BLDC 모터의 온도 및 진동 특성 연구 Study on Temperature and Vibration of BLDC Motor

예정우* · 손문규** · 최명환** · 김대화** · 조연수** · 이현석** · 심재술*†
 Jung-Woo Ye*, Mun-Gyu Son**, Myoung-Hwan Choe**, Dae-Hwa Kim**, Yeon-Su Cho**, Hyun-Seok Lee** and Jae-Sool Shim*†

(접수일 : 2014년 06월 05일, 수정일 : 2014년 06월 30일, 채택확정 : 2014년 06월 30일)

Abstract: In this paper, transient temperature and vibration characteristics of a brushless DC (BLD(c)) motor are studied for external load (165W~495W) and rotational speed (2000 rpm~4000 rpm). For experiment, a simple measurement system is developed to allow a change in load and speed for measuring transient temperature and vibration simultaneously. Temperature and vibration were also measured under the conditions of natural convection and forced convection. Vibrations in the directions of x-axis (#Ch1), y-axis (#Ch2) and z-axis (#Ch3) were obtained by three accelerometers and temperature was obtained by a thermo-couple with respect to time until the motor is steady. Experimental results show that the amplitude of vibration is higher in the order of z-axis (#Ch3), x-axis (#Ch1) and y-axis (#Ch2) and the amplitude of vibration at the forced convection conditions is 10.6% to 17.8% lower than that of vibration at the natural convection. However, the ratio of the vibration value is similar on average regardless of external convection condition.

Key Words : BLDC motor, Load device, Vibration, Temperature, Accelerometer

— 기 호 설 명 —

#Ch1* : #Ch1과 #Ch3의 전달 함수 값
 #Ch2* : #Ch2와 #Ch3의 전달 함수 값
 Tr : 전달 함수

1. 서 론

지구 온난화와 천연자원의 고갈로 인해 전세계

적으로 화석연료가 아닌 친환경 및 그린에너지에 대한 요구가 점점 증가하고 있다. 특히 석유를 사용하는 자동차에 의해서 생산되는 이산화탄소는 지구 온난화에 밀접한 관계가 있어서 자동차가 만들어내는 이산화탄소를 줄인다면 전 세계의 이산화탄소 방출량을 효과적으로 줄일 수 있다. 최근 전세계적인 자동차 제조 회사에서는 이러한 지구 온난화 문제와 에너지 고갈의 문제를 동시에 해결하기 위해서 자동차의 동력을 내연기관이

*† 심재술(교신저자) : 영남대학교 기계공학부

E-mail : jshim@ynu.ac.kr, Tel : 053-810-2465

*예정우 : 영남대학교 기계공학과

**손문규, 이현석, 최명환, 김대화, 조연수 : 경상과학고등학교

*† Jaesool Shim(corresponding author) : School of Mechanical Engineering, Yeungnam University.

E-mail : jshim@ynu.ac.kr, Tel : 053-810-2465

*Jungwoo Ye : School of Mechanical Engineering, Yeungnam University.

**Mungyu Son, Myounghwan Choe, Daehwa Kim, Yeonsu Cho, Hyunseok Lee : Department of Natural Science, Gyeongsang science high school.

아닌 전기 모터로 대체하고 있고, 국가적으로도 중소형 운송용 자동차 뿐 만 아니라 농업 분야에서 사용하는 소형 운송기구에 전기 모터를 사용하도록 장려하고 있다.

