

초고속 전동기의 설계기술

정연호*, 구대현**

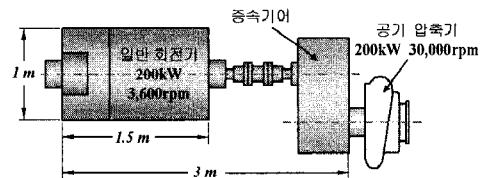
(전기연구원 전동력연구그룹 *선임연구원, **그룹장)

1. 서론

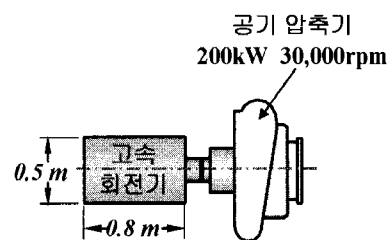
초고속 전동기와 전력변환장치로 구성된 초고속 전동기 시스템은 고속회전을 이용하여 일반 산업용 전동기 대비 소형·경량, 고출력, 고효율 성능을 얻을 수 있는 전동력 구동장치이다. 일반 산업용 전동기(유도기)의 최고 속도는 2극기의 경우 최대 3600rpm이며, 이러한 일반 산업용 전동기의 최고속도를 초과할 때 고속 전동기로 분류할 수 있다. 고속 전동기의 개발을 위한 요소기술로는 전자계 시스템 설계 및 해석, 고속용 베어링설계, 구조 및 진동 설계, 열해석 및 냉각설계, 고속스위칭 전력변환기술 및 제어기술 등으로 이들을 종합적으로 포함한 집약형 메카트로닉스기술이 요구된다.

초고속을 요구하는 기기의 동력을 기어 없이 제공한다면 기존의 단점을 보완할 뿐만 아니라 고효율, 소형·경량, 저소음, 높은 신뢰성 등을 얻을 수 있어서 근래에는 초고속 회전을 채용한 고속 구동시스템이 개발되어 기존의 동력원에 도입되고 있다. 이 분야는 장래의 신 산업분야의 국제 경쟁력을 결정짓는 핵심기술의 하나로서 선진업체들이 기술이전을 회피하고, WTO 체제 출범이후 세계적인 다국적 기업들이 후발국에의 기술제공 또는 협력관계 구축을 기피하는 대신 직접 진출하고자 하는 추세로서 특정사양의 제품이 아닌 핵심설계기술을 제공받기는 더욱 어려운 실정이다^{1, 2)}.

한편, 높은 에너지 밀도의 영구자석이 개발되고 가격이 하락함에 따라 고효율 특성을 갖는 초고속 영구자석 전동기의 개발이 가속화되고 있다. 전동기의 단위 무게당 출력은 산업용의 일반전동기 0.5 kW/kg 보다 10배 증가된 5 kW/kg까지 도달하고 있다. 그림 1은 초고속 전동기가 채용된 터보 공



a) 일반 회전기 응용



b) 고속 회전기 응용

그림 1 200kW급 공기압축기 비교

표 1 고속 회전기 응용분야

분야	활용 대상
일반 산업분야	공작기계 spindle 전동기, 진공 터보펌프, gas 압축기, 고속 연마기, 전동공구, gas turbine 발전기, 원심분리기
교통 및 수송분야	고속전철 추진 전동기, 자기부상 추진시스템, 전기자동차, HV 승용차, 직접분사엔진 자동차, 고속 전기선박
국방분야	전자포 발사장치용 보상발전기, 어뢰 추진장치, 미사일 위치제어, 전기 추진 戰車
항공 및 우주분야	가스터빈 연료펌프, gas turbine의 Start 및 Alternator, 공조기, 발전기, 비행선 추진장치
에너지분야	Fly-Wheel 에너지 저장장치, 에너지절약형 전기기기

기압축기의 크기를 기존 저속 전동기를 이용하는 시스템과 비교하여 나타내고 있다. 초고속 구동 시스템은 증속기 등의 부가장치를 갖는 기존 시스템에 요구되는 공간에 비해 약 1/10까지 줄일 수 있고, 시스템의 효율 또한 약 10%이상 높으며, 유지·보수 측면에서 우수한 특성을 갖는다.

