

자동차 Cooling Fan용 고효율 BLDC모터의 효율개선에 대한 연구

안영일* 박창순

한국기술교육대학교 정보기술학부

A Study on efficiency improvement of BLDC motor for radiator cooling fan

Young-II Ahn,* Chang-Soo Park

School of Information Technology, Korea University of Technology and Education

Abstract -

Nowday it is trend to be one cooling radiator and cooling fan from separate engine radiator and air condition radiator in cars. For the cooling fan is developed a electrical motor which is limited in size.

The motor should be working in silence and have no electromagnetic problem and high efficiency.

In this paper will be proposed some parameters for improvement of the efficiency of a BLDC motor which is developed for the cooling system after theoretical and experimental investigation.

1. 서 론

최근에 자동차에 사용되는 에어컨과 엔진 radiator의 cooling system이 하나로 통합되는 추세로 cooling fan 용 motor의 개발되고 있는데 이 motor는 크기가 제한되어 있고 조용하며 전자기적인 문제가 없어야 하는 제약을 갖고 있다.

본 논문에서는 cooling fan으로 개발된 brushless motor를 해석과 실험을 통하여 motor의 특성을 분석하고 효율 증대를 위하여 몇 가지의 parameter를 변경한 모델을 제시하고자 한다.

2. 모터 특성해석

2.1 해석모델의 구성

제작된 자동차 radiator cooling fan용 BLDC 모터의 사양을 표 1.에서 나타내었다. 회전자내 영구자석은 릴렉턴스 토오크 극대화를 위하여 자속의 집중이 필요하다. 영구자석은 막대자석 형상으로서 회전자에 삽입하도록 제작하였는데 이것은 제작이 쉽기 때문에 판단된다.

표 1. BLDC 모터의 사양

입력전압 Vdc	13V	정격회전수(rpm)	1800
상 수	3	정격토크(Kg.Cm)	2.54
극 수	6	Coil 단면적(㎟)	0.066
슬롯수	36	자석두께[mm]	5
철심종류	H14	영구자석	
철심두께 [mm]	0.35	잔류자속밀도(T)	1.25
회전자외경[mm]	78.6	리코일 투자율	1.135
고정자외경[mm]	110	Turn / Coil	80
철심장 [mm]	20	상당저항 6별렬(Ω)	0.35
공극길이 [mm]	0.8	상당인덕턴스 (mH)	0.39

해석모델은 그림1.과 같고, 고정자의 slot은 총 36slot 중 18slot만 활용하여 빈 slot은 치 부분으로 채워지는 자속의 상쇄를 줄일 수 있으며 유입공기로 냉각효과에 도움이 될 것으로 가정하고 있다.

인버터의 출력은 그림2.와 같이 다상제어방식의 part

wave 구형파를 인가한다. 고정자 권선의 경우 그림 3.과 같이 6별렬로 구성하였고, 이는 코일을 Y 및 Δ의 직렬 구성시보다 상간 전압에 인가되는 코일의 길이를 감소하여 큰 전류를 흘릴 수 있어 출력증대를 꾀하였다.

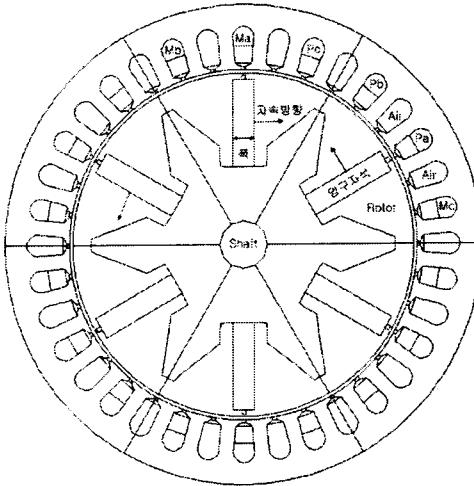


그림 1. 해석모델 Geometry

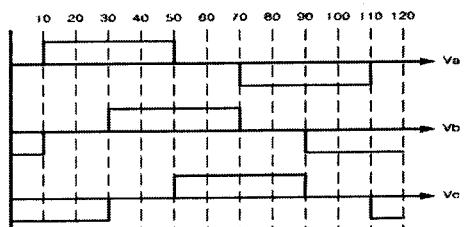


그림 2. 인버터 전압 파형

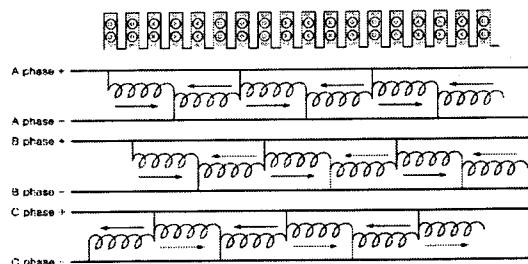


그림 3. 슬롯형상에 따른 권선구조

전동기의 특성을 정확하게 해석하기 위하여 외부전압에 의한 회로방정식을 이용하여 formulation하며 이를 유한요소해석영역과 coupling하게 된다.

