

Marx Generator의 출력전류 측정 및 Blumlein 송신선의 동작 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Measurement of Output Current of Marx Generator by Rogowski Coil and Operating Characteristics of Blumlein Transmission Line

강형부·김상훈·육종철

한양대학교 공과대학

정은관·이천*

"

1. 서론

플라즈마는 일반적으로 전도도가 크므로 플라즈마 확산시간 보다 짧은 시간 동안에는 플라즈마 외부에서 걸어진 자장이 내부로 침투해 들어오는 것을 막는다. 이때 플라즈마는 급격히 단열압축되어 비전리된 기체를 전리시키고 온도를 높여주며, 플라즈마 표면에 유기된 표면전류가 급격히 흐를 때 증가비가 큰 미시적 불안정성이 유기되고 이로인해 생기는 난류(Turbulence)는 비정상적으로 크게 플라즈마를 가열하여 플라즈마의 온도를 핵융합 온도까지 증가시킨다. 제타판치는 이러한 단열압축 및 난류가열을 이용하는 장치(1)로서 전원부, 펄스 형성부, 자장 발생코일 및 플라즈마 발생부로 이루어져 있다. 전원부에서 발생된 원만한 수 마이크로의 펄스전압은 Blumlein 회로를 거치면서 감소되지 않고 펄스의 상승시간(Rise time)과 소멸시간이 짧아져서 거의 단펄에 가까운 파형이 된다. 이 회로를 거친 전압이 편치코일에 걸리면 플라즈마 발생부의 축방향으로 큰 펄스 자장이 만들어지고 플라즈마 발생용기 내부의 기체를 급격히 전리시켜 플라즈마를 만들 뿐 아니라 이 플라즈마를 압축, 가열시킨다. 본 연구는 전원부로 최대출력이 200kV이고 저장에너지가 2kJ인 Marx Generator를 설계

제작하여 Rogowski coil을 이용하여 정상 출력전류를 측정하고, Blumlein 송신선 및 편치코일로 구성되는 펄스형성 회로계의 동작 특성을 실험적으로 조사하여 이미 만들어진 복합회로계의 펄스형성 이론(2)(3)에 의한 펄스손실(Pulse profile)과 비교 분석함을 목적으로 한다.

2. 실험

1) Marx Generator

이 장치는 0.5μF, 40kV인 콘덴서 5개를 병렬로 하여 40kV의 전압으로 충전하였다가 이들을 순간적으로 직렬발전시켜 200kV의 펄스전압을 만들어 내며, 이 고전압은 Blumlein 송신선에 연결된다.

2) Blumlein 송신선 및 편치코일

Blumlein 송신선은 새 겹의 동판과 그 사이의 마일러(Mylar)로 구성된 두개의 평판 콘덴서와 절연판 스위치로 이루어지며(4) 송신선의 윗 판과 아래 판은 편치코일에 연결하도록 되어 있고, 편치코일은 두께 2mm인 황동판을 사용하여 직경 300mm, 길이 360mm인 원통형으로 만들어졌다.

3) 플라즈마 발생용기

원통형 용기는 외경 200mm, 두께 12mm, 길이 1000mm인 국산 특경질 유리를 사용했고, 용기의 배기에는 로터리 펌프와 확산펌프를 사용했으며 각종 프로브 및 진공계 등이 설치되도록 제작했다.

4) 실험 방법

Marx의 출력 전류는 주반경이 50mm, 종반경이 5mm, 권수 20회인 알루미늄 Rogowski coil을 사용하여 측정하였으며, Blumlein 송신선의 동작 특성에 따른 핀치코일 내부의 빠른 펄스형 자장의 측정은 자기유도 프로브와 적분회로를 통하여 오실로스코프로 관측했다.

3. 결과 및 분석

Rogowski coil에 유기되어서 RC 적분회로를 통하여 관측된 전압 V와 Marx Generator의 출력전류 I와의 관계는 다음과 같다.

$$V = (L_r / R_r C_r N) I(t)$$

여기서 L_r , N 는 각각 Rogowski coil의 인덕턴스 및 권수이다. 이 실험으로부터 얻은 Marx Generator의 정상 출력 전류는 핀치코일에 축 방향으로 발생한 자장을 이용하여 계산된 값과 거의 일치 함을 보였다. 자기유도 프로브와 적분

회로를 통과한 오실로스코프의 신호전압 펄스 ($V_{osc}(t)$)로 부터 자장 $B(t)$ 를 직접 계산 (5) 하면 다음 식과 같다.

$$B(t) = (RC / nA) V_{osc}(t) = 1870 V_{osc}(t) (G)$$

여기서 n 은 유도코일의 권수, A 는 자장방향의 단면적이다. 또한 자기유도코일의 기전력으로부터 핀치코일 양단의 지이크 전압 V_c^0 는 다음 식과 같다.

