자동차 경량화를 위한 탄소섬유강화 복합재료의 동향

김기석·배경민·오상엽*·서민강*·강창기**·박수진†

인하대 화학과, *전주기계탄소기술원, **화승R&A

접수일(2012년 1월 4일), 수정일(1차: 2012년 1월 26일, 2차: 1월 27일), 게재확정일(2012년 2월 13일)

Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles

Ki-Seok Kim, Kyong-Min Bae, Sang-Yeob Oh*, Min-Kang Seo*,
Chang-Gi Kang**, and Soo-Jin Park†

Department of Chemistry, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Jeonju Institute of Machinery and Carbon Composites, Jeonju 561-844, Korea

**R&D Team, R&D Center, HWASEUNG R&A, 147-1, Gyo-dong, Yangsan, Gyeongnam, 626-210, Korea

(Received January 4, 2012, Revised January 26, 2012, January 27, Accepted February 13, 2012)

요약 : 최근 전세계적으로 자원 고갈로 인한 에너지 절약과 환경 문제에 관한 규제 강화는 환경 친화적인 소재 개발의 필요성을 가속화시키고 있다. 이러한 추세는 자동차 산업을 포함한 운송 산업도 예외가 아니다. 또한, 기본적으로 단순히 성능이 좋으면서도 값이 저렴한 제품이 아니라, 소비자와 사회의 요구에 부합되는 고기능성 소재의 개발이 필요하다. 이에 부합하는 소재로는 최근 운송 수단의 경량화를 위하여 많은 연구가 진행중인 탄소섬유 복합재료라 할 수 있다. 최근 탄소섬유 복합재료는 자동차의 경량화를 위해 차체 및 부품 등 다양한 부분에 적용됨에 따라 그 수요는 크게 증가하고 있고, 차량에 적용시 차체 중량감소에 따른 제동, 조향, 내구 및 연비향상과 이에 따른 에너지 절약 및 이산화탄소 배출을 최소화 하는 장점을 갖는다. 따라서, 본고에서는 자동차의 경량화를 위한 탄소섬유 복합재료의 필요성과 더불어 탄소섬유 복합재료의 기술동향과 나아가야 할 방향에 대하여 살펴보도록 하겠다.

ABSTRACT : Recently, the need of developing eco-friendly materials has been required with restriction strengthening on environment and energy saving by the resource depletion worldwide. These trends are not an exception in transport industry including automobile. In addition, these materials have to fulfill not only the high quality and cheap price but also the high-performance which meet the needs of customer and society. Among the various materials, carbon fiber-reinforced composite which is actively studying for lightweight of the automobile is one of the most suitable candidates. Indeed, the carbon fiber-reinforced composites are used as the essential materials to substitute body and other parts in automobile and the demand is increasing largely. Carbon fiber-applied automobile has improved brake, steering, durability and high fuel efficiency, leading to the energy conservation and minimizing carbon dioxide emissions. This paper focuses on the necessity of carbon fiber-reinforced composites for lightweight of automobile and its technical trends.

Keywords : automobile, lightweight, carbon dioxide, carbon fiber composites, market trend

I. 서 론

최근 산업이 점차로 고도화, 세분화됨에 따라 다양한 분야에서 요구되는 엄격한 규제조건을 충족시킬 수 있는 차세대 소재에 대한 필요성이 증대되고 있으며, 특히 자원의 고갈로 인한 에너지절약과 환경문제에 관한 규제 등은 환경 친화적인 소재개발의 필요성을 가속화시키고 있다. 이러한 추세는 항공기, 철도, 선박뿐만 아니라 자동차산업도 예외가 아니어서 최근 환경변화에 대응하기 위한 신규 소재개발이 시급한 실정이다. 따라서 단순히 성능이 좋으면서도 값이 저렴한 제품이 아

니라, 이제는 에너지소비 및 환경보호 차원까지 산업환경변화에 대응하기 위해 다양한 요건을 충족시킬 수 있는 소재개발이 요구되고 있다.^{1,2}

자동차산업은 점점 전자화, 고급화 되고 있으며, 안전성 등에 대한 소비자들의 요구가 다양해짐에 따라 부대장비가 늘어나 자동차 중량은 계속 증가하는 추세이다. 반면에 세계적으로 환경오염 문제가 대두되면서 기법별 평균연비 및 자동차 배기가스 규제강화에 대비한 연비개선이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 자동차의 연비개선 대책으로는 엔진, 구동 계의 효율 향상, 주행저항 저감을 위한 차체 설계, 소형화 및 경량화 등이 있다. 이중 구조 변경, 경량재료로의 대체, 부품합리화 등에 의한 차체의 경량화는 연비를 대폭적으로 향상시킬 수

* 대표저자 E-mail: sjpark@inah.ac.kr

있을 것으로 기대되어 현상황에서 경량화가 가장 유력한 방안으로 제시되고 있다.³⁻⁵

이러한 차체 경량화를 위한 소재로 알루미늄 합금 등의 비철금속류가 주로 사용되어 왔으나 최근에는 일반 고분자 재료와 적절히 강도가 보강된 고분자 복합재료가 금속소재를 대체해 나가며 경량화 소재에 있어 선두주자가 될 수 있다. 일반적인 자동차용 고분자 재료는 Handle, Cover류, Tank, Instrument Panel, Fascia 등 내·외장재가 주종을 이루는 반면 고분자 복합재료는 Hood, Door, Trunk Lid, Roof 등 차체 외판에 이용되고 있다. 이 밖에도 범퍼, 엽상 스프링 및 도어의 임팩트 빔 같은 승용차의 하중지지 부재를 비강도 및 충격에너지 특성이 좋은 유리섬유 복합재료로 제조하려는 시도가 상당한 성공을 거두고 있다.⁶⁻⁸

고분자를 이용한 복합재료는 앞으로도 계속 응용범위가 증가될 주요 자동차 소재이며, 국내의 경우 차량 생산규모와 역사에 비해 채용비율은 극히 초보적인 단계로 향후 성장잠재력이 매우 큰 분야 중 하나라 할 수 있다. 또한, 자동차산업은 국내산업 중 중요한 산업으로서, 자동차의 경량화를 위한 경량소재의 사용량은 석유쇼크로 연비절감의 필요성이 강하게 제기되면서 급증하고 있다. 이런 상황 속에서 연비절감의 유력 수단인 자동차 경량화에 대한 요구는 더욱 높아져 그 중에서도 섬유강화 복합재료의 역할이 커질 것으로 예상된다.⁹⁻¹¹

따라서 본고에서는 최근 자동차 경량화에 있어서 필수 소재로서 다시금 큰 관심을 받고 있는 탄소섬유 복합재료의 필요성과 기술동향을 알아봄으로써 탄소섬유 복합재료의 중요성과 발전방향에 대하여 논의하고자 한다.

