解 説

浦項工科大学校複合材料研究室

韓 京 燮*

浦項工科大学校 (Pohang University of Science and Engineering, <http://www.postech.ac.kr>) は韓国の南東の方の浦項市にある。浦項市は世界第1位の鉄鋼会社である浦項製鉄 (POSCO) でよく知られた都市である。当大学は15年間の短い歴史にもかかわらず今までの各種評価で理工系の最高峰大学として認められ、1998年には香港の週刊誌「アジアウィーク」から「アジア最優秀科技大」として選定された。浦項工大複合材料研究室は1988年韓京燮教授の浦項工科大学校機械工学科への赴任と同時に開設された。韓京燮教授は浦項に赴任する前、米国の大学で数年間機械・航空工学科の教授として在職しながら、高分子系複合材料 (polymer matrix composites) の疲労・破壊等に関する研究を重点的に遂行し、特に複合材料の疲労損傷に関する独自の理論は世界的に認知されている。このような研究経験を基に当研究室では設立初期から次世代新素材と言われる金属基複合材料 (metal matrix composites) の国産開発研究を始め、現在は韓京燮、朴賢哲、黄雲峰の教授3名とPost-Doc. 2名、博士課程の学生8名、修士課程の学生7名の複合材料グループに発展した。当研究室では複合材料製造工程の開発と共に静的特性及び疲労、破壊等の動的物性解析等の研究を行っており、適応構造物 (adaptive structure) と関連し知的構造物の理論及び実験的研究を

遂行している。当実験室で保有している装備には予備成形体を作製するための真空圧抽出機、超音波乾燥機、電気オープン等があり、また squeeze casting の装備も保有している。なお、FRPを製作するための装備として hot press とオートクレーブがある。この他にも加工のための bend saw や wheel cutter, 材料試験のための MTS, UTM, 計装化された落錘衝撃試験機と音響放出機, FFT analyzer 等の計測装備を保有しているため、素材の生産から加工、試験に至る全ての作業を遂行できる能力を保有している。

当研究室で主に研究・開発している複合材料は金属基複合材料、高分子系複合材料、適応構造物の3つの分野であり、これらの独立した研究分野を、材料の開発、疲労破壊等の損傷問題解析、適応構造開発・解析を前提に相互有機的に連結させて研究効率を極大化している。

1. 金属基複合材料分野

金属基複合材料 (MMCs) 研究は製造工程の開発と製造した複合材料の機械的特性の評価を中心としている。製造工程は大きく多孔性の予備成形体の製作と金属を浸透させる二つの工程に分けられる。当実験室では予備成形体の開発のための成形体の選択、水分の除去および乾燥の方法などの研究を行い、その結果、短繊維予備成形

図1 浦項工科大学校の全景

図2 計装化された落錘衝撃試験機

* Kyung Seop Han: 浦項工科大学校機械工学科教授
<http://www.postech.ac.kr/me/cm>

図3 金属基複合材料の予備成形体

図4 MMC製コン・ロッド

図5 最新電子パッケージング用のMMC

体と繊維/粒子混合複合予備成形体が製作できるほどの独自の技術が確保できた。浸透工程としては加圧浸透法 (squeeze casting) を使用し、これまで最適な製造条件の確立に努めた結果、良質な金属基複合材料を製造できるようになった。このノウハウに基づき、種々の材料の予備成形体と母材を使用した多様な種類の複合材料を製造するなど、特性にあう応用分野を広めていっている。なお実験室の初期に使用した SAFFIL 短繊維や SiC ウィスカーなどの値段の高い補強材に依存した製造方法から脱皮して、国内で生産可能で低価格の繊維を使用して対等の物性を持った複合材料と繊維/粒子を混合した hybrid 金属基複合材料の開発にも努め、実用化のための研究にベストを尽くしている。

複合材料の製造と共に、複合材料の磨耗、疲労、衝撃特性の評価とそのメカニズム解明に関する研究も行っている。金属基複合材料の機械的特性と強度を把握し、基本的には構造材としての性能が保障できるようにしている。しかも、各材料の特性に最も適した用途を見つけ、効果的な応用ができるようにデータベースも作っている。なお実験結果に基づき、強化機構をモデリング、分析する作業を通じて、現在、より優秀な物性を有する複合材料が開発できる基盤を作っている。そして今まではピストン、コン・ロッドなど自動車部品でよく用いられた低体積含有率の金属基複合材料の開発に主力を注いできたが、最近電子パッケージング用の高体積含有率の金属基複合材料の製造に既存の金属含浸法を拡大、適用するための実験装置を導入し、多角的な研究を進めている。金属基複合材料を電子パッケージング材料として使用するためには従来の用途で要求された高強度、高耐磨耗などの特性とは違う熱伝導率と熱膨脹係数が重要な変数となる。従って、このような設計条件に適した予備成形体の製作と含浸条件の開発に力を入れている。一般的にこんな用途に適合させるには 50~70% の高体積含有

