

## 論文

탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용한  
Harmonic Drive 의 Flexspline 의 제작

김영환\* · 이대길\* · 오박균\*\*

Manufacturing of the Flexspline of a Harmonic Drive  
With Carbon Fiber Epoxy Composite Material

Young-Han Kim\*, Dai-Gil Lee\* and Park-Kyoun Oh\*\*

## ABSTRACT

The harmonic drive is used in very high speed reduction or speed increase in a single stage. The flexspline of the harmonic drive should be made statically flexible to transmit motion but dynamically rigid to reduce vibration in high speed rotation. These two properties are coupled and cannot be satisfied with conventional materials.

In this paper, the flexspline is manufactured with carbon fiber epoxy composite by elastomeric cascade tooling. The elastomeric cascade tooling is composed of a silicon rubber die and a conical steel core which increases the pressure of the silicon rubber die.

The manufactured composite flexspline has better static and dynamic properties than those of steel flexspline. Also, the machining cost and time of the composite flexspline can be reduced compared to the steel flexspline.

## 초 록

Harmonic Drive 는 한개의 단으로 고감속 또는 고증속을 시키는데 사용된다. Harmonic Drive 의 요소중 Flexspline 은 유연하기 때문에 고속 회전시 진동의 주 원인이 된다. 따라서 Flexspline 은 정적으로 유연하면서도 동적으로 강성을 가져야만 한다. 이러한 두가지 성질은 상반된 것이므로 일반적인 재료로는 이를 만족시키기 어렵다.

이 논문에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용하여 Elastomeric Cascade Tooling 방법으로 Flexspline 을 제작하였다. Elastomeric Cascade Tooling 은 Silicon 고무 Die 와 압력을 증가시키기 위한 Steel Core 로 구성되었다.

\* 정회원, 과학기술대학

\*\* 한국과학기술연구원

완성된 복합재료 Flexspline 은 정적 및 동적 성질이 Steel Flexspline 보다 우수하고, 생산비용과 시간 역시 Steel Flexspline 보다 적게 든다.

## 1. 서 론

Harmonic Drive 는 Torque Driver 의 일종으로 소형 경량이고, 간단한 구조이면서도 고감속비를 가지고, 동력전달 효율이 크다는 장점을 가지고 있다. Harmonic Drive 의 부품중에서 Flexspline 은 동력을 전달하는 중요 부분인데, 동력 전달시 운동의 방향이 거의 반경 방향으로, 미끄럼 속도가 없기 때문에 치형의 마찰에 의한 손실과 치형의 마멸이 매우 적다. 이와 같은 장점 때문에, Harmonic Drive 는 최근에 로봇의 동력전달 장치에 많이 사용되고 있다[1].

우리가 현재까지 사용하고 있는 기계는 일반적으로 강체의 개념에서 설계되고 제작되었으나 Harmonic Drive 시스템은 탄성체의 개념에서 설계되고, 제작되었다[2].

Harmonic Drive 는 일반적으로 그림 1과 같은 구조를 가진다. 크게 Internal Wave Generator, Flexspline 및 Circular Spline의 세 요소로 구성되어진다. Internal Wave Generator 는 타원형으로 되어 있고, 회전할 때 Flexspline 과의 마찰을 줄

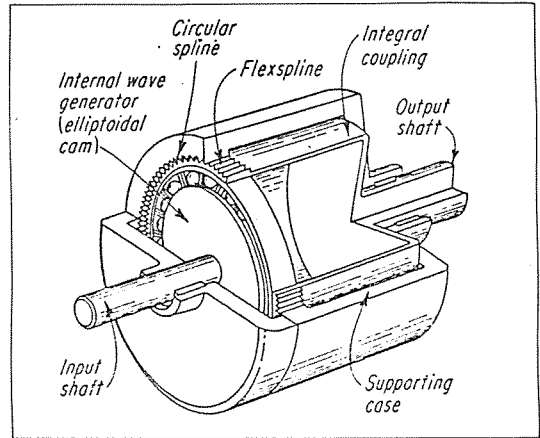


Fig. 1 Structure of Harmonic Drive.

