

1Cr-0.5Mo 강의 재질열화가 프레팅 피로거동에 미치는 영향

권재도[†] · 최성종^{*} · 김경수^{**} · 배용탁^{**}

(2003년 6월 18일 접수, 2003년 9월 25일 심사완료)

The Effect of Degradation on the Fretting Fatigue for 1Cr-0.5Mo Steel

Jae Do Kwon, Sung Jong Choi, Kyung Soo Kim and Yong Tak Bae

Key Words : Fretting Fatigue(프레팅 피로), Degradation(열화), Relative Slip(상대슬립), Friction Force(마찰력), Gross Slip(전면슬립), Partial Slip(부분슬립), Debris(데브리), Non-Propagation Crack(정류균열)

Abstract

Fretting is a kind of surface degradation mechanism observed in mechanical components and structures. The fretting damage decreases in 50-70 % of the plain fatigue strength. This may be observed in the fossil power plant and the nuclear power plant used in special environments and various loading conditions. The thermal degradation of material is observed when the heat resisting steel is exposed for long period time at the high temperature. In the present study, the degraded 1Cr-0.5Mo steel used for long period time at high temperature (about 515 °C) and artificially reheat-treated materials are prepared. These materials are used for evaluating an effect of thermal aging on the fretting fatigue behavior. Through the experiment, it is found that the fretting fatigue endurance limit of the reheat-treated 1Cr-0.5Mo steel decreased about 46 % from the non-fretting fatigue endurance limit, while the fretting fatigue endurance limit of the degraded 1Cr-0.5Mo steel decreased about 53 % from the non-fretting fatigue endurance limit. The maximum value of fatigue endurance limit difference is observed as 57 %(244 MPa) between the fretting fatigue of degraded material and non-fretting fatigue of reheat-treated material. These results can be a basic data to a structural integrity evaluation of heat resisting steel considered to thermal degradation effect.

1. 서론

화력 및 원자력 발전설비와 같은 에너지 변환 설비에는 주로 Cr-Mo 강, Cr-Mo-V 강 및 스테인리스강과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 가지는 내열강이 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 내열 구조부재들은 고온에 장시간 노출되면 재료의 미세 조직이 변화되어 재질 열화현상이 진전되어

기계적 강도특성이 저하된다.⁽¹⁻³⁾

프레팅(fretting)이란 접촉하고 있는 두 표면 사이의 상대적인 미끄럼(slip) 현상을 일컫으며, 일반적으로 강하게 체결되어진 기계 구조물들의 접촉면들이 미소한 진폭의 반복 상대운동을 일으킬 때 발생한다. 프레팅 작용에 의해서 구조부재의 피로 강도는 현저하게 저하하며, 이 현상을 프레팅 피로(fretting fatigue)라고 한다.⁽⁴⁾

일반적으로 기계 및 구조물의 파손 사고는 대부분 부재의 피로현상에 기인한다고 널리 알려져 있으며, 이러한 피로파괴에 관련된 다양한 연구가 오랜 기간을 통해 활발히 진행되어왔다.^(5,6) 또한 접촉부의 마모부위에서 균열이 발생하며, 피로수명을 현저하게 감소시키는 프레팅 피로파괴에 대

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : jdkwon@yu.yeungnam.ac.kr
TEL : (053)810-2462 FAX : (053)813-3703

^{*} 회원, 영남대학교 기계공학부

^{**} 회원, 영남대학교 대학원 기계공학부

한 중요성이 인식되어지면서 최근에 활발한 연구가 이루어지고있다. 잠재적 열화 기구의 한 형태라고 할 수 있는 프레팅은 화력발전 설비뿐만 아니라 원전 설비, 석유화학 플랜트 등의 특수 환경과 하중상태에서 사용되면 어떤 경우든지 일어날 수 있다.

특히 고온에서 장시간 사용되며 재질의 열화를 일으키는 내열부재의 수명평가에 있어서 프레팅의 고려는 매우 중요하다고 할 수 있으며, 이미 구조스테인리스 강(CF8M)의 프레팅 피로거동을 보고한 바 있다.¹⁾

본 연구에서는 고온, 고압 하에서 장기간 사용된 1Cr-0.5Mo 강의 열화재에 대하여 적절한 재열처리로 재열처리재를 제작한 후, 열화재와 재열처리재에 대하여 일반피로시험 및 프레팅 피로시험을 수행하여 피로수명을 비교 평가 하고자 하였다. 또한 이러한 검토로부터 열화재 및 재열처리재의 프레팅 피로수명 감소율을 평가함으로써 보수 및 설계자료의 제시를 목적으로 하였다.

