

# 후륜구동 자동차용 일체형 복합재료 동력전달축의 설계

김진국\*, 조덕현\*, 이대길\*\*

## Design of One-piece Composite Propeller Shaft for a Rear Wheel Drive Automobile

Jin Kook Kim, Durk Hyun Cho and Dai Gil Lee

KEY WORDS : One-piece composite propeller shaft(일체형 복합재료 동력전달축)

### 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 composite and glass/epoxy one were designed and manufactured for a rear wheel drive automobile, which uses generally a steel two-piece propeller shaft. From the tests of the composite propeller shafts, it was found that the propeller shafts satisfied requirements of static torque transmission capability, torsional buckling capability and the first natural bending frequency and had 40% weight saving effect compared with 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 등속조인트 등의 복잡한 구조를 가져 구동중 발생한 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 등속조인트 1 개가 제거되는 단순한 구조이므로, 구동중 발생하는 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

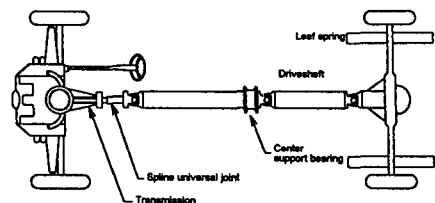


Fig. 1 Schematic diagram of the propeller shaft for a rear wheel drive automobile.

\* 한국과학기술원

\*\* 회원, 한국과학기술원

년 Ford Econoline Van 모델에 처음 적용되었다. General Motors에서는 1988년형 pickup truck에 Spicer의 동력전달축을 적용하여 판매 목표량의 3배 이상의 매출을 올렸다.<sup>(9)</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 일체형 동력전달축)의 개발은 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 차량 경량화를 위한 일체형 동력전달축을 개발하는 것에 목표를 두고 있다. 이를 위해서 일체형 동력전달축의 설계 및 제작을 수행하고, 정적 토크전달능력을 시험하였으며, 설계된 동력전달축의 특성을 시험하기 위한 비틀림 시험기를 개발하였다.

## 2. 일체형 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 일체형 동력전달축을 제조하였다. Table 1에 각각의 물성을 나타내었다.

**Table 1** The 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. 동력전달축으로 전달된 토크에 의하여 발생하는 각 플라이의 응력성분들을 고전 적층판 이론으로 구하여 각 성분의 강도와 비교하여 첫번째 플라이 파손기준에 의한 파괴 토크를 토크전달능력이라 한

다.

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

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

$E_x$  : average modulus in the axial direction

$E_h$  : average modulus in the hoop direction

$t$  : the overall wall thickness

$r$  : the mean radius

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

일체형 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,

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

$E$  : 사용된 재료의 축방향 강성

$I$  : 단면 2차 모멘트

$\rho$  : 단위 길이당 질량 (kg/m)

$l$  : 동력전달축의 길이

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, 토크전달력과 임계 비틀림 좌굴 하중을 모두 3,500 Nm 이상으로 하기위하여, 적층각도가  $\pm 45$ 도인 유리섬유 에폭시 복합재료 플라이의 수를 달리하여 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다.  $T$ ,  $T_c$ ,  $\omega$ 는 각각 정적 토크전달능력, 비틀림좌굴 하중, 굽힘 1차 고유진동수를 나타낸다.

**Table 2** The 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
16	3,610	12,800	7,260
17	3,846	14,700	7,170

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,  $[0_{\text{carbon}}/(\pm 45)_{16t,\text{glass}}]$ 가 최적의 설계이다. Fig. 2는 상기 stacking sequence로 제작한 복합재료 중공축에 알루미늄 요크와 포크를 접착제로 접합한 일체형 동력전달축의 모습을 나타낸다.



Fig. 2 The photograph of one-piece composite propeller shaft.

### 3. 정적 토크전달 능력 시험

접착제를 이용한 복합재료와 알루미늄의 접합 설계가 타당한지 판단하기 위하여 정적 토크전달 능력 시험을 수행하였다. 접착길이에 따라 정적 토크전달 능력은 다르므로, 이번 절에서는 Fig. 3과 같은 형상의 시편을 여러 접착길이에 따라 정적 토크전달능력을 시험하였다. 시험에 사용된 복합재료 중공축은 2절에서 설계된 치수와 동일하며, 길이만 300mm로 짧다.

