

고온상태에서의 크리이프 파단거동에 관한 연구

강대민, 구 양*, 백남주**

부산개방대학 산업안전공학과
*부산개방대학 기계공학과
**부산대학교 생산기계과

A Study on the Creep-Fracture Behavior under High Temperature

Dae-Min Kang, Yang Koo,*Nam-Ju Baek**

Dept. of Industrial Safety Engineering, Busan Open University, Busan, Korea
**Dept. of mechanical Engineering, Busan Open University.*
***Dept. of mechanical Engineering, Busan National University.*

ABSTRACT

Modern technological progress demands the use of materials at high temperature and high pressure. One of the most critical factors in considering such applications—perhaps the most critical one—is creep behavior.

In this study the activation energy for the creep rupture (Q_f) and the stress dependence of rupture time (n') have been determined during creep of Al 7075 alloy over the temperature range of 200°C to 500°C and stress range of 0.64 kgf/mm² to 9.55 kgf/mm², respectively, in order to investigate the creep-rupture property. Constant load creep tests were carried out in the experiment

At around the temperature 210°C~390°C and the stress level 1.53~9.55 (kgf/mm²), the stress dependence of rupture time (n') had the value of 6.6~6.78 but at 500°C, the value of 1.3. Besides at around the temperature of 200°C~500°C and under the stress level of 0.89~8.51 (kgf/mm²), the activation energy for the creep rupture (Q_f) was nearly equal to that of the volume self diffusion of pure aluminum (34Kcal/mole)

1. 서 론

고온, 고압의 조건하에서 사용되는 모든 장비들의 경우 그 안전성이 중요시되는 것은 설명할 여지가 없고 특히 원자력 발전소의 안전성 문제는 아주 중요시되므로 선진국에서는 원자력 발전소의 건설은 물론 운영시에 발전설비 및 부품들의 안전성에 관하여 실험적인 규모로 부터 **proto-type**의 시설물을 대상으로 철저하게 연구 되어오고 있다. 한국에서는 현재 건설중에 있는 원자력 발전소가 모두 7기로서 이것이다 완공되면 총 6,350 MW를 생산할 예정이다. 특히 2000년대 이전에 모두 20여기의 원자력 발전소가 건설될 예정이다.¹⁾ 선진국은 주로 미국, 독일, 캐나다 그리고 불란서 등으로 자신들의 원자력 발전소의 외국판매와 관련하여 그 실험 결과를 비밀 취급하는 사례가 많이 있다. 이러한 이유로 우리나라에서도 장차 국산 원자력 발전소 건설을 계획하고 현재로서는 한국 중공업등의 국내 산업체에서도 국산설비를 제작하고 있는 실정에서 국내에 이들 재료의 사용상의 안전성 관계로 정확한 수명 예측이 필요하다.

본 연구에서는 고온, 고압 또는 고응력하에서 사용되는 재료들이 사용도중 손상을 당하여 기능이 약화되거나 종국에 가서는 파괴되는 원인 및 과정을 고찰하고 항공기 재료(동체, 날개등)에 많이 쓰이고 있는 Al 7075 합금의 크리이프 파단수명을 예측하고자 한다.