초고속 회전기의 응용 가능한 분야를 보면 일반 산업분야, 교통 및 수송분야, 국방분야, 항공 산업분야, 에너지분야 등 표 1에 나타낸 것과 같이 다양하다^[3].

본 고에서는 고부가가치 구동시스템을 개발하기 위한 초고속 전동기의 주요 기술과 설계기술에 대해 연구자석 전동기를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 초고속 전동기의 요소기술

회전에서 출력 P는 식 (1)과 같이 전동기의 체적, 공극 자속밀도, 전류로 표현된다^[4].

$$P = k \frac{\pi^2}{2} n_s D_m^2 L_c A_m B_g \quad (1)$$

여기서, n_s , D_m , L_c , A_m , B_g , k 는 각각 초당 회전수, 고정자 내경, 회전자 길이, 선전류 밀도, 공극자속 밀도 그리고 비례상수를 나타낸다. 출력은 체적 $D_m^2 L_c$ 와 속도에 비례하므로, 고속화 시키면 속도에 비례해서 출력이 증가하여 전동기의 체적을 감소시킬 수 있다.

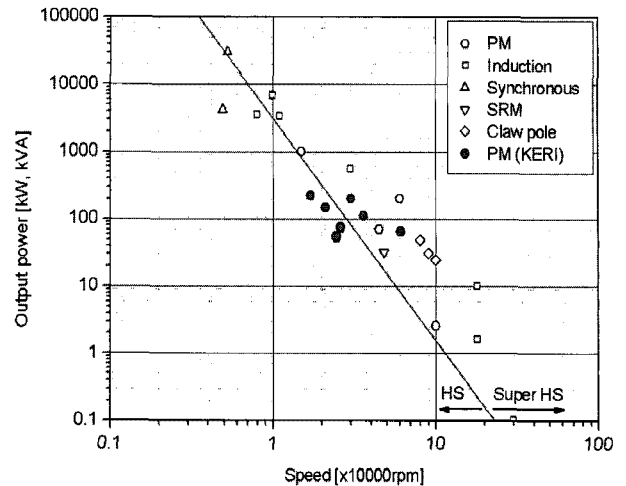


그림 2 회전속도와 출력의 관계

회전기 구성 재료의 원주속도 한계 때문에 용량이 크면 실현할 수 있는 회전속도는 줄어들고, 이와 반대로 회전 속도를 높이면 용량의 한계는 감소하게 된다. 학계에서 참조하는 고속 회전기의 회전 속도 N (kr/min)과 출력 P (kW)의 한계에 대해서는 식 (2)와 같다^[5].

$$N^{3.3} P = 6.2 \times 10^6 \quad (2)$$

식 (2)는 고속영역과 초고속 영역을 구분하는 경계선을 나타내는 것으로서 경계선의 좌측은 고속회전기, 우측은 초고속 회전기로 분류된다. 그림 2는 이러한 경계선과 이미 개발된 기기를 나타내는 것으로 기술의 발전에 따라 이러한 한계선을 보다 우측과 상측으로 높이기 위해 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다.

초고속회전기는 단위 체적 당 출력이 증가하는 장점이 있는 반면, 이에 수반하여 단위 체적당 손실 또한 증가하며 회전속도가 높을 때는 인버터에 의한 구동주파수가 높아져 철손이 증가하므로 고성능 냉각구조의 설계가 중요한 과제이다. 손실을 최소화함으로써 효율을 높일 수 있으며 또 회전자는 강력한 원심력에 견딜 수 있는 구조로 제작해야 한다. 따라서 회전자의 구조 설계가 중요한 기술이 된다. 또한 기동 혹은 운전시 온도상승 및 원심력에 의해 회전자가 원주방향으로 팽창 및 이완될 수 있으므로 강성을 보장할 수 있는 재료의 선택과 용접, 제작, 가공 등의 문제가 무엇보다 중요하지만 이에 대한 연구가 현재까지 국내에서는 미미한 상황이다. 초고속 회전기의 핵심요소별로 설명을 하면 다음과 같다.

