

乱流加熱 세타핀치의 高電壓 펄스 特性에 관한 研究

論 文

33~11~5

Study on the High Voltage Pulse Profile Characteristics of a Turbulently Heated Theta Pinch

姜 衡 富* · 鄭 運 官** · 陸 鐘 澈***

(Hyung-Boo Kang · Woon-Kwan Chung · Chong-Chul Yook)

The fast-rising high-voltage pulse generation circuit system of a theta pinch is both theoretically and experimentally investigated.

The idealized model of this circuit system is a hybrid circuit system composed of three parts: a lumped circuit part being consisted of a capacitor bank and a spark switch connected in series, another lumped circuit part being consisted of entirely the pinch coil of the the theta pinch, and a distributed circuit part being consisted of the Blumlein transmission line, whose end load is the pinch coil. The voltage difference between two ends of the pinch coil is formulated by analyzing this hybrid circuit system by means of the law of the signal propagation in the transmission line and Kirchhoff's laws. The expedient numerical method for computer calculation is developed to generate the pulse profile of the voltage difference across the pinch coil.

The period of the experimentally measured main pulse is a fourth of the theoretical one neglecting the resistance of the pinch coil. We attribute this discrepancy to the modelling in the theoretical calculation that the resistance and inductance of the spark switch and capacitor bank are assumed to be constant through discharge. Therefore, we can see that the rise time of the imploding magnetic-field pulse is mainly dependent on the spark switch and capacitor bank.

1. 서 론

난류가열 세타핀치는 자장 밀폐 방식을 이용하여 핵융합을 연구하는 장치로써, 적은 비용을 가지고도 쉽게 제작할 수 있는 장점이 있으나 이미 자장에 의해 바이어스된 플라즈마의 Implosion을 위하여 빠르게 커지는 고전압펄스생성 회로계를 구성하여야 함이 매우 중요하다.¹⁾ 이 회로계는 전원부인 콘덴서뱅크, 펄스정형 송신선, 핀치코일 그리고 동작시간이 빠른 스위치등으로 구성된다.

핀치코일은 원통형 플라즈마 발생용기를 둘러싸고 있고, 송신선은 핀치코일을 통과하는 빠르고 큰 전압펄스를 얻기 위하여 보통 Blumlein구조를 사용한다. 이 회로를 통과하는 전압펄스가 핀치코일을 통과하면 큰 펄스자장이 만들어지고 플라즈마 발생용기내부의 기체를 급격히 진리시켜 플라즈마를 만들 뿐 아니라 이 플라즈마를 압축가열시킨다.^{2),3)} 그러나 빠른 세타핀치회로계에 대해서 단순한 Blumlein 이론⁴⁾만을 적용하여 구한 전압펄스의 이론치는 콘덴서뱅크와 방전스위치의 내부인덕턴스와 저항을 무시하더라도 실험치와 완전히 일치하지 않는다. 이 이유는 단순한 Blumlein 이론에서는 핀치코일의 유도임피던스를 고려하지 않았기 때문이며 이 값은 skin effect에 의해 커지는 저항임피던스 성분보다 훨씬 지배적인 것이다.

본 연구는 송신선의 전파이론과 집중회로에 대한

*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 慶熙大 理工大 原子力工學科 專任講師
***正 會 員 : 漢陽大 工大 原子力工學科 教授 · 工博
接受日字 : 1984年 9月 6日

Kirchhoff 법칙을 이용하여 복합회로계를 분석하고 핀치코일에 걸리는 전압펄스의 이론적인 프로파일을 구하기 위한 편리한 전산방법을 개발함에 목적을 두며 또한 이 이론의 타당성을 점검하기 위하여 제작, 가동중인 쉐타핀치장치⁶⁾에서 핀치코일내부의 자장을 측정하여 전압펄스의 실험치와 이론치를 비교 검토하였다.

2. 회로분석

일반적인 Blumlein 송신선 구조를 갖는 쉐타핀치 회로도는 그림 1-(a)와 같다. 여기서 스위치 S_a와 콘덴서뱅크의 용량이 송신선의 총용량에 비해 매우 크므로 정전압원으로 간주하면 그림 1-(b)와 같은 등가회로를 나타낼 수 있다. 여기서 스위치 S_a는 콘덴서뱅크가 충분히 충전된 후에 방전을 시키기 위한 스위치이며, S_b는 고전압펄스를 사용한 후 남아있는 전하를 어스로 방전시키기 위하여 필요하고, 열려진 상태에서는 핀치코일을 통과한 후 B점에 도달한 전압파를 극성과 크기가 같은 상태로 반사시키기 위한 스위치역할도 한다.

본 연구에서는 그림 2와 같은 이상화한 모델을 생각하여 이론을 적용하였는데 그림 2와 그림 1의 회로가 기능적으로 간음이 이미 증명⁶⁾되었으므로 그림 2는 그림 3과 같이 등가회로로 표현할 수 있으며 이 회로의 parameter 들은 다음과 같이 표시된다.

