

# 전력용 강재의 정적·동적 크리프의 상관성과 예측 및 AE평가(1) ; 정적 크리프와 AE평가

오 세 규\* · 장 홍 근\*\* · 송 정 근\*\*\*

(98년 1월 4일 접수)

Life Prediction and AE Evaluation of Pure or Cyclic Creep for Power Plant  
Materials ; Pure Creep and AE Evaluation

Sae-Kyoo Oh\* · Hong-Keun Chang\*\* · Jeong-Keun Song\*\*\*

**Key Words** : Creep Properties(크리프특성), Creep Stress(크리프응력), Rupture Time(파단시간), Initial Strain(초기연신률), Acoustic Emission(음향방출)

## Abstract

In this 1st report, the relationship between pure creep properties and initial strain was studied and also its acoustic emission test was performed during creep test at 500, 600 and 700°C. And the applicability of the acoustic emission technique was investigated to analyze the quantitative relationship between all the pure properties(creep strength, creep rupture time or creep life, steady state creep rate, total creep rate, creep strain, total creep strain, etc.) and the initial strains as well as to analyze AE properties during the pure creep loading condition.

## 1. 서 론

화력발전용 증기터빈 로터와 같은 발전용 강재는 고온, 고압하에서 장시간 사용되므로 정적크리프(static creep or pure creep) 및 사용반복에 따른 동적 크리프(cyclic creep or dynamic creep)에 의한 크리프 손상을 불의에 일으키게 되면, 고장 수리에 의한 단전과 급작스런 파손에 의한 사고로 보

수내지 교체 등의 심각한 재산손실과 인명피해가 우려된다. 따라서 강재의 장시간( $10^5$  시간) 고온 크리프 특성을 단시간 실험을 통하여 파악하고 예측한다는 것은 터빈 로터(turbine rotor)의 설계, 제조, 운전 및 보수에 있어서 가장 기본적이고 필수적인 요건 중의 하나이다. 특히 반복적인 동적 크리프와 정적 순수크리프의 상관성을 규명하고 안전강도와 수명을 예측함으로써 사고의 미연 방지

\* 종신회원, 부경대학교 공대 기계·자동차공학부

\*\* 정회원, 한국기계연구원

\*\*\* 정회원, 부경대학교 대학원

는 물론 전력손실 예방을 도모하고, 실시간에 연속 감시를 할 수 있는 AE평가법의 개발의 전망은 매우 필요하고 절실한 실정이다.

본 연구(1)에서는 터빈로터 강재인 NiCrMoV강, 1CrMoV강, 12Cr강에 대한 정적·동적 크리프 및 초기연신률(IS)과의 상관성 규명, 초기연신률법(ISM)<sup>1-3)</sup>에 의한 정적, 동적 크리프 예측식 도출, 그리고 정적·동적 크리프의 AE 특성 규명<sup>3)</sup>에 관한 연구에서 먼저 NiCrMoV강에 대한 정적 크리프 특성 규명과 AE 평가에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에서는 국내 H사가 제조한 울진, 영광 원자력 발전소의 터빈 로터재인 B50A5 T105 3.65NiCrMoV강이다. 사용재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

시험편의 형상, 치수는 Fig.1과 같다.

Table 1 Chemical composition of material(wt%)

Mtl.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
3.65NiCrMoV	0.27	0.08	0.35	0.01	0.007	3.65	1.7	0.55	0.11

Table 2 Mechanical properties of material

Mtl.	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\Psi$ (%)	E.
3.65NiCrMoV	955	831	21.3	69.6	166184

$\sigma_t$  : Tensile strength,  $\sigma_y$  : Yield strength,  
 $\epsilon$  : Elongation,  $\Psi$  : Reduction of area  
 E : Elastic modulus

(a) Room Temperature

Mtl.	Temp (°C)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\Psi$ (%)
3.65NiCrMoV	500	634	577	28.3	83.7
	600	407	390	34.2	90.9
	700	151	117	83.9	98.1

