

320°C에서의 인코넬 합금의 프레팅 피로 거동 평가에 관한 연구

권재도* · 정한규*† · 정일섭* · 박대규** · 윤동환***

* 영남대학교 기계공학부, ** 한국섬유기계연구소, *** 한국항공우주연구원

Evaluation of Fretting Fatigue Behavior for Inconel Alloy at 320°C

Jae-do Kwon*, Han-kyu Jeung*†, IlSup Chung*, Dae-kyu Park** and Dong-hwan Yoon***

* Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,

** Korea Textile Machinery Institute,

*** Korea Aerospace Research Institute

(Received April 4, 2011 ; Revised April 24, 2011 ; Accepted May 2, 2011)

Key Words : Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Inconel Alloy(인코넬합금), Structural Integrity(구조건전성), Plain Fatigue(단순피로), Fretting Fatigue(프레팅피로)

초록: 원자력 발전설비의 증기발생기용 세관 재료로 인코넬 합금이 사용되고 있다. 인코넬 합금은 고 니켈과 크롬의 합금으로 고온에서 내부식성이 뛰어난 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 인코넬 600 과 690 합금에 대해 실제 원전의 운전온도, 즉 320°C가 프레팅 피로 거동에 미치는 영향에 대해 연구해 보았다. 그 결과 320°C에서의 단순 피로한도와 프레팅 피로한도가 상온에서의 단순 및 프레팅 피로한도에 비해 다소 저하하는 것을 알 수 있었다. 아울러 하중 반복회수와 마찰력의 변화 특성도 얻었다. 또한 파단면을 전자현미경으로 관찰하여 프레팅 피로기구도 검토해 보았다. 이와 같은 결과는 실제 운전온도에서 프레팅을 받는 증기발생기의 구조건전성 평가에 활용 가능할 것으로 생각된다.

Abstract: Inconel alloys are generally used as steam generator tubes in nuclear power plants. These alloys are high-nickel chromium alloys that exhibit excellent resistance to aqueous corrosion. In this paper, the effects of elevated temperatures such as an operating temperature of 320°C on the fretting fatigue behavior of inconel 600 and 690. We observed that the plain and fretting fatigue limits at 320°C were slightly lower than those at room temperature. The frictional forces varied depending on the number of load cycles. After each test, we studied the fretting fatigue mechanisms via SEM observations. These results can be used for structural integrity evaluations at elevated temperatures and for studying fretting damage in steam generator systems.

1. 서 론

최근 원자력발전 설비의 안전성 평가는 그 무엇보다 사회의 관심이 집중된 과제이다. 이 설비가 반복 응력이 작용하는 가운데 사용될 경우, 피로 손상 이론에 근거하여 설계 단계에서부터 신뢰성 확보가 요구되고 있다.⁽¹⁾ 프레팅은 접촉부의 미세한 상대 슬립 현상에 따른 구조용 재료의 손상 현상이다. 그 주요 영향 인자로는 상대 슬립량, 면압 및 마찰력, 온도와 습도 등이 있다. 이러한 프레팅 현상이 발생되면, 구조용 재료에는 마모와 함께 균열의 발생과 성장에 따른 피로파괴가 진행된다.

이러한 프레팅 현상은 재료의 수명을 단축시켜 건전성과 경제성을 크게 감소시키는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

Inconel 합금은 고온에서 내산화 및 내부식성이 우수한 니켈-크롬 합금으로, 원전 증기발생기 세관용 재료로 사용되고 있다.⁽³⁾ 그러나, 원자력 발전설비의 증기발생기와 같이 고온, 고압의 환경에서 Inconel 합금이 프레팅과 피로 현상을 동시에 받을 경우에 대한 데이터가 부족하다. 그래서 증기발생기 용 세관 재료의 실제 사용 온도에서의 프레팅 피로에 대한 연구가 필요한 실정이다.^(4,5)

본 연구에서는 Inconel690 및 600 합금에 대하여 원전의 실제 운전 온도인 320°C에서 단순 및 프레팅 피로시험을 수행한 후, 프레팅 피로를 받을 경우와 단순피로를 받을 경우의 피로 한도의

† Corresponding Author, hkjeung@kotmi.re.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

변화 특성을 검토하였다. 또한 상온에서의 기존의 연구 결과⁽⁶⁾와도 비교, 검토하였다. 더불어 프레팅 파단면을 전자현미경으로 관찰하여 320°C 에서의 프레팅 피로 기구도 검토해 보았다.

