

特輯

다축섬유구조 복합재료 연구실(국가지정 연구실 소개)

강태진*

1. 다축 섬유구조 복합재료 연구의 필요성

최근 소재 공업의 발달과 더불어 재료성능에 대한 기대치가 높아져 가고 있다. 산업과 과학기술이 발달함에 따라 재료가 지녀야 할 특성이 더욱 다양화되고, 하나의 재료가 여러 재료의 장점을 동시에 가질 것을 요구하는 경우도 많다. 이러한 다양한 성능과 기능을 만족시켜 주는 새로운 고분자 복합재료 중의 하나가 다축섬유구조 하이브리드 복합재료이며 textile 복합재료가 다축섬유구조 복합재료의 대표적인 예이다. 다축섬유구조 복합재료는 고인성, 내피로성, 내충격성, 구조보지성 (damage tolerance) 성질 등이 월등히 우수한 차세대 구조재료이다.

다축 방향으로 섬유가 보강된 3-D 복합재료의 제조기술은 여러 가지 독특한 성형기술의 개발과 더불어 그 응용분야가 확대되고 있으며 기존의 textile 구조물 제조 방법을 이용한 여러 가지 새로운 textile 복합재료의 제조 방법이 개발되어 왔다. 본 연구실에서는 스티칭에 의한 3축 보강 기술, 다축 3-D weaving, 3-D braiding, angle interlocking, multi-axial warp knitting 등의 textile 구조물을 응용한 복합재료의 최적설계와 성형기술을 연구하여 왔다. 특히 이러한 textile 복합재료의 최적 설계에 의하여 하이브리드화 기술과 정형가공 기술을 확립하였으며, 다축섬유구조 복합재료의 탄소성 성질, 내충격성, 구조보지성, 내피로성, 내마모성, 내삭삭성 등의 특성을 규명하여 왔다.

이러한 textile 복합재료는 기존의 적층복합재료보다 다축 방향으로 향상된 이방성을 지니며 하중분산능력이 우수하여 기계적 성질이 뛰어나고 외부 충격 에너지를 효과적으로 분산시켜 충격에 강하고 치명적 파괴를 방지하여 구조보지성이 우수하다. 따라서 다축섬유구조 복합재료는 첨단 소재의 구조재로서 매우 효율적으로 사용되며 특히 지능화 기능이 부여되는 경우에는 차세대 스마트 구조물에 응용할 수 있는 신기능성 구조재료를 창출할 수 있다. 지능기능을

다축섬유구조 하이브리드 복합재료에 추가하는 경우 극한 지능복합재료를 효율적으로 최적 설계할 수 있다. 적층복합재료의 지능화를 위한 센서 배치기술, actuator 배치기술, 구조설계기술, 성형기술, 감지 및 제어기술 등에 대한 많은 연구가 수행되어 상당한 수준의 기술이 확보되어 있으나 이러한 결과를 고성능 다축섬유구조 복합재료에 응용하기 위한 연구는 미미한 실정이다.

적층복합재료는 2차원적인 구조를 갖는 얇은 판재를 포개놓은 단순 구조를 가지고 있는 반면에 다축섬유구조 복합재료는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 두께 방향 또는 제4, 제5축 방향으로 보강된 다차원적 섬유구조를 가지고 있어 외력에 의한 변형시 응력조건이 적층복합재료와는 판이하다.

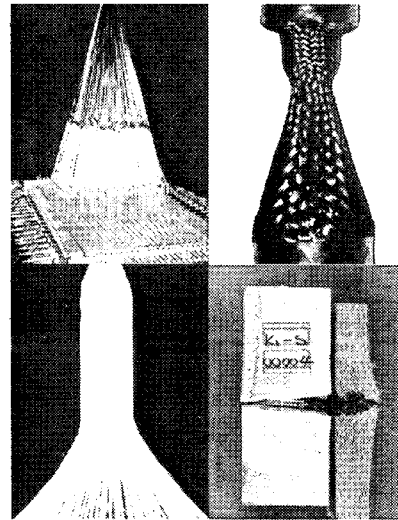


Fig. 1 Multi-axial Fiber Reinforced Composite Structure.