II. 차량 경량화의 필요성

현대 사회에서 지구 온난화 문제와 고유가 시대의 도래 등 환경과 에너지 문제는 더 이상 간과할 수 없는 현안과제가 되었다. Figure 1에서 1999~2008년 지구의 평균온도는 1940~1980년대에 비해 최대 2도 정도 상승하였으며, 이를 토대로 2070~2100년 지구의 평균온도를 예상해보면 1960~1980년에 비해 최대 8도 상승할 것으로 예측된다. 이러한 지구온난화는 가뭄, 홍수, 폭염 및 생태계파괴 등을 유발하며, 기후변화로 인한 경제손실은 매년 세계 GDP의 5~20%일 것으로 추정된다. 세계은행은 2010년 탄소배출권 시장규모가 1,500억 달러에 달할 것으로 전망하였고, 모건스탠리는 신재생에너지 시장이 2020년에는 1조 달러에 달할 것으로 예상하였다.

지구온난화의 원인 중 자동차를 비롯한 수송기기의 대부분은 화석연료를 주에너지원으로 사용하고 있으며, 이로 인한 온실가스 배출은 Figure 2에 나타난 바와 같이 산업, 발전에 이어 세 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 온실가스 배출문제 외에도, 수송기기의 폐기 과정에서 발생하는 폐기물 및 재활용 문제, 그리고 배기가스에 의한 스모그 문제 등이 있다.

Figure 1. Global mean temperature change (Left: 2070-2100 forecasts, Right: 1999-2008 forecasts).

Figure 2. CO₂ content emitted from various industry fields in 2006.

따라서 세계 환경선진국들은 다양한 환경문제 개선방안 및 오염방지 대책마련을 위하여 다양한 노력을 기울이고 있으며 동시에 제도적 마련을 추진하고 있다. 그 중 가장 대표적인 것이 기후변화협약이라 할 수 있다. 정식명은 기후변화에 관한 기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change)으로 1992년 5월 정식으로 체결되었으며, 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 방출을 제한하여 지구 온난화를 방지하고자 하는데 가장 큰 목적을 둔다. 그리고 1997년 12월 체결된 교토의정서(Kyoto Protocol)는 기후변화협약에 따른 온실가스 감축목표에 관한 구체적인 이행 방안으로 선진국의 온실가스 감축 목표치를 규정하였다. 교토회의에서 2008~2012년에 걸쳐 선진국 전체의 CO₂ 배출량을 1990년 대비 평균 5.2% 감축목표가 설정되었다. 한국은 3차 당사국총회에서 기후변화협약상 개발도상국으로 분류되어 의무대상국에서 제외되었으나, 몇몇 선진국들은 감축목표 합의를 명분으로 한국, 멕시코 등이 선진국과 같이 2008년부터 자발적인 의무부담을 할 것을 요구하고 있다.

자동차 분야에 있어서 미국은 환경청(EPA: Environmental Protection Agency)과 교통부(DOT: Department of Transportation)를 중심으로 자동차 온실가스 규제 법안을 만들었고, 이에 따르면 오는 2016년부터 이산화탄소 배출기준은 155 g/km이 적용된다. 유럽연합에서는 온실가스 감축을 위해 자동차로부터 발생하는 이산화탄소 배출량을 2008년 147 g/km에서 2012~2015년 130 g/km로 약 13% 낮추고자 하고 있으며, 추가적으로 2020년까지 105 g/km로 이산화탄소 배출기준을 설정하였다.

Figure 3. Effect of lightweight by applying carbon fiber composites on CO₂ emission reduction from automobile.

또한 1973~4년 오일쇼크로 인해 원유가격이 세배 가량 상승하면서 자동차 연료효율성 부족이 사회문제로 대두되면서 미국은 1975년부터 1만대 이상의 차량을 판매하는 회사들을 기준으로 자동차 기업 평균연비 규제(CAFE: Corporate Average Fuel Economy)를 적용하였다. CAFE 적용 후 10년만에 자동차 연비를 5.7 km/l에서 11.7 km/l로 획기적으로 개선시켰다. 현재는 2008년 12 km/l의 연비를 2016년까지 15.1 km/l로 약 26% 향상시키는 목표를 설정하였고, 향후 2025년까지 평균연비를 23 km/l까지 올리려는 목표를 설정한 바 있다. 그리고 이러한 기준에 미달성시 기준 미달분에 비례하는 과태료를 부과하고 있다. 또한, 2017년부터 승용차는 연간 5%씩 연비를 향상시켜야 하고, SUV, 소형트럭, 승합차는 연간 3.5~5%씩 연비효율을 높여야하며, 이를 통해 미국 정부는 2017~2025년에 60억 톤의 2008년 CO₂ 배출 감축을 예상하고 있다. 국내의 경우에는 2008년 12.3 km/l의 연비를 2012~2015년까지 17 km/l로 약 38% 연비향상을 목표로 하고 있다.

위와 같이 전 세계적으로 환경오염과 지구온난화에 대한 관심이 급증하고 있는 상황에서 이산화탄소에 의한 지구 온난화를 막기 위한 효율적인 방법으로는 수송기로부터 발생하는 이산화탄소의 최소화라 할 수 있다. 더욱이 환경문제와 관련된 배기가스 및 연비규제 관련 법안이 제정되고 있어 이에 대한 대처여부가 향후 자동차 업체의 생존과도 직결되는 문제로 대두되고 있다. 이러한 환경 문제를 해결하기 위해 자동차 업체들은 여러가지 노력을 기울이고 있는데, 그 중 하나가 바로 차량의 경량화이다. 탄소섬유 복합재료를 자동차에 적용한 경우 온실가스 절감효과를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3에서 보는 바와 같이 자동차의 연료소비는 자동차 중량에 비례하여 증가하므로 탄소섬유 복합재료의 적용을 통한 자동차의 경량화는 연비향상과 배기가스 감소를 위해 필수적이라 할 수 있다.¹²⁻¹⁴

이러한 차체 경량화를 위하여 알루미늄합금 등의 비철금속류가 사용되어 왔으나, 최근에는 고분자, 특히 적절히 강도가 보강된 고분자 복합재료가 선두 주자라 할 수 있다. 현재 국내에서 일반소형 승용차를 1대 제조하는데 있어 사용재료별로 보면 철강재료 40%, 특수강 20%, 알루미늄 15%, 고분자(고무류 포함) 14% 수준이며, 특히 향후 고분자의 사용량은 크게

증가될 것으로 예상된다. 또한, 최근에는 탄소섬유 복합재료는 금속소재 대비 우수한 물성과 낮은 비중으로 자동차뿐만 아니라 각종 수송기기의 경량화 소재로 각광을 받고 있다.^{15,16}

III. 탄소섬유 복합재료의 적용 및 고효율 자동차 현황

1. 자동차 경량화를 위한 탄소섬유 복합재료 동향

고분자계 복합재료의 구성 소재의 발전과정은 다음과 같이 3개의 세대로 분류할 수 있다.

