

순수 비틀림 하중하에서 열화를 고려한 2상 스테인리스강의 저주기 피로특성

권재도[†] · 박중철^{*}

(2002년 2월 1일 접수, 2002년 7월 4일 심사완료)

Low Cycle Fatigue Characteristics of Duplex Stainless Steel with Degradation under Pure Torsional Load

Jae Do Kwon and Joong Cheul Park

Key Words: Duplex Stainless Steel(2상 스테인리스강), Virgin Material(건전재), Artificial Degraded Material(모의열화재), Thin Walled Tubular Specimen(얇은 튜브형 시편), Electrolytic Polish(전해연마), Shear Strain Control(전단변형률제어), Low Cycle Fatigue(저주기 피로)

Abstract

Monotonic torsional and pure torsional low cycle fatigue(LCF) test with artificial degradation were performed on duplex stainless steel(CF8M). CF8M is used in pipes and valves in nuclear reactor coolant system. It was aged at 430°C for 3600hrs. Through the monotonic and LCF test, it is found that mechanical properties(i.e., yield strength, strain hardening exponent, strength coefficient etc.) increase and fatigue life(N_f) decreases with degradation of material. The relationship between shear strain amplitude(γ_a) and N_f was proposed.

1. 서론

기호설명

τ, G : 전단응력, 전단탄성계수
 $\Delta\gamma/2$: 총 전단변형률 진폭
 n_b, n'_t : 모노토닉 · 반복 가공경화지수
 K_b, K'_t : 모노토닉 · 반복 강도계수
 $N_f, 2N_f$: 피로수명
 b_b, c_t : 피로강도 · 연성지수
 τ'_f, γ'_f : 피로강도 · 연성계수
 subscript t : 비틀림

70년대 후반부터 건설되기 시작한 원자력 발전소는 현재 국가전체 전력 공급의 많은 부분을 담당하고 있다. 따라서 매년 폭발적인 전력 수요의 증가에 따른 전력 난을 해결하기 위해서는 보다 많은 원자력 발전소의 건설이 요구되고 있다. 또한 이미 건설되어 가동 중에 있는 원자력 발전소의 수명 관리를 위한 연구가 우리나라뿐만 아니라 세계 여러 나라에서 진행되고 있다.^(1~4)

원자력 발전소 설비의 여러 분야들 중 중요하지 않은 분야는 없지만 특히 원자로를 냉각시켜 주는 역할을 하는 1차 배관 계통, 즉 압력 용기에 파손이 일어난다면, 방사능 누설의 위험성이 있다.⁽⁵⁾ 특히 배관 계통은 고온, 고압의 부식성 유체 및 방사능을 띤 유체가 흐르고 있어 장기간 사용 후 갑작스러운 파괴가 발생할 수 있어 큰

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jdkwon@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2462 FAX : (053)813-3703

^{*} 회원, 영남대학교 대학원 기계공학부

물적 피해를 동반하기도 하며 심한 경우 인적피해도 야기할 수 있어 배관계통의 건전성 평가는 상당히 중요하다고 사료된다.^(1~4)

본 논문의 저자도 연구용 재료인 2상 스테인리스(CF8M)강에 대해 430℃에서 모의 열화재를 제작하여 조직관찰, 인장시험, 충격시험, 피로균일진전 시험, 탄소성 파괴인성 시험 등을 수행한바 있다.^(1, 2) 그 결과 재료가 열화가 되면 상당한 수준의 기계적 특성이 저하되는 것을 알았다. 그러나 실제 구조물에서는 항상 다축(multi-axial) 응력 상태에 놓이게 된다. 예를 들어 지진하중, 설비의 정기검사와 고장으로 인한 가동·정지의 반복, 쿠하변동에 따른 부하상태의 변동 등으로 인한 피로현상은 심각한 문제로 대두될 수 있고, 또한 사실로 드러나고 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 2축 응력 상태에서의 피로특성 연구에 앞서 순수 비틀림 상태에서의 저주기 피로시험을 수행하여 열화현상으로 인한 피로수명의 변화를 연구하였다.

