

음향방출법에 의한 항공기용 가스터빈 재료의 크리프 수명예측 평가

Evaluation on Creep Life Prediction of Aircraft Gas Turbine Material by AE

공유식 · 윤한기 · 오세규

Y. S. Kong, H. K. Yoon, S. K. Oh

Key Words : Acoustic emission(음향방출), AE cumulative counts(AE누적총량), Secondary creep (2차 크리프), Tertiary creep(3차 크리프), Rupture time(파단시간)

Abstract : There has been no report on the life prediction for gas turbine materials at high temperatures based on the creep properties and their relationship with the AE(acoustic emission) properties as a means of real time non destructive testing. One of the important issues is thus to develop a reliable method of evaluating creep properties by the AE technique. In this paper, the real time evaluation of high temperature creep time and AE cumulative counts for nickel based superalloy Udimet 720 was performed on round bar type specimens under pure load at the temperatures of 811, 922 and 977K. The total AE cumulative counts until the starting point of secondary creep(N_1) and that of tertiary creep(N_2) have quantitative relationship with the tertiary creep time and the rupture time. It is thus possible to construct the life prediction system based on creep and the prevention system of tertiary creep by using AE technique.

1. 서 론

항공기용 가스터빈 재료는 고온에서 장시간 사용되므로 정적 크리프 및 사용반복에 따른 동적 크리프에 의한 크리프 손상을 불시에 일으키게 되어, 파손은 물론 급기야 사고로 인하여 인명피해가 우려되는 것으로서 치명적 손실이 아닐 수 없다¹⁾. 따라서 정적 크리프의 안전강도와 수명을 예측함으로써 사고의 미연 방지는 물론 재료파손위험 예방을 도모하고, 실시간에 연속감시를 할 수 있는 AE 평가법에 의한 재료손상 해석법이 구축될 경우 그 응용 가능성은 매우 높다.

국내외적으로 항공기용 가스터빈 재료에 대한 고온 하에서의 정적 크리프와 동적 크리프의 확실한 상관성 규명과 수명예측에 관한 연구는 거의 없으며, 또한 이러한 정적·동적 크리프 중에 발생하는 음향방출 특성을 규명하는 음향방출법에 의

한 운전 중 실시간 평가에 관한 연구는 미약한 실정이다^{2~5)}. 따라서 본 연구에서는 항공기용 가스

터빈 재료인 U720(Udimet 720)의 음향방출 시험장치에 의한 크리프 특성을 정량적으로 평가함으로써 3차 크리프 방지 시스템 구축이 가능하므로 비파괴 검사에 의한 분석은 부품 특성평가에 대단히 중요하기 때문에 음향방출 특성 규명에 관한 연구를 수행하고자 하였다^{5~8)}. 그러므로 국내는 물론 국제적으로 획기적이고 실용화를 통한 안전성과 신뢰성 있는 항공기용 가스터빈 재료의 설계, 제작 및 사용을 위한 기초자료로써 그 기여도가 클 것으로 전망된다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 R사로부터 구입한 것으로서 항공기용 가스터빈의 디스크에 사용되는 초내열합금이다. 사용재료의 화학성분과 기계적 성질

접수일 : 2001년 5월 10일
공유식 : 동의대학교 산업기술개발 연구소
윤한기 : 동의대학교 기계공학과
오세규 : 부경대학교 기계공학부

은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 사용 재료에 대한 열처리 조건을 Table 3에 나타내었다. 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같고, 크리프 시험기는 미국 SATEC사(DLF 10 1029)의 크리프 시험기를 사용하였다⁹⁾.

Table 1 Chemical composition of material (wt. %)

Material	C	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	B	Zr	Ni
U720	0.025	18	14.75	3	1.25	5	2.5	0.035	0.035	bal.

