Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 4, pp.63-68 (2008)

Copyright Ⓒ 2008 KSAE
1225-6382/2008/094-09

쇼트피닝에 의한 자동차용 베벨기어의 피로설계

이 동 선[1)] · 정 성 균[*2)]

서울산업대학교 산업대학원[1)] · 서울산업대학교 기계공학과[2)]

Fatigue Design of Bevel Gear for Automobile by Shot Peening

Dongsun Lee[1)] • Seongkyun Cheong[*2)]

[1)]The Graduate School, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
[2)]Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received 17 May 2007 / Accepted 1 January 2008)

Abstract : The fatigue characteristics of bevel gear used for differential gear of automobile was investigated in this paper. From the A-N(Almen intensity-Number of fracture)curve of bevel gear it was shown that there was a specific time that have a maximum fatigue life. Optimal peening condition was 65m/s of project velocity and 8min of project time. Fatigue life was also investigated from the S-N curve between optimal peened specimen and unpeened specimen. Another very significant point is that the crack initiation of bevel gear by shot peening was generated in the subsurface from fractography. This paper shows that shot peening process tremendously improve fatigue characteristics of bevel gear.

Key words : Shot peening(쇼트피닝), Optimal peening condition(최적조건), Fatigue characteristic(피로특성), Bevel gear(베벨기어), Almen intensity(알멘강도)

1. 서 론

인류가 사용할 수 있는 에너지는 한정되어 있으며 고유가로 인한 대체 에너지의 개발 및 절감에 관한 연구가 시급한 실정이다. 이에 따라 선진국에서는 이미 오래 전부터 연료전지, 전기 자동차, 하이브리드 자동차등 이에 관한 연구가 활발히 진행 되어 왔으며 머지않아 상용화가 될 전망이다. 국내에서도 일부 대기업을 중심으로 이러한 연구가 진행되고 있으나 여타 선진국에 비해 많이 미흡한 실정이며 이러한 연구가 이루어지기 위해서는 우선 부품의 고강도화로 인한 차체의 경량화가 반드시 선행되어야 할 것 이다. 경량화가 요구되는 부품 중 기어는 기계 및 자동차 부품의 핵심이 되는 것으로서 동력 전달장치로서 중요한 역할을 하며 특히 베벨기어는 자동차 차동기어 등에 사용되는 부품으로 우수한 기계적 특성 및 높은 피로 강도가 요구 된다.[1)]

베벨 기어는 부품간의 상대적인 운동에 의해 작동된다. 이로 인해 상대운동에 의한 표면 피로, 과열에 의한 열피로, 진동에 의한 피로 및 무수히 많은 피로 하중을 받게 된다. 기어의 고강도화를 위한 방법으로는 일반적으로 침탄법, 질화법, 고주파 열처리[2)] 등의 표면경화법이 주로 쓰이고 있으나 이에 관한 연구는 이미 많은 연구에 의해 입증되어있는 상태이며[3)] 근래에는 피로강도를 향상시킬 목적으로 쇼트피닝의 가공조건에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

쇼트피닝이란 재료 표면에 쇼트볼이란 작은 강구로 소성 변형을 주어 표면에 압축 잔류응력을 부여

*Corresponding author, E-mail: skjung@snut.ac.kr

하는 기술로서 이 방법은 기어강 뿐만 아니라 기초 기계, 자동차, 선박, 항공기용 스프링 등 산업 전반에 걸쳐 제품의 내구성 및 피로강도 향상을 위해 많이 쓰이고 있는 방법이다. 하지만 단순히 피닝 강도만을 너무 높일 경우 재료의 수명이 오히려 감소 할 수 있으며 국내에서 이러한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 아직 국내에서는 활발히 연구가 진행되고 있지 않은 베벨기어에 쇼트 피닝이라는 표면처리 기술을 적용한 후 최적 피닝 조건 탐색 및 피로 특성에 관한 연구를 하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 시험편

논문에 사용된 시험편은 현재 자동차 내부에 조립되어 실제 사용 중에 있는 차동기어(differential gear)와의 동일 소재이며 화학적 성분은 Table 1과 같다. 표면 경화를 위한 시험편의 열처리 조건은 Fig. 1과 같으며 인장 실험은 시편을 부하방향이 압연방향에 평행하도록 채취하여 ASTM E-8 규격에 의거 최소직경 12mm로 실험하였으며 Table 2는 시험편의 기계적 성질을 나타내고 있다.

