



# 초고속 회전기 기술개발 동향 및 요소기술

강도현 / 한국전기연구원 산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹 그룹장

## 서론

고속 회전기(전동기/발전기)는 전기 에너지를 기계 에너지 혹은 기계에너지를 전기 에너지로 변환시키는 에너지변환기로 새로운 전기기기 관련 재료(예 : 희토류 영구자석, 자성재료)와 전력용 반도체 소자 및 전력전자 기술 발전에 따라 계속적으로 발전하고 있다. 특히, 회전자(rotor)에 영구자석을 부착하여 기존의 회전기보다 손실을 줄이고, 고효율, 소형·경량, 고속 및 고풍력을 얻을 수 있는 기술로 산업이 고도화 선진화됨에 따라 필수적인 기술이다. 따라서 논 논문에서는 해외 기술 선진국에서 개발되고 있는 고속 회전기, 이의 요소기술 및 시장전망을 소개하고자 한다.

현재 초고속 회전(20,000~60,000rpm)을 요구하는 동력장치는 중속의 터빈엔진이나 전동기(1,800~6,000 rpm)에 증속기어를 이용하여 고속회전을 얻고 있어 기어의 소음, 효율, 중량 등이 큰 단점이다. 초고속을 요구하는 기기의 동력원이 기어 없이 고속화 된다면 기존의 단점을 보완할 뿐더러 소형·경량, 저소음, 고신뢰성을 얻을 수 있어 현재 기술 선진국에서 고속전동기가 개발되어 기존의 동력원에 도입되고 있는 실정이다. 이의 응용 예를 보면 다음과 같다.

- 일반 산업분야 : 산업이 고도화 첨단화됨에 따라 기어 없이 고속 회전력이 요구되는 공작기계 spindle 전동기, 진공 터보펌프, gas 압축기, 고속 연마기, 전동공구, gas turbine 발전기, 원심분리기
- 교통 및 수송분야 : 수송분야는 전동기 자체가 수

- 송중량으로 계산되기 때문에 가능한 적은 중량이 요구되는 고속전철 추진 전동기, 자기부상 추진시스템, 전기자동차, HV 승용차, 고속선박
- 국방분야 : 고밀도 에너지가 필요한 전자포 발사 장치용 보상발전기, 어뢰 추진장치, 미사일 위치 제어, 전기 추진 戰車
- 항공 산업분야 : 항공 산업은 경량화가 최우선으로 요구되기 때문에 가스터빈 연료펌프, gas turbine의 Starter 및 Alternator, 공조기, 발전기, 비행선
- 에너지 분야 : Fly-Wheel 에너지 저장장치는 회전자의 기계적 회전 에너지를 전기에너지로 변환시키는 기기로 건전지에 비해 환경오염이 없고 에너지 밀도가 높으므로 차세대 에너지 저장장치로 각광받고 있다.

### 고속 회전기는

- Power electronics 기술의 진보에 따른 교류 모터 가변속 드라이브 시스템의 기능 및 성능의 향상, 이것과 연관된 스위칭 특성이 뛰어난 반도체 디바이스와 처리능력이 높은 신호처리 디바이스의 출현과 저가격화
- 철손이 적은 자성재료, 강력한 영구자석의 출현
- 베어링, 냉각, 윤활 기술의 진보, 특히 자기 베어링의 실용화
- 해석, simulation, 설계기술의 향상 등의 제 요인에 의해 뒷받침되어서 대형기기가 고속화 되고 있다.

따라서, 본 논문은 고속회전기의 특성, 요소기술 및 시장전망을 소개하고자 한다.

## 본 론

### 고속 회전기 속도-출력

회전기의 구성재료의 원주속도 한계 때문에 용량이 크면 실현할 수 있는 회전속도는 줄어들고, 역으로 회전 속도를 높이면 용량의 한계는 적게 된다. 회전 속도  $N$  (kr/min)과 출력  $P$  (kW)의 한계에 대해서는 대략 식 (1)과 같다.

$$N^{3.3} P = 6.2 \times 10^8 \quad (1)$$

그림 1은 이러한 한계선과 실제 기계의 데이터를 표시하며, 기술의 발전에 따라 이러한 한계선을 보다 우측으로, 보다 위쪽으로 가지고 가기 위하여 많은 연구 및 개발이 수행되고 있다.

회전기에서 출력  $P$ 는 다음 식(2)와 같이 전동기의 체적, 공극 자속밀도, 전류로 표현된다.

