

The Influence of Transverse Magnetic Field for Shortening DC Arc Time

趙顯吉[†] · 李殷雄^{*}
(Hyun-Kil Cho · Eun-Woong Lee)

Abstract - We derived a theory of increasing electromagnetic force which acts on arc column for reducing arcing time between electric contacts. A simulation method of arc velocity is presented by calculating blowout force using 3D FEM and drag force acting on arc column. This paper proposes 3 types arc extinguish chamber of different flux path and presents the specific electromagnetic force and arc velocity of each model by the analysis. The result of analysis and experimental proposes the prediction method of arc time when all conditions are same except external magnetic field.

Key Words : 직류 개폐기, 직교 자계, 아크 소호 원리, 아크 형성과정, 직류 아크 소호구조, 아크 소호시간 단축

1. 서 론

접점의 접촉작용으로 전기회로를 개폐하는 전자접촉기와 같은개폐장치는 회로 개폐시 발생하는 접점의 소모량에 의하여 전기적 수명이 좌우된다. 그래서, 접점의 개방과 투입시에 발생하는 아크 현상에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다 [1]. 접점의 투입과 개방을 반복하면서 접점의 소모량을 재질별로 비교하는 연구[2]와 통신용 계전기의 접점 신뢰성 연구[3]가 꾸준히 진행되고 있다. 그리고, 개폐장치의 아크 소호실에 SF6 가스를 주입하여 아크 소호 시간과 절연 회복시간을 짧게하는 방법으로 차단 성능을 향상시키는 연구가 진행 중이다 [4]. 접점재료를 은(Ag)을 사용한 개폐장치를 DC 부하에 사용할 때 접점 표면 상태, 접점 두께와 아크가 접점사이에 머무는 시간 등이 접촉저항과 수명에 영향을 미침이 밝혀졌다.[5] 아크에 의한 접점 소모량을 최소화하기 위한 방법으로 아크의 자기적 구동 현상이 아크에 미치는 영향에 관하여 연구되고 있다.[6][7]

최근 전력변환 기술의 눈부신 발전으로 직류 전압과 전류를 자유롭게 제어 할 수 있어 직류 전원 사용이 크게 증가되고 있다. 또, 대기 환경보호를 위한 하이브리드 차, 연료전지 자동차 개발에 직류 전원 응용이 집중되고 있다. 이로 인하여 대전류 직류 개폐 장치의 새로운 수요가 급증하고 있다.

직류 개폐장치는 아크 전류의 자연영점이 발생하지 않기 때문에 아크 소호부에 신속한 열전도 특성을 가진 수소나 질소 가스를 채우고, 영구자석의 자력을 이용한 아크 구동력 증대로 아크 냉각 효과를 높이고 아크 길이 연장함으로써 아크 임피던스를 증대시켜 아크 소호시간을 단축하는 방법이 연구중이다.[8][9] 또한, 가스내에서 아크 운동에 의해 유체의 난류 현상을 일으키는 항력(Drag force) 도입에 관한 연구가 진행 중이다.[7][10]

본 논문에서는 철판 그리드를 사용하여 아크 전류와 직교하는 자속을 증대시켜 아크 구동력을 향상하는 방법을 이론적으로 정립하고, 영구 자석에 의하여 자계를 인가하는 경우에 철판 그리드 구조에 따른 자속밀도 변화를 3차원 FEM을 통하여 해석한다. 그리고, 유체의 난류로 일어나는 항력(Drag force)의 개념을 도입하여 아크 구동속도를 해석하고, 아크 소호시간과 자속밀도의 상관관계를 이론적으로 정립한다. 이를 토대로 제작 공정의 기구적 공차가 자기적 특성에 영향을 적게 받는 아크 소호 구조를 제안하고, 해석모델을 시제품으로 제작하여 직류 전류 차단시 전류와 전압 파형을 오실로스코프를 사용하여 측정한다. 실험 결과에 의해 전개된 이론으로 자속밀도가 아크 소호시간에 미치는 영향을 증명한다. 또한, 직류아크 소호시간을 단축하기 위한 아크 소호부 모델을 제시하였다.

2. 아크 형성과 소호 원리

2.1 아크 방전

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

[†] 교신저자, 正會員 : 忠南大 工大 博士課程修了

E-mail : hkchoa@lsls.biz

^{*} 終身會員 : 忠南大 工大 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 11月 22日

最終完了 : 2006年 1月 23日

단계 1. 금속의 용융

그림1과 같이 압축 스프링에 의하여 접촉압력을 받는 접촉점의 접촉저항 R_c 은 식(1)과 같이 변한다.

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi h}{F_c}} \quad (1)$$

여기서 h : 접점의 경도, ρ : 저항율, F_c :접촉 압력이다.

접점 개방이 시작되는 순간에 접촉압력 F 가 0으로 감소할 때, 접촉저항 R_c 와 접점에 흐르는 전류를 I 라고 하면 접점 사이의 전압 강하 V_c 는 식(2)와 같다.

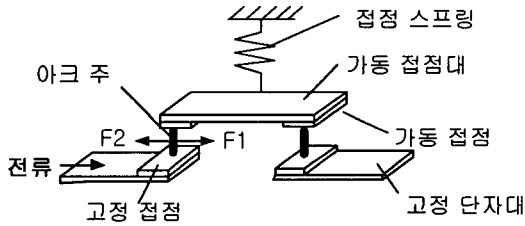


그림 1 Double break 아크 소호부
Fig. 1 Mechanism of extinguishing

$$V_c = IR_c \quad (2)$$

접점 개방하는 순간 접점(spot) 온도 T_c 는 식(3)과 같다.

$$T_c^2 = T_0^2 + V_c^2 \times 10^7 K \quad (3)$$

여기서, T_0 : 주위 온도이다.

접점이 개방되어 접촉압력 F_c 가 "0"이 되는 순간에 접점의 접촉점 온도 T_c 가 접점이 녹는 온도인 T_m 에 도달한다.