2. 시험재료의 특성

2.1 재열처리재의 제작

본 연구에 사용된 재료는 인발에 의해 제작된 ASTM A182 Grade F12 1Cr-0.5Mo 강이며, 화력발전소 보일러 헤드(Boiler Header)부분으로 1960년대 상업운전에 들어갔으며, 515°C에서 약 22만 시간(약 25년)동안 실제 장기 사용된 열화재(degraded material)를 사용하였다.

프레팅 피로거동에 미치는 재질 열화의 영향을 평가하기 위한 동일 재료의 건전재를 구할 수 없으므로, 보일러 헤드 제작시의 조직에 근사한 재료를 얻기 위하여 재열처리 하였다.

열화재를 870°C에서 1시간 동안 유지 시키고, 870°C에서 500°C까지 약 30°C/min의 속도로 냉각시켜, 다시 620°C에서 1시간 동안 뜨임(tempering) 후 공냉 하였다. 그리고 720°C에서 6시간 동안 유지 시킨 후 공냉 하였다.²⁾

이렇게 기계적 특성을 회복시킨 재료를 재열처리재(reheat-treated material)라고 칭하였다.

2.2 조직변화, 경도, 충격 및 인장강도 특성

이 재료의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다.

조직관찰을 위한 에칭액은 에탄올(ethanol)에 5%의 피크리산(picric acid)과 2.5%의 질산(nitric acid)을 혼합하여 약 20초(sec)동안 에칭(etchant) 하였다.

관찰은 100배(좌측)와 200배의 광학현미경으로

Table 1 Chemical compositions of degraded 1Cr-0.5Mo steel

Composition, wt. %										
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	
0.18	0.27	0.68	0.016	0.014	0.095	0.94	0.44	0.12	0.008	

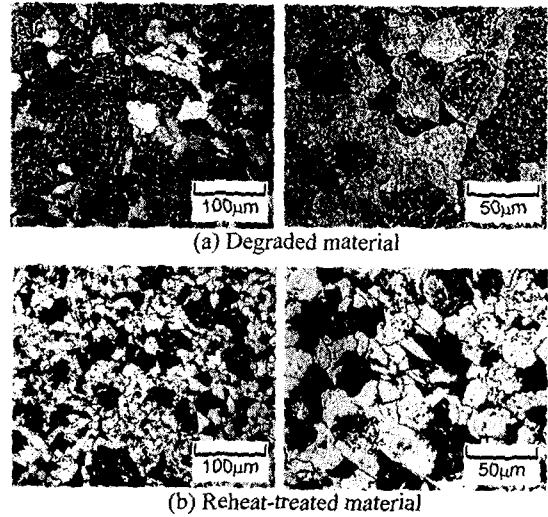


Fig. 1 Optical micrographs for degraded and reheat-treated materials

관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1의 (a)열화재와 (b)재열처리재를 비교해 볼 때 재열처리재에 비하여 열화재의 조직이 상당히 조대해져 있고, 페라이트(ferrite)의 면적률이 감소하였으며, 배나이트(bainite) 또는 미세 펄라이트(pearlite)로 볼 수 있는 부분이 상당히 증가되어 있었다.³⁾

열화재와 재열처리재의 경도 특성은 SHIMADZU사의 마이크로 비커스 경도 시험기(micro vickers hardness tester) HMV-2000을 사용하여 경도시험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

본 실험용 재료인 1Cr-0.5Mo 강은 열화재가 재열처리재에 비하여 페라이트에서는 경도가 높고, 펄라이트에서는 경도값이 다소 낮아졌다. 그러나 열화재 내의 펄라이트가 재열처리재에 비하여 보다 광범위하게 분포하고 있다는 점을 감안하여 취화 되었다고 판단된다.

재료의 충격특성 시험은 KS B 0809 4호 시험편을 사용하였으며, 시험기는 Instron사의 개장화 샤피 충격 시험기(instrumented Charpy impact test machine)이며 시험기의 용량은 300 Joule이다. 시험 결과를 Fig. 3에 나타내는 것과 같이 재열처리재에 비하여 열화재의 충격흡수에너지의 상부단 값이 다소 감소하였으며, DBTT(Ductile-Brittle Transition Temper-

ature)도 다소 고온측으로 이동하여 재질열화에 따른 취화를 잘 보여주고 있다.

