

## 외부 유동을 고려한 1.2[kW] BLDC 모터의 열 전달 해석

(The Heat Transfer Analysis of 1.2[kW] BLDC Motor on the Condition of the External Flow)

황하영\* · 정태욱 · 이동연 · 황 평 · 심재솔\*\*

(Ha-Young Hwang · Tai-Uk Chung · Dong-Yeon Lee · Pyung Hwang · Jae-Sool Shim)

### Abstract

In this paper, we researched the heat transfer analysis of 1.2[kW] BLDC motor on the condition of the external flow. The BLDC motor is fallen under influence of some heat generated by rotating motor speed and it changes the life and confidence of motor. The heat makes to reduce the life of insulation and the magnetization. So motor can't make own performance. Therefore we calculated the losses about number of revolutions of motor. And then, we analyzed the heat transfer of BLDC motor by using the results when a fan attached to motor makes the external flow or not. The results showed that the temperature of motor increased constant values irrespective of external air temperature. The temperature of motor decreased very lower values than prior researches when the fan makes the external flow. In this method we can analyze the performance, losses and heat transfer of motor applied in the many industries.

Key Words : BLDC Motor, External flow, Loss, Variation, Heat Transfer

### 1. 서 론

현대 사회에서는 많은 것들이 자동화되고 있다. 이러한 자동화를 이루기 위하여 반드시 사용되는 것이 모터이다. 즉 자동화를 이루기 위해 동력이 들어가는 곳이라면 모든 곳에 있어서 모터가 사용된다. 이러한 모터들 중에서도 많이 사용되는 것이 BLDC 모터이다. 이것은 소형이면서도 고속형으로 만들 수

있기 때문에 많은 분야에서 넓게 사용된다. 이 모터의 수명과 신뢰성은 모터의 구동 회전속도에 의하여 발생하는 열에 의해 매우 큰 영향을 받는다. 특히나 구조적인 장점을 가지고 있는 BLDC 모터의 경우에는 열에 굉장히 많은 취약점을 가지고 있다. 열에 의하여 절연체의 수명이 줄어들고 PCB에서의 제어 성능이 저하되고 자석에 의한 자화 정도도 줄어들므로써 모터의 제 기능을 발휘하기가 어려워진다. 이러한 모터의 내부 열전달을 구하기 위하여 지금까지 수행된 연구로는 컴퓨터를 이용한 열 유동 해석인 CFD(CFD-computational fluid dynamics)[12] 및 3D FEM[3]을 사용하는 사례가 있었고 산술적인 방법인 수치해석을 이용한 방법[6-9]이 많이 사용되었다. 이

\* 주저자 : 영남대학교 기계공학 석사 재학중

\*\* 교신저자 : 영남대학교 기계공학 조교수

Tel : 053-810-3568

E-mail : gfhhy@yu.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 28일

1차심사 : 2011년 10월 1일, 2차심사 : 2011년 12월 27일

심사완료 : 2012년 2월 2일

것을 통하여 모터 내부의 열전달을 구할 수 있었지만 이러한 방법들은 너무 많은 시간의 소요와 노력을 요구하였다. 그리고 모터 내부의 열전달에 영향을 미치는 많은 변수들이 있음에도 각각의 요소들 중에서도 가장 크게 미치는 요소들만 적용해 볼 수 있는 점에서 한계에 도달한다. 즉 다시 말해 여러 변수들에 대한 동시 다발적인 고려를 하기 매우 까다로웠다.

그렇기에 우리는 이번 연구를 통하여 다양한 변수들에 대하여 변화하는 모터 내부의 열전달을 연구하였다. 이것을 위하여 모터의 회전수에 따른 손실을 구하고 그 값을 적용하여 모터에 외부 유동을 만들어 주는 팬이 장착된 경우와 장착되지 않는 경우에 대한 열전달 해석을 실시하였다. 그 결과 우리는 흡입 온도와의 거의 상관없이 모터의 각 내부 온도는 거의 일정하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 팬에 의한 외부 유동이 있는 경우는 없는 경우와 비교하였을 때 매우 많은 온도강하를 볼 수 있었다. 이를 통하여 설계하고자 하는 용량의 모터를 제조함에 있어서 기존의 방법보다 더 쉽게 모터 내부 각 부분의 온도를 추정하는데 큰 도움이 될 것이다.

