자동차용 베벨기어의 표면강도 향상에 관한 연구

A Study on Improvement of Contact stress of Bevel gear with Vehicle

*양정호[1], #김현욱[2], 이희대[3]
*J. H. Yang[1], #H. O. Kim(hokim@dymos.co.kr)[2] , H. D. Lee[3]
[1,2,3] 다이모스(주) P/T연구소

Key words : Straight bevel gear, Bending stress, Contact stress

1. 서론

기어는 자동차, 항공기, 선박 등 모든 산업분야에서 구동요소와 피동요소 간에 운동이나 동력을 전달하는데 사용되는 기계장치중의 하나이며 성능향상과 대량생산에 의한 원가 절감 등이 절실히 요구되고 있는 부품이다. 특히 스트레이트 베벨기어는 자동차의 차동기어에 사용되는 중요한 부품으로 우수한 기계적 피로특성이 요구된다.[1] 특히 정밀 냉간단조의 발달은 대량생산과 함께 원가절감에 크게 기여한 바가 크며 계속 확대되어 가고 있는 추세이다.

차동기어용 베벨기어는 차량이 주행을 할 때 반복하중을 받게 되고 기어의 손상은 굽힘 피로하중에 의한 치의 파손의 유형과 표면 피로하중에 의한 치의 표면 피팅(Pitting)으로 파괴가 나타난다. 따라서 우수한 특성을 지닌 베벨기어를 개발하기 위해서는 굽힘과 피로특성에 관한 연구가 선행되어야 한다. 지금까지 기어의 피로특성은 주로 평기어에 국한되어 왔고 치의 경사각을 갖는 베벨기어의 피로특성도 굽힘피로 특성에 관한 연구에는 연구가 이루어지었지만 표면피로 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.[2)-4)]

본 연구는 자동차용 차동기어에 사용되는 정밀 냉간단조 공법으로 가공된 직선 베벨기어를 대상으로 실제 자동차에 장착되는 액슬의 캐리어(Carrier Assembly)를 대상으로 하여 차동시험을 행하였다. 피로시험은 실제 적용중인 차량을 기준으로 굽힘피로와 표면피로시험을 행하였으며 시험조건은 차량의 제원에 따른 입력값을 선정하여 수행하였다.

또한 시험결과와 비교, 평가하여 면압강도 평가에 의한 제품의 신뢰성을 검증하였다.

2. 차동내구 시험 및 결과

본 연구에 표면 피로 시험을 수행하기 위해 사용된 샘플은 소형 SUV 차량의 냉간단조용 베벨기어로써 재료는 SCR 420H와 SCM 822H를 사용하였으며 각각의 기계적 특성은 Table 1과 같고, 베벨기어의 주요 제원은 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical properties of bevel gears

Material	Youngs modulus (GPa)	Ultimate strength(Mpa)	Elongation	Hardness (Hв)
SCM 420H	205	834	14	235~321
SCM 822H	205	1030	12	302~415

Table 2 Dimension of straight bevel gear

Sample	Sample #1	Sample #2	Sample #3
Pressure angle	22° 30'	22° 30'	22° 30'
No. of teeth	14	13	13
Module	4.359	4.695	4.298
P.C.D	61.03	61.03	55.87
Face width	12.93	13.25	11.50
Whole depth	8.95	9.62	9.62
Addendum	3.07	3.53	3.53
Dedendum	5.78	6.09	6.09
No. of mating gear teeth	10	9	9
Material	SCM 420H	SCM 822H	SCM 822H

시험에 앞서 차동기어용 베벨기어의 내구 강도를 평가하기 위하여 굽힘강도를 계산하였다. 계산식은 실제 차동용 베벨기어 개발시 사용되는 강도 검토식을 사용하였으며 식 1)과 같다.

$$B_d \times \mu_{tg} \times SLR \times W_d \qquad \text{식 1)}$$

여기서, B_d는 디프 피니언에 작용하는 부하분배로 인한 계수값이며, μ_{tg}는 마찰계수, SLR은 타이어 정하중 반경(mm)이며, W_d는 액슬의 무게(Kg)이다.

각 샘플에 대한 차량제원에 대한 피니언 토크와 시험에 사용된 시험 입력 토크 그리고 굽힘응력 계산식에서 제시하는 허용응력 144,000 Psi에 대한 피니언 토크는 Table 3과 같다.

