

<논문> SAE NO. 933769

자동차용 복합재료 드라이브샤프트 설계 및 성형 연구

Design and Manufacturing of Composite Drive Shaft for Automobiles

김 태 욱,* 이 상 관,* 전 의 진,* 김 완 두,* 이 대 길**
T. W. Kim, S. K. Lee, E. J. Jun, W. D. Kim, D. G. Lee

ABSTRACT

A carbon/epoxy composite drive shaft used for the power transmission of the automobiles with steel joints. Compared with the metallic drive shaft, the composite one has the weight saving of 50% with equivalent torsional strength and fatigue characteristics.

In this study, the filament winding technique for the composite tube and composite/metal joining technique are established. The performance test of the drive shaft is carried out. The optimal condition of the surface roughness of the steel adherend was $1.5\mu\text{m}$ to $2.5\mu\text{m}$, and the optimal condition of the bonding thickness was 0.15mm. Maximum torque and torsional stiffness of the composite drive shaft manufactured by filament winding process were found to be $210\text{kg} \cdot \text{m}$ and $18.5\text{kg} \cdot \text{m}/\text{deg}$, respectively.

주요기술용어 : Carbon/Epoxy Composite, Drive Shaft, Filament Winding, Composite/Metal Joining, Torsional Strength

1. 서 론

복합재료는 경량성의 구조재로서의 여러가지 기계적 특성의 장점과 설계의 유연성 및 기능성 재료의 장점으로 그 응용범위는 날로 확대되고 있으며, 새로운 원자재 개발 및 신 성형기술이 점차적으로 발전됨에 따라 스포츠 레저 및 항공분야 뿐만 아니라, 자동차 산업분야로의 복합재료의 응용이 급속히 증가되고 있다.

복합재료의 경량, 강성, 내환경성은 자동차 부품의 재료로서의 좋은 특성이 되며 현재 자동차

부품의 복합재료화에 관한 연구가 일본, 미국, 유럽등지에서 활발히 진행되고 있다. 일본 및 미국에서는 자동차 소재로서 복합재료가 현재 5~6% 사용되고 있으며 90년대에는 20~12%에 이를 것으로 보고 있다.¹⁾

복합재료의 자동차 부품에의 응용은 부하부품, 외장부품, 엔진부품의 범퍼, 플라이 휠일, 브레이크라이닝 등 여러부품이 있으며, 그중에서 특히 부하부품으로 드라이브샤프트, 접판 스프링, 프레임 등을 들 수 있다. 복합재료 드라이브샤프트는 엔진동력 전달장치로 자동차 주행에 결정

* 정회원, 한국기계연구원

** 한국과학기술원

적인 역할을 하는 위험도가 높은 핵심부품이다. 복합재료 드라이브 샤프트는 복합재료로 된 튜브와 강재로 된 접합부위로 구성되어 있으며, 전체의 무게가 기존의 금속제품에 비해 50% 정도이고, 피로, 비틀림 특성 및 진동 특성이 우수하다.

복합재료 드라이브샤프트를 개발하기 위한 핵심기술은 크게 3가지로 생각할 수 있다. 첫째, 엔진 동력의 요구조건을 만족할 수 있는 비틀림 강도, 강성도 및 피로 특성을 가지는 복합재료 튜브 설계 해석 및 필라멘트 와인딩 성형기술이다. 둘째로는, 복합재료와 금속재료간의 접합기술이다. 셋째로는, 드라이브 샤프트의 피로 특성 등의 시제품 성능 평가 기술을 들 수 있다. 복합재료는 일반 금속재료와는 달리 피로 하중을 받았을 때, 급속한 파괴 양상이 아니고 서서히 파괴된다. 기지재료의 균열, 기지재료와 보강섬유간의 분리, 층간분리 및 섬유파손 등의 손상들이 복잡한 메카니즘으로 성장하다가 서서히 파괴되므로 피로 특성이 우수하다. 그러나 피로 현상에 대한 명확한 규명이 아직 이루어지지 않고 있으며, 특히 구조물에서의 피로 파괴 예측은 더욱 어려운 문제라 할 수 있다.

본 연구에서는 최대 회전속도 720rpm, 비틀림 강도 200kg·m를 만족하는 자동차용 복합재료 드라이브샤프트를 개발하기 위해 앞에서 언급한 3가지 핵심기술에 대해 연구하였다.

