

# 가스차단기내 아크의 복사에너지 측정에 관한 연구

論 文

56-12-11

## Study on the Measurement of Radiation Energy of the Arc in GCBs

宋 基 東<sup>†</sup> · 吳 年 浩<sup>\*</sup> · 鄭 鎮 敦<sup>\*\*</sup> · 趙 龍 成<sup>\*\*\*</sup>

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

**Abstract** – A special PM-Tube(Photo Multiplier Tube) that is using the photoelectric effect has been designed and manufactured to measure the radiation energy of arc in a gas circuit breaker(GCB). The PM-Tube, LLG(liquid light guides), ND(neutral density) filter, and a model gas circuit breaker have been combined for the reception and the transmission of the light and a simplified synthetic test facility with the arc energy measuring system has been established. In the case of SF<sub>6</sub> gas pressure 5kg.f/cm<sup>2</sup> and arc length 20mm, the radiation energy increases with the arc current but it tends to be saturated in the above 20kA. Under the arc current 20kA, the total radiation energy has the biggest value around 8kA and was not exceeded 40% of the total arc energy.

**Key Words** : PM-Tube, Radiation, Arc, SF<sub>6</sub> gas, GCB

### 1. 서 론

초고압용 가스차단기가 전류를 차단할 때, 아크는 두 접점사이에서 필연적으로 발생하게 된다. 이 아크는 보통 전도, 대류, 복사라는 에너지 손실과정을 거쳐 소모된다. 이러한 세 가지 에너지 전달과정은 아크 시뮬레이션에서도 중요하게 다루어지고 있으며, 컴퓨터의 속도와 해석기술의 발달로 해석결과에 대한 정확성도 점점 증가하고 있는 추세이다. 하지만, 에너지를 직접 측정한다는 측면에서 보면, 차단기내 아크의 복사에너지 측정은 다른 2개의 에너지 전달과정 보다는 다소 복잡하다고 할 수 있다. 전도에 의한 에너지는 보편화되어 있는 열전대(thermo couple)센서 또는 비접촉식 온도센서 등으로 쉽게 알 수 있고, 대류의 경우는 압력센서(pressure transducer) 또는 미소 갭에 의해 대류 특성을 알 수 있다[1,2]. 하지만, 차단기내에서 수십 ms의 짧은 시간에 발생하는 아크처럼 고압(high pressure) 대전류의 복사에너지를 직접 측정하는 것은 대단히 어려우며, 측정 방법에 대해 알려진 것도 거의 드문 실정이다. 그 결과 SE model, P1 model 또는 MPC 등의 해석기법을 이용하여 복사에너지를 전달에 대한 해석을 완료하더라도 비교/검증할 실험데이터가 부족하여 현재의 아크해석에서는 단순히 인위적 계수를 조정하여 결과에 맞춰가는 실정이다[3].

차단기내 아크의 복사에너지를 측정하기 위해서는 아크의

특성에 맞는 측정 장비를 선택하는 것이 중요하다. 차단기내 SF<sub>6</sub> 아크는 일반적인 광원과 달리 지속시간이 수 ms에 불과하다. 그럼에도 불구하고 측정하고자 하는 복사에너지는 매우 크며, 광장 영역이 200~1500nm로 넓게 분포하는 스펙트럼 특성을 갖고 있다. 그 중에서도 SF<sub>6</sub> 아크의 복사에너지의 대부분을 차지하고 있는 광장 영역대가 300~800nm이다. 이러한 특성을 이용하여 외국에서는 200~800nm사이에 민감한 광 다이오드(photo-diode)를 여러 개를 조합하여 측정하는 방법 등을 제시하고는 있지만, 측정시스템 및 산출과정에서의 큰 오차를 포함하고 있으며 측정결과에 대한 정확성 평가도 어려운 실정이다[4].

본 연구에서는 초고압 가스 차단기내 아크의 복사에너지를 직접 측정하기 위해 위의 특성에 맞는 광전증배관(PMTube; Photo Multiplier Tube)을 선택하여 적용하였다. 이 광전증배관은 최소 0.1ms의 반응시간을 가지며, 300~800nm의 광장영역을 포함할 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 아크를 안정화시키고 일정영역에서 발생시키기 위한 모델 차단기(아크발생장치)가 특별히 고안/제작되었으며, 측정방법 및 시스템, 전류크기에 따른 측정 결과를 본 논문에서 제시할 것이다.

