解説

KAIST における複合材料の研究活動

Chun-Gon Kim*¹ (翻訳 轟 章*²)

KAIST (Korean Advanced Institute of Science and Technology; 韓国大田) には複合材料の研究活動をしている研究室は複数存在する。これらの研究室の中で下記の4研究室の研究活動をこの解説記事で紹介する。

- ・スマート構造・複合材料研究室：航空宇宙工学校
- ・知的システム・振動制御研究室：航空宇宙工学校
- ・先進材料を用いた機械設計研究室：機械工学校
- ・複合材料研究室：材料科学・工学科

1. スマート構造・複合材料研究室

スマート構造・複合材料研究室 (<http://smartech.ac.kr>) は1979年に設立され2名の教授 (C.S. Hong 教授と C.G. Kim 教授) が着任し、20名以上の修士と博士の学生が所属している。研究は複合材料構造の解析、設計、製作、光ファイバーセンサー構造、損傷検知、構造ヘルスマニタリングなどが行われている。これらの技術は航空宇宙の設計製作で次第に適用されている。これらのいくつかの研究について簡単に解説する。

1.1 光ファイバーセンサーを用いたひずみや破壊の同時計測 (図1参照)

稼動条件下での複合材料構造の安全性や信頼性を確認するために、稼動中の構造モニタリングのための新しい非破壊検査 (NDI) 手法を確立することが望まれている。この研究の目的は光ファイバーセンサーを用いた複合材料のリアルタイムの破壊信号やひずみの測定手法を開発することである。この研究において、広帯域 FBG (ファイバーブラッググレーティング: Fiber Bragg Grating) 反射鏡を用いた同時センシング技術を当研究室では提案している。引張試験の結果から、AEFPI センサー (Absolute Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) で測定したひずみは電気抵抗線ひずみゲージの測定結果と良く一致

し、マイクロクラックの信号を検出することで破壊検知することが可能であることが示された。

1.2 偏光維持ファイバーを用いた FBG センサーの信号特性 (図2参照)

ほとんどの光ファイバーひずみセンサーはファイバーの繊維方位ひずみ成分しか測定できない。この研究では、直交方位の2方位のひずみを測定可能な光ファイバーセンサーが研究されている。そのセンサーは1本の2つの屈折率を持つ偏光維持光ブラッググレーティングファイバーセンサーである。光ファイバーコア中の2つの独立した直交ひずみ成分は、2つのピーク値の波長変化から計算される。ブラッググレーティングを使うことの利点はひずみ情報がセンサーから反射される光の周波数変化にコーディングされることであり、これによって簡単に多重化が可能となる可能性を有している。

1.3 C/C 複合材ブレーキディスクの解析と設計 (図3参照)

C/C は高温環境での優れた特性から、航空機のブレーキシステムで特に使われている。この研究の目的は航空機に使用されている C/C 複合材のブレーキディスクシステムのための実験的・解析的設計手法の開発である。この研究の最終目標は、C/C 複合材の機械的特性を評価し、ブレーキシステムの過渡的な温度・応力場の熱弾性解析の検討とブレーキシステムの破壊解析によって、より安全で効率的なブレーキシステムを開発することである。

1.4 空間的に強化された複合材製ノズルの熱弾性解析 (図4参照)

C/C で空間的に強化された複合材製キックモーターノズル (SRC) の熱的・機械的特性を予測し、有限要素解析からノズルの熱弾性挙動を解析している。この解析結果から、SRC の横方向熱伝導が軸方向よりもノド部の温度分布に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。また、他の部分よりも C/C 複合材 SRC と C/フェノールの境界において温度勾配が急であることがわかった。4D-SRC の熱変形は 3D-SRC よりも小さいことが明らかになった。しかし、応力分布は類似していた。

*¹ 韓国科学技術院航空宇宙工学校
373-1 Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon 305-701, Korea

*² Akira TODOROKI: 東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻 (152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

図1 リアルタイムひずみ測定・破壊モニタリング用光ファイバーセンサーシステム概念図

図2 開発したFBGシステムによるひずみ測定原理

図3 C/C複合材ブレーキディスク

1.5 フィラメントワインディング圧力タンクの解析と設計 (図5参照)

金属燃料タンクに比較して、フィラメントワインディング (FW) 圧力タンクは剛性や耐熱性に優れた特性を有している。それにもかかわらず、FW 成形の適用は容易ではない。FW 圧力タンクは長軸方向に沿った鏡部において複雑な特性と形状を有している。FW 構造の挙動を理解するためや複合材圧力タンクの設計には洗練された解析手法が必要である。この研究では、ABAQUS 解析の便利のためにプリプロセッサ (PreAft) が開発された。

