# 의생명 분야에서의 햅틱 활용

김 정 • 한국과학기술원 기계항공시스템학부, 교수 _e-mail : jungkim@kaist.ac.kr

이 글에서는 가상현실 공간에서 햅틱을 이용한 실제 의생명 분야의 응용 사례와 현재 연구 동향에 대해서 설명한다.

피부에 존재하는 감각수용기(mechanoreceptor)와 근육의 수용기들을 통해 받아들이는 햅틱 정보는 일상생활에서 사람이 주위의 물체를 조작하는 데 쓰일 뿐만 아니라 표면의 거칠기(roughness)와 미세한 진동 등과 같은 접촉하고 있는 물체의 정보를 획득하는 데 쓰인다. 햅틱의 정보통로를 통해서 전달되는 정보의 양은 생각보다 아주 풍부하며 한 예로 TV의 사극에서 보듯이 한의사가 진맥을 통해 환자의 건강, 임신 유무 등을 판단하는 것은 이러한 햅틱 정보 처리의 좋은 예라고 할 수 있다.

따라서 실제와 유사한 환경을 제공하는 가상현실에서도 햅틱은 실제감을 느낄 수 있는 중요한 통로의 하나로 알려져 있으며 의생명(Biomedical) 분야 내에서도 여러 방향으로 응용이 시도되고 있다. 현재까지 활발하게 적용이 되는 분야는 의료용 훈련기(medical simulator), 세포 조작기(cellular manipulator), 재활장비(rehabilitation machine) 등이며 햅틱기술의 발전과 발맞추어 그 적용분야는 증가하는 추세이다. 이 글에서는 가상현실 공간에서 햅틱을 이용한 실제 의생명 분야의 응용 사례와 현재 연구 동향에 대해서 설명하며 맺음말에서는 실제적인 응용을 위한 기술적 문제와 연구 방향에 대해 짧게 서술하고자 한다.

## 연구 동향

### 1) 의료 시뮬레이션

의료 시뮬레이션은 수술 등의 각종 의료 활동을 실시간 혹은 비실시간으로 시뮬레이션함으로써 안전하고 객관적인 교육을 목적으로 하고 있으며, 이러한 시뮬레이션 내에서 실제와 유사한 형태의 햅틱 재현은 매우 중요하게 여겨지고 있다. 특히, 미국에서는 의사들에게 가상환경에서의 수술 훈련을 의무화하려는 움직임이 있으며 여기에 맞물려 복강경, 대

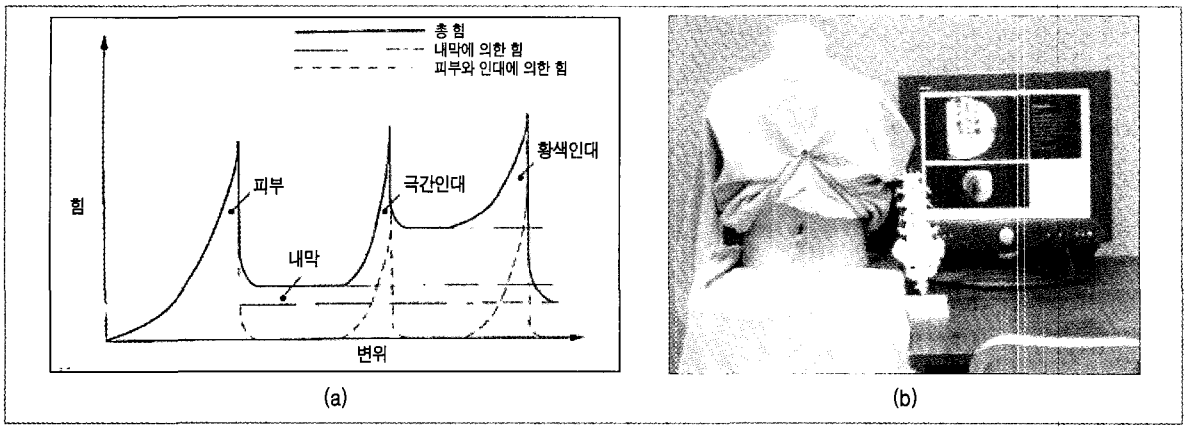



그림 1 (a) 바늘시술의 의료시뮬레이션의 힘 재생을 위한 힘-변형 곡선, (b) YantricTM 사의 경막외 마취법 훈련을 위한 의료 시뮬레이터

장 내시경 등의 다양한 수술에서의 시뮬레이터가 개발 중에 있다.

