

구형또까마크플라즈마에서 풍선형불안정성에 미치는 압력구배와 부트스트랩전류의 영향

손영석, 리승창, 김문옥

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서는 나라의 경제발전과 인민생활향상에서 전망적으로 풀어야 할 문제들과 현실에서 제기되는 과학기술적문제들을 풀고 첨단을 돌파하여 지식경제건설의 지름길을 열어놓아야 합니다.》

풍선형불안정성은 찢어짐불안정성과 함께 경계국부모드(ELM)를 시동하여 다이버터판과 벽에로의 립자수송과 열수송을 일으키는 불안정성으로서 구형또까마크플라즈마경계에서의 물리적과정을 해명하고 가두기와 수송과정을 밝히는데서 중요한 문제로 제기된다.

우리는 $R=0.8m$, $A=1.25$ 인 구형또까마크플라즈마에서 풍선형불안정성의 안정성에 미치는 압력구배와 부트스트랩전류의 영향을 고찰하였다.

1. 풍선형불안정성의 해석방법

ELM이 이상적인 MHD불안정성들은 주각가까이에서 반복적인 자기적섭동들인데 이것은 립자가두기에 매우 불리하지만 H모드(H-mode)에서 불순물조종을 위한 한가지 방도로 되고있다.[4, 5] 이러한 ELM을 일으키는 중요한 원인은 이상적인 MHD불안정성들인 풍선형불안정성과 찢어짐불안정성때문이다.

풍선형불안정성은 H모드의 주각구역에서 나타나게 되는 강한 압력구배에 의하여 발생된다. 풍선형불안정성을 해석하는 대표적인 연구방법은 선형리상MHD방정식인 뉴콧방정식에 대한 수값풀이를 진행하는것이다.

축대칭토로이드계 (r, θ, ζ) 에서 2차원뉴콧방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d}{dr} f \frac{dX}{dr} + g \frac{dX}{dr} + hX = 0 \quad (1)$$

여기서 f, g, h 는 행렬들이다. 이 방정식의 특징은 m/n 의 유리면에서 특이점을 가지며 f 의 대각선원소들이 $(n/m - 1/q)^2$ 에 관계된다는것이다.

문에서는 2차원뉴콧방정식을 플라즈마의 포텐셜에 대한 고유값문제로 변화시켜 각이한 모드의 경계불안정성들을 대표하는 고유함수들과 고유값들을 얻을수 있는 고유값방정식을 풀기 위한 알고리즘을 작성하고 행렬의 최소고유값을 계산하기 위하여 거꼴반복법을 리용하였다.[1]

구형또까마크플라즈마에서 풍선형불안정성은 경계에서 생기는 현상이므로 계산구역으로 전체 플라즈마구역의 8%정도만을 설정하여도 충분히 고찰할수 있다.

고유값방정식의 경계조건으로 유리면에서의 연속조건과 자연경계조건을 리용하고 초기조건으로 구형또까마크플라즈마의 평형상태파라미터들을 리용하였다. 이 방정식을 해석하면 풍선행불안정성의 성장률과 안정성한계 등을 밝힐수 있다.[3]

2. 압력구배와 부트스트랩전류의 영향

압력구배와 부트스트랩전류를 조종하기 위하여 구형또까마크플라즈마의 평형과 비슷

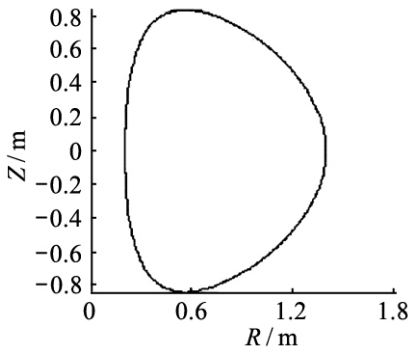


그림 1. 구형또까마크의 평형모형

한 가상적인 기하학적모형을 리용하였다.(그림 1) 이 평형의 모양파라미터들을 보면 주반경이 $R=0.8\text{m}$, 모습비가 $A=1.25$, 연장도가 $\kappa=1.4$, 삼각도가 $\delta=0.4$ 이다.[2] 또한 토로이달자기마당은 $B_t=0.5\text{T}$, 전류는 $I_p=1\text{MA}$, 자기축에서 폴로이달자기흐름은 $\psi=0.17\text{Wb}$, 압력은 $p=0.1\text{MPa}$, 안전결수는 $q_{95}=4$ 이다.