(b) High Temperatures

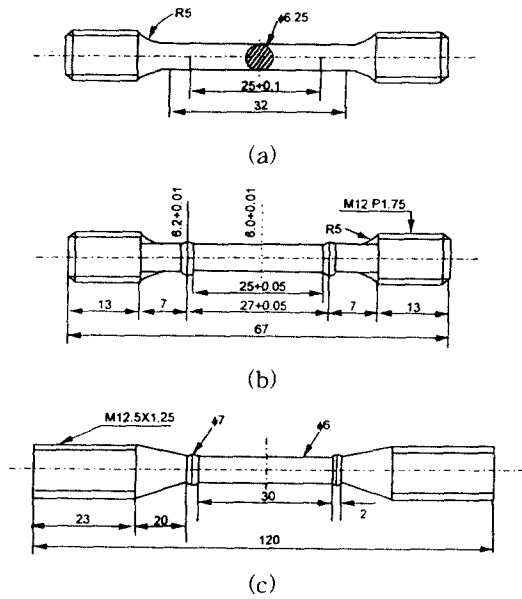


Fig. 1 Geometry of room temperature tensile specimen (a), high temperature tensile specimen (b) and creep test specimen (c)

### 2.2 실험방법

크리프 시험기는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029로 온도 측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 10°C/min로 가열하였다. 크리프시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점

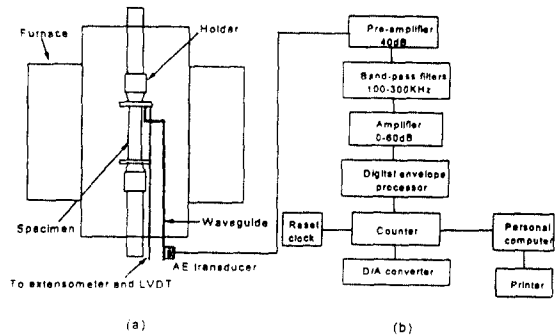


Fig. 2 AE transducer location (a) and block diagram of AE monitoring equipment and computer aided strength and toughness evaluation (b)

거리 30mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하였고 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하였다. 초기연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정된 것으로 통일하였다.

정적 크리프특성의 실시간 평가를 위하여 미국의 PAC사의 LOCAN 320 AE측정장치를 사용하였다.

Fig. 2는 고온 크리프 시험시 AE 시험장치의 개략도를 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 크리프 곡선

일정온도(500, 600, 700℃) 하에서 응력을 변화시켰을 때 구한 3.65NiCrMoV강의 정적 크리프 곡선은 각각 Fig. 3 (a), (b), (c)에 나타내었다. 각각의 경우에 초기연신률(initial strain, IS)도 측정하여 표시하였다.

Table 3은 각각 Fig. 3 (a), (b), (c)에서 크리프 실험한 결과의 데이터를 정리한 것으로서, 온도 500, 600, 700℃에서 응력( $\sigma$ , MPa), 파단시간( $t_r$ , h), 초기연신률( $\epsilon_0$ , %), 총크리프속도( $\dot{\epsilon}_T$ , %/h), 정상 크리프속도( $\dot{\epsilon}$ , %/h), 총연신률( $\epsilon_T$ , %)을 나타내고 있다.

Table 3 Data by creep test of 3.65CrMoV steel

Temp.	Stress	Rupture time	Initial strain	Total creep rate	Steady state creep rate	Total strain
(℃)	$\sigma$ (MPa)	Tr(h)	$\epsilon_0$ (%)	$\dot{\epsilon}_T$ (%/hr)	$\dot{\epsilon}$ (%/hr)	$\epsilon_T$ (%)
500	200	$10^4$	$7.99 \times 10^{-5}$			
	345	900	0.0125	0.0238	0.0017	
	420	115.6	0.0583	0.1946	0.025	22.5
	480	12	0.2330	1.8250	0.403	21.9
	550	3.17	0.7493	7.2240	1.472	22.9
600	40	$10^4$	$2.49 \times 10^{-5}$			
	118	1000	0.0057	0.0620	0.0052	
	190	29	0.0661	1.7424	0.21	50
	230	8	0.1695	5.0838	1.01	40.67
	304	0.817	0.6936	38.8000	9.525	31.7
700	5	$10^4$	$2.82 \times 10^{-5}$			
	23	1000	0.0053	0.1913	0.0338	
	50	34	0.0747	3.0706	0.9175	104.4
	80	4.56	0.3746	19.5395	6.85	89.1
	100	1.66	0.8008	57.3494	17.792	95.2

