

기계장치의 잔존수명예측 및 평가

김 전 영

한국기술연구원 발전연구실 책임연구원



● 1945년생
● 파괴공학을 전공하였으며 기계설비 및 구조물의 파괴해석, 상태진단, 수명예측등 수명평가기술에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

기계 구조물의 잔존수명을 예측, 평가한다는 것은 공업재료의 각종 성질이 사용환경에 따라 변화하는 현상을 규명하고 이들 성질변화에 따라 균열(crack) 크립, 부식, 감육등의 손상이 생기는 정도를 예측, 기술 및 경영상의 특성을 고려하여 신뢰성 및 가치를 부여하는 것을 말한다.

다시말하면 재료의 열화와 증상이 어떻게 결합으로 진전하여 설비의 안전운전과 경제성에 영향을 주는가를 예측평가하는 기술이다.

이러한 기술의 최근에 와서 산업사회의 중요한 현안으로 대두된 이유는 설계 및 제작시 아무리 안전성과 열화를 고려하였다 하더라도

- (1) 운전경과년수의 증대
- (2) 설비의 대형화
- (3) 효율향상을 위한 열기계의 고온고압화
- (4) 운전조건의 변화
- (5) 설계, 제작시 예상하지 못했던 열화등에 의해 경년적으로 손상(열화)이 진행하기 때문에
- (6) 사용조건하에서 사용재료의 열화현상 판정
- (7) 열화의 정도파악
- (8) 열화된 기계구조물의 사용성능 판단과 사용가부 결정이 요구된다.

본 글에서는 발전설비에 발생하는 경년열화

의 이론적 배경과 실제로 응용된 사례를 기술한다.

2. 설비의 수명

설비의 수명을 정의하는데는 그림 1에서와

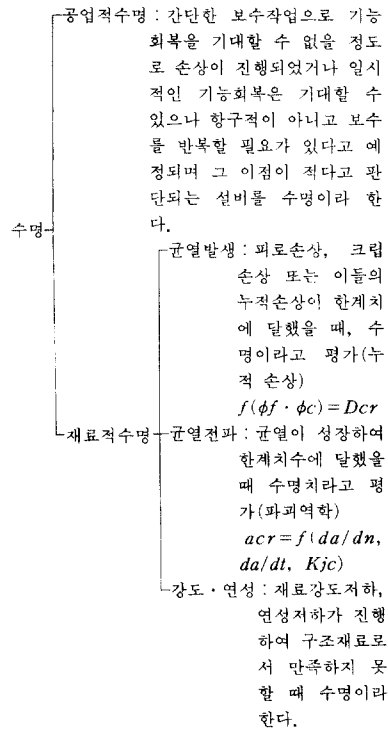


그림 1 설비의 수명

같이 공업적 수명과 재료적 수명으로 분류하고 잔존수명의 예측 및 평가기술의 대상이 되는 것은 재료적 수명이며 균열발생, 균열전파 및 강도연성저하가 그 내용이다.

