

구형또까마크플라즈마에서 풍선형불안정성에 미치는 삼각도의 영향

김효성, 손영석, 리승창

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

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

풍선형불안정성은 경계국부불안정성(ELM)과 다이버터판, 1벽에로의 립자 및 열수송을 일으키는 불안정성으로서 구형또까마크플라즈마의 경계물리를 해명하고 가두기와 수송문제를 해결하는데서 중요한 문제이다.

우리는 구형또까마크플라즈마에서 풍선형불안정성을 모의하기 위한 한가지 방법을 제기하고 이에 기초하여 풍선형불안정성에 미치는 삼각도의 영향을 연구하였다.

1. 기 초 개 념

리상적인 자기류체력학적(MHD)불안정성은 주각근처에서의 반복적인 자기적섭동들인데 이것은 립자가두기에 매우 불리하지만 H-방식에서 불순물조종을 위한 한가지 방도로 연구되고있다.[1, 2] ELM을 일으키는 중요한 원인은 MHD불안정성들인 풍선형불안정성과 외부킹크불안정성이다. 풍선형불안정성은 H-방식의 주각구역에서 나타나게 되는 강한 압력구배에 의하여, 외부킹크불안정성은 이 구역에서의 부트스트랩전류에 의하여 형성된다. 이러한 불안정성들은 경계에서 립자가두기를 위한 최대압력구배에 제한을 준다.

구형또까마크에서도 ELM현상이 관측되며 이것을 설명하기 위한 선형안정성수값해석이 진행되였다.[3]

풍선형불안정성에 대한 대표적인 연구방법은 선형리상MHD방정식인 뉴콧방정식[4]에 대한 수값풀이를 진행하여 성장률과 불안정성구조, 안정성한계들을 밝히는것이다. 이러한 모의프로그램들로는 ELITE[5], GATO[6] 등을 들수 있다.

주각구역에서 풍선형불안정성과 외부킹크불안정성은 연장도[7], 평방도[8]를 비롯한 구형또까마크의 모양파라미터들의 영향을 받는다. 모양파라미터로서의 삼각도는 구형또까마크플라즈마의 D-형차름면에 접하는 큰 원의 점들과 작은 원의 접점을 맺은 삼각형의 각이 얼마나 큰가를 나타내는 특성량이다.(그림 1)

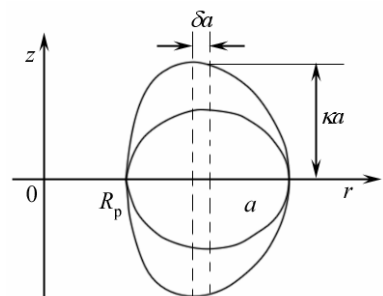


그림 1. 삼각도의 의미

κ 는 연장도라고 부르는 모양파라미터인데 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa = b/a \quad (1)$$

여기서 a 는 플라즈마부반경, b 는 플라즈마자름면에 접하는 큰 원의 반경이다.

2. 모 의 모 형

모의방정식 축대칭 토로이드계(r, θ, ζ)에서 2차원뉴콤방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d}{dr} f \frac{dX}{dr} + g \frac{dX}{dr} + hX = 0 \quad (2)$$

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. 풀이들은 1차원뉴콤방정식과 비슷하게 특이점근방에서 존재하며 국부안정조건은 머큐어안정조건으로부터 유도된다.

우리는 이 방정식을 고유값방정식형태로 리용하여 특이점근방에서 고유값들과 고유함수들을 구하여 풍선형불안정성을 연구하였다.

구형또까마크플라즈마에서 풍선형불안정성은 구역의 5%정도를 차지하는 주각의 경계에서 중요하므로 우리는 경계의 8%구역을 계산구역으로 정하고 그밖의 중심플라즈마는 균일한 플라즈마로 처리하였다. 또한 불안정성이 일어나기 전의 플라즈마프로필은 그레드-샤프라노브방정식풀이로부터 계산하였다.

정확성검증 각이한 토로이드회전수를 가진 풍선형불안정성들을 모의하고 그 결과를 ELITE 계산결과[5]와 비교하였다. 계산에서 리용한 특성량들은 다음과 같다.

$$B_t = 2T, I_p = 1.225MA, R = 1.685m, a = 0.063m, k = 1.77, \delta = 0$$

$$\Delta = 1.9cm, n_{ped} = 3 \cdot 10^{19}/m^3, \omega_A = 2.2 \cdot 10^6/s$$

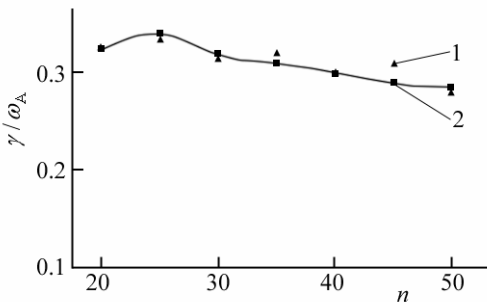


그림 2. n 에 따르는 풍선형불안정성들의 성장속도계산결과

1-계산값, 2-ELITE계산결과[5]

계산결과는 그림 2와 같다. 이때 성장속도는 알펜파동주파수로 무분화되었다.

