

## 플라즈마 장치 개발에서 CFD code의 유용성 Usefulness of CFD code in plasma equipment development

주 정 훈

군산대학교, 신소재·나노화학공학부

**초 록 :** 3차원 모델이 가능한 전산유체역학에 기초를 둔 유체 플라즈마 모델링 소프트웨어가 플라즈마 장치 개발에 어떤 도움을 줄 수 있을 것인지 고찰하였다. 몇 가지의 유도 결합 플라즈마용 안테나 구조와 유동의 역할, 공간 및 표면 화학반응의 결과에 대한 자동 최적화 계산의 유용성에 대해서 논한다.

### 1. 서 론

진공 챔버를 기반으로 하는 반도체 장비 개발 과정은 기본적으로 유동장 해석에 기반을 둔 설계와 함께 플라즈마가 부가적으로 사용되었을 때의 여러 가지 문제, 아크 발생, 하전 입자에 의한 박막의 증착 및 식각 불균일, 챔버 내부의 화학적 환경의 경시변화 등을 고려한 설계 능력을 요구하고 있다. 웨이퍼를 이용한 공정 데이터에서는 하드웨어 설계 변수의 직접적 함수 관계를 도출하기 어렵다. 플라즈마가 가지고 있는 여러 가지 비선형적 관계들이 해석을 어렵게 하기 때문이다. 플라즈마 진단 방법들이 발달하면서 점차 플라즈마가 관여하는 화학반응에 대한 이해가 깊어지고 있지만 여러 가지 혼합 가스 환경에 대한 모든 반응 상수가 가용한 것은 아니어서 상당한 가정을 수반해야 진단 결과의 해석이 가능한 경우가 많다.

플라즈마의 수치 모델은 입자의 운동 방정식을 기반으로 하는 축과 유체모델을 적용하는 두 갈래로 나눌 수 있다. 입자 기반 모델은 최근 컴퓨터 CPU 속도의 눈부신 발달과 고속 네트워크를 기반으로 하는 cluster computing 기술의 발달로 큰 진전을 보이고 있지만 10 mTorr의 압력에서 중성 입자의 수가  $3.2 \times 10^{14} (\#/cm^3)$ , 0.1%의 이온화 정도를 고려했을 때 전자와 이온의 수가  $10^{13} \#/cm^3$  입을 생각하면 2 - 3일 이내에 한 번의 계산을 마치려면 입자 당  $10^{10}$  sec 이내에 계산을 마쳐야 한다. 마그네트론 스퍼터링의 경우 발생된 전자가 이온화 과정으로 에너지를 잃어버리고 계산 영역 밖으로 빠져 나가기 까지  $10^4$  step을 계산한다면 CPU의 연산 능력은  $10^4/10^{10}$  flops 이상 되어야 한다. 현재 시판되는 PC용 CPU의 연산 속도는 Gflops 수준이므로  $10^5$ 개의 CPU가 있어야 한다는 결론이다. 현재 세계 최고의 supercomputer 들이 대개 수 백 Tflops 수준이므로 이들 자원을 사용할 수 있다면 거의 1:1의 입자 시뮬레이션이 가능하다는 결론이 나온다. 아니면 100,000 : 1의 비례 대표를 이용하는 super-particle 개념을 도입하여 정확도를 양보하는 선에서 만족할 수밖에 없다. 이에 대한 대안이 전자를 유체로 이온을 입자로 보고 수치 모델을 세우는 하이브리드 방법인데, multiphysics 개념의 상용 3차원 코드가 드물다.

