韓國産業應用學會誌, 제4권, 제3호, 311-318, 2001.8
J. Korean Society of Industrial Application, Vol.4, No.3, 311-318, August, 2001

폐수 처리용 고전압 나노 펄스 발생기
High Voltage Nano-Pulse Generator for Industrial Waste Water Treatment

장성덕*, 손윤규**, 오종석***, 권오정****
Sung-Duck Jang*, Yoon-Gyu Son**, Jong-Seok Oh***, O-Jung Kwon****

<Abstract>
The application of a pulsed power system is being extended to a environmental and industrial fields. The non-dissolution waste water pollutants from industrial plants can be processed by applying high voltage pulses with a fast rising time (a few nanoseconds) and short duration (nano to microseconds) in a pulsed corona discharge reactor. The nano-pulse generator with a magnetic switch has been developed. Its corona current in load can be adjusted by pulse width and repetition rate. we investigated the performance of the nano-pulse generator using the dummy load which is composed of resistor and capacitor equivalent to the actual reactor. This paper descibes the electrical characteristics of the nano-pulse generator that produces a 300 ns pulse at maximum repetition rate of 400 pps with a voltage of 40 kV across a 640 Ω load. In this paper we briefly discuss a configuration of system and test results.

Key Words : nano-pulse generator, waste water pollutants, magnetic switch

1. 서 론

최근 들어 고전압 나노 펄스를 이용한 장치들이 환경산업 및 군용기술 등 여러 분야에 응용되고 있다. 산업의 발달과 더불어 첨단 반도체 산업, 석유화학, 섬유 등 각종 제조산업에서

* 정회원, 포항공과대학교 가속기연구소 선임연구원,
** 정회원, 포항공과대학교 가속기연구소 기술원,
*** 정회원, 포항공과대학교 가속기연구소 책임연구원, 서울대 원자핵공학과졸, 工博
**** 정회원, 제4기 한국(주) 전력전자팀 선임연구원,

* Research Associate, PAL, POSTECH, Dong-A University, B. Eng., sdjang@postech.ac.kr
** Engineer, PAL, POSTECH, Kyungil University, B. Eng.
*** Staff Scientist, PAL, POSTECH, Dept. of Nuclear Engineering, Seoul National University
**** Senior Research Engineer, JESAGI HANKOOK LTD, Ulsan University, B. Eng.

발생되는 산업폐수는 양적으로 급속한 증가추세에 있다. 저온 플라즈마 기술을 적용하여 분해하기 어려운 유기 화합물을 안정적인 저분자 화합물로 전환시켜 생물학적으로 처리가 가능하게 하는 전처리 공정이 주목을 받고 있다.[1] 고전압의 짧은 펄스에 의한 저온 플라즈마를 반응기에 생성한 후 일반 생화학적 방법으로 처리하기 어려운 난분해성 오염물질을 처리하기 위해서는 고전압 나노 펄스 전원 시스템이 요구된다.[2] 자기 펄스압축 기술을 사용하여 분사형 수처리 설비용으로 사용 가능한 최대출력 1 kW 급 나노 펄스 발생 장치(40 kV, 300 ns, 400 Hz)를 개발하였다. 본 시스템은 출력 전압과 펄스 반복율을 가변 할 수 있다. 자기 펄스압축 스위치를 이용한 펄스 발생기의 동작원리 이해와 최적의 스위치 단 수, 각 단에서의 압축비, 스위치의 hold-off 시간 등 고전압 나노 펄스 발생기의 특성분석을 위한 성능시험을 수행하였다.

본 논문에서는 자기 스위치 제작 및 특성분석, 펄스 전원장치의 특성을 파악하기 위한 고전압 성능시험 결과를 고찰하였다.

2. 펄스 발생기 시스템

2.1 회로구성 및 동작원리

일반적으로 커패시터에 에너지를 충전하고 방전회로를 통하여 방전시킴으로써 펄스를 만들어 낸다. 펄스 발생 회로는 크게 라인 타입과 하드 튜브 타입으로 나눌 수 있다. 라인타입의 펄스 발생회로는 부하 임피던스와 사용전압에 맞추어 설계를 하여야 한다.[3] 나노초의 펄스를 생성하기 위해서는 고속의 스위치가 필요하게 되는데 이러한 크로우징 스위치로써 자기 스위치를 사용하였다.

Fig. 1은 자기 스위치를 이용한 1 kW 급 나노 펄스 발생기 시스템에 대한 회로도이다. 시스템 기본구성은 크게 펄스 에너지를 충전하는 충전부와 펄스를 만드는 방전부, 펄스를 압축하여 부하로 전달하는 자기 스위치부로 구성된다.

충전부는 단상 220 V의 입력 교류전압을 조절하는 SCR 위상 제어기부, 정류기를 통하여 직류전원을 공급하는 직류전원부, 충전인덕터(Lc), 충전다이오드(Dc), 에너지 저장용 커패시터(Cs) 회로로 구성되며, 인덕터와 커패시터의 공진 충전작용에 의하여 커패시터(20 uf, 1 kV, 50 Arms)에는 정류부 공급전압의 2배의 전압으로 충전하는 것이 가능하다.

방전부는 저장용 커패시터(Cs), 싸이리스터(ABB 5STF 06D1220, S1), 펄스 트랜스포머(PT), fly-wheeling diode(D_0)로 구성된다. 싸이리스터 스위치의 스위칭 동작에 의하여 저장용 커패시터(Cs)에 저장된 에너지는 펄스 트랜스포머 1차를 통하여 방전전류가 흐르고 2차 저장용 커패시터(C1)에는 승압비 만큼 커진 전압으로 충전된다.