Table 2 Mechanical properties of U720

(a) Room temperature

Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area Ψ (%)	Vickers hardness Hv
U720	1385	1025	10	11.9	466

(b) High temperatures

Temp	811K				922K				977K			
	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	Ψ (%)	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	Ψ (%)	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	Ψ (%)
U720	142	1070	119	143	139	941	13	143	123	977	15.1	185

Table 3 Heat treatments of U720

Treatment	Temp. × Time	Cooling	Hv
Standard	1105°C × 4 h	Air cooling	429
	650°C × 24 h	Air cooling	456
	760°C × 16 h	Air cooling	466

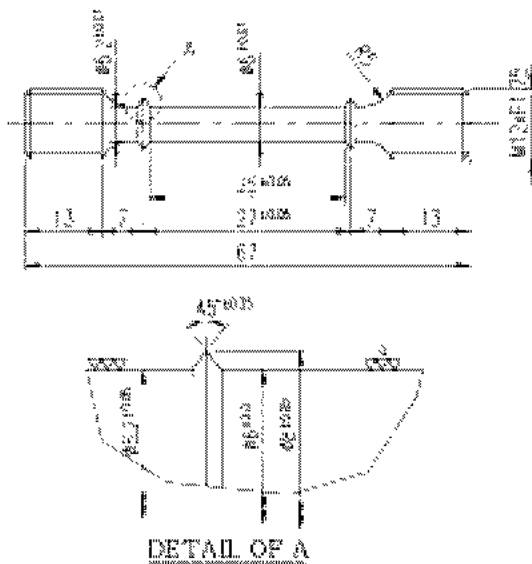


Fig. 1 Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139 83) (unit : mm)

2.2 실험 방법

AE에 의한 크리프 특성 평가에 사용된 AE 시험기는 PAC사의 음향방출 시험장치(PAC LO CAN320, 4 channel)로서, 그 AE 시스템 구조는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. Fig. 2(a)는 크리프 실험 중에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(transducer, R15, 150kHz)를 노외부에 만든 센서 부착판에 고정하였고, (b)는 크리프 시험편에 연결된 노외부에 부착된 변환기를 거쳐 연결된 음향방출 시험장치의 개략도를 나타낸다.

부착판에 고정된 변환기로부터 전달된 AE 신호는 프린터에 기록되며, 그 기록 결과는 단위 시간당 AE량 또는 AE 누적총량의 형태로 표시될 수 있고, AE 시험기는 AE량으로 표시될 수 있게 디지털 기록장치(digital read out system)를 갖추고 있다. 주파수 범위의 넓은 스펙트럼을 포함하는 광범위한 발원으로부터 AE가 발생하기 때문에 고감도 변환기용 전치증폭기(pre amplifier)와 함께 사용하였다. 그리고 AE 시스템 이득(gain)은 전치증폭기에서 40dB(100~300 kHz filter), 낮은 수준의 신호전압을 높이기 위하여 주증폭기에서 40dB을 제공하여, 합계 80dB로 고정하였다. 그리고 외부소음을 제거하기 위해 한계전압(threshold voltage)을 1.0V로 설정하여 실험하였다.

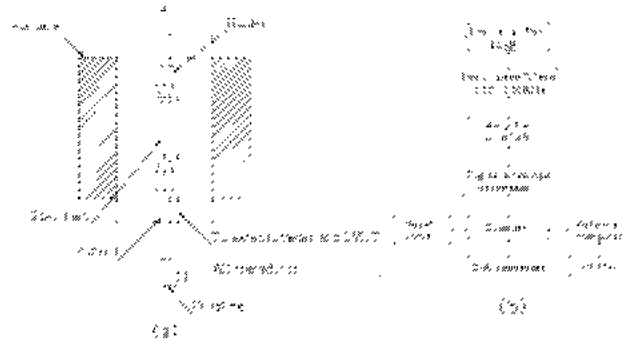


Fig. 2 AE transducer location (a) and block diagram of AE monitoring equipment and computer aided control system(b)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리프 곡선과 AE 특성

Fig. 3(a)~(c)는 811K에서 표준열처리 후 AE 누적총량의 그래프를 나타내고 있다. 이들 그래프에서 나타낸 것을 살펴보면, AE의 여러 변수 중 AE 총량률(counts rate)과 AE 누적총량을 크리프

시험에서 구하여, 크리프 변형과 시간 관계 곡선인 크리프 곡선에 맞춰 비교함으로써 크리프의 정량적 해석에 접근하고자 하였다.