피로시험을 하기위한 기어 시험편은 두께를 20mm로 하였으며 이와 이사이의 각을 22˚ 30' 로 하여 굽힘 실험 시 기어가 받게 되는 하중의 각도를 66˚ 5' 으로 하였다. 시험편의 열처리는 Fig. 1과 같은 조건으로 900°C에서 270분간 침탄 및 확산 처리를 한 후 다시 90분간 담금질한 뒤 냉각하여 오스테나이트 조직을 지나 정상적인 마르텐사이트 조직을 형성하였고 침탄 깊이는 1mm로 하였다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.18	0.08	0.81	0.01	0.009	1.33	0.61	0.17

Table 2 Mechanical properties of specimen

	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)	σ_f (MPa)	ε (%)
Heat treated (Carburizing)	733.63	1133.8	1052.5	1.12

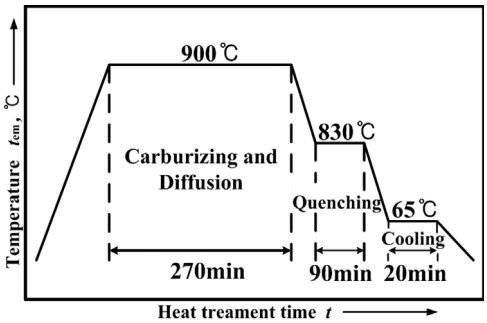


Fig. 1 Condition of heat-treatment

2.2 실험 방법 및 조건

2.2.1 치 강도 테스트

본 연구에서는 피로 실험 시 적용하게 될 하중 조건을 결정하기 위해 기어의 치 강도 테스트를 실행하였다. Photo. 1은 테스터기의 형상을 나타내고 있으며 보는 바와 같이 피로 실험 시 받게 될 동일 하중 부과 부위에, 기어의 정적 굽힘 강도 테스트를 하였다. Fig. 2는 강도 테스트의 결과 값이며, 얻어진 최대 하중 값을 이용하여 실험 시 부여 할 하중 레벨을 결정 하였다. 여기서 La는 기어의 한쪽 치에 부과된 하중이며, S_{trok}는 크로스헤드의 변형 량이다.

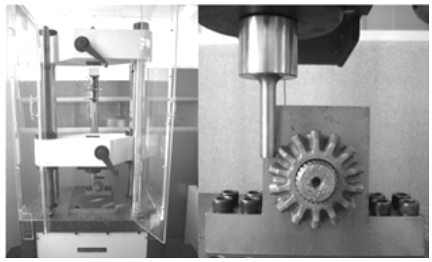


Photo. 1 Test machine of gear tooth intensity

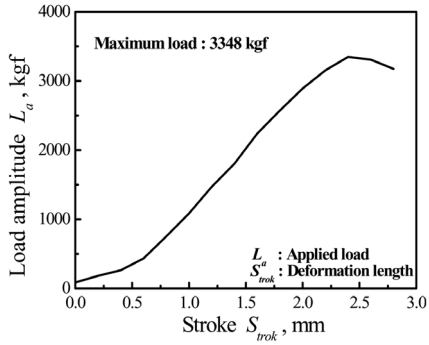


Fig. 2 The test result of tooth intensity

2.2.2 쇼트피닝 가공

최적의 피로 강도 및 수명을 갖는 피닝 조건을 탐색하기 위하여 알멘 강도(Almen intensity)에 따른 피닝가공을 하였다. 본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 하여 투사 속도를 1,400rpm(65m/s)으로 고정하였으며[4] 시간의 변화에 따른 아크하이트(Arc height)를 측정하여 쇼트피닝의 강도를 변화하였다. 쇼트피닝기는 쇼트볼의 투사방식이 임펠러식인 쇼트피닝머신(MULTI TABLE TYPE, PTM400)이며 쇼트볼은 0.8mm주강 쇼트볼을 사용하였다. Table 3은 쇼트피닝의 조건을 나타내고 있다.

