

기계적 응력을 고려한 수소 연료전지 자동차용 초고속 동기전동기의 회전자 설계

Rotor Design of Ultra-high-speed Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle considering Mechanical Stress

저자 (Authors)	김재현, 김동민, 이정민, 홍정표, 최규성, 양현섭, 조경석 Jae-Hyun Kim, Dong-Min Kim, Jeong-Min Lee, Jung-Pyo Hong, Kyu Sung Choi, Hyun Sup Yang, Kyung Seok Cho
출처 (Source)	한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회 , 2018.11, 1141-1145(5 pages)
발행처 (Publisher)	한국자동차공학회 The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07593410
APA Style	김재현, 김동민, 이정민, 홍정표, 최규성, 양현섭, 조경석 (2018). 기계적 응력을 고려한 수소 연료전지 자동차용 초고속 동기전동기의 회전자 설계. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1141-1145
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.122 2019/05/22 10:31 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

기계적 응력을 고려한 수소 연료전지 자동차용 초고속 동기전동기의 회전자 설계

김 재 현¹⁾ · 김 동 민¹⁾ · 이 정 민¹⁾ · 홍 정 표^{*1)} · 최 규 성²⁾ · 양 현 섭²⁾ · 조 경 석²⁾

한양대학교 미래자동차공학과¹⁾ · 한온시스템 선행부품개발팀²⁾

Rotor Design of Ultra-high-speed Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle considering Mechanical Stress

Jae-Hyun Kim¹⁾ · Dong-Min Kim¹⁾ · Jeong-Min Lee¹⁾ · Jung-Pyo Hong^{*1)}
Kyu Sung Choi²⁾ · Hyun Sup Yang²⁾ · Kyung Seok Cho²⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

²⁾Advanced Component Team, Hanon systems, 95, Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Korea

Abstract : In this paper, the rotor design of ultra-high-speed synchronous motor for hydrogen fuel cell electric vehicle considering mechanical stress is carried out. The rotor consists of shaft, permanent magnet, and sleeve. Airgap magnetic flux density, which determines the electrical characteristics, is calculated using spatial harmonic analysis. The mechanical stress was estimated using the equations calculated from the equilibrium equations and the safety factor of permanent magnet and sleeve are calculated based on the von-Mises theory. The rotor is designed to have a safety factor of 1.1 or higher at a maximum speed of 110krpm and a driving temperature of 200°C, while satisfying the target airgap magnetic flux density. Then, airgap magnetic flux density and mechanical stress of the designed rotor were verified using finite element analysis.

Key words : Hydrogen fuel cell electric vehicle(수소 연료전지 자동차), Mechanical stress(기계적 응력), Rotor design(회전자 설계), Ultra-high-speed motor(초고속 전동기)

Nomenclature

a : outer radius of shaft, m
 b : outer radius of permanent magnet, m
 c : outer radius of sleeve, m
 δ : interference, m
 σ : stress, Pa
 r : radius, m
 ν : Poisson's ratio
 u_r : radial displacement, m
 M : magnetization, A/m
 Φ : magnetic scalar potential, A

μ_{rec} : recoil permeability
 ω : angular velocity, rad/s
 ρ : density, kg/m³

Subscripts

I : airgap region
II : permanent magnet region
 FE, m, c : shaft, permanent magnet, sleeve
 r : radial direction
 θ : tangential direction

* 홍정표, E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr.

1. 서론

수소 연료전지 자동차(FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle)는 주행 시 환경오염 물질을 만들어내지 않으며, 기존 내연기관 자동차에 비해 적은 소음과 큰 에너지 효율을 가진다는 장점이 있기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FCEV는 수소 탱크에 저장되어 있는 수소와 공기 블로워를 이용하여 압축한 공기를 연료전지에 공급한다.¹⁾ 이 공기 블로워용 모터의 소형화를 위해서는 작은 부피를 가지면서도 큰 출력밀도를 낼 수 있는 초고속 영구자석 동기전동기를 사용하는 것이 적합하다. 초고속 영구자석 동기전동기는 높은 회전속도에 의해서 발생하는 큰 원심력 때문에 영구자석이 비산할 수 있기 때문에, 자석을 슬리브로 압입하여 제작하게 된다.²⁾ 이 때 자석과 슬리브가 받는 기계적 응력에 의해 자석 및 슬리브가 파단 될 수 있기 때문에, 기계적 응력을 고려한 회전자 설계가 필수적이다.

