

알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 입력발생 및 이용기술 개발

조 주현, 임 근희, 이 홍식, E. Pavlov*
한국전기연구소, NIEFA(Russia)*

A Development of the Rotary Arc Gap Switch for Pulsed High Current Transfer

Chu-Hyun Cho, Geun-Hie Rim, Hong-Sik Lee, E. Pavlov*
Korea Electrotechnology Research Institute, NIEFA(Russia)*

Abstract- Recently, An important research field of pulsed power is high voltage, high power generation with exploding wire opening switch. Another point of view exploding wire effects have been researched for generation of the pulsed high pressure shock wave.

Theoretical considerations of the shock pressure generation along with experiment results are presented in this paper and . Some experimental results of hard rock fracturing show the possibilities of commercial using.

I. 서론

현재 연구되고 있는 펄스파워의 중요한 분야 중 하나는 Exploding Wire Opening 스위치를 이용한 펄스 고전압의 발생이다[4, 5]. Exploding Wire의 시간에 따른 비선형 저항 특성이 Opening 스위치로서의 역할을 할 수 있게 한다. 또 한편으로 Exploding Wire는 그 자체로 Shock pressure pulse를 발생하기 위한 방법으로 최근에 연구가 많이 진행되고 있다[1-3, 6-7]. 본 연구에서는 알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 압력발생의 기본 원리에 관해서 고찰하고, 알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 압력 발생의 응용 연구로서 암반 발파 실험을 행하였고, 충분한 가능성을 확인하였다.

II. Exploding wire를 통한 펄스 압력발생 원리

현재까지 연구된 바에 의하면 알루미늄 호일 등과 같은 Exploding wire에 의해서 펄스 압력이 발생하는 원리로서 크게 두 가지가 제안되고 있다. 그 하나는 퓨즈의 급격한 증발기화에 의한 팽창으로 퓨즈 주위의 물질(액체 또는 고체)에 초음속으로 전파하는 펄스 압력과 (shock wave:충격파)가 발생한다는 것으로 퓨즈를 둘러싸고 있는 물질이 산소가 없는 상태 즉, 물이 아닌 경우에는 유일한 메카니즘이 될 것이다[1-3]. 또 다른 한가지는 알루미늄 또는 구리 등의 산화 가능한 금속이 물 속에서 exploding wire로서 동작할 때 금속과 산소와의 결합에 의해서 산화물질이 생성되며 발생하는 열에 의해서 추가적인 압력이 발생한다는 것이다[6-7]. 이때 알루미늄과 물이 반응하여 열이 발생하는 과정은 그 반응속도가 빠를 수록 훨씬 더 폭발적인 압력을 얻을 수 있다. 한편 반응 속도는 온도와 관련하여 Arrhenius 관계식으로 알려진 다음과 같은 관계가 있다.

$$\text{반응속도 상수 } k = Ae^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

여기서 A는 비례상수이고, 지수인자 $e^{-\frac{Q}{RT}}$ 는 전체 분자 중에서 활성화 에너지가 적어도 Q인 분자의 비율을 나타낸다. 이 방정식은 가장 일반적인 형태이며, 어떠한 물리적 과정이나 화학적 과정에도 잘 적용된다. 이 관계식에서 온도가 상승하면 급속히 반응속도가 증가함을 알 수 있다. 이는 일반적으로 사용되는 화약과 똑 같은 원리

이며 온도를 상승시키는 것은 전기적 에너지에 의한 퓨즈의 가열 및 퓨즈 자체의 온도에 따른 비선형적 저항 증가에 기인한다. 그 과정은 대략 다음과 같다.

알루미늄 퓨즈를 통해서 펄스 대전류가 흐르면 알루미늄 퓨즈의 저항에 의해서 열이 발생하고 알루미늄 퓨즈의 저항은 더욱 커지게 된다. 따라서 열은 더욱더 많이 발생하고 저항은 비선형적으로 증가하여 커패시터에 저장된 에너지의 일부분이 알루미늄 퓨즈에서 소비되어 알루미늄이 증발 기화되어 미세한 분말로 변하고 전류는 그림 3과 같이 최대치에서 급격히 감소하게된다. 이때 케이블의 인덕턴스와 전류의 시간변화량에 비례하여 블라스터 부분에서 그림 4와 같이 2차적인 전압상승이 발생한다. 이렇게 유기되는 전압은 알루미늄 파우더가 섞여있는 물속에서 전류를 지속적으로 흘리는 역할을 하고 알루미늄 파우더와 물이 섞여있는 영역을 고온으로 가열하게되어 2차적인 화학 반응을 촉진시키는 역할을 하는 것으로 추정된다. 이때 발생하는 화학반응에 의한 에너지는 전기적인 에너지에 비해서 클것으로 예측되며 화약의 폭발과 같은 메카니즘이 작용하는 것으로 생각할 수 있다. 실제로 측정된 2차적인 전압상승은 25-30kV 정도로 측정되었다.

