

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학ME-C-05)에 의하여 연구되었음.

# 침탄질화 처리된 크롬-몰리브덴(SCM415)강의 피로거동 및 응력해석 - 피로강도에 영향을 주는 제 인자를 중심으로 -

송삼홍\*, 이상훈\*\*

## A Study on Stress Analysis and Fatigue Behaviors of Carbonitried Cr-Mo(SCM415) Steel

- About Various Factors Having an Effect on Fatigue Strength -

S. H. Song\*, S. H. Lee\*\*

### ABSTRACT

In this research, the fatigue behaviors of Cr-Mo(SCM415) steel and carbonitried Cr-Mo(SCM415) steel are examined. The description of experiments in detail as follows. For SCM415 and carbonitried Cr-Mo(SCM415) steel, smooth specimens and hole defected specimens are fabricated and tested under a rotary bending tester, respectively. By performing the rotary bending fatigue test for smooth and hole defected specimens, the characteristics of the fatigue strength are examined for parameters such as tensile strength, hardness at surface, and residual stresses.

**Key Words** : fatigue strength(피로강도), fisheye(어안), fatigue behaviors(피로거동), carbonitried treatment(침탄질화 처리), inclusion(개재물)

### 1. 서론

자동차 엔진의 오일펌프 축, 워터펌프 축, 크랭크 축 및 베어링 등의 기계부품에 피로강도의 향상을 목적으로 사용되는 침탄질화 처리된 재료는 표면에서 경도 상승과 잔류응력의 존재로 처리전의 재료와는 피로거동이 다르기 때문에 피로강도의 정량적인 평가를 위해 피로거동에 대

한 연구가 필요하다. 재료의 고유한 기계적 성질인 경도는 직접적으로 피로강도 및 피로수명과 관계가 있지만, 고경도재(Hv≥400)의 경우 이러한 관계는 성립하지 않는다. 이에 대한 원인으로 경도가 낮은 저경도강(Hv≤400)의 경우 피로균열은 대부분 표면의 연한 조직 내에서 피로균열이 발생·전파하는 거동을 나타내지만<sup>(1)</sup>, 경도가 높은 경우 재료 내에 산재하여 있는 결함이나 개재

\* 고려대학교 기계공학과  
\*\* 두원공대 컴퓨터응용설계과

물에서 피로균열이 시작되기 때문이다<sup>(2),(3)</sup>. 이러한 결함이나 개재물 주위의 국부적인 응력집중과 피로강도의 관계를 논한 연구들은 다소 찾아볼 수 있다. 이에 대한 연구를 분류하면 (1) 결함, 개재물의 크기 및 형태<sup>(4),(5)</sup> (2) 결함, 개재물의 응력집중<sup>(6),(7)</sup>, (3) 결함, 개재물의 종류<sup>(8)</sup>, (4) 결함, 개재물과 모재의 접착상태<sup>(9)</sup>로 구분된다. 침탄 질화 처리에 의해 표면에서 높은 경도특징을 지닌 표면경화재의 피로거동도 결함이나 개재물과 많은 관계가 있고, 표면과 내부의 경도구배로 인해 기존의 연구조건과는 차이가 있지만 아직 명확한 결과가 보고되고 있지 않다.

한편 吉川徹 등<sup>(10)</sup>은 표면경화재의 개재물과 피로강도의 관계에 대해 표면에 분포하는 개재물 보다는 표면에서 약 0.3mm 위치에 존재하는 개재물들이 피로강도에 영향을 끼치고, 유효경화층의 깊이가 0.9~1.2mm의 범위에 있게 되면 피로강도는 최대치를 나타낸다고 보고하였다. 하지만 Naito 등<sup>(11)</sup>은 침탄 처리된 표면경화재에서 표면과 표면 직하에 있는 개재물 모두가 피로강도와 관계가 있고, 작용하는 응력의 수준이 피로한도에 근접할수록 표면 직하의 개재물은 피로강도와 관계있다고 지적하였다. 이와 같이 표면경화 처리에 의해 개재물과 피로강도에 관한 연구결과는 각기 다르기 때문에 표면경화재의 피로강도 평가를 위해서는 피로거동 및 균열 발생 주위의 응력해석 등 아직도 많은 연구가 필요하게 된다.

이상과 같은 관점에서 본 연구에서는 우선 피로거동에 대한 연구를 하려고 한다. 즉 침탄질화 처리재의 피로한도 특성, 경도변화에 따른 피로강도의 변화, 피로균열 발생과 경도분포, 고경도재의 피로균열 발생 기점 및 위치, 개재물과 피로균열의 발생관계 등을 상세하게 고찰하였다.

## 2. 시험편 가공 및 침탄질화처리 방법

본 실험에서 사용한 재료는 KS D 3711(한국 공업 규격)에 규정되어 있는 크롬 몰리브덴 강인 SCM415( $\phi$  16mm)이다. 재료에 남아있는 잔류응력을 제거하고 조직을 균일화하기 위해 960℃에서 한시간 동안 유지한 후, 노냉시키는 풀림처리(annealing)를 하였다. 시험재료의 화학적 성분을 X선 스펙트라 분석법에 의하여 조사하였고, 그 결과는 Table 1과 같다. 또한 시험 재료의 기계적 성질과 경도는 Table 2에 나타내었다.

