

정적 강도와 피로 수명을 충족하는 경량 인텀 샤프트의 설계

방우석¹⁾ · 이광주²⁾

한국기술교육대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한국기술교육대학교 기계공학부²⁾

Design of Lightweight Steering Intermediate Shaft Which Satisfies Requirements for Static Strength and Fatigue Life

Wooseok Bang¹⁾ · Kwangju Lee^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of KoreaTech, Chungnam 31253, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, KoreaTech, Chungnam 31253, Korea

(Received 3 February 2022 / Revised 1 April 2022 / Accepted 30 April 2022)

Abstract : In this paper, an attempt was made to reduce the weight of the intermediate shaft in the automotive steering system by hollowing it. Analysis was performed in order to determine whether the hollow shaft satisfies the requirements for static torsional strength and torsional fatigue endurance. In the static torsional strength analysis, it was confirmed that the maximum stress of the hollow shaft with an inner hole diameter of up to 9 mm was almost the same as the maximum stress of the solid shaft. In the torsional fatigue endurance analysis, it was confirmed that the fatigue life of a hollow shaft with an inner hole diameter of 12 mm also satisfies the requirements. Furthermore, it was confirmed that hollowing the shaft could reduce approximately 20 % of its weight.

Key words : Intermediate shaft(인텀 샤프트), Steering(조향), Nonlinear stress analysis(비선형 응력 해석), Fatigue analysis(내구 해석), Lightweight design(경량 설계)

1. 서론

자동차 조향장치에서 인텀 샤프트는 조향 컬럼 샤프트와 조향 기어 샤프트를 서로 기계적으로 연결하는 장치이다.¹⁾ 인텀 샤프트는 샤프트 요크, 핀치 볼트 요크, 크램프 요크, 스파이더 등의 다양한 구성품으로 이루어져 있다. 인텀 샤프트는 스티어링 핸들의 조향력을 전달하는 주된 기능 외에 차량 주행 시 차체의 전달음 및 노면의 진동, 소음을 흡수하는 기능, 차량 충돌 시 차체에서 밀려오는 변위를 흡수하여 운전자의 하체 상해를 방지할 수 있는 충격 흡수 기능 등을 수행하는 중요 부품이다.^{2,3)}

이러한 인텀샤프트의 형상 설계와 해석 등에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.^{4,6)} 자동차의 경량화에 대한 요구가 점차 증가함에 따라서 자동차의 조향장치에서 사용되는 인텀 샤프트의 소재가 기존의 강재에서 알루미늄으로 변경되고 있는 추세이다. 내연기관 자동차에서

는 고온에서의 물성이 중요하므로, 6xxx 계열의 알루미늄 합금이 인텀 샤프트의 소재로 사용되어 왔다.^{7,8)}

그러나 최근에 자동차의 동력원이 내연기관으로부터 전기로 전환되는 추세에서는, 고온에서의 우수한 재료 물성이 더 이상 요구되지 않고 있다. 이에 따라서 상온에서 더 높은 강도를 갖는 7xxx 계열의 알루미늄 합금이 인텀 샤프트의 재료로 고려되고 있다. 그러나 7xxx 계열의 알루미늄 합금은 가격이 더 높은 단점이 있다. 이에 따라서 인텀 샤프트 형상의 변경을 통하여 경량화를 하게 된다면, 7xxx 계열의 알루미늄 합금을 인텀 샤프트에 적용할 수 있게 된다.

본 논문에서는 상온 물성이 우수한 7xxx 계열의 알루미늄 합금으로 설계된 인텀 샤프트를 기존의 중실축 형상에서 중공축 형상으로 설계를 변경함으로써, 자중을 경감하고자 하였다. 설계 변경을 검증하기 위하여 인텀 샤프

*Corresponding author, E-mail: klee@koreatech.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

트의 정적 비틀림 해석과 비틀림 내구 해석을 수행하였다. 해석에서 필요한 재료의 물성은 인장시험을 통하여 확보하였다. 정적 비틀림 해석에서는 크기가 280 Nm인 비틀림 모멘트를 가하여 재료가 정적 강도를 충족하는지 검토하였다. 비틀림 내구 해석에서는 크기가 29.4 Nm인 비틀림 모멘트가 2.3 Hz의 속도로 사인과 형태로 반복적으로 가해질 때 내구 수명을 충족하는지 검토하였다.

