

고압 대전류 아크의 복사강도 측정

Measurement of Radiation Intensity of the High-Pressure and Large-Current Arc

宋基東[†] · 吳年浩^{*} · 鄭鎮教^{*} · 趙龍成^{**}

(Ki-Dong Song · Yeon-Ho Oh · Jin-Kyo Chong · Yong-Sung Cho)

Abstract - This paper presents the measured radiation intensity of high-pressure and large-current arc with the current. In order to measure the radiation intensity of large-current arc, a model circuit breaker was specially designed and manufactured and the method using an astronomical telescope was utilized after various measuring methods were investigated. A trigger system was designed and fabricated to coincide the time of desired current with the exposure time of 1ms of the spectroscope. A high-speed camera was used to investigate the shape and behavior of the arc and the captured results have been used to calculate the radiation energy. The calculated arc temperature with Boltzmann plot method using the measured radiation intensity have 18,000 ~ 27,000 K to the current 4kA ~ 15kA. And also, using the calculated arc temperature and the captured arc shape the radiation energy of the current 5kA ~ 15kA were calculated with $8 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^6$ W/m respectively.

Key Words : radiation, arc, circuit breaker, spectroscope, arc temperature

1. 서 론

전력계통에서 고장이 발생하는 경우에 고장범위가 커져 가는 것을 방지하고 여러 전력기기들을 보호하기 위해 고장 전류를 신속히 차단해 주어야 한다. 이러한 고장전류를 자동적으로 차단하는 기기가 차단기(circuit breaker)이며, 초고압 계통에는 주로 SF₆ 가스 차단기가 사용되고 있다. 차단기가 고장전류를 차단하는 과정에는 두 접점사이에 아크가 필수적으로 발생하게 된다. 이 아크는 주위로 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)라는 에너지 전달과정을 거쳐 냉각되고 소멸되게 된다. 위의 세 가지의 에너지 전달과정 중에서 고장전류가 증가할수록 복사에 의한 에너지 손실분은 증가하게 되며, 수 십kA 이상이 되면 에너지 전달의 대부분을 차지하는 것으로 보고되고 있다[1]. 또한 고압 대전류 아크에서 복사에 의한 에너지 전달과정은 아크해석을 하는 데 있어서 매우 중요하게 다루어지고 있으며, 노즐 용삭(ablation)을 일으키는 주요 요인이다[2]. 따라서 이러한 복사전달에 대한 실험에 의한 정량적인 분석은 차단성능 해석용 프로그램 개발과 아크현상을 규명하는 데 필수적이며 매우 유용한 자료가 된다. 하지만, 불행히도 국내에서는 아직까지 고압 대전류 아크 복사에너지 측정을 시도해 본 적도 없거니와 SE model, P1 model 또는 MPC 등

의 해석기법[3]을 이용하여 복사에너지 전달에 대한 해석을 수행한 결과에 대해서 비교/검증할 데이터조차 확보되어 있지 않다. 차단기에서 발생하는 아크는 보통 20ms라는 극히 짧은 시간에 발생하고, 파장의 손실 없이 정확하게 복사에너지를 측정하는 것이 결코 쉬운 일이 아니기 때문일 것이다. 이러한 이유 때문에 세계적으로도 측정된 결과는 극히 드물며, 측정시스템 및 시험조건에 대한 상세한 설명도 부족한 실정이다.

본 연구에서는 고압 대전류 아크의 복사에너지 전달을 측정된 결과를 제시한다. 안정된 아크를 발생시키기 위한 모델 차단부의 설계/제작부터 파장별 복사강도(intensity)를 측정하기 위한 시스템, 측정된 결과를 이용하여 아크의 온도와 복사에너지를 산출하는 과정에 대해 상세히 설명한다.

2. 모델 차단부의 설계/제작 및 측정시스템

2.1 모델 차단부의 설계 및 제작

차단기에서 발생하는 아크를 안정적으로 발생시키는 것이 최우선적으로 고려되었고, 그와 동시에 복사에너지를 측정하는 데 있어서 각종 변수들 예를 들어, 아크 길이, 가스압력, 관측창의 재질 등을 쉽게 변경할 수 있는 구조를 가질 수 있는 차단부를 고안하는 데 주력하였다. 그림 1은 고압 대전류 아크의 복사에너지 측정용 차단부와 전체 조립도를 나타낸 것이다(이 차단부는 2005년 9월에 "피스톤 이동형 차단부"로 대한민국 특허 등록되었다). 기존의 차단기와는 달리 피스톤(A)이 움직여서 파피 실린더(B)내의 가스를 압축하여 노즐(C)을 통해 아크 접점(D와 E)사이에 발생하는 아크에 가스를 공급한다. 이 가스는 아크가 중심축에서 외부

[†] 교신저자, 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

E-mail : kdsong@keri.re.kr

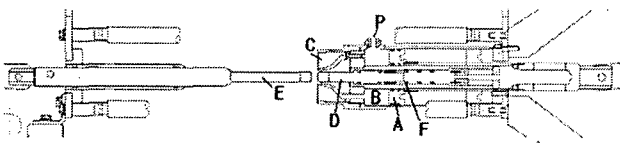
* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員

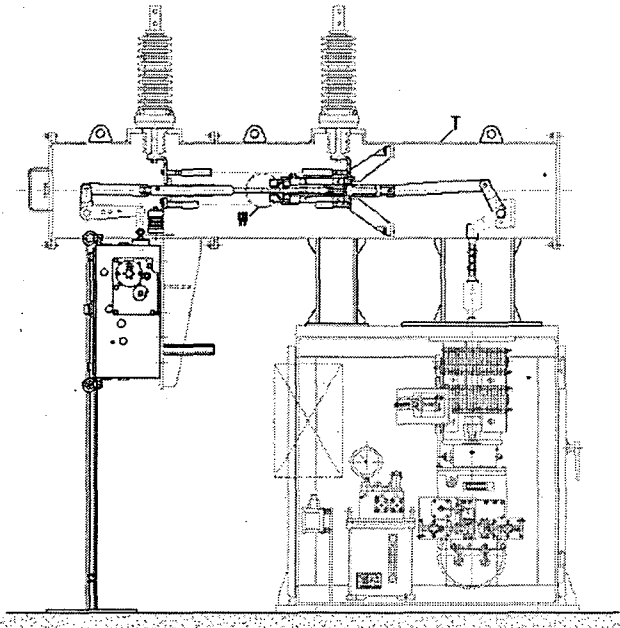
接受日字 : 2006年 8月 18日

最終完了 : 2006年 9月 11日

로 벗어나는 것을 방지하여 아크가 안정되고 일정한 형태를 유지할 수 있도록 한다. 파퍼 실린더에는 가스압력을 측정할 수 있는 센서(P: piezo type transducer)가 부착되어 있다. 가동아크 접점(E)는 전동스프링 조작기와 연결되어 있고, 조작링크의 길이를 조정하여 아크 길이(극간의 길이)를 조정할 수 있도록 되어 있으며, 고정아크 접점(D)는 유압조작기와 연결되어 있고 투입 시에 가동아크 접점(E)과 밀착될 수 있도록 압착스프링(F)을 설치하였다. 극간의 중심을 기준으로 차단부 탱크(T)에는 관측-창(W)이 설치되어 있다. 관측창의 재질은 아크릴, 수정, Fused silica 등이 쉽게 교체될 수 있는 구조를 가지고 있다. 차단부 탱크는 내부에 SF₆ 가스가 최대 25bar까지 채워질 수 있도록 설계/제작되었다.



