

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2011.35.2.157

ISSN 1226-4873

응력 및 온도 변화시 무기력계수를 이용한 크리프-피로 수명설계[§]

박정은* · 양성모*[†] · 한재희* · 유효선*

* 전북대학교 기계시스템공학부

Creep-Fatigue Life Design with Various Stress and Temperature Conditions on the Basis of Lethargy Coefficient

Jung Eun Park*, Sung Mo Yang*[†], Jae Hee Han* and Hyo Sun Yu*

* Dept. of Mechanical System Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received July 5, 2010 ; Revised December 14, 2010 ; Accepted December 16, 2010)

Key Words: Coupling Effect(커플링효과), Creep-Fatigue(크리프-피로), High Cr-Mo Steel(고크롬 몰리브덴강), Integration Life Equation(통합수명식), Lethargy Coefficient(무기력계수)

초록: 발전설비 및 자동차의 엔진에서 고온과 응력이 발생하므로 안전을 위하여 제품을 생산하기 전에 재료의 수명설계가 필요하다. 본 연구에서는 온도, 응력, 파단 시간으로 이루어진 무기력계수를 이용하여 수명설계를 수식화하였다. 통합수명식을 이용하여 SP-Creep 시험 데이터와 계산된 데이터를 비교하였다. SP-Creep 시험은 X20CrMoV121강의 파단시간을 획득하기 위하여 수행하였고 수명설계식을 통해 하중, 온도, 하중-온도가 작용하는 3가지 경우를 고려하였다. 첫째로, 무기력계수는 SP-Creep 시험에서 획득한 파단응력과 시간에 의해 계산하였다. 두 번째로, 온도 조건을 주어 수명을 예상하였다. 세 번째로, 부재는 피로와 크리프가 동시에 작용할 때 커플링 효과 때문에 더 열악한 상태에 놓이게 된다. 수명은 커플링 효과 때문에 현저하게 감소하는 것으로 나타났다.

Abstract: High temperature and stress are encountered in power plants and vehicle engines. Therefore, determination of the creep-fatigue life of a material is necessary prior to fabricating equipments. In this study, life design was determined on the basis of the lethargy coefficient for different temperatures, stress and rupture times. SP-Creep test data was compared with computed data. The SP-Creep test was performed to obtain the rupture time for X20CrMoV121 steel. The integration life equation was considered for three cases with various load, temperature and load-temperature. First, the lethargy coefficient was calculated by using the obtained rupture stress and the rupture time that were determined by carrying out the SP-Creep test. Next, life was predicted on the basis of the temperature condition. Finally, it was observed that life decreases considerably due to the coupling effect that results when fatigue and creep occur simultaneously.

1. 서론

화력발전이나 원자력발전 설비에서는 그 작동 조건이 550℃ 이상의 고온·고압의 환경에서 장시간 가동되며 그에 따라 고온 크리프 특성이 매우 중요하다. 또한 자동차의 엔진매니폴더 및 주변부품들, 이착륙과 비행에 의한 항공기의 터빈에서는 고온·고압의 환경과 더불어 정하중과 동하중이 복합적으로 작용하여 크리프-피로 상태에 놓이게

되며 그에 따른 재질열화 및 손상을 겪게 된다.⁽¹⁾

하지만 사용할 구조물에 대하여 장시간 크리프 수명을 시험으로 정확히 확인한 후 사용한다는 것은 현실적으로 불가능하므로 비교적 단시간의 크리프 파단자료를 이용하여 설계 목적에 맞는 장시간 크리프 수명을 예측하거나 초음파, 방사선, 레플리카, 경도측정을 통한 잔여수명 평가 등의 비파괴적인 방법을 이용하여 수명을 평가하여 재질 열화에 따른 손상을 주기적으로 평가하고 있다.⁽²⁾

Kim⁽³⁾ 등은 다수의 크리프 수명예측 파라미터 방법의 수명예측 오차를 분석하여 적합성을 판단하였고, Yu⁽⁴⁾ 등은 경도법과 SP-Creep 시험을 이용하여 내열강 용접부의 크리프 특성평가를 수행

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 호남지회 춘계학술대회(2010. 5. 14., 전북대) 발표논문임

† Corresponding Author, yangsm@jbnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

하였다. Lim⁽⁵⁾ 등은 크리프-피로의 상호작용 재료에 대해 크리프-피로시험 시 하중유지시간이 균열성장거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 온도, 하중과 파단시간의 관계를 이용하여 무기력계수를 구하고, 온도와 하중을 고려하여 크리프-피로 통합수명식을 연구하였으며 SP-Creep 실험 데이터와 해석 데이터를 검증하였다. 또한, 피로와 크리프가 동시에 작용할 경우 발생하는 커플링효과를 연구하였다.