Kick Motor Nozzle

図4 キックモーターノズル

図5 FW圧力タンク

PreAft はFW 圧力タンクの非線形解析のために ABAQUS 用の入力ファイルを作成し、ABAQUS を用いた非線形有限要素解析からスペック (体積, 重量, など) に

図 6 複合材シェル構造の最適設計

合致した FW 圧力タンクの最適設計を実行する。

1.6 エキスパートシステムを用いた複合材シェル構造の最適設計 (図 6 参照)

複合材構造では、繊維方位や積層構成を制御することで設計者の目的に合致した最適設計を実施することができる。しかし、従来の金属材料と異なり、複合材料の適用には多くの困難がある。例えば、強い機械的特性の異方性のために従来と異なる解析方法を採用しなければならないこと、複雑な層間相互作用、設計経験の不足などである。これらの経験のない設計者には、エキスパートシステムの導入が有効である。さらに、実際に使用されている複合材料の積層繊維方位は連続変数ではなく離散的であるために、離散的な最適設計が必要である。これらの背景から、この研究の主要な目標は、複合材積層構造の予備設計や最適設計のためのエキスパートシステムの統合と離散的な最適設計法の開発である。

1.7 光ファイバーセンサーを用いた宇宙環境での複合材料の熱膨張率変化の測定 (図 7 参照)

近年、宇宙構造物に複合材料は頻繁に使用されるようになってきた。宇宙環境下での複合材料の熱膨張係数変化の研究のために、光ファイバーセンサーを CF/エポキシ複合材 (HFG CU-125 NS) に埋め込んだ。この複合材を、低軌道を模擬した高真空 ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr) で紫外線照射 (200 nm 以下) の熱サイクル ($-80^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$) 環境の熱真空炉に設置して環境負荷を与えた。

光ファイバーセンサーは多くの利点を有している。

図 7 宇宙ステーション

EMI 特性, 広い温度範囲, 省スペース, 軽量などである。このため、過酷な宇宙環境では光ファイバーセンサーは宇宙構造に非常に適している。この研究では、ひずみと温度を同時に測定するために FBG センサーが使用されている。この研究によって、宇宙構造のヘルスマonitoring が可能となる。

2. 知的システム・振動制御研究室

知的システム・振動制御研究室 (<http://asdl.kaist.ac.kr>) は 1987 年にスマート構造と空力弾性の重点的研究のために設立された。In Lee 教授と 12 名の修士と博士課程の学生, 1 名のポスドクが配属されており, スマート構造, 複合材料, 航空宇宙構造の熱圧電効果, 熱弾性, 構造振動制御, 空力弾性やフラッタ制御の研究が行われている。研究活動は以下の通りである。

- 適応振動制御: ニューラルネット, 適応 PPF, 適応シャントを用いた知的複合材構造
- アクティブ振動制御: 最適制御と PPF 制御による圧電セラミックと光ファイバーセンサーを用いた知的複合材構造の振動制御
- セミアクティブ振動抑制: ER ダンパや ER 流体埋め込みの複合材構造による振動抑制
- パッシブダンパ強化: 粘弾性層や圧電シャントを用いたパッシブ振動抑制
- 複合材構造の非線形ダイナミクス: 圧電素子や粘弾性 ER 流体層を有する複合材積層板やシェル構造の非線形動力学解析
- ヘリコプタの空力弾性: ホバリング時や前進時の複合材製ヘリコプタローターブレードのフラッタ解析
- 遷音速航空機の空力弾性: 遷音速航空機的全機空力解析
- 複合材航空機の空力解析: 低速, 遷音速, 超音速下

図8 熱圧電スナップスルー現象

の複合材製航空機構造のフラッタ解析

- ・パネルフラッタ：超超音速の複合材構造のフラッタ解析

知的システム・振動制御研究室では圧電素子や粘弾性材料、ER流体、光ファイバーセンサーを用いた複合材構造の振動と変形制御の問題を研究し続けている。最近の研究はスマート構造の変形制御である。熱や電気的な負荷を受けた圧電素子積層板の座屈や座屈後挙動が数多く実行されている。熱負荷による座屈後の変形制御において、熱圧電スナッピング (snapping) 現象が発生する場合がある。圧電アクチュエータを使った耐熱構造の性能向上の研究が実施されている。図8は熱圧電スナップスルー現象である。詳細は参考文献 *AIAA Journal*, 39, 6, 1188-1197 に記載されているので参照されたい。

