



## 탄화규소 증착에서의 전산유체역학 시뮬레이션의 응용

글 \_ 최균, 서진원

### 1. 서론

탄화규소 (silicon carbide, SiC)는 3.21의 비중을 지닌 탄화물로 1700도 이하에서는 zinc blende 구조를 가진 입방정의 3C-SiC가 얻어진다. 소결이나 반응 소결 (reaction bonded silicon carbide: RBSC), 화학기상 증착법 (chemical vapor deposition: CVD)을 통하여 제조되며 구조재료로 널리 사용되는데 CVD의 경우에는 고순도로 만들 수 있어서 반도체 공정용 치구로도 활용될 수 있다 (Fig. 1 참조). 탄화물 중에서 비교적 기계적 물성이 우수하면서도 열전도, 전기전도, 내열, 내화학 특성 등이 우수하여 다양한 용도에 응용되고 있고 특히, 탄화규소 섬유와 탄화규소 매트릭스 복합체의 경우 미래의 군사용이나 우주항공용 소재로도 활용 가능성이 높다.<sup>1)</sup> 이런 복합체



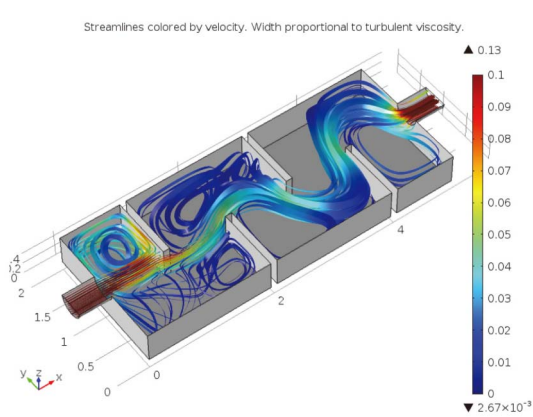
Fig. 1. 탄화규소로 만든 반도체 치구들.

의 치밀화 과정에는 화학기상 침투법 (chemical vapor infiltration: CVI)이 이용되는데 온도나 조성 혹은 압력의 기울기를 적절하게 활용하여야만 완전 치밀화가 가능하기 때문에 컴퓨터를 이용한 전산유체역학 모사가 많이 연구되고 있다.<sup>2,3)</sup>

### 2. 전산유체역학의 개요

#### 2.1. CFD 응용과 범위

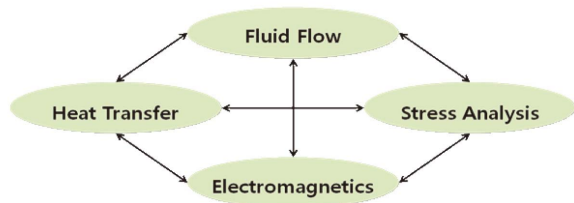
전산유체역학 (CFD, computational fluid dynamics)은 유체 현상을 기술한 비선형 편미분 방정식인 나비에-스토크스 방정식 (Navier-Stokes Equations)을 FDM (Finite Difference Method), FEM (Finite Element Method), FVM (Finite Volume Method) 등의 방법들을 사용하여 공간을 계수화하여 대수 방정식으로 변환하고, 이를 수치 해석 (numerical analysis)의 알고리즘을 사용하여 유체 유동 문제를 풀고 해석하는 것이다.<sup>4)</sup> 그 전형적인 예를 Fig. 2에 나타내었다. 경우에 따라, 와류의 배제와 선형화에 의하여 단순화될 수 있는데, 일반적인 단순 유동의 경우에는 개인용 컴퓨터에서도 충분히 활용될 수 있는 상업적인 코드들이 많이 나와있다.<sup>5,8)</sup> 흔히 열 이동(heat transfer)을 동시에 해석하여 열 유동해석을 수행하거나 연소와 같은 복잡한 화학반응 (chemical reaction)을 포함시켜서 화학반응 유동해석까지 CFD 해석을 이용할 수 있다. 실제로 자연에서 일어나는 수많은 현상들이 유체역학과 관련이 있는데 예를 들면, 크기는 기상 예측, 원유의 생산