3. 수명평가기술 구성

수명예측 및 평가기술은 특정한 학문적 분야

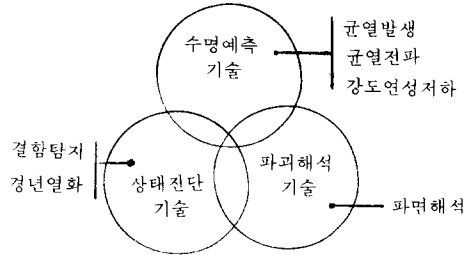


그림 2 수명평가 기술분야의 구성

표 1 열화원인 및 잔존수명에 측방법

	대상부위	열화원인	잔존수명예측방법		
			①	②	③
보일러설비	1. 보일러튜브 회로증발관 과열기관 (고열부하부)	고온 크립	파괴검사	경도측정법 또는 전기저항법 해석법	조직검사법
	2. 보일러 헤더 (고열부하부)	고온 크립 저 사이클 피로	경도측정법 또는 전기저항법	조직검사법	파괴검사
	3. 보일러 헤더 스팀터브 튜브 고응력작용부	저 사이클 피로	경도측정법 또는 전기저항법	해석법	파괴검사
터빈설비	1. 터빈차실	고온 크립 (고, 중압내부차실)	경도측정법 또는 전기저항법	조직검사법	파괴검사
		저 사이클 피로 (고, 중압내부차실)	경도측정법 또는 전기저항법	해석법	파괴검사
	2. 터빈차축	고온 크립 (중심공) 저 사이클 피로 (heat groove)	육안검사 UT, MT 해석법	— 경도측정법 또는 전기저항법	—
3. 터빈동익	고온 크립 (고, 중압초단 홈부분)	부상량측정	—	—	
열교환기	1. 열교환기튜브 (급수가열 및 냉각기, 복수기)	부식, 마식	감육량측정	해석법	—

가 있는 것이 아니고 보전 및 신뢰성 공학을 근거하여 각종 분야를 종합하여 설비를 얼마나 신뢰성있고 경제적으로 운영하느냐 하는데 목적을 두므로 일반적으로 기계구조물의 고장 및 열화현상을 예측하고 여기에 대책을 세우는 기술이라고 말할 수 있으므로 종종 사람을 다루는 의학과 비유하여 설명하면 이해가 쉬워진다.

즉 상태진단기술은 각종 의료장비를 이용하여 인체의 결합상태를 측정하는 것과 비유되며 파괴해석기술은 사후에 병인을 규명하기 위한 부검수술과 비유되고 수명예측기술은 이를 종합한 외에 의사의 각종 경험과 예지를 필요로 하는 기술이라 할 수 있다.

그림 2는 수명평가기술의 기술분야와 상호관계를 나타낸 것이다.

4. 열화형태와 예측기술

열화는 넓은 뜻으로 사용된 재료의 각종 성질의 저하를 말하지만 기계구조물에서의 열화형태는 사용환경에 따라 구조재의 필요 성질인 강도 및 연성의 저하, 피로 및 크립부식 및 마식이 발생하는 손상을 말한다.

따라서 수명(열화) 예측기술은 일반적으로 크게 두가지로 나눌수 있는데 하나는 재료의 표준물성치와 운전이력을 근거로 균열의 발생과 거동을 해석에 의해 산출하는 간접평가법(해석법)이며 또 하나는 사용중인 설비로부터 얻어진 실상태의 자료로부터 수명을 예측하는 직접평가법(비파괴 또는 파괴법)이 있는데 최근 비파괴적방법의 연구가 활발히 수행되고 있다.

표 1은 발전설비에 발생하는 열화의 원인과 잔존수명 예측 방법이다.

5. 피로 및 크립 손상기구

앞에서 언급했듯이 해석적방법은 결합(균열)이 없는 설비를 대상으로 하는 균열발생예측

법, 발생균열 또는 존재하는 균열의 진전을 예측하는 균열전파 예측법, 부식마멸 등에 의한 형상변화예측법이 있다.

균열발생은 피로손상(fatigue damage)이 가장 특징적으로 재료의 연화 및 강화현상, 재료 표면의 미끄럼대(slip band)발생, 미소균열의 발생 및 성장을 들수 있다.

피로강화 및 연화는 그림 3과 같이 저주기 피로시험시 변형량을 일정하게 두고 주파수를 증가시키면 강화현상은 응력이 증가하고 연화현상은 반대로 응력이 감소한다. 이러한 피로강화 및 연화현상은 대개 전체 피로수명의 20% 내에서 급격히 일어나다가 포화되는 경향을 가진다.

미끄럼대발생은 그림 4와 같이 미끄럼(slip)에 의해 표면에 요철(intrusion과 extrusion)이 생기고 지속적인 변형에 의해 요(intrusion)부가 깊어져 균열이 된다.

생성된 균열이성장, 파단되는 과정은 일반적으로 그림 5와 같이 3단계로 구분된다.