단계 2. 용융 금속 다리의 형성

고정 접점과 가동 접점이 떨어지는 순간 고정 접점과 가동접점은 용융 금속으로 연결되고, 이 형상을 원통형 필라멘트가 녹는 것과 같은 것으로 가정되고, 접점의 개리(開離) 거리가 $3\mu m \sim 16\mu m$ 정도의 작은 값에서 이루어진다. 접점간의 전압 변화는 접점의 개리속도에 크게 의존한다.[2]

단계 3. 아크 방전 개시

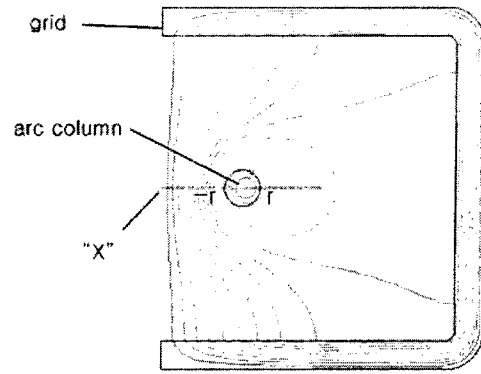
금속 용융 다리가 소멸되면, 피크 전압이 나타나고, 접점과 접점 사이에는 광자, 이온, 전자가 출현하고 기중 아크 방전이 개시되며 양광주(柱)가 형성된다.

2.2 자기 구동 원리

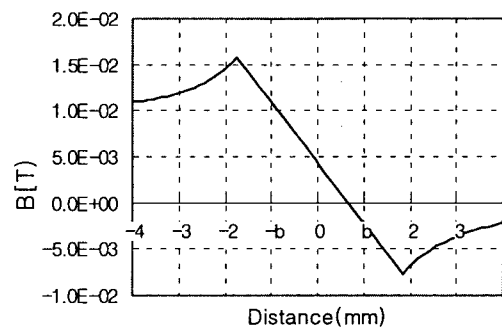
그림1과 같은 2중 접촉구조의 개폐장치에서 아크 구동력을 증대시켜 신속히 소호시키는 아크 소호부의 원리를 그림 2에 나타냈다.

아크 소호실에 아크 주가 형성되었을 때, 그림2 (a)는 아크 전류의 반경 b , 아크 전류와 쇄교하는 자속을 증대시키는 그리드(grid) 구조, 아크 전류에 의한 자속 흐름도를 나타낸다. 아크 전류에 의한 자속은 암페어의 오른손 법칙과 일치하는 방향으로 자성체 그리드를 통하여 흐르고, U자형 그리드의 개방된 부분에서 아크 전류 후면을 통과하여 폐로를 형성한다.

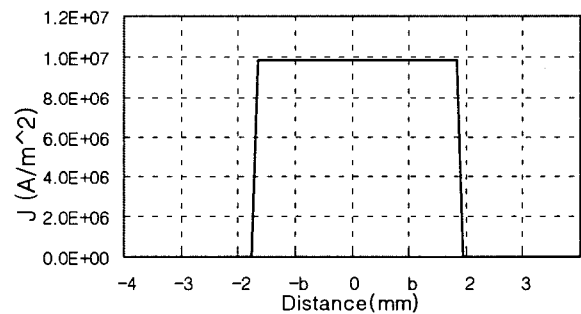
아크 전류의 반경을 b , 아크 기하학적 중심점에서 떨어진 거리를 r , y 성분의 단위벡터를 a_y 라고하면, 도체 내부($r \leq b$)와 외부($r \geq b$)의 자속밀도 B_1, B_2 는 식(4)와 같다.



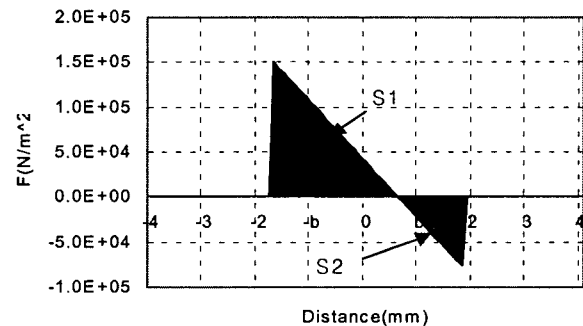
(a) 아크 전류와 자속흐름



(b) 아크 전류 주위의 자속밀도 분포



(c) 아크 주의 전류분포



(d) 아크주에 작용하는 로렌츠 힘의 분포

그림 2. 아크 전류 주위의 자속특성
Fig. 2 Principle of arc driving force

$$B_1 = a_y \frac{\mu_0 I}{2\pi b^2} \quad r \leq b$$

$$B_2 = a_y \frac{\mu_0 I}{2\pi} \quad r \geq b \quad (4)$$

자속밀도는 아크 중심에서 b까지 아크주 내에서는 선형적으로 증가하고, b보다 r이 큰 아크주 밖에서는 선형적으로 감소한다.

그림2 (b)는 아크 중심을 지나는 X축에서 자속밀도 B_y 의 변화를 나타낸 것이다. 그림2 (b)의 -b 점에서 자속밀도가 (+) 값을 가지는 것과 b점에서 자속밀도 값이 (-) 값을 가지는 것은 방향이 서로 반대인 자속벡터를 의미한다.

그림2 (c)는 X 축위의 아크 주에 흐르는 전류밀도를 나타낸다. 주파수 특성을 고려하지 않았으므로 균일한 전류 분포를 가지는 것으로 가정한다.

그림2 (d)는 자속밀도와 전류 밀도에 의한 로렌츠 힘의 분포를 나타낸 것이다. 그림2 (b)와 그림 2 (c)의 자속밀도와 전류분포에 의하여 아크에 작용하는 로렌츠 힘은 식(5)와 같다.

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

여기서, 아크주(柱)의 전류밀도는 $9.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 로 가정한다. [11]

아크주에 작용하는 아크 구동력 F_x 는 자기 중심에서 -b까지 로렌츠 힘을 적분한 S_1 과 자기 중심에서 b까지 로렌츠 힘을 적분한 S_2 의 차이 식(6)과 같다.

$$F_x = S_1 - S_2 \quad (6)$$

식 (6)과 같이 아크주에 작용하는 힘의 차로 의하여 아크는 x의 (+) 방향으로 이동된다.

