

병렬 또는 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 출력특성분석

論 文
53B-11-2

Output Characteristics of Parallel or Serially Connected Helical Magneto-Cumulative Generators

鞠 旻 鉉^{*} · 李 興 浩^{*}
(Jeong-Hyeon Kuk · Heung-Ho Lee)

Abstract - Helical magneto-cumulative generator(HMCG)s are very useful devices in supplying pulsed high current to inductance loads. To apply fast high voltage pulses to high impedance loads, high current outputs of HMCGs are required to be conditioned to higher voltages by using various pulse components such as opening/closing switches and pulse transformer. In this paper, stepping with the trends of requirements for ever-increasing energy in pulsed power applications coupling methods is investigated to obtain higher output energy by connecting several HMCGs in series or parallel way. The coil dimension of HMCGs used in series or parallel connections was 50 mm in diameter and 150 mm in length. The coil was fabricated by using enamel-coated copper wire of 1 mm in diameter. The highest energy amplification ratio and peak voltage of load were achieved from the serially connected four-barrel HMCG system. They were 68 and 34 kV, respectively, when the initial energy of 0.36 kJ was supplied into that system with the load of 0.4 μ H. Within the tested range of inductance ratio, energy amplification ratio was found to be highly dependent on the inductance ratio of serial- and parallel-connected HMCG systems to load, which to be optimal around 500 was turned out. The experimental results showed that the output energy and voltage of load are controlled by connecting HMCGs in series or parallel.

Key Words : HMCG(Helical Magneto-Cumulative Generator), Magnetic Flux, Explosive, Energy Amplification Ratio

1. 서 론

자장압축발전기는 부하에 고에너지와 대전류 펄스를 공급할 수 있는 장치이다[1,2]. 여러 가지 형태의 자장압축발전기 중에서 나선형 자장압축발전기는 높은 에너지 증폭률과 설계의 용이성 때문에 과학 분야뿐만 아니라 군사적인 응용 분야에 일반적으로 적용된다. 자장압축발전기의 응용분야에서 높은 에너지의 대전류와 고전압 등, 부하에 따라 적절한 형태의 입력에너지를 요구함에 따라 자장압축발전기의 출력에너지를 증가시키고, 출력과형을 조절할 필요가 있다.

자장압축발전기의 출력에너지와 출력과형을 조절하는 방법으로 자장압축발전기의 크기를 증가시키거나, 자장압축발전기를 다양한 형태로 결합하는 방법이 있다. 자장압축발전기를 크게 만드는 방법은 자장압축발전기의 제작과정에서 정밀도를 유지하기가 어렵고, 크기와 무게의 증가로 인하여 제작과 조작의 어려움이 따르며, 크기가 커짐에 따라 출력에너지를 부하에 공급하는 시간이 증가한다. 자장압축발전기는 활성화 제한(activity limitation)이라는 규칙을 따르며, 활성화도(Λ)는 자장압축발전기의 에너지 증폭률(A_E)과 총 에너지 효율(η , global energy efficiency)로 표현되고, $\Lambda = \eta \cdot A_E$ 로

기술된다[2, 3]. 총 에너지 효율은 $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$ 로 표현되며, η_1 은 화약의 화학적 에너지가 자장압축발전기 내에 형성된 자속을 압축하는 전기자의 운동에너지로 전환되는 효율을 의미하고, η_2 는 전기자의 운동에너지가 자속을 압축하여 전자기 에너지로 전환되는 효율을 의미한다. 나선형 자장압축발전기의 총 에너지 효율은 30%보다 작고, 활성화도는 $1 < \Lambda \leq 100$ 의 범위인 것으로 알려져 있다. 이와 같은 연구결과를 고려할 때에 단일 자장압축발전기의 출력에너지를 즉, 에너지 증폭률을 높이기 위해서는 총 에너지 효율이 낮아짐으로 자장압축발전기에 사용하는 화약의 양을 증가시켜야 한다. 화약의 양이 증가하면 사고발생의 위험성이 높아지고, 자장압축발전기의 제작이나 취급에 어려움이 따른다. 이러한 단일 자장압축발전기의 제한성을 극복하고, 출력에너지를 높이며, 출력과형을 조절하기 위하여 자장압축발전기를 다양한 형태로 결합하는 방법을 고려하게 되었다[2,3].

자장압축발전기를 결합하는 방법 중의 하나는 단일 자장압축발전기를 변압기의 형태로 결합하는 것이다[4-10]. 변압기의 형태에 따라서 동적변압기(dynamic transformer)와 공심 변압기(air-cored transformer)형으로 구분된다. 공심 변압기결합형은 두 개의 자장압축발전기 사이에 공심형 변압기가 결합된 형태로 앞단의 출력전류가 공심 변압기 1차 코일에 공급되고, 2차 코일에 유도된 전류는 2차 코일과 직렬로 연결된 다음 자장압축발전기의 초기 입력전류가 된다. 동적변압기 결합형은 별개의 변압기가 추가되지 않고, 앞단 자장압축발전기의 출력을 전달받는 다음 단의 자장압축발전

* 교신저자, 正會員 : 國方科學研究所 前任研究員

E-mail : jhkuk@hanafos.com

* 正會員 : 忠南大學交 電氣工學科 教授

接受日字 : 2004年 8月 27日

最終完了 : 2004年 10月 1日

기 내에 1차와 2차 코일이 변압기 형태로 함께 만들어져 있어, 1차 코일에 공급된 앞단의 출력전류가 2차 코일 내에 초기 자장을 형성하고, 초기 자장이 최대가 되었을 때 자장압축발전기가 동작을 시작하여 2차적으로 전자기에너지를 증폭한다. 변압기결합형 자장압축발전기는 각 자장압축변환기가 회로적으로 분리되어있어 최종 자장압축발전기가 동작하는 시간동안에만 펄스 형태의 출력에너지가 부하에 공급된다는 장점이 있고, 변압기 결합부분의 권선비에 비례하여 2차 코일에 유도되는 전압이 높으므로 자장압축발전기 내부에서 전압강하가 발생할 가능성이 높다는 단점이 있다.

자장압축발전기의 출력에너지를 높이는 두 번째 방법으로는 자장압축발전기를 직렬과 병렬 또는 직렬과 병렬의 혼용으로 연결하는 방법이 있다[11, 12]. 자장압축발전기를 직렬과 병렬로 결합하는 경우에는 배터리처럼 부하에 필요한 에너지의 크기에 따라 자장압축발전기의 수를 쉽게 증감할 수 있으며, 직렬 및 병렬로 결합되는 형태에 따라 동작시간을 짧게 유지하면서 부하에 출력되는 전류와 전압을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 자장압축발전기를 직렬과 병렬로 결합할 때에 결합부분의 인덕턴스를 줄여야 하고, 화약을 정밀하게 폭발시켜야 하는 어려움이 있으며, 결합된 자장압축발전기들 중 하나라도 비정상적으로 동작하면, 출력특성이 현저히 감소하게 된다.

자장압축발전기의 출력에너지를 높이고, 출력파형을 조절하는 방법 중에서 자장압축발전기의 크기를 증가시키거나 변압기형태로 결합하는 방법에 관한 연구는 많이 수행되었으나, 직렬과 병렬결합에 관한 연구는 체계적으로 이루어지지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 직렬과 병렬로 결합한 자장압축발전기 시스템의 특성을 간단한 회로해석을 통하여 이해하고, 자장압축발전기의 수를 변화시킨 직렬 및 병렬결합 자장압축발전기 시스템을 설계하고, 제작하여 인덕턴스 부하에서의 전압과 전류의 출력특성을 측정함으로써 자장압축발전기의 직렬 및 병렬결합 특성을 체계적으로 분석하였다.

2. 병렬과 직렬로 결합한 자장압축발전기의 회로해석

나선형 자장압축발전기 N개를 병렬로 결합한 회로도들 그림 1에 도시하였다. 그림 1에서 L₁-L_n은 시간에 따라 변화하는 자장압축발전기들의 인덕턴스를 표시하며, R₁-R_n은 각 자장압축발전기에서 발생하는 모든 자속손실을 포함하는 저항을 의미한다. R_{load}와 L_{load}는 각각 부하의 저항과 인덕턴스를 표시하며, 부하의 인덕턴스는 시간에 따라 변화하지 않는다.

그림 1에서 임의의 자장압축발전기와 부하로 이루어진 폐회로는 다음과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$L_i \frac{dI_i}{dt} + I_i \frac{dL_i}{dt} + R_i I_i + L_{load} \frac{dI}{dt} + R_{load} I = 0 \quad (1)$$

여기서, i=1, 2, 3, ..., n 이다.