2.1 회전자 설계

회전축은 부하기계와 직결되어 고속으로 회전하기 때문에

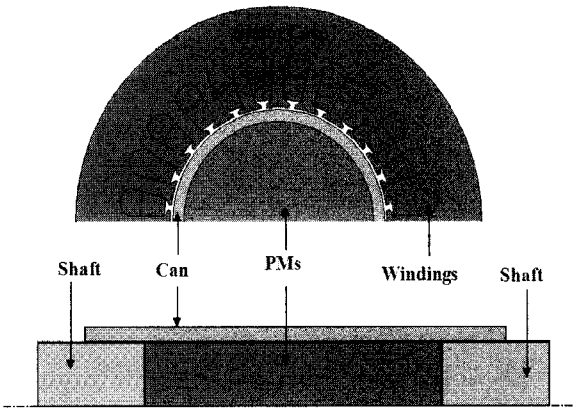
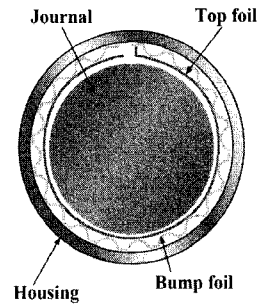
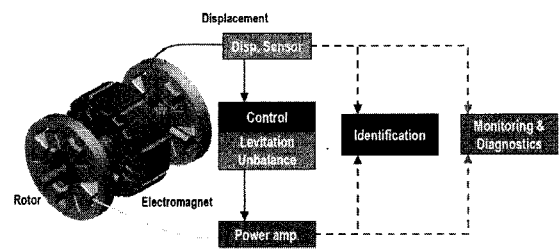


그림 3 초고속 영구자석 전동기의 단면 형상



a) Air-foil 베어링



b) 능동 제어형 자기베어링

그림 4 고속용 비접촉 베어링

안정되게 지지되어야 하며, 회전축이 위험 속도에서도 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야만 한다. 이때, 고속 회전에 의한 원심력으로부터 회전자의 각 부분에서 과도한 응력이 발생하는지의 여부를 분석하기 위해 구조해석이 필요하며, 고속회전에 따른 진동특성을 분석하기 위해 진동해석이 필요하다. 또한 회전축을 안정되게 지지하는 동시에, 유지보수 없이 기기를 안정적으로 작동시키기 위한 회전자와 축의 고정방법도 중요하다.

초고속 영구자석 회전기에서는 회전자에 부착된 영구자석이 고속회전에 의한 원심력 때문에 파손 및 비산(飛散)될 수 있으므로 회전체의 강도를 높이기 위해 영구자석의 외측에 고강도 비자성 재질의 캔을 덧씌우는데, 일반적으로 비자성 금속성 재질(Inconel718, Ti64, SUS 등)로 선정한다. 이러한 캔은 전기적인 관점에서는 공극에 해당되어 자기저항을 증가시키기 때문에 구조적인 강도와 자기회로로서의 기능을 서로 만족하도록 그 두께를 선정해야 한다. 또한, 회전자의 단위체적당 영구자석에 의한 자속량을 최대로 얻기 위해 회전자에서 자성체 코어를 제거하고 원통형 영구자석만 사용하게 되는데, 이때에 캔은 영구자석과 회전축(그림 3에서 Shaft)을 연결하는 역할도 담당하므로 진동측면도 고려하여 캔의 두께를 선정해야 한다.

그리고 회전자는 고정자의 내측에 위치해 있어 냉각에 어려움이 있으므로 열적인 특성도 고려하여 영구자석의 종류와 재질을 선정해야 하며, 일반적으로 네오디뮴(NdFeB) 계열보다는 사마륨 코발트(SmCo₅, Sm₂Co₁₇) 계열의 영구자석을 이용한다.

