

特輯

21세기 복합재료의 전개 방향

남현욱*, 한경섭**

1. 21세기 과학기술의 전개 방향과 복합재료

전 세계가 일일 생활권이 된 것은 이미 오래된 일이 되었으며, 현재는 인터넷이라는 정보망을 통해 실시간으로 세계 각지의 정보를 공유하는 단계에 이르렀다. 이러한 변화는 이제 시작일 뿐이다. 21세기 미래 사회는 지식 정보화 됨으로 국부 창출의 원천이 변화되며, 무한 경쟁이 심화될 것으로 예상하고 있다. 또한 과학 기술의 획기적 발전으로 과학과 사회의 연계가 심화되며, 개인의 삶의 질 향상 욕구나 새로운 가치체계의 출현을 예상하게 하고 있다[1].

이러한 21세기의 사회에서 변화를 주도하는 것은 과학 기술이라 할 수 있는데, 세계 각국은 첨단 기술을 선점하기 위하여 많은 노력을 하고 있다. 국제과학기술의 동향은 과학기술과 경제의 접목, 다국적 기업의 일반화, 학제간 연구의 협력으로 요약할 수 있는데, 한 마디로 경제를 떠나 과학을 생각하기 어려우며 주요 기술 선점을 위한 이합집산이 이루어진다고 할 수 있다.

21세기 핵심 과학 기술 분야는 IT, BT, NT라고 할 수 있는데, 미국의 MIT, SRI 등의 기술예측 자료에 의하면 21세기 핵심 기술 85 개 중 IT분야가 48개, BT분야가 14개, NT분야가 30개로 95% 이상이 IT, BT, NT와 관련된 기술들이며, 이들 기술들이 융합화, 복합화되어 나타나는 기술들이 대부분이다. 다시 말해서 이들 3대 기술은 상호간 상승작용으로 많은 분야의 기술 혁신을 가속화시킬 것으로 예상되며, 나노 소자의 성능혁신은 IT혁명의 견인차 역할을 할 것이다[2].

이러한 신기술의 기반이 되는 분야가 신소재 분야라 할 수 있다. 신소재는 21세기 3대 핵심 기술 개발의 기본을 제공하는 동시에 기존 기반 기술의 발전을 마련해 주는 역할을 해야 한다.

Table 1 신소재 분야 재질 별 시장 동향 및 전망

(단위:억불)

세계 신소재 재질 별 시장 전망						
시장구분	90	95	2000	2005	2010	증가율
신금속	238	515	1120	1700	2350	12.7%
파인세라믹스	297	578	1124	1630	2300	11.2%
신고분자	350	617	1088	1750	2400	10.4%
정보전자재료	150	302	1000	1220	2450	15.4%
복합재료	43	156	568	738	900	18.0%
국내 신소재 재질 별 시장 전망						
신금속	8.6	24.6	70	90	133	15.9
파인세라믹스	9.5	27.9	82	95	142	15.7
신고분자	7.6	24	76	85	135	16.7
정보전자재료	12	35	80	180	350	20.3
복합재료	1.8	4.1	10	12	20	13.9

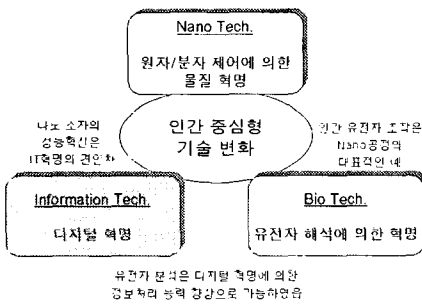


Fig. 1 21세기 핵심 과학 기술 분야.

* 포항공과대학교 기계공학과 연구원

** 포항공과대학교 기계공학과 교수

신소재 기술 개발의 경향은 시장성과 경제성이 강조, 경량 소형화 추세와 더불어 지능화되고 다양한 기능을 보유, 에너지 절약형, 환경 친화적 소재 개발이라고 할 수 있다. Table 1에 신소재 재질별 시장 동향 및 전망을 나타내었다.

전 세계적으로는 신소재 중 복합재료가 차지하고 있는 비중은 상대적으로 작지만, 연평균 성장률이 가장 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 자료는 복합재료가 21세기 핵심 기술을 뒷받침할 중요한 분야임을 나타내는 것이다.

