

## 2상 주조 스테인리스강의 열화로 인한 2축 피로수명의 변화와 예측

권재도† · 박종철\*

(2003년 6월 18일 접수, 2004년 2월 28일 심사완료)

### A Change and Prediction of Biaxial Fatigue Life of Cast Duplex Stainless Steels by Degradation

Jae Do Kwon and Joong Cheul Park

**Key Words:** Biaxial Fatigue(2축 피로), Shear Strain Control(전단변형률 제어), Cast Duplex Stainless Steels(2상 주조 스테인리스강), Degraded Material(열화재), Thin Walled Tubular Specimen(얇은 튜브형 시편), Critical Plane(임계면)

#### Abstract

The multiaxial fatigue test under in-phase and out-of-phase load were performed to study what degradation phenomenon affects fatigue life with virgin and 3600 hrs degraded materials. The various kind of fatigue data for fatigue life prediction were acquired under pure axial and pure torsional load of fully reversal condition. The models which was investigated are: 1) the von Mises equivalent strain range, 2) the critical shear plane approach method of Fatemi-Socie(FS) parameter, 3) the modified Smith-Watson-Topper(SWT) parameter. The result showed that, fatigue life by material degradation are decreased and life prediction which was used the FS parameter is not conservative but the best result.

---

#### 기호설명

#### 1. 서론

- $\epsilon_a, \gamma_a$  : 축/전단 변형률 진폭
- $\epsilon_{eq}$  : von Mises 등가 변형률
- $\nu_{eff}$  : 유효 푸아송비
- $\lambda$  : 변형률 비례상수,  $\gamma_a/\epsilon_a$
- $\phi$  : 축방향과 비틀림 변형률의 위상차(각)
- $\sigma_n^{max}$  : 최대 전단변형률에 대한 최대수직응력
- $k$  : Fatemi-Socie 파라미터 상수
- $\sigma_1^{max}$  : 최대 주변형률면에 대한 최대수직응력

실제 운전중인 기계부품들과 구조물들의 대부분은 다축(multiaxial)의 반복적인 하중상태에 놓여있다. 예를 들어 압력용기, 터빈 블레이드, 구동축, 크랭크축, 차축 등이 있다. 따라서 복잡한 하중상태에 놓여있는 이러한 기계부품들과 구조물들에 대한 피로수명을 예측하기 위한 적합한 다축 피로이론이나 표준이 필요하다.

고전적인 다축 피로이론으로는 항복이론(yield criteria)을 확장하여 응력을 기초로 한 다축 피로이론이 있다. 이러한 이론의 대부분은 최대 전단응력(maximum shear stress) 또는 Tresca, 8면체 전단응력(octahedral shear stress) 또는 von Mises 항복이론이 그것이다. 이후 변형률을 기초로 한 접근법은 단축(uniaxial)의 저주기 피로에 대해 응력

---

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

\* 회원, 영남대학교 공업기술 연구소

을 기초로 한 이론보다 더 만족할 만한 결과를 가져왔다.

최근의 접근법들은 피로균열의 생성과 진전에 서 임계면(critical plane)을 정의함으로써 피로손상 과정의 물리적인 해석을 가능하게 하고 있다. 또한 임계면 이론에 의해 피로수명과 균열의 방향을 예측할 수 있게 하여 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1-3)</sup>

본 연구에서는 2축 하중(axial-torsional loading) 하에서의 피로수명을 예측하기 위해 다음의 3가지 이론을 이용하였다. 첫째, von Mises 항복이론인 등가 변형률(equivalent strain)을 이용한 피로수명 예측,<sup>(4)</sup> 둘째, 임계면 접근법의 한 방법인 Fatemi-Socie(FS) 파라미터를 이용한 피로수명 예측,<sup>(5)</sup> 셋째, Smith-Watson-Topper(SWT) 파라미터를 이용한 피로수명 예측이다.<sup>(6,7)</sup>

위 3가지 모델을 이용하여 원전의 1차 냉각 계통의 배관재로 사용되는 2상 주조 스테인리스강(CF8M)의 열화의 영향으로 인한 2축 피로 수명의 변화와 예측을 통해 설비의 설계, 유지, 보수 등에 필요한 중요한 데이터를 제공하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료 및 시편

본 연구에 사용된 재료는 원자력 발전소의 1차 배관계통에 사용되는 재료로서, 2상 주조 스테인리스강(ASM A351 Grade CF8M)이며 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

열화가 2축 피로 수명에 미치는 영향을 평가하기 위해서 건전재와 본 연구실에서 개발한 모의 가속 열화방법에 의해 제작된 열화재에 대해 연구를 수행하였다. 열화재는 430℃에서 3600시간 동안 등온 열처리하여 제작하였다.<sup>(8,9)</sup>

