

고토크 복합재 프로펠러 샤프트 개발에 관한 연구

박지상*·황경정*·김태욱*·윤형석**

A Study on the Development of High Torque Composite Propeller Shaft

Ji-Sang Park*, Kyung-Jung Hwang*, Tae-Wook Kim*, Hyung-Seok Yun**

Key Words: Composite Propeller Shaft, High Torque, Thermal Interference Fit Joint

Abstract

The goal of this study is to replace the current forward 2-piece propeller shaft of 8 ton large truck made of steel with 1-piece composite propeller shaft. A low cost Glass/Epoxy composite propeller shafts were successfully developed, which satisfy requirements such as the capacity of static torque transfer, fatigue strength and bending natural frequency. Devising secure joining method of a composite tube and metal yoke was the most critical issue in successful development of a high torque composite propeller shaft. In this study, joining method using thermal interference fit was adopted for composite to metal joint. Optimum conditions of heating temperature and interference level of thermal interference fit were determined from thermal stress analysis using 3D finite element method. Static torsion test, fatigue test, RPM and balance test were performed to verify the design.

1. 서 론

섬유강화수지 복합재료는 경량, 강도 및 강성, 내환경성, 진동감쇄능 등에서 우수한 특성을 갖기 때문에 수송기기 분야에 적용 시 경량화, 내구성 증가, NVH 특성 향상 등의 효과를 얻을 수 있다. 이러한 이유로 복합재료의 자동차 분야에 대한 활발한 적용이 2차 구조물은 물론 1차 구조물에게까지 확대되고 있으며, 최근 동력전달 계통에까지 적용되고 있을 정도로 자동차 부품의 복합재료화가 급속히 추진되고 있다. 특히 자동차의 동력전달 계통 중 회전 구동력을 전달하는 프로펠러 샤프트의 튜브 부분을 기존 금속재에서 복합재료로 대체할 경우, 무게는 기존 금속 제품에 비해 40~50%정도 절감 효과가 있다. 일반적으로

샤프트의 굽힘 및 고유진동수 또는 임계회전수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 복합재 샤프트는 스틸 샤프트에 비해 높은 중량 대비 강성(E/ρ =비강성)을 지니고 있어 상대적으로 샤프트 길이(L)를 증가시킬 수 있으며, 따라서 기존의 두 개로 연결된 스틸 샤프트를 한 개의 복합재 샤프트로 대체 가능하다.

$$N_C = (C/L^2) \cdot \sqrt{(E/\rho \cdot I/A)} \quad (1)$$

또한 고유진동수 증가와 함께 연결 및 지지부 제거로 인해 NVH 특성 향상, 피로수명, 내환경성, 전방충돌 특성 등이 향상되는 장점이 있다.

이러한 이유로 르노, 토요타, 아우디 등의 세계 유수 선진 자동차 업체에서는 자동차용 프로펠러 샤프트의 복합재료 응용에 관한 활발한 연구개발 및 실용화에 성공하였으나, 최대 토크 200kgf·m 내외의 소형 승합차나 승용차에 국한되고 있다. 국내에서도 수 차례에 걸쳐 복합재료 프로펠러 샤프트에 대한 개발을 시도한 바 있으나 상용화

* 한국기계연구원 복합재료그룹

** (주)현대자동차 상용차연구소

에 실패하였으며, 특히 대용량 고토크 샤프트 연구개발 사례는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 현재 적용중인 8ton급 대형트럭의 전방 2-piece 금속재 프로펠러 샤프트를 1-piece의 복합재 샤프트로 대체 개발함에 목적이 있다. 특히 고토크 전달과 피로특성 및 Balancing 특성을 만족시키고 동시에 복합재 튜브와 유니버설 조인트와의 연결을 위한 핵심 접합기술인 열박음 접합 방법을 개발하고, 유한요소해석, 정적 비틀림시험 및 피로시험, RPM 및 Balance 시험 등을 수행하여 개발 가능성을 입증하였다.

