

에너지 응용분야에서의 초전도체 연구동향

기술해설 2

Research and Development of Superconductor in the Energy Application Area

장 건 익, 유 재 근, 이 호 진, 홍 계 원

(Gun-Eik Jang, Jae-Keun, You, Ho-Jin, Lee, Gye-Won, Hong)

Key Words(중요단어) : SMES(초전도 자석 에너지 저장 장치), Motor(모터), Generator(발전기, 변압기), Transformer(변압기), Fault Current Limiter(한류기)

1. 서 론

현재 초전도체로는 NbTi 과 Nb₃Sn의 저온 다심 선재가 주로 사용되고 있으며 여러가지 형태의 전도체가 상업적으로 가능하다. 이들의 임계전이온도는 10K와 18K로서 액체헬륨을 사용해야 동작이 가능하다. 하지만 1987년 이후 발견된 산화물 고온 초전도체는 77K(액체질소 비등온도) 이상의 온도에서도 탁월한 초전도 특성을 유지하고 있어 고부가가치의 응용연구가 활발히 진행 되고 있다. 특히 고온초전도체는 저온초전도체와 비교하여 고자장 하에서 대 전류를 저항 없이 흘릴 수 있는 통전 능력을 지니고 있어 에너지 저장장치(SMES)의 산업 대용량 장치에서 부터 초전도 자석, 송전선, 모터 및 발전기 등 산업 전반에 이르기 까지 그 응용범위가 광범위 하다. 대용량 전기기기의 상전도체를 임계전류밀도가 높은 고온 초전도체로 대체하는 것은 효율, 무게 및 크기의 면에서 중요한 개선을 가져올 뿐아니라 초전도체를 사용하는 것은 기존의 기술로는 실현될 수 없었던 에너지 문제의 해결점을 제시할 수 있다. 이러한 측면에서 산화물 고온초전도체가 실제 응용 시점에 도달하였을 시 산업의 발전도에 따른 부수적 영향도 훨씬 더 가속화될 것으로 예측하고 있다.

하지만 산화물 초전도체의 발전 속도는 금속계의 저온초전도체의 진전 상황과 비교하여 볼 때 그다지 빠르지 않다. 최근에는 실용화에 필수적인 통전 전류에 관한 연구가 활발히 진행되어 통전 능력인 임계전류 밀도가 상당히 향상되었으며 통전 물성의 재현성에 대한 신뢰성도 뚜렷히 증진되었다. 현재로서는 고온초전도체의 대규모 응용은 의료기용 MRI와 가속기용 초전도자석에 제한되고 있는 실정이며 터보발전기, 광물 분리용 자석, SMES, MAGLEV등의 대규모기기는 비교적 가까운 장래에 실용화될 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 초전도의 전반적인 시장 규모, 에너지 분야에서의 고온 초전도 연구 진척 내용, 마지막으로 저온 초전도체의 기술 현황을 토대로 저온을 고온초전도체로 대체 시 이에 따른 대체 효과를 비교 분석하고자 하였다. 하지만 고온초전도체에 관한 기술적 문제가 아직 많은 문제로 제기되고 있어 정확한 기술적 판단에는 아직 상당히 미흡하다고 여겨진다. 또한 초전도를 이용한 에너지 응용범위가 너무 광범위하여 본고에서는 대표적 응용분야 몇가지만 소개하고자 한다. 참고로 4K 와 77K 의 차이점을 평가할 때의 기준은 자기장과는 무관하게 임계전류밀도를 77K에서 10⁵ A/cm² 으로 가정 실시한 것이다.

2. 고온 초전도 세계시장 전망

1995년 G7 선진국으로 주 구성원 국제 초전도 산업 정상회의 (ISIS: International Superconductivity Industry Summit)와 유럽 기업 컨소시움 (CONNECTUS: Consortium of European Companies)에서는 고온초전도 세계 시장을 크게 전자, 에너지, 수송, 의료, 기타, 5 부분으로 나눠 분석하였다(표 1). 국제 산업 정상회의 분석에 따르면 2020년 세계 전체 초전도 시장은 총 약 160조원, 유럽 기업 컨소시움에서는 총 96조 원으로 예상하고 있다. 그 중 에너지 부분은 국제 산업 정상 회의에서는 전자 응용부분 다음의 높은 비율인 18% 로 28.8 조원, 유럽 기업 컨소시움에서는 가장 높은 비율인 약 37.9% 인 37 조원으로 예상하고 있다.

표 1의 통계 자료를 기준하여 볼때 초전도 전체 시장 중 에너지 분야가 차지하는 비중은 전자 산업 부분과 동일하게 높은 비율로 반영되어 있음을 알 수 있으며 2020년에는 응용분야의 대부분이 초전도에 의해 상업화 및 실용화가 될 것으로 판단 하고있다. 더욱이 위 통계 자료는 현 기술 수준

표 1. 고온초전도 세계시장 예측

Table 1. High T_c Superconductor World Market Forecast.

A. CONECTUS Market Forecast(in U.S. \$Billion)

Market Sector		Year				Market Sector		Year			
		1995	2000	2010	2020			1995	2000	2010	2020
Electronics	Computing			0.6	11.0	Medicine & Science	Science	0.1	0.2	1.0	2.0
	Passive		1.0	5.0	20.0		MRI	2.0	3.0	5.0	10.0
	Active		1.0	1.5	7.5		Acceleratos	0.05	0.2	0.5	1.0
	Subtotal		2.0	7.1	38.5		NMR	0.5	0.6	1.0	1.5
Energy	SMES		0.1	1.5	12.0	Processing Industry	Sensors	0.02	0.1	0.5	2.0
	MHD			0.7	2.0		Subtotal	2.67	4.1	8.0	16.5
	Transformers			1.5	13.0		NMR		0.1	1.0	5.0
	FCLs		0.1	3.5	17.0		Magnetic Separators		0.2	1.5	6.0
	Motors			0.1	1.0		Actuators		0.1	0.5	2.0
	Generators				0.0		Levitation			0.1	1.0
	Cables			0.1	2.0		ReactionControl			0.1	1.0
	Subtotal		0.2	7.4	47.0		Sensors			0.1	1.0
Transport	Motors			1.0	4.0	Subtotal		0.4	3.3	16.0	
	Levitation			0.1	4.0	TOTAL GLOBAL MARKET					
	Bearings				0.1						
	Actuators			0.1	1.0						
	Subtotal			0.2	6.1						

