航空・宇宙と有機材料について

古 田 敏 康*

Toshiyasu FURUTA*

I. は し が き

航空・宇宙に使用される有機材料は複合材料として使用される例が多い。一般に2種以上の化学的に区別できる材料を3次元的に結合させ、単独材料では得られなかったような性質が作り出される材料を複合材料とよんでいる。またせまい意味ではFRP(強化プラスチック—Fiber Reinforced Plastic—)とも呼んでいる。すなわちファイバーで強化したプラスチックである。

プラスチックの開発の初期には、航空材料としてプラスチックの単体が、機装品ならびに電気装備品などとして使用されてきたにすぎなかったが、ガラス繊維およびそれらのFRPが開発されるようになって、次第に2次構造材(たとえばドア、フロア、補強材など)として使用され、現在では航空機の全重量に対して約5~22%をしめ、近年その比重をさらに増しつつある。さらにごく最近になり、ボロンおよびカーボンFRPが開発されるにおよび、それらの比強度(強度/密度)と比剛性(剛性/密度)が他の工業材料に比較して格段と高いことに注目され、軽量構造を必要とする宇宙航空材料として使用されるようになってきた。ガラスFRPの航空への応用などについては、今までに沢山の報告¹⁾があるのでそれらを参照されたい。ここでは、主として最近のボロン、カーボンFRPと一部ガラスFRPについて航空・宇宙への応用について述べる。

II. 航空・宇宙材料としてのFRP の利点と欠点

一般に航空宇宙材料のFRP用として使用される樹脂には、荷重の余りかからない部分にはポリエステル樹脂が、強度を必要とするところにはエポキシ樹脂が、耐熱性を必要とする部分にはフェノール樹脂またはポリイミ

ド樹脂が使用される。

補強材としては、ガラス繊維は積層用としてはクロスが、フィラメントワインディング用としてはロービングが使用され、カーボン、ボロン、金属細線、その他の繊維はロービングによるプリプレグ(prepreg)シートが使用され、ホットプレスなどにより成形される。ここで、プリプレグとは繊維を樹脂に含浸後に乾燥させ離型紙にならべたものをいう。

FRPは経済的、力学的、熱的ならびに電気的面において金属材料と異なった種々の特長を有している。いまこの特長を簡単にまとめてみるとつぎのようになる。

1) FRPは複雑な曲面の成形性がよく、大幅なコスト低下が期待できる。

2) 比強度、比剛性が大きい

従来のガラスFRPは比強度は大きかったが、比剛性は低い欠点があった。すなわちガラスFRPの弾性率は3,500~4,000 kg/mm²で、剛性を必要とする構造材としては不適當とされてきた。

しかしカーボン、ボロンFRPでは弾性率は20,000 kg/mm²の値も得られており、FRPの密度も約1.5~1.7 g/cm³であり、ガラスFRPの欠点をカバーできる。

図1に各種材料の比強度、比剛性の値を示す。

図1 各種材料の比強度と比剛性

* 航空宇宙技術研究所 ()

* National Aerospace Laboratory ()

3) Multi filament 構造は fail safe²⁾ 構造である。

fail safe とは航空機構造のように、構造のどこか一部分がこわれても、ある限られた期間は設計荷重のかんりの割合の荷重に耐え、安全な運航がつづけられるような構造方法をいう。すなわち、たくさんのフィラメント構造からなる FRP は、一部分のフィラメントが破断しても他のフィラメントが力を分担し、他の部材が代って力を受持ち、信頼性を高めることができる。いわゆる fail safe 構造といえる。