## 2. 손실 및 열전달

모터의 수명은 아레니우스 식(Arrhenius equation)에[1] 따르면 온도가 10[°C] 높아질 때 그 수명은 절반으로 감소한다. 그렇기에 모터의 온도에 대한 예측은 매우 중요하다. 이러한 온도를 예측하기 위하여 모터에 대한 손실을 알아야한다. 먼저 모터의 손실은 동손과 철손이 가장 크게 작용하기 때문에 이 둘을 고려하여야 한다.

동손( $P_r$ )은 권선에 전류가 통전할 때 권선의 저항에 의해 발생하는 손실로서 온도 상승으로 직결된다.

$$P_r = 3 \times i_{ph}^2 \times R_{ph} \quad (1)$$

여기서,  $i_{ph}$  : 상전류,  
 $R_{ph}$  : 상장 코일 저항

다음으로 철손은 자계에 의하여 철심의 재료적 성질에 의해 발생하는 손실이며 철심의 온도상승 요인이 된다[12].

$$P_c = P_h + P_e \quad (2)$$

$$= k_h f B^n + k_e f^2 B^2$$

여기서,  $P_c$ : 철손  
 $P_h$ : 히스테리시스 손실  
 $P_e$ : 와전류 손실  
 $k_h$ : 히스테리시스 손실 계수  
 $k_e$ : 와전류 손실 계수  
 $n$ : Steinmetz 상수  
 $B$ : 자속밀도

그리고 모터의 열전달을 구하기 위한 일반 형태에서의 열전달은 다음과 같다.

$$Q = Sk(T_1 - T_2) \quad (3)$$

여기서,  $S$ : 전도형상계수  
 (conduction shape factor)  
 $k$ : 표면사이 매체의 열전도도

본 연구에서는 이러한 모터의 회전수에 따른 철손과 동손을 구하여 이것을 이용하여 모터의 구동 회전수와 흡입 온도에 따른 각 내부의 온도를 측정하는 시뮬레이션을 실시하였다. 이 때 외부 유동을 만들어내는 모터에 장착되어 있는 모터의 회전수와 동일하게 움직이는 냉각팬의 유무에 따른 해석을 실시하였다.

## 3. Simulation 검증

모터 내부 각 부분의 온도를 구하기 위한 시뮬레이션을 그림 1과 같은 순서대로 수행하였다.

표 1. Maxwell™을 이용한 손실 해석 조건  
 Table 1. Conditions of loss analyzed with Maxwell™

조건	적용값
컴퓨터 사양	· CPU : intel(R) core(TM)2 Duo, 2.00[GHz] · RAM : 2.00[GB] · 32비트 운영체제 · 해석 시간 : 10분
출력[W]	1200
정격 전압[V]	72
회전 속도[RPM]	1000~10000
해석 방식	시간변화에 따른 변화

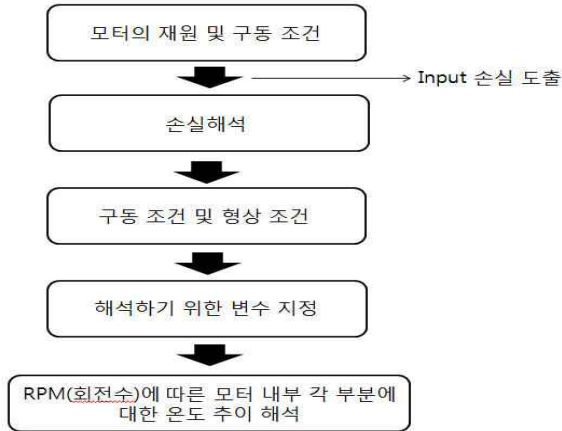


그림 1. 온도 특성 시뮬레이션을 위한 Flow chart  
Fig. 1. Flow chart for simulation of temperature characteristic

손실을 구하기 위하여 사용된 조건은 표 1과 같다. 사용한 프로그램으로는 Maxwell™을 활용하였다.

