

〈論 文〉

다단계 모의 열화재의 재료강도 평가와 수명예측

권재도* · 진영준** · 류승우** · 장순식***

(1993년 3월 5일 접수)

Strength Evaluation and Life Prediction of the Multistage Degraded Materials

Jae-Do Kwon, Yeung-Jun Jin, Sung-Woo Ryu and Soon-Shik Jang

Key Words : Temper-Embrittlement(템퍼링 취화), Degraded Material(열화재), Simulate Degradation(모의 열화), Recovered Material(회복재), Ductile-Brittle Transition Temperature(파면 천이온도), Fatigue Test(피로실험), Degradation Curve(열화 곡선), Life Prediction(수명예측)

Abstract

In the case of life prediction on the structures and machines after long service, it is natural to consider a degradation problems. Most of degradation data from practical structures are isolated data obtained at the time of periodical inspection or repair. From such data, it may be difficult to obtain the degradation curve available and necessary for life prediction. In this paper, for the purpose of obtaining a degradation curves, developed the simulate degradation method and fatigue test and Charpy impact test were conducted on the degraded, simulate degraded and recovered materials. Fatigue life prediction were conducted by using the relationship between fracture transition temperature (DBTT : vTrs) obtained from the Charpy impact test through the degradation process and fatigue crack growth constants of m and C obtained from the fatigue test.

1. 서 론

원자력 발전 설비, 압력용기 및 배관계통 등과 같은 기존 구조물들은 설치 당시에 기대했던 자체 수명을 능가하거나 근접하고 있는 것들이 증가하고 있으며, 이에 따른 기계구조물들의 교환시기, 보수 및 검사기간의 최적기 선택, 또는 열화정도의 예측과 잔여 수명의 평가에 대한 연구의 중요성이 한층 더 높아지고 있다.

장기간 사용한 기계구조물의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 열화와 누적손상을 정도 좋게 평가하고 이것에 근거한 수명평가가 절실히 요구된다. 특히, 압력용기용 고온재료로서 고온 강도와 내수소성의 관점에서 넓게 사용되고 있는 Cr-Mo강이 열화에 관련된 연구동향은 각종 Cr-Mo강의 취화 거동과 취화감수성에 관한 연구,⁽²⁾ 표면균열의 진전 특성에 재질열화가 미치는 영향^(3,4)과 재질열화가 파괴인성치에 미치는 영향에 관한 연구⁽⁵⁾ 장기사용 열화재의 신뢰성 공학적인 피로수명 예측⁽⁶⁾ 등 다수의 연구결과가 발표되고 있다. 그러나 이와 같은 연구들은 시간에 따라 진행되는 열화과정을 고려한 수명예측에 적용하기에는 어려움이 따르

*정회원, 영남대학교 기계공학과

**영남대학교 기계설계학과 대학원

***한국원자력안전기술원

고 있다. 따라서, 취화된 기계구조물의 수명을 열화의 정도에 따라 각 단계별로 정도 높게 평가하는 방법이 개발된다면, 기존의 기계구조물에 대한 잔존 수명을 평가할 수 있으며, 또 갑작스런 파괴 사고에 따른 손실을 줄일 수 있다는 관점에서 실험적인 열화재를 가속제작하는 방법을 개발하여 열화도중 단계의 강도 평가에 대한 연구가 절실히 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 장기 사용한 Cr-Mo강을 사용하여 실험실에서 슬로우쿨링(slow cooling) 및 스텝쿨링(step cooling)방법을 이용⁽³⁾하여 모의 열화시켜 단계별 열화재를 제작하여 샤피 충격시험 및 피로실험을 수행하여 열화의 정도와 샤피 충격치 및 피로 균열진전속도 사이의 관계를 평가해 보고, 샤피 천이온도(vTrs)와 피로균열 진전 특성에서 나타나는 상수 C 및 지수 m의 값에 대한 열화곡선을 추정하여 수명예측에 활용해 보고자 한다.

2. 실험용 재료 및 시험편

2.1 모의 열화방법

템퍼링 취화(temper embrittlement)는 저합금강의 경우에 있어서 약 350~600 °C 온도 범위에서 장기 사용될때 인성(toughness)이 감소되는 현상으로 주로 합금강내에 존재하는 P, Sn, Sb 및 As와 같은 불순물이 결정 입계에 편석되어 결정입자간의 응집력을 감소시킴으로써 발생한다. 특히, P가 가장 취화의 감수성을 증가시킨다고 보고되어지고 있다.^(2,3,8,9)

이와 같이 재질이 열화되어가는 현상을 정도 높게 평가하기 위한 가장 적절한 방법은 실제 기계구조물에서 장기간 사용하는 도중에 적당한 사용시간마다 시료를 채취하여 시험편을 제작한 후 강도 평가실험을 행하는 것이다. 이 방법은 사용 시간에 따른 재질 열화 특성의 변화를 가장 정확하게 해석할 수 있지만, 이 방법을 수행하기에는 많은 시간과 어려움이 따르므로 열화현상을 규명하기 위해서는 실험실에서 모의 열화시킨 시료를 제작하는 방법이 고려될 수 있다.