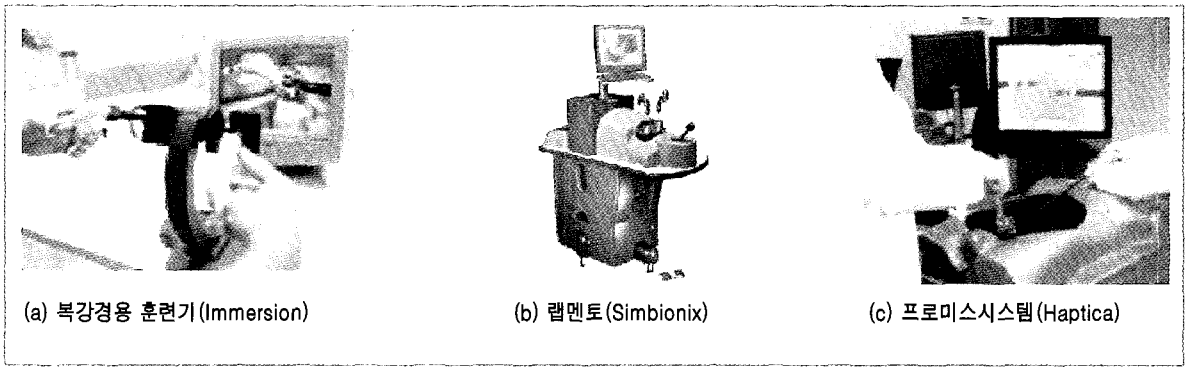
**(1) 바늘 시술의 의료 시뮬레이션**

마취나 시침 등의 바늘(needle)을 이용한 시술의 의료 시뮬레이션은 생체의 변형을 시뮬레이션하는 데 계산의 복잡도가 적어서 햅틱 시뮬레이션이 비교적 수월하다는 장점이 있다. 지금까지 세계의 여러 학교와 회사에서 도관 삽입법, 내시경 검사법, 경막외 마취법, 척추 생검법 등의 시술을 위한 시뮬레이터들이 개발된 바 있으며, 이 중에서 경막외 마취법(epidural anesthesia)을 소개하고자 한다. 경막외 마취법은 무통 분만 등을 위해 많이 시도되는 시술법이다. 이 시술은 주사바늘을 이용하여 국소 마취제를 척수부의 근육막 5개를 통과해서 2mm의 경막 외강(epidural space) 위치에 정확히 투입함으로써 이루어진다. 시술자는 주사가 각 근육막을 통과할 때마다 각기 다른 미세한 촉감을 느끼게 되고, 이 촉감에 의해 시술의 성공여부가 결정된다. 하지만 이 감각의 습득은 매우 어려우며 이러한 미세한 촉각의 습득을 위해서는 45~90회의 시술 경험이 필요하다고 한다.

미국 M.I.T. Touch Lab.은 경막외 마취법 훈련을 위한 시뮬레이터를 개발했다. 각 근육막을 통과하는 촉감을 훈련자에게 전달하기 위해 근육막은 점탄성 모델의 하나인 포크스 모델(Voigt element)을 이용해서 모델링을 했으며, 경막외 마취법에 정통한 시술자로 하여금 이 시뮬레이터를 시도하게 하고, 변수(parameter)를 튜닝하여 실제 촉감과 유사한 시뮬레이터를 만들었다. 사용자가 이 시뮬레이터를 통하여 각 근육막을 통과할 때마다 느끼게 되는 힘-변형 커브는 그림 1(a)와 같다. 현재 이 시뮬레이터는 미국의 YantricTM 사에서 상용화를 추진하고 있는 중이며, 햅틱 장비로는 SensAble Technologies 사의 PHANToM 장비를 마네킹 내부에 설치했다.(그림 1(b))

