

# 유체 모델을 기반으로 하는 유도 결합 플라즈마 시뮬레이터 개발 현황

권득철 · 윤남식\*

충북대학교 전기공학과, 청주 361-763

(2009년 4월 21일 받음, 2009년 5월 18일 수정, 2009년 5월 19일 확정)

유체 모델을 기반으로 하는 국내의 유도 결합 플라즈마원의 시뮬레이터 개발 현황을 정리하였다. 전체 시뮬레이터를 구성하는 각 부분으로서, 전자 가열, 하전 입자 및 중성종 수송, sheath를 포함한 표면 반응, 그리고 GUI (Graphic User Interface) 및 전후처리 등 순으로 설명되었다. 현재까지 시뮬레이터에 구현된 화학 반응 데이터와 swarm 데이터도 정리하여 보았고, 앞으로의 개발 방향을 전망하여 보았다.

주제어 : 유도 결합 플라즈마, 유체 모델, 시뮬레이션

## I. 서 론

유도 결합 플라즈마원은 간단한 기하학적인 구조로 고밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있다는 장점 때문에 반도체, 디스플레이 및 태양전지 제작을 위시한 여러 산업 분야에 널리 응용되고 있다. 유도 결합 플라즈마원의 구성은 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 전자 가열 과정과 연관된 전원에서 안테나까지의 영역, 하전 입자와 중성종의 수송 현상이 발생하는 플라즈마 반응로 그리고 sheath 현상과 표면 반응이 발생하는 부분 등으로 구성되어 있다.

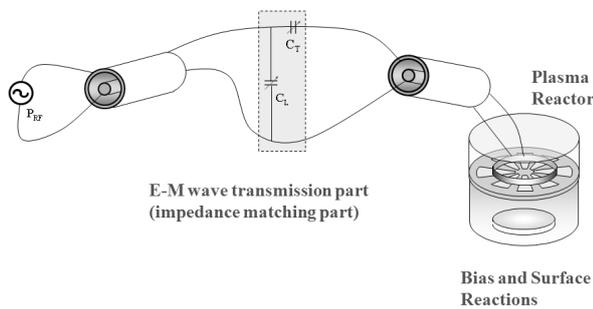


Figure 1. A schematic diagram of ICP source.

이러한 플라즈마원의 개발과 성능 향상 및 공정 최적화를 위해서는 플라즈마원의 작동 원리와 플라즈마의 물리, 화학적 물성에 대한 이론적인 이해가 필수적이며, 이를 기

반으로 한 시뮬레이터의 제작은 공정 기술의 출발점이라고 할 수 있을 것이다.

그러나 플라즈마의 특성을 기술하는 유체 방정식은 매우 복잡한 비선형 미분 방정식들이며, 특히 전자기학적 특성이 매우 강해 맥스웰 (Maxwell) 방정식의 지배를 동시에 받아야 하는 하전 입자의 경우, 여러 가지 물성에 대한 물리적인 이해도는 매우 낮은 수준이라고 할 수 있으며, 그러한 전기 유체 방정식을 다룰 수 있는 수치 해석적 기법도 완전하지 못한 상황이다. 또한 공정 기술의 발전에 의해 적용되는 방전 가스의 종류가 매우 다양해짐에 따라 이에 대한 물리, 화학적 반응에 대한 계수들의 확보도 기업의 요구 수준에 크게 못 미치고 있는 상황이다. 이러한 기술적인 상황으로 인해 야기되는 당연한 결과로써, 실제 장비를 개발하고 응용하는 산업 현장에서의 적용 과정은 많은 부분들이 정확한 원리 이해가 결핍된 상태에서 시행착오에 의존하여 진행되는 경우가 많으며, 이는 심각한 인적, 물적, 그리고 시간적 낭비들을 초래하고 있다.

그러므로 근래에 유도 결합 플라즈마원에 대한 작동 원리와 플라즈마의 물성을 이해하기 위한 학술적인 노력들이 경주되어, 그 결과 상당한 기술적 진보가 있었으나, 아직도 산업 현장에서의 요구에는 크게 못 미치고 있어 앞으로의 지속적인 기술 개발 노력이 필요한 상황이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 기술적 현황을 배경으로 현재까지 개발되어 완성된 시뮬레이터의 기술적 상황을 주로 국내

\* [전자우편] nsyoon@cbnu.ac.kr

대학 연구실의 연구 성과들을 중심으로 정리해 보았고, 앞으로의 개발 방향에 대해서도 전망해 보았다. 이어지는 II장에서 유도 결합 플라즈마원 시뮬레이터의 구성 요소와 관련된 기술에 대해 포괄적으로 정리하였고, III장에서 VII장까지 각 부분별 개발 현황을 정리하였다. VIII장에서는 앞으로의 시뮬레이터 개발에 대한 방향을 전망하며 끝을 맺었다.

## II. 유도 결합 플라즈마 시뮬레이터의 전체 구성

유도 결합 플라즈마원 시뮬레이터는 Fig. 2와 같이 크게 핵심적인 물리, 화학적 양들을 계산하는 기능의 시뮬레이션 부분과 장치 및 장치 외부 변수를 입력하고 계산된 결과를 시각화하는 GUI (Graphic User Interface) 부분으로 구성된다. 시뮬레이션 부분은 다시 전자가열 모듈, 하전 입자 수송 모듈, 중성종 및 활성종 수송 모듈, 그리고 RF (Radio Frequency) sheath를 포함하는 표면 반응 모듈로 구분할 수 있다.

플라즈마 발생의 근원인 이온화 과정의 직접적인 원인으로서의 전자 에너지 흡수 과정을 다루는 전자 가열 모듈은 Fig. 1의 전체 장비 구조에서 볼 때 주로 전원에서 안테나까지의 영역에 연관되어 있고, 이때 안테나와 근접해 있는 플라즈마는 전자기학적 물질로 취급된다. 플라즈마 내에서는 맥스웰-볼츠만 (Maxwell-Boltzmann) 방정식을 수치적 혹은 해석적인 방법으로 풀어 전자기장과 흡수된 파워를 계산한다. 계산된 전자기장과 흡수된 파워의 공간 의존성은 수송 모듈과 일관성을 잃지 않고 결합될 수 있으며, 독립 모듈로서 안테나 설계에 활용될 수 있다. 또한 임피던스의 장 정의 이론 (Field Definition of the Impedance)을 이용하여 장치 임피던스를 계산함으로써 전체 장치의 회로적 모델을 정립하고, 이 결과는 임피던스 정합 회로의 설계 도구로 활용될 수 있다. 가열 이론의 핵심이라고 할 수 있는 전자 가열 모듈은 고전적인 충돌 흡수 현상 뿐 아니라 저압 조건에서의 비 충돌 과정인 ASE (Anomalous Skin Effect)가 포함되어야 한다는 것이 잘 알려져 있으며 [1-5], 이를 수치 해석적으로 구현하기 위한 여러 가지 모델들이 제시되어 왔다 [1-15]. 전자 가열 모듈에 대한 보다 자세한 개발 현황은 III장에서 기술 될 것이다.

안테나로부터 흡수된 파워의 공간 의존성이 전자 가열 모듈에서 계산되면, 이를 에너지원으로 하여 수송 방정식

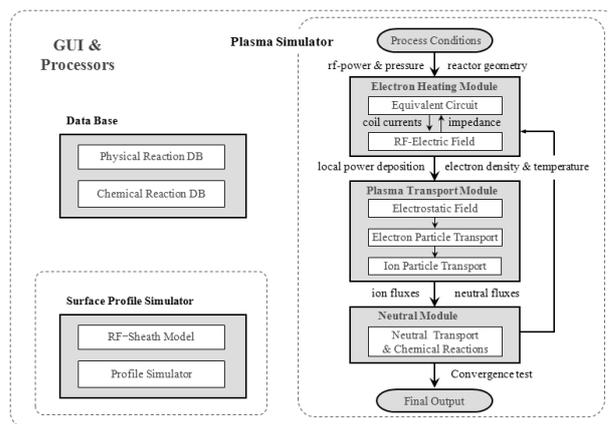


Figure 2. A block diagram of inductively coupled plasma simulator.