이 파라미터들은 구형또까마크플라즈마의 평형배위로부터 얻어진 자료들에 기초하였다.[8]

압력구배와 부트스트랩전류는 다음의 식을 리용하여 모형화하였다.[8]

$$\frac{dp}{d\psi} \propto (1-\psi_N^{0.8})^{1.5} + C_p \cdot \exp\left[-\frac{(\psi_N-0.96)^2}{2 \cdot 0.025^2}\right] \quad (2)$$

$$\langle j \cdot B \rangle \propto (1-\psi_N^{0.55})^{2.2} + 0.3(1-\psi_N^5) + C_j \cdot \exp\left[-\frac{(\psi_N-0.96)^2}{2 \cdot 0.025^2}\right] \quad (3)$$

여기서 p 는 압력, j 는 전류밀도, B 는 자기마당, ψ_N 은 규격화된 폴로이달자기흐름, C_p 와 C_j 는 상수들인데 이 값들을 조절하여 압력구배와 부트스트랩전류를 변화시킬수 있으며 $\langle X \rangle$ 는 어떤 물리적량 X 의 흐름면평균값을 나타낸다.

이 압력구배와 부트스트랩전류프로필, 폴로이달흐름량들로부터 안전결수프로필과 토로이달자기마당을 얻어 초기자료로 리용하였다.

1) 압력구배의 영향

압력구배의 영향을 보기 위하여 $C_j=0.3$ 으로 고정시키고 C_p 값을 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75로 변화시켰다. 이때 반경방향에 따르는 압력구배의 변화를 그림 2에 보여주었다.

그림 2에서 보는바와 같이 압력구배프로필들은 $r=0.96$ 인 경계에서 봉우리모양을 가지는데 C_p 의 값에 따라 그 점에서의 압력구배값이 변한다는것을 알수 있다.

그림 3에 매 압력구배프로필들에 따르는 $n=35, 40, 45, 50, 55, 60$ 인 모드들의 성장률을

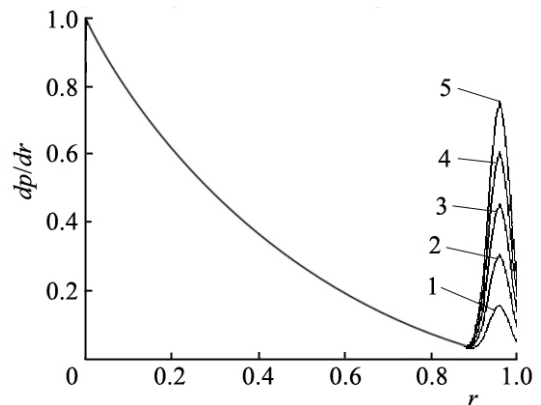


그림 2. 반경방향에 따르는 압력구배의 변화
1-5는 C_p 가 각각 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75인 경우

계산하고 $r=0.96$ 에서 압력구배에 따르는 풍선형모드들의 성장률변화(γ/ω_A)를 보여주었다.

그림 3에서 보는바와 같이 모드들의 성장률은 압력구배에 따라 증가하였다가 다시 감소하였다. 이것은 압력구배가 어떤 값이하에서는 풍선형불안정성이 성장하며 그 값이상이면 성장률이 감소하다가 안정화된다는것을 의미한다. 이러한 경향성은 $s-\alpha$ 평면에서 풍선형불안정성의 안정성판정에서도 나타난다. 물림새를 보면 압력구배는 명백히 풍선형불안정성을 발생시키고 불안정하게 하지만 압력구배가 커질 때 경계에서의 부트스트랩전류가 증가하여 경계에서의 국부적인 자기쉬어를 낮추어 안정화효과가 나타나게 된다.

$r=0.96$ 에서의 가장 불안정한 압력구배값은 모드수에 따라 다르지만 $0.45 \sim 0.55$ 이다. 또한 가장 불안정한 모드는 $n=45$ 이다.

2) 부트스트랩전류의 영향

부트스트랩전류는 원래 자기마당에 포획된 립자들과 포획되지 않은 립자들사이의 속박힘에 의하여 생겨나는데 자기마당에 평행인 전류이다. 부트스트랩전류는 평형에서 압력구배에 따라 커진다.

토라스플라즈마에 압력경사가 있을 때 바나나형영역에서는 전류밀도가 $j_b = -\epsilon^{1/2} B_\theta^{-1} dp/dr$ 인 부트스트랩전류가 토로이달방향으로 흐를수 있다. 압력분포가 $[1-(r/a)^2]^n$ 일 때 평균폴로이달베타값을 $\beta_p = \langle p \rangle / (B_\theta^2 / 2\mu_0)$ 이라고 하면 부트스트랩전류값 I_b 는 B_θ 를 형성하는 플라즈마전류값 I_p 에 대하여 $I_b/I_p \sim 0.3(n+1)(a/R)^{1/2}(\beta_p/q_a)$ 로 되며 이 값은 β_p 가 커져 $\beta_p \sim R/a$ 로 되면 1에 가까워진다. 선행연구결과들[6, 7]에서는 부트스트랩전류가 충돌에 관계된다는것이 밝혀져있으나 이를 변화시키는 요인은 압력구배만이라고 볼수 없다. 이로부터

