

플라즈마 포커스(Plasma Focus)

기술개발 동향

한상보 <경남대학교 교수>

1. 서 론

펄스파워(Pulsed power) 기술을 이용하여 콘덴서에 충전된 정전에너지를 스위칭 순간에 방출시켜 진공 내에 매우 높은 전계가 생성되도록 함으로서, 전기적 파괴(Breakdown)에 따른 전류 시스(Current sheath)가 일정한 경로를 따라서 가속되어 전극 끝에 핀치(Pinch)를 생성시킨다. 이때 고온·고밀도 플라즈마 채널이 생성되는데 이러한 기술을 플라즈마 포커스(Plasma Focus, PF)라고 한다. 끝단에 생성된 플라즈마 포커싱에 의하여 매우 짧은 시간에 이온과 전자의 가속에 의하여 X-ray, 중성자 빔, 이온 빔과 같은 전자기파를 발생시킬 수 있다. 또한, Z-pinch, Θ -pinch, Wire-implosion 등과 더불어 펄스파워 플라즈마를 이용하여 전자기파를 발생시키는 것이 가능하다. PF 장치에서 발생된 X-ray는 고온의 플라즈마(\sim keV) 내 전자의 제동복사에 의한 것이며, 중성자 빔은 고온·고밀도 플라즈마 자체에서 발생하는 열핵융합 반응(thermonuclear fusion)과 가속된 중수소 이온이 다른 중수소와의 충돌에 의한 핵융합 반응(beam-target fusion)을 일으키는 두 가지 모델 중에서 후자가 중성자 발생에 보다 높은 가능성이 있는 것으로 밝혀지고 있다[1-3].

최근 연구동향으로는 저에너지 Mather형 PF 장치를 이용하여 중수소 방전에 의한 고에너지 이온빔 및 중성자 빔 발생 특성에 대하여 논하였으며[1], 차세대 리소그래피 기술로서 65nm 이하의 빛을 나노급 반도체 소자 양산기술에 적용하기 위하여 PF 장치를 이용한 EUV(Extreme Ultraviolet: 10~15nm)의 발생 및 출력특성에 대한 연구가 진행되었다[4]. 또한, 펄스형 PF 장치를 이용하여 X선 발생위치 및 3keV 이상인 X선을 PIN 포토다이오드와 핀홀 카메라로 측정된 결과에 대하여 논하였다[5].

본 기술원고는 PF 장치의 구조 및 최적 설계를 위한 일반적인 파라미터에 대하여 분석을 실시하였으며, PF 장치 제작을 위한 기초 파라미터에 대하여 논하였다.

2. 본 론

2.1 플라즈마 포커스 장치의 구조 및 동작특성

1960년대 N. V. Filippov와 J. W. Mather에 의해 PF 장치가 개발되었으며, 개발 초기에는 핵융합을 위한 예비실험 장치로서 연구되었지만, 최근에

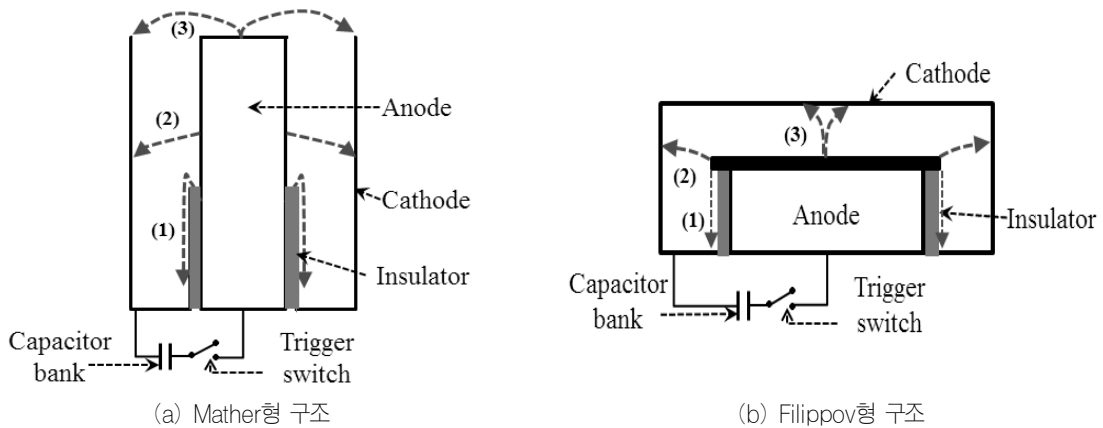


그림 1. 플라즈마 포커스 장치의 구조[6-7]

