

레이저에 의한 모의 진공차단기 내 구리입자들의 거동 예측

최준영, 전용우, 하장호, 김정배, 박원주, 이광식
 영남대학교 전기공학과, 삼척대학교 제어계측공학과, 호성(주) 중공업연구소

Measurement of behaviour of Cu particles in simulated VCB using laser

Joon-Yeong Choe, Yong-Woo Chun, Jang-Ho Ha, Jung-Bae Kim, Won-Zoo Park
 Dept. of Electrical Engineering & Computer Science, Yeungnam University
 Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Samchok National University
 Hyosung Corporation

Abstract - 본 논문에서는, 모의 진공차단기 내에서의 구리 증기입자의 공간적 및 시간적 밀도분포를 레이저유기형광법(LIF)에 의해 예측하였다. 레이저 트리거 방전에 의해 생성된 어블레이션(ablation) 플라즈마에서의 구리입자를 324.75nm의 Nd:YAG 레이저를 이용하여 여기시키고, 이때 여기준위에서 기저준위로 천이할 때의 형광신호(510.55nm)를 분광기 및 광전자증배관을 이용하여 예측하였다.

음극으로부터 넓은 각도를 가지고 전자가 튀어나오며, 넓은 범위에 걸쳐 전자나 이온이 존재하는 것을 알 수 있었다. 또한 음극으로부터 8mm (x=0, y=8mm) 진 위치에서 가장 강한 신호와, 2mm (x=0, y=2mm) 가장 약한 신호를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

전기에너지는 순시의 전송이 가능하며 고도의 가제어성을 가지고 있으므로 인간의 생활면 및 산업활동에 있어서 불가결한 자원이며, 여러 에너지 중 전기에너지의 수요는 급후 더욱 더 증대할 것으로 생각된다. 따라서, 전기에너지를 안정적으로, 동시에 고효율적으로 공급하는 것은 매우 중요한 과제이다.

한편, 정보화의 진전, 산업의 고도화, 도시의 근대화, 생활환경의 다양화에 따른 순시의 정전조차 허용되지 않는 안정적인 전력공급에 대한 신뢰성이 더욱 더 중요하다. 이러한 배경으로부터, 차단기에 대해서도 보호성능의 향상, 신뢰성의 향상이 요구되고 있다.

그 중에서, 진공차단기¹⁾는, 차단부에 진공밸브를 사용하고 있는 것으로 높은 절연내력을 가지며, 진공에 의한 강력한 확산작용에 의한 우수한 소화능력을 가지고 있으며, 현재 6kV에서 30kV까지의 배전계통에서 사용되고 있다. 또한, 그 성능의 향상에 의해, 최근에는 60kV에서 70kV까지의 계통에 있어서도 많이 사용되기 시작했다. 60kV에서 70kV까지의 계통에서는, 송전선에 직접 차단기 접속되어 있기 때문에, 낙뢰의 영향을 받는 일이 적지 않다. 이 때문에, 진공밸브내의 접촉자라고 불리는 전극간에, 전극의 개폐에 의해 전극표면의 상태가 변화하고, 절연파괴가 일어난다. 따라서, 차단기에 진공중의 전극표면으로부터 비산한 금속입자가 재발호를 일으켜, 절연성능의 저하를 가져온다. 이러한 절연파괴현상에 대해서 논의하기 위해서는, 금속입자의 거동을 파악하는 것이 극히 중요하다.²⁾⁻⁶⁾

이에 본 논문에서는 진공차단기를 모의하여 제작한 진공밸브내의 접촉자 사이에서 일어나는 현상을 파악하기 위해 레이저유기형광법(Laser Induced Fluorescence, LIF)을 이용하여 시간적 및 공간적인 밀도분포를 예측함으로써 진공차단기 내에서의 입자들의 거동을 파악하고자 한다.