자장압축발전기는 부하의 인덕턴스에 따라 출력특성과 전류 허용량이 달라지므로 자장압축발전기를 직렬과 병렬로 결합할 경우에 출력특성을 최적화하기 위하여 동일한 자장

압축발전기를 사용한다. 이와 같은 경우, 모든 자장압축발전기의 전류와 전류의 시간변화율은 동일하므로 I₁=I₂=...=I_i 그리고 dI₁/dt=dI₂/dt=...=dI_i/dt이다. 따라서 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(L_i + NL_{load}) \frac{dI_i}{dt} + I_i \frac{dL_i}{dt} + (R_i + NR_{load}) I_i = 0 \quad (2)$$

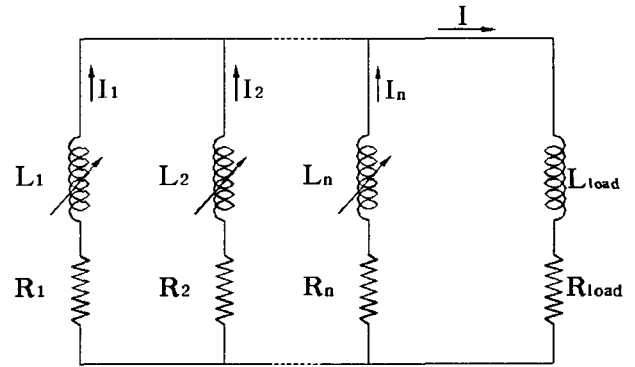


그림 1 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 등가회로도
Fig. 1 Equivalent circuit diagram for HMCs connected in parallel

식 (2)를 보면 병렬로 결합된 각각의 자장압축발전기는 R_{load}와 L_{load}가 아닌 NR_{load}와 NL_{load}를 부하로 보고 동작하게 된다. 만일 각각의 자장압축발전기가 부하 L_{load}에 적합하도록 설계되었다면 병렬로 결합된 자장압축발전기 시스템에서 부하의 크기가 N배로 증가함으로써 자장압축발전기의 출력특성이 달라진다. 따라서 자장압축발전기를 병렬로 결합할 때에는 자장압축발전기와 부하와의 관계를 고려하여야 한다.

식 (2)의 양변에 I_i를 곱하여 정리를 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} (L_i + NL_{load}) I_i^2 \right) - \left((R_i + NR_{load}) + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (L_i + NL_{load}) \right) I_i^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 왼편의 항은 자기에너지의 시간적 변화율을 나타낸다. 병렬로 결합된 자장압축발전기 시스템에서 시간에 따라 자기에너지, 즉 출력에너지를 증가시키기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$-\frac{dL_i}{dt} > 2(R_i + NR_{load}) \quad (4)$$

식 (4)로부터 부하의 저항효과는 단일 자장압축발전기에 동일한 부하를 부착하였을 경우보다 더 크게 나타남을 알 수 있다. 그렇지만, 대부분의 경우에 자장압축발전기는 수회선에서 수십 회선의 동선으로 제작을 하고, 부하는 1회선 정도의 동판이나 동 실린더로 제작함으로써 R_i>R_{load}가 되어 결합부분의 접촉저항을 없애 준다면 출력에너지에 미치는

부하의 저항효과는 크지 않을 것이다.

식 (4)에서 알 수 있듯이 에너지를 증폭시키기 위하여 자장압축발전기의 시간에 대한 인덕턴스 변화율을 저항 값보다 매우 높게 설계한다. 이와 같은 경우에 식 (1)에서 부하 양단의 전압은

$$L_{load} \frac{dI}{dt} \cong -(L_i \frac{dI_i}{dt} + I_i \frac{dL_i}{dt}) \quad (5)$$

로 표현할 수 있다. 식 (5)를 보면 병렬로 결합한 자장압축발전기 시스템에서 부하 양단의 전압은 단일 자장압축발전기에 의하여 유도되는 부하 양단의 전압과 같다는 사실을 알 수 있다.

나선형 자장압축발전기 N개를 직렬로 결합한 시스템의 회로는 다음 식으로 기술할 수 있다.

$$(L_{load} + \sum_{i=1}^n L_i) \frac{dI}{dt} + (\sum_{i=1}^n \frac{dL_i}{dt}) I + (R_{load} + \sum_{i=1}^n R_i) I = 0 \quad (6)$$

식 (6)에서 직렬로 결합한 자장압축발전기의 경우, $I_1=I_2=\dots=I_n=I$ 이므로 부하 양단의 전압은 각 자장압축발전기에 의하여 부하 양단에 유도되는 전압의 합으로 주어진다. 즉, N개의 자장압축발전기가 직렬로 결합되었다면 부하 양단의 전압은 자장압축발전기의 인덕턴스의 시간변화율에 의하여 부하에 유도되는 전압의 크기에 N배가 된다.

3. 실험

직렬과 병렬 결합효과분석에 사용한 자장압축발전기의 설계조건을 표 1에 정리하였다. 표 1에서 모델-I은 4개와 6개의 자장압축발전기를 직렬과 병렬로 결합한 시험에서 큰 초기 입력에너지를 공급하고, 부수적으로 자장압축발전기의 2단계 결합특성을 보기 위하여 사용한 자장압축발전기이고, 모델-II는 직렬과 병렬결합에 사용한 자장압축발전기이다. 모델-I과 II의 코일 내경은 50 mm이고, 코일 길이는 각각 200과 150 mm이다. 두 모델 모두 알루미늄 전기자의 외경은 25 mm이고, 두께는 2.5 mm이다. 자장압축발전기의 코일은 절연을 위해 에나멜이 피복된 직경 1mm의 동선을 사용하여 제작하였고, 대전류가 흐를 때에 변형되지 않도록 코일을 전기절연 에폭시로 견고하게 고정하였다. 모델-II의 단면도를 그림 2에 도시하였다. 직렬과 병렬결합효과를 분석하기 위한 자장압축발전기의 결합구조를 그림 3과 4에 도시하였고, 시험전의 설치사진을 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 3과 4에서 부하의 저항과 인덕턴스에 대한 1단 자장압축발전기의 인덕턴스 시간변화율을 크게 하여 에너지증폭률을 높이기 위해 1단 자장압축발전기를 부하로 작용하는 2단 자장압축발전기와 병렬로 결합하였다.

자장압축발전기의 출력특성은 각 자장압축발전기의 후면에 설치한 로고우스키 센서와 부하의 내면 중앙에 설치한 루프형 자기센서를 사용하여 측정하였다. 로고우스키와

표 1 나선형 자장압축발전기의 설계변수

Table 1 Design parameters of helical MCGs

구분 모델	코일 내경 (mm)	선경 (mm)	코일의 규격			
			구획번호	1	2	3
I	50	1.0	피치(mm)	1.25	2.5	
			길이(mm)	100	100	
			선수	1	2	
II	50	1.0	피치(mm)	1.5	3.0	6.0
			길이(mm)	54	48	48
			선수	1	2	4

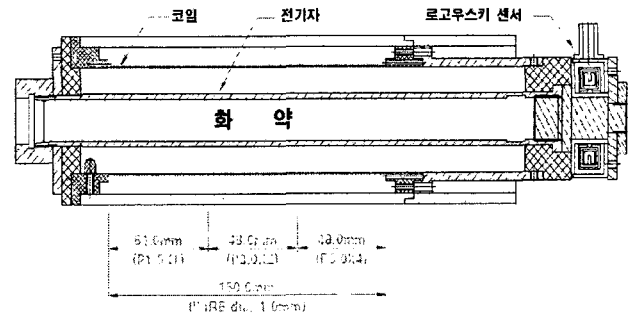


그림 2 나선형 자장압축발전기의 단면도

Fig. 2 Cross section diagram of HMCg

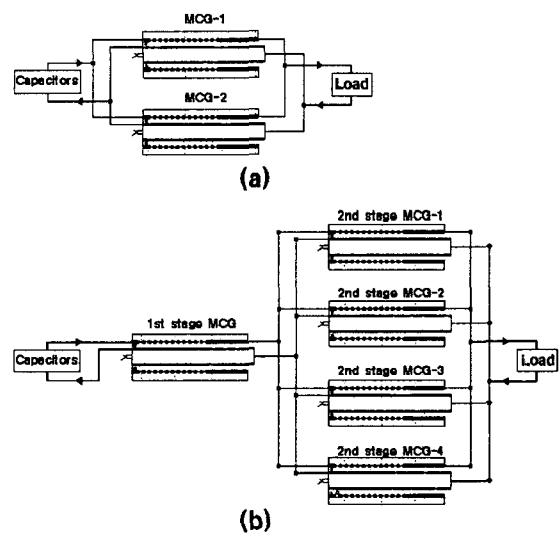


그림 3 (a) 2개, (b) 4개의 나선형 자장압축발전기를 병렬로 결합한 연결도

Fig. 3 Connection diagrams of (a) two- and (b) four-barrel HMCg systems connected in parallel