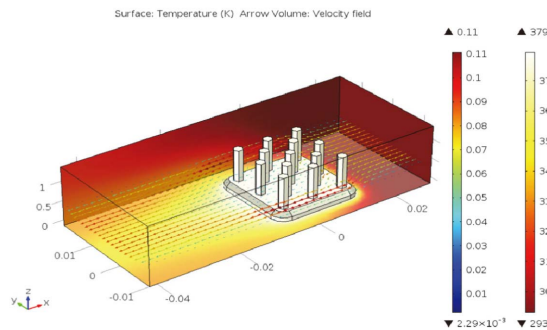
**Fig. 2.** 하수 처리장에서의 유체 유동 해석에 따른 유속 분포의 예측. (채굴)에서부터 작게는 미세 혈관에서의 혈류의 예측, 휴대용 전화기에서의 내부 온도 예상에 이르기까지 광범위하게 활용되고 있다. 특히, 공학적인 관점에서는 자동차, 비행기 등의 운송 수단의 설계나 화학 공장에서의 생산량 예측과 같이 대단히 중요한 이슈에 대하여 대상물을 직접 제작하지 않고도 결과를 예측하는데 활용될 수 있다.

### 2.2. 다중 물리현상의 이해

CFD 해석 기술의 발달과 함께 컴퓨터 계산 속도의 비약적인 증가는 보다 복잡한 현상에 대하여 CFD 적용을 가능하게 해주었다. 그 중 하나의 예가 다중물리 현상 (multiple physical phenomena)에 대한 CFD의 적용이다. 다중 물리 현상이란 하나의 자연 현상 혹은 제품의 해석에 구조 해석, 열 해석, 유동 해석, 전자기 해석, 화학반응 해석 등이 동시에 적용되는 경우를 말한다 (Fig. 3 참조). 이런 경우에 모든 해석들은 서로가 그 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 동시에 해석되거나 중간에 서로 보정을 해주어야 하며 이를 어떻게 내부적으로 구현해 내는지가



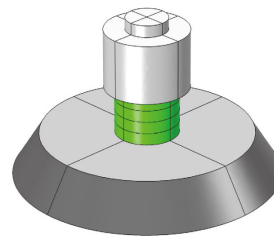
**Fig. 3.** CFD의 다중 물리 해석의 개념도.



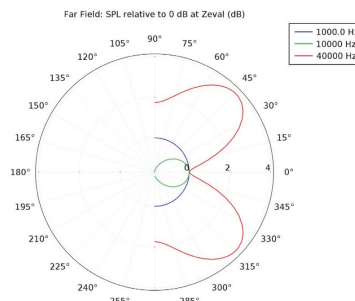
**Fig. 4.** 열 이동과 유동해석의 다중 물리 해석 (방열판 구조에 따른 주변 기온 및 유속 분포).

CFD 소프트웨어 업체들의 가장 큰 관심사이다. 세라믹 재료의 제조 공정에서도 같은 문제들이 흔히 발생하는데 화학 반응이나 열 이동이 대표적인 현상이다. 따라서 기상을 통한 물질 이동을 일으키는 공정을 CFD 툴로 해석할 때는 동시에 발생하는 여러 가지 현상을 동시에 해석하는 과정이 적절히 포함되어야 한다.

