

# 복합재료 응용기술 및 현황

홍 창 선

## Technology and Status of Composites Applications

Chang-Sun Hong



- 홍창선(한국과학기술원 항공우주공학과)
- 1944년생
- 복합재료 역학 및 그 응용에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

복합재료기술은 그림 1에 나타낸 바와 같이 강화 섬유, 매트릭스 재료의 기술에서부터 설계제작에 이르기까지 여러 학문 분야가 복합적으로 필요하며 각 세부분야에 대한 연구를 위하여 학제간의 상호지식이 필요한 전형적이고 복합적인 기술분야이다. 기존 재료와 달리 복합재료를 이용하기 위하여는 소재기술의 발달과 그 특성에 대한 이해를 바탕으로 적절한 성형방법을 결정하고 원하는 구조물의 설계방법을 습득해야 복합재료의 장점을 살린 효율적 응용을 기대할 수 있

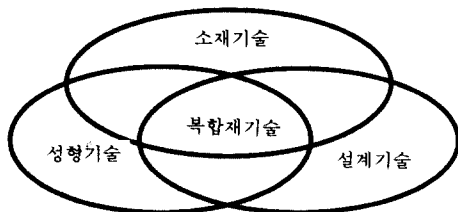


그림 1 복합재료기술의 구성

다. 고강도(high strength) 복합재료가 등장한 이래 많은 연구개발의 성과로 이제는 항공우주 구조물에서부터 자동차, 산업기계 등에 이르는 상업적인 응용이 본격적으로 시작되었다. 지속적인 소재기술의 발전으로 취약했던 여러가지 기계적 성질이 보완되어 그 응용의 폭이 넓어지고 있으며 재료의 신뢰성에 관련된 연구가 진전을 보임에 따라 응용되는 부분도 2차구조물(secondary structure) 위주에서 고하중을 지지하는 1차 구조물(primary structure)로 확대되고 있다.

이글에서는 복합재료의 소재기술, 성형제작, 기계적 특성 및 설계에 대한 연구경향과 응용에 대한 소개 및 최근에 관심을 끌고 있는 환경문제로 인하여 자동차와 같이 대량생산과 관련된 제품의 리사이클링(recycling), 그리고 복합재료 분야의 시장규모에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 복합재료 소재기술

고강도 섬유강화 복합재료는 섬유(fiber)와 매트릭스(matrix)로 구성되어 있으며 보

표 1 고성능 강화섬유의 성질

상표	종류	탄성계수 GPa	탄성강도 GPa	밀도 gm/cm <sup>3</sup>	압축강도 GPa
E-glass	유리	69	2.6	2.54	
Kevlar 49	아라미드	125	3.5	1.44	0.39, 0.48
Kevlar 149	아라미드	185	3.4	1.47	0.32, 0.46
Spectra 1000	폴리에틸렌	170	3.0	0.97	0.17
P-25	탄소	160	1.4	1.90	1.15
P-1000	탄소	725	2.2	2.15	0.48
T-300	탄소	235	3.2	1.76	2.88
T-1000	탄소	295	7.1	1.82	2.76
AS-4	탄소	235	3.6	1.80	1.96
Dupont E-130	탄소	900	3.9	2.19	
Toray M60J	탄소	585	3.8	1.94	1.67

강섬유로는 유리(glass), 탄소(carbon/graphite), 아라미드(aramid), 보론(boron), 폴리에틸렌(polyethylene)섬유 등이 있다. 일반 공업제품에는 가격이 저렴한 유리섬유가 많이 사용되고 있다. 고강도 및 고강성을 요하는 고급구조물에는 강화재로서 탄소섬유를 많이 사용하고 있으며 PAN(polyacrylonitrile)계 탄소섬유가 주류를 이루었으나 최근에는 보다 저렴한 피치(pitch)계 탄소섬유의 기술이 많이 발전하여 표 1에 나타낸 바와 같이 기계적 성질도 많이 개선되고 있다. 미국의 Dupont사는 고탄성 피치계 탄소섬유의 개발에서 인장 탄성계수가 900 GPa이고 인장강도는 3.9 GPa에 이르렀다고 이미 수년전 발표한 바도 있다. PAN계 탄소섬유의 탄성계수 378~400 GPa에 비하면 매우 높은 값이다. 그러나 아직도 PAN계 섬유의 압축성질이 우수한 것으로 알려져 있다. 일본의 피치계 탄소섬유 개발은 매우 활발하여 앞으로 가격의 저렴화는 일반 구조에의 응용에 크게 기여할 것으로 기대된다.