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + N \frac{d\Phi}{dt}$$

여기서, V 는 외부 전압원, R 은 회로의 저항, L 은 퀸선의 end-Leakage inductance, Φ 는 회로를 지나가는 자속이다.

모터의 출력으로 나타나는 토크는 회전자 표면에 작용하는 Maxwell응력을 이용하여 구하며, 회전자 표면의 미소 경로상을 통과하는 자속밀도B의 평균치를 이용하고 작용하는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \int \int_S B^2 dS$$

또한 경계조건은 고정자의 유크의 외곽은 고정경계조건 ($A=0$)으로 하고, 1/6해석의 대칭면은 주기경계조건으로 하여 해석하였다.

2.2 실측값과 해석값의 비교

실험방식은 제작된 BLDC모터를 Dynamo meter를 이용하여 속도-토크 특성과 효율곡선을 찾아내고, 각 손실에 대해 분석하며, 이를 유한요소 해석프로그램인 FLUX2D를 이용하여 실측치와 해석치를 비교하여 보았다.

효율을 개선하기 위한 방향을 찾기 위해 영구자석의 길이, 공극의 길이, 회전자 slot에서 Air slot의 유무에 따른 특성 변화를 FLUX2D를 이용하여 결과를 비교하여 효율이 가장 뛰어난 그룹을 찾아내었다.

그림 4.에서 실제모터를 Dynamo-meter를 이용하여 측정한 입출력 손실과, Flux2D를 이용하여 해석한 입출력 손실을 비교한 것이다. 실측과 해석치의 차이는 약 5%정도로 해석치의 결과를 신뢰할 수 있는 수준이다.

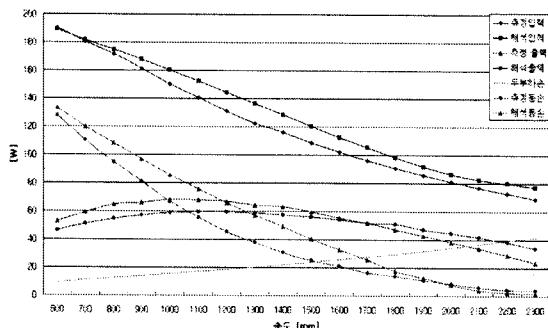


그림 4. 실측과 해석의 입출력 손실 그래프

그림5는 역기전력의 파형을 비교한 것으로 토크의 차와 슬롯의 구조로 어느 정도 토크리플을 예상할 수 있으며 본 실험에서는 토크의 리플에 대하여는 Ripple Factor r를 이용하여 ripple rate를 비교하였다.

$$Torque RF = \sqrt{\left(\frac{T_{RMS}}{T_{AVG}}\right)^2 - 1}$$

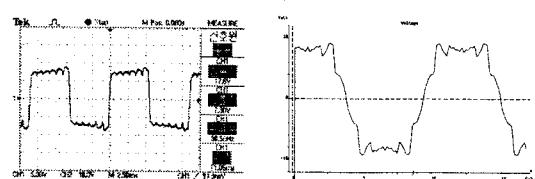


그림 5. 실측 및 해석 역기전력 파형

cooling fan으로 요구하는 회전속도는 1800rpm이며 해당하는 속도에서 효율은 실측치에서 52%이고 해석치에서는 54%로 비슷한 효율로 나타난다.

효율개선을 위한 변화 요소는 회전속도 1800rpm에 대해서 변화시킬 것 이고 변화요소는 다음과 같다.

- 영구자석의 폭
- 공극의 길이
- 고정자 슬롯의 형상 변화 (Air slot의 유무)

2.3 최적의 파라메터 산출

표2는 영구자석의 폭의 변화에 따른 해석결과로 실제모터의 경우 5mm이다. 폭을 줄일 경우 토크는 줄어들고 입력이 커지며 효율은 감소하고 토크의 리플도 증가함을 알 수 있다. 자석폭이 증가함에 따라 입력이 줄어들고 토크가 커지며 효율은 증가하고 RF도 줄어듦을 알 수 있다. 하지만 8[mm] 이상 증가 시에는 다시 효율이 떨어지고 RF도 증가한다. 따라서 영구자석의 적정 폭은 8[mm]로 정해야 한다.