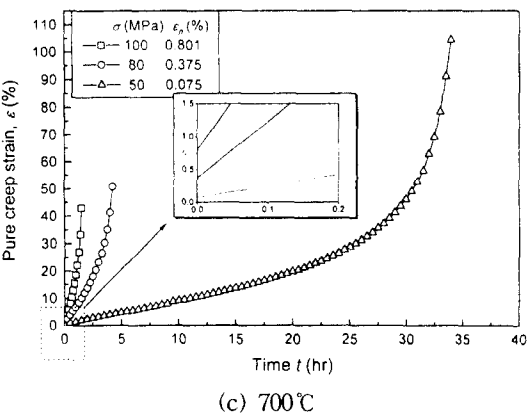
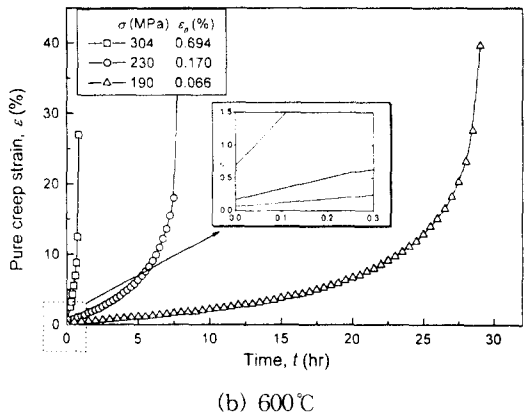
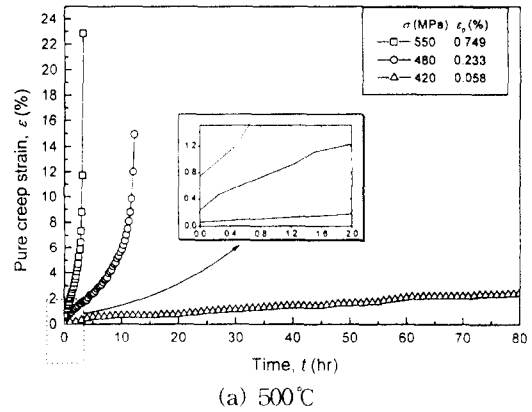


Fig. 3 Typical pure creep curves for 3.65NiCrMoV steel at 500, 600, 700℃

### 3.2 정적 크리프 응력과 정상 크리프 속도와의 상관성

Fig. 4는 정적 크리프 실험결과에서 크리프 응력  $\sigma$  (MPa)와 정상 크리프 속도  $\dot{\epsilon}$  (%/h)가 양대수 좌표에서 그 값이 선형적인 상관관계가 성립함을 보여준다.

양대수 직교 좌표 평면에서 정상 크리프 속도는 응력이 높아질수록 증가하며, 온도가 상승할 수록 그 증가율이 높아지고 있음을 알 수 있고, 이는  $Oh^3$ <sup>4)</sup>의 보고와 일치한다.

$\sigma$ - $\dot{\epsilon}$ 의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

$$500^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.063 \log \dot{\epsilon} + 2.720 \quad (R^2=0.95) \quad (1)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.123 \log \dot{\epsilon} + 2.360 \quad (R^2=1) \quad (2)$$

$$700^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.234 \log \dot{\epsilon} + 1.710 \quad (R^2=1) \quad (3)$$

여기서  $R^2$ 은 커브피팅(curve fitting)에서 기여율(coefficient of determination)을 나타낸다.

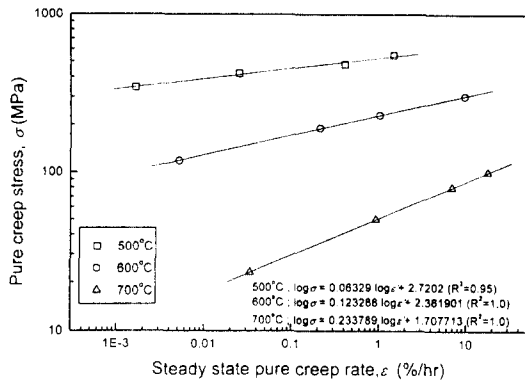


Fig. 4 Relationship of stress versus steady state creep rate of 3.65NiCrMoV steels at 500, 600 and 700°C.

### 3.3 크리프응력과 크리프수명(파단시간)과의 상관성

온도가 500, 600 및 700°C에서 3.65NiCrMoV강재에 대한 크리프 설계 데이터 선도(creep design data diagram)를 얻기 위하여 응력과 파단수명과 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 각 온도하에서 크리프 응력이 증가함에 따라 크리프 수명은 직선적

으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 다만 500°C와 600°C의 경우 기울기가 완만하다.