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

여기서,  $n$ ,  $D$ ,  $L_c$ ,  $A$ ,  $B_g$ ,  $k_w$ 는 각각 회전수, 고정자 지름, 회전자 길이, 선전류 밀도, 공극자속 밀도를 나타낸다. 출력은 체적  $D^2 L_c$ 과 속도에 비례한다. 즉 고속화 시키면 속도에 비례해서 출력이 증가하여 경량화 된다.

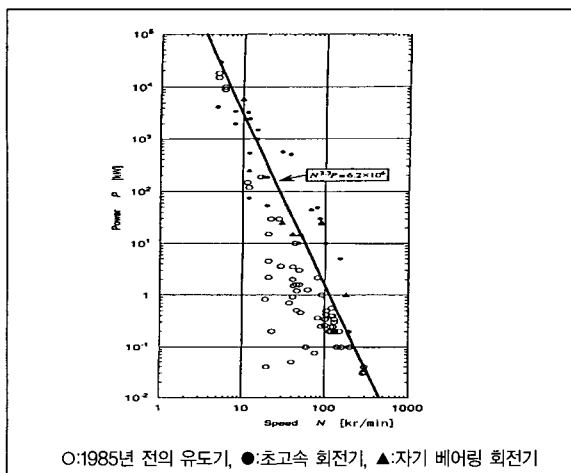


그림 1 회전속도와 출력의 한계선

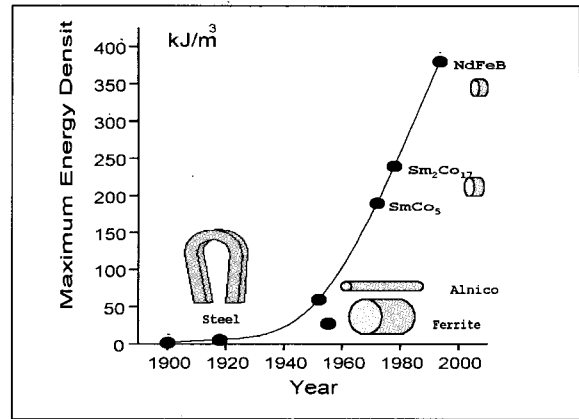


그림 2 고에너지 밀도 영구자석 개발 동향

초고속 영구자석 회전기는 그림 2와 같이 높은 에너지 밀도의 영구자석(NdFeB)이 개발되고 가격이 하락됨에 따라 기술 선진국에서 독점적으로 보유하고 있는 기술로 기어 없이 고속에서 고효율을 얻을 수 있는 장점 때문에 미국, 유럽, 일본에서 설계·제작·시험을 자체적으로 해결하고 있으며 전동기 단위 무게당 출력은 산업용의 일반전동기 0.5kW/kg보다 10배 증가된 5kW/kg까지 도달하고 있다. 실현 가능한 초고속 회전기는 사마륨 코발트 자석을 이용하여 주속(周速) 250m/s가 재료의 기계적 한계 값인 것으로 알려져 있다.

