

복합재 판스프링의 재료특성에 따른 스프링 강성변화와 초기 파단하중 예측

오 성 하* · 최 복 록**†

* 맥소프트(주) 기술연구소, ** 강릉원주대학교 기계자동차공학부

Prediction of Spring Rate and Initial Failure Load due to Material Properties of Composite Leaf Spring

Sung Ha Oh* and Bok Lok Choi**†

* Maxoft Inc.

** School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l Univ.

(Received May 27, 2014 ; Revised July 23, 2014 ; Accepted August 25, 2014)

Key Words: Leaf Spring(판 스프링), Spring Rate(스프링 상수), GFRP(유리섬유강화 플라스틱), FEM(유한요소법), Progressive Failure Analysis(점진적 파괴해석)

초록: 본 연구에서는 자동차 판스프링을 대상으로 유리섬유 복합재의 적용을 위한 해석적 방법들을 제시하였다. 즉, 판스프링의 정적거동에 영향을 미치는 복합재 재료의 구성 성분비와 섬유각의 변화 등을 고려한 해석을 수행하였다. GFRP 복합재의 기계적 성질들은 ASTM 표준시험 방법을 따라서 직접 측정하였으며, 역해석 방법을 통해서 섬유와 수지 각각의 직교이방성과 등방성 성질들을 시험결과들로부터 재구성하였다. 다음으로 섬유의 방향과 섬유와 수지의 함유량 비와 같은 주요 재료변수들의 변화에 따른 스프링 계수들의 변화를 분석하였다. 마지막으로 초기 파괴하중을 예측하기 위해서 선형 탄성해석과 파손조건식을 이용해서 점진적 파괴해석을 수행하였으며, 그 결과 최초의 손상부위는 전단응력에 의해 판스프링의 모서리 부위에서 발생하였다.

Abstract: This paper presented analysis methods for adapting E-glass fiber/epoxy composite (GFRP) materials to an automotive leaf spring. It focused on the static behaviors of the leaf spring due to the material composition and its fiber orientation. The material properties of the GFRP composite were directly measured based on the ASTM standard test. A reverse implementation was performed to obtain the complete set of in-situ fiber and matrix properties from the ply test results. Next, the spring rates of the composite leaf spring were examined according to the variation of material parameters such as the fiber angles and resin contents of the composite material. Finally, progressive failure analysis was conducted to identify the initial failure load by means of an elastic stress analysis and specific damage criteria. As a result, it was found that damage first occurred along the edge of the leaf spring owing to the shear stresses.

1. 서론

자동차의 경량화에 대한 요구가 증가하면서 기존 철강소재의 부품을 복합소재와 같은 초경량 소재로 대체하기 위한 연구가 완성차 업체를 중

심으로 여러 분야에서 활발히 진행되고 있다.^(1,2) 특히, 유리섬유(GFRP) 나 탄소섬유(CFRP)와 같은 복합소재의 경우 기존 철강재에 비해서 비강도와 비강성이 매우 우수할 뿐만 아니라 제조공법이나 직조방법, 그리고 섬유와 수지의 함유량을 조절함으로써 재료의 기계적 성질들을 크게 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.^(3,4)

본 연구에서는 자동차 판스프링을 대상으로 유

†Corresponding Author, blchoi@gwnu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

리섬유 복합소재 적용시의 재료특성 변화에 따른 역학적 거동과 파손하중을 예측하기 위해서 유한요소해석과 점진적 파괴해석을 수행하였다. 먼저, 유리섬유 복합소재의 기본적인 기계적 성질들을 얻기 위해서 시편 시험을 수행하였으며, 이 같은 시험 결과들을 이용해서 섬유와 수지 각각에 대한 기계적 성질들을 역으로 계산할 수가 있을 것이다. 한편, 계산되어진 섬유와 수지의 물성들을 조합해서 직교이방성의 9가지 재료상수들을 포함하는 복합재 물성을 구성할 수가 있으며, 섬유의 방향뿐만 아니라 섬유와 수지의 함유량의 비를 여러 가지로 변화시킴으로써 각각에 대한 기계적 성질들의 변화를 예측할 수가 있다. 이 같은 결과들을 이용해서 판스프링에서 재료특성의 변화가 스프링의 굽힘강성에 영향을 미치는 효과를 유한요소 해석을 통해서 구할 수 있으며,⁽⁵⁾ 또한 하중을 점진적으로 증가시키면서 판스프링에 발생하는 응력결과를 이용해서 초기 손상이 발생하는 파단하중도 예측할 수가 있다.^(6,7)

