

고전압 · 대전류펄스파워를 이용한 암반발파 모의 기술개발

서 길수, 김 영배, 이 형호  
한국전기연구소 고전압연구팀

Application of Pulsed Power with the High Voltage & current for Rock Fragmentation

Kil-Soo Seo, Young-Bae Kim, Hyeong-Ho Lee

**Abstract** - The rock fragmentation system with a capacitor bank, switching device, cable and blasting electrode are described. Utilization of the chemical energy from the electrolyte and the pseudospark with a large current capacity suggested the commercialization possibility of the rock fragmentation system. The vibration and noise level of the pulsed blasting is acceptable in the most ground breaking. And also the electromagnetic force produced by the inductor is introduced for the rock fragmentation.

1. 서 론

Power electronics 펄스의 개념으로부터 약간 확장된 고출력펄스파워기술은 종래의 고전압·대전류공학을 기초로 하여 콘덴서, 인덕터 등에 저장된 초기電磁에너지를 時空적으로 成形·重疊·壓縮하여 수ns~수ms의 짧은 시간 안에 고출력에너지를 좁은 공간에 집중 공급하는 기술이다. 펄스파워기술의 핵심은 얼마나 짧은 시간에 전기에너지를 부하로 방출할 수 있는가에 달려 있다. 예를 들면 1J의 에너지를 1초간 방출할 때의 전력은 1[W] 이나 1ns동안에 방출하면 1[GW]가 된다. 이와 같이 에너지를 극히 짧은 시간에 방출하면 power는 큰 값이 된다. Power 자체는 임피던스에 의하여 영향을 받기 때문에 동일 power의 경우, 임피던스가 작은 부하에는 대전류가 흐르고, 임피던스가 큰 부하에는 고전압이 필요하다[1,2,3].

펄스파워기술의 시작은 1940년의 핵융합의 연구로 거슬러 올라갈 수 있는데, 고밀도 플라즈마를 발생시키기 위한 펄스 대전류를 콘덴서 방전으로 얻기 위하여 펄스대전력의 제어기술이 필요하여 그후 고온플라즈마의 연구에는 콘덴서 방전이 불가결한 기술이 되었다. 이러한 펄스파워기술이 공학으로써 체계화하기 시작한 것은 1970년대이고 펄스대전력이 사업분야의 응용에 대해서 관심을 가지게 된 것은 극히 최근의 일이다. 직류 및 교류의 전력기술과는 달리 대전력 펄스기술은 미개척의 부분이 많고 또한 그 응용분야는 표 1에서 보이고 있는 것처럼 무한히 넓다.

예를 들면 1대의 소형장치로써 비행기, 자동차 등의 정밀부품 및 선박, 배관설비 등의 대형부품의 성형용 전원장치로 이용될 뿐만 아니라, 공사장 바위발파 및 도시내 노후건물의 폭파작업등에 첨단기술로 이용되고 있다[3]. Nobel이 다이너마이트를 발명한 이후 화약발파는 도목, 건설에 없어서는 안 되는 중요한 수단이었으나, 화약은 안전성에 많은 문제점이 있어서 운반, 보관, 취급이 까다롭고 특히, 도심지나 인구밀집 지역에서의 화약발파는 진동, 소음, 분진이나 비석으로 인하여 거의 사용이 불가능하게 되었다.

이러한 화약발파의 문제점을 해결하기 위해서 Noranda사와 Maxwell사가 공동으로 전기적 펄스파워를 이용하는 암반 파쇄 방법을 개발하기에 이르렀다[16,17,18,19]. 여기에는 Plasma blasting과 Electromagnetic force를

표 1. Pulsed Power기술 응용

|              | 1차 에너지변환  | 2차 에너지변환  | 응용분야  |
|--------------|---|---|---|
| Pulsed Power | 고 에너지 밀도<br>플라즈마<br>(레이저생성,<br>linac 압축)            | X선  | 연 X선 lithography, 연 X선 현미경, X선 레이저, 물질처리, 광원, 의료용 |
|              |   | 중성자   | 중성자 lithography,                                  |
|              |   | 핵융합   | 핵융합발전,  |
|              | 전자beam  | 초 강자계   | 물성연구  |
|              |   | micro·mm파   | 가속기, 플라즈마가열, 레이저, 레이더, 마이크로파송전, 대기전리, 살균          |
|              |   | 방전  | 레이저, 대기환경정화                                       |
|              | 이온beam  | 자유전자레이저, X선   |   |
|              |   | 플라즈마  | 핵융합발전, 재료개발                                       |
|              | 전자가속<br>(rail gun, coil gun,<br>electrothermal gun) |   | 표면가공,   |
|              |   | 플라즈마  | 충돌 핵융합발전, 핵융합재료공급                                 |
|              |   | 초고압   | 재료개발, 물성연구  |
|              | 방전  |   | 로켓트발사, 우주충돌 시뮬레이션, 우주과학                           |
| 여기, 화학반응     |   | 레이저(CO <sub>2</sub> , Excimer, Glass Laser), 대기환경정화 |   |
| 초 강자계        |   | 전자성형가공, 광물분리, 암반발파                                  |   |
|              |   | 절연시험장치  |   |

