

아크주에 작용하는 자기구동력에 의한 아크 거동의 변화

조현길\*, 이은웅\*\*, 김준호\*, 정종호\*\*, 김일중\*\*\*  
 LS산전\*, 충남대학교\*\*, 일신ENG\*\*\*

The Change in Arc Behavior by magnetic driving force acting on Arc Column

Hyun-Kil Cho\*, Eung-WoongLee\*\*, Jun-Ho Kim\*, Jong-Ho Jeong\*\*, Il-Jung Kim\*\*\*  
 LSIS\*, Chung Nam University\*\*, IL-Shin ENG\*\*\*.

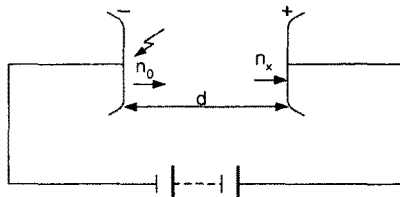
**Abstract** - To investigate a arc behavior when the flux density linking arc current is different, two kinds of models having the different flux density with each other are proposed. Calculations of the flux density and the electromagnetic force acting on arc column using finite element method is described in this paper. And, arc behavior photographs by the high speed camera are illustrated at breaking DC 100V, 100A on the resistance load. So, the arc driving forces are compared with according to the arc types.

1. 서 론

전동기의 시동, 정지 장치로 사용되는 전자접촉기는 부하회로 개폐를 위하여 접점의 접촉과 분리를 핵심으로 하기 때문에 가동접점과 고정 접점을 필수 요소로 한다. 접점 분리시에 접점간에 아크 방전이 발생하고, 이로 인하여 접점이 소모되고 열이 증가하여 시스템의 신뢰성 측면에서 가장 취약하기 때문에 수명의 한계를 갖는다. 그래서, 수명을 연장하는 방법으로 아크소호시간을 단축하는 연구가 진행되었으나[1][2], 타운젠드 방전이론으로 정리되는 접점사이에 발생하는 아크 현상이 아크 구동력이 작용하는 경우에 정확히 알수가 없었다. 따라서, 본 논문은 직류전자접촉기의 접점사이에 아크가 방전이 발생될 때 자속밀도가 다른 2가지 모델을 선정하고, 아크주에 작용하는 자기구동력을 3차원 유한요소법으로 계산한다. 그리고, 직류 전자접촉기가 부하회로를 차단하는 순간에 발생하는 아크를 고속카메라로 관측하여 아크 구동력에 따라 다르게 되는 아크 형상을 비교한다.

2. 본 론

2.1 아크 방전 이론



<그림 1> 전자 방출 구조

그림1과 같이 평판 전극 사이에 직류전압을 인가하고 음극면을 자외선으로 조사할 때 단위 시간당 광전자  $n_0$ 개가 방출하고, 전계에 의해 가속되어 양극을 향하면서 중성분자와 충돌하여 이온화시켜 전자들을 증가시킨다.

$n_0$ 개의 전자가 전계  $E$ 로부터 에너지를 얻어서 전계방향으로 거리  $d$ 를 이동할 때  $a$ 작용으로 양극에 도달한 총전자수  $n_d$ 는 식(1)이고, 평균 전류  $I$ 는 식(2)이다.

$$n_d = n_0 e^{(ad)} \quad (1)$$

$$I = I_0 e^{ad} \quad (2)$$

타운젠드 전리계수  $a$ 는 기체의 종류에 따라 다르고 압력  $p$ 와 전계의 세기  $E$ 에 따라  $E/p$ 로 변하는  $a$  작용의 비자속 방전을 일으킨다.

