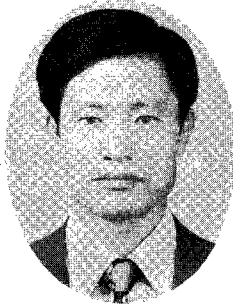




TOKAMAK 핵융합로의 시험제작



정 기 형

1. 서언

현재의 핵분열형 원자로(고리 원자력발전소)가 설치되어 가동되기 15~20년전에 한양대와 서울대에 원자력 공학과가 설치되고 또 원자력 연구소도 설립되어 이나마 현재의 인력이 확보되고 있다고 보면 1990년대 후반에 등장할 동력용 핵융합로에 대한 교육과 연구개발도 진행되고 있어야 할 때라고 본다. 혹자는 후진국의 연구개발이 불필요하고 적당한 시기에 완성품을 Turn-key 방식으로 도입하면 된다고들 하나 장기적인 안목으로 보면 선진국의 연구개발비는 결국 완성품 도입시 몇배로 후진국이 부담하게되며 더군다나 설치, 운전, 보수등에 따르는 기술적, 경제적인 예측이 계속되어 진정한 선진국으로서 발돋움을 불가능하게 만들뿐만아니라 경제적인 손실도 막대하게 될 우려가 있어서 분야에 따라서는 과감한 투자가 오히려 필요하다고 본다. 요즘 서울대학은 대학원중심대학으로 탈바꿈을 모색하고 있으나 재정적으로 밀받침되지 않으니 한낱 구호에 그치게 되고 기초과학육성' 혹은 '전국민의 과학화 운동' 등의 표어와 같은 것이 되고 만다. 공학을 가르치고 실습시키다 보면 자, 제도기, 실습장치, 책, 학술어등 외제 아닌 것이 없고 이것이 중진국 선도형 산업국의 공대 원자핵공학과인가 의심스럽다. 과학화란 언어에 있

어서 우선 핵융합로를 없앤 만큼 과학화가 이루어지는 것이고 반면에 무엇이든 수치화를 하는 것이며 수치화 하기위하여 축정을 하고 표준화를 이룩해야 하는 것이다. 80년대에는 소비가 미덕이 된다는 환상과는 달리 세계적인 긴축과 절약의 소리만 높아가고 있는 이때 현실성있게 긴축과 절약을 하자면 전기에 너지는 원자력(핵분열이나 핵융합에너지)에서 얻고 석유는 일상생활 필수품으로 전환되어야 할 것이라는 것은 상식화된 생각이다. 우리가 만들려는 핵융합장치는 연료가 D_2 로서 바닷물의 육천분의 일이 D, O 로 존재하고 있는 이상 원광도입과 같은 수고를 덜 수 있으며 현 추세대로 에너지를 소모해도 세계가 1억년이상 사용할 수 있는 양이 바다에 있다. 여하튼이런 고도의 기술을 요하는 분야들이 자라나야 기초과학도 육성되며 나아가서 산업계도 저력있는 성장을 할 것이라는 것은 너무나도 확실한 것이다. 급하게 넘버서 곧 성공할 수 있을 것처럼 날뛰는 경솔한 자세로는 언제나 패배하는 결과를 가져올 수 밖에 없다는 것은 살면서 경험하는 것이 아닌가!

핵융합이 일어난다는 것은 이미 20여년전에 수소폭탄으로서 확실히 증명된 것이며 이출력을 우리가 원하는 정도로 알맞게 조절하여 뽑아내자는 기술적인 문제만이 남아있는 것이다. 고리 원자력 발전소가 가동중에 있기는하나 우리가 그것

에 대하여 얼마나 이해를 하고 기술자료를 확보하고 있는지는 의심스러운 과제이며 연구소 창립 이래 내놓는 원자로 국산화의 목표도 기초연구과정없이는 요원한 과제라고 본다. 저마다 Know-how의 필요를 말하지만 그 문제를 익혀 소화하려면 선진국이 투자한 만큼 자금을 투입하지 않고는 이루어질 수 없고 그렇게 되면 후진의 대열에서의 이탈은 불가할 것이다.