매트릭스재료에는 고분자재료, 금속재료, 세라믹/탄소 재료 등이 있으며 사용온도에 따라 매트릭스 재료의 선택을 하게 된다. 구조용 복합재료로 많이 사용하는 고분자계통

매트릭스로는 에폭시(epoxy) 계통의 열경화성수지(thermoset)와 PEEK 등의 열가소성수지(thermoplastic) 등이 있다. 특히 에폭시 계통 수지는 내열성이 150°C 밖에 안되고 취성인 단점이 있으며 이러한 점을 보완하여 개선된 높은 파괴인성치를 보이는 고인성 에폭시도 개발되어 주목을 받고 있다. 최근에는 저속충격후 잔류압축강도(CAI: compression after impact)를 그림 2에서 보인 바와 같이 많이 개선하였으며 계속해서 더욱 파괴인성이 높은 프리프레그(prepreg)가 개발되고 있다. 일반 산업용 수지(resin)로는 고온

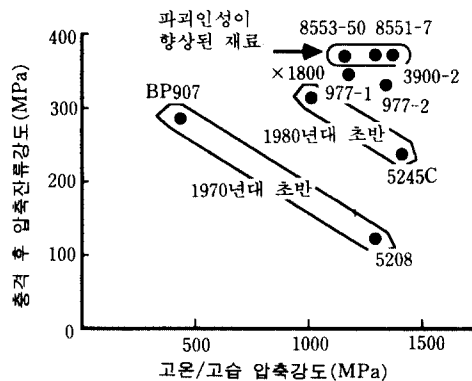


그림 2 고인성 재료의 개발 현황

에서 기계적 성질이 떨어지고 화염에 취약하고 화재시 악성가스를 유발하는 문제를 피해야 할 경우에 페놀(phenolics)이 매우 매력적인 선택이 된다. 페놀수지는 그 자체가 고온에 강하고 악성가스를 내뿜지 않기 때문에 안전을 특히 고려해야 할 건축 자재, 비행기, 선박 등 화재관련 규정이 까다로운 내장 구조에 많은 응용이 기대된다.

열경화성(thermosets) 복합재료는 리사이클링에 문제점이 있고 성형이 잘못되면 버려야 하고 다시 새 재료를 사용해야 하는 까다로움이 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위하여 GMT(glass mat thermoplastics)가 많은 관심을 끌고 있다. GMT는 유리섬유와 열가소성 수지로 이루어져 있어 광판처럼 똑같이 절단하여 보관하고 원할 때 성형

제작 할 수 있어 편리하고 또한 경량이고 화학물질 등 내부식성을 요하는 구조에 좋다. GMT는 표 2에 나타난 바와 같이 자동차에 이미 응용되고 있으며 앞으로 더욱 경량화를 원할 경우에 자동차를 비롯한 대량생산의 운송기계에 응용이 증가할 것으로 보인다.

극초음속 항공기 개발 및 우주연락선 등에 필요한 고온용 복합재료는 강도나 강성보다는 표 3에 나타난 바와 같이 고온기능을 요하는 것으로 금속계 복합재료, 세라믹 복합재료 특히 탄소/탄소(C/C: carbon/carbon) 복합재료의 연구가 활발하여 많은 발전을 이루고 있다. 에폭시보다 사용온도가 높은 BMI(bismaleimide)와 폴리이미드(polyimide) 등이 초음속이나 극초음속 항공구조물에 앞으로 많은 응용이 기대된다. 표 4에 폴리이미

표 2 1992~1997년 GMT 소비량(천톤)

지역	구분	1992	1993	1994	1995	1996	1997
유럽	자동차	14.0	15.0	16.2	17.4	18.7	20.0
	기타	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0
미국	자동차	20.0	22.0	25.2	29.0	33.0	38.0
	기타	2.5	2.8	3.0	3.5	4.0	5.0
기타 지역	자동차	3.4	4.0	5.5	7.5	10.0	15.0
	기타	1.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
총계		42.0	46.0	54.0	62.5	72.5	87.0
성장률 (%)			+9.5	+17.4	+15.7	+16.0	+20.0