한편 알루미늄 호일을 이용한 전기폭파에 있어서 최적의 알루미늄 단면적(cross section)과 길이는 식(2)와 식(3)에 의해서 결정이 된다[4]. 이 식의 조건을 만족하게 되면 알루미늄 호일에 의해서 에너지가 소비되는 시간이 전류가 피크치에 다다랐을 때가 되고, 에너지가 모두 소비되는 시간이 최소로 되어 큰 파워를 발생한다.

$$A^2 = \frac{E^{3/2}}{VLs^{1/2}K_v} \quad (2)$$

$$l = \frac{EL_L}{\rho_m A \zeta (L_s + L_L)} \quad (3)$$

A : Fuse cross section l : Fuse length E : Energy stored in C at voltage V Ls : Circuit inductance L_L : Load inductance ρ_m : Liquid mass density ζ : specific energy of vaporization K_v : Constant

재료 상수는 알루미늄에 대하여

$$\rho_m = 10.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$K_v = 2.2 \times 10^{16} \text{ [MKS]}$$

$$\zeta = 10.8 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

III. 실험장치 구성

본 연구는 개발중인 Rotary Arc Spark Gap Switch를 이용한 펄스 대전류 응용 연구로서 펄스 대전류를 발생하는 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있다. 시스템 구성에 있어서 고려해야할 사항은 스위치를 포함한 전체 시스템의 응용분야로서 그 응용에 따라 다양한

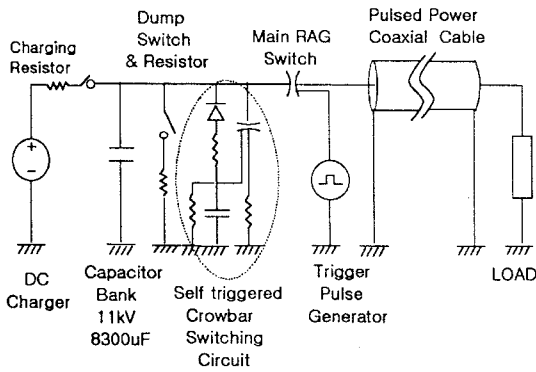


그림 1 RAG 스위치를 이용한 펄스파워 시스템 구성 회로도

사양이 필요하다. 그림 2에서 DC 충전부는 220V/13000V, 10kVA 상용 변압기를 이용하여 승압하고, Voltage doubler 회로를 이용하여 피크 전압을 다시 크게 하여 다이오드를 이용하여 정류하여 충전저항을 통하여 커패시터 뱅크에 충전한다. 커패시터 뱅크는 830 μ F, 11kV, 10개를 병렬로하여 최대 500kJ의 에너지를 저장할 수 있으며 필요에 따라서 커패시터를 분리하여 사용할 수 있으며, 유사시 커패시터를 보호하기 위한 퓨즈가 연결되어 있다. 이 퓨즈는 보통 때에는 충전전류를 공급하는 패스가 되고 과전류가 흐르면 주울 열에 의해서 퓨즈가 녹아서 절단되도록 설계되었다. Dump 회로는 방전이 끝난 후에 제어회로에 의해서 dump 스위치를 닫으면 dump 저항에 의해서 잔류에너지가 소비되도록 하였으며 그 소비시간은 500kJ의 에너지에 대해서 약 1분이 소요되도록 하였다.

트리거 펄스는 LC 공진에 의해서 펄스를 발생시키고 펄스 변압기를 통하여 승압하여 피크 전압 약 15kV의 펄스를 메인 RAG 스위치의 그림 1의 under electrode와 트리거 핀 사이에 인가하여 트리거 동작이 일어나게 된다.

발생된 펄스를 부하에 전달하기 위해서는 펄스파워용 케이블이 필요하다. 실제적인 응용에 있어서 케이블의 영향은 아주 중요하다. 펄스 파워용 케이블은 인덕턴스가 작은 동축형 이어야하고, 내부도체와 외부 도체의 단면적이 같아야하며 도체는 전자력에 의해서 그 구조가 변하지 않도록 편조선 형태의 것이 바람직하다. 그러나 한편으로 펄스 압력 발생과 같은 목적에서는 큰 전류와 그에 상응하는 적절한 인덕턴스도 중요한 역할을 하게된다. 따라서 케이블의 인덕턴스는 필요에 따라서 최적의 값을 갖도록 선정해야 한다. 그러나 대부분의 경우 인덕턴스가 작을수록 유리하다.

