

섬유강화 복합재료와 자동차 산업에의 응용

Fiber Reinforced Composites and Their Applications to Automotive Industry

이 우 일*
Woo Il Lee

1. 서 언

복합재료는 두 가지 이상의 재료를 섞어 만든 어떤 원하는 성질을 가진 재료를 일컬으며, 자연적 복합재료로서 목재등이 있어 예전부터 사용되어 왔으나, 2차대전 이후 우주 항공산업의 급격한 발전으로 재료의 경량화 문제가 대두되면서 그 물성에서 빠른 발전을 거듭해 왔는데, 이는 재료과학의 발달로 말미암아 새로운 섬유와 Polymer를 위시한 소재의 개발에 기인한다. 최근 부품 소재로서 각광받고 있는 섬유강화 복합재료는 그림 1에서와 같이 보강섬유(Reinforcing Fiber)와 이들을 서로 접착시키고 형태를 갖추게 하기 위한 기지재료(Matrix)로 이루어지며, 보통 보강섬유는 기계적으로 아주 강하고 기지재료는 비교적 약하나 파괴 특성등이 우수해 서로 보완적인 관계에 있다.

보강섬유로는 가장 오래된 유리섬유를 비롯하여, 탄소섬유(Graphite Fiber, 혹은 Carbon Fiber), Kevlar섬유, Boron섬유 및 Ceramic계 섬유(Silicon Carbide섬유, Alumina 섬유 등)들이 주로 쓰이며, 기지재료로는 범용으로 많이 사용되는 Unsaturated Polyester, Vinyl Ester 등과 비교적 고가인 Epoxy, Nylon, 또 고온용의 Phenolic, Polyimide 수지들의 Polymer 들

이 주종을 이루는데, 이외에 Aluminum을 비롯한 금속과 Ceramic들도 사용된다. 보강섬유는 연속적인 형태로 사용되는 경우도 있고(Continuous Fiber), 짧게 자른 형태로 쓰이는 경우도 있는데(Chopped Fiber) 보통 기계적 성질 면에서는 Continuous Fiber쪽이, 가격면에서는 Chopped Fiber쪽이 우수하다. 이외에 섬유형태는 아니나, Whisker 등이 보강재료로 쓰이기도 한다.

섬유강화 복합재료는 그 사용되는 기지재료에 따라 Polymer 기지 복합재료(Polymer Matrix Composite, 혹은 Fiber Reinforced Plastic, FRP라고도 함), 금속 기지 복합재료(Metal Matrix Composite, 혹은 Fiber Reinforced Metal, FRM), Ceramic 기지 복합재료(Ceramic Matrix Composite, 혹은 Fiber Reinforced Ceramic, FRC) 등으로 나눌 수 있다. 현재까지는 Polymer 기지 복합재료가 주로 쓰이고 있으나, 고온용 등 특수용도로 금속기지 및 Ceramic 기지 복합재료들에 대한

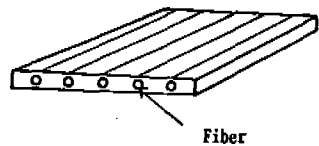


그림 1. 복합재료의 구조

* 정희원 서울대학교 기계공학과

연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

보강섬유 중 그 사용량에 있어서는 범용 FRP 때문에 유리섬유가 으뜸이나, 고성능복합재료(Advanced Composite Material)와 관계되어 가장 많이 쓰이는 것은 탄소섬유이다. 탄소섬유는 현재까지는 가격 때문에 주로 우주항공용 부품 및 고급 스포츠 용품 등에 사용되어왔으나 새로운 섬유 제조기법의 개발로 그 가격이 현저히 떨어질 것으로 기대되어(현재 약 \$30/kg에서 \$10/kg 이하로), 자동차산업 등 대 수요 시장으로의 응용이 보다 본격화될 전망이다.