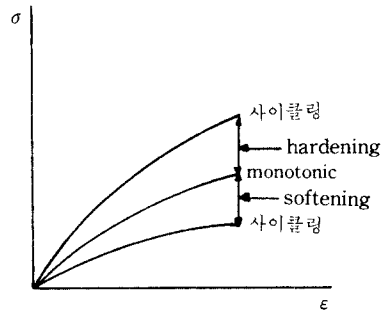
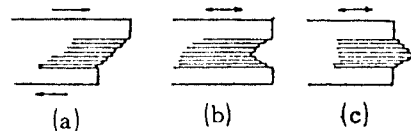


그림 3 재료의 피로연화 및 강화



(a) 정응력하의 미끄럼단계
(b), (c) 피로응력하의 요철

그림 4 피로균열발생과정

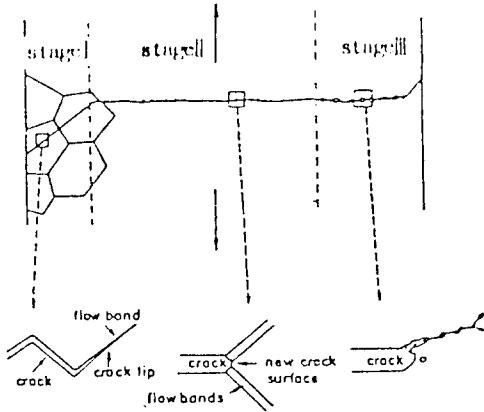


그림 5 피로균열의 전파



그림 6 피로파면의 줄무늬

(1) 1단계의 균열성장은 균열생성의 연속이며 최대전단응력방향(인장축의 45°방향)으로 계속성장, 결정입 2개정도크기까지 진전한다. 이단계를 보통 균열생성의 단계라하며 피로파면의 특징인 줄무늬(striation)은 거의 관찰되지 않는다.

(2) 2단계의 균열성장은 피로균열이 응력축에 수직으로 성장하고 그림 6과 같이 피로파면의 전형적특징인 줄무늬가 뚜렷이 관찰된다.

그림 6은 전자현미경으로 관찰된 피로파면이다.

(3) 3단계의 균열성장은 피로균열 앞에서 기공(void)이 기계적으로 생성, 성장 및 연결되

어 균열성장이 가속되며 응력축에 약 45°방향으로 파단이 일어난다.

위의 3단계중 피로응력이 낮으면 1단계의 균열성장이 전체피로 수명을 지배하며 응력이 높으면 2단계의 균열성장이 피로수명을 지배한다. 그러나 3단계의 경우는 균열성장속도가 아주 크므로 전체 피로수명에 큰 영향을 주지 않는다.

고온에서는 상온피로손상에 추가로 크립 및 분위기 손상을 받기때문에 피로수명이 상온에 비해 상당히 감소된다. 피로수명이 감소에 영향을 주는 인자는

(a) 온도가 상승하면 열적활성화과정인 전위의 상승 및 교차미끄럼이 쉬워져 상온에서는 적층결함에너지가 낮아 평면미끄럼(planar slip)을 하는 재료도 고온에서는 웨이브 미끄럼(wavy slip)이 가능하게 되므로 피로균열이 조기에 생성될 수 있다.

(b) 고온에서는 입계가 모체(matrix)보다 약해지므로 입계가 먼저 균열생성장소로 되어 균열의 조기생성을 조장한다.

(c) 분위기의 영향은 표면 및 입계가 산화, 균열생성을 조장하고 피로균열 선단의 계속적인 산화와 깨짐이 균열성장속도를 가속화 시키며 입계를 따라 공동(cavity)의 생성성장이 크립손상의 원인이다.

즉, 고온에서는 크립 피로 상호작용에 의해 파단이 일어나므로 크립손상기구의 입계공동의 생성장소, 생정 및 성장기구에 대해 알아본다.