* 서울대학교 재료공학부, 교신저자(E-mail:taekang@plaza.snu.ac.kr)

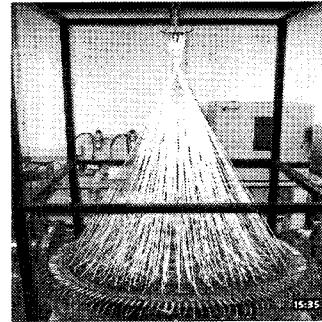
특히 다축섬유구조 복합재료는 기계적 성질이 서로 다른 보강섬유를 이용하는 경우 복잡한 응력조건 하에서 개개 섬유 특성을 발휘할 수 있는 하이브리드화가 가능하여 극한물성을 갖는 다축섬유구조 하이브리드 복합재료를 최적 설계할 수 있다. 다축섬유구조 복합재료에 센서 및 actuator를 적용하는 경우에는 센서 및 actuator의 개수와 위치의 선정이 적층복합재료와는 기계적 거동의 차이 때문에 매우 다를 것으로 예상된다. 따라서 적층복합재료의 지능화를 위한 구조해석 기술과 센서 및 actuator의 최적 배치 기술을 다축섬유구조 복합재료에 적용하기 위한 연구가 필요하다. 다축섬유구조 복합재료의 변형은 섬유의 다차원적 구속력에 의하여 적층복합재료와는 상이하며 이러한 섬유구조의 차이 때문에 지능화된 다축섬유구조 복합재료의 기계적 거동은 적층복합재료보다 더욱 효율적이다. 따라서 이러한 다축섬유구조 복합재료의 지능화를 위해서는 센서 및 actuator의 최적배치 방법이 적층복합재료와는 차별화되어야 한다.

지능섬유복합재료의 설계 및 효율적인 활용을 위하여서는 다축섬유구조 preform의 최적구조설계기술, 센서적용기술, actuator 제어기술, 센서와 actuator의 최적 배치기술, 정형가공기술 (net-shape processing) 등이 핵심기술이다. 고성능의 구조안정성이 요구되는 분야에 적용가능한 복합재료를 설계제작하기 위하여서는 기존의 복합재료와는 다른 다축섬유구조가 요구된다. 기존의 적층 복합재료는 충격에 약하고, 두께방향의 물성과 굽힘특성이 떨어지는 단점이 있으며, 이를 보완하기 위하여 다축섬유구조물을 응용한 textile 복합재료가 필요하다.

2. 연구실 현황

본 연구실은 강태진 서울대학교 재료공학부 교수를 연구책임자로 하여 정관수, 윤재륜 서울대학교 재료공학부 교수가 연구원으로 참여하고 있으며 박사과정 19명, 석사과정 19명의 대학원생이 연구개발 인력으로 참여하고 있다. 이들 연구인력은 다축섬유구조 복합재료 구조설계팀, 복합재료 성형팀, 복합재료 소성해석설계팀으로 세분화 되어 연구를 진행하고 있으며 다년간에 걸친 복합재료의 설계와 성형 및 해석 관련 연구를 통해 다수의 논문과 특허를 보유하고 있다. 본 연구실이 보유하고 있는 주요 장비로는 Fig. 2에 보인 바와 같은 preform 설계를 위한 Circular braiding machine, Stitching machine과 이를 복합재료로 성형하기 위한 Autoclave, Resin transfer molding 장비, Injection molding 장비, Hot press machine, Diamond saw 등이 있으며

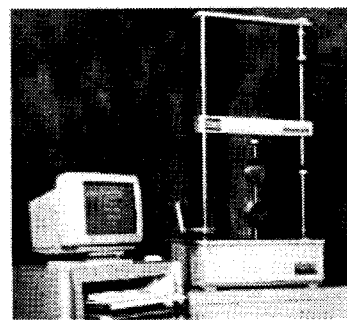
복합재료의 물성을 측정하고 평가할 수 있는 MTS machine, Impactor tester, Fiber optic sensor, Image analyzer 등을 갖추어 복합재료의 설계에서 성형, 시험에 이르는 작업을 수행할 수 있는 능력을 보유하고 있다.



(a) Circular Braiding Machine



(b) Reaction Injection Molding Machine



(c) Universal Testing Machine

Fig. 2 Photographs of Some Equipments in MATCOM Lab.

