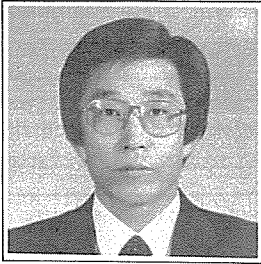


핵융합발전과 초전도응용

“核融合 실용화에 큰 몫”



강희동

〈韓國에너지연구소 핵융합연구실장〉

1950년대 초 수소폭탄실험의 성공으로 인공적인 열핵융합의 실현이 이루어진 이후, 제어핵융합에 의한 새로운 에너지원의 개발은 미국 프린스턴대학의 Spitzer등이 시작한 스텔러레이터(Stellarator) 실험으로 본격화되었다.

이 당시에 이미 자기밀폐방식에 관한 기본적인 구상들까지 제안되었으며, 핵융합로의 개발은 비교적 단기간내에 실현될 것으로 예상되어 자세한 진전 상황은 비밀에 싸여 있었다. 그러나 플라즈마 불안정성등과 문제점들이 등장함에 따라 1958년의 제 2회 원자력의 평화적이용을 위한 국제회의를 계기로 정보교환 및 연구인력의 교류등 국제공동연구의 시대로 돌입되었다. 이 후 30년이 경과한 지금도 토카막(tokamak), 미러(mirror), 스텔러레이터등의 자기밀폐장치들과 레이저나 입자빔을 이용한 관성밀폐장치들이 국가간 협력사업 또는 국가별 단독사업으로 추진되고 있다.

특히 토카막장치에 있어서는 미국의 TFTR, 유럽공동체의 JET, 일본 원자력연구소의 JT-60, 소련의 T-15등 주반경 3m급의 대형장치들이 운전에 돌입하여 핵융합로의 과학적 실증을 눈앞에 두고 있으며, 이들 선진각국들은 공학적 실증을 위한 주반경 4~5m급의 초대형 핵융합장치들의 설계에 이미 착수하고 있다. 대표적인 이 장치들의 설계제원은 <표-1>과 같으며, 이들은 모두 플라즈마를 구속하기 위한 약 12Tesla 이상의 강

한 토로이달(Toroidal) 자기장과, 플라즈마의 생성, 가열 및 평형유지를 위한 폴로이달(poloidal) 자기장등의 전력소모가 큰 전자석들을 필요로 한다. 따라서 이러한 전자석들을 초전도재료를 사용하여 제작하려 하고 있으며, 기초실험들을 활발히 수행하고 있다.

◇ 핵융합로용 초전도재료

현재 실용화되어 사용가능한 초전도코일용 재료들은 핵융합로에의 응용에 곤란한 점들이 많다. 즉 D-T 융합반응에 의한 14MeV 중성자 조사에 의한 영향이 고려되어야 하며, 대형에 복잡한 형상을 하게 되므로 가공성이 좋아야 한다. 또한 10~15Tesla의 강한 외부자기장에 노출되며, 폴로이달 자기장을 발생시키기 위한 펄스형태의 전류에 의해 유기되는 교류손실과 융합반응에 의한 발열이 초전도상태에 야기시킬 수 있는 불안정성을 막을 수 있도록 대용량의 냉각부하를 필요로 하게 된다.

현재 실험이 수행중인 초전도 전자석들의 재료는 합금계인 Nb-Ti와 화합물계인 Nb₃Sn가 주로 사용되고 있으며, 이들 초전도재료의 특성을 나타내는 인자들은 임계온도 Tc와 임계자장 Hc₂ 그리고 임계 전류밀도 Jc를 들 수 있다. 모든 환경조건이 이들 임계값보다 낮아야 초전도상태가 되며, 따라서 물질의 임계값들이 높을 수록 실용

에 유리하다. 즉 Tc가 높으면 온도여유(temperature margin)가 커서 안정성이 높으며, 핵융합로의 경우 높은 자장을 필요로 하기 때문에 높은 Hc₂ 및 Jc를 가져야 한다. 이상과 같은 관점에서 볼 때, 앞서 언급한 고려사항들에 관한 Nb-Ti와 Nb₃Sn의 제반특성들은 다음과 같다.