제1세대는 강화재로 값이 저렴한 유리섬유, 고분자 기지로는 불포화 폴리에스테르 수지, 에폭시 수지 등을 조합시킨 복합재료가 중심이 되어 경량화를 목표로 개발이 진행되었다. 그러나 이 복합재료는 비강도는 우수하지만 비강성이 낮은 것이 결점이다.

제2세대는 강화재로서 탄소섬유나 아라미드섬유를 이용한 고강도, 고강성의 특성을 갖는 고성능의 고분자계 복합재료가 중심이 되어 우주·항공분야를 필두로 많은 분야에 진출하고 있다. 고분자 기지로는 점도가 낮고 강화재와 젖음성이 좋으며, 성형 후에는 내열성이나 경도 등이 양호한 에폭시 수지가 많이 이용되었다. 그러나 에폭시 수지는 열경화성 수지이기 때문에 경화반응 등에 의한 성형 사이클 시간의 증가나 내충격성 등을 개량해야 하는 과제가 있다.

제3세대는 상기와 같은 열경화성 수지의 결점을 개량하기 위해 매트릭스로 열가소성 수지를 이용하는 것을 특징으로 한다. 열가소성 수지는 경화반응이 필요 없는 건식 프로세스를 채택하기 때문에 성형사이클 시간을 단축하는 것이 가능하여 생산성이 좋은 점 등의 이점이 있다. 그러나 열가소성 수지 본래의 내열성 부족 및 성형시의 고점도에 의한 섬유강화와의 젖음성이 나쁜 점 등에 따라 실용화가 늦어졌다. 최근에는 내열성이 현저하게 개량된 열가소성 수지가 개발되어 인성과 내열성이 우수한 섬유강화 열가소성수지(Fiber Reinforced Thermoplastics: FRTP)가 앞으로 이상적인 성형재료로 위치할 것으로 전망된다. 아래 Table 1에 섬유강화 열가소성 복합재료와 섬유강화 열경화성 복합재료의 특성을 나타내었다.

차량 경량화 및 고안전화 방안 중 하나는 고강도 초경량 탄소섬유강화 플라스틱(Carbon Fiber-reinforced Plastic, CFRP)의 적용이다. 아직까지는 재료비용과 생산성 때문에 CFRP 자동차 부품 적용이 많지 않은 실정이지만 유리섬유 고분자 복합재료(GFRP)를 이용한 자동차 부품은 비교적 다양하게 적용되고 있다. 현재 적용 중이거나 기존에 적용되었던 GFRP 및 CFRP 자동차 부품들을 Table 2에 정리하였고, CFRP를 사용하는 경우 평균적으로 알루미늄 대비 약 30%, 스틸 대비 약 50% 정도의 경량효과가 보고되고 있다.¹⁷⁻¹⁹ 일반적으로 섬유강화 복합재료의 물성은 강화제인 섬유의 물성에 가장 큰 영향을 받으며, 탄소섬유 복합재료, 일반 섬유강화 복합재료와 금속

Table 1. Comparison of two types of composite materials

Item	Thermoplastic fiber-reinforced composites	Thermoset fiber-reinforced composites
Material storage	<ul style="list-style-type: none"> • Semipermanently storage possible. • Heat and light blocking is unnecessary. 	<ul style="list-style-type: none"> • Heat and light blocking is necessary in the case of preprag.
Molding productivity	<ul style="list-style-type: none"> • Molding cycle time is short because curing time is not required. • High molding temperature and poor drapability. • Molding is difficult. 	<ul style="list-style-type: none"> • Molding cycle time is long because curing time is required. • Molding is easy because molding temperature is low.
Mechanical property	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent impact and fatigue resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent static characteristics including high temperature and strength
Regeneration	Possible	Impossible

Table 2. Application cases of CFRP-based automobile parts

Maker	Model	Materials(Process)	Parts
GM Cadillac etc	Solstice etc	E-glass/polyester E-glass/vinyl ester (SMC)	Trunk, radiator support, bumper, beam, roof frame, door frame, engine valve cover, timing chain cover, oil pan etc.
Ford etc	Various trucks	E-glass/polyurethane (SRIM)	Cargo box
GM Chevrolet	Corvette	E-glass/epoxy	Leaf spring
BMW	M6	CF/epoxy (RTM)	Roof panel
Bar 1	Formula 1	CF/epoxy	Gear box, rear suspension
Dodge	Viper	E-glass/thermoset resin (RTM)	Body panels
Hyundai	QarmaQ(concept)	E-glass/PP+ core sandwich	Hood
GM Chevrolet	Vorvette ZR1	CF/epoxy (autoclave)	Hood, fender, roof
Examples of CFRP introduced cars

Mercedes Benz SLR McLaren (2004)	BMW M3 (2007)	Toyota 1/X (2007)	Chevrolet Corvette ZR1 (2008)

재료의 물성을 Table 3에 정리하였다. 또한, 탄소섬유 복합재료를 자동차의 차체 및 각종 부품에 적용할 경우 차량 전체에서 약 100 kg 이상의 경량화가 가능하며 적용 부위 및 금속대비 무게 경량율을 Figure 4에 나타내었다.

자동차가 기존의 연소엔진에서 하이브리드 및 전기자동차로 패러다임을 쉬프트하면서, 차량 경량화가 더욱 중요해지고 있다. Tesla Motors의 Roadster, Myers Motors의 Duo, Aptera

Motors, Fisker Automotive의 Karma Sunset, Bright Automotive의 IDEA등 미국을 대표하는 전기자동차 전문생산업체에서는 차체 부품 및 다양한 내외장재에 CFRP를 적용하며 경량화를 시도하고 있다.