자기 스위치부는 펄스 트랜스포머 2차측에 있는 2개의 저장용 커패시터(C1, C2), 1단의 자

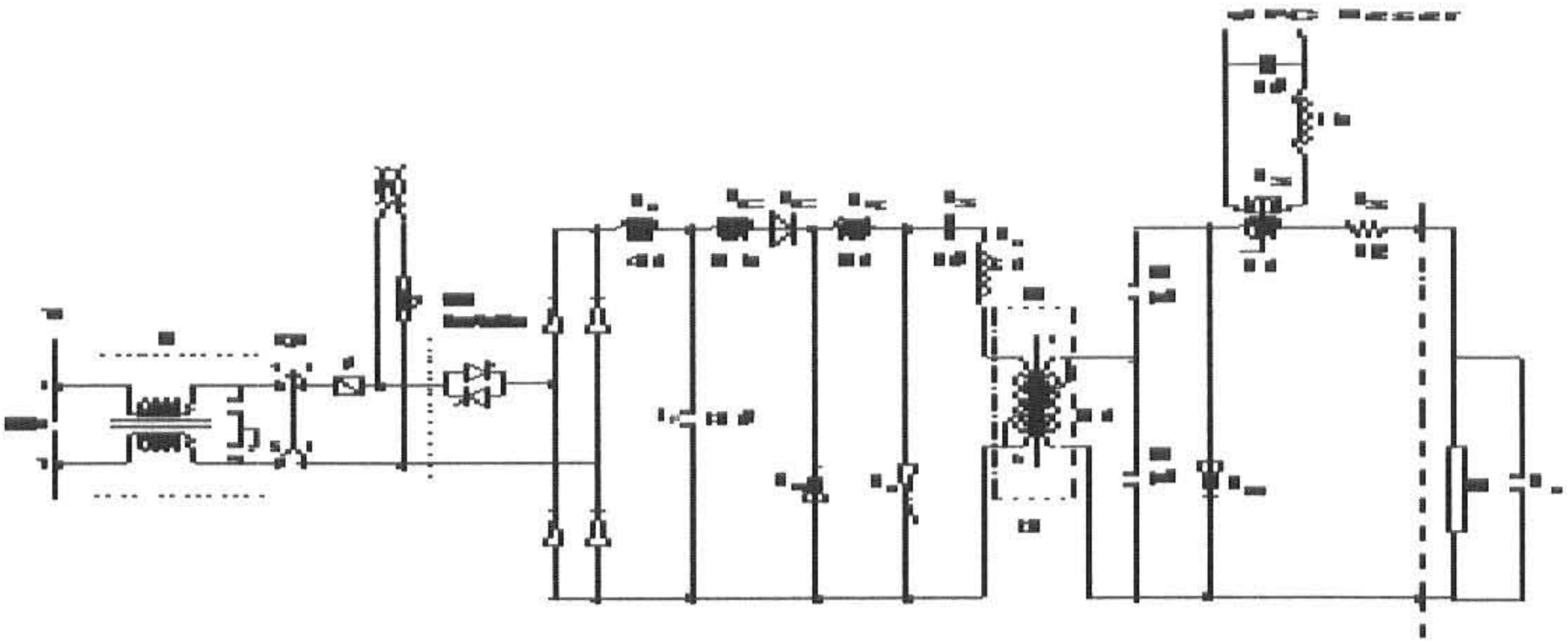

Fig. 1. Electric circuit of 1 kW nano-pulse generator

기 스위치와 다이오드, 부하로 구성된다. 초기 충전시 다이오드는 순방향이 되어 저장용 커패시터 C1과 C2가 동시에 병렬로 충전된다. 펄스 트랜스포머와 병렬로 접속되어 있는 저장용 커패시터(C1)가 충전이 완료 된 후 펄스 트랜스포머가 포화되면 커패시터(C1)와 트랜스포머의 포화 인덕턴스에 의한 공진 주파수로 커패시터(C1)의 전압이 역방향으로 반전된다. 커패시터(C1)의 전압이 역방향으로 반전되면 다이오드의 역방향에 의하여 자기 스위치(Ms) 양단에는 2개의 직렬 커패시터 C1과 C2에 충전된 전압의 합이 인가된다. 이때, 자기 스위치는 포화되고 스위칭 작용을 하여 부하로 압축된 펄스 전압을 전달한다.[4][5]

펄스 압축용 자기 스위치는 별도의 Core bias reset 전원을 사용하여 스위치의 포화시점을 조절 가능하도록 구성되어 있다.

2.2 설계 사양

Table 1은 나노 펄스 발생기의 주요 설계 파라미터를 나타내고 있다.

Table 1. Main parameters of nano-pulse generator

Parameters	Design Value
Peak voltage	40 kV (negative)
Peak current	288 A(max)
Pulse Width(FWHM)	300 ns
Pulse repetition rate	400 pps
Average power	1 kW(max)
Pulse overshoot	10 % (max)
Load impedance	200 Ohms, 200 pF

Table 2는 펄스 발생기 시스템의 각각의 단에 대한 펄스폭의 설계사양이다.

Table 2. Specification of pulse width for each stage

Parameters	Specifications
Charging	1 ㎳, 14.2 A
Switch pulsing	10 ㎲, 1.1 kA
PT inversion	2 ㎲, 144 A
Average load power	869 W @400 Hz
Efficiency	0.8

1차 저장용 커패시터에 공진 충전된 에너지는 방전 스위치인 싸이리스터 스위치의 동작에 의하여 10 ㎲ 펄스가 만들어지고, 자기 스위치의 양단에 배 전압을 인가하기 위한 펄스 트랜스포머의 포화에 의한 반전동작에 의하여 2 ㎲ 펄스폭으로 압축된다. 최종적으로 자기스위치의 포화동작에 의하여 300 ns로 압축된 출력펄스가 얻어진다.

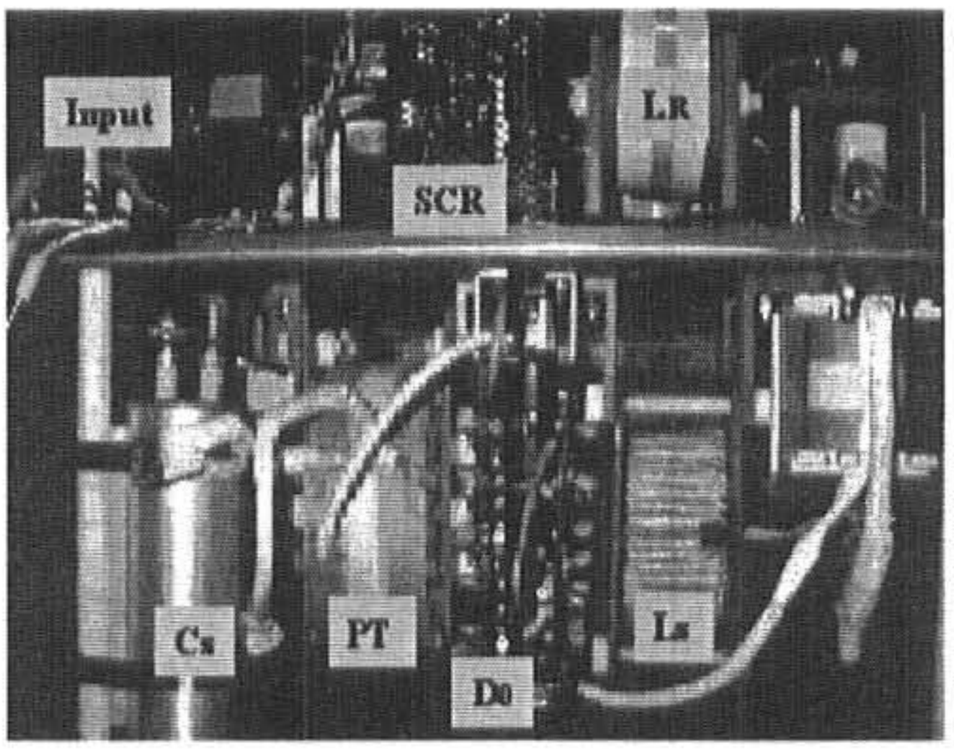

Fig. 2. Photogrph of nano-pulse generator

Fig. 2는 특성 실험을 하기 위하여 설계 제작된 수처리 설비용 나노 펄스 발생기에 대한 그림이다.

