Tribol. Lubr., Vol. 38, No. 1, February 2022, pp. 27~31
Tribology and Lubricants
Short Communication

ISSN 2713-8011(Print) • 2713-802X(Online)
http://Journal.tribology.kr
DOI https://doi.org/10.9725/kts.2022.38.1.27

3D 프린팅 기법을 이용한 하모닉 드라이브(Harmonic Drive) 설계 및 응용 분석

김상현[1] · 변창섭[2] · 이철희[3†]

[1]인하대학교 건설기계공학과 석사과정생
[2]인하대학교 기계공학과 학부생
[3]인하대학교 기계공학과 교수

Design of a Novel 3D Printed Harmonic Drive and Analysis of its Application

Sang-Hyun Kim[1], Chang-Sup Byeon[2] and Chul-Hee Lee[3†]

[1]Master Student, Graduate School, Dept. of Construction Machinery Engineering, Inha University
[2]Undergraduate, Dept. of Mechanical Engineering, Inha University
[3]Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

(Received January 19, 2022; Revised February 25, 2022; Accepted February 28, 2022)

Abstract – Harmonic drives have attracted increasing attention with the development of materials, parts, and related equipment. Harmonic drives exhibit high deceleration, high accuracy, and light weight. The stiffness of flexible splines according to the radial load is studied using a commercial FEM program to design the structure of the flexible spline and finite element to improve the weight and price competitiveness of harmonic drives. In addition, several studies have measured and compared friction coefficients based on 3D printed tread patterns. However, owing to the characteristics of plastic materials, a decrease in stiffness in the radial direction is inevitable. To prevent a decrease in stiffness in the radial direction, we designed and manufactured flex splines with a wrinkle shape. Through structural analysis, the reaction force and stiffness in the radial direction were determined. In addition, the maximum angle of the mound was derived by theoretical calculations, and the performance of the harmonic drive was compared with the results obtained in the mound experiment. Structural analysis shows that the shape of wrinkles decreased the stress and reaction force and increased the safety factor in comparison with that of the circular shape. During performance verification through continuous experiments, the developed harmonic drive showed continuous performance similar to that of an actual tank model. It is expected that the flex spline with a compliant spring and wrinkle shape will prevent a decrease in the radial stiffness.

ⓒ Korean Tribology Society 2022. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – Harmonic drive(하모닉 드라이브), Flex spline(플렉스 스플라인), Compliant spring(컴플라이언트 스프링), Wrinkle shape(주름 형상), Static analysis(정적 해석)

†Corresponding author: Chul-Hee Lee
Tel: +82-32-860-7311, Fax: +82-32-873-7311
E-mail: chulhee@inha.ac.kr
https://orcid.org/0000-0003-1095-3713

1. 서 론

하모닉 드라이브는 기존의 감속기와는 달리 협소한 공간에서 높은 감속비를 얻을 수 있으며 기존의 로봇 산업

의 발전에 따라 핵심 부품으로 주목받으며 발전하고 있다. 반경방향으로 작용하는 하중에 따라 플렉스 스플라인이 갖는 강성에 대해 상용 FEM 프로그램을 이용해 수치해석을 진행했으며[1], 하모닉 감속기의 경량화를 위해 플라스틱 재질을 사용한 제품을 개발하며 감속기의 구조를 설계하고 이를 구현하기 위한 형상 설계 및 유한요소해석을 통한 검증을 진행했다[2]. 또한, 3D 프린팅된 트레드 패턴에 따른 마찰계수를 측정해 비교 분석과 같은 연구가 수행되어왔다[3]. 하지만, 플라스틱 재질의 적용으로 인해 반경방향으로의 강성이 저하되는 것은 사실이다. 소재, 부품, 장비 산업의 핵심 부품들은 여전히 수입에 의존하고 있어 독자적인 개발로 인해 국산화의 확장이 필요하다. 또한, 동적성능의 방지와 경량화를 위해 금속이 아닌 플라스틱 재질을 적용한 간편한 제작이 필요하다. 본 연구에서는 하모닉 드라이브 구동부인 플렉스 스플라인의 새로운 구조를 제시하고, 해석을 통한 검증 및 제작을 진행하여 새로운 플렉스 스플라인을 적용한 하모닉 드라이브를 장착시켜 등판각 실험을 통해 최적의 성능을 도출함을 목표로 한다. 해당 모델은 플렉스 스플라인과 플래닛 기어가 맞닿는 부분에 모따기 설계를 진행하여 마찰 및 마모를 최소화 시켰으며, 주름 형상을 적용해 경량화뿐만 아니라, 플렉스 스플라인의 내부를 컴플라이언트 스프링(Compliant Spring)의 형상을 적용하여 스프링이 아닌 구조 자체로 진동 충격 흡수 효과는 물론 원주 방향의 탄성력을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