2. 복합재료 드라이브샤프트 설계

2.1 복합재료 튜브의 주요치수 결정

일반적으로 드라이브 샤프트가 만족해야 하는 가장 중요한 변수는 최대 각속도까지 올렸을 때 걸리는 토오크 및 각(角)변형이라 할 수 있다. 동력원에서 전달되는 힘이 드라이브샤프트를 통해 전달되므로 튜브에 토오크에 의한 응력이 작용하고, 이에 따른 각(角)변형이 생긴다. 이러한 응력과 변형은 튜브의 파괴 요인이 되기 때문에 설계 시 중요하게 검토되어야 한다.

본 연구에서는 복합재료의 물성치 밀도 등을 고려하여 와인딩 각도에 따라 복합재료 튜브의

길이와 평균직경을 구하였다. 주어진 각속도에 대하여 복합재료 튜브의 임계길이(critical length)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.²⁾

$$L_{crit} = \sqrt{\frac{\pi}{4\sqrt{2}} \frac{d_m}{w} \sqrt{\frac{E_x}{r}}} \quad (1)$$

여기서, d_m 는 튜브의 평균직경,

w 는 튜브의 각속도,

ρ 는 튜브에 사용된 복합재료 밀도,

E_x 는 튜브축방향의 탄성계수,

이며, 특히 E_x 는 와인딩 각도, θ 의 함수로 나타낼 수 있다.³⁾

$$E_x = \left[\frac{1}{E_1} \cos^4\theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{1}{E_2} \sin^4\theta \right]^{-1} \quad (2)$$

여기서, E_1, E_2 는 섬유방향 및 섬유의 직각방향의 탄성계수를 각각 말하며, G_{12} 는 전단강성도, ν_{12} 는 포아송 비를 말한다.

Fig.1은 가장 대표적인 carbon/epoxy에 대해 와인딩각도 변화에 따른 임계길이와 직경과의 관계를 그린 것이다. Fig.1에서 알 수 있는 바와 같이 복합재료의 와인딩 각도가 달라짐에 따라 임계길이와 직경의 관계가 달라진다. 와인딩각도가 커질수록 일정한 직경에 대해 임계길이는 짧아진다. 긴 드라이브샤프트를 요구하는 경우는 와인딩 각도를 작게 하는 것이 유리하지만 비틀림 특성, 인장, 압축 등을 고려해야 하므로 와인딩 각도가 작은 것이 최적은 아니다. 비틀림 강도나 강성도에 유리한 와인딩 각도는 $\pm 45^\circ$ 이며, 인장과 압축에 대해서는 0° 이므로 이 각도 사이에 있는 와인딩 각도가 최적이므로 이는 설계 시 충분히 고려되어야 한다. 본 연구에서는 일반 승용차 및 상용차에 사용될 수 있도록 길이를 1200mm로 결정하고, 와인딩 각도가 $\pm 30^\circ$ 일 때의 평균직경을 Fig.1에서 부터 60mm로 정하였다.

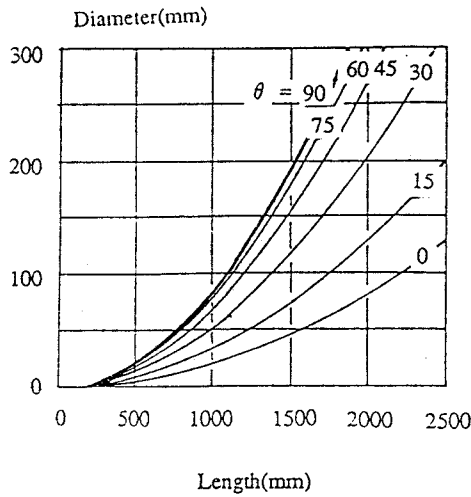


Fig.1 Critical length vs. diameter

2.2. 복합재료/금속 접합해석

복합재료를 사용하여 제품을 제조할 때는 정형가공(net shape manufacturing)을 하는 것이 바람직하나, 모든 부품을 복합재료로 제조하는 것이 비경제적인 경우나 불가능한 경우가 많기 때문에 복합재료는 금속이나 다른 복합재료에 접합(joining)하는 것을 필요로 한다. 그러나 복합재료 구조물 중에서 접합부위가 가장 취약하고, 접합부위에서 차지하는 무게가 상당하므로, 접합부분의 설계와 제조가 가장 중요하다.⁴⁾

접착제(adhesive)에 의한 접합은 기계적인 접합보다 넓은 영역에 하중을 분포시키며, 구조물에 구멍을 낼 필요가 없기 때문에 복합재료의 섬유가 끊어지지 않는 장점이 있다. 그리고 접합부위의 높은 피로 저항과 소음 감소 및 진동 발생시의 감소효과를 주는 잇점도 있다.⁵⁾

접착제에 의한 접합(adhesive fastening)에는 여러가지 종류가 있으나 크게, 원통형 싱글랩 조인트(single lap joint)와 더블랩 조인트(double lap joint) 및 기타 사각형 싱글랩 조인트 등이 있다.

