

## 저모습비또까마크플라즈마에서 $n=1$ 기울임불안정성에 미치는 중심도체전류의 영향

홍선향, 리승길, 김영혁

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학기술부문에서는 새로운 원리에 기초한 에네르기전환기술과 에네르기저장기술에 대한 연구사업을 강화하여 나라의 전력공업을 첨단수준에 올려세우는데 적극 이바지하여야 합니다.》

저모습비또까마크플라즈마에서 나타나는 주요불안정성들을 평가하고 그것의 안정화에 미치는 여러 인자의 영향을 해석하는것은 장치의 설계제작과 운영에서 매우 중요한 문제로 제기된다.

선행연구[1]들에서는 또까마크플라즈마에서 전류가 플라즈마에 균일하게 분포된 강체근사모형을 리용하여 그에 따르는 기울임불안정성을 해석하고 그것의 성장률을 평가하였다.

론문에서는 저모습비또까마크플라즈마의 평형자기마당배위에 기초하여  $n=1$ 기울임불안정성의 성장률을 평가하고 그에 미치는 연장도와 중심도체전류의 영향을 고찰하였다.

### 1. 전류분포모형에 의한 $n=1$ 기울임불안정성해석방법

또까마크와 같은 자기가두기핵융합실험장치들에서 플라즈마의 MHD불안정성들을 평가하고 억제하는것은 장치의 효율적인 운영에서 특별히 중요한 문제로 나선다.

MHD불안정성의 한가지 종류인 기울임불안정성은 이미 콤팩트토라스에서 특히 스페로마크배위에서 대표적인  $n=1$ 불안정성으로 주목되어 일련의 연구[4]가 진행되였다. 토로이달자기마당이 매우 작거나 없는 자기마당에서 생겨나는 특수한 모드가 기울임불안정성 또는 기울임모드이다. ULART(Ultra Low Aspect Ratio Tokamak)실험들에서는 기울임 또는 변위모드를 안정화시키기 위해 도선막대기를 삽입하여 전류를 흘려보낸다. 외부마당권선에 의한 전류와 호상작용하는 토로이달플라즈마전류로부터 이 모드를 구동하는 자유에너지가 발생하며 외부토로이달마당은 이 모드들을 안정화시킨다.[1]

한편 저모습비또까마크에서의 기울임불안정성에 대하여서는 TS-3장치를 리용하여 낮은 토로이달마당전류범위에서의 기울임불안정성성장을 실험적으로 확인하였다.[1]

ULART에서 기울임 또는 변위경계를 조사하기 위한 연구를 진행하여 기울임 또는 변위불안정성에 대한 실험적인 토로이달마당전류한계를 고찰하였다.[4]

강체근사모형에서는 폴로이달면에서의 플라즈마전류밀도분포를 균일분포로 하고 저모습비를 고려하여 자기면(플라즈마자름면)을 세로 늘어난 타원형으로 근사시킨다.

이 모형에서는 플라즈마의 기울임이 생겼을 때 그것의 성장이 금지되는 물림새를 다음과 같이 보고있다.(그림 1)

즉 플라즈마의 기울임에 따라 외부토로이달권선전류  $I_{TF}$ 에 대한 유도전류  $I_{회리}$ 가 플라즈마속에 발생하며 이  $I_{회리}$ 와 토로이달자기마당과의  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  힘이 기울임을 억제한다.[4]

기울임불안정성은 플라즈마전류가 만드는 폴로이달자기마당과 플라즈마자름면에 유도된 회리전류에 의한 힘의 작용으로 발생하며 이것은 주축에 설치된 중심도체에 전류를 흘려주어 안정화시킬수 있다.

플라즈마전류가  $I_p$ 인 플라즈마자름면이 외부자기마당  $B_{EF}$ 의 중심축으로부터 각  $\theta$ 만큼 경사졌다고 하면 폴로이달자기마당에 의한 기울임모멘트는 다음과 같다.[3]

$$M_p = \frac{\mu_0 I_p^2}{4} (1 - n^*) \theta R_p C_L \quad (1)$$

여기서  $R_p$ 는 플라즈마의 주반경,  $a$ 와  $b$ 는 각각 플라즈마자름면의 작은 반경, 큰반경이다.  $C_L$ 은 1정도로서 타원형자름면을 가진 저모습비플라즈마의 자체유도계수이다.