2. 본 론

2.1 레이저유기형광법(LIF)

파장가변레이저 기술의 발전과 함께, 그 특성을 살린 여러 가지 레이저 응용계측법도 발전의 길을 걷고 있다. 레이저광의 파장을 바꾸어, 광흡수의 크기를 관측하는 것을 흡수스펙트럼법이라고 한다. 하지만, 흡수스펙트럼은 강한 입사광의 흡수에 의한 강도변화가 일어나기 때문에 정밀한 관측은 곤란하다. 이에 반해, 원자·분자의 광여기에 수반하여 일어나는 방사천이에 의한 강도를 관측하여 얻는 스펙트럼이 유기형광 스펙트럼이다. 그리고, 유기형광 스펙트럼을 관측하여 원자·분자의 기저상태로의 분포를 아는 방법이 레이저유기형광법이다. 레이저유기형광법은 극히 고감도이며, 공간, 시간적 분해능이 우수하기 때문에 그 응용범위가 매우 넓고, 현재, 각종 플라즈마 프로세스의 최적화를 도모하기 위한 분광법으로서 널리 이용되고 있다. 게다가 레이저입사에 의한 영향을 형광으로서 관측하기 때문에, 다른 전기적인 검출법과 달리 주위의 여러 가지 전기적인 노이즈에 영향을 덜 받는다.

2.1.1 LIF의 원리

레이저 유기형광법은, 원자·분자의 흡수스펙트럼에 공명하는 파장의 레이저광으로 상부준위로 여기시켜, 그 후 하부준위로 천이할 때에 방출되는 형광을 관측하여 그 형광 스펙트럼 정보에 의해 밀도 등을 측정하는 방법이다.

그림 1에 레이저 유기형광법의 개념도를 나타내었다.

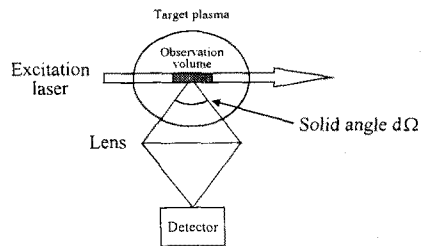


그림 1. 레이저유기형광법의 개념도

2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 첫째, 동(銅)증기입자를 여기시키기 위한 파장의 레이저광을 생성하기 위한 레이저여기부, 둘째, 아르 플라즈마 생성을 위한 방전회로부, 셋째, LIF 신호를 관측하기 위한 형광관측부이다. 그림 2은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다.

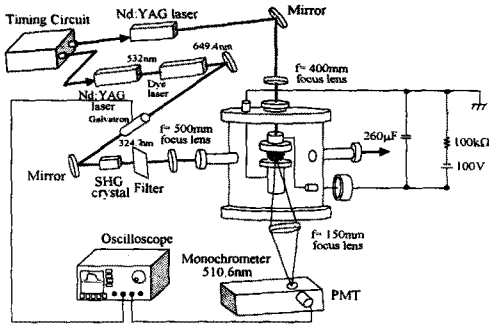


그림 2. 실험장치

2.2.1 레이저 여기부

Nd:YAG 레이저(Spectra-Physics사 : GCR-11)의 기본파(1064nm)를 KDP 결정을 통과하여 제 2고조파(532nm)로 변화시키고, 이것을 가변파장 색소레이저(Spectra-Physics사 : PDL-3)의 여기원으로 하였다. 색소레이저는, 색소레이저용 매질(rhodamine)을 이용함으로써 603nm~670nm 파장의 레이저발진이 가능하다. 이 색소레이저의 발진을 650nm에 맞추어, 이 레이저광을 SHG결정, 필터에 통과시킴으로써 동의 흡수파장인 324.75nm과 같은 파장을 얻는다. 이것을, 초점거리 500mm인 렌즈를 이용하여 진공챔버 내의 관측부로 입사시키고, 그 반사방향에서 입사레이저광의 파장확인을 hollow cathode lamp를 이용하여 행하였다.

