

본 논문은 1998년도 과학기술기초중점연구 지원(1998-018-E00079)에 의해 연구되었음.

침탄질화 처리된 크롬-몰리브덴(SCM415)강의 피로거동 및 응력해석 (2) - 피로강도의 예측을 중심으로 -

송삼홍*, 이상훈**

A Study on Stress Analysis and Fatigue Behaviors of Carbonitrided Cr-Mo(SCM415) Steel - About the Prediction of Fatigue Strength -

Sam-Hong Song*, and Sang-Hoon Lee**

ABSTRACT

In this research, the fatigue behaviors of carbonitrided Cr-Mo(SCM415) steel are examined. From fatigue test results, we propose a modified fatigue strength evaluation model and modified formulae. That is, we develop improved models for evaluating and predicting the fatigue strength of carbonitrided SCM415 by modifying specific terms in the Murakami and Endo's model which is the representative fatigue strength evaluation formulae for high strength steel.

Key Words : fatigue strength(피로강도), fisheye(어안), fatigue behaviors(피로거동), carbonitrided treatment(침탄질화 처리), SCM415

1. 서론

강의 침탄질화 처리와 피로거동에 대해서는 앞의 연구⁽¹⁾를 통해 피로균열은 표면으로부터 급격한 경도의 변화가 끝나는 경도의 경계층에 존재하는 결함 및 개재물에서 발생하고, 피로강도에 영향을 미치는 인자는 경도, 잔류응력, 최대 주응력이 작용하는 수직방향에서 투영한 결함형상 면적의 평방근임을 보고하였다. 그러나 정량적인 피로강도의 평가는 피로설계 분야의 필요성과 지속적인 연구에도 불구하고 만족할 만한 결과는 아직까지 미흡한 실정이다. 특히 산업현장에서 쉽게 적용할 수 있는

정량적인 평가식에 대한 연구^{(2),(3),(4)}는 국내·외에서 일부만이 수행되고 있다.

Murakami와 Endo^{(5),(6)}는 여러 재료와 다양한 경도의 범위를 갖는 경우에 대하여 회전굽힘 피로시험을 통해 얻은 결과에서 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 는 경도와 최대 주응력이 작용하는 수직방향에서 투영한 결함 형상 면적의 평방근인 \sqrt{area} 에 의해 정리되고, 이를 토대로 정량적인 피로한도의 평가식을 제시하였다. 또한 Melander⁽⁷⁾은 경도가 높은 재료의 피로균열이 개재물에서 시작된다는 사실에서 개재물을 원형의 형태로 가정하여 유한요소 해석을 통해 피로한도를 구하였고, 해석결과는

* 고려대학교 기계공학과

** 두원공과대학 컴퓨터응용설계과

Murakami등에 의해 제안된 식과 잘 일치한다고 보고하였다.

阿部등⁽⁸⁾의 연구에서도 SUP 7, 9A 재료를 담금질 처리한 고경도 재료에서 피로균열이 발생하는 응력확대계수를 Murakami등이 제안한 식으로 정리될 수 있는 결과를 보고하였다. 그러나 Murakami등이 제안된 평가식은 경도가 일정한 재료에 대해서만 적용할 수 있는 제한이 있기 때문에 표면경화 처리된 기계부품에 대한 평가식의 적용은 충분한 검토가 필요하다.

한편, 송등⁽⁴⁾과 이등⁽⁹⁾은 인공결함을 갖는 표면경화 처리재의 피로시험 결과에서 피로균열의 발생은 인공결함에서 시작되므로 표면경화 처리 여부에 관계없이 Murakami등이 제안한 피로강도 평가식에 의해 예측할 수 있음을 보고하였다. 그러나 인공결함이 없는 경우에 피로균열의 발생 위치는 작용응력의 수준과 경화층의 두께에 따라 변하므로 정량화된 평가식의 제안은 어려움이 있다.

따라서 본 연구는 침탄질화 처리된 SCM415강을 이용하여 정량적으로 피로강도를 평가할 수 있도록 피로시험의 결과와 관련식을 검토하였다.