### 2. 모델 차단기 및 측정시스템

#### 2.1 모델 차단기

그림 1은 모델 차단기의 대략적인 구조를 나타낸다. 제1 아크접점(D)과 제2 아크접점(E)이 분리되면서 아크가 발생하고, 아크의 거동을 안정화시키기 위해 피스톤에 의해 압축실(B)에서 압축된 가스를 노즐(C)을 통해 분사한다. 아크의 길이는 제1 아크접점과 제2 아크접점사이의 길이에 따라 결정되며, 본 연구의 경우는 20mm로 고정되어 있다. 압축실의 압력을 측정하기 위해 압력센서(P)가 설치되어 있으며, 제 2

\* 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

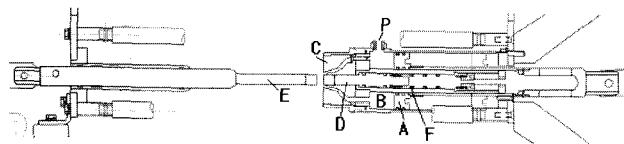
\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

\*\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員

接受日字 : 2007年 9月 10日

最終完了 : 2007年 10月 11日

아크접점은 전동스프링 조작기, 피스톤은 유압조작기에 의해 각각 구동된다. 모델 차단기에 대해서는 참고문헌 [5]에 보다 상세히 설명되어 있다.



A : 피스톤, B : 압축실, C : 노즐, D : 제1아크접점,  
E : 제2아크접점, F : 접점 지지용 스프링, P : 압력센서

그림 1 모델 차단기의 구조도

Fig. 1 Diagram of arc ignition switchgear.

## 2.2 측정시스템

참고문헌[5]에서 아크 복사에너지를 스펙트럼 분석에 의해 추정하는 방법을 제시하고 있으나, 복사에너지를 산출하는 과정에서 필요한 물리적 상수, 가정 등이 다수 포함되어 있기 때문에 많은 오차를 포함하고 있다고 할 수 있다. 따라서 보다 정확한 값을 얻기 위해서는 복사에너지를 직접 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 측정방법을 결정하는 데 있어서 아크는 수ms만 존재하고 파장영역이 300~800nm가 지배적이라는 것을 고려하여야 한다. 따라서 응답속도가 커야하며 위의 주 파장 영역을 포함해야 한다.

위의 특성을 고려하여 응답시간 100ns 특성파장영역 250~850nm의 광전증배관을 선택/적용하였다. 광전증배관은 금속표면에 빛을 쬐이면 전자가 방출되는 광전효과를 이용한 것이다. 그림 2는 광전증배관의 원리를 나타낸 것으로 방출된 전자는 다이노드(dynodes)라 불리는 여러 개의 전극을 거치면서 기하급수적으로 증가하게 된다.

광원과 광전증배관 사이에서 빛의 수광 및 전송용으로 사용되는 광케이블은 전송률이 뛰어난 LLG(Liquid light guide)를 이용하였다. LLG는 광 전송률이 뛰어난 액체를 채워 일반적인 광케이블보다 광량의 손실이 적다. LLG수광부의 직경은 8mm이며, 250~800nm사이 즉, 자외선에서 가시광선 영역사이의 광전송률은 70~80%인 것으로 알려져 있다 [6]. LLG와 광전증배관의 사이에는 빛의 량을 조절하기 위해 ND필터(neutral density filter)를 설치할 수 있는 구조를 갖도록 하였다.

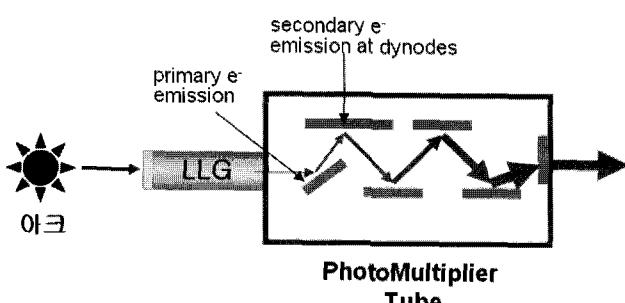


그림 2 광증배관의 원리

Fig. 2 Principle of PMTube.

입사된 빛의 강도가 광전증배관을 거쳐 광전효과 및 다이노드에 의해 증폭된 전자가 전기적인 신호(전압 V)로 오실로스코프에 직접 나타나도록 그림 3과 같이 시스템을 구성하였다.

