


Comparison of the characteristics of the ferrite spoke rotor shape for a 3kW wind Generator

3kW급 풍력발전기용 페라이트 스포크 회전자 형상 특성비교

Su Yong Kim · Ju Lee

김수용* · 이주† 

Abstract

Most of the generators and electric motors developed in recent years are synchronous machines using permanent magnets of rare earth. As the name suggests, rare earth permanent magnets are expensive because they have a small amount distributed on the earth. In addition, the price fluctuation is large because it is concentrated and mined in a specific region. Therefore, in recent years, research has been actively conducted on developing a generator using a low cost ferrite permanent magnet for stable supply and reduction of the price of the generator. Ferrite magnet has a low magnetic flux density compared to a rare earth permanent magnet, so a large amount of permanent magnet must be used. In particular, the generator rotor is made in the form of a spoke to insert a large amount of permanent magnets. There are three typical spoke type types. This paper compare three types of characteristics at the same size and the same output.

Key Words

generator, spoke, ferrite, rotor

1. 서론

NdFeB(Neodymium Iron Boron)와 같은 희토류 금속을 사용하는 PM(Permanent Magnet) 발전기 혹은 전동기들은 높은 출력밀도와 고효율의 장점을 가진다. 이런 이유에서 전세계에 설치되어 있는 많은 풍력발전기, 전기자동차용 전동기들은 희토류 영구자석을 사용하여 만들어졌다. 하지만 희토류 광물들은 이름에서 뜻하는 것과같이 지구에 있는 광물들 중 매우 희귀하고 따라서 높은 가격대를 형성하고 있다. 또한 특정지역(중국)에 편중되어 채굴이 되어지기에 때에 따라서는 희토류 금속이 자원의 무기화로 사용되기도 한다. 실제 일본-중국과의 영토분쟁 시, 미국-중국과의 무역 전쟁 시에 이와 같은 일들이 일어나면서 전세계의 희토류 광물가격이 급등하기도 하였다. 이런 이유로 근래 희토류 금속을 적게 사용하거나 혹은 아예 전혀 사용하지 않는 발전기에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

특히 고가의 희토류 영구자석을 대신하여 저가의 페라이트(Ferrite) 영구자석을 다량 사용하는 방법에 대한 연구들이 많다. 왜냐하면 재료비에 민감한 가전이나 자동차 분야에서 사

용되는 전동기의 경우에는 이미 고가의 희토류 영구자석 대신 페라이트(Ferrite) 재질을 사용한 상용화 제품도 이미 나와 있기 때문이다. 전동기와 발전기는 유사한 구조를 가지기에 페라이트를 적용한 전동기 양산사례처럼 발전기 부분에서도 유사한 결과를 얻을 있을 것이라는 기대된다[1].

그 동안, 고가의 희토류 영구자석을 사용한 발전기가 각광을 받을 수 있었던 가장 큰 이유는 바로 출력밀도에 있다. 희토류 영구자석은 높은 잔류자속밀도를 가지고 있기에 작은 사이즈로 큰 출력의 발전기 개발이 가능하다. 이에 반하여 페라이트는 희토류 영구자석 대비 약 1/3의 잔류자속밀도를 가진다. 따라서 동등한 성능의 발전기를 만들기 위해서는 약 3배의 페라이트 자석을 사용해야 한다. 이런 이유에서 페라이트 영구자석을 적용하는 발전기는 가능한 발전기 사이즈를 그대로 유지하면서 많은 양의 페라이트를 사용할 수 있는 스포크 타입의 회전자 방식을 채용하고 있다. 이는 그림 1. (c)와 같은 형태이다. 그림 1.(a), (b)와 같이 희토류를 사용한 발전기를 대비하여 회전자 안쪽의 공간을 활용하여 영구자석을 깊숙이 삽입하는 형태이다.

페라이트 영구자석을 적용한 스포크 타입 발전기는 많은 영

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0003-0251-6492>

† Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea./Korea Electronics Technology Institute, Korea.

