

중성자 발생용 구형 집속빔 핵융합 장치의 방전현상 연구

A Study on Discharge Phenomenon of Spherically Convergent Beam Fusion Device for Neutron Generation

박정호¹, 주흥진¹, 고광철^{2,a}
(Jeong-Ho Park¹, Heung-Jin Ju¹, and Kwang-Cheol Ko^{2,a})

Abstract

Application field of neutron beam is very broad including industry, medicine and science. But the research and development and use of neutron beam is restricted within in narrow limits in this country, because neutron beam facility is insufficient - a big research facility of nuclear reactor(HANARO) and some small industrial facilities which use radioisotope neutron source are available. This paper compare and investigate the results of experiment and numerical analysis of the discharge in the spherically convergent beam fusion device which were expected as a portable neutron source. The spherically convergent beam fusion device will offer stability in neutron production, possibility of movement for convenience, low construction cost and higher neutron flux than radioisotope neutron source. The star mode discharge which efficiently generate neutron, were observed at both results.

Key Words : Neutron beam, Spherically convergent beam fusion, Star mode discharge

1. 서 론

양성자, 중성자 등의 핵자빔 기술은 현재는 물론 21세기를 이끌고 가는 미래지향적 핵심기술이다. 특히 중성자 빔은 핵자료 생산, 핵폐기물 분석, 중성자 라디오그래피, 공항 및 항만에서의 우편 소화물 보안검색(마약, 폭발물, 핵물질), 방사화 분석 연구(PGAA), 계측기 및 선량계 검교정, 지뢰탐지, 석유·광물탐지, BNCT(Boron Neutron Capture Therapy), 신소재 연구 등 산업, 의학, 학문적으로 활용범위가 매우 넓다. 현재 이용되는 중성자원으로는 원자로, 핵파쇄 중성자원, 동위원소를 이용한 중성자 발생장치, neutron tube 등이 있다[1]. 원자로나 핵파쇄 중성자원은 중성자속이 높지만 시설의 규모가 크고 건설비용 또한 매우 높아 활용 범

위가 제한되며, neutron tube는 소규모이나 비교적 낮은 중성자속 때문에 이용이 제한적이다. 국내에서의 중성자 빔 이용시설 역시 대형 연구시설인 연구용 원자로(하나로)와 동위원소 중성자원을 사용하는 소수의 산업시설에 제한되어 있어 연구개발 및 활용이 극히 미비하다. 하지만 구조가 간단하여 소형으로 제작하여 휴대용의 중성자 발생장치로도 이용이 가능하고, 중성자속에 있어서도 동위원소 중성자원보다 커서 중성자 빔 응용연구를 위한 소규모의 중성자 빔 시설 구축에 적합한 구형 집속빔 핵융합 장치를 이용한 중성자원을 개발한다면 중성자빔을 이용한 학문적 연구개발 및 의학, 산업적 활용이 크게 증대될 것으로 기대된다. 본 논문에서는 이용범위가 넓은 중성자 발생을 위한 구형 집속빔 핵융합 장치의 방전 현상에 대하여 연구하였다.

- 1. 한양대학교 전기공학과
- 2. 한양대학교 전기제어생체공학부
(서울시 성동구 행당1동 17)

a. Corresponding Author : kwang@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2007. 3. 19
1차 심사 : 2007. 4. 12
심사완료 : 2007. 4. 21

2. 본 론

2.1 구형 집속빔 핵융합

바깥쪽의 구형 양극과 동심원적으로 위치한 안

쪽의 쇠창살 모양의 음극 사이에서 글로 방전을 일으키고 이때 생성된 이온을 음극 안쪽으로 가속시켜 서로 반대 방향의 이온이 충돌할 때 발생하는 핵융합 반응을 구형 집속빔 핵융합이라 한다[2]. 구형 집속빔 핵융합 장치에 방전이 일어나면 이온들은 플라즈마 상태가 되고, 따라서 고밀도 플라즈마가 발생되어야 효율적인 핵융합 반응이 일어날 것이다. 핵융합을 위한 구형 집속빔의 개념은 1950년대 초에 텔레비전 개발자인 P. T. Farnsworth에 의해 처음으로 제안되었으나[3] 별로 주목받지 못하다가, 다른 핵융합 장치와 달리 구조가 매우 간단하여 소형화 할 수 있어 1990년대 들어와서 핵융합 반응 때 발생하는 중성자를 이용한 휴대용 중성자 발생장치로써 연구되기 시작하였다.

2.2 실험장치의 구성

실험 장치는 스테인리스 스틸 망으로 만들어진 지름 20 cm의 양극과 동심원적으로 위치한 직경 0.2 cm 스테인리스 스틸 철사로 만든 지름 5 cm의 쇠창살 모양의 음극으로 이루어진다. 양극과 음극은 안정성과 진공유지를 위해 지름 22 cm, 높이 20 cm의 진공 용기 안에 놓여진다. 용기내의 압력을 터보분자펌프에 의해 고진공 상태를 유지하다가 아르곤 기체를 주입하여 저압 상태를 만든 후 펄스파워를 전극에 인가한다. 펄스파워를 발생하기 위한 전원과 에너지 저장장치, 스위치 및 스위치 동작을 위한 공기압축기, 트리거 발생기, 발생된 트리거를 필요한 전압까지 승압시켜주는 펄스변압기가 실험 장치에 연결되어 있다.