2. 연구 방법 및 내용

2-1. 하모닉 드라이브 설계

3D 모델링은 NX를 이용해 진행했으며 플렉스 스플라인 치형에 모따기를 적용해 마찰 및 마모를 고려한 설계를 진행했다. 구동원리는 다음과 같다. 모터에 의해 썬기어가 구동되어 그에 맞물려 플래닛 기어가 구동된다. 이러한 플래닛 기어들이 플렉스 스플라인과 맞물려 구동되며 이때, 플렉스 스플라인과 연결된 축이 최종적으로 감속하여 회전한다. 설계를 진행한 형상의 플렉스 스플라인은 안쪽의 기어와 맞물려 돌아가며 스프링 형상을 적용해 기계적 요소의 스프링이 아닌 구조 자체에서 탄성력을 갖도록 설계했으며, 주름 형상을 적용해 기계적 요소의 스프링이 아닌 구조 자체에서 탄성력을 갖도록 설계했다. 주름 형상을 적용해 작동 부하를 줄이고 하모닉 드라이브를 경량화 시켰으며, 이가 맞닿는 플렉스 스플라인과 플래닛 기어의 마모를 최소화시키기 위해 모따기 설계를 진행했다.

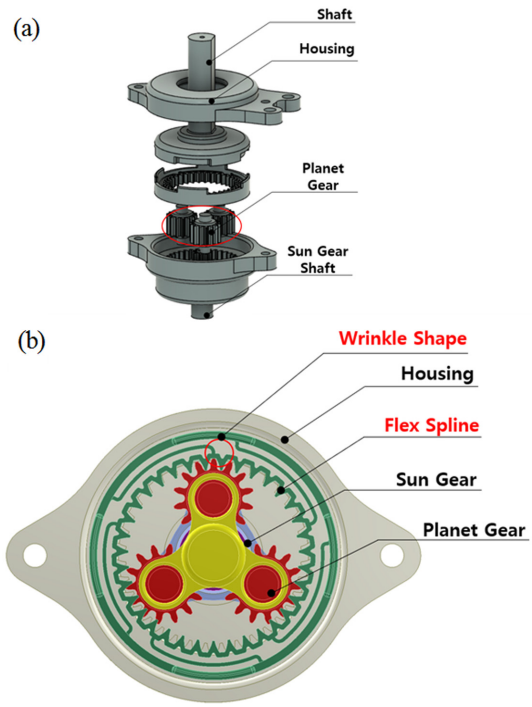

Fig. 1. Harmonic Drive (a) Assembly (b) Cross-Section.

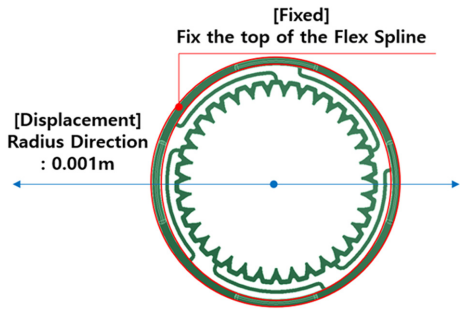

Fig. 2. Boundary Conditions for Structural analysis.

