



컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 자성 소재 설계 기술

글 _ 현상일
한국세라믹기술원

I. 서론

첨단산업 발전에 있어서 우수한 물성을 갖는 소재 개발이 기여한 바가 매우 크다. 인류가 기원전부터 사용하여 오던 자성소재를 비롯하여 철강소재 및 반도체 개발 등 소재에 관한 연구는 바야흐로 21세기에 들어오면서 다양한 분야가 융합되어가는 첨단산업 분야에 필수적인 과정이 되고 있다. 최근 산업기술의 트렌드가 되고 있는 융합기술에 맞추어 전자기물성이나 기계물성 외에도 열 및 광학특성 등이 복합된 물성들의 최적화가 다기능성 디바이스의 소재개발에서 요구되어 가고 있다. 많은 첨단 디바이스들이 소형화 및 경량화 되고 있으며 동시에 다양한 기능들이 요구되는데, 단일 물성만을 갖는 소재로는 이러한 복합적 요구를 충족시키기 어렵다. 작은 전자 부품 하나에도 수십 가지의 서로 다른 기능들이 동시에 요구되는데, 이 같은 복합 물성을 최적화할 수 있는 기술은 앞으로 필히 개발되어야 될 중요한 소재 생산기술이라고 하겠다.

이러한 여러 가지 물성 중 자기적 물성 (Magnetic property)은 이미 오래 전부터 인류에 의해 발견되어 일상생활에 활용되고 있는 성질이다.¹⁾ 그리스에서는 금속을 끌어당기는 힘이 있는 물질인 자석 (Magnet)을 “magnesian stone”이라는 이름으로 불리었으며, 중국이나 인도에서도 이미 2,500여년 전부터 자석에 관한 기록이 남아 있을 정도로 인류와 오랫동안 함께 해온 소재이다. 이 후 폭 넓게 활용된 예로는 12-13세기에 시작된 대 항해 시

대에 해상 항로의 방향을 결정하기 위한 나침반이 있다. 인류가 오래 전부터 자석을 다 방면에 활용하기는 하였지만, 자성에 대한 물리학적 이해는 19세기 초 오르스테드 (Hans Christian Ørsted)를 거쳐 Michael Faraday에 의해 이뤄졌다고 하겠다. 자기적 성질은 인력과 척력이 존재한다는 면에서 전기적 성질과도 매우 유사하며 실제로 이 두 가지 물리현상은 유사한 수학적 틀에 의해 표현될 수 있음이 알려지게 되었다. 이와 같은 전자기 법칙은 James Clark Maxwell에 의해 정립되었는데, 중력에 대한 뉴턴의 만유인력의 법칙, 이 후 20세기 확립된 양자역학과 함께 자연현상을 설명하는 중요한 이론으로 자리잡게 되었다. 전자기 물성을 설명하는데 어려움이 있었던 몇 가지 현상들은 후에 양자역학에 의해 원자레벨에서 스핀(Spin)의 개념이 도입되면서 설명할 수 있게 되었다. 전자기 현상을 원자레벨에서 설명할 수 있는 단계로 접어들면서 자성 나노 소재 (Magnetic nanomaterials)라는 새로운 분야가 확립되어 많은 이론 및 실험적인 연구들이 수행되었다. 앞서 언급한대로 자기적 물성은 전기적 물성과는 별도로 설명할 수 없는 복합적인 물리현상이며 이런 관점에서 전자기소재는 대표적인 다기능 (Multi-functional) 소재이며, Maxwell 법칙 또한 다중물리 (Multiphysics) 현상을 나타내는 대표적인 이론이라 하겠다.

