



표면경화재의 피로한도 예측에 대한 연구

A Study for the Prediction Fatigue Limit in a Case Hardening Material

이 상 훈* · 박 원 태**

S.H. Lee · W.T. Park

(1999년 5월 13일 접수, 1999년 12월 8일 채택)

ABSTRACT

The standard of the allowed stress in designing components such as shafts used in machinery and aircraft should be determined. It is very important to estimate fatigue strength of a component analytically, because service stress of the components is usually under the level of its fatigue limit. Improving the fatigue strength of each component in machinery is essential for high performance, lightness, and endurance. Surface treatment of components is widely used for these purpose.

In this research, the fatigue behaviors of SCM415 steel and carbonitrided SCM415 steel are examined. In the analysis of the fatigue behaviors of the carbonitrided SCM 415 steel, we propose a modified fatigue strength evaluation model and modified formulae.

1. 서 론

최근 경제성과 생산성의 측면에서 기계 부품의 수명을 효과적으로 향상하는 표면경화 처리법이 산업 현장에서 개발되어 사용되고 있다. 그러나 표면경화 처리로 인해 재료는 표면에서 고경도의 특성과 잔류응력 등의 영향으로 신뢰성 있는 피로강도와 수명평가가 어려우므로 피

로강도강도와 수명의 평가는 일부에서만 연구가 수행되고 있기 때문에 현장에서 피로강도의 설계는 현장의 경험에 의존해 이루어지고 있다. 그러나 고경도재의 파손이 결함 및 개재물에서 시작된다는 연구결과¹⁾에서 최근에 주목받고 있는 해석방법은 결함 및 개재물을 균열과 동등하게 고려해서 파괴역학의 개념을 도입해 피로강도를 평가한다. 이것은 Kitagawa와 Takahashi²⁾

* 두원공과대학

** 천안공업대학

에 의해 짧은 균열(short crack)문제에 대해 파괴역학적 접근이 시작된 이후, Dugdale 모델³⁾에 근거해서 반복소성역(cyclic plastic zone)의 크기를 계산에서 구해 평가하는 방법과 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 근거한 접근 방법으로 구분된다.

파괴역학에 근거해 피로한도는 Topper와 Smith⁴⁾, Usami와 Shida⁵⁾, Tanaka와 Nikai⁶⁾, Murakami와 Endo^{7,8)} 등의 연구자들이 각기 피로설계를 위한 평가 모델을 제안하였다. 그러나 이들 모델은 제한된 경우에서만 적용할 수 있기 때문에 실제로 기계부품의 피로설계를 위해서는 정확한 검토가 요구된다.

본 연구는 현장에서 널리 사용되는 표면경화 처리재에 원공결함을 가공해 고강도 회전축의 설계 강도를 예측할 수 있는 정량적인 피로강도 평가식을 제안한다.

2. 실험 및 평가 방법

2.1 실험 방법

본 연구에서 사용한 재료는 KS D 3711(한국 공업규격)에 규정되어 있는 크롬 몰리브덴 강인 SCM415($\phi 16\text{mm}$)를 사용하였다. 실험재료의 기계적 성질을 얻기 위해서 KS B 0801 규정에 따라 인장 시험편을 제작하여 시험하였다. 인장시험을 통해 구한 실험재료의 인장응력, 연신율과 탄성계수 등의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 경도는 미소 비커스 경도계를 사용하여, KS B 0811 규정에 따라 측정하였다. 시험편들의 평균 경도는 표면을 임의로 50개소 선정하여 통계처리를 하여 결정하였다. 그리고 표면경화층의 경화층은 KS D 0215에 의해 유효경화층을 결정하였다.

