

## 자화표적핵융합을 위한 금속라이너내폭과정에서 몇가지 특성량모의계산에 대한 연구

김일혁, 김래성

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《제국주의자들의 핵공갈과 침략위협이 계속되는 한 우리는 세대가 바뀌고 정세가 어떻게 변하든 절대로 핵을 약화시킬수 없으며 주체적인 원자력공업을 끊임없이 발전시켜나가야 합니다.》

표적압축때 일어나는 전자기압축과정과 그 특성량들에 대한 이론적해석은 자화표적핵융합의 실현가능성을 확증하고 가장 적중한 융합조건을 찾는데서 매우 중요한 문제이다.

우리는 자화표적핵융합(MTF)장치의 금속라이너내폭체계에서 자화표적에 대한 반경방향전자기적압축때 라이너의 운동과정과 그것의 온도, 라이너의 전기적파라미터들의 변화와 그 공간에서 플라즈마의 전자밀도 및 전자온도에 대한 이론적해석을 진행하고 모의하였다.

### 1. 금속라이너의 내폭과정에 대한 해석

금속라이너의 형태는 그림 1과 같다.[1]

내폭때 라이너압축힘에 의하여 라이너의 두께는 증가하며 또한 라이너의 반경은 감소한다.

금속라이너의 전자기적압축과정은 수십  $\mu s$ 의 매우 짧은 순간에 진행되며 센전류, 고전압방전이 동반되는 과정이므로 라이너가열과 용융때 일어나는 체적변화와 내부공간에서 표적과의 전자기적호상작용을 무시할수 있다.

이 경우 라이너용융액은 비압축성을 띠며 라이너압축과정을 단열압축과정으로 볼수 있다. 라이너의 두께( $d$ )와 반경( $r$ )사이관계는

$$d(r) = -r + \sqrt{r^2 + 2r_0d_0 + d_0^2}$$

로 표시된다.

압축때  $t$  시각의 라이너내부반경을  $r(t)$  라고 하면 라이너의 유도도  $L_{라}$  는 다음과 같다.

$$L_{라} = \frac{\mu_0}{2\pi} l \cdot \ln \frac{R_{기}}{r(t)} + \frac{\mu_0 l}{8\pi} \quad (1)$$

여기서  $R_{기}$ 는 전류회로의 귀환고리반경이다.

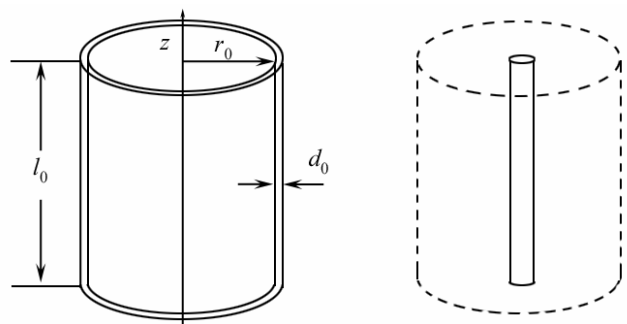


그림 1. 금속라이너의 형태

1) 라이너의 외형, 2) 라이너의 압축과정

라이너의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{d^2 r(t)}{dt^2} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla P \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 라이너재료의 밀도,  $\mathbf{B}$ 는 Z축방향전류가 만드는 자기마당세기,  $\mathbf{j}$ 는 라이너를 통하여 흐르는 축방향전류밀도로서 단위는  $A/m^2$ ,  $P$ 는 라이너에 작용하는 압력을 나타낸다.

식 (2)는 라이너의 반경방향에 따르는 힘평형을 나타낸다.

라이너의 내부에서 자기마당은  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\mathbf{I}}{r}$  로 표시되는데 여기서  $\mathbf{I}$ 는 라이너를 통하여 흐르는 축방향전류의 세기(A)이다.

한편  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$  로 표시된다.

이 두 식을 식 (2)에 대입하고 원기둥자리표계를 리용한 변환을 적용하면 라이너의 두께가 매우 얇은 경우의 운동방정식이 얻어진다.[2]

$$\rho d \frac{d^2 r(t)}{dt^2} = \frac{-\mu_0 I^2}{8\pi^2 r(t)^2} + 2n_e T + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

여기서  $2n_e T$ 는 라이너내부표면에서 플라즈마압력을 나타내며  $\frac{B^2}{2\mu_0}$ 은 플라즈마내부에서 축방향자기마당에 의한 자기압을 나타낸다.