### 고속회전기 특징

그림 3은 200kW급 air-compressor에 동력을 제공

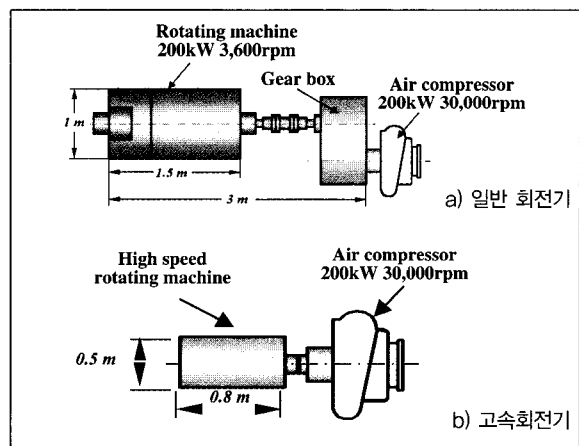


그림 3 200kW급 compressor 구동장치

표 1 해외 선진국 초고속 회전기 기술개발 동향

분야	개발 기관	개발 사양 및 종류	용도
일반 산업 분야	스위스 IBAG	40kW 40,000rpm ○	공작기계
	미국	6.7MW 10,000rpm ○	gas 압축기
	일본 미즈비시	1kW, 145,000rpm ○	고속연마기
교통 및 수송 분야	독일 ICE21	500kW 5,000rpm ○	추진장치
	일본 NEXT250	250kW 5,000rpm ●	추진장치
	독일 Magnet-Motor	4.3MW 5,000rpm ●	선박추진
국방 분야	독일 AEG	100kW 50,000rpm ●	어뢰발사장치
	러시아 SibECA	150kW 60,000rpm △	戰車 발전기
항공 및 우주 분야	미국 AVCON	200kW 50,000rpm △	gas turbine
에너지 분야	독일 Magnet-Motor	900kW 15,000rpm ▲	Fly-Wheel
	독일 FKG	10kW 50,000rpm ▲	Fly-Wheel
	네덜란드 Eindhoven	1,500kW 18,000rpm △	발전기
	미국 Turbo Genset	50kW 60,000rpm △	발전기

○:유도기 ●:영구자석 전동기 △:영구자석 발전기 ▲:영구자석 전동-발전기

하는 전동력 시스템으로 종래의 기술은 3600rpm의 일반 회전기에서 증속기를 부착하여 부하에 동력을 공급하기 위해서 1(m)×3(m)의 공간과 증속 기어가 요구되나 현재의 고속회전기를 적용하면 0.5(m)×0.8(m)의 공간에서 동력 제공이 가능하고 5% 정도의 효율 향상이 가능하다.

### 고속회전기 개발동향

표1은 일반 산업 분야, 교통 및 수송 분야, 국방 분

표 2 국내 고속 회전기 기술개발 동향

분야	개발 기관	개발 사양	용도
일반 산업 분야	한국전기연구원	200kW 10,000rpm ○	Dynamo-meter
교통 및 수송 분야	한국전기연구원	30kW 8,000rpm ●	전기자동차
	한국전기연구원	20kW 8,000rpm ○	전기자동차
	한국철도차량	1,000kW 5,000rpm ○	고속전철
	현대중공업,효성	200kW 6,000rpm ○	지하철
국방 분야	ADD	100kW 50,000rpm ●	어뢰 추진
에너지 분야	기계연구원, 전력연구원	500Wh급 ▲	Fly-Wheel 에너지 저장

○:유도기 ●:영구자석 전동기 ▲:영구자석 전동-발전기

야, 항공 및 우주 분야, 에너지 분야에서 해외 선진국 초고속 회전기 기술개발 동향으로 영구자석 회전기가 주종을 이루고 있다.

국내에서는 '90년대 초까지 영구자석 전동기 개발 시 요소기술인 전자계 해석기술, 일반 전동기 구동기술이 연구소와 대학에서 개발되어 왔으나 직접적인 고속전동기 개발이 전혀 없이 선진 외국으로부터의 제품을 구입하는 단계였으나 '90년대 초부터 전기자동차 개발을 시작으로 지금까지 활발히 다음과 같이 기술개발이 진행되고 있으며 국내 기술개발 동향은 다음과 표2와 같다.

### 고속회전기 요소기술

#### 고속회전기 종류

회전기의 작동 원리, 기본구조, 고속화를 실현하기 위한 구조상의 연구, 특징을 검토할 때 유도형 전동기와 영구자석형 전동기가 일반적으로 적용되는데 다음 표 3은 이들의 장단점을 나타내고 있다.

#### 회전자 강도

초고속 회전기의 회전 한계를 결정하는 가장 큰 요인은 회전자의 강도이다. 회전 전기기계의 중요한 구성품인 철심에는 회전시의 과대한 원심력, 기동정지시의 열 응력, 축과의 응력에 견디고, 뛰어난 자기력 특성을 가진 재료를 사용할 필요가 있다. 고 장력 전자강판 이외에 퍼멘줄과 아모퍼스 금속 등의 재료가 연구되고 있다. 또한

표 3 고속 유도기와 영구자석 동기 특징

기기의 종류	장점	단점
유도기	시동 용이 개방루프제어 가능	회전자 발열 고속시 역률이 저하.
영구자석 동기	갭이 큼 역률 양호	회전자 구조 복잡 공전시의 손실이 큼 약계자 제어 난이 자성재료 큰 응력 요구

강도를 높이기 위하여서는, 회전자를 괴상의 철심(솔리드 코어)로 구성하지만, 와전류 손의 증가가 문제가 된다. 유도기의 2차 도체에는 강도를 늘린 알루미늄 합금의 다이캐스트와 용융 단조 등이 채용되고 있지만, 초고속기의 경우 고조파 성분예 의한 2차 동손의 증가가 있기 때문에 전기저항이 적은 동을 다이캐스트로 제작하는 방법과 동 합금을 진공중 가열 가압 접합법으로 제작하는 방법도 개발되고 있다.