2.3 항력(Drag Force)

아크는 이온과 전자(electron)가 흐르는 전류로 기계적 힘, 자기적 힘의 합성에 의하여 자유로이 변형된다. 따라서, 아크내의 모든 입자의 운동을 구할 수 있다면 아크의 움직임을 정확히 알 수 있다. 하지만 실제로 모든 입자의 운동을 정확히 추적하는 것과 아크 주(柱)가 호 모양이나 나선형으로 시간에 따라 변형되는 모양을 정확하게 예측하는 것이 어렵기 때문에 단순화하여 직선의 원통형 아크 주(柱)로 가정하고, 아크 주 주위의 조건에 따라 아크 주의 직경은 변화하지 않는 것으로 가정한다.

아크 주의 중심은 고온에서 강하게 이온화 가스, 중성자 가스와 전자를 포함한다. 이온화 가스와 전자는 아크 구동력에 의하여 구동하지만, 중성자 가스와 주위 가스는 아크 구동력에 의하여 구동되지 않는다. 그러므로, 원통형 아크가 중성자 가스와 주위 가스를 가르고 나아갈 때, 아크 주(柱)는의 추진 방향과 반대로 작용하는 항력(Drag Force)가 작용한다. 따라서, 아크 주(柱)에 작용하는 항력(Drag Force)은 식(7)과 같다.[10]

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho D L u^2 \quad (7)$$

여기서, u는 아크의 이동 속도, ρ 는 공기 밀도, D는 아크

의 직경으로 $D = 2\sqrt{\frac{I}{\pi J}}$, L은 개극 거리이다. 항력계수

(Drag Coefficient) $C_D = 0.62 * \left(\frac{L}{D}\right)^{0.12}$ 는 이다.[10]

2.4 아크의 거동

점점 재질을 고려한 아크 운동 방정식은 식(8)과 같다.

$$F_x - F_d = m \frac{du}{dt} \quad (8)$$

여기서, F_x 는 식(6)의 아크 구동력을 나타내고, m은 점에서 분출된 아크 가스의 중량으로 식(9)와 같다.

$$m = \left(\frac{M}{N_0}\right) \times \left(\frac{\pi}{4} D^2 L\right) \times \left(\frac{P}{2kT}\right) \quad (9)$$

여기서, M은 이온화 가스의 원자질량이고, N_0 는 아보가드로수를 나타낸다. k는 볼츠만 상수, P는 아크 압력, T는 아크주의 온도를 나타낸다. 산업용 점점 재질로 주로 사용되는 은(Ag)의 원자질량은 1.02×10^{-31} 으로 상당히 작기 때문에 무시 할 수 있다.[10]

단순화된 아크 운동방정식은 식(10)과 같이 나타내진다.

$$F_x = F_d \quad (10)$$

자속밀도를 B_y , 아크 전류를 I_z , 점점 개극 거리를 L이라고 하면 아크 구동력 F_x 는 식(11)와 같다.

$$F_x = B_y I_z L \quad (11)$$

식(7),(8)(11)식을 식(10)에 대입 정리하면 식(12)와 같다.

$$u = \sqrt{\frac{2B_y I_z}{C_D \rho D}} \quad (12)$$

아크 구동 속도 u와 아크 열전도의 관계를 고려하여 아크 소호 시간 T_a 는 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_a = k_{ext} \frac{1}{u} \quad (13)$$

여기서 k_{ext} 는 아크 소호 공간과 스위칭 전압에 의하여 결정되는 비례 상수이다.

식(12)과 (13)에 의하여 아크 소호 시간 T_a 는 식(14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_a = k_g \sqrt{\frac{C_D \rho D}{2B_y I_z}} \quad (14)$$

여기서 k_g 는 자속밀도와 아크 소호시간의 관계에 의한 비례상수이다. 아크 소호시간 T_a 는 식(14)와 같이 자속밀도의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서, 아크 소호시간은 아크 전류와 직교하는 자속밀도 $B_y^{-0.5}$ 에 비례한다.

2.5 유한요소법의 정식화

영구자석의 자화력 M, 아크 전류에 의한 자계 세기 H와 투자율 μ_0 에서 영구자석중의 자속밀도 B는 식(15)와 같다.

$$H = \frac{1}{\mu_0} (B - M) \quad (15)$$

계의 전류 밀도 J_0 와 자계 H의 관계에서 벡터 포텐셜 $B = \nabla \times A$ 를 대입한 전자기 방정식은 (16)과 같다.

$$\nabla \times \nu_0 (\nabla \times A - M) - J_0 = 0 \quad (16)$$

여기서, $\nu_0 = \frac{1}{\mu_0}$ 이다.

Galerkin Method에 의한 정식화는 식 (17)과 같다.

$$G_i = \int_s \nabla \times \{N_i \nu_0 (\nabla \times A - M)\} dx dy - \int_s \nabla N_i \times \nu_0 (\nabla \times A - M) dx dy - \int_s N_i J_0 dx dy \quad (17)$$

3. 해석 모델

그림 3 (a),(b),(c)는 2.1절에서 설명한 아크 구동 원리에 따른 모델을 나타낸 것이다. 아크 소호 현상은 복잡하여 아크 구동력 이외에도 아크 소호공간의 크기, 가동 접점의 이동 속도, 접점간 개극 거리 등의 영향을 받는다. 그러므로, 변화 요인을 최소한으로 줄이기 위하여 아크 소호 공간, 접점 개극 속도와 개극 거리는 동일하게 한다.