2. 시험재료 및 시험방법

2.1 시험재료

일반적으로 화력발전 설비의 보일러 배관이나 헤더 그리고 증기밸브 등과 같은 고온·고압부에서는 초임계압 증기조건의 사용에 따른 발전소의 효율 증가와 고온·고압부의 안전성을 증가시키기 위해 고 Cr-Mo 강계의 사용이 추천되고 있다.⁽⁶⁾

이러한 초임계압 발전설비에 사용되는 재료는 고온 크리프 강도 및 열피로 특성이 우수한 9~12% Cr강계가 가장 적당한 재료로 평가받고 있다. 따라서 본 연구에서는 초임계압 화력 발전소의 보일러 헤더의 후육부재로 사용되고 있는 10% Cr강계인 X20CrMoV121강의 모재를 시험재료로 선정하였다.⁽⁷⁾

Table 1과 Table 2에 시험재료의 화학적 조성과 상온에서 기계적 성질을 나타내었다. X20CrMoV121 강 모재로부터 고온 SP-Creep 시험을 위한 표준 소형편치 시험편을 제작하였으며, 표준 시험편의 크기는 10mm×10mm, 두께는 0.5mm이며, 시험편 두께의 오차범위는 ± 0.01mm로 하였다.

2.2 시험방법

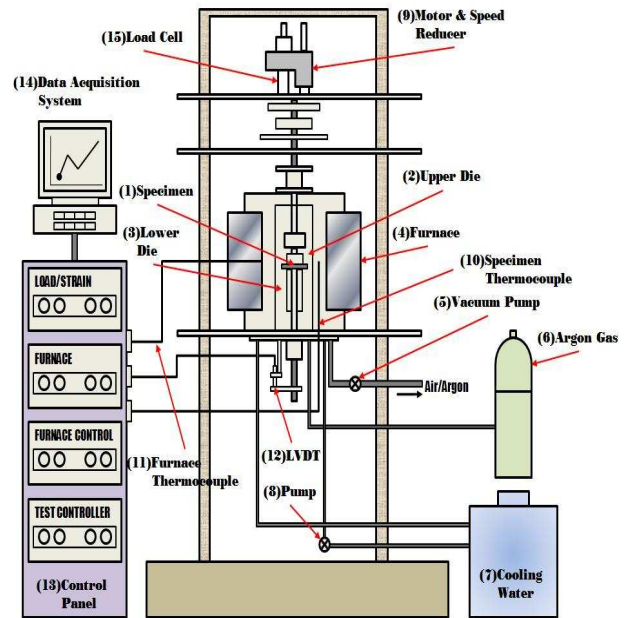
내열재료의 고온 크리프 특성을 평가하기 위해 자체 설계한 SP-Creep 시험 장치는 Fig. 1과 같다. 미소시험법을 이용한 SP-Creep 시험은 시험편의 상부에 $\phi 2.4\text{mm}$ 의 Si_3N_4 세라믹 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로써 수행되며, 시간에 따른 시험편의 중앙변위 (Central Displacement : δ)를 측정함으로써 크리프 변형 거동을 조사한다. 그리고 시험편 가열온도의 오차범위는 약 ± 1°C 범위로 하며, 고온 크리프 시험온도 범위는 600°C~650°C로 하고, 하중조건은 30kg~50kg으로 제어한다. 시험도중 시험편의 중앙변위는 LVDT 시스템을 이용하여 최소 1 μm 까지 정밀 계측한다.

Table 1 Chemical compositions of heat resistance materials

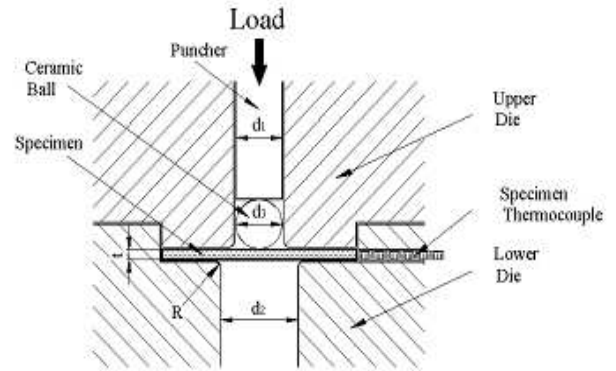
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Fe
0.19	0.19	0.48	0.011	0.003	0.66	10.40	0.86	0.26	bal.