이러한 중소형 자동차에 사용되는 모터는 BLDC 모터로 전기를 흘려주는 카본 브러시와 정류자가 없어 마찰열이 적은 것이 특징이며, 에너지 효율성이 높은 장점을 가지고 있으며, 소음, 진동 등에서도 우수한 특성을 나타낼 뿐만 아니라 저속에서도 높은 토크를 낼 수 있어 자동차 뿐 만 아니라 다양한 분야에서도 활용되고 있다. 하지만 BLDC 모터의 단점은 BLDC 모터 내부에 영구 자석을 사용하기 때문에 모터의 이상 발열 때에는 영구 자석의 성질을 잃어버릴 수가 있고, 다양한 부하에 따른 이상 진동은 모터의 수명과 직결되기 때문에 BLDC 모터의 개발시 필수적으로 모터 회전수와 다양한 외부 부하에 따른 모터의 발열 및 진동에 대한 특성이 아주 중요하게 여겨지고 있다. 그러므로 BLDC 모터의 진동 특성과 열 발생 메카니즘에 대하여 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔다. 진동적인 측면에서 BLDC의 연구는 다음과 같다. 2005년도에 김한들 연구진은 진동 및 소음의 원인이 되는 가진력을 분석하여 소음 및 진동 저감¹⁾을 시도하였으며, 2007년도에 정희준 연구진은 전자기 가진력의 변화에 따른 진동 특성을 해석하였다.²⁾ 같은 년도에 김용한 연구진은 전동기의 고유진동수 및 불평형 응답해석을 위한 해석 기법을 정립³⁾하였고, 2008년도에 방기창 연구진은 모터의 슬롯 수에 따른 진동 특성을 분석⁴⁾하였고, 그리고 이택진 연구진들은 실험적 모드 해석 방법(Experimental Modal Analysis)을 통하여 모터의 진동을 측정하고 분석한 연구 하였다.⁵⁾ 또한 2013년도에 강순신 연구진은 BLDC 모터 회전자의 무게 불균형에 의한 진동 발생에 대한 연구⁶⁾를 하였고, 같은 해에 정택성 연구진들은 모터에 걸리는 코깅 토크 저감과 가진력의 불평형을 평형화하기 위한 연구를 진행하여 진동 저감에 대한 연구를 시도하였다.⁷⁾

진동 발생 원인 및 저감에 대한 연구와 더불어 많은 연구자들은 BLDC의 열 발생 메카니즘 및

열 전달에 대한 연구를 또한 진행하였다. 2004년도에 이태구 연구진은 모터부와 PCB(PRINTED CIRCUIT BOARD) 모듈부가 일체형인 BLDC 모터에서 작동시간에 따른 열내구성을 연구⁸⁾하였고, 2007년도에 강수진 연구진은 외전형 BLDC모터의 열유동을 해석⁹⁾하였고, 2011년도에 김호연 연구팀은 10 MW급 BLDC 모터내부의 온도분포를 유한요소법을 사용하여 예측¹⁰⁾하였고, 2013년도에 이인준 연구진은 부하와 모터의 회전수에 따라 BLDC의 모터의 온도 분포를 연구하였다.¹¹⁾

하지만 지금까지 많은 연구자들의 BLDC 접근은 단순히 열과 진동에 대한 단독적인 연구를 수행하였고 열과 진동의 상호 작용이나 상관관계에 대한 연구들은 전세계적으로도 아주 부족한 실정이다.

본 연구는 BLDC 모터가 부하 및 회전수의 변화에 따른 BLDC 모터의 내부 코어 부분의 온도 변화와 모터에서 발생하는 진동을 직접 측정하고 분석하였다.

BLDC모터 측정 시스템은 0 rpm~4000 rpm까지 조절 가능한 모터를 부착하여 농업용 소형 자동차에 쓰이는 모터와 비슷한 조건을 만들었다. 그리고 실제 자동차에 사용하는 BLDC모터 환경을 그대로 반영하기 위해 부하 장치로 중첩부하(superposition load)¹²⁾의 방법으로 모터의 끝에 직류 발전기를 병렬구조의 일정한 용량으로 에너지를 소모할 수 있도록 다량의 전구와 연결하여 부하를 조절 할 수 있도록 하였다.^{13,14)} 전구는 개당 55 W의 전력을 소비 하고, 3개씩 먼저 직렬 연결하고 그 직렬 연결한 전구를 다시 병렬로 7줄을 연결하여 총 21개의 전구를 사용하여 부하를 주었다. 전구 한 개당 55 W의 전력을 소모하므로 165 W~495 W의 전력을 소비하도록 부하를 조절할 수 있도록 시스템을 구성하였다. BLDC 모터를 측정하기 위해서 x, y, z축으로 동시에 측정하기 위해서 정밀 실험을 위해서 보정된 3개의 가속도계(accelerometer) 모터의 외부에 부착하여 시간에 따른 모터의 진동 특성을 얻었다. 실험은 외부 부하(165 W~495 W)와 모터의 회전수 (2000 rpm~4000 rpm) 및, 외부 풍량 조건을 바꾸어 가면서