2. 크리이프이론

2-1. 일반적인 크리이프

크리이프 변형은 고온에서 일정한 하중 또는 일정한 응력하에서 시간에 따라 재료가 소성 변형되는 현상으로 일정 하중하에서의 시험도중

시편의 단면적 감소에 따른 응력은 계속 증대되며 크리이프 변형속도가 응력에 크게 의존되므로 일정한 응력하에서 시간에 따른 변형을 측정함으로써 변형속도가 일정하게 되는 값(steady state creep rate, $\dot{\epsilon}_s$)과 시편이 파단되는데 요하는 시간(rupture time, t_r)과 파단시까지 크리이프된 스트레인(rupture strain, ϵ_r)을 측정하고 정상상태에서의 크리이프 변형속도($\dot{\epsilon}_{min}$)을 측정하여 재료의 유효수명 및 사용에 맞는 설계 하중을 추측할 수 있다. 결국 이러한 실험결과를 분석함으로써 고온, 고압의 조건하에서 사용되는 모든 장비에 사용되는 재료의 안전성 확립과 수명의 정확한 예측이 필요하다. 일정하중 또는 일정 응력하에서의 크리이프 실험결과를 Fig. 1에 보이듯이 크리이프 변형량을 시간에 대하여 나타내는 것이 첫번째 자료분석이다. 실험온도는 재료의 가공경력 또는 재료의 조직적 특성에 따라서 크리이프 곡선의 모양이 다를 수 있고 저온에서는 크리이프 변형량을 무시할 수 있으나 고온이 되면 큰 변형량이 발생한다. 즉 크리이프 변형은 높은 온도구간에서 특히 중요하며 이는 원자들의 활발한 열진동에 의한 확산이 쉬워지기 때문이라고 알려지고 있다. 기계적으로 가해진 크리이프 응력의 도움을 받아국부적으로 원자들의 확산이동이 방향성을 갖게되면서 원자들의 순수한 확산 또는 회복에 의한 전위의 이동에 의하여 시간이 지남에 따라 크리이프 변형이 계속된다. 일반적으로 크리이프는 시간에 따른 변형이며 탄성, 소성, 점성 변형을 모두 포함하며 이러한 변형량을 역학적인 상태 방정식으로 나타내면,

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

크리이프의 성질은 연신율-시간 좌표로서 크리이프 곡선에 의해 표시할 수 있고 정상적인 크리이프 성질의 양상을 가진 크리이프 곡선은

Fig.1 와 같다.

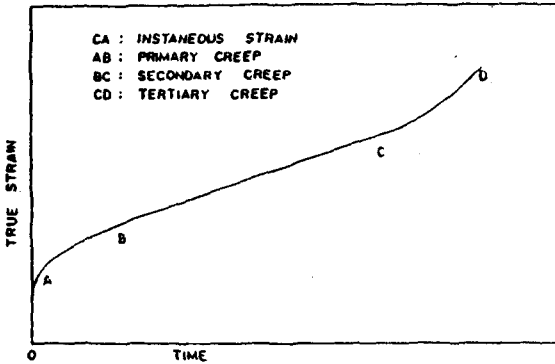


Fig.1 Schematic representation of a Creep-Rupture Curve

Fig.1에서 크리이프 곡선은 일반적으로 세구역으로 구분되어 AB는 초기 크리이프 구역으로 연신, 경화의 진행에 따라 내부응력이 증가하는 반면 외부응력 σ_a 와 내부응력 σ_i 의 차인 유효응력 (effective stress) σ_e 는 감소한다. 이러한 유효응력이 소성변형을 일으켜 초기 크리이프 동안에 크리이프 속도는 감소한다. BC의 2차 구역인 정상 크리이프에서는 전위가 이동할 때 변형을 억제하는 배응력 (back stress) 의 증가에 의한 전위들 간의 상호작용으로 연신경화가 생긴다. 이 과정에서 배응력이 구동력의 역할을 하여 전위 상승같은 확산작용의 도움에 의한 전위의 재배열로 재료내의 자유 에너지를 감소시키게 되며 이것을 회복 (recovery)이라 한다. 이러한 회복이론의 기초개념을 재료가 연신에 따른 경화와 시간에 따른 연화의 관계를 일찌기 Bailey²⁾에 의해 제의되었고 Orowan³⁾에 의하여 발전되었다. 정상 크리이프 상태에서 재료는 가공경화와 회복이 균형을 이루어 크리이프 속도는 $\dot{\epsilon} = (-\frac{2\sigma}{\sigma T}) / (2\sigma/\sigma E) = r/h \dots (2)$ 여기서 r 은 회복속도이며 h 는 가공경화계수를

나타낸다. Weertman⁴⁾은 두 평행한 슬립면에서 활주하는 반대 부호를 가진 칼날전위들의 상호작용으로 슬립면들 간의 거리가 $2r$ 이 될때 까지 축적되어 회복이론과 같이 경화와 회복이 평형을 이룬다고 설명하였다. 또한 전위루프들은 서로 다른 평형 슬립면들에서 F-R Source로 부터 생기어 이 루프들이 확장되면서 서로 다른 응력 구역에서 만나 상승현상이 일어나 서로 소멸되어 다음과 같은 정상 크리이프 속도를 유도한다. $\dot{\epsilon}_s = A \sigma^n e^{-Q_c/RT} \dots \dots \dots (3)$ 여기서 Q_c 는 측정된 크리이프 활성화 에너지, A, n 는 상수, R 은 일반 기체상수이다. CD의 3차 크리이프 구역에서는 변형과정에서 균열과 기공이 결정입계에서 생기게 되어 intergranular cracking에 의해 가속 크리이프가 생겨 D점인 시편의 파단시까지 크리이프 속도가 계속 증가한다. 대체로 결정보다 결정입계가 약한 eguicohesive 온도 이상에는 inter granular crack-ing이 일어나며 이하의 온도에서는 결정입계보다 약한 결정내에서의 trans granular cracking에 의한 파단이 일어난다.