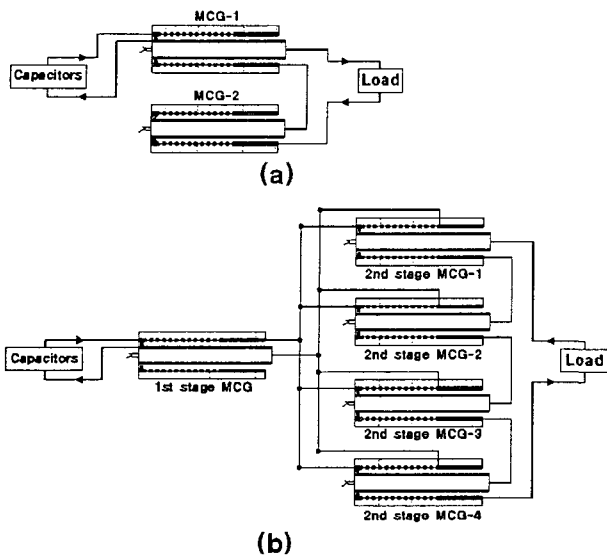


그림 4 (a) 2개, (b) 4개의 나선형 자장압축발전기를 직렬로 결합한 연결도
 Fig. 4 Connection diagrams of (a) two- and (b) four- barrel HMG systems connected in series

루프형 자기센서를 보정하기 위해 실험과 동일하게 자장압축발전기와 센서를 구성하고, 8 μF 의 축전기를 4 kV로 충전하여 초기 전류를 공급한 후, 센서의 측정파형을 Ion Physics Corporation사의 CM-01-L Current Monitor (sensitivity=0.001 V/A, 최대전류=500 kA)의 전류측정파형과 비교하여 보정계수를 결정하였다. 자장압축발전기의 동작시간을 측정하기 위하여 각 자장압축발전기의 crowbar와 코일의 구획사이에 광학편을 설치하였다. 광학편의 반대쪽은 Thorlabs DET 110 광다이오드와 연결되고, 팽창하는 전기자와 광학편이

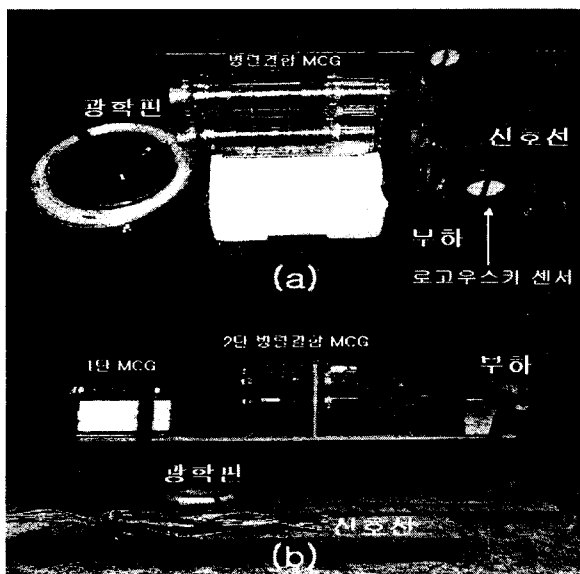


그림 5 (a) 2개, (b) 6개의 나선형 자장압축발전기를 병렬로 결합한 시험체의 사진
 Fig. 5 Photographs of (a) two- and (b) six-barrel HMG systems connected in parallel

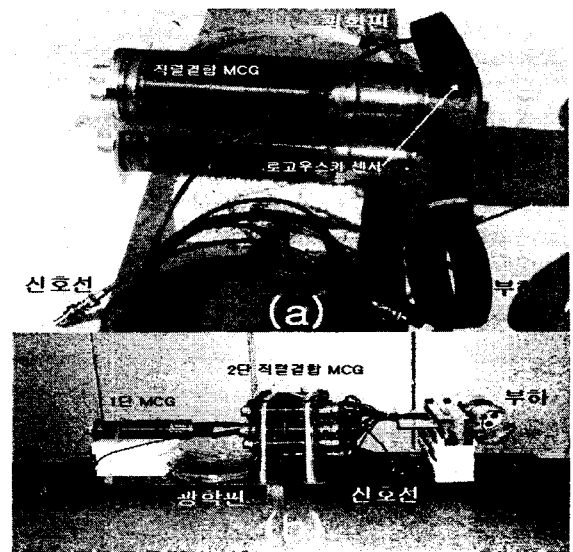


그림 6 (a) 2개, (b) 4개의 나선형 자장압축발전기를 직렬로 결합한 시험체의 사진
 Fig. 6 Photographs of (a) two- and (b) four-barrel HMG systems connected in series

충돌하여 발생한 빛에 의해 증폭된 광다이오드의 출력전압은 오실로스코프에 기록된다. 부하 양단에서의 전압은 부하의 인덕턴스와 전류의 시간 변화율에 의하여 계산할 수 있으나, 직접 실험적으로 측정된 값과 전류측정파형으로 계산한 값을 비교하기 위해 4개의 자장압축발전기를 직렬로 결합한 시험체의 부하 양단에 그림 7과 같은 전압 센서를 부착하였다. 그림 7에서 current monitor로는 Pearson Electronics Inc.의 모델 411 M, 출력감도 0.1V/A인 pulse current transformer를 사용하였다. 실험장치의 구성도를 그림 8에 도시하였다. 그림 8에서 자장압축발전기의 초기 에너지는 25 kV, 25 μF 인 축전기 2개를 병렬로 결합하여 구성된 초기전류 공급장치로 공급하였다. 축전기에서 공급되는 초기 전류의 최대치에서 자장압축발전기를 동작시키기 위하여 시간지연장치로 화약의 기폭시간과 장비의 동작시간을 조절하였다.

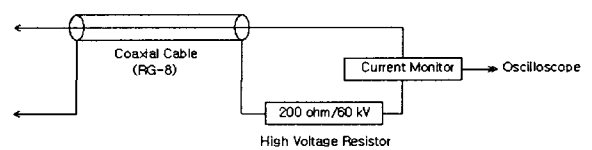


그림 7 부하 양단의 전압을 측정하기 위한 센서의 구조
 Fig. 7 Schematic diagram of the sensor measuring load voltage

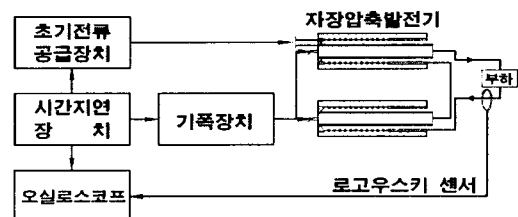


그림 8 실험장치의 구성도
 Fig. 8 Schematic diagram of the experimental set-up

4. 실험결과 및 논의

본 절에서는 직렬과 병렬로 결합된 자장압축발전기 시스템의 출력특성 측정결과를 기술하였고, 측정결과를 분석하여 자장압축발전기의 직렬과 병렬결합 특성을 논의하였다.

4.1 자장압축발전기의 직렬결합 특성분석

자장압축발전기의 직렬과 병렬결합 특성을 분석하기에 앞서 단일 자장압축발전기의 출력특성을 측정하였다. 실험에서 측정한 dI/dt 와 전류의 출력파형을 그림 9에 도시하였고, 실험결과를 표 2에 정리하였다. 그림 9에서 세로의 진한 선들은 광학편을 사용하여 측정한 결과로 자장압축발전기의 동작시작시간과 팽창하는 전기가 코일의 구획사이에 도달하는 시간을 나타낸다. 표 2에서 효율지수(figure of merit)는 $\ln(I_f/I_0)/\ln(L_0/L_f)$ 로 정의되며 출력성능을 평가하기 위하여 도입되었고, 하첨자 0과 f는 초기와 최종 값을 나타낸다. 에너지 손실이 없는 이상적인 경우에 효율지수는 1.0이 되고, 0.75보다 높은 값을 가지면 자장압축발전기의 성능이 좋다고 평가한다[1, 13]. 표 2에서 효율지수가 0.75보다 크므로 실험에 사용한 단일 자장압축발전기는 정해진 부하에 대하여 잘 설계되었음을 알 수 있다.