동원자를 여기시켜 LIF 신호를 얻기 위해서는, 동의 흡수파장(324.75nm)에 여기레이저의 파장을 공명시켜야 한다. 본 실험에서는, 파장의 공명을 위해, hollow cathode lamp(봉입가스 : Ne, 음극 : 동)에 의한 optogalvano 분광법을 이용하였다. 아래에 그 원리에 대해서 간단히 설명한다.

저압기체의 직류방전 등에 의해 생성되는 정상(定常) 플라즈마 내에서는, 입자간의 충돌, 복사, 확산 등의 다양한 원자과정을 통하여 일정한 평형상태가 유지되고 있다. 이에 따라, 플라즈마 중의 하전입자(전자, 이온)수 밀도, 및 원자, 분자, 이온의 각 양자준위의 점유밀도는 정상상태가 되어 있다. 원자, 분자 혹은 이온 중 하나의 광학천이에 공명하는 레이저가 플라즈마에 조사되면, 레이저광의 일부가 흡수되어, 이 공명천이의 상하준위밀도가 변화한다. 이 두 준위의 밀도변화는 충돌, 복사 등의 입자간 상호작용에 의해 타준위의 점유밀도변화를 유기함과 동시에, 이온화, 재결합 과정 등에도 변화를 준다. 그 결과, 플라즈마의 임피던스변화(음도감마노 효과 : OG효과)가 생긴다. 이것이 방전회로의 저항간의 전압변화로써 오실로스코프로 관측된다.

2.2.2 방전회로부

진공챔버 내의 전극간에 아크 플라즈마를 생성하기 위한 방전회로를 그림 3에 나타내었다. 챔버의 위쪽으로부터 Nd:YAG레이저를 집점거리 400mm인 렌즈를 이용하여 집광시키고, 상부전극에 마련해 둔 투과구멍(3mm)을 통과하여, 하부전극 표면에 집중시킨다. 사용하는 레이저는 수ns 펄스폭인 단일 자이언트 펄스레이저광이며, 조사시간이 짧기 때문에, 금속표면만이 가열되어 증발하고, 게다가 그 증기는 레이저광 에너지를 흡수하여 플라즈마가 되며, 충격파를 수반하여 폭발적으로 팽창한다. 이것을 어블레이션이라고 한다. 이 플라즈마가 전극간을 채움으로써, 갭간을 절연파괴하고, 이것을 트리거로 하여 주방전을 유기시켰다. 또 인가전압은 100V, 챔버내의 기압은 평균 1.0×10^{-5} torr로 하였다.

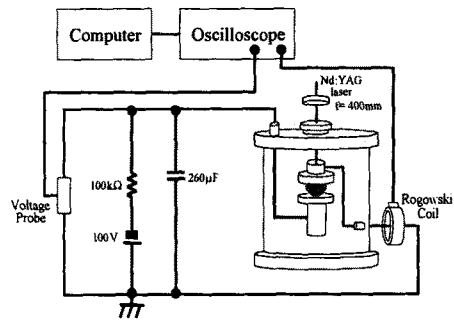


그림 3. 방전회로도

2.2.3 형광관측부

입사레이저 광에 의한 형광의 강도는, 여기레이저광과 90도의 방향으로부터 초점거리 150mm인 석영렌즈를 이용하여 분광기(JOBIN YVON, H.10-D-UV)로 집광시켜, 광전자증배관(Photronics, R1464)에 의해 증폭·검출하며, 최종적으로는 오실로스코프로 측정한다.

본 실험에서는 미광이나 먼 산란의 영향이 없는 3준위계의 계측시스템을 이용하였다.

그림 4에 피측정입자인 동원자의 간략화된 에너지 준위도를 나타내었다. 분광기의 다이얼은, 여기파장과 다른 파장의 형광(510.554nm : $4p^2P_{3/2} - m^2D_{5/2}$)을 관측하도록 설정한다. 510.554nm에서 관측된 형광의 강도는 관측제척 내에 존재하는 기저상태($4s^2S_{1/2}$)의 원자들의 수에 비례한다.

