MPDS 웜기어의 효율인자 분석과 효율예측 모델 개발

Analysis of Efficiency Factors for MDPS Worm Gear and Development of Efficiency Estimation Model

*오광환 [1], #김성한 [1], 변정원 [1], 신민철 [1], 주종남 [1]

*K. H. O[1], #S. H. Kim(mowgli00@snu.ac.kr)[1], J. W. Byun[1], M.C. Shin[1], C.N. Chu[1]

[1] 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Worm Gear Efficiency, MDPS Worm Gear, EPS HILS, Efficiency Estimation

1. 서론

MDPS(Motor Driven Power Steering)은 현재 자동차 조향부에 널리 이용되고 있는 유압파워스티어링을 대체하기 시작한 새로운 시스템이다. MDPS 는 스티어링 동작이 일어날 때에만 모터를 돌려 동력을 보조함으로써 유압 펌프가 상시 가동하는 유압파워스티어링에 비해 자동차 연비 향상의 효과가 크다.[1] 이러한 MDPS 의 이점을 살려, 보다 연비 향상에 기여할 수 있는 방안의 일환으로 현재의 MDPS 의 성능을 분석하고, 시스템의 개선 방안을 모색하기 위해 여러 연구가 진행 중이다.

MDPS 모듈은 모터, ECU, 감속기어, 조향축으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 실험 세트를 구성하여 MDPS 모듈에서 모터와 ECU 를 제외한 감속기어 부분만의 효율을 측정하고, 수학적인 방법을 통해 각 설계 변수들이 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 향후 설계 변경 시 효율을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다.

MDPS 모듈의 감속기어는 마찰계수가 작고, 인장강도, 열적 안정성 및 내마모 특성이 우수한 Nylon 6 재질의 웜기어로 구성되어 있다.[2] 웜기어의 동력 손실은 크게 Churning loss, Windage loss, Bearing loss, Tooth friction loss 로 구성된다. 여기서 윤활유에 의해서 발생하는 손실인 Churning loss 와 기어와 공기간의 마찰로 인해 생기는 동력손실인 Windage loss 는 실제로 매우 작기 때문에 손실 전체에서 차지하는 비율은 무시할 수 있다.[3] 또한 Bearing loss 또한 작은 값이기 때문에 실제 MDPS 의 손실은 대부분 Tooth friction loss 에 의한 것이다. 따라서 본 연구에서는 MDPS 모듈의 웜기어 감속기 효율을 측정한 뒤, Bearing loss 를 고려하여 측정값을 보상함으로써 웜과 웜휠 간의 동력전달 효율을 구하였고, Tooth friction 이론에 근거하여 웜기어의 효율인자를 분석하고, 효율 예측 모델을 개발하였다.

2. 실험 방법 및 결과

웜기어만의 효율을 측정하기 위하여 Fig. 1 과 같이 실험장비를 제작하였다. 웜기어에서 효율 손실과 관련된 주요 인자는 미끄러짐 속도와 부하상태 두 가지이다.[4] 각 인자들의 조건에 따라 웜기어의 마찰계수가 결정되고, 그로부터 웜기어의 효율 손실이 결정되기 때문에 이들 조건을 변수로 삼고 효율 실험을 진행하였다.

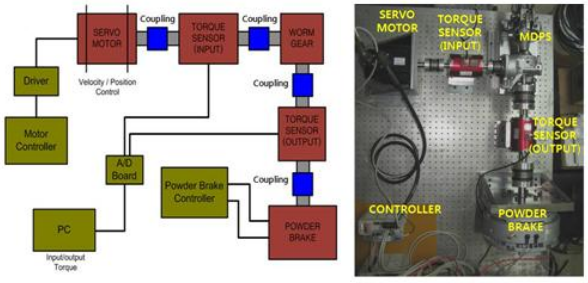
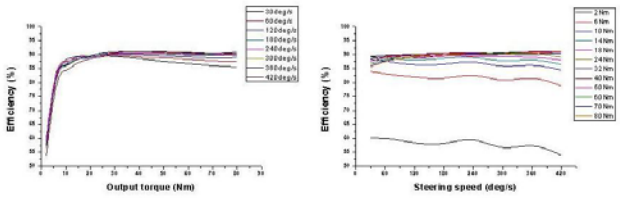


Fig. 1 Experimental system: worm gear efficiency tester



(a) (b)

Fig. 2 Worm gear efficiency data: (a) efficiency according to output torque, (b) efficiency according to steering speed

웜기어에서 부하상태를 결정하는 출력단 토크와 효율과의 관계, 미끄러짐 속도를 결정하는 회전속도와 효율과의 관계에 대한 실험 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 회전속도 인자는 효율에 미치는 영향이 거의 없다. 반면, 출력단 토크와 효율과는 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 웜기어 모듈의 효율 실험 결과에서 베어링 손실을 보상하기 위하여 Fig. 3 과 같은 실험 세트를 구성하고 실험을 진행하였다. Fig. 4 는 베어링 손실 실험결과를 나타낸다. 결과그래프에서 베어링의 마찰계수는 속도에 영향을 받지 않고, 하중이 증가함에 따라 특정한 값, 약 0.02 로 수렴한다.

