자기유체역학 코드를 이용한 축 대칭 엑스 핀치 플라즈마 구조의 2차원 전산해석

변상민¹⁾ · 나용수^{*,1)} · 정경재¹⁾ · 김덕규²⁾ · 이상준¹⁾ · 이찬영¹⁾ · 함승기¹⁾ · 류종현¹⁾

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부

²⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Numerical Simulation on the Formation and Pinching Plasma in X-pinch Wires on 2-D Geometry

Sangmin Byun¹⁾ · Yong-Su Na^{*,1)} · Kyoung-Jae Chung¹⁾ · Deok-Kyu Kim²⁾ · Sangjun Lee¹⁾ ·
Chanyoung Lee¹⁾ · Seunggi Ham¹⁾ · Jonghyeon Ryu¹⁾

¹⁾ Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Korea

²⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 30 November 2020 / Revised 18 January 2021 / Accepted 12 March 2021)

Abstract

This paper deals with the computational work to characterize the formation and pinching of a plasma in an X-pinch configuration. A resistive magnetohydrodynamic model of a single fluid and two temperature is adopted assuming a hollow conical structure in the (r,z) domain. The model includes the thermodynamic parameter of tungsten from the corrected Thomas-Fermi EOS(equation of state), determining the average ionization charge, pressure, and internal energy. The transport coefficients, resistivity and thermal conductivity, are obtained by the corrected Lee & More model and a simple radiation loss rate by recombination process is considered in the simulation. The simulation demonstrated the formation of a core-corona plasma and intense compression process near the central region which agrees with the experimental observation in the X-pinch device at Seoul National University. In addition, it confirmed the increase in radiation loss rate with the density and temperature of the core plasma.

Key Words : X-pinch(엑스 핀치), Magnetohydrodynamics(자기유체역학), Exploding Wires(세션폭발)

기 호 설 명

$I_{\max}$: Peak current (kA)

τ_r : Current rising time (ns)

B_{global} : Global magnetic field (T)

B_{local} : Local magnetic field (T)

* Corresponding author, E-mail: ysna@snu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

ρ	: Mass density (kg/m ³)
ρ_W	: Tungsten mass density (kg/m ³)
r_{wire}	: Wire radius (m)
T_e	: Electron temperature (eV)
n_e	: Electron density (/m ³)
P_{recomb}	: Recombination radiation (W/m ³)
Δ_{ei}	: Electron – ion exchange energy (W/m ³)
τ_{ei}	: Electron – ion collision time (s)

1. 서 론

대기압의 백만 배 이상의 강한 압력(> 1 Mbar)이 물질에 가해지면 중성입자가 전리되어 플라즈마 상태로 변하는데, 이를 고에너지밀도 플라즈마라고 한다. 이러한 플라즈마는 물질에 레이저를 조사하여 압축하는 관성 압축과 강한 펄스전류로 유도되는 자기장을 활용하는 자장 압축 방식으로 구분되며, 이중 펄스전류에 의한 세션의 내폭 현상(implosion)을 활용하는 자장 압축은 관성 핵융합(ICF, inertial confinement fusion), 방사선원(X-선), 중성자원으로 다양하게 활용되고 있다^[1]. 1990년대 초 미국의 산디아 국립연구소는 고전압 펄스전원장치를 통해 200 TW, 2 MJ의 세계기록의 X-선을 발생시켰으며, 2000년 이후부터는 원자번호가 높은 물질의 원통형 실린더 내폭 현상을 응용하여 핵 융합을 달성하는 Maglif(Magnetized liner inertial fusion), ZPDH(Z-pinch dynamic hohlraum)의 연구가 이루어지고 있다.

이러한 개념은 수소폭탄 개발과 직결되는 군사과학 분야로 오늘날 한반도 핵 위협이 고조되는 상황에서 고에너지밀도 플라즈마 연구는 핵 융합 현상을 활용한 무기의 위협을 이해하고 대비하기 위해서 필수적인 군사과학 분야라고 할 수 있다.