2 - 2. 크리이프 파단

고온의 크리이프 변형하에서 파단되는 경우 파단면을 관찰하면 입계에 생성된 cavity가 성장하였기에 거의 대부분 입계파단이 발생되며 이러한 입계의 cavity는 크리이프 변형중 고온 취성파괴와 관련이 있기 때문에 크리이프 수명을 연장시키자면 결국 입계에서 성장하는 void 또는 cavity의 생성과 성장의 연구가 필요하며 이에 cavity의 생성과 성장 및 크리이프 파단을 주도하는 크리이프 파단기구에 대해 언급하면 다음과 같다. 2.2.1.

cavity 생성

Raj⁵⁾는 cavity의 생성속도를 결정입계의 triple point 또는 결정입계내의 석출물에 vacancy가 과포화 되는 정도와 연관시켜 제안하였는데 vacancy의 과포화는 triple point 또는 석출물 등의 응력집중부에 작용하는 높은 국부응력에 의하여 형성된다고 언급하였다. 즉 이들 과포화된 vacancy가 응력 집중부에 밀집하여 몇개의 원자부피에 해당하는 작은공간(embryonic cavity)이 생성되며 이것이 cavity로 되기 위하여 입계크기로 성장하여야 하는데 이 입계크기 r_c 와 입계에 수직으로 작용하는 국부적 작용응력 (σ_n) 사이에는 $r_c = 2r/\sigma_n$ 의 관계가 성립된다고 제안하였다. 즉 국부적 작용응력이 크면 클수록 cavity로 생성될 수 있는 빈공간의 입계반경은 점점 작아지는 것을 암시하며 이는 응력집중이 큰 부분에서 우선적으로 cavity가 생성됨을 보여준다. 재료에 따라서는 소성변형이 잘 되든지 또는 확산이 빨리 진행되는 경우 결정입계에서 국부적 응력집중이 쉽게 이관되므로 σ_n 이 의 부에서 작용하는 크리이프 응력과 같게 될 것이고 이 값이 결정입계 전반에 걸쳐서 같은 값을 갖게되면 vacancy의 과포화가 발생할 수 없어서 cavity생성이 곤란하므로 결국 취성파괴가 아닌 연성파괴에 이르게 되는것도 설명될 수 있다. 2.2.2.

cavity 성장

Hull과 Rimmer⁶⁾에 의하여 1959년에 제안된 것으로 cavity성장에 관한 이론들 중에서 가장 고전적인 이론으로서 Balluffi와 Seigle⁷⁾에 의하여 최초로 제안된 다음의 이론에 근거를 둔 것이다. 다시말하면 Balluffi는 결정입계에서 vacancy가 생성될 수 있는데 그 양은 cavity를 성장시킬 수 있을 정도로 많다고 언급했다. 이러한 이론에 근거하여 Hull등은 다음의 몇가지가

정을 통하여 cavity의 성장속도를 유도하였다. 그 가정들은 다음과 같다.

- (a) cavity표면을 통한 빠른 확산은 cavity의 표면을 구형으로 유지시킨다.
- (b) 각각의 결정입들은 강체로 가정한다.
- (c) matrix를 통한 확산보다 boundary를 통한 확산이 더 빠르다.
- (d) boundary는 vacancy의 완전한 source이기에 cavity부근의 응력과 vacancy 농도사이에 평형관계가 유지된다.
- (e) vacancy의 flux는 고전적인 확산이론으로 표시될 수 있다.
- (f) cavity바로 근처의 결정입계에 작용하는 normal stress의 값은 $2r/a$ 의 값으로 유지된다. (r : 표면장력, a ; cavity의 반경) 이상의 여러가지 가정하에서 Fig.2와 같이 cavity가 존재하는 제면에서의 vacancy생성속도는 일정하나 cavity바로 주위에서는 cavity내의 원자들이 주위의 vacancy로 이동하여 구형의 cavity가 되면서 결정 입계의 응력은 cavity 끝에서 최소로서 $(2r/a)$ 의 값을 갖는 것을 보여 준다.

