

# 아크플라즈마와 유동간의 상호작용을 고려한 열가스 유동 해석

論 文

51B-3-2

## Analysis of Hot Gas Flow Considering Arc-Flow Interaction

金 烘 樅\* · 朴 敬 燁\*\* · 裴 埜 允\*\*\* · 趙 慶 淵§ · 鄭 炫 敎§§

(Hong-Kyu Kim · Kyong-Yop Park · Chae-Yoon Bae · Kyung-Yeon Cho · Hyun-Kyo Jung)

**Abstract** - This paper presents the analysis of hot gas flow in puffer-type circuit breakers using FVFLIC method. For the analysis of arc-flow interaction, the flow field is analyzed from the equations of conservation for mass, momentum and energy with the assumption of local thermodynamic equilibrium state. The arc is represented as the energy source term composed of ohmic heating and radiation term in the energy conservation equation. Ohmic heating is computed by the electric field analysis only within the conducting plasma region. An approximate radiation transport model is employed for the evaluation of emission and absorption of the radiation. The analysis method was applied to the real circuit breaker model and simulation results such as pressure rise and arc voltage were compared with the experimental ones.

**Key Words** : Puffer-type circuit breaker, SF<sub>6</sub> gas, arc, FVFLIC method, Radiation transport

### 1. 서 론

현재 사용중인 초고압 가스 차단기(Gas circuit breaker : GCB)의 대부분이 소호 매질로서 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하고 있으며, 1950년대 초에 이미 AC 전류를 차단하는 데 SF<sub>6</sub> 가스의 탁월한 차단 성능이 알려졌다. 파퍼식 SF<sub>6</sub> 가스 차단기는 초고압용으로 현재 전 세계적으로 많이 이용되고 있으며, 적절한 아크 온도 제어 방법을 통해 전류를 차단하는 원리를 이용하고 있다[1,2].

이러한 차단기의 차단 특성 해석을 위한 기본 해석 수법으로는 유동 해석이 필요하다. 차단 특성은 공간 상의 밀도, 온도 분포와 직접 관련이 있으며, 구하여진 밀도, 온도 분포로부터 열적, 유전적 파괴 특성을 파악하여 차단 성공 및 실패를 판단하기 때문이다. 유동 해석 시에는 유한 체적법(Finite volume method), 유한 차분법(Finite difference method), 유한 요소법(Finite element method), FLIC법(Fluid in cell method) 등의 여러 가지 수치 해석 기법이 적용되고 있다.

대전류 차단 시에 발생하는 아크의 영향을 고려한 열가스 유동 해석 및 아크 모델링에 대한 연구는 최초에는 아크에 대한 외부 유동을 준1차원 모델로 근사화한 경계층 모델을 이용하여 아크와 유동의 상호 작용을 해석하였다. 이 해석 방법은 긴 형상의 slender 아크 해석에는 적합하지만 정확한 아크 형상을 고려한 해석에는 한계가 있다. 그 후 여러 가지 아크 모델링 방법이 연구되었으며, 2차원 축대칭 오일러 방정식 혹은 Navier-Stokes 방정식에 물리적 아크 모델을 결합한 연구는 대전류 차단시의 아크 특성을 시험 결과와 비교하여 비교적 정확히 계산하였다. 그리고, 복사 에너지 전달에 관한 모델은 아직까지 많은 모델이 제시되지는 않았으며, Fang 등에 의해 제안된 간이 복사 모델[4]과 Trépanier 등에 의해 제안된 모델[5]이 온도 분포에 따른 복사 에너지의 재흡수를 충분히 고려하고 있는 정도이다.

본 논문에서는 대전류 구간에서의 차단부 내의 열가스 유동 해석을 위해서 축대칭 오일러 방정식을 기본 지배 방정식으로 하여 FVFLIC(Finite volume fluid in cell)법에 의한 이산화 방법을 적용한다[6-8]. 아크와 유동 간의 상호작용은 아크 내에서의 에너지 평형 관계에 의해 표현되며, 대전류 구간에서의 주된 에너지 전달 메커니즘은 ohmic heating과 복사 전달이다. 차단부 아크 내의 복사 전달에 대한 정확한 모델링 기법은 아직까지 연구된 바가 없으며, 주로 실험에 의한 경험적 모델이 많이 이용되고 있다. 본 논문에서 적용한 복사 모델인 간이복사전달 모델(Approximate radiation transfer model)도 실험 결과를 이용한 경험적 모델의 하나이며, 방출(emission) 및 재흡수(reabsorption)되는 복사에너지를 고려하고 있다. 실험 결과[9]로부터 대전류 구

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員

\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 그룹長

\*\*\* 正 會 員 : 서울대학교 電氣·컴퓨터工學部 博士科程

§ 正 會 員 : 서울대학교 電氣·컴퓨터工學部 研究員

§§ 正 會 員 : 서울대학교 電氣·컴퓨터工學部 教授

接受日字 : 2001年 10月 30日

最終完了 : 2002年 1月 11日

간에서는 전도에 의한 에너지 전달은 무시할 수 있으며, 여기서는 전도에 의한 에너지 손실은 무시하였다.

## 2. 아크 모델링 및 열가스 유동 해석

### 2.1 열가스 해석을 위한 기본 방정식

차단부 내에서 발생하는 아크는 고압 아크 방전의 일종이며, 이 경우 공간에는 전자와 이온, 그리고 중성 기체 원자들로 구성된 플라즈마 상태다. 저압 아크 방전의 경우에는 중성 기체 원자들의 밀도가 낮아서 전자와 중성 원자 간의 탄성 충돌 빈도가 낮아서 전자의 온도는 매우 높은 반면 중성 원자들의 온도는 낮다. 그러나 기체 압력이 점차 높아져서 고압 아크 방전으로 이행되면 중성 기체 원자의 밀도가 높아져서 탄성 충돌의 빈도가 점점 높아지게 된다. 즉, 전자의 평균 에너지는 낮아지고 중성 원자의 평균 에너지는 높아져 고압 아크 방전에서는 이들 입자의 온도가 거의 같아지게 되어, 단위 체적 내에 있는 모든 입자들의 에너지가 동일한 국부적 열역학 평형상태(Local Thermodynamic Equilibrium : LTE)가 성립하게 된다. 그러므로 복사 에너지를 제외한 모든 물리적 상태들의 분포 함수를 볼츠만 분포(Boltzmann Distribution)에 의해 표현할 수 있다. 차단부 내에서 발생하는 아크는 고압 아크 방전의 일종이므로, 차단기 내의 아크에 관한 대부분의 연구는 LTE를 가정하여 해석을 진행하고 있으며, 대전류 아크 해석 시에는 보존 방정식을 기본 유동 해석 방정식으로 이용하고 있다.