이기 위해 Wave Generator 와 Flexspline 사이에 볼 베어링을 넣는 것이 일반적이다[2].

Wave Generator 가 회전을 하게 되면 Flexspline 은 점진적으로 변형이 되면서 타원형의 Wave Generator 의 형을 따르게 된다. 이어서 Flexspline 바깥쪽에 있는 Circular Spline 과 타원의 장축에서 두 Spline 이 접촉하게 되고, 타원의 단

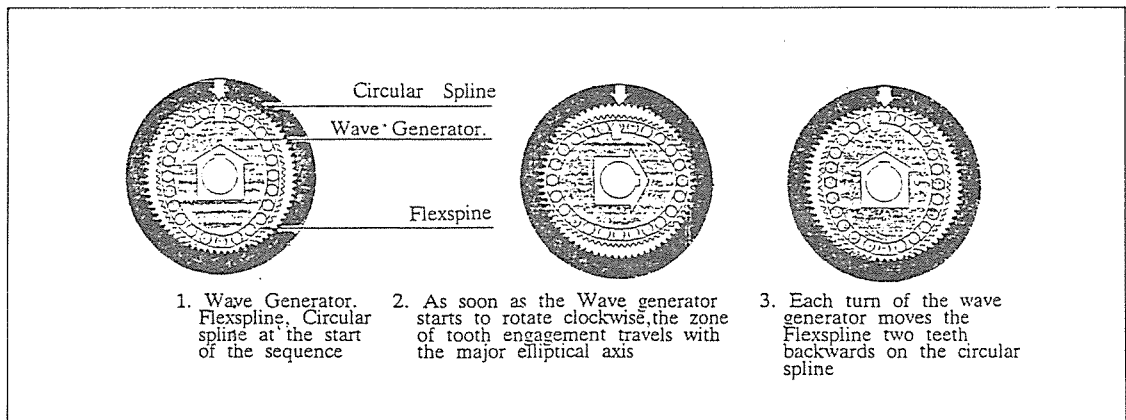


Fig. 2 Motion of the Harmonic Drive.

축에서는 접축이 풀리면서 그림 2와 같이 동력을 전달하게 된다. 이와 같은 이유 때문에 Flexspline은 반경방향으로 유연(Flexible) 하여야만 한다.

Harmonic Drive의 요소중 Flexspline은 유연하기 때문에 고속 회전시 진동의 주 원인이 된다. 따라서 Flexspline은 정적으로 유연하면서도 동적으로는 강성을 가져야만 되는데, 두가지 성질은 서로 상반된 특성이기 때문에 Flexspline은 Coupled Design 되어야만 한다[3]. 이와 같은 Flexspline의 두가지 성질을 만족시키려면 Flexspline의 반경방향의 고유진동수를 높이는 한편 Flexspline에 진동이 생겼을 때 진동을 빨리 감쇠시키는 재료를 사용하는 것이 바람직하다.

이러한 재료로서 복합재료가 적합하다[4, 5]. 탄소섬유 에폭시 복합재료는 강철이나 알루미늄에 비하여 비탄성 계수가 4배 이상 크고, 감쇠특성도 10배 정도 크기 때문에[6], 본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용한 Harmonic Drive의 Flexspline의 제작을 수행하고, 동적인 성능을 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 측정하였다.

## 2. 복합재료 Flexspline의 제작

### 2.1. 금형의 설계 및 제작

복합재료로 Flexspline을 제작한 후 비교실험을 하기 위하여 Harmonic Drive사(일본, 동경)의 HDUC, 20-80 Steel Harmonic Drive의 제원을 기초로 하여 설계하였다. 이 Harmonic Drive의 주요 제원은 <표 1>과 같다.

