

# 피팅 파손면적분석기법을 이용한 기어재의 피팅 수명 실험

## Pitting Life Experiments of Gear Material using a Damaged Area Analysis Method

주진욱<sup>1</sup>, 이병욱<sup>1</sup>, 문석만<sup>1</sup>, 김태완<sup>2</sup>, 조용주<sup>1,✉</sup>  
Jin Wook Joo<sup>1</sup>, Byung Wook Lee<sup>1</sup>, Seok Man Moon<sup>1</sup>, Tae Wan Kim<sup>2</sup> and Yong Joo Cho<sup>1,✉</sup>

1 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

2 부경대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, PuKyong National Univ.)

✉ Corresponding author: yjcho@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2307

Manuscript received: 2010.8.16 / Revised: 2010.9.14 / Accepted: 2010.9.24

*The object of this study is to investigate the definite method for pitting damaged surfaces. Pitting is a sort of fatigue damages and it is made by a repetitive load. For a judgment between damages or not, sensing vibrations of test equipment is simple. However, it is not only difficult to observe a growth of pitting but also impossible to detect the juncture of initial pitting. Therefore, a method for the pitting damaged area measuring technique was effectively implemented by Two Roller Machine. The change of surface damaged area was measured by an optical microscope in regular time and calculated by the use of dark and bright ratio of test specimens' pictures taken by optical microscope. In conclusion, S - N Curves gained by Failure rate - Cycle graph was led and the curves are able to be chosen as occasion demands for a failure area percentage.*

Key Words: Pitting (피팅), Micro Pitting (마이크로피팅), Pitting Experiment (피팅실험), Gear Pitting Life (기어피팅수명), Pitting Area (피팅면적), Gear Failure (기어파손), S-N Curve (수명선도)

### 기호설명

$R_1, R_2$  = Radius of sphere

$R_{eq}$  = Equivalent radius

$E_1, E_2$  = Modulus of elasticity

$E_{eq}$  = Equivalent modulus of elasticity

$f(x,y)$  = Distance between two bodies

$p(x,y)$  = Contact pressure

$e(x,y)$  = Gap between two bodies

$F_{ij}$  = Influence function by normal pressure

$a, b$  = Half width of rectangular patch

$u$  = Displacement

### 1. 서론

기어는 동력전달을 위해 필수적으로 요구되는

부품으로, 시스템의 핵심이며 시스템의 신뢰성과 직결되는 부품이다. 기어에 대한 고부하, 저소음, 장수명에 대한 요구가 날로 높아짐에 따라 기어의 신뢰성 설계기술은 산업의 핵심적인 기반 기술로서의 위치를 차지하고 있다.

기어의 파손은 크게 굽힘강도와 면압강도에 의한 파손으로 나눌 수 있다. 먼저 기어의 굽힘강도에 의한 파손에 대해서는, 전체 하중이 이끝에 작용하는 캔틸레버(cantilever)로 단순화시켜 강도를 평가하며, 기어의 면압강도에 의한 파손에 대해서는 수직하중을 받는 두 개의 실린더로 단순화시켜 강도를 평가한다. 지금까지 굽힘강도와 관련된 연구는 활발히 이루어져 이론과 적용에 있어서 상당 수준에 도달하였지만, 면압강도와 관련된 연구는 마찰, 마멸, 표면 손상 및 접촉피로수명 등과 같은 트라이볼로지 현상을 파악하는데 있어서 가장 중

요한 분야이기 때문에 많은 연구가 필요하다.

