

窒化處理된 1Cr-1Mo-0.25V鋼의 高溫下 疲勞特性評價

서창민 · 황병원 · 서창희
경북대학교 기계공학부

Improvement of Fatigue Strength and Characteristics of Nitrided 1Cr-1Mo-0.25V turbine Rotor Steels at evaluated temperature

Chang-Min Suh · Byung-Won Hwang · Chang-Hee Suh

Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ. Daegu 702-701, Korea

Key Words: Nitemper 가스연질화, Fisheye 어안, Fatigue strength 피로강도,

Abstract : The purpose of this study is to investigate the effect of nitriding on the fatigue strength and fatigue life of turbine rotor steel (1Cr-1Mo-0.25V), and acquire data on the fatigue strength of nitrided turbine rotor steel at high temperature (538°C). Specimens were nitrided with various layer thicknesses (160 μ m, 270 μ m and 290 μ m) using the nitemper method. A microstructure analysis, microhardness test, surface roughness test, and fracture surface analysis were also carried out at room temperature in order to investigate the mechanical properties of the nitrided specimens

1. 서론

최근 과학기술이 발전함에 따라 기계, 구조물들은 원자로, 화력 발전소등 가혹한 고온환경 하에서 사용되게 되었으며, 이러한 환경조건에서 사용되고 있는 재료의 적용 한계성이 나타나고 있다[1]. 이에 재료의 고수명, 고강도, 고기능화 및 열적, 화학적 안정이 요구되어짐에 따라 재료의 표면개질 기술에 대한 연구의 필요성이 대두되어지고 있다.

금속재료의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 표면경화법의 하나인 질화법이 이용되고 있다.

질화법에는 크게 가스질화, 염욕질화, 가스연질화, 이온질화가 있으며 본 연구에서는 가스연질화법의 하나인 Nitemper법을 사용하였다. 가스연질화법은 기존의 가스질화법에 비해 단시간에 질화가 가능하고 어떠한 강종에도 처리할 수 있으며 공해가 없는 장점이 있다[2]. 질화처리재는 질화물 형성에 의한 표면층재질의 강화와 질화층의 압축잔류응력 때문에 피로한도가 상승한다고 알려져 있다[3]. 그리고 회전굽힘시험에서는 질화처리 시편의 피로한도가 비처리재에 비해 훨씬 크며, 균열발생은 시편의 표면이나 질화층과 모재의 경계점에서의 기공이나 개재물등의 결함부에서 시작한다는 사실이 보고되고 있다[4].

본 연구에서는 증기터빈로터 소재로서 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강을 시험편으로 사용하였다. 시험편은 질화시간, 조건 및 공정을 변화시켜 가면서 160 μ m, 270 μ m, 290 μ m의 깊이로 질화처리하여 증기터빈로터 소재의 실제 사용환경인 538°C에서 피로시험을 수행하여 질화가 터빈로터강의 고온피로강도 및 피로

수명 특성에 미치는 영향을 파괴역학적인 개념을 도입하여 조사, 연구하였다. 그리고 질화층의 표면 거칠기 및 조성, 기계적 성질을 파악하기 위해 X-선을 이용한 표면분석, 표면 거칠기시험, 경도시험 및 파단면 분석 등도 실시하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 제작

2.1.1 시험편 재료

시험편 재료는 증기 터빈로터용 소재로 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강재로서, 화학적 조성은 ASTM A470-8에서 규정한 화학성분은 Table 1과 같다. 시험편은 단조 후 재료의 조직을 균질화하기 위해 955°C 까지 가열, 22시간동안 에어 블라스팅으로 냉각처리한 후, 다시 680°C까지 재가열하여 40시간동안 유지시킨 뒤 공냉한 소재로부터 채취하였다.

2.1.2 시험편 형상 및 처리방법

회전굽힘 시험편은 JIS Z2274에 의거하여 Fig. 1(a)과 같이 평행부 길이 8mm, 평행부 직경 ϕ 8mm, 자루부 12mm, 시험편 길이 80mm로 제작하였다. 특히, 질화처리재의 노치감소효과를 알아보기 위하여 Fig. 1(b)에서와 같이 시험편 중앙부에 반경 2.5mm, 깊이 0.2mm의 부분노치(Transverse shallow notch)를 제작하였다.

