

전기자동차에서 ETC Motor의 회전자 영구자석이 효율 향상에 미치는 영향에 관한 연구

한재만, 김동석, 박관수
부산대학교 전자전기공학과

A Study on a Rotor Permanent magnet to affect a Efficiency Improvement of the ETC Motor at a Electric Vehicle

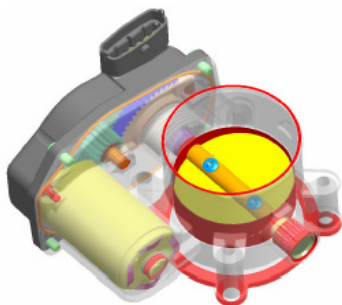
Jae Man Han, Dong Sok Kim, Gwan Soo Park
Dept. of Electronic and Electrical Engineering of Pusan National University

Abstract - 최근 하이브리드 전기자동차의 관심이 높아짐에 따라 전기적 신호의 연결로 구동 시스템을 구성하는 X-by-wire기술 연구가 활발하게 이루어지고, 있다. 그 중 Drive시스템을 관장하는 Throttle-by-Wire 기술의 일환으로 ETC(Electronic Throttle Control)장치에 대한 연구가 진행되고 있으며, 일부 제품이 출시되고 있다. ETC 구성요소 중 가장 핵심인 모터 설계를 위해 본 논문에서는 우수한 성능을 가지는 BLDC 모터를 선택하고, 기초 설계를 통해 그 형상을 설계하였으며, 보다 더 높은 효율과 출력 토크를 얻기 위해 회전자 영구자석의 재질과 형상을 변화시키며 효율과 출력 토크에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

1. 서 론

지구의 환경오염 문제가 심각해지고, 화석연료의 고갈이 사회의 큰 문제로 대두되면서, 친환경적이며 저연비의 실현을 위한 하이브리드 전기자동차의 관심이 높아지고 있으며, 기계적 링크 구조를 탈피하여 전기적 신호의 연결로 구동 시스템을 구성하는 X-by-Wire기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. X-by-Wire 기술은 Break, Steering, Gear 등 자동차의 기본 동작을 관장하는 모든 부분에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 Drive를 관장하는 엔진의 가장 중요한 요소인 Throttle Valve를 전기적 신호로 동작하는 구동 시키는 시스템에 대한 연구도 또한 진행되고 있다. Throttle-by-Wire(또는 Drive-by-Wire)는 기계적 또는 유체시스템으로 구동되던 Throttle Valve를 Electric Wire로 구동시키는 연구로써 가장 핵심적인 부분인 Electronic Throttle Control(ETC) 장치는 최적의 엔진 성능을 확보할 수 있도록 보다 정확한 Throttle 입력력을 가능케 하고, 흡기량을 조정하여 부하 변화를 보정할 수 있는 장치로써 현재 여러 업체에 의해 ETC를 장착한 차량이 출시되고 있다. ETC 구성요소 중 구동의 위한 가장 핵심 요소인 모터의 설계는 ETC의 성능을 보다 향상시키는데 필수 조건이라 하겠다. 차량은 제한된 전압과 전류라는 조건 때문에 ETC 모터로 DC 모터를 사용해 왔다. DC모터는 정류작용 시 브러시의 스파크를 발생하여 브러쉬와 정류자가 마모되고, 고주파를 발생시키며, 열손실을 발생시키는 단점을 가진다. 이에 비해 BLDC모터는 전기적 및 기계적 Noise가 적고 신뢰성이 높으며 수명이 길다. 그리고 고속화와 속도제어가 용이하고 소음에서도 우수한 성능을 가진다. 선진 업체에서 BLDC 모터를 개발하고, 제품을 출시했으나, 그 구조에 의한 출력과 효율이 낮다. 따라서 본 논문에서는 원하는 출력을 낼 수 있도록 기초설계를 하고, 고정자의 장하비를 조절하여 선진 업체보다 더 작은 구조이면서, 선진 업체의 0.15[Nm]보다 더 큰 0.2[Nm]를 목표로하여 토크와 효율을 높일 수 있는 연구를 진행하였다. 하지만 제한된 조건에서 입력에 대해 보다 높은 출력을 가질 수 있도록 효율을 더 높일 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 회전자 영구자석의 재료, 형상의 변화가 출력에 미치는 영향에 대해 알아보고, 높은 토크와 효율을 가지는 회전자 영구자석을 설계하였으며, 전자기유한요소법을 이용하여 전자기 분포를 해석하였다.



