

疲勞限度에 영향을 미치는 表面거칠기의 정량적 평가

김진학* · 김민건**

Quantitative Estimation of Surface Roughness Affecting the Fatigue Limit

Kim, Jin-Hak* · Kim, Min-Gun**

ABSTRACT

Fatigue tests were performed to investigate how much vary the fatigue limit under the different surface conditions on Carbon Steel(SM55C). Four types of specimen which have different surface roughness each other, Series A by turning, Series B by grinding, Series C by polishing and Series D by roller finishing showed the fatigue limit of 265, 320, 335 and 365MPa, respectively. Series D show 36% higher than Series A, which is caused by compressive residential stress on the surface. Therefore, roller finishing machining is helpful not only increase the fatigue limit but also improve the surface roughness.

Moreover, to predict the fatigue limit under the conditions of knowing surface roughness and hardness of specimen, \sqrt{area} parameter method is very useful.

1. 서론

최근의 산업기계 및 설비들은 기술의 발달과 더불어 고신뢰성을 가지는 생산설비에 대한 필요성이 높아지고 있는 실정이다. 생산설비의 신뢰도를 높이기 위해서는 설계단계에서부터 집중적인 연구가 이루어져야 하며, 제작과정에서의 소재선택 및 처리, 가공기술등이 병행되어야만 그 성능과 신뢰도를 높일 수 있다. 특히 가공기술 및 정밀도는 신뢰도와 직접적으로 관련된다. 본 연구에서는 기계제작에 많이 사용되는 기계구조용 탄소강(SM55C)을 대상으로 일반적 기계가공 형태인 선삭(Turning), 연삭(Grinding), 연삭후 연마가공을 한 다음 표면거칠기 상태를 측정하고, 조도에 따른 피로강도값을 이론적으로 예측한 후 실험값과 비

교 평가하여, 표면거칠기가 피로강도에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 더불어 선반가공에서 간단히 응용할 수 있는 롤러피니싱 가공을 통하여 소재표면에 표면압축 잔류응력을 형성시켰을 때의 피로한도에 대한 변화를 고찰하고자 한다.

2. 표면가공정도와 피로한도의 관계

피로크랙은 대부분의 경우에서 부재의 표면에서 발생하기 때문에, 기계가공에 의한 표면의 조도는 재료의 피로한도에 큰 영향을 미치게 된다. 피로한도에 영향을 미치는 인자를 분류하면 다음과 같다.

- (1) 표면거칠기
- (2) 잔류응력
- (3) 소성변형에 의한 표면층의 가공경화, 가공연화
- (4) 소성변형에 의한 표면층의 조직변화

2. 1 표면거칠기와 피로한도

* 강원대학교 기계공학과 박사과정

** 강원대학교 기계공학과 교수

위 4가지 인자들은 상호복잡하게 관계해서 피로한도에 영향을 주게 된다. 위 인자들 중에서 표면거칠기는 피로크랙에 직접관여하므로 피로한도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 절에서는 표면거칠기에 주목하여, 표면거칠기가 피로한도에 미치는 영향에 대하여 Murakami^[1] 등이 제안한 \sqrt{area} 법을 이용하여 정량적으로 평가해 보고자 한다.

표면거칠기가 피로한도에 미치는 영향을 밝히기 위해서는, 조도의 기하학적 parameter에 대한 정의가 필요하며 현재까지 조도의 척도로써 여러가지가 정의되고 있다. 예를 들면, 최대높이 Rmax, 중심선 평균거칠기 Ra, 자승 평균거칠기 Rrms 등이 있다. Rmax는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 기준길이만을 추출하여 그 중에서 가장 깊은 골로부터 가장 높은 봉우리까지의 높이를 표시한 것이며, Ra, Rrms는 Fig. 2에서와 같이, 중심선을 x축, 거칠기의 높낮이를 $y=f(x)$ 로 표시할 때, 각각 다음 식으로 정의되어 진다.

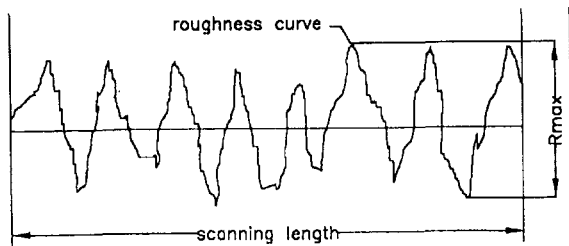


Fig. 1 Maximum Roughness(Rmax)

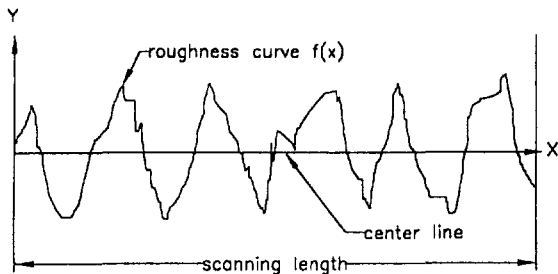


Fig. 2 Roughness Curve and Center Line

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y-hl| dx \quad (1)$$

$$Rrms = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l (y-hl)^2 dx} \quad (2)$$

(여기서, $hl = \frac{1}{l} \int_0^l y dx$, l = 측정길이)

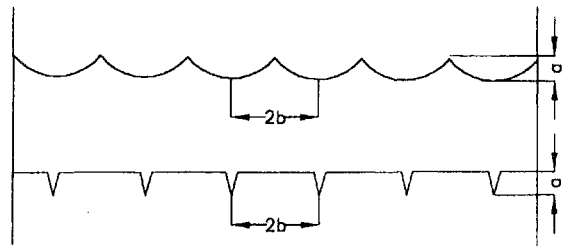


Fig. 3 Notches and its Equivalent Crack

그러나, 피로현상은 국소적인 것으로 피로한도에 미치는 표면거칠기의 영향은 조도로부터 크랙이 발생했을 때의 응력집중의 정도를 통해서 나타나는 것으로 생각된다. 표면거칠기는, 표면에 존재하는 미소결함과 역학적으로 등가하고 생각할 수 있다^[1]. 따라서, 표면거칠기의 문제는 본질적으로 미소크랙의 문제가 된다. \sqrt{area} parameter법에 의하면, 결함의 초기 \sqrt{area} (최대 주응력방향에 투영한 면적의 평방근)가 피로한도를 결정하는 치수가 된다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 주기적 결함체의 피로한도를 생각할 때, 주기적 결함과 등가인 \sqrt{area} 를 평가할 필요가 있다.

표면거칠기와 같이 주기적 원주결함(크기)의 경우, 크랙 상호간의 간섭에 의한 영향을 고려해서 \sqrt{area} 를 평가해야 한다. 무한개의 얇은 주기적 원주 크랙을 가지는 환봉의 응력확대계수 K는 Fig. 4와 같이 된다. Fig. 4의 F는 아래식으로 주어지는 보정계수이다.

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

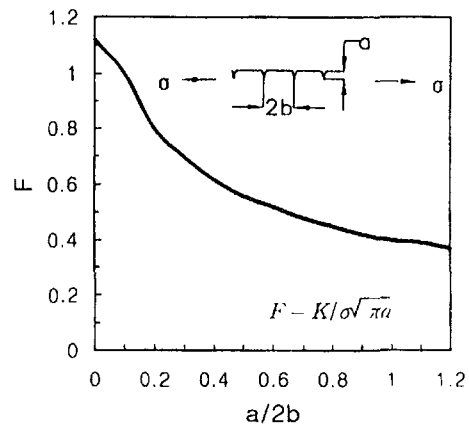


Fig. 4 Stress Intensity Factor for Periodical Surface Crack

그림으로부터 a를 일정하게 할 때, 크랙열의 피

치(2b)가 작을수록 크랙끼리의 간섭에 의한 K값이 작아짐을 알 수 있다. 한편 Fig 5에 나타내는 임의의 형상의 미소크랙의 크랙 선단에서의 응력확대수 K의 최대치 Kmax는 다음 식으로 주어진다.

$$K_{max} = 0.65 \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (4)$$

식(3), (4)로부터, 크랙의 등가 \sqrt{area} 를 구할 수 있는 다음 식이 얻어지는데, 이것을 $\sqrt{area_R}$ 이라 하면, 아래의 식이 얻어진다.

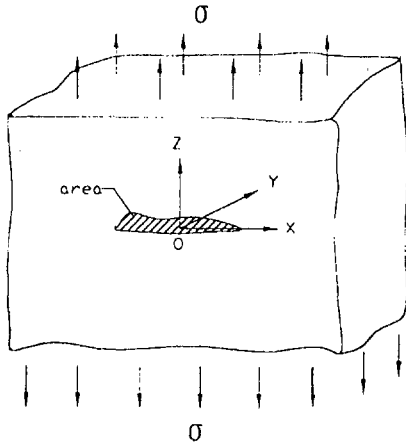


Fig. 5 Surface Crack of Arbitrary Shape

$$\sqrt{area_R} = (F/0.65)^2 a \quad (5)$$

실용적인 측면을 고려하여 식(5)를 a와 2b의 함수로 근사식을 만들면 다음과 같다.

$$\sqrt{area_R} = \{1.72 - 0.27(a/2b) + 1.17(a/2b)^2\}^2 a \quad (6)$$

지금까지의 연구에 의해, 미소결함(크랙)이 재료 표면에 존재하는 경우의 \sqrt{area} parameter법에 의한 피로한도(σ_w)의 예측식은 다음과 같이 주어지는 것으로 알려져 있다^[2].

$$\sigma_w = 1.43(Hv + 220) / (\sqrt{area_R})^{1/6} \quad (7)$$

위 식(7)은 Hv=70~720까지 여러 종류의 금속 재료에 대하여 적용할 수 있음이 알려져 있다.

2. 2 표면 압축잔류응력과 피로한도

재료에 표면처리를 하게 되면 표면에 압축잔류응력이 발생하여 존재하게 되며, 표면에 압축잔류응력이 발생하면 피로특성이 현저하게 향상되는데, 잔류응력은 외력에 의해 생긴 탄성응력과 같다고

생각할 수 있으며^{[3],[4],[5]}, 표면에서의 최대인장응력은 압축잔류응력만큼 감소하며 최대인장응력이 내부에서 발생하게 된다. 피로파괴가 재료의 표면으로부터 진행되는 기구를 생각한다면, 표면에서의 인장응력 감소는 피로한도를 증가시키는 결과가 될 것이다. 또한 표면으로부터의 압축잔류응력 발생깊이가 클수록, 응력구배가 클수록 표면에서의 인장응력이 감소하며 피로한도 상승효과가 큰 것으로 알려져 있다^[6].

공업적으로 재료에 잔류응력을 형성시키는 방법으로는 기계적 방법으로 샷피닝(Shot Peening), 롤러피니싱(Roller Finishing), 버니싱(Burnishing) 등이 있고, 조직학적 방법으로는 침탄, 질화, 유도경화가 있으며, 템퍼링처리시 급냉처리를 통한 열응력을 형성시키는 방법등이 있다.

3. 실험방법

3. 1 재료 및 시험편

본 실험에서는 기계구조용 탄소강(SM55C)을 사용하였으며, 화학성분은 Table 1에 기계적 특성은 Table 2에 각각 나타내었으며, 현장성을 고려하여 열처리는 행하지 않았다.

Table 1 Chemical Composition (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SM 55C	0.54	0.25	0.77	0.02	0.02	0.08	0.01	0.05

Table 2 Mechanical Properties

	σ_Y	σ_{TS}	δ	ρ	Hv
SM55C	422	652	20	40	93

σ_Y : Yield Strength(MPa)

σ_{TS} : Tensile Strength(MPa)

δ : Elongation(%)

ρ : Reduction of Area(%)

시험편은 표면거칠기에 따른 피로특성을 시험하기 위하여 표면거칠기가 다른 3종의 시험편과 표면 압축잔류응력을 형성한 시험편 1종을 준비하였다. Series A는 CNC선반에서 1차 선삭가공만 하였고, Series B는 선삭후 원통 연삭장치를 이용하여 2차 연삭가공하였으며, Series C는 연삭가공후 연마제를 이용하여 폴리싱(Polishing)처리를 행하여 준비하였다. Series D는 시편표면에 압축잔류응력이 형성되도록 1차 선삭가공에 의해 일정한

조도(R_{max} 19.0~23.0 μm)로 가공한 다음 Roller Finishing공구를 사용하여 선삭가공 흔적이 없어질 때까지 반복가공하여 준비하였다. 축침식 표면조도측정기를 사용하여 각 시험편의 조도를 측정 한 결과 Series A는 R_{max} : 22.80 μm , Series B는 R_{max} : 6.60 μm , Series C는 R_{max} : 0.65 μm 그리고 Series D는 R_{max} : 1.08 μm 로 측정되었다. 또한, 각 시험편의 비커스경도값을 Table 5에 나타내었다.

3. 2 피로시험

피로시험은 상온 대기중에서 회전굽힘 피로시험기(RPM 3500)를 사용하여 행하였다. 시험편은 동일한 조건으로 가공된 각 Series(A, B, C, D)별로 실험하였고, 피로한도는 10^7 회의 반복 응력부하에도 파단하지 않는 응력범위를 취하여 정의하였다.

4. 결과 및 고찰

4. 1 표면거칠기가 피로한도에 미치는 영향

우선 표면거칠기와 피로한도의 상관관계를 고찰하여 표면거칠기가 피로한도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Series A, B, C재의 표면거칠기를 각각 측정후 피로한도(σ_w)의 시험값을 구하여, 가공방법에 따른 표면거칠기와 피로한도값을 Table 3에 제시하였다. 대표적인 조도곡선은 Fig. 6~Fig. 8과 같다. Fig. 9는 Series D의 조도곡선을 나타낸 것이다. Table 3에서 보여주는 바와 같이 가공정도, 즉 표면거칠기에 따라 피로한도는 선삭한 Series A를 기준으로 연삭가공한 Series B는 20%, 폴리싱한 Series C는 26% 높게 나타나 표면거칠기가 부품의 피로수명과 깊은 관련이 있음을 보여주고 있다.

Table 3 Fatigue Limit according to Surface Roughness

	Roughness(μm)	Fatigue Limit σ_w (MPa)
Series A	22.80	265
Series B	6.60	320
Series C	0.65	335

4. 2 피로한도에 미치는 표면거칠기의 정량적 평가

다음으로 이론적 피로수명 예측식인 식(6), (7)을 이용하여 피로한도를 계산하고, 실험결과치와

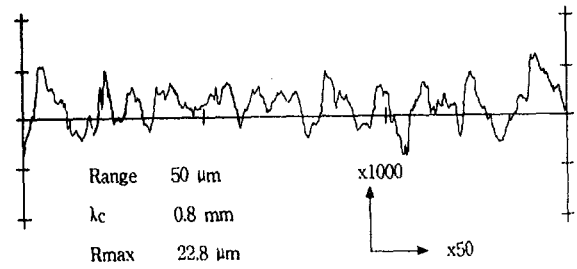


Fig. 6 Roughness Curve of Series A

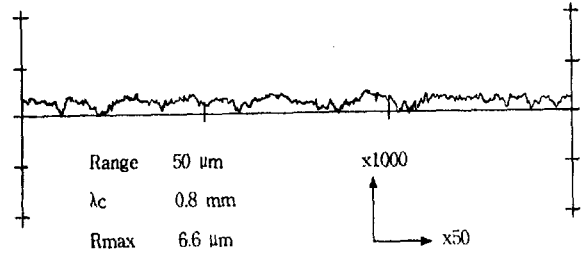


Fig. 7 Roughness Curve of Series B

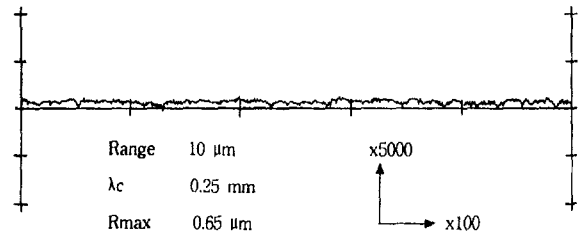


Fig. 8 Roughness Curve of Series C

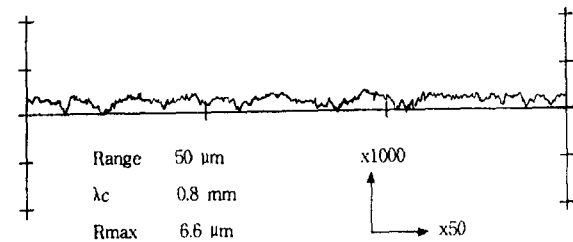
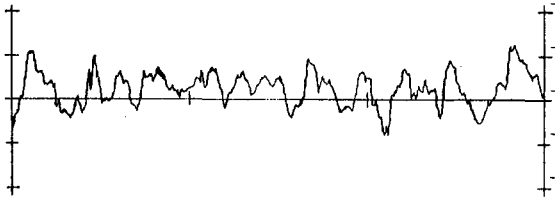


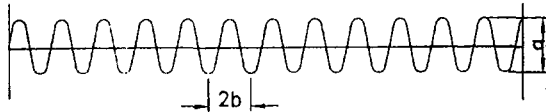
Fig. 9 Roughness Curve of Series D

비교하여 표면거칠기에 따른 피로한도를 정량적으로 평가하여 보고자 한다. 우선, 선삭가공한 Series A를 대상으로 하였다. Series A의 표면거칠기와 조도곡선을 모델화하기 위하여 (a/2b)를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 $2b=220\mu\text{m}$ 로 측정되었고, a는 R_{max} 값인 22.80 μm 를 사용하였다. 이렇게 정한 값을 식(6)과 식(7)에 대입하여 피로한도(σ_w)를 계산하였다. Series A, B, C의 결과를

Table 4에 나타내었다.



(a) Real Roughness Curve



(b) Model Curve

Fig. 10 Modeling of Roughness Curve

Table 4 Comparison of Fatigue Limit

	a	2b	$\sqrt{area_R}$	Fatigue Limit	
				Pred.	Expr.
Series A	22.80	220	51.1	232	265
Series B	6.60	171	17.6	285	320
Series C	0.65	63	1.9	406	335

Table 4로부터 \sqrt{area} parameter법으로 평가한 피로한도값이 실험값보다 10~15% 낮은 값을 보이고 있다. 이 원인으로는 가공으로 인한 잔류응력과 가공경화의 인자가 고려대상에서 제외되었기 때문이다. 일반적으로 기계가공에서 오는 잔류응력은 압축성으로서 피로강도에 유익하게 작용하며, 가공경화도 유익한 것으로 알려져 있다. 이처럼 피로강도에 유익한 몇가지 요소가 배제됨으로써 계산값이 실제값에 미치지 못하였다고 생각된다. 그러나 Series C의 경우, 계산값과 실험값의 차이가 크기 때문에 이론식을 적용할 수 없으며, 이것은 경면과 같은 이상적인 표면거칠기를 유지하는 것에는 한계가 있음을 시사해 주고 있다. 따라서, 일반적인 기계가공에 의해 생성되는 표면거칠기 범위내에서의 피로수명 예측은 가공에 의한 미소 잔류응력과 가공경화를 고려한다면, 표면거칠기를 \sqrt{area} parameter법으로 평가하여 피로한도를 예측하는 기법은 매우 유용한 것으로 생각된다.

4. 3 표면 압축잔류응력이 피로한도에 미치는 영향

다음으로 Roller Finishing처리한 Series D를 시험한 경우에 피로한도의 차이를 고찰하기 위하여 Series A, B, C와의 비교값을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Comparison of Series A, B, C and D

	Roughness (μm)	Hardness (Hv)	Fatigue Limit (MPa)
Series A	22.80	93	265
Series B	6.60	102	320
Series C	0.65	96	335
Series D	1.08	99	360

Table 5에서 Series D의 경우, Series C와 비교하였을 때, 낮은 조도값을 가지고 있음에도 불구하고 높은 피로한도값을 보이고 있는 것으로 보아 표면 압축잔류응력이 피로한도에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 Series D가 Series C보다 표면거칠기값이 낮은데도 Series A보다 피로한도값이 36%높게 나타나, 표면거칠기와 함께 표면 압축잔류응력이 부재의 피로한도에 많은 영향을 주고 있음이 증명되었다. 또한 Roller Finishing가공은 피로한도 상승뿐만 아니라 표면거칠기를 상승시켜 가공 정밀도를 높일 수 있고, 가공방법 또한 간단하기 때문에 현장에서 응용하여 적용할 수 있는 유용한 가공법이라 하겠다.

5. 결 론

본 연구에서는 기계구조용 탄소강(SM55C)을 가공정도에 따라 표면거칠기가 다른 시편 3종과 Roller Finishing한 시편 1종을 사용하여 피로실험을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면거칠기가 다른 3종의 시편에 대하여 피로한도를 구한 결과, Series A, B, C의 피로한도가 각각 265, 320, 335MPa로 나타났으며, Series A를 기준으로 했을 때 Series B와 C는 각각 20%, 26%의 피로한도 상승을 보였다. 따라서 가공정도에 따라 피로한도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

(2) 일반적인 가공방법, 즉 절삭이나 연삭에 의해 가공된 부품의 표면거칠기와 경도를 알고 있을 때, 피로한도를 예측할 수 있는 방법으로써의 \sqrt{area} parameter법은 매우 유용함을 알 수 있다.

(3) Roller Finishing한 Series D의 경우, 그 피로

한도가 360MPa로 Series A와 비교하여 36% 높게 나타났다. 이 경우에는 표면 압축잔류응력이 피로 한도를 상승시키는 주요 원인으로 작용한 것이며, Roller Finishing에 의한 가공은 피로한도 상승뿐만 아니라 표면거칠기 향상을 동반하며, 가공방법도 매우 간단한 유용한 가공법임이 밝혀졌다.

참 고 문 헌

- [1] Murakami, Tsutsum and Fujishima, "疲勞強度に及ぼす表面加工層の影響", 日本機械學會論文集, 51-464, pp1124, 1996
- [2] 村上, "微小缺陷と介在物の影響", 養賢堂, pp54, 1993
- [3] 川田雄一, "機械設計", 養賢堂, pp3-7, 1994
- [4] 恒成利康外, 3人 "機械の疲勞壽命設計", 養賢堂, pp.169-175, 1994
- [5] 横堀, "金屬材料の疲勞", 日本機械學會論文集, pp.84, 1973
- [6] 石橋正, "金屬の疲勞と破壊の防止", 養賢堂, pp.158-163, 1983