기지재료로 주로 쓰이는 Polymer 재료는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 열경화성 수지(Thermosetting Resin)과 열가소성 수지(Thermoplastic Resin)이 그것이다. 열경화성 수지는 반응이 일어나기 전에는 액체 상태이다가, 열을 가해 화학반응이 일어나면 굳어지게 되는데, 앞서 말한 Unsaturated Polyester, Vinyl Ester, Epoxy, Phenolic, Polyimide 등이 여기 속하며, 상온에서 액체 상태이므로 보강섬유와 쉽게 섞을 수 있고, 경화 반응 후에는 기계적, 열적 성질이 우수한 장점이 있는 반면, 일단 경화가 되면 다시 돌이킬 수 없다는 단점도 가지고 있다. 한편 열가소성 수지는 이미 화학 반응이 완결된 상태이며 상온에서 고체로 존재하다가 열을 가해 온도가 올라가면 녹거나 부드러워지는 특징을 지니고 있고 Nylon, ABS, Polyethylene, PEEK, PPS 등이 있다. 이들 수지의 특성은 복합재료의 물성 및 제조공정의 선택과도 직접 연관이 되므로 충분히 파악되어야 한다.

이 글에서는 가장 많이 사용되는 유리섬유 및 탄소섬유 강화 Polymer 기지 복합재료를 중심으로 그 특징 및 제조 방법과 자동차 산업에의 응용 가능성과 응용 현황을 설명하고자 한다.

2. 섬유강화 복합재료의 특징과 제조 방법

섬유강화 복합재료의 가장 큰 특징은 그 우

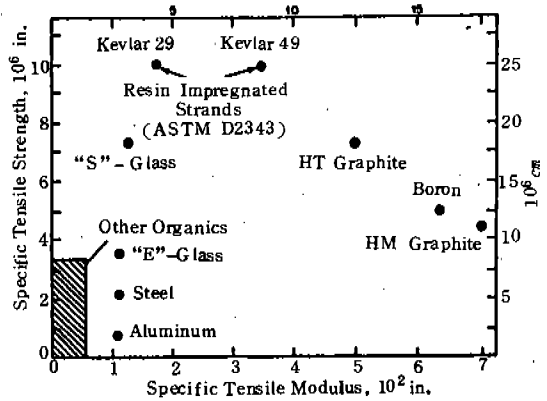


그림 2. 복합재료 보강섬유와 금속재료의 단위 무게당 기계적 성질

수한 기계적 성질에 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 보강섬유와 높은 무게비강도 및 강성도(Specific Strength and Modulus) 때문에 복합재료도 기존 금속재료에 비해 높은 무게비강도 및 강성도를 가지고 있다. 표 1에 대표적인 섬유강화 복합재료의 물성치들이 소개되어 있다. 또한 복합재료의 기계적 성질은 섬유의 배열 방향에 따라 달라져 탄소섬유 강화 Epoxy의 경우 섬유방향과 그 직각 방향과는 강성도가 약 20배 정도 달라지게 되어 심한 이방성(Anisotropy)이 존재하게 되므로 그 설계가 금속재료와는 많이 달라지게 되며, 적절한 섬유 방향을 선택하면 더욱 더 경량화 효율을 높일 수 있다. 복합재료는 부품의 무게 감소 효과외에 긴 피로 수명, 우수한 진동 감쇠 특성 등 여러 가지 다른 우수한 기계적 성질들을 가지고 있다. 그외에 내식성이 높으며, 전기절연성이 우수한 것 등 여러 면에서 장점을 지니고 있다. 이러한 소재의 장점들로 인하여, 복합재료로 만들어진 구조물이나 부품들은 경량, 고강도, 내식성 등의 특징을 지닌다.

또 복합재료 구조물은 그 제조공정이 금속재료 부품에 비해 비교적 간단하며 복잡한 형상을 쉽게 만들 수 있으므로 부품의 수효가 많이 줄어들게 되어(Parts Consolidation) 부가적인

