

Pulsed Power전원장치용 Gas Puffing INPIStron의 개발

論 文
49C - 12 - 5

Development of Gas Puffing INPIStron for Pulsed Power Supply

徐吉洙* · 金永培* · 趙國熙* · 李亨浩**

(Kil-Soo Seo · Young-Bae Kim · Kuk-Hee Cho · Hyeong-Ho Lee)

Abstract - Closing switch, key component of pulsed power system, is constructed simply and used frequently due to the easy control and manufacture of one. The kind of one are spark-gap, triggered vacuum switch, pseudo-spark switch and INPIStron. But the electrode of spark gap switch is damaged with the hot spot by Z-pinch and then the life of one become short. INPIStron with inverse pinch effect has long life but it is difficult trigger system to provide uniform discharge between cathode and anode. In this paper, the design and manufacturing of INPIStron with gas puffing trigger method in order to supply uniform discharge inter-electrode and the performance of the developed INPIStron applied to 500[kA]-2[MJ] pulsed power system is presented.

Key Words : Pulsed Power, INPIStron, Gas Puffing, Inverse Pinch, Closing switch, plasma.

1. 서 론

Pulsed power기술은 콘덴서, 인덕터 등에 저장된 초기 電磁에너지를 時空적으로 成形·重疊·壓縮하여 수[ns] ~ 수 [ms]의 짧은 순간에 고출력에너지를 좁은 공간에 집중 공급하는 기술로서 펄스파워기술의 핵심은 얼마나 짧은 시간에 전기에너지를 부하로 방출할 수 있는가에 달려 있다. 예를 들면 그림 1과 같이 1[J]의 에너지를 1[sec]간 방출할 때의 전력은 1[W]이나 1[ns]동안에 방출하면 1[GW]가 된다. 이와 같이 에너지를 극히 짧은 시간에 방출하면 power는 큰 값이 된다. Power자체는 임피던스에 의하여 영향을 받기 때문에 동일 power의 경우, 임피던스가 작은 부하에는 대전류가 흐르고, 임피던스가 큰 부하에는 고전압이 필요하다[1~8].

정전, 유도에너지 등의 형태로 축적된 에너지를 고속 스위치를 투입하여 급속히 방출하면 고전압·대전류 pulse power가 발생되어 입자빔, 전자파, plasma 등의 에너지 변환되어 최종 용도에 맞는 부하로 공급되는 데 표 1에 주요 응용분야를 나타낸다.

펄스 파워시스템의 핵심인 폐 스위치(closing switch)는 구조가 간단하고, 제어가 용이하여 현재까지 널리 애용되고 있는 데 주요 스위치로는 spark-gap switch, TVS(triggered vacuum switch), pseudo-spark switch, INPIStron등이 있다 [4~16]. 그중 spark-gap switch는 통상 2개의 반구전극형

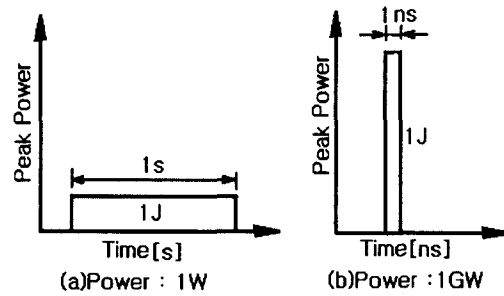


그림 1. 에너지와 출력과 관계

Fig 1. Relationship between energy and output power

태인 간단한 구조이나, 대전류에 의해서 발생하는 z-pinch에 의해 전극표면이 국소적으로 hot spot되어 심하게 손상되므로 장시간 사용이 곤란한 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 pseudo-spark switch 및 inverse pinch현상을 응용한 INPIStron이 널리 사용된다. Paschen curve의 최소 파피전압 좌측영역에서 중공방전(hollow cathode discharge)을 이용하는 Pseudo-spark switch는 열 발생, 전극의 열화로 대용량 장시간의 전류 제어시 적합하지 않은 반면 INPIStron은 inverse pinch효과를 이용하므로 spark gap에 비해 전류밀도가 약 1/62정도가 낮아 대전류 제어가 쉽고, 장시간 사용이 가능하다는 장점을 갖고 있다.

