

<論 文>

2024 Al 합금의 고온 정상크리이프 중의 내부응력, 의탄성 및 회복에 관한 연구

박경동* · 오세욱** · 강상훈***

(1985년 11월 16일 접수)

Internal Stress, Anelasticity and Recovery in Steady State Creep of 2024 Al Alloy at High Temperature

Kyung Dong Park, Sae Wook Oh and Sang Hoon Kang

Key Words: Anelasticity(의탄성), Internal Stress(내부응력), Recovery(회복), Non-conservative Motion(비보존운동), Self-diffusion(자기확산), Subgrain(아결정립)

Abstract

Measurements of internal stress σ_i , anelastic strain ϵ_A and recovery rate r were made in steady state creep of 2024 Al alloys over a wide range of stresses at temperatures between 260°C and 380°C, for the purpose of investigating the relations among the three parameters.

Values of σ_i were obtained by the method of strain transient dip test, and those of ϵ_A and r were determined from the results of sudden stress removal or reduction tests.

As a main result, it is thought that the anelastic behavior and the recovery process are basically dependent on same deformation mechanisms.

1. 서 론

2024 Al 합금의 고온 정상 크리이프의 주요 변형기구는 회복과정의 하나인 전위의 상승(climb)과정으로 나타났으며⁽¹⁾, 회복에 의한 정상 크리이프의 변형속도는 가공경화에 의한 내부응력의 증가와 회복에 의한 내부응력 감소의 동적균형에 의하여 일정하게 유지된다.

또한 응력 감소시 시간의 경과에 따라 서서히 발생

하는 의탄성 변형은 주로 내부응력에 의하여 휘어진(bowed) 전위의 퍼짐(unbowing)에 의하여 발생하며^(2,4), 이 역시 내부응력이 감소하는 과정이다⁽³⁾. 이와 같이 자기확산에 의한 전위의 비보존운동에 의하여 발생하는 회복과정이나, 전위의 퍼짐에 의하여 발생하는 의탄성 변형은 둘 다 내부응력이 감소하는 과정이므로 내부응력, 의탄성 변형 및 회복과정 사이에는 반드시 어떤 특정한 관계가 존재함을 유추할 수 있다.

따라서 본 연구는 2024 Al 합금에 대하여 260~380°C의 온도 범위 및 2~5 kgf/mm²의 부과응력 범위에서 실시한 고온 정상 크리이프 변형 중의 내부응력 σ_i , 의탄성 변형 ϵ_A 및 회복율 r 의 측정 실험을 통하여 이들 상호간의 관계를 살펴 보고자 한다.

* 정회원, 부산개발대학 기계공학과

** 정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

*** 동아대학교 대학원

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 시험편

크리이프 시험기는 최대 허용하중 3톤, 최대 사용 온도는 850°C이며 설정된 온도는 자동 온도조절장치와 디지털 멀티미터에 의하여 실내 온도를 보정하여 ±1°C 이내로 유지 가능하며 시험편의 변형율은 디지털 지시계와 자동 기록계에 의하여 노온 및 시험편 온도와 함께 시간에 따라 자동적으로 차트에 기록된다. 또한 내부응력, 의탄성 변형 및 회복을 측정을 위하여 x-y 배코더를 크리이프 시험기의 LVDT에 디지털 지시계와 병렬로 연결하여 지시계에서 읽을 수 없는 0.5 × 10⁻⁵(%) 이하의 미소 변형율을 애벌로그로 판독할 수 있게 하였다.

시험편은 경화를 위하여 알루미늄 합금의 주요 경화 방법인 가공경화와 시효경화법을 이용하였다. 즉, 주조한 산업용 2024 Al 합금을 450~480°C의 고온에서 수평한 다음 가공경화를 위해 인발하여 NC 선반에서 Fig. 1과 같이 가공한 후 시편 "A"는 냉간 인발로 얻어진 가공경화 강도를 유지하고 선반 가공시 생긴 내부응력을 제거하기 위하여 재결정 온도 이하인 190°C에서 12시간 저온풀림 하였으며, 시편 "B"는 시효경화를 위하여 490±5°C의 염욕에서 30분간 고용체화 처리 한 다음 72시간 이상 자연시효시켰다. 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1 및 2와 같다.

2.2 실험 방법

내부응력 σ_i 는 변형률 강하시험(Strain Transient Dip Test)⁽⁶⁾ 방법으로 측정하였으며, 부과응력, 온도 변화 및 변형률에 따른 내부응력의 변화를 조사하였다.