2. 실험용 재료 및 시험편

본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 원자력 발전설비의 증기발생기 세관 재료 중 대표적인 2종인 Inconel600과 690 합금을 선택 하였다. 두 재료는 고온에서 내부식성이 뛰어난 니켈과 크롬의 합금이다. Inconel600과 690은 각각 73.66%와 58.05%의 니켈과 15.75%의 29.44%의 크롬 성분을 함유하고 있다.

Inconel600 및 690합금과 SUS409에 대한 화학성분을 Table 1에 나타내었으며, 인장시험 결과 얻은 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. Inconel 합금은 연신율이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 1은 Inconel600 및 690의 미세 조직으로써 30ml의 증류수, 20ml의 HNO₃, 20ml의 HCl, 그리고 10ml의 H₂O₂의 혼합 용액을 사용하여 2분간에 칭한 뒤 100배 배율의 광학현미경을 사용하여 촬영하였다. 두 재료 모두 결정립 크기의 차이는 있지만, 결정립 내에 다수의 쌍정을 가지고 있는 것이 특징이다.

본 연구에서 사용된 단순 피로 및 프레팅 피로 시험편은 각각 Inconel600 및 690 합금으로 제작 하였다.

Table 1 Chemical compositions of Inconel600, Inconel690 and SUS409

Materials	Compositions, wt. %					
	Al	Si	P	K	S	Cl
Inconel 600	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
	0.253	0.273	-	0.055	0.041	0.109
Inconel 690	0.318	15.748	0.339	9.158	73.662	0.044
	0.146	0.283	0.016	-	0.036	0.068
SUS409	0.218	29.439	0.381	11.358	58.054	-
	-	0.52	-	-	-	-
	0.18	12.43	0.37	86.50	-	-

Table 2 Tension properties of Inconel600, Inconel690 and SUS409 in room temperature

Materials	Inconel 600	Inconel 690	SUS409
0.2% yield strength	257MPa	239MPa	172MPa
Tensile strength	628MPa	591MPa	379MPa
Elongation	41%	49%	20%
Young's modulus	189GPa	199GPa	208GPa

접촉패드는 증기발생기 내의 세관을 지지하는 격자와 동일한 재료인 stainless steel (SUS 409)로 제작하였다.

320°C 에서 단순 및 프레팅 피로 시험에 사용할 시험편의 형상은 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 평행부의 폭 7mm, 두께 4mm 인 plate 로 제작하였다.

접촉패드는 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 시험편과 면 접촉을 시키기 위해 브릿지 타입으로 제작 하였다.

3. 시험방법 및 결과

3.1 320°C에서의 단순 및 프레팅 시험 방법

Fig. 3는 고온 프레팅 피로시험 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

먼저 프루빙 링에 50MPa의 일정한 초기 접촉압력을 가하면, 그 압력은 암(arm)과 접촉 패드를 통해 시험편에 가해진다.

시험편과 접촉패드 사이의 마찰력은 암의 표면에 부착된 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다.⁽⁷⁾ 또한 그 접촉부 사이의 상대 슬립 량은 변위계를 사용하여 측정하였다.