<https://orcid.org/0000-0003-3775-3594>

Received : April 24, 2020 Revised : May 27, 2020 Accepted : May 29, 2020

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

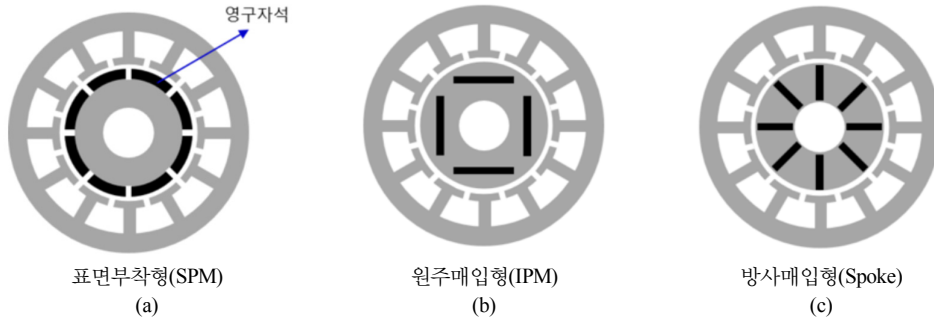


그림 1 대표적인 영구자석형 발전기 회전자 형상
fig. 1 Typical permanent magnet generator rotor shapes

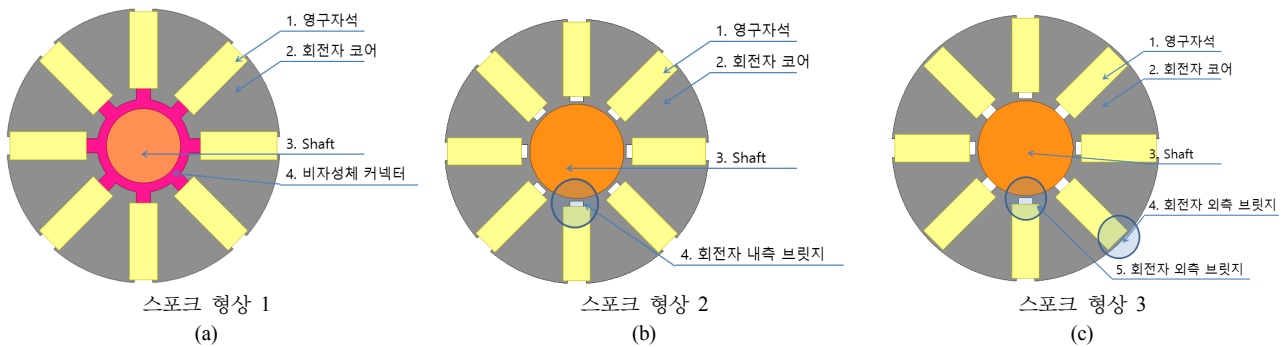


그림 2 대표적인 스포크 회전자 형상
fig. 2 Typical spoke rotor shapes

구자석을 사용함에도 낮은 잔류자속으로 인하여 회전자 내측에서 많은 누설자속이 발생하는 단점을 가진다. 이런 단점을 보완하는 방법에는 크게 3가지 타입의 페라이트 스포크 형상이 있다. 그림 2. (a)와 같이 회전자 내측을 자속이 흐를 수 없는 비자성체로 구성하는 타입과 그림 2. (b)와 같이 회전자 내측 코어를 극단적으로 작게 설계하여 내측 코어의 빠른 자속 포화로 누설자속을 줄이는 방법, 마지막으로 그림 2. (c)와 같이 회전자 내측과 외측 브릿지를 지그재그로 배치하는 첫 번째, 두 번째 방법의 하이브리드 형태이다. 첫 번째 방법의 경우에는 원천적으로 누설자속의 패스를 제거하여 높은 출력밀도를 기대할 수 있지만 회전자 코어와 샤프트 사이에 또 다른 재료의 구성품을 두기 때문에 제조 시에 부품수도 늘어나고 공정의 수가 늘어나면서 생산단가가 높아지는 단점을 지닌다. 두 번째, 세 번째 방법의 경우에는 첫 번째 경우와는 달리 부품 수도 작고 공정도 짧아서 생산단가는 작지만 극단적으로 작은 내측 회전자를 도입 하였음에도 누설자속이 발생하여 첫 번째 경우 대비 출력밀도가 떨어지게 된다. 본 논문에서는 동일한 사이즈, 출력에서 세가지 모델 성능 및 특성을 비교해 보고자 한다[2][3].

2. 본 론

2.1 발전기 사양

발전기 사양과 형상 치수들은 표 1과 같다. 300rpm 속도로

회전하면서 3kW출력을 내는 소형 발전기이다.

표 1 발전기 사양

Table 1 Generator specifications

	발전기
출력[kW]	3
정격 속도[rpm]	300
코깅토크[Nm]	9.5 미만
극 수	10
슬롯 수	36
회전자 외경[mm]	251
고정자 외경[mm]	390
공 극[mm]	1
턴 수[tum]	37
적층높이[mm]	70

3가지 스포크 타입의 성능을 비교하기 위하여 고정자 형상과 권선 사양은 모두 동일하게 적용하였다. 서로 다른점은 회전자 코어의 형상이다.

