

재질 열화와 프레팅 피로거동 평가에 관한 연구

권재도[†] · 성상석* · 최성종**

(2001년 2월 13일 접수, 2001년 5월 24일 심사완료)

A Study on Material Degradation and Fretting Fatigue Behavior

Jae Do Kwon, Sang Suk Sung and Sung Jong Choi

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

Abstract

Fretting is a potential degradation mechanism of structural components and equipments exposed to various environments and loading conditions. The fretting degradation, for example, can be observed in equipments of nuclear, fossil as well as petroleum chemical plants exposed to special environments and loading conditions. It is well known that a cast stainless steel(CF8M) used in a primary reactor coolant(RCS) degrades seriously when that material is exposed to temperature range from 290°C ~ 390°C for long period. This degradation can be resulted into a catastrophic failure of components. In the present paper, the characteristics of the fretting fatigue are investigated using the artificially aged CF8M specimen. The specimen of CF8M are prepared by an artificially accelerated aging technique holding 1800hr at 430°C respectively. Through the investigations, the simple fatigue endurance limit of the virgin specimen is not altered from that obtained from the fatigue tests imposed the fretting fatigue. The similar tests are performed using the degraded specimen. The results are not changed from those of the virgin specimen. The significant effects of fretting fatigue imposed on both virgin and degraded specimen on the fatigue strength are not found.

1. 서 론

프레팅(fretting)이란 접촉하고 있는 두 표면 사이에서 발생하는 상대적인 미끄럼(relative slip)현상을 일컫으며, 강하게 체결된 기계 구조물들의 접촉면들이 극히 미소한 진폭의 반복 상대운동을 일으킬 때 발생한다. 프레팅으로 인해 구조 재료의 피로강도는 현저하게 저하하게 되는데 이 현상을 프레팅 피로(fretting fatigue)라고 한다.⁽¹⁾ 기계 및 구조물의 파손 사고의 중대한 원인으로

부재의 피로(고온 피로, 부식 피로, 프레팅 피로) 파괴에 대한 연구가 오래동안 활발하게 진행되어 왔지만, 상대적으로 프레팅 피로에 대한 연구는 상당히 미비한 상태이다.

프레팅은 기계 구조물이 사용환경 및 하중 부하상태에 따라 일어날 수 있는 잠재적 열화 기구의 한 형태로서, 원전 설비뿐만 아니라 화력발전 설비, 항공기, 석유화학 플랜트 등과 같이 특수 환경과 하중상태에서 사용되면 어떤 경우든지 일어날 수 있다.⁽²⁾ 또한, 원자력 발전설비 등과 같이 가혹한 환경하에서 사용되는 기계 구조물들의 주요 파손 원인은 주로 재질 열화(degradation)에 의한 피로 및 환경 파괴로서 주로 원자로 냉각계통 설비에서 발생된다고 보고되고 있다.⁽³⁻⁵⁾

일반적으로 프레팅 피로에 있어서 50가지 이상

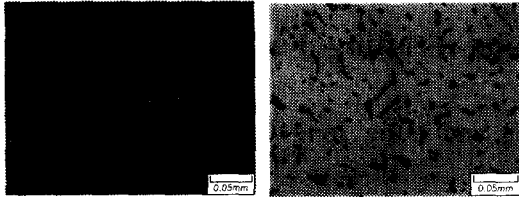
[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : jdkwon@ynucc.yeungnam.ac.kr
TEL : (053)810-2462 FAX : (053)813-3703

* 영남대학교 대학원

** 회원, 영남대학교 기계공학부

Table 1 Chemical composition of CF8M

Composition, wt. %							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.074	1.21	0.0318	0.0126	1.14	9.59	18.67	2.73



(a) Virgin (b) 1800 hrs degraded

Fig. 1 Microstructures of virgin and degraded material ($\times 400$)

의 인자들이 복합적으로 작용하며, 접촉면압, 마찰력, 상대슬립, 접촉패드 재질, 표면상태, 환경등 많은 요인이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾

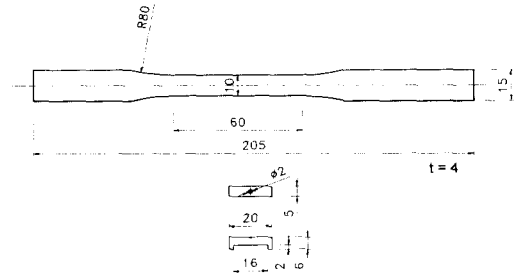
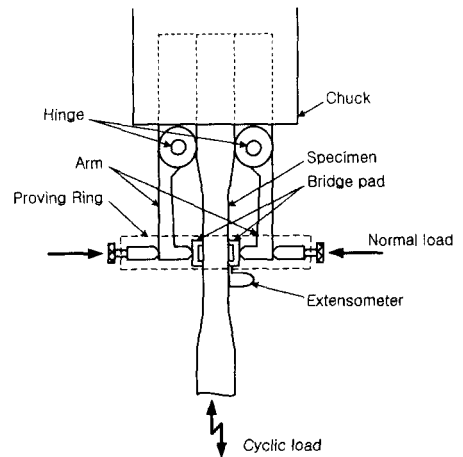
본 연구에서는 원전 1차계통의 RCS (Reactor Coolant System) 배관계통 재료로 사용되는 주조 스테인리스 강(CF8M)을 모의 가속 열화방법에 의해 열화재를 제작하고 재료의 열화에 따른 프레팅 피로 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편 및 장치구성

본 연구에 사용된 재료는 원자력 발전소의 1차 계통에 사용되는 ASTM A351 Grade CF8M 주조 스테인리스강이며, Table 1에 CF8M의 화학성분을 나타내었다.

열화가 재료강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 실험실에서 모의 가속 열화재를 제작하는 방법을 선택하였다. 열화온도는 단시간에 열화를 시킬 수 있고, 가능한 한 낮은 온도인 430℃를 채택하여, 430℃에서 100, 300, 900, 1800 및 3600 시간 유지 후 수냉하여 각 단계별 열화재를 제작하였다. 프레팅 피로시험용 재료는, 충격시험을 한 결과 상부단 충격흡수에너지의 현저한 차이를 보이고 1800시간 이후에는 거의 충격흡수에너지의 차이가 없었다.⁽⁷⁾ 이것은 열화가 시간의 함수로서 1800시간에서 거의 포화에 다다르게 되기 때문이다. 따라서 건전재와 1800시간 모의열화재

**Fig. 2** Shape of dimintion of fretting fatigue specimen and bridge pad**Fig. 3** Schematic of fretting fatigue test

를 채택하여 프레팅 피로 실험에 임하였다.

Fig. 1은 건전재와 1800시간 모의열화재의 조직 사진을 나타내는 것으로서 열화재가 건전재에 비해 조직이 조대해 졌음을 알 수 있다.⁽⁸⁾

본 시험에 사용된 시험편과 패드의 형상 및 치수는 Fig. 2에 나타내었다. 시험편은 ASTM E 466⁽⁹⁾ 피로시험편 규격에 따라 와이어 커팅(wire cutting)으로 직경 10mm, 평행부 60mm를 가지며 R80으로 가공하였다. 또한 접촉 패드는 재질이 탄소강(SM45C)으로서 양단에 2mm의 평행부가 있어 접촉면을 대칭형으로 배치하여 안정된 접촉 상태에서 실험을 행할 수 있는 브리지 패드(bridge pad)를 사용하였다. 시험편과 브리지 패드 평행부는 표면거칠기 효과를 최소화 하기 위하여 #1000~2000까지 에머리 페이퍼(emery paper)를 이용하여 단계적으로 연마 후 최종적으로 산화

알루미늄(Al_2O_3) 파우더를 이용하여 마무리 연마를 하였고, 아세톤으로 세척 후 실험에 임하였다.

사용된 피로시험기는 Instron사의 유압서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine : Model 8516)로 최대용량은 10ton이며, 시험조건은 응력비 $R=0.1$, 주파수 20Hz로 정현파형(sine wave)의 인장-인장 하중형태를 채택하였고 상온(습도 $50 \pm 5\%$)에서 행하였다.

