

유성 로울러형 트랙션 드라이브 개발

박태조*(경상대, 항공기부품기술연구센터), 하해용(세일공업),
문호근(FAG한화베어링), 정현기, 독고욱(국방과학연구소)

Development of a Planetary Roller Type Traction Drive

T.J. Park*(Gyeongsang Nat. Univ., ReCAPT), H.Y. Ha(Seil Industrial Co.)
H.K. Moon(FAG Hanwha Bearing Co.), H.G. Jung and W. Dokko(ADD)

Abstract - This paper show the designing, manufacturing and performance test procedure of a high speed, fixed ratio planetary roller type traction drive as a speed reducer. The arrangement and size design for sun roller, planetary rollers and ring roller are carried out and a proper pre-load mechanism are adopted. To improve transmitting power capacity and endurance limit, nitro-carburized bearing steel and a synthetic traction oil are used. The manufactured and assembled traction drive operated successfully under unloaded conditions. Further tests for various load and speed conditions are executing now to improve the performance of the traction drive.

Keywords : Traction drive(트랙션 드라이브), Planetary roller type(유성 로울러형), Speed reducer(감속기), Preload(예압), EHL(탄성유체윤활)

1. 서론

산업의 발전에 따라서 기계장치는 고효율, 고성능, 고정밀, 고신뢰성 뿐만 아니라 소형으로 고효력의 발휘가 동시에 요구된다. 특히, 소형화를 달성하기 위한 가장 핵심적인 부분은 원동기이며 이를 위해서는 고속화가 필수적이다. 하지만 대부분의 기계에서는 요구되는 토크(Torque)를 발생시키기 위하여 적절한 감속기구를 채용하여 있으며, 고속으로 운전되는 원동기일수록 고감속이 요구된다. 현재 이러한 목적으로 상용화된 제품은 기어와 기어를 응용한 것으로[1] 유성기어(Planetary

gear) 감속장치가 대표적이다[2]. 이 장치는 일반적인 기어감속장치에 비하여 좁은 적재공간에서 높은 감속비를 얻을 수 있고, 확실하게 동력을 전달할 수 있기 때문에 일반기계에서 널리 사용되고 있다. 그러나, 서로 맞물리는 치면의 간섭운동에 의하여 동력이 전달되기 때문에 완벽하게 가공되고 조립된 경우일지라도 치면간에서의 접촉과 비틀림 진동으로 인하여 상당한 정도의 소음발생은 불가피하다. 또한, 접촉하는 기어와 피니언(Pinion)간의 잇수 차이 제한 때문에 감속비를 크게 하기 위해서는 감속기가 커지게 된다.

한편, 트랙션 드라이브(Traction drive)

는 기하학적으로 간섭이 되지 않는 두면 사이에 형성된 아주 얇은 윤활막에 작용하는 유체의 점성에 의하여 동력이 전달된다. 이 결과, 비틀림 진동과 소음이 거의 발생하지 않으며, 아주 높은 감속비를 쉽게 얻을 수가 있는 등의 많은 장점을 지니고 있다. 하지만 우리 나라에서의 이에 관련된 기초연구나 독자적인 제품개발은 극히 미흡한 상태이며, 단지 사용목적에 따라서 외국의 완제품을 도입하여 자동차의 변속장치나 일부기계장치 등에 설치하는 정도에 머무르고 있다.

본 논문에서 소형이지만 감속비를 크게 할 수 있으며 전달 동력이 대용량인 유성 로울러형 트랙션 드라이브의 개발에 관련된 내용을 소개하고자 한다. 유성 로울러형은 저소음, 고감속, 고정밀화와 같이 요구조건이 까다로운 분야에 적합하므로 현재 가장 많이 사용되고 있는 형태이다.

