

머 리 말

첨단소재는 고온 터빈엔진, 인공 관절, 첨단 전지 및 전자기기 등 각종 신제품의 효율성, 생체 적합성, 수명을 결정짓습니다. 또한, 보건, 방위, 에너지 등 국민 생활과 산업 활동에 산적한 다양한 도전과제를 해결할 수 있는 유망 분야로서 국가 경쟁력 향상을 위해 기술혁신이 기대되는 영역입니다. 다만 첨단소재의 발견부터 상업적 활용까지 아우르는 연구개발 전 과정에는 약 20년 정도가 소요되는데 첨단소재의 개발 및 활용에 대한 혁신을 위해서는 장기 전략에 기반한 추진력을 확보할 필요가 있습니다.

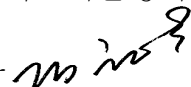
이러한 필요에 대응하기 위한 방안으로 오바마 정부는 2011년 소재게놈이니셔티브(Materials Genome Initiative, MGI)를 수립한 바 있습니다. 이는 현재 미국이 점하고 있는 과학기술의 주도적 입지를 지속하기 위해 첨단소재의 발견·개발·제조 및 보급 속도를 가속하는 전략을 세우고 있으며, 시스템 차원의 소재 설계, 최적화 및 실행을 추진하고 첨단제조파트너십(Advanced Manufacturing Partnership)과의 연계를 통해 국가적 주요 사안들을 해결한다는 계획을 제시하고 있습니다.

본 보고서는 오바마 정부가 글로벌 경쟁력 확보를 위해 첨단소재 활성화 방안으로 2011년에 소재게놈이니셔티브(MGI)를 수립한 이후, 2014년 MGI의 비전 달성을 위한 단기 계획을 수립한 것으로 첨단소재 기반의 혁신을 촉진 및 통합적 공동연구 패러다임 형성을 위한 전략을 요약 및 정리한 것입니다.

본 보고서가 혁신의 새로운 돌파구를 모색하고 있는 과학기술 정책 당국자 및 연구자들에게 도움이 되기를 기대합니다.

2015년 1월

국가나노기술정책센터

소장 

요약

비전 : 청정에너지, 국가안보, 인류 복지 등의 다양한 산업분야의 도전과제를 해결하기 위해 첨단소재를 핵심적으로 활용

목적 : 도전과제를 해결하기 위한 '소재계놈이니셔티브(MGI)'는 합리적인 비용으로 첨단 소재의 발견부터 개발, 제조 및 보급을 촉진

2011년 6월 오바마 대통령은 기업들이 첨단소재를 발견하고, 개발, 보급하는 속도를 두 배 이상 가속화하고자 '첨단제조파트너십(AMP: Advanced Manufacturing Partnership)' 과 더불어 MGI를 발족시켰다.

미국은 현재까지 첨단소재분야에서 주도적인 위치를 유지해왔다. 그렇지만 첨단소재는 발견부터 상업적인 활용에 이르기까지는 대개 20년 이상의 시간이 필요하기 때문에 미국이 에너지에서부터 전자, 군수 및 헬스케어에 이르기까지 첨단소재를 필요로 하는 다양한 분야에서 주도적 선두 입지를 계속 유지해 나가기 위해서는 반드시 시간적 격차를 줄일 수 있는 MGI의 강력한 추진이 필요하다.

MGI는 소재 모델링, 이론, 데이터마이닝 분야에서 최근 획기적인 기술 발전을 통해 합리적인 비용으로 첨단소재의 발견 및 보급을 가속화하는 데 목적을 두고 있다.

MGI는 첨단 모델링, 데이터 및 실험 툴 등 다양한 툴과 기법을 활용하고 있으며, 더 나아가 첨단소재 관련 연구를 수행하는 대학, 연방연구소, 기업 소속 과학자들간의 네트워크를 구축하고, 신소재 개발 및 제품 개발의 근간이 되는 정보들을 보다 효과적으로 공유하여 획기적인 기술 진보를 달성하고자 하는 것이다.

이러한 비전을 달성하기 위해서는 다음 4가지 도전과제의 해결이 필요하다.

- (1) 소재 연구에 대한 연구 문화 변화 선도
- (2) 실험, 컴퓨테이션, 이론 등을 접목
- (3) 디지털 데이터에 대한 접근 허용
- (4) 세계 수준의 소재 분야 전문인력 양성

본 전략계획은 MGI의 비전 달성을 위해 미 연방정부의 단기 계획을 정리한 자료로써 대학과 기업의 소재과학 및 공학 전문가들이 9개 소재 분야의 발전에 저해되는 문제를 해결하는 과학기술 도전과제들이 포함되어 있다. 이는 첨단소재의 신속한 개발과 보급이라는 오바마 대통령의 MGI 추진 취지에도 부합하는 것이다. MGI는 보건, 방위, 에너지 분야 등 다양한 산업 부문에서 등장하고 있는 신소재기술의 개발 및 보급을 적극 추진함으로써, 궁극적으로 21세기 미국의 경쟁력 확보와 혁신에 대해 미국의 선도적 입지를 유지하는 데 핵심적인 역할을 수행할 것이다.

<차 례>

제1장 서론	1
제2장 주요 도전과제	3
1. 소재 연구, 개발, 보급을 둘러싼 연구 문화의 변화	3
2. 실험, 컴퓨테이션, 이론의 통합	3
3. 디지털 데이터에 대한 접근	3
4. 인프라 및 툴 활용 능력을 갖춘 인력	4
제3장 전략 목적 및 목표	5
1. 목적 1 - 연구 문화 패러다임 변화 추진	5
2. 목적 2 - 실험, 컴퓨테이션, 이론을 통합	8
3. 목적 3 - 소재 관련 데이터에 대한 접근 장려	12
4. 목적 4 - 툴 및 인프라 활용 능력을 갖춘 차세대 소재 인력 양성	15
제4장 국가적 목표 달성	18
1. 국가 안보	18
2. 보건 및 복지	18
3. 청정에너지 시스템	18
4. 인프라 및 소비재	19
제5장 과학기술 도전과제	20
1. 바이오소재	20
2. 촉매제	21
3. 폴리머복합소재	22
4. 상관소재	22
5. 전자소재 및 광소재	23
6. 에너지 저장 시스템	23
7. 경량 구조물	23
8. 유기전자소재	24
9. 폴리머	24
제6장 결론	25

부록 1. 기관별 관심 분야 및 중점 분야	26
1. 국방부 (DOD)	26
2. 에너지부 (DOE)	27
3. NASA	28
4. 미국표준기술연구원 (NIST)	29
5. 미국국립보건원 (NIH: Nation Institutes of Health)	30
6. 미국국립과학재단 (NSF: National Science Foundation)	30
7. 미내무부 산하 지질연구소 (U.S. Geological Survey)	31
 부록 2. 연방 기관들의 기타 관련 활동	 32
1. 제조	32
2. 개방 접근	32
3. 기타 연방 차원의 이니셔티브	33
4. 기관간 협력	33
5. 미대통령실 (EOP: Executive Office of the President)	34

제1장 서론

현대인의 삶을 가능하게 해 주는 각종 기기들, 예를 들면 고온 터빈엔진, 인공 관절이나 생체 이식 물질, 첨단전지, 첨단 전자기기 등의 효율성이나 생체적합성, 수명 및 성능 등은 모두 그 소재에 의해 결정이 된다. 이들 소재의 혁신이 현재 및 미래의 우리의 삶을 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 신소재의 경우 개발에서부터 실제 사용에 이르기까지는 대개 20년 이상의 시간이 소요된다.

향후 수십 년 동안의 미국 경제의 경쟁력과 번영 여부는 혁신의 속도에 달려 있다. 미국 제조업의 혁신을 지원하는 데 있어서의 첨단소재의 중요성을 인식한 오바마 대통령은 2011년 6월 합리적인 비용으로 첨단 소재의 발견, 개발, 제조 및 보급 속도를 현재보다 두 배 가속화하는 것을 핵심 내용으로 하는 MGI를 발족하였다.

MGI의 이러한 야심찬 목표는 충분히 달성가능하다. 2000년대 초반에 수행한 연구 결과, 소재 설계, 최적화 및 실행에 있어 시스템 차원에서 접근을 한다면, 품질은 높이면서도 설계에 드는 시간과 비용은 절감할 수 있다는 분석 결과가 나왔으며, 실제 이러한 성과를 거둔 사례들이 2008년에 발표된 미국가연구위원회(NRC: National Research Council)의 “통합 컴퓨테이션 소재 엔지니어링(ICME: Integrated Computational Materials Engineering): 국가 경쟁력 제고 및 국가안보 강화를 위한 혁신 분야”라는 연구에서 자세히 소개되었다. 이들 사례 중 하나는 미국방위고등연구계획국(DARPA)의 “Accelerated Insertion of Materials” 프로그램의 일환으로 추진된 프로젝트로 본 프로젝트에서는 두 개 항공우주 엔진 설계 기업들이 공동 참여하여 설계와 제조 프로세스를 최적화함으로써 엔진의 무게를 21% 줄이는 대신 엔진 과열 강도는 19% 높이는 성과를 거두었고, 또한 통상적인 개발 주기보다 약 50% 정도 개발 기간도 단축하였다. 또 다른 사례의 경우에는 모델링과 분석 툴을 이용한 시뮬레이션 방식을 적용함으로써 개발자들이 다양한 디자인 대안들을 컴퓨터로 시연해 볼 수 있었기 때문에 새로운 디젤 엔진 개발에 드는 시간과 비용을 절감할 수 있었다.

또한 혁신적인 실험 툴을 이용, 소재 개발 및 보급 가속화를 달성하고 있다. 제약 연구 분야에서는 처리율이 높은 실험 기법을 활용함으로써, 신약의 개발에서 시장 출시까지의 시간을 단축하고 있다.

이들 성공 사례들로부터의 교훈은 소재 개발에서도 다양한 접근방식을 채택, 신소재 개발에서 시장 출시에 이르는 시간을 단축하고 MGI의 목표 달성에도 기여할 수 있음을 시사한다. 2011년 MGI 백서 “글로벌 경쟁력을 위한 소재계놈이니셔티브(MGI)”에서

는 첨단 컴퓨테이션 툴, 실험 툴 및 데이터 인포메틱스 툴들을 비롯해 통합 공동 연구 패러다임을 소개하고 있다. 이러한 ‘MGI 방식’은 컴퓨테이션 툴, 실험 툴 및 데이터 툴들을 통합적으로 활용함으로써 신소재의 성공적인 개발 및 신속한 보급, 그리고 제품에 대해 신소재의 적극적인 채택을 도모하고자 한다.

