

Zirconium계 합금의 Creep특성

임성혁, 임종국*, 김경환, 최재하

충북대학교 공과대학 재료공학과

*충주산업대학교 안전공학과

The Creep Characteristics of Zirconium-base Alloy

S.H. Im, S.K. Rhim*, K.H. Kim, J.H. Choi,

Department of Materials Engineering, Chungbuk National University

Department of Safety Engineering, Chungju National University

ABSTRACT

The-steady-state creep mechanism and behavior of Zircaloy-4 used as cladding materials in PWR have been investigated in air environment over the temp. ranges from 600 to 645°C and stress ranges from 4 to 7kg/mm². The stress exponents for the creep deformation of this alloy, n were decreased 4.81, 4.71, 4.64, and 4.56 at 600, 615, 630 and 645°C, respectively; the stress exponents decreased with increasing the temperature and got closer to about 5. The apparent activation energies, Q , were 62.1, 60.0, 57.9 and 55.4 kcal/mole at stresses of 4, 5, 6, 7kg/mm², respectively; the activation energies decreased with increasing the stress and were close to those of volume self diffusion of Zr in Zr-Sn-Fe-Cr system. In results, it can be considered that the creep deformation for Zircaloy-4 was controlled by the dislocation climb over the ranges of this experimental conditions. Larson-Miller parameter, P , for the crept specimens was obtained as $P=(T+460)(\log t, +23)$. The failure plane observed by SEM slightly showed up intergranular fracture at this experiment ranges. However, it was essentially dominated by the dimple phenomenon, which was a characteristics of the transgranular fracture.

1. 서 론

전 세계적으로 원자로내의 핵연료 피복재료로 사용되고 있는 Zr-base합금 중 Zircaloy-4는 기계적 성질과 내식성을 향상시키기 위하여 개발된 것이며, 중성자 흡수 단면적이 Zircaloy 계열중 가장 작고 방사선 조사후에도 우수한 기계적 성질과 내식성을 유지하여 오래전부터 원자력 발전소의 가압경수로(PWR)의 핵연료 피복관 및 구조재로서 널리 사용되고 있다. Zr-base합금과 같이 열중성자의 흡수단

면적이 매우 작아 연쇄반응(chain reaction)을 멈추지 않고 사용 가능하게 해주는 금속에는 Zr이외에도 Al, Mg, Be등이 있으나 Al, Mg은 용점이 낮아 고온강도와 부식측면에서 적합하지 않으며, Be은 취성이 있어 소성가공성이 불량하고 값도 비싸다, Zr의 creep mechanism에 관한 최초의 연구는 Ardell과 Sherby¹⁾와 Bernstein²⁾에 의해서 이루어졌는데, 그들은 Zircaloy-2(Zr-1.5w%Sn-0.15w%Fe-0.1w%Cr-0.5w%Ni)에 대해서 static creep 실험을 온도범위 520~620°C, 응력범위 0.35~7kg/mm²에

서 연구한 결과, 응력범위 2kg/mm^2 이하에서는 응력지수 n 은 1이며, 응력범위 $2\sim 7\text{kg/mm}^2$ 에서는 응력지수 n 은 $4.5\sim 5.5$ 값을 갖는다고 하였다. 또한 Holmes³⁾는 Zircaloy-2에 대해 온도범위 $50\sim 500^\circ\text{C}$, 응력범위 $14\sim 21\text{kg/mm}^2$ 에서 creep 실험을 하였는데 285°C 이상에서 static creep에 필요한 활성화에너지 값은 58.5kcal/mole 로 Zr의 자기 확산에 필요한 활성화 에너지 값과 유사하였으며 dislocation climb에 지배되는 creep이었다고 주장하였다. 또한, McInteer⁴⁾은 $0.5T_m$ 의 비교적 낮은 온도에서 Zr과 Zr합금의 주된 creep변형은 slip속도를 제한하는 방해물(용질원자, dislocation networks, intermetallic particle) 주위의 dislocation climb에 의하여 조절된다고 하였다. Zircaloy-4는 미국에서 개발한 것으로 일본에서 1958년 개발한 Zircaloy-2에서 수소화물을 형성시키는 주원인인 Ni를 제거하고 Fe량을 약간 증가시킨 합금이다⁵⁾. Zircaloy-4의 creep 실험을 Rosinger, Bera 그리고 Clending⁶⁾이 1979년에 $667\sim 1600^\circ\text{C}$ 구간에서 행하였는데, 그들은 $10^{-6}\sim 10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형속도로 실험하여 Power law-Arrhenius 식에 의해 활성화 에너지를 구하였으며, Choi⁷⁾는 Zircaloy-4의 creep 실험에서 응력지수 n 값은 5에 수렴하며, 활성화에너지는 Zr의 자기 확산에 필요한 활성화에너지 값과 유사하다고 하였다. Zircaloy-4의 creep속도는 transient fuel 거동을 다루는 컴퓨터에 입력시킬 자료중 가장 기본적인 것 중에 하나이다. fuel cladding 재료에 대한 변형성질을 알아야 가능하며 응력-변형-온도-시간 관련성을 이해하므로써 가능하다.