이와 같은 측면에서 본 연구에서는 대전류 펄스파워의 closing switch 개발을 위한 일련의 연구를 진행하고 있으며 그 결과를 발표하였다[18~23]. 본고에서는 gas puffing trigger기법을 이용한 INPIStron스위치의 설계 및 제작에 대해서 자세히 논하고, 개발된 INPIStron스위치를 500[kA]-2[MJ] pulsed power system에 적용하여 그 성능의 우수성에 대해서 기술하였다.

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 産業電氣研究團 電氣物理研究
그룹 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 産業電氣研究團 電氣物理研究
그룹 責任研究員

接受日字 : 2000年 5月 24日

最終完了 : 2000年 12月 5日

표 1. Pulsed power기술 응용분야

Table 1. Application division of pulsed power technology

	1차 에너지변환	2차 에너지변환	응용분야
Pulsed power	고 에너지 밀도 플라즈마 (레이저생성, linac 압축)	X선	Soft X선 lithography, soft X선 현미경, X선 레이저, 물질처리, 광원
		중성자	중성자 lithography
		핵융합	핵융합발전
		초 강자계	물성연구
	전자beam	$\mu\text{m} \cdot \text{mm}$ 파	가속기, 플라즈마가열, 레이저, 레이다, 마이크로파송전, 대기전리, 살균
		방전	레이저, 대기환경정화
		자유전자레이저, X선 발생	
	이온beam	플라즈마	핵융합발전, 재료개발
			표면가공
	전자가속 (rail gun, coil gun, electrothermal gun)	플라즈마	충돌 핵융합발전, 핵융합재료공급
초고압		재료개발, 물성연구	
방전	여기, 화학반응	레이저(CO ₂ , Excimer, Glass Laser), 대기환경정화	
초 강자계		전자성형가공, 광물분리, 암반발파	
		절연시험장치	

2. INPIStro의 메카니즘과 트리거 기법

Inverse pinch 현상은 1958년 O.A. Anderson에 의하여 처음 소개되었다. Spark gap switch의 경우 $\vec{J} \times \vec{B}$ 힘이 전류의 중심으로 집중되어 전류밀도가 굉장히 높은 반면 INPIStro에서는 버섯 모양의 전극구조에 의해 $\vec{J} \times \vec{B}$ 힘이, 바깥으로 밀어내도록 작용하여 전류밀도를 작게 만드는 구조를 가지고 있다. 여기서 \vec{J} 는 전류밀도, \vec{B} 는 전류에 의한 자속밀도이다. 표 2에서 알 수 있듯이 INPIStro의 전기적 특성이 거의 모든 parameter에서 spark gap의 그것을 능가함을 알 수 있다[9~15].

표 2. INPIStro와 spark gap의 전기적 특성 비교

Table 2 Comparison of electrical characteristics for INPIStro and spark gap

Parameter	Spark gap	INPIStro	단위
Capacitance	8.21	8.21	μF
Capacitor energy	1.65	1.65	kJ
Operating voltage	20	20	kV
Cycle period	11.4	9.6	μs
Rise time	2.9	1.9	μs
Ring frequency	87.7	104.1	kHz
Total resistance	27.01	25.35	m Ω
Total inductance	399	283	nH
Switch inductance	147.8	17.6	nH
External inductance	251.2	265.4	nH
Switch capacitance	14.7	219.9	pF
Switch impedance	100.27	8.94	Ω
Damping factor	3.38×10^4	4.47×10^4	Ωs^{-1}

가. 메카니즘

과거부터 널리 사용되고 있는 대전하 전송용 스위치인 spark gap은 통상 2개의 반구전극으로 구성되어 있으므로, 그림 2에서 알 수 있듯이 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ 에 의하여 z-pinch가 발생하여, 전극 표면이 hot spot의 형성으로 심하게 손상되는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선한 INPIStro는 그림 3과 같이 힘 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ 을 이용하여 전류를 조이지 않고 시트형태로 분산시켜 전극의 전체면에 흐르게 함으로써 국소 hot-spot를 근본적으로 제거하도록 설계되어 있다. Cavalante와 John은 이러한 inverse-pinch기구를 대전류 스위치에 적용하였다[17].