2. 트랙션 드라이브

예압(Preload) 상태인 두 개의 로울러에서 한쪽 로울러를 회전시키면 접촉면에서 발생하는 마찰력에 의하여 나머지 로울러가 회전하게 된다. 이러한 아주 단순한 원리로 운동을 전달하는 기구를 마찰구동장치라고 부르며 건마찰(Dry friction)인 경우에는 Friction Drive, 유체의 점성마찰로 구동하는 경우에는 트랙션 드라이브라고 구별한다. 이때, 접촉 로울러의 직경을 다르게 하면 기어를 사용하는 경우와 동일하게 감속기나 증속기로 사용할 수 있다. 만일, 높은 변속비가 요구될 경우에는 유성기어 감속장치의 경우와 아주 유사하게 접촉 로울러의 배열 수를 증가시키면 된다.

트랙션 드라이브에서의 동력전달은 Fig.1에 나타낸 것과 같이 구름요소의 아주 작은 탄성변형영역을 통해서 발생한다.

즉, 구름운동을 하는 로울러 사이에 존재하는 윤활유의 전단시에 발생하는 점성력이 종동 로울러에 구동력으로 작용하며, 이때, 간극의 윤활유에는 극히 짧은 시간 동안에 아주 큰 압력이 작용한다. 탄성유체윤활(Elastohydrodynamic lubrication : EHL)이라고 잘 알려져 있는 이러한 윤활영역에서는 높은 유체압력으로 인하여 윤활면이 국부적으로 탄성변형됨과 동시에 윤활유의 점도가 지수함수적으로 증가한다 [3,4]. 이러한 두 가지의 복합적인 특성 때문에 얇은 유막을 통하여 동력이 전달됨과 동시에 집중하중상태에서 오랜 시간동안 성공적인 운전이 가능한 것이다.

일반적인 기어장치와 비교하여 유성 로울러형 트랙션 드라이브에는 다음과 같은 여러 가지의 장점이 있다.

- ① 구름운동을 하기 때문에 기어에서의 백래시(backlash) 발생이 거의 없다.
- ② 저속에서 속도오차가 작으며, 변속비를 아주 크게 할 수 있다.
- ③ 과부하를 방지할 수 있으며 제작이 쉽다.
- ④ 진동이 거의 없기 때문에 소음특성이 우수하며 고속회전이 가능하다.
- ⑤ 기동마찰력과 각속도 및 토오크의 변동이 작은 반면에 비틀림 강성은 아주 크다.

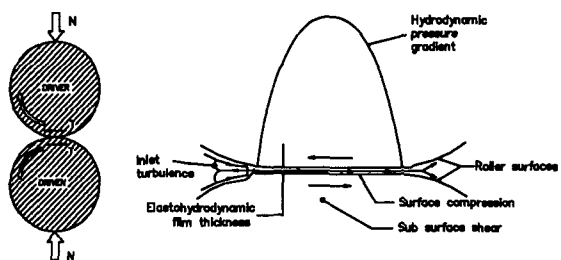


Fig. 1. Principle of Traction Drive.

마찰력을 이용한 구동장치의 역사는 망원경용 렌즈 가공과 거울면의 연마에 적용된 중세의 Leonardo Da Vinci 시대까지 거슬러 올라간다. 1900년대 초에, Ford 자동차사는 CVT(Continuously Variable Transmission) 장치로 이를 사용하고자 시도하였지만 상용화에는 실패하였다[5]. 이의 원인은 기구학적으로 단순한 장치임에도 불구하고 마찰력이 발생하고 전달되는 원리에 대한 이해의 부족과 함께 소재, 윤활제 등에 대한 제반성능이 현재에 비하여 크게 미흡하였기 때문이다. 1950년대 이후에 이르러 EHL분야에 대한 집중적인 연구 및 이를 응용한 구름베어링 설계기술의 확립, 베어링강과 같은 피로수명이 우수한 소재의 개발, 트랙션 오일(Traction oil)의 개발 등의 결과로 고효율, 저소음, 고감(중)속 특성을 지닌 트랙션 드라이브가 개발되었다. 이 결과, 현재에는 산업용, 군사용, 항공우주용 등과 같은 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