Flexspline의 치형은 모듈 0.4, 기초원의 반경이 30.45mm 이고 압력각이 20°인 인볼류트(Involute)형이며 그림 1에서 보는 바와 같이 외치차의 형태이다. 이러한 외치차를 복합재료로 제작하기 위한 금형은 내치차의 형태를 가져야만 하는데, 치형을 160개나 갖는 Flexspline을 내치차의 형상을 갖는 금형에서 경화후 탈형하는 것은 매우 어렵다. 본 실험에서는 복합재료 Flexspline의 탈형을 용이하게 하기 위하여, 금형의 소재를 네쪽으로 절단한 후, 절단면의 표면을 매우 정밀하게 연마하여 다시 조합한

<Table 1> Steel Harmonic Drive의 주요 제원

잇 수	$Z_f(\text{flexspline})=160$ $Z_c(\text{circular spline})=162$
모 들	$m = 0.4$
기초원	$r = 30.45\text{mm}$
압력각	$\phi = 20^\circ$
감속비	$\varepsilon = 1/81$

후 바깥면을 용접하였다. 금형의 재료는 SM 45C를 사용하였고, 용접 부위의 응력 집중 현상을 없애기 위하여 800°C까지 온도를 올린 후 서서히 식히면서 풀립(Annealing) 처리를 하였다. 이렇게 준비한 금형 소재의 중심부를 보링한 후, 치형은 슬로팅(Slotting) 가공으로 제조하였다. 슬로팅 가공으로 제조한 치형은 면이 약간 거칠어서 복합재료 Flexspline의 면이 깨끗하지 못하였으므로, 다시 NC(Numeric Control) EDM(Electro Discharge Machining) Wire Cut으로 치형을 가공한 결과 면이 깨끗한 치형을 얻을 수가 있었다<그림 3 참조>. 금형의 제작에서 직경이 0.3mm인 Wire를 사용하였는데, 모듈 0.4이고  $r=30.45\text{mm}$ 인 치형을 가공하는데 충분히 가늘어서 치형을 정밀하게 완성할 수 있었다.

### 2.2. Elastomeric Cascade Tooling을 이용한 Flexspline의 제작

그림 4는 복합재료 Flexspline을 제조하기 위한 금형을 금형 바이스에 조립한 조립도이다.

Vise-2와 Vise-3은 볼트로 체결되었고, Vise-1은 Vise-2의 나사 부분에 조일 수 있도록 설계되었다. Silicon 고무 Die에 탄소섬유 에폭시 복합재료를 적당한 양만큼 감은 후에 금형 내부에 밀어 넣은 후 Vise-1의 핸들을 돌려서 금형을 고정시킨다.

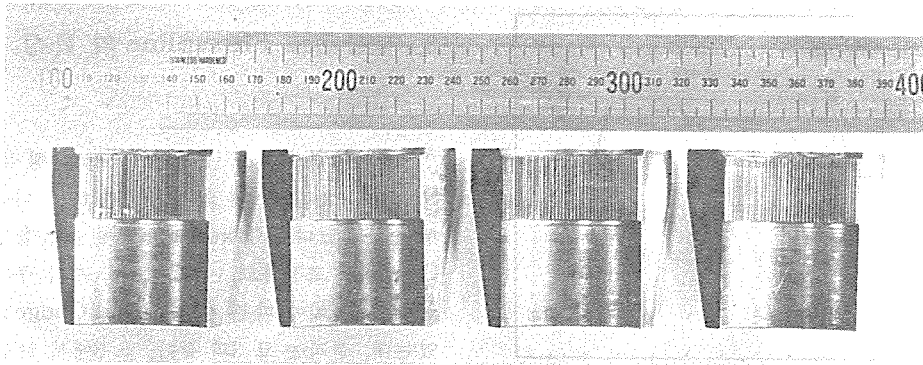


Fig. 3 Photograph of the Die for the Composite Flexspline.