이 모의 열화의 목적은 현장의 가동 온도에서 장시간 사용에 따른 재료가 열화되는 것을 단 시간에 실험실에서 모의하기 위한 방법으로 실제 사용 온도보다 다소 높은 온도에서 열처리하는 것이다. 이는 단시간에 여러 단계의 열화를 모의할 수 있다는

점에서 각광을 받는 방법이다. 그러나 실제 장기 사용한 재료의 특성과 모의 열화재의 특성을 완전하게 일치시키기에는 다소 어려움이 있다.

재료의 열화현상을 실험실에서 모의 제작하는 방법으로는 등은 취화처리법, 스텝쿨링(step cooling)방법, 슬로우쿨링(slow cooling)방법이 이용되고 있다. 그중 등은 취화처리법은 장시간 동안 인성의 변화를 정량적으로 관찰해야 하는 불편한 점이 있는 반면, 스텝쿨링 방법은 Fig. 1의 (a)와 같이 300~600°C 취화온도 영역에서 단계적으로 냉각하는 것으로서 재질의 특성에 따라 그 온도 및 시간을 다양하게 조합시킬 수 있다. 또한 슬로우쿨링 방법은 Fig. 1의 (b) 및 (c)와 같이 냉각속도를 조정함에 따라 여러 단계별로 열화도중 단계인 시료 제작이 가능한 잇점이 있다.

특히, 스텝 및 슬로우쿨링 방법을 이용하여 가속 열처리한 Susumu, Murakami^(2,3)는 시재를 Auger electron spectroscopy에 관찰한 결과, 파면 천이온도(vTrs)의 증가는 P, Sn 등의 양에 따라 거의 직선적으로 증가하고, 장기 사용에 의한 열화와 유사한 특성을 가진다는 것이 보고되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 Fig. 1 (a)의 스텝쿨링 방법과 Fig. 1 (b) 및 (c)의 슬로우쿨링 방법을 이용하여, 10 °C/hr 및 30 °C/hr의 슬로우쿨링에 의한

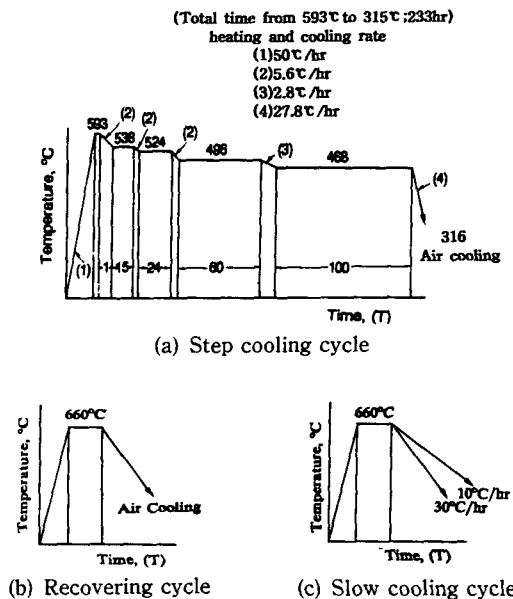


Fig. 1 Various kind of simulate degradation method

Table 1 Chemical compositions of 2 1/4 Cr-1Mo steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	As
.16	.29	.55	.014	.01	.17	2.40	.20	1.04	<.005	.30

열화의 도중 단계인 단계별 열화재를 제작하는 방법을 택하였다.

2.2 실험용 재료

모의 열화에 의한 다단계 열화재를 제작하는 연구를 수행하기 위하여 석유화학 플랜트의 일부로서 약 400~430°C 정도, 약 60,000여 시간을 사용하여 템퍼링 취화(temper embrittlement)된 압력용기용 강인 2 1/4 Cr-1Mo강을 실험용 재료로 사용하였다. 그러나 2 1/4 Cr-1Mo강 열화재(degraded material)의 강도와 비교하기 위한 동일재료의 건전재가 필요하지만, 10여년 이상 사용된 모재와 동일한 재료를 구할 수 없기 때문에 열화재를 660°C에서 1시간 유지후 공냉하는 방법을 사용하여 충격치를 회복시킨 재료를 회복재(recovered material)라고 하였다. 다단계 열화재를 제작하기 위하여 회복된 재료를 사용하며, Fig. 1 (a)와 같은 과정의 스텝쿨링 처리를 하였다. 이 재료를 스텝쿨링재라고 하였으며, Fig. 1 (b), (c)와 같은 과정의 10°C/hr, 30°C/hr 슬로우쿨링 처리한 재료를 슬로우쿨링재라고 정의했다. Table 1는 2 1/4 Cr-1Mo강의 화학적 성분을 나타내고 있으며 Table 2는 열화재 및 회복재의 기계적 성질을 나타내고 있다.