### 2. 본 론

#### 2.1 CFD로 가능한 multiphysics 수치 모델

플라즈마를 CFD를 이용하여 수치 모델화하기 위해서는 전자의 가열을 계산할 전자기장 해석 모듈, 전자와 이온의 확산을 계산할 drift-diffusion 모듈, 쉬스 모듈 그리고 공간 및 표면 전자 화학 반응이 고려되어야 한다. 현재

CFD-ACE+에서는 이 중 ICP(inductively coupled plasma)와 CCP(capacitively coupled plasma)를 독립적으로 나누어 해석할 수 있게 되어 있으며 2차원과 3차원 모델에서 구현 방법이 약간 다르다. 특히 유체 코드의 한계인 적용 압력 범위에 있어서 10 mTorr 이하에서는 안정적 해를 얻기 어렵다. 그러나 열전달 모듈을 같이 해석할 수 있으며

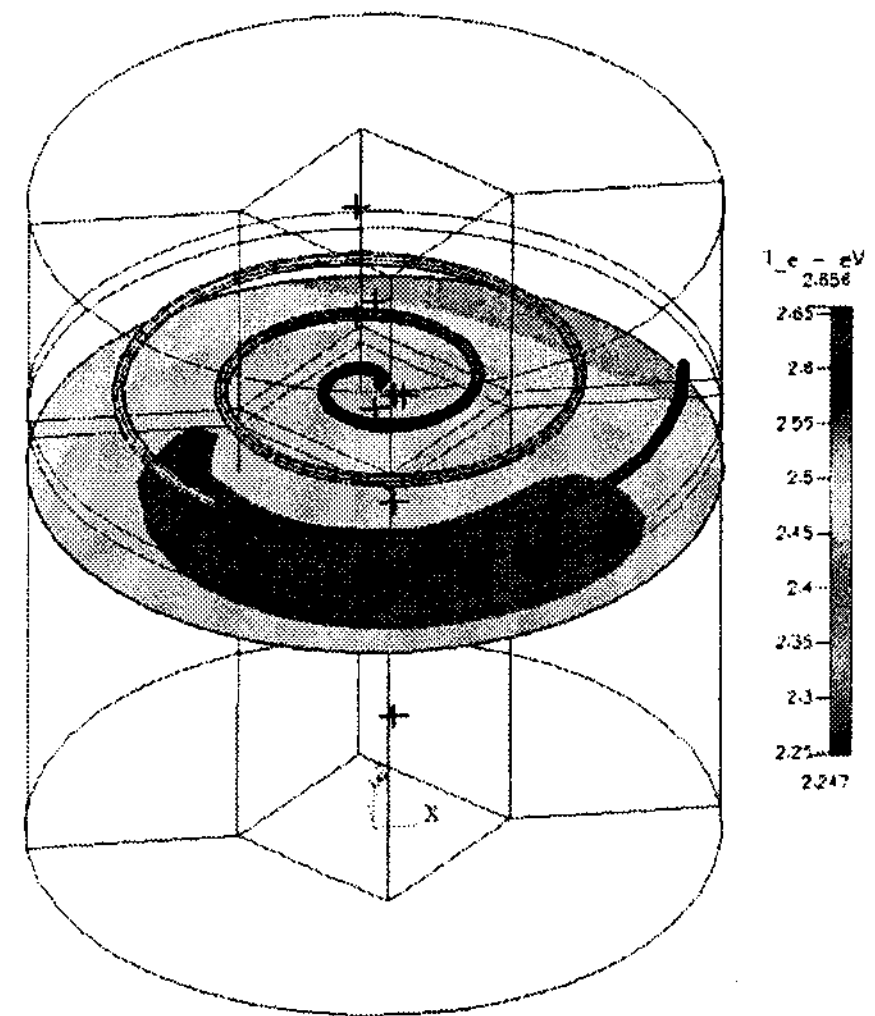


그림 1. 3 turn spiral antenna의 해석 예  
(전자 온도)

로 가스 가열에 따른 효과를 계산할 수 있다. 가장 효율성이 좋은 것은 기하적 변화에 대한 영향을 수치 모델로 예측하는 것이라고 할 수 있다. 이점에서 특히 3차원이 가능한 code의 유용성이 높다. 그러나 3차원 수치모델의 경우 연산에 소요되는 시간이 2차원 모델보다 훨씬 길어서 cluster computing의 필요성이 대두된다. 현재 plasma model의 경우 ICP의 경우 88%, CCP의 경우 59%의 효율을 보이고 있으므로 Poisson solver를 사용하는 CCP의 경우 병렬컴퓨터를 사용하더라도 이득이 기대보다 적다. 그림 1에는 고전적인 3 turn spiral model의 해석 예를 나타내었다. 20,000 cell 미만인 이 경우는 유동을 제외하면 해석시간이 3 GHz Pentium 4 CPU에서 불과 10여분 정도이므로 안테나의 설계와 검증에는 매우 유용하다.