표 2 단일 나선형 자장압축발전기의 실험결과

Table 2 Experimental results of single HMCGs

구분 시험	인덕턴스 (μH)		전류 (kA)		에너지 (kJ)		에너지 증폭률	효율 지수	부하 침투전압 ($L_{load} \times dI/dt$) (kV)
	MCG	부하	입력	출력	입력	출력			
1차	45.98	0.090	2.97	353	0.204	5.58	27.4	0.77	8.4
	45.58	0.092	2.94	365	0.197	6.10	30.9	0.78	8.9

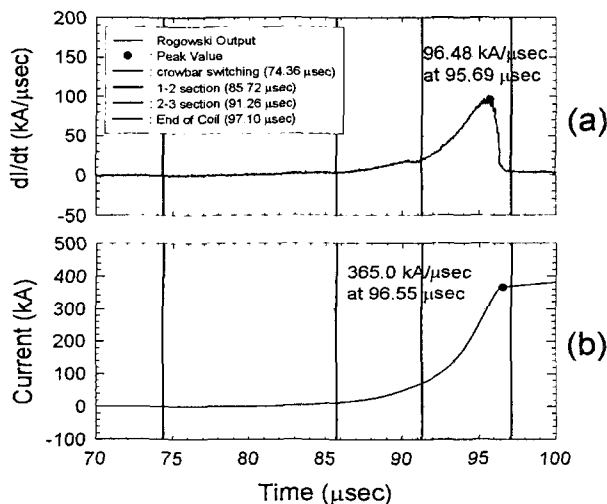


그림 9 단일 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 출력파형(2차 시험). (a) dI/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 9 Output waveforms recorded at the load of single HMCG(2nd test): (a) dI/dt waveform, (b) current waveform

표 2에 기술한 출력특성을 갖는 단일 자장압축발전기를 직렬로 2개와 4개를 결합한 실험결과를 표 3과 4에 기술하고, 부하에서 측정한 dI/dt 와 전류의 출력파형을 그림 10과 12에 도시하고, 4개의 자장압축발전기를 직렬로 결합한 시스템의 입력으로 사용한 1단의 dI/dt 와 전류의 출력파형을 그림 11에 도시하였다. 또한 자장압축발전기 4개를 직렬로 결합한 실험에서 전압측정센서로 기록한 부하 양단의 전압출력파형을 그림 13에 도시하였다. 그림 13의 전압측정파형은 부하에서 측정한 dI/dt 출력파형과 부하의 인덕턴스를 곱한 결과와

표 3 2개의 나선형 자장압축발전기를 직렬로 결합한 실험결과

Table 3 Experimental results of two-barrel HMCG system connected in series

구분 시험	인덕턴스 (μH)		전류 (kA)		에너지 (kJ)		에너지 증폭률	부하 침투전압 ($L_{load} \times dI/dt$) (kV)
	MCG	부하	입력	출력	입력	출력		
1차	45.95	0.136	2.94	347	0.395	8.21	20.8	15.5
	45.37							

표 4 4개의 나선형 자장압축발전기를 직렬로 결합한 실험결과

Table 4 Experimental results of four-barrel HMCG system connected in series

구분 시험	인덕턴스 (μH)		전류 (kA)		에너지 (kJ)		에너지 증폭률	부하 침투전압 ($L_{load} \times dI/dt$) (kV)	
	MCG	부하	입력	출력	입력	출력			
1차	1단	143.8	11.10	2.15	17.0	0.358	1.61	4.48	15.5
	2단	44.45	0.399	4.25	349	1.61	24.2	15.1	34.0
		44.28							
		44.62							
		44.74							

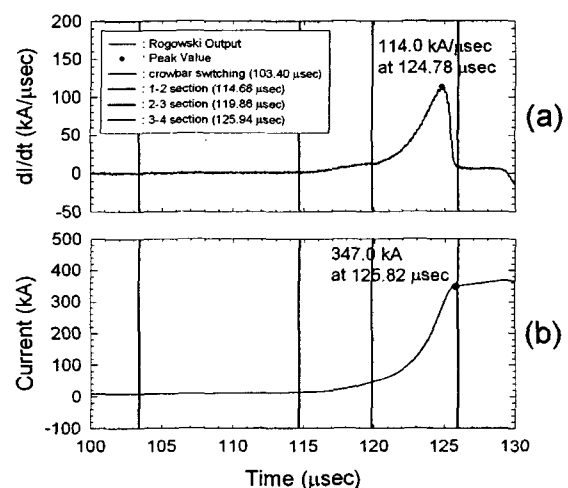


그림 10 2개를 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 출력파형. (a) dI/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 10 Output waveforms recorded at the load of two-barrel HMCG system connected in series: (a) dI/dt waveform, (b) current waveform

일치하였다. 따라서 그 외의 실험에서는 부하 양단의 전압을 측정하기 위하여 별도의 전압측정센서를 사용하지 않았으며, 부하에서 측정된 dI/dt 값에 인덕턴스를 곱한 값의 최대치를 부하 양단의 첩두 전압으로 사용하였다.

앞에 기술한 표 2에서 4의 실험결과로부터 자장압축발전기의 직렬결합특성을 분석하기 위하여 표 5에 실험결과를 종합적으로 요약하였다. 표 5에 기술한 에너지 증폭률은 직렬로 결합된 자장압축발전기의 입력에 대한 출력에너지의 비를 의미한다. 표 5를 살펴보면 동일한 규격의 자장압축발전기를 사용하였음에도 에너지 증폭률이 실험에 따라 달라짐을 나타내고, 효율지수의 정의에서 자장압축발전기의 출력 성능은 부하와 인덕턴스의 비에 따라 달라짐을 알 수 있다.

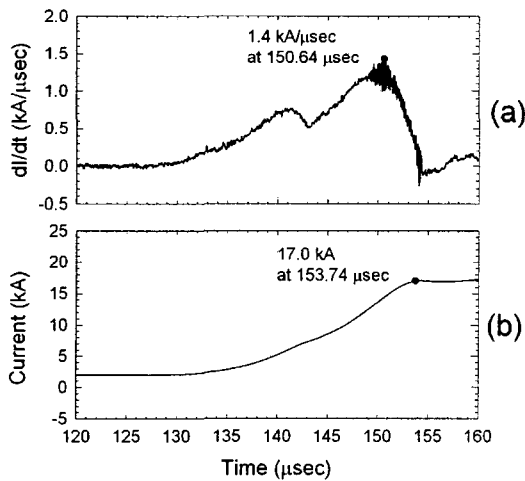


그림 11 4개를 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 1단에서 기록한 출력파형. (a) dI/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 11 Output waveforms recorded at the 1st stage of four-barrel HMCG system connected in series: (a) dI/dt waveform, (b) current waveform

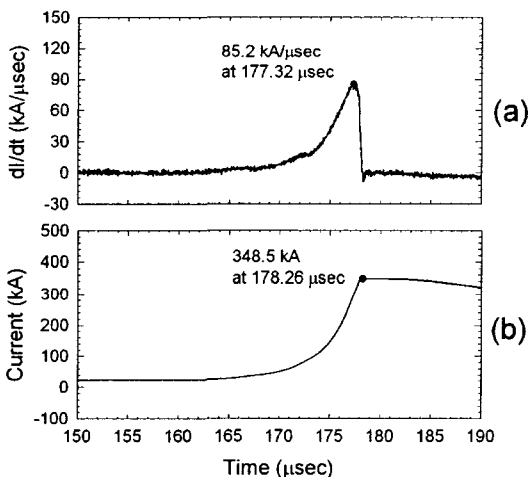


그림 12 4개를 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 출력파형. (a) dI/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 12 Output waveforms recorded at the load of four-barrel HMCG system connected in series: (a) dI/dt waveform, (b) current waveform

