

접촉하중에 따른 기어의 트랜스미션 에러에 관한 연구

탁성훈 · 황규석* · 손유선 · 배효제 · 류성기**†

경상대학교 대학원 기계항공공학부, *LG전자,
**경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

A Study on the Transmission Error of the Gear on Contact Load

Sunghoon Tak, Guesec Hwang*, Yusun Son, Hyoje Bae and Sungki Lyu**†

Graduate school of Graduate School of Gyeongsang National University

*LG Electronics LTD.

**School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT, Gyeongsang National University

Abstract – This study deals with the TE (Transmission Error) of gear tooth by modifying a profile and lead of a surface of tooth. First, we experimentally confirmed that the TE is a synthesis of the sliding velocity between both gears. Since various types of TE appear in the experiments, we introduced definition of transmission error and the optimism design by modifying a surface parameters.

The test stand's performance is then evaluated through a series of multiple torque transmission error tests. Comparisons are made between data recorded before and after the test stand's redesign, and subsequently repeatability studies are performed to verify the veracity of the measured data. Finally, the experimental results are compared to the analytical predictions of two different gear analysis programs.

Key words – contact load, T.E. (transmission error), profile modifying, lead modifying, optimism design.

1. 서 론

운송수단으로 쓰이고 있는 자동차, 잠수함, 헬리콥터, 공격용 전투기 등의 동력전달장치에서 가장 문제가 되고 있는 파트중의 한 부분은 소음이라고 할 수 있다. 자동차의 소음은 사람의 피로감을 증가시키며, 잠수함은 적의 감시에서 벗어나기 위해 저음이어야 한다. 그리고 헬리콥터와 공격용 전투기 또한 소음의 저감은 필수요건이라고 할 수 있다. 장비의 소음을 일으키는 가장 큰 요인은 엔진부분과 기어의 조합으로 이루어진 기어박스부분으로 나눌 수 있다. 엔진의 경우는 피스톤과 내부 구조의 변경 등, 많은 부분에서 수정을 가하여 소음을 줄여야 하므로 많은 시간과 고가의 장비들을 필요로 하지만 기어박스의 경우 기어박스 내에 있는 기어의

치형수정과 접촉하중에 따른 소음의 변화를 쉽게 관찰할 수 있으며, 각종 해석프로그램의 발달로 인한 시뮬레이션을 통해 결과 값을 쉽게 찾아 낼 수 있기 때문에 현재 많은 연구를 하고 있다[1-2].

본 연구에서는 기어박스내의 기어 치형의 최적 설계법과 최적의 접촉하중을 찾기 위한 방법으로 기어의 소음에 가장 크게 영향을 미치는 요소를 분석 하였으며 그 과정 중 치형의 수정과 접촉하중이 소음저감에 가장 영향을 많이 미친다는 것을 많은 연구자료[3-13]를 통하여 확인 할 수 있었다. 그 중에서 치형의 프로파일과 리드부분의 수정이 소음에 많은 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

현재 각 연구기관과 대기업에서도 치형의 수정을 통해 기어의 최적설계기법을 찾고 있으며, 본 연구에서도 기어 치형의 최적값을 찾기 위하여 연구를 수행하였다. 이론적으로 기어 소음의 가장 큰 원인은 트랜스미션 에

†주저자 · 책임저자 : sklyu@snu.ac.kr

러(Transmission Error, T.E.)로 알려져 있다[14]. 따라서 T.E.값을 감소시키기 위해 기어의 치형을 어떻게 수정해야 하는지를 연구하게 되었다.

본 연구에서는 치형의 수정을 통한 기어 T.E.의 최적화 범위와 최적의 접촉하중을 찾는 것이 목적이며 이를 위해 프로파일과 리드의 수정을 통해 구한 이론값과 기어의 물림특성을 고찰함으로써 T.E.와 함께 접촉하중, 하중분포, 기어 잇면의 응력분포 등을 고찰하였다. 그리고 이론으로 구한 트랜스미션 에러값과 실제 실험에서 구한 실험값의 데이터를 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. Transmission Error 이론

기하학적으로 완벽하고 무한대의 강성을 가진 기어는 트랜스미션 에러(T.E.)가 존재하지 않을 것이다. 그러나 일정한 하중이 가해진 상태의 기어의 맞물림은 한쪽 기어의 치형에 편각이 나타나게 되어 T.E.를 발생시킨다. Fig. 1은 T.E.의 발생현상을 설명하고 있다.