사용된 시편의 형상은 얇은 튜브형 시편(thin-walled tubular specimen)으로서 Fig. 1과 같다. 시편 가공 후 노치(notch) 효과를 최소화하기 위해 시편의 내부를 전해연마(electrolytic polishing)하여 시편 내부에서의 균열발생과 진전을 억제하였다.<sup>(9)</sup>

### 2.2 순수 축방향 및 비틀림 피로 재료 물성치

연구의 목표인 2축 하중 하에서의 피로 수명을 예측하기 위해서는 여러 종류의 재료 물성치가

필요하다. 즉 모노토닉 하중 하에서의 인장 및 비틀림 물성과 순수 축방향 및 비틀림 저주기 피로 거동에서의 재료 물성치를 모두 알아야 한다.

본 연구에서는 2축 피로시험 이전에 위의 실험을 수행하여 재료 물성치를 확보하였다.<sup>(9)</sup> 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 사용된 시험기는 MTS 809 Axial/Torsional Test System이고, 사용된 소프트웨어는 Test Star II이다.

### 2.3 실험방법 및 조건

건전재 및 열화재에 대한 2축 하중 하에서의 저주기 피로 거동을 알아보기 위해 축방향과 비틀림 방향의 조합으로 변형률 제어 하에서 피로 시험을 수행하였다.

시험은 상온에서 수행하였고, In-phase 조건( $\phi = 0^\circ$ )은  $\lambda=1.13, 1.50, 1.67, 2.44$ 이고, Out-of-phase 조건( $\phi=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ )은  $\lambda=0.40, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 1.20$ 에서 수행하였다. 자세한 시험 조건은 Table 3에 나타내었다. 이 시험 조건에 대한 축방향-비틀림 방향의 변형률 경로를 Fig. 2에 나타내었다.

사이클의 파형은 삼각파형(triangular waveform)으로 하였고, 주파수는 0.1 Hz로 각 시편마다 동일하게 적용하였다. 변형률 제어를 위한 신장계(extensometer)는 용량이 5%,  $\pm 5^\circ$ 의 축/비틀림(axial/torsional) 신장계를 사용하였고, 시편의 중간 부분에 부착하였다.

피로수명은 축방향이나 비틀림 방향에서 먼저 최대 하중의 80%가 되는 지점으로 정의하였다.

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

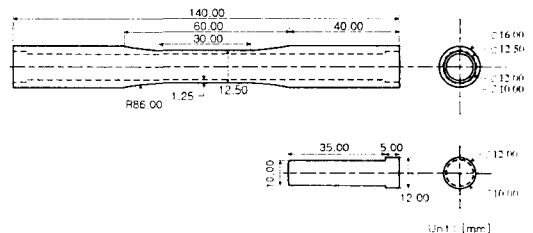


Fig. 1 Thin-walled tubular specimen

**Table 2** Properties of low cycle fatigue for virgin and 3600 hrs degraded materials

	Virgin material		3600 hrs degraded	
	Axial property	Shear property	Axial property	Shear property
Transition fatigue life ( $2N_f$ )	125,111	115,924	76,186	47,224
Fatigue strength coefficient ( $\sigma_f', \tau_f'$ ), MPa	822	570	840	692
Elastic modulus ( $E, G$ ), MPa	198	77	199	78
Elastic Poisson's ratio ( $\nu_e$ )	0.28			
Plastic Poisson's ratio ( $\nu_p$ )	0.50			
$\sigma_f'/E, \tau_f'/G$	0.00414	0.00736	0.00423	0.00890
Fatigue ductility coefficient ( $\epsilon_f', \gamma_f'$ )	0.175	0.5701	0.1007	0.8175
Fatigue strength exponent ( $b, b_f$ )	-0.111	-0.125	-0.116	-0.137
Fatigue ductility exponent ( $c, c_f$ )	-0.430	-0.498	-0.398	-0.557

**Table 3** Conditions of axial-torsional fatigue test

#	$\epsilon_a$ (%)	$\gamma_a$ (%)	$\lambda(\gamma_a/\epsilon_a)$	$\phi$
1	0.20	0.30	1.50	0°
2	0.30	0.50	1.67	0°
3	0.80	0.90	1.13	0°
4	0.45	1.10	2.44	0°
5	0.40	0.45	1.13	30°
6	0.50	0.65	1.30	60°
7	0.45	0.75	1.67	90°
8	0.25	0.55	2.20	90°
9	0.20	0.40	2.00	90°
10	0.30	1.20	4.00	90°

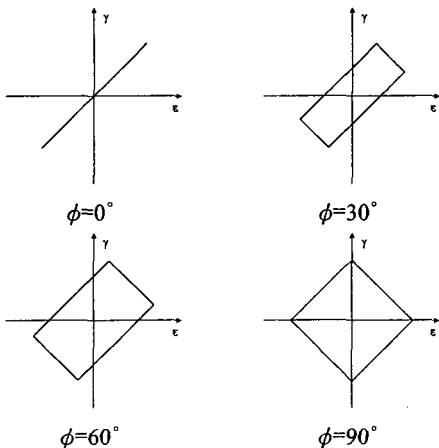
### 3. 실험결과

건전재 및 열화재의 in-phase와 out-of-phase 조건 하에서 수행한 저사이클 피로시험 결과를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다. 여기서  $\sigma_m, \tau_m$ 은 각각 축방향/비틀림 방향의 평균응력이다. 이들 Table에 나타난 모든 데이터는 피로수명의 1/2 지점의 히스테리시스 곡선으로부터 얻은 것이다.