프레팅 피로시험의 조합형태를 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 시험편과 압은 로드 셀(load cell)에 위치한 척(chuck)에서 동시에 잡는 방법을 채택하였다. 프레팅 조건을 만들기 위하여 프루빙 링(Proving ring)의 볼트를 조임으로서 패드에 30 MPa의 일정한 접촉면압을 부가하고, 프루빙 링에서 나오는 신호는 스트레인 인디케이터(strain indicator)를 통하여 출력하였다. 시험편과 패드의 상대 슬립은 변위계(extensometer)에 부착된 스트레인 게이지(strain gage)의 신호를 앰프를 통해 증폭시켜 디지털 멀티미터(digital multimeter)로 출력되도록 하였다. 본 시험에 사용된 프로그램은 Instron사의 MAX 8516이며, 각 시험편에 대해서 소정의 사이클마다 압과 변위계로부터 데이터를

자동으로 저장하였다.

2.2 실험장치 보정

본 실험에 사용된 프루빙 링, 암(arm) 및 변위계는 직접 제작하여 보정 후 사용하였다.

패드에 수직력을 부가하기 위해 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 SM45C로 직사각형 형상의 프루빙 링을 제작하였고, 산화방지를 위해 코팅처리하였다. 링 양단에는 4장의 스트레인 게이지를 부착하여 풀 브리지(full bridge) 회로를 구성한 후 보정하였다. 시험편과 패드 사이에 발생하는 마찰력의 측정을 위하여 Fig. 4(b)와 같은 형상의 암을 제작한 후 양단에 4장의 스트레인 게이지를 부착하여 보정하였다. 암의 재질은 SM50C이며 산화방지를 위해 코팅처리 하였다.

시험편과 패드의 접촉부에서 발생하는 상대슬립을 측정하기 위하여 0.3mm의 청동판재로 Fig. 4(c)와 같은 형상의 상대슬립 측정용 변위계를 제작하였으며, 곡률 부분 안팎으로 2장의 스트레인 게이지를 부착하여 1/2 브리지(half-bridge) 회로를 구성 후 보정하였다. 프루빙 링, 암 및 변위계의 보정곡선을 각각 Fig. 5에 나타내었다.