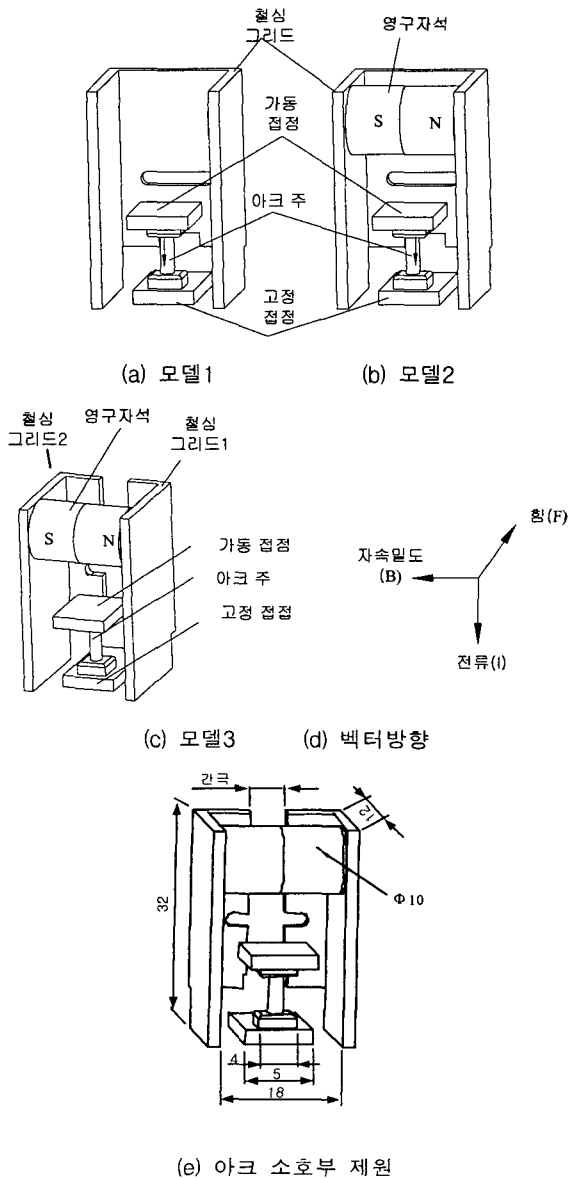


그림 3. 아크소호부 모델 및 제원
Fig. 3 Model of arc quench unit

그림3 (a)는 U자형 철심 그리드만으로 아크 소호실이 구성되었고, 아크 전류에 의해 발생한 자속은 자성체인 철심 그리드에 집중하여 흐르고 철심의 개로부를 통과하여 아크 전류와 직교한다.

그림3 (b)는 U자형 그리드와 영구자석을 혼합한 형태이며, 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 기중을 통하는 자로를 형성한다.

그림3 (c)는 5mm의 간극(gap)으로 나뉜 철심 그리드와 영구 자석을 혼합한 형태이다. 모델 2는 영구자석 N에서 출발하여 발생한 자속이 주로 철심 그리드를 통과하고 영구자석 S를 들어가는 자로를 형성하지만, 모델 3은 철심 그리드1과 2 사이에 간극(gap)이 존재하기 때문에, 영구자석 N에서 철심 그리드1을 통과하고 간극, 철심 그리드2, 영구자석 S극으로 구성되는 자로1과 영구자석 N에서 철심 그리드1을 통과하고 아크 소호부, 철심 그리드2, 영구 자석 S를 통과하는 자로2로 자로는 분할된다. 즉 철심 그리드1과 2사이의 간극은 영구자석 자속이 철심만을 통과하여 자속이 흐르는 것을 방해하는 릴럭턴스로 작용한다. 그래서, 철심 그리드1과 2사이의 간극(gap)의 길이 변화 따라 아크 전류와 직교하는 자속은 변화된다.

그림 3 (e)는 아크 소호공간을 나타낸 것으로 그리드, 영구자석과 접점의 설계치수를 표시하였다. 특히 모델 3은 모델2와 영구자석은 동일하고, 간극(gap)의 크기로 아크 전류와 직교하는 자속을 변화 시킨다.

4. 해석과 실험 결과

4.1 자속밀도와 자기 구동력

자기구동력 해석은 모델1, 모델2와 모델3이 3차원 유한요소법으로 해석하였다. 해석 모델은 개극 거리는 5mm이며, 아크 주의 직경은 아크의 전류밀도 ($J=9.5 \times 10^6 A/m^2$)를 기준으로 설정하였다.

그림4 (a)는 모델1의 100A 전류가 그림4(b)와 같은 방향으로 흐르는 경우의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 영구자석 자계가 없이 아크 전류에 의하여 자속이 발생하므로 아크 전류표면의 자속밀도가 가장 높게 나타난다.

그림4 (c)는 아크 중심을 지나는 직선 "X"에 분포하는 자속밀도 B_y 그래프이다. 기하학적 중심인 "0" 점 근처에서 B_y 성분이 (+)에서 (-)로 반전됨을 알 수 있다. (-1) 위치에서 아크 전류 표면의 자속밀도는 0.024[T]이며, (+1)위치에서는 -0.018[T]로 도체표면에서 자속밀도가 가장 높다. 서로 벡터 방향이 다른 것은 자계가 아크 전류를 중심으로 회전하는 성분을 가지고, 아크 중심을 지나는 직선 상에서 마주보고 있기 때문이다. 아크주(柱)의 전류밀도는 균일한 분포를 가지는 것으로 해석한 로렌쯔 힘이다.

그림5(a)는 모델2의 100A 전류가 그림5(b)와 같은 방향으로 흐르는 경우의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 철심 그리드는 영구자석의 자속에 의하여 포화되어 영구자석에 의한 자속이 아크 공간을 통과한다. 아크 전류에 의하여 발생한 자속과 중첩되어 아크 전류와 직교하는 자속은 모델 1보다 증가한다.

그림5 (c)는 아크 중심을 지나는 "X"선 위의 합성 자속밀도 B_y 와 로렌즈 힘의 분포 그래프이다. 자속밀도 B_y 성분은 (+) 방향 성분이 (-) 성분에 비하여 뚜렷하게 증가되어 아크 중심을 기준으로 대칭되는 현상은 사라지고, -1 위치에서 자속의 합성효과가 최대로 되고, -1위치에서 자속방향이 반대로 되어 합성효과가 최소로 된다.

