

12 Cr 강의 열피로 수명예측에 관한 연구

하 정 수*, 김 건 영*, 안 희 돈**

A Study on the Thermal-Mechanical Fatigue Life Prediction of 12 Cr Steel

Jeong-Soo Ha*, Kun-Young Kim*, Hye-Thon Ahn**

ABSTRACT

Fatigue behavior and life prediction method were presented for thermal-mechanical and isothermal low cycle fatigue of 12 Cr forged steel used for high temperature applications. In-phase and out-of-phase thermal-mechanical fatigue test from 350°C to 600°C and isothermal low cycle fatigue test at 600°C, 475°C, 350°C were conducted using smooth cylindrical hollow specimen under strain-control with total strain ranges from 0.006 to 0.015. The phase difference between temperature and strain in thermal-mechanical fatigue resulted in significantly shorter fatigue life for out-of-phase than for in-phase. Thermal-mechanical fatigue life prediction was made by partitioning the strain ranges of the hysteresis loops and the results of isothermal low cycle fatigue tests which were performed under the combination of slow and fast strain rates. Predicted fatigue lives for out-of-phase using the strain range partitioning method showed an excellent agreement with the actual out-of-phase thermal-mechanical fatigue lives within a factor of 1.5. Conventional strain range partitioning method exhibited a poor accuracy in the prediction of in-phase range partitioning method in a conservative way. By the way life prediction of thermal-mechanical fatigue by Taira's equivalent temperature method and spanning factor method showed good agreement within out-of-phase thermal-mechanical fatigue.

Key Words : Thermal-Mechanical Fatigue(열피로), In-Phase(동상), Out-of Phase(역상), Fatigue Life Prediction(피로수명 예측), Strain Range Partitioning(변형률 분할), Equivalent Temperature(등가온도), Spanning Factor(구간함수)

1. 서 론

석유화학 및 발전 플랜트등의 산업 현장에서 사용되고 있는 고온, 고압 설비들의 대부분은 기계적인 응력은 물론 열응력을 감당하게 되고 특히 응력의 변동과 동시에 온도의 변화가 수반되어 고온의 등온피로 거동(elevated

isothermal fatigue behavior)과는 다른 열피로(thermal-mechanical fatigue)현상을 보여 주고 있다.^[1] 이러한 고온기 및 구조물들에 있어서의 열피로는 자유스런 열팽창이 부분적으로 또는 완전히 구속될 때 일어나며 가열과 냉각이 반복됨에 따라 재질에 점증적인 손상을 주게 되어 균열을 발생시키고 궁극적으로는 파손에 이르게 하고 있다.

* 한국전력공사 기술연구원

** 충남대학교 대학원 기계설계학과

산업 플랜트에서는 열효율 향상을 고온고압화에 의존하고 있으며, 특히 발전설비의 경우에 있어서는 운전 중 심한 부하변동과 빈번한 기동 및 정지가 요구되고 있다. 고온고압 기기 및 구조물내의 온도 구배에 의한 열응력이 발생하게 되며, 특히 응력집중부에서 변동하는 열응력은 기계적 응력과 함께 열피로 손상을 주게 된다. 따라서 이처럼 가혹한 사용 조건에서의 등온 저주기 피로수명과 다른 거동을 보이는 열피로에 대한 연구의 중요성이 높아지고 있다.

열피로 실험은 1950년대 Coffin에 의하여 실험장치가 구상되어^[2] 1960년대 후반부터 Manson등에 의하여 구체화되었으며, 소성변형률과 수명과의 관계가 열피로 실험에 적용되고 열피로 수명예측에 대한 연구가 시작되었다.^[3,4] 최근에서 이르러 각종 고온 재료의 열피로 거동 및 열피로 수명예측에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.^[5,6] 한편 국내에서는 최근에 실험기를 보유하기 시작하여 열피로에 대한 구체적인 연구를 시작하는 단계에 있다.^[7] 그러나 고온기기 및 구조물의 열피로 수명예측을 함에 있어서 많은 실험 및 해석적 어려움이 있으며 실제 수명과 예측된 수명이 큰 오차를 보이고 있어 이에 대한 지속적인 연구가 요구되고 있다.

본 논문에서는 595℃의 고온에서 사용될 초임계압 발전소의 터빈 로터용으로 시험 제작된 12Cr 단조강을 사용하여 열응력과 기계적 응력을 함께 고려할 수 있는 열피로 실험과 등온저주기 피로실험을 수행하여 등온저주기 피로 실험 결과를 이용한 수명예측법을 열피로 수명예측에 적용하여 보다 정확하고 간편하게 개선된 열피로 수명예측법을 제시코자 한다.

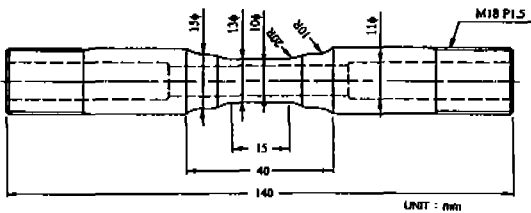


Fig. 1 Isothermal and thermal fatigue test specimen

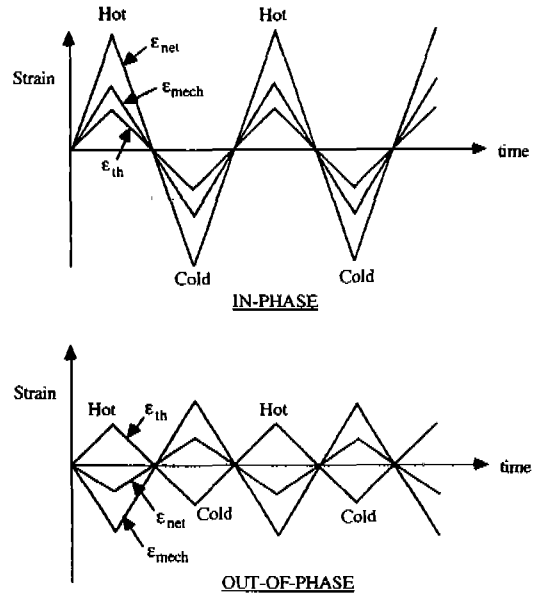


Fig. 2 Strain versus time under in-phase and out-of-phase thermal-mechanical fatigue tests

2. 열피로 특성 및 수명예측법

과거에는 열피로를 등온저주기피로와 동일한 현상으로 간주하였으나 최근에는 실험장치의 발달 및 지속적인 관련 연구에 힘입어 복잡한 열피로 실험이 가능케 되었다. 열피로 손상을 정량화 할 수 있는 열피로 실험은 기계적 변형을 뿐만 아니라 온도까지 동시에 변화시켜 재료의 피로 파괴 거동을 고찰하는 것으로서 일반적으로 두가지 형태로 구분하여 실시한다. Fig.2는 본 연구에서 수행된 동상(in-phase)과 역상(out-of-phase) 열피로 실험의 형태를 보여 주고 있다. 동상열피로 실험에서는 온도가 상승하면서 기계적 인장 변형률이 작용되므로 기계적 변형률(ϵ_{mech})과 열적 변형률(ϵ_{th})이 더하여진 총변형률(ϵ_{net})로 반복 제어되며, 역상 열피로 실험에서는 온도가 강하하면서 기계적 인장 변형률이 작용되므로 변형률의 방향이 서로 상이한 기계적 변형률과 열적 변형률의 차이 총변형률로 제어되는 특징을 지니고 있다.