표 1. 대표적인 복합재료들의 물성치

보 강 섬유	Kevlar 49	E-Glass	Graphite
Density, lb/in ³ (g/cm ³)	0.050 (1.38)	0.075 (2.08)	0.055 (1.52)
Tensile strength 0°, 10 ³ psi(MN/m ²)	200 (1,378)	160 (1,102)	180 (1,240)
Compressive strength 0°, 10 ³ psi(MN/m ²)	40 (276)	85 (586)	160 (1,102)
Tensile strength 90°, 10 ³ psi(MN/m ²)	4.0 (27.6)	5.0 (34.4)	6.0 (41.3)
Compressive strength 90°, 10 ³ psi(MN/m ²)	20 (138)	20 (138)	20 (138)
In-plane shear strength 10 ³ psi(MN/m ²)	6.4 (44.1)	9.0 (62.0)	9.0 (62.0)
Interlaminar shear strength, 10 ³ psi(MN/m ²)	7~10 (48.2~68.9)	12 (82.7)	14 (96.5)
Poisson's ratio	0.34	0.30	0.25
Tensile and compressive modulus 0°, 10 ⁶ psi(MN/m ²)	11 (75,790)	5.7 (39,270)	19 (130,900)
Tensile and compressive modulus 90°, 10 ⁶ psi(MN/m ²)	0.8 (5,512)	1.3 (8,960)	0.9 (6,200)
In-plane shear modulus, 10 ⁶ psi(MN/m ²)	0.3 (2,070)	0.5 (3,445)	0.7 (4,820)

조립 공정이 많이 생략되게 되고 Sheet Metal 성형의 경우보다 금형 값이 월등히 적어 생산원가를 낮출 수 있다는 장점도 지니고 있다.

복합재료의 제조방법은 제품의 형상에 따라 아주 많고 또 계속 새로운 공정이 개발되고 있으나 주요한 제조방법을 열거해 보면 다음과 같다.

Hand Lay-up 및 Spray-up : Hand Lay-up 은 그림 3에서와 같이 Open Mold 위에 적절한 이형처리를 한 후 그 위에 보강섬유(보통 직물 형태로 되어 있음)와 수지를 잘 섞어 Roller 등으로 밀며 원하는 두께까지 한 층씩 수작업에 의해 쌓아나가는 방법을 말하며 Spray-up은 이 방법을 약간 자동화하여 Chopped Fiber와 수지의 혼합물을 Spray Gun 등으로 뿌려 나가는 방법이다. 이들 방법은 대형구조물을 손쉽게 만들 수 있다는 장점은 있으나 생산성이 낮고 제품의 기계적 성질이 균일하지 않아 Prototype 제작용 등 외에는 자동차 산업에서는 별로 사용되지 않는다.

Matched Die Molding(Compression Molding) : Sheet Metal의 성형에서처럼 표면이 잘 가공된 압, 수의 Molding Die 사이에 보강섬유와 수지의 혼합물을 넣고 온도를 올리고 Press에서 압력을 가해 성형하는 방법이다(그림 4). 이 때 보강섬유와 수지의 혼합물은 그

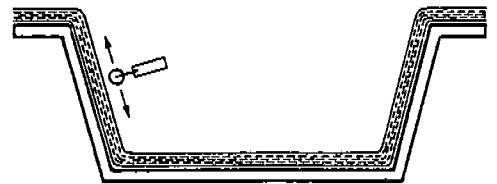


그림 3. Hand Lay-up 공정

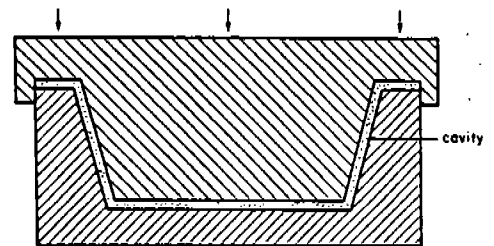


그림 4. Matched Die Molding 공정

형태에 따라 Bulk Molding Compound(BMC)와 Sheet Molding Compound(SMC) 등으로 나눈다. BMC는 Dough Molding Compound(DMC)라 부르기도 하는데, 보강섬유와 수지를 적당한 비율로 섞어 만들어지며, Putty상태이다. SMC는 보강섬유와 기지재료의 혼합물이 얇게 퍼진 Sheet 모양으로 된 것으로(그림 5) 보강섬유의 수지에 대한 비율을 높일 수 있어 BMC에 비해 제품의 기계적 성질이 우수하며, 다루기가 쉽고 대량 생산에 적합해 Panel이나 Bumper 등 자동차 부품 생산용으로 많이 쓰이고 있다. SMC는 좋은 표면을 얻기 위하여 Molding 시 높은 압력을 필요로 하는데(1,000psi 이상), 큰 부품의 제조를 위하여는 대용량의 Press가 필요하게 된다. SMC의 변형된 형태로 SMC보다 훨씬 두꺼운 Sheet를 만들 수 있는 TMC(Thick Molding Compound), Chopped Fiber 대신 Continuous Fiber가 사용되는 XMC 등이 있다.