2. 시험편 및 실험

본 실험에서 사용한 재료는 KS D 3711(한국공업규격)에 규정되어 있는 크롬 몰리브덴 강인 SCM415($\phi 16\text{mm}$)를 사용하였다. 실험재료의 기계적 성질과 경도는 Table 1에 나타내었다. 본 연구에 사용한 침탄질화 열처리는 650℃ 상태의 노 내에 시험편을 장입시킨 후, 온도를 840℃에서 3시간 동안 일정하게 유지시키면서 시험편에 탄소와 질소를 침입시킨다. 다음에 시험편을 80℃까지 유냉시켜 담금질을 한 후, 잔류 오스테나이트의 감소 및 β -마르텐사이트화 처리를 위해 180℃에서 2시간 동안 뜨임처리(tempering)하였다. 위의 처리과정에서 제작한 회전굽힘 시험편을 침탄질화처리 시험편으로 CNTS(CarboNitriding Treatment Specimen, 이하 CNTS라 칭함)라 칭하였다. CNTS 시험편 중에서 2차 뜨임처리(tempering)를 하여 표면의 잔류응력을 거의 제거하였다. 이 때 처리온도와 유지시간은 45)℃에서 3시간으로 결정하였다⁽¹⁾. 이와 같이 잔류응력이 거의 제거된 시험편은 본 연구에서 침탄질화 처리 후 템퍼링 처리 시험편으로 RCNTS(Releasing residual stresses of CNTS, 이하 RCNTS라 칭

함)라 칭하였다.

본 연구에 사용된 시험편은 Fig. 1과 같이 기계가공하였고, 시험기는 회전굽힘 피로시험기(10 kg·m, 3000rpm)이다.

Table 1 Mechanical properties of specimens

	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Young's modulus (GPa)
CNTS*	1044.8	755.4	2.10	2.33	218.2
RCNTS**	922.1	760.3	2.24	2.59	208.3

* : CarboNitriding Treatment Specimen

** : Releasing residual stresses of CNTS

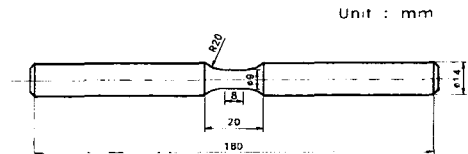


Fig. 1 Geometries of fatigue test specimen

3. 침탄질화 처리재의 정량적인 피로강도 평가

3.1 기존의 피로강도 평가식

RCNTS와 CNTS재의 피로균열은 경도의 경계층에서 발생하며, 표면에서 멀리 떨어진 내부에 존재하게 된다^{(1),(4)}. 따라서 피로강도의 평가를 위해서 먼저 임의의 형상을 갖는 내부균열에 대한 응력확대계수의 결정이 필요하다. 재료의 내부에 삼각형태의 균열, 사각형태의 균열과 타원형태의 균열선단과 균열의 면적에 따른 응력확대계수의 최대 값, $K_{I\max}$,를 고려하면 식(1)로 표시된다.

$$K_{I\max} \cong 0.5\sigma_{\infty}(\pi\sqrt{area_i})^{1/2} \quad (1)$$

여기서 σ_{∞} 는 최대인장응력이고, $area_i$ 는 내부에 있는 결함 혹은 개재물의 면적이다. 이 때 결함 혹은 개재물의 면적 $area_i$ 는 작용하는 최대 주응력

방향에 투영된 면적으로 본 실험에서는 SEM을 이용해 파단된 시험편을 조사해서 면적을 결정하였다. 식 (1)의 오차율은 타원형태의 균열에 대해서 5% 이하이고, 다른 형태의 균열에 대해서는 10% 이하이다. 이 때 내부균열에 대한 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 를 결정하기 위해서 표면균열의 면적 평방근 \sqrt{area} 와 내부균열의 면적 평방근 $\sqrt{area_i}$ 의 관계는 식(2)와 같다⁽¹⁰⁾.

$$\sqrt{area_i} = 1.69\sqrt{area} \quad (2)$$

식(2)를 경도와 결합면적의 관계로 표시되는 하한계 응력확대계수범위의 관계식인 $\Delta K_{th} \cong 3.3 \times 10^{-3} (Hv + 120) (\sqrt{area})^{1/3}$ 에 대입하여 정리하면 내부결함에 대한 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 는 식(3)과 같다.

$$\Delta K_{th} \cong 2.77 \times 10^{-3} (Hv + 120) (\sqrt{area_i})^{1/3} \quad (3)$$