기어의 강성이 무한대라고 하면 관련 식은 다음과 같다.

$$\theta_2 = \theta_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

그러나 트랜스미션이 더해지면 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_2 = \theta_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right) + TE$$

이를 원동축 기어 잇수(N_1)와 종동축 기어 잇수(N_2)로 바꾸어 T.E.식을 나타내면 다음과 같다.

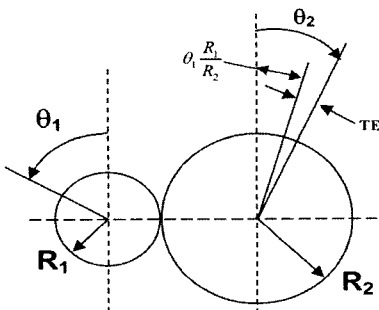


Fig. 1. Graphical definition of Transmission Error.

Table 1. Dimensions of hypoid gear pair

	Helical Gear	
	Pinion	Gear
Number of Teeth	13	46
Normal Diameters Pitch (mm)	4.7	
Pressure Angle (degree)	20	
Spiral / Helix Angle (degree)	41	
Center Distance (mm)	183	
Outside Diameter (mm)	85	104
Root Diameter (mm)	68	273
Face Width (mm)	45	45
Transverse Tooth Thickness (mm)	9.7	9.7
Diameter at Tooth Thickness (mm)	81	286
Profile/Face/Total Contact Ratio	1.093/1.978 /3.071	

$$TE = \theta_2 - \theta_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

기어의 Whine noise를 일으키는 변수에는 T.E., 물림강도, 축의 흔들림, 마찰, 충격, 윤활, 공기 등의 요소들이 있지만 그중에서 가장 큰 영향을 미치는 요소가 T.E.이다.

3. 실험 조건과 실험 방법

3-1. 시험기어 및 실험장치

Table 1은 실험에 사용된 하이포이드 기어의 제원을 나타내고 있다.

Fig. 2는 T.E. 측정장치로써 기어와 피니언이 맞물려 돌아 갈 때 소음을 분석하여 데이터 값을 모니터에 나타나며, T.E.값은 데이터 기록장치에 기록된다. Fig. 3

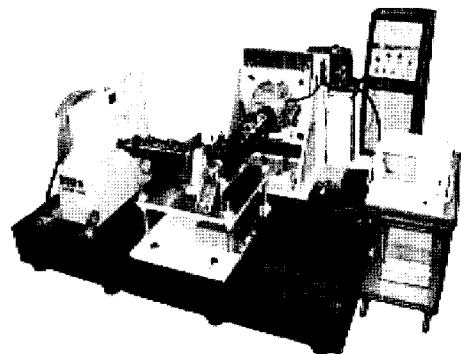


Fig. 2. The Apparatus photograph of T.E. test.

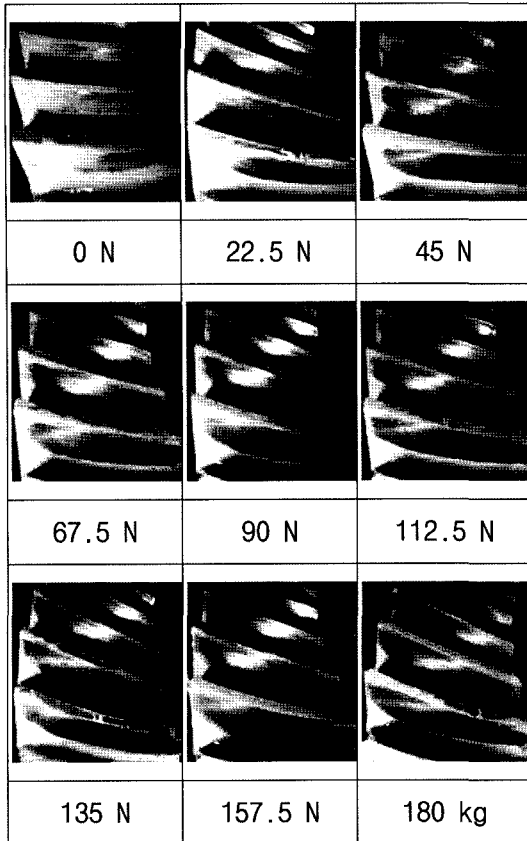


Fig. 3. Contact shape under contact load.