본과에서는 교육용 TOKAMAK 핵융합로 제작을 시작하고 있고 이과에서는 간단하게 TOKAMAK 핵융합로의 원리와 본과 제작품의 설계규격들을 소개하고 현시점에서 선진국의 핵융합로 개발현황과 예산규모등을 소개하려 한다.

II. TOKAMAK 핵융합로의 구성

자장구속방법에 의한 핵융합장치중 동력형을 바라보면서 가장 많은 투자를 하고 있는 것이 TOKAMAK 이다. 우리가 만들고 있는 핵융합로는 그림 1.에서 보는 바와같이 D₂ 플라즈마를 토러스내에 구속하기 위한 토로이달 코일, 플라즈마에 의하여 발생하는 폴로이달 자장, 플라즈마의 바깥방향으로의 이동을 막는 수직자장, 플라즈마의 상하진동을 방지하는 2차곡선자장, 주반경 방향의 자기유체역학적 불안정을 막는 제한자장 및 오믹가열코일등으로 구성된다.

1. 토러스형 진공용기

주반경 50cm, 부반경 20cm, 두께 5mm의 SUS 304판으로 만들어질 이통은 진공도가 10⁻⁵~10⁻⁶ torr까지 내릴 수 있으며 4개의 자기밸브를 써서 D₂ 개스를 주입시킨다. 플라즈마 진단을 위한 포트들이 수직 및 수평으로 설치되고 내부에는 라이너 및 리미터등이 설치된다. 불순물 원자들을 걸러내기 위한 다이버터설치도 별도로 고려해서 설계하고 있다. 선진국에서 쓰고 있는 D-T 연료는 D-D보다 핵융합반응 점화온도가 아주 낮은 것이 이점이며 (DT : 4.5keV, DD : 35keV) 장치들이 훨씬 간략하게 된다. 또한 고온플라즈마에 의한 벽의 손상도 줄일수 있는것등도 장점이 라 할 수 있다.

2. 토로이달 자장

평균직경 65cm, turn수 30회 정도의 묶음 16개로 이루어진 코일에 약 10KA의 전류를 흘려 토로이드 중심부에서 10KG정도의 자장을 얻게 될 것이다. 현재 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 자장분포와 이에따른 기초설계를 진행하고 있다. 펄스형의 전류에 의한 코일자체의 온도상승은 10℃ 미만으로 계산되고 있으나 코일내부로 물을 돌려 냉각시키도록 하고 있다. 외국것은 대부분 초전도체를 쓰고 있으나 일본 원자력연구소의 JT-60경우는 구리각판을 쓰고 있다. 전원으로는 1750회전짜리 모터를 감속시켜 Homopolar 발전기와 관성바퀴를 한축으로 회전시켜 $\frac{1}{2} I_L W^2$ 의 에너지를 (I_L : 관성능률, W : 각속도) $\frac{1}{2} L I^2$ 으로 변환하여 (L : 인덕턴스, I : 전류) 저장하고 이 축적에너지를 스위치를 통하여 토로이달 코일에 공급하는 방법을 택했다. 이때 전류과형이 임계감쇄하도록 크로우바 스위치등을 설치해야 한다. 우리는 모터, 감속기, 관성바퀴와 인덕터 및 스위치의 전원등을 구비하고 있고 Homopolar 발전기를 효율적으로 제작하기 위하여 설계중에 있다. 토로이드 중심축에서의 자장의 변동을 1% 이내로 잡고 있고 안전인자 q의 값은 3-4 정도가 될 것이다.

3. 폴로이달 자장

이것은 플라즈마전류자체에 의하여 생기는 것으로 토로이달 자장과 합성되어 완만한 나선형 자장을 이루며 자장의 구배에 의한 전하 분리를 나선형 회전에 의해 중화시켜서 붐확산을 방지한다. 자장선의 급격한 회전은 플라즈마의 거시적 불안정을 유도하므로 플라즈마전류의 크기를 제한하여 폴로이달 자장이 토로이달 자장의 $\frac{1}{10}$ ~ $\frac{1}{5}$ 정도가 되도록 만든다. 초기의 소련형은 토러스벽면을 두꺼운 구리판으로 만들어 플라즈마 컬럼의 이동에 따른 유도전류에 의해 생기는 자장을 써서 플라즈마 컬럼의 안정계도를 유지 하였으며 프린스턴대학의 경우는 토러스 외부에서 폴로이달 자장을 보충하여 플라즈마의 안정을 꾀하였다. 우리는 장치의 실용형을 생각하여 후자 경우를 따르려고 한다.

