フレキシブルマトリックスセンサを用いた
CFRP 積層板多点成形モニタリング*小林 誠 治^{*1}, 松 崎 亮 介^{*2}, 轟 章^{*2}Multipoint Cure Monitoring of CFRP Laminates
Using Flexible Matrix SensorSeiji KOBAYASHI^{*3}, Ryosuke MATSUZAKI and Akira TODOROKI^{*3} Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

Since CFRP structure becomes complicated due to adoption of integral molding, local molding faults such as under cure and dry spot are liable to occur. For solving this problem, it is demanded to measure the distribution of cure-degree of whole composite structure. In the present study, we propose a patch-type flexible matrix sensor based on permittivity measurements. Multiple electrodes and wirings are readily fabricated at one time using a photolithographic process. Moreover, the sensor has only $m+n$ wirings for $m \times n$ sensors, and is thereby suitable for the multipoint cure monitoring. We also constructed the method of estimating degree of cure considering effect of frequency dependence of permittivity of resin and viscosity variation due to temperature change. Experiments of multipoint cure monitoring are carried out using a CFRP plate and an actual aircraft structure. As a result, we confirmed the effectiveness of this method by comparing with the conventional differential scanning calorimeter.

Key Words: Composite Material, Smart Structure, Nondestructive Inspection, Sensor, Permittivity Frequency Dependence, Degree of Cure, Multipoint, Viscosity

1. 結 言

CFRP は優れた比強度、比剛性を有するため航空宇宙産業を中心に広く用いられている。近年、部品点数の削減による軽量化・信頼性向上のため複雑形状構造を一体で成形する一体成形技術が開発されている。しかし、一体成形による構造物の複雑化により、局所的に硬化不足・過熱などの成形不良が生じやすくなる問題が生じている。これに対して、構造全体の硬化度分布測定が実現されれば、硬化進行が遅れている個所を局所的に加熱することができ、硬化不良・残留ひずみの低減⁽¹⁾と成形時間の効率的な短縮⁽²⁾が可能になると考えられる。また樹脂自体の劣化により、同一の成形条件でも不良品⁽³⁾が生じることから製品成形条件の策定だけでなく、品質保証の観点からも成形時の硬化度分布測定が要望されている。

硬化度測定手法として既に誘電率センサ⁽⁴⁾や光ファイバセンサ⁽⁵⁾⁽⁶⁾、圧電素子⁽⁷⁾などを利用した手法が提案されているが、センサを成形品に埋め込む方法は、構

造の力学的特性を低下させる可能性があり問題となる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。また、これらのセンサはポイント型のセンサであるため、構造全体の硬化度分布を把握するには多数のセンサ、複雑な配線取り回し、高価な測定機器が必要となり測定システムが高コストとなる。さらに、成形測定時に埋め込んだこれらのセンサは運用時には不要となり重量増加も引き起こすため、実用的なセンシングシステムとして用いるには課題が多い。これまでに、FBG 光ファイバを利用した分布計測⁽¹⁰⁾も提案されているが、硬化度測定はファイバ線上に限られ、また測定手法はひずみ計測に基づくものであり硬化度を直接算出するものではない。以上から、硬化測定終了後も使用可能で、複雑形状の硬化度分布計測が低コストで実現可能な新しいモニタリング手法が求められている。

そこで本研究では、多点硬化度測定センサとして、フレキシブル基板からフォトリソグラフィにより多数のセンサと配線パターンを一括で作製可能なフレキシブルマトリックスセンサを提案する。本センサは、配線を横と縦に分けることにより横 m 個、縦 n 個の($m \times n$)個の測定点に対して($m+n$)本の配線数しか必要とせず多点測定に適したセンサである。さらにセンサは厚

* 原稿受付 2008 年 3 月 19 日。

^{*1} 学生員, 東京工業大学機械物理学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。^{*2} 正員, 東京工業大学機械物理学専攻。

E-mail: skobayas@ginza.mes.titech.ac.jp

さ 85 μm と薄く柔軟性を有し, CFRP 成形品の表面に貼付するため複雑形状への適用が可能であり成形品の力学的特性の低下の恐れがない。

著者らはこれまでに CFRP 自体の電気抵抗変化から内部損傷を検知するシステムを構築しており⁽¹¹⁾, 本フレキシブルセンサを成形モニタリング後もそのまま電圧印加電極として利用することで, 構造ヘルスマニタリングとしても使用可能である。これは成形品が生まれる時(成形時)から運用後までを1つのセンサでセンシングすることができることからフレキシブルマトリックスセンサはゆりかご(成形時)から墓場(廃棄)までのヘルスマニタリング“Cradle-to-grave monitoring”が可能な画期的なセンサであると言える。