세션의 내폭 현상을 이용하는 연구 중 X자 형태로 연결한 세션에 고전압 펄스전류를 인가하여 중심부의 강한 플라즈마의 압축 현상을 활용하는 것을 엑스 핀치(X-pinch)라고 한다. 엑스 핀치 플라즈마는 짧은 시간(~ ps) 내에 중앙부의 고온, 고밀도 조건을 형성함으로써 고 출력의 방사선(X-선)을 방출^[2] 할 수 있으며, 물질과 부하의 구조를 달리함으로써 고 출력의 X-선을 한 곳에 집중시키거나 특성을 바꿀 수도 있다.

또한, 엑스 핀치는 일반적으로 알려진 세션을 원통

형으로 배치하여 내폭시키는 제트 핀치(Z-pinch)에 비해 비교적 작은 파워의 펄스 전원장치에서도 엑스선 발생과 강한 압축 조건을 형성할 수 있어서 대학 규모의 연구소에서 고에너지 밀도 플라즈마 현상을 연구하는 데 많이 활용된다.

엑스 핀치의 전산해석은 주로 미국, 영국, 러시아 등 일부 국가에서 이루어졌으며, 최근 주요 연구로는 1차원으로 해석한 Oreshkin, V. I(2017)^[3], 3차원으로 해석한 J. P Chittenden(2007)^[4], 2차원으로 해석한 Ivanenkov, G. V(2008) 연구^[5]가 있다. 세션 폭발과 관련된 수치 해석의 경우 일부 국가에 연구 노하우가 집중되어 있으며, 일반적인 코드 접근이 어렵다. 일부 공개 코드(FLASH, Chicago University)의 경우도 물성을 모사할 수 있는 물리 모델이 고려되지 않아서 다양한 물질에 따른 엑스 핀치 현상을 해석하는데 제한점이 많다.

이러한 제한점들로 인해 본 연구는 새로운 자기유체 역학 코드를 개발하고 엑스핀치 현상을 전산모사함으로써 코드를 검증하고자 한다. 먼저 제트 핀치(Z-pinch)나 세션 폭발과 관련된 물리 현상을 주로 해석하기 위해 영국 임페리얼 대학교에서 개발한 2차원 (r, θ) 버전의 자기유체역학코드인 GORGON^[6]을 벤치 마킹하여 (r, z) 버전으로 저항 자기유체역학 코드를 개발하였다. 물성 모델 없이 단순 내폭 현상 분석만 가능한 공개 코드와 차별적으로 토마스 페르미 기반의 상태방정식과 고밀도 상황에서 쿨롱 결합을 고려한 수송계수 모델^[7]을 이용하여 실제 실험과 비교 가능하도록 텅스텐 플라즈마의 특성을 모사하였으며, 이온화 평형 과정에서 발생하는 재결합 방사 손실 모델을 적용하였다.

이를 통해 본 연구진에서 개발한 엑스 핀치 장치를 대상으로 전산해석을 수행하고 엑스 핀치 플라즈마 구조에서 나타나는 코어 – 코로나, 마이크론 Z 핀치의 형성과 축 방향으로 확장되는 마이크론 Z 핀치 구조를 실험 사진과 비교하였다. 또한, 중앙부에서 생성되는 고온, 고밀도의 조건과 연계하여 증가하는 방사 손실에 대해서 살펴보았다.

2. 모델 및 수치해석 방법

2.1 X자 형태의 세션 부하

2개의 텅스텐 세션(Φ 25 μ m)을 X자 형태로 결합 후 고전압 펄스전원장치에 연결하였다. Fig. 1은 본 연구진에서 제작한 고전압 펄스전원장치와 엑스 핀치

부하의 개략도이다.