이상의 21세기 사회의 변화와 과학 기술의 추세, 그리고 복합재료의 역할을 생각할 때 복합재료가 나아가야 할 방향은 다음과 같이 요약된다 할 수 있다.

첫째로 새로운 소재 및 공정 개발을 통한 가격 경쟁력 및 생산성의 향상이 필수적이다. 복합재료의 비중이 신소재 전체 분야에서 적은 것은 복합재료의 가격 경쟁력 및 생산성이 상대적으로 떨어지기 때문이다. 둘째로 대량의 소재가 사용되는 건축 토목 분야에 복합재료의 영역을 넓혀가야 한다. 셋째로 NT, BT, IT 등 신기술에 동참할 수 있는 새로운 분야를 개척해 나가야 한다. 마지막으로, 복합재료의 응용 분야 확대를 통하여 복합재료의 영역을 넓혀가야 한다. 각각에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

2. 소재 및 공정 개발을 통한 가격 경쟁력 및 생산성 향상

소재 및 공정은 복합 제품을 생산하는데 있어 매우 많은 비용을 차지한다. 이러한 부분의 비용을 줄이는 것은 복합재료의 응용 분야를 넓히는데 있어 현실적으로 중요한 일이다.

현재 안전 성장 단계에 들어선 고분자 복합재료의 경우 새로운 제조 공법의 도입으로 경쟁력을 높이는 방향으로 연구가 진행 중이며, 양산 전 단계에 있는 금속복합재료는 상용화 가능한 소재와 공정 개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

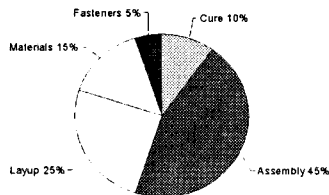


Fig. 2 The cost drivers for making composite components.

2.1 고분자 복합재료 분야

2.1.1 Fiber placement process

Fiber placement process는 1980년대 초반부터 연구되기 시작한 공정으로 filament winding 공정의 단점을 보완하여 복잡한 형상의 대형 구조물을 자동화하여 제작하기 위해 개발되었다[3,4].

Fiber placement process는 Fig. 3과 같이 clamping, cutting, re-threading이 가능한 장치를 가져 곡면의 형상을 제작할 때에도 인장응력이 발생하지 않도록 하는 것이 가능하다. 이 공법을 이용하여 V-22 Osprey 항공기 동체를 제작한 결과 75%정도의 경비 절감할 수 있었다고 보고되고 있다. 1989년까지 개발 단계에 있어 자체 제작하여 사용하던 수준의 이 공법은 1999년 기준으로 많은 항공 분야에 응용이 되고 있으며, 이 공법을 상업적으로 이용하는 회사도 등장하였다.

또한 현재 Bell/BA-609 Commercial Tiltrotor 의 Forward Fuselage, Airbus A340-500/600의 Fan Cowl Doors, Ariane 5의 Payload Adapters, Thrust Frame, Vehicle Equipment Bay 등 많은 분야에 응용되고 있다.

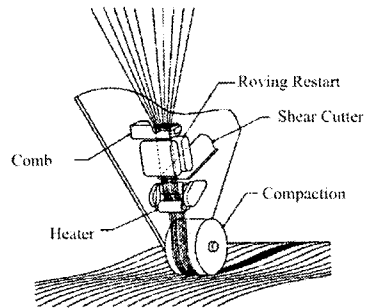


Fig. 3 Fiber placement head schematic.

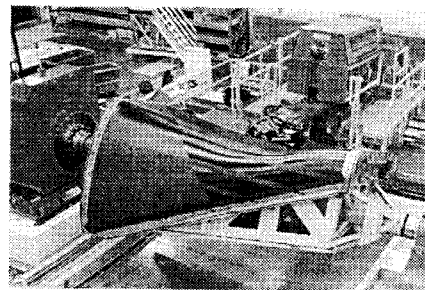


Fig. 4 V-22 Osprey aircraft fuselage.