4. 수직자장

토러스 외부에 코일을 설치하여 자장이 토러스에 수직으로 걸리도록 해줌으로써 플라즈마전류방향과 상호작용으로 생기는 로렌쯔 힘에 의해서 플라즈마 컬럼이, 플라즈마 압력과 인덕턴스의 증가로 인해, 주변경이 커지는 것을 막아주며 곡선형 자장에 따른 입자들의 바깥방향으로의 드리프트를 방지한다. 플라즈마전류의 시간에 따른 변화와 외부코일에 흐르는 전류의 변화를 조화시켜서 플라즈마컬럼이 벽과 충돌하지 않도록 주의해야 하며 주변경을 줄임으로써 단열압축에 의한 플라즈마 가열도 시도한다. (B형 가열)

5. 이차곡선형 자장

수직자장이 플라즈마 컬럼 상하면 근처에서 중심쪽으로 굽어지도록 만들므로써 플라즈마 컬럼이 상하로 진동하는 것을 막고 안정을 유지하게 한다. 이를 위해서는 토러스 외부의 네귀통이에 코일을 설치하고 교대로 서로 반대 방향으로 전류를 흘려줌으로써 수직자장과 합성되도록 만든다. 이 전원으로는 콘덴서뱅크를 사용하게 된다.

6. 제한 자장

토러스내의 플라즈마는 자유에너지가 최소가 되도록 이동하기 때문에 들어갈수록 에너지가 증가하는 볼록형 자장에는 뚫고 들어가질 못함을 이용하여 MHD불안정성을 방지할 목적으로 설치하며 토러스의 직경방향의 끝에 위치한다.

7. 오믹 가열 코일

토러스내에 0.1torr 정도의 D_2 가스를 채우고 플라즈마를 만들때 먼저 자외선이나 전자빔을 써서 전단계 이온화를 시키고 토러스 안쪽벽 바깥둘레에 코일을 설치하여 인덕터나 콘덴서뱅크로부터 펄스형 전류를 흘려 트랜스포머의 이차회로에 해당하는 토러스가 플라즈마 전류를 유지 시킨다. 이때 자속회로를 철심 또는 공심으로 할 수 있는데 일차 전류의 크기가 작고, 토러스 주변경 또는 일차코일의 반경이 작으며 또 펄스폭이 긴 경우 철심을 사용하게 된다. 외국의 경우 초전도체를 사용하는 경우가 대부분이고 일차코일의 반경도 크므로 공심으로 하는 때가 많다. 토로이드 축방향으로의 전장은 먼저 전자를 가속시키고 전자가 이온과 충돌하여 플라즈마의 온도가 올라가게 된다. 그러나 전자와 이온의 상

대속도 v 가 크면 충돌단면적이 v^{-3} 으로 (또는 $T^{-3/2}$ 으로) 감소되어 평형시간이 에너지의 구속시간에 대해서 길어진다. 또한 이것은 플라즈마의 저항이 온도의 증가에 따라 감소하기 때문에 플라즈마전류가 더 커지더라도 플라즈마 자신에게 주어지는 에너지는 더 이상 커지지 않음을 나타내는 것으로 Ohmic가열 방법의 한계성을 말해주는 것이다. 또 온도가 높아짐에 따라 제동복사와 사이클로트론복사에 의한 에너지손실이 각각 T^2 과 T^2 에 비례하게 됨으로 가열한계에 부딪치게 된다. 따라서 여러가지 방법으로 플라즈마를 가열하여서 일단 점화가 되도록 하고 그 다음은 α -입자 등에 의해서 반응이 지속되도록 하여야 한다. 이런 방법으로는 광속에 가까운 전자빔, 중성 입자등에 의한 가열 또는 플라즈마의 각종 고유진동수에 맞는 고주파에 의한 가열등이 일반적으로 시도되고 있으나 아직도 개발단계이다. 특히 D-D 플라즈마의 발화온도까지 높이는 방법은 아직도 연구단계이며 물리과, 원자과 및 전기과 등에서 실험단계에 있다.