의탄성 변형률 ϵ_A 의 측정은 크리이프변형 중에 나타나는 전체 변형률을 ϵ , 응력제거 즉시 순간적으로 수축하는 탄성 변형률을 ϵ_B , 영구 변형률을 ϵ_D 라 하면 응력제거 후 시간의 경과에 따라 서서히 회복하는 의탄성 변형률 ϵ_A 는

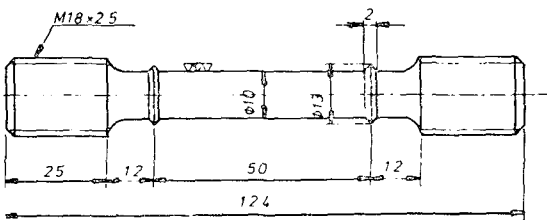


Fig. 1 Creep test specimen

Table 1 Chemical composition (wt %)

Al	Cu	Mg	Mn	Pb	Fe	Si
Bal.	4.15	1.51	0.54	0.27	0.18	0.12

Table 2 Mechanical properties

	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elong. (%)	Hard. (Hb)
A	23.2	32.6	18.1	59.4
B	39.2	43.2	10.0	120.0

$$\epsilon_A = \epsilon - \epsilon_B - \epsilon_D \tag{1}$$

로 표시된다.

또한 크리이프 변형중 부과응력 σ 를 시간 t 와 변형률 ϵ 의 함수로 가정하면

$$d\sigma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right) dt + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right) d\epsilon \tag{2}$$

의 Bailey-Orowan 방정식⁽⁶⁾으로 표시되고 이 식은 일정 응력하의 크리이프 시험에서는 $d\sigma = 0$ 이므로

$$d\epsilon/dt = -\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right) / \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right) = r/h \tag{3}$$

으로 되고 여기서 $r = -\partial\sigma/\partial t$ 는 회복률, $h = \partial\sigma/\partial\epsilon$ 는 가공경화율을 나타낸다.

실험적으로 회복률 r 는 $\Delta\sigma$ 의 응력 감소후 일시적으로 변형이 중단 되었다가 다시 재개할 때 까지의 잠복기간 Δt 를 측정 함으로써 구해진다^(6,7). 즉,

$$r = (\Delta\sigma/\Delta t)_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \tag{4}$$

로 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 σ_i , ϵ_A 및 r 의 부과응력 의존성

Table 3은 부과응력 σ 및 온도 T 에 대한 σ_i 및 σ_i/σ 의 관계를 나타낸다. 부과응력의 증가에 따라 내부응력은 증가하나 부과응력에 대한 내부응력의 비율 σ_i/σ 는 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 가공경화는 전위의 활주(glide)에 의한 전위 밀도의 증가 속도에 의하여 지배되며 내부응력을 증가시키거나, 자기확산에 의한 칼날전위의 상승, 나사전위의 교차활주(cross slip) 및 전위망의 성장 등에 의한 전위의 소멸 및 재배열 현상에 의하여 발생하는 회복과정은 전위밀도를 감소시키고 전위의 분포를 균일하게 하므로 주로 전위의 불균일 분포에 의하여 발생하는 내부응력을 감소시킨다. 그런데 회복은 전위활주 보다 응력 의존성이 크

Table 3 Stress and temperature dependence of σ_i and σ_i/σ on specimen "B"

σ (kgf/mm ²)		3.31	3.57	3.82	4.08	4.33
T (°C)						
260	σ_i	3.16	3.31	3.41	3.49	3.67
	σ_i/σ	0.95	0.93	0.89	0.86	0.85
280	σ_i	3.11	3.24	3.31	3.41	3.59
	σ_i/σ	0.94	0.91	0.87	0.84	0.83
300	σ_i	3.01	3.18	3.26	3.39	3.57
	σ_i/σ	0.91	0.89	0.85	0.83	0.82
320	σ_i	2.98	3.13			
	σ_i/σ	0.90	0.88			
340	σ_i	2.93	3.05			
	σ_i/σ	0.89	0.86			

므로⁽⁸⁾ 부과응력이 증가할수록 일정한 정상크리이프 속도를 유지하기 위해서는 전위활주의 구동력이 되는 유효응력⁽⁹⁾의 비율이 증가해야 하므로 상대적으로 내부응력의 비율 σ_i/σ 가 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 2는 부과응력에 대한 의탄성변형률 ϵ_A 의 관계를 보여준다. 부과응력이 증가함에 따라 ϵ_A 도 증가하며, 시편 "A", "B"는 강도차이에 의한 다소의 측정치의 차이는 있으나 모두 유사한 증가경향을 나타내며, 이것은 Table 3에서 나타난 바와 같이 부과응력의 증가에 따른 내부응력의 증가에 의하여 휘어진 전위의 퍼짐이 활발해지기 때문으로 생각된다.

