

## 초고속 전동발전기 개발

홍도관 · 정연호 · 우병철 (한국전기연구원 전동력연구센터)

### 1 서론

최근 이동형 로봇이나 소형 무인 장비 등과 같이 휴대용 전원을 필요로 하는 장비들이 많이 개발되고 있다. 무인이동로봇을 개발하는데 있어서 큰 장애로 작용하는 것 중의 하나로 높은 에너지밀도로 장시간 에너지를 공급할 수 있는 소형동력원의 확보이다. 그러나 현재 휴대용 전원으로 가장 많이 사용되고 있는 배터리의 경우 출력밀도는 높지만 에너지밀도가 낮아 연속사용 시간이 짧고 충전시간이 오래 걸리며 전원에 대한 접근이 어려운 곳에서는 충전이 불가능한 문제가 있다. 다른 형태의 휴대용전원인 연료전지는 에너지밀도는 높으나 출력밀도가 낮아 고효율이 요구되는 전기모터에는 사용이 어려운 단점이 있다.

이동형 로봇이나 로봇 복장의 경우 높은 에너지 밀도와 출력밀도를 동시에 요구한다. 이에 따라 새로운 형태의 휴대용 전원 장치 개발에 대한 요구가 대두되었는데 마이크로 가스 터빈을 이용한 발전기가 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 적합한 수단의 하나로 알려져 있으며 일본, 벨기에, 스위스, 미국 등에서는 꾸준히 연구가 계속되고 있다[1-2]. 본 연구원에서는 출력밀도 500(W)급의 마이크로 가스터빈 발전기(Micro turbine generator, MTG) 시스템에 들어가는 전동발전기를 개발하고 있다. 사이클 해석 결과가 500(W)의 출력을 발생시키기 위해서는 전동

(motoring) 모드로 자력운전속도(self-sustaining speed)인 20만(rpm)까지 압축기의 속도를 증가시키고 이 때 필요한 동력은 280(W)이고 그 이후 계속 속도를 증가시키다가 40만(rpm)에서 정상상태 발전을 해야 하며, 최종출력 500(W)를 확보할 수 있도록 설계되어야 한다[3-5].

본 연구원에서는 MTG 시스템의 심장과 같은 역할을 하는 전동발전기의 설계, 해석, 제작 및 평가에 대한 내용을 소개하고자 한다. MTG 전동발전기의 회전속도에 대한 전동모드와 발전모드의 전기적인 손실을 고려한 특성을 해석을 수행하였다[6-7]. 그리고 초고속에서 발생하는 철손을 줄이기 위해 고정자 코어로 아몰퍼스 코어(Amorphous core, 2605SA1)를 사용하여 실리콘 스틸(20PNF1500)과 결과를 비교하였다. AC 부하시험에서 전동모드 200,000(rpm)에서 400(W)가 되도록 부하저항을 6.25, 10, 25( $\Omega$ )로 바뀌가면서 해석을 수행하였으며, DC 배터리 저장장치의 전력변환을 고려한 해석을 수행하였다. 또한 초고속 회전 시 회전속도의 상승에 비례하는 원심력에 의해 영구자석 동기기 회전자는 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하고, 기계적인 스트레스를 견디도록 견고한 구조가 되어야 한다. 비자성의 원통형 슬리브의 내경과 자석의 외경과의 미소한 간섭량으로 열박음된 로터에 영구자석이 이탈되는지 여부와 원심력에 의한 로터의 기계적인 강도를 평

가하기 위해 강도해석을 수행하여 안전성을 확보하였다[8]. 마지막으로 회전체동역학 해석을 통해서 사이로스코픽 효과를 고려한 캠벨선도를 이용하여 위험속도를 평가하였다[8]. 마이크로 터빈에서는 에어포일베어링이 사용되나 개발 중에 있고, 안정적인 전동발전기의 구동을 위해서 세라믹 볼베어링을 적용하였다. 전동발전기의 발전특성을 평가하기 위하여 back-to-back 테스트를 수행하였다. 유연커플링으로 연결된 두 대의 전동발전기에서 한 대는 전동기로 쓰고 한 대는 발전기로 평가하였으며 안정적인 구동 속도까지 발전 테스트를 하기 위해서 두 로터의 축계시스템의 위험속도(critical speed)를 평가하고 충분한 분리여유(separation margin)를 갖고 구동되도록 하였다.

## 2. 마이크로 터빈 발전기 구성 및 동작

그림 1의 구성도와 같이 예비 설계된 500(W)급 MTG는 모터/발전기, 원심형 압축기, 구심형 터빈, 연소기, 열교환기로 구성되어 있다. 500(W)급 MTG는 부피 1,000(cm<sup>3</sup>)의 휴대가 가능한 작은 크기를 가지도록 개발하는 것이 목표이기 때문에 압축기 및 터빈이 회전축에 직접 연결되어 회전하는 직결 구동방식으로 설계하였다.

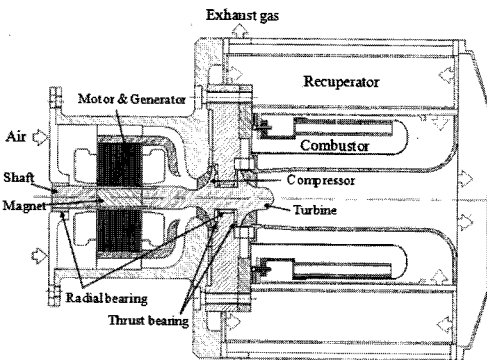


그림 1. Micro Turbine Generator(MTG)

회전축은 구조해석을 거쳐 외경이 8(mm)로 설계되었으며 이를 지지하는 베어링은 반경방향(radial) 베어링과 추력방향(thrust) 베어링 모두 에어포일 베어링(air foil bearing)으로 선정하였다. 에어포일 베어링은 공기를 윤활제로 사용하여 회전축이 회전함에 따라 형성되는 베어링 주위 공기의 압력구배에 의해 스스로 회전축을 부양시키는 베어링으로서 경량이며 소형화가 가능하다. 또한 윤활제인 공기의 점성이 기름에 비해 매우 작기 때문에 점성마찰에 의한 동력 손실이 적어 고속회전이 가능하며, 별도의 윤활유 회수장치나 실링(sealing)이 없어 구조가 간단하며 가격이 저렴한 것이 장점이다.