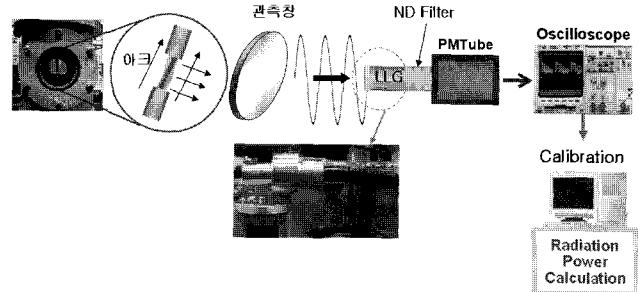


그림 3 측정시스템 구성도

Fig. 3 Diagram of measuring system.

## 3. 아크 복사에너지 측정시험

### 3.1 시험회로

대전류 아크를 발생시키기 위해 간이합성시험설비를 이용하였으며, 그림 4는 간이합성시험 회로도를 나타낸다[7]. 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 [7]에 상세히 설명되어 있다.

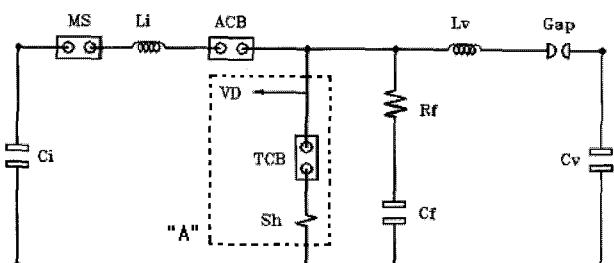


그림 4 간이합성시험 회로도

Fig. 4 Circuit diagram of simplified synthetic test facility.

차단기내 아크의 복사에너지를 측정을 위해 그림 4의 회로에 그림 5와 같이 별도의 측정시스템을 구축하였다. 그림 5의 측정시스템은 그림 4의 "A"로 표시된 부분과 결선되어 있다. 측정된 결과는 광 절연(Tektronix A6905S Optical isolation)설비를 거쳐 오실로스코프에 저장하였다. 또한 TCB 고압 단에서의 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.

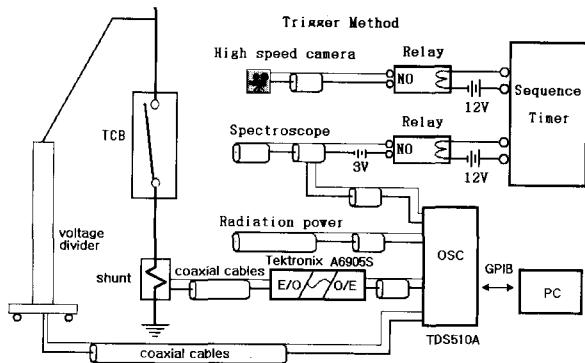


그림 5 아크 복사에너지 측정을 위한 측정회로

Fig. 5 Diagram of measuring circuit for arc radiation energy.

### 3.2 보정(calibration)시험

복사에너지지를 정확히 측정하기 위해 광원(아크)을 접광원으로 만드는 것도 중요하지만, 광원과 LLG수광부를 정확히 일치시키는 정렬작업에 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서는 LLG수광부에 소형 레이저를 설치한 후 광원의 관측창에 부착된 거울에 레이저를 조사(照射)하여 정확히 수광부에 재조사되도록 하는 방법으로 정렬작업을 수행하였고, 수광부와 관측창과의 거리는 8.05m로 고정시켰다.

차단기내 아크의 복사에너지를 측정하기에 앞서 광전증배관에서 검출된 신호를 에너지로 환산하기 위해 표준광원을 이용한 보정(Calibration)시험이 필요하다. 보정시험은 LLG를 포함한 광전증배관, 그리고 검출기의 출력신호를 조절하기 위한 ND 필터에 대해 수행되었다. 표준광원은 UV 및 가시광선 영역의 파장을 방출할 수 있는 150W 제논(Xenon) lamp를 사용하였다. 그림 6은 보정 작업 후에 얻어진 입사광에 대한 출력전압을 나타낸다.

