

결합부 강화구조용 탄소복합재 자동차 부품 개발

고관호* · 이민구* · 허몽영*†

Development of the CFRP Automobile Parts Using the Joint Structure of the Dissimilar Material

Kwan Ho Ko*, Min Gu Lee*, Mongyoung Huh*†

ABSTRACT: In this study, the development purpose is to replace steel Tie Rod of commercial vehicle to the carbon composite by a braiding process. CFRP tie rod was designed to meet the performance requirements of existing products by designing the cross section of the core for braiding weaving and the structural design of the joint between the core and the carbon fiber. The specimens were fabricated by braiding method and applied to structural analysis through test evaluation. The manufacturing process proceeded from braiding to infusion through post-curing process. The test evaluation of the final product was satisfactorily carried out by sequentially performing tensile test, torsion test, compression test and fatigue test. In addition, the weight of CFRP tie rod could be reduced by about 37% compared to existing products.

초 록: 본 연구에서는 기존의 스틸제 타이로드를 브레이딩 공법을 적용한 탄소복합재로 개발하고자 하였다. 탄소복합재 타이로드는 기존 제품과 동등한 성능을 만족시키기 위하여 브레이딩 직조에 필요한 코어 단면설계, 코어와 탄소섬유의 접합부에 대한 구조형상설계를 진행하였다. 그리고 브레이딩 공법을 적용한 시편을 제작하여 시험평가를 통해 구조해석에 적용하였다. 제작 공정은 브레이딩 직조 후 인퓨전 공정을 거쳐 후경화 공정까지 진행하였으며 최종 제품에 대한 시험평가는 인장 시험, 비틀림 시험, 압축 시험과 피로시험을 순차적으로 진행하여 모두 만족시켰다. 또한 탄소복합재 타이로드의 중량을 기존 제품 대비 약 37% 정도 경량화시킬 수 있었다.

Key Words: 탄소섬유복합재(CFRP), 브레이딩 공법(Braiding process), 타이 로드(Tie rod), 복합재 설계(Composite design), 경량화(Lightweight), 구조해석(Structural analysis)

1. 서 론

지구온난화에 대한 우려와 고유가 상황이 지속되면서 세계의 자동차업체에서는 날이 갈수록 강화되고 있는 연비 규제와 CO₂ 배출규제(EU, 신차에서 배출되는 CO₂ 배출량을 2020년까지 95 g/km 이하로 억제)를 만족시킬 수 있는 친환경 자동차 기술 개발에 주력하고 있다. 그 중 직접적인

큰 효과가 기대되는 것으로 자동차 그 자체를 가볍게 하는 것이다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서, 결국 소재의 경량화는 환경오염 방지와 연료절감에 가장 적합하고 중요한 요소이다[1].

탄소섬유강화복합재(CFRP)는 고강도의 구조재로 탄소섬유를 사용하여 자동차의 구조재 및 각종 부품, 항공기의

Received 1 November 2018, received in revised form 12 December 2018, accepted 17 December 2018

*Composites Processing Division, Korea Institute of Carbon Convergence Technology, Jeonju 54853, Korea

*†Composites Processing Division, Korea Institute of Carbon Convergence Technology, Jeonju 54853, Korea,
Corresponding author (E-mail: herpoly@gmail.com)

구조재 등 첨단산업의 기능성 핵심소재로 최근 자동차의 적용 비율이 점차 증가하면서 대체소재로서 각광받고 있다.

상용차용 타이로드는 차량의 조향시스템을 구성하는 하나의 부품으로 운전자의 조향의지를 마지막으로 너클에 전달하여 차량을 원하는 방향으로 회전시키는 역할을 한다.

본 연구에서는 기존의 탄소강관을 사용하여 제작되는 상용차용 타이로드의 부품인 링크로드의 구조재료를 피로특성이 우수한 탄소복합소재로 대체하여 피로내구를 만족시키는 타이로드의 경량화 설계를 진행하였고 구조해석을 통해 이를 검증하였으며, 브레이딩 공정으로 탄소복합재 타이로드를 제작한 후 피로내구시험을 통해 제품에 대한 안전성 및 해석의 타당성을 평가하였다.

복합재 타이로드 제작에 사용되는 브레이딩 공법은 파이프 형상의 코어재 위에 탄소섬유 가닥들을 지그재그 형태로 감아서 프리폼을 만드는 고속성형 공법으로 최근에 파이프 형상의 구조용 복합재 제작에 주목 받는 성형방법 중 하나이다.

