창 립
40주년학술대회
논문 87-E-20-4

핵융합 발전과 초전도 자석

황 기 웅
서울 대학교 공과 대학 전기공학과

" Nuclear Fusion and Superconducting Magnet"

WHANG KI WOONG
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

1. 서론

핵융합 발전은 중수소나 삼중수소와 같은 가벼운 원소들이 핵융합 반응을 통해 무거운 원소로 바뀌면서 방출되는 에너지를 이용해서 전기에너지를 얻는 것을 말하며 아직 실용화되지는 못하고 있지마는 핵융합 에너지가 갖는 여러 장점들 때문에 인류의 궁극적인 에너지원이 될 것으로 기대되고 있다. 현재 지구상에서 인류가 직접, 간접으로 이용하는 에너지는 전부가 태양에너지에 의한 것이며 태양에너지는 바로 핵융합 반응에 의한 것이라는 것은 잘 알려져 있고 지구상에서는 수소폭탄의 형태로 실증이 되어있으나 아직 평화적으로 이용하기에는 기술적으로 풀려야 될 문제가 많이 남아 있다. 핵융합에너지가 갖는 장점을 몇가지 생각해보면 첫째, 원료로 사용되는 중수소는 지구표면의 3/4 을 덮고 있는 해수로 부터 얻을 수 있으며 이로 부터 얻어지는 중수소를 핵융합 반응으로 전부 에너지로 바꾼다면 현재 전세계적으로 인류가 사용하는 에너지를 10^9년 정도 충당할 수 있으므로 거의 무한에 가깝다고 할 수 있고, 둘째, 핵분열 반응과는 달리 방사능을 갖는 반응 부산물이 없으므로 환경 오염의 걱정이 없으며 셋째, 반응의 제어 기능이 마비되었을 핵분열과는 달리 노의 용침과 같이 파멸로 진행이 되지 않고 스스로 안전하게 소멸이 되는 점 들이 있어서 인류가 필요하는 가장 이상적인 에너지원이라고 할 수 있으나, 이의 구현에는 고밀도 (10^{14} cm $^{-3}$), 초고온 (1억도)의 플라즈마를 장시간 유지해야 되는 어려움이 있으나 21세기초에는 상업용 핵융합로가 등장할 수 있을 것으로 기대된다. 핵융합 반응에 초고온의 플리즈마가 필요한 이유는 핵융합 반응이 일어나기 위해서는 양전하를 가진 원자핵이 서로 가까이 접근해야 하나 같은전하 사이에 작용하는 Coulomb 반발력을 이기기 위해 서로 매우 빠른 속도로 접근해야 되기 때문이다. 고밀도의 플라즈마를 장시간 유지해야 되는 이유는 충분한 양의 핵융합 반응이 일어나서 고온 플라즈마의 생성에 필요한 에너지보다 많은 에너지가 방출이 되어야 하기 때문이다. 그러나 1억 °K 나 되는 초고온의 플라즈마를 가두어 두는데는 보통의 물질로서는 불가능하고 강한 자장(3 tesla)이나 레이저 빔 혹은 대전된 입자빔을 이용하게 된다. 자장을 이용하는 방법을 크게 나누면 open system 과 closed system으로 나눌 수 있으며 open system 에는 mirror 장치가 대표적인 기기이며, closed system 에는 tokamak 장치가 대표적이고 지금까지 tokamak 에서 훨씬 더 뜨거운 플라즈마가 생성이 되어 오래동안 유지가 될 수 있었기 때문에 앞으로 자장을 이용한 핵융합 장치는 당분간 tokamak 장치가 주가 될 것으로 기대된다. 그림(1)에 tokamak 장치의 개략도가 보여지고 있다. 도우넛 모양의 플라즈마는 Toroidal 방향과 poloidal 방향의 자장에 의해 용기의 벽과 격리되어 유지가 되고, 변압기의 1차측에 흐르는 전류에 의해 플라즈마 내부에 유도되는 전류가 플라즈마를 생성, 가열하게 된다. 이렇게 해서 생성이 된 플라즈마의 온도는 통상 2-3천만도를 넘지 못하고, 핵융합의 임계조건을 만족하는 온도인 1억도에 도달하기 위해서는 중성입자빔, 전자파 등을 추가로 가해줘야만 한다.