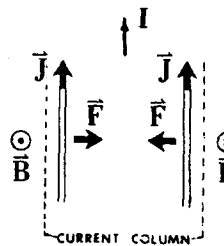


그림 2 Z-pinch
Fig 2 Z-pinch

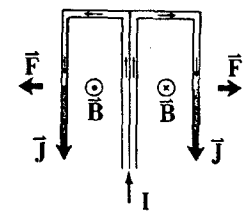


그림 3 Inverse-pinch
Fig 3 Inverse-pinch

그림 4에서 trigger전극과 cathode간에 트리거 펄스를 인가하여 방전이 개시하면, 버섯모양의 전류시트(current sheet)가 형성되는데 current sheet의 속도는 plasma focus 해석에 사용하는 snow-plow 모델을 이용하면 동축 원통구조를 1차원 모델로 단순화하여 다음 방정식으로 쓸 수 있다. 여기서 좌측항은 가스 current sheet의 운동량의 변화분이고, 우측항은 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ 에 작용하는 힘을 서로 같다고 가정한다.

$$\frac{d}{dt}(2\pi r_0 \rho_0 z \frac{dz}{dt}) = 2\pi r_0 \frac{\mu_0}{2} (\frac{I}{2\pi r_0})^2$$

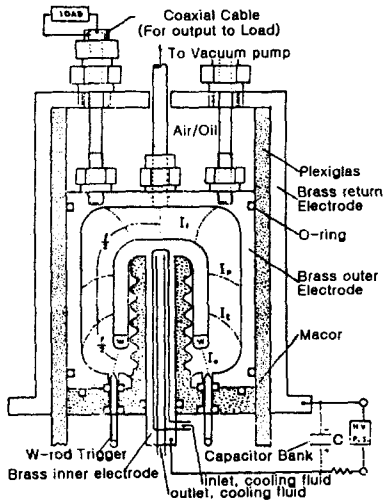


그림 4. Pin트리지에 의한 INPIStrom
Fig 4. INPIStrom using pin trigger

나. 트리거기법

INPIStrom에 있어서 inverse pinch 효과를 최대한 높이기 위해서 가장 중요한 것은 360° 전 영역에서 균일 방전을 일으키게 하여 전류밀도 J 를 최대한 줄임으로써 전극 수명을 연장하는 것이다. 그림 5는 8[mmTorr] ~ 760[Torr] 범위에서의 방전각도를 조사해서 나타낸 것으로써, 80[mmTorr]이하의 압력에서는 거의 360° 전 영역에서 균일한 방전이 일어나고, 80[mmTorr] 이상의 압력에서는 방전각도가 급격하게 떨어지므로 스위치 수명의 측면에서 80[mmTorr] 이하의 저압 영역에서 스위치가 작동하는 것이 유리함을 알 수 있다.

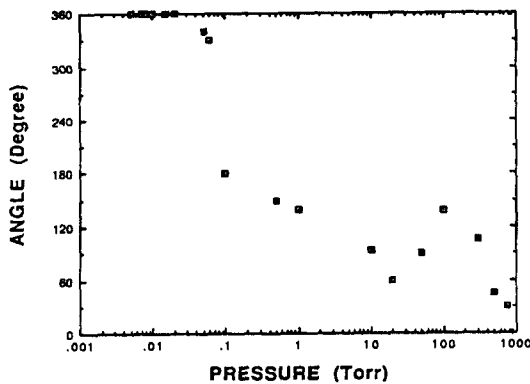


그림 5. N₂가스 압력변화에 따른 INPIStrom의 방전각도[16]
Fig 5. Discharge angle of INPIStrom according to N₂ gas pressure variation[16]

INPIStrom과 spark gap의 직접적인 비교를 위하여 Arc 플라즈마의 면적과 전류밀도를 계산하여 표 3에 나타냈다. INPIStrom의 전류밀도가 spark gap에 비해서 약 1/62배였으며, 스위치의 수명과 직접적인 관계가 있는 Joule heating은 전류 밀도의 자승이므로 spark gap에 비해 약 3800배 작았다.