인장특성 평가는 ASTM E8M 에 준하여 수행하였으며, 사용된 시험기는 Instron 사의 만능재료시험기(Universal Testing Machine ; Instron 4485) 이다. 인장시험 결과는 Table 2 에 나타낸 것과 같이 인장강도는 열화재와 재열처리재 모두 유사한 값을 보이고 있으나 항복강도는 열화재가 다소 낮은 값을 보였다. 이것은 재료의 열화에 의하여 열화재 내에서 전위의 장벽 역할을 하는 미세한 입자 수가 감소하고 탄화물의 크기 및 분포가 커졌기 때문으로 사료된다.⁽⁸⁾

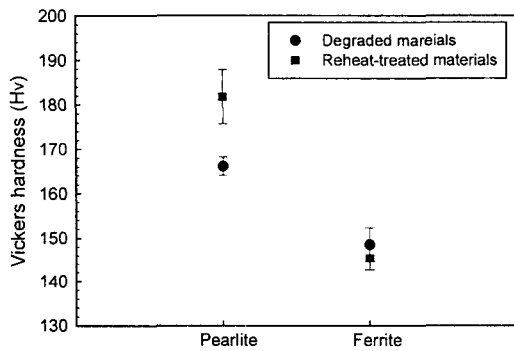


Fig. 2 Results of hardness test

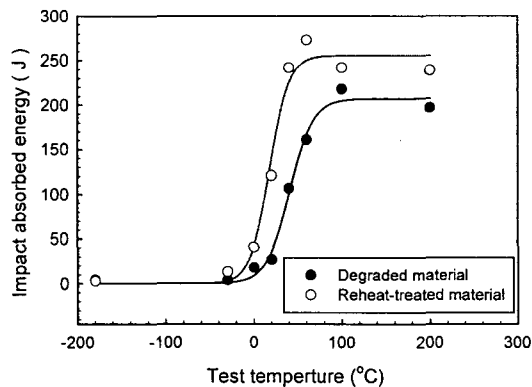


Fig. 3 Results of Impact test

Table 2 Mechanical property of 1Cr-0.5Mo Steel

Material	0.2%Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)
Degraded	313	487	26	188
Reheat-treated	329	481	32	199

3. 프레팅 피로 실험 방법

본 시험에 사용된 재료는 장기간 사용한 보일러 헤드에서 직접 채취한 1Cr-0.5Mo 강으로서, 내부와 외부의 기계적 성질의 변화는 미소하다고 판단되어 고려하지 않았다.

Fig. 4 에 나타내는 것과 같이 일반 피로 시험편과 프레팅 피로 시험편은 ASTM E66⁽¹⁰⁾ 피로시험편 규격에 따라 와이어 커팅(wire cutting)으로 폭 8 mm, 평행부 60 mm 를 가지며 R=80 mm 로 가공하였다. 또한 접촉 패드는 재질이 탄소강(SM45C)으로서 양단에 2 mm 의 평행부가 있어서 접촉면을 대칭으로 배치하기 때문에 안정된 접촉상태에서 시험을 수행할 수 있는 브릿지 패드(bridge pad)를 사용하였다.

시험편과 브릿지 패드의 평행부는 각각 표면거칠기 효과를 최소화하기 위해 #2000 까지 에머리-페이퍼(emery paper)를 이용하여 단계적으로 연마한 후 산화 알루미늄(Al₂O₃) 분말을 이용하여 마무리 연마를 하였고, 최종적으로 아세톤으로 세척한 후 본 실험에 임하였다.

본 시험에 사용된 피로시험기는 SHIMADZU 사의 피로시험기(Model : EHF-ED10-20L)로 최대 용량은 100 kN 이며, 시험조건은 응력비 R=0.1 의 정현파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였다. 주파수는 100 사이클까지는 데이터의 안정적 검출을 위하여 1 Hz 로 하고 그 이후는 20 Hz 로 일정하게 유지하여 상온에서 실험을 수행하였다.

