

## 500 kV 다중 채널 다중 갭 자발 방전 개스 스위치 개발

박성수, 남상훈, 김상희, 허훈, 김승환, 박용정, 손병학\*  
포항공과대학교 가속기 연구소, 동아테크(주)\*

### Developments of 500 kV Multi-Channel Multi-Gap Self Breakdown Switch

S.S. Park, S.H. Nam, S.H. Kim, H. Heo, S.H. Kim, Y. J. Park, B. H. Son\*  
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, Dong-A Tech. Corp.\*

**Abstract** – 가속기 연구소에서 500 kV 고전압 다중채널 다중갭(MGMC) 스위치를 개발하였다. 이 다중 채널 다중 갭 스위치는 개스를 채우는 방식으로 자발 방전전압을 증가 시킬 수 있는 10단의 갭으로 구성이 되어 있다. 멀티갭 스위치의 구조는 스위치의 자체 인더턴스를 증가시키는 결과를 가져온다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다중채널을 사용하여 인더턴스를 줄이는 스위치로 구조를 설계하였다. 제작된 스위치는 500 kV의 Marx generator를 사용하여 시험을 하였다. 본 논문에서는 개발된 스위치 설계 및 스위치의 특성에 대하여 알아보자 한다.

### 1. 서 론

개발하고자 하는 고전압 단락 스위치의 목표 사양은 첨두 전류 100 kA, 첨두 전압 500 kV, 펄스폭 1 μs, 펄스 상승시간 100 ns이다. 이와 같은 사양을 만족 할 수 있는 스위치의 종류로서는 스파크갭 스위치, inverse pinch switch, multi gap multi-channel switch, rail gap switch 등이 있다. 본 연구에서 설계된 스위치의 경우 최대 8개의 방전 경로의 발생이 가능하나 실험에서 알려져 있듯이 약 4개 정도의 방전 경로에 의하여 스위치가 동작된다고 가정하면 전체 극간 거리의 90 %에 50 %의 인더턴스 감소 효과를 고려하면 첫 번째 극간에서 발생되는 인더턴스의 약 4.5배의 인더턴스 증가가 예상되고 결과적으로 총 5.5배의 인더턴스를 가질 것으로 추정할 수 있다. 그러나 본 연구에서 개발하려는 과전압 단락 스위치의 경우, 운전하고자 하는 자발 방전 전압에 대한 충진 기체의 압력은 스위치 고유의 특성으로서 차후에 제작하여 실험으로 결정하여야 한다. 따라서 본 스위치의 설계에서 극간의 거리는 SF<sub>6</sub>를 약 4 기압 정도를 사용하여 약 800 kV의 hold-off 전압을 얻기 위한 극간 거리인 5 cm를 선택하였다. 모든 극간의 간격은 동일하게 5 mm로 총 10단으로 설계 및 제작하여 시험을 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 스위치의 기본 이론

그림 1과 같은 구조의 스파크갭 스위치의 경우 스위치의 인더턴스는 다음의 식으로 계산될 수 있다. [1]

$$L_{sg} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ y_1 \cdot \ln \left[ \frac{r_{o1}}{r_{i1}} \right] + y_2 \cdot \ln \left[ \frac{r_{o2}}{r_{i2}} \right] + y_3 \cdot \ln \left[ \frac{r_{o3}}{r_{i3}} \right] \right\} \quad (1)$$

이들 항 중에서 아크 기동의 반경이 스위치의 외경 보다 매우 작으며 전극의 외경과 접지된 외벽의 거리가 거의 같도록 스위치를 제작하면 스파크갭 스위치의 인더턴스는 다음과 같이 아크의 인더턴스로 근사할 수 있다.

$$L_{sg} \approx L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot y_2 \cdot \ln \frac{r_{o2}}{r_{i2}} \quad (2)$$

일반적으로 스파크갭으로 연결되는 회로에서 rise time은 다음과 같이 전원부의 임피던스와 부하의 임피던스 그리고 스파크갭의 인더턴스에 영향을 받는다.

$$t_L \approx 3 \cdot \tau_L = 3L_a / (Z_0 + R_L) \quad (3)$$

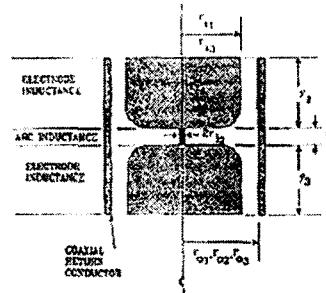


그림 1. Spark-gap 스위치.