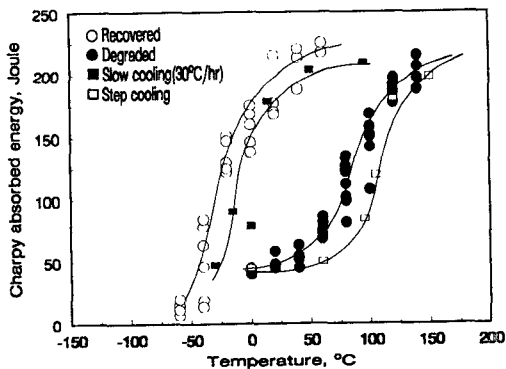


Fig. 2 Charpy V-notch energy absorption behavior for impact testing on the multistage degraded materials

2.3 충격실험

스텝쿨링 및 30°C/hr 슬로우쿨링 처리에 따른 열화의 정도를 정량화할 목적으로 다단계 열화재 및 회복재를 KS B 0809 규격의 충격시험편을 제작하여 -70°C~150°C의 온도 범위에서 샤피 충격시험을 수행하였다. Fig. 2는 -70°C~150°C 온도범위에 걸쳐 수행한 다단계 열화재 및 회복재의 샤피 충격시험의 결과를 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 회복재에 비해 스텝쿨링 및 슬로우쿨링 사이클처리를 함에 따라 2 1/4 Cr-1Mo강의 파면 천이온도 ductile-brittle transition temperature, DBTT, vTrs)가 상승됨을 알 수 있다. 본 실험의 경우 회복재를 기준으로 할때 30°C/hr 슬로우쿨링재, 열화재 및 스텝쿨링재의 ΔvTrs는 각각 20°C, 105°C 및 125°C로 증가됨을 알 수 있다.

3. 피로균열진전 실험

3.1 피로 시험편

Fig. 3는 본 실험에 사용된 중앙관통균열(CCT 시험편)을 가진 시험편의 형상을 나타내고 있다. 열화재, 회복재, 스텝쿨링재, 10°C/hr 및 30°C/hr 슬로우쿨링재의 5종류의 재료를 실험에 사용하였다. 특히 실험의 정도를 높이기 위하여 노치가공에 주의를 하였으며, 와이어 커터로서 2a=6.6 mm, ρ=0.2 mm로 일정하게 가공하였다. 이렇게 가공된 시험편의 균열진전거동을 정확하게 측정하기 위해서 시험편의 표면을 #200부터 #1500까지의 에머리 페이퍼(emery paper)를 사용하여 연마한

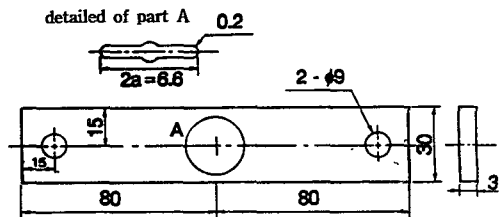


Fig. 3 Geometries of specimen (Dimension ; mm)

후 레프리카(replica)법과 이동식 현미경을 이용하여 피로균열진전실험을 하였다.

3.2 피로실험방법

본 실험에 사용한 피로시험기는 Instron사의 유압서버시험기(Hydraulic-servo fatigue test machine; Model 1332)로 최대용량은 250 kN (25 ton)이다. 실험은 상온, 실험조건은 사인파형(sine wave)의 인장-인장(tension-tension)하중 제어방식으로 주파수 10 Hz, 응력비($R = P_{min}/P_{max}$)=0.05로 하였다. 피로균열의 길이측정방법은 일정한 반복하중 회수(N)마다 하중진폭만을 정지시킨후, 이동식 광학현미경을 사용하여 시험편의 전면 좌, 우측의 균열길이 증가분을 측정 한 후, 시험편의 노치길이를 더하여 균열길이(2a)로 정의하였다. 이와같은 실험을 응력진폭범위 $\Delta\sigma = 115.8$ MPa, 초기 응력확대계수 범위 $\Delta K_I = 11.8$ MPa \sqrt{m} 의 일정조건하에서 각 재료에 대하여 피로실험을 행하였다.

각 시험편에서 피로시험 도중에 측정하여 얻은 균열길이(a)와 하중반복회수(N)의 데이터로 부터 a-N선도 및 ΔK -da/dN선도를 작성하여 열화 정도가 균열진전에 미치는 정도를 관찰하여 보았다.

