기가 전부하 조건에서 정격속도에 면, 풍손은 약 0.38 W 정도이다.

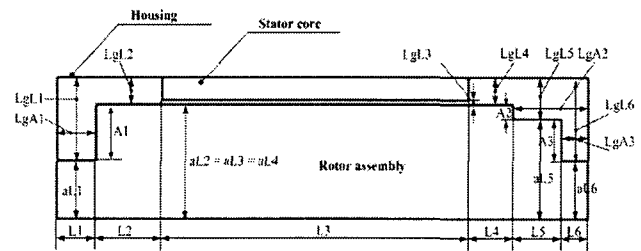


그림 20. 회전자, 고정자, 하우징에 대한 단순화 된 풍손 해석 모델
Fig. 20. Simplified windage loss model for Rotor, stator and housing model

표 3. 풍손 계산을 위한 기계적 파라미터.
Table 3. Mechanical parameters for windage loss calculation

	L1 = 6	aL1 = 8.5	LgL1 = 11.9
Cylinder Surface (mm)	L2 = 10	aL2 = 16.5	LgL2 = 3.9
	L3 = 48	aL3 = 16.5	LgL3 = 0.8
	L4 = 7	aL4 = 16.5	LgL4 = 3.9
	L5 = 7.5	aL5 = 14.5	LgL5 = 5.9
	L6 = 4.1	aL6 = 8.5	LgL6 = 11.9
	Disk Surface (mm)	A1 = 8	-
A2 = 2		-	LgA2 = 11.6
A3 = 6		-	LgA3 = 4.1

서 운전될 때 내부 공기의 온도가 최고 120°C 로 일정하다

그림 22는 전동기 내부 온도에 따른 풍손의 변화를 1-기압 상태 하에서 해석한 결과이다. 만일 전동기 내부 공기의 냉각이 충분히 이루어진다면, 손실의 발생을 최소화 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 23은 전동기의 운전조건을 진공상태로 하였을 때 풍손의 변화를 나타낸다. 즉, 고속 전동기의 고효율 운전을 위해 플라이휠과 같은 특수 분야에서 내부 진공을 택할 수도 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이, 이론적 진공상태에서 풍손의 발생율이 상온 1기압 상태에서 손실의 0.7%에 해당하므로, 풍손의 발생은 거의 0에 가깝다.

4. 결 론

본 논문에서는 고속 전동기를 대상으로 고정자 전기 강판에서 자계의 거동과, 철손의 해석을 수행하고, 전동기의 성능에 미치는 영향 분석을 위한 속도-손실 특성 곡선을 제시하였다. 또한, 기계적 손실 중 하나인 풍손의 이론적 해석을 속도, 기압, 온도에 따라 정량적으로 분석하였다. 철손해석에서는, 고속 영구자석형 전기기기에의 적용이 적합한 저손실 강판인 Arnon 7 의 철손 해석에 관한 방법을 제안하였다. 즉, 전기강판의 제작자에 의해 제공되는 주파수, 자속밀도-철손 데이터의 분석과 수정된 Steinmetz 식을 적용하여 철손에 관련된 계수 및 단위 증량당 철손을 예측하였다. 풍손의 해석에서는 전동기 내부 유체(공기)의 흐름을 정의하고, 풍손계산을 위한 전동기 내부 면과 유체간의 접촉면을 단순화한 해석 모델을 제시하였다. 또한, 풍손의 이론적 해석은 속도, 온도, 기압에 대하여 분석하였으며, 냉각과 진공 효과에 의한 풍손의 저감 방안을 정량적으로 제시하였다.

따라서, 실험이나 해석적 방법으로 예측하기 어려운 고속 영구자석 전동기에서의 철손 및 풍손을 제시된 해석 방안에 의하여 예측 할 수 있었으며, 상용 유한요소해석 소프트웨어와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 이들의 해석 결과는 향후, 고속, 초고속 전동기의 운전조건에 직접적인 영향을 미치는 열적특성을 고려한 전동기의 설계 및 성능평가 등에 적용하고자 한다.

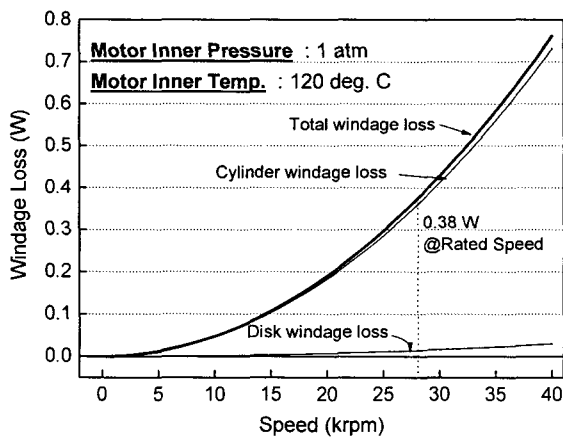


그림 21. 풍손 해석 결과 (전동기 내부 1 기압, 온도 120°C)
Fig. 21. Result of windage loss (1-atm and 120 deg. C)