본 연구에서는 현재 원자로 내의 핵피복재료로 사용되고 있는 Zircaloy-4의 static creep 실험을 온도범위 $600\sim 645^\circ\text{C}$, 응력범위 $4\sim 7\text{kg/mm}^2$ 에서 행하여 얻은 자료로부터 creep 응력지수 n 값과 활성화에너지 Q 값을 구하여 creep mechanism을 규명, 크립파단 수명 예측, creep속도의 경험식을 산출하고 SEM을 이용해 파단양상을 규명하여 원자로에서 본 재료의 사용안정범위를 예측하고 보다 나은 재료개발

의 기초자료로 활용코져 한다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 재료는 Zr계 합금인 Zircaloy-4로서 미국의 Teledyne Wha Chang, Albany에서 제조한 어닐링 처리된 두께 1mm 의 판상으로, 그 조성은 Fig. 1과 같고, 재료를 인장방향과 압연 방향이 평행하도록 하여 gauge length가 25mm 인 인장크립 시편으로 방전가공하였다. 시편의 결정 입도는 불산 5%, 질산 45%와 물 50%를 혼합한 부식액으로 부식한 후 광학현미경으로 측정된 결과 평균 입도는 $17\mu\text{m}$ 이었다. 현미경 조직사진은 Photo 1에 나타나 있다.

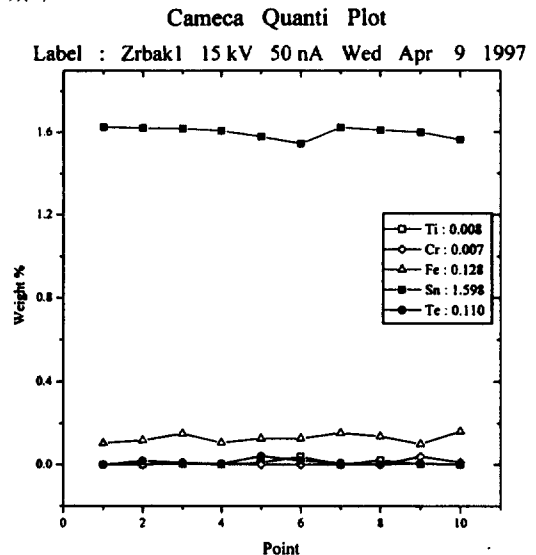


Fig. 1. EPMA analysis of chemical composition of Zircaloy-4.

creep 시험기는 변형량이 증가함에 따라 시편의 단면적이 감소하여 시편에 작용하는 하중은 일정하나 응력이 증가하는 constant load creep 시험기와 시편의 변형에 따라 단면적이 감소하여 하중이 감소하는 constant stress creep 시험기 두 종류가 있는데, 본 실험에서는 creep 변형을 지배하는 creep 변형기구를 정확하게 해석하기 위하여 변형의 증가와 무관하게

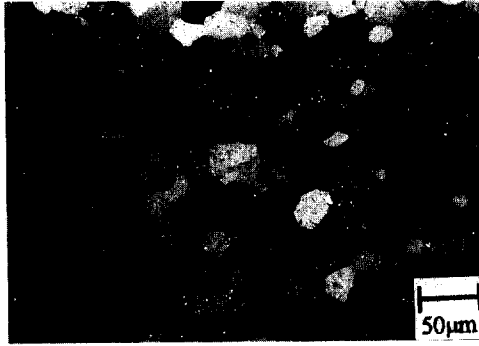


Photo. 1. Microstructure of the specimen.

항상 일정한 응력이 유지되는 constant stress creep시험기를 제작 사용하였다. 이 시험기는 1910년 이후 여러 가지 개발되었으나, 본 실험에서는 비교적 간단하면서도 정확하여 널리 사용되는 Andrade와 Chalmer⁹⁾ 등이 개발한 lever-beam model을 채택하였고 cam system의 크기 및 형태에 의해 시편의 초기 길이가 결정되는 단점을 배제하기 위하여 Garofalo등⁸⁾의 착안을 기초로 하여 cam lever에서 초기하중의 위치가 바뀌어 시편의 초기 길이가 변하여도 한가지 cam으로 사용할 수 있게 하였으며, 이 때 cam은 강도와 무게를 고려하여 두랄루민으로 제작하였다. 또한 시편의 loading시 적당한 조절과 하중을 맞추기 위해 Balance cam을 Loading cam의 반대 방향에 역으로 부착시켰고¹⁰⁾, lever arm의 비가 1:15가 되게 하였으며 변형량의 100%까지 측정할 수 있게 하였다. 실험장치는 Fig. 2와 같다. 일정한 시험온도를 유지하기 위해 니크롬선 개폐식 수직관상로를 사용하였고, 노내에는 석영관을 장치하여 열분포를 균일하게 하였다. 또한 시편의 정확한 온도를 측정하고 유지하기 위하여 시편중심부 위에 K-type 열전대를 접촉시키고, 비례식 온도조절기에 연결하여 온도변화를 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하로 되도록 하였다. Creep 변형량은 Schavitz 사의 500HR

LVDT(Linear variable differential transformer)를 이용하고 출력 전압을 CAS signal conditioner로 정류 증폭하여 연결된 recorder에서 0.5×10^{-6} 까지의 변화량을 측정 가능하게 하였다. 또한 creep 파단면의 파단기구를 규명하기 위해 파단된 시편의 파단부를 1.0cm 정도의 크기로 절단하여 아세톤 용액에서 1시간 동안 초음파 세척후 주사전자현미경 SEM(JEOL JSM-5410)으로 파단 양상을 관찰하였다.