한편 MGI는 청정 에너지, 국가 안보, 보건 및 복지 등 국가적 주요 사안들을 해결하기 위한 행정부 및 연방 차원의 다른 다양한 프로그램들과도 밀접하게 연결되어 있다. 사실 이들 사안들을 성공적으로 해결하기 위해서는 첨단소재가 필요하다. MGI가 제조업 부문을 쇄신하고자 하는 연방 정부의 노력과 밀접히 관련이 있다는 것은 오바마 대통령이 MGI를 발표할 당시 제조업 부문의 기술, 프로세스, 제품 개선을 위한 산학연 공동 프로젝트인 “AMP”도 함께 발표했다는 사실에서도 잘 드러나고 있다. 한편 MGI의 중요한 임무 중 하나가 데이터 공유 및 접근을 위한 인프라를 제공하는 것인데, 이 문제는 2013년 미 과학기술정책실(OSTP: Office of Science and Technology Policy) 각서에서도 다루고 있는 내용이다. 본 각서에서는 연방 정부가 지원하는 공공 연구 프로젝트의 경우 오픈 데이터 접근을 제공할 것을 명시하고 있다. 이 밖에도 MGI는 미국의 “국가나노기술이니셔티브(NNI: National Nanotechnology Initiative)”와도 밀접한 관련이 있다. 이상에서 언급한 다양한 이니셔티브들과 프로젝트들을 연계함으로써 MGI는 미국 제조업을 지원할뿐만 아니라, 여러 부문에 걸친 공동의 노력 및 다학제적 접근을 통해 미국이 직면한 국가적 도전과제를 보다 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 혁신 채널을 개척할 수 있을 것이다.

MGI는 합리적인 비용으로 차세대 소재 개발 주기를 현재보다 절반 수준으로 단축한다는 야심 찬 목표를 제시하고 있는데, 본 전략계획에서 소개하고 있는 전략들은 이러한 비전을 달성하는 데 도움이 될 것이다.

이어지는 2장과 3장에서는 각각 MGI의 비전을 달성하는 과정에서 직면한 4가지 전략적 도전과제를 간략히 설명하고, 이어 이들 도전과제가 해결하고자 하는 목적 및 목표가 무엇인지를 제시한다. 4장에서는 안보, 보건 및 복지, 청정에너지, 인프라, 소비자 제품 분야에서의 국가적 사안들을 해결하는데 MGI를 어떻게 활용할 수 있는지, 즉 MGI를 활용한 해결 방안을 제시하고 있다. 5장에서는 소재와 관련이 있는 모든 분야에서 제기되고 있는 일련의 과학기술 도전과제들을 정리하여 제시하고 있다. MGI의 일환으로 개발되는 새로운 툴과 연구 문화 변화는 이들 도전과제를 비롯해 다양한 미래의 도전과제들을 해결하는 데 직접 적용이 될 것이며, 이를 통해 보다 신속한 첨단소재의 개발 및 보급이라는 MGI 발족 취지에도 심분 부합하게 될 것이다.

제2장 주요 도전과제

MGI가 미래 비전을 달성하는 과정에는 다음과 같은 4가지 주요 도전과제가 장애요인이 될 수 있다.

1. 소재 연구, 개발, 보급을 둘러싼 연구 문화의 변화

실험, 컴퓨테이션, 그리고 이론을 보다 심도 있게 접목하는 소재과학 및 공학분야의 연구 문화 전반에 변화가 일고 있다. 이와 관련 MGI가 직면한 가장 중요한 도전은 소재 개발의 전체 단계에 걸쳐 이론가와 실험가들 사이의 지식 공유 및 지식 흐름뿐만 아니라 대학, 산업계 특히 제조업체들간의 지식 공유와 지식 흐름을 촉진시킬 수 있는 메카니즘을 어떻게 구축할 것인가 하는 문제이다.

2. 실험, 컴퓨테이션, 이론의 통합

MGI 수행 방식의 중요한 특징은 실험, 컴퓨테이션, 이론 등 다양한 접근방법을 통합적으로 접목한다는 데 있다. 소재 연구의 경우 그 주기가 길다 보니 소재 연구에 적합한 정량적이고 예측 가능한 툴을 개발하는 것은 쉽지 않다. 이에 ① 실험 데이터를 통해 입증된 첨단 시뮬레이션 툴 개발, ② 모델링 및 분석 코드를 공유할 수 있는 네트워크 구축, ③ 정량적 분석 툴에 대한 접근 확보 등이 소재 혁신 인프라의 중요한 요소가 될 것이다.

3. 디지털 데이터에 대한 접근

방대한 데이터를 저장할 수 있을 뿐 아니라 이러한 데이터를 쉽게 검색할 수 있는 디지털 데이터의 인프라를 구축하는 것은 소재과학 및 공학을 비롯한 많은 과학기술 분야의 공통된 과제이다. 특히 소재 부문의 경우는 ① 어떤 툴이나 데이터를 활용할 수 있는지를 사용자들이 인식할 수 있도록 지원하고, ② 일반적으로 수용되는 거버넌스 구조가 무엇인지를 정의하고 이를 실행하며, ③ 보안상의 요건과 데이터 활용성 및 검색 편의성 간에 적절한 균형 유지하고, ④ 데이터를 설명하고 데이터 수준을 평가하는 데 필요한 표준을 구축해야 하는 도전과제에 직면해 있다. MGI의 비전을 달성하기 위해서는 전체 소재 개발 주기에 걸쳐 생성되는 방대한 데이터와 관련 툴에 대한 오픈

접근이 필요하다. 이러한 오픈 접근을 통해, 개별 데이터에 다양한 데이터 분석 기법을 적용함으로써 다양한 데이터 소스로부터 나오는 방대한 양의 데이터를 효과적으로 검토, 분석할 수 있다.

4. 인프라 및 툴 활용 능력을 갖춘 인력

오픈 접근이 가능한 데이터 인프라와 새로운 툴이 갖추어졌다 할지라도 차세대 소재 부문 연구자들은 이들 인프라와 툴을 전문적으로 활용할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 이를 위해 앞으로 산업계나 대학에서 소재 분야에서 일하고자 하는 학부생이나 석사과정생들에게 이러한 통합적 접근방법에 대한 교육을 실시하거나, 이미 소재 연구 분야에 종사하고 있는 전문 인력들에 대해서는 추가적인 교육훈련을 실시함으로써 이러한 필요에 효과적으로 대응해 나아갈 수 있을 것이다. 또한 차세대 인력들이 소재혁신 인프라 활용 능력을 갖추기 이전에 우선 교육훈련 전문가들이 새로운 툴이나 연구 접근방법 그리고 이들 툴이나 연구 접근방법의 가치에 대해 정확히 알고 있어야 할 것이다.

제3장 전략 목적 및 목표

본 장에서는 MGI의 목적(Goal)과 그에 따른 세부적인 목표(Objective) 및 추진 계획(Milestone)등을 살펴보고자 한다. 특히 추진 계획에서는 해당 테스크(task)를 실행하는 주체의 주도적인 역할을 하게 될 기관들의 목록도 함께 제시한다.

MGI 세부 과제를 개발하고, 실행하는 과정에서 프로그램의 효과성 및 파급효과를 평가하는 기법이나 접근방법도 함께 개발이 될 것인데, 이러한 평가 기법에 대한 자세한 내용은 아직 정리된 것이 없지만 평가 기법 및 접근방법 개발을 위해서는 어떤 부분이 효과적이었는지, 과학적 성과가 무엇인지, MGI 추진으로 인해 소재 혁신의 속도와 상업화 성과가 어느 정도 개선되었는지 등에 대한 자세한 데이터를 수집하는 것이 필요하다.

MGI의 성공은 다음 4가지 목적 달성 여부에 달려 있다.

- ① 연구 문화 패러다임 변화 추진
- ② 실험, 컴퓨팅, 이론의 통합
- ③ 소재 데이터에 대한 접근 촉진
- ④ 툴 및 인프라 활용 능력을 갖춘 차세대 소재 부문 전문 인력 양성

1. 목적 1 - 연구 문화 패러다임 변화 추진

소재 개발에서 보급에 이르는 전체 프로세스 주기를 단축하고 비용을 절감하기 위해서는 MGI는 소재 연구개발 및 상업화 수행 방식에 있어 변화를 추진해야 한다. 이러한 패러다임 변화를 위해서는 기본적으로 팀이 협력하는 방식에 있어서의 변화가 필요하다. 이를 위해서는 ① 이론, ② 소재 물성 파악, 합성, 및 프로세싱, ③ 전산 모델링 등을 종합적으로 접목하는 협업이 필요하다. 이러한 다학제적 접근방식을 통해 학제간 소통을 촉진하고, 지연이나 실수를 최소화함으로써 최적의 성과를 도출할 수 있을 것이다.

이러한 패러다임의 변화는 기초 연구에서부터 설계, 최적화, 제조 단계에 이르는 연구개발 전체 주기에 걸쳐 이론, 모델링, 실험을 접목하는 노력을 필요로 하기 때문에 산업계의 역할이 특히 중요하다.

1) 목표 1.1 통합 연구개발 장려 및 촉진

MGI의 연구 문화와 연구 기법의 핵심 키워드는 다학제간 통합적 협력이다. 이러한 통합적 협력 노력이라는 MGI의 패러다임은 미국립과학재단의(NSF: National Science Foundation) MGI 프로그램인 “미래혁신을 위한 소재설계 (DMREF: Designing Materials to Revolutionize and Engineer out Future)” 프로그램을 비롯해 다른 연방 연구 기관들에서 이미 채택하고 있다. 2014년에 NSF는 DMRFEF 수혜기관을 추가로 선정할 예정이며 MGI 관련 프로젝트에 참여하는 과학자들의 수는 매년 증가할 전망으로, 이를 통해 MGI의 통합적 협력 노력이라는 연구 패러다임이 더욱 확산되는 효과를 가져올 것이다.

① **추진계획 1.1.1:** 향후 2년 동안 MGI 관련 프로젝트에 참여하는 누적 참여 연구원 수 50% 확대 (국방부(DOD), 에너지부(DOE), NSF)

② **추진계획 1.1.2:** 보다 강력한 MGI 커뮤니티 구축을 위해 여러 기관의 연구책임자들이 참여하는 정기회의 개최 및 회의에 산업계 대표들이 참여 (DOD, DOE, NSF)

한편 연방정부는 특히 산학협력의 중요성을 강조하고 있는데, 어떤 컴퓨테이션 툴과 실험 툴이 가장 필요한지를 파악하고, 이들 툴을 도입, 보급하고, 이들 툴을 사용할 차세대 전문인력을 양성, 교육하는 데 있어 산학 파트너십은 반드시 필요한 요건이다.

이러한 산학 파트너십 사례로 기초엔지니어링문제 (FEP: Foundational Engineering Problem) 해결을 위해 발족된 산학 파트너십을 들 수 있는데, 이러한 산학 파트너십을 통해 소재 및 부품 엔지니어링에 있어 구체적인 성과를 도출하였다.

③ **추진계획 1.1.3:** 연방정부가 지원하는 추가 FEP 프로젝트를 2년 내에 발족 (DOD, DOE)

MGI에 보다 많은 연방 기관들이 참여하게 됨에 따라 각 기관이 가진 전문지식을 공동으로 활용할 수 있는 기회 역시 확대되고 있다. 2013년 DOE의 EERE (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)는 EERE와 국립표준기술연구원 (NIST: National Institute of Standards and Technology)간 파트너십 프로그램에 대해 연구비 지

원을 결정하였다.

