

FEM解析による燃料電池自動車用 CFRP 製圧力容器の最適構造設計

日大生産工(院) ○寺尾拓実 日本生産工 邊吾一 日本生産工 坂田憲泰

1. 緒言

現在、世界中の自動車メーカーで燃料電池自動車 (Fuel cell vehicle, FCV) の開発が進められている。FCV は空気中の酸素と、車載した圧力容器中に貯蔵されている水素の化学反応から発電し動力を得るため、二酸化炭素やその他の有害ガスを排出しない。そのため、環境問題、エネルギー問題を解決する車両として注目されている。水素を貯蔵するための圧力容器には金属ライナーあるいは樹脂ライナーに炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber reinforced plastics, CFRP) をフルラップした CFRP 製圧力容器に 35MPa または 70MPa に圧縮した水素を貯蔵する方式が採用されている。今後は一充電での走行距離をガソリン車並みの 500km にするために、70MPa での貯蔵が主流になっていくことが予想される。2014 年度にトヨタ自動車から発売予定の FCV においても、70MPa の圧力容器が採用されている。しかし、CFRP は高価な材料のため、車両価格を低減させるためには、可能な限り少ない CFRP で最大限耐圧性能が向上可能な CFRP 製圧力容器の開発が望まれている。

著者らは、これまで内容積 7.5L、常用圧力 35MPa の CFRP 製グリッド補強容器を供試体とし、FEM 解析と破裂実験から力学特性を評価し、CFRP グリッド補強容器が軽量化と低コスト化に適した構造であることを示した¹⁻³⁾。また、生産性を考慮して、圧力容器と円筒形 CFRP グリッドを別々に成形し、最後に円筒形 CFRP グリッドを圧力容器本体にはめ込む挿入型グリッド補強圧力容器の検討を行い、グリッドのヘリカル巻き角度、さらに圧力容器本体最外層と円筒形 CFRP グリッドのクリアランスが破裂圧力に及ぼす影響を FEM 解析結果より明らかにしてきた。

本研究では、これまでの研究で構築した FEM 解析手法を踏襲し、内容積 65L、常用圧力 70MPa の従来型 CFRP 製圧力容器と、CFRP 製グリッド補強容器を FEM 解析にて評価し、CFRP の使用量を比較した結果について報告する。

2. 解析モデル

2.1 従来型 CFRP 製圧力容器

CFRP 製グリッドで補強を行わない、従来型の CFRP 製圧力容器には、外径 320mm、全長 1,020mm、内容積 65L のアルミニウム合金ライナー (A6061-T6) を CFRP で覆ったフルラップした CFRP 製圧力容器を用いた。本 CFRP 製圧力容器を 2 本車載することで、一回の水素充電で 500km の走行が可能となる。従来型 CFRP 製圧力容器の積層構成は、破裂圧力が KHK S 0128 での規定圧力 ($70\text{MPa} \times 2.25 = 157.5\text{MPa}$) 以上で、容器胴部フープ巻き層で破裂となるように決定した (Table 1)。

2.2 CFRP 製グリッド補強容器

CFRP 製グリッド補強容器の解析モデルでは、Table 1 の 28 層目のヘリカル巻き層と 29 層目のフープ巻き層を削除し、破裂圧力 (157.5MPa 以上) と破裂箇所 (容器胴部フープ巻き層) の制約条件を満たすように CFRP 製グリッドに置き換えた。また、本検討では CFRP 製グリッドのヘリカルグリッド層の巻き角度 ($\pm 50^\circ$) とグリッド層の幅 (6 mm) は一定値とし、CFRP 製圧力容器本体と CFRP 製グリッドのクリアランスはなしとした。

3. 解析方法

解析ソフトには汎用有限要素法プログラム ANSYS Ver. 15.0 を使用した。アルミニウム合金ライナーと CFRP 層の要素には 3 次元 8 節点の構造及び積層ソリッドを用い、解析モデルはフルモデルの 1/16 となる周期対称モデルとした。容器本体と CFRP 製グリッドの接触には、3 次元ターゲット要素 (TARGE170) と 3 次元コンタクト要素 (CONTA173) を用いた。解析条件は、アルミニウム合金ライナーを弾塑性解析、CFRP 層を弾性解析とし、境界条件は周期対称拘束とした。Table 2 に解析で用いた弾性率等の材料定数を示す。