일반적으로 면압강도에 의한 기어의 수명선도를 그릴 때, 기어재의 탄성영역 내의 응력범위에 대한 일정파손까지의 수명을 통하여 수명선도를 얻을 수 있다. 하지만 접촉피로의 특성상 수명 데이터의 높은 산포도 때문에 많은 시간과 노력이 요구되며, 이런 노력에도 불구하고 만족스럽지 못한 결과 데이터를 얻기 십상이다. 그리고 정확한 파손기준을 정하는 것이 미흡하여 피팅 수명 예측에 많은 어려움을 겪고 있다. K. Aslantas 는 최대 피팅 크기를 결정하여 특정 피팅이 최대의 피팅 크기보다 크면 파손으로 결정하였고,<sup>1</sup> Klaus Michuetis 는 Weibull distribution 의  $L_{50}$  을 이용하여 파손을 판정하였고,<sup>2</sup> R. S. Zhou 는 crack 의 길이를 측정하여 파손을 판정하였다.<sup>3</sup> 그리고 Kim, J. S. 는 실험장비의 진동을 측정하여 진동의 크기로 파손을 판정하였으며,<sup>4</sup> H. -P. Otto 는 피팅 실험에서 현미경을 이용하여 기어 전체면적과 피팅 면적의 비율이 4%이상이면 파손으로 판정하였다.<sup>5</sup>

2. 실험장치 및 시편

2.1 실험장치

접촉피로 수명실험을 위해 두 개의 롤러가 맞닿아 구동되는 피로수명 실험장비(Two Roller Machine, Phoenix Tribology 社)를 사용하였다. Fig. 1 은 본 연구에 사용된 실험장비로, 최대하중 12kN, 최대회전속도 3000rpm, 0~100%의 Slip ratio 로 순수 구름 및 미끄럼 실험이 가능하다.

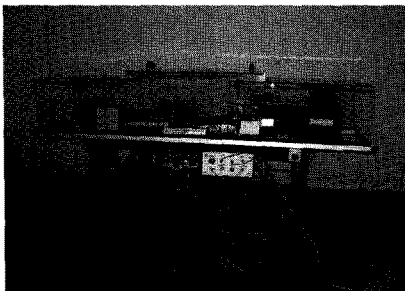


Fig. 1 Test apparatus

2.2 시편

시편재질은 SCr420 이고, 탄성계수 210GPa, 프와송 비 0.3 의 기계적 성질을 갖고 있으며, 시편 형상은 지름이 40mm, 폭이 10mm, 12mm 의 롤러형

상이다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이, 두 실린더 접촉시 발생하는 Edge effect 를 없애기 위해 한쪽 시편에 rounding 을 하였다.

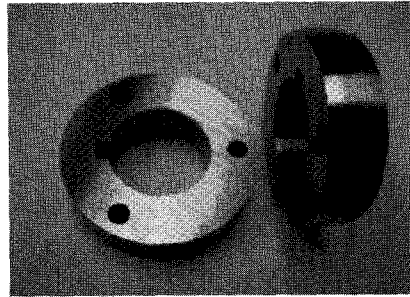


Fig. 2 Test specimens

3. 실험조건

실험에 필요한 응력범위를 정하고, 각 실험응력을 부하시키기 위해 접촉해석을 통하여 실험하중을 결정하였다.<sup>6,7</sup>

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

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

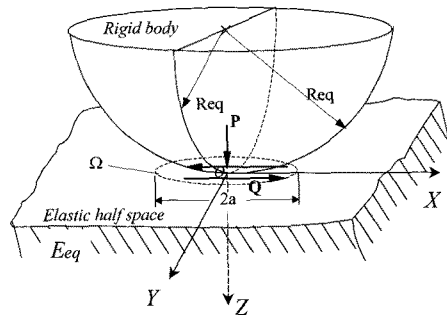


Fig. 3 Contact geometry of an equivalent body

Fig. 3 의 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 구속 조건에 따른 반복 연산이 필요하다.

접촉영역에서는

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

접촉영역 밖에서

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

$F_{i,j}$  는 요소  $j$  에서의 수직분포하중에 의한 요소  $i$  에서의 영향을 나타내는 영향함수 (influence function)로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>8</sup>

$$F_{i,j} = C_1 \left[ (x+a) \ln \left\{ \frac{(y+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x+a)^2}}{(y-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x+a)^2}} \right\} + (y+a) \ln \left\{ \frac{(x+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x+a)^2}}{(x-a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x-a)^2}} \right\} + (x-a) \ln \left\{ \frac{(y-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}}{(y+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x-a)^2}} \right\} + (y-a) \ln \left\{ \frac{(x-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}}{(x+a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x+a)^2}} \right\} \right] \quad (6)$$

탄성범위 이내의 최대응력 3GPa 에서부터 1.557GPa 까지의 실험응력으로 실험을 실시하였고, Fig.4 은 최대실험응력인 3GPa 부하 시 응력분포이며, 각 응력 당 부하하중은 아래의 Table 1 과 같다.

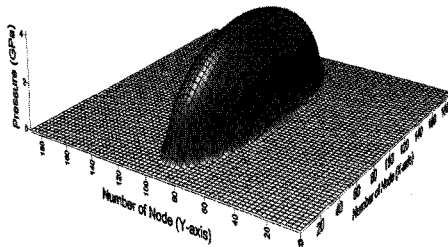


Fig. 4 Stress distribution at 3GPa

Table 1 Test stress and load

STRESS	3GPa	2.5GPa	2GPa	1.557GPa
LOAD	5400N	3070N	1600N	700N

실험에 사용될 윤활유는 상용되고 있는 수동 트랜스미션 오일(MTF)을 사용하였으며, 공급되는 윤활유의 온도는 기어박스 안의 온도를 고려하여 90° 를 유지하였고, 회전속도는 2000rpm, 공급유량은 200ml/min, 실제 기어 구동 시 발생하는 접촉부의 온도상승을 통한 유막두께의 변화를 고려하여 한 쌍의 기어이 접촉구간(Single Tooth Contact Zone)에서 발생하는 Slip 의 평균값인 5%로 실험을 실시하였다. 파손기준은 시편의 전체 면적에 대해 피팅 파손부의 면적이 4% 이상일 때로 선정하였다.<sup>5</sup>

#### 4. 파손면적측정

네 가지의 응력에 대해 실험을 실시하며, 일정 시간 간격으로 시편의 파손 정도를 확인하기 위하여, 광학현미경을 통한 시편의 명암비(Dark/Bright ratio)를 통한 파손면적측정법을 도입하였다.<sup>9</sup> 이 측정법은 실험 후 시편의 접촉부를 광학현미경으로 촬영한 후, 광학현미경 사진의 밝고 어두운 부분의 비율 즉, 명암비를 이용하여 파손면적을 계산하는 방법이다.

Fig. 5 는 실험 후, 접촉부를 촬영하는 구간을 넘버링 한 것이며, 같은 부위의 피팅 파손정향을 분석하기 위해서이다.

각 실험응력 조건마다 시편의 접촉폭이 달라지므로, 접촉면적에 대한 피팅 파손 면적을 계산해야 한다. Fig. 6 은 접촉해석을 통해 각 실험응력에 대한 접촉폭을 나타내었다.

Fig. 6 을 통해 접촉응력이 높을수록 접촉폭이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 은 실험을 실시하며 일정시간이 지나면서 시편의 파손부에 발생하는 피팅의 성장을 나타낸 광학현미경 사진으로, 피팅이 점차 증가하는 모습을 볼 수 있다.

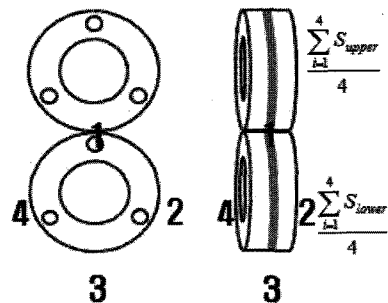


Fig. 5 Test specimen numbering

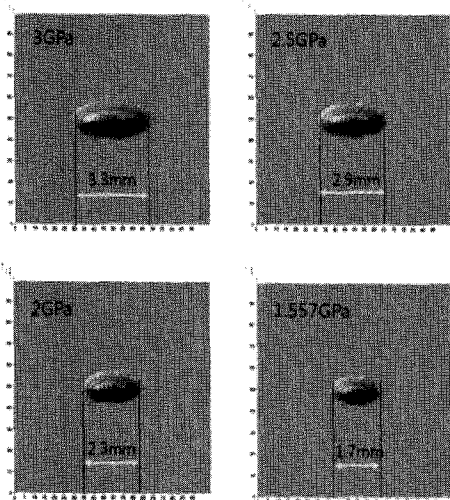


Fig. 6 Contact widths of each test case

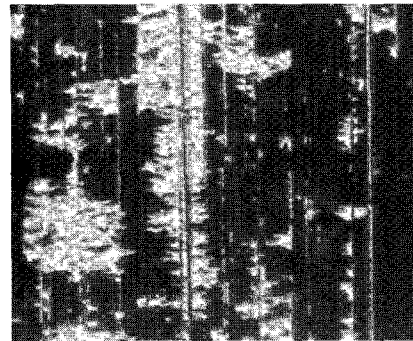


Fig. 8 Pitting failure at 2.5GPa

5. 실험결과

5.1 파손율 - 수명 그래프

각 실험응력에 대해 일정시간 간격으로 시편의 파손여부 및 파손 정도를 광학현미경으로 관찰하며 시편의 면적에 대한 피팅 파손면적과 수명을 그래프로 나타내었다.

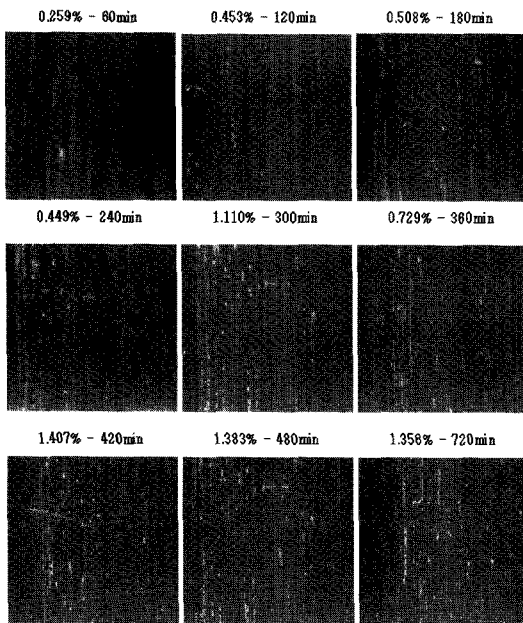


Fig. 7 Pits growth photograph by optical microscope

Fig. 8 은 광학현미경으로 촬영한 피팅 파손부위의 사진이다. 이 사진 중, 어둡게 나온 부분은 시편 표면이고, 밝게 나온 부분은 표면에 파손이 발생하여 광학현미경의 빛이 반사되어 나온 것이다.

Fig. 8 에서 사진 전체의 픽셀(Pixel) 수에 대해, 파손이 발생하여 밝게 나온 부분의 픽셀(Pixel) 수의 비율을 계산하여, 파손부의 비율이 파손기준을 넘게 되면 피팅 파손으로 보았다.