4. 피로균열진전 특성

4.1 a-N 선도

Fig. 4는 응력비(R)=0.05, 주파수 10 Hz, 응력진폭범위 $\Delta\sigma = 115.8$ MPa, 초기 응력확대계수 $\Delta K = 11.8$ MPa \sqrt{m} 하의 동일조건에서 열화재, 회복재, 스텝쿨링재, 10°C/hr 및 30°C/hr 슬로우쿨링재에 대해 피로실험을 행한 후 얻은 균열진전 길이 a와 하중 반복회수 N 사이의 관계를 나타낸 a

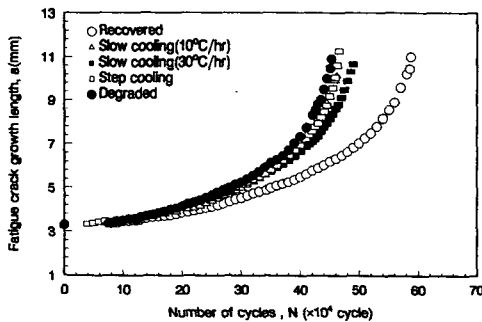


Fig. 4 a-N curves for the multistage degraded Cr-Mo steel

-N선도이다. 여기서 열화재와 회복재의 파단수명은 현저한 차이가 있음을 볼수 있었고, 다단계 열화재의 피로 수명은 열화재, 스텝쿨링재, 슬로우쿨링재 및 회복재의 순으로 그 수명이 짧게 나타났으며, 열화재와 스텝쿨링재, 슬로우쿨링(10 및 30°C/hr)재의 피로수명은 큰 차이는 나타나지 않았다.

4.2 ΔK -da/dN 선도

피로균열의 진전 특성에 대한 파괴역학의 도입은 여러학자들에 의해 실험적 연구가 시도되어 왔으며 Paris에 의하면 시험편과 하중조건에 따른 피로균열진전속도 da/dN이 응력확대계수 범위 ΔK 로서 결정되며 피로균열진전 속도법칙은 식(1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

여기서 C와 m은 균열 진전법칙에서의 지수(m) 및 상수(C)이다. 피로균열 진전속도 da/dN의 계산은 ASTM E647-92에서 제안된 균열길이(a)와 하중 반복회수(N)에 대한 데이터로 부터 Secant 법에 따라 계산하였으며, 응력확대계수 K는 다음 식(2)의 H. Tada식을 사용해서 구했다.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} F_I(a) \tag{2}$$

여기서 $F_I(a) = (1 - 0.025a^2 + 0.06a^4) \sqrt{\sec(a\pi/2)}$, $a = 2a/W$

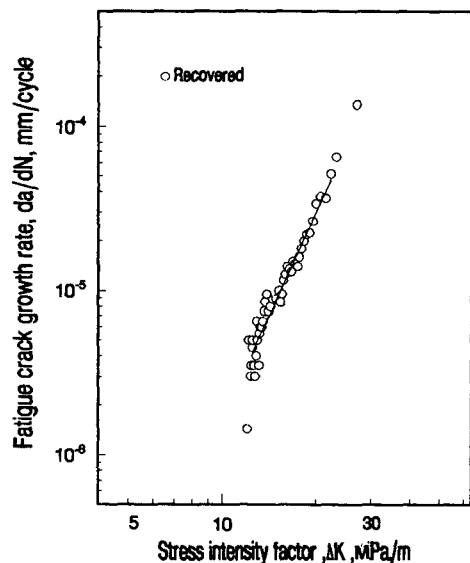


Fig. 5 ΔK -da/dN relation in the recovered material

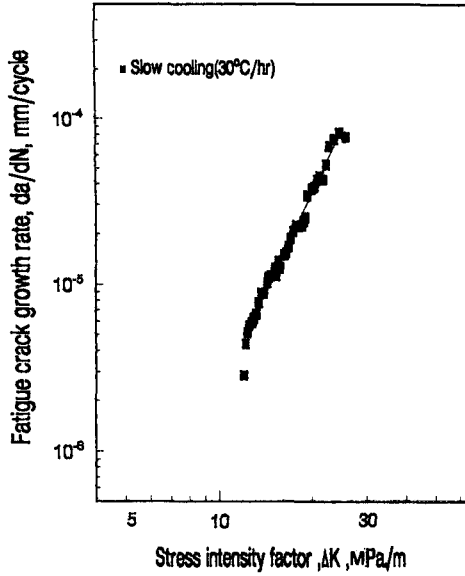


Fig. 6 ΔK -da/dN relation in the slow cooling(30 °C/hr)