시험편은 Fig. 1과 같이 기계 가공하였다. 결함의 크기에 따른 피로강도의 효과를 고찰하기 위해 미소 원공결함

Table 1. Chemical composition (wt%) of the testing material

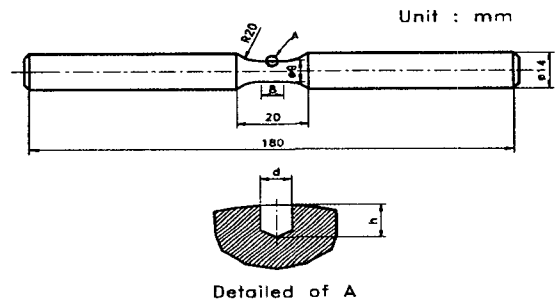
Composition (Wt%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18	0.22	0.68	0.01	0.014	1.0	0.17

Table 2 Mechanical properties of testing materials

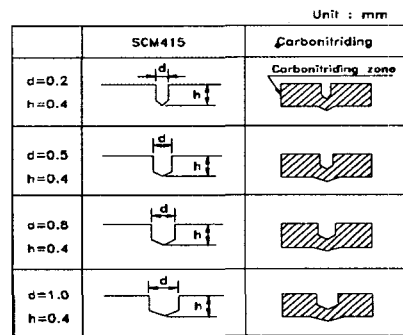
	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Mean hardness (Hv <sub>0.05</sub> )	Young's modulus (GPa)
SCM415	536.9	307.4	20.97	35.34	275	208.1
CNTS*	1044.8	755.4	2.10	2.33		218.2
RCNTS**	922.1	760.3	2.24	2.59		208.3

\* : CarboNitriding Treatment Specimen

\*\* : Releasing residual stress of CNTS



(a) Geometry of fatigue test specimen



(b) Configuration of various hole defects

Fig. 1 Geometries of fatigue test specimen and hole defects

은 0.2mm, 0.5mm, 0.8 mm, 1.0mm로 변화시켜 가공하였고, 깊이는 모두 0.4mm로 하였다. 1차 가공이 완료된 시험편에 대해 침탄질화 열처리를 수행하였다. 열처리 과정은 650℃ 상태의 로내에 시험편을 장입시킨 후,

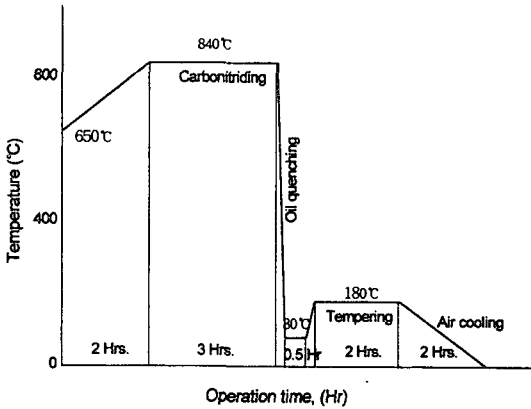


Fig. 2 The condition and process of carbonitriding treatment

온도를 840°C에서 3시간동안 일정하게 유지시키면서 시험편에 탄소와 질소를 침입시켰다. 다음에 시험편을 80°C까지 유냉시켜 담금질을 한 후, 잔류 오스테나이트의 감소 및 β-마르텐사이트화 처리를 위해 180°C에서 2시간 동안 템퍼링을 하였다. 이 열처리 과정 선도는 Fig. 2에 나타내었다.

한편, 피로강도와 경도구배 등과의 관계를 고찰하기 위하여, 2차 템퍼링을 함으로서 표면의 잔류응력은 거의 제거되었다고 생각했다. 침탄질화 처리재를 A<sub>1</sub> 이하의 온도로 재가열한 후, 일정한 속도로 냉각시켰다. 이 때 처리온도와 유지시간의 선정은 각기 재료에 따라 달라지게 되는데, Stickels등<sup>(12)</sup>에 의한 실험결과와 예비시험과 측정을 통해 재처리온도는 450°C에서 3시간으로 결정하였다.

사용한 시험기는 회전굽힘 피로시험기(10kg-m, 3000rpm)이고, 시험 주파수는 57Hz이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 침탄질화 처리재의 S-N 선도

Fig. 3은 원공결합의 지름에 따라 회전굽힘 피로시험을 통해 구한 침탄질화 처리된 표면 경화재의 S-N 곡선이며, 이 때 원공결합의 지름에 따른 피로한도는 Table 3에 나타내었다. 실험 결과에서 CNTS(CarboNitriding Treatment Specimen)으로 이하 CNTS라 정함)의 피로한도는 원공결합의 크기에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다.

한편 평활재의 피로한도는  $\sigma_{wo} = 740\text{MPa}$ 로 SCM415 원재의 피로한도  $\sigma_{wo} = 270\text{MPa}$ 에 비해서 약 174%의 피

로한도 증가를 보이고 있다. 또한 원공결합의 지름에 따른 피로한도의 증가 비는 160~180%로 평활재의 그것과 거의 동일한 수준의 범위를 나타냈다. 이러한 결과에서 원공결합의 지름에 관계없이 침탄질화 처리에 의한 피로한도는 약 160% 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 평활재 및 결합재의 파단수명은  $N=1 \times 10^4$ 부터  $N=10^6$ 의 영역에 걸쳐서 모두 파단하는 경향을 나타내고 있다. CNTS에서 평활재의 경우, 피로한도 부근의 응력인  $\sigma_o = 750\text{MPa}$ 부터  $\sigma_o = 880\text{MPa}$ 까지 비교적 넓은 응력 범위에서 시험편의 파단면에 고경도재의 피로파단의 특징인 어안(fisheye)이 발견되었다.