의 수치 해석적 해로서 밀도와 온도를 비롯한 다양한 물리량들을 계산하게 된다. 중성 가스에 대한 유체 방정식과는 달리, Poisson 방정식과 연계된 하전 입자의 수송 방정식은 플라즈마 주파수가 크고 sheath 길이가 장치 사이즈에 비해 매우 작기 때문에 시뮬레이션의 시공간 간격에 매우 강력한 제약이 존재한다는 것이 잘 알려져 있으며, 이러한 제약을 극복하기 위한 다양한 모델과 수치 해석적 방법이 제안 되어왔고 [16-25], 아울러 다양한 형태의 경계 조건들이 개발되어 활용되었다 [26-30]. 이와 같이 다양한 모델이 개발되어 시뮬레이터로 제작된 이유는 간략화 작업이 배제된 상황에서 현실적인 시뮬레이션을 위한 수치 해석적 방법을 찾기 어려운 것에서 비롯된 것으로, 결과적으로 개발된 여러 가지 방법들과 모델들은 용도에 맞게 선택되어 활용되어야 한다.

현대의 장비들이 보다 낮은 조건에서의 방전을 요구하는 경우가 많아짐에 따라, 하전 입자 수송 과정에 대한 유체 모델의 정당성에 대한 비판적인 견해가 제기되는 경우가 종종 있는 상황이다. 사실상 이온의 경우에는 평균 충돌거리가 장치의 크기에 비견할 만한 상황이 가능하여 Knusen flow의 특성을 띠게 된다. 그래서 평균 충돌거리가 짧은 전자는 유체로, 상대적으로 긴 이온은 입자로 취급하는 혼합 방식의 시뮬레이션 기법도 시도된 경우가 있다 [31]. 그러나 여전히 유체 모델은 측정 가능한 물리량과 가장 근접해 있는 양들을 산출하여 가장 간단하고 효율적인 분석 도구로서의 역할을 수행할 수 있으므로, 이온의 충돌 거리가 장치의 사이즈를 초과할 경우에 장치 외벽과의 충돌을 유효한 충돌로 간주하여 유체 모델을 적용하는 방법이 보편적

으로 적용되고 있다. 따라서 현재의 시뮬레이터가 지향하는 전체적인 방향은, 여타의 여러 가지 플라즈마 모델링 상황이 모두 그렇듯이 하전 입자의 수송에 대한 기본 방정식으로 유체 방정식을 선택하고 kinetic한 효과들이 밝혀지면 그러한 효과가 포함될 수 있도록 유체 방정식을 수정하는 것이라고 할 수 있겠다.

중성종 및 활성종은 이온과 더불어 저압 조건에서 종종 유체 모델의 한계 상황에 있게 되는데, 역시 이온과 마찬가지로 유체 모델을 기반으로 하고 이를 보완하는 것이 보다 활용도를 높일 수 있는 방법일 것이다.

하전 입자 및 중성종을 포함하는 플라즈마의 수송 모델이 특정한 가스 방전에 적용되기 위해서는 물리, 화학적 반응들에 대한 계수들이 확보되어야 한다. 복합 가스 방전에 연관된 반응의 종류가 수십 가지에 이르는 경우가 많은 상황을 고려하면, 이러한 물리, 화학적 DB (Data Base)의 구축은 시뮬레이터의 활용도를 높이기 위해 매우 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 각각의 반응들에 대한 데이터들이 밝혀지고, 그러한 데이터들이 누적되어 하나의 가스 방전에 대한 종합 데이터가 구성되는 과정을 거친 후에야 시뮬레이션에 적용될 수 있는 상황을 고려하면, 이러한 DB 구축은 매우 어려운 일이 아닐 수 없다. 그러한 이유로 인해 현재 시뮬레이션에 직접 적용될 수 있는 방전 데이터들은 상당히 제한적인 상황이라고 할 수 있다 [32-54].

바이어스 및 표면 반응 모듈은 바이어스 전극에서 이온의 플럭스, 에너지 분포, 그리고 포텐셜을 계산하는 RF sheath 모듈과 식각이나 증착 공정을 시뮬레이션 하는 표면 반응 모듈로 구성된다. 여러 연구 그룹에 의해 RF

sheath 모델이 제시 되었고 [55-58], 최근 전자 온도의 공간 의존성을 고려하는 모델도 제시되었다 [59]. 그러나 대부분의 sheath 모델들이 1차원 모델에 머물고 있으며, 여타의 경우를 포함하여 플라즈마에서 sheath와 물질 표면의 문제에는 미해결 문제들이 산재해 있는 상황이므로 앞으로의 연구 개발이 가장 크게 요구되는 분야라고 할 수 있겠다.

각 모듈 별로 보다 구체적인 개발 현황에 대해서는 다음 장부터 차례로 정리하고자 한다.

### III. 전자 가열 모듈 개발 현황

시뮬레이터의 기능면에서 분류하여 전자 가열 모듈의 역할은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 수송 모듈과 연계되는 전자의 파워 흡수량을 계산하는 것과 전체 등가 회로의 회로 소자 값들을 산출하는 것이다 (Figs. 4(a)와 (b)).

전자의 파워 흡수량은 맥스웰-볼츠만 방정식을 직접 풀거나 이로부터 유도된 파동 방정식의 해를 구하는 것이다. 이때 파동 방정식은 다음과 같이 나타나는데, 저압의 경우 플라즈마 전류  $\mathbf{J}_p$ 가 전기장에 대한 비국소적인 함수로 표현되어 수학적으로 다루기 어려운 형태가 된다.

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E} = -\frac{4\pi\omega}{c^2} i(\mathbf{J}_p + \mathbf{J}_c)$$

여기서,  $\omega$ 는 파동 주파수,  $c$ 는 빛 속도,  $\mathbf{J}_p$ 는 플라즈마 전류 밀도, 그리고  $\mathbf{J}_c$ 는 안테나 전류 밀도이다.

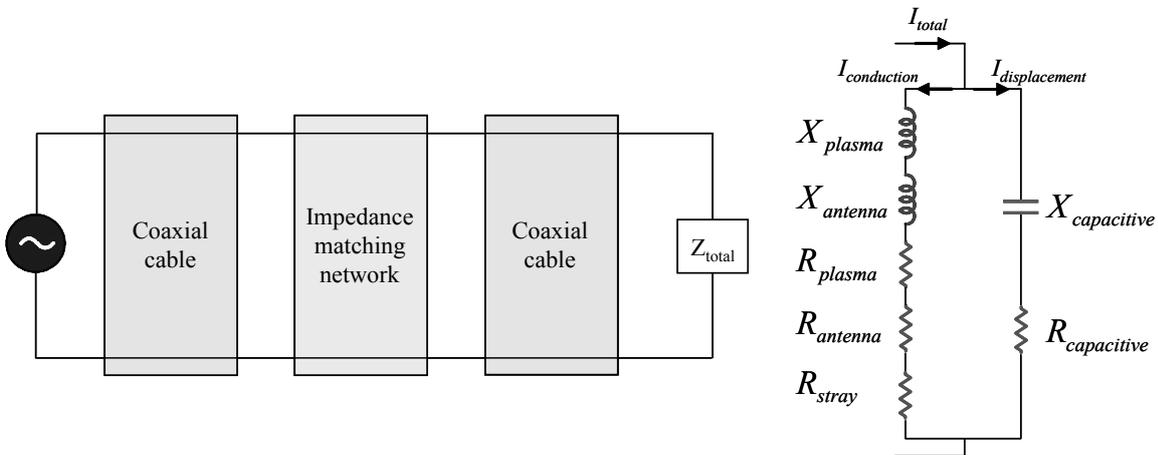


Figure 3. An equivalent circuit of inductively coupled plasma sources.

장치 내에 존재하는 전자기파는 종파를 형성하는 축전형 전기장과 횡파를 형성하는 유도형 전기장으로 구성되는데, 장치의 이름에서 알 수 있는 바와 같이 유도형 전기장이 보다 중요한 역할을 하겠지만, 축전형 전기장도 적지 않은 영향을 끼칠 수 있다는 것이 밝혀졌다. 축전형 전기장을 Poisson 방정식을 통해 계산하여 안테나의 conduction 전류에 미치는 영향을 계산하고 [15] 이러한 방법을 수송 시뮬레이션과 결합 [60]하는 방법이 제안되어 있으나, 3차원적인 상황으로 확대 적용되기에는 현실적이지 못해 새로운 방법이 개발되어야 할 필요가 있다. 이러한 상황이 등가회로에 반영되면 Fig. 3과 같이 각각 축전형 및 유도형 reactance로 구현될 것이다.