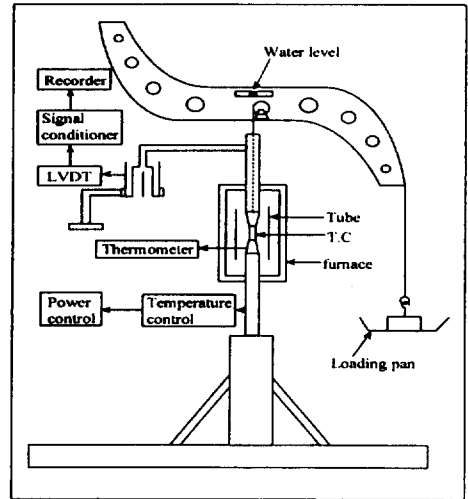


Fig. 2. A schematic diagram of constant stress creep tester.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 실험조건은 $600 \sim 645^\circ\text{C}$ 의 온도 영역과 $4 \sim 7\text{kg/mm}^2$ 의 응력범위에서 온도와 응력을 변화시켜 주면서 static creep실험에 의한 결과를 시간 증가에 대한 진변형($\epsilon - \epsilon_0$)으로 도시한 결과, Fig. 3~6에서 보는 바와 같이 creep곡선은 전 구간에서 normal creep을 나타내었다. 실험온도나 재료의 가공 경력, 재료의 조직적 특성에 따라서 creep 곡선의 모양이 다르게 나타날 수 있으나, 정상적인 creep 곡선을 보면 변형 초기 영역(primary creep stage)에

서는 시간에 따라 변형 속도가 느려지다가 정상상태 creep 영역(steady state creep stage)에 이르러 변형속도가 일정해진 후 계속하여 변형이 진행되며 변형 속도가 점차적으로 빨라지게 되는 3차 creep 영

역(tertiary creep stage)에 이르게 되고 결국 파단에 이르게 된다. 이들 곡선으로부터 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다.

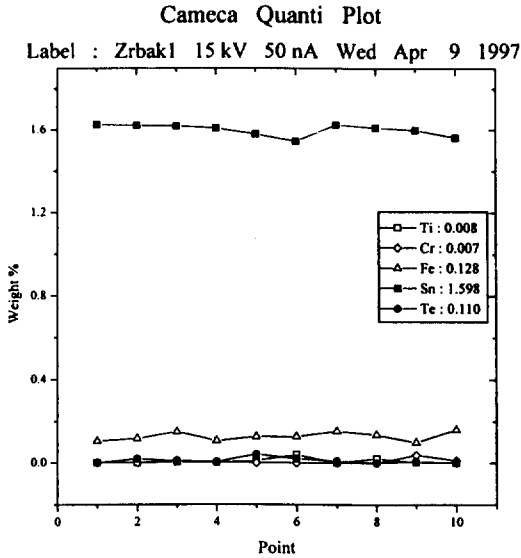


Fig. 3. Typical creep curves for Zircaloy-4 at 600°C.

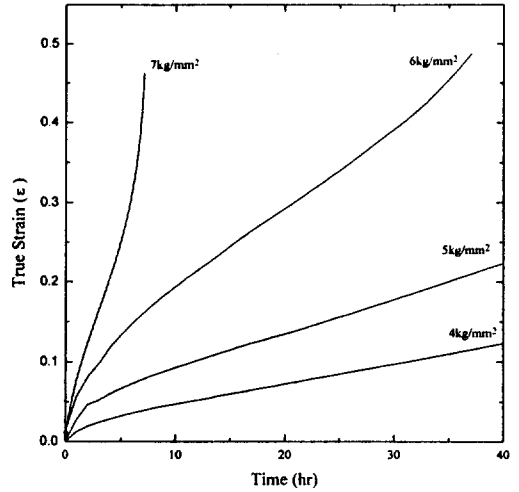


Fig. 5. Typical creep curves for Zircaloy-4 at 630°C.

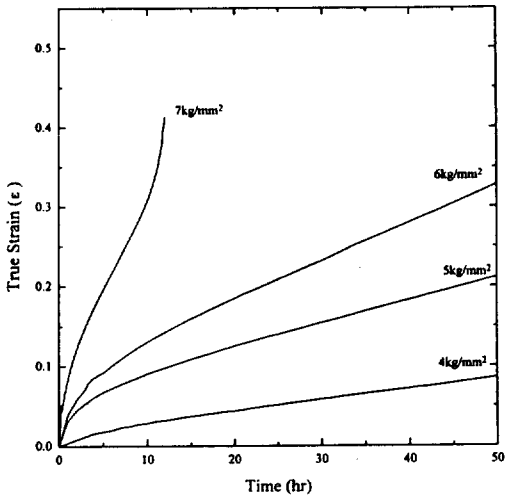


Fig. 4. Typical creep curves for Zircaloy-4 at 615°C.

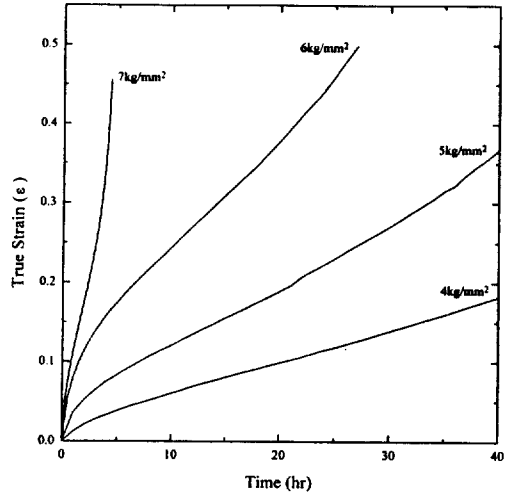


Fig. 6. Typical creep curves for Zircaloy-4 at 645°C.