Fig. 3에는 대표적으로 건전재에 대한 축방향 응력-변형률, 전단응력-전단변형률 및 변형률 경로를  $\phi=0^\circ$  ( $\lambda=2.44$ ),  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 대해 각각 나타내었다. 이 결과를 보면 in-phase일 때보다는 out-of-phase일 때가 더욱 경화가 더 크게 일어남을 알 수 있다. 이는 열화재의 경우도 마찬가지였다.

이러한 현상이 일어나는 이유는 out-of-phase 또는 비례하지 않는 하중(nonproportional loading)이 작용하면 반복하중을 받는 동안 주응력(principal stress)과 주변형률(principal strain)의 축이 회전하기 때문이다. 이러한 이유로 인해 재료에 추가적인 경화가 일어나기 때문에 더 심한 손상이 일어나게 된다.<sup>(10)</sup>

피로수명의 1/2지점이기 때문에 응력진폭에는 건전재와 열화재 모두 큰 차이는 나타나지 않고 피로수명만 현저하게 감소하는 결과를 나타내었다. 그러나 수명의 초기에는 열화재가 건전재보다 상당한 가공경화 현상을 나타내었다.

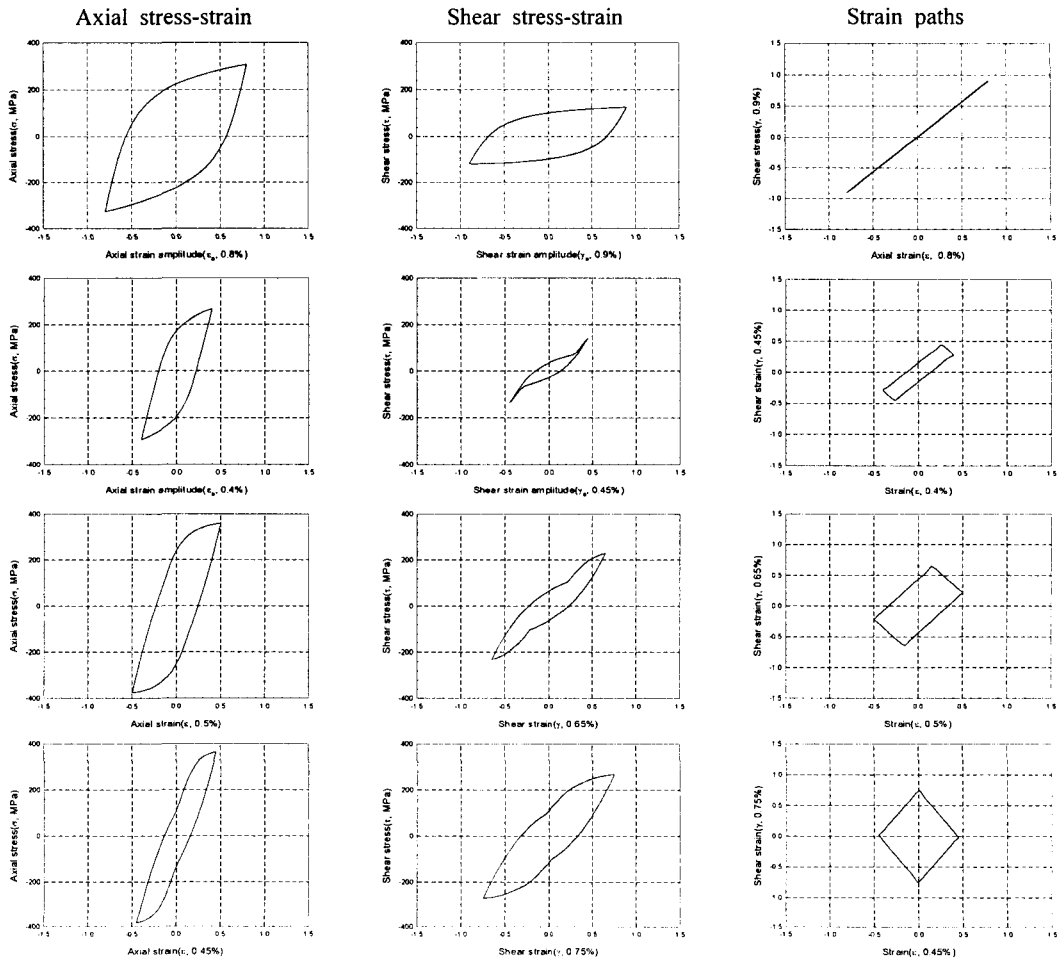
**Fig. 2** Schematics of strain paths

**Table 4** In-phase and out-of-phase axial-torsional fatigue data of virgin materials

#	$\lambda$	$\phi$ (deg.)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\tau_m$ (MPa)	$N_f$
1	1.50	0°	168	-26	112	0	12,453
2	1.67	0°	197	-14	132	4	5,284
3	1.13	0°	307	-9	126	2	1,102
4	2.44	0°	173	-5	187	0	1,528
5	1.13	30°	268	-13	143	3	2,931
6	1.30	60°	360	-8	231	0	1,341
7	1.67	90°	367	-9	270	-1	663
8	2.20	90°	273	-21	203	-2	3,738
9	2.00	90°	179	-23	148	-3	8,341
10	4.00	90°	264	-3	279	-2	612

**Table 5** In-phase and out-of-phase axial-torsional fatigue data of 3600 hrs degraded materials

#	$\lambda$	$\phi$ (deg.)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\tau_m$ (MPa)	$N_f$
1	1.50	0°	170	-11	116	-3	11,032
2	1.67	0°	202	-21	152	2	3,174
3	1.13	0°	319	-9	144	2	457
4	2.44	0°	180	-18	196	3	887