Table 1 Chemical composition (wt, %).

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Al
ASTM A470-8	0.25 ~0.35	0.15 ~0.35	1.0 max	0.012	0.015	1.05 ~1.50	1.00 ~1.50	0.20 ~0.30	0.75 max	-
Composition	0.29	0.24	0.76	0.0033	0.0006	1.10	1.19	0.24	0.46	0.0018

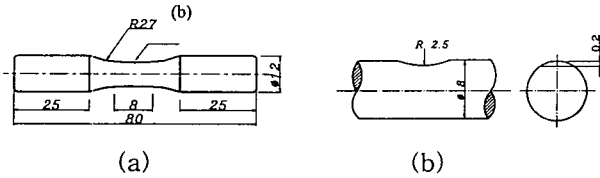


Fig. 1 Configuration of cylindrical bulk material and specimen (unit : mm)
 (a) Rotary bending fatigue specimen
 (b) Detail of shallow transverse notch

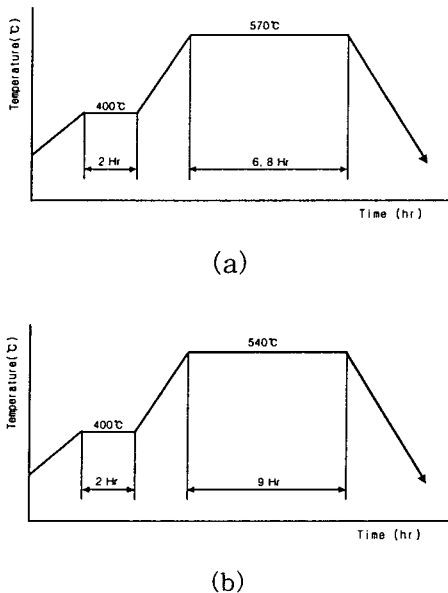
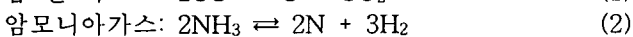
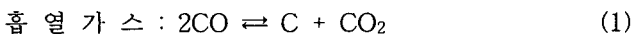


Fig. 2 Heat treatment cycles of nitriding process
 (a) 570°C nitriding (b) 540°C nitriding

이렇게 기계가공된 시험편 표면을 연마지(Emery paper)를 이용하여 #2000까지 연마한 후, 산화크롬(Cr₂O₃)으로 버핑한 다음 초음파 세척기를 사용하여 표면에 존재하는 이물질 제거하였다.

2.2 시험편의 질화처리법

본 연구에서는 가스연질화법의 하나인 Nitemper법을 사용하는 전문업체에서 시험편을 질화처리(Nitriding) 하였다. 이 처리에서의 질화생성반응과 질화층을 처리하는 흡열성 가스와 암모니아 가스반응은 다음과 같다.



위의 질화공정으로 160 μm(540°C-9hr), 270 μm

(570°C-6hr), 290 μm(570°C-8hr)의 3가지 질화층을 얻었으며 이 질화층은 질화온도 및 시간에 비례하여 결정되며 색깔은 무광택 회색을 띤다.

2.3 실험방법

2.3.1 조직관찰

터빈로터강의 조직을 관찰하기 위해 질화처리된 시험편을 절단하여 마운팅(Mounting)하고 연마한 후 Nital 5%의 부식액에 에칭(Etching)하였다. 에칭된 시험편은 금속현미경(Olympus CHC-012, Nikon)으로 조직을 관찰하고 부착된 카메라를 이용하여 표면부와 중앙부의 조직을 100배로 촬영하였다.

2.3.2 경도시험

질화처리된 시험편의 질화층 및 중심부의 경도값을 정량적으로 파악하기 위하여 마이크로 비커스 경도기(HMV-2000, Shimadzu)를 사용하여 상온에서 실시하였다. 질소가 확산된 깊이 측정을 위해 표면부터 중심부로 일정간격마다 압입하중 25g으로 약 10회 측정하여 평균값을 취하였으며, 화합물층은 두께가 얇은 관계로 압입하중 10g으로 측정하였다.

2.3.3 회전굽힘 피로시험

질화층이 모재의 피로강도 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 상온 대기중에서 회전굽힘 피로시험(Rotary bending fatigue test)을 실시하였다.