2. GFRP 복합소재의 시험 및 특성

직교이방성 성질을 지니고 있는 복합소재의 경우 특정 제조공법에 대해서 섬유와 수지의 구성비와 섬유의 방향 등을 최적화함으로써 재료의 기계적 성질들을 크게 향상시킬 수가 있다. 따라서 복합재료로 구성된 기계구조물을 설계할 경우 구조물의 특성에 맞는 제조방법과 플라이의 적층방향 등을 가장 먼저 결정해야 할 것이다. 기본적인 복합소재의 기계적 성질들을 얻기 위해서는 섬유의 단방향(UD ; unidirectional) 시험편을 이용해서 5가지의 시험을 주로 수행하고 있으며, 시

Table 1 Ply properties of UD specimen test based on ASTM standard

Unidirectional ply properties (Test)			Unit
E ₁₁	Longitudinal modulus	39.14	GPa
E ₂₂	Transverse modulus	11.67	GPa
G ₁₂	Shear modulus	3.48	GPa
ν ₁₂	Poisson's ratio	0.31	
S _{11T}	Tensile strength	888.00	MPa
S _{11C}	Compressive strength	564.06	MPa
S _{22T}	Tensile strength	43.03	MPa
S _{22C}	Compressive strength	143.89	MPa
S _{12S}	Shear strength	63.42	MPa

Table 1은 본 연구에서 대상으로 하는 유리섬유 복합재에 대해서 위에서 언급한 각각의 시험에 대해 3~5개의 시편시험을 통해서 측정한 평균값들을 나타낸 것이다. 직교이방성 복합재료에서 섬유 축에 수직인 횡방향 등방성 플라이 재료의 경우 5개의 재료상수를 가지고 있으며, 2-3 평면의 횡방향 전단탄성계수를 제외한 4개의 기계적 성질들을 직접 얻을 수가 있다. 또한 표에서 보는 바와 같이 5가지 시험 각각의 파단강도 크기도 얻을 수 있다.

그러나 일반적으로 복합재 구조물은 여러 장의 플라이를 섬유각도별로 적층해서 원하는 성능을 얻어야하므로 플라이의 구성원인 섬유와 수지의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 복합재 구조물의 재질특성 최적화 및 구조해석 용도로 널리 사용되고 있는 상용프로그램인 ASC/GENOA의 MCQ-Composites⁽⁹⁾를 활용해서 플라이의 구성 성분인 섬유와 수지의 기계적 성질들을 역으로 계산하였다. 아래 식 (1)~(6)은 섬유와 수지의 기계적 성질과 플라이의 특성과의 관계를 나타내는 것들이며, 식 (7)은 섬유와 수지의 함유량을 나타내는 관계식으로 기존 수식에서 수정된 형태이다. 여기서 하첨자 *l* 과 *f*, *m* 각각은 lamina와 fiber, matrix를 의미하며, 1, 2, 3은 주방향(principal direction)을 나타내고, *E*, *G*, *ν*는 재료의 탄성계수와 전단탄성계수, 그리고 포아송비를 의미한다.⁽¹⁰⁾

① Elastic modulus

$$E_{l11} = E_{f11} \bar{V}_f + E_m \bar{V}_m \quad (1)$$

$$E_{l22} = E_{l33} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{\bar{V}_f}(1 - E_m/E_{f22})} \quad (2)$$

② Shear modulus

$$G_{l12} = G_{l13} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{\bar{V}_f}(1 - G_m/G_{f12})} \quad (3)$$

$$G_{l23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{\bar{V}_f}(1 - G_m/G_{f23})} \quad (4)$$