2.2 고속 회전용 베어링

회전부가 회전 마찰손실이나 풍손(風損), 그 외의 동력손실 등으로 인한 발열 때문에 온도가 상승하면, 회전축의 열변형 및 열팽창이 일어나고 베어링 예압이 증가한 경우에는 더욱

더 발열을 촉진하여 최악의 경우에는 베어링이 손상된다. 그러므로 회전축을 고속으로 회전시키기 위해서는 온도상승에도 충분히 견딜 수 있는 공기베어링, 또는 자기베어링 등 비접촉 베어링을 채택해야만 한다. 현재 상용화된 초고속 회전기 응용제품에는 성능과 가격경쟁력이 우수한 Air-foil베어링(공기베어링의 일종)이 일반적으로 채용되고 있으며, 중대형 출력급의 고속 회전기, 초정밀 또는 진공상태 등 제어 및 환경성에 따라 능동 제어형 자기베어링이 적용되고 있다.

능동 제어형 자기 베어링은 비교적 자유롭게 강성 및 감쇠 특성을 조절할 수 있기 때문에 회전축의 진동특성을 변화시킬 수 있으며, 각종 보상기법을 사용하여 회전축의 진동 진폭을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나 능동 제어형 자기 베어링은 귀환제어의 특징상 회전축 변위 측정기의 측정신호를 귀환 받아야만 하기 때문에 변위센서의 측정신호의 안정성 및 청결성에 큰 영향을 받으며, 제어 요소의 작동 특성에 따라 불안정 현상이 발생할 수도 있으며, 가격이 높다는 단점을 갖고 있다.

자기베어링의 강성 및 감쇠력은 작동주파수에 따라 크게 변화하며, 이를 원하는 범위로 변화시키기 위한 제어 알고리즘이 필요하다. 그리고 베어링의 제어 알고리즘의 변화를 통하여 회전축의 공진 주파수나 공진 진폭을 크게 변화시킬 수 있기 때문에, 이러한 특성을 이용하여 공진점이 없는 회전축을 모델링할 수 있으므로 이상적으로는 가장 안정된 회전축 지지용 베어링으로 기대된다.

2.3 냉각 시스템

전동기의 고속화, 대용량화 및 소형 경량화의 기술이 가능한 것은 내열성이 우수한 절연재료의 개발에 의한 것과 이와 병행하여 각 부분에 일어나는 온도상승을 허용치 이하로 제한할 수 있는 냉각설계 및 해석 방법이 발달되었기 때문이다. 전동기의 중량, 무게 등은 전자기적 특성 및 재료의 기계적 강도에 따라 차이가 있을 수 있으나, 기본적으로는 온도 상승을 제한하는 기술 여하에 따라 결정될 수가 있다.

초고속 전동기는 소형 및 경량으로서 출력밀도가 높기 때문에 열발산 면적의 감소로 인해 전동기의 냉각에서는 불리한 측면이 있다. 수십 kW급 초고속 전동기는 대체로 95% 이상의 높은 효율을 나타내지만 반대로 생각하면 5% 정도의 손실을 갖고 있기 때문에 작은 열발산 면적에서 효율적인 냉각설계가 요구되고, 특히 열전도 매개체가 공기로 단절된 회전자 냉각과 고정자 권선에서 엔드-턴 부분의 냉각이 중요하다. 일반적으로 터보기기(공기압축기/블로워)에서는 고정자와 회전자 사이의 공극으로 압축공기를 불어넣어 회전자에서 발생되는 열을 냉각시키고 있다.

2.4 제작 및 가공기술

회전자 축 및 베어링 가공시에는 허용공차를 UP급으로 가공을 하여야 한다. 회전체 진동의 주원인은 베어링에서 발생을 하게 되므로 베어링 부분에서 소음과 진동을 최대한 줄이기 위하여 베어링 하우징의 정밀가공은 필수적이다. 그리고 회전자 축의 열팽창과 수축 등 열변형율을 고려한 변형 흡수설계도 이루어져야만 한다. 또한 회전자 재질로 사용되는 높은 장력의 소재는 경도 또한 높으며, 회전자의 형태로 가공하기도 간단한 일은 아니어서, 일반적인 코어 프레스로는 가공할 수 없으므로 방전가공 등의 방법으로 가공을 해야 한다.