여기서 Hv는 마이크로 비커스 경도값이고, 단위는 kgf/mm^2 이다. 위의 식은 내부결함과 균열에 대해, 응력비 R=1의 경우 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$)에서 성립한다. 그리고 식(1)에서 σ_{∞} 대신에 피로한도 $2\sigma_w$ 를 대입하면 응력확대계수의 최대값은 식(4)와 같이 정리된다.

$$\Delta K_{th} \cong 0.5 \times (2\sigma_w) \times \sqrt{\pi \sqrt{area_i}} \quad (4)$$

여기서 식(3)과 식(4)에서 내부 결함 및 개재물을 갖는 피로한도 σ_w 는 식(5)와 같이 표시된다⁽¹¹⁾.

$$\sigma_w \cong 1.56 (Hv + 120) / (\sqrt{area_i})^{1/6} \quad (5)$$

그리고 내부결함 및 개재물 주위의 잔류응력을 고려해야 하는 경우는 식(6)과 같이 표시된다⁽¹²⁾.

$$\sigma_w \cong 1.56 (Hv + 120) / (\sqrt{area_i})^{1/6} [(1 - R)/2]^{\alpha} \quad (6)$$

여기서 R은 응력비이며, α 는 $0.226 + Hv \times 10^{-4}$ 로서 일괄적으로 표시된다.

3.2 기존의 피로강도 평가식과 실험결과의 비교 · 검토

Fig. 2는 CNTS와 RCNTS의 S-N 선도이다. 이

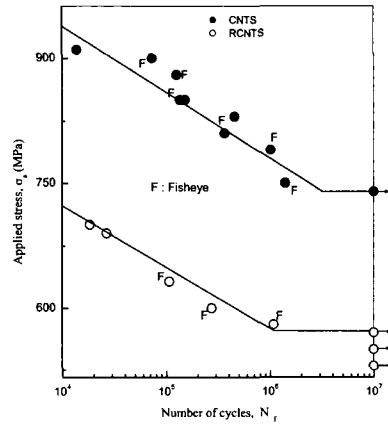


Fig. 2 S-N curves for CNTS and RCNTS

때 CNTS의 피로한도는 740MPa, RCNTS의 피로한도는 570MPa이다. S-N 선도에서 CNTS의 피로균열 발생은 피로한도 부근의 저응력 수준(긴 수명 영역)과 그 이상의 고응력 수준(짧은 수명 영역)에 따라 구분된다. 즉 CNTS 및 RCNTS 모두 피로한도 부근의 응력 수준에서 재료의 내부에 위치하는 결함 및 개재물에서 피로균열이 발생하고, 이들을 중심으로 어안(fish-eye)이 형성되는 형태를 갖는다. 이러한 피로균열의 발생형태는 침탄질화 뿐만 아니라 침탄, 고주파처리와 같은 표면경화 처리제에서 동일한 실험결과를 나타낸다⁽¹⁾.

Fig. 3은 침탄처리를 한 시험편에 대한 회전굽힘 피로시험편으로 작용하중이 750MPa이고, 파단 수명 $N_f = 1.005 \times 10^6$ 인 경우이다. 즉 경화층이 깊은 경우에도 적용하중이 피로한도 부근의 저응력수준에서 피로균열은 내부의 결함 혹은 개재물에서 발생하는 사실을 나타낸다. 그리고 결함 혹은 개재물 주위에 타원 형상의 어안이 존재하고, 어안의 수는 2개이다. 여러 개의 어안은 작용응력이 파단면 내에 일정하게 분포하는 경우에 주로 발생되지만⁽¹³⁾,



($\sigma_a = 750\text{MPa}$, $N_f = 1.005 \times 10^6$)