③ Poisson's ratio

$$\nu_{l12} = \nu_{l13} = \nu_m + \bar{\nu}_f(\nu_{f12} - \nu_m) \quad (5)$$

$$\nu_{l23} = \bar{\nu}_f \nu_{f23} + \bar{\nu}_m(2\nu_m - \frac{E_{l22}}{E_{l11}}\nu_{l12}) \quad (6)$$

④ Modified fiber and matrix volume fractions

$$\bar{V}_f = (1 - V_v) V_f, \quad \bar{V}_m = (1 - V_v) V_m \quad (7)$$

Table 2는 선형 보정(linear calibration)관계를 통해서 단방향 재료시험 결과와 1% 미만의 거의 동일한 결과를 나타낼 수 있도록 얻어진 섬유와 수지 각각의 기계적 성질들이다.

3. 본 론

3.1 복합재 판스프링의 구조

본 연구에서 대상으로 한 복합재 판스프링 (1,350L×75W×27.5t)의 구조는 Fig. 1과 같다. 후방 서스펜션을 구성하는 크로스멤버의 양단에 고정되어 있으며, 차량의 상하 움직임에 따른 판스프링의 굽힘 변형에 의해 스프링의 특성을 나타내는 구조로서 공차시의 캠버량은 135mm이다.

3.2 복합재 판스프링의 스프링 상수

3.2.1 섬유각도에 따른 판스프링의 굽힘강성

판스프링의 중요한 역학적 특성인 굽힘강성에

의한 스프링 상수와 복합재의 섬유 적층방향과의 상관성을 분석하였다. 복합재의 경우 섬유의 배열 방향은 굽힘강성에 직접 영향을 미치는 탄성계수의 크기를 크게 변화시킬 수 있으므로, 구조물의 형상과 하중의 방향을 고려해서 적층방향을 결정하는 것은 복합소재 구조물 설계 시에 매우 중요하다. Fig. 2는 동일한 두께에 대해서 5가지 적층 방향에 따른 영향을 고려하였으며, 양 끝단에서 상하방향으로 고정된 후 중앙 한 점에서 상하방향으로 하중을 작용하였다. 그림으로부터 예측되는 바와 같이 판스프링의 길이 방향으로만 섬유가 적층된 경우가 가장 강성이 크게 나타날 것이며, 각 적층조건에 따른 스프링 강성의 크기들을 Table 3에 나타내었다.

3.2.2 수지함유량에 따른 판스프링의 굽힘강성

복합재는 섬유와 수지의 혼합으로 구성되어 있으므로 각각의 함유량 비에 따라서 재료의 기계적 성질들은 또한 크게 변할 수 있다. 따라서 복합재 판스프링에서 원하는 스프링 특성을 얻기 위해서는 섬유 함유량을 변화시키면서 스프링

Table 2 Calibrated material properties of fiber and epoxy from GENOA software

EGLASS			
Created from MCQ Module of Fiber Calibration			
Property	Symbol	Value	Unit
MASS DENSITY	Rhof	2.54E-12	tonne/(mm ³)
NORMAL MODULUS (11)	Ef11	70000.0	N/(mm ²)
NORMAL MODULUS (22)	Ef22	68880.0	N/(mm ²)
POISSON'S RATIO (12)	Nuf12	0.28	
POISSON'S RATIO (23)	Nuf23	0.45	

EPOXY			
Created from MCQ Module of Matrix Calibration			
Property	Symbol	Value	Unit
MASS DENSITY	Rhom	1.27E-12	tonne/(mm ³)
NORMAL MODULUS	Em	3552.00	N/(mm ²)
POISSON'S RATIO	Num	0.34	



Fig. 1 Geometry of composite leaf spring mounted on rear cross member

Table 3 Spring rate due to the variation of fiber angles

Fiber angles arrays	Spring rate, <i>k</i> (kgf/mm)
[0]	12.6
[0/90] (90%/10%)	11.6
[0/90]	8.5
[0/45/90/-45]	6.7
[45/-45]	3.9