2.2 스포크 타입 회전자 형상

2.2.1 타입 1

그림 3은 스포크 타입 1의 회전자 형상을 나타낸다. 회전자 내측 방향으로 누설되는 자속량을 줄이기 위하여 회전자와 샤프

프트 사이에 누설자속이 흐를 수 없도록 비자성체 재질을 끼워넣었다. 누설되는 자속을 원천적으로 차단할 수 있도록 한 것이다. 그리고 회전자 외측 부분의 누설 차단을 위하여 영구자석을 지지하는 돌기 부분만 남기고 코어 외측을 오픈하였다. 따라서 영구자석에서 발생된 자속은 대부분 고정자 코어로 이동하여 다시 영구자석으로 되돌아 온다.

이와같은 구조는 기존 회토티 영구자석을 사용한 동기발전기와 비교하였을 때 비자성체 지지물이라는 구성품이 새롭게 필요로 하게된다. 또한 회전자 코어가 각각 분리되어 있기 때문에 코어를 모아서 지지할 수 있는 구조를 비자성체 지지물이 가져야하고 코어를 하나하나 결합해야 하는 공정이 생겨나게 된다.

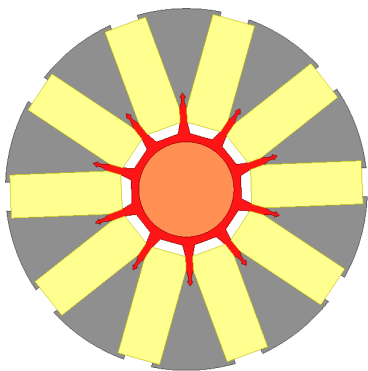


그림 3 스포크 타입 1 형상
fig. 3 Spoke type 1 shape

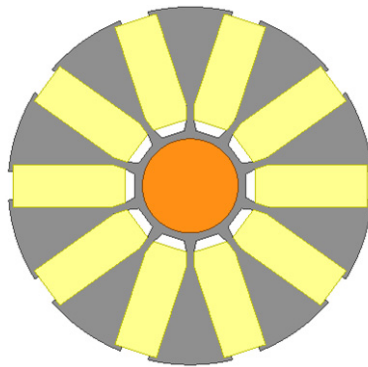


그림 4 스포크 타입 2 형상
Fig. 4 Spoke type 2 shape

2.2.2 타입 2

그림 4는 스포크 타입 2의 회전자 형상을 나타낸다. 회전자 내측 코어를 극단적으로 작게 설계하는 것이다. 이로인해 내측 코어의 빠른 자속포화를 이끌어 내어서 누설자속을 줄이는 방법이다. 그리고 타입 1과 마찬가지로 회전자 외측 부분의 누설 차단을 위하여 영구자석을 지지하는 돌기 부분만 남기고 코어 외측을 오픈하였다.

이와같은 구조는 한번의 타발로 회전자 코어를 얻을 수 있기에 타입 1에 비하여 회전자 구성품 수도 작고 회전자 코어

가 모두 연결되어 있기 때문에 이를 결합해야 하는 공정이 필요하지 않다.

2.2.3 타입 3

그림 5는 스포크 타입 3의 회전자 형상을 나타낸다. 회전자 코어의 내측 브릿지와 외측 브릿지가 번갈아 가며 지그재그 형태로 연결되어 있다. 타입 2와 마찬가지로 회전자 코어가 한번의 타발로 얻을 수 있다.

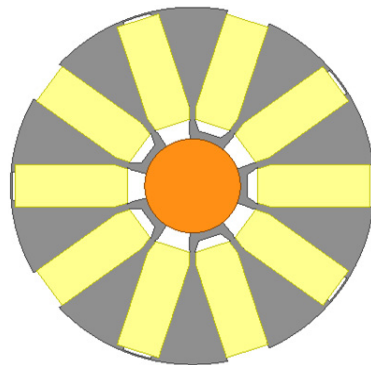


그림 5 스포크 타입 3 형상
Fig. 5 Spoke type 3 shape

2.2.4 비교 사양 정리

위 3가지 스포크 타입의 성능을 비교하기 위하여 고정자 형상과 권선 사양은 모두 동일하게 적용하였다. 타입 2와 타입 3은 회전자 내측 브릿지 두께에 따라서 누설되는 자속량이 달라지기 때문에 두께에 따라서 다른 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 타입 2와 3은 브릿지 두께를 5mm~1mm로 0.5mm씩 변경하며 성능을 확인한다. 브릿지 두께가 작아지면 생기는 공간은 그림 6과 같이 영구자석을 채워서 비교한다.