Table 3 Shot peening condition

Shot ball dia.	0.8 mm
Shot velocity	65m/s (1,400rpm)
Time	0~14min
Coverage	≥100% (1min)
Arc height	0 ~ 0.586mmA

2.2.3 피로 실험

피로 특성을 파악하기 위한 기어의 굽힘 피로실험은 유압 서보식 실험기인 Instron-8516을 이용 하였으며 하중 부가 장치는 좌우 치차의 치부에 동일한 하중이 부과 될 수 있도록 더블투스 치구를 사용하였다. 또한 본 연구에서는 치 접촉 테스터기(SEIMITZU KIKAI, GTR25)를 사용하여 실제 기어의 이와 이가 맞닿는 부분에 하중을 부과 하기위한 예비 실험을 하였으며 시험기의 특성에 맞는 기어 고정용 지그를 새롭게 고안하여 치 면이 고르게 접촉 되어 균일한 하중을 줄 수 있도록 하였다. Photo. 2는 베벨기어와 시험 지그를 이용하여 굽힘 피로실험을 수행하는 시험 장비의 모습을 보여주고 있다.

본 실험에 사용된 시험편은 현재 실제 자동차에 장착되어 사용 중에 있는 베벨기어이며, 베벨기어 한 치차의 운행 중 실제 받는 하중은 약 1ton이다.[5] 하지만 실제 하중을 적용하여 실험을 할 경우 피로한도 이하가 되어 실험을 할 수 없게 되므로, Fig. 2의 굽힘 강도 테스트 결과를 이용하여 적용 하중을 정하였다. 여기서의 적용하중은 Strain-Life곡선에 더 적합한 low cycle fatigue[6]영역을 피하고, 쇼트피닝에 의한 피로향상 효과를 관찰하기 위하여 피로

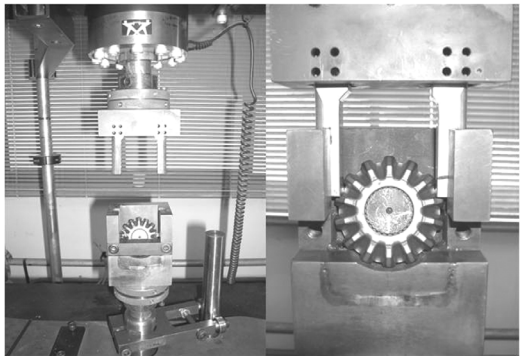


Photo. 2 Photograph of fatigue test system

수명이 10^5전 후가 될 수 있도록 하중을 조절하였으며, 실험을 통해 최대 파단하중(3,348kgf)의 약 80%인 2,750kgf으로 적용 하중을 결정하여 좌우 동시에 5,500kgf의 하중을 가하였다. 하중 비는 R=0.1로 하였으며 파단 수명은 좌우 치차 중 하나의 치에 1mm 이상의 크랙이 진전 되었을 때를 파단으로 설정하여 모든 실험에 동일하게 적용하였다.

2.2.4 파단면 관찰

피로 실험 후 파단면의 조직 관찰을 위해 전자 주사 현미경(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여, 시험편의 파단면 초기 크랙 발생을 중점으로 각각 피로 파괴의 진행 방향 및 특성을 평가하였다.