다음으로 Motor\_cad™를 이용하여 입력은 형상에 대한 입력, 손실에 대한 입력, 구동 조건에 대한 입력이 있다. 먼저 형상에 대한 입력 조건이라는 것은 모터의 생김 및 재료에 대한 것이다. 어떤 종류의 모터를 해석 할 것인가를 먼저 정한 다음 그 모터에 대한 수치를 입력였다.

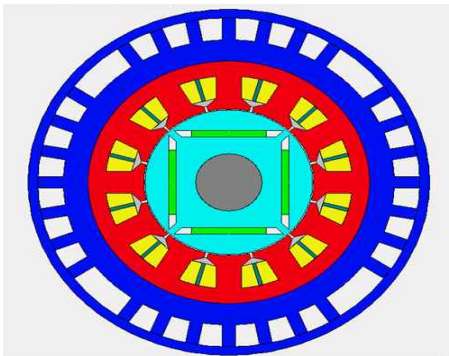


그림 2. 반경형상(Motor\_cad™)  
Fig. 2. Radial shape(Motor\_cad™)

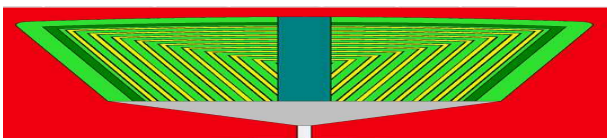


그림 3. 코일부(Motor\_cad™)  
Fig. 3. Coil shape(Motor\_cad™)

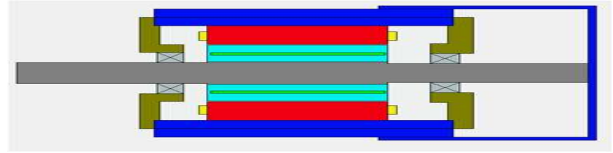


그림 4. 측면 형상(Motor\_cad™)  
Fig. 4. Side shape(Motor\_cad™)

다음으로 구동 조건에 대한 입력은 앞에서 구한 손실 및 기타 몇 가지가 있다.

표 2. 작동 모터의 구동 환경  
Table 2. Operating statement of rotating motor

조건	입력 데이터	
냉각 종류	축에 고정된 팬[TEFC]	
모터 오리엔테이션	수평적	
여러 가지 데이터 (Miscellaneous data)	대기 온도[°C] [Convection]	40
	대기 온도[°C] [Radiation]	40
	축 스피드 [RPM]	1,000~10,000
	실리콘 강판 두께 (Lamination Stacking Factor[Stator])	0.95
	철심의 점적률 (Lamination Stacking Factor[Rotor])	0.95
바깥 유체 유동 (External Fluid data)	바깥 유체 유동	공기
	열적 용량 [J/C]	0.02723
	밀도[kg/m³]	1.127
	압력계수[Pa]	1007
	동적 점성도 [kg/m/s] (Kinematic Viscosity)	1.689E-5
	역학 점도 [m²/s] (Dynamic Viscosity)	1.904E-5
	Pr-Prandtl Number	0.7039

### 4. 결과 및 토의

손실을 해석하기 위하여 먼저 구동 모터에 대한 형상을 먼저 입력하고 해석을 수행하고자 하는 모델을 만든 다음 앞에서 적용한 조건에 따라 시뮬레이션을 수행한다. MaxwellTM을 이용하여 수행한 결과 철손과 동손의 결과는 다음과 같다.

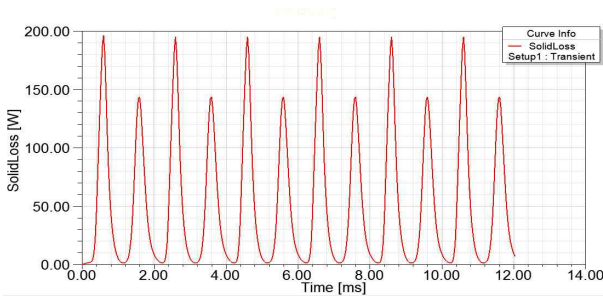


그림 5. 동손(5000RPM)  
Fig. 5. Copper Loss(5000RPM)