한편 토로이달자기마당은 주축근방에 다가갈수록 급격히 커지므로 기울임모드에 대하여 안정화효과가 매우 크다. 토로이달자기마당의 자기압에 의한 모멘트  $M_{TF}$ 는

$$M_{TF} = \frac{2\pi b^3}{3\mu_0} B_t^2 \theta \quad (2)$$

로 주어지며 식 (1)과 (2)로부터 전체 기울임모멘트  $M_{\text{tilt}}$ 는

$$M_{\text{tilt}} = \frac{\mu_0 I_p^2}{4} \theta R_p \left[ (1 - n^*) C_L - \frac{2}{3\pi} (I_{TF} / I_p)^2 (b/R)^3 \right] \quad (3)$$

으로 된다. 그러므로 안정조건  $M_{\text{tilt}} < 0$  으로부터 기울임모드의 안정화를 위한 토로이달자기마당을 만드는 전류는

$$I_{TF} / I_p \geq \left[ \frac{3}{2} \pi (1 - n^*) C_L A \right]^{1/2} \frac{A - 1}{\kappa^{3/2}} \quad (4)$$

로 표시된다. 여기서  $A$ 는 모습비,  $\kappa = b/a$ 로서 플라즈마자름면의 연장도이다.

기울임모드의 성장률  $\gamma$ 는 강체근사를 리용하면

$$\gamma_{\text{tilt}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_A}{R_p} A \left[ \frac{2\pi(1 - n^*) C_L}{\kappa} \right] \left( 1 - \frac{I_{TF}^2}{I_{th}^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

으로 된다.[3] 여기서

$$I_{th} = I_p \left( \frac{3}{2} \pi C_L A \right)^{1/2} (A - 1) / \kappa^{3/2} \quad (6)$$

이고  $n^*$ 은 외부평형자기마당의 반경방향감쇠지수로서  $n^* = \frac{r}{B_z} \cdot \frac{\partial B_z}{\partial r}$ 이며  $v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho_0}$

은 폴로이달알파속도이다.

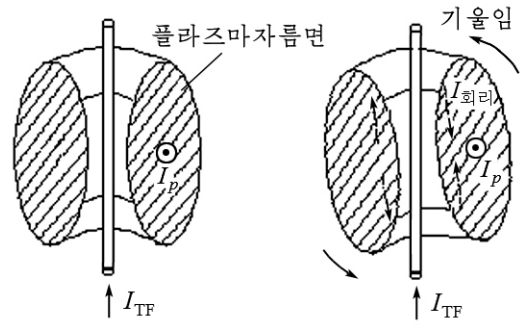


그림 1. 플라즈마자름면의 기울임과 회리전류의 발생

식 (4)와 (6)에서 알수 있는바와 같이 모습비가 작을수록 안정화에 필요한 토로이달 자기마당전류 즉 중심도체전류는 작아진다.

력학적평형의 견지에서 보면 실제장치에서 플라즈마전류는 균일분포가 아니며 플라즈마자름면의 중심에서 최대값을 가지고 경계에서 최소로 된다.

또까마크플라즈마의 MHD평형계산에 대한 선행연구[2]들에서는 물리적으로 타당하고 실제장치에 근사한 초기전류밀도분포를 설정함으로써 평형계산시간을 단축하고 자기면계산의 정확도를 높이고있다.

고모습비원형자름면또까마크들에서 플라즈마전류밀도분포는 다음과 같다.[2]

$$j_p = j_0 \left[ 1 - \left( \frac{R_p - r}{a} \right)^2 \right]^\nu \quad (7)$$

여기서  $\nu$ 는 플라즈마전류밀도프로필지수이다. ( $\nu=0$ 은 균일전류밀도분포(강체모형),  $\nu=1$ 은 포물선형전류밀도분포를 나타낸다.)

현재 가두기효율과 안정성을 개선하기 위하여 비원형자름면플라즈마가 리용되며 저모습비장치에서는 외부자기마당권선의 조종이 없이도 자연연장된 비원형자름면플라즈마가 얻어진다.

비원형자름면플라즈마에서 전류밀도분포는 립자밀도와 온도가 높고 전기저항이 작은 자기축근방에서 전류밀도가 최대인 단조로운 분포로 된다.