표 3. INPIStrom과 spark gap의 전류밀도 및 아크 플라즈마 면적 비교[16]

Table 3. Comparison of current density and arc plasma cross section area for INPIStrom and spark gap[16]

Parameters	Spark gap	INPIStrom	Unit
Peak current	96	96	kA
Inner radius of plasma column	0	29	mm
Outer radius of plasma column	2	33	mm
Effective area	12.56	778	mm ²
Current density	7643	123	A/mm ²
Current density squared J^2	55.7×10^9	15,129	(A/mm ²) ²

3. INPIStrom설계 및 제작

실제 INPIStrom의 설계 및 제작시 다음 사항을 고려하였다. 또한 장 수명을 위해서는 closing시 발생하는 도체의 Joule열, 스위치내부의 온도상승을 감안하여 도체의 재질 및 절연물을 결정한다[18~23].

가. 전극의 온도상승

그림 6은 전류밀도, 펄스폭에 따라 단위 [cm]당 온도상승을 나타낸 것이다. 500[kA]급 600[μs]의 pulsed current가 INPIStrom을 흐른다 하고, 설계시 허용온도를 80[°C]로 제한하면 cathode나 anode의 전류밀도는 약 5[kA/mm²]이므로 전극의 단면적은 100[mm²]로써 직경 11.3[mm]의 전극에 해당한다. 여기서는 전류가 흐르는 단면적이 100[mm²]의 2배 이상이 되도록 제작하였다.

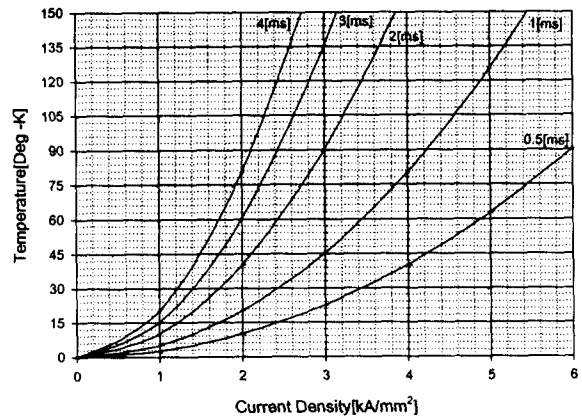


그림 6. 펄스폭을 매개변수로 한 전류밀도-전극온도 특성
Fig 6. Characteristics of the temperature of the electrode vs current density as pulse width

나. 방전각도 및 voltage hold-off

스위치내부의 압력은 80[mmTorr] 이하의 저기압 또는 수 [bar]의 고기압을 이용할 수 있지만, 압력이 높아지면 360° 전 영역에서 방전이 균일하게 발생하지 않게 되어 전극의 손상이 국부적으로 일어날 수 있다.

다. Gas puffing trigger

Switch의 내부를 진공펌프를 이용, 압력을 80[mmTorr] 이하로 유지하면 방전유지전압 10[kV]가 가능하다. 또한 트 리거는 질소가스를 puffing하는 방법으로 360[°] 전 영역에서 균일한 방전을 일으키도록 제작하였다. 그림 7은 switch의 Paschen's curve로서 이를 이용해 switch의 가스압력을 결정하였다.

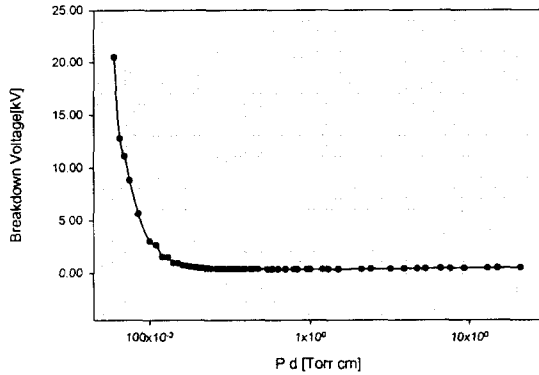
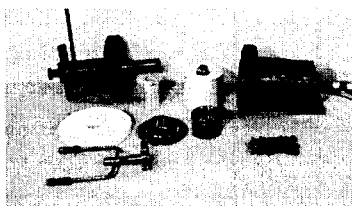