트랙션 드라이브에서는 접촉면에 항상 압축력이 작용하여 마찰력이 발생하게 하기 위해서는 예압장치가 필수불가결하다. 하지만, 사용목적에 적합한 트랙션 드라이브를 제작할 경우에 발생하는 가장 어려운 문제는 적절한 형태의 예압장치를 설계하는 것이다. 현재, 상용화된 유성 로울러형 트랙션 드라이브는 예압장치에 따라서 크게 Nasvytis형과 Mitsubishi형으로 나눌 수 있다[6].

Fig.2는 유성 로울러가 2열인 Nasvytis형 트랙션 드라이브를 나타낸 그림이다. 이 형태는 NASA와 A. L. Nasvytis가 공동개발한 것으로 주로 대출력의 고감속용으로 사용된다[7-10]. 이때, 각 유성 로울러는 3점지지 형태를 이루고 있으므로 로울러 결합체는 아주 안정적일 뿐만 아니라 로울러간의 하중분배도 아주 우수하다. 특히, 로울러들간의 크기에 약간의 차이가

있고 하우징이 비틀리거나 열변형 등이 발생해도 로울러의 방위는 조금 변화할 뿐이다. 따라서, 유성 로울러의 직경차이를 $\pm 20\mu\text{m}$ 정도로 크게 허용할 수 있는 바 이 양은 최소한 로울러 베어링에 부여되는 공차의 여러 배이다. 이와 같이 Nasvytis형은 주요부품에 대한 허용공차의 범위가 넓고, 가벼우며, 소형으로 제작비용이 저렴할 뿐만 아니라 원천적으로 진동과 소음 레벨이 낮기 때문에 고속펌프, 공작기계, 선박추진, 보링 머신(Boring machine), 원심분리기, 방직기 등에 널리 사용된다.

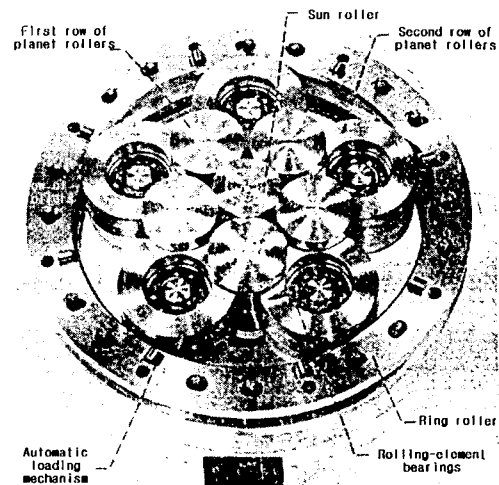


Fig. 2. Nasvytis Type Traction Drive.

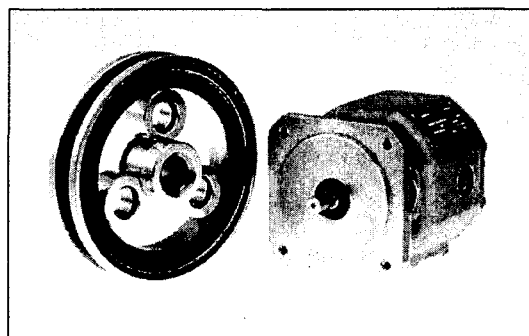


Fig. 3. Mitsubishi Type Traction Drive.

Fig.3에는 소출력, 저속, 초정밀 이송용으로 주로 사용되는 Mitsubishi형 트랙션 드라이브에 대한 로울러 형상과 외형을 나타내었다.