2. 시편 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 원자력 발전소의 1차 배관계통에 사용되는 재료로서, ASTM A351 Grade CF8M 2상 스테인리스강이며 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

열화가 재료강도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 장기 사용된 실제의 열화재로서 평가하는 것이 보다 이상적이지만, 현 상황에서 실제 사용된 열화재를 입수하기는 거의 불가능한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 실험실에서 모의적으로 가속해서 열화재를 제작하는 방법을 선택하였다.^(1,2) 즉, 원전 1차 배관계통의 hot leg 부분의 운전온도인 약 330℃에서와 같은 열화정도를 가지는^(3,4) 475℃ 취화구간(약 400~550℃)중 430℃에서 3600시간 동안 등온 열처리 방법을 사용하였다.

건전재 및 430℃ 3600시간 열화재에 대하여 Fig. 1과 같이 얇은 튜브형 시편(thin-walled tubular specimen)을 가공하여 피로특성을 연구하였다. 시편 평행부의 길이는 30mm, 외경은 12.5mm, 내경은 10mm, 두께는 1.25mm이다. 시편 가공 후 노치(notch) 효과를 최소화하기 위해 시편의 내부를 전해연마(electrolytic polishing)하여 시편 내부에서의 균열발생과 진전을 억제하였다.⁽⁶⁾ Fig. 2에 전

해연마 개략도를 나타내었다. 전해연마에 사용된 전해액은 에탄올(ethanol(95%)) : 800ml과 과염소산(perchloric acid (60%)) : 200ml이다. 욕조(bath)의 전압은 20V이고 연마시간은 60초로 하였다. 연마 후 시편의 치수 변화는 없었다. 비틀림 시험에 사용된 시험기는 MTS 809 Axial/Torsional Test System이고, 사용된 소프트웨어는 Test Star II이다.

연구의 최종 목표인 2축 하중 하에서의 피로수명을 예측하기 위해서는 여러 종류의 재료 물성치가 필요하다. 이에 대한 종류로는 모노토닉 하중 하에서의 비틀림 및 인장특성과 반복 하중 하에서의 비틀림 및 인장-압축 거동에서의 재료 물성치를 모두 알아야 한다.

Table 1 Chemical composition of CF8M

Composition, wt. %							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.07	0.81	0.024	0.015	0.91	9.45	18.69	2.47

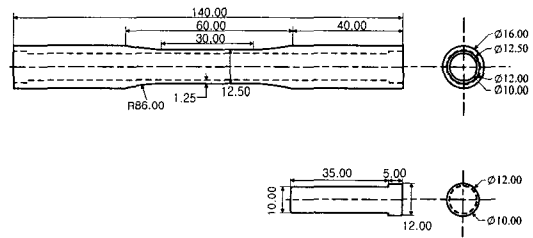


Fig. 1 Thin-walled tubular specimen

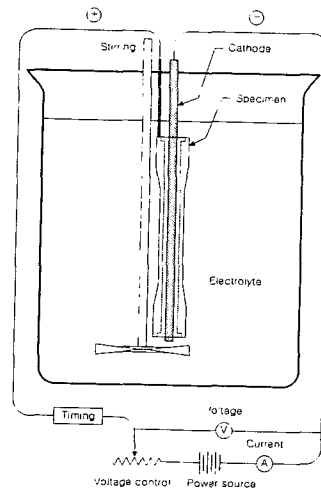


Fig. 2 Electrolytic polishing of specimen

따라서 본 연구에서는 건전재 및 열화재에 대해 모노토닉 비틀림 거동을 알아보기 위해 먼저 비틀림 시험을 수행하였다. 시험 속도는 0.05 deg/sec로 하였다.