B. ISIS Market Forecast(in U.S. \$Billion)

Market Sector	Year			
	1993	2000	2010	2020
Electronics		1.84-2.76	19.8-28.8	69.0-92.0
Energy		1.2-1.8	9.6-14.4	27.0-36.0
Transport		0.72-1.08	3.6-5.4	13.5-18.0
Medical		2.4-3.6	14.4-21.6	16.5-22.0
Other		1.84-2.76	13.2-19.8	24.0-32.0
TOTAL	1.5	8-12	60-90	150-200

* Adapted from "Superconductor Week" (July. 17. 1995)

산업으로 MRI(Magnetic Resonance Imaging) 장치가 있으나 그 후 상품화 할 수 있는 분야는 전력산업에 사용 될 수 있는 SMES가 가장 가능성 있는 장치로 생각되고 있다. 일반적인 에너지 저장 방법과 비교할때 SMES가 갖는 전력계통 상의 장점은 다음과 같이 예상되고 있다.

의 진척상황에 비추어 작성된 것으로 비추어 볼때 고온초전도 임계온도(T_c)가 더욱 상온에 가까워질수록 고온초전도체에 의한 전체 시장은 훨씬 더 광범위하게 형성 될 것으로 예상하고 있다.

3. 에너지 응용분야에 따른 주 관련기술 및 연구 동향

A. 에너지 저장용(SMES) 초전도 자석

급격한 산업 발전 및 생활 수준 향상에 따른 에너지 소비량이 급격히 증가하고 있다. 이에 대한 에너지의 효율적 관리를 위한 전기에너지 저장장치(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)에 대한 많은 관심이 기술기 시작했다. 지금까지 초전도체를 상품화할 수 있는 분야는 의료

- 1) 에너지 저장은 수천 MWh급 까지 95% 효율이 예상되고 부하관리 면이나 대용량 부하 손실 경우에도 충분한 역할을 담당한다.
- 2) 부하 추종 특성이 양호하여 경직성 발전소의 일정 출력 운전을 가능케 함으로써 전체 설비 운용의 효율을 향상시킨다.
- 3) 계통의 과도현상에 대해서 SMES는 저주파 전력 동요 현상을 억제하고 주파수를 안정화 시킬 수 있는 제어 능력을 갖는다.
- 4) 무효 전력 제어 기능이 양호하여 송전선로에서의 안정도와 전송 능력 증가에 도움을 준다.
- 5) 정전 시에도 SMES는 발전기 계통 도움 없이 송전할 수 있다.
- 6) 효율이 높은 전원으로 에너지를 저장 함으로써 석유나 가스발전소의 사용을 감소시킬 수 있다.
- 7) SMES는 수요의 변동과 급격한 변화를 흡수 함

으로써 발전기가 가장 효율적인 점에서 운전하도록 하여 운전의 지속성을 증가 시킨다.

- 8) 재생식 발전소의 송전선로 설비 투자를 감소시킬 수 있다.
- 9) 재생식 발전소의 운전 기회를 감소 시킴으로써 연료 절감은 물론 탄산가스나 유황질소 화합물 등의 공해 유해물질을 감소시켜 환경보호에 기여한다.

SMES에 의한 전력저장 원리는 폐쇄된 초전도 회로에서 직류 전류가 무한히 흐른다는 사실에 바탕을 두고 있다. 즉 초전도코일을 액체헬륨으로 냉각시키고 소정의 전류를 통한 후 전기저항이 제로인 초전도 스위치 양단을 연결시키면 코일과 스위치와의 폐회로가 형성되어 계속 전류가 흐르게 된다. 즉 코일과 스위치의 저항을 R, 인덕턴스를 L이라 하면 전류 감소 시 정수는 다음식으로 표시된다.

$$\tau = L/R \quad (1)$$

여기서 R이 제로이면 전류 감소 시 정수는 무한대가 된다. 즉 전원을 코일로부터 분리한 후에도 코일의 전류는 감소되지 않고 계속 흐른다는 것을 의미한다. 코일에 흐르는 전류가 I_0 , 인덕턴스가 L_0 라면 코일에는 다음식과 같은 자기에너지가 축적되며 전류가 감소되지 않는다면 이 에너지는 그대로 유지하게 된다.

$$E = \frac{1}{2} L_0 I_0^2 \quad (2)$$

이 에너지는 직류 저장코일과 교류 전력계통간의 연결체인 트리스터(thyristor) 변환기에 의하여 이루어지며 저장장치의 능력을 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. 4000-5000 MWh급의 저장용량을 갖는 1000 MWh급 시스템 경우 낮시간 사용을 위한 저장효율은 93-95% 정도로 예상하고 있으며 이는 양수발전의 75% 정도보다 훨씬 높은 값이다.

만일 에너지 저장용 초전도 자석에 있어서 저온 초전도 선재를 만일 고온초전도 선재로 대체한다면 액체헬륨의 액체질소 대체에 의한 전체시설비는 약 10% 정도 감소할 것으로 예상되지만 이 절약분은 대부분 77 K에서 초전도체의 전자적 및 기계적 특성 저하에 의하여 상쇄될 것으로 예상된다. 구체적으로 볼때 SMES에 있어서 고온초전도체의 현 응용 부분은 전류도입선, 저장용 전선에 국한된다고 볼 수 있다. 하지만 긍정적인 면으로는 주간

저장시의 저장효율이 90% 정도로 상승할 것이라는 점이다. 대규모 용량의 전력기기 라는 측면에서 저온에서 고온초전도 대체 측면은 아직까지는 이르다고 할 수 있다.

