

접점 개방시 아크 형성과 외부자계에 의한 효과적인 아크 소호

조현길*, 이은웅**, 김준호*, 이희수**
 LG산전*, 충남대**

Forming the Arc at Opening contacts and Arc Extinction by External Magnetic Force

HYun-Kil Cho*, Eun-Woong Lee**, Jun-Ho Kim*, Hwa-Su Lee**하며
 LGIS*, Chungnam Nat'l. Univ.**

Abstract - This paper compare the Townsend theory with the Molten metal bridge theory of Holm for the arc discharge at opening contacts. And we measured the arc voltage at opening contacts of the 3 types arc extinction unit used in DC magnetic contactor. So, we sure that the molten metal bridge contributes to form the arc. By the experiment of the 3 types arc extinction unit, we know that the magnetic force acting on the arc doesn't effect forming arc but contribut the arc extinction.

1. 서 론

접점의 접촉현상을 이용하는 전자 접촉기나 전자계전기등의 스위칭 장치는 회로 개폐시 발생하는 접점의 소모량에 의하여 전기적 수명이 좌우된다. 그래서, 접점의 개방과 투입시에 발생하는 아크 현상에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다.[1] 접점의 폐로와 개방을 반복하면서 접점의 소모량을 재질별로 비교하는 연구와 통신용 계전기 분야에서 접촉 신뢰성 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 은(Ag) 접점을 사용하는 개폐장치를 DC 부하에 사용할 때 아크가 접점사이에 머무는 시간과 접점 표면 상태, 접점 두께 등에 의하여 접촉저항과 수명에 영향을 준다. 아크에 의한 접점 소모량을 최소화하기 위한 방법으로 아크 자기적 구동 현상을 이용하고 아크 구동력은 아크 소호시간을 단축하는 효과를 가진다. 그러나, 아크 구동력이 아크 소호시간을 단축하는 것은 이론적으로 정확하게 규명되지 않았다. 그러므로 본 논문에서는 Townsend 방전이론과 열전 방출에 의한 아크 발생, 유지, 소호 상호 관계를 분석하고, 아크 구동력이 아크 소호시간에 미치는 영향을 해석적으로 분석하려고 한다.

2. 아크 형성

2.1 Townsend 방전이론

그림1과 같은 평행한 전극사이에 균일한 전계를 인가 하였을 때, 전자의 충돌전리 계수를 α , 양이온의 음극 충돌에 의한 음극 전자 방출계수 γ , 음극에서 자외선 조사등에 의해 방출된 초기 전류밀도를 J_0 , 전극 사이의 거리를 d 라 한다면 전류 밀도는 Townsend 이론 식(1)과 같다.

$$J = J_0 \exp(\alpha x) / [1 - \gamma \exp(\alpha x) - 1] \quad (1)$$

$$\alpha/E = f(E/p), \quad \gamma = g(E/p)$$

여기서 p 는 기체의 압력이다.

Townsend 불꽃조건 식(2)가 만족되어 전류 밀도 J 가 ∞ 로 되면, 극판 사이의 절연파괴가 일어난다.

$$\gamma \{ \exp(\alpha x - 1) \} = 1 \quad (2)$$

그러므로 일정한 전압에서 전극 사이의 거리가 변화하거나 일정한 전극 사이 거리에서 전압이 변화하므로 절연파괴가 일어난다. 식(2) 조건에 α 와 γ 를 대입하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha x = \log\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (3)$$

γ 를 전기장에 의한 정수로 고려하면 기체의 압력 p 와 전계 E 는 식(4)와 같은 관계가 된다.

$$\alpha = A p \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (4)$$

여기서, $E/p = V_s/p x$ 로 치환하여 식(3)에 식(4)를 대입하면 식(5)로 V_s 를 구할 수 있다.

$$V_s = \frac{B p x}{\ln\left(\frac{A p x}{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)}\right)} \quad (5)$$

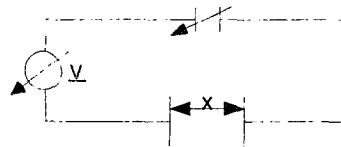


그림 1 전극에 전압을 가하여 방전 전류를 측정하는 장치

2.2 접점사이의 아크 방전

접점을 이용하는 스위칭 소자의 접점 사이에 발생하는 아크는 Holm이 열전자 방출에 의한 것으로 주장하였다. Holm은 접점이 개방되는 순간에 접점 사이에 일어나는 현상을 3가지 단계로 나누었다.[1]

Stage 1. Molten metal bridge 형성.

그림2와 같이 압축 스프링에 의하여 접촉압력을 받는 접촉점의 저항은 식(6)과 같다.