Fig. 4는 CPU 방열판을 팬으로 강제 공랭시키는 경우의 유속과 기온 분포에 대한 다중 물리해석 결과이다. 팬



(a)



(b)

**Fig. 5.** (a) Tonpilz형 세라믹 압전 트랜스듀서와 (b) 주파수에 따른 수중 음압의 지향성 해석 결과.



의 모양과 크기 등을 변수로 하여 온도 분포를 예측할 수 있고 경우에 따라서는 팬의 크기 등을 결정하는데도 활용될 수 있다. 또 다른 다중 물리 해석의 예로 세라믹 압전체 (PZT-4)를 수중 초음파 발생기 (tonpilz transducer)로 제작하는 경우를 Fig. 5에 나타내었다. 압전체의 형상이나 크기 또는 이를 고정시키는 볼트의 구조나 재질 및 음파를 발생시키는 헤드 부의 모양과 재질에 따라서 응답 특성이 크게 달라진다. 그 한 예로 강철 재질의 볼트와 알루미늄 헤드에 대하여 나타나는 주파수 응답 특성에 대하여 Fig. 5(b)에 나타내었다. 이런 다중 물리 해석을 활용하면 여러 가지 부품을 제작하기 전에 간단한 모사 과정을 통하여 제품의 제작 후의 특성을 확인해 볼 수 있다.

### 2.3. CFD를 통한 화학기상 증착법의 모사

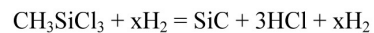
어떤 세라믹 소재를 화학기상 증착법을 통하여 증착하는 과정은 반응기 내에서의 원료 물질의 열분해와 기상에서의 유체 유동과 화학종들 간의 상호반응을 거치게 되며 증착하고자 하는 피증착물 근처에서는 확산과 흡착, 표면반응과 탈착의 과정을 거친다. 이는 상당히 복잡하고 연속적인 반응으로 이런 과정을 컴퓨터를 통하여 정확히 묘사하는 것은 매우 복잡하고 어려운 과정이다. 이러한 해석을 더욱 어렵게 하는 것은 반응기 내부의 환경이다. 대부분의 반응기는 완전한 단열이나 등온이 아닌 어중간한 상태일 경우가 많으므로 반응기의 경계조건을 설정하기 어려운 경우가 대부분이다. 유체 유동과 화학 반응들은 모두 온도의 함수이므로 반응기 내부의 온도 분포에 따라 반응 양상이 시시각각 달라지게 된다. 또한 각각의 기상 반응과 표면 반응들은 엔탈피 변화를 수반하므로 역으로 주변에 온도의 변화를 일으킬 수 있다. 따라서 이런 전체 과정을 정확히 묘사해 내는 과정은 상당히 어렵고 고단한 과정이 될 수밖에 없다. 따라서 ‘어떻게 단순화하여 실제 계산 가능한 수준까지 근사하게 묘사해 가느냐’ 하는 것이 모델링 과정으로 컴퓨터 모사 과정에서 가장 중요한 단계가 된다.

### 3. 탄화규소 CVD 공정에서의 CFD의 적용

#### 3.1. CVD 공정의 개요

탄화규소는 전형적인 구조 재료로서 강도와 경도가 뛰어나고 화학적으로 안정하며 내열 특성이 뛰어나서 극한 환경인 항공/우주용 세라믹스나 내플라즈마/내화학 특성을 요하는 반도체 공정용 세라믹스로서 그 가치가 높다. 탄화물로서는 유일하게 대기 중에서 상당 시간 동안 견딜 수 있는 내산화 특성까지 갖추고 있어서 점점 그 활용 범위가 넓어지고 있다. 특히, 등방성 카본과의 열팽창 계수의 차이가 적어서 섭씨 1200°C 이상의 고온에서 CVD로 카본 위에 탄화규소를 증착하면 카본의 분진을 효과적으로 억제할 수 있다.

탄화규소의 CVD 공정은 Fig. 6와 같이 간단한 진공로와 주변 장치만으로 공정이 가능한데 SiC 원료로는 흔히 메틸트리클로로실란 (methyltrichlorosilane: MTS, CH<sub>3</sub>SiCl<sub>3</sub>)이라는 액상의 원료가 사용된다. 상온에서 증기압이 높아서 수소를 운반가스 (carrier gas)로 사용하면 고온 반응기 내에서 다음과 같은 반응을 거쳐 탄화규소로 석출한다.