한편 Fig. 4는 CNTS에서 잔류응력을 제거한 RCNTS(Releasing residual stresses of CNTS로 이하 RCNTS라 정함)의 S-N 곡선이며, 이 때 원공결합의 지름에 따른 피로한도는 Table 3에 나타내었다. 원공결합이 없는 경우 RCNTS의 피로한도는  $\sigma_{wo} = 570\text{MPa}$ 로 CNTS 보다 감소하였지만, SCM415 원재의 그것에 비해 110% 이상의 증가를 나타내고 있다. 그리고 원공결합의 지름에 따른 피로한도는 평활재의 경우와 같은 감소 경향을 보이고 있다. 즉 시험편의 표면 및 원공결합 주위의 잔류응력이 제거됨에 따라 피로한도의 값이 영향을 받고 있음을 나타내고 있다. 또한 원공결합이 없는 RCNTS의 경우도 피로한도 부근의 작용응력인 긴 수명의 영역에서 어안이 발견되었다. 그리고 CNTS의 경우와 동일하게 RCNTS의 경우, 평활재 및 결합재의 파단수명은  $N=1 \times 10^4$ 부터  $N=10^6$ 의 영역에 걸쳐서 모두 파단하는 경향

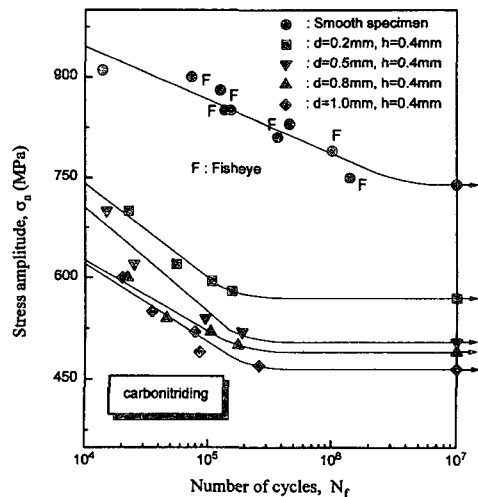


Fig. 3 S-N curves for CNTS

을 나타내고 있다. 침탄질화 처리된 결합재는 2차 트임처리에 관계없이 긴 수명영역에서 파단되지 않지만, SCM415 원재의 실험결과는 긴 수명영역에서 파단하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 사실에서 침탄질화 처리된 결합재는 표면의 경도상승으로 인해 피로균열이 매우 빠르게 전파하기 때문이라고 생각한다. Table 3은 원공결합의 지름에 따라 CNTS와 RCNTS의 피로한도를 나타낸 것이다. 이 경우 원공결합의 지름이 커짐에 따라 CNTS와 RCNTS의 피로한도는 동등한 수준으로 감소함을 나타내고 있다. 즉 평활재의 경우 피로한도의 차이는  $\sigma=170\text{MPa}$ , 원공결합재의 경우  $\sigma=150\sim 180\text{MPa}$ 의 감소 범위를 나타낸다. 여기에서 침탄질화 처리된 재료의 피로한도는 경도, 잔류응력 및 원공결합의 크기와 관련이 있다는 것을 의미한다고 생각한다.

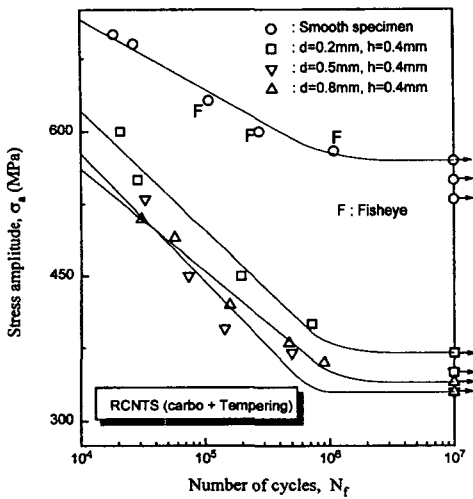


Fig. 4 S-N curves for RCNTS

Table 3 Fatigue limit of CNTS and RCNTS for variations of hole diameter

		SCM415	Fatigue limit of CNTS	Fatigue limit of RCNTS
Smooth specimen	d=0mm	270MPa	740MPa	570MPa
	d=0.2mm	205MPa	570MPa	390MPa
Hole defected specimen	d=0.5mm	191MPa	505MPa	350MPa
	d=0.8mm	185MPa	490MPa	340MPa
	d=1.0mm	180MPa	465MPa	-

### 3-2. 경도변화와 피로한도의 관계

Fig. 5는 재료의 표면경도와 피로한도의 관계를 구체적으로 나타낸 것이다. SAE 4140은 SCM415 원재와 유사한 재료로서 경도의 변화에 대한 비교의 목적으로 다른 문헌의 데이터에서 수록하였다<sup>(13)</sup>. SAE4140의 경우 미소 비커스경도  $Hv \leq 400\sim 450$ 의 범위에서 피로한도는 경도에 비례하는 관계를 나타내며, 다음과 같은 식에 의해 정리되고 있다.

$$\sigma_{wo} \cong 1.6Hv \pm 0.1Hv \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{wo}$ 는 굽힘하중 상태에서 평활재의 피로한도로서 단위는 MPa이며, Hv는 미소 비커스경도로 단위는  $Kg/mm^2$ 이다. 그렇지만  $Hv \geq 450$  미소 비커스경도 범위에서 SAE4140재의 피로한도는 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있어, 경도가 높은 경우의 피로강도에 미치는 인자는 저경도재의 경우와는 다를 것으로 예상할 수 있다.

