

분광법을 이용한 아크 플라즈마의 온도 및 성분 측정

정 영 우, 이 상엽, 박 홍태, 오 일 성  
LG산전 전력연구소

Measurement of a temperature and components of arc plasma with a spectroscopic method

Jeong Young-Woo, Lee Sang-Youb, Park Hong-Tae, Oh Il-Sung  
LG Industrial Systems, Electrotechnology R&D Center

**Abstract** - This paper describes an experiment of detecting a temperature and components of arc plasma of electrical circuit breaker with a spectroscopic system. The system includes an optical fiber, a monochromator which has three gratings from low to high resolution and ICCD of which time resolution is 50 ns. This system enables measuring a temperature and components of arc plasma of a circuit breaker which is generated and extinguished in a few ms. We use a Planck's law and Boltzmann Plot method for calculating a temperature of arc plasma. In this study, Arc plasma of Ag and Cu contact was investigated and these represent the contact of low voltage and extra-ultra high voltage circuit breaker, respectively. 8 kA<sub>rms</sub> test current was applied with a capacitor bank.

1. 서 론

전력용 차단기의 차단 동작 시 발생하는 아크 플라즈마는 차단기 성능을 결정짓는 중요한 요소이며, 이 아크 플라즈마의 소호과정을 이해하고 개선하기 위해서는 온도, 성분, 크기 등의 특성을 측정하는 것이 필요하다. 차단기 성능의 주요 인자는 아크 전압 상승에 따른 한류 효과와 전류 영점에서 절연 회복이다. 이를 위해서 저압 차단기에서는 아크 플라즈마 발생시 열분해를 통해 소호 가스를 다량 발생시키는 소호재료를 아크 주변에 두고 있다. 아크의 직경을 축소시키는 pinch 효과를 이용하며, 이때 열평형이 붕괴되고 이온에서 원자로 재결합되는 냉각이 일어나는데 이것에 의해서 절연을 회복하게 된다. pinch 효과에 의해서 아크를 압축했을 때 아크 저항이 늘어나고 아크 전압이 상승하게 된다. 아크의 중심부는 온도가 높아지고 아크 외각부위는 온도가 낮아진다. 따라서 아크의 온도를 측정하는 것은 소호재료의 효과를 평가하는데 중요한 지표가 되며, 성분을 측정할 때, 냉각효과를 위한 수소 등의 소호가스의 발생경도와 전류 영점에서 차단실패를 초래할 수 있는 금속증기의 존재를 평가할 수 있다.

차단기 아크 플라즈마의 온도는 수천~수만 K에 이르고 그 현상이 수 ms동안만 지속되므로 온도와 성분을 계측하기 위해서는 고속의 분광 시스템이 요구된다.

본 연구에서는 Cu 및 Ag 접점에서 발생하는 아크의 빛을 분광하여 Planck의 법칙과 Boltzmann Plot 법을 이용하여 아크 온도를 측정하였고, 아크 성분을 측정하였다. 스펙트럼의 여러 파장 피크를 적용하여 온도를 측정할 때 상관계수 R값을 계산하여, 데이터의 연관성을 평가하였고, Xenon 램프로 전 시스템의 파장별 응답 특성을 교정하여 온도 측정에 정확성을 기하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치

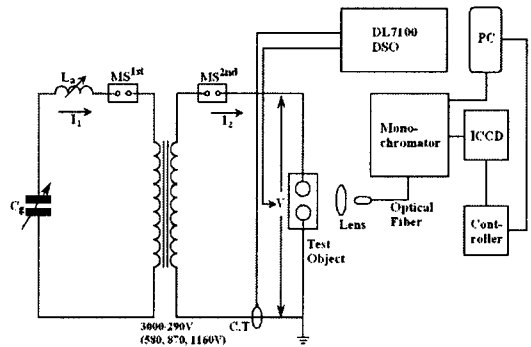


그림 1 차단기 아크 플라즈마의 분광측정 회로도

그림 1.은 모델 차단기 접점 아크 플라즈마의 전기적 및 분광적 측정을 위한 회로도이다. 실험 전류는 LC공진 회로와 단락시험용 변압기를 이용하였으며 220[V], 8[kA<sub>rms</sub>]를 인가하였다.