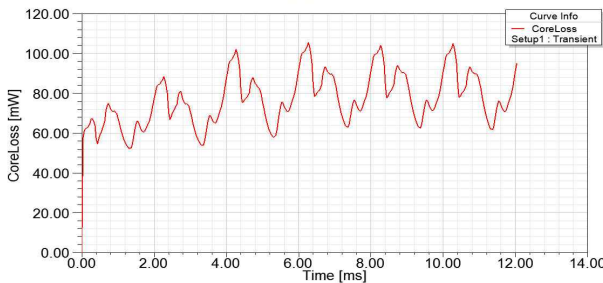


그림 6. 철손(5000RPM)  
Fig. 6. Iron loss(5000RPM)

그림 5와 그림 6에서 볼 수 있듯이 동손은 180[W] 정도가 나오고 철손은 100[W] 정도가 된다는 것을 알 수 있다. 위에서 구한 값들을 세부적으로 나누어 프로그램에 적용하였다. 실질적으로 손실 데이터는 모터 세부적으로 자세히 나누어지게 된다. 우리는 여기서 동손은 고정자 구리 손실과 코일부 동손(copper loss)로 나뉘게 되고 철손은 나머지 부분에서 발생된 손실로 나뉘게 된다. 모터의 부하 조건은 일정한 회전 속도를 적용하여 구하였다. 여기서 코일부 동손은 코일의 감긴 형상에 의해 발생하는 손실을 의미한다. 고정자 치의 철손은 고정자 치의 형상에 의해 발생하

는 손실을 의미한다. 베어링에 의한 마찰 손실은 전체 적 손실에 대한 비율을 적용하여 구하였다.

표 3. 손실 데이터(5000RPM)  
Table 3. Loss data(5000RPM)

손실 종류		손실값[W]
동손	고정자 동손	166
	코일부 동손(windage)	14
철손	고정자 치의 철손	57
	고정자 철손 (Stator Back Iron)	43
	회전자 철손 (Rotor Back Iron)	0
마찰손	베어링 마찰 손실 (Friction - R Bearing)	3.3
	베어링 마찰 손실 (Friction - R Bearing)	3.3
풍손	삽입된 자석 극 손실 (Embedded Magnet Pole)	0
	Loss(Magnet)	0

다음으로 이번 연구에서 적용한 모터의 구동환경이다. 다음과 같은 변수를 적용하여 시뮬레이션하여 모터 내 각 부위에서의 온도 추이를 살펴보았다.

표 4. 시뮬레이션 변수  
Table 4. Simulation conditions

대기 온도	주입 유체	유동 정의	모터 파워	회전속도
25[°C]	공기	축에 고정된 팬	1.2[kW]	1,000~10,000 RPM
35[°C]				
45[°C]				

각 실험데이터는 노드 데이터 혹은 output 데이터를 통하여 확인할 수 있다. 이것의 온도 분포 흐름은 그림 7과 같이 볼 수 있다. 이것은 앞에서 설정한 모터의 내부 구조를 색에 따라서 구별할 수 있도록 되어 있다. 이것을 통하여 열전달이 어떻게 이루어지는지 알 수 있다. 고정자와 회전자 사이의 공기층에 의한 열전달이 활발하게 이루어짐을 알 수 있다. 팬에 의한 냉각이 없을 경우 최고의 온도 변화를 보이는 곳은 코일이 감겨진 치아 부분이고 최저의 온도 변화는 하우징(housing)임을 알 수 있다.

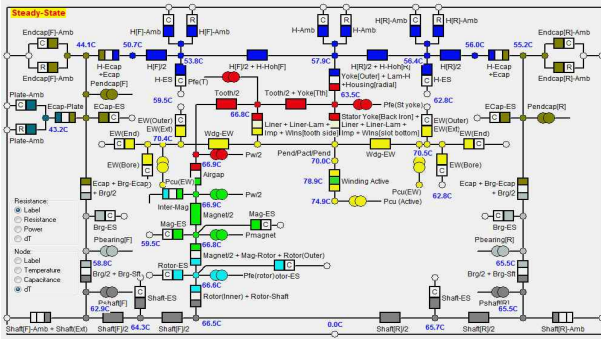


그림 7. 온도 분포 해석 회로도  
Fig. 7. Circuit diagram for analysis of temperature location

그리고 회전속도에 따른 온도 그래프로 나타내면 그림 8~13과 같다. 온도는 모터 내 그 부분에서의 평균값을 적용하였다. 각 부분에 대한 그림은 그림 8과 같다.