(a) 차단부 형상



(b) 전체 조립도

그림 1 고압 대전류 아크의 복사에너지 측정용 차단기
Fig. 1 Circuit breaker for the measurement of arc radiation.

2.2 측정방법

고압가스로 밀봉된 차단부 내에서 고온의 아크 복사에너지를 정밀하게 측정하기 위해 여러 가지 방법이 검토되고 시도되었으나, 천체관측에서 사용되는 복사에너지 측정방법이 가장 간단하고 효율적이라는 결론을 얻었다[4]. 이 방법은 멀리 떨어져 있는 별의 복사를 측정하기 위한 반사망원경을 이용하는 것으로, 반사망원경을 통하여 원하는 위치에서 자유로이 복사에너지를 측정하는 방법이다. 반사망원경을 이용한 복사에너지 측정방법은 다음과 같은 장점이 있다. 즉, UV 영역까지도 측정이 가능하며, 반사망원경의 초

점면에서 직접 측정하므로 채널 간 빛의 간섭이 없다. 또한, 측정방법이 매우 간단하며, 다른 방법에 비해 측정할 수 있는 위치를 세밀하게 조정할 수 있고, 저비용으로 고정도의 측정결과를 얻을 수 있다. 한편, 반사망원경이 멀리 떨어져 있는 별을 관측하기에 적합한 구조로 되어 있으므로 차단부와의 거리 및 초점면 등을 조절하는데 약간의 경험이 필요하다. 그림 2는 반사망원경을 이용한 아크 복사에너지 측정 시스템을 나타내고 있다. 관측-창을 통해 나오는 아크 복사를 반사망원경의 초점면에서 직접 측정하여 분광기로 전송한다.

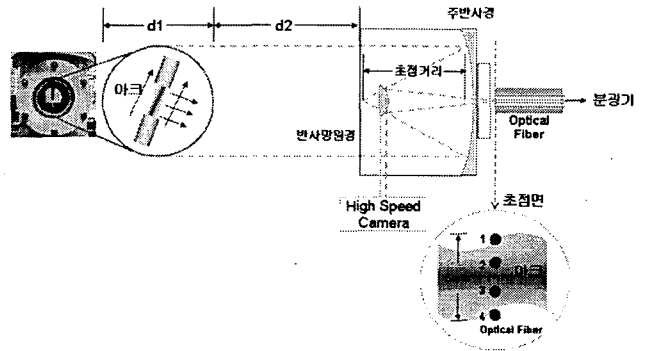


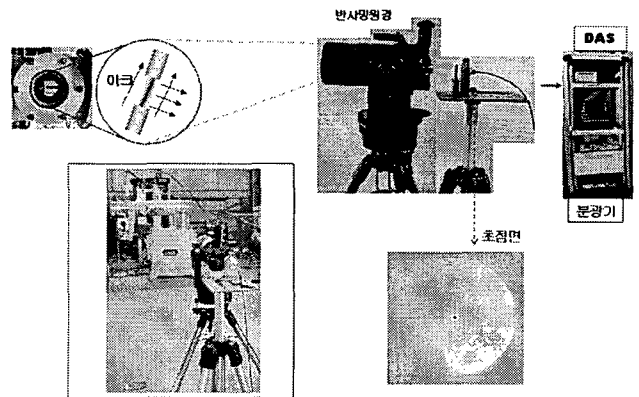
그림 2 반사망원경을 이용한 아크 복사에너지의 측정
Fig. 2 Measurement of arc radiation using a reflector.

초점면에 맺어지는 영상의 크기는 다음 식(1)로 결정되며, 따라서 측정거리나 반사망원경의 초점거리를 변경하여 원하는 아크 상의 크기를 얻을 수 있다. 주의할 점은 사전시험을 통해 반사망원경의 초점이 측정거리 d2에서 제대로 만들어지는지 육안으로 직접 확인할 필요가 있다.

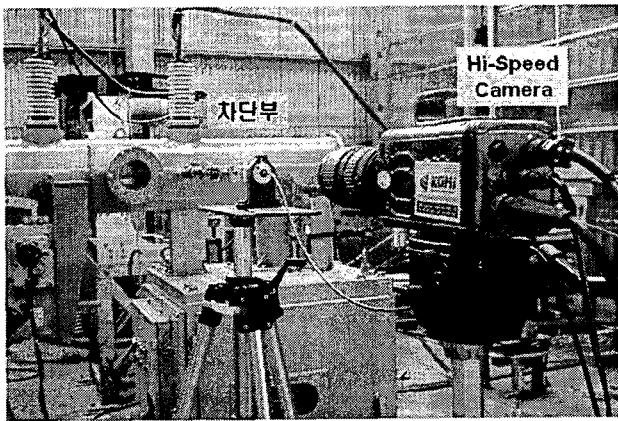
$$\tan^2\left(\frac{d1}{d2}\right) \times \frac{\pi}{180} \times d_f = P_s [mm] \tag{1}$$

여기서 d1은 관측창의 직경, d2는 초점거리, P_s는 영상의 크기를 나타낸다.

그림 3은 실제 측정시스템을 나타낸 사진이다. 관측-창의 재질에 대한 특성을 파악하기 위해 관측-창을 아크릴과 수



(a) 반사망원경의 초점교정시험



(b) 고속도 카메라를 이용한 아크거동 촬영

그림 3 고압 대전류 아크의 복사에너지 측정시스템
Fig. 3 Measuring system for arc radiation.

정으로 교체하여 시험하였고, 초점을 맞추기 위한 초점면에서의 교정지(calibration sheet)를 보여주고 있다. 분광기에서 측정된 복사강도는 DAS에 저장되도록 하였다. 또한 그림 3(b)와 같이 아크의 거동을 관찰하고 아크 전류크기에 따른 복사에너지를 산출하기 위해 고속도 카메라를 사용하여 관찰 내부를 촬영하였다.