Fig. 5에서 파단수명  $10^3$ hr까지는 직선적으로 감소하지만 문헌<sup>5, 6)</sup>에 의하면 파단 수명  $10^4$ hr에서는 크리프 강도가 급격히 감소하므로 단기 크리프 수명범위에 의하여 장시간( $10^3$ hr 이상) 크리프 수명을 예측한다는 것은 매우 위험하다는 것을 알 수 있다.

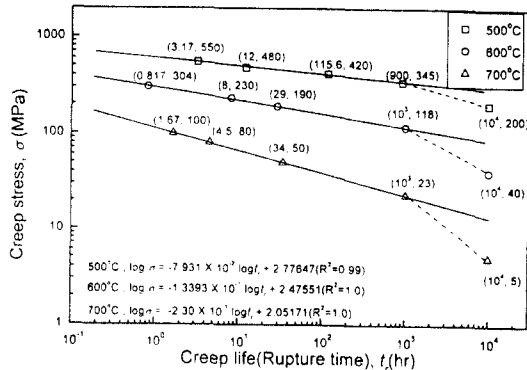


Fig. 5 Relationship of creep stress versus creep life(rupture time) of 3.65NiCrMoV steel at 500, 600 and 700°C

### 3.4 초기연신률과 정상크리프 속도 및 총크리프 속도와의 상관성

Fig. 6과 Fig. 7은 크리프 초기연신률  $\epsilon_0$ (%)와 정상 크리프 속도  $\dot{\epsilon}$ (%/h) 및 총크리프 속도  $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)와의 상관성을 나타낸다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 초기연신률이 증가함에 따라서 정상크리프 속도가 선형적으로 증가하는 관계를 보여주고 있으며, 온도의 감소에 따라서 기울기의 변화는 다소 증가하고 있다. 이들의 상관관계를 최소자승법을 이용한 회귀해석법의 결과 다음과 같이 전산되었다.

$$500^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon} = 1.704 \log \epsilon_0 + 0.506, \quad (R^2=0.99) \quad (4)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon} = 1.567 \log \epsilon_0 + 1.210, \quad (R^2=1.0) \quad (5)$$

$$700^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon} = 1.249 \log \epsilon_0 + 1.370, \quad (R^2=1.0) \quad (6)$$

Fig. 7에서는 초기변형률이 증가함에 따라서 전 크리프 속도가 선형적으로 증가하는 관계를 보여 주고 있으며, 온도의 증가에 따라 경사의 변화가

거의 없음을 알 수 있다. 이들의 상관관계는 다음과 같이 전산되었다.

$$500^{\circ}\text{C} ; \log \dot{\epsilon}_T = 1.422 \log \epsilon_0 + 1.08, (R^2=0.99) \quad (7)$$

$$600^{\circ}\text{C} ; \log \dot{\epsilon}_T = 1.334 \log \epsilon_0 + 1.78, (R^2=1.0) \quad (8)$$

$$700^{\circ}\text{C} ; \log \dot{\epsilon}_T = 1.207 \log \epsilon_0 + 2.03, (R^2=0.93) \quad (9)$$

식(4)~(9)에서 초기연신률을 크리프 초기순간에 측정하면 장기간의 크리프특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다.

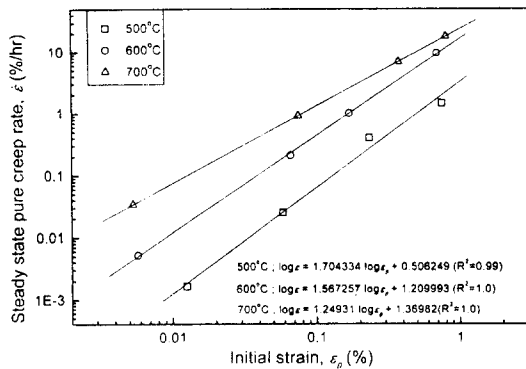


Fig. 6 Relationship of steady state creep rate versus initial strain of 3.65NiCrMoV steel at 500, 600 and 700°C

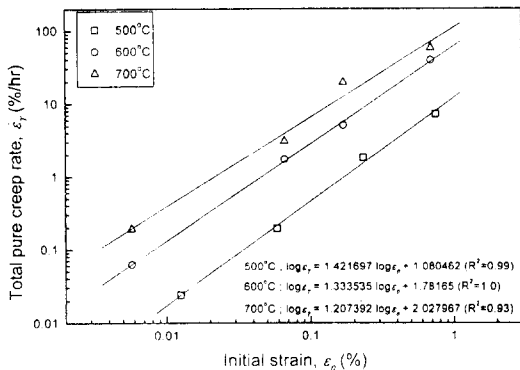


Fig. 7 Relationship of total creep rate versus initial strain of 3.65NiCrMoV steel at 500, 600 and 700°C