### 2.1 전동발전기 기본 설계 및 사양

고속전동발전기의 기본 설계사양으로는 영구자석의 감자조건, 장하분배법과 퍼미언스법을 이용하여 설계조건을 만족하는 기본 치수를 결정하였으며, 전압방정식에 의해 특성을 분석하여 결정되었다.

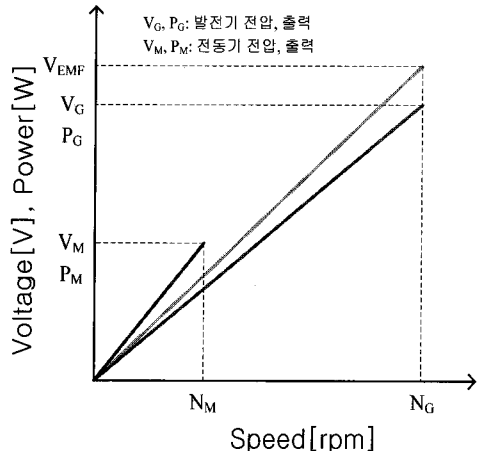
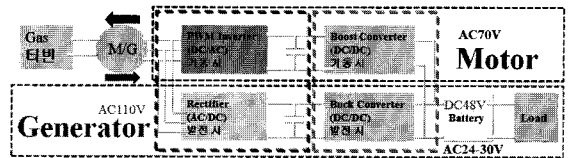


그림 2. 전원설계

그림 2는 전원설계를 나타낸다. 마이크로 터빈용 전동발전기의 구성에서 가장 중요한 요소가 전압설정이다. DC 전압부터 발전전압, 전동구동 전압이 설정되어야 구동할 수 있는 전류를 산정할 수 있고 이를 바탕으로 코어, 코일, 마그넷 사양이 결정될 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 전압을 설정하고 차후 관련기관과 협의 후 수정이 필요하게 되면 전동발전기를 수정 설계하고자 한다. DC 전원의 전압을 42(V), 전동모드의 전압을 70(V), 발전모드의 전압을 110(V)로 설정하여 설계하였다. 그림 3은 전동발전기 시스템의 구성을 나타낸다. 그림 4는 전력변환부 설계를 나타낸다. 출력은 속도의 제곱에 비례하고, 속도가 2배 증가하면 출력은 4배, 속도가 4배 증가하면 출력은 16배가 된다. 센스리스 알고리즘을 이용한 구동용 드라이버 개발도 완료하였으며 개발 드라이버의 성능비교를 위해 Sieb & Meyer의 상용 드라이버를 이용하여 성능검토를 수행하였다. 개발 드라이버와 상용드라이버를 각각 적용하여 전동발전기의 성능평가를 수행하였다.

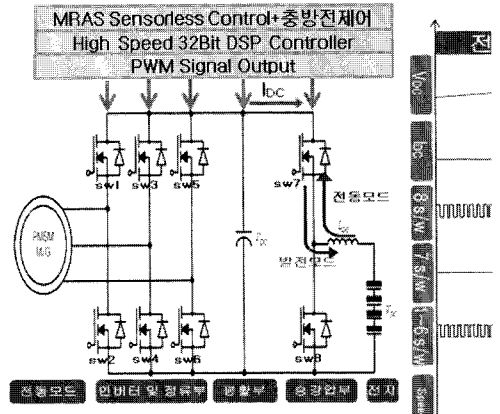


그림 4. 전력변환부 설계

## 2.2 전동모드특성

전동/발전기의 전동모드는 마이크로 터빈을 기동할 때 일시적으로 이용하는 특성이다. 전동모드에서는 입력전원을 정현파일 경우와 PSIM 회로 시뮬레이션을 통해서 얻어진 고조파 포함된 전류로 구분하여 해석을 수행하였다. 그림 5은 실리콘스틸(0.2t)과 아몰퍼스 코어(0.025t)로 각각 75장과 600장을 적층하고 스테인리스강으로 고정자 형태 아래위로 따서 압축해서 리벳팅을 한 사진을 나타낸다. 그림 6과 그림 7은 아몰퍼스 코어와 실리콘스틸의 BH곡선와 손실곡선을 나타낸다. 그림 8은 200,000(rpm), 400(W) 전동모드 일 때 고정자와 회전자의 자속선도와 자속밀도 분포를 나타낸다. 고정자 치에서 최대 1.2(T)가 발생하여 포화되지 않는 안정적인 영역에서 구동함을 확인하였다.

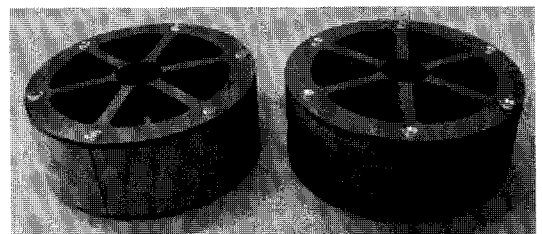


그림 5. 2605SA1 및 20PNF1500 core

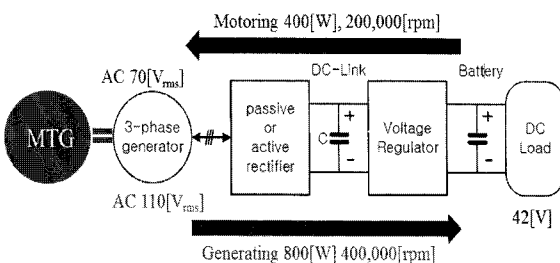
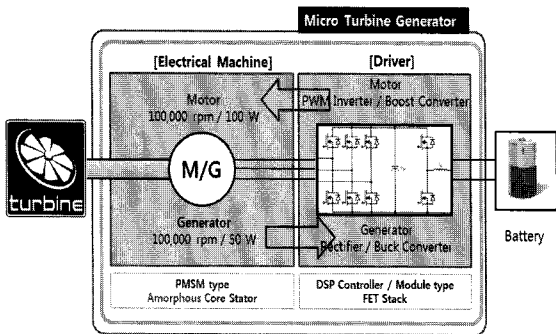


