

섬유 강화 플라스틱의 공업적 응용 Industrial Application of Fiber Reinforced Plastics

김 홍 철(金洪喆)

I. 서 론

복합체의 역사는 토담집을 지을 때 진흙에 짚을 섞던 시절로 거슬러 올라간다. 복합체란 두 가지 이상의 상으로 구성된 물질로서 그 상들은 서로 물리적으로는 구분이 되나 기계적으로는 연속성을 지닌 것으로 정의된다. 복합체는 각 구성 성분의 장점을 모두 지니고 있으며 철근, 콘크리트로부터 dual steel에 이르기까지 우리 생활과 밀접하게 연결되어 있다.

섬유 강화 플라스틱(fiber reinforced plastics, FRP)은 중합체 매트릭스를 섬유(glass, graphite, aramid, etc.)로 보강한 것으로 일상용품, 운동기구, 자동차 부품등에 널리 이용되고 있다. FRP의 장점은

첫째, 밀도에 비해서 높은 강도를 가지고 있고(강철의 약 4배),

둘째, 여러가지 부식에 저항이 강하며,

셋째, 공정이 간단하고 생산 가격이 낮은 점들이다.

FRP는 주로 가구나 오락제품, 또는 자동차의 비 구조부 부품에 사용되어 왔으나 최근 고강도 연속성 섬유와 수지가 등장함에 따라 구조부품의 응용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 최근 원유 가격 인상으로 미국 자동차 업계는 1985년까지 27.5mpg EPA기준에 도달하여야 하며 FRP부품 응용은 자동차 무게 감소로 가장 유력한 방법으로 등장하고 있다. 중합물 특히 FRP는 금속에 비해서 최근에 연구가 시작된 분야이고 특히 fracture mechanism이나 구조와 성질과의 관계등은 아직도 미개척지가 많이 남아 있다. 복합체는 두가지 이상의 물질로 구

성되어 있고 특히 중합물은 소위 점탄성 성질을 가지고 있어서 모든 기계적 성질 연구나 품질 관리등이 균일 재질에 비해서 난이하다 하겠다.

II. FRP의 공업적 응용

FRP의 주요 응용분야는 아래와 같다.

1. 승용차¹(Fig. 1)

A. Non-structural; grille opening panels, hood scoops, fender extensions, window frames, spoilers, instrument panels.

B. Structural; radiator support panels, bumper back-up beams, hoods, door beams, drive shafts, leaf springs, wheels, air-conditioner brackets, transmission supports, split bench seats.

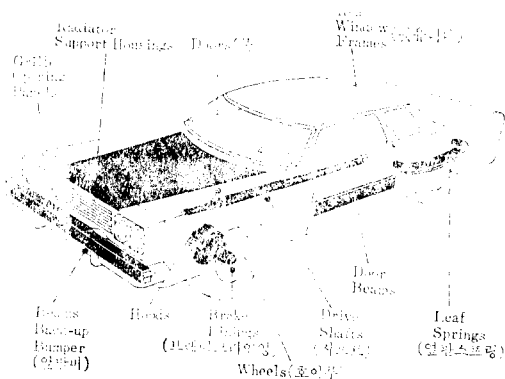


Figure 1. Application of fiber reinforced plastics in automobiles.

2. 오락용 차량 : mower hood & grilles, snowmobile hoods, duotherm shroud and base pans.
3. 운동 기구 : 스키, 낚시대, 골프채, 활 본체, 테니스 라켓, 패속경, 수영용 플.
4. 가구 : 정화조, 가정용 에어컨 케이스 및 밀판, 텔레비전 선회 받침대, 목욕조, 수세대.

H.C. KIM: The Goodyear Tire & Rubber Co. Jackson, Ohio. Development Engineer-Staff.

5. 기타 : 농업용 트랙터 덮개 및 창살, 고압 용기, 기기 커버 및 덮개, 저장용조 깔대기, 의자, 탁자 및 보드의 동체, 쟁반, 항공기의 내부부재, 착륙용 장치.

III. 재료 및 가공공정

FRP는 중합체 매트릭스와 섬유 보강재로 구성되어 있다. 매트릭스에는 cure catalyst, mold release agent, filler, 안료, thickener 등이 포함되어 섬유 표면은 섬유와 매트릭스의 결합을 강하게 하는 짝지음 시약으로 피복되어 있다.

