

초고속 전동기의 기술동향

정 연 호

(한국전기연구원 메카트로닉스연구그룹 선임연구원)

1. 서론

고속 전동기는 중전기 분야에서의 회전기 기술(전동기/발전기)에 해당되는 기술로 산업이 고도화 첨단화됨에 따라 기어 없이 고속 회전력이 요구되는 모든 분야에 적용가능하고 특히 경량화가 요구되는 구동시스템에 필수적인 요소기술이다. 초고속 전동기 시스템은 고속 회전을 이용한 고효율의 전동력 구동장치로서 일반 산업용 전동기보다 소형·경량, 고효율, 고효율 성능을 얻을 수 있다. 일반 산업용 전동기의 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, 열해석 및 냉각설계, 구조 및 진동 설계, 고속 스위

칭 전력변환기술 및 제어기술 등으로 이들을 종합적으로 포함한 집약형 메카트로닉스기술이 요구된다.

초고속을 요구하는 기기의 동력을 기어 없이 제공한다면 기존의 단점을 보완할뿐더러 고효율, 소형·경량, 저소음, 높은 신뢰성 등을 얻을 수 있어 현재 기술 선진국에서는 초고속 회전기가 개발되어 기존의 동력원에 도입되고 있다. 이 분야는 장래의 신 산업분야의 국제 경쟁력을 결정짓는 핵심기술의 하나로서 선진업체들이 기술이전을 회피하고, WTO 체제 출범 이후 세계적인 다국적 기업들이 후발국에의 기술제공 또는 협력관계 구축을 기피하는 대신 직접 진출하고자 하는 추세로서 특정사양의 제품이 아닌 핵심설계기술을 제공받기는 더욱 어려운 실정이다.

본 고에서는 고부가가치 제품을 개발하기 위한 요소기술인 초고속 전동기의 주요기술과 국내외 개발동향을 소개하고자 한다.

2. 초고속 전동기

2.1 개요

회전기에서 출력 P는 다음 식 (1)과 같이 전동기의 체적, 공극자속밀도, 전류로 표현된다.

$$P = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n}{60} \cdot D^2 \cdot L_c \cdot A_m \cdot B_g \cdot k_w \quad (1)$$

여기서, n , D , L_c , A_m , B_g , k_w 는 각각 회전수, 고정자 지름, 회전자 길이, 선전류 밀도, 공극자속 밀도를 나타낸다. 출력은 체적 $D^2 L_c$ 와 속도에 비례하므로, 고속화 시키면 속도에 비례해서 출력이 증가하여 경량화된다.

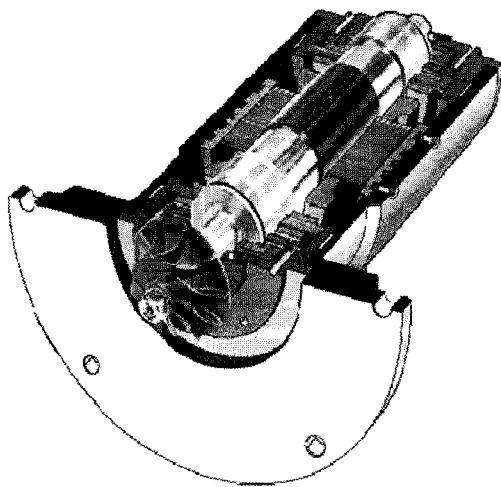


그림 1 초고속 전동기

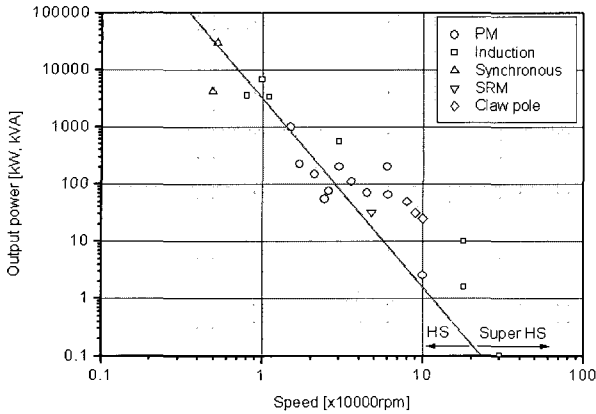
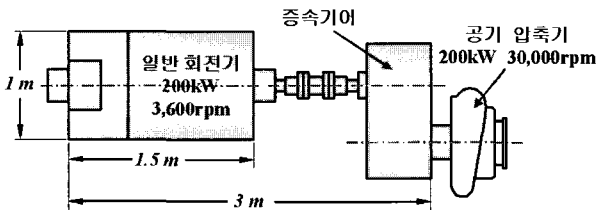
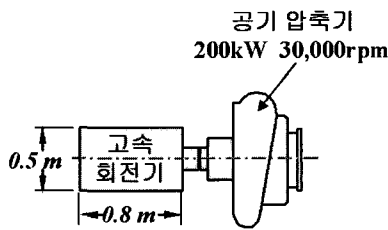