유도형 전기장은 주로 파동 방정식의 해를 구함으로써 계산되는데, 외부 자기장이 인가되지 않은 상황에 대해서 살펴보면, 장치 축 방향으로의 1차원 모델, 회전 방향으로 대칭성이 있다고 가정한 원통형 형태의 장치에 대한 2차원 모델, 그리고 4각형 형태의 장치에 적용 가능한 3차원 모델 등이 개발되었고 원통형 장치에 적용 가능한 3차원 모델에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 모델링 방법은 맥스웰-볼츠만 방정식의 해를 구하는 방법에 따라 MEM (Mode Excitation Method), FNM (Full Numerical Method) 그리고 HBM (Hybrid Method) 등으로 구분할 수 있다. MEM은 해석적인 방법으로 해를 구하는 것으로, 반경 방향 전류를 다루는데 상대적으로 용이하지만 불균일한 플라즈마 밀도 조건에서의 적용이 어렵고 장치 전체 임피던스 계산에 어려움이 있다. FNM은 수치적으로 계산하는 방법으로 자유도가 높은 장점이 있지만, 계산 시간이 오래 걸리고 반경 방향 전류를 다루는데 주의가 필요한 방법이다. 그리고 HBM은 안테나와 플라즈마 영역을 각각 수치적/해석적 또

Table 1. Current development status of electron heating model.

차원	전자가열 모델		모델링 방법	반응기 형태	참고 문헌
	Collisional	Collisionless			
1D	○	○	MEM	-	1-4
2D	○	○	HBM	원통형	5,6
			MEM	원통형	7-9
3D	○	○	FNM	원통형	10
			MEM	4각형	11

MEM; Mode Excitation Method  
 HBM; Hybrid Method  
 FNM; Full Numerical Method

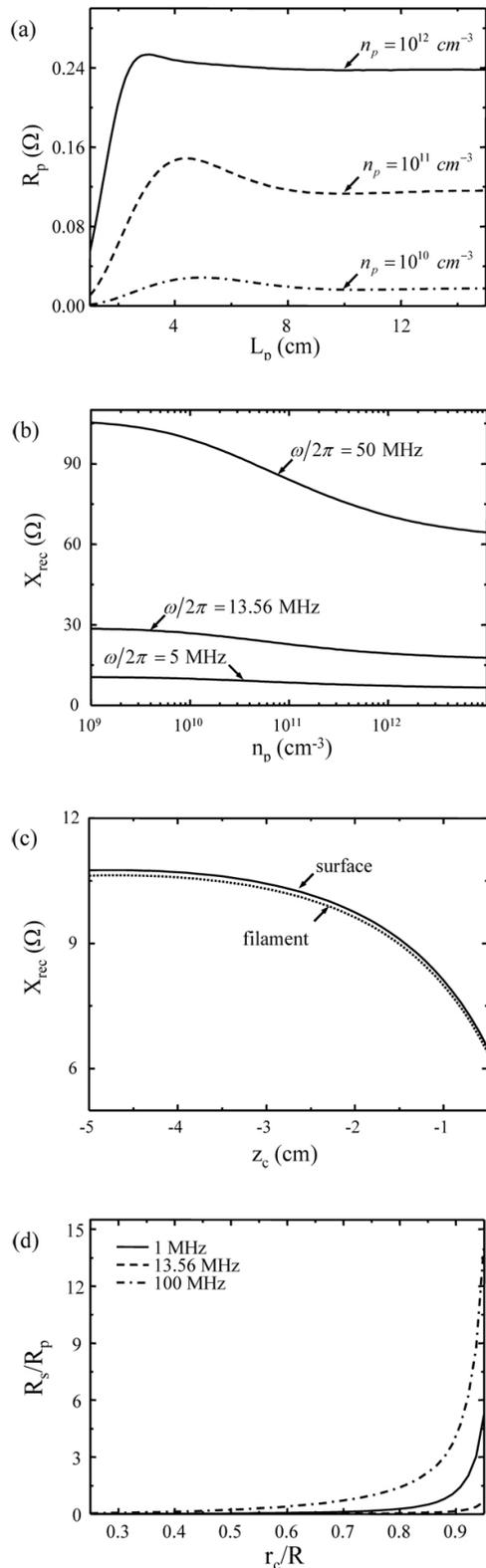


Figure 4. Various components of the impedance: (a) Plasma resistance (b) Plasma reactance (c) Reactance calculated by a filament antenna current model (d) Stray resistance.

는 해석적/수치적으로 푸는 방법이다. 이 방법은 MEM과 FNM의 장단점을 가지고 있으며 FNM 보다는 계산 시간이 짧고 반경 방향 전류를 다루는데 용이한 장점이 있다. 현재의 개발 현황을 표로 정리하면 Table 1과 같다.

안테나의 전류에 대한 모델은 큰 물리학적 주제를 담고 있지는 않지만, 시뮬레이터 제작 상의 기술적인 측면에서 매우 중요한 문제 중의 하나이다. 가장 간단하고 단순한 안테나 전류 모델은 필라멘트 형태의 선 전류를 가정하는 것인데, 이 경우 계산이 간단하여 3차원 모델로의 확장에 용이한 장점이 있지만, 안테나가 위치한 지점에서 전기장이 무한대가 되는 비 물리화적인 상황이 야기되며 이것은 회로적인 측면에서 임피던스 값이 무한대로 산출됨을 의미하게 된다 [12]. 이러한 문제를 극복하기 위해 안테나 전류에 유한한 넓이를 부여하는 표면 전류 모델을 적용할 수 있으나 이 경우 3차원 모델로 확장하기에는 비현실적으로 복잡한 계산이 요구된다 [13].

이러한 상황에서 선 전류 모델을 적용하되 임피던스 값이 유한하게 계산될 수 있는 방법이 최근에 제시되었으며, 표면 전류 모델을 이용한 경우와 수 % 이내의 오차 이내에서 일치하는 결과를 보여 준다는 것이 확인되었다 [12] (Fig. 4(c)). 이러한 방법은 앞으로 진행될 3차원 프로그램 개발에 유용한 도구로 활용될 것으로 기대된다.

장치의 각 부분에 산재하는 기생 저항도 이상화된 가열 모델에서 제외되어 있는 부분이므로 독립적인 모델링을 통해 환산되어야 한다. 최근, 전송 선로의 유효 전류 밀도나 자기장의 수평 성분으로 전송 선로나 도파관의 저항에 의한 파워 손실을 계산하는 방법을 이용하고 플라즈마 반응로의 표면 전류를 계산하여 이러한 기생 저항 값들을 산출하는 계산이 수행되었고, 그 결과는 조건에 따라 기생 저항이 플라즈마 저항보다 더 커질 수 있음을 보여준다 [14] (Fig. 4(d)).

기타 임피던스로서 안테나 자체의 저항과 축전 임피던스 등이 있다. 안테나 자체의 저항은 skin depth만큼의 유효 단면적으로 전류가 흐른다고 가정을 통해 계산할 수 있다 [14]. 그리고 축전 임피던스는 축전 전기장을 계산하는 방법이 제시되었고 [15], 현재 이를 이용해 축전 임피던스를 계산하는 작업이 진행 중에 있다.