본 프로그램에서 NIST는 DOE-EERE의 자동차 경량화 소재 개발 프로젝트에서 나오는 소재 관련 데이터의 저장 및 관리 업무를 담당하게 된다. 이 파트너십 프로그램을 모델로 삼아, 다른 연방 기관으로 파트너십 프로그램을 확대할 수 있으며, NIST의 데이터 관리 선진사례를 다른 MGI 참여 연구 기관들로 확대 적용할 수 있을 것이다.

- ④ **추진계획 1.1.4:** 3개의 추가적인 MGI 관련 범기관 연구비 지원 및 협력 프로젝트 기회를 향후 2년 내에 파악

2) 목표 1.2 MGI식 접근방식 채택 장려

MGI식 접근방식의 효과를 십분 실현하기 위해서는 연방 정부의 투자만으로는 충분하지 않으며 대학과 산업계에서도 MGI 접근방식을 채택할 필요가 있다. 이를 위해 특히 SMGI는 산업계와의 협력을 촉진하는 중간 연결 고리 역할을 지속적으로 수행할 것이다.

산학간 교류를 장려하고, MGI 방식의 산업계 적용을 촉진시키기 위해 연방정부와 민간 부문은 물리, 화학, 소재과학 및 공학 전공 학생들을 대상으로 창업 교육 및 기업체 훈련 기회를 함께 모색해 볼 수 있다. 이를 통해 학생들은 수업 시간에 배운 MGI 기법들을 실제 현장에 적용하면서 현장 경험을 쌓을 수 있고 대학에서 배운 첨단 기술을 기업에 전파시키는 비공식적인 기술이전 매체 역할 할 수 있다.

- ① **추진계획 1.2.1:** 대학의 소재과학, 소재공학 학과와 전문 학회, 소재 부문 기업들과 협력하여 MGI 관련 프로젝트에서 학생들을 포함한 대학 연구자 그리고 기업 연구자들간 산학 협력을 촉진시킬 수 있는 채널을 파악함 (SMGI)

또한 연방정부는 최근 인센티브나 경연대회 등을 활용해 연구개발에 대한 관심을 유도하는 데 있어 어느 정도 성공을 거두었다.

- ② **추진계획 1.2.2:** MGI 기법을 적용, 신속하게 신소재를 개발한 성공 사례를 발표하는 경연 혹은 포상 프로그램을 향후 2년 내에 도입함 (DOE, NASA)

3) 목표 1.3 국제사회와 협력

첨단소재 시스템의 개발 및 보급을 가속화하는 것은 미국뿐만 아니라 미국의 파트너 국가들에게도 경제적 이익이 될 수 있다. 개별 연방 기구들이 국제협력을 추진하겠지만, SMGI는 특히 소재과학 및 공학 분야에서의 국제협력을 추진하고 있다.

- ① **추진계획 1.3.1:** 다른 파트너국가들과의 협력 기회를 지속적으로 추진하고, 소재 과학 분야 연구개발 관련 국제회의에 참석하고, 기존의 국제 파트너십을 강화함 (SMGI)

2. 목적 2 - 실험, 컴퓨테이션, 이론을 통합

MGI에서는 소재 개발, 처리, 제조 관련 기초 연구 툴, 이론, 모델, 데이터의 접목을 강조한다. 소재혁신 인프라를 통해 이러한 접목이 가능한데, 이러한 통합 툴을 활용하여 핵심 소재에 대한 대체 소재를 파악하고, 새로운 소재들을 생산한다. 이를 통해 소재 개발을 위한 시뮬레이션 및 모델링 툴을 이해할 수 있고, 제품 및 생산 설계를 수행할 수 있으며, 부품 수명을 예측하고, 유지관리 프로토콜을 정립할 수 있다. 다음의 일련의 구체적인 목표들을 통해 이러한 통합 프로세스 문제를 해결할 수 있다.

1) 목표 2.1 MGI 자원 네트워크 구축

초기 연방 차원의 MGI 지원은 소재혁신 인프라 개발 분야 연구자들에 대한 투자가 주를 이루었다. 이제는 연구원들을 서로 연결시켜주고, 연구원들과 소재 연구 커뮤니티를 연결시켜 주는 전국적인 네트워크를 구축하는 일이 중요한 과제가 될 것이다.

다양한 MGI 이해관련 당사자들에게 모델링 툴과 소프트웨어 툴을 제공하기 위해서는 다양한 툴들에 대한 실험을 거쳐 그 적절성을 확보하고, 다양한 플랫폼 및 사용자 그룹이 사용할 수 있도록 범용적인 기능성을 갖추어야 한다. 이를 위해서는 컴퓨테이션 모델을 애플리케이션 코드와 접목하여, 통합 설계, 확인, 성능 예측, 지속성 확보가 가능해야 한다. 코드 개발자와 소프트웨어 개발자들간 네트워크를 통해 소통을 강화하게 되면 보다 많은 사용자들이 이들 툴을 사용할 수 있게 될 것이다. 이를 위해서는 컴

퓨테이션 툴 개발 분야에서 어떤 노력들이 진행되고 있는지에 대한 정보를 확보하는 일이 중요하다.

코드와 소프트웨어 이외에도 소재 합성 및 소재 물성 파악을 위한 실험을 수행할 수 있는 인력과 자원들을 효과적으로 활용해야 한다. 현재 전국적으로 이러한 자원과 인력들이 존재하므로 이러한 자원 및 인력들에 대한 정보를 파악하는 것이 필요하다.

- ① **추진계획 2.1.1:** 소재 연구 커뮤니티와 협력하여, 공개적으로 이용할 수 있는 코드와 소프트웨어 관련 정보 및 소재 합성, 소재 물성 파악을 위한 실험 자원과 인력들에 대한 정보를 담을 수 있는 정보 저장 인프라를 구축함 (SMGI)

모델 개발자 혹은 소프트웨어 개발자 커뮤니티는 이들 모델이나 소프트웨어를 활용하는 주체들과는 상당히 다른 특성을 가지고 있기 때문에, 연구 수준의 코드를 실제 사용할 수 있는 소프트웨어로 전환할 수 있는 경로를 구축하는 것이 필요하다. 이는 장기적으로 코드 및 소프트웨어 패키지 개발을 위해서도 필요하며, 컴퓨터공학, IT, 소재과학을 아우르는 다학제적 연구 프로그램을 위해서도 필요하다.

네트워킹 활동을 통해 연구자들은 필요한 소프트웨어를 가장 잘 발전시킬 수 있는 방법이 무엇인지를 효과적으로 파악할 수 있다. 또한 소재 연구 분야에서 구축한 네트워크를 통해 여러 다양한 분야에 적용할 수 있는 운영 표준 및 공동 소프트웨어 모드를 파악할 수 있다.

- ② **추진계획 2.1.2:** 구조물용 소재 예측 소프트웨어 개발을 위한 개발자 네트워크를 구축함. 이 과정에서의 교훈 및 선진사례 등을 문서화하여 다른 소재나 다른 소재 응용 분야에서의 네트워크 구축에 활용함 (DOD, DOE, NIST, NSF)

2) 목표 2.2 정확하고 신뢰할 수 있는 시뮬레이션 구축

MGI의 성공적인 추진을 위해서는 현재 가용한 이론, 모델링, 시뮬레이션 툴을 소재 연구 및 엔지니어링 분야에까지 확대할 필요가 있다. 현재 범 연방정부 차원에서 진행되는 특정 소재 설계 활동들은 연구개발 전체 단계에 걸쳐 예측 기능을 갖춘 첨단 컴

퓨테이션 툴을 개발하는 것을 목표로 삼고 있다. 이러한 컴퓨테이션 툴들을 실험 설계에 접목함으로써 신소재 개발 성과를 가속화하고 성과 수준을 제고할 수 있을 것이다.

한편 시뮬레이션에 있어 특정 기술 장벽으로 인해 소재 분야의 발전이 지연되고 있다. 효과적인 소재 설계를 위해서는 입자 크기가 다양한 소재들을 아우를 수 있는 통합 모델이 필요하다. 이를 위해 MGI는 이들 기술 니즈를 해결하는 데 노력을 기울여야 할 것이다. 또한 모든 소재 유형에 대해 이론, 모델링, 시뮬레이션에 있어 어떤 과학 기술적 도전이 있는지를 소재 연구 커뮤니티의 다양한 의견을 수합해 파악해야 한다.

- ① **추진계획 2.2.1:** 소재 연구 커뮤니티 참여자들간 회의를 소집, 각기 다른 소재 종류별로 어떤 이론, 모델링, 시뮬레이션 관련 도전이 있는지를 파악함. 연례 워크숍을 개최하고 다양한 소재 종류별로 보고서를 출간함. 첫 4년 동안은 구조물 소재, 자기장 소재, 에너지 저장용 소재, 전자 소재 등을 주로 다루게 될 것임 (SMGI)

3) 목표 2.3 소재 개발에서 보급에 이르는 전 단계에 걸쳐 실험 툴 개선

소재는 일반적으로 계층적 구조를 띠는데 이러한 계층적 구조로 인해 실험과 시뮬레이션에 어려움을 야기한다. 구조의 변화를 측정하는 툴은 X-ray나 중성자 장비와 전자, 이온, 레이저 분광기에 사용되고 있다. 다양한 소재의 합성 및 제조에 사용되는 툴은 처리 과정을 모니터링 할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 그러나 이런 우수한 툴들은 대개 특정 소재 시스템에만 국한되어 있다. 따라서 실험 데이터를 생성하고 이론, 모델링, 시뮬레이션을 통한 예측의 신뢰성을 확보하기 위해서는 첨단 실험 툴의 지속적인 개발이 필요하다. 또한 각기 다른 분자 구성을 지닌 다양한 소재들을 합성하는 합성 기법들을 적용할 수 있는 분야가 확대됨에 따라, 각각의 개별 소재들에 있어 관련 소재의 물성을 신속하게 측정할 수 있는 복합적인 물성 파악 능력이 함께 수반되어야 한다.

오늘날 다양한 기술에 사용되는 소재의 복잡성은 MGI에 추가적인 어려움을 안겨주고 있다. 예를 들면 첨단 전자제품 및 광학제품에 사용되는 소재는 다른 소재들과의 인터페이스 소재이거나 소재의 구성요소를 정교하게 조정해야 하는 얇은 막(膜)형 소재이다. 이처럼 소재의 구성요소를 구조적으로 조정해서 소재를 만들어야 하는 경우는 새로운 합성 기법과 처리 절차가 필요하다.

MGI의 목표가 새로운 소재의 발견, 개발, 설계, 보급을 가속화하여 이를 제품에 반

영하는 것이므로 소재의 다이나믹한 분석을 위해 실시간 방식을 채택하는 것이 필요하다. 즉 인위적으로 통제된 환경이 아니라 실제 환경에서 측정을 해야 한다. 이렇게 측정된 데이터인 경우에 비로소 이론이나 모델의 정확성을 뒷받침해 줄 수 있으며, 종합적인 이론이나 모델이 정립되지 않은 데이터를 보완해 줄 수 있고, 소재의 성질이 시간이 지나면서 어떻게 변화할 것인지를 예측하는 데 요긴한 정보로 활용될 수 있다.