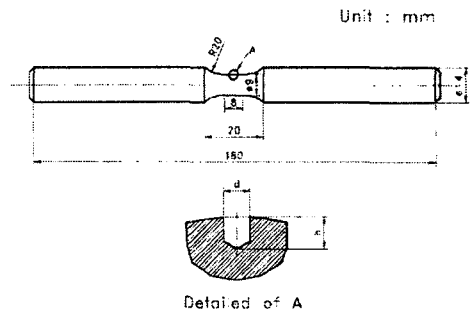
한편, 본 연구에 사용한 침탄질화 열처리에는 650°C 상태의 로 내에 시험편을 장입시킨 후, 온도를 840°C에서 3시간 동안 일정하게 유지시키면서 시험편에 탄소와 질소를 침입시킨다. 다음에 시험편을 80°C까지 유냉시켜 담금질을 한 후, 잔류 오스테나이트의 감소 및 β -마르텐사이트화 처리를 위해 180°C에서 2시간 동안 뜨임처리(tempering)를 하였다.

Table 1 Mechanical properties of the testing material

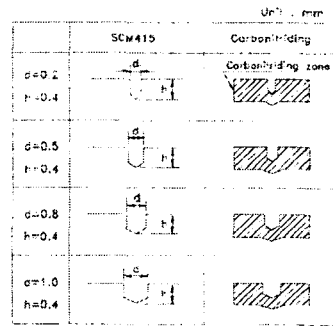
	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Mean hardness (Hv _{0.05})	Young's modulus (GPa)
SCM415	536.9	307.4	20.97	35.34	275	208.1
CNTS*	1044.8	755.4	2.10	2.33	575	218.2
RCNTS**	922.1	760.3	2.24	2.59	532	208.3

*: CarboNitrided Treatment Specimen

** : Released residual stresses of CNTS



(a) Geometry of fatigue test specimen



(b) Configuration of various hole defects

Fig. 1 The geometries of specimens

이상의 처리 과정에서 제작한 시험편을 CNTS(Carbonitrided Treatment Specimen, 이하 CNTS라 칭함)이라 정하였다. 그리고 본 연구에서 침탄질화 처리재의 피로강도에 미치는 인자들 중에서 잔류응력의 영향을 고찰하기 위해 2차 뜨임처리(tempering)를 하여 표면의 잔류응력을 거의 제거하였다. 이 때 처리온도와 유지시간의 선정은 각기 재료에 따라 달라지게 되는데, Stickels 등⁹⁾에 의한 실험결과와 예비시험에

서 재처리온도는 450℃에서 3시간으로 결정하였다. 이와 같이 잔류응력이 거의 제거된 시험편은 본 연구에서 RCNTS(Released residual stresses of CNTS, 이하 RCNTS라 칭함)라 정하였다.

한편, 표면경화재의 피로강도를 평가하기 위해 앞에 방법에 의해 제작된 시험편을 이용해 회전굽힘 피로시험을 하였고, 시험편은 Fig. 1에 나타내었다. 이 때 원공은 표면경화 처리를 하기 전에 고속드릴을 이용해 가공하였다. 그리고 시험은 회전굽힘 피로시험기를 사용했고, 시험주파수는 56.7Hz이었다.

2.2 피로하중에서 피로한도의 평가 모델

2.2.1 Frost의 모델¹⁰⁾

강재에 대한 보고에서 Frost는 피로한도 σ_w 와 2차원 균열길이 혹은 표면 노치의 길이 l 에 대한 연구에서 다음과 같은 형태의 경험식을 제안하였다.

$$\sigma_w^3 \cdot l = C \dots\dots\dots(1)$$

이 때 C는 연강에 대한 재료 상수이지만, 그 후 여러 재료에 대한 연구로부터 재료 의존성이 밝혀져서 실험에 의해 결정되는 값이다. 그리고 인장강도 σ_u 의 값이 77MPa에서 925MPa의 범위에서 피로한도 σ_w 는 $\pm 7\%$ 의 오차의 범위에서 평가될 수 있다. 매우 단순한 형태의 평가식이지만 균열길이 l 이 짧은 영역에서는 성립하지 않는다.