Table 1. Experimental creep data.

Temp (°C)	Stress (kg/mm ²)	Initial strain, ϵ_0	Creep rate (hr ⁻¹)	Rupture time(hr)
600	4	0.0181	5.84×10^{-4}	-
	5	0.0217	1.49×10^{-3}	-
	6	0.0252	3.21×10^{-3}	-
	7	0.0294	8.80×10^{-3}	38.16
615	4	0.0202	1.20×10^{-3}	-
	5	0.0234	2.84×10^{-3}	-
	6	0.0286	6.02×10^{-3}	70.00
	7	0.0310	1.79×10^{-2}	12.11
630	4	0.0224	2.18×10^{-3}	-
	5	0.0257	4.75×10^{-3}	74.2
	6	0.298	1.09×10^{-2}	29.21
	7	0.0341	2.87×10^{-2}	-
645	4	0.0249	3.45×10^{-3}	101.26
	5	0.0284	9.34×10^{-3}	-
	6	0.0321	1.67×10^{-2}	-
	7	0.0366	4.22×10^{-2}	4.00

본 실험은 일정응력 조건하이므로 2차구간의 creep 속도인 steady state creep 속도를 $\dot{\epsilon}$ 로 표시함을 밝혀둔다. 한편 creep rupture된 시편의 표면과 내부의 경계를 주사전자현미경으로 조사해 본 결과 시편 표면 부위에는 산화물로 여겨지는 치밀한 막이 형성되었으나, 시편 단면적에 대한 산화 피막의 단면적은 1% 이하로 측정되었으며 따라서 산화피막이 creep속도에 미치는 영향은 시험오차 범위내에서 무시될 수 있겠다.

Creep이란 전위의 점진적인 이동에 의하여 변형을 유발하는 것으로 시간에 의존하는 열적활성화 과정이라 할 수 있는데, creep 시험시 응력이 가해지면 전위들이 상호작용으로 얽혀 경화되기도 하며, 이 얽힌 전위들이 일정온도, 일정응력하에서 시간이 경과함에 따라 풀려나가 회복되는데 정상상태 creep영역에서는 경화속도와 연화속도의 비가 일정하여 일정한 creep속도를 보이게 된다. 회복의 방법은 dislocation gliding에 의한 것과 dislocation climb에 의한

방법으로 대별될 수 있다. Zircaloy-4의 creep에 대하여 연구한 Rosinger, Bera 그리고 Clending⁹⁾의 연구보고에 의하면 steady-state creep속도 $\dot{\epsilon}$ 의 응력의존성은

$$\dot{\epsilon} = (f(\epsilon, T, \sigma, ST)) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ϵ 는 strain, T는 absolute temperature, σ 는 applied stress, ST는 structure이다.

Dorn¹¹⁾은 dilute metal이나 dilute solid solution alloy의 steady-state creep은 일반적으로 다음과 같은 Power law-Arrhenius equation을 따른다고 하였다.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon} = A(\sigma, T, ST)\sigma(\epsilon)^{n(\sigma, T, ST)} \cdot \exp[-Q(\sigma, T, ST)/RT] \dots \dots \dots (2)$$

여기서 R은 기체상수이고 Q는 자기확산에 필요한 활성화에너지와 관련있는 값이다.

Dorn¹¹⁾은 순금속이나 고용체합금에서 응력지수, n값은 항상 4보다 크고 7보다 작다고 하였고, Weertman¹²⁾은 creep변형이 dislocation gliding에 의해 지배될 때 응력지수 값은 3이 된다고 보고한 바 있으며, 또한 dislocation climb이 creep변형을 유효할 경우 응력지수 5가 된다고 보고한 바 있다.¹³⁾ Ardell과 Sherby¹¹⁾는 α -Zirconium에 대하여 응력지수, n값은 응력이 증가함에 따라 7.5에서 4.7로 감소하였다고 보고했다. Fig. 7에 가해진 응력에 따른 creep속도의 변화 및 응력지수, n값을 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 600, 615, 630, 645°C에서 각각 4.81, 4.71, 4.64, 4.56으로 온도가 증가함에 따라 n값은 다소 감소하는 경향을 보이나 약 5정도의 값에 근사하다는 것을 보여주고 있으며 일반적으로 creep 변형을 dislocation climb이 주도할 때 응력지수, n값은 4.2~6.9이므로 본 실험 결과로부터 Zircaloy-4의 steady-state creep변형기구가 dislocation climb에 의해 주도된다고 사료된다.

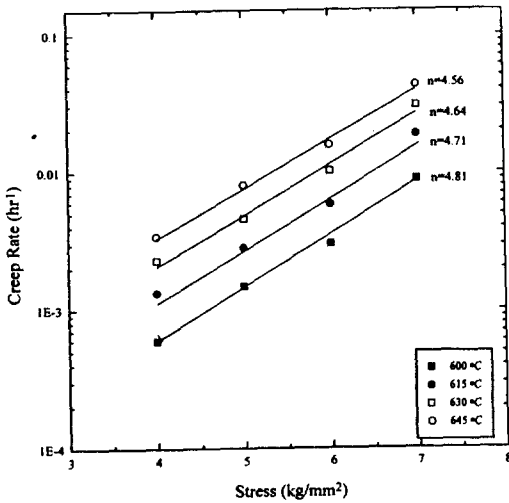


Fig. 7. Dependence of applied stress on steady-state creep rate.