한편 본 실험의 침탄질화 처리된 CNTS와 RCNTS의 표면경도는 미소 비커스경도  $Hv \geq 450$ 의 범위를 넘고, 경도의 증가에 따라 피로한도도 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 본 실험의 경우에도 식(1)의 관계를 이용하여 구한 이론 값과는 큰 차이가 있어, 식의 적용은 어렵다. 하지만 침탄질화 처리에 의해 표면이 경화된 경우에는 완전 경화된 재료의 결과에 비해서 피로한도와 경도의

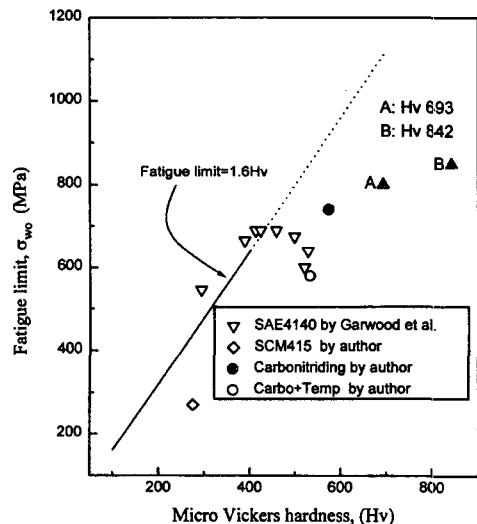


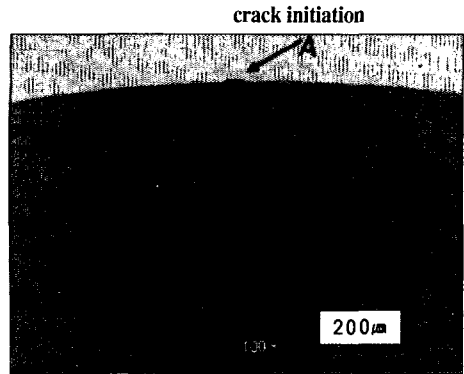
Fig. 5 Relation of fatigue limit and surface hardness

관계는 비례적임을 나타내고 있다. 또한 침탄질화 처리된 재료 보다 표면경도가 높은 경우에 대해 표면경화재의 피로강도의 변화를 조사하기 위해 실험한 결과를 각기 ▲의 기호로 나타내었다. ▲ 기호 중에서 A는 고주파 처리에 의해 표면의 경도가 Hv 693인 경우이고, B는 침탄처리에 의해 표면의 경도가 Hv 842인 경우이다. 표면 경화 처리된 재료의 표면경도가 증가함에 따라 피로한도는 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 그 증가범위는 완만하다. 이러한 사항에서 표면 경화재의 피로강도는 경도 값에 따라 증가하는 것이 아니라, 최적의 경도가 존재한다는 것을 의미한다고 생각한다.

### 3-3. 피로균열 발생과 개재물과의 관계

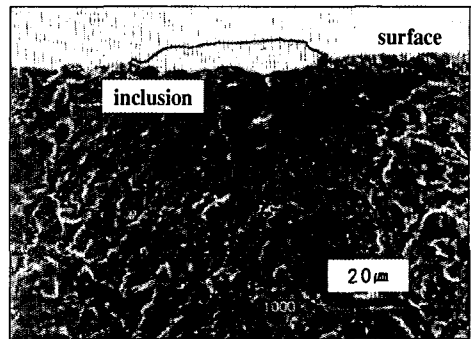
#### 3-3-1. 전경화된 고경도재의 피로균열 발생

본 절에서는 일반 베어링강 (KS규격 STB2)을 기존의 시험편과 동일한 모양과 치수로 가공된 전경화재 시험편 (Fig. 1 참조)에 대하여 표면경화재와의 피로균열 발생을 비교·검토하였다. 전경화 처리된 시험편의 경도분포는 표면과 심부에서 일정하며, 측정된 미소 비커스경도 값은 Hv=730이다. Fig. 6의 (a)는 회전굽힘 피로시험 후 전경화재의 피로파괴된 파단면이다. 시험응력은 850MPa이고, 파단수명은  $N=4.11 \times 10^4$ 이다. 파단면은 고경도재에서 나타나는 일반적인 파단 형태로 표면 부위에서 피로균열이 발생하여 안정적으로 성장한 뒤, 최종적으로 파단되었다. Fig. 6의 (b)는 피로균열의 발생을 자세히 살펴보기 위해 피로균열이 발생한 곳으로 추정되는 부분을 확대한 사진이다. 표면에 밝게 보이는 부분이 개재물이며, 개재물 주위는 비교적 안정적으로 균열이 성장한 부분이다. 이러한 파단면의 해석에서 피로균열은 표면의 개재물에서 시작되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 위에 언급한 사항을 확인하기 위해 나타낸 사진이다. 작용응력은 800MPa이고, 파단수명은  $N=5 \times 10^6$ 이다. 개재물은 표면 바로 밑에 밝게 관찰되고 있으며, 개재물 주위로 반원형의 형태로 피로균열이 성장하고 있음을 나타내고 있다. 성장된 피로균열의 주위는 입계 형태의 피로파괴된 양상이 존재한다. 또한 피로균열의 발생원인인 개재물은 기지조직과 바로 밀착되어 있는 것이 아니라, 국부적으로 미세한 공간을 갖고 있음을 알 수 있다. 즉 고경도의 전경화재에서 피로균열은 개재물에서 시작되고, 그 위치는 표면 및 표면 직하에서 시작된다는 것을 의미한다. 그리고 표면에서 심부의 경도가 일정한 상태의 전경화재는 하중이 최대로 작용하는 표면 및 표면 직하에서 피로



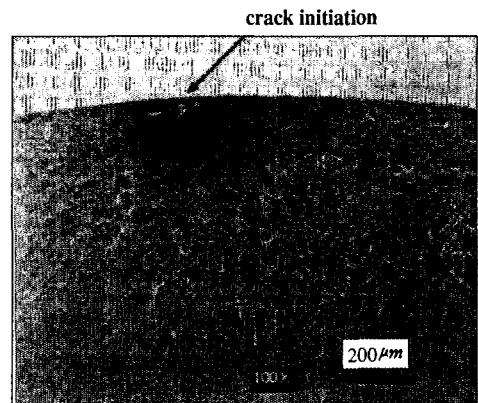
$\sigma_a = 850MPa, N_f = 4.11 \times 10^4 \text{ cycles}$

(a) Fractured surface of through hardening



(b) Enlargement of A

Fig. 6 Fractured surface of through hardening in case of fatigue crack initiated at inclusion of surface



$\sigma_a = 835MPa, N_f = 5.0 \times 10^6 \text{ cycles}$

Fig. 7 Fractured surface of through hardening in case of fatigue crack initiated at inclusion of sub-surface

균열은 대부분 발생하고, 또한 그것은 개재물과도 밀접한 관계가 있다고 추정할 수 있다.