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi h}{F}} \quad (6)$$

여기서 h : 접점의 경도, ρ : 저항율, F : 접촉 압력이다. 접점 개방이 시작되는 순간에 접촉압력 F 는 0으로 감소하며, 접촉 저항 R_c 이 증가하여 접점 사이의 전압 강하 V_c 는 식(7)와 같다.

$$V_c = I R_c \quad (7)$$

접점 (spot) 온도 T_s 는 식(8)과 같다.

$$T_s^2 = T_0^2 + V_c^2 \times 10^4 K \quad (8)$$

여기서, T_0 : 주위 온도

접점이 개방되어 접촉압력이 "0"이 되는 순간에 접점의 접촉점 온도가 접점이 녹는 온도 T_m 에 도달하게 된다. 이와 같이 접점이 용융 상태에서 접점사이가 이어지는 것을 Molten metal bridge라 부른다.

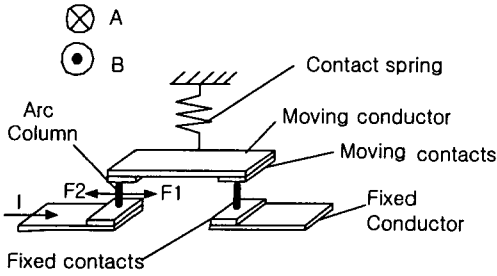


그림 2 점접의 접촉 압력과 아크 방전

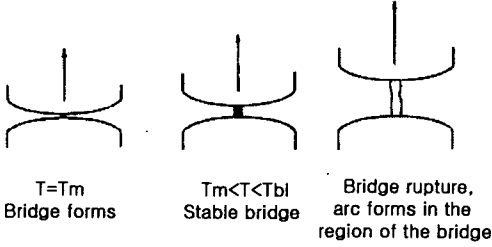


Fig. 3 점접 개방시 아크 발생 메카니즘

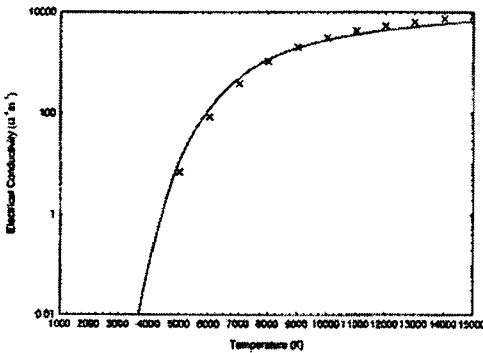


그림 4 아크 가스의 온도에 따른 도전을 변화



그림 5 자기 구동력에 의한 아크 냉각 현상

Stage 2. Molten me bridge 안정.

Stage 3. Molten me bridge가 소멸되고 아크가 형성된다.

점접 사이의 아크는 점접 개방에 의하여 길이가 증가하고, 아크 구동력에 의하여 구동한다. 아크 구동력에 반비례하는 arcing time을 가진다.

2.3 아크 소호

P. Adre와 L. Brunet는 플라즈마 토치 설계 연구에서 온도에 따라 아크의 도전율이 달라짐을 밝혔다. [2] 그림 4와 같이 아크 온도가 4000K 이하가 되면 도전율을 상실하고, 4000K에서 15,000K 사이에서 $0 \sim 10,000 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ 의 도전율을 가진다. [2] 그러므로, 신속한 아크 소호를 위하여 아크 구동력을 증가하게 되면 아크 이동속도가 증가한다. 아크 열은 복사, 대류, 전도에 의하여 주위 가스로 전달된다. 아크 이동 속도가 증가하는 것과 복사와 대

류 열전달과는 상관관계가 적으므로 이를 고려하지 않고 전도 열전달을 생각하면 무차원 열전달 계수 Nusselt수 Nu_m 식(9)를 이용하여 유체 열전도 전달 비로 해석될 수 있다. [3]

$$Nu_m = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{NEcRePr} (1 - e^{-5.33NEc})^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

여기서,

$$Ec = \frac{u^2}{C_p \theta}, \quad Re = \frac{uD}{\mu}, \quad N = \frac{\sigma B_y^2 D}{C_p \theta} \quad \text{이다.}$$

σ : 아크 도전율, μ : 점접계수, D : 아크직경, u : 아크 이동속도, B_y 는 자기 구동력을 갖도록 하는 자속밀도, C_p 는 아크 가스의 비열이다. θ 는 아크 가스 온도와 주위 온도의 차를 나타낸다.

그림 5와 같이 고온 아크는 아크 구동력에 의하여 냉각된 주위 가스로 밀려가고 냉각 가스의 열전도에 의하여 냉각된다.