본 연구에서는 복합재료 드라이브샤프트 개발을 위해 복합재료와 금속간의 최적 접합 조건을 구하여 드라이브샤프트 시제품 제작에 적용하였다. 여러종류들의 접합부에 대한 비틀림 강도, 강성도 및 피로특성을 고찰하였으며, 특히 접합부 간격(bonding thickness)과 접합면의 표면조도가

비틀림 피로특성에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다.

2.2.1 비틀림 정적특성

조인트의 정적 비틀림 시험은 싱글랩, 스카프(scarf)를 가진 싱글랩, 더블랩 및 스카프를 가진 더블랩, 육각형 및 타원형 싱글랩 조인트를 시험하였다. Fig.2는 정적 비틀림 시험을 하기 위한 조인트 부분의 형상을 나타낸 것이다. 조인트의 강 접착부위(steel adherend)는 SM45C 탄소강을 사용하여 제작하였으며, 조인트의 복합재료 접착부위는 carbon/epoxy로 제작하였다. 복합재료 튜브의 적층각은 $\pm 30^\circ$ 로 하였으며 접합부 길이는 60mm로 하였다. 조인트의 플랜지 부분에 $\phi 13$ 의 구멍을 6개 뚫어 비틀림 시험 시 시험기와 볼트 체결을 할수 있게 하였다. 이때 사용된 접착제는 epoxy계의 HYSOL 9309 2NA이며, 모든 steel 접합부의 표면은 염산 20% 용액에서 약 1시간동안 표면을 부식시켰다. Fig.3은 여러종류의 원형 조인트의 형상을 나타낸 것이며, Fig.4는 타원형과 육각형 싱글랩 조인트의 형상을 나타낸 것이다.

Table 1은 각 접합부에 대한 비틀림 강도를 나타낸 것으로 정적 비틀림 시험 결과, 모든 시편의 복합재료 튜브에서 파괴가 발생하였다. Table 1의 결과에서 스카프를 가진 조인트의 끝단에서 응력집중이 적게 걸림에도 불구하고, 스카프가 없는 조인트보다 작은 토오크에서 파괴가 발생하는 것이 관찰되었다. 이것은 복합재료의 스카프 끝부분에서 일단 초기 파단이 발생한 후, 응력집중이 완화되기는 하나 응력을 지탱하는 단면적이 축소되므로, 전체적인 토오크 전달능력이 감소되는 것으로 판단되다. 따라서 랩 조인트의 경우에 복합재료 튜브에 스카프를 주는 것은 정적인 토오크 용량의 관점에서 볼때 바람직하지 않다는 결론을 얻었다.

육각형 싱글랩 조인트인 경우의 복합재료 튜브 파괴는 응력집중이 발생하는 면의 중심에서 일어났으며, 타원형 싱글랩 조인트의 경우에는 타원의 단축 부근에서 파괴가 일어남을 확인할 수 있었다.

정적 비틀림 시험결과, 더블랩 조인트가 가장 비틀림 강도가 크고, 싱글랩 조인트 중에는 타

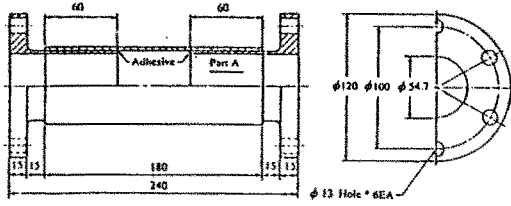
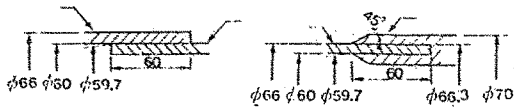
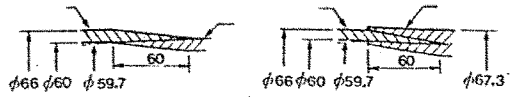