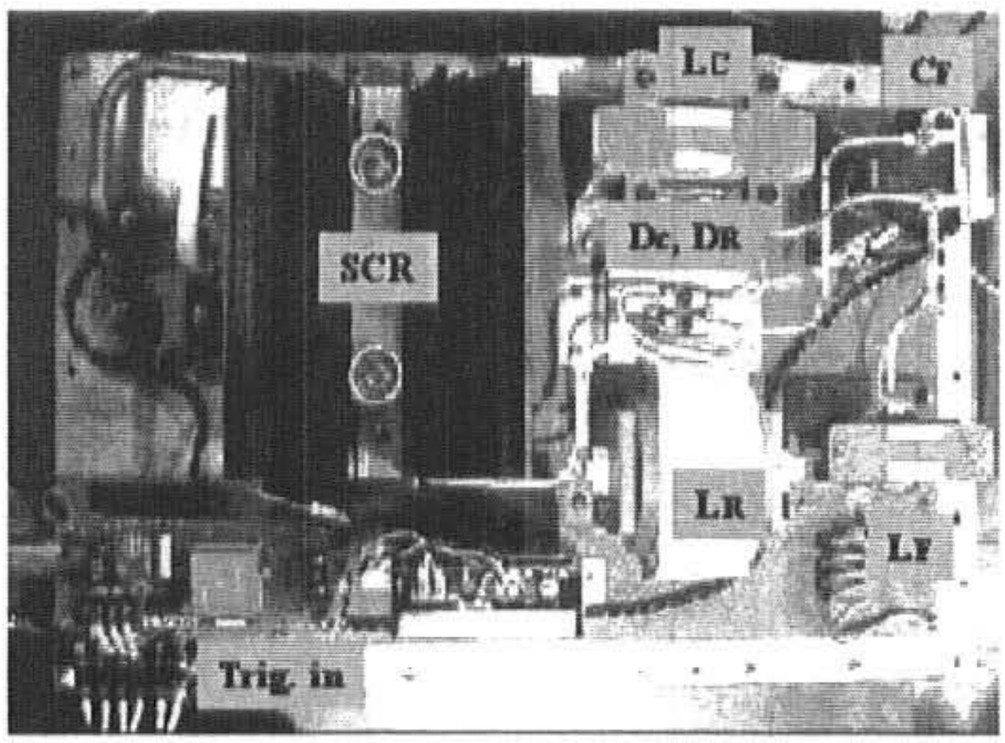

Fig. 3. Overhead photogrph of nano-pulse generator

Fig. 1의 시스템 구성 회로에서 SCR 제어기, 정류부, 충전인덕터(Lc), 충전다이오드(Dc)를 포함한 충전부는 상판에 장착되어 있고, 펄스 트랜스포머, 에너지 저장용 커패시터, 자기스위치를 포함한 후단 고압부는 외함의 하단부에 장착되어 고전압용 절연유로 채워지게 된다. Fig. 3은 상부에서 본 평면도이다. 좌측 하단부분에 단

상 220 V 교류 입력단자와 SCR 스위칭용 트리거 보드가 위치하고 있다.

2.3 자기 스위치

자기스위치의 기본적인 원리는 자성체 코아가 포화되면서 나타나는 투자율(permeability)의 변화에 의한 임피던스의 변화를 이용한 것이다. 자기 코어의 포화 특성을 이용한 인덕터 회로를 Fig. 4와 같이 구성하면 긴 입력 펄스를 짧은 펄스로 압축시킬 수 있다.[4] 자기 코어의

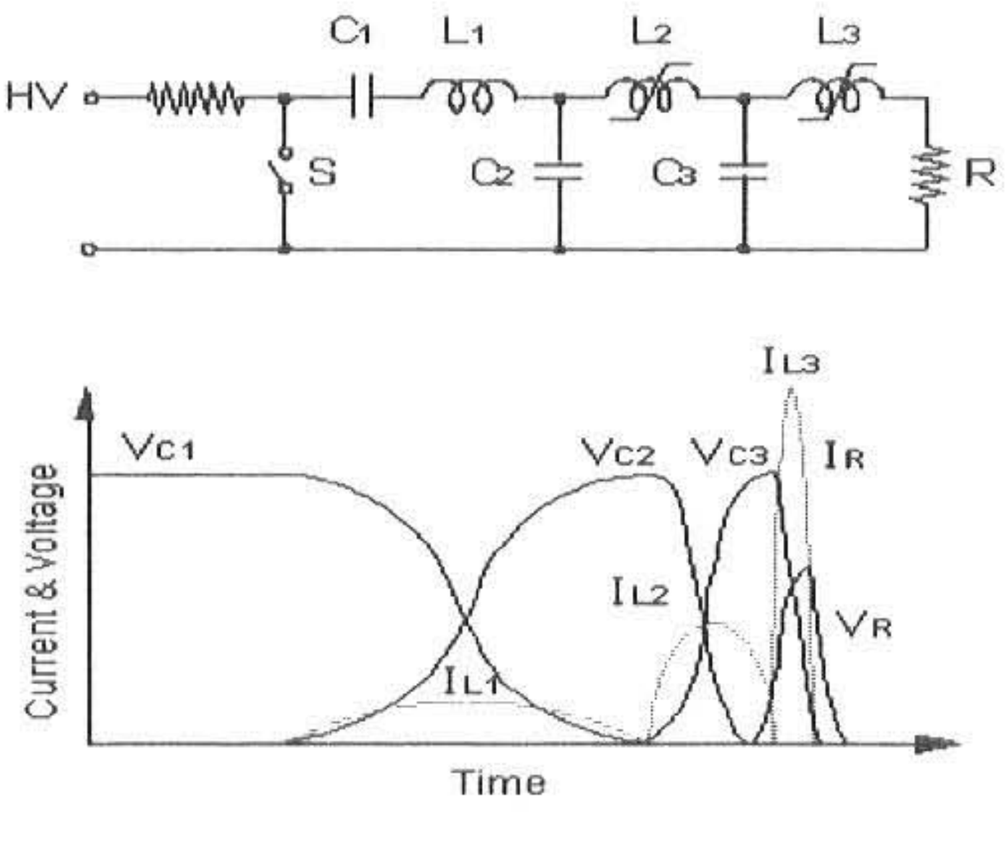

Fig. 4 Basic operating principles of magnetic switching and magnetic pulse compression