Creep 변형은 활성화 과정에 의하여 서서히 진행되는 시간에 따른 변형이므로 Arrhenius eq. type의 속도식을 이용하여 creep 변형에 필요한 활성화 에너지를 구할 수 있다. 이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots(3)$$

정상상태 creep 변형속도의 온도 의존성은 Fig. 8에 도시되었다. Zircaloy-4의 변형이 열적으로 활성화 된다고 가정하면 steady-state시 변형속도, $\dot{\epsilon}$ 는 다음식으로 표시될 수 있다고 Gifkins⁽⁴⁾에 의해 제안되었다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{AG}{KT} \left(\frac{b}{D}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

여기서 p, A는 상수, G는 전단계수, K는 볼츠만 상수, b는 버저스 벡터, D는 입자 크기이다.

그에 의해서 지적된 것처럼 Q의 의미있는 값을 구하기 위해서는 온도범위는 응력지수가 상수 값을 갖도록 선택되어야 하며 σ/G 가 특정값일 경우 변형기

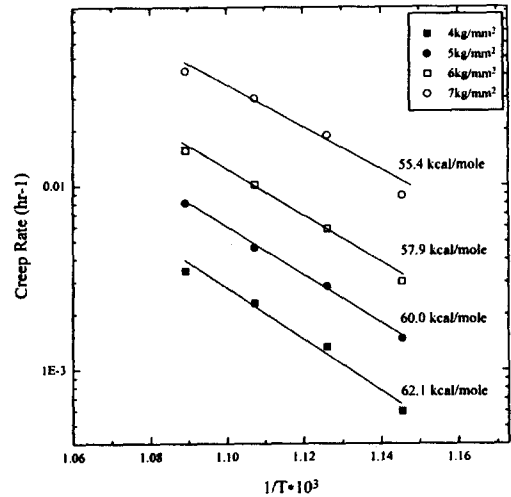


Fig. 8. Steady-state creep rate v. temperature plot for Zircaloy-4.

구에 변화가 없도록 선택되어야 할 것이다. Q는 (4)식에서 보듯이 σ 또는 σ/G 가 일정한 조건하에서 변형속도 혹은 보정된 변형속도를 $1/T$ 에 따라 plot하여 그 기울기로부터 구해질 수 있다.

$$Q = -R \frac{d \ln(\dot{\epsilon})}{d(1/T)} \dots\dots\dots(4)$$

본 실험에서는 $1/T$ 에 대한 $\ln \dot{\epsilon}$ 를 plot하여 그 기울기로부터 Q값을 구했으며, 이때 Q값은 Fig. 8에서 보듯이 가해진 응력, σ 가 4, 5, 6, 7kg/mm²로 증가함에 따라 62.1, 60.0, 57.9, 55.4kcal/mole로 감소하는 경향을 보여주는데 이 사실은 다음과 같이 설명된다. 즉 apparent activation energy는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$Q_{app} = Q_{SD} - \sigma_e \cdot \Delta V \dots\dots\dots(5)$$

여기서 Q_{SD} 는 자기확산에 필요한 활성화 에너지, σ_e : 유효응력, ΔV : 활성화 체적이다. (5)에서 $\sigma_e \Delta V$ 는 "athermal"항으로서 가해진 응력이 증가함에 따라 증가한다. 따라서 정성적으로 σ 가 증가할 때

Q_{app} 는 감소하게 됨을 알 수 있으며 Fig. 8의 data 는 이를 잘 설명해 준다. 일반적으로 0.6Tm이상의 고온에서 대부분의 다결정 재료들의 creep변형에 필요한 활성화 에너지는 자기 확산에 필요한 활성화에너지와 일치한다는 사실이 여러 학자들에 의하여 증명되었다. 한편 I.M. Bernstein²⁾이 Zircaloy-2에 대해서 creep실험을 520~620℃ (0.4Tm 근처)에서 행하였는데 그는 응력이 2-7kg/mm²에서 creep에 필요한 활성화 에너지는 정성적으로 보아 자기확산에 필요한 활성화에너지와 거의 일치한다고 보고하였으며, 또한 Rosinger등⁶⁾도 Zircaloy-4에서 creep에 필요한 활성화에너지는 자기확산에 필요한 그 값과 유사하다고 보고하고 있다. Kidson¹⁵⁾은 Zircaloy-2에서 Zr의 자기확산에 필요한 활성화에너지는 62kcal/mole 이라고 보고한 바 있다. 본 실험 조건에서 얻은 creep변형에 필요한 활성화에너지는 62.1~55.4kcal/mole로서 Kidson이 비교한 자기확산에 필요한 활성화 에너지 값인 62kcal/mole에 근사함을 알 수 있다. 또한 앞에서 보인 응력지수가 4.6~4.8의 값을 갖는 것으로 미루어 보아 600~645℃의 온도범위와 4~7kg/mm²의 응력범위에서 static creep변형은 dislocation의 climb에 의해 주도 된다고 사료된다.