피로시험이 끝난 후 피로균열의 성장거동(Growth behavior)을 파악하기 위해 파단면을 저배율 금속현미경으로 관찰하여 균열발생부(Crack initiation : Fish-eye)와 최종파단부(Final fracture)의 면적을 구하여서 응력값에 따른 면적값의 변화를 측정하였다.

2.3.4 파단면 관찰

피로시험 후, 주사형 전자현미경(SEM)을 사용하여 시험편 표면에 대해서 파단면의 특징 및 피로균열의 발생 기점을 조사하였고, 에너지분산형 X-선분광기(energy dispersive spectrometer ; EDS)를 사용하여 피로균열 발생 기점에서의 결합 또는 개재물의 조성을 분석하였다.

그리고 피로균열의 발생 원인이 되는 개재물이 피로강도 및 피로균열 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 개재물의 위치 및 크기를 측정하여 피로강도와의 관계를 조사하였다.

3 실험결과

3.1 질화층 및 모재중심부의 조직관찰

Fig. 2와 같이 실험에 적용된 3가지 질화공정에 따른 질화층의 특성을 비교하기 위하여, 표면에서의 조

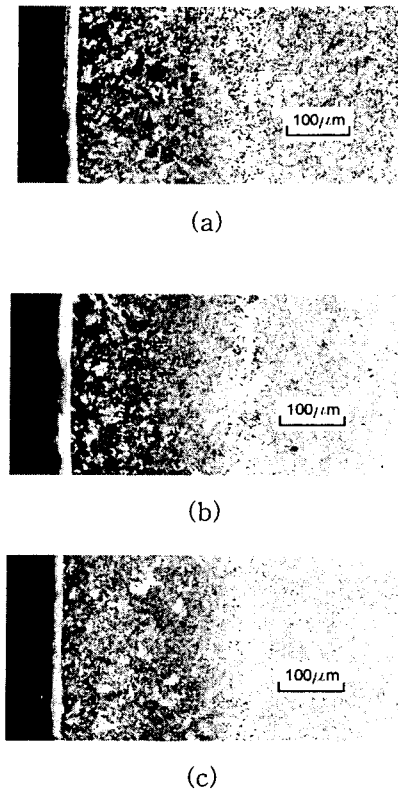


Fig. 3 The microstructure of nitrided layer according to each heating cycles ($\times 100$)

- (a) $160 \mu\text{m}$, 540°C -9hr
- (b) $270 \mu\text{m}$, 570°C -6hr
- (c) $290 \mu\text{m}$, 570°C -8hr

직상태를 Fig. 3에 각각 나타내었다. 그림에서 희게 보이는 부분이 화합물층(compound layer)이며, 이 두께는 질화처리재의 단면을 연마한 후, 에칭처리하여 금속현미경을 이용하여 측정하였다.

540°C 질화처리재(9hr- $11.8 \mu\text{m}$)보다 570°C 질화처리재(6hr- $19.4 \mu\text{m}$, 8hr- $16.8 \mu\text{m}$)의 화합물층 두께가 깊어져서 온도가 증가할수록 질화층의 두께가 증가한다는 기존의 결과들과 잘 일치하나 동일 온도에서 질화시간이 길어지면 화합물층이 증가한다는 결과와는 일치하지 않음을 보이고 있다[5].

3.2 질화깊이에 따른 경도값의 변화

Fig. 4은 질화처리된 터빈로터강의 질화깊이에 따른 경도값의 변화를 나타낸다. 질화처리된 강의 중심부의 경도값은 약 260Hv 로 질화처리전의 모재와 거의 경도값의 차이가 없었으나 질소가 확산 침투된 질화층에서의 경도값은 상승하였다. 질화층은 백색의 고경도 화합물층과 질소의 확산층으로 나누어지며 화합물층에서의 경도값은 약 $900\sim 1000\text{Hv}$ 정도이며 확산층에서의 경도값은 약 $300\sim 600\text{Hv}$ 정도임을 확인할 수 있었다. 이는 시험편 표면에 Fe와 N이 금속간 화합물