2.3 펄스파워의 발생

실험장치의 수명을 연장하고 적은 소비 전력에 비해 효율적인 고밀도 플라즈마를 장치 내에 발생시키기 위하여 음극에 펄스파워를 인가하였다. 펄스파워는 주어진 에너지를 극히 짧은 시간 내에 부하에 방출시킴으로써 얻어질 수 있다. 펄스파워 시스템은 전원, 에너지 저장장치, 스위치 및 부하로 구성되고 특히, 고밀도, 고효율의 에너지 저장장치와 축적된 에너지를 부하에 효율적으로 전달하는 스위치는 펄스파워 시스템에서 핵심적인 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 펄스파워를 발생시키기 위한 에너지 저장장치로 50 kV까지 충전 가능한 용량 0.1 μ F의 커패시터를 사용하였고, 충전된 에너지를 부하에 전달하는 단락스위치로는 갭 스위치인 트리가트론을 사용하였다. 펄스파워 시스템에서 스위치로서 트리가트론을 쓰는 이유는

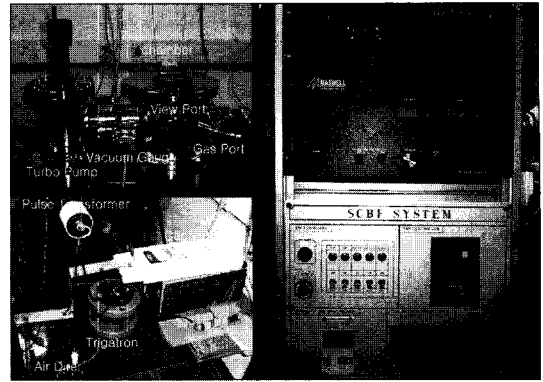


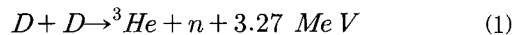
그림 1. 실험장치의 사진.

Fig. 1. Photo of experimental device.

높은 절연과피 전압, 절연과피까지의 짧은 지연시간, 지연시간에서의 작은 변동 및 빠른 전압 붕괴 시간 때문이다[4].

2.4 방전실험

고진공 상태의 실험 장치에 아르곤 기체를 주입하여 일정한 압력 2.667 Pa을 유지한 상태에서 음극에 25 kV의 음펄스 전압을 인가하여 방전실험을 하였다. 음극의 안쪽에 밝은 플라즈마 코어가 발생하였고, 이것으로부터 방사성 방향으로 빛이 퍼져나가는 현상을 관측할 수 있었다. 구형 집속빔 핵융합 장치의 방전현상은 star mode 방전, central spot 방전, halo mode 방전의 세 가지 형태로 분류할 수 있다[5]. 실험을 통하여 관측된 방전은 star mode 방전으로써 만약 실험 장치에 아르곤 기체 대신에 중수소 기체를 주입한다면, 글로 방전에 의해 발생된 중수소 이온들이 음극 중심으로 가속되어 D-D 핵융합 반응을 할 것이며 그 때 중성자가 발생할 것이다. D-D 핵융합 반응식은 다음과 같다.



핵융합 반응이 일어나기 위해서는 중수소 이온들이 그들 사이에 작용하는 척력(쿨롱의 힘)을 극복하기에 충분한 에너지를 가져야한다. 두 원자핵의 전하량을 각각 Z_1e 와 Z_2e 라하고 충돌 반경을 R_0 라 하면, 핵융합 반응에 필요한 에너지는 다음과 같다.

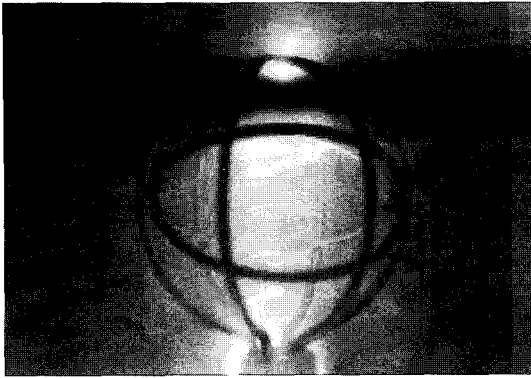


그림 2. 아르곤 기체를 사용한 펄스방전의 사진.
Fig. 2. Photo of pulsed discharge with Ar gas.

$$E_{Coul} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R_0} \quad (2)$$

중수소의 경우 $Z_1=Z_2=1$ 이고, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ F/m와 $R_0 = 5 \times 10^{-15}$ m을 사용하면 $E_{Coul} = 286$ keV를 얻을 수 있다[6]. 하지만 양자역학 터널링에 의해서 핵융합 반응은 실제적으로 더 낮은 에너지에서 발생할 수 있다.