그림 2에는 720mm×360mm×210mm의 직사각형 챔버의 안테나 설계 예를 나타내고 있는데, 36,000 cell 정도로 모델링 했으며 수렴 기준을 잔차 지수  $10^{-4}$ 로 했을 때에도 10분 이내로 계산 결과를 얻을 수 있었다. 다만 복잡한 구조물의 모델링을 위해서 격자의 형상을 사면체(tetrahedral grid)로 했을 때에는 비슷한 해상도의 모델에 대해서 수배에서 수십 배 오랜 연산 시간이 소요되는 점이 단점이다.

#### 2.2 자동 최적화의 유용성

기본적인 기하적 모델을 구축한 다음에는 여러 가지 기

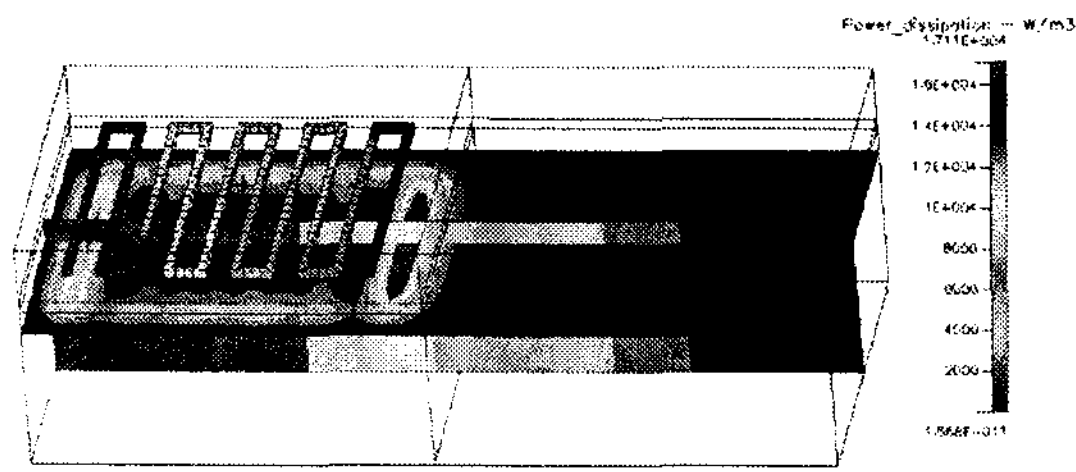


그림 2. 사각형 인라인 타입 챔버에서 직렬 안테나의 전력 전달 특성 계산 예

하적 구조 변경이나 다양한 공정 변수에 대한 계산을 수행하게 되는데 CPU의 연산 속도가 충분히 빠른 모델의 경우에는 수작업으로 기하적 구조 및 공정 변수의 입력을 하는 경우 많은 수고와 함께 조직적 가상 실험을 어렵게 하는 요소가 되고 있다. 이를 해결하기 위한 기능으로 parametric study와 optimization study 기능을 제공하고