FW 成形においてヘリカル巻きは、式 (1) を

Optimum Design of CFRP Pressure Vessels for FCV by FEM Analysis

Takumi TERA0, Goichi BEN and Kazuhiro SAKATA

満足するように繊維と子午線との角度 α が決定される。

$$r \sin\alpha = r_0 \quad (1)$$

ここで、 r は繊維が巻き付けられる部位の半径、 r_0 は口金部の半径を表す。本解析では鏡部を子午線方向に 41 分割し、ヘリカル巻き層の各要素系に式(1)から求めた α を定義した。アルミニウム合金ライナーの物性値については、引張り試験から取得したデータを用いた。また、金属ライナーを用いた CFRP 製圧力容器では通常、疲労特性を向上させるために自緊処理を行うが、本研究では CFRP 製グリッドの補強効果を破裂圧力で評価したため、加圧時に自緊処理はしていない。

4. 破裂圧力の予測方法

CFRP 製圧力容器は、内圧の上昇に伴って破断ひずみの小さい CFRP 層がアルミニウムライナーより先に破断し、CFRP 層の欠如した状態では内圧に耐えることができなくなり圧力容器の破裂に至ると考えられる。したがって、圧力容器の CFRP 層の破損則には最大ひずみ説を用いた。また、最内層に繊維より破断伸びが大きいライナーがある圧力容器においては、層間せん断や層間剥離で機能が大きく損失されず、初期破損後、応力は徐々に繊維引張力に移り、最終破壊は繊維方向となる。そのため、本解析では CFRP 層に生じる繊維方向ひずみが CFRP の破断ひずみである $15,700\mu$ (1.57%) に達したときに圧力容器が破裂するとみなした。

5. CFRP 使用量の比較

従来型 CFRP 製圧力容器の FEM 解析の結果、破裂は容器胴部中央近傍のフープ巻き最内層で発生し、破裂圧力は 161MPa で CFRP 使用量は 38.4 kg となった。

一方、CFRP 製グリッド補強容器では、フープ巻きグリッドが 13 層、ヘリカル巻きグリッドが 1 層の積層構成で破裂圧力は 158MPa となった。CFRP の使用量は 36.2kg で、従来型圧力容器と比較して、2.2kg (6%) の低減となったが、これは CFRP の価格が 5,000 円/kg のため、圧力

容器一本当たりのコスト低減効果は 11,000 円となる。本報告では、CFRP 製グリッドのヘリカルグリッド層の巻き角度、グリッド層の幅は一定値としたが、これらの設計変数を最適化すれば、CFRP の使用量をさらに少なくすることが可能となるが、これについては今後の課題としたい。

6. 結言

従来型 CFRP 製圧力容器と CFRP 製グリッド補強容器の CFRP 使用量の低減量を比較した結果、CFRP 製グリッド補強容器の CFRP 使用量は従来型容器と比較して、6%少ない結果となった。

参考文献

- 1) 坂田憲泰, 邊吾一, 鈴木崇司, 望月裕太, 黒岩夏樹, 榊田明宏, 日本設計工学会誌, 46, 11, pp.655-660 (2011).
- 2) 坂田憲泰, 邊吾一, 鈴木崇司, 黒岩夏樹, 榊田明宏, 日本設計工学会誌, 49, 6, pp.305-310 (2011).
- 3) K. Sakata, G. Ben, Proceedings of the American Society for Composites 29th Technical Conference/16th US-Japan Conference on Composite Materials/ASTM-D30 Meeting , CD-R (2014).

Table 2 Material properties

Aluminum liner	Young's modulus	72.9	GPa
	Yield strength	237	MPa
	Tensile strength	355	MPa
	Poisson's ratio	0.31	
CFRP	Modulus of elasticity		
	Longitudinal	144	GPa
	Transverse	7.40	GPa
	Shear	4.90	GPa
	Poisson's ratio		
Longitudinal		0.276	
	Transverse	0.014	
GFRP	Modulus of elasticity		
	Longitudinal	15.0	GPa
	Transverse	2.36	GPa
	Shear	4.71	GPa
	Poisson's ratio		
	Longitudinal	0.288	
Transverse	0.045		

Table 1 Thickness and winding angles of conventional CFRP pressure vessel

	AL liner	CFRP							
		1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer	5th layer	...	28th layer	29th layer
Thickness(mm)	2.03	1.17	0.78	0.78	0.78	0.78	...	0.78	0.78
Winding angle(°)	-	88	21	88	21	88	...	21	88