3-3-2. 침탄질화 처리된 표면경화재의 피로균열 발생

Fig. 8의 (a)는 CNTS의 피로균열의 발생을 조사하기 위해 회전굽힘 피로시험후 피로파괴된 시험편의 파단면이다. 그림에서 표시된 F는 표면경화재의 파단면에서 은백색의 어안(fisheye)이고, 그 내부는 주변에 비해 매우 평탄하게 되어있다. F의 중심 부근에 하얗게 보이는 부분 I가 어안의 기점이고, 개재물에서 표면까지의 거리  $H=0.92\text{mm}$ 로서 그 개재물은 전경화된 층과 일정한 경도를 갖는 심부층의 경계에 존재하고 있다(Fig. 9 참고). 그리고 개재물에서 성장하는 어안의 모양은 장반경과 단반경을 갖는 타원형이다. 이러한 원인은 침탄질화 처리과정에 의해 시험편의 표면에서 깊이방향으로의 경도구배가 있기 때문이라고 생각된다. 또한 어안의 반경은 표면에서 임의의 거리까지만 성장한 것으로 관찰되는 데, 이 위치는 경도 분포와 관련이 있다고 생각된다.

한편, 주사전자현미경(SEM)을 이용해 어안 중심의 개재물의 형태를 분석한 결과, Fig. 8의 (b)에서와 같이 개재물의 모양은 거의 원형 및 모서리진 육각형 형태로 다양하였다. 1000배 이상의 고배율을 통해 파단면상의 비금속 개재물과 모재 사이의 부착형태를 조사한 결과, 개재물들은 모재와 완전히 부착된 것이 아니라, 그 사이에 공간(void)을 가지고 있다는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 결과는 피로수명 해석을 파괴역학적으로 고찰할 수 있다는 가능성을 제시하는 것으로 매우 중요한 의미를 갖는다고 생각한다.

3-4. 피로균열의 발생위치

Fig. 9는 개재물을 중심으로 발생하는 피로균열과 표면에서 단면 중심으로의 경도구배와의 관계를 나타낸다. 여기서 피로균열이 발생하는 개재물의 위치는 경도의 경계층에 분포한다. 표면경화재에서 피로균열의 발생위치를 조사하기 위하여 고주파 열처리된 재료를 침탄질화 처리된 SCM415 시험편과 동일한 방법에 의해 실험하였다.

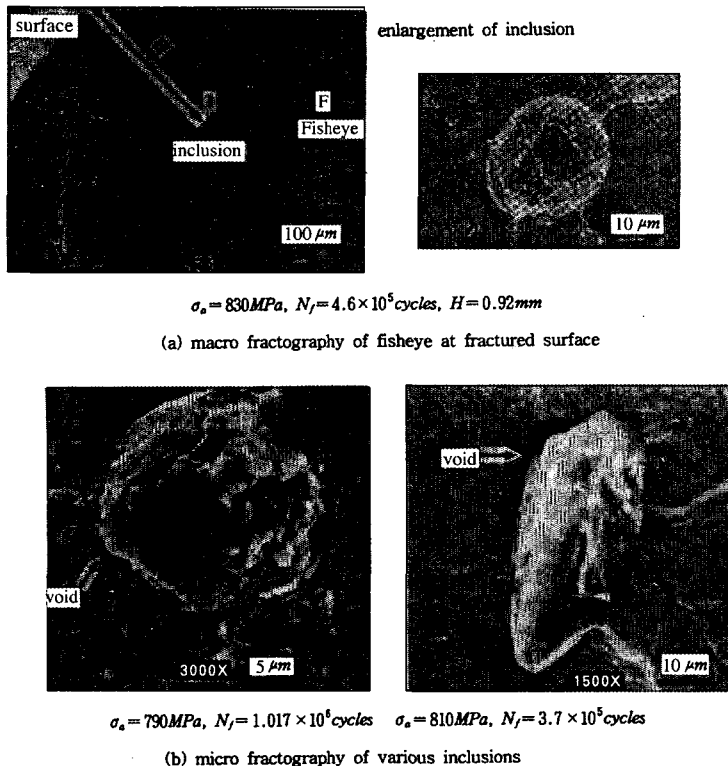


Fig. 8 Fractured surface of carbonitriding in case of fatigue crack initiated at interior inclusion