2-2. 플렉스 스플라인 구조 해석

플렉스 스플라인의 기어치와 컴플라이언트 스프링 사이의 공간을 원형 형상과 주름 형상을 적용해 모델링을 진행했으며, 원형 형상보다 주름 형상이 플렉스 스플라인에서 플래닛 기어로 가해지는 반력을 줄일 수 있다는 것을 검증하기 위해 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 사용해 정적해석을 수행하였다.

플렉스 스플라인 초기 설계 단계에서 진행한 원형 형상보다 주름형상을 적용했을 때, 플래닛 기어에 가해지는 반력이 줄어 모터가 플래닛 기어를 구동하는데 있어

Table 1. The material properties of filament

Ultimaker CPE+ Filament	
Poisson's ratio	0.42
Modulus of Elasticity	1100 MPa
Density	950 kg/m^3
Tensile Strength	35.2 MPa

Table 2. Structural analysis results

Shape Result	Wrinkle Shape	Circular Shape	Comparison
Equivalent Stress	11.70 MPa	14.00 MPa	-16.4%
Safety Factor	2.51	3.01	+19.9%
Force Reactions	2.25 N	1.83 N	-18.7%

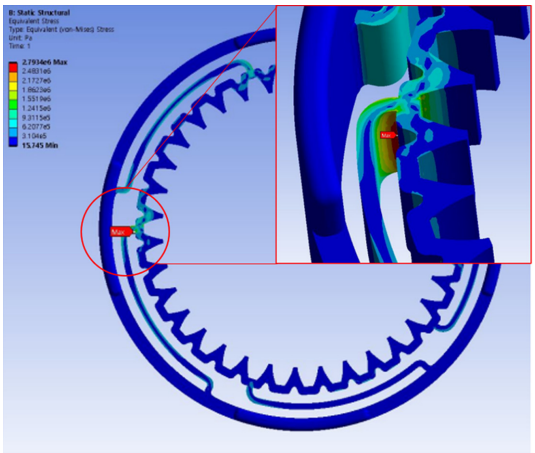

Fig. 3. Structural analysis of Flex Spline. (Equivalent Stress)

손실되는 동력이 줄어들고 더 적은 응력이 기어에 가해져 파손의 위험 또한 줄어들 것이라 판단해 y축 방향으로 0.001 m의 변위를 주고 플렉스 스플라인의 상단부를 고정해 해석을 진행했으며, 플렉스 스플라인 필라멘트 물성치는 Table 1과 같다. 구조해석 결과 원형 형상의 플렉스 스플라인 보다 주름 형상을 적용한 플렉스 스플라인의 응력이 감소하고 안전율이 증가함을 Table 2에서 확인할 수 있다.

2-3. 하모닉 드라이브 제작

하모닉 드라이브의 각 부품의 특성별로 탄성력, 강도, 녹는점 등을 고려해 다음과 같은 기준으로 필라멘트를 선정했다. 플렉스 스플라인에 적용하기 위한 탄성력이 우수하며 일반 CPE 대비 높은 충격 강도의 특성이 있으며, 강도와 치수 안정성이 뛰어난 필라멘트 (CPE+, Ultimaker)를 선정했으며, 마찰 및 마모가 많을 것이라고 예상되는 썬기어 및 플래닛 기어의 특성을 파악 후 후처리가 용이하고 녹는점이 높은 필라멘트(ABS, Zortrax)를 선정했다. 그 외의 부품 재질에 대해서는 표면이 매끄럽고 가공성이 우수하며 수축률이 매우 낮고 경도가 높은 필라멘트(PLA, Zortrax)를 적용해 제작했다. 하모닉 드라이브를 무한궤도 로버(rover) 모형에 부착하기 위해 마운트 부분 또한 가공성이 뛰어난 필라멘트(PLA, Zortrax)로 제작했다.