내폭공간에서 수소밀도관계는 다음과 같이 유도할수 있다.[2, 4]

라이너공간에 중수소와 초중수소가 균일한 밀도분포를 가지고 채워졌다고 보고  $n_H$ ,  $n_{He}$ 를 각각 수소와 헬륨의 밀도라고 하면 그것들사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$n_{He} = \frac{1}{2} \left( n_0 \frac{r_0^2}{r^2} - n_H \right)$$

여기서  $n_0$ 은 초기수소밀도이고  $n_H = n_D + n_T$ 이다.

이 경우 시간에 따르는 수소밀도는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dn_H}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{N_H}{V} \right) = \frac{1}{V} \frac{dN_H}{dt} + N_H \frac{dV^{-1}}{dt} \quad (4)$$

여기서  $\frac{1}{V} \frac{dN_H}{dt} = -n_D n_T < \sigma v >_{DT}$  이며  $N_H \frac{dV^{-1}}{dt} = -\frac{N_H}{V^2} \frac{dV}{dt} = -\frac{2n_H}{r} \frac{dr}{dt}$  이다.

$n_D n_T < \sigma v >_{DT} = R_{DT}$ 는 중수소와 초중수소의 융합반응률로서 이온과 전자온도에 관계된다.[2, 7]

이로부터

$$\frac{dn_H}{dt} = -n_D n_T < \sigma v >_{DT} - \frac{2n_H}{r} \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

내폭체계에서 일어나는 과정의 에네르기평형식은 다음과 같다.

$$3n_e \frac{dT}{dt} = -\frac{2\rho}{r} \frac{dr}{dt} - P_{rad} \quad (6)$$

여기서  $P_{\text{rad}} = 1.692 \times 10^{-38} n_e (n_H + 2n_{\text{He}}) \sqrt{T}$  로 표시되는 제동복사출력이다.

한편 라이너가 련결된 전기회로에 대한 등가회로방정식은 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} = \left( \frac{\mu_0 l}{2\pi L_{\text{라}} r} \frac{dr}{dt} - \frac{R}{L_{\text{라}}} \right) \frac{du_C}{dt} - \frac{1}{L_{\text{라}} C} u_C \quad (7)$$

여기서  $u_C$ ,  $C$ 는 콘덴샤의 방전전압과 전기용량이다.

또한 라이너의 저항은 온도에 따라 다음과 같이 변한다.

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (8)$$

결과적으로 라이너의 동력학방정식계는 다음과 같이 구성된다.

$$\left. \begin{aligned} \rho d \frac{d^2 r}{dt^2} &= \frac{-\mu_0 I^2}{8\pi^2 r^2} + 2n_e T + \frac{B^2}{2\mu_0} \\ 3n_e \frac{dT}{dt} &= -\frac{2\rho}{r} \frac{dr}{dt} - P_{\text{rad}} \\ \frac{dn_H}{dt} &= -n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{\text{DT}} - \frac{2n_H}{r} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d^2 u_C}{dt^2} &= \left( \frac{\mu_0 l}{2\pi L_{\text{라}} r} \frac{dr}{dt} - \frac{R}{L_{\text{라}}} \right) \frac{du_C}{dt} - \frac{1}{L_{\text{라}} C} u_C \\ R &= R_0 (1 + \alpha(T - T_0)) \\ L_{\text{라}} &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R_{\text{기}}}{r(t)} + \frac{\mu_0 l}{8\pi} \end{aligned} \right\}$$

## 2. 모의계산 및 결과분석

라이너는 반경  $r_0 = 4.89\text{cm}$ , 두께  $d_0 = 1.1\text{mm}$ , 높이  $l_0 = 30\text{cm}$  인 속이 빈 원기둥형구조를 선택하였으며 라이너의 재질은 알루미늄으로 설정하였다.