따라서 전류의 상승 시간을 짧게 하기 위해서는 최대한 인더턴스가 작은 스위치를 설계하여야 하며, 특히 아크에 의한 인더턴스를 줄이기 위해서는 극간의 간격을 줄여야 한다. 그러나 스파크갭의 hold-off 전압은 같은 기체 압력 조건에서 극간의 간격에 비례하여 증가하므로 고전압의 스파크갭을 만들기 위해서는 충분한 극간이 필요하게 된다. 즉, 스파크갭의 hold-off 전압은 Paschen's law에 의하여 전극간의 거리와 기체의 압력의 함수로 주어지는데 그림 2는 질소 기체를 충진한 경우의 Paschen 곡선을 보여준다. 따라서 과제에서 요구하는 500 kV급의 스파크갭을 1기압 조건에서 만들기 위해서는 질소를 사용할 경우 극간을 수 cm 이상 유지하여야 함을 알 수 있다.

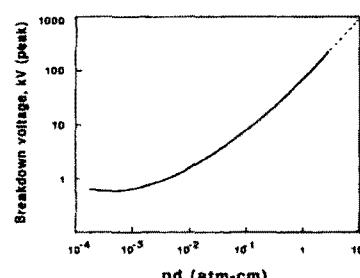


그림 2. 질소 기체에 대한 스파크갭의 Paschen 곡선.[3]

공기 중에서 떨어져 있는 두 전극이 견딜 수 있는 절연파괴 전압은 다음의 근사식으로 주어진다.

$$V_b = 6.72(pd)^{1/2} + 24.36(pd) \quad (4)$$

기체를 채울 경우의 절연파괴 전압은 기체의 압력이 높은 영역에서는 공기 중에서 절연파괴 전압에 대한 비례로 추정할 수 있다. 다음의 표 1은 공기에 대한 절연파괴 계수를 정리한 것이다. 질소의 경우 거의 공기와 같은 절연 효과를 가짐을 알 수 있다. SF6가 일반적으로 고전압의 절연에 사용되는데 공기에 비하여 2 배 이상의 절연 효과가 있음을 알 수 있다. SF6는 질소 기체와 혼합하여 사용되기도 하는데, 그럼 3에서 알 수 있는 바와 같이 질소의 절연효과를 상당히 향상 시킬 수 있다.

표 1. 공기에 대한 여러 기체의 상대적인 절연 세기.

Gas	Relative strength
N <sub>2</sub>	1
CO <sub>2</sub>	0.9
SF <sub>6</sub>	23-25
Freon	2.4-2.6
CCl <sub>4</sub>	6.3

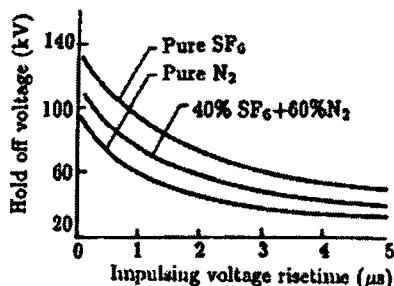


그림 3. 질소와 SF<sub>6</sub>의 혼합비에 따른 Hold-off 전압의 특성 예.[2]

## 2.2 스위치의 설계 및 제작

### 2.2.1 스위치의 설계

본 논문에서 목표로 하는 사양인 500 kV의 Hold-off 전압, 최대 100 kA의 통전 전류, 100 ns 미만의 전류 상승 시간을 달성하기 위한 단일 캡 스파크캡 스위치의 경우 다음과 같이 고려하여 볼 수 있다.

전류의 상승 시간을 최대 100 ns로 가정하고 MILO의 임피던스 5 Ω이 시스템의 임피던스의 대부분이라고 가정을 하고 식 2에 의하여 인덕턴스를 구하면 약 227 nH가 된다. 따라서 스위치 자체의 인덕턴스는 227 nH 보다 충분히 작아야지만 전류 상승 시간 100 ns를 만족 할 수 있다.