실제적인 문제로서 일반적인 케이블은 내부 도체와 외부도체의 단면적이 같지 않다. 이 경우 외부도체의 적은 단면적에 의해서 케이블의 저항이 커지게 되고, 내부 도체의 경우도 표피효과에 의한 단면적의 축소 효과가 있으므로 적절한 펄스 파워 케이블이 아닌 경우에는 지나치게 큰 단면적의 케이블을 사용하여야 하는 문제점이 있다. 국내의 경우 아직 대전류 펄스파워용 케이블이 생산되지 않고 있다. 본 연구에서는 일반 케이블을 사용하였으나 전류에 의해서 케이블의 외부도체가 전자력에 의해서 뭉쳐지는 문제가 있었다.

IV. 알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 압력 발생 실험

그림 2에 알루미늄을 이용한 블라스터의 구조 및 동축 케이블의 단면도를 나타내었다.

동축 케이블의 바깥쪽 도체를 필요한 길이 (알루미늄 호일의 길이+터미널 조립에 필요한 길이) 만큼 제거하고 절연체를 이용하거나 손상을 방지하기 위하여 테프론 튜브를 끼운다. 폭발력을 발생시키는 알루미늄 호일은 그림

2의 동축케이블의 단면도에 나타난 케이블의 바깥도체와 내부 도체를 전기적으로 연결한다. 식(2)와 식(3)에 의해서 계산된 단면적과 길이의 알루미늄 호일로 동축케이블의 내부도체와 외부도체에 부착된 터미널을 감싸서 케이블의 터미널에 부착시킨다.

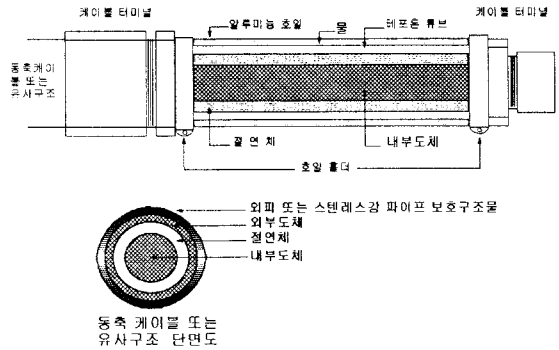


그림 2 알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 압력 발생 장치의 개념도

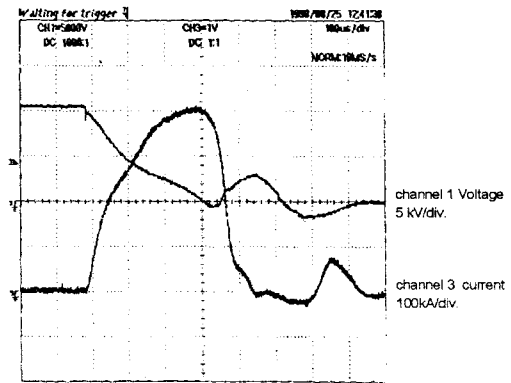


그림 3 커패시터 양단의 전압 및 블라스터를 통하여 흐르는 전류의 파형의 예

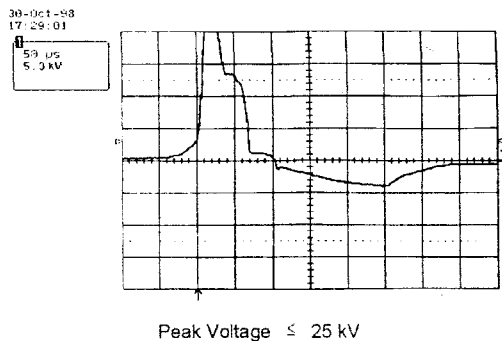


그림 4 Opening Switch 효과에 의한 블라스터 양단의 전압상승

앞의 압력 발생원리에서 언급한 바와 같이 전류 파형에서는 몇 가지 특징적인 형태를 갖는다. 즉, 호일 퓨즈의 상이 고체에서 액체 기체로 변하면서 저항이 달라지므로 전류의 상승 및 하강 곡선이 정현파에서 많이 벗어나게 되는 것이다. 이 파형을 통해서 알 수 있는 것은 전류

가 급격히 감소하는 구간에서는 저항이 다른 구간에 비하여 훨씬 크게 작용한다는 것이고 이러한 상태를 규명하기 위해서 다수의 연구들이 행하여지고 있다[8-9]. 전류가 급격히 감소하는 이 구간은 펄스 압력을 발생시키는 원동력이 된다.

한편 커패시터 양단의 전압이 전류의 감소시간에 더불어 상승하는 효과는 그림 4와 같은 부하전압의 상승효과가 캐이블 등을 통하여 커패시터에 분배되어 나타난 것이다.