그림 2 회전속도와 출력의 한계선



(a) 일반 회전기



(b) 고속 회전기

그림 3 200kW급 공기압축기 구동장치

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

$$N^{3.3}P = 6.2 \times 10^8 \quad (2)$$

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

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 |

진행되고 있다.

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 3은 고효율 밀도를 갖는 초고속 전동기가 채용된 공기압축기의 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, 효율 또한 약 10%이상 높으며, 유지·보수 측면에서 우수한 특성을 갖는다.

초고속 회전의 응용 가능한 분야를 보면 일반 산업분야, 교통 및 수송분야, 국방분야, 항공 산업분야, 에너지분야 등 표 1에 나타낸 것과 같이 다양하다.

2.2 요소기술

초고속회전은 단위 체적 당 출력이 증가하는 장점이 있는 반면, 이에 수반하여 단위 체적 당 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. 초

고속 회전기의 핵심요소별로 설명을 하면 아래와 같다.

2.2.1 회전자 설계

회전축은 부하기계와 직결되어 고속으로 회전하기 때문에 안정되게 지지되어야 하며, 회전축이 위험 속도에서도 충분히 견딜 수 있도록 설계해야만 한다. 또한 회전축을 안정되게 지지하는 동시에, 유지보수 없이 기기를 안정적으로 작동시키기 위한 회전자와 축의 고정방법도 중요하다. 영구자석 고속 회전기에서는 회전자에 부착된 영구자석이 고속 회전에 의한 원심력 때문에 파손 및 비산(飛散)될 수 있으므로 강도를 높이기 위해 영구자석의 외측에 고강도 비자성 재질의 캔을 덧씌운다. 이러한 캔은 전기적인 관점에서는 공극에 해당되어 자기저항을 증가시키기 때문에 구조적인 강도와 자기회로로서의 기능을 서로 만족하도록 그 두께를 선정해야하며 회전축의 진동측면도 고려해야 한다. 또한 회전자는 회전의 내측에 위치해 있어 냉각에 어려움이 있으므로 열적인 특성도 고려하여 영구자석의 종류와 재질을 선정해야 하며, 일반적으로 네오디뮴(NdFeB) 계열보다는 사마륨 코발트(SmCo) 계열의 영구자석을 이용한다.

2.2.2 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 더욱더 발열을 촉진하여 최악의 경우에는 베어링이 손상된다. 그러므로 회전축을 고속으로 회전시키기 위해서는 온도 상승에도 충분히 견딜 수 있는 공기베어링, 또는 자기베

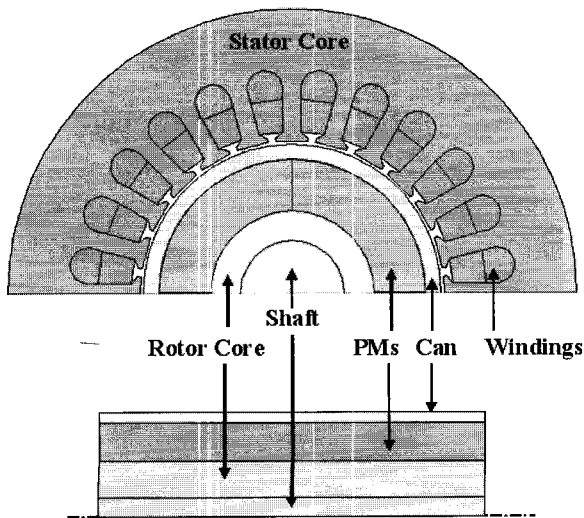


그림 4 초고속 영구자석 전동기의 단면

링 등 비접촉 베어링을 채택해야만 한다. 현재 상용화된 초고속 회전기 응용제품에는 가격경쟁력이 높은 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 감쇠특성을 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 작동특성에 따라 불안정 현상이 발생할 수도 있다는 단점을 갖고 있다.

베어링의 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.