2. 인텀 샤프트 소재의 물성 측정

7xxxx 계열의 알루미늄 합금 소재를 사용하여 ASTM E8에서 명시한대로 인장시험에서 사용될 시편을 제작하였다.⁹⁾ 시편의 크기는 ASTM E8에 명시된 몇 가지 형상 중에서 가장 기본으로 이용되는 표준 시편(Standard specimen)으로 선정하였으며, 그립부의 직경은 16.5 mm가 되도록 환봉 형상으로 제작하였다(Fig. 1).

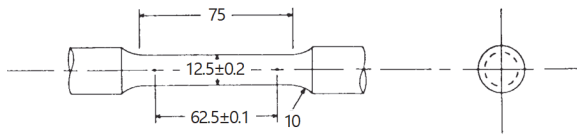


Fig. 1 Standard round tension test specimen according to ASTM specification E8

2.1 인장항복강도와 인장극한강도

제작된 시편을 MTS 810 Material Testing System에 장착하여 상온에서 인장시험을 수행하였다. ASTM E8에서는, 시편의 단면적이 줄어든 영역의 길이에서 변형률의 속도로 시험속도를 명시하고 있다.⁹⁾ 이에 따라서 본 연구에서는 시험속도를 변위의 속도로 환산하여 3.75 mm/min의 속도로 인장시험을 진행하였다. 인장시

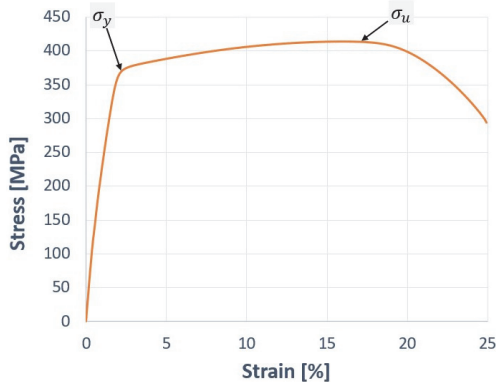


Fig. 2 Engineering stress-strain diagram which is used to find tensile yield stress and tensile ultimate stress

험에서는 시편이 파단될 때까지 하중의 크기를 점점 증가시켜서 공학응력-변형률 선도를 구하였으며, 이 선도로부터 항복강도와 극한강도를 구하였다. 총 10개의 시편 중에서 하나의 시편을 제외하고, 나머지 9개의 시편에서 거의 유사한 크기의 항복강도와 극한강도를 얻을 수 있었다. 하나의 시편으로부터 얻은 공학응력-변형률 선도를 Fig. 2에 나타내었다.

총 9개의 시편으로부터 항복강도와 극한강도를 구하였으며, 평균 항복강도(σ_y)는 365.38 MPa이고 평균 극한강도(σ_u)는 413.89 MPa이었다. 시험으로 얻은 7xxx 계열의 알루미늄 합금의 항복강도와 극한강도는 6xxx 계열의 알루미늄 합금의 항복강도 60~250 MPa과 극한강도 120~290 MPa보다 더 높은 것으로 나타났다.¹⁰⁾

2.2 탄성계수

탄성계수를 구하기 위하여 신장계(Extensometer)를 사용하여 인장시험을 수행하였다. 인장항복강도와 인장극한강도를 구하기 위한 시험과 달리, 신장계를 사용한 시험에서는 가능한 최대 변형률에 제한이 있다. 따라서 총 5개의 시편을 추가로 활용하여 MTS 810 Material Testing System을 사용하여 탄성계수를 확보하였다. 탄성계수를 구할 때에는 신장계를 이용하여 항복강도 이하의 응력을 가한 다음에 응력-변형률 선도를 구하였고, 이 선도의 기울기를 얻어서 탄성계수를 얻을 수 있었다. 평균 탄성계수 값으로 64.93 GPa을 얻었다.

3. 정적 비틀림 해석

3.1 인텀 샤프트의 모델링

중실축 형상의 인텀 샤프트의 기하학적 형상과 치수를 Fig. 3에서 나타내었다.

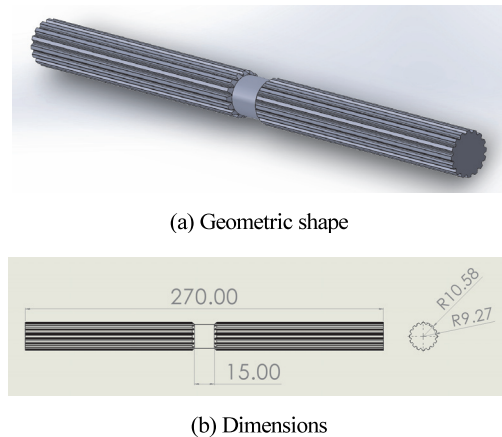


Fig. 3 Geometric shape and dimensions of intermediate shaft with solid cross section

해석에서는 기존의 중실축과 함께 4가지 크기의 내부 직경을 갖는 중공축을 고려하였다(내부 직경의 크기는 각각 7.0, 9.0, 10.5 및 12.0 mm). 상용 소프트웨어인 HyperMesh를 사용하여 전체 인텀 샤프트의 유한요소를 생성하였다. 유한요소로는 육면체요소(Hexahedron)와 사면체요소(Tetrahedron)를 사용하였다.