그리고 건전재 및 열화재에 대한 반복 하중 하에서의 비틀림 거동을 알아보기 위해 저주기 비틀림 피로시험(low cycle fatigue test)을 수행하였다. 시험 온도는 상온에서 수행되었고, 총 변형률 진폭은(strain amplitude)은 각각의 재료에 대해 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.4 및 1.7%로 수행하였으며, 사이클의 파형은 삼각파형(triangular waveform)으로 하였고, 주기는 0.1 hz로 각 시편마다 동일하게 적용하였다. 전단변형률제어를 위한 신장계(extensometer)는 표점거리(gage length)가 25mm, 용량이 $\epsilon = \pm 5\%$, $\pm 5^\circ$ 의 axial/torsional 신장계를 사용하였다.

저주기 피로시험에서의 피로수명은 명확하게 결정되어 있지 않다. 일반적으로 현재 사용되고 있는 피로수명의 결정법은 아래에 나타낸 바와 같은 4가지 정도의 방법이 주로 사용되고 있다.^(7,8)

1. 임의의 감지 할 만한 크랙(small crack)이 발생할 때까지의 수명
2. 인장-압축하중(비틀림 하중)이 임의의 비율(%)로 감소할 때까지의 수명 (ASTM E606에서는 하중이 50%로 감소할 때까지로 권장)
3. 인장-압축할 때의 탄성계수의 변화가 임의의 비율(%)로 될 때까지의 수명
4. 시편이 완전히 파손될 때까지의 수명

그러나 본 연구에서는 히스테리시스 루프에서 굴곡(inflexion)현상이 일어나기 전인 최대 비틀림 하중의 80%가 될 때까지를 피로수명으로 결정하여 저주기 피로거동을 알아보았다.

3. 모노토닉 비틀림 거동

건전재와 열화재에 대한 토크-비틀림 각도 선도로부터 전단 응력과 전단 변형률은 식 (1)을 사용하여 구하였다.⁽⁹⁾ 표점거리(gage length)내에서의 전단응력은 시편이 두께에 걸쳐 일정하다고 가정하였고, 평균 반경(r)을 기준으로 전단응력을 계산하였다. 이 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다.

$$\tau = \frac{2T \cdot r}{\pi(r_o^4 - r_i^4)} \tag{1}$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{r\theta}{L}\right)$$

여기서, τ : shear stress, T : torque, r_o : outer radius, r_i : inner radius, r : mean radius, γ : shear strain, L : gage length, θ : angle of twist(rad.)

또한 모노토닉 비틀림 거동에서의 재료 물성치를 구하기 위해 Ramberg-Osgood의 관계식인 식 (2) 및 식 (3)을 이용하여 각 전단응력-전단변형률에 대해 커브 피팅(curve fitting)을 하였고 그 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 식 (2)는 전단응력이 항복점 이상에서는 멱함수(power function)로서 표현 할 수 있다는 것이고, 식 (3)은 전단변형률이 탄성변형률(γ_e)과 소성변형률(γ_p)의 합으로서 표현 할 수 있음을 나타낸다.

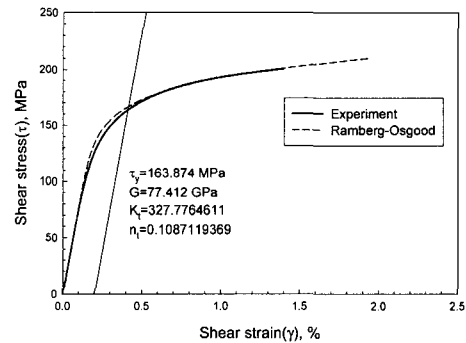


Fig. 3 Shear stress-strain curve and Ramberg-Osgood relationship for virgin material

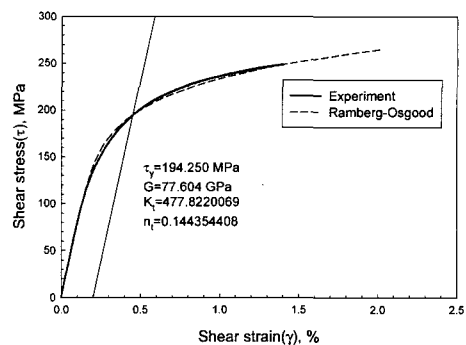


Fig. 4 Shear stress-strain curve and Ramberg-Osgood relationship for 3600 hrs degraded material

$$\tau = K_t(\gamma_p)^{n_t} \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_p = \frac{\tau}{G} + \left(\frac{\tau}{K_t}\right)^{\frac{1}{n_t}} \quad (3)$$