회전자에 영구자석을 사용한 영구자석형 동기기는 큰 원심력에 대하여 영구자석의 비산방지 때문에 경량으로 고강도의 비자성 재료인 탄소섬유강화 플라스틱 등으로 유지하는 방법이 제안되고 있다.

### 냉각방법

초고속기에는 고조파 성분예 의한 손실의 증가와 주축이 빠른 것에 의해 풍손이 증가하므로 어떻게 효율 좋게 냉각하는가가 과제가 된다. 자기냉각 펜에 의한 냉각은, 펜의 강도와 소음의 문제가 있으며, 강제 타 냉각 펜이 채용되는 경우가 많다. 또한, 고정자 원주나 코너 내부에 열 전달 계수가 높은 물 및 기름 등의 액체를 통하여, 냉각효율을 높이는 방법도 채용되고 있다. 터보 분자 펌프처럼 진공 중에 사용되는 기기에는 열전도도가 높은 절연재와 충전재를 사용한 열을 외부에 빼내는 구조가 필요하게 된다. 회전자의 냉각에 편향이 있으면, 히트 언밸런스에 의한 진동의 증가가 발생하기 때문에 회전자의 냉각구조에는 특히 주의를 기울일 필요가 있다.

### 베어링

고속회전기용의 베어링으로서는, 구름 베어링, tilting pad 베어링, 기체 베어링, 자기베어링 등이 채용되고 있다.

구름 베어링은 가격이 싸며 구조도 비교적 간단하기 때문에 일반적으로 널리 사용되고 있지만  $dn$  값의 제한과 진동 감쇠 효과가 대부분 없고, 위험 속도를 통과하여 운전하는 것이 대단히 어렵기 때문에 중·소형 용량기에 적용되고 있다.

대 용량기에는 1차의 위험속도를 넘어서 사용되는 것이 많다. 또, 속도 제어를 행하는 경우에는 오일 휠와

오일 휠 등의 불안정 영역에서의 운전을 피하는 것이 어렵고, 이것들에 대하여 유효한 tilting pad 베어링이 채용되고 있다.

기체 베어링은 윤활 매체로서 공기 및 가스를 사용하여 비접촉으로 지지하는 구조이며, 오일이 없기 때문에 깨끗하고 긴 수명, 보수 불필요 등의 특별한 장점이 있지만, 부하능력이 작고, 먼지 등의 이 물질의 침입에 약하다.

자기력을 이용하여 물체를 비접촉으로 지지하는 기술은 자기부상기술이라 불리며 회전체의 몇개의 자유도를 비접촉으로 구속하는 베어링을 자기 베어링이라 부른다. 자기 베어링은, 자기력을 이용하여 비접촉으로 회전자를 지지하고, 오일리스, 보수 불필요, 특수 환경하에서의 사용이 가능, 댄핑 특성을 제어할 수 있기 때문에 위험 속도의 통과가 가능한 많은 장점을 가지고 초고속 회전에는 적합하지만, 제어장치가 필요하므로 가격이 비싸다.

자기 베어링은 공간에 있어서 부상 물체는 그 중심에 관한 3가지의 독립된 병진 운동의 자유도와 거기에다가 3개의 독립된 회전운동의 자유도, 합하여 6자유도를 가지고 있다. 회전체를 비접촉 지지하기 위해서는, 회전축 주위의 운동을 허용하면 남은 5개의 자유도를 완전히 공간에 구속할 필요가 있다.

#### (1) 능동제어형 자기베어링

능동 제어형 자기베어링이란 회전체의 변위를 변위 센서로 검출하여, 회전체에 배치된 전자석에 흐르는 여자 전류를 조절하여 여자 흡인력을 제어함으로써 자기 부상시키는 베어링이다. 5 자유도 모두를 구속하여 회전체의 비접촉 지지를 달성하는 것은 5 자유도 제어형 자기 베어링이라 한다. 그림 4는 5 자유도 제어형 자기 베어링의 시스템 구성을 표시한다.

