

하이브리드 샤프트 설계 파라미터 변화에 따른 특성 연구

A study on characteristics according to the parameter variation for hybrid shaft design

홍동표† · 김현식* · 홍 용*

Dong-Pyo Hong, Hyun-Sik Kim, Yong Hong

Key Words : Hybrid shaft(하이브리드 축), Composite(복합재료), Natural frequency(고유진동수), Torsion torque(비틀림토크)
Design parameter(설계파라미터)

ABSTRACT

The Carbon fiber epoxy composite material and aluminum have many advantages about higher specific stiffness and good fatigue characteristics. basically, the propeller shaft of automobile must satisfy high natural frequency more than 9,200 rpm to satisfy high number of rotation and high torsion torque more than 2,700Nm. In these reason, studied natural frequency and torsion torque characteristics of shaft according to parameter variations with the outdiameter and thickness. From the torsion tester and natural frequency experiments FE analyses was compared vibration and torque characteristics of hybrid shaft. Designed hybrid shaft was experimented through FFT analyzer and torsion tester each and satisfied that hybrid shaft reverence 60mm and thickness 5mm by a these experiment is most suitable. Therefore, that can manufacture existent steel two piece type propeller shaft to one piece type hybrid shaft.

1. 서 론

자동차의 프로펠러샤프트는 후륜구동차량의 뒷바퀴에 엔진으로부터 나오는 동력을 전달하는 역할을 수행하는데 이러한 프로펠러샤프트는 차량의 구동에 필요한 높은 회전수에 견딜 수 있어야 하며 차량의 운행 시 가해지는 외부 충격에도 변형되거나 파괴되지 않아야 한다. 보통 자동차 구동 시 엔진 회전으로부터 프로펠러샤프트의 회전수는 9,200rpm 이상의 높은 회전수를 만족하여야 하며 엔진으로부터의 동력을 차동기어로 전달시킬 때 발생하는 비틀림 토크 또한 2,700Nm 이상을 견딜 수 있어야 한다. 따라서 프로펠러샤프트 자체의 고유진동수가 축의 회전속도 9,200rpm 이상을 견딜 수 있게 설계되어야 하며 2,700Nm 이상의 비틀림 토크를 견딜 수 있게 설계되어야 자동차 구동 시 공진에 의한

파괴 및 외부 충격 및 차량 구동 시 발생하는 비틀림 토크에 의한 프로펠러샤프트의 파괴를 막을 수 있다. [1]

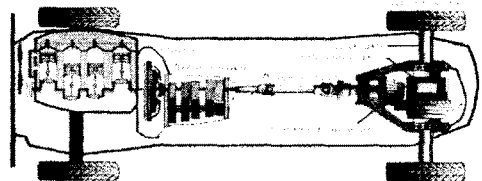


Fig. 1 Propeller-shaft for a rear-wheel driven automobile [2]

현재 기존에 나와 있는 수많은 자동차는 강철 재질의 2단 분리형 구조의 프로펠러샤프트로 되어있는데 이러한 2단 분리형 구조는 중량이 10kg을 넘어서는 강철 재질에 의한 자중 및 2단 축 구조를 연결 및 지지 시켜주기 위하여 복잡한 구조로 되어있어 차량의 연비 및 소음 진동을 통한 차량의 승차감에 부정적인 영향을 미치게 된다. 또한 강철 재질은 재료의 특성상 비강성이 낮아 프로펠러샤프트가 하나의 일체형 구조로 되어있을 경우 축의 높은 고유진동수를 만족시키기 어려워 2단 분리형 구조를 가지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 높은 비강성 및 좋은 피로특성을 가지고 있는 탄소섬유를 비롯한 여러 복합재료에 대한 연구가 활발하게 이어지고 있으며 이러한 연구는 우주항공

† 홍동표: 전북대학교 정밀기계공학과 공업기술연구소
E-mail : hongdp@chonbuk.ac.kr
Tel : (063) 270-2374, Fax : (063) 270-2374