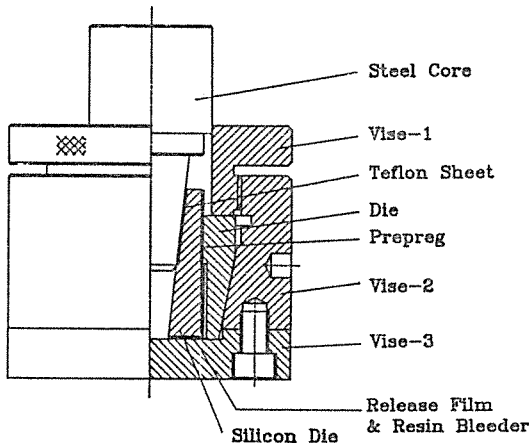


Fig. 4 Assembly of the die and die vise.

Silicon 고무 Die 의 열팽창에 의한 압력을 증가시키기 위하여 Taper 를 가진 Steel Core 를 Air Press 를 이용하여 Silicon 고무 Die 내부에 강제로 밀어 넣었다. 이때 사용한 Press 축방향의 Steel Core 의 압력은 약 25기압 정도가 된다.

### 2. 3. 복합재료 Flexspline 의 제작

실험에 사용한 Carbon Epoxy Prepreg 의 특성은 Table 2와 같다. Silicon 고무 Die 에 금형 이형

<Table 2> 사용한 Prepreg 의 특성

Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Modulus (kN/mm <sup>2</sup> )	Resin Content (%)	Density
2400	343	40	1.6

재 (Mold Release #50, Airtech Corp, 미국)를 분사하여 바른후, 반경방향과 축방향의 강성을 조절하기 위하여, 직측각도를 90°와 20°의 두가지로 병행하여 감은후 치형이 형성되지 않는 부분에 Nonporous Teflon Release Film 을 1겹 감고, Resin 의 흡수를 위하여 Resin Bleeder 를 10회 감는다. 치형 부분의 금형은 Release Film 이나 Resin Bleeder 를 감지 않았다. 대신 경화(Cure) 과정에서 치형 근처에서 나온 Resin 을 흡수하기 위한 Resin Bleeder 를 치형 근처에 여러겹 감았다. Silicon 고무 Die 는 중심부에 6°의 Taper 를 주어서 Steel Core 가 삽입될 때 Silicon 고무 Die 가 반경방향으로 압력을 가해줄 수 있도록 하였다. Silicon 고무 Die 와 Steel Core 사이에는 마찰을 줄이기 위해서 Teflon Sheet 를 넣었다. 앞에서 설명하였듯이 이것을 그림 4와 같이 금형과 금형 바이스로 조립하고, Air Press 에서 누른후 그림 5와 같은 경화 사이클을 이

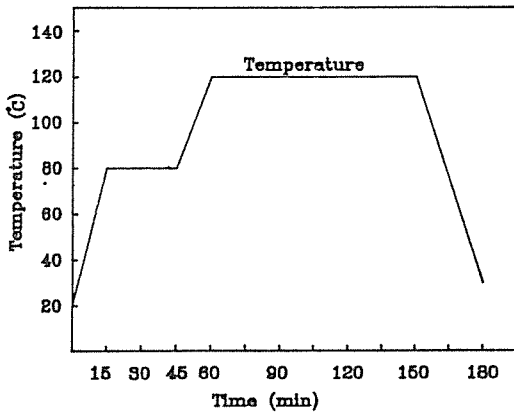


Fig. 5 Curing cycle.

용하여 경화시켜서 복합재료 Flexspline을 완성하였다(그림 6 참조). 완성된 Flexspline은 HDUC, 20-80 Harmonic Drive의 Circular Spline 및 Wave Generator와 조립하여 회전시켜 본 결과 부드럽게 회전이 되었다.