3.5 AE에 의한 정적 크리프의 정성적·정량적 해석.

음향방출시험법(acoustic emission testing tech-

nique, AE)에 의한 고온 정적·동적 크리프를 평가한 자료는 국내외적으로 거의 없다. 다만 Oh 등<sup>7, 8)</sup>에 의해 고온 크리프를 AE에 의해 평가 가능성 시험을 시도한 결과의 보고 뿐이다. 정적 크리프 시험중에 크리프 변형거동을 AE에 의해 연속 감시, 기록하여, creep strain vs. time, counts vs. time, energy vs. time을 누적총량(cumulative total)과 단위시간의 양에 대한 두가지로 나누어 정성적으로 조사하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 시간에 따른 creep strain-counts rate-total counts와 creep strain-energy rate-total energy의 관계양상을 나타낸 것으로서 AE에 의한 크리프거동의 정성적 해석이 가능함을 보여주고 있다.

Fig. 8, Fig. 9의 정적 크리프 실험 중 측정된 AE 특성치들을 Table 4에 나타내었다.

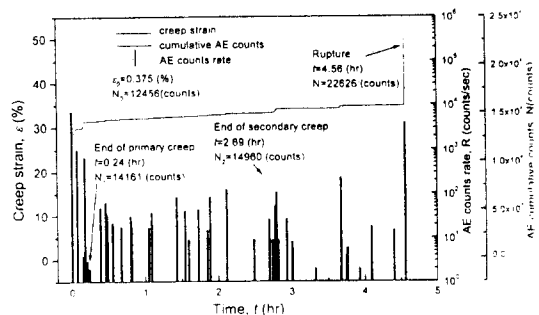


Fig. 8 AE counts rate and cumulative counts of 3.65NiCrMoV steel under pure creep test(T=700°C, σ=80MPa, AE Gain=80dB)

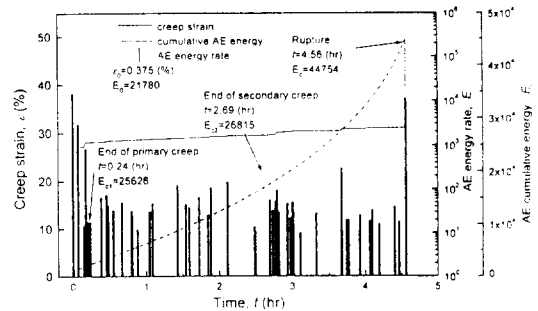


Fig. 9 AE energy rate and cumulative energy of 3.65NiCrMoV steel under pure creep test(T=700°C, σ=80MPa, AE Gain=80dB)

Fig. 10은 3.65NiCrMoV강의 제 2 정적크리프 시작까지의 AE 총량  $N_1$ (counts)과 크리프 응력  $\sigma$  (MPa)과의 정량적 상관성을 Table 4의 결과로부터 각각의 온도에 대하여 조사한 그래프다. 그림에서 알 수 있듯이 500℃, 600℃에서는  $\sigma$ 와  $N_1$ 은 직선적 상관성이 있음이 확인되었다. 700℃의 고온에서는 응력의 미소 변화에 따른 AE 총량의 증가-감소 변화가 급변하는 양상으로 나타나고 있다. 이는 앞으로 응력의 여러변화에 따른 AE 총량의 변화를 더 많은 실험 데이터로 조사할 필요가 있다.

Table 4 Quantitative properties of AE according to creep proceeding for 3.65NiCrMoV steel

Temp. (°C)	Creep stress	AE Gain (db)	$E_{c1}$	$N_1$ (counts)	$t_a$ (hr)	$N_2$ (counts)	$t_r$ (hr)
500	420	75	3696	2544	86	2581	115
	480		8628	4794	8	4794	12
	520		9995	5980	3.05	6050	5.17
	550		10770	6852	1.64	6853	3.17
600	190	80	95341	10732	15.4	25855	29
	200		62277	8801	10.6	20516	20.65
	215		33760	5395	7.03	10945	14.8
	230		5675	2621	3.49	2865	8
700	304	75	2536	1905	0.35	1905	0.817
	80	208568	2118	22	33755	31	
		26815	14161	2.69	14960	4.56	
		2589	1425	1.1	1711	1.66	
2415		1392	0.86	5911	1.4		