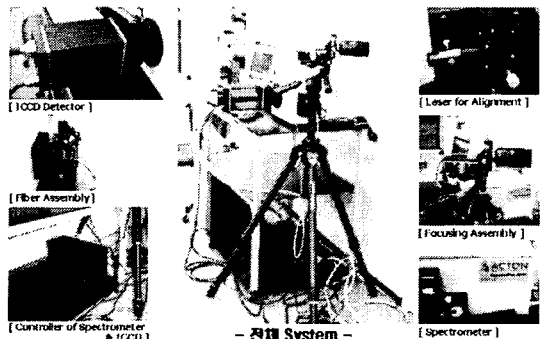


그림 2 분광 시스템 사진

분광 시스템은 동시에 아크의 여러 지점을 측정할 수 있도록 15개의 광섬유가 묶인 번들을 사용하였으며, 70~300mm 망원 줌렌즈에 의해 아크 발생위치에 초점을 맞추도록 하였다. 분광기(SP-308, Acton)는 1200groove/mm, 150groove/mm, 100groove/mm 세 개의 반사 회절발을 가지고 있으며, 레이저를 이용해 분광 측정 전에 아크 발생 위치에 초점을 맞춘다. 분광된 빛은 512×512 pixel의 ICCD(PI-Max 512 RB, Princeton Inc.)를 통해 수광되어 디지털 데이터 형태로 PC에 전송된다.

## 2.2 아크 플라즈마의 온도 계산

차단 아크 플라즈마의 온도는 국소 열역학적 평형 (Local Thermodynamic Equilibrium:LTE)이 성립한다는 가정하에 계산하며, 이러한 가정은 여러 참고 문헌에서도 적용하여 타당한 결과를 얻고 있다.[1,2] LTE라는 가정하에서 파장  $\lambda$ 에서의 스펙트럼 강도  $I$ 는 온도  $T$ 의 함수가 된다.

$$I = N_0 \frac{hc g_n A_{nm}}{U(T)\lambda} \exp(-E/kT) \quad (1)$$

여기서,  $I$  : spectral intensity,  $N_0$  : metal-vapor density in the fundamental condition,  $h$  : Planck's constant,  $c$  : velocity of light,  $g_n$  : statistical weight in the upper level  $n$ ,  $A_{nm}$  : probability of transition from the upper level  $n$  to the lower level  $m$ ,  $U(T)$  : partition function,  $\lambda$  : wavelength of the spectrum,  $E$  : exciting energy,  $k$  : Boltzmann's constant ( $=8.61 \times 10^{-5}$  eV/K),  $T$  : arc temperature 이며, 식(1)은 자연로그로 바뀌어져 다시 쓰여질 수 있다.

$$\log \frac{I\lambda}{g_n A_{nm}} = -\frac{0.434E}{kT} + \log \frac{N_0 hc}{U(T)} \quad (2)$$

식(2)에서 동일 원자로부터 방출된 스펙트럼의  $N_0$ 와  $U(T)$ 가 고정되어 있으므로 2가지 이상의 스펙트럼 강도로부터 온도를 계산할 수 있다. 이때 파장 피크의 선택시 요구되는 사항은 스펙트럼 강도가 클 것, 다른 파장 피크와 구분될 것, Exciting energy의 차이가 클 것 등이다.

## 2.3 Cu 접점 아크 플라즈마의 온도 측정

본 연구에서는 Cu에 대해서는 3가지 파장의 스펙트럼의 강도를 이용하여 식(2)를 선형 회귀하여 온도를 구하였으며, 상관관계(correlation coefficient)  $R$ 값을 계산하여 데이터의 일관성을 추정하였다.  $R=1$ 일 때는 두 변수가 완전한 상관관계에 있으며,  $0.9$  이하이면 낮은 상관관계를 가진다고 볼 수 있다. 일반적으로  $0.9 \leq R \leq 0.95$ :보통,  $0.95 \leq R \leq 0.99$ :양호,  $0.99 \leq R$ :높은 직선성으로 간주된다. Cu의 특성 피크중에서 높은 상관관계를 갖는 파장 3가지를 선정하여 온도를 계산하였다. 해당 파장에 대한 값들을 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 atomic spectra database에서 인용하여 표 1.에 나타내었다.