즉, Fig. 3의 휘어진 전위의 퍼짐과 내부응력 및 선장력(line tension)과의 관계에서 보는 바와 같이 정상상태의 크리이프 변형중에 부과응력에 의하여 Fig. 3의 1과 같이 휘어진 전위는 부과응력이 제거되면 부과응력과 반대 방향으로 작용하는 내부응력 σ_i 와 선장력에 의하여 Fig. 3의 2,3과 같이 퍼짐이 발생하며 이때 내부응력이 크면 Fig. 3의 3,4,5와 같이 내부응력에 의하여 전위는 반대방향으로 다시 휘어지게 되며 이 과정에서 동시에 발생하는 회복에 의하여 내부응력은 차츰 감소하고 반대 방향의 선장력은 점점 증가하므로 결국 선장력이 내부응력 보다 크게되어 Fig. 3의 6,7과 같이 전위는 다시 선장력에 의하여 원상태로 다시 퍼지게 되며 이 과정에서 내부응력은 거의 소멸되는 것이다⁽³⁾.

Table 4는 부과응력과 온도에 대한 회복율 r 의 관

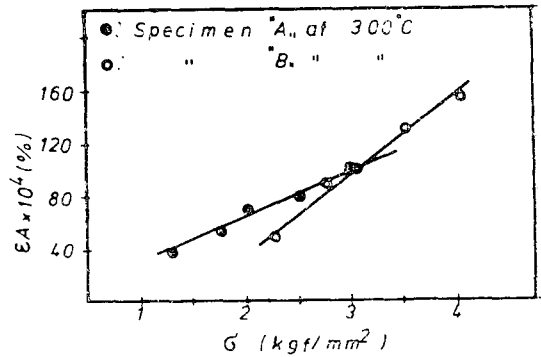


Fig. 2 Stress dependence of ϵ_A

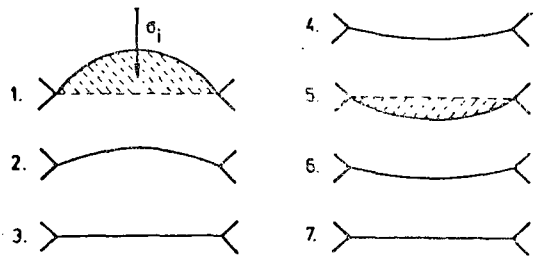


Fig. 3 Unbowing of a dislocation segment due to the combined effect of dislocation line tension and internal stress (configurations 1 to 3), rebowing of the segment due to the internal stress (configurations 3 to 5) and rebowing of the segment caused by dislocation line tension (configurations 5 to 7). [Courtesy of Scripta Metallurgica⁽³⁾]

제으로써 일정 온도하에서 부과응력이 증가함에 따라 회복율이 증가함을 보여주며, 이 역시 부과응력의 증가에 따른 내부응력의 증가가 그 원인으로 생각된다.

즉, 내부응력이 회복의 구동력으로 작용하여 회복을 촉진시키며 동시에 회복의 결과로써 내부응력 자체는 감소하는 것이다.

Table 4 Stress and temperature dependence of r (kgf/mm²·sec) on specimen "B"

T (°C)	300	320	340
σ (kgf/mm ²)			
3.57	8.49×10^{-5}	—	—
3.82	1.12×10^{-4}	1.69×10^{-4}	8.85×10^{-4}
4.08	1.42×10^{-4}	4.42×10^{-4}	2.83×10^{-3}
4.33	1.52×10^{-4}	1.24×10^{-3}	1.06×10^{-2}
4.59	1.77×10^{-4}	2.36×10^{-3}	—