$t_a$  : Time to the end of secondary creep (accelerated creep start)

$t_r$  : Time to rupture

$N_1$  : Cumulative counts to start of secondary creep

$N_2$  : Cumulative counts to start of tertiary creep (accelerated creep start)

$E_{c1}$  : AE cumulative energy to end of primary creep

Fig. 11은  $E_{c1}$ 과 응력  $\sigma$ 와의 정량적 상관성을 나타내는 것으로 온도가 500, 600 및 700℃에 대하여 조사한 그래프로 500℃와 600℃에서는 정량적 상관성이 확인될 수 있으나 700℃에서는 역시 응력의 미소 변화에 따른 AE에너지 총량 변화가 급변하여 앞으로 계속된 연구가 필요한 부분이다.

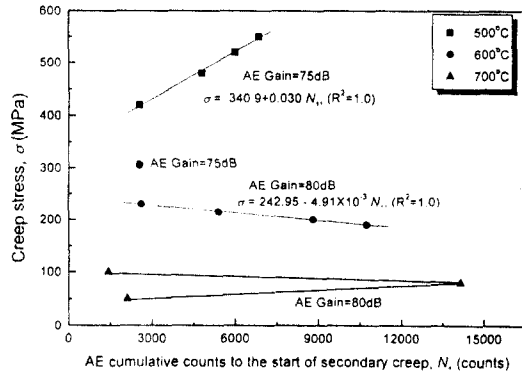


Fig. 10 Relationship between  $\sigma$  and  $N_1$  to the start of secondary pure creep for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700℃

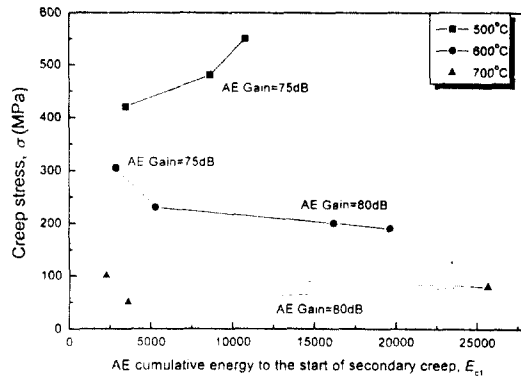


Fig. 11 Relationship between  $E_{c1}$  and  $\sigma$  to the start of secondary pure creep for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700℃

Fig. 12는 제 3 크리프 시작까지의 AE의 총량  $N_2$ (counts)와 크리프 응력  $\sigma$  (MPa)가 각 온도에서 모두 직선적 상관성이 있음을 보여준다.

Fig. 13은 제 3 크리프의 시작까지에 이르는 AE 총 에너지량  $E_{c2}$ 와 크리프 응력  $\sigma$  (MPa)사이의 정량적 상관성을 500, 600 및 700에 대해 조사한 결과의 그래프를 나타내고 있다. 역시 모두 직선적 상관성이 존재한다.

Fig. 12와 Fig. 13에서 알 수 있듯이 제 3 크리프의 시작 즉, 가속 크리프가 시작될 때의 AE 누적 총량 및 AE 총에너지량이 크리프 응력과의 정량

적 상관성을 잘 나타내므로, AE 누적총량이나 AE 총에너지량을 파라미터로 사용하여 고온 크리프의 가속 크리프 시작을 예측하는 것이 용이함을 확인할 수 있다.

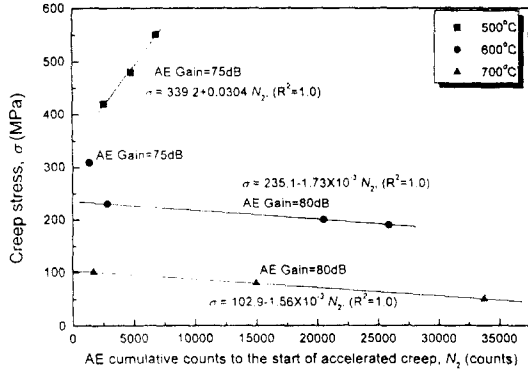


Fig. 12 Relationship between  $\sigma$  and  $N_2$  to the start of accelerated pure creep for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700°C