그러나 자동차에 있어서 탄소섬유 복합재료의 적용은 일부 고급차에 한정적으로 적용되는 것이 실상이며 본격적으로 실용화 단계에는 들어가 있지 않은 상태이다. 이에 비해 유럽에

Table 3. Comparison of the properties of CFRP, FRP, aluminium, and steel

Property	Unit	CFRP*	FRP	Al	steel
Specific gravity	-	<2	<2	2.7	7.8
Tensile strength	MPa	2,550	90	190	450
Tensile modulus	GPa	135	10	70	200
Flexural strength	MPa	1670	196	-	-

(*:Toray T700S data)

Figure 4. Effect of applying carbon fiber composites on light-weight of metal-based automobile.

서는 볼보, 르노, VW 및 EPFL 등 대학이 컨소시엄 형태로 참여하여 2000년부터 2004년까지 약 520만 유로의 비용으로 TECABS(Technologies For Carbon Fibre Reinforced Modular Automotive Body Structures) 과제를 수행한바 있고 미국에서는 ACC 프로그램이 국가 프로젝트로 되어 있다. TECABS 과제 개발 목표로서는 기존차 대비 경량화 50%, 부품수 70% 삭감 그리고 고속 성형공법 개발이었으며, 과제의 주요 내용으로는 1) 고속 저가 성형 프로세스, 고비용효율/고속 pre-form 및 레진 기술, 2) 정적/충돌 거동 및 경제/환경 영향 시뮬레이션, 그리고 3) 성능 요구조건을 만족하면서 실현 가능한 부품 컨셉 설계이다. 일본에서도 국가 프로젝트로서 NEDO(신에너지 산업기술 총합 개발 기구)에 의해 ALSTECC 프로그램(Automobile Lightweight Structural Elements of CFRP Composite, 지구온난화 방지 신기술 프로그램/자동차 경량화 탄소섬유 강화 복합재료의 연구 개발)이 2003년부터 2007년에 걸쳐 시행된바 있다.

최근에는 미국, 일본의 자동차 업계에서 경량화 효과를 증대시키기 위하여 탄소섬유를 사용한 복합재료 부품의 사용을 추진 중에 있다. 예를 들면, 미국의 Ford 사에서는 100% 탄소섬유 복합재료 시작차를 제조하여 SAEC(The Annual Society of Automotive Engineers Convention)에 전시하였고 이 차의 연비는 같은 형의 Ford TD의 7.2 km/l에서 9.7 km/l로 향상되었

Figure 5. CFRP-applied Toyota concept car (1/X).

다. Toyota사는 최근 시카고 오토쇼에서 차체 골격에 탄소섬유 강화 플라스틱을 채용하는 등 차량 중량을 대폭으로 감소시킨 컨셉트카 “1/X” (Figure 5)를 출품한바 있다. 하이브리드 카인 “Prius”와 동등한 실내공간을 지니면서 차량중량은 420 kg으로 Prius의 약 1/3로 감소시켰다. 탄소섬유 복합재료를 사용하여 골격을 가볍게 함으로써 엔진의 소비기량화 또한 power train의 경량화, 협폭 타이어의 채용 등이 가능하게 되어 차량 중심을 대폭으로 삭감할 수 있게 되었다.

차체의 경량화는 구동계의 손실 감소 이외의 전부에 기여할 수 있으므로 충돌 시의 안전을 위해 크고 무거운 자동차를 좋아해도 자동차의 경량화는 앞으로 계속 추진될 것으로 기대된다. 탄소섬유 복합재료는 앞으로도 계속 응용범위가 증가될 신개념 자동차 소재이며, 국내의 경우 차량 생산규모와 역사에 비해 채용 비율은 극히 초보적인 단계로 향후 성장잠재력이 매우 큰 분야 중 하나이다.

하지만 탄소섬유 복합재료의 제조기술에 있어서 국내의 기술은 일반 사출성형과 같은 생산기술 분야에서 비교적 많은 경험이 축적되어 있지만 원천 소재 개발 및 신공법 성형장비 등 전반적인 기술 인프라가 많이 부족한 상황이다. 탄소섬유를 예로 들면 현재 전량 일본 또는 다른 나라로부터 수입에 의존하고 있는 실정으로 국내에서의 원천소재 제조기술 확보가 시급한 실정이다. 국내에서는 동양제철화학이 연간 150톤 규모의 탄소섬유 제조시설을 가동하고 있었으나 1991년부터 생산을 중단하였다. 그리고, 그 동안 연간 60톤의 탄소섬유를 제조, 생산해 왔던 태광산업도 2001년에 생산을 중단함에 따라서 국내의 PAN계 탄소섬유 제조시설은 전무한 상태이다.

또한, 일반적인 사출성형기나 프레스 성형장비를 제외한 고가의 동시 압출사출성형기 및 정밀 제어 프레스 등은 국내업체에서 제작할 수 없는 실정이다. 또한, 성형공법 측면에서 보면 아직까지 RTM 또는 RIM 공법에 대한 부품의 실제 양산 적용 예가 없다. 위에서 언급한 바와 같이 자동차용 탄소섬유 복합재료 제품에 있어서 일본이나 미국은 이미 응용단계에 진입해있음을 알 수 있고 이미 상품화된 제품도 있다. 하지만 국내의 탄소섬유 복합재료는 초기 도입단계로서, 국내의 기술은 대학이나 연구소등에서 기초연구를 시작하여 최근에 들어 금호석유화학이나 코오롱 같은 기업체가 고분자 특성을

살린 고분자 복합체에 대한 개발에 착수하였고, 현대는 개발 중인 태양광 자동차 솔라에 탄소섬유 복합재료를 사용하여 초경량화를 꾀하고 있다. 따라서 체계적인 탄소섬유 복합재료 개발이 절실하며, 무엇보다 자동차 산업에서 즉각적인 활용이 가능한 제품의 개발을 통한 부가가치 상승이 절실히 요구된다.

2. 세계 고효율 자동차산업 현황

현실적으로 하이브리드차나 전기차 등이 상용화되어 양산 체제로 접어들기에는 기술발전과 제품가격을 낮추는 것이 필요하며 인프라 등이 뒷받침되어야 한다. 또한 완성차업체들은 자동차 엔진에서 배출되는 이산화탄소 발생량을 줄이기 위한 방안으로 연비를 향상시키기 위한 노력도 병행하고 있다. 가솔린의 경우 효율을 제고하기 위한 기술적 노력이 계속되고 있으나 효율성 제고에 한계가 있다. 따라서 자동차 부품의 경량화에 중점을 두면서 가솔린 내연기관차의 효율성을 높이고 있다.