3.2 선형 해석

정적 비틀림 해석에서는, 축의 한 쪽을 고정하고 다른 한 쪽에 크기가 280 Nm인 비틀림 모멘트를 가하여 최대 응력(von Mises stress)의 크기를 구하였다. 해석에서는 상용 소프트웨어인 Optistruct를 사용하였다. 선형 해석을 통하여 얻은 결과를 Fig. 4에 정리하였다.

280 Nm 크기의 비틀림 모멘트가 가해질 때, 중실축 및 내부 구멍의 직경이 각각 7.0, 9.0, 10.5, 12.0 mm인 중공축의 순으로 최대 응력의 크기가 각각 595.59 MPa, 600.55 MPa, 623.04 MPa, 649.24 MPa 그리고 691.00 MPa

로 나타났다. 이들 최대 응력의 크기는 모두 재료의 항복 응력인 365.38 MPa를 초과하였다. 따라서 재료의 물성을 비선형으로 고려한 해석을 통하여 중실축과 중공축에서의 최대응력을 비교해보아야 한다.

3.3 비선형 해석

인장시험을 통하여 얻은 공학응력-변형률 선도(Fig. 2)를 사용하여 중실축 및 4가지 크기의 내부 직경을 갖는 중공축(내부 직경의 크기는 각각 7.0, 9.0, 10.5 및 12.0 mm)에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석에서는, 선형 해석에서 사용한 것과 동일한 유한요소 모델, 하중 및 경계 조건을 사용하였다.

비선형 해석을 통하여 구한 von Mises stress의 분포를 Fig. 5에 나타내었다.