3. 트랙션 드라이브의 설계와 제작

본 논문에서는 Nasvytis형과 유사한 형태의 유성 로울러형 고감속 트랙션 드라이브를 개발하고자 하며 Table 1에 주요설계사양을 나타내었다. 트랙션 드라이브는 태양(Sun) 로울러, 유성 로울러 및 링(Ring) 로울러로 구성되며, 입력축은 태양 로울러에, 출력축은 태양 로울러 주위로 자전과 동시에 공전운동을 하는 유성 로울러에 각각 연결되고 링 로울러는 전동기에 고정된다. 따라서, 감속비는 태양 로울러의 회전수와 유성 로울러의 공전수에 의해서 결정된다.

트랙션 드라이브 주요부품의 설계에는 전달동력, 회전수, 유성 로울러의 수와 직경, 트랙션 계수뿐만 아니라 허용응력, 조립용이성도 고려되어야 한다. 이에 따라 태양 로울러는 입력축 보다 직경을 약간 크게 하였으며, 태양 로울러, 유성 로울러 및 링 로울러의 폭은 허용접촉압력을 고려하여 별도로 설계하고 이중에서 제일 큰 값을 채택하였다. 한편, 내구성을 향상시키기 위해서는 로울러에 대한 크라우닝 설계가 요구되지만[11-12], 본 논문에서는 고려하지 않았다.

트랙션 드라이브에서 필수적인 예압장치를 설계하기 위해서는 로울러에 대한 정확한 탄성변형량 예측이 우선적으로 요구된다. 본 논문에서는 각 로울러의 변형량을 구한 후 기하학적 공식으로 로울러들의 전체 변형량을 구하였다. 최종적으로는 링 로울러의 내경을 탄성변형량 만큼 작게 설계하여 두 부분으로 나누어진 링 로울러를 조임으로써 예압이 되게 하였다. 한편, 성

능시험시 발생하는 제반문제를 줄이기 위하여 입력축과 구동 전동기의 출력축은 스플라인으로 연결하고 커버(Cover)부는 전동기 케이스에 부착시켰다. Fig.4에 설계된 트랙션 드라이브의 개략형상을 나타내었다.

유성 로울러형 트랙션 드라이브는 로울러 베어링의 응용제품이므로 이에 상당하는 정밀도를 가지도록 부품을 설계하였다. 특히, 높은 접촉압력과 전단응력이 작용하는 가속조건에서 성능을 발휘하기 위해서는 재료의 선정도 중요하다. 일본의 산양 특수강에서는 트랙션 드라이브용의 초고청정 침탄강(SCM435)을 개발하였지만 본 논문에서는 국내에서 구입이 가능한 고청정 침탄강인 SCM415를 사용하였다.

Table 1. Specification of Traction Drive.

Row of Planetary Roller	1
No. of Planetary Rollers	3
Max. Input RPM	20,000
Reduction Ratio	6.9
Max. Power	50kW
Output	Planetary Roller

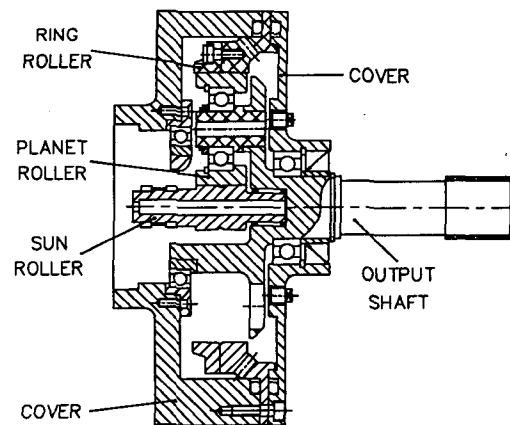


Fig. 4. Schematics of Traction Drive.

트랙션 드라이브에서는 일반적인 윤활유와는 특성에 차이가 있는 트랙션 오일이 사용되며, Table 2에는 본 논문에서 사용한 오일의 물성치를 나타내었다. 이 오일은 일반윤활유에 비하여 유막두께를 크게 하여 EHL상태로 유지시킴으로써 동력전달면의 마모와 피로 발생을 경감시킴과 아울러 트랙션 계수를 증가시켜 동일한 부하 상태에서 전달동력을 크게 한다.