2.2 시험회로

대전류 아크를 발생시키기 위해 간이합성시험설비를 이용하였으며, 그림 4는 간이합성시험 회로도를 나타낸다. 그림 4에서 TCB를 기준으로 왼쪽은 시험전류를 공급하기 위한 전류원이며, 오른쪽은 주입전류(injection current) 및 과도회복전압(TRV; transient recovery voltage)을 공급하는 전압원이다. 간이합성시험설비 및 운영방법에 대해서는 참고문헌 5에 상세히 설명되어 있기 때문에 여기서는 생략한다.

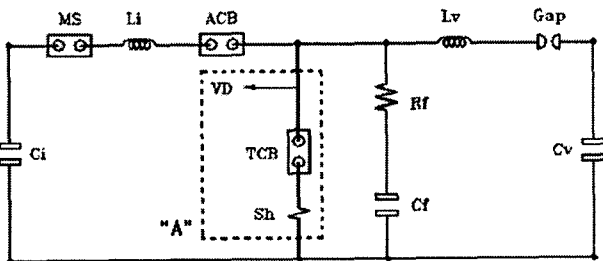


그림 4 간이합성시험 회로도
Fig. 4 Circuit diagram of simplified synthetic test facility.

고압 대전류 아크의 복사에너지 측정을 위해 그림 4의 회로에 그림 5와 같이 별도의 측정시스템을 구축하였다. 그림 5의 측정시스템은 그림 4의 "A"로 표시된 부분과 결선되어 있다.

측정시스템을 구성하는 과정에서 가장 주의해야 하는 것은 트리거(trigger) 시점이다. 분광기(multiplex-chromator)가 아크에 노출되어 복사에너지를 받아드릴 수 있는 시점은 교

류전류에서 전류크기의 변화가 가장 작은 최대 점이다. 이 시점의 크기는 약 1ms이며 따라서 분광기의 노출시점과 교류전류 최대점이 일치하도록 트리거 시스템을 구성해 주어야 한다. 측정된 결과는 광 절연(Tektronix A6905S Optical isolation)설비를 거쳐 오실로스코프에 저장하였다. 또한 TCB 고압단에서의 전압을 분압기(voltage divider)를 이용하여 측정하였고, 측정결과는 시험전류와 동기화시켜 오실로스코프에 저장하였다. 측정된 전류와 전압의 결과는 시험 종료 후, 결과분석을 위하여 GPIB 케이블을 이용하여 컴퓨터에 저장하였다.

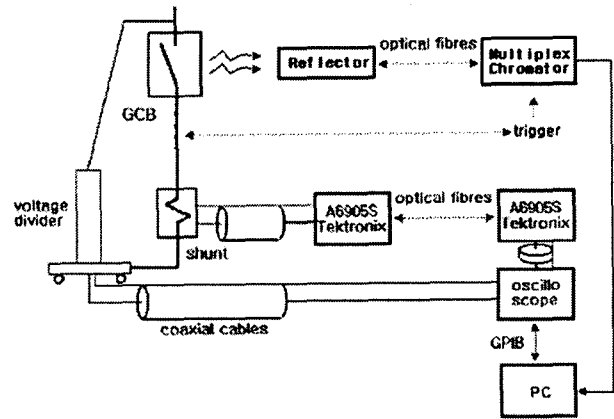


그림 5 아크 복사에너지 측정을 위한 측정회로
Fig. 5 Measuring circuit for arc radiation.

3. 복사강도 측정시험

3.1 보정(calibration)시험

경우에 따라서 분광기의 CCD로 검출된 후의 파형은 화소(pixel) 단위의 값을 가지는 경우가 있다. 이 경우에 화소단위를 파장(wavelength) 단위로 환산해야 하며, 이를 위해 측정 전에 단위 환산을 위한 보정시험이 필요하다. 또한 분광기의 회절격자(diffraction grating)의 반사각이 최초 설정된 값에서 변경될 수 있으므로, 화소-파장의 환산 값을 알고 있는 광원을 이용한 보정시험이 필요하다. 이 경우 수은 등(Mercury lamp)이 주로 이용되며, 본 연구에서도 그림 6과 같이 회절격자를 조정하여 보정시험을 수행하였다.

본 연구에서처럼 광원과 일정한 거리를 두고 복사에너지를 측정하는 경우에 측정거리와 분광기의 슬릿(Slit: 광량을 조절하는 장치), 그리고 ND 필터(neutral density filter)의 적절한 조합을 통해서만 최적의 값을 얻을 수 있다는 것에 주의해야 한다. 또한 트리거 시점의 검증, 분광기의 슬릿 조절, 검출부의 수신 범위를 조정해 별도의 광원을 이용하여 사전에 마무리되어야 한다. 이와 같은 보정시험을 위해 제논 등(Xenon lamp)이 이용되었으며, 그림 7에 측정결과를 예로 나타내었다. 이때 제논 램프의 발광시간은 약 10μs이었다.

일정한 거리를 두고 반사망원경을 이용하여 복사강도를 측정하는 경우, 경험적인 요소가 다소 필요하지만 초점을 정

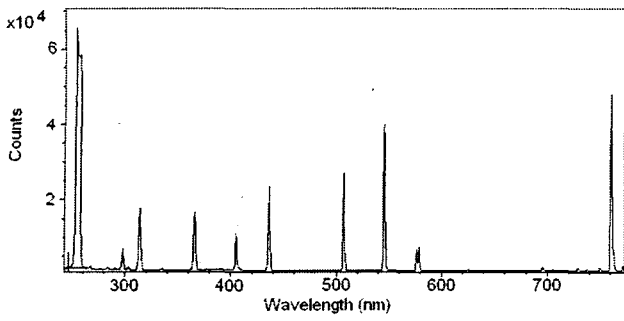
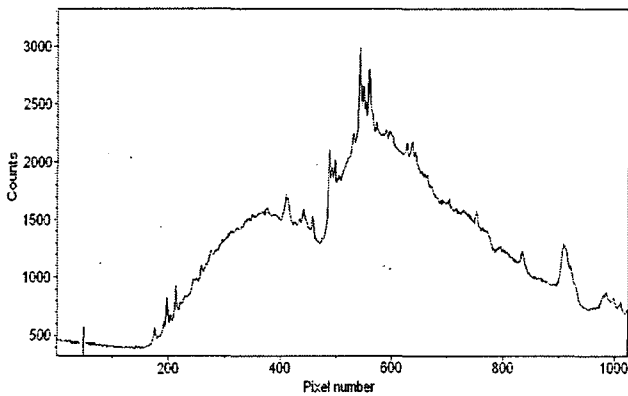
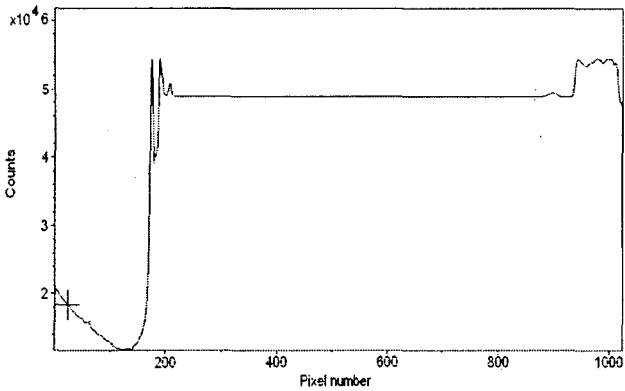