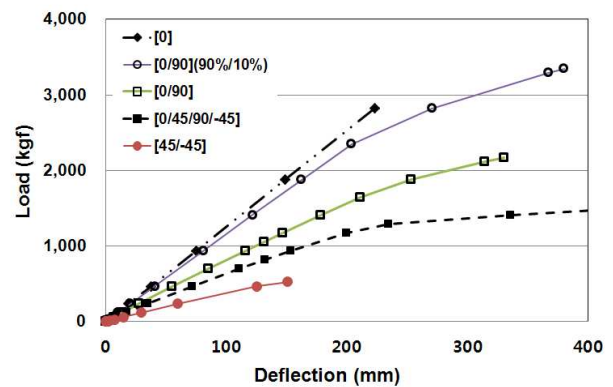


Fig. 2 Load-deflection curves according to fiber angles of GFRP leaf spring

강성의 변화를 계산 또는 측정해야 한다. 그러나 섬유 함유량이 변화될 경우 플라이 시편의 기계적 성질도 또한 변경됨으로 실험적으로 접근하기 위해서는 매우 많은 시간과 비용이 소비되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Table 2에서 나타낸 섬유와 수지 각각의 기계적 성질과 식 (1)~(7) 또는 상용 프로그램을 이용해서 섬유와 수지의 함유량 비가 다양하게 변할지라도 쉽게 플라이의 기계적 성질들을 계산할 수가 있으며, 이같이 얻어진 재료 특성값들을 유한요소 해석에서 입력 데이터로 활용하였다.

플라이와 섬유, 수지의 밀도에 따라 섬유의 체적비와 레진의 함유량, 그리고 밀도는 아래 식들과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$V_f = \left\{ (1 - RC) \times \frac{\rho}{\rho_f} \right\} \times 100 \tag{8}$$

$$RC = \left\{ 1 - \left[V_f \times \frac{\rho_f}{\rho} \right] \right\} \times 100 \tag{9}$$

$$\rho = \frac{1}{\left\{ \frac{1 - RC}{\rho_f} \right\} + \left\{ \frac{RC}{\rho_r} \right\}} \tag{10}$$

$$= V_f \rho_f + (1 - V_f) \rho_r$$

여기서,

V_f : fiber volume fraction (vol%)

RC : resin content (wt%)

ρ : laminate specific gravity

ρ_f : fiber specific gravity

ρ_r : resin specific gravity

따라서 glass fiber와 resin의 밀도를 각각 2.54×10^{-12} tonne/mm³와 1.27×10^{-12} tonne/mm³이라 가정할 경우, fiber와 resin의 함유량을 하나의 값을 기준으로 구할 수 있으며, Table 4는 V_f (fiber volume fraction)를 기준으로 RC (Resin Contents)를 나타낸 경우이다.

Table 4 Density and resin contents w.r.t FVR

V_f (%)	55%	60%	65%	70%
ρ	1.97	2.03	2.10	2.16
RC (%)	29.03%	25.00%	21.21%	17.65%

여기서 섬유의 함유량은 55~70% 범위를 고려하였으며, 이것은 일반적으로 복합소재 제조시의 구성비를 대부분 포함하고 있는 영역이다. 대표적인 플라이의 기계적 성질들은 Table 5에서 보는 바와 같이 섬유의 함유량이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하는 경향을 가지고 있다. 이 같이 계산되어진 각 FVR에 따라 재료의 변화된 성질들을 이용해서 앞에서와 동일한 과정으로 복합재 판스프링의 구조해석을 수행하였으며, 이를 통해 하중과 변위와의 관계들을 얻을 수가 있다.

Fig. 3은 각 섬유 함유량에 대응하는 기계적 물성을 이용해서 얻은 유한요소 해석 결과이다.