Table 2. Properties of Traction Oil.

Designation	SANTOTRAC 50
Oil Type	Synthetic Hydrocarbon
Viscosity	5.61 cSt @98.9°C
	34 cSt @37.8°C
Density	889 kg/m ³ @37.8°C
Pressure-Viscosity Coeff.	$\alpha = 30.1\text{GPa}^{-1}$
Traction Coeff.	0.095

높은 형상정밀도와 매끈한 표면 거칠기가 요구되는 트랙션 드라이브에서 구름운동이 발생하는 각 로울러는 초사상가공(Super finishing)을 하여 표면거칠기는 0.1 μm Ra이하가 되도록 규제하였다. 또한, 내구수명을 향상시키기 위하여 경화층의 깊이는 3mm이상, 경도는 HRC 60 \pm 2가 되도록 각 로울러에 침탄질화처리를 실시하였다. 한편, 유성 로울러형 트랙션 드라이브의 장점을 최대한 활용하기 위해서는 조립부품들간의 치수 차이를 가능하면 작게 하는 것이 중요하다. 즉, 태양 로울러, 유성 로울러, 링 로울러의 치수를 측정하여 상호차이가 작은 부품끼리 조합하고 예압량을 고려하여 조립하였다. Fig.5에는 조립된 트랙션 드라이브의 사진을 나타내었다.

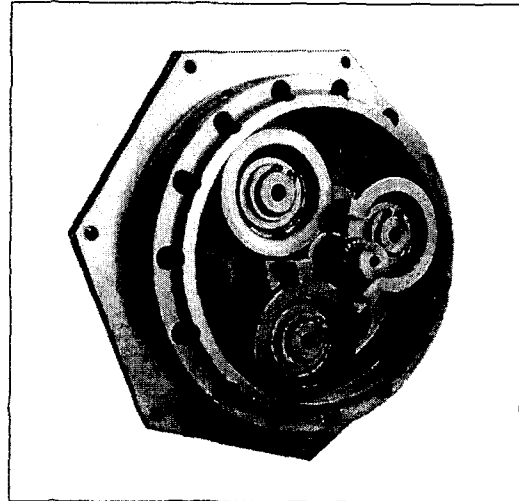


Fig. 5 Manufactured Traction Drive.

4. 성능시험장치

본 논문에서 설계, 제작한 유성 로울러형 트랙션 드라이브의 성능을 평가하기 위해서는 구동을 위한 전동기와 전달동력을 측정하기 위한 동력계(Dynamometer)가 기본적으로 요구된다. Table 3과 Table 4에는 성능시험에 사용된 전동기와 동력계의 사양을 각각 나타내었다.

실험에서는 전동기, 트랙션 드라이브 및 동력계의 정렬상태가 매우 중요하며 고부하가 걸리므로 입력단은 전동기의 회전자에 직접 연결하였다. 연결부에서의 정렬오차(Misalignment)를 보상하기 위하여 고무재질이 함유된 Flexible Coupling을 사용하여 출력단과 동력계를 연결하였다. Fig.6은 성능시험장치의 배치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 트랙션 드라이브는 고속으로 회전하므로 외부에서의 과도한 진동, 회전중심의 정렬상태불량, 예압력이 작을 경우 및 가공상태가 불량한 경우 등에는 미끄럼(Slip)이 발생하여 원활하게 작동하지 않기 때문에 제작과 조립시에 이러한 부분을 고려하여야 한다. 실험장치에

대한 사진을 Fig.7에 나타내었다.