본 논문에서는 아크 존재시의 유동 해석을 위한 기본 방정식으로서 오일러 방정식의 에너지 보존식에 에너지 소스(Energy source) 항을 추가한 다음의 축대칭 식을 이용한다.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \nabla \cdot F = S \tag{1}$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho \vec{U} \\ \rho u \vec{U} \\ \rho v \vec{U} \\ \rho E \vec{U} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial P}{\partial z} \\ -\frac{\partial P}{\partial r} \\ -\nabla \cdot (P \vec{U}) + S_e \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]는 밀도,  $\vec{U} = (u, v)$  [m/s]는 축방향 및 반경 방향 속도 성분,  $E$ [J/kg]는 비총에너지 (specific total energy),  $P$ [N/m<sup>2</sup>]는 압력,  $S_e$  [J/kg·sec]는 에너지 소스 항을 나타낸다.

아크가 존재하지 않는 경우의 냉가스 해석의 경우, 이상 기체를 가정하여  $P = (\gamma - 1)\rho I$  의 이상 기체 상태 방정식으로부터 압력을 구하지만, 열가스 해석시에는 온도, 압력에 따라서 비열비가 다르기 때문에 압력은 다음과 같은

함수 형태로 표현되어진다.

$$P = f(\rho, I) \tag{4}$$

여기서  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]는 밀도를,  $I$  [J/kg]는 비내부 에너지를 나타낸다.

대전류 차단시에 전극이 분리되면 극간에는 고온의 아크 플라즈마가 생성되며, 유동 해석시 이러한 아크의 영향은 에너지 소스항인  $S_e$  로 표현이 된다. 대전류 차단시의 아크는 주로 Ohmic heating과 복사 에너지에 의해 에너지 평형을 이루게 된다. 따라서 아크에 의한 에너지 소스 항  $S_e$  를 다음과 같이 ohmic heating 항과 복사전달 항으로 표현한다.

$$S_e = S_{ohm} - U_{rad} \tag{5}$$

여기서  $S_{ohm} = \sigma E^2$  [J/kg·sec]이며, 전기전도도는  $\sigma = \sigma(P, T)$  [mho/m]의 압력과 온도의 함수이며, 전장의 세기  $E$  [V/m]는 전장 해석을 통해 구하여진다.

$U_{rad}$  은 아크 중심부에서 방출되는 복사 에너지와 아크 주변부에서 재흡수되는 복사 에너지를 고려한 다음의 식으로 표현된다.

$$U_{rad} = U_e - U_a \tag{6}$$

여기서  $U_e$  [J/kg·sec] : 방출되는 복사량,

$U_a$  [J/kg·sec] : 재흡수되는 복사량을 나타낸다.

방출되는 복사에너지  $U_e$  는 온도, 압력 및 아크 반경의 함수로 주어지지만, 재흡수되는 복사 에너지  $U_a$  는 아크 중심부에서 방출되는 복사량에 따라서 달라지며 평가하기가 매우 어렵다.

### 2.2 고온 SF6의 물성치 계산

본 논문에서 이용한 고온 SF<sub>6</sub> 가스의 물성치는 Libermann[10]의 데이터를 이용하였다. 이 데이터에는 1000[K]에서 40000[K]의 온도 및 1기압에서 16기압의 압력에 따른 밀도, 엔탈피, 전기전도도, 압축도 등의 여러 가지 물성치가 주어져 있다. 즉, 밀도 및 내부 에너지가 다음과 같은 온도와 압력에 대한 함수 형태로 주어진다.

$$\rho = \rho(P, T) \tag{7}$$

$$I = I(P, T) \tag{8}$$

하지만 오일러 방정식을 해석하게 되면 밀도 및 내부에

너지가 구하여지며, 이들 값으로부터 압력 및 온도를 구하여야 한다. 이상 기체의 경우는  $P = (\gamma - 1) \rho I$  의 상태 방정식을 이용하여 압력을 구할 수 있지만, 고온 가스의 경우는 비열비가 온도 및 압력의 함수이기 때문에 압력이 이상 기체의 경우처럼 간단한 식으로 주어지지 않는다. 오일러 방정식에 의해 구한 밀도 및 내부에너지로부터 온도 및 압력을 구하기 위해서는 다음과 같은 형태의 데이터가 필요하다.

$$P = P(\rho, I) \tag{9}$$

$$T = T(\rho, I) \tag{10}$$

식(7),(8)의 형태로 주어진 데이터를 식(9)(10)의 형태로 변환하여 사용할 수 있지만, 이 경우 두 변수에 대한 역변환이 필요하며 정확한 데이터를 얻기 위해서는 많은 수의 데이터가 필요하다. 여기서는 역변환시의 데이터 오차를 줄이면서 밀도 및 내부에너지에 대한 압력 및 온도를 정확히 구하기 위해서 다음의 과정을 이용하였다.

먼저 압력 변화가 이전 해석 스텝에 비해 크게 변하지 않는다는 가정 하에 이전 스텝의 압력을 이용하여 다음 식에 의해 엔탈피를 계산한다.

$$h^n = E^n + \frac{P^{n-1}}{\rho^n} \tag{11}$$

여기서  $E^n$  은 현재 계산 스텝의 에너지이며,  $P^{n-1}$  은 이전 계산 스텝의 압력이다.