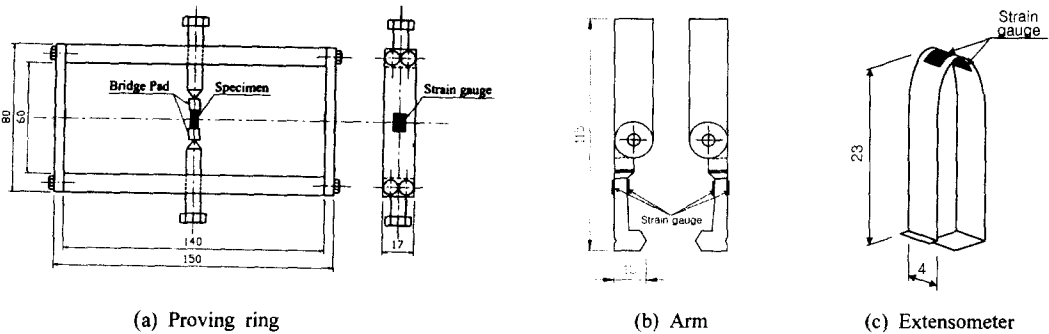


Fig. 4 Schematic of proving ring, arm and extensometer

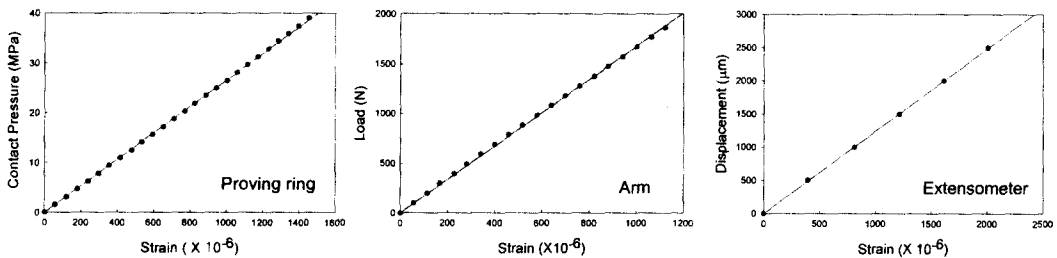


Fig. 5 Calibration curves for proving ring, arm and extensometer

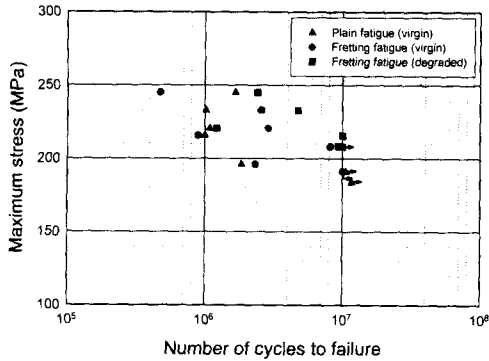


Fig. 6 S-N curve for plain and fretting fatigue test

3. 실험 결과

3.1 S-N(Number of cycles) 곡선

주조 스테인리스 강(CF8M)에 대한 프레팅 피로실험 결과, 건전재와 열화재에 대하여 얻어진 S-N 곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

두 재료의 피로실험 결과는 상당히 큰 오차 폭을 가지는 밴드(band)를 형성하고 있었으며, 피로 한도(fatigue limit)는 건전재 단순피로의 경우와 프레팅 피로의 경우에는 거의 동일한 극한강도의 약 36%(191MPa)로, 열화재의 프레팅 피로의 경우는 약 33%(208MPa) 정도로 나타났다.

본 연구에 사용된 재료는 고 인성, 고 연성 재료이며, 열화가 진행됨에 따라 탄화물이 석출하여 페라이트 입계에서 구상화, 조대화 함으로서 취화 현상이 일어난다. 프레팅 피로균열의 발생이 표면에서 상대슬립에 의한 마모 및 마찰력에 관계한 전단력에 의존함을 고려하면 석출된 미세한 탄화물 또는 입계에서 조대화 된 탄화물이 열화재 프레팅 피로수명을 상승시킬 가능성이 있는 것으로 사료된다.

3.2 마찰력과 상대슬립의 영향

주조 스테인리스강의 프레팅 피로거동을 평가하기 위하여 마찰력(friction force)과 상대슬립거동을 측정하였다. 건전재와 열화재의 사이클 비(N/N_f)에 따른 마찰력과 상대슬립의 관계를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 건전재와 열화재 모두 사이클 비 초반에 마찰력이 급격히 증가한 후 감소하는 경향이 나타났으며, 사이클 비 0.05% 이후 일정한 거동을 보이다가 마찰력은 점점 감소하는 반면 상대슬립은 증가하는 경향을 나타내