타이로드의 제작 공정은 제품 형상의 코어재를 제작하고, 코어재 위에 브레이딩 공정으로 탄소섬유를 적층하여 프리폼을 제작한다. 그리고 수지와 경화제를 혼합하여 주입시키는 Infusion 공정을 거친 후 상온에서 일정시간 동안 경화시켜 제작되어진다.

2. 타이로드 설계

2.1 연구모델

복합재 타이로드 설계는 크게 부품의 크기 및 경량화를 결정하는 코어 단면과 복합재 단면 설계, 그리고 집중응력이 발생하는 코어재와 복합재의 결합부 설계로 볼 수 있다.

먼저 코어 단면 설계는 기존 스틸의 외경을 기준으로 초기 $\varnothing 35$ 로 설정하였으며, 경량화를 위해 코어재의 준공관은 알루미늄 소재를 사용하였고 볼 조인트와 체결되는 부위는 스틸재 소재로 별도 제작하여 코어와 압입하는 구조로 설계되었다. 복합재 단면 설계는 타이로드 외경의 두께 변화에 따른 구조해석을 통해 적절한 강도를 갖는 외경을 결정하였다.

코어재와 복합재 결합부 설계는 결합력 강화를 위해 총 3가지 타입으로 형상설계 후 제작하여 시험평가를 진행하였다.

타이로드의 설계 기준은 인장시험의 경우 147.1 kN 이상의 인장하중을, 압축시험의 경우 96.1 kN 이상의 압축하중을, 비틀림시험의 경우 1,972 N·m 이상의 비틀림 모멘트를 견딜 수 있어야 한다. 또한, 피로내구시험에서는 ± 24.5 kN의 축하중 상태에서 500,000 cycle 이상 견딜 수 있는 내구성을 만족하면서 동시에 기존 제품 대비 약 30% 이상의 경량화를 목표로 하였다.

타이로드 설계는 구조해석을 위하여 시편에 대한 물성평가를 먼저 진행한 후 코어재 및 복합재 설계를 위한 구조

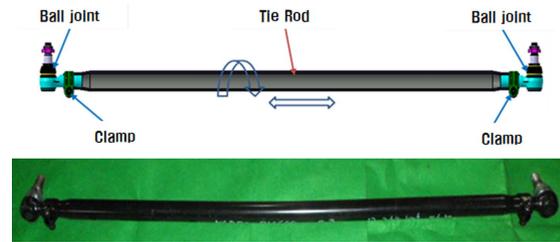


Fig. 1. Shape of TIE ROD



Fig. 2. Core shape of CFRP TIE ROD

해석을 통하여 설계를 완료하였다. 그리고 복합재 타이로드를 제작한 후 시험 평가를 진행하였으며, 시험 평가의 경우 시간단축과 제작의 용이성을 위해 별도의 샘플을 제작하여 체결부에 대한 인장시험과 비틀림시험을 진행하였다. 그리고 나서 최종 제품에 대한 압축시험과 피로내구시험을 통해 제품의 시험평가를 완료하였다.

2.2 시편 물성평가

초기 타이로드 설계 및 구조해석을 위하여 브레이딩 시편에 대한 인장 시험을 하였다. 브레이딩 성형에 사용된 섬유는 Toho Tenax UTS50(12K) 탄소섬유이고, 고분자 수지로는 Kinetix R118-H141이 사용되었다. 시편 제작에는 성형 시 고려되는 변수인 축방향 섬유의 수 18개, 36개에 대한 강도 비교를 위하여 각각 4 ply씩 적층 후 시편을 5개씩 제작하였다.

인장 시험은 ASTM D3039 규격에 준하는 방법으로 진행되었으며, 30 ton MTS 만능재료시험기를 사용하였다. 또한 시편의 변형률 측정을 위하여 시편 중앙에 변형률게이지를 부착하고 재하속도 2 mm/min으로 시험을 진행하였다.

Fig. 3은 인장시험 세팅 사진과 게이지 부착 사진을 나타내었고, Fig. 4는 시험 후의 시편 사진으로 모두 그림 부근에서 파손이 일어난 것을 볼 수 있다. Table 1은 축방향 18



Fig. 3. Test equipment of tensile test



Fig. 4. After shape of specimen for UD18 and UD36 in tensile test

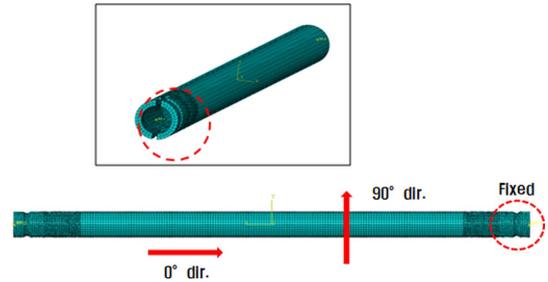


Fig. 5. Load/Boundary Condition for tensile and torsion

Table 1. Tensile test results of specimen for UD18 and UD36

		Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)	Poisson's ratio
UD18	0°	563.7	40.6	1.14
	90°	79.7	9.9	0.3
UD36	0°	764.5	49.7	1.1
	90°	84.6	10.6	0.23

개, 36개에 대한 시험 결과의 평균값으로 정리하였으며, 인장강도는 약 35%, 탄성률은 약 29%의 차이를 보였다.