본 논문에서는, 수소 연료전지 자동차용 초고속 동기전동기의 기계적 응력을 고려한 회전자 설계를 진행하였다. 회전자는 Fig. 1 과 같이 중실 축(solid shaft)을 가지며 구조는 샤프트, 영구자석, 슬리브로 구성하며, 영구자석 바깥에 슬리브가 압입되어져 있다. 전기적 특성을 결정짓는 공극자속밀도는 영구자석과 공극 영역의 지배방정식을 해석적으로 접근하는 방법인 공간고조파 기법을 이용하여 산정하였다. 기계적 응력 및 변위를 수식적으로 산정하였다. 온도 및 회전속도에 따라 영구자석과 슬리브가 받는 기계적 응력이 크게 바뀌기 때문에 이를 고려하여 영구자석과 슬리브가 받는 응력을 구하였다. 수식적으로 산정한 응력을 바탕으로 안전계수가 1.1 이상이 되도록 회전자를 설계하였고, 이를 유한요소해석을 이용하여 검증하였다.

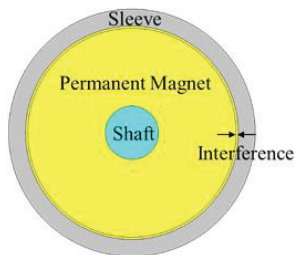


Fig. 1 Configuration of rotor

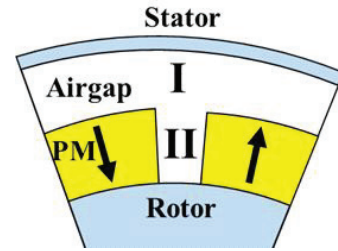


Fig. 2 Space harmonic analysis model

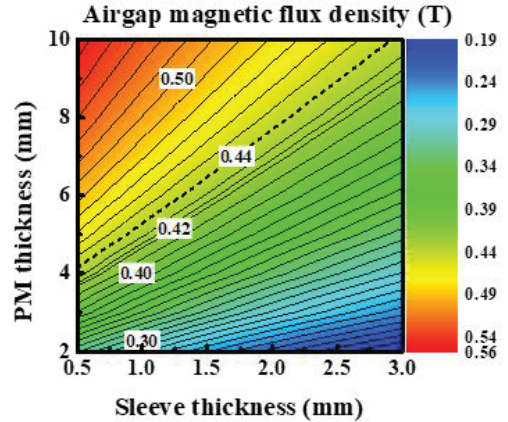


Fig. 3 Airgap magnetic flux density according to PM thickness and sleeve thickness

2. 공극자속밀도 산정

전기적 특성을 결정짓는 공극자속밀도는 공간고조파 해석(SHA : Space Harmonic Analysis)을 이용하여 산정하였다. 공간고조파 해석은 Fig. 2와 같이 고정자의 치, 슬롯 구조를 평활철심으로, 철심의 투자율을 무한대로 가정하여 식 (1), (2)의 지배방정식을 푸는 해석적인 방법이다.^{3), 4)} 식 (1)과 (2)는 각각 공극과 영구자석 영역에서의 지배방정식이다. 이 때, 샤프트의 반경, 공극 길이는 각각 5mm, 1.6mm로, 목표 공극자속밀도는 0.44T로 선정하였다.

$$\nabla^2 \Phi_1 = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \Phi_2 = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_{rec}} \quad (2)$$

공간고조파 해석을 이용하여 자석 두께 및 슬리브의 두께에 따라 Fig. 3 와 같이 공극자속밀도를 산정하였다.