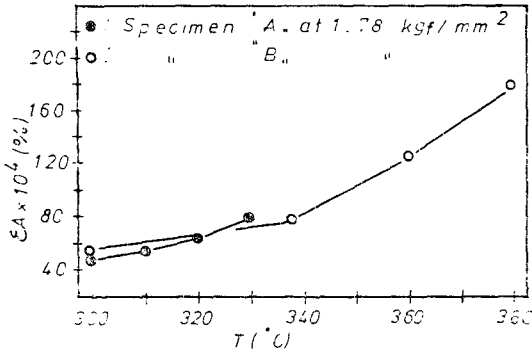


Fig. 4 Temperature dependence of ϵ_A

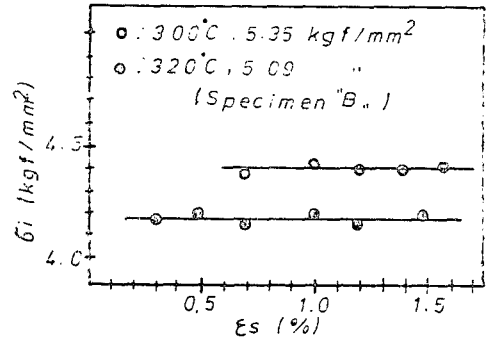


Fig. 6 Steady state strain dependence of σ_i

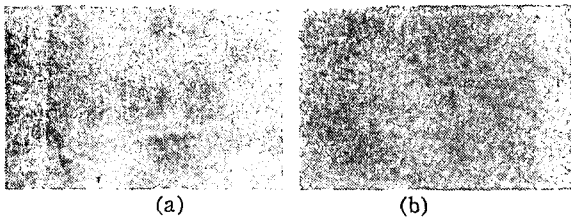


Fig. 5 SEM micrograph before (a) and after (b) anelastic deformation on 1.6% straining at 320°C, 3.31 kg/mm² of specimen "A"

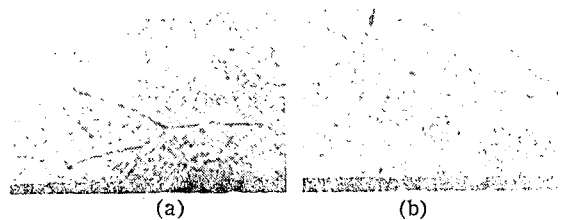


Fig. 7 SEM micrograph on 0.51% (a) and 1.23% (b) of steady state straining at 300°C, 5.35 kg/mm² of specimen "B"

3.2 σ_i , ϵ_A 및 r 의 온도 의존성

Table 3에서 나타난 바와 같이 내부응력 σ_i 는 온도가 증가함에 따라 감소한다.

이것은 온도가 증가하면 공공(vacancy)의 확산이 활발해지고, 따라서 전위의 비보존운동에 의한 회복이 용이해지므로 Table 4와 같이 온도가 증가함에 따라 회복율이 증가하게 되고 이로 인하여 내부응력이 감소하는 것이다.

Fig. 4는 온도에 대한 의탄성 변형률 ϵ_A 의 관계를 나타내며, 일정 부과응력하에서 온도가 증가함에 따라 ϵ_A 도 역시 증가하며 시편 "A", "B" 모두 유사한 증가양상을 보여준다. 이와 같이 온도의 증가에 따라 내부응력은 감소하지만 ϵ_A 가 증가하는 것은 온도가 높아지면 의탄성변형에 대한 내부응력의 영향이 작아지고 오히려 아결정립계의 형성이 용이해지므로⁽¹⁰⁾ 결정립계 활주(sliding), 아결정립계의 소멸, 이동(migration)등의 다른 변형기구들의 영향이 커지기 때문으로 보이며 Fig. 5의 조직 관찰이 이를 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 5는 일정온도, 일정 변형하에서 의탄성 변형전 (a)와 3시간 동안의 충분한 의탄성 변형후 (b)의 조직 사진으로, (a)에서는 인장방향(횡방향)으로 길쭉한 형태의 아결정립을 보이고 있으며, (b)에서는 의탄성 변형 동안의 아결정립계의 소멸, 이동 등에 의하여 아결

정립이 성장하고 정 다각형에 가까운 정상적인 아결정립의 형상으로 회복되었음을 보여준다.