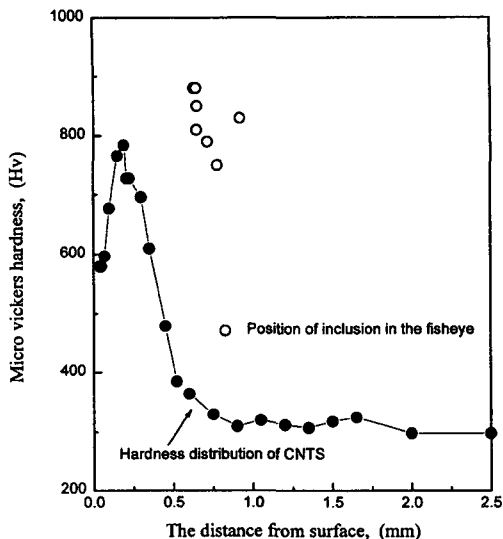


Fig. 9 Position of inclusion initiated fatigue crack for hardness distribution

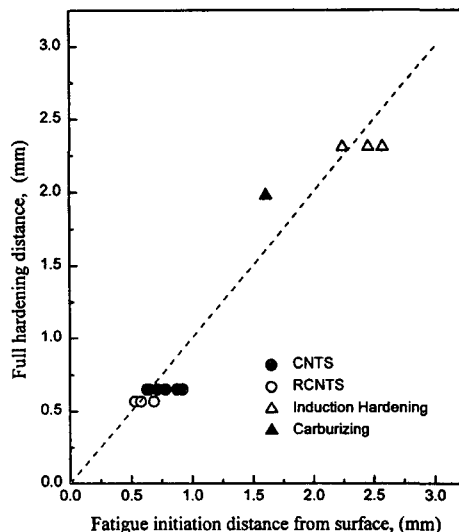
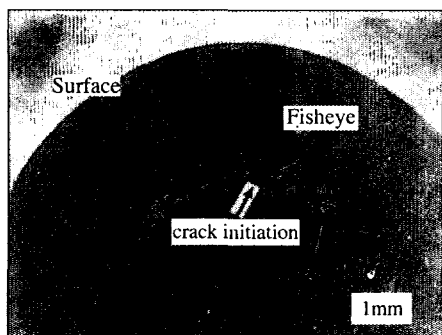


Fig. 11 Relation of hardening distance and crack initiation distance



$$\sigma_a = 833MPa, N_f = 1.01 \times 10^6, H = 2.24mm$$

Fig. 10 Fractured surface of induction hardening material

회전굽힘 피로시험을 실시한 결과 파단된 시험편의 일례를 Fig. 10에 나타내었다. 고주파 열처리의 경우 전경화층의 깊이는 더욱 심부방향에 있으며, 그 거리는  $H=2.31mm$  이다. 침탄질화 처리재와 동일하게 고주파 처리재의 경우도 경도의 경계층에서 피로균열은 어안(fisheye)의 중심에 있는 개재물로부터 시작된다. 고경도의 균일한 분포를 지니는 전경화재에서는 재료 내의 개재물 및 결함이 피로균열의 기점이 되는 데, 이것들은 표면 및 표면 직하의 부위에 위치한다.

한편, 침탄질화나 고주파 처리에 의한 표면경화재의 피로균열이 발생하는 위치는 재료의 표면에서부터 표면과

심부의 경도 경계층이라는 것을 알았다. Fig. 11은 침탄질화, 침탄, 및 고주파 처리에 의해 시험편의 전경화층의 깊이를 변화시켰을 때 피로균열이 발생한 위치를 나타낸 것이다. 표면 경화처리 방법에 관계없이 피로균열이 시작되는 위치는 전경화층과 심부의 경도경계층에 존재하는 것을 알 수 있다. 전경화층의 깊이가 깊은 경우(본 연구의 경우 고주파처리재나 침탄 처리재의 경우), 전경화재와 같이 작용응력이 최대인 표면 및 표면 직하에서 피로균열이 시작된다고 알려졌으나, 본 연구에서는 강도가 가장 취약하다고 고려되는 경도의 경계층에서 피로균열이 시작된다. 즉 표면경화재의 피로균열은 표면과 심부의 경도 경계층 사이에 있는 개재물에서 시작된다. 이러한 사실은 표면경화재의 피로강도는 개재물 및 결함과 관련이 있음을 의미하고, 이 결과는 굽힘하중 상태에 있는 표면경화재에 대해 최적의 경화층의 깊이를 선정하기 위한 기본 데이터를 제공한다.

### 3-5. 개재물의 분포 및 피로수명

전경화 처리된 고경도재의 피로균열은 재료 내에 있는 개재물에서 시작한다는 현상에 대해 앞에서 고찰하였다. 그리고 고경도재의 피로균열이 발생하는 개재물의 위치는 표면과 표면 직하로 구분되며, 반면에 침탄질화 처리된 표면경화재는 작용하중의 크기에 관계 없이 경화층의 경계층에 있는 개재물에서 피로균열이 발생한다는 것은 이미 언급하였다. 그러므로 재료 내에 존재하는 개재물에

대하여 그 분포를 조사할 필요가 있다. 조사한 시험편은 압연방향에 대해 평행한 면(longitudinal section)과 횡단면(transverse section)으로 2면을 준비하여 관찰하였다. Fig. 12는 압연방향과 평행하게 절단하여 깊이 방향에 대해 개재물의 분포를 조사한 것으로, 표면에서 약 0.1mm 위치에 30 $\mu$ m 정도의 지름을 갖는 개재물들이 존재하며, 0.5mm 위치에 10 $\mu$ m 정도의 지름을 갖는 개재물과 1.2mm 위치에 20 $\mu$ m의 개재물도 관찰할 수 있다. 그리고 불규칙적으로 매우 작은 수  $\mu$ m의 개재물이 산재하고 있음을 알 수 있었다. 횡단면으로 절단한 경우, 깊이 방향에 대한 개재물의 분포를 Fig. 12에 나타내었다. 개재물의 분포는 불규칙적으로 산재하고 있으며, 그 형태는 주로 원형으로 나타내고 있다. 시험편의 재질은 압연재이므로 압연과정에서 개재물은 임의의 길이를 가지고 늘어나게 되므로, 횡단면으로 개재물을 관찰하면 주로 원형임을 알 수 있었다. 본 연구의 파단된 시험편에서 관찰된 피로 균열의 발생원인인 개재물의 크기는 최소 18 $\mu$ m 이상이다. 이 결과에서 대다수를 차지하는 수  $\mu$ m의 개재물들은 피로 강도에 영향을 미치지 않는다는 사실을 알았다.