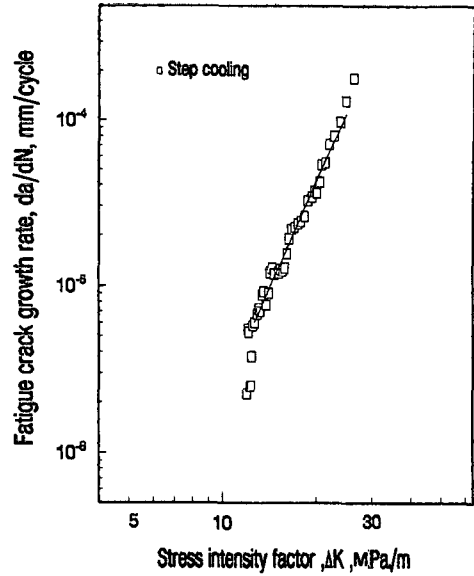


Fig. 8 ΔK -da/dN relation in the step cooling

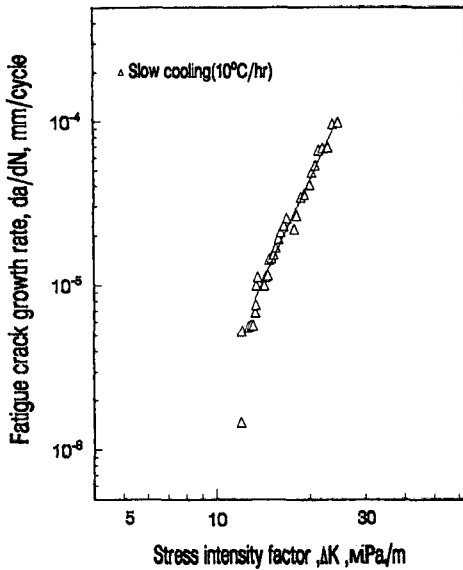


Fig. 7 ΔK -da/dN relation in the slow cooling(10 °C/hr)

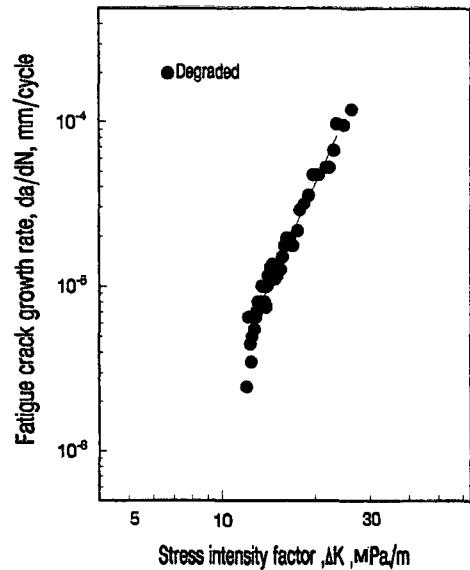


Fig. 9 ΔK -da/dN relation in the degraded material

Table 2 Mechanical properties of 2 1/4 Cr-1Mo steel

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Degraded	416	599	26.6	65.4
Recovered	400	581	29.8	69.8

또한 응력확대계수 범위 $\Delta\sigma=115.8 \text{ MPa}$ 즉, 초기 응력확대계수 범위 $\Delta K=11.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 하에서 각각 실험한 시험편들에 대한 $a-N$ 관계로부터 균열진전 속도(da/dN)와 응력확대계수 범위(ΔK)를 계산하여 ΔK 와 da/dN 사이의 관계를 양대수(log-log) 그래프 상에 플롯(plot)한 것을 Figs. 5, 6, 7, 8 및 9에 나타내었다.

Figs. 5, 6, 7, 8 및 9는 각각 회복재, 30 °C/hr 슬로우쿨링재, 10 °C/hr 슬로우쿨링재, 스텝쿨링재 및 열화재에 대한 $\Delta K-da/dN$ 의 관계를 나타낸 것으로 동 선도들로부터 Paris의 법칙, 즉 균열진전법칙에서의 지수 m 및 상수 C 의 값을 최소자승법에 따라 산출하였다. Table 3에는 이와같이 계산된 C 와 m 의 값을 표로 나타낸 것이다. 여기서 재료가 열화가 되어감에 따라 m 의 값은 다소 증가하며 C 의 값은 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 각 시험편에 대하여 얻은 m 값과 C 값

의 관계를 반대수(semi-log) 그래프상에 플롯트한 결과를 나타낸 것으로 열화가 진행됨에도 불구하고 m 과 $\log C$ 사이에는 직선관계가 있음을 알 수 있으며, 근사적으로 $C=A \times B^m$ 의 관계식으로 나타낼 수 있다. 본 실험의 경우 $A=2.24 \text{ E-6}$, $B=0.098$ 의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

5. 열화곡선의 제안과 수명예측

5.1 피로균열진전 특성에 대한 열화곡선

회복재, 슬로우쿨링재, 열화재 및 스텝쿨링재의 피로균열진전 실험을 행하여 구한 각 재료의 피로균열진전 지수 m 및 상수 C 값과 샤피 충격시험 결과 얻은 파면 천이온도(vTrs)와의 관계로부터 열화진행곡선을 구성하여 보았다.