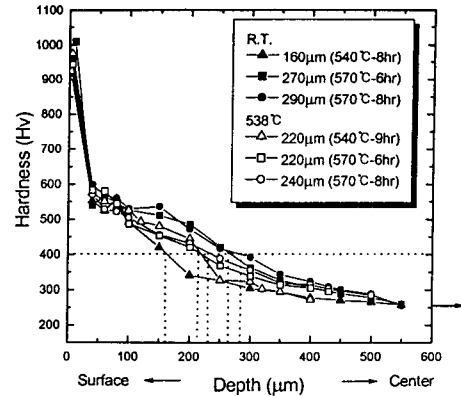


Fig. 4 Relationship between the Vickers hardness and nitrided depth at different nitriding process

Table 2 The nitriding process and depth of compound and diffusion layer

Nitriding process	Depth of nitrided layer		
	Nitrided layer	Compound layer	Diffusion layer
540°C - 9hr	$160 \mu\text{m}$	$11.8 \mu\text{m}$	$148.2 \mu\text{m}$
570°C - 6hr	$270 \mu\text{m}$	$19.4 \mu\text{m}$	$250.6 \mu\text{m}$
570°C - 8hr	$290 \mu\text{m}$	$16.8 \mu\text{m}$	$273.2 \mu\text{m}$

을 이루어 화합물층에서는 $\epsilon(\text{Fe}_{2-3}\text{N})$ 상 및 Fe_3C 의 혼합상이, 확산층에서는 $\gamma'(\text{Fe}_4\text{N})$ 상의 결정상을 형성하기 때문이다[6]. 그리고 질소의 확산이 활발한 표면에서 중심방향으로 갈수록 경도값이 감소함을 나타낸다.

질화층의 두께는 표면에서부터 경도가 400Hv 가 되는 곳까지의 깊이로 정의 하였다[4]. 이에 따라 실용 질화층은 540°C -9hr 질화처리재의 경우 $160 \mu\text{m}$, 570°C -6hr 질화처리재의 경우 $270 \mu\text{m}$, 그리고 570°C -8hr 질화처리재의 경우 $290 \mu\text{m}$ 의 질화층이 관찰되었다. 여기서 질화온도가 증가할수록 질화층의 깊이가 깊어지고 동일 온도에서는 질화시간이 증가할수록 질화층의 깊이가 깊어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용한 질화시간과 질화온도의 범위에서는 이 두가지 요소가 질화층의 형성에 미치는 영향이 아주 크다는 것을 확인할 수 있었다. 화합물층의 깊이는 광학현미경을 사용하여 구한 후 질소, 탄소 등의 확산이 인정되는 층인 확산층(diffusion layer)의 깊이는 식(3)과 같이 구하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

$$\text{DD} = \text{ND} - \text{CL} \quad (3)$$

여기서, DD : 확산층의 깊이
 ND : 질화층의 깊이
 CL : 화합물층의 깊이

3.3 S-N 특성

Fig. 5는 Hv 경도값으로 구한 질화층 두께가 $160 \mu\text{m}$,

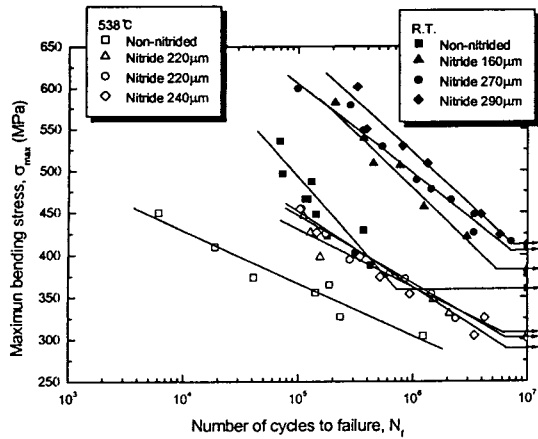


Fig. 5 Relationship between the maximum bending stress, σ_{max} and the number of cycles to failure, N_f for non-nitrided and nitrided specimen at room temperature and 538°C

270 μ m, 290 μ m로 질화처리된 로터강재의 피로시험편을 상온에서 회전굽힘 피로시험을 실시한 결과이다. 비 질화처리재와 질화처리재의 상온하 S-N 데이터는 이전 실험자의 S-N 데이터를 인용하였다[6,7]. 그림에서와 같이 질화처리는 상온 및 고온에서 피로수명을 향상시킨다는 것을 확인할 수 있었다. 상온에서는 질화층의 두께가 두꺼울수록 피로수명이 증가하지만 고온(538°C)의 경우, 본 연구에서 사용된 160~290 μ m 범위의 질화처리가 모재의 피로강도 및 피로수명향상에 미치는 영향은 거의 유사함을 관찰할 수 있었다.