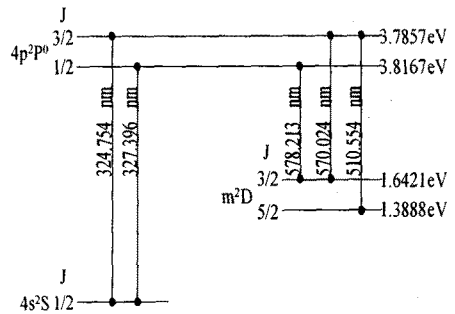


그림 4. 동원자의 에너지 준위도

3. 실험결과 및 검토

그림 5는 LIF법에 의한 양극과 음극 사이에서의 관측 위치를 개략적으로 나타내고 있다.

모의 진공차단기 내에서의 구리증기입자들의 밀도를 레이저유기형광법을 이용하여 계측하였다. 각 실험에 있어서의 공통된 조건은 다음과 같다. 리액터의 진공도는 1×10^{-5} torr, 동증기입자의 여기파장은 324.75nm, 모노크로메타의 형광파장은 510.55nm, 모노크로메타의 입사슬릿은 0.6mm, 광전자증배관(Photomultiplier, PMT)의 인가전압은 -1500V이며, 각 실험은 5회 측정된 신호를 평균하였다.

아크발생 후 80μs까지는 LIF신호가 관측되지 않았다. 이는 아크에 의한 강한 발광신호에 비해 상대적으로 약한 LIF신호가 그 속에 섞여 버린 것이라고 생각된다.

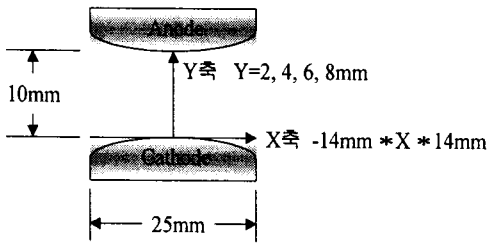


그림 5. LIF법에 의한 관측 위치

아래에 각 실험결과에 대해서 기술한다.

전류영점 후 $90\mu\text{s}$ 부터 $140\mu\text{s}$ 까지의 신호를 취하여 관측위치를 음극점(cathode spot)을 기준으로 X축 방향(양 횡축으로 12mm씩)으로 넓혀 LIF신호를 관측한 결과를 그림 6~11에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 중심축상에 가까운 쪽이 밀도가 높고, 또 시간과 함께 감쇠하는 것을 나타내고 있다. 그림 6~11에서와 같이 음극점 상($X=0$)에서의 신호가 가장 강하게 나타나고 있으며, $Y=2, 6, 8\text{mm}$ 에서는 비교적 대칭적인 밀도분포를 얻을 수 있었으나 4mm 에서는 다소 비대칭적인 분포가 나왔다. 이는 음극점으로부터 튀어나온 전자가 다른 입자들과의 충돌, 전계에 의한 가속, 재결합, 이온화에 의한 음극측으로의 당겨짐 등 상하로 이동하는 입자들의 무질서한 거동으로 인해 비대칭적으로 넓게 분포하고 있다고 생각된다.

음극점으로부터 튀어나오는 전자는 전부가 양극을 향해 수직으로 나아가고 있는 것 뿐만 아니라, 횡축으로도 속도성분을 가지는 전자들이 존재하므로, 전자의 튀어나오는 각이 좌우로 조금 열려져 있다. 이 각을 분출각이라고 하며, 그 범위 안에서, 동원자가 주로 전자와의 충돌에 의해 이온화함으로써 전극간에 많이 잔존하므로 삼각뿔과 같은 형태를 취하며 넓게 분포하고 있다.