그림 7. switch의 Paschen's curve
Fig 7. Paschen's curve of INPIStrom

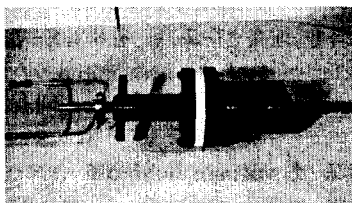
라. 절연체

절연물이 스위치의 수명에 많이 관련된다. 절연물은 다음과 같은 가혹한 환경에서 잘 견디어야 좋다. UV방사, 충격과 특히 INPIStrom에서는 열이 많이 발생하므로 녹는점이 낮은 플라스틱보다는 세라믹(alumina: Al_2O_3 , Zirconia: Zr_2O_3)은 녹는점이 2,593[°C]이지만, shock wave에 약하므로 이를 고려하여 절연물을 선택하였다. 세라믹 절연물의 제작은 분말 알루미늄을 원하는 치수의 틀에 넣고 hot press casting하여 제작하였다.

그림 8은 조립전의 switch이고, 그림 9는 switch의 전체 블럭도를 나타낸 것으로 동작은 다음과 같다.



(a) 조립전의 INPIStrom
(a) Component of INPIStrom



(b) 조립후의 INPIStrom
(b) INPIStrom after assembling of INPIStrom
그림 8. INPIStrom의 구조

Fig 8. Configuration of INPIStrom

진공펌프로 INPIStrom의 내부진공도 $p \cdot d < 80$ [mmTorr $r \cdot cm$]으로 배기시키면 anode와 cathode간에 절연내력 $V_{br} > 10$ [kV]로 증가한다. 다음에 capacitor bank에 전압을 충전시킨 후 즉 anode와 cathode간 전압이 10[kV]가 인가된 후, trigger 신호를 전자식 밸브에 입력하면 밸브가 열려 INPIStrom 내부로 N_2 가스가 공급된다. 그러면 Paschen's curve의 $p \cdot d$ 는 우측으로 이동하여 절연내력이 저하하여 INPIStrom이 닫히게 된다.

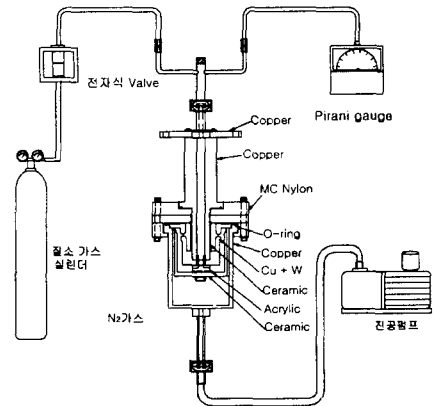


그림 9. INPIStrom의 전체 개략도
Fig 9. Configuration of INPIStrom

4. 개발된 INPIStrom의 응용

펄스파워시스템의 회로는 그림 10과 같다. 펄스파워시스템은 크게 충전용 capacitor bank, DC전압인가용 high voltage power supply, 순간적으로 대 전류를 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.

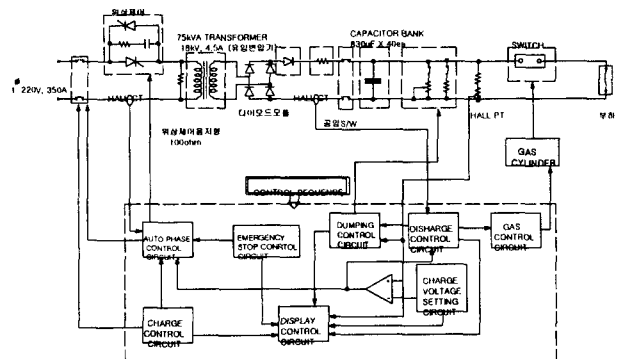


그림 10. 2[MJ] 펄스파워시스템 구성도
Fig 10. Block diagram of 2[MJ] pulsed power system

그림 11은 실제 제작된 2[MJ]-500[kA] pulsed power system의 외형이다. 본 시스템의 총 정전용량은 33.2 [mF] (= 830 [μ F] $\times 40$ [EA])으로써 전체 인덕턴스가 최소화 되도록 capacitor를 배열하였다. 사용된 capacitor는