* 전북대학교 정밀기계공학과

산업 및 자동차 산업 등 산업전반에 걸쳐 다양하게 응용되어 사용되어가고 있다. [2]

탄소섬유를 사용한 프로펠러샤프트는 탄소섬유가 가지고 있는 높은 비강성 성질에 의하여 강철 재질에 비하여 높은 고유진동수를 가지게 되어 2단 분리형 구조가 아닌 하나의 일체형 구조로도 9,200rpm 이상의 회전수를 만족시킬 수 있다. 하지만 프로펠러샤프트에서 요구되는 조건으로는 높은 회전수를 만족시켜야하는 문제뿐만이 아니라 프로펠러샤프트의 회전 시 발생하는 높은 비틀림 토크도 만족시켜야하기 때문에 이러한 문제에 의하여 알루미늄샤프트와 탄소섬유를 사용한 복합재료 하이브리드 프로펠러샤프트 개발이 필요하다. 선진국에서는 이미 알루미늄과 복합재료 등 진동 및 피로특성이 우수한 새로운 재료의 연구가 활발하지만 높은 제조비용으로 인하여 실차적용은 미미하다. 따라서 앞으로 이러한 알루미늄과 복합재료의 연구는 꾸준히 계속되어야하며 좀 더 많은 특성들에 대하여 연구 할 필요가 있다.

본 연구에서는 하이브리드 샤프트를 두께 및 외경에 변화를 주어 성형하고 각각의 하이브리드 샤프트의 고유진동수 및 비틀림 토크 테스트를 수행하여 결과 값을 토대로 하이브리드 샤프트의 특성변화에 대하여 알아보았다.

2. 하이브리드 샤프트 설계

2.1 이론적 배경

일체형 알루미늄/복합재료 하이브리드 샤프트는 프로펠러 샤프트에서 요구되는 비틀림 토크와 높은 고유진동수를 모두 만족시킬 수 있어야 한다. 먼저 여기서 탄소섬유는 복합재료 특성상 가지고 있는 높은 비강성으로 인하여 하이브리드 샤프트의 고유진동수를 높여주는 역할을 하게 되며 알루미늄 샤프트는 높은 비틀림 토크를 견디어 외부에서 가해지는 충격 등 사용 환경에 의한 충격에서 하이브리드 샤프트를 보호해주는 역할을 수행한다. 하지만 금속재료에 복합재료를 적층시키는 기술은 매우 어려운 기술로서 서로 다른 특성을 가지고 있는 금속재료와 복합재료를 가지고 하나의 축으로 성형을 해야 한다.

하이브리드 샤프트 성형을 위해서는 탄소섬유 복합재료와 알루미늄 샤프트 사이에 유리섬유 복합재료가 필요하게 되는데 이는 복합재료와 알루미늄 금속 사이에 적층 공정 시 두 층 사이에 잔류응력이 존재하게 되므로 이를 낮추주기 위함이다. 이러한 적층 공정에서 복합재료 섬유는 와인딩 되는 각도에 따라서 축의 특성이 달라지게 되는데 이때의 관계식은 다음과 같다. [3]

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

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

여기서 E_1 은 복합재료 섬유의 섬유길이 방향의 탄성계수이며, E_2 는 복합재료 섬유의 횡방향 탄성계수이다. 또한 E_z 는 복합재료 와인딩 된 축의 종 방향 탄성계수이며 E_h 는 와인딩 된 축의 hoop방향 탄성계수이다. 자동차 프로펠러샤프트 특성상 hoop방향 고유진동수는 배제되기 때문에 E_h 는 여기서 고려하지 않기로 한다.

복합재료 섬유의 적층각도에 따른 축의 탄성계수 그래프는 Fig. 2 과 같다.