2. 복합재 튜브 설계/해석

본 연구에서 개발하고자 하는 프로펠러 샤프트의 목표 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. 프로펠러 샤프트 개발 목표 사양

최대 비틀림강도	1,430 kgf·m
최대 RPM	2,910 RPM
목표 수명	15만 Cycle(0~944 kgf·m)
중량목표치	50% 이내 (스틸 대비)

위의 요구 조건을 만족시키는 최적의 와인딩 각도를 결정하는 것이 복합재 튜브 설계/해석의 요점이며, 유한요소 해석을 통하여 최적 설계 및 와인딩 각도($\pm 30^\circ$)를 도출하였다. Fig. 1은 유한요소 해석을 이용한 정강도 해석 및 고유진동수 해석 결과를 보여주고 있으며, 그 결과 비용절감과 생산성 증대를 위해 유리섬유/에폭시 복합재료를 이용하여 단일 각도만으로 와인딩 하였다.

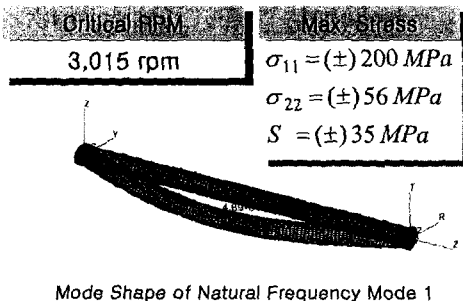


Fig. 1 정강도 및 고유진동수 해석 결과

3. 조인트 접합방법 개발

복합재 프로펠러 샤프트는 Fig. 2와 같이 복합재 튜브와 금속재 조인트 파트가 결합된 구조로서, 용접이 불가능한 재료인 복합재 튜브와 금속재 연결부에 대한 접합 방법 개발이 필요하다. 기존에 개발된 소형 승합차나 승용차용 복합재 프로펠러 샤프트 접합부는 보통 접착제를 이용한 접착, Fastener를 이용한 기계적인 접합이 주종을 이루고 있다.

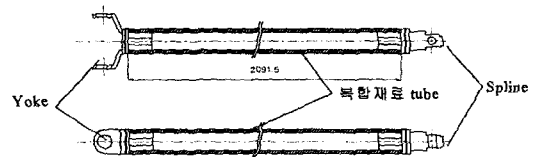


Fig. 2 자동차용 복합재료 P-Shaft 구조

그러나 이러한 기존의 접합 방법을 고토크 대용량 프로펠러 샤프트에 적용할 경우 정적 토크 전달강도 및 피로내구 한도, Balancing 용이성 등에서 설계 요구조건을 만족시키지 못하기 때문에 개발에 실패할 수 있다. 따라서 고토크 대용량 프로펠러 샤프트 접합부에 적용할 수 있는 열박음 접합방법을 개발하고, FEM을 통한 접합부 구조해석을 수행하여 토크 전달능력 및 제작 가능성을 확인하였다. 또한 열박음 제작공정을 개발하고 치수 공차 확인용 1차 시제품을 제작하여 최적의 열박음 치수를 결정하였다. 이를 통하여 2차 시제품을 제작하여 정강도 및 피로시험, RPM 및 Balance 시험 등을 수행하여 실제 적용 가능성을 확인하였다.

3.1 열박음 접합부 제작 공정

열박음 접합 방법은 금속재 유니버설 조인트를 복합재 튜브에 열박음하여 결합부에 잔류되는 높은 열응력에 의한 압착력과 이에 따른 마찰력에 의해 토크를 전달하는 결합 방법이다. 이 때 복합재 튜브의 수축으로 인한 압착력의 저하를 방지하기 위한 수단으로 금속재 인서트를 냉각박음 함으로써, 압착력과 이에 따른 마찰력에 의한 토크 전달능력을 극대화하였다.

3.2 열박음 접합부 설계/해석

3.2.1 열박음 접합부 형상 및 유한요소 모델

열박음 접합부에 대한 비선형 접촉 해석에서는 기하학적 비선형 해석(geometric nonlinear analysis)과 복합재 튜브와 스틸에 대한 접촉해석(contact analysis) 및 냉각박음 용 steel insert와 열박음 용 steel connector에 대한 열해석(thermal analysis)을 수행하였다. 해석에 사용된 접합부 형상은 Fig. 3과 같으며, 해석에 사용된 형상 치수 및 조건은 다음과 같다.