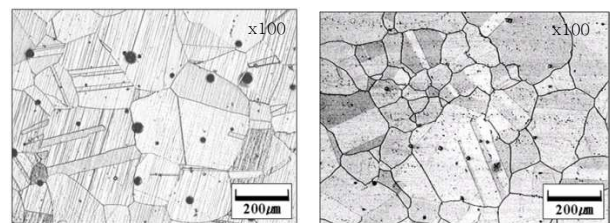
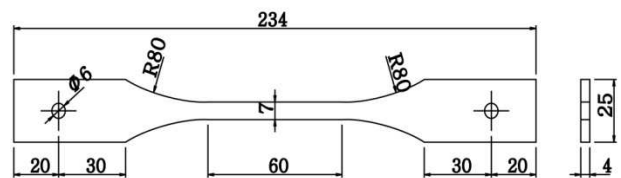
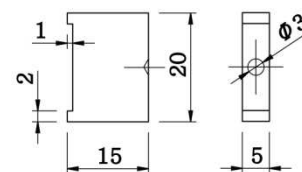


Fig. 1 Microstructures of (a) Inconel600, (b) Inconel690



(a) Specimen (Inconel)



(b) Contact pad (SUS409)

Fig. 2 Shape and dimensions of specimen and contact pad

프레팅 피로시험은 응력비 R=0.1의 인장-인장 하중을 가하며, 주파수는 10Hz로 수행하였다. 정확한 마찰력을 얻기 위하여 압은 320°C에서 보정하였고, 초기 면압을 가하기 위하여 프루빙 링은 상온에서 보정을 하였다.

Inconel 합금의 고온시험은 원자력 발전설비의 증기발생기의 운전온도가 약 300°C임을 고려하여 320°C에서 실험을 수행하였다. 고온 피로시험은 먼저 척(chuck)으로 시험편을 고정시킨 다음, heat-controller를 가동하여 로의 온도가 충분히 시험온도에 도달한 후 30분간 유지한 뒤에 컴퓨터를 제어하여 수행하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 320°C에서의 단순 및 프레팅 피로시험 결과 얻은 S-N선도를 나타낸 것이다.

Inconel600의 경우 320°C 에서 단순 피로한도는 약 260MPa, 프레팅 피로시험에서는 약 80MPa 로 나타났으며, 단순피로에 비해 프레팅 피로한도가 약 69% 저하 하였다.

또한 Inconel690의 경우 320°C 에서 단순피로 한도는 271MPa, 프레팅 피로한도는 약 180MPa 로

단순피로에 비해 프레팅 피로한도가 약 33% 저하 하였다.

한편 저자들의 선행 연구결과⁽⁶⁾에 따르면 Inconel600의 경우, 상온에서의 단순피로 시험 시의 피로한도는 약 313MPa, 프레팅 피로 시험 에서는 약 101MPa로 단순피로에 비하여 프레팅 피로한도가 약 67% 저하 하였다.

또한, Inconel690의 경우, 상온에서의 단순 피로 시험시의 피로한도는 315MPa, 프레팅 피로 시험 에서는 약 175MPa로 나타났으며, 단순피로에 비해 프레팅 피로한도는 약 44% 저하하였다.

단순 피로한도의 경우를 살펴보면 두 재료 모두 상온에 비해 320°C에서 단순피로 한도의 감소폭이 상대적으로 적게 나타났다. 이는 Inconel 합금이 고온 특성이 우수한 재료이기 때문으로 생각된다. 320°C에서 프레팅을 받을 경우 Inconel600 합금의 피로한도가 Inconel690 합금에 비해 그 감소폭이 더욱 크며 피로한도가 급격히 낮아짐을 알 수