그림에서 알 수 있듯이, 특히, $90\mu\text{s}, 100\mu\text{s}$ 에 있어서 가장 강한 신호가 나오는 것을 알 수 있다. 이는 음극점으로부터 튀어나오는 전자의 분출각의 영향에 의한 것이라고 생각된다. 아크발생 $120\mu\text{s}$ 후부터는 $Y=2\text{mm}$ 에서의 밀도분포를 거의 볼 수 없음을 알 수 있다. 이는 시간이 지남에 따라 입자들이 주위의 고진공영역으로 급속히 확산되어 갈 때 음극표면 부근부터 진공화된다는 것을 나타낸다.

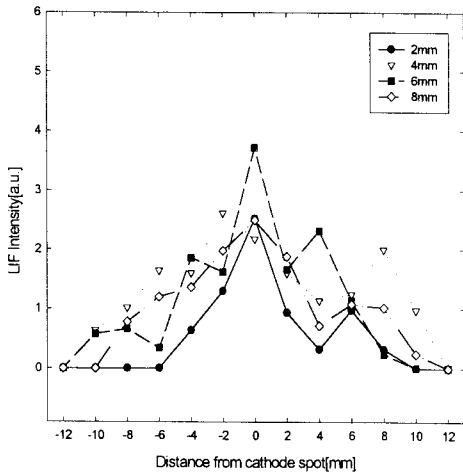


그림 6. 아크발생 $90[\mu\text{s}]$ 이후의 밀도분포

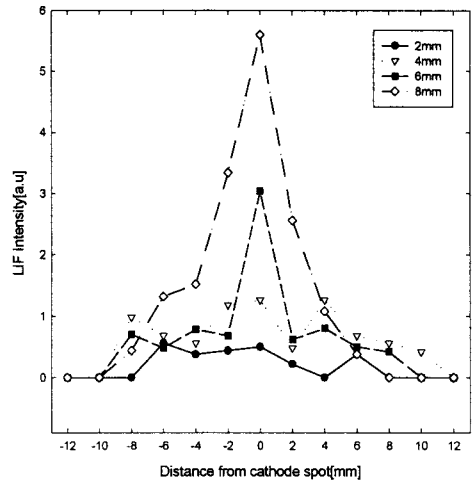


그림 7. 아크발생 $100[\mu\text{s}]$ 이후의 밀도분포

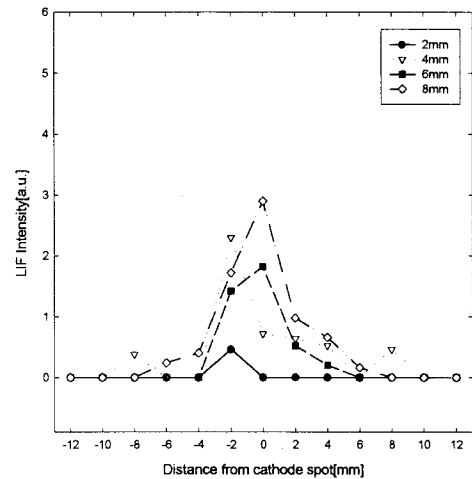


그림 8. 아크발생 $110[\mu\text{s}]$ 이후의 밀도분포

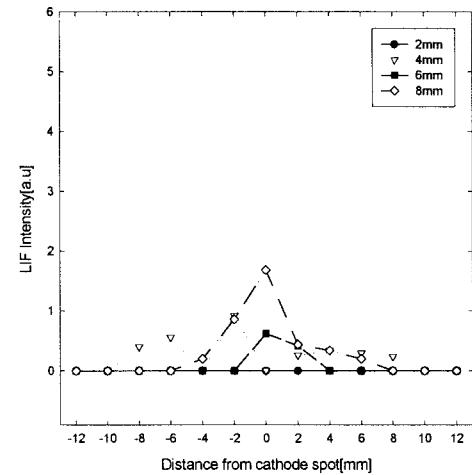


그림 9. 아크발생 $120[\mu\text{s}]$ 이후의 밀도분포

(참고 문헌)