현대 산업에서 자성소재가 활용되고 있는 대표적인 도구로 발전기 (Generator)와 모터 (Motor)를 들 수 있다. 현대 산업이나 일상생활에서 가장 많이 사용되고 있는 에



너지인 전기 에너지는 대부분이 자석에 의해 생성된다고 볼 수 있다. 태양전지를 비롯한 일부 전기 에너지원은 자석이 없어도 생성이 가능하지만, 아직까지 이러한 에너지원이 차지하는 비중은 미미하다. 로렌츠 (Lorentz) 법칙에 의하면 자속의 변화에 따라 발생하는 유도 기전력에 의해 전기에너지가 생산되는데, 이는 자석이 우리 일상생활에 미치는 가장 큰 기여라 하겠다. 또한 이러한 전기 에너지를 운동에너지로 변환하는 모터는 마이 크로 로봇에서부터 전기 자동차등에 이르기까지 생활의 많은 부분에서 이용되고 있는 중요한 도구이다(Fig. 1). 이외에도 자성소재는 의료용 영상 및 진단에도 사용되며, 각종 통신 디바이스, 메모리 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있는 소재이다.

이러한 자성소재 물성 최적화는 실험실에서 직접 이뤄지는 것이 일반적이다. 하지만, 다양한 분야에서 요구되는 성능을 갖는 첨단소재 개발은 고 비용 및 긴 개발 기간이 요구되므로, 실험을 대체하거나 보완하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션이 도입되고 있다. 최근 비약적으로 발전한 시뮬레이션 해석기법 및 하드웨어 성능에 힘입어 기술 개발 전 분야에 광범위하게 적용되어 가고 있는 실정이다. 특히 실험실에서의 개발이 용이하지 않거나 위험을 수반하는 등 소재 개발에 어려움이 있을 경우 매우 효과적임이 확인되고 있으며, 기타 소재 개발 및 성능 평가 등 응용범위가 지속적으로 확대되어 가고 있다. 일반적으로 소재 개발비용이 높게 요구되는 첨단 소재의 경우 시뮬레이션 기법은 비용 절감에 매우 효과적이다. 현재 사용되고 있는 대부분의 주요 소재 설계용 시뮬레이션 기법이 미국, 유럽, 일본 등 소재 개발 비용이 높은 나라에서 더욱 활발히 개발되고 있음은 이런 이유 때문이기도 하다.

소재의 물성은 몇 가지 변수 즉 원자의 종류, 원자의 조성 및 미세구조 등에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 기본적인 물성은 소재를 이루고 있는 원자의 종류에 따라 결정되고, 특정 원자들의 물성은 대부분 잘 알려져 있으므로, 요구되는 물성에 적합한 원자의 종류를 선택하는 과정이 가장 기본적인 소재 설계 단계라고 할 수 있다. 하지만 한 가지 종류의 원자로는 다양한 물성을 동시에



Fig. 1. 강자성체가 사용된 모터의 예.

구현하는데 한계가 있으므로, 다 기능 소재 설계를 위해서는 두 가지 이상의 원자들로 이뤄진 화합물이 필요하게 된다. 이 경우 원자의 종류 및 비율에 따라 복합적인 물성의 조절이 가능해지는데 이 같은 과정을 “조성 최적화 (Composition optimization)”라고 한다. 오늘날의 대부분의 복합물성 소재 개발은 이 같은 방식에 의해 이뤄지고 있다.

본 글에서는 자성소재의 개략적인 소개와 함께 시뮬레이션 기술을 이용한 물성 개발이 어떻게 활용되고 있는지를 소개하고, 두 가지 이상의 복합물성을 동시에 극대화하는 다 기능성 소재 개발에 대한 연구 동향 및 컴퓨터 시뮬레이션 기법 적용의 사례를 살펴보고자 한다.

II. 자성 소재 및 물성 최적화 시뮬레이션

자성을 갖는 소재는 외부 자기장과 소재의 자화되는 형태에 따라 반자성체 (Diamagnetism), 상자성체 (Paramagnetism), 강자성체 (Ferromagnetism) 등으로 구분된다. 이 중 자성소재로 주로 활용되는 것은 외부 자기장이 없는 상태에서도 자화되는 강자성체로서, 우리가 일상생활에서 흔히 접하는 예로 영구자석이 있다. 보어-판레이우언 (Bohr-van Leeuwen) 정리¹⁾에 따르면, 고전역학으로는 이러한 자기적 성질을 설명할 수 없었는데, 스핀의 개념과 파울리의 배타원리를 설명할 수 있는 양자역학이 발전하면서 비로써 설명이 가능한 것으로 알려져 있다.