5	1.13	30°	277	-14	158	2	2,755
6	1.30	60°	363	-5	236	0	1,263
7	1.67	90°	463	-36	306	-15	571
8	2.20	90°	292	-33	215	-4	2,896
9	2.00	90°	187	-43	156	-11	6,564
10	4.00	90°	274	-5	285	-1	411



**Fig. 3** Axial and torsional hysteresis loops at half-life for virgin materials

4. 2축 피로수명 예측 및 고찰

4.1 The von Mises 등가 변형률

이 모델은 다축 상태의 변형률을 단축의 등가 변형률로 변환하는 것이다. 얇은 튜브형 시편에서의 응력상태, 즉 평면응력 상태에서의 이 모델의 제안식을 식 (1)에 나타내었다.<sup>(4)</sup>

$$\epsilon_{eq} = [\epsilon_{xx}^2 + \frac{3}{4(1 + \nu_{eff})^2} \gamma_{xy}^2]^{1/2} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{xx}$ ,  $\gamma_{xy}$ 는 가해진 변형률이고,  $\nu_{eff}$ 는 유효 푸아송비(effective Poisson's ratio)로서 아래 식 (2)를 사용하여 피로 수명의 1/2 지점에서의

축방향 히스테리시스 곡선으로부터 구하여진다.

$$\nu_{eff} = [\frac{\epsilon_e \nu_e + \epsilon_p \nu_p}{\epsilon_a}] \quad (2)$$

식 (1)의 von Mises 등가 변형률은 탄성변형률 ( $\epsilon_{eq}^e$ )과 소성변형률( $\epsilon_{eq}^p$ )의 합으로 나타낼 수 있고, 이는 Coffin-Manson의 변형률-피로수명 관계 식인 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta \epsilon_{eq}^t &= \frac{1}{2} \Delta \epsilon_{eq}^e + \frac{1}{2} \Delta \epsilon_{eq}^p \\ &= \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \end{aligned} \quad (3)$$

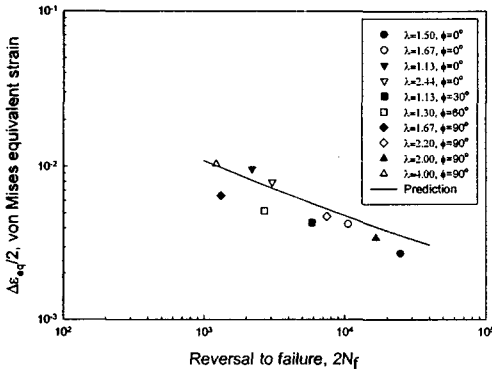


Fig. 4 Life prediction by the von Mises equivalent strain range model for virgin materials

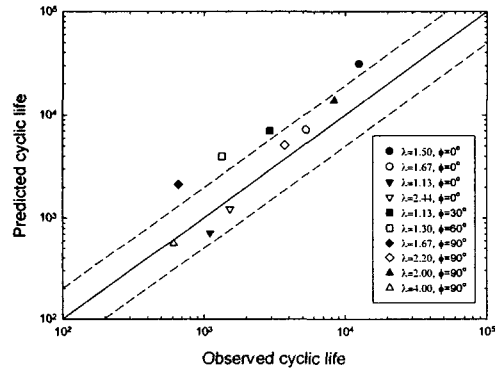


Fig. 5 Comparison of predicted and experimental lives by von Mises equivalent strain range model for virgin materials

