

# 스퍼 기어의 피팅 수명 예측 및 실험에 관한 연구 Experiments and prediction of pitting life in spur gears

\*김종성<sup>1</sup>, 주진욱<sup>1</sup>, 이상돈<sup>1</sup>, #조용주<sup>2</sup>

\*J. S. Kim<sup>1</sup>, J. W. Joo, S.D.Lee, #Y.J. Cho (yjcho@pusan.ac.kr)

<sup>1</sup> 부산대학교 대학원, <sup>2</sup> 부산대학교 기계공학부

Key words : spur gear, pitting, fatigue

## 1. 연구배경

기어는 동력전달을 위한 가장 중요한 부품이자 시스템의 핵심 요소로 신뢰성이 필수적으로 요구되는 부품이다. 산업이 발전해 감에 따라 기어에 대한 고 부하용량과 저소음화, 고 수명에 대한 요구는 날로 높아지고 있고 이에 따라서 기어의 신뢰성 설계기술은 핵심적인 기반 기술로서의 그 위치를 차지하고 있다.

기어의 파손은 크게 강도에 관련된 것과 접촉면에서의 손상으로 나눌 수 있다. 그 동안 기어의 강도와 관련된 것은 이를 중심으로 활발한 연구가 이루어져 이론과 적용에 있어서 상당수준에 도달하게 되었지만 접촉면 파손기구의 측면에서는 상대적으로 미흡하다. 최근 기어의 접촉면 파손기구의 측면이 부각되고, 이와 관련된 연구가 증가하고 있긴 하지만 여전히 미진한 부분이 많아 부품파손문제 해결에서 많은 어려움을 겪고 있다.

본 연구에서는 이러한 기어의 접촉 피로 파손수명을 예측하기 위해 mesoscopic 피로이론을 바탕으로 한 피로수명 식을 사용하여 기어의 접촉 피로 수명에 대한 정량적인 예측을 하였으며, 실험을 통하여 결과에 대한 신뢰성을 검증하고자 하였다.

## 2. 접촉해석 및 표면아래 해석

일반적인 두 탄성체의 접촉 해석은 상당표면과 강체면의 접촉으로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 영향 함수를 이용하여 3차원 접촉 해석을 이용하였다. Fig.4와 같은 등방성 및 균질한 두 non-conformal 탄성체에 수직 하중이 작용할 때 접촉 면적과 압력분포를 알기위해 사각조각 표면에 작용하는 균일한 분포하중에 의한 변위의 해를 이용하여 두 탄성체사이의 응력을 해석하고자 한다.

강체구의 등가 곡률 반경  $R_{eq}$  및 상당 탄성계수  $E_{eq}$ 는 다음과 같다. [1]

$$R_{eq} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$E_{eq} = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

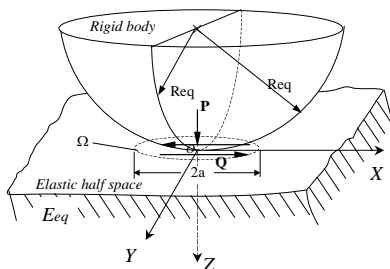


Fig.1 Contact geometry of an equivalent body

Fig.1의 표면 위의 두 점간의 접촉 전 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x,y) = R_{eq} - \sqrt{R_{eq}^2 - (x^2 + y^2)} \quad (3)$$

접촉문제를 풀기 위해서는 다음과 같은 구속조건에 따른 반복 연산이 필요하다.

접촉영역에서는

$$p(x,y) > 0, e(x,y) = 0 \quad (4)$$

접촉영역 밖에서

$$p(x,y) = 0, e(x,y) > 0 \quad (5)$$

여기서  $p(x,y)$ 는 접촉압력이며  $e(x,y)$ 는 변형후의 강체면과 거친 표면간의 거리를 나타내며, 다음과 같이 표현될 수 있다. 접촉 영역 내에서는 Boussinesq의 식으로 나타내면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{2}{\pi E_{eq}} \iint_{\Omega} \frac{p(x',y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy' = \delta - e(x,y) \quad (6)$$

사각조각면(patch)내에서는 균일한 압력을 가지므로 다음과 같이 단순 이산화될 수 있다.