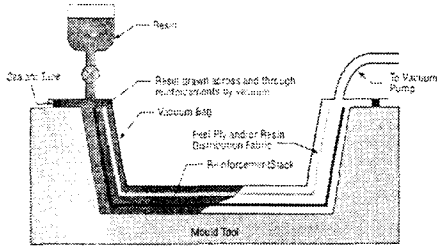


Fig. 5 Schematic representation of resin infusion process.

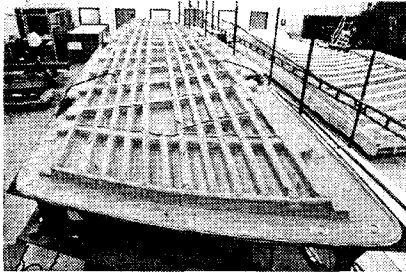


Fig. 6 RFIT lower wing cover panel for future transport aircraft design.

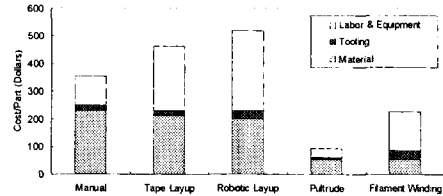


Fig. 7 Composite production technology cost comparison.

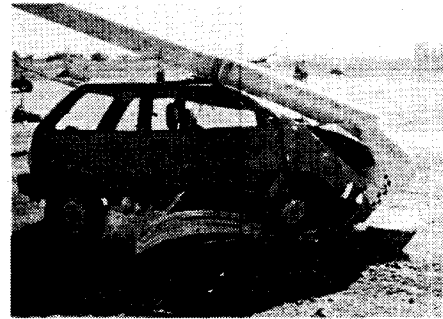


Fig. 8 Composite utility pole after impact by 820kg vehicle at 100km/h.

2.1.2 Resin film infusion technology

공정비를 줄이기 위해 연구되고 있는 또 하나의 공법은 Resin film infusion technology이다[5]. 이 공법은 RTM 공법의 발전에 의해 개발된 방법으로 RTM 공정 중의 한 쪽 부분을 flexible한 film으로 대체함으로써 낮은 공정비를 가지면서도 물성은 우수한 특성을 나타낸다. 이 공법은 항공기의 날개 등을 제작할 때 이용되고 있다.

2.1.3 Pultrusion technology

Pultrusion 공법은 널리 알려진 복합재료 공법 중의 하나이다. 이 방법은 연속적으로 제작이 가능하고 공정이 간단하여 복합재료 공법 중 가장 경제적인 제작법이다. 현재 이 공법은 건축 토목 분야의 복합재료에 많이 사용되고 있으며 보다 크고 복잡한 형상의 구조물을 생산할 수 있는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

현재 8ft 정도의 폭을 가진 복합재료 구조물은 pultrusion 공법을 이용하여 생산되고 있으며 보다 크고 다양한 형상에 대한 연구도 진행되고 있다.

주요 응용 분야는 교량이나 간이 구조물, 파이프 등이다. Pultrusion을 이용한 군용 막사의 경우 알루미늄 구조의 막

사에 비하여 50%의 경비를 절감할 수 있으며, 거주 편이성이 우수하다고 보고되고 있다. 또한 도시의 전주 등을 복합재료로 대체할 경우 경제성이 외에도 콘크리트 전주나 목재 전주에 비하여 사고 발생시 안전한 특징이 있다.

2.2 금속복합재료 분야

2.2.1 Reinforcement type

금속복합재료는 고분자 복합재료와는 달리 양산되어 지는 분야가 아직 한정되어 있는 상황이다. 이러한 주된 이유는 우수한 물성에도 불구하고 다른 소재에 비하여 경제성이 떨어지기 때문이다. 따라서 앞으로의 금속복합재료분야는 양산 가능한 수준의 소재와 공정 개발에 초점이 맞추어져 연구가 진행될 것이다.

금속복합재료의 소재는 초기에 장섬유에서 현재는 단섬유나 휘스커 형태가 사용되고 있다[6]. 그러나 단섬유 역시 양산에 필요한 경제성을 확보하는 것은 어려움으로 앞으로는 입자 형태가 주류를 이룰 것으로 예상된다. 이 경우 보강재 형태 변화에 따른 금속복합 재료 제조법도 같이 연구될 것으로 생각된다. 몇 가지 새로운 제조법에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

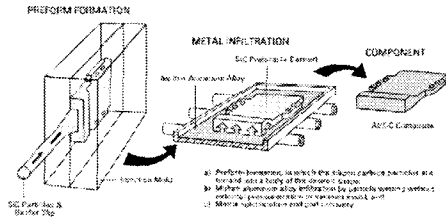


Fig. 9 Pressureless infiltration process.