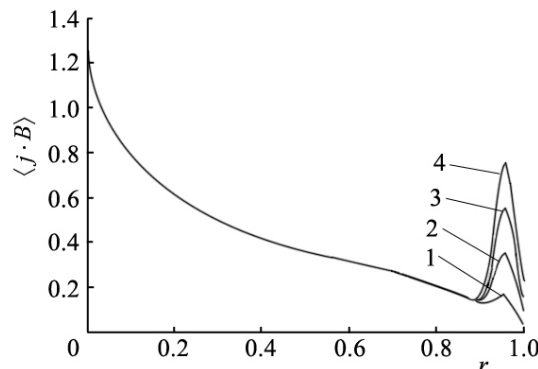


그림 4. 반경방향에 따르는 부트스트랩전류의 프로파일변화

1-4는 C_j 가 각각 0.1, 0.3, 0.5, 0.7인 경우

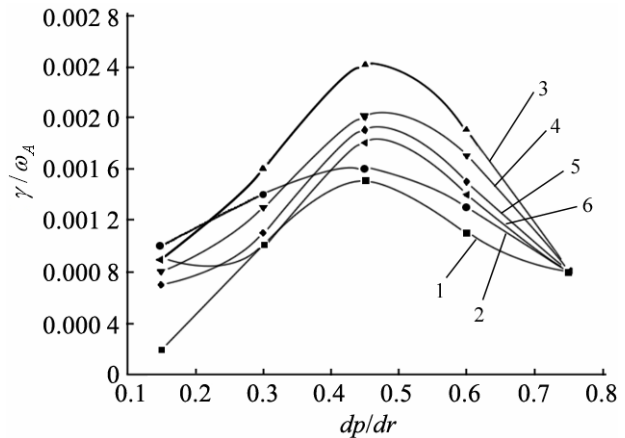


그림 3. 압력구배에 따르는 풍선형모드들의 성장률변화

1-6은 모드값이 각각 35, 40 45, 50 55, 60인 경우

터 식 (3)을 리용하여 풍선형불안정성에 미치는 부트스트랩전류의 영향을 고찰하였다.

$C_j = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 일 때 반경방향에 따르는 부트스트랩전류의 프로파일변화를 그림 4에 보여주었다.

압력구배는 $C_p = 0.15$ 로 고정시킨 조건에서 $n=30, 40, 50$ 인 모드들의 성장률을 계산하였다.(그림 5)

그림 5에서 보는바와 같이 부트스트랩전류가 커질 때 성장률은 급격히 감소하며 풍선형불안정성의 안정화효과가 뚜렷이 나타난다는것을 알수 있다.

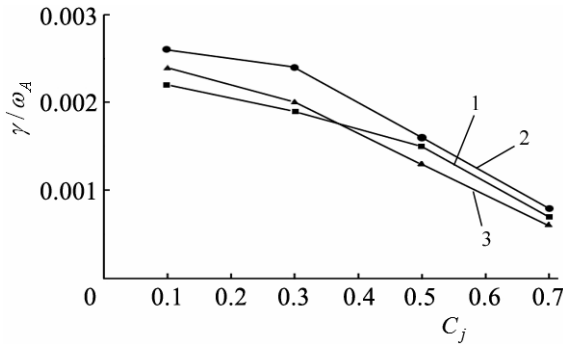


그림 5. 부트스트랩전류에 따르는
풍선형모드들의 성장률변화
1-3은 n 이 각각 30, 40, 50일 때

맺는 말

1) $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 인 구형또까마크플라즈마경계에서 풍선형불안정성은 압력구배가 일정한 값($dp/dr \approx 0.44$)이하일 때에는 성장하며 그 이상에서는 성장률이 감소하다가 안정화된다.

2) 부트스트랩전류가 커질 때 성장률은 급격히 감소하여 풍선형불안정성이 안정화된다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 62, 9, 12, 주체105(2016).
- [2] 김일성종합대학학보(자연과학), 56, 1, 87, 주체99(2010).
- [3] A. Y. Pankin et al.; Nucl. Fusion, 46, 403, 2006.
- [4] H. Zohm; Plasma Phys. Control. Fusion, 38 1213, 1996.
- [5] W. Suttrop; Plasma Phys. Control. Fusion, 42, 1, 2000.
- [6] A. Y. Pankin et al.; Plasma Phys. Control. Fusion, 47, 483, 2005.
- [7] L. L. Lao; Plasma Phys. Control. Fusion, 42, 1, 2000.
- [8] N. Aiba et al.; Nuclear Fusion, 47, 297, 2007.

주체106(2017)년 5월 5일 원고접수

The Effect of Pressure Gradient and Bootstrap Current Influential Ballooning Instability in Spherical Tokamak

Son Yong Sok, Ri Sung Chang and Kim Mun Ok

In this paper, we found that ballooning instability grows for pressure gradient $dp/dr < 0.44$ and growth rate decreases and instability is stabilized $dp/dr > 0.44$ in $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ spherical Tokamak plasma boundary.

We confirmed that the growth rate decreases rapidly and as a result ballooning instability is stabilized as bootstrap current was increased.

Key words: spherical Tokamak, MHD instability