표 5에 기술한 인덕턴스의 비와 에너지 증폭률의 관계를 도시한 그림 14를 보면 에너지 증폭률이 최적화 되는 인덕턴스의 비율이 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 관계로부터 자장압축발전기는 부하의 특성에 따라 다르게 설계되어야 하며, 자장압축발전기를 직렬로 결합할 경우에도 최적의 에너지 증폭효율을 달성하기 위해서는 부하의 인덕턴스에 따라 결합하는 자장압축발전기의 수를 변경해야 함을 알 수 있다. 예로 그림 14에서 본 실험에 사용한 나선형 자장압축발전기는 인덕턴스의 비가 대략 500일 때 에너지 증폭률이 최적화됨으로, 부하의 인덕턴스가 0.5 μH 라고 하면 최적의 에너지 증폭률은 자장압축발전기 5개를 직렬로 결합할 때 얻어질 것이다. 인덕턴스 비율이 에너지 증폭률에 미치는 영향을 논의해 보면 정해진 자장압축발전기에 대해 인덕

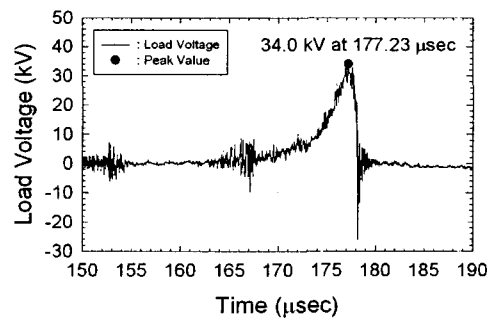


그림 13 4개를 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 전압파형

Fig. 13 Voltage waveform recorded at the load of four-barrel HMCG system connected in series

표 5 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기 시스템의 실험결과 종합

Table 5 Summary of experimental results for HMCG systems connected in series

구분	단일 MCG		2개 직렬결합	4개 직렬결합
	1차 시험	2차 시험		
인덕턴스 (전체 HMCG)	45.98	45.58	91.32	178.1
인덕턴스(Load)	0.090	0.092	0.136	0.399
인덕턴스 비	511	495	671	446
에너지 증폭률	27.4	30.9	20.8	15.1
부하 전압 ($L_{load} \times dI/dt$)	8.36	8.88	15.5	34.0

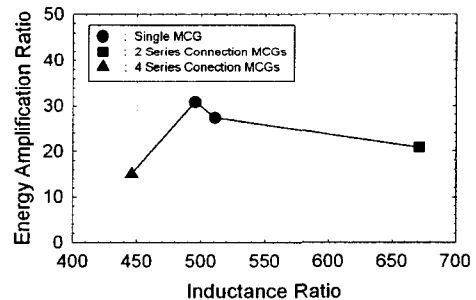


그림 14 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 인덕턴스 비에 대한 에너지 증폭률

Fig. 14 Energy amplification ratio with respect to inductance ratio of HMCG systems connected in series

턴스 비가 감소하여 부하의 인덕턴스가 점점 커지는 경우, 식 (4)에서 알 수 있듯이 인덕턴스의 시간변화율에 비하여 부하의 저항이 증가하고 에너지 손실이 커져 에너지 증폭률은 감소하게 된다. 부하의 인덕턴스가 작아져 인덕턴스 비가 증가하게 되면 자장압축발전기의 내부 유도전압($I \cdot dL/dt$)이 점차 높아져서 전기자와 코일 사이의 전압강하에 의한 에너지 손실과 급격한 전류의 상승에 의한 저항의 증가로 에너지 증폭률이 감소한다. 실험결과로부터 본 실험에 사용한 자장압축발전기는 인덕턴스의 비율이 대략 500 근방일 때 최대의 에너지 증폭률을 나타내었다.

자장압축발전기를 직렬로 결합하였을 때 부하에 출력되는 전압의 변화를 알아보기 위하여 표 5에 기술한 직렬로 결합한 자장압축발전기의 인덕턴스와 부하 양단에 걸리는 침두 전압과의 관계를 그림 15에 도시하였다. 그림 15를 보면 부하 양단의 침두 전압은 직렬로 결합한 자장압축발전기의 인덕턴스에 비례하여 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 이와 같은 사실은 2절의 회로해석결과를 입증한다.

자장압축발전기의 직렬결합 특성분석에서 자장압축발전기의 출력특성은 부하의 인덕턴스에 따라 달라지므로, 적용할 부하에 대해 최적의 에너지 증폭효율을 얻기 위해서는 인덕턴스 비율을 고려하여 자장압축발전기의 결합수를 조절하여야 한다. 자장압축발전기를 직렬로 결합하면 결합한 수에 비례하여 부하 양단의 전압은 증가하고, 결합한 자장압축발전기의 화약을 동시에 기폭시킴으로 단일 자장압축발전기와 동일한 동작시간을 유지한다. 자장압축발전기를 직렬로 결합하면 부하의 전압은 증가하나, 부하의 전류는 직렬로 결합된 단일 자장압축발전기의 출력전류 허용한계에 의하여 제한된다.

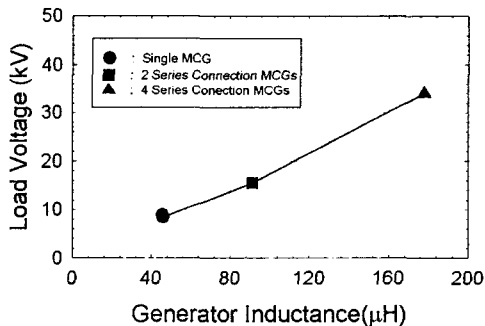


그림 15 직렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 인덕턴스에 대한 부하의 침두 전압

Fig. 15 Maximum voltage of the load with respect to inductance of HMCG systems connected in series

4.2 자장압축발전기의 병렬결합 특성분석

병렬로 결합한 자장압축발전기의 실험결과를 표 6에서부터 8에 정리하였고, 대표적인 dI/dt 와 전류의 출력파형을 그림 16에서부터 20에 도시하였다.

자장압축발전기의 병렬결합특성을 분석하기 위하여 표 6에서 8의 실험결과를 종합하여 표 9에 요약하였다. 표 9에서 에너지 증폭률은 병렬로 결합된 자장압축발전기에 대한 입력과 출력에너지의 비율을 나타낸다. 표 9를 보면 자장압축발전기의 직렬결합특성처럼 자장압축발전기에 대한 부하의 인덕턴스 비율에 따라 에너지 증폭률이 달라짐을 알 수 있다. 병렬결합 자장압축발전기의 인덕턴스 비에 대한 에너지 증폭률의 관계를 그림 21에 나타내었다. 그림 21에서

표 6 2개의 나선형 자장압축발전기를 병렬로 결합한 실험결과

Table 6 Experimental results of two-barrel HMCG systems connected in parallel

구분 시험	인덕턴스 (μH)		전류 (kA)		에너지 (kJ)		에너지 증폭률	부하 침두전압 ($L_{load} \times dI/dt$) (kV)
	MCG	부하	입력	출력	입력	출력		
1차	46.14	0.096	2.05	308	0.194	4.55	23.4	6.9
	45.96							
2차	44.54	0.097	2.68	390	0.326	7.38	22.7	7.4
	45.94							

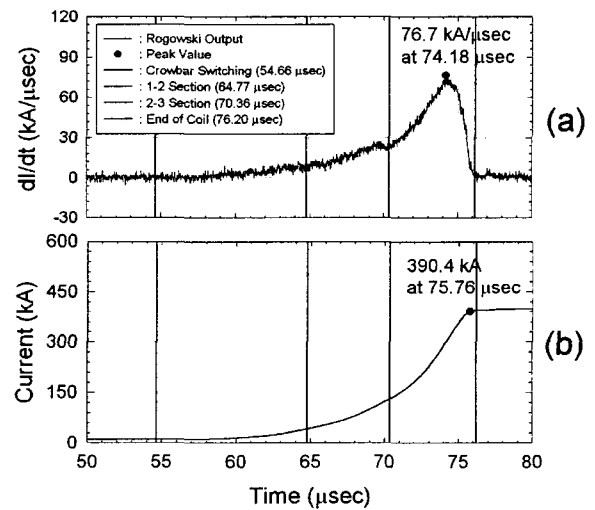


그림 16 2개를 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 출력파형(2차 시험). (a) dI/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 16 Output waveforms recorded at the load of two-barrel HMCG system connected in parallel(2nd test): (a) dI/dt waveform, (b) current waveform

표 7 4개의 나선형 자장압축발전기를 병렬로 결합한 실험결과

Table 7 Experimental results of four-barrel HMCG systems connected in parallel

구분 시험	인덕턴스 (μH)		전류 (kA)		에너지 (kJ)		에너지 증폭률	부하 침두전압 ($L_{load} \times dI/dt$) (kV)	
	MCG	부하	입력	출력	입력	출력			
1차	1단	147.3	11.09	2.68	16.9	0.569	1.55	2.7	22.2
	2단	46.22	0.083	4.23	764	1.55	24.2	15.7	11.4
		45.41							
		45.87							
2차	1단	146.6	11.35	2.19	17.0	0.379	1.63	4.3	18.2
	2단	45.43	0.096	4.25	658	1.63	20.8	12.7	9.8
		45.90							
		45.66							
45.05									

본 실험에 사용한 자장압축발전기는 인덕턴스의 비율이 대략 500일 때에 최적의 에너지 증폭률을 나타냄을 알 수 있으며, 직렬결합 특성분석의 결과와 일치한다. 이와 같은 결과로부터 부하의 인덕턴스가 작을 경우, 예로 0.02 μH 의 부하에 에너지를 공급할 경우에 본 실험에 사용한 자장압축발전기 5개를 병렬로 결합한다면 최대의 에너지 증폭효율을 달성할 수 있을 것이다.