계산된 엔탈피 및 이전 스텝의 압력으로부터 Libermann의 데이터를 이용하여 온도를 계산한다.

$$T^n = T(P^{n-1}, h^n) \tag{12}$$

그리고 이전 스텝의 압력 및 계산된 온도와 Libermann 데이터를 이용하여 압축도(compressibility)를 계산한다.

$$Z^n = Z(P^{n-1}, T^n) \tag{13}$$

최종적으로 압력은 다음의 일반적인 기체 상태 방정식에 의해 구한다.

$$P^n = R Z^n \rho^n T^n \tag{14}$$

여기서  $R$  은 상온에서의 기체 상수[J/kg · K]이다.

### 2.3 Ohmic Heating 계산

유동 해석으로부터 온도 및 압력을 구하면 각 셀에서의 전기전도도는 Libermann 데이터[10]를 이용하여  $\sigma = \sigma(P, T)$  로부터 구할 수 있으며, 이 때 Ohmic

heating은 다음과 같다.

$$S_{ohm} = \sigma E^2 \tag{15}$$

여기서  $E$  [V/m]는 전장의 세기를 나타내며, 다음의 식들로부터 전장의 세기를 구한다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \tag{16}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{17}$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \tag{18}$$

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \tag{19}$$

식(19)는  $\sigma \neq 0$  인 영역에 대해서만 해석을 하여야 하지만, 계산의 편의를 위해 해석 영역은 고정시켜 두고,  $\sigma$  가 0인 요소에는 매우 작은 값의 전기전도도를 입력하여 해석하면 해석 영역을 바꿀 필요 없이 해석이 가능하다.

한편 해석 시에 알고 있는 값은 아크 전류이며, 전장 해석 시에는 양극 및 음극의 전위차를 알아야 한다. 이를 위해서 다음의 경계 조건을 이용하여 전장 해석을 한 후, 총 전력(total power)을 계산하여 아크 전압을 계산한다.

$$\phi_a = 1 [V] \tag{20}$$

$$\phi_c = 0 [V] \tag{21}$$

$\phi_a, \phi_c$  는 해석 시 경계조건으로 부여되는 양극 및 음극의 전위값이며, 이 값으로부터 전장 해석을 하면 전위차가 1[V]인 경우의 전장의 세기가 계산되어진다. 전위차가 1[V]인 경우의 전장의 세기를  $\vec{e}$  라고 하고, 실제 전극간의 전위차를  $V_{arc}$  [V]라고 하면 실제 전극간의 전장의 세기는

$$\vec{E} = V_{arc} \vec{e} \tag{22}$$

가 된다.

아크 전압  $V_{arc}$  를 계산하기 위한 아크 영역의 총 전력은 다음 식으로 표현이 된다.

$$P = \int \sigma E^2 dV = \int \sigma (V_{arc} e)^2 dV = V_{arc} I_{arc} \tag{23}$$

여기서  $I_{arc}$  [A]는 알고 있는 아크 전류의 크기이다.

따라서 극간의 전압은 다음 식으로 계산된다.

$$V_{arc} = \frac{I_{arc}}{\int \sigma e^2 dV} \tag{24}$$

### 3. 열가스 해석을 위한 복사 모델의 적용

#### 3.1 간이 복사 모델

차단기 내에서 복사에 의한 에너지 전달은 대부분 고온 플라즈마 영역에 집중되어 있다. 아크 플라즈마 내에서 복사에 의한 강한 에너지 교환이 일어나며 이로 인해 온도는 평형 상태에 도달한다. 물리적으로 복사는 방출(emission)과 흡수(absorption)의 두 부분으로 나눌 수 있다. 가스를 구성하는 모든 기본 구성 입자들은 각각 일정한 비율로 복사 에너지를 방출하며 이 비율은 국부적인 온도 및 압력에 의해 결정되며, LTE 조건 하에서는 2개의 열역학적 변수의 함수 형태로 표현이 가능하다.

한편, 방출된 복사 에너지의 많은 양은 아크 경계부분에서 재흡수가 일어난다. 재흡수 되는 양은 공간에 존재하는 아크에 의해 방출된 복사 에너지와 플라즈마의 다른 부분에서 재흡수된 양에 따라 결정된다.

아크 내에서의 복사 전달을 계산 시에는 많은 어려운 문제들이 있으며, 가장 큰 문제 중의 하나는 방출되는 복사 에너지는 LTE 가정 하에서 국부적인 현상이지만, 흡수되는 복사 에너지는 전체 플라즈마 영역에서 방출되는 복사 에너지에 의해 결정된다는 점이다. 따라서 온도 및 압력으로부터 방출되는 복사 에너지의 양은 계산되지만, 어떤 지점에서 흡수되는 복사 에너지의 양을 계산하기는 매우 어렵다.

차단기 내에서 발생하는 아크는 거의 실린더 형상이기 때문에, 많은 연구자들은 아크 내의 복사 전달을 계산 시에 순방출계수(Net emission coefficient)를 이용하고 있다. Liebermann과 Lowke[11]에 의해 계산된 이 계수는 등온, 등압의 실린더 형태의 아크에서 방출되는 단위 체적당 평균 복사 에너지를 나타내며, 아크 온도, 압력 및 아크 반경의 함수로 구성되어 있다. 그림 1에 SF<sub>6</sub> 가스 아크의 아크 온도, 반경 및 압력에 따른 순방출계수를 나타내었다.

이 계수를 이용하여 아크에 의한 복사 에너지를 계산하면 계산이 간단해지지만, 아크에 의한 복사 전달을 거시적 관점에서 평가하게 된다. 하지만 차단기 내에서 발생하는 아크는 위치에 따라서 온도 및 압력이 다르기 때문에 평균적인 복사 에너지를 표현하는 순방출계수를 어떻게 이용하여 실제 아크 내의 복사 전달을 표현할 것인가가 문제가 된다. 또 다른 복잡한 사항은 아크 중심부에서 방출되는 복사 에너지의 상당한 양이 아크 경계 부분에서 재흡수가 되며, 이 특성은 어떠한 아크 모델에서도 고려가 되어야만 정확한 복사 전달을 표현할 수 있다. 실험에 의해서 밝혀진 바로는 방출되는 전체 복사 에너지의 약 10~25[%]만이 흡수가 되지 않고 완전히 아크 영역을 벗어나는 것으로 알려지고 있다.

