

Hybrid 자동차용 1KW Double Cylinder Motor 설계 및 제작에 관한 연구

이현장, 송삼삼, 박창순
한국기술교육대학교 전기전자공학부

A Study on the Design and Manufacture of 1KW Double Cylinder Motor for a Hybrid Car

Hyon-Jnag Lee, Sen-Sen Song, Chang-Soon Park
School of Information Technology, Korea University of Technology and Education

Abstract - Recently, we are concerned about car energy efficiency because of high price of oil. Hybrid cars are manufactured and used. Now most cars use BLDC Motor, but these motors generate cogging phenomenon due to its frame. As a result, cars are low efficiency and occur noise and vibration. In this paper, 1KW Double Cylinder Motor which is high efficiency, low noise and vibration by its no slot structure was designed and manufactured for a Hybrid car.

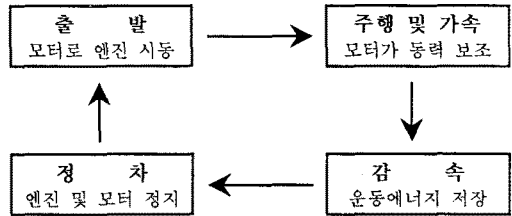


그림1. Hybrid 자동차 구동 특징

1. 서 론

최근 고유가 시대로 접어들면서 우리 일상생활에 가장 많이 사용되고 있는 교통수단인 자동차의 에너지 효율증가에 많은 관심을 가지게 되었다. 에너지 효율 증가를 위해 Hybrid 자동차가 개발되어 이용이 증가하는 추세이다. 일반적으로 Hybrid 자동차에서 사용되는 모터는 AC, BLDC 모터이다. AC 모터는 DC모터에 비하여 제어기가 용이하지 않아 많이 사용되지 않고, 대부분 사용되고 있는 BLDC 모터는 전기자 슬롯이 있기 때문에 코깅토크가 발생하여 승차감에 악영향을 주는 소음 및 진동이 발생시킨다. 이를 개선한 Slotless BLDC Motor는 슬롯이 존재 하지 않아 BLDC보다 적은 코깅 토크를 가지고 있지만, Yoke가 고정되어 있고 Rotor가 회전하게 됨에 따라 원천적으로 Hysteresis Loss를 제거 할 수 없어 에너지 손실을 가져온다. 그리고 대부분 모터가 Inner Rotor Type이 많아 높은 회전수에서 원심력에 의한 Magnet의 내구성이 떨어진다. 본 연구에서는 이러한 단점들을 개선하기 위하여 슬롯을 제거하고, Yoke와 Magnet이 함께 회전하여 원천적으로 Hysteresis loss를 제거고, 높은 관성 Moment 및 고 효율을 얻는 1KW급 Hybrid 자동차용 Double Cylinder Motor를 설계하고 제작 하였다.

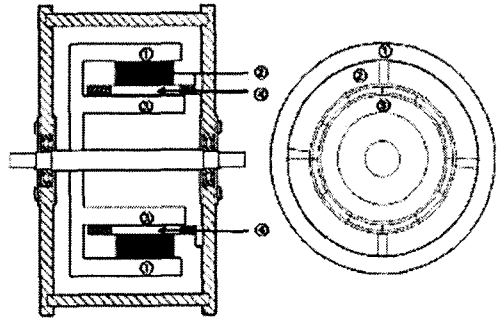
2. 본 론

2.1 Hybrid 자동차 구동 특징

Hybrid 자동차의 구동 특징은 그림1과 같이 차량의 출발시 기동 토크의 큰 장점을 가지고 있는 DC모터로 시동 후 엔진을 작동시킨다. 주행 및 가속시 모터가 엔진의 동력을 보조하는 역할을 하게 되어 에너지 효율 및 성능이 향상된다. 그리고 자동차 제동시 모터를 이용한 빠른 제동을 기대 할 수 있으며, 발전기로 제어하여 제동 에너지를 전기 에너지로 변환 후 배터리에 저장하여, 모터 구동시 에너지를 공급하게 하여 환경오염 및 에너지 효율을 높일 수 있는 특징을 가지고 있다. Hybrid 자동차의 동력의 핵심인 기존의 BLDC 모터를 높은 효율의 특징을 가지고 있는 Double Cylinder Motor로 교체할 경우 보다 높은 효율을 기대 할 수 있다.

2.2 Double Cylinder Motor 특징

Slotless BLDC Motor에서 한 단계 높은 효율을 가지고 있는 Double Cylinder Motor는 그림2와 같이 Magnet②(Rotor부①)과 Yoke③를 함께 회전시킴으로써 Hysteresis 손실을 제거하여 더욱 효율을 높일 수 있는 장점이 있다[2].