이 과정에서 발생하는 수소와 염화수소를 스크러버에서 제거해야 하는데 다른 공정보다 유지보수가 부담스러운 이유 중의 하나이다. CVD 공정은 이미 국내 기업들이 양산 단계에 와 있어서 기술 자체는 성숙기에 있으나 불량률을 줄이고 생산성을 올리기 위한 연구가 진행 중이다. 즉, 큰 반응기를 이용하여 생산성을 향상시키고 수율을 높이기 위해서는 CFD를 활용하여 여러 가지 공정

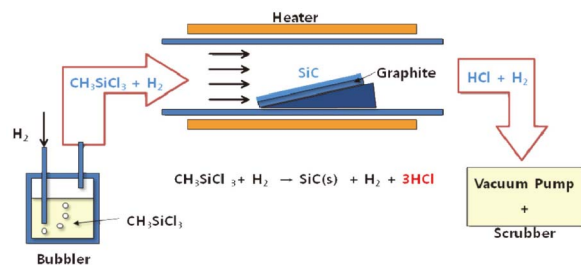


Fig. 6. 탄화규소의 CVD 증착 과정에 대한 모식도.



조건에서의 제품에 대한 시뮬레이션 작업이 필요한 상황이다.

### 3.2. SiC CVD 공정에 대한 열역학 해석

MTS-H<sub>2</sub> 계에서 탄소와 실리콘의 비는 항상 1로 고정되는데 외부에서 프로판이나 사염화실란 등의 원료 가스가 첨가되지 않는 이상, 가스 상에서의 조성 영역은 Fig. 7의 붉은 점선 상에서 움직이게 된다. 이런 조성 폭의 제한은 MTS-H<sub>2</sub> 계에서 조성 변화에 대한 한계임과 동시에 챔버 내에서 특히, 증착이 일어나는 기관 근처에서 C/Si의 비를 1에 가까운 값으로 유지하게 만드는 장점도 있다. 온도에 따라 조금씩 차이가 나긴 하지만 대략 H/Si가 70 근처에서부터 카본이 탄화규소와 함께 석출되기 시작한다. 한 가지 강조하고 싶은 것은 H/Si 비 보다는 C/Si 비에 의하여 석출되는 탄소의 양이 민감하게 변화한다는 점이다.

이런 열역학 계산 결과는 화학반응 CFD해석의 근간이 될 뿐만 아니라 각 화학종의 열역학 DB와 평형 농도를 이용하여 증착속도를 예측하는 데에도 활용된다. 한편, 열역학적으로 예측할 수 있는 것은 평형 상의 농도일 뿐 실제 증착 과정에서 생성되는 여러 가지 준 안정상에 대한 정보는 얻을 수 없다. 이러한 정보들은 Arrhenius 식으로 표현되는 반응속도의 온도 의존성에 대한 실험적 데이터베이스 (database: DB)로부터 주어질 수 있다.

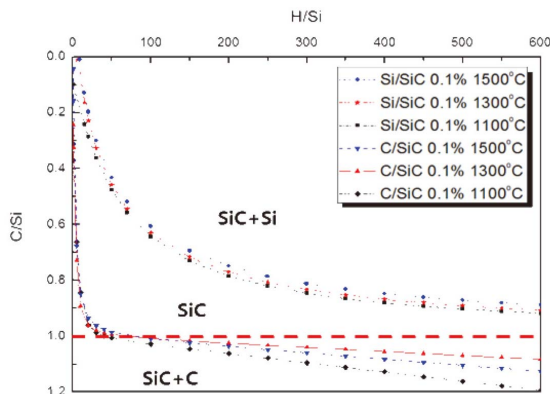


Fig. 7. MTS-H<sub>2</sub> 계에서 기상의 조성 C/Si와 H/Si에 따른 탄화규소의 단일 상 영역과 탄소 및 실리콘 과의 2 상 영역의 온도 의존성.