한편, KS D 0204-1982 규격에 의하면 개재물의 종류는 A, B, C계로, 그리고 ASTM A의 규격은 이를 세분화하여 A(deformable sulfide), B(row of oxide), C(deformable silicate), D(globular oxide)계의 개재물로 구분한다. 이러한 개재물 중에서 피로강도 및 수명에 영향을 미치는 개재물은 입자의 탄성계수가 모재의 경우보다 큰 경우라고 보고되어 왔다. 본 연구에서 파단면에서 관찰된 어안의 중심에 있는 개재물의 성분은 EDS 분석을 통해 얻은 결과를 검토하였다. Fig. 13은 개재물 주변의 모재에 대한 성분 분석결과로서 전형적인 철(Fe)의 성분이 검출된 예를 나타내고 있다. Fig. 14 (a)는 침탄질화 처리제인 CNTS의 피로균열의 기점인 개재물의 성분 분석결과로 알루미늄(Al), 산소(O), 칼슘(Ca)과 소량의 마그네슘(Mg), 실리콘(Si)으로 구성되어 있고, Fig. 14 (b)는 침탄질화 처리후 2차 템퍼링된 RCNTS의 피로균열의 기점인 개재물의 성분 분석결과로 지배적인 알루미늄(Al), 칼슘(Ca)과 소량의 마그네슘(Mg)으로 구성되어 있다. 따라서 개재물의 성분은 비금속 개재물로 이루어져 있고, 구성 성분은 B와 D계의 개재물임을 나타내고 있다.

Fig. 15는 개재물의 크기와 피로수명의 관계이고, 여기서 개재물의 크기가 클수록 피로수명이 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 개재물의 크기가 30  $\mu$ m보다 큰 경우

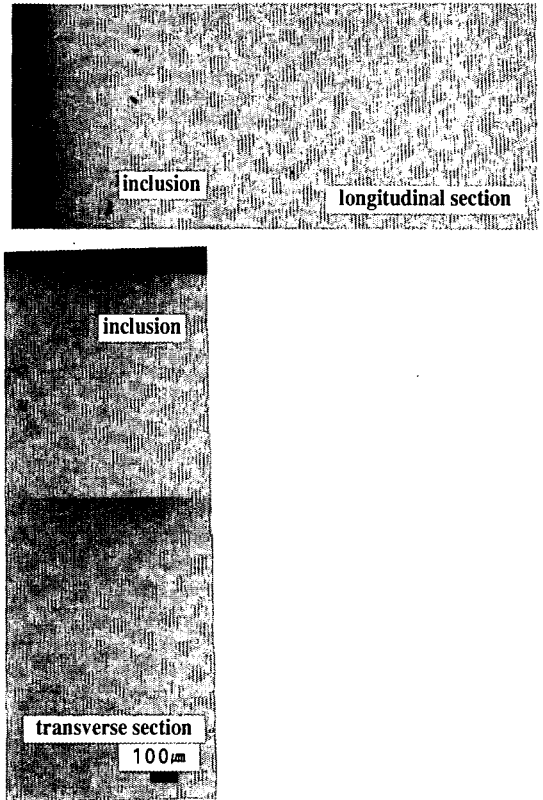


Fig. 12 Inclusions distribution of longitudinal and transverse section

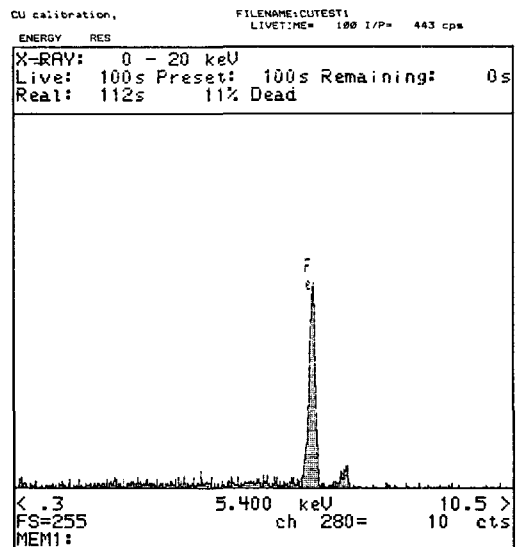


Fig. 13 Qualitative analysis by EDS(energy dispersive spectroscopy) for matrix



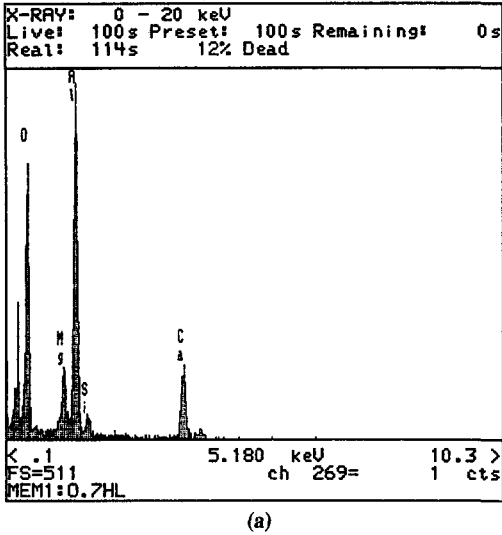


Fig. 14 Qualitative analysis by EDS for inclusion of CNTS

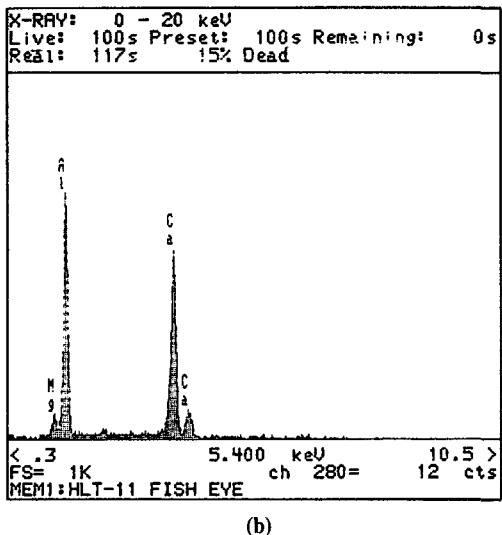


Fig. 14 Qualitative analysis by EDS for inclusion of RCNTS

에 이러한 관계를 더욱 명확히 나타내고 있다. 여기서 개재물 크기란 작용하는 응력 방향에 수직 방향으로, 수직 방향의 투영면적과 개재물의 면적을 구하여 그 면적의 평방근을 사용한 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 침탄질화 처리재의 피로거동 및 응력해석에 대한 고찰을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