3. 주요 연구 내용

본 연구실에서는 다축섬유구조 복합재료의 최적설계기술을 확립하고 하이브리드화에 의한 기계적, 물리적 성능의

극한치 달성을 위하여 아래와 같은 목표를 설정하고 연구를 진행하고 있다.

- 다축섬유 하이브리드 구조의 최적설계 및 preform 제작 기술 확립
- 다축섬유구조 복합재료의 정형가공 설계 및 성형기술 개발
- 다축섬유구조 복합재료의 탄소성 구조해석
- 다축섬유구조 하이브리드 복합재료의 지능화를 위한 preform 구조설계기술 확립
- 다축섬유구조 복합재료 내의 센서 및 actuator 최적 배치 기술 확립

현재 수행중인 주요 연구 분야는 다음과 같다.

3.1 원형 Braiding Machine 이용한 Preform 제작

본 연구실에서 보유하고 있는 circular braiding machine은 perpendicular 형태의 4-step circular braiding machine으로서 총 2016개의 carrier를 compressed air에 의해 조작되는 piston에 의해 움직이도록 설계되어 있다. 지름방향으로의 motion을 담당하는 288개의 piston과 원주방향의 motion을 담당하는 8개의 piston에 의해 braiding step motion을 하게 되어있으며, 각 motion은 control board로 제어할 수 있다. 현재 실험실에서 사용하는 기계의 pattern은 96개의 piston과 8개의 piston을 사용하여, 1by1 pattern(carrier가 각 방향으로 한 칸씩 움직이는 형태)으로 setting 되어 있다.

본 연구실에서는 최종적인 circular braided composite을 만들기 위해 circular mold를 제작 중이며, resin transfer mold시 permeability를 측정하고 또한 circular braided composite의 geometry의 최적 modeling과 이를 바탕으로한 응력해석을 연구중이다.

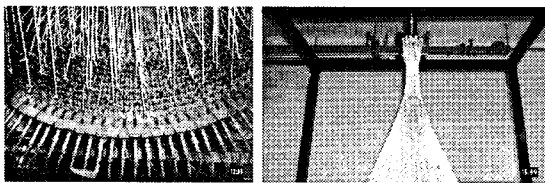


Fig. 3 Circular Braiding Machine and Preform.

3.2 다축섬유구조 복합재료의 성형해석 및 설계

현대사회가 더욱 가볍고 강한 신소재를 요구함에 따라

고분자 재료 및 이들을 모재로 하는 복합재료는 학문적으로나 산업적으로 커다란 관심의 대상이 되고 있으며 이를 위해서는 최적화된 공정의 설계와 개발이 이루어져야 하는데, 이는 재료의 공정(processing), 구조(structure), 성질(property) 관계의 이해를 바탕으로 해야 이루어 질 수 있다. 이를 위하여 본 연구실에서는 실험적 연구와 함께 유체 및 고체 역학, 열전달, 물질전달, 유변학 등에 바탕을 둔 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 연구에 초점을 맞추고 있으며 이를 검증하기 위한 실험과 새로운 공정 개발을 위한 실험 연구도 수행하고 있다.

고분자재료의 가장 일반적인 성형 방법인 사출성형, 압출성형, 용융방사 등에 대한 공정을 해석하고 설계하고 있다. FEM/FDM 등의 수치해석을 통한 사출성형의 충전과 후충전과정 모사, 잔류응력 측정과 예측, 압출성형 다이 내에서의 3차원 열유동 해석, FEM을 통한 이형단면사 용융방사의 3차원 열유동 해석, 쾌속 조형법의 하나인 3차원 입체 인쇄 기술(SLA) 등에 대한 연구를 수행하여 왔고 계속 발전시키고 있다. 기존의 복합재료는 거의 두께가 얇은 2차원적인 구조를 지니왔으나, 최근에는 3차원적 구조를 가지는 복합재료가 많이 요구되고 있으므로 형상이 복잡한 복합재료를 성형하는데 가장 용이한 방법으로 알려진 수지 이송성형(RTM)이 관심의 초점이 되고 있으므로 본 연구실에서는 3차원 수지이송성형의 열유동 해석, 섬유 preform의 투과성 측정과 이론적 예측에 관한 연구 등을 수행하고 있다. Fig. 4는 본 연구실에서 수행한 성형공정 연구의 예를 보여주고 있다.