질량이 큰 양이온은 큰 에너지를 가지고 음극에 충돌하여 전자들을 방출하는  $\gamma$ 작용과  $a$ 작용에 의해 식(3)과 같은 방전 전류가 흐른다[3].

$$I = \frac{I_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (3)$$

식(3)에서 분모가 영(零)보다 크면 전자 방출이 반복됨에 따라 전류는 증가하고, 식(4)가 성립되어 분모가 0이 되면 전류가 무한대가 되어 절연이 파괴되면서 발광하는 타우젠의 불꽃방전이 발생한다.

$$ad = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (4)$$

2.2 자기 구동력

자기 구동력은 전극사이의 절연과피로 흐르는 아크 전류와 자속밀도가 직교하여 아크주에 작용하는 로렌즈 힘으로 식(5)와 같다.

$$F = J \times B \quad (5)$$

여기서,  $J$ 는 아크주의 전류밀도이고,  $B$ 는 자속밀도이다. 영구자석의 자화력  $M$ , 아크 전류에 의한 자계 세기  $H$ 와 투자율  $\mu_0$ 에서 아크소호공간의 자속밀도  $B$ 와 관계는 식(6)로 된다.

$$H = \frac{1}{\mu_0}(B - M) \quad (6)$$

$\nabla \times H = J$ 와 벡터포텐셜  $B = \nabla \times A$ 를 대입한 전자기 방정식은 (7)와 같다.

$$\nabla \times v_0(\nabla \times A - M) - J = 0 \quad (7)$$

여기서,  $v_0 = 1/\mu_0$ 이다.

식(6)의 해를 유한요소법으로 풀어 식(5)의 자기구동력을 계산한다.

2.3 모델의 선정과 해석

교류와 직류 아크 소호를 위한 U자형 철심그리드만으로 구성된 모델1의 그림2(a)는 아크 소호실에서 아크 전류에 의해 발생하는 자속은 자성체인 철심 그리드에 집중하여 흐르고 철심의 개로부를 통과하여 아크전류와 직교한다.

U자형 철심 그리드와 영구자석을 혼합한 모델2의 그림2(b) 아크 소호실에서 아크 전류에 의해 발생한 자속은 U자형 철심 그리드를 통과하여 철심 그리드의 개로된 부분을 지나면서 아크 전류와 쇄교한다. 영구자석에 의한 자속은 U자형 그리드 철심과 아크 전류가 흐르는 기둥을 통하는 자로를 형성한다. 아크 소호부 구성 부품의 사양은 표1, 표2와 같다.

모델1,2의 그리드, 아크주의 자속밀도 분포는 그림3(a), (b)와 같고, 그림2(c)의 "x"선에서 자속밀도 분포 그래프는 그림3(c)이며, 모델1,2의 자속밀도 최대값은 각각 아크 중심으로부터 -1.8mm 떨어진 점에서 0.016[T], 0.029[T]이고, 최소값은 아크 중심으로부터 1.8mm 떨어진 점에서 -0.008[T], 0.006[T]으로 자속밀도의 차이가 나타났다.

"x"선에서 자기구동력 밀도분포는 그림3(d)와 같이 전류가 흐르는 아크주(柱)만 작용하고, 모델1,2의 자기구동력 밀도의 최대값은  $1.4 \times 10^5 [N/m^2]$ ,  $2.83 \times 10^5 [N/m^2]$ 이고, 최소값은  $-8.3 \times 10^4 [N/m^2]$ ,  $6.3 \times 10^4 [N/m^2]$ 이다.

그림3(e)는 자기 구동력 해석 결과로 모델1,2는 0.0018[N], 0.0107[N]이다.

모델1,2의 그리드, 아크주의 자속밀도 분포는 그림3(a), (b)와 같고, 그림2(c)의 "x"선에서 자속밀도 분포 그래프는 그림3(c)이며, 모델1,2의 자속밀도 최대값은 각각 아크 중심으로부터 -1.8mm 떨어진 점에서 0.016[T], 0.029[T]이고, 최소값은 아크 중심으로부터 1.8mm 떨어진 점에서 -0.008[T], 0.006[T]으로 자속밀도의 차이가 나타났다.