Bag Molding : 이 방법에는 Vacuum Bag Molding, Pressure Bag Molding, Autoclave Molding 등이 있는데 보강섬유와 수지의 혼합물을 밀폐된 Bag으로 싸 다음 Bag 안에 진공을 걸거나(Vacuum Bag Molding), Bag 바깥쪽에 압력을 가하거나(Pressure Bag Molding), Bag 안에는 진공을 걸고 Bag 바깥에는 압력을 가하는(Autoclave Molding) 방법들이 있다(그림 6 참조). 이 방법은 Die를 비교적 쉽게 제작할 수 있고 진공을 걸 경우 수지에 남아 있던 휘발성 물질을 제거할 수 있다는 장점은 있으나, 대량생산에는 적합하지 못한 단점도 가지고 있다. 이 중 Autoclave Molding은 우주항공용 등 고성능 복합재료(ACM) 부품 제조용으로 가장 많이 쓰이는 방법이다.

Filament Winding : Filament Winding은 축대칭인 형상의 부품을 만드는데 사용되며, 그림 7에서와 같이 미리 연속 보강섬유에 수지를 묻혀 Mandrel 위에 감는 방법이다. Rocket Motor Case, 압력용기 등이 이 방법으로 만들어지며 자동차용으로는 Drive Shaft, LPG Gas Tank 등이 이 방법으로 제조된다.

Pultrusion : 그림 8에서와 같이 섬유에 수지를 묻혀 Die를 통해 뽑아내는 방법인데, Angle, Tube 등의 구조재를 연속적으로 만들어 낼 수 있다. 이 방법의 변형으로 Pulforming이 있는데 Leaf Spring의 제조에 응용되고 있다.

이상에 설명한 방법들외에 보강섬유/수지의 혼합물을 Plastic의 경우처럼 Injection Mold-

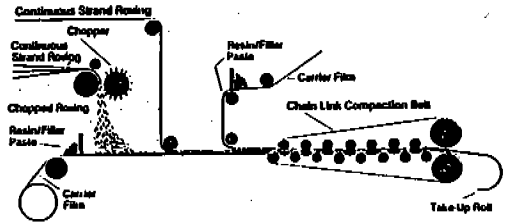


그림 5. SMC의 제조 방법

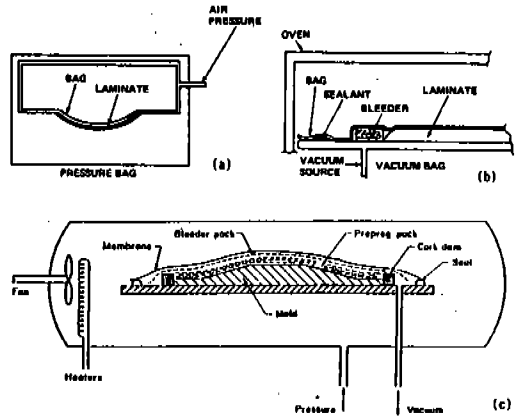


그림 6. Bag Molding 공정

- (a) Pressure Bag Molding
- (b) Vacuum Bag Molding
- (c) Autoclave Molding

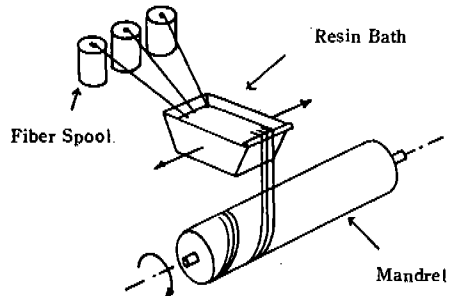


그림 7. Filament Winding 공정

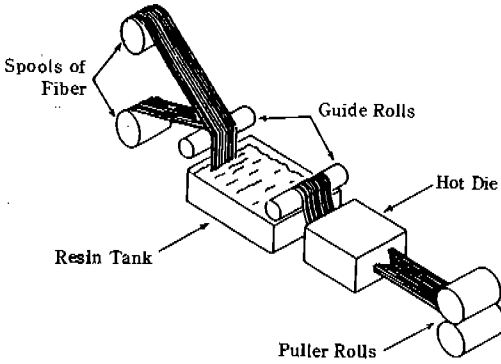


그림 8. Pultrusion

ing, Transfer Molding 등을 하여 여러 제품을 만들 수 있는데, 복합재료의 제조 방법은 기지재료의 성질을 비롯해 만들어질 제품의 형상, 수량, 요구되는 기계적 성질 등에 따라 각각 다르게 선택되어야 한다.