Kobayashi 등¹¹⁾은 유사한 연구를 통해 Frost의 경험식에서 균열길이의 변화에 의해 지수가 3→4로 수정될 수 있다고 제시하였다. 그리고 Murakami 등⁷⁾은 결함의 투영 면적으로 작은 표면결함에 대해 $\sigma_w^n \cdot \sqrt{\text{area}} = C$ 라는 수정된 관계식과 $n \approx 6$ 임을 제안하였다. 또한 제안된 관계식의 지수 n 은 연구에서 고려한 결함 크기의 차이로 인해 3→4→6으로 변화된다고 지적하였다. 고려되는 결함의 형태는 2차원의 균열과 2차원의 노치로 제한된다. 고강도재의 인장강도는 이 모델이 제한된 인장강도의 범위를 초과하는 경우가 대부분이고, 실험에 의해 상수 C를 결정해야 하므로 이 모델은 저·중강도강의 피로강도를

평가하는 경우로 제한된다.

2.2.2 Murakami와 Endo의 모델⁸⁾

Murakami와 Endo는 다양한 결함에서 균열의 3차원 수치 응력해석과 작은 표면결함에서 균열이 발생하는 미세 관찰을 통해 새로운 기하학적인 변수 $\sqrt{\text{area}}$ 를 제안한 이후, 하한계 응력확대계수범위(threshold stress intensity factor range) ΔK_{th} 와 피로한도 σ_w 에 대한 각각의 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (H_v + 120) (\sqrt{\text{area}})^{1/3} \quad (2a)$$

$$\sigma_w = \frac{1.56 (H_v + 120)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/6}} \dots\dots\dots(2b)$$

$$\sigma_w = 1.56 (H_v + 331) / (\sqrt{\text{area}_i})^{1/6} [(1-R)/2]^a \dots\dots\dots(2c)$$

여기서 ΔK_{th} 는 응력비 $R = -1$ 에서 하한계 응력확대계수범위(threshold stress intensity factor range)이다. σ_w 는 회전굽힘 혹은 인장-압축 응력 상태에서 피로한도이고, H_v 는 미소 비커스 정도이다. 그리고 식 (2b)는 잔류응력이 재료의 내부에 존재하지 않는 경우이고, 식 (2c)는 잔류응력이 재료의 내부에 존재하는 경우에 평가식으로써 적용된다. 이 모델이 적용되는 정도의 범위는 H_v 70~720이고, $\sqrt{\text{area}}$ 의 최대 범위는 1000 μm 이다. 피로한도 평가식은 시험재료, 작용하중과 시험편의 형상에 따라 다르기 때문에 표면경화재의 피로강도 평가는 충분한 검토가 필요하다. 그러나 이 등^{12,13)}에 의해 연구된 CNTS의 피로거동의 검토에서 Murakami의 모델이 가장 타당할 것으로 판단되므로, 본문에서 상세히 검토한다.

3. 표면경화 처리와 피로강도

3.1 결함의 크기와 피로한도

결함의 크기에 따라 재료의 피로한도가 변화하지만, 원공결함의 지름이나 깊이 혹은 2가지 변수의 형상비에 의해 피로한도의 매개변수로 일괄적으로 정리하는 것은 어렵다. 이에 대해 최근에 주목받고 있는 매개변수는 결함의 최대 주 응력 방향에 투영된 면적의 평균근 $\sqrt{\text{area}}$ 이다.

본 연구에서는 원공결함을 $\sqrt{\text{area}}$ 라는 매개변수로써 표시하고자 한다. 매개변수 $\sqrt{\text{area}}$ 는 다음과 같이 산출한다.

$$\sqrt{\text{area}} = \sqrt{hd - \frac{d^2}{4\sqrt{3}}}, \theta = 120^\circ \dots\dots(3)$$

여기서 d는 원공의 지름이고, h는 원공의 깊이이다.

한편, 피로한도의 상태를 미소결함에서 정류균열이 발생한 상태로 고려하면 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta K_{th} \cong 0.65 \times (2\sigma_w) \times \sqrt{\pi\sqrt{\text{area}}} \dots\dots(4)$$

여기서 σ_w 는 피로한도이다.