4) FRP は電気的には不良導体であるが、電波の透過性は良好である。

5) カーボン FRP は振動減衰特性がよい

6) カーボン FRP は疲労強度が高い

7) FRP の熱伝導率は金属材料に比較して、数百分の1と格段に低く、アブレーション特性が良好である。

ところでアブレーション(Ablation)とは、FRP などが加熱されると、表面の樹脂は加熱分解して、メタン、エチレン、水素、アセチレンなどの気体を発生し、分解残渣は炭化層を形成し、発生した気体は炭化層を通して表面に発散されて、比較的低温の境界層をつくって内部を熱的に絶縁し冷却する方法で、再突入時(Reentry)の防熱材や、カーボン FRP ノズル材料としてその原理が応用されている。

以上の特長を有している反面、また航空宇宙材料として考慮した場合にはつぎのような欠点をも持っている。

1) 強度の信頼性の不足

成形法による空洞率、繊維の配向性、フィラメントの含有率の差による強度のバラツキが多い。

2) 耐熱強度の不足

現在マトリックスとしてエポキシ樹脂を使用している限りでは耐熱強度は落ちる。しかし各種の耐熱樹脂が開発されつつあり、早晚解決されるものと思われる。

3) 非破壊検出法がまだ確立されていない。

非破壊検査による FRP 内部の欠陥、または接着部のはくりの検査法が要望されているが、まだよい結果は得られていない。しかし最近になりマイクロウェーブ法、ホログラフィ法などによる検査法が研究されている。

4) 摩耗(Abrasion)に弱い。

カーボン FRP の摩耗は Al 合金の 1/10、ステンレス合金の 1/15 程度といわれている。

5) 衝撃値が低い

鋼にくらべて FRP の衝撃値は約 1/10 程度とかなり低い値である。

III. 成形法について

現在寸法精度を要するものはプレス成形が用いられているが、その代表的な成形法を列挙するとつぎのとおりである。

1. ハンドレイアップ法(Hand lay up method)

これは手積み法ともいい、繊維基材を裁断して型の上にしきつめ、触媒を加えた樹脂をはけやローラーでその上に塗り込んだのち自然に硬化させ、離型して仕上げる方法で、上記の方法を湿式法という。この成形法の特長は寸法精度はやや落ちるが、治工具費がきわめて安く、大規模な設備投資がさけられるなどの利点がある。

2. マッチドダイ法(Matched die Method) これは金型とプレスを用いて成形する方法で、この特長は寸法精度がよく、製品の均一性がよい。機械成形による量産ができる。などの利点があるが、一方相当多額の投資が必要となるなどの欠点もある。

3. ブレークアウェイ法(Break away method) これは曲率のあるパイプ類の成形時に、中子を石こう、低融点金属、岩塩などで作り、それにクロス、マットなどに樹脂を含浸させながら巻きつけて成形、硬化後になかの中子をくだいて取除き製品とするもので、複雑な中空製品はこの方法で作られる。

4. フィラメントワインディング法(Filament Winding method—FW 法ともいう—) この成形法は第2次大戦後に開発された成形法である。これはエポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂のような熱硬化樹脂を含浸した連続繊維をマンドレルに巻きつけ、樹脂を硬化したのち離型して製品とする。巻き方にはスパイラル巻き、インプレーン巻きとがあり、パイプ、压力容器などの製品ができる。この方式にも湿式法、乾式法(プリプレグテープを使う方法)などがある。いままでの成形法ではマット、クロスなどの織物として利用したもので、あまり強度は望めなかった。しかし FW 法は連続繊維の強靱性を十分に活用したものといえる。

この FW 法はアメリカで軍事研究として進められ、宇宙工業材料製造法として所期の目的を達成したのちに一般に公開されたもので、FW の驚異的特性が一般に知られると、一般工業材料としての活用の研究がなされた。

IV. ロケットへの応用

ロケットに FRP が応用されている部分はつぎの通りである。

1. ノーズコーン フェノール系 FRP の断熱性と

電波の透過性が利用される。衛星放出のため分離開頭を飛ばす中に行なうため軽量であることが要求される。したがってフェノール樹脂系 FRP, エポキシ樹脂系 FRP などによるハニカム構造とフィラメントワインディング法などの併用が考えられる。