3. 기계적 응력을 고려한 회전자 설계

3.1 회전자 응력의 수식적 산정

초고속 영구자석 동기전동기는 고속 운전 시 원심력에 의해서 영구자석이 비산할 수 있으므로, 영구자석 바깥을 슬리브로 압입하여 제작한다. 이 때, 회전 및 압입에 의해서 작용하는 응력을 받아 자석 및 슬리브가 파단 될 수 있으므로 이를 고려한 회전자 설계가 필수적이다. 유한요소해석(FEM : Finite Element Method)을 이용할 경우 정확한 결과를 얻을 수 있지만 전처리 과정, 해석 시간 및 후처리 과정이 오래 소요되므로 초기 설계 시 사용하기에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 4 과 같이 미소 요소에 작용하는 응력으로부터 평행방정식을 세워 일반해를 식 (3) - (5) 과 같이 산정하고, 식 (6) - (11) 의 경계조건을 이용하여 특수 해를 산정하여, 영역별 응력을 수식적으로 산정하였다.

$$u_{rl} = A_l r + \frac{B_l}{r} - (1 - \nu_l^2) \frac{\rho_l r^3 \omega^2}{8 E_l} \quad (l = FE, m, c) \quad (3)$$

$$\sigma_{rrl} = \frac{E_l}{1 - \nu_l} A_l - \frac{E_l}{1 + \nu_l} \frac{B_l}{r^2} - \frac{3 + \nu_l}{8} \rho_l r^2 \omega^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta\theta l} = \frac{E_l}{1 - \nu_l} A_l + \frac{E_l}{1 + \nu_l} \frac{B_l}{r^2} - \frac{1 + 3\nu_l}{8} \rho_l r^2 \omega^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{rrFE}(0) = finite \quad (6)$$

$$\sigma_{rrm}(a) = \sigma_{rrFE}(a) = p_1 \quad (7)$$

$$\sigma(a) = \sigma_{rFE}(a) \quad (8)$$

$$\sigma_{rrc}(b) = \sigma_{rrm}(b) = p_2 \quad (9)$$

$$u_{rc}(b) - u(b) = \delta \quad (10)$$

$$\sigma_{rrc}(c) = 0 \quad (11)$$

최고 회전속도인 110krpm과 구동 시 예상 회전자 온도인 200°C에서의 영구자석과 슬리브의 안전계수를 영구자석 두께와 슬리브 두께에 대하여 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타내었다. 이 때, von-Mises 이론⁵⁾을 이용하여 안전계수를 구하였고, 슬리브의 압입량은 0.06mm이다.

