

다극 회전자를 갖는 영구자석 기기의 코깅토크 저감을 위한 해석적 접근 및 실험적 검증

장 석명, 최 장영, 고 경진
충남대학교

Analytical Approach and Experimental Verification for the Cogging Torque Reduction of Permanent Magnet Machines with Multi-pole Rotor

Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Kyoung-Jin Ko
Chungnam National University

Abstract - In order to reduce the cogging torque, by predicting the variation of the cogging torque according to pole arc/pitch ratio by analytical and FE methods, pole arc/pitch ratio which makes the cogging torque minimum are determined. And then, the measurements of cogging torque for permanent magnet generators with determined pole arc/pitch ratio are presented. The reasons for the error between predicted and measured value are discussed fully in terms of the shape of permanent magnet. Finally, by confirming that predicted results for cogging torque according to pole arc/pitch ratio and skew are shown in good agreement with those obtained from measured one, the validation of analysis results is confirmed.

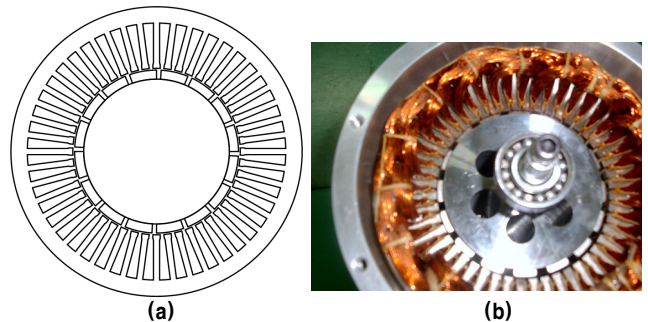
1. 서 론

저자들은 [1]에서 다극 회전자를 갖는 영구자석기기의 코깅토크를 해석적으로 예측하였고 해석결과는 유한요소해석결과와 비교하여 이미 해석해의 타당성을 입증하였다. 따라서 본 논문은 [1]에 제시된 특성식을 사용하여 코깅토크를 저감방안으로 영구자석 극호비에 따른 코깅토크의 변화를 해석적 방법과 유한요소해석방법을 통해 해석함으로써 코깅토크가 최소가 되는 극호비를 도출하였으며, 스큐가 코깅토크에 미치는 영향 역시 해석적 방법과 유한요소해석방법 모두를 이용하여 계산하였다. 또한, 극호비와 스큐 유무에 따른 코깅토크를 측정하여 해석결과의 타당성 입증 및 코깅토크의 크기에 영향을 주는 스큐, 극호비와 영구자석의 형상과 같은 인자들을 해석적 뿐만 아니라 실험적으로도 확인하여 코깅토크 저감 및 그 방법을 제시하였다.

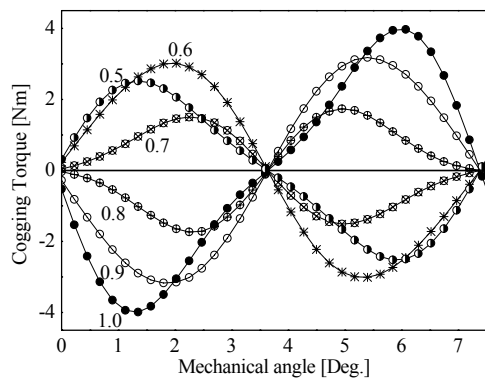
2. 코깅토크 최소화

2.1 극호비 변화

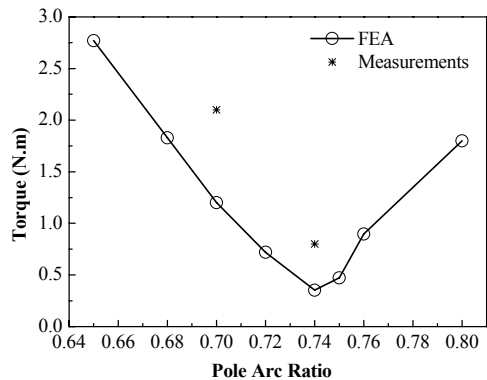
코깅토크 저감 방법은 현재까지 많은 논문에서 다루어 졌으며 그 중 슬롯 개구폭 최소화, 보조슬롯, 극호비 변화에 의해 최소화될 수 있다고 보고 되고 있다. 이 중 슬롯개구폭은 권선두께에 의해 최소화의 한계가 있으며 보조슬롯은 설계된 발전기의 치 폭이 작아 시행하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 고려한 방법은 극호비에 따른 코깅토크 저감방법으로 그림 1(a)에서 알 수 있듯이, 제시된 영구자석 기기의 경우 다극이기 때문에 영구자석의 극 피치가 일반적인 4극기기에 비해 상대적으로 작아 코깅토크가 극호비에 매우 민감한 영향을 받을 것으로 예측되어 질 수 있다. [1]에서 제시되었듯이, 코깅토크에 대한 해석결과가 유한요소 해석결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었기 때문에 오직 해석 해만을 사용하여 다양한 극호비에 따른 코깅토크의 해석을 그림 2와 같이 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 극호비가 0.7인 경우가 제일 작음을 확인할 수 있고 극호비가 0.5~0.7인 경우의 코깅토크는 +에서 -로 변하는 반면 0.8~1.0의 경우에 코깅토크는 -에서 +로 변함을 알 수 있다. 코깅토크를 연구한 대부분의 논문에서 알 수 있듯이, +로 혹은 -로 시작하는 코깅토크가 그 반대의 부호로 시작하는 코깅토크로 변하는 극호비 사이에서 코깅토크가 최소가 되기 때문에 0.7~0.8사이에 코깅토크가 최소가 되는 극호비가 존재함을 예측할 수 있다. 실제로 유한요소해석으로부터 얻어진 그림 3에서 알 수 있듯이, 0.74에서 코깅토크가 최소가 됨을 확인하였다. 극호비를 제외한 영구자석기기의 설계 파라미터가 이미 정해진 상태였기 때문에 해석결과로부터 본 논문은 극호비를 0.74로 하여 그림 1(b)에 보이는 영구자석기기를 제작하였다. 그러나 그림 3의 측정결과로부터 실험결과와 해석결과 사이의 오차가 거의 2배 정도임을 알 수 있다. 이 오차의 이유는 다음 장에서 자세히 다루어질 것이다. 한편, 본 논문은 극호비에 따른 코깅토크의 최소화를 해석적으로 검증하였으나 실제와는 차이가 남을 확인하였기 때문에 코깅토크 저감의 가장 확실한 방법인 스큐를 결정하였으며, 아울러 극호비에 따른 코깅토크 변화를 확인하기 위해서 극호비 0.7에 고정자 스큐가 시행된 영구자석기기