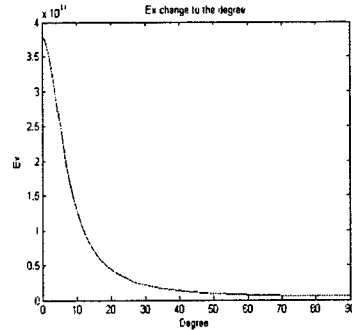


Fig.2 Relationship between winding angles and E_z

본 연구에서 복합재료는 하이브리드 샤프트의 축 방향 진동특성을 높여 주기 위함이므로 적층 각도는 0° 로 결정하였다. 하이브리드 샤프트에서 주어지는 알루미늄 샤프트의 외경 및 두께는 $50*2t$, $50*5t$, $60*5t$ 로 주어지며 제원은 다음의 Table. 1 과 같다.

Table. 1 Specifications of hybrid-shaft

Specification	Hybrid Shaft-1	Hybrid Shaft-2	Hybrid Shaft-3
length	1,250mm	1,250mm	1,250mm
Outer Diameter	50mm	50mm	60mm
Inner Diameter	46mm	40mm	50mm
Carbon Composite Thickness	0.5mm	0.5mm	0.5mm
Glass Composite Thickness	0.25mm	0.25mm	0.25mm

이는 복합재료 적층 후 비틀림 토크 및 고유진동수 측정에 서 비교 분석되어 하이브리드 샤프트의 외경 및 두께 변화에 따라서 샤프트의 특성을 파악하기 위함이다. 하이브리드 샤프트를 성형하기 위하여 적층에 사용되는 탄소섬유 복합재료와 유리섬유 복합재료는 SK Chemical의 URN300과 UGN150을 사용하였으며 알루미늄샤프트는 고강도 A6061-T6을 사용하였으며 이들 물성은 Table.2와 같다.

Table. 2 The mechanical properties of carbon and glass composites and aluminum

Specification	A6061-T6	URN300	UGN150
E (GPa)	69.0	-	-
G (GPa)	27.0	5.6	4.4
E_1 (GPa)	-	380	43.3
E_2 (GPa)	-	5.1	14.7
ν	0.33	0.29	0.3
ρ (kg/m ³)	2,700	1,550	2,100

2.2 하이브리드 샤프트 제조

하이브리드 샤프트의 제조는 알루미늄 샤프트 내부에 복합 재료를 적층시키는 방법으로서 복합재료 섬유 프리프레그를 사용하여 적층된 샤프트를 오토클레이브 안에서 진공 포장된 상태로 고온/고압을 발생시킨 후 냉각하여 성형시킨다. 다음 Fig. 3은 하이브리드 샤프트 적층 방법을 나타내고 있다. 최외각에 알루미늄 샤프트가 있으며 알루미늄 샤프트 내부에 유리섬유 복합재료가 한층 적층되고 그 위에 탄소섬유 복합재료가 2층 적층되는 방법이다. 유리섬유 복합재료는 하이브리드 샤프트 제조 시 탄소섬유 복합재료와 알루미늄 샤프트 경계면 사이에 발생하는 잔류응력을 낮추기 위하여 적층되며 하이브리드 샤프트의 피로특성에 있어서 중요한 역할을 수행한다. [1]

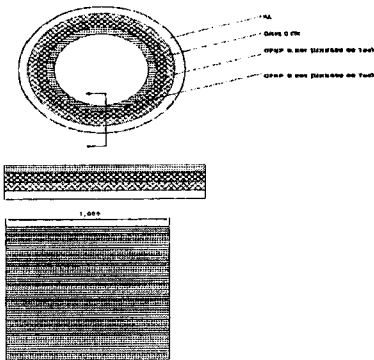


Fig.3 composite winding angles and matrix

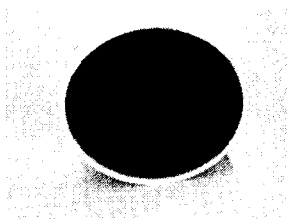


Fig. 4 Inside view of hybrid-shaft

Fig. 4는 적층된 하이브리드 샤프트 내부모습을 보이며 이러한 하이브리드 샤프트를 이용하여 외경 및 두께에 따른 고유진동수 및 비틀림 토크 실험을 바탕으로 파라미터 변화에 따른 하이브리드 샤프트의 특성을 알아보려고 한다.