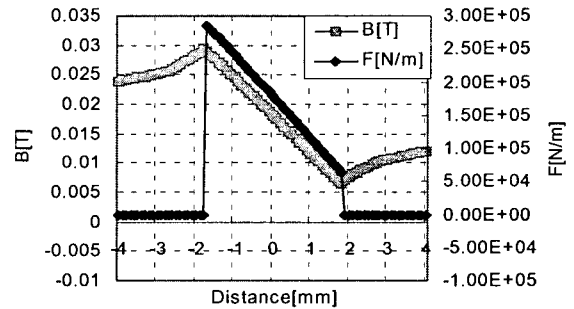
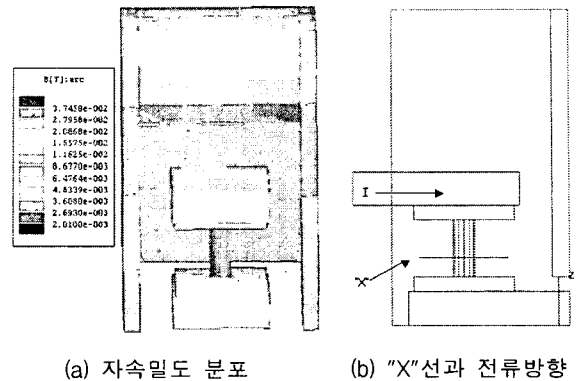
모델 1에 비하여 -1 위치에서 아크 전류 표면의 자속밀도가 0.032[T]로 0.08[T] 증가하였고, +1위치에서 자속밀도는 -0.009[T]로 0.09[T] 감소하였다.

그림6 (a)는 모델3 아크 소호부에 100A 전류가 그림6(b)와 같은 방향으로 흐르는 경우의 자속밀도 분포이다. 모델3에서 분리된 철심 그리드 사이의 간극(Gap)은 5mm이며, 철심 그리드 사이에 삽입한 영구자석에 의한 영구자석 자체가 철심그리드를 통과한 후 아크 전류와 직교하도록 하였다.

그림6 (b)의 "x" 축은 아크 중심을 지나며, 고정 접점의 표면에서 15mm 곳에 위치한다. 전류가 흐르는 방향은 I 방향과 일치한다.

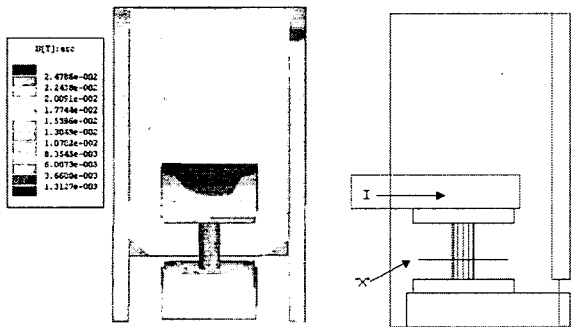
그림6 (c)는 아크 중심을 지나는 직선 "X" 에서 합성 자속밀도 B_y 와 로렌즈 힘의 분포를 나타낸 것이다. 자속밀도 B_y 성분은 (+) 성분이 (-) 성분에 비하여 뚜렷하게 증가되어 아크 중심을 기준으로 대칭되는 현상은 사라졌다.

(-1) 위치에서 영구자석의 자속이 중첩하여 자속밀도가 증가하고, (+1) 위치에서는 자속벡터의 상쇄되어 자속밀도는 감소되었다.

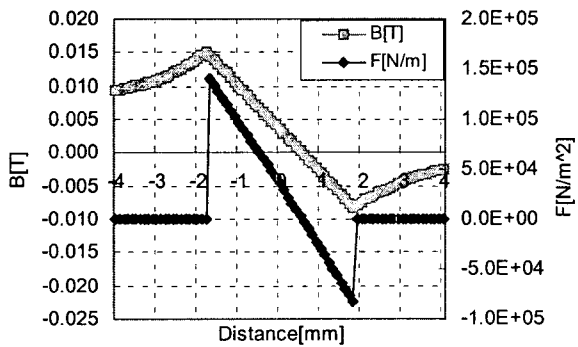


(c) 자속밀도와 자기 구동력

그림 5. 모델2의 해석결과
Fig. 5 Analysis of model 2

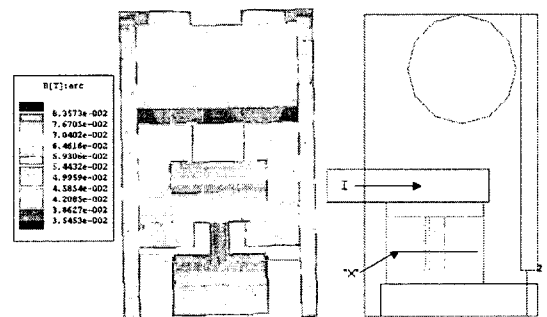


(a) 자속밀도 분포 (b) "X" 선과 전류 방향

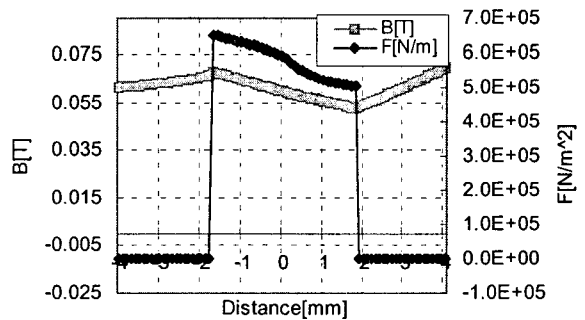


(c) 자속밀도와 자기 구동력

그림 4. 모델1의 해석결과
Fig. 4 Analysis of Model 1



(a) 자속밀도 분포 (b) "X"선과 전류방향



(c) 자속밀도와 자기 구동력

그림 6. 모델3의 해석결과
Fig. 6 Analysis result of model 3

그림7 (a)는 모델 3의 간극(gap)이 변화될 때 접점의 아크 전류와 쇄교하는 영구자석에 의한 자속밀도를 나타낸 것이다. 모델 2는 간극이 "0"인 경우이며, 영구자석에 의한 자속밀도는 0.01T이고, 철심 그리드 사이의 간극(gap)이 6mm 이상으로 증가하면 아크 전류와 쇄교하는 자속밀도는 더 이상 증가하지 않는다. 그림7 (b)는 아크 전류가 100A가 흐르는 경우, 간극 변화에 따른 아크 구동력을 나타낸 것이다.