공동의 생성은 그림 7에서와 같이 주로 입계에서 기하학적으로 불규칙한 3중점(triple point), 돌출부(ledge), 석출물 및 개재물등에 응력집중이 일어나며 이런곳에 공동이 생성된다. 공동생성기구는 r-형과 W-형이 있는데 r형은

(가) 입계활주(grain boundary sliding)에 의해 석출물이나 3중점등에 매우 높은 국부적인 응력집중이 일어나 이로인해 공동이 생성된다.

(나) 입계에 전위가 직접되어 석출물과 입계

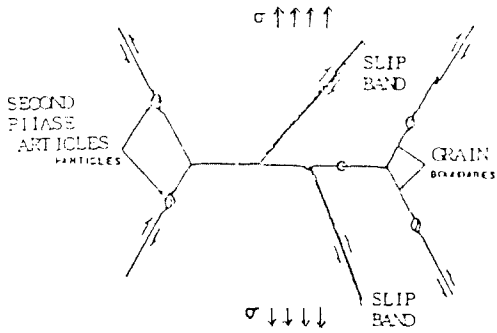


그림 7 세로발생된 입계공동

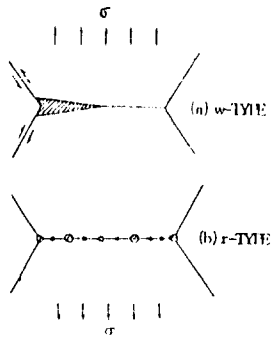


그림 8 공동모형의 두 유형

에 응력집중을 일으켜 공동이 생성된다.

(다) 입계의 돌출부나 불규칙한 곳이 입계 활주와의 상호작용, 미끄러미와의 상호작용으로 응력집중이 일어나 공동이 생성된다.

(라) 모체(matrix)와 결합력이 약한 입계석출물 또는 개재물이 모체와의 분리(decohesion)로 공동이 생성된다.

위와같은 기구에 의해 생성된 공동의 성장기구를 살펴보면

(i) 생성된 공동이 입계를 따라 공간(vacancy)의 확산이 일어나 공동이 성장한다는 입계를 공간생성 및 소멸의 무한근원으로 보는것 (공간확산기구)

(ii) 가해진 응력이 큰경우 공동성장은 모체의 소성변형에 의해 주도된다고 보는것 (크립변형기구)

(iii) 공간확산과 크립변형의 상호작용에 의해 공동이 조장된다고 보는것(공간확산과 크립변형 상호작용기구)등을 들 수 있다.

W형은 입계활주등으로 집중된 응력이 입계 관강도를 증가할 때 발생하며 응력집중과 입계 활주등에 의해 성장한다. 변형속도가 큰경우는 입내변형, 변형속도가 느리면 3중점에서 응력집중이 소멸되므로 중간변형속도에서는 W형 공동이 생성, 성장될 수 있다.

그림 8은 R형, W형 공동생성을 도식적으로 나타낸 것이다.

6. 해석적방법에 의한 수명예측

이 방법은 결함(균열)이 없는 설비를 대상으로 할것인가, 있는것을 할것인가에 따라 균열 발생예측, 균열전파 예측법이 있고 강도부족에 예측법은 부식, 마멸등 형상부족과 재료의 기계적 성질변화에 근거한다.

6.1 균열발생예측

피로 및 크립의 손상기구에서 알 수 있듯이 이들 손상은 어떤 응력 및 온도하에서 작용회수와 유지시 시간과의 관계이다.