표 3 복합재료의 허용온도

Polymer matrix composites (PMC)	polyimide 250~316°C
Metal matrix composites (MMC)	Al and Ti matrices with continuous boron, carbon, SiC-and AL2O3-fibers SiC/Ti-6Al-4V 650°C
Glass matrix composites (GMC)	borosilicate glass matrices with carbon- or Sic-fibers, alumino-silicates(AS) 500°C lithium-alumino-silicatesm(LAS) 1100°C
Ceramic matrix composites (CMC)	1200°C
Carbon/carbon composites (C/C)	1200°C, 2000°C·short duration

표 4 열경화성 Polyimides의 사용온도

Polyimide	T <sub>g</sub> , C	1000 hr	10,000 hr	Resin Manufacturers
PMR-15	343	315	260	HyComp, American Cyanamide Hexcel, ICI, Du Pont
PMR-II-50	385	357	300	HyComp, Daychem Labs Du Pont, SP Systems
VCAP-75	370	357	300	HyComp, Daychem Labs SP Systems
AFR-700B	393	370	315	Hycomp, SP Systems
RP-46	397	343	288	NASA-Langley
TRW-R-8xx	450	TBD	TBD	Hycomp, via TRW license

드계 수지의 사용온도 범위를 보면 에폭시계보다 높음을 알 수 있다. C/C 복합재료는 로켓 노즐처럼 고온에 좋고 또한 내열 및 내마멸성이 요구되는 항공기용 브레이크에 사용한다. 최근에는 우주용 구조의 환경이 구조의 두께 방향으로 많은 온도차이를 유발함에 따라 구조의 표면과 내부의 온도차이에 따른 열적인 문제를 해결하기 위하여 재료의 성질이 균질이 아니고 두께방향에 따라 다른 경사기능재료(FGM: functionally gradient material)의 개발이 일본에서 주로 이루어지고 있다.

### 3. 복합재료 성형기술

복합재료의 사용은 성능과 생산성으로 이어지는 중요한 이점을 가져다 준다. 예를 들면 복합재료는 설계의 유연성과 복합재료의 물성을 재단할 수 있어서 새로운 설계개념을 실현시킬 수 있는 유일한 재료가 되기도 한다. 시장의 점유율을 높이기 위하여 새로운 재료를 개발하기보다는 현재의 복합재료 시스템을 충분히 효과적으로 사용하는 것도 바람직하며, 물론 새로운 재료 시스템이 고성능 고생산성의 필요를 충족하면 충분한 시장 기회를 가질 것이다. 고생산성의 필요성은

열가소성 복합재료(thermoplastic composites)와 같이 제품 제작이 쉬운 복합재료의 재료개발과 그 성형법의 연구와 연관되며 고성능의 필요성은 폴리이미드와 같은 고분자 재료의 개발, 금속복합재 및 세라믹 복합재 등과 같은 고온용 복합재료의 연구와 연관시킬 수 있다.

고분자 복합재료 적층 및 부품성형은 형태에 따라 일반적으로 고강도를 요하고 복잡한 형상일 경우에 오토클레이브(autoclave)를 사용하며, 축대칭인 형상이면 필라멘트 와인딩(filament-winding)을 이용하여 제작하며 단면이 일정하면 펄트르전(pultrusion)을 사용하고 최근에는 특히 경제성을 기대할 수 있는 RTM(resin transfer molding) 기법이 주목을 받고 있다. 고강도를 요구하는 구조물에 사용하는 오토클레이브 성형은 에폭시 같은 고분자 재료에 일방향으로 배열된 탄소(graphite) 섬유를 함침시킨 프리프레그를 사용하여 제작된다. 일방향으로 배열된 프리프레그를 원하는 섬유방향을 가지도록 절단하여 정해진 적층순서(stacking sequence)에 따라 적층한 후에 적절한 온도와 압력을 가하면 복합재료 적층판이 얻어진다. 적절한 온도와 압력을 가하는 과정을 성형사이클(curing cycle)이라고 하며, 성형사이클은

프리프레그의 종류, 특히 사용되어진 모재의 특성에 따라 변하게 된다. 성형과정은 화학적 과정과 물리적 과정을 포함하고 있다. 화학적 과정은 선형 분자구조를 가진 B-stage epoxy에 열을 가하여 분자구조간의 cross-link를 유발시키는 중합화(polymerization) 과정이며, 물리적 과정은 프리프레그에 포함되어 있는 여분의 수지를 제거하는 과정이다. 여분의 수지를 제거하기 위해서 B-stage epoxy의 점성(viscosity)이 가장 낮아지는 온도에서 압력을 가하게 된다. 성형과정에서 여분의 수지를 흡수하기 위한 블리더(bleeder)와 몰드(mold)와의 이형을 쉽게 하는 테프론 필름(teflon film) 등의 성형 보조재료가 필요하다. 복합재료 제품의 성형시에 복잡한 구조물의 일체성형을 할 수 있기 때문에 부품수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이러한 오토클레이브 성형은 고강도 제품의 성능은 우수하지만 성형시간이 오래 걸리며 가격을 줄이는데 한계가 있어 대량생산 품목에는 불리하여 좀더 빠르고 경제적인 성형방법이 필요하다.