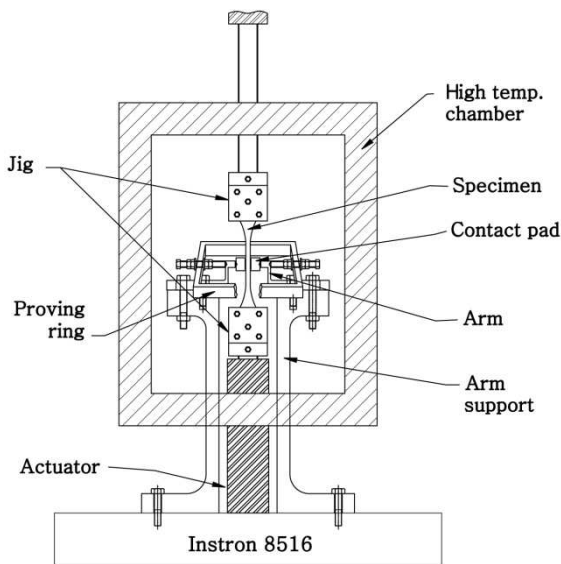


Fig. 3 Fretting fatigue test apparatus at 320°C

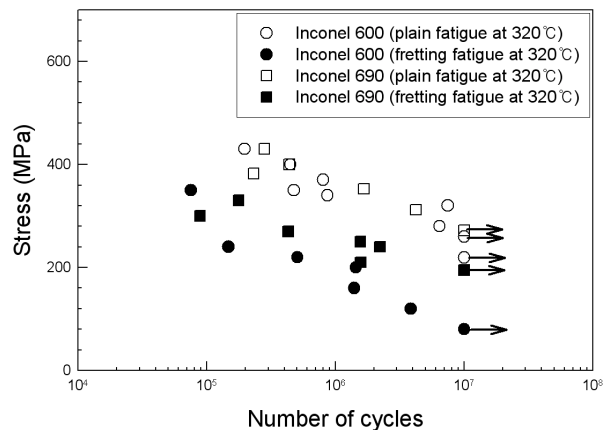


Fig. 4 The S-N diagram of plain and fretting fatigue tests at 320°C

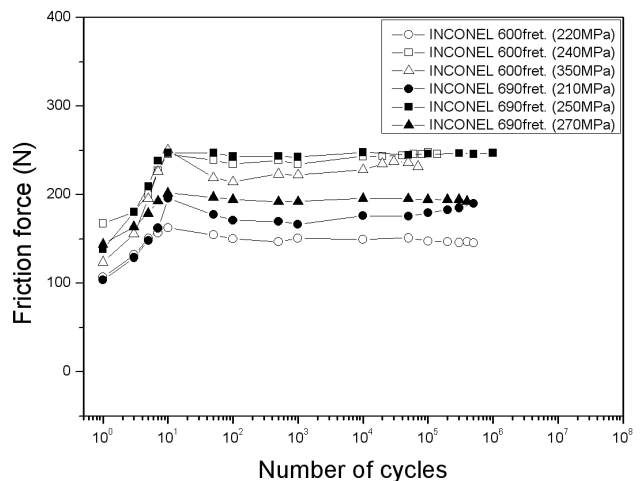


Fig. 5 Variation in the frictional force with increase in the number of cycles at 320°C

있었다. 이는 두 재료가 고온환경에서 우수한 재료이지만 프레팅 환경하에서는 Inconel600보다는 Inconel690합금이 고온에서의 프레팅 피로특성이 더 우수하다고 판단된다. 또한 두 재료 모두 상온에 비해 320°C에서의 피로한도가 다소 적게 저하한 점을 감안하면, Inconel 합금이 고온 환경에서 사용될 때 그 영향을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 데이터는 증기발생기의 구조 건전성 평가에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 5는 두 재료에 대해 프레팅 피로시험 결과 나타난 반복 사이클에 따른 마찰력의 변화를 압에 부착된 스트레인 게이지를 사용하여 측정된 예를 나타낸 것이다. 마찰력은 Inconel600 및 690 모두 응력 진폭에 관계없이 약 10^3 cycle까지 급격하게 증가한 후, 일정한 값을 나타내었다.

