

피로한계를 고려한 IPM타입 영구자석 전동기 Bridge부 구조 해석 방법

강경호, 유석진, 안효철, 김지현*, 정상용**

현대로템 기술연구소, POSCO 기술연구소*, 동아대학교 전기공학과**

A method to analyze the strength of bridge in IPM type permanent magnet motor considering the effect of mechanical fatigue characteristic

Kyong-Ho Kang, Suk-Jin Yu, Hyo-Chul Ahn, Ji-Hyun Kim*, Sang-Yong Jung**

Hyundai Rotem Company R&D Center, POSCO Research Lab.*, Dept. of Electrical Engineering in Dong-A University**

Abstract - 영구자석을 삽입하는 IPM(Interior Permanent Magnet : 이하 IPM) 방식의 동기전동기 설계에서 브리지의 형상 결정은 기계적인 안정성을 확보하고 출력 요구사항을 만족시키기 위해 구조해석과 자기회로 해석을 병행하여 검토하는 것을 요구한다. 본 논문에서는 IPM타입 동기전동기를 대상으로 회전자 원심력이 정적상태로 인가되는 정하중 조건과 속도변화가 시간에 따라 변하는 동하중 조건일 경우를 구분하여 설계 여유를 분석하였으며, 영구자석의 접착여부에 따라 브리지에 발생하는 응력 분포의 차이를 해석하였다. 또한, 동하중 상태에서 재료의 응력-피로 특성을 통해 피로 한계 조건을 설계단계에서 예측하였다.

1. 서 론

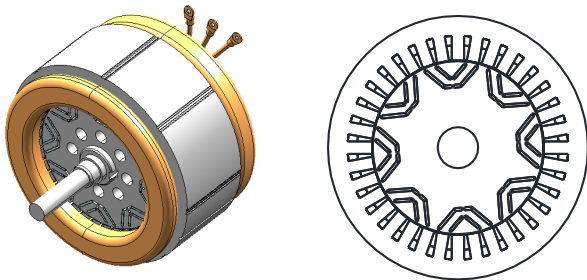
최근 저탄소 녹색기술에 대한 관심과 함께 인버터 구동형 고효율 전동기의 개발이 증가하고 있다. 특히 영구자석형 동기전동기인 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 PMSM)은 타 전동기 방식에 비해 고효율화, 고풍력화, 소형화가 가능하여 가전 및 수송 분야에 적용되고 있다. 영구자석형 동기전동기는 자석의 배치 및 구조에 따라 표면착형(SPM 방식)과 회전자 삽입형(이하 IPM 방식)으로 구분되는데, 최근 고효율화의 요구에 따라 고속화에 유리한 IPM방식을 설계할 경우, 고속운전 시 발생하는 원심력에 의한 브리지의 강도를 설계단계에서 검토하는 것이 중요해지고 있다[1]. 회전자의 자석에서 발생하는 누설을 줄이기 위해서는 브리지 두께를 줄이는 것이 유리하나, 충분한 강도를 가지지 못할 경우 내구 시험 시 브리지 부분이 파손되는 사례가 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 원심력이 일정하게 작용되는 정하중 경우와 시간에 따라 일정하게 주기적으로 적용되는 동하중 조건에 대하여 강판의 항복강도 및 피로특성을 고려함으로써 설계된 전동기의 브리지 두께가 적합한지 분석하는 방법을 제안하고자 한다. 또한 회전자에 삽입된 자석의 접착성능에 문제가 발생한 경우와 그렇지 않은 상태를 비교하여 실제 시험 시 발생 가능한 최악조건에서의 브리지 강도를 상용 유한 요소 해석 툴로 비교 해석하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델의 정의

2.1.1 영구자석 동기전동기 설계 제원 및 형상

본 논문의 해석대상인 전동기는 3상 PMSM의 IPM타입으로 설계되었으며, 고속 구동 및 정출력 영역을 확보하기 위해 2 Layer 형태의 회전자 구조를 가지고 있다.



〈그림 1〉 해석 대상 전동기의 주요 형상

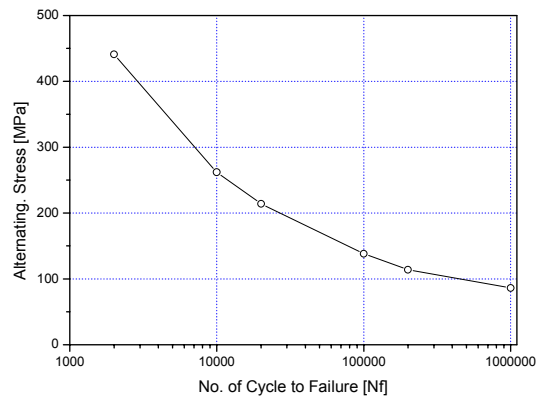
〈표 1〉 전동기기의 주요 제원

항 목	값 [단위]	비 고
극 수/슬롯 수	8극 / 36슬롯	극소강판 재질 : PN08급, 0.35T 적용
권선방식	분포권	
상 수	3상	
고정자 외경	320 / 212 [mm]	
회전자 외경	210 [mm]	
최대 회전속도	12,000 [RPM]	
로터 구조	IPM타입 (2층)	

표 1에 정리된 바와 같이, 해석 대상 전동기의 최대 회전속인 12,000RPM을 구조해석의 하중 기준 속도로 정하고자 한다.