2.2.5 조도(Roughness)측정

쇼트피닝 후 표면의 생성되어지는 덴트 자국으로 인한 변화를 관찰 하기위해 피닝 가공 전과 가공 후의 표면조도를 측정 하였다. 표면 조도는 Mitutoyo, SJ-301을 이용하여 측정하였으며 굴곡의 산술 평균값인 중심선 평균 거칠기(R_a)와, 굴곡의 최대값인 최대 거칠기(R_y), 10점 평균 거칠기(R_z)를 각각 측정하였다. 측정구간은 0.8mm 탐촉자의 속도는 0.4mm/s로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 최적 피닝강도 탐색

쇼트피닝 조건에 따른 피로 수명의 분포를 알아보기 위해 알멘 강도에 따른 피로실험을 하였다. Fig. 3은 선행연구[4,7]를 바탕으로 탐색되어진 피로수명 분포를 나타내고 있다. 피닝 적용 시간이 길어질

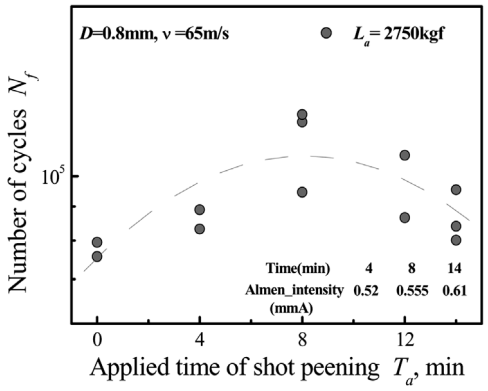


Fig. 3 Optimal peening condition of bevel gear

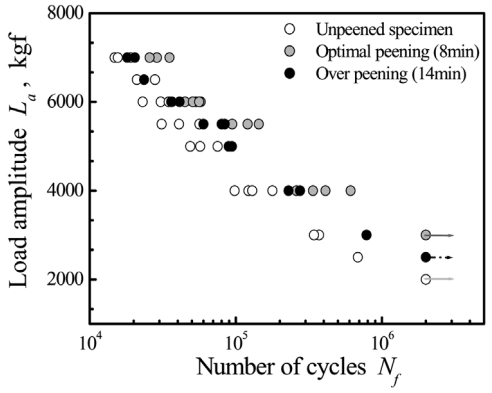


Fig. 4 S-N Curve of bevel gear

수록 수명이 점차 증가하다가 8분 이후로 피로 수명의 감소가 나타나고 있다. 결과에서, 최적의 피로수명을 갖는 쇼트피닝 강도는 투사속도 65m/s의 8분에서 탐색되었다. 이는 오버피닝 가공 시 생성되어진 표면의 마이크로 크랙으로 인한 표면의 응력 집중 및 잔류응력 감소로 사료 된다. 실제로 잔류응력 측정을 위한 동일 재료의 시험편에서, 최적피닝 조건의 표면 압축잔류응력은 -390MPa, 오버피닝 조건의 표면 압축잔류응력은 -350MPa로 측정이 되었다. 이와 동시에 오버피닝 에서의 미세크랙(Micro-crack)또한 관찰 할 수 있었으며 이에 관한 것은 선행연구에 의해 잘 나타나 있다.[8)]

3.2 S-N Curve

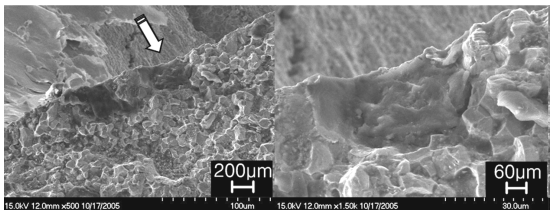
쇼트피닝 가공 시 그 효과는 고 응력의 저 사이클(low cycle)보다 저 응력의 고 사이클(high cycle)에서 더 효과가 있다고 일반적으로 알려져 있다. 본 논문에서는 탐색되어진 피닝조건을 이용하여 피닝 가공되지 않은 시험편과 최적 피닝조건, 오버 피닝조건의 수명 변화를 관찰하기 위해 Fig. 4와 같이 응력 레벨에 따른 피로실험을 하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 저 응력 고 사이클로 갈수록 피닝의 효과는 더욱 확연히 드러나며 오버피닝에 대한 최적 피닝조건의 효과 또한 관찰할 수가 있다. 적용응력 5,500kgf (양단응력)를 기준으로 하였을 때 최대 수명을 갖는 피닝강도로 시험편을 가공한 경우, 평균피로수명은 119,674cycles, 피닝 가공하지 않은 경우는 40,470 cycles로서 195%의 피로향상이 있었지만 피닝 가공 시간을 14분으로 한 오버피닝(over peening)의 경우 평균수명이 74,743cycles로서 84.68%의 수명증가에 그쳐 최적과 오버피닝의 차이가 평균 110%의 차이가 남을 알 수 있다. 한편 피로한도에 있어서도 피닝 가공하지 않은 시험편 2,000kgf, 최적피닝의 경우 3,000kgf, 오버피닝의 경우 2,500kgf로서 최적조건이 오버피닝 조건에 비해 20%향상된 것을 볼 수 있다. 이것은 최적피닝 강도의 중요성을 단적으로 보여주며 최적 피닝 강도로 가공하였을 시 얻게 되는 경제적, 시간적 이점을 보여주는 좋은 예가 된다.