硬化度測定手法として, 母材であるエポキシ樹脂などの誘電体樹脂の誘電率の周波数依存性と温度による粘性変化を考慮して硬化度を算出する新たな成形モニタリング手法を提案する。本手法により, 成形時に流動する炭素繊維や電極形状の影響を受けることなく樹脂の物理的特性を表す粘度を求めることができ, 温度による影響分を推定・除外することで, 硬化度を視覚化することができる。

まず, プリプレグによる CFRP 積層平板成形時の硬化度分布をフレキシブルマトリックスセンサを用いて測定し, 提案手法の有効性を検討した。さらに, 温度ムラの生じやすい複雑な形状を有する航空機構造物の硬化度分布測定を行い, 硬化進行の様子を測定した。

2. 硬化モニタリング原理

本研究では樹脂の粘性と誘電率の周波数依存性の関係に着目し, 硬化度を算出する。エポキシ樹脂などの有極性高分子では配向分極は双極子の回転運動に粘性抵抗の影響で時間的な遅れが生じ, 誘電緩和現象に起因する誘電率の周波数依存性を示す⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。一般的に複素誘電率 ε^* は緩和時間 τ と交流周波数 ω を用いて式(1)で表わされる。

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon / (1 + i\omega\tau) \quad (1)$$

ここで, ε_∞ は高周波数極限での誘電率, $\Delta\varepsilon$ は緩和強度である。式(1)の複素誘電率の実部 ε' は次式で表わされる。

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon / (1 + \omega^2\tau^2) \quad (2)$$

高周波の場合 $\omega^2\tau^2 \gg 1$ であるため, 式(2)は式(3)で近似することができる。

$$\varepsilon' \approx \varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon / (\omega^2\tau^2) \quad (3)$$

さらに式(3)に関して ω_0 まわりで Taylor 展開すると次式になる。

$$\varepsilon' \approx \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{\omega_0^2\tau^2} - \frac{2\Delta\varepsilon}{\omega_0^3\tau^2} \Delta\omega = b_0 + b_1\Delta\omega \quad (4)$$

ここで $\Delta\omega$ は ω_0 に対して微小な周波数範囲である。式(4)から定数 m を用いて次式が成り立つ。

$$\tau = m / \sqrt{-b_1} \quad (5)$$

ここで, $m = \sqrt{2\Delta\varepsilon/\omega_0^3}$ である。Rouse 理論⁽¹⁵⁾によると, 絶対温度 T , 密度 ρ の状態での緩和時間 τ_T は次式となる。

$$\tau_T = \frac{6\mu_T M}{\pi^2 \rho R T} \quad (6)$$

ここで, μ_T は絶対温度 T 時での粘度, M は分子量, R は一般気体定数である。絶対温度 T_0 , 密度 ρ_0 の状態での緩和時間を τ_{T_0} とすると,

$$\frac{\tau_T}{\tau_{T_0}} = \frac{\mu_T \rho_0 T_0}{\mu_{T_0} \rho T} \quad (7)$$

となる。ここで, μ_{T_0} は絶対温度 T_0 時での粘度である。温度変化ならびにそれに伴う密度変化は微小であるため $(T_0\rho_0/T\rho) \approx 1$ とみなすことができ, 緩和時間 τ と粘度 μ との間には比例関係が成立し, 次のように表記できる。

$$\mu = \frac{\mu_{T_0}}{\tau_{T_0}} \tau = \frac{\mu_{T_0}}{\tau_{T_0}} \cdot \frac{m}{\sqrt{-b_1}} = n / \sqrt{-b_1} \quad (8)$$

ここで, $n = \frac{\mu_{T_0}}{\tau_{T_0}} \cdot m$ である。

また, ゲル化後の熱硬化性高分子樹脂の粘度 μ は絶対温度 T と硬化度 β に依存して, 次式で表わされることが知られている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

$$\mu = \mu_\infty \exp\left(\frac{U}{RT} + K\beta\right) \quad (9)$$

ここで, μ_∞, K は材料定数, U は活性化エネルギーである。式(8), (9)から粘度の指標 $1/\sqrt{-b_1}$ は次式で表わされる。

$$\frac{1}{\sqrt{-b_1}} = \frac{\mu_\infty}{n} \exp\left(\frac{U}{RT} + K\beta\right) \quad (10)$$