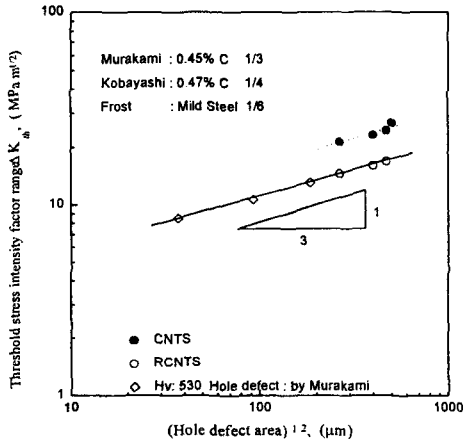


Fig. 2 Relation between ΔK_{th} and $\sqrt{\text{area}}$ for various hole defects

Fig. 2는 식 (4)에서 구한 ΔK_{th} 와 원공결함의 $\sqrt{\text{area}}$ 관계를 나타낸 선도이다. ○ 기호는 원공결함을 갖고 표면경도 Hv 532인 RCNTS재에 대한 결과이고, ◇ 기호는 RCNTS재와 동일경도인 표면경도 Hv 530인 마르에징강(maraging steel)에 대한 Murakami 등¹⁴⁾의 결과이다. 이때 ΔK_{th} 와 $\sqrt{\text{area}}$ 는 직선 상의 관계에 있고, 직선의 기울기는 약 1/3이다. 그리고 ● 기호는 원공결함을 갖고 표면경도 Hv 575인 CNTS재의 경우로 그 기울기는 1/3의 경향을 따르고 있다.

직선의 기울기의 값에 대해 Murakami 등은 1/3, Kobayashi 등은 1/4, Frost는 1/6 임을 제

시하고 있다. 본 연구의 결과에서는 원공결함을 갖는 CNTS의 ΔK_{th} 와 $\sqrt{\text{area}}$ 는 다음과 같은 관계로 정리될 수 있다.

$$\Delta K_{th} \propto (\sqrt{\text{area}})^{1/3} \dots\dots(5)$$

결함의 크기에 따른 피로한도 σ_w 의 의존성의 관계는 식 (4)와 식 (5)에서 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\sigma_w \propto \frac{1}{\sqrt{(\text{area})^{1/6}}} \dots\dots(6)$$

Table 2는 침탄질화 표면경화재의 ΔK_{th} 와 피로한도의 $\sqrt{\text{area}}$ 와 표면경도 Hv에 따른 변화를 나타낸 것이다.

Table 2 The values of ΔK_{th} and σ_w according to $\sqrt{\text{area}}$ and Hv

Material	$\sqrt{\text{area}}$ of hole defect, μm	Surface hardness, Hv	ΔK_{th} from test, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Fatigue limit from test, MPa
RCNTS	272.5 (d=0.2,h=0.4)	532	14.83	390
	404.9 (d=0.5,h=0.4)	532	16.22	350
	477.1 (d=0.8,h=0.4)	532	17.11	340
CNTS	272.5	575	21.68	570
	404.9	575	23.41	505
	477.1	575	24.66	490
	505.6	575	24.09	465
Maraging steel ¹⁴⁾	185	740	13.8	441
	185	670	14.5	461
	185	650	13.2	422
	185	550	13.8	441

RCNTS재의 경우 $\sqrt{\text{area}}$ 의 변화에 따른 ΔK_{th} 의 값은 14.83~17.11 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 의 범위로 나타났다. 기존의 연구결과¹⁴⁾에서 $\sqrt{\text{area}}$ 가 185 μm 인 경우 ΔK_{th} 의 값은 각기 13.2~14.5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 이고, 본 실험결과에서 $\sqrt{\text{area}}$ 가 272.5 μm 인 경우 ΔK_{th} 의 값은 14.83 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 로 실험오차 범위에 있다. 그러나 동일한 $\sqrt{\text{area}}$ 를 갖는 CNTS재의 경우 ΔK_{th} 의 값은 21.68 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 로 높게 나타났다. 그 이유는 CNTS재의 원공 주위에 압축 잔류응력 값이 고려되지 않았기 때문으로 추

정된다. 원공결함 면적의 평방근인 $\sqrt{\text{area}}$ 의 변화에 따라 ΔK_{th} 의 값은 일정한 상수가 아니라 변화하는 결과를 나타내고 있다.