자성소재를 산업에 사용할 때 가장 중요하게 고려되는 물성들은 자성의 강도 (세기)와 자기 이방성 (방향성)이다. 자성체의 물성은 일반적으로 Fig. 2와 같은 자기 이

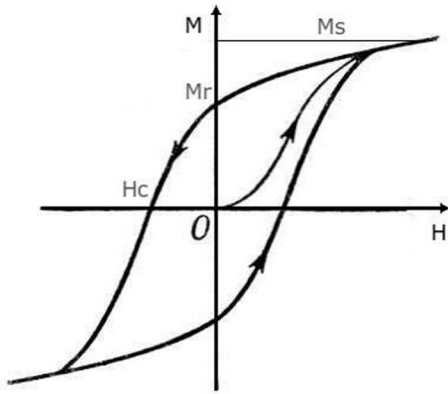


Fig. 2. 자화곡선의 예.

력곡선 (Hysteresis curve)에 의해 표현된다. 자성체가 외부에 제공할 수 있는 최대 자기력인 포화자화(Saturation magnetization, M_s), 외부자기력이 0일때의 외부 자장값인 보자력 (H_c), 외부자장이 0일 때 자성체에서 발생하는 자기력인 잔류자화 (M_r) 등 활용도에 따라 다양한 형태의 자성이 정의된다. 또한 포화자화가 크거나 이력 곡선의 면적인 에너지적 (BH_{max})이 높으면 강자성체(hard magnet), 포화자화가 작고 에너지적이 낮으면 연자성체(soft magnet)로 구분되기도 한다. 자기 이방성(MAE: Magnetic Anisotropic Energy)은 주로 소재의 결정성에 따라 나타나는 자기 에너지의 방향성을 나타낸다. 자기의 세기나 자기 이방성 등을 필요에 따라 임의로 설계할 수 있으면 매우 유용할 것이다. 하지만 이를 위해서는 많은 양의 실험이 반복 수행되어야 하며, 시간과 비용이 많이 요구된다. 따라서 실험적인 방식과 더불어 관심을 끌고 있는 시뮬레이션 방식이 양자역학에 기반하여 원자레벨에서 소재의 물성을 예측할 수 있는 제일원리(First principle) 계산법이다.

다양한 스케일에서의 소재 개발을 위해서는 여러 종류의 시뮬레이션 기법이 동시에 적용될 수 있다. 이 중 원자레벨에서 이용되는 제일원리해석은 양자레벨에서 슈뢰딩거(Schrodinger) 방정식의 해를 밀도 범함수 이론(DFT: Density functional theory)에 따라 구하는 방식이다.³⁾ 이외에도 수 μm 이상의 거시적인 스케일에서 소재를 연속체로 가정하여 해석하는 유한요소해석(FEM:

finite element method) 기법이 있다. 또한 원자레벨과 거시적인 스케일 사이에 해당되는 $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ 의 매조 스케일 영역에서는 고전적 분자동력학(MD: molecular dynamics)이 이용된다.⁴⁾ 유한요소해석(FEM) 기법에는 기계, 전자기, 열 등 거의 모든 물성에 대한 해석이 가능한 반면 각 소재에 대한 기초 물성들이 제공되지 않으면 해석이 불가능하고, 제일원리해석이나 분자동력학에서는 기계적인 물성 및 제한적인 열, 전자기물성에 대한 해석만이 가능하다. 하지만 다양한 분야에서의 절대적인 필요성에 의해 전기 전도도나 자기 특성 및 광학적인 물성에 대한 시뮬레이션 기법들은 지속적으로 개발될 것으로 기대된다.