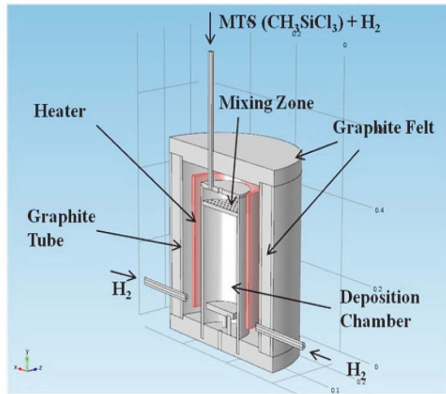
### 3.3. 탄화규소의 CFD 해석의 예

탄화규소의 증착의 CFD 모델링은 1991년 Allendorf에 의하여 제시된 이후<sup>10)</sup> 여러 그룹에 의하여 더 개선된 모델들이 제시되고 있다. Masi 등<sup>11-17)</sup>은 SiH<sub>4</sub>과 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>를 전구체로 하여 탄화규소 증착을 위한 반응기에 대하여 기상 반응과 표면 반응에 대하여 모사 계산을 진행하였으며, 탄화규소 성장속도를 예측하였다. Wang 등<sup>18-21)</sup>은 상용 시뮬레이션 프로그램인 CFD-ACE+와 상용 열역학 계산 프로그램인 CHEMKIN을 이용하여 SiCl<sub>4</sub>와 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>를 전구체로 하여 반응기 내에서 온도 분포를 예측하고 주요 화학종의 농도를 계산하였고, 탄화규소 성장 속도와 전구체의 유량에 대한 모사 연구를 진행하였다.

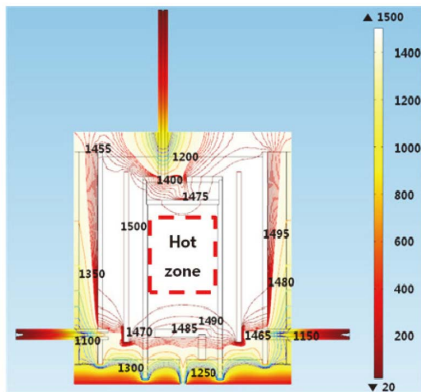
Nishizawa 등<sup>22)</sup>은 SiCl<sub>4</sub>와 SiHCl<sub>3</sub>를 각각 실리콘의 전구체로 하였을 때에 HCl의 존재가 기상 및 표면 반응에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 연구하였다. Pons 등<sup>23-25)</sup>은 SiH<sub>4</sub>과 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>를 전구체로 사용하여 반응가스의 유속에 따른 탄화규소 성장 속도를 예측하였다. Janzén 등<sup>26-29)</sup>은 여러 가지 전구체 즉, SiH<sub>4</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + HCl, SiH<sub>4</sub> + CH<sub>3</sub>Cl + HCl, SiH<sub>4</sub> + CH<sub>4</sub> + HCl, SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + HCl, SiHCl<sub>3</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, SiCl<sub>4</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, SiCl<sub>4</sub> + CH<sub>3</sub>Cl, CH<sub>3</sub>SiCl<sub>3</sub>에 대하여 SiC 성장을 위한 반응기 형상에 대하여 CFD 시뮬레이션을 진행하였다. 기상과 표면 반응에 대하여 반응속도의 DB를 활용하여 C/Si 비에 따른 탄화규소의 성장 속도를 예측한 후, Allendorf의 모델과 비교하였다.