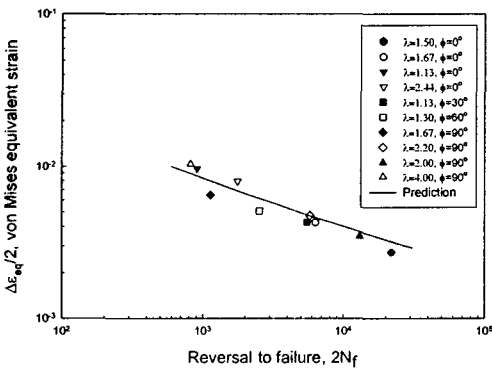


Fig. 6 Life prediction by the von Mises equivalent strain range model for 3600 hrs degraded materials

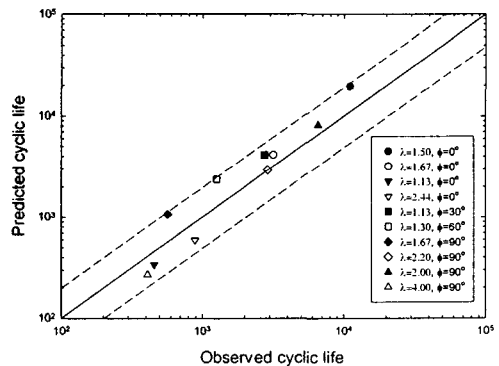


Fig. 7 Comparison of predicted and experimental lives by von Mises equivalent strain range model for 3600 hrs degraded materials

그 결과 건전재의 등가변형률과 피로수명과 관계를 Fig. 4에 나타내었고, 실험적으로 관찰한 피로수명과 예측된 피로수명과의 관계를 Fig. 5에 각각 나타내었다. 여기서 실선은 측정된 피로수명과 예측수명이 같은 경우이고 점선은  $\pm 1$ 배의 피로수명을 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 7에는 열화재에 대한 결과를 각각 나타내었다.

In-phase 하중일 때는 건전재 및 열화재 모두 큰 등가변형률인,  $\lambda=1.13$ ,  $\phi=0^\circ$ ,  $\lambda=2.44$ ,  $\phi=0^\circ$  에서는 예측한 수명보다 길고, 낮은 등가변형률인,  $\lambda=1.50$ ,  $\phi=0^\circ$ ,  $\lambda=1.67$ ,  $\phi=0^\circ$  에서는 예측수명보다 짧게 나타났다.

Out-of-phase 하중 조건 일 경우에는 건전재 및 열화재 모두  $\lambda=4.00$ ,  $\phi=90^\circ$  인 경우를 제외하고는 예측한 수명보다 짧게 관찰되었다.

그리고 건전재의 경우 4개의 데이터를 제외하고는 in-phase 조건이나 out-of-phase 조건 모두에서 예측한 피로수명과 측정된 피로수명 사이, 즉 2배의 신뢰도 구간을 나타내는 점선으로 표시한 선 안에 위치함을 알 수 있다. 열화재의 경우는 건전재에 비해 예측된 피로수명과 측정된 피로수명 사이에는 오차가 많이 줄어들고 양호한 결과를 보여주고 있다.

## 4.2 임계면 접근법

### 4.2.1 최대 전단변형률 이론(Fatemi-Socie 파라미터)

앞 절에서 평가한 von Mises 등가변형률에 의한 2축 피로 수명예측은 일반적으로 많은 결점을 내포하고 있다. 이러한 결점 중에 주된 결점은  $90^\circ$  out-of-phase와 같은 비례적이지 못한 하중이 작용할 때는 수명예측 결과가 보수적이지 못하다는데 있다.<sup>11)</sup> 이러한 2축 피로의 수명예측에 대한 결점을 보완하기 위하여 최근에 여러 가지의 새로운 2축 피로 수명예측 제안식들이 발표되었다. 그 중에서 임계면 접근법(critical plane approach)은 피로균열의 생성과 성장은 특별한 평면, 즉 임계면에서 발생한다는 것이 실험적으로 관찰됨으로서 나오게 되었다.<sup>11)</sup>

재료와 하중 조건에 기인하는 이러한 면들은 최대 전단면 또는 최대 인장 응력면이다. 이러한 면들에 대해 응력 또는 변형률이 피로손상에 관여하는 다축 피로모델을 임계면 모델(critical plane model)이라고 한다. 따라서 이 모델은 피로

수명 뿐만 아니라 균열 또는 파손면의 방향을 예측할 수 있다. 이러한 임계면에 대한 손상평가를 위해 응력, 변형률, 에너지 등의 서로 다른 여러 손상 파라미터가 사용되어지고 있다.