① Outer Rotor ② Magnet ③ Inner Rotor ④ Coil

그림2. Double Cylinder Motor 구조

Double Cylinder Motor는 아래와 같은 특징이 있다.

- 1) Slotless BLDC Motor의 모든 장점을 갖추고 있다.
- 2) 영구자석②을 외부회전자①(전기자) 안쪽에 부착한 형태로, 원심력에 견디기 쉬운 구조로 되어있어 높은 회전수에 적합하다.
- 3) 외부 및 내부 회전자 양쪽에 자석을 부착하여 사용할 경우 고가의 영구자석을 최적상태로 사용할 수 있다.
- 4) Hybrid 자동차에 적용하기 쉬운 간단한 구조 및 내구성이 우수하다.
- 5) 내부 및 외부 회전자가 함께 회전하여 자속 방향이 일정하여 Hysteresis loss가 적어 고속 주행시 고 효율을 얻을 수 있다.
- 6) 자계와 권선을 잘 배치하면 일정한 전기적 Torque가 발생하고 정속회전을 시킬 수 있다.
- 7) 회토티 자석을 사용할 경우 출력비를 높일 수가 있다.
- 8) 높은 회전력과 높은 관성 Moment를 얻을 수 있다.

9) Hybrid 자동차에 적용될 경우 토크 리플에 의한 진동 및 소음이 낮아 좋은 승차감을 기대 할 수 있다.

2.3 Double Cylinder Motor Flux2D 분석 및 비교

모터 특성을 분석을 위해 유한요소 프로그램인 Flux2D를 이용하여 효율 및 Hybrid 차량에 적용 되었을 시 악영향을 주는 공극 자속밀도 리플 및 토크 리플을 측정하여 BLDC Motor와 비교 분석 하였다. Double Cylinder Motor 분석 파라미터는 아래 표1과 같으며, 영구자석은 NdFeB35SH를 사용하였다.

입력전압 [V]	24	코일절연저항 [MΩ]	1
입력전류 [A]	10	잔류자속밀도 Br [T]	1.202
회전수 [RPM]	2900	최대 에너지적 [T]	3.7

표1. 1KW Double Cylinder Motor Flux2D 파라미터

아래 그림3은 4극 Double Cylinder Motor의 내부 및 외부 공극 자속밀도를 나타낸 것이고, 그림4는 4극 24슬롯 BLDC Motor의 공극 자속밀도를 나타낸 것이다. 그림과 같이 Double Cylinder Motor는 원천적으로 슬롯을 제거 하였기 때문에 BLDC Motor와 다르게 각 극에서 발생하는 리플성분이 없는 것을 확인 할 수 있다.

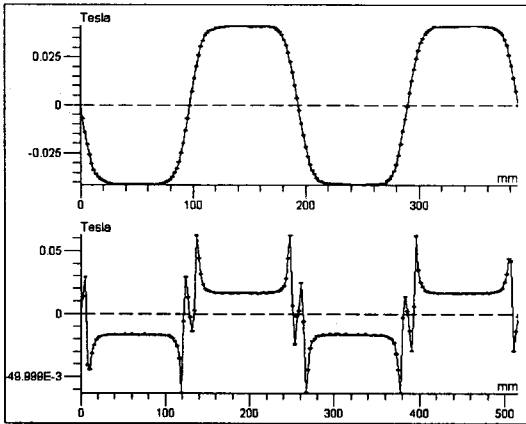


그림3. Double Cylinder Motor 내부(상) 및 외부(하) 실린더 공극 자속밀도

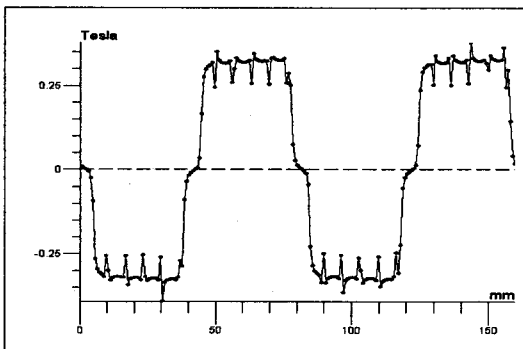


그림4. BLDC Motor 공극 자속밀도

그림5는 Double Cylinder Motor와 BLDC Motor의 토크 리플 부분을 나타낸 것이다. Double Cylinder Motor의 경우 최대 토크 리플이 3.472×10^{-4} [N.m], 최소 -3.293×10^{-4} [N.m], BLDC Motor는 2.099×10^{-3} [N.m], -1.987×10^{-3} [N.m]로 더블실린더 모터의 토크 리플이 16.5 배 작게 나타났다. 실제 모터 제작하여 Hybrid 자동차에 적용 할 경우 기존에 사용되었던 BLDC모터보다 토크 리플에 의한 Hysteresis loss가 적어 저 진동 및 에너지 효율이 좋을 것이라고 예상된다.