### 3.4. CVD 챔버에 대한 열 유동해석

Fig. 8은 MTS-H<sub>2</sub> 계에서 탄화규소 증착을 위한 CVD 반응기의 예이다. 일반적인 탄화규소 증착 조건에서의 온도 분포를 CFD 해석을 통하여 예측한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 이중 챔버 구조로 발열체와 증착 영역이 분리되어 있어서 반응기 내부의 온도 균일도가 상당히 균일한 것을 알 수 있다.<sup>30)</sup> 표시된 핫존(증착 영역) 내에서의 온도 차이는 십씨 10도 이내로 예측되었고 실험적으로도 거의 일치하는 것이 확인되었다. 이를 근거로 하여 이 반응기의 증착 영역에서의 경계 조건을 등온으로 가정할 수 있었고 정상 상태 (steady state)에서의 유속을 근거로 하여 증착 속도를 예측하였다.



(a)

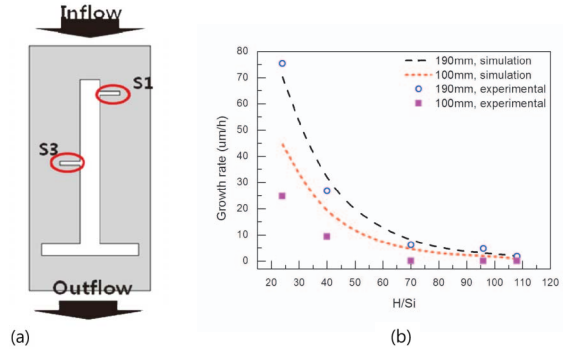


(b)

**Fig. 8.** (a) 이중 챔버로 구성된 탄화규소 증착을 위한 CVD 챔버의 단면 모식도와 CFD 열유동 해석을 통하여 얻어진 예상 온도분포.

### 3.5. 탄화규소의 CVD 공정에 대한 화학반응 유동해석

계산에 이용된 화학종의 수는 기상에서는 28종이었고 표면 반응에서는 12 종이었으며 도합 81개의 화학반응에 대하여 화학반응 CFD 모사를 수행하였다.<sup>31)</sup> 계산 시간을 줄이기 위하여 Fig. 9(a)와 같이 반응기와 증착 샘플을 2차원으로 도식화하였다. 샘플의 위치인 S1, S3에 대하여 정상 상태에서 해석한 화학반응 CFD 결과를 Fig. 9(b)에 각각 점선으로 나타내었다. 실험적으로 섭씨 1300도와 150 torr의 압력에서 조성을 바꾸면서 5회에 걸쳐 실험한 성장속도 결과를 Fig. 9(b)에 S1, S3에 대하여 각각 원형과 삼각형으로 나타내었다. 반응기의 위쪽(S1)에서는 실험적으로 결정한 SiC의 성장속도가 모사 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 반면



**Fig. 9.** 2차원 평면에서 구현한 샘플의 위치 (a)와 각 위치에서 조성 (H/Si)에 따른 성장속도의 CFD 해석 결과(점선)와 실험치(원, 삼각표)의 비교.

에 S3의 위치에서는 실험 결과가 모사 결과보다 상당히 작게 측정되었다. 이는 실제 증착 챔버 내의 샘플 위치에서 S3의 표면 온도가 등온으로 가정된 1300도보다 낮을 것으로 추정되는 것과 관련된 것으로 보인다.

컴퓨터를 이용하여 화학반응 CFD 모사를 실시하는데 가장 큰 애로 사항은 모사하는데 걸리는 시간이다. 유체 유동과 함께 수 많은 연쇄적인 화학반응에 대하여 계산을 수행하여야 하기 때문에 긴 시간이 소요되는 것을 피할 수 없다. 임의의 3차원 구조체에 대하여 모사 시간을 줄이기 위해서는 등온이나 정상 상태 혹은 축 대칭등을 적용함으로써 단순화하고 격자 수의 조절이나 화학반응 수의 조절을 통하여 계산 시간을 줄여야 한다. 그러나 이로 인하여 생기는 실제 측정 값과의 오차는 피할 수 없다. 따라서 구조적으로 복잡하고 큰 CVD 반응기에서는 이런 모델링 과정을 통하여 단순화하면서도 결과에의 영향을 최소화하는 것이 시뮬레이션의 성패를 좌우하는 가장 중요한 요소가 될 것으로 보인다.