일반적으로 등온저주기피로는 주로 노내의 일정 온도에서 실험되므로 가열속도가 느리고 실험편내 일정온도의

안정적 유지가 중요하지만 반면에 열피로실험에서는 가열/냉각 속도가 상대적으로 빨라야 되므로 가열/냉각 설비 및 시험편형상과 신장계(extensometer) 등이 특수한 형태로 고안되어야 한다.^[8]

또한 고온에서의 피로수명예측법에 대한 광범위한 연구는 물론 이를 열피로 수명예측에 적용하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 상대적으로 간단한 등온저주기 피로실험과의 연관성을 규명하여 복잡한 열피로실험을 수행하지 않고 열피로 수명을 예측할 수 있는 Taira의 등가 온도법과 구간함수법이 제안되었으며, 등온피로에서 일반적으로 사용하고 있는 변형률분할법을 열피로에 적용하는 방법에 대하여도 계속적으로 연구하고 있다.^[9] 최근에는 산화의 효과를 고려한 Sehitoglu의 산화손상법(oxidation damage method)이 제안되었으나 고려되어야 할 요소와 함수가 많은 단점이 있다.^[10]

3. 실험재료 및 방법

3. 1 실험재료 및 실험장치

12 Cr 강은 일반적으로 석유화학 플랜트, 가스터빈 엔진, 터빈 블레이드, 터빈 디스크, 항공기 구조용 재료로 널리 사용되고 있는 재료로 본 연구에서 사용된 12 Cr 단조 강은 터빈 로터용 강으로 제작된 재료이다. 그 화학적 조성 및 기계적 성질은 각각 Table 1과 2에 나타내었다.

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Nb
0.16	0.24	0.67	0.003	0.005	0.58	11.01	0.92	0.23	0.05

Table 1 Chemical composition of 12Cr forged rotor steel

Tensile Property	25℃	350℃	600℃
Elastic modulus, E(GPa)	226.1	198.9	126.6
0.2% offset yield strength, σ_y (MPa)	777.6	660.1	370.7
Strain hardening exponent, n	0.045	0.062	0.032
Strain hardening coefficient, K(MPa)	1022.7	969.7	448.6

Table 2 Tensile properties of 12Cr forged rotor steel

시험편의 형상은 Fig.1과 같이 표점거리가 15 mm 이고 외경이 13 mm, 내경이 10 mm인 중공의 봉상(hollow cylindrical specimen)이다. 시험편의 내표면 및 외표면은 1200번의 연마지로 연마한 후 6 μ m 입자의 다이아몬드 연마제를 사용하여 마무리 연마를 함으로서 시험편 표면 거칠기에 의한 영향을 줄이고자 하였다.

열피로 실험에 사용된 실험장치는 10톤 용량이 Instron사의 전기기계식 피로 실험기(electro-mechanical dynamic fatigue testing machine : Instron model 1362)로서 시험편 가열용 고주파 발생장치, 시험편 냉각용 공기압축기등이 포함되어 있으며 시험편을 하중방향에 정열(align)하여 편심이 되지 않도록 하기 위하여 우즈 메탈 그립(wood's metal grip)을 사용하였다. 변형률은 시험편의 축방향으로 설치된 10 mm 표점거리의 신장계(extensometer)를 사용하여 측정하였으며 시험편의 온도는 표점거리의 중앙 부위에 점용접(spot weld)된 열전대에 의하여 측정하였다.

3. 2 실험조건 및 방법

본 연구에서의 열피로 실험온도 범위는 초임계압 발전소 터빈 로터의 사용온도인 350℃와 600℃ 사이의 영역이었으며 ASTM standard practice E606에 의거하여 변형률 제어 상태로 수행되었다.^[11] 변형률 싸이클의 파형은 삼각파(triangular wave)이었으며 주파수는 0.5 cycle/min, 온도 변화율은 4.167℃/sec이었고 총 변형률 범위 $\Delta \epsilon = 0.015, 0.012, 0.010, 0.008, 0.006$ 에서 실험이 실시되었다.

열피로 파괴거동과 등온저주기피로 파괴거동을 비교하고 등가온도법과 구간 함수법을 적용하기 위하여 등온저주기 피로실험을 열피로 실험의 최고 온도인 600℃와 평균온도인 475℃ 그리고 최저온도인 350℃에서 열피로 실험에서와 같은 주파수인 0.5cpm으로 수행하였다. 또한 변형률분할법을 이용하여 열피로 수명을 평가·예측하기 위하여 시간에 무관한 소성 변형률을 발생시키는 $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 의 빠른 변형률 속도와 시간에 의존하는 크리프 변형률을 발생시키는 $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 의 느린 변형률 속도를 이용하여 fast-fast(PP), fast-slow(PC), slow-fast(CP), slow-slow(CC)의 변형률 파형을 지나는 등온 저주기 피로실험을 수행하였다.

피로실험 과정에서 최대인장 응력이 연속적으로 강하하는 현상이 발생하여 피로수명을 정의하는데 어려움이 있었

으므로 히스테리시스 루프(hysteresis loop)의 최대 인장 응력이 준안정 상태에서의 최대 인장응력의 75퍼센트를 나타낼 때까지의 반복수를 피로수명으로 정의하였다.

식으로 표현될 수 있다.^[12]

$$\Delta \epsilon = CN_f^m \quad (1)$$

위 식에서의 계수와 지수를 로그-로그 선형 회귀법(log-log linear regression analysis)을 이용하여 구한

4. 열피로 수명예측법의 적용결과 및 고찰

4-1. 열피로 수명과 변형률과의 관계

열피로 온도 범위인 350~600℃의 동상 및 역상 열피로 실험과 주파수 0.5cycle/min, 600℃ 등온저주기 피로실험에서의 총 변형률 범위($\Delta \epsilon_p$)와 피로수명(N_f) 사이의 관계를 각각 Fig.3과 Fig.4에 나타 내었다. Fig.4의 소성 변형률 범위와 수명과의 관계는 다음과 같이 Coffin-Manson