이용하는 2개의 기술로 대별되는데, 전자의 Plasma Blasting법은 저장된 전기에너지를 암반 속의 전극사이에 있는 전해액에 순간적으로 방전시켜, 발생된 고온·고압의 Plasma가 급속히 팽창하여 Shock Wave를 만들고, 이 Shock Wave는 암반 속에 Stress Field를 형성시켜 암반을 파쇄 시킨다. 한편 후자의 Electromagnetic force법은 인дук타에 축적된 유도성 에너지에 의해 발생되는 전자력을 이용하여 암반을 발파하는 기술이다. 본고에서는 생산업체용, 환경산업용, 군수산업용, 대체에너지용 등에서 국제적 첨단기술로 활발히 개발되고 있는 고전압·대전류 펄스파워기술의 현황을 소개하고, 특히 환경산업체의 공사장 바위발파 및 도시내 노후건물 폭파작업시 폭풍, 분진, 폭음, 진동이 방지되어 민원 해소용 환경기술로 각광받고 있는 고출력펄스파워를 이용한 암반발파 모의기술 개발에 대해서 기술코져 한다.

2. Pulsed Power Sytem

펄스파워시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 충전용 Capacitor Bank와 DC전압인가용 High Voltage Power Supply, 순간적으로 대전류를 개폐할 수 있는 Switch와 부하측에 전기에너지를 인가하기 위한 케이블로 구성된다. 이외에도 안전을 위하여 비상시와 매 발파시 Capacitor Bank에 남아 있는 전기를 방전시킬 Charge Dump와 발파시스템을 제어할 Control Panel이 있다. 모든 고전압 부위는 안전을 위하여 알루미늄 상자 속에 차폐되어 있으며, 암반 속의 전극 및 인дук타에 연결되는 동축케이블의 Shield선도 알루미늄 상자에 연결하여 순간적인 전자기장의 변화에 의한 강한 전자기파의 발생을

억제하였다.

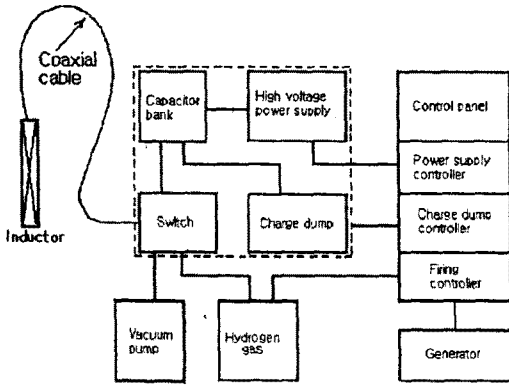


그림 1 펄스파워시스템의 구성

커패시터 뱅크는 Aerovox사에서 금속증착 필름을 전극으로 적합한 커패시터를 이용해서 구성하였다. 커패시터의 에너지 밀도 0.77kJ/kg, 수명은 전압 9kV일 때 충방전회수가 413,000회이고, 전극은 미세한 셀구조로 구성되어 있어 절연수명이 우수하고 안전하다. 커패시터 뱅크의 정전용량은 8.3mF이므로서 9kV로 충전했을때의 저장되는 에너지는 약 500kJ이다.

부하에 Pulsed Power를 전송을 위한 동축케이블은 인덕턴스 0.118  $\mu$ H/m, 정전용량 0.235nF/m이고 전압, 전류용량은 각각 12kV, 300kA이고 직경 30mm이다.

펄스파워시스템의 핵심은 switching기술로써 기능별로는 페스위치(closing switch) 가스위치(opening switch)가 있고, 매질별로는 가스, 진공, 액체, 고체, 마그네트 스위치가 있다. 그림 2, 3은 각종펄스위치의 점두전류, 내전압성능 및 충전달전하량, 수명을 비교한 것이다.