크립손상의 평가는 어떤 응력에서 크립수명(파단)이 발생하는 시간을 T_{ir} 라 하고 이응력에서 T_i 시간 사용하였다면 크립손상(creep damage)는 다음과 같이 정의된다.

$$D_c = T_i / T_{ir} \quad (1)$$

즉 $D_c=1$ 이면 수명이 끝날것으로 간주한다. 좀더 범위를 확장시켜 위의 응력을 받고 또 크립수명이 발생하는 시간이 T_{jr} 인 다른 응력에서 T_j 시간이 사용하였다면 이 재료가 받은 크립손상은

$$D_c = T_i / T_{ir} + T_j / T_{jr} \quad (2)$$

이며 이식을 일반화 시키면 총 크립손상(D_c)는

$$D_c = \int \frac{dt}{T_r} \quad (3)$$

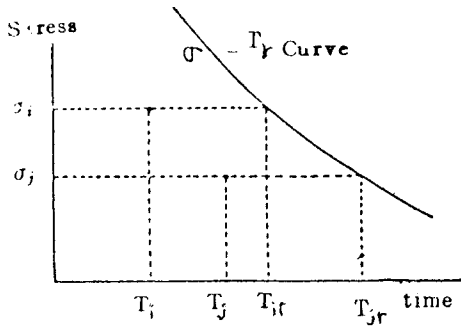


그림 9 크립손상 매개변수 곡선

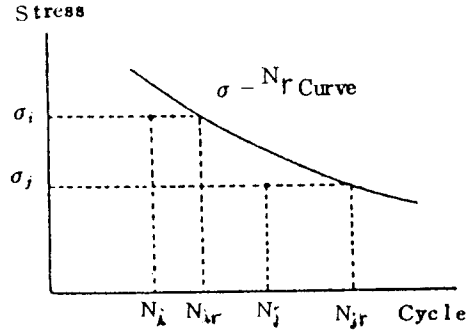


그림 10 피로손상 매개변수 곡선

가 된다.

크립의 경우와 동일한 방법으로 피로손상 (fatigue damage)이 계산된다(그림 9).

즉 어떤응력하에서 피로파단이 발생하는 회수를 N_{ir} , 피로가 발생한 회수를 N_i 라 하면 피로손상(Df)는 다음과 같이 정의된다.

$$Df = N_i / N_{ir} \quad (4)$$

여기서도 $Df=1$ 이면 수명이 끝난것으로 간주한다. 좀더 범위를 확장시켜 다른 응력에서 N_j 회 사용하고 이때 피로파단이 N_{jr} 에서 발생한다면 총 피로손상(Df)은

$$Df = N_i / N_{ir} + N_j / N_{jr} \quad (5)$$

이며 이식을 일반화시키면 총 피로손상(Df)는

$$Df = \sum N_i / N_{ir} \quad (6)$$

이 된다(그림 10).

재료가 크립과 피로손상을 동시에 받으면 이 손상은 일정변형(constant strain)에서 유지시간(hold time)을 갖는 저주기피로이다. 이경우 총손상은 피로손상(Df)과 크립손상(Dc)이 독립적으로 작용하며 이의 합이 어느 임계치(Dcr)에 도달하였을때 재료가 파단된다는 가정에서 linear damage summation법이 제안되어 실용화되고 있다.

$$Df + Dc = Dcr \quad (7)$$

이식의 피로손상(Df)은 Robinson 법으로 표시되고 크립손상(Dc)은 Miner의 법으로 표시

하고 있다.

즉 Robinson의 법은

$$\frac{N_i}{N_f} + \frac{N_2}{N_{f2}} \dots + \frac{N_k}{N_{fk}} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (8)$$

Miner의 법은

$$\frac{T_i}{T_r} + \frac{T_2}{T_{r2}} \dots + \frac{T_k}{T_{rk}} = \sum_{i=1}^k \frac{T_i}{T_{ri}} \quad (9)$$

로 되므로 식(8), (9)를 식 (7)에 대입하면,

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{fi}} + \sum_{i=1}^k \frac{T_i}{T_{ri}} \leq Dcr \quad (10)$$

그러나 일반적으로 각 응력수준사이의 상호작용, 피로 및 크립손상의 상호작용으로 Dcr 의 값은 1이 되지않고 0.5~1.5의 값을 갖는데 사고의 위험전도에 따라 0.5~1.0사이가 선택된다.