Type	C	m
Isothermal	2.729	-0.939
In-phase	0.727	-0.668
Out-of-phase	0.914	-0.803

Table. 3 Coefficients and exponents of plastic strain-life equations

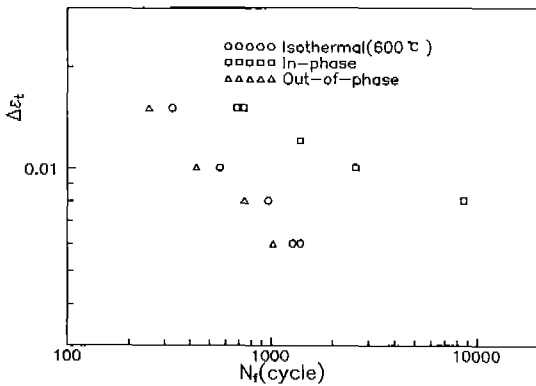


Fig. 3 Total strain versus cycles to failure

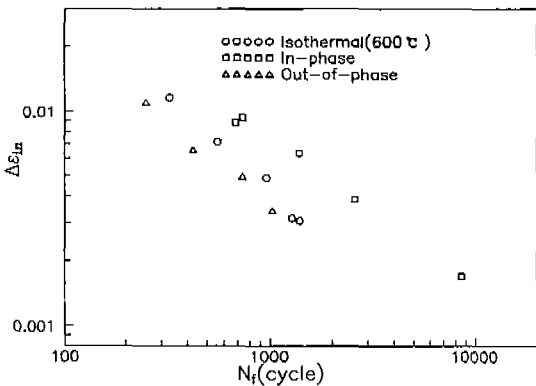


Fig. 4 Plastic strain versus cycles to failure

결과는 Table 3과 같다. Fig.3으로부터 역상 열피로 수명이 가장 짧으며, 동상 열피로 수명이 가장 길게 됨을 알 수 있다. 매우 큰 소성 변형률을 포함하는 변형률 범위인 $\Delta \epsilon = 0.015$ 에서의 동상 열피로 수명은 역상 열피로 수명의 약 3배의 긴 수명을 나타내고 있지만 상대적으로 적은 소성 변형률을 포함하는 변형률 범위에서는 큰 수명의 차이를 보이고 있어서 $\Delta \epsilon = 0.008$ 에서는 약 12배의 차이를 나타내고 있다.

열피로 손상은 피로 손상과 크리프 손상의 합으로 알려져 있으므로^[13] 같은 변형률 주파수를 가지는 Fig.3과 같은 열피로 수명의 차이는 서로 다른 열피로 하중에 의한 피로 손상에 기인함이라고 생각되며, 이는 Fig.5와 같은 변형률 범위의 히스테리시스 루프에서 동상 열피로가 상대적으로 적은 소성 변형률을 나타내고 있으므로 다른 경우보다 적은 열피로 손상을 받게 되어 긴 수명을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 Fig.5의 역상 열피로 히스테리시스 루프에서

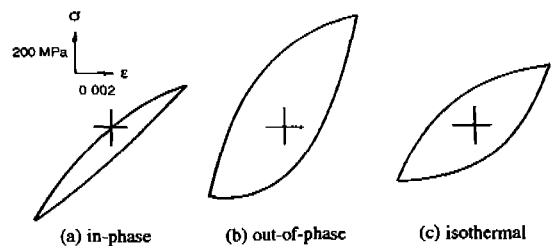


Fig. 5 Hysteresis loops at half lives for $\Delta \epsilon = 0.008$

는 인장 평균응력(tensile mean stress), $\sigma_0=108$ MPa가 존재하고 있으며, 동상 열피로 히스테리시스 루프에서는 압축 평균응력(compressive mean stress), $\sigma_0=-123$ MPa의 상당히 큰 평균응력이 존재하고 있다. 이러한 현상은 인장 평균응력이 피로수명을 단축시키며, 압축 평균응력은 피로수명을 연장시키는 영향을 미치게 되어 Koh와 Stephens의 연구와 일치하고 있다.^[14]

4-2. 변형률분할법에 의한 수명예측

변형률분할법은 등온저주기피로 실험시 형성되는 히스테리시스 루프상의 비탄성 변형률 범위를 소성과 크리프의 성분으로 분할한 후 각 변형률 범위의 방향성까지 고려하여 피로 수명을 예측하는 방법이다. 분할된 변형률 범위를 Coffin-Manson 관계식에 적용시켜 각 성분별의 변형률 범위와 피로 수명을 중첩하여 합산하는 형태로서 수식으로 표현하면 다음과 같다.^[15]

$$1/N_{pre} = F_{pp}/N_{pp} + F_{pc}/N_{pc} + F_{cp}/N_{cp} + F_{cc}/N_{cc} \quad (2)$$

$$F_{pp} = \Delta\epsilon_{pp}/\Delta\epsilon_{in}, \quad F_{pc} = \Delta\epsilon_{pc}/\Delta\epsilon_{in},$$

$$F_{cp} = \Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{in}, \quad F_{cc} = \Delta\epsilon_{cc}/\Delta\epsilon_{in}$$

$$\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{pc} + \Delta\epsilon_{cp} + \Delta\epsilon_{cc}$$

위에서 언급한 네개의 기본적인 변형률 성분인 $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$, $\Delta\epsilon_{cc}$,를 얻기 위하여는 PP, PC, CP, CC 형태의 각기 다른 파형으로 실험을 수행하여야 한다. 실험에서 얻어진 히스테리시스 루프로부터 변형률 즉 시간에 무관한 소성 변형률 성분과 시간에 관계있는 크리프 변형률 성분을 구별하는 방법은 여러가지 방법이 제안되고 있다. 이러한 방법 중에서는 실험도중에 변형속도를 변화시켜야 하는 단점이 있거나 별도의 각 응력과 온도에서의 크리프 실험결과나 동적 응력-변형률의 실험결과 등이 있어야 하는 적용상의 단점이 있어 실험의 특성과 조건에 맞게 선택해야 할 필요가 있다.

4-2-1. 변형률 파형이 등온 저주기 피로수명에 미치는 영향

변형률 파형을 달리하는 저주기 피로실험을 600°C의 일정한 온도에서 수행하였다. 이는 변형률 속도(strain rate, $\dot{\epsilon}$)를 달리 하여 각각 피로손상에 의한 변형률-수명 관계와 크리프손상에 의한 변형률-수명 관계를 구하기 위한 방

법이다.

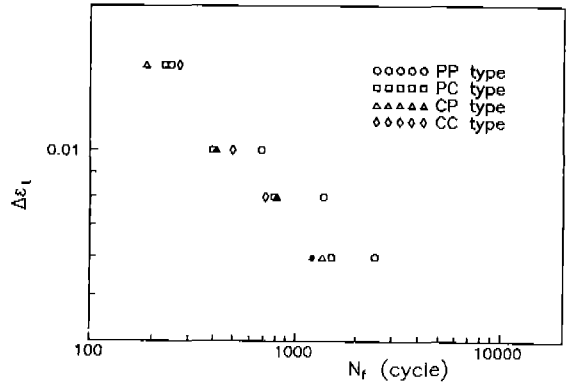


Fig. 6 Total strain range versus cycles to failure for each type of strain waveform in isothermal fatigue tests

Fig.6은 각 변형률 파형에서의 총 변형률 범위와 수명과의 관계를 보여 주고 있다. PP파형의 수명은 다른 파형의 수명에 비하여 변형률 범위에 따라 약 1.2에서 2배까지의 긴 수명을 나타내고, 변형률 범위가 작을 수록 큰 수명의 차이를 보이고 있으며, CP파형의 수명이 PC파형보다