는 핵융합 장치 응용연구는 진행되고 있지 않다. PF 장치의 에너지 밀도는 수십 kJ에서 수백 MJ에 이르기까지 매우 광범위하게 개발되었으며, 작은 사이즈의 PF 장치도 대형 장치처럼 전자온도 및 밀도를 비슷하게 발생시킬 수 있다고 보고되고 있다. 대형 장치는 방사 에너지를 높일 수 있는 큰 체적의 PF를 생성시키는 것이 가능하며, 수 kJ(수백 kA)의 PF 장치는 수십 nanoseconds 동안 고밀도의 플라즈마 상태로써 빔의 방사가 유지되며, 수 MA의 대형 장치에서는 마이크로초 동안 유지하는 것이 가능하다.

그림 1과 같이 PF 장치는 Mather형과 Filippov형 장치로서 2가지 구조로 분류되며, Mather형 장치는 수 마이크로초에서 수십 마이크로초까지 유지할 수 있지만, Filippov형 장치는 Mather형에 비교하여 축방향으로 진전시간이 매우 짧은 단점이 있다. 두 구조 모두 내부 양극전극 주위에 절연체로 절연되어 있으며, 동축케이블 형태의 구조를 이루고 있지만 종횡비가 상이함을 알 수 있다. Filippov형 구조는 종횡비가 일반적으로 0.2로서 1보다 작은 값이며, Mather형 구조는 종횡비가 5~10으로서 1보다 크다고 볼 수 있다[6].

전극 종횡비(aspect ratio) = 전극길이/내부 전극 직경

그림 1에서 트리거 스위치를 닫아 콘덴서에 충전된 정전에너지가 순간적으로 양극과 음극사이에 인가될 때 시간에 따른 동작순서는 다음과 같으며, 각 단계별 방전개시 후 시간에 따른 측정결과를 그림 2에 나타내었다[8].

2.2 설계 파라미터 기초이론[9-10]

필스파워 전원장치의 에너지에 의존하는 핀치에서의 전류는 수십 kA에서 수 MA까지 변화되며, 축방향으로 진전되는 전류 시스의 일반적인 속도는 $v_a = 1 \times 10^5 [m/s]$ 이며, 핀치 압축 속도는 $v_p = 2.5 \times 10^5 [m/s]$ 로 제안되어 있다. 핀치 온도는 200eV ~ 1keV 범위에 해당되며, 밀도는 $\sim 10^{24} - 10^{26} [m^{-3}]$ 의 범위에 있다고 알려져 있다. Lee[9]는 축방향 및 방사상 방향으로 전류 시스의 속도 모델을 제안하였는데, 이를 구동 파라미터(Drive parameter)라고 불린다.

$$v = \frac{I_0}{ap^{1/2}}$$

기술래설

1 단계	양극에서 음극으로 절연체를 경유하여 (1)과 같이 초기 방전 시작	그림 2 (a)
↓		
2 단계	축대칭 전류 시스가 (2)와 같이 생성되면서 양극(Anode) 전극의 끝 방향으로 가속되어 진전. 이때 회로의 전체 인덕턴스는 증가되며, 콘덴서 बैं크의 정전에너지가 전류 시스의 운동에너지로 전달되어 가속되는 단계를 의미.	그림 2 (b)
↓		
3 단계	시스가 양극(Anode) 전극의 끝으로 이동하여 (3)과 같이 강한 필라멘트상 플라즈마를 축방향으로 생성	그림 2 (c)
↓		
4 단계	양극 끝단 중심부에서 축방향 위쪽으로 핀치 생성	