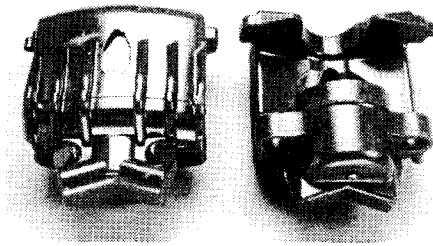


Fig. 10 MMC brake calipers.

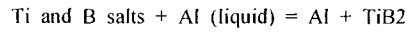
2.2.2 Pressureless infiltration method

Pressureless infiltration 공법은 1980년대 후반 Lanxide사에서 개발된 공법이다[7]. 이 공법의 특징은 이차 가공의 필요가 거의 없고, 복잡한 형상의 금속복합재료를 제작하는 것이 가능하다는 것이다. 따라서 가공이 어려운 금속복합재료의 특성을 고려할 때 매우 좋은 장점을 가지고 있다. 이 공법은 마그네슘이 함유된 알루미늄을 질소분위기에서 녹이면 압력 없이 화학 반응에 의해 알루미늄이 보강재 사이로 침투가 되는데, 보강재의 형상에 상관없이 침투가 발생되기 때문에 입자 형태의 보강재 이용이 가능하다. 그러나, 알루미늄의 침투 속도가 느리고 침투시 반응 생성물이 많이 발생되기 때문에 이러한 문제를 해결하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. Fig. 10는 pressureless infiltration을 이용하여 제작한 금속복합재료 brake calipers이다.

2.2.3 In situ compositing process

In situ 공법은 화학적 반응에 의해 알루미늄 모체에 직접적으로 보강재를 형성시켜 금속복합재료를 제작하는 방법이다. 이 방법은 보강재를 원재료로 이용함으로써 재료비가 저렴하며 보강재의 균일한 분포를 얻을 수 있다는 것이

점이다. Fig. 11에 In situ방법을 개략적으로 나타내었다. In situ 공정의 예를 들면 아래와 같다.



즉, Ti와 B salt가 알루미늄과 반응하여 TiB₂가 형성되어 알루미늄 사이에 보강되는 것이다. 이러한 In situ공정 역시 몇 가지 문제점이 있는데, 첫번째로 상업화하기에는 가격이 높다는 점이다. 금속복합재료가 상용화 되기 위해서는 생산 단가가 3\$/kg정도가 되어야 하지만 현재 in situ방법에 의해 생산되는 금속복합재료의 생산 단가는 7\$/kg이다. 두번째로 viscosity와 반응성의 문제로 보강재의 부피비를 12%이상 증가시키지 못한다는 점이다. 현재 in situ 방법은 반응 속도 향상, 불안전 반응 문제 해결, 화학 반응에 의한 보강재 형성 연구 등 연속 공정을 통한 MMC제작을 위한 연구가 진행 중이다.

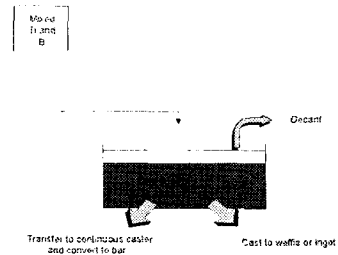


Fig. 11 Schematic of in situ process.

3. 건축 토목 분야에 복합재료 영역 확대

건축 토목 분야는 대량의 소재가 소비되는 분야인 만큼 사회적 파급효과도 매우 크다. 복합재료가 21세기 주요 소재가 되기 위해서는 이 분야에 많이 이용되어야 한다. 현재 건축 토목 분야에 새롭게 이용되고 있는 예를 살펴보면 다음과 같다.

3.1 GFRP Composite Bridge Deck

건축 분야의 복합재료 소재는 대부분 비용이 저렴한 pultrusion공법을 이용하여 생산된다. 교량 등에 사용되는 bridge deck의 경우도 이 공법을 이용하여 제작되고 있다. 이 경우 노동력이 절감되며, 설치비가 줄어들며, 재료의 낭비가 적으며 생산성이 향상된다[8].