C₀ ; 콘덴서뱅크의 정전용량

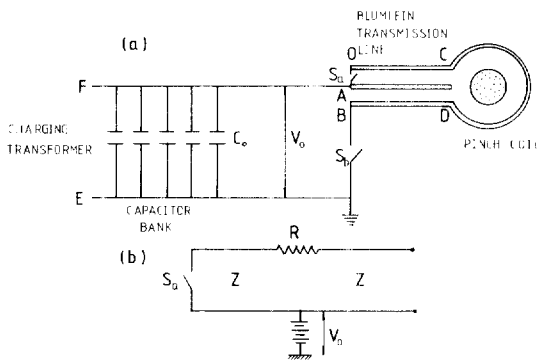


그림 1. (a) 통상적인 쉐타핀치의 블룸라인 구성
(b) 위 회로계의 등가회로도
Fig. 1. (a) Ordinary Blumlein configuration of the theta pinch
(b) Equivalent circuit diagram of the above circuit system

- L ; 직렬연결된 콘덴서뱅크와 방전스위치의 인덕턴스
- R ; 직렬연결된 콘덴서뱅크와 방전스위치의 저항
- Z ; 송신선의 특성 임피던스
- Z_c ; 핀치코일의 임피던스

여기서 방전스위치의 정전용량은 콘덴서뱅크보다 매우 적으므로 무시했다.

핀치코일의 임피던스 Z_c는 다음식과 같이 주어진다.⁷⁾

$$Z_c = \left[\left(\frac{\rho 2\pi r_0}{p \delta} \right)^2 + (2\pi\omega L_c)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 로 핀치코일의 재료인 동종의 비저항이고, $P \approx 2\ell c$ 인데 ℓc 는 플라즈마용기의 축방향인 핀치코일의 길이, δ 는 동도의 skin depth, L_c는 핀치코일의 인덕턴스, ω 는 cycle / sec단위로 주어지는 핀치코일에 흐르는 전류의 주파수, 그리고 r₀는 핀치코일의 반경이다.

동의 skin depth는 다음식과 같이 주파수 ω 와 관

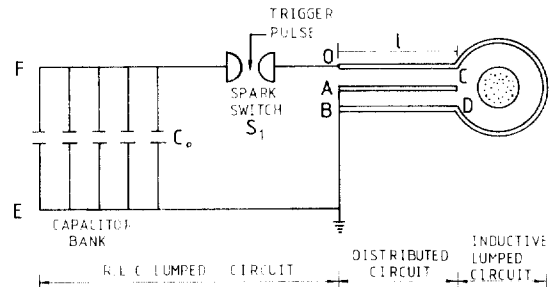


그림 2. 모형으로 한 쉐타핀치의 구성도
Fig. 2. Schematic diagram for the theta pinch of our interest

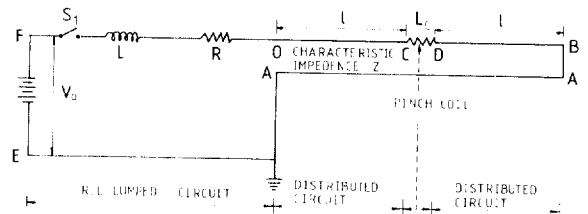


그림 3. 그림 2의 회로계에 대한 등가회로도
(그림 3의 각성분은 그림 2에 대응)
Fig. 3. Equivalent circuit diagram for the circuit system of Fig. 2
(The components in Fig.3 correspond to those in Fig. 2)

계된다.⁸⁾

$$\delta \approx 0.071 \omega^{-1/2} \text{ (m)} \quad (2)$$

또한 핀치코일의 인덕턴스 L_c 는 대략 다음식과 같다(M.K.S 단위)

$$L_c \approx 4\pi^2 \times 10^{-7} \times r_0^2 / (\ell_c^2 + 4r_0^2)^{1/2} \text{ (henry)} \quad (3)$$

식(1)~(3)으로부터 $\omega > 10$ cycle/sec에 대한 reactance 성분과 ℓ_c, r_0 의 실제값을 비교하면 Z_c 내의 저항부분은 $\frac{1}{10000}$ 이하로 무시될 수 있어 결국 $Z_c \approx 2\pi\omega L_c$ 로 쓸 수 있다.

그림 4는 시간 $t = 0$ 에서 스위치 S_1 를 닫을때 x 축으로 진파하는 전압파를 나타낸 것으로 선분 \overline{OC} 와 \overline{DB} 사이의 x 점에서 송신선의 신호전파법칙으로 다음식들을 구할 수 있다.⁹⁾

$$V(x, t) = V_+(x, t) + V_-(x, t) \quad (4)$$

$$I(x, t) = I_+(x, t) + I_-(x, t) \quad (5)$$

$$\frac{V_+(x, t)}{I_+(x, t)} = -\frac{V_-(x, t)}{I_-(x, t)} = Z = \left(\frac{L_c}{C_c}\right)^{1/2} \quad (6)$$

여기서 V, I 는 각각 전압과 전류를 나타낸 것이고, 하첨자 $+, -$ 는 wave의 진행방향을 나타내며, L_c, C_c 는 $\overline{OC}, \overline{DB}$ 의 길이인 송신선의 길이 ℓ 의 인덕턴스와 정전용량을 각각 나타낸다.