이와 함께 편의장비 적용 확대에 따른 차량 중량증대에 대응하기 위해 자동차 경량화에 대한 관심이 높아지고 있으며, 완성차 업체들은 최신기술을 구사하여 성능을 확보하면서 작고 가벼운 엔진을 개발하고 있다. 특히 연비향상을 위한 신기술 도입이나 대체연료 차량 개발보다는 경량화가 더 저렴한 비용으로 효과를 거둘 수 있어 완성차 업체들은 경량화에 많은 노력을 기울이고 있다.

완성차 업체는 경량화 목표를 설정하고 이를 자체 프로젝트로 추진하는 경우가 많지만, 자체 경량화와는 별도로 부품회사와 공동으로 경량화 기술을 연구·개발하기도 하고 있다. 조직을 개편 또는 신설하기도 하고, 경량화 기술 개발에 강점을 가진 업체라면 부문에 구애 받지 않는 광범위한 제휴 또는 공동개발을 추진하며, 업체들은 이렇게 개발한 기술을 대부분 양산 부담이 없는 콘셉트카에 적용해 보고, 품질, 가격, 제조성형성 등을 개선하여 양산차에 적용하고 있다.

폭스바겐은 꿈의 연비차 1 리터카의 콘셉트카를 제작한 바 있다. 2002년 세계 최초로 경유 1 L로 100 km를 주행할 수 있도록 개발한 이 차에도 경량화 기술은 필수적이며, 알루미늄 재질의 크랭크케이스, 실린더 헤드, 서스펜션 등 가벼운 재질의 부품을 적극 사용하였다. 폭스바겐은 이미 세계 최초로 3 리터카를 상용화한바 있는데, 3 리터카의 연비 향상 요인 중 경량화 부분은 20%를 차지하는 것으로 분석되었다. 닌서는 향후 신차가 기존 차량의 중량을 초과하지 않도록 한다는 원칙을 세웠다. 실제로는 5% 정도의 경량화를 목표로 하고 있으며 이를 실현하기 위한 다양한 계획을 수립 중에 있다. 현재로선 양산차에 적용하기 어려운 기술들을 콘셉트카에 시험 적용하고 있는데, 향후 10년 이내에 이들 중 50% 이상을 적용할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

도요타는 범사적인 차량 경량화 프로젝트 'MI(Mass Innovation)'를 추진중이다. 2007년 시작된 'MI 프로젝트'는 사내 기술 및 조달부문이 참여하고, 소재·부품업체가 동참하는 방식으로 진행되는 경량화 계획으로, 목표는 친환경 자동차업체로서의 이미지 제고와 함께 경량화를 통한 산업 주도권 확보이며, 연비 향상을 위해 사용 소재 및 부품 설계 시스템을 대폭 재구축할 계획이다. 한편, 각 주요 차종에 대해서는 중량 삭감 목표를 설정하였다. 중형 승용차 부문에서 8~10% 정도의 경량화 목표를 설정하여 3~4% 수준의 연비향상을 추구하고 있다. 도요타는 2010년 중반까지 출시되는 신차들을 순차적으로 경량형 차량으로 대체할 계획을 세웠다.

닛산은 2015년까지 판매 전 차종에 대해 2005년 대비 15% 경량화를 추진하기로 하였으며, 이는 중형차를 대상으로 10% 경량화하겠다고 선언한 도요타의 목표보다도 강력한 것으로, 일본 선두 자동차업체들이 큰 폭의 경량화 전략을 경쟁적으로 추진함에 따라 자동차 소재혁명이 가속화될 것으로 예상된다. 닌산은 이 계획이 일본, 유럽, 미국 등지에서의 연비 규제강화에 대응하기 위한 것이라고 밝혔으며, 세부 방안으로는 탄소섬유 복합소재 등 신소재 적용확대, 부품설계 재수정, 차체 디자인 개선 등을 꼽았다.

3. 국내 고효율 자동차산업 현황

국내 완성차업체들도 연비향상을 위해 자동차 경량화에 노력하고 있으며, 경량화를 위한 최적 설계기술, 부품설계기술, 대체소재 적용기술 개발에 주력하고 있다. 특히 Figure 6에 나타난 바와 같이 대체소재 적용기술 개발을 중점으로 알루미늄, 플라스틱, 마그네슘, 복합소재 등 경량소재를 적용하고 있다. 국내 자동차 제조 3사의 자동차 소재 구성 현황을 Table 4에 나타내었다.

차체, 엔진, 새시, 의장 경량화를 진행하고 있는데, 특히 차체경량화는 연료소비 및 온실가스 배출, 주행저항 등을 감소시켜 차체의 관성이 경감되어 조종안전성, 동력성능 향상 등

Figure. 6. The direction of applying composite materials of the domestic automobile manufacturers.

Table 4. Composition of materials in domestic automobile

Classification	Fuel efficiency (km/l)	Weight (kg)	Material composition (%)					
			Steel	(HSS*)	iron	Al	Plastic	Other
HYUNDAI SONATA	12.14	1,235	62.8	(28.8)	8.0	7.6	8.3	13.4
KIA PRIDE	16.87	880	65.3	(24.4)	8.8	3.6	4.8	7.5
DAEWOO LEMAN	14.35	1,002	62.7	(2.3)	10.9	5.3	5.0	16.1

*Composition against High Strength Steel and steel, DAEWOO: Application of thicker thickness of about 0.05-0.1 mm compared to other companies

의 과급효과도 크게 나타나고 있다. 엔진부분의 주철로 된 엔진블록을 알루미늄 다이캐스팅으로 교체하고 있으며 40~50%의 경량화 효과를 가져왔다. 시트 내부 프레임과 패널을 알루미늄 압출재와 마그네슘 주조재로 교체하여 경량화하고 있으며 주로 고급차종을 중심으로 개발하고 있다.