#### IV. 하전 입자 수송 모듈 개발 현황

하전 입자의 수송을 지배하는 기본적인 유체 방정식은 다음과 같이 전자, 이온의 연속 방정식, 운동 방정식, 온도 방정식, 그리고 Poisson 방정식 등으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e &= S_e - L_e, \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_i &= S_i - L_i, \\ \frac{\partial \Gamma_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\Gamma_e \mathbf{u}_e) &= -\frac{en_e}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{u}_e \times \mathbf{B}) - \frac{\nabla(n_e T_e)}{m_e} - \mathbf{M}_e, \\ \frac{\partial \Gamma_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\Gamma_i \mathbf{u}_i) &= \frac{en_i}{m_i} (\mathbf{E} + \mathbf{u}_i \times \mathbf{B}) - \frac{\nabla(n_i T_i)}{m_i} - \mathbf{M}_i, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_e T_e \right) + \nabla \cdot \left( \frac{3}{2} n_e T_e \mathbf{u}_e \right) &= -\nabla \cdot \mathbf{q}_e - n_e T_e \nabla \cdot \mathbf{u}_e + P_{abs} - P_{coll}, \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi e(n_i - n_e). \end{aligned}$$

여기서  $n_e$ 는 전자 밀도이고  $n_i$ 는 이온 밀도,  $\Gamma_e$ 는 전자 플럭스,  $\Gamma_i$ 는 이온 플럭스이다.  $S_e, L_e, S_i, L_i$ 는 각각 전자와 이온의 생성과 손실 항을 나타낸다.  $\mathbf{E}$ 는 전기장,  $\mathbf{u}_e$ 는 전자 속도,  $\mathbf{u}_i$ 는 이온 속도,  $m_e$ 는 전자 질량,  $m_i$ 는 이온 질량,  $T_i$ 는 이온 온도,  $P_{abs}$ 는 흡수된 파워, 그리고  $P_{coll}$ 은 충돌에 의한 파워 손실이다. 그리고

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_e &= \frac{-m_e m_\beta}{m_e + m_\beta} n_e \nu_{e\beta} (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_\beta), \\ \mathbf{M}_i &= \frac{-m_i m_\beta}{m_i + m_\beta} n_i \nu_{i\beta} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_\beta), \\ \mathbf{q}_e &= -\frac{5}{2} \frac{n_e k T_e}{m_e \nu_{e\beta}} \nabla (n_e T_e). \end{aligned}$$

여기서  $\beta$ 는 임의의 중성종,  $\nu_{eN}$ 은 전자-중성종 충돌 주파수, 그리고  $\nu_{iN}$ 은 이온-중성종 충돌 주파수를 나타낸다 [18-25].

하전 입자의 수송을 나타내는 하전 입자 수송 시뮬레이션에서 우선적으로 선택되어야 할 사항은 공간 평균된 (OD 시뮬레이션) 양들을 계산할 것인지, 공간적인 분포를 중시하는 시뮬레이션을 행할 것인지 선택하는 것이다. 일반적으로 공간적인 분포가 중요하지 않은 상황에서는 빠른 계산 시간 내에 종간의 상대적인 밀도비를 확인할 수 있는

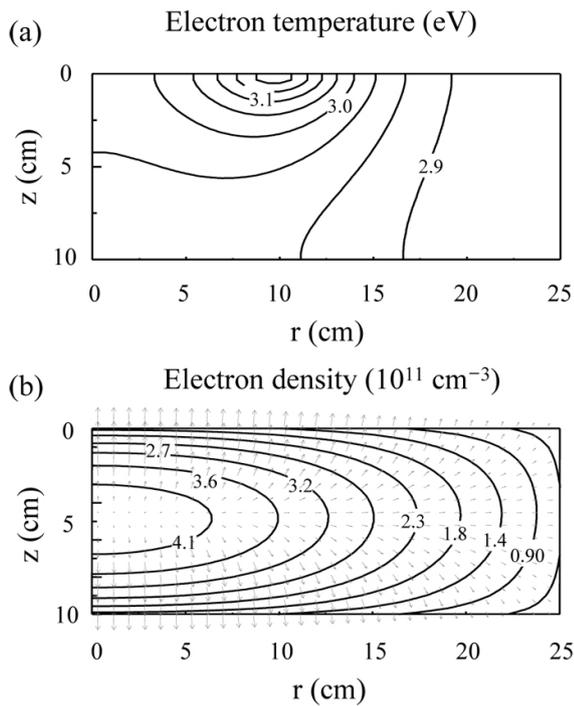


Figure 5. 2D profiles of (a) the electron temperature and (b) the electron density.

0D 시뮬레이션이 유용하며, 균일성(uniformity)의 문제가 중요할 경우에 밀도와 온도 등의 공간적인 분포(Fig. 5)를 계산하게 되는데, 이 경우에 sheath를 포함하여 two-fluid 모델로 갈 것인지 플라즈마 approximation [59]을 통해 준중성의 플라즈마 몸체를 다루고 sheath는 따로 모델링하여 결합할 것인지에 대한 여부를 결정해야 한다. 계산 시간의 단축을 위해 플라즈마 몸체는 준중성을 가정하고 sheath 모델과 결합하는 방식이 추천될 수 있을 것이다.

일반적으로 시뮬레이션 공간 간격에 대한 안정성 제약은 upwind scheme과 power-law scheme 등으로 극복할 수 있다는 것이 잘 알려져 있으며 [16], 시간 간격에 대한 제약은 MEM (Massless Electron Method) [18], SIM (Semi-Implicit Method) [19] 등이 제안되었고, 최근 연구에 의하면 DRS (Dielectric Relaxation Scheme)가 MEM나 SIM에 비해 효율적이라는 것이 밝혀졌다 [20,21].

수치 해석 알고리즘뿐만 아니라 다양한 경계 조건들에 대해서도 검토되어야 한다. 근래에 여러 모델들과 경계 조건들이 정확성과 효율성 면에서 비교, 검토되었고, 가장 적합한 방법과 경계 조건이 제시 되었다 [30]. 제시된 조건에서 유체 속도에 대한 경계 조건으로 Bohm 속도로 선택하

Table 2. Current status of the developed plasma transport simulators.

차원	전자가열 모델		알고리즘	참고 문헌
	Collisional	Collisionless		
0D		○	EXM	17
1D		○	MEM	18,22
2D	○		SIM	19
		○	DRS	23,24
3D	○		MEM	25

EXM; Explicit Method

MEM; Massless Electron Method

SIM; Semi-implicit Method

DRS; Dielectric Relaxation Method

고 있는데, upwind scheme과 power-law scheme 등을 이용할 경우 Bohm sheath criterion [26]과 Persson's criterion [27]이 서로 상충하여 특이점이 발생할 수 있다 [28,29]는 문제를 극복하고 수치 해석적으로는 안정적인 해를 얻을 수 있다는 것이 확인되었다 [30].

여러 방법들을 이용해 개발된 하전 입자 수송 모듈의 개발 현황은 Table 2와 같다. 수송 시뮬레이터는 차원에 따라 공간 평균화 0D와 1/2/3D로 구분할 수 있으며, 현재 ASE가 고려된 3D 수송 모듈을 개발하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

한편, 수송 모듈의 입장에서 에너지 흡수량을 제공하는 전자 가열 모듈이 입자 수송에도 PMF를 통해 특히 낮은 주파수 영역에서 큰 영향을 끼칠 수 있다는 사실이 알려지고 이러한 효과에 대한 계산들이 시도 되었다 [61-63]. 특히 DiPeso는 유체 모델과 결합하여 PMF가 플라즈마 밀도 값과 균일도를 향상시킬 수 있다는 것을 제안했다 [64]. 그러나 매우 간략화된 전자 가열 모델을 통해 PMF를 계산하였기 때문에 플라즈마 수송에 대한 PMF 효과의 정확성을 신뢰할 수 없는 문제가 있었다. 최근에 보다 정확한 가열 이론을 바탕으로 수행된 PMF 연구 결과에 따르면 [64] 주파수에 따라 차이는 있지만 Dipeso의 결과와 상충하여 균일성은 향상되지 않고 밀도만 수 % 이내에서 증가하는 것으로 확인되었다.

외부 자기장이 인가된 상황에서 저온 플라즈마의 하전 입자 수송에 대한 유체 시뮬레이션 기술은 일반적으로 보아 잘 개발되어 있지 않은 상황이라고 할 수 있다. 매우 제한적인 상황에서 2차원 시뮬레이션이 시도된 바가 있으나 [66], 일반적으로 확장 적용될 수 있는 방법을 제시하지는 못하고 있다.