다음에서는 제일원리해석을 이용한 자성소재 설계의 한 예를 들고자 한다. Fig. 3에 나타낸 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (SFO)는 Hexagonal 격자에 $P6_3/mmc$ 공간군을 가지며 격자 상수가 $a = 5.88 \text{ \AA}$, $c = 23.01 \text{ \AA}$ 인 소재로 자기 모멘트가 단위셀당 $20 \mu\text{B}$ 를 갖는 강자성체이다. 이 소재에 $5 \mu\text{B}$ 를 갖는 Fe^{3+} 이온의 배열이나 위치를 조절하거나 첨가물(Zn, Sn)등을 조합하여 자기 모멘트등을 향상시킬 수 있음을 보인 연구이다.⁵⁾ 이를 위해서 VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package)⁶⁾ 라는 프로그램을 사용하였고,

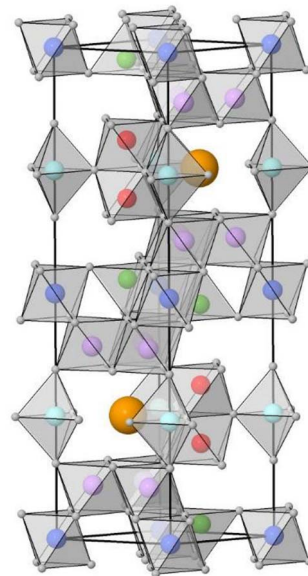


Fig. 3. 제일원리해석에 이용된 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 의 원자구조.⁵⁾



이를 통해 자기 모멘트가 역방향으로 배열되어 있는 Fe 이온들을 다른 이온들로 치환할 경우 전체 자기 모멘트를 최대 25 μB 까지 증가시킬 수 있음을 계산을 통해 규명하였다.

또한 자기 이방성을 나타내는 에너지 E_{MAE} 는 아래 식 (1)과 같이 정의되는데, 제일원리해석을 통하여 결정 방향 (100)와 (001)에 대한 전체 에너지의 차이를 구하여서 아래 식 (2)와 같은 자기 이방성 계수 K 를 구할 수 있었다.

$$E_{MAE} = E_{(100)} - E_{(001)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E_{MAE}}{V \sin^2 \theta} \quad (2)$$

여기서 V 는 단위셀의 체적이며, θ 는 (100)과 (001)의 결정방향간의 각도를 나타낸다. 위 연구에 따르면 초기 SFO의 $E_{MAE} = 0.84 \text{ meV}$, $K = 190 \text{ KJ/m}^3$ 에서 Zn와 Sn의 치환함에 따라 $E_{MAE} = 0.45 \sim 0.53 \text{ meV}$, $K = 100 \sim 120 \text{ KJ/m}^3$ 로 자기 이방성은 다소 감소함을 알 수 있었다.

III. 다기능 재료 설계를 위한 시뮬레이션

현재까지의 최적 소재 개발은 주로 단일 물성을 극대화하는 방식으로 이뤄져 왔다. 기계적인 강도를 향상시키거나, 전기전도도 및 유전율, 자기모멘트, 자기 이방성 등을 극대화 하는 소재 개발 등이 이에 해당된다. 단일 물성의 최적화에 관한 이론적인 연구는 오래 전부터 이뤄져 왔는데, 대표적인 예로 Hashin과 Shtrikman에 의해 제안된 “한계 (Bound) 이론”을 들 수 있다.⁷⁾ 이 들은 서로 다른 전기 전도도 (σ_i) 및 체적비 (ϕ_i)를 갖는 두 가지 소재로 구성된 복합체에 대해 미세구조의 변화에 따라 이론적으로 가능한 전도도의 최고치와 최저치를 예측하는 식 (3)을 발표하였는데, 이를 통하여 다양한 복합소재가 가질 수 있는 물성의 범위를 예측할 수 있게 되었다. 이 결과는 전기 전도도 뿐만 아니라 유사한 물리 법칙을 따르는 열전도도, 탄성강도, 유체특성 등에도 확장될 수 있다. 이 경우 각각의 단일 상의 물성은 정해져 있으므로, 실제적인 물성 최적화 변수는 미세구조인데, 이 이론이 제안하는 극대치를 만족하는 미세구조들이 추후 수행된 연구들을 통해서 알려지게 되었다.⁸⁾

$$\langle \sigma \rangle - \frac{\phi_1 \phi_2 (\sigma_1 - \sigma_2)^2}{\langle \bar{\sigma} \rangle + 2\sigma_{\min}} \leq \sigma_e \leq \langle \sigma \rangle - \frac{\phi_1 \phi_2 (\sigma_1 - \sigma_2)^2}{\langle \bar{\sigma} \rangle + 2\sigma_{\max}} \quad (3)$$

$$\langle \sigma \rangle = \sigma_1 \phi_1 + \sigma_2 \phi_2 \quad \langle \bar{\sigma} \rangle = \sigma_1 \phi_2 + \sigma_2 \phi_1$$