3.3 파단면 관찰

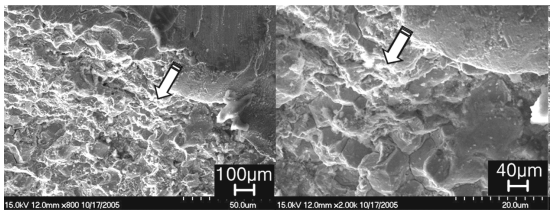
Photo. 3(a), (b)는 피로실험 후 시험편의 파단면을 관찰한 Fractography이다. 파단 된 시험편 모두 피로줄무늬를 보였으나 크랙의 생성 위치와 진전 형태에서는 상이한 차이를 보였다. 피닝가공을 하지 않은 시험편의 경우 표면으로부터의 크랙팁이 발생하여 균열이 전파해 나아가지만 피닝가공한 시험편의 경우 표면 직하(subsurface)영역으로부터 크랙이 발생하여 전파해 나아가는 것을 볼 수 있다. 이것은 피닝 시 생성되는 압축잔류응력으로 인하여 표면에서의 결함 생성이 억제 되었으며 또한 피닝 공정으로 인한 표면 경화가 내부 크랙의 원인이 되었을 것으로 사료된다.

3.4 조도(Roughness) 평가

피닝 가공이 재료 표면에 미치는 영향을 알아보기 위해 조도 평가를 하였다. Fig. 5는 피닝 가공된



(a) Unpeened specimen



(b) Peened specimen

Photo. 3 Fractography of bevel gear specimen

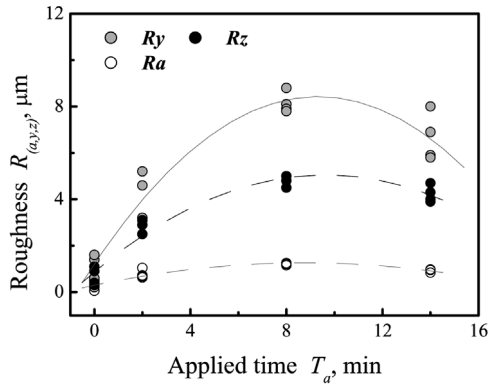


Fig. 5 Roughness of test specimen

기어 시험편의 조도 분포를 나타내고 있다. 열처리한 후 측정한 시험편 표면조도의 경우, 중심선 평균 거칠기(R_a)는 0.2㎛, 최대 거칠기(R_y)는 1.4㎛, 10점 평균 거칠기(R_z)는 1.1㎛로 측정되었다. 최적조건으로 가공한 시험편의 경우, 중심선 평균 거칠기(R_a)는 1.25㎛, 최대 거칠기는(R_y) 7.8㎛, 10점 평균 거칠기(R_z)는 4.5㎛로 더 높게 측정되었으나 오버피닝의 경우중심선 평균 거칠기(R_a)는 0.84㎛, 최대 거칠기(R_y)는 5.8㎛, 10점 평균 거칠기(R_z)는 4㎛로 최적 피닝가공 보다 더 낮게 측정 되었다.