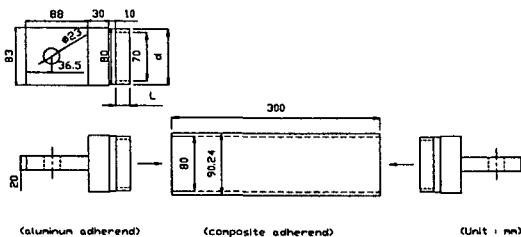


Fig. 3 The drawing of specimen for torsion test.

사용된 접착제는 IPCO9923 (National Starch, USA)이며, 시험속도는  $0.1^\circ / \text{sec}$ 이다.

Fig. 4에 접착길이에 따른 정적 토크전달 능력

을 나타내었다. 접착길이가 길어짐에 따라 토크전달 능력은 커지며, 50mm 이상에서 토크 전달능력이 포화됨을 알 수 있다. 또한 접착길이에 상관없이 모든 시험에서 정적 토크전달 능력 기준 (3,500Nm)을 넘어섰기 때문에 복합재료 중공축과 알루미늄 요크 및 포크와의 접착제를 이용한 접합은 타당한 설계이며, 아울러 2절의 일체형 동력전달축에 관한 설계 역시 정적 비틀림 전달능력 측면에서 만족함을 알 수 있다.

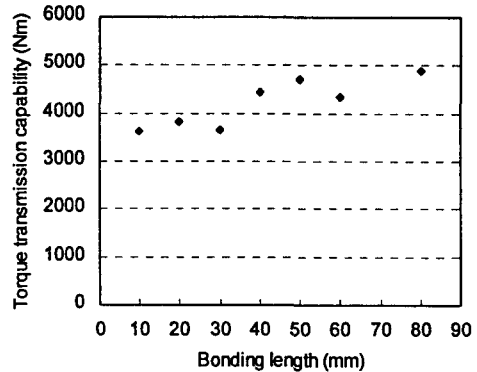


Fig. 4 The static torque transmission capabilities with respect to bonding length.

### 4. 비틀림 시험기의 개발

일체형 동력전달축의 정적 토크전달 능력을 평가하기 위하여 비틀림 시험기를 개발하였다. Table 3에 비틀림 시험기의 사양을 나타내었다.

Table 3 The specification of torsion tester.

Maximum torque	1,300Nm
Maximum length of a specimen	520mm
Speed of testing	0.02~0.7° / sec
Encoder resolution	0.088°

주파수 변환기, 감속비 31433:1의 사이클로 감속기를 이용하여 시험속도를 조절하며, 토크센서 TRS-100K (Transducer Techniques Inc., USA)를 이용하여 토크를 측정하였다. 감속비가 매우 높아 0.5마력의 모터를 사용하여도 높은 토크를 얻는 것이 가능하였다. 또한 시험 수행 중 시편이 순수비틀림 이외의 축방향 하중을 받지 않도록 시편장착부를 두개의 봉 위를 미끌어 지도록 설계하였으며, 핀 조인트를 이용하여 시편을 장착하기 때문에 시편장착시 굽힘이나 인장, 압축 등의 불필요한 하중이 전혀 가해지지 않아 정확한 실험이 가능하다.

Fig. 5 는 제작한 비틀림 시험기의 모습이다.

및 제조 기술, 시그마프레스, Chapter 12.

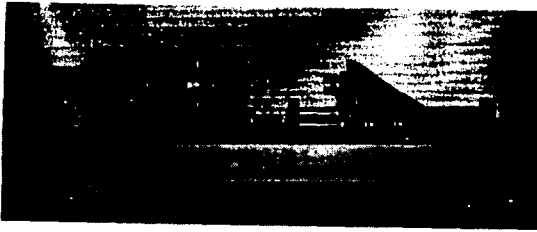


Fig. 5 The photograph of torsion tester.

## 5. 결론

본 연구에서 설계한 일체형 복합재료 동력전달축은 기존의 강철 동력전달축에 비하여 중량비가 40%밖에 되지 않아, 약 6kg의 무게 절감을 가져온다. 또한 정적 토크전달능력 시험에서 접촉길이 50mm에서 토크전달능력이 약 4,800Nm로 포화되었으며, 동력전달축과 알루미늄 요크 및 포크의 접착제 접합설계는 타당하였다.

하지만, 본 연구에서의 일체형 동력전달축이 기존 강철 동력전달축을 대체하기 위해서는 회전시험을 통하여 회전 주파수에 따른 진동특성 및 소음특성의 검증이 필요하다.

## 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., Scherr-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*