$$\sum_{j=1}^k F_{i,j} P_j = \delta - e_i \quad (7)$$

여기서,  $k$ 는 접촉영역  $\Omega$ 내에서의 사각조각면의 수이고  $F_{i,j}$ 는 요소  $j$ 에서의 수직분포하중에 의한 요소  $i$ 에서의 영향을 나타내는 영향함수(influence function)로서 다음과 같이 나타낼 수 있다. [2]

$$\begin{aligned} F_{i,j} = \frac{2}{\pi E_{eq}} & \left[ (x+a) \ln \left\{ \frac{(y+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x+a)^2}}{(y-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x+a)^2}} \right\} \right. \\ & + (y+a) \ln \left\{ \frac{(x+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x+a)^2}}{(x-a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x-a)^2}} \right\} \\ & + (x-a) \ln \left\{ \frac{(y-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}}{(y+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x-a)^2}} \right\} \\ & \left. + (y-a) \ln \left\{ \frac{(x-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}}{(x+a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x+a)^2}} \right\} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

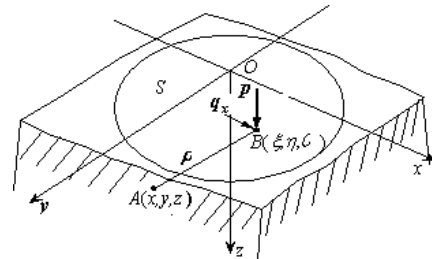


Fig.2 The normal and tangential loading applied to a closed area S of the elastic half space

표면 아래 응력 해석은 Fig. 2와 같이 등방성이고 균질인 반 무한체 표면의 임의의 영역 S위에 수직하중  $p(\xi, \eta)$ 이 작용할 때 반 무한체 내에서 생기는 응력을 다음과 같은 포텐셜함수를 도입하여 각각 표현할 수 있다.

$$H_1 = \int_S \int p(\xi, \eta) (z \ln(\rho + z) - \rho) d\xi d\eta \quad (9)$$

여기서  $\xi, \eta$ 는 하중이 작용하는 영역 S위의 임의의 점의 x, y축 방향으로의 좌표이다. 그리고  $\rho$ 는 반 무한체내의 점 A(x,y,z)와 영역 S위의 점 B( $\xi, \eta, 0$ )와의 거리이다. 식 (10)을 z에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$H = \frac{\partial H_1}{\partial z} = \int_S \int p(\xi, \eta) z \ln(\rho + z) d\xi d\eta \quad (10)$$

### 3. 피로해석

금속의 피로 거동은 여러 가지 영역(scale)으로 분석될 수 있다. 공학에서 사용되는 영역은 재료를 연속체로 볼 수 있는 범위 즉 거시적(macroscopic) 영역을 주로 사용한다. 지금까지 제시된 피로 조건 식은 이 영역에 해당한다. 또한 금속의 피로 거동은 미시적(microscopic) 영역 즉 전위(dislocation) 영역에서 분석될 수 있다. Meso 영역은 미시적 영역과 거시적 영역의 중간 범위의 것으로 금속의 결장 크기의 영역에 해당된다.

본 연구에서는 papadopoulos에 의해 제안된 피로 수명식을 사용하였다. [3]

$$\frac{\max T_a + 3(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,a}}{1 - \frac{3}{t_{-1}}((t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,m})} = \kappa N^{-\lambda} + t_{-1} \quad (11)$$

papadopoulos에 의해 제안된 피로 판정식은 두 개의 재료상수에 의존한다는 것을 알 수 있다. 여기서 재료상수를 구하기 위해 완전교번 비틀림 한도  $t_1$ 와 완전교번 굽힘에서의 피로한도  $f_1$ 를 사용하였다.  $\max T_a, \sigma_{H,m}, \sigma_{H,a}$ 는 각각 최대 전단 응력 및 평균정수압응력, 정수압응력의 진폭을 말한다.  $\kappa, \lambda$ 는 단축 SN커브에서 얻은 재료 상수를 말한다.

### 4. 실험 장치 및 시편

기어의 피팅 수명 예측을 위하여 구름시편을 제작하였으며, 피팅 수명 실험을 위하여 롤링 테스트기를 사용하였다. 피팅 파손의 판단은 육안 관찰 및 진동센서를 이용하였다.