2.5 전력변환장치

반도체 전력변환 소자의 개발은 급속히 진행되고 있으며 사이리스터로부터 고주파, 고효율화를 겨냥하여 개발된 GTO, 파워 MOSFET, 스위칭 속도의 고속화가 가능한 IGBT에로 진화되어 왔다. 인버터 출력전압 또는 전류의 제어방식으로는 비교적 주파수가 낮은 영역에서는 PWM 제어, 높은 영역에서는 PAM 제어가 사용되고 있지만, 수십 kVA의 중·소용량까지는 1kHz 정도의 고주파 출력이 가능한 PWM 제어 인버터가 실용화되고 있다. 이후에도 고속화와 대용량화가 진행되어 PWM 제어의 적용범위가 확대될 것으로 예측되지만 점호 소호시의 스위칭 손실을 얼마나 억제할 수 있는가가 이후의 과제이다. 캐리어 주파수를 높게 하면 소음이 감소하지만 한편으로는 누설 전류가 증가하는 경향이 있다. 인버터의 정류기는 정류 과정에서 고조파를 발생시켜 입력전원의 전

압, 전류파형을 외곽 시키지만 입력전류를 전원 전압과 동상(역률 1)으로 제어하는 것과 더불어 입력전류 파형이 정현파가 되도록 PWM 제어하여 지류전압을 일정 제어하는 정현파 정류기가 제품화되고 있다.

종래, 범용 인버터는 V/f제어가 일반적이지만, 저속역의 토크 제어성, 속도 응답성, 속도 정도의 향상을 위해 벡터제어도 사용되어 최근에는 출력 전류와 전압으로부터 전동기의 회전 속도를 정확히 추정하여 고정도의 속도 제어를 행하는 센서리스 벡터제어가 실용화되고 있다. 에너지 절약에 대한 관심이 높아지면서 소자의 저손실화, 직접 고압구동 인버터에 의한 효율 상승, 최적상태에서의 운전 등에 의한 고효율화가 더욱 요구된다.

상기한 핵심 설계요소를 정리하면,

- 높은 원심력에 견딜 수 있고, 축의 공진주파수를 높일 수 있는 회전자 구조
- 낮은 철손의 자성재료 및 자기회로 구조
- 손실이 적으며, 손쉽게 유지 및 보수할 수 있는 고속용 베어링 설계기술
- 효율적이고, 간편한 냉각시스템
- 저손실 센서리스 구동 알고리즘

등으로 구분된다.

3. 초고속 영구자석 전동기의 설계

초고속 영구자석 전동기는 일반 저속의 영구자석 전동기와 비교하여 회전자의 구조에 큰 차이점이 있다. 2장의 "1) 회전자 설계"에도 서술하였지만 고속회전으로 인한 원심력으로부터 영구자석을 보호하기 위해 영구자석의 외측에 고강도비자성의 금속 캔을 부착한다. 비자성의 금속 캔은 자기적으로 공기와 동일한 특성을 나타내기 때문에 전동기의 전기적인 설계에서는 공극에 해당된다. 따라서 회전자의 구조설계가 우선적으로 수행되어야 전기적인 설계를 수행할 수 있다.