우선 중성자 조사효과를 보면 Nb-Ti는 1MeV 이상의 중성자를 10¹⁸개/cm²을 조사시켰을 경우 Tc는 약 0.5K 정도 감소되며, 전기저항률P_n도 약간 증가하는 것으로 알려지고 있으며, Jc는 8~25% 저하되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 10¹⁹/cm² 이상의 조사환경에서는 임계전류밀도 Jc가 낮아지는 것을 고려해야 한다. 한편 화합물계인 Nb₃Sn은 초전도 특성이 중성자 조사에 크게 의존되며, 1MeV 이상의 중성자 10¹⁸개/cm²을 조사시키면 Tc가 급격히 낮아지고 10¹⁹개/cm²에서는 약 40%

정도 낮아지는 것으로 알려지고 있다. 임계자장의 변화는 복잡하여 1~2 × 10¹⁸개/cm²을 조사하면 최대값을 보이고 그 이상에서는 급속히 낮아지는 경향을 보인다. Jc도 복잡하게 변화하여 5 × 10¹⁷개/cm²에서 최대값을 보이며, 그 전후에는 급격히 낮아지는 것으로 알려지고 있다. 따라서 약 3 × 10¹⁸개/cm² 이상의 중성자 조사는 가급적 피해야 하며, 이에 따른 중성자 차폐구조물이 설계에 포함되어야 한다.

또한 이들의 기계적 특성을 살펴보면 Nb-Ti는 가공성 및 응력특성이 좋아서 대형 전자석의 제조기술이 확립되어 있으나, Nb₃Sn은 응력특성이 좋지않아 가공이 곤란하지만 임계치들이 Nb-Ti보다 높은 장점이 있다.

펄스전류에 의한 교류손실은 재료의 특성보다는 설계상의 문제가 된다. 즉 폴로이달 전자석은 약 8~14 Tesla 이상의 자장을 필요로 하며 1~3 Tesla/sec 이상의 자장변화율을 갖게 된다. 따라서 전자석의 한 동작주기당 교류손실이 가능한 적도록 인덕턴스값을 낮게 설계하여야 하며, 현재는 교류손실이 전자석의 총 축적에너지의 0.3%정도에 이르고 있으나, 이를 0.2% 이하로 낮추는 것을 목표로 하고 있다.

이외에도 온도상승에 의한 초전도상태의 파괴를 막기 위해서는 온도여유가 클수록 좋은데, Nb-Ti는 임계온도가 9.5K이고, Nb₃Sn은 18.2K이므로 액체헬륨의 온도 4.2K로 냉각하였을 때의 온도 여유는 Nb₃Sn이 약 3배정도가 된다. 한편 초저온으로의 냉각방법은 pool bath법과 forced flow 법이 고려되고 있는데, 전자의 경우는 온도변화에 따른 상전도 전이시 초전도 상태로의 자율적 회복이 기대되어 유리하고 냉동계의 소비전력이 적으며 전자석 건설비용이 적지만, 후자는 체적을 작게 유지할 수 있는 장점이 있다.

한편 초전도재료의 특성과는 직접적인 관계가 없지만, 핵융합로의 운전시 발생하는 각종 전자기적 힘과 자체 중량을 유지하기 위한 구조재료 및 상전도 전이의 경우 전자석 계통의 보호를 위한 안정화재료(stabilizer)의 선택도 중요한 고려사항이 된다.

〈표 - 1〉 초대형 핵융합장치의 설계제원

	국제원자력기구	미	국	유럽공동체	일	본
	INTOR	TIBER II	NET	FER		
플라즈마 주반경 (m)	4.9	3.0	5.18~5.79	4.42~4.92		
플라즈마 부반경 (m)	1.2	0.84	1.35~1.53	1.25~1.32		
플라즈마 전류 (MA)	8.0	10.0	10.8~9.9	8.7		
핵 융 합 출력(MW)	585	272	600~625	406~459		
동 작 주 기 (S)	150	준정상	500~1000	800		
토로이달 자장						
• 중심자장(T)	5.5	6.0	5.0~5.8	4.6~4.7		
• 최대자장(T)	11.4	12	10.4~11.6	12		
• 축적에너지(GJ)	30	~7	25~36	14~19		
• 전자석규모(m)	7.2×10.2	4.3×6.5	6.7×11.8	7.5×9.6		
• Ripple (%)	1.2	0.94	1.2~1.5	0.75		
• 코일 갯수	12	16	16	12		
• 총기자력(MAT)	143	90	127	102~115		
• 정격전류(KA)	25	35	16	30		
• 전류밀도(A/cm ²)	2000	4000	2350	3300		
폴로이달 자장						
• 최대자장(T)	8	14	10	10~12		
• 자장변화율(T/S)	2	1	3	3		
• 전자석규모(m)	2.7~24.7	1.5~12	2.9~20	2.0~21		
• 총기자력(MAT)	114	83	72~99	150~170		
• 축적에너지(GJ)	5	·	4.2~4.6	7~11		
• 정격전류(KA)	54	20	40	40		
• 전류밀도(A/cm ²)	1600	3500	2200	2500~3000		

◇ 핵융합로용 대형 초전도전자석의 개발 현황

핵융합로용 대형 초전도전자석은 토로이달 전자석과 플로이달 전자석으로 크게 나눌 수 있으며, 전자는 직류전류용이고 후자는 펄스전류용으로 각각의 설계와 추구하는 목표가 다르다.