차체 이외에 알루미늄이나 마그네슘을 이용하여 개발이 활발히 진행되고 있는 부품으로 비교적 복잡한 형상을 가지고 있는 엔진의 실린더 헤드 및 실린더 블록, 변속기의 케이스, 너클, 로커암 등이 있고, 플라스틱의 경우에는 유리, 시트프레임 및 헤드라이트의 리플렉터 등에 적용하여 기존 차량 대비 25% 이상의 경량화 효과를 보고 있다. 마그네슘 적용부품으로는 중소형 다이캐스팅 부품 위주에 머물고 있으며 내열소재 관련 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 한편, 스페이스 프레임 타입(Space Frame Type) 차체 개발, 고강도 경량화 강판 개발, 친환경 압축기 개발 등의 경량화 연구를 지속적으로 진행하고 있다. 국내 완성차업체들은 강도와 두께를 개선한 고강도 경량화 강판을 개발하여 적용 중에 있다.

현재 자동차 차체 및 부품에 탄소섬유 복합재료의 적용에는 거의 전무한 현실이다. 하지만 최근 현대기아자동차는 차체 경량화를 위한 미래 소재인 탄소섬유를 자체적으로 만들기 위해 개발에 착수했다. 이러한 기술전략은 BMW와 벤츠, 제너럴모터스(GM) 등 글로벌 주요 기업들이 탄소섬유 전문 생산업체와 제휴해 경량화를 준비하는 것과 비교된다. 하지만 탄소섬유의 높은 가격적인 문제로 인하여 현재 현대자동차는 자체 커스터마이징 브랜드인 '튜익스'를 통해 튜닝된 쏘나타에 탄소섬유를 적용하는 데 그치고 있다. 후드와 본네트에 독일 업체에서 생산된 탄소섬유를 필름방식으로 입히는 수준이다.

또한, 현재 현대자동차는 2010년 'i 10 EV'의 배터리 팩 하부 케이스를 대상으로 탄소섬유 복합재료 적용 연구를 착수 하였고, 신소재 신공법 적용으로 100,000 대/년 이상 생산성 확보를 목표로 하고 있다. 그리고, 최근에는 전주기계탄소기술원과의 공동 연구를 통하여 국내 처음으로 탄소섬유 복합재료로 만들어진 자동차를 제작하여 시범 운행을 하고 있다. 일부 외제 자동차나 수제차에 탄소섬유 복합재료가 적용된 경우는 있지만 양산차량에 응용되기는 처음이며, 대상차는 현대자동차의

제네시스 쿠페이다. 약 1억원의 연구개발비가 투입된 이 차량은 제네시스 쿠페 보닛과 루프 등에 탄소섬유와 탄소복합체를 적용해 제작됐다. 이 차량은 차체부분인 후드, 루프, 테일게이트, 웬더, 사이드립 및 도어와 브레이크 디스크 등 총 8개 부분에 탄소섬유 복합재료가 적용됐다. 차체의 경우 탄소섬유 복합재료를 적용해 강철에 비해 70%의 경량화 효과를 확인하였고, 탄소세라믹 브레이크 디스크는 무게를 44% 줄였다. 탄소섬유 복합재료를 적용한 결과 일반 차량의 무게보다 약 80 kg이 가벼워졌고, 연비는 2.2% 개선되는 것으로 분석됐다. 하지만 탄소섬유 복합재료가 도입된 차량을 양산하기는 현실적으로 어려운 실정이다. 탄소섬유 가격이 현재 kg당 30달러나 돼 이를 10달러 이하로 낮춰야 경쟁력이 있다는 것이 업계 설명이다. 만약 현대기아차가 탄소섬유 개발에 성공할 경우 비용도 줄이면서 차량도 경량화하는 이중의 과제를 해결하게 될 것으로 보인다. 탄소섬유의 구체적 생산 시기를 정하지 않았지만 개발을 완료할 경우 전기차와 고성능 스포츠카 등에 탄소섬유를 적용할 계획이다. 또한, 기아차는 독일 프랑크푸르트 모터쇼에서 공개된 스포츠 콘셉트카 'GT'의 휠에 탄소섬유를 적용해 미래의 차체 경량화에 대한 방향성을 제시한바 있다.

국내 경량화 소재 관련산업은 장기간에 걸쳐 많은 연구개발비가 투입되어야 하는 특성상 산·학·연 공동연구 협력체제의 구성이 절실하나, 주로 정부 연구소, 대학 등 연구기관에서 기초연구 위주로 진행되어 연구개발과 생산의 시차 발생, 연구결과와 생산의 연계가 부족한 문제점을 지니고 있다.

4. 고효율 자동차 부품소재 실태와 구조적 문제점

최근 자동차산업은 고급차 붐 및 차량 고성능화를 배경으로 각종 편의장비 및 에어백 등의 안전장비에 대한 소비자의 요구가 급증하면서 자동차의 중량은 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있다. 차량 무게증가가 연비 악화의 중요 원인으로 지적되면서, 연비 향상을 위해서는 중량 증가분을 상쇄할 수 있는 경량화가 반드시 필요하다는 인식이 대두되고 있으며, 일반적으로 차량 무게를 10% 줄이면 연비는 3~8% 개선되는 것으로 알려지고 있다.

우수한 연비개선 효과를 바탕으로 각국은 경량화 프로젝트

를 추진 중이며, 주요 완성차업체들은 자사의 현황에 적합한 전략을 진행하고 있다. 자동차 경량화 경쟁이 가속화되면서 국가별, 업체별로 신소재 개발을 중심으로 한 광범위한 기술 개발이 진행되고 있다. 경량화의 핵심은 고장력 강판, 알루미늄, 마그네슘 등 경량 소재 채용이며, 장기적으로는 CFRP가 유력하다 할 수 있다.

그러나 CFRP는 뛰어난 물성임에도 가격이 워낙 비싸고 성형이 어려워 지금까지는 경주용 차나 고급 승용차의 디스크 브레이크, 브레이크 패드, 리어 스포일러 등에 일부만이 이용되어 왔다. 그러나 도레이, 데이진, 미쓰비시레이온 등 탄소섬유 기업들의 적극적인 노력과 정부의 적극적인 지원에 힘입어 보닛이나 지붕 등 자동차 차체에 대한 적용 가능성이 높아지고 있다. 도레이는 2001년부터 정부 지원하에 닛산, 일본 내 6개 대학 등과 공동으로 CFRP의 성형시간 단축 연구를 수행하고 있으며, 2008년에는 A&A(Automotive and Aircraft) 센터를 설치, 본격적인 고객 개척 활동에 돌입한 상태이다.