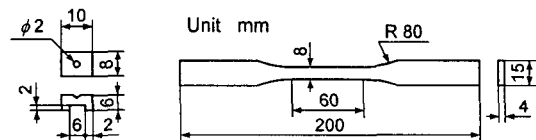


Fig. 4 Shape and dimension of fretting fatigue specimen and bridge pad

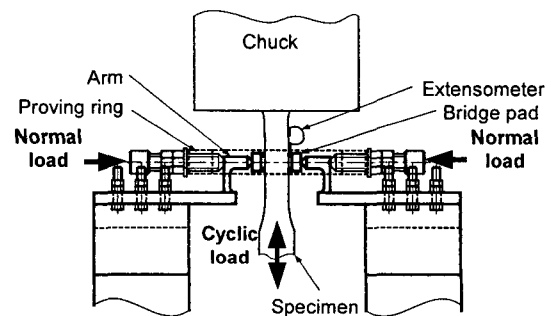


Fig. 5 Schematic illustration of the fretting fatigue test

프레팅 피로 시험시 접촉면압은 30 MPa로 일정하게 유지 하였으며, 프레팅 피로시험의 조합 형태를 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 시험편과 암은 로드셀(load cell)에 위치한 척(chuck)에 동시에 잡는 방법을 채택하였다. 시험방법 및 장비의 보정 등 기타 상세한 사항은 전보⁽⁷⁾와 동일한 조건으로 수행하였다.

4. 실험 결과

4.1 S-N(Number of cycles) 곡선

인발에 의해 제작된 보일러 헤드용 1Cr-0.5Mo 강의 프레팅 피로 특성을 평가 하기 위하여, 열화재와 재열처리재 각각에 대해 프레팅 피로를 받을 경우와 프레팅 피로를 받지 않는 경우의 S-N 곡선을 최대응력(maximum stress, σ_{max})과 파단 사이클과의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 열화재와 재열처리재의 단순피로(non-fretting fatigue)실험의 결과, 피로 한도는 열화재가 재열처리재에 비하여 약 9% 감소한 것으로 나타났다. 이것은 열화재 내의 미세탄화물 입자가 구상화 및 조대화하여 초기 피로균열이 발생 할 수 있는 비교적 규모가 큰 탄화물의 수가 증가한 결과라고 생각되어진다. 그러나 두 재료의 단순 피로한도는 약 393 MPa 및 430 MPa로서 앞에서 제시한 열화재 및 재열처리재의 항복강도 313 MPa 및 329 MPa 보다 높게 나타나는 특징을 보였다. 이러한 경향은 내열강으로서 개발되어진 이 재료의 특성으로서 알려져 있으며 다른 보고서들의 결과와도 거의 일치하고 있다.⁽¹¹⁾

피로한도를 비교해 보면 프레팅을 받은 재열처리재의 피로한도는 일반 피로한도에 비하여 약 46% 감소하였다. 또한 열화재에 있어서는 프레팅을 받은 경우 프레팅을 받지 않는 단순 피로시험에 비하여 피로한도가 53% 정도 감소하여 재열

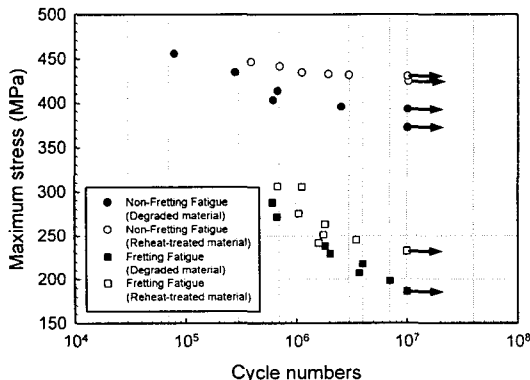


Fig. 6 S-N curve for plain and fretting fatigue test

처리재 보다 프레팅에 의한 수명 감소율이 크게 나타났다. 그리고 열화재의 프레팅 피로한도와 재열처리재의 단순 피로한도를 비교하면 57% (244 MPa)정도로 가장 큰 차를 보였다.

4.2 마찰력과 상대슬립의 영향

프레팅 피로에 영향을 미치는 중요 인자인 마찰력과 상대슬립을 측정하여 시험재료의 피로거동을 평가 하였다.

프레팅 피로시험에서 얻어진 사이클 수와 마찰력의 관계를 Fig. 7에 나타내었으며, 사이클 수와 상대슬립 진폭의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 시험편의 반복 하중진폭이 증가하면 마찰력 및 상대슬립 진폭도 증가한다고 알려져 있다. 본 실험에서 얻어진 결과도 약 100 사이클 이후에서 하중진폭의 크기가 증가하면 마찰력이 증가하는 경향이 있으나 하중진폭의 크기에 엄밀하게 대응하는 경향을 가지지는 않았다. 그 이유는 본 실험에 사용되어진 재료가 연신율이 비교적 크고, 부하하중 레벨이 항복강도에 근접하고 있기 때문에 부하시에 시험편 단면적의 급격한 감소로 인하여 불안정 해지기 때문이라고 추정 되어진다. 그러나 두 재료 모두에서 하중 반복횟수의 증가와 함께 마찰력은 약 100 사이클까지는 급격하게 증가하나 그 이후에는 다소 감소하거나 증가율이 감소하였다. 상대 슬립진폭은 하중 반복횟수의 증가와 함께 약 1000 사이클까지는 급감하나 그 이후에는 거의 일정하게 유지하였다.