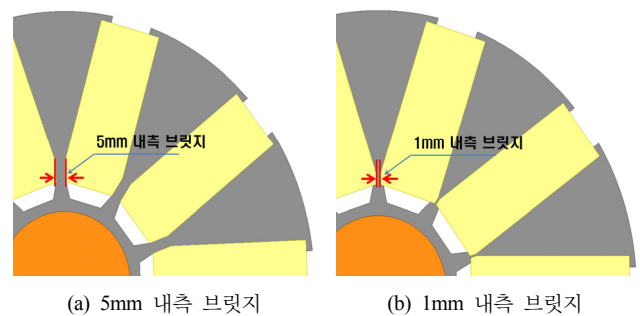


그림 6 내측 브릿지 두께에 회전자 형상
Fig. 6 Rotor shape according to inner bridge thickness

2.3 무부하 성능

2.3.1 역기전력

무부하 역기전력은 300rpm으로 회전할 때 고정자 권선에 유기되는 전압을 살펴보았고 결과는 그림 7과 같다. 3가지 모델 중 비자성체를 사용하여 회전자 코어를 완전 분리시킨 타입 1이 146.14[V]로 가장 높은 역기전력 크기를 나타냈다. 그

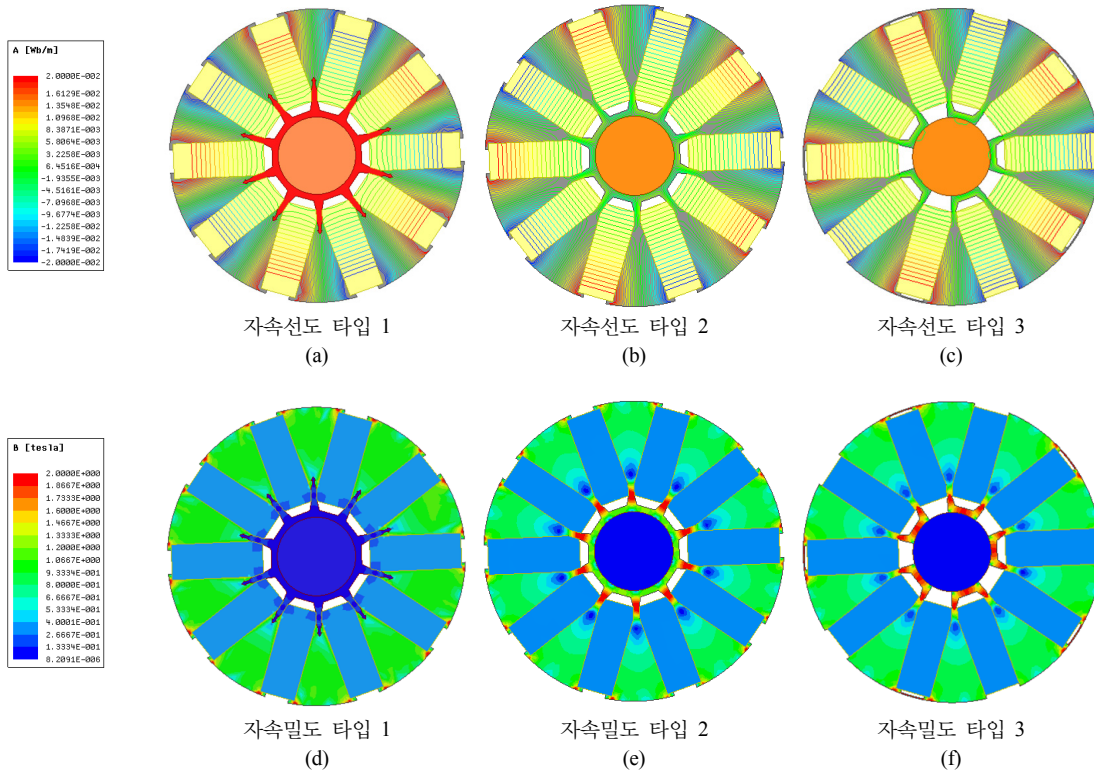


그림 8 회전자 형상에 따른 자속선도 및 자속밀도 분포

Fig. 8 Magnetic flux line and magnetic flux density distribution according to rotor shape

림 8. (a) 자속선도를 보면 영구자석에서 발생한 자속이 비자성체 커넥터로 자로가 막혀서 회전자 내측으로 발생하는 누설 자속 없이 모두 고정자 코어 방향으로 향하게 하였음을 확인할 수 있다. 이로인하여 회전자에서 만들어진 자속이 대부분 고정자 코어의 권선을 쇄교하면서 3모델 중 가장 높은 유기전압을 발생시킨 것으로 보인다.