또한 자동차는 아무리 느려도 수분 내에 1개 정도를 생산할 수 있는 사이클타임이 요구되므로, 사출성형(Injection Molding), 압축성형(Compression Molding), 반응사출성형(Reaction Injection Molding, RIM), 구조반응사출성형(Structural Reaction Injection Molding, SRIM), 인발성형(Pultrusion), 수지이송성형(Resin Transfer Molding, RTM) 등의 자동화 가능한 고속 제조 방법이 사용된다. 최근들어, 일본 Toray사는 CFRP 자동차 부품의 양산화를 위해서 Toyota, Nissan 등과 협력하여 고속 RTM 기술을 개발하고 있다.^{20,22} Corvette ZR1과 같은 한정판 매 차종의 경우, 오토클레이브 성형법을 이용해서 고품질, 고신뢰성 부품을 제조하는 경우도 있으나, 일반적으로 오토클레이브는 재료와 수지 경화 거동에 따라 사이클타임이 60~120분 정도 되므로 생산성 측면에서는 매우 불리한 공정이다.

결국 CFRP가 양산 자동차 부품 시장에 진입하기 위해서는, 사이클타임, 소재 및 생산 비용, 성능의 3박자가 맞아야 한다. 또한, 제품화 및 양산화 되기 위해서는, 이 중 특히 생산성이 기존의 복합재료 성형방법에 비해 최소한 10배 이상 빨라져야 한다 (부품 1개당 1분 내). 뿐만 아니라, CFRP 유지보수 기술, 부품 설계 및 성형 기술, 재활용 기술 등이 동시에 개발되어야 할 것이다.

4. 탄소섬유 리사이클 기술개발

탄소섬유 및 탄소섬유 복합재료 폐기물(Figure 7)은 현재 산업폐기물로서 취급되고 있으며, 탄소섬유는 일반 쓰레기 소각로에서는 완전하게 소각되지 않아 일반적으로 흙 속에 매립되고 있다. 따라서, 유한 자원의 재이용, 지구환경 부담의 감소를 위해 탄소섬유 리사이클 중요성이 확대되고 있다.²³

현재 복합재료의 리사이클에 관한 연구는 거의 진행되지 않고 있으므로 앞으로 관련 업계는 효율적인 제후를 통해 보다 활

Figure. 7. Discarded carbon fiber composites.

Figure. 8. Carbon fiber (left, scale bar=20 μ m) and the recycled carbon fiber (right, scale bar=50 μ m) images.

발히 추진할 필요가 있다. 모든 제품은 반드시 수명을 다하게 되며, 따라서 섬유를 제조할 때부터 폐각의 경우를 고려하면 제품의 완성도는 높게 될 것이다. 현재는 사용 완료된 복합재료는 그 부품을 선별하여 에너지 리사이클하거나 산업폐기물로서 폐각하는 것이 일반적이나 복합재료의 보급을 확대하기 위해서는 보다 고효율 재료로서 재활용해야 할 것이다.

탄소섬유 복합재료의 리사이클 기술로서 분쇄+수지의 열분해에 의한 탄소섬유의 재이용 등 일부 연구되고 있지만 아직 실용화되고 있지 않고 있다.²⁴ Figure 8은 일반 탄소섬유와 재활용된 탄소섬유를 비교한 것으로, Figure 8에서 보는 바와 같이 일반 탄소섬유와 달리 재활용된 탄소섬유 표면에는 리사이클 동안 제거되지 않은 미량의 불순물들이 표면에 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 초임계수(초임계온도 374°C, 임계압력 22.1 MPa 이상의 물)와 아임계수(임계온도 이하, 포화증기 이상의 액체수)를 이용하여 수지만을 분해하여 탄소섬유를 손상 없이 회수하는 방법이 개발된바 있지만 재활용 탄소섬유의 물성 저하로 인하여 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

현재는 폐각된 복합재를 분쇄 후 콘크리트에 혼합하여 콘크리트 강도를 높이는 연구나 섬유와 수지로 분리 후 분리된 섬유를 다시 복합재화 하는 연구 등이 있다. 현 단계에서는 리사이클 비용이 지나치게 많다는 문제점도 있다. 또한 현재의 리사이클 컨셉으로는 섬유의 질은 리사이클이 반복됨에 따라 저하될 수밖에 없다. 사용 완료된 복합재를 섬유로 분리한 후 리사이클에 의해 섬유의 원재료와 보다 유사한 재료로 개발할 수 있으면 생산과 재생의 프로세스가 근접하여 한층 좋은 재료로서 보급될 수 있다.

한편 리사이클링 전문회사인 밀드 카본사(Milled Carbon

Ltd.)는 재활용에서 거절되던 탄소부품들을 유용한 재활용 재료로 바꿀 수 있는 새로운 공정을 개발하였다. 2003년 후반부터 밀드 카본사는 경화되었거나 경화되지 않은 탄소섬유 복합재료를 연속적으로 재활용하는 시스템을 개발하였다. 현재 밀드 카본사는 2미터 넓이와 250밀리미터 두께를 가진 경화된 탄소섬유 복합재료 부품들을 25밀리미터의 두께를 가지는 조각으로 계속해서 리사이클하고 있다. 또한 제조공정에서 배출되었거나 사전 함침된 재료들의 사용하지 않는 부분에서 나온 경화되지 않은 재료들을 유사한 형태의 제조공정을 거쳐 리사이클 한다. 결과에 의하면 새로 재생된 재료들은 탄소섬유 원재료에 비해 약간 성능이 떨어질 뿐이며 같은 제품을 만드는 데에도 그대로 사용될 수 있다고 알려져 있다.

밀드 카본사는 가치가 있는 “재활용 제품”을 위해 일련의 최종 용도를 개발하고 있다. 사출 성형업체들이 이미 관심을 보이고 있어 비직물 재료에 사용하면 분명히 이 재활용 탄소섬유에 대한 시장성은 큰 것으로 보고 있다. 또한, 밀드 카본회사는 몇몇 영국 대학들의 교수들과 함께 리사이클 공정을 향상시키기 위한 연구도 진행하고 있다.

5. 맺 음 말

본고에서는 자동차를 포함한 각종 운송수단의 차체 재료로서 가장 많이 사용되고 있는 금속재료의 대체를 위하여 전체계적으로 활발하게 연구되고 있는 탄소섬유 복합재료의 필요성과 기술 동향에 대하여 기술하였다.