- ① **추진계획 2.3.1:** 여러 기관이 참여하는 워크숍을 개최하여 소재의 물성, 합성 및 공정에 현재 시점에서 파악할 수 있도록 해주는 소재 물성 파악 툴의 현황 및 미래 방향에 대해 살펴봄 (DOD, DOE, NASA, NIST, NSF)

MGI의 경우, 제조 공정에 요소가 최종 소재 및 제품 성능에 어떻게 영향을 미치는지를 예측할 수 있도록 해 주는 제조업 부문의 컴퓨테이션 툴 및 실험 툴을 결합하여 채택하고 있어 소재 개발의 가속화에 기여하고 있다.

일단 소재가 보급되고 나면 소재의 전주기에 걸친 성능을 예측하는 것이 매우 중요하다. MGI를 통해 개발된 성능 예측 통합 툴을 통해 사용자들은 내구성 있는 설계가 무엇인지를 예측할 수 있다. 또한 소재의 구조적 변화와 성능을 실시간으로 파악할 수 있는 통합 진단시스템 역시 상당한 효과를 가져다 줄 수 있다. 또한 시간과 환경적인 요인들이 소재의 구조적 변화에 어떻게 영향을 미칠 수 있는지를 파악할 수 있도록 컴퓨테이션 툴과 실험 툴들을 개발하는 것도 MGI의 주요 임무 중 하나이다.

첨단 센서 시스템 개발, 제조 과정에서의 품질 평가를 위한 소프트웨어 개발, 소재 보급 후 시장 실패까지 걸리는 시간 예측 시스템 등은 여러 다양한 응용 분야에서 상당한 효과를 기대할 수 있다. 그러나 이러한 소재 보급 후에 발생할 수 있는 문제를 소재 설계 단계에서부터 제대로 반영하고 있지 못하는데, 이는 이러한 사후 프로세스를 설명하는 모델이 제대로 개발되어 있지 못해 그 활용 역시도 제한적이기 때문이다. 이들 분야에 대한 심층적인 이해를 통해, 소재 테스트 시간을 단축, 전체적으로 소재의 개발, 제품 설계, 통합, 인증 등에 걸리는 시간을 단축할 수 있을 것이다.

- ② **추진계획 2.3.2:** 여러 기관이 참여하는 워크숍을 개최, 첨단 소재 개발을 위한 MGI의 통합 접근방식을 적용하는 데 장애요인이 되는 주요 과학 기술상의 도전과제를 파악함. 첫 4년 동안 워크숍은 경량금속, 축

매제, 전지, 에너지보관장치, 반도체 및 통합회로 등 특정 소재 종류 및 응용 분야에 집중하여 개최함 (NIST, DOE, DOD, NSF)

소재 개발에서 시장 출시까지의 전체 소재 개발 단계에서 각 단계별로 걸리는 시간을 파악하는 것이 전체 시간을 줄이는 데 매우 중요하다. 하지만 이와 관련해서는 개별 사례 데이터만 있을뿐, 여러 산업분야, 다양한 소재 유형 및 용도에 걸쳐 현재의 전체적인 상황을 파악할 수 있는 데이터가 부재한 상태이므로 이와 관련 체계적인 조사 연구가 필요하다.

- ③ **추진계획 2.3.3:** 벤치마킹 조사를 실시, 소재 종류별, 용도별 시장 출시까지 걸리는 시간을 정량화하여 분석함 (NIST)

4) 목표 2.4 실험 데이터 및 컴퓨테이션 데이터 가치를 제고할 수 있도록 데이터 분석기법을 개발

첨단 실험 툴 및 컴퓨테이션 툴의 개발은 신소재 개발 및 신소재의 새로운 기능 예측을 위한 데이터마이닝 및 데이터 분석에 새로운 기회를 던져주고 있다. 소재 관련 데이터를 통일되게 포맷팅할 수 있고 데이터의 출처를 알 수 있는 일관성 있는 메타데이터를 구축하게 되면, 데이터마이닝 및 데이터 분석이 가능해진다. 또한 모델링 및 시뮬레이션 툴을 이용, 실시간으로 시험 데이터를 분석함으로써 시험적인 결과를 보다 빨리 도출할 수 있다.

- ① **추진계획 2.4.1:** 워크샵을 개최, 소재과학 및 공학 분야에서 새롭게 등장하는 데이터 분석용 컴퓨테이션 툴 현황을 파악함 (NIST)

3. 목적 3 - 소재 관련 데이터에 대한 접근 장려

양질의 소재 관련 데이터를 확보하는 것은 MGI 성공을 위한 핵심 전제이다. 소재 데이터는 모델링 작업에서 중요한 인풋 데이터가 된다. 그리고 여러 다양한 데이터 소스를 한데 모아 데이터 저장소를 만들 경우, 데이터간 차이를 파악하고 연구의 중복되는 부분을 줄일 수 있는 측면에서 유용하게 활용할 수 있다. 그러나 이러한 방대한 데

이터에 접근하기 위해서는 데이터 인프라 구축과 더불어 데이터 공유 문화를 진작시킬 필요가 있다.

다양한 요구사항을 가진 여러 연구 커뮤니티들의 수요를 충족시키기 위해서는 데이터 인프라는 소재 데이터에 대한 온라인 접근을 허용함으로써, 관련 정보를 신속하고 편리하게 제공할 수 있어야 한다. 또한 복수의 분산 정보 저장소를 갖춤으로써 실험과 계산 과정에서 생성되는 소재 데이터들 편리하게 저장, 검색할 수 있어야 한다. 또한 연구 커뮤니티들이 개발한 데이터 표준을 마련함으로써, 어떤 데이터를 포함시키고 어떤 데이터는 삭제할지를 결정하는 기준을 비롯해 데이터 포맷, 메타데이터, 데이터 유형 등을 제공해야 한다. 현재 이에 필요한 IT 솔루션이 개발 중에 있거나 이미 개발되어 있으므로, 본 전략계획에서도 이러한 첨단 IT 기술을 적절히 활용, 소재 연구에 접목시키는 것을 적극 권장한다.

1) 목표 3.1 소재 데이터 인프라 실행의 선진사례 파악

소프트웨어, 하드웨어, 연구 커뮤니티 전체 차원의 표준 등을 아우르는 소재 데이터 인프라가 바로 MGI가 목표로 하는 소재 혁신 인프라의 중요한 구성요소이다. 소재 데이터가 워낙 다양하고 복잡하기 때문에, 하나의 공통적인 데이터 인프라 비전을 수립하기는 쉽지 않다. 이처럼 소재 데이터 인프라 구축이 복잡하고 방대한 작업이라는 점을 감안, 기존 데이터 컬렉션 선진사례를 벤치마킹함으로써 소재 데이터 저장소 및 기타 다른 데이터 인프라 구축 노력으로부터 유용한 교훈을 도출할 수 있을 것이다.

- ① **추진계획 3.1.1:** 대학, 기업, 정부의 연구자 등 여러 기관의 이해관련 당사자들이 참여하는 워크숍을 개최, 다양한 소재 관련 커뮤니티의 니즈를 파악하고, 소재 데이터 인프라 구축에 대해 장애요인을 파악하며, 이러한 장애요인을 극복하는 잠재적인 방안을 마련함 (DOD, NIST)

또한 여러 연방 기관들의 기존 선진사례 벤치마킹 결과를 종합하여 소재 부문 데이터 인프라를 구축함으로써, 이 소재 부문 데이터 인프라를 연방 기관들 내의 다른 온라인 인프라에도 적용, 전반적인 과학 연구에 대한 기여를 극대화할 수 있을 것이다.

현재 각 기관의 데이터 관리 계획에서는 연구자들로 하여금 연구 과정에서 생성되는 데이터에 대한 관리 계획을 수립하고, 데이터를 다른 연구원들에게 공개하도록 요

구하고 있다. 최근 OSTP 지침에서는 연방의 재정지원을 받는 연구 프로젝트의 경우, 연구 결과에 대한 접근을 제고하도록 하고 있어 앞으로의 데이터 관리의 주된 방향은 더 많은 데이터를 공개 데이터로 전환하는 것이 될 것이다.

- ② **추진계획 3.1.2:** 참여 기관들이 현재 시행 중에 있는 데이터 관리 계획들을 검토, 이를 바탕으로 선진 사례에 관한 논의를 활성화함으로써 MGI 연구 커뮤니티 내에서 이들 데이터 관리 계획이 보다 널리 확산 될 수 있도록 함 (SMGI)

데이터 공유를 장려할 수 있는 한 가지 인센티브는 데이터를 생성하는 주체들에게 그에 대한 정당한 보상이나 인정을 해 주는 것이다. 예를 들면, 디지털 데이터에 대해서도 정확한 인용을 규정화하는 것이다. 다양한 미국 내 기관들과 국제 기구들이 이 문제를 적극 검토 중에 있으며 데이터 소스 공개 및 인용과 관련해 표준을 개발 중에 있는데, MGI 데이터 저장소의 경우 이러한 표준을 채택할 수 있을 것이다.

2) 목표 3.2 접근 가능한 소재 데이터 저장소 구축을 지원

본 목표는 소재 데이터 인프라의 구성요소가 무엇인지, 그리고 데이터 저장소의 상호 운영성 및 데이터 이전에 필요한 관련 표준이 무엇인지를 파악하는 것이 그 목적이다.

성공적인 데이터 인프라라면 대학 및 기업들에 유용한 소재 관련 정보를 신속하고 용이하게 제공할 수 있어야 한다. 이러한 인프라는 데이터 자체뿐만 아니라 여러 다양한 데이터 저장소에 걸쳐 해당 데이터를 파악하고, 해당 데이터의 활용을 평가하고, 모든 종류의 다양한 쿼리를 지원할 수 있도록 충분한 기술적(Descriptive) 정보도 함께 제공해 주어야 한다.

- ① **추진계획 3.2.1:** 최소 3개의 소재 데이터 저장소 파일럿 프로젝트를 기획, 실행함으로써 다양한 저장소 모델을 평가하고 소재 부문 데이터 인프라 모델을 정립함 (DOD, DOE, NIST)

이들 파일럿 프로젝트를 통해 데이터 인프라 구축에 필요한 기술 방식들(Modality)이 무엇인지를 탐색, 조정, 테스트할 예정이다. 이 과정에서 데이터 공유 및 데이터 호

환성을 위해 필요한 포맷 및 프로토콜 등 표준을 파악하는 한편, 궁극적으로 중앙통제 방식이 아닌 연합 방식의 시스템을 구축하게 될 것이다.

4. 목적 4 - 툴 및 인프라 활용 능력을 갖춘 차세대 소재 인력 양성

미국 내 소재 연구 커뮤니티가 앞서 설명한 MGI 프레임워크를 십분 활용하기 위해서는 차세대 소재 인력들에게 소재 분야의 새로운 연구 방법에 대한 교육이 필요하다. 차세대 인력들은 소재 합성이나 소재 물성 정의에서부터 이론이나 모델링에 이르는 다양한 분야를 아우르는 전문지식을 가진 팀에서 유능한 팀의 구성원으로 일할 수 있는 소양을 갖추어야 한다. 이를 위해서는 소재 관련 학과의 커리큘럼이 소재 부문 최신 기술들을 반영하여 지속적으로 업데이트되어야 한다.