### V. 중성종 모듈 개발 현황 및 DB

중성종 수송 방정식은 하전 입자의 수송과 비슷하게 연속 방정식, 운동 방정식, 온도 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_n = S_n - L_n,$$

$$\frac{\partial \Gamma_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\Gamma_n \mathbf{u}_n) = -\frac{\nabla(n_n T_n)}{m_n} - \frac{\nabla \cdot \bar{\pi}}{m_n} - \mathbf{M}_n,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_n T_n \right) + \nabla \cdot \left( \frac{3}{2} n_n T_n \mathbf{u}_n \right) = -\nabla \cdot \mathbf{q}_n - n_n T_n \nabla \cdot \mathbf{u}_n + \sum_{\alpha} E_{\alpha}.$$

여기서  $n_n$ ,  $S_n$ ,  $L_n$ ,  $\Gamma_n$ ,  $\mathbf{u}_n$ ,  $T_n$ ,  $\mathbf{q}_n$ 는 각각 중성종의 밀도, 생성 항, 손실 항, 플럭스, 속도, 온도, 그리고 열 플럭스를 나타낸다. 그리고

$$\mathbf{M}_n = \sum_{\alpha} -\frac{m_n m_{\alpha}}{m_n + m_{\alpha}} n_n \nu_{n\alpha} (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_{\alpha}),$$

$$E_{\alpha} = \frac{1}{2} m_{\alpha} u_{\alpha}^2 (S_{\alpha} - L_{\alpha}) - \mathbf{M}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}_{\alpha} + \sum_i n_i n_n \sigma_n^m \left( \frac{2m_i m_n}{(m_i + m_n)^2} \right) \times \left\{ \frac{m_i}{2} \left( \frac{\pi^{2/3} 8T_i}{2^{2/3} m_i} + u_i^2 \right)^{3/2} - \frac{3}{2} kT_n \left( \frac{8kT_i}{m_i} + u_i^2 \right)^{1/2} \right\}.$$

여기서  $\alpha$ 는 임의의 중성종을 나타낸다 [47]. 중성종 및 활성종에 대한 유체 모델의 어려운 점은 이온들과 같이 낮은 압력에서 Knusen flow 영역에 속하게 된다는 점이다. 따라서 일반적인 Navier-Stalks 방정식 기반의 중성 유체 해석 시뮬레이터를 통해서 안정적인 계산이 용이하지 않다. 이러한 상황에 대한 대안으로서 이용되는 방법은 이온의 경우와 같이 유효 충돌 거리를 장비의 크기로 제한하는 방법이다. 장비 개발의 측면에서 중성종 유체 시뮬레이션으로부터 기대하는 상황은 주로 균일성과 관련된 복잡한 형상에 의한 효과인데, 이러한 경우 FEM (Finite Element Method) 또는 FVM (Finite Volume Method)을 이용한 프로그램 개발이 요구된다고 할 수 있다.

I장에서도 언급되었듯이, 중성종 모듈에서 다양한 종류의 화학 반응에 대한 반응 계수를 확보하는 것이 실용적인 측면에서 매우 중요한 문제 중의 하나이며, 시뮬레이션에 요구되는 통합 데이터 set을 확보하는 것은 매우 큰 인적, 물적, 시간적 자원이 요구되는 상황이다. 현실적으로 시뮬

Table 3. Current status of the obtained chemical gas data.

가스	화학 반응 데이터	제작된 시뮬레이터	참고 문헌	가스	화학 반응 데이터	제작된 시뮬레이터	참고 문헌
Ar	(a)	○	32	SF <sub>6</sub>	(a)	○	38,39
Cl <sub>2</sub>	(a)	○	33	O <sub>2</sub> /Ar	(a)	○	34,40
O <sub>2</sub>	(a)	○	34	O <sub>2</sub> /F <sub>2</sub>	(a)	○	41
CF <sub>4</sub>	(a)	○	35	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	(a)		42
SiH <sub>4</sub>	(a)	○	32	CF <sub>4</sub> /Ar	(a)		43
H <sub>2</sub>	(a)	○	32	CF <sub>4</sub> /O <sub>2</sub>	(a)		44
He/Ne/Xe	(a), (c)		36	SiH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> /Ar	(a)	○	32
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> /O <sub>2</sub>	(a)		37	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	(a)	○	45

(a) Arrhenius form  
(c) coefficient form

레이터 개발 그룹은 취합 발표된 논문 검색을 통해 데이터를 확보하고 이러한 데이터의 정확도를 1차적으로 공간 평균 시뮬레이터로 검증하는 방법을 적용하고 있는데, 현재까지 확보된 데이터는 Table 3과 같다. 현재 공간 평균 시뮬레이터에 적용 가능한 가스는 Ar, Cl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>, SiH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, O<sub>2</sub>/Ar, O<sub>2</sub>/F<sub>2</sub>, SiH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar, 그리고 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 등이다. 계산 예로서 보인 Fig. 6는 SiH<sub>4</sub> 방전에서 주요 하전 입자와 전자 밀도의 압력 의존성이다.

1차원 이상의 시뮬레이터를 제작하기 위해서는 화학 반응 DB에 추가적으로 물리학적 DB가 확보되어야 한다. 물리학적 DB는 크게 이온화 등을 포함한 중간의 물리학적 반응 계수와 유동 및 확산 계수 산정을 위해 필요한 swarm

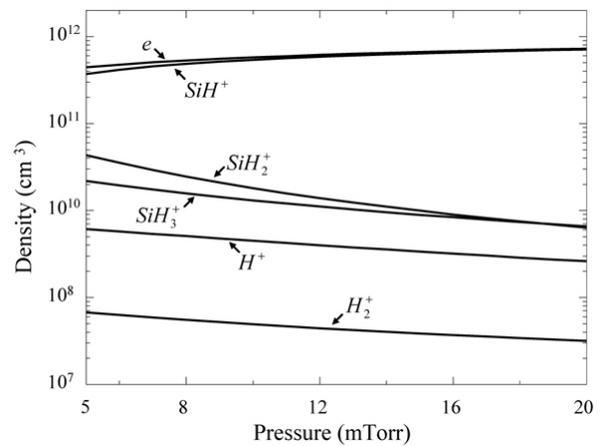


Figure 6. Major ion densities for various pressure in SiH<sub>4</sub> discharge.

Table 4. Current status of the obtained physical data.

가스	물리학적 데이터			제작된 시뮬레이터	참고 문헌
	전자-중성종	이온-중성종	중성종-중성종		
Ar	Ⓒ	Ⓢ	Ⓢ	○	46,47
Cl <sub>2</sub>	Ⓒ	Ⓢ	Ⓢ	○	47
O <sub>2</sub>	Ⓢ	Ⓟ	Ⓛ	○	48-50
CF <sub>4</sub>	Ⓢ	Ⓟ	Ⓛ		35
SiH <sub>4</sub>	Ⓢ	Ⓟ	Ⓛ	○	50-52
H <sub>2</sub>	Ⓢ	Ⓟ	Ⓛ	○	50,52-54
O <sub>2</sub> /Ar	Ⓢ	Ⓟ	Ⓛ	○	46-50
CF <sub>4</sub> /Ar	Ⓢ	Ⓟ	Ⓛ		35,46,47

Ⓒ coefficient form  
 Ⓢ cross section form  
 Ⓟ polarizability form  
 Ⓛ lennard-jones parameters

데이터로 구분할 수 있는데 모두 하전 입자의 충돌 산란 단면적 데이터를 기반으로 하는 양들이다. 현재까지 확보된 데이터는 Table 4와 같으며, Ar, Cl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SiH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, 그리고 O<sub>2</sub>/Ar 방전에 대한 시뮬레이터가 개발되었다.

### VI. Sheath 및 표면 반응 모듈 개발 현황

반도체 기판이나 유리 등과 같은 처리해야 될 물질과 플라즈마 사이에는 sheath 층이 형성되어 있고, 이온의 에너지를 제어할 필요가 있는 경우에는 RF-sheath 층이 [55-59] 형성된다. 이러한 sheath 층은 매우 높은 비선형적 특성으로 인해 기초적인 모델만이 제안되어 있을 뿐 다양한 조건들에 적용될 수 있는 이론 및 모델의 정립이 요구되고 있는 상황이다. 특히 물질 표면 반응과 그 결과물로서 물질에서 방출되는 입자들의 sheath에 대한 영향에 대한 이해

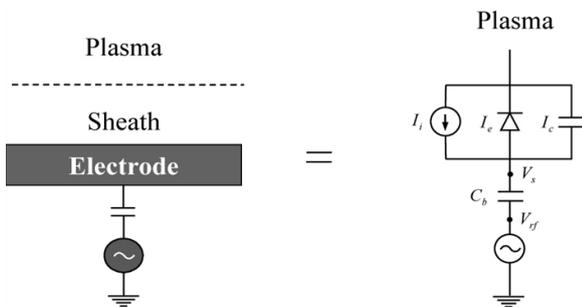


Figure 7. A schematic diagram and equivalent circuit of the biased sheath.

