

초전도 전자기 세라믹 전력응용기술 동향



김소정 교수 (한중대학교 전기전자공학과), 이상현 교수 (선문대학교 전자공학과)



1. 서론

저온초전도체로 시작된 초전도체에 대한 열기는 1986년 스위스 IBM연구소의 Bednorz와 Muller에 의한 LaBaCuO계 산화물 초전도체가 발견된 이래 본격적인 연구가 활성화되어 고온초전도체의 시대가 열리게 되었다. 특히, 1987년 미국 휴스턴대학의 Chu와 알라바마대학의 Wu에 의한 임계온도 90 K 이상인 YBCO계 고온초전도체가 발견되면서 TV와 신문을 포함한 각종매체를 통해 ‘제3의 산업혁명’으로 부르며 그 열기가 가속화되었다. 이러한 YBCO산화물 초전도체의 발견은 고자기장 영역에서 높은 전류밀도 값의 실현이 가능해져 전력시스템 및 전기기기 분야에 상용화를 위한 실용화연구가 미국, 일본 및 유럽을 중심으로 집중적으로 진행되고 있다. 고온초전도 응용기술은 전력, 수송, 에너지, 의료, 전자 등 많은 분야에 다양하게 응용이 되고 있다. 특히, 초전도 전력응용 분야는 전력손실이 없으며 친환경적이고 대용량화가 가능하면서 무게와 부피를 경감시킬 수 있다는 이점으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다. 본고에서는 초전도체 응용기술동향에 대해 특히, 전력응용기술을 중심으로 미국, 일본 및 유럽의 초전도 선진국의 시장규모 예측 및 현재 진행되고 있는 기술에 대해 살펴보고자 한다.

표 1. 대규모 초전도 응용분야.
(출처 : CONECTUS)

Large Scale Applications of Superconductivity	
Application	Major Technical Features
Power Cables	higher current densities, smaller conductor diameters, low transmission losses,(side effect : oil free)
Current Limiters	highly non-linear super-normal-conductor transition, self-controlled current limitation
Transformers	higher current densities, smaller size, lower weight, lower losses,(side effect : oil free)
Motors / Generators	higher current densities, higher magnetic fields, smaller size, lower weight, lower losses
Magnets for RTD, Magnetic Energy Storage, Magnetic Separation,... NMR, MRI,... Magnetic Levitation Systems	higher current densities, higher & ultra-high magnetic fields gradients, smaller size, lower weight, lower losses persistent currents, ultra-high temporal field stabilities stronger levitation forces, large air gaps
Cavities for Accelerators (based on LTS sheets or coatings)	lower surface resistances, higher quality factors, higher microwave-power handling capability
Magnetic Bearings (based on HTS bulk material)	higher current densities, lower losses, stronger levitation forces, self-controlled auto-stable levitation

2. 초전도체 응용기술 시장 전망

미국 (CSAC : U.S's Council on Superconductivity for American Competitiveness)), 일본 (ISTEC : International Superconductivity TEchnology

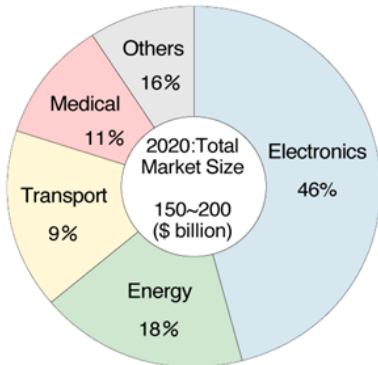


그림 1. 초전도체 세계시장 예측. (출처 : ISIS-2)