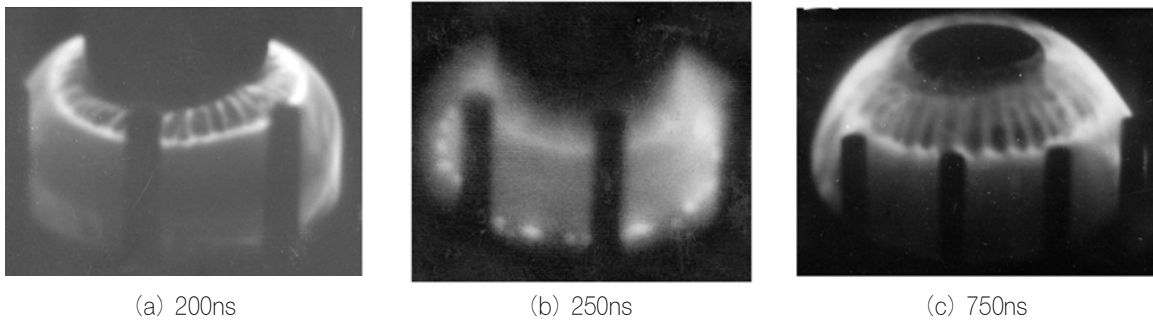


그림 2. 방전 개시 후 시간에 따른 플라즈마 포커스 장치의 동작 측정결과(8)

여기서 I_0 : 전류의 피크값, a : 양극 반경, p : 가스 압력

또한, 핀치의 길이(z_p)와 핀치 반경(r_p)은 양극 반경에 비례하여 아래와 같은 관계가 있다.

$$z_p = 0.8a, \quad r_p = 0.12a$$

적절한 양극의 길이(z_a)를 결정하기 위해서는 핀치 순간과 전류가 피크치가 동일한 순간에 발생된다는 점으로부터 축방향 속도 $v_a = 1 \times 10^5 [m/s]$ 와 방사상 속도 $v_r = 2.5 \times 10^5 [m/s]$ 로부터

$$\frac{z_a}{v_a} + \frac{a}{v_r} = \frac{T}{4}$$

로 계산할 수 있다. 여기서 T 는 방전 주기를 의미한다.

그리고, 방사상 방향으로의 플라즈마 칼럼에 대한 인덕턴스(L_p)와 저항성분(R_p)은 아래와 같이 제안되어져 있다.

$$L_p = \frac{\mu_0}{2\pi} z_p \ln \frac{b}{r_p}, \quad R_p = \frac{z_p}{\sigma \pi r_p^2}$$

여기서 b : 음극 반경(m), σ : 전기 전도율($S.m$)
또한, 중성자 빔의 수율(Y)은 피크 전류의 3.3승에 비례하며, 부분적으로 4.7승에 비례한다는 결과를 제안하기도 하였다.

표 1은 다양한 PF장치들의 동작특성 및 구조를 나타낸 것으로서, 구동 파라미터는 SPEED2 장치를 제외하여 대부분 $68 \sim 95 [kA/cm.mbar^{1/2}]$ 영역에 있음을 알 수 있으며, 매우 높은 에너지 밀도에서 낮은 에너지 밀도 이르기까지 파라미터 대부분이

표 1. 다양한 플라즈마 포커스 장치들의 제원(9)

Device [reference]-location	Energy <i>E</i> (kJ)	Anode radius <i>a</i> (cm)	Peak current (kA)	Pressure (mbar)	Energy density parameter $28E/a^3$ ($J\ m^{-3}$)	Driven factor $I_0/ap^{1/2}$ (kA mbar ^{-1/2} cm)
PF-1000 [8]-Poland	1064	12.2	2300	6.6	1.6×10^{10}	73.4
PF-360 [60]-Poland	130	6	1200	1.6	1.7×10^{10}	61.4
SPEED2 [11]-Chile	70	5.4	2400	2.7	1.2×10^{10}	270
7 kJ PF [63]-Japan	7	1.75	390	6	3.7×10^{10}	91
GN1 [13]-Argentina	4.7	1.9	—	—	1.9×10^{10}	—
Fuego Nuevo II [47]- Mexico	4.6	2.5	350	3.7	0.8×10^{10}	73
UNU/ICTP-PFF [4]- Asia and Africa	2.9	0.95	172	8.5	9.5×10^{10}	81
PACO [14, 47]- Argentina	2	2.5	250	1.5	3.6×10^9	95
PF-400J [31]-Chile	0.4	0.6	127	9	5.2×10^{10}	70
PF-50J [33]-Chile	0.07	0.3	60	9	7.3×10^{10}	66.7
	0.05	0.3	50	6	5.2×10^{10}	68