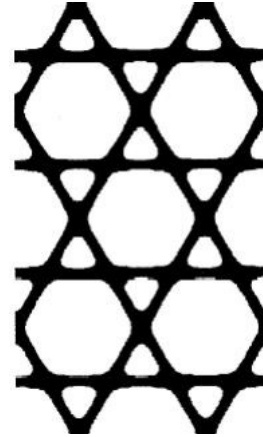


Fig. 4. 우수한 기계적 강도 및 전기 전도도를 갖는 2차원 카고메 구조

위와 같이 제안된 전기 전도도의 최대치를 만족하는 미세구조로는 코팅된 구로 이뤄진 공간 채움 구조 (Space-filling coated spheres), 계층적 라미네이트 (Hierarchical laminates) 구조, Vigdergauz 구조, 카고메 (Kagome) 구조 등이 있다.⁸⁻¹¹⁾ 앞의 두 가지 구조들은 무한 반복되는 형태로 이루어진 가상적인 구조인 반면 Vigdergauz 구조¹⁰⁾나 Fig. 4와 같이 대바구니 형태를 갖는 카고메 구조¹¹⁾는 단일스케일에서 정의되는 간단한 구조여서 실제 디바이스에 적용이 가능하다. 이와 같이 최적화된 미세구조는 실제 디바이스에 적용이 가능하여야 그 효용성이 있다.

한편 다 기능성 소재 설계를 위해서는 두 가지 이상의 물성들의 상호 연관성에 대한 연구가 필요하다. 복합소재의 경우 각 소재의 물성들이 정의되어 있으면, 전체 물성은 이들 간의 미세구조에 의해 결정되는데, 서로 다른 물성들이 동일한 미세구조를 매개로 연결되게 된다. 예를 들면 특정 미세구조에 대한 전기 전도도를 알면, 동일한 미세구조에 대한 열전도도나 기계적인 탄성률을 특정 범위 안에서 예측할 수 있다는 것이다.^{12,13)} 이와 같은 관계를 “상호물성 (Cross-property)” 관계¹⁴⁾라고 하는데, 다 기능성 물질 최적화를 위해서는 유용한 이론이다. 두 가지 소재가 갖는 전기 전도도 (σ_i) 및 열전도도 (λ_i)의 상



호 관계는 아래와 같은 식과 같으며 이 식들은 두 물성의 가능한 범위를 결정짓게 된다.

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_e - \phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_e - \phi_1 \sigma_1 - \phi_2 \sigma_2} = \frac{3(\lambda_2 \sigma_1 - \lambda_1 \sigma_2)}{\phi_1 \phi_2 (\lambda_2 - \lambda_1)(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_2} \left(\frac{\sigma_2 + 2\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_2} - \phi_2 \frac{\sigma_e + 2\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_e} \right) = \frac{\lambda_1 + 2\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} - \phi_2 \frac{\lambda_e + 2\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_e} \right) \quad (5)$$

아래 식 (6)의 부호에 따라서, 양수일 때는 (4)식이 복합 소재의 전도도(σ_e, λ_e)의 상한곡선을, (5)식은 하한곡선을 나타낸다.

$$\frac{\lambda_2 \sigma_1 - \lambda_1 \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_2} \geq 0 \quad (6)$$

예를 들자면, 두 소재의 전기 전도도와 열전도도가 $\sigma_1 = 0.1, \sigma_2 = 1.0, \lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0.1$ 와 같이 주어졌을 때, 이들로 이뤄진 복합소재의 열전도도와 전기 전도도가 가질 수 있는 범위는 Fig. 5에서 나타난 렌즈모양의 영역안으로 한정된다.¹⁵⁾

