

표면아래응력을 고려한 기어이의 크라우닝 최적화에 관한 연구

이상돈[†] · 김종성 · 조용주[‡]

부산대학교 기계공학부

Optimization of the Gear Tooth Crowning Amount Considering Contact Subsurface Stress

Sangdon Lee[†], Jongsung Kim and Yongjoo Cho[‡]

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received December 17, 2008; Revised January 5, 2009; Accepted January 20, 2009)

Abstract – Gear is an essential component of an automotive. Crowning is used for tooth modification of a gear. The basic concept of gear tooth crowning is to reduce the stress concentration in edge of contact area and appropriate profile modifications can help gears to resist scoring, pitting, and tooth breakage. In this study, a method to determinate spur gear tooth crowning amount to make smooth surface stress and subsurface stress distribution is proposed. This method is based on the contact analysis.

Key words - gear(기어), contact fatigue(접촉 피로), subsurface stress(표면아래 응력), crowning(크라우닝), pitting(피팅), contact analysis(접촉 해석)

1. 서 론

일반적으로 기어는 속도비가 정확하고 전달효율이 높기 때문에 동력전달용 부속으로 가장 선호되고 또한 자동차의 주요부품에 널리 사용되고 있는 기계요소이다. 그러므로 기어에 대한 고 부하 용량과 저 소음화 및 원활한 작동특성 등에 대한 요구는 날로 높아지고 있고 이에 따라서 기어의 신뢰성 있는 설계기술은 핵심적인 기반 기술로서의 그 위치를 차지하고 있다.

기어의 파손은 크게 강도에 관련된 것과 접촉면에서의 손상으로 나눌 수 있다. 그 동안 기어의 강도와 관련된 분야는 활발한 연구가 이루어져 이론과 적용에 있어서 상당 수준에 도달하게 되었지만 접촉면 파손기구의 측면에서는 상대적으로 미흡하다.

Dudley[1]는 기어 작동시 발생할 수 있는 마멸모드를 분석하였으며 마멸을 줄일 수 있는 방법에 관해서도 연

구하였다. Godfrey[2]에 의해서는 좀 더 다양한 마멸 메커니즘을 밝히기 위한 해석기법이 개발되었다. 이러한 노력들에 의해 기어손상에 있어 일반적인 분류가 체계화 되었는데, 즉 기어 손상은 주로 이끝과 이뿌리 부분에 발생하는 스킵핑, 피치선의 주위에서 발생하는 피팅 그리고 치의 절손과 같은 강도와 관련된 파괴형태로 분류되어지고 있다.[1,3,4]

이러한 접촉에 의한 기어 이 표면 손상의 주 원인은 접촉 표면에 발생하는 과도한 접촉 압력 및 표면아래의 응력이다. 접촉표면영역 가장자리에서 발생하는 접촉응력의 집중은 윤활상태에도 영향을 미칠 수 있고, 과도한 마찰열을 발생시켜 기어이 표면에 손상을 발생시킬 수 있다. 문석만[5]은 스퍼기어의 원활한 동력전달 및 표면응력의 집중을 막기 위한 치형수정기법을 제시하였다.

본 연구에서는 기어이 표면손상의 주 원인인 기어이 접촉 표면의 응력집중을 막기 위한 크라우닝 뿐만 아니라 접촉피로파손의 원인이 되는 접촉표면 에지(edge)

[†]주저자 : lsd1975@pusan.ac.kr

[‡]책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

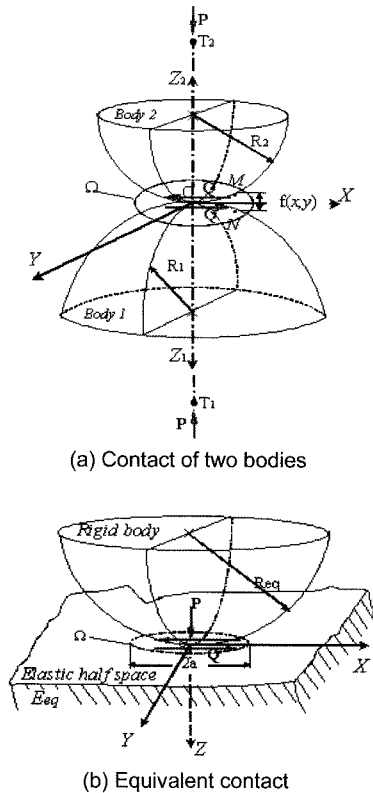


Fig. 1. Contact of two non-conformal bodies.

