

고합금강과 오스테나이트 스테인레스 강의 저사이클 피로 특성 연구 Study on Characteristics of Low Cycle Fatigue for High Alloy and Austenite Stainless Steel

김용찬 · 백세현

Y. C. Kim and S. H. Back

(접수일 : 2010년 8월 23일, 수정일 : 2010년 10월 14일, 채택확정 : 2010년 10월 21일)

Key Words : Low Cycle Fatigue(저사이클 피로), High Alloy Steel(고합금강), Crack(균열), Strain(변형률), Fatigue Life(피로수명)

Abstract : As the steam temperature of fossil power plant boiler is increasing, the use of 9Cr-1Mo high alloy material is prevalent and it is needed to investigate the characteristics of low cycle fatigue for high alloy and austenite stainless steel that has used up to recently. As a result of test, in 9Cr-1Mo high alloy steel, the relation of strain and fatigue life is non-linear and the crack mode of low cycle fatigue is brittle but in the austenite stainless steel, that of strain and fatigue life is linear and the crack mode of low cycle fatigue is ductile. Comparing the fatigue life between high alloy and austenite stainless steel, there is no consistent characteristics as to strains. But the fatigue life of 9Cr-1Mo steel is longer by 25% than that of STS304 stainless steel in the relatively low, 0.3% strain. In the other strain, the fatigue life of two materials is similar.

1. 서 론

화력발전설비는 전력산업의 경쟁심화와 환경규제 강화 등으로 발전효율을 향상하기 위하여 증기조건인 고온 고압화가 이루어지고 있다. 국내 발전설비의 증기조건을 보면 2000년도 이전의 화력발전설비는 255kg/cm², 541℃가 대부분이었으나 2004년도 준공된 영흥화력 #1호기의 증기 조건은 255kg/cm², 569℃로 상승하였으며, 이후 건설되고 있는 발전설비의 증기조건은 255kg/cm², 596℃로 상승하고 있는 추세이다.^{1)~3)}

이렇게 증기조건이 상승되면서 기존에는 저합금강이나 오스테나이트 스테인레스강으로 사용되었던 보일러 최종 파열기 및 재열기의 재질은 내산화성과 고온강도가 개선된 고합금강(9Cr 및 12Cr강)으로 대체되고 있다.⁴⁾

그리고 대용량 화력발전 설비의 기동/정지, 출력 변동, 연소 및 운전 상태에 따른 온도 변화 등은 고합금강 튜브의 저사이클 피로 손상을 야기한다.

따라서 본 논문은 고합강(9Cr-1Mo강)과 오스테나이트 스테인레스강(STS304)의 저사이클 피로(LCF : low cycle fatigue) 특성을 파악하여 화력발전용 보일러 설비의 고장원인 규명과 수명진단의 자료로 활용하고자 한다.

2. 이론적 배경

피로라 함은 시간에 관계없이 사이클수에만 의존하는 표면 균열의 생성 및 이의 성장과정을 말한다. 특히 재료가 항복 변형량 이상의 비교적 높은 변형을 되풀이해서 받게 되면 균열의 생성 및 성장에 의한 유효 단면적 감소로 인하여 약 10⁵ 사이클 이하에서 파단이 일어나게 되는데, 이러한 현상을 저사이클 피로라 한다. 이 경우 파단 양상은 입내 파단이며 파면에는 연속적인 물결모양의 스트라이에이션(striation) 관찰이 일반적이다. 표면에서 생성된 피로 균열의 전파양상은 보통 2단계로 구분하는 경우와 좀 더 세밀하게 그림 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 3단계로 구분하는 경우가 있다.

① 1단계 균열전파 : 피로 균열 생성의 연속적인 전파단계로서 최대 전단응력 방향인 인장응력의

김용찬(교신저자) : 한전전력연구원
E-mail : yongchan@kepcoco.kr, Tel : 042-865-7520
백세현 : 한전전력연구원

45° 방향으로 성장하여 결정립 2개 정도 크기까지 발전한다. 이 때 전파면에서는 스트라이에이션이 관찰되지 않는다.

② 2단계 균열전파 : 1단계 균열전파가 지나면 균열은 응력에 수직한 방향으로 성장하고, 전파된 면에는 피로파괴의 전형적인 특징인 스트라이에이션이 형성된다.