은 접촉하중에 따른 접촉부위를 나타내고 있다. 하중이 클수록 접촉부위가 크게 나타났다.

3-2. 기어의 최적설계용 응용 소프트웨어

3-2-1. LDP

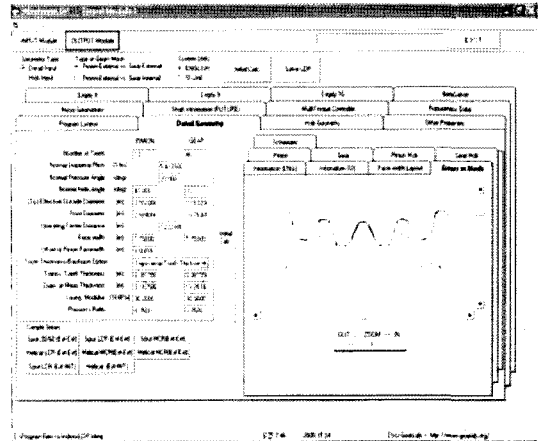
LDP는 스퍼기어와 헬리컬기어의 응력과 트랜스미션 에러, 그리고 하중분포를 계산하기 위해 Houser와 Harianto가 만든 기어 최적화 프로그램이다[14].

LDP는 T.E의 해석시간을 단축시키고 결과값을 빠르게 분석하는데 사용되어지며, 하이포이드 기어와 헬리컬 기어의 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 만들어진 프로그램이다.

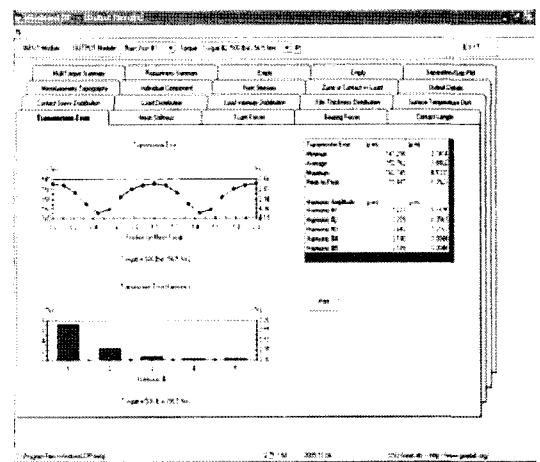
Fig. 4는 Data 입력화면과 출력화면을 나타내고 있다.

3-2-2. Calyx

Calyx는 Sandeep에 의해 개발된 유효요소 해석 기어 디자인 프로그램이다[15]. LDP가 T.E를 측정하는 프로그램이라면, Calyx는 기어의 응력과 강도 측정을



(a) Input



(b) Output

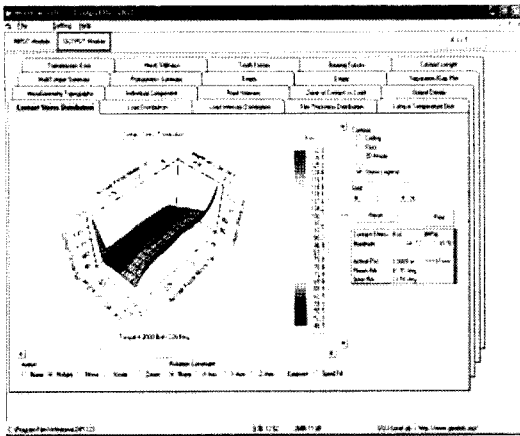
Fig. 4. Input and output sheet of LDP.

위해 만들어진 프로그램이다.