8. 플라즈마의 진단

토러스내에서의 플라즈마컬럼의 위치, 온도, 밀도, 시간에 따른 변화 또는 불안정성 등을 알아 보기 위한 수단으로서 여러방법이 실행되고 있고 우리도 본과에서 가동중인 플라즈마 집속장치를 써서 여러 진단방법을 실험하면서 개량을 거듭하고 있다.

III. 예상 결과

이 장치를 제작하고 실험하는 목적은 우선 대학원생의 교육 및 연구를 위한 것이며 유학을 가더라도 열심히 문제점을 파악하도록 하려는 것이다. 또한 이러한 제작된 장치를 써서 논문을 발표함으로써 국제사회에서 인정받아야 핵심적인 부분에 대한 정보교환, 전문가회의 등에 참여할 수 있으며 공부하는 젊은 세대에 정신적 긍지를 심어줄 것이다. 우리의 교육은 철관의 그림이나 말로서의 전달이 대부분이며 실기란 교육자금도 많이 들고 시간이 걸리니 학생들이 기피하는 경향이 있고 이렇게 5~10년이 지나면 그 학생이 다시 교수로 와서 실습면을 점점 등한히 하게 되는 악순환이 거듭된다. 우리는 이미 과학계에서 개발된 극한의 모든 학술 및 기술이 동원되고

있는 핵융합장치 제작에 전력을 기울이고 있고 연구자금만 지원되면 2년내에 완성할 수 있을 것이다.

IV. 세계의 핵융합로 개발 현황

Tokamak계열의 자장밀폐형은 역사가 약 25년 가량 연구되어 왔으며 1970년대에 들어서서 소련의 Archimovich그룹에 의하여 방법적으로 새로운 아이디어를 도입한 이래 미국의 프린스턴대학에도 도입되어 소형을 거쳐 Princeton Large Tokamak의 실험을 끝내고 대형 Tokamak Fusion Test Reactor 건설에 2억 \$를 투입하고 있으며 그외 각 국립 및 회사 연구소와 대학교에 30여개 정도가 건설되어 실험단계에 있고 유럽도 공동체로서 혹은 독자적으로 독특한 Tokamak장치를 제작하고 있다. 가까이 일본이 1천억엔을 들여 JT-60을 짓고 있으며 여러면에서 세계정상을 달리고 있다. JT-60의 건설과정은 각부분을 일본 원자력연구소 주관하에 대기업이 떠 맡아 제작하고 있으며 제일 문제가 큰 토로이달 코일은 Hitachi Co에서 하고 있는데 무산소구리(0.2Ag W/O)만도 2500여톤이 소요되고 토로이달 코일에 소요되는 전기입력이 고리 원자력발전소에서 나오는 전기를 모두 쓰는 정도이며 여러 대학에서도 장기계획을 세워 수십 혹은 수백억엔을 들여 연구개발에 열을 올리면서 일본국민의 긍지를 높이고 있다. 일본 원자력연구소 예산이 작년에

1천 100억엔 정도로서 우리나라 원자력 연구소에 비하면 50배정도이며 GNP가 12 : 1이라고 하는 비례와 견준다면 정책적 배려가 모자란다는 것을 알 수 있다. 이런 상황하에선 끝없는 학술적 식민지를 면할 길이 없을 것이다. 표1.에는 세계에서 건설되고 있는 제일 큰 Tokamak핵융합로들의 각종 규격이 요약되어 있다. 이 장치들은 핵융합에 들어가는 에너지와 나오는 에너지가 같아지는 (Scientific breakeven) 것을 목표로 하고 있으며 자기 특징을 가지고 있다. 완성되어 실험적으로 Lawson 조건을 만족하는 것을 보일 수 있는 때는 약 83~85년경이 될 것이다. 각각의 핵융합로에 대한 발전과정은 국제원자력기구 (IAEA)에서 발행하는 Nuclear Fusion잡지에 매년 발표되고 있고 일반 국민에게도 핵융합에 대한 소개책자도 많이 발간되고 있다. 표2는 Tokamak 핵융합로의 개발과정을 보인 것으로 각 연구소나 나라마다 약간의 차이가 있으나 Calendar year가 비슷하다. 또한 관성밀폐형 핵융합도 미국의 L-orenty Livermore Lab. 이나 Los Alamos Scietific Lab.에서 거의 같은 프로그램을 작성하고 있다.