③ 3단계 균열전파 : 피로 균열이 더욱 성장하면 피로 균열 앞에서 기공이 기계적으로 생성, 성장 및 연결됨으로서 균열의 성장이 가속화되며, 피로 파단 면에는 딥플(dimple)이 관찰된다.

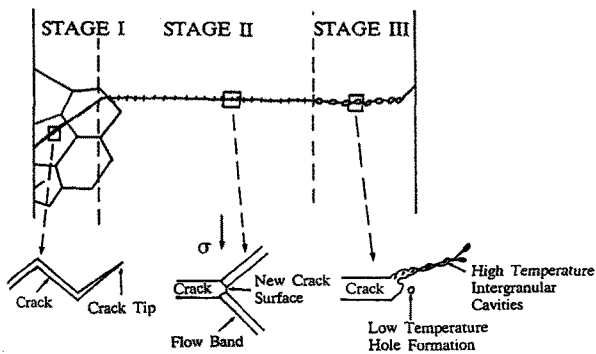


Fig. 1 Propagation modes of fatigue crack

재료가 항복 변형량 이상의 비교적 높은 변형을 반복적으로 받는 저사이클 피로의 경우 피로수명과 소성변형량 간에는 실험적인 데이터 분석으로부터 Coffin -Manson 관계식이 만족되는 것으로 알려져 있다.

$$\Delta \epsilon_p N_f^\alpha = C \quad (1)$$

여기서 N_f 는 피로 수명이고, α 와 C 는 상수이다.

한편 $Rie^{(5)}$ 등은 저사이클 피로에서 피로수명을 파단 될 때까지의 사이클수 N_f 대신 시편에 균열이 형성되어 재료가 현저히 취약해질 때까지의 사이클수인 임계수명 N_{cr} 을 적용하는 것이 합리적이라 제안하고, 다음의 관계가 더 잘 만족된다고 제안하였다.

$$\Delta \epsilon_p N_{cr}^\alpha = C \quad (2)$$

열피로는 재료의 점진적인 열화와 자유 열팽창이 부분적으로 혹은 전체적으로 구속된 상태에서 반복적으로 가열과 냉각이 진행됨으로써 결국 균열이 발생되는 것으로서 정의했다. 열팽창의 구속은 결과적으로 열응력을 발생시키며 그로 인해 균열이 발생되며 지속적으로 균열이 성장하게 된다. 대체적으로 열응력은 소성변형을 일으키며 $10^4 \sim 10^5$ 사이클

에서 파단되기 때문에 열피로는 저사이클 피로의 한 형태로 볼 수 있다. 자유 열팽창의 구속과 제한은 열피로 손상의 필수 성분이다. 구속은 외부적인 것이거나 내부적인 것일 수 있으며 열 기계적 피로 (TMF : thermal mechanical fatigue) 시험에서 온도는 변형률과 독립적으로 작용한다.

저사이클 피로 또는 고변형률 피로(high strain fatigue)는 $N < 10^4$ 사이클에서 발생하는 손상과 상당한 사이클릭 소성변형(cyclic plasticity)이 발생하는 손상 메커니즘으로 정의된다. Skelton은 일정한 변형률로 수행된 LCF 시험을 바탕으로 한 S-N 곡선이 고사이클 피로(HCF : high cycle fatigue) 시험에서 얻어진 자료와 혼합된다는 것은 두 과정의 메커니즘에 근본적인 큰 차이가 없다는 것을 나타낸다. HCF와 LCF 사이의 중요한 차이는 HCF에서는 대부분의 피로 수명을 균열 시작에 소비되는 반면에 LCF는 피로 수명의 3~10% 이내에서 발견되므로 대부분의 수명을 균열 성장에 소비한다. LCF 시험은 변형률 범위(strain range)를 고정시키고 응력을 변화시키는 것만 제외하고 HCF 시험과 동일하게 수행된다. 이 결과는 S-N 곡선과 유사한 $\Delta \epsilon - N$ 곡선을 나타낸다. LCF 시험에서 변형률에 따른 응력의 변화는 Fig. 2와 같은 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 나타내며, 인장-압축 응력범위 $\Delta \sigma$ 는 시편에 가해진 변형 범위 $\Delta \epsilon$ 에 대응한다. Loop의 총 폭(tip에서 tip까지)은 총 변형률 범위($\Delta \epsilon$)에 대응하며 탄성 변형률(elastic strain) 범위와 소성 변형률(plastic strain) 범위로 나누어진다.