Aerovox사의 metalized electrode capacitor로서 충전에너지 밀도가 크고(0.77[KJ/kg]), capacitor의 metalized electrode에 절연과피가 발생했을 때 self healing이 가능하여 안전성이 좋고, 수명이 길다. 시스템의 크기는 높이 2000[mm], 길이 2000[mm], 폭 2000[mm]이고, 무게는 약 4[ton]이다. 그림 12는 INPIStron을 closing시켰을 때 전압 전류파형으로써, 펄스폭 800[μs], 전류피크치 213.6[kA]의 펄스가 얻어지는 것을 볼 수 있었고, 이로서 스위치가 잘 동작하는 것을 확인하였다. 여기서 전류측정은 Pearson CT를 이용하였다.

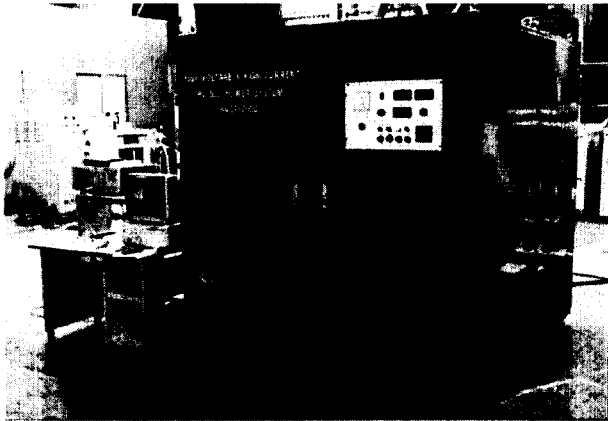


그림 11. 2[MJ]-500[kA] pulsed power전원장치
Fig 11. Pulsed power system with 2[MJ]-500[kA]

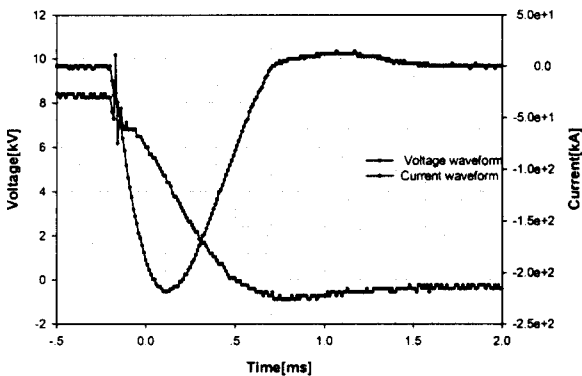


그림 12. 전압, 전류파형
Fig 12. Voltage and current waveform

5. 결 론

본 연구에서는 대전류 펄스파워의 closing switch 개발을 위한 일련의 연구를 진행하고 있는 바, 본고에서는 gas puffing trigger기법을 이용한 INPIStron스위치의 설계 및 제작에 대해서 자세히 논하고, 개발된 INPIStron스위치를 500[kA]- 2[MJ] pulsed power system에 적용하여 그 성능의 우수성에 대해서 기술하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. Gas puffing trigger기법을 이용하여 INPIStron

trigger시 스위치의 360[°] 전 영역에 균일한 전하를 공급할 수 있도록 함으로써 INPIStron 스위치의 우수성을 입증하였다.