고강도 및 고강성을 필요로 하는 구조물은 일방향 프리프레그로 정축한 구조의 형태로 성형제작하는데 이와 같이 여러 층으로 구성된 적층의 특성 중의 하나는 층과 층이 낮은 매트릭스 강도로 인하여 분리되는 현상이 있다. 이러한 층간분리(delamination)를 억제하기 위한 수단으로 삼차원 직물(3-dimensional fabric) 형태의 방직기술도 주목을 받고 있다. 삼차원 직물에는 얇은 여러 층으로 구성된 적층과 달리 섬유배열이 삼차원으로 서로 얽혀 구성되어 있어 층간분리 현상을 걱정할 필요가 없다. 삼차원 직물에 수지를 침투시키는 RTM기법을 사용하여 성형제작에 따른 시간과 경비의 절감을 기대할 수 있다. 자동차 등 대량생산에 범용으로 사용하는 방법으로는 SMC(sheet mold compound) 방법을 많이 사용하였으며 앞으로 RTM기법의 응용이 기대된다.

최근에 연구가 시작된 지능 복합재료(smart composites) 개발기술은 역학적 해석뿐만 아니라 복합재료 기술, 광섬유 센싱 기술, 제어기술 등의 여러 분야가 복합되어 있다. 지능 복합재료를 구성하기 위한 매체로는 광섬유를 복합재료 구조물에 성형시에 삽입·제작하여 작용하는 기계적·전기적·음향적·자기적·열적 영향 등의 여러 물리적 외란(perturbation)을 측정하기 위한 센서 매체로서 최근 각광을 받고 있는 광섬유는 통신용으로 이미 널리 사용되고 있으며 다른 여러가지 기술분야에 응용이 기대되는 복합기술이다. 광섬유는 복합재료의 강화섬유와 비슷한 물리적 성질을 갖고 있어 삽입시에 발생할 수 있는 문제가 다른 어느 매체보다 우수하다. 지능복합재료의 제작은 광섬유 삽입시에 구조에 미치는 영향 등을 파악하여 본래 구조의 기능을 저하시키지 않도록 제작하여야 한다. 광섬유를 복합재 구조 성형시에 삽입하여 사용중에 생기는 변형, 손상 등을 실시간 모니터링하여 자가진단할 수 있는 지능구조는 손상탐지 및 처리기술의 획기적인 방법으로 앞으로 더 연구를 해야 실용화가 기대된다.

#### 4. 복합재 구조 손상해석 및 설계

복합적층판은 섬유방향으로는 큰 하중을 견딜 수 있으나 섬유와 수직인 방향으로는 매우 취약한 특성을 갖는다. 이러한 직교이방성 단층들을 각각 서로 다른 방향으로 차례대로 배열하여 적층한 복합적층판은 방향에 따라 서로 다른 강도와 강성을 갖게 된다. 따라서 복합재료 구조물은 등방성 재료와는 달리 재료의 성질을 설계자가 조절할 수 있으므로 적층판을 효율적으로 설계한다면 복합재료의 뛰어난 비강도와 비강성으로 인하여 동일한 구조적인 특성을 유지하면서도 상당한 중량감소 효과를 얻을 수 있다. 또한 복합재료는 금속재료에 비하여 월등한

내부식성(corrosion resistance) 및 내피로(fatigue resistance) 특성과 내마멸성(wear resistance)을 갖고 있으며 온도 변화에 따른 열팽창도 매우 적고 열전도가 잘 안되는 특성이 있다.