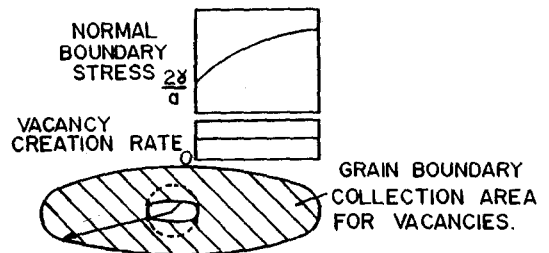


Fig.2 cavity growth

이들이 유도한 식을 아래에 소개한다.

$$\frac{dV}{dt} = 8\pi \frac{D_v \sigma \pi}{kT} \frac{\sigma - (2v/a)}{4\ln(\frac{c}{a}) - (1 - a^2/c^2)(3 - a^2/c^2)}$$

..... (4)

여기서 v 는 cavity부피, t 는 시간, D_g 는 입계 확산계수, δ 는 입계의 두께, Ω 는 원자부피, σ 는 작용응력, 그리고 $2c$ 는 cavity 간의 간격이다.

2-2-3. 크리이프 파단기구⁸⁾

다 결정체 고온 크리이프 중 정상상태 크리이프 율 $\dot{\epsilon}$ 는 일반적으로,

$$\dot{\epsilon} = ADGb/kT \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^p \cdot \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \dots\dots\dots (5)$$

여기서 A : 무차원 상수, D : 확산계수 G : 전단계수, b : Burgers 벡터 k : Boltzmann 상수, T : 절대온도, d : 입자크기 σ : 적용응력, P, n: 상수

크리이프는 정상상태 단계를 지나 3 단계 크리이프와 완전한 파단에 이르게 되고 파단기구는 입내 크리이프파단, 그리고 입계 크리이프 파단으로 나뉜다.

여기서 t 는 시간이고 $\dot{\epsilon}_{gbs}$ 는 입계슬립에 기인한 총 변형율이다. 균열 불안정 조건은 $h\sigma \geq 2r$

여기서 r 는 파단의 유효 표면에너지이다. 따라서 $tf = 2r/\sigma d \cdot (\dot{\epsilon}_{gbs})^{-1} \dots\dots\dots (10)$

이것은 $tf = 2r/Gb_s \cdot (\sigma/G)^{-1} \cdot (\dot{\epsilon})^{-1}$ 여기서 $h (= \dot{\epsilon}_{gbs}/\dot{\epsilon})$ 는 전변형도에 대한 입계슬립 분포이다.

나. 공동파괴 (cavitation failure)

고온. 고응력의 실험적인 조건하에서 공동은 생성되어 hole주위에 결정모재에서 vacancy 들의 확산에 의하거나 역급수 크리이프에 의해서 입계에서 성장한다. vacancy들이 입계에 따라 cavity속으로 확산할때 확산성장(diffusion growth)가 일어난다. 입계 면적당 cavity의 수가 일정한 상태에 대해서 사용된 Raj와 Ashby 의 모델에서 $tf = 6 \times 10^{-3} kT\ell^3/\delta D_{gb}\Omega \dots\dots\dots (11)$

여기서 ℓ 은 경계에서 평균 cavity간격
 δ : 입계의 폭, D_{gb} : 입계 확산계수
 Ω : 원자부피

2.2.3.

a. 입내 크리이프 파단

Ashby에 의해서 해석된 파단과정을 살펴보면 Fig.3에서 설명될 수 있고 이러한 과정은 저온 연성파괴와 유사하다.