그림 1에서와 같이 스파크 캡 스위치의 인덕턴스는 국간에 발생되는 아크의 인덕턴스와 전극을 포함한 입출력 연결 부위에서 발생되는 인덕턴스의 합으로 생각 할 수 있다. 전극에 부착되는 연결부를 동축의 형태로 만들면 이 부분의 인덕턴스를 크게 줄일 수 있어서 스위치 전체의 인덕턴스는 아크 부위의 인덕턴스 값과 유사하게 된다. 따라서 아크 부위의 인덕턴스는 아크의 길이 즉 전극의 간격 l에 비례하게 되는데, 아크의 반경을 일반적으로 1 mm로 가정하고 전극의 외벽을 감싸고 있는 접지된 반경 10 cm의 동축 실린더 전선을 고려하여 인덕턴스를 계산하면  $(9.2 \times l) \text{ nH}$ 가 된다. 전극의 간격 l은 스위치의 인덕턴스 이외에도 스위치의 hold-off 전압을 결정하게 된다. 요구하는 500 kV의 hold-off 전압을 SF<sub>6</sub> 기체를 사용하여 얻기 위해서는 그림 4에서 보

는 바와 같이 3.5 기압의 SF<sub>6</sub>를 사용하면 4 cm 이상의 전극 간격이 필요함을 알 수 있다. 따라서 전극 간격을 5 cm로 하여 3.5 기압의 SF<sub>6</sub>를 채우면 약 600 kV의 hold-off 전압을 얻을 수 있으므로, 전극 간격을 5 cm 하여 계산된 스위치의 인덕턴스는 약 46 nH가 되어서 100 ns 미만의 상승시간에 필요한 시스템 전체의 최대 인덕턴스 277 nH에 비해서 상당히 작음을 알 수 있다.

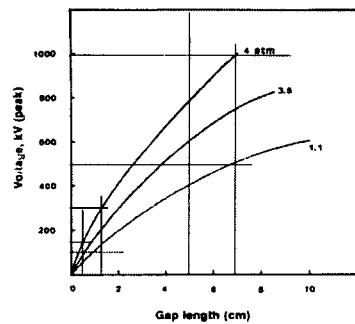


그림 5. Breakdown voltage vs gap length for different SF<sub>6</sub> pressures (from Ref. 9).

그림 4. SF<sub>6</sub>의 기압에 따른 절연파괴 전압과 간격의 관계 그래프.[3]

그러나 이러한 경우에 아크에 의한 인덕턴스를 제외 한 부분에서의 인덕턴스의 합이 약 180 nH 미만이 되어야 한다. 따라서 스파크 캡의 연결 부위는 동축형으로 제작하여 인덕턴스의 크기를 최소화 할 수 있도록 설계 하여야 한다. 따라서 스파크캡 스위치로 고속의 peaking gap을 만들기 위해서는 전극의 간격을 줄여서 아크에 의한 인덕턴스 효과를 최소화하여야 하는데 이를 위해 서는 기체를 고압으로 충전해야 가능하다.

낮은 인덕턴스를 가지며 고전압의 hold-off 전압을 가지는 스위치로서는 rail-gap 스위치와 multi-gap multi-channel (MGMC) 스파크 캡 스위치가 있다. over voltage 방식의 MGMC 방식의 스파크캡 스위치를 개발 하면 다음의 식에서 알 수 있는 바와 같이 낮은 인덕턴스를 가지는 스위치의 설계가 가능하다.

