

Cu 순금속의 사이클릭 크리프 변형

정순억*, 이현식**.

Cyclic Creep Strain of Cu Pure Metal

S. U. Jeong, H. S. Lee.

Key Words: Cyclic creep(사이클릭 크리프), TTP(Time Temperature Parameter), LMP(Larson-Miller Parameter), OSDP(Orr-Sherby-Dorn Parameter), MHP(Manson-Hafner Parameter)

Abstract

The creep rate is affected by the temperature and in fact, if the temperature above $T_M/2$ (T_M : melting point). The aim of the present investigation is to study the relationship of static creep and cyclic creep behavior of pure copper and the formulation of these phenomena with the special attention to the instantaneous strain. strain rate from time and number of cycles have the same inclination. Steady state creep rate depend upon maximum stress and can be expressed as linear function according to power law creep equations. Creep rupture time has relation with creep rate, and it make a group represented as the same direct line regardless of max. stress, stress ratio and the temperature. Initial strain effect on continuous creep deformation, and have quantitative relationship between elastic and plastic strain. LMP have similar tendency than OSDP and MHP according to temperature.

1. 서론

재료에 어떤 일정한 하중을 가하고 어떤 온도에서 긴 시간동안 유지하면 시간이 경과함에 따라 변형이 증가하게 된다. 이 현상을 크리프(creep)라 한다^{1,2)}. 크리프속도는 온도의 영향이 크며 실제로 금속에서는 $T_M/2$ (T_M : 용점) 이상의 온도가 되면 실용적으로 크게 문제가 된다³⁾.

따라서, 고온용 재료의 경우 크리프 변형 저항의 해석은 중요한 의미를 가지며, 특히 용융점이 낮은 금속, 예를 들면 연(Pb), 구리(Cu) 등의 순금속은 250℃ 이상의 온도가 되면 현저한 크리프 현상이 발생한다.

그리고, 사이클릭의 경우는 정적(순수) 크리프 시험보다 더욱 복잡한 응력과 변형과정을 고려해야만 한다. Cu 순금속의 크리프 변형에서 반드시 수반되는 초기연신을 측정하여 이후의 크리프 탄, 소성 변형과정과의 연관성 조사⁴⁾와 TTP(LMP, OSDP, MHP)의 적용에 대한

연구 보고^{5,6)}는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 비교적 고온 변형이 용이한 순금속인 구리의 정적 크리프와 사이클릭 크리프 현상에 대한 상관성을 해석하고, 초기순간변형 중의 탄소성 변형 해석 및 TTP의 특성을 연구하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에서 이용한 재료는 400℃에서 2.5시간 풀립 처리한 순수한 구리로서 KS D2301 규정에 따라 전기분해에 의해 Cu 99.9% 이상의 순도를 가진 것으로서 화학 성분은 Table 1에 나타냈다.

*경상대

**경상대 대학원

Table 1. Chemical composition of Cu material(wt.%).

Cu	As	Sb	Bi	Pb	S	Fe
99.95	0.003	0.005	0.001	0.005	0.010	0.010

구리의 상온 인장강도는 24.9kg/mm², 0.2% offset 항복강도 3.5kg/mm², 연신율 40%로 나타났다. 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타냈으며 치수공차는 ±0.01으로 CNC 선반으로 가공한 후 #1000 사포로 표면을 연마하였다. 표점 거리를 50mm로 하여 고온 스트레인 게이지를 부착하기 위한 플레지(flange)부를 가공하였다.

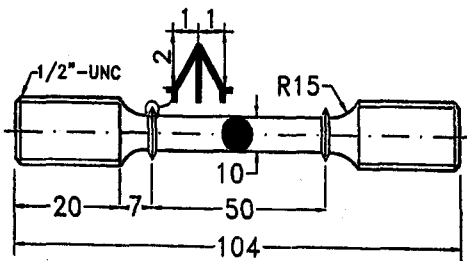


Fig. 1 Cyclic creep test specimen.

2.2 실험방법

사이클릭 하중의 부가는 단식 레버형 사이클릭 크리프 시험기(DYCT-10TC)를 사용하였다.