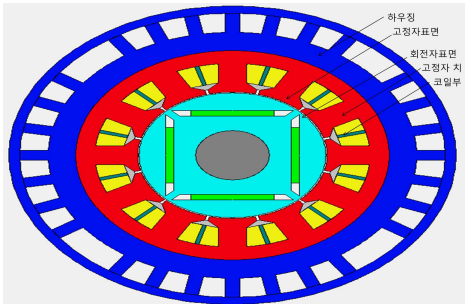


그림 8. 온도 시뮬레이션 된 부분  
Fig. 8. Part for temperature simulated

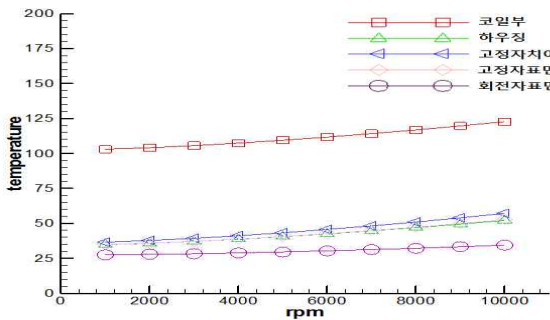


그림 9. 냉각팬 동작시의 흡입온도(25°C)의 회전 속도별 온도 특성  
Fig. 9. Temperature characteristic of absorbed temperature(25°C) in proportion to rotation velocity when cooling fan is operating

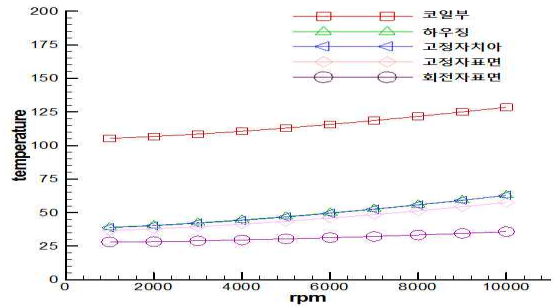


그림 10. 냉각팬 비 동작시의 흡입온도(25°C)의 회전 속도에 따른 온도 특성  
Fig. 10. Temperature characteristic of absorbed temperature(25°C) in proportion to rotation velocity when cooling fan is not operating

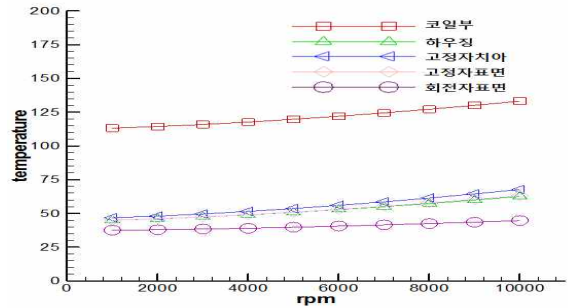


그림 11. 냉각팬 동작시의 흡입온도(35°C)의 회전 속도별 온도 특성  
Fig. 11. Temperature characteristic of absorbed temperature(35°C) in proportion to rotation velocity when cooling fan is operating

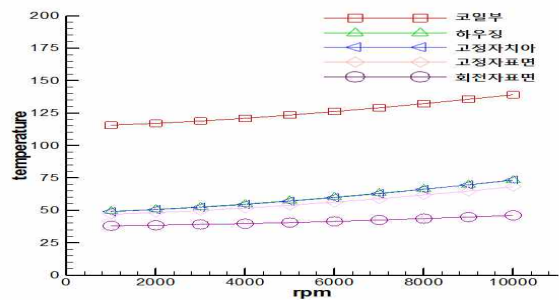


그림 12. 냉각팬 비 동작시의 흡입온도(35°C)의 회전 속도에 따른 온도 특성  
Fig. 12. Temperature characteristic of absorbed temperature(35°C) in proportion to rotation velocity when cooling fan is not operating