- (Steel Insert)5t/[(±30° Glass)6.5t]/(Steel Connector)5t
- 복합재 tube : 내경=104mm, 외경=117mm
- 접합부 길이 : 100mm
- Steel connector : 열하중 작용, 복합재 tube 외측에 열박음
- Steel insert : 반경방향 수축 보강을 위해 복합재 tube 내측에 냉박음

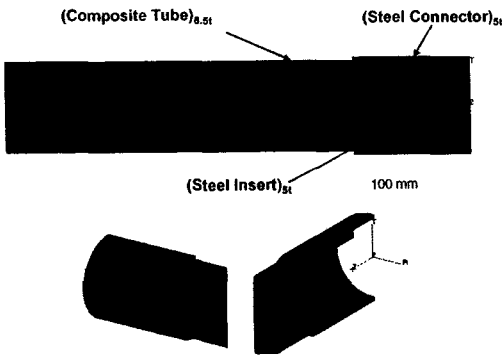


Fig. 3 원형열박음 접합부 형상

열박음 접합부에 대한 유한요소 모델은 다음과 같은 내용으로 수행하였으며, Fig. 4에서 보여주고 있다.

- 3D solid 요소 사용
- 주기적 대칭조건 이용, 1/72 부위 (5°)만 모델링
- 접촉면 정의 :
 - Composite tube to steel connector
 - 마찰력 고려: 마찰계수 = 0.25
- Steel connector : 열하중, $\Delta T = -270^\circ \text{C}$
- 해석절차 : 열하중 부가 후 토크 부가
- Steel 열팽창계수 : $12 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$

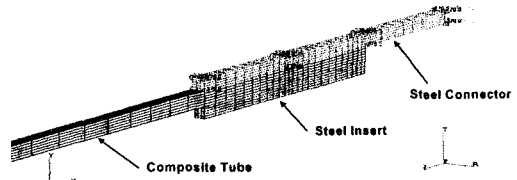


Fig. 4 원형 열박음 유한요소 모델

3.2.2 유한요소 해석 결과

열박음 접합부에 대한 유한요소 해석결과, 반경방향 수축분포 및 수직 접촉압력분포 결과를 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다.

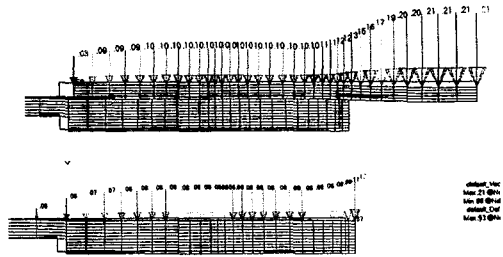


Fig. 5 열박음 접합부 반경방향 수축 분포

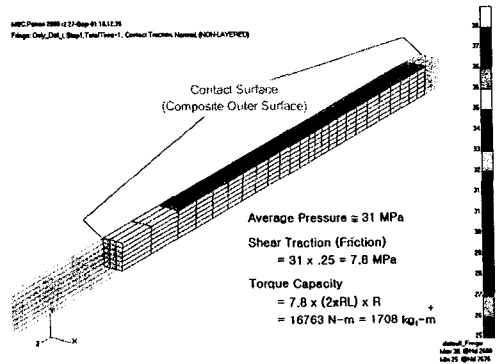


Fig. 6 열박음 수직 접촉압력 분포

해석 결과 접합부에서의 반경방향 수축은 약 0.1mm, 평균압력 31MPa, 전달 가능한 최대토크는 약 1,708kgf·m로써 토크 전달에 충분히 효과적임을 알 수 있다. 또한 원형 열박음 접합으로 일체의 노치가 없기 때문에 응력집중이 거의 없어 모든 파트에서 충분히 낮은 응력수준을 유지할 수 있으며, 결과적으로 열박음에 의한 접합방법은 고토크 전달이 가능하고 피로 특성 향상에도 크게 기여할 것으로 나타났다.