그림 6 보정시험에서의 수은 등의 파형특성
Fig. 6 Characteristics of Mercury lamp in calculation test.



(a) 슬릿, ND필터, 트리거 시점 등이 적절히 조합된 조건에서의 파형



(b) 부적합한 경우의 출력파형

그림 7 제논 등을 이용한 사전시험결과
Fig. 7 Result of calibration test using Xenon lamp.

확하게 맞추는 데 특히 주의해야 한다. 또한 반사망원경을 통해 나오는 아크 상에서 초점이 어느 지점에 맺히는지를 확인하는 것이 반드시 필요하다. 그림 8은 반사망원경의 부경을 통해 초점면에 맺힌 아크점점 사이의 상을 나타낸 것이다. 이와 같이 부경을 조절하여 초점을 맞춘 후에는 원하는 위치에서의 복사강도를 측정할 수 있다.

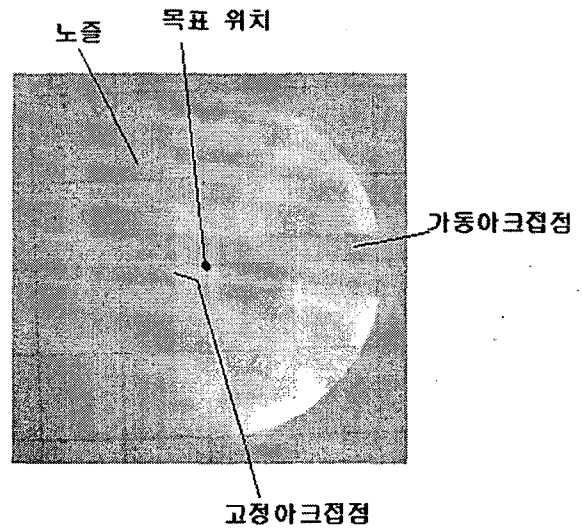


그림 8 초점조절
Fig. 8 Focusing

3.2 복사강도 측정

그림 8에서처럼 복사강도를 측정하고자 하는 위치는 아크가 발생했을 때 고정점점과 가동점점 사이의 중간이며, 이때 점점간의 길이는 10mm이다. 측정시험에서의 전류의 크기, 분광기 슬릿의 크기, ND 필터조건 등에 대해 표 1에 정리하였으며, 트리거 시점, 아크전류, 아크전압 등에 대한 측정결과에 대한 예를 그림 9에 나타내었다.

표 1 복사강도의 측정 시의 시험조건

Table 1 Test condition in measuring test of radiation intensity.

시험번호	전류크기 [kA _{rms}]	ND filter	Silt	관측-창 재질
(a) T061501A	4.7	0.01	0.01	Acrylic-resin
(b) T061502A	9.6	0.01	0.005	Acrylic-resin
(c) T061504A	9.6	0.01	0.01	Acrylic-resin
(d) T062106A	4.0	없음	0.005	Quartz
(e) T062108A	5.0	0.01	0.005	Quartz
(f) T062109A	5.0	0.1	0.005	Quartz
(g) T062110A	10.0	0.1	0.005	Quartz
(h) T062111A	10.0	0.01	0.005	Quartz
(i) T062112A	10.0	0.01	0.005	Quartz
(j) T062113A	15.0	0.01	0.005	Quartz
(k) T062114A	15.0	0.1	0.005	Quartz

그림 9에서 전류 값의 변화가 가장 적은 전류의 최대 점에서 트리거 신호가 들어간 것을 볼 수 있으며, 이 시점부터 약 1ms동안 분광기는 아크 복사에 노출된다. 가동아크접점(스프링 조작기)의 스트로크(stroke)는 이 시점에서는 끝나 있으며, 유압조작기의 스트로크는 노즐을 통해 분출되는 가스가 거의 일정하도록 스트로크 중간에 위치하도록 설정하였다. 복사전달의 이론적 해석에 필요한 압력 값은 압력상승 곡형(4)에서 얻을 수 있으며, 복사에너지에 대한 입력 아크 에너지($= \int VI dt$)의 비율을 산출하는 데 필요한 아크전압과 전류는 각각 곡형(3)과 (5)에서 얻을 수 있다. 이와 같

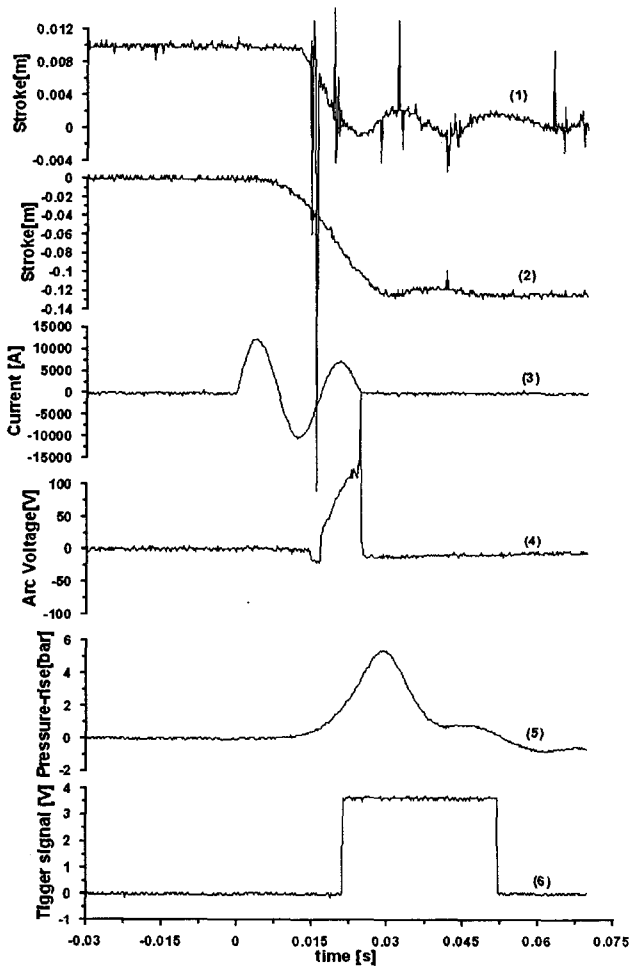
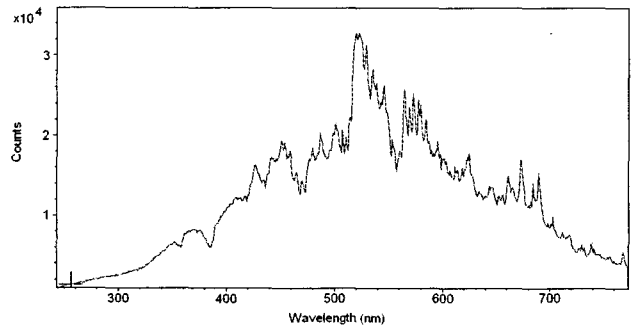