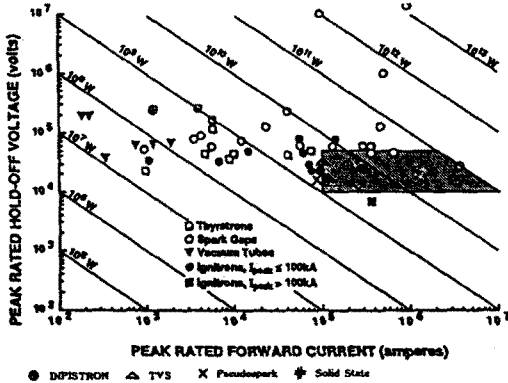


그림 2. 각종 펄스스위치의 점두전류 및 내전압성능비교 [4~11]

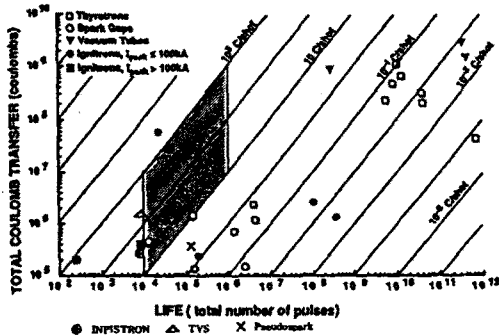
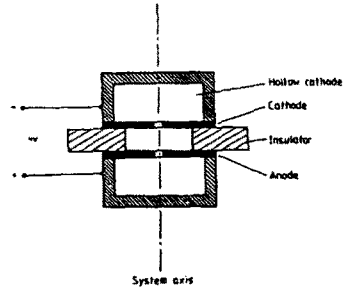


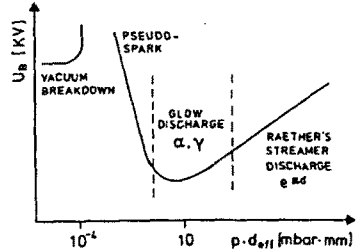
그림 3 각종 펄스스위치의 충전달 전하량과 수명성능비교 [6~13]

정전펄스파워시스템에 이용되는 페스위치는 구조가 간단하고, 재료가 용이하여 Pulsed Power System에 가장 널리 애용되는 spark-gap switch, 동축구조의 역핀치현상을 이용하여 전류통전면적을 최대로 하여 전하량 전달율이 높은 Inpistron(Invers pinch), spark gap을 진공용기내에 수납한 TVS(triggered vacuum), Paschen 곡선의 최소파괴전압의 좌측 영역에서 발생하는 super glow discharge 즉 Pseudo-spark를 이용한 Pseudo-spark switch등이 있다.

본 연구에서는 중대전류영역인 100kA~1MA에서 적합한 Pseudo-spark switch를 제작하여 사용하였다. Pseudo-spark switch는 그림 4(a)에 나타낸 것과 같고, 그림 4(b)의 보인 것처럼 Paschen 곡선의 최소내전압의 가스압영역에서 동작한다. 방전은 super glow discharge이며 전극구조상 넓은 면적에서 발생한다.



(a) Pseudospark switch



(b) Paschen curve

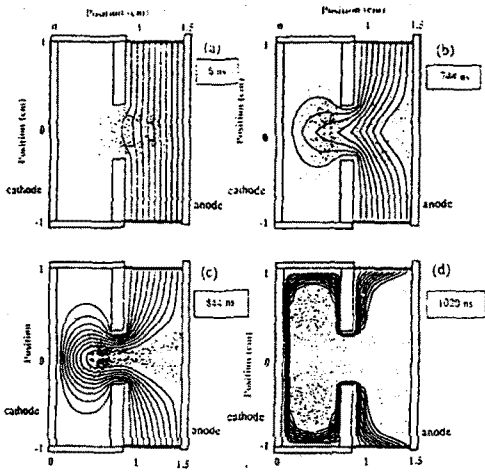
그림 4(a) Pseudospark switch (b) Paschen curve[4]

Pseudo-spark switch의 장점은 Thyatron의 장점을 살리는 동시에 단점을 극복한 스위치이다. 대전류용으로 사용될 때에는 중공전극을 여러 장을 사용한다. 그림 5는 Pseudospark를 Monte-Carlo기법을 이용하여 구현한 모델이고, 정성적인 설명은 잘되지만, 스위치 구성을 위해 필요한 파괴전압의 예측은 어렵다. 통상 Pseudospark영역에서는 Paschen법칙이 들어맞지 않으므로, 보완 Paschen법칙을 이용하면 다음과 같은 식으로 정의된다 [5].