모터의 온도 및 진동을 동시에 측정하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 진동 측정 시스템의 개략도를 요약하였다. BLDC모터는 차량용 12.5V짜리 배터리를 4개를 직렬 연결하여 50V의 전압으로 구동할 수 있다. 먼저 모터가 구동되면 전구와 연결된 직류 발전기가 전력을 발생시키고 이 전력은 부하장치와 연결되어 전구의 불을 켜게 된다. Fig. 2와 같이 한 줄에 전구 3개가 직렬로 연결되어 있고 3개씩 묶음으로 켜고 끌 수 있는 스위치가 있어 조절이 가능하며 총 7세트로 21개가 연결되어있다. 전구 한 개당 55 W의 소비 전력을 가진다. 즉 최대 1.2 kW의 부하를 걸 수 있는 장치이다. 모터의 회전수는 모터의 구동 측 옆에 회전수를 측정할 수 있는 센서를 부착하여 회전수를 보며 사용자가 컨트롤러를 조작하여 조절한다.

Table. 1과 같이 부하는 전구의 수를 3, 6, 9개를 사용하여 165 W, 300 W, 495 W의 부하 조건을 각각 주어 실험 하였다. 모터의 회전수는 각각의 부하 조건에서 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm의 회전수를 바꿔가면서 모터의 정상 상태가 도달 하도록 6000s 동안 실험 하였다. 이렇게 하면 총 9번의 실험이 되는데 여기에 대류 조건에 따라 자연대류 강제대류 이렇게 두 가지 조건을 달리하여 실험하여 총 18번의 실험을 진행하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 가속도계는 #Ch1과 #Ch3은 모터 축방향 하우징 근처에, #Ch2는 모터 회전체 근처에 부착하였고 각속도 방향은 Fig. 4와 같이 x축은 #Ch1, y축은 #Ch2, z축은 #Ch3로 설정하여 진동을 측정하였다. 장비는 NI사에서 나온 U640모델을 사용하였고 프로그램은 eZ-TOMAS를 사용하였다. 진동 신호는 16s 동안 가속도값을 평균하였고, 600s 간격마다 저장하도록 하였다. 온도값은 내부의 BLDC 모터의 코어부분에 열전대를 이용하여 계측된 온도 데이터를 실시간으로 저장하도록 하였다.

차의 정지 상태와 동작 상태를 모사하기 위해서 외부 조건을 자연 대류의 경우와 강제 대류의

실험조건을 비교하고자 하였다. 봄과 가을의 차량운전을 가정하여 실험실의 조건을 22℃로 에어컨과 히터를 이용하여 유지하며 실험 하였고, 강제대류의 경우에는 Fan을 작동시켜 강제적인 공기흐름을 이용한 냉각방법을 사용하였다. 차량이 달리고 있는 상황을 가정하여 Fan의 유량은 100m³/min로 모터의 회전 측 방향으로 유지하였다. 또한 태양열에 의한 부하를 방지하기 위하여 외부의 빛을 차단한 후 실험실 내부의 전등만 키고 실험을 진행하여 외부의 영향을 일정하게 유지하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of the Vibration measurement system for 1.2 kW BLDC motor