부분의 표면아래 응력의 집중을 방지할 수 있는 크라우닝 양을 결정하는 기법을 제시하고자 한다.

2. 기어 접촉 해석

2-1. 이론

2-1-1. 접촉표면응력

두 탄성체에서 작용하는 수직과 수평 하중은 Fig. 1 과 같으며, 물체는 등방성이며 균질한 거동을 보인다고 가정한다.

이 때 접촉면의 압력분포는 사각조각표면에 작용하는 균일한 분포하중에 의한 변위의 해를 이용하여 두 탄성체 사이의 접촉문제를 수직적으로 해석한다. Fig. 1 에서와 같이 비접합 탄성체의 접촉영역은 탄성체의 다른 크기에 비해 매우 작으므로 두 탄성체는 반무한체로 생각할 수 있다.

2-1-2. 표면아래응력

입의의 형상을 갖는 접촉면을 균일한 분포하중이 작

Table 1. Gear data

Gear Data		
Item	DRIVER	DRIVEN
Number of teeth	18	28
Pressure angle, degrees	27.0°	
Module	4	
Face width (mm)	31.5	26
Torque (Nm)	815	
Young's modulus (GPa)	210	
Poisson's ratio	0.3	
Contact ratio	1.40	

용하는 사각조각 표면들로 이산화한다. 하중이 작용하는 반무한체 표면을 미소 사각요소로 나누어, 각 미소 요소의 수직, 접선 분포하중을 사각요소 중심에 작용하는 미소 집중 하중으로 등가시킨다. 각각의 사각요소에 작용하는 집중하중으로 인한 탄성체내 응력 성분은 Love[6]와 Cho et al.[7]의 변위해를 통해 계산할 수 있다. 따라서 응력은 전체 표면의 미소 요소로부터의 영향을 중첩함으로써 구할 수 있다.

3. 기어 크라우닝 양 결정

3-1. 해석 대상 기어제원

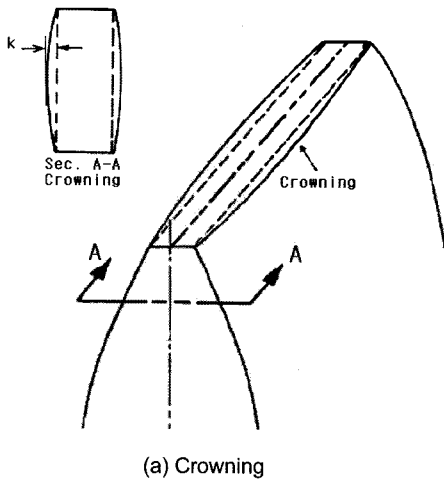
본 연구에서 해석대상으로 사용한 기어는 감속기용 스퍼기어이다. 해석대상 기어의 제원을 Table 1에 나타내었다.

3-2. 표면 접촉 응력을 고려한 크라우닝

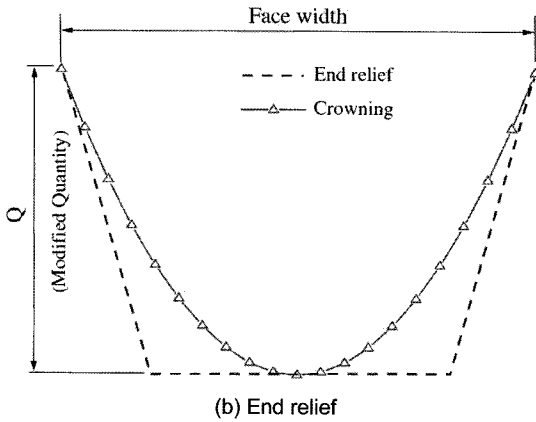
Fig. 2는 일반적인 크라우닝 기법을 나타낸 그림이다. 기어의 모서리를 일정한 각도로 제거하는 모따기(end relief)와 달리 크라우닝은 치면을 불룩하게 가공하여 접촉면의 가장자리에 응력집중이 발생하지 않게 가공하여 주는 것을 말한다. 하지만 과도한 크라우닝은 오히려 중앙부분에 과도한 응력이 발생하게 하는 역효과도 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 치면의 가장자리에 응력집중이 발생하지 않도록 수정된 치면형상에 대해서 압력분포를 계산해서 크라우닝양을 결정하였다.