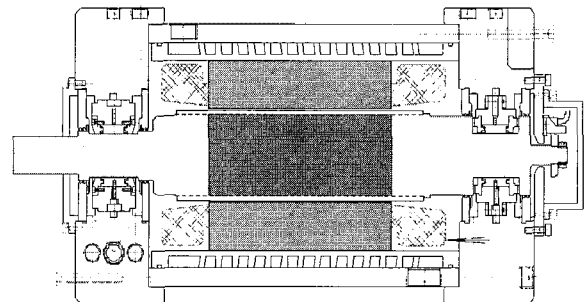


그림 5 초고속 영구자석 전동기의 구조

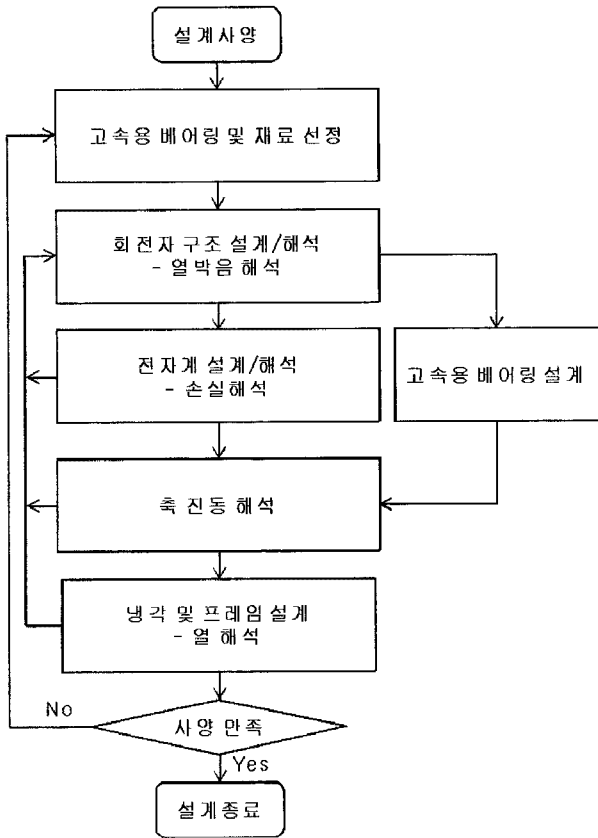


그림 6 초고속 영구자석 전동기의 설계 흐름도

저속 전동기의 설계에서는 열분석을 통한 최적설계를 제외하면 기계적인 설계요소를 특별히 고려하지 않고 전기적인 측면만 고려하여 설계를 수행해도 충분할 수 있다. 하지만, 초고속 전동기의 설계에서는 고속회전에 의한 원심력의 파파력 때문에 안전문제로 인해 기계적인 설계가 결정적인 요소로 작용한다.

그림 6에는 초고속 영구자석 전동기의 전체적인 설계 흐름도를 나타내었다. 설계 흐름도에 나타난 바와 같이 초고속 영구자석 전동기의 설계에는 전자계 설계, 구조해석, 진동해석, 열해석 등 메카트로닉스 기술이 집약되어 있다.

설계과정은 우선, 출력, 속도, 입력전압 등의 설계사양으로부터 고속용 베어링과 전동기를 구성하는 재료를 선정하는데 고속용 베어링은 응용시스템에 따라 공기베어링, 자기베어링 그리고 유체베어링 등의 비접촉 베어링을 선정할 수 있다. 고정자 철심의 재질은 일반적으로 철손이 낮은 0.2mm이하 두께의 고주파수용 전기강판을 선정하며, 고정자 권선은 내열성이 우수한 H종 이상의 절연등급을 사용한다. 권선의 저항은 표피효과로 인해 고주파수일수록 증가하므로, AC저항을 감소시키기 위해 권선 1가닥을 1.0mm이하의 코일을 병렬형태로 구성한다.

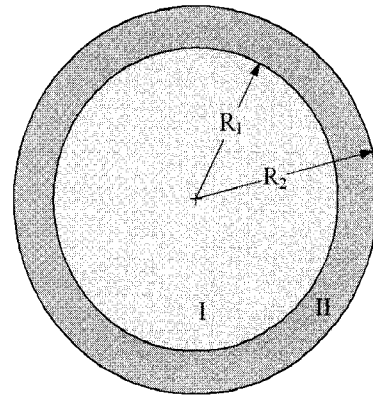


그림 7 회전자의 단면

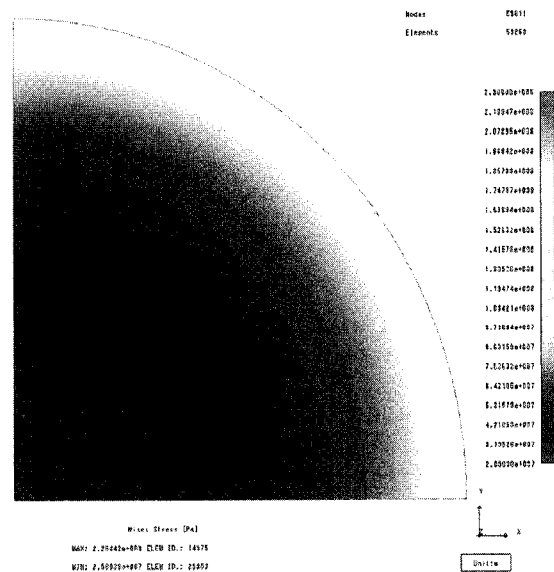


그림 8 회전자 구조해석 결과 예

초고속 영구자석 전동기의 실제적인 설계는 회전자의 구조 설계로부터 시작되며, 회전자의 구조설계는 일반 전동기의 설계와 구별되는 요소이다. 초고속 영구자석 회전기에서 회전자는 그림 7과 같이 영구자석(I영역)과 캔(II영역)으로 구성된다.