연구 동향을 본다면 현재 가장 큰 장치로는 영국의 National Grid Co가 Dinorwig 지역에 설치한 8,000 MWh급 수용 장치이다. 연구가 가장 활발한 미국의 경우 1970년대 초 Wisconsin 대학에서 SMES에 관한 연구를 본격적으로 시작하였으며 국립 연구소인 LANS(Los Alamos National Laboratory)가 그 뒤를 따랐다. 기업이 SMES 개발에 참여한 것은 1980년대 Bechtel이 Electric Power Research Institute(EPRI) 와 LANL의 연구에 참여하기 시작하면서 부터였다. 최근 가장 대규모로 수행되는 연구과제는 1987년 미국의 DoD(Department of Defense) 지원으로 SDI(Strategic Defense Initiative) 프로그램의 일환으로 수행 중인 ETM(Engineering Test Model) 이라고 명명한 SME 설계 프로그램이다. 현재 개발 중인 ETM 설계 사양은 400 MW를 100 초 동안 공급할 수 있는 용량이며 이는 10MW로 2시간 공급할 수 있는 대규모 용량이다. ETM에 사용되는 초전도코일은 Nb-Ti 선재로 직경이 130 m이며 예상 turn 수는 약 112 번, 총 초전도선재의 길이는 수 km 정도이다. 또한 계통안정화 장치로서는 미국의 BPA의 Tacoma 변전소에 30 MJ의 것을 설치 0.35 Hz 불안정 진동억제에 성공한 예가 있다.

초전도 자석을 이용하는 장치 개발 및 초전도 연구는 국내의 경우 1988-1989 년도에 초전도 에너지 저장 장치(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)에 대한 기초적인 연구로부터 시작되었으며 1980년대 말부터는 고온 초전도체에 대한 정부 차원의 연구비 투자가 계기가 되어 저온 초전도체의 응용연구 또한 전기 연구소를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 (주) 한국전력 지원으로 서울대학교에서 25 KJ의 용량을 설계한 바 있으며 현재는 전기연구소 중심으로 0.5 MJ 전력 안정용 SMES에 관한 초전도 자석의 고속 에너지 전달용 전력 변환기의 제작 및 조립 그리고 평가가 이루어 졌다.

B. 핵융합로용 초전도 자석

차세대 에너지 원으로 불리는 핵융합은 중수소와 3중 수소를 혼합해서 가열, 원자와 전자가 분리된 플라즈마가 되게 한 후 초전도 코일로 플라즈마를 포박, 이를 태양 중심부 온도 보다 높은 1~2

역 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열하고, 밀도는 $10^{16}/\text{cm}^3$ 인 상태를 1/100~1 초 이상 유지하면 일어난다. 고온의 플라즈마를 자기장으로 포집하는 기술은 핵융합의 중요한 분야 중의 하나이며 이 분야에 초전도 자석을 사용함으로써 핵융합의 실현 및 응용가능성을 더욱 증가 시키고 있다. 지금까지 핵융합에 사용되어 오던 상전도 전자석의 경우 발전 전기 생산량을 초과하는 경우가 많아 발전로로서의 응용에 제한을 받게된다. 핵융합로의 자기밀폐 관점에서만 본다면 적은 출력 소비로 고 자속 밀도를 발생시킬 수 있는 큰 초전도자석은 현재 발전소의 효율을 실현 가능한 단계까지 끌어 올릴 수 있는 유일한 방법이다.

실제 현재 생각되고 있는 자석은 세가지 형상으로 토카막, stellarator 그리고 탐뎀 반사형 자석이다. 토카막의 배치에서 가장 중심적인 초전도 요소는 플라즈마를 밀폐하는 직류 토로이달 자석과 일차코일의 변압기의 역할을 수행하면서 플라즈마에 전류를 유도시키는 교류형 폴로이달 자석이다. 즉 전류에 의한 자기장의 중첩으로 인하여 원주형의 자기장 배열을 가지게 하여 결국 플라즈마를 밀폐하는 역할을 하게 된다. 여기서 발생된 유도전류는 플라즈마를 가열하는데 이용되는데 토카막의 경우 플라즈마의 축에서 5-6 T의 자속밀도가 필요하며 이 정도의 자속밀도를 얻기 위해서는 코일에서의 자속밀도는 12 T 정도가 필요하며 이러한 자속밀도를 위해서는 Nb_3Sn 의 초전도 선재만으로 가능하다. 개량형 1000 MW급의 토카막 발전로의 토로이달 코일은 소반경 7 m, 대반경 10 m 정도가 예상된다. stellarator의 경우 요구되는 자기장의 세기는 토카막의 경우 보다는 적어질 수 있으며 NbTi 초전도 선재로도 가능한 수준이 될 것으로 기대하고 있다.

탐뎀 반사장치는 원통형 플라즈마를 가두는 긴 원통형 직류자석으로 구성되며 양 끝에 플라즈마의 누출을 막기위한 반사 마개역할을 수행하는 직류코일이 위치하게 된다. 토로이달 직류자석과 같이 탐뎀 반사장치의 중심코일은 여러개의 디스크형 직류자석으로 구성된다. 전력규모 1000 MW급의 장치를 위해서는 배경 7-9 m, 길이 100 m 이상의 중심자석이 필요하며 중심에서의 자속밀도는 3-4 T가 요구되고 권선부의 자속밀도는 5-7 T가 요구된다. 따라서 NbTi 전도체 사용도 가능하다. 그러나 양단의 반사용 코일에서는 부분적으로 최대 15-20 T의 자기장이 필요하며 이때는 Nb_3Sn 코일의 사용이 필수적이다.

현재 일본과 미국에서는 폴로이달 코일에 대한

연구가 많이 수행되고 있으며 만족할 만한 연구결과를 발표하고 있다. 더욱이 일본 원자력연구소에서는 국내 초전도 코일 연구 분야와 공통되는 점이 많은 것으로 보이며 DPC(Demo Poloidal Coil)-U1, DPC-2에 대한 연구 결과는 국내 PF코일 개발에 필요한 기초 자료로 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