여기서, 치면 형상을 크라우닝하는 과정은 다음과 같다. 우선, 크라우닝을 하지 않은 치면에 대하여 Hertzian 접촉해석을 수행하여 탄성변형량과 수직 압력

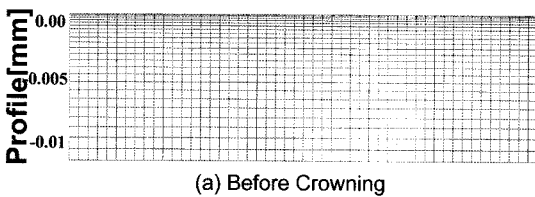


(a) Crowning

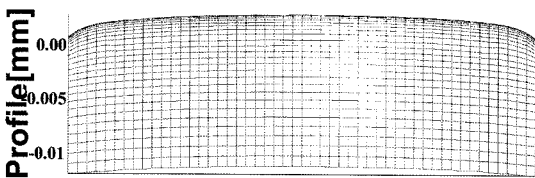


(b) End relief

Fig. 2. Gear tooth crowning.



(a) Before Crowning



(b) After Crowning

Fig. 3. Gear tooth geometry.

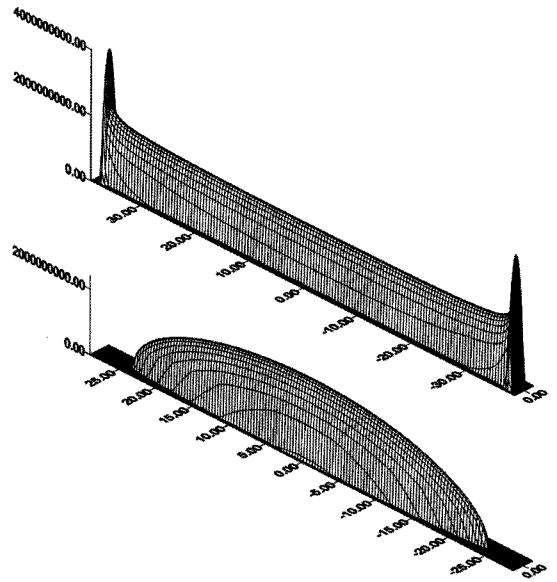


Fig. 4. Surface contact stress(Max=2.23 GPa).

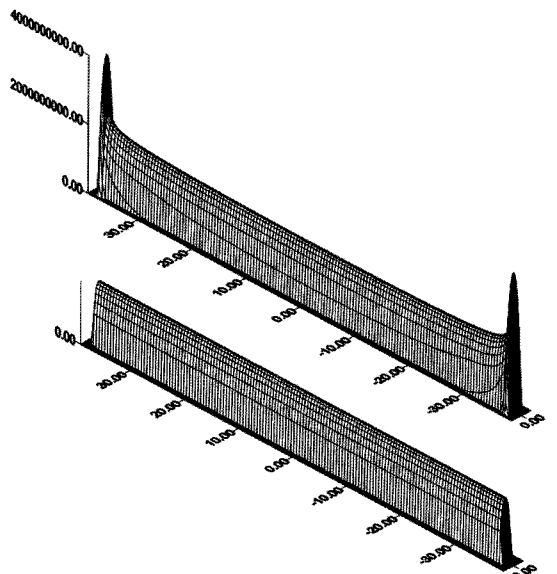


Fig. 5. Surface contact stress(Max=1.83 GPa).