미 연방 정부의 과학, 기술, 엔지니어링, 수학 (STEM) 교육 관련 활동은 “미연방정부 STEM 5개년 전략 계획”에 그 근간을 두고 있다. 본 전략계획에서는 STEM 교육 투자가 필요한 5개 우선순위 분야를 제시하고 있는데 그 중 2개 분야가 ① 학부생들의 STEM 경험 제고와 ② 미래 STEM 인력을 위한 대학원 과정 설계로 이들 2개 분야는 MGI 목표를 달성하는 데 있어서도 핵심이 되는 부분으로 현재 수립 중에 있는 이들 2개 분야의 실행 전략과 연계하여 연방 정부의 구체적인 활동을 기획하고, 설계하게 될 것이다.

1) 목표 4.1 새로운 커리큘럼 개발 및 실행 추진

학생들이 장차 소재 연구 커뮤니티에서 MGI가 개발한 툴을 활용하여 효과적으로 연구 업무를 수행하도록 준비시키기 위해서는 우선 교수진이 MGI의 목표가 무엇인지를 이해하는 것이 필요하다. 이를 위해 연방정부는 NSF, DOD, DOE를 통해 워크숍을 지원하거나 혹은 연구 보조금을 지원한다. MGI의 성공은 다양한 배경을 가진 전문가들이 하나의 팀이 되어 얼마나 긴밀히 협력할 수 있느냐에 달려있다. 즉 소재를 개발 및 가공 분야 연구원들이라도 소재 모델링을 위한 분석 기법들을 잘 파악하고 있어야 하며, 마찬가지로 이론, 모델링 전문가들 역시도 소재 제조, 가공 및 물성 파악 과정에 대해 잘 알고 있어야 한다.

- ① **추진과제 4.1.1:** 여름학교나 연구실 인터쉽 등의 기회를 통해 교수진, 박사후과정 연구원, 석사생들에게 MGI의 접근방법에 대한 교육 기회를 제공

함. 이 때 실험 전문 인력들에게는 최신 모델링 및 이론에 대해 교육을 하고 컴퓨테이션 전문 인력들에게는 소재 합성 및 물성 파악 기법에 대해 교육함 (DOD, DOE, NSF)

소재 연구는 본질적으로 소재과학이나 소재 엔지니어링을 넘어 물리, 화학, 화학공학, 생명공학, 응용수학, 컴퓨터공학, 기계 공학 등 다양한 분야의 전문가들이 참여하는 다학제적 연구 분야이다.

- ② **추진계획 4.1.2:** 물리학, 화학, 생명과학, 공학 등 소재 연구에 참여하고 있는 대학의 여러 학과들이 공동으로 참여하여, 소재 연구 분야로 진출할 학부 및 대학원생들을 대상으로 이론, 모델링, 실험, 데이터 분석 기법에 관한 통합 교육을 보다 효과적으로 실행할 수 있는 교육 방법을 모색함. 대학의 리더들이 모여 선진사례를 검토, 공유할 수 있는 연례회의를 개최함 (SMGI)

소재과학을 공부하는 많은 학부 및 대학원생들은 기업에서 미래 첨단 소재를 연구개발 하는 직종으로 진출하고자 한다. 따라서 기업 관계자들이 함께 동참하여 차세대 소재 연구개발을 위해서는 어떤 스킬과 전문지식이 필요한지를 파악하는 노력이 필요하다. 즉 대학과 기업이 힘을 합쳐 앞으로 어떤 역량이 필요한지 그리고 이러한 역량을 배양하기 위해서는 어떤 커리큘럼상의 변화가 필요한지 등을 함께 모색해야 할 것이다.

- ③ **추진계획 4.1.3:** 연방 기관, 대학, 기업간 협의를 활성화함으로써, 산업계로 진출하는 대학 졸업생 혹은 대학원 졸업생들이 어떤 역량과 스킬을 갖추어야 하는지를 파악하고 어떻게 하면 이러한 역량과 스킬 개발을 교육기관의 최우선순위 과제로 추진할 수 있을지를 고민함 (SMGI)

2) 목표 4.2 통합적인 연구 경험 기회를 제공

교수와의 공동 연구나 기업 인턴쉽 등은 강의실 수업을 보완하는 좋은 기회이다. 강의실에서 배운 지식을 활용할 수 있으며 실제 현장에서 소재를 개발하고 이를 실제 제

품에 적용해 보는 현장 경험을 얻게 된다. 이 과정에서는 기업들이 중요한 역할을 수행하게 되므로, 소재 연구 커뮤니티가 개최하는 워크샵에 기업 전문가를 초청, MGI 관련 활동에 대한 멘토링을 제공하는 것을 고려해 보아야 할 것이다.

- ① **추진계획 4.2.1:** 기업, 대학, 연방기관, 국립연구소들 간의 기존 협력 프로그램 선진사례 및 미래의 잠재적인 파트너십에 대한 논의를 활성화함으로써 MGI 접근방식을 현장에 실제 적용할 수 있는 현장 경험을 학생들에게 제공함. (SMGI)

- ② **추진계획 4.2.2:** 박사후 연구생들을 대상으로 MGI 접근방법을 직접 실행해 볼 수 있는 연구직 진로 옵션을 기획, 제안함 (SMGI)

제4장 국가적 목표 달성

본 4장에서는 국가안보, 보건 및 복지, 청정에너지 시스템, 인프라, 소비재 부문에 있어 미국의 국가적 목표 달성에 있어 MGI의 성공이 어떤 관련성을 가지고 있는지를 잘 설명하고 있다.

1. 국가 안보

국방부 (DOD), 에너지부 (DOE)의 국가원자력안전청(NNSA) 및 공공방위연구소들은 국가 안보를 위해 소재 연구에 상당한 투자를 하고 있다. DOD는 미국 군대의 방위력 보강을 위해 첨단소재를 사용하고 있고, NNSA는 미국의 핵역지력의 안전성과 효과성을 담보하는 데 첨단소재를 활용하는 등 다양한 국가 안보 분야에서 첨단 소재가 사용되고 있다. 또한 경량화 자동차 소재, 첨단 에너지 소재, 터빈 엔진 소재, 방위시스템 수명 예측, 전자제품 소재, 에너지 저장 및 보급 등 다양한 분야에서 첨단 소재가 사용되고 있으며, 다양한 첨단 소재들은 궁극적으로는 국민들의 삶의 수준을 높여 줄 수 있는 제품으로 상업화된다.

2. 보건 및 복지

식량, 물, 거주지, 건강 관련 제품 등 우리 삶의 필수품들을 합리적인 가격에, 친환경적인 방식으로 충분한 양을 제공할 수 있도록 해 주는 데 있어 첨단 소재의 역할은 필수적이다. 예를 들면 생체적합소재는 인공기관을 제작하고 인공 장기를 배양하는 첨단 기술의 핵심이다. 또한 유기고체 센서는 의료진단장비와 생체 내 투여 약품에 활용되며, 새로운 화학물질은 의약품 성능 개선에 기여한다. 새로운 수분리 기술을 통해 깨끗한 음용수를 확보할 수 있다. 이들 기술을 개발하는 데 MGI 원칙들을 적용함으로써 인류의 삶의 질을 높이는 데 있어 미국은 주도적인 입지를 계속 유지해 나아갈 수 있을 것이다.

3. 청정에너지 시스템

향후 20년 동안 미국의 에너지 수요는 완만한 성장을 할 것으로 예상되고는 있지만 에너지 인프라를 지원하는 장비나 기기들은 상당히 많이 바뀔 것이다. 한편 전세계 에

너지 수요는 향후 20년 동안 50% 증가가 예상되고 있어 신속한 소재 개발의 필요성이 더욱 절박하다.

국가 에너지 전략에 있어 첨단 소재의 발견 및 보급은 친환경적인 에너지를 충분하고 합리적인 비용으로 공급하는 데 있어 절대적으로 중요하다.

4. 인프라 및 소비재

앞에서 언급한 3개 부문 이외에도 미국의 경제 번영과 신소재 개발에 중요한 다양한 기술 및 인프라 분야들이 존재한다. 예를 들면, 첨단 콘크리트 설계를 이용, 보다 안전하고 내구성 높은 교량이나 철도를 건설할 수 있으며, 유연한 태양광 소재를 이용, 차세대 핸드폰을 제작할 수 있다. 첨단 광소재를 이용, 인터넷 접속 속도를 훨씬 더 높일 수도 있다. 아직은 실현되지 않았지만 이러한 획기적인 첨단 기술들은 MGI를 통한 신소재 개발 및 보급을 통해 가능해질 것이다.

제5장 과학기술 도전과제

국가안보, 보건 및 복지, 청정에너지, 인프라, 소비재 부문의 기술 발전은 미국 미래 세대 번영의 핵심이다. 이들 부문에 있어 새로운 소재의 개발 및 보급을 가속화하고자 하는 MGI 이니셔티브의 성공적 실행을 위해서는 몇몇 핵심 도전과제를 해결하는 것이 필수적이다. 2013년 SMGI가 개최한 두 차례의 “Grand Challenge Summit”회의에서 소재 과학 및 공학 전문가들은 MGI 접근방식을 적용할 몇몇 핵심 소재 종류와 응용 분야를 검토하였는데, 중점 검토 대상으로는 바이오소재, 촉매제, 관련 물질, 전자 및 광소재, 에너지 저장 소재, 경량구조물 소재, 유기전자소재, 폴리머, 폴리머합성소재 등이 포함되었다. Summit 회의에는 대학, 국립연구소, 기업, 연방기관의 대표자들이 참석하였으며, 이 회의는 이들 다양한 참석자들의 의견을 종합적으로 반영, 연구, 제조, 상업화 측면에서의 다양한 시각들이 본 전략계획에 잘 반영될 수 있도록 하는데 중요한 기여를 했다.

회의 참가자들은 각 소재 종류별로 예상되는 주요 도전과제를 파악하였다. 연구가 진행됨에 따라 이들 도전과제가 보다 구체적으로 정의될 것으로 예상되며 중점 추진 분야와 분야별 구체적인 추진 일정 등도 도출 가능할 것이다.

또한 각 소재 종류별로 어떤 과학기술적 도전과제에 직면해 있는지를 매칭 방식으로 파악하였다. 그 결과 여러 부문에 걸쳐 참가자들은 공통적으로 ① 소재 개발 전체 주기에 걸쳐 실험 및 모델링 통합을 위해서는 연구 문화의 변화가 필요하며, ② 다양한 길이 및 시간 척도별 톨을 통합해야 하며, ③ 데이터 및 소재 샘플에 대한 접근 및 조정이 필요하고, ④ 소재 발견 및 개발을 소재 제조 프로세스와 연계해야 하며, ⑤ 차세대 인력들을 대상으로 시뮬레이션 및 실험 기법에 대한 교육을 실시해야 한다는 필요성에 주목하였다.

다음은 각 소재 종류별로 Summit 회의에서 논의된 과학기술 도전과제들이다.

1. 바이오소재

바이오소재에 대한 4대 추진방향은 다음과 같다.