질화처리한 시험편의 경우, 상온과 고온 모두에서 피로수명이 크게 향상되는 경향을 보이고 있으며, 이와 같은 피로강도의 증가는 표면층의 재질경화와 열처리과정에서 표면층 부근에 생긴 압축잔류응력이 표면 및 모재부에서 발생하는 피로균열의 발생을 지연시킴으로서 질화처리재의 피로수명을 향상시킨 것으로 판단되며 다른 보고서와 유사한 결과를 얻었다[6].

또한, Fig. 5와 같이 피로수명의 향상은 질화층의 두께가 커질수록 크지만 화합물층의 두께와는 무관함을 알 수 있다.

3.4 피로균열의 발생 및 성장거동

3.4.1 피로균열의 발생기구

터빈로터강과 같은 금속 평활재 시험편의 피로균열 발생은 고사이클 반복하중을 받는 피로의 경우 표면에서의 국부적인 소성변형에 의한 슬립이 발생한다. 이러한 슬립발생에 의한 기하학적인 요철, 즉 돌출부(extrusion)와 함몰부(intrusion)가 응력집중원이 되어 피로균열 발생의 중요한 인자가 된다. 이외에도 입계(grain boundary), 쌍정(twin boundary), 개재물(inclusion) 및 미소결함(flaw)이 피로균열의 발생원인이 된다. 따라서 반복변형이 수반되는 재료의 표면에 질화처리와 같은 소성변형을 제어하는 경질의 표면처리를 실시하면 재료표면으로 이동하는 전위(dislocation)를 억제하여 피로균열 발생을 지연시킬 수 있을 것이다.

질화처리재에 있어서 피로균열 발생의 경우, 고경도

의 질화층과 질화처리시 생성된 압축잔류응력으로 인하여 회전굽힘 응력하에서 표면에는 상대적으로 적은 응력이 작용하고 모재부나 질화층과 모재부 경계점에 존재하는 개재물 또는 기공 등의 결함을 기점으로 응력이 집중되어 피로균열이 발생되는 것으로 보고되고 있다[3,4].

3.4.2 피로균열의 발생 및 성장거동

Fig. 6은 160 μ m, 270 μ m, 290 μ m로 질화처리된 1Cr-1Mo-0.25V강의 시험편을 고온에서 회전굽힘 피로시험을 실시하여 얻은 파단면을 광학현미경으로 저배율로 촬영한 것이다. 그림에서와 같이 파단면 모두에서 고강도 금속의 피로파단면의 대표적 파단양식인 Fish-eye를 관찰할 수 있다.

Fig. 7에 상온과 고온에서 표면으로부터 피로균열의 발생지점을 응력레벨의 변화에 따라 나타내었다. 응력이 증가함에 따라서 상온과 고온에서 피로균열의 발생지점은 표면으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이는 고응력 영역에서는 표면에 상대적으로 큰 굽힘응력이 작용하므로 압축잔류응력과 고경도의 표면경화층이 이에 저항하지 못하고 응력이 크게 작용하는 표면부위에서 피로균열이 발생하게 된다. 그러나 저응력영역에서는 표면에 상대적으로 작은 굽힘응력이 작용하므로 압축잔류응력과 고경도의 표면경화층이 이러한 굽힘응력에 따른 소성변형을 억제하는 효과를 가져와서 강도가 약한 내부의 개재물에서 피로균열이 발생하기 때문이다.