〈그림 1〉 영구자석형 다극기기: (a) 설계모델 및 (b) 제작모델



〈그림 2〉 극호비에 따른 코깅토크의 공간고조파법 해석결과

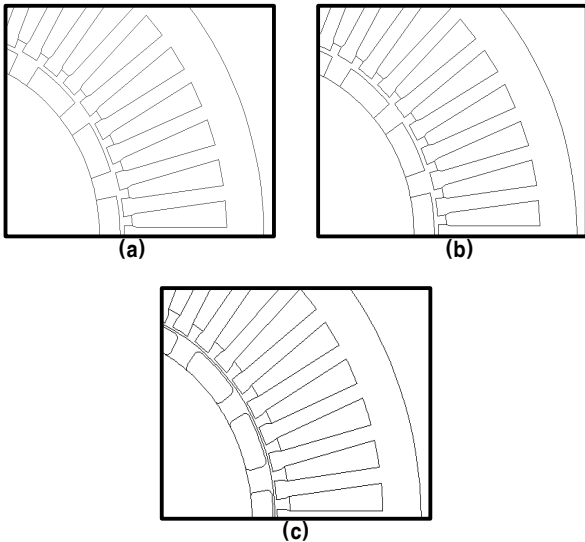


〈그림 3〉 극호비에 따른 코깅토크의 유한요소 해석결과 및 측정결과

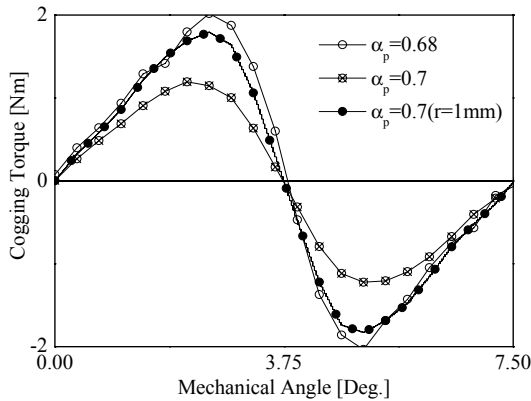
1대를 더 제작하였다. 이로써 스큐 유무에 따른 그리고 극호비에 따른 코깅토크 측정결과를 4가지 경우에 대해 얻을 수 있었으며 이 결과는 또한 다음 장에 자세히 다룰 것이다.

2.2 영구자석의 형상

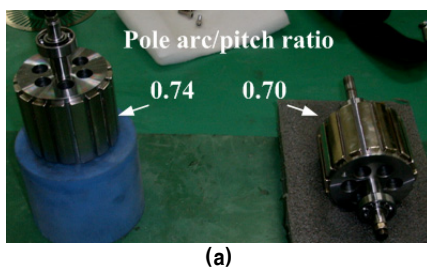
그림 4 (a), (b) 및 (c)는 코깅토크의 유한요소 해석 모델로 각각 극호비가 0.68, 0.7 및 극호비 0.7에 영구자석 모서리를 $r=1\text{mm}$ 의 호로 가공한 것이다. 그림 5의 유한요소 해석결과에서 알 수 있듯이, 극호비가 0.7 일지라도 영구자석의 모서리 끝에 약간의 R을 주면 그것의 코깅토크는 마치 영구자석의 극호비가 0.68과 같은 효과를 낼 수 있고, 이는 그림 3의 측정결과에서도 알 수 있다. 또한 앞 장에서 논의 되었던, 회전자의 영구자석은 코깅토크가 최소가 되는 극호비인 0.74로 제작되었으나, 제작된 회전자는 영구자석 모서리에 $r=1\text{mm}$ 준 경우이므로, 그림 3에서 알 수 있듯이, 측정결과는 마치 극호비가 0.72일 때의 해석결과와 비슷한 값을 가진 것으로 사료된다. 실제로 영구자석은 부식방지를 위한 니켈도금을 위해서 영구자석의 모서리를 둥글게 가공을 해야만 하며, 이는 영구자석형 다극기와 같이 다극인 경우 한 극이 차지하는 극호비의 감소를 야기할 수 있음을 해석결과와 실험결과를 통해서 확인 할 수 있다. 따라서 다극형 영구자석 기기의 코깅토크는 해석 시 반드시 제작 될 영구자석의 정확한 형상을 고려해야 한다.