3.2 경도값과 피로한도

CNTS의 피로특성은 표면의 경도분포와 관계가 있음을 고찰했고, 저·중경도강의 피로한도와 미소 비커스 경도와의 관계에 대한 실험적인 결과¹⁵⁾는 많이 보고되어 왔다. 그러므로 CNTS의 피로한도는 경도 값과 관계를 가지고 있음을 알 수 있으나, 단순히 경도값과 선형적인 관계보다는 결함의 크기와 함께 관계가 있을 것으로 추정할 수 있다. 이 때 하한계 응력확대계수범위(threshold stress intensity factor range), $\Delta K_{th}(\Delta K=K_{max}-K_{min})$ 는 응력비 R이 -1일 때, 식 (2a)는 다음과 같은 관계식으로 주어진다.

$$\Delta K_{th} = C_1(H_v + C_2)(\sqrt{\text{area}})^{C_3} \dots \dots \dots (7)$$

여기서 C_1, C_2 는 재료에 무관한 상수로, C_1 은 3.3×10^{-3} , C_2 는 120이다¹⁶⁾. 그리고 C_3 는 본 연구의 경우 1/3이고, 식 (7)은 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (H_v + 120)(\sqrt{\text{area}})^{1/3} \dots \dots \dots (8)$$

여기서 ΔK_{th} 의 단위는 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $\sqrt{\text{area}}$ 는 μm , H_v 는 kgf/mm^2 이다.

Fig. 3은 $\sqrt{\text{area}}$ 에 따라 Table 2에 있는 ΔK_{th} 의 값과 원공 주위의 경도값에서 구한 결과를 나

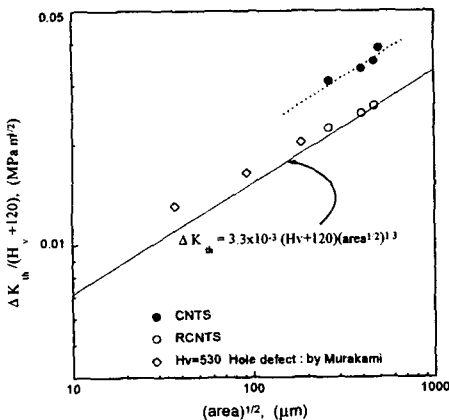


Fig. 3 Relation between $\sqrt{\text{area}}$ and $\Delta K_{th} / (H_v + 120)$

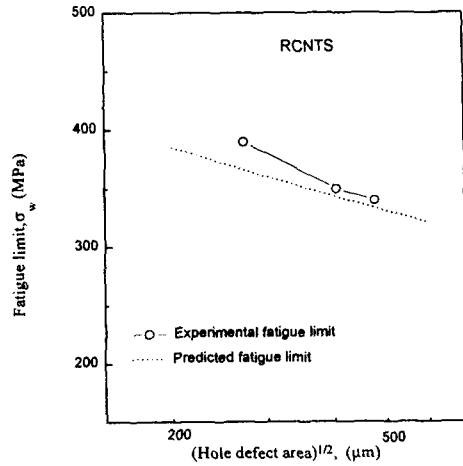


Fig. 4 Comparison of the predicted and test fatigue limit for RCNTS

타낸 것이다. RCNTS재는 기존의 실험결과¹⁴⁾와 비교해 매우 양호한 경향을 나타내고 있다. 즉 원공결함을 갖고, 잔류응력이 없는 경우의 표면 경화재는 식 (8)에 의해 잘 정리됨을 의미한다. 그러나 잔류응력을 갖는 CNTS재의 경우는 식 (8)의 관계에 비해 과대평가되는데, 이것은 원공결함 주위의 압축 잔류응력효과가 고려되지 않았기 때문이다. 이 때 피로한도 σ_w 는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\sigma_w \cong 1.43(H_v + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \dots \dots \dots (9)$$

여기서 σ_w 는 피로한도로 단위는 MPa, H_v 는 미소 비커스경도로 단위는 kgf/mm^2 이다.

$\sqrt{\text{area}}$ 는 원공결함을 최대 주응방향에 투영된 면적으로 단위는 μm 이다.