Table 3 Test spec of Vehicle Dimension of straight bevel gear

Sample	Sample #1	Sample #2	Sample #3
Engine torque(N.m)	260	412	372
T/M 1st/2nd ratio	3.789/2.056	3.528/1.909	4.2522.654
Final ratio	4.533	4.75	3.041
T/C ratio	0.323	0.323	0.395
Pinion Torque(N.m)	715	900	900
Test torque(N.m)	352	544	533
Torque on Allowable bending stress	870	1026	1087
Safety coefficient of Stress	2.47	1.94	2.10

강도 계산식에 의한 굽힘강도 계산결과 강도안전율은 1.94이상이므로 굽힘강도에 대하여 충분히 안전하다고 할 수 있다.

차동내구 시험은 액슬 내구시험기를 사용하였으며, 샘플 장착 모습은 Photo. 1)과 같다. 시험 입력토크는 차량 제원에 준하여 계산되어 지며 엔진 최대 토크, 변속기의 기어비, 트랜스퍼 케이스 기어비에 의하여 계산되고 내구시험시 좌. 우측 속도를 달리하여 총 600 cycle 시험완료 후 손상이 없을시 적용가능하다고 판단한다.

각 샘플의 시험입력 토크에 의한 내구시험 결과 굽힘강도에 대한 영향은 발견되지 않았으며 면압강도 부족에 의한 기어와 피니언의 표면에 피팅이 발생되었다. Photo. 2는 Sample #2의 시험품에 대하여 내구시험 완료후 분해하여 확인한 결과 실제 기어와 피니언 표면에 피팅 및 압흔의 손상이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

내구 시험결과을 통하여 굽힘강도 외에 면압강도에 의한 평가로 표면 피로특성에 대한 검토가 이루어 져야 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

Photo. 1 Photograph of Endurance test system

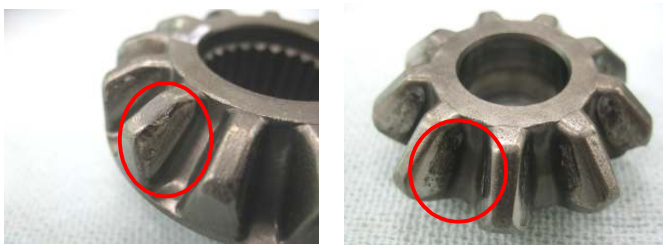

Photo. 2 Photograph of Bevel gear set after Endurance test

3. 면압 강도 평가

내구시험 결과에 따른 피팅의 원인을 확인하기 위하여 면압강도 계산을 행하였다.

면압강도는 치면에 손상을 받지 않는 하중을 평가하기 위하여 AGMA 규격[5),6)]과 GLEASON 규격[7)]을 적용하였으며 면압강도 평가식은 Hertz의 면압강도식에 기초를 두고 있으며 피팅 예방을 위한 AGMA 규격에 의한 면압강도 계산식은 식 2)과 같이 계산되며, Gleason규격에 의한 면압강도 계산식은 식 3)와 같다.

$$s_c = C_p\sqrt{\frac{2T_P}{Fd^2I}K_oK_vK_{in}C_sC_{xc}} \quad (lb/in^2) \qquad 2)$$

$$s_c = C_p\sqrt{\frac{2T_PC_o}{C_v}\frac{1}{Fd^2}\frac{C_sC_mC_f}{I}}\sqrt[3]{\frac{T_{PC}}{T_P}} \quad (lb/in^2) \qquad 3)$$

여기서 Cp는 기어 재질의 탄성계수와 포아손비를 고려한 탄성 정계수, Tp는 최적의 패턴을 얻기위한 피니언 토크의 최소치인 설계 피닌언토크, F는 치폭, d는 피니언의 피치경, I는 면압강도의 형상계수를 나타내며, Ko/Co는 과부하 계수, Kv/Cv는 동하중계수, Km/Cm은 하중분포 계수, Cs는 치수 효과계수, Cxc는 크라우닝 계수를 나타내고, Cf는 치면다듬질, 잔류응력, 소성효과등에 좌우되는 치면상태 계수이며 Tpc는 Tp로부터 계산되는 피니언 토크를 나타낸다.

