

코일에 흐르는 전류밀도를 변화시킨 자장압축발전기의 출력특성

국정현*, 안재운*, 이흥호**
 *국방과학연구소, **충남대학교 전기공학과

Output Characteristics of Helical Magnetic Flux Compression Generators with Varing Current Density Flowing through Coil

Kuk Jeong-Hyeon*, Ahn Jae-Woon*, Lee Heung-Ho**
 *Agency for Defense Development, **Chungnam University

Abstract - We designed and manufactured helical magnetic flux compression generator, in which, the current density was reduced by increasing the number of wires by stages, and the voltage between wires was reduced by decreasing the time rate of inductance change. The figure of merit and the energy multiplication ratio of the generator were measured as a function of current density flowing through coil and their characteristics were analyzed. When the current density of coil was more than 250 kA/cm, the figure of merit and the energy multiplication ratio were decreased rapidly.

나선 코일형 자장압축발전기는 나선형 코일에 전류를 흘려줄 때, 코일의 내부에 형성된 초기 자장을 화약의 폭발력으로 코일 내부에 설치된 실린더형 금속도체를 팽창시켜 압축시킴으로써 유도성 부하에 증폭된 에너지를 공급한다. 자장압축발전기의 구조와 등가회로를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 점선으로 표시된 부분은 축전기로 구성된 초기 전원공급장치이며, 자장압축발전기가 압축을 시작하면 회로에서 분리된다.

1. 서 론

미국에서는 flux compression generators (FCG)라고 부르며, 러시아에서는 magneto-cumulative generator (MCG)라고 부르는 자장압축발전기는 화약의 폭발에너지를 전자기에너지로 변환시키는 일종의 발전기이다. 자장압축발전기에 관한 연구는 1950년대에 미국 로스알라모스 연구소의 Fowler[1]와 소련의 Sakharov[2]에 의해 개별적으로 수행되었다. 자장압축발전기는 물질의 압축을 위한 초고압 발생장치, 금속막막기폭 및 플라스마 발생분야, 고출력 섬광 X-선 장치, 그리고 고속 충격 실험을 위한 레일건 등의 실험장비에 응용될 수 있다.

자장압축발전기는 낮은 임피던스를 갖는 부하에 높은 전류를 공급하는 응용분야에 유용하게 사용할 수 있으며, 유도성 부하에 전자기에너지를 저장하기 위해 매우 이상적이다.

본 연구에 사용된 자장압축발전기는 나선 코일형 자장압축발전기로 화약이 충전된 실린더형 금속도체와 금속도체로부터 일정한 공간을 두고 금속도체를 둘러싼 여러 가닥의 절연된 구리선으로 만든 코일, 그리고 유도성 부하로 구성된다. 자장압축발전기의 출력특성은 화약의 폭발특성, 금속도체와 코일의 제작조건, 그리고 초기 입력 에너지와 부하의 특성 등에 따라 매우 달라진다.

본 논문에서는 코일에 흐르는 전류밀도가 자장압축발전기의 출력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 나선 코일형 자장압축발전기를 제작하고, 초기 입력에너지를 변화시키면서 출력특성을 측정 및 분석하였다.

2. 이론적 고찰

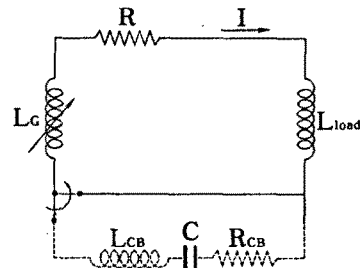
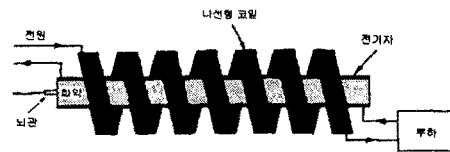


그림 1. (a)자장압축발전기의 구성도, (b)등가회로도.

그림 1의 등가회로는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} + IR = 0 \quad (1)$$

여기서, $L = L_G(t) + L_{load}$ 로 L_G 는 자장압축발전기의 인덕턴스이고, L_{load} 는 부하의 인덕턴스이다. 회로의 저항(R)과 부하의 인덕턴스(L_{load})가 일정하다면 식(1)의 해는

$$I(t) = I_0 \frac{L_G(t)_{t=0} + L_{load}}{L_G(t) + L_{load}} \exp\left[-\int_0^t \frac{R}{L_G(t) + L_{load}} dt\right] \quad (2)$$

로 쓸 수이다. 식(2)에서 자속계수(flux coefficient)를

$$\eta(t) = \exp\left[-\int_0^t \frac{R}{L_G(t) + L_{load}} dt\right] \quad (3)$$

라 하고, 유도압축비율(inductive compression ratio)을

$$\gamma_L(t) = \frac{L(t)_{t=0}}{L(t)} \quad (4)$$

으로 표기하면

$$\frac{I(t)}{I_0} = \gamma_L(t) \eta(t) \quad (5)$$

을 쓸 수 있다.