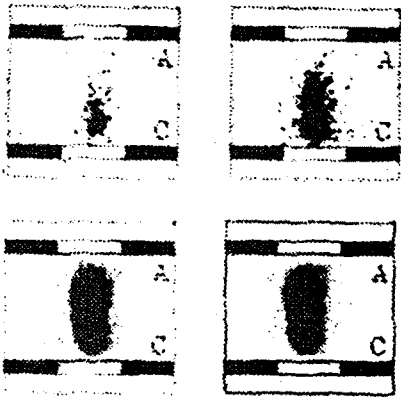
$$V_b = c \times d_{eff}^m \times p^{n1} \quad (1)$$

여기서  $d_{eff} = d + 2t + 3.14r$ ,  $d$ : 전극간 간극거리, 두 전극의 두께,  $r$ : 전극의 중공반경이다.

계수  $m$ ,  $n1$ 은 전극구조, 주입가스, 압력등에 따라 달라지게 된다. 그림 6은 실제 제작된 Pseudospark Switch이며, Base Pressure가 0.04~0.08[Torr]인 스위치 안에 Gap Puffing Switch를 통하여 가스통에 있는 수소가스를 흡입시켜서 스위치 안의 압력을 높임으로써 스위칭이 가능하도록 하였다. Pseudospark Switch는 Gap Puffing Switch가 고전압 부위와 멀리 떨어져 있어서 스위치 작용으로 인한 전기적 유도가 없고, 가스 압력에 따라서 Switching이 되므로 신뢰성이 좋은 스위치이다.



(a) Pitchford-Ouadoudi의 pseudospark모델[14]



(b) Anode(A)-Cathode(C)간극에서 진전하는 pseudospark를 고속카메라로 촬영한 모습[15]

그림 5 Pitchford-Ouadoudi의 pseudospark모델과 High-Speed카메라로 촬영한 pseudospark현상

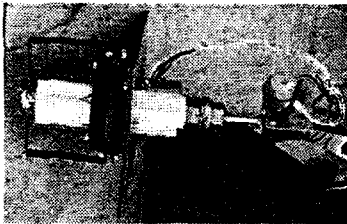


그림 6 실제 제작된 pseudospark Switch

### 3. Pulsed Power system의 응용 예

#### Plasma Blasting에 의한 발파

그림 7은 plasma rock fragmentation 시스템의 일반적인 전압·전류파형이다. 전류 peak값은 153kA 펄스폭은 360  $\mu$ s. 이 방법에 의한 발파력은 다이ना마이트 250g의 파괴력에 해당한다. 소음이나 진동은 충분히 낮았고, 그 크기는 10m떨어진 거리에서 80~90dB이다. 그림 8은 플라즈마에 의한 바위발파시 발생하는 주파수의 분포를 나타낸 것이다. 또한 그림 9은 Pulsed Power 시스템을 이용했을 때 거리에 따른 진동의 감쇄를 나타낸다. 건물의 고유주파수는 10~20Hz이므로 고주파진동과 거리에 따

라 진동이 급속하게 감소하므로 이웃건물에 영향을 미치지 않는다.