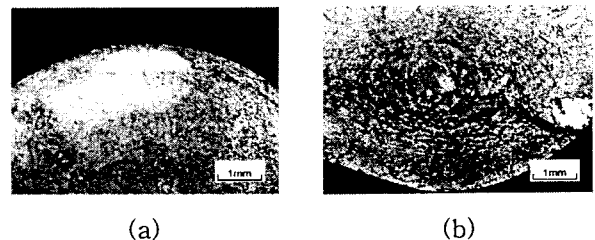


Fig. 6 Fractographs on view of fish-eye and final fracture part at 538°C ($\times 10$) (nitride 270 μ m, $\sigma_{max}=425\text{MPa}$, $N_f=1.73 \times 10^5$)

(a) Fish-eye part (b) Final fracture part

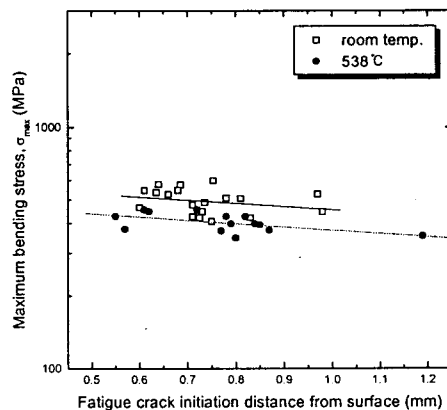


Fig. 7 Relationship between the maximum bending stress and the fatigue crack initiation distance from surface

이러한 경향은 상온과 고온에서 동일하게 나타난다. 이는 상온과 고온에서 피로균열 발생 기구가 거의 유사함을 보여주고 단지 고온에서 재질의 연화에 의해 피로균열 발생응력이 낮아짐을 알 수 있다.

그리고 Fig. 8에서 고온에서 피로균열의 성장거동과 파단 특성을 파악하기 위해 저배율 금속현미경으로 fisheye와 최종파단부(final fracture)의 면적을 구하여 응력값에 따른 면적의 변화를 비교하였다.

Fisheye의 면적은 상온과 고온 모두에서 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 상온과 고온데이터들은 식 (4)과 같이 일정한 선형적인 관계를 가진다. 또한 최종파단부의 면적은 상온과 고온에서 응력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 큰 부하응력으로 인해 최종파단부의 면적이 증가하며 상온과 고온에서 최종파단부 역시 작용하는 응력과 식 (5)와 같이 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$\log F = 1.058 - 0.0017X \quad (4)$$

$$\log R = 0.520 + 0.0010X \quad (5)$$

여기서, F : fisheye 면적

R : 최종파단부 면적(Rupture area)

X : 최대굽힘응력

3.5 파단면 관찰 및 분석

고온에서 회전굽힘 피로시험후, 피로균열 발생부의 특성을 파악하기 위해서 시편의 파단면을 주사형 전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

Fig. 9는 160 μ m의 두께로 질화처리된 시험편의 피로파면을 저배율과 고배율로 촬영한 것이다. 그림(a)는 피로파단된 시험편의 파단면에서 SEM으로 Fish-eye 부분을 저배율($\times 50$)로 각각 관찰한 것으로, 피로균열 발생의 위치와 피로균열이 방사상으로 전파되는 것을 볼 수 있다. 그림(b)는 그림(a)의 균열발생의 중심부를 고배율($\times 1500$)로 관찰한 것으로 피로균열의 발생 위치에는 개재물이 존재하는 것을 알 수 있다.

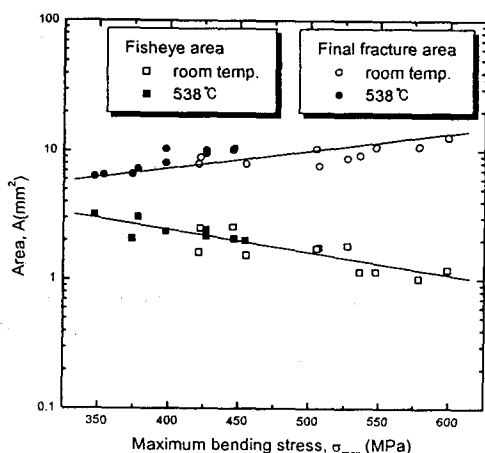


Fig. 8 Relationship between the maximum bending stress and the area of fisheye and final fracture at room temperature and 538 $^{\circ}$ C