3. 섬유강화 복합재료의 자동차 산업에의 응용과 전망

근래의 에너지 위기로 자동차의 연료 절감은 필수적인 과제로 대두되어 왔으며 이의 해결을 위하여는 고효율의 엔진과 더불어 경량화된 차체 및 부품을 이용한 자동차 중량의 감소가 필수적이다. 이에 따라 가벼운 구조재료로서의 복합재료가 자동차 산업계의 관심사가 되어 왔는데, 제조공정의 개념이 기존 공정과 많이 다르고 재료의 원가가 비싼 점들 때문에 본격적인 응용이 미루어져오고 있으나 탄소섬유 가격의 하락으로 전술한 바와 같이 가격이 \$10/kg 이하가 되면 그 응용이 매우 늘어날 전망이다. 그림 9에서와 같이 현재에도 차체 총 중량의 7% 내외에서 복합재료 및 Plastic이 쓰이고 있고 그 추세 및 현재 이루어지고 있는 기술 개발 등으로 보아 앞으로도 그 비율이 계속 급격히 늘어날 전망이다. 자동차 부위별로 복합재료의 응용 현황과 전망을 살펴보면 다음과 같다.

차체 : GM의 Fiero는 그 차체가 전부 복합재료로 만들어져 있으며, Sports Car인 GM의 Corvette도 차체가 복합재료로 이루어져

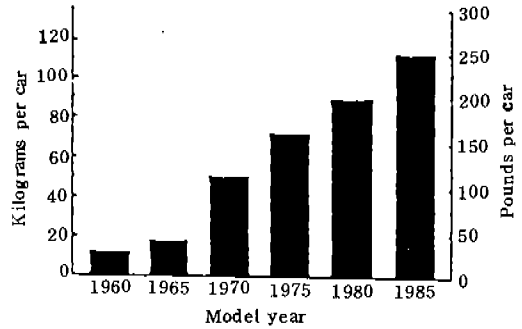


그림 9. 복합재료 및 Plastic의 자동차에의 응용 추이(GM사의 경우)

있다. Motor Home의 Body는 전체가 복합재료로 만들어진 경우가 많으며, 특히 Trailer 등에는 일찍부터 유리섬유 강화복합재료가 사용되어 왔다. Chassis 및 Body를 완전히 고성능 복합재료로 만들려는 시도는 여러 모델의 승용차에 대하여 이루어지고 있으며, 예로써 Ford사의 LWV(Light Weight Vehicle) Program은 탄소섬유강화 복합재료의 자동차에의 응용 가능성에 대한 연구가 그 목적이었다. Ford에서는 Ford LTD sedan의 Frame을 비롯한 차체를 전부 탄소섬유강화 복합재료로 시험 제작해 본 결과 약 50%의 중량감소효과를 얻은 바 있다. 현재 판매되고 있는 GM Fiero의 경우에는 차체를 강철제 Frame 위에 SMC를 위주로 만든 약 20개의 부품으로 이루어진 외관을 씌워 만드는데, 이렇게 함으로써 차 형상(Model)을 쉽게 바꿀 수 있다는 점외에 중량의 감소는 물론, 사용 부품의 현저한 감소, 내식성 등의 잇점이 있다.

엔진 : 복합재료는 엔진 부품용으로도 연구되고 있는데 Metal Matrix Composite 혹은 Ceramic Matrix Composite 등은 엔진의 고온 부위의 응용이 연구되고 있으며, 엔진 밸브 Pushrod 등 비교적 저온용의 엔진 부품에는 경주용차에 Polymer 복합재료가 이미 사용된 바 있다. 엔진의 움직이는 부분의 중량의 감소는 그 효과가 연속적으로 과급되어 다른 부품의 설계 한도도 낮출 수 있으므로 더욱 더 중량의 감소에 기여할 수 있고 고속회전이 가능하게

되어 엔진 출력이 보다 높아지게 된다.