Fatemi-Socie<sup>(5)</sup>는 피로균열 성장 기구의 물리적 해석을 기초로 서술한 다축 피로이론을 개발하였다. 이 모델은 피로손상의 파라미터로서 최대 전단변형률 진폭( $\Delta\gamma_{\max}/2$ )과 이 면에 작용하는 최대 수직응력( $\sigma_n^{\max}$ )으로 구성되어 있다. 제안식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_n^{\max}}{\sigma_y}\right) = C \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_y$ 는 항복응력,  $k$ 는 재료상수 이다.

최대 수직응력은 변형률과 같이 무차원화를 위해 항복응력으로 나누어 진다. 재료상수,  $k$ 는 완전양진의 축방향 피로 데이터를 완전양진의 비틀림 피로 데이터에 맞춤으로서 결정된다.<sup>(12)</sup> 그 결과 건전재의  $k=0.35$ , 열화재의  $k=0.94$ 라는 값을 얻었다. 만일 이러한 피로 데이터를 사용할 수 없을 경우에는  $k \approx 1$ 로 하여도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다.

Fatemi-Socie 모델은 완전양진의 비틀림 피로시험의 결과를 이용하여 아래와 같이 식 (5)의 피로 수명 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_n^{\max}}{\sigma_y}\right) \\ = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^{b_f} + \gamma_f' (2N_f)^{c_f} \end{aligned} \quad (5)$$

In-phase와 out-of-phase 하중조건일 때의 피로수명과 FS 파라미터와의 관계를 건전재는 Fig. 8, 예측되는 피로수명과 측정된 피로수명의 관계는 Fig. 9에 나타내었고, 열화재는 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었다.

건전재의 경우  $\lambda=1.13$ ,  $\phi=0^\circ$  와  $\lambda=2.44$ ,  $\phi=0^\circ$  를 제외한 모든 데이터는 측정된 피로수명이 예측된 피로수명보다 매우 짧게 나타났고 데이터의 오차도 다소 나타났다. 반면에 열화재의 경우에는 예측수명에 매우 근접한 결과를 보이고 있다. 열화재에서 이러한 실험결과가 나타나므로 열화현상으로 인한 피로 수명예측이라는 관점에 있어서 매우 다행스런 결과라 할 수 있겠다.

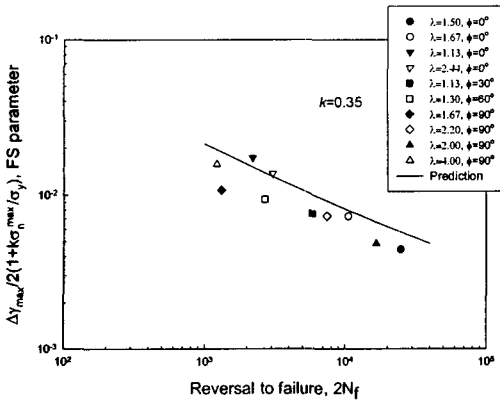


Fig. 8 Life prediction by FS parameter for virgin materials

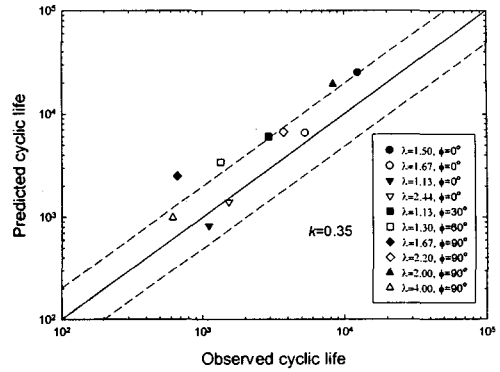


Fig. 9 Comparison of predicted and experimental lives by FS parameter for virgin materials

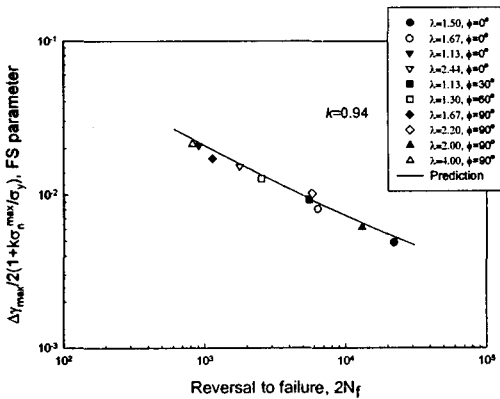


Fig. 10 Life prediction by FS parameter for 3600 hrs degraded materials

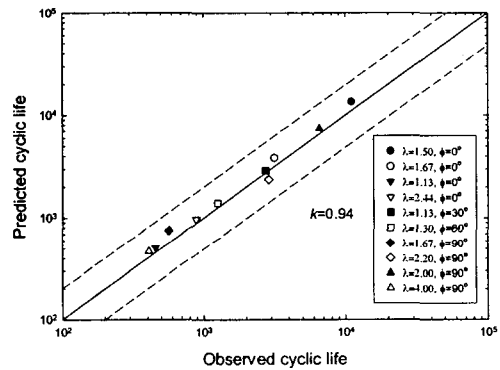


Fig. 11 Comparison of predicted and experimental lives by FS parameter for 3600 hrs degraded materials