타입 2와 타입 3은 브릿지 두께에 따라 다른 결과 값을 나타냈다. 브릿지 두께 5mm~4mm 까지는 타입 3이 더 높은 역기전력을 나타냈지만 브릿지 두께 4mm보다 작은 구간에서는 타입 2가 더 높은 역기전력을 나타냈고 두께가 작아질수록 그 차이는 더 커져갔다. 타입 2와 타입 3의 구조적인 차이는 회전자 내측 브릿지의 연결 유무이다. 타입 2의 경우에는 총 10개의 브릿지가 있고 이들은 서로 연결되어 누설자속이 연결된 브릿지로 흐를 수 있다. 타입 3 역시 10개의 브릿지를 가지고 있기는 하지만 브릿지는 2개씩만 연결되어 서로 분리되어 있다. 이와같은 구조적 차이에 의해서 두께 5mm~4mm 구간에서는 회전자 내측 누설자속이 많이 발생하였고 브릿지 두께 4~1mm 구간에서는 내측 브릿지를 통한 누설보다는 외측 누설이 더 많다고 볼 수 있다.

발전기 용량에 따라서 요구되는 회전자 강성이 다를 수 있기에 높은 회전자 강성을 요구하는 발전기에서는 역기전력 측면에서 타입 2가 타입 3보다 유리하고 낮은 회전자 강성을 요구하는 발전기에서는 타입 3이 타입 2보다 유리한 것으로 보인다.

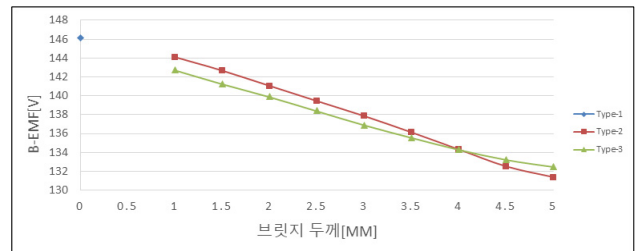


그림 7 타입 및 브릿지 두께에 따른 역기전력

Fig. 7 B-EMF according to type and bridge thickness

2.3.2 코깅토크

코깅토크는 회전자에 삽입된 영구자석이 철로 되어있는 고정자 코어를 끌어당기면서 발생하게 되는데 풍력발전기에 있어서 코깅토크의 저감은 매우 중요한 요소이다. 코깅토크가 크다면 최초 바람의 힘으로 기동할 때 큰 힘이 필요로 하게 된다. 그리고 발전하면서 토크리플이 크게 발생하여 소음과 진동의 원인이 되어 발전기 운전 수명을 줄이게 하는 원인이 되기도 한다.

코깅토크 결과는 그림 9와 같고 가장 높은 역기전력을 나타낸 타입 1이 3.05[Nm]로 가장 높게 나왔다. 타입 2는 2.82~2.99[Nm]의 코깅토크를 나타냈으며 타입 3은 0.5~0.96[Nm]로 타입 1과 2에 비하여 매우 낮게 나타났다. 타입 1과 2는 그림 10에서 나타내는 바와 같이 회전자 외측 브릿지를 가지고 있지 않다. 따라서 회전자가 회전하면서 회전자 코어 부분(①)에서는 고정자 코어와의 흡입력이 크게 발생하고 외측 브릿지가

없는 영구자석 부분(②)에서는 흡입력이 작게 발생하는 현상으로 보여진다.

또한 타입 2와 타입 3은 브릿지 두께가 커질수록 코깅토크가 줄어드는 경향을 나타냈다. 브릿지가 커지는 것은 곧 누설 자속이 많아진다고 볼 수 있다. 따라서 브릿지가 커질수록 누설자속이 늘어나면서 고정자 코어로 흐르는 자속량이 작아지게 되면서 코깅토크가 줄어드는 것이다.

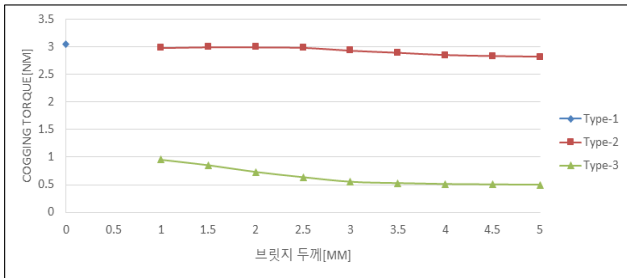


그림 9 타입 및 브릿지 두께에 따른 코깅토크
Fig. 9 Cogging torque according to type and bridge thickness