이 전압과 전류는 다음과 같은 초기조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} V_+(x, 0) &= V_-(x, 0) = 0, \\ I_+(x, 0) &= I_-(x, 0) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$x = 0$ 에서 경계조건은;

$$\begin{aligned} L \frac{dI(0, t)}{dt} + RI(0, t) + V(0, t) \\ = V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t dt' I(0, t') \end{aligned} \quad (8)$$

$x = 2\ell$ 에서 경계조건은 :

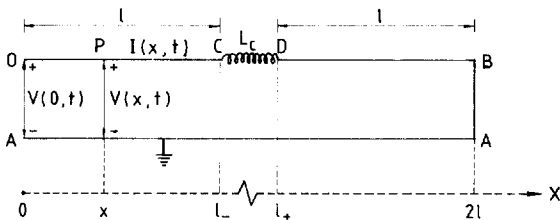


그림 4. 송신선 내의 위치에서 전압 및 전류
Fig. 4. Voltage and current at x position in the transmission line

$$V_+(2\ell, t) = -V_-(2\ell, t), \quad (9)$$

$x = \ell$ 에서 Interface 조건은 :

$$\begin{aligned} V_c(t) &= V(\ell_-, t) - V(\ell_+, t) \\ &= L_c \frac{dI_c(t)}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

$$I_c(t) = I(\ell_-, t) = I(\ell_+, t) \quad (11)$$

여기서 V_0 는 콘덴서뱅크의 초기전압, 그리고 V_c, I_c 는 각각 핀치코일을 통과하는 전압과 전류이다.

송신선내에서 손실을 무시하고 송신선내에서 위치와 시간에 따른 wave의 진파를 구하면 식(12), (13)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} V_+(x, t) &= V_+(x + vt', t + t') \\ I_+(x, t) &= I_+(x + vt', t + t') \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_-(x, t) &= V_-(x - vt', t + t') \\ I_-(x, t) &= I_-(x - vt', t + t') \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 식(12)는 x 와 $x + vt'$ 가 ℓ_- 보다 작거나 ℓ_+ 보다 큰 경우이고 식(13)은 x 와 $x - vt'$ 가 ℓ_- 보다 작거나 ℓ_+ 보다 큰 경우이며 v 는 진파속도로 다음식으로 주어진다.⁹⁾

$$v = \ell / (L_c C_c)^{1/2} = \ell / (Z C_c) \quad (14)$$

식(4)~(13)을 이용하여 계산하면 다음과 같은식들을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_c(0, t) &= V_-(0, t) + [V_+(0, t_1) \\ &\quad - V_-(0, t_1)] \exp[-\alpha(t - t_1)] \\ &\quad + \frac{ZV_0}{(R+Z)} \{1 - \exp[-\alpha(t - t_1)]\} \\ &\quad + (\beta - \alpha) \exp(-\alpha t) \int_{t_1}^t V_-(0, t') \exp(\alpha t') dt', \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} V_+(\ell_-, t) &= V_+(0, t - t_0), \quad (16) \\ V_-(\ell_-, t) &= [V_-(\ell_-, t_1) - V_+(\ell_-, t_1)] \\ &\quad \exp[-r(t - t_1)] + V_+(\ell_-, t) \\ &\quad + r \exp(-rt) \int_{t_1}^t [V_-(\ell_-, t') - V_+ \\ &\quad (\ell_-, t')] \exp(rt') dt', \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V_+(\ell_+, t) &= [V_+(\ell_+, t_1) - V_-(\ell_+, t_1)] \exp \\ &\quad [-r(t - t_1)] + V_-(\ell_+, t) + r \exp \\ &\quad (-rt) \int_{t_1}^t [V_+(\ell_+, t') - V_-(\ell_+, \\ &\quad t')] \exp(rt') dt', \end{aligned} \quad (18)$$

$$V_-(\ell_+, t) = -V_+(\ell_+, t - 2t_0), \quad (19)$$

$$V_-(0, t) = V_-(\ell_-, t - t_0), \quad (20)$$

$$V_+(\ell_-, t) = V_-(\ell_-, t) = V_+(\ell_+, t) = 0$$

$$(t < t_0) \text{ 일때,} \quad (21)$$

$$V_-(0, t) = 0 \quad (t < 2t_0) \text{ 일때,} \quad (22)$$

$$V_-(\ell_+, t) = 0 \quad (t < 3t_0) \text{ 일때,} \quad (23)$$

여기서

$$\alpha = \frac{R+Z}{L}, \quad \beta = \frac{R-Z}{L}, \quad \tau = \frac{2Z}{L_c}, \quad (24)$$

이고

$$t_0 = \ell / v \quad (25)$$

이며 t_0 는 초기시간이다.

(15)식의 유도는 콘덴서뱅크의 정전용량 C_0 가 송신선에 비해 훨씬 크기 때문에 Imploding 펄스의 주 모드 시간 영역에서 정전압원으로 모델화하여 계산하였다.

식(15)~(25)는 위치와 시간에 따른 $V(x, t)$, $I(x, t)$ 에 대하여 유일한 해를 가지므로 이 식들을 계산하기 위해서는 다음과 같이 계통적으로 연쇄적풀이를 하여야 한다.