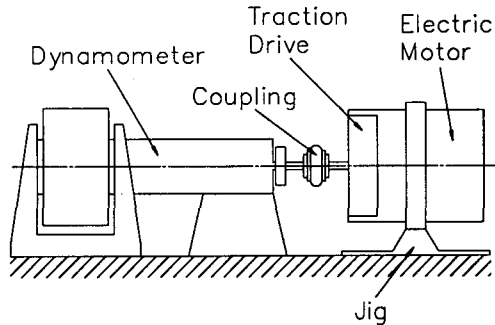


Fig. 6 Layout of Test Apparatus.

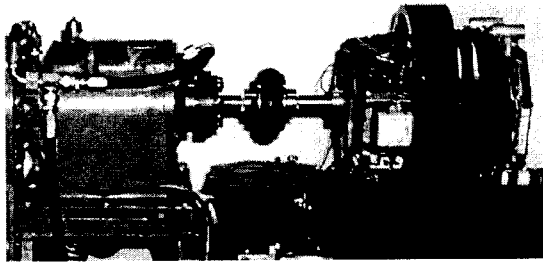


Fig. 7 Photo of Test Apparatus.

Table 3. Specification of Electric Motor

Type	BLDC
Max. Speed	25,000rpm
Max. Power	70kW

Table 4. Specification of Dynamometer

Maker	Froude Consine
Model	AG250HS
Max. Speed	30,000rpm
Max. Torque	300Nm
Max. Load	250kW

5. 결과 및 고찰

본 논문에서는 감속비가 고정된 유성 로울러형의 고감속 트랙션 드라이브의 설계, 제작 및 성능시험에 관련된 내용을 소개하였다. 이 결과, 무부하상태에서 성공적으로 운전됨을 확인하였으며, 현재 다양한 조건에 대한 상세한 설계자료를 구하기 위하여 성능시험을 계속하고 있다. 따라서, 본 논문에서 개발하려는 유성 로울러형 트랙션 드라이브는 저소음, 고감속, 고정밀화가 요구되는 기계의 증(감)속기로 널리 사용될 수 있을 것으로 기대되므로 우리나라의 정밀기계공업 발전에 크게 기여할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2000년도 중소기업1사1기술사업 및 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 高橋久義, 齒車裝置と遊星ローウ裝置の特性比較, 機械設計, Vol.29, No.11, 1985, pp.97-101.
2. Henriot, G., Gears and Planetary Gear Trains, Brevini.
3. Dowson, D. and Higginson, G. R., Elastohydrodynamic Lubrication, SI ed., Pergamon Press, 1977.
4. Hamrock, B. J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill, 1994.
5. Heilich, F. W. and Shube, E. E., Traction Drives : Selection and Application, Marcel Dekker, 1983.

6. 岡村貴句男, トラクションドライブの種類と性能, トライボロジスト, Vol.35, No.1, pp.14-19, 1990.
7. Loewenthal, S. H., Anderson, N. E. and Nasvytis, A. L., Performance of a Nasvytis Multi-roller Traction Drive, NASA TP-1378, 1978.
8. Loewenthal, S. H., Rohn, D. A. and Anderson, N. E., Evaluation of a High Performance Fixed-Ratio Traction Drive, J. of Mech. Design, Vol.103, pp.410-422, 1981.
9. Loewenthal, S. H. and Zaretsky, E. V., Design of Traction Drives, NASA RP-1154, 1985.
10. Steinetz, B. M., Rohn, D. A. and Anderson, N. E., Evaluation of a High Torque Backlash-Free Roller Actuator, NASA CP-2423-Rev, pp.205-230, 1986.
11. Park, T. J. and Kim, K. W., The Elastohydrodynamic Lubrication of Profiled Cylindrical Roller, *Proc. of the Int. Tribology Conf.*, Yokohama, Vol.2, pp.1043-1048, 1995.
12. Park, T. J. and Kim, K. W., Elastohydrodynamic Lubrication of a Finite Line Contact, *Wear*, Vol.223, No.1-2, pp.102-109, 1998.