V. 펄스 압력에 의한 암반 폭발 시험

RAG 스위치 및 알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 압력 발생 기술의 실제적인 응용분야의 하나로써 연구하고 있는 암반 발파 및 스위치 성능 테스트를 위해서 서울 강서구 방화동의 신축공사 현장에서 현장적용 실험을 행하였다. 적용대상은 노출된 바위 및 땅속에 묻힌 암반 등을 대상으로 10여 차례 발파를 시도하여 실용가능성을 확인하였다. 사진 1과 2는 약 3루베 정도의 노출된 경암을 대상으로 한 발파전과 후의 모습을 나타낸 것이다.

땅속에 묻혀있는 암반의 경우는 수 개의 크랙이 발생하였으나 화약에 의한 폭발과 같이 부서진 암반이 비산 또는 땅위로 노출되지 않았다. 이는 순간적인 펄스 압력은 강력하나 그 지속시간이 짧은 이유로 생각된다. 실제로 노출된 바위의 경우 부서진 파편의 수는 오히려 화약 등에 의한 파편의 수 보다 많다. 이는 순간적 펄스 압력이 화약 등에 의한 것보다 더욱 강력하다는 것을 의미하는 것으로 생각된다.

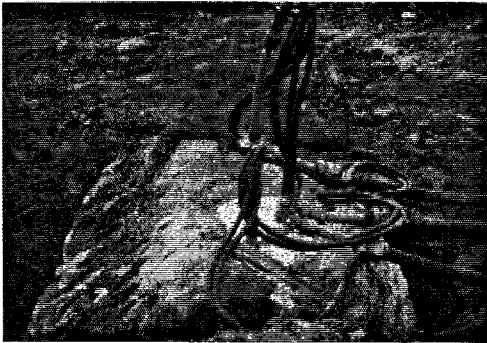


사진 1 발파를 위해 준비된 바위 및 블라스터



사진 2 발파에 의해서 파괴된 바위

VI. 결론

알루미늄 호일 퓨즈를 이용한 펄스 압력발생 및 이용에 관한 연구를 수행하여 실험에 근거하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ◎ 펄스 압력 발생의 기본 메카니즘은 다음의 두가지가 결합되어 있는 것으로 생각된다.
 - ◇ 알루미늄 호일 퓨즈의 증발기화에 의한 부피 팽창으로 발생하는 압력발생
 - ◇ 증발 기화된 알루미늄 파우더와 물속의 산소와의 화학결합에 의한 추가적인 에너지 발생
- ◎ 응용 연구 및 현장 적용시험을 통하여 다음을 확인할 수 있었다.
 - ◇ 11kV, 400kA의 피크전류의 100us동안에의 소비에 의한 GW급 파워발생
 - ◇ 현장에서의 암반 및 노출된 바위의 폭발성공
 - ◇ 화약을 대체할 수는 없으나 특수한 조건하에서는 상업적 이용 가능성이 충분하다.

참고문헌

- [1] J. Hofmann and Th. H.G.G. Weise "Pulsed Power Technologies for Commercial Material Reduction and Crushing Applications", 11th IEEE Pulsed Power Conf. , 1997, pp 203.
- [2] Igor. V. Lisitsyn et al, "Characterization of a Shock Wave Generated by a Wire Explosion in Water" J. Acoust. Soc. Jpn. (E) Vol. 18, No. 2 1997, pp 89
- [3] Igor V. Lisitsyn, Taishi Muraki, Hidenori Akiyama, "Features of Shock Wave Formation in a Wire Induced Surface Flashover" Appl. Phys. Lett. Vol. 70, No. 13, 1997, pp 1676.
- [4] R.E. Reinovsky et al, "Inductive Store Pulse Compression System for Driving High Speed Plasma Implosions", IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. PS-10, No. 2, June, 1982, pp 73
- [5] Irvin R. Lindemuth et al, "Exploding Metallic Foils for Slapper, Fuse, and Hot Plasma Applications: Computational Predictions, Experimental Observations" 5th IEEE Pulsed Power Conf. 1985, pp 299.
- [6] Th. H.G.G. Weise and M.J. Loffler, "Experimental Investigations on Rock Fractioning by Replacing Explosives with Electrically Generated Pressure Pulses", 9th IEEE Pulsed Power Conf. 1993, pp 19.
- [7] W. M. Lee and R. D. Ford "Effective Couple of Pulsed Power to Chemically Reactive Metallic System" 7th IEEE Pulsed Power Conf. 1989, pp 981
- [8] J.V. Parker and W.M. Parsons, "Foil fuses as Opening Switches for Slow Discharge Circuit", 5th IEEE Pulsed Power Conf. 1985, pp. 283
- [9] Naoyuki Shimomura, Hidenori Akiyama et al, "Mechanism of Unstable Behavior of Parallel Fuses as an Opening Switch" IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 23, No. 5, 1995, pp. 860