

오일에 잠긴 스퍼기어의 동력 손실 해석

Power Loss Analysis of Spur Gears Submerged in Oil

박찬일† · 김민철*
Chan IL Park and Min Chul Kim

1. 서 론

자동차 변속기, 풍력 터빈 및 산업용 기어상자는 연비와 CO₂ 저감을 위해 효율의 증대를 요구받고 있고, 기어상자 효율을 높이기 위해 동력 손실을 줄이는 것이 필요하다.

기어상자의 동력 손실은 부하와 무부하 손실로 나눌 수 있고, 부하손실은 기어와 구름 베어링 등의 마찰손실이고 오일과 관계된 교란손실(churning loss)은 무부하 손실이다. 자동차 기어와 같이 기어가 중간 속도에서 작동될 경우, 접선 속도가 기름으로부터 기어 이와 베어링에 윤활유를 튀겨주는 비산급유 윤활이 가장 적당하고 경제적이다. 이 윤활과정의 가장 결점은 윤활유의 교란에 의해 야기되는 동력 손실의 발생이다. 이것은 기어 상자의 온도의 상승을 유발시키고 주요한 손실 항이 된다. 또한 기어 이의 마찰손실과 베어링에 의한 마찰손실은 전체 동력 손실에 크게 기여한다. 따라서 이 연구에서는 스퍼기어의 무부하와 부하 손실을 해석하기 위하여, 회전속도에 따른 교란 손실, 기어 이의 마찰 손실, 구름 베어링 마찰손실에 의한 동력 손실을 해석한다.

2. 동력 손실 해석

2.1 동력 손실 모델링

(1) 오일의 교란손실

기어 오일에 의한 교란 마찰토크 M_c 은 다음 식으로 주어진다⁽¹⁾.

$$M_c = \frac{1}{2} \rho V^2 R A C_m . \quad (1)$$

† 교신저자; 정회원, 강릉원주대학교 기계자동차공학부
 E-mail : pci@gwnu.ac.kr

Tel : 033-760-8723, Fax : 033-760-8721

* 강릉원주대학교 정밀기계공학과(원)

여기서 ρ 는 오일밀도, V 는 표면속도, R 은 기어피치반경, ν 는 동점성계수, Re 는 Reynold 수이며 $Re = VL/\nu$ 로 주어진다. C_m 은 무차원 토크계수로서 Reynold 수가 2000이하일 때 $20/Re$ 로 계산한다.

Fig. 1은 기어가 오일에 빗금친 부분 깊이 d 만큼 잠긴 상태를 표시한다. A 는 기어가 오일에 잠긴 면적으로 기어 양쪽 측면 잠긴 면적과 기어 이부위 잠긴 면적의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$A = R^2(\theta - \sin \theta) + Z\theta ht / \pi \cos \alpha + R\theta t . \quad (2)$$

여기서 h 는 이높이, α 는 압력각, t 는 이폭, Z 는 기어 잇수를 나타낸다.

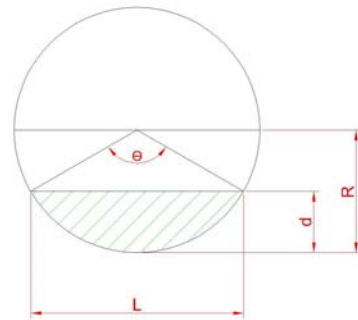


Fig. 1 Gear wetted area

(2)이의 마찰손실

기어 이의 마찰손실 P_g 는 다음 식으로 주어진다
 (2)

$$P_g = P_{in} Hf . \quad (3)$$

여기서 P_{in} 는 입력축 동력(W), f 는 기어 이의 마찰 계수로 이 해석에서는 f 는 0.01로 가정한다. H 는 다음 식으로 주어진다.

$$H = \pi \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2), \quad (4)$$

여기서 Z_1 은 구동기어 잇수, Z_2 는 피동기어 잇수, ε_1 은 접근 물림률, ε_2 은 퇴거 물림률을 나타낸다.