Center) 및 유럽 (CONNECTUS : Consortium of European Companies determined To Use Superconductivity)의 선진국으로 구성된 국제 초전도산업 정상회의 (ISIS : International Superconductivity Industry Summit)은 초전도체의 응용시장을 전자 분야, 에너지 분야, 수송 분야, 의료 분야 및 기타분야로 구분하고 그 시장규모가 60억불~90억불, 2020년에는 150억불~200억불 규모로 세계초전도응용시장을 예상하고 있다. 그림 1과 표 2에 세계 초전도체 응용기술 시장에 대해 나타냈다. 표 2에서 보듯이 아직까지 상용화되고 있는 응용기술 분야의 많은 부분은 저온초전도체 분야이며, 세부 응용분야로는 의료진단에 사용되는 초전도자석으로 인해 의료분야인 MRI (Magnetic resonance imaging)시장이 많은 부분을 차지하고 있다. 연구개발기술 (RTD) 분야는 꾸준히 증가되는 추세이며 고온초전도체 분야의 응용기술 약진이 두드러지게 예상되고 있다.

RTD와 MRI를 포함하는 사업 분야 외에 새로운 초전도체 물질에 기초한 신규 사업 분야가 주목받고 있으며 에너지관련 고부가가치 상업시장과 정보통신 그리고 산업공정과 수송 분야 및 신규 의료응용분야가 포함된다. 표 3에 대규모 및 전자산업 응용기술 분야의 신규 사업 분야에 대해 나타냈으며 그

표 2. 초전도체 세계시장 예측 (출처 : ISIS-2).

Market Estimation(World Wide)					
	2000 Year	2010 Year	2020 Year	Products	
Total Market Size (\$ billion)	8~12	60~90	150~200		
Marker Share of Each Field	Electronics	23%	32%	46%	Computer, Microwave device ect.
	Energy	15%	16%	18%	SMES, Generator ect.
	transport	9%	6%	9%	Maglev train, Electromagnetic propulsion ship etc.
	Medical	30%	24%	11%	Medical SQUID system, MRI, NMR
	Others	23%	22%	16%	Magnet, Magnetic shield ect.
	Total	100%	100%	100%	

표 3. 초전도체 시장규모 (단위 : 백만 유로, 출처 : CONECTUS)).

Global Market for Superconductivity (CONECTUS, 2007)		2007 Year	2010 Year	2013 Year
Business Field	RTD	660	835	955
	MRI	3,300	3,410	3,525
Total of RTD & MRI		3,960	4,245	4,480
New Large Scale Applications		65	150	410
New Electronics Applications		60	125	210
Total of Emerging New Businesses		125	275	620
Total Market		4,085	4,520	5,100
Market Shares for LTS		4,025	4,350	4,600
Market Shares for HTS		60	170	500

시장규모는 2013년 기준으로 약 6.2억 유로에 해당된다. 또한, 표 3에서 보여준 저온초전도체에 의한 응용기술 시장 규모는 2013년 기준 46억 유로, 고온초전도체에 의한 응용기술 시장규모는 5억 유로를 예측하고 있다.