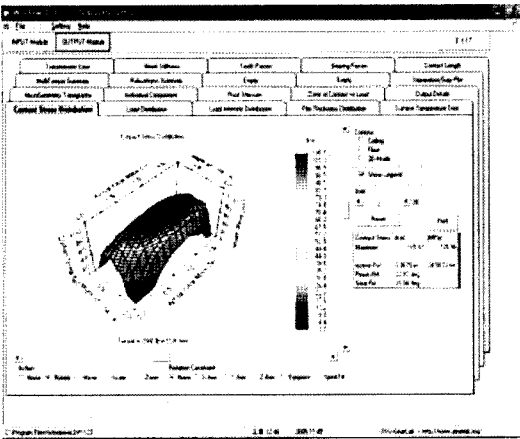
Calyx의 장점은 LDP에서 다루기 어려운 베벨기어의 특정값을 쉽게 계산할 수 있지만 단점은 모든 값의 파라미터를 기하학적인 좌표로 값을 도출하기 때문에 계산시간이 많이 걸린다.

3-3. 실험조건 및 실험 방법

기어의 Whine noise를 일으키는 변수에는 T.E., 물림강도, 축의 흔들림, 마찰, 충격, 윤활, 공기 등의 요소들이 있지만 그중에서 가장 큰 영향을 미치는 요소가 트랜스미션 에러(T.E.)이다. T.E.값을 변화시키는 변수에서 프로파일과 리드부분의 수정값이 가장 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 프로파일과 리드의



(a) Before modification



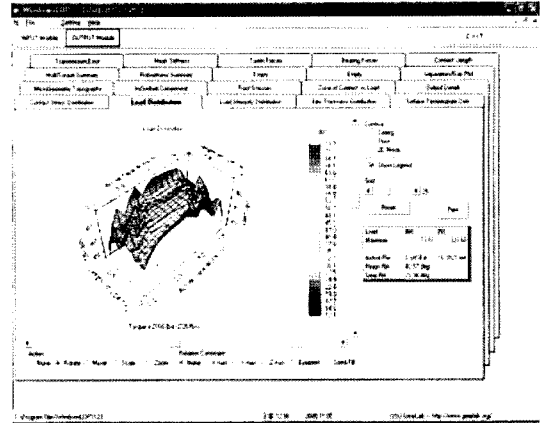
(b) After modification

Fig. 8. Contact stress distribution.

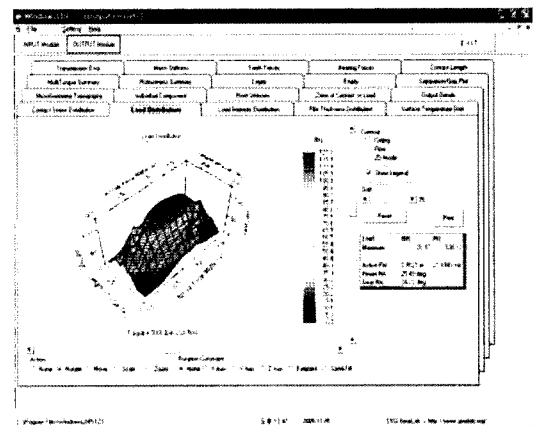
소하였음을 그래프를 통해 알 수 있었다.

Fig. 8은 치형이 맞물려 돌아갈 때의 접촉응력 분포를 나타내고 있으며 Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이 치형 수정 후 치형 전체면이 균일하게 접촉하고 있음을 알 수 있다. 특히 치형 가운데를 중심으로 접촉응력이 높은 것은 기어와 피니언의 치형이 서로 잘 맞물려 돌아간다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 치형이 맞물려 돌아갈 때의 하중분포를 나타내고 있으며 Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이 치형 전체면이 균일하게 하중을 받고 있음을 알 수 있다. 치형에서는 균일한 하중이 온도 및 마찰, 마모, 그리고 내구성에도 상당한 영향을 미치기 때문에 기어설계에 있어서는 상당히 중요한 변수로 작용하고 있다.



(a) Before modification



(b) After modification

Fig. 9. Load distribution.