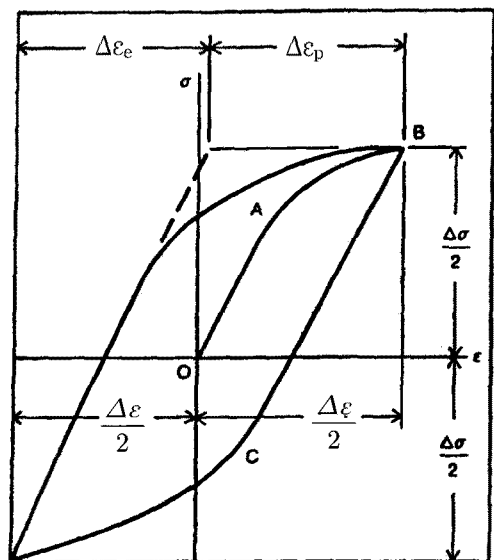


Fig. 2 Stress and strain hysteresis loop of low cycle fatigue

3. 실험 방법

3.1 실험 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 3과 같이 표점거리가 25mm이고 외경이 10mm인 봉상시험편이다. 시험편을 채취한 후 표면 조도를 개선하기 위해 연마지 #2000으로 마무리 처리하였다. 시험편의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

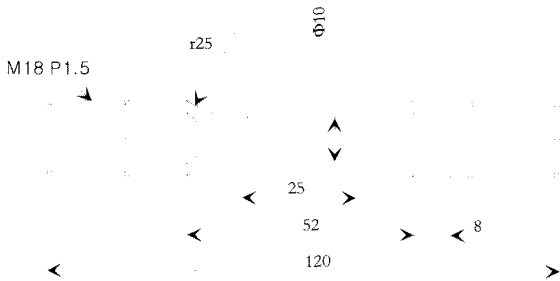


Fig. 3 Geometry of low cycle fatigue test specimen

Table 1 Chemical composition of test specimen

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
T91	0.1	0.4	0.45	0.02	0.01	-	9.0	1.0
STS304	0.07	0.60	1.40	0.027	0.03	9.30	18.0	-

3.2 실험 장치

고온 저사이클 피로시험에 사용된 실험 장치는 최고온도 1,000℃, 하중 10ton 사양의 전기기계식 피로시험기(closed loop electro-servo mechanical dynamic fatigue testing machine : INSTRON model 1362)이다. 부대설비로는 시험편의 유도가열을 위한 5kW 용량의 가열용 고주파발생장치(induction heater), 6~7kg/cm² 압력의 시험편 냉각용 공기를 공급하는 공기압축기가 포함되어 있으며 시험편의 편심방지를 위하여 우즈 메탈그립(Wood's metal grip)을 사용하였다. 온도제어를 위한 시험편의 온도 측정에는 Accufiber社의 고온측정 제어시스템(high temperature measurement and control system)을 장착하여 고주파 가열에 의한 온도를 광고온계(optical pyrometer)를 사용하여 측정한다.

3.3 실험 조건

실험 조건은 Table 2와 같으며, 변형률의 인가속도는 전 시험편에서 동일하게 0.01%/sec로 설정하

였다. 파단 조건으로는 초기 응력값에서 응력이 75%로 감소할 때의 사이클 수(N₂₅)를 파단시점으로 설정하였다.

Table 2 Test conditions of low cycle fatigue

Load ratio (R)	-1 (tension/compression)
Strain rate	0.01%/sec
Strain amplitude ($\Delta\epsilon$)	0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.75%
Temperature	600℃
Pressure	Atmospheric pressure

4. 결과 및 고찰

4.1 고합금강의 저사이클 피로 수명

9Cr-1Mo 강에 대한 고온 저사이클 피로 실험 결과를 Table 3에 종합하였다. 변형률의 크기가 커질수록 수명의 감소가 커졌지만, 감소의 폭은 점점 작아지는 경향을 보였다. Fig. 4는 변형률의 크기와 수명과의 관계를 곡선으로 나타낸 것이다. 각 조건 사이에는 비선형적인 관계가 성립한다.