**(2) 복강경 시술의 의료 시뮬레이션**

복강경수술(Laparoscopic surgery)로 대표되는 최소 침습술(minimally invasive surgery)은 최소 절개로 인한 적은 출혈, 빠른 회복, 적은 입원비용 등의 장점으로 인하여 최근 선호도가 급격히 증가하고 있다. 시술에서는 시술 도구와 생체간의 충돌 시 긴 도구를 통해 시술자가 느끼게 되므로 그 감각이 크게 격감된다. 이의 훈련을 위한 시뮬레이션 개발은 활발히 진행되고 있으나 바늘 기반의 의료 시뮬레이션과는 달리 도구와 생체간의 상호작용에 의한 생체의 변형이 크다는 점에서 시뮬레이션의 복잡도가 높다. 또한 시뮬레이션을 구현하는 데 있어서 시술도구에



(a) 복강경용 훈련기(Immersion) (b) 랩멘토(Simbionix) (c) 프로미스시스템(Haptica)

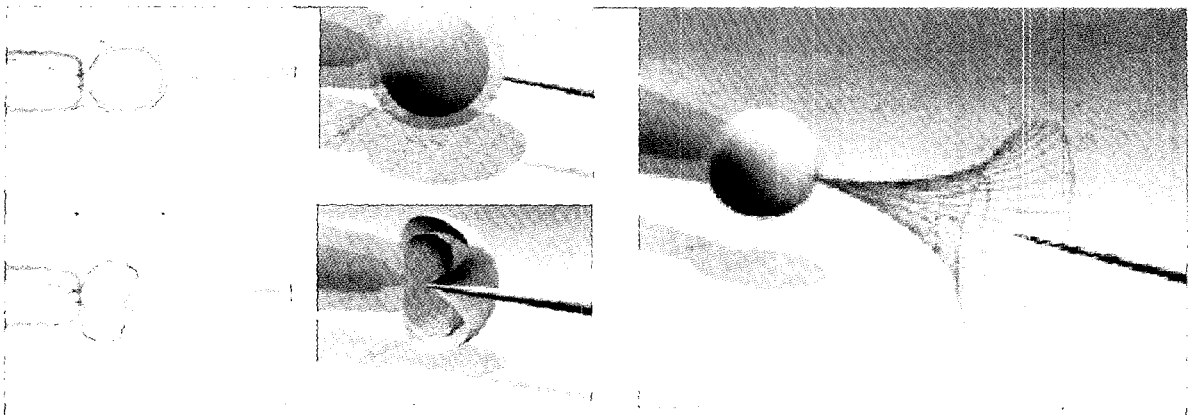
**그림 2 상용화된 복강경 수술용 의료 시뮬레이터**

의해 일어나는 생체의 변형뿐만 아니라 절개, 봉합 등 다양한 시술법을 시뮬레이션 하는 작업은 필수적이다. 하지만 절개나 봉합 시술을 시뮬레이션할 경우 실시간으로 리메시(remesh)작업을 해야 한다. 하지만 이를 위해 많은 계산시간이 요구되며, 1kHz로 안정적인 햅틱 피드백을 하는 데 방해요인이 된다. 그림 2는 현재 상용화되어 시판되고 있는 복강경기반의 의료 시뮬레이터이다. Immersion 사의 Laparoscopic Surgical Workstation 장비는 담낭절제술(cholecystectomy), 자궁관결찰술(tubal ligation), 자궁절제술(oophorectomy), 자궁내막진단술(endometriosis treatment), 식도질환시술(nissen fundoplication) 등을 시뮬레이션할 수 있다. 또한 Simbionix 사의 LAP MENTOR는 직장결장시술(colorectal procedure), 비만치료술(bariatric procedure), 부인과 진찰시술(gynecological procedures)을 위해, Haptica 사의 ProMIS™ 는 자궁내막절제술(endometrial ablation)을 각각 시뮬레이션할 수 있도록 설계되었다. 이들은 모두 컴퓨터 모니터와 자체 개발된 햅틱장비를 이용하여 훈련자에게 시술에서 일어나는 시각, 촉각적인 감각을 습득할 수 있도록 하고 있다. 하지만 아직은 햅틱 디바이스의 기술력이 부족하기 때문에 실제 생체의 물리적 특성에 근거를 두지 않은 단순하고 초보적인 형태의 햅틱 피드백만을 제공하고 있는 실정이다.