론문에서는 이러한 이론적근거와 식 (7)을 고려하여 비원형자름면플라즈마 특히 저모습비축대칭고리형플라즈마의 전류밀도분포를 다음과 같은 타원자름면포물선형으로 설정하였다.

$$j_p^{(0)} = j_0^{(0)} \left[ 1 - \frac{(r - R_0)^2}{a^2} - \frac{z^2}{a^2 \kappa^2} \right]^\nu \quad (8)$$

$$I_p = \int j_p^{(0)} d^2 A \quad (9)$$

## 2. $n=1$ 기울임불안정성의 성장을평가

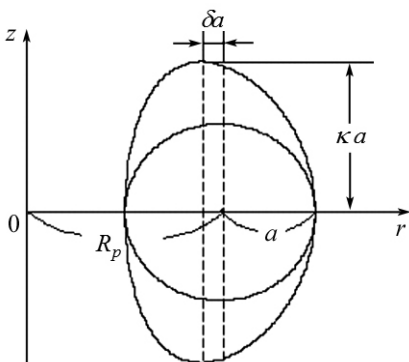


그림 2. 플라즈마자름면

론문에서는 삼각도와 연장도에 의해 결정되는 다음과 같은 플라즈마자름면을 리용하였다.[4]

$$\begin{cases} r = R_p + a \cos(\theta + \delta \sin \theta) \\ z = \kappa a \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

여기서  $R_p$ 는 플라즈마주반경,  $a$ 는 플라즈마부반경,  $\kappa$ 는 연장도,  $\delta$ 는 삼각도이다.(그림 2)

연장도와 중심도체전류의 영향에 따르는 성장률의 변화를 고찰하는데서 식 (8)과 다음의 조건들을 리용하였다.

$n^*$  은 0~1의 값인 0.3,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ ,  $\rho = 3.3 \cdot 10^{-7} \text{g/cm}^3$ ,  $B_p = 0.035 \text{T}$  로 설정하여 계산하였다.

연장도의 변화에 따르는  $n=1$  기울임모드의 성장률은 그림 3과 같다. 그림 3에서 알수 있는바와 같이  $n=1$  기울임모드의 성장률은 연장도의 변화에 따라 일정한 값까지 급격히 감소하다가 완만해진다. 그리고 현재 많이 이용되고있는 연장도 1~2범위내에서 성장률은 약  $10^6 \text{s}^{-1}$  정도라는것을 알수 있다.

다음으로 모습비와 중심도체전류의 변화에 따르는  $n=1$  기울임모드의 성장률을 강제 근사모형 및 실험자료와 비교하였다.(그림 4)