포화가 일어나기 전에는 자성재료의 높은 투자율로 인하여 인덕턴스가 매우 크기 때문에 개방회로처럼 동작하며 자기 코어가 포화되면서 투자율이 급격히 작아져서 인덕턴스가 줄어들어 마치 스위칭이 된 것과 같이 빠르게 다음 단의 콘덴서로 에너지를 전달하게 된다. 이러한 용도로 설계된 인덕터를 자기 스위치라 부르며 가스나 액체형 스위치에서와 같은 방전 원리를 이용하지 않기 때문에 스위치의 소호를 위한 이온의 재결합 시간이 필요하지 않아 대출력이면서 높은 동작 주파수의 시스템에 유용하게 쓰일 수 있다.[6][7]

C_1 콘덴서에 고압으로 충전된 에너지는 스위치 S가 켜지면 L_1 인덕터를 통하여 C_2 콘덴서로 LC 공진 충전되며, C_2 콘덴서에 충전이 완료되는 시점에서 L_2 자기 스위치가 포화되어 C_3 콘덴서를 충전시키고, C_3 콘덴서에 충전이 완료되는 시점에서 다시 L_3 자기 스위치가 포화되어 부하 저항 R로 에너지를 전달한다. 각각의 자기 스위치를 출력 단으로 가면서 포화 인덕턴스가 점차로 줄어들게 배치하면 자기 스위치를 거치면서 공진 충전 시간이 점차로 줄게 되어 부하 단에서 짧은 폭의 대출력 펄스를 얻게 되는 것이다.

잘 설계된 자기 스위치의 경우 포화 천이 속도가 5 nsec 정도로 빠르게 할 수 있다. 그리고 각 단의 전압은 손실 분을 제외하면 비슷하게 충전되나 충방전 전류는 점차 증가함을 그림에서 알 수 있다.

Fig. 1의 회로에서 자기 스위치(Ms)는 에너지 저장용 커패시터(C1, C2)에 충전된 전압의 합이 인가 될 때 포화되어 스위칭 작용을 하여 부하로 압축된 펄스전압을 전달하는 역할을 한다. 커패시터를 충전시키는 시간보다 빠르게 방전시키면 펄스의 압축이 일어나는 것이다. 이러한 자기 스위치는 고 신뢰성과 10^{10} 펄스 이상의 수명이 보장되며, 일단 한 방향으로 포화가 되면 역방향 전류를 순간적으로 차단하기 때문에 다이오드와 같은 특성을 지닌다.[8] 또한, 외부의 Core bias reset 전원을 변화시킴으로써 스위치의 포화시점을 조절 할 수 있는 것이 특징이다.[9][10] 본 실험에 사용된 자기 스위치의 재질은 AlliedSignal 사의 소형 비정질 자기코어(AMCC-500)이다. Fig. 7은 자기 스위치용 비정질 자기코어의 상세 치수를 나타낸다.

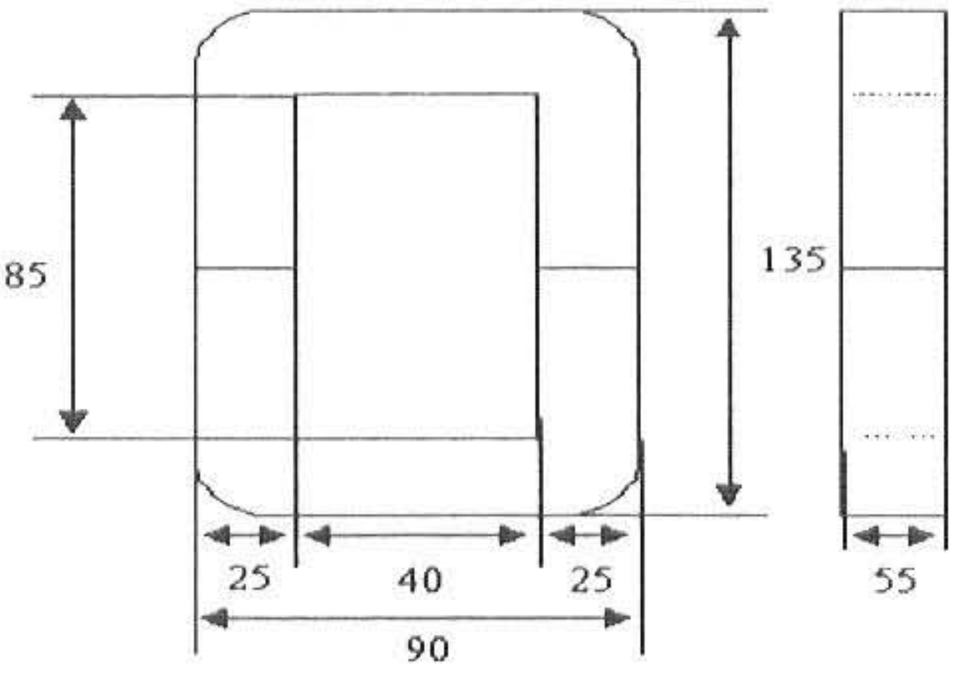

Fig. 5 Detailed dimension of core for magnetic switch (AMCC-500)

Table 3은 자기코어의 주요 파라메타를 나타내고 있다. 코어의 실효 단면적(A_{eff})은 11.3 cm^2, 평균 자기 경로(l_m)는 35.6 cm, 전체 체적(VOL)은 403.34 cm^3 이다. 자기 스위치의 주 권선수는

20 회이고, 코아의 포화 시점을 조절하기 위한 bias reset 용의 권선수는 2회이다. reset 용 전원은 스위칭 동작시 발생되는 고압의 펄스 신호가 전원 쪽으로 흐르는 것을 차단하기 위하여 3 mH 의 isolation 인덕터를 통하여 공급된다.

Table 3. Main parameter of magnetic core

Parameter	Value
l_m	35.6 cm
Ac	11.3 cm^2
MASS	2900 g
VOL	403.34 cm^3
Wa	34.0 cm^2
WaAc	384.2 cm^4

코어에 대한 물리적, 자기적 사양은 Table 4 와 같다. 코아는 박막의 두께가 22 μm 인 C형 커트 코아이다. 최대 포화 자속밀도는 1.56 [T], 투자율(permeability)은 갭의 크기에 의하여 가변할 수 있다.