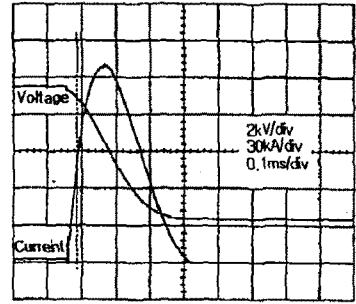


그림 7 발파시의 전압,전류파형

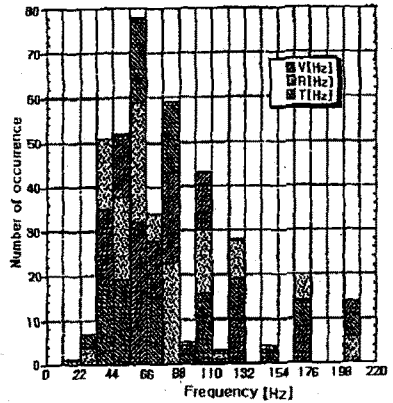


그림 8 주파수에 따른 발생빈도수

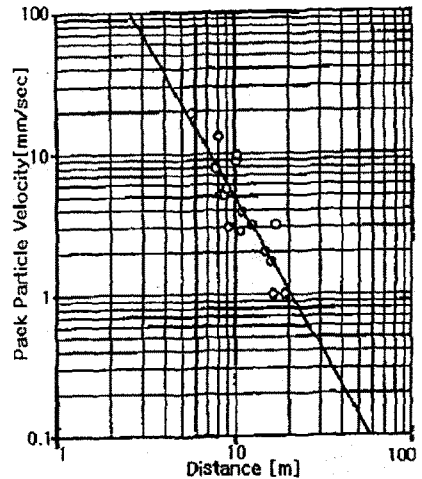


그림 9 거리에 따른 파티클의 속도분포

#### 초강자계 코일을 이용한 발파

암반발파를 위한 다른 방법으로는 앞서 기술한 바와 같이 초강자계 코일을 이용하는 것이다[19].

그림 10은 단면적  $10 \times 4$ (mm<sup>2</sup>)인 동선( $\mu=1$ )을 길이 700(mm), 폭 50(mm), 높이 23(mm)인 MC나일론( $\mu=1$ )에 turn간격 1(mm)로 20 turn을 감은 2개의 인дук타를 서로 마주 보게 한 암반발파용 인дук타의 자속 밀도분포 예를 나타낸다. 이때 인дук타의 전류방향은 상호간 척력이 작용하도록 반대방향으로 흐르게 하였으며, 크기는 100kA이다.

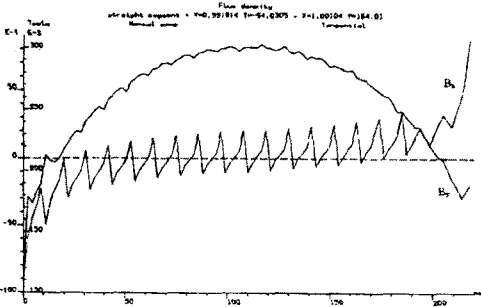


그림 10 발파용 20turn 인덕타 코일의 자속밀도분포

이때 인덕타 양 끝단에 있어서 x방향 자속밀도 크기  $B_x$ 는  $\pm 50 \times 10^{-1}$  Tesla 범위에서 변화하고, 외측은 약  $90 \times 10^{-1}$  Tesla이다.  $B_y$  성분은 크기는  $B_x$  성분에 비해 1/10이며, 가운데 부분이 외측과 내측의 크기가 각각  $300 \times 10^{-2}$  Tesla,  $270 \times 10^{-2}$  Tesla인 것으로 추정된다. 그림 10에서 보인 자속밀도분포 및  $F = I \times B$ 를 이용하여 인덕타의 코일에 미치는 힘을 계산해 보면 그림 11와 같이 분포하여 코일의 양 끝 부분에서 코일의 중심방향으로 힘이 작용하는 것을 예측할 수 있다. 발파를 위해 바위에 구멍을 뚫어 암반발파 인덕타를 설치하여 수백 kA의 펄스전류를 흘리면 코일 각각에 발생하는 힘은  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 으로 여러 성분으로 이루어져 있는데 이 중에서 실제 발파에 이용되는 힘의 성분은

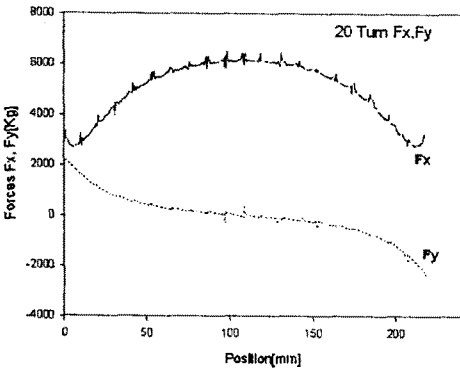


그림 11 암반 발파용 인덕타의 전류에 의한 힘의 분포

$F_x$ (바위의 벽면과 직각으로 작용하는 힘) 성분이다.  $F_y$  성분은 코일간에 작용하는 힘으로 인덕타 양 끝부분의 코일이 인덕타의 중심으로 변형을 일으키게 한다. 실제 Pulsed Power 장치에 의해 전류 peak치는 100kA에 이르고, 순간적으로 강자계가 발생, 인덕타의 코일에 흐르는 전류와 쇠교하여 x의 양방향으로, 즉 암반의 hole속에서 팽창하려는, 충격력이 발생하여 암반이 발파하게 된다. 그러나 본 연구의 경우 인덕타의 양 끝단에서 코일 중심으로 작용하는 힘  $F_y$  성분 때문에 순간 힘의 작용하여 인덕타가 파괴될 가능성이 상존하고 있다.