6.2 터빈 로우터의 균열발생 수명예측

터빈 로우터가 기동, 정지등 과도운전시 그림 11에서와 같이 온도변화에 의해 열응력이 발생하며 정상운전시에는 회전력에 의해 크립손상이 발생한다.

기동, 전지시의 열응력변화양상은 일정유지시간을 갖는 저주기 피로시험(strain controlled low cycle fatigue with hold time)의 응력변화 양상과 흡사하다.

따라서 손상은 크립과 피로가 중첩되는 linear damage summation법의 Robinson의 법

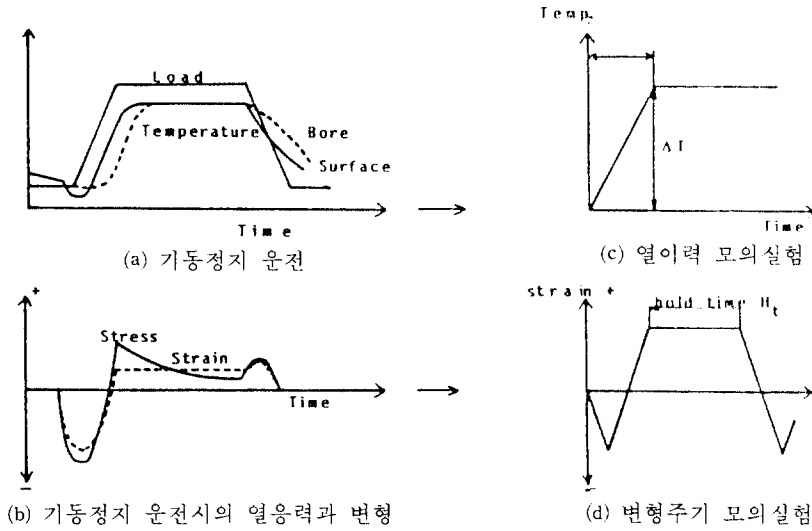


그림 11 터빈의 기동정지시 온도, 응력 및 저주기 피로시험

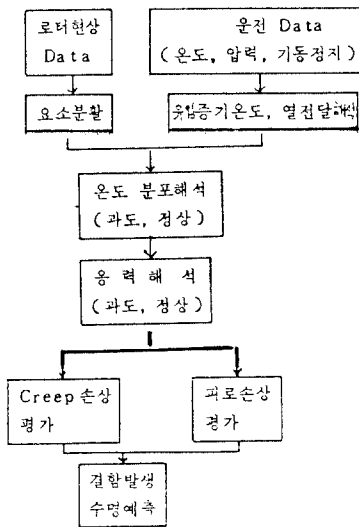


그림 12 터빈 로우터의 균열발생 예측도

및 Miner의 법이 적용되어 그림 12와 같은 과정으로 균열발생 수명을 예측한다.

7. 비파괴 재질열화 진단

비파괴적 열화진단기술은 조직변화, 공동

(void), 미시균열등을 측정하여 크립, 피로 및 취화정도를 관찰하는 방법이나 현재 실용화되어 넓게 쓰이는 것은 경도측정법과 Replica법이다.

7.1 경도측정법

금속재료는 크립손상을 받으면 연화하거나 경화되는 성질이 있으므로 경도변화량과 크립손상량과의 관계를 실험적으로 구한다면 크립손상을 정성적이 아닌 정량적으로 구할 수 있다.

그러나 경도변화량과 크립손상량과의 관계가 각 온도조건과 응력조건에 따라 달라지기 때문에 실제 부품에 가해질 수 있는 응력과 온도조건을 연산이나 실측으로 구한 후 각각의 조건에서 크립손상과 경도 감소량의 관계를 구하는 상당한 량의 시험결과가 필요하다.

실험량을 줄이고 실험하기 어려운 조건에서의 결과를 유추하기 위하여 여러온도 및 응력 조건에서 경도비와 크립손상량 혹은 잔류수명을 한개의 식이나 파라미터로 나타내고자 하는 연구가 진행되어 Goto나 Muramatsu등이 새로운 파라미터를 제안하였다.