3. 하이브리드 샤프트 특성실험

3.1 진동특성 테스트

하이브리드 샤프트의 진동특성을 알아보기 위하여 FFT Analyzer를 사용하여 각각의 시편의 고유진동수를 분석하였으며 실험 방법은 다음과 같다. 고유진동수 실험은 프로펠러샤프트의 상태를 Free-Free상태로 가정하고 2개의 방진 스펀지를 이용하여 외부에서 가해지는 진동영향을 억제하였으며 충격망치를 사용하여 시편에 가진 시켜 가속도계를 통하여 발생된 신호를 FFT 분석을 통하여 확인하였으며, 실험 장치는 Fig. 5 와 같다.



Fig. 5 Equipment for shaft vibration test

고유진동수의 계산식은 (1)과 같으며 E 는 하이브리드 샤프트의 탄성계수(GPa), I 는 2차 단면 모멘트(m^4), ρ 는 밀도(kg/m^3), A 는 샤프트의 면적(m^2), l 은 샤프트의 길이를 말하며 하이브리드 샤프트의 first-mode를 계산하기 위하여 상수 4.73을 대입하였다. [4]

$$f = \frac{(4.73)^2}{2\pi^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \text{ (Hz)} \quad (3)$$

하이브리드 샤프트의 탄성계수 E 값을 알아내기 위하여 샤프트의 끝단에 가속도계를 부착하고 다른 쪽 끝에 충격망치로 가진 시켜 발생하는 진동수를 가지고 다음과 같은 식에 대입하여 계산하였다. [4]

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ (m/s)} \quad (4)$$

여기서 C 는 파동 속도를 말한다.

$$f_1 \text{ (Hz)} = \frac{C}{2L} \quad (5)$$

실험으로 얻어진 하이브리드 샤프트의 탄성계수 값은 다음

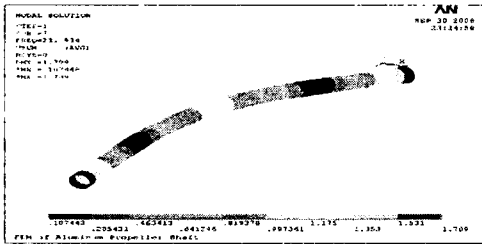
의 Table. 3과 같다.

Table. 3 Modulus of elasticity for hybrid shaft

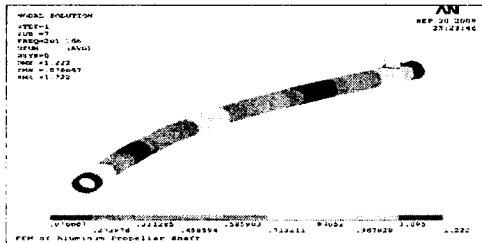
Specification	Hybrid Shaft-1	Hybrid Shaft-2	Hybrid Shaft-3
E(GPa)	100GPa	84.6GPa	90.5GPa

또한 ANSYS를 이용하여 실험에서 구해진 탄성계수 값을 입력데이터로 활용하여 고유진동수를 해석하였다.

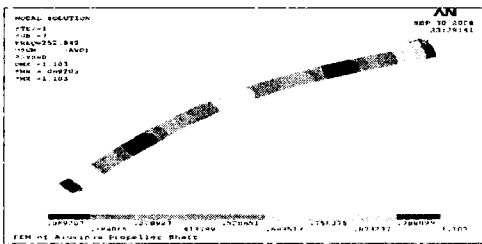
Fig. 6은 해석 결과를 보여주고 있다.