시험편을 가열하는 로는 온도 조절 장치를 구비한 것으로 열전대의 접점은 시험편의 표면과 열적으로 잘 접촉하고 노벽으로부터 방사열을 피할수 있도록 차폐 하였으며, 로내의 부분은 절연되도록 하였다. 또한, KS B0814규정에 따라 표점 거리가 50mm를 초과하는 시험편의 온도는 표점거리의 양 끝부와 중앙부 3곳에 측정된 후 그 평균치를 취한 값으로 하였으며, 본 실험에서는 400℃와 500℃에서 ±2℃의 편차가 발생됨을 확인하였다.

그리고, 시험편의 열평형을 위해 실험시작 16~24 시간전에 로를 가열시킨 상태에서 승온시간 및 균열시간을 기록하였으며, 0.01mm 정확도를 가진 연신계(LVDT)를 사용하여 변형률을 측정하고 표점거리 편차는 ±1% 이내로 하였다.

신장량은 AD Converter가 부착된 Personal Computer를 사용하여 0.1초 간격

으로 측정하였다. 사이클릭 응력은 Fig. 2에 도시하는 것처럼 실험 개시 시점에서 부터 적용하여 최소응력(σ_{min})에서 최대응력(σ_{max})에 이르기까지 하중을 로드셀에 의해 비교 확인 하였으며, 이에 대한 응력비는 $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ 로 규정된다.

μ 는 σ_{max} 의 유지시간 비이므로 σ_{min} 은 $1-\mu$ 가 된다. τ 는 주기당 유지시간으로 본 실험에서는 τ 를 20min으로 하였다.

실험조건은 Table 2와 같이 최대응력을 5단계, R을 4단계로 다양하게 변화시키면서 수행하였다.

Table 2. Cyclic creep test condition.

Temp(℃)	σ_{max} (kg/mm ²)	R				
		1	0.8	0.3	0	
400	6	1	0.8	0.3	0	
	5	1	-	0.3	0	
	4	1	-	-	0	
	3	1	-	-	-	
500	5	1	0.8	0.3	0	
	4	1	0.8	0.3	0	
	3	1	0.8	0.3	0	

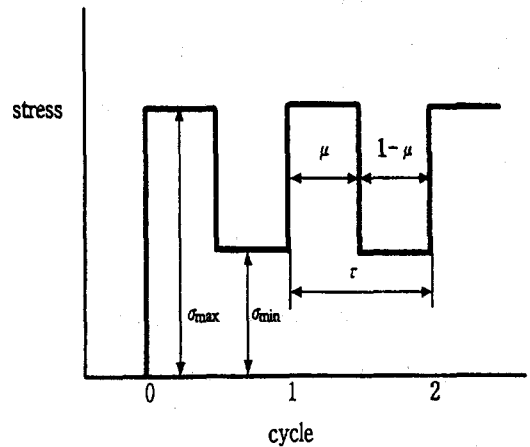


Fig. 2 Schematic diagram of cyclic creep test.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 최대응력이 크리프 속도에 미치는 영향

400℃, 500℃의 크리프 시험에서 최대응력(σ_{max})이 크리프 속도($\dot{\epsilon}$)에 미치는 상관성을 Fig.

3에 도시하였다. σ_{max} 와 $\dot{\epsilon}$ 의 상관관계를 수식으로 표현하기 위해 단순선형 회귀모형을 활용하여 400°C의 경우에 Norton의 Power law 크리프를 적용하면 다음과 같은 식으로 나타났다.

$$\begin{aligned}
 R=1, \log \dot{\epsilon} &= 3.57 \times (\log \sigma_{max})^{-2.48} \\
 R=0.8, \log \dot{\epsilon} &= 4.59 \times \log(\sigma_{max})^{-3.55} \\
 R=0.3, \log \dot{\epsilon} &= 4.89 \times \log(\sigma_{max})^{-3.55} \text{-----(1)} \\
 R=0, \log \dot{\epsilon} &= 5.22 \times \log(\sigma_{max})^{-3.87}
 \end{aligned}$$

이므로 응력비 (R)을 고려하면 다음과 같은 식이 도출 되었다.

$$\log \dot{\epsilon} = (5.31 - 1.26R) \log \sigma_{max}^{(-3.93 + 1.06R)} \text{-----(2)}$$

따라서, 크리프속도는 최대응력과 R의 선형함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 한편, 500°C에서도 유사한 경향으로 나타남을 알 수 있다.