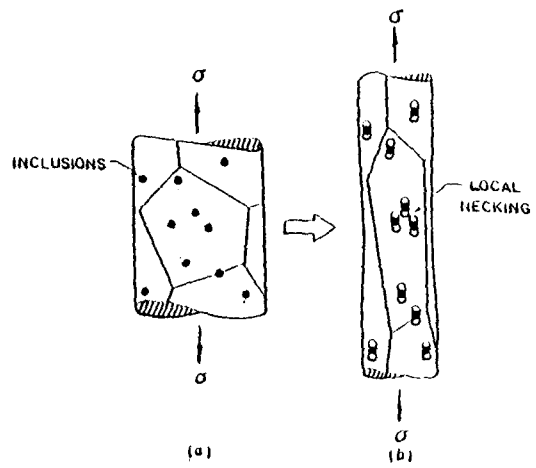


Fig.3. The principle of transgranular creep fracture in which holes are nucleated at inclusions due to stress concentrations

파괴의 미시적 기구는 모재에 있는 개재물에서 hole의 생성에 기초로 하고 있고 국부적 내부 네킹이 생길때까지 크리이프중 hole의 성장은 서로 합체되어 입내파단을 유발시킨다. 그 hole들은 개재물에서 응력집중이 생기기때문에 성장한다. 즉 응력집중이 변형율을 증가시키기 때문에 그 응력은 개재물이 축척되기 시작하여 모재로부터 파괴되거나 분리된다. hole은 McClintock에 의한 저온 파괴에 대해서 서술한 방법으로 모재의 크리이프 때문에 성장하고 마지막으로 hole이 합체되어 파괴가 시편의 연신을 더이상 일으키지않고 발생한다. 정상상태

조건하에서 발생하는 모든 변형에 대한 가정을 간단히 하면 파단시간 (t_f)와 정상상태 크리이프 속도 ($\dot{\epsilon}$)의 관계는 $t_f = \epsilon_f / \dot{\epsilon} \dots\dots\dots(6)$

여기서 파단에서 총 연신율 ϵ_f 는 $\epsilon_f = \epsilon_n + \epsilon_g$ 여기서 ϵ_n 과 ϵ_g 는 각각 nucleation 변형율, 성장 변형율이다. 모든 hole은 같은 변형도에서 생성된다고 가정하고 Ashby는,

$$\epsilon_g = (1/1.8) \cdot (\mu/\mu-1) \cdot \ln(0.7/fv^{1/2}-1) \dots\dots\dots(7)$$

여기서 fv 는 입내 개재물의 부피, 따라서,

$$t_f = \{\epsilon_n + (1/1.8) \cdot (\mu/\mu-1) \cdot \ln(0.7/fv^{1/2}-1)\} (\dot{\epsilon})^{-1} \dots\dots(8)$$

2-2-3 b. 입계 크리이프 파단

가. 삼중점 균열 (triple point cracking)

일반적으로 삼중점 균열은 fig.4에서 보여진 것과 같이 높이가 h 의 쐐기형태인 균열이고 인장응력이 작용하면 변위 x 에 의해서 나타낸 바대로 입계슬립이 일어나고 이러한 슬립과정 때문에 쐐기거동에 의해서 성장한다. 만약 균열이 입계 슬립에 의해서만 성장한다면 시간에 대한 쐐기높이 변화율 ($= dh/dt$)는

$$dh/dt = \dot{\epsilon}_g b_s d \dots\dots\dots(9)$$

Monkman과 Grant는 실험을 다양하게 하여 파단시간 (t_f)와 정상상태 크리이프 속도 ($\dot{\epsilon}$) 사이의 관계는 다음과 같이 비례관계가 성립함을 밝혔다.

$$\dot{\epsilon} \cdot t_f = C_{MG} \dots\dots\dots(12)$$

여기서 C_{MG} ; Monkman - Grant 상수이다.

Raj는 실리카 입자를 함유하는 구리의 다결정과 이중결정에 있어 벽함수를 연구한 결과

$$t_f = \left(\frac{1-A_0}{1-48} \right) \cdot (\dot{\epsilon})^{-1} \dots\dots\dots(13)$$

여기서 A_0 는 입계에 있어 Cavity의 초기 면적

이다. cavity가 입계입자에서 형성된다면 A_0 는 경계에서 입자의 면적이고

$$A_0 = (\pi/4) \cdot (P_0/\ell_0) \dots\dots\dots(14)$$

여기서 P_0 와 ℓ_0 는 각각 경계에 따라 평균입자지경과 간격이다. 많은 합금이나 금속에는 정상 크리이프 속도와 파단시간과의 관계는 다음과 같다.