따라서 향후 성공적인 암반 발파를 위해 인덕타의 양 끝단에 발생하는  $\pm F_y$ 를 최소화하고  $\pm F_x$ 를 최대화하는 코일의 배치 방법, 코일의 단면적에 따른 힘의 분포 및 코일의 지지방법이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 고에서는 펄스파워장치 및 이를 이용한 암반발파 방법에 대해서 아래와 같이 검토하였다.

- Pulsed Power장치의 각 구성요소, 특히 펄스위치

(closing switch)의 원리 및 그 응용법

- 플라즈마 팽창 충격력(plasma basting rock fragmentation)에 의한 암반발파
- 초강자계 전자코일을 이용한 암반발파

#### (참고 문헌)

- [1] Frank B.A Früngel: "High Speed Pulse Technology", Vol I, II(1965), "Capacitor Discharge Engineering", Vol III (1975), "Sparks and Laser Pulses", Vol. IV, 1980, Academic Press
- [2] Technical Research Report(II), IEEJ, 228(1986), 247(1987), 292(1989), 426(1992)
- [3] Masanori Hara and Hidenori Akiyama, "High Voltage Pulsed Engineering", 1991
- [4] G. Mechtshemer, R. Kohler, "Multichannel Pseudospark Switch(MUPS)," J.Phys,E:Sci., Instrum., 20, pp270~273, 1987.
- [5] Bin Lin and Quantie Chow, "Breakdown Voltages of Pseudospark in He, Ar and  $N_2$ " IEEE Transactions on Plasma Science, vol., 23, No., 3, pp 239~242, June 1993.
- [6] Y.G.Chen, R.Dethlefsen, R.Criley, et al., "High Coulomb Triggered Vacuum Switch," 9th Int. Pulsed Power Conf., 1993, pp938~941
- [7] K.Frank, et al., "Pseudospark Switches for High Repetition Rates and high Current applications", 8th int. Pulsed Power Conf., 1991, pp472~477
- [8] T.R.Burke, General Switching Considerations, in :Gas Discharge Closing Switches, G.Schaefer, M.Kristiansen, A.Guenther, eds., Plenum, New York 1990
- [9] G.L.Schuster, J.H.Lee, S.H.Choi, "High Power Inverse pinch Switch," 5th IEEE Int. Pulsed Pwer Conf., 1988, pp66~69
- [10] R.Dethlefsen, V.A.Sidorov, V.A. Vozdvijenskii, "Triggered Vacuum Switch Testing for Millisec Pulses." 8th IEEE Int. Pulsed Power conf., 1991, pp 511~514
- [11] K.Frank et al., "Experiments with Multichannel Pseudospark Switches," 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 1993, pp 277~280
- [12] R.Pastore, et al., "Evaluation of SCRs as Millisecond Switches for Electric Gun Launchers," 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 1993, pp 360~363
- [13] E.Ramezani, E.Spahn, "A Novel high Current Rate SCR for Pulsed Power Applications," 7th EEMLS, Nottingham,GB, 1996.
- [14] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, "Pseudospark Discharge via Computer Simulation", IEEE Trans. Plasma Sci. 19, 286, 1991.
- [15] Claudius Kozlik, et al., "Trigerrred Low-Pressure Pseudospark-Based High Power Switch" IEEE Transactions on Plasma Science, vol.17, No. 5, pp758~761, October, 1989.
- [16] H.H.Lee et al., "Rock Blasting Technology by Using the Pulsed Power with High Voltage and High Current", '97 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp.11-14, 1997
- [17] H.H. Lee et al.: "Application Technologies of Pulsed Power with the High Voltage and High Current, KIEE Annual Summer Conference, DHO14, pp. 1678-1680, 1997
- [18] H.H. Lee et al.: "An Investigation on the Application Technologies of High Speed Pulsed Power with the High Voltage and High Current", Elec. Dis. & High Vtg. Soc. of KIEE, pp.7-11, 1997
- [19] 서길수, 김영배, 이형호, 제환영 "고출력 펄스파워 발생용 Inductor설계 및 이용기술", 대한전기학회 춘계방전 및 고전압연구회, 1998. 5. 23. pp10~13