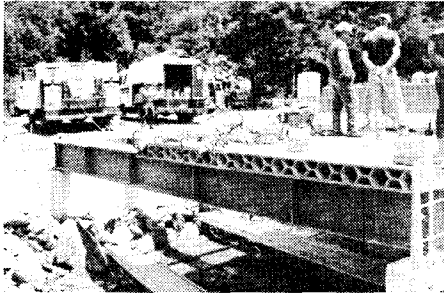


Fig. 12 Composite bridge deck

Fig. 12과 같이 복합재료 Deck을 이용하여 교량을 건설할 경우 콘크리트 Deck에 비하여 에너지 흡수나 피로 특성이 우수하고 건설 기간을 단축할 수 있다. 또한 수명이 길고 유지 비용이 낮게 때문에 콘크리트 Deck에 비하여 초기 비용이 60%정도 높지만 경쟁력이 있다. 현재 Pultrusion 공정의 개선을 통해 가격을 낮추려는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

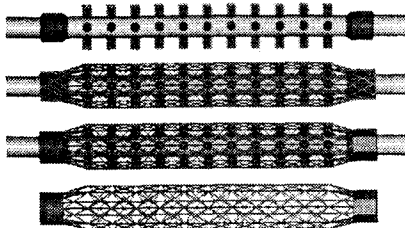


Fig. 13 Collapsible mandrel concept employed in filament winding fabrication of IsoTruss grid structure.

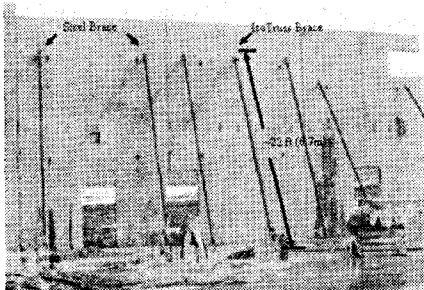


Fig. 14 Full-scale field application of isotruss grid structure.

3.2 IsoTruss Grid Structure

IsoTruss grid 구조물은 최근 새롭게 연구되고 있는 건축 소재로 매우 높은 비성성과 비강도를 가지고 있는 소재이다. 이 소재는 Fig. 13에서와 같이 filament winding으로 제작이 되며 소재가 grid 형태로 연결되기 때문에 가볍고 우수한 물성을 가진다. 이 소재의 응용분야는 Fig. 14에서와 같이 건축 구조물의 지지대로 이용이 되고 있으며 인공 위성이나 해양 구조물의 지지대, 도시의 전주, 스포츠 용품의 폴 등 다양한 응용 분야를 가지고 있다. 현재 다양한 형태의 IsoTruss grid 구조물이 개발되고 있으며 앞으로 더욱 활발히 연구가 될 것으로 기대되고 있다.

3.3 Braiding Application for Civil Infrastructure

Braiding기법은 Fig. 15와 같이 Mandrel을 중심으로 섬유를 엮어 구조물을 제작하는 방법으로 자동화된 공정과 사용되는 섬유의 종류를 혼합하여 사용하는 방법으로 구조물의 가격을 최적화 할 수 있다는 장점 때문에 많이 연구가 되어 왔다. 그러나 제작 형태가 원형에 한정되었기 때문에 많은 응용이 되지 않았으나 Foster-Miller에 의해 평면 형상을 만들 수 있는 braiding machine이 개발됨에 따라 civil infrastructure에 응용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

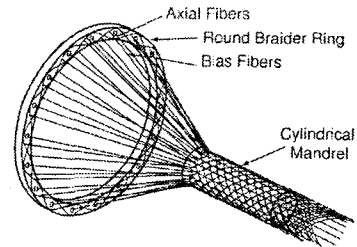


Fig. 15 Schematic of the braiding process.

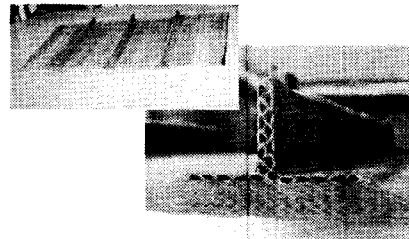


Fig. 16 Flat braided stiffener.