2. 大型固体ロケットノズル 従来のロケットではノズルのスロート部(ノズル断面積の一番小さい部分)にはグラファイトが用いられてきたが、ロケットが大型になるにしたがってこの部分の直径も大きくなり、従来と同じ規格品の製作が困難となり、しかも比重も大きく、高性能固体ロケットのノズル材料としては不適當である。そこで熱衝撃にも強く、アブレーション特性のよいフェノール樹脂系耐熱 FRP ノズルが要望され、ノズルスロート部分にはフェノール樹脂と炭素繊維の FRP が、ノズル開口部にはフェノール樹脂と炭素繊維またはシリカガラス繊維の FRP が用いられ、また外側全体の成形にはガラス FRP による全プラスチックノズルなどがある。図 2 は全プラスチックノズルの燃焼試験後の断面写真である。

図 2 全 FRP ノズル

3. 上段用固体ロケットのチャンバー 上段用ロケットはいずれも L/D (長さ対直径の比) が 1~2 程度の値であるので、材料自身の剛性の低いことはあまり問題とはならない。FRP の軽量で、かつ強度の高い特長がもっとも活用されている。

4. その他の応用 各種搭載機器のパーツとして、また液体ロケットの気蓄器および各種姿勢制御装置用タンクとして、その使用の可能性について検討が行なわれている。

アメリカではカーボン繊維の FW 法とサンドイッチ構造法による人工衛星の構造体を試作している。

V. ジェットエンジンへの応用

一般のガラス FRP を航空エンジンの部品として使用することにより、価格と重量の軽減をはかろうと、すでに 1950 年にロールスロイス社の研究所でジェットエンジンのコンプレッサーブレードの研究が始まった。1956 年にガラス FRP ブレードがモデルコンプレッサーとして試験され、1960 年に初めてこのブレードが RB-108 リフトエンジン用として使用された。リフトエンジンは V/STOL 機用のもので、軽用でしかも大きな推力を必要とした。ついで 1961 年に RB-162 エンジンを完成させ、実験研究の段階から一步実用の段階に入った。

最近 General Electric 社でも、エンジン材料として FRP を使う計画を発表し、つぎのように評価している。1975 年頃には FRP の使用によるメリットは次のようである。

1) 11% の重量軽減, 2) 12% のコスト低減, 3) 20% 程度ブレードの数が少なくてすむ。

その結果エンジンとしては、

1) 200 ポンド以下のファンブレード, 2) シャフト, ベアリングの軽量化, 3) エンジン一基当り 800 ポンド軽くなる。結局 4 発の飛行機を考えたとき

- 1) 3200 ポンド積載量増加
- 2) 12,000,000 ton-miles の性能増
- 3) 2,000,000 ドルの収入増

などと評価している。

VI. 航空機構造材としての応用

FRP が航空機に応用されたのは古く、1940 年イギリスにおいてであった。電波透過性のよいこと、比強度の高いこと、複雑な曲面の成形が容易なことなどの利点のためその利用も徐々に増加してきた。

最近接着技術の向上と非破壊検査法などの技術の向上により、とくにハニカム構造と FRP の共用によるサンドイッチ構造材として FRP がたくさん使用されるようになってきた。

Boeing-737 の Rudder (尾翼) には FRP サンドイッチ表皮材が使用されている。

その後 Boeing-747 (ジャンボ機) ではさらに使用箇所も多く、フラップ、主翼下の胴体部、エンジンサポート、車輪カバーなど全重量の約 22% にガラス FRP が使用されている。

その他ヘリコプターのブレードに FRP が使用されており、最近ではボディも FRP 化しようとする試みがなされている。

VII. あとがき

FRP の宇宙航空への応用についてごく一部分の紹介をしたにすぎない。FRP の新しい設計法, 成形法, 非破壊検査法などの技術の向上により信頼性もたかまり, これからもますます FRP が宇宙航空材料として使用される可能性は多い。

(昭和47年7月27日受理)