Table 4. Physical and magnetic properties of the core for magnetic switch

Parameters	Value
Ribbon thickness	22 μm
Density	7.18 g/cm^3
Thermal expansion	7.6 ppm/℃
Crystallization temp.	550 ℃
Curie temperature	392 ℃
Saturation flux density	1.56 Tesla
Permeability	Variable(gap size)
Saturation resistivity	27 ppm
Electrical resistivity	137 $\mu\Omega$-cm

3. 시험 및 결과

3.1 기중 성능시험

기중에서 고전압 나노 펄스 발생기에 대한 동작특성을 분석하기 위하여 실제 반응기 부하와 등가한 200 Ω 저항과 167 nF 병렬 콘덴서 부하를 사용하여 성능시험을 수행하였다. 먼저, 각각의 부품별 파라미터를 측정하고 원리적인 면에서 정상적으로 동작한다는 것을 확인하기 위하여 정격전압의 50% 이상에서 시험을 하였다. 최적의 동작조건을 찾기 위하여 자기 스위치의 권선수, 바이어스 등 여러 가지 조건의 변화에 따른 실험을 수행하였다.

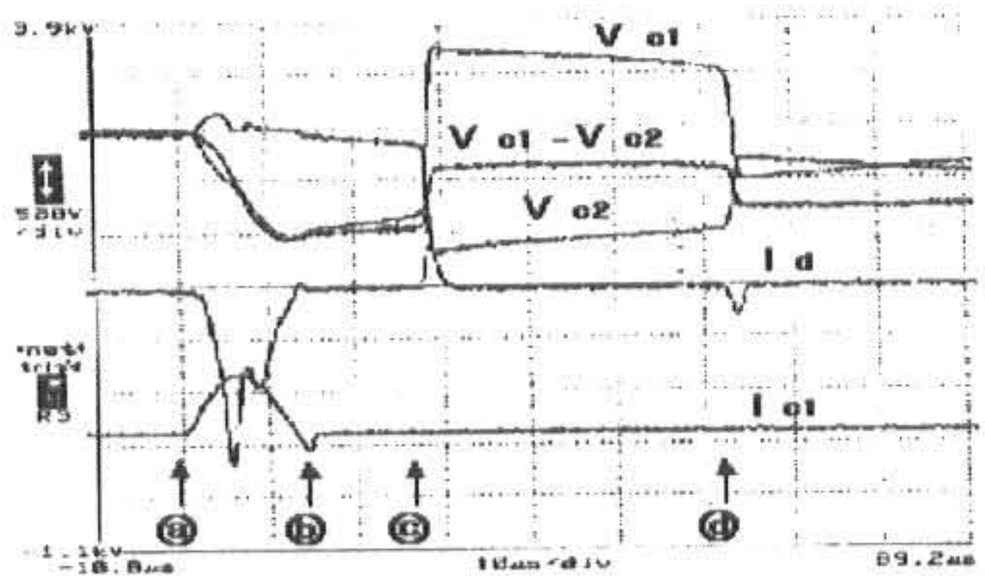

Fig. 6 Waveforms of charging and transformer inversion voltage at secondary capacitors (V_{C1}, V_{C2}: 10 kV/div, I_{C1}, I_d: 20 A/div)

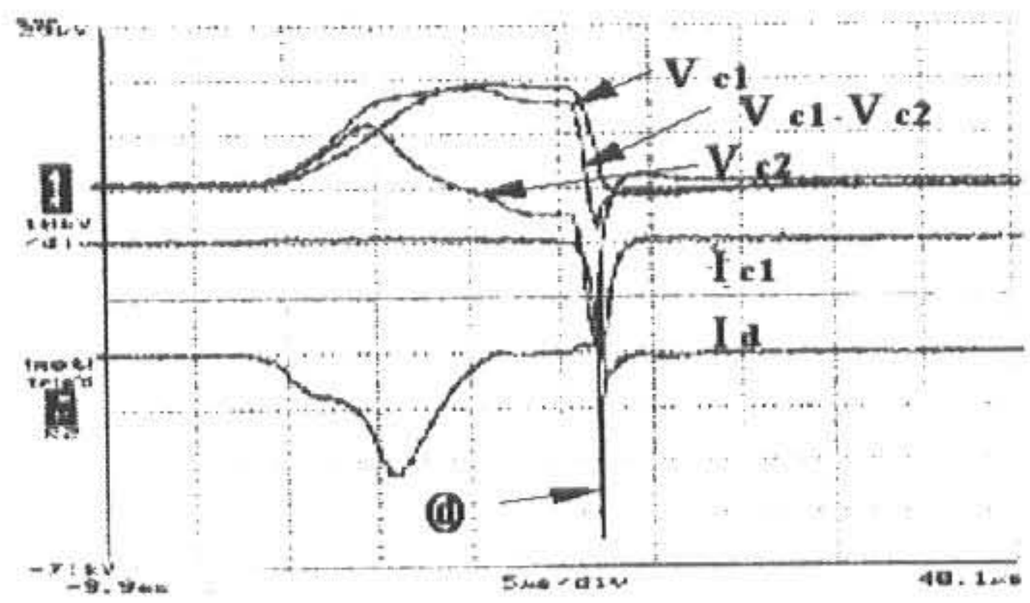

Fig. 7 Waveforms for magnetic switch saturation (V_{C1}, V_{C2}: 10 kV/div, I_{C1}, I_d: 20 A/div)

Fig. 6는 트랜스포머 2차측 저장용 커패시터 각단의 충전전압, 전류 및 펄스 트랜스포머 포화에 의한 반전동작을 보여주는 파형이다.

시간 축 기준으로 ⓐ 지점에서 충전이 시작되며 다이오드는 순방향이 되어 저장용 커패시터 C1의 전압(Vc1)과 C2의 전압(Vc2)이 동시에 병렬로 충전된다. ⓑ 시점에서 펄스 트랜스포머와 병렬로 접속되어 있는 저장용 커패시터(C1)가 충전이 완료된 후 일정한 전압을 유지한다. ⓒ 시점에서 펄스 트랜스포머의 포화에 동작에 의하여 커패시터의 전압(Vc1)이 역방향으로 반전되는 현상을 확인 할 수 있다. ⓓ 시점까지 C1의 전압과 C2의 전압의 합이 자기 스위치 양단에 인가되며, ⓒ 시점에서 35 μs 시간지연 후 자기 스위치는 포화되고 있다. 다이오드에 흐르는 전류(Id) 와 커패시터 C1의 충전전류도 함께 나타내었다.

Fig. 7은 자기 스위치가 포화될 때의 파형을 보여준다. 자기 바이어스 전원 조정에 의한 자기 스위치의 이른 포화작용으로 인하여 C1의 전압이 완전히 반전되지는 않고 있다.

3.2 자기 스위치 특성시험

자기 스위치의 권선수를 크게 설계하면 충전시 누설 전류는 작지만 포화시 누설 인덕턴스가 크서 전압강하가 커진다. 그러므로, 실제 회로에서 응용을 위한 최적의 값을 찾기 위하여 권선수의 변화와 코아 종류에 따른 자기스위치의 특성을 조사하였다.