또한 Fig. 5에 점으로 표시된 전기 전도도 및 열전도도 두 가지 물성을 동시에 최대화하는 미세구조는 시뮬레이션에 의해 Fig. 6에 나타난 “이중 연결(Bicontinuous)” 구조와 같음이 밝혀졌다. 그림에서 한 상(red)은 다른 상(green)보다 전기 전도도가 높고 열전도도는 낮는데, 두 가지 상이 서로 동일한 형태를 갖고 얽혀있어 열전도도 및 전기 전도도를 최대화 하는 동시에 두 소재 간의 접촉 면적을 최소화하는 구조이기도 하다. 이 연구는 이론적으로 제시된 두 가지 이상의 물성 최대값을 갖는 구조를 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현한 다 기능성 소재 개발의

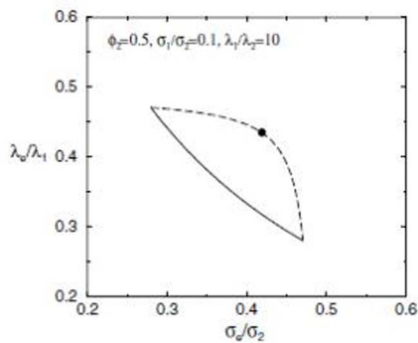


Fig. 5. 열전도도와 전기 전도도의 상관계수에 의해 정의되는 복합소재의 물성 범위.¹⁵⁾

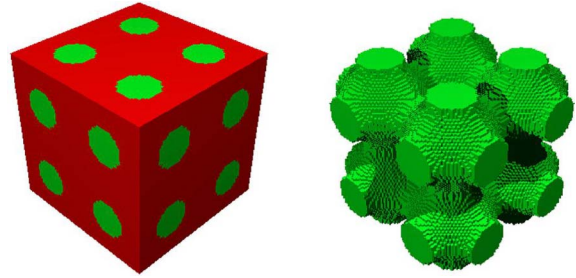


Fig. 6. 전기 전도도 및 열전도도의 최대값을 갖는 다기능 소재인 이중 연결 구조¹⁵⁾

한 예이다.

소재를 구성하는 원자들을 독립적으로 보고 설계하는 조성 최적화와 함께, 미세구조 최적화는 소재 개발에서는 빼 놓을 수 없는 기술이다. 소재 자체 개발과는 무관한 듯 보이지만, 소재의 물성과 구조가 서로 영향을 주고받기 때문에 소재 개발에는 필히 포함되어야 한다. 미세구조 최적화는 원자레벨 및 거시레벨에서 모두 가능한데, 양자점(Quantum dots)이나 탄소나노튜브(CNT), 그래핀(Graphene)과 같이 수 nm인 나노구조에서부터 IT부품의 패키징 소재에 이르기까지 다양한 스케일에서 적용이 가능한 시뮬레이션 기술이다. 거시적 스케일에서 적용되는 대표적인 구조 최적화로 “위상 최적화(Topology optimization)”를 들 수 있으며, 이는 각종 디바이스, 부품 등의 물성 최적화에 적용되고 있다.¹⁶⁾

IV. 맺는 말

현대 산업에서 소재 개발 분야의 화두중에 하나인 융합소재 개발에 있어서, 다양한 물성을 동시에 극대화하는 방안과 생산 비용과 시간을 절약하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하는 소재 설계 기술에 대해 논의하였다. 또한 현대산업에서 다양한 분야에서 사용되고 있는 자성소재 개발을 위한 시뮬레이션 기술 및 적용 사례를 간략히 소개하였다. 양자현상에 기반하고 있는 자성소재 설계에는 제일 원리 해석 등의 시뮬레이션 툴이 절대적으로 필요하며 이를 소재 개발에 적용하는 연구는 지속적으로 발전하고 있다. 자기 모멘트나 자기 이방성을 원자레벨에서 예측하고 최적의 조성을 찾는 시뮬레이션 기법



은 첨단 나노소재 개발에서 실험적인 개발법과 함께 필수적인 소재 설계의 방법론으로 자리잡아 가고 있다.