Fig. 4는 식 (9)를 적용하여 계산한 결과와 실험에서 구한 결과를 비교하기 위한 선도이다. 결함의 크기가 증가함에 따라 실험결과와 예측 결과의 차이는 점차로 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 실험의 범위에서 경도에 따른 피로한도값의 실험값과 예측값은 일치하며, 그 차이는 최대 6.5%에서 2%로 매우 양호하다. 즉 침탄결화 처리되어 경도구배를 갖는 표면경화재의 경우도 결함이 표면에 존재하면 예측에 의해서도 실험결과와 거의 일치된 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 잔류응력과 피로한도

잔류응력의 분포는 피로한도 및 피로수명에 영향을 준다는 사실에 대해 잔류응력의 값을 작용하는 응력의 평균응력 효과로 정리될 수 있다고 알려졌다. 평균응력이 피로강도에 미치는 영향은 수정 Goodman 선도와 Soderberg 선도에 의해 나타내는 방법으로 제안되고 있으나, 강도가 높게 되면 평가에 오차가 많고, 그 오차도 위험 측에 존재하게 된다¹⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 잔류응력을 국부적으로 작용하는 평균응력과 같다고 고려해서, 피로강도의 평가를 시도하였다.

$$\sigma_w \cong 1.43(Hv + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \times [(1-R)/2]^{\alpha} \quad (10)$$

여기서 R은 응력비로 $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ 이고, 본 연구에서 작용 응력의 최소와 최대값은 피로한도의 상태이므로 $(\sigma_{\text{res}} - \sigma_a) / (\sigma_{\text{res}} + \sigma_a)$ 의 관계로 나타낼 수 있다. 여기서 σ_a 는 실험에서 피로한도이다. 그리고 α 를 결정하기 위하여 σ_w 와 $1.43(Hv + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6}$ 의 비를 log-log 선도의 종축으로 잡고, $(1-R)/2$ 를 횡축으로 하여 실험값과 정리하였다.

Fig. 5는 정리된 결과를 나타내고 있다. 여기서 저경도(Δ 기호로 표면경도 Hv 105인 0.13% 탄소강)와 고경도(\diamond 기호로 표면경도 Hv 704~

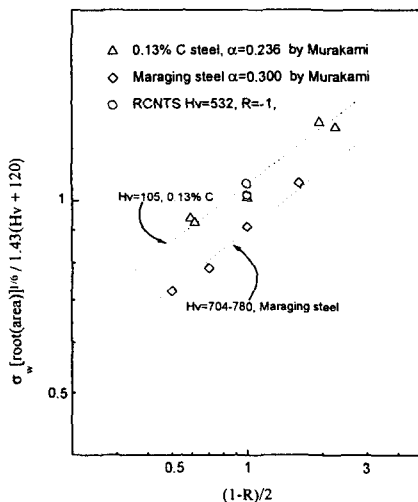


Fig. 5 Effect of stress ratio for fatigue limit according to various materials

780인 마르에이징강)의 실험결과는 선도에서 직선으로 정리되지만, 기울기는 재료의 경도에 의존하는 경향을 나타내고 있다.

여러 경도의 범위에서 α 는 재료상수로 $0.226 + Hv \times 10^{-4}$ 으로 정리될 수 있으며, 경도에 의존하는 재료상수로 표시된다. 본 연구의 경우 Hv 532인 RCNTS재의 경우 실험값이 경도가 다른 두 재료의 실험 범위에 존재하므로 α 를 $0.226 + Hv \times 10^{-4}$ 로 결정하였다.

위의 식 (10)을 이용하여 원공결함을 갖고 표면에 잔류응력이 존재하는 CNTS재에 대한 정량적인 피로한도 평가를 시도하였다. Fig. 6은 원공결함을 갖는 CNTS재에 대한 평가값과 실험값의 비교결과이다. 이 때 원공 주위의 표면잔류응력은 X-ray diffraction방법을 이용하여 측정하였고, 그 결과 약 -200MPa로 측정되었기 때문에 이 값으로 고려하였다¹²⁾. 원공결함의 $\sqrt{\text{area}}$ 의 증가에 따라 피로한도의 실험값은 감소하고, 평가값도 감소하는 경향을 보이고 있다. 실험값과 평가값의 차이는 원공결함 면적의 평방근 $\sqrt{\text{area}}=272.5 \mu\text{m}$ ($d=0.2\text{mm}$)에서 113MPa, $\sqrt{\text{area}}=404.9 \mu\text{m}$ ($d=0.5\text{mm}$)에서 71MPa, $\sqrt{\text{area}}=477.1 \mu\text{m}$ ($d=0.8\text{mm}$)에서 66MPa, $\sqrt{\text{area}}=505.6 \mu\text{m}$ ($d=1.0\text{mm}$)에서 44MPa의 범위에 있으며, 그 오차율은 24.7%, 16.4%, 15.6% 및 10.5%의 분포를 나타낸다. 오차는 원공 주위의 잔류응력 오차,