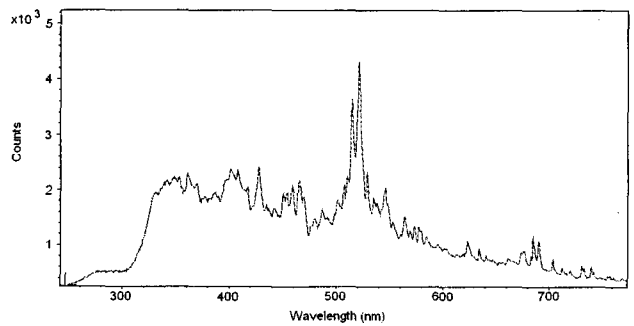
그림 9 고압 대전류 아크 시험파형(시험번호 T062108A, (1) 스프링조작기 스트로크, (2) 유압조작기 스트로크, (3) 전류, (4) 파퍼 실린더 압력상승, (5) 아크전압, (6) 트리거 신호)

Fig. 9 Test results of high-pressure and large current arc (Test No. T062108A, (1) stroke of spring mechanism, (2) stroke of hydraulic mechanism, (3) current, (4) pressure-rise in puffer cylinder, (5) arc voltage, (6) trigger signal).

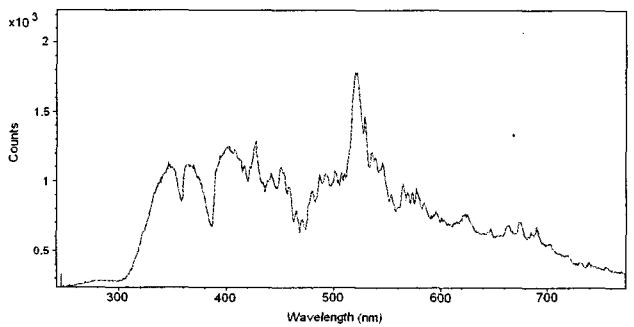
이 원하는 시점에 정확하게 트리거가 되도록 시스템을 구성하는 것이 중요하며, 그림 10에 복사강도 측정결과와 대표적인 예를 나타내었다.



(a) 시험번호 T061501A



(b) 시험번호 T062108A



(c) 시험번호 T062112A

그림 10 복사강도 측정결과와 예(표 1참조)
Fig. 10 Results of radiation intensity(see table 1).

또한 그림 11에는 고압 대전류 아크의 복사에너지를 산출하는 데 필요한 아크의 직경과 아크의 형태를 알기 위해 고속도 카메라로 촬영한 아크사진의 예를 나타낸 것이다.

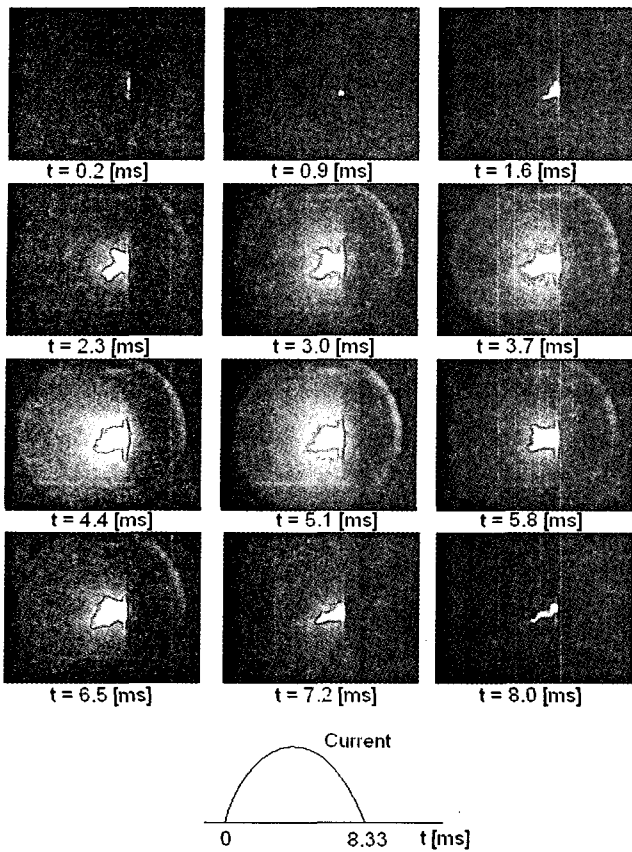


그림 11 아크의 거동(표1의 시험번호 T062108A)
Fig. 11 Behavior of arc(test no. T062108A in table 1).

4. 결과 및 검토

4.1 복사강도 측정결과

그림 12에서 13까지는 여러 가지 시험조건에 따라 복사강도의 측정결과를 비교한 것이다. 그림 12의 경우, 관측창의 재질을 제외하고는 모든 시험조건이 거의 유사하다. 그림 12에서 이미 잘 알려져 있듯이 관측창의 재질이 아크릴(Acrylic)인 경우 수정(Quartz)에 비해 400nm 이하의 자외선 영역의 파장을 흡수한다는 것을 잘 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수정 창을 이용해서 주로 관측시험을 수행하였으며, 보다 좋은 특성을 얻기 위해 자외선 영역까지도 측정 가능한 fused-silica재질의 창을 사용할 예정이다[6].