2. Spark gap switch의 수명과 비교하여 약 100배 이상의 수명이 유지됨을 알 수 있었다.

향후 INPIStron의 지연시간, jitter time의 감소, 통전전류 용량의 증대를 통한 성능향상을 기하고, 또한 전기적 trigger기법을 채용하는 스위치의 개발에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [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. Mechttershemer, R. Kohler, "Multichannel Pseudospark Switch(MUPS)," J.Phys,E:Sci., Instrum., 20, pp. 270~273, 1987.
- [5] Bin Lin and Quantie Chow, "Breakdown Voltages of Pseudospark in He, Ar and N₂" IEEE Transactions on Plasma Science, vol., 23, No. 3, pp 239~242, June 1993.
- [6] Y.G.Chen, R.Dethefsen, R.Crueley, et al., "High Coulomb Triggered Vacuum Switch," 9th Int. Pulsed Power Conf., 1993, pp938~941.
- [7] Claudius Kozlik, et al., "Triggered Low-Pressure Pseudospark-Based High Power Switch" IEEE Transactions on Plasma Science, vol.,17, No. 5, pp758~761, October, 1989.
- [8] Gerhard Schaefer, M. Kristiansen "Gas Discharge Closing Switches" Plenum press · New York and London.
- [9] 국방과학연구소 "제 2차 전열추진기술세미나" 1998. 11. 26.
- [10] Ja H. Lee, Sang H. Choi and Young S. Choi "Plasma-Puff Triggering of Plasma Switch" IEEE CAT pp 137-140, 1988.
- [11] Sang H. Choi "Simulation Study of a New Inverse-Pinch High Coulomb Transfer Switch" NASA Contractor Report 172420.
- [12] Ja H. Lee, "Ultra-High-Power Plasma Switch INPIS for Pulse Power Systems", Proceeding of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference VIL.1 pp 412-417.
- [13] Kwang S.Han and Ja H. Lee "INPIStron Switched Pulsed Power for Dense Plasma Pinchs" Digest of Technical IPERS 9th IEEE International Pulsed Power Conference Vol 2.
- [14] Ja H. Lee, Sang H.Choi and Kyo D. Song, "Design

- for Megavolt inverse pinch plasma switch", Proc. for the Seventh IEEE Int. Pulsed Power Conference, Monterey, CA 11-14, 1989 pp 717-720.
- [15] Sang H. Choi, Ja H. Lee, "An Invers-Pinch Switch for High Coulomb Transfer" Proc. 10th ISD and EI in Vacuum pp 273-277.
- [16] Yongkee Kim, "Comparative Study of Closing Plasma in Inverse Pinch Switch and Spark Gap", Master Thesis, Hampton University, 1992.
- [17] C. Cavalconte, "Coaxial Triggered Gap Switch," 4th Symp. Eng. Aspects of Magnetohydrodynamics, Berkeley, (April 1963).
- [18] 서길수, 김영배, 이형호, 제한영, "고출력 펄스파워 발생용 인다타 설계 및 이용기술", 98춘계 방전 및 고전압연구회, pp10~13, 98. 5. 23.
- [19] 서길수, 김영배, 이형호, "고전압·대전류 펄스파워를 이용한 암반발파모의기술개발", 98 전기학회 하계학술대회 DHO 7, pp. 1592~1595, '98. 7.22.
- [20] Hyeong-Ho Lee, Kil-Soo Seo, Yeong-Bae Kim, Ik-Soo Kim, Jae-Gu Choi, "Application of Pulsed Power with the High Voltage and Current for Rock Fragmentation", The ICEE, Vol 2. No. PD-3. pp.759~762, '98. 7.24.
- [21] 서길수, 김영배, 이형호, 제한영, "전기 Triggering형 고전압 대전류 INPIStrotron 설계기술 개발", 춘계 방전 및 고전압연구회, pp75~78, 99. 5.8.
- [22] 서길수, 김영배, 이형호, "고전압/대전류 투입스위치의 최적설계기술", 99 전기학회 하계학술대회 DHO 7, pp. 2173~2175, '99. 7.19-21.
- [23] K.S.Seo, Y.B.Kim, K.H.Cho, H.H.Lee "Development of Pulsed Power System with 500kA Current" Proceedings of 1999 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp 29~32, 1999.

저 자 소 개



서길수 (徐吉洙)

1966년 8월 25일생. 1989년 2월 22일 영남대 전기공학과 졸업. 1994년 8월 영남대 전기공학과 졸업(석사). 1995년 1월~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1532, Fax : 055-280-1406
E-mail : ksseo@keri.re.kr



조국희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1577, Fax : 055-280-1406
E-mail : khcho@keri.re.kr



김영배 (金永培)

1957년 2월 2일생. 1978년 부산공전 전기공학과 졸업. 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1535, Fax : 055-280-1406
E-mail : ybkim@keri.re.kr



이형호 (李亨浩)

1953년 3월 16일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 일본 큐우슈우대(九州大) 대학원 전기공학과 졸업(공학박) 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리

그룹 책임연구원
Tel : 055-280-1531, Fax : 055-280-1406
E-mail : hhlee@keri.re.kr