2.2 강판의 피로 특성

전기강판을 포함한 금속 재료에 반복적인 하중에 적용될 때는 재료가 가진 피로특성을 고려하여 설계하는 것이 필요하다[2]. 피로해석을 위해 적용되는 몇 가지 방법 중, 본 논문에서는 재료의 거동이 탄성한도 내에서만 고려된다고 가정하고 응력-수명 방법을 이용하였으며, 전기강판 및 영구자석의 S-N(Stress-No.of Cycle) 커브는 입수가 어려워 ASME의 표준 Carbon Steel의 기본 커브를 이용하였으며 그림 2와 같다.



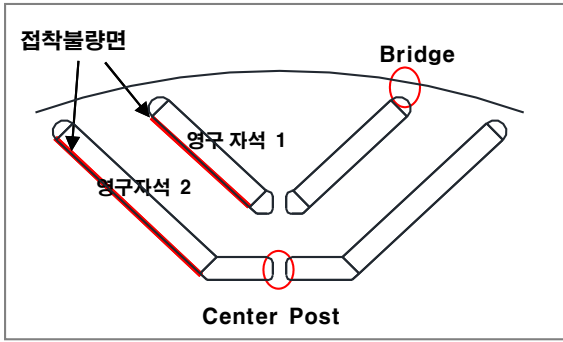
〈그림 2〉 ASME 표준 Carbon Steel의 S-N 커브

2.3 브리지 부 구조 해석

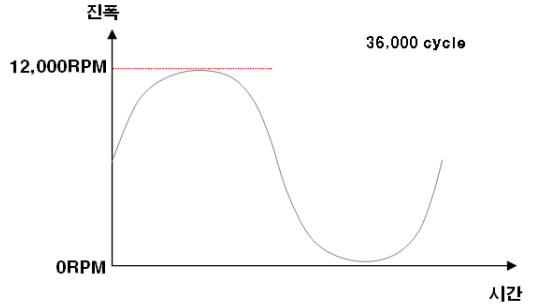
해석 대상 전동기의 브리지부를 확대하면 그림 3과 같다. 현재 설계된 브리지부의 최소 폭은 2.3mm로 자석 삽입단 끝단을 라운드 형태로 설계하여 응력의 부분 집중을 최소화하고자 하였다. 회전자가 고속으로 회전할 경우, 브리지에 응력집중을 발생시키는 하중조건으로는 원심력만 고려하였으며 고속 운전 시, 상대적으로 영향이 작다고 판단되는 반경방향 전자력은 고려하지 않는다. 또한, 실제 내구 시험 시, 자석이 삽입되는 경우를 고려하여 자석의 접착이 정상인 경우와 접착에 문제가 발생하여 반경 방향으로 원심력이 더욱 커지는 두 가지 경우를 해석하고자 한다.

2.3.1 해석 기준

브리지 부의 설계 타당성을 해석하기 위해 총 세 가지 경우로 모델링을 수행하였다. 케이스 1은 회전자에 삽입된 자석이 정상적으로 접착이 된 경우, 케이스 2와 3은 접착력에 문제가 발생한 경우로 그림 3에서 정의된 바와 같이 해석 모델의 영구자석 1번과 2번의 하단면에 접착 불량 이 발생한 경우이다.



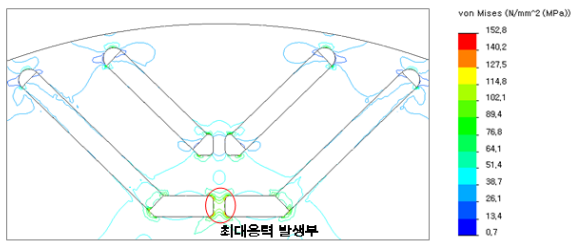
<그림 3> 해석 모델의 정의



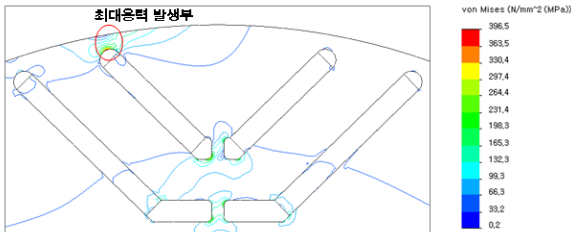
<그림 5> 동하중 사이클 정의 (동작/정지 시험)

2.3.1 일정 회전속도로 운전할 경우 (정하중)