3.3 정강도 시험

열박음 접합방법을 이용하여 정강도 시험용 2차 시제품으로 Half Length 4개, Full Length 1개를 제작하여 시험을 수행하였다. 다음 Fig. 7은 Full Length 시제품에 대한 정강도 시험 장면이며, Fig. 8은 하중에 따른 비틀림 강성 변화거동 확인을 위한 스트레인게이지 부착 위치 및 형태를 보여주고 있다. Fig. 9~10은 토크-비틀림 거동 및 스트레인 측정 시험결과를 보여주고 있다.

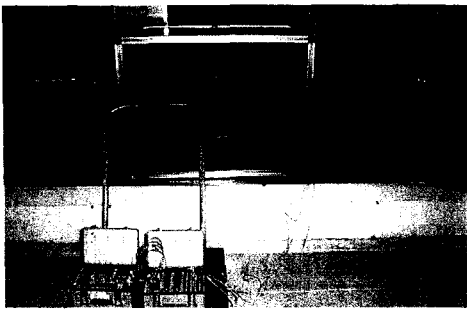


Fig. 7 정강도 시험 장면

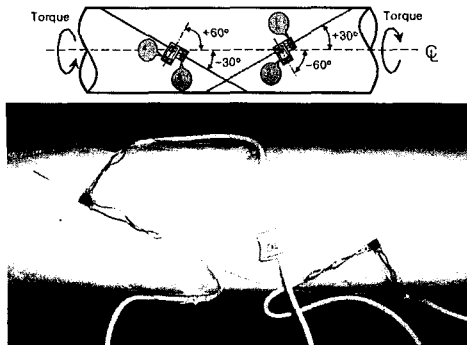


Fig. 8 스트레인게이지 부착 위치 및 형태

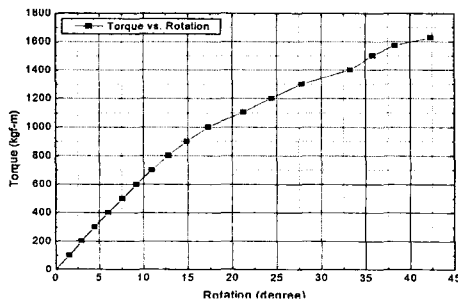


Fig. 9 토크-비틀림각 시험 결과

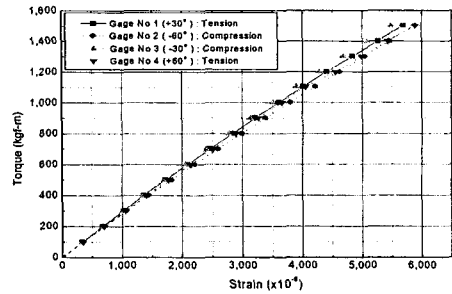


Fig. 10 토크-스트레인 측정 결과

Half Length 및 Full Length 정강도 시험결과 모두 약 1,600kgf-m(요구성능비, 110%) 이상의 최대 전달토크를 보여주었으며, 최종 접합부 파손은 Fig. 11과 같이 미끌림(Slip) 형태로 나타났다.



Fig. 11 정강도 시험결과 접합부 파손 형태

3.4 피로내구 시험

자동차 구동축인 프로펠러 샤프트는 운용 중 토크 형태의 가혹한 피로하중을 받게 되므로, 제품의 신뢰성 및 안전성 확보를 위해서는 피로내구성 평가가 필수적이다. 이에 내구시험용 Full Length 시제품을 2개 제작하여 피로내구 시험을 수행하고 설계요구 피로수명을 확인하였다. 다음 Table 2는 피로내구 시험 결과이며 모두 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 최종 파손 형태는 정강도 시험 결과와는 달리 Fig. 12와 같이 스틸 접합부 용접부위의 균열 형태로 나타났다. 이는 용접부위의 높은 취성과 용접에 의한 노치 등으로 피로강도가 취약한 것이 원인이었으며, 따라서 양산시 일체형 금속 조인트를 사용함으로써 용접부의 피로파손을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. 피로내구시험 결과