$$t_f = (E/\dot{\epsilon}_s)^\beta \dots\dots\dots(15)$$

식(3)과 (15)에서 β 의 값이 1이라면 응력과 온도가 크리이프 수명에 대한 의존성은 다음과 같다.

$$t_f = A' \sigma^{n'} \exp(Qf/RT) \dots\dots\dots(16)$$

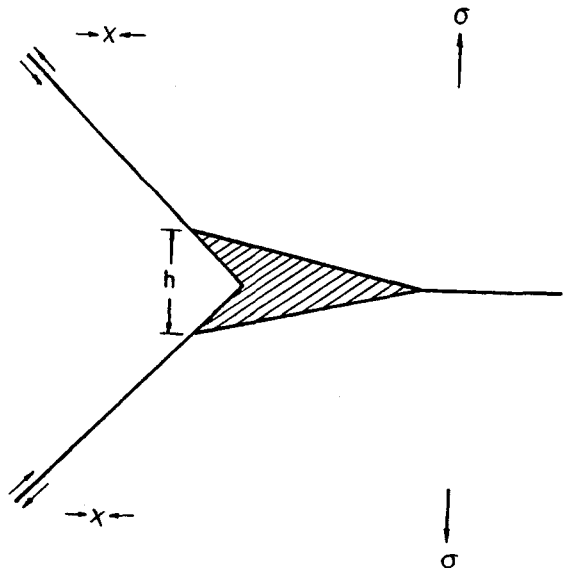


Fig.4. Under the action of a tensile stress a wedge-shaped crack of height h is formed at the triple point due to grain boundary sliding.

3. 실험장치 및 방법

크리이프 실험은 다음과 같은 실험순서로 행하여 졌다.

- 가. 실험하중에 해당하는 무게를 단다.
- 나. 시험편 고정용 너트를 죄어서 시험편을 물린다.
- 다. 열전대를 시험편 중심부에 석면실을 사용하여 묶는다.
- 라. 시험편이 로의 중간부에 위치하도록 한다.
- 마. 열전대의 음극, 양극과 연신을 검출 플라그를 기록장치와 연결한다.
- 바. 온도조절기를 사용하여 시험온도를 유지시킨다.
- 사. 다이알게이지를 적당히 조절하여 extensometer를 교정한다.
- 아. pull botton을 사용하여 시험하중을 부가한다.
- 자. rupture light의 불이 꺼지면 하중이 모두 부가된 것이다.

실험시편은 Al 7075 합금봉재를 NC선반가공하여 50 mm의 게이지 길이와 10 mm게이지 직경이 되게하여 T₆로 열처리하였다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2과 같으며 아랫칸에 적힌 값은 "Aluminum standard & data"에서 참조한 것이다. 여기서 인장시험은 Tinius Olsen 사의 super-1 인장시험기를 이용하여 10 mm/min 속도로 행했다. 경도시험은 Detroit Testing M/C Co. 사의 HB-2 Brinell 경도계를 이용하여 실시했고 화학성분분석은 발광분광분석장치 (Spectrometer)를 사용했다. 실험에 사

용했다. 실험에 사용한 크리이프 시험기는 동경시험기기 회사의 모델 CRL-3000으로 허용 최대하중은 3 톤이고 레버비는 20 : 1 이다. 로의 최대온도는 850°C이며 로 온도는 자동온도 조절장치로서 설정할 수 있다. 시편의 변형량은 유도변환기와 다이알게이지를 사용하여 관찰하였고 시험에 적용된 온도와 응력조건을 열거하면 Table 3 와 같다.