"x"선에서 자기구동력 밀도분포는 그림3(d)와 같이 전류가 흐르는 아크주(柱)만 작용하고, 모델1,2의 자기구동력 밀도의 최대값은  $1.4 \times 10^5 [N/m^2]$ ,  $2.83 \times 10^5 [N/m^2]$ 이고, 최소값은  $-8.3 \times 10^4 [N/m^2]$ ,  $6.3 \times 10^4 [N/m^2]$ 이다.

그림3(e)는 자기 구동력 해석 결과로 모델1,2는 0.0018[N], 0.0107[N]이다.

2.4 아크 구동력해석과 아크 거동 실험

DC 100V, 100A 전류를 차단하는 실험장치를 구성하고, 고속카메라로 접점 사이의 아크 거동 관측하기 위하여 아크 소호부에 그림4와 같이 투명 아크 관측창을 14.1mmX3.6mm로 설치하였다.

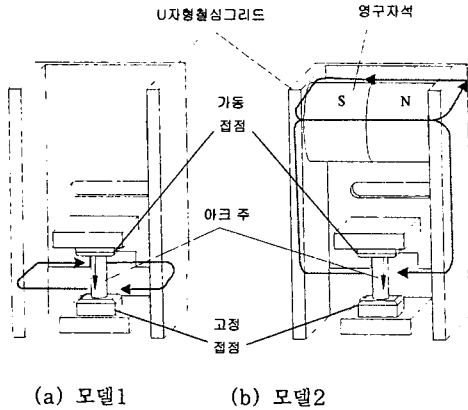
그림4(a)는 고속카메라에 의한 아크 거동 측정실험의 개략도이며, 접점 개방되기 10ms 전에 고속카메라가 촬영을 시작하도록 하였다.

<표 1> 주요부품의 사양

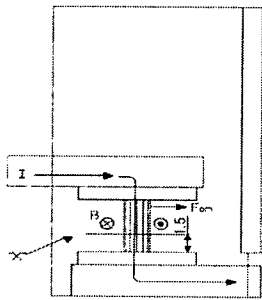
부품명	재질	가로/지름[mm]	세로[mm]	높이[mm]
고정 접점	AgCdO	9.4	9.4	1.5
가동 접점		9.0	9.0	1.5
철심 그리드	Fe	18	18	32
영구자석	Alnico5	10	-	18

**<표 2> 전압 스프링 자원**

재질	초기압력(N)	최종압력(N)	스프링상수(N/m)
STS304	5.9	9.5	$1.6 \times 10^{-3}$

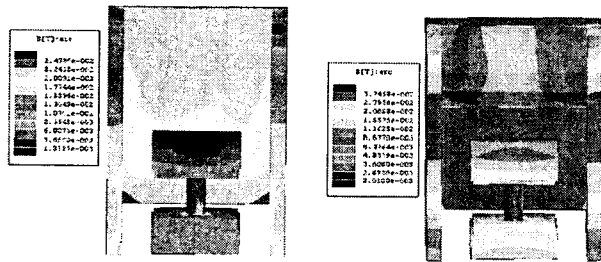


(a) 모델1 (b) 모델2

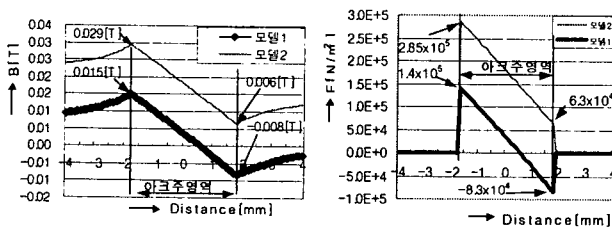


(c) 전류, 자속방향 및 line "x"