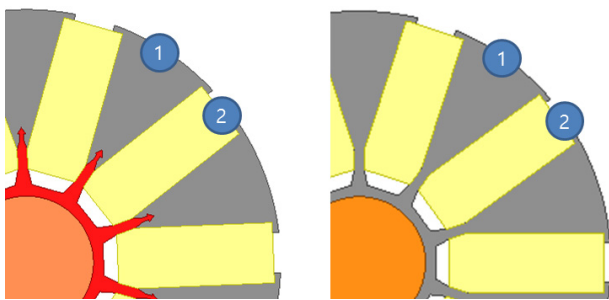


그림 10 타입 1과 2의 회전자코어 형상
Fig. 10 Type 1 and 2 rotor core shapes

2.4 부하 성능

3가지 타입 스포크 모델의 부하성능을 비교하기 위하여 부하전압과 부하전류를 곱한 출력값 3.3[kW]로 고정하였다. 또 회전자 내측 브릿지의 두께를 1~5[mm]로 0.5[mm] 간격으로 변화시켜 가면서 부하시의 각 성능들을 확인하였다. 그림 11은 브릿지 두께에 따른 출력 그래프를 나타내고 있으며 3가지 모델 모두 3300[W]±30[W] 공차내에 들어와 있음을 확인 할 수 있다.

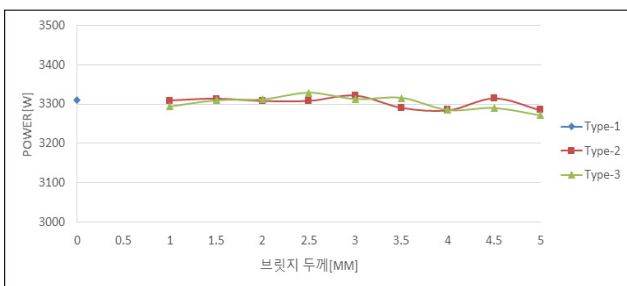


그림 11 브릿지 두께에 따른 출력
Fig. 11 Output power according to bridge thickness

2.4.1 부하토크

부하 시 토크는 그림 12와 같이 타입 3이 가장 큰 것으로 나타났다. 앞서 역기전력 크기의 경우 타입 2와 3은 유사했다. 부하전류 역시 3.3[kW] 부하 출력 시 표 2와 같이 유사한 수준이었다. 하지만 평균 부하토크 부분에서는 타입 3이 타입 1에 비하여 4.7[%], 타입 2에 비하여 3.4[%] 더 높게 나왔다. 일반적으로 스포크타입의 발전기나 전동기의 경우에 릴럭턴스분의 토크는 미미하게 발생하게 된다. 왜냐하면 d축과 q축과의 인덕턴스가 유사하기 때문이다. 하지만 타입 3은 타입 1, 2와는 달리 회전자 외측에 브릿지가 존재하면서 d축과 q축과의 인덕턴스 차가 생기면서 마그네틱 토크 외에 릴럭턴스 토크분이 발생하게 되면서 이와 같은 결과가 나온 것으로 보여진다 [4][5].

또한 브릿지 사이즈가 변화함에도 타입 2의 경우에는 평균 000[Nm]로 일정하게 나타났고, 타입 3의 경우에도 평균 000[Nm]로 일정한 값을 나타냈다. 이는 브릿지가 줄어들수록 역기전력은 상승하지만 상승분만큼 부하전류가 줄어들면서 동일한 출력인 3.3[kW]를 나타냈기 때문이다.

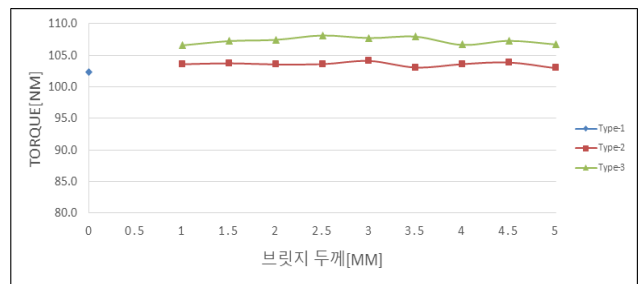


그림 12 브릿지 두께에 따른 부하토크
Fig. 12 Load torque according to bridge thickness

표 2 브릿지 두께에 따른 평균전류

Table 2 Average current according to bridge thickness

	Type-1	Type-2	Type-3
평균전류[A]	8.69	9.08	9.15

2.4.2 토크리플, 부하전압, 부하전류

타입 3의 경우에는 다른 타입에 비하여 코깅토크가 매우 작았다. 하지만 토크리플은 그림 13. (a)와 같이 타입 2<타입 3<타입 1의 순으로 나왔다. 이는 타입 1에 비하여 역기전력이 낮기에 유사한 성능을 내기 위하여 부하전류가 더 많이 들어가면서 발생된 것으로 보인다.