2.2.3 냉각 장치

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

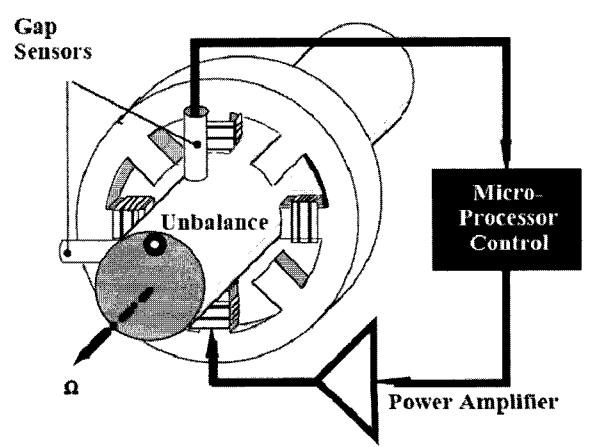


그림 5 능동 제어형 자기베어링

2.2.4 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 흡수 설계도 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.

2.2.5 전력변환장치

반도체 전력변환 소자의 개발은 급속히 진행되고 있으며 사이리스터로부터 고주파, 고효율화를 겨냥하여 개발된 GTO, 파워 MOSFET, 스위칭 속도의 고속화가 가능한 IGBT에 진화되어 왔다. 인버터 출력전압 또는 전류의 제어방식은 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 높게하면 소음이 적게되지만 한편으로는 누설 전류가 증가하는 경향이 있다. 인버터의 정류기는 정류 과정에서 고조파를 발생시켜 입력전원의 전압, 전류파형을 왜곡시키지만 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.

3. 초고속 전동기의 국내의 개발현황

3.1 국외 현황

현재 선진국에서 개발된 초고속 전동기 시스템은 15,000(rpm)에서는 1000(kW)까지, 80000(rpm)에서는 50(kW)까지, 100000 (rpm)에서는 최고 25(kW)까지의 제작 예가 알려져 있다. 유체운송용 파이프라인의 경우에는 유지보수 작업 없이 작동할 수 있어야 하므로, 기어 없이 고속회전기를 사용하고 있으며, 북미지역에서 고속전동기를 이용하여 1만 (rpm)에서 정격출력 6750(kW)의 시스템을 제작하여 사용하고 있다. 11,000(rpm)에서 3,300(kW)정격의 터보 컴프레서 역시 유도기를 이용하여 초고속시스템을 구현하고 있으며, 동기기와 전류형 인버터를 이용하여 4900(rpm)에서 4,200(kW), 고속유도기를 이용한 8,000(rpm)에서 3,500(kW)를 구현하는 제품 등이 실용화되어 있다. 고속 회전기는 미국의 Calnetix, 스위스의 EnA 등에서 상업적인 제품을 출시하고 있으며, 고속회전기용 드라이버는 선두 주자인 독일의 Sieb&Meyer를 비롯하여 Siemens, 핀란드의 Vacon 등에서 상업제품을 출시하고 있음. 고속 회전기 시스템의 상업제품 용량은 150HP, 60000rpm급까지 공기베어링을 채용하여 개발되고 있다. 표 2는 다양한 분야에서 개발된 고속 회전기를 나타낸다.

초고속 회전기의 응용분야로 최근 각광받고 있는 것이 마이크로터빈을 이용한 초소형 열병합 분산발전시스템이다. 분산전원시스템 중에서도 가스기반의 마이크로터빈을 이용한 분산전원의 응용 분야는 주거용, 상업용, 산업용에서 다양한 용도로 적용될 수 있다.

마이크로터빈, 혹은 터보형 발전기는 30kW에서 300kW급에 이르는 소형 연소엔진이다. 이 기술은 자동차나 트럭의 터보충전기나 항공기의 보조동력용, 소형비행기용 제트엔진에서 발전되었다. 최근 이 기술은 하이브리드용 자동차나 혹은 분산전원의 원동기로 개발되고 있다. 그런데 이 경우 소형, 경량화하기 위하여 100,000rpm 정도에 달하는 초고속으로 회전하며 동일 축에 영구자석 발전기를 연결하고 있다. 고속 운전시의 소음저감과 효율의 향상, 유지보수의 용이성을 위하여 일반적으로 공기베어링과 공기 냉각방식이 적용된다.