그림 2에서 보는바와 같이 계산결과는 선행 연구결과와 비교적 잘 일치한다.

3. 삼각도의 영향

정확성이 검증된 우리의 모형을 리용하여 풍선형불안정성의 성장률을 계산하였다. 우선 구형또까마크플라즈마평형들의 렬을 얻었다.

파라미터조는 다음과 같다.

$$(1) B_t = 1.24T, I_p = 1MA, R = 0.8m, a = 0.64m, k = 1.67, \delta = 0.0$$

$$(2) B_t = 1.24T, I_p = 1MA, R = 0.8m, a = 0.64m, k = 1.57, \delta = 0.15$$

$$(3) B_t = 1.24T, I_p = 1MA, R = 0.8m, a = 0.55m, k = 1.53, \delta = 0.21 (I_{PF3} = -0.25MA)$$

(4) $B_t = 1.24T$, $I_p = 1MA$, $R=0.8m$, $a=0.64m$, $k=1.58$, $\delta=0.32$ ($I_{PF2} = 0.4MA$)

(5) $B_t = 1.24T$, $I_p = 1MA$, $R=0.8m$, $a=0.51m$, $k=1.57$, $\delta=0.37$ ($I_{PF5} = -0.36MA$)

평형파라미터열 (1)과 (2)는 플라즈마모양조종권선들에 전류를 보내지 않고 얻어낸 자연삼각도의 파라미터열들이며 나머지열들은 플라즈마모양조종권선전류들의 조종으로 얻어낸 파라미터열들이다.

플라즈마의 모양은 X -점이 있는 D -모양이다.

주각에서의 플라즈마밀도와 온도프로필은 구형또까마크들에서 측정자료[3]로부터 쌍곡 접선모양으로 주었다. 플라즈마경계의 밀도는 중심밀도의 70%로 주었는데 그 값은 $n_{ped} = 1.2 \cdot 10^{19} / m^3$ 이며 주각넓이는 $\Delta = 1.4cm$ 로 주었다.

이에 기초하여 평형열의 삼각도에 따르는 안정한 최대주각압력을 구하였다. 불안정성의 안정화턱값으로는 $\gamma / \omega_A > 0.01$ 의 조건을 리용하였으며 성장속도가 느린 파동들은 안정성연구에서 무시하였다.

$\delta=0$ 에서 가장 불안정한 파동들은 $n \geq 40$ 이며 삼각도가 커짐에 따라 $\delta=0.37$ 에서 $n \approx 13$ 까지 떨어졌다.

삼각도에 따르는 최대주각압력변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 삼각도가 커짐에 따라 최대주각압력은 증가하였다.

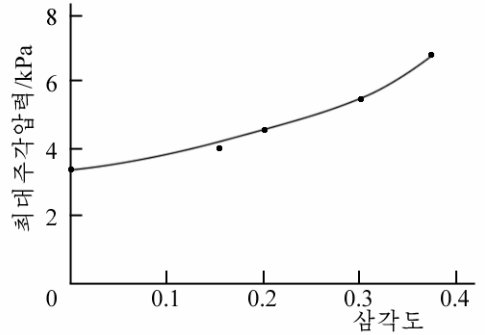


그림 3. 삼각도에 따르는 최대주각압력변화

맺는 말

구형또까마크플라즈마경계에서 특이점근방에서의 고유값과 고유함수들을 구하는 2차원뉴콤방정식을 해석하여 풍선형불안정성을 연구하였다. 모양파라미터인 삼각도가 커짐에 따라 불안정한 토로이달회전수들은 감소하고 최대주각압력은 증가하였다.

참고문헌

- [1] S. Saarelma; Plasma Phys. Control. Fusion, **53**, 025011, 2011.
- [2] W. Suttrop; Plasma Phys. Control. Fusion, **42**, A97, 2000.
- [3] P. B. Synder et al.; Phys. Plasma, **9**, 2037, 2002.
- [4] W. A. Newcomb; Ann. Phys., **10**, 232, 1960.
- [5] H. R. Wilson et al.; Phys. Plasma, **9**, 1277, 2002.
- [6] L. C. Bernard et al.; Comp. Phys. Commun., **24**, 377, 1981.
- [7] J. W. Connor et al.; Phys. Plasma, **5**, 2687, 1998.
- [8] A. W. Leonard et al.; Bull. Ann. Phys. Soc., **50**, 270, 2005.

주체105(2016)년 5월 5일 원고접수

Effect of Triangularity on Ballooning Instability in Spherical Tokamak Plasma

Kim Hyo Song, Son Yong Sok and Ri Sung Chang

We study the ballooning instability by analyzing 2D Newcomb equation for getting eigenvalue and eigenfunction in around singular point of the frontier of spherical Tokamak plasma. The triangularity's increment decreases the number of unstable troidal modes and increases maximum pressure of pedestal.

Key words: ballooning instability, Newcomb equation, triangularity