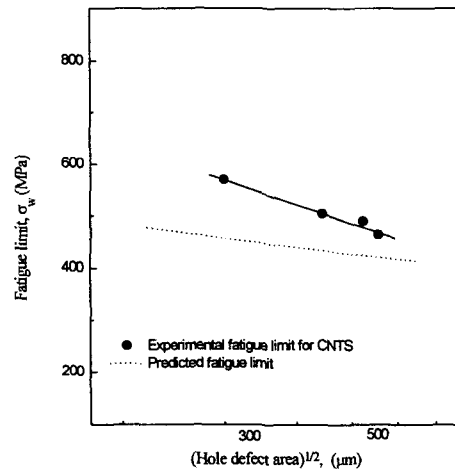


Fig. 6 Comparison of the predicted and test fatigue limit for CNTS

원공결합의 가공 오차 및 경도의 오차 등에 의해 발생했다고 생각된다. 그러나 그 오차율은 최대 25% 이하의 범위를 나타내고 있어, 피로한도의 평가식으로 파괴역학적 접근이 타당함을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.4 원공결합을 갖는 표면경화재의 피로한도 평가 및 예측

CNTS재에 원공결합이 있는 경우 피로한도의 정량적인 평가를 위해서 고려해야 하는 변수는 원공결합 면적의 평방근, 원공결합 주위의 경도와 잔류응력 등이다. 표면경화재의 피로균열은 원공결합에서 시작되기 때문에 원공결합을 갖는 CNTS의 정량적인 피로한도 평가는 전경화재의 경우와 차이가 없이 평가된다.

Fig. 7은 원공결합에 따른 표면경화재의 실험 피로한도와 예측 피로한도의 비를 표시한 선도이다. 잔류응력이 없는 RCNTS재는 예측값이 실험에서 구한 값과 6% 이내의 범위로 잘 일치하고 있다. 그리고 CNTS재는 잔류응력을 평균 응력효과로 고려한 경우와 고려하지 않은 2가지 경우로 해석하여 보았다. 잔류응력을 고려하여 예측한 경우가 잔류응력을 고려하지 않은 경우보다 실험값에 더욱 근접한 결과를 나타내고 있다. 그리고 잔류응력을 고려하여 예측한 결과는 실험값에 비해 오차의 범위는 24.7% 이하이며,

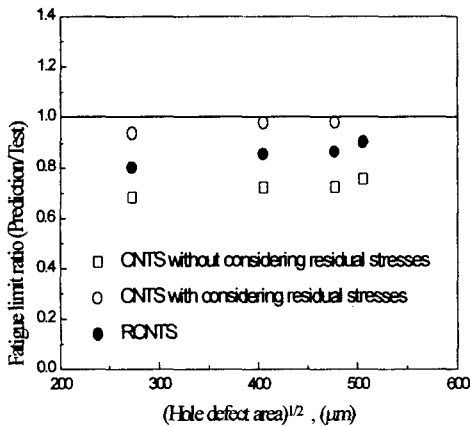


Fig. 7 Comparison of fatigue limit ratio (Prediction/Test) according to $\sqrt{\text{area}}$ of hole defect

원공결합의 크기가 크면 오차의 범위는 10.5%까지 감소한다. 즉 원공결합을 갖는 침탄질화표면 처리재는 열처리에 따라 표면의 경도, 잔류응력등이 차이를 나타나게 되는데, 이 경우 피로한도는 실험을 통하지 않더라도 현장에서 피로한도의 범위를 예측할 수 있다고 생각한다.