Fig. 3 Fractured surface of carburized SCM415

본 실험의 경우에서 경도의 경계층에 존재하는 결함 혹은 개재물에서 피로균열이 발생하고, 복수의 어안을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4는 식(5) 및 (6)을 이용하여 RCNTS와 CNTS재의 경우에 대해 피로강도를 평가한 결과이다. 여기서 식(5)를 이용한 RCNTS재의 피로강도(Fig. 4에서 점선으로 표기됨.)는 피로균열이 시작되는 내부 결함 혹은 개재물 면적의 평방근인 $\sqrt{\text{area}}$ 와 피로균열이 시작되는 위치에서 경도 값을 고려하여 평가하였다. 그리고 회전굽힘 피로시험에서 어안 내부의 결함 혹은 개재물에서 피로균열이 시작된 RCNTS의 피로강도는 결함 혹은 개재물이 위치한 곳의 공칭 피로강도이다. 작용응력의 범위는 피로한도의 11% 이내이다. 평가결과는 실험결과와 매우 큰 차이를 보이고 있어, 앞 절에서 제안된 평가식에 의해 RCNTS의 피로강도 평가는 곤란하다. 또한, 식(6)을 이용한 CNTS재의 피로강도(Fig. 4에서 파선으로 표기됨.)는 RCNTS의 경우와 같이 $\sqrt{\text{area}}$, 그 위치에서 경도값과 잔류응력을 고려하여 평가하였다. 그리고 회전굽힘 피로시험에서 어안 내부의 결함 혹은 개재물에서 피로균열이 시작된 CNTS의 피로강도는 결함 혹은 개재물이 위치한 곳의 공칭 피로강도이다. 작용응력의 범위는 피로한도의 19% 이내이다. 평가결과는 RCNTS와 동일하게 실험결과와 매우 큰 차이를 보이고 있다. 내부의 개재물 혹은 결함 면적의 평방근과 그 위치의 경도값 및 잔류응력의 효과를 고려

하는 기존의 평가에 의한 결과는 실제의 실험값에 비해 과소평가되어 침탄질화 처리재의 피로강도 평가는 어렵다. 이러한 원인은 경도가 표면에서 심부까지 일정한 전경화재의 경우에서 식(5)와 (6)이 유도되었기 때문이다.

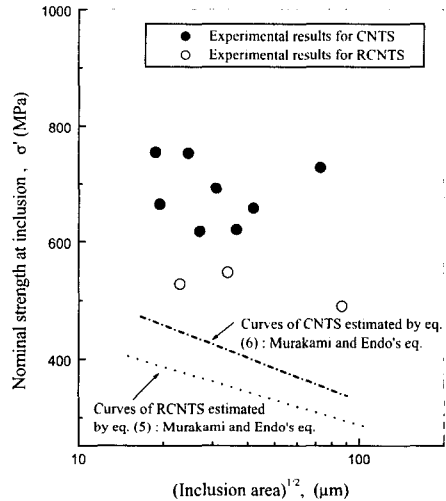


Fig. 4 Comparison of test and estimation results from eq. (5) and (6) for carbonitrided SCM415

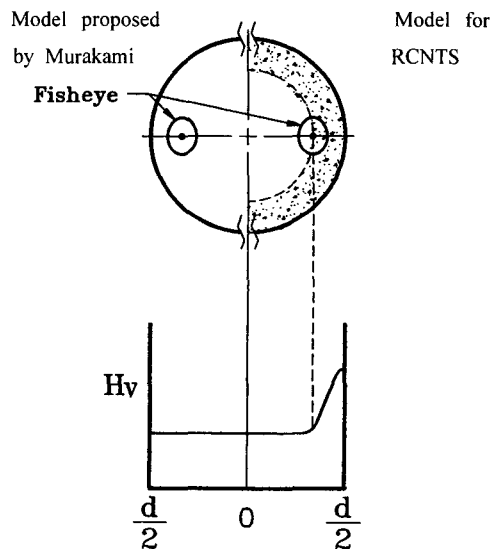


Fig. 5 Comparison of estimating model for eq. (5) and RCNTS model with hardness gradient at fractured surface

Fig. 5는 평가된 결과에 의한 모델과 실제 RCNTS의 경우에 대한 차이를 설명한 것이다. 즉 기존의 피로강도 평가식에 의한 결과는 균열이 시작되는 위치의 경도값을 갖는 재료의 피로강도에 대한 평가이므로 표면에서 심부방향으로 경도 구배를 갖는 침탄질화 처리재의 결과와는 차이가 있게 된다. 실제로 시험편에 작용하는 하중의 증가와 피로강도 향상의 직접적인 원인은 표면 부위에서 경도 구배의 존재에 기인하므로, 피로균열이 발생한 위치에서의 경도값으로 피로강도를 평가하는 식(5)와 (6)은 경도 구배의 효과를 고려해 수정되어야 한다.