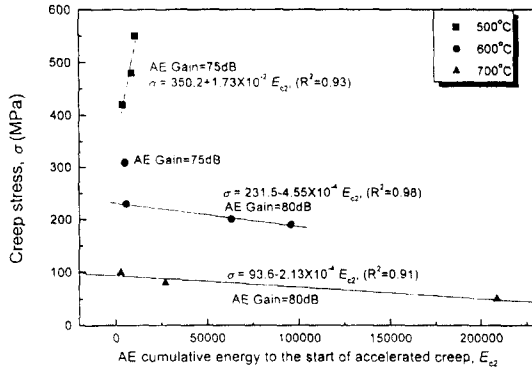


Fig. 13 Relationship between  $\sigma$  and  $E_{c2}$  to the start of accelerated pure creep for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700°C

Fig. 14는  $N_1-t_a$ 의 상관관계 그래프로 양대수 좌표평면에서 500°C와 600°C에서는 직선적 상관성이, 700°C에서는 2차 함수적 상관성이 존재함이 확인됨으로써,  $N_1$ 에 의한  $t_a$ 의 예측이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 15는 제 2 크리프(정상 크리프) 시작까지의 AE총량  $N_1$ (counts)를 크리프 시험 중 측정하므로

제 1 크리프 파단시간  $t_a$ (hr)을 예측하기 위하여,  $N_1-t_r$ 의 상관관계를 나타낸다.

양대수 좌표평면에서 500°C와 600°C에서는 직선적 상관성이, 700°C에서는 2차 함수적 상관성이 존재함이 발견되었다.

$N_1-t_a$ ,  $N_1-t_r$ 사이에는 정량적 상관성이 존재하므로  $N_1$ 의 측정만으로  $t_a$ 와  $t_r$ 의 예측이 크리프 중에 가능함이 확인 되었다. 다만 온도에 따라 직선의 기울기와 곡선의 급변이 심각한 이유는 앞으로 밝혀져야 할 것이다.

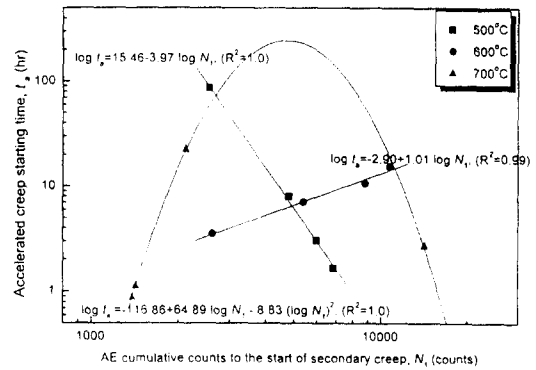


Fig. 14. Relationship between  $N_1$  and  $t_a$  for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700°C

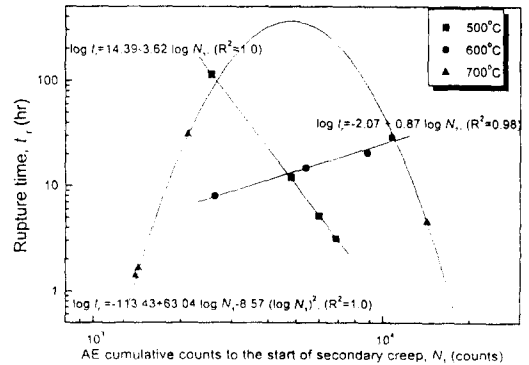


Fig. 15. Relationship between  $N_1$  and  $t_r$  for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700°C

Fig. 16과 Fig. 17은 3 크리프(가속크리프) 시작 시간까지의 AE 총량  $N_2$  (counts)를 크리프 시험 중 측정함으로써 제 3 크리프 시작시간,  $t_a$ (hr)는 물론

크리프 파단시간,  $t_r$ (hr)을 예측하기 위하여  $t_a-N_2$ ,  $t_r-N_2$ 관계를 나타내며, 양대수 좌표평면에서 직선적 또는 2차 함수적 정량관계가 성립함을 나타내고 있다.