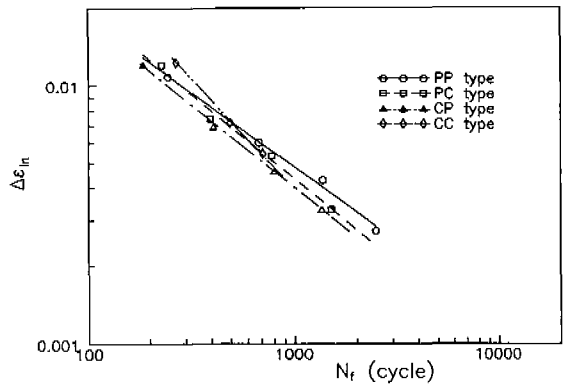


Fig. 7 Inelastic strain range versus cycles to failure for each thpe of strain waveform in isothermal fatigue tests

약간 짧은 경향을 나타내고 있다. 비탄성 변형률 범위 (inelastic strain range)와 수명과의 관계는 Fig.7과 같으며 이 관계는 Coffin-Manson식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.528} = 0.269 (PP \text{ type}) \quad (3)$$

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.648} = 0.352 (PC \text{ type}) \quad (4)$$

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{0.661} = 0.418 (CP \text{ type}) \quad (5)$$

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^{1.395} = 0.269 (CC \text{ type}) \quad (6)$$

위 식에서의 지수와 계수는 최소오차법을 이용한 로그-로그 선형 회귀법으로 구하였다. 식(3)~(6) 및 Fig.7 CC 파형에서의 비탄성 변형률-수명식의 기울기는 PP, PC, CP파형의 기울기 값에 비하여 상당히 큰 경향을 나타내고 있다. 이는 큰 변형률 범위에서는 변형률 속도가 피로수명에 비교적 적게 영향을 미치고 있어서 같은 변형률 범위에서 서로 다른 변형률 파형에 따른 피로수명의 차이가 크지 않았다. 그러나 변형률 범위가 작은 경우에는 변형률 속도가 피로수명에 미치는 영향이 상당히 커져서 매우 느린 변형률 속도를 지니는 CC파형의 피로수명이 상대적으로 빠른 변형률 속도를 지니는 PP파형의 피로수명에 비하여 상당히 감소하는 현상에 기인한다.

4-2-2. 변형률 범위의 분할

600°C의 등온저주기 피로실험 결과를 토대로 분할된 순수 $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$ 와의 관계를 구하기 위하여는 PC, CP, CC 파형의 실험에서 얻어진 히스테리시스 루프를 분할하여야 한다. 본 연구에서 사용된 등온저주기피로 실험의 변형률 분할법은 Fig.8에서와 같은 방법을 사용하였다.^[16]

시간에 무관한 PP 파형의 실험에서 얻어진 히스테리시스 루프 위에 시간에 의존하는 PC, CP, CC 파형의 실험에서 얻어진 루프를 중첩시켜 순수 $\Delta \epsilon_{pc}$, $\Delta \epsilon_{cp}$, $\Delta \epsilon_{cc}$ 를 구하였다. 구하여진 변형률 범위 $\Delta \epsilon_{pc}$, $\Delta \epsilon_{cp}$, $\Delta \epsilon_{cc}$ 로부터 다음과 같은 (7)식을 이용하여

$\Delta \epsilon_{pc}$, $\Delta \epsilon_{cp}$, $\Delta \epsilon_{cc}$ 를 구하였고 그 결과는 Table 4와 같다.

$$\frac{1}{N_{ij}} = \frac{1}{f_{ij}} \cdot \frac{1}{N_f} - \frac{\Delta \epsilon_{pp}}{\Delta \epsilon_{ij}} \cdot \frac{1}{N_{pp}} \quad (7)$$

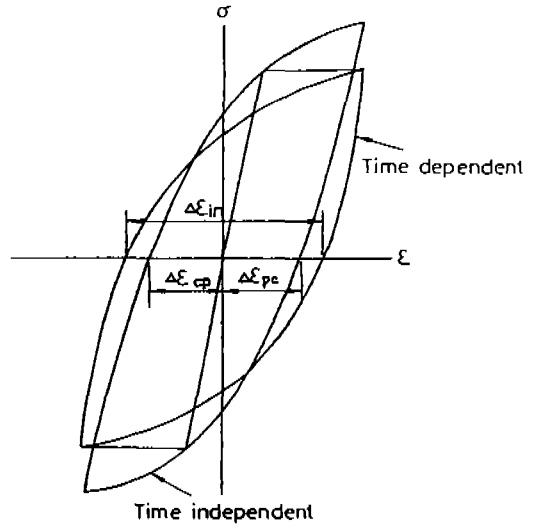


Fig. 8 Procedure of strain range partitioning method for isothod for isothermal fatigue

Test Type	$\Delta \epsilon_t$	$\Delta \epsilon_{in}$	Partitioned strain range				Calculated life			
			$\Delta \epsilon_{pp}$	$\Delta \epsilon_{pc}$	$\Delta \epsilon_{cp}$	$\Delta \epsilon_{cc}$	N_{pp}	N_{pc}	N_{cp}	N_{cc}
PP	0.015	0.0108	0.0108				251			
	0.010	0.0060	0.0060				689			
	0.008	0.00428	0.00428				1231			
	0.006	0.00272	0.00272				2682			
PC	0.015	0.0120	0.00193	0.01007				196		
	0.010	0.0074	0.00147	0.00593				324		
	0.008	0.00532	0.00126	0.00406				622		
	0.006	0.0033	0.00098	0.00240				1157		
CP	0.015	0.01206	0.00168		0.01038				161	
	0.010	0.00694	0.00162		0.00532				325	
	0.008	0.00464	0.00146		0.00318				591	
	0.006	0.00330	0.00114		0.00216				967	
CC	0.015	0.01228				0.00961				220
	0.010	0.00718				0.00438				352
	0.008	0.00544	0.00232			0.00312				487

Table. 4 Results of partitioned inelastic strain range

분할되어진 $\Delta \epsilon_{ij}$ 와 계산된 N_{ij} 로부터 각 조건에서의 Coffin-Manson 식의 형태로 $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$ 관계를 수식화 하면 다음과 같고 도시하면 Fig.9와 같다.