Table 1에서 static rupture time을 분석해 보면 온도 및 외부 응력 증가에 따라 static rupture life 는 급격히 감소하고 있다. 어느 온도에서 rupture time을 알고 있을 때 그 이외의 다른 온도에서도 rupture time을 예측할 수 있는데, 그 방법¹⁶⁾으로 Larson-Miller Parameter와 Dorn-Sherby Parameter 그리고 Manson-Harferd Parameter등이 있다. 본 연구에서는 간편하면서 정확하기 때문에 여러 합금에서 폭넓게 사용되는 Larson-Miller Parameter로 살펴보기로 했다.

$$P = (T + 460) (\log t + c) \dots\dots\dots(6)$$

여기서 P는 Parameter value, T는 화씨온도

(°F), t는 파단시간(hour), c는 상수이다. 위 식에서 상수값 c를 구하므로 creep수명을 예측할 수 있기 때문에 c값을 구하기 위해 Table 1 data를 이용해 graphical determination¹⁶⁾방법으로 구한 결과, static creep시 본 실험조건인 600~645℃, 4~7kg/mm²에서 그 상수값 c는 23였다. Fig. 8은 (6)에 의하여 가해진 Larson-Miller parameter와 응력과의 관계를 보여주었다. parameter값은 그림에서와 같이 본 실험구간에서 대체로 잘 적용되었다.

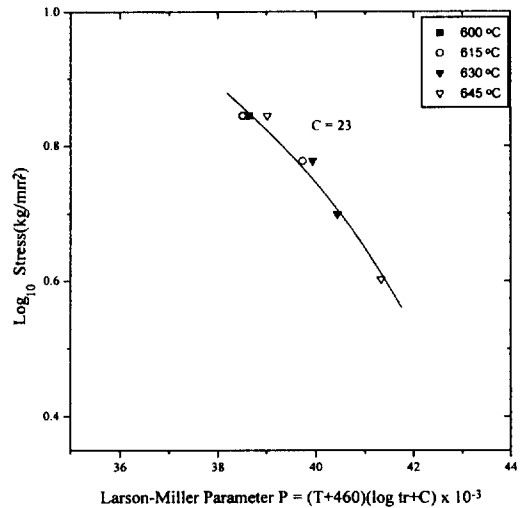


Fig. 9. Correlation of Larson-Miller parameter for Zircaloy-4 from experimental stress-rupture data.

Fig. 10에서 관찰해 보면 본 실험구간에서 static creep에 대한 응력지수, n과 온도, T와의 관계를 살펴보면 온도가 증가할수록 응력지수, n값은 거의 직선적으로 감소되고 있음을 알 수 있다. 따라서 $n = aT + b$ 로 표시되는 직선 관계식을 최소자승법으로 구한 결과 static creep시 응력지수, $n = -5.553 \times 10^{-3}T + 9.683$ 로 구해졌다.

또한 Fig. 11에서 관찰해 보면 본 실험구간에서 static creep의 활성화에너지, Q와 응력, σ 와의 관계에서 살펴보면 응력이 증가할수록 Q값은 거의 직선적으로 감소되고 있음을 보여주고 있어 $Q = c\sigma +$

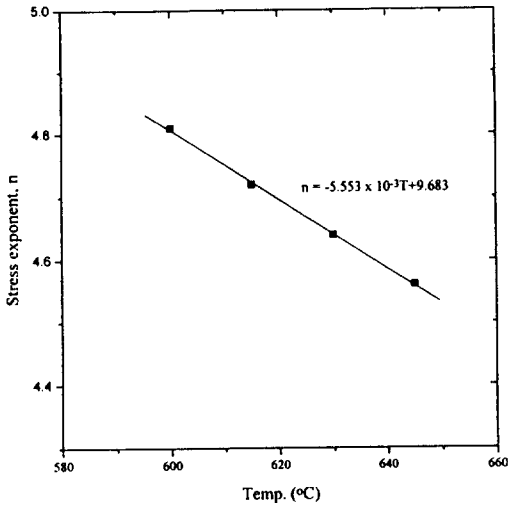


Fig. 10. Stress exponent, n vs. temperature.

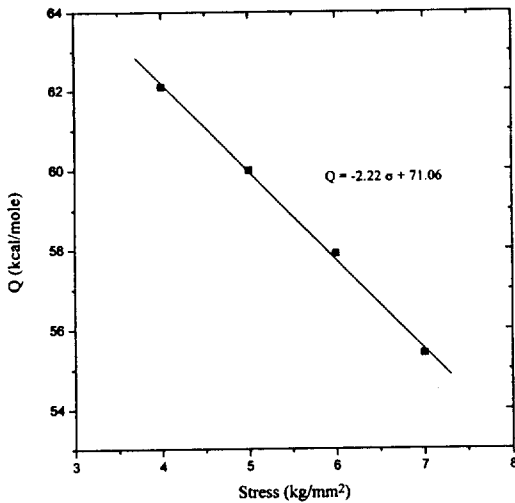


Fig. 11. Activation energy vs. stress.

d로 표시되는 직선 관계식을 최소자승법으로 구한 결과 static creep시 활성화에너지, $Q = -2.22 \sigma + 71.06$ 로 얻어졌다.