Table 2 Mechanical properties of X20CrMoV121 steel

Yield strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Y/T ratio (%)
58.4	81.4	19.4	72



(a) SP-Creep Tester



t	d ₁	d ₂	R	Ceramic Ball d ₃
0.5mm	2.4mm	4.0mm	0.2mm	Φ2.4mm

(b) The detailed dimensions of SP-jigs

Fig. 1 The schematic diagram of SP-Creep tester and detailed SP-jigs with ceramic ball($\phi 2.4\text{mm}$)

3. 수명식

Zhurkov는 일정온도에 있는 부재가 일정한 인장응력을 받고 있는 상태에서 반실험실의 피로수명식을 도출하였다.⁽⁸⁾ 원자가 격자상의 안정한 위치로부터 제거되어 파손이 일어난다는 가정하에 일정시간동안 열진동에 의해 한 개의 원자가 격자의 위치로부터 제거되는 확률을 고려하여 Zhurkov의 Static Fatigue 식을 Dynamic Fatigue 식으로 변형하여 크리프와 피로의 일반수명식을 다음 적분식의 상한 L로 나타냈다.

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{kT(t)}}} = 1 \quad (1)$$

여기서 $\sigma(t)$ 와 $T(t)$ 는 임의의 시간함수로 변화하는 응력(하중)과 절대온도이며, U_0 는 내부에너지, γ 는 그 재료가 내포하고 있는 결함과 금속학적 조직에 따른 무기력계수이다. τ_0 는 10^{-13} sec로서, 모든 재료에 공통으로 적용되는 상수이며, k 는 Boltzmann 상수이다. 이것은 피로와 크리프가 각각 발생할 때 각각의 수명을 예측하는 일반식으로 피로와 크리프가 동시에 작용할 경우에는 바로 적용하기 힘들다. 일반적으로 피로는 온도가 일정한 환경에서 반복적 하중에 의해 발생한다고 간주되고, 크리프는 온도변화가 큰 영향을 끼친다고 생각하면 서로 상관관계가 있다. 따라서 크리프와 피로를 동시에 받는 부재에 대해

시간적으로 변동하는 하중 :

$$\sigma = \bar{\sigma} + \hat{\sigma} \cos \omega_1 t$$

와 시간적으로 변동하는 온도 :

$$T = \bar{T} + \hat{T} \cos \omega_2 t$$

를 받는 경우를 고려하고자 한다. 여기서 $\bar{\sigma}$ 와 \bar{T} 는 평균응력과 평균온도이며 $\hat{\sigma}$ 와 \hat{T} 는 그들 평균치 주위에 변동하는 응력과 온도의 진폭이다. 시간적으로 변동하는 하중과 온도를 일반 수명식에 대입하여 계산하면 소망의 수명식이 나오게 된다.

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}(1 + (\hat{\sigma}/\bar{\sigma})\cos\omega_1 t)}{k\bar{T}(1 + (\hat{T}/\bar{T})\cos\omega_2 t)}}} = 1$$

그러나 이 식은 그대로는 적분되지 않으며, ($\hat{T}/\bar{T} \ll 1$)인 경우에 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}}}} \int_0^L e^{\frac{\gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \cos\omega_1 t} e^{\frac{\gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \cos\omega_2 t} dt = 1$$

이 식을 다음과 같은 Cauchy-Schwarz Inequality와

$$\int_a^b f(x)g(x)dx \leq \left[\int_a^b f^2(x)dx \int_a^b g^2(x)dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

(여기 등호는 $f(x)$ 와 $g(x)$ 가 비례할 때만 성립)

Bessel Function을 사용하여 계산하면

$$\int_{L_1}^{L_2} e^{x \cos x} dx = (L_2 - L_1) I_0(x) \quad \text{이므로}$$

$$I_0(0) = 1$$

$$I_0(x) = e^x / \sqrt{2\pi x}$$

$$I_0(2x) = e^{2x} / \sqrt{2\pi 2x} = I_0^2(x) \sqrt{\pi x}$$

$$\frac{1}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}}}} L \left[I_0 \left(2 \frac{\gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) I_0 \left(2 \frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \geq 1$$

으로 되어 재료의 통합수명식은

$$L \geq \frac{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}}}}{\left[I_0 \left(2 \frac{\gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) I_0 \left(2 \frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

으로 표시된다. 피로와 크리프는 위에서 언급하였듯이 온도와 하중에 큰 영향을 받는다.