## 4. 결론

본고에서는 CFD 모사가 세라믹 재료의 연구에 어떻게 활용될 수 있는지에 대하여 살펴보았다. 소결로나 반응기 등, 공정 장비의 설계에 많이 활용되는 CFD 모사가 기상과 표면에서의 복잡한 화학반응을 수반하는 CVD 공정에도 적용될 수 있었다. 탄화규소 외의 다른



시스템의 경우에도 열역학과 반응속도에 대한 데이터베이스가 확보된다면 성장속도를 계산할 수 있어서 CVD 공정의 최적화에 폭 넓게 적용될 수 있다. 향후 미래의 극한소재로 평가받는 탄화규소 복합체의 제조 공정에도 같은 모사 기술의 활용이 가능한데 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 온도나 압력 기울기를 구현하는 방법이나 단속적인 공정에 적용하는 기술 뿐만 아니라 전체 공정을 단순화시키는 모델링 기술에 대해서도 더 많은 연구가 필요한 상황이다.

## 참고문헌

1. 류도형, 신동근, 박은비, 조광현, 허승현, “항공우주용 SiC 섬유의 개발동향,” *Ceramist*, **12** [1] 72-82 (2009).
2. D. A. Streitwieser, N. Popovska and H. Gerhard, “Optimization of the Ceramization Process for the Production of Three-dimensional Biomorphic Porous SiC ceramics by CVI,” *J. Europ. Ceram. Soc.* **26** 2381-2387 (2006).
3. I. Golecki, “Rapid vapor-phase Densification of Refractory composites,” *Mater. Sci. Eng. R.*, **20** [2] 37-124 (1997).
4. Computational fluid dynamics, <http://ko.wikipedia.org>.
5. Fluent, <http://www.fluent.com>.
6. CFX, <http://www.aeat.com/cfx>.
7. CFD-ACE+, <http://www.cfdrc.com>.
8. COMSOL Multiphysics, <http://www.comsol.com>.
9. K. Choi and J. W. Kim, “Thermodynamic Comparison of Silicon Carbide CVD Process Between  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3\text{-H}_2$  and  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-SiCl}_4\text{-H}_2$  Systems.” *Kor. J. Met. Mater.*, **50** 569-573 (2012).
10. M. D. Allendorf and R. J. Kee, “A Model of Silicon Carbide Chemical Vapor Deposition,” *J. Electrochem. Soc.*, **138** 841-852 (1991).
11. A. Veneroni, F. Omarini and M. Masi, “Horizontal Hot Wall Reactor Design for Epi-SiC Growth,” *Cryst. Res. Technol.*, **40** [10-11] 972-975 (2005).
12. A. Veneroni and M. Masi, “Gas-Phase and Surface Kinetics of Epitaxial Silicon Carbide Growth Involving Chlorine-Containing Species,” *Chem. Vap. Deposition*, **12** 562-568 (2006).
13. A. Fiorucci, D. Moscatelli, and M. Masi, “Mechanism of n-Doping of Silicon Carbide Epitaxial Films,” *J. Cryst. Growth*, **303** [1] 345-48 (2007).
14. A. Fiorucci, D. Moscatelli, and M. Masi, “p-Doping Mechanism in HTCVD Silicon Carbide,” *J. Cryst. Growth*, **303** [1] 349-51 (2007).
15. A. Veneroni and M. Masi, “Reduced Gas Phase and Surface Kinetics for Silicon Carbide Epitaxial Growth,” *Electrochem. Soc. Transact.*, **2** [7] 11-20 (2007).
16. A. Fiorucci, D. Moscatelli and M. Masi, “Homoeptaxial Silicon Carbide Deposition Processes Via Chlorine Routes,” *Surf. Coat. Technol.*, **201** 22-23 8825-29 (2007).
17. M. Masi, C. Cavallotti, D. Boccalari and F. Castellana, “Preliminary Design of a Novel High Throughput CVD Reactor for Photovoltaic Applications,” *Cryst. Res. Technol.*, **49** 614-19 (2014).