산업용 발전소에 사용될 대형 자석 장치의 기술적인 가능성을 입증하기 위하여 대형 토카막 설비(1/3 - 1/5 모델)가 건설되어 성공적으로 운전되었다. 예로서는 6개의 D자형 NbTi 코일로 구성된 ORNL의 LCT(Large Coil Task)와 프랑스의 TORE-SUPRA가 있다. 탐뎀 반사장치로서는 미국 Livermore National Laboratory의 Mirror Fusion Test Facility B 가 있으며 독일 Garching의 Institute of Plasma Physics의 초전도 stellarator(W7X)는 현재 계획중에 있다. 외국 선진국의 경우 초전도체를 이용한 핵융합 용 코일의 설계 제작 기술은 어느정도 확립되어 있는 단계이다. 단지 시스템의 크기가 커짐에 따라 큰 자기장을 요구하게 되어 이에 필요한 선재 개발이 큰 부분을 차지하며 또한 큰 시스템을 냉각시키기 위한 저온 시스템 개발 및 장비 개발이 주된 연구 대상이 되고 있다. 핵융합로용 초전도자석에 관한 연구는 일반적으로 핵융합 연구와 동일한 선상에서 연구되고 있다. 1990 년대의 핵융합에 관한 연구를 보면, 유럽공동체, 일, 러시아의 다국간 국제 공동 연구 형태로 1994년에 결성 1998년에 가동 계획으로 추진 중인 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor), 단일 국가 형태의 프로젝트로는 유럽 공동체가 99 년까지 추진 검토 중인 JET(Joint European Torus), 일본이 2002-3 년 목표로 초전도 자석을 사용하여 독자적 설계 방식으로 추진 중인 JT(Japanese Tokamak)-60U, 미국에서는 2001-2 년 가동 목표로 추진 중인 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)를 들 수 있다. 차세대의 토카막인 Next European Torus 와 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)도 현재 진행중이다.

국내에서는 한국원자력 연구소에서 추진 중인 KT-2 핵융합로에 사용 가능한 초전도 폴로이달 자장(Poloidal field: PF) 코일 제작에 필요한 설계 방법 및 제작 기술을 개발하고 초전도 폴로이달 코일의 유용성을 실증하기 위한 기초 연구가 기초 과학 지원 연구센터와 더불어 수행되고 있다. 지금까지 수행된 초전도 코일은 소규모로서 제작 시설이 비교적 적고 저온 방법 역시 저온조의 액체 헬

름에 담그는 일반적인 방법을 수행하고 왔다. 그러나 핵융합에 필요한 PF 초전도 코일의 경우 그 크기가 매우 크므로 권선 장치의 개발 및 AC 손실을 고려하는 선재 개발 이외에 코일을 임계온도 이하로 냉각하기 위한 냉각 방식 결정 및 저온시스템 제작에 대한 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다. KT-2에 사용되는 PF코일은 모두 14개의 상전도 코일로서 플라즈마 발생 및 자기장 평형 기능을 갖게 된다. 현재 14개의 PF 코일 중 PF6 코일을 초전도 코일로 대체 하기위한 설계 및 제작 기술을 1 차 목표(1995 년)로 하고 있다.

C. 초전도코일을 사용하는 회전기기

교류 손실 문제로 인한 급속제 다심 초전도선재의 사용범위는 현재 직류형 초전도 코일이나 통기형 기기에 일부 제한 되고 있다. 후자의 경우에 있어서 가장 가능성있는 분야는 대형 터보발전기이다, 발전기의 출력은 공극자속 밀도 B, 고정자 내주변 길이 당 전류 A, 회전자 직경 D, 길이 L이라고 할 경우

$$P = BAD^2L \quad (3)$$

로 표시된다.

만일 초전도체를 사용할 경우에는 B는 6배, A는 2배 정도로 증가 시킬 수 있고 그 크기를 약 1/10로 줄일 수 있게 되어 중량과 재료를 크게 경감시킬 수 있다. 특히 초전도 발전기는 동기 리액턴스가 종전기기에 비해 1/4~1/6로 감소되고 전압강하도 작아 안전도가 크게 향상될 수 있다. 또한 송전선 설비 경비를 크게 감축시킬 수 있으며 철심이 없기 때문에 저역자 진상 시 철심 과열 현상이 나타나지 않아 진상 운전시에는 정격 출력까지 가능하게 된다. 또한 초전도 자장코일의 저손실(열손실외의 손실이 없음)과 길이 감소에 의한 마찰손실 감소는 효율의 증가를 상당히 기대할 수 있다. 특히 중량과 부피 그리고 효율 관점에서 0.1 μm 직경의 새로운 형태의 다심 NbTi선재가 사용된다면 그 이상의 효율 증가를 기대할 수 있다.

저온초전도를 이용한 발전기와 모터에 관한 연구는 1960 대 여러나라에서 추진되었다. 그 중에서도 영국에서 대용량의 AC 발전기와 DC homopolar 모터에 관한 연구가 활발히 추진되었다. 미국에서는 GE(General Electric)사에서 1970년대 20 MW 급의 초전도 발전기를 제조하였다. 예측 결과에 따르면 초전도 발전기는 800 MW급 정도에서 경제적으로 경쟁력이 있는 것으로 분석되고 있어 일본, 러시아 미국등에서 대형 연구과제가 현재

추진 중에 있다. 현재까지 알려진 최대 용량은 독일이 1990 년에 제작한 1,000 MVA이며 비교적 큰 규모의 시제품이 현재 제작 중에 있으며 Siemens의 400 MVA, 일본 Suepr GM 의 두개의 70 MVA, 러시아 레닌그라드의 All Union Electro-technical Institute의 300 MW등은 현재 제작 중에 있다.

고온초전도체를 이용한 자석 응용은 4.2 K에서 77.3 K에 걸쳐 다양한 온도 범위에서 사용할 수 있다. Bi계를 이용한 초전도 Coil은 30 K이하에서 탁월한 J_c -B 특성을 보이고 있어, 4.2 K에서 20 T 이상의 높은 자장을 얻을 수 있다. 초전도 자석에 대한 고온초전도체 응용은 제작 방식에 따라 크게 두가지로 구분된다. 첫번째 방식은 단지 산화물계 선재만을 이용하여 수 T의 초전도 자석을 제작하는 방식이다. Bi-2223상의 선재를 이용한 자석 제작 방식으로 이미 4 K에서 2.5 T를, Bi-2212 상의 선재로는 0.7 T를 얻을 수 있었다. 현재 보고된 가장 높은 자장의 자석은 Sumitomo 사가 개발한 직경 60 mm, 61 다심의 Bi-2223 선재를 이용하여 4.2 K에서 4 T, 21 K에서 3 T의 자석이다. 이때 61 다심 선재의 J_c 는 4.2 K에서 42,000 A/cm², 27 K에서 30,000 A/cm²으로 보고 되고 있다. 두번째 방식은 기존의 초전도 자석에 고온 산화물 선재를 부수적으로 첨가하는 Hybrid 형태로, 20 T이상의 고 자장을 얻을수 있는 방식이다. 일본의 National Research Institute of Metal에서는 기존의 20.9 T의 초전도 자석에다 고온 초전도 선재로 만든 내부자석을 부수적으로 첨가하여 1.8 K에서 21.8 T를 성공적으로 얻었다. Sumitomo 사에서는 4.2 K에서 24 T, 27 K에서 23.3 T의 최대치를 얻었다.