Fig.2 Shape of tublar single lap joint used in the torsional static test

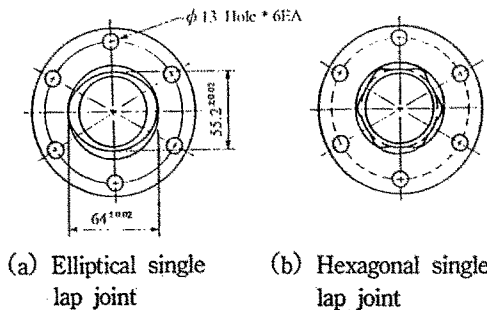


(a) Single lap joint (b) Single lap joint with scarf



(c) Double lap joint (d) Double lap joint with scarf

Fig.3 Joints



(a) Elliptical single lap joint (b) Hexagonal single lap joint

Fig.4 Configuration of joint

원형의 경우가 가장 큰 비틀림 강도를 갖고 있음을 알 수 있었다. 비틀림 강도면에서는 더블랩 조인트가 가장 유리하지만 실제로 제작공정이 복잡하며, 육각형 혹은 타원형 싱글랩 조인트인 경우도 높은 비틀림 강도를 지니고 있지만, 금형등의 면에서 실제적으로 적용되기에는 생산단가가 높아지는 단점을 갖고 있다. 스카프가 없는

Table 1. Results of torsional static test

Types of joints	Max.torque(kg · m)
Single lap	258
Single lap with scarf	249
Double lap	514
Double lap with scarf	496
Hexagonal lap	400
Elliptical lap	466

싱글랩 조인트만 하더라도 비틀림 강도면에서 요구조건인 비틀림 강도 200kg · m를 충분히 만족하므로, 시제품 제작시 싱글랩 조인트를 채택하였다.

2.2.2 접합부의 비틀림 피로 특성

복합재료와 금속과의 접합특성중 비틀림 피로 특성을 규명하기 위해 싱글랩 조인트의 접합면의 표면조도(surface roughness)와 접합면 간격(bonding thickness)에 따른 피로특성을 고찰하였다. Fig5는 표면조도와 수명과의 관계를 알아 보기 위하여 접착부분의 두께를 1mm, 최대 응력을 +4.0MPa, 최소응력을 -4.0MPa로 하고, 피로 응력의 진폭을 4.0MPa로 하였을 경우의 결과를 보여준다. 표면조도가 1μm이하에서는 접착제의 경계면에서 파괴가 발생하여 급격히 피로수명이 떨어지고, 1.5μm부터 2.5μm까지의 기율기의 변화가 둔화되어 거의 일정하며 2.5μm이상에서는 수명이 다시 감소함을 알 수 있었다. 그러므로 피로 수명은 표면조도가 1.5μm에서 2.5μm사이에서는 조도에 민감한 편이 아니며 최적 접합 조건은 2μm부근임을 알 수 있었다.

Fig6은 접착제의 두께와 피로수명과의 관계를 나타내는 시험 결과이다. 시편의 표면조도를 15 μm에서 2.5μm이내가 되도록 조절하였고, 최대응력을 +4.0MPa, 최소응력을 -4.0MPa로 하고, 피로 응력의 진폭을 4.0MPa로 일정하게 하여 시험하였다. Fig6에서 접합조인트의 피로 특성은 접착제 두께가 감소할수록 좋은 결과를 보여주고 있다. 따라서 접착제의 두께는 편심이 없는 접합을 고려하여 0.15mm정도로 하는 것이 좋다는 결론을 얻었다.