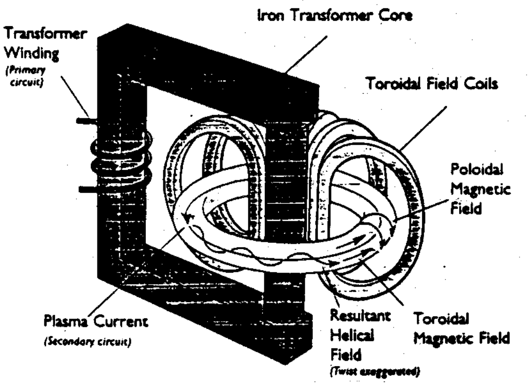


그림 1 Tokamak 장치의 개략도

토카막에서 중요한 자석은 toroidal 방향의 자장을 만들기위한 자석으로써 그림2에서와 같이 수십개의 자석으로써 구성이 된다. 30 m^3정도의 체적을 3-5 tesla의 큰 자장으로 채워야하기 때문에 토카막 장치에서 전원의 대부분이 이들 자석에 필요한 전류를 위한 것이다. 현재 대부분의 tokamak들이 수냉시킨 동선을 사용하고 있으며 EURATOM 의 JET 경우 rotor의 무게가 775 ton 이나 되는 두대의 flywheel 발전기에 의해 400 MW의 전력이 공급된다. 이중 약 200 MW의 전력이 동선의 전기저항에 의해 열손실로 나타난다. Tokamak 에서 toroidal 자장을 동선을 이용한 자석에 의해 만들어지면 장치의 운용은 펄스 형태로 되며 주기는 전원의 충전능력과 코일의 냉각 속도에 의해 좌우된다. 이에 덧붙여 플라즈마의 위치와 단면의 모양을 조정하는데 이용되는 Poloidal 방향의 자장을 만들기 위한 자석과, 플라즈마의 생성및 가열을 하기 위해 약 2-4MA 의 플라즈마 전류를 유도하기 위한 ohmic가열용 자석이 필요하게 된다.

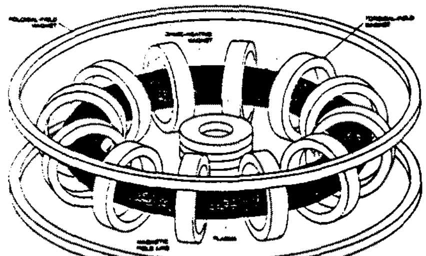


그림 2. tokamak 장치에 필요한 자석의 종류

현재 전세계적으로 자장을 이용해서 임계조건 (입력에너지 = 출력에너지가 되는 조건)을 만족하는 플라즈마를 만족하는 플라즈마를 만들기 위해 제작된 tokamak 장치들로써 대표적인 것은 미국의 TFTR, 유럽의 JET, 일본의 JT-60 및 소련의 T-15등을 들 수 있으며 이들 개개의 주요 제원이 표 1에 나타나 있다. 이들 중 TFTR, JET 및 JT-60은 동선을 이용한 자석에 의해 자장을 형성하고 소련의 T-15가 초전도자석을 이용하여 자장을 만든다.

장치명	국가	주반경(m)	부반경(m)	자장(T)	비고
TFTR	미국	2.5	0.85	5.2	
JET	EURATOM	2.9	2.1X1.25	2.8	D형단면
JT-60	일본	3.0	0.95	4.5	
T-15	소련	2.3	0.75	3.5	초전도코일

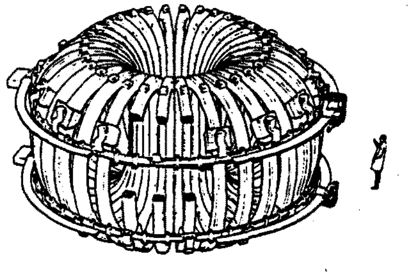
표1. 주요 토카막 장치의 제원

2. 핵융합 장치와 초전도 코일

자장을 이용한 핵융합 장치중 대표적인tokamak 에서 필요한 자석중 toroidal 자장을 만들기 위한 자석에 동선이 사용될 경우 문제점으로써는 구리의 전기 저항에 의한 열손실이며, 이로 인해 운용이 지속적이지 못하고 펄스 형태로 될 수 밖에 없으며 높은 효율과 발전량이 요구되는 상업용 핵융합로에서는 초전도 자석이 사용되어야만 한다. 만일 수냉된 동선을 사용한 자석인 경우 한개의 toroidal 자장 코일에서 옴성 열손실로 소비되는 전력은 아래의 식으로 주어진다.

(P 손실) = r (m) X B(T)^2 MW

이식에 의하면 반경이 3m 이고, 자장이 3T 인 경우 한개의 TF 코일에서 소비되는 전력은 27MW 가 되며 통상 한개의 장치에서 20-30개의 코일이 필요하므로 공급되는 전원의 대부분의 전력이 코일에서 열손실로 나타나게 된다. 그림 3에 JET 에 사용하는 TF (Toroidal Field)코일과 이의 주요 제원이 나타나 있다. 여기서 볼 수 있듯이 전원에서 공급되는 400 MW의 전력중 280MW 가 코일에서 열손실로 소비가 된다. 이러한 코일에서의 열손실을 줄이고 토카막의 운용을 펄스 형태가 아닌 지속적인 운용이 가능하도록 하기 위해서는 동선 대신에 초전도 코일을 사용하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 1977 년에 International Energy Agency 주관하에 미국, EURATOM , 일본, 스위스의 협력으로 tokamak 에 사용될 수 있는 초전도 코일을 개발하는 LCTF (Large coil Test Facility) 계획이 수립되었다. 이 계획은



	Basic performance	Extended performance
Toroidal field at plasma centre line Duration of pulse Maximum current in conductor Resistive power dissipated	2.8 Tesla 30 seconds 53,000 Amp 180 MW	3.4 Tesla 20 seconds 66,000 Amp 280 MW
Cross section of copper conductor Weight of one coil Overall height of one coil Overall width of one coil Weight of complete magnet (32 coils)	3900 mm^2 12 tonnes 5.68 metres 3.86 metres 384 tonnes	

그림 3. JET 에 사용되는 TF 코일.