Table 3 Result of low cycle fatigue test for 9Cr-1Mo steel

구분	Strain amplitude (%)				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.75
Fatigue life (N ₂₅ cycles)	1276	672	537	478	455

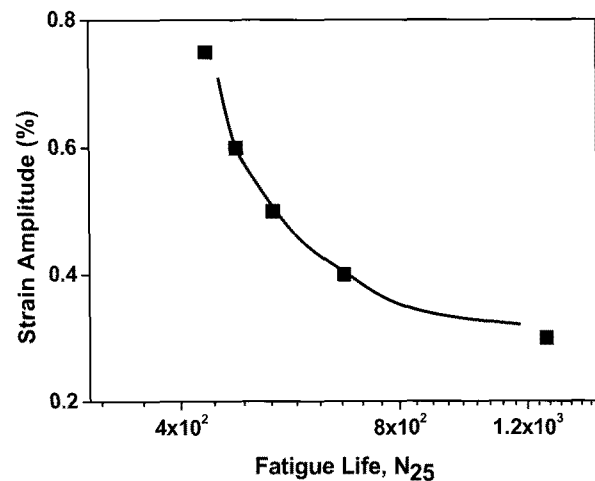


Fig. 4 Fatigue life of 9Cr-1Mo steel

4.2 고합금강의 저사이클 피로균열 미세조직 거동
 파단에 이른 시편은 파단면에 인접한 부분을 채취하여 금속 광학현미경으로 균열의 형상 및 진행 상태를 관찰하였다. 또한 탄화물의 분포와 입계 공동(cavity)을 추가적으로 관찰하기 위해 전자현미경을 사용하였다.

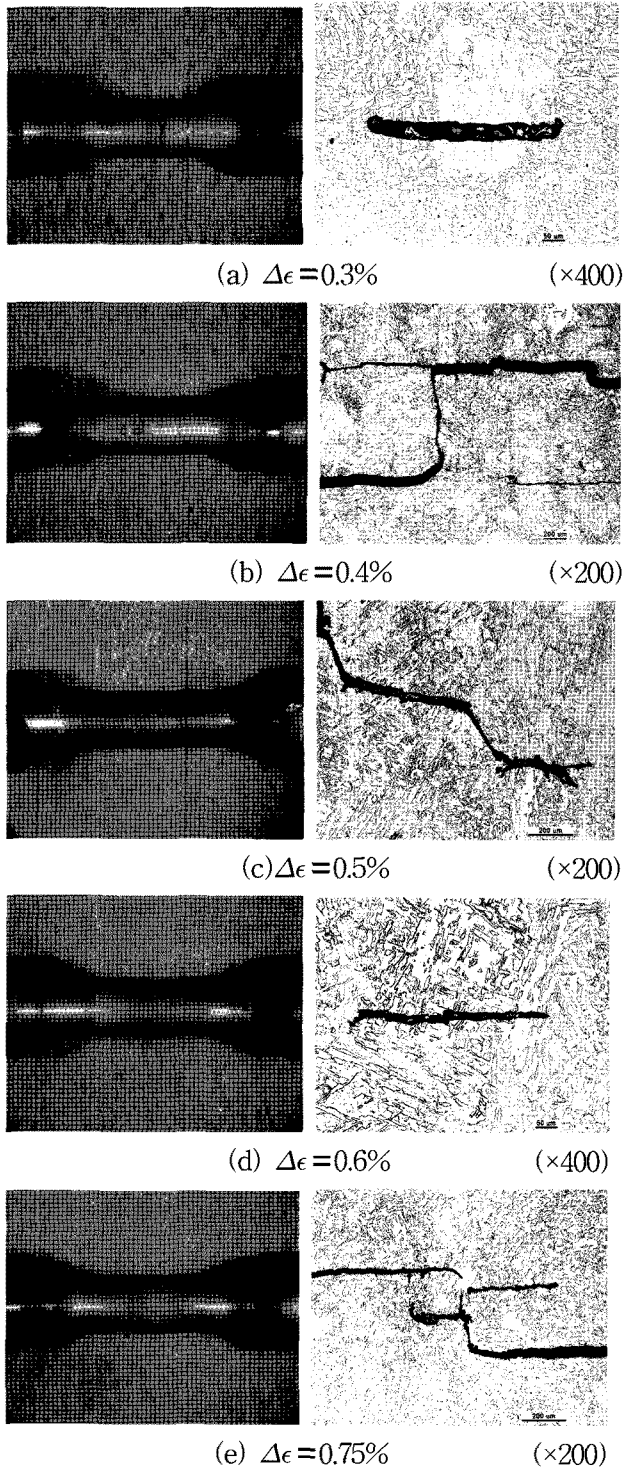


Fig. 5 Micro structure of low cycle fatigue crack for 9Cr-1Mo steel(Optical microscope)