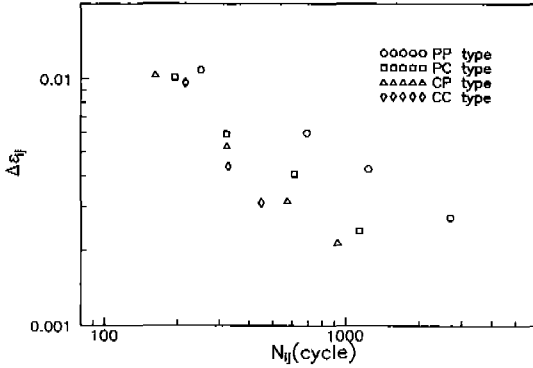


Fig. 9 Relationship between partitioned strain ranges and estimated fatigue lives

$$\Delta\epsilon_{cp} \cdot N_{cp}^{0.901} = 0.991 \quad (8)$$

$$\Delta\epsilon_{pc} \cdot N_{pc}^{0.779} = 0.586 \quad (9)$$

$$\Delta\epsilon_{cc} \cdot N_{cc}^{1.434} = 21.263 \quad (10)$$

$\Delta\epsilon_{cc} - N_{cc}$ 의 관계는 다른 세 관계에 비하여 기울기가 매우 큰 형태를 보이고 있어 PP, PC, CP에서 지수가 1보다 작은데 비하여 CC형태에서는 1보다 큰 것을 알 수 있다.

4-2-3. 열피로 수명 예측에의 적용

변형률분할법을 열피로 수명예측에 사용하기 위하여는 등온저주기 피로의 히스테리시스 루프 보다 일반적으로 복잡한 형상인 열피로의 히스테리시스 루프를 분할할 수 있어야 한다. 열피로의 특수성을 고려하여 Fig. 10과 같은 루프 치환법이 가장 간단하게 열피로 실험에 적용될 수 있는 장점이 있다. 루프 치환법은 열피로 실험중 온도를 상승시키는 과정에서만 크리프 변형률이 발생되고 온도를 하강시키는 과정에서만 크리프 변형률이 발생되지 않는다는 가정으로부터 제안되었다.^[17] 따라서 Fig. 10에서 처럼 온도를 하강시키는 중에 발생하는 히스테리시스 루프의 성분 CD를 온도가 상승될 때 생성되는 히스테리시스 루프의 성분 AE로 치환하여 PP 성분과 CP 및 PC 성분을 분할하는 방법이다.

열피로 실험에 있어서 고온으로 온도가 상승하며 인장 변형이 발생하는 동상 열피로에서는 $\Delta\epsilon_{cp}$ 성분이 발생하고, 반면에 저온으로 온도가 하강하면서 인장변형이 발생

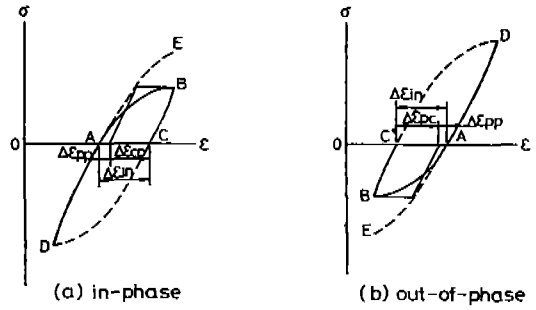


Fig. 10 Procedure of the loop inversion method for evaluating creep strain component in thermal-mechanical fatigue

하는 역상 열피로에서는 $\Delta\epsilon_{pc}$ 성분이 발생하고 있으며 최고온도에서 유지시간이 있을 경우에는 $\Delta\epsilon_{cc}$ 성분이 존재하게 된다.

열피로 실험에서의 복잡한 히스테리시스 루프를 분할하기 위하여 루프 치환법을 사용한 결과 얻어진 각각의 $\Delta\epsilon_{ij}$ 와 이것을 다시 (3), (8), (9), (10) 식에 대입하여 구하여진 N_{ii} 는 Table 5와 같다. 구하여진 $\Delta\epsilon_{ij}$ 와 N_{ii} 를 (2)식에 대입하여 수명예측치 N_{pre} 를 구한 결과를 Table 4에 나타내었다.

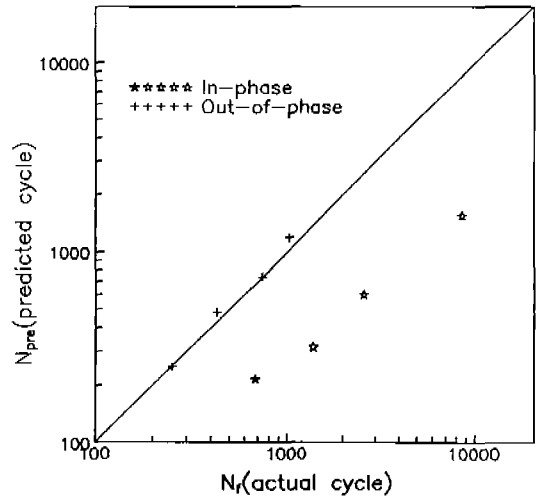


Fig. 11 Relationship between predicted life and experimental life of thermal-mechanical fatigue

여기에서 실험치와 예측치를 비교하여 보면 Fig.11과 같다. 역상 열피로 실험의 결과는 오차범위 1.5배(factor of 1.5) 이내에서 비교적 정확하게 일치하고 있으나 동상 열피로 열피로실험에서는 상당한 오차가 발생하고 있음을

Test Type	$\Delta\epsilon_{total}$	$\Delta\epsilon_{th}$	Partitioned strain range			Predicted life					N_r
			$\Delta\epsilon_{cp}$	$\Delta\epsilon_{pc}$	$\Delta\epsilon_{cp}$	N_{pp}	N_{pc}	N_{cp}	N_{pc}	N_{cc}	
IP-TMF	0.015	0.0088	0.00054		0.00826	44, 116		203	216	241	680
	0.012	0.00628	0.00042		0.00586	66, 400		297	318	382	1382
	0.010	0.00384	0.0004		0.00344	72, 207		537	599	929	2586
	0.008	0.00168	0.0002		0.00148	237, 581		1369	1553	3994	8566
OP-TMF	0.015	0.01094	0.00182	0.00912		5, 345	209		249	223	252
	0.010	0.00658	0.00112	0.00546		12, 310	404		484	421	428
	0.008	0.00492	0.00092	0.00400		17, 260	603		736	620	738
	0.006	0.0034	0.00064	0.00276		32, 200	971		1188	983	1026

Table. 5 Results of predicted thermal fatigue life using of loop inversion method

알 수 있다. 오차의 원인은 동상 열피로 수명이 상당히 길은데 반면하여 동상 열피로 수명을 예측하는데 주된 성분으로 사용되는 CP 파형의 피로 수명은 오히려 PC 파형의 피로수명보다도 상대적으로 짧아 예측치가 실험치보다 작게 나타나도록 함으로 오차를 크게 하고 있는 것으로 생각된다. 또한 열피로 실험에서는 기계적 변형률과 열적 변형률이 실제 제어되는 총 변형률에서 차지하는 비율이 동상과 역상 열피로 실험에서 각각 다르다는 열피로의 특성에 기인하는 것으로 보인다.^[10]

4-2-4. 변형률분할법의 수정모델 제안

변형률분할법을 이용한 피로수명예측법을 열피로 실험에 적용하여 본 결과 역상 열피로에서는 비교적 정확하게 일치하고 있으나 동상 열피로에서는 오차가 발생하고 있는 실정이므로 변형률분할법을 열피로에 적용시키는 경우에는 열피로의 특성을 고려할 필요가 있다. 일반 등온저주기피로와 달리 열피로에서 제어되는 총 변형률범위는 기계적 변형률이 차지하는 부분이 동상 열피로에서는 작고 역상 열피로에서는 상대적으로 크다는 특징이 있다. 이와 같은 특징은 열피로 수명에 영향을 미쳐서 기계적 변형률이 차지하는 부분이 작고 대신 열적 변형률의 비중이 큰 동상 열피로에서는 수명이 길고 반면에 열적 변형률이 작고 기계적 변형률이 큰 역상 열피로에서는 수명이 가장 짧은 것으로 보아 기계적 변형률이 수명에 미치는 영향이 크다는 사실을 알 수 있다.