여기서, γ_e : elastic shear strain, γ_p : plastic shear strain, K_t : torsional strength coefficient, n_t : torsional strain hardening exponent

그 결과 건전재와 열화재의 전단탄성계수(G)는 각각 77.412 GPa, 77.604 GPa로 유사하였고, 전단항복응력은 각각 163.874 MPa, 194.250 MPa이다. 전단강도계수(K_t)는 각각 327.776 MPa, 477.822 MPa이고, 전단가공경화지수(n_t)는 각각 0.109,

0.144이다. 이들 값들을 Table 2에 나타내었다. 모노토닉 비틀림 시험결과 재료가 열화됨에 따라 전단탄성계수의 변화는 거의 없고, 항복응력, 강도계수 및 가공경화지수의 값은 커졌다. 즉 열화 현상으로 인해 인성이 감소하였음을 의미한다.⁽²⁾

4. 저주기 비틀림 피로시험 결과 및 고찰

4.1 정상상태에서의 히스테리시스 루프

건전재 및 열화재의 80%로의 하중감소에 대한 최대·최소 전단응력과 피로수명 값을 Table 3에 나타내었고, 또한 히스테리시스 루프 중 대표적으로 전단변형률진폭(γ_a)이 0.3, 1.0 및 1.7%에 대한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 또한 Fig. 6에는 양(+)¹의 최대전단응력 진폭과 수명비(cycle ratio : N/N_f)와의 관계를 나타내었다. 그 결과 반복응력 초기에는 수 사이클만에 반복경화(cyclic hardening) 현상이 일어나고, 변형률 진폭이 커질수록 그 주기도 길어짐을 알 수 있다. 그 이후 아주 늦은 속도로 반복연화(cyclic softening) 현상이 일어났으며, 또한 건전재 및 열화재 모두 전체수명의 약 95%까지 안정상태의 히스테리시스 루프를 관찰할 수 있었다. 건전재의 경우 전단 변형률이 0.3%일 때는 시편의 파손이 일어나지

Table 2 Monotonic Mechanical properties

	Virgin material	3600 hrs degraded
G , GPa	77.412	77.604
τ_y , MPa	163.874	194.250
K_t , MPa	327.776	477.822
n_t	0.109	0.144