금속을 이용하여 Flexspline을 제작하려면, 원소재에서 많은 양의 금속을 절삭한 후 치형을 Hobbing 하거나 Slotting 하여야만 하는데, 복합재료 Flexspline의 제작방법은 일단 금형이 완성되면, 계속 찍어서 만들수 있으므로 재료 및 가공비를 절감할 수가 있다.

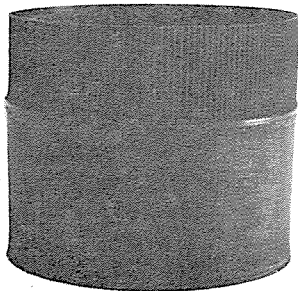


Fig. 6 Photograph of the Composite Flexspline.

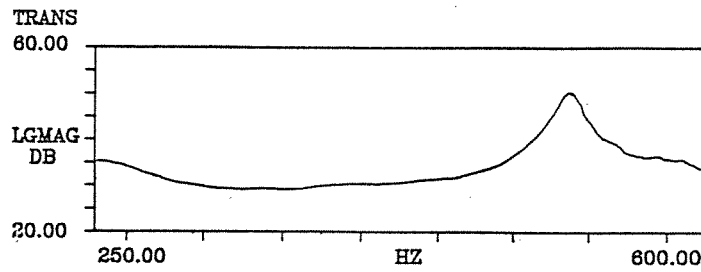
### 3. 복합재료 Flexspline의 특성 실험 및 결과

완성된 복합재료 Flexspline의 정적 특성을 Steel Flexspline과 비교하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. Flexspline의 윗부분을 Stand에 Clamp로 고정하고, 아래쪽으로 추의 무게를 증가시키면서, 이에 따른 변형을 Dial Gauge로 측정하였는데, 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 알수 있는 바와 같이 Steel Flexspline의 반경방향의 강성도(Stiffness)는 복합재료 Flexspline보다 약 2배가 크다. 복합재료 Flexspline은 Prepreg의 적층각도를 바꿈으로써 적절히 강성도를 조절할 수 있다.

탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용하여 제작한 Flexspline의 동적 특성을 측정하기 위하여 Flexspline의 아래면에 Accelerometer(B & K Shear Minimeter Accelerometer, Type 4374)를 부착시킨 후, 윗면을 Impulse Hammer를 이용하여 진동시킨후 FFT(Fast Fourier Transform) 처리한 결과가 그림 7, 8에 나타나 있다. FFT 처리는 HP 5423A Structural Dynamics Analyzer를 사용하였다. 그림 7의 Flexspline은 Prepreg의 적층각도가 축방향에 대해서  $[90_4/\pm 20_2]$ 이고, 그림 8의 Prepreg의 적층각도는 축방향에 대해서  $[\pm 20/90/\pm 20_2]$ 이다. 복합재료 Flexspline의 동적 특성과 비교하기 위해서 Harmonic Drive사의 HDUC, 20-80 Flexspline에 대해서 실험한 결과가 그림 9에 나타나 있다. 그림 7, 8, 9에서 본 바와 같이 복합재료 Flexspline의 고유 진동수는 강철로 된 Flexspline의 고유 진동수보다 높으며, 감쇠 특

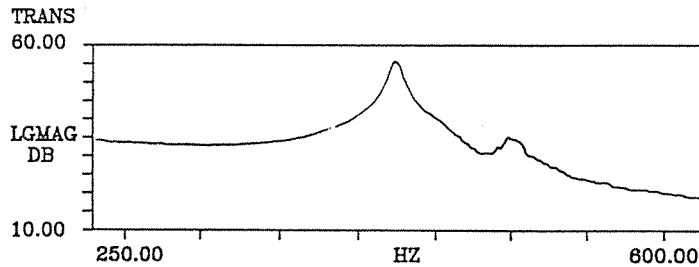
<Table 3> Flexspline의 정적 특성 비교(하중-인장시험 결과치)