硬化度 β について求めると次式になる。

$$\beta = \frac{1}{K} \left[\ln\left(\frac{1}{\sqrt{-b_1}}\right) - \frac{U}{RT} - \ln\left(\frac{\mu_\infty}{n}\right) \right] \quad (11)$$

3. CFRP 積層板の硬化度測定

3.1 フレキシブルマトリックスセンサ 本研究では硬化度測定センサとしてフレキシブル基板 (Sunhayato ポジ感光基板 1K) を用いる。銅箔厚, ポリイミド厚はそれぞれ $35\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ である。フォトリソグラフィ加工により作成した電極・配線パターンを図 1 に示す。1つの電極サイズは $5 \times 20\text{ mm}^2$ である。この2枚のフレキシブル基板を重ねて、下層の基板の電極部が露出するように上層の基板のポリイミド層を切り取る。重ねた時の 0° 方向の隣接電極間隔は、約 4 mm である。上記の手順で完成したセンサを本研究ではフレキシブルマトリックスセンサと呼ぶ。本センサは、配線を横と縦に分けることにより横 m 個、縦 n 個の $(m \times n)$ 個の測定点に対して $(m+n)$ 本の配線数しか必要としない。この利点は測定点が多いほど活かされるため、フレキシブルマトリックスセンサは多点計測に適したセンサと言える。フレキシブルマトリックスセンサは、例えば図 1 中の配線番号 1 と A を測定器に接続することで左上領域の隣接電極間にコンデンサが形

Fig. 1 Electrode pattern for CFRP plate (dimensions in mm).

Fig. 2 Electrode pattern for CFRP actual aircraft structure (dimensions in mm).

成され、配線番号を切り替えることで任意の場所の電気容量を測定することができる。硬化度測定を CFRP 積層平板と CFRP 実構造の 2 種類の構造で行った。CFRP 積層平板の硬化度測定では図 1 の形状のセンサを、CFRP 実構造の硬化度測定では図 2 の形状のセンサを用いた。図 2 のセンサには Sunhayato ポジ感光基板 3K を用い、1つの電極サイズは $10 \times 6\text{ mm}^2$, 90° 方向の隣接電極間隔は約 5 mm である。

3.2 実験方法

3.2.1 CFRP 積層平板 アルミ治具 $250 \times 250 \times 5\text{ mm}^3$ 上に図 1 のフレキシブルマトリックスセンサを設置し、フレキシブルマトリックスセンサ上の電極部を覆うサイズの $70 \times 100\text{ mm}^2$ のプリプレグ (PYROFIL #380) を積層構成 $[90/0/90/0/90]$ で積層する。積層したプリプレグ上にテフロンシートを重ね、K 熱電対を設置する。対のアルミ治具を重ね、シャコ万力でプリプレグに圧力をかけ、電気炉 (ISUZU Drying Oven AT-E58) で加熱成形する。フレキシブルマトリックスセンサを LCR メーター (HIOKI 3532-50) に接続して電気容量を、熱電対で温度を測定する。実験の概略図を図 3 に示す。フレキシブルマトリックスセンサの配線番号 1~3, A~C を PIC 回路に接続する。PIC 回路はスイッチング回路であり、例えば、配線番号 1 が LCR メーターの Low Voltage に、

Fig. 3 Schematic setup of multipoint cure monitoring using flexible matrix sensor for CFRP laminates.

Fig. 4 Jig shape for actual aircraft structure (dimensions in mm).