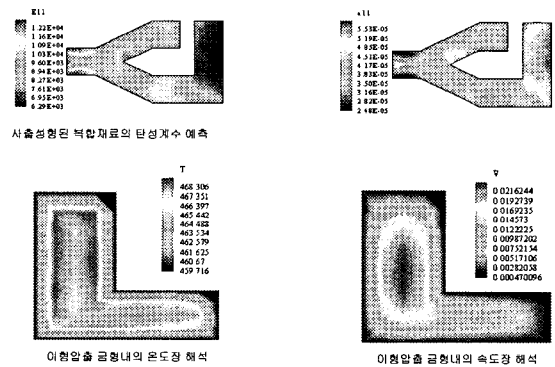


Fig. 4 Analysis of Polymer Composites Molding Process.

3.3 다축섬유 복합재료의 구조해석 및 설계

다축섬유 복합재료를 설계하고 수치해석을 통하여 이들

의 물성을 평가하고 설계에 응용할 수 있는 연구를 수행하고 있다. 이를 위해 하이브리드 Preform의 탄소성 구조해석 및 설계, 다축섬유구조 하이브리드 복합재료의 정형가공 및 공정해석, 다축섬유구조 하이브리드 복합재료의 기계적 성질 평가, 기능경사형 Preform의 구조해석 및 설계, 기능경사형 다축섬유구조 복합재료의 성형공정 해석 및 설계, 기능경사형 다축섬유구조 복합재료의 탄소성 해석 및 기계적 성질 평가 등을 수행하고 있으며, Fig. 5는 이와같은 연구 분야 중 수치해석에 의한 복합재료의 구조 해석 예를 보여주고 있으며, Fig. 6은 복합재료의 소성공정 해석 시뮬레이션 과정을 보여주고 있다

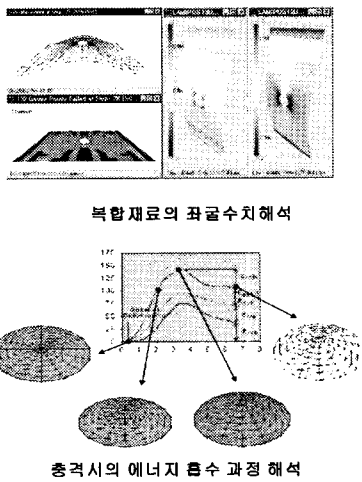


Fig. 5 Structural Analysis of Textile Reinforced Composites.

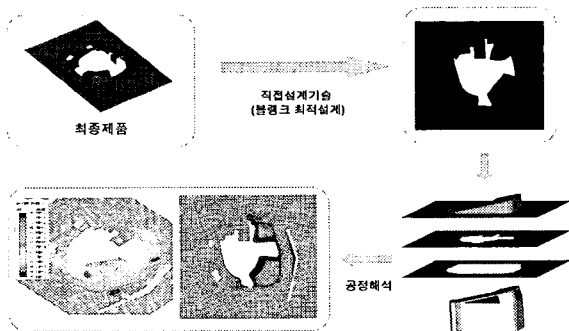


Fig. 6 Process Analysis of Multi-Axial Fiber Reinforced Composites.

3.4 복합재료내의 센서 및 actuator 배치기술

다축섬유구조 복합재료의 변형은 섬유와 매트릭스의 다차원적 구속력에 의하여 적층복합재료와는 상이하게 발생하며 이러한 섬유구조의 차이 때문에 지능화된 다축섬유구조 복합재료의 기계적 거동은 적층복합재료보다 더욱 효율적이다. 이러한 다축섬유구조 복합재료의 지능화를 위해서는 센서 및 actuator의 최적배치 및 신호해석 방법이 적층복합재료와는 차별화되어야 한다. 따라서 지능섬유복합재료의 설계 및 효율적인 활용을 위하여서는 다축섬유구조 preform의 최적 구조설계기술, 센서적용기술, actuator 제어기술, 센서와 actuator의 최적 배치기술, 정형가공기술 (net-shape processing) 등이 핵심기술이다.