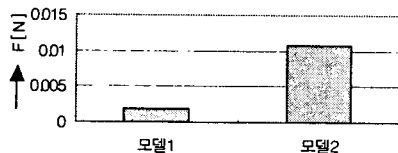
**<그림 2> 해석 모델과 전압, 전류의 방향**



(a) 모델1의 자속밀도 분포 (b) 모델2의 자속밀도 분포

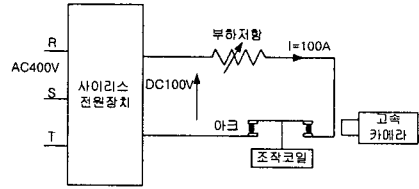


(c) 자속밀도 그래프 (d) 자기구동력밀도 그래프

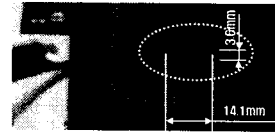


(e) 자기 구동력

**<그림 3> 해석 결과(I=100A)**

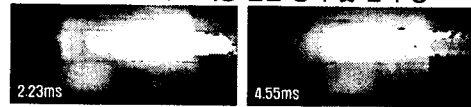


(a) 아크 거동 측정 실험 개략도



(b) 아크 관측 창

**<그림 4> 아크 거동 실험 장치 및 관측 창**

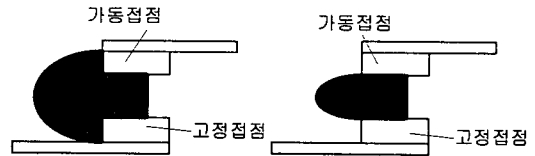


(a) 모델1의 아크 사진(DC100V, 100A)



(b) 모델2의 아크 사진(DC 100V, 100A)

**<그림 5> 각 모델의 아크 사진**



(a) 모델1 (b) 모델2

**<그림 6> 각 모델의 아크 형태분석**

모델1은 67장의 사진이 촬영되어 7.4ms 동안 빛이 발생되었고, 그림 5(a)는 아크방전 시작 후 2.23ms와 4.55ms 후의 아크 사진이다.

아크 이동은 그림4의 F방향으로 이동하고, 접점 사이의 발광체가 분출하며, 접점면을 이탈한 발광체는 팽창하는 형태를 갖고, 접점 거리가 멀어짐에 따라 접점 사이의 발광물질은 증가하고 아크의 후면부는 발광부와 뚜렷한 경계가 생성된다.

모델2의 아크 운동의 시간 변화 사진으로 23개 프레임이 기록되고, 아크 전류가 흐르는 시간은 2.3ms 이다.

초기 접점 개방상태는 작고 얇은 발광체를 형성하고 개리 속도보다 빠르게 F방향으로 이동하였다. 그림5(b)는 모델2에서 아크 시작 후 1.11ms와 1.55ms후의 아크 이동 사진이며, 아크이동 방향과 반대면에 모델1보다 뚜렷한 경계를 형성한다.

모델1,2에서 발생한 아크 형상은 그림 6(a),(b)와 같고, 자속밀도가 낮은 모델1은 접점면을 벗어난 아크 형태가 확산되어 퍼나가는 형상을 갖고, 모델 2는 접점 평면과 수평으로 구동되는 형상을 갖는다.

### 3. 결 론

본 논문은 타운제드 방전이론으로부터 방전 전류의 변화를 수식적으로 나타내고, 아크 방전 발생시 아크 소호부의 자속밀도 분포를 유한 요소법으로 해석하였다. 특히, 아크 전류와 직교하는 자속밀도 분포를 상세히 해석하고, 아크 주(柱)에 작용하는 아크 구동력을 해석하였다. 그리고, 고속 카메라로 모델1,2의 아크 이동을 관측하고, 아크 전류에 의하여 발생하는 자속만을 갖는 모델1은 확산되어 퍼져나가는 형상이 되고, 영구자석에 의하여 아크가 구동되는 모델2는 접점면과 평행하게 구동되는 아크 형상이 됨을 확인하였다.

### [참고 문헌]

- [1] 조현길, 이은웅, 정종호, "DC Arc Extinction Using External Magnetic Field In Switching Device", KIEE International trans on. EM Vol.5-B No.4, pp 306-311, 2005.12
- [2] 조현길, 이은웅, "직류 아크 소호 시간을 단축시키는 직교자계의 영향", 대한전기학회 논문지B, 제49권 7호, pp. 339-344, 2006.3
- [3] J. D. cobine, "Gaseous Conductors", Dover Publications Ltd, co., 1957.