〈그림 1〉 Electronic Throttle Control(ETC)

2. 본 론

2.1 BLDC Motor의 기초 설계

BLDC Motor 설계에 있어 기본설계사양 중 가장 먼저 원하는 토크에 대한 부피를 구해야 하고, 부피와 토크의 관계식은 식 (1), (2)와 같다. 이 식에서 TRV는 소형기에 집중권이므로 14[kNm/m³]로 정하고 계산하였다.

$$T = KD_r^2 L_{stk} [Nm] \tag{1}$$

$$m^2 L_{stk} = \frac{T}{TRV} [m^3] \tag{2}$$

K:출력계수, Dr:회전자 직경[m], Lstk, 회전자 길이[m], TRV:최적당 토크상수[kNm/m³]

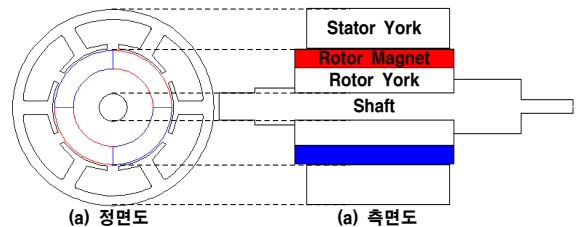
위 식에 의해 부피를 정하고, 제한된 모터의 전체 직경에 의해 한정된 고정자의 구조적 부피 내에서 장하 비를 바꾸며 토크와 효율을 높일 수 있는 구조를 설계한 결과 회전자의 직경은 표 1과 같이 정했고, 그림 1과 같은 단면도와 축면도의 구조를 가지는 모터의 기초 설계를 하였다. 그리고 기본 사양은 제한된 엔진룸 조건에 따라 표2와 같이 설정하였다.

〈표 1〉 ETC용 BLDC 모터의 구조

	전체 직경	회전자 직경	축방향 길이
구조적 한계치수	45[mm]	.	48[mm]
설계된 전동기의 치수	43[mm] (Housing 2[mm])	25[mm]	40[mm]

〈표 2〉 ETC용 BLDC 모터의 설계 Parameter

개발 사양	
Motor type	BLDC(Inner Rotor type)
입력	77.5[W]
극수	4극
상수	3상
정격전압 Vs	13.5[V]
최대전류 Is	5[A]
최대 토크	0.215[Nm]
최대 회전속도	5000[rpm]



〈그림 2〉 ETC용 BLDC 모터의 구조

2.2 ETC용 BLDC Motor의 전자기 수치해석 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 맥스웰 방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_o (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

여기서 μ_o 는 진공에서의 투자율(permeability), A는 자기 벡터 포텐셜이다. 해석 영역 내에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우의 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 회전에 의한 벡터 관계식과 Coulomb 계이저로부터 식 (7)과 같은 지배방정식을 얻는다. 이 지배방정식을 이용하여 ETC용 BLDC Motor는 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정 값 이하로 될 때까지 유한요소법으로 반복 계산해야 한다.

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla) \mathbf{A} = \mathbf{J} - \nabla \times \mathbf{M} \quad (7)$$

2.3 영구자석의 재질에 따른 BLDC Motor의 출력 변화

ETC용 BLDC 모터는 내부의 열문제와 제한된 부피에 의해 회전자의 영구자석으로 Ferrite를 사용하였다. Ferrite는 높은 보자력을 가지고 열에도 강한 성질을 가지므로 많이 이용되고 있으며, 자속 밀도와 보자력의 값에 따라 그 종류가 다양하다. 높은 회전력을 위해서는 높은 자속 밀도가 필요하지만, 제한된 부피와 제한된 전류에서는 한계 값이 존재한다. 개발된 ETC용 BLDC 모터의 회전자의 영구자석의 종류를 변화시키며 수치해석을 해 본 결과 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 자속 밀도와 보자력의 곱에 의한 값을 입력 에너지로 표현할 수 있으며, 입력 에너지가 클수록 출력도 커지지만, 일정 값 이상이 되면 자기 포화에 의해 불필요한 에너지가 입력된다. 부피를 더 크게 할 수 없는 상황에서 최소한의 에너지로 높은 출력을 얻을 수 있는 영구자석을 찾을 필요가 있고, 표에 나온 결과에 따라 본 연구에서는 PMFS-40을 사용하였다.

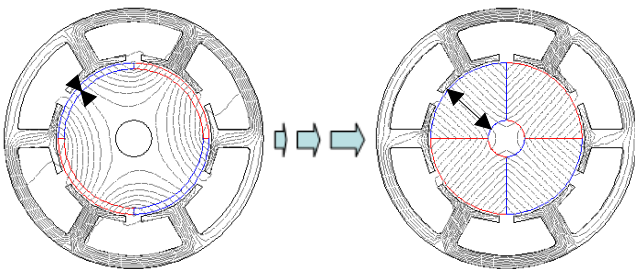
〈표 3〉 영구자석 재질에 따른 BLDC Motor의 출력변화

Magnet	jHc (Oe)	Br(Gauss)	BHmax (MG'Oe)	최대 토크(Nm)	최대 효율(%)
YBM-5BD	3600	4100	3.975	0.208	77.43
YBM-6BE	4050	4100	3.975	0.208	77.43
PMF-2BB	2100	4200	4.2	0.212	77.67
YBM-6BD	3600	4200	4.2	0.213	77.72
YBM-2BB	2800	4225	4.2	0.214	77.79
YBM-2BA	2400	4275	4.35	0.216	77.91
PMF-2BA	2420	4300	4.4	0.216	77.93
YBM-5BB	2900	4300	4.375	0.217	77.98
YBM-6BB	3200	4300	4.375	0.217	77.98
PMFS-40	3200	4100	4	0.215	77.99