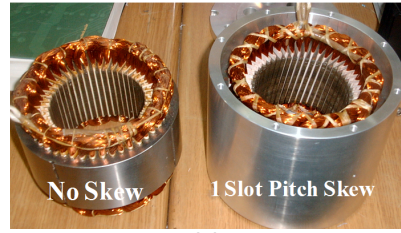
〈그림 4〉 코깅토크 해석 모델: 극호비가 (a) 0.68, (b) 0.7 및 (c) 0.7 ($R=1\text{mm}$).



〈그림 5〉 그림 4 모델의 코깅토크에 대한 유한요소 해석결과.

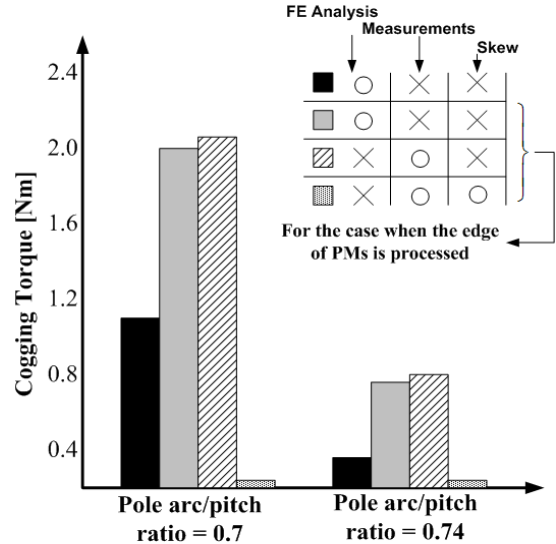


(a)



(b)

〈그림 6〉 제작된 영구자석형 발전기: (a) 극호비가 다른 회전자 및 (b) 스큐 유무에 따른 고정자.



〈그림 7〉 극호비 및 스큐에 따른 코깅토크에 대한 해석결과 및 측정결과.

2.3 코깅토크저감결과

그림 6 (a) 및 (b)는 각각 극호비가 0.7 및 0.74인 두 회전자와 스큐를 준 그리고 주지 않은 고정자의 제작 사진을 보여준다. 그림 7은 앞 장에서 논의된 코깅토크 해석결과와 다양한 극호비에 대해 스큐를 준 경우의 코깅토크 측정결과를 정리한 것이다. 극호비가 비록 0.04의 작은 차이가 남에도 불구하고 코깅토크는 무려 3배 이상의 차이가 남을 확인할 수 있고, 각 극호비에서 영구자석의 모서리를 가공한 경우와 가공하지 않은 경우의 코깅토크 역시 거의 2배정도 차이 남을 알 수 있다. 이 결과들로부터 다극 영구자석형 기기의 경우 코깅토크는 극호비에 매우 민감함을 알 수 있다. 또한, 1 슬롯 피치 스큐를 시행한 경우 이론적으로 코깅토크는 0이 되나 그림 11에서 알 수 있듯이 실제 측정결과는 그렇지 않음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고, 영구자석기에서 스큐가 코깅토크 최소화에 가장 적합함을 해석적 및 실험적으로 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 코깅토크를 저감하기 위해 영구자석 극호비에 따른 코깅토크의 변화를 해석적 방법과 유한요소해석방법을 통해 예측함으로써 코깅토크가 최소가 되는 극호비를 도출하였으며, 도출된 극호비를 갖는 영구자석 발전기를 제작하여 코깅토크 측정도 수행하였다. 예측된 결과와 측정된 결과와의 오차원인이 영구자석의 극호비에 영향을 주는 영구자석 형상 측면에서 논의되었다. 마지막으로 극호비에 따른 그리고 스큐 유무에 따른 코깅토크 측정결과와 예측결과를 비교하여 비교적 잘 일치함을 확인함으로써, 해석결과의 타당성을 다시 한번 입증하고 코깅토크에 영향을 주는 요소를 해석 및 실험 모듈을 통해 확인할 수 있었다.

〈참 고 문 헌〉

[1] 장성명, 최장영, 고경진, 박지훈, “다극회전자를 갖는 영구자석기기의 코깅토크에 대한 해석적 예측”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문 춘계학술대회, pp.56-58, 2007.