- 1) 인체조직 및 기관 재생을 위한 바이오소재
- 2) 근육처럼 자생적 조직력, 자가치유 및 환경 적응력을 갖춘 바이오소재
- 3) 세포 유전자 조작 물질을 만들 수 있는 바이오소재

- 4) 생물학과의 인터페이스를 통해 생물 시스템의 기능을 탐색할 수 있는 신소재를 개발하고 이를 센서, 재생, 신약개발, 연료 생산 등의 용도에 활용

바이오소재의 주요 도전과제

- 다양한 길이 및 시간 척도를 아우를 수 있는 이론 및 모델링 툴 개발
- 소재의 자기조립성을 개발하고 생물학을 이용 소재 합성 및 제작을 도모
- Watson-Crick 염기쌍을 닮은 3D 자기조립성을 가진 소재 설계
- 재생의학 분야에 바이오소재 활용
- 생물 시스템의 기능을 조절하는 소재 개발
- 합성 폴리머 개발 전략 수립
- 소재의 새로운 물성 개발을 위한 전략 수립
- 바이오소재의 비파괴적 구조적 물성 파악을 위한 툴을 개발함으로써 기능과의 연관성 파악

2. 촉매제

촉매제 관련 주요 도전과제

- 기본적인 이론을 넘어서는 모델링 툴 개발 (예: 길이와 시간 척도 확대 및 정확도 개선, 복잡한 환경 및 반응 네트워크 포괄)
- 활성 부위와 기능에 대한 실험적, 컴퓨터이론적 정의를 바탕으로 촉매제 과학을 발전시킴
- 실제 운영 환경에서 촉매제 구조와 물성을 평가할 수 있는 첨단 분광법 및 현미경을 이용한 기법 개발
- 촉매제, 촉매율, 열화학 데이터에 대한 오픈 접근 데이터베이스 구축 및 실행
- 연구실에서부터 전면적인 상업화에 이르는 전 주기에 걸쳐 적용 가능한 새로운 합성 전략을 개발해, 촉매제 설계 지원 및 분자 단위의 다양한 기능을 수용
- 열역학 및 상태도 정보 혹은 데이터마이닝 정보를 효과적으로 활용할 수 있는 툴을 개발하여 적절한 합성 기법, 조건 및 전구체 물질을 제안
- 촉매 성능 및 물성 평가를 위한 소재 실험 표준을 확립

3. 폴리머복합소재

폴리머복합소재 관련 주요 도전과제

- 3,500 cm³ 크기의 복합소재 구성물을 3D 이미지로 구현
- 치료 과정에서 일어나는 비평형 변화, 폴리머분자 덩어리 변화 및 화학적 기능성의 변화 등을 평가하는 지수 및 모델개발
- 합성시험 및 시뮬레이션 데이터로 이루어진 개방형 데이터베이스 구축
- 최종 물성 예측 필요성에 따라 화학결합을 파괴 또는 생성할 수 있는 “반응형 분자역학 시뮬레이션” 시행
- 화학량론, 결합 형태 및 분포, 구성 변화도 등의 변수를 포함하여 미세구조를 정량적이고 현실적으로 묘사
- 정확한 모델링을 통해 피해 생성 및 증식을 예측
- 물리/화학/속도(kinetic) 다중 모델 내에 모든 프로세싱 관련 현상을 포착
- 신속한 실험 기법을 활용, 모든 시간 및 길이에서 물성 및 물성 변화를 측정
- 탄성계수가 높은 탄소섬유의 열변형 모델링

4. 상관소재

상관소재 관련 주요 도전과제

- 상관효과를 관찰할 수 있는 틀을 이용해 소재를 신속히 파악
- 다중변수 최적화 기법을 새로운 종류의 신소재 합성의 지침으로 활용
- 상관소재 구조 및 성장을 모델링
- 장기적으로 나노3D 프린터를 염두에 두고, 10nm 이하 소재 제작(fabrication) 역량을 개발함
- 작계는 나노단위에서부터 시작하는 척도와 방법을 통합하는 시스템 모델을 활용해 복잡한 기기를 모델링
- 시뮬레이션과 실험을 통합
- 산화물의 인터페이스 엔지니어링, 전자화학 나노단위 통제, 비선형 메모리기기의 결합공학 등을 활용해 상관 현상을 통제할 새로운 기기 개발

5. 전자소재 및 광소재

전자소재 및 광소재 관련 주요 도전과제

- 전자소재의 여기상태, 수송 및 비평형 구조물 예측
- 10 nm 미만의 구조물에 있어 소재의 전자적 혹은 광학적 물성을 모델링하는 정확한 이론 및 방법 시연
- 소재의 물성, 통합 모드, 프로세싱 이력, 구조적 혹은 결합적 특성, 공간적/기하학적 특징 등의 인풋을 활용, 시스템 특징에 대한 예측 모델 구축
- 벤치식 설계에서 기존 설비에 대한 실제 부품 설계에 이르기까지 모델을 개발하고 데이터를 검증함
- 투명하고 소재 중심의 데이터베이스를 전향적으로 검증할 수 있는 틀 실행
- 연구 단위에서 얻은 정보만으로도 생산 단위의 기기, 회로, 전자시스템의 물성을 모델링하고 예측함
- 생산 기기의 부품별 편차를 모델링하고 예측함

6. 에너지 저장 시스템

에너지 저장 시스템 관련 주요 도전과제

- 에너지 밀도가 높은 새로운 전지시스템 구축
- 신소재의 실행을 가속화하고 새로운 전지시스템 설계를 가능하게 해주는 저감 메커니즘을 파악하고 정량화함
- 예측 틀의 범위와 성능을 발전시켜 신소재 합성 및 전지시스템 적용을 가속화함

7. 경량 구조물

경량 구조물 관련 주요 도전과제

- 금속합금의 부식 정도를 정량적으로 예측하고 부식이 물성에 미치는 영향을 예측함
- 1주일 내에 1cm² 크기의 합금의 물성과 마이크로 구조를 완전히 파악할 수 있는 능력 시연
- 길이 척도가 더 긴 실험, 모델링, 설계에 대표적으로 사용되는 부피 정의
- 데이터 접근이 용이한 연합 데이터베이스 및 데이터베이스 틀을 개발하고 운영함
- 프로세스-구조-물성간의 연계를 효율적으로 파악할 수 있는 분석 틀 개발

8. 유기전자소재

유기전자소재 관련 주요 도전과제

- 분자결정 구조와 다형체 예측
- 각기 다른 규모와 다양한 길이/시간/크기 척도 조합별로 소재 물성 및 행동 특성을 파악하고 모델링
- 분자 단위에서 기기 물성 변화를 예측
- 액체 상태의 제조 패러다임 구축
- 유기전자-생물 인터페이스를 위한 종합 모델 구축
- 성능 변화를 체크할 수 있는 표시물 개발

9. 폴리머

폴리머 관련 주요 도전과제

- 평형 및 비평형 폴리머 구조와 형태, 물성을 예측하고 폴리머 프로세싱 전략을 설계할 수 있는 중간규모 모델 구축
- 기능성 확보를 위해 폴리머소재의 계층적 구조 설계
- 3D 구조 및 동역학을 실시간으로 파악, 해석하는 전략 수립
- 장기간에 걸친 폴리머소재의 물성을 파악, 모델링, 예측, 통제할 수 있는 전략 개발
- 극한 환경에 대응 가능한 폴리머를 개발할 수 있는 컴퓨터 기반 접근방법 설계

제6장 결론

SMGI는 MGI 추진 방향 제시를 위해 본 전략계획을 수립하였다. MGI 관련 연방 기관들과 대학 및 기업의 소재과학, 소재공학 전문가들의 의견을 종합하여 SMGI는 구체적인 목적과 단기 추진계획 등을 규정하였으며, 이를 통해 신소재의 시장 출시까지 걸리는 시간과 비용을 줄일 수 있을 것이다.

본 전략계획의 목적은 MGI 관련 당사자 및 기관들로 하여금 이들 목적과 단기 추진 계획들을 활용, 향후 연구개발 노력에 한층 더 박차를 가하도록 만드는 것이다. 소재혁신인프라를 구축하고 이를 각 소재 종류별 기술 장애요인 해결에 활용한다면 소재과학 및 공학 커뮤니티는 보건 및 복지, 국가안보, 청정에너지, 경제 성장 등 미국이 직면한 도전과제 해결에 크게 기여할 수 있을 것이다.

부록 1. 기관별 관심 분야 및 중점 분야

1. 국방부 (DOD)

DOD 지도부는 미래 전쟁수행 시스템의 장기적인 기술 혁신에 있어 매우 중요한 ICME (Integrated Computational Materials Engineering)에 집중하고자 한다. DOD는 프로세싱-구조-물성간의 관계를 계산하고 정량화하는 등 기초적인 수준에서 소재 관련 기초 연구에 투자하고 있다. 또한 이러한 기초적인 지식을 바탕으로 SBIR (Small Business Innovative Research)로부터 지원을 받아 산업 부문에서 즉시 활용할 수 있는 툴을 개발하였다. 또한 ManTech (Manufacturing Technology) 프로그램을 통해 제조부문 기술에도 상당한 투자를 하고 있다. 이러한 협업을 통해 첨단 소재 및 시스템 실행을 가속화시킬 수 있다.

DOD는 ① 국가의 소재 부문 역량을 강화하는 데 필요한 기초적인 툴 개발, ② 소재 개발 전주기의 가속화에 필요한 방대한 양의 이론, 커뮤니케이션, 실험 데이터에 저장하고 공유하는 데 필요한 커뮤니케이션 인프라 구축, ③ 차세대 과학자와 엔지니어들이 첨단 툴 및 데이터베이스를 사용할 수 있도록 교육하는 데 투자하고 있다.

다음은 MGI를 지원하는 DOD의 ICME 관련 협력 프로그램 및 프로젝트들이다.