$$\tau_L = (L_a/N + L_h)/Z \quad (5)$$

여기서  $L_a$ 와  $L_h$ 는 각각 아크 하나의 인덕턴스와 스위치 하드웨어의 인덕턴스를 의미한다. Rimfire 스위치의 경우 트리거에 의하여 방전이 시작되는 전극의 간격에는 전체 스위치에 인가되는 전압의 약 20 % 정도가 인가되며, 나머지 전압은 자발 방전에 영역의 전극 간에 균일하게 분배된다. 만약, 첫 번째 극간이 조절 가능하도록 설계되어진다면 주어진 기압 조건에서 스위치가 동작하는 전압을 결정할 수 있어서 운용에 유리하다. 이와 같은 스위치의 설계 시 고려하여야 할 점은 일반적으로 전극과 전극을 고정하여주는 절연물 영역에서 발생할 수 있는 표면 방전 효과이다. 전극과 전극을 분리하여 주는 절연체의 길이는 충전 기체의 압력이 증가함에 따라서 더 길게 설계하여야 하는데, 그림 5를 참고하면, 약 3.5 기압이 SF<sub>6</sub> 분위기에서 spacer의 길이는 60 %의 효과를 가짐을 알 수 있다. 표면 방전의 절연 파괴 전압은 일반적인 전극 간의 절연 파괴 전압보다 낮으므로, 전극의 간격에 비하여 절연물 표면의 길이가 충분히 길도록 설계하여야 하며 기압을 높일수록 더욱 더 길게 하여야 한다.

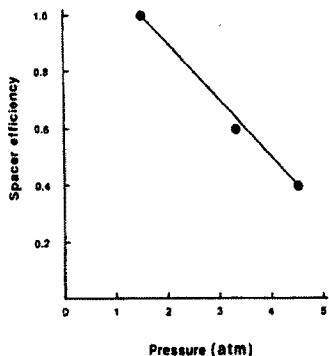


그림 5. SF6의 기압에 따른 절연물 길이의 표면 방전 절연 효과.[3]

## 2.2.2 스위치의 제작

앞에서 언급된 스위치의 특징을 고려하여 우리는 그림 6과 같은 형태의 스위치를 설계하였다. 즉, Rimfire 형태의 스위치와 같이 실린더 축 상으로 여러 층의 스위치를 배열하고 고전압이 입력되는 곳에는 반구로 이루어진 스파크 캡을 설치하였다. 그리고 러시아의 MGMC와 같이 구슬을 동심원상에 균일하게 배열하여 다중 경로 방전을 유도할 수 있는 구조를 만들었다. 러시아의 MGMC에서는 실린더 벽면에 구슬이 접하도록 배치하여 상대적으로 낮은 절연 파괴 전압을 가지는 것에 비하여, 본 연구에서 설계된 MGMC의 경우에는 그림 6에 나타나 있듯 바와 같이 구슬이 두개의 절연판 사이에 끼워진 형태인데, 표면 자발 방전을 고려하여 구슬과 구슬을 지지하고 있는 절연체 면의 거리를 멀게 하기 위하여 홈의 길이를 충분히 길게 하였다. 설계된 스위치는 총 8 개의 구슬을 사용하여서 최대 8개의 방전 경로를 생성할 수 있도록 설계하였다. 그러나 Rimfire 스위치의 경우 실험으로 알려진 바에 의하면 스위치가 동작할 때 약 4개 정도의 방전 경로가 발생하는 것으로 알려져 있다. 설계된 MGMC의 경우 첫 번째 전극은 단일 방전 경로를 가지는 스파크 캡 구조이므로 이 전극 간격에서 발생하는 아크에 의한 인덕턴스가 스위치 인덕턴스에서 가장 큰 영향을 미치게 된다. 나머지 전극 간에는 다중의 경로로 방전이 진행될 경우 인덕턴스는 식 5에 의하여 방전 경로의 수만큼 줄어들게 된다. 본 연구에서 설계된 스위치의 경우 최대 8개의 방전 경로의 발생이 가능하나 실험에서 알려져 있듯이 약 4개 정도의 방전 경로에 의하여 스위치가 동작된다고 가정하면 전체 극간 거리의 90 % 에 50 %의 인덕턴스 감소 효과를 고려하면 첫 번째 극간에서 발생되는 인덕턴스의 약 4.5배의 인덕턴스 증가가 예상되고 결과적으로 총 5.5배의 인덕턴스를 가질 것으로 추정할 수 있다. 그러나 본 연구에서 개발하려는 과전압 단락 스위치의 경우, 운전하고자 하는 자발 방전 전압에 대한 충진 기체의 압력은 스위치 고유의 특성으로서 차후에 제작하여 실험으로 결정하여야 한다. 따라서 본 스위치의 설계에서 극간의 거리는 그림 4로부터 SF6를 약 4 기압 정도를 사용하여 약 800 kV의 hold-off 전압을 얻기 위한 극간 거리인 5 cm를 선택하였다. 모든 극간의 간격은 동일하게 5 mm로 총 10단으로 설계되었다. 전류 회귀 회로 (current return circuit)가 실린더의 반경이 135 mm가 된다고 가정하였을 때 아크의 반경을 1 mm라고 가정하고 아크에 의한 인덕턴스를 계산하면 약 5 nH가 된다. 따라서 전체 아크 영역의 인덕턴스는 약 28 nH가 된다. 전극 부분에 의한 인덕턴스를 포함한 전체 인덕턴스를 계산하여 보면 약 70 nH로 계산되어 단일 스파크 캡 스위치에 비하여 작은 인덕턴스를 가짐을 알 수 있다. 그럼 7은 1차 설계된 MGMC 스위치를 제작하여 시험한 결과를 적용하여 개선시킨 본 제품 MGMC 스위치 도면이다. 주로 개선한

