

## 마당반전배위형성모의에 대한 연구

김일혁, 김래성

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《에너지, 동력문제와 식량문제는 인민경제의 자립적이며 지속적인 발전을 이룩하는 데서 관건적의의를 가집니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 46페이지)

현재 자화표적핵융합은 전형적인 핵융합방식인 자기마당가두기방식과 관성가두기방식에 비하여 그 실현원가가 2%미만정도로 추정되고있다.[1] 이 방식에 대한 연구는 세계적으로 FRX-L장치와 FRCHX, C-2U, MAGO장치 등을 리용하여 진행되고있다.[2]

본문에서는 자화표적핵융합(MTF)장치의 표적형성체계에서 마당반전배위(FRC)형성과정에서 대한 리론적해석과 검증을 진행하고 그에 기초하여 모의를 진행하였다.

### 1. 마당반전배위형성장치의 구조와 배위형성에 대한 수학적모형화

마당반전배위(FRC)형성을 위한 장치의 일반적구조는 그림 1과 같다.

장치의 길이는 1m, 내부권선은 외경 11.5cm이며 용량이  $800\mu\text{F}$ , 방전전압이 10kV인 콘덴샤와 연결되였고 외부권선은 외경이 45cm이며 용량이  $800\mu\text{F}$  혹은  $1200\mu\text{F}$ , 방전전압이 10kV인 콘덴샤와 연결되였다. 플라스마가 들어있는 공간의 벽은 석영을 리용하였으며 그 공간의 내부직경은 13.5cm, 외부직경은 40.4cm이다.

플라스마내부공간에서 일어나는 전자기적과정에 대한 수학적모형화를 위한 기초적인 가정을 다음과 같이 설정한다.

공간에서 일어나는 전자기적과정은 리상적인 자기류체력학적과정으로 취급하며 플라스마에서 전형적으로 나타나게 되는 거시적불안정성에 대하여 크게 고려하지 않는다. 원리적으로 마당반전배위는 플라스마에서 거시적불안정성이 가장 심하게 나타나는 자기마당배위이다. 그러나 실험들에서 측정된 값들을 보면 상대적으로 작은 계에 대하여서는 그 불안정성이 크게 나타나지 않으며 가두기특성이 매우 좋다는것이 확인되였다. 이로부터 불안정성문제에 대하여서는 구체적인 계산을 진행하지 않아도 된다는것을 알수 있다. 이 가정에 기초하여 플라스마공간에서 마당반전배위형성을 위한 수학적모형화를 다음과 같이 진행한다.

모형은 리상적인 플라스마자기류체력학적모형을 리용한다. 이 형성과정에서 플라스마립자들의 평균자유행로는 1mm이하이다. 이에 비하여 립자들의 속도변화특성길이는 1m정도로써 평균자유행로를 무시할수 있을 정도로 크다.

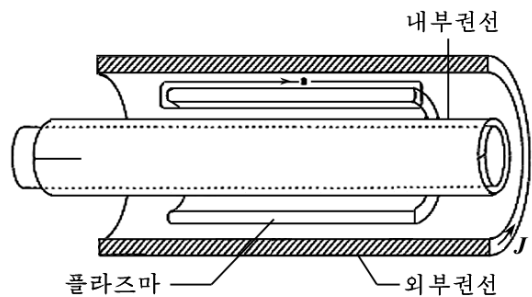


그림 1. 마당반전배위형성을 위한 장치의 일반적구조

이로부터 장치에서 진행되는 과정을 자기류체력학적과정으로 취급할수 있다.

그에 대하여 간단히 보면 아래의련립방정식들로 구성된다.

$$\partial \rho / \partial t = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (\text{흐름의 련속방정식})$$

$$\partial \mathbf{v} / \partial t = -(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{p} / \rho + \mathbf{J} \times \mathbf{B} / \rho \quad (\text{자기류체력학적힘평형을 나타내는 방정식})$$

$$\partial \mathbf{p} / \partial t = -(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{p} - \gamma \mathbf{p} \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (\text{플라즈마의 단열압축과정을 나타내는 방정식})$$

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \quad (\text{자기마당에 대한 암배아의 법칙})$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \eta \mathbf{J} \quad (\text{자기마당에 대한 막스웰방정식})$$

여기서  $\rho$ 는 플라즈마립자수밀도,  $\mathbf{v}$ 는 립자흐름속도,  $\mathbf{J}$ 는 플라즈마전류밀도,  $p$ 는 플라즈마기체압력,  $\mathbf{B}$ 는 플라즈마공간내에서 형성되는 자속밀도,  $\gamma$ 는 전형적으로  $\gamma = 5/3$ 로 되는 열력학적상수,  $\eta$ 는 플라즈마저항결수이다.

우의 련립방정식제에 기초한 모의는 CFD-ACE프로그램을 리용하여 진행하였다.

초기에 이 공간에 들어있는 플라즈마에는 선행이온화공정을 거쳐 이온화된 수소기체가 차있으며 압력은 2.67Pa이다. 선행이온화는 용량성방전이나 유도성방전을 통하여 능히 진행할수 있다. 장치회로의 진동주기는 외부권선에 대하여  $30\mu\text{s}$ , 내부권선에 대하여  $10\mu\text{s}$ 로 정한다. 이것은 외부권선에 최대전류가 흐르는 경우 내부권선에 그와 반대방향의 최대전류가 흐르도록 하기 위해서이다. 장치에 흐르는 최대전류의 세기는 1MA정도로 된다. 두 권선은 모두 단권권선을 리용하며 재료로는 동을 리용한다.

## 2. 모의계산 및 결과

우선 CFD-ACE프로그램의 대상설계프로그램인 CFD-GEOM에서 대상설계를 진행한다.