Table 5 Ply properties w.r.t. FVR

Ply properties	Fiber Volume Fraction (%)			
	55%	60%	65%	70%
E_{11} (GPa)	39.14	42.47	45.71	48.96
E_{22} (GPa)	11.67	12.99	14.57	16.50
G_{12} (GPa)	3.48	3.75	4.05	4.40
ν_{12}	0.31	0.31	0.30	0.30

Table 6 Spring rate due to the variation of FVR

FVR	Spring rate, k (kgf/mm)
RC32% (FVR 51.52%)	9.2
55%	9.7
RC27% (FVR 57.48%)	10.1
60%	10.5
65%	11.3
70%	12.1

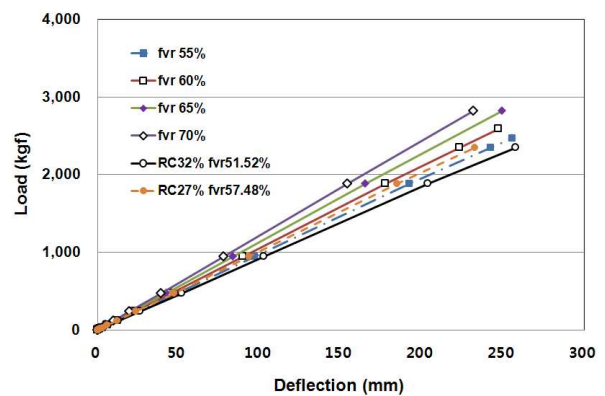


Fig. 3 Load-deflection curves according to FVR of GFRP leaf spring

그래프의 기울기들로부터 섬유 함유량에 따른 판스프링의 스프링 상수를 계산하였으며, Table 6에서 요약해서 나타내었다.

3.3 판스프링의 점진적 파괴해석

복합재 구조물의 초기 파단하중을 예측하기 위해서 선형탄성 해석을 통해 점진적 파괴해석을 수행하였다. 파손조건은 응력 기반의 파손조건식을 이용하였으며, 섬유와 수지 각각의 수직 및 전단응력과 박리(delamination)에 의한 전단응력이 재료의 허용강도에 도달하면 파손이 일어난다는 것이다. 점진적 파괴해석은 하중의 크기를 점차 증가시켜 가면서 주어진 하중크기에서 응력을 계산하게 되며 파괴조건에 도달하는지를 고려해서 반복적으로 해석하는 과정이다.⁽¹¹⁾ 여기서 일부 요소에서 파손이 일어날 경우 구조물의 강성이 저하될 것이며, 이 경우 파손모드에 대응하는 재료의 특성을 다시 계산해서 다음 단계의 해석을 진행하게 된다. 따라서 이와 같은 해석과정이 각 하중의 증분에 대해 최종 파손이 일어날 때까지 계속해서 반복적으로 수행되며 최종 파단하중을 예측할 수가 있을 것이다.

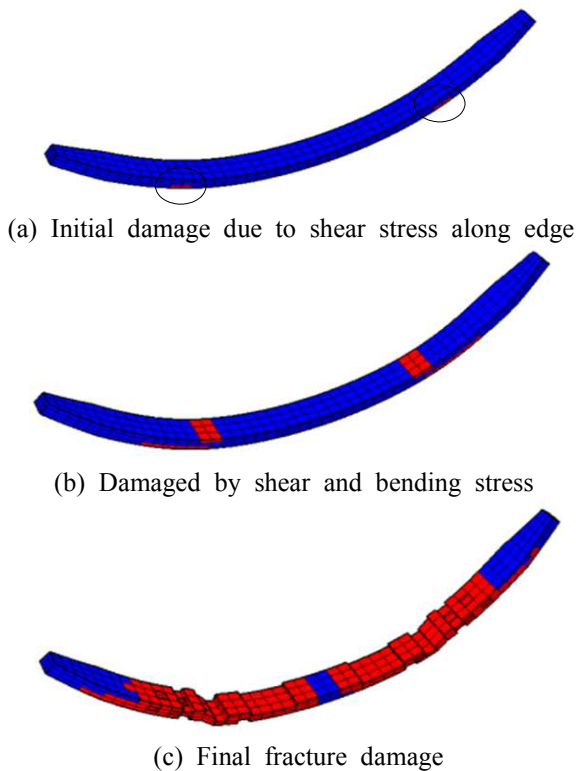


Fig. 4 Progressive failure analysis of GFRP leaf spring by increasing step-by-step load

Fig. 4는 점진적 파괴해석을 통해서 얻은 손상 부위를 나타낸 것으로서, 해석조건은 판스프링이 장착되는 조건과 유사하게 양쪽 끝단에서 상하방향 변위를 구속하였으며 크로스멤버와 연결되는 부위에서 수직방향으로 하중을 작용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 유리섬유 복합재로 구성된 판스프링에서 최초 손상이 발생하는 부위는 모서리(edge) 부위로서 길이방향 전단에 의한 박리에 의해 나타나고 있으며, 초기 파손하중의 크기는 약 68,590 N으로 예측되었다. 이 값은 설계시 한계조건으로 하는 정적 4G 하중(static 4G load = 1,600 kgf × 4 = 6,400 kgf)의 크기와 비슷한 값을 나타내고 있다.