配線番号 A が High Voltage に PIC 回路を経由して接続されている場合、電気容量の測定終了後に LCR メーターの外部出力端子 GPIB コネクタから出力される信号を受け取り、LCR メーターとの接続を 1 と A (以後“1-A”と表記) から“1-B”に自動的に切り替える回路である。測定順序は、電極“1-A”、“1-B”、“1-C”、“2-A”、…、“3-C”の順で行った。

3.2.2 CFRP 実構造 人力飛行機の主翼迎角調整器に用いられる CFRP 実構造の硬化度分布測定を行った。迎角調整器の作製には図 4 の形状の治具が用いられ、このように曲面部の治具厚が大きく熱容量も大きくなるため、昇温速度が平面部より遅くなり温度差が生じると考えられる。この温度差を測定するため、図 4 の CH1-4 の 4 カ所に K 熱電対を設置した。図 2 の寸法のフレキシブルマトリックスセンサを治具上に設置した図を図 5 に示す。配線番号 5 が曲面部と平面部との境となるようにフレキシブルマトリックスセンサを設置した。フレキシブルマトリックスセンサ上の電極部を覆うサイズの $60 \times 185 \text{ mm}^2$ のプリプレグ (PYROFIL #380) を積層構成[0₅]で積層する。加熱には温

Fig. 5 Position of the flexible matrix sensor on the jig.

Fig. 6 Capacitance at “1-A” and temperature of the CFRP plate during curing process.

度調節が容易なホットプレートを用いて治具下面を加熱した。電気容量、温度の測定機器は CFRP 積層平板と同一であり、電気容量の測定順序は電極“1-A”、“1-B”、“1-C”、“2-A”、…、“8-C”の順で行った。

4. 実験結果と考察

4.1 CFRP 積層平板 電極“1-A”における電気容量と温度を図 6 に示す。110~120°Cにおける電気容量の周波数依存性が最大となっていることがわかる。これは使用したプリプレグ中のエポキシ樹脂が最小粘度をとる温度と一致している。加熱による温度上昇で樹脂の粘度が低下するため双極子が回転しやすくなり電気容量の周波数依存性が増加し、硬化進行により粘度が増加するため双極子の回転が制限され電気容量の周波数依存性が低下していく。800~1600 [Hz]まで 200 [Hz]ごとに測定した電気容量と周波数の関係を線形近似した際の傾きを b_1 とし、縦軸に粘度の指標となる $1/\sqrt{-b_1}$ をとり、硬化過程での時間変化を図 7 に示す。ここで線形近似した際の相関係数 R^2 が 0.3 以上の点のみをプロットした。80 分前で粘度が最小となり、その後、硬化反応により粘度が増加していることがわ

Fig. 7 Index of viscosity $1/\sqrt{-b_1}$ variation at “1-A” of the CFRP plate during curing process.

Fig. 8 $1/\sqrt{-b_1}$ - reciprocal number of T at “1-A” of the CFRP plate during curing process.

かる。70 分以前と 90 分以降において $1/\sqrt{-b_1}$ の変化が小さい。この原因は、これらの時間帯では樹脂粘度が高いため電気容量が非常に小さくなり、使用した LCR メーターでは明確な周波数依存性を測定することができないためである。縦軸に $1/\sqrt{-b_1}$ を、横軸に絶対温度の逆数を取り、図 8 に示す。硬化反応が開始していない温度領域で指数近似することで、 $\mu_\infty/n=1.98 \times 10^{-11}$ 、 $U/R=1.42 \times 10^4$ と求まる。図 8 は横軸が絶対温度の逆数であるため測定点は右側から左側へプロットされていく。昇温するにつれて $1/\sqrt{-b_1}$ の値が下に凸の曲線を描いて指数近似曲線からはずれていく様子がわかるが、これは硬化反応が進行している表れである。この指数近似曲線は、 b_1 を求める際の相関係数 R^2 が 0.7 以上となる 3 点を用いて算出した。硬化度算出の際に用いる b_1 は線形近似性が良いことから式(4)の近似式が成立し、その近似精度は十分であることを確認した。測定開始直後は前述したように明

Fig. 9 Temperature and cure terms at “1-A” of the CFRP plate.

Fig. 10 Distribution of cure-degree in the CFRP plate.