한편 냉각 저온조 개발에 있어서, 미국 Brookhaven 국립 연구소에서는 최근 세계에서 제일 큰 직경 15.1 m 초전도 Coil을 77 K 온도 이하로 냉각시키는데 성공하였다.

고온초전도체를 이용한 모터 개발은 미국의 EPRI의 지원 하에 REC(Reliance Electric Co.)사는 ASC(American Superconductor Co.) 사로부터 코일을 받아 회전자에 레이스트랙형 고온초전도 코일 4개를 이용한 5 마력 회전자계형 동기 모터(출력 3,730)를 1,800 rpm으로 회전시키는 데 성공하였다. REC사에서는 1993 년에 고온초전도 코일을 이용하여 정자계용 2마력 모터의 개발에 성공하였으며 금번 회전자를 초전도화 하는 것에 성공함으로써 출력을 2.5배로 높인 것이다. 미국의 경우 산업용 전력의 70% 이상이 모터 용 동력으로 소비되고 있고 그 효율 향상은 에너지 절약에 큰

효과가 있는 것으로 분석되고 있다. 모터의 개발은 현재 125 마력까지 향상되었으며 20 K에서 운전된다. 향후 목표는 1,000 마력 급 개발을 목표로 하여 SPI(Superconductivity Partnership Initiative) 그룹인 REC 사, ASC 사, EPRI, Centerior Energy, Sandia National Lab.가 상호 공동 연구를 수행하고 있다.

저온을 고온초전도로 대체하였을 시 기술적 측면에서 동일하다고 가정하면 발전기의 경우 냉각 장치를 77 K로 교체함에 따른 비용절감액은 10% 정도로 예상할 수 있다. 이러한 비용감소는 규모면에서의 손익분기점을 400 MVA 급정도로 낮출 수 있을 것으로 예상되며 따라서 초전도 발전기의 시장규모도 차츰 확대될 것으로 전망하고 있다. 이와 함께 field winding loss 도 800 MVA급코일의 경우 400 KW(4.2 K)에서 40 KW(77 K)로 감소할 것으로 계산되었다.

D. 초전도 고전력 케이블

도시 지역에서의 송전은 주로 지하에서 이루어진다. 1,000 MW급 이상의 송전선에는 강제 냉각 방식이 적당하다. 손실이 적고 소요공간이 적어 전력밀도가 높기 때문에 헬륨 강제냉각 방식의 초전도 송전선이 가장 유망한 것으로 예상된다. 기술적으로 가장 중요한 점은 교류 3상용 송전선의 개발이다.

현재까지 제안된 교류 송전선은 모두 비슷하다. 송전선의 초전도 내심부분은 유연하고 동축으로 배열되며 내부가 빈 원통형으로 Nb이나 Nb₃Sn으로 만들어 지거나, 최근에는 Bi계 고온초전도 송전선의 시제품이 개발되고 있다. 자기장의 크기가 비교적 크지 않기 때문에 교류손실을 비교적 감수할 수 있는 수준이다. 저온초전도체를 위해 사용되는 절연재료는 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌과 같은 저온에서 유전율이 낮은 플라스틱 계통이다. 저온초전도체는 강하면서도 유연한 스테인레스스틸 관 내부에 위치하며 관속을 흐르는 헬륨에 의하여 냉각된다. 이 관은 다시 진공층과 열방사 차폐가 되어있는 유연하거나 딱딱한 상온의 절연체로서 둘러 쌓이게 된다.

초전도체는 높은 전류밀도로 인하여 초전도 송전선의 전류가 매우 높으며 전압은 비교적 낮게 설계된다(최대 420 KV). 이러한 송전선의 사용 가능성은 여러개의 시제품으로 입증된바 있다. 가장 발전된 것으로는 미국 BNL(Brookhaven 국립 연구소)에서 만든 138 KV, 1000 MVA Nb₃Sn 케이블로서 길이는 115 m 였고 하나의 단단한 관에 두

개의 초전도 내심이 들어 있다. 그러나 경제성 연구결과 최근에 개발된 SF₆ 기체 절연방식의 재래식 송전선과 비교할 때 4K 초전도 송전선의 경제적 손익분기점은 용량이 회선당 4000 MW 근처로서 이러한 전력 용량은 가까운 장래에는 필요하지 않은 것으로 예측된다.

초전도체의 고온화는 냉각 설비비에서 25% 정도의 감소 요인을 발생시키고 더불어 이송시의 손실도 상당히 감소시킬 것이다. 감가상각을 고려하더라도 고온초전도체 송전선의 경제적 손익분기점은 1000 MW 정도로 예상되며 이 규모의 송전선은 이미 사용 중에 있다. 케이블 개발은 고온초전도 응용 분야 중 가장 활발히 연구되는 부분 중 하나이다. 미, 일을 위시한 선진국에서는 사전 축적된 기본 기술을 바탕으로 장, 다심 선재 개발에 가일층 박차를 가하고 있다. 일본 동경 전력회사(Tokyo Electric Power Company)에서는 기존 Duct나 Tunnel에 설치된 송전선을 초전도 Cable로 바꾸는 작업에 이미 착수하였다. 구체적으로 66 KV/1GVA 송전선 개발에 상당한 진전을 보았으며, 다심 선재를 이용 5m 길이의 유연한 송전선 개발에도 성공하였다.