- (i) 식(15)에 식(22)를 대입하고 식(17)의 초기조건을 사용하여 계산하면 $t = 2t_0$ 까지의 $V_+(0, t)$ 를 구할 수 있다.
- (ii) 계산된 $V_+(0, t)$ 와 식(16)으로부터 $t_0 \leq t \leq 3t_0$ 에서의 $V_-(\ell_-, t)$ 를 구할 수 있다.
- (iii) 계산된 $V_-(\ell_-, t)$ 와 식(17), (23)으로부터 $t_0 \leq t \leq 3t_0$ 에서의 $V_-(\ell_-, t)$ 를 구할 수 있고, $V_+(\ell_+, t)$ 와 식(18), (23)으로부터 $t_0 \leq t \leq 3t_0$ 에서의 $V_+(\ell_+, t)$ 를 구할 수 있다.
- (iv) 앞단계에서 구한 $t_0 \leq t \leq 3t_0$ 에서의 $V_+(\ell_+, t)$ 와 식(19)로부터 $3t_0 \leq t \leq 5t_0$ 에서의 $V_-(\ell_+, t)$ 를 구할 수 있고, $t_0 \leq t \leq 3t_0$ 에서의 $V_-(\ell_-, t)$ 와 식(20)으로부터 $2t_0 \leq t \leq 4t_0$ 에서의 $V_-(0, t)$ 를 구할 수 있다. 그러므로 첫번째 cycle 을 끝마칠 수 있고 다시 (i) 단계로 돌아가서 식(15)에 $2t_0 \leq t \leq 4t_0$ 에서의 $V_-(0, t)$ 를 대입하고 앞 cycle 에서 얻어진 $V_+(0, 2t_0)$ 를 이용해 계산하면 $2t_0 \leq t \leq 4t_0$ 에서의 $V_+(0, t)$ 를 구할 수 있으며 (ii), (iii), (iv) 단계를 반복하면 두번째 cycle 을 끝마칠 수 있다. 따라서 이와같은 과정을 계속하면 모든 시간 범위에서의 $V_+(\ell_-, t)$ 와 $V_-(\ell_-, t)$ 를 구할 수 있으며, 원치코일을 통과하는 전압차는 식(4)~(6), (10), (11)에 의해 다음식,

$$V_c(t) = \frac{L_c}{Z} \frac{d}{dt} [V_+(\ell_-, t) - V_-(\ell_-, t)] \quad (26)$$

으로 표시되므로 모든 시간 범위에서의 $V_c(t)$ 를 구할 수 있다.

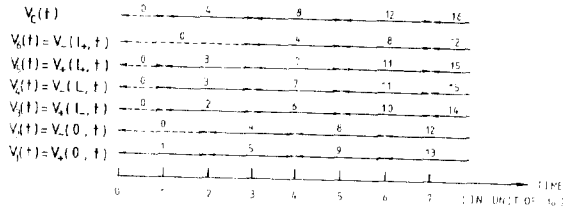


그림 5. 식 (15) ~ (20) 및 (26) 식의 해를 구하기 위한 순서

Fig. 5. The sequence for solving Eqs. (15) ~ (20), and (26)

그림 5는 이와같이 계산하는 순서를 도시한 것이다. 여기서 중복되는 숫자는 어느것을 먼저 계산해도 상관없다.

3. 전산방법

$V_c(t)$ 에 대한 계산과정은 각 cycle에서 식(15), (17), (18)에 의하여 주어지는 미분방정식들의 해를 포함하며 두번째 cycle 이후의 계산은 매우 복잡하고 길기 때문에 해석적으로 구하기는 쉽지 않으므로 전산기 활용하여야 한다.

식(15)~(20)을 풀기 위한 수학적인 계산을 편리하게 하기 위하여 $V_1(t) = V_+(0, t)$, $V_2(t) = V_-(0, t)$, $V_3(t) = V_+(\ell_-, t)$, $V_4(t) = V_-(\ell_-, t)$, $V_5(t) = V_+(\ell_+, t)$, $V_6(t) = V_-(\ell_+, t)$ 라 놓으면 다음식과 같은 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$V_j(t) = A_j^N + \sum_{i=1}^N B_{j,i}^N [(\beta - \alpha)t_N]^{i-1} \exp(-\alpha t_N) + \sum_{i=1}^N D_{j,i}^N (\tau t_N)^{i-1} \exp(-\tau t_N); j=1, 2 \quad (27)$$

$$V_j(t) = A_j^N + \sum_{i=1}^N B_{j,i}^N [(\beta - \alpha)t'_N]^{i-1} \exp(-\alpha t'_N) + \sum_{i=1}^N D_{j,i}^N (\tau t'_N)^{i-1} \exp(-\tau t'_N); j=3, 4, 5, 6 \quad (28)$$

여기서 상첨자 N 은 계산되는 cycle 의 번호로서 $t_N = t - 2(N-1)t_0$, $t'_N = t - (2N-1)t_0$ 를 나타내며, A, B, D는 상수이다.