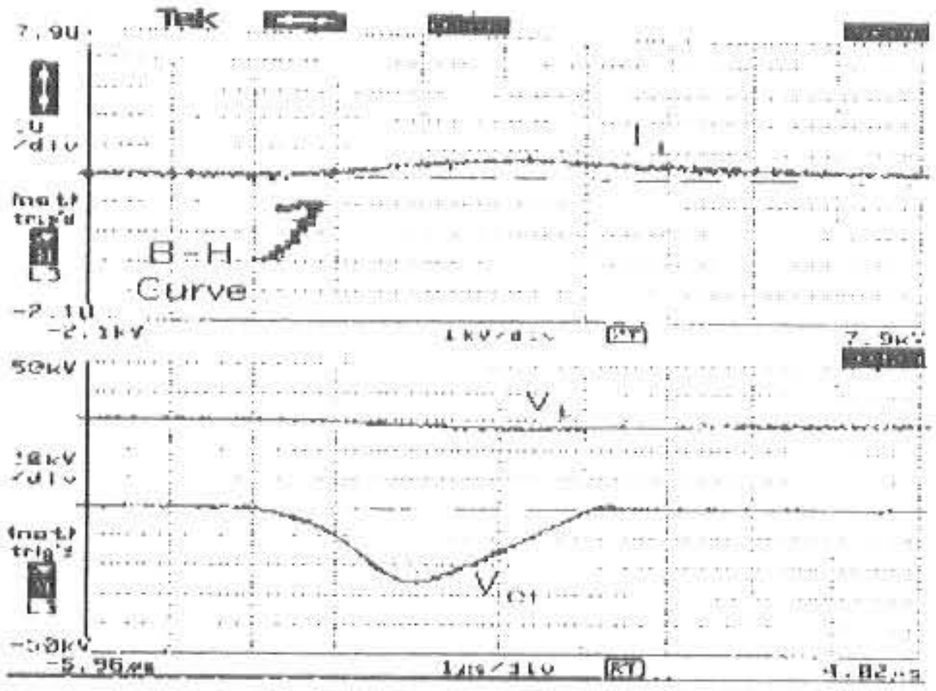

Fig. 8 B-H Curve of magnetic switch before core saturation

시스템이 동작중인 때 비정질 자기 스위치의 자기 특성을 확인하기 위하여, 계측한 전압과 전류 값으로부터 수식 (1), (2)를 사용하여 B와 H를 계산하였다.

$$B = \frac{\int v\,dt}{N A_{eff} \times 10^{-4}} \quad [\text{Tesla}] \qquad (1)$$

$$H = \frac{N\,i}{l_m} \quad [\text{A/m}] \qquad (2)$$

여기서, v는 스위치 양단의 전압, N은 권선수, A_{eff}는 스위치 권선의 실효 단면적, i는 스위치에 흐르는 전류, l_m은 평균 자기 경로이다.

Fig. 8과 Fig. 9은 자기 스위치 용 커트 코어에 대하여 측정한 B-H 곡선을 보여준다.

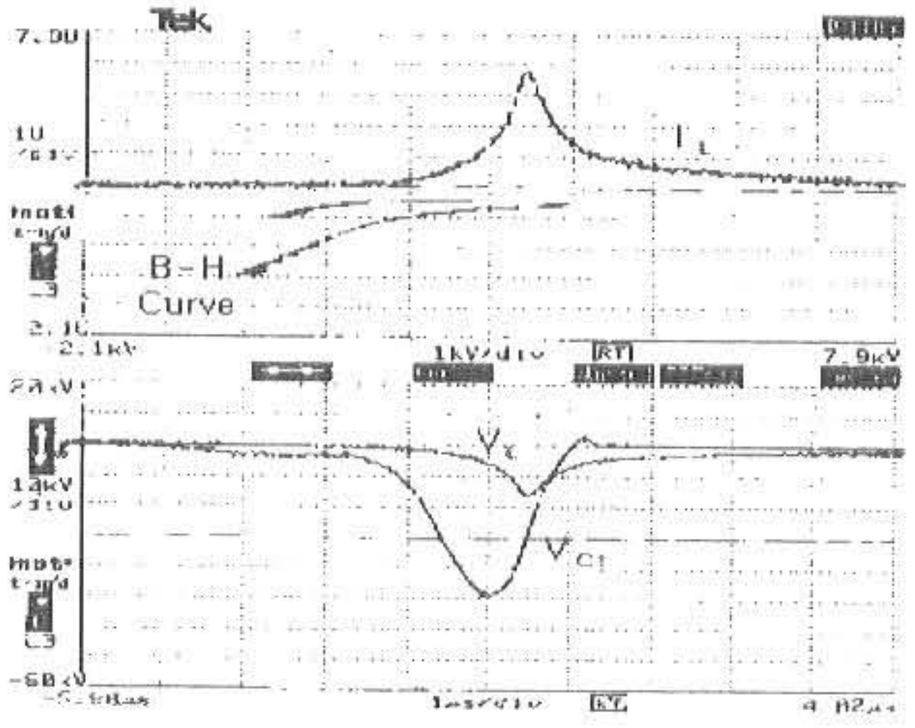

Fig. 9 B-H Curve of magnetic switch after core saturation

Fig. 8은 자기 스위치 포화전의 파형이고, Fig. 9는 포화시의 파형이다. 실험결과로부터 Fig. 8은 순방향 코어 바이어스 전류 5 A 일 때에 포화전 자기 스위치의 최대 자속밀도 변화는 2 Tesla, 자화력은 0.7 [kA/m]를 나타내었다. 식 (1)과 (2)를 사용하여 계산한 실효 펄스 투자율은 2275 이다. Fig. 9에서 포화후의 자기 스위치는 최대 자속밀도 변화 2.5 Tesla, 자화력 5.6 [kA/m]에서 실효 펄스 투자율은 355를 나타내었다. 자기 스위치의 인덕턴스 계산시 포화전에는 코아의 유효 단면적을 사용하고, 포화시에는