그림 3. 전동발전기 시스템의 구성

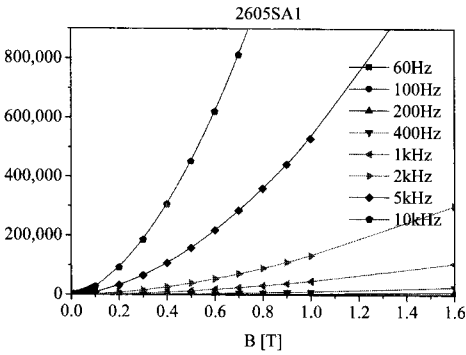
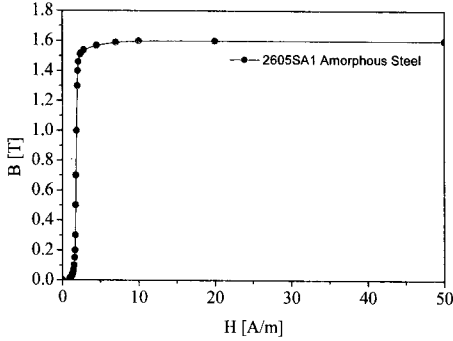


그림 6. 2605SA1 BH 커브 및 손실커브

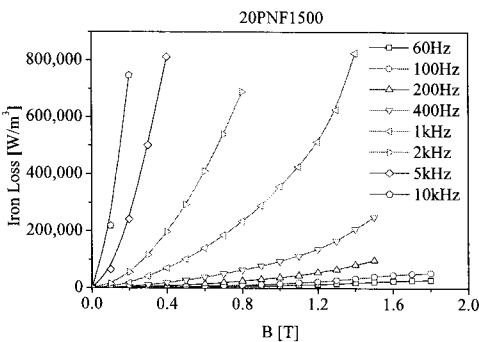
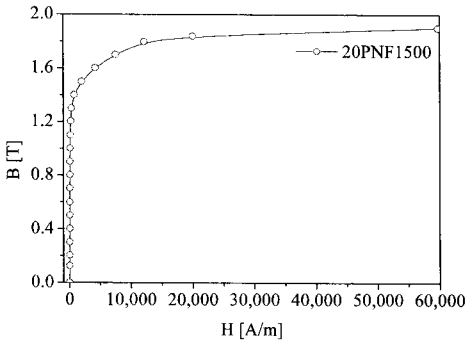


그림 7. 20PNF1500 BH 커브 및 손실커브

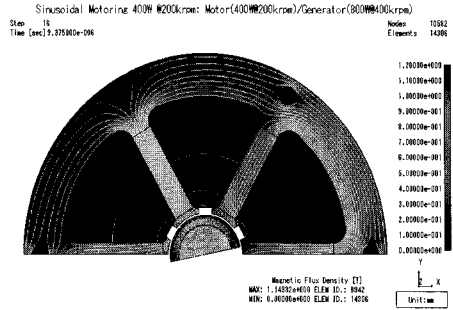


그림 8. 슬롯타입의 자속밀도분포

고속전동기에서 출력의 손실은 고정자 코어의 손실, 권선의 동손, 영구자석과 슬리브에서 발생하는 와류손 및 베어링부의 손실과 풍손으로 발생하는 마찰손 등으로 나눌 수 있다.

### 2.2.1 고정자 손실 해석

고정자 손실은 코어 손실과 동손으로 나눌 수 있다. 적층 코어에서 발생하는 코어손실은 Steinmetz 방정식을 이용하여 최대 자속밀도 상수 값( $B_m$ )으로 계산된다.

$$P_{core} = P_h + P_e + P_a \quad (1)$$

$$= K_h f B_m^n + K_e f^2 B_m^2 + K_f f^{1.5} B_m^{1.5}$$

여기서  $P_h$ ,  $P_e$ 와  $P_a$ 은 히스테리손, 와전류손 및 표유 철손을 나타낸다.  $K_h$ ,  $K_e$ ,  $K_a$ 와  $n$ 은 히스테리시스 계수, 와전류손 계수 및 표유 철손 계수를 나타낸다. Steinmetz 방정식에서 보이는 바와 같이 철손은 주파수와 자속밀도의 함수로써 주파수에 따라 그 값은 비례하거나 자승에 비례하여 증가하게 된다. 그림 9는 전동발전기가 400,000(rpm) 구동 시 입력과 출력 및 전기손실을 정리하여 나타내었다. 또한 고정자에서 발생하는 철손과 회전자(영구자석 및 슬리브)에서 발생하는 와류손을 나타내었다.

부하 종류	전압 [V]	전류 [A]	전기손실[W]					기계손 [W]	입력 [W]	출력 [W]	효율* [%]
			동손	PM손	Can손	철손	합계				
AC부하	116.937	4.624	7.282	0.257	3.429	81.323	92.291	-	893.901	801.610	89.675
DC부하	165.695	4.873	9.779	2.379	5.771	73.682	91.611	-	899.358	807.747	89.814

\* 효율은 전기적인 손실만 고려함

부하종류	철손분포 [W]		
	Hysteresis	Joule	합계
AC부하	40.606	40.717	81.323
DC부하	38.831	34.851	73.682

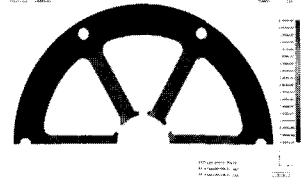
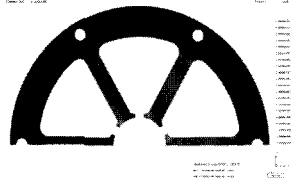
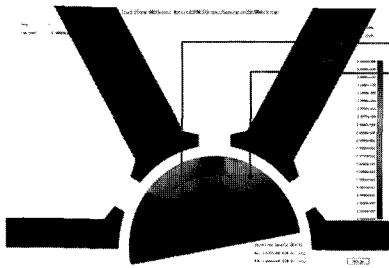


그림 9. 실리콘스틸 발전모드 특성결과(400,000(rpm) 구동 시)

부하 종류	전압 [V]	전류 [A]	전기손실[W]					기계손 [W]	입력 [W]	출력 [W]	효율* [%]
			동손	PM손	Can손	철손	합계				
AC부하	119.350	4.650	7.329	0.261	3.465	10.823	21.878	-	829.079	807.201	97.361
DC부하	167.003	4.912	9.859	2.393	5.811	13.735	31.798	-	852.336	820.538	96.269