Fig. 11은 각 재료의 파면 천이온도(vTrs)와 균열진전법칙에서의 지수 m 값과의 관계를 나타낸

Table 3 Material constants m and C in Cr-Mo steel

Material	m	$C(\times 10^{-10})$	Note
Recovered	3.81	3.2631	
Slow cooling	3.92	2.8259	30 °C/hr
Slow cooling	4.08	2.1103	10 °C/hr
Degraded	4.23	1.3262	
Step cooling	4.31	1.0342	

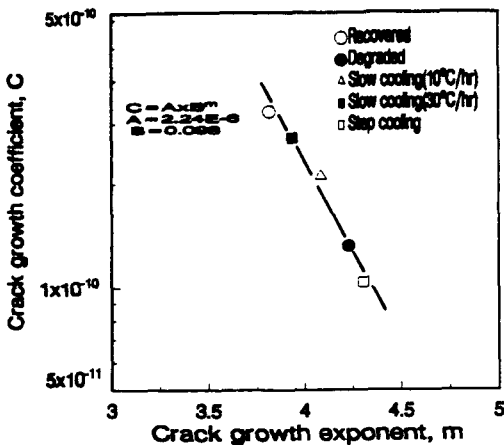


Fig. 10 Relationships between $\log C$ and m in the multistage degraded Cr-Mo steel

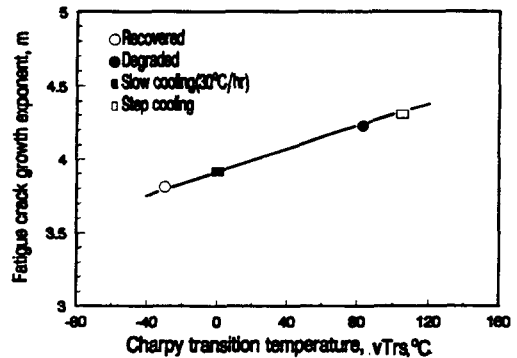


Fig. 11 Relationships between m and $vTrs$ in the multistage degraded Cr-Mo steel

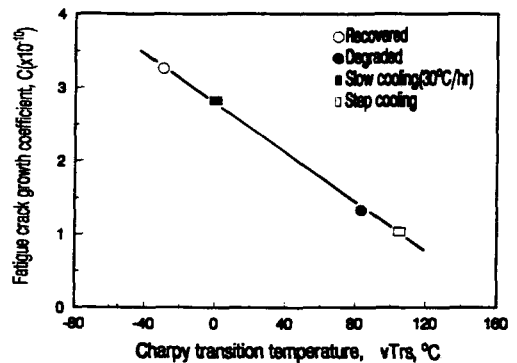


Fig. 12 Relationships between C and $vTrs$ in the multistage degraded Cr-Mo steel

것으로 파면 천이온도가 상승(열화가 진행됨)함에 따라 m 값은 직선으로 증가하고, 파면 천이온도와 m 값 사이의 관계는 식(3)으로 표현할 수 있었다.

$$m = 3.92 + 0.37 \times 10^{-2} vTrs \quad (3)$$

반면, Fig. 12에서는 각재료의 살피 파면 천이온도($vTrs$)와 균열진전법칙에서의 상수 C 사이의 관계를 나타낸 것으로 파면 천이온도가 상승(열화가 진행됨)함에 따라 C 값은 직선적으로 감소함을 볼 수 있으며, 파면 천이온도와 C 값 사이의 관계는 식(4)로 표현할 수 있었다.

$$C = 2.78 \times 10^{-10} - 1.69 \times 10^{-12} vTrs \quad (4)$$

열화가 진행중인 Cr-Mo강 구조물로 부터 시료를 채취하여 살피 충격시험을 수행하여 파면 천이온도($vTrs$)를 구할 수 있다면 Fig. 11 및 12의 결과를

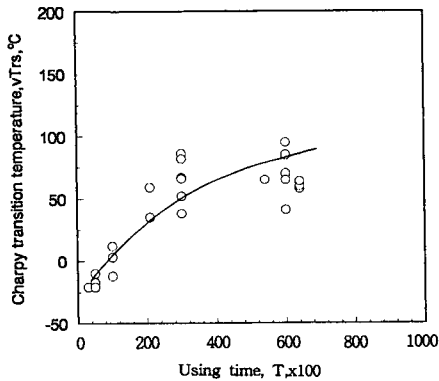
이용하여 피로균열진전 실험에서의 재료상수 C 와 지수 m 의 값을 추정할 수 있으며, 피로균열진전의 수명예측이 가능하다는 것을 시사한다. 그러나 기계구조물에서 비파괴적으로 시험편을 얻는다는 것은 어려운 일이며 따라서 가동시간을 알 경우의 수명 예측방법이 필요하게 된다.