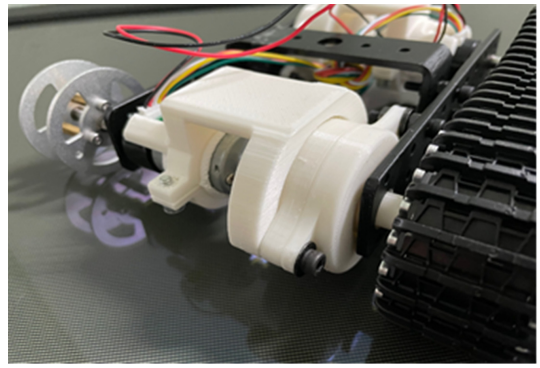

Fig. 4. A harmonic drive created by a 3D printer.

3. 등판성능 실험

실제 등판 성능 실험을 진행하기 전 이론식을 통한 최대 등판각 검증을 진행했다. 기존 부착되었던 유성기어 타입의 감속기는 1:34의 감속비를 내며 연구 및 제작을 진행한 하모닉 드라이브의 경우 출력축에서의 감속비가 1:192.5이다. 평탄한 경사지형에서 궤도와 지면과의 슬립이 없는 경우의 마찰계수를 μ이며, 식 (1)을 통해 0.625의 마찰계수를 도출할 수 있다. 수직항력을 N이라 할 때, 무한궤도 로버가 등판할 수 있는 경사는 다음과 같다. 구동 모멘트 J는 식 (2)로부터 계산된다.

$$\tan\theta \leq \mu \tag{1}$$

$$J \leq \frac{\mu r Mg}{4}\left(1+\frac{m}{M}\right) \tag{2}$$

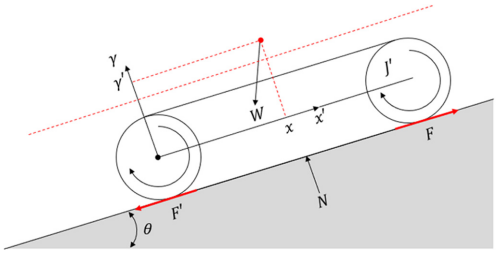

Fig. 5. Schematic of the theoretical climbing angle.

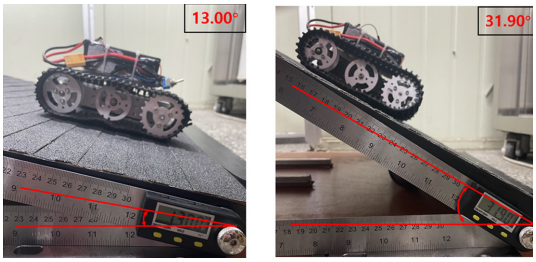

Fig. 6. Measurement of Climbing angle.

Table 3. Theoretical calculation results

	Reducer	Harmonic Drive
Weight	618 g	563 g
Gear Ratio	1 : 34	1 : 192.5
Torque	0.07115 Nm	0.402864 Nm
Max. Climbing Angle	13°(23.1%)	32°(62.5%)