(a) The result of FEA for 50*2t hybrid shaft



(b) The result of FEA for 50*5t hybrid shaft



(c) The result of FEA for 60*5t hybrid shaft

Fig. 6 The result of FEA for hybrid shaft

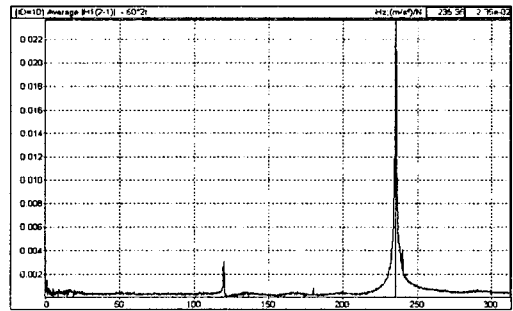
Table. 4는 유한요소해석을 통하여 얻어진 결과를 나타내는데 외경 50mm에서 두께를 변화하여 살펴 본 결과 고유진동수는 두께가 2mm에서 5mm로 변할 때 14% 정도로 낮아짐을 알 수 있다. 또한 동일한 두께에서 외경을 50mm와 60mm로 변화하여 살펴 본 결과 외경 60mm의 하이브리드 샤프트의 고유진동수가 25% 정도로 상승된 것을 볼 수 있다.

따라서 상대적으로 외경이 커지고 두께가 얇아질수록 진동 특성은 높아짐을 알 수 있다.

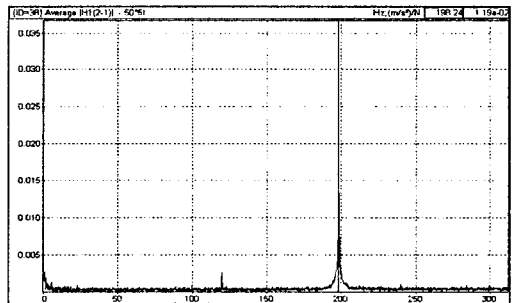
Table. 4 The result of hybrid shaft FEA for natural frequency

Specification	Hybrid Shaft-1	Hybrid Shaft-2	Hybrid Shaft-3
Natural frequency	232Hz	201Hz	252Hz

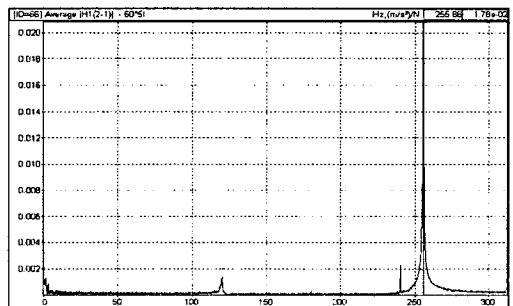
Fig. 7은 각각의 시편의 고유진동수 테스트 결과를 나타내고 있다. 테스트에 의한 하이브리드 샤프트의 진동특성도 해석결과와 같이 두께가 얇을수록, 외경이 커질수록 더 유리한 조건임을 알 수 있는데 다음의 Table. 5는 각각의 하이브리드 샤프트 고유진동수의 해석 결과와 실험 값을 보여주고 있다.



(a) The result of 50*2t natural frequency test



(b) The result of 50*5t natural frequency test



(c) The result of 60*5t natural frequency test

Fig. 7 The result of natural frequency test

Table. 5 The result of hybrid shaft experiment for natural frequency

Specification	Hybrid Shaft-1	Hybrid Shaft-2	Hybrid Shaft-3
TEST	235Hz	198Hz	255Hz
FEM	232Hz	201Hz	252Hz

또한 실험 결과에 의하면 모든 하이브리드 샤프트는 자동차의 프로펠러샤프트에서 요구하는 9,200 rpm 이상의 높은 회전수를 극복할 수 있는 높은 고유진동수를 가지고 있어 진동특성 조건에 만족함을 알 수 있는데 이는 복합재료의 높은 비강성 때문이다.