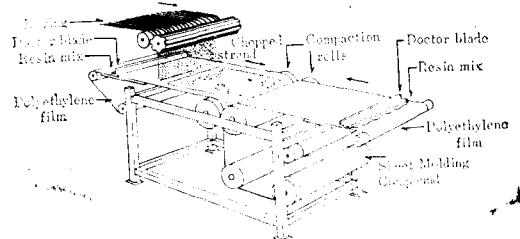
현재 가장 널리 쓰이는 수지는 폴리에스테르로서 가격이 싼 것 외에도 cure가 빠르고, 물리기체적 성질이 좋고, 염색이나 다른 개질이 용이한 등의 장점을 지니고 있다. 비닐 에스테르는 폴리에스테르보다 가격이 비싼 대신 강성과 내식성이 크고 높은 온도에서 안정한 장점을 지니고 있어서 현재 내부구조 부재로서도 많이 쓰이고 있다. 예폭시 수지는 높은 온도에서 더 안정하나(약 176°C까지) cure 시간이 길어서 현재 탄소섬유 pre-preg나 hand lay-up 등 한정된 분야에 응용되고 있다.

섬유 보강재로서는 현재 유리가 가장 많이 쓰이고 있으나 최근 더 강하고 딱딱한 graphite와 aramid 섬유의 응용이 점증하고 있다. 현재 graphite fiber(탄소섬유)는 유리섬유보다 30배 가량 비싸나 수요가 증가함에 따라 \$10/lb 선까지 떨어질 것으로 전망된다.

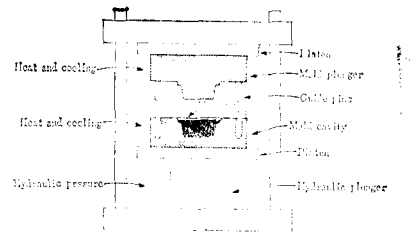
섬유와 매트릭스를 혼합하는 방법에는 pre-form, pre-preg, sheet molding compound, bulk molding compound 등이 있으며 가공방법으로는 hand lay-up, compression molding, injection molding, filament winding, pultrusion 등이 있다^{2,3}. 최근 SMC- 압축성형(Fig. 2)이 가장 많이 사용되고 있고, 자동차 장식용 부품의 질 향상과 가격 감소를 위해 주입성형 방법을 추구하는 경향이 있다. Filament winding은 내부구조체나 압력용기 등에서 섬유 방향으로 최대강도를 얻기 위해서 사용되고 있다.

FRP의 완전 제품을 만들기 위해서는 몰딩 후에 제품 주위에 남아있는 잔류물들을 제거하고

필요한 구멍들을 뚫고 mold mark들을 제거하고(연마) 이상 사전 다듬은 다음에 시발제를 칠하고(oven bake) 마지막 금속 부품을 부착하고 운반용 상자에 포장하게 된다.



(a)



(b)

Figure 2. a) Sheet molding compound process and
b) Compression molding process.

IV. 구조와 특성사이의 상호관계

FRP는 섬유의 길이, 방향에 따라서 일방향성, crossply, angleply, random chopped fiber composite로 분류된다. 여러가지 glass fiber 강화복합체의 대표적 기계적 성질이 Table I에 비교되어 있다^{4,5}.

유리섬유 복합체의 최대 modulus는 7×10^6 psi (48 GPa) 정도로서 기존 철강(30×10^6 psi modulus) 부품을 대신할 수 없다. 그러나 graphite나 aramid fiber는 딱딱함, 강도, 견고도 면에서 glass보다 월등해서 구조물 부품에 적합하다. 여러가지 FRP의 기계적 성질이 Table II에 요약되어 있다^{6,7}.

FRP의 구조물 이외의 응용분야에서는 결합특성보다는 표면외관이 더 중시되었으나 구조체 부

Table I. Mechanical Properties of Various Fiberglass Composites

	Random	Random	Crossply	Directional +Random	Unidirectional	Unidirectional
Glass Content w/o	30	65	60	30/20	60	80
Tensile Strength Axial, MPa	90	220	300	360	550	1,100
Tensile Modulus GPa	14	20	24	24	42	45
Fracture Strain %	1.5	1.9	—	—	—	2.75
Tensile Strength Transverse, MPa	75	190	240	60	20	34.5
Flexural Strength MPa	210	400	480	570	900	1,138
Izod Impact J/m	800	1,550	—	—	—	3,246

Table II. A Comparison of the Mechanical Properties Between Various Unidirectional Fiber Reinforced Composites