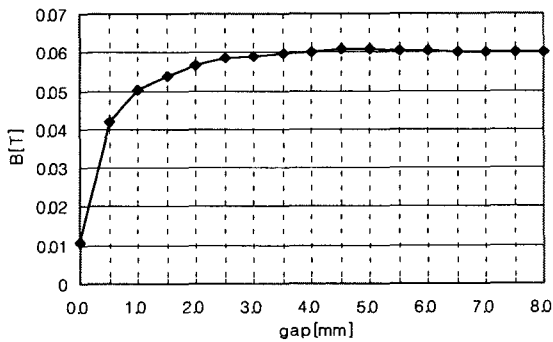
그림7 (a)와 (b)에서 보는 것처럼 철심 그리드 사이의 간극(gap)이 4mm에서 6mm까지 변화하여도 자기적 특성은 크게 변하지 않는 구간이 존재한다. 이 구간을 모델3에 적용하여 가공 공정에서 나타나는 오차에 의한 자기적 특성의 영향을 최대한 작게 받도록 하였다.

4.2 아크 이동속도

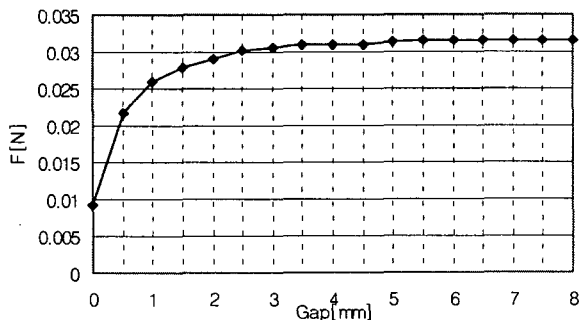
본 해석에서는 아크 주(柱)의 형상이 시간적으로 변화하지 않고 온도변화에 따른 아크의 도전을 변화는 없는 것으로 가정하였다. 아크 주위 가스는 공기로 가정하고 공기밀도는 $\rho = 1.3\text{kg/m}^3$ 으로 하였다.[7]

그림8(a)는 영구자석을 사용하지 않은 모델과 철심 그리드 사이의 간극(gap) 변화에 의하여 변화된 자속밀도를 기준으로 아크 전류가 100A인 경우에 아크 구동 속도를 해석한 결과이다.

그림 8. (b)는 아크 전류 변화에 따른 아크 구동속도의 변화를 해석한 결과이다.

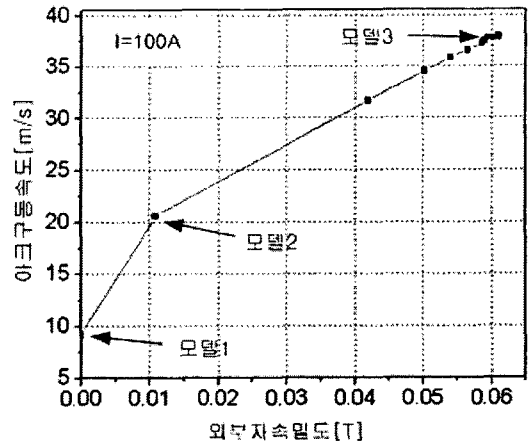


(a) 간극 변화에 따른 자속밀도

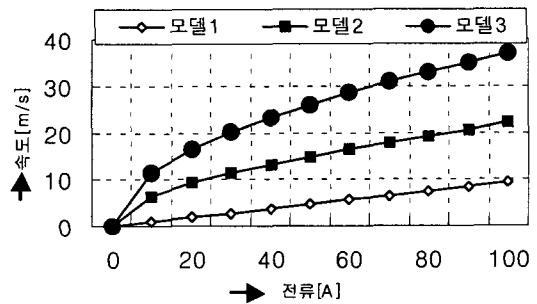


(b) 간극 변화에 따른 자기 구동력

그림 7. 형상 변화에 따른 자속밀와 자기 구동력
Fig. 7 Flux density and arc driving force



(a) 자속밀도와 아크 구동속도(I=100A)



(b) 전류 변화에 따른 아크 구동 속도

그림 8. 아크 구동 속도 해석 결과
Fig. 8 Arc velocity

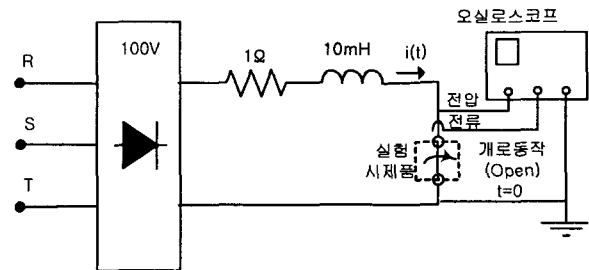


그림 9. 실험 장치
Fig. 9 Experimental equipment

모델 1은 전류 증가에 비례하여 아크 구동 속도가 증가하지만 모델 2와 3은 영구자석에 의한 자력에 의하여 초기에 작은 전류에도 급속히 이동 속도가 상승하게 된다.

100A 전류에서 모델1, 2와 3의 아크 구동 속도는 각각 9.2 m/s, 20.55m/s와 37.97m/s이다. 모델1은 참고문헌 (13)의 실험모델의 접점 사이3.3mm, 전류 109A, 자속밀도 5mT에서 측정된 속도 13m/s에 못미치는 속도이다. 이는 아크 소호부의 구조에 따라 자속밀도가 다르고, 비교 실험 모델보다 자속밀도가 작기 때문이다.

4.3 아크 소호시간

그림9는 실험회로와 측정 장치를 나타내었다. 실험용 접촉기의 조작 코일 전원을 인가하여 폐로 후 조작 코일 전원을 끊어 실험 시료의 접점 개방시 접점 양단의 전압을 싱글(Single) 트리거 신호로 사용하여 파형을 정지하고, 접점 양단에 식(2)의 캐소드 전압 V_c 의 발생 시점을 개방 시작 시간 $t=0$ 로 하고, 전류가 감소하여 값이 "0"으로 떨어질 때까지의 시간을 아크 소호시간으로 측정한다.