종 류	강 성 도
Steel Flexspline	$6.13 \times 10^4 \text{ N/m}$
Composite Flexspline $[90_4/\pm 20_2]$	$2.80 \times 10^4 \text{ N/m}$
Composite Flexspline $[\pm 20/90/\pm 20_2]$	$2.70 \times 10^4 \text{ N/m}$



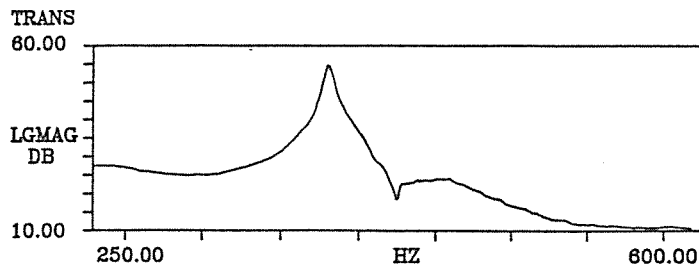
FIRST MODE FREQUENCY	538.373 Hz
DAMPING RATIO	1.051 %

Fig. 7 Dynamic characteristics of the Composite Flexspline  $[90_4/\pm 10_2]$ .



FIRST MODE FREQUENCY	424.342 Hz
DAMPING RATIO	0.7724 %

Fig. 8 Dynamic characteristics of the Composite Flexspline  $[\pm 20/90/\pm 20_2]$



FIRST MODE FREQUENCY	381.476 Hz
DAMPING RATIO	0.2589 %

Fig. 9 Dynamic characteristics of the Steel Flexspline.

성은 약 4배 정도가 증가하였으므로, 동적 특성이 매우 향상되었음을 알 수 있다.

적층 각도가  $[\pm 20/90/\pm 20_2]$ 인 복합재료 Flexspline은  $[90_4/\pm 10_2]$ 인 복합재료 Flexspline 보다 Damping 값이 약간 작게 나왔는데, 이는 두 Flexspline의 적층 순서가 다르기 때문에 변형시의 Fiber와 Resin의 상대 변형이 달라졌고, 또한 두 Flexspline의 Resin 함량을 일정하게 조절하지 못하였기 때문으로 판단된다. 앞으로 복합재료 Flexspline의 적층 순서 및 Resin 함량변화에 대한 감쇠 특성에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용하여 기초원의 반지름  $r=30.45\text{mm}$ , 모듈 0.4이고 이빨수가 160개인 Harmonic Drive용 Flexspline을 Elastomeric Cascade Tooling 방법으로 제조하여 실험하였는데, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 복합재료 Flexspline은 Steel Flexspline보다 정적으로 더 유연하다.

(2) 복합재료 Flexspline은 고유진동수가 강철로 된 Flexspline보다 크고, 감쇠특성이 약 4배 정도 증가하였기 때문에 동적 특성이 매우 향상되었다.

(3) 탄소섬유 에폭시 복합재료를 이용한 Flexspline의 제조방법은 강철로 Flexspline을 제조하는 것에 비하여 재료 및 가공시간을 많이 단축할 수가 있다.

#### 참고문헌

1. *Harmonic Drive Manual(CS type)*, Harmonic Drive Inc., Catalog No. 8611-02R, pp.3-4.
2. Darle W. Dudley, *Gear Handbook*, McGraw-Hill, pp.3-35~43(1962).
3. Nam P. Suh, *The Principles of Design*, chapter 2, M.I.T. 1988.
4. C. Reugg and J. Habermair, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization", *Advanced in Composite Materials, Proceedings of ICCM 3, Vol. 2*, pp.1740-1755(1980)
5. Roy R. Craig, Jr., *Structural Dynamics*, John Wiley and Sons, pp.209-210(1981)
6. E.F. Crawley and D.G. Mohr, "Experimental Measurements of Material Damping in Free Fall With Tuneable Excitation", AIAA/ASME/ASCE/AHS Conference Paper No. 83-0858-CP(1983).