피로는 일정한 온도에서 반복적 하중에 의해 발생된다고 가정하면 위 식에서 온도변화를 나타내는 \hat{T} 는 0이 되고 $I_0(0) = 1$ 이 되어 피로수명식은 다음과 같다.

$$L \geq \frac{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}}}}{I_0 \left(2 \frac{\gamma\bar{\sigma}}{k\bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

응력변화가 없다고 가정하는 크리프수명식의 경우도 $\hat{\sigma}$ 항이 0이 되므로 다음과 같다.

$$L \geq \frac{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{kT}}}{\left[I_0 \left(2 \frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{T}}{T} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

이는 기존의 피로와 크리프수명식과 동일한 형태를 갖게 되어 통합수명식이 합당함을 보여주고 있다.^(9,10)

여기서, 피로와 크리프가 동시에 작용할 경우를 고려하면, 다음과 같다.

$$L \geq \frac{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{kT}}}{\left[I_0 \left(\frac{\gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) I_0 \left(\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{T}}{T} \right) \right]^{\frac{1}{2}} / \left(\pi \left(\frac{\gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \pi \left(\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{T}}{T} \right) \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (5)$$

이 식에서 피로와 크리프가 동시에 작용하면, 따로 작용할 때보다 $\frac{1}{\left(\pi \left(\frac{\gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \pi \left(\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{kT} \frac{\hat{T}}{T} \right) \right)^{\frac{1}{4}}}$ 만큼 감소하고 이를 커플링효과라 한다. 이는 두 가지를 모두 고려했을 때 수명이 감소하고 부재가 열악한 상태에 놓임을 나타낸다.

4. 고찰

4.1 수명

수명을 구하기 위한 무기력 계수는 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\gamma = \frac{U_0}{\sigma_u} (1 - \eta)$$

$$\eta = \frac{\ln \left(\frac{\tau_u}{\tau_0} \right)}{\frac{U_0}{kT}} \left(1 - \frac{\ln \left(\frac{U_0}{kT} - \ln \left(\frac{\tau_u}{\tau_0} \right) \right)}{\ln \left(\frac{\tau_u}{\tau_0} \right) \left[1 - \left(\frac{U_0}{kT} - \ln \left(\frac{\tau_u}{\tau_0} \right) \right)^{-1} \right]} \right)$$

Table 3에 무기력계수 계산에 사용되는 상수값을 나타내었고 이를 이용하여 600°C, 625°C 그리고 650°C에서 동일하게 적용된 하중 40kg에 대한 무기력 계수를 Fig. 2에 나타내었다.⁽¹²⁾ 그림에서 볼 수 있듯이 하중이 40kg으로 일정할 때 온도가 증가하면 무기력계수가 증가하는 경향을 보였다. 이는 무기력 계수는 온도의 함수라는 것을 의미한다.

4.1.1 피로조건에서의 수명

온도가 600°C로 일정할 때 하중 40kg, 45kg,

50kg의 실험값과 피로수명 식을 통한 해석값을 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3 Constants of lethargy coefficient

Bonding Energy	Life Coefficient	Boltzmann Constant
U_0 (kJ/mole)	τ_0 (sec)	k (kJ/mole · K)
344.4	10^{-13}	0.008316

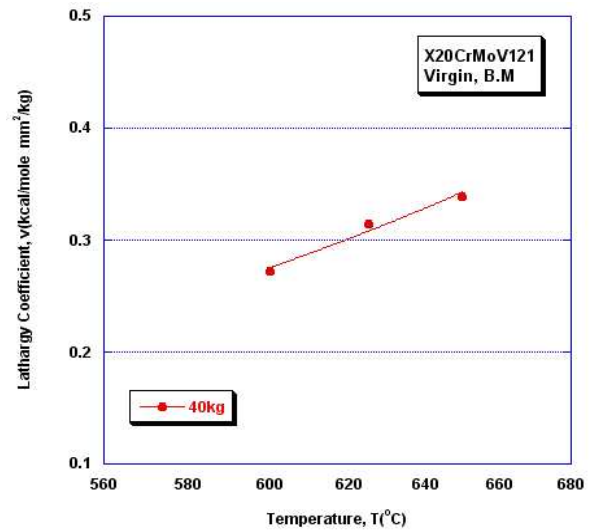


Fig. 2 The relationship between test temperature and Lethargy coefficient at 40kg by calculation using modified Power-law