### 2) 세포 조작기

줄기세포나 정자주입술 등의 직접적으로 세포를 기계적으로 조작하는 이른바 세포수술에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나 현재 가장 큰 문제점은 30%에 미치고 있는 낮은 수율(success rate)이며 이는 조작자의 손기술에 많은 부분을 의존하기 때문이다. 현재 널리 쓰이고 있는 세포 조작법은 전적으로 시각을 통하여, 피펫(Pipette), 원자현미경(AFM) 등을 이용해 세포를 조작하고 있다. 이러한 조작법은 세포를 조작할 시, 세포의 변형에 따른 힘의 정도를 사용자가 제어할 수 없기 때문에 과도한 힘이 가해져서 세포가 변형을 일으키기 쉽다. 이는 세포의 손상을 야기하고 실험 생산성을 저하시키는 주요한 원인이 되며, 그에 따라 세포 조작은 높은 숙련도가 필요로 하게 된다. 따라서 실제 센서에 기반을 둔 혹은 세포 역학 모델에 근거한 햅틱 정보를 제공함으로써 작업의 용이성을 높이는 것에 대한 연구가 수행 중이다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 프랑스 오를레앙 대학 연구팀은 기존의 방식에 햅틱 인터페이스를 추가하는 방향으로 연구를 진행하고 있다. 이러한 햅틱 인터페이스가 추가된 조작기는 기존의 기기를 크게 바꾸지 않으면서도, 사용자에게 조작의 현실감을 제공하는 것이 이점이다. 이는 실사 영상으로부터 영상



(a) 현미경 카메라에서 추출한 실제 영상 (b) 실시간 영상처리를 통해 구현된 세포모델 (c) 설치된 깔때기 모양의 가상 가이드

그림 3 햅틱 인터페이스 조작기에서의 GUI(Graphic User Interface)

처리를 통해 세포 모델을 구현함으로써 시작된다. 이렇게 얻어진 세포 모델에서 조작기에 의해 세포가 변형된 정도에 따라 힘을 계산하여 사용자에게 전달한다. 이렇게 전달된 가상 촉감을 통해 사용자는 세포에 가하는 힘을 적절하게 제어하고 보다 정밀한 조작이 가능해진다. 최종적으로는, 그림 3(c)에서와 같이 그래픽 상에서 사용자에게 시각적으로 가상 가이드(virtual guide)와 함께, 촉각적으로 의도한 곳에 정확히 찌를 수 있도록 가이드에 대한 힘 피드백(가이드를 건드리면 진동하게 하는 방법 등)을 제공한다. 이러한 가이드는 사용자가 원하는 어떤 형태로든지 수정 가능한 것으로써, 햅틱 인터페이스의 조작기는 찌르기 이외의 다양한 세포 조작기의 운동을 모두 지원한다.

미네소타 대학의 Bradely Nelson이 이끄는 연구팀은 힘의 구현 방식에서 그래픽 모델에서 계산해 낸 세포막의 반력을 쓰는 대신 조작기 부착된 힘 센서로 세포에 가해지는 힘을 측정하였다. 이를 통해 측정된 세포 조작시에 발생한 힘을 사용자에게 적합한 크기로 증폭해 실시간으로 사용자에게 전달함으로써 햅틱 인터페이스를 구현하였다. 안정적이지 못한 힘 센서의 신호를 어떻게 햅틱 재현에 필요한 안정적인 힘신호를 얻었는지에 대한 언급은 없었으나 이를 통해 쥐 정자에 대한 DNA 주입 성공률을 100%로 상승시켰다고 보고했다. Drexel 대학의 연구팀도 또한 기존 세포조작기의 낮은 수율을 힘 피드백을 이용해 해결하였다. 실험을 통해 피펫이 세포막이 뚫을 때 발생하는 힘이 일정한 범위를 가진다는 결과를 얻어내었다. 따라서 세포막이 뚫릴 때 발생된 수 수준의 힘을 증폭시켜 사용자에게 언제나 일정한 수준으로 피드백 함으로써, 사용자에게 학습 효과를 제공한다. 따라서 기존의 세포조작에서는 시각적인 정보만을 가지고 세포조작을 함으로써 일정한 숙련도를 달성하기 위해 오랜 숙련 과정을 필요로 하지만, 햅틱 피드백을 추가함으로 인해 긴 숙련 과정의 기간을 단축할 수 있다. 하지만 크기가 0.7인 연어 알과 같은 큰 세포를 대상으로 한 실험이므로 한계를 지닌다. 따라서 좀더 일반적인 세포에 대한 실험을 준비 중에 있으며, 이러한 세포에서 발생하는 더욱 작은 힘을 노이즈의 영향을 제거하고 사용자에게 안정적으로 전달하기 위한 방법을 연구 중에 있다.