N 번째 cycle [즉 $(2N-1)t_0 \leq t \leq (2N+1)t_0$]에서의 계산은 식(15), (16), (17), (20), (27), (28)을 결합시켜 상수를 구하면 다음과 같다.

$$A_3^N = A_4^{N-1} \cdot \beta / \alpha + V_0 Z / (R+Z),$$

$$B_{3,1}^N = B_{4,1}^{N-1} + V_{3f}^{N-1} - V_{4f}^{N-1} - V_0 Z / (R+Z) - A_4^{N-1}$$

$$(\beta - \alpha) / \alpha + \sum_{i=1}^{N-1} D_{4,i}^{N-1} (-1)^i (\beta - \alpha) r^{i-1} / (i-1)! / (\alpha - r)^i,$$

$$B_{3,i}^N = B_{4,i}^{N-1} + B_{4,i-1}^{N-1} / (i-1)!; i = 2, 3, \dots,$$

$$D_{3,i}^N = D_{4,i}^{N-1} + \sum_{j=i}^{N-1} D_{4,j}^{N-1} \frac{(-1)^{j-i} (j-1)! (\beta - \alpha) r^{j-i}}{(\alpha - r)^{j-i+1} (i-1)!}$$

$$; i = 1, 2, \dots \tag{29}$$

여기서 V_{3f}^{N-1} 과 V_{4f}^{N-1} 은 시간 $t'_{N-1} = 2t_0$ (즉, $t = (2N-1)t_0$)에서의 $V_3(t)$ 와 $V_4(t)$ 의 값을 각각 나타내는데 $N=1$ 일때는 식(20)에 의해 주어지는 초기조건으로, $N \neq 1$ 일때는 $(N-1)$ 번째 cycle의 계산으로부터 알 수 있다.

같은방법으로 식(17)~(19)에 적용하면

$$A_4^N = -A_5^{N-1},$$

$$B_{4,i}^N = B_{3,i}^{N-1} - \sum_{j=i}^{N-1} (B_{5,j}^{N-1} + B_{3,j}^N) \frac{(-1)^{j-i} (\beta - \alpha)^{j-i}}{(\alpha - r)^{j-i+1}} \frac{(j-1)! r}{(i-1)!}; i = 1, 2, \dots$$

$$D_{4,i}^N = V_{4f}^{N-1} - V_{3f}^{N-1} + D_{3,i}^N + A_5^{N-1} + A_3^N - \sum_{i=1}^{N-1} (B_{5,i}^{N-1} + B_{3,i}^N) \frac{(-1)^i r (\beta - \alpha)^{i-1} (i-1)!}{(\alpha - r)^i}$$

$$D_{4,i}^N = D_{3,i}^N - (D_{5,i-1}^{N-1} + D_{3,i-1}^N) / (i-1)$$

$$i = 2, 3, \dots,$$

$$A_5^N = A_3^N$$

$$B_{5,i}^N = -B_{5,i}^{N-1} + \sum_{i=1}^{N-1} (B_{5,i}^{N-1} + B_{3,i}^N)$$

$$\frac{(-1)^{j-i} r (\beta - \alpha)^{j-i} (j-1)!}{(\alpha - r)^{j-i+1} (i-1)!}$$

$$i = 1, 2, \dots,$$

$$i = 1, 2, \dots,$$

$$B_{5,1}^N = V_{5f}^{N-1} - V_{5f}^{N-1} - D_{5,1}^{N-1} - A_3^N - A_5^{N-1}$$

$$+ \sum_{i=1}^{N-1} (B_{5,i}^{N-1} + B_{3,i}^N) \frac{(-1)^i r (\beta - \alpha)^{i-1} (i-1)!}{(\alpha - r)^i}$$

$$D_{5,i}^N = -D_{5,i}^{N-1} + (D_{5,i-1}^{N-1} + D_{3,i-1}^N) / (i-1)$$

$$i = 2, 3, \dots, \tag{30}$$

여기서 V_{5i}^{N-1} 과 V_{5f}^{N-1} 은 각각 $t'_{N-1} = 0$ 에서의 $V_5(t)$ 의 값과 $t'_{N-1} = 2t_0$ 에서의 $V_5(t)$ 의 값이다. 끝으로 식(26)과 (28)로부터 $V_c(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_c(t'_N) = \frac{L_c}{Z} \left\{ \sum_{i=2}^N (B_{3,i}^N - B_{4,i}^N) (\beta - \alpha)^{i-1} (i-1 - \alpha t'_N) \exp(-\alpha t'_N) (t'_N)^{i-2} + \sum_{i=2}^N (D_{3,i}^N - D_{4,i}^N) r^{i-1} (i-1 - \alpha t'_N) \exp(-\alpha t'_N) (t'_N)^{i-2} - \alpha \exp(-\alpha t'_N) (B_{3,1}^N - B_{4,1}^N - r \exp(-\alpha t'_N) (D_{3,1}^N - D_{4,1}^N)) \right\} \tag{31}$$

4. 실험 방법

그림 6은 제작된 세타핀치의 진경 사진으로서 최대출력전압이 200kV, 저장에너지가 2kJ인 Marx 발생장치, 능판과 Mylar로 구성되는 Blumlein 송신선, 핀치코일, 그리고 진공장치등으로 구성된다.⁵⁾

Marx 발생장치의 상시출력전압을 100 kV로 조절하여 세타핀치를 작동하였고 이때 핀치코일 내부에 생성되는 자장의 측정은 그림 7과 같이 자기유도프로브를 설치하여 프로브에 유기되는 기전력을 RC적분회로를 거쳐 오실로스코프로 사진관측하였다. 여기서 자기유도프로브는 권수 20회, 직경 4 mm 길이 1.5 cm로 제작하였다.