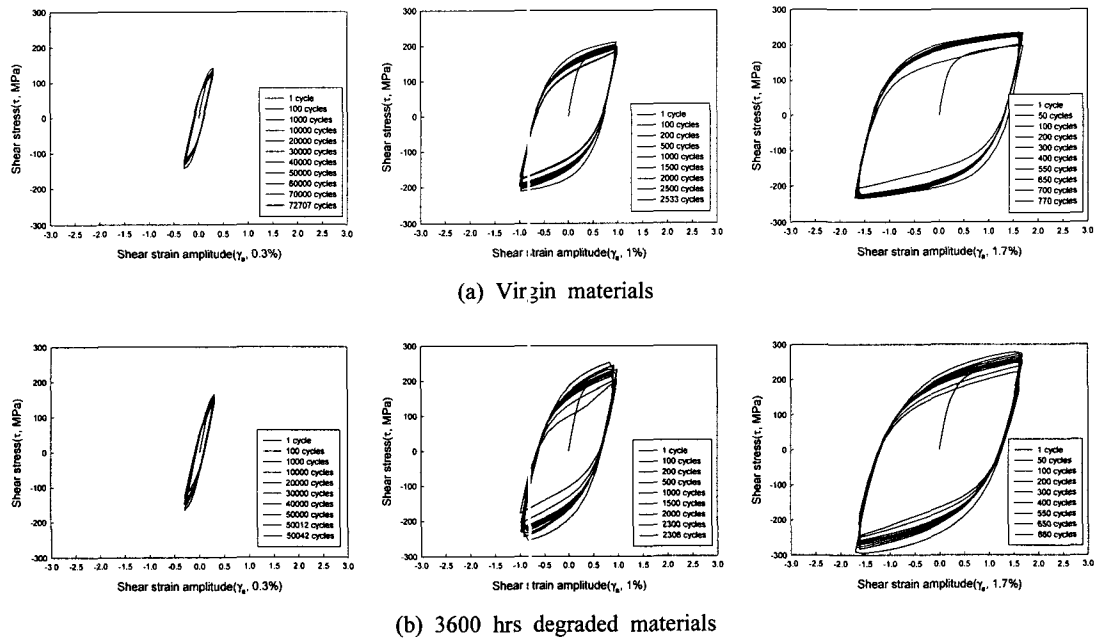


Fig. 5 Hysteresis loop of 3600 hrs degraded materials

않았다.

재료의 안정(정상)상태 반복 응력-변형률(stable or steady-state cyclic stress-strain)거동은 일반적으로 피로수명의 약 1/2되는 지점의 히스테리시스 루프로 표현된다. 모노토닉 비틀림 시험 일 때와 마찬가지로 Ramberg-Osgood의 관계식인 식 (4) 및 식 (5)를 이용하여 각 전단응력진폭-전단변형률진폭에 대해 커브 피팅을 함으로서 반복하중 상태에서의 재료물성치를 구할 수 있다.

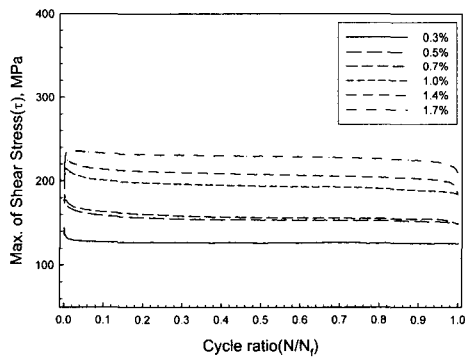
건전재 및 열화재에 대한 안정(정상)상태에서의 반복 응력-변형률 곡선을 모노토닉 하중일 때와 같이 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 각 재료에 대해 반복하중일 때와 모노토닉하중일 때를 비교하여보면 건전재는 전단변형률이 약 1%, 열화재는 약 2% 이상에서 반복하중일 때의 응답응력이 더 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 열화재가 건전재보다 넓은 범위의 변형률에 대해 응답응력이

낮으므로 반복응력, 즉 피로하중에 더 취약하다는 것을 의미한다.

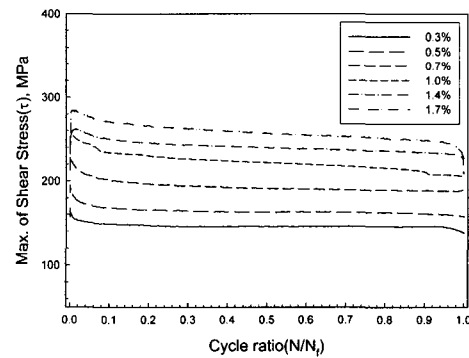
$$\tau_a = K_t' \left(\frac{\Delta\gamma_p}{2} \right)^{n_t'} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_a &= \frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\Delta\gamma_e}{2} + \frac{\Delta\gamma_p}{2} \\ &= \frac{\Delta\tau}{2G} + \left(\frac{\Delta\tau}{2K_t'} \right)^{\frac{1}{n_t'}} \\ &= \frac{\tau_a}{G} + \left(\frac{\tau_a}{K_t'} \right)^{\frac{1}{n_t'}} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, γ_a : total shear strain amplitude, K_t' : cyclic torsional strength coefficient, n_t' : cyclic torsional strain hardening exponent