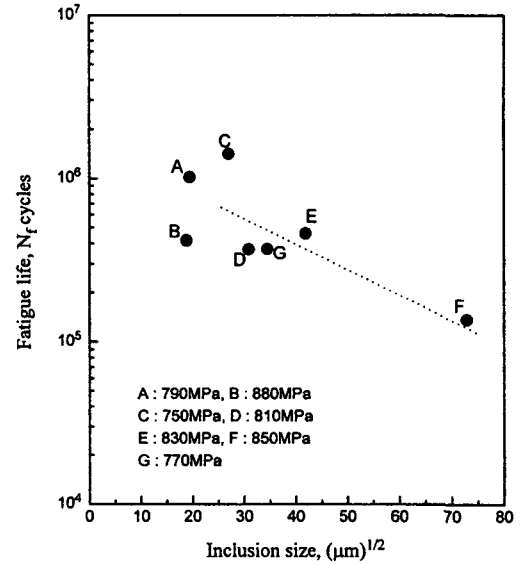


Fig. 15 The correlation between inclusions and fatigue cycles

1) SCM415재의 경우, 피로한도는 270MPa이고, 침탄질화 처리재의 경우 피로한도는 740MPa이다. 따라서 피로한도의 증가비는 174% 이고, 원공결함의 크기에 따라서 피로한도의 증가비는 160~180% 이다. 이와 같은 결과에서 평활재와 결함재 공히 동등한 피로한도의 증가 경향을 갖는다.

2) 침탄질화 처리, 고주파 처리, 침탄 처리에 의한 표면경화층의 피로강도는 경도 값에 따라 증가하는 경향을 나타내지만, Hv=600 이상의 경도에서 피로강도의 변화는 완만하게 증가한다.

3) 고경도의 전경화재에서 피로균열은 재료 내부의 개재물에서 시작되고, 그 위치는 표면 및 표면 직하이다. 그러나 침탄질화 처리재의 피로균열은 경도가 가장 취약한 경도의 경계층에 위치한 개재물에서 시작되고, 개재물과 모재는 공간을 가지고 있어 개재물은 균열로 고려할 수 있다고 판단된다.

4) 표면처리 방법에 관계 없이 표면경화층의 피로균열은 개재물에서 시작되고, 그 위치는 전경화층과 심부 경도의 경계층에 존재한다. 이 결과는 굽힘하중 상태에 있는 표면경화층의 최적 경화층의 깊이를 선정할 수 있는 기본 데이터를 제공한다.

5) 본 연구에서 피로균열의 발생원인인 최소 결함 혹은 개재물의 크기는 18  $\mu\text{m}$  이상이며, 수  $\mu\text{m}$  크기의 개재물들은 표면경화재의 피로강도에 영향을 미치지 않는다. 그리고 개재물의 성분은 ASTM 규격에서 B(row of oxide)와 D(globular oxide) 형태의 비금속 개재물이고, 개재물의 크기가 클수록 피로수명이 감소하는 경향을 나타낸다.

### 참 고 문 헌

1. P. H. Firth, "Fatigue Tests on Rolled Alloy Steels Made in Electric and Open-Hearth Furnaces," *Journal Iron Steel Inst.*, Vol. 180, pp.26, 1955.
2. W. A. Wood, *Fracture*, Technology Press of M.I.T. and Wiley, pp. 412, 1959.
3. 송삼홍, 오완섭, "미소원공 주위의 피로크랙 발생 전과 거동에 관한 연구," *한국해양공학회지*, 제1권, 제2호, pp. 250-258, 1987.
4. 原田昭治 外4人, "微小き裂を有するホットプレス窒化ケト素の三点曲げおよび繰返レ曲げ疲勞強度," *日本機械學會論文集*, 第56卷, 第528號, pp. 51-54, 1990.
5. M. Endo and Y. Murakami, "Effects of an Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steel," *Trans. ASME*, Vol. 109, pp. 124-129, 1987.
6. D. Brooks and K.W. Andrews, "Stress Fields around Inclusions and their Relation to Mechanical Properties," *Journal Iron and Steel Inst.*, pp. 246-255, 1972.
7. G. G. Trantina and M. Barishpolsky, "Elastic-Plastic Analysis of Small Defect-Void and Inclusion," *Engineering Fracture Mech.*, Vol. 20, No.1, pp. 1-10, 1984.
8. 村上敬宣 外2人, "マルエーソダ鋼の疲勞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.
9. 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.
10. 吉川徹 外3人, "浸炭表面硬化した鋼の回轉曲げ疲勞特性に及ぼす浸炭深さと切欠ぎ形状の影響," *鐵と鋼*, 第66年, 第3號, pp. 410-417, 1980.
11. T. Naito, H. Ueda, and M. Kikuchi, "Fatigue Behavior of Carburized Steel with Internal Oxides and Nonmartensitic Microstructure near Surface," *Metallurgical Trans. A*, Vol. 15A, July, pp. 1431-1436, 1984.
12. 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.
13. M. F. Garwood, M. Gensamer, H. H. Zurburg, J. T. Burwell, M. A. Erickson and F. L. La Que, *Interpretation of Tests and Correlation with Service*, ASM, pp. 1, 1951.