엑스 핀치는 3차원 구조이지만 엑스선 방출과 연관된 중앙 부분은 방전에 따라 원 기둥 형태로 발전하므로 중앙 부분을 방위각 방향의 대칭성을 가정한 속이빈 원뿔 형태(hollow conical structure)로 정의하였다. 다만, 세선의 개수에 따른 질량을 축 방향으로 동일하게 맞추기 위하여, 플라즈마의 밀도가 중앙부에서 멀어질수록 작아지도록 식 (1)과 같이 밀도를 정의하였다.

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (2\pi r) \rho_r dr = N_{\text{wire}} \rho_W (\pi r_{\text{wire}}^2) \quad (1)$$

$$N_{\text{wire}} = \text{세선 수}, \quad \rho_W = 19,500 \text{ kg/m}^3$$

$$r_{\text{wire}} = 12.5 \text{ } \mu\text{m}$$

Fig. 2. (a) X-pinch load of 2 tungsten wires in experiment (left); The red-line box (1.5 ~ 1.5 mm) is for computation and the schematic of hollow conical configuration (right), (b) 270-degree rotating image around the z-axis (above) and simulation domain (below)

Fig. 1. (a) Schematic of 100 kA pulsed power generator (left) and X-pinch wire load (right), (b) 100 kA pulsed power generator

2.2 고전압 펄스전원장치

본 연구진에서 개발한 100 kA급 고전압 펄스전원 장치 특성을 적용하여 전산모사를 수행하였다. 최대 전류 120 kA, 전류상승시간이 650 ns 고려하여 Fig. 3 과 같이 단일 사인과 형태의 전류 개형을 전산모사에 사용하였다. 이러한 가정은 본 연구의 목적이 실험과의 정량적 비교보다는 정성적인 엑스핀치 플라즈마 구조 형성 과정과 거동 분석에 주안을 두고 있음을 밝혀둔다.

$$I(t) = \frac{I_{\max}}{2} [1 - \cos(\pi \frac{t}{\tau_r})] \quad (1)$$

$$I_{\max} = 120 \text{ kA}, \quad \tau_r = 650 \text{ ns}$$

Fig. 3. Sinusoidal current profile of 100 kA pulsed power generator for simulation

2.3 엑스핀치 플라즈마 구조

Fig. 4는 엑스핀치에서 나타나는 주요한 플라즈마 구조로 중심부 - 코로나 구조, 중앙부의 마이크로 Z-핀치 (Micron Z-pinch)와 제트 구조가 있다. 엑스핀치 플라즈마는 다음의 단계로 변화한다.

- ① 플라즈마 형성 및 삭마 과정(ablation)
- ② 고전압 펄스장치로부터 유도되는 자기장(B_{global}), 세선에 흐르는 전류로 유도되는 국부 자기장(B_{local}) 변화와 플라즈마 거동
- ③ 전자기력($j \times B_0$)에 의한 압축과 제트(jet) 구조
- ④ 중앙 부분의 마이크로 사이즈의 플라즈마 기동 (micro Z-pinch) 형성 및 엑스선 발생

Fig. 4. Schematic of X-pinch plasma structure: mass density contour [$\log_{10}(\text{kg/m}^3)$] demonstrate the core-corona structure, micron Z-pinch and jet structure

2.4 저항 자기유체역학(Resistive MHD) 모델

본 연구에 사용한 코드는 단일 유동에 이온 온도 (T_i)와 전자 온도(T_e)를 따로 계산(Single fluid, Two temperature) 하며, Van-Leer 이류 기반의 수치 기법을 이용한다. 코드에 적용된 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla (p_{ion} + p_{elec}) + \bar{j} \times \bar{B} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial \epsilon_{ion}}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_{ion} \bar{u}) = -p_{ion} \nabla \cdot \bar{u} + \nabla \cdot (\kappa_{ion} \nabla T_{ion}) + \Delta_{ie} \quad (2c)$$

$$\frac{\partial \epsilon_{elec}}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_{elec} \bar{u}) = -p_{elec} \nabla \cdot \bar{u} + \nabla \cdot (\kappa_{elec} \nabla T_{elec}) + \eta |\bar{j}|^2 - Q_{rad} + \Delta_{ei} \quad (2d)$$