다음 CFD-ACE Solver프로그램을 기동시키고 Plasma, Magnetic모듈을 선택한다.

다음 문제설정창(Problem Type)에서 시간에 따르는 과도과정으로 대상모의를 진행하도록 설정을 진행한다.

이때 시간걸음의 크기는  $0.1\mu\text{s}$ 로 하며 걸음의 총수는 200으로서  $20\mu\text{s}$  동안에 해당한 과정을 해석하도록 한다.

$17\mu\text{s}$ 인 시각에 이 도구로 해석을 진행하여 얻은 결과를 보면 마당반전배위가 장치의 중심근방에 형성되었다.(그림 2)



그림 2.  $17\mu\text{s}$ 인 시각에 형성된 마당반전배위

또한 이 시각에 중심축우에서 자기마당분포는 그림 3과 같다.

얻어진 결과와 선행결과를 비교하면 그 평균편차가 9.5%정도이다. 이를 통하여 모의결과는 실험결과와 그 경향성이나 수값이 매우 잘 일치된다는것을 알수 있다. 모의과정을 통하여 마당반전배위형성과정을 리상적인 자기류체력학적모형으로 수학적모형화를 진행할수 있다는것과 마당반전배위형성모의의 정확성이 검증되었다.

지금까지 진행한 모의과정에 기초하여 다음의 대상에 대한 모의를 진행하였다.

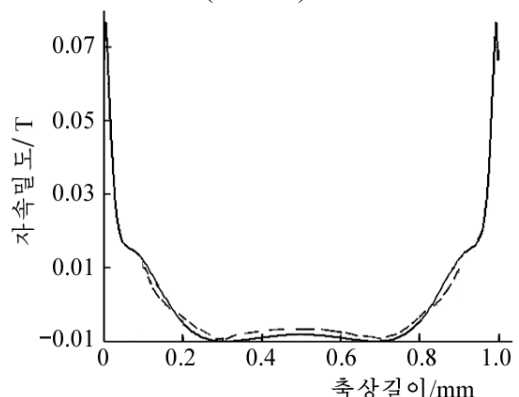


그림 3. 중심축우에서 자기마당분포  
실선-모의값, 점선-측정값

권선은 중심축상의 내부권선이 없이 외부권선 하나로만 되어있는것으로 진행하였다. 권선의 길이는 30cm, 내경은 10cm, 권선의 두께는 2cm, 초기  $x$ 축방향자속밀도는 0.5T, 콘덴샤의 전기용량  $C=1\ 300\mu F$ , 방전전압은  $V_0=80kV$ , 유도도는  $L_0=44nH$ , 플라스마내에서 초기전자온도는  $T_{e0}=300eV$ 로 정하였다. 이때 권선에 흐르는 최대전류의 세기는 10MA이며 진동주기는  $10\mu s$ 이다.

$20\mu s$ 인 시각에 형성된 마당반전배위와 축방향에 따르는 자기마당분포는 각각 그림 4, 5와 같다.

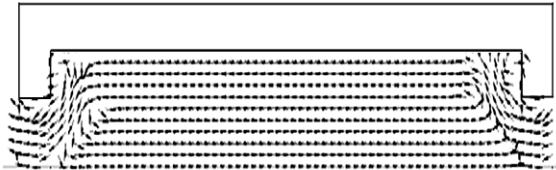


그림 4.  $20\mu s$ 인 시각에 형성된 마당반전배위

얻어진 자기마당분포특성은 이와 유사한 기하학적크기와 방전조건을 가진 FRX-L장치에서 자기탐침을 리용하여 얻은 자기마당측정결과와 그 경향성이 매우 일치한다. 또한 얻어진 배위의 기하학적특성은 마당반전배위형성때 그 안정성조건을 충분히 만족시킨다.

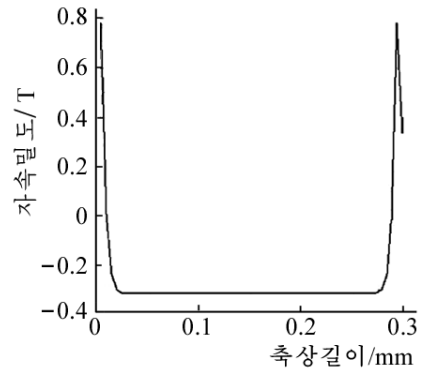


그림 5.  $20\mu s$ 인 시각 축방향에 따르는 자기마당분포

## 맺 는 말

우리는 CFD-ACE프로그램을 리용하여 자화표적핵융합표적형성의 선결조건인 마당반전배위형성과정에 대하여 모의하였으며 그 결과를 실험결과와 대비하여 정확성을 검증하였다.

모의과정을 통하여 마당반전배위의 형성과정을 리상적인 자기류체력학적과정으로 볼수 있다는것이 확인되었다. 또한 이에 기초하여 새로운 대상에 대하여 모의를 진행하였으며 그것과 유사한 장치실험에서 측정된 자기마당변화특성과 모의결과가 그 경향성에서 매우 잘 일치한다는것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. W. Binderbauer et al.; Physics of Plasmas, 10, 1063, 2015.
- [2] Masaaki Yamada; AIP Conf. Proc., 1721, 020005, 1, 2016.

주체106(2017)년 8월 5일 원고접수

## Study on Simulation of Formation of the Field-Reversed Configuration

Kim Il Hyok, Kim Thae Song

We simulated the process of field-reversed configuration that was a precondition for production of pre-magnetized target in magnetic target fusion and identified the correctness compared with experimental results by the CFD-ACE program.

Key words: nuclear fusion, FRC(Field Reversed Configuration), MTF(Magnetized Target Fusion)