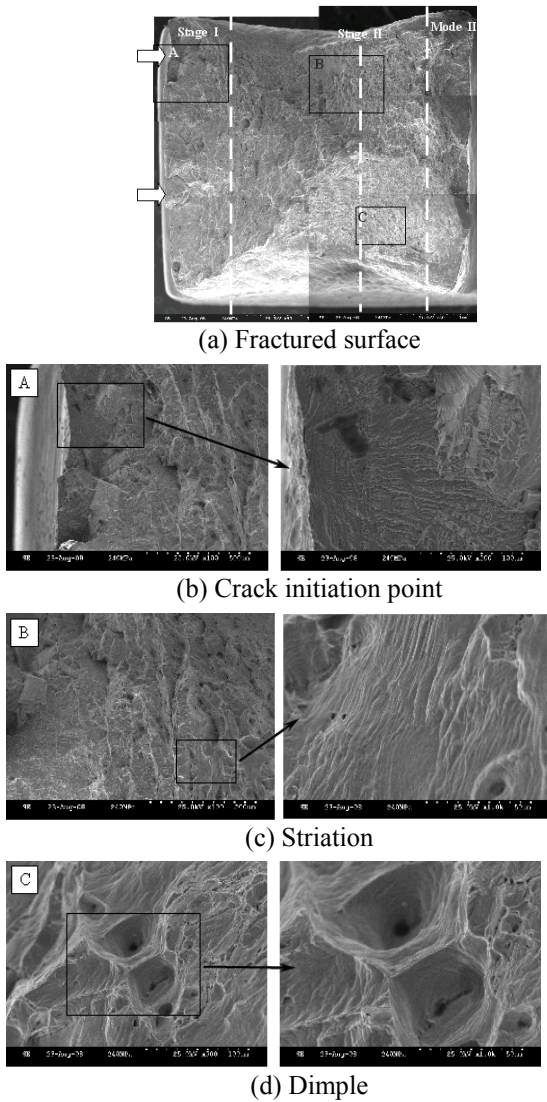


Fig. 6 SEM micrographs of fracture surface for Inconel600 after fretting fatigue test at 320°C ($\sigma_{max}=240MPa$)

3.3 파단면 관찰

Fig. 6은 Inconel600의 320°C에서 프레팅 피로 시험 후 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다.

Fig. 6(b)는 초기 균열부로 고온환경에서의 부식된 모습과 더불어 프레팅 환경하에서의 특징인 마찰력으로 인하여 생긴 손상된 표면이 보이며,⁽⁸⁾ 이는 초기 경사균열의 성장과 관련이 있어 보인다. 또한 Fig. 6(c)의 균열 성장부에서는 고온 피로에서 나타나는 연성 스트라이에이션이 광범위하게 분포되어 있다. Fig. 7은 Inconel690의 320°C에서 프레팅 피로시험 후 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다. Fig. 7(b)의 초기 균열부와 Fig. 7(c)의 균열 성장부에서는 Inconel600과 비슷한 모습을 나타내고 있다. 최종파단부인 Fig. 7(d)에서는 딴플을 가진 연성파괴 양상이 나타났다.