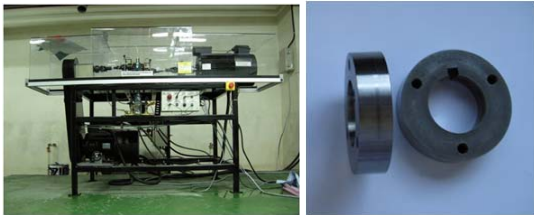


Fig.3 Experiment equipment

### 5. 실험 및 해석 결과

Fig.4는 표면에서 최대 2.3GPa의 응력이 발생하였을 경우 표면 아래의 응력 분포를 나타내고 있다. 본 연구에서는 표면아래 최대 응력이 발생한 지점에 피로 파손이 발생한다고 가정하고 있다.

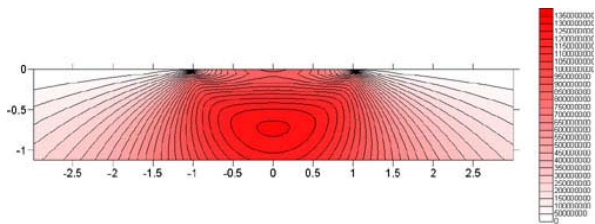


Fig.4 Distribution of subsurface stress

Fig.5은 피팅이 발생한 시편을 SEM으로 측정 한 사진이다.

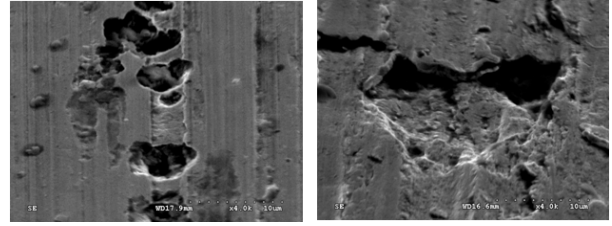


Fig.5 SEM micrographs of specimen showing

Fig.6은 피팅 시험의 결과를 이용하여 SN curve를 구한 결과이다. 각각 10%, 50%의 수명을 나타내었으며, AGMA 규격의 10%수명과 비교한 결과이다.

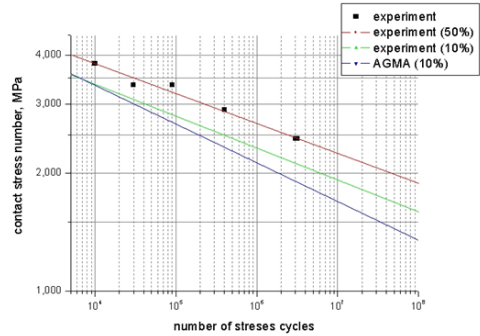


Fig.6 Result of pitting experiment

Fig.7는 피팅 시험의 결과와 해석 결과를 비교한 것이다.

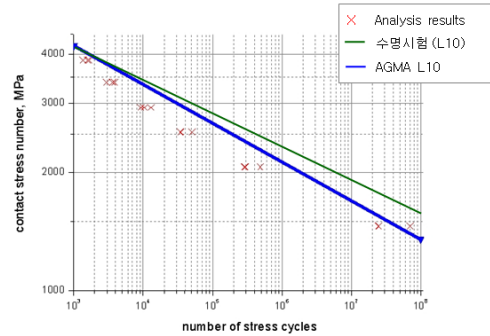


Fig.7 Comparison of experiment and analysis

### 6. 결론

본 연구에서는 피팅 수명 시험법 및 예측 기법을 개발하였으며, 피팅 수명 예측 및 실험을 통하여 피팅 수명의 경향을 분석할 수 있었다.

### 후기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

### 참고문헌

1. Love, A. E. H., 1929, "The Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary," Proc. Roy. Soc. London, Vol. A228, pp.377
2. K.L.Johnson, 1985, "Contact mechanics", Cambridge university press, pp.45-83
3. I.V. Papadopoulos, 1993, "A new criterion of fatigue strength for out-of-phase bending and torsion of hard metals" Fatigue. Vol.16, pp377