(3) 베어링 손실

베어링 마찰토크 M_b (N·m)는 하중에 의한 베어링 마찰토크 M_l (N·m)와 오일점성에 의한 마찰토크 M_v 의 합으로 다음과 같이 주어진다⁽³⁾.

$$M_b = M_l + M_v, \quad (5)$$

$$\text{여기서 } M_l = f_l F_\beta d_m 10^{-3}, \quad (6)$$

$$f_l = z(F_S / C_0)^y, \quad (7)$$

$$M_v = 10^{-10} f_0 (vn)^{2/3} d_m^3, \quad vn \geq 2000. \quad (8)$$

$$M_v = 160 \times 10^{-10} f_0 d_m^3, \quad vn \leq 2000. \quad (9)$$

f_l 은 베어링 디자인과 하중과 관계된 계수, F_β (N)는 베어링의 하중, F_S (N)은 정등가하중, f_0 은 베어링 형식과 윤활방법에 관계된 계수, ν 는 동점성계수(censtistokes), n 은 rpm, d_m 은 베어링의 평균지름(mm)이다.

Table 1 Gear data

Data	Input gear	Output gear
모듈	2.0	
압력각	20°	
이높이	4.46 mm	
잇수	30	26
바깥 지름	65.70 mm	57.90 mm
피치원 지름	60 mm	52 mm
이뿌리원 지름	56.48 mm	48.40 mm
기초원 지름	56.38 mm	48.86 mm
치폭	16 mm	13 mm
전위계수	+0.57	+0.55

2.2 해석 결과 및 토의

해석 기어는 Table 1의 제원을 가진 스퍼 기어를 사용하였고, 기어가 오일에 잠긴 깊이 $d=15$ mm일 때 교란 손실을 계산한다. 사용된 오일은 SAE 80W-90이고, 밀도는 892.3 kg/m^3 이며, 18.5°C 에서의 동점성 계수는 $0.0005091 \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

단열 깊은 홈 볼 베어링 SKF 6302 ($C_0=5400\text{N}$, $d_m=28.5\text{mm}$)를 사용하고, Eq. (7)에서 $z=0.005$,

$y=0.55$ 을 적용한다. 베어링 하중은 기어 입력 토크를 기초원 반경으로 나누어 수직하중을 계산하고 기어는 축의 중앙에 위치한다고 하여, 한 개의 베어링에 작용하는 마찰 손실을 계산한다.

이 데이터로 구동 스퍼기어가 입력토크 2.5 N·m에서 200 rpm에서 500 rpm로 변동할 때 기어 이의 마찰 손실, 구름 베어링 마찰손실에 의한 동력 손실을 계산한다. 그 결과를 각각의 동력 손실과 전체 동력손실을 Table 2에 표시하였고, 동력손실은 회전속도가 증가할수록 커지고 이중 베어링 마찰손실이 가장 크다. 이 해석에서 기어 이의 마찰계수를 0.01로 가정하였으므로 마찰계수가 커지면 이 손실도 커지고 실제 변속기에는 여러 개의 이가 맞물리므로 이 마찰 동력 손실과 교란손실은 증가할 것으로 예상된다.

Table 2 Power loss

rpm	교란손실 (W)	이마찰 손실(W)	베어링 손실(W)	손실 합계(W)
200	0.118	0.083	0.327	0.528
300	0.266	0.125	0.636	1.027
400	0.473	0.166	1.026	1.665
500	0.740	0.208	1.484	2.432

3. 결 론

이 연구에서는 스퍼 기어를 대상으로 오일에 의한 교란 손실, 기어 이의 마찰 손실, 구름 베어링 마찰 손실에 의한 동력 손실을 해석하였다. 그 결과 베어링 마찰손실이 가장 크고, 부하와 회전속도가 증가할수록 전체 동력손실이 증가한다는 결론을 얻었다. 차후 실험결과와 비교하여 이 해석결과를 검증할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) Bones, R.J., 1989, Churning losses of discs and gears running partially submerged in oil, Proc. ASME Int.Power Trans. Gearing Conf. pp.355-359.
- (2) Changenet, C., Oviedo-Marlot, X., and Vexel, P., 2006, Power loss predictions in geared transmission using thermal networks-Applications to a six speed manual gearbox, ASME, Journal of Mechanical Design, Vol.128(3), pp. 618-625.
- (3) Haris, T. A., 2001, Rolling Bearing Analysis, 4th ed. Wiley Inter-sciences, New York.