라이너의 전자기적회로에 대하여  $C = 1300\mu\text{F}$ ,  $u_{C,0} = 80\text{kV}$ ,  $L_0 = 44\text{nH}$ ,  $R_{\text{기}} = 7.89\text{cm}$ ,  $R_0 = 1\text{m}\Omega$ ,  $T_{e0} = 300\text{eV}$ ,  $n_0 = 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 으로 설정하였다.

MATLAB의 ode45를 리용하여 위의 과정에 대한 해석을 진행한 결과들은 그림 2-7과 같다.

모의한 대상은 선행연구[5, 6]에서와 똑같은 기하학적구조 및 초기조건을 가진다.

그림 2에서 보는바와 같이 내폭시간이  $23\mu\text{s}$  정도일 때 라이너는 최대로 압축되며 그것의 반경은  $1.468\text{mm}$ 로서 선행연구결과와 거의 일치한다.

그림 3에서 보는바와 같이 라이너는  $18\mu\text{s}$  까지는 급속히 가열되지만 그 이후에는 온도변화가 없으며 이것은 내폭과정에 라이너의 증발이 거의 없다는것을 의미한다.

그림 4에서 보는바와 같이 내폭시간이  $10.17\mu\text{s}$  일 때 라이너를 통하여 흐르는 전류의 최대값은  $11.82\text{MA}$ 이며 선행연구결과와 약 7.5%의 오차를 가진다.

그림 5에서 보는바와 같이 최종압축속도가  $4200\text{m/s}$  이상으로서 보통 라이너압축속도를  $3 \sim 4\text{mm}/\mu\text{s}$  이상 보장하여야 한다는 이전 실험결과들[2, 3, 5]에서 밝힌 조건을 충분히 만족시킨다는것을 알수 있다.

