

# 복합재료 동력전달축의 접착조인트 설계

김진국\* · 이대길\*\*

## Design of Adhesive Joints for Composite Propeller Shafts

Jin Kook Kim and Dai Gil Lee

KEY WORDS : Composite propeller shaft(복합재료 동력전달축), Bonding length(접착길이), Yoke thickness(요크두께)

### ABSTRACT

Substituting composite structures for conventional metallic structures has many advantages because of higher specific stiffness and specific strength of composite materials. In this work, one-piece propeller shafts composed of carbon/epoxy and glass/epoxy composites were designed and manufactured for a rear wheel drive automobile satisfying three design specifications, such as static torque transmission capability, torsional buckling and the fundamental natural bending frequency. Single lap adhesively bonded joint was employed to join the composite shaft and the aluminum yoke. For the optimal adhesive joining of the composite propeller shaft to the aluminum yoke, the torque transmission capability of the adhesively bonded composite shaft was calculated with respect to bonding length and yoke thickness by finite element method and compared with the experimental result. Then an optimal design method was proposed based on the failure model which incorporated the nonlinear mechanical behavior of aluminum yoke and epoxy adhesive. From the experiments and FEM analyses, it was found that the static torque transmission capability of composite propeller shaft was maximum at the critical yoke thickness, and it saturated beyond the critical length. Also, it was found that the one-piece composite propeller shaft had 40% weight saving effect compared with a two-piece steel propeller shaft.

### 1. 서론

후륜구동 자동차용 동력전달축은 엔진에서 나온 출력을 뒷차축의 차동기어장치로 전달하는 중공축이다 (Fig. 1). 일반적으로 동력전달축은 강철을 이용한 2단 분리형으로 제작되는데, 강철을 이용하여 동력전달축을 일체형으로 제작할 경우, 굽힘 1차 고유진동수가 운전 진동수 범위 내에 위치하여 공진이 발생하기 때문이다. 또한 이러한 분리형 동력전달축은, 축 중간에 차체와 부착을 위한 축지지베어링과 브라킷, 그리고 3개의 등속 조인트 등의 복잡한 구조를 가져 구동중 발생된 진동과 소음이 차체로 전달되기 쉽다.

비강성이 강철보다 4 배이상 우수한 탄소섬유

에폭시 복합재료로 제작된 동력전달축은 굽힘 1차 고유진동수가 제작기준인 6,500 rpm 이상으로 높일 수 있어 일체형으로 제작이 가능하다.<sup>(1-2)</sup> 일체형 동력전달축은 분리형 동력전달축에 비하여 축지지베어링과 차체 부착용 브라킷과 등속 조인트 1 개가 제거되는 단순한 구조이므로, 구동중 발

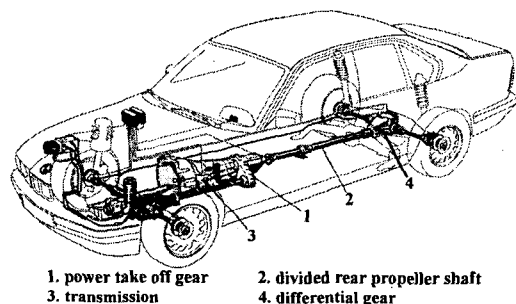


Fig. 1 Schematic diagram of the propeller shaft for a rear wheel drive automobile.

\* 한국과학기술원

\*\* 회원, 한국과학기술원

생하는 진동과 소음이 줄어든다. 또한 기존의 강철 동력전달축에 비하여 무게가 50%밖에 되지 않아, 경량화에 이롭다. 그러나 일체형 복합재료 동력전달축은 등속조인트의 강철 요크와 동시경화 샤프트의 안정한 결합부위가 요구된다.<sup>(3-4)</sup>

일체형 복합재료 동력전달축은 Dana Corporation 의 Spicer U-Joint Division 에서 처음 개발하여 1985 년 Ford Econoline Van 모델에 처음 적용되었다. General Motors 에서는 1988 년형 pickup truck 에 Spicer 의 동력전달축을 적용하여 판매 목표량의 3 배 이상의 매출을 올렸다.<sup>(5)</sup>