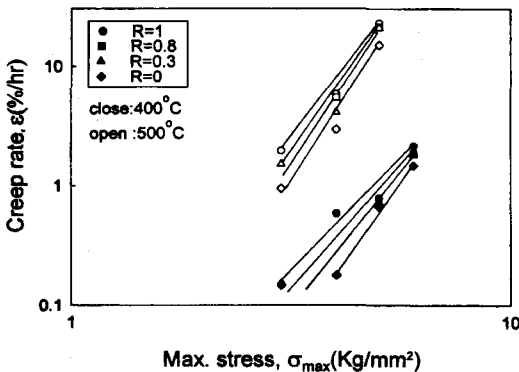


Fig. 3 Relationship between maximum stress and cyclic creep rate.

3.2 정상 크리프 속도와 파단시간의 상관성

정상 크리프 속도 ($\dot{\epsilon}$)와 파단시간(RT)의 상관성을 조사하기 위해 Table 3에 의해 RT와 $\dot{\epsilon}$ 의 상관관계를 도시한 결과 Fig. 3과 같다. 여기서 RT와 $\dot{\epsilon}$ 의 상관성을 단순선형 회귀모형으로서 다음과 같이 모델화 될 수 있었다.

$$\log \dot{\epsilon} = -1.113 \log (RT) + 0.788 \text{-----(3)}$$

여기서, RT와 $\dot{\epsilon}$ 의 관계는 σ_{max} , R 및 시험온도에 관계 없이 동일 직선상에 군집함을 알 수 있었다.

Table 3. Creep rupture test results.

σ_{max}	400°C		σ_{max}	500°C	
	RT(hr)	$\dot{\epsilon}$ (%/hr)		RT(hr)	$\dot{\epsilon}$ (%/hr)
6	2.88	2.1612	5	0.283	22.6923
	3.08	1.8666		0.350	21.111
	3.27	1.7931			
	3.42	1.4761			
5	7.65	0.7941	4	-	15.00
	7.58	0.7352		0.650	5.833
	8.15	0.6756		0.733	5.4901
4	10.58	0.5074	3	1.417	4.130
	-	0.1810		-	2.9696
3	34.22	0.1583	3	1.666	1.9696
				-	1.600
				2.720	1.5151
				3.733	1.0545

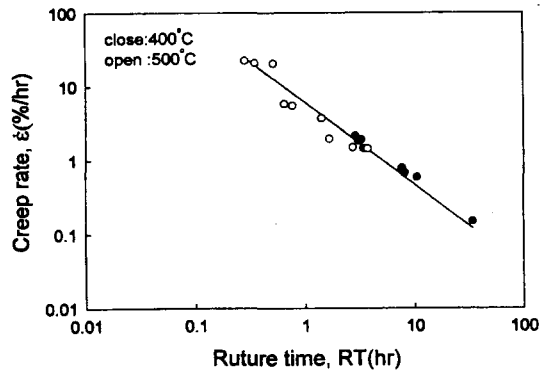


Fig. 4 Relationship between rupture time and steady state creep rate at 400°C and 500°C.

3.3 초기순간 변형률의 탄성변형률 해석

400°C와 500°C에서 응력이 비교적 낮은 경우에 초기순간 변형률(initial instantaneous strain)은 크리프 변형초기의 탄, 소성변형으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_0 = \epsilon_e + \epsilon_p \text{-----(4)}$$

여기서, ϵ_0 : 초기 순간변형, ϵ_e : 탄성변형

Table 4. Elastic and plastic strain in the initial stain.