복합재료의 주요 구조물에 대한 적용이 확대됨에 따라 하중을 크게 받게 되고 따라서 적층수가 많은 두꺼운 복합적층판의 사용이 증가하고 있다. 이와 같이 복합재료의 사용이 점차 증가함과 더불어 복합적층 구조를 적합하게 설계하기 위해서는 다양한 설계변수가 구조물에 미치는 영향에 대한 세밀한 검토가 필요해졌다. 그리고 적용하중에 대한 구조물의 거동을 예측하기 위한 적절한 해석 방법, 손상진전해석과 실시간 손상탐지기술의 필요성도 증대되었다.

### 5. 리사이클링

환경에 대한 관심이 고조되어감에 따라 복합재료업계도 이 분야에 많은 연구가 필요하게 되었다. 업계가 환경문제에 올바르게 대응하기를 바라는 기대와 어우러져 각국 정부의 건강과 안전에 대한 입법조치는 세계적인 경향이다. 고분자 복합재는 쉽게 열화되거나 부서지지 않는 고분자의 특성이 장점인 되어 많은 제품에 사용되지만 반면에 이 재료는 운용수명(in-service life)이 길어 환경문제를 야기하고 있다. 특히 열경화성 수지계 복합재는 재생형이 불가능하여 리사이클링에 어려움이 많다. 열가소성 수지계 복합재는 재생형의 강점으로 인하여 이론적으로는 직접적이고 효과적인 리사이클링이 가능하다. 이러한 이유로 GMT(glassfiber mat thermo-plastics)가 많은 부분의 리사이클링에 관한 법률규제를 받는 자동차분야에서 관심을 끌고 있다. (표 2 참조)

업계에서 고려하는 리사이클링 방법으로는 분쇄(pulverization)와 열분해(pyrolysis)가 있다. 분쇄는 잘게 부수어 선별하는 과정을

거쳐 균일한 입자 크기를 갖는 filler로 구분되어 SMC재료로 사용된다. 열분해는 경비가 많이 드는 방법으로 열경화성 복합재로부터 유성분, 보강섬유, 또는 filler를 분리하는 것을 목표로 한다. 미국자동차 업체들은 1988년 기준으로 2백만 톤의 플라스틱이나 고무를 사용한 것으로 알려져 있어 폐기물관리가 업계의 중용한 사안임을 보여주고 있다. 분쇄와 열분해의 몇 가지 단점들 때문에 폐기물관리에 관한 더 많은 연구가 필요한데, 이 두 방법은 많은 에너지를 소비하므로 상대적으로 비싼 filler를 SMC/BMC 업체가 얼마나 사용할지 등의 제약이 있다. 최근 일본에서는 열가소성복합재(FRTP: fiber reinforced thermo-plastics)의 폐쇄형 리사이클링 개념이 도입되고 있다. 그림 3과 같이 고부가가치의 연속섬유 FRTP 부품이 수명을 다하면 절단 재생형을 통하여 중부가가치 제품으로 활용하고 이후 몇 단계를 거친 후 최종단계에서 유성분과 filler로 구분 재 활용하는 개념이다. 이를 위하여 재활용 평가 체계에 대한 연구가 그림 3의 오른편처럼 진행되어야 한다.