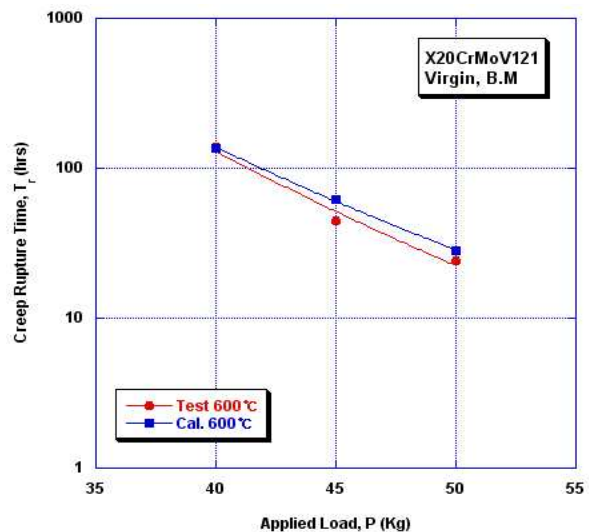


Fig. 3 The creep lives obtained by test and calculation using modified Power-law for X20CrMoV121 steel

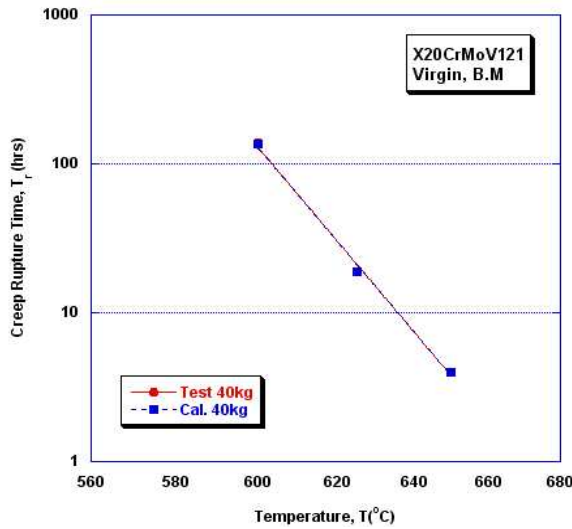


Fig. 4 The creep lives obtained by test and calculation using modified Power-law at 40kg for X20CrMoV121 steel

그림에서 볼 수 있듯이 무기력계수를 이용하여 얻은 예측값과 시험을 통하여 얻은 피로수명 값은 비슷한 양상을 보여 타당함을 알 수 있다. 또한, 하중이 증가할수록 파단수명이 짧아짐을 알 수 있었다.

4.1.2 크리프 조건에서의 수명

시험을 통하여 얻어진 값과 크리프수명식을 통한 해석값을 600°C, 625°C 그리고 650°C의 온도에서 동일하게 적용된 하중 40kg에 대하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 하중이 40kg으로 일정할 때 온도가 600°C, 625°C 그리고 650°C로 증가하면 파단수명이 짧아지는 경향을 보였다.

4.2 예측

피로와 크리프가 동시에 작용할 경우, 수명예측값과 크리프 시험 데이터와 비교하여 수명식의 타당성을 검토하였다. 피로와 크리프가 동시에 작용하면, 식 (5)에서와 같이 커플링효과가 발생할 것이다.

4.1절의 수명조건이 동시에 작용한다면, 즉 온도가 600°C이고 하중이 40kg에서 $\bar{\sigma}$ 와 \hat{T} 가 10%일 때, 피로와 크리프를 동시에 받는 조건에서의 수명을 예측한다.

$$\bar{\sigma} = 40 \text{ kg/mm}^2, \quad \bar{T} = 873^\circ \text{ K}$$

$$\hat{\sigma} = 4 \text{ kg/mm}^2, \quad \hat{T} = 87.3^\circ \text{ K}$$

$$\frac{1}{\left(\pi \left(\frac{\gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \pi \left(\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \right) \right)^{\frac{1}{4}}} \text{ 이면, 커플링 인자는}$$

$$\frac{1}{\left(\pi \left(\frac{\gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \pi \left(\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \right) \right)^{\frac{1}{4}}} = \frac{1}{(25.574)^{\frac{1}{4}}} = \frac{1}{2.25}$$

이는 온도와 하중이 동시에 변화했을 때에는 커플링 인자가 발생하여 수명이 각각 수명설계에 비해 $\frac{1}{2.25}$ 만큼 크게 감소됨을 보여주고 있다.