3. 구조해석

3.1 해석 조건 및 방법

복합재 타이로드에 대한 구조해석은 상용소프트웨어인 Midas NFX 프로그램을 사용하였고, 정적해석을 통해 설계 검토 및 로드부의 피로파손 여부를 예측하였다.

코어재는 외경에 따른 해석을 통해 설계 검토를 하였고, 복합재의 경우 두께에 대한 구조해석을 통해 설계 검토를 진행하였으며, 로드부 피로 파손의 경우는 타이로드에 작용하는 최대 응력이 재료가 가지는 인장강도의 40% 수준으로 설계한도를 설정하였다[2].

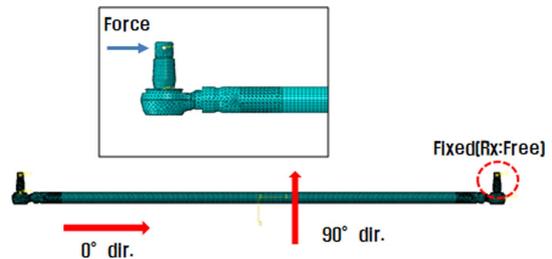


Fig. 6. Load/Boundary Condition for compression

FE모델은 스틸의 경우 Solid 형상으로, 탄소복합재의 경우 Surface 형상으로 모델링하여 적층 조건을 부여하였다. 타이로드의 해석 조건은 코어재의 한쪽 끝부분을 고정시키고 반대쪽 끝부분에 rigid body를 생성하여 하중을 부여하였다. 인장 및 비틀림해석의 경우 하중을 부여하는 rigid body에 하중방향으로만 움직일 수 있도록 자유도를 설정하였고 압축해석의 경우 고정되는 끝부분을 Rx방향을 제외한 모든 자유도를 고정시켰다.

3.2 구조해석 결과

타이로드 설계는 압축, 인장, 비틀림, 피로해석의 요구강도를 모두 만족시키는 방향으로 진행되었으며 Table 2는 최

Table 2. Analysis result for final design

		Unit	Spec.	core Ø35,5t	core Ø40,2t	core Ø40,3t	
Compression	Dis.	mm	-	5.6	9.3	5.8	
	stress	0°	MPa	507	377	568	323
		90°	MPa	72	63	80	51
Tensile	Dis.	mm	-	1.9	3.6	2.2	
	stress	0°	MPa	564	185	394	270
		90°	MPa	80	38	71	44
Torsion	Dis.	mm	-	29.6	22.2	13.2	
	stress	0°	MPa	564	70	74	73
		90°	MPa	80	9	10	10
		S ₁₂	MPa	90	219	111	90
Fatigue	stress	0°	MPa	338	OK	NG	OK
		90°	MPa	48	OK	NG	OK