단일 물성 최적화와 더불어 시뮬레이션을 이용한 다기능성 소재 개발 분야도 소개하였다. 요즘과 같이 소형화 및 여러가지 기능이 집약된 다기능 소자들에 이용되고 있는 소재들의 물성 최적화를 위해서는 다양한 이론과 이를 구현하는 최적의 조성 및 미세구조들이 많이 제안되어야 함을 강조하였다. 이와 같이 융합된 소재 개발은 아직은 시작 단계이며 개별적인 기술 또한 완성되지 못한 부분이 많음도 사실이다. 하지만 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 소재설계 기술은 실험실에서 수행되는 직접적인 소재 합성 기술과 함께 효율적인 소재 개발 기술의 중요한 한 축을 형성하고 있으므로, 이에 대한 다양한 분야의 연구자들의 지속적인 협조와 조화로운 공조가 이뤄질 경우 그 활용 시기와 범위는 더욱 빨라지고 넓어지게 될 것이다.

참고문헌

1. H. P. Vowles, "Early Evolution of Power Engineering," *Isis*, **17** 412-20 (1932).
2. N. Bohr, "Studier over Metallernes Elektrontheori," Københavns Universitet (1911); Hendrika Johanna van Leeuwen, "Problèmes de la théorie Électronique du Magnétisme," *J. de Physique et le Radium*, **2** 361-77 (1921).
3. W. Kohn and L. J. Sham, "Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects," *Phys. Rev.*, **140** A1133 (1965).
4. M. Allen and D. J. Tildesley, *Computer Simulation of Liquids*, Clarendon, Oxford, 1987.
5. L. S. I. Liyanage, S. Kim, Y.-K. Hong, J.-H. Park, S. C. Erwin, and S.-G. Kim, "Theory of Magnetic Enhancement in Strontium Hexaferrite through Zn-Sn Pair Substitution," *J. Mag. Mag. Mat.*, **348** 75-81 (2013).
6. <http://cms.mpi.univie.ac.at/VASP/>
7. Z. Hashin and Shtrikman, "A Variational Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials," *J. Appl. Phys.*, **33** 3125 (1962).

8. S. Torquato, *Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties*, Springer-Verlag, New York, 2002.
9. G. W. Milton, in *Homogenization and Effective Moduli of Materials and Media*, Ed. by J. L. Eriksen, D. Kinderlehrer, R. Kohn, and J. L. Lions, Springer, New York, 1986.
10. S. B. Vigdergauz, "Regular Structures with Extremal Elastic Properties," *Mech. Solids*, **24** 57 (1989); S. B. Vigdergauz, "Three-dimensional Grained Composites of Extreme Thermal Properties," *J. Appl. Mech.*, **3** 300 (1994).
11. S. Hyun and S. Torquato, "Optimal and M two-dimensional, Kagome-like Cellular Solids," *J. Mater. Res.*, **16** 280 (2001).
12. D. J. Bergman, "The Dielectric Constant of a Composite Material-a Problem in Classical Physics," *Phys. Rep.*, **43** 377 (1978)
13. G. W. Milton, "Bounds on the Complex Permittivity of a Two-component Composite Material," *J. Appl. Phys.*, **52** 5294 (1981).
14. L. V. Gibiansky and S. Torquato, "Link between the Conductivity and Elastic Moduli of Composite Materials," *Phys. Rev. Lett.*, **71** 2927 (1993).
15. S. Torquato, S. Hyun, and A. Donev, "Multifunctional Composites: Optimizing Microstructures for Simultaneous Transport of Heat and Electricity," *Phys. Rev. Lett.*, **89** 266601 (2002).
16. M. P. Bendsøpe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer, New York, 2003.

현상일



- 1986년 서울대학교 물리학과 학사
- 1998년 미시간 주립대 물리학과 박사
- 2004년-2007년 경북대학교 기계공학부 초빙교수
- 2007년-현재 한국세라믹기술원 책임연구원