성능 실험을 진행하기 위해 경사판은 사포를 격자로 놓아 제작해 구동륜과 경사판의 마찰을 최대로 높였으며, 플렉스 스플라인과 플래닛 기어의 이가 맞닿는 면에서의 마찰을 최소화 시키기 위해 그리스(grease)를 도포했다. 평기어 모형 로봇의 최대 등판각은 13°로 23.1%의 등판성능을 보였으며 연구를 진행한 하모닉 드라이브의 경우 최대 32°까지 등판이 가능했으며, 그리스를 사용함으로써 마찰에 의한 구동 소음이 줄었을 뿐만 아니라, 기어의 마모 현상도 줄어듦을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 3D 프린팅을 이용해 하모닉 드라이브를 설계, 제작 및 검증을 진행했다. 플라스틱의 재질 특성상 반경 방향으로의 강성이 저하되는 것을 방지하기 위해 컴플라이언트 스프링과 주름형상을 적용해 스프링이 아닌 구조를 적용했다. 또한, 기어 간의 마찰을 고려해 모따기 설계를 진행하고 그리스를 도포했다. 검증하기 위해 해석을 진행했으며 해석 결과 응력이 감소하고 반력이 증가해 내구성이 높아지며, 원주방향으로의 탄성력이 향상되었음을 검증했으며, 등판각 실험을 통해 등판성능을 검증하였다. 해석 결과 주름 형상을 적용한 플렉스 스플라인의 응력이 16.4%, 반력이 18.7% 감소했으며, 실험 결과 62.5%의 등판성능을 보였다. 또한 그리스를 도포함으로써 하모닉 드라이브 구동 시 소음이 줄어들었으며, 모따기 설계를 진행해 기어 이의 마모도 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 연구를 진행한 하모닉 드라이브는 플라스틱 재질로 제작해 기존의 감속기보다 가볍게 제작되어 기존 감속기의 문제점인 고중량 감속기를 구동하기 위해서 구동에 필요한 엔진의 동력이 높아져 동적성능이 저하되어 연비가 낮아지는 현상을 방지할 수 있을 것이라 생각되며, 추후 헬리컬 기어로 제작해 하모닉 드라이브에 적용하고자 한다.

Acknowledgements

"이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0012769, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)."

References

[1] LEE, M. S., Kim, J. G., Koh, D. G., "A Numerical Study on the Radial Stiffness of a Flex spline for Harmonic Drive", KSME Spring Conference, Jeju, August, Korea, 2021.

[2] Shin, H. S., Um, H. J., Kim, Y. S., Kim, C. S., "Design and Analysis of a Flexspline for a Plastic Harmonic Drive", KSME Spring Conference, Busan, June, Korea, 2007.

[3] Tao, Z., Lian, C., Lee, K. H., Lee, C. H., "Rolling friction of 3D printed thread pattern", Proc. Fall Conf. Korean Tribol. Lubr. Engr., Muju, Korea, October 2016.

[4] Song, C. H., Kim, B. J., Oh, S. H., "Development of the steel composite hybrid flexspline of a harmonic drive", *Journal of the Korean Intellectual Patent Society*, Vol.4, No.1, pp.45-52, 2002.

[5] Jeong, K. S., Lee, D. G., Kwak, Y. K., "New Manufacturing Method of the Composite Flexspline for a Harmonic Drive", *Journal of the Korean Societ for Composite Materials*, Vol.7, No.2, pp.1-13, 1994.

[6] Ban, J. S., Lee, K. W., Cho, K. Z., "Study on the Tooth Modification for High Speed Gear by Finite Element Method", *Journal of the Korean for Power System Engineering*, Vol.15, No.5, pp.61-66, 2011.

[7] Nam, W. K., Ham, S. H., Oh, S. H., “Structural Analysis for Silk Hat type of the Harmonic Drive for Precision Robot”, *Journal of the Korean Society For Power System Engineering*, Vol.15, No.5, pp.61-66, 2011.

[8] Lee, J. G., Kim, S. H., Han, S. G., Shin, Y. I., Song, C. K., “Design of a Reducer Gear for Small Electric Vihicles”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Edngineers*, Vol.19, No.9, pp.116-121, 2020.

[9] Kim, H. J., “3D Printing Characteristics of Reverse Idle Gears for Tractor Transmissions”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,* Vol.16, No.4, pp.45-52, 2017.

[10] Lee, K. S., “Development of a Modeling System for involute Spur Gear Considering Backlash, Profile Modification, and Crowning”, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.45, No.8, pp.645-655, 2021.