Table 3 stress-temperature matrix

Temperature(°C)	stress (kg/mm ²)			
200 (0.52 Tm)		8.51		
210 (0.53 Tm)	8.13	8.51	8.91	9.55
220 (0.54 Tm)		8.51		
230 (0.55 Tm)		8.51		
240 (0.56 Tm)		8.51		
280 (0.61 Tm)				2.55
290 (0.62 Tm)				2.55
300 (0.63 Tm)	1.85	2.04	2.17	2.55
310 (0.64 Tm)				2.55
320 (0.65 Tm)				2.55
380 (0.72 Tm)		1.66		
390 (0.73 Tm)	1.53	1.66	1.78	1.91
400 (0.74 Tm)		1.66		
410 (0.75 Tm)		1.66		
470 (0.82 Tm)			0.89	
480 (0.83 Tm)			0.89	
490 (0.84 Tm)			0.89	
500 (0.85 Tm)	0.64	0.76	0.89	1.02

Table 1 Chemical composition Wt. (%)

Material	Cu	Ce	Mn	Si	Fe	Zn	Mg	Ti
Al 7075	1.48	0.18	0.02	0.12	0.19	5.49	2.40	0.14
	1.2-2.0	0.18-0.25	0.30	0.4	0.5	5.1-6.1	2.1-2.9	0.2

Table 2 Mechanical properties

Material	Y/S(Kgf/mm ²)	T/S(Kgf/mm ²)	elongation(%)	hardness(HMN)
Al 7075	52.7	62.2	17	147
	51.33	58.37	11	150

Table 3에서 보는 바와같이 파단시간의 응력의 존성 (n') 값을 측정하기위해 일정온도에서 응력조건을 변화시켰고 파단을 위한 활성화에너지 (Qf) 측정을 위해 일정 초기응력에 대해 응력조건을 변화시켰다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5 는 390°C에서 정상상태의 크리이프속도와 파단시간과의 관계를 나타낸 그래프이다.

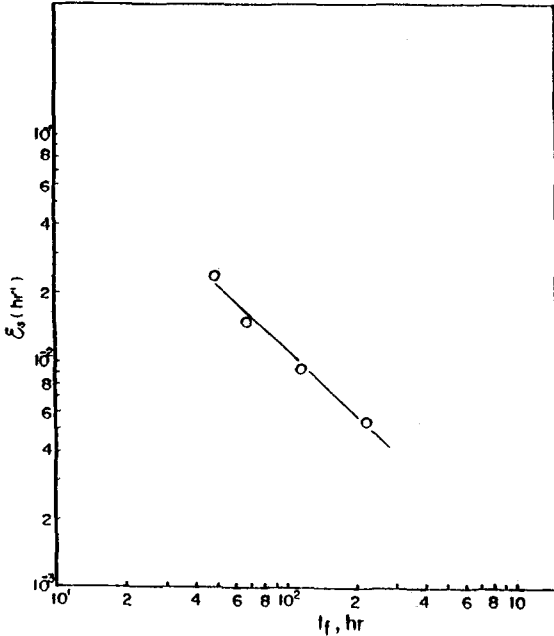


Fig. 5 The relationship between the time to fracture and the steady-state creep rate for A17075 alloy at 390°C.

여기서 가로축을 파단시간, 세로축을 정상상태 크리이프 속도로 표시하면 서로 직선적으로 반비례함을 알 수 있다. 이렇게 하여 식 (15) 에서 상수 β, E의 값은 390 °C 온도조건에서 각각 1, 1.113 이 된다. 식 (16)에서 온도조건을 일정하게 두고 양변에 대수를 취하면 ,

$$\log tf_1 - n' \log \sigma_1 = \log tf_2 - n' \log \sigma_2 = \text{const}$$

$$\therefore n' = \log(tf_2/tf_1) / \log(\sigma_2/\sigma_1) \dots \dots \dots (17)$$

여기서 작용응력 σ_1, σ_2 하에서의 파단수명은 각각 tf_1, tf_2 이다. 파단시간의 응력의존성 (n') 값은 대수 파단시간과 대수응력의 그래프에서 직선의 기울기로 표시된다. Fig. 6 는 210 °C, 300 °C, 390 °C 및 500 °C에서 크리이프 파단수명과 응력과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 구한 온도와 응력에 따른 파단시간의 응력의존성의 값은 Table 4에 표시했다. 파단을 위한 활성화 에너지값을 구하기 위해서 식 (16) 에서 응력을 일정하게 두면 ,

$$tf = B \cdot \exp(Q_f/RT) \dots \dots \dots (18)$$

식 (18) 을 변형하면

$$\ln tf = \ln B + Q_f/RT \dots \dots \dots (19)$$

식 (19) 에서 $\ln tf - 1/T$ 의 좌표에서 직선으로 표시되어 기울기가 Q_f/R 의 값이 되고 파단을 위한 활성화 에너지값은 다음과 같이 계산된다. $Q_f = R \times$ (기울기) (KJ/mole) Fig. 7는 응력조건이 0.89, 1.66, 2.55 및 8.51 kgf/mm²에서 온도와 파단시간과의 관계를 나타내었다. 여기서 구한 파단을 위한 활성화 에너지값은 Table 4에 나타내었다. 여기서 파단시