3.3 수정된 평가식의 제안

수정된 피로강도 평가식을 제안하기 위해서 기존 평가식의 구성에 대해 검토해야 한다. 여기서 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 로 나타나는 기존의 평가식(3)은 식(7)과 같이 표시될 수 있다.

$$\Delta K_{th} = C_1(Hv + C_2)(\sqrt{area_i})^{C_3} \quad (7)$$

여기서 상수 C_3 는 결함 혹은 개재물의 크기와 관련된 상수로 ΔK_{th} 의 관계에서 1/3임을 앞의 연구에서 구했다.

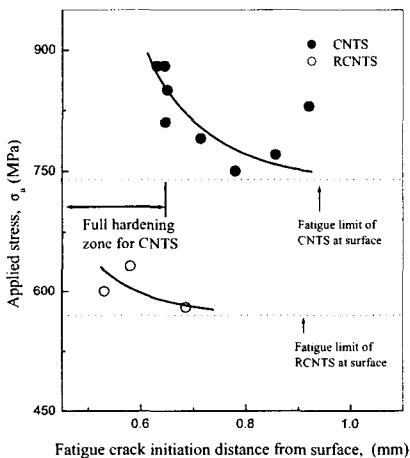


Fig. 6 Relation between the initiation distance of fatigue crack and stress amplitude

그리고 상수 C_1 은 피로균열이 발생하는 결함 혹은

개재물의 위치와 관련된 상수로 1.43 (표면에서 피로균열이 발생하는 경우), 1.56 (재료의 내부에서 피로균열이 발생하는 경우)으로 村1:등^{(6),(10)}에 의해 제시되었다. 또한 상수 C_2 는 재료의 경도와 관련된 상수로서 전경화재의 경우 실험을 통해 120으로 제시되었다⁽⁶⁾. 그러나 침탄질화 처리재의 경우 피로강도 평가시 앞 절에서 검토한 것과 같이 경도 구배의 효과를 고려해야 한다.

Fig. 6은 침탄질화 처리재에 대해 작용하는 응력과 피로균열이 시작되는 위치를 나타낸 선도이다. 여기서 작용응력이 피로한도에 접근할수록(수명이 길수록) 피로균열의 발생 위치는 전경화층의 영역을 넘어 표면에서 더욱 멀어지는 경향을 보인다. 잔류응력이 없는 RCNTS의 경우에서도 동일한 결과를 나타낸다.

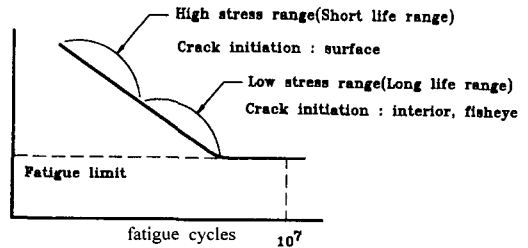


Fig. 7 Crack initiation position of fractured surface for the level of stress amplitude

Fig. 7은 작용응력의 수준에 따라 피로균열이 발생하는 위치의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 즉 피로한도에 비해 높은 응력의 범위에서 강도가 높은 경화층의 저항범위는 작용응력 보다 낮기 때문에 피로균열은 가장 높은 응력이 작용하는 표면 부위에서 시작된다. 그러나 피로한도 부근의 작용응력 수준에서 표면의 경화층은 이에 저항하고, 강도가 가장 취약한 경도의 경계층 이하의 영역에서 피로균열이 발생한다. 따라서 피로한도 부근의 반복수 영역에서 침탄질화 처리재의 피로강도는 표면부위에서 경도구배의 효과를 고려해서 ΔK_{th} 의 관계식에 평가해야 한다는 점을 의미한다. 즉 표면 부위에서 경도구배의 효과가 ΔK_{th} 의 관계에 고려되지 않았기 때문에 경도와 관련 있는 상수 C_2 는 수정되어야 한다.

$$\Delta K_{th} \propto (Hv + C_2) \quad (8)$$

그러므로 식(4)와 (7)에서 피로강도의 평가식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_w = C_1(Hv + C_2)/(\sqrt{area_i})^{1/6} \quad (9)$$