분포를 구하여 치면의 가운데 부분의 압력을 접촉영역에 걸쳐 대체시킨다. 즉, 가장자리의 피크 압력이 없는 변경된 압력분포를 만드는 것이다. 그후 변경된 압력분포로서 다시 Hertzian 접촉해석을 수행하여 탄성변형량을 계산한다. 최종적으로 원래의 치면형상에 기존의 탄성변형량과 변경후의 탄성변형량의 차를 감함으

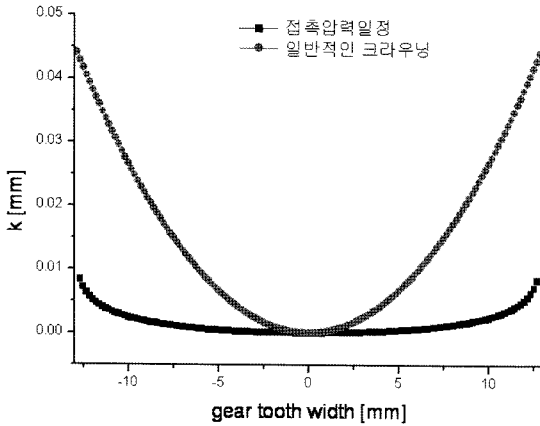


Fig. 6. Crowning amount.

로써 수정된 치면 형상을 얻을 수 있었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 실제 해석용 기어의 표면 접촉응력의 해석결과를 나타내었다. Fig. 4는 일반적인 크라우닝 기법으로 가공하였을 때의 표면 접촉응력을 나타내었다. 크라우닝을 하지 않았을 때에는 접촉영역의 가장자리부분에서 접촉응력이 4 GPa의 응력피크가 발생하나 크라우닝을 하였을 때에는 가장자리에 높은 응력 집중의 발생을 피할 수 있다. 하지만, 전체적으로 균등한 접촉응력이 발생하지 않고, 가운데 부분에서 응력이 높게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 5는 본 연구의 접촉해석을 통한 크라우닝 기법을 사용하였을 때의 표면접촉응력 해석 결과이다. 일반적인 크라우닝 기법을 사용하였을 때보다 최대응력 값 1.83 GPa로써 약 18%의 최대응력 감소를 가져오면서도 전체적으로 균일한 응력분포가 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 일반적인 크라우닝 기법의 가공량과 본 연구에서 제시한 크라우닝 기법의 가공량을 비교한 그림이다. 일반적인 크라우닝 기법의 가공량은 치폭방향 전체에서 호의 형태를 보이지만, 본 연구에서 제시한 기법은 가공량은 적으면서, 양 끝단부분에 완만한 호의 형태를 가진다.

3-3. 표면아래 응력을 고려한 크라우닝

앞 절에서 제시한 크라우닝 기법은 치면 전체적으로 균일한 표면접촉 응력의 발생을 목적으로 한 크라우닝 양을 결정하는 방법이다. 표면에서의 슬라이딩에 의한 마멸의 경우 접촉응력에 따라 마멸상태 또는 마멸량, 윤활상태 등이 변화지만, 접촉피로파손, 즉 피팅, 스폴

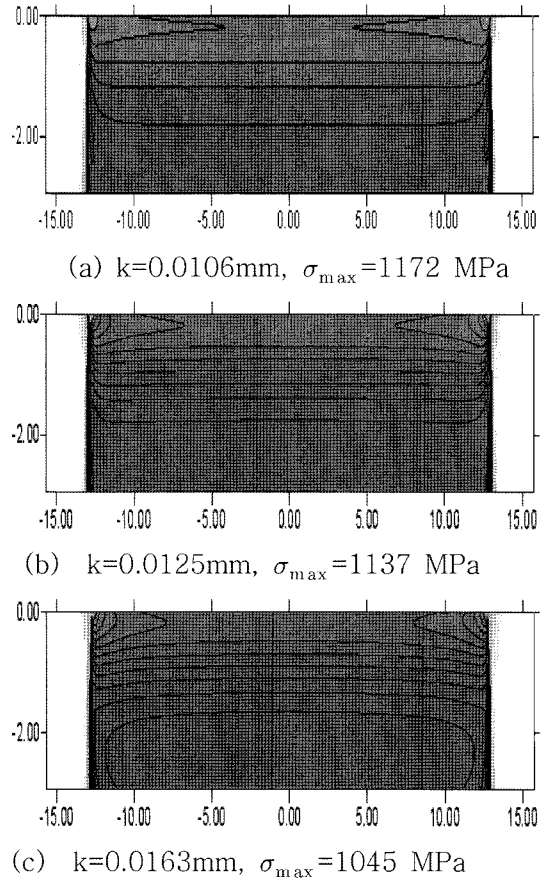


Fig. 7. Subsurface stress distribution (Von Mises Stress).