열을 뽑아내는 수단이나 발전하는 방법과 원자로 재료 등이 핵융합로나 핵분열로에 있어 유사점이 많아 동력용 핵분열로 건설에 소요되었던 기간보다 동력용 핵융합로의 건설기간이 짧을 것이며 재력이 많은 국가들이 힘을 기울이면 기간은 더 축소될 것이다.

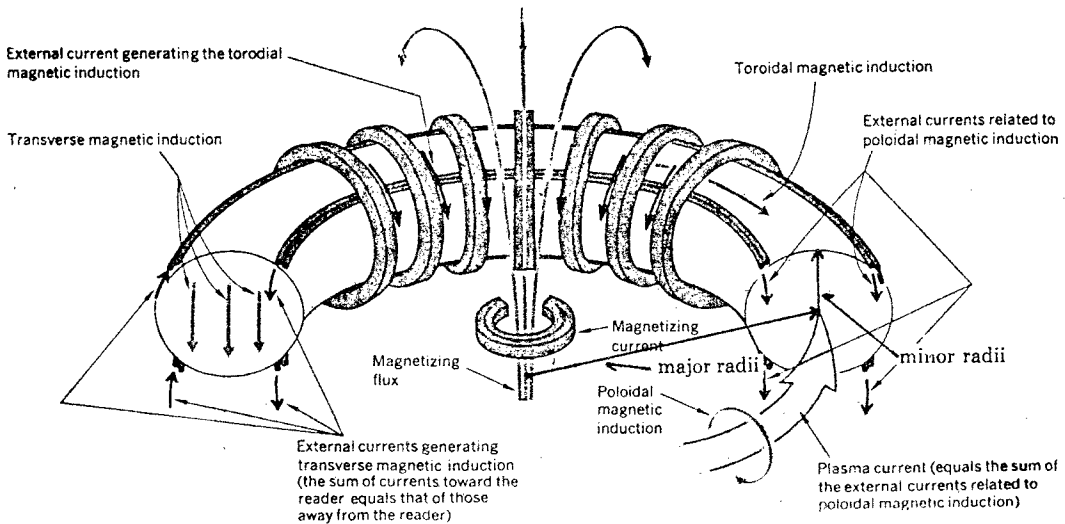


그림 1. 플라즈마의 가열과 구속을 위한 각종 코일의 구성도

표 1. 대형 Tokamak 장치들의 설계규격

Item	System	T. F. T. R (U. S. A)	JET (EC)	JT-60 (Japan)	T-20 (U. S. S. R)
Major radius (R) m		2.48	2.96	3	5
Minor radius (a) m		0.85	2.1×1.25 (Elliptical)	1	2
Temperature (T) Kev		6	5	5~10	7~10
Plasma density (n) cm ⁻³		~10 ¹⁴	5×10 ¹³	2~10×10 ¹³	0.5~5×10 ¹³
Confinement time (c) sec		0.1~1	1	0.2~1	2
Plasma Current (Ip) MA		2.5	4.8	3.3	6
Toroidal magnetic field (Bt) KG		52	34	50	35
nT cm ⁻³ . sec		~1×10 ¹⁴	5×10 ¹³	~1×10 ¹⁴	~1×10 ¹⁴
Peak power supply MW		488	330	350	1200
Expected time to run Year		'81		'83	'84

* TFTR : Tokamak Fusion Test Reactor

JET : Joint European Torus

표 2. Tokamak 핵융합로의 건설 일정표