따라서 변형률분할법을 열피로 수명예측에 적용키 위하여 이러한 열피로의 특성을 고려하여 수정하고자 한다. 본 연구에서 사용된 12 Cr 단조강의 열적 변형률을 직접 실험한 결과 열피로의 최저온도인 350 °C 와 최고온도인 600 °C 간의 열적 변형률($\Delta\epsilon_{th}$)은 0.00331로 얻어졌다. 각 실험에서의 총 변형률 범위에 따른 기계적 변형률과 열적 변형률의 범위 및 기계적 변형률과 정미 변형률과의 관계 $\alpha = \epsilon_{net} / \epsilon_{mech}$ 는 Table 6과 같다.

	ϵ_{net}	ϵ_{ther}	ϵ_{mech}	α^4
In-phase TMF	0.015	0.00331	0.01169	2.71
	0.012	0.00331	0.00869	3.63
	0.010	0.00331	0.00669	4.99
	0.008	0.00331	0.00469	8.45
Out-of-phase TMF	0.015	0.00331	0.01831	0.45
	0.010	0.00331	0.01331	0.32
	0.008	0.00331	0.01131	0.25
	0.006	0.00331	0.00931	0.17

Table. 6 Net, thermal, mechanical strain in thermal-mechanical fatigue

변형률분할법의 수명예측식 (2)식에서 변형률의 크기와 상호관계를 나타내는 F_{ij} 항에 열피로의 특성을 보정하고자 α_{mech} 를 이용하여 F_{ij} 항을 보완하였다.

$$\frac{1}{N_{mod}} = \frac{F_{pp} \alpha^4}{N_{pp}} + \frac{F_{pc} \alpha^4}{N_{pc}} + \frac{F_{cp} \alpha^4}{N_{cp}} + \frac{F_{cc} \alpha^4}{N_{cc}} \quad (11)$$

수정된 변형률분할법의 식을 이용하여 수명을 예측한 결과인 수정된 수명예측치(N_{mod})는 Table 5에 나타내었다. 이 결과를 실험치와 비교하여 본 결과 Fig.12 와 같다. 전체적으로 열피로수명 실험치와 수명예측치가 정확하게 일치하는 경향을 보이고 있는데 특히 동상 열피로 수명에서도 오차범위 3배 이내에서 비교적 잘 일치하고 있어 정확도를 높여 주고 있음을 알 수 있다. 또한 역상 열피로에서도 수정된 수명예측치가 실험치와 더욱 일치하는 양상을 보여주고 있어 수정된 변형률분할법의 식이 12 Cr 단조강의 열피로 수명예측에서는 성공적으로 적용할 수 있음을 알 수 있다.

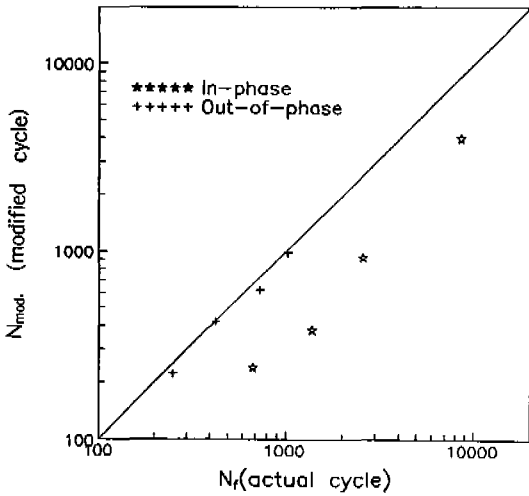


Fig. 12 Relationship between modified life and experimental life of thermal-mechanical fatigue

4-3. 등가온도법과 구간함수법에 의한 수명예측

열피로와 등온저주기 피로사이의 상관관계를 알 수 있다면 최저 온도 T_1 , 최고온도 T_2 사이를 반복하는 복잡한 열피로 실험을 수행하지도 않고 열피로실험에서의 동일한 수명을 갖는 등온저주기 피로실험의 온도를 구할 수 있다고 하는 가정하에서 Taira 등에 의하여 다음과 같은 방법이 제안되었다.^[18]

Taira는 등가온도법 (equivalent temperature method)을 제안하기 위하여 일반적인 Coffin-Manson 식에 부가하여 온도의 영향을 다음과 같은 식의 형태로 고려하였다.^[19]

$$\lambda(T) \cdot \Delta \epsilon_p^n \cdot N_f = 1 \tag{12}$$

$\lambda(T)$ 는 온도에 관계하는 함수로서 1 cycle당의 피로손상량 $\Delta \phi$ 는 cycle 도중의 소성변형률 $\delta \epsilon_p$ 에 대응하는 손상량 $\delta \phi$ 의 개념을 도입하게 되고 이를 이용하여 열피로 실험의 온도범위가 높은 경우와 낮은 경우의 등가온도를 구하고자 하였다.

$$\Delta \phi = 1/N_f = \lambda(T) \cdot \Delta \epsilon_p^{n(T)} \tag{13}$$

$$d(\delta \phi) = (1/2) \cdot \lambda(T) \cdot n(T) \cdot (\delta \epsilon_p)^{n(T)-1} d(\delta \epsilon_p) \tag{14}$$

여기에서 열피로실험의 온도범위가 상대적으로 낮아 식 (12)의 지수 n 이 2의 값을 갖는다면 등가온도(T_e)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda(T_e) = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \tag{15}$$

$$T_e = T_n = (T_1 + T_2)/2 \tag{16}$$

반면에 열피로의 고온 T_2 가 높아서 식(12)의 지수 n 의 값이 1에 가깝게 되면 $\lambda(T_e)$ 는 낮은 온도영역에서와 고온영역에서의 $\lambda(T)$ 로 구성되므로 등가온도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e \cong T_2 \tag{17}$$

이상에서와 같이 열피로실험의 온도영역이 상대적으로 저온일 경우에는 등온저주기 피로실험으로 대체할 수 있는 온도 즉 등가온도가 열피로 실험온도의 평균온도와 일치하고 실험온도 영역이 고온일 경우에는 최고온도에서의 등온저주기 피로실험의 수명과 일치한다고 주장하였다.