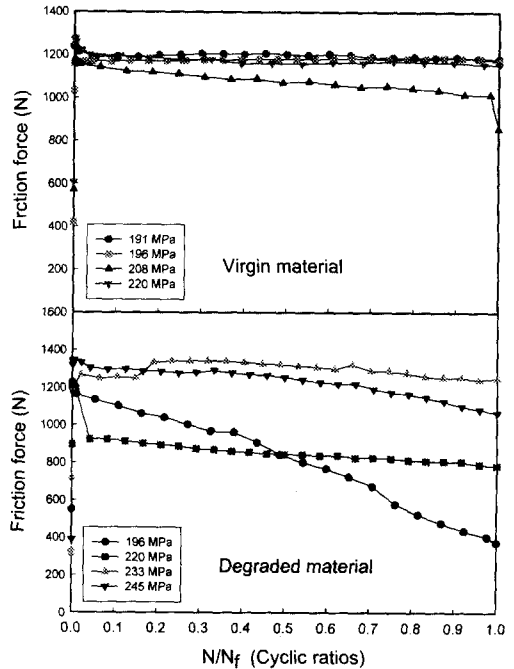


Fig. 7 Relationship between friction force and cyclic ratios

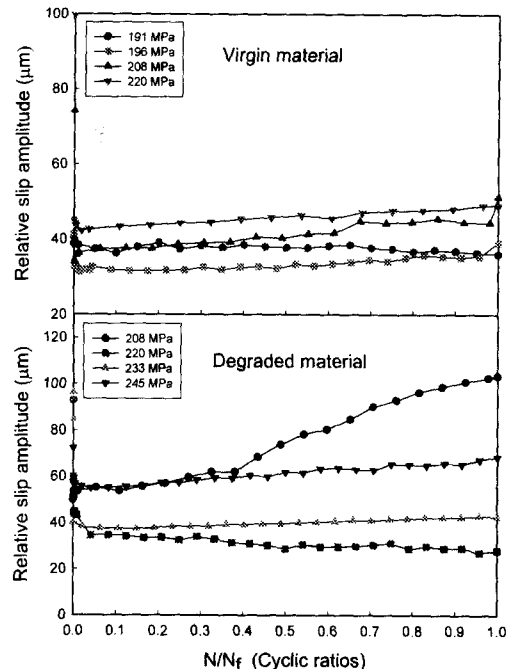


Fig. 8 Relationship between relative slip amplitude and cyclic ratios

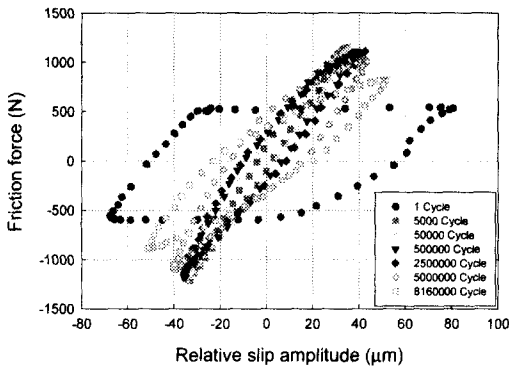


Fig. 9 Relationship between relative slip amplitude and friction force for various cycles in virgin material (208MPa)

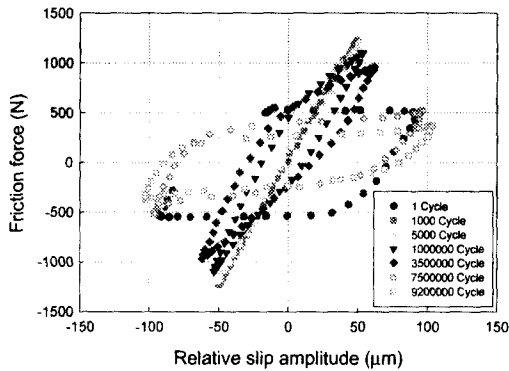


Fig. 10 Relationship between relative slip amplitude and friction force for various cycles in degraded material (208MPa)

었다. 프레팅 피로파괴 양상을 보인 210MPa에서 건전재보다 열화재의 경우가 마찰력의 감소가 크게 나타났다. 이것은 열화재의 경우 건전재에 비해 큰 조직과 석출물로 인하여 시험편과 패드 사이에 이러한 탄화물 입자들이 재재함으로서 보다 큰 윤활 작용을 하기 때문으로 사료된다. 또한 대부분 프레팅 피로에 의하여 균열 발생후 정류 균열(non-propagation crack)로 잔존하여 접촉부를 벗어난 곳에서 파단이 일어났다.

전형적인 프레팅 피로파괴를 일으킨 대표적인 시험편에 있어서의 상대슬립 진폭과 마찰력의 관계를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 건전재와 열화재에 있어서 초기에 전면슬립(gross slip)이 발생한 후 급격하게 부분 슬립(partial slip) 형태가

되어 사이클 수의 증가와 더불어 혼합 슬립 (partial & gross slip)의 양상을 나타내었다.⁽¹⁰⁾

전면슬립은 초기에 두 접촉면의 전면에서 슬립이 발생하여 가공 시에 형성된 표면이 슬립에 의하여 사라지고 국부적인 용착 상태로의 천이가 발생한다. 이러한 용착에 의하여 슬립진폭이 급감하는 부분슬립이 일어나게 되고 연속되는 사이클 수의 증가에 따라 접촉면 사이에서 데브리(debris)가 발생되어 새로운 형태의 표면이 형성되며, 데브리에 의한 윤활 효과가 발생하고 초기에 발생한 프레팅 미시 균열의 성장과 더불어 상대 슬립 진폭이 증가하는 것으로 사료된다.

3.3 접촉부 및 파면관찰

접촉부의 프레팅 손상(fretting damage)에 의한 균열성장 기구를 규명하기 위하여 파단 후 광학현미경(optical microscope)으로 접촉부의 형상 및 균열을 관찰하였다.