率の予備成形体の製作とこれを用いた含浸法の開発が必要となる。当実験室では、従来方法では高体積含有率の MMC の製作が不可能なので、SiC 粒子を使用した新しい製造工程の開発に力を入れている。なお熱機械的な特性を向上させる方法と薄板の製作方法も研究している。

そして現在は金属基複合材料の製造工程を数値的に解析・予測できる技術と関連して理論的な研究も進行している。当実験室で使用する含浸法の過程で起こる溶融金属の流動と冷却過程のシミュレーションを通じて、浸透可能性や冷却時間を予測することによって新しいプロセス開発に要する時間と努力を減らすことができると期待している。また予備成形体の製造過程で起こる繊維の積層を数値的にモデル化して繊維配向の異方性について研究しており、微細構造に基づいた強化機構をモデリングして数値的な解析を試みている。これにより、従来の解積的な強化モデルの短所を補完する新しいモデルができると期待されている。

最後に繊維金属積層板 (FML, fiber-metal laminate) に関する研究も遂行している。この素材は繊維と金属をつぎつぎに積層した後、硬化 (curing) させて作られた

図 6 ディーゼルエンジンピストンと予備成形体

図 7 風力発電機用の風車

材料で、金属に比べて軽く高い強度を持つ上疲労き裂遅延特性が20～100倍以上優秀な材料である。また使用目的に沿って繊維と金属を適切に選んで使用できるし、繊維層の角度と数を調節することによって設計者の意図に合うように設計することもできる。当実験室ではアルミニウム薄板と炭素繊維を使用したFMLを開発している。1970年代から先進国ではFMLの研究が始まったが、韓国ではほとんど研究が行われていなかったのが、独自の研究分野ということができる。当実験室では従来の疲労特性などを中心とした研究から脱して、繊維の積層順序の影響を考慮した有限要素解析を通じて最適設計を行い、積層形態と圧入、衝撃、疲労特性の関連について研究している。この研究で示された損傷モデルは妥当性があると評価されており、成形性の研究とともに重要な研究結果につながる可能性が高いと予想している。最近、このような基礎研究と並行して自動車の構造材などに適用する研究も遂行している。

一方、現在まで蓄積した金属基複合材料の製造技術を実際に応用するために金属基複合材料を専門的に扱うベンチャ企業であるハンテック (Hantech. Co., Ltd.) を設立した。2000年1月に設立されたハンテックは長年の金属基複合材料の研究経験と製造ノウハウ、金属基複合材料を利用した高性能の部品の開発経験に基づいて大学発のベンチャ企業として出発した。現在、金属基複合材料の部品開発に必須の予備成形体を開発、生産しており、国内の自動車業界と浦項工科大学校など産学連繋を通じて最大の効率を引き出す技術集約形のベンチャ企業を追い求めている。ハンテックの主要な開発人力は長年金属基複合材料を直接製作、研究してきた博士3人、修士3人であり、特にこの中で2人は現職教授として持続的に金属基複合材料の研究をしている。現在生産している代表的な予備成形体は、ディーゼルエンジンピストンのtop ring grooveを金属基複合材料に代替するために必要な予備

成形体であり、新しい応用分野を開拓するための研究を継続している。

2. 高分子系複合材料分野

初期には主として高分子系複合材料の機械的特性を理論的あるいは実験的に研究してきた。その中で疲労破壊に関連した疲労係数 (fatigue modulus) 理論は代表的な研究結果である。これは今までの疲労損傷モデルが複合材料には適合しなかったという短所を補完して、材料の特性をより詳しく表現していると評価されている。既存の非線形モデルは材料定数を求めるため数多くの試験が必要であるという短所があり、実際の疲労現象における微視的あるいは巨視的な材料の変化に基づくのではなく、単なる経験的な実験結果に基づく数式という意味しかないのである。これに比べて疲労係数を用いる疲労累積損傷モデルで予測する疲労寿命予測式は、より实际的で幅広い適用が可能であろうと評価されている。最近、このモデルが複合材料だけではなく普通のステンレス鋼にも適用できることが報告され、ますます適用範囲が広がっている。また、今までの単純な荷重条件での疲労破壊現象の研究を補完し、軸方向及びねじれ方向の二軸荷重下で複合材料強度及び疲労特性に与える影響を研究したことがある。この研究で提案した解釈は実用性と信頼性に富み、強度と疲労寿命の予測結果もすぐれていると評価されている。これは複合材料の破壊現象が複雑であるため、今まで多軸荷重下での強度及び破壊機構についての実験及び解析結果が不足していることを勘案する独自の研究結果だと言えよう。この他にも複合材料の強度