가 요구되고 있다.

넓은 범위에 적용 가능한 모델로 인정받고 있는 RF-sheath 모델은 Miller-Riley 모델이며, 이를 표현하는 기본 방정식은 다음과 같다 [56].

$$\nabla^2 V_s = -4\pi en_s \left[ \left( 1 - \frac{2\bar{V}_s}{M^2 T_e} \right)^{-1/2} - \exp\left(\frac{V_s}{T_e}\right) \right],$$

$$\frac{\partial \bar{V}_s}{\partial t} = -\frac{1}{\tau_i} (\bar{V}_s - V_s),$$

여기서  $V_s$ 는 real 포텐셜,  $\bar{V}_s$ 는 damped 포텐셜,  $n_s$ 는 sheath 입구에서 이온 밀도,  $M$ 은 mach number, 그리고  $\tau_i$ 는 이온 transit 시간이다. Miller의 sheath 모델은 제안된 모델 중 가장 널리 응용되는 모델이지만 1차원 모델이라는 한계를 가지고 있으며, 표면에서 방출되는 입자의 영향 등 추가적으로 보완되어야 할 내용을 많이 남겨 놓고 있다.

표면 반응은 크게 식각, 증착, sputtering, implantation 및 기타 표면개질 현상 등으로 구분할 수 있는데, 본질적으로 모든 과정이 물리, 화학, 및 재료 공학적으로 이해되어야 할 속제로 남아 있는 상황이다. 이러한 점에서 최근의 분자 동력학적인 연구 [67]는 주목할 만한 시도라고 할 수 있다.

식각이나 증착과 같이 시간에 따라 변화하는 표면의 형상을 추적하는 시뮬레이션 방법으로는 string method와 level set method [68] 등이 있다. 이 중 level set method

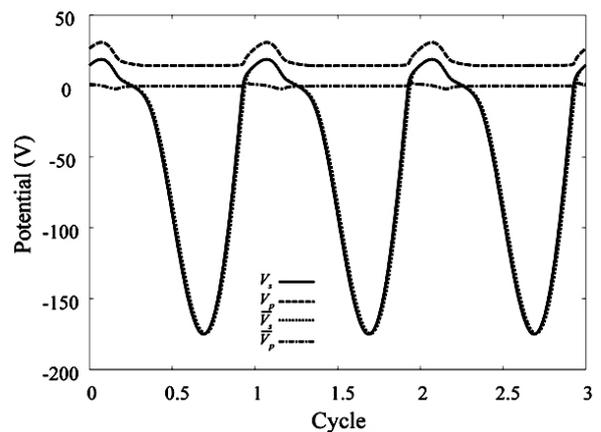


Figure 8. The time dependence of the substrate and plasma potential.  $V_s$  and  $\bar{V}_s$  are real and damped potential of the substrate, respectively. And  $V_p$  and  $\bar{V}_p$  are real and damped potential of the plasma, respectively.

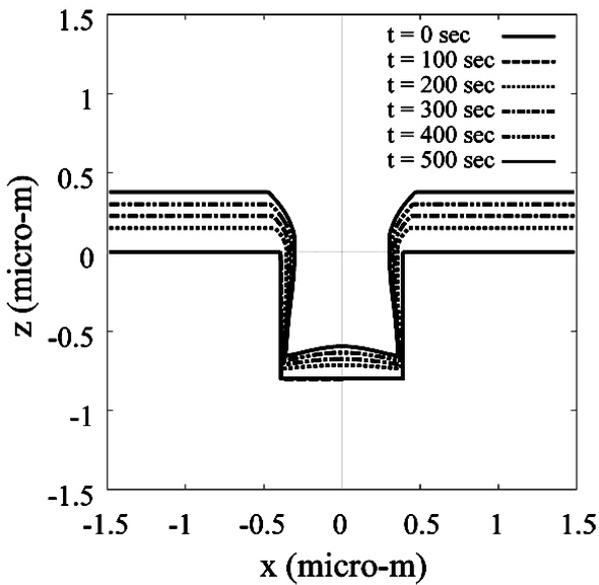


Figure 9. Temporal evolution of the deposition profile during 500 second.

는 안정적이며 정확하게 표면 형상에 대한 특성 방정식을 풀 수 있기 때문에 현재 널리 응용되고 있다.

현재 개발된 표면 반응 모듈로는  $Cl_2$  식각 시뮬레이터와 Ar 플라즈마를 이용한 Al 증착 시뮬레이터 정도가 있다. 현상론적 데이터 기반의 표면 반응 모듈에서도 그나마 식각률과 증착률 등을 계산하기 위해서는 수율 데이터들의 확보와 반응기 벽에서의 이온-전자, 활성중-활성중, 중성중-중성중, 그리고 이차전자 방출 계수 등과 같은 데이터의 추가적인 확보가 필요한 현실이다.

RF-sheath 시뮬레이션의 한 예로서, Fig. 1은 바이어스 전극과 플라즈마 전위를 보여주고 있고, 증착 시뮬레이션의 예로서, Fig. 9는 500 초 동안 Ar 플라즈마를 이용한 Al 증착과정을 보여주고 있다.

## VII. GUI

GUI는 시뮬레이터의 활용 편의성을 위해 중요한 요소 중의 하나이며, CAD 등의 장비 설계용 프로그램과의 연동(전처리) 및 계산된 물리량들을 시각적으로 형상화하여 보여주는 기능의 후처리 등을 포함하면 더욱 그 기능이 향상될 수 있다.

GUI 제작에 활용될 수 있는 다양한 프로그래밍 언어 가운데 Tcl/Tk는 C언어나 JAVA에 비하여 비교적 간단한 코

드로 GUI를 손쉽게 작성할 수 있는 장점이 있다 [69]. 또한 파일 조작, 스트링 조작 등 프로그램 개발에 꼭 필요한 기능도 충실히 지원하고 있으며 유닉스, 리눅스, 윈도우즈, 매킨토시 등과 같은 플랫폼에 상관없이 실행이 가능하므로 GUI 구현을 위해 가장 적합한 언어라고 할 수 있다.

시뮬레이터의 후처리기로는 VTK (Visualization Tool Kit)을 사용할 수 있다. VTK는 객체지향 기법으로 설계, 구현된 3차원 그래픽 C++ 클래스 라이브러리이다. VTK는 Tcl/Tk, JAVA, 그리고 Python과 같은 언어에 대한 인터페이스를 함께 제공하고 있어 3차원 스칼라와 벡터 필드 시각화를 쉽게 구현할 수 있는 장점 등이 있다 [70]. Fig. 10은 Tcl/Tk와 VTK를 연동하여 개발된 GUI의 한 예를 보여준다.

전처리 및 CAD 프로그램과의 연동 문제는 보다 높은 수준의 프로그래밍 기법이 요구되는 상황이고 일부 상용 프로그램에서만 구현되어 있다. 향후 컴퓨터 공학과의 융합 기술 개발로서 보다 높은 수준의 프로그램이 제작될 필요가 있는 상황이라고 할 수 있다.

## VIII. 향후 연구 개발 방향 및 결론

지금까지 유도 결합 플라즈마 시뮬레이터 개발 현황에 대해 각각 전자 가열, 하전 입자 및 중성중 수송, sheath 및 표면 반응, 복합 가스 방전 DB 및 GUI 로 구분하여 정리해 보았다. 비록 기본적인 시뮬레이터로 적용할 수 있는 많은 장비 및 공정 문제들이 있기는 하지만, 보다 현실적인 장비 및 공정 상황에 꼭 들어맞는 시뮬레이터 개발을 위해서는 많은 추가 연구 개발이 요구되고 있는 상황이며, 이 중 많은 부분이 전기 공학, 화학, 재료 공학 및 전산 공학과의 융합 연구 개발을 필요로 한다.