3.3 σ_i , ϵ_A 및 r 의 정상크리이프 변형률 의존성

Fig. 6은 일정 온도, 일정 응력하의 정상 크리이프 변형과 내부응력 σ_i 의 관계로써 변형의 증가에 불구하고 σ_i 는 일정한 값으로 나타났다. 또한 Fig. 7은 같은 조건에서 정상 크리이프 변형률 0.51% (a)와 1.23% (b)의 하중 부과 상태에서 탄성 및 의탄성 변형을 최대한 억제하여 노중 급냉시킨 조직 사진으로 내부응력이 일정하여도 변형률에 따라 하부조직이 변화함을 보여준다. 변형의 증가에 따라 아결정립 내의 공공이 일제로 이동하여 명확한 아결정립계를 형성하고 결정립의 수도 증가하였다. 따라서 정상 크리이프 동안, 회복으로 인한 내부응력의 감소와 가공경화로 인한 내부응력 증가 뿐만 아니라, 변형의 증가로 인한 아결정립계의 거동과 같은 하부조직의 변화가 복합적으로 작용하여 내부응력이 일정한 상태로 유지되는 것으로 생각된다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 각각 정상크리이프 변형과 ϵ_A 및 r 과의 관계로써 일정 부과응력, 일정 온도하에서는 ϵ_A 와 r 둘 다 정상크리이프 변형 동안 변형의 크기

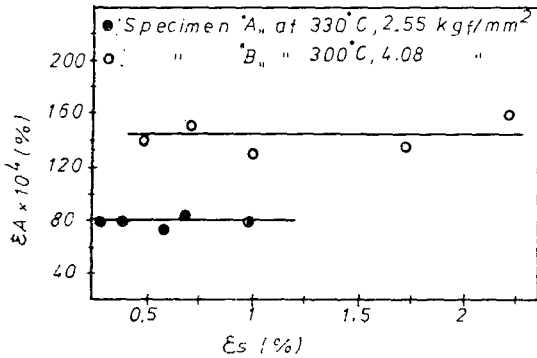


Fig. 8 Steady state strain dependence of ϵ_A

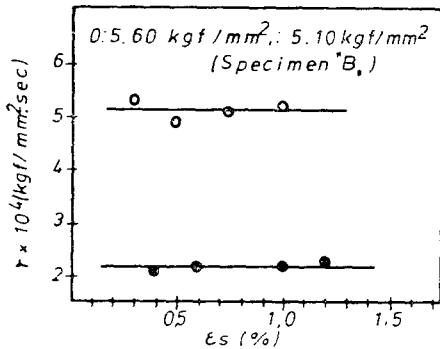


Fig. 9 Steady state strain dependence of r at 300°C

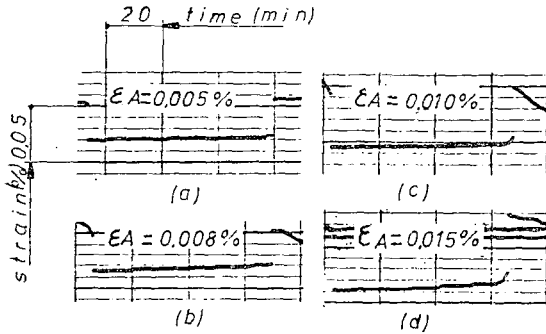


Fig. 10 Time dependence of anelastic strain during steady state creep of specimen "A" (a) 300°C, 1.78 kgf/mm² (b) 330°C, 1.78 kgf/mm² (c) 300°C, 3.06 kgf/mm² (d) 320°C, 3.06 kgf/mm²

에 관계 없이 거의 일정하게 유지됨을 보여준다.

3.4 의탄성 변형 시간에 대한 σ_i 및 ϵ_A 의 관계

일반적으로 의탄성 변형율의 크기는 응력제거 또는

[[감소 후 시간의 경과에 따라 증가하나 그 증가 양상은 Fig. 10과 같이 시험 조건에 따라 각각 다르게 나타났다. Fig. 10 (a), (b)와 같이 1.78 kgf/mm²의 저응력에서는 급속단계(fast stage)는 나타나지 않고 완속단계(slow stage)만 발생하였으며, Fig. 10 (c), (d)와 같이 3.06 kgf/mm²의 비교적 고응력에서는 급속단계와 완속단계가 명확하게 나타났다. 의탄성 변형 중의 내부응력 변화에 대한 Pahutova⁽³⁾ 등의 실험 결과에 의하면 상당히 짧은 시간 동안의 급속단계 중에 매우 빠른 내부응력 감소가 발생하였다. 따라서 급속단계는 내부응력에 의한 휘어진 전위의 퍼짐에 의하여, 완속단계는 전위의 비보존운동, 결정립계 활주 및 아결정립계 거동 등의 복잡한 현상에 의하여 변형이 주도되는 것으로 생각된다.