4.2.2 최대 주변형률 이론(Smith-Watson-Topper 파라미터)

이번 절에서도 역시 임계면 접근법의 한 방법인 Smith-Watson-Topper<sup>(6)</sup>에 의해 제안된 SWT 파라미터를 이용한 피로수명 예측에 관해 논의하였다. SWT 파라미터는 피로수명 예측에 평균응력의 영향을 설명하기 위해 응력-변형률의 함수로서 제안되었다. SWT 파라미터에서 평균응력으로서 발생하는 최대 주변형률 면에 작용하는 수직인 최대응력은 Basquin의 피로수명식인 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

Socie<sup>(7)</sup>는 2축 하중 하에서의 피로수명 예측에서 SWT 파라미터를 이용하여 out-of-phase의 2축 하중 하에서 주응력(주변형률)의 회전에 의해 추

가적인 경화로 발생하는 최대 응력으로 인한 피로수명의 변화가 축방향의 피로수명에서 평균 인장응력의 영향을 고려한 피로수명 관계식과 유사하다는데 착안하여 아래에 나타난 식 (8)과 같은 수정된 SWT 파라미터를 이용한 피로수명 예측식을 제안하였다. 이 모델의 제안식인 식 (8)은 축방향 주변형률로 표현한 피로수명식[식 (7)]과 식 (6)을 곱한 식이다.

$$\sigma_1^{\max} = \sigma_f'(2N_f)^b \tag{6}$$

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \tag{7}$$

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{2} \sigma_1^{\max} = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (8)$$

Fig. 12와 Fig. 13은 건전재에 대한 SWT 파라미터를 이용한 수명예측 결과를 나타낸 것이다. 그 결과  $\lambda=1.13, \phi=90^\circ$  를 제외한 모든 피로 데이터들은 예측한 수명보다 훨씬 짧게 나타났고, 데이터의 오차도 심하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15에는 열화재에 대한 피로수명 결과를 나타내었다. 건전재의 경우와 마찬가지로

$\lambda=1.13, \phi=90^\circ$  를 제외한 모든 데이터에서 예측한 수명보다 훨씬 짧게 나타났다. 다행스럽게도 건전재보다는 점선으로 표시한 2배의 신뢰구간에 많은 데이터가 속함을 알 수 있다.

FS 파라미터를 이용한 피로수명과는 달리 이렇게 오차가 많이 나는 이유는 실험조건에서 축방향 변형률에 비해 비틀림 변형률의 진폭이 너무 크기 때문에 최대 주변형률을 계산할 때 실질적으로 재료에 미치는 영향보다 과소 평가 되기 때문이다.

일반적으로 순수 비틀림 피로나 전단변형률 진폭이 축방향에 비해 현저하게 클 경우에는 수명 예측에서 양호한 결과를 보이지 않고 있다.<sup>(13)</sup>

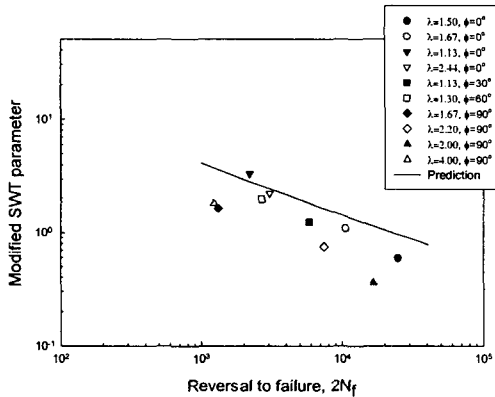


Fig. 12 Life prediction by SWT parameter for virgin materials

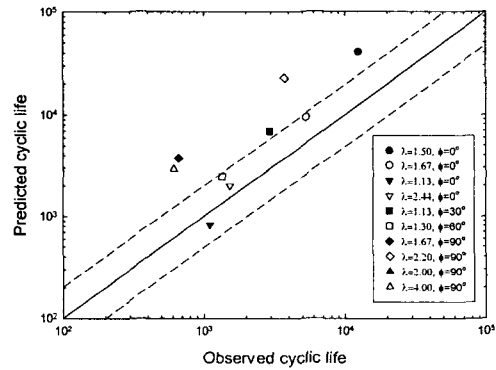


Fig. 13 Comparison of predicted and experimental lives by SWT parameter for virgin materials