한편 Taira는 구간함수법(spanning factor method)도 제안하였는데 이는 열피로 실험을 하는 중에 높은 온도 영역에서는 고온 손상기구에 의하여 많은 미세균열(microcrack)을 발생시키고 낮은 온도 영역에서는 노치 효과(notch effect)에 의하여 거시균열(macrocrack)의 전파를 가속시킨다고 생각하였다. 손상의 증가는 최고온도와 최저온도사이의 평균 손상을 나타낼 수 있는 상호함수에 의하여 계산할 수 있다고 보고 구간함수를 제안하였다.^[20] 구간함수는 두 온도 영역사이의 균열성장 효과를 나타내는 것으로 최고, 최저온도에서의 등온저주기 피로 수명에 의하여 구하여 진다.

$$\text{Spanning factor} = \left(\frac{N_f(T_1)}{N_f(T_2)} \right)^\delta \tag{18}$$

위 식과 같은 구간함수의 개념을 열주기(thermal cycling)동안의 손상을 고려하여 최고온도와 최저온도에서의 등온저주기 피로수명을 이용한 열피로 수명예측식을 다음과 같이 제안하였다.

$$N_{TMF}(T_1, T_2) = 2N_f(T_2) \frac{[N_f(T_1)/N_f(T_2)]^{(1-\delta)}}{[1 + N_f(T_1)/N_f(T_2)]} \quad (19)$$

$N_f(T_1)$: 최저온도에서의 등온저주기 피로수명
 $N_f(T_2)$: 최고온도에서의 등온저주기 피로수명
 $N_{TMF}(T_1, T_2)$: T_1, T_2 사이의 열피로실험에서의 수명
 $\delta = 2 D(T_2)/3$
 $D(T_2)$: 최고온도에서의 Coffin-Manson 관계식의 지수 절대치

4-3-1. 등가온도법의 적용

등가온도법과 구간함수법을 적용하기 위하여 열피로실험의 최고온도와 평균온도, 그리고 최저온도인 600℃, 475℃, 350℃에서 등온저주기피로 실험을 열피로 실험과 동일한 주기인 0.5cpm으로 수행하였다. 온도별 등온저주기 피로실험에서의 전체 변형률 범위와 수명과의 관계 및 소성변형률 범위와 수명과의 관계는 Fig.13 및 Fig.14에 나타내었다.

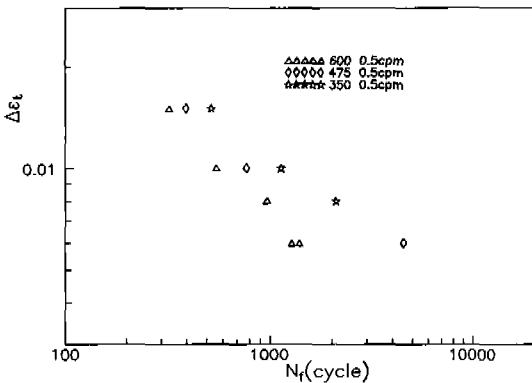


Fig. 13 Total strain range versus cycles to failure for 600, 475, 350 °C in isothermal fatigue tests

온도에 의한 등온저주기 피로수명은 온도가 증가할수록 피로수명이 감소하는 일반적인 경향을 나타내고 있어 최고온도인 600℃에서의 등온저주기 피로수명이 가장 짧은 현상을 보여 주고 있다. 각 온도에서의 소성변형률 범위와 수명과의 관계를 Coffin-Manson 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

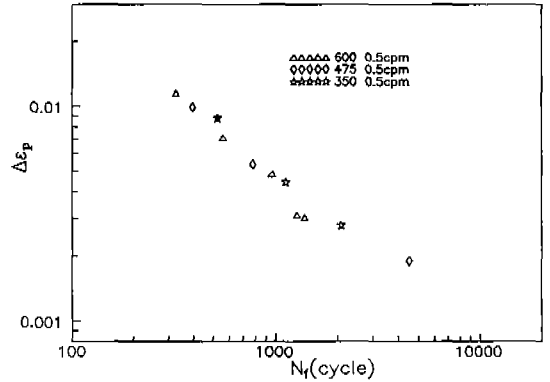


Fig. 14 Inelastic strain range versus cycles to failure for 600, 475, 350℃ in isothermal fatigue tests

$$\Delta \epsilon_{in} = 2.471 N_f^{-0.924} \quad (600^\circ\text{C}) \quad (20)$$

$$\Delta \epsilon_{in} = 0.462 N_f^{-0.655} \quad (475^\circ\text{C}) \quad (21)$$

$$\Delta \epsilon_{in} = 1.632 N_f^{-0.835} \quad (350^\circ\text{C}) \quad (22)$$

열피로 수명중에서 수명이 짧은 역상 열피로 수명과 비교하여 볼 때에 열피로 실험의 온도영역인 350℃~600℃는 고온이므로 평균온도인 475℃의 등온저주기 피로수명보다 최고온도인 600℃에서의 피로수명과 더욱 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 12 Cr 강의 열피로 수명의 등가온도는 열피로의 평균온도가 아닌 최고온도를 알 수 있다. 이를 역상 열피로 실험과 최고온도인 600℃에서의 등온저주기 피로실험에서의 수명을 비교하여 보면 Fig.15와 같다. 등온저주기 피로수명이 역상 열피로 수명보다 약 1.3배 정도 더 긴 것으로 나타나고 있어 Taira의 등가온도법은 비록 역상 열피로수명에 국한되는 문제는 있지만 오차범위 1.3배 이내에서 비교적 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

4-3-2. 구간함수법의 적용

구간함수법은 열피로 실험의 최저온도인 350℃와 최고온도인 600℃에서의 등온저주기 피로실험 결과를 가지고 열피로 수명을 예측하는 것이므로 식 (19)에 대입하면 간단히 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 열피로 수명예측에 필요한 등온저주기 피로실험 결과는 다음과 같다.

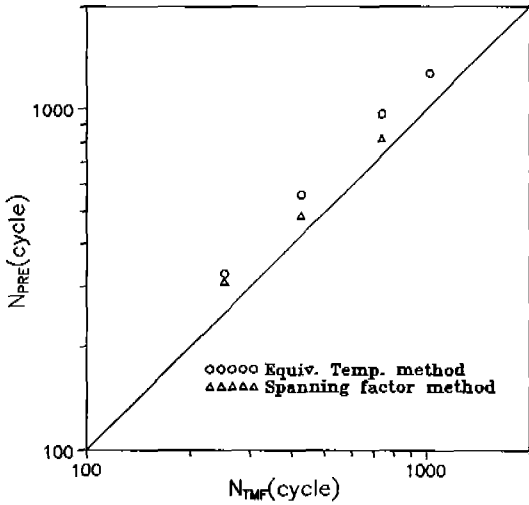


Fig. 15 Relationship between cycles to failure of OP TMF tests and cycles by equivalent temperature & spanning factor method

$N_f(T_1)$: 최저온도에서의 등온저주기 피로수명 :