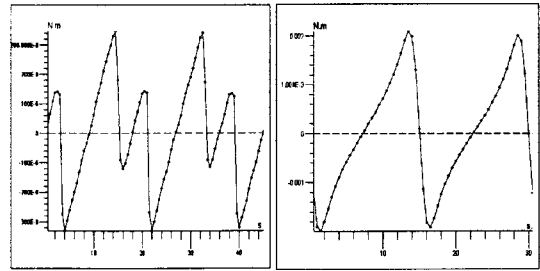


그림5. Double Cylinder Motor 토크 리플(좌), BLDC Motor 토크 리플(우)

2.4 1KW Double Cylinder Motor 설계

모터 설계를 위해 Biot-Savart 법칙을 이용하여 공극 자속밀도를 구하였다. Double Cylinder Motor는 구조상 2개의 실린더를 가지고 있기 때문에 내부 회전자에 Flux line이 형성된 것을 볼 수 있다. 아래 그림6은 Flux2D로 Flux line 해석과 실제 제작한 더블 실린더를 Magnetic Field Viewing Film으로 본 사진이다. 만일 외부 및 내부 회전자에 모두 자석이 부착하여 사용할 경우 자석을 최적상태로 이용할 수 있다.

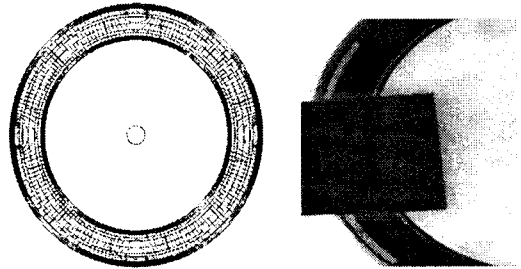


그림6. Double Cylinder Motor의 Mirror Effect

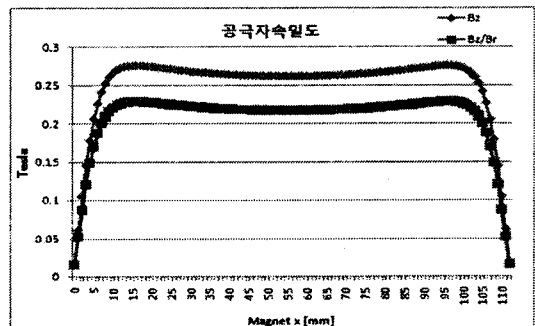


그림7. 공극자속밀도 그래프

1) 공극 자속밀도

그림 7의 공극자속밀도 그래프를 참조하면 Magnet의 x축 중심부에서 자속밀도 B_{zp} 는 0.2617 [T]이다. 이것을 실험치로 계산하면 식(1)과 같으며, 해석에 이용된 파라미터는 표2와 같다.

잔류자속밀도 Br [T]	1.202	$\vec{M} = / \vec{A}$ [KA/m]	919.6
Magnet X 길이 b [mm]	110	Magnet Y 길이 ℓ [mm]	75
Magnet 간격 r [mm]	22	Pole Pitch τ_p [mm]	117.8
Magnet High h [mm]	3(6)	Y_p [mm]	0
Z_p [mm]	5.5	공극 δ [mm]	11

표2. 공극자속밀도 해석 파라미터

$$B_{airgap} = \frac{B_{zp}}{\sqrt{2}} = \frac{0.2617}{\sqrt{2}} = 0.185 [T] \quad (1)$$

2) 극절(Pole Pitch)

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2P} = \frac{\pi \cdot 150}{2 \times 2} = 117.81 [mm] \quad (2)$$

3) 극당 발생 자속

$$\Phi_g = B_g \cdot \tau_p \cdot l = 0.185 \times 117.81 \times 37.5 \times 10^{-6} = 8.175 \times 10^{-4} [Wb] \quad (3)$$

4) 인버터 인가전압 및 주파수

3상 인버터는 60°로 도통하게 되며 실제로 인가되는 전압은 2900[rpm] 기준으로 선간전압은 11.7[V]하여 계산 하였다.

$$E_a = \frac{E_{ab}}{\sqrt{3}} = \frac{11.7}{\sqrt{3}} = 6.75 [V] \quad (4)$$

$$f = \frac{N \cdot P}{120} = \frac{2900 \cdot 4}{120} = 97 [Hz] \quad (5)$$

5) 권선수

$$N_{ph} = \frac{E_a}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_w \cdot \Phi_g} = \frac{6.75}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 97 \cdot 1 \cdot 8.175 \cdot 10^{-4}} \approx 20 [Turns] \quad (6)$$

실제 제작시 유효공극과 발생하는 손실을 고려하여 턴수를 30[Turn]으로 하여 제작하고 계산 하였다.