레이디얼 자기 베어링에는, 주로 회전체의 회전에 따라 회전자 측에 와전류 손실, 히스테리시스 손실의 철손이 발생하여 이것이 회전 손실이 되기 때문에, 이것을 최소화하는 목적에서 적층 구조의 규소강판을 사용한다.

#### (2) 수동형 자기베어링

(a) 영구자석 자기베어링 : 영구자석을 회전체, 고정

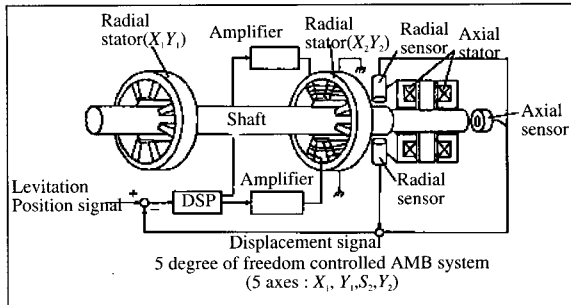


그림 4 능동제어형 자기 베어링

자 축에 대향 배치하여 서로 작용하는 흡인력, 반발력을 이용하여 비접촉 지지하는 자기베어링이다. 반발력을 이용하는 경우에는 반발 방향에는 안정되지만 그 직각방향에는 불안정하며 제어가 필요하고, 영구자석의 흡인력을 이용하는 경우에는 안내 방향은 안정되지만 흡인방향에는 불안정하기 때문에 무언가의 제어가 필요하게 된다.

(b) 초전도 자기 베어링 : 초전도현상은 도체를 극저온까지 냉각하면 전기저항이 0이 되는 현상이 되며, 초전도가 발현하는 온도를 임계온도 ( $T_c$ )라고 부른다. 최근, 액체 질소온도 (77 OK) 이상이  $T_c$ 를 가지는 고온초전도체가 출현한 것과 동시에, 이 초전도 현상에서 얻어질 수 있는 마이스너 효과와 핀닝 효과를 이용하여 회전체(영구자석)를 비접촉 지지하는 베어링이 연구되고 있다.

마이스너 효과란 초전도 상태의 초전도체가 외부자계를 완전히 배제하는 것이며, 베어링으로서 이용하는 경우에는 회전체 측에 설치된 영구자석의 반발력만을 이용하는 것이 되었다.

핀닝 효과란 초전도체 내부에 분산하여 있는 자력선이 포착(트랩)된 현상이며, 한번 자력선이 트랩되고 한계이상으로 힘을 가하지 않는 이상 이 자력선은 이동할 수 없다. 회전체 측의 영구자석 자력선이 초전도체에 놓인 경우에는 자력선 이동을 허락하지 않는 힘이 작용하지만, 이 힘은 반발력, 흡인력의 쌍방의 힘을 발생하기 때문에 영구자석은 안정된 부상력과 안내력을 가지므로 미래의 이상적인 베어링이라고 사료된다.

#### 진동, 소음

고속 회전 전기기계에는 고조파 성분에 의한 전기 진

동과 고속회전에 의한 기계음 진동이 있기 때문에 강화된 고정자의 설계와 진동 절연이 필요하게 된다. 또, 통풍 소리의 증가에 대하여는 회전자 표면을 원활하게 하여, 통풍 저항을 적게 한다.

#### 해석기술

컴퓨터와 해석 tool의 급속한 발달에 의해 초고속 회전기에도 PC 수준에 유한 요소법을 이용한 자체해석, 구조해석, 열 유체 해석이 가능하다. 다만 모델화와 경계 조건 등의 주어진 방법에 의해서는 바른 결과가 얻을 수 없는 경우도 있을 수 있기 때문에 검증이 필요하다. 효율과 역율의 특성을 예측하는 경우에는, 풍손의 정확한 추정과 코어의 와전류 손실과 자기 포화 등을 정확히 추정할 필요가 있다.

#### 전력 변환기

반도체 전력 변환기의 소자의 개발은 급속히 진행되고 있으며, 사이리스터로부터 고주파, 고 효율화를 겨냥하여 개발된 GTO, 파워 MOSFET, 스위칭 속도의 고속화가 가능한 IGBT로 진화하고 있다.