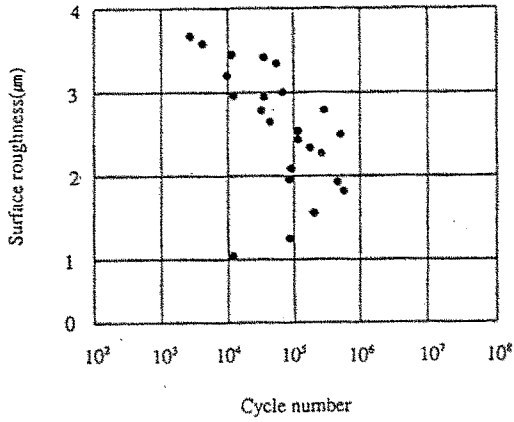


Fig.5 The effect of surface roughness

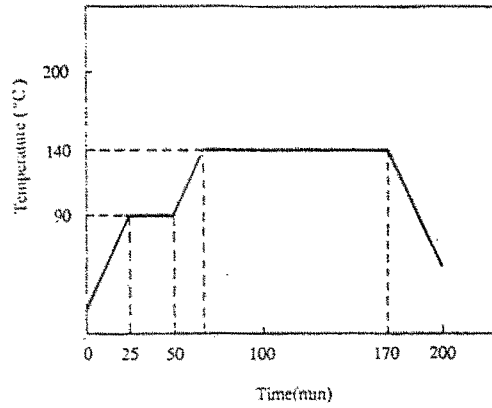


Fig.8 Cure cycle

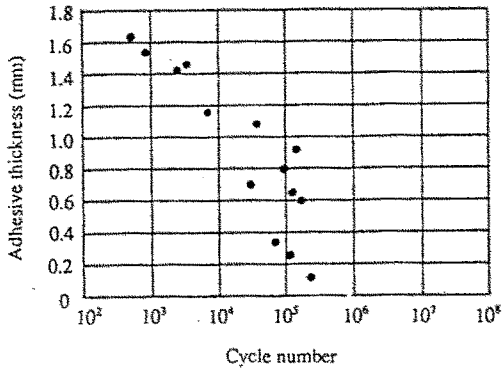


Fig.6 The effect of bonding thickness

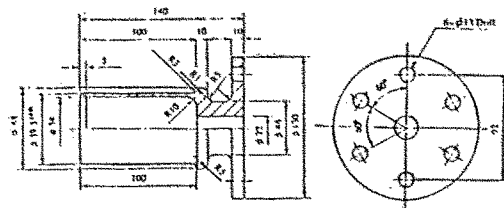


Fig.9 Dimension of joint for drive shaft

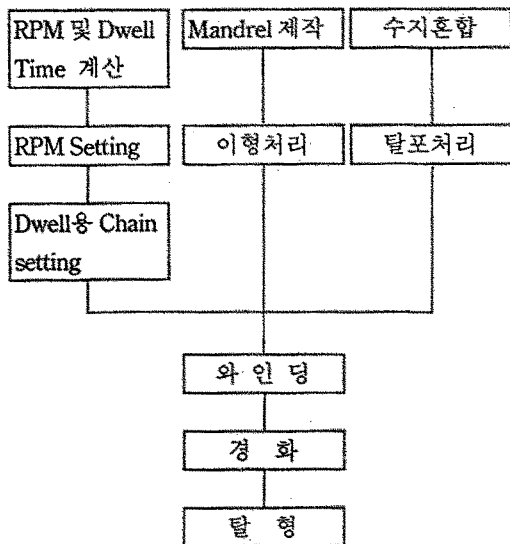


Fig.7 Processing flow chart

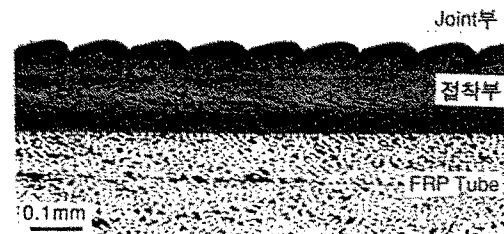


Fig.10 Microstructure of the joint part

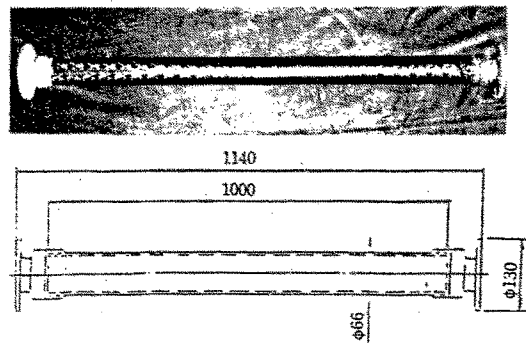


Fig.11 The Composite drive shaft

3. 복합재료 드라이브샤프트 제작

3.1 복합재료 튜브의 필라멘트 와인딩

드라이브샤프트의 복합재료 튜브의 필라멘트 와인딩성형법으로 제작하였고, 이때 복합재료의 보강섬유로 미국 Hercules사의 탄소섬유(AS4-W-6k)를, 기지재료로 IPCO 2447/2347 에폭시를 사용하였으며 Fig.7은 시제품 제작 공정을 도식화한 것이다.