실험 부하는 직류 100V, 100A, 시정수 10ms를 가지는 직류 분권전동기이며, 아크 소호시간 측정을 위한 장치로 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 시험 제품의 가동 접점부가 약 1m/s로 이동하고, 접점 사이의 개극 거리는 5mm이며, 접점부 재질은 은(Ag)합금이다.

그림 10은 오실로스코프로 측정한 전류 파형을 나타낸 것이며, 모델 1, 2, 3의 아크 소호시간은 각각 20.9ms, 10.1[ms], 5.2[ms]로 측정되었다.

그림 10. (a)는 모델1의 전류 차단시 파형으로 10ms/Div, 100V/Div와 20A/Div로 측정된 전압과 전류 파형이다. 전류는 감소하면서 일정시간 전류와 전압이 유지되는 현상이 발생되었다. 이는 접점간의 개극 거리가 완전 개방되고 아크 주(柱)가 전력 손실과 아크 전류와 전압에 의하여 공급되는 에너지 평형상태가 유지되는 것으로 해석되고, 아크가 냉각되어 접점 양단의 아크 전압이 인가 전압보다 높은 전압의 하여 전류는 차단된다.

그림10 (b)는 모델2의 전류 차단시 파형으로 2ms/Div, 100V/Div와 20A/Div로 측정된 전압과 전류 파형이다.

아크 전류가 유지되는 현상이 발생하지 않았다. 전압과 전류의 공급에너지보다 아크 주의 방출에너지가 크게되어 감소하는 것으로 해석된다. 전원 전압보다 높은 아크 전압에 의하여 전류는 차단되었다. 전류 차단시까지 시간은 모델1에 비하여 월등히 변화되었음을 알 수 있다.

그림 10 (c)는 모델3의 전류 차단시 파형으로 2ms/Div, 100V/Div와 20A/Div로 측정된 전압과 전류 파형이다.

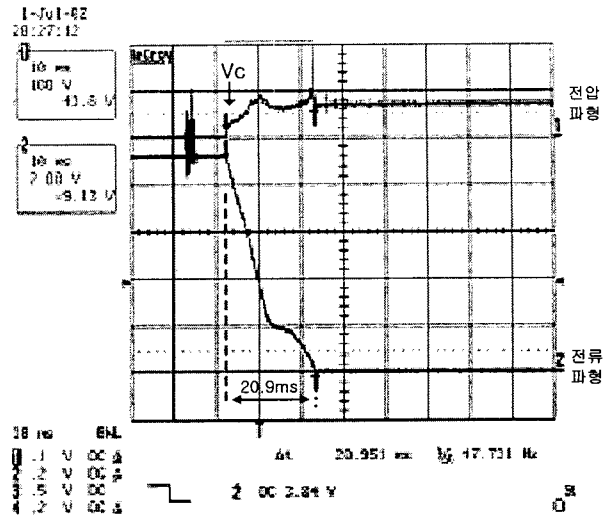
전압과 전류의 가파른 변화를 보여준다. 아크의 거동이 빨라짐에 따라 접점 사이에 발생한 이온화 가스에 의하여 접점간 절연내력이 심하게 변동되는 현상으로 해석된다. 모델 2에 비하여 전류차단 시간이 뚜렷하게 단축되었을 알 수 있다.

아크 소호 시간은 반복 실험에 따라 조금씩 달라지고, 전압과 전류에 따라 변화한다.[12] 그러므로, 그림 11은 동일 조건에서 각각 30회 반복한 실험결과를 통계 그래프로 나타낸 것이다.

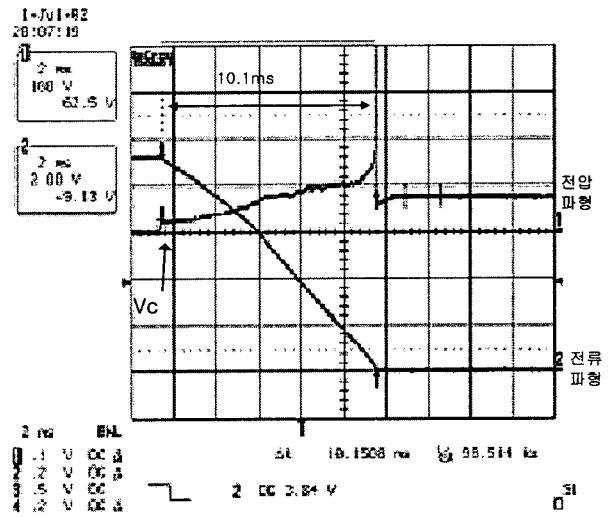
그림 11 (a) 모델1의 아크 소호시간은 10~20ms 범위로 넓게 나타나고, 평균 소호 시간은 14ms를 이다. 그림11 (b)의 모델2는 10~15ms 사이의 아크 소호시간을 가지고 평균 아크 소호시간은 12ms이다.

그림 11 (c)는 아크 소호시간이 4.5~6ms 사이로 시간 편차가 모델 1에 비하여 크게 감소하였다.

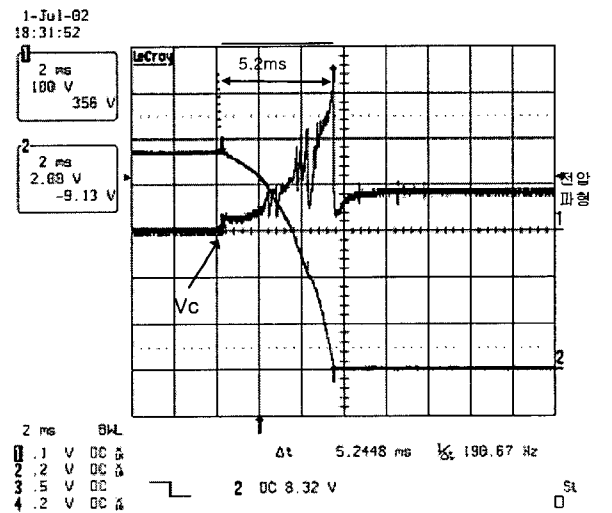
아크 소호실내의 자속밀도가 증가함에 따라서 아크 소호 시간은 짧아지고, 아크 소호 시간 변화 범위도 크게 감소하였다.