미세조직 시편은 마운트(mount)한 후 연마지 #1000까지 연마한 후 다이몬드 서스펜션(diamond suspension) 0.1 μ m까지 연마를 하고 부식액(picral 1g+염산 5ml+알코올 100ml)을 사용하여 부식한 다음 관찰하였다.

일반적으로 저사이클 피로파면의 경우 상온에서는 재료의 표면에서 균열이 생성되어 슬립에 의해 표면에 인트루전(intrusion)과 엑스트루전(extrusion)이 생겨 지속적인 변형에 의해 피로균열로 진전되지만, 고온에서 균열 생성 및 성장은 크리프 및 분위기에 의한 손상으로 피로수명이 상당히 감소하게 된다. 온도상승으로 인한 슬립 특성의 변화, 입계강도의 변화, 산화에 의한 영향 등으로 균열의 생성과 성장을 촉진하게 된다.

9Cr-1Mo강에 대한 고온 저사이클 피로에 따른 파단형상 및 미세조직의 거동을 관찰한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 균열은 Fig. 5에서와 같이 표면에서 시작하여 직선적으로 내부로 진행하고 있으며, 취성과파의 특징을 나타내고 있다. 일부의 시편에서는 내부에서 균열이 성장한 것도 확인할 수 있다. 변형률 차이에 따른 미세조직의 특성은 나타나고 있지 않으나 변형률 0.4%에서는 지그재그 형상이며 주균열 주변에 미세균열이 나타나고 있다.

Fig. 6은 입계의 삼중점에서 탄화물이나 개재물이 피로 응력을 받아 손상되면서 균열의 시작점이 되고, 이러한 것들이 모여 균열을 성장시킨다는 것을 보여주고 있다.

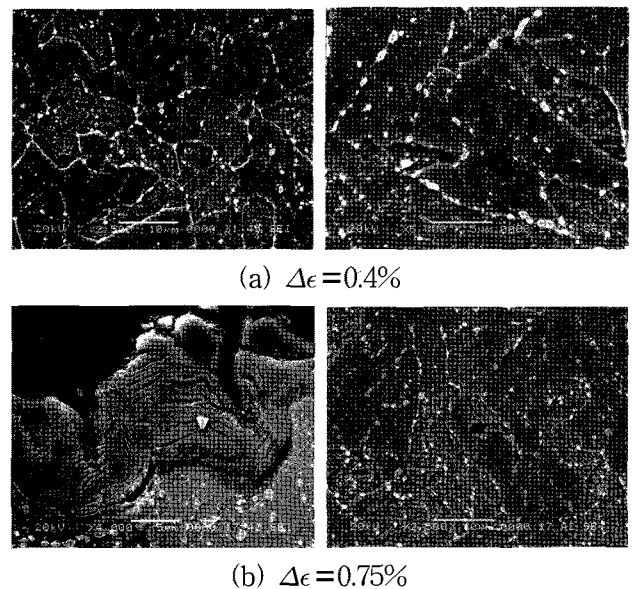


Fig. 6 Micro structure of low cycle fatigue crack for 9Cr-1Mo steel(SEM)

4.3 스테인레스강의 저사이클 피로 거동

STS304 스테인리스강에 대한 고온 저사이클 피로 결과를 Table 4에 종합하였다. 변형률의 크기가 커질수록 수명의 감소가 커졌다. Fig. 7은 변형률의 크기와 수명과의 관계를 곡선으로 나타낸 것이다. 각 조건사이에는 선형적인 관계가 성립되었다.