4. NT, BT, IT 분야에 복합재료 응용

4.1 Nano Composites(Nano Tech.)

4.1.1 Ceramic nanocomposites

세라믹 나노 복합재료는 나노 크기의 입자들이 결합되어 나노 크기의 grain을 형성하여 전통적인 세라믹 재료의 특징인 마모나 고온 특성이 우수하면서도 약점이었던, 파괴 인성이나 가공성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 소재이다 [10]. 기존 세라믹 소재에서 고강도를 유지하기 위해서는 밀도가 높아야되며, 균일한 미세구조를 가져야 하며, 고인성을 가지기 위해서는 조대하며 비균질한 구조에 약간 grain boundary를 가져야 한다. 또한 우수한 고온 강도를 가지기 위해서는 조대한 구조에 강한 grain boundary를 가져야 한다. 이러한 각각의 요구 조건은 서로 상충되는데, 나노 복합재료는 요구 조건을 만족시킬 수 있는 소재이다. 현재 나노복합재료는 나노 크기의 입자를 기지재에 결합시키는 intra, inter, intra/inter 형태의 연구가 진행되고 있는데, 이 경우 고강도나 고온 강도의 특성은 확보할 수 있으나 고인성의 확보는 어렵다. 따라서 Fig. 17과 같이 나노 크기의 grain들이 서로 미세하게 결합되어 있는 nano/nano형태로 세라믹 나노 복합재료를 제작하기 위하여 연구들이 진행되고 있다.

4.1.2 Nanoparticle reinforced polymers

폴리머 나노 복합재료는 나노 크기의 입자를 폴리머와 결합시킨 복합재료로 가공성이 매우 뛰어나 성형시 거의 최종 형상으로 제작할 수 있는 특징이 있다.

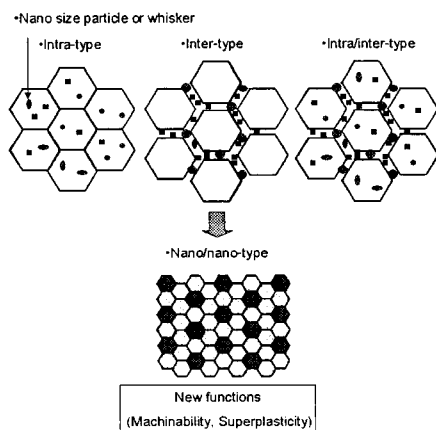


Fig. 17 Type of ceramic nano composites.

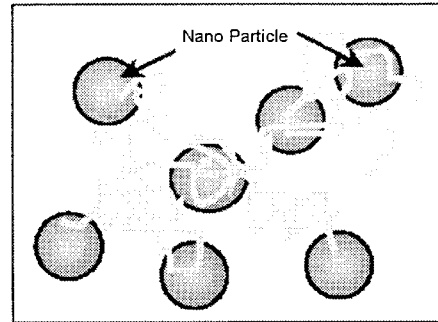


Fig. 18 Nanopolymer reinforced polymer.

또한 이 소재는 가벼우면서도 금속 소재의 강도와 강성을 가지며 부식이나 소음에 우수한 특성을 가진다. 이 외에도 재활용성이 우수한 환경 친화적 소재로서 활발한 연구가 진행중이다. 현재는 나노 크기의 입자를 폴리머 속에 균질하게 분포시킬 수 있는 방법에 대한 연구들이 진행되고 있다.

4.2 Bio Composites(Bio Tech.)

복합재료는 가볍고 높은 강도를 가지는 특징으로 예전부터 의료가기나 의료 용품의 장비로 이용되어 왔다. 최근에는 복합재료 자체를 인체 내부에 삽입하여 사용하는 바이오 복합재료에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 바이오 소재의 특성은 기계적 강도가 충분히 유지되어야 하며, 인체 구조에 맞는 적절한 움직임을 보유하고 있어야 한다. 마지막으로 신체에서의 거부 반응이나 독성이 없어야 한다. 복합재료는 이러한 특성을 만족시킬 수 있는 소재로 인체의 여러 관절이나 뼈를 개발하는데 이용되고 있다. 이외에도 의족이나 의수, 각종 임플란트 등 다양한 분야에 응용이 증가할 것으로 기대하고 있다.