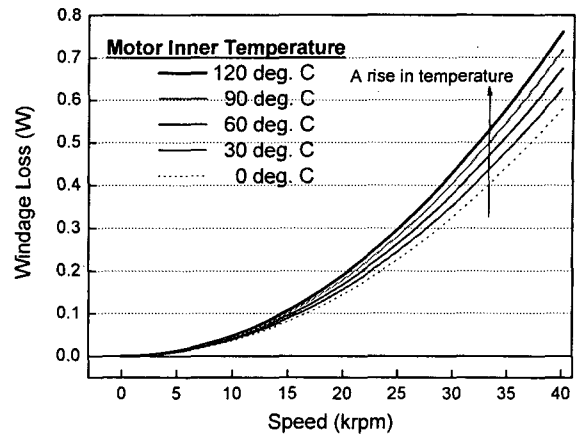


그림 22. 풍손 해석 결과 (1 기압 상태)
Fig. 22. Result of windage loss (1-atm)

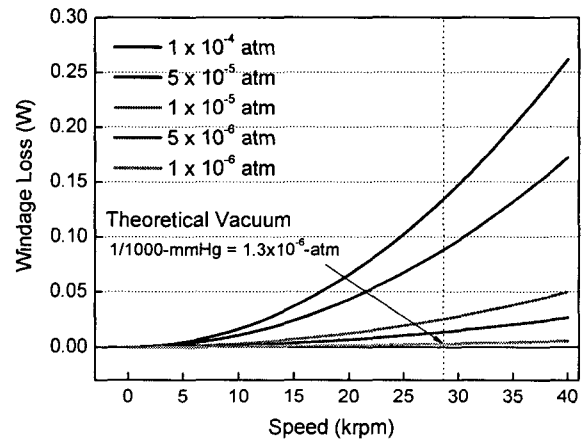


그림 23. 풍손 해석 결과 (진공 상태)
Fig. 23. Result of windage loss (vacuum)

감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] 하경호, 차상윤, 김재관, 홍정표, "영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석," 대한전기학회 논문지, vol. 55B, no.2, pp.76-82, Feb. 2006.
[2] C. Mi, G. R. Slemon, R. Bonert, "Modeling of iron losses of permanent magnet synchronous motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 39, May/June 2003.

[3] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, A. C. Smith, "Estimating rotational iron losses in an induction machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, November 2003.

[4] C. C. Mi, G. R. Slemon, R. Bonert, "Minimization of iron losses of permanent magnet synchronous machines," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 20, March 2005.

[5] 칠손 해석 및 측정 기술 개발에 관한 최종보고서, 통상 산업부, 1997.

[6] 김태형, "FRM의 새로운 설계 기법 및 PWM 구동시 제특성 해석," 한양대학교 박사학위논문, 2005

[7] K. Yamazaki, and S. Watari, "Loss analysis of permanent magnet motor considering carrier harmonics of PWM inverter using combination of 2-D and 3-D finite-element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, May 2005.

[8] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Yeon-Ho Jeong, "Influence on the rectifiers of rotor losses in high-speed permanent magnet synchronous alternator," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, 08R315, 2006.

[8] 전기강판 제품 개발 동향, 신전력기기연구센터(FEMRC) 워크샵 자료집, 2005.

[9] Y. Chen, and P. Pillay, "An Improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation," *Industry Applications Conference*, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Volume 2, 13-18 Oct. 2002 Page(s):759 - 766 vol.2

[10] N.Stanges, R.D.Findlay, "Importance of rotational iron loss data for accurate prediction of rotating machine core losses," *Proceeding of IEEE-IAS*, 1994, vol. 1, pp.123-127, 1994.

[11] Jeong-Jong Lee, Young-Kyoun Kim, Hyuck Nam, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, "Loss distribution of three phase induction motor fed by pulsewidth modulated inverter," *IEEE Trans. Magn.*, vol.40, pp.762-765, 2004.

[12] Michael D. Werst, Jonathan J.Hahne, Hsing P.Liu, and Charles E. Penney, "Design and Testing of a high speed spin test for evaluating pulse alternator windage loss effects," vol.39, pp.389-393, 2003.

[13] Ajisman, Jun Kobuchi, Ken Oobayashi, Uyuichi Shimada, "Windage loss reduction of flywheel/generator system using He and SF6 gas mixtures," *Energy Conversion Engineering Conference (IECEC-97)*, vol 3, pp. 1754 - 1757, 1997.

[14] Awad, M.N.; Martin, W.J., "Windage loss reduction study for TFTR pulse generator," *Fusion Engineering*, 17th IEEE/NPSS Symposium, vol. 2, pp.1125 - 1128, 1997.

부 록 해석 모델의 사양

Appendix Specification of analysis model

항 목	설 계 사 양	단 위
정 격 출 력	1	kW
정 격 속 도	28,000	rpm
상 수	3	phase
극 수	4	pole
고정자 외경	65	mm
고정자 내경	34.6	mm
회전자 외경	33	mm
슬리브 두께	2	mm
기계적 공극의 길이	0.8	mm
고정자 적층 길이	48	mm
슬롯 개구폭	1.2	mm
정격시		
전류밀도(강제공냉)	6	A/mm ²

저 자 소 개



장 석 명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 2003년~2004년 대한전기학회 부회장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 회장.

Tel : 042-821-5658

Fax : 042-822-4933

E-mail : smjang@cnu.ac.kr

Homepage : <http://sems.cnu.ac.kr>



조 한 옥 (趙漢旭)

1976년 12월 3일생. 2002년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : 042-821-7608

E-mail : hwcho@cnu.ac.kr



고 경 진 (高敬眞)

1980년 2월 2일생. 2006년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 2006년 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 042-821-7608

E-mail : kkongjin@cnu.ac.kr