5. 결론

피로와 크리프에서 파단시간의 관계를 이용하여 무기력계수를 구하고 피로-크리프 통합수명식을 도출하였다.

미소시험편을 이용하여 X20CrMoV121강에 대해 온도와 하중별 파단수명의 타당성을 검토하고 온도와 하중이 동시에 작용하는 수명을 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) 도출한 크리프-피로 통합수명식은 다음과 같다.

$$L \geq \frac{\tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}}}}{\left[I_0 \left(2 \frac{\gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) I_0 \left(2 \frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

(2) 피로와 크리프가 각각 발생하는 경우보다 동시에 일어날 때 부재는 커플링효과에 의해,

$$\frac{1}{\left(\pi \left(\frac{\gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \pi \left(\frac{U_0 - \gamma \bar{\sigma}}{k \bar{T}} \frac{\hat{T}}{\bar{T}} \right) \right)^{\frac{1}{4}}} \text{ 만큼 열악한 상태에 놓인다.}$$

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

(1) Granacher, J., Klenk, A., Tramer, M., Schellenberg, G., Mueller, F. and Ewald, J., 2001, "Creep Fatigue Crack Behavior of Two Power Plant Steels,"

- International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 909~920.
- (2) Wilshire, B. and Burt, H., 2008, "Damage Evolution During Creep of Steels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 47~54.
- (3) Kim, W. G., Yoon, S. N., Ryu, W. S. and Yi, W., 2005, "Creep-Life Prediction and Standard Error Analysis of Type 316LN Stainless Steel by Time-Temperature Parametric Methods," *Trans. of the KSME A*, Vol. 29, No. 1, pp. 74~80.
- (4) Baek, S. S., Kwon, I. H., Kim, H. H., Lee, D. H. and Yu, H. S., 2004, "A Creep Damage Evaluation for Local Structure of Weldment using Hardness and SP-Creep Test," *KWS 2004-Autumn*, Vol. 43, pp. 144~163.
- (5) Lim, B. S., Kim, B. J. and Jin, M. J., 2004, "Effect of Hold Time on Crack Growth Behavior of Base Metal and HAZ in P92 Steel Weldment under Creep-fatigue Interaction," *KSAE Fall Conference Proceeding*, pp. 1369~1373.
- (6) Al-Mazrouee, A., Raman, R. K. and Ibrahim, R. N., 2005, "Effect of Post Weld Heat Treatment on the Oxide Scaling of Cr-Mo Steel Weldments," *Materials Processing Technology*, Vol. 164~165, pp. 964~970.
- (7) Souza, L. F. G. D., Bott, I. D. S. and Paranhos, R. P. P. R., 2005, "Microstructural Analysis of Single Pass 2.25% Cr-1.0% Mo Steel Weld Metal with Different Manganese Contents," *Materials Characterization*, Vol. 55, No. 15, pp. 19~27.
- (8) Yang, S. M., Kang, H. Y., Kim, H. G. and Song, J. H., 2002, "Fatigue Life Prediction of Bolted Joint in Vehicle Structures by the Lethargy Coefficient," *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 30, No. 1~2.
- (9) Yokobori, T. and Yokobori, T. A., 2001, "High Temperature Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction in Engineering Materials," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 903~908.
- (10) Lee, H. Y., Kim, Y. W. and Song, K. N., 2008, "Preliminary Application of the Draft Code Case for Alloy 617 for High Temperature Component," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 22, pp. 856~863.
- (11) Lee, C. M., Kim, C.W., Yu, H. S. and Yang, S. M., 2006, "Creep-Fatigue Life Design Using Lethargy Coefficient," *KSAE 06-H0013*, pp. 1~5.
- (12) Oxtoby, D. W., Gillis, H. P., Campion, A., 2008, *Principles of Modern Chemistry*, 6th Edition, Science-Plus, Seoul, pp. 87~101, pp. 354~365.