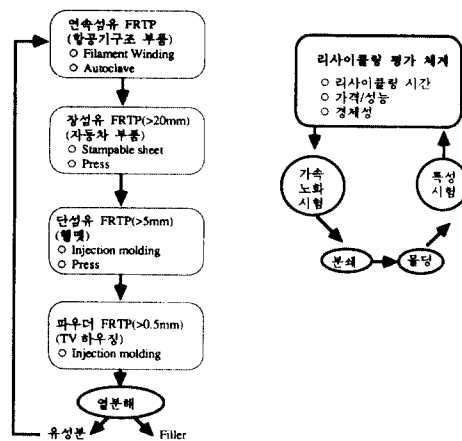


그림 3 열가소성 복합재의 폐쇄성 리사이클링 개념

6. 시장동향

복합재료 제품은 항공우주 및 방산제품에 사용되는 고등 복합재료와 산업용 및 건축자재와 같은 용도로 사용되는 범용복합재료로 대별할 수 있다. 고등 복합재료로는 탄소섬유, 아라미드 섬유와 같은 고강도 고강성섬유에 고온에서 성형하여 넓은 온도범위에서 바이너로서의 역할을 충분히 수행하는 에폭시 또는 PEEK와 같은 기지재료로 구성된 복합재를 지칭하며 범용복합재료는 유리섬유에 폴리에스터, 비닐에스터, 페놀과 같은 비교적 값이 저렴한 기지재료로 구성된 복합재를 지칭한다. 1992년도 세계의 복합재 시장규모는 표 5와 같이 출하량 기준 370만 톤, 금액기준 약 690억 불에 이르리라 추정된다. 또한 향후 1997년까지의 보수적 성장률을 가정하여도 표 6과 같은 규모를 보이리라 예측된다. 기지재료가 고분자가 아닌 금속복합재나 세라믹 복합재는 아직 상품화된 제품이 많지 않으나 꾸준한 연구를 통하여 고분자 복합재에 비하여 높은 온도에서 사용할 수 있는 이점이 있어 향후 제품화되어 그 시장규모의 성장률은 표 7에 나타난 바와 같이 상당히 높으리라 전망된다.

범용복합재의 대표적 전용사례인 자동차용 부품의 시장규모를 살펴보면 표 8과 같이 자동차의 연비향상 및 성능향상을 위하여 복합

표 5 세계 복합재료 출하량과 시장규모('92년도)

	출하량(천톤)	시장규모(억 \$)
대양주	40	7.4
극동/인도	384	71.0
일본	659	122.0
중동	220	40.7
아시아(위지역제외)	65	12.0
미국	1116	206.5
유럽	384	181.4
기타	275	50.9
총계	3734	690.9

표 6 세계 복합재료 출하량과 시장규모 예측

	1993	1994	1995	1996	1997
연평균 성장률(%)	4.2	4.2	4.7	4.7	5.3
출하량(천톤)	3890.0	4054.0	4254.0	4444.0	468.0
시장규모(억불)	743.0	802.0	870.0	942.0	1029.0

자료 : Composites : A profile of the worldwide reinforced plastics industry

표 7 미국의 고등복합재료 시장규모, 1987~2000 (단위 : 백만 불)

	1987	1993	2000	연평균성장률 (%)
고분자 복합재	2,778	5,431	9,072	9.5
금속 복합재	-	69	229	18.7
세라믹 복합재	39	203	627	17.5
계	2,817	5,703	9,928	10.2

표 8 세계 자동차용 복합재료 출하량 예측(1992~1997년)<sup>(1)</sup>(천톤)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997
유럽	140.0	150.5	161.8	174.0	187.0	201.0
일본	20.8	22.3	24.0	25.8	27.7	29.8
미국	265.3	285.2	306.6	329.6	354.3	380.9
기타	31.2	33.5	36.0	38.7	41.6	44.7
총계	457.3	491.5	528.4	568.1	610.6	656.4
자동차당 평균(Kg)	9.3	10.0	10.8	11.6	12.4	13.4

자료 : Composites : A profile of the worldwide reinforced plastics industry

재의 사용비율이 꾸준히 증가하리라 예측된다. 향후 개발될 전기자동차는 이보다 훨씬 높은 비율의 복합재 사용이 필수적이므로 이 분야의 연구개발투자가 선행되어야 할 것이다.

국내의 복합재 시장은 탄소섬유 복합재의 경우 스포츠 용품과 항공용 부품이 주를 이루고 있으며 유리섬유 복합재 시장은 건축자재, 전자회로기판, 스포츠용품이 주를 이루고 있다. 금속복합재 및 세라믹 복합재는 향후 자동차용 부품과 고온용 마찰재 등의 제품화 개발로 그 성장률은 상당히 높으리라 기대된다.

### 7. 맺음말

복합재료 제품의 응용은 현재 약 5만 종에 이르나 새로운 소재, 성형기술의 개발로 점차 응용범위가 더 확대되어 가고 있으며, 복합재료 시장의 규모도 항공우주 분야뿐 아니

라 산업적 응용의 촉진으로 높은 성장이 예측된다. 아울러 새로이 고조되는 환경적 기대에 부응하여 리사이클링이나 폐기물 관리를 염두에 둔 연구개발이 필요하다. 복합재료 제품의 개발은 여러 학문 분야가 복합적으로 필요하며 각 세부분야에 대한 연구를 위하여 학제간의 상호지식이 필요한 전형적인 기술분야이므로 관련된 소재기술과 성형기술을 파악하여 복합재의 장점을 살린 설계/해석이 필요하다.

### 참고문헌

- (1) Composites : A Profile of the Worldwide Reinforced Plastics Industry, Elsevier Advanced Technology(1992).
- (2) Business Communication Report.
- (3) Journal of the Japan Society for Composite Materials, Vol. 20, No. 1(1994). 