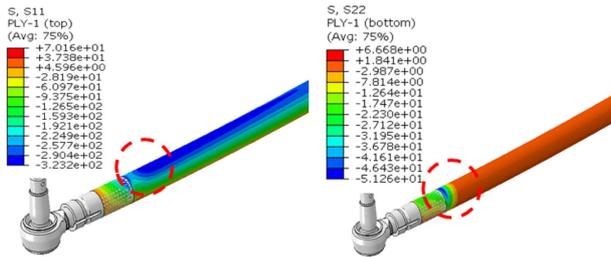


Fig. 7. Stress distribution of dir. 0° and 90° for Compression

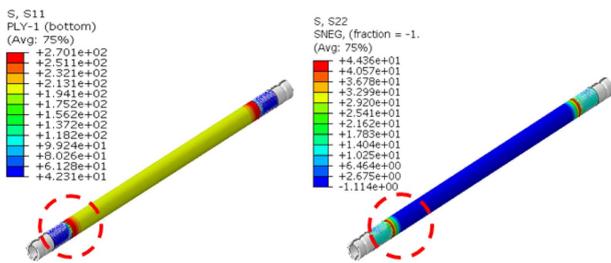


Fig. 8. Stress distribution of dir. 0° and 90° for Tensile

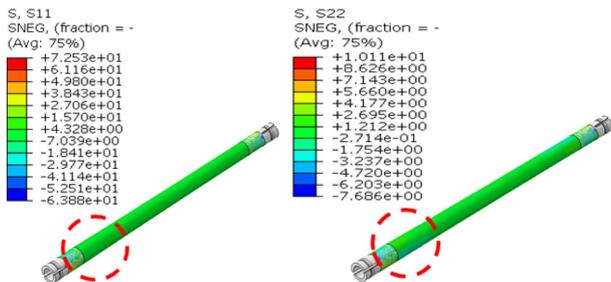


Fig. 9. Stress distribution of dir. 0° and 90° for Torsion

중설계안에 대한 해석결과를 나타내었다. 초기 코어재의 직경인 $\varnothing 35$ 를 적용하여 CFRP 두께를 증가시키면서 해석을 진행한 결과 CFRP의 두께 5 t일 때 비틀림해석에서 전단응력(S_{12}) 219 MPa로 파손이 발생할 것으로 예측되었다. 따라서, 코어재의 직경을 $\varnothing 40$ 으로 변경하고 CFRP 두께를 증가시키면서 추가 해석을 진행하였다. CFRP 두께 2 t일 때 압축과 비틀림에서 각각 568 MPa, 111 MPa로 파손이 일어날 것으로 예상되었으며 CFRP 두께 3 t일 때 모든 해석에서 만족하는 결과가 나와 최종설계안으로 확정하였다.

4. 복합재 타이로드 제작

복합재 타이로드 제작 공정은 Fig. 10와 같이 브레이딩을 이용하여 요구되는 두께에 맞게 적층하는 프리폼 제작 공정, 적층된 프리폼을 진공 필름에 넣고 수지와 경화제를 주입하여 경화시키는 인퓨전 공정, 보다 더 안정된 제품을 제작하기 위하여 타이로드를 오븐에 넣고 일정시간 동안 고온에서 경화시키는 후경화 공정 순으로 이루어진다.



Fig. 10. Braiding process of CFRP TIE ROD



Fig. 11. Infusion process of CFRP TIE ROD



Fig. 12. CFRP TIE ROD

프리폼 제작공정에서 탄소섬유는 Toho Tenax UTS50(12K)를 사용하였고, 인퓨전 공정에서는 수지 Kinetix R118과 경화제 H141를 4:1의 비율로 혼합하여 상온에서 24시간 경화하였다. 후경화 공정에서 제품을 오븐에 넣고 40°C에서 16시간 경화시켜 Fig. 12와 같이 최종 제품을 제작하였다.

5. 시험 성능 평가

먼저 볼 조인트 부와 결합되는 코어재의 체결부에 대한 인장 및 비틀림 시험을 위하여 Fig. 13과 같이 체결부 형상을 3가지 타입으로 제작하여 시험평가를 진행하였다. 인장 시험은 50 ton 인장시험기를 이용하여 10 mm/min의 일정한 속도로 시험을 진행하였으며 시험 결과 a타입은 인장하중 117.6 kN에서 파손이 발생하였다. b타입과 c타입의 경우 각각 인장하중 165.5 kN과 201.9 kN으로 요구 기준인 147.1 kN을 초과하여 설계 기준을 만족시켰다.



Fig. 13. Three types of Core shape for ball joint region



Fig. 14. Test process of tensile test for ball joint region



Fig. 15. Test process of torsion test

비틀림 시험은 별도의 지그를 제작하여 장비에 고정시킨 후 비틀림 각도제어(45°)를 통해 시험을 실시하였다. Table 3과 같이 시험결과 a타입과 b타입은 각각 1,396 N·m, 1,865 N·m로 변형이 발생하였으며 c타입은 요구 기준인 1,972 N·m를 초과한 2,344 N·m로 설계 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 인장 시험과 비틀림 시험을 모두 만족하는 c타입의 형상을 최종 설계안으로 확정하여 타이로드를 제작 후

Table 3. Test result of CFRP TIE ROD for tensile and torsion

		Unit	spec.	Test result
Tensile	a type	kN	147.1	117.6
	b type	kN	147.1	165.5
	c type	kN	147.1	201.9
Torsion	a type	N·m	1,972	1,396
	b type	N·m	1,972	1,865
	c type	N·m	1,972	2,344



Fig. 16. Test process of compression test for TIE ROD



Fig. 17. Test process of Fatigue test for TIE ROD

Table 4. Test result of CFRP TIE ROD

		Unit	Spec.	Test result
Compression	#1	kN	96.1	117.6
	#2			103.3
Fatigue	#1	cycle /24.5 kN, 1 Hz	500,000	500,000 ↑
	#2			500,000 ↑

압축 시험과 피로내구 시험을 추가로 진행하였다.