4. 결 론

원공결합을 갖는 크롬 몰리브덴강을 침탄질화 표면처리한 경우에 대해 피로강도 해석을 통해 피로강도를 평가할 수 있는 식을 다음과 같이 제안한다.

1) 원공결합을 갖고 잔류응력이 없는 경우에 표면경화재의 피로한도 평가식을 제안한다.

$$\sigma_w \cong 1.43(H_V + 120)/(\sqrt{\text{area}})^{1/6}$$

2) 원공결합을 갖고 잔류응력이 있는 경우에 표면경화재의 피로한도 평가식을 제안한다.

$$\sigma_w \cong 1.43(H_V + 120)/(\sqrt{\text{area}})^{1/6} \times [(1-R)/2]^a$$

참 고 문 헌

- 1) J. Lankford, "Initiation and Early Growth of Fatigue Crack in High Strength Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, pp. 617~624., 1977.
- 2) H. Kitakawa and S. Takahashi, "Application of Fracture Mechanics to very small Cracks or the Cracks in the Early Stage", Proceedings of the 2nd International Conference on the Behavior of Materials, Boston, Mass., pp. 627~631., 1976.
- 3) D.S. Dugdale, "Yielding in Steel Sheets Containing Slits", J. of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8. pp. 100~104., 1960.
- 4) T.H. Topper and K.N. Smith and M.H. El Haddad, "Fracture Mechanics Analysis for Short Fatigue Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 45, pp. 573., 1979.
- 5) S. Usami and S. Shida, "Elastic-Plastic analysis of the Fatigue Limit for a Ma-

- terial with Small Flaws”, *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 1, pp. 471~481, 1979.
- 6) K. Tanaka, Y Nakai and M Yamashita, “Fatigue Growth Threshold of Small Cracks”, *International Journal of Fracture*, Vol. 17, pp. 519., 1981.
 - 7) Y. Murakami, S. Kodama and S. Konuma, “Quantitative Evaluation of Effects of Non-metallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength Steels. I: Basic Fatigue Mechanism and Evaluation of Correlation between the Fatigue Fracture Stress and the Size and Location of Non-metallic Inclusions”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 11, No. 5, pp. 291~298, 1989.
 - 8) 村上敬宣 外2人, “高强度鋼の疲労強度に及ぼす介在物の影響の定量的評價法”, *日本機械學會論文集(A編)*, 第54卷, 第500號, pp. 688~696, 1988.
 - 9) C.A. Stickels and C.M. Mack, “Heat Treatment of Some Temperature-Resistant Carburizing Steels”, *Journal Heat Treating*, Vol. 4, No. 3, June, pp. 223~236, 1986.
 - 10) N.E. Frost, “A Relation Between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel”, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, London, UK, Vol. 173, No. 35, pp. 811~827, 1959.
 - 11) H. Kobayashi and H. Nakazawa, “On the Alternating Stress Required to Propagate a Fatigue Crack in Carbon Steel”, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 36, No. 291, pp. 1789, 1970.
 - 12) 송삼홍, 이상훈, “침탄질화 처리된 크롬-몰리브덴강의 피로거동 및 응력해석”, *한국정밀공학회지*, 제15권, 제8호, pp. 135~144, 1998.
 - 13) S.H. Song, S.H. Lee, “The quantitative Fatigue Strength Evaluation for Carbonitrided Case Hardening Material”, *Proceedings of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength '96*, pp. 633~638., Kyungju, Korea, 1996.
 - 14) 村上敬宣 外2人, “マルエーシソダ鋼の疲労強度に及ぼす微小缺陷と介在物の影響”, *日本機械學會論文集(A編)*, 第53卷, 第492號, pp. 1482~1491, 1987.
 - 15) 村上敬宣, 微小缺陷と介在物の影響, 養賢堂, pp. 33~72, 1993.
 - 16) 村上敬宣, 上村裕二郎, 夏目喜孝, 宮川進, 1990, “微小缺陷または介在物を含む高强度鋼の疲労強度に及ぼす平均應力の影響”, *日本機械學會論文集(A編)*, 第56卷, 第525號, pp. 1074~1081, 1990.