다만 100 사이클 이후의 마찰력이 전체적으로 열화재가 재열처리재 보다 낮은 값을 보이는 것은 재질 열화에 따른 탄화물의 증가가 패드와의 접촉부위에서 발생하는 데브리의 윤활 작용이 열화재가 상대적으로 크기 때문이라고 사료된다.

상대슬립 진폭과 마찰력의 관계를 소정의 사이클마다 표시한 선도를 재열처리재는 Fig. 9에 나타내었으며, 열화재는 Fig. 10에 나타내었다. 공통적으로 초기에는 전면슬립(gross slip)이 발생한 후, 100 사이클 근방에서 급격하게 부분슬립(partial slip) 형태가 되며, 사이클 수의 증가와 함께 미소하지만 혼합슬립(partial & gross slip)의 양상을 나타내었다.⁽¹²⁾

4.3 접촉부 및 파면관찰

파면 및 표면의 패드 접촉부의 미세적 관찰을 위하여 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)을 이용하여 관찰하였다.

Fig. 11은 재열처리재의 파면 및 패드 접촉부(마

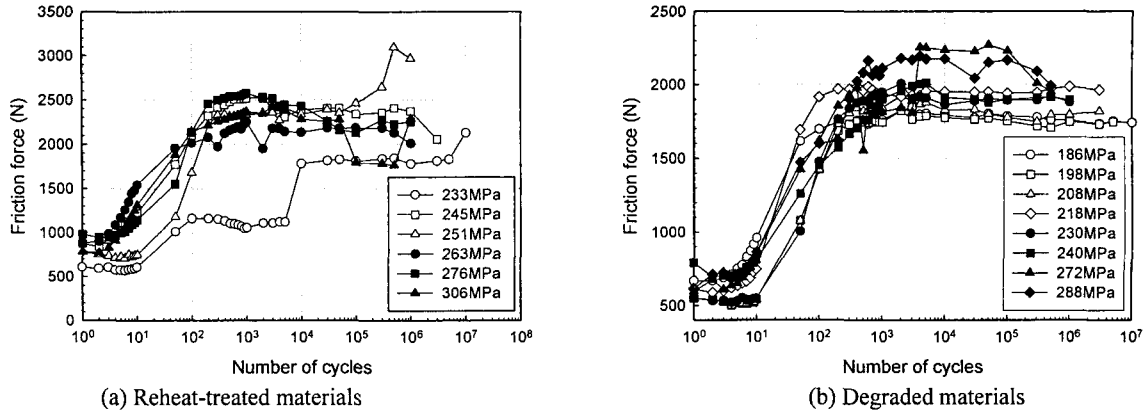


Fig. 7 Relationship between friction force and number of cycle

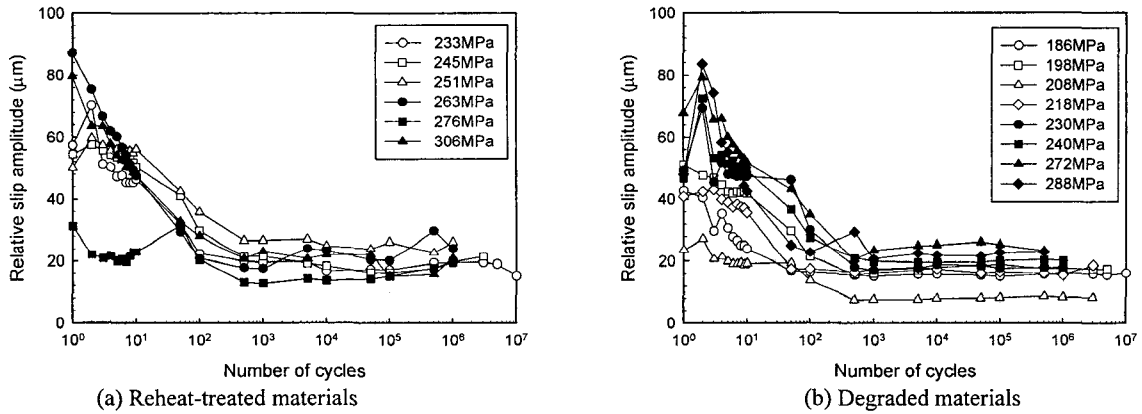


Fig. 8 Relationship relative slip amplitude and number of cycles