그림 13에서 슬릿의 크기에 따라 광량의 차이가 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있었고, 그림 14에서는 전류의 크기에 따라 복사강도가 비례한다는 것을 확인할 수 있었다. 그림 15는 ND필터의 유무에 따라 복사강도의 변화를 관측한 것이다. 복사강도의 측정결과를 활용하기 위한 최종목적은 결국 어떠한 파장에서 복사강도의 특성이 나타나느냐를 파악하기 위함이므로, 분광기의 슬릿의 크기를 적절히 조정하여 고정할 수 있다면, ND필터를 사용하지 않는 것이 더 좋은 특성을 보여준다는 것을 알 수 있다. 즉, ND필터를 사용하지 않는 경우가 특성파장영역에서 더욱 더 뚜렷한 복사강도의 특이성이 볼 수 있다는 것이다.

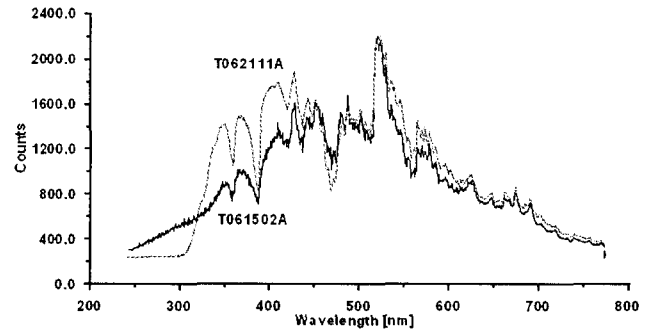


그림 12 시험번호 T061502A과 T062111A의 복사강도 비교
Fig. 12 Comparison between T061502A and T062111A.

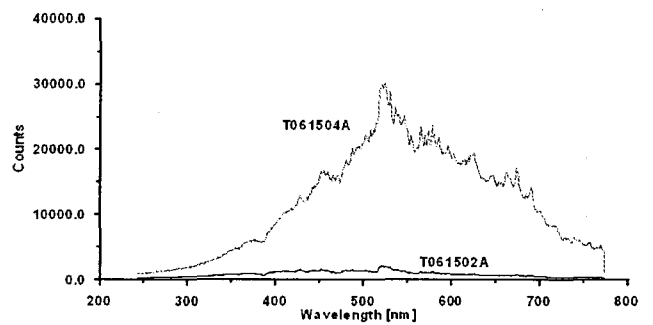


그림 13 시험번호 T061502A과 T061504A의 복사강도 비교
Fig. 13 Comparison between T061502A and T061504A.

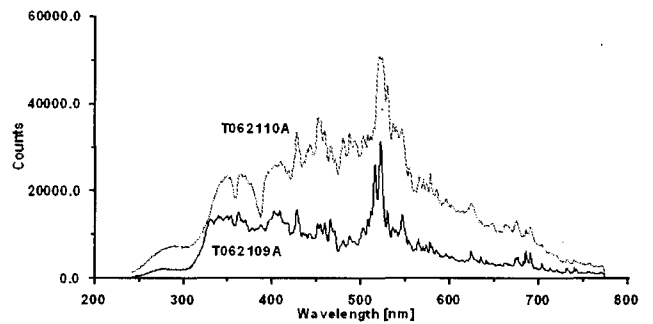


그림 14 시험번호 T062109A과 T062110A의 복사강도 비교
Fig. 14 Comparison between T062109A and T062110A.

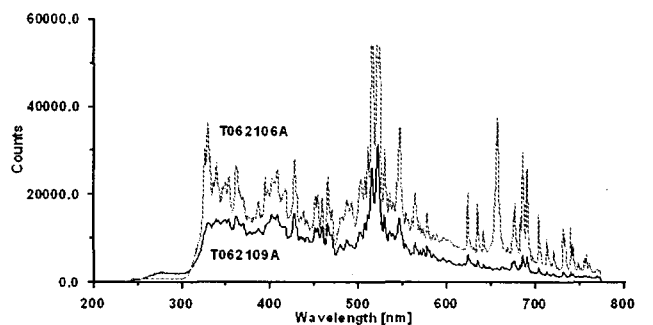


그림 15 시험번호 T062106A과 T062109A의 복사강도 비교
Fig. 15 Comparison between T062106A and T062109A.

4.2 아크온도 및 복사강도의 산출

4.2.1 아크온도의 계산

상위 에너지 준위 q에서 하위 에너지 준위 p로 천이할 때 방출되는 특정 파장의 방출 선에 대한 국부적 복사강도 ϵ_{qp} 는 상위 에너지 준위 q에서 하위 에너지 준위 p로의 단위 시간당 천이 확률 A_{qp} , 상위 에너지 준위로 여기 되어 있는 입자의 분포 N_q , 그리고 상위 준위에서 하위준위로 천이 시에 방출되는 광자의 에너지 $h\nu_{qp}$ 에 비례한다. 이 때 상위 에너지 준위의 분포는 LTE 플라즈마 하에서는 볼츠만 (Boltzmann) 분포를 따른다. 이를 식으로 나타내면 다음 식 (2)와 같다[7].

$$\epsilon_{qp} = \frac{h\nu_{qp}}{4\pi} A_{qp} N_p = \frac{h\nu_{qp}}{4\pi} A_{qp} g_q \frac{N_o(T)}{U(T)} \exp\left(\frac{-E_q}{\kappa T}\right) \quad (2)$$

여기서 g_q , $U(T)$, $N_o(T)$, E_q 는 각각 상위 준위에 대한 통계적 가중치, 대상 입자의 파티션 함수(partition function), 대상 입자의 바닥상태의 초기 밀도, 상위 준위 q에서의 여기 에너지를 나타낸다.

식(2)를 이용하여 아크 온도를 구하기 위해서는 파티션 함수, 대상 입자의 바닥상태의 초기 밀도에 대해 알고 있어야 하는데 이를 안다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 2개 이상의 분광 선을 이용하여 파티션 함수와 초기밀도의 정보 없이 온도를 산출할 수 있는 볼츠만 플롯 법을 사용한다. 볼츠만 플롯 법을 사용하는 데 있어서 식(2)는 아래의 식(3)과 같이 정리하여 사용하였다.

$$\ln\left(\frac{\epsilon_{qp}}{\nu_{qp} A_{qp} g_q}\right) = -\frac{E_q}{\kappa T} + K \quad (3)$$

이 때 $K = \ln\left(\frac{hN_o(T)}{4\pi U(T)}\right)$ 는 방출 선과 관계된 매개 변수를 가지지 않기 때문에 상수로 가정할 수 있다. 분광기의 측정에 의해 여러 방출 선들에 대한 방출도(ϵ_{qp})를 알 수 있고, 나머지 변수 ν_{qp} , A_{qp} , g_q , E_q , κ 는 스펙트럼과 관련된 데이터 시트(data sheet)를 보고 찾을 수 있다. 결국 식(3)을 이용하여 x축(E_q)과 y축($\ln\left(\frac{\epsilon_{qp}}{\nu_{qp} A_{qp} g_q}\right)$)에 대해 하나의 직선을 그릴 수 있다. 이 때 나타나는 직선의 기울기가 $-\frac{1}{\kappa T}$ 가 되고 볼츠만 상수 κ 를 알고 있기 때문에 최종적으로 온도를 구할 수 있다. 즉, 여러 방출 선들에 대한 복사강도를 측정 한 값과 최소 자승법(LSM)을 이용하여 직선을 구하고 그 직선의 기울기로부터 온도를 구한다.