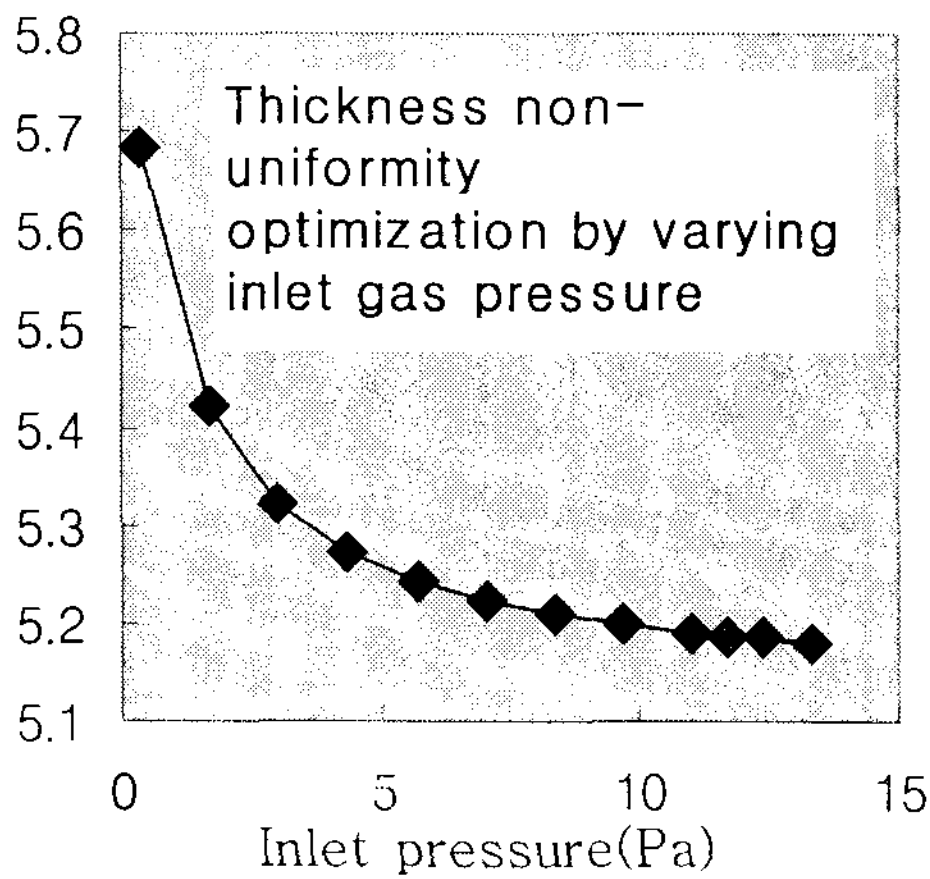


그림 4. 자동 최적화 기능을 사용하여 SiO<sub>2</sub> ICP-CVD에서 두께균일도를 개선한 예

있는데 수작업 입력 작업을 매크로 개념의 절차언어로 기록을 하고 이를 자동 반복하는 구조로 되어 있다. 그림 3에는 이를 이용한 결과가 나와 있는데 이를 통해서 공정 변수의 변화 효과가 상당한 범위를 설정할 수 있고 이 가이드라인을 이용하여 다른 공정 변수 변화 공간을 설계할 수 있다.

### 2.3 Kinetic model의 이용

현재 전자 온도 방정식의 처리는 Maxwellian distribution을 가정하고 진행되는데 Fokker-Plank 식을 이용하여 전자에너지 분포를 풀 수 있는 모듈을 운영하고 있다. 이를 이용하면 증착/식각 공정 모델에서 이온의 입사 에너지를 고려한 전자-화학반응식의 운영이 가능하다. 즉, 유체 모델의 한계에 입자모델의 장점을 도입하려는 시도인데 아직은 계산 방법과 긴 연산시간으로 인해서 3차원 모델까지 도입하는 것은 장기적 과제인 것으로 판단된다.

### 2.4 Internal ICP antenna의 모델링

상용 코드의 응용 분야는 사용자가 많아질수록 다양해지고 다시 이것이 코드에 추가되어 유용성이 늘어난다. 플라즈마 모델링을 하는 많은 그룹들이 자체적으로 코드를 작성하여 모델링 작업을 하고 이것이 상용 코드를 개발하는 기업으로 연결되어 보급되므로 상당한 시간적 오차와 함께 대학 연구실에서 제한적인 응용 범위를 갖는 환경과 multiphysics background의 상용 코드의 특성이 상호 제한