(a) 모델1



(b) 모델2



(c) 모델3

그림 10. 아크 전압과 전류 파형
Fig. 10 Arc voltage and current

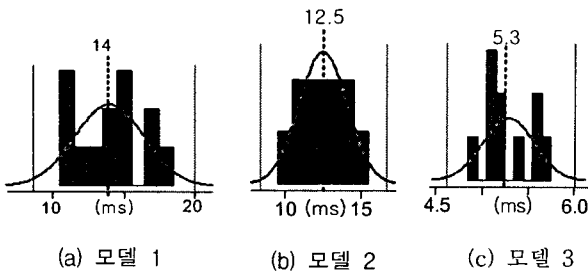


그림 11. 아크 소호시간 반복실험 결과
 Fig. 11 Statistical arc extinction time

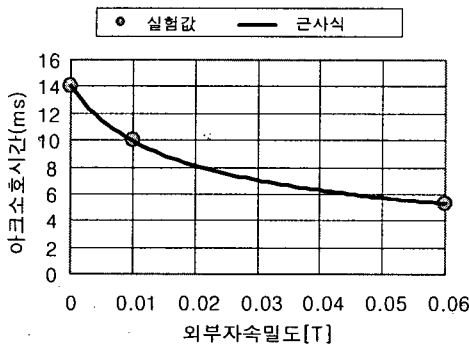


그림 12. 자속밀도와 아크소호 시간
 Fig. 12 Flux density vs. arc extinction time

그림 12은 아크 호소 시간을 반복 측정하고, 자속밀도에 따른 아크 소호시간을 나타낸 것이다. 자속밀도와 아크 소호 시간과의 실험식은 식(18)과 같다.

$$T_a = 14.054B^{-0.5009} \quad (18)$$

본 실험에서 자속밀도 변화를 제외한 모든 조건은 동일하도록 실험하여 식(14)의 k값은 2545.94를 구하였다. k값은 전기 회로 조건과 아크 소호부의 체적 및 구조에 따라 달라진다. 실험에 의하여 아크 소호시간은 자속밀도 $B^{-0.5}$ 에 비례하는 것이 증명되었다.

따라서, 아크 전류와 직교하는 자속밀도의 증대시켜 아크 이동 속도를 증대시키고, 이 효과로 아크 길이 연장과 아크 전압 상승시키므로써 아크 소호 시간을 단축 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 대전류를 페로 차단하는 장치의 아크 주(柱) 형성 과정을 체계적으로 기술하고, 아크 주(柱)에 작용하는 아크 구동력의 발생 원리를 이론적으로 정립하였다. 아크 주(柱)를 원통형 모델로 가정하고 아크 주에 작용하는 Drag Force를 도입하여 아크주의 구동속도를 계산하였다. 3차원 FEM 해석을 통하여 제작과정에서 발생하는 오차에 의하여 자기적 특성의 변화가 적은 모델을 설계, 제작하였다.

직류 부하전류를 차단하는 순간의 전압과 전류 특성을 측정하고, 아크 소호시간을 정의하였다. 아크와 직교하는 자속 밀도에 따라 접점 양단의 아크 전압이 변화됨을 확인하였

다. 아크 소호 시간은 아크 전류와 직교하는 자속밀도의 상승에 반비례됨을 증명하고, 아크 소호시간을 단축을 위해서 물리적으로 제어가 가능한 인자인 자속밀도 값을 자기회로 구현 방법에 따라 증대시키는 방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] V. Samoilov et al, "Physical Process at Opening Contacts", Proc. 45th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp.111-120, 1999
- [2] D.Jeanot et al, "Advanced AgSnO2 contact materials for the replacement of AgCdO in high current contactors", Proc. 46th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp.225-230, 2000
- [3] N. Ben Jemaa et al, " Break Arc Study for the New Electrical Level of 42V in Automotive Applications", Proc. 47th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp.50-55, 2001
- [4] Wemem Johler, "Optimized contact erosion by using electronegative gases in telecom relays" Proc. 47th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp. 83-93, 2001
- [5] J.W. McBride, et al., "Volumetric erosion measurements of contacts tested in dc automotive relays" Proc. 47th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp. 73-81, 2001
- [6] Chi Leung, Anthony Lee, " Electric contact materials and their erosion in automotive DC relays", Proc. 46th IEEE Holm Conf, on electric contacts, pp.114-121, 1991
- [7] Teijiro Mori, et al., "A New interruption for low-voltage, small-capacity, air-break contactors", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol.27, No.1, pp. 161-166, Jan. 1991
- [8] Riichi Uotome, Kataaki, "Sealed contact device with contact gap adjustment capability", U.S Patent Number 5892194, Apr, 1999
- [9] Katsumi Yoshitani, " Hig voltage relay unit for hybrid electric vehicle", 松下電工技報, pp. 20-24, May, 2001
- [10] K. Pechrach, et al, " The correlation of magnetic, gas dynamic and thermal effects on arc mobility in low contact velocity circuit breaker", Proc. 48th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp.86-94, 2002
- [11] J.W Spencer, et al, " Behaviour of electromagnetically rotated arcs in gas heaters and circuit interrupters", IEE proceeding-A, Vol. 140, No. 4, pp. 271-280, July. 1993
- [12] Zhuan-ke Chen, Koichiro Sawa, " Effect of arc Behavior on Material Transfer: A Review", IEEE Transactions on Componets, and Manufacturing Technology Part A, Vol. 21, No. 2, pp. 310-322. June. 1998

- [13] L.P. Winsor and T.H. Lee, " Properties of a d-c arc in a magnetic field," AIEE Trans. Communication and Electronics, Vol. 75, No, 2, pp. 143-148. May, 1956

저 자 소 개



조 현 길 (趙顯吉)

1969년 6월 10일생. 1994년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사졸업. 1996년 ~ 현재 LS 산전 개폐기 설계팀 근무. 1998년~ 동대학원 박사과정 수료

Tel : 043-261-6325

E-mail : hkchoa@lisis.biz



이 은 응 (李殷雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~'97), 1997년~2000년 당학회 부회장. 2004년도 당학회 회장, 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr