

## 침탄기어의 피로강도에 미치는 표면이상층의 영향에 관한 연구

류 성 기\* · 박 준 철\*\*

### A Study on the Effect of Non-martensitic Layer on the Fatigue Strength in Carburized Gears

S-K Lyu\* · J-C Park\*\*

**Key words** : Fatigue Strength(피로강도), Non-martensitic Layer(표면이상층), Carburization Treatment(침탄처리), Chemical Polishing(화학연마), Electro-polishing(전해연마)

#### Abstract

This study deals with the effect of non-martensitic layer on the fatigue strength in carburized gears. The test gears are carburized, then treated by the combination of chemical polishing and electro-polishing. Carburization treatment is used widely on parts of power transmission system like surface hardened layer to improve fatigue strength.

Carburized gears are observed using a scanning electron microscope(SEM) to determine the characteristics of crack initiation mechanism in the surface layer.

The constant stress amplitude fatigue test is performed by using an electro-hydraulic servo-controlled pulsating tester. The S-N curves are obtained and illustrated. The effect of non-martensitic layer on the fatigue strength is clarified.

#### 1. 서 론

기계요소 중 가장 기본적인, 동력전달장치에 가장 많이 사용하고 있는 기어는 근대공업의 발달과 함께 출력향상과 동력전달의 효율을 증가시키기 위하여 소형화, 경량화, 고강도의 기어가 요구

되고 있다. 그러나 한국의 기어설계, 제조, 강도평가, 검사기술은 매우 낮은 수준이며, 고부하능력, 고정밀화, 저소음화, 저가격면에서 국제경쟁력이 뒤떨어지고 있다. 따라서 현재 기어 생산기술의 한계를 극복하고, 기어 생산업체의 현장 애로기술을 해결하기 위하여 고강도의 신뢰성이 높은 열처리

\* 정회원, 경상대학교 수송기계공학부, 생산기술연구소(원고접수일 : 2000년 12월)

\*\* 학생회원, 경상대학교 산업대학원, 기계시스템전공

기어에 관한 연구가 필요하다.

침탄처리 등의 표면경화처리를 실시하면 표면 경화층이 형성되고 압축잔류응력이 생성된다. 표면경화층과 압축잔류응력은 기어의 굽힘피로강도 향상에 크게 영향을 미친다. 이 효과를 정량적으로 구하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1-4)</sup>

현재 침탄처리는 AGMA<sup>5)</sup>의 추천으로 자동차, 산업용 기계 등의 동력전달장치용 기어에 많이 사용되는 일반적인 방법이다. 그러나 침탄처리를 할 때 표면에서는 탈탄 작용에 의하여 표면이상층이 생성되어 피로강도를 저하시키고 있다.<sup>2)</sup> 표면이상층의 생성원인과 기어의 피로강도에 미치는 메카니즘에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 침탄치차의 굽힘피로강도에 미치는 표면이상층의 영향을 연구하기 위하여 SCM415재료로 가공한 기어에 침탄처리를 실시한 후 침탄처리치차의 표면이상층을 화학연마와 전해연마법으로 10 μm, 20 μm, 30 μm 연마하여, 시험치차의 표면경도, 금속조직, 이뿌리위험단면의 압축잔류응력 등의 기계적 성질을 고찰하였다. 그리고 표면이상층 내에서의 초기크랙 메카니즘의 특성을 고찰하고, 피로실험을 실시하여 피로강도를 구한 후 표면이상층이 피로강도에

미치는 영향을 밝혀 기어 생산기술에 기여하고자 한다.

## 2. 시험기어의 제특성

### 2.1 시험기어

본 연구에 사용한 시험치차의 주요 제원을 Table 1에 나타냈다. 이뿌리면에서의 X선 응력측정이 가능하도록 모듈을  $m=5$ , 잇수  $z=18$ 을 선택하고, 피로시험기의 부하 능력을 고려하여 이폭은  $b=8\text{ mm}$ 를 채택하였다.

재료는 SCM415를 사용하였으며, Table 2에 치차재료의 화학조성의 규격값과 실측값을 나타

Table 3 Surface treatments of test gears

| Code of gears | Surface-treatment | Note   |
|---------------|-------------------|--|
| C             | Carburized        | C : Carburized<br>$d_{\text{eff}}=0.85\text{mm}$<br>CP : Chemical polishing<br>EP : Eletro-polishing<br>No : Removed thickness<br>1 : 10μm<br>2 : 20μm<br>3 : 30μm |
| CSP           | C+SP              |  |
| CCP1          | C+CP1             |  |
| CCP2          | C+CP2             |  |
| CCP3          | C+CP3             |  |
| CEP2          | C+EP2             |  |

Table 1 Dimensions of test gears

|                                  |       |                  |
|----------------------------------|-------|------------------|
| Module $m$                       | [mm]  | 5                |
| Number of teeth $z$              |       | 18               |
| Pressure angle                   | [deg] | 20               |
| Finish                           |       | Hobbed           |
| Gear grade                       |       | JIS 5            |
| Profile modification coefficient |       | 0                |
| Face width                       | [mm]  | $8.0 \pm 0.01$   |
| Tip diameter                     | [mm]  | $100.0 \pm 0.01$ |
| Span gauge(3 teeth)              | [mm]  | $38.16 \pm 0.01$ |
| Material                         |       | SCM415           |
| Heat-treatment                   |       | Carburized       |
| Surface-treatment                |       | see Table 3      |

Table 2 Chemical compositions of SCM415 [wt. %]

| SCM415   | C         | Si        | Mn        | P      | S      | Cr         | Mo        |
|----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|------------|-----------|
| Range    | 0.13~0.18 | 0.15~0.35 | 0.60~0.85 | <0.030 | <0.030 | 0.090~1.20 | 0.15~0.30 |
| Measured | 0.165     | 0.265     | 0.731     | 0.0147 | 0.0172 | 1.07       | 0.151     |

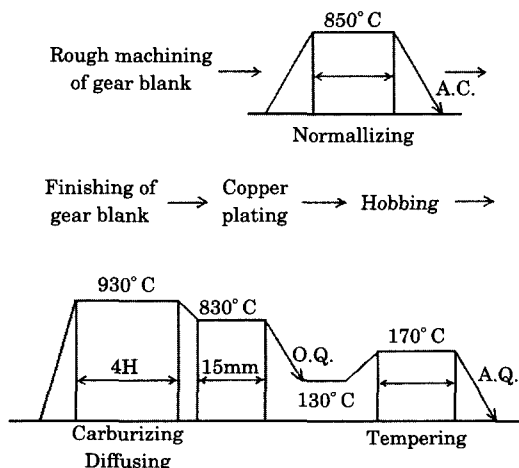


Fig. 1 Machining and carburizing process

냈다. 그리고 치차의 가공 공정과 열처리 조건을 Fig. 1에 나타냈다. 직경 110 mm의 SCM415 환봉으로 치차 블랭크를 만들어 850°C에서 1시간 열처리를 한 다음 기계가공을 하고, 측면에서의 침탄을 방지하기 위하여 약 20 $\mu$ m의 동도금을 실시한 다음, 호브머신으로 치차를 제작하였다. 유효침탄 깊이는 AGMA<sup>5)</sup>의 추천값을 사용하여 침탄처리를 실시한 후 Table 3에 나타낸 바와 같이 표면이상층을 제거하기 위하여 10, 20, 30  $\mu$ m의 화학연마와 20  $\mu$ m의 전해연마를 실시하였으며, 침탄처리, 화학연마, 전해연마 등을 조합한 표면처리 기어들을 각각 기호로 분류하여 Table 3에 나타냈다.

## 2.2 표면처리 조건

### 2.2.1. 화학연마

표면이상층을 제거하기 위하여 화학연마와 전해연마를 실시하였다. 화학연마는 치차 이(齒)면만을 노출시키고 나머지는 피막을 입힌 후 HF[1mol/l], H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>[2mol/l]의 수용액에 침적시켜 화학반응을 일으키게 하여 화학적으로 용해시켜 이뿌리면을 약 10, 20, 30 $\mu$ m의 화학연마를 실시하여 각각 CP1, CP2, CP3로 분류하였다.

### 2.2.2. 전해연마

전해연마는 양극에 연마할 치차를 접속시켜 전해액 속에 넣어 침적해 있는 음극 사이에 전류를 흐르게 하여, 치차 금속이온이 전해액속에서 용해되도록 하여 연마를 하였다. 양극에는 직류정류화 전원, 가변저항, 치차를 결선 시키고, 음극에는 각 연마부에서 균등하게 전류가 흐를 수 있도록 치차 주위에 전체를 원통형으로 만든 알루미늄판을 연결하였다. 전해액은 인산과 황산을 3 : 1로 혼합하여 사용하였으며 이뿌리면을 약 20 $\mu$ m 전해연마를 실시하여 EP2로 나타냈다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 시험치차의 경도

다수의 시험치차 이폭 중앙을 저석커터로 절단한 후, 표면을 연마한 다음 표면으로부터 깊이 방

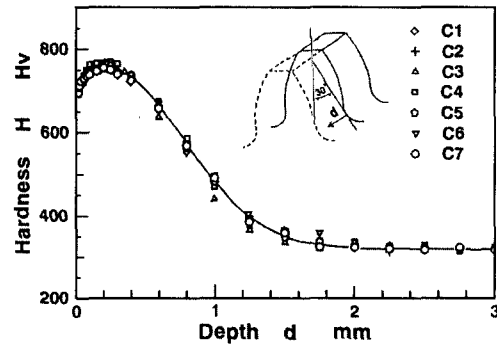


Fig. 2 Hardness distributions along the depth

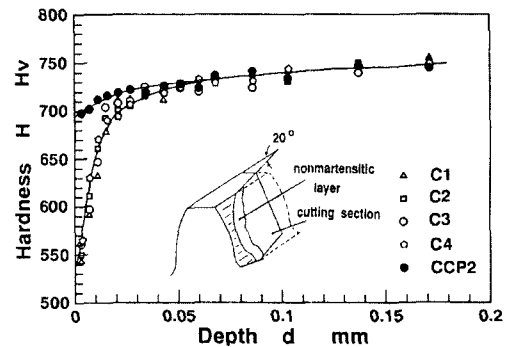


Fig. 3 Decrease of hardness due to decarburization

향의 경도를 측정하였다. 측정하중은 300 kgf, 유지시간을 20 초로 하였다. 침탄치차 7개의 이뿌리 위험단면에서 측정된 경도분포의 측정결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에는 이의 절단면과 깊이 방향의 측정위치도 함께 나타냈다. 경도 측정결과 얻어진 표면경도를 H<sub>s</sub>, 최대경도는 H<sub>max</sub>, 심부경도를 H<sub>c</sub>라 칭하여 Table 4에 나타냈다. 표면경도는 시험치차의 이를 약 20° 경사로 절단하여 극표면 경도를 측정하여 사용하였으며, 극표면 경도의 측정결과를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 표면을 화학연마 또는 전해연마하여 표면이상층을 제거함으로써 표면경도가 약 150 Hv 높게 나타났다.

### 3.2 이뿌리면의 거칠기

시험치차의 거칠기 측정은 피로시험에 사용하는 이뿌리면의 위험단면 위치에서 이폭을 6등분한

Table 4 Surface conditions

| Code of gears | Hs (Hv) | H <sub>max</sub> (Hv) | Hc (Hv) | γ (MPa) | σ <sub>R</sub> % | R <sub>a</sub> μm |
|---------------|---------|-----------------------|---------|---------|------------------|-------------------|
| C             | 540     | 750                   | 320     | -308    | 21               | 23.1              |
| CCP1          | 695     | 760                   | 318     | -499    | 20               | 13.8              |
| CCP2          | 698     | 756                   | 320     | -496    | 19               | 11.3              |
| CCP3          | 702     | 759                   | 319     | -527    | 17               | 10.1              |
| CEP2          | 705     | 760                   | 322     | -463    | 19               | 12.4              |

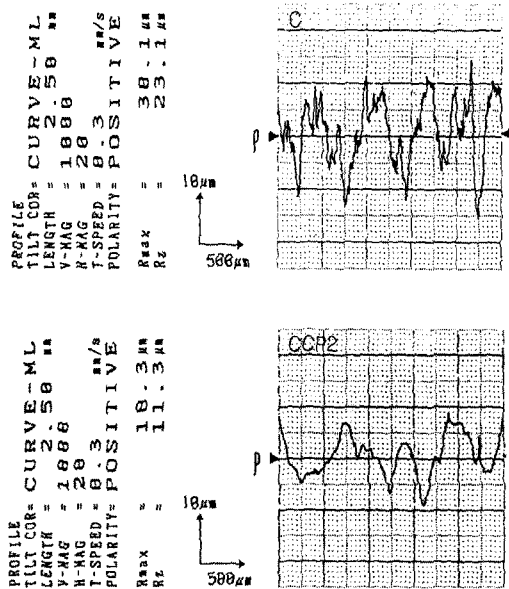


Fig. 4 Comparison of surface roughness on test gears

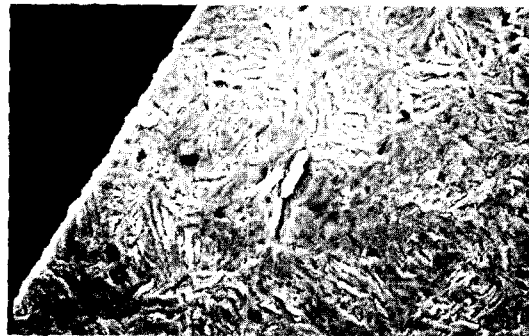
곳의 좌측, 중심부, 우측 3개소의 치형방향, 이끝 방향으로 측정하였다. 측정기준길이는 25 mm, 측정속도는 0.3 m/sec로 하였다. 표면처리 시험치차 중 측정결과에 예를 Fig. 4에 나타냈으며, Table 4에 각 계열 치차의 10점 평균거칠기 평균값을 나타냈다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 표면을 화학연마 또는 전해연마하여 표면이상층을 제거함으로써 표면거칠기가 약 50% 향상되었다.

### 3.3 이뿌리면 부근의 압축잔류응력과 금속조직

압축잔류응력의 측정은 SMX-50 X선 잔류응력 측정장치를 사용하여 측정된 평균압축잔류응력



(a) C



(b) CCP2

Fig. 5 Metallographic observation by SEM(× 1,500)

을 Table 4에 나타냈다. 화학연마와 전해연마를 실시함으로써 표면이상층이 제거되어 표면에 높은 압축잔류응력이 나타남을 알 수 있었다.

시험이를 절단하여 래핑연마 후 3% 소산에탄올에 부식시켜 주사전자현미경(SEM)으로 조직을 관찰하였다. Fig. 5의 금속사진에서 알 수 있듯이 칩탄치차의 이뿌리 위험단면부근에서는 약 16 μm의 표면이상층이 발견되었으며, 약 20 μm이상 화학연마 또는 전해연마를 실시함으로써 표면이상층은 거의 제거되었다.

그리고 표면이상층의 초기크랙 메카니즘의 특성을 고찰하기 위하여 하중을 주지 않은 칩탄치차와 크랙이 발생했을 때까지 피로하중을 준 칩탄치차의 표면이상층을 관찰하였다. 초기 크랙을 인지하기 위하여 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 디텍터게이지(detective gage, DG)를 시험이의 이뿌리위험 단면에 부착하였다. DG가 절단되어 크랙을 인지

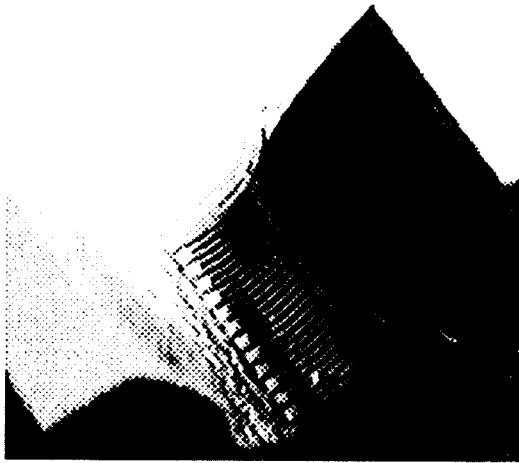


Fig. 6 Detective gage adhered on a tooth fillet

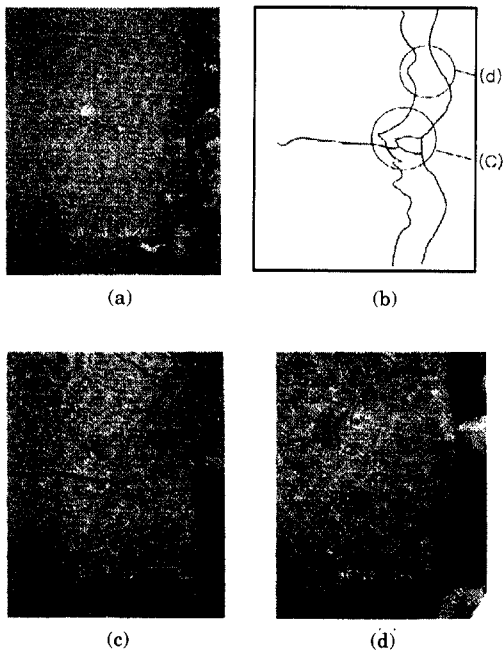


Fig. 7 A cross section of carburized gear after loading (Loading was stopped just after the breakage of detective gage)

하였을 때는 약 0.5 mm 정도 크랙이 진전되어 있었다. Fig. 7(a)는 하중 1,000 MPa, 반복 하중수 25,500에서 DG가 절단된 침탄치차의 이뿌리 위험 단면 부근의 금속조직이다. Fig. 7(c), (d)는 Fig.

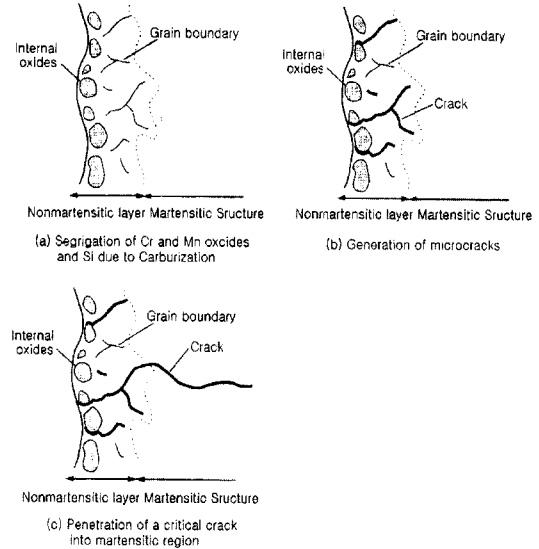


Fig. 8 A model of crack initiation mechanism

7(a)를 확대하여 관찰한 사진이다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(c), (d)의 관찰 위치를 나타내고 있다. Fig. 7(c), (d)에서 알 수 있듯이 표면이상층에서는 많은 마이크로 크랙들이 관찰되었으며, 표면이상층의 마이크로크랙으로부터 크랙이 진전되는 것을 알 수 있었다.

따라서 표면이상층을 갖는 침탄치차의 초기 크랙의 생성과정을 Fig. 8과 같이 초기 크랙 메카니즘의 모델로 나타낼 수 있다.

하중을 주지 않는 표면이상층에는 Fig. 8(a)와 같이 Cr, Mn 산화물과 Si가 분리된 결정입계 (grain boundary)가 존재하며, 하중을 주면 결정입계와 산화물들이 응력 집중부위로 활동하여 많은 마이크로 크랙들이 발생하여 Fig. 8(b)와 같이 마이크로 크랙들 중 몇 개가 결합되어 크랙이 진행된다. 그리고 대부분의 크랙들은 Fig. 8(c)와 같이 표면이상층내에 잔류하지만 가장 큰 입계 크랙은 깊이 방향으로 진행된다.

### 3.4 굽힘 피로시험 결과

굽힘 피로시험에는 정적정격하중 2,500 kgf, 운전주파수 40Hz, 공급유압은 210 kgf/cm<sup>2</sup>의 고속형 전기·유압서보식 피로 시험기를 사용하였으

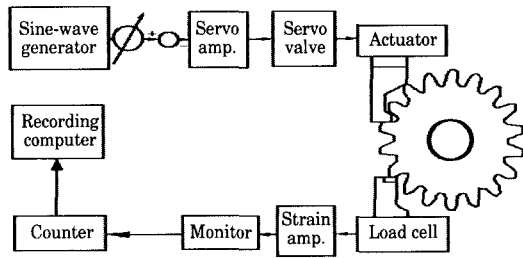


Fig. 9 System of bending fatigue tester

Table 5 Fatigue strength

| Code of gears    | C   | CCP1 | CCP2 | CCP3 | CEP2 |
|------------------|-----|------|------|------|------|
| $\sigma_w$ (MPa) | 761 | 985  | 1009 | 1031 | 993  |

며 피로시험기의 시스템구성은 Fig. 9와 같다. 시험기의 원리는 신호발생기에서 정현파 신호를 발생시켜 신호레벨 조정기에 의해 실험설정압을 조정한다. 서보앰프에 의해 서보신호로 증폭되며, 이 신호에 의해 서보밸브가 작동하여 유압을 제어하는 피스톤을 구동한다. 시험기어의 이에 가해지는 하중은 로드셀에 의해 검출되어, 스트레인앰프에서 증폭된 후 피드백 된다. 시험기의 유온, 유압, 서보전류, 하중, 입력신호 및 편차신호는 각각 전기신호로 변환되어 제어판에서 모니터 된다. 시험기에는 자동정지회로가 설치되어 유온, 유압, 서보전류 및 하중이 설정상한값을 초과하거나, 시험기어의 이빨이 절손되어 피스톤의 변위가 크게 되면, 피로시험기가 자동적으로 정지된다.

또한, 시험 중에는 항상 오실로스코프에 의해 하중파형 및 설정하중과의 편차가 모니터 된다. 부하에 의한 이끝의 손상을 방지하기 위하여 이 끝부터 반경방향으로 0.8 mm 내측의 점을 하중점으로 하였으며, 부하속도는 20~40 Hz로 하였다. 시험에는 일정진폭을 반복한 하중을 사용하였으며, 그 최대하중의 변동은 1% 이내가 되도록 조정하였다.

그리고 로드셀의 분리를 방지하기 위해 반복하중의 최소 값으로서 약 8.8 kgf를 설정하였다.

ISO<sup>6)</sup> 기어 강도계산식을 참고로 하여, 본 연구

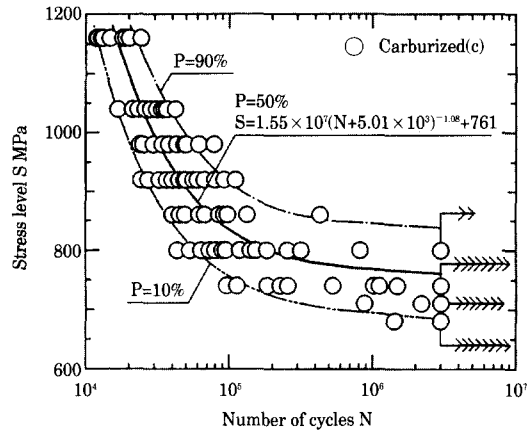


Fig. 10 Fatigue life and SN curves for gear C

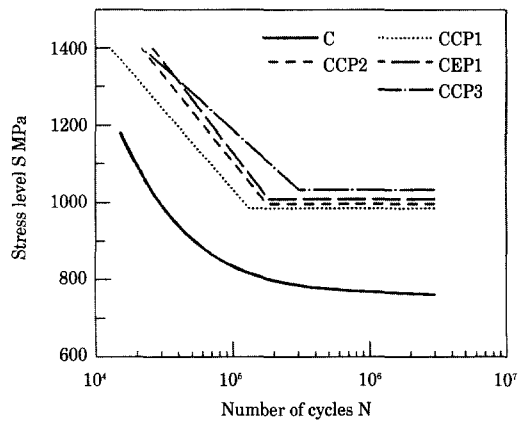


Fig. 11 Mean SN Curves of all test gears

에서는 열처리 시험기어의 수명계수가  $N \geq 3 \times 10^6$ 에서 1.0인 것을 고려하여 비파괴 반복하중수는  $N = 3 \times 10^6$ 으로 하였다. 표면처리차의 기본이 되는 침탄치차C에 대하여 총시험수 107개를 사용하여 피로시험한 결과를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10으로부터 파괴확률 50%의 피로강도  $\sigma_w$ 는 761 MPa, 표준편차는 약 63 MPa이 얻어졌다.

C계열 이외의 각 계열시험치차는 14점법으로 굽힘피로실험을 하여 S-N곡선의 경사부와 수평부를 구하였다<sup>7)</sup>. 각 계열의 피로시험 결과를 정리하여 Table 5와 Fig. 11에 나타냈다. 피로시험 결

과, 화학연마의 피로강도는 화학연마량의 증가에 비례하여 약 30~35% 향상되었는데, 이것은 표면 이상층을 제거함으로써 표면경도의 증가와 이뿌리위험단면에서 높은 압축잔류응력의 표출과 표면형상 등이 향상되었기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기어의 피로강도에 미치는 표면 이상층의 영향을 연구하기 위하여 화학연마와 전해연마법으로 침탄처리치차의 표면이상층을 제거하여 표면경도, 금속조직, 압축잔류응력 등의 기계적 성질과 표면이상층 내에서의 초기크랙 메카니즘의 특성을 고찰하였고, 피로실험을 실시하여 피로강도를 구한 후 표면이상층이 피로강도에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 침탄기어를 약 20~30  $\mu\text{m}$  화학연마 또는 전해연마를 하여 표면이상층을 제거 한 결과 최대높이 거칠기( $R_{\text{max}}$ )는 47~64%, 10점 평균거칠기( $R_z$ )는 45~50% 향상되었으며, 표면경도는 158~162 Hv, 압축잔류응력은 188~219 MPa 높게 나타났다.
2. 침탄기어의 이뿌리위험단면부근에서 표면이상층이 약 16  $\mu\text{m}$  관찰되었으며, 약 20  $\mu\text{m}$  화학연마, 또는 전해연마를 실시하므로써 표면 이상층은 거의 제거되었다.
3. SEM사진의 관찰을 기초로 많은 마이크로 크랙들이 표면이상층에서 발생하며, 하중을 받으면 몇 개의 마이크로 크랙들이 결합하여 크랙이 진행되고, 가장 큰 입계크랙이 깊어방향으로 크랙이 진행된다고 하는 초기 크랙의 모델을 제안하였다.
4. 침탄기어를 약 20~30  $\mu\text{m}$  화학연마 또는 전해연마를 하여 표면이상층을 제거 한 결과 피로강도는 약 32~35% 향상되었다.

#### 후 기

본 연구는 경상대학교 생산기술연구소 학술연구재단의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 參考文獻

1. Lyu, S., Inoue, K., Kato, M., Deng, G., "Estimation of Residual Stress Due to Shot Peening in Carburized Gears and Its Effect on the Stress Intensity Factor", JSME, Vol. 60, C, pp. 3505~3509, 1994.
2. Sung-ki Lyu, etc, "Effects of Surface Treatment on the Bending Fatigue Strength of Carburized Spur Gears", JSME International Journal Series C, Vol. 39, No. 1, pp. 108~114, 1996.
3. Aida, T., Oda, S., Kusano, K. and Ito, Y., Bender, "Fatigue Strength of Gears", Trans. JSME, Vol. 26, No. 33, pp. 1314~1320, 1967.
4. Nishioka, K., Nishino, A., Hirakawa, K. and Komatsu, H., "Effect of Residual Stress on Bending Fatigue Strength of Case Hardened Gears", Report of Sumitomo Metals Industry Ltd., Vol. 26, pp. 448~457, 1974.
5. AGMA Standard, "Practice for carburized aerospace gearing", 246. 0A, pp. 11~14, 1979.
6. ISO/DP 6335/111, "Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears", part 3, pp. 78~105, 1980.
7. Little, R. E. "Probabilistic Aspects of Fatigue", ASME Spec. Tech. Pull, Vol. 5, No. 11, pp. 54~56, 1972.

## 저 자 소 개



**류성기(柳晟基)**

1962년 6월 1일생. 1987년 전북대학교 정밀기계공학과 졸업. 1994년 日本東北大學 정밀공학전공 졸업 (공학박사). 1996년 3월 ~ 현재 경상대학교 수송기계공학부 조교수.



**박준철(朴俊哲)**

1976년 1월 22일생. 1998년 경상대학교 기계설계학과 졸업 및 동대학 산업대학원 기계시스템전공 입학.