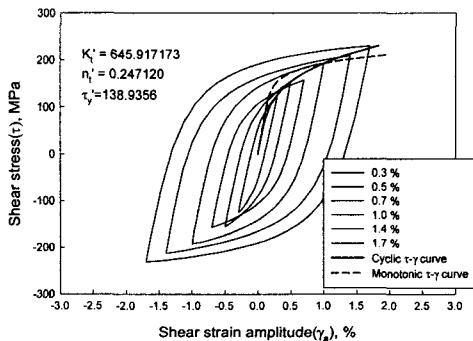


(a) Virgin material

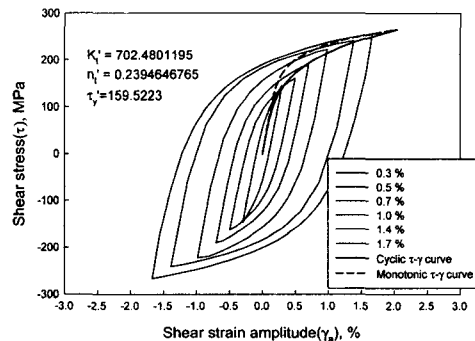


(b) 3600 hrs degraded material

Fig. 6 Max. cyclic shear stress response curves of virgin and 3600 hrs degraded material



(a) Virgin material



(b) 3600 hrs degraded material

Fig. 7 Steady-state cyclic stress-strain curve of virgin and 3600 hrs degraded material

건전재의 반복전단항복강도(τ_y')는 138.936 MPa, 반복강도계수(K_t')는 645.917 MPa, 반복가공경화지수(n_t')는 0.247이다. 열화재의 τ_y' 는 158.522 MPa, K_t' 는 702.480MPa, n_t' 는 0.239이다. 모노토닉 비틀림 거동과 비교하면 전단항복응력은 대폭 감소하였고, 반대로 강도계수와 가공경화지수는 대폭 증가하였다. 이는 재료가 열화됨에 따라 모노토닉 하중일 때보다는 피로하중 일 때가 재료의 손상이 더 쉽게 일어난다는 정량적인 증거이다. 이러한 값은 Table 4에 나타내었다.

4.2 저주기 피로수명 평가

어떤 피로수명(N_f)에서의 변형률 진폭(total shear strain amplitude)은 정상상태의 히스테리시스 루프로부터 탄성 변형률과 소성 변형률의 합으로서 표시 할 수 있다. 큰 변형률 혹은 짧은 피로수명을 가질 때에는 소성 변형률 향이 우세하고, 작은 변형률 혹은 긴 피로수명을 가질 때에는 탄성 변형률 향이 우세하다. 이러한 관계는 식 (6)

과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\gamma}{2} &= \gamma_a = \frac{\Delta\gamma_e}{2} + \frac{\Delta\gamma_p}{2} \\ &= \frac{\tau_f'}{G}(2N_f)^{b_f} + \gamma_f'(2N_f)^{c_f} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, $\Delta\gamma/2$: total shear strain amplitude = γ_a ,
 $\Delta\gamma_e/2$: elastic shear strain amplitude = $\Delta\tau/2G = \tau_a/G$, $\Delta\gamma_p/2$: plastic shear strain amplitude = $\Delta\gamma/2 - \Delta\gamma_e/2$

이 식의 해를 구하는 방법은 수학적인 해법(numerical solution)과 도식해법(graphical solution)이 있다. 본 논문에서는 최소자승법을 이용한 수학적 방법으로 해를 구하였다. 탄성거동의 직선 부분은 Basquin⁽¹⁰⁾이 제안한 식 (7)과 같이 표현 할 수 있다. 또한 피로수명과 소성변형률과의 관계는 Manson-Coffin⁽¹¹⁾이 제안한 식 (8)과 같이 표현 할 수 있다.