시험번호 T062106A의 측정결과를 가지고 아크 온도와 복사강도를 산출하는 과정을 설명한다.

우선, 측정값이 명료한 스펙트럼선을 선택하여 사용하여야 하고, 또한 계산에 필요한 상수 값이 정확한 데이터가 확보 되어 있는 스펙트럼선을 선택되어야 한다. 본 실험조건에서 예상되는 온도영역은 10,000 K ~ 25000 K 정도이므로, 참고문헌 8을 참조하여 그림 16과 같이 상대적으로 안정적인 S II, F I 선 위주로 선택하였다. 선택된 파장영역에 대한 스펙트럼 상수(spectral constants) 값들을 참고문헌 9의 데이터 시트에서 표 2와 같이 찾아낸다.

스펙트럼 상수(spectral constants) 값들을 참고문헌 9의 데이터 시트에서 표 2와 같이 찾아낸다.

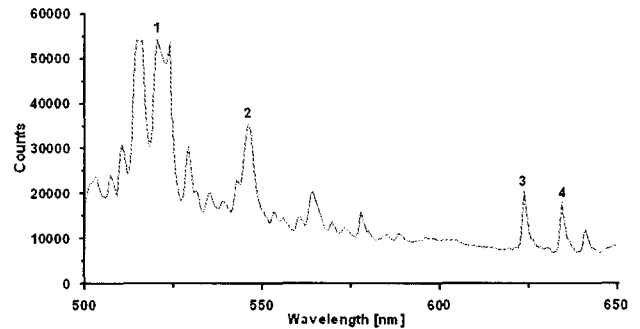


그림 16 파장에 따른 복사강도(시험번호 T062106A)
Fig. 16 Radiation intensity with wavelength (test no. T062106A).

표 2 그림 16의 선택된 파장에서의 스펙트럼 상수
Table 2 Spectral constants of selected wavelength in fig.16.

No.	$\lambda(\text{nm})$ ($=1/\nu_{qp}$)	ϵ_{qp}	g_q	$A_{qp} (10^8 \text{s}^{-1})$	$E'_q (\text{cm}^{-1})$
1	520.324	54337	4	6.5e-2	140750.34
2	545.784	35417	8	8.5e-1	128599.16
3	623.658	20423	4	2.9e-1	118427.82
4	634.553	17952	4	1.8e-1	118427.82

※ E_q 를 구하기 위해서는 E'_q 에 $100 \cdot h \cdot c$ 를 곱해 표준단위로 환산해야 한다.

표 2에서 구해진 4개의 점을 기준으로 최소 자승법으로 작성한 그림 17의 그래프에서 기울기를 구한다. 그림 17에서 구해진 기울기 $a = -3.866 \times 10^{18}$ 이므로 온도 $T(=1/ka)$ 에서 약 18,735 K임을 알 수 있다. 이와 같이 각 전류의 크기에서 온도를 계산 결과를 표 3에 나타내었다.

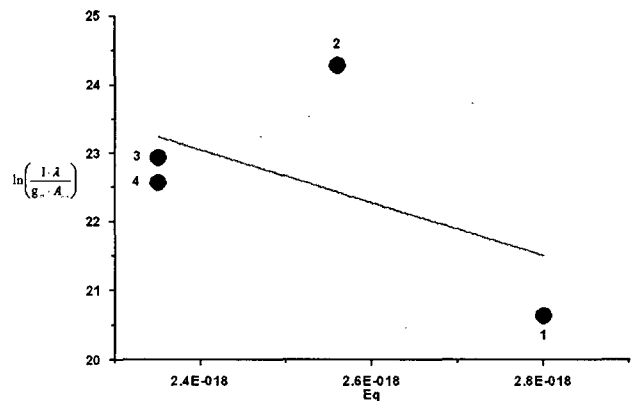


그림 17 아크 온도 계산을 위한 볼츠만 플롯(T062106A)
Fig. 17 Boltzmann plot for calculation of arc temperature (T062106A).

4.2.2 복사강도의 산출

고압 대전류 아크의 복사강도 P_{rad} 는 다음의 식(4)로부터 구할 수 있다[10].

$$P_{rad} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \times \epsilon \quad (4)$$

여기서, D 는 아크직경, ϵ : 방사계수 $[W/m^3]$ 이다.

그림 17에서 구해진 온도 18,116 K에 대한 방사계수는 그림 18에서 구해질 수 있다[11].

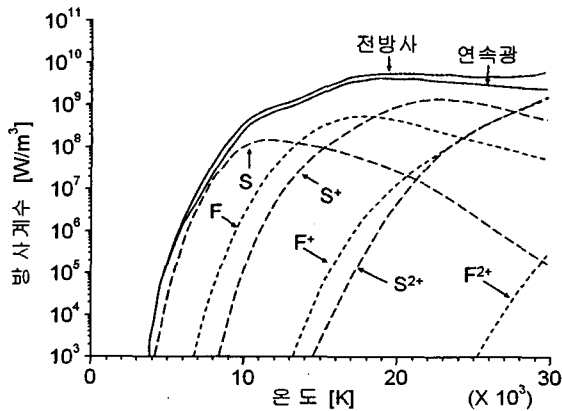
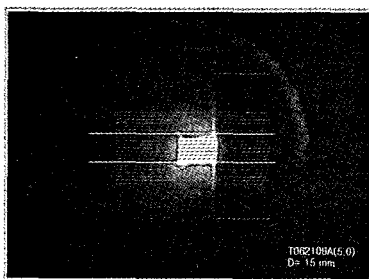
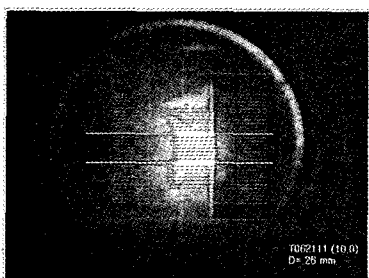


그림 18 SF₆ 가스 중의 온도에 따른 방사계수(0.1MPa)
Fig. 18 Net emission coefficient in SF₆ gas with temperature (0.1MPa).