3.2 국내 현황

고속회전기의 경우 국내에서는 '90년대 초까지 고속전동기

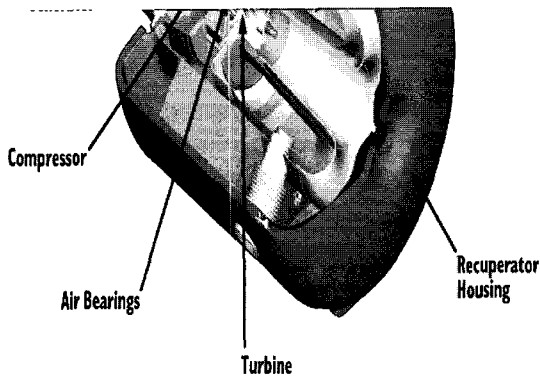


그림 6 마이크로 터빈 발전기의 구조

표 2 해외 선진국 초고속 회전기 기술개발 동향

| 분야 | 개발 기관 | 개발 사양 | 용도 |
|---------------|--|---|--|
| 일반 산업 분야 | 스위스 IBAG, 일본 FANAC 독일 Braun GmbH 미국 Calnetix 북미지역 일본 미즈비시 | 40kW 40,000rpm 150kW 55,000rpm 유도전동기 150kW, 70,000rpm 영구자석 전동기 6.7MW 10,000rpm 1kW, 145,000rpm 유도전동기 | 공작기계 compressor 구동 compressor 구동 gas 압축기 고속연마기 |
| 교통 및 수송분야 | 독일 차세대 고속철 ICE21 일본 NEXT250 독일 Continental AG 독일 Magnet-Motor 독일 Siemens | 500kW 5,000rpm 영구자석 전동기 250kW 5,000rpm 영구자석 전동기 50kW 10,000rpm 영구자석 전동기 4.3MW 5,000rpm 영구자석 전동기 20MW 150rpm 영구자석 전동기 | 추진장치 추진장치 발전기 선박추진 선박 추진 |
| 국방 분야 | 미국 국방성 독일 AEG 러시아 SibECA Co. Ltd 독일 Siemens 미국 Pacific Scientific | 100MJ 저장 영구자석 발전기 100kW 50,000rpm 영구자석전동기 150kW 60,000rpm 영구자석 발전기 5,000kW 300rpm 영구자석 전동기 4kW 30,000rpm 영구자석 전동기 | 보상 발전기 어뢰발사 장치 戰車 발전기 잠수함 추진 미사일 추진 |
| 항공 및 우주 분야 | 독일 Braun GmbH 미국 AVCON | 13kW 18,000rpm 영구자석 전동기 200kW 50,000rpm 영구자석발전기 | 공기순환 Fan gas turbine |
| 에너지 분야 | 독일 Piller 독일 Magnet-Motor 독일 FKG 중국 清華 대학 네덜란드의 Eindhoven 대학 미국 Turbo Genset Co. 미국 Calnetix | 1,000kW 영구자석전동/발전기 900kW 15,000rpm 전동/발전기 10kW 50,000rpm 전동발전기 2.5kW 60,000rpm 전동발전기 1,500kW 18,000rpm 영구자석발전기 50kW 60,000rpm 영구자석 발전기 150kW 60,000rpm 영구자석 발전기 | Fly-Wheel Fly-Wheel Fly-Wheel Fly-Wheel 발전 비상발전기 gas turbine |

요소기술인 전자계 해석기술, 일반 전동기 구동기술이 연구소와 대학에서 개발되어 왔으나, 고속전동기는 국내개발이 전혀 없이 선진 외국으로 부터의 제품을 구입하는 단계였으며, '90년대 초부터 전기자동차 개발을 시작으로 지금까지 활발히 기술개발이 진행되고 있다. 고속 회전기에 대한 활발한 연구를 진행하고 있는 한국전기연구원에서는 200kW, 30000rpm급 영구자석 전동기와 유도전동기, 65kW 60000rpm급 발전기를 정부사업으로 개발한 바 있으며, 200마력, 30000rpm급 이하의 영구자석 전동기를 산업체에 기술이전하고 있다.

최근 고속 회전기를 응용한 제품(공기압축기, 공기블로워)을 삼성테크윈, (주)한국터보, (주)뉴로스 등에서 출시하였다. 삼성테크윈은 미국의 Calnetix사에서 고속 전동기를 도입하여 150마력 70,000rpm급 이하의 터보 공기압축기를 출시하였고, (주)뉴로스에서는 한국전기연구원의 기술이전을

통해 300마력, 30,000rpm 이하의 터보 공기블로워를 국내외 시장에 출시하고 있는 상태이다. 이외에 기존 방식의 공기압축기/블로워를 생산하고 있는 업체들도 고속 전동기를 채용한 터보기기의 개발에 뛰어들고 있는 상황이다.