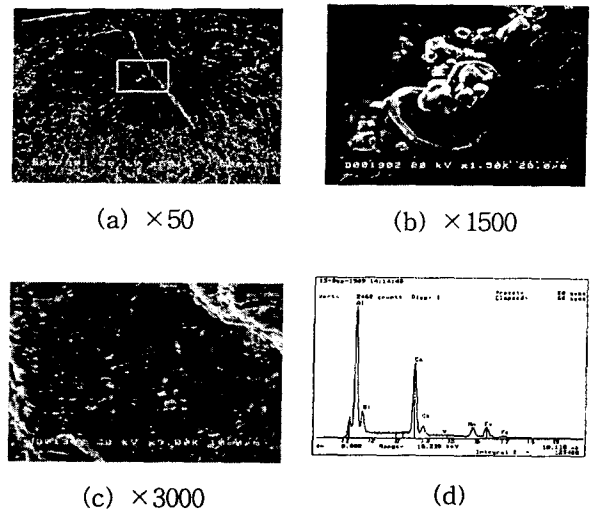


Fig. 9 SEM fractographs(figs.(a)~(c)) and EDS analysis(d) at fish-eye site of nitrided 160 μ m specimen under 536.1MPa ($N_f=3.56 \times 10^5$ cycles) at room temperature

이러한 기공을 포함한 개재물은 응력집중원이 되어 피로균열의 발생이 용이하게 되므로 이곳을 기점으로 타원형의 형태로 피로균열이 성장하고 있음을 알 수 있다. 그림(c)는 피로특성 무늬인 연성줄무늬(Ductile striation)를 나타낸다. 그림(d)는 균열발생 원인인 개재물의 EDS분석결과를 나타내고 있다. 그 결과, 개재물의 주성분이 Al과 Ca인 것을 확인할 수 있다.

3.6 유한요소법의 적용

3.6.1 유한요소 모델

질화처리와 같이 표면처리를 했을 경우 경계층에 작용하는 응력상태를 평가하여 표면경화층이 피로강도향상에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 행렬(matrix) 연산에 의한 변위법(displacement method)을 기본 원리로 채택하고 있는 MSC/MARC를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. Pre-processor 및 Post-processor로 MENTAT3.3을 사용하였다.

Fig. 10(a)는 해석에 사용된 유한요소모델을 나타낸다. 재료를 탄성체로 가정하였으며 순수굽힘상태의 재료를 모델링하였다. 모델의 크기는 가로 600mm, 세로 8mm, 두께 8mm이며 총 7277개의 4절점 평면변형요소를 사용하였다. 또 관심의 대상이 되는 중심부의 요소는 정밀성을 높이기 위해 Fig. 10(b)와 같이 요소의 크기를 작게하여 노드(node)수를 증가시켰다.

화합물층은 25 μ m, 확산층은 220 μ m 깊이로 모델링하였으며, 해석에 사용된 기계적 물성치는 고경도 특성을 나타내는 백색의 화합물층의 경우 탄성계수 600GPa, 프와송비를 0.29로 하여 세라믹재료와 같은 취성재료의 특성을 나타내게 하였으며, 확산층은 탄성계수 206GPa, 프와송비를 0.3으로 하여 담금질된 강 of 특성을 나타내었다. 그리고 모재는 탄성계수 200GPa, 프와송비를 0.3으로 일반 탄소강의 특성을 나타내도록 하였다.

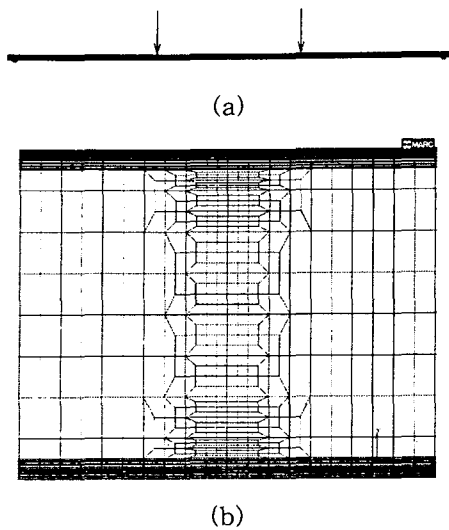


Fig. 10 Finite element mesh of the model
(a) whole body (b) central part of model

3.6.2 해석결과

회전굽힘 피로시험과 같이 일반적인 재료가 순수굽힘을 받는 경우 재료의 표면에서 생성된 균열이 표면에 대해서 수직으로 전파해 나가 재료는 파괴에 도달하게 된다. 표면의 슬립이나 결함등에서 생성된 균열을 진전시키기 위해서는 굽힘에 의한 인장응력이 가장 주요한 역할을 하게 된다. 따라서 응력성분중 균열을 성장시키는데 가장 크게 기여하는 σ_{11} 에 대해 분석하였다.