토로이달 전자석개발을 위해서는 1977년 국제에너지기구(IEA)를 중심으로 미국의 3개 회사와 유럽공동체, 일본, 스위스의 6개 장치가 대형코일 계획(LCP)하에 각각 시작되어 실험을 시작하였으며, 각 제원을 비교하여 <표-2>에 보였다. 미국의 웨스팅하우스사를 제외한 나머지 장치들은 Nb-Ti를 초전도재료로 사용하고 있으며, 전반적인 목표로 8 Tesla의 최대중심자장값과 D형코일의 내부면적을 $2.5 \times 3.5\text{m}^2$ 로 설정하여 각각의 독창적인 세부설계에 따라 제작 및 특성조사를 수행하였다. 그 후 이들 6개 기관의 초전도 전자석들을 미국의 Dakridge 국립연구소에 모아서 조합한 후 공동실험을 수행하여 목표인 8 Tesla의 자기장을 실현하였다. 이외에도 안정성 측정, 이상상태에서의 보호동작에 관한 모의실험등 앞으로의 대형 초전도전자석의 개발에 필요한 설계 자료들을 얻어 공동으로 활용하도록 함으로써 국제협력사업으로 추진하고 있다. <표-1>에서 보는바와 같이 공학적 실증을 위한 초대형 핵융

합장치들의 토로이달 전자석은 약 $2 \times 5\text{m}^2$ 의 공간내에 최대 중심자장값이 12 Tesla가 되어야 하므로, 이러한 수준으로의 개발은 그리 멀지않은 장래에 실현될 수 있을 것으로 판단된다.

플로이달 전자석의 경우는 펄스전류의 인가에 따른 교류손실 및 재료의 피로 현상이 발생하게 되며, 플라즈마의 생성 및 가열을 위한 저항가열 코일과 플라즈마의 평형유지를 위한 수직 및 수평자장코일등 여러가지 크기의 코일들로 조합되게 된다. 따라서 초전도재료를 이용한 개발에 어려움이 있어서 토로이달 전자석보다 늦어지고 있다. 미국의 Argonne 국립연구소에서는 총 축적 에너지가 3.3MJ 초전도 플로이달 전자석을 제작하여 실험을 수행하였으며 11KA의 전류를 흘렸을 때 직경 45cm, 높이 62.2cm인 원통형 공간내에 중심축상에 6.5 Tesla의 자기장을 얻었음을 보고하고 있다. 자장변화율은 6~10 Tesla/sec의 비교적 좋은 결과를 보이고 있으며, 교류손실을 약 0.44%를 얻고 있다. 초대형 핵융합장치들의 경우는 축적에너지가 수 GJ급이 되어야 하고 교류손실이 0.2% 이하가 되어야 하므로 앞으로 개발의 여지가 많다.

초전도 전자석들의 안정화재료로는 구리를 일반적으로 사용하고 있으며, 초전도물질에 대한 구리의 단면적비는 약 3~10배를 필요로 한다. 이 때 사용되는 구리는 무산소동으로서 초전도

<표-2> LCP 계획의 초전도 전자석 제원

	유럽공동체	스 위 스	일 본	미 국 G D	미 국 G E	미 국 W H
최대 자장 (T)	8.0 D					
내부 면적 (m ²)	2.5×3.5 (D-형)					
정격전류 (kA)	11	15	10.21	10.2	10.45	17.8
전류밀도 (A/cm ²)	2500	2990	2420	2580	2260	2020
초 전 도 재 료	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb ₃ Sr
인 덕 턴 스 (H)	1.59	1.03	2.0	1.8	1.8	0.75
냉 각 방 식	forced flow	forced flow	pool bath	pool bath	pool bath	forced flow
헬륨내장량 (ℓ)	630	91	2200	2090	2349	444
구 조 물 재 료	316LN	316LN	304LN	304L	316LN	Al합금
총 중 량 (大)	39.0	38.8	39.0	43.9	38.7	33.6
제 작 완 료 년	1983	1984	1982	1983	1985	1985

주 : GD;General Dynamics WH;Westinghouse GE;General Electric

상태에서는 절연층의 역할을 하며, 초전도 상태가 파괴되었을 때는 도체의 역할을 하게 되어 전자석 계통을 보호하게 된다.