자기베어링을 채용한 고속 회전기는 기계연구원에서 Fly-wheel에너지저장장치 개발을 목적으로 약 10kW, 50000rpm급 내외의 영구자석 전동/발전기를 학연 협력으로 개발한 바 있으며, 전기연구원에서는 200kW, 30000rpm급 유도전동기에 자기베어링을 응용하였다. 자기베어링 시스템은 서울대, Kaist, 충남대 등의 학계에서 주로 연구를 진행하고 있으며, 전력연구원에서는 초전도를 이용한 자기베어링 시스템을 개발중에 있다.

고속회전기의 여러 가지 장점에도 불구하고 그동안 국내에서 생산이 활발하지 못했던 이유는 정밀가공 및 제작, 생산기술이 부족하며, 고속회전기에 대한 국내 연구개발 사례가 미

표 3 신기술의 세계 시장(200위)중 고속 전동기 필요 기술

| 순위 | 신기술 | 적용 대상 | 시장 규모 |
|-----|-----------------------|--------------------|-------|
| 22 | 전기 자동차 | 추진 시스템 | 190조원 |
| 25 | 직접분사엔진 자동차 | Starter/Alternator | 171조원 |
| 30 | 연료전지 자동차 | 추진 시스템 | 139조원 |
| 32 | 고속 전기선박 | 추진 시스템 | 125조원 |
| 47 | 에너지절약 전기기기 | 고효율 전동기 적용 | 74조원 |
| 65 | 고효율 열병합 발전기 | 영구자석 발전기 | 44조원 |
| 85 | 2차전지 자동차 | 추진 시스템 | 25조원 |
| 90 | 하이브리드 자동차 | 추진/에너지저장 시스템 | 24조원 |
| 113 | 강력 모터 (조정밀 가공) | 기계 가공공정 | 15조원 |
| 164 | 전동이동 기기 | 추진 시스템 | 4조원 |
| 179 | 조정밀 연마기 | 연삭 공정 | 2조원 |
| 186 | 메탄올·에타놀 자동차 | 추진 시스템 | 1조원 |
| 191 | 수소 자동차 | 추진 시스템 | 1조원 |
| 198 | Fly-Wheel 에너지 저장장치 | 회전체 에너지저장 | 1조원 |
| 총계 | 14개 제품 | | 816조원 |

미했던 점이다. 향후 고속 회전기 시스템의 개발에서 성능향상은 물론 제조비용 절감이 관건이 될 것이며, 이를 위해 최적설계가 필수적으로서 각 기기에 대한 전자기 시스템/전력 변환장치/구조설계를 최적화하는 것이 중요하다.

3.3 고속회전기 시장의 전망

현재 형성된 고속 회전기 관련 세계시장의 규모는 아직 추산되고 있지 않으며, 국내는 약 200억으로 추산된다. 미래의 시장규모에 대한 예측은 일본 日經産業新聞의 조사에서 엿볼 수 있다. 이 신문의 "특집 21세기의 신기술·신시장 조사"에서 2020년 신기술의 세계 시장 200위중 초고속 전동기를 필요로 하는 기술은 14개 제품에 시장규모는 816조원에 달하는 미래 첨단 고부가 가치 제품을 개발하기 위한 요소기술임을 나타내고 있다. 적용 시스템과 시장규모를 표 3에 나타내었다.

5. 결 론

초고속 회전기 및 전력변환장치 설계기술은 기술집약형 벤

처기술로서 향후 모든 산업분야에 적용가능하고, 성능평가기술은 국제적 규격 및 규정의 강화로 무역 장벽화 되어가고 있는 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 기초기반 기술이 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. ■

참 고 문 헌

- [1] Franklin P.W., Advanced Theory and Design of Rotating Electrical Machinery, University of Missouri, 1976, USA
- [2] 일본 전기학회 기술보고 제749호, ISSN 0919-9195, "超高速 드라이브 技術", 1999.
- [3] Kaevinen J., "Future Perspectives of Electrical Machines and Market Trends", Procc. of ICEM, 2000 Espoo, Finland, pp.1-4.
- [4] 日經産業新聞, "특집 21세기의 신기술, 신시장 조사", 1999.
- [5] Do Hyun Kang, "Future Perspectives of High-Speed Electrical Machines and Market Trends", Spring Annual Conference 2001, KIEE EMECS, B-41, 2001.

〈 저 자 소 개 〉



정연호(鄭然鎬)

1968년 3월 10일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사수료. 1996~현재 한국전기연구원 선임연구원(산업전기연구단 메카트로닉스 연구그룹).