본 논문에서는 간이 복사 전달 모델[4]을 이용하여 방출 및 흡수되는 복사 에너지를 계산한다. 이 모델은 파퍼식 차단기 내의 아크, auto-expansion 타입의 차단기 내의 아크 [12] 및 초음속 노즐 내의 아크 등의 해석에 이용되어 시험 결과와 비교하여 만족할 만한 결과를 보였다.

이 모델은 그림 2에서와 같이 반경 방향의 온도 분포를 이용하여 방출 및 재흡수되는 구간을 온도에 따라서 설정하여, 아크 중심부에서는 방출되는 복사 에너지를 계산하고, 아크 경계부에서는 방출되는 에너지의 일정량이 재흡수되

게 한다.

이 모델에 의하면 아크의 중심부(  $0 \leq r \leq R_1$  )에서 방출된 에너지의 일부가 흡수층(  $R_1 \leq r \leq R_3$  )에서 흡수가 되고, 나머지 부분이 완전히 아크 영역을 벗어나게 된다. 아크의 중심부와 재흡수층은 반경 방향의 온도 분포에 따라 결정된다. 아크 중심부에 해당하는 온도 범위는  $\alpha T_0 \leq T \leq T_0$  이며, 여기서  $T_0$  는 축상의 온도이며,  $\alpha$  는 실험 결과에 기초한 상수이다. 이 영역에서 복사되는 단위 체적당 단위 시간당의 복사에너지는 온도, 압력 및 아크 반경의 함수가 된다. 아크 반경에 대한 정확한 정의는 없지만, 일반적으로 아크 반경은 이온간의 재결합 및 이온화 현상을 무시할 수 있는 경계 온도에 해당하는 반경을 선택한다. SF<sub>6</sub> 가스의 경우, 이 온도는 약 4000[K] 정도이다. 상수  $\alpha$  는 여러 가지 시험 결과와 해석 결과를 바탕으로 하여 [13] 약 0.83의 값을 설정하였다. 또한 이온과 분자간의 재결합에 의해 복사 에너지의 양이 감소하기 시작하는 반경  $R_2$  는 중심축 상의 온도의 1/2이 되는 지점으로 선택하였다. 각 아크 반경에 대한 복사 에너지는 각각 다음과 같이 구하여진다.

$$(i) \text{ 아크 중심부 : } \alpha T_0 \leq T \leq T_0$$

$$( 0 \leq r \leq R_1, \alpha \approx 0.83 )$$

이 구간에서 단위 체적당 단위 시간당의 순 방출되는 복사 에너지는 다음과 같다.

$$U_{rad} = \epsilon_N ( T, P, R_{arc} ) \quad (25)$$

여기서  $R_{arc}$  은 아크 반경을 나타내며,  $\epsilon_N$  [Watt/m<sup>3</sup> ] 은 순방출계수를 나타내며, 아크 온도, 압력 및 반경의 함수로 구성되어 있다. 아크 반경  $R_{arc}$  는 온도가 4000[K]인 지점의 반경으로 설정하였으며, 그림 1에서 보듯이 순방출계수 데이터는 1기압 및 10기압에 대한 값만 주어져 있기 때문에, 이 범위 내의 압력에 대해서는 보간을 하여 사용하였고, 이 값의 범위를 벗어나는 기압에 대해서는 외삽에 의해 값을 구하였다.

$$(ii) \text{ 재흡수층 : } T_s \leq T \leq \alpha T_0 \quad ( R_1 \leq r \leq R_3 )$$

이 구간에서는 이온과 원자간의 빠른 재결합에 의해 아크 중심부에서 방출되는 복사 에너지를 흡수하게 되며, 따라서 흡수되는 양이 방출되는 양보다 많기 때문에 음의 복사 에너지 평형을 이루게 된다. 재흡수가 시작되는 온도는 중심축 상의 온도에 따라 달라지며, 아크 반경에 해당하는 온도  $T_s$  는 4000[K]로 설정한다.

구간  $R_1 \leq r \leq R_0$  및  $R_2 \leq r \leq R_3$  에서는 재흡수되는 양이 선형적으로 변하고,  $R_0 \leq r \leq R_2$  에서는 일정한 값  $U_b$  를 가진다고 가정한다. 여기서  $R_0 = (R_1 + R_2) / 2$  이다.

참고문헌[14]에 의하면 방출되는 양의 약 80[%]가 재흡수되며, 이 조건으로부터  $U_b$  를 다음식에 의해 계산할 수 있다.

$$\int_{R_1}^{R_3} U_{rad} dV = 0.8 \int_0^{R_1} U_{rad} dV \quad (26)$$

$$U_b = \frac{-2.4 \int_0^{R_1} U_{rad} dV}{\pi [(R_2 - R_1)(R_2 + R_0 + R_1) + (R_3 - R_0)(R_0 + R_2 + R_3)]} \quad (27)$$

(iii) thermal layer :  $T_\infty \leq T \leq T_s$

여기서  $T_\infty$  [K]는 주변의 가스의 온도를 나타내며, 이 영역에서 가스는 방출 및 흡수하는 복사 에너지가 0이다.