다축섬유구조 복합재료의 지능화를 위한 기초기술로서 능동제어를 위한 다양한 센서와 actuator가 개발되어 선진국에서 그 특성이 평가되고 있으며 예를 들어 광섬유(압전재료+유전유체) 등의 조합을 이용한 혼합형 지능구조물도 개발되었다. 건축물이나 교량과 같은 대형 구조물에 있어서는 외부 하중에 따른 손상여부 및 손상 영역을 감지하기 위하여 다축섬유구조 복합재료 구조물 내에 센서를 삽입함으로써 구조물의 건전성을 판정하고 있으며 센서의 응답특성 변화로부터 손상을 판정하기 위한 신경망 이론 알고리즘을 개발하고 있다. 이러한 손상감지 복합재료내의 센서 배치는 섬유구조에 따라 다르며 예를 들면 적층복합재료와 다축섬유구조 복합재료의 경우는 센서의 갯수 및 위치, 삽입방법 등에 있어서 큰 차이가 있다.

국내에서는 이러한 관련 기술의 연구가 아직은 미비한 실정이며, 관련된 일부 분야에서 연구가 진행되고 있다. 적층복합재료의 지능화를 위한 연구로서 광섬유/압전재료, 압전재료/압전재료, 캡디텍터/유전유체를 센서/actuator의 조합으로 사용한 구조물의 진동억제에 관한 이론과 실험에 대한 결과가 국내에서 일부 발표된 바 있다. 이러한 연구는 모두 기존의 적층복합재료에 한정되어 수행되었으며 다축섬유구조 복합재료에 적용하는 연구는 보고된 바 없다.

Textile 복합재료의 전반적인 기술 수준은 선진국과 비교하여 생산 기술면에서는 큰 차이가 없으나, 다축섬유구조의 설계 기술 및 복합재료의 성형기술 등이 낙후된 실정이다. 특히 지능화 복합재료에 대한 국내기술이 취약하며 이는 센서와 actuator제작에 필수적인 소재 기술의 낙후성, 지능 구조물 설계에 대한 경험부족, textile 복합재료 생산기술의 부재, 기술개발에 대한 소극적 투자에 기인한다. 또한 이러한 제품이 방위산업 분야에 많이 적용되고 있는 바, 설계 및 제품성형 기술 등의 핵심 기술은 선진국으로부터 도입하기가 어려운 실정이기 때문에 다축섬유구조 복합재료 기술의 자체 개발이 절실하다. 그러나 각각의 핵심기술 분야에서는 국내에서도 어느 정도 잠재적 기술력을 보유하고

고 있기 때문에 이를 종합적으로 연계하여 시스템화하는 기술을 개발한다면 상당한 수준의 기술력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구실에서는 다차원 구조를 가지는 다축섬유구조 복합재료의 구조설계와 탄소성 해석을 통하여 다축섬유구조 내에 센서와 actuator를 배치하는 최적설계기술 개발에 역점을 두고 있으며 이를 통해 다축섬유구조 복합재료를 지능화 하여 변형, 진동, 손상 등 거동감지는 물론 능동제어도 가능한 구조물을 제조하는 기술을 개발하여 미래의 첨단구조물에서 필수적인 핵심기술을 확립하고자 하고 있다.

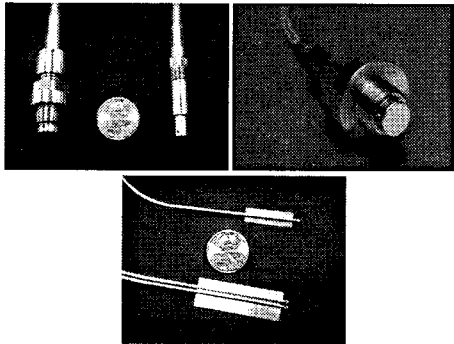


Fig. 7 Fiber Optic Sensors.

4. 기대 성과 및 향후 계획

다축섬유구조 복합재료는 기존의 적층복합재료에 비하여 우수한 물성을 소유하고 있어 응용 분야에 따라서는 10-20%의 소재를 절약할 수 있다. 다축섬유구조 복합재료의 제조비용 상승분을 감안할지라도 높은 경제적 이익을 얻을 수 있으며 응용 분야에 따라서는 구조물의 성능이 경제원리에 우선할 수도 있다. 현재 국내의 장섬유보강 적층복합재료의 시장규모는 약 7,000 - 8,000억원 정도이며 경량 고성능 복합재료의 응용이 확대되는 추세를 고려할 때 다축섬유구조 복합재료의 성공적 개발은 기존 시장의 10% 이상을 점유함과 동시에 새로운 시장을 추가로 개척할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 국내 복합재료산업, 기계산업, 방위산업 및 섬유고분자 관련 소재 산업의 기술 경쟁력을 제고시킬 수 있으며, 인접 학문의 학제간 연구를 통한 종합적 사고력을 지닌 인력을 양성하고 연계공학 교육을 실현할 수 있다.