표 2. 영구자석 폭 변화에 따른 특성 데이터

Magnet 두께 [mm]	토크 RF [Kg.Cm]	토크리플	입력 [W]	기계적출력 [W]	효율 [%]
4	2.4756	0.2988	93.24	45.73	49.04
4.5	2.5613	0.2948	91.83	47.31	51.51
5	2.6559	0.2799	90.43	49.06	54.25
5.5	2.7179	0.2614	89.72	50.20	55.95
6	2.7883	0.2365	89.06	51.50	57.83
6.5	2.8529	0.2180	88.60	52.70	59.47
7	2.9063	0.2097	88.34	53.68	60.77
7.5	2.9596	0.2085	88.23	54.67	61.96
8	3.0013	0.2138	88.91	55.44	62.35
8.5	3.0196	0.2177	89.60	55.78	62.25
9	3.0331	0.2180	90.61	56.03	61.83
9.5	3.0464	0.2193	91.29	56.27	61.64
10	3.0562	0.2209	92.08	56.45	61.30
10.5	3.0595	0.2224	92.70	56.51	60.96

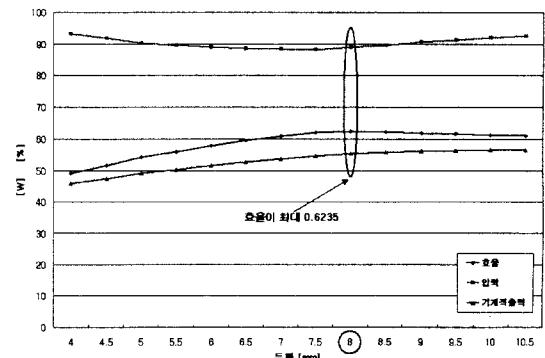


그림 6. 영구자석폭에 따른 특성해석 그래프

표 3은 Air-gap 길이의 변화에 따른 특성에 대한 해석결과로 실제모터는 8[mm]로 공극의 길이가 증가할수록 자기저항이 커지면서 코일에 유기되는 역기전력은 줄어들고 전류가 많이 흐르게 된다. 토크는 증가하지만 효율이 줄어듦을 알 수 있다. 공극의 길이가 0.5[mm]까지 작아질 때는 효율은 증가하지만 그 이후로 작아질 경우는 오히려 효율이 감소함을 알 수 있다.

토크의 리플은 공극의 길이가 작아질수록 커진다. 본 연구의 목적은 모터효율의 증가함에 비중을 두었으며, 토크의 리플이 너무 크게 작용하지 않는다면 공극의 길이는 0.5[mm] 일 때가 가장 적절하다.

표 3. 공극길이 변화에 따른 해석결과

공극길이 [mm]	토크 [Kg.Cm]	토크리플 RF	입력 [W]	기계적출력 [W]	효율 [%]
1.0	2.8629	0.2205	100.08	52.88	52.83
0.9	2.7188	0.2759	95.28	50.22	52.70
0.8	2.6559	0.2799	90.43	49.06	54.25
0.7	2.5538	0.3133	85.57	47.17	55.12
0.6	2.4428	0.3765	80.55	45.12	56.02
0.5	2.3203	0.4392	75.71	42.86	56.60
0.4	2.1214	0.5828	70.89	39.18	55.27
0.3	1.9674	0.6217	66.26	36.34	54.84

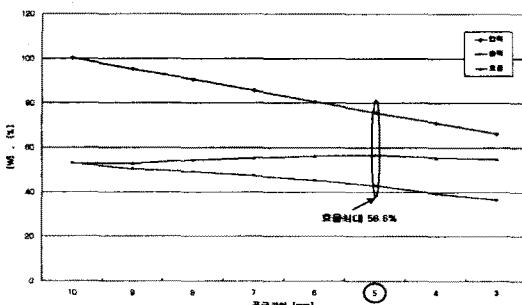


그림 7. 공극길이 변화에 따른 해석결과 그래프

고정자의 슬롯에서 쇄교자속의 감소와 냉각효과를 위해 사용된 Air slot의 유무에 대한 결과는 표 4에 나타내었고 Air slot이 없는 경우에 효율이 2[%] 상승하지만 토크리플은 RF가 0.605정도로 증가하여 전동과 소음에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 최종적인 모델에서는 Air slot을 가진 모델로 선택되었다.