일반적으로 프레팅 피로균열 진전방향은 접촉 응력과 외부응력이 중첩된 응력의 최대 주응력에 수직이다. 즉, 접촉면의 표면근처에서는 마찰력의 영향에 의하여 균열은 표면에 대하여 경사지게 진전하고, 내부로 진전함에 따라서 마찰력의 영향권에서 벗어나 표면에 대하여 수직하게 진전한다고 알려져 있다.⁽¹¹⁾

Fig. 11(a)는 건전재 280MPa인 경우에 얻어진 프레팅 피로파괴된 시험편의 측면에서 촬영한 경사균열로서 정류균열과 슬립 띠(slip band)를 나타낸 것이다. 약 45도 방향으로 경사균열 거동을 보인 정류균열은 패드와의 접촉부 내부에서 발생하기 때문에 상당한 규모로 성장하기까지는 관찰하기가 극히 곤란하며, 슬립 띠의 경우 모든 시험편의 접촉부 근방에서 관찰되었다.

프레팅 피로의 정확한 손상정도를 알아보기 위해 염산(HCl)으로 세척하여 접촉부의 데브리를 완전히 제거한 후 접촉 표면을 관찰하였고 그 결과를 Fig. 11(b)에 나타내었다. 건전재와 열화재 모두 패드 접촉부에서 점선으로 표시한 부분과 같이 심한 마모손상으로 움푹 패인 자국(valley)이 생겼고, 그 부위에는 미시 균열들이 국부적으로 관찰되었다. 움푹 패인 자국은 연성재료에서 어브레시브 마모(abrasive wear)에 기인한 것이며, 이것은 접촉면압이 최대인 곳에서 발생하기 때문에 미시 균열의 발생을 초래하는 것으로 사료된다.

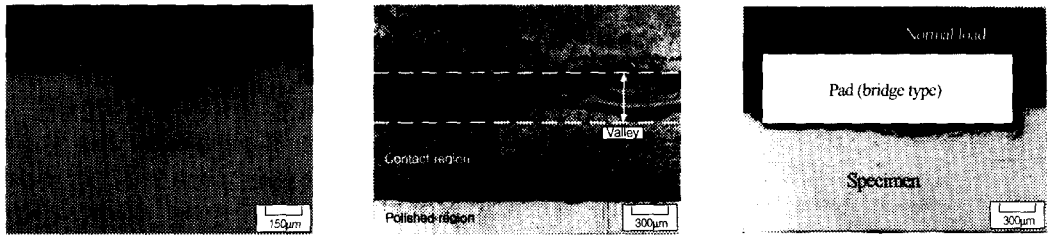
다. Fig. 11(c)에는 패드 접촉부를 측면에서 관찰한 것을 나타내었다. 그림에서 보여주는 패드 두께와 접촉부의 차이가 150 μm 정도이고 이 시험편에서 얻어진 상대슬립 진폭이 최대 약 100 μm 이나, 본 연구에서 사용되어진 재료가 고연성 재료임을 감안하면 충분히 이해가 되어진다.

또한, 시험편 접촉부와 파단면의 미시적 고찰을 위하여 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)을 이용하여 접촉부와 파단면을 관찰하였다.

Fig. 12(a)는 건전재 191MPa에서 패드 접촉부를 나타낸 것으로 어브레시브 마모에 의해 형성된 자국(Scar)을 나타내고 있으며, 접촉부 끝부분에 미세한 단(step)이 형성되었음을 알 수 있다. 이러

한 단들은 상대 슬립의 변화에 의하여 형성된 것으로 볼 수 있으며 데브리가 패드에 밀려서 형성된 것으로 사료된다. Fig. 12(b)는 패드 접촉부에 인접한 시험편 표면에서 관찰된 슬립 띠를 나타내고 있으나, 이러한 슬립 띠들은 패드 접촉부 근방에서 가장 규모가 크고 패드 접촉부에서 멀어질수록 그 정도는 규모도 적고 수적으로도 적어지는 경향이 있었다. 이러한 슬립 띠는 대부분의 건전재와 열화재의 시험편에서 관찰되었다. Fig. 12(c)에서는 작은 덩어리 모양의 데브리를 나타낸 것이다.