시제품 제작을 위해 수지를 주재인 IPCO 2447 과 경화제 IPCO 2347을 100 : 7.5의 비율로 혼합한 에폭시를 선택하여 필라멘트 와인딩기의 스펀들과 캐리지의 속도를 맞추는 다음, 와인딩 각도는 $\pm 30^\circ$ (stacking sequence : $[\pm 30^\circ]_s$, 14layers), 와인딩 섬유는 6K의 탄소섬유(미국, Hercules사)로 폭이 4.5mm가 되도록 하여 와인딩한다. Fig.8과 같은 경화 사이클로 경화로에서 경화시킨 후 복합재료 튜브를 탈형시켜 완성하였다.

3.2 복합재료 튜브의 금속 조인트의 접합

복합재료와 접합되는 조인트 부분의 길이는 100mm로 하였고 복합재료와 금속조인트 부분과의 간격은 0.15mm로 하였으며, 조인트 부분의 플랜지 부분에 6개의 구멍은 비틀림 시험기에 장착시키기 위한 것이다. Fig.9에 복합재료 드라이브샤프트용 튜브와 접합시키기 위한 조인트의 치수를 나타내었다.

접합부는 SM45C를 가공한 싱글랩 조인트를 사용하였으며 복합재료 튜브와 접합부 간의 틈을 0.15mm로 하였으며, 접합순서는 다음과 같다.

1) 우선 조인트 부분의 바깥쪽 표면과 복합재료 튜브의 안쪽표면을 사포(#600)로 문질러 일정하게 한다.

2) Joint부분의 접합면은 염산 20% 용액에서 약 1시간동안 표면을 부식시킨 다음 아세톤으로 깨끗하게 세척시킨다.

3) 세척된 접합면에 CIBA-GEIGY산 AW136접착제를 균일하게 도포시킨 후, 두 부분을 충분히 들러서 골고루 접착제를 도포시킨다.

4) 이렇게 한 시제품을 경화로 속에 넣어 회

전축을 중심으로 회전시키면서 약 100°C 에서 1시간동안 경화시킨다.

Fig.10은 제작 완료된 접합부위를 광학 현미경으로 관찰한 것인데, 접착제가 균일하게 도포되어 아주 양호한 접합상태를 나타내고 있다. Fig.11은 완성된 복합재료 드라이브 샤프트 시제품의 모습이다. Table 2는 개발된 복합재료 드라이브 샤프트와 강재 샤프트의 무게를 비교한 것이다. Table 2에서 복합재료 튜브의 무게는 강재튜브의 18%였고, 복합재료 드라이브 샤프트는 강재 샤프트의 51.9%였다.

Table 2. The comparison of the weight

	Carbon/ Epoxy(g)	Steel(g)	Composite/ Steel(%)
Tube	710	3870	18.0
Joint part	2700	2700	100.0
Total	3400	6570	51.9

4. 복합재료 드라이브 샤프트의 성능 평가

4.1 정적 비틀림 강도 시험

Fig.12와 같은 비틀림시험기에서 하중속도(ramp speed)를 0.1deg/sec 로 비틀림각을 증가시키면서 시험편이 파괴될 때까지 시험하였다. 토오크-비틀림각 선도를 시험기로부터 X-Y기록기 및 컴퓨터로 받아서 정적 비틀림 강도 및 강성도를 구하였다.

Fig.13은 비틀림 토오크와 비틀림각과의 관계 선도의 대표적 그림으로서, 동 시제품의 비틀림각-비틀림토오크 특성은 극한 비틀림 강도까지 거의 선형적으로 변화되다가 갑자기 파손되는 양상을 띠며, 통상의 금속 재료의 특성에서 볼 수 있는 비선형 영역 및 항복현상 등은 나타나지 않았다.

튜브의 파손 양상은 파손 초기에 표면에 발생된 수지 균열과 섬유 파괴가 점차 진전되어 토오크를 견디지 못하고 순간적으로 큰 폭발음과 함께 Tube몸체가 크게 파손되는 형태를 띤다. Fig.14는 튜브 몸체의 파손된 모습을 보여준다. 시험 결