Fig. 11은 질화처리를 하지 않은 재료와 질화처리한 재료의 표면에서 중심으로의 작용하는 하중이 변화함에 따른 σ_{11} 의 변화를 나타낸다. 질화층에 발생하는 응력은 비질화처리재의 경우와 유사하나 피로균열이 발생하는 표면하 경계층에서는 비질화처리재에 비해 질화처리재의 경우 작용하는 응력이 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 시험결과와 유사하게 동일 하중이 작용하는 피로시험의 경우 질화처리재가 비질화처리재에 비해 피로수명이 향상되는 현상을 잘 설명해준다.

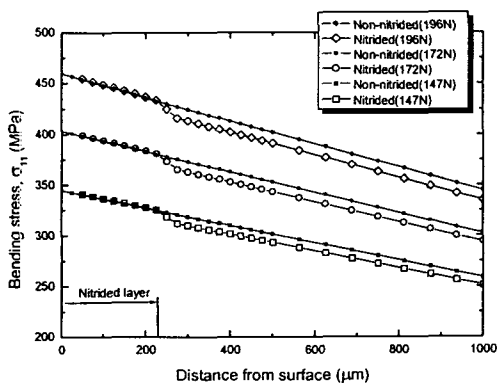


Fig. 11 The relationship between bending stress (σ_{11}) and distance from specimen surface

5. 결론

화력발전소용 터빈로터소재로 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V강을 질화처리하여 두께의 변화에 따른 538°C 고온대기중에서의 피로특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고온대기 중에서 질화처리재의 피로수명은 비처리재에 비해 크게 향상되었고 상온에서의 질화처리재 보다는 피로수명이 감소하였다. 그리고 고온에서는 질화처리 두께에 따른 피로강도변화는 거의 없음을 확인할 수 있었다.
2. 고온대기중에서도 질화층의 영향이 없어지는 모재와의 경계부에서 피로균열이 발생하여 성장하였다. 이는 고경도의 질화층이 표면의 소성변형을 억제하여 상대적으로 큰 응력이 작용하는 경계부의 개재물에서 응력집중이 생겨 피로균열이 발생하였기 때문이다.
3. 피로파단면에는 고강도 금속의 피로발생양식인 fisheye와 타원형의 취성과피된 최종파단부를 관찰할 수 있었다. 고온과 상온에서 최대굽힘응력의 증가에 따라 fisheye의 면적(F)과 최종파단부의 면적(R)이 선형적으로 변화함을 관찰할 수 있었고 다음 식으로 표현된다

$$\log F = 1.058 - 0.0017X, \quad \log R = 0.520 + 0.0010X.$$

4. 유한요소법을 적용한 결과, 순수굽힘하에서 질화처리로 인한 확산층에서의 σ_{11} 응력이 비처리재에 비해 낮음을 확인할 수 있었다. 이는 질화처리가 피로균열의 발생을 억제한다는 사실을 확인해 준다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- [1] 猿木勝司, "界面・表面の材料力學の動向," 日本機械學會誌, Vol. 99, No. 933, pp. 23~25, 1996
- [2] 오세규 외 5인, "신편 기계재료", pp. 191~194, 1999.
- [3] Magnusson, L., "Low Cycle Behavior of Case Hardened Steel", Mechanisms of Deformation and Fracture, pp. 105~110, 1973.
- [4] Kyuhiko Yamamoto et al., "The Comparison of Properties in Iron-nitrided and un-nitrided Specimen", Japanese Metallic Material, 15-7, pp. 2 6~37, 1975.
- [5] 이상운, "최신 금속열처리", pp.547~642, 1996.
- [6] Suh, C. M., Kim, K. R., Lee, D. W. "Fatigue Strength of TiAlN Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperatures", International Journal of Ocean Engineering and Technology, 1-1, pp. 69~76, 1999.
- [7] 서창민, 하중현, 서창희, "질화처리된 1Cr-1Mo-0.25V 로터강재의 피로강도 향상 및 피로균열 특성에 관한 연구", 대한기계학회 2000년도 제 1회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp.181~186, 2000.