3. 대규모 응용분야-전력응용기술

현대 문명사회는 전력 없이는 그 기능을



상실하게 된다. 미국, 일본 및 유럽의 선진국들의 전력수요는 꾸준히 일정하게 증가하고 있는 반면, BRICS (브라질, 러시아, 인도, 중국)를 포함하는 개발도상국은 에너지 소비의 급격한 성장을 보이고 있다. 이러한 요인은 에너지 가격을 점차적으로 상승시키고 있으며, 환경보호 차원의 에너지 사용 억제에 점차 엄격해지고 있음을 암시한다. 초전도기술은 이러한 절박한 에너지 관련 문제들을 해결할 수 있는 중요 기술 중의 하나로 인식되고 있다. 전 세계적으로 매년 약 11조 (KW-hours) 이상의 전력을 요구하고 있으며, 2010년에는 약 15조 (KW-hours) 이상의 규모로 성장할 것으로 예측하고 있다. 초전도체로 제작된 선재는 전기저항이 없다는 이점으로 인해 전력산업의 중요 핵심인자로 대두되고 있으며 모터, 송전선로, 발전기, 변압기 등 기존의 전력기기를 초전도체 선재를 이용한 전력기기로 대체함으로써 전력산업분야에 매년 기존의 도체로 인한 저항손실분 약 10억불 이상의 절감효과를 가져오고 있다. 초전도체의 대규모 응용기술 분야는 선재 (Wires)와 테이프 (Tapes) 그리고 케이블 (Cables) 및 시트 (Sheets), 기타 벌크 부분으로 크게 대별된다. 저온초전도체 (LTS) 응용기술 분야는 대부분 NbTi, Nb3Sn에 기초한 선재와 케이블에 국한되고 있으며 이러한 LTS선재들은 NMR (Nuclear magnetic resonance spectroscopy)과 MRI용 초전도 자석으로 응용 및 상용화되고 있다. 고온초전도체 (HTS)를 이용한 선재의 경우 1세대 BSCCO선재는 이미 많이 상용화가 되고 있으며, 2세대인 YBCO coated conductor선재의 경우 상용화를 위한 연구개발이 한창 진행 중에 있다. 일본의 경우 2007년 기준으로 길이 500 m 임계전류 300 (A/cm-width) 이상의 특성을 갖는 YBCO선재를 개발 중에 있으며 액체질소 온도에서 212 m 길이에 245 A를 흘리는데 성공하였다. 또한, 66 (KV), 200~300 m, 3 (KA) "3-in-One" BSCCO

표 4. 현재 진행 중인 미국의 BSCCO케이블 실증프로젝트.

연구개발프로젝트	연구개발내용
(1) Triaxial distribution cable project in Columbus	13.2 (KV), 200 m, 3 (KA)
(2) "3-in-One" cable project in Albany	34.5 (KV), 350 m, 800 A (※ BSCCO cable replaced by a 30 m YBCO cable)
(3) Transmission cable project in Long Island	138 (KV), 600 m, 2.4 (KA)

케이블 프로젝트가 현재 진행 중에 있으며 2010년 내에 요코하마 (Yokohama) 상용화 송전망에 투입할 계획을 갖고 있다. 미국의 경우 2006년 기준 연구목표는 100 m의 길이에 300 (A/cm-width)의 전류특성을 얻는 것으로, 4.4 mm의 폭과 길이 85 m를 갖는 선재에서 165 (A/cm-width)의 전류특성을 얻는 것을 포함해 206 m의 길이에 100 (A/cm-width)의 특성을 얻는데 성공하였다. 특히, 미국에서는 일본과 유럽의 초전도체 제조업체의 참여와 함께 BSCCO선재를 이용한 3개의 케이블 실증 프로젝트를 진행 중에 있으며, 그 내용을 표 4에 나타내었다. 유럽의 연구목표는 2007년 기준 250 m 길이를 갖는 YBCO선재이며 MgB2 및 새로운 초전도체 재료의 실용화 연구가 진행 중에 있다.

최근 BSCCO와 YBCO초전도체 응용을 포함한 새로운 확장된 프로젝트가 진행되고 있으며 이와 관련해서 미국의 경우 2007년도에 "HYDRA"로 명명된 YBCO선재 프로젝트가 시작되었다. 또한, 미국 에너지성 (DOE)에서는 YBCO선재와 YBCO한류기 (Fault current limiter, FCL)로 구성된 새로운 HTS선재와 한류기 실증 프로젝트를 2007년에 착수하였다. 일본의 경우, 2008년에 'YBCO 전력응용기술 5개년 계획'을 수립하여 운용중이며 REBCO를 포함한 YBCO선재를 이용한 전력케이블, SMES (Superconducting magnetic energy storage)시스템, 변압기 등의 미래 상용화를 위한 응용기술 개발과, 병행해서 YBCO선재

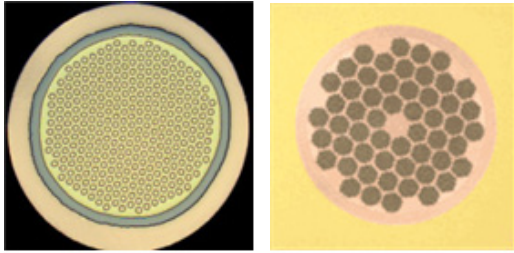


그림 2. 저온초전도체 선재의 단면 모습 (출처 : CONECTUS).