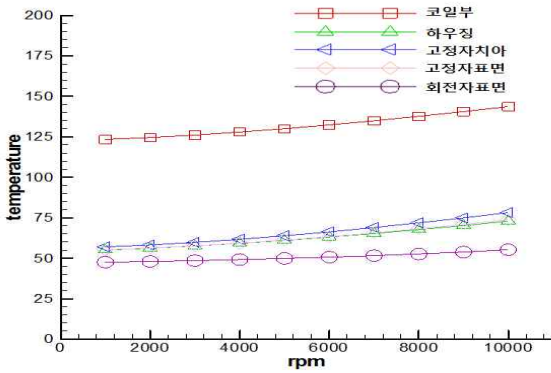


그림 13. 냉각팬 동작시의 흡입온도(45[°C])의 회전 속도별 온도 특성

Fig. 13. Temperature characteristic of absorbed temperature(45[°C]) in proportion to rotation velocity when cooling fan is operating

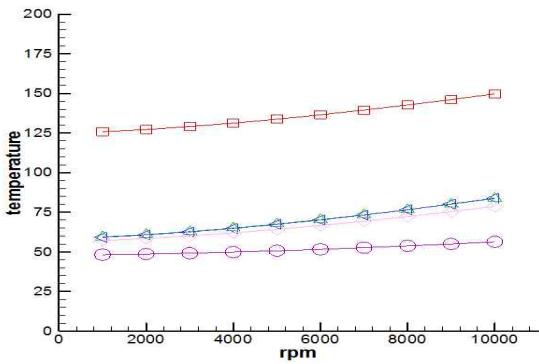


그림 14. 냉각팬 비 동작시의 흡입온도(45[°C])의 회전 속도에 따른 온도 특성

Fig. 14. Temperature characteristic of absorbed temperature(45[°C]) in proportion to rotation velocity when cooling fan is not operating

위의 그래프를 살펴보면 흡입되는 공기의 온도에 따른 모터 내부에서의 온도는 흡입온도가 높아질수록 9도 정도의 증가를 보였다. 그리고 RPM(회전 속도)에 따른 온도 차이는 팬에 의한 냉각, 즉 외부 유동에 의한 냉각이 없을 경우와 팬에 의한 냉각이 없는 자연대류에 의한 냉각만 존재할 경우 온도차는 2도 정도였다. 이것은 모터의 회전수와 같은 속도로 돌아가는 팬에 의한 공기유량이 자연대류에 의한 공기유량과 비슷함을 의미한다.

## 5. 결 론

우리는 이번 연구에서 모터의 수명과 신뢰성을 좌우하는 모터 내부의 열전달에 대한 방법을 연구하였다. 다양한 변수에 따른 결과를 도출하기 위한 방법을 활용하였고, 또한 유동에 관하여 와류 등의 경계조건 값에 대한 자료 없이 올바른 해석을 할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션을 한 결과 모터 내부의 각 부품 온도는 모터 속도와 이에 따른 냉각팬의 속도 변화에 따라 많은 변화를 보였고 냉각 방식의 차이에 따른 온도의 차이도 극명하게 나타났다. 반면에 초기 대기 흡입 온도에 따른 변화는 미미하였다. 우리가 시뮬레이션을 위하여 모터의 회전수와 냉각방식, 그리고 흡입온도를 변수로 지정하였으며 이에 따른 모터 내부의 온도 변화 추이를 살펴보았다. 하지만 이것 외에도 모터 내부에 들어가는 절연체의 재료, 영구자석의 재료, 고정자나 회전자를 이루는 재료 등 온도변화에 관여하는 다양한 변수가 존재하고, 이번 연구를 통하여 모터에 사용되어지는 모든 것에 대한 온도 변화 추이를 변수로 정하여 시뮬레이션을 할 수 있다. 이번 연구는 앞으로 많은 모터의 성능 향상을 위한 모터 제작에 있어서 많은 좋은 선행 연구로 사용될 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원에서 시행한 광역경제권 연계협력사업의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Andreas, J. C., "Energy -efficient electronic motor" Selection and Application, Marcel Dekker Inc., pp.243-245,1992.
- [2] B.K. Fussell " Thermal effects on the torque-speed performance of a brushless DC motor".Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & coil winding conference, pp403-411, Oct. 1993.
- [3] Alain Cassat, Christophe Espanet, and Nicolas Wavre "BLDC Motor Stator and Rotor Iron Losses and Thermal Behavior Based on Lumped Schemes and 3-D FEM Analysis".IEEE Trans. on Industry Applications. Vol. 47, No. 3, 2003.