\* 효율은 전기적인 손실만 고려함

부하종류	철손분포 [W]		
	Hysteresis	Joule	합계
AC부하	6.258	4.565	10.823
DC부하	9.744	3.991	13.735

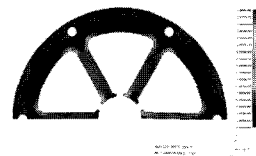
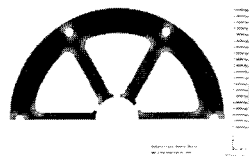
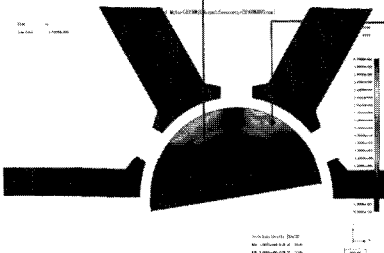


그림 10. 아몰퍼스 코어 발전모드 특성결과(400,000(rpm) 구동 시)

### 2.2.2 회전자 손실 해석

로터의 손실은 영구자석과 도전성을 띤 슬리브에서 유도된 와전류손에 의해서 발생한다. 로터의 손실은 고정자 손실에 비교해서 작은 양에도 불구하고 로터로부터 발생하는 열을 방사하기 어렵기 때문에 로터가 가열된다. 또한 이러한 열은 자석에 부분적인 감자로 이어진다. 와전류손은 아래의 Poynting의 이론을 이용하여 계산될 수 있다.

$$P_{eddy} = Re\{[E_z]_y = R_g \times [H_x]_y = R_g\} / 2 \quad (2)$$

여기서  $E_z$ 는 축방향으로 전기장 세기의 크기를 나타내며,  $H_x$ 는 접선방향 자기장 세기의 공액복소수의 크기를 나타낸다.  $R_g$ 는 슬리브의 외경을 나타낸다.

### 2.2.3 전동모드 성능시험평가

그림 11은 아몰퍼스 코어 소재의 전동모드 성능결과를 나타내며, 그림 12는 실리콘 스틸 코어 소재의 전동모드 성능결과를 나타낸다. 전동모드일 때 실리콘 스틸 코어에 비해서 아몰퍼스 코어 전동모드의 효율이 더 좋은 것을 확인하였다. 그림 11과 12는 구동 속도에 따른 입력력 파워를 계산하여 효율을 함께 나타내었으며 또한 Back-to-back 테스트 시 측정된 전동기와 발전기의 전류 전압 파형을 나타낸다.

그림 11과 12의 전류와 전압 파형에서 위에 2개의 파형은 전동기의 파형이며, 아래의 2개는 발전기의 파형을 나타낸다. 전동기의 파형에서 아몰퍼스 코어의 경우 전류와 전압파형에서 고주파 성분이 적게 발생함을 알 수 있다.

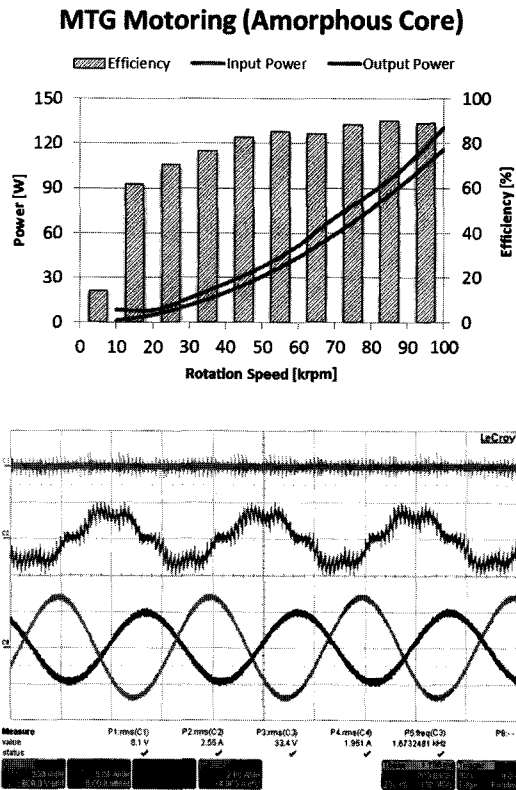


그림 11. 아몰퍼스 코어 전동모드 성능테스트 결과

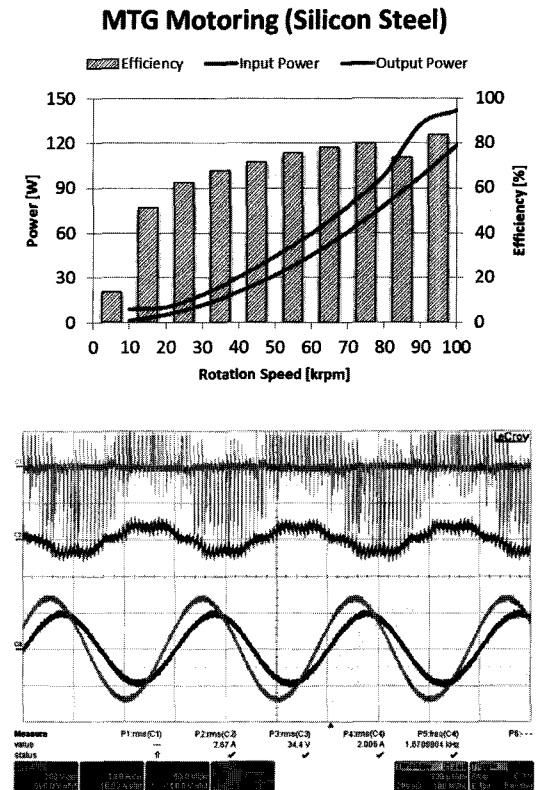


그림 12. 실리콘 스틸 코어 모터모드 성능테스트 결과

### 2.3 발전모드 특성

성능평가를 위한 Back-to-back 시험에서 전동모드(정격 400(W), 200,000(rpm)) 시험을 기준으로 분석하였다. 따라서 Back-to-back 시험에서 전동기 출력부를 400(W)로 하기 위해서 모터의 입력부는 효율 86(%)를 고려하여 465(W)가 되어야 한다. 여기서 효율은 200,000(rpm)에서 전동모드 정격의 약 10(%)에 해당하는 40(W)의 손실로 가정하였다. 그림 13은 전동모드 출력부 정격속도 특성을 나타내며 단자전압에 대한 전류와 출력을 나타내었다. 그림 14는 발전모드 출력부 정부하 특성을 나타내며 회전속도에 따른 단자전압과 전류 및 출력을 나타내었다.