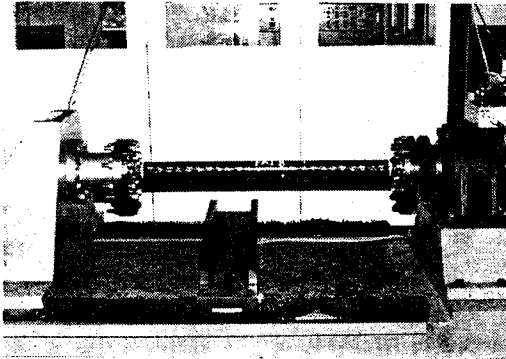


Fig.12 Structural torsional fatigue testing machine

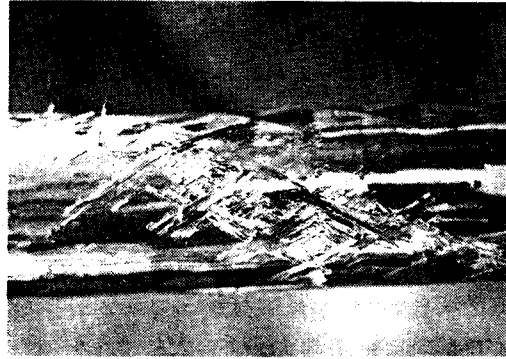


Fig.14 Torsional failure of the composite tube

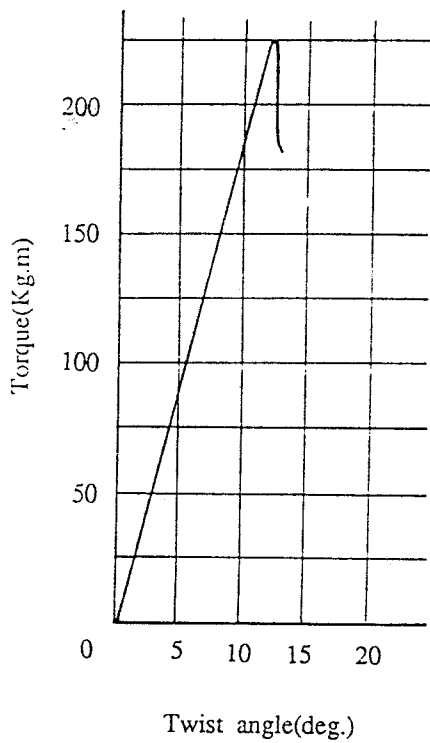


Fig.13 The relationship between torque and twist angle of composite drive shaft

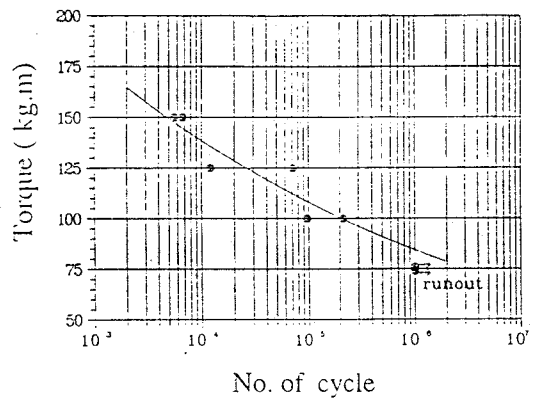


Fig.15 Torque-life curve of composite drive shaft

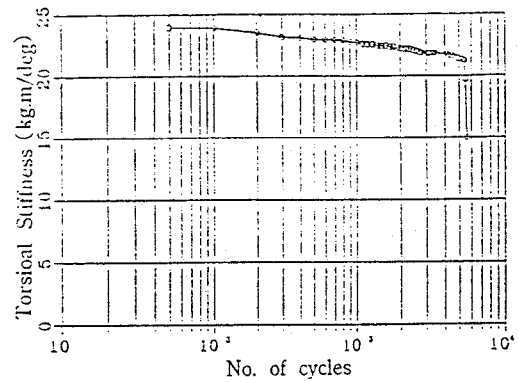


Fig.16 Torsional stiffness vs. number of cycles

과로부터 동 시제품의 극한 비틀림 강도는 210kg·m, 비틀림 강성도는 18.5kg·m/deg의 값을 가지며, 파손 위치가 튜브몸체임을 고려해 볼때 접착부위의 정적 비틀림 강도는 튜브의 강도보다 높음을 알 수 있다.

4.2 비틀림 피로시험

복합재료 드라이브샤프트는 실제 동력 전달 시 동적인 토크를 받게 되므로, 제품의 신뢰성 및 안전성 확보를 위해서는 피로강도 평가가 필수적이라 하겠다. 일반 기계구조물의 경우 정적 강도시험에서의 취약부위(응력 집중 부위)는 곧 피로하중하에서의 취약부위와 일치하는 것이 통례이나, 본 연구에서 개발하고 있는 제품과 같이 제품전체가 한가지 소재가 아니고 여러가지 소재, 즉 복합재 튜브, 기계구조용 강으로 제작된 접착부위 및 접착제(Adhesive) 등으로 구성되어 있는 경우는 정적하중에 의한 취약부위와 피로하중에 의한 취약부위가 다르게 나타날 수도 있다.