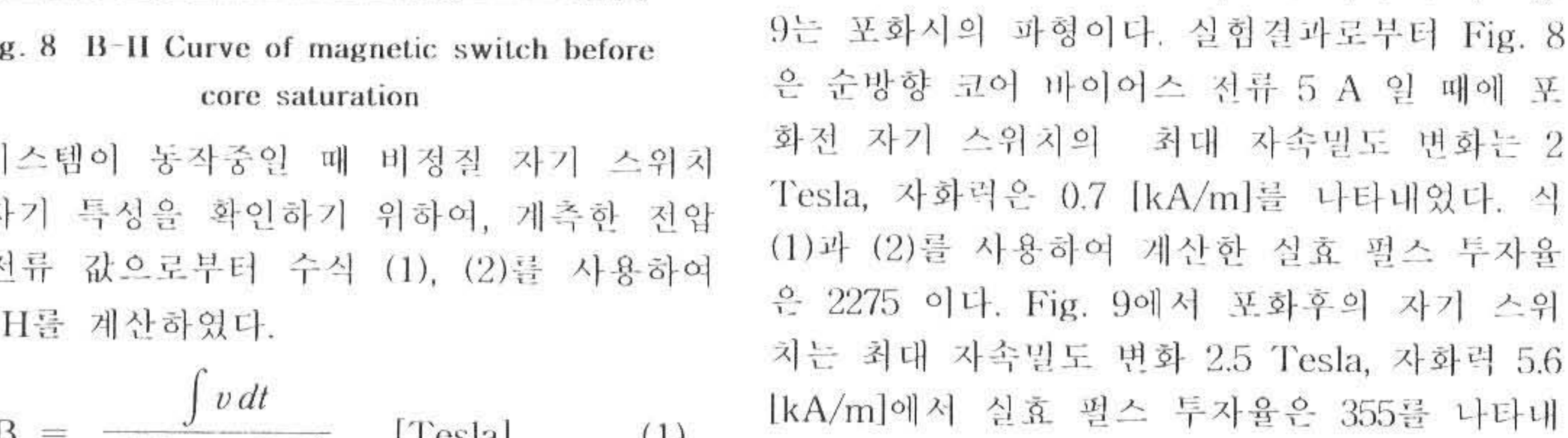

Fig. 10 Simulation circuit for magnetic switch saturation

공심코일 내의 단면적을 사용한다. Table 3의 자기스위치 사양으로부터 자기 스위치가 포화되었을 때의 실효 펄스 투자율을 사용하여 계산한 포화 인덕턴스는 566 μH 이다.

실험과정에서 출력단에 나타나는 부하 펄스 파형을 예측하기 위하여 비선형 특성을 가지는 포화 인덕터의 등가모델을 사용하여 PSpice를 사용한 자기 스위치의 응답특성을 조사하였다.

Fig. 10은 시뮬레이션(simulation)을 위한 등가 회로도이다. 자기 스위치는 스위치(X1), 인덕터(L3), 다이오드(D3)의 직렬회로와 병렬 인덕터(L2)를 사용하여 등가모델로 표현하였다. 병렬로 접속된 인덕터의 값은 포화가 일어나기 전의 값이고, 포화가 일어나는 시간을 계산하여 스위치를 닫음으로서 스위치와 직렬로 연결된 인덕터의 값이 포화시의 인덕터 값이 되도록 구성하였다.

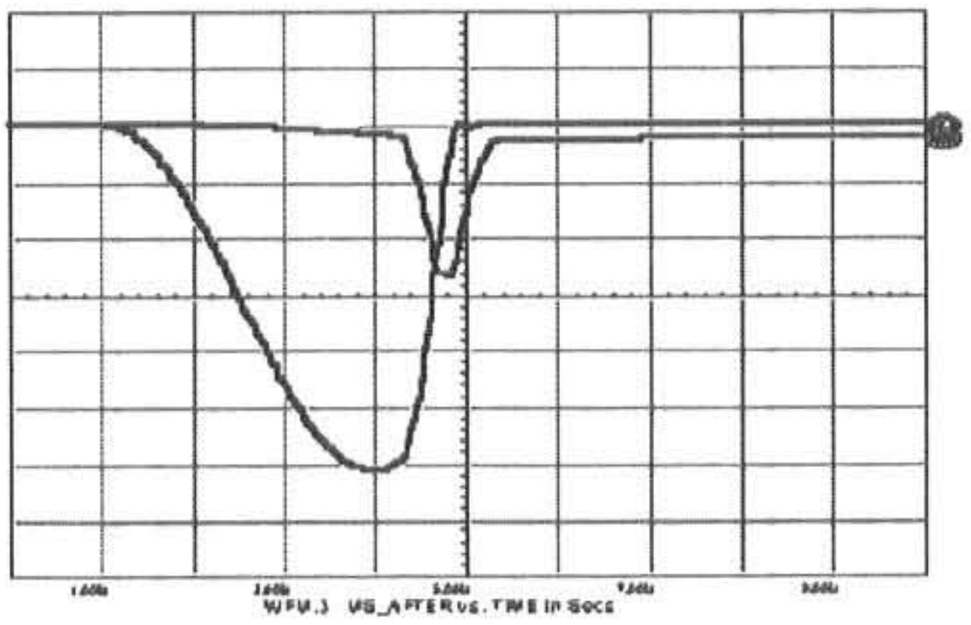

Fig. 11 Simulated waveforms at magnetic switch saturation (the lower: MS switch vol., the upper: load vol., 10 kV/div, 1 μs/div)

Fig. 11은 시뮬레이션 결과 파형을 보여준다. 실험 및 시뮬레이션 파형으로부터 자기 스위치는 충분히 포화되지 않고 있으며, 포화 인덕턴스가 커서 충분한 스위칭 작용을 하지 못하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 것은 유중에서 보다 높은 전압을 인가하고 우수한 각형비를 가지는 즉, 포화특성이 보다 우수한 커트되지 않은 코아를 사용함으로써 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 유중 고전압 성능시험