[1] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications", Marcel Dekker, Inc., pp.182~192, 1997
 [2] G. Lins, "Measurement of the Neutral Copper Vapor Density around Current Zero of a 500-A Vacuum Arc Using Laser-Induced Fluorescence", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.PS-13, No.6, pp.577-581, 1985
 [3] B. Gellert, "Measurement of high copper vapor densities by laser-induced fluorescence", J. Phys. D: Appl.Phys., 21, pp.710-717, 1988
 [4] G. Lins *et al.*, "Neutral Copper Vapor Density and Dielectric Recovery after Forced Extinction of Vacuum Arcs", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.17, No.5, pp.676-678, 1999
 [5] K.Koyama *et al.*, "Two-Dimensional Observation of Copper Vapor in Vacuum Arcs by Laser-Induced Fluorescence", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.25, No.4, pp.598-602, 1997
 [6] Yaw Okraku-Yirenyi *et al.*, "Characteristics of post arc conditions and conductance in the gap of a pseudo vacuum circuit breaker under DC discharge", The 9th Acean Conference on Electrical Discharge, A1-9, 1998

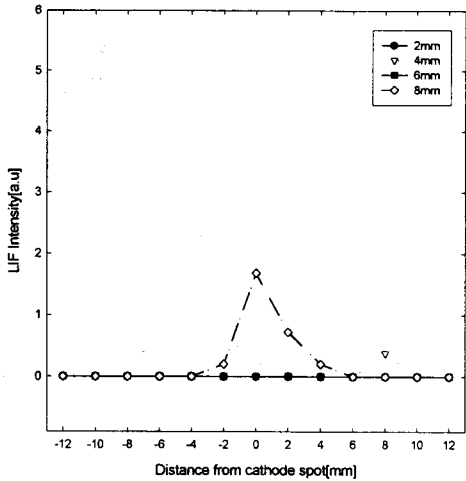


그림 10. 아크발생 130[μ s] 이후의 밀도분포

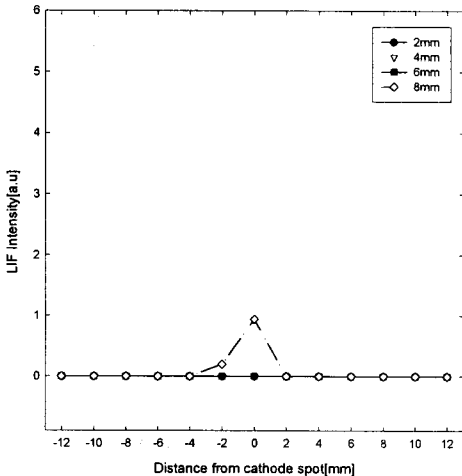


그림 11. 아크발생 140[μ s] 이후의 밀도분포

4. 결 론

본 논문에서는 모의 진공차단기를 구성하여 진공밸브 내에서의 구리증기입자들의 공간적 및 시간적은 밀도분포를 레이저유기형광법을 이용하여 구한 것으로, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 아크발생 후, 특히, 90 μ s, 100 μ s에 있어서 가장 강한 신호가 나오는 것을 알 수 있었다.
- (2) 아크발생 후 시간이 지남에 따라 입자들이 주위의 고진공영역으로 급속히 확산되어 갈 때 음극표면 부근부터 진공화된다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 음극으로부터 8mm(x=0mm, y=8mm) 떨어진 위치에서 가장 강한 신호를 얻을 수 있었다. 이는 이 위치에서 구리입자들의 밀도분포가 가장 높다는 것을 나타낸다.
- (4) 음극으로부터 2mm(x=0mm, y=2mm) 떨어진 위치에서 가장 약한 신호를 얻을 수 있었다. 이는 이 위치에서 구리입자들의 밀도분포가 가장 낮다는 것을 나타낸다.