Temp(°C)	σ_{max} (kg/mm ²)	ϵ_0 (%)	E (kg/mm ²)	ϵ_e (σ_{max}/E)	ϵ_p (%)
400	3	0.42	2.856	1.0504×10^{-3}	0.4190
		4		1.09	1.4006×10^{-3}
	0.92			1.4006×10^{-3}	0.9186
	1.46			1.7507×10^{-3}	1.4582
	1.41			1.7507×10^{-3}	1.4082
	1.53			1.7507×10^{-3}	1.5282
	2.15			2.1008×10^{-3}	2.1479
	6	2.00		2.1008×10^{-3}	2.2079
		2.46		2.1008×10^{-3}	2.4579
		2.10		2.1008×10^{-3}	2.0979
		0.85		1.6666×10^{-3}	0.8483
	500	3		0.24	510
0.81			1.5882×10^{-3}	0.8084	
0.18			0.3529×10^{-3}	0.1796	

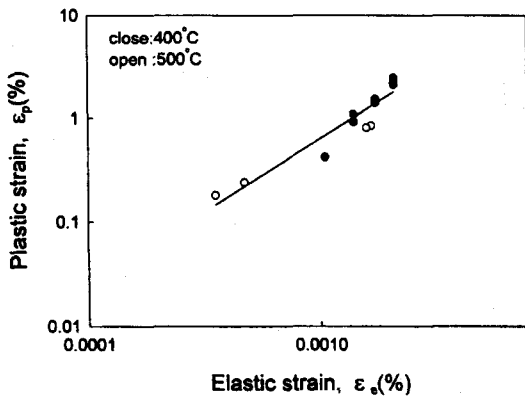


Fig. 5 Relationship between plastic strain and elastic strain.

ϵ_p : 소성변형이다. (4)식을 변형시키면 다음과 같이 된다.

$$\epsilon_p = \epsilon_0 - \epsilon_e \quad (5)$$

여기에서 ϵ_e 는 Hooke의 법칙에 의해 σ_{max}/E 으로 다시 표시할 수가 있으며, E(400°C, 500°C에서의 탄성계수)는 2,586kg/mm², 510kg/mm²로 나타났⁸⁾.

이러한 소성 변형의 크기는 연속적으로 일어나는 사이클릭 크리프를 해석하는데 매우 유용하며, 각 변형률의 수치를 식 (4), (5)로부터 구하

여 Table 4에 표시하였다.

ϵ_p 와 ϵ_e 의 상관 관계를 Fig. 5에 도시하였다. 그리고, 양자는 선형적인 상관성을 가지며 다음과 같이 모델화 될 수 있었다.

$$\epsilon_p = 2.383 \times 10^6 \times (\sigma_{max}/E)^{2.454} \quad (6)$$

식 (6)과 실험 데이터는 $r^2=0.95$ 로서 상호 잘일치 하는 것으로 나타났다.

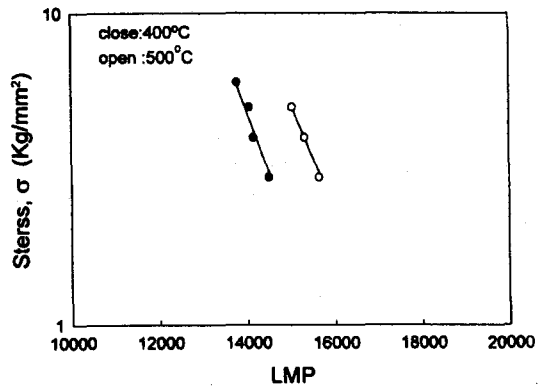


Fig. 6 LMP of Cu metal.

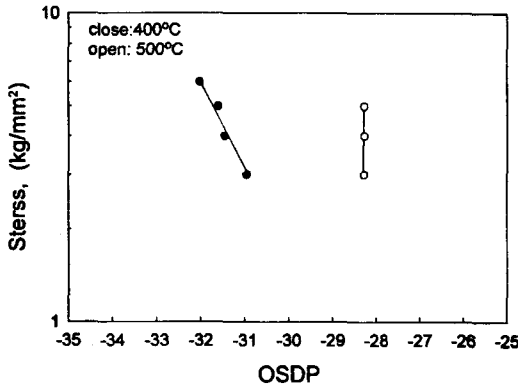


Fig. 7 OSDP of at Cu metal.