표 1 Cu 아크 온도계산에 사용한 파장의 데이터

Spectrums [nm]	$g_n$	$A_{nm} [10^8 s^{-1}]$	$E$ [eV]
Cu 406.3	6	$2.10 \times 10^{-1}$	6.868108
Cu 427.5	8	$3.45 \times 10^{-1}$	7.737547
Cu 515.3	4	$6.00 \times 10^{-1}$	6.191593

전류 8 [kArms]를 인가하고 차단 후 첫째 반파의 접두에서 아크의 빛을 측정하여 분광하였고, 광섬유 간격이 아크 플라즈마 직경에 비하여 넓어서 아크 플라즈마 중심 부근의 온도가 높은 한 점의 온도를 측정하였다. 이 때 광학 필터를 사용하지 않았고 회절발은 150 groove/mm를 사용하였으며, 중심 파장은 500 nm, ICCD의 노출 시간은 50 $\mu$ s로 실험하였다.

표 2 Cu 접점 아크 플라즈마의 온도 및 상관관계

	온도 [K]	R
1	13,500	0.99
2	16,100	0.99
3	18,600	0.99
4	17,400	0.94
5	14,000	0.97
6	17,800	0.99
7	16,900	0.91
8	19,100	0.92
9	17,500	0.84
10	15,600	0.99
평균	16,650	0.95

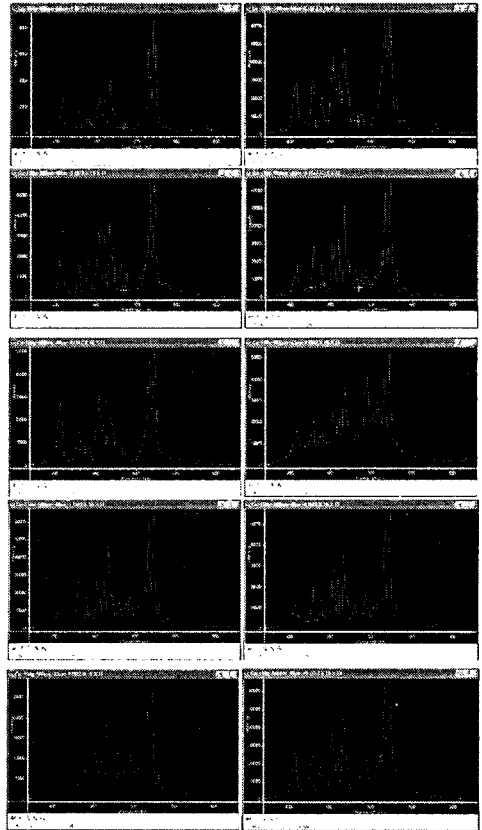


그림 3 Cu 접점 아크 플라즈마에 대한 스펙트럼

## 2.4 Ag 접점 아크의 온도 측정

Ag의 경우 아크의 특성 파장 피크의 개수가 Cu에 비해 적어서 다수의 파장을 선택하여 선형회귀를 하는데 어려움이 있어, 비교적 다른 파장과 섞이지 않은 두 파장 546.5, 768.7 nm를 사용하여 온도를 측정하였고, 정확한 측정을 위하여 Xenon Lamp로 교정을 한 후 온도를 측정하였다. 본 연구에 적용된 분광 시스템의 경우, 광학렌즈, 광섬유, ICCD의 파장별 투과 및 감응 특성이 조금씩 다를 수 있으므로, Xenon lamp 교정이 중요하다. 예로 교정하지 않은 데이터에서 산출된 온도 값은 -28,800K이나, 교정 후의 온도 계산 결과는 9,111K였다.

Ag 접점 아크의 경우는 기존 MCCB의 접점이 Ag이므로 MCCB의 측면을 제거하고, 그리드 및 소호실을 뺀 후 순수한 아크의 온도만을 측정하였다. Cu 접점은 전류 침두에서만 온도를 측정하였으나, Ag 접점

의 경우 아크 발생 첫 번째 반파의 전류 침점, 전류 침두 앞, 전류 영점 부근에서 온도를 측정하였다.

표 3 Ag 아크 온도계산에 사용한 파장의 데이터

Spectrums [nm]	$g_n$	$A_{nm} [10^8 s^{-1}]$	E [eV]
Ag 546.5	6	$7.879 \times 10^{-1}$	3.778389
Ag 768.7	2	$1.771 \times 10^{-1}$	3.664234

전류 8 [kA<sub>rms</sub>]를 인가하고 차단 후 첫째 반파의 침두와 침두 앞, 전류 영점 부근에서 아크의 빛을 측정하여 분광하였고, 아크 플라즈마 중심 부근의 한 점에 대한 온도를 측정하였다. 이 때 다른 피크의 영향을 줄이기 위하여 480 nm 이상의 빛을 투과시키는 Y48(Nikon) 광학 필터를 사용하였고 회절발은 150 groove/mm를 사용하였으며, 중심 파장은 670 nm, ICCD의 노출 시간은 25 $\mu$ s로 실험하였다.