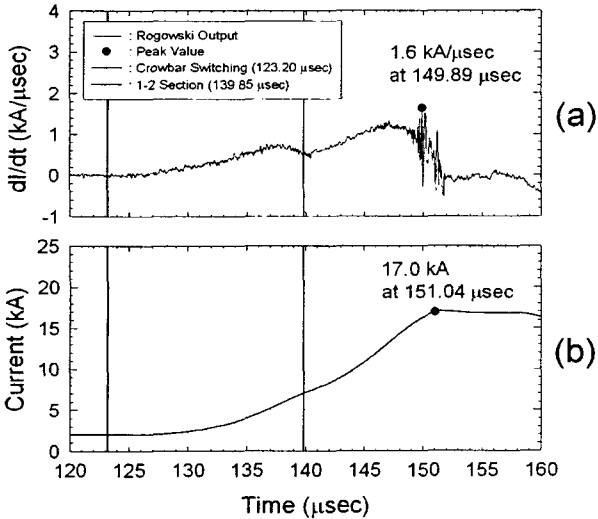


그림 17 4개를 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 1단에서 기록한 출력파형(2차 시험). (a) di/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 17 Output waveforms recorded at the 1st stage of four-barrel HMCG system connected in parallel(2nd test): (a) di/dt waveform, (b) current waveform

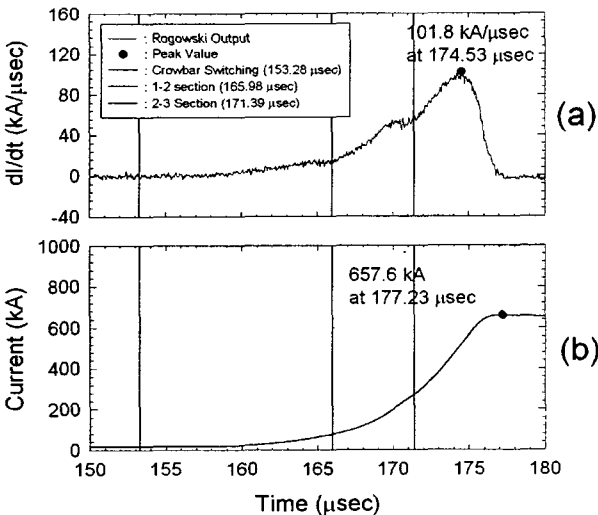


그림 18 4개를 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 출력파형(2차 시험). (a) di/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 18 Output waveforms recorded at the load of four-barrel HMCG system connected in parallel(2nd test): (a) di/dt waveform, (b) current waveform

표 8 6개의 나선형 자장압축발전기를 병렬로 결합한 실험결과

Table 8 Experimental results of six-barrel HMCG system connected in parallel

시험	구분	인덕턴스 (μH)		전류(kA)		에너지(kJ)		에너지 증폭률	부하 침투전압 ($L_{\text{load}} \times di/dt$) (kV)
		MCG	부하	입력	출력	입력	출력		
1차	1단	144.7	7.525	2.28	24.0	0.395	2.17	5.5	24.8
	2단	44.63	0.081	4.0	707	2.17	20.2	9.3	8.6
		44.69							
		44.85							
		44.50							
		45.01							
44.97									

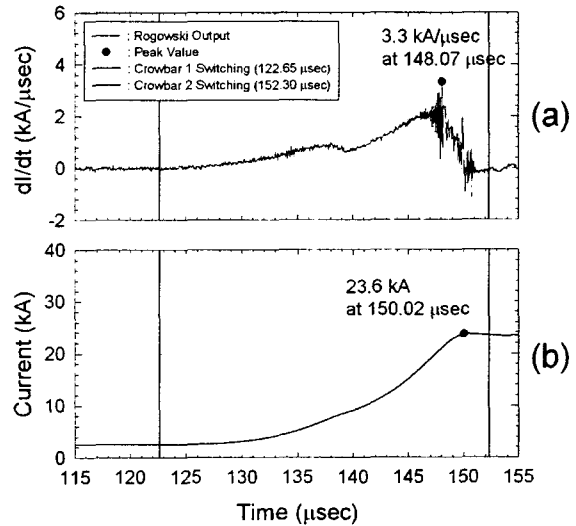


그림 19 6개를 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 1단에서 기록한 출력파형. (a) di/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 19 Output waveforms recorded at the 1st stage of six-barrel HMCG system connected in parallel: (a) di/dt waveform, (b) current waveform

자장압축발전기를 병렬로 결합하였을 때 부하에 출력되는 전압의 변화를 알아보기 위하여 표 9에 기술한 병렬결합 자장압축발전기의 인덕턴스와 부하 양단에 걸리는 침투 전압과의 관계를 그림 22에 도시하였다. 그림 22를 보면 병렬로 결합한 자장압축발전기의 수에 관계없이 부하에 출력되는 전압은 일정하게 유지됨을 알 수 있고, 이러한 결과는 직렬결합의 분석결과처럼 2절의 회로해석결과를 확인해 준다.

병렬로 결합한 자장압축발전기의 실험결과에서 자장압축발전기와 부하의 인덕턴스 비율에 따라 출력특성이 달라짐을 확인하였고, 부하의 인덕턴스가 작을 경우, 자장압축발전기를 병렬로 결합함으로써 최적의 에너지 증폭효율을 달성할 수 있음을 알았다. 이러한 사실은 직렬결합의 분석결과와 일치한다. 자장압축발전기를 병렬로 결합하면 결합한 수에 관계없이 부하의 출력전압은 일정하게 유지되고, 부하의 출력전류는 각 자장압축발전기의 전류 허용한계와 직렬로 결합한 자장압축발전기의 수를 곱한 값에 의하여 제한된다.

직렬로 결합한 자장압축발전기의 끝에 설치한 로고우스키 센서의 출력파형은 모두 동일하였으나, 병렬로 결합한 자장압축발전기의 끝에 설치한 로고우스키 센서의 출력파형은 자장압축발전기의 동작시간에 따라 심한 변화를 보였다. 그림 23에 4개를 병렬로 결합한 각 자장압축발전기의 끝에서 측정된 dI/dt 출력파형을 도시하였다. 그림에서 세로의 굵은 선은 광학핀으로 측정된 자장압축발전기의 동작시간을 나타낸다. 동작시간의 최대 차이는 대략 1 μsec 로 자장압축발전기의 작동이 종료되는 시점에서 dI/dt 파형이 더욱 급격하게 변화한다. 이와 같은 현상은 자장압축발전기의 동작종결시간의 차이에 따라 각각의 자장압축발전기가 바라보는 부하 인덕턴스의 크기가 갑작스럽게 달라지기 때문에 발생한다.

자장압축 발전기의 동작 시간의 차이로 인해 변형되는 dI/dt 출력파형이 출력특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2 개의 자장압축발전기를 병렬로 결합하고, 1 μsec 의 시간차를 두고 동작시킨 후, 출력특성을 측정하였다. 측정된 실험결과를 표 10에 정리하고, 자장압축발전기의 dI/dt 출력파형을 그림 24에 도시하였다. 표 10에 정리한 결과를 시간 지연이 없는 표 6의 실험결과와 비교해 보면, 부하에서의 전압은 약간 낮아졌고, 에너지 증폭률은 평균적으로 12 % 감소하였다. 그림 24를 보면 자장압축발전기의 동작시간에 차이가 발생하면 dI/dt 출력파형이 심하게 변형됨을 알 수 있다. 이와 같은 dI/dt 파형의 급격한 변화는 자장압축발전기 내부에서 전압강하 등을 발생시켜 출력특성을 감소시킬 수 있다. 또한 병렬로 결합한 자장압축발전기의 동작종결시간이 다를 경우에 동작종결시간이 가장 빠른 자장압축발전기의 끝부분에서 부하가 하나의 폐회로를 형성함으로써 남은 다른 자장압축발전기에 의하여 생성되는 에너지는 부하에 공급되지 못하고 자체적으로 소모되어 버린다. 병렬결합 자장압축발전기의 출력에너지를 감소시키지 않기 위해서는 가능한 자장압축발전기의 동작시간이 일치하도록 주의가 기울여야 하며, 자장압축발전기의 끝부분에서 상대적인 인덕턴스의 변화가 작도록 설계하여야 한다.