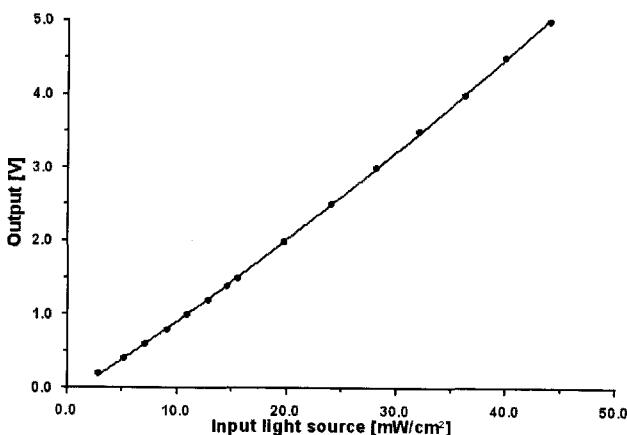
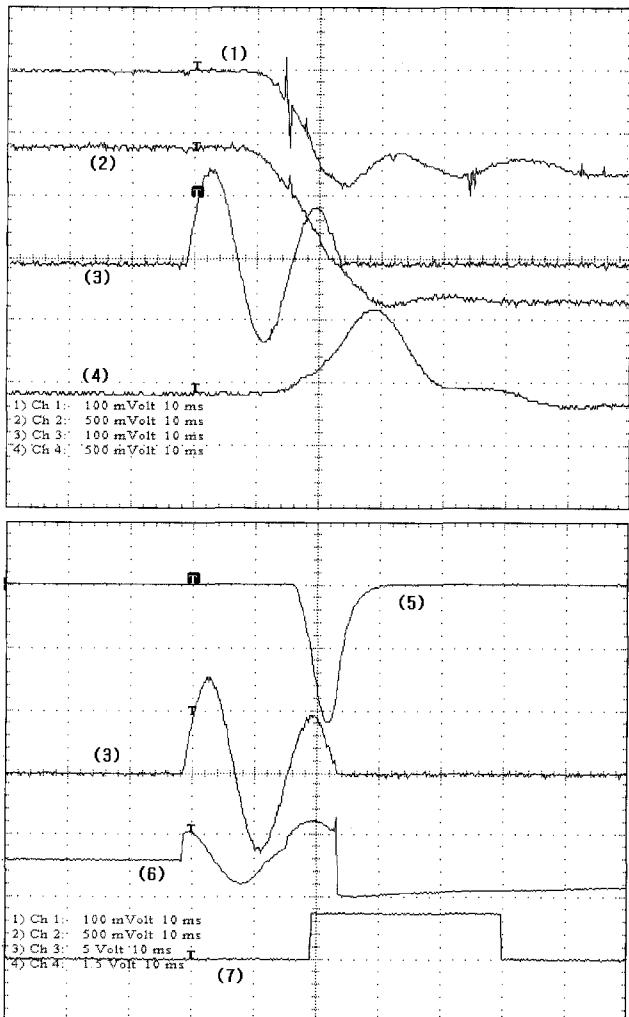


그림 6 입사 광 에너지에 대한 출력전압

Fig. 6 Output of PMTube to the input light source.

아크의 복사에너지를 측정하기 위해서는 무엇보다 정확한 빛의 세기를 검출하는 것이 중요하다. 그러나 밀폐된 차단부 내에서 아크가 발생하는 경우에는 SF<sub>6</sub> 분해가스가 발생하며, 이외에도 노즐용사과 접점의 금속증기가 발생한다.

이러한 물질들은 결국 아크 광을 간섭하여 정확한 복사에너지 측정을 방해한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 방지하고자 아크 발생 시마다 차단부 내의 가스를 교체하여 측정시험을 수행하였다. 그림 7은 아크전류 10.3kA<sub>rms</sub>, 가스압력 5.0 kg.f/cm<sup>2</sup>, 아크 길이 20.0mm일 때 측정된 DAS파형의 한 예이다.



- (1) 제2 아크접점의 스트로크, (2) 피스톤의 스트로크,
- (3) 아크전류, (4) 압축실의 압력상승,
- (5) 광전증배관의 출력전압, (6) 아크전압, (7) 트리거 신호

그림 7 측정된 DAS파형의 한 예.

Fig. 7 An example of DAS

### 4. 결과 및 검토

그림 8에는 대표적인 측정결과들을 나타내고 있다. 충진 가스압력 5.0 kg.f/cm<sup>2</sup>, 아크 길이 20.0mm인 경우이다. 그림 8에서 아크 에너지는 아크전류와 아크전압의 곱으로 산출하여 나타낸 것이며, 총 아크 에너지는 이 파형을 적분하여 얻었다.