4. 결 론

복합재 판스프링에 대해서 재료의 설계인자변화에 따른 스프링 강성들을 계산하였으며, 또한 점진적 하중증가에 의해 초기 파손하중을 예측하였으며, 요약하면 아래와 같다.

(1) 단방향 시편시험을 통해서 측정된 플라이의 물성들을 이용해서 선형 보정관계를 통해 단방향 재료시험 결과와 1% 미만의 오차를 나타내는 섬유와 수지 각각의 기계적 성질들을 역으로 추정하였으며, 이를 통해서 목표로 하는 성능을 만족하도록 Ply들의 섬유방향과 섬유 함유량 등을 최적화 할 수 있을 것이다.

(2) GFRP 판스프링에서 섬유의 적층방향과 함유량의 변화에 따른 여러 기계적 물성들을 이용해서 복합재질의 판스프링 설계시 요구되어지는 스프링 강성을 해석적인 방법을 통해 얻을 수 있었다. 본 연구에서 대상으로 한 판스프링의 경우 굽힘변형을 받는 구조물이므로 섬유각이 0°일 경우 최대 굽힘강성을 나타낼 것이다.

(3) 복합재로 구성된 구조물의 초기 파손하중을 예측하기 위해서 점진적 파괴해석을 수행하였으며, 그 결과 초기 손상이 나타나는 파손모드는 전단응력에 의해 발생하였으며, 초기 파손하중 크기는 약 68,590 N으로 예측되었다.

참고문헌 (References)

(1) Kim, K. S., Bae, K. M., Oh, S. Y. and Seo, M. K., 2012, "Trend of Carbon Fiber-Reinforced

- Composites for Lightweight Vehicles," *Elastomers and Composites*, Vol. 47, No. 1, pp. 65~74.
- (2) Oh, S. H. and Choi, B. L. 2014, "Analytical and Experimental Study for Development of Composite Coil Springs," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 1, pp. 31~36.
- (3) Bogdanovich, A. E., 2006, "Multi-Scale Modeling, Stress and Failure Analyses of 3-D Woven Composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 20, pp. 6547~6590.
- (4) Kang, M. S., Park, H. S., Choi, J. H. and Koo, J. M., 2012, "Prediction of Fracture Strength of Woven CFRP Laminates According to Fiber Orientation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 8, pp. 881~887.
- (5) Jeffrey Kueh, J. T. and Faris, T., 2012 "Finite Element Analysis on the Static and Fatigue Characteristics of Composite Multi-Leaf Spring," *Journal of Zhejiang University A*, Vol. 13, No. 3, pp. 159~164.
- (6) Ellul, B., Camilleri, D. and Betts, J. C., 2013, "A Progressive Failure Analysis Applied to Fiber-Reinforced Composite Plates Subject to Out-of-Plane Bending," *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 49, No. 6, pp. 605~620.
- (7) Kim, S. Y., Geum, J. H., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2010, "Study of Failure Criterion of Hole-Notched Plain-Weave Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 295, pp. 481~486.
- (8) ASTM Annual Book of Standards, 2001.
- (9) GENOA Technical Manual. Ver. 5. 2013, AlphaStar.
- (10) Hull, D., 1981, *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge Univ. Press, pp. 102~124.
- (11) Shokrieh, M. M., Torabizadeh, M. A. and Fereidoon, A., 2012, "Progressive Failure Analysis of Glass/Epoxy Composites at Low Temperatures," *Strength of Materials*, Vol. 44, No. 3, pp. 314~324.