Fig. 2 Variable external loads for temperature and vibration experiment

Table 1 Conditions Table

rpm	2000 rpm	3000 rpm	4000 rpm
Load			
165 W	Cooling	Cooling	Cooling
	Natural	Natural	Natural
330 W	Cooling	Cooling	Cooling
	Natural	Natural	Natural
495 W	Cooling	Cooling	Cooling
	Natural	Natural	Natural

Fig. 5는 이번에 제작한 열 및 진동 측정 시스템의 전체적인 모습이다. 열 및 진동 측정 시스템은 다음과 같이 구성되어 있다. (a)는 가변부하 장치이고, (b)는 전력 발전기, (c)는 BLDC 모터, (d)는 FFT 장치이며, (e)모터의 회전수를 조절하는 컨트롤러이다. f)는 NI사 Table 1에서 나온 u640, (g)는 보조 밧데리, (h)는 부하를 조절하는 장치이다.

Fig. 3 Accelerometer positions

Fig. 4 Accelerometer directions

Fig. 5 Vibration measurement system for 1.2 kW BLDC motor

(a) 2000rpm, 165W

(b) 2000rpm, 330W

(c) 2000rpm, 495W

Fig. 6 Time-Temperature, Vibration ratio

3. 실험결과

BLDC의 모터의 온도 변화 및 진동 변화를 동시에 비교하기 위해서 외부 환경조건을 자연대류와 강제대류에 대한 특성을 고찰하였으며, 외부 부하 조건(330 W~495 W), 모터의 회전수 (2000 rpm~4000 rpm)등을 변경하여 실험하였다.

진동의 크기 값은 식 (1)과 같이 두 축에서 나오는 Cross 스펙트럼값 (#Ch1xconj(#Ch2))과 #Cha3에서 나오는 Auto 파워 스펙트럼 값의 비로서 정의 되는 전달함수 값을 정의하여 무차원 화를 하였고, 전체 진동을 지배하는 1차 모드의 값(60Hz)을 15s 동안 평균화 하여 매 600s 마다 그래프로 표시하였다.

$$Tr(Ch1, Ch2) = \frac{Ch1 \times conj(Ch2)}{Ch2 \times conj(Ch2)} \quad (1)$$

먼저 Fig. 6 (a)의 경우는 외부 부하 165 W에서 회전수 2000 rpm하에 자연대류 및 강제 대류하에 모터 가동시간에 따른 부하가 걸려 있는 경우이다. 자연대류일 때 온도는 대략 3000s에서 점차 수렴해 가는 것을 보이고 있고 최고 온도인 6000s에서의 온도는 76 °C까지 상승하였다. #Ch1*은 대략 3000s까지는 점차 감소 하지만 3000s 이후로는 일정하게 수렴하는 모습을 보였다. 특징적인 것은 전달함수 값이 강제 대류에서 3000s 미만에서 1보다 큰 값을 가지는데, 이는 #Ch3 (z축)의 진동 보다 #Ch1 (x축)방향의 진동값이 더 지배적임을 볼 수 있었다. 하지만 온도가 증가 함에 따라서 전체적인 진동은 저감됨을 알 수 있다. 전체적인 평균값은 0.8905이다. #Ch2*은 3000s 까지는 약간 증가하는 것을 보였으나 3000s 이후 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다. 평균값은 0.6466으로 #Ch1*보다 27.39% 낮게 측정 되었다. 강제대류일 때의 경우는 강제대류의 경우 3000s 보다는 좀 더 이후에 수렴하는 것을 확인 하였고 58 °C까지 상승하였다. #Ch1*, #Ch2*은 3000s까지 약간 증가하지만 그 뒤로 일정한 값을 유지하는 것을 확인하였다. 3000s이후의 평균값은 각각 0.8396, 0.6370

(a) 3000 rpm, 165 W

(b) 3000 rpm, 330 W

(c) 3000 rpm, 495 W

Fig. 7 Time-Temperature, Vibration ratio

으로 #Ch1*보다 #Ch2*가 24.13% 낮은 것을 확인하였다. #Ch1*의 경우 자연대류와 강제 비교하면 자연대류일 때 강제대류 보다 5.71% 적은 값을 보였다.