기중에서 보다 높은 전압에서의 특성시험을 위하여 절연유를 주입한 후 실제 사용될 부하

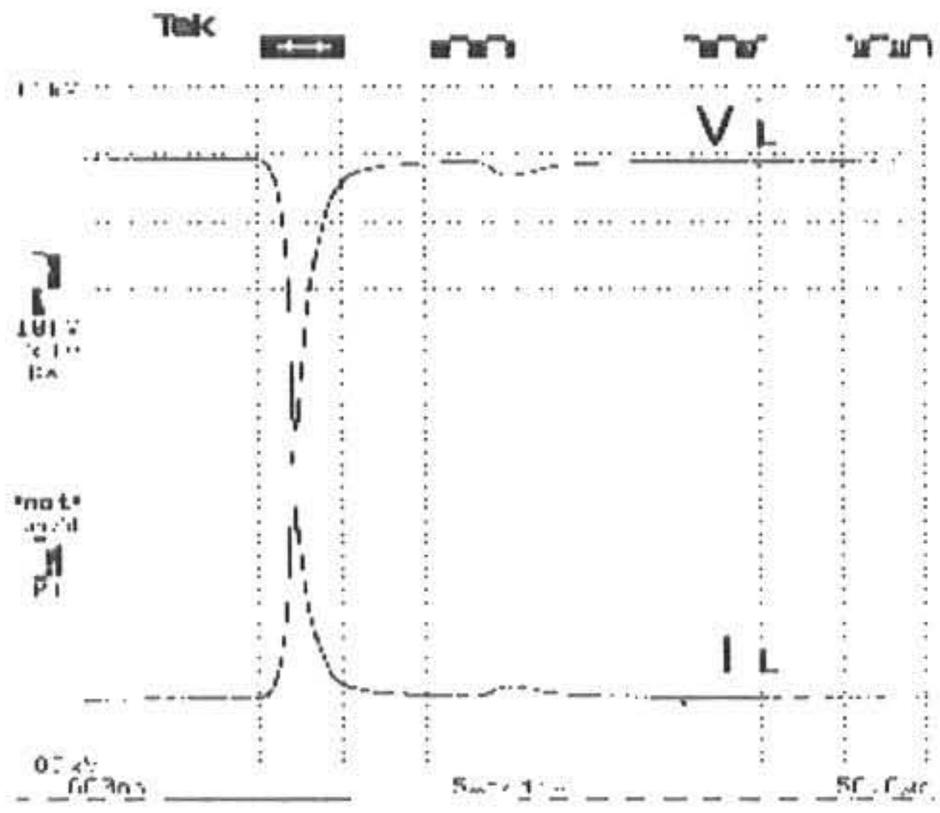

Fig. 12 Output voltage and current (VL: 10 kV/div, IL :20 A/div, 2 μs/div)

와 등가한 640 Ω 저항과 167 nF 병렬 콘덴서로 구성된 Dummy 부하에 대하여 유중 고전압 성능시험을 실시하였다.

Fig. 12는 1차측 입력전압 300 VDC에 대한 부하단의 출력 전압(V_L), 전류(I_L) 파형을 보여준다. 2000 : 1 voltage probe(Pulse Tech.) 와 10 : 1의 변류기(current transformer, 50 Ω)를 사용하여 측정한 값으로 펄스 반복율 200 Hz에서 최대전압 41 kV, 최대전류 72 A, 1.1 μs 의 펄스를 얻었다

4. 결 론

지금까지 분사형 수처리 설비를 위한 최대출력 1 kW 급 나노 펄스 발생기의 장치구성 및 자기 스위치 설계원리를 알아보고, 자기 스위치 특성시험, 최대 펄스 파형을 예측하기 위한 PSpice를 사용한 등가회로 시뮬레이션, 펄스 전원장치의 특성을 파악하기 위한 일환으로 실제 사용될 반응기와 등가한 Dummy 부하를 사용한 절연유 내에서의 고전압 성능시험을 완료하였다. 최종 실험결과는 640 Ω 저항과 167 nF 병렬 콘덴서 부하에 대하여 41 kV, 1.1 μs 펄스를 얻었다. 향후 반응기 부하에서 시험시 커트되지 않고 우수한 각형비를 가지는, 스위칭 시 코아의 포화특성이 보다 우수한 코아를 사용함으로써 보다 출력전압이 높고 펄스폭이 좁은

파형이 얻어질 것으로 기대된다.

나노 펄스 발생기의 최종부하는 코로나 방전 현상을 이용하는 반응기이다. 반응기 내에서의 코로나 방전 현상은 근본적으로 비선형 부하 특성을 가지고 있으며 조건에 따라 그 반응 현상이 복잡하여 일괄적으로 규정하기 매우 힘들다. 코로나 방전 현상에서는 인가 전압의 극성, 방전 개시전압, 방전 개시 후 전압에 따른 전류 특성 등이 중요한 변수이다. 이 변수들은 전극의 구조, 반응기 내부 물질의 성분비, 압력 및 온 습도 조건에 의존하기 때문에 펄스 발생기는 특정 최적 조건뿐만 아니라 넓은 범위에서 안정적으로 잘 동작하도록 설계하여야 한다.

펄스 코로나 방전을 이용한 저온 플라즈마 기술을 난분해 유기성 오염물질 즉, 염색폐수, 전자산업 폐수, 석유화학 폐수, 침출수 등 의 처리 시스템에 적용하면 생물학적 처리의 전처리 공정으로 적용될 수 있으며, 플라즈마 기술과 생물학적 기술을 접목한 최적의 산업폐수 처리 시스템의 구성이 가능하다. 또한, 현재의 화학적 폐수처리 방법에 의하여 발생되는 2차 오염물질의 발생량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 향후 고전압 나노 펄스 발생 기술의 실기 적용을 위해서는 전압 및 주파수 등 여러 가지 운전변수에 따른 최적 운전조건의 도출을 위한 실제 반응기 부하에서의 특성 시험에 대한 연구가 계속 진행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 JESAGI HANKOOK LTD 및 MOST의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

1) Muhammad Arif Malik, Abdul Ghaffar and Salman Akbar Malik : Water Purification by electrical discharges, Journal of Plasma Sources Science and Technology, 10, pp.82-91, (2001)
2) E. L. Neau : Environmental and Industrial Applications of Pulsed Power Systems, IEEE Transaction on plasma science, Vol. 22, No.1, February (1994)
3) G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz, W. H.Bostick et al., : Pulse Generators, McGraw - Hill Book Company, Inc., Part III, pp.497-630 (1948).
4) V. M. Bystritskii, T. K. Wood, Y. Yankelevich, S. Chauhan, D. Yee, F. Wessel, : Pulsed Power for Advanced Waste Water Remediation, 11th IEEE International Pulsed Power Conference, pp.79-84, Baltimore, Maryland, USA, June29 - July2 (1997)
5) D. M. Barrett, : Magnetic Pulse Compression Techniques for Non-thermal Plasma Discharge Applications, IEEE Transaction on plasma science, pp.2065-2070, (1996)
6) Stanley Humphries, : Principles of Charged Particle Acceleration, John Wiley & Sons, New York, pp.263-267, (1986)
7) Godfrey T. Coate, Laurence R. Swain, JR. High - Power Semiconductor Magnetic Pulse Generators, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts (1966)
8) James C.Dickens, John Bridges and M. Kristiansen, : Compact Modulator Using Inductive Energy Storage and a Solid State Opening Switch, Proceedings of the 26th IEEE International Power Modulator Symposium. pp55-58, (1996)
9) J. S. Oh, S. S. Park, S. D. Jang, M. H. Cho, I. S. Ko, W. Namkung, and G. H. Jung, : Prototype 2-stage Magnetic Pulse Compression Modulator for Pulse Power Application, Conference Record of the 22nd International Power Modulator Symposium, pp.186-189, Boca Raton, Florida, USA, June 24-27, (1996)
10) J. S. Oh, S. S. Park, S. W. Park, S. D. Jang, J. H. Lee, M. H. Cho, and W. Namkung, Basic Circuit Design and Analysis of Pulse Modulator for Plasma De-NOx/ De-SOx System, 1995 KAPRA pp.192-194, Daeduk Science and Culture Center, DaeJeon, Korea, June 21-24, (1995)

(2001년 4월26일 접수, 2001년 8월22일 채택)