여기서 상수 C_1 은 1.56이고, C_2 는 경도와 관련된 상수로 본 실험의 RCNTS의 피로시험 결과에서 구하였다. 즉 상수 C_2 는 식(9)에서 결함 혹은 개재물의 면적 평방근, 그 위치에서 피로강도와 경도의 함수이므로 계산에 의해 결정하였고, 침탄질화 처리재의 경우 331이다. 따라서 내부의 개재물 혹은 결함에서 피로균열이 발생한 표면경화재의 피로강도 평가식은 식(10)과 같이 수정되어 정리된다.

$$\sigma_w = 1.56(Hv + 331)/(\sqrt{area_i})^{1/6} \quad (10)$$

그리고 잔류응력이 존재하는 경우에 대해서는 식(11)로 표시될 수 있다.

$$\sigma_w = 1.56(Hv + 331)/(\sqrt{area_i})^{1/6} [(1 - R)/2]^\alpha \quad (11)$$

여기서 R 은 응력비이며, α 는 $0.226 + Hv \times 10^{-4}$ 로서 일괄적으로 표시된다. 그리고 이 평가식은 본 연구의 실험결과에서 피로균열의 발생위치 H 와 시험편의 지름 D 의 관계가 $2H/D > 0.127$ 의 범위로 제한된다.

Fig. 8은 RCNTS재와 CNTS재에 대하여 개재물에서 피로균열이 시작되는 위치의 공칭응력과 수정된 평가식의 비와 피로반복수의 관계이다. 여기서 수정된 평가식에 의한 결과는 짧은 수명영역과 긴 수명의 영역 모두에서 안정적인 결과를 나타내고 있다. 특히 피로한도 부근의 응력에서의 반복수인 긴 수명의 영역에서 실험과 평가식의 비율이 1에 근접해 수정된 피로강도 평가식의 오차는 더욱 감소한다. 그리고 Ni-Cr-Mo강에 대한 피로강도의 평가시 Murakami등은 오차의 범위가 20% 이내로 분포한다고 보고⁽⁶⁾하였지만, 본 연구에서 수정된 피로강도의 평가 오차는 대부분 이보다 작은 범위에 분포한다.

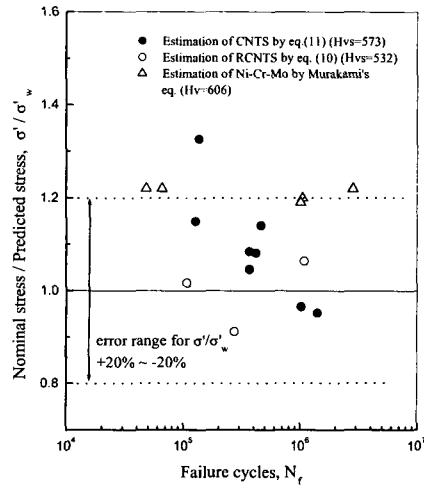


Fig. 8 Modified S-N curve (σ' / σ_w) from suggested estimation

Table 2는 수정된 평가식을 이용하여 실험데이터에 대해 상세히 정리한 결과이다. 잔류응력이 없는 RCNTS의 경우 수정된 피로강도 평가식을 이용하여 실험 값과 비교해 본 결과 오차의 범위는 -8.8%에서 6.4% 까지의 분포를 보이고 있다. 오차는 개재물에서 피로균열이 발생한 위치의 공칭응력을 고려한 것으로, 실제의 피로한도인 570MPa의 경우를 고려한다면 수정된 피로강도 평가식은 의미가 있다고 생각된다. 그리고 잔류응력이 있는 CNTS의 경우 평가값과 실험값의 비교에서 오차의 범위는 -4.8%에서 32.6%의 범위를 나타내고 있으나, 대부분의 경우 오차율은 15% 미만으로 평가값과 실험값이 일치하는 1을 중심으로 분포하고 있다. 또한 CNTS의 피로한도가 740MPa임을 고려해 평가의 결과를 검토하면 매우 안정적인 평가의 범위를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 따라서 수정된 피로강도의 평가식 (10)과 (11)은 CNTS의 피로강도 평가에 사용될 수 있음을 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서 침탄질화 처리재의 피로한도는 표면의 경도 구배에 의해 증가하고, 피로균열은 경도의 경계층에서 발생한다는 사실을 알 수 있었다.