Fig. 6 (b)의 경우 2000 rpm, 330 W의 부하가 걸려있는 상태이다. 온도의 경우 앞의 Fig. 5 (a)의 경우와 비슷한 경향을 보였지만 기울기가 좀 더 가파른 것을 확인하였고 최종온도도 자연 대류의 경우 90 °C, 강제대류일 경우 63 °C로 앞의 실험 보다 높은 값을 보였다. #Ch1*, #Ch2*의 경우 자연대류 일 때는 3000s까지는 값이 증가하다가 감소하다 다시 증가하며 불안정한 모습을 보였다. 3000s 이후에는 다시 일정한 값으로 유지 되는 것을 보이고 있다. 3000s 이후 평균값은 각각 0.8449, 0.6376으로 나타났고 #Ch1*보다 #Ch2*의 값이 27.39% 낮게 나타났다. 강제대류의 경우 각각 0.8396, 0.6370으로 나타나 24.13% #Ch2가 낮은 것을 확인할 수 있다. 강제 대류와 자연 대류에서 #Ch1*의 값을 비교해보면 5.71% 자연대류가 더 높은 값을 보였다.

Fig. 6 (c)의 경우는 2000 rpm, 495 W의 부하가 걸려있는 상태이다. 온도의 경우 앞의 실험과 비슷한 양상을 보이고 있으나 기울기가 온도 좀 더 급격히 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 최고온도는 94 °C, 69 °C로 나타났다. 진동의 비의 경우를 보면 강제대류와 자연대류일 때 #Ch1*는 0.8702, 0.7955로 측정 되었고 #Ch2*는 0.6920, 0.5702으로 각각 8.6%, 17.6% 감소하였다. Fig. 5 (a), (b), (c)의 경우 강제 대류에서 #Ch1*를 비교해 보면 0.8905, 0.8449, 0.8702으로 나타났다.

Fig. 7 (a)의 경우 3000 rpm, 165 W의 부하가 걸려있는 상태이다. 온도 그래프는 앞의 결과와 비슷한 양상을 보였고 자연대류와 강제대류의 최고온도는 각각 98 °C, 67 °C로 측정 되었다. #Ch1*와 #Ch2*은 강제대류, 자연대류 모두 3000s까지는 조금씩 감소하는 모습을 보였고 3000s 부터는 일정하게 수렴하는 모습을 보였다. 강제대류의 경우 3000s이후 평균값은 각각 0.7153, 0.4279, 자연대류일 경우 0.6731, 0.4265으로 각각 5.89%, 0.32% 감소한 값을 보여 앞의

실험과 비슷한 양상을 보였다.

Fig. 7 (b)의 경우는 3000 rpm일 때 330 W의 부하가 걸려 있는 상태이다. 이 경우도 앞의 경우와 비슷한 경향을 보였는데 자연 대류, 강제대류의 최고 온도는 각각 105 °C, 75 °C으로 나타났다. 3000s 전까지는 대체로 감소하는 모습을 보였지만 3000s 이후로는 일정한 값을 보이며 앞의 실험들과 비슷한 양상을 보였다. #Ch1*의 경우 강제대류 일 때 0.7230으로 나왔고, 자연대류일 때는 0.6512으로 10%정도의 차이를 보였다.

Fig. 7 (c)는 3000 rpm, 495 W의 경우이다. 자연대류, 강제대류의 최고 온도는 각각 109 °C, 76 °C 이고, 마찬가지로 3000s 이후에 #Ch1*의 경우 평균값은 0.6401, 0.6612으로 3.19%의 비슷한 값을 보여 자연대류조건과 강제대류조건에서의 차이가 거의 나지 않는 것을 보였다. 3000 rpm에서 165 W, 330 W, 495 W를 비교해 보면, #Ch1*의 경우 강제 대류일 경우 0.7153, 0.7230, 0.6612으로 나타났다. 반면에 온도는 67 °C, 75 °C, 76 °C 으로 각각 8°C, 1°C 증가한 반면 진동비는 1%증가하고 8.54%감소하였다.