6) 1상의 유기기전력

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_g = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 97 \cdot 1 \cdot 30 \cdot 8.175 \cdot 10^{-4} = 10.6 [V] \quad (7)$$

2.5 1KW Double Cylinder Motor 제작

표3은 위의 식(1)-(7)을 이용하여 만든 파라미터 이고, Hybrid 자동차용 1KW Double Cylinder Motor 제작에 사용 되었다.

입력전압[V]	24	상전압[V _{rms}]	6.75
공극자속밀도[T]	0.185	전류 [A _{rms}]	10
Pole Pitch[mm]	117.81	극수	4
극당발생자속[Wb]	8.175*10 ⁻⁴	권선결선방식	Y결선
속도[rpm]	2900	영구자석	NdFeB35SH
권선계수	1	사용권선	AWG 18
상당도체수[Turn]	30	유효공극[mm]	11

표3. Double Cylinder Motor 제작 파라미터

아래 그림8는 실제로 제작된 1KW Double Cylinder Motor 사진이다. 제작을 용이하게 하기 위하여 모터 프레임은 10[mm] 아크릴을 사용하여 볼트로 고정 하였으며, 회전하는 실린더를 관찰하기 위하여 외부 커버는 제작하지 않았다.

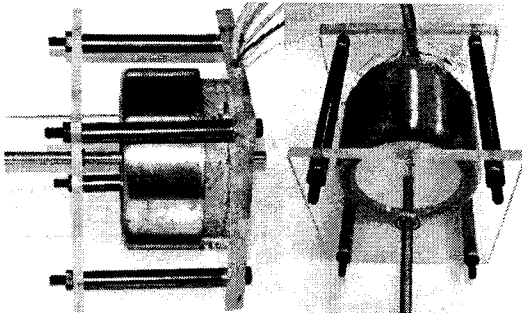


그림8. 제작된 1KW Double Cylinder Motor

그림9는 1KW Double Cylinder Motor의 내부 구조 사진이다. 원통형 아크릴을 사용하여 코일부분을 고정 하였으며, 코일은 Y결선 하였다. 영구자석은 N-S-N-S극 순서로 부착하였고, 실린더 아래 부분에 홀센서를 3개를 부착 하여 자기 신호를 검출하였다. 두 개의 실린더는 내부와 외부를 각각 제작하여 볼트형식으로 결합하였다.

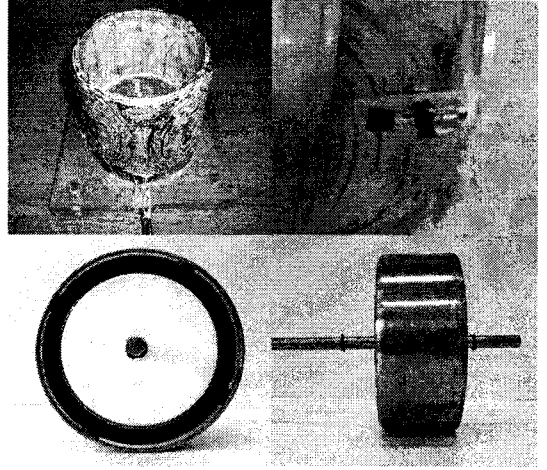


그림9. 1KW Double Cylinder Motor 내부 구조

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 Hybrid 자동차에 적용된 DC 모터들이 가지고 있는 문제점을 분석 하였고, 코깅 토크 리플에 의한 Hysteresis loss를 감소한 1KW Double Cylinder Motor를 설계하고 제작 하였다. 본 모터는 슬롯이 없고, 외부 회전자와 내부 회전자가 동시에 회전하는 더블 실린더 구조이므로, 기존의 BLDC 모터보다 낮은 코깅 토크리플을 가지고 있어 Hybrid 자동차에 적용될 경우 높은 에너지 효율과 뛰어난 승차감을 얻을 수 있다. 또한 소형으로 모터가 제작 될 경우 기존의 자동차에 이용되었던 모터를 대체 할 수 있으며, 특히 저속 저 진동을 요구하는 부분에 이용되면 높은 효과를 얻을 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 홍선기, 천장성, "Analysis of the Characteristics for slotless type BLDC motor", 대한전기학회, 2003
- [2] Jai Chun Chang, "Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem elektronisch kommutierten Gleichstrom-Doppelzylinderlaufermotor", Thesis TU Berlin 1984.
- [3] 병경호, 박창순, "Double Cylinder Motor 설계 및 해석에 관한 연구", 대한전기학회, 2004
- [4] 안영일, 박창순, "자동차 Cooling Fan 구동용 motor에 BLD C Motor 적용에 관한 설계해석 및 특성연구", 한국기술교육대학교논문지, 2004.
- [5] 박창순 "전기기기", 한국기술교육대학교, 1999.
- [6] Paresh C, Sen, 신대철의, "전기기기공학", Wiley, 1998.