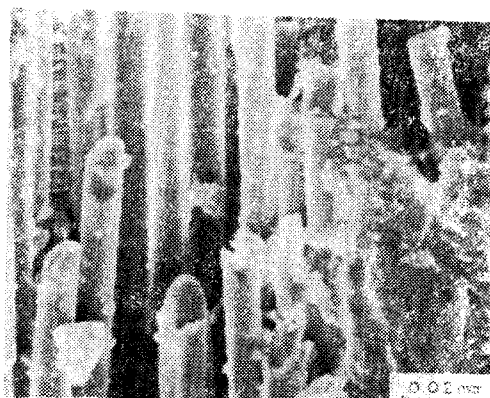
Property Composite	E-Glass	Kevlar 49 Aramid	Graphite Magnamite AS	Graphite Magnamite HMS
Tensile Strength Axial, MPa	1,103	1,379	1,551	1,138
Tensile Modulus Axial, GPa	45	76	138	200
Tensile Elongation %	2.75	—	1.2	0.55
Compressive Strength Axial, MPa	586	276	1,376	—
Tensile Strength Transverse, MPa	34.5	27.6	—	41.4
Compressive Strength Transverse, MPa	138	138	138	138
Tensile Modulus Transverse, GPa	8.96	5.5	6.2	—
Interlaminar Shear Strength, MPa	83	59	124	55
Density gm/cc	1.94	1.38	1.55	1.63
Poisson's Ratio	0.28	0.34	0.25	—

*60-62 v/o Fibers in Epoxy Resin

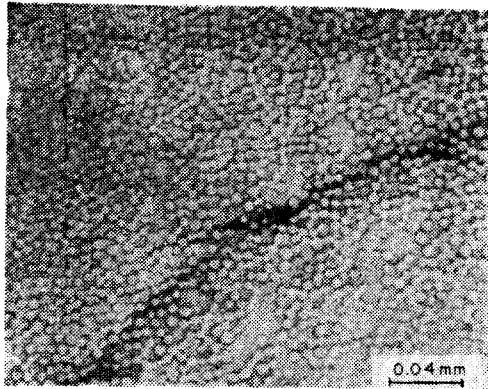
분에서는 부하가 커지므로 각종 사용조건에서의 failure mechanism을 이해하는 것이 설계하는데 필요하다. 근래에 와서 장력, 굽힘, 노화, creep, impact failure mechanisms 등이 활발히 연구되어 왔으며 주사형 전자현미경, 딱딱함 변화 측정, acoustic emission, 초음파탐사, 방사선 투과 검사, hysteresis heating 측정등이 균열 탐지등 연구에 이용되고 있다.

FRP의 섬유 장소는 matrix, fiber reinforcement, fiber/matrix 경계면 세곳이며 부하 조건에 따라 각 재료 재질의 열화가 복합체의 열화를 지배하게 된다. Random chopped 섬유 복합체에서는 균열이 매트릭스에서 발생해서 경계면을 통해 마지막 fracture가 일어나며, 연속적 일방행성 복합체는 인장 조건에서는 섬유의 failure가 복합체의 failure를 지배하고 bending condition(short-beam type)에서는 매트릭스와 경계

면의 shear cracking이 제복복합체 failure를 일으키게 된다^{8,9}(Fig. 3).



a) Fiber failure $\times 900$



b) Matrix and interface failure X 400

Figure 3. Micrographs showing failure loci in fiber reinforced plastics.

FRP의 성능은 온도, 습도 등에 민감하며 섬유와 매트릭스의 성질 차에서 오는 residual stress 등 기계적 성질에 영향을 주는 인자들의 연구도 활발히 진행되고 있다⁸.

V. 분석 평가에 의한 품질 예측

이상에서 요약된 바와 같이 FRP는 여러가지 물질 조합으로부터 여러가지 제조 방법을 거쳐 다양한 분야에 사용되며 성질 또한 다양한 것이 설명되었다.

어떤 특정한 부품을 만들기 위해서는 요구되는 성질을 만족시킬 구성물질, 제조방법을 선택하고 만든 제품이 고안한 대로 성질을 가지고 있나를 증명 실험을 해야 한다. 여러가지 물질 중에서 가장 좋은 조합을 선택하는 것이나 또는 성질을 실험하는 것은(특히 fatigue, creep 같은 장시간 시험)시간과 노력이 많이 들므로 이런 목적을 위해 전자계산기를 사용하는 분석시스템 개발이 많이 연구되고 있다. 이 방법에는 각 구성물질의 성질과 그들이 차지하는 용적 점유율, 그리고 다른 사용여건(온도, 습도, 사용빈도)등이 압력 데이터가 되며 Fig. 4에 예시된 것처럼 복합체의 균형단위를 작은 소자로 분류해서 stress와 strain을 계산하는 미세 소자분석이 계산 방법으로 사용되고 있다. Fig. 5에 E-glass-epoxy system의 계산된 일축장력곡선이 실제 실험치와 비교되어 있다⁹.