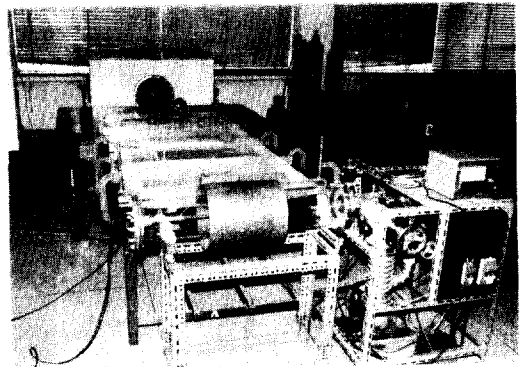


그림 6. 실험장치의 전경

Fig. 6. Photograph of the experimental apparatus

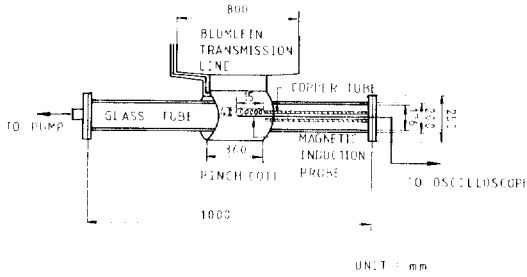


그림 7. 세타핀치 코일과 자기유도프로브의 구성도
 Fig. 7. Configuration of theta pinch coil and magnetic induction probe

5. 결과 및 분석

복합회로계로 구성된 본 세타핀치의 parameter는 이론적으로 다음과 같은 값을 갖는다.

$$Z = 0.68 \text{ ohm}, \quad t_0 = 1.0 \times 10^{-8} \text{ sec}, \quad L_c = 1.9 \times 10^{-7} \text{ henry}$$

그러나 R.L 값은 방전스위치 가 방전하는 동안 시간에 따라 변하는 인덕턴스의 값을 작각 포함하여 정확히 측정할 수 없으므로 R.L 값을 Z와 L_c 의 비율로 4가지 다른 경우에 대해 계산하였다.

그림 8~11은 Marx의 초기전압이 100 kV 일때

R.L 값을 4가지 경우의 상수값으로 보고 이에 따른 $V_c(t)$ 를 세 장 진상방법에 따라 구한 펄스profile들이며 이 펄스 profile 들로부터 핀치코일전압의 피크치와 $\frac{1}{2}$ 주기, 그리고 주파수 ω 를 표 1에 나타냈다. 표 1에 나타난 것과 같이 저항 R에 따라 핀치코일전압의 피크치는 크게 변화하여 $V_c(t)$ 를