280 Nm 크기의 비틀림 모멘트가 가해질 때, 중실축 및 내부 구멍의 직경이 각각 7.0, 9.0, 10.5, 12.0 mm인 중공축의 순으로 최대 응력의 크기가 각각 369.13 MPa,

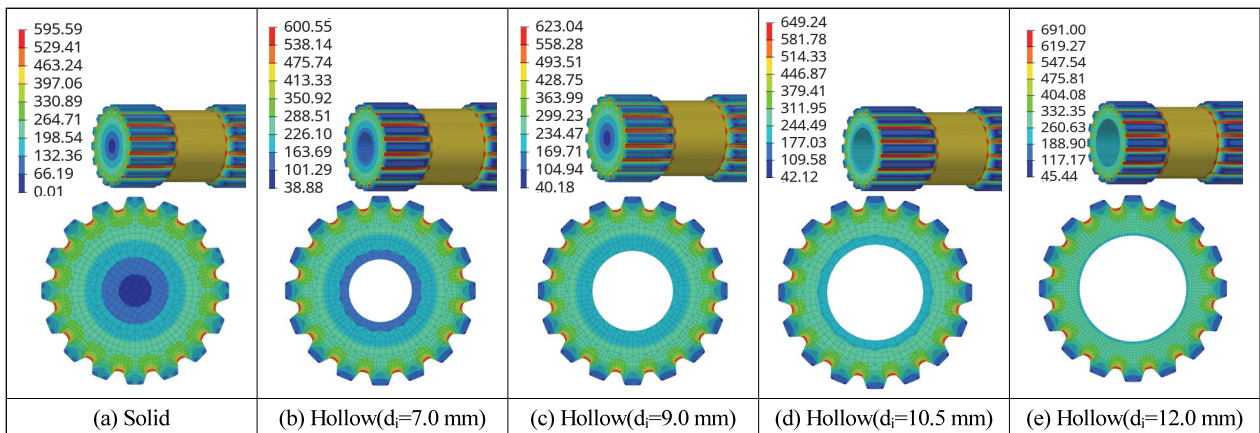


Fig. 4 Results of linear static torsion analysis under T=280 Nm

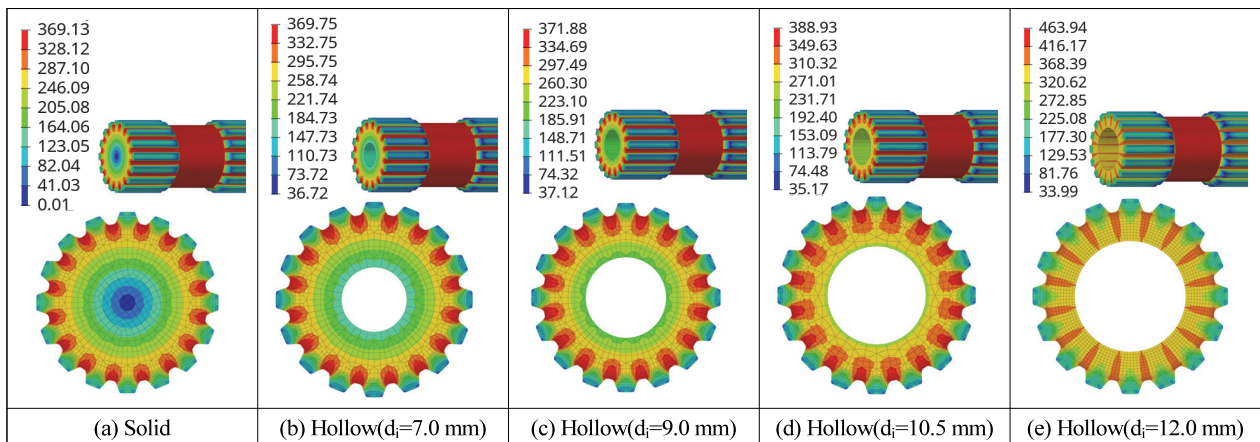


Fig. 5 Results of nonlinear static torsion analysis under T=280 Nm

369.75 MPa, 371.88 MPa, 388.93 MPa 그리고 463.94 MPa로 나타났다.

Fig. 5에 의하면 중실축의 최대응력은 369.13 MPa이고 내부 구멍의 직경이 7.0 mm인 중공축의 최대응력은 369.75 MPa이며 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축의 최대응력은 371.88 MPa로 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 즉 중실축과 내부 구멍의 직경이 7.0 mm와 9.0 mm인 중공축의 경우에는 최대응력이 거의 동일하다는 것을 확인하였다.

그러나 내부 구멍의 직경이 10.5 mm와 12.0 mm인 중공축의 경우 최대응력이 각각 388.93 MPa과 463.94 MPa로, 중실축의 최대응력과 차이가 많다는 것을 알 수 있다.

따라서 비선형 해석을 통하여, 중실축 대신에 내부 구멍의 직경 9.0 mm를 가진 중공축을 사용하여도 최대응력의 관점에서는 무리가 없음을 알 수 있었다. 이 경우에, 중실축 대비하여 축의 자중을 약 20 % 정도 줄일 수 있다.

4. 비틀림 내구 해석

인턴 샤프트는 반복적인 비틀림 하중을 받는 경우에 기대 이상의 피로수명을 가져야 한다. 본 연구에서 사용된 축의 경우에는, Fig. 6에서 제시된 비틀림 모멘트를 반복적으로 받는 경우에 1,000,000회 이상의 수명을 갖도록 설계되어야 하는 요구 조건을 충족하여야 한다.

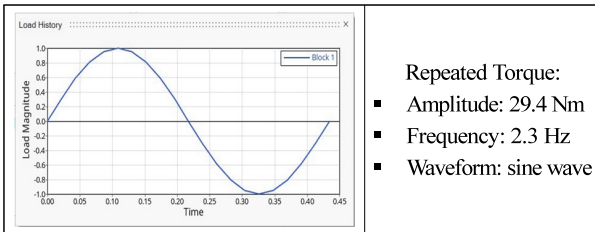


Fig. 6 Load conditions in fatigue analysis

피로해석에서는 중실축과 함께 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축을 고려하였다.

피로 해석을 수행하기 이전에 29.4 Nm의 토크가 가해진 경우에 대하여 정적 해석을 수행하여야 한다. 가해진 토크의 크기가 작기 때문에, 선형 해석을 수행하였다. 중실축과 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축의 von Mises stress의 분포는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에 의하면, 중실축과 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축의 최대응력의 크기는 각각 62.62 MPa과 65.66 MPa이다.