3.2 비틀림 토크 테스트

다음은 하이브리드 샤프트의 두께 및 외경변화에 따른 정적 비틀림 토크 특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. 시편의 길이는 250mm로 양끝을 맞추고 양끝에 시편과 시험기에 연결하기 위하여 Fig. 8과 같이 알루미늄 원형 지그를 제작한 후 하이브리드 샤프트에 용접을 실시하여 비틀림 테스트 장치에 장착 가능하게 만들었다.

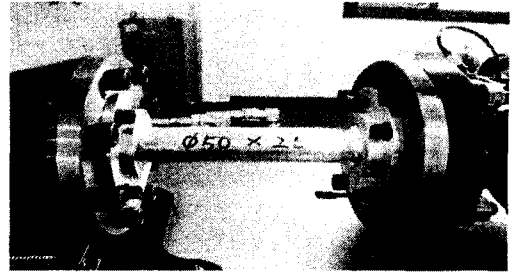


Fig. 8 Torsion test model

주어진 시편을 가지고 정적 비틀림 토크 실험을 실시하였으며 Fig. 9에 실험 모습을 보여주고 있다. 시험 속도는 0.1°/sec 이며 시편의 끝단의 파괴가 되는 시점에서 멈춰 각각의 하이브리드샤프트의 정적 비틀림 토크를 측정하였다. 여기서 프로펠러샤프트에 걸리는 정적 비틀림 토크 계산식은 다음과 같다. [5]

$$T_{static} = 2\pi \cdot r_{avg}^2 \cdot t_{al} \cdot S_{al} \quad (4)$$

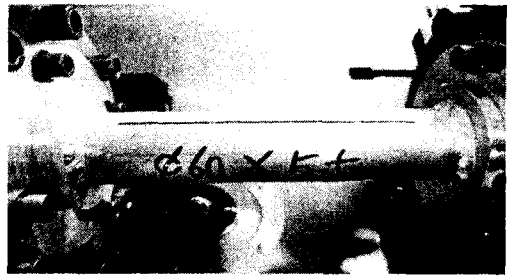
S_{al} 은 알루미늄 샤프트의 전단강도이며 r_{avg} 는 하이브리드 샤프트의 평균 반지름, t_{al} 은 두께를 말한다. 하이브리드 샤프트에서 알루미늄 샤프트는 비틀림 토크를 극복해내는 역할을 수행하며 복합재료는 고유진동수를 높여주는 역할을 수행하므로 정적 비틀림 토크 계산에 있어서 복합재료의 비틀림 토크는 제외하고 알루미늄 샤프트의 비틀림 토크만 고려하기로 한다. [5]



(a) Torsion test 50*2t hybrid shaft



(b) Torsion test 50*5t hybrid shaft



(c) Torsion test 60*5t hybrid shaft

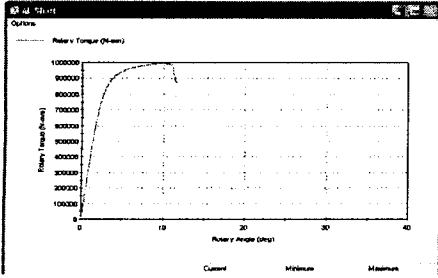
Fig. 9 Torsion test hybrid shaft

각각의 하이브리드 샤프트 시편은 정적 비틀림 테스트 결과 60*5t의 하이브리드 샤프트가 2,700Nm 이상의 만족하는 결과를 얻었으며 Fig. 10 및 Table. 6에 실험 결과가 나타나있다.

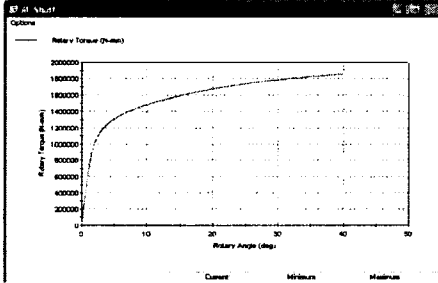
Table. 6 The result of hybrid shaft experiment for torsion torque

Specification	Hybrid Shaft-1	Hybrid Shaft-2	Hybrid Shaft-3
Torsion test	1,000Nm	1,850Nm	2,900Nm