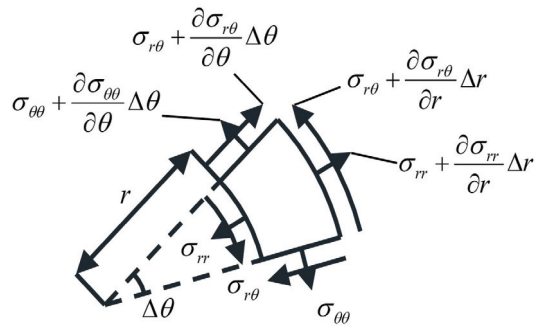


Fig. 4 Free body diagram of infinitesimal element

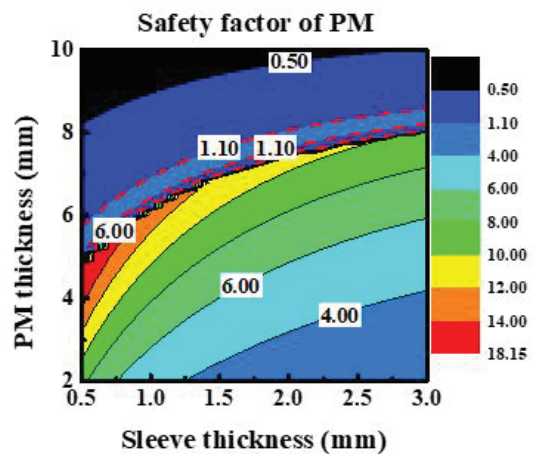


Fig. 5 Safety factor of PM according to PM thickness and sleeve thickness

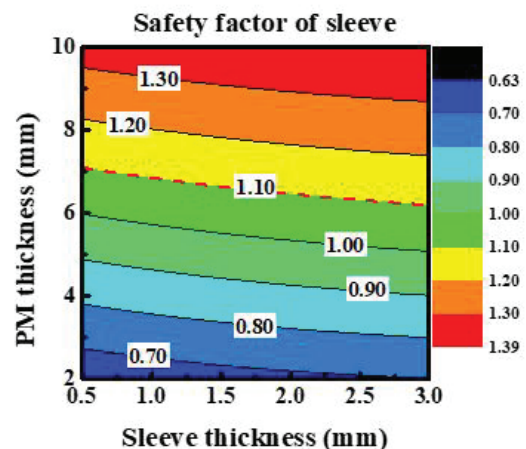


Fig. 6 Safety factor of sleeve according to PM thickness and sleeve thickness

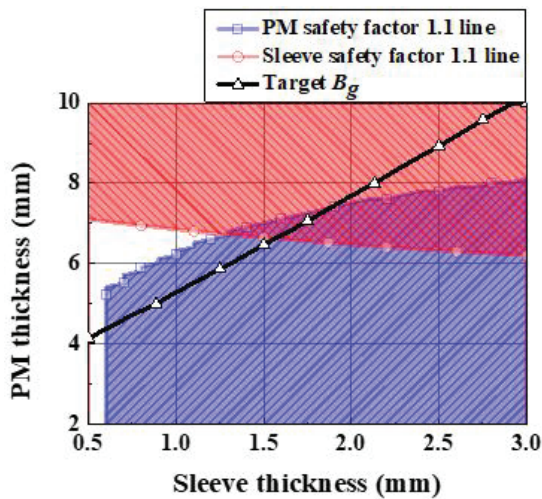


Fig. 7 Designable area

Table 1 Parameters of designed rotor

Parameter	Value (Unit)
Shaft radius	5 (mm)
PM thickness	6.7 (mm)
Sleeve thickness	1.6 (mm)
Safety factor of PM	10.7
Safety factor of sleeve	1.11

3.2 회전자 설계

앞서 산정한 공극자속밀도와 영역 별 안전계수를 바탕으로 기계적 응력을 만족하는 회전자를 설계하였다. 목표 공극자속밀도인 0.44T와 영구자석 및 슬리브의 안전계수가 1.1 이상이 되도록 하는 영역을 Fig. 7 과 같이 나타내었다. 설계 가능 영역 중 영구자석 및 슬리브의 사용량이 최소가 되는 지점에서 설계를 진행하였고, 결정된 회전자의 형상 치수 및 안전계수를 Table 1 에 정리하였다. 샤프트 반경 5mm, 영구자석 두께 6.7mm, 그리고 슬리브 두께 1.6mm로 회전자를 설계하였고 영구자석과 슬리브의 안전계수는 각각 10.7과 1.11이다.

4. 결과 및 분석

앞서 수식적으로 산정한 공극자속밀도와 설계된 회전자의 영역 별 응력을 검증하기 위하여 유한요소해석을 진행하였다. 먼저 공간고조파 해석 기법 및 전자기 유한요소해석을 이용하여 구한 공극자속