確な電気容量の周波数依存性を測定することが困難なため R^2 値は非常に低いが、温度上昇により樹脂粘度が低下するため誘電率の周波数依存性が増加し、 R^2 値が増加する。硬化反応が十分進行すると再び粘度が高くなり、周波数依存性が小さくなるため R^2 値が低下する。 R^2 値が低く、 $1/\sqrt{-b_1}$ の算出精度に誤差が大きくなるため図 7 の 70 分以前と 90 分以降では $1/\sqrt{-b_1}$ の値の信頼性が低い。上記の手順で各変数を求め、硬化度を算出することができる。粘度は温度と硬化の影響を受けて変化する。指数近似より求めた $\mu_\infty/n, U/R$ を用いて式(10)の温度項 $(\mu_\infty/n)\exp(U/RT)$ を、硬化項 $(\mu_\infty/n)\exp(K\beta)$ を図 9 に示す。硬化項算出の際、 $\mu_\infty/n, U/R, 1/\sqrt{-b_1}, T$ が既知なので式(10)より $K\beta$ を求め、硬化項を算出した。本手法では粘度変化から温度と硬化の影響をそれぞれに分離可能であり、温度変化による粘度変化の影響を考慮して硬化度を求めることができる。上記の手順で全ての電極での硬化度を算出し、積層平板内の硬化度分布図を図 10 に示す。平板においてはほぼ一様に硬化進行していることがわかる。

4.2 CFRP 実構造 設置した熱電対での測定温度を図 11 に示す。推測通り、治具厚の大きな曲面部で

Fig. 11 Temperature at each CH of the CFRP actual structure.

Fig. 12 Capacitance at “1-A” and temperature at CH1 of the CFRP actual structure.

Fig. 13 Distribution of cure-degree in the CFRP actual structure.

は平面部に比べて昇温速度が遅いことがわかる。樹脂粘度が最小になる約 110℃に到達する時間差は、CH1 と CH4 で 6 分ほどであった。電極 “1-A” における電気容量と CH1 の測定温度を図 12 に示す。平板での実験同様、110~120℃において電気容量の周波数依存性が最大となっていることがわかる。先ほどと同様の手順で各変数を求め、フレキシブルマトリックスセンサの配線番号 1, 2 は CH1 の測定温度を、配線番号 3, 4 は CH2 を、配線番号 5 は CH3 を、配線番号 6, 7, 8 は CH4 を参照して硬化度を算出した CFRP 実構造の硬化度分布図を図 13 に示す。昇温速度の速い治具の平面部から硬化し、曲面部の硬化が遅れている。このように複雑な形状を持つ構造物では治具の部位による熱容量の差異から硬化反応が一樣に進行せず、大きな残留ひずみを有することが考えられるため、局所的な温度コントロールを施すことが好ましい。

5. DSC による硬化度測定

本手法で算出される硬化度の有効性を確認するために示差走査熱量計 (SHIMADZU DSC-60) を用いて硬化度を測定した。プリプレグ(PYROFIL #380)からエポキシ樹脂のみを採取し、DSC での硬化度測定の試料とした。DSC の温度プログラムは 130℃まで CFRP 積層

Table 1 Material specification

	Reference material	Specimen
Material	α -Alumina	PYROFIL #380 Epoxy resin
Mass [mg]	11.1	12.5

Fig. 14 Heat current and temperature of the PYROFIL #380 epoxy resin in DSC.

Fig. 15 Comparison of degree of cure β between flexible matrix sensor and DSC.

平板実験での昇温速度と同一にし、その後 130℃を保持した。測定に用いた基準物質と試料の詳細を表 1 に示す。DSC で測定した単位時間当たりの発熱量とその時の温度を図 14 に示す。熱量測定で定義される硬化度 β を式(12)に示す。

$$\beta = \frac{1}{H} (dQ/dt) dt \quad (12)$$

ここで、 H : 全発熱量、 dQ/dt : 単位時間当たりの発熱量である。115℃付近から発熱し始め、硬化反応が始まっていることがわかった。式(12)を用いて硬化度を算出し、その硬化度を CFRP 積層平板の硬化度と比較して本手法の有効性を確認する。DSC を用いて測定した硬化度は昇温速度が CFRP 積層平板実験とほぼ同一であるため、CFRP 積層平板実験における測定温度での硬化度をそれぞれ比較することで本手法の有効性を確認できる。CFRP 積層平板の硬化度算出の際、 K は DSC で十分硬化していると確認できた図 15 中の 160~180 分での β の平均値が 1 となるよう定めた。CFRP 積層平板ではほぼ一樣に硬化進行しているのでの電極を比較しても良いが今回は、電極 “1-A” を用いて比較す

る。比較した硬化度を図 15 に示す。硬化過程が一致しており本手法の有効性が確認できる。硬化度 0.9 以上では樹脂粘度が高く、本手法では誤差が生じているが、工業的には硬化度 0.9 以上を硬化したとみなすため本手法の有効性は十分である。