전자 가열 모듈에서는, 외부 자기장이 걸린 상황에서의 전자 가열 모델이 현재 1차원 모델 [71] 밖에 개발 되지 않았는데 2/3차원으로 확장하는 문제가 남아 있다. 그리고 원통형 장치에서 3차원으로 확장, 다양한 안테나 모형이 적용 가능한 일반화된 회로 모델이 필요하다. 또한 축전 임피던스 계산 모듈도 완성하여 결합되어야 한다.

수송 모듈에서는 3차원 시뮬레이터의 개발 및 외부 자기장이 걸린 경우에 대한 수송 시뮬레이션 알고리즘 개발이 요구되고 있다. 부족한 화학 반응과 표면 반응 계수들의 확

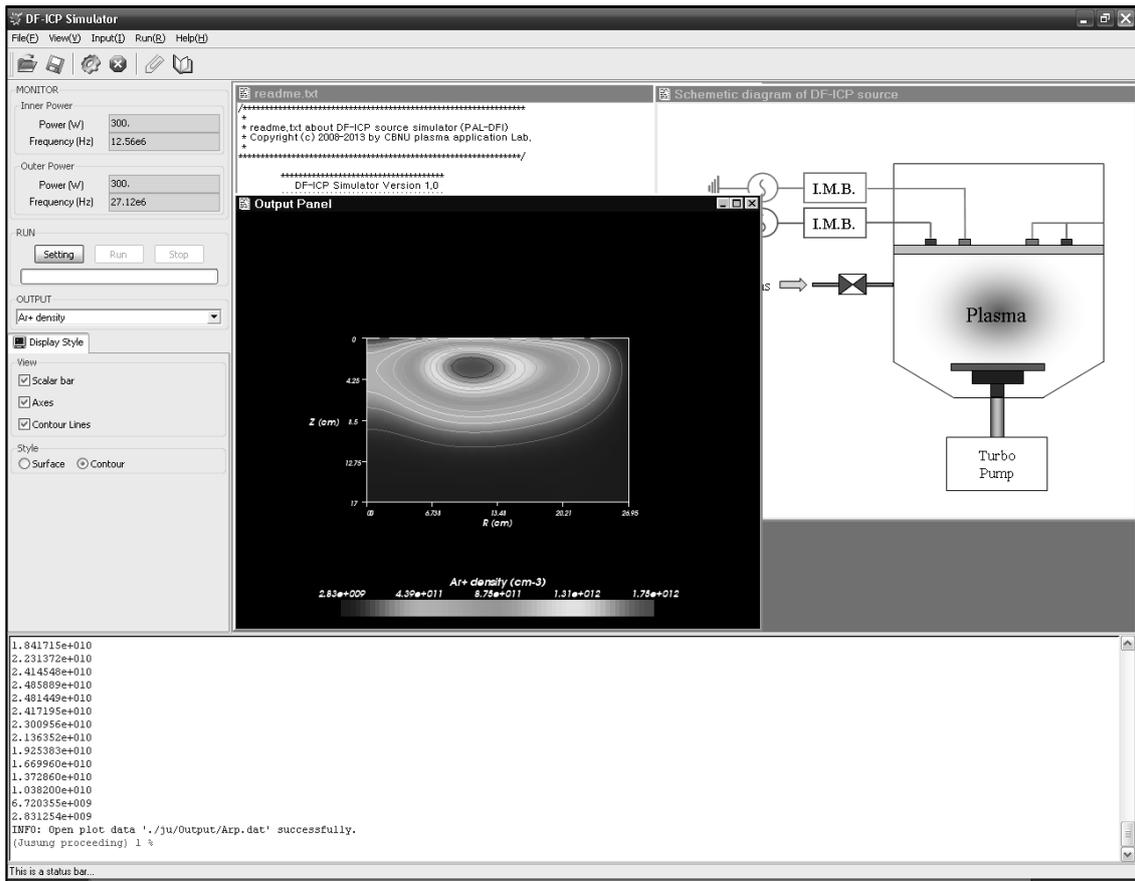


Figure 10. An example of the developed GUI using Tcl/Tk and VTK.

보도 필요하며, 복잡한 형상의 반응기에도 적용 가능한 FVM 혹은 FEM 기반의 모듈이 개발되어야 한다.

보다 정교한 sheath 모델이 개발되어야 하며, 물질 표면에서의 기초 이론 정립과 분자 동력학적 시뮬레이터 개발이 요구되고 있다.

또한 CAD 설계 프로그램과의 연동할 수 있는 전처리기의 개발도 요청되고 있으며, 보다 활용도가 높은 GUI와 고기능의 후처리기 개발도 필요하다.

이러한 모듈 별 시뮬레이션 개발이 완료된 후에 계획되고 있는 시뮬레이터의 미래는 가상현실 머신의 구축이다. 가상현실 머신은 일차적인 순서로 소프트웨어적으로 구현될 것이며, 이후 하드웨어적인 기법을 적용하는 것으로 그 기능을 확대하여 다양한 장비 및 공정 개발에 용이하게 응용될 수 있도록 할 것이다. 또한 이와 유사한 내용의 방법들을 확대 개발하여, Immersed type ICP, CCP (Capacitively Coupled Plasma), DC magnetron sputter 등을 포함한 다양한 장비에 대한 시뮬레이터 제작에 적용될 예정이며 그 기초적인 연구들도 진행 중에 있다 [72-77].

## 감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

## 참고문헌

- [1] M. M. Turner, Phys. Rev. Lett. **71**, 1884 (1993).
- [2] N. S. Yoon, S. S. Kim, C. S. Chang, and D. I. Choi, Phys. Rev. E **54**, 757 (1996).
- [3] K. - I. You, N. S. Yoon, and S. M. Hwang, Surf. Coat. Technol. **114**, **60** (1999).
- [4] S. S. Kim, C. S. Chang, N. S. Yoon, and K. W. Hwang, Phys. Plasmas **6**, 2926 (1999).
- [5] N. S. Yoon, B. H. Park, J. H. Kim, and Y. H. Shin, Thin Solid Films **435**, 293 (2003).
- [6] D. C. Kwon, N. S. Yoon, J. H. Kim, Y. H. Shin,