위 실험들을 통하여 웜기어와 관련된 인자들의 분석이 완료되었으므로, 수치화된 베어링에 의한 효과를 처음의 효율결과에서 제거하여 부하 상태에 따른 웜과 웜휠의 동력전달 효율 및 마찰계수를 도출하는 것이 가능해졌다. 그 결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

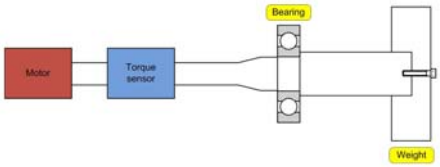
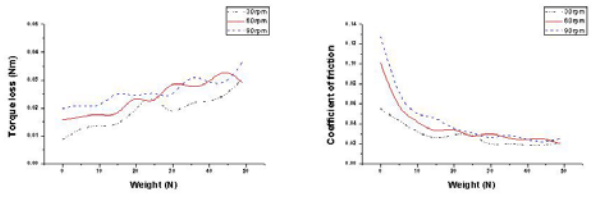
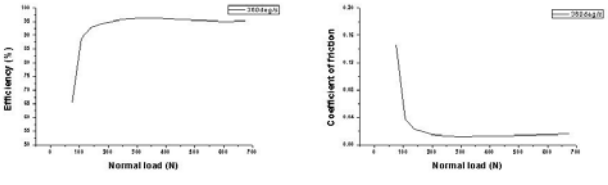


Fig. 3 Experimental system: bearing loss tester



(a) (b)

Fig. 4 Bearing data: (a) torque loss, (b) coefficient of friction



(a) (b)

Fig. 5 Compensated worm gear data according to normal load at 360 deg/s: (a) efficiency, (b) coefficient of friction

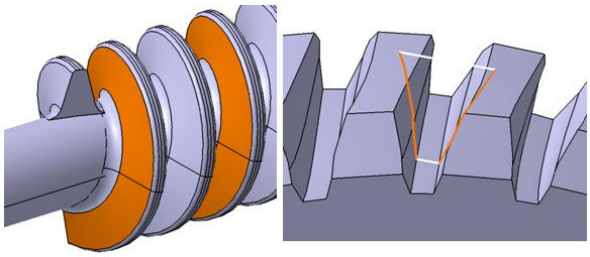
3. 결과 분석

실험을 통하여 부하상태에 따라 웜과 웜휠 사이에 작용하는 수직하중과 웜기어의 마찰계수와의 관계를 도출해내었다. 하지만 이 결과가 설계상 많은 변수를 가지고 있는 웜기어의 효율 예측에 쓰이기 위해서는 수직하중이 아닌 접촉 압력에 관한 결과로 정리되어야 한다. 본 연구에서는 웜기어의 수학적 모델링과 이를 이용한 접촉면적 계산을 통하여 접촉 압력 대비 마찰계수의 값을 산출하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 마찰계수의 결과값과 가장 유사한 근사 곡선 식을 도출하여 효율 예측에 이용하였다.

Fig. 6 는 웜과 웜휠을 프로그램을 이용하여 3D 모델링한 것이다. 웜과 웜휠이 닿는 지점은 면과 면이 접촉하는 지점이므로, 여기서는 한 면에 속하는 두 개의 커브를 정의하여 해석하기로 한다. 웜의 면에 속하는 커브는 피치점의 경로와 치면의 방정식으로 정의했으며, 웜휠의 면에 속하는 커브는 홉(hob)가공의 경로와 인볼루트 방정식으로 정의하였다.

위에서 정의한 커브들을 통하여 접촉면적을 구하기 위해서 Hertz's elastic law 를 적용하였다.[5] 이를 위해 몇 가지 가정이 필요한데, 웜과 웜휠이 접하는 지점은 각 원과 웜휠의 피치원 상에 있다는 것과 접촉지점에서의 두 면은 면을 이루는 두 개의 기본 커브(principal curve)로 정의되었다는 것, 그리고 웜과 웜휠은 세 지점에서 접하고 각 지점에는 같은 하중이 가해진다는 것이 그것이다. 이러한 가정과 수학적 계산을 통해 웜기어의 각 변수와 하중조건에 따른 접촉면적 식을 도출해낼 수 있었고, 본 연구에서 이용한 웜기어의 변수와 하중조건 값을 넣어서 접촉면적을 계산하였다.