図8 複合材料プーリー

に与える円孔ノッチの影響や損傷した試験片の振動特性に関する研究も行っている。

こういう基礎的な研究結果を土台にして高分子系複合材料の応用分野を開拓しようとする研究も進行しつつある。先ず最近の代替エネルギー開発と関連して国内技術で風力発電機を開発するための研究が行われている。風力発電機用の風車の回転翼はガラス繊維強化複合材料 (class fiber reinforced plastics, GFRP) を用いて製作され、回転中には遠心力及びスプリングの力によって持続的な静荷重及び疲労荷重が作用する。従って疲労寿命評価は回転翼の重要な指標であり発電機の性能に大きく影響を与える要素である。それゆえに本実験室では異なる繊維積層角を有する多様な回転翼を製造し、疲労特性と安定性及び振動特性を実験及び理論的に研究している。この実験によって実際の作動条件で構造的な安定性を予測できるような技法を開発している。この技術を確認することによって、国内風力条件に合うような風車回転翼を開発できるのではないかと期待している。

さらにプーリー、自動車用バッテリーケースなどを複合材料で代替しようとする研究も行っている。最近自動車分野で軽量化により燃費を改善しようとする技術開発が世界的に活発に推進されている。そこで既存の金属材料の代替材料として比強度と比剛性に優れる複合材料の適用の割合が毎年増加している。今まで自動車への複合材料の応用は主として外装材に限られていたが、最近その範囲が広まり、苛酷な耐熱性、耐化学性、優秀な機械的物性を要求するアンダーフード部品まで適用範囲が拡大しつつある傾向にある。当実験室で開発しているダンパープーリーハブはカム軸を駆動するベルトプーリーシステムの主要部品で、クランク軸で生じるトルクと振動に対する耐久性、及びオイル、燃料、不凍液などに対する耐化学性と共に騒音低減特性まで要求される部品である。ダンパープーリーの構成部品は、クランク軸と連結するための

図9 電気自動車用バッテリーケース

挿入リング、ダンパープーリーハブ、ハブの剛性増大のためにプーリーハブ内部に挿入する補強プレート、ベルトがつながる振動リング、そして振動リングとダンパープーリーハブとの間に設置する振動低減のためのゴムがある。このようなダンパープーリーハブを既存の金属の代わりに短繊維強化複合材料 (Nylon 66 GF) を用いて製作している。プーリーの振動特性を分析して低周波領域における共振の原因を把握し、これを解決するためにダンパープーリーハブのリップ (rib) を様々な形状に変えながら最適な振動特性を持つプーリー形状を工夫している。なお電気自動車用バッテリーケースの研究も行っている。電気自動車は動力源の特性のため相当量のバッテリーを搭載する必要があるため、バッテリーの重量が問題になる。電気自動車に使われているバッテリーケースは今まで鋼材の溶接により製作していた。しかし鋼材はバッテリーを活性化する時に生じる圧力に耐えるために十分な板厚が要求され、バッテリーケースの重量増加の原因になっている。そこで、バッテリーケースを高分子系複合材料により代替し、バッテリーの重量を減らす方法を研究している。この技術によって動力源の効率の極大化と原価節減もできるのではないかと考えている。

3. 適応構造 (adaptive structure) 分野

適応構造物の研究として、構造物の能動制御の理論研究、振動制御の実験的研究、光ファイバーを利用した適応構造物に関する研究が進められている。初期は形状記憶合金 (shape memory alloy, SMA) とか圧電セラミックス (piezoelectric materials, PZTs) の特性などに関連して駆動機としての研究が行われていたが、その後、実際構造物に適用されてトラス構造物と航空機の翼の形状と振動の制御に関する研究を行っている。トラス構造物は組立と分解がし易く、体積に比べて軽いので宇宙構造