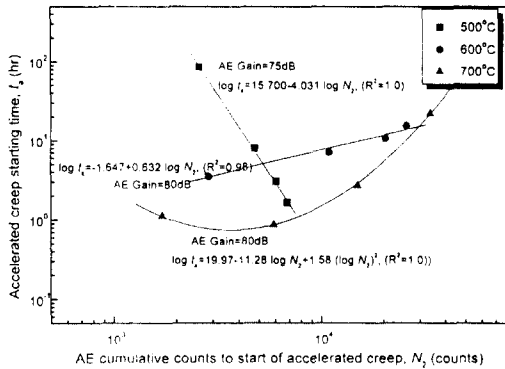


Fig. 16. Relationship between  $N_2$  and  $t_a$  for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700°C

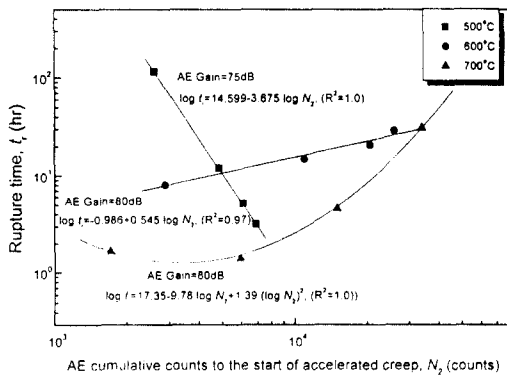


Fig. 17. Relationship between  $N_2$  and  $t_r$  for 3.65NiCrMoV at 500, 600 and 700°C

결과적으로 제 2 크리프(정상크리프) 시작까지의 AE 총량 또는 AE 총에너지량은 제 3 크리프(가속크리프) 시작 시간 및 크리프 파단시간(수명)과 정량적 상관성이 존재하며, AE에 의해 크리프 예측이 가능함이 확인되었다.

#### 4. 결 론

본 연구(1)에서 발전용 터빈로터 강재인

3.65NiCrMoV강에 대한 정적 크리프 특성 및 초기 연신률과의 상관성을 규명하고 정적 크리프의 AE 특성에 관한 평가를 실시간에 실험을 통하여 얻은 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 발전용 터빈 로터 강재의 정적 크리프 제특성을 정량적으로 규명하였으며, 초기연신률과의 상관성을 정량적으로 규명하였다.
- 2) 3.65NiCrMoV강에 대한 고온 정적 크리프 시험 중 AE 거동을 조사한 결과 크리프 곡선의 초기 변형, 순간변형, 천이크리프, 정상 크리프 속도, 가속 크리프, 균열 파단에 이르는 여러 크리프 거동에 따라 AE 특성들이 점진적, 돌발적 증가 등이 나타나므로 AE parameter를 실시간에 해석, 평가함으로써 고온 정적 크리프 특성을 규명할 수 있었다.
- 3) 제 2 크리프(정상크리프) 시작까지의 AE 총량 또는 AE 총에너지량은 제 3 크리프(가속크리프) 및 크리프 파단시간(수명)과 정량적 상관성이 존재하며, AE에 의하여 크리프 수명예측이 가능함이 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원(96-023)에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 이원석, "ISM에 의한 SUH3과 SUH35 마찰용 접재의 고온 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구", 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp.18~51, 1997
- 2) 이향동, "로켓 모터 노즐재의 마찰용접에 대한 ISM에 의한 고온 Creep 수명예측과 AE평가에 관한 연구", 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp.17~40, 1997
- 3) Oh, Sae-Kyoo, Hong-Keun Chang, Min-Hwa Chung and Sang-Guk Lee, "Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of



- Steam Turbin Rotor Steel and AE Evaluation", Proc. The 7th Int. Offshore Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. 4-S19, pp.21~28, 1997
- 4) 이상국, 정민화, 오세규, 송정근, "발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성평가(3)-2.25Cr1Mo강의 크리프 특성과 LMP에 의한 크리프 수명 예측, 한국해양공학회 후계 학술강연 논문집, pp.73~77, 1997
  - 5) Oh, S. K., T. E. Jeon, Y. S. Song, S. W. Oh and J. S. Oh, "Relationship between Cyclic Creep Properties and Initial Strain of Cr-Mo Alloy Steels at High Temperatures and AE Evaluation(1st report) ; Effects of Initial Strain on Cyclic Creep Properties", Proc. Asian Pacific Conference for Fracture and Strength '96, APCFS, pp.639~646, 1996
  - 6) Woodford D. A., "Perspectives in Creep and Stress Rupture", Proc. of the Int'l Cof. on Creep, pp.11~19, 1986, Tokyo
  - 7) Chang, H. K., S. K. Oh, T. E. Jeon and B. S. Lee, "Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation", Proc. The 4th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, ISOPE- PACOMS, pp.239~248, 1996
  - 8) 오세규, "Cr-Mo계 합금강의 사이클릭 고온 크리프 특성과 초기연신률과의 상관성 및 AE평가", 한국과학재단 '95 핵심 전문연구과제 연구 결과보고서, pp.9~43, 1996