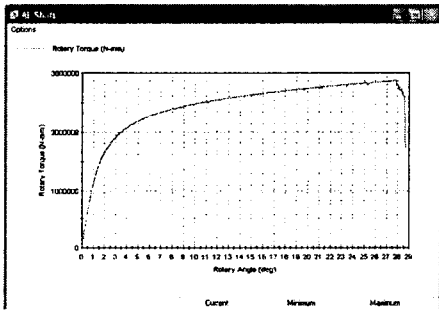
테스트 결과 정적 비틀림 토크는 외경 및 두께가 두꺼울수록 높은 값을 나타냄을 보였는데 이는 정적 비틀림 토크 관계식과 연관되어 있음을 보여준다. 이로써 하이브리드 프로펠러샤프트를 만들기 위해서는 고유진동수와 정적 비틀림 토크를 기준치에 맞추기 위해 외경 및 두께를 적절하게 조절해야 한다는 것을 알 수 있다.



(a) The result of torsion test 50*2t hybrid shaft



(b) The result of torsion test 50*5t hybrid shaft



(c) The result of torsion test 60*5t hybrid shaft

Fig. 9 The result of torsion test

4. 결 론

알루미늄과 탄소섬유 복합재료의 하이브리드 샤프트는 두께 및 외경 변화에 있어서 3가지 하이브리드 샤프트 시편을 가지고 실험 및 해석을 수행한 결과 진동 및 토크 능력이 달라짐을 확인하였는데 고유진동수는 외경이 크고 두께가 작을수록 높은 값을 만족시킨다는 것을 알 수 있었다. 하지만 정적 비틀림 토크 테스트 결과 하이브리드 샤프트의 비틀림 토크는 외경이 크고 두께가 두꺼울수록 높은 특성을 보였으므로 본 연구의 최종적인 목표인 복합재료와 알루미늄을 이용한 일체형 하이브리드 프로펠러샤프트를 제작하기 위해서는 고유진동수와 비틀림 토크를 모두 만족시키기 위한 외경 및 두께 파라미터의 절충이 필요하다. 또한 여기서 강철 2단 분리형 프로펠러샤프트의 고유진동수 및 정적 비

틀림 토크 요구치를 모두 만족하는 경우는 외경 60mm 두께 5mm의 하이브리드 샤프트였다.

앞으로 일체형 하이브리드 프로펠러샤프트를 만들기 위하여 실제 차량의 운행 중에 발생할 수 있는 급격한 높은 토크 변동 및 외부 충격에 의한 영향 등을 고려하여야 할 것이며 이러한 충격에 의한 프로펠러샤프트의 문제점을 보완하여 일체형 하이브리드 프로펠러샤프트를 개발할 것이다.

후 기

본 연구는 (재)전북테크노파크가 지원하고 있는 지방기술혁신사업인 "승용차용 탄소강화 MMC응용 Propeller-shaft 개발" 사업으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim. H. S, Lee. D. G, 2005, "Optimal design of the press fit joint for a hybrid aluminum/composite drive shaft," Composite Structures., pp. 33~47.
- (2) Lee. H. J, Hwang. J. H, Kim. S. S, Byun. J. M, Kim. E. Z, Cha. D. J, Kang. S. W, Byun. W. Y, 2006, "A study on the Vibration characteristic of Slip-in tube propeller-shaft in FR automobile," KSNE., pp. 309~313.
- (3) Kim. T. W, Lee. S. K, Jun. E. J, Kim. W. D, Lee. D. G, 2006, "Design and manufacturing of composite drive shaft for automobiles," KSAE., Vol. 1, No. 3, pp. 109~117.
- (4) Palm. William, J, 2007, "Mechanical vibration," Interscience., John Wiley & Sons, pp. 663~670
- (5) Lee. D. G, Kim. H. S, Kim. J. W, Kim. J. K, 2004, "Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft," Composite Structures 63., pp. 87~99.