표 4 Ag 접점 아크 플라즈마의 온도 [K]

	전류 침두	전류 침두 앞	전류영점부근
1	8,671	(22,232)	5,655
2	9,248	(17,627)	5,796
3	9,111	6,290	5,732
4	10,055	6,369	5,931
5	8,985	(15,357)	5,774
평균	9,214	-	5,778

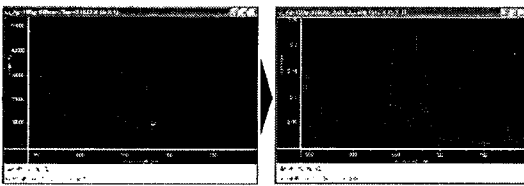


그림 4 Ag 접점 아크 플라즈마에 대한 스펙트럼

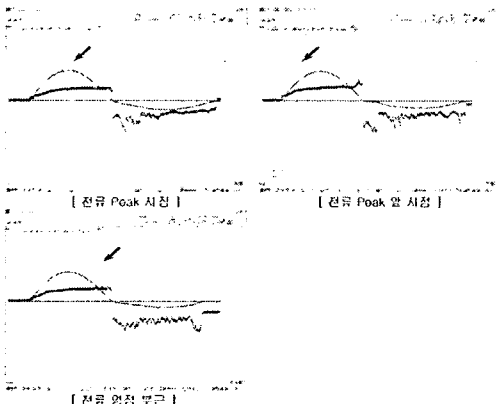


그림 5 Oscilloscope 측정 데이터

### 2.5 아크 플라즈마 성분 측정

그림 6의 스펙트럼에서 656.3nm 피크는 수소에서 발생하는 스펙트럼이며, 546.5, 768.7 nm는 Ag의 피크이다. 원소별로 바닥상태와 여기 상태 사이에 해당하는 에너지의 파장을 빛으로 방출하므로 파장의 피크 데이터로 원소를 구분할 수 있으며 NIST database를 활용하여 98가지 원소와 33가지 분자를 측정할 수 있

고, 이러한 과정은 측정된 스펙트럼 데이터를 PC에서 S/W적으로 처리하여 측정한다.

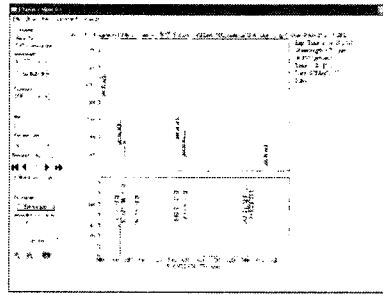


그림 6 성분 계측 S/W 화면

### 3. 결 론

본 연구에서는 차단기 접점에서 발생하는 아크 플라즈마의 온도 및 성분을 계측하기 위하여 광학렌즈, 광섬유, 분광기, 초고속 ICCD카메라, 제어기, PC로 이루어진 계측 시스템을 구성하고 저압 및 초고압 차단기의 주 접점 재료인 Ag 및 Cu에 대한 아크 플라즈마의 온도를 Planck의 법칙과 Boltzmann Plot 방법을 사용하여 측정하였다. 또한 주변 소호 재질에서 분리되는 원소를 측정하였다.

차단기 연구시 접점, 소호재질, 구동 메카니즘 특성 등의 변수에 대한 아크 플라즈마의 특성을 계측하여, 최적의 설계를 수행할 수 있는 평가 근거를 마련하였다.

향후 연구에서는 광섬유 계측 지점의 간격을 좁혀서 아크 플라즈마 반경 방향의 온도 분포를 측정하고, 전류 영점 직전에서의 금속증기의 함유 정도를 측정하여, 성능 평가를 더 명확히 하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Mitsuru Takeuchi et al, "A Spectroscopic Detecting System for Measuring the Temperature Distribution of Silver Breaking Arc Using a CCD Color Camera", IEEE Tran. on Instrumentation and Measurement, vol. 48, No. 3, pp. 678-683, 1999
- [2] P. G. Slade et al, "Spectroscopic analysis of high-current free-burning ac arcs between copper contacts in argon and air", J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 1, 157-162, 1973
- [3] G. R. Jones et al, "A Spectroscopic investigation of electrode material entrained into the extinguishing arc of an SF6 circuit breaker", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, 1414-1420, 1988