식(1)의 양변에 I를 곱하여 정리하면

$$-\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dt} = RI^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} LI^2 \right) \quad (6)$$

을 얻는다. 식(6)에서 왼쪽 항은 시간의 변화에 대한 인덕턴스의 변화를 나타내며, 오른쪽 첫째 항은 회로의 줄열(Joule heating)에 의해 소모되는 에너지, 그리고 두 번째 항은 자속의 변화에 의해 생긴 시간에 따른 자기에너지의 변화를 나타낸다. 위의 식들로부터 자기에너지의 비율은

$$\frac{W(t)}{W_0} = \frac{L(t)}{L(t)_{t=0}} \frac{I^2}{I_0^2} = \gamma_L(t) \eta^2(t) \quad (7)$$

로 쓸 수 있다. 식(6)과 (7)에서 화약의 폭발력으로 도체를 고속으로 변형시켜 자장압축발전기의 인덕턴스를 감소시킴에 따라 생성되는 전자기에너지는 부분적으로 줄열로 소모되고, 나머지는 부하의 전자기에너지를 증가시킨다. 자기에너지를 증가시키는 최적의 방법은 유도된 식으로부터 회로의 저항(R)을 작게 하고, 인덕턴스의 변화시간, 즉 자장을 압축하는 도체의 변형시간을 짧게 만들어야 한다.

3. 실험

코일에 흐르는 전류밀도의 변화에 대한 출력특성을 측정 및 분석하기 위하여 코일의 안쪽 직경과 길이가 각각 80mm와 200mm이며, 화약으로 충전된 바깥직경과 두께가 각각 36mm와 4.5mm인 알루미늄으로 만든 나선 코일형 자장압축발전기를 제작하였다. 자장압축발전기의 설계변수를 <표 1>에 정리하였고, 자장압축발전기의 설계도와 사진을 그림 2와 3에 나타내었다.

<표 1>. 나선 코일형 자장압축발전기의 설계변수.

모델명	구분	코일 내경 (mm)	선경 (mm)	코일의 규격			
				구획번호	1	2	3
C80W2S3P4A36		80	2	피치(mm)	4	8	16
				길이(mm)	64	56	80
				가닥수	1	2	4

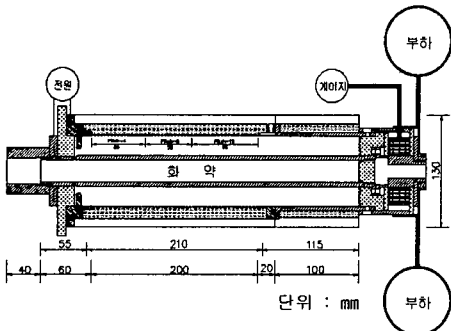


그림 2. 나선 코일형 자장압축발전기의 설계도.

실험을 수행할 때에 자장압축발전기의 초기 전류는 25kV, 25 μF 축전기 2개를 병렬로 결합하여 제작한 충·방전 시스템을 사용하여 공급하였고, 코일에 흐르는 전류밀도를 변화시키기 위하여 각각의 실험마다 충전전압을 변경하였다. 축전기에서 방전되는 전류의 최대 값

에서 자장압축발전기의 동작을 시작하기 위하여 시간지연장치로 화약의 기폭시간과 측정장비의 작동시간을 조절하였다. 자장압축발전기의 출력특성을 차례적으로 제작한 로고우스키 코일을 자장압축발전기의 후면과 부하의 중심에 설치하여 측정하였다. 로고우스키 코일은 Ion Physics Corporation사의 CM-01-L 전류센서(0.001V/A, 최대 500kA)와 5kV, 1μF의 축전기를 사용하여 제작한 전원 공급장치를 사용하여 보정되었다.

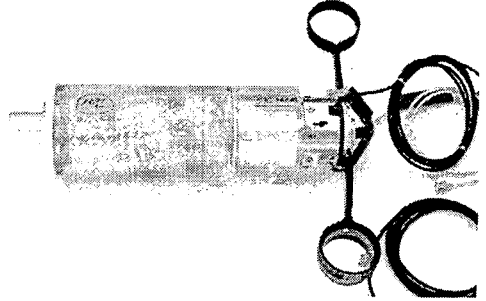


그림 3. 나선 코일형 자장압축발전기의 사진.