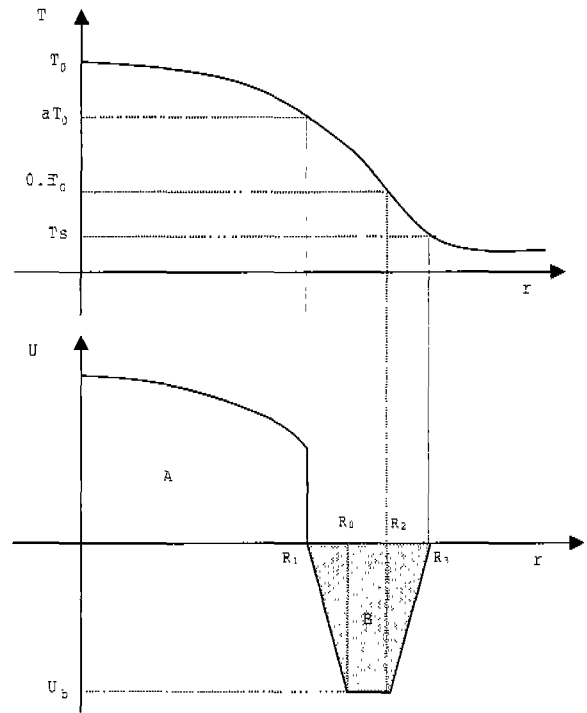
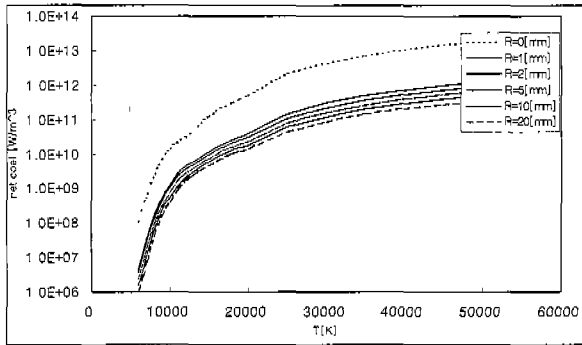


그림 2 간이 복사 모델  
Fig. 2 Simplified radiation model

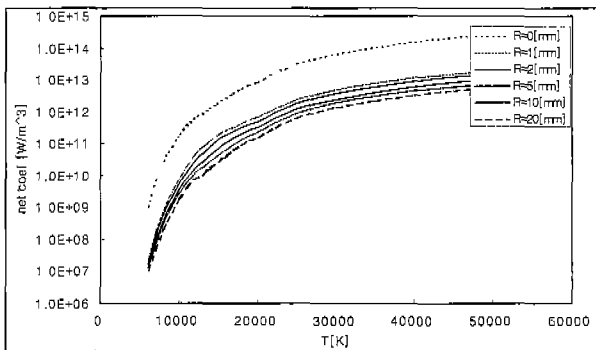
3.2 가상 아크 영역을 이용한 간이 복사 모델의 적용

간이 복사 전달 모델을 이용하는 경우, 반경 방향으로의 온도 분포를 알아야 한다. 하지만 삼각형 요소 등의 비정렬 격자를 사용하는 경우, 요소들이 반경 방향으로 일정하게 정렬되어 있지 않기 때문에 반경방향의 온도 분포 파악 및 간이 복사 모델을 적용하기가 쉽지 않다. 여기서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 가상 아크 영역을 설정하여, 이 영역에 아크 모델을 적용하는 방법에 대해서 설명한다.

가상 아크 영역은 아크가 발생할 가능성이 있는 영역을 포함하는 임의의 영역이다. 영역의 형상은 임의로 정의할 수 있으며, 되도록 아크 발생 가능성이 있는 영역을 위주로 최소로 잡는 것이 좋다. 가상 아크 영역에 간이 아크 모델을 적용하기 위해서 본 논문에서는 직사각형 형태의 가상 아크 영역을 선택한 후, 이 직사각형 영역 내에 정렬 격자를 생성한다. 가상 아크 영역 내의 셀의 유동 변수들은 이 셀을 둘러싸고 있는 유동 격자 셀들을 이용하여 계산한다. 이제 가상 아크 영역 내의 셀들의 온도 분포를 알면, 이 분포를 이용하여 각 셀별로 간이 아크 모델을 적용한다. 각 셀에서의 복사 에너지 항을 계산 한 후, 가상 아크 영역 내에 있는 유동 셀들에 이 값들을 다시 대입한다. 이상을 정리하면 다음의 순서로 가상 아크 영역을 이용하여 아크 모델을 적용시킨다.



(a) 1기압인 경우



(b) 10기압인 경우

그림 1 아크 반경 및 압력에 따른 순방출계수  
Fig. 1 Net emission coefficients according to arc radius and pressure

- (1) 아크가 발생할 가능성이 있는 영역을 둘러싸는 직사각형의 가상 아크 영역을 설정.
- (2) 가상 아크 영역 내에 직사각형의 정렬 격자 생성.
- (3) 비정렬 유동 셀의 값을 이용, 가상 아크 영역 내의 정렬 격자 셀의 온도, 압력 및 전기 전도도를 계산하여 저장.
- (4) 각 셀별로 반경 방향의 온도 분포를 이용하여 간이 복사 모델로부터 방출 및 재흡수되는 복사량 계산.
- (5) 가상 아크 영역 내의 유동 셀에 계산된 복사 에너지 대입.

#### 4. 사례 연구 및 검토

본 논문에 의한 열가스 유동 해석 방법을 72.5kV급 차단기에 적용하여, 대전류 차단시의 실린더 실의 압력과 아크 전압을 시험 결과와 비교한다.

아크는 접점이 분리되는 순간부터 발생하지만, 해석 시에 아주 작은 공간사이에 아크를 고려하는 것이 어렵기 때문에, 접점이 분리된 후, 어느 정도 접점을 더 이동시킨 후에 아크가 발생하는 것으로 가정한다. 아크 영역에 전류가 흐르기 위해서는 가스 공간이 전기 전도성을 가져야 하기 때문에, 아크 영역의 온도는 전기 전도도를 가지는 최소 온도 이상이 되어야 한다. 따라서 점점 분리 전의 냉가스 유동 해석 후, 열가스 해석으로 전환 시에 아크 영역에 대한 초기화가 필요하다. 즉 적절한 방법에 의해 접점 사이의 공간이 아크 전류가 흐를 수 있도록 온도를 설정해 주어야 한다.