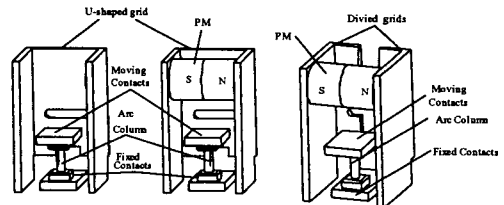
2.4 실험 모델

그림 6에 점접 개방시 나타나는 현상을 관측하기 위한 아크 소호 unit 모델을 나타내었다. 점접의 개방 속도와 아크 소호 공간, 스프링 접촉 압력이 3가지 형태 모두 동일하다. 점접 개방시에 아크 형성에 자속밀도가 미치는 영향을 규명하기 위하여 모델 1은 아크주에 의한 자속밀도만이 아크 전류와 쇄교한다. 모델 2는 영구 자석에 의한 외부자계가 작용한다. 모델 3은 그리드를 분할하여 모델 2보다 자속밀도를 높게하였다. 실험 모델의 외형 크기는 가로, 세로, 높이 각각 18, 18, 32mm이며, 그리드의 두께는 1.2mm이고, 그리드 사이에 분할된 gap은 4.5mm이며, 점접재질은 AgCdo이다. 모델 2와 모델 3에서 아크와 쇄교하는 외부자계 자속밀도 B_y 는 각각 20mT와 60mT이다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험 결과

각 모델의 실험은 전자 점접기의 점접부에 DC 100[A]를 인가하고, 시정수 15[ms]의 부하를 이용하여 시험하였다. 아크 구동력이 증가하면 아크가 소호실에 머무는 시간이 짧게 되므로 아크 소호시간을 측정하여 아크 구동력과 비교하고 부하를 off하는 순간의 점접 사이의 전압 파형을 측정하였다. 그림 7은 인가 전압 100V에서 100:1 프로브를 이용하여 측정한 아크 전압을 나타내었다. 아크 발생시 전압 양단간의 전압은 모델 1, 2, 3은 10~15V사이에 아크 방전이 시작되었고, 0.2 μs 이내에 방전이 시작되었다. 가동 철심의 이동 속도는 1m/s로 이동하는 것으로 가정하면, 점접gap이 0~0.2 μm 에서 아크 방전이 이루어졌다.