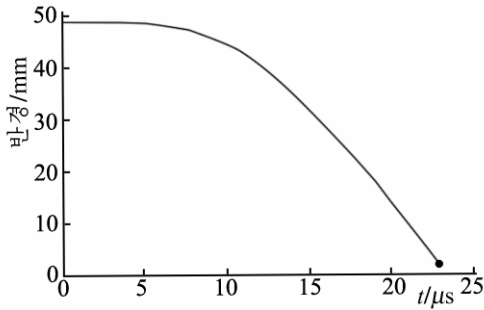


그림 2. 시간에 따르는 라이너의 반경변화  
표시된 점은 선행연구[5, 6]의 결과

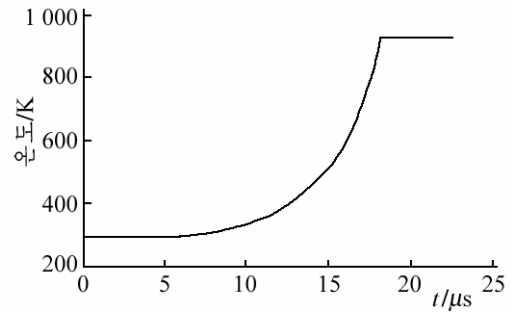


그림 3. 시간에 따르는  
라이너온도변화

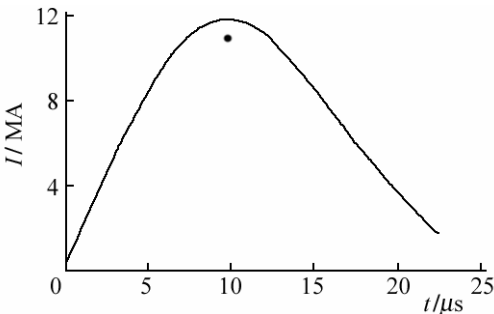


그림 4. 시간에 따르는 라이너전류세기변화  
표시된 점은 선행연구[5, 6]의 값

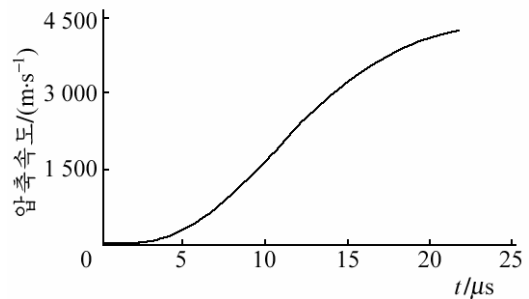


그림 5. 시간에 따르는 라이너압축  
속도변화

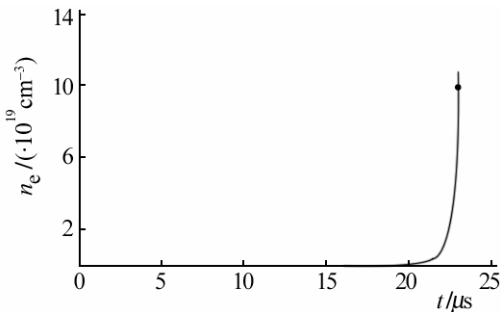


그림 6. 시간에 따르는 전자밀도변화  
표시된 점은 선행연구[2, 3, 7]의 결과

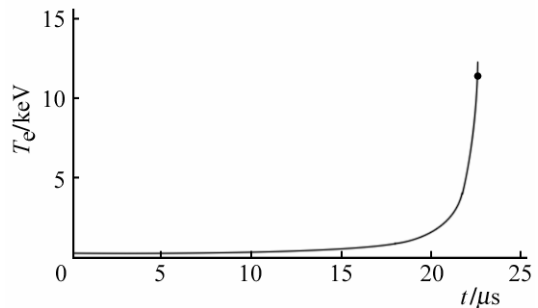


그림 7. 시간에 따르는 전자온도변화  
표시된 점은 선행연구[2, 3, 7]의 결과

그림 6, 7의 전자밀도와 전자온도에 대한 결과는 선행연구결과와 잘 일치한다.

모의계산과정에 전자온도는 10.6 keV, 전자밀도는 약  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  까지 이른다.

많은 실험결과와 모의자료, 이론적해석과정을 통하여 위의 대상인 경우 그리고 FRC(마당반전배위)표적을 리용하는 경우 그것의 플라즈마가두기시간은  $1 \mu\text{s}$  이다. 여기로부터  $n\tau$  를 계산하면 그값이  $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  로 된다. 이것은 전자온도 10 keV 에서의 로우손조건을 충분히 만족시킨다. 즉 이 방식에 의한 핵융합이 가능하다는것을 알수 있다.

한편 모의과정에 전기저항온도결수를 추가한 경우와 추가하지 않은 경우를 대비해보면 그것들의 차이는 거의나 없다.

이상과 같은 내용들은 앞으로의 핵융합모의체계구성에 얼마든지 리용될수 있을것이다.

## 맺 는 말

우리는 자화표적핵융합장치의 라이너내폭체계에서 자화표적에 대한 동경방향전자기적 압축때 라이너의 운동과정과 그 온도 그리고 라이너의 전기적파라미터들의 변화와 공간에서 핵연료의 전자밀도와 전자온도에 대한 이론적해석을 진행하였으며 이에 기초하여 모의 코드를 작성하고 모의를 진행하였다.

우리는 얻어진 모의결과들을 선행연구결과들과 비교하여 그 정확성을 확증하고 이로 부터 자화표적핵융합모의체계를 구성할수 있다는것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. Wurden et al.; Magneto-Inertial Fusion, LA-UR-14-23844, 2014.
- [2] H. S. Bosch et al.; Nuclear Fusion, 32, 4, 121, 1992.
- [3] W. I. Madison; LA UR-04-2578, 2004.
- [4] R. E. Siemon et al.; LA-UR-99-2956, 1999.
- [5] R. E. Siemon et al.; LA-UR-00-1081, 2000.
- [6] G. A. Wurden et al.; LA-UR-98-5674, 2009.
- [7] M. Taccetti et al.; Nuclear Fusion, 42, 211, 2002.

주체106(2017)년 3월 5일 원고접수

## **On the Simulation of Some Parameters in Imploding Process of Metal Liner for Magnetized Target Fusion (MTF)**

*Kim Il Hyok, Kim Thae Song*

We theoretically analyzed the movement process, temperature and electric parameters of a liner and the density and temperature of electrons in it, and made simulation code and simulated the process occurring in imploding system of liner for magnetized target fusion (MTF).

We compared our simulation results with the previously experimental and theoretical ones, and verified the correctness, so we constructed the foundation of MTF simulation system.

**Key words:** nuclear fusion, electromagnetic compression, liner