図 10 適応トラス構造物

物に使用される構造である。従って宇宙空間での高い効率性と精密な振動制御の必要性から圧電素子を利用した能動制御の研究を行っている。最近研究している adaptive wing は時々刻々変化する飛行条件に対し、最適化された形態に変形できる翼である。今まではその構造の複雑さや重量制約のために応用は容易ではなかった。当実験室では SMA と PZTs を併用することによって、今までの技術的な限界を克服した adaptive wing を開発中である。そのためにセンサーとアクチュエーターの数値モデルを使用して形状を予測するプログラムを開発し、この結果を実験的に検証している。今までの形状に関するデータを利用して適用性を広めて行く計画である。

構造物の振動制御と関連して振動する物体から発生する騒音を制御する必要性もある。特に最近の航空機の設計において、エンジンや翼の振動が胴体を通じて伝達される騒音低減に対する重要性が増加している。これまで騒音を減らすために、胴体の内部表面にガラス繊維のような胴体に比べて軽い減衰用の内装材をつけたり、エンジンと翼の表面に調整された振動減衰機をつけたり、胴体の構造を変えるなどの受動的な方法が使われてきた。しかしこんな方法は様々な音響環境への対処が困難で、特に音圧が大きい低周波領域の騒音制御にはあまり効果的ではないという短所があった。このような短所を克服するために、航空機から発生される音響モードに影響を及ぼす構造振動モードを能動的に制御するための感知機、及び作動機を胴体表面に付着させ、構造を通じて伝達される騒音を低減する方法を開発している。最近のモード理論と制御理論、そして向上してきたコンピュータ

技術を利用して多様な周波数に対する能動制御アルゴリズムを開発しており、感知機及び作動機の位置に関して数値的、実験的なアプローチによって最少の作動機を使用して最適な騒音制御を実現するための研究を進めている。

そして上述の作動機の開発と振動制御の研究を複合材料に適用し、知能化に関する研究を進めている。その一つとして、従来のアンテナの外観上・構造上の弱点を補完した CLAS (conformal load-bearing antenna structure) を開発した。CLAS はアンテナと構造物を統合したもので、構造物に挿入可能な spiral アンテナ及びマイクロストリップアンテナと、アンテナに必要な空間を提供するサンドイッチ構造物より構成される。マイクロストリップアンテナは値段が安いし、軽いし、付着し易いという長所があり、体積が小さい共振アンテナであるので、現在の移動通信用のアンテナに適している。サンドイッチ構造物は今までの研究結果により比強度及び比剛性、圧縮荷重に対する高い安定性を持つことがわかっている。従ってこの二つの材料を積層した CLAS はアンテナと構造物の性能を同時に満足させる。今まで多様なハニカム、アンテナの構成材料と結合材を用い、構造的強度と電波の放射パターンを調査することによって最適な製造条件を確立してきた。また、座屈、衝撃、屈曲実験により、すぐれた機械的性質と高い送/受信効率を有するサンドイッチ構造物を開発し、同時に衝撃や屈曲損傷がアンテナの性能に及ぼす影響について研究してきた。これらの研究結果を基盤とし、携帯電話、ノートブック、自動車、人工衛星アンテナなどへの適用研究を行っている。

このほか、複合材料の構造物に直接挿入して使用できる光ファイバセンサーを開発している。光ファイバセンサーは、分散されたセンサネットワークを構築し易く感度が優れており、電磁波の影響を受けないという特性をもっている。最近産業構造物への適用が拡大されているセンサーである。当研究室では光の干渉を利用した Fabry-Perot 干渉計 (EFPI) 及び光度解析による光ファイバセンサー (intensity based optical fiber sensor) を製作し、構造物の静的な変形と振動・圧入などの動的な変形を測定する研究を進めている。具体的に、光ファイバセンサーを利用した構造物の振動制御と衝撃位置の測定に関する研究と、疲労過程の中で構造物に挿入した光ファイバセンサーの信号を比較、分析することによって構造物の内部の疲労損傷を検出する研究を行っている。現在開発した光ファイバセンサを当実験室で開発中

の風力発電機用複合材料回転翼に設置する方法の研究と共に、疲労損傷に関する理論に基づいて光ファイバセンサーの配列を決定したり、実時間信号処理の技法を適用して構造物の健全性評価のための常時監視システム (on-line monitoring system) への発展を推進している。

今年設立 13 年を迎える当研究室は、実験施設及び研究内容においても着実に成長しながら、活発な国内外で

の学会活動などを通じて学問的な発展に寄与している。また実験室の多様な研究テーマを相互有機的に連係させ研究効率の極大化を推進しており、研究結果を実システムに適用するためにベストを尽して実用的な技術の発展にも寄与しようと考えている。これからも継続して世界的な複合材料研究室を目指して努力する所存である。