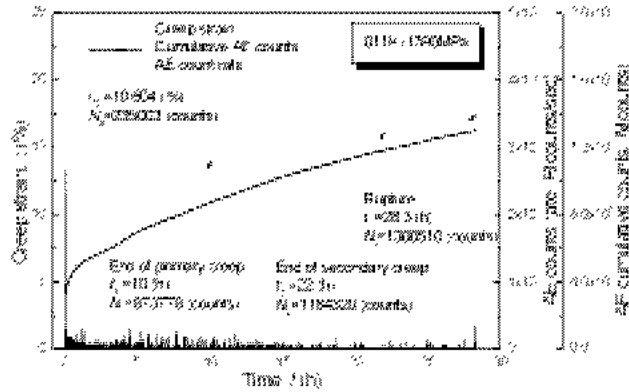


Fig. 3(a) Typical graphs AE counts rate and cumulative counts for U720 at 811K, 1390MPa

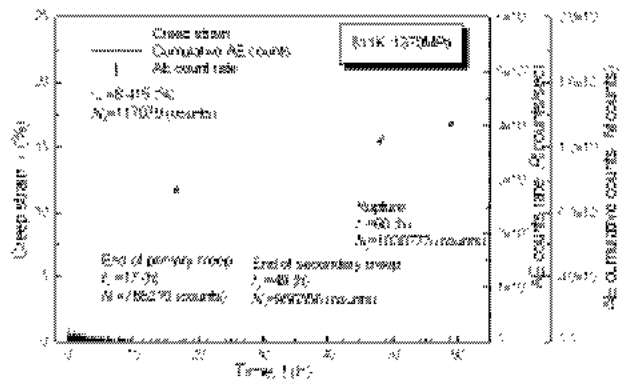


Fig. 3(b) Typical graphs AE counts rate and cumulative counts for U720 at 811K, 1370MPa

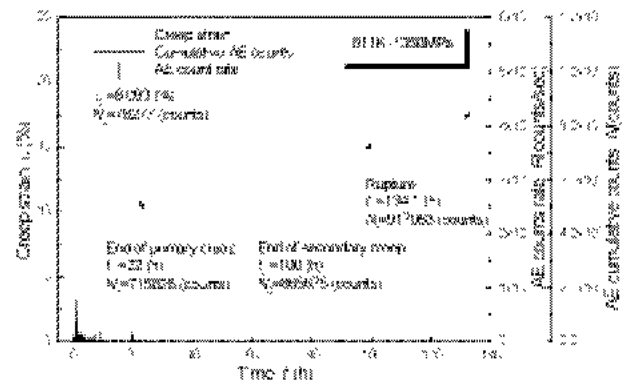


Fig. 3(c) Typical graphs AE counts rate and cumulative counts for U720 at 811K, 1350MPa

초기연신률 $\epsilon_0(\%)$ 와 초기 AE 총량 $N_0(\text{counts})$, 1차 크리프(천이 크리프) 종료까지의 시간 t_1 과 AE 누적

총량 $N_1(\text{counts})$, 2차 크리프(정상 크리프) 종료(또는 3차 크리프 시작)까지의 시간 $t_2(\text{h})$ 와 AE 누적 총량 $N_2(\text{counts})$, 크리프 파단시간 $t_r(\text{h})$ 과 AE 누적총량 $N_r(\text{counts})$ 등을 조사하였다.