고온 선재 개발에 있어서 대표적인 선두 주자로는 미국의 ASC(American Superconductor Co)와 IGC(Intemagnetic General Corp.), 일본의 Furukawa, Toshiba, Chubu, Sumitomo, Showa 전기 회사 들을 들 수 있으며 기타 이태리의 최대 동력 공급 케이블 회사 Pirelli 사, 영국의 Oxford사 등 전력 관련 업체에서 많은 관심을 갖고 연구 중에 있다. 현재까지 보고된 단심의 최대 임계전류밀도는 77 K, 0 T에서 대략 70,000 A/cm², 100 m~1 Km의 장선에서는 10,000 A/cm² 정도로 보고되고 있다. 구체적으로는 발표된 결과에 따르면 미국 IGC 사는 단선에서 45,000 A/cm², 일본 Toshiba사의 66,000 A/cm, Sumitomo사의 53,700 A/cm², 장선에서는 1 Km의 길이에 10,000 A/cm² 으로 보고하고 있다. 다심의 예를 들어보면, 미국 IGC사는 37 다심, 850 m 길이 선재에서 10,500 A/cm²의 Jc 값을 얻었다. 표 2는 IGC사의 Bi계 고온초전도에 대한 전기적 측정 결과이다.

선재를 장선화하기 위한 방식으로는, 널리 이용되는 PIT(Powder-in-Tube) 방식 이외에도 다른 여러가지 기법들이 검토되고 있다. Jelly-roll 방식, Pyrolysis of organic acid salts 기법, Dip coating 기법, Electrophoretic deposition 기법등을 통한 다심 선재 제조가 이러한 특별한 예들이다. 이러한 방식들은 Bi-2223상 보다는 저온에서 임계전류밀

표 2. 77K에서 측정된 단, 장 BSCCO 2223 Tapes의 전기적 특성

Table 2. Electrical Properties of Short and Long BSCCO 2223 Tapes measured at 77K (Data from IGC(Intermagetics General Corp.)

(Data from IGC (Intermagetics General Corp.))

Filament type	Length (m)	Ic (A)	Jcs (A/cm ²)	SC (%)	Jco (A/cm ²)
Monofilament					
Short Pressed	0.03	51	45,000	20	9,000
Short Rolled	0.03	51	29,000	27	7,800
Long Length	70	23	15,000	24	3,500
Long Length	114	20	12,000	27	3,200
Multifilament(37)					
Long Length	20	42	21,000	32	6,800
Long Length	90	35	17,000	32	5,600
Long Length	190	17	8,000	30	2,400
Long Length	850	16	10,000	24	2,500

* 자료: Adapted from "Superconductor Week"(Feb. 95)

표 3. 77K에서 Electrophoretically 처리된Bi-2223 Tapes 의물성(Data from General Atomics)

Table 3. Properties of Electrophoretically Produced Bi-2223 Tapes at 77K (Data from General Atomics)

As-Coated Shape	Length (m)	Ic (A)	Jcs (A/cm ²)	SC (%)	Jco (A/cm ²)
Short Round Single Layer		9.4	9,700	35	3,400
Short Round Single Layer	610	7.8	8,000	43	3,500
Long Round Single Layer	70	6.8*	22,000*	16	3,400*
Short Round Double Layer	115	8.6	23,000	16	3,700
Long Round Double Layer	114	2.6**	8,100**	13	1,000**
Short Flat Single Layer		9	14,000	25	3,500

* measured in short lengths
** measured end to end

* 자료: Adapted from "Superconductor Week "(Feb. 95)

도 치가 높은, Bi-2212상 선재 제조에서 주로 적용되고 있다. Electrophoretic coating deposition 방법은 연속적 선재 제조 방식 중의 하나로, PIT 방식에 비해 비교적 경제적으로 저렴하고 연속적이어서, 일본의 Sumitomo 사, 미국의 IGC 사, ASC

사, General Atomic 사등의 기업에서 많은 관심을 가지고 연구 개발 중에 있다. 이 공정은 평평하거나 등그런 은 판이나 은 튜브에 Slurry 상태의 초전도를 연속적으로 Coating 한 후, 인발 공정 없이 압연, 열처리하고 있다. 표 3은 최근 Electro-phoretic deposition 기법을 이용하여 제조된, 미국 General Atomic 사의 선재 특성 도표이다.

AC 손실을 줄이기 위한 Twist 선재 연구도 활발히 진행 중에 있으며 미국 ASC 사의 최근 선재 Twist 결과에 따르면 Twist pitch가 3.7 mm, 7.1 mm 시 Jc 값이 13,800 A/cm² 과 15,300 A/cm² 로 보고하고 있다. 이 값은 Twist 되지 않은 선재의 Jc 값, 18,600 A/cm² 보다는 약간 낮은 값이지만 선재 전체에 대한 AC 손실 치는 일반 선재와 비교하여 볼때 상당히 낮게 나타나고 있다. 또한 77 K에서 5,00 A를 통전시킬 수 있는 5 cm직경 유연한(Flexible) 선재 제조에도 성공하였다. 이 밖에도 다심의 형태에 관한 연구가 미국의 IGC나 ASC (American Superconductor Co)를 중심으로 활발히 전개되고 있다.

국내에서는 초전도 선재 개발은 1980년대 말부터 과학기술처의 지원을 받아 정부 출연 연구기관인 한국원자력연구소, 한국기계연구원, 한국전기연구소를 위주로 고온 초전도체 선재 연구를 시작하였다. 현재까지 보고된 결과로는 1 m 이내의 단심에서 최대 임계전류밀도 치는 77K, 0 T 기준, 대략 10,000 A/cm² 로 보고되고 있다. 차후는 100 m 이상의 장선에서 10,000 A/cm² 정도를 목표로 하고 있다.

E. 초전도 변압기

변압기는 전압과 전류를 자유자제로 변환 조정시킬 수 있는 장치이다. 현재 변압기에 사용 중인 구리선을 초전도체로 대체 할 때 전력 손실 방지 이외에도, 부수적으로 갖게되는 변압기의 장점은 일반적으로 4 가지로 대변할 수있다. 즉 구리선 코일 주변의 절연용 오일 사용 대신, 액체헬륨이나 액체질소를 대체함에 따른 절연 효율 증대, 약 50%의 부피와 무게 감소, 제조 원가 절감, 무공해성의 잇점을 들 수 있다.

최근에 개발된 교류 손실이 적은 다심 sub-micron NbTi과 고 저항 matrix 초전도 선재는 초전도 변압기 개발의 가능성을 높여 주었다.

초전도 변압기는 구체적으로 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

가) 50/60 Hz 코일 손실이 적다.

나) 낮은 코일손실은 암페어 턴수를 증가시킬 수

있으며 자속의 감소를 가능케 한다. 이는 철심의 손실과 무게의 감소에 크게 기여한다.