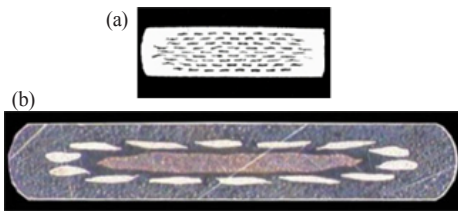


그림 3. Multi-filament BSCCO tapes (a), 그리고 MgB2 wires (b) (출처 : CONECTUS).

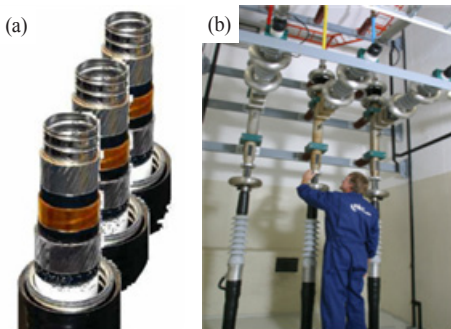


그림 4. 3상 BSCCO전력케이블의 개요 (a)와 장착된 모습 (b) (출처 : CONECTUS).

의 성능을 향상시키려는 개발목표로 연구개발이 진행되고 있다.

LTS선재를 이용한 MRI와 NMR자석은 수년에 걸쳐 성공적으로 상품화되고 있으며 최근에는 HTS자석이 상용화가 가능하게 되었다. 일본의 경우, BSCCO선재를 이용한 소형의 3T의 자기장을 갖는 MRI자석이 상품화되었으며 뉴질랜드도 이러한 HTS자석의 과학적, 산업적인 신규 HTS응용시장에 참여하고



그림 5. 2MJ LTS-SMES (출처 : CONECTUS).



그림 6. 900 Mhz 초전도체 NMR시스템 (Yokohama City Univ.).

있다. 초전도자석은 MRI와 NMR에서는 없어서는 안 될 필수불가결한 요소로 이미 시장에서 그 이점과 가치차원에서 공인되고 있다.

LTS응용기술에 부연해서 송전케이블, 한류기, 변압기 및 발전기들은 LTS선재로 제조되어 이미 성공적으로 시험, 운전이 되고 있으나 액체 헬륨 (Liq. He)에서 동작이 되기 때문에 가격 면에서 실제 장착하는데 있어 걸림돌이 되고 있다. 이러한 연유로 많은 초전도체 신규 사업들이 기술적, 경제적으로 이점이 있는 HTS에 기초한 신소재분야에 관심을 갖고 있다. 기본적으로 HTS는 대규모 응용분야에 있어 (1) 선재 및 테이프용 Bi-based HTS (BSCCO)와, (2) Melt-textured 벌크 Type 및 Coated conductor YBCO (Y-

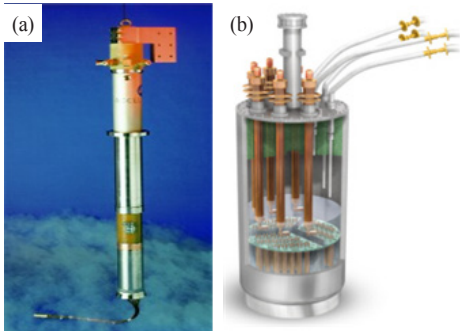


그림 7. 13 KA BSCCO 전류도입선 (a)와 Melt-cast BSCCO HTS 한류기 (b) (출처 : CONECTUS).



그림 8. 200 KW, 300 rpm YBCO (Bulk parts in the rotor, Diameter 70/148 mm) Reluctance Motor (출처 : CONECTUS).

123)의 2종류로 대별되며 최근에는 LTS와 HTS 중간의 온도영역에서 동작이 가능한 MgB2 초전도체 제조에 관심을 갖고 있다.