압축 시험은 볼 조인트 부를 체결시킨 상태에서 인장 시험과 동일한 10 mm/min의 속도로 하중을 부여하여 시험을 진행하였다. 총 2차례에 걸쳐 시험을 진행한 결과 모두 요구강도인 96.1 kN을 초과한 117.6 kN, 103.3 kN으로 설계 기준을 만족하였다.

피로 시험의 경우 양 끝부분의 볼 조인트를 고정시키고 ±24.5 kN의 하중을 1 Hz의 속도로 각각 설정하였다. 시험 결과 두 번의 시험 모두 요구기준인 500,000 cycle을 만족하였고 파손이 발생하지 않아 시험을 중단하였다. Table 4는 각 시험에 대한 시험 결과를 정리하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 브레이딩 공법을 이용하여 기존 스틸 제품을 탄소복합재로 대체하기 위한 구조 설계, 해석 및 시험 평가를 실시하였다. 특히 타이로드의 핵심 설계요소인 코어재의 형상 및 단면설계를 진행하였고 복합재 해석을 통하여 구조 검토를 진행하였다. 그리고 별도의 샘플을 제작 후 인장 및 비틀림 시험을 통해 코어재 단면과 CFRP 두께에 대한 타당성을 검증하였고, 순차적으로 압축시험과 피로시험을 통해 타이로드의 최종 설계안에 대한 강도 및 내구성을 평가하였다.

본 연구를 통하여 개발된 타이로드의 중량은 6.1 kg으로 기존 스틸 제품 11.7 kg 대비 약 48% 경량화 효과가 있었으며, 코어재와 복합재의 결합부 설계 및 해석 등 복합재 해석에 대한 설계기술을 확보할 수 있었다.

후 기

본 연구는 전라북도 R&D지원사업의 지원(20170914-C1-012)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Mun, J.H., Han, K.D., Hong, S.H., Kweon, Y.G., and Do, R.M., "A Study on Development of Automobile Parts using CFRP" *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Proceedings of the KSMPE Conference*, Vol. 11, 2011, pp. 59-59.
2. Kim, D.H., "Fatigue Analysis for Fiber Right Angle Direction of FRP Deck," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 6, pp. 81-86, December 2014.
3. Kwon, D.J., Park, S.M., Park, J.M., and Kwon, I.J., "A Study on Bonding Process for Improvement of Adhesion Properties Between CFRP-Metal Dual Materials," *Composites Research*, Vol. 30, No. 6, 2017, pp. 416-421.
4. Shin, D.W., Kim, J.J., Lee, J.H., Kwon, I.J., and Park, S.M., "Evaluation on the Effect of Beads for Adhesive Improvement of CFRP and Aluminum," *Composites Research*, Vol. 30, No. 4, 2017, pp. 254-260.
5. Baek, S.M., Lim, S.J., Kim, M.S., Ko, M.G., and Park, C.Y., "Study on Mechanical Properties of CFRP Composite Orthogonal Grid Structure," *Composites Research*, Vol. 31, No. 2, 2018, pp. 69-75.
6. Im, J.M., Kang, S.G., Shin, K.B., and Lee, S.W., "Study on Evaluation Method of Structural Integrity of Cylindrical Composite Lattice Structures," *Composites Research*, Vol. 30, No. 6, 2017, pp. 338-342.
7. Park, S.J., Ko, M.G., Kim, D.G., Kim, S.K., Moon, C.O., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Design and Verification of Shear Buckling Test Fixture for Composite Laminate," *Composite Research*, Vol. 27, No. 4, 2017, pp. 158-167.
8. Chen, H.J., and Tsai, S.W., "Analysis and Optimum Design of Composite Grid Structures," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 4, 1996, pp. 503-534.
9. Jeon, S.W., Han, M.G., Chang, S.H., Cho, Y.H., and Park, C.M., "Design of CFRP-Metal Hybrid Pantograph Upper-arm," *Composites Research*, Vol. 28, No. 5, 2015, pp. 327-332.
10. Park, Y.M., Chung, S.G., Jeong, Y.J., Park, N.H., Kim, S.Y., Huh, M.Y., and Lee, H.S., "Preliminary Study on the Toughened Epoxy Matrix for High Performance CFRP Pressure Vessels," *The Korean Society of Propulsion Engineers, 2015 KSPE Fall Conference*, pp. 933-936.