식 (2b) 운동량 식은 이온과 전자 간의 충돌 (collision)이 충분한 상황에서 유동의 운동량이 이온에 의해 결정되는 단일 유동을 가정한다. 즉, 전자에 의한 운동량 변화의 영향을 무시하면 플라즈마의 운동량은 대부분 이온에 의하여 결정되며, 에너지 식은 전자와 이온을 분리하지만, 플라즈마의 유동은 식 (2b)

와 같이 단일 유동(single fluid)을 가정할 수 있다.

이온과 전자의 속도가 평형을 이룬 경우 일반적인 형태의 옴의 식(generalized Ohm's law)을 전자와 이온의 속도 차이에서 기인하는 홀 효과(Hall effect) 등 부가적인 항 들을 생략한 축약된 형태의 옴의 식(degenerated Ohm's law)^[8]으로 전기장(E)을 기술할 수 있다. ($\bar{E} = \eta \bar{j} - \bar{u} \times \bar{B}$) 이를 패러데이식 ($\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\nabla \times \bar{E}$)과 연결하면 자기장($\bar{B}$)은 이류 항(advection)과 확산 항(diffusion)으로 구성된 식 (3a)로 기술되며 이를 통해 전류밀도는 식 (3b)와 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \nabla \times (\bar{u} \times \bar{B} - \frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \bar{B}) \quad (3a)$$

$$\bar{j} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \bar{B} \quad (3b)$$

식 (3b)로부터 얻어진 전류밀도($\bar{j}$)는 식 (2b)의 운동량 식과 연결하여 플라즈마 운동량에 영향을 미친다.

식 (2c), (2d)에서 ϵ_{ion} , ϵ_{elec} 과 p_{ion} , p_{elec} 은 각각 이온과 전자의 내부에너지와 압력을 나타낸다. 내부에너지와 압력은 수정된 토마스 페르미 상태방정식 모델로부터 플라즈마의 밀도와 온도 조건에 의해 결정된다; $\epsilon_{ion,elec}(\rho, T)$, $p_{ion,elec}(\rho, T)$.

이온의 내부에너지(ϵ_{ion})는 상태방정식으로부터 얻어진 압력에 단열지수(γ) 5/3를 적용하여 $\epsilon_{ion} = p_{ion}/(\gamma-1)$ 얻어지며, 전자의 내부에너지(ϵ_{elec})는 $\epsilon_{elec} = p_{elec}/(\gamma-1) + (n_{elec} \times Q(\bar{Z}))$ 로 관계로 기술한다. 여기서, Q는 평균 이온화도($\bar{Z}$)에 따른 이온화 포텐셜을 말한다.

κ_{ion} , κ_{elec} , η 는 각각 이온과 전자의 열전도도 계수와 전기저항도를 나타낸다. 세션이 폭발하면서 플라즈마로 변화하는 과정은 상온에서 수천 eV까지의 온도 범위와 고체 상태에서 플라즈마까지 다양한 밀도 범위를 형성하므로 광범위한 영역을 포함할 수 있도록 Lee & More 수송계수 모델을 적용하였다. 특히, 밀도가 높은 영역에서 쿨롱 결합(coulomb coupling effect) 효과를 고려한 모델^[10]을 사용하였다.

식 (2d)의 Q_{nd} 는 복사손실 에너지이며 방출되는 복사손실 에너지가 흑체 복사 손실 에너지를 넘을 수 없도록 정의하였다. 상태방정식 모델로부터 얻어진 플

라즈마의 평균 이온화도($\bar{Z}$), 밀도, 온도의 항으로 방사손실의 방출률을 표현하며, 충돌이 많은 플라즈마(collisional plasma) 영역에서 이온화 평형과정에 따른 재결합(recombination process) 과정만을 고려하였다.

$$P_{recomb} = 1.69 \times 10^{-38} n_e T^{1/2} \Sigma [Z^2 n(Z) (\frac{E_{\infty}^{Z-1}}{T_e})] \quad (4)$$

여기서, E_{∞}^{Z-1} 은 텅스텐 세션의 이온화 에너지를 나타낸다.