Fig. 13(a) 및 (b)는 370~430°C 하에서 실제 장기 사용된 2 1/4 Cr-1Mo강^(2,4,5,6,7,9)에 대한 기존의 연구 결과들에서 파면 천이온도($vTrs$) 및 파면 천이온도 차이($\Delta vTrs$)와 운전시간 T 와의 관계를 수합하여 운전시간에 따라 $vTrs$ 의 변화 추이를 나타낸 것이다. Fig. 13(a)는 파면 천이온도와 운전시간 사이의 관계를 나타내며, (b)는 파면 천이온도차와 운전시간과의 관계를 나타낸 것으로 이 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

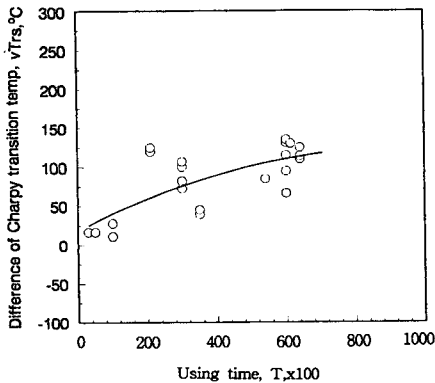
$$vTrs = -1.24 \times 10^{-8} T^2 + 2.51 \times 10^{-3} T - 25.54 \quad (5)$$

$$\Delta vTrs = -1.23 \times 10^{-4} T^2 + 0.23 \times 10^{-2} T + 18.24 \quad (6)$$

본 연구에서는 재료가 장기 사용되어 열화됨에 따라 파면 천이온도($vTrs$)가 변한다는 점에 초점을 맞추어서 수명예측하는 방법을 제안하고자 한다. 즉 구조물이 370~430°C 하에서 사용된 시간을 알 수 있다면 식(5) 및 (6)에서 $vTrs$ 을 구하고, 이 값을 식(3) 및 (4)에 대입하여 C 와 m 을 구할 수 있다.



(a) Using time and $vTrs$



(b) Using time and $\Delta vTrs$

Fig. 13 The relationship between using time T and $vTrs$ s or $\Delta vTrs$ for the long term serviced 2 1/4 Cr-1Mo steel

5.2 수명예측에의 활용 방안

피로균열진전법칙에서의 상수 C 및 m 값과 $vTrs$ 사이의 관계식이(3) 및 (4)와 같이 표현될 수 있고, $vTrs$ 와 운전시간과의 관계식이(5) 및 (6)과 같이 표현되었으므로, 이 관계를 이용하여 기계구조물의 사용시간을 이용하여 $vTrs$ 의 값을 추정하고, 이 결과로 부터 피로균열진전 상수 C 및 m 값을 추정하여 피로균열진전 특성에 대한 $a-N$ 관계를 시뮬레이션하여 열화도중 단계의 재료에 대한 수명예측의 한 방법을 제시하고자 한다.

즉, 수명예측방법은, 충격시험에서 회복재, 슬로우쿨링재, 열화재, 및 스텝쿨링재의 $vTrs$ 의 값은 -25, -5, 80, 및 102°C이었으므로, 이에 대한 운전시간을 역으로 추정하면 210, 8550, 59720 및 78700 시간이 된다. 아울러 여기에 해당하는 피로 균열진전 특성의 재료상수 m 및 C 값을 식(3) 및

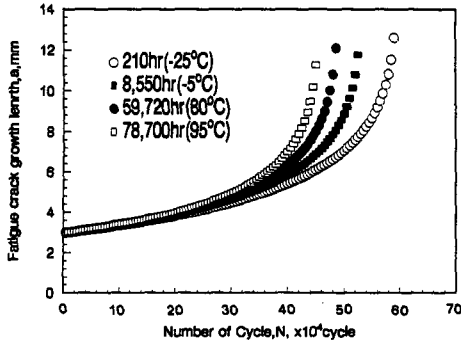


Fig. 14 Simulation of a-N curves for the Cr-Mo steel on the multistage using time

(4)에서 구한다. 그 후 식(1)에서 N 사이클 하중 반복을 가했을 경우 피로균열의 진전길이는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$an = a_0 + \int_{N_0}^N C (\Delta K)^m dN \quad (5)$$

여기서는 N_0 는 초기 하중 반복회수이고, N 는 ΔN 사이클 후의 하중반복수를 나타낸다. 또한 an 는 ΔN 사이클 반복후의 균열의 길이이며, a_0 는 초기 균열의 길이를 나타낸다. 이 경우 an 값을 시뮬레이션한 모델은 본 실험에서 사용한 시험편의 형상과 하중조건이 동일한, 중앙 노치길이 $2a = 6.6$ mm, 두께 $t = 3$ mm, 폭 $W = 30$ mm인 모델에 1축 인장반복하중이 가해지는 경우를 선정했다.