본 논문에서는 이러한 아크 초기화 방법으로서 점점 사이의 공간에 임의로 에너지를 주입하여, 이 에너지에 의한 유동 해석을 통해 아크 초기 영역이 일정 온도 이상이 될 때까지 계속 에너지를 주입하는 방법을 이용하였다. 즉 주입된 에너지에 의해 온도가 상승하여, 초기 아크 영역의 평균 온도가 5000[K]가 될 때까지 에너지 주입을 계속 한 후, 5000[K]가 넘어서면 아크 모델링에 의해 열가스 유동을 진행한다.

모델 차단기의 총 스트로크 길이는 128[mm], 스트로크 이동 시간은 약 30[ms]이다. 점점 분리되는 스트로크 이동 길이가 약 18[mm]시이며, 이 시점이 아크 발생 시작 시간이 된다. 그림 3은 해석에 이용한 아크 전류 크기를 보여주며, 이 파형은 실제 시험에 이용된 것이다. 전류는 피크치 21.5[kA], 주파수 55[Hz]의 정현파 교류이며, 아크 시간은 8.5[ms]이다.

그림 4는 아크 시간에 따른 전압을 시험 결과와 비교한 것이다. 해석 시에 접점이 분리된 후, 약 2[ms] 동안 전극을 더 이동시킨 후 아크를 점점 사이에 발생시켰기 때문에, 해석 결과는 아크 시간 약 2[ms]이후부터 나타내었다. 아크 시간 6[ms] 이후의 해석 결과와 시험 결과가 차이가 많이 나는 것은 본 모델에서는 오일러 방정식을 기본 지배방정식으로

주울 열과 복사 에너지에 의한 에너지 손실만을 고려하였지만, 전류 영점으로 갈수록 전도에 의한 영향이 크게 나타나며, 또한 전극 증발에 의한 금속 증기 등도 아크 저항에 영향을 주지만, 본 논문에서의 아크 모델은 이러한 점들을 고려하지 못하였기 때문인 것으로 생각된다.

그림 5는 실린더실의 압력 상승치를 시험 결과와 비교한 것이다. 개극 전의 냉가스 해석 시에는 시험 결과와 해석 결과가 거의 비슷한 경향을 보인다. 스트로크 시작 후 약 9.5[ms]에서 접점이 개극되어 아크에 의해 노즐목이 막히는 폐색 현상(clogging) 때문에 실린더실의 압력은 아크가 없는 무부하의 경우보다 높아진다. 그림에서 보면 아크 발생 후 초기에는 해석 결과는 시험 결과와 비슷하지만, 시간이 지날수록 차이가 나고 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 본 논문에서는 노즐 용삭 및 전극의 금속 증기에 의한 영향 등을 고려하지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

그림 6은 아크 시간에 따른 온도 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 아크 중심부의 온도는 23,000~25,000[K] 정도이며, 고정 아크 전극이 노즐목을 벗어 나기 전에는 고온의 열가스가 왼쪽으로 많이 흐름을 볼 수 있다. 아크 시간 약 5[ms] 이후에는 전극과 노즐목 사이의 공간으로도 유동이 많이 발생하여 열가스가 이 공간으로 이동하는 현상을 볼 수 있다. 아크 시간 7[ms] 이후에는 전극이 노즐목을 벗어 나기 때문에 열가스가 전극 선단 90도 이후 영역까지 확대된다. 그리고 아크 전류가 0이 되는 아크 시간 8.5[ms] 시점에서는 아크가 냉각되어 아크 최고 온도는 약 2,500[K]가 된다. 이 때 전극 앞부분에서 열가스가 많이 남아 있음을 볼 수 있다. 아크가 소멸된 8.5[ms] 이후에도 공간에는 수 천도의 뜨거운 가스가 분포하고 있으며, 이러한 열가스는 절연 특성에 영향을 주기 때문에 정확한 해석을 통해 이러한 열가스 분포를 파악하는 것은 매우 중요하다.

그림 7은 아크 시간에 따른 밀도 분포를 보여준다. 고온 아크 영역은 밀도가 4[kg/m<sup>3</sup>] 이하의 낮은 밀도 값을 형성하며, 열가스가 왼쪽 및 오른쪽 노즐 방향으로 흘러가고 있는 현상을 잘 나타내고 있다. 아크 시간 10[ms] 이후에는 극간의 온도가 점차 낮아져 밀도가 높아지고 있다. 이는 피스톤 압축에 의해 냉가스가 극간의 가스를 냉각시키며, 전류 영점으로 갈수록 입력 에너지가 적어지기 때문이다. 하지만 전류 영점 이후 아크가 소멸한 후에도 공간에는 밀도가 6[kg/m<sup>3</sup>] 이하의 가스가 존재하며, 이러한 가스는 절연 특성의 저하를 가져올 가능성이 높다.