국내에서도 복합재료와 알루미늄을 사용한 하이브리드 타입의 일체형 동력전달축의 제조에 관한 연구<sup>(6)</sup>가 진행되어 왔지만, 현재까지 섬유강화 복합재료만을 사용하여 제조하는 일체형 복합재료 동력전달축(이하 복합재료 동력전달축)의 개발은 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 차량 경량화를 위한 복합재료 동력전달축을 개발하는 것에 목표를 두고 있다. 이를 위해서 복합재료 동력전달축을 설계 및 제작하고, 유한요소해석과 비틀림시험을 수행하여 개발가능성을 입증하였다.

## 2. 복합재료 동력전달축의 설계

자동차용 동력전달축은 정적 토크전달 능력이 3,500Nm 이상이고, 굽힘 1차 고유진동수가 6,500 rpm 이상이고, 비틀림좌굴 임계 토크가 3,500Nm 이상으로 설계되어야 한다. 또한 설치 공간의 제약으로 인하여 외경이 100mm 이하로 제한된다.

위의 조건을 만족시키면서, 생산단가를 낮추고, 제조의 편리성을 위하여, 탄소섬유 에폭시 복합재료 (Mitsubishi Chemical Co., HYEJ34M65D) 와 유리섬유 에폭시 복합재료 (SK Chemical, UGN150) 를 이용하여 복합재료 동력전달축을 제조하였다. Table 1 에 각각의 물성을 나타내었다.

**Table 1** Mechanical properties of carbon/epoxy composite and glass/epoxy composite.

	Carbon/epoxy composite	Glass/epoxy composite
$E_L$	370GPa	43.5GPa
$E_T$	5.3GPa	5.0GPa
$G_{LT}$	5.3GPa	5.0GPa
$\nu_{LT}$	0.31	0.25
$\rho$	1,710kg/m <sup>3</sup>	1,980kg/m <sup>3</sup>
$\alpha_L$	-1.1 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$	6.3 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$
$\alpha_T$	27 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$	19.8 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$

토크전달 능력은 다음과 같이 정의하였다. 동력

전달축으로 전달된 토크에 의하여 발생하는 각 플라이의 응력성분들을 고전 적층판 이론으로 구하여 각 성분의 강도와 비교하여 첫번째 플라이 파손기준에 의한 파괴 토크를 토크전달능력이라 한다.

이방성 재료로 제작된 중공축의 비틀림좌굴 임계 토크는 다음과 같이 계산된다.<sup>(7)</sup>

$$T_c = (2\pi r^2 t)(0.272)(E_x \cdot E_h^3)^{0.25} (t/r)^{1.5} \quad (2-1)$$

$E_x$  : average modulus in the axial direction  
 $E_h$  : average modulus in the hoop direction  
 $t$  : overall wall thickness  
 $r$  : mean radius

샤프트의 두께가 얇을수록, 반경이 작을수록, 축방향과 Hoop 방향 강성이 작을수록 낮은 토크에서 축은 비틀림좌굴이 발생하여 파괴된다.

복합재료 동력전달축 양단의 유니버설조인트에는 요크간의 회전을 자유롭게 하기위한 베어링이 삽입된다. 따라서 양단의 경계조건을 양단 단순지지 조건이라고 가정하고, 굽힘 1차 고유진동수 ( $\omega$ )<sup>(8)</sup>를 구하여 보면,

$$\omega = \frac{9.87}{l^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}} \quad (\text{rad/s}) \quad (2-2)$$

$E$  : modulus in the axial direction  
 $I$  : second moment of inertia  
 $\rho$  : mass per unit length (kg/m)  
 $l$  : length of the composite propeller shaft

과 같다.