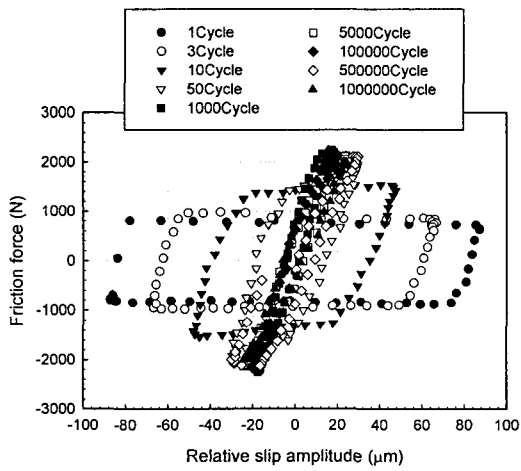


Fig. 9 Relationship between friction force and relative slip amplitude for various cycles in reheat-treated materials ($\sigma_{max} = 263\text{MPa}$)

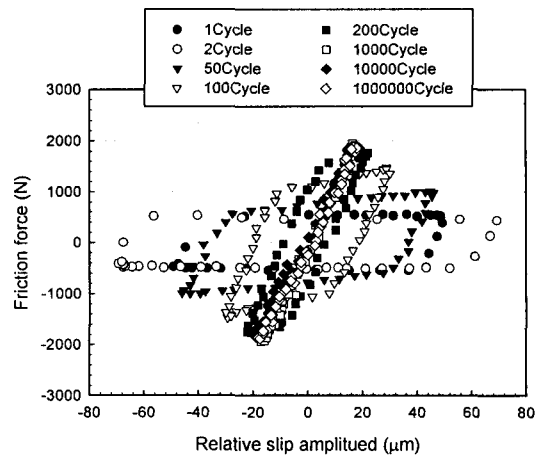


Fig. 10 Relationship between friction force and relative slip amplitude for various cycles in degraded materials ($\sigma_{max} = 230\text{MPa}$)

모 손상 부위)에서 얻어진 대표적인 SEM 사진이다. 균열발생 위치는 Fig. 11(a)와 같이 시험편 모서리부에서 발생하여 성장한 경우이며, 시험편은

모두 패드 접촉부의 끝부분에서 균열이 발생하고 있었다. 또한 파면에는 전형적인 연성 스트라이에이션(striation)과 과시 스트라이에이션(quasi-striation)이

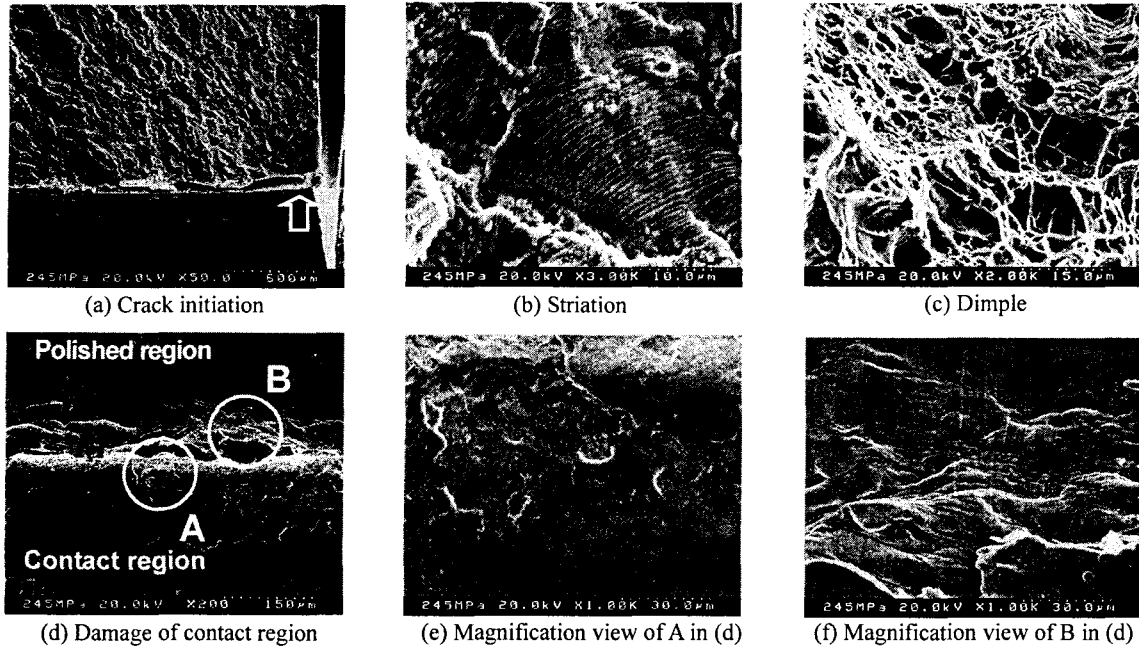


Fig. 11 SEM micrographs of fracture surface and contact area for reheat-treated material ($\sigma_{max} = 245\text{MPa}$)