3. 결론

에너지는 우리사회에서 없어서는 안 될 중요 요소 중 하나로 전 세계의 수요는 계속 증가되고 있는 추세이다. 우리나라의 경우 에너지의 대부분을 석유 수입에 의존하고 있음을 인식하고 있으나 대체할 대안이 없는 것 또한 사실이다. 석유 수입의 증가와 동시에 석탄 량의 소비도 증가하고 있어 에너지 가

격을 상승시키고 있으며 이러한 것들은 많은 사회, 경제적인 문제로 새로 대두되고 있다. 특히, 지속적인 불안정한 국제 원유가격은 전 세계 경제의 심각한 요인으로 작용하고 있는 게 현실이다. 석유와 석탄의 소비 증가는 탄소방출로 인한 지구환경을 심각하게 오염시킬 뿐만 아니라 지구의 급격한 기후변화를 가져와 가뭄, 홍수, 대규모 허리케인과 같은 자연재해의 원인으로 작용해 전 세계의 관심이 집중되고 있다. 그러나 이러한 화석연료의 소비를 계속 관망할 수만은 없는 것이 화석연료의 소비로 인한 탄소방출이 지구온난화 효과의 원인이기 때문에 전 세계적으로 정치적 중요 이슈중 하나로 보각되고 있다. 화석연료 에너지 소비의 큰 비중을 차지하고 있는 것이 전기이다. 이러한 관점에서 이전보다 더 많이 효율적으로 전기에너지를 사용해야 할 의무가 있다고 보며 보다 효율적인 발전과 수송, 그리고 그 이용이 매우 절실하게 요구되고 있다.

정전은 산업적으로 큰 경제적 손실을 가져다 줄 뿐만 아니라 때로는 인간 생명을 위협하는 원인이 되기도 한다. 그래서 더더욱 신뢰성 있는 안정된 전기 공급이 중요하다고 볼 수 있다. 초전도기술은 이러한 절박한 경제, 사회적 요구를 해결할 수 있는 새로운 주요기술 중 하나로 평가되고 있다. 초전도 선재제조기술은 대규모 전력응용 분야의 필수 불가결한 기초기술로, 초전도 선재를 이용한 케이블, 변압기, SMES시스템, 한류기와 같은 초전도 전력장치들은 전기의 송전 및 배전에 있어 도심지역에 많은, 다양한 이점을 제공하고 있다. 초전도체 전력장치는 에너지 효율, 소형, 경량화 차원에서 미래 전력산업의 여러 관점에서 매우 중요한 역할을 수행할 것으로 예측하고 있으며 이러한 이유로 인해 전력기술의 연구개발은 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는 실정이다. 국내의 경우에도 한국전기연구원을 중심으로 단계별 초전도체 전력응용기기 프로젝트사업이 진





행되고 있으나 미국, 일본과 유럽의 경우처럼 활성화되고 있지 않는 것도 현실이다. 이러한 관점에서 차세대 미래 국가 중요기술 중 하나로 평가받고 있는 친환경, 저탄소 녹색성장의 선두주자인 초전도 전력기술 응용 분야에 대한 지대한 관심과 이 분야의 적극적인 투자가 절실히 요구되고 있다.

저자약력



성명 : 김소정
◆ 학력
· 1986년
인하대학교 공과대학
전기공학과 공학사
· 1990년
인하대학교 대학원
전기공학과 공학석사
· 1999년
한국과학기술원
신소재공학과 공학박사

◆ 경력
· 1986년 - 1995년 한국과학기술원
전자세라믹재료연구실 연구원
· 2000년 - 현재 한중대학교 전기전자공학과
교수



성명 : 이상헌
◆ 학력
· 1989년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과
공학사
· 1991년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과
공학석사
· 1994년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과
공학박사

◆ 경력
· 1994년 - 1997년 일본 초전도공학연구소
책임연구원
· 1994년 - 1997년 일본 東京電氣대학교 연구교수
· 1997년 - 현재 선문대학교 전자공학과 교수