크리프 시험에서 측정된 AE 총량에 대한 특성치들을 Table 4에 나타내고 있다. Table에서 알 수 있듯이, 각 구간별 AE 누적총량이 온도가 상승함에 따라 현저히 감소함을 알 수 있다⁵⁻⁸⁾. 다시 말해서, 811, 922K에 비해 977K에서 더욱 감소함을 알 수 있다. 또한 922, 977K의 정상크리프 구간에서는 AE 총량이 거의 나타나지 않았다. 이는 고온에서 원자간의 확산에 의한 AE 센서로 전달되는 음향의 발생이 무더지기 때문으로 생각된다.

3.2 크리프 응력과 AE 변수와의 상관성

Fig. 4는 각 구간별 크리프 시작까지의 AE 총량 N_1 , N_2 , $N_r(\text{counts})$ 과 크리프 응력 $\sigma(\text{MPa})$ 와의 정량적 상관성을 Table 4의 결과로부터 조사한 그래프를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, AE 이득(gain)이 75dB일 때 σ N_1 은 선형적 상관성이 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 σ N_1 의 상관관계 실험식이 각각 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 4에서 σ N_1 관계식

$$811\text{K}; \sigma = 2.419 \times 10^{-4} N_1 + 1180.1 \quad (1)$$

$$922\text{K}; \sigma = 3.263 \times 10^{-4} N_1 + 1172.99 \quad (2)$$

$$977\text{K}; \sigma = 0.002 N_1 + 986.333 \quad (3)$$

Table 4 Quantitative properties of AE according to creep proceeding for U720

Temp (K)	Creep stress (MPa)	Initial strain, $\epsilon_0(\%)$	t_1 (h)	N_1 (counts)	t_2 (h)	N_2 (counts)	t_r (h)	N_r (counts)
811	1390	10.604	10	873778	22	1184320	28.3	1300510
	1370	8.415	17	765219	49	956356	60	1030773
	1350	8.093	22	715828	100	865675	134.1	917063
922	1100	2.718	0.5	222100	2.5	302300	4.6	744500
	1025	1.291	3.5	458091	20	520900	29.3	969276
	980	0.562	6	588590	54	710410	109.8	1195319
977	950	1.592	0.33	14300	2.5	56986	6.3	328200
	875	0.506	1.5	52781	14	115155	23.7	430170
	795	0.231	3	81865	24	169119	80.7	516381

또한, 3차 크리프(가속 크리프) 시작까지의 AE 총량 N_2 (counts)와 크리프 파단시의 AE 총량 N_r 에 대해 크리프 응력 σ (MPa)와의 정량적 상관성을 Table 4에서 얻은 데이터로부터 811, 922 및 977K에서 조사한 결과의 그래프를 나타낸다. 마찬가지로 선형적 상관성이 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 σ N_2 , σ N_r 의 상관관계 실험식이 각각 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 4에서 σ N_2 관계식

$$811\text{ K}; \sigma = 1.182 \times 10^{-4} N_2 + 1251.533 \quad (4)$$

$$922\text{ K}; \sigma = 2.953 \times 10^{-4} N_2 + 1185.951 \quad (5)$$

$$977\text{ K}; \sigma = 0.001 N_2 + 1030.436 \quad (6)$$

Fig. 4에서 σ N_r 관계식

$$811\text{ K}; \sigma = 9.886 \times 10^{-5} N_r + 1262.955 \quad (7)$$

$$922\text{ K}; \sigma = 2.661 \times 10^{-4} N_r + 1293.055 \quad (8)$$

$$977\text{ K}; \sigma = 8.210 \times 10^{-4} N_r + 1222.196 \quad (9)$$

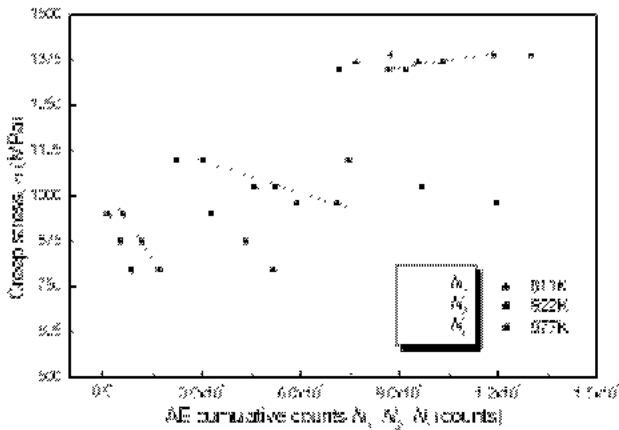


Fig. 4 Relationship between σ and N_1 , σ and N_2 and N_r for U720 at 811, 922 and 977K