### 3) 재활 시뮬레이션

재활공학에서 환자의 운동감각과 균형감각의 향상을 위한 훈련에는 적절한 촉각 자극을 이용한

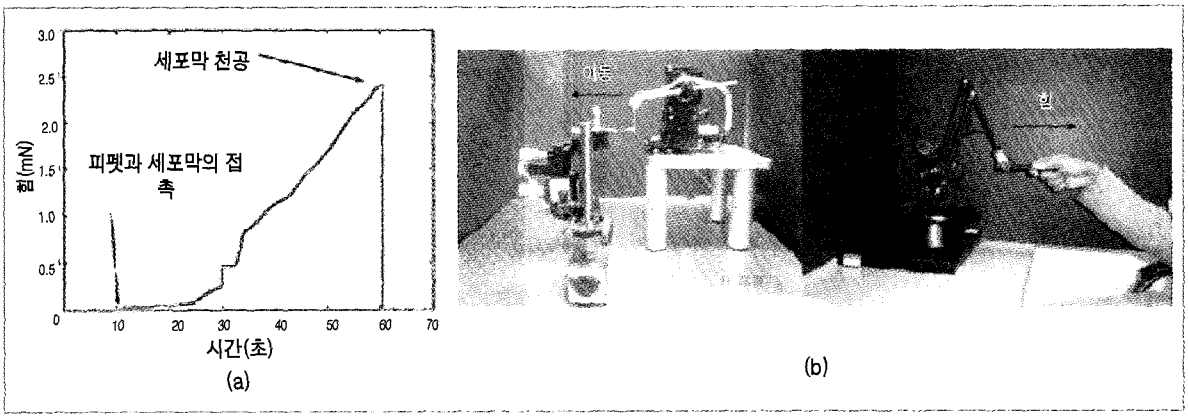



그림 4 (a) 세포를 뚫을 시 발생하는 힘의 곡선, (b) 세포 조작부와 햅틱 기기(SensAble Technologies사의 PHANToM)로 구성된 플랫폼

요법이 주가 되어 행해진다. 촉각을 통하여 환경의 차이를 느끼게 하는 것이 치료에 있어 중요하기 때문이다. 햅틱 기술을 재활시스템에 적용하면 환자의 상태에 맞춰, 현실적으로 불가능하거나 시간과 경비의 문제로 구현하기 어려운 환경 등을 포함한 다양한 가상환경을 구현하고 조종할 수 있어 재활치료에 활용될 수 있다. 또한, 사람의 햅틱 감각은 온몸에 분포되어 있으므로 감각기능이 집중되어 손상될 경우 해당 감각의 상실로 이어지는 시각, 청각에 비해 감각상실의 가능성이 적으므로 재활과 장애인 보조기술에 사용될 여지가 많다고 할 수 있다.

뉴저지공과대학의 연구팀은 뇌졸중 후 마비 환자들의 손 기능 회복을 위하여, 햅틱을 사용한 가상환경 재활 시스템에 대하여 연구하였다. 환자는 손에 착용하는 햅틱장치를 사용하여 물체를 쫓고, 그림을 지우고, 피아노 건반을 누르는 등의 간단한 비디오

그림 5 가상현실 훈련기의 화면

게임을 즐기듯이 훈련에 임하게 된다(그림 5). 여기에 훈련의 질을 높이고 환자의 몰입감과 동기부여를 위하여, 훈련성과에 따라 착용한 햅틱장치를 통하여 힘 피드백이 전달되게 된다. 이를 통해 일상생활에서 손의 사용에 있어서 필요한 각 손가락의 독립적인

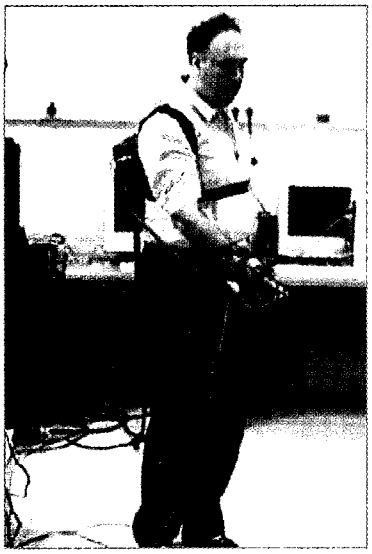


그림 6 훈련 중인 환자

움직임과 굽히는 속도, 힘 등을 훈련하게 되며, 또한 원격 모니터링, 온라인상의 데이터 수집과 결합하여 환자가 원거리에서 훈련하는 동안에 치료사는 환자의 상태를 체크할 수 있게 하였다.