그러나, 딴플부에서도 미세한 스트라이에이션이 존재하여 최종 파단이 일어날 때까지 고온피로의

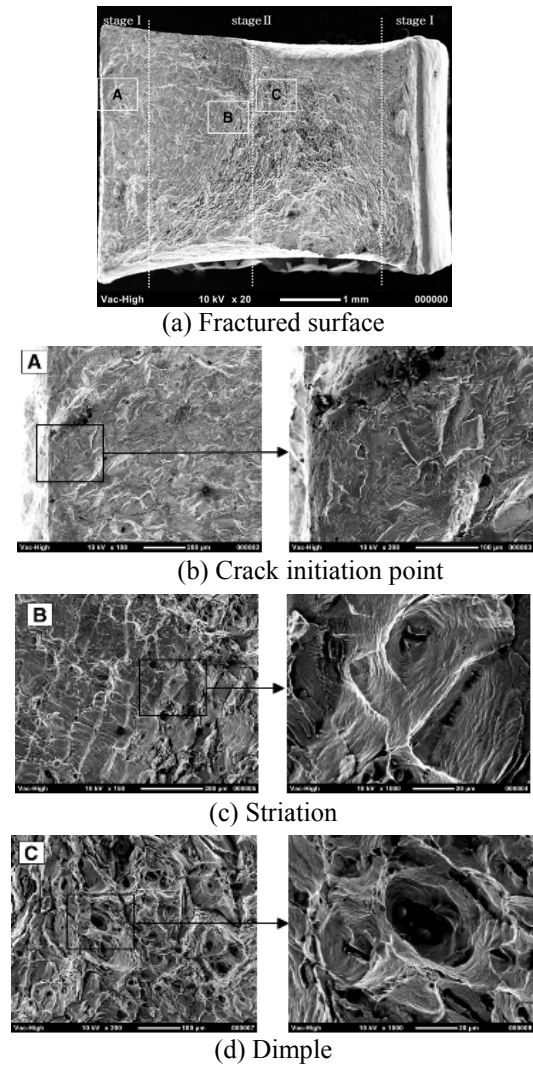
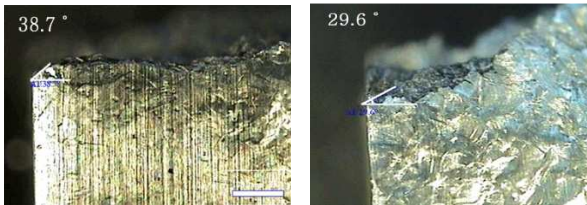


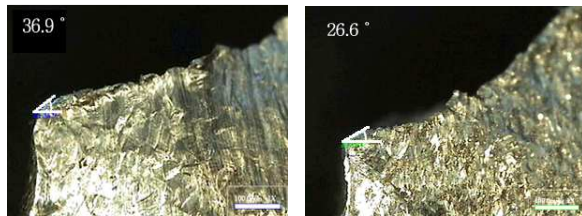
Fig. 7 SEM micrographs of fracture surface for Inconel690 after fretting fatigue test at 320°C ($\sigma_{max}=240MPa$)

영향이 있었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Inconel600 및 690 합금의 320°C에서 프레팅 피로 시험후 파단면을 광학현미경에서 관찰하여 패드와 시험편의 접촉면에서 초기균열 발생 특성을 관찰한 결과 사진의 대표적인 예를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 Inconel600의 $\sigma=160\text{MPa}$ 의 응력 진폭으로 320°C에서 프레팅 피로 시험한 결과이고, (b)는 $\sigma=350\text{MPa}$ 에서 동일한 시험을 수행한 결과 나타난 초기 균열의 발생 각도를 나타낸 것이다. (c)는 Inconel690의 $\sigma=210\text{MPa}$ 응력 진폭으로 320°C에서 프레팅 피로 시험한 결과이고, (d)는 Inconel690의 $\sigma=330\text{MPa}$ 응력진폭으로 시험한 시험편의 초기 균열의 발생 각도를 나타낸 것이다.



(a) Inconel600 $\sigma=160\text{MPa}$ (b) Inconel600 $\sigma=350\text{MPa}$



(c) Inconel690 $\sigma=210\text{MPa}$ (d) Inconel690 $\sigma=330\text{MPa}$

Fig. 8 First stage fretting crack initiation angle of Inconel600 and 690 at 320°C