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 811K에서는 크리프 응력이 증가함에 따라 AE총량이 증가하지만, 922K와 977K에서는 크리프 응력이 증가함에 따라 AE 총량이 감소함을 알 수 있다. 이는 응력이 감소함에 따라 크리프 연신이 감소하지만 시간이 증가하기 때문에 AE 누적총량이 증가하는 것으로 판단되므로 타 문헌^{2, 3, 5)}과 비슷한 경향임을 알 수 있었다. 또한 977K의 고온에서는 응력의 미소 변화에 따른 AE 총량과의 증가 감소 변화에 따른 기울기가 급변하는 양상으로 나타나고 있다. 그리고 811K와 922K 사이에서 어느 임계온도를 기점으로 기울기의 방향이 바뀌어 짐을 예상할 수 있다. 앞으로 이에 대한 응력의 여러 변화에 따른

AE 총량과 관련된 실험을 통하여 임계온도를 규명하고 조사할 필요가 있다고 생각한다.

결과적으로 2차, 3차 크리프의 시작과 파단될 때의 AE 누적총량과 크리프 응력과의 상관성을 나타냄으로써, AE 누적총량을 변수로 한 고온 크리프의 2차, 3차, 파단에 이르기까지의 수명예측이 가능함을 확인할 수 있다.

3.3 크리프 경과시간과 AE 총량과의 상관성

Fig. 5(a)는 U720의 811, 922 및 977K 크리프 시험에서 2차 크리프(정상 크리프) 시작까지의 AE 총량 N_1 (counts)를 크리프 시험 중 측정하였다. 따라서 2차 크리프인 정상 크리프 시작시간 t_1 (h)을 예측하기 위하여, t_1 N_1 의 상관관계 그래프를 Table 4의 실험 데이터로부터 조사하여 구한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 811K는 N_1 이 증가함에 따라 정상 크리프 시작시간이 감소하는 반면에 922K와 977K에서는 증가함을 알 수 있다. 이는 응력이 감소함에 따라 크리프 연신이 감소하지만 시간이 증가하기 때문에 AE 누적총량이 증가하는 것으로 생각된다. 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 5(a)에서 t_1 N_1 관계식

$$811\text{ K}; \log t_1 = 3.906 \log N_1 + 24.534 \quad (10)$$

$$922\text{ K}; \log t_1 = 2.580 \log N_1 + 14.091 \quad (11)$$

$$977\text{ K}; \log t_1 = 1.241 \log N_1 + 5.647 \quad (12)$$

Fig. 5(b), (c)는 2차 크리프(정상 크리프) 시작까지의 AE 총량 N_1 (counts)을 크리프 시험 중 측정하였다. 이는 3차 크리프 시작시간 t_2 (h)는 물론 크리프 파단시간 t_r (h)를 예측하기 위하여 t_2 N_1 , t_r N_1 의 상관관계를 Table 4의 실험 데이터로부터 구한 결과를 그래프에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 양대수 좌표에서 선형적 상관성이 존재함이 확인되었다. 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 5(b)에서 t_2 N_1 관계식

$$811\text{ K}; \log t_2 = 7.373 \log N_1 + 45.132 \quad (13)$$

$$922\text{ K}; \log t_2 = 3.090 \log N_1 + 16.138 \quad (14)$$

$$977\text{ K}; \log t_2 = 1.302 \log N_1 + 5.008 \quad (15)$$

Fig. 5(c)에서 t_r N_1 관계식

$$811\text{ K}; \log t_r = 7.499 \log N_1 + 45.985 \quad (16)$$

$$922\text{ K}; \log t_r = 3.099 \log N_1 + 15.945 \quad (17)$$

$$977\text{ K}; \log t_r = 1.359 \log N_1 + 4.888 \quad (18)$$

앞의 Fig. 5(b), (c) 및 식 (13)~(18)에서와 같이 t_2 , N_1 , t_r , N_1 사이에는 정량적 상관성이 존재하므로 N_1 의 측정으로 t_2 와 t_r 의 예측이 가능함이 확인되었다.