복합재료는 자동차에 있어서 외장재, 구조부품 등으로 응용되고 있으며 향후 사용량은 대폭 증가할 것으로 예상된다. 그러나 복합재료가 자동차에 응용되는데 있어서 장애요인으로 알려진 성형 중 발생하는 물리·화학적 변화, 계면효과, 재활용, 데이터베이스 및 실험방법 등 해결해야 할 과제가 남아 있다. 또한, 운송수단의 경량화 기술은 단순한 경량 소재의 개발에서 더 나아가 실제 차체에 사용할 수 있을 정도의 견고성과 경제성, 안전성들을 고루 갖추고 있어야 하는 만큼 오랜 기간의 기술적 노후가 필요한 분야이다. 주요 부품·소재의 경우 장기간의 계획과 투자가 요구되므로 국내의 투자 여건상으로는 무리한 부분들이 있으나 자동차 산업의 고부가가치화 및 주요 부품·소재의 수요증가와 해외기술 의존도가 높아지는 현실을 고려할 때 지속적인 투자와 연구가 필요하다.

최근 탄소섬유를 이용한 복합소재의 우수한 물성으로 인하여 산·학·연에서의 연구가 활발히 진행되고 있지만, 현재 상품화된 예는 극히 미비한 실정이며, 대부분 수입에 의존하고 있다. 이러한 면에서 고부가가치 산업인 자동차, 고속전철 및 우주항공에 탄소섬유 복합소재를 응용하기 위해서 원천소재 기술 개발이 시급하며, 원천소재 기술개발을 통하여 수입대체 효과가 매우 클 것으로 예상된다. 하지만, 국내에서의 기술기반은 특정분야에 치우쳐져 있을 뿐만 아니라 관련시장 또한

매우 취약해 장차 소재분야에서의 경쟁력 확보를 위한 연구개발 기반이 시급히 확충 되어야 할 것이다. 이를 위해서는 이미 확보된 전문인력 및 기초기술을 이용하여 상용화 및 응용기술 개발에 필요한 적극적인 연구지원 및 산업계와의 협력이 필요하다. 또한, 이러한 탄소소재를 이용한 소재는 다양한 응용분야에 적용이 가능하며, 저탄소 녹색성장을 이루는 원동력이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 광역경제권 연계협력사업과 광역경제권 선도사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Adam, “Carbon fibre in automotive applications”, *Mater. Design*, **18**, 349 (1997).
2. S.J. Park and M.K. Seo, “The effects of MoSi₂ on the oxidation behavior of carbon/carbon composites”, *Carbon*, **39**, 1229 (2001).
3. W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, and A. Vieregge, “Recent development in aluminium alloys for the automotive industry”, *Mater. Sci. Eng.*, **A280**, 37 (2000).
4. G.S. Cole and A.M. Sherman, “Light weight materials for automotive applications”, *Mater. Charact.*, **35**, 3 (1995).
5. S.W. Lee and D.G. Lee, “Composite hybrid valve lifter for automotive engines”, *Compos. Struct.*, **71**, 26 (2005).
6. S.U. Khan, A. Munir, R. Hussain, and J. K. Kim, “Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites containing nanoclay”, *Compos. Sci. Technol.*, **70**, 2077 (2010).
7. R.H. Dauskardt, R.O. Ritchie, and B.N. Cox, “Fatigue of advance materials”, *Adv. Mater. Process*, **7**, 26 (1993).
8. W. Zhang, R.C. Picu and N. Koratkar, “The effect of carbon nanotube dimensions and dispersion on the fatigue behavior of epoxy nanocomposites”, *Nanotechnology*, **19**, 285709 (2008).
9. B. Backman, “Composite structures, design, safety and innovation”, Elsevier, 2005.
10. R.M. Jones, “Mechanics of composite materials”, Philadelphia, Taylor Francis, 1999.
11. E.R.H. Fuchs, F.R. Field, R. Roth, and R.E. Kirchain, “Strategic materials selection in the automobile body: Economic opportunities for polymer composite design”, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 1989 (2008).
12. K.S. Kim and S.J. Park, “Technique status of carbon fibers-reinforced composites for aircrafts”, *Elast. Compos.*, **46**, 118 (2011).
13. G. Savage, I. Bomphray, and M. Oxley, “Exploiting the frac-

- ture properties of carbon fibre composites to design lightweight energy absorbing structures”, *Eng. Fail. Anal.*, **11**, 677 (2004).
14. J. Obradovic, S. Boria, and G. Belingardi, “Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures”, *Compos. Struct.*, **94**, 423 (2012).
 15. K.S. Kim, Y.S. Shim, B.J. Kim, L.Y. Meng, S.Y. Lee, and S.J. Park, “Present status and applications of carbon fibers-reinforced composites for aircrafts”, *Carbon Lett.*, **11**, 235 (2010).
 16. Y. Arao, J. Koyanagi, S. Utsunomiya, and H. Kawada, “Effect of ply angle misalignment on out-of-plane deformation of symmetrical cross-ply CFRP laminates: Accuracy of the ply angle alignment”, *Compos. Struct.*, **93**, 1225 (2011).
 17. S.J. Park, “Interfacial forces and fields: Theory and applications”, Ed. J.P. Hsu, Marcel Dekker, New York, 1999.
 18. M. Hussain, A. Nakahira, S. Nishijima, and K. Niihara, “Evaluation of mechanical behavior of CFRC transverse to the fiber direction at room and cryogenic temperature”, *Composites: Part A*, **31**, 173 (2000).
 19. J.A. Rodosts and N.C. Trivedi, “Handbook of fillers and reinforcement plastics”, New York, Van Nostrand Reinhold, 1987.
 20. J. Verrey, M.D. Wakeman, V. Michaud, and J.A.E. Manson, “Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan”, *Composites: Part A*, **37**, 22 (2006).
 21. R. Vipond and C.J. Daniels, “Non-destructive examination of short carbon fibre-reinforced injection moulded thermoplastics”, *Composites*, **16**, 14 (1985).
 22. M.D. Wakeman, T.A. Cain, C.D. Rudd, R. Brooks, and A.C. Long, “Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro-mechanical properties II. Glass-mat-reinforced thermoplastics”, *Compos. Sci. Technol.*, **59**, 709 (1999).
 23. J. Palmer, L. Savage, O.R. Ghita, and K.E. Evans, “Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recyclate”, *Composites: Part A*, **41**, 1232 (2010).
 24. H.L.H. Yip, S.J. Pickering, and C.D. Rudd, “Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process”, *Plast. Rubber Compos. Process Appl.*, **31**, 278 (2002).