Table 2 Size and location of inclusions and fatigue limit predicted by eq. (10) and (11)

Material and vickers hardness, Hv	Applied stress at surface, (MPa)	Cycles to failure, N_f	Inclusion size, \sqrt{area}_i (um)	Distance from surface, H(mm)	Nominal stress at inclusion, σ'	Fatigue limit predicted by Eq. (10) and (11), σ'_w	$\frac{\sigma'}{\sigma'_w}$
RCNTS, Hv=532	580	1.09×10^6	86.69	0.686	490.2	460.5	1.064
	600	2.75×10^5	23.01	0.531	528	579	0.912
	632	1.08×10^5	34.0	0.58	547.6	538.2	1.017
CNTS, Hv=573	750	1.41×10^6	27.0	0.78	618	649	0.952
	770	3.70×10^5	36.49	0.857	621	593.9	1.046
	790	1.02×10^6	19.43	0.714	664.4	688	0.966
	810	3.68×10^5	30.9	0.647	691.7	637.9	1.084
	830	4.60×10^5	41.9	0.92	657.6	576.8	1.140
	850	1.37×10^5	72.89	0.65	728	549.1	1.326
	880	1.26×10^5	24.6	0.645	752.7	655	1.149
	880	4.17×10^5	18.82	0.63	754.9	698.2	1.081

이와 같은 결과를 수식으로 정리하면 침탄질화 처리재의 피로강도 평가식은 다음과 같다.

잔류응력이 없는 경우의 피로강도 평가식은

$$\sigma_w \cong 1.56(Hv + 331) / (\sqrt{area})^{1/6}$$

잔류응력이 있는 경우의 피로강도 평가식은

$$\sigma_w \cong 1.56(Hv + 331) / (\sqrt{area})^{1/6} \times [(1 - R)/2]^\alpha$$

여기서 R은 응력비이며, α 는 $0.226 + Hv \times 10^{-4}$ 로서 일괄적으로 표시된다.

참고문헌

1. 송삼홍, 이상훈, "침탄질화 처리된 크롬-몰리브덴 (SCM415)강의 피로거동 및 응력해석," 한국정밀공학회지, 제15권, 제8호, pp. 135-144, 1998.
2. D. Lukas, L. Kunz, B. Weiss and R. Stickler, "Notch Size Effect in Fatigue," Fatigue of Fracture

- Engineering Materials and Structures, Vol. 12, No. 3, pp. 175-186, 1989.
3. H. Abdel-Raouf, T. M. Topper and A. Plumtree, "A Model for the Fatigue Limit and Short Crack Behavior Related to Surface Strain Redistribution," Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 15, No. 9, pp. 895-909, 1992.
4. S. H. Song and 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.
5. Y. Murakami and M. Endo, "Effects of Hardness and Crack Geometries of ΔK_{th} of Small Cracks Emanating from Small Defects," The Behavior of Short Fatigue Cracks, Mech. Engng. pub., pp. 275-293, 1986.
6. Y. Murakami, "Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on the Fatigue Strength of Metals," JSME International Journal, Series I, Vol. 32, No. 2, pp. 167-180, 1989.
7. A. I. Gustavsson and A. Melander, "Fatigue Limit Model for Hardened Steels," Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 15, No. 9, pp.

- 881-894, 1992.
8. 阿部孝行, 金澤健二, "高强度鋼の疲勞強度と疲勞き裂發生・進展," 材料, 第40卷, 第458號, pp. 39-44, 1991.
 9. 이수진, 전형용, 성낙원, "S45C강의 고주파 열처리 표면경화재 피로한도 예측에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제6권, 제1호, pp. 134-142, 1998.
 10. 村上敬宣 外2人, "高强度鋼の疲勞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.
 11. Y. Murakami and H. Usuki, "Prediction of Fatigue Strength of High-Strength Steels Based on Statistical Evaluation of Inclusion Size," Trans. Japan Society Mech. Eng., Vol. 55, No. 510, pp. 213, 1989.
 12. 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.
 13. 増田千利, 西島敏, 下平益夫, "浸炭鋼の疲勞におけるフィシコアイ形成について," 日本機械學會論文集(A編), 第49卷, 第440號, pp. 413-423, 1983.