$\times 10^{10} [J/m^3]$ 영역으로서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 최근에는 PF 장치가 1J보다 작은 에너지에 의해서도 동작 가능하다는 주장도 제기되고 있다. 에너지 밀도 파라미터는 표 1과 같이 여러 실험결과를 종합하여 아래 식과 같이 도출되었다.

$$D = \frac{28E}{a^3} [J/m^3]$$

여기서 E: 콘덴서 뱅크에 저장되는 에너지(J), a: 양극 전극의 반경(m)

그림 2는 다양한 플라즈마 포커스 장치의 구조 및 동작특성을 나타낸 것으로서, 그림 2 (b)는 ICCD 카메라에 의해 측정된 그림 2 (a) 장치의 펀치 이미지를 보였다. ICCD 이미지 중앙에 밝게 보이는 부분이 펀치로서 길이가 약 6mm에 해당된다. 그림 2 (c)는 이온 및 X-ray 측정을 위한 PF구조로서 이온을 Faraday cup으로 측정하기 위해서는 핀 홀 등을 적절히 설계해야만 하며, 그림 2 (d)는 중수소 가스의

압력에 따른 중성자 빔의 수율을 보인 것으로서, 가스 압력이 적절한 범위에 있는 8~10mbar 영역에서 최대수율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 2 (e)는 PF 장치에서 발생된 X-ray에 의해 측정된 BNC T형 구조를 보인 것으로서, 내부가 명확히 구별됨을 알 수 있다.

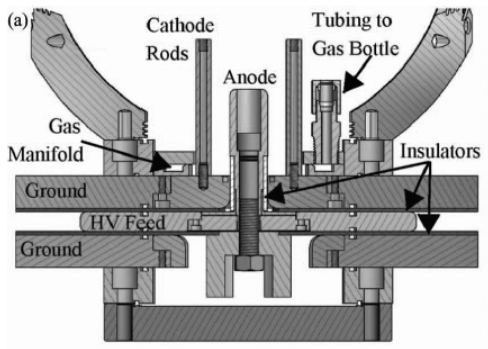
3. 설계시 고려사항

3.1 특성 측정가능한 구조 설계

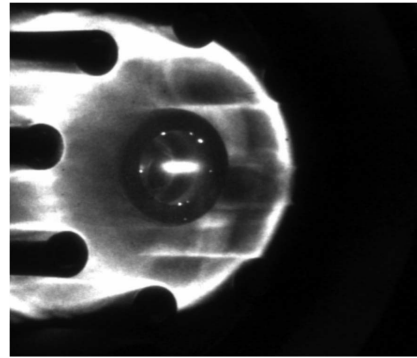
전류가 흐를 때 주위에 발생하는 자장과 도선과의 자속 쇄교에 의해 발생하는 유기전압을 측정하여 교정함으로써 실제 전류를 측정할 수 있다. 그림 3에서 직사각형 부분의 빈 공간을 통과하는 자속과 1회 회전된 코일과 쇄교함에 의하여 전류의 시간변화에 따른 전압신호를 측정할 수 있다.