Table. 4 n' - Q' matrix

1.85-2.55(kg/mm ²) (n')	300°C (6.12)	280°C-320°C (Q')	2.55(kg/mm ²) (36.78)
8.13-9.55(kg/mm ²) (n')	210°C (6.06)	200°C-240°C (Q')	8.51(kg/mm ²) (33.17)
1.53-1.91(kg/mm ²) (n')	390°C (6.78)	470°C-500°C (Q')	0.89(kg/mm ²) (37.59)
0.64-1.02(kg/mm ²) (n')	500°C (1.1)	380°C-410°C (Q')	1.66(kg/mm ²) (36.41)

간의 응력의존성은 1.3 ~ 7 값으로 나타냈고 파단을 위한 활성화값은 33 ~ 38 Kcal/mole로 나타나 약 40 Tm (Tm : 용융점)으로 계산되

어진 순수 알루미늄의 자기확산에 필요한 활성화 에너지 34Kcal/mole 과 거의 일치한다.

5. 결 론

고온에서 사용되는 금속재료의 변형과 손상에 관한 현상을 설명하기 위해서 크리이프 파단 이론들을 간단히 고찰하였고 Al 7075 합금을 온도 200 ° ~ 500 °C, 응력조건 0.64 ~ 9.55 kgf / mm² 에서 크리이프 파단수명을 관찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 파단시간과 정상크리이프 속도의 관계는 서로 직선적으로 반비례하여 정상크리이프 속도로서 파단시간을 예측할 수 있다.

2) 파단시간의 응력의존성 (n')의 값은 대수파단시간과 대수응력의 관계에서 직선의 기울기로 표시되고 210 °C ~ 390 °C에는 6.06 ~ 6.78, 500 °C에서는 1.3 으로 나타났다.

3) 온도조건 200 ° ~ 500 °C, 응력조건 0.89 ~ 8.51 (kgf / mm²)에서 파단을 위한 활성화에너지 값은 33 ~ 38 Kcal/mole 로 나타나 순수 알루미늄의 자기확산에 필요한 활성화에너지 34 Kcal/mole 과 거의 일치한다.

4) 현재 국내에서도 많은 원자력 발전소를 건설중이고 또 공업적으로도 고온조업의 필요성이 증대되고 있는 시점에서 이러한 고온 고압 상태에서 사용되는 모든 장비들의 안전성에 관한 연구가 활성화 되어야 하겠다.

6. 참고문헌

- 1) Korea Times 23 of April, 1983
- 2) R. W. Bailey, Note on the Softening of strain hard ened metals and its relation to creep. J. of Ins. metals. V. 35, p27~43, (1926)
- 3) E. Orowan, The creep of metals: J. of the west of scotland Iron and steel Inc. V. 54, p45~96, (1946)
- 4) J. Weertman, Steady state creep through dislocation climb; J. of App. phy., V. 28, p. 362 - 364, (1957)
- 5) R. Raj; Acta Met. 26(1978) 995.
- 6) D. Hull and D. E. Rimmer: Phil. Mag., 4 (1959)673
- 7) R. W. Ballufi and L. L. Seigle: Acta, Met., 3 (1955), 1970
- 8) D. A. Miller and T. G. Langdon, creep fracture maps for 316 stainless steel, Vol 10A, November, p. 1636~p1641, (1979)



안 전 신 조

- 一、 나의 생명과 복지를 위하여 안전을 제일로 한다.
- 一、 내 가정의 행복과 화목을 위하여 안전을 도모한다.
- 一、 나의 동료를 보호하기 위하여 안전을 항상 생각한다.
- 一、 복지국가 건설과 회사 번영을 위하여 안전한 작업을 실천한다.
- 一、 산업재해를 예방하기 위하여 안전시설 투자를 게을리하지 아니한다.