Fig. 8 (a), (b), (c)의 경우 온도는 앞의 실험들과 비슷한 양상을 보였다. 최고온도는 (c)의 경우인 122 °C였고 자연대류와 강제대류의 온도 차이는 30°C 정도로 나타났다. 하지만 진동의 비 그래프는 앞의 실험들과 조금 다른 양상을 보였는데 (a)의 경우는 3000s까지 큰 증가 폭을 보였고 그 이후로는 일정한 값을 보였다. #Ch1*의 경우 3000s 이후의 평균값은 강제대류, 자연대류 각각 0.9949, 0.8907으로 10.5%감소하였다. (b)의 경우 0.8369, 0.8119으로 3%감소하였고, (c)의 경우 0.8532, 0.7409으로 13.17%감소하였다. 다른 실험보다 감소폭이 더 큰 것을 확인하였다.

495 W, 강제대류 조건일 때 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm의 경우를 비교해보면, 온도는 69 °C, 76°C, 92°C로 각각 7°C, 16°C 증가하였다. 진동의 비의 경우는 0.8702, 0.6612, 0.8532으로 나타나 3000 rpm에서는 2000 rpm보다는 24.0%적었고, 4000 rpm 보다는 22.5% 적어 3000 rpm의 값이 유독 낮은 값을 보였다.

(a) 4000 rpm, 165 W

(b) 4000 rpm, 330 W

(c) 4000 rpm, 495 W

Fig. 8 Time-Temperature, Vibration ratio

Fig. 9 Maximum Vibration of #Ch3 at 6000s (Forced convection)

Fig. 10 Maximum Vibration of #Ch3 at 6000s (natural convection)

Fig. 9와 Fig. 10은 모터의 회전수와 부하조건에 따른 #Ch3의 진동의 크기를 비교해 놓은 그래프이다. 그래프를 보면 자연대류조건이나 강제대류조건 두 경우 모두 부하에 따른 진동은 크게 차이가 없었으나 모터 회전수의 변화에는 큰 차이를 보였다.

Fig. 9의 자연대류조건인 진동의 크기는 2000 rpm 에서는 330 W의 값은 165 W에서 값 보다

16.8% 높았고 495 W의 값은 330 W값 보다 14.9%높게 측정되었다. 3000 rpm에서는 330 W의 값은 165 W에서 값 보다 8.72% 높았고 495 W의 값은 330 W값 보다 8.3%높은 것으로 측정 되었다. 4000 rpm의 경우 330 W의 값은 165 W과 거의 유사한 값을 보였다. 또한 495 W의 값은 330 W값 보다 3.8%높은 것으로 측정 되었다. 세 경우를 비교하면 회전수가 높을수록 부하의 변화에 따른 진동크기의 변화는 더 크다는 것을 확인하였다.

Fig. 10 강제대류조건의 결과는 Fig. 9 와 비슷한 양상을 보였다. 두 조건을 비교해 보면 모든 조건에서 온도는 거의 30℃차이가 나는 반면, 진동의 크기는 강제 대류 조건에서 보다 자연대류 조건에서 2000 rpm에서는 평균적으로 10.4%, 3000 rpm에서는 11.7% 4000 rpm에서는 18.2% 높은 값을 보였다.

5. 결 론

본 연구는 BLDC모터의 열 및 진동의 특성을 연구하기 위하여 다양한 외부 조건에서의 열 및 진동의 변화를 관찰할 수 있는 시스템을 직접 제작하였고, 강제 대류 및 자연 대류의 조건하에 회전수 2000 rpm~4000 rpm, 외부 부하 165 W~495 W의 변화에 대한 열 및 진동의 변화를 관찰하였다.