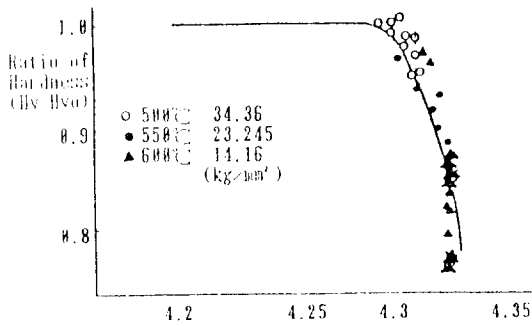


그림 13 크립에 대한 G-파라미터와 경도비

Goto는 G 파라미터로

$$G = \log T + \log(20 + \log t) + 0.00217(\sigma - 11)$$

식을 제안하였으며 위 식에서 t 는 파단시간이 아닌 사용시간이다. 그는 이식을 사용하여 여러조건에서의 크립손상량과 경도변화비를 G-파라미터로 표시하였다. 사용온도와 시간을 알면 경도비를 구한 후 위식을 사용하여 소재에 걸린 응력을 알 수 있으며 이를 이용하여 Larson-Miller 파라미터로 부터 잔류 크립수명을 알아낼 수 있는 것이다.

Muramatsu는

$$T(C + \log tr) = [a(\log \sigma)] Hv + b(\log \sigma)$$

식을 제안하였다. 위식에서 Hv 는 Vickers 경도, σ 는 소재에 가해진 응력이다. 위식은 실험적으로 구한 후 현장에서도 경도시험으로 Hv 만 구하면 쉽게 파단시간 tr 을 알 수 있으므로 앞으로 남은 잔여수명을 예측할 수 있다.

그러나 이 방법 역시 위의 관계식을 얻기 위하여 많은 실험을 해야한다(그림 13).

7.2 Replica법

현재 가장 널리 사용되고 비교적 체계적이고 표준화가 시도된 방법이 Replica법이다. 이 방법은 크립손상을 받고 있는 재료의 입내에 생성되는 미소기공(cavity) 관찰, 0.1mm이하의 미소균열 조사에 대해서는 표준화가 되어 있다.

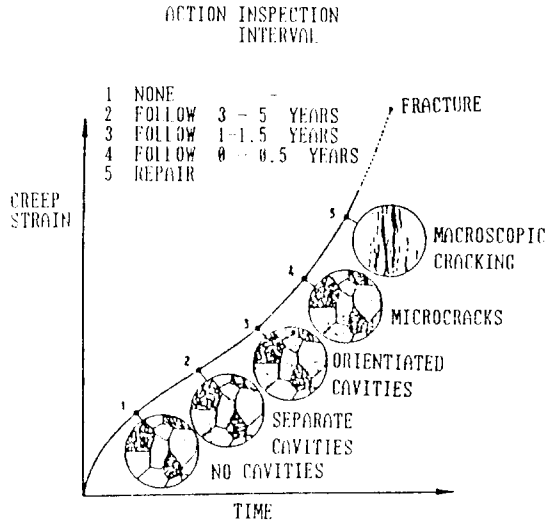


그림 14 Replica법에 의한 크립손상의 분류

독일에서는 각 상태에 따른 폐기여부의 결정, 정기적으로 비파괴 검사를 하는 기간의 설정, 손상단계의 판단기준등이 규격화 되어 있다.

그러나 이에 더하여 Replica법에 의한 조직 검사를 통한 소재내의 탄화물의 형태나 크기 및 조성의 정량분석을 함으로서 손상정도의 정량화까지 시도하려는 연구가 진행중이다. 이런 연구는 캐나다의 Ontario Hydro, 영국의 OEGB에서 주로하고 있으며 탄화물의 크기와 손상과의 관계식을 구하고 비파괴적으로 사용 중인 소재에서 탄화물을 직접 추출할 수 있는 기법까지 개발하였다. 그들은 이 방법을 응용하여 정유공장의 천연가열기나 보일러에서 실조업시 과열된 부분의 온도까지 추정하여 실질적인 안전관리를 할 수 있도록 하였다.