축방향 강성을 높여서 굽힘 1차 고유진동수를 6,500rpm 이상으로 높이기 위하여, 길이방향 강성이 매우 높은 탄소섬유 에폭시 복합재료 한 플라이를 동력전달축의 최외각에 놓고, 토크전달능력 과 임계 비틀림 좌굴 하중을 모두 3,500 Nm 이상으로 하기위하여, 적층각도가  $\pm 45$  도인 유리섬유 에폭시 복합재료 플라이의 수를 달리하여 계산한 결과를 Table 2 에 나타내었다. T, Tc,  $\omega$ 는 각각 정적

**Table 2** Design values of one-piece composite propeller shaft with the stacking sequence of  $[0_{\text{carbon}}/(\pm 45)_{\text{nt, glass}}]$ .

n	T (Nm)	Tc (Nm)	$\omega$ (rpm)
10	2,239	4,590	8,210
15	3,377	11,100	7,370
<b>16</b>	<b>3,610</b>	<b>12,800</b>	<b>7,260</b>
17	3,846	14,700	7,170
30	7,040	53,700	6,510
31	7,380	57,900	6,480

토크전달능력, 비틀림좌굴 하중, 굽힘 1차 고유진동수를 나타낸다.

탄소섬유 에폭시 복합재료는 강성은 높지만, 섬유 횡방향 인장강도가 낮기 때문에 토크전달능력 기준인 3,500Nm에 이르기 위해서 유리섬유의 적층수가  $n=16$  이상일 때, 즉 최소 32 플라이의 적층이 필요하였다. 그렇게 되면, 비틀림 좌굴 임계하중값과 1차 고유진동수는 모두 기준을 여유있게 만족시킨다. 유리섬유 에폭시 복합재료의 적층수가 커질수록 토크전달능력과 비틀림 좌굴 임계하중값은 증가하는 반면, 1차 고유진동수는 감소하는데, 이는 유리섬유의 증가로 인하여 탄소섬유만 사용할 때보다 축방향 강성이 줄어들기 때문이다. 생산단가를 고려할 때,  $[0_{\text{carbon}}/(\pm 45)_{16}/\text{glass}]$ 가 최적의 설계이다. Fig. 2는 상기 stacking sequence로 제작한 복합재료 중공축에 알루미늄 요크(yoke)와 포크(fork)를 접착제로 접합한 복합재료 동력전달축의 모습을 나타낸다.

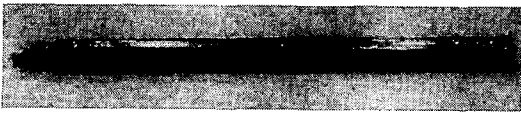


Fig. 2 Photograph of one-piece composite propeller shaft.

### 3. 접착조인트의 유한요소해석

접착제 접합에 의한 복합재료 동력전달축의 토크전달능력은 접착두께, 접착길이, 피접착체의 두께 및 표면조도에 많은 영향을 받는다. 접착길이와 요크두께에 따른 정적 토크전달능력을 예측하기 위하여 상용유한요소코드인 ABAQUS 5.4 (Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., US)를 이용하여 해석하였으며, 3차원 솔리드 요소를 사용하여 1/180 만을 모델링하였다 (Fig. 3).

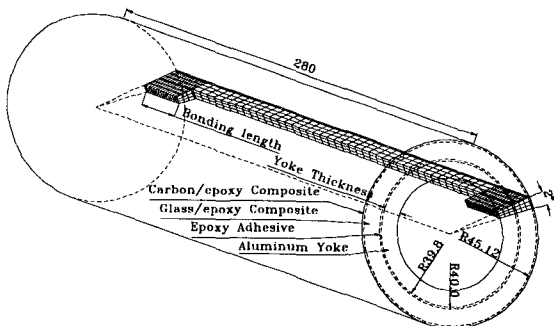


Fig. 3 Finite element mesh with eight-node three-dimensional solid elements for stress analysis.

이 모델에서는 에폭시 접착제와 복합재료 중공축, 그리고 알루미늄 요크는 서로 완전결합하고 있다고 가정된다.