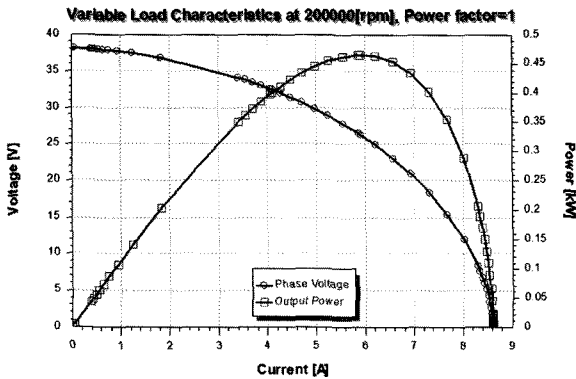


그림 13. 정속도 특성

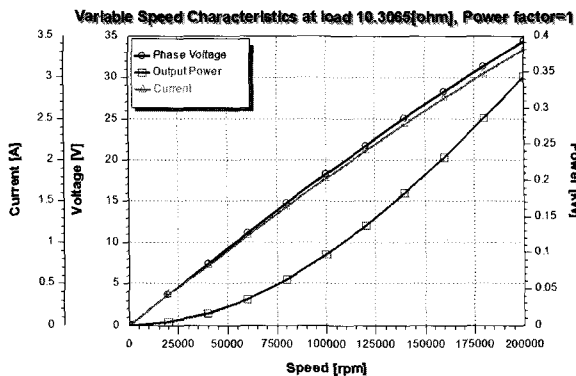


그림 14. 정부하 특성

### MTG Generating (Amorphous Core)

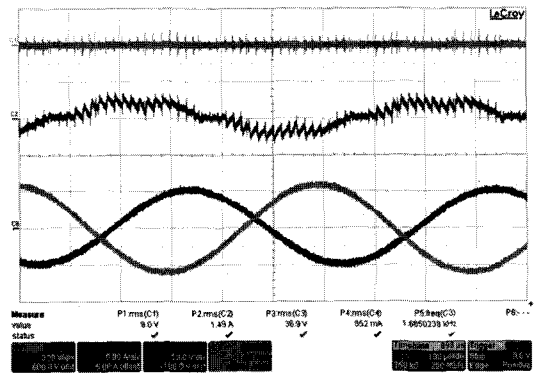
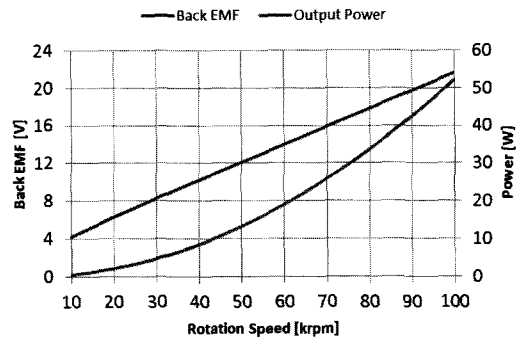
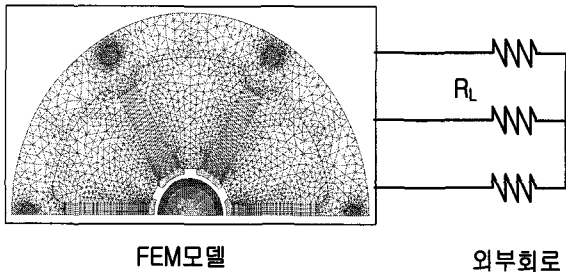


그림 15. 아몰퍼스 코어 발전모드 성능테스트 결과

전동모드의 정격운전속도인 100,000(rpm)에서 해석결과, 무부하 전압은 약 39(V), 정격 전압은 34(V), 정격출력은 400(W)로 계산되었으며, 전압 변동률은 약 12.83(%)로 나타났다. 그림 15는 아몰퍼스 코어 발전모드의 성능테스트 결과를 나타낸다.

### 2.4 AC부하 해석 및 테스트 비교

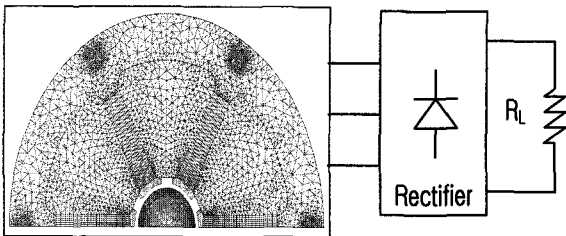
그림 16의 AC부하 해석에서는 Back-to-back 시험에서 전동모드(정격 400(W), 200,000(rpm)) 시험을 기준으로 부하저항을 선정하였다. 출력이 344(W)부터 466(W)까지 부하 저항은 사용된 저항 부하는 6.25, 10, 25(Ω)의 총 3가지 특성을 파악하였다. 그림 17의 DC부하 해석에서는 정류회로를 연결하여 출력특성을 해석하였다.