부하전압과 부하전류는 타입 2와 3은 유사한 수준이고 역기전력이 높았던 타입 1의 경우에는 가장 부하전압은 높게, 부하전류는 가장 낮게 해석이 되었다.

2.4.3 철손, 동손

철손과 동손은 그림 13 (a), (b)와 함께 나타났다. 타입 2, 3은 브릿지 두께가 얇을수록 더 많은 철손을 나타내고 있다.

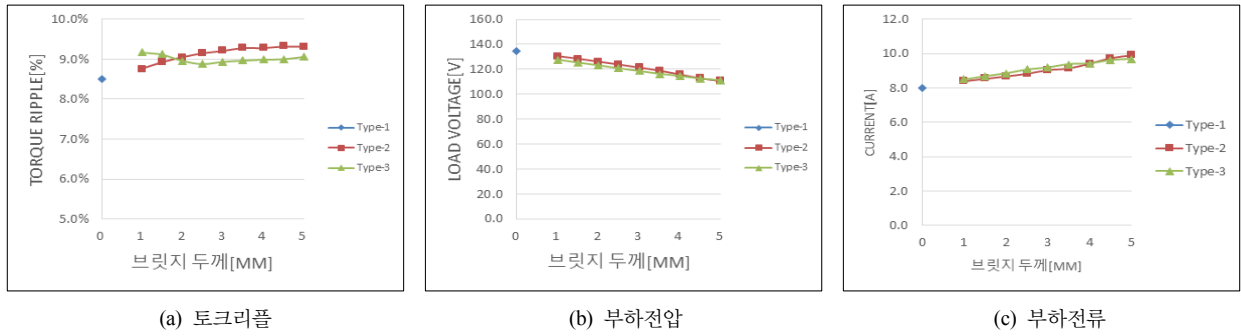


그림 13 브릿지 두께에 토크, 부하전압, 전류특성
 Fig. 13 Torque, load voltage, and current characteristics of the bridge thickness

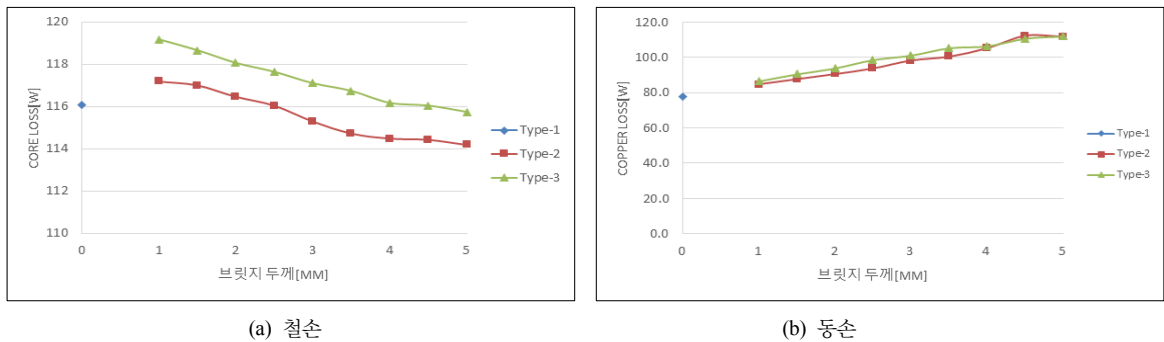


그림 14 브릿지 두께에 따른 특성
 Fig. 14 Loss characteristics according to bridge thickness

앞서 기술했던 바와 같이 브릿지가 얇아질수록 그만큼 영구자석의 사용량은 많아지게 된다. 또한 브릿지가 얇아질수록 자료가 좁아지면서 회전자 내측으로 누설되는 자속량이 줄어들게 된다. 이로 인하여 회전자로부터 고정자로 다시 회전자로 회귀하는 자속량이 많아지고 이로인해 코어의 자속밀도가 커져가면서 철손이 커진 것으로 보인다.