또한, 탄소섬유 에폭시 복합재료와 유리섬유 에폭시 복합재료의 물성은 선형, 에폭시 접착제는 식 (3-1)에 의한 비선형, 알루미늄 요크는 항복강도와 인장강도에 근거한 2단선형물성을 사용하여 해석하였다. Fig. 4에 유한요소해석에 사용된 에폭시 접착제와 알루미늄 요크의 응력-변형률 선도를 나타내었다.

$$\sigma = S(1 - e^{-(E/S)\epsilon}) \quad (3-1)$$

$\sigma$ : tensile stress       $E$ : Young's modulus  
 $S$ : tensile strength     $\epsilon$ : tensile strain.

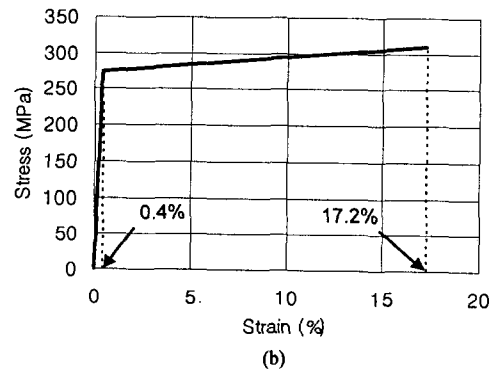
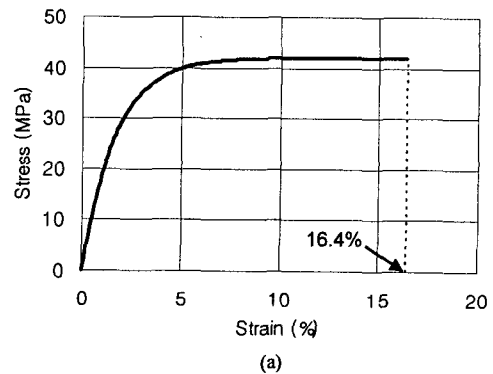


Fig. 4 Idealized stress-strain curve for nonlinear property of (a) epoxy adhesive (IPCO 9923) and (b) aluminum yoke (6061-T6 aluminum).

복합재료 축의 정적 토크전달능력을 평가하기 위하여 Tsai-Wu 파괴지수가 사용되었다<sup>(9)</sup>.

$$FIC = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 \quad (3-2)$$

에폭시 접착제와 알루미늄 요크의 파괴는 아래

의 유효변형률  $(\epsilon_{eff})$  이 파괴변형률에 이르렀을 때 발생하는 것으로 가정하였다.

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (3-3)$$

Fig. 5 에 복합재료 동력전달축의 비틀림강도에 따른 파괴지수를 나타내었다. 3,700Nm 에서 외각의 탄소섬유 에폭시 복합재료가 먼저 파괴되고난 후, 유리섬유 에폭시 복합재료만으로 더 높은 하중을 전달할 수 있지만, 굽힘 1 차 고유진동수가 6,500 rpm 이하로 떨어져서 더 이상 동력전달축의 역할은 수행할 수 없다.

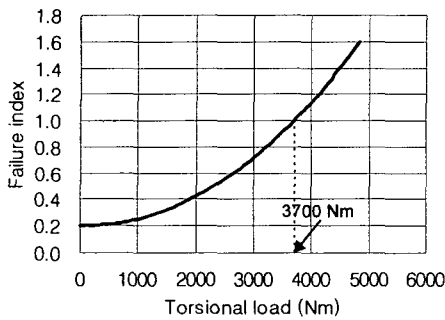


Fig. 5 Failure indices of the composite shaft with respect to torsional loads.

Fig. 6 은 접착두께 0.2mm, 요크 두께 4.8mm 일 때, 접착길이에 따른 토크전달능력을 나타내었다. 접착길이 20mm 이하에서는 토크전달능력은 선형적으로 증가하였고, 25mm(critical length) 이상에서 서서히 포화되었다. Fig. 7 은 접착두께 0.2mm, 접착길이 20mm 일 때, 요크의 두께에 따라 토크전달능력을 나타내었다. 요크 두께가 4.8mm(critical thickness)일 때, 최대 토크전달능력을 나타내었다.