또한, 식 (2c)와 (2d)에서 Δ_{ei} , Δ_{ie} 는 전자와 이온 간의 온도 차이에 따른 에너지 교환율^[11]을 나타내며 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\Delta_{ei} = \frac{3m_e}{m_i} \frac{n_e}{\tau_{ei}} (T_e - T_i) \quad (5)$$

여기서 $\tau_{ei} = 3.44 \times 10^5 \frac{T_e^{3/2}}{Z^* n_e \Lambda}$ [sec]는 이온과 전자 간의 충돌시간(s)을 나타낸다.(Z^* : 평균 전하, Λ : 쿨롱 로그리즘)

자기장의 시간 변화는 진공에서 빛의 진행 속도를 가정한 시간 간격(time-step)으로 기술하며, 플라즈마 유동의 변화는 음속과 자기장의 알펜 속도의 평균값 $\sqrt{C_s^2 + V_A^2}$ 을 적용한 시간 간격을 적용한다. 계산 상 자기장의 변화에 따른 짧은 시간 간격이 플라즈마 유동의 상대적으로 긴 시간 간격까지 루프(loop) 안에서 계산되며, 자동적으로 CFL 조건을 충족하도록 한다.

2.5 초기설정

엑스 핀치 부하의 중앙 부분을 기준으로 총 높이 1.5 mm, 반경 1.5 mm로 해석구간을 정의하였으며, 세션의 초기온도는 0.1 eV를 기준으로 난수값을 이용하여 초기온도 섭동을 부여하였다.

$$T_{e,0} = 0.1^{(1+\chi)} \text{ [eV]} \quad \chi \text{ 난수, [0,1]} \quad (6)$$

초기온도 섭동은 각 셀마다 서로 다른 플라즈마의 저장계수(η)를 결정하며, 서로 다른 옴 가열에 따라 셀마다 다른 온도의 차이로 에너지가 변화한다. 실제 세션 폭발 현상에서도 축 방향에 따라 플라즈마 기동

이 자기장에 의해 압축되는 정도가 다르며, 이는 플라즈마의 불안정성 ($m = 0$) 구조로 발전한다. 이러한 초기조건에 대한 정확한 원인은 밝혀지지 않았지만 세션 재질의 불균일성 등 여러 가지 원인으로 추정하고 있으며, 이를 위해 수치해석에서는 축 방향에 따른 밀도 섭동 또는 온도 섭동을 부여한다. 즉, 초기 온도의 섭동 조건은 서로 다른 음 가열에 따른 삭마율을 의미한다. 경계 조건은 Fig. 2(b)에서 왼쪽 부분은 대칭 경계조건(axis symmetry)으로 설정하며, 나머지 부분은 출구 경계조건(zero gradient)으로 설정하였다. $6 \mu\text{m}$ 크기의 총 62,500개 (250×250)셀에 대하여 병렬 계산을 수행하였다.