- 1) 컴퓨테이션 방법 및 실험 방법 기초 수준 제고
- 2) 소재 연구 과학자 및 공학자들과 컴포넌트 및 시스템 설계 전문가를 서로 연결시켜주는 툴들에 있어 프로세싱-구조-성능 간의 상관관계를 잘 이해함으로써, 소재 개발에서부터 지속적인 보급에 이르는 전 과정에 있어 실행의 신뢰성을 제고
- 3) 다척도 소재 모델링이 가능한 확률적, 통계적 프레임워크를 갖춘 수학적 접근방법 파악
- 4) 비동질성과 불확실성을 보다 잘 관리할 수 있도록 미세구조 변화의 구조 및 모델에 대한 축소차수(reduced-order) 기술방식(description) 개발
- 5) 실험을 통해 도출한 물성을 활용, 양자화학위상수학(quantum chemical topology)으로부터 데이터 세트를 생성, 관리
- 6) 다학제적, 다척도 모델링을 통해 첨단전자소재를 개발
- 7) 극한 환경에서도 예측가능한 성능을 보여줄 수 있는 신소재의 설계 및 개발
- 8) 반응 속도와 이동 관련 기검증 물리적 모델들을 통합한 전산유체역학 (computational

- fluid dynamics) 코드를 개발, 첨단전자화학발전 및 저장 장치 툴로 활용
- 9) 실험 및 모델링 결과를 종합하여 에너지 집약도가 높은 축전기와 티타늄 기반 컴포넌트를 설계하고 제작하는 원리 및 관련 툴을 개발
 - 10) 니켈 기반의 초합금 터빈 엔진 구조의 설계 및 생산에 잔류응력 요인들을 반영
 - 11) 고온 폴리머 매트릭스 합성소재 개발을 위한 디지털 설계 시스템 개발
 - 12) 경량화첨단금속소재 제조혁신연구소(Lightweight and Modern Metals Manufacturing Innovation Institute)를 통해 첨단 제조 역량 개발
 - 13) 기존 소재의 새로운 용도에 대한 인증 가속화

2. 에너지부 (DOE)

MGI는 에너지 관련 소재의 첨단 연구 및 소프트웨어 개발에 대한 주도적인 역할을 수행한다. 구체적으로는 경량, 고온 구조물 소재, 촉매제, 태양광 소재, 자기장소재, 초전도물질 등 기능성 소재 등 다양한 소재를 총망라하고 있다. 현재 DOE의 MGI 관련 활동은 DOE 내 기초에너지연구실(BES: Office of Basic Energy Science) 산하 과학국(Office of Science)과 에너지효율 및 신에너지국(EERE: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy), 그리고 화석에너지국(FE: Office of Fossil Energy)이 담당하고 있다. 또한 DOE의 국가핵안전청 (NNSA: National Nuclear Security Administration)은 오랜 동안 국가안보 관련 소재 연구를 담당해 오고 있으며, DOE는 첨단연구프로젝트 에이전지-에너지(ARPA-E) 프로그램을 통해 상당한 응용소재 연구를 진행하고 있다.

BES는 소재과학 및 소재 공학, 화학, 지질학, 물리생명과학 분야를 망라해 에너지, 환경, 국가안보 분야에 있어 DOE의 임무와 관련이 있는 신기술에 대한 기초 연구를 지원한다. BES는 MGI의 예측이론 및 모델링 프로그램에 참여해, 새로운 이론 및 모델링 설계 패러다임 개발을 주도하고 있는데, 이는 신소재, 신소재 시스템 및 화학 프로세스 개발 속도를 가속화시켜 줄 수 있을 것이다. 이 일환으로 새로운 소프트웨어 툴 및 데이터 표준을 개발 중에 있으며 또한 실험 기법 선진화를 추진하고 있다. 한편 연구 지원 단위도, 개인 연구자나 소규모 연구팀뿐만 아니라 소프트웨어센터 등도 지원을 하고 있다.

EERE는 에너지 효율 및 재생에너지 관련 분야의 응용연구 및 기술 개발을 지원하는데, 에너지 효율 및 재생에너지 분야의 경우는 특히 고성능 소재 및 프로세스가 중요한 분야이다. EERE는 MGI 활동을 통해 컴퓨테이션 툴과 실험 툴을 활용해 소재 연구 개발을 지원하고, 제조 프로세스의 경쟁력 및 효율을 제고하고, 소재 및 프로세스가 실

제 시스템 엔지니어링 관련 문제를 해결할 수 있도록 지원하고 있다.

FE는 국가 경제 발전의 동력을 제공하고, 국가 안보를 강화하고, 환경을 보호하고자 혁신적인 화석 에너지 기술 대안들을 제공하는 데 역점을 두고 있다. 화석연료의 환경 영향을 최소화하고, 세계 에너지 분야에서의 미국의 주도적 입지를 유지하는 한편, 화석 연료 자원을 보다 효율적으로 사용하기 위한 첨단 기술 개발에 있어 MGI식 접근방법과 연구 문화는 매우 중요하다. 이에 FE 포트폴리오는 다양한 분야에서 소재 개발 활동에 통합 다척도 컴퓨테이션 및 실험 방식을 채택하고 있다.

NNSA는 미국의 핵역지력을 유지하는 것이 그 주요 임무로, 이를 위해서는 기초 과학 및 응용 과학이 모두 필요하다. NNSA는 특히 다양한 소재의 생명주기를 이해하고, 극한환경에서 어떤 소재가 우수한 성능을 발휘할 수 있는지, 그리고 핵역지력 유지를 위해서는 어떤 기초 연구 작업이 필요한지를 파악하는 데 힘을 쏟고 있다. 이 과정에서 첨단 컴퓨테이션 방식을 비롯해 극한환경에서도 우수한 성능을 발휘하는 소재에 대한 이해가 선행되어야 하므로, 이는 결국 통합 컴퓨테이션 소재 과학의 발전으로 이어졌다.

ARPA-E는 민간 부문에서 투자하기에는 불확실성이 있는 첨단 에너지 기술 개발에 주력한다. 따라서 ARPA-E 프로젝트에서는 응용 소재 연구가 중요한 부분을 차지한다. ARPA-E 연구진은 MGI의 일환으로 개발되는 첨단 소재 설계 및 소재 데이터 분석 기법 등의 컴퓨테이션 툴을 활용한다.

3. NASA

NASA는 극한 환경에서도 사용할 수 있는 발사대 및 다른 인프라에 어떤 소재가 사용될 수 있는지에 대한 종합적인 정보를 MGI에 제공하는 역할을 수행한다. 극한 환경이 소재 성능에 어떤 영향을 미치는지를 파악하고, 새로운 물성을 가진 합성물질을 개발하기 위한 혁신적인 컴퓨테이션 모델을 구축하는 작업은 NASA의 입장에서는 상당히 시간이 오래 걸리는 작업이지만 그 투자 효과는 상당히 높다. 이를 통해 NASA는 차세대 소재를 개발하고 시스템 신뢰도 제고에 필요한 기본적인 물리학에 기반한 관련 지식들을 확보할 수 있을 것이다.

NASA의 우주기술미션국 (STMD: Space Technology Mission Directorate)은 민간 부문에서 수행할 수 없는 우주 탐사 및 우주과학 임무를 수행하는 데 필요한 첨단 기술을 개발하고, 우주과학과 관련한 산업계의 지식 기반 강화를 지원한다. 한편 NASA의 우선순위 과제는 우주과학 분야에서의 신소재의 개발에서부터 보급이 이르는 전체 시간

주기를 단축시킬 수 있는 기술을 개발하는 것이다. NASA의 장기적인 MGI 비전은 소재 및 제조를 모두 포괄하는 디지털 설계 프로세스를 구축하는 것이다. 이를 위해 NASA는 다양한 소재들에 적용할 수 있는 컴퓨테이션에 기반한 소재 설계 방식을 개발함으로써 ① 새로운 소재 시스템에 대해 여러 복수의 센터간 모델링 협업을 도모하고, ② 소재 테스트 시간 및 소재 최적화 주기를 단축하는 다척도 모델링을 통해, 소재 원속도 달성 경로를 정립하고, ③ 소재 설계 전문가들에게 신속한 프로토타이핑을 위해 관심 있는 소재의 특정 물성을 양보해야 하는 데 따른 득과 실을 평가하도록 선택권을 줄 수 있다. 또한 NASA는 “NASA 기술 분야 10: 나노기술”과 “NASA 중점 기술 분야 12: 소재, 구조, 기계적 시스템 및 제조 (MSMM)”라는 로드맵들에서 명시한 소재 개발 분야를 중심으로 소재 관련 활동들을 추진해나갈 계획이다.

4. 미국표준기술연구원 (NIST)

MGI와 NIST의 임무는 서로 긴밀히 연계되어 있다. NIST는 계측학과 계측학 분야의 표준 및 관련 기술 발전을 도모함으로써 국가 경제 보안을 강화하고 삶의 질을 향상시킴으로써, 미국의 혁신과 산업 경쟁력을 제고한다. 이는 소재 개발, 최적화 및 보급 관련 비용을 절감하고 시간을 단축함으로써 가능하다. 소재 혁신 인프라를 구축, 소재 산업 부문 경쟁력을 제고함으로써 비용 절감과 시간 단축이라는 두 가지 목표를 동시에 달성하고자 한다.

데이터의 통합, 관리, 제공에 있어 NIST의 전문성을 감안, MGI에서 NIST는 주도적인 역할을 수행하고 있다. MGI 패러다임을 소재 개발을 둘러싼 모든 분야에서 광범위하게 채택하기 위해, NIST는 현재 데이터 교류 프로토콜 및 소재 데이터와 모델의 우수성을 담보할 수 있는 방안 등을 마련 중에 있다. NIST는 기업, 대학, 정부의 이해관련 당사자들과의 협력을 통해 ① 소재 관련 데이터의 확보 및 개발, ② 다양한 길이와 시간 척도를 아우르는 상호운영성을 갖춘 컴퓨터 시뮬레이션, ③ 소재 데이터, 모델, 시뮬레이션의 수준 평가 등에 필요한 표준, 틀, 기법 등을 개발하고 있다.

내부적으로 초합금 및 첨단 합성물질 개발, 에너지효율이 높은 자동차용 소재 개발 파일럿 프로젝트를 추진 중에 있다. NIST 산하의 소재측정연구실 (Material Measurement Laboratory)은 정보기술연구실 (Information Technology Laboratory)과 NIST 내 다른 부서들과 협력하여 이들 프로젝트를 추진하고 있으며, DOE EERE의 자동차용 경량 소재 개발 프로그램 연구 결과 나온 소재 데이터 및 모델 저장소를 활용하고 있다.

한편 NIST는 첨단소재 분야 우수연구소 사업을 지원하기 위해 최대 10년 동안 연간

5백만 달러를 투자하기로 결정하였다. 이 일환으로 2013년 12월에는 NIST와 시카고에 본부를 둔 Center for Hierarchical Materials Design (CHiMaD)간 협력 협정을 체결하였다. 본 센터는 차세대 컴퓨테이션 툴, 데이터베이스, 실험 기법 개발에 주력할 것이다.

2015년에는 NIST는 핵심 MGI 인프라에 대한 투자 등 소개 연구 분야의 노력을 더욱 확대할 계획이다. 이 일환으로 계측학 및 첨단 소재 데이터 인프라에 대한 투자를 확대, 다양한 소재 활용 분야에서의 “빅 데이터”를 활용하는 첨단 분석 기법을 비롯해 컴퓨테이션 및 실험 기법 공동 설계를 추진할 것이다.

5. 미국국립보건원 (NIH: National Institutes of Health)

NIH는 의학 연구를 수행, 지원하는 미국의 대표적인 연방 기관으로 NIH의 임무는 생명체의 본질 및 행동에 관한 기본적인 지식을 축적하고, 이러한 지식을 건강 증진, 수명 연장, 질병 및 장애 부담 완화를 위해 활용하는 것이다. NIH 경영진은 소재 분야 특히 바이오소재 분야의 기술 발전이 생물학과 의학 분야 발전 및 나아가 미래 헬스케어 전반의 발전에 기여할 수 있다는 사실을 인식하고 있다. 이에 따라 NIH가 지원하는 연구개발 프로그램은 일반 혹은 희귀병의 진단 및 치료에 있어 새로운 패러다임을 가져오고 있으며, 그 결과 새로운 형태의 치료 및 진단 지표물질, 테스트 기법 및 장비 개발로 이어지고 있다.