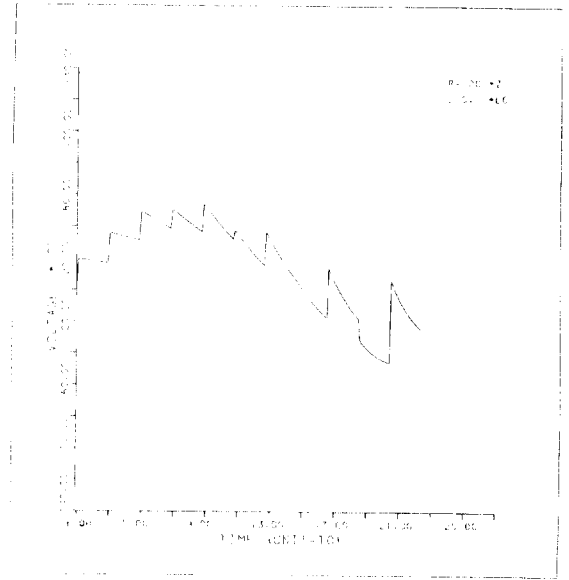


그림 9. $V_c(t)$ 의 이론적인 펄스윤곽
 Fig. 9. Theoretical pulse profile of $V_c(t)$

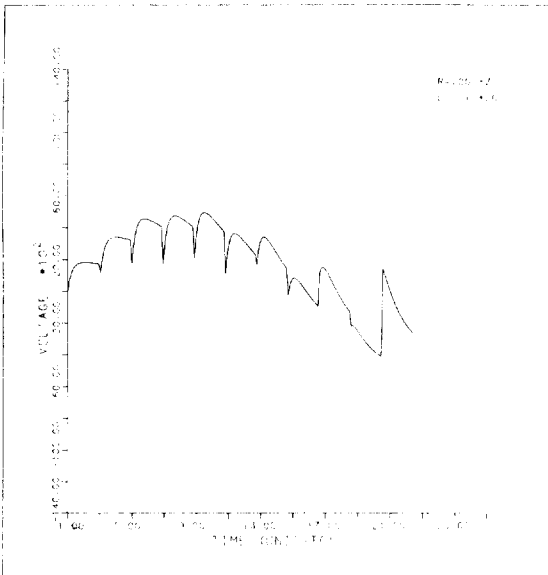


그림 8. $V_c(t)$ 의 이론적인 펄스윤곽
 Fig. 8. Theoretical pulse profile of $V_c(t)$

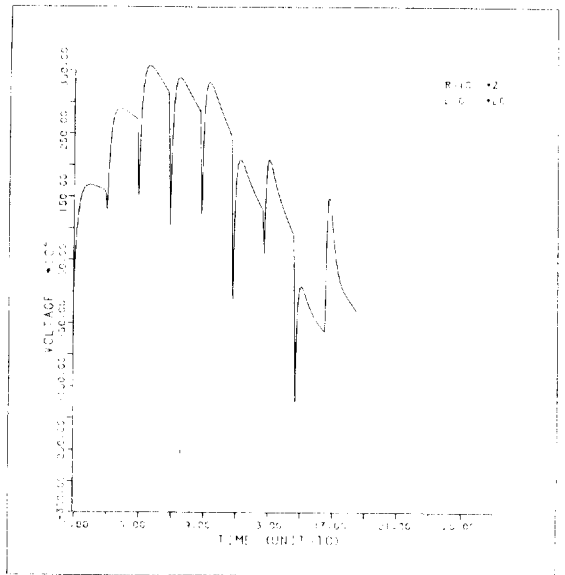


그림 10. $V_c(t)$ 의 이론적인 펄스윤곽
 Fig. 10. Theoretical pulse profile of $V_c(t)$

표 1. 복합회로 이론으로 구한 핀치 코일 전압, 반주기, 주파수

Table 1. Theoretical results of pinch coil voltage, half period, and frequency obtained by hybrid circuit theory

R (ohm)	L (henry)	Pinch coil voltage (max.) (volt)	Half period (sec)	Frequency (cycle/sec)
68	1.9×10^{-7}	4.8×10^3	1.6×10^{-7}	3.13×10^6
68	1.9×10^{-8}	5.8×10^3	1.5×10^{-7}	3.33×10^6
6.8	1.9×10^{-8}	3.5×10^4	1.48×10^{-7}	3.38×10^6
6.8	1.9×10^{-9}	3.8×10^4	1.48×10^{-7}	3.42×10^6

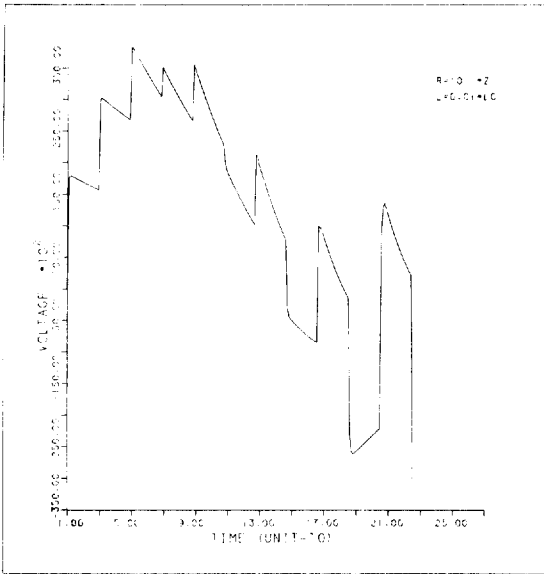


그림 11. $V_c(t)$ 의 이론적인 펄스유형
Fig. 11. Theoretical pulse profile of $V_c(t)$

높이기 위해서는 R 값을 줄여야함을 알 수 있으며, 또한 imploding 펄스의 주파수는 수 MHz 정도로 나타났다.

그림 12는 $R=0$, $L=0$ 그리고 핀치코일의 임피던스가 저항성분만으로 구성된 것이라고 가정하여 Blumlein 이론을 적용한 펄스 profile로 반사계수 r 의 변화에 따른 시간 t 와 핀치코일전압 $V_c(t)$ 를 나타낸 것이다¹⁾ 여기서 $r = R_c / (R_c + 2Z)$ 이며 R_c 는 핀치코일의 저항이다. 위와같이 가정된 Blumlein 이론은 지금까지 빠른 세타핀치를 설계하는데 매우 중요한 이론으로 알려지고 있으나, 여러대학에서 행한 실험결과^{2),4)}는 Blumlein 이론치의 펄스 주기보다 길어진 것으로 나타났다. 본 실험에서도 같은 결과가 나왔는데 그림 13은 핀치코일 중심에서 자기유도프로브로 측정된 기전력 사진으로 펄스의

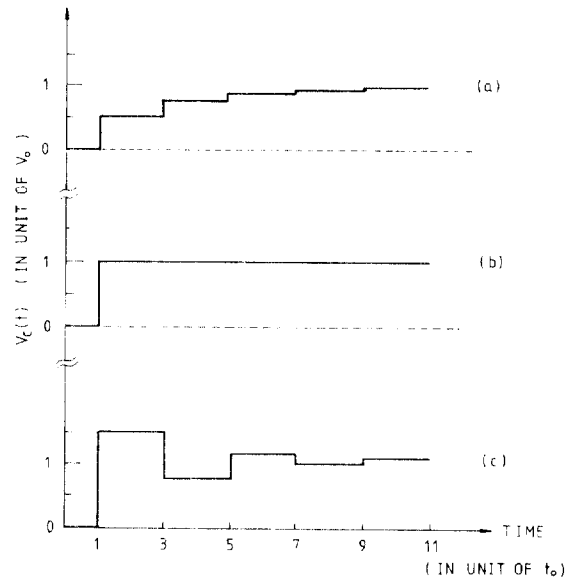


그림 12. 반사계수에 대한 $V_c(t)$ 와 시간 t 의 관계
Fig. 12. $V_c(t)$ vs. time t for reflected coefficient (a) $r = 1/4$ (b) $r = 1/2$ (c) $r = 3/4$