링등의 손상의 경우에는 표면아래응력상태가 파손의 발생원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 표면접촉응력을 일정하게 하는 크라우닝 기법에서 나아가 표면아래의 응력집중을 피할 수 있게 크라우닝 기법을 제시하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 제시한 기법에서 사용하는 탄성변형량 계수값에 따른 표면아래 응력상태를 나타낸 그림이다. 탄성변형량 계수는 접촉해석을 통해 계산된 응력에 의한 탄성 변형량을 초기표면 형상값에 감하여 줄 때 곱해지는 계수값을 의미한다. 그림에서는 각 경우에 상당하는 크라우닝 양으로 나타내었다.

앞 절에서 제시하였던 표면응력을 일정하게 하는 크라우닝 기법보다 크라우닝 양은 약간 증가하였다.

크라우닝 초기에는 최대응력이 접촉면의 끝단부분에서 발생하였으나 크라우닝 양을 증가시킬수록 최대응력의 발생위치가 가운데 부분으로 이동하며 최대 응력

값은 오히려 감소함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기어의 표면접촉 손상을 발생시킬수 있는 접촉영역 가장자리의 표면응력집중을 방지하기 위한 크라우닝 뿐만 아니라 접촉피로 파손의 원인인 표면아래 응력집중의 발생을 피하기 위한 크라우닝 양을 결정하는 기법을 제시하였다.

이를 위해 기존의 크라우닝 기법을 사용하였을 때와 본 연구에서 제시한 기법을 사용하였을 때의 표면 접촉응력과 표면아래 응력해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일반적인 크라우닝기법의 경우 접촉영역 가장자리에서 발생하는 표면응력의 집중을 없앨 수 있으나, 그 양이 지나친 경우 치면 가운데 부분에서 응력값이 높게 발생할 수 있다.

2) 본 연구에서 제시한 크라우닝 기법을 사용한 경우 접촉영역 가장자리에서 발생하는 표면응력의 집중을 없애면서도 전체적으로 균일한 표면응력이 발생하였다.

3) 접촉표면에서 응력이 균일하게 발생하여도 표면아래응력은 가장자리에서 피크가 발생할 수 있다.

4) 본 연구에서 제시한 크라우닝 기법을 사용하면 표면응력의 집중 및 표면아래의 응력집중을 피할 수 있어, 기어이 접촉면 가장자리에서 발생할 수 있는 미끄럼 마멸 및 접촉 피로파손을 줄일 수 있을것으로 예

상된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국 산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

1. Dudley, D. W., "Gear Wear", ASME Wear Control Handbook, ed. M. B. Peterson and W. O. Winer, pp. 755-830, 1980.
2. Godfrey, D., "Diagnosis Wear Mechanics", ASME Wear Control Handbook, ed. M. B. Peterson and W. O. Winer, pp. 283-311, 1980.
3. Ku. P. M., "Tribology of Gears and Spline", Proc. Tribology Workshop, NSF, pp. 402-427, 1974.
4. AGMA Standard, "Nomenclature of Gear Tooth Failure Modes", American Gear Manufacturer Association, ANSI/AGMA, 110.04., 1980.
5. 문석만, 김태완, 조용주, "고 물림률 Spur Gear의 원활한 하중 전달을 위한 최적 치형 수정에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 424-430, 1999.
6. Love, A. E. H., "Stress Produced in a Semi-infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary", Phil. Trans. Royal Society, A228, pp. 377-420, 1929.
7. Cho, Y. J., Kim, T. W., and Lee, M. J., "The Stress Field in Body Caused by the Tangential Force of a Rectangular on a Semi-infinite Solid", *KSTLE int. J.*, Vol. 2, No. 1, pp. 29-34, 2000.