또한 핵융합로의 동작시 각종 전자기적 힘들로부터 전자석을 유지·보호하기 위한 구조재료로는 스테레스 스틸을 주로 사용하고 있으며, 이 경우 스테레스 스틸을 질소경화처리한 304LN 또는 316LN이 사용된다. 이들은 yield strength가 약 70kg/mm²로서 경화처리전의 30~40kg/mm²보다 약 2배가량 높다. 그러나 초대형 핵융합장치에서 요구되는 120kg/mm²에는 미치지 못하고 있는 실정이다. 이외에도 구리와 열팽창율이 비슷한 탄소처리된 스테레스 스틸, 알루미늄 합금, 또는 FRE 등이 고려되고 있으나 단가, 구조적 안정성, 또는 방사선 상해등의 문제점들을 안고 있어서 적합하지 못하다.

◇ 앞으로의 과제

초전도재료를 이용한 전자석들이 핵융합로에 응용되기 위해서는 고성능의 초전도물질이 개발되어야 하고, 초대형 전자석의 설계제조기술이 확립되어야 하며, 신뢰성있는 대용량의 냉각계통에 관한 기술개발 및 cryostat 구조의 최적화등에 관한 연구가 수행되어야 한다.

고성능의 초전도재료의 개발은 임계온도, 임계자장 및 임계전류밀도가 모두 높은 값을 갖는 것이 중요하며, 또한 개발된 재료의 가공성, 기계적 강도, 중성자 조사특성이 좋아야 한다. 현재 활발히 개발되고 있는 II형으로 분류되는 높은 임계온도의 새로운 초전도물질들은 대부분 산화물계이므로 재료의 가공성이 좋지 않으며, I형으로 분류되는 기존의 Nb-Ti등과는 달리 임계전류밀도나 임계자장값이 임계온도에 따라 높아지지 않고 재료의 준비방법과 grain 크기에 더 크게 의존한다. 예를 들면 $Sr_xLa_{2-x}CuO_{4-y}$ 의 임계전류밀도는 초기에는 수백 mA/cm²로 측정되었으나 최근에는 10⁶A/cm²까지 증가시켰으며, 이 재료의 계온도는 약 50K 정도이다.

임계온도는 높을 수록 온도여유를 많이 갖게

되어서 요구되는 냉각계통의 용량을 줄일 수 있으며, 온도환경의 변화에 따른 초전도상태의 파괴를 방지하고, 신뢰성을 높일 수 있다. 또한 임계전류밀도는 장치의 전반적인 소형화 및 고성능화와 직결된다. 현재 사용되고 있는 Nb-Ti의 임계전류밀도는 8 Tesla, 4.2K의 조건에서 8.5×10^6 A/cm²이며, Nb₃Sn은 10 Tesla, 4.2K에서 3×10^6 A/cm²이고 각각의 임계자장값은 12.5 및 22 Tesla이다. 핵융합로에 응용되기 위해서는 플라즈마 중심에서의 자기장 세기가 6 Tesla 정도 되어야 하므로 전자석표면에서의 최고자계는 약 1~12 Tesla가 되고, 따라서 이러한 자기장의 조건에서 높은 전류밀도를 갖는 초전도 재료의 개발이 요구되며, 물론 낮은 단가의 대량생산 및 대형 전자석으로의 가공성이 충족되어야 한다.

한편 초전도상태로의 냉각을 위한 냉동방식도 현재는 주로 pool bath 법이 사용되고 있으며, 앞서 언급한 몇가지의 장점들이 있지만, 앞으로의 초대형 핵융합로에 사용되기 위해서는 기계적 안정성과 내전압특성이 좋은 forced flow 법에 관한 기술개발이 요구된다. 또한 구조재료 사용되고 있는 재료들도 아직은 초대형 핵융합장치들에서 요구되는 수준에 미치지 못하고 있어서 앞으로 연구개발의 여지를 남겨두고 있다.

◇ 결 론

토카막으로 대표되는 대형 핵융합장치들이 가동을 시작하여 과학적 실증을 눈앞에 두고 있으며, 선진국들은 서로 협력하여 공학적 실증을 위한 초대형 핵융합장치들의 설계를 활발히 추진하고 있다. 이들 초대형 핵융합장치들은 각종 전자석의 재료로 초전도물질을 채택하고 있어서, 결국 높은 임계값들을 가지면서 앞에서 설명된 핵융합장치들에 필요한 특수 조건을 만족시킬 수 있는 새로운 초전도재료의 개발에 중점을 두어야 할 것이다. 인류에게 주어진 에너지문제를 장기적으로, 어떠한 영구히 해결해 줄 핵융합에너지의 실용화에 초전도재료가 큰 몫을 하게 될 것임은 확실하다.