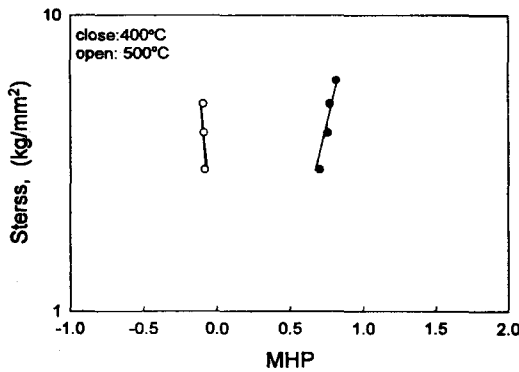


Fig. 8 MHP of Cu metal.

3.4 TTP법의 적용

400°C, 500°C의 크리프 파단시험의 결과로부터 장시간의 결과를 추정하거나, 응력 및 온도를 변수로 하여 크리프 파단수명을 예측하기 위한 TTP로서 LMP, OSDP, MHP를 Table 5에 나타냈다.

Table 5. Static creep data for TTP.

Temp (°C)	Stress	RT(hr)	LMP	OSDP	MHP
400	3	34.22	14495.80	-30.952	0.700
	4	10.58	14152.63	-31.462	0.754
	5	7.65	14057.83	-31.603	0.770
	6	2.88	13772.24	-32.027	0.815
500	3	1.666	15634.38	-28.063	-0.086
	4	0.65	15918.35	-28.472	-0.0913
	5	0.283	15039.15	-28.833	-0.0953

이상을 종합하면 Fig. 7의 OSDP와 Fig.8의 MHP는 온도의 영향이 뚜렷하여 각각 독립적인 경향으로 나타났다. 그러나 Fig. 6의 LMP는 온도에 따라 유사한 경향을 보이면서 온도가 높을수록 LMP값이 높은 것으로 나타났다. 400°C의 경우 LMP 실험식은 다음과 같다.

$$\ln \sigma = -1.019 \times 10^{-3} (LMP) + 15.858 \text{ ---- (7)}$$

한편, MHP의 경우는 LMP, OSDP와 달리 400°C의 경우 파라미터가 더 크게 나타났다. 향후 MSP, MBP, MC법 등을 포함한 이 부분에 대한 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

400°C 및 500°C에서 Cu 순금속의 cyclic creep 변형에 대한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 크리프 속도는 최대응력과 응력비(R)에 따라 좌우되며, R의 선형함수로 나타낼 수 있었다.

2) 크리프 파단수명은 정상 크리프속도와 정량적인 상관관계가 있음을 알수 있으며, 최대작용 응력, R 및 시험온도에 관계없이 동일직선상에 군집함을 알 수 있었다.

3) 초기순간변형은 이후의 탄소성 크리프변형에 연속적으로 영향을 미치며, 낮은 응력에서 소성 변형률과 탄성변형률은 선형적인 상관관계가 존재한다.

4) TTP의 적용시 LMP는 온도에 따라 유사한 특성을 보였으나 OSDP와 MHP는 온도에 따라 뚜렷이 다른 경향을 보였으며, MHP의 경우 LMP, OSDP와 다르게 400°C의 경우에 수치가 더 높게 나타났다.

참고문헌

1. Skelton, R. P. 1983. "Fatigue at high temperature", Applied Science Publishers, London and New York, pp. 135

~ 185.

2. 조용이, 김희승, 1993, "A17075 합금의 고온 크리프 활성화에너지의 상태 의존성", 대한기계학회논문집, pp. 131 ~ 140.
3. 이익선, 홍성경, 1994, "코스틱스 방법을 이용한 고온 크리프 파괴 현상에 관한 연구", 대한기계학회논문집, pp.2543 - 2553.
4. 오세규, 정순억, 한상덕, 1993, "화력 발전용 로터강의 초기 변형율이 Cyclic 크리프 특성에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집, pp.79 ~ 86.
5. Yokoi, I., Ikeda, S. and Tto, H., 1979, "Current Status of NRIM Creep Data Sheet Project", Iron and Steel, pp.2076~2087.
6. Fujita, T. and Monma, Y., 1984, "Accuracy of Extrapolation for Creep-rupture Strength and Standardization of Extrapolation Methods", Iron and Steel, pp.327~335.
7. Norton, F. H., 1929, "The Creep of steel at High Temperature", Mcgraw-Hill, New york, pp. 67.
8. Ishikawa, H., 1987, "Relation Between Cyclic Creep and Pure Creep on Copper", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.109, pp. 221.