Fig. 7 은 위의 접촉면적을 이용하여 치면에 작용하는 압력을 구함으로 접촉압력 대비 마찰계수의 값을 산출한 결과이다. 점으로 표시된 것은 실험결과로부터 도출한 마찰계수를 나타내고, 곡선으로 표시된 것은 추세선이다. 이로써 MDPS 웜기어 효율 실험을 통한 Nylon 6 와 Steel 로 제작된 일반적인 웜기어의 마찰계수 특성곡선이 얻어진다. 이 특성곡선은 서로 다른 설계 변수를 가진 웜기어에 적용될 수 있다.



(a) (b)

Fig. 6 Worm gear modeling: (a) worm, (b) worm wheel

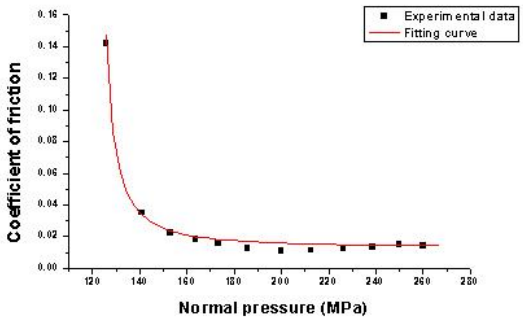


Fig. 7 Coefficient of friction according to normal pressure and fitting curve

4. 효율 예측 모델링

효율 예측과정은 설계 치수 및 운행 조건에 따른 접촉압력 분석을 기반으로 한다. 수학적 모델링을 통해 치면의 접촉 압력을 구하고, 실험을 통해 산출한 접촉 압력 대비 마찰계수 모델에 근거하여 마찰계수를 구한다. 이 마찰 계수를 이용하여 베어링 손실이 포함되지 않은 Tooth friction 에 의한 웜과 웜휠 간의 동력전달 효율을 구할 수 있다.

Fig. 8 은 위의 과정을 통해서 필요한 MDPS 의 모터 토크와 출력, MDPS 모듈의 전체 효율을 산출하는 프로그램을 나타낸다. 설계상의 표현되어 있는 데이터, 웜휠 가공에 사용된 홉의 반경 비율, 출력 토크, 운전 속도 및 베어링의 설계 치수를 입력하면 모터 입력토크, 모터 출력, 베어링 손실일, 모듈 전체의 효율이 표시된다.

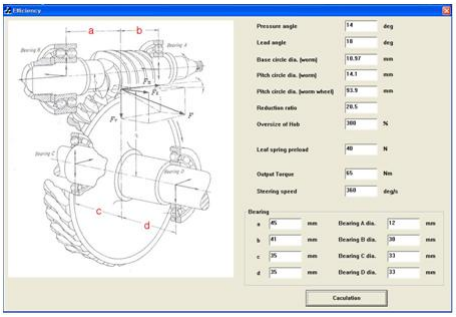


Fig. 8 Efficiency estimation model

5. 결론

실험을 통하여 실제 웜기어 모듈의 효율을 구할 수 있었고, 웜기어 모듈의 효율에서 베어링의 영향을 고려하여 웜과 웜휠 간의 효율과 마찰계수를 도출하였다. 또한 웜기어의 수학적 모델링과 실험 결과에 기반한 일반적인 Nylon 6 재질 웜기어의 특성곡선을 구할 수 있었다. 본 연구의 결과는 웜기어 설계 단계에서부터 웜기어의 효율을 예상하여 설계에 고려할 수 있게 함으로써 웜기어 설계와 제작 공정간의 시간과 비용을 절약하고, 웜기어가 쓰이는 많은 기계분야에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 위효성, 조근진, 박진일, 박경석, 이종화. "파워스티어링 시스템 종류에 따른 차량연비 개선 효과", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, 733-738, 2006.
2. 하동헌, 김성수, "EPS 감속기 기어로 사용된 Nylon6 소재의 윤활제 첨가에 의한 기계적물성 및 마찰특성 향상에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1675-1682, 2004.
3. S. Kong, K. Sharif, H. P. Evans, R. W. Snidle, "Elastohydrodynamics of a worm gear contact", Journal of Tribology, Vol. 123, April 2001.
4. Wangquan Cheng, "Tribological study of grease lubricated plastic wormgear for automotive application", Tribology Transactions, Vol. 45, 2002.
5. Y. Yamaguchi, "Tribology of plastic materials", Elsevier, Amsterdam, 1986.