FEM모델

외부회로

그림 16. AC부하 해석



FEM모델

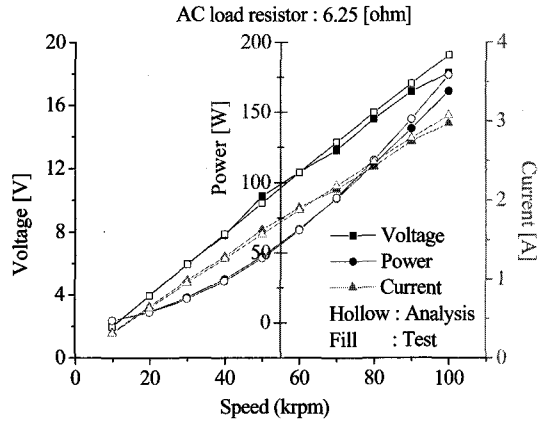
전력변환기 외부회로

그림 17. DC부하 해석

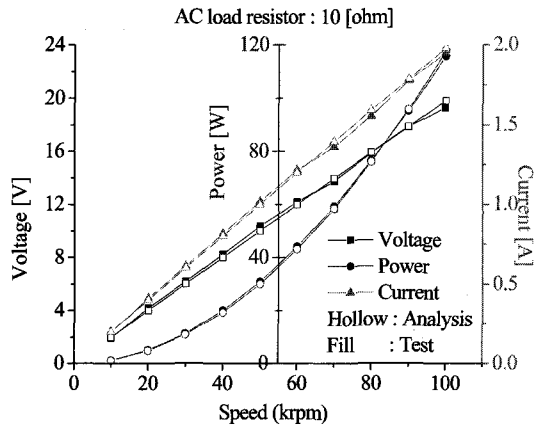
그림 18의 AC부하가 6.25( $\Omega$ )일 때는 회전속도에 따라서 발전기의 발전 전압과 전류 및 발전 출력은 거의 비슷하게 발생함을 알 수 있다. AC 저항부하가 증가할수록 10( $\Omega$ ), 25( $\Omega$ )일 경우도 비슷하게 발전 전압과 전류 및 발전 출력은 거의 비슷하게 발생하였다. 해석과 측정이 아주 잘 일치함을 알 수 있다. DC부하는 테스트는 수행하지 않고 해석결과만 실리콘 스틸과 아몰퍼스 코어일 경우 각각 그림 9와 10에 나타내었다.

## 2.5 회전자 강도해석

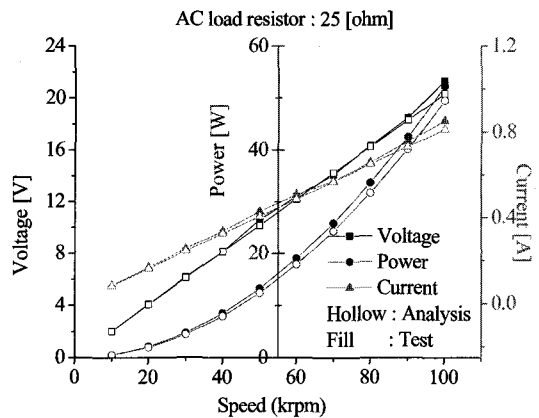
그림 19는 슬리브와 영구자석이 열박음된 모델이 고속 회전 시 발생하는 등가응력분포를 나타내었다. 영구자석은 압축에는 강하지만 인장에는 취약하다. 열박음 시 간섭량이 적당하지 않으면 초고속으로 회전 시 원심력에 의해서 영구자석이 슬리브와 이탈할 수 있으며 또한 원심력에 의한 인장으로 비산할 수 있다. 따라서 해석적으로 고속으로



(a) AC : 6.25( $\Omega$ )



(b) AC : 10( $\Omega$ )



(c) AC : 25( $\Omega$ )

그림 18. AC부하에 따른 발전모드 출력특성



회전하더라도 영구자석이 충분히 압축을 받고 있는지와 그 때 발생하는 최대응력값이 소재의 항복강도를 넘지 않는지를 파악해야 한다. 영구자석에서 발생하는 최대 압축응력은 682(MPa)로 소재의 항복강도를 고려하면 안전율이 1.17이 되고 슬리브의 최대 발생 등가응력은 807.3 (MPa)로서 안전율이 1.36이 된다. 초고속 회전 시 열박음된 로터에서 발생하는 응력이 적당한 수준으로 설계되었음을 확인할 수 있었다.

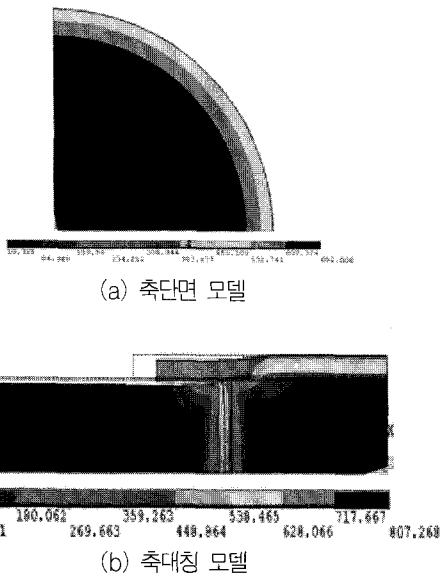


그림 19. von-Mises 등가응력분포(간섭량 0.012(mm), operating:440(krpm), 180(°C))

## 2.6 회전자 위험속도해석

그림 20는 세라믹 볼베어링으로 지지된 전동발전기 로터의 위험속도 모드와 캠벨선도를 나타낸다. 초고속 운전속도에서 안정적인 구동을 위해서는 위험속도 평가가 필요하며 충분한 분리여유가 필요하다. 따라서 회전속도에 따라서 자이로스코픽 효과를 고려하여 캠벨선도를 구하였으며 1X와 교차하는 점이 위험속도가 된다. 캠벨선도에서 1차

전방회돌림 위험속도는 약 255,777(rpm)으로 평가되었으며 운전속도와 약 27.88(%)의 분리여유가 확보되었다.

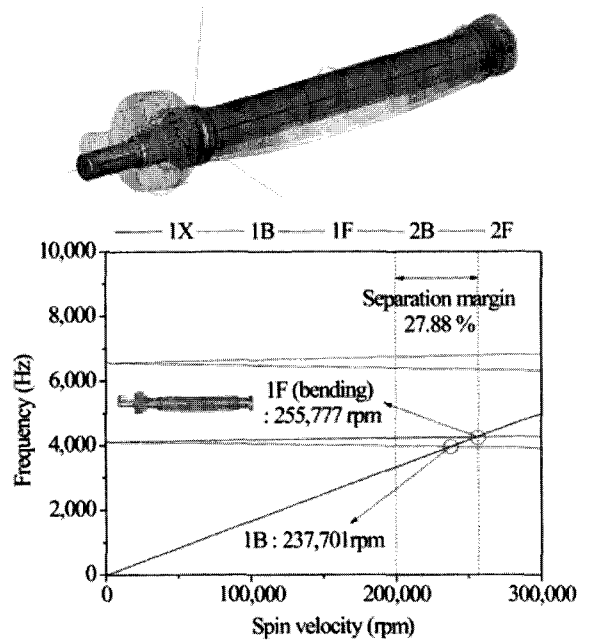


그림 20. Campbell diagram

## 2.7 back-to-back 테스트 안정성해석

고속에서는 다이내모시스템이 없기 때문에 성능 평가를 위해서는 back to back 테스트가 이용되는데, 한 대는 전동기로 사용되고 한 대는 발전기로 사용된다. 두 전동발전기를 유연커플링으로 연결하여 구동하게 되면 두 로터를 유연커플링으로 연결했을 때 축계 시스템의 위험속도평가가 반드시 필요하다. 두 로터를 연결하는 방법으로는 스플라인으로 연결해서 강체로 연결하는 방법도 있으나 이는 축정렬이 잘 이뤄져야 원활하게 구동이 된다. 스플라인으로 연결하면 축계 시스템의 위험속도가 향상되어 고속까지 전동발전테스트를 수행할 수 있다. 그러나 축직경이 작아서 스플라인으로 제작하