- and K. H. Chung, J. Korean Phys. Soc. **50**, 40 (2007).
- [7] N. S. Yoon, S. M. Hwang, and D. I. Choi, Phys. Rev. E **55**, 7536 (1997).
- [8] K. -I. You and N. S. Yoon, Phys. Rev. E **59**, 7074 (1999).
- [9] S. S. Kim, H. Y. Chang, C. S. Chang, and N. S. Yoon, Appl. Phys. Lett. **77**, 492 (2000).
- [10] T. Panagopoulos, D. Kim, V. Midha, and D. J. Economou, J. App. Phys. **91**, 2687 (2002).
- [11] S. B. Song and N. S. Yoon, Surf. Coat. Technol. **171**, 183 (2003).
- [12] B. S. Jung, D. C. Kwon, and N. S. Yoon, will be submitted.
- [13] 정봉삼, 윤남식, 한국진공학회지 **17**, 419 (2008).
- [14] D. C. Kwon and N. S. Yoon, J. Korean Phys. Soc. **51**, 522 (2007).
- [15] E. F. Jaeger, L. A. Berry, J. S. Tolliver, and D. B. Batchelor, Phys. Plasmas **2**, 2597 (1995).
- [16] S. V. Patanker, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, (1980).
- [17] 배상현, 권득철, 윤남식, 한국진공학회지 **17**, 426 (2008).
- [18] S. S. Kim, C. S. Chang, and N. S. Yoon, J. Korean Phys. Soc. **29**, 678 (1996).
- [19] P. L. G. Ventzek, R. J. Hoekstra, and M. J. Kushner, J. Vac. Sci. Technol B **12**, 461 (1994).
- [20] H. H. Choe, N. S. Yoon, S. S. Kim, and D. I. Choi, J. Computational Phys. **170**, 550 (2001).
- [21] D. C. Kwon, N. S. Yoon, J. H. Kim, Y. H. Shin, and K. H. Chung, J. Korean Phys. Soc. **47**, 163 (2005).
- [22] K. -I. You, N. S. Yoon, and S. M. Hwang, Surf. Coat. Technol. **114**, 60 (1999).
- [23] N. S. Yoon, K. -I. You, and S. M. Hwang, Surf. Coat. Technol. **112**, 34 (1999).
- [24] S. S. Kim, S. Hamaguchi, N. S. Yoon, C. S. Chang, Y. D. Lee, and S. H. Ku, Phys. Plasmas **8**, 1384 (2001).
- [25] T. Panagopoulos, D. Kim, V. Midha, and D. J. Economou, J. App. Phys. **91**, 2687 (2002).
- [26] D. Bohm, *Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Field*, McGraw-Hill, (1949).
- [27] K. -B. Persson, Phys. Fluids **5**, 1625 (1962).
- [28] V. A. Godyak and N. Sternberg, IEEE Trans. Plasma Sci. **18**, 159 (1990).
- [29] N. S. Yoon, N. H. Choi, B. H. Park, and D. I. Choi, IEEE Trans. Plasma. Sci. **23**, 609 (1995).
- [30] 권득철, 윤남식, 김정형, 신용현, Trans. KIEE. **53C**, 433 (2004).
- [31] R. A. Stewart, P. Vitello, and D. B. Graves, J. Vac. Sci. Technol. B **12**, 478 (1994).
- [32] E. Meeks, R. S. Larson, P. Ho, S. M. Han, E. Edelberg, E. Aydil, and C. Apblett J. Vac. Sci. Technol. A **16**, 544 (1998).
- [33] E. Meeks and J. W. Shon IEEE Trans. on Plasma Sci. **23**, 539, (1995).
- [34] J. T. Gudmundsson, I. G. Kouznetsov, K. K. Patel, and M. A. Lieberman J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 1100 (2001).
- [35] D. B. Hash, D. Bose, M. V. V. S. Rao, B. A. Cruden, and M. Meyyappan, J. Appl. Phys. **90**, 2184 (2001)
- [36] S. Rauf and M. J. Kushner J. Appl. Phys. **85**, 3450 (1999).
- [37] P. Ho, J. E. Johannes, and R. J. Buss, J. Vac. Sci. Technol. A **19**, 2344 (2001).
- [38] S. Rauf and P. L. G. Ventzek, J. Appl. Phys. **92**, 6998 (2002).
- [39] C. Riccardi, R. Barni, F. D. Colle, and M. Fontanesi, IEEE Trans. on Plasma Sci., **28**, 278 (2000).
- [40] M. Baeva, X. Luo, B. Pfelzer, T. Repsilber, and J. Uhlenbusch, Plasma Sources Sci. Technol. **9**, 128 (2000).
- [41] J. T. Gudmundsson, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 328 (2002).
- [42] G. I. Font, W. L. Morgan, and G. Mennenga, J. Appl. Phys. **91**, 3530 (2002).
- [43] T. Kimura and K. Ohe, Plasma Sources Sci.

- Technol. **8**, 533 (1999).
- [44] M. W. Kiehlbauch and D. B. Graves, *J. Appl. Phys.* **89**, 2047 (2001).
- [45] Y. Tanaka<sup>1</sup>, T. Michishita, and Y. Uesugi, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 134 (2005).
- [46] D. C. Kwon, N. S. Yoon, J. H. Kim, Y. H. Shin, and K. H. Chung, *J. Korean Phys. Soc.* **47**, 163 (2005).
- [47] J. D. Bukowski and D. B. Graves, *P. Vitello, J. Appl. Phys.* **80**(5), 2614 (1996).
- [48] Y. Itikawa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **38**, 1 (2009).
- [49] E. W. McDaniel and E. A. Mason, *The mobility and Diffusion of Ions in Gases* (Wiley, New York, 1973).
- [50] [http://uigelz.eecs.umich.edu/pub/data/e\\_reactions.pdf](http://uigelz.eecs.umich.edu/pub/data/e_reactions.pdf).
- [51] T. Shimada, Y. Nakamura, Z. L. Petrovic, and T. Makabe, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, 1936 (2003).
- [52] David R. Lide, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Internet Version 2007, (87th Edition).
- [53] H. Tawara, Y. Itikawa, H. Nishimura, and M. Yoshino, *J. Phys. and Chem. Ref. Data*, **19**, 617 (1990).
- [54] J. L. Giuliani, V. A. Shamamian, R. E. Thomas, J. P. Apruzese, M. Mulbrandon, R. A. Rudder, R. C. Hendry, and A. E. Robson, *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **5**, 1317 (1999).
- [55] A. Metze, D. W. Ernie, and H. J. Oskam, *J. Appl. Phys.* **60**, 3081 (1986).
- [56] P. A. Miller and M. E. Riley, *J. Appl. Phys.* **82**, 3689 (1997).
- [57] D. Bose, T. R. Govindan, and M. Meyyappan, *J. Appl. Phys.* **87**, 7176 (2000).
- [58] Z. L. Dai, Y. N. Wang, and T. C. Ma, *Phys. Rev. E* **65**, 036403 (2002).
- [59] D. C. Kwon and N. S. Yoon, will be published.
- [60] R. A. Stewart, P. Vitello, D. B. Graves, E. F. Jaeger, and L. A. Berry, *Plasma Sources Sci. Technol.* **4**, 36 (1995).
- [61] J. C. Helmer and J. Feinstein, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 507(1994).
- [62] R. H. Cohen and T. D. Rognlien, *Phys. Plasmas* **3**, 1839 (1996).
- [63] V. A. Godyak, R. B. Piejak, B. M. Alexandrovich, and A. I. Smolyakov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **10**, 459 (2001).
- [64] G. DiPeso, T. D. Rognlien, V. Vahedi, and D. W. Hewett, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23**, 550 (1995).
- [65] D. C. Kwon and N. S. Yoon, will be submitted.
- [66] C. Costin, L. Marques, G. Popa, and G. Gousset, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 168 (2005).
- [67] D. Humbird and D. B. Graves, *J. Chem. Phys.* **120**, 2405 (2004).
- [68] J. A. Sethian, *Level Set Methods and Fast Marching Methods* (Cambridge University Press, New York, 1999).
- [69] B. B. Welch, K. Jones, and J. Hobbs, *Practical Programming in Tcl and Tk*, Prentice Hall, (2003).
- [70] Kitware Inc., *The VTK User's Guide*, Kitware Inc., (2003).
- [71] S. S. Kim, C. S. Chang, N. S. Yoon, and Ki-Woong Hwang, *Physics of Plasmas* **6**, 2926 (1999).
- [72] H. J. Kim, D. C. Kwon, and N. S. Yoon, *Current Appl. Phys.* **9**, 647 (2009).
- [73] 유동훈, 권득철, 이종규, 윤남식, 김정형, 신용현, *Trans. KIEE.* 54C, 326 (2005).
- [74] 유동훈, 김정미, 윤남식, 이승욱, 설여송, 대한전자공학회 및 대한전기학회 충북지부 2002년도 합동 추계 학술대회 논문집 pp. 32-36.
- [75] 이원기, 배상현, 권득철, 윤남식, 대한전기학회 충북지부 2009년 춘계학술대회 논문집, 게재예정.
- [76] H. Y. Kim, D. C. Kwon, N. S. Yoon, H. H. Choe, and J. H. Kim, *J. Korean Phys. Soc.* **49**, 1967 (2006).
- [77] 김용일, 윤남식, *한국진공학회지* **17**, 400 (2008).

## The Present Status of Development of Inductively Coupled Plasma Simulator based on Fluid Model

D. C. Kwon and N. S. Yoon\*

*Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763*

(Received April 21, 2009, Revised May 18, 2009, Accepted May 19, 2009)

The domestic development status of Inductively Coupled Plasma (ICP) simulator which is based on fluid model is explained. As each part which composes the unified simulator, electron heating module, charged and neutral particle transport module, surface reaction module including a sheath model, and GUI (Graphic User Interface) with pre- and post-processors are described in order. Also, we present data base status of chemical reaction and physical collision, which has been applied to the recently developed simulator until now. Lastly, some future plans of development are suggested.

Keywords : Inductively coupled plasma, Fluid model, Simulation

\* [E-mail] nsyoon@cbnu.ac.kr