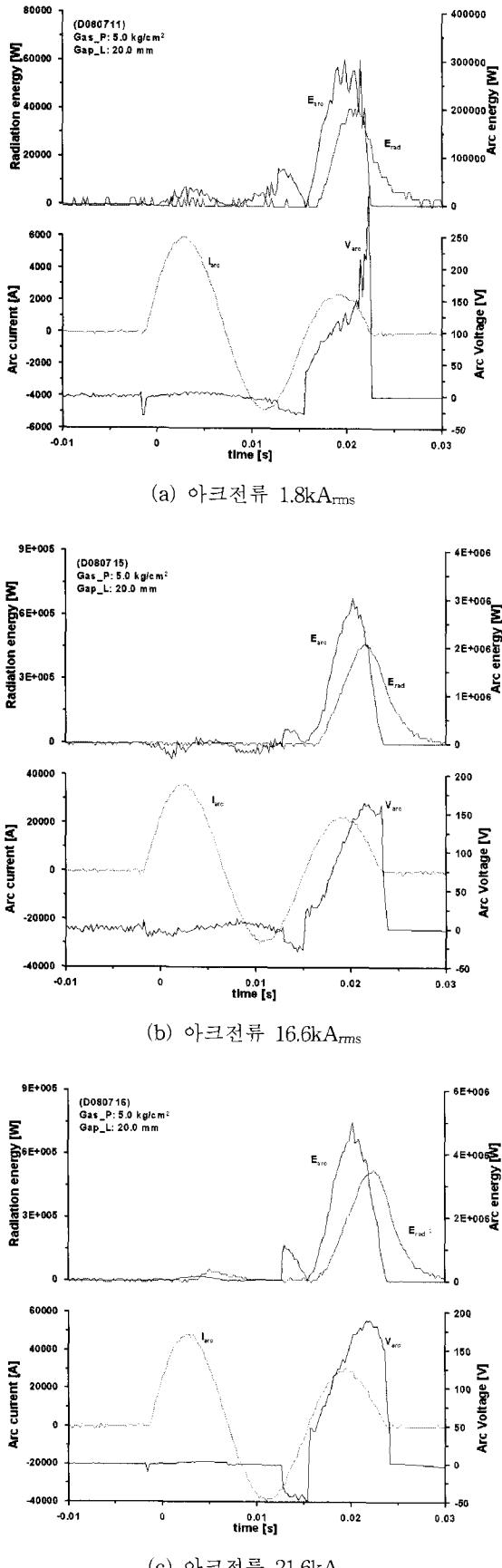


그림 8 전류 크기에 따른 아크 복사에너지의 측정결과  
Fig. 8 Arc radiation energy with arc current.

그림 9에는 시간에 대해 적분한 총 아크에너지에 대한 복사에너지의 변화를 나타낸 것이다. 복사에너지의 크기는 아크에너지 즉, 전류의 크기에 따라 증가하지만 20kA<sub>rms</sub>이상에서는 포화되는 경향을 보이고 있다.

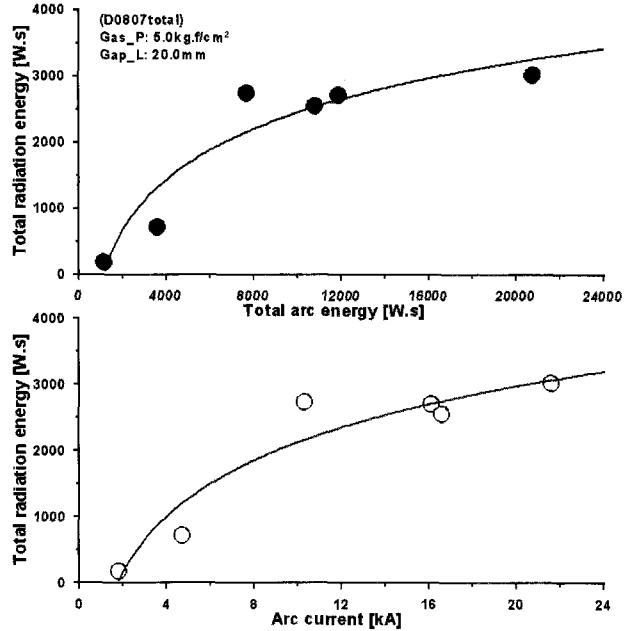


그림 9 전류 및 총 아크에너지에 대한 복사에너지

Fig. 9 Total radiation energy to arc current and total arc energy.