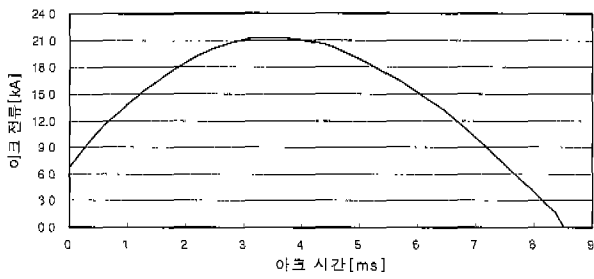


그림 3 아크 전류 크기

Fig. 3 Arc current magnitude

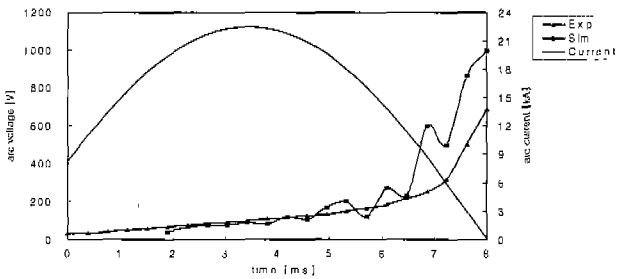


그림 4 아크 전압 비교

Fig. 4 Comparison of arc voltage

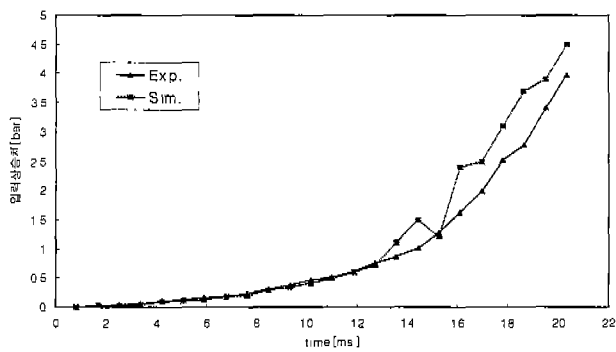
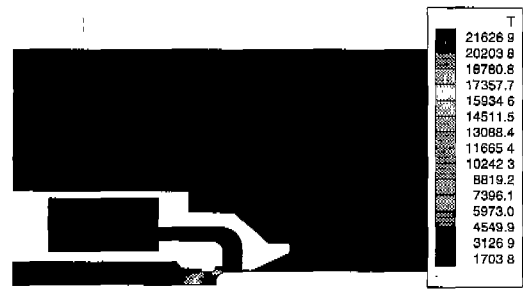
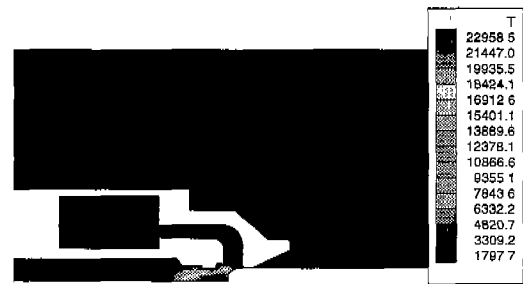


그림 5 실린더실 압력 상승 비교

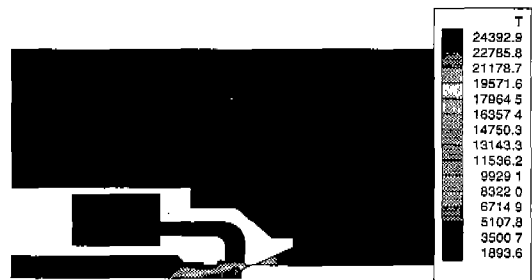
Fig. 5 Comparison of pressure rise in cylinder chamber



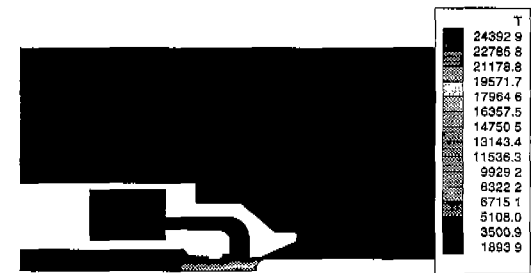
(a) 아크시간 = 2[ms]



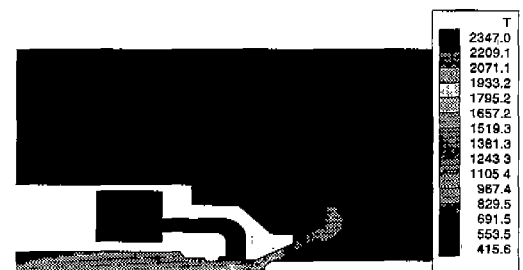
(b) 아크시간 = 4[ms]



(c) 아크시간 = 5[ms]



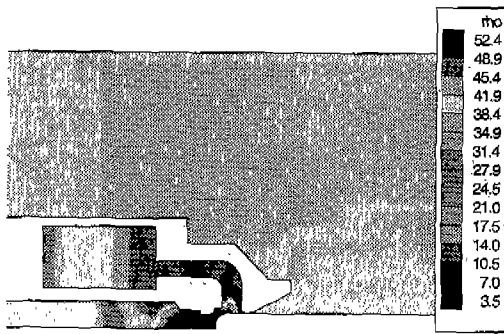
(d) 아크시간 = 7[ms]



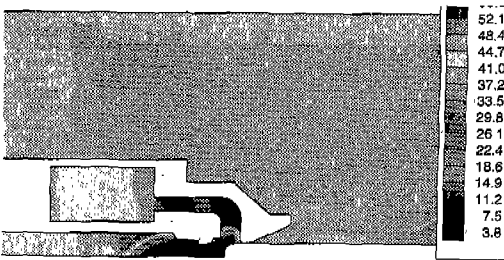
(e) 아크시간 = 8.5[ms]

그림 6 아크 시간에 따른 온도 분포[K]

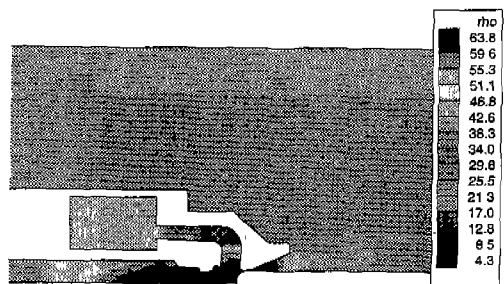
Fig. 6 Temperature distribution with arcing time[K]



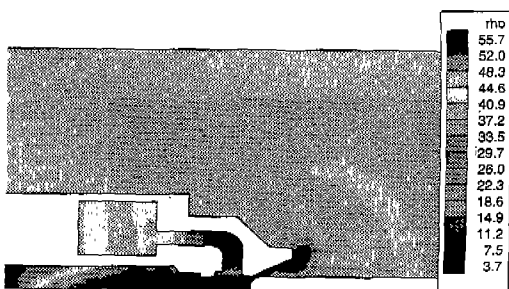
(a) 아크시간 = 2[ms]



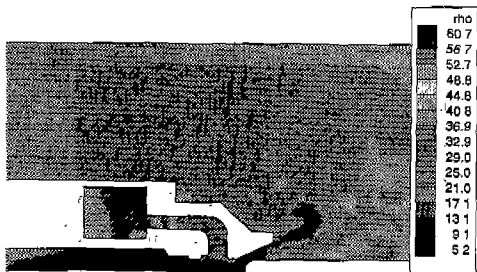
(b) 아크시간 = 4[ms]