다) 초전도상태에서 상전도 상전리로 인한 오전류 차단기능이 일어난다.

라) 오전류 차단이 일어나므로서 전체적인 전류밀도의 증가와 코일 권선의 설계가 간단해지며 따라서 코일의 무게를 크게 감소시킬 수 있다.

최근에는 다심의 sub-micron NbTi 초전도선체에 의한 100 KVA급 단상 소형 변압기 시제품이 많이 개발되었다. 이것들은 과전류 시의 오전류 차단기능의 장점을 성공적으로 증명하였다. 흥미있는 결과로는 일본 Kyushu 대학의 60 Hz/72 KVA 변압기와 프랑스 Alstom의 50 Hz/220 KVA 변압기이다. 93년 기준, 고온 초전도체를 이용한 40 MVA 급이상의 변압기 세계 시장은 약 40억 \$로 예상하고 있다. 고온 초전도체에 관한 최근 연구동향은 변압기의 세계 굴지 회사인 Swiss ABB사가 미국의 ASC와 국제 공동 연구를 통하여 630 MVA 급, 변압기 생산을 계획하고 있으며 ABB사는 우선 96년 말까지 시제품을 제작 선보일 예정에 있다.

77 K 초전도체의 효과는 단상 850 MVA 급 변압기의 경우에 계산되었다. 금속계 초전도체와 같은 효과에 의한 손실과 질소냉각의 높은 효율성을 감안하면 세심의 두께가 10 μm 인 전도체라면 사용 가능한 것으로 판단된다. 변압기의 전체무게는 냉각용 오일을 포함하여 100 Ton 정도로 예상되며 손실은 240 KW 정도로 예상된다. 재래식 기기의 경우는 무게 520 Ton 손실, 1820 KW 정도이다. 고온 초전도재료에 의한 재료의 절감은 기술적인 복잡성에 의하여 대부분 상쇄될 것이며 결국 77 K 고온 초전도에 의한 변압기의 장점은 그다지 크지 못하다.

F. 한류기

초전도 한류기는 번개, 단선, 다른 제어 문제로 유발 될수 있는 전압 급등에 따른 고가의 장치나 기기의 파손을 사전 방지하는 장치이다. 전기시설 용량이 크게 증가하고 전류밀도가 높아짐에 따라 접속 사고시의 오전류값이 크게 증가한다. 고전압의 경우(245 KV, 420 KV) 재래식 방법에 의한 오전류 차단 가능 범위는 제한적이다. 따라서 초전도상태에서 저항이 큰 상전도 상태로의 조절된 전이를 이용하는 초전도 오전류 차단기는 고전압에서 특히 매력적이다. 이러한 전류차단기를 사용함으로써 계통이나 각 요소부분에 반대 효과가 파급되는 것을 방지할 수 있다.

초전도 전류 차단기는 타당성 조사의 연구 과제로서 그간 많은 모의 전산 실험이 실시되어 왔다. 예로서는 1976년 미국 EPRI(Electrical Power Research Institute)에 의해 수행된 연구로서 통상 전류 2 KA의 145 KV계통에서 전류를 20 KA로 제한하기 위한 연구였다. 위 연구를 위해 전도체로 플라스틱 테이프 위에 얇은 NbN 초전도체 박막을 사용하였다. 이 후 최근에는 다심 sub-micron 크기의 NbTi 초전도선체를 사용하여 20 KV, 5000 KVA급 전류차단기를 개발하였다. 통상전류의 1.4 배가 흘렀을 때에 전류가 차단되었으며 전반적인 성능은 재 개통에 소요되는 시간이 계통에서 요구하는 것보다 긴 것외에는 만족스러웠다.

고온을 이용한 연구 예로는 미국의 일리노이 초전도 사(Illinois Superconductor Corp.)에서는 95년 4월 Argonne 국립연구소와 함께 12,000 V의 기기에 사용 될 수 있는 600A 급 한류기 제작에 나섰다. \$400,000 예산에 2년 기간으로 추진되는 Project는 먼저 100 A AC 한류기 제작을 목표로 진행되고있다. 이러한 산.연 차원의 연구 이외에도 미국에는 미 에너지성이 주관하는 SPI 그(Superconductivity Partnership Initiative) Project Team 내에는 Los Alamos 국립연구소 외 3개의 기업이 참여하는 한류기 개발팀이 결성되어 연구 수행 중에 있다.

저온을 고온초전도체로 대체 시 두개의 단상 차단기의 경우(500 MVA, 110 KV, 2.5 KA) 77 K와 4 K의 차이는 NbTi와 새로운 산화물 초전도체를 사용한다고 가정하고 분석하면 가동 중의 손실이 저온형의 30%밖에 되지 않는다는 점이다. 두경우 모두 90% 이상의 손실이 전류 단차때문이며 요구되는 냉동기의 감소에 따른 이득도 60% 정도에 이른다.

G. 전류도입선

액체 헬륨의 소비나 액체 헬륨의 냉각 부하를 덜기 위해서 Bi 계를 중심으로 한 고온초전도의 Current lead 연구가 선재 연구와 더불어 광범위하게 진행되고 있다. 그 이유로는 액체헬륨에 의한 열 손실이 약 50% 정도 감소 되는 것으로 보고되고 있다. 현재까지 사용 전류 형태에 따라 두가지 형태로 나뉘, 상용화 되고 있다. 첫째는 큰 DC 용도로 사용되며, 주로 은 피복재 선재를 여러겹 겹친 형태(stacking)의 전류도입선으로서, 고온에서는 은 피복재를 통한 열 전달을 최소한 감소시키기 위해 선재의 두께를 두껍게, 저온에서는 반대로 층 두께를 얇게 조절하여 사용하고 있다. 일본의

Sumitomo 사에 의해 제조된 단자의 열 손실은 DC 2.5 KA에서 운전시 0.412 W/KA 였으며 1.5년 기간 동안에도 안정적으로 운전되었다. 둘째는 큰 AC에 견딜수 있는 산화물 자체 만의 전류도입선으로 일반적인 방법인 Bi계 Green compact를 고상 반응에 의해 소결, 제조하고 있다. 일본 Fuji사와 Furukawa사의 공동 연구에 의해 제작된 단자의 열 손실은 AC 2KA에서 운전시 2.58 W/lead 였으며 최대 전류 통전 용량은 AC 2.45 KA로 보고 되고 있다.