특집: 고속 및 고효율 회전기 기술

는 방법은 쉽지 않다. 따라서 유연커플링으로 연결된 축계시스템의 위험속도평가는 반드시 필요하며 꼭 체크해서 위험속도 회피가 되는 운전속도까지 구동해야 한다.

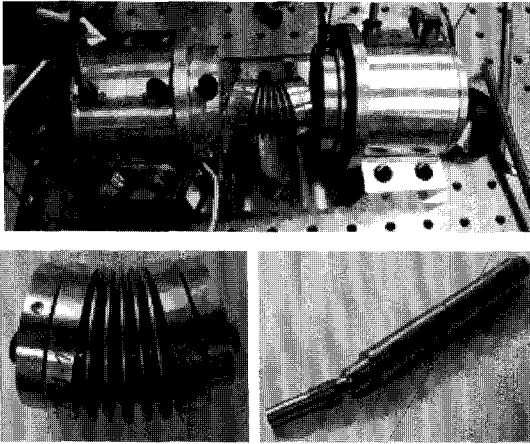


그림 21. Bending whirling mode

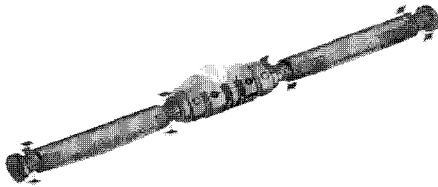


그림 22. 1차 위험모드(1st forward whirling mode)

만일 위험속도를 고려하지 않고 테스트를 하게 되면 그림 21과 같이 운전속도와 위험속도가 일치되어 위험모드가 발생하게 되며 축계시스템의 1차 휘돌림 모드로 인해 파괴된다. 그림 22는 1차 전방휘돌림 모드를 나타내며 그림 23는 캠벨선도를 나타낸다. 1X와 교차하는 점이 위험속도를 나타내며 1차 전방휘돌림 위험속도는 140,500(rpm)으로 평가되었으며 운전속도와와의 분리여유는 약 40.5(%)로 평가되었다. 따라서 100,000(rpm)까지 발전모드로 평가하기 위해서 구동하더라도 위험속도 회피와 충분한 분리여유로 유연커플링으로 연

결된 축계 시스템의 안정성에는 문제가 없는 것으로 확인하였다.

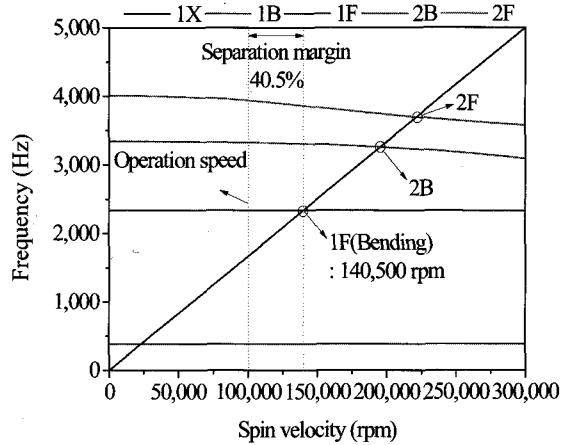


그림 23. Campbell diagram

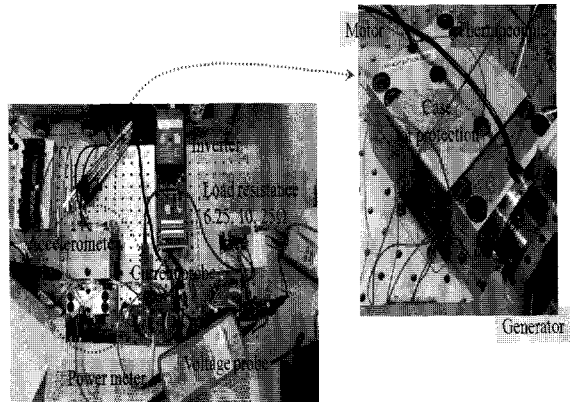
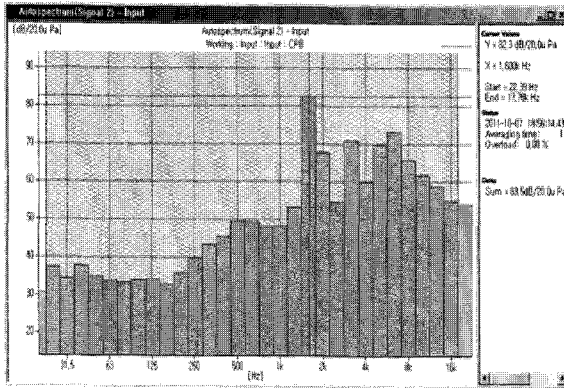
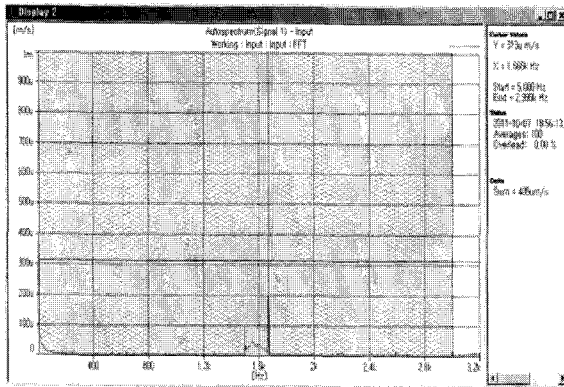


그림 24. Back-to-back test

그림 24는 back-to-back 테스트 사진을 나타내며, 그림 25는 100,000(rpm) 구동 시 전동발전기에서 발생하는 소음과 진동속도를 나타낸다. 베어링 지지 케이싱 부위에 가속도계를 부착하여 진동속도를 측정하였으며, 최대 0.5(mm/s<sub>rms</sub>)이내로 허용진동속도로 구동함을 확인하였으며, 소음의 경우 전동발전기 바로 옆에서 측정하여 가청주파수 영역내에 약 80(dB(A))이 발생하였다.