(c) 아크시간 = 5[ms]



(d) 아크시간 = 7[ms]



(e) 아크시간 = 8.5[ms]

그림 7 아크 시간에 따른 밀도 분포[kg/m<sup>3</sup>]  
Fig. 7 Density distribution with arc time[kg/m<sup>3</sup>]

### 5. 결 론

본 논문에서는 대전류 구간에서의 아크에 의한 영향을 고려한 열가스 유동 해석을 위해서 오일러 방정식을 기본 지배 방정식으로 하여, FVFLIC법을 이용한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 간이 복사전달 모델로부터 방출 및 재흡수를 고려한 복사 전달량을 계산하였으며, 이 모델을 비정렬 격자에 적용하기 위해서 가상 아크 영역을 이용한 적용 방법을 제안하였다. 해석 결과와 시험 결과와의 비교를 통해, 오일러 방정식을 이용한 본 논문의 해석 방법은 대전류 구간에서는 정확도를 가지지만, 전류 영점으로 갈수록 시험 결과와 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 전류 영점 부근에서 정확한 해석을 하기 위해서는 아크에 의한 노즐의 용삭, 전극의 증발, 난류 및 점성에 의한 영향, 열전도 등을 정확히 모의하여야 할 것이다. 또한 복잡한 복사전달 과정을 정확히 고려할 수 있는 복사모델의 연구도 수반되어야 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] Kunio Nakanishi, "Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers", MARCEL DEKKER, INC., 1991.
- [2] H.M. Ryan and G.R. Jones, "SF6 switchgear", Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [3] Hermann, W., Kogelschatz, U., Ragaller, K. and Schade, "Investigation of a Cylindrical Axially Blown High Pressure Arc", *Journal of Physics, D: Applied Physics*, 7, pp. 607-619, 1974.
- [4] J. F. Zhang, M. T. C. Fang, D. B. Newland, "Theoretical investigation of a 2kA DC nitrogen arc in a supersonic nozzle", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 20, pp. 368-379, 1987.
- [5] J.Y. Trépanier, X. D. Zhang, H. Pellegrin, R. Camarero, "Application of computational fluid dynamics tools to circuit-breaker flow analysis", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 2, pp. 817-823, 1995.
- [6] 김홍규, 신승록, 정현교, 김두성, 권기영, "Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석", 대한전기학회 논문지 Vol. 48B, No. 7, pp. 233-239, 2000년 4월.
- [7] 신승록, 김홍규, 정현교, "Modified FLIC법과 아크 모델을 이용한 차단기 내의 아크 유동 해석", 대한전기학회 논문지 Vol. 49B, No. 3, pp. 172-170, 2000년 3월
- [8] H.K. Kim, C.Y. Bae, H.K. Jung, B.Y. Lee, K.D. Song, and K.Y. Park, "Numerical Analysis of High Current Arcs in a Gas Circuit Breaker", *Proceedings of the XIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications*, Vol. 1, paper No. A-2, 2000.
- [9] X. Jianyuan and W. Qiping, "Spectroscopic



investigations for the temperature of nozzle arc in a SF<sub>6</sub> model puffer interrupter," *Proc. ECAAA*, pp. 169-172, 1989.

- [10] Frost, L. S. and Liebermann, R. W., "Composition and Transport Properties of SF<sub>6</sub> and their Use in a Simplified Enthalpy Flow Model", *Proc. IEEE*, 59(4), 474-485, 1971.
- [11] R. W. Liebermann, J. J. Lowke, "Radiation emission coefficients for sulfur hexafluoride arc plasmas", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, vol. 16, pp. 253-264, 1976.
- [12] J. D. Yan, M. T. C Fang, W. Hall, "The development of PC based CAD tools for auto-expansion circuit breaker design", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 1, pp. 176-181, 1999.
- [13] K.Y. Park, "Mathematical Modelling of SF6 Puffer Circuit Breakers", Ph.D. Thesis, The University of Liverpool, 1993.
- [14] M. T. C. Fang and J. F. Zhang, "The dynamic behavior of nozzle arcs," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. PS-14, pp. 350-356, Aug. 1986.

## 저 자 소 개



**김 홍 규 (金 洪 桂)**  
 1969년 출생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 서울대 공대 전기공학부 대학원 박사과정  
 Tel:(055) 280-1568 ,  
 Fax:(055)280-1589  
 E-mail : kimhk@keri.re.kr



**박 경 업 (朴 敬 燁)**  
 1957년 1월 3일 생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1978년 12월~1981년 5월 효성중공업(주) 전장설계부. 1981년 6월~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 신전력기연구그룹 그룹장(책임연구원).  
 Tel:(055) 280-1561, Fax:(055)280-1589  
 E-mail : kypark@keri.re.kr



**배 채 윤 (裴 埜 允)**  
 1972년생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업(학사). 2001년 서울대 공대 전기·컴퓨터 공학부 대학원 졸업(석사). 현재 서울대 공대 전기·컴퓨터 공학부 대학원 박사과정.  
 Tel:(02) 880-7262, Fax:(02)878-1452  
 E-mail : olando@elecmech.snu.ac.kr



**조 경 언 (趙 慶 淵)**  
 1979년 서울대 공대 기계과 졸업. 1981년 KAIST 대학원졸업(석사). 1988년 Georgia Institute of Technology 대학원 졸업(공학박사). 대우 및 삼성전자 연구원 역임. 현 서울대 전기공학부 연구원.  
 Tel:(02) 880-7262, Fax:(02)878-1452  
 E-mail : kycho@elecmech.snu.ac.kr



**정 현 교 (鄭 炫 敎)**  
 1955년생, 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1989년 뉴욕 Polytechnic Univ. 객원교수. 1984~1993년 강원대 전기공학과 부교수. 현재 서울대 전기·컴퓨터공학부/ 전기공학부 교수.  
 Tel:(02) 880-7242, Fax:(02)878-1452  
 E-mail : hkjung@snu.ac.kr