Replica법의 문제점으로 들 수 있는 것은 보이는 표면만을 조사할 수 있으며 응력 집중점으로 작용하는 심하게 굴곡진 부위는 측정 정확도가 떨어진다. 또 미소기공의 관찰만으로는 손상 추정의 정량화가 어려우며 단지 어느 손상단계(보통 4단계)에 해당한다는 정도 이외에는 알 수가 없다. 그러나 측정 및 판정이 용이

하고 직접조치를 볼 수 있기 때문에 그 이용도가 비교적 크다는 장점이 있다. 그림 14에 크립손상의 단계를 나타낸다.

8. 맺음말

지금까지 기계 구조물의 수명예측 및 평가에 대하여 기초이론과 실예를 중심으로 기술하였다.

기계설비의 파손방지 및 수명예측, 평가기술은 학문적으로나 산업분야에서나 종합적이므로 제작자, 설계자, 사용자, 연구자, 기술자 등이 서로 긴밀한 협력체제를 구축하여 지속적으로 설계, 재료, 운전, 시험, 검사, 보수등 각자의 전문분야를 조화있게 연구개발 하여야만 문제를 해결 할 수 있다는 뜻이다. 따라서 관련종사자는 협력체제를 설비 및 기업특성에 맞게 구축하는 것이 가장 중요하고 시급한 과제이다.

참고 문헌

- (1) 1976, "Operating and Maintaining Steam Turbine Generators."
- (2) "증기터빈 로우터의 열피로 문제점", HITACH평론, Vol. 54, No.9.
- (3) "증기터빈의 기동과 열응력관리에 대하여", HITACH평론, 증기터빈 강습회 자료, HITACHI Ca
- (4) Halford, G.R., Hirschberg M.H. and Manson. S.S., 1973, "Fatigue at Elevated Temperature", ASTM STP520, pp. 658, ASTM
- (5) Timo, D.P., 1984, "Design Philosophy and Thermal Stress Considerations of Large Fossil Steam Turbines", General Electric Company.
- (6) Hales, D., 1987, "A Method of Creep Damage Summation Based an Accumulated Strain for the Assessment of Creep-Fatigue Endurance", Fatigue Engineering Materials and Structure, Vol. 6, No. 2, pp.121~135.
- (7) Taske, C.E., Mindlin, Ho and Perrin, J.S., 1973, "Combined Low-Cycle Fatigue and Stress Relaxation of Alloy 800 and Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Fatigue at Elevated Temperature, ASTM STP 520, pp. 365~376.
- (8) Woodford, D. A., 1979, "Creep Damage and the Remaining Life Concept", Trans. of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Oct., Vol. 101, pp.311~316.
- (9) Campbell, R.D., "Creep Fatigue Interaction Correlation for 304 Stainless Steel Subjected to Strain-Controlled Cycling with Hold Times at Peak Strain", Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry.
- (10) Robinson, E.L., 1938, "Effect of Temperature Variation on the Creep Strength of Steel", Trans. ASME, Vol.60, pp.253~259
- (11) Randal, P.N., 1962, "Cumulative Damage in Creep-Rupture Tests of a Carbon Steel", Journal of Basic Eng., Trans ASME, Series D, Vol, 84, No.2, pp.239~242.
- (12) Voorhees, H.R., 1956, "The Creep-Rupture Life at Life at Uniform Elevated Temperature of Engineering Structures with an Initial Strees Gradient", PhD Thesis, the University of Michigan.
- (13) Liberman, Y., 1962, "Relaxation Tensile Strength and Failures of E1612 and 20KhF-L Steels", Metalloved, Term, Obrabotka Metal, Vol. 4, pp.6~13.
- (14) Voorhees, H.R. and Freeman, J.W. "Nothch Sensitivity of Aircraft Structural and Engine Alloys", Wright Air.