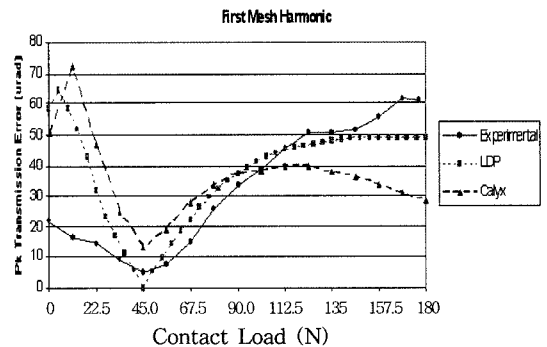


Fig. 10. T.E. comparison between experimental results, LDP predictions, and Calyx predictions.

4-4. T.E의 실험값과 이론 결과값 비교

LDP, Calyx S/W를 이용하여 하중에 따른 T.E.값과 실험으로부터 구한 측정값을 Fig. 10에 나타냈다. 기어

에 주어지는 하중에 따라 T.E.값이 변하므로 최적의 하중을 구할 수 있다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 LDP, Calyx를 이용한 T.E.값과 실제 측정된 실험값이 근사하게 나타났으며, 최적의 T.E.값은 접촉하중 45 N에서 나타났다.

5. 결 론

기어의 소음과 진동을 줄이기 위한 방법으로 치형의 프로파일과 리드를 수정하여 기어의 치형을 최적설계한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 사용한 기어의 제원에서 기어의 프로파일과 리드의 수정값은 6.6, 5.8 μm 에서 최적화 되었다.
2. 기어의 프로파일과 리드의 값을 각각 6.6 μm 와 5.8 μm 로 수정할 경우 T.E., 접촉응력, 하중분포 등의 값이 최적화 되었다.
3. 본 연구에서 사용한 기어의 제원에서 기어의 프로파일과 리드의 수정 후 전달오차값이 약 30% 감소하였다.
4. LDP와 Calyx를 이용한 T.E.값과 실험값이 근사한 값으로 나타났으며, 최적의 T.E.값은 접촉하중 45 N에서 나타났다.

후 기

이 논문은 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업과 2단계 BK사업 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Bajpai, A., "The Effect of Gear Geometry and Sur-

- face Finish on Measured T.E. and Noise for Several Gear Sets," MSc. Thesis, The Ohio State University, 2004.
2. Houser, D. R. and Singh, R., "Gear Noise Basic Short Course Notes," The Ohio State University, 2003.
3. Dziech A.M., "Design of a Loaded Static T.E. Tester for Non-Parallel Axis Gearing," MSc. Thesis, The Ohio State University, 1996.
4. Poling A.M., "Hypoid Gear Test Rig T.E. Measurement Enhancement and Topics in Root Stresses of Several Gear Types," MSc. Thesis, The Ohio State University, 1999.
5. Bassett D.E., "The Design and Analysis of Single Flank T.E. Tester for Loaded Gears," MSc. Thesis, The Ohio State University, 1987.
6. Schutt, T.C., "Development of a Loaded Single Flank T.E. Measurement System," MSc. Thesis, The Ohio State University, 1988.
7. Foster, C.A., "Digital Control of a Loaded Single Flank T.E. Measurement System," MSc. Thesis, The Ohio State University, 1991.
8. Hochmann, D., "An Improved Loaded Single Flank Static T.E. Tester," MSc. Thesis, The Ohio State University, 1992.
9. Coleman, W., "Guide to Bevel Gears," McGraw-Hill Publishing Co., Inc, 1963.
10. Dudley, D.W., "Handbook of Practical Gear Design," CRC Press, 1994.
11. Yukon Gear and Axle Installation Kit Instructions, Yukon Gear and Axle, 2003.
12. Spicer Axle Maintenance Manual, Model 44, Independent Rear Suspension, Dana Corporation, 1984.
13. Rotec Data Acquisition System User Manual, Rotec, 1999.
14. Houser, D.R. and Harianto, J.H., "The Effect of Micro-Geometry and Load on Helical Gear Noise Excitations," SAE, May 2005.
15. Sadndeeep Vijayakar, "Finite Element Analysis of Quasi-Prismatic Bodies with Application to Gears," 1987.