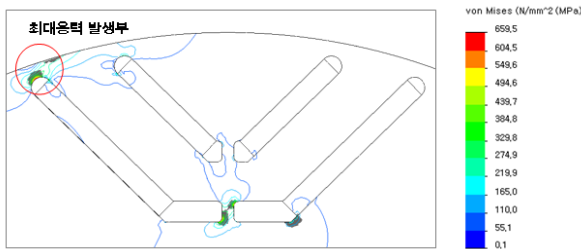
구동 전동기의 최대 회전 속도로 일정하게 일정시간 동안 운전될 경우 원심력 하중은 일정하게 적용되는 정하중 조건으로 고려할 수 있다. 정하중 조건이 적용된 경우, Static 상태로 응력 해석을 수행하여 각 케이스 별로 결과를 비교하였다.



(a) 케이스 1 해석 결과



(b) 케이스 2 해석 결과



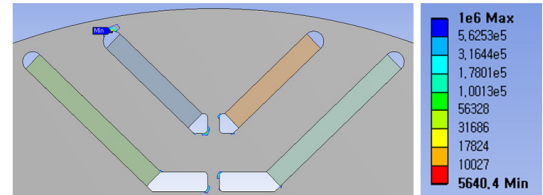
(c) 케이스 3 해석 결과

<그림 4> 케이스 별 정하중 인가 시, 브리지 부 응력 해석 결과

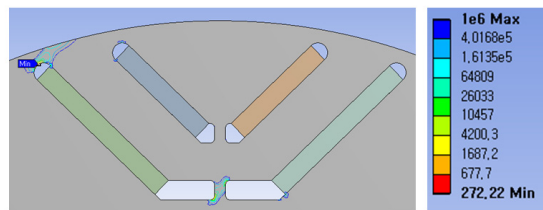
자석의 접촉에 문제가 없는 케이스 1의 해석결과 최대 응력 (Von-Mises응력 기준)은 155MPa로 센터 포스트부에 집중되나, 인장강도인 420MPa에 비하여 설계 여유가 충분한 것으로 판단된다. 그러나, 자석 접촉력에 문제가 있다고 가정된 케이스 2와 케이스 3의 경우, 최대 응력이 각각 브리지부에 집중되며 396MPa(케이스 2), 659MPa(케이스 3)로 파손이 우려됨을 예측할 수 있다. 특히, 케이스 3의 경우 브리지 및 센터포스트 모두 구조적으로 문제가 발생할 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다.

2.3.2 가변 회전속도로 운전할 경우 (동하중)

전동기의 내구시험 중, 동작/정지 시험의 경우 그림 5와 같은 형태의 주기를 가진 동하중 조건으로 고려될 수 있다. 시험 인가 주기는 36,000 사이클로 고려하여 피로해석을 각 케이스 별로 수행하였다.



(a) 케이스 2 해석 결과



(b) 케이스 3 해석 결과

<그림 6> 케이스 별 동하중 인가 시, 피로해석 결과

케이스 1번의 경우, 정하중 해석결과에서 알 수 있듯이 인장강도에 비해 설계 마진이 충분함으로 피로해석 결과 이론적인 무한 수명인 1,000,000 사이클 이상을 전 영역에서 만족하였다. 그러나, 케이스 2번과 3번의 경우, 국부적인 응력집중이 발생하는 브리지 부분에서 최소 피로 사이클이 각각 5,640, 272사이클로 시험 주기인 36,000 사이클에 훨씬 못 미침을 알 수 있다. 따라서, 자석의 접촉력에 문제가 생길 경우 내구시험 중에 문제가 발생할 것으로 예측되는 반면, 정상적인 자석 접촉 상태에서는 오히려 설계 여유가 충분한 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석 매입형 3상 동기 전동기를 고속영역에서 운전시킬 때 브리지 및 센터포스트부에 집중되는 응력을 해석하는 방법을 제안하였다. 기존에 연구된 회전자 철심만 해석대상으로 고려한 방법으로는 내구 시험 및 실제 운용 시 영구자석 접촉불량으로 인한 최악 조건을 고려할 수 없다. 특히, 본 논문에서 제안한 바와 같이 영구자석이 철착된 경우 브리지와 센터포스트부의 응력분포가 달라지므로 이를 정적 및 동적 하중 상태에서 고려함으로써 합리적인 설계 여유를 예측하는 것이 가능해진다. 추후, 구조강판의 실제 S-N커브를 입수하여 현실적인 브리지 두께를 산정하고 Magnetic Radial Force의 영향을 동시 고려하는 방법에 대해서도 연구를 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 손윤규, 황규윤, 권병일, “제어특성과 기계적 응력을 고려한 Spoke-Type IPMSM의 최적설계에 대한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, 2010
- [2] Julie A.Bannantine, Jess J.Comer, James L.Handrock, “Fundamentals of Metal Fatigue Analysis”, 청문각, 2010