4. 결 론

21 세기는 철저히 정보력과 기술력에서 승리하는 나라만이 우위를 독점할 수 있다. WTO를 통한 기존 무역 장벽이 철폐됨에 따라 국내 기업을 보호하던 보호대는 점차로 사라져 가고 문제의 심각성은 더욱더 피부로 감지할 수 있는 단계에 와 있다. 미, 일, 유럽을 위시한 선진국에서는 산,학,연이 공동 참여하는 초전도 컨소시움 형태의 프로젝트를 국가적 차원에서 추진, 기반 기술 확보에 지속적인 투자를 계속하고 있으며 다가올 초전도 시장에 특허를 통한 기반기술을 상당 부분 확보하고 있다. 초전도 산업은 총체적인 과학의 집대성이며 선진국 예를 보더라도 이는 정부, 연구기관, 기업이 하나로 결집된 상태로 만이 중요한 결실을 기대 할 수 있다. 국내에서 초전도 산업을 지속적으로 발전시켜 대외 경쟁력을 갖는 첨단 기술의 확보와 선진 기술국으로의 진입을 위해서는 정부 및 공공기관 주도 하의 지속적인 투자가 우선적으로 요구되고 있으며 기업 참여를 적극적으로 유도키 위한 정부 차원의 홍보와 기업의 각성을 절실히 필요하다고 할 수 있다. 우리나라에서 독자적인 연구 개발 계획을 갖지 않으면 다가오는 21세기에는 초전도 핵심 기술 분야 및 관련 분야에서 선진국의 기술 종속국이 될 가능성도 크다고 할 수 있다. G7 선진 입국에 도전하는 중요한 시점에서 에너지의 종속은 바로 후진국을 의미하는 것이다.

참 고 문 헌

1. 이승연 “초전도 기술개발 추진 정책연구” 한국 과학재단(95. 6)
2. Proceeding of 95' International Workshop on Superconductivity” co-sponsored by ISTE and MRS, Hawaii, USA.
3. "Superconductor Week", Feb., and July., 95.

4. 한국원자력연구소 “토카막 실험기술 개발(KT - 2) (세부과제명: 토카막 자장계 개념 설계)” 95년 제 3차 연차 보고서.
5. Cave Jr, Fevrier A, Verhage T. 1989, IEEE Trans. Magn. 25: 1945-8.
6. Forsyth E B, Thomas R A, 1986, Cryogenics 26: 599-614.
7. International Superconductivity Technology Center(ISTEC), "Executive summary report, 1990, March 4-5, Japan.
8. Initchar L, Lambrecht D, 1989 Entwicklung supraleitender Kraftwerksgeneratoren. VDI Ber. (Ver. Dtsch. Ing.) 733: 121-135.
9. Kozman T, Shimer D, Van Scant J, Zbasnik J, 1987, IEEE Trans., 23: 1448-63.
10. Loyd R J, Schoenung, S M, Nakamura T, Hassenzahl W V, Rogers J D, Purcell J R, Lienrance D W, Hilai M A, 1987, IEEE Trans. 23: 1323-1330.
11. Marston P G, Thome R J, Dawson A M, Bobrov E S, Hatch A M, 1981, IEEE Trans. Magn. 17: 352-353.
12. Peoples J, 1989, IEEE Trans. Magn. 25: 1444-1454.
13. Reichert T, Bittner G, Heinzelmann K G, Sddner L, Vetter J, 1988, IEEE Trans. Magn. 24: 1272-1275.
14. Turck B, 1989, IEEE Trans. Magn. 25: 1473-1480.
15. Vetter J, Ries G, Reichert T, 1988, IEEE Trans. Magn. 24: 1285-1287.
16. Watson J H P, 1988, Proceeding of International Cryogenics Engineering Conf., Butterworth, Guildford, UK.
17. Wolff S, 1992, IEEE Trans. Magn. 28: 96-103.
18. Von Dollen D W, Electric Power Research Institute.
19. John S Englehardt, Underground System Inc..
20. Hara T, Tokyo Electric Power Co..
21. Kakimoto K, Fujikura Ltd. and Chubu Electric Power Co..
22. Nakamura N, ISTEC Journal vol. 6, No 1, 1993.
23. "Superconductor Week" Vol. 9, No. 2, 1995.
24. Higaga H, ISTEC Journal vol. 7, No. 1, 1994.

25. Abboud, R G, presented at the 56th Annual American Power Conference, Chicago, IL, April 1994.

저자소개



장건익

1956년 5월 8일 생. 1983년 2월 한양대학교 무기재료 공학과 졸업. 1988년 12월 미국 University of Utah, 재료공학과 M.S. 1992년 5월 미국 Michigan State University, 재료공학과 Ph.D 1993. 2 - 1994. 9월 한국과학기술원 전

자세라믹 재료연구센터 연구원. 1994. 9 - 1995. 9월 한국원자력연구소 초전도재료 응용기술개발팀 선임연구원. 1995. 9 - 현재 충북대학교 재료공학과 조교수. 본 학회 편수위원.



이호진

1958년 1월 28일 생. 1979년 2월 한양대학교 기계공학과 졸업 1981년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1992년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(박사). 1981 - 1985년 (주)현대 건설. 1986. - 현재 한국원자력연구소 초전도재료 응용기술개발팀 선임연구원.



유재근

1965년 1월 26일 생. 1987년 2월 한양대학교 무기재료 공학과 졸업. 1989년 2월 한양대학교 무기재료 공학과 졸업(석사) 1994년 8월 한양대학교 무기재료 공학과 졸업(박사). 1994. 11 - 현재 한국원자력연구소 초전도재료 응용기술개발팀. 박사후 연수생.



홍계원

1956년 4월 3일 생. 1978년 2월 서울대학교 요업공학과 졸업. 1980년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1983년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사). 1983 - 현재 한국원자력연구소 초전도재료 응용기술개발팀 책임연구원.

■ 1996년도 5월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으니 많은 참고 바랍니다.

題	目	著者 및 所屬
A ₂ B ₂ O ₇ 계를 중심으로 한 고온용 압전재료의 개발 동향		남효덕 (영남대학교 전기전자공학부)
송배전용 Composite Insulator 개발 동향		강동필 (한국전기연구소)