캔은 운전영역의 모든 온도조건 그리고 회전수에 따라 회전자에 발생하는 원심 응력에 대하여 항상 영구자석을 압축해야 하며, 재료의 최대 강도 이내의 응력이 발생되도록 두께를 선정해야 한다. 또한 같은 조건에서 영구자석에도 재료의 최대 강도 이내의 응력이 발생해야 한다. 즉, 회전자의 온도상승이 0℃와 운전온도에서 회전수가 정격속도와 정지상태일 때 4가지의 경우에 상기의 조건을 만족해야 한다. 그림 8은 유한요소법을 이용한 회전자의 구조해석 결과를 예시한다.

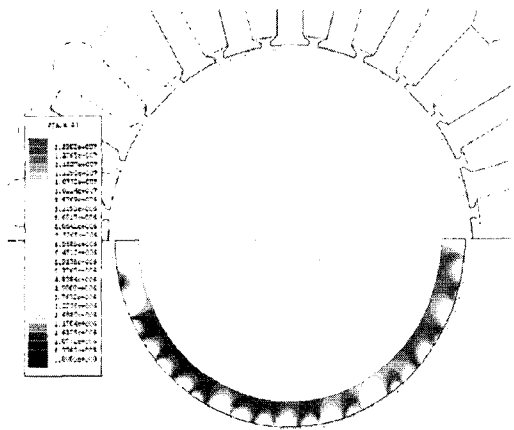


그림 9 캔에 발생하는 외전류 손실

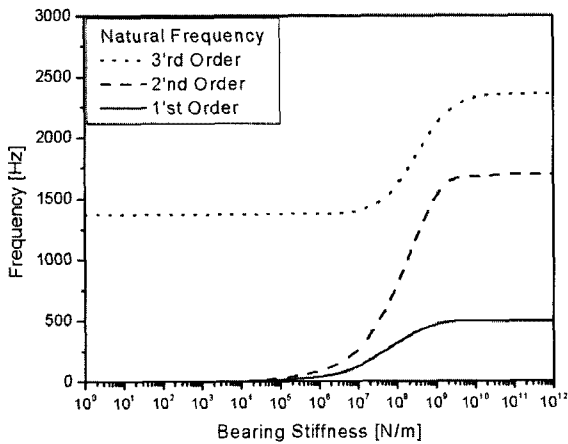


그림 10 베어링의 강성에 따른 고유진동수

회전자의 제작시 캔과 영구자석을 조립할 때는 열박음 방법을 이용하는데, 이때 캔과 영구자석 사이의 조립공차, 즉 열박음양도 고려하여 구조해석을 수행해야 한다. 열박음양은 보통 0.06~0.12mm 정도로서 토크(회전력)를 고려하여 결정한다. 캔은 영구자석과 영구자석의 좌우측에 위치한 회전축(그림 3에서 Shaft)을 연결하는 역할도 하므로 회전축에 인가되는 부하토크 보다 높은 마찰력을 갖도록 열박음양 및 캔의 길이를 선정해야 한다.

회전자의 구조설계를 통해 회전자의 단면이 결정되면 자기 회로해석을 통한 고정자의 형태 및 축방향 길이 결정, 권선사양 결정, 손실계산 등 설계사양을 만족하도록 전자계 설계를 수행한다. 이때 정격전류에 의한 권선의 전류밀도는 일반 저속기보다 낮은 값이 되도록 유지해야 하며, 출력에 따라 다르지만 압축공기를 이용한 공랭식의 경우에는 6~7A/mm², 수냉식을 병행하는 경우에는 10A/mm² 내외의 값을 갖도록 설계하고 있다.