시험에 사용된 장비는 앞의 정적 비틀림강도 시험에서 사용된 구조물용 비틀림 피로시험기이며, 피로시험 도중 드라이브샤프트의 비틀림 강성도를 지속적으로 감지하기 위해 machine interface, A/D 변환기 및 전산기로 구성된 데이터 처리장치(data acquisition system)을 이용하였다.

피로시험 결과, 시편의 파손 위치는 모두 복합재 튜브와 조인트 부분의 접착부위로써 정적 시험 시의 파손 부위인 복합재 튜브와는 전혀 다른 파손 양상을 나타냄을 알 수 있었다. 이런 양상은 접착제가 지닌 높은 취성으로 인하여 정적강도는 복합재 튜브보다 높으나 피로강도는 좋지 못한다 그 원인이 있는 것으로 추정된다. Fig.15는 토크-피로수명선도를 나타낸다. 하중진폭 75kg·m에서는 100만회까지 수행한 후 시험을 중단하였으며, 정적 비틀림 강도의 약 70%인 150kg·m의 토크에서는 피로수명이 약 5,000회, 60%인 125kg·m 토크에서는 피로수명이 약 25,000회, 100kg·m에서는 약 200,000회임을 알 수 있다. Fig.16은 피로시험중에 데이터 처리장치를 이용하여 얻은 수행 사이클에 따른

복합재료 드라이브 샤프트의 비틀림 강성도의 변화를 나타낸 것이다. 비틀림 강성도가 10% 감소하였을 때 파괴가 처음으로 일어났으며, 그후 비틀림강성도는 급격히 감소하면서 최종파괴에 이르게 된다.

5. 결 론

자동차용 복합재료 드라이브 샤프트를 개발하기 위하여 필라멘트 와인딩 최적성형기술 및 복합재료와 금속간의 접합해석 등 기본 핵심기술을 연구하였으며, 실제 크기의 드라이브 샤프트를 제작하여 비틀림 정·동적 시험 및 피로시험을 실시하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 복합재료 튜브의 치수결정이론을 이용하여 튜브의 평균 직경, 길이, 두께 및 사용된 복합재료들을 결정하였다.
- 2) 복합재료 튜브와 금속 조인트사이의 접합은 접착제에 의한 접합이 피로특성면에서 유리하므로 시제품은 접착제로 접합하였다.
- 3) 여러종류의 접합부에 대한 비틀림 정적시험 결과, 스카프가 없는 접합이 스카프가 있는 접합의 경우보다 비틀림 강도가 오히려 더 높은 값을 가졌으며, 싱글랩 조인트중 원통형보다는 육각형 혹은 타원형 접합이 강도면에서는 더 우수함을 확인할 수 있었다.
- 4) 접합면의 표면조도 및 접착면 간격이 비틀림 피로 특성에 미치는 영향에 대해서는, 피로수명은 표면조도가 1.5 μ m에서 2.5 μ m사이에서는 조도에 민감이 편이 아니며, 최적 접합 조건은 2 μ m부근임을 알 수 있었다. 또한, 접합면의 간격이 작을수록 피로특성이 우수하며, 편심없는 이상적인 접합 상태를 위해서는 0.15mm가 최적조건이다.
- 5) 복합재료 드라이브샤프트 시제품을 정적 비틀림 시험결과, 비틀림 강도 및 강성도는 210kg·m, 18.5kg·m/deg이며, 파손은 튜브에서 발생되었다. 한편, 비틀림 피로시험결과 피로한도는 75kg·m이며, 피로파손은 조인트 부품과의 접착부위에서 발생되었다.

참 고 문 헌

1. 전의진, 조치룡, “복합재료의 자동차에의 응용”, 기계와 재료, Vol.2.No.1, pp.29-34, 1990.
2. W.Funchs, P.Lutz, Ch.Ruegg, “CFRP Precision-Wound Tubes in Aerospace Engineering” Ciab-Geigy Publication No.24876/e.
3. Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, Mc Graw-Hill, 1975.
4. Reinhart, T.J., Composites, ASM International, pp.816-822(1987).
5. Lekhnitskii, S.G., *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body*, Holden-Day, Inc. pp.169-174 (1963).