변형률에서 탄성 및 소성변형률 향이 같아지는 곳의 피로수명을 천이수명(transition fatigue life : $2N_t$)라 한다. 따라서 천이수명은 식 (6), (7) 및 (8)의 관계로부터 식 (9)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{\Delta\tau}{2} = \tau_a = \tau_f'(2N_f)^{b_f} \tag{7}$$

$$\frac{\Delta\gamma_p}{2} = \gamma_f'(2N_f)^{c_f} \tag{8}$$

$$2N_t = \left(\frac{\gamma_f' G}{\tau_f'}\right)^{\frac{1}{b_f - c_f}} \tag{9}$$

Table 3 Pure torsional stress peck-valley

Strain	Virgin			3600 hrs degraded		
	Max.	Min.	Cycles	Max.	Min.	Cycles
0.3%	36.39 -36.96		72,707 (∞)	42.15 -42.67	33.72 -34.13	50,042
0.5%	46.30 -46.56	37.04 -37.25	188,21	49.05 -49.78	39.24 -39.83	18,419
0.7%	46.33 -46.53	36.98 -37.22	6,873	56.63 -57.09	45.31 -45.67	5,522
1.0%	54.23 -54.31	43.38 -43.45	2,533	64.12 -64.66	51.29 -52.73	2,306
1.4%	56.81 -58.05	45.45 -46.44	1,725	65.94 -66.18	52.75 -52.94	1,325
1.7%	59.78 -60.08	47.82 -48.06	770	71.58 -74.51	57.26 -59.61	660

Table 4 Cyclic properties of virgin and 3600 hrs degraded material

	Virgin material	3600 hrs degraded
τ_y' , MPa	138.936	158.522
K_t' , MPa	645.917	702.480
n_t'	0.247	0.239

건전재 및 열화재 저주기 피로시험 결과를 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각 나타내었다. Fig. 10에는 건전재와 열화재에 대한 총전단변형률 진폭과 피로수명과 관계를 비교하여 나타내었다. 또한 Table 5에는 저주기 피로수명 관계식의 각 물성치 값과 천이수명을 나타내었다.

그 결과 열화재의 피로강도·연성계수, 피로강도·연성지수의 변화는 열화가 됨에 따라 커짐을

알 수 있다. 또한 천이수명은 47,224 cycle, 건전재는 115,924 cycle로 건전재에 비하여 약 60% 정도로 감소함을 알 수 있다. 천이수명 이하의 피로수명에서는 소성변형률 향이 우세하고, 반대로 이상에는 탄성변형률 향이 우세하다. 일반적으로 경도가 증가할수록 천이 수명은 감소한다는 기존의 연구결과와도 잘 일치하는 것을 보여준다.⁽¹²⁾

5. 결론

원전의 1차 계통의 배관재료로 사용되는 2상 스테인리스강(CF8M)을 사용하여 건전재 및 43 0°C에서 3600시간동안 모의 열화 시킨 재료를 사용하여 순수비틀림 하중 하에서의 저주기 피로특성 시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모노토닉 비틀림 시험결과 재료가 열화됨에 따라 재료의 강도는 상승하였다.
- (2) 일정 전단변형률 제어 하에서 저주기 비틀림 시험을 수행한 결과 건전재의 경우, $\gamma_a=0.3\%$ 일 때는 시편의 파손은 일어나지 않았고, 전체적으로는 열화재가 건전재에 비해 피로수명이 감소하였다.
- (3) 건전재 및 열화재 모두 수명의 초기에는 급격히 반복경화 현상이 일어나고, 그 이후에는 천천히 반복연화 현상이 일어나다가 수명의 약 95% 지점에서 급격한 하중 감소가 일어났다.
- (4) Basquin's 및 Manson-Coffin 식에 따라 저주기 피로수명을 예측해본 결과 재료열화의 영향으로 천이수명은 약 60% 정도로 감소하였고, 피로 하중 하에서의 재료물성치들은 증가하였다.