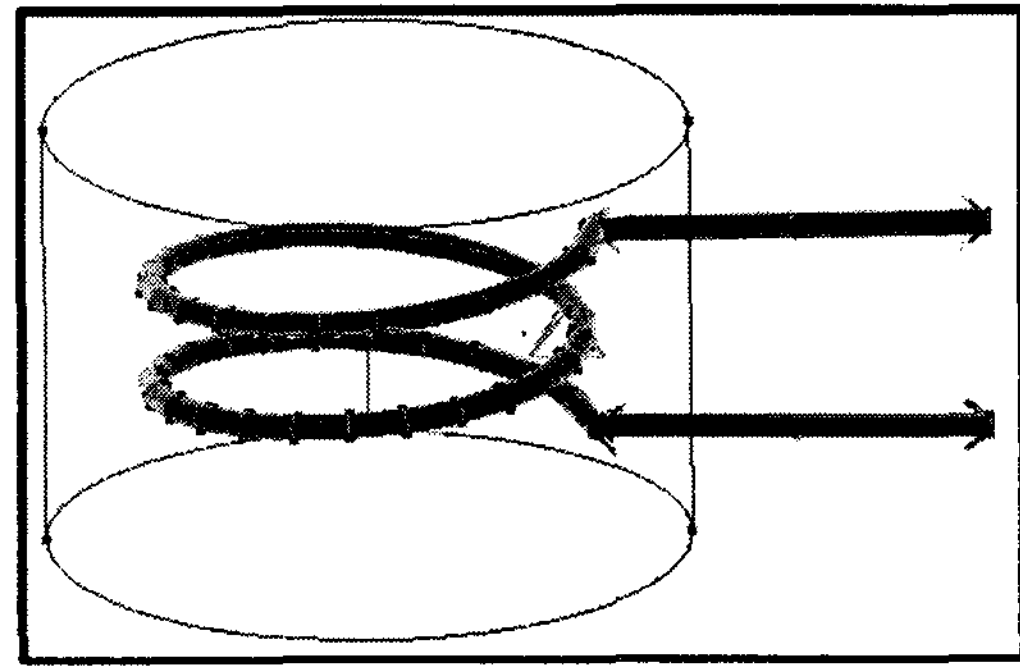


그림 4. 2 turn internal ICP antenna model

적인 경우가 많다. 그 예의 하나로 현재 ICP는 안테나와 챔버와 유전체로 격리되는 경우에 대해서만 CFD-ACE의 plasma module이 테스트 되어 있는데 그림 4에 보인 것과 같은 세라믹 쉬스를 갖는 3차원 형상의 2turn antenna의 경우 완전한 plasma physics의 해석을 위해서는 3D current conduction으로 교류 전류를 구하고 이에 의한 전기장이 계산되면 전자 가열 계산을 위한 조건은 만족되지만 내장형 안테나의 특징인 CCP 성분을 계산하기 위해서는 FVM base의 electrostatic module이 동시에 사용되어야 하는데 현재까지는 구현되어 있지 않다. 따라서 내장형 안테나의 단점인 코일 표면 물질의 스퍼터링 현상을 주도하는 코일 표면의 전압을 따로 계산할 수 없는 한계가 있다. 2차원 모델에서는 위의 문제없이 모델이 가능하다.

## 3. 결 론

상용 3차원 multiphysics 기반의 CFD code를 이용하여 ICP 및 CCP 장치의 개발에 응용하는 것은 기하적 구조 변경과 공정 변수 공간의 경제적 설계를 측면에서 유용성을 갖는다. 자동 최적화 기능의 효율적인 사용은 클러스터 컴퓨팅등의 고속 연산 환경하에서 유용하지만 플라즈마의 특성상 CPU수의 증가에 대한 연산 효율이 60% 정도이다. 유체코드의 한계 극복을 위한 노력으로 kinetic module이 도입되었으며 지속적인 개선을 통하여 3차원 모델에도 연산 속도의 큰 저하 없이 수치해의 안정적 수렴성이 확보되면 유체 코드의 물리적 정확성을 향상 시키는데 크게 기여할 것으로 보인다.

## 참 고 문 헌

- [1] CFD research, CFD-ACE modules V2007, Vol.2, pp117 - 141