이는 고정자 코어의 자속밀도 분포를 살펴보면 알 수 있다. 표 3은 브릿지 두께에 따른 고정자 코어의 자속밀도를 나타내는데 브릿지가 얇을수록 많은 자속밀도가 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

표 3 브릿지 두께에 따른 고정자 자속밀도 분포
 Table 3 Stator flux density distribution according to bridge thickness

자속밀도 색깔 레벨[T]	Type-2	Type-3
B [tesla] 	 브릿지 1mm	 브릿지 5mm

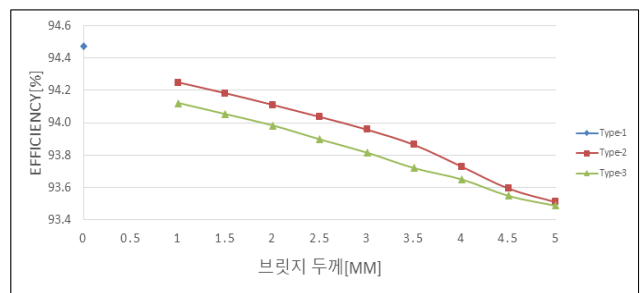


그림 15 브릿지 두께에 따른 효율
 Fig. 15 Efficiency according to bridge thickness

2.4.4 효율

효율 계산식은 아래 수식 2와 같고, 타입 1이 가장 높게 나타났다. 타입 2와 3의 경우에는 브릿지 두께가 5mm에서는 유사하였으나 브릿지 두께가 얇아질수록 약 0.15[%] 타입2가 더 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 브릿지 두께가 얇아질수록 효율이 개선되었는데 이는 철손 부분에 있어서는 3 모델 모두 유사하였지만 동손부분이 저감되었기 때문이다. 브릿지가 얇아지면서 누설자속이 줄어들면서 동일한 출력을 만드는데 필요한 전류가 작아지면서 동손이 개선되고 따라서 효

을역시 개선되어졌다.

$$\text{발전기 효율} = \frac{\text{발전기 출력}}{\text{발전기 출력} + \text{철손} + \text{동손}} \times 100 \quad (\text{수식 1})$$

3. 결론

본 논문에서는 고가/고성능의 희토류 영구자석을 대신하여 저가의 페라이트 영구자석을 사용하는 발전기를 개발함에 있어서 3가지 대표적인 회전자 코어 형상에 따른 무부하 및 부하 성능을 비교하였다. 자속밀도가 낮은 페라이트를 사용하는 스포크 회전자 특성상 회전자 내측 브릿지 두께에 따라서 누설자속량이 달라지면서 다른 결과를 도출되기에 회전자 내측 브릿지 두께를 바꾸어 가면서 특성을 살펴보았다. 동일한 출력 3.3[kW] 부하에서 3가지 타입을 비교하였을 때 유사한 효율을 얻을 수 있었고 초기 기동시에 작은 바람에도 회전하는 것이 유리한 풍력발전기 측면에서는 타입 3이 현저하게 낮은 코깅토크를 가지므로 가장 유력한 형태로 보여진다.

Acknowledgements

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 연구개발특구진흥재단-기술이전사업화 사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2019-GJ-RD-0158 / 하이브리드 스포크 회전자를 적용한 3kW급 발전기 개발)

References

- [1] D. Dorrell, L. Parsa, and I. Boldea, "Automotive electric motors, generators, and actuator drive systems with reduced or no permanent magnets and innovative design concepts," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5693-5695, Oct. 2014.
- [2] Sandra M. Castano ; James Weisheng Jiang1 ; Berker Bilgin1 ; Hossein Dadkhah ; Nitin Patel, "Design of a Spoke-Type Ferrite Magnet Generator for a Hybrid Electric Vehicle Application," in ITEC 2019, 19-21, June 2019.
- [3] Z. S. Du and T. A. Lipo, "Efficient utilization of rare earth permanent magnet materials and torque ripple reduction in interior permanent magnet machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 4, pp. 3485-3495, August 2017.
- [4] Sooyoung Cho, Hanwoong Ahn, Sang-Hwan Ham, Chang-Sung Jin, Sung Gu Lee, and Ju Lee, "Design of Fan-shape Type PMSM for Improving Efficiency of Non-rare Earth Motor," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 65, no. 2, pp. 360 ~ 364, 2016.
- [5] Min-Jae Jeong, Sung-Gu Lee, Hyung-Sik Kong, Hyun-Jo Pyo, Dong-Woo Nam, Seo-hee Yang, Seung-hyeon Lee, and

Won-Ho Kim, "Design of Spoke Type Permanent Magnet Synchronous Motor of Maximize Utilization in Reluctance Torque," The 50th KIEE Summer Conference, pp. 1109-1110, 2019.

저자소개



김수용 (SuYong Kim)

2008년 한양대학교 전기공학과 졸업.
2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2013년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
2012년~현재 전자부품연구원 선임연구원.
Tel : 062-975-7043
E-mail : sykim@keti.re.kr



이주 (Ju Lee)

1986년 한양대학교 전기공학과 졸업.
1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1988~1993년 국방과학연구소연구원.
1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사).
1997년 한국철도기술연구원 선임연구원.
1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.
Tel : 02-2220-0342
E-mail : julee@hanyang.ac.kr