부분은 고전압이 인가되는 전극을 코로나 링으로 설계를 하였으며 양극과 음극을 절연하여 주는 스위치 챔버는 절연체를 사용하였으며 표면 방전을 막기 위하여 챔버의 바깥쪽을 주름진 모양으로 설계를 하였다. 그럼 8은 설계한 제품을 제작한 사진이다.

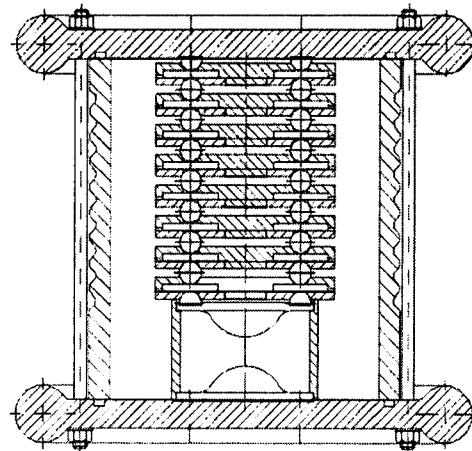


그림 6. 멀티캡 멀티채널(MGMC) 스위치 도면

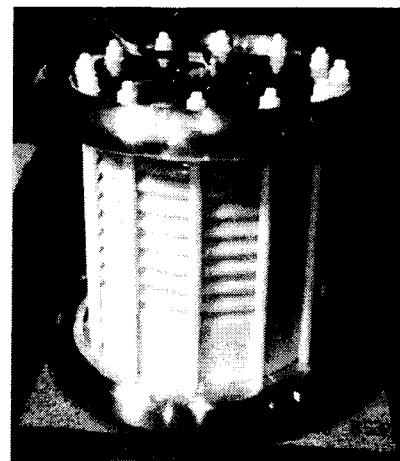


그림 7. 멀티캡 멀티채널(MGMC) 스위치 사진

## 2.3 MCMG 스위치 시험장치 및 시험

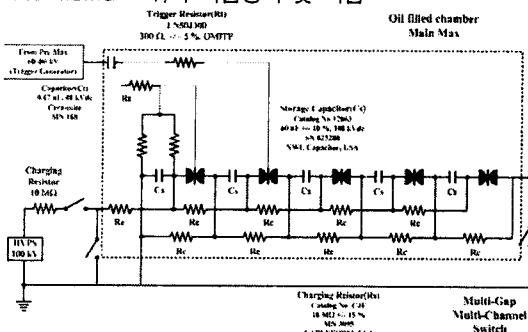


그림 8. MGMC 스위치 시험용 Max 회로

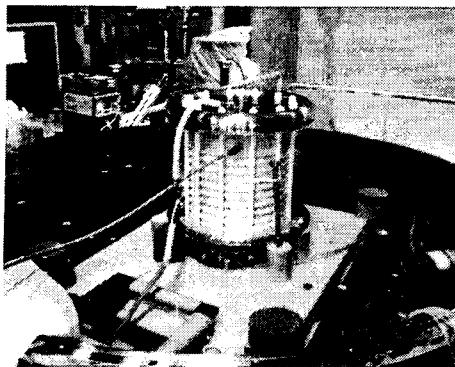


그림9 Marx에 설치한 MGMC 스위치 사진

그림 8은 MGMC 스위치를 시험하기 위해 제작한 Max 회로이다. MGMC 스위치는 회로와 같이 설치되어 있으며 부하는 단락상태로 시험을 하였다. 그림 9는 그림 8과 같이 Max에 MGMC 스위치를 설치한 사진이다. Max의 내부는 500 kV를 절연하기 위하여 절연유로 채워져 있으며 MGMC는 내부는 사용 전압에 따라 절소 개스를 채워서 사용을 하였다. 그림 10은 MGMC 스위치의 전압과 상승속도를 측정한 시험 과형이다. 전압 평균은 약 400 kV에서 스위치가 스위칭 했으며 MGMC 스위치의 상승속도는 약 16 ns로 측정되었다.

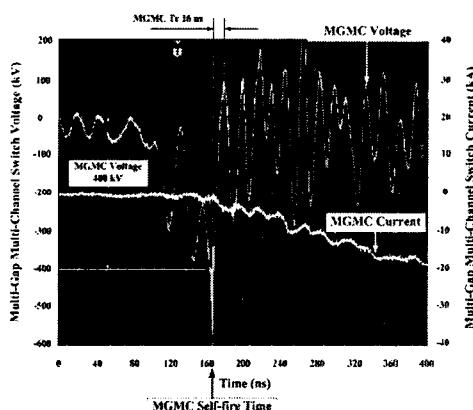


그림 10. MGMC 스위치의 전압 및 상승속도를 측정한 과형

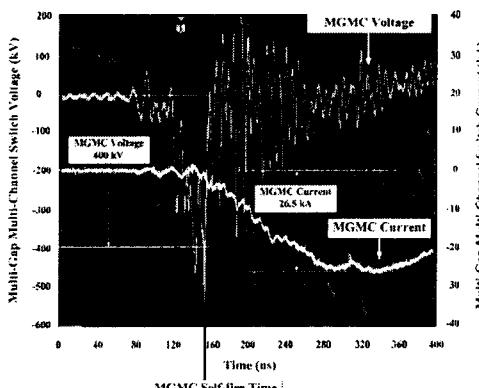


그림 11. MGMC 스위치의 전압, 전류 과형

그림 11은 MGMC 스위치의 전압과 전류 과형을 측정