- [4] T.J.E. Miller, Fellow, IEEE, Mircea popescu, Calum Cossar, and Malcolm McGillp, "Performance Estimation of Interior Permanent-magnet Brushless Motors Using the Voltage-Driven Flux-MMF Diagram". IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 42, No. 7, July 2006.
- [5] Katsumi Yamazaki, Member, IEEE, and Yoshiaki Seto "Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition", IEEE transactions on industry applications, Vol.42, NO.4, July. 2006.
- [6] Soojin Kang, Kwan-Soo Lee, Semyung Wang and Hokyung Shim "Thermal and flow analysis of outer-rotor type bldc motor".The Korean society of mechanical engineers paper B, No.31, Vol.9, pp772~779, 2007.
- [7] Min-soo Kim, Kwan-soo Lee and Sukkee Um, "Numerical investigation and optimization of the thermal performance of a brushless DC motor". ScienceDirect on international Journal of Heat and Mass transfer, Volume 52, issues 5-6, February. 2008.
- [8] Min-soo Kim, Kwan-soo Lee "Thermo-flow behavior of a BLDC motor according to design parameters" The Korean society of mechanical engineers paper pp:2-293, 2007.
- [9] Min-soo Kim, Kwan-soo Lee "Effects of design parameters on the Thermal performance of a brushless DC MOtor". The Korean society of mechanical engineers paper, B, No. 32, Vol.2, pp. 141~148, 2008.
- [10] Jin-Huek Hur, Tae-Gu Lee, Sun-Ae Moon, Sang-Jae Lee, Hoseon Yoo, Seung-Jae Moon and Jae-Heon Lee "Thermal reliability analysis of a BLDC motor in a high-speed axial fan by the accelerated-life test and numerical methods". Heat and Mass Transfer. Vol. 44, NO. 11, pp. 1355-1369, 2008.
- [11] Sun-Ae Moon, Jae-Heon Lee "Thermal reliability analysis of BLDC Motor in a high speed axial fan by numerical method". Korean Journal of air-conditioning and refrigeration engineering. No.33, Vol.3, pp.130-138, 2010.
- [12] James Kuria, Pyung Hwang "Optimizing Heat Sink Geometry for Electric Vehicle BLDC Motor Using CFD", Sustainable Research and Innovation conference Proceedings, Vol.3, 2011.
- [13] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Kyoung-Jin Ko "Analysis on the core loss and windage loss in permanent magnet synchronous motor for high-speed application", The Korean institute of electrical engineers, B, pp.511-520, 2006.

◇ 저자소개 ◇



**황하영(黃荷永)**

1985년 3월 14일생. 2011년 영남대학교 기계공학 졸업. 2011년 영남대학교 기계공학 석사 재학중.  
Tel : (053)810-3648  
E-mail : gfhhy@nate.com



**정태욱(鄭泰旭)**

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학 졸업. 1995년 부산대학교 전기공학 졸업(석사). 1999년 부산대학교 전기공학 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 경남대학교 전기공학과 조교수. 본 학회 평의원, 편수위원.  
Tel : (055)249-2628  
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr



**이동연(李東淵)**

1975년 2월 26일생. 한국과학기술원 기계공학전공 졸업(박사). 한국과학기술원 기계공학전공 졸업(석사). 고려대 기계공학전공 졸업. 2008년~현재 영남대학교 기계공학 조교수.  
Tel : (053)810-3648  
E-mail : dylee@ynu.ac.kr



**황 평(黃 平)**

1955년 11월 6일생. 1979년 서울대학교 기계설계학 졸업. 1981년 서울대학교 기계설계학 졸업(석사). 1989년 서울대학교 기계설계학 졸업(박사). 1982년~현재 영남대학교 기계공학부/전임강사, 조교수, 부교수, 교수.



**심재술(沈在述)**

1971년 7월 21일생. 워싱턴주립대 기계재료공학전공 Ph.D. 포항공과대 기계공학전공 졸업(석사). 부산대 생산기계공학전공 졸업. 2008년~현재 영남대학교 기계공학 조교수.  
Tel : (053)810-2465  
Email : jshim@ynu.ac.kr