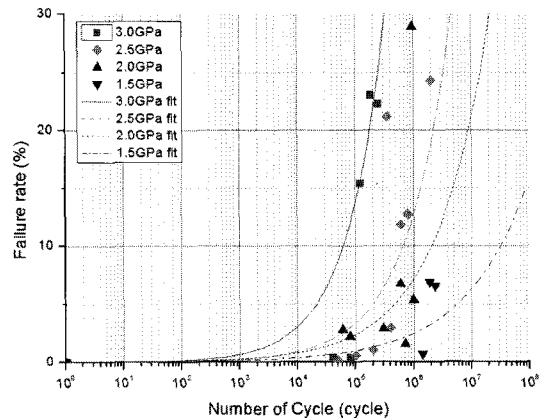


Fig. 9 Failure rate - Number of cycle graph

Fig. 9 의 가로축은 실험시간, 세로축은 파손율을 나타낸다. 파손율이란, 시편의 접촉부의 전체 면적에 대한 피팅 파손부 면적의 비율을 나타낸다. Fig. 9 을 통하여 일정시간 동안 각 실험응력을 부하시킨 시편 전체면적에 대한 피팅 파손면적을 사이클 수에 대해 나타내었다. 파손기준은 피팅 파손된 면적이 전체면적의 4%일 때이고, 피팅 파손의 성장추이 또한 관찰된다. Fig. 9 의 파손율-수명 그래프에 나타난 데이터를 피팅(fitting)시켜 피팅 파손면적에 대한 S-N 그래프를 얻을 수 있다.

5.2 응력 - 수명 그래프

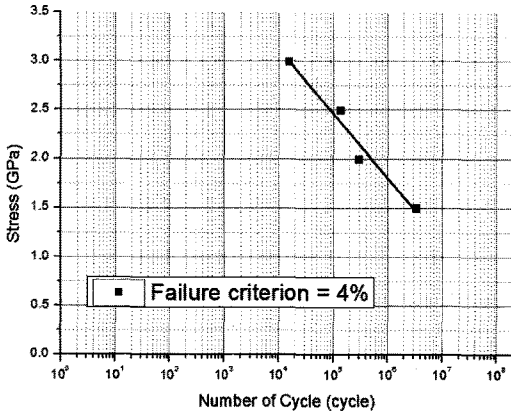


Fig. 10 S-N Curve at 4% failure criterion

Fig. 9 의 파손율-수명 그래프에서 Y 축의 값이 4%일 때의 X 축 수명으로 그린 S-N 그래프를 Fig. 10 에 나타내었다.

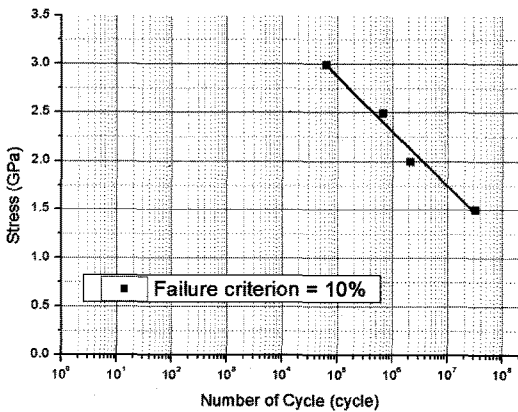


Fig. 11 S-N Curve at 10% failure criterion

매 실험마다의 데이터를 이용하여 S-N 그래프에 나타낸 것이 아니라, 실험 데이터를 파손율에 따른 수명 그래프로 나타낸 후, 파손 기준을 만족할 때의 수명을 이용하여 그린 S-N 그래프이다. 따라서 각 응력마다 하나의 데이터로 나타내어진 수명으로 S-N 그래프를 얻을 수 있다.

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 의 S-N 그래프를 통해서 알 수 있듯이, 파손율-수명 그래프를 통하여 설계자가 원하는 피팅 파손기준에 대한 S-N 그래프를 얻을 수 있다. 기어나 베어링 및 캠-롤러와 같은

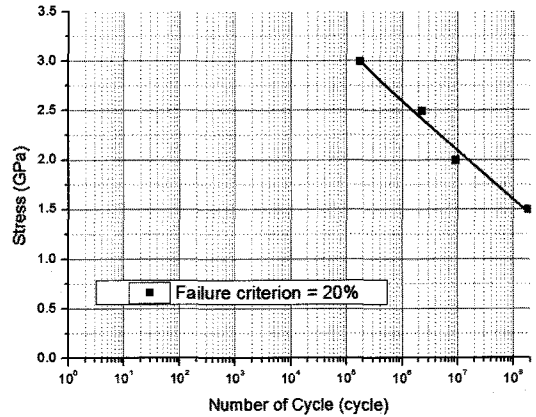


Fig. 12 S-N Curve at 20% failure criterion

기계요소의 접촉부에서 발생하는 피팅 파손의 기준은 절대적으로 정해진 값이 아니다. 이런 기계요소들의 높은 신뢰성 및 작동상태에서의 정숙성 등을 고려하여 설계자들의 판단에 맞도록 기준이 설정된다.