(a) 모델 1 (b) 모델 2 (c) 모델 3

그림 6. 실험 모델

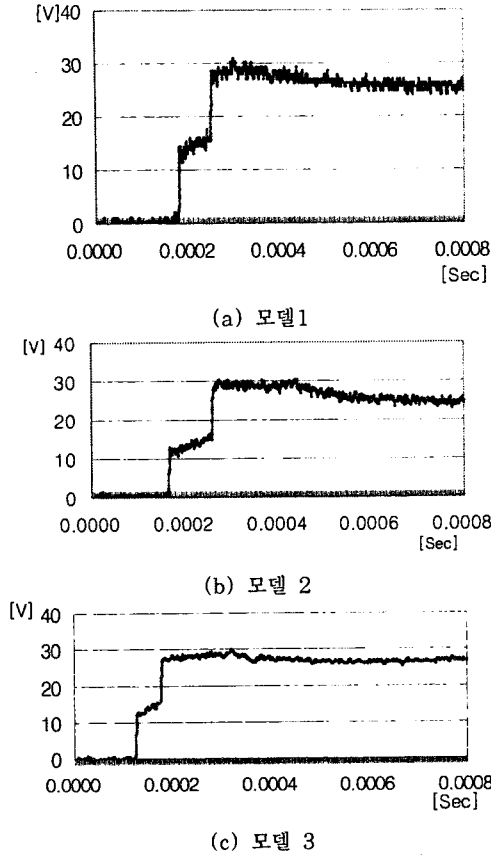


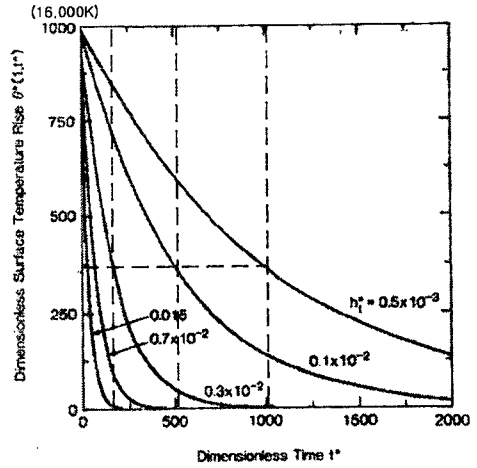
그림 7. 아크 발생 전압 측정 결과

3.2 결과 검토

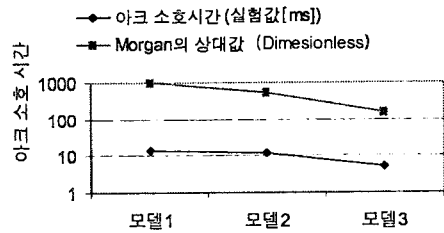
식(5)의 A,B 값을 ENGEL과 STEENBCK은 실험에 의하여 공기에서 14.6과 365로 정의하였다.[6] 그리고, M. KNOLL과 F. OLLENDORFF는 공기에서 γ 를 0.017-0.077사이로 정의하였다.[6] 이들의 실험결과를 0.2 μm 의 점점 gap을 가진 것으로 $V_s \approx 0$ 가 된다.

그리고, 전계에 의한 절연파괴가 일어나려면 존재하여야 하는 전류 불연속점이 존재하지 않았다. 따라서, 전류가 흐르고 있는 2점점이 서로 분리되는 경우에는 TOWNSEND 방전이론과 일치되지 않음을 알 수 있다. 그러나, 그림2에서 가동 점점 양단에 gap을 가지고 있으므로 점점 사이의 전압 $V_c \approx 5-7\text{V}$, 주위 온도 $T_0 = 293\text{K}$ 로하면 접촉점 온도 $T_s \approx 16000\text{K}$ 가 된다. Ag 점점의 녹는 온도 T_m 1234K를 초과하고, 끓는점 $T_b = 2,485\text{K}$ 를 접촉점 온도 T_s 가 초과하여 Molten metal bridge 형성과 아크 형성과정이 논리적으로 성립된다.

식(8)에 의한 접촉점의 온도에서 아크 도전율을 그림4의 최대 도전율 $10,000\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 으로 하고, 점성 계수는 6.7mm/s^2 , 아크 직경을 0.25mm, 아크 가스 비열 47.29kJ/kg 이다.[4][5] 무차원 열전달 계수 Nusselt 수는 2.47×10^7 , 2.32×10^6 , 2.55×10^5 을 모델 1,2,3에 대하여 각각 얻었다. 열전달 계수 $h_m = \text{Nu}_m k$ 로하고, 강제 열전도가 있는 도체의 전류가 변화하여 상대적 온도가 변화하는 것이 일치하는 결과를 얻었다. 그림6(a)는 Morgan에 의하여 구하여진 해와 아크 온도 변화를 나타내고 있다.[3] Morgan의 해와 결과를 비교하기 위하여 k 는 1000으로 하고, 초기 온도 16,000K로 하였다. 그리고, 아크의 도전성을 상실하기 시작하는 6,000K에 대응하는 Morgan



(a) Morgan의 강대 대류 시변 열해석 결과



(b) 아크 소호 시간의 상대해석과 측정결과
그림 8. 강제 대류에 의한 아크 소호 시간 예측

의 결과는 375인 상대온도를 아크 소호시점으로 보았다. 비교결과를 그림8(b)에 나타내었다.

4. 결론

점점을 이용한 스위칭 소자의 아크 형성이론을 Townsend 방전이론과 Molten metal bridge 발전이론을 비교하여 Molten metal bridge로부터 점점 사이에 아크가 발생됨을 실험을 통하여 입증하였다. 그리고, 자기회로 구조가 다른 아크 소호실의 아크 구동력이 아크 소호시간에 미치는 영향을 해석적으로 입증하고 실험결과를 비교하였다. 자기구동력 증대는 아크 냉각속도를 증가시켜 아크 소호 시간이 단축됨을 밝혔다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Holm, Electric Contacts: Theory and Appli Springer, New York, 1967
- [2] P. Andre and L. Brunet, "Theoretical computation of the electrical conductivity of thermal plasmas-application to plasma torch design of an electrothermal launcher", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol.29, No.1, Feb. 2001.Pp
- [3] Vincent T. Morgan : Thermal Behavior of Electrical Conductors, Research studies press Ltd. 1991
- [4] K. Horinuchi, et al., "A Method of Simu Magnetically Driven Arcs", IEEE Transaction on delivery, Vol. 12, No.1, Jan. 1997. pp.213-218
- [5] K. Pechrach, et al., "The Correaltion of magnetic, gas dynamic and thermal effects on arc mobility in low contact velocity circuit breakers", Proc. 48th IEEE Holm Conf. electric contacts, pp. 86-94, 2002
- [6] Paul G. Slade, Electrical Contacts: Principles and Applications, Marcel Dekker, New York, 1999, Pp.489-530