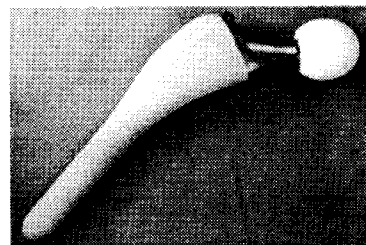


Fig. 19 Hip endoprosthesis made by carbon fiber reinforced PEEK.

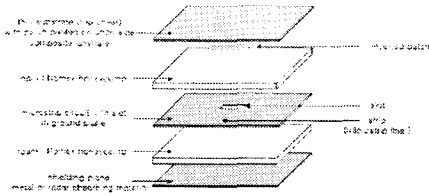


Fig. 20 Structure of Smart Skin.

4.3 Smart Skin (Information Tech.)

스마트 스킨은 복합재료를 정보통신 기술에 응용한 한 예라 할 수 있다. 기본 개념은 복합재료 샌드위치 판넬에 SSFIP(Strip Slot Form Inverted Patch)를 결합한 소재로 구조물의 기능과 안테나의 기능을 동시에 보유한 기능성 소재이다. 제작은 가볍고 압축강도가 뛰어난 허니콤 소재에 Radiating sheet를 구성하여 적절한 수신을 할 수 있도록 설계한 다음 구조물로서의 충분한 강도를 가지도록 설계하는 것이다.

이 소재는 앞으로 무선 통신이 활발해질 21세기에 핸드폰, 노트북, PDA의 모바일 제품에 광범위하게 이용될 것으로 기대되고 있다.

5. 복합재료 응용 분야 확대

이상의 복합재료의 연구 방향 외에도 복합재료의 강점을 살린 더욱 다양한 분야가 연구될 전망이다. 탄소/탄소 복합재료는 이러한 대표적인 예이다. 탄소/탄소 복합재료는 가볍고 강도가 높고, 낮은 열팽창 계수와 높은 열전도 등의 특징 외에 2000°C 이상의 고온에서 물성이 저하되지 않는 거의 유일한 재료이다. 이러한 탄소/탄소 복합재료는 현재 항공기 브레이크 디스크, 추진체 구조물, 인공 위성의 안테나 등에 이용되고 있는데, 이러한 분야에서의 탄소/탄소 복합재료의 독점은 지속될 것으로 예상된다[11].

탄소/탄소 복합재료의 단점은 소재의 가격 뿐만 아니라 공정을 반복해서 제작해야 되는 탄소/탄소 복합재료의 특성상 가격이 매우 높다는 점인데, 최근 단섬유를 이용한 저렴한 탄소/탄소 복합재료를 다른 분야에 이용하고자 하는 연구들이 진행되고 있다. Fig. 21의 내연기관의 피스톤이 그 예이다. 또한 높은 탄소의 열전도성을 이용하여 전자 제품의 보드에도 이용이 되는데 이 경우 빠른 속도로 열을 제거하는 특징을 가진다. 이 외에도 고온에서 이용할 수 있는 볼트나 너트 등도 탄소/탄소 복합재료로 제작되고 있으며, 생체재료에도 이용이 되고 있다[12].

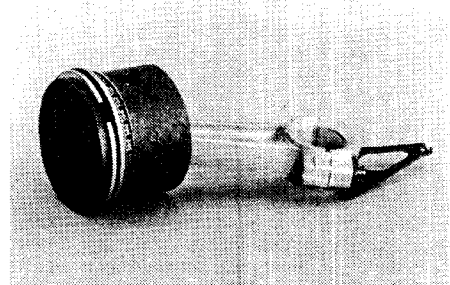


Fig. 21 Low cost, chopped fiber CCC piston an internal combustion engine.

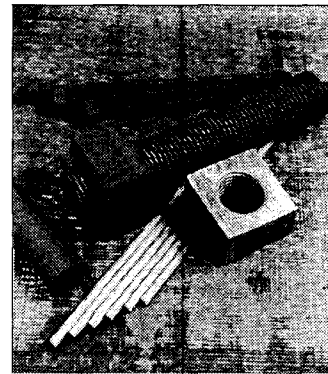


Fig. 22 CCC nuts, bolts, and rod fasteners for high temperature attachment and joining.