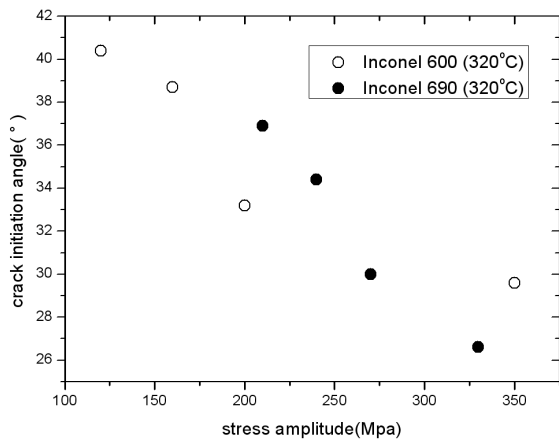
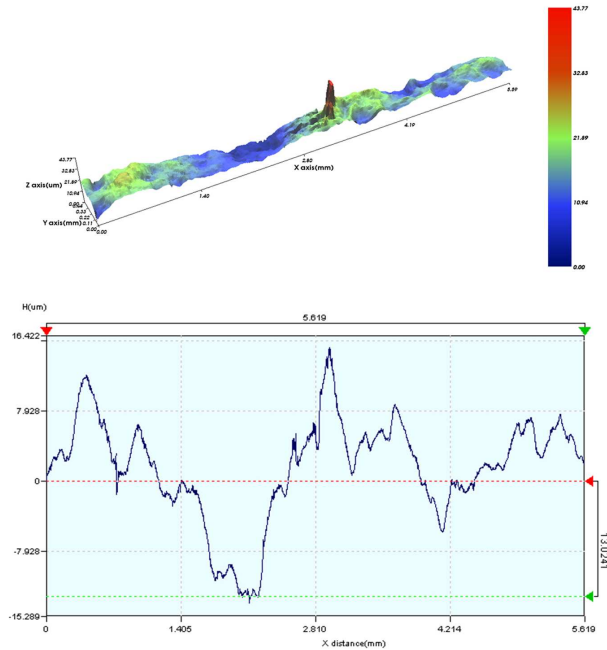
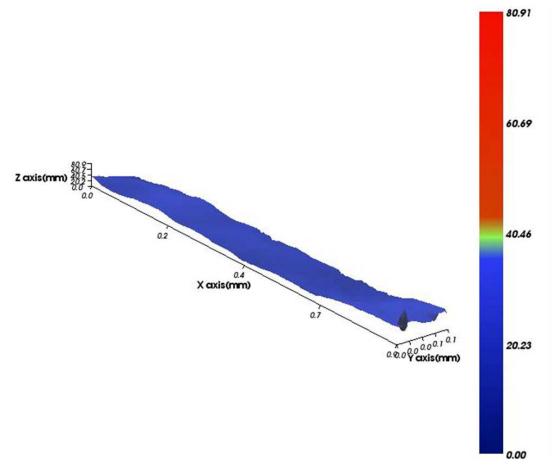


Fig. 9 Relationship between first stage fretting crack initiation angle and stress amplitude at 320°C



(a) Inconel600 (max=220MPa)



(b) Inconel690 (max=240MPa)

Fig. 10 Measurement of roughness in contact surface of Inconel600 and 690 at 320°C

Fig. 9 는 프레팅 피로 시험시의 응력 진폭과 초기 프레팅 피로 균열 발생각도 사이의 관계를 나타낸 것이다.

이러한 결과로 볼 때 Inconel600 과 690 재료 모두 반복 응력 진폭이 높을수록 초기 균열 경사 각이 다소 작아짐을 알 수 있었다.

이는 초기 피로 균열 발생각도는 마찰력 및 수직응력에 따라 영향을 받는다는 기존의 연구와도^(9,10) 유사한 결과로 판단된다.

320°C에서 프레팅 피로시험을 수행한 후 마찰에 따른 접촉면의 손상 정도를 비교하기 위하여 비접촉 3 차원 미세 형상측정기(모델:NV-2000)를 사용하여 접촉부의 표면거칠기를 측정하였다. 표면거칠기 측정은 두 재료를 320°C에서 프레팅 시험 후 각 응력별 시험편에 대하여 3 회씩 측정하여 평균값으로 나타내었다.