Table 5 Properties of low cycle fatigue for virgin and 3600 hrs degraded material

	Virgin material	3600 hrs degraded
$2N_f$	115,924	47,224
τ_f'/G	0.00736	0.00890
γ_f'	0.5701	0.8175
b_t	-0.125	-0.137
c_t	-0.498	-0.557

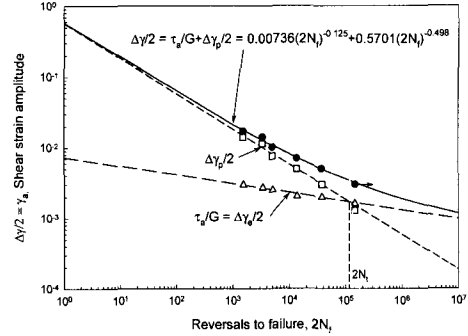


Fig. 8 Low-cycle fatigue behavior of virgin material

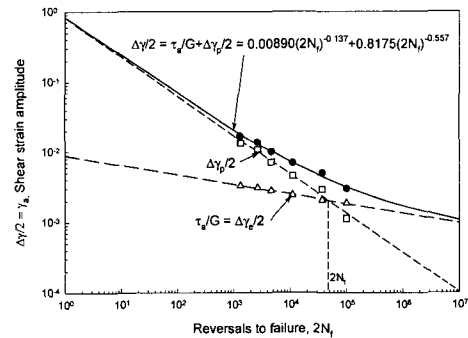


Fig. 9 Low-cycle fatigue behavior of 3600 hrs degraded material

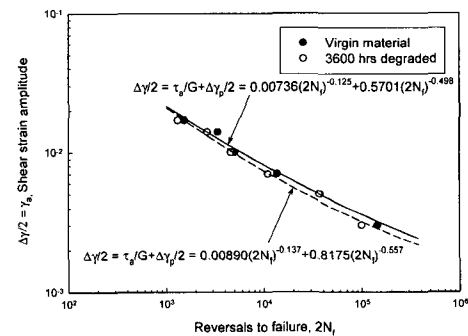


Fig. 10 Total shear strain amplitude vs. reversal to failure

후기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Kwon, J. D., Park, J. C., Lee, Y. S., Lee, W. H. and Park, Y. W., 2000, "A Study on the 430°C Degradation Behavior of Cast Stainless Steel (CF8M)(I) - Evaluation of Degradation Mechanism, Static and Fatigue Strength," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 8, pp. 1910~1916.
- (2) Kwon, J. D., Ihn, J. H., Park, J. C., Choi, S. J., Park, Y. W., 2000, "A Study on the 430°C Degradation Behavior of Cast Stainless Steel(CF8M)(I) - Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness," *Transaction of the KSME, A*, Vol.24, No.10, pp. 2405~2412.
- (3) Chung, H. M. and Leax, T. R., 1989 August 1-2, "Embrittlement of Laboratory and Reactor Aged CF3, CF8 and CF8M Duplex Stainless Steel," *International Workshop on Intermediate Temperature Embrittlement Processes in Duplex Stainless Steel*, Oxford, England.
- (4) Chopra, O. K and Chung, H. M., 1989, "Aging Degradation of Cast Stainless Steels : Effect on Mechanical Properties," *Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, pp. 737~748.
- (5) International Atomic Energy Agency Advanced Incident Reporting System, 1996.
- (6) "ASTM Standard E 1558 : Standard Guide for Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens," 1999, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01.
- (7) "ASTM Standard E 606 : Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," 1992, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01.
- (8) Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens and Henry O. Fuchs, 2001, *Metal Fatigue in Engineering, second Edition*, Wiley-Interscience, pp. 106~108.
- (9) John, R. N., Joseph, R. D. and Sunniva, K. R., 1992, *ASM Handbook Vol.8 : Mechanical Testing*, pp. 139~144
- (10) Basquim, O. H., 1910, "The Exponential Law of Endurance Tests," *Proc. ASTM*, Vol. 10, Part 11, ASTM, West Conshohocken, PA, p. 176.
- (11) Tavernelli, J. F., and Coffin, L. F., Jr., 1962, "Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue," *Trans. ASME*, Vol. 84, No. 4, p. 533.
- (12) Morrow, J. D., 1965, "Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity," *ASTM STP*, 378, p. 72.