일반적으로 글로방전이 일어날 때 두 전극 사이에 흐르는 방전전류는 방전전압이 증가함에 따라 선형적으로 증가하고[7], 중성자 발생량과 밀접한 관계가 있다. 따라서 중수소 기체를 사용할 때의 방전전류와 방전전압 사이의 관계를 명확히 규명할 수 있으면 중성자 발생량 증대에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2.5 전산모사

구형 집속빔 핵융합 장치의 방전 개시를 모의하기 위해 하전입자의 운동 및 atomic processes를 MCM(Monte Carlo Method)을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서 모의된 입자는 중수소 이온 (D^+ , D_2^+)과 빠른 중성입자 (D^0 , D_2^0) 및 전자 (e^-)이다. 이들 입자들이 MCM을 이용하여 각 time step(10^{-12} s)에서 추적되었다. 초기조건으로 각각 2000개씩의 에너지가 0인 입자를 난수를 발생시켜 장치 내에 무작위로 분포시켰고, 음극에 -40 kV의 전압을 인가하였으며, 압력은 1.33 Pa로 하였다. 또한 이온이 음극에 유입될 때마다 이차전

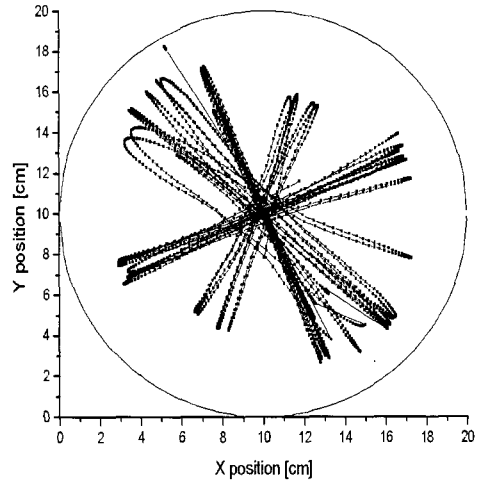


그림 3. D_2^+ 이온의 궤도.
Fig. 3. Orbit of D_2^+ ion.

자를 발생시켜 방전이 지속되도록 하였다. Atomic processes는 전자의 경우 탄성충돌과 전리충돌만을, 이온 및 빠른 중성입자의 경우 탄성충돌과 전하교환충돌(charge exchange collision)만을 고려하였다.

그림 3은 D_2^+ 이온의 궤도를 추적한 것이다. 음극 중심에서 방사성 방향으로 이온들이 움직이는 star mode 방전현상을 확인할 수 있다.

3. 결론

중성자 발생을 위한 구형 집속빔 핵융합 장치의 음극에 펄스전압을 인가하였을 때 발생하는 방전현상을 관측하였고, 전산모사를 통하여 중수소 이온의 궤도를 확인하였다. 실험과 전산모사 모두의 결과로부터 음극 중심에서 방사성 방향으로 이온들이 움직이는 star mode 방전현상을 관측할 수 있었다. Star mode 방전은 구형 집속빔 핵융합 장치에서 발생할 수 있는 여러 형태의 방전들 중에서 중성자를 가장 효율적으로 발생시킬 수 있는 방전이다. 따라서 실험장치내에 아르곤 기체 대신에 중수소 기체를 주입한다면 소형의 중성자 발생장치를 개발할 수 있을 것으로 생각된다. 발생하는 중성자의 양은 방전이 일어날 때 흐르는 방전전류에 비례한다. 앞으로의 연구는 음극의 기하학적 구조와 대칭성의 변화 및 방전조건을 통한 방전전류의 증대 방안을 모색하고 중수소 기체를

이용한 실험을 통해 중성자 발생여부 확인과 발생량의 계측이 필요할 것이다.

참고 문헌

- [1] 최희동, "방사선 이용 확대를 위한 중성자 발생 장치 핵심기술 연구", 2단계연구보고서, p. 1, 2005.
- [2] K. Yamauchi, K. Ogasawara, M. Watanabe, A. Okino, Y. Sunaga, and E. Hotta, "Neutron production characteristics and emission properties of spherically convergent beam fusion", *Fusion Technology*, Vol. 39, p. 1182, 2001.
- [3] W. C. Elmore, J. Tuck, and K. Watson "On the inertial-electrostatic confinement of a plasma", *Phys. Fluids*, Vol. 2, No. 3, p. 239, 1959.
- [4] S. J. MacGregor, F. A. Tuema, S. M. Turnbull, and O. Farish, "The influence of polarity on trigatron switching performing", *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol. 25 No. 2, p. 118, 1997.
- [5] G. H. Miley, J. Javedani, Y. Yamamoto, R. Nebel, J. Nadler, Y. Gu, A. Satsangi, and P. Heck, "Inertial-electrostatic confinement neutron/proton source", *Proc. 3rd Int. Conf. Dense Z-Pinches*, p. 675, 1994.
- [6] K. Nishikawa and M. Wakatani, "Plasma Physics", Springer, p. 156, 2000.
- [7] 곽동주, 하양진, 신용섭, 최연석, "글로우 방전 플라즈마에 의한 탄산가스 전환특성", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 3호, p. 249, 1998.