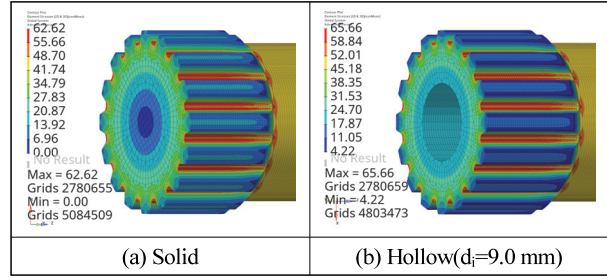


Fig. 7 Results of linear static torsion analysis under T=29.4 Nm

정적 해석을 통하여 얻은 결과를 이용하여 중실축과 중공축의 비틀림 내구 해석을 수행하였다. 이를 위해서 상용 프로그램인 Hyper Life를 이용하였다. 피로 해석의 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

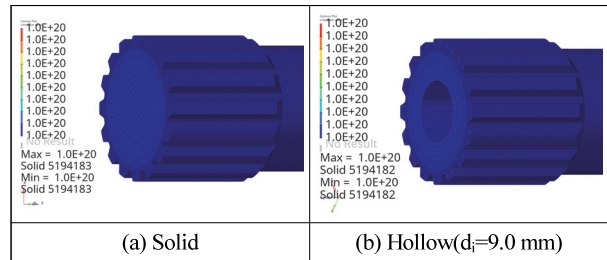


Fig. 8 Results of fatigue analysis under T=29.4 Nm

Fig. 8에 의하면, 중실축과 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축의 피로 내구 수명이 모두 무한이란 것을 알 수 있다. 따라서 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축이 Fig. 6에 제시된 비틀림 모멘트를 반복적으로 받는 경우에 1,000,000회 이상의 수명을 충족하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

7xxx계열의 알루미늄 합금을 사용하여 인턴 샤프트를 설계하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정적 비틀림 강도 해석의 결과, 내부 구멍의 직경을 9.0 mm까지 뚫은 중공축의 최대 응력은 중실축의 최대 응력과 거의 동일하였다. 따라서 중실축을 내부 구멍의 직경이 9.0 mm인 중공축으로의 형상 변경이 가능하며, 이를 통하여 약 20%의 자중을 줄일 수 있었다.
- 2) 정적 비틀림 강도 해석의 결과, 내부 구멍의 직경을 10.5 mm 이상으로 크게 뚫은 중공축의 최대 응력은 중실축의 최대 응력과 보다 크게 나타났다. 내부 구멍의 직경을 12.0 mm의 크기로 뚫은 중공축의 경우, 극한 응력을 초과하는 최대 응력이 발생하였다.

- 3) 비틀림 내구 해석의 결과, 내부 직경의 구멍이 9.0 mm 인 중공축과 중실축 모두 무한 수명을 나타내어 설계 요구 조건을 충족하는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 연구비 지원과 중소벤처기업부 기술개발사업[과제번호 S2950221]의 지원에 의한 연구임.

References

- 1) M. Harrer and P. Pfeffer, *Steering Handbook*, Springer International Publishing, 2017.
- 2) S. Lee, H. Lee, K. Koo and J. Woo, "Effects Analysis of I-Shaft Torque Modulation According to the True Position of Yoke Bearing Hole," *Transactions of KSAE*, Vol.25, No.6, pp.742-749, 2017.
- 3) A. Emadi, *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, CRC Press, pp.625-632, 2017.
- 4) A. Koparde, N. Mithra and S. Ahankari, "Numerical and Experimental Analysis of Torsional Stress of Traditional and Modified Steering Yoke," *Materials Today: Proceedings*, Vol.46, pp.7099-7104, 2021.
- 5) C. Gandhi, P. Shinde, M. Rammamoorthi, B. Krshnadoss and A. Yadav, "Design and Analysis of Automotive Steering Sheet Metal Yoke for High Strength and Rigidity Requirement," *SAE 2019-28-0122*, 2019.
- 6) K. Miyake, T. Nishida, T. Kurokawa and H. Arai, "Sliding Properties of Polyamide Coating in High Temperature for Intermediate Shaft of Electric Power Steering," *SAE 2016-01-0507*, 2016.
- 7) S. Kang, B. Kim, D. Kim, T. Kim, H. Lee, I. Lee, J. Woo, H. Shin and Y. Ryu, "Developed Lightweight Aluminum Universal-joint with Improved High Temperature Performance and Rigidity," *Transactions of KSAE*, Vol.28, No.5, pp.315-321, 2020.
- 8) A. Gupta, V. P. Yashvanth and L. B. Rao, "Design of Gears Using Aluminium 6061-T6 Alloy for Formula SAE Steering System," *Recent Trends in Mechanical Engineering*, Springer, pp.489-505, 2021.
- 9) ASTM International, *ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Annual Book of ASTM Standards, 2021.
- 10) Korean Industrial Standards, *KSD 6759 Aluminium and Aluminium Alloy Extruded Shapes*, 2017.