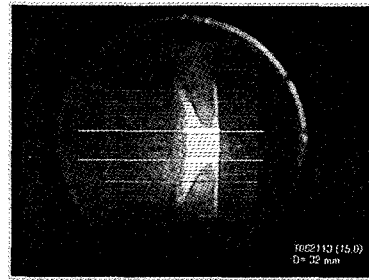
전류 크기에 따른 아크 직경을 구하기 위해, 고속도 카메라로 찍은 아크 사진에서 직접 산출하였다. 동일한 조건에서 수회의 시험을 통해 그림 19와 같이 각 전류의 크기에 따른 평균 아크 직경을 구하였다.



(a) 전류 5kArms



(b) 전류 10kArms



(c) 전류 15kArms

그림 19 전류 크기에 따른 아크 직경의 산출
Fig. 19 Calculation of arc diameter with the current.

그림 18과 19에서 얻어진 방사계수와 아크직경을 식(4)에 대입하여 예를 든 그림 17의 복사강도는 약 $8.8 \times 10^5 W/m^2$ 이다. 단, 그림 18의 온도에 대한 방사계수 값은 SF₆ 가스의 압력이 0.1 MPa 인 경우의 것이므로, 본 실험 0.4MPa에서의 값과는 약간의 오차가 있을 수 있다. 이상의 결과를 정리하면 표 3과 같다.

표 3 전류 크기에 따른 아크 온도 및 복사강도
Table 3 Arc temperature and radiation intensity with the current.

전류 [kArms]	볼츠만 플롯의 기울기 [J]	아크 온도 [K]	아크 직경 [mm]	복사강도 [W/m ²]
4.00	-3.86×10^{18}	18,735	-	-
5.00	-3.31×10^{18}	21,892	15.00	8.84×10^5
10.00	-3.03×10^{18}	23,892	26.00	2.65×10^6
15.00	-2.66×10^{18}	27,242	32.00	4.00×10^6

※ 4kArms인 경우에 아크 사진 없음.

전류크기 4.0kArms인 경우에 고속도 카메라로 촬영한 아크 사진은 없지만, 아크 온도, 아크 직경, 복사강도가 전류 크기에 따라 비례한다는 결론을 얻기에는 충분한 것으로 판단된다.

5. 결론

국내에서 아직까지 시도해보지도 못하고 확보하지도 못했던 고압 대전류 아크의 복사강도를 전류크기에 따라 측정하는데 성공하였다. 대전류 아크의 복사강도를 측정하기 위해 특수 모델 차단기가 설계/제작되었고, 여러 가지 측정방

법이 시도되고 검토된 끝에 결국 천체 망원경을 이용하는 방법이 채택되었다. 1ms 이내에서 원하는 전류 크기의 시점과 분광기의 노출시점을 일치시키는 트리거 시스템도 설계/제작되었다. 또한 전류에 따른 아크의 거동과 형태를 파악하기 고속도 카메라가 이용되었고, 측정된 아크의 형상은 복사에너지를 산출하는 데 활용되었다. 측정된 복사강도를 볼츠만 플롯 법에 적용하여 산출한 아크의 온도는 전류 크기 4kA ~ 15kA에서 18,000 ~ 27,000 K로 매우 만족한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 계산된 온도와 촬영된 아크직경으로 산출한 복사에너지는 전류 크기에 비례하여 5kA ~ 15kA 영역에서 $8 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^6$ W/m 범위의 에너지를 가지는 것으로 나타났다.

본 연구에서 얻어진 측정기술을 기반으로 가스압력, 전류 크기, 아크길이 등에 대한 고압 대전류 아크의 복사전달에 대한 시험 데이터의 축적이 가능해 질 것이며, 축적된 데이터는 차단성능 해석 프로그램의 검증과 차단부 설계에 크게 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] D.W.Shimmin and G.R. Jones, "Arc radiation monitoring in a commercial EHV circuit breaker using optical fiber transmission", J. Phys. D: Appl. Phys. 21. pp737 ~ 743, 1988.
- [2] W. H. Bu, MTC Fang and ZY Guo, "The behaviour of ablation-dominated DC nozzle arcs", J. Phys. D: Appl. Phys. 23. pp175 ~ 183, 1990.
- [3] C.M. Dixon, J.D.Yan and M.T.C Fang, "A comparison of three radiation models for the calculation of nozzles arc", J. Phys. D: Appl.Phys. 37, pp3309~3318, 2004.
- [4] 산업자원부, 중기거점 사업 1단계보고서 10011387, pp183~192, 2006
- [5] 이우영, 박경엽, 송기동 외, 간이차단성능 평가기술 및 시스템 개발, 1997-EL02-E-41, 산업자원부, 2000.
- [6] Lase component Ltd, Uncoated substrates, 2006
- [7] M. Takeuchi and T. Kubono, "Multichannel Spectroscopic Measurement System (MSMS) and its application to measurement of the temperature in breaking arc of electrical contact", 電子情報通信學會論文誌 C-II, Vol.J79-C-II No.9 pp483 ~ 489, 1996.
- [8] D.R. Airey, P.H. Richards and J.D. Swift, "Time-resolved radial temperature profiles for 10kA SF6 Arcs", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 8, pp1982 ~ 1993, 1975.
- [9] NIST Atomic Spectra Database(http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main_asd)
- [10] Y. Nakayam, K. Kokura et al., "Measurement of the temperature for SF6 Arcs in Current Decreasing Region", Sp-99-134, pp55~ 59, 1999.
- [11] T. Matsumura, Y. Yokomizu et al., "Total radiation power of 20kA-class SF6 Gas-Blast Arcs", Trans. IEE of Japan, Vol. 114-A, No. 9, pp585 ~ 590, 1994.

저 자 소 개



송기동(宋基東)

1963년 7월 5일생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년 3월~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 책임연구원.

Tel : 055-280-1563, Fax : 055-280-1569
E-mail : kdsong@keri.re.kr



오연호(吳年浩)

1991년 동아대 공대전기공학과 졸업(학사). 1993년 동아대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1566, Fax : 055-280-1589
E-mail : yhoh@keri.re.kr



정진교(鄭鎭敎)

1967년생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사).

현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1564, Fax : 055-280-1589
E-mail : jkchong@keri.re.kr



조용성(趙龍成)

1977년 9월 16일생. 2003년 부산대 전자전기통신공학부 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 3월~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 연구원.

Tel : 055-280-1558
Fax : 055-280-1589
E-mail : yscho@keri.re.kr