건전재와 열화재 모두 피로파면부에서는 전형적인 스트라이에이션(striation)이 다수 관찰되었으며, 열화재에서는 Fig. 13(b)에서 나타낸 것과 같



(a) Oblique crack (208MPa, $\times 100$) (b) Fretting damage (191MPa, $\times 50$) (c) Fretting damage (208MPa, $\times 50$)
Fig. 11 Photographs of oblique crack and fretting damage in contact region (a, b : virgin, c : degraded)



(a) Fretting scar (virgin 191MPa) (b) Slip band (virgin 191MPa) (c) Fretting scar (degraded 208MPa)
Fig. 12 SEM micrographs of fretting damage on the contact region



(a) Crack initiation (b) Striation and brittle fracture (c) Dimple
Fig. 13 SEM fractography on the fracture surface (degraded 220MPa)

이 스트라이에이션과 취성파면이 혼재하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 열화에 의한 페라이트 취화에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 최종 파단부에서는 Fig. 13(c)와 같이 전형적인 딴플(dimple)이 관찰되었다.

4. 결론

건진재 및 430°C에서 1800시간 모의 가속열화에 의하여 제작된 열화재에 대하여 단순 피로시험과 프레팅 피로시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 건진재 단순피로 시험과 프레팅 피로시험의 경우 피로한도의 차이를 보이지 않았다. 이것은 고인성, 고연성인 본 연구 재료의 특성인 것으로 사료된다.

(2) 건진재와 열화재의 프레팅 피로시험에 있어서 열화재가 건진재보다 높은 피로한도를 나타내었다. 열화 메카니즘으로 볼 때 프레팅 피로균열의 발생이 표면에서의 상대 슬립에 의한 마모 및 마찰력에 관계한 전단력에 의존함을 고려하면 석출된 미세한 탄화물 또는 입계에서 조대화 된 탄화물이 프레팅 피로균열 발생과 전파를 방해하여 열화재의 프레팅 피로수명이 건진재보다 상승된 것으로 사료되나, 데브리에 의한 윤�활작용이 열화재의 경우가 우세하기 때문이라는 것도 배제할 수 없다.

(3) 프레팅 피로균열 거동을 나타낸 재료와 나타내지 않은 재료 모두 프레팅에 의한 미세한 정류균열을 포함하고 있었다.

(4) 고 인성 재료인 본 연구 재료(CF8M)에서는 열화재, 건진재 모두 프레팅 피로의 영향에 의한 강도저하는 없었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업안전설비 안전성 평가 연구센터와 BK21사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Waterhouse, R. B., 1972, *Fretting Corrosion*,

Pergamon, Oxford.
 (2) Gillemot, F., 1995, *Identification of NPP Key Components and Classification*, Kins-IAEA Work on Technology for Life Management of NPPs.
 (3) Solomon, H. D. and Levinson, Lionel M. 1978, "Mössbauer Effect Study of 475°C Embrittlement of Duplex and Ferritic Stainless Steels," *Acta Metallurgica*, Vol. 26, pp. 429-442.
 (4) Chung, H. M. and Leax, T. R., 1989 "Embrittlement of Laboratory and Reactor Aged CF-3, CF-8 and CF-8M Duplex Stainless Steel," *International Workshop on Intermediate-Temperature Embrittlement Processes in Duplex Stainless Steel*, August 1-2, Oxford, England.
 (5) Chopra, O. K. and Chung, H. M., 1989, "Initial Assessment of the Process and Significance of Thermal Aging in Cast Stainless Steels," *NUREG/CP-097*, Vol. 3, pp. 519-546.
 (6) Waterhouse, R. B., 1992, "Standardization of Fretting Fatigue Test Method and Equipment," *ASTM STP 1159*, pp. 60-66.
 (7) Jae-do Kwon, Joong-cheul Park, Yong-son Lee, Woo-ho Lee and Youn-won Park, 2000, "An Investigation of the Degradation Characteristics for Casting Stainless Steel, CF8M, Under High Temperatures," *Nuclear Engineering and Design* 198, pp. 227-240.
 (8) 권재도, 박중철, 이용선, 이우호, 박윤원, 2000, "주조 스테인리스강 CF8M의 430°C 열화거동에 관한 연구(I) - 열화기구·정적 및 피로강도평가," 대한기계학회 논문집, 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제8호, pp. 1910-1916.
 (9) ASTM, "Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," *ASTM E 466* 82, pp. 470-474.
 (10) Fouvry, S., Kapsa, P. and Vincent, L., "Fretting-Wear and Fretting Fatigue: Relation Through a Mapping Concept," *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, *ASTM STP 1367*, pp. 49-64.
 (11) ASM Handbook, 1996, "Fatigue and Fracture, edited by Steven R, Lampman, et. al.," Vol. 19, pp. 321-368.