Table 4 Result of low cycle fatigue test for STS304 steel

구분	Strain amplitude (%)				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.75
Fatigue life (N ₂₅ cycles)	971	731	595	468	335

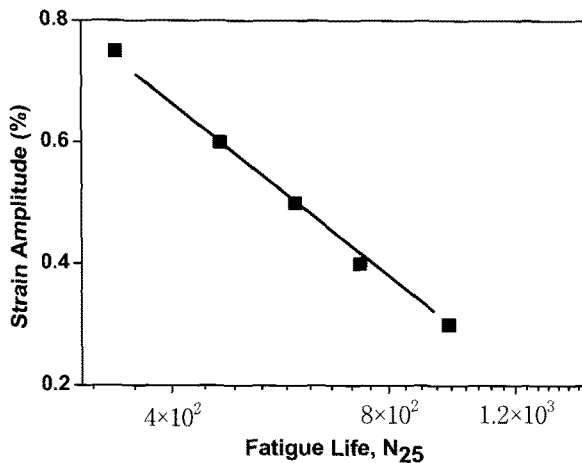


Fig. 7 Fatigue life of STS304

4.4 스테인레스강의 저사이클 균열 미세조직 거동

고온 저사이클 피로 조건에 따른 파단형상 및 미세조직의 거동에 대하여 관찰한 결과를 Fig. 8, 9에 나타내었다. 파단의 외형적 형상은 지그재그 형상으로 단면의 변형은 없었다. 스테인리스강에서는 균열이 입계를 따라 진전(inter-granular cracking) 하였으며, 내부로 진행할수록 크기가 커졌다. 변형률의 차이에 따른 미세조직의 차이점을 발견하지 못하였다. 전자현미경 관찰에 의하면, 입계에 형성된 많은 기공들이 서로 응집되어 입계 전체를 손상시킨다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 바와 같이 주위의 매트릭스(Matrix)에 의한 크리프 유동(creep flow)이 억압되어 기공이 성장하는 것으로 판단된다. 그러나 파단면에서 피로의 가장 큰 특징인 매크로적인 스트라이에이션의 흔적을 찾지 못하였다.

일부의 시편에서는(Fig. 9(a)) 입계에 형성된 계재물이 저사이클 피로의 특징인 스트라이에이션을 보여주지만, 전체적인 경향이 아니므로 자세한 추가적인 관찰이 요구된다.

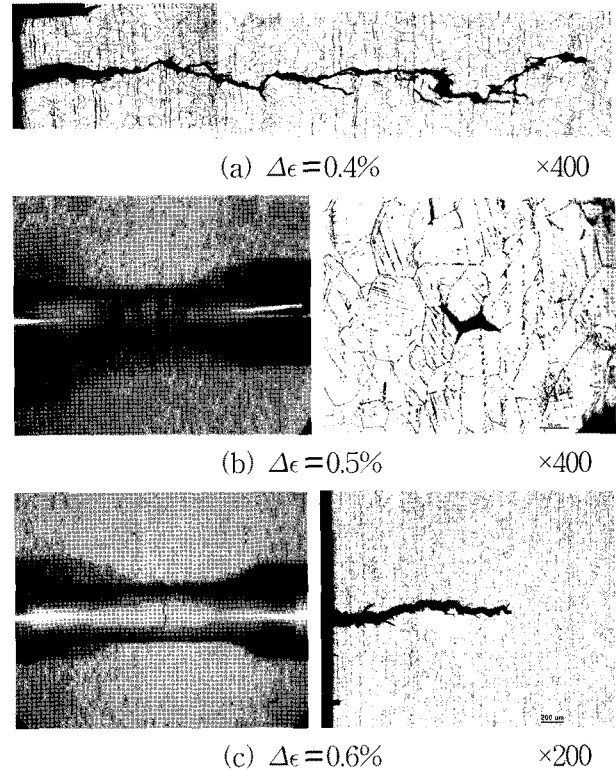


Fig. 8 Micro structure of low cycle fatigue crack for STS304 stainless steel(Optical microscope)

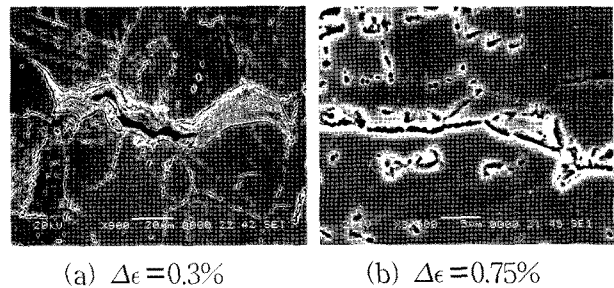


Fig. 9 Micro structure of low cycle fatigue crack for SUS 304 stainless steel(SEM)

4.5 고합금강과 스테인레스강의 피로수명 비교

두 금속간에 변형률에 따른 피로 수명이 일관된 특징을 나타내고 있지 않으나 변형률이 낮은 0.3%에서는 9Cr-1Mo강의 수명이 STS304 스테인레스강에 비하여 약 25% 정도 크다. 반면에 나머지의 변형률에서는 두 재질의 피로 수명이 유사한 특징을 나타내고 있다.