4. 실험결과 및 분석

코일의 전류밀도를 변화시키면서 측정한 자장압축발전기의 출력특성 분석결과를 <표 2>에 정리하였으며, 대표적인 자장압축발전기의 dI/dt 출력파형과 유도성 부하에서의 전류출력파형을 그림 4와 5에 도시하였다.

<표 2>. 나선 코일형 자장압축발전기의 출력특성.

시험차수	인덕턴스		초기 전류 (kA)	출력 전류 (kA)	전류 증폭률	초기 에너지 (kJ)	출력 에너지 (kJ)	에너지 증폭률	감도 지수
	장 치 (μH)	부 하 (nH)							
1	18.76	18.7	2.17	307.5	141.7	0.044	0.88	20.0	0.72
2	18.51	83.9	10.7	628.6	59.0	1.06	16.6	15.7	0.76
3	18.74	78.9	16.4	807.4	49.2	2.53	25.7	10.2	0.71
4	18.40	36.9	16.0	1082.1	67.8	2.35	21.6	9.2	0.68

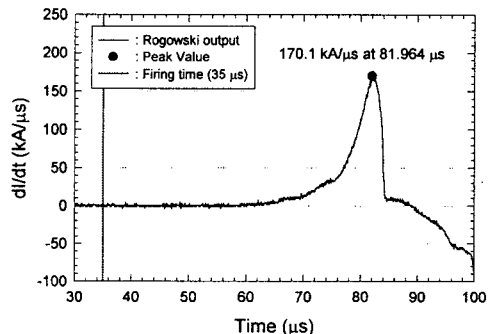


그림 4. 자장압축발전기의 dI/dt 출력파형 (4차시험).

<표 2>에서 자장압축발전기의 효율성을 평가하기 위하여 도입된 감도지수(a)는 다음과 같이 정의한다(3).

$$\ln(I_f/I_0) = a \ln(L_0/L_f) \quad (8)$$

여기에서 0과 f는 각각 초기와 최종의 출력값을 의미한다. 자장압축발전기에서 손실이 없을 때 a=1이며, a<0.5이면 거의 에너지 이득이 없는 것이다. 통상적으로 a=0.85이면 자장압축발전기의 출력효율이 매우 좋음을 의미하고, 0.75-0.8은 평균적인 성능을 가지며, 0.7보다 작을 때

에는 자장압축발전기의 효율이 다소 작다고 볼 수 있다.

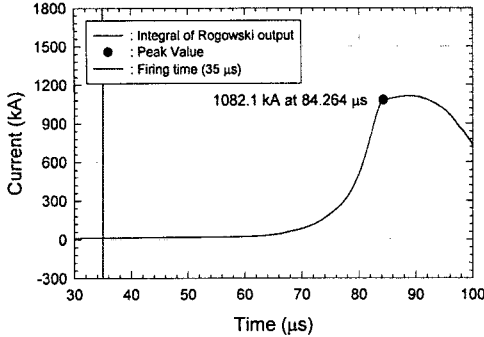


그림 5. 자장압축발전기의 전류출력파형 (4차시험).

〈표 2〉의 실험분석결과로부터 자장압축발전기의 마지막 코일구획에서 코일에 흐르는 전류밀도에 대한 에너지 증폭율 및 감도지수의 그래프를 그림 5에 도시하였고, 각 자장압축발전기의 출력전류파형으로부터 코일의 구간별 전류밀도를 표시한 그래프를 그림 6에 도시하였다. 그림 5을 보면 에너지 증폭율과 감도지수는 전류밀도가 250kA/cm 이상이 되면서 급격하게 감소하다가 완만하게 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 코일에 흐르는 전류밀도가 250kA 이상이 되면서 출력특성이 현저히 감소하는 원인은 참고문헌 [4]를 인용하여 판단할 때 다음과 같다.

참고문헌 [4]에서 초기전류를 22~56kA로 변화를 주었을 때 출력전류는 초기전류의 크기와 관계없이 5MA를 넘지 못하였으나, 화약이 삽입된 전기자와 코일부분, 그리고 부하의 전류밀도가 낮아지도록 변경함으로써 52kA의 초기전류를 공급하여 8.0MA의 최대 전류를 출력한 바 있다. 참고문헌에서 구리의 표면전류밀도가 410kA에 이르면 용해점에 도달한다는 언급에 따라 금속의 용해점을 보면 구리는 1,081^oC이고, 알루미늄은 659^oC임을 감안할 때에 알루미늄의 표면이 용해되는 표면 전류밀도는 410kA보다 상당히 낮을 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서 사용된 구리선으로 만든 코일과 알루미늄으로 만든 전기자로부터 구성된 자장압축발전기의 경우, 코일의 마지막 구획에서 전류밀도가 250kA 이상이 되면 자장압축발전기의 저항이 급격히 증가함으로써 출력특성이 감소하는 것으로 판단된다.