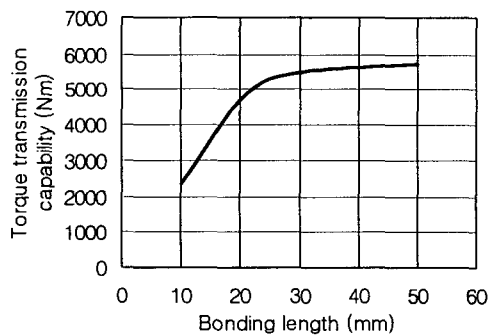


Fig. 6 Static torque transmission capabilities with respect to the bonding length when the bonding thickness and yoke thickness were 0.2mm and 4.8mm, respectively.

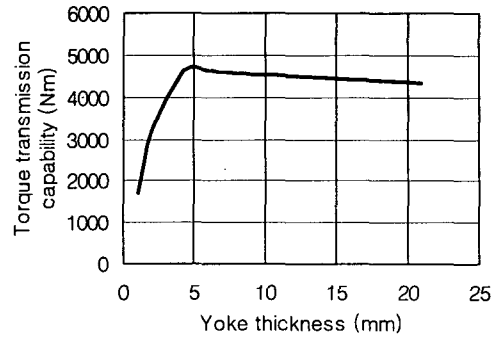


Fig. 7 Static torque transmission capabilities with respect to the yoke thickness when the bonding thickness and bonding length were 0.2mm and 20mm, respectively.

#### 4. 정적 토크전달능력 시험

접착제를 이용한 복합재료와 알루미늄의 접합 설계가 타당한지 판단하기 위하여 접착길이와 요크두께에 따른 정적 토크전달능력 시험하였다. 시험편의 형상은 Fig. 8 과 같으며, 시험에 사용된 복합재료 중공축은 길이 (300mm)를 제외한 모든 치수가 2 절에서 설계된 치수와 동일하다.

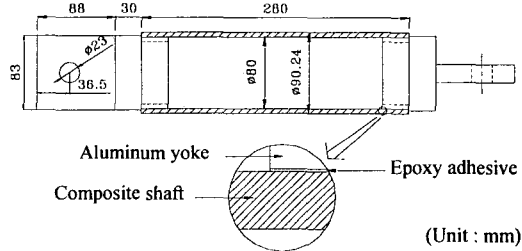


Fig. 8 Drawing of specimen for torsion test.

정적 토크전달능력은 Fig. 9 에서 나타낸 비틀림 시험기를 사용하여 측정하였다. 비틀림 시험기는 최대 13,000Nm 까지 측정가능하며, 주파수변환기와 1:31400 의 감속비를 가지는 사이클로 감속기를 모터출력부에 설치하여 비틀림 속도를 0.02~ 0.7° / sec 사이에서 조절할 수 있으며, 시험편의 파괴시 발생하는 충격하중으로부터 토크센서를 보호하기 위하여 플렉시블 커플링을 사용하였다. 또한 시험 수행중 시험편이 순수비틀림 이외의 축방향 하중을 받지 않도록 시험장착부를 두개의 봉 위를 미끌어 지도록 설계하였으며, 핀 조인트를 이용하여 시험편을 장착하기 때문에 시험장착시 굽힘이나 인장, 압축 등의 불필요한 하중이 전혀 가해지지 않아 정확한 실험이 가능하다.

Fig. 10 은 접착길이에 따른 정적 토크전달능력을 Fig. 6 의 유한요소해석을 통하여 얻은 결과와

함께 나타내었다. 접착길이 20mm 이상에서는 실험결과는 해석값과 거의 일치하였고, 15mm 이하에서 해석값에 비하여 40%정도 높게 측정되었다.

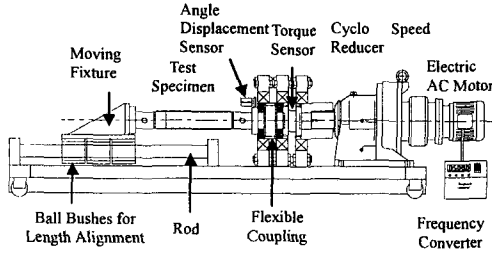


Fig. 9 Schematic diagram of torsion tester of 13,000Nm torque capacity.