NIH는 내외부 펀딩을 모두 활용해 바이오소재 연구개발을 지원함으로써, MGI에 기여하고 있다. NIH가 펀딩하는 구체적인 연구 주체들을 NIH 연구포트폴리오 온라인 검색 시스템인 www.report.nih.gov를 방문, 검색할 수 있다. 현재 NIH의 지원 대상은 대형 연구소, 대형 프로그램뿐만 아니라 자사 제품이나 기술에 대해 라이선스를 획득하였거나 현재 임상실험 1-3단계에 있는 중소기업들도 포함된다.

6. 미국국립과학재단 (NSF: National Science Foundation)

NSF는 국민의 보건, 경제적 번영 및 복지에 기여할 수 있는 기초 과학 및 엔지니어링 연구를 지원한다. 이러한 국가적 니즈를 해결하는 데 있어 첨단 신소재는 중요한 역할을 담당한다. 이에 NSF는 “미래혁신을 위한 소재 설계(DMREF: Designing Material to Revolutionize and Engineer our Future)” 프로그램을 통해 MGI에 참여하고자 한다. 이를 통해 NSF는 MGI의 비전을 공유하고, 통합적 접근방식을 채택하고자 한다.

기초 연구에 중점을 두는 NSF 본연의 목적에 부합하고자 NSF는 소재의 설계 및 제

작에 필요한 지식 기반을 구축함으로써 첨단 소재 개발을 지원하고자 한다. MGI에서 상정하고 있는 도전과제를 해결하기 위해서는 신소재 개발, 소재 물성 최적화 및 예측, 소재 시스템 설계를 위한 정보 구축 등에 있어 획기적으로 혁신적인 접근방법이 필요하다. 이에 따라 DMREF에서는 이론과 실험, 그리고 컴퓨테이션간 상호협력 및 지원 방식의 협업 프로세스를 지향하고 있다. 이러한 협업 프로세스를 통해 소재과학 및 공학 분야 연구, 개발, 보급 방식에 있어 패러다임 변화를 촉진시키게 될 것이다.

DMREF의 궁극적인 목적은 측정 및 실험을 통해 검증된 설계 단계를 통해 소재 물성을 조절하는 것이다.

이를 위해서는 ① 소재를 제작하고 물성을 파악하는 방법, ② 소재의 현상 및 물성을 파악하는 이론적 기초, ③ 데이터 분석틀 및 통계 알고리즘, ④ 선진 예측 모델링, ⑤ 쉽게 접근할 수 있도록 확장성과 지속성을 갖춘 데이터인프라, ⑥ 대규모 이질적 분산 데이터를 관리할 수 있는 협업 능력 등이 필요하다.

DMREF는 수학, 물리학국 (MPS: Directorate of Mathematical and Physical Science), 엔지니어링국 (ENG: Directorate of Engineering), 컴퓨터 및 정보과학엔지니어링국 (CISE: Directorate of Computer and Information Science and Engineering) 등의 NSF 내부 조직들이 상호 협력을 통해 추진할 예정이다.

7. 미내무부 산하 지질연구소 (U.S. Geological Survey)

MGI가 소재의 전체 주기에 있어 제조를 위한 소재 개발이라는 중간 단계에 집중을 하고 있지만, ① 원료 소재의 발견 및 프로세싱, ② 공급 리스크 및 원료 소재 흐름, ③ 이해 관계 대립 상황에 있는 자원의 추적 및 감식, ④ 소재의 재활용 및 폐기 등 소재 전체 주기의 전반부와 후반부와 관련해서도 중요하게 고려해야 하는 부분들이 있다. 지질연구소는 바로 이들 4개 분야 중 특히 앞의 두 개 분야 연구에 집중하고 있다. 새로운 소재나 프로세스를 개발할 때, 그 재료가 되는 자원의 가용성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 특히 금, 플라티늄 같은 금속은 우수한 물성을 지녔지만 잠재적인 공급상의 제약이 있다. 따라서 소재의 재료 확보가 신소재 개발 연구와 제조에 영향을 미칠 수 있다. 또한 특정 나노기술에 있어서의 코발트 활용이라는 새로운 연구 방향을 파악하고 있을 경우, 향후 지질연구소의 광석 연구 및 평가 방향 역시도 이에 영향을 받게 된다.

부록 2. 연방 기관들의 기타 관련 활동

1. 제조

오바마 대통령은 MGI 발표시, AMP도 함께 발표했다. AMP는 정부, 기업, 대학간협력 프로그램으로 제조업 분야 전반에 걸쳐 기술, 프로세스, 제품을 개선함에 있어 어떤 도전과제나 혁신 기회가 있는지를 파악하고자 한다. 이는 그만큼 MGI와 제조업 부문 활성화 노력이 밀접히 연관되어 있음을 보여주는 것이다. MGI를 통해 미국 제조업 부문은 MGI가 제공하는 첨단 컴퓨테이션 소프트웨어, 데이터베이스 및 툴들을 이용할 수 있게 되어 궁극적으로 경쟁력을 확보할 수 있게 될 것이다.

오바마 대통령이 계획하고 있는 “제조업혁신을 위한 국가네트워크”의 취지에도 부합하는 차원에서 미행정부는 공개경쟁을 통해 3개의 추가 “제조업혁신연구소”를 선발하겠다고 발표했다. 이들 3개 연구소 중 하나는 DOE가 관리를 하고 넓은 띠 간격 반도체 전자기기를 개발하는 업무를 담당하게 된다. 다른 하나는 DOD의 해군연구소가 관리를 하고 “경량 신소재 제조”에 주력할 예정이다. 또한 최근 오바마 대통령은 공개 경쟁방식으로 “첨단합성물제조혁신연구소”를 선정하겠다고 발표하였는데 이 연구소는 2014년에 새롭게 발족할 제조혁신 관련 연구소 중 첫 번째가 될 것이다.

또한 DOE는 2013년 청정에너지 제품 분야에서의 미국의 제조 경쟁력을 강화하고 에너지 생산성을 제고함으로써 미국의 제조업 전반의 경쟁력을 제고하기 위해 “청정 에너지제조이니셔티브”를 발족하였다.

2. 개방적 접근

연방 정부에서 재정지원을 하여 수행한 공공 연구 프로젝트 결과 데이터에 대한 개방적 접근이 가능해 지게 됨에 따라 소재과학 및 공학 연구 커뮤니티는 많은 혜택을 볼 수 있다. 2013년 2월 22일, OSTEP의 존 홀드렌 국장은 연구개발 지출이 1억 달러 이상인 연방 기관들을 대상으로 연방정부의 재정지원을 받은 연구의 경우 연구결과를 1년 내에 일반 대중에게 무료로 공개할 수 있도록 각 기관별로 데이터 공개 계획을 수립해 줄 것을 요청하였다. 또한 연구자들에게도 자신들이 제공하는 데이터에 대해 책임을 지고 관리해 줄 것을 요청하였다. 이러한 요청에 따라 데이터 공개 계획을 수립하는 과정에서 각 연방기관들은 기존의 데이터 관리 방식에서 더 나아가 소재 과학 분야의 연구

데이터 관리, 저장, 접근에 관한 데이터 인프라를 구축하게 될 것이다.

3. 기타 연방 차원의 이니셔티브

지난 수십 년 동안 첨단 소재 설계를 위해 연방 차원에서 새로운 실험 프로세스나 기법에 대한 상당한 투자가 진행되었다. MGI는 이러한 기존의 노력들을 활용할 계획이다.

예를 들면 MGI는 NNI가 기개발한 소재 물성 파악 및 합성 기법을 활용할 계획이다. 나노 단위에서 소재의 화학적 물성 및 구조를 파악하고, 조정할 수 있게 되면 이를 이론, 모델링, 컴퓨테이션 틀과 결합하여 MGI의 비전을 달성하는 데 활용할 수 있을 것이다. 또한 ‘나노기술지식인프라시그너처 이니셔티브’에서는 나노단위 소재의 물성을 예측할 수 있는 모델, 시뮬레이션 틀, 데이터베이스 개발을 적극 추진하고 있다. 이 이니셔티브 역시 MGI와 NNI 활동과 직접 관련이 있으며 MGI와 NNI의 결과를 실제 활용에 볼 수 있는 좋은 기회이기도 하다.

MGI는 “네트워킹 및 정보기술연구개발프로그램(NITRD: Networking and Information Technology Research and Development Program)”도 조율하고 있는데, 본 프로그램은 첨단 네트워킹, 컴퓨팅 시스템, 소프트웨어 및 관련 정보기술 분야에 대해 미국의 선도적 지위를 유지할 수 있도록 필요한 연구개발 기반을 제공하는 것이 그 목적이다. NITRD의 ‘빅데이터 고위운영 실무그룹’은 연방 정부 전체에 걸쳐 현재 진행 중인 빅데이터 연구개발 활동을 검토, 기관간 상호협력 기회가 있는지를 파악하고 있다.

또한 NITRD를 통해 MGI는 현재 대규모 데이터 컬렉션에 포함되어 있는 지식과 정보를 활용할 수 있을 것이다. 현재로서는 개별 연구소와 기업들이 어느 정도의 소재과학 및 공학 데이터를 보유하고 있는지 정확히 파악할 수 없지만, 일단 MGI가 계획하는 소재 데이터 인프라가 구축되면 상당한 양의 데이터를 공개할 수 있을 것이다. 이처럼 데이터 처리 역량이 높아지면 새로운 연구 분야에 대한 접근이 가능해지고 혁신과 발견의 속도 또한 더욱 빨라질 것이다.

4. 기관간 협력

SMGI는 연방정부 차원의 MGI 관련 지원 활동에 있어 NSTC와 OSTP를 지원하고 이들 두 기관에 정책, 절차 및 계획 관련 자문을 제공하기 위한 목적으로 2012년 NSTC의 기술위원회가 추진하는 이니셔티브로 발족되었다. 이에 SMGI는 MGI의 비전과 목

표를 달성하는 데 있어 연방 기관들간 협력을 촉진하도록 설계되었다.

SMGI는 연방 정부의 첨단 소재 관련 의사결정에 도움이 될 수 있도록 다양한 워크숍 및 기관간 협력 활동을 조직하고 지원한다.

5. 미대통령실 (EOP: Executive Office of the President)

미대통령실 관계자들 역시 MGI 활동에 참여하여 MGI에서 추진하는 활동들이 행정부의 우선순위에 부합하는 방향으로 추진이 될 수 있도록 하고 있다. 이 과정에서 OSTP가 주요 연락책 역할을 수행한다.

OSTP는 과학기술 분야에 대해 EOP에 자문을 제공하고 연방 기관들이 추진하는 과학기술 활동을 기관간에 조율하는 역할을 수행한다. OSTP는 NSTC의 관리감독기관으로 이러한 업무 협조 방식을 통해 다양한 MGI 활동을 지원함에 있어 EOP의 의견을 반영하고 있다.

소재게놈 전략계획
(Materials Genome Initiative)

인 쇄 2015년 4월

발 행 2015년 4월

발 행 인 한 선 화

발 행 처  한국과학기술정보연구원
www.kisti.re.kr Korea Institute of Science and Technology Information

주 소 서울시 동대문구 회기로 66

전 화 (02)3299-6114

I S B N 0

인 쇄 처 승림디앤씨

<비매품>