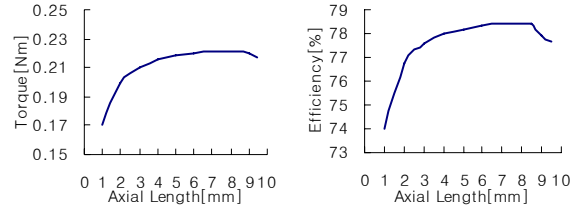
2.4 영구자석의 형상에 따른 BLDC Motor의 출력 변화

2.4.1 영구자석의 두께에 따른 변화

영구자석의 두께는 탈자의 위험성을 고려해 설계에 반영한다. 하지만 그 두께에 따라 BLDC Motor의 출력이 변화됨을 알아보고, 그 결과는 그림 4와 같다. 회전자의 york가 두꺼울 때, 그리고 회전자를 영구자석만으로 설계했을 때 모두 그 출력이 줄어들음을 확인 할 수 있다. 그래서 최적의 두께를 찾아야 하고, 그 두께는 8[mm]이다. 그리고 4[mm] 이상부터는 그 증가율이 낮으므로 산업체에서 가격 절감을 위해서는 사용가능 할 것이다.



〈그림 3〉 영구자석의 두께 변화에 따른 Magnetic Flux Line

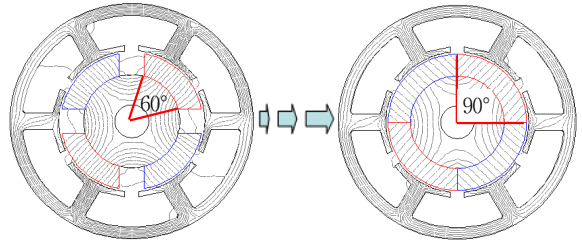


〈그림 4〉 영구자석 두께 변화에 따른 출력

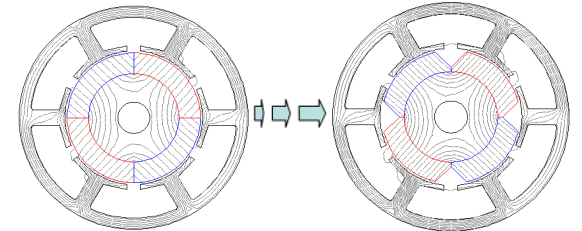
2.4.2 영구자석 형상에 따른 변화

그림 5와 같이 자석의 형상을 O형에서 C형으로 변화시키며, 출력을 알아보았다. 그 O형일 때, 효율과 토크가 크기는 하지만, BLDC 모터에서 또 다른 요소인 코깅 토크와 토크 리플 측면에서 C형이 더 우수함을 확인할 수 있었다. 하지만 일정 토크 이상으로 떨어지면, 원하는 동작을 할 수 없게 되므로 두 파라미터를 모두 만족시키는 조건을 찾아야 한다.

그림 6은 자석의 형상 중 Edge 부분의 형상을 변화시키며, 그 출력을 살펴보았다. 그 결과 역시 Edge부분을 가공하지 않았을 때, 토크와 효율이 더 높게 나왔지만, 코깅 토크와 토크 리플 측면에서는 가공했을 때 특징이 더 좋아짐을 확인할 수 있었다. 하지만 이 형상은 최적된 형상이라 할 수 없음을 알 수 있으며, 산업 현장에서 가공하기 쉬운 형상 중에서 가장 이상적임을 알 수 있었다.



〈그림 5〉 영구자석 전체 형상에 따른 Magnetic Flux Line



〈그림 6〉 영구자석의 Edge의 모양에 따른 Magnetic Flux Line

3. 결 론

본 연구에서는 새로운 자동차로 각광을 받고 있는 하이브리드 전기 자동차의 엔진에 사용하는 ETC의 Motor 설계에 대한 연구를 진행하였으며, 선진 업체보다 작은 구조에서 더 높은 출력을 얻기 위해 효율을 높일 수 있는 연구를 하였다. 이 과정에서 기초 설계 후 출력토크와 효율을 높이기 위한 회전자의 영구자석의 재질과 형상에 대한 연구를 하였고, 그 결과 적정의 자속밀도를 가지는 재료를 찾았으며, 영구자석의 두께 또한 효율과 출력이 가장 높은 치수를 찾을 수 있었다. 형상은 효율과 출력 면에서는 o형일 때가 가장 높았지만, 코깅 토크와 토크 리플 측면에서는 c형일 때, 그리고 Edge부분을 가공했을 때 더 우수한 특성을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 원하는 토크 범위 내에서 코깅 토크와 토크 리플을 최소화 할 수 있는 설계를 하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Jeon, Y.S.; Mok, H.S.; Choe, G.H.; Kim, D.K.; Ryu, J.S, "A new simulation model of BLDC motor with real back EMF waveform", IEEE Tran. on Power Elec., pp.217-220, 16-18 July 2000
 [2] Ko, J.S., "Asymptotically stable adaptive load torque observer for precision position control of BLDC motor", Electric Power Applications, IEEE Proceedings, vol 145, no. 4, pp. 383-386, 1998