두 커브는 대체로 좋은 일치를 보이고 있으나 residual stress, 구성물질의 실제 복합체 내에서의 성질(in-situ properties), 그리고 복합체의 실제품질등이 계산에 포함되어야 더 정확한 예측을 할 수 있을 것이다.

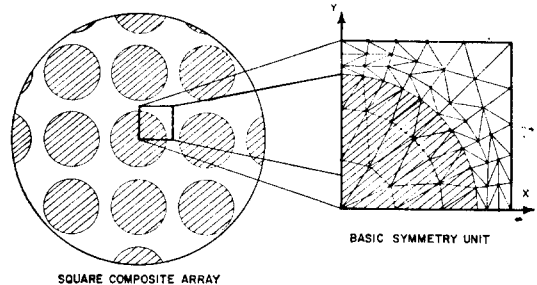


Figure 4. Square fiber array idealization of composite with accompanying basic symmetry unit.

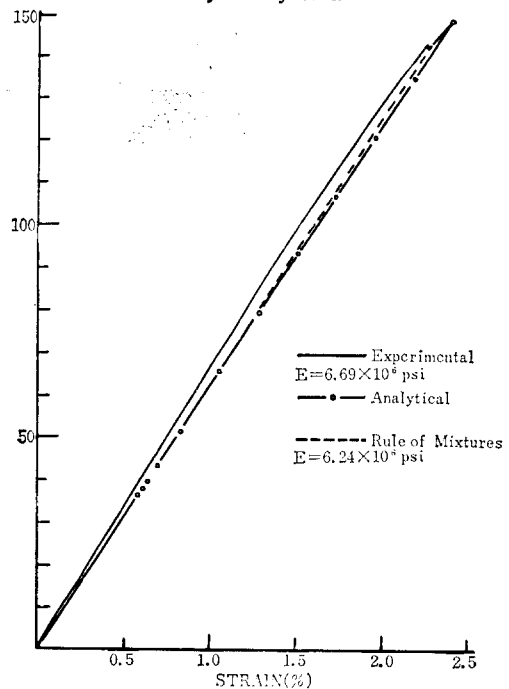


Figure 5. Experimental and analytical stress-strain curves for epoxy-57.4% fiberglass composite measured in uniaxial longitudinal tension.

VI. 결 론

이상 간단하게 섬유로 강화된 열 경화성 중합

물 복합체의 장점, 응용분야, 재료와 제조방법, 구조—성질 관계, 분석에 의한 품질예측에 대해서 소개했다. 이들 각 분야는 이론과 실제 응용면에서 많은 토론의 대상이 되고 있으며 특히 failure characteristics의 완전 이해나 안전도를 위한 품질보증, 그리고 제품의 성질을 보장하는 신빙성있고 오랜기간을 거쳐 증명된 데이터 등은 아직도 연구 과제로 남아 있다.

특히 이 산업은 자본투자가 비교적 적게 들고 다양한 제품을 만들 수 있으며 또 수동력을 많이 필요로 하므로 원료 문제만 해결하면 한국에서 발전할 수 있는 좋은 여건을 지니고 있다.

미래의 재료로 불리는 FRP(특히 두가지 이상의 다른 섬유로 구성된 혼성 복합체)는 무궁 무진한 개발과 응용이 가능하며 현재 세계를 위협하는 에너지 위기를 완화하는 한 방법이 될 것이다.

References

1. W. E. Chambers, "Low-Cost High-Performance Carbon Fibers", Union Carbide Corporation.
2. "Fiber Glass Reinforced Plastics-by Design", Pittsburgh Plate Glass Industries Bulletin.
3. "An Introduction to Fiberglass-Reinforced Plastics/Composites", Owens-Corning Fiberglass Corp.
4. H. C. Kim and L. J. Ebert, "Axial Fatigue Failure Sequence and Mechanisms in Unidirectional Fiberglass Composites", *J. Composite Materials* **12** (1978).
5. "Structural SMC: Material, Process, and Performance Review", Owens-Corning Fiberglass Corp.
6. "Characteristics and Uses of Kerlar 49 Aramid High Modulus Organic Fiber", Du Pont Technical Information, Bulletin K-2 (Feb. 1978).
7. "Magnamite Graphite Fibers", Hercules Incorporated.
8. H. C. Kim, "Fatigue Performance Characteristics and Fatigue Life Limitations of Fiberglass Composites", Ph. D. Dissertation Case Western Reserve Univ. (Aug. 1978).
9. H. C. Kim, "Analytical Prediction of Mechanical Behavior and Fatigue Failure Mechanisms in a Unidirectional Fiberglass Composite", M. S. Thesis, Case Western Reserve Univ. (Aug. 1976).