$$V = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{dI}{dt}$$

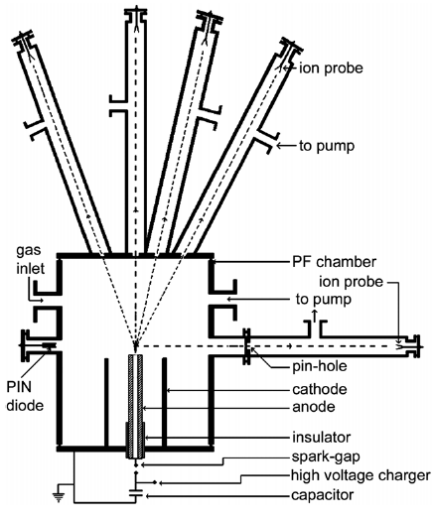
기술래설



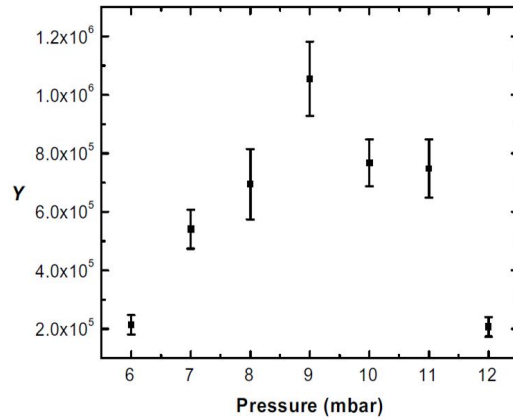
(a) 수 kJ급 PF 장치의 세부구조[11]



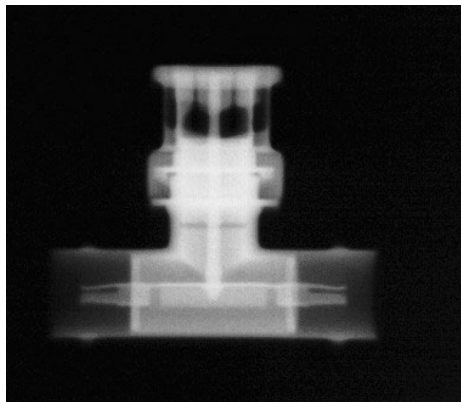
(b) (a)장치에서 핀치 ICCD 카메라 이미지[11](1.2kJ, 27kV, D_2 gas 5.3mbar, gate: 20ns)



(c) 이온, X-ray 측정을 위한 PF구조[12]



(d) PF-400J 장치에서의 가스 압력에 따른 중성자 수율관계[9]



(e) X-ray에 의해 측정된 BNC T형 구조 (PF-400J 장치)[9]

그림 2. 다양한 플라즈마 포커스 장치의 구조 및 주요 특징

여기서 $A[m^2]$ 는 자속 통과면적을 의미하며, N 는 턴수(turns), $l = 2\pi R(m)$ 로서 평균자로 길이를 의미한다.

그림 3 (b)에서와 같이 전류 센서의 원신호가 0가 되는 시간에 실제의 전류신호는 적분에 의하여 최대치를 나타내며, 원신호가 최대인 경우는 적분 신호가 최소로 됨을 알 수 있다. 또한, 전류가 흐르는 방향과는 반대방향으로 전압이 유기되므로 -신호로 출력됨을 알 수 있다.

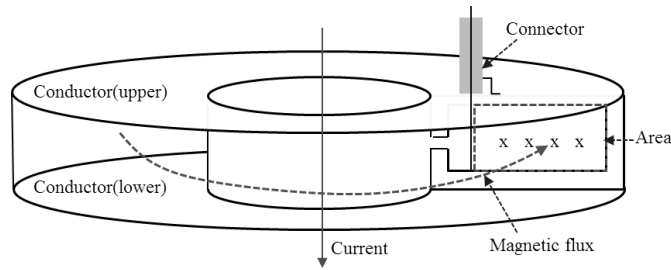
이처럼 PF장치 설계 단계에서 전류, X-ray, 이온빔, 중성자 빔 등을 측정할 수 있는 기본 구조를 고려해야만 한다.