Fig. 14는 열화의 진행을 고려한 단계별 피로균열진전거동에 대해 충격실험에서 구한 파면 천이온도를 이용하여 사용시간을 추정할 후 C 와 m 값을 구하고 이 값으로부터 $a-N$ 선도를 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다. 그 결과 피로실험에서 회복재, 슬로우쿨링재, 열화재, 및 스템쿨링재의 파단 수명은 각각 584,000, 492,000, 457,000, 및 468,000 cycle인 반면에 시뮬레이션한 결과, 파단 수명은 각각 590,000, 525,000, 485,000 및 450,000 cycle로 나타났으며, 파단수명이 각각 1~7% 정도의 차이가 있었으며, 최대 차이는 약 7%로 정도 이내에 속하는 것을 파악할 수 있었다. 따라서 이 방법은 열화 진행을 고려한 수명에측이 가능함을 시사한다. 그러나 열화에 영향을 미치는 모든 인자들을 고려한 확률 통계적방법으로 열화곡선을 나타낼 수 있을 경우에는 열화의 진행을 고려한 수명에측을 좀더 정도높게 추정할 수 있으리라고 사료된다.

6. 결 론

장기 사용한 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo강을 이용하여 실험실에서 모의 열화재를 제작하여 충격 및 피로실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 피로균열진전법칙에서 얻은 실험상수 m 및 C 값과 샤피 충격시험에서 얻은 파면 천이온도 ($vTrs$)와의 관계로부터 열화곡선을 제안하였다. 이 결과 $vTrs$ 가 상승함에 따라 m 값은 증가되며, C 값은 감소함을 알 수 있다.

(2) 실제 가동중인 구조물에 대한 기존 연구결과들로부터 운전시간과 $vTrs$ 사이의 관계를 얻었으며, 이 결과를 활용하여 m , C 값을 추정하여 피로균열진전 거동을 시뮬레이션하여 봄으로서, 가동중인 구조물의 열화정도에 따르는 잔존 수명의 추정이 가능함을 시사하였다.

(3) 동일 조건하에서 피로실험을 행한 결과 피로 수명은 열화재, 스템쿨링, 10 및 30°C/hr 슬로우쿨링, 그리고 열화재 순으로 빠르게 진전됨을 알 수 있었다.

(4) 샤피 충격시험에서 파면 천이온도 차이($\Delta vTrs$)는 회복재를 기준으로 슬로우쿨링재는 20°C, 열화재가 105°C, 스템쿨링재가 130°C로 증가됨을 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서 택한 스템쿨링 및 슬로우쿨링 방법은 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo강의 열화현상을 실험실에서 가속 제작할 수 있는 방법으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Challenger, K.D., Miller, A.K., "An Explanation for the Hold Perid on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel," Tran of ASME Vol. 103 pp. 7~14.
- (2) 村上賀國, "壓力容器用Cr-Mo鋼の焼鈍脆性に關する研究," 1983.
- (3) Susumu Sawada, Tateo Ohhashi, Masamichi Okamoto, Juro Watanabe "Temper Embrittlement Characteristics of $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo Steel Used in Hydrogenation units for 30,000 and 60,000 Hours at 660 to 840°F," ASME/MPC, pp. 167~186.
- (4) 권재도, "재질열화가 표면크랙진전에 미치는 영향과 수명에측에 관한 연구," 대한기계학회논문

- 문집, 제13권, 제5호, pp. 921~927, 1989.
- (5) 권재도, “장기 사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴 인성 평가와 수명예측,” 대한기계학회논문집 제 16권, 제8호, pp. 1421~1428, 1992.
- (6) 權在度, 中憎根佑司, 北川英夫, “長期使用 劣化材の 信賴性工學的 疲勞壽命豫測,” 日本機械學會論文集, 第36卷, 第408號, pp. 927~933, 1989.
- (7) Erwin, W.E., Keer, J.G., The Use of Quenched and Tempered $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel for Thick Wall Reactor Vessel in Petroleum Refinery Process, Welding Research Council, Bulletin 275, 1982.
- (8) Nakazima, H. etc, “Proc. Int. Conf. on Safety Aspects of Ageing and Maintenance Nuclear Power Plants,” IAEA 379, 1988.
- (9) 神奈川県, “高温 高壓下で使用さねる壓力容器の破壊 防止,” 高壓ガス 設備 耐久性豫測 調査報告書, pp. 1~42, 1985.