현가장치 : 유리섬유 혹은 탄소섬유 복합재료로 만들어진 Leaf Spring은 이미 실용화 단계에 있으며, 전용 제작기계인 Pulforming Machine도 판매되고 있다. Coil Spring 및 Torsion Bar도 이미 제작된 바 있으며, 이러한 복합재료로 만들어진 Spring은 금속제보다 경량이며 피로 수명이 길고 녹이 슬지 않는다는 장점을 가지고 있다.

동력전달장치 : Driveshaft는 운행시 회전하게 되므로 그 동적인 특성이 매우 중요하다. 특히 차대가 긴 경우에는 Driveshaft는 길어져서, 자중에 의한 처짐 때문에 회전시 진동이 발생하게 되므로 이를 막기 위하여 2 Piece로 되어 있다. Driveshaft가 복합재료로 만들어지면 중량이 감소해 금속제의 경우처럼 긴 경우라도 2Piece 설계가 필요 없으므로 Driveshaft 자체의 중량 감소는 물론 중간에 있는 Support Bearing까지도 필요없게 되어 더욱 그 잇점이 증가한다. 현재 Econoline Van에는 이러한 복합재료 Driveshaft가 사용되고 있다.

내장재 : 내장재들은 이미 대부분이 Plastic 혹은 복합재료로 만들어지며, 금속제 부품의 Plastic으로의 대체가 가장 먼저 시작된 부분이다.

기타 : 자동차 바퀴의 복합재료화는 알루미늄 바퀴의 보편화와 더불어 다음 단계의 하나로 연구되어 왔으며 시제품이 제작된 바 있다. 또 타이어의 Steel Belt도 Kevlar로 대체되고 있으며, 과거 공해물질인 Asbestos로 되어 있던 Brake Lining도 Kevlar Pulp를 이용한 복합재료로 바뀌고 있다. 또한 Belt, Hose 등에도 Kevlar섬유가 이용되어 중량감소 및 수명증가에 기여하고 있다.

이상 알아본 바와 같이 자동차의 거의 모든 부분에 복합재료의 응용이 시도되고 있으며, 실제로 현재 사용되고 있는 경우도 많다. 엔진의 경우 심지어는 복합재료 Engine Block이 성공적으로 시험제작된 바 있으므로 복합재료의 자동차 산업에의 응용은 계속 급격히

확대될 것이 확실시 된다. 이에선결되어야 할 여러 가지 기술 상의 문제들이 많은데, 보다 좋은 기계적 성질을 위하여 연속섬유를 사용할 수 있는 고속 대량 생산 기술의 확립, 원자재(특히 보강섬유) 생산 가격의 하락 등이 이루어지고, 많은 경험의 축적으로 높은 신뢰도를 기대할 수 있게 되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Lubin, G., Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold Co., 1982.
2. Schwartz, M.M., Composite Materials Handbook, McGraw-Hill Book Co., 1984.
3. Hancox, N.L., Fiber Composite Hybrid Materials, Applied Science Publishers Ltd., 1981.
4. Noton, B., Engineering Application of Composites, Academic Press, 1974.
5. Watt, A.A., Commercial Opportunities for Advanced Composites, STP 704, ASTM, 1980.
6. Fesko, D.G., Mallick, P.K. and Newman, S., "Automotive Composites - Manufacturing and Material Interactions," presented at the ASME Annual Winter Meeting, San Francisco, California, Dec. 10-15, 1978.
7. Kaiser, R., "Technology Assessment of Automotive uses of Advanced Composite Materials," Proceedings of the 24th National SAMPE Symposium and Exhibition, Vol.24, Book 1, May 8-10, 1979.
8. Chase, V.A., "Automotive Applications of Composite Materials," Proceedings of the 11th National SAMPE Technical Conference, Nov. 13-15, 1979.
9. Kliger, H.S. and Yates, D.N., "Hybrid Carbon-Glass Driveshafts" Proceedings of the 25th National SAMPE Symposium and Exhibition, Vol.25, May 6-8, 1980.
10. Beardmore, P. and Johnson, C.F., "The

Potential for Composites in Structural Automotive Applications," Composites Science and Technology, Vol.26, pp. 251-281, 1986.

11. 吉川昌範, "米國における先端複合材料産業について", 日本複合材料學會誌, Vol. 12, No.2, pp.49~56, 1986.
12. CMC, 高性能複合材料の最新技術, シーエムシー, 1983.