3.2 피크 전류와 인덕턴스·구동 파라미터와의 상관관계

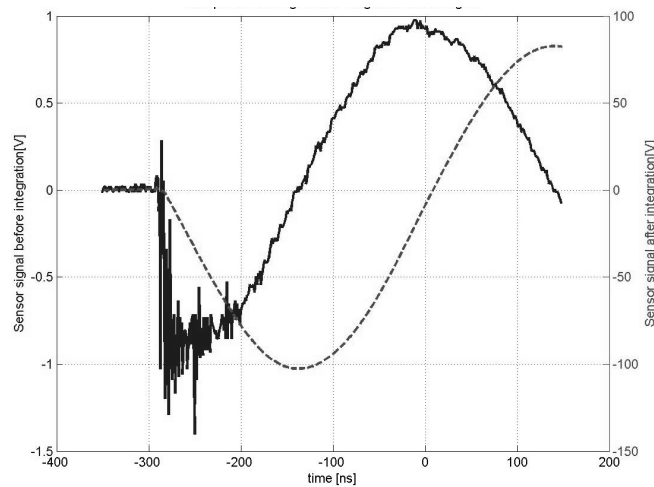
플라즈마 포커스 장치에서 외부의 전기에너지를 플라즈마로 최대한 효과적으로 전달하기 위해서는 많은 전류가 핀치로 전달되어야 하며, 전류시스가 높은 전기 전도율을 유지하도록 해야 한다. 이를 위해서는 외부 펄스파워 전원과 구동부 사이의 임피던스를 낮게 해야만 한다.

또한, 중성자 수율은 구동 파라미터에서 압력에도 의존하지만 주로 피크 전류의 크기에 의존한다고 볼 수 있다.

그림 4는 다양한 수식들에 근거하여 Matlab을 이

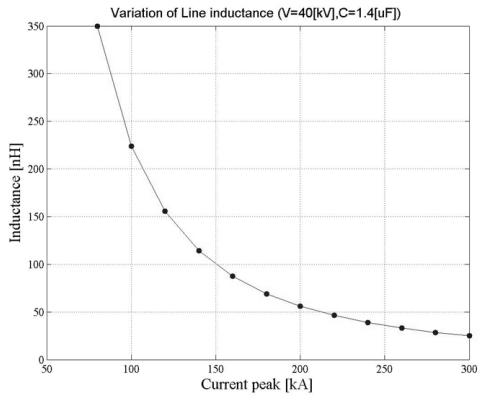


(a) 전류 측정용 코일부의 구조

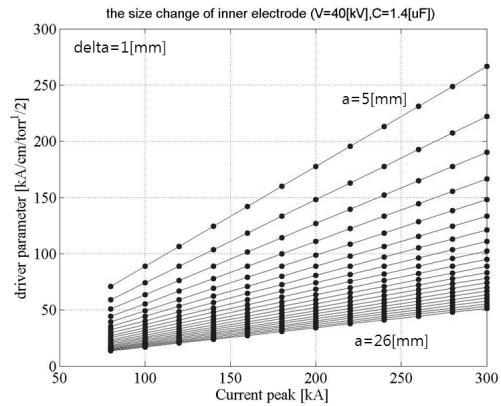


(b) 전류센서 출력 전압과 적분값의 비교

그림 3. 전류 측정용 코일부의 구조 및 출력값의 특징



(a) 피크 전류와 인덕턴스의 상관관계



(b) 양극 직경 변화에 따른 피크 전류와 구동 파라미터와의 상관관계

그림 4. 피크 전류와 인덕턴스 및 구동 파라미터와의 상관관계

용한 계산 결과를 보인 것으로서, 펄스파워 충전용 콘덴서 전압 40kV, 용량 1.4μF 고정된 경우에 대하여 나타내었다. 그림 4 (a)는 피크 전류와 플라즈마 칼럼의 인덕턴스와의 상관관계를 나타낸 것이다. 약 200kA에서 50nH가 되며, 이보다 전류가 증가됨에 의하여 플라즈마 칼럼은 지수 함수적으로 감소됨을 알 수 있다. 또한, 그림 4 (b)는 내부 전극의 반경의 크기를 5mm에서 26mm까지 변화시킴에 따른 구동 파라미터 값의 변화를 보인 것으로서, 피크 전류값과의 의존성을 나타내었다. 일반적인 구동 파라미터의 값은 60~100 사이이므로 그 사이의 범위에 존재하는 반경(a)의 크기와 피크 전류의 상관관계를 명확히 파악한 후 PF장치 설계한다면 원하는 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 인덕턴스 값이 가능한 최소가 되도록 설계하는 것이 바람직 하지만, 그림 4 (b)에서와 같이 피크 전류를 상승시킴에 따라서 PF 장치의 전체 외형이 증가되는 결과를 초래한다.