3. 先進材料を用いた機械設計研究室

先進材料を用いた機械設計研究室 (<http://lacomrs6.kaist.ac.kr>, Dai Gil Lee 教授) は自動車のプロペラシャフトや液晶ディスプレイ組み立てロボット用のエンドエフェクタ、誘電率を用いた成形モニタリングなどの複合材の適用製品に研究の焦点をおいている。

自動車用プロペラシャフト (図9参照) は前部のエンジンから後輪駆動自動車の後部減速機まで動力を伝導している。プロペラシャフトは通常は曲げの固有振動数は回転振動共振を避けるために 6,500 rpm よりも大きいことが要求され、鉄鋼材料やアルミニウム合金で作製した1本のプロペラシャフトは通常は曲げの固有振動数は

図9 プロペラシャフト (右が鉄鋼製, 左が複合材製)

この要求は達成できない。このため、鉄鋼材料のプロペラシャフトは通常2本の接合で製造されている (図9参照)。これは、曲げ固有振動は梁の長さの2乗に反比例するからである。炭素繊維複合材料の比剛性は鉄鋼材料やアルミニウム合金に比較して4倍程度大きいため、炭素繊維強化複合材料のプロペラシャフトの基本的固有振動数は 6,500 rpm よりも大きくすることができる。これによって、乗用車のプロペラシャフトを1本の部品からなる構造にすることができる。複合材プロペラシャフトは他にも重量軽減や騒音や振動の軽減という利点がある。

産業用ロボットは人間による汚染を防ぐためにクリーンルームの環境で盛んに使用されはじめています。液晶パネルのサイズの増大に伴い、ペイロードが増加し、ロボットの剛性が要求されるようになった。それゆえに、スリムで剛性の高いエンドエフェクタの設計と製作が重要になった。エンドエフェクタの変形を減少させるために液晶パネルのガラス板を取り扱う軽量のロボットハンド用エンドエフェクタがCF/エポキシとハニカムのサンドイッチ構造によって設計され、製作された (図10参照)。ロボット用複合材エンドエフェクタの静的な変形や固有振動数、減衰などの静的・動的特性はアルミニウム合金製の競合製品と比較して優れた特性を示した。

熱硬化性樹脂を母材とする複合材料の成形プロセスは複数相の化学反応だけでなく熱と質量の物理的な輸送も伴う。これらは樹脂の粘性に依存している。熱硬化性樹脂の化学反応は複雑なモノマー同士の架橋による発熱反応である。複合材製品は硬化過程の温度勾配や不均一な硬化度によって引き起こされる熱残留応力によって変形したり、ねじれたりする。それゆえに、複合材製品の品

図 10 大型液晶パネル組み立て用ロボットの複合材料製エンドエフェクタ

図 11 16 ch オンライン成形誘電センサーとそのシステム

質向上のために硬化作業のオンライン測定や制御は重要である。あるいは成形中の周囲温度や圧力のオンラインモニタリングによって短時間に効率的に信頼性の高い複合材製品が製造できる。新規に開発した 16 チャンネルの埋め込み AC ブリッジタイプ回路とインターデジタル誘電センサーによって、以前のバージョンよりもさらに制度良く便利なシステムとなっている (図 11 参照)。

4. 複合材料研究室

複合材料研究室 (<http://composite.kaist.ac.kr>, Soon Hyung Hong 教授) では、金属基複合材料とナノ複合材の製造プロセスと特性評価が行われている。

図 12 SiC アルミ複合材製放熱器とマイクロプロセッサ

図 13 ナノ結晶性 WC-10 Co 複合材の TEM 写真

金属基複合材料の構造適用に関連して、ウイスキー強化複合材料の荷重伝達メカニズムが解析され、最近是一般化されたシェアラグモデルが提案された。提案された理論モデルに基づいて金属基複合材料の高温環境下のクリープ挙動をさらに正確に解析することができる。金属基複合材料の機能材料としての適用に関しては、高体積含有率 SiC 粒子強化アルミニウム合金の製造のための高圧溶浸鋳造プロセスが開発された。高体積含有率 SiC 粒子強化アルミニウム合金複合材料は熱膨張係数が 6.5 ppm/K であり、熱伝導率が 150 J/mK である。これは熱伝導率に関してはセラミック部材より優れており、熱膨張に関しては金属よりも優れている (図 12 参照)。

ナノ複合材料に関しては、ナノ結晶性 WC/C 複合材料が工具材料として、W/Cu ナノ複合材料がヒートシンクとして検討されている。ナノ結晶性 WC/C 複合材料はスプレー転換プロセスによって準備され、優れた硬さを示している。これは従来の WC/Co 材のほぼ 2 倍である。焼結 W/Cu ナノ複合材料は従来の混合材入りの W/Cu 複合材と比較して、高い熱伝導率を示している (図 13 参照)。