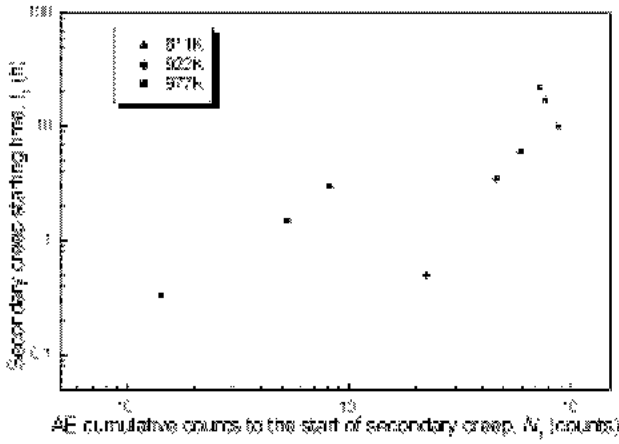


Fig. 5(a) Relationship between t_1 and N_1 for U720 at 811, 922 and 977K

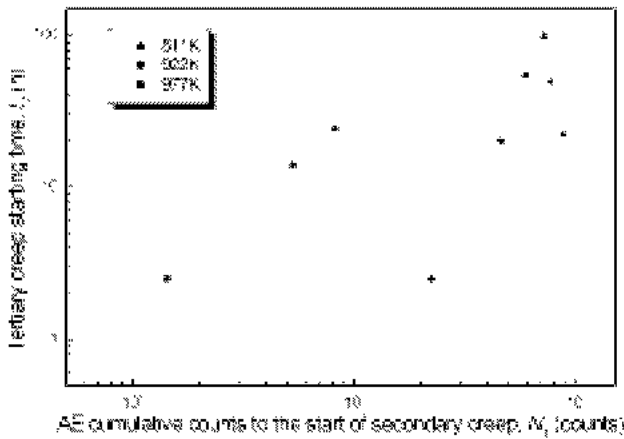


Fig. 5(b) Relationship between t_2 and N_1 for U720 at 811, 922 and 977K

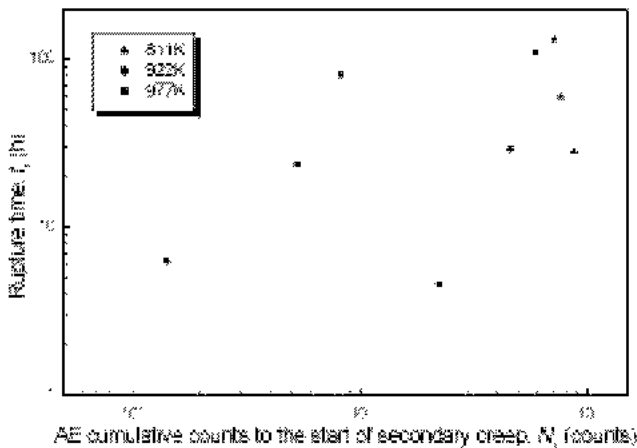


Fig. 5(c) Relationship between t_r and N_1 for U720 at 811, 922 and 977K

Fig. 6(a)는 3차 크리프(가속 크리프) 시작까지의 AE 총량 N_2 (counts)를 크리프 시험 중 측정하였다. 2차 크리프인 정상 크리프 시작시간 t_1 (h)을 예측하기 위하여, t_1 , N_2 의 상관관계 그래프를 Table 4의 실험 데이터로부터 조사하여 구한 결과이다.