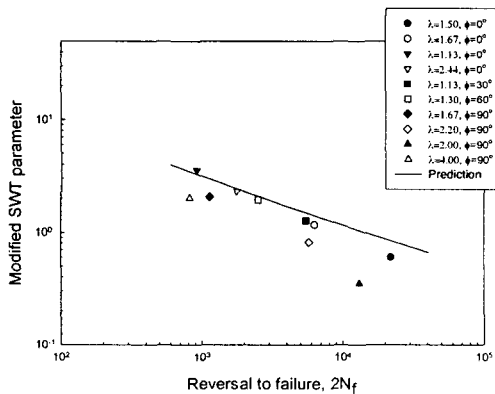


Fig. 14 Life prediction by SWT parameter for 3600 hrs degraded materials

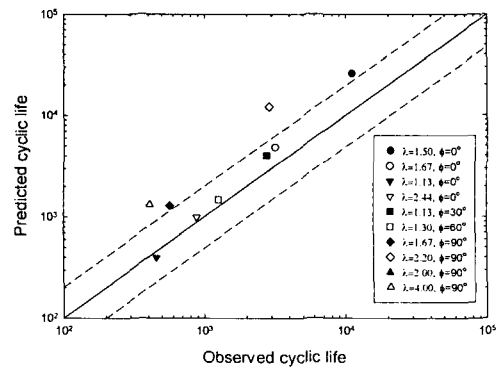


Fig. 15 Comparison of predicted and experimental lives by SWT parameter for 3600 hrs degraded materials



#### 4. 결론

원자력 발전소의 1차 냉각계통의 배관재로 사용되고 있는 2상 주조 스테인리스강이 건전재와 열화재를 사용하여 여러 피로수명 예측 파라미터를 통해 2축 피로수명 예측을 수행하였다. 그 결과 아래와 같은 CF8M의 열화평가 결과를 얻었다.

##### (1) 재료물성 및 피로수명의 변화

순수 인장-압축 및 비틀림 하중 하에서 저사이클 피로시험을 수행하여 피로수명의 변화와 재료물성치를 확보하였다. 그 결과 건전재에 비해 열화재의 피로수명 및 천이수명은 많이 감소하였다.

##### (2) 2축 하중 하에서의 피로수명 예측

In-phase와 out-of-phase 하중 하에서 피로수명의 변화 및 예측을 수행하였다. 그 결과 열화로 인한 피로수명은 건전재에 비해 많이 감소함을 알 수 있었다. 수명예측에 사용된 파라미터로는 von Mises 등가 변형률, Fatemi-Socie(FS) 파라미터, Smith-Watson-Topper(SWT) 파라미터이다. 그 결과 FS 파라미터를 이용한 수명예측이 가장 양호한 결과를 나타내었고, SWT 파라미터를 사용한 수명예측은 많은 오차를 보여주었다. 그러나 3가지 모델 모두 보수적인 측면에서의 수명예측은 보여주지 않았다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) McDowell, D. L. and Ellis, J. R., 1993, *Advances in Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- (2) Brown, M. W. and Miller, K. J., 1989, *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, Mechanical Engineering Publications, London.
- (3) Socie, D. F. and Marquis, G. B., 2000, *Multiaxial Fatigue*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa.
- (4) CASE 1592-7, 1978, *Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 388~389.
- (5) Fatemi, A. and Socie, D. F., 1988, "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 149~165.
- (6) Smith, D. F., Watson, P., and Topper, T. H., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," *Journal of Materials, JMSLA*, Vol. 5, No. 4, pp. 767~778.
- (7) Socie, D. F., 1987, "Multiaxial Fatigue Damage Model," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 109, pp. 293~298.
- (8) 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," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 24, No. 8, pp. 1910~1916.
- (9) Kwon, J. D. and Park, J. C., 2002, "Low Cycle Fatigue Characteristics of Duplex Stainless Steel with Degradation under Pure Torsional Load," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1897~1904.
- (10) Shang, D. G. and Wang, D. J., 1998, "A New Multiaxial Fatigue Damage Model Based on the Critical Plane Approach," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 3, pp. 241~245.
- (11) Kanazawa, K., Miller K. J. and Brown. M. W., 1977, "Low-Cycle Fatigue Under Out-of-Phase Loading Conditions," *Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME*, Vol. 99, pp. 222~228.
- (12) Park, J. S. and Nelson, D., 2002, "Evaluation of an Energy-based Approach and a Critical Plane Approach for Predicting Constant Amplitude Multiaxial Fatigue Life," *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, pp. 23~39.
- (13) Han, C., Chen, X. and Kim, K. S., 2002, "Evaluation of Multiaxial Fatigue Criteria Under Irregular Loading," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 9, pp. 913~922.