$$V_c^0 = (2\pi RC / nT) (r_o / r_r)^2 V_{osc}^0 = 1.04 \times 10^4 V_{osc}^0 (V)$$

여기서 T 는 신호전압의 주기, r_o 는 핀치코일의 반경, r_r 은 유도코일의 반경이다. Marx의 출력을 변화시키면서 용기의 중심에서 측정된 신호전압 사진으로부터 펄스를 이용하여 계산하면 표 1과 같다. 표 1에서 핀치코일의 양단전압은 Marx 출력 전압의 약 17% 정도로 나타났으며 최대 27kV까지 걸어 줄 수 있었고 이때 중심에서의 자장의 세기는 약 5kG 정도이다. 또한 이 자장의 펄스 상승시간은 100ns 이하로, 앞에서 측정된 Marx 출력전류파형의 상승시간인 수 μs 보다 매우 빨라졌는데 그 이유는 다음과 같다. Blumlein 송신선의 전파속도 v 는 $v = 1 / (L_t C_t)^{1/2} = 1 / (Z C_t)$

표 1. 자장과 핀치 코일 전압에 대한 실험 결과

Output voltage of Marx generator V_o (kV)	Oscilloscope's voltage signal V_{osc}^0 (Volt)	Magnetic Field B_z^0 (kG)	Pinch coil voltage V_c^0 (Volt)
80	1.3	2.43	1.35×10^4
100	1.6	2.99	1.66×10^4
120	1.9	3.55	1.98×10^4
140	2.3	4.30	2.39×10^4
160	2.6	4.86	2.70×10^4

여기서 L_t , C_t 는 각각 송신선의 인덕턴스 및 정전용량이며, l 은 송신선의 길이, Z 는 송신선의 특성임피던스이다. 따라서 ZC_t 를 작게 할수록 v 는 빠라짐을 알 수 있다. 이 제타핀치 회로계를 Marx로 구성된 집중회로, 핀치코일로만 구성되는 또 다른 집중회로, Blumlein 송신선으로 구성되는 본포회로 등의 복합회로로 생각하여 송신선의 신호전자이론과 집중회로에 대한 키르히호프의 법칙에 의해 만든 펄스정형 이론 (2) (3) 을 이용하여 이 장치의 Parameter들로부터 예측되는 펄스온도를 표 2 와 같이 얻었다. 여기서 L_c 는 핀치코일의 인덕턴스이고 L, R 은 각각 Marx 내부의 총 인덕턴스 및 저항이다. Marx 출력이 $100kV$ 일 때 표 1 과 표 2 를 비교하면 실험치는 $L = L_c$ 와 $L = 10 L_c$ 사이에 해당하는 핀치코일전압과 자장의 세기를 갖는 것을 알 수 있으며 L 의 값을 이 이하로 낮추어 주면 더 크고 더 빠른 고전압펄스를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결 론

인덕턴스가 매우 낮은 콘덴서를 다량 구입하기 어려운 현 대학연구실 수준에서 빠른 펄스를 얻기 위해서는 Blumlein 송신선의 사용이 효과적임을 알 수 있다. 또한 펄스정형이론에 맞추어 제타핀치의 parameter를 설계 제작하면 성능이 더 좋은 장치를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

(1) Kenro Miyamoto, "Plasma Physics for Nuclear Fusion", MIT Press, (1980) 441
 (2) S.H.Kim and W.K.Chung, "Analysis of the Circuit System of a Theta Pinch", KIEE, 32, 277 (1983)
 (3) S.H.Kim and W.K.Chung, "Transmission Circuit and System", (Submitted to IEEE)
 (4) A.W.Desilva et al., "Collisionless Shock Waves and Turbulent Heating in High Voltage Theta Pinch", Univ. of Maryland, CN-24/A-8, (1968)
 (5) R.H.Lovberg, "Plasma Diagnostic Techniques" edited by R.H.Huddleston and S.L.Leonard, Academic Press, (1965) 76

표 2. 자장과 핀치 코일 전압에 대한 이론값

Inductance of lumped circuit: L	Resistance of lumped circuit: R	Pinch coil voltage: V_c^0 (Volt)	Half period: $T/2$	Magnetic field: B_z^0 (kG)
$0.1 L_c$	0.001 Z	1.56×10^5	$3.45 t_0$	7.02
	0.1 Z	1.51×10^5	$3.5 t_0$	6.90
	Z	1.07×10^5	$3.75 t_0$	5.24
L_c	0.001 Z	2.6×10^4	$5.8 t_0$	3.80
	0.1 Z	2.5×10^4	$5.9 t_0$	3.72
	Z	2.4×10^4	$6.0 t_0$	3.63
$10 L_c$	0.001 Z	9.3×10^3	$9 t_0$	1.09
	0.1 Z	9.2×10^3	$9 t_0$	1.08
	Z	9.1×10^3	$9 t_0$	1.07