한편 고정된 응력, σ 에서 $\ln A$ 와 온도, T 와의 관계를 Table 2와 Fig. 12에서 살펴본 결과 온도가 올라갈수록 static creep에서의 $\ln A$ 값은 거의 직선적으로 증가되고 있음을 보여주고 있어 $\ln A = eT + f$ 로 표시되는 직선 관계식을 최소자승법으로 구한결과 e

$= 5.8 \times 10^{-4} \sigma + 8.11 \times 10^{-3}$, $f = -1.751 \sigma + 19.478$ 이었으며, 위의 식으로부터 $\ln A = (5.8 \times 10^{-4} \sigma + 8.11 \times 10^{-3}) T - 1.751 \sigma + 19.478$ 이었다.

Table 2. $\ln A$ obtained by computer simulation.

Stress (kg/mm ²)	Temp (°C)	$\ln A$	
4	600	21.60	$\ln A = 0.0104T + 12.59$
	615	21.94	
	630	22.00	
	645	22.12	
5	600	20.20	$\ln A = 0.0111T + 10.55$
	615	20.39	
	630	20.52	
	645	20.71	
6	600	18.84	$\ln A = 0.0115T + 8.97$
	615	19.22	
	630	19.25	
	645	19.40	
7	600	17.84	$\ln A = 0.0122T + 7.28$
	615	18.24	
	630	18.33	
	645	18.42	

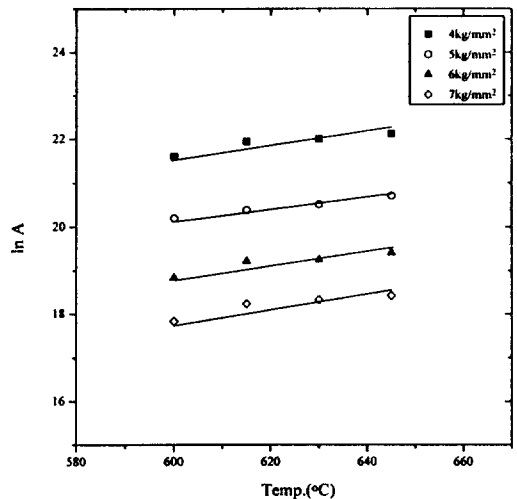


Fig. 12. Temperature dependence of material parameter, A.

그러므로 본 실험 구간에서의 static creep rate, $\dot{\epsilon}$ 의 회기분석결과 얻은 경험식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \exp[(5.8 \times 10^{-4} \times \sigma + 8.11 \times 10^{-3}) T - 1.751 \times \sigma + 19.478] \times \sigma^{(-5.553 \times 10^{-3} T + 9.683)} \exp\left[-\frac{(-2.22 \times \sigma + 71.06) \times 10^3}{RT}\right] \dots\dots\dots(7)$$

(7)식으로부터 어떤 주어진 온도나 응력에서 creep rate를 구할 수 있다. Table 3은 경험식으로 구한 creep rate이다.

Table 3. Creep rate, $\dot{\epsilon}$ obtained empirical equation.

Temp(°C)	Stress(kg/mm ²)	$\dot{\epsilon}$ (hr ⁻¹)
600	4	5.21×10^{-4}
	5	1.57×10^{-3}
	6	3.93×10^{-3}
	7	8.64×10^{-3}
615	4	9.92×10^{-4}
	5	2.92×10^{-3}
	6	7.01×10^{-3}
	7	1.52×10^{-2}
630	4	1.86×10^{-3}
	5	5.21×10^{-3}
	6	1.26×10^{-2}
	7	2.61×10^{-2}
645	4	3.40×10^{-3}
	5	9.41×10^{-3}
	6	2.11×10^{-2}
	7	4.40×10^{-2}

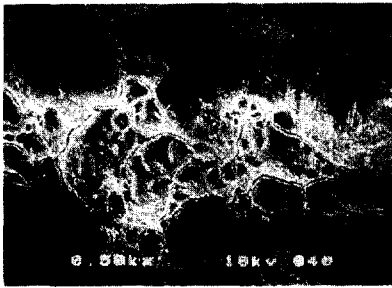
creep파면을 보면 저온 고응력에서는 결정립내부를 통한 입내파괴가, 고온 저응력에선 결정립계를 통한 입계파괴가 나타난다. 또한 고온이건 저온이건 금속이나 합금의 creep 파단은 거의가 cavity들의 형

성에 의해서 이루어지고 이러한 cavity들이 성장함으로 인해 궁극적으로 파단에 이르게 된다. 본 실험 구간중 높은 응력보다는 낮은 응력에서 다소의 입계 파괴 양상을 보였지만, 전반적으로 dimple파단이 지배적이었다(Photo. 2). 이는 응력이 감소할수록 creep손상을 받는 시간이 길어지므로 결정립계에 void형성등에 의한 결정립계손상이 증가되며, 또한 creep분위기가 공기분위기이므로 결정립계산화에 의한 손상을 받게되어 나타난 현상으로 생각된다. 고온 고응력에서는 파단면에 주어진 방향으로 sliding된 흔적이 관찰되는 것으로 보아 균열의 전파는 sliding을 수반하여 진행된 듯하다(Photo. 3). 온도가 높아질수록 결정립계를 따른 2차 균열이 발달되는데, 그것은 온도가 높아질수록 열적 평형 공공의 수가 증가하고, 또한 확산이 용이해지므로 결정립계로 더욱 많은 공공 혹은 불순물들이 확산하기 때문이다. 그러나 Photo. 3의 d는 고온 고응력하의 파단면이지만 입계 파괴가 발견되지 않았는데 그것은 creep손상을 받는 시간이 매우 짧아 결정립계에 공공의 발생이나 불순물의 확산등이 존재하기전에 파단되었기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

공기분위기에서 온도범위 600~645°C, 응력범위 4~7kg/mm에서 Zircaloy-4의 static creep거동에 대한 결과는 다음과 같다.