4. 결 론

본 기술해설에서는 고에너지밀도 연구그룹(High Density Energy Research Group, 미국)에 의해

활발한 연구가 진행되고 있는 플라즈마 포커스 (Plasma Focus) 장치의 기본 동작특성 및 기초 이론에 대하여 논하였다.

본 기술을 이용하여 실험실 규모의 작은 공간에서도 X-ray, 중성자 빔, 이온 빔 등을 발생시켜 다양한 첨단 응용실험이 가능하므로 국내에서도 효율적인 PF장치 개발을 위한 기초적 특성측정 연구가 필요할 실정이다.

이러한 PF 장치를 개발하기 위해서는 나노초 영역에서의 측정기술, 이온 빔 및 X-ray 측정을 위한 방사선 분야의 전문기술, 펄스파워 설계 및 절연기술, 트리거 전원 및 스위치(trigatron) 개발, 대용량 콘덴서 개발 등이 필요하다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김재연, “플라즈마 포커스 장치를 이용한 펄스 중성자 발생에 관한 연구”, 석사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [2] F. Castillo, M. Milanese, R. Moroso, and J. Poujo, “Evidence of thermal and non-thermal mechanisms coexisting in dense plasma focus D-D nuclear reactions”, J. Phys. D: Appl. Phys. 33, 141, 2000.
- [3] M. G. Haines, S. V. Lebedev, J. P. Chittenden, F. N. Beg, S. N. Bland, and A. E. Dangor, “The Past, Present, and Future of Z Pinches”, Physics of Plasma 7, 1672, 2000.
- [4] 문민욱, “플라즈마 포커스 장비를 이용한 EUV (Extreme Ultraviolet:10~15nm) 빛샘의 설계 및 특성진단”, 박사학위논문

- 문, 광운대학교, 2007.
- [5] 최운상, 문병연, 곽호원, “펄스형 방전플라즈마에서 발생하는 X선 측정”, J. Korean Opt. Soc., Vol. 11, No. 4, 311-315, 2006.
 - [6] A. BERNARD et. al., “The Dense Plasma Focus - A High Intensity Neutron Source”, Nuclear Ins. and Methods, Vol. 145, 191-218, 1977.
 - [7] J. W. Mather, “Formation of High-Density Deuterium Plasma Focus”, The Physics of Fluids, Vol. 8, No. 2, 1965.
 - [8] Maria Magdalena Milanese and Roberto Luis Moroso, “The First Stages of the Discharge in a Low-Energy Dense Plasma Focus”, IEEE Trans. On Plasma Sci., Vol. 33, No. 5, 1658-1661, 2005.
 - [9] Leopoldo Soto, “New trends and future perspectives on plasma focus research”, Plasma Phys. Control. Fusion, Vol. 47, A361 - A381, 2005.
 - [10] S. Lee, T. Y. Tou, et. al., “A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion”, Am. J. Phys., Vol. 56, 62-67, 1988.
 - [11] J. L. Ellsworth et. al., “Design and initial results from a kilojoule level dense plasma focus with hollow anode and cylindrically symmetric gas puff”, Review of Sci. Ins., Vol. 85, 013504, 2014.
 - [12] H. Bhuyan, M. Favre1, E. Valderrama, H. Chuaqui, and EWyndham, “Experimental studies of ion beam anisotropy in a low energy plasma focus operating with methane”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 39, 3596 - 3602, 2006.

◇ 저 자 소 개 ◇



한상보 (韓尙甫)

1998년 경남대학교 전기공학과 졸업.
2000년 동 대학원 전기공학과 졸업
(석사). 2004년 동경대학교 전자공학과
졸업(박사). 2015년 UCSD 방문교수.

현재 경남대학교 전기공학과 교수.

Tel. : (055)249-2635

E-mail : hansangbo@uok.ac.kr