18. R. Wang and R. Ma, “Kinetics of Halide Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide Film,” *J. Cryst. Growth*, **308** 189-97 (2007).
19. R. Wang and R. Ma, “An Integrated Model for Halide Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide Epitaxial Films,” *J. Cryst. Growth*, **310** 4248-55 (2008).
20. R. Wang and R. Ma, “Reactive Flow in Halide Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide Epitaxial Films,” *J. Thermophys. Heat Transfer*, **22** 555-62 (2008).
21. R. Wang and R. Ma, M. Dudley, “Reduction of Chemical Reaction Mechanism for Halide-Assisted Silicon Carbide Epitaxial Film Deposition,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48** 3860-66 (2009).
22. S. Nishizawa, “Numerical Modeling of SiC Single Crystal Growth-Sublimation and Hot-Wall Epitaxy,” *J. Cryst. Growth*, **311** 871-874 (2009).
23. J. Meziere, M. Ucar, E. Blanquet, M. Pons, P. Ferret and L. Di Cioccio, “Modeling and Simulation of SiC CVD in the Horizontal Hot-Wall Reactor Concept,” *J. Cryst. Growth*, **267** 436-51 (2004).
24. S. Nishizawa and M. Pons, “Growth and Doping Modeling of SiC-CVD in a Horizontal Hot-Wall Reactor,” *Chem. Vap. Deposition*, **12** 516-22 (2006).
25. G. Chichignoud, M. Ucar-Morais, M. Pons and E. Blanquet, “Chlorinated Silicon Carbide CVD Revisited for Polycrystalline Bulk Growth,” *Surf. Coat. Technol.*, **201** 8888-92 (2007).
26. Ö. Danielsson, A. Henry and E. Janzén, “Growth Rate Predictions of Chemical Vapor Deposited Silicon Carbide Epitaxial Layers,” *J. Cryst. Growth*, **243** [1] 170-184 (2002).
27. S. Leone, O. Kordina, A. Henry, S. Nishizawa, Ö. Danielsson and E. Janzén, “Gas-Phase Modeling of Chlorine-Based Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide,” *Cryst. Growth. Des.*, **12** 1977-84 (2012).
28. Ö. Danielsson, P. Sukkaew, M. Yazdanfar, O. Kordina



## 특 집 ■■■ 최균, 서진원

- and E. Janzén, "Simulation of Gas-Phase Chemistry for Selected Carbon Precursors in Epitaxial Growth of SiC," *Mat. Sci. Forum*, **740-742** 213-216 (2013).
29. Ö. Danielsson, O. Kordina and E. Janzén, "Simulations of SiC CVD - Perspectives on the need for surface reaction model improvements," *Mater. Sci. Forum*, **778-780** 218-221 (2014).
30. K. Choi and J. W. Kim, "CFD Simulation of Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide in CH<sub>3</sub>SiCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> System," *Curr. Nanosci.*, **10** [1] 135-137 (2014).
31. J. W. Seo, J. W. Kim, K. Choi and J. H. Lee, unpublished work.

### ●● 최균



- 1997년 한국과학기술원 공학박사
- 1998년 일본 동경공업대학 방문연구원
- 1999년 서울대학교 신소재공동연구소 특별연구원
- 2000년-현재 한국세라믹기술원 이천분원 수석연구원

### ●● 서진원



- 2013년 세종대학교 신소재공학과 학사
- 2013년-현재 한국세라믹기술원 이천분원 학생연구원
- 2014년-현재 고려대학교 신소재공학과 석사과정