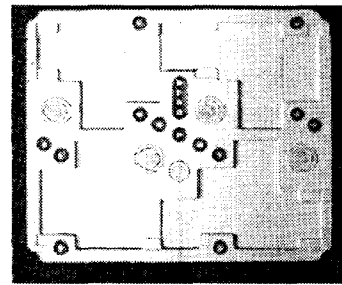


Fig. 23 MMC electronic packaging.

금속복합재료 분야에서도 새로운 응용분야에 대한 연구가 진행되고 있다. 일반적인 금속복합재료의 응용분야는 고강성이나 고내마모성이 요구되는 분야에 응용되었다. 그러나 최근 금속복합재료의 낮은 열팽창계수와 높은 열전도 특성을 이용하여 전자 패키징 소재로 이용하는 연구가 진행되고 있다.

전자 부품의 집적화에 따라 열발생량이 급증하며 이것은 전자 부품의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 높은 열전도 계수가 패키징 소재에 요구되게 되었다. 기존 PCB보드는 이러한 특성을 만족시킬 수 없으며 구리 등 열전도 계수가 큰 다른 소재들은 열팽창 계수나 밀도 등을 만족시키기가 어렵다. 금속복합재료는 보강재의 함량에 따라 열팽창 및 열전도 특성을 만족할 수 있는 소재로 최근 전자 패키징 분야에서 주목을 받고 있다. 현재 소재 개발은 끝난 상태 이나 가공성 향상을 위해 많은 연구들이 진행되고 있다.

5. 결론

신소재 산업은 21세기 핵심 기술의 기반이 되는 분야이다. 특히 복합재료는 신소재 분야 중 가장 성장율이 높은 분야로 주목 받고 있다.

현재 복합재료는 상대적으로 높은 생산 단가 때문에 응용분야가 제한되는 면이 있는데 21세기에는 새로운 공정의 개발과 공정 자동화가 가속화되어 이러한 문제가 해결될 것으로 기대하고 있다. 또한 나노 복합재료 등 새로운 복합재료의 개발도 기대되고 있는데 이러한 개발은 복합재료의 영역을 한단계 발전시킬 것으로 기대하고 있다.

이 외에도 바이오 복합재료, 스마트 스킨, 전자 패키징 등 다양한 BT, IT 분야의 응용 될 것으로 기대되며 건축 토목 등 대량 소재 소비 산업에 응용되어 21세기 소재 산업에서 복합재료의 비중이 더욱 커질 것으로 예상된다.

참고문헌

- 1) 기술혁신을 중심으로 한 국가 발전 전략, 과학기술연감, 제6호, 1997.
- 2) 임관, "21세기 한국 기계공학의 비전 및 발전 방향," *대 한기계학회춘계학술대회 논문집 A*, 2001.
- 3) Fiber placement : The path to affordability, *Sampe Journal*, Vol. 34, No. 3, 1998.
- 4) Global overview of fiber placement applications, *Sampe Journal*, Vol. 36, No. 4, 2000.
- 5) RTM : An affordable process, *Sampe Journal*, Vol. 35, No. 4, 1999.
- 6) Minoru Taya and Richardj. Arsenault, *Metal Matrix Composites : Thermomechanical Behavior*, Pergamon Press. 1989.
- 7) Anthony Kelly and Carl Zweben, *Comprehensive composite materials: Metal Matrix Composites*, Vol. 3, ELSEVIER, 2000.
- 8) Composite bridge structures of the future, *Sampe Journal*, Vol. 35, No. 4, 1999.
- 9) A glimpse into the world of innovative composite isotruss grid structure, *Sampe Journal*, Vol. 36, No. 5, 2000.
- 10) Metallics, Ceramics and Nanocomposites, *Sampe Journal*, Vol. 37, No. 5, 2001.
- 11) Anthony Kelly and Carl Zweben, *Comprehensive composite materials: Carbon/Carbon Composites*, Vol. 4, ELSEVIER, 2000.
- 12) Unique applications of carbon/carbon materials, *Sampe Journal*, Vol. 35, No. 5, 1999.