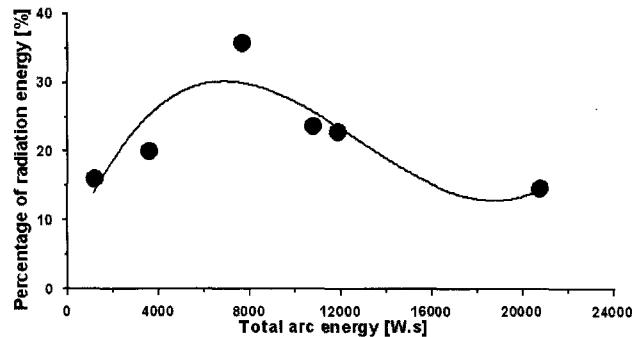


그림 10 총 아크에너지에 대한 복사에너지의 비율

Fig. 10 Percentage of the total radiation energy to the total arc energy.

그림 10에는 총 아크에너지에 대한 복사에너지의 비율을 나타낸 것이다. 일반적으로 전류가 증가하면서 복사에 의한 에너지 손실은 증가한다고 알려져 있다. 하지만, 본 연구에서는 8kA를 기준으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 이제까지 전산해석에서 10kA 이상만 되면 무조건 총 아크 에너지에 대해 복사에너지 손실계수를 40%이상으로 설정한 것에 대해 문제가 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과가 비록 아크접점의 용량이 20kA이하로 제한되어 설계/제작되어서 20kA이상의 전류에서 복사에너지를 측정할 수 없었다고는 하나, 현재까지 알려져 왔던 복사에너지의 손실은 전류의 크기가 증가함에 따라 아크에너지 손실의 대부분을 차

지할 것이라는 예상은 재고되어야 할 것으로 판단된다. 또한 20kA 이하의 SF<sub>6</sub> 아크에서 복사에너지에는 총 아크에너지의 10%이상이지만 40%를 넘지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

광전효과를 이용한 광전증배관을 이용하여 차단기내 아크의 복사에너지를 전류크기에 따라 측정하는 데 성공하였다. 충진 가스압력 5kg.f/cm<sup>2</sup>, 아크길이 20mm 아크의 복사에너지의 크기는 아크 전류에 따라 증가하지만 20kA이상부터는 포화되는 경향을 보이고 있다. 20kA이하의 아크전류에서 총 아크에너지에 대한 복사에너지의 비율은 약 8kA에서 가장 큰 값을 보이고 있으며, 이후 20kA까지 점차 감소한다는 것을 직접 측정하여 확인하였다. 또한 20kA이하의 아크에서 복사에너지에 의한 아크에너지 손실은 총 아크에너지에 대해 10%이상이며 40%를 넘지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 아크전류가 20kA 이상 증가할 경우 복사에 의한 에너지손실 비율도 증가할 것으로 예상되나, 불행히도 본 연구에서는 아크접점 용량의 한계로 인하여 직접 확인할 수는 없어 추가적인 연구가 요구된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 송기동, “차단부내 유동가시화 및 아크거동의 관측”, 전력용 개폐장치 연구회 제2차 논문집, pp1~9, 2000.
- [2] 정진교, 김홍규 외, “small-gap을 이용한 가스차단기에서의 열가스 속도 측정에 관한 연구”, 대한전기학회 Trans. KIEE. vol.55B, No. 3, pp155~158, 2006.
- [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] T. Matsumura, Y. Yokomizu et al., “Total radiation power of 20kA-class SF<sub>6</sub> Gas-Blast Arcs”, Trans. IEE of Japan, Vol. 114-A, No. 9, pp585 ~ 590, 1994.
- [5] 송기동, 오연호 외, “고압 대전류 아크의 복사강도 측정”, 대한전기학회 논문지 Vol 55B, No. 11, pp555~563, 2006.
- [6] LUMATEC, A technological break through in light transmission, liquid light guides Catalog.
- [7] 이우영, 박경엽, 송기동 외, 간이차단성능 평가기술 및 시스템 개발, 1997-EL02-E-41, 산업자원부, 2000.

## 저 자 소 개



### 송 기 동 (宋基東)

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

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



### 오 연 호 (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 (鄭鎮教)

1967년 생. 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 16일 생. 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