$\Delta \epsilon_t = 1.5\% \rightarrow 456$, $\Delta \epsilon_t = 1.0\% \rightarrow 1127$,
 $\Delta \epsilon_t = 0.8\% \rightarrow 2090$

$N_f(T_2)$: 최고온도에서의 등온저주기 피로수명 :

$\Delta \epsilon_t = 1.5\% \rightarrow 328$, $\Delta \epsilon_t = 1.0\% \rightarrow 560$
 $\Delta \epsilon_t = 0.8\% \rightarrow 965$

$D(T_2)$: 최고온도에서의 Coffin-Manson 관계식의 지수 절대치 : 0.924

$\delta = 2 D(T_2) / 3 : 0.616$

이러한 과정을 거쳐 계산된 열피로 수명은 $\Delta \epsilon_t = 1.5\%$ 에서는 311회, $\Delta \epsilon_t = 1.0\%$ 에서는 486회, $\Delta \epsilon_t = 0.8\%$ 에서는 820회를 얻었다. 이 결과와 실험에서 얻어진 역상 열피로의 실제 수명과 비교하여 보면 Fig. 15와 같다. 이와 같이 구간함수법에 의하여 열피로 수명을 예측한 결과는 오차범위 1.2배 이내로서 등가온도법 보다는 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있지만 등가온도법과 마찬가지로 역상 열피로에 국한되는 문제가 있다.

5. 결 론

터빈로터용으로 사용하는 12 Cr 단조강을 대상으로 하여 온도와 변형률을 동시에 변화시키는 동상과 역상 열피로 실험과 등온저주기 피로실험을 수행하여 열피로 거동을 규명하고 등온저주기 피로실험의 결과를 이용하여 열피로 수명을 예측하는 방법인 변형률분할법, 등가온도법, 구간함수법등으로 12 Cr 강의 열피로 수명을 예측하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 세가지 형태의 피로실험 중에서 역상 열피로의 수명이 가장 짧았으며 역상 열피로에 비하여 600℃ 등온저주기 피로수명이 약간 길고 동상 열피로의 수명이 가장 길게 나타났다. 이러한 수명의 차이는 열피로 하중에 대한 히스테리시스 루프의 형상에 기인하며 특히 비탄성 변형을 범위의 크기와 평균응력이 열피로 수명에 큰 영향을 미치고 있었다.

나. 변형률분할법을 열피로 실험에 적용한 결과 역상 열피로의 수명은 오차범위 1.5 배 이내에서 정확하게 일치하고 있으나 동상 열피로의 수명은 오차가 발생하고 있다. 이러한 오차는 동상 열피로 수명예측의 주된 요소인 CP 파형의 수명이 상대적으로 짧기 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

다. 변형률분할법을 이용한 열피로 수명예측의 정확성을 개선하기 위하여 기계적 변형률과 열적 변형률을 고려하는 수정된 변형률분할법을 제시하여 열피로 수명예측을 수행하였으며 예측된 수명은 실험으로부터 얻어진 수명과 잘 일치하였다.

라. 등가온도법을 이용하여 열피로 수명을 예측한 결과 열피로 실험시의 최고 온도에서의 등온저주기 피로수명과 역상 열피로 수명이 오차범위 1.3배 이내에서 잘 일치하고 있으며 구간함수법을 이용한 경우에도 오차범위 1.2배 이내에서 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 등가온도법과 구간함수법은 역상 열피로 수명의 예측에만 적용할 수 있는 문제점을 가지고 있었다.

參 考 文 獻

1. Spera, D.A. "What is Thermal Fatigue?", Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612, Spera, D.A., and Mowbray, D.F., eds., pp.3~9, 1976
2. Coffin, J.R., Jr. and Wesley, R.P., "An apparatus for the Study of Effects of Cyclic Thermal Stress on Ductile Metals", Trans. ASME, Vol.76, pp.923~930, 1954
3. Manson, S.S., "Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue", McGraw-Hill, New York, 1966
4. Udoguchi, T., Wada, T., "Thermal Effect on Low Cycle Fatigue Strength of Steels", Proc. Int. Conf. on Thermal Stresses and Thermal Fatigue, pp.109~123, 1969
5. Ohtani, R., Ohnami, M. and Inoue, T., Eds., "High Temperature Creep-Fatigue", Current Japanese Materials Research, Vol.3, Elsevier, New York, 1988
6. Degallaix, G., Korn, C., Pluvinage, G., "Lifetime Prediction on Cr-Mo-V and 316 L Steel under Thermal and Mechanical Cycling", Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct., Vol.13, No 5, pp.473~485, 1990
7. 하정수, 김건영, 정태섭, 고승기, 웅장우, "1 Cr-0.5 Mo 관강의 열피로 거동에 관한 연구", 대한 기계학회 추계 학술대회 논문집(II), pp.29~33, 1992
8. Miller, D.A., Priest, R.H., "Materials Response to Thermal Mechanical Strain Cycling", High Temperature Fatigue Properties & Prediction, Elsevier Applied Science, London & New York, pp.113~176, 1987
9. Manson, S.S., Halford, G.R., Nachtigall, A.C., "Advances in design for elevated temperature environment", Proc. 2nd national congress on vessels and piping, ASME, pp. 17~26, 1975
10. Sehitoglu, H., "Thermo-Mechanical Fatigue Life Prediction Methods", Advances in fatigue Lifetime Predictive Techniques, ASTM STP 1122, pp. 47~76, 1992
11. Standard E606, "Strain-Controlled Fatigue Testing", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01, pp.623~646, 1993
12. Coffin, L.F., Jr., "A Study of the effects of Cyclic Thermal Stresses on a ductile Metal", Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 76, pp.931~950, 1954
13. Viswanathan, R., "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM, Metals Park, pp. 132~152, 1989
14. Koh, S.K. and Stephens, R.I., "Mean Stress effects on Low Cycle Fatigue for High Strength Steels", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.12, No.4, pp.413~428, 1991
15. Halford, G.R., Manson, S. S., "Life prediction of Thermal-Mechanical Fatigue Using Strainrange Partitioning", Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM 612, pp.239~254, 1976
16. Nitta, A., Kuwabara, K., Kitamura, T., "The Evaluation of Thermal Fatigue Strength of a 2¼ Cr-1Mo Steel Pipe Material Used for a Long Period", CRIEPI Report E279007, 1980
17. Nitta, A., Kuwabara, K., Kitamura, T., "Prediction of Thermal Fatigue Life in High Temperature Component Materials for Power Plant", CRIEPI Report E282015, 1983
18. Taira, S., "Relationship between Thermal Fatigue & Low Cycle Fatigue at Elevated Temperature", ASTM STP 520, pp.80~101, 1973
19. 平 修二, 藤野宗昭 上郎降 "低炭素鋼の熱疲労強度に及ぼす平均温度と温度変動幅の影響," 材料 第22卷 第234號, pp.80~101, 1973
20. Taira, S., Fujino, M., Haji, T., "A Method for Life Prediction of thermal Fatigue by Isothermal Fatigue testing", Symp. on Mechanical Behavior of Materials, pp. 257~264