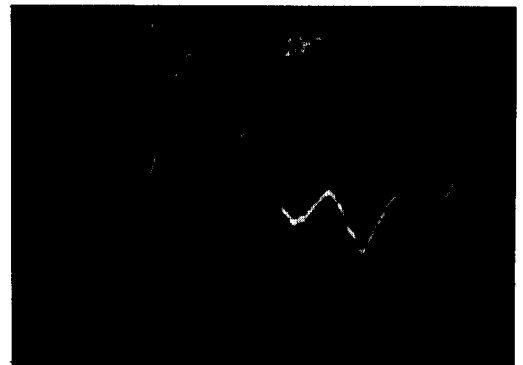


그림 13. 핀치코일 중심에서의 신호전압 사진
Fig. 13. Oscilloscope's view of the voltage signal at the center of the pinch coil

주기는 약 80nsec 정도로 측정되었다. 이 펄스의 주기는 복합회로 이론으로부터 구한 표 1과 비교하면 펄스의 주기는 $\frac{1}{4}$ 정도의 값이며 그림 12의 Blumlein 이론에 의한 값의 약 2배에 해당한다. 이 불일치는 복합회로에서 방전스위치와 콘덴서뱅크가 방전할때의 R, L 값을 상수값으로 가정하면서 계산된 오차로 생각되며 실제적으로는 시간에 따라 변하는 변수로 취급하여야 한다. 따라서 동일한 콘덴서로 구성된 썬타핀치에서 Imploding 펄스의 rise time은 방전스위치가 주로 기인함을 알 수 있어 본실험의 경우 성능이 좋은 방전스위치를 사용하면 더 잘 일치할 것으로 생각된다.

이상과 같은 연구결과 복합회로이론은 썬타핀치의 Parameter 에 따른 특성을 미리 예측할 수 있어 썬타핀치의 발달에 매우 중요하며 나아가서는 고출력 펄스 레이저 및 강한 입자빔 생성원등의 최적설계를 위해서도 복합회로에 대한 이론이 매우 필요하다고 생각된다.

6. 결 론

지금까지 사용하고 있는 Blumlein 이론과 썬타핀치의 펄스특성은 잘 일치하지 않았으며 많은 모순이 있었다. 본 연구에서는 썬타핀치를 집중회로와 분포회로가 결합된 복합회로계로 생각하여 이론적인 펄스 profile 을 구하는 전산프로그램을 개발하였으며 이 이론은 펄스형고진압을 이용하는 많은 연구분야에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

본연구 결과 실험적으로 측정된 펄스주기는 이론적인 값보다 짧았는데 이 차이는 방전스위치와 콘덴서뱅크의 R, L 값을 상수값으로 가정하였기 때문이며, 썬타핀치의 Imploding 자장펄스의 rise time은 주로 방전스위치와 콘덴서뱅크에 기인함을 알 수 있었다.

끝으로 본 연구는 82년도 한국과학기술원의 연구비 지원으로 이루어진 것이며 이에 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

- 1) E.Oktay, A.W. Desilva, P.C.Liewer, Y. G.Chen, H.R.Griem, R.Hess, and N.A.Krahl, "A turbulently heated high-voltage theta pinch", Proceedings of 5th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Tokyo, 1974 (IAEA, Vienna, 1975), p. 365
- 2) G.C. Goldenbaum, "Experimental Study of Collision-Free Shock Wave and Anomalous Electron Heating", Phys. Fluids, vol. 10, p. 1897 (1967)
- 3) G.C. Goldenbaum, "Experimental Study of Collision-Free Shock Wave Formation in an Almost Collisionfree Plasma", Phys. Fluids, vol. 8, p. 2111 (1965)
- 4) A. W. Desilve et al., "Collisionless Shock Waves and Turbulent Heating in High Voltage Theta Pinches", Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, vol. 1, IAEA VIENNA, CN-24/A-8, p. 143 (1969)
- 5) 정문규외 18인, "핵융합 기술조사" KAERI/RR-312/81, 한국에너지 연구소, pp. 310-328 (1981)
- 6) 정운관, 김상훈, "썬타핀치 회로계의 분석" 대한전기학회 논문지 vol. 32, p. 277 (1983)
- 7) C.C. Johnson, "Field and wave Electrodynamics", McGraw-Hill, p. 81 (1965)
- 8) J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics", John Wiley, New York, p. 298 (1975)
- 9) S.Ramo, T.R. Whinnery, and T.V. Duzer, "Fields and Waves in Communication Electronics", John Wiley, New York, pp. 23-31 (1965)