이상과 같이 일정 온도하에서는 부과응력이 증가하면 내부응력이 증가하고 내부응력이 휘어진 전위의 퍼짐의 구동력으로 작용하여 전위 밀도를 감소시키므로써 회복율과 의탄성 변형이 둘 다 증가하며, 또한 일정 온도, 일정 부과응력하에서는 정상크리프 변형 동안 변형이 증가함에도 불구하고 내부응력이 일정하고 동시에 회복율 및 의탄성 변형도 거의 일정하게 유지된다. 그러나 일정 부과응력하에서 온도가 증가하면 내부응력은 감소하지만 반대로 회복율과 의탄성 변형은 증가하며 이러한 조건하에서는 의탄성 변형과 회복의 원인이 되는 아결정립계 거동, 결정립계 활주, 자기확산에 의한 전위의 비보존운동 등의 다른 변형기구들의 영향이 내부응력의 영향보다 증가되기 때문으로 생각된다. 따라서 회복과 의탄성 변형은 위의 3가지 크리프 변형 조건에 대하여 모두 동일한 양상을 보여주므로 근본적으로 내부응력에 의한 휘어진 전위의 퍼짐 아결정립계 거동, 전위의 비보존운동에 의한 칼날전위의 상승 등의 동일한 변형기구들에 의존하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

2024 Al 합금의 고온 정상크리프 변형중에 실시한 내부응력 σ_i , 의탄성 변형 ϵ_A 및 회복율 r 에 대한 실험 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정 온도하의 정상크리프 변형중 σ_i , ϵ_A 및 r 는 모두 부과응력의 증가에 따라 증가하나, 변형의 증가와는 관계없이 일정하게 유지된다.

(2) 일정 부과응력하에서 온도가 증가하면 σ_i 는 감소하지만 ϵ_A 와 r 는 증가한다.

(3) 일정 온도, 일정 변형하에서 의탄성 변형동안 아결정립계의 이동, 소멸등의 아결정립계 거동이 발생한다.

(4) 위의 사실들을 종합하면 내부응력에 의한 취어진 전위의 퍼짐이 의탄성 변형과 회복의 중요한 변형기구로 작용하나 일정 부과응력하에서 온도가 증가하면 내부응력보다 아결정립계 거동, 전위의 비보존운동 등의 다른 변형기구들의 영향이 증대된다. 따라서 ϵ_A 와 r 은 위의 모든 실험조건에 대해서 동일한 양상을 나타내므로 의탄성 변형과 회복은 근본적으로 동일한 현상으로 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) 박경동, 강상훈, 2024 Al 합금의 고온 정상크리이프 거동에 관한 연구, 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp.9~12, 1984
- (2) V. Lupinc and F. Gabrielli, Effect of Grain Size, Particle Size and r' Volume Fraction on Strain Relaxation in Ni-Cr Base Alloys, Materials Science and Engineering, Vol. 37, pp.143~149, 1979
- (3) M. Pahutová, J. Čadek and P. Ryš, Anelasticity and Measured Internal Stress in High Temperature Creep, Scripta Metallurgica, Vol. 11, pp.1061~1066, 1977
- (4) M. Pahutová, J. Čadek and P. Ryš, Some Stress change Experiments on Creep in α Zirconium, Materials Science and Engineering, Vol. 39, pp. 169~171, 1979
- (5) C.N. Ahlquist and W.D. Nix, The Measurement of Internal stresses during Creep of Al and Al-Mg Alloys, ACTA Metallurgica, Vol. 19, pp.373~385, 1971
- (6) J.H. Gittus, Strain, Recovery and Work-hardening during Creep due to Dislocations, Phil. Mag. Vol. 23, pp.1281~1296, 1971
- (7) S. Takeuch and A.S. Argon, Steady-state Creep of Single-phase Crystalline Matter at High Temperature, J. Materials Science, Vol. 11, pp.1542~1566, 1976.
- (8) C.N. Ahlquist, R. Gasca-Neri and W.D. Nix, A Phenomenological Theory of Steady state Creep Based on Average Internal and Effective Stresses, ACTA Metallurgica, Vol. 18, pp.663~671, 1970
- (9) K. Kucharová, I. Saxl and J. Čadek, Effective stress in steady state Creep in Al-5.5 at. % Mg Solid Solution, ACTA Metallurgia, Vol. 22, pp. 465~472, 1974
- (10) F. Garofalo, Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals, chap. 5, Macmillan Series in Materials Science, 1966