Fig. 11은 요크두께에 따른 정적 토크전달능력과 Fig. 7의 유한요소해석결과를 함께 나타내었다. 실험에서는 두께 3mm에서 최대의 토크전달능력을 얻었지만, 해석에서는 4.8mm에서 얻어졌다.

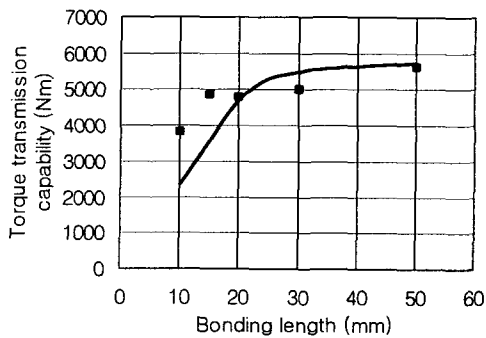


Fig. 10 Experimental results of the static torque transmission capabilities of the composite propeller shaft with calculated values of Fig. 6 with respect to the bonding length.

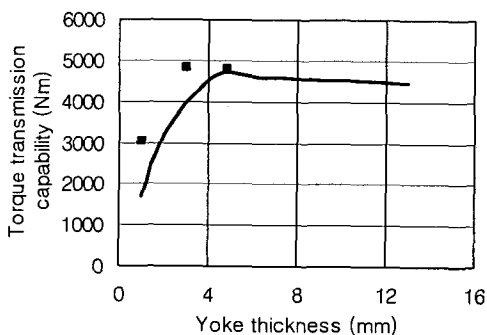


Fig. 11 Experimental results of the static torque transmission capabilities of the composite propeller shaft with calculated values of Fig. 7 with respect to the yoke thickness.

## 5. 결론

본 연구에서 설계한 일체형 복합재료 동력전달축은 6.9kg (복합재료 중공축: 3.5kg, 알루미늄 요크: 3.4kg)으로 약 12kg인 기존 강철 동력전달축에 비하여 40%이상의 무게절감 효과가 있다. 또한 알루미늄 요크의 인장물성을 2단 선형으로 도입하여 유한요소해석을 수행하여도 실제 실험결과와 거의 일치하는 정적 토크전달능력을 얻을 수 있었다. 접착두께 0.2mm, 요크두께 4.8mm일 때, 최소 16mm 이상의 접착길이에서 정적 토크전달능력 기준 (3,500Nm)을 만족하였고, 접착두께 0.2mm, 접착길이 20mm일 때는 최소 3mm 이상에서 기준을 만족하였다.

## 참고문헌

- (1) Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K. 1991, "Manufacturing of a SCARA-type direct-drive robot with graphite/epoxy composite materials," *Robotica*, Vol. 9, pp. 219~229.
- (2) Kulkarni, S. V., Zweben, C. H. and Pipes, R. B. 1978, *Composite Materials in the Automobile Industry*, The ASME winter annual meeting.
- (3) Schmelz, F., Seherr-Thoss, C. & Aucktor, E. 1992, *Universal Joints and Driveshafts*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Chapter 4.
- (4) Reimpell, J. and Stoll, H. 1996, *The Automotive Chassis*, Society of Automotive Engineers, Inc., Chapter 1.
- (5) Mallick, P. K. and Newman, S. 1990, *Composite Materials Technology*, Hanser Publishers, Chapter 6.
- (6) Cho, D. H., Lee, D. G. and Choi, J. H. 1997, "Manufacturing of one-piece automotive driveshafts with aluminum and composite materials," *Composite Structures*, Vol. 38, pp. 309~319.
- (7) Swanson, S. R. 1997, *Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite material*, Prentice-Hall, Inc., Chapter 8.
- (8) 이대길, 정광섭, 최진호 1998, *복합재료 역학 및 제조 기술*, 시그마프레스, Chapter 12.
- (9) Gibson, R. F. 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, Inc., pp. 110-112.
- (10) Hosford, W. F. and Caddell, R. M. 1993, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Prentice-Hall, Inc., pp. 29-48.