文 献

- 1) 三田達, 航空機用プラスチック, 日本航空学会誌 Vol. 14, No. 141, Oct. (1965); 高坂 邵, 航空機への応用, プラスチック Vol. 20, No. 6, 1969

年6月; 田尾忠, 航空機および航空宇宙体, 日本機械学会誌 71巻 593号, 43年6月; 田尾 忠, 航空機における利用と将来の方向, 工業材料 Vol. 14, No. 5, 1966 年; 竹中幸彦, 古田敏康, 宇宙開発の現状と将来, プラスチックマテリアル Vol. 11, No. 1, 1970 年1月; 門屋正臣 他, 航空機への応用, 70年プラスチック年鑑, 工業調査会編, 1970 年1月; 古田敏康, 新しい複合材料と宇宙航空への応用, プラスチックス, Vol. 22, No. 3, 1971 年3月; 早乙女増雄 他, YS-11 M ハニカム製床板の開発, 日本航空学会誌 14 巻 154 号 (1966年11月)

- 2) 科学技術庁編, 宇宙便覧 p. 395 (上山忠夫著)

書 評

有機化合物の構造決定60題

—MS, NMR, IR, UV の併用—

A.J. Baker, T. Cairns,
G. Eglinton, F.J. Preston 編

佐々木 慎一・丸山 雅雄 訳
東京化学同人発行
114 ページ, 720 円

一言でたとえればスペクトルは分子からの手紙である。有機合成化学にたずさわる者がその素晴らしい情報の解説をマスターし, 自己の研究した新しい化合物なり, 新しい反応なりに応用して, 明確に示したいと願うのは当然であり, いまや合成と構造解析を切り離しては研究そのものが成立たなくなっている。構造解析の三種の神器とまでいわれた MS, NMR, IR 装置は10年前に比して格段に普及し, 性能も向上しその他の各種の分析装置も含めて研究的には手近な頻用機器となった。これに伴ない講習会はいつも盛況であるし, 各スペクトルのデータ集もかなり蓄積, 整備されてきている。しかし従来, 要求が強くてもその割に教育的立場を配慮した定評のある総合的な解析法演習書が少なかった。

本書は T. Cairns らの編集になる "Spectroscopy in Education Series" 全5巻のうちの第4巻に当る "More Spectroscopic Problems in Organic Chemistry" の訳と訳者による演習問題の解答集であり, 如上の要求にある程度応えるものといえよう。全114ページの小冊子であり, 構成はスペクトルの基礎解説7ページ, 問題60ページ, 解答37ページ, その他10ページで, 原図は縮刷されている。問題の配列は, 順不同で, その形成は第1問

から第60問まで1問毎に一つの有機化合物を採り上げ, 構造推定に必要な MS, NMR, IR, UV などのチャートとを同一ページに並べ, 1, 2 の条件を付け加えてある。編者の序によれば化合物の化学的性質を抜きにした方がスペクトル解析に精通するのに近道であるという。したがって, そのねらいは構造決定に必須な4種のスペクトルに対する理解度の質的向上とスペクトルの解釈の相補的合理化であろう。解答者はこの趣旨を生かして個々の解答をコンパクトに整理し, 明解に示された。ここで編者ならびに解答者の労を多としたい。なお読者の立場で1つ2つ付言させてもらうなら, スペクトルのみでは解が得られないとした解答が幾題もあり, このままでは本書の意図に添えないと思うこと, 可能な異性体相互の区別についての論議をもっと取り入れて欲しかったこと, 重要な鍵である精密質量表, ケミカルシフト表, Colthup 表などで解答に必要な部分を付録で参照できるようにして欲しかったことなどがあげられる。本書は活用しだいでは有機合成化学関係者はもちろん, 化学系諸学科の学生ならびに研究者の初, 中級用実力練成書として, また機器分析の教材用として格好の書であり, お薦めしたい手応えのある問題集と思う。

(西 久夫)