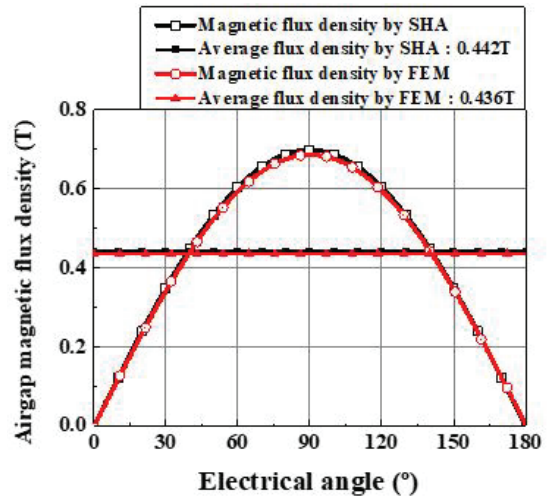


Fig. 8 Airgap magnetic flux density of designed rotor calculated by SHA and FEM

Table 2 Safety factor of PM and sleeve calculated by analytical method and FEM

	PM safety factor	Sleeve safety factor
Analytical method	10.70	1.110
Finite element method	10.48	1.107
Relative error (%)	2.10	0.27

밀도를 Fig. 8에 나타내었다. 공간고조파 기법과 유한요소해석을 이용하여 구한 평균 공극자속밀도는 각각 0.442T와 0.436T로써 허용 가능한 오차 수준임을 확인하였다. 다음으로는 설계된 회전자의 구조 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석을 이용해 산정한 영구자석과 슬리브의 von-Mises 응력으로부터 von-Mises 이론을 적용하여 안전계수를 구하였고, 수식적으로 구한 안전계수와 비교하여 Table 2에 정리하였다. 유한요소해석과 수식적 방법을 이용해 산정한 영구자석과 슬리브의 안전계수의 상대 오차는 각각 2.1%와 0.7%로 수식적으로 산정한 회전자의 응력 및 안전계수가 정확하다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 기계적 응력을 고려한 수소 연료 전지 자동차의 공기 블로워용 초고속 영구자석형 동기전동기의 회전자 설계를 진행하였다. 공간고조파 기법을 이용하여 목표 공극자속밀도를 영구자석 및 슬리브의 두께에 따라 산정하였고, 수식적으로 회전자의 기계적 응력을 구하여 영구자석과 슬리브의 안전계수를 산정하였다. 이를 바탕으로 최고 회전속도인 110krpm 및 구동 시 예상 회전자 온도인 200°C에서 안전계수가 1.1 이상이 되면서 목표 공극자속밀도를 만족하는 회전자를 설계하였다. 또한 유한요소해석을 이용하여 설계한 회전자의 공극자속밀도 및 영구자석과 슬리브의 안전계수를 검증하였다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업” (과제번호 R0006468) 으로 수행된 연구결과입니다.

References

- 1) J. Y. Yook, H. S. Yang, C. H. Lee, K. S. Cho, K. I. Kim, H. R. Kwon and Y. S. Park, “Dynamic Analysis of FCEV Turbo Blower“, 한국소음진동 공학회논문집, VOL. 21, NO. 7, 591~598, 2011.
- 2) Byung-Chul Woo, Do-Kwan Hong, Dae-Hyun Koo, Yoo-Young Choi and Jung-Koo Cho, “Manufacturing of 120,000rpm, 15kW Permanent Magnet High Speed Motor for Air Blower“, KIEE Conf., 914-915, 2010.
- 3) Jae-Hyun Kim, Doo-Young Kim, Kwon-Il Park, Myung-Hwan Yoon and Jung-Pyo Hong, “Torque Ripple Analysis and Reduction Design of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor for EPS“, KSAE Conf., 1107-1111, 2017.
- 4) Jong-Hyun Park, Jae-Yui Kim, Dong-Min Kim and Jung-Pyo Hong, “Optimum Design of Outer rotor SPMSM for Cogging Torque Reduction“, KSAE Conf., 566-571, 2016.
- 5) J. F. Araujo, E. G. Costa, F. L. M. Andrade, A. D. Germano, and T. V. Ferreira, “Methodology to Evaluate the Electromechanical Effects of Electromagnetic Forces on Conductive Materials in Transformer Windings Using the Von Mises and Fatigue Criteria“, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 31, NO. 5, 2206-2214, 2016.