그리스 Aristotle 대학 D. Tzovaras의 연구팀은 시각장애인들의 재활훈련을 위한 햅틱 가상환경 시스템을 개발하였다. 시각 장애환자가 착용형 햅틱장치를 입고 움직이게 되면 장치에 부착된 모션 트래커(motion tracker)를 통해 사용자의 손의 방향과 위치, 움직임에 따라 계산된 힘 피드백이 환자에게 작용한다(그림 6). 다른 가상 시뮬레이션과는 달리 피험자의 특성상, 시각적인 피드백 없이 가상환경과 접하게 되며, 여러 상황에 맞게 구현된 가상환경 내에서 시각장애인들은 가상의 물체와 반응하고 공간감을 느끼는 훈련을 하게 된다. 이 시스템은 착용형의 햅틱장치를 사용하여 넓은 공간(workspace)을 움직이며 환자들이 훈련할 수 있으며, 또한 장갑형으로 이루어져 있기 때문에 손가락 하나(one point of contact)가 아닌 모든 손가락을 통해 가상물체와 접촉하여 현실감을 높였다.

## 기술적 한계와 향후 연구 방향

위에서 예에서 볼 수 있듯이 의생명분야에서 햅틱정보의 응용은 활발하게 진행되고 있으나 다음과 같은 부분에서 많은 보완이 필요하다.

기존의 DC 모터 등의 구동기 기술이 아직은 크기나 복잡한 케이블 등으로 인해 정교하며 신체를 구속하지 않는 수준의 햅틱 장비를 구성하기에 적합하지 못하다. 또한, 압전형 구동기나 형상기억합금 등의 이른바 지능형 구동 기술 역시 아직은 작은 최대 출력 등으로 인해 많은 약점을 지니고 있다.

햅틱장비의 제작과 설계에도 아직은 많은 제약이 있다. 팬텀으로 대표되는 시판형 햅틱장치가 아직 고가이며 성능 또한 만족스럽지 못한 약점이 있다. 특히 6축의 햅틱 피드백을 제공하는 햅틱장비의 성능개선 및 가격 하락을 기대한다. 전용 햅틱장비의 설계기술역 시 많은 발전을 요구한다. 예를 들면 재활 부분은 환자로부터 상당한 크기의 힘을 전달하고 이를 지탱해야 하는데 이러한 고출력의 안전한 햅틱 장비를 설계하는 기술이 요구된다.

햅틱 렌더링 기술 역시 발전이 요구된다. 기존의 응용사례는 대부분이 도구의 끝을 하나의 점으로 모델링하고 이를 렌더링하게 되는데 이 경우 실제에서는 볼 수 없는 이상한 현상이 관측된다. 예를 들면 시판 중인 의료 시뮬레이션 장비의 경우 과다하게 가상의 생체에 변형을 가하게 되면 실제와 다른 이상한 거동을 목격할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 유한 요소법 등의 실제 생체의 거동에 기반을 둔 시뮬레이션 알고리듬의 개발과 다양한 형태의 충돌검사 기법의 개발이 요구된다.

햅틱장비의 개발과 프로그래밍 등에 있어서 표준화에 대한 작업이 요구된다. 햅틱을 기존의 장비에 부가할 경우 시스템의 복잡도는 급격히 증가하는 경향이 있으며 초기 개발의 시간과 비용이 많이 요구된다. 또한 문제가 발생할 경우 적용분야의 작업자가 해결할 수 있는 수준의 문제가 아닌 경우가 많기에 더욱 다양한 분야의 햅틱 적용에 제약이 되고 있다. 따라서 비전문가도 쉽게 접근할 수 있도록 Toolbox 형태와 데이터의 표준화 등에 대한 작업이 요구된다. 현재 GiPSiTM (General Physical Simulation Interface) 등의 여러가지 표준화 작업이 제안되고 있으나 그 확산은 미비한 수준이다.