그림 5에서 전류밀도가 대략 100kA/cm(1차 시험)일 때 에너지 증폭율이 높으면 감도지수도 높아야 하나, 1차 시험의 경우에 다른 시험과 달리 초기와 출력에너지가 작고, 부하의 인덕턴스가 작음에 따라 실험에서 발생하는 측정오차에 의하여 상이한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 그림 6과 그림 5의 경향성을 볼 때 동일한 자장압축발전기의 경우에 코일의 각 구간별 전류밀도를 감소시킴에 따라 출력특성이 계속 향상되는 것은 아니며, 점차 증가추세가 완만해지는 것을 알 수 있다. 더 낮은 전류밀도에서의 출력특성의 변화는 추가적인 시험이 이루어져야 할 수 있을 것으로 판단된다.

위의 실험분석결과로부터 전류와 에너지증폭율이 높은 효율적인 나선 코일형 자장압축발전기를 설계하고, 제작하기 위해서는 코일의 전류밀도가 250kA를 초과하지 않도록 초기 입력에너지와 부하를 고려하여 자장압축발전기의 시간에 따른 인덕턴스의 변화율을 조절해야 하며, 식 (6)에서 알 수 있듯이 코일에 흐르는 전류밀도를 낮추기 위하여 코일의 가닥수나 직경을 증가시키면 인덕턴스의 시간변화율이 작아짐에 따라 자장압축발전기의 에

너지증폭이 소모되는 에너지에 비하여 상대적으로 증가하지 않음으로 출력효율이 감소할 수 있음을 고려하여야 한다.

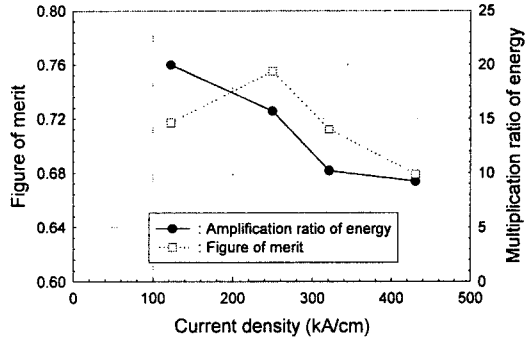


그림 5. 자장압축발전기의 최대 전류밀도에 대한 에너지증폭율과 감도지수.

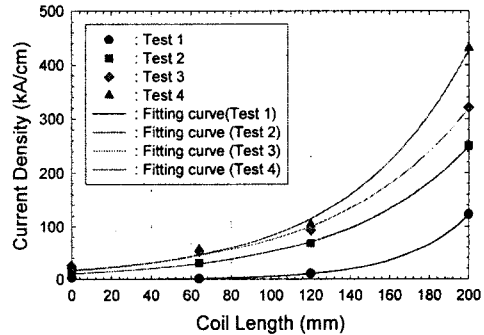


그림 6. 자장압축발전기의 코일 구간별 전류밀도.

5. 결 론

코일의 전류밀도 변화에 따른 나선 코일형 자장압축발전기의 출력특성을 분석하기 위하여 초기 입력전류를 변화시키면서 유도성 부하에 출력되는 전류를 측정하였다. 실험분석결과, 나선 코일형 자장압축발전기의 코일에 흐르는 전류의 밀도가 대략 250kA 이상이 되었을 때에 출력효율을 나타내는 감도지수와 에너지 증폭율이 현저하게 감소되었다. 따라서, 에너지 증폭율이 좋은 나선 코일형 자장압축발전기를 설계할 때에는 코일에 흐르는 전류밀도가 250kA를 넘지 않도록 시간에 따른 인덕턴스의 변화율과 코일의 제작에 사용이 되는 선의 가닥수나 직경, 초기입력에너지와 부하의 크기를 고려하여야 한다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] C. M. Fowler, W. B. Garn, and R. S. Caird, J. Phys., Vol. 31, No. 3, 588, 1960.
- [2] A. D. Sakharov, R. Z. Lyudraev, and E. N. Smirnov et al., Sov. Phys. Dokl., Vol. 10, No. 11, 1045, 1966.
- [3] J. W. Shearer et al., J. App. Phys., Vol. 39, 2102-2116, 1968.
- [4] Yozo Kakudate, Shu Usuba, and Hiroyuki Yokoi et al., Kayaku Gakkaishi, Vol. 57, No. 3, 123-128, 1996.