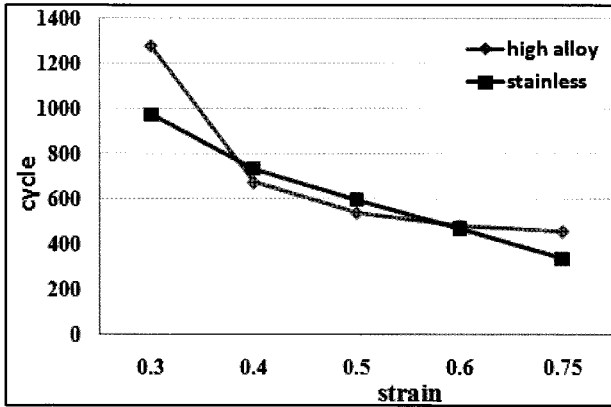


Fig. 10 Comparison of fatigue life between high alloy and stainless steel

5. 결 론

최근 발전설비 고온부위에 많이 적용되고 있는 고합금강(9Cr-1Mo)의 고온 저사이클 피로 특성을 파악하고, 기존에 많이 적용되었던 오스테나이트 스테인레스 강과의 비교분석을 위하여 두 재질에 대하여 고온 저사이클의 피로 실험을 시행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고온 저사이클 피로 거동을 보면 9Cr-1Mo강은 변형률의 크기가 커질수록 수명의 감소는 커졌지만 감소의 폭은 점점 작아지는 경향을 보이고 있고, 변형률과 수명의 관계는 비선형적이다. STS304 스테인레스강에서도 변형률의 크기가 커질수록 수명의 감소가 커지는 경향을 보이고 있으며, 변형률과 수명의 관계는 선형적이다.

(2) 고온 저사이클 피로에 따른 미세조직 거동을 관찰한 결과 고합금강에서는 균열이 표면에서 시작하여 내부 직선적으로 진행되는 취성과파의 특징을 나타내고 있다. 또한 입계의 삼중점에서 탄화물이나 개재물이 피로 응력을 받아 손상되거나 응집되어 균열의 시작점이 되면서 성장하는 것으로 판단된다.

(3) STS304 스테인레스강의 저사이클 피로에 따른 미세조직 거동을 관찰한 결과 균열은 주 균열 주위에 입계를 따라서 작은 균열이 발생하면서 성장하고 있으며 연성과파의 특징을 갖고 있다. 전자현미경 관찰에 의하면, 입계에 형성된 많은 기공들이 서로 응집되어 입계 전체를 손상시킨다는 것을 알 수 있다.

(4) 고합금강과 스테인레스강의 피로수명을 비교한 결과 일관된 특징을 나타내고 있지 않으나 변형률이 낮은 0.3%에서는 9Cr-1Mo강의 수명이 STS304

스테인레스강에 비하여 약 25% 정도 크므로 9Cr-1Mo강이 화력발전소 보일러의 재질로서 열피로 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 화력발전설비 현장에서 많이 사용되고 있는 재질에 대한 피로 수명 및 균열의 거동에 관한 실험결과이다. 이러한 실험결과가 발전설비 현장에서 고장원인 규명 및 수명진단 등에 많은 참고가 되기를 바란다.

참고문헌

1. 한국전력기술(주), 1994, “보령화력 5. 6호기 보수 지침서”, 서울, pp. 2-1.
2. 한국전력공사, 1998, “영흥화력발전소 1, 2호기 보일러 공급 계약서”, 서울, pp. II-186
3. 한국전력공사, 1989, “삼천포화력발전소 3, 4호기 보일러 공급계약서”, 서울, pp. II-211
4. 한국전력기술(주), 2002, “태안화력 5, 6호기 발전소 Data Book(I)”, 서울, pp. 2-106~2-112
5. K. T. Rie and H. P. Stuwe, 1974, Int. J. Frac., Springer, Vol. 10, pp. 545