베벨기어가 피팅에 견딜 수 있는 면압강도(Permission contact stress; Swc)는 AGMA규격과 Gleason 규격에 의해 식 3)으로 계산된다. Sac는 시험기어에 의해 평가된 재질의 허용 면압강도(Allowable contact stress)를 나타내고, C_L, C_H, C_T, C_R는 각각 면압에 대한 수명계수, 경도비 계수, 온도계수, 신뢰도계수를 나타내며 이들은 각 규격에 따라 평가방법이 상이하다. 따라서 식 2)와 식 3)의 면압강도가 식 4)의 사용 면압강도보다 같거나 작으면 면압강도면에서 안전한 것으로 평가한다.

$$S_{wc} = \frac{S_{ac}C_LC_H}{C_TC_R} \quad (lb/in^2) \qquad 4)$$

Gleason과 AGMA 면압강도 계산식에 의해 계산된 결과는 Table 4와 같다. 여기서 C_L은 6,000,000 cycle에 해당하는 계수값인 1.5, C_H는 1, C_T는 시험시 캐리어 내부에 발생하는 온도 90℃에 해당하는 계수 값 1.17, C_R은 90% 신뢰수준의 계수값인 1을 적용하였다.

계산결과 AGMA 계산식에 의한 계산결과가 크게 평가됨을 알 수 있다. 또한 접촉응력에 대한 허용응력값의 크기가 AGMA규격쪽이 더 엄하게 강도 평가를 하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Calculation of Contact stress

Sample	Sample #1	Sample #2	Sample #3	Allowable Stress
Test torque(N.m)	352	544	533	
Gleason contact stress(Psi)	402,751	476,314	578,752	
AGMA Contact stress(Psi)	673,931	809,578	983,689	
Swc(Psi)	Gleason: 357,500, AGMA: 321,750			
Safety factor on Gleason(Psi)	0.89	0.75	0.62	250,000
Safety factor on AGMA (Psi)	0.48	0.40	0.33	225,000

계산결과 면압강도 안전율이 Glesson 방식을 적용할 경우 안전율 0.62 ~ 0.89로 피팅을 예상할 수 있었다. 따라서 치형수정 및 표면처리 추가 또는 재질변경에 의한 면압강도 향상이 필요하며 표면처리 및 재질 변경을 통한 면압 강도 검토가 필요하다. 피팅이 발생한 Sample #2의 제품은 실제 표면처리 추가로 내구시험을 만족할 수 있었다.

4. 결론

1. 실제 소형 SUV차량에 적용중인 차동 기어의 굽힘강도와 면압강도를 계산하였다.
2. 면압강도 계산결과 AGMA 규격쪽이 Gleason 규격보다 더 엄하게 평가함을 알 수 있었다.
3. 차량제원에 의한 내구시험결과 굽힘강도에 의한 손상은 발생하지 않았으며, 면압강도에 의한 치면 피팅이 발생하였다. 따라서 굽힘강도에 의한 검토보다 면압강도 평가에 의한 고찰이 선행되어야 한다.
4. 면압강도 부족에 의한 표면손상 Sample은 표면처리를 통해 면압강도를 높일 수 있었으며, 재질변경과 표면처리를 반영한 면압강도 검토가 필요하다.

참고문헌

1. J. H. Kim, J.W. Sa, D. H. Kim and Sang Y. Lee, "An Evaluation of Bending Fatigue Strength for Cold Forged Bevel Gear", Journal of the KSPE, Vol. 17, No. 1, pp. 61-67, 2000
2. S.K. Lyu, K. Inoue, M. Kato. M. Onisi and K. Shimoda, "Effects of surface Treatment on the Bending Fatigue Strength of Carburized Spur Gear", JSME International Journal, Series C, Vol. 39, No. 1, pp. 108-114, 1996.
3. S.G. Ryu, and K. M. Kim, "A Study in the Bending Fatigue Strength of Sintering Spur Gear", The Korea Institute of Industrial Safety, Vol. 9, No. 3, pp. 28-33, 1994.
4. S.Y. Martowibowo, "Bending Fatigue Life Estimation of Carburized Steel Gear", The Ninth International Pacific Conference of Automotive Engineering, pp. 549-553, 1997
5. ANSI/AGMA 2003-B97, Rating the Pitting and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel, and Spiral Bevel Gear Teeth, 1997
6. ANSI/AGMA 2005-D03, Design Manual For Bevel Gears, 2003
7. Gleason Works, SD4033, Surface Durability Pitting Formulas for Bevel Gear Teeth, 1981