(a) 1/3 옥타브 소음분석



(b) 진동속도

그림 25. 소음진동 측정결과

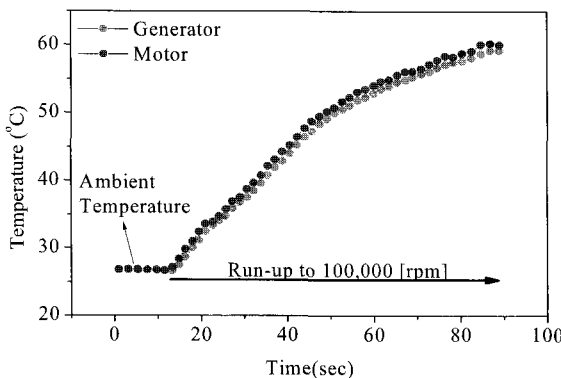


그림 26. 전동기와 발전기 온도테스트

그림 26은 back-to-back 테스트 시 전동기와 발

전기의 권선 엔드턴 부의 온도 특성을 나타낸다. 강제 냉각없이 100,000(rpm)까지 run-up 시 온도를 나타내었으며 모터부에서 최대 60(°C)까지 상승하였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 MTG 시스템의 심장과 같은 역할을 하는 전동발전기의 설계, 해석, 제작 및 평가에 대한 내용을 소개하였다. MTG 전동발전기의 회전속도에 대한 전동모드와 발전모드의 전기적인 손실을 고려한 특성을 해석을 수행하였으며, 초고속에서 발생하는 철손을 줄이기 위해서 고정자 코어로 0.025t 아몰퍼스 코어(2605SA1)를 사용하여 0.2t 실리콘 스틸(20PNF1500)과 결과를 비교하였다. AC 부하와 DC 배터리 저장장치의 전력변환을 고려한 해석도 수행하였다. 또한 기계적인 강도를 고려한 해석과 위험 속도 평가를 위한 회전체동역학 해석을 수행하여 고속에서도 안정적으로 구동할 수 있도록 하였다. 전동발전성능을 평가하기 위하여 back-to-back 테스트를 수행하였으며, 구동 시 발생하는 소음, 진동과 전동기 내부의 온도를 체크하였고, 초고속 전동발전기를 성공적으로 개발하였다.

### 참고 문헌

- [1] Isomura, K., Tanaka, S., Togo, S. and Esashi, M., "Development of high-speed micro-gas bearings for three-dimensional micro-turbo machines," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, No. 9, pp. S222~S227., 2005.
- [2] Zwysig, C., Kolar, J. W., Thaler, W. and Vohrer, M., "Design of a 100(W), 500000(rpm) Permanent-Magnet Generator for Mesoscale Gas Turbines," Industry Applications Conference, Vol. 1, pp. 253~260., 2005.
- [3] 박철훈, 최상규, 함상용, "손실을 고려한 500(W)급 마이크로 가스터빈 발전기용 전동발전기의 요구동력 및 요구효율 선정," 유체기계저널, 제14권, 제5호, pp. 24~30., 2011.
- [4] 박철훈, 최상규, 함상용, "임팩트 테스트를 이용한 초고속 회전체용 공기 포일 베어링의 동특성 계수 측정," 유체기계저널, 제14권, 제1호, pp. 5~10., 2011.
- [5] 한상조, 박준영, 박무림, 최범석, "초소형 가스 터빈 사이클

특집: 고속 및 고효율 회전기 기술

- 해석," 대한기계학회 충청지회 춘계학술대회, pp. 357~358, 2010.
- [6] Kyoung-Jin KO, Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Sung-Ho Lee, Sang-Chul Han, and Yong Bok Lee, "A core loss calculation based on magnetic field analysis considering the time harmonic of high-speed permanent magnet machine according to driving method," Electrical Machine and Systems, pp. 1143~1146, 2010.
- [7] Nakano, M., Komatani, H., and Kawamura, M., "A study on eddy-current losses in rotors of surface permanent-magnet synchronous machines," Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 42, No. 2, pp. 429~435, Mar./Apr., 2006.
- [8] D. K. Hong, B. C. Woo, and D. H. Koo, "Rotordynamics of 120000 r/min 15 kW Ultra High Speed Motor," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 6, JUNE, pp. 2831-2834., 2009.

◇ 저자 소개 ◇



**홍도관(洪道琯)**

1972년 2월 22일생. 1998년 동아대 기계공학과 졸업. 2000년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 2004년 ~현재 한국전기연구원 전기추진연구본부 전동력연구센터 선임연구원. 초고속 영구자석 전동기/발전기/대구경 고토크 영구자석동기전동기/구조 및 회전체 설계분야  
 Tel : 055-280-1395  
 Fax : 055-280-1490  
 E-mail : dkhong@keri.re.kr



**정연호(鄭然鎬)**

1968년 3월 10일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 대학원 졸업(석사). 2007년 동 대학원 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기연구원 전기추진연구본부 전동력연구센터 책임연구원. 초고속 영구자석 전동기/발전기/착자기/서보모터/전기기기 설계 분야  
 Tel : 055-280-1488  
 Fax : 055-280-1490  
 E-mail : yhjeong@keri.re.kr



**우병철(禹炳哲)**

1963년 7월 22일생. 1989년 영남대 기계공학과 졸업. 1991년 경북대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 졸업(박사). 1991년~현재 한국 전기연구원 전기추진연구본부 전동력연구센터 책임연구원. 초고속 영구자석 전동기/발전기/대구경 고토크 영구자석 동기전동기/전기기기 기계설계분야  
 Tel : 055-280-1632  
 Fax : 055-280-1490  
 E-mail : bcwoo@keri.re.kr