미국의 GD / CONVAIR , GE , Westing hause 의 3개 회사와 EURATOM , 일본, 스위스의 각국이 각각 크기가 2.5X3.5 m 인 D 형이고, 자장이 8 T, 무게가 40 ton , 전류가 10-18 KA 정도가 필요한 tokamak 의 TF 코일을 1개씩

각국에서 제작하여 미국의 ORNL (Oak Ridge National Laloratory)연구소에서 이들을 모아서 성능검사와 장단점을 비교, 검토하여 상업용 핵융합로에 필요한 초전도 코일을 개발하는 내용이며 표 2에 각국에서 제작되는 코일의 제원과 초전도 코일의 재료 및 냉각 방식이 나타나 있다.

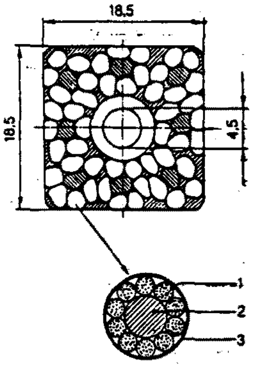
제작 / 제원	GD/ Convair	GE	WESTING-HAUS	EURATOM	JAPAN	SWISS
전류(KA)	10.2	10.5	17.8	11	10.2	13
재 질	NbTi	NbTi	NbSn	NbTi	NbTi	NbTi
He 냉각	PB	PB	SFF	SFF	PB	SFF
Amp-turns	6.6×10^6	7×10^6	7.4×10^6	6.6×10^6	6.8×10^6	6×10^6

PB : Pool Boiling

SFF : Supercritical Forced Flow

표2. LCTF 계획에서 제작되는 초잔도 코일의 제원

이중 SWISS 에서 제작되는 코일은 BBC 에서 제작을 담당해서 만들어 졌으며 그림 4에 코일의 단면이 보여지고 있다. NbTi 으로 만들어진 직경 17㎛ 의 필라멘트330 개가 뭉쳐진 초전도선 (직경 0.46 mm)10 개가 동선 주위에 나란히 CuTi 테이프에 의해 부착이 되고, 이들 48 개가 중심에 액체 헬리움이 흐르는 관 주위에 18.5x18.5 mm 의 단면을 갖는 형태로 복층 케이블화 방법에 의해 제작이 되었다. 이들을 다시 가로 22층, (582 mm) 세로21층 (570 mm)으로 감아서 1 개의 코일을 만들게 되며, 가로는 2 개씩 1 개조로 되어서 11 개의 층이 병렬 연결되며, 13KA 의 전류에 의해 8 T 의 자장을 만들 수 있으며, He 의 입구 압력은 15 bar 이며 300g / s의 유량이 흐르도록 설계되었다.



1 - Superconducting wire
2 - Cu wire
3 - CuNi tape

그림 4. SWISS LCTF 코일의 단면

토카막에 필요한 자석은 큰 체적에 높은 자장을 형성시켜야 하며, 많은 코일이 나란하거나 수직되게 배치가 되므로 높은 임계 전류 밀도와 높은 임계 자장을 갖는 초전도체가 필요하며, LCTF 계획에서 얻어진 결론은 액체 헬리움 냉각에 의한NbTi , NbSn 등이 사용된 초전도 자석은 핵융합로에 사용이 가능하나 높은 가격과 장치의 복잡성 등이 문제점으로 지적되고 있다.

3. 결론

핵융합에너지는 점점 심각해지고 있는 인류의 에너지 문제를 해결해 줄 수 있는 미래의 에너지 원으로써 기대되고 있으며, 이를 얻기 위해서는 강한 자장에 의해 초고온 플라즈마를 가두어야 한다. 핵융합 장치에필요한 자장은 3-5 T 정도의 자장이 30 m^3 정도의 큰 체적에 형성이 되어야 하며 수냉시킨 동선이 사용될 경우 열손실이 너무 크고, 펄스형태로 장치가 운용이 되어야 하므로 상업용 핵융합로에서는 초전도 코일이 사용되어야 한다. 이의 실현을 위해 LCTF 계획이 수립되어 초전도 코일이 제작되어 성능시험이 진행되고 있으며 모두가 액체 헬리움냉각이 필요한 NbTi 이나 NbSn 이 사용되었고, 소기의 자장을 안정되게 얻을 수 있었으나 제작, 운용에 많은 비용과 어려운 기술이 필요한 단점등을 안고 있다. 최근에 발견되어 전세계적으로 많은 과학자들의 연구의 대상이 되고 있는 고온 초전도체가 실용화되어 핵융합장치에 필요한 자장을 만드는데 이용이 될 수 있으면 핵융합 에너지의 실용화는 훨씬 앞당겨 질 수 있을 것으로 기대된다.