1) 모터의 진동크기는 평균적으로 z축(#Ch3)이 0.0178g으로 가장 크게 측정 되었고 그다음 x축(#Ch1)의 0.0138g, y축(#Ch2)의 0.0075g 순으로 크게 나왔다.

2) 진동비의 변화는 온도가 수렴하는 시간인 3000s이전에는 상승하거나 감소하는 등 불안정한 모습을 보였지만 3000s 이후로는 일정한 값을 유지하였다.

3) 진동의 크기는 각 회전수에서 최댓값을 가지는 495 W의 경우의 값들을 비교하면 2000 rpm에서의 값보다 3000 rpm은 167.0% 증가하였고, 4000 rpm 에서의 값은 54.7% 증가하여 증가폭이 감소한 것을 확인하였다.

5) 각 부하에서 최댓값을 가지는 4000 rpm의 경우의 값들을 비교해보면 165 W에서의 값보다 330 W의 값은 거의 비슷하게 나왔고, 495 W는 3.5%증가 하여 비슷한 값을 보여 부하에 의한 변화 보다 회전수의 변화에 따른 변화가 더 큰 것을 확인하였다.

후 기

한국과학창의재단에서 시행한 RNE사업의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

1. H. D. Kim, C. Kim, P. S. Shin, D. S. Kim and G. S. Park, 2005, "A Magnetic Exciting Force Analysis of the large scale BLDC Motor", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 83-85
2. H. J. Chung, P. S. Shin and S. H. Woo, 2007, "Vibration Analysis for BLDC Motor by Electromagnetic Exciting Force", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 118-120
3. Y. H. Kim, J. Y. Ha, J. G. Lee, S. H. Kim and B. S. Yang, 2007, "Finite Element Model Updating and Vibration Analysis of PMDC Motor Rotor System", Journal of the Korea society for power system engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 20-27
4. K. C. Bang, K. S. Kim, J. H. Kwon, Y. U. Lee and S. M. Hwang, 2008, "Analysis of Outer Rotor Type BLDC motor vibration characteristics according to slot", Journal of the Korean society for noise and vibration engineering, pp. 1-6
5. T. J. Lee, J. H. Park, S. H. Lee and J. P. Hong, 2007, "The vibration and noise characteristic analysis of the BLDC Axial-gap type motor by using Finite Element Method", Journal of the Korean society for noise and

- vibration engineering, pp. 1-4.
6. S. S. Kang and C. W. Kim, 2013, "A study on vibration characteristics of brushless DC motor with inertia load", journal of the Korean Society of Precision Engineering, pp. 813-814
 7. T. S. Jeong, K. D. Lee, G. W. Cho and G. T. Kim, 2013, "The design of Radial magnetic force equilibrium for reduction of vibration and noise in IPM type BLDC motor", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 11, pp. 155-158
 8. T. G. Lee, B. K. Park, J. H. Lee, Y. C. Im, C. H. Choi and B. S. Song, 2004, "Thermal Reliability Analysis of a BLDC Motor in High Speed Axial Fan", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, pp. 1187-1195
 9. S. J. Kang, K. S. Lee, S. M. Wang and H. K. Shim, "Thermal and Flow Analysis of Outer-Rotor Type BLDC Motor with Cooling Blades", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 31, No. 9, pp. 772-779
 10. H. Y. Kim, Y. B. Kim and P. S. Shin, 2011, "A Thermal Analysis of 10MW-BLDC Motor by FE Program", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 52-54
 11. I. J. Lee, J. W. Ye, D. H. Lee, P. Hwang and J. S. Shim, 2013, "Development of Heat Dissipation Measuring System for 1.2-kW BLDC Motor", Vol. 37, No. 11, pp. 1423-1428
 12. P. Gnacinski, 2008, "Prediction of windings temperaturerise in induction motors supplied with distorted voltage", Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp. 707-717
 13. "<http://www.youtube.com/watch?v=0y64QiC9mkA>"
 14. "<http://www.schneider-electric.hu/documents/automtion-and-control/asg-3-motors-and-loads.pdf>" 51-55