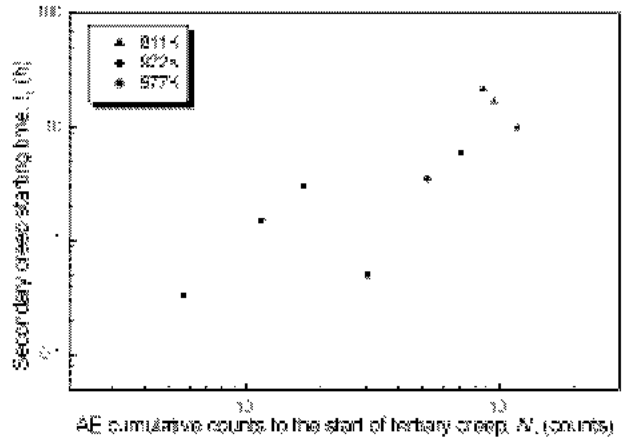


Fig. 6(a) Relationship between t_1 and N_2 for U720 at 811, 922 and 977K

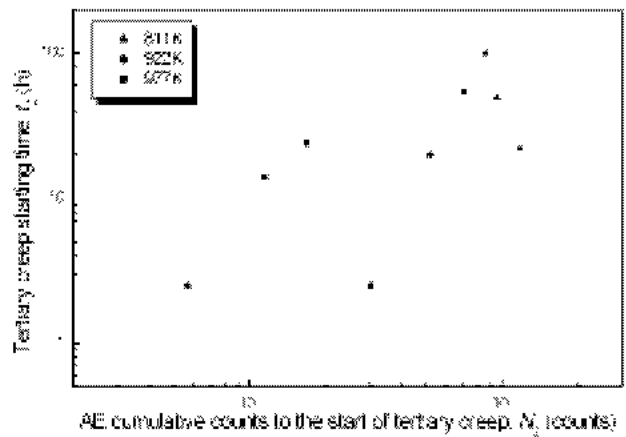


Fig. 6(b) Relationship between t_2 and N_2 for U720 at 811, 922 and 977K

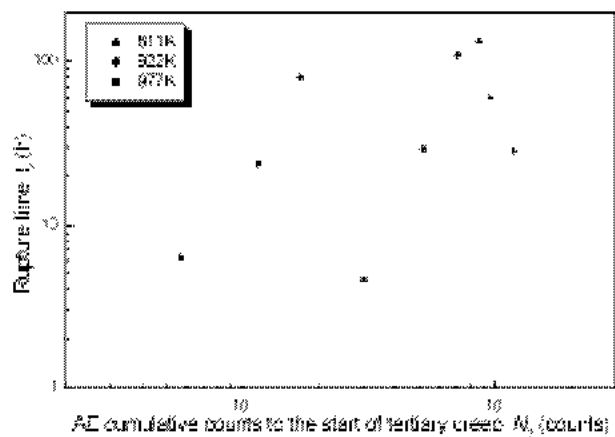


Fig. 6(c) Relationship between t_r and N_2 for U720 at 811, 922 and 977K

참 고 문 헌

그림에서 알 수 있듯이, 811K는 N_2 가 증가함에 따라 정상 크리프 시작시간이 감소하는 반면에 922K와 977K에서는 증가함을 알 수 있다. 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 6(a)에서 $t_1 N_2$ 관계식

$$811\text{K} : \log t_1 = 2.510 \log N_2 + 16.256 \quad (19)$$

$$922\text{K} : \log t_1 = 2.984 \log N_2 + 16.617 \quad (20)$$

$$977\text{K} : \log t_1 = 2.044 \log N_2 + 10.195 \quad (21)$$

Fig. 6(b), (c)는 U720의 811, 922 및 977K 크리프 시험에서 3차 크리프(가속 크리프) 시작시간까지의 AE 총량 N_2 (counts)를 크리프 시험 중 측정하였다. 이는 3차 크리프 시작시간 t_2 (h)는 물론 크리프 파단시간 t_r (h)을 예측하기 위하여 $t_2 N_2$, $t_r N_2$ 관계를 Table 4의 실험 데이터로부터 조사하여 구한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 양대수 좌표에서 직선적 관계가 성립함을 나타내고 있다. 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 6(b)에서 $t_2 N_2$ 관계식