3. 수치해석 결과

Fig. 5. (a)는 방전시간에 따른 엑스 핀치 플라즈마의 밀도 등고선 변화를 나타낸 것이다. 방전 초기, 전류는 표면 효과(skin effect)로 인해 세션 표면의 코로나 플라즈마로 주로 진행하며 저항 가열 등을 통한 삭마 과정이 발생한다. 이 때, 발생한 코로나 플라즈마는 세션에 수직인 방향으로 팽창하며, 온도가 낮고 밀도가 높은 중앙부를 온도가 높고 밀도가 낮은 플라즈마가 둘러싼 코어-코로나(core-corona) 구조를 형성한다. 이 후 전류는 전기전도도가 우수한 플라즈마로 진행하면서 자기장의 구조를 변화시키는데, 고전압 펄스장치로부터 유도된 자기장(B_{global})과 세션의 전류 흐름으로 인해 유도된 국부자기장(B_{local})의 전체적인 위상이 변화하면서 전자기력에 의한 플라즈마의 유동이 변하게 된다. 하지만, 본 연구의 2차원 (r, z) 해석 결과에서는 단일 세션에 작용하는 3차원 형태의 자기장 모사가 제한되므로 고전압 펄스전원 장치에서 유도되는 방위각 방향의 자기장(B_{global})이 주로 영향을 미치는 중앙 부분과 상대적으로 영향을 적게 미치는 부분으로 분리하여 설명할 수 있다. Fig. 5. (a)에서 중앙부에서 생성된 플라즈마는 반경 방향으로 팽창 (200 ns) 하다가 중앙 부분의 증가한 전자기력으로 인해($j_z B_\theta$) 플라즈마가 내측으로 내폭, 압축되는 구조 (250 ns, 280 ns)를 나타낸다. 310 ns부터는 안쪽으로 강해지는 전자기력과 축 방향의 압력 기울기의 평형 과정(Bennet equilibrium)을 통해 축 방향으로 모인 플라즈마가 원 기둥 형태의 구조를 유지한 채 정체 상태(stagnating phase)를 유지한다. Fig. 5. (a)에서 서로

다른 삭마율에 따라 생성된 플라즈마는 국부적으로는 서로 다른 속도로 팽창하지만, 250 ns부터는 부하 전체의 증가한 방위각 방향의 자기장 영향으로 인해 축 방향으로 서서히 압축되는 형태를 나타낸다. 압축이 형성된 비 균일한 플라즈마 기둥은 플라즈마 불안정성 구조 ($m = 0$)로 발전하며, 310 ns 이후부터는 초기 텅스텐 밀도인 $19,500 \text{ kg/m}^3$ 대비 최대 ~1.8배 까지 압축되는 구간($35,000 \text{ kg/m}^3$)이 발생한다. 이렇게 고온, 고밀도의 조건이 형성된 압축 지점(pinching point)에서 활발한 재결합 과정을 통해 급격한 방사 손실이 발생한다. 또한, 축 방향으로 형성된 비 균일한 구조의 플라즈마 기둥은 정체 상태를 유지하는 동시에 축 방향을 통한 질량 수송에 의하여 길이가 증가하게 된다.

전산해석 결과를 실험결과와 비교해 보았다. Fig. 5. (b)는 일반 DSLR 카메라를 이용하여 10초 동안 노출하여 촬영한 텅스텐 엑스 핀치 플라즈마의 가시광 이미지이다. 2차원 전산해석에서 나타나는 중앙부에서 발생하는 축 방향의 플라즈마 수송과 세션의 내폭에 따른 이미지가 전산해석 결과와 유사함을 확인하였다.

Fig. 6은 전산모사에서 얻어진 200 ~ 350 ns에서의 전자와 이온의 에너지, 방사 손실의 에너지 변화를 시간별로 나타내고 있다. 310 ns부터 축 방향으로 압축된 플라즈마가 고온, 고밀도의 조건을 형성하면서, 방사 손실이 증가함을 확인하였으며, 엑스핀치 중앙의 강한 압축 조건이 강한 방사선(X-선) 방출과 연관이 있음을 알 수 있다.