표 4. Air slot 유무에 따른 특성 비교

Air slot 有	Air slot 無
토크 [Kg.Cm]	2.6559
토크리플 RF	0.27999
입력 [W]	90.43
기계적출력 [W]	49.16
효율 [%]	54.25
토크 [Kg.Cm]	2.6879
토크리플 RF	0.60501
입력 [W]	87.97
기계적출력 [W]	49.65
효율 [%]	56.54

2.4 최적 파라미터의 해석결과.

효율을 높이기 위한 최적의 요소는 다음과 같다.

- 영구자석의 두께 : 8 [mm]
- Air-gap 길이 : 0.5 [mm]

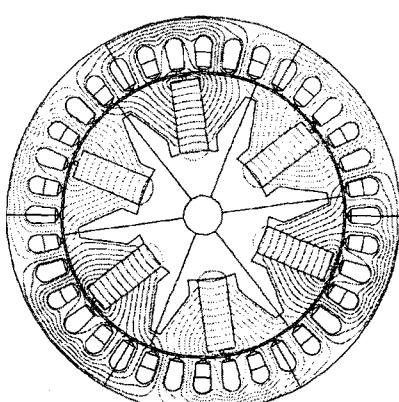


그림 8. 모터의 등자속 분포

최종적으로 최적화된 해석모델의 자속분포는 그림 8.과 같이 나타나며, 표 5.에서는 해석결과를 요약하였다.

표 5. 제작된 모터와 최적조건해석의 특성비교

제작된 모터의 특성	최적조건 해석특성
토크 [Kg.Cm]	2.6559
토크리플 RF	0.27999
입력 [W]	90.43
기계적출력 [W]	49.16
효율 [%]	54.25
토크 [Kg.Cm]	2.6961
토크리플 RF	0.3331
입력 [W]	75.95
기계적출력 [W]	49.81
효율 [%]	65.56

제작된 모델을 공극의 길이와 영구자석의 폭을 최적화시키면 토크 RF는 약간 증가하지만 효율은 11.31[%]의 개선을 나타내었다.

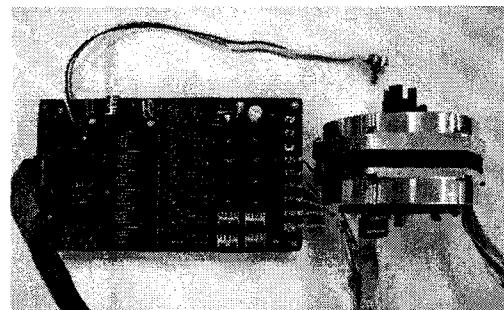


그림 9. 제작된 motor와 power supply

3. 결 론

자동차 Radiator cooling fan용 모터는 공간의 제약을 받아 motor의 크기가 작고 주변온도가 높기 때문에 모터의 온도가 높을 것으로 판단된다. 따라서 효율이 낮은 모터는 그만큼 열손실이 많이 발생하므로 효율을 높이는 것은 매우 중요하다.

효율이 변화를 줄 수 있는 요소들은 영구자석의 착자방식, 회전방식(내전형, 외전형)등 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 자동차 cooling fan으로 설계된 BLDC 모터의 외형규격을 변화시키지 않고 효율을 개선하기 위한 방향으로 영구자석폭과 공극길이를 변화시킴으로서 최고의 효율을 얻는 방법을 연구하여 최적의 영구자석폭과 최적의 공극길이를 찾아내고 이를 조합함으로서 11.3[%]의 효율을 증가시킬 수 있었다.

효율 65%는 일반 100W 유도전동기와 비교할 때 비슷한 값이며 출력이 작아 이상의 효율을 기대하기는 어려울 것으로 판단된다.

이 motor는 radiator에서 나오는 더운 공기가 직접 motor의 표면으로 유입되므로 온도상승이 문제가 될 것으로 생각된다. 따라서 이에 대한 예측과 실험 및 해석을 통한 대책이 있어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] J.R Hendershot Jr, Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.
- [2] 김상옥, 김보열, "MPB BLDC 전동기의 제어기 개발", 대한전기학회 논문지, 50P-3-3, 2001.
- [3] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [4] 백수현, "소형모터설계편람", 세화출판사, 1988.
- [5] Nasar, S.A, "Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors", Boca Raton : CRC, 1993.
- [6] Jack F. Gieras, "Permanent Magnet Motor Technology : Design and Applications", Marcel Dekker, 1997.
- [7] 김현철외 3명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 49B-5-2, 2000