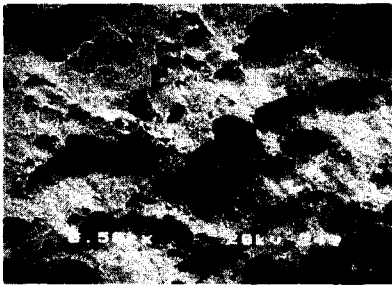
- 1) 응력지수, n값은 온도가 600, 615, 630, 645°C에서 4.81, 4.71, 4.64, 4.56로 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이나 약 5정도에 근사한 값을 갖는다.
- 2) creep변형에 필요한 결보기활성화에너지, Q는 응력이 4, 5, 6, 7kg/mm²로 증가함에 따라 62.1, 60.0, 57.9, 55.4kcal/mole로 감소하는 경향을 보였으며, 이때 creep변형에 필요한 활성화에너지값은 Zircaloy계에서 Zr의 자기확산에 필요한 활성화에너지 값과 비슷하였다.



c-1. 615°C, 6kg/mm²(×500)



c-2. 615°C, 6kg/mm²(×3000)

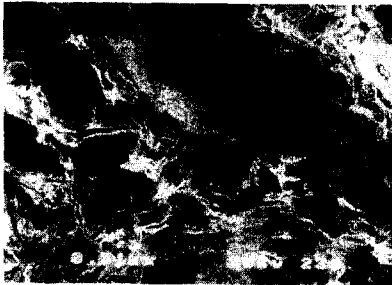


d-1. 615°C, 7kg/mm²(×500)



d-2. 615°C, 7kg/mm²(×3000)

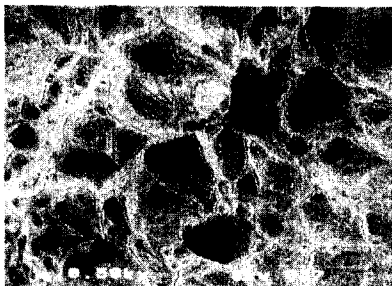
Photo. 2. SEM Photograph for crept specimens.



a-1. 7kg/mm², 600°C(×500)



a-2. 7kg/mm², 600°C(×3000)



b-1. 7kg/mm², 645°C(×500)



b-2. 7kg/mm², 645°C(×3000)

Photo. 3. SEM Photograph for crept specimens.

- 3) 위의 결과로 미루어 보아 본 실험조건하에서 Zircaloy-4의 정적크립 변형은 전위의 상승에 의해 지배된다고 사료된다.
- 4) 정적크립에서 Larson-Miller Parameter는 $P = (T + 460)(\log t + 23)$ 의 값을 갖는다.
- 5) 정적크립속도, $\dot{\epsilon}$ 의 경험식은
- $$\dot{\epsilon} = \exp[(5.8 \times 10^{-4} \times \sigma + 8.11 \times 10^{-3}) T - 1.751 \times \sigma + 19.478] \times \sigma^{(-5.553 \times 10^{-3} T + 9.683)} \exp \left[- \frac{(-2.22 \times \sigma + 71.06) \times 10^3}{RT} \right]$$
- 6) 파단부의 균열은 입계파괴가 다소 보이나 전반적으로 dimple현상이 지배적이었다.

후 기

본 연구는 충북대학교 국책 자유공모과제(과제번호 : 95F-18)의 지원으로 수행된 것임

참고문헌

- 1) A.J. Ardell, O.D. Sherby : Trans. AIME, 239, (1967) 1547
- 2) I.M. Bernstein : Trans, AIME, 239, (1967) 1518
- 3) J.J. Holmes : J. Nucl. Mat., 13, no2, (1964) 137
- 4) W.A. McInTeer, D.L. Baty, K.O. Stein : ASTM 8th Inter. Symposium, (1989) 622
- 5) 정용한 : 박사학위논문, 연세대학교, (1991).
- 6) H.E. Rosinger, P.C. Bera and W.R. Clending : J. Nucl. Mat., 82, (1979) 286
- 7) J.H. Choi, J.H. Hong : J. Korean Inst. Met., 22, no7, (1985) 617
- 8) E.N. Da, C. Andrade, B. Chalmers : Proc. Roy. Soc., 138A, (1932) 348
- 9) F. Garofalo, O. Richmond, W.F. Domis : J. Basic Eng., June, (1962) 287
- 10) H.E. Evans : Mechanism of Creep Fracture Elsevier Sci. Pub. Co., New York, (1984) 2
- 11) J.H. Dorn : "The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature", McGraw-Hill, New York, (1961)
- 12) J. Weertmen : Trans. AIME, 218, (1960) 207
- 13) S.H. Hong, J. Weetman : Acta Met., 34, no4, (1986) 735-741
- 14) R.C. Gifkins : Scr. Metal, 10, (1976) 433
- 15) G.V. Kidson : Electrochem. Tech., 4, (1966) 193
- 16) J.D. Lubahn, R.P. Felgar : "Plasticity and Creep of Metals", (1961) 210