이런 이유에서 파손율-수명 그래프를 이용한 S-N 그래프는 기계요소 설계자들이 생각하는 기준에 맞추어 눈으로 볼 수 없을 정도로 작고 깊이가 20um 이하의 마이크로 피팅(Micro Pitting)에서부터 1mm 내외의 매크로 피팅(Macro Pitting)<sup>10</sup> 까지의 S-N 그래프를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

조금의 표면파손도 허용되지 않는 고가의 시스템에서는 낮은 파손율에 대한 S-N 그래프를 얻을 수 있고, 매크로 스케일의 파손이 표면파손의 기준이 되는 시스템에 대해서는 그 이상의 파손율에 대한 S-N 그래프를 얻을 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 접촉피로파손 중의 하나인 피팅에 의한 표면파손의 실험방법을 제시하기 위한 목적으로, 피팅 파손면적분석기법을 이용한 기어재의 피팅 수명 시험에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 파손율-수명 그래프의 데이터를 피팅(fitting) 시켜서 S-N 그래프를 얻는 방법을 제시하였다.
- 2) 파손율-수명 그래프를 이용하여, 설계자가 원하는 피팅 파손기준에 맞는 S-N 그래프 확보 기법을 구축하였다.
- 3) 표면의 피팅 파손면적이 일정하게 증가하였

으며, 피팅 파손기준이 높아질수록 S-N 그래프가 일정한 기울기를 가지며 S-N 그래프의 X 축 오른편으로 이동하는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

1. Aslantas, K. and Tasgetiren, S., "A study of spur gear pitting formation and life prediction," *Wear*, Vol. 257, No. 11, pp. 1167-1175, 2004.
2. Michuetis, K., Hoehn, B.-R. and Osfer, P., "Influence of Lubricant on Gear Failures Test Methods and Application to Gearboxes in Practice," *Tribotest Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 43-56, 2004.
3. Zhou, R. S., Cheng, H. S. and Mura, T., "Micropitting in Rolling and Sliding Contact Under Mixed Lubrication," *Journal of Tribology*, Vol. 111, No. 4, pp. 605-613, 1989.
4. Kim, J. S. and Joo, J. W., "Experiments and prediction of pitting life in spur gears," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 197-201, 2009.
5. Hohn, B.-R., Michaelis, K. and Otto, H.-P., "Minimized gear lubrication by minimum oil/air flow rate," *Wear*, Vol. 266, No. 3-4, pp. 461-467, 2009.
6. Johnson, K. L., "Contact mechanics," Cambridge University Press, pp. 45-83, 1985.
7. Lee, M. J. and Cho, Y. J., "Numerical Analysis of a Subsurface Stress Field by a Sliding Contact on a Semi-infinite Solid," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 191-194, 2000.
8. Love, A. E. H., "The Stress Produced in a Semi-infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary," *Phil. Trans. Royal Society*, Vol. A228, pp. 377-420, 1929.
9. Wang, W., Wong, P. L. and Zhang, Z., "Experimental study of the real time change in surface roughness during running-in for PEHL contacts," *Wear*, Vol. 244, No. 1-2, pp. 140-146, 2000.
10. The American Gear Manufacturers Association, "ANSI/AGMA 1010-E95, Appearance of Gear Teeth-Terminology of Wear and Failure," AGMA, 1995.