하였으며 전압은 약 400 kV가 인가되었으며 전류는 약 26.5 kA가 흘렀다. MGMC 스위치의 피킹캡 운전조건을 찾기 위하여 반복적인 시험을 수행하여 얻은 결과는 200 kV에서는 0psi, 250 kV에서는 5 psi, 300 kV에서는 10 psi, 350 kV에서는 15 psi, 400 kV에서는 20 psi의 기압에서 운전하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

### 3. 결 론

500 kV 고전압 단락스위치를 설계 제작하여 고전압 시험을 하였다. 설계된 MGMC 스위치의 구조는 스위치의 인더턴스를 줄이기 위하여 8개의 다중 채널의 구로 스위치를 구성하였으며 10개의 다중캡으로 구성한 하였다. 제작된 스위치를 400 kV의 Max 발생기를 이용하여 시험을 하였으며 측정한 상승속도는 약 16 ns 이었으며 고전압 단락스위치의 자발 방전조건을 찾았다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G. Schaefer, M. Kristiansen, and A. Quenther, "Gas Discharge Closing Switches", Plenum Press, 1990.
- [2] S. T. Pai and Qi Zhang, "Introduction To High Power Pulse Technology", World Scientific, 1995.
- [3] Ja H. Lee, Sang H. Choi, and Kyo D. Song, "Design For Mega-volt Inverse Pinch Plasma Switch", IEEE Pulsed Power Conference, pp. 717 - 720, 1989.
- [4] S. H. Nam, S. H. Choi, J. H. Lee, "Preliminary tests of megavolt inverse-pinch plasma switch", IEEE Power Modulator Symposium, pp. 281-286, 1990.