본 연구실에서 얻을 수 있는 기술적인 성과로는 경량 고강도 다축섬유구조 복합재료의 개발, 하이브리드 복합재료

의 최적설계, 다축섬유구조물의 최적설계에 따른 정형가공, 기능경사형 최적구조 복합재료 개발, 다축섬유구조 복합재료의 역학적 특성 규명, 센서 및 actuator의 최적배치 등이 있다. 특히 다축섬유구조 preform의 구조해석 및 최적설계, 다축섬유구조 하이브리드 복합재료의 정형가공 해석, 다축섬유구조 복합재료의 탄소성 거동 해석, 파괴특성 평가, 충격특성 평가, 내피로성의 평가, 내삭막성의 평가, 3차원 다축섬유구조 복합재료내의 센서 및 actuator 최적배치를 위한 탄소성 응력해석 등의 기반기술을 확립함으로써 다축섬유구조를 이용한 첨단 복합소재의 개발과 지능화를 위한 고급정보를 제공할 수 있다.

본 연구실에서 연구하고자 하는 목표가 실현되면, 21세기의 무한 경쟁 시대를 선도할 수 있는 소재/기계공학 기술을 확보하는 데 일조할 것이다. 건축 분야에서는 외부 온도, 진동, 구조물의 손상 감지 등에 유용하게 쓰일 것이며 복합재료 구조물 내에 센서를 삽입하여 구조물의 건전성 평가기술 개발에 기여함으로써 구조물의 안전도에 대한 보다 정확한 예측이 가능하여 안전도 향상에 기여할 수 있다. 항공/자동차 분야에서는 단순 구조재로 쓰이던 복합재료에 다기능성을 부여함으로써 제작비용을 절약하고 진동, 소음 문제를 획기적으로 개선할 수 있다. 또한 실제 운전 상황에서 각 부분의 응력에 따른 변형 등을 측정함으로써 유사한 목적의 구조물을 설계하는 데 필요한 설계 데이터를 얻을 수 있는 효과가 있을 것이다. 생체 공학 분야에서는 기존의 복합재료를 적용함에 있어서 기능의 집적화를 이룩하여 제품의 소형화와 생산의 용이성을 확보하게 되며, 더욱 적용 범위를 넓힐 수 있을 것이다. 이렇듯 다축섬유구조 복합재료의 개발은 우리나라의 소재산업을 발전시키고, 선진국에 뒤지지 않는 공학 기술의 경쟁력을 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.

5. 맺음말

다축섬유구조 복합재료의 연구를 통하여 기존의 복합재료를 사용하는 여러 구조물의 물성을 향상시키고 내구성, 구조보지성을 증진시킴으로써 구조물의 경량화, slim화를 달성하고 극한물성 부여를 가능케 하여 지금까지 복합재료의 적용이 불가능하였던 제품까지 활용이 가능하게 된다. 이러한 향상된 섬유구조 복합재료는 그 활용범위를 더욱 확대하여 산업전반의 첨단소재로서 응용될 것이다. 다축경편성물 응용 복합재료의 국산화 및 성능 고도화를 실현하여 다축경편 preform의 여러 형태를 선진국에 수출하고 있는 한 국내 기업의 실례를 고려할 때 다축섬유보강 복합재

료의 개발은 국내 시장에서 뿐만 아니라 세계 시장에서도 무한한 응용을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

이를 위해 본 연구실에서는 세계적 수준의 기술로서 학문적 가치를 진작시키기 위해 개발된 이론 및 기술에 대하여 국제학술지에 게재를 적극 장려하고 있으며 다축섬유구조 복합재료의 설계 및 성형기술을 활용할 산업체와 국제공동연구를 위한 협력기관을 선진국에서 발굴할 예정이다. 이들과 더불어 국내산업체의 참여를 유도하여 신기술 개발을 위한 컨소시엄을 형성하고 정보센터를 운영함으로써 본 기술의 활성화에 주력할 것이다.