시편	시험 하중 (kgf-m)	최대 cycle 수 (cycle)	파손부위 및 형태	요구 성능비(%)
#1	0~944	179,136	용접부 균열	119
#2	0~944	300,000	파손 없음	200

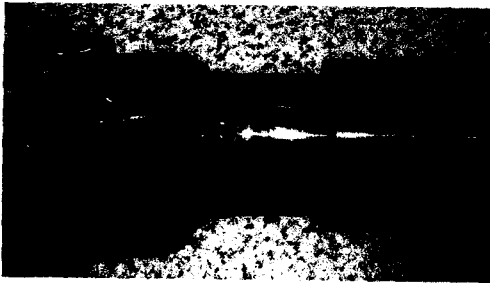


Fig. 12 피로내구 시험 결과 최종 파손형태

3.5 Balance 및 RPM 시험

정강도 및 피로내구 시험을 성공한 열박음 접합부 시제품에 대해 Balance 및 RPM 시험을 수행하고 설계요구조건 만족도를 확인하였다. Table 3은 Balance 및 RPM 시험결과이다. 시험 결과 Balance는 6g 이내로써 요구성능을 만족하였으며, RPM은 임계회전수가 3,450rpm으로써 요구성능비 122%를 나타내 요구성능을 충분히 만족하였다.

Table 3. Balance 및 RPM 시험 결과

시험항목	시험 결과	요구성능비	판정
Balance	6g 이내	규격만족	합격
RPM	임계회전수 : 3,540 rpm	122%	합격

4. 결 론

상용차에 적용 가능한 대용량 복합재 프로펠러 샤프트를 개발하기 위하여 필라멘트 와인딩 복합재 튜브에 대한 설계/해석을 수행하였다. 또한 효과적인 고토크 전달을 위한 접합방법으로 열박음 공법을 개발하고 접합부에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과를 이용하여 시제품을 제작하고 비틀림 정강도 및 피로내구 시험, Balance 및 RPM 시험 등을 통하여 성능평가를 수행하였다. 시험결과 모두 설계요구조건을 충분히 만족

하는 것으로 나타났으며, 양산화 공정 및 경제성 검토에 의해 양산 가능성을 확인하였다. 특히 열박음에 의한 접합방법은 우수한 제작성 및 재현성과 함께 응력집중 제거로 정강도 및 피로내구 성능면에서도 우수한 특성을 보였다. 또한 열박음 접합방법은 기존의 접촉체에 의한 접합에서 나타나는 clearance가 interference fit에 의해 제거됨으로써 편심 방지 효과와 더불어 Balancing이 용이해지는 장점이 있다. 이상으로 열박음에 의해 제작되어진 프로펠러 샤프트는 대용량 고토크를 전달하는 대형 상용차에 효율적으로 적용 가능함이 입증되었다.

후 기

본 연구는 (주)현대자동차의 연구비 지원으로 수행된 "복합재료 P-Shaft 개발" 과제의 결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) W. Funchs, P. Lutz, Ch. Ruegg, "CFRP Precision-Wound Tubes in Aerospace Engineering" Ciab-Geigy Publication No. 24876/e
- (2) Reinhart, T. J., "Composites", ASM Int., pp. 816-822, 1987
- (3) Schmelz, F., Seherr-Thoss, C. & Aucktor, E. "Universal Joints and Drive Shafts", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Chapter 4. 1992
- (4) Chon C. T. "Analysis of Tubular Lap Joint in Torsion," Journal of Composite Materials, Vol. 16, pp. 268-284, 1982
- (5) Swanson, S. R. "Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Material", Prentice-Hall, Inc., Chapter 8. 1997
- (6) Gibson, R. F. "Principles of Composite Material Mechanics", McGraw-Hill, Inc., 1995, pp. 163-185
- (7) H. Nayeb-Hashemi, J. N. Rossettos and A. P. Melo, "Multiaxial fatigue life evaluation of tubular adhesively bonded joints", Int. J. Adhesion and adhesives, 1997, pp. 55-63