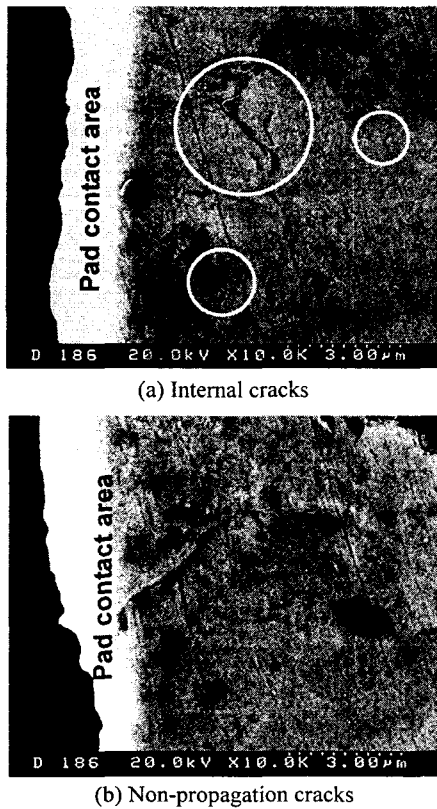


Fig. 12 SEM micrographs of non-propagating cracks of degradation materials ($\sigma_{max} = 186\text{MPa}$)

광범위하게 형성되어 있었으며 최종 파단부에는 딴플(dimple)이 형성되어 있었다.

시험편 표면의 패드 접촉부위에서는 Fig. 11(d)에 나타내는 바와 같이 프레팅에 의하여 마모손상이 발생한 흔적들이 관찰되었다. 마모손상 부위 주변 및 내부에서는 Fig. 11(f)에 제시하는 것과 같이 표면 균열이 발생한 장소도 관찰되었다. 이것은 패드 접촉부에서 다수의 초기 균열이 발생하여 특정 균열만이 지속적으로 성장한 후 파단에 이르며, 상당수의 균열은 정류균열로서 마찰면에 남는다고 여겨진다. 이러한 현상들은 열화재에서도 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 12 에는 프레팅 피로를 10^7 사이클까지 부가하여도 파단하지 않아 시험을 중단한 열화재 시험편을 길이 방향으로 절단한 후, 관찰한 사진이다. (a)는 패드 접촉부 직하 약 $5\mu\text{m}$ 깊이의 내부에서 발생한 균열을 보여 주고 있으며 (b)는 패드 접촉부 표면에서 발생하여 45° 로 약 $3\mu\text{m}$ 길이로 성장한 균열을 보여주고 있다. 이러한 균열은 정도의 차이는 있으나 열화재 및 재열처리재 모두에서 발견되었다. 이러한 관찰로부터 프레팅에 의한 표면균열의 생성 및 성장과정에 내부에서 발생한 균열의 합체 및 성장이 가미되어 가장 우세한 장소에서 지속적으로 균열이 성장하며, 나머지 부분은 정류균열로 남는다고 판단되어진다.

특히 앞에서 제시한 조직사진을 참고로 하여,

내부균열의 핵이 될 수 있는 탄화물의 규모와 분포 상황 등을 고려하면 탄화물이 고르게 분산되어 있는 열화재에서 상대적으로 균열의 발생 및 지속적인 성장이 우세하게 전개된다고 보는 것이 타당하다. 즉 열화재가 재열처리재에 비하여 프레팅에 의한 손상이 크게 나타난다고 볼 수 있다.

5. 결론

화력발전소의 보일러 헤더용 1Cr-0.5Mo 강의 장기 사용으로 인한 재열열화가 강도에 미치는 영향과 프레팅 피로거동을 평가하기 위하여 실제 장기 사용된 열화재를 사용하였다. 제작시의 조직에 근사한 재료를 얻기 위하여 재열처리 하였으며, 단순피로와 프레팅 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재열처리재에 비하여 열화재 조직이 상당히 조대해져 있었다. 경도시험에서는 열화재가 재열처리재에 비하여 펄라이트에서는 경도가 높고, 펄라이트에서는 경도 값이 다소 낮아졌으나, 열화재 내의 펄라이트가 재열처리재에 비하여 보다 광범위하게 분포하고 있다는 점을 감안하여 취화 되었다고 판단된다.