자기유체역학 코드를 이용한 축 대칭 엑스 핀치 플라즈마 구조의 2차원 전산해석

Fig. 5. (a) Mass density evolution (kg/m^3): Plasma expansion at 200 ns, Implosion and the formation of Micron Z-pinch in center at 250 ns and 280 ns, Stagnating phase and extend micron Z-pinch to axial direction at 310 ns and 320 ns. mass density region is 10 to 350,000 (kg/m^3) (b) X-pinch time-integrated (10 seconds) image of 2 tungsten wires

Fig. 6. Time evolution of electron work ($p_{elec} \nabla \cdot \vec{v}$), ion work ($p_{ion} \nabla \cdot \vec{v}$) and radiation loss (Q_{rad}) from 200 ns to 350 ns

4. 결 론

본 연구에서는 저항 자기유체역학 코드를 이용하여 텅스텐 세션의 엑스핀치 현상에 대해 2차원 (r, z) 전산해석을 수행하였다. 방전 초기 코어-코로나 구조, 플라즈마의 내폭 현상, 중앙부의 마이크론 Z 핀치 구조의 형성과 축 방향으로 확장하는 마이크론 Z 핀치의 구조 등 엑스핀치에서 발생하는 주요현상들이 전산모사에서 재현됨을 확인하였다. 또한, 실제 실험장치에서 얻은 플라즈마 구조와 정성적으로 비교하여 그 유사성을 확인하였으며, 중심부에서 형성된 고온, 고밀도의 플라즈마 조건에 따라 증가하는 방사 손실의 출력을 확인하였다. 향후에는 3차원 해석을 위해 코드를 확장하고 물리 모델을 보완할 예정이다. 그리고 엑스핀치 실험장치의 진단장치를 개발하여 정량적인 비교연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방특화연구실 사업의 일환으로 수행되었으며, 대한민국 해군의 장학금 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Liberman, M. A., Groot, J. S. D., Toor, A. & Spielman R. B., "Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas," Springer New York, p. 238, 1999.
- [2] Pikuz, S. A., Shelkovenko, T. A. & Hammer, D. A., "X-pinch. Part I," Plasma Physics Reports, 41, 291-342, 2015.
- [3] Oreshkin, V. I., Artyomov, A. P., Chaikovsky, S. A., Oreshkin, E. V. & Roussikh A. G., "Simulation of the Radiation from the Hot Spot of an X-pinch," Physics of Plasmas, 24, 012703, 2017.
- [4] Chittenden, J. P., Ciardi, A., Jennings, C. A., Lebedev, S. V., Hammer, D. A., Pikuz, S. A. & Shelkovenko T. A., "Structural Evolution and Formation of High-Pressure Plasmas in X-Pinches," Physical Review Letters, 98, 2007.
- [5] Ivanenkov, G. V., Stepniewski, W. & Gus'kov, S. Y., "MHD Processes During the Cascade Development of the Neck and Hot Spot in an X-pinch Plasma," Physics Reports, 34, 619-638, 2008.
- [6] Chittenden, J. P., Lebedev, S. V., Jennings, C. A., Bland, S. N. & Ciardi, A., "X-ray Generation Mechanisms in Three-dimensional Simulations of Wire Array Z-pinches," Plasma Physics and Controlled Fusion, 46, B457-B476, 2004.
- [7] Kim, D.-K., Chittenden, J. P., Lebedev, S. V., Marocchino A. & Suzuki-Vidal, F., "Magnetohydrodynamic Simulation of Tungsten Wire in Wire-Array Z Pinch," Contributions to Plasma Physics, 50, 115-120, 2010.
- [8] R. J. Goldston and P. H. Rutherford., "Introduction to Plasma Physics," IOP Publishing Ltd, pp. 116-118, 1995.
- [9] More, R., "Pressure Ionization, Resonances, and the Continuity of Bound and Free States," Advances in Atomic and Molecular Physics, 305-356, 1985.
- [10] Kim, D.-K. & Kim, I., "Calculation of Ionization Balance and Electrical Conductivity in Nonideal Aluminum Plasma," Physical Review E, 68, 2003.
- [11] S. I. Braginskii, "In Reviews of Plasma Physics," Ed. by M. A. Leontovich Vol. 1, Consultants Bureau, New York, p. 232, 1965.