Fusion Reactor Technology I (459.760, 3 Credits)

Prof. Dr. Yong-Su Na (32-206, Tel. 880-7204)

Contents

```
Week 1. 에너지와 지구환경 문제
Week 2-3. 토카막로의 기초
Week 4-6. 토카막로의 설계
Week 8-9. 노심 플라즈마에 관한 기반과 과제
Week 10-13. 노공학 기술에 관한 기반과 과제
Week 14. 상용로의 길 / Project Presentation
```

• 플라즈마의 형상

- 에너지 밀폐 시간, MHD 안정성 등 토카막 플라즈마의 성능은 플라즈마 단면 형상에 의존

Cylindrical and local coordinates for a tokamak



Aspect ratio: R₀/a ~ 3-5
 ex) KSTAR: 3.6, ITER: 3.1

Plasma equilibrium parameters



- Elongation: κ
- Triangularity: δ
- Squareness: ζ

Plasma equilibrium parameters



Plasma equilibrium parameters



121497 1150.0000 121516 1150.0000

• Outer and inner squareness: $\zeta_{o,i}$

What is the squareness?

$$R = R_0 + a\cos(\theta + \sin^{-1}\delta\sin\theta)$$
$$Z = \kappa a\sin(\theta + \zeta_{o,i}\sin 2\theta)$$

 $\bigcup_{-0.2} \bigcup_{0.0} \bigcup_{0.2} \bigcup_{0.4} \bigcup_{0.6}$

- 플라즈마의 형상 Elongation
- 토카막 플라즈마의 MHD 안정성을 기술하는 safety factor는 elongation을 포함

• Safety factor q = number of toroidal orbits per poloidal orbit

General definition

$$q = \oint \frac{B_{\varphi}}{R_0 B_{\theta}} ds$$

Integral is along a closed path enclosing the minor axis and lying on a specific magnetic surface; thus *q* is a surface quantity.

$$q_{95} = \frac{5a^{2}B_{T}}{RI_{MA}}f \qquad f: \text{ describing the role of plasma shape}$$
$$f = \frac{1+\kappa^{2}\left(1+2\delta_{95}^{2}-1.2\delta_{95}^{3}\right)}{2}\frac{\left(1.17-0.65A^{-1}\right)}{\left(1-A^{-2}\right)^{2}} \qquad A: \text{ aspect ratio}$$

ITER Physics Basis, Nucl. Fusion **39** 2169 (1999)

9

- 플라즈마의 형상 Elongation
- 토카막 플라즈마의 MHD 안정성을 기술하는 safety factor는 elongation을 포함

$$q(\psi) = \frac{F}{2\pi} \oint_{I_p} \frac{dl_p}{R^2 B_p}, \quad F = RB_T$$

$$q_a = \frac{2\pi}{\mu_0} \sqrt{\frac{1+\kappa^2}{2}} \frac{1}{A} \frac{aB_T}{I_p}$$

- *q*_a는 플라즈마 전류와 elongation이 거의 결정 (toroidal field, aspect ratio 고정 시)
- *q_a* ≥ 2.5: 플라즈마 전류의 상한 존재
- Elongation 증가로 플라즈마 전류 증대 가능



- 플라즈마의 형상 Elongation
- 토카막 플라즈마의 MHD 안정성을 기술하는 safety factor는 elongation을 포함

$$\beta = \beta_N \frac{I_p}{aB_0}$$

$$q_a \beta = 5 \sqrt{\frac{1 + \kappa^2}{2}} \frac{\beta_N}{A}$$

- Safety factor, beta 증대에 모두 elongation 증대가 유효함.
- 플라즈마의 vertical instability 초래: conducting wall이나 internal control coil 필요



- 플라즈마의 형상 Triangularity
- Triangularity는 safety factor 증대에 약간 기여
- β_N -limit 증대에 기여



- 플라즈마의 형상 Triangularity
- Divertor plate에 미치는 heat load 증대의 요인으로 작용
- ELM 제어에 효과적으로 작용



Cf. Type II ELMs

- confinement not degraded, relatively small impurity accumulation, lower heat load on divertor
- at high triangularity and in a high safety factor regime



- ELM behaviour constant over pulse
- Very fine scale activity distinct ELMs almost indistinguishable



• No sawteeth, good confinement, and $\beta_N \sim 3.5$, $T_i \sim T_e$, $< n_e > / n_{GW} \sim 0.88$, averaged over 3.6 seconds ($\sim 50 \tau_E$).