$$811\text{K} : \log t_2 = 4.659 \log N_2 + 29.617 \quad (22)$$

$$922\text{K} : \log t_2 = 3.622 \log N_2 + 19.438 \quad (23)$$

$$977\text{K} : \log t_2 = 2.125 \log N_2 + 9.681 \quad (24)$$

Fig. 6(c)에서 $t_r N_2$ 관계식

$$811\text{K} : \log t_r = 4.734 \log N_2 + 30.176 \quad (25)$$

$$922\text{K} : \log t_r = 3.678 \log N_2 + 19.511 \quad (26)$$

$$977\text{K} : \log t_r = 2.288 \log N_2 + 10.113 \quad (27)$$

4. 결 론

AE에 의한 항공기용 가스터빈 재료의 초내열합금인 U720에 대한 크리프 시험 중 수명예측 평가에 관하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) U720에 대한 고온 크리프 시험 중 AE 거동을 조사한 결과, 크리프 곡선의 초기변형, 1차, 2차, 3차 크리프 및 균열파단에 이르는 여러 크리프 거동에 따라 AE 매개변수를 실시간에 평가할 수 있게 되었다.
- 2) 2차, 3차 크리프 시작점까지의 누적 AE 총량 (N_1 , N_2)에 의하여 2차, 3차 크리프 시작시간(t_1 , t_2) 및 크리프 파단시간(t_r)을 예측할 수 있었다.
- 3) 그러므로 AE누적총량에 의한 고온 크리프 정량적 수명예측의 가능성이 확인되었다.

1. 최승주, 유명수, 김인수 외 한국기계연구원 5명, "항공기 가스터빈 핵심 재료 기술 개발", 과학기술처 연구과제 최종 보고서, pp. 9~49, 1997
2. 오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화, "엔진배기밸브의 내열강 이종재 마찰용접의 최적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가(1), (2)", 한국해양공학회 강연논문집, pp. 249~254, pp. 281~287, 1996
3. 오세규, 장홍근, 이향동, 신국식, 정문식, 송윤섭, "로켓모터용 노즐의 동종재 마찰용접의 최적화와 고온 크리프 예측 및 AE평가(2) 고온 크리프 예측 및 AE 평가", 한국해양공학회 강연논문집, pp. 90~96, 1996
4. 오세규, 장홍근, 장지훈, "Cr Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴 검사학회지, 제15권 제4호, pp. 511~519, 1995
5. S. K. Oh, "Relationship between Cyclic Creep Properties and Initial Strain of Cr Mo Alloy Steels at High Temperatures and AE Evaluation," Int. J. of Ocean Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 78~86, 1998
6. S. K. Oh, H. K. Chang and J. W. Oh, "Development of Real Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission ; 2nd Report Effects of Welding Parameters on Weld Strength and AE", Proc. Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp. 177~184, 1996
7. S. K. Oh, H. K. Chang, H. D. Park and B. S. Lee, "Development of Real Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission ; 3rd Report. Effects of Initial AE Counts during Plastic Deformation in FRW", Proc. The 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE. Vol. 4 S37, pp. 11~17, 1997
8. K. Yoshida, J. Takatsbo and H. Yokogawa, "Acoustic Emission Behavior in Tensile Test of Steels at Elevated Temperatures", Progress in Acoustic Emission III, The 8th Int'l AE Symposium, pp. 469~476, 1986
9. 공유식, 오세규, 박노광, "항공기용 가스터빈 재료의 열처리 조건에 따른 크리프 특성", 한국해양공학회지, 제13권, 제4호 pp. 112~117, 1999