인버터 출력전압 혹은 전류의 제어방식으로서, 비교적 주파수가 낮은 영역에서는 PWM 제어, 높은 영역에서는 PAM 제어가 사용되고 있지만, 파워 소자의 발달과 더불어, 캐리어 주파수를 높게 하는 것이 가능하게 되며, 수십 kVA의 중 소 용량기까지는 1kHz 정도의 고주파 출력이 가능한 PWM 제어 인버터가 실용화되고 있다.

이후에도 고속화와 대용량화가 진행되어 PWM 제어의 적용범위가 확대한다고 생각되지만 점호 소호시의 스위칭 손실을 얼마나 억제할 수 있는가가 이후의 과제이다. 캐리어 주파수를 높게 하면, 소음이 적게되지만, 한편으로는 누설 전류가 증가하는 경향이 있기 때문에 주의가 필요하다.

인버터의 정류기는 정류하는 때에 고조파를 발생하여, 입력전원의 전압, 전류파형에 비틀림을 발생시킨 것이 문제가 되지만, 입력전류를 전원 전압과 동상(역률1)에 제어하는 것과 더불어, 입력전류 파형이 정현파가 되도록 PWM 제어하여, 직류전압을 일정 제어하는 정현파 정류기가 제품화되고 있다.

제어기

종래, 범용 인버터는 V/f 제어가 일반적이었지만, 저속역의 토크 제어성, 속도 응답성, 속도 정도의 향상을 위해, 벡터 제어도 사용되게 되어, 최근에는 출력 전류와 전압으로부터 전동기의 회전 속도를 정확히 추정하여, 고정도의 속도 제어를 행하는 속도 센스리스 벡터 제어가 실용화되고 있다.

최근에는, 에너지 절약에 대한 관심이 대단히 높아져, 소자의 저손실화, 직접 고압구동 인버터에 의한 효율 상승, 최적점(속도)에서의 운전 등에 의한 고효율화가 더욱 가속되어 가는 것이 요구된다.

고속 회전기 시장

고속 회전기 기술(전동기/발전기)은 산업이 고도화 첨단화됨에 따라 기어없이 고속 회전력이 요구되는 모든 분야에 적용가능하고 특히 경량화가 요구되는 전기 추진시스템에 필수적인 요소기술이다. 표4의 日經産業新聞 특집 21세기의 신기술·신시장 조사에서 2020년 신기술의 세계 시장 200위중 초고속 전동기를 필요로 하는 기술은 14개 제품에 시장규모는 816조원에 달하는 미래 첨단 고부가 가치 제품을 개발하기 위한 요소 기술임을 나타내고 있다.

표 4 신기술의 세계 시장(200위)중 고속 전동기 필요 기술

순위	신기술	적용 대상	2,020년 시장
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(초정밀 가공)	기계 가공공정	15조원
164	전동이동 기기	추진 시스템	4조원
179	초정밀 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

(日經産業新聞, 특집 21세기의 신기술·신시장 조사)

결론

초고속을 요구하는 기기의 동력을 기어 없이 제공한다면 기존의 단점을 보완할 뿐더러 소형·경량, 저소음, 고신뢰성을 얻을 수 있어 현재 기술 선진국에서 초고속 회전기가 개발되어 기존의 동력원에 도입되고 있는 실정이다.

이의 응용 예를 보면 일반 산업분야, 교통 및 수송분야, 국방분야, 항공 산업분야 에너지 분야 등 다양하다. 본 논문에서는 고속회전기의 속도-출력, 특징, 국내외 개발동향을 조사하였고, 요소기술로 회전자 강도, 냉각 방법, 베어링, 진동 및 소음, 해석기술, 전력 변환기, 제어기를 언급하였다. 고속 회전기의 시장성에서는 21세기의 신기술·신시장 조사에 의하면 2020년 신기술의 세계 시장 200위중 초고속 전동기를 필요로 하는 기술은 14개 제품에 시장규모는 816조원에 달하는 미래 첨단 고부가 가치 제품을 개발하기 위한 요소 기술이다.

[참고 문헌]

- [1] Franklin P. W. Advanced Theory and Design of Rotating Electrical Machinery, University of Missouri, 1976, USA.
- [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] Magnet-Motor GmbH, Starnberg, Germany, fly wheel, <http://www.magnet-motor.de/>
- [5] Kaevinen, J. "Future Perspectives of Electrical Machines and Market Trends", Procc. Of ICEM, 2000 Espoo, Finland, pp. 1-4.
- [6] 일본 전기학회 전기학회기술보고 제749호 ISSN 0919-9195, "超高速ドライブ技術", 1999