• Divertor 평형 형성



17



- limiter plasma로 시작하여 플라즈마 전류 증가에 따라 divertor로 이행.
- 이행 시 divertor 코일의 전류값이 크게 변화므로 이행 직전에 null point를 plasma surface에 가까이 해 두는 것이 좋음. 경우에 따라 oversized limiter plasma를 형성하여 divertor plasma 이행 시에 크기를 좁히는 방법도 사용.
- Limiter에의 열부하 저감을 위해 current flattop 이전에 divertor plasma로 이행
- 통상 운전 시나리오 설계 시 대표적인 scenario를 복수 설정해 특징적인 시각에서의 snapshot 평형을 계산하여 코일 전류의 시간 변화를 구함.
 평형 계산은 eddy current의 영향, 전원 전압, 최대 전류 및 코일의 경험 자장의 제한을 반영해 실시



- 연소 플라즈마의 특징과 제어에 대한 고찰
- 자기가열, 자발전류, 자발회전 및 그들 parameter의 상호 관련에 대표되는 자율계





- 연소 플라즈마의 특징과 제어에 대한 고찰
- 자기가열, 자발전류, 자발회전 및 그들 파라미터의 상호 관련에 대표되는 자율계
- 국소적·넓은 영역적인 연관, 다른 시공간 스케일 요동(MHD, 난류)이 혼재하는 복합계
- ideal MHD(μs), 에너지 밀폐(s), 전류 확산 시간(~100 s), 입자벽 포화(~1000 s)의 폭넓은 시상수의 현상이 혼재

10-3	10-2	10-1	10 ⁰	101	10 ²	10 ³	10 ⁴	105	Sec. 10 ⁶
MHD Energy confinement Current diffusion									
ELM's - Disruption C-bloom				Cooling of P.F.C.			Total thermalization		
		Particle	confine	nent	Wall inve	entory		Erosio	n

- 연소 플라즈마의 특징과 제어에 대한 고찰
- 핵융합로의 정상 연소 플라즈마는 자율성이 높아 전류구동 파워와 가열 파워가 독립이 아니어서, 플라즈마 파라미터의 연관을 통해 제어 시스템을 구축해야 함.
- 핵융합로에 설치할 수 있는 진단장치에 제약을 받음.
- Actuator 또한 TBR을 확보하기 위해 차지할 고유 면적이 제한되기 때문에, 다양한 종류를 설치할 수 없음.
- Burning plasma simulator 개발이 중요함.

예) 한정된 계측 기기로부터의 정보를 토대로 직접 측정할 수 없는 피제어량 을 시뮬레이터로 추측. 그리고 연소 플라즈마의 수송, MHD 현상과 그에 따른 플라즈마 수송 등의 응답 특성을 포함하여, 정확하게 기술한 통합 연소 플라 즈마 모델을 이용해, actuator에 대한 연소 플라즈마의 응답을 전산모사함으 로써 피제어량의 제어 목표치에 근사하기 위해 최적한 제어 수단을 판단하여 실시

플라즈마 운전 영역의 설정: β

- β 높을 수록 플라즈마의 에너지 밀도 상승
 - → 경제성 유리. First wall이나 divertor plate에의 열/입자 부하나 중성자 부하 증가
 - Cf. 방사손실 이용 시 연료 순도 저하 문제 야기
- MHD 불안정성에 의해 제한됨.
 - NTM (Neoclassical Tearing Mode): ECH/CD를 전용 actuator로 준비 RWM (Resistive Wall Mode):
 - Alfven 속도의 0.3% 이상 회전 필요 → 핵융합로에서는 부적합.
 - → conducting wall 필요 → blanket 설계에 크게 영향을 줌.

- 플라즈마 운전 영역의 설정: q
- 높은 $q \rightarrow 높$ 은 stability
- 핵융합 성능(Q or Fusion power)과 정상특성(f_{BS})에 밀접하게 연관 플라즈마 전류를 낮추어 q를 높임 → Q감소

 $f_{BS} \propto \beta_p \propto \beta_p q_{95}$ (a) ITER: $Q = 10, q_{95} = 3$.VS. $Q = 5 q_{95} = 5$

• Plasma 운전 영역의 설정: Q

- 높은 Q → 10-15% 정도의 외부 가열 파워로 전류 구동을 해야 함.
 → 높은 f_{BS} 필요
- Ignition ($Q \sim \infty$)

(1) 자발전류 비율 100%를 가진 안정한 연소 plasma 경우
(2) α 가열만으로 연소 plasma가 유지되지만, 자발전류 이외의 plasma current를 유도 전류에 의해 보상하는 펄스 운전 경우