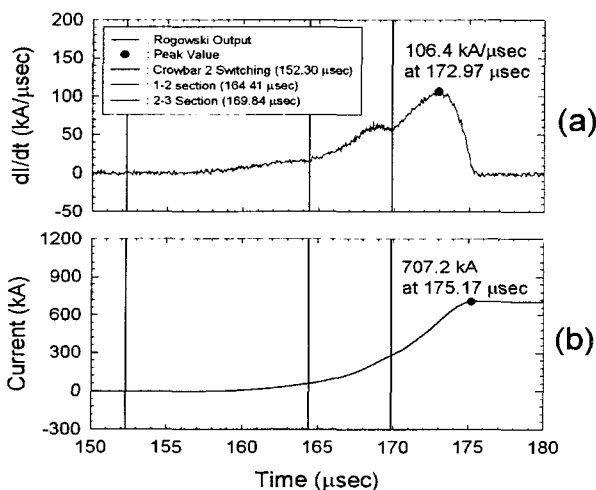


그림 20 6개를 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 부하에서 기록한 출력파형. (a) dI/dt 출력파형, (b) 전류 출력파형

Fig. 20 Output waveforms recorded at the load of six-barrel HMCG system connected in parallel: (a) dI/dt waveform, (b) current waveform

표 9 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기 시스템의 실험결과 종합

Table 9 Summary of experimental results for HMCG systems connected in parallel

구 분	2개 병렬		4개 병렬		6개 병렬
	1차	2차	1차	2차	
인덕턴스 (전체 HMCG)	23.03	22.61	11.43	11.38	7.46
인덕턴스 (Load)	0.096	0.097	0.083	0.096	0.081
인덕턴스 비	239.8	233.1	137.8	118.5	92.1
에너지 증폭률	23.4	22.7	15.7	12.1	9.3
부하 전압 ($L_{load} \times dI/dt$)	6.9	7.4	11.4	9.8	8.6

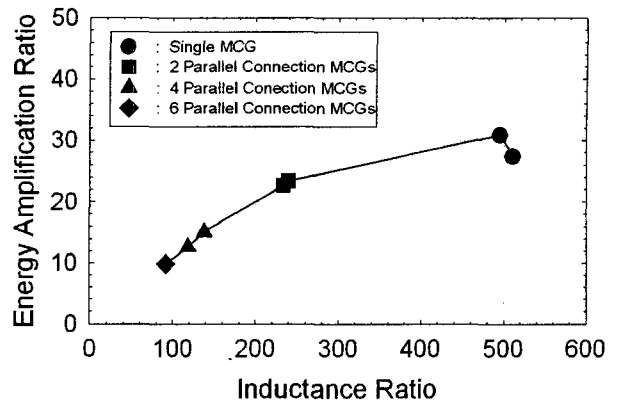


그림 21 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 인덕턴스비에 대한 에너지 증폭률

Fig. 21 Energy amplification ratio with respect to inductance ratio of HMCG systems connected in parallel

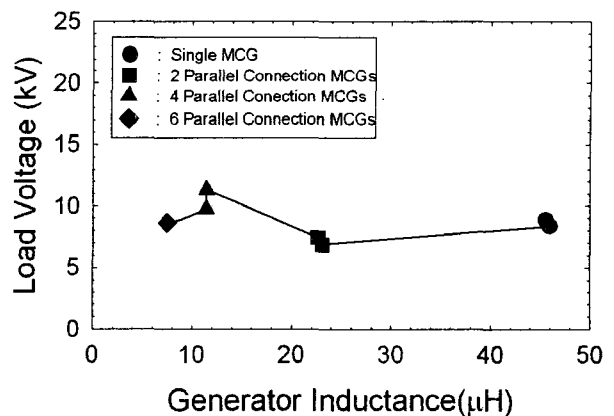


그림 22 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기의 인덕턴스에 대한 부하의 첨두 전압

Fig. 22 Maximum voltage of the load with respect to inductance of HMCG systems connected in parallel

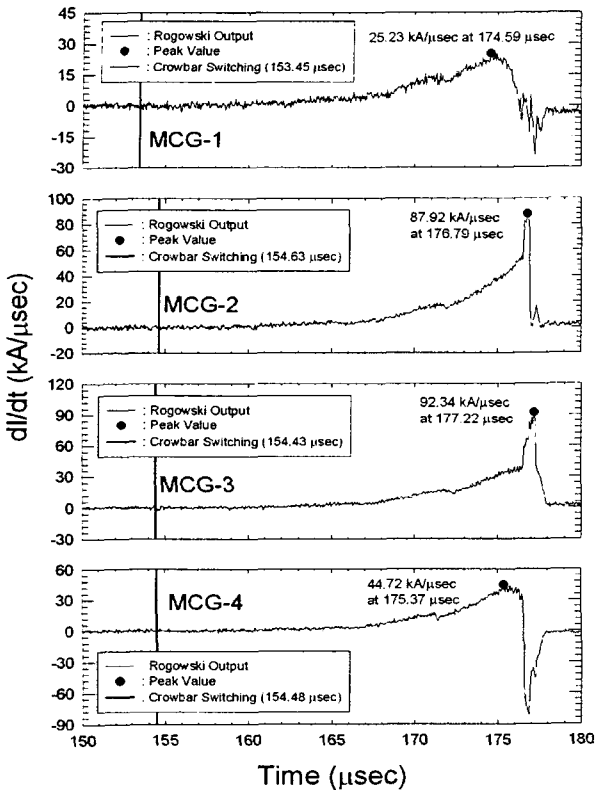


그림 23 4개를 병렬로 결합한 나선형 자장압축발전기 각각에 대한 di/dt 출력파형(1차 시험)
 Fig. 23 Each di/dt waveform of four-barrel HMCG system connected in parallel(1st test)

표 10 2개의 자장압축발전기를 병렬로 결합하고 자장압축발전기 사이에 1 μsec의 시간차를 두고 동작시킨 실험결과

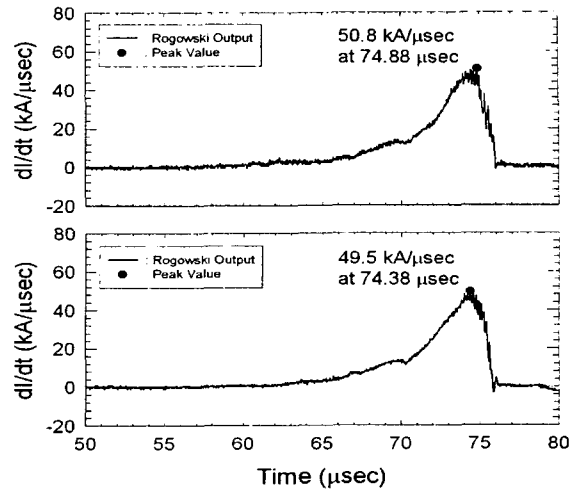
Table 10 Experimental results of two-barrel HMCG system connected in parallel and initiated by delay of 1 μ sec between two HMCGs

구분 시험	인덕턴스 (μH)		전류 (kA)		에너지 (kJ)		에너지 증폭률	부하 침투전압 (L _{load} ×di/dt) (kV)
	MCG	부하	입력	출력	입력	출력		
1차	45.57	0.107	2.29	300	0.240	4.82	20.2	6.7
	45.57							

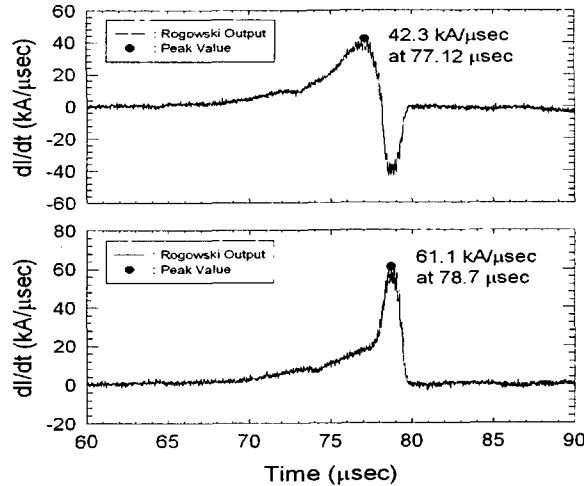
5. 결 론

자장압축발전기의 부하에 대한 직렬과 병렬결합 특성을 분석하기 위하여 자장압축발전기의 결합수를 변경한 나선형 자장압축발전기 시스템을 제작하고, 출력특성을 분석하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험결과 중에서 최대의 에너지 증폭률과 부하 양단의 침투 전압은 67.7 배와 34.0 kV로 단일 자장압축발전기를 1단으로 하고, 4개를 직렬로 결합한 자장압축발전기를 2단으로 구성한 시스템에서 달성하였다. 이 시스템에 사용한 부하 인덕턴스는 0.4 μH이고, 초기 공급에너지는 0.36 kJ이었다.