손실 계산에서는 고정자 권선의 저항손실, 고정자 철심에 발생하는 철손실, 회전자의 캔에서 발생하는 와전류 손실을 계산하며, 이때 베어링의 마찰손실, 회전자의 풍손 등 기계적인 손실도 기계적인 출력으로 고려하여 전기적인 손실을 계산한다. 전자계 설계는 일반 저속기의 설계와 다를 바 없으므로 본 고에서 자세한 서술은 생략한다.

전자계 설계와 더불어 베어링의 설계도 동시에 수행되어야 회전자의 전체 길이를 계산할 수 있는데, 전자계 설계와 베어링의 설계로부터 전동기의 형태가 도출되면 회전자의 형태를 이용하여 진동해석을 수행한다. 회전자의 진동특성은 지지강성과 축의 형태 그리고, 질량 또는 관성의 분포에 의존하므로 적정한 치수변경에 의해 양호한 특성을 얻을 수 있다⁽⁶⁾⁽⁷⁾. 즉, 형태가 결정된 상태에서의 고유진동수는 베어링의 강성과 위치에 따라 변화되므로 베어링의 적절한 선택이 중요하다.

그림 10은 전동기의 회전축에서 발생할 것으로 예측되는 고유진동수 계산의 일례를 나타낸다. 베어링의 강성에 따라 전동기의 운전속도와 시스템의 고유진동수가 일치하면 회전자에 공진이 발생하여 최악의 경우에는 전동기의 파손에 이른다.

진동해석에서 문제가 없으면 전동기의 냉각설계와 외부 프레임 설계가 수행된다. 이때 회전자의 캔과 고정자 권선의 엔드부분에서 발생하는 열을 발산시킬 수 있는 효과적인 공기통로 및 냉각설계가 요구된다. 보통 100kW급 이상에서는 고정자의 외표면에 냉각자켓을 설치하는 수냉식 냉각방법이 병행된다.

이상의 전기적, 기계적 설계에서 문제가 없으면 설계를 종료하고 제작도면을 작성하게 되며, 각 설계 부분에서 문제가 발생하면 회전자의 구조설계 단계에서 재 설계를 수행한다.

4. 결론

초고속 회전기 및 전력변환장치 설계기술은 기술집약형 벤처기술이며, 향후 모든 산업분야에 적용가능하고 세계무역의 장벽을 극복할 수 있는 기술로서 우리나라가 세계시장 점유율을 제고하기 위해서는 필수적으로 확보하여야 한다. 짧은 기간에 고도의 경제 성장을 이룩한 대부분의 국내기술은 생산기술위주로 구성되어 후진 개발국의 강한 도전에 직면하고 있으나, 장기간의 투자가 요구되는 기초기반기술이 매우 취약하다. 특수전동기 분야가 이의 대표적인 기술분야이며, 우리나라 경제의 취약점인 부품소재 개발 대상 기술에 속하고 있다. 초고속 회전기 시스템의 설계기술이 특수 회전기의 설계에 적용되면 언급한 기초기반기술의 부족 문제가 해결 가능할 것으로 생각된다. ■

참고문헌

- [1] Kaevinen J., "Future Perspectives of Electrical Machines and Market Trends", Procc. of ICEM, pp.1-4, 2000 Espoo, Finland.
- [2] Do Hyun Kang, "Future Perspectives of High-Speed Electrical Machines and Market Trends", Spring Annual Conference 2001, KIEE EMECS, B-41, 2001.
- [3] 日經産業新聞, "특집 21세기의 신기술, 신시장조사", 1999.
- [4] J.F. Gieras, M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [5] 일본 전기학회 기술보고 제749호, ISSN 0919-9195, "超高速 드라이브 技術", 1999.
- [6] E.C Pestel, F.A Leckie, "Matrix methods in elastomechanics", McGraw-Hill Book company, 1963.
- [7] 이동주, 홍준희, 박종권 공역, "자기베어링의 기초와 응용", 시그마프레스, 2001.

〈필자 소개〉

**정연호(鄭然鎬)**

1968년 3월 10일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 전기연구원 전동력연구그룹 선임연구원.

**구대현(具大鉉)**

1963년 9월 21일생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 전기연구원 전동력연구그룹 그룹장.