Fig. 10 은 Inconel600 의 $\sigma_{max}=220\text{MPa}$ 와 Inconel690 의 $\sigma_{max}=240\text{MPa}$ 로 320°C에서 프레팅 피로시험을 실시한 시험편에 대하여 표면 거칠기를 측정할 결과를 나타낸 것이다. 측정 결과 Inconel600 의 경우 중심선 평균값(평균 거칠기)인 Ra 가 $5.33\ \mu\text{m}$ 로 나타났으며, Inconel690 의 경우 Ra 가 $1.18\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한 Inconel600 의 경우 $\sigma_{max}=80\text{MPa}$ 과 160MPa 에 대해서도 측정하였으며, 평균거칠기는 $10.527\sim 13.637\ \mu\text{m}$ 수준이었다. 반면 Inconel690 의 경우 $\sigma_{max}=210\text{MPa}$ 과 270MPa 에서 평균 거칠기를 측정할 결과 $1.18\sim 1.50\ \mu\text{m}$ 수준이었다.

두 재료의 평균거칠기 수준을 비교해본 결과 Inconel690 이 Inconel600 보다 평균 거칠기 값이 낮게 나타났으며, 평균 거칠기가 클 경우가 피로한도 저하폭이 크게 나타났다.

4. 결 론

원전 증기발생기 세관용 재료인 Inconel600 및 690 합금의 320°C에서의 단순 피로시험과 프레팅 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 320°C에서 단순 및 프레팅 피로시험을 수행한 결과, 단순 피로의 경우 상온에 비해 Inconel600 의 피로한도는 약 15%, Inconel690 의 피로한도는 약 13% 정도 저하함을 알 수 있었다. 또한 프레팅 피로한도는 Inconel600 의 경우 약 20% 저하하였고, Inconel690 의 경우 거의 유사함을 알

수 있었다.

(2) 또한 320°C에서 Inconel600 의 경우 단순피로에 비해 프레팅을 받을 경우 약 69%의 피로한도 저하가 있었으나, Inconel690 의 경우 약 33%가 저하하였다. 이러한 결과로 볼 때 고온에서 프레팅을 받을 경우 Inconel690 이 Inconel600 보다 프레팅 피로 특성이 우수하다고 판단된다.

(3) 320°C에서 프레팅 피로 응력 진폭과 초기 프레팅 피로균열 발생각도 사이의 관계를 분석한 결과 마찰력과 수직응력의 조합응력이 균열 발생에 영향을 미쳐서 반복 응력 진폭이 높을수록 초기 프레팅 피로균열 발생각이 작아짐을 알 수 있었다.

(4) 본 연구를 통해 얻은 결과 데이터는 증기발생기의 건전성 평가에 중요한 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Goldenberg, S. S., 1991, *Fatigue of Materials*.
- (2) Kim, H. K. and Lee, Y. H., 2003, "Influence of Contact Shape and Supporting Condition on Tube Fretting Wear," *Wear*, Vol. 255, p. 1183.
- (3) Attia, M. H. and Waterhouse, R. B., 1992, "Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment," *ASTM STP 1159*.
- (4) Caron, R. N. and Staley, J. T., 1992, "Materials Selection and Design," *ASM Handbook*, Vol. 20.
- (5) Kwon, J. D., Choi, S. J. and Bae, Y. T., 2004, "A Study on Fretting Fatigue Behavior of Degraded 1Cr-0.5Mo Steel," *Key Eng. Mater.*, Vol. 261~263, p. 1221.
- (6) Park, D. K., Woo, S. W., Chung, I. S., Chai, Y. S. and Kwon, J. D., 2007, "Evaluation of Fretting Fatigue Life for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants," *Key Eng. Mater.*, Vols. 345-346.
- (7) Lindley, T. C. and Nix, K. J., 1992, "Fretting Fatigue in the Power Generation Industry," *ASTM STP 1159*, p. 153.
- (8) Mutoh, Y. Y., 1995, *JSME Int. Journal*, 38-4, A, pp. 405~415.
- (9) Endo, K. and Goto., H., 1976, "Initiation and Propagation of Fretting Fatigue Cracks," *Wear*, Vol. 38, pp. 311~324.
- (10) Huh, Y.-H., Edwards, R. E., Brown, M. W., Rios, E.D.L., 2003, "Prediction of Initiation Location and Direction of Fretting Fatigue Crack," *KSME A*, Vol. 27, No. 7, pp. 1185~1192.