6. 結 言

樹脂粘度と誘電率の周波数依存性に着目し、新たな成形モニタリング手法を提案した。本手法で CFRP 積層平板と CFRP 実構造の 2 つの構造で硬化度測定を行い、その有効性を確認するために DSC による硬化度と比較を行った。得られた結論は次の通りである。

- (1) 多電極・配線を一括作製可能で、測定配線が少なく多点硬化度測定に適するフレキシブルマトリックスセンサを提案し、その有効性を実証した。
- (2) 樹脂粘度と誘電率の周波数依存性の関係から硬化度の算出式を構築し、その有効性を実証した。
- (3) 複雑な形状を有する構造では治具の部位による熱容量の差異から、一様に硬化進行しないことを確認した。この問題から局所的な温度コントロールなどを施す必要があることが示された。

参考文献

- (1) J. W. Kim et al., Reduction of residual stresses in thick-walled composite cylinders by smart cure cycle with cooling and reheating, *Compos struct*, Vol. 75 (2006), pp. 261-266
- (2) J. Hodges et al., Residual stresses and the optimum cure cycle for an epoxy resin, *J. Mater. Sci*, Vol. 24 (1989), pp. 1984-1990
- (3) K. Uzawa, Present and Future State of FRP Processing, *J. Soc. Mater. Sci*, Vol. 55, No. 1 (2006), pp. 131-137
- (4) H. G. Kim, D. G. Lee, Dielectric cure monitoring for glass/polyester prepreg composites, *Compos Struct*, Vol. 57, No. 1-4 (2002), pp. 91-99
- (5) K. Osaka et al., The measurement of internal strain of FRP laminates using EFPI optical fiber sensor on autoclave molding (in Japanese), *In the proceeding of 24th Composite materials symposium*, (1999), pp. 119-120
- (6) D. L. Woerdeman et al., Cure monitoring of the liquid composite molding process using fiber optic sensors, *Polym. Composite*, Vol. 18, No. 1 (1997), pp. 133-150
- (7) N. Oshima et al., Cure monitoring of Composite Materials by Using Impedance Changes of Piezoelectric Ceramics (in Japanese), *The Japan Society of Mechanical Engineers*, (2002), pp. 192
- (8) S. Kitade et al., Influence of embedded optical fibers on interlaminar shear strength of composite laminates (in Japanese), *J. Soc. Mater. Sci., Japan*, Vol. 43, No. 486 (1994), pp. 283-289
- (9) T. Fukuda et al., Interlaminar shear fracture behavior of FRP laminates embedded optical fiber (in Japanese), *In the proceedings of academic lectures, J. Soc. Mater. Sci., Japan*, Vol. 43, (1994), pp. 159-160
- (10) S. H. Eum et al., Structural health monitoring using fiber optic distributed sensors for vacuum-assisted resin transfer molding, *Smart. Mater. Struct.*, Vol. 16, No. 6 (2007), pp. 2627-2635
- (11) A. Todoroki et al., Electric Resistance Change Method for Identification of Embedded Delamination of CFRP Plates (in Japanese), *J. Soc. Mater. Sci., Japan*, Vol. 50, No. 5 (2001), pp. 495-501
- (12) G. Leivita et al., Dielectric monitoring of epoxy cure, *J. polym. Sci. PartB*, Vol. 34, No. 16 (1996), pp. 2731-2737
- (13) G. M. Maistros et al., Dielectric monitoring of cure in a commercial carbon-fibre composite, *Compos. Sci. Technol*, Vol. 53, No. 4 (1995), pp. 355-359
- (14) T. Inada, A. Todoroki, Smart cure monitoring method carbon/epoxy laminates using electric capacitance change with applied alternating current frequency, *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300 (2005), pp. 2903-2908
- (15) J. D. Ferry, Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons, Inc., pp. 204-205
- (16) K. G. Bang et al., Measurement of the degree of cure glass fiber-epoxy composites using dielectrometry, *J. Mater. Process. Tech*, Vol. 113, No. 1 (2001), pp. 209-214
- (17) W. I. Lee, Alfred C. Loos et al., Heat of reaction Degree of cure and Viscosity of Hercules 3501-6 resin, *J. Compos. Mater*, Vol. 16, No. 6 (1982), pp. 510-52