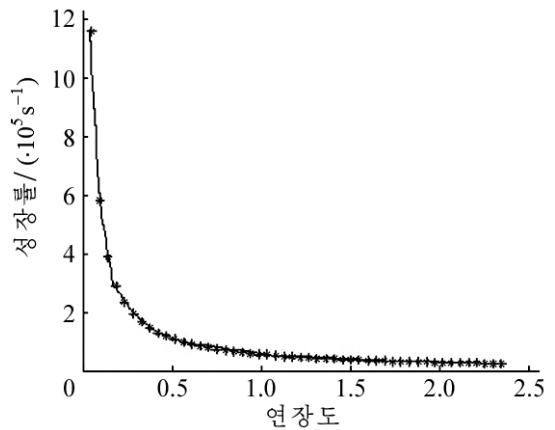


그림 3. 연장도의 변화에 따르는  $n=1$  기울임모드의 성장률

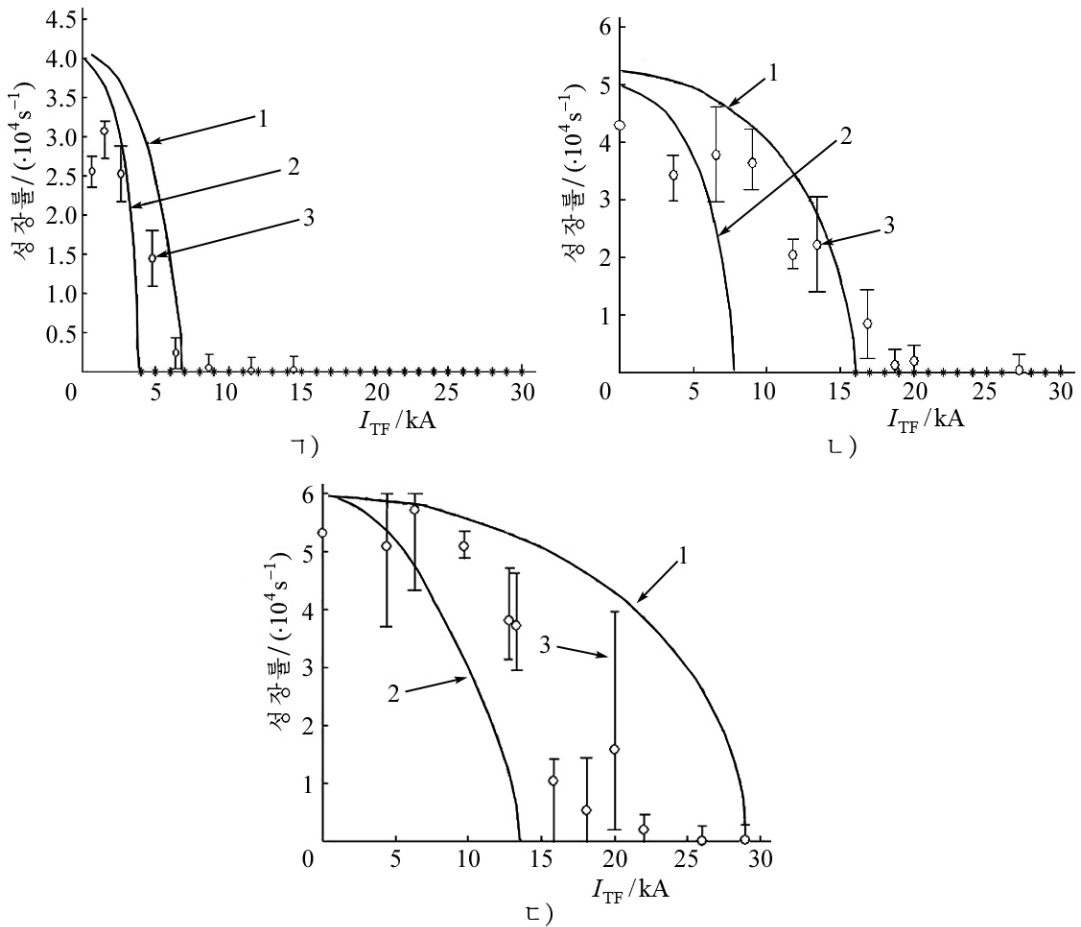


그림 4. 모습비와  $I_{TF}$  에 따르는 성장률의 변화

㉠)~㉡)는 A가 각각 1.1, 1.4, 1.6인 경우

1-강제근사모형, 2-분포전류모형(타원자름면포물선형), 3-실험값[3]

그림 4에서 보는바와 같이 모습비가 증가함에 따라 기울임성장률이 감소하다가 0으로 되는 중심도체전류의 한계값이 증가하며 실험값과 어느 정도 일치한다는것을 알수 있다. 그리고 중심도체전류가 증가할 때 성장률은 감소하다가 0으로 되며 플라즈마전류밀도 분포를 고려하였을 때 강제근사모형에서보다 안정화에 필요한 중심도체전류값이 작아진다는것을 알수 있다.

## 맺 는 말

타원자름면포물선형전류분포모형을 리용하여 저모습비또까마크플라즈마에서 나타나는  $n=1$  기울임불안정성의 성장률을 연장도와 모습비, 중심도체전류에 대하여 평가하였다. 성장률은 연장도와 중심도체전류의 증가에 따라 감소하고 연장도 1~2범위내에서 약  $10^6 \text{s}^{-1}$  정도이며 모습비가 작을수록 안정화에 필요한 중심도체전류의 한계값이 감소하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Ezekial A. Unterberg; Accessing High Normalized Current In an Ultra-Low-Aspect-Ratio Torus, University of Wisconsin-Madison, 23~47, 2007.
- [2] Ri Sung Gil et al.; MHD Equilibrium Interpretation of Low Aspect Ratio Tokamak Plasma, Radiation Effects and Defects in Solids, Taylor & Francis , 1~8, 2016.
- [3] M. Yamada; The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, 72, 3, 205, 1996.
- [4] S. Sakai et al.; The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, 74, 11, 1320, 1998.

주제107(2018)년 9월 5일 원고접수

## Effect of Central Conductor Current on the $n=1$ Tilt Instability of Low Aspect Ratio Tokamak Plasma

*Hong Son Hyang, Ri Sung Gil and Kim Yong Hyok*

We estimated the growth rate of tilt instability of low aspect ratio tokamak plasma by using the model of current density distribution with the parabolic type of ellipse section.

We illuminated that the growth rate decreases as the elongation and central conductor current increases, and the limit value of central conductor current for stability decreases by reducing the aspect ratio. Also we described the growth rate is about  $10^6 \text{s}^{-1}$  when the elongation is within the range of 1~2.

Key words: tilt instability, low aspect ratio tokamak, plasma, central conductor current