(a)



(b)

그림 24 병렬로 결합한 2개의 나선형 자장압축발전기의 끝에서 동시에 기록한 di/dt 출력파형. (a) 동시 기록, (b) 1 μsec의 지연시간을 갖는 기록

Fig. 24 di/dt waveforms simultaneously recorded at the end of each HMCG of two-barrel HMCG systems connected in parallel: (a) simultaneous initiation (b) initiation by delay of 1 μsec between HMCGs

자장압축발전기의 직렬과 병렬결합 실험결과로부터 에너지 증폭률은 부하에 대한 자장압축발전기의 인덕턴스 비율에 따라 달라지며, 최적의 에너지 증폭효율을 나타내는 인덕턴스 비율이 존재함을 알았다. 본 실험에 사용한 자장압축발전기는 부하에 대한 인덕턴스의 비율이 대략 500일 때에 최대의 에너지 증폭률을 나타내었다.

자장압축발전기를 직렬로 결합하면 부하의 전압은 결합한 자장압축발전기의 수에 비례하여 증가하며, 부하의 출력전류범위는 단일 자장압축발전기의 전류 허용한계에 의하여 제한을 받을 것이다. 직렬로 결합한 자장압축발전기의 화약을 동시에 폭발시킴으로 부하에 출력되는 전압의 지속시간은 일정하게 유지된다. 자장압축발전기를 병렬로 결합할 경우, 결합한 수에 관계없이 전압이 일정하게 유지되고, 부하의 출력전류범위는 자장압축발전기의 전류 허용한계와 결합한 수를 곱한 값에 의하여 제한될 것이다.

자장압축발전기의 병렬결합 실험결과로부터 병렬로 결합한 자장압축발전기의 동작시간이 달라지면 각 자장압축발전기의 dI/dt 출력파형이 심하게 왜곡됨을 확인하였다. 이와 같은 원인은 자장압축발전기의 동작이 종결되는 시점에서 각 자장압축발전기의 부하 인덕턴스가 서로 달라지기 때문이다. 2개의 자장압축발전기를 병렬로 결합한 후, 1 μsec 의 시간차를 두고 자장압축발전기를 동작시켰을 때 지연시간이 없는 경우보다 에너지 증폭률이 12 % 감소하였다.

실험결과로부터 부하의 인덕턴스 크기에 따라 자장압축발전기를 직렬과 병렬로 적절하게 결합하면 부하에 출력되는 전류와 전압을 조절할 수 있으며, 최적의 에너지 증폭효율을 달성할 수 있음을 알았다.

본 연구에서는 자장압축발전기를 직렬과 병렬로 결합하고, 인덕턴스 부하에서의 출력특성을 측정하고 분석하여 자장압축발전기의 직렬과 병렬결합특성을 기술하였다. 앞으로의 연구에서는 힘들고, 위험한 실험회수를 줄이도록 이론과 실험에 근거한 전산해석기법을 개발할 계획이며, 출력에너지를 높이기 위한 자장압축발전기의 변압기 결합기법과 스위치와 펄스형 변압기 등을 사용하여 자장압축발전기의 대전류 출력을 고 임피던스 부하에 적용할 수 있도록 빠른 고전압 펄스로 변환하는 연구를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] C. Fowler, R. Caird and W. Garn, "An Introduction to Explosive Magnetic Flux Compression Generators," Los Alamos Report LA-5890-MS, 1975.
 [2] L. Altgilbers, M. Brown, I. Grishnaev, B. Novac, I. Smith, I. Tkach and Y. Tkach, Magnetocumulative Generators, New York: Springer-Verlag New York Inc., 2000.
 [3] I. Ursu, M. Ivascu, A. Ludu, B. Novac, I. Panaitescu, D. Preotescu, A. Radu, N. Verbata, V. Zambreanu, and V. Zoita, Megagauss Technology and Pulsed Power Application, Plenum Press, New York and London, pp. 389-396, 1987.
 [4] A. I. Pavlovskii, R. Z. Lyudaev, L. I. Sel'Chenkov, A. S. Seryoghin, V. A. Zolotov, A. S. Yuryzhev, D. I. Zenkov, V. Ye. Gurin, A. S. Boriskin, and V. F. Basmanov, Megagauss Physics and Technology, Plenum Press, New York and London, pp. 585-593, 1980.
 [5] A. I. Pavlovskii, R. Z. Lyudaev, L. N. Pljashkevich, A. M. Shuvalov, A. S. Kravchenko, Yu. I. Plyushchev, D. I. Zenkov, V. F. Bukharov, V. Ye. Gurin, and V. A. Vasyukov, Megagauss Physics and Technology, Plenum Press, New York, pp. 611-626, 1980.
 [6] E. C. Cnare, R. J. Kaye, and M. Cowan, Ultrahigh Magnetic Field. Physics. Proceedings of the Third International Conference of Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Novosibirsk, June 13-17, pp. 50-56, 1983.
 [7] V. K. Chernyshev, E. I. Zharinov, V. E. Vaneev, A. I. Ionov, V. N. Buzin, and Y. G. Bazanov, Megagauss Field and Pulsed Power Systems, Nova Science Publishers Inc., New York, pp. 355-365, 1990.

[8] A. I. Pavlovskii, L. N. Plyashkevich, A. M. Shuvalov, and E. M. Dimant, Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application, Nova Science Publishers Inc, New York, pp. 629-635, 1994.
 [9] R. Z. Lyudaev, A. I. Pavlovskii, A. S. Yuryzhev, and V. A. Zolotov, Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application, Nova Science Publishers Inc, New York, pp. 607-618, 1994.
 [10] V. B. Mintsev, A. E. Ushnurtsev, V. E. Fortov, A. A. Leontyev, A. V. Shurupov, and G. F. Kiuttu, "Multi-Stage Flux-Trapping Helical Flux Compression Generators," The 13th IEEE International Pulsed Power Conference, pp. 994-997, Las Vegas NV, 2001.
 [11] A. I. Pavlovskii, R. Z. Lyudaev, V. A. Zolotov, A. S. Seryoghin, A. S. Yuryzhev, M. M. Kharlamov, A. M. Shuvalov, V. Ye. Gurin, G. M. Spirov, and B. S. Makaev, Megagauss Physics and Technology, Plenum Press, New York and London, pp. 557-583, 1980.
 [12] R. Z. Lyudaev, A. I. Pavlovskii, A. S. Yuryzhev, and V. A. Zolotov, Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application, Nova Science Publishers Inc, New York, pp. 619-628, 1994.
 [13] J. W. Shearer, F. F. Abraham, C. M. Aplin, B. P. Benham, J. E. Faulkner, F. C. Ford, M. M. Hill, C. A. McDonald, W. H. Stephens, D. J. Steinberg, and J. R. Willson, "Explosive Driven Magnetic Field Compression Generators," J. App. Phys., Vol. 39, pp.2102-2116, 1968.

저 자 소 개



국 정 현(鞠 景 鉉)

1963년 8월 19일생. 1986년 한양대학교 물리학과 졸업. 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1988~현재 국방과학연구소 선임연구원.

Tel : 042-821-3713

Fax : 042-821-2390

E-mail : jhkuk@hanafos.com



이 흥 호(李 興 浩)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대학교 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5656

E-mail : leehh@cnu.ac.kr