(2) 열화재와 재열처리재를 비교해 볼 때 재열처리재에 비하여 충격흡수 에너지 상부단 값이 감소하였고, DBTT 도 다소 고온측으로 이동하였으며, 인장강도는 열화재와 재열처리재 모두 유사한 값을 보이고 있으나 항복강도는 열화재가 다소 낮은 값을 보였다. 이것은 재료의 열화에 의하여 열화재 내의 탄화물의 규모는 커지고 미세한 입자 수가 감소하였기 때문으로 사료된다.

(3) 열화재와 재열처리재의 단순피로 시험의 결과 피로한도는 열화재가 재열처리재에 비하여 약 9 % 감소하였다. 이것은 열화재 내의 미세 탄화물 입자가 구상화 및 조대화하여 초기 피로균열이 발생 할 수 있는 비교적 규모가 큰 탄화물의 수가 증가한 결과라고 사료된다.

(4) 프레팅 피로를 받은 재열처리재의 피로한도는 일반피로 한도에 비하여 약 46 % 감소하였다. 또한 열화재에 있어서는 프레팅 피로를 받을 경우 프레팅을 받지 않는 단순 피로시험에 비하여 피로한도가 53 % 정도 감소하여 재열처리재 보다 프레팅에 의한 수명 감소율이 크게 나타났다.

(5) 재열처리재의 단순피로 한도에 비하여 열화재의 프레팅 피로한도는 무려 57 % 정도 감소하여 가장 큰 차를 보였다.

이와 같은 결과는 장기간 고온에서 사용되어지며 재질의 열화를 일으키는 내열강에 있어서 프레

팅 피로에 의한 수명감소를 설계단계에서 심각하게 고려할 필요성이 있음을 시사하고 있다고 판단되어진다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성 분석연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Nishizaka, Y., Hara, Y., Hori, A., Tsukahara, H., Miyano, K., Wada, T. and Cox, T. B., 1985, "Changes in Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Mo Reactor Vessel Steels During Long-Term Services," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 107, pp. 285~294.
- (2) Watanabe, Y. and Shoji, T., 1991, "The Evaluation of in-service Materials Degradation of Low Alloy Steels by The Electrochemical Method," *Met. Trans.*, Vol. 22A, pp. 2097~2106.
- (3) Trautwein, A. and Gysel, W., 1982, "Influence of Long-Time Aging of CF8 and CF8M Cast Steel at Temperatures Between 300 and 500°C on Impact Toughness and Structural Properties," *ASTM STP 756*, pp. 165~189.
- (4) Waterhouse, R. B., 1992, "Standardization of Fretting Fatigue Test Method and Equipment," *ASTM STP 1159*, pp. 60~66.
- (5) Challenger, K. D., Miller, A. K. and Brinkman, C. R., 1981, "An Explanation for the Effects of Hold Periods on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of 2 1/4 Cr-Mo Steel," *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 103, pp. 7~14.
- (6) 村上賀國, 1983, "壓力容器用 Cr-Mo 鋼の脆性に關する研究," 博士學位論文, 大阪大學工學部.
- (7) Kwon, J. D., Sang, S. S., Choi, S. J., 2001, "A Study on Material Degradation and Fretting Fatigue Behavior," *Transaction of the KSME*, A, Vol. 25, No. 8, pp. 1287~1293.
- (8) Bißs, V. A. and Wada, T., 1985, "Microstructural Changes in 1Cr-0.5Mo Steel after 20 Years of Service," *Met. Trans.*, Vol. 16A, pp. 109~114.
- (9) Kwon, J. D., Bae, Y. T., Choi, S. J., 2000, "Evaluation of Degradation Behavior of the Long-Term Serviced Boiler Header," *Transaction of the KSME*, A, Vol. 24, No. 7, pp. 1673-1680.
- (10) ASTM, "Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," *ASTM E 466-82*, pp. 470~474.
- (11) The Society of Materials Science, Japan, 1996, *Data Book on Fatigue Strength of Metallic Materials*, Vol. 1, p. 192.
- (12) Fouvry, S., Kapsa, P. and Vincent, L., "Fretting-Wear and Fretting Fatigue: Relation Through a Mapping Concept," *ASTM STP 1367*, pp. 49~64.