일반적으로 피닝가공을 하게 되면 조도가 저하된다. 그럼에도 불구하고 피로 수명이 향상되어 지는 것은 쇼트피닝에 의한 재료 표면의 압축잔류응력 생성과 표면 경화가 저하된 조도의 영향 보다 더 크기 때문이다. 하지만 기어 강의 경우 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 시간이 지남에 따라 최적강도인 8분이후로는 조도가 점차 향상 되어 지는 것을 보이며 이는 피닝 초기 가공 시 형성된 덴트 자국이 시간이 지날 수 록 점차 평탄화 되어 조도의 향상을 가져온 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 기존의 시험편적인 연구에서 벗어나 실제 현장에서 사용하는 단품을 이용하여, 쇼트피닝이 재료의 피로강도 및 수명에 미치는 효과와 특성을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최적의 피로수명을 갖는 피닝 강도는 투사속도 65m/s의 8분에서 탐색되었으며 최대 수명을 갖는 피닝 강도로 시험편을 가공한 경우 평균 피로수명은 119,674cycles, 가공하지 않은 경우는 40,470cycles로서 195%의 피로향상이 있었다.
2) S-N Curve로부터 최적피닝 조건으로 가공한 시험편의 경우 피로 한도가 3,000kgf, 오버피닝의 경우 2,500kgf, 피닝가공 하지 않은 시험편의 경우 2,000kgf 으로서 최적 피닝의 경우 오버 피닝에 비해 피로 한도가 20%더 향상 되었다.
3) Fractography에서 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 경우 표면으로부터 크랙팁이 발생되어 균열이 진전해 나아갔으나 쇼트피닝 가공한 시험편의 경우 표면직하(subsurface)에서 크랙이 발생되었다.
4) 열처리 한 후 시험편 표면조도의 경우, 중심선 평균 거칠기(R_a)는 0.2㎛, 최대 거칠기(R_y)는 1.4㎛, 10점 평균 거칠기(R_z)는 1.1㎛로 측정되었고 최적조건으로 가공한 시험편의 경우, 중심선 평균 거칠기(R_a)는 1.25㎛, 최대 거칠기(R_y) 7.8㎛, 10점 평균 거칠기(R_z)는 4.5㎛로 더 높게 측정되었으나 수명이 향상된 이유는 쇼트피닝 가공 시 생성되는 압축잔류응력 및 경도의 증가로 사료된다.
5) 피닝 가공시간이 지남에 따라 조도가 향상되었으며 이는 피닝 초기 가공 시 형성된 덴트 자국이 시간이 지날 수 록 점차 평탄화 되어 조도의 향상을 가져온 것으로 사료 된다.

References

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) J. K. Xenophon, “Shot Peening Viable Method to Extending Component Life,” SAE 891932, pp.1-8, 1989.
3) H. Wohlfahrt, “The Influence of Peening Condition on the Resulting Distribution of Residual Stress,” ICSP-2, pp.316-331, 1984.
4) D.-S. Lee, K.-J. Lee, T.-H. Kim and S.-K. Cheong, “A Study on the Investigation of Optimal Peening Intensity for Shot Peened Spur Gear,” Transactions of the KSMTE, pp.185-190, 2005.
5) HYUNDAI Corporation, Training Guide for Maintenance, pp.1-10, 2005.
6) J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall Englewood Cliffs, pp. 1-41, 1990.
7) J.-H. Nam, T.-H. Kim, K.-J. Lee, D.-S. Lee and S.-K. Cheong, “A Study on the Fatigue Characteristics of Automotive Gear Steel by Investigating the Optimal Peening Intensity,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1117-1122, 2004.
8) D.-S. Lee, T.-H. Kim, J.-H. Lee, T.-K. Lee and S.-K. Cheong, “A Study on the Improvement of Durability of Gear Steel by Shot Peening,” International Conference of the ANDE, p.662, 2005.