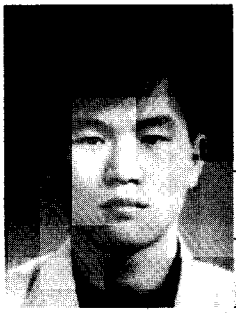
技術現況分析

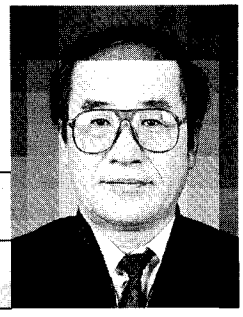
화학설비의 수명관리 기술



현 양 기

(KIMM 공인시험평가부)

'89 - '93 부산대학교 금속공학과(학사)
'93 - '95 부산대학교 금속공학과(석사)
'95 - 현재 한국기계연구원 연구원



이 재 도

(KIMM 공인시험평가부)

'75 서울대학교 금속공학과(학사)
'82 - '87 한국과학기술원 금속재료과(석사)
'90 - '93 EURACA 경영경제(박사)
'78 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 개요

현재 국내의 석유화학 설비들은 상당부분은 60~70년대에 건설되어 노후화 된 상태로 설비의 폐기, 보수 또는 대체를 결정해야 할 시기이거나, 소재 및 설계기술이 축적되어 있지 못한 상태에서 국내기술로 제작·설치된 상태이므로 설비구조 재료의 신뢰성, 설계시공 및 운전조건의 불안정 요인이 상존하고 있어 가동전/가동중 시험평가 기술 및 경년열화현상, 수명예측 및 보수용접 기술 등 설비 유지관리에 대한 기법개발과 설비운용자인 석유화학산업계의 공통 애로기술 해소를 위한 실용화 기술의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

국내의 사회간접자본, 기간설비, 장치산업의 증대 및 노후화에 따른 안전성 확보와 사고예방 및 환경보전 관점에서 뿐만 아니라, 저성장 경제시대에 당면하여 산업설비의 수명연장을 위한 안전진단, 구조재료의 열화도 진단, 유지보수 등 설비의 경제적 운용을 위한 기술수요가 더욱 증가될 것이 예상되므로 이 분야의 중요성이 더욱 부각될 것으로 본다.

발전설비나 화학플랜트등에서의 경년열화(經年劣化)는 기기, 구조물의 사용환경이나 재료의 사용기간에 따라 다종다양하나 크게 대별하여 보면 ;

1) 재질형 열화 : 재료내부의 미세조직의 변화에 의한 열화

2) 균열형 열화 : 잠재 균열의 성장 또는 사용중 균열의 생성 및 성장에 의한 열화

3) 표면손상형 열화 : 재질변화나 균열의 잠재 혹은 발생, 성장이 없더라도 표면에서 손상이 생

긴 결과로서의 열화로 분류된다.

설비나 기기의 구조재료의 건전성 평가 및 잔존수명 진단을 보다 정확하게 하기 위해서는 이들 세가지 열화 및 상호관계에 대한 충분한 이해가 필요하며, 각각의 열화에 대한 정보를 적절히 계측·평가하여 모델화시키는 것은 정도 및 신뢰성 향상에 극히 중요하며, 또한 평가 정도 및 신뢰성 향상을 위해서는 표준화된 방법에 의해 계측된 데이터를 계통적으로 축적, 이들을 효율적으로 활용 가능토록 하는 환경이 필요하다.

과거 수년간에 걸쳐서 각종 기기, 구조물에 대한 잔존수명진단 또는 수명연장기술의 향상이 활발하게 진전되어 플랜트 구조재료의 고온손상 평가방법도 많이 제안되어있다. 그러나 이들 방법들은 각각의 장단점을 가지고 있어 몇가지를 잘 조합함으로써 평가범위의 상호 보완은 물론 정도(精度) 향상을 도모하는 것이 필요하다.

2. 설비의 보전방법(Maintenance Policy)

Plant의 내용한계(耐用限界), 구성재료의 교체시기 등을 파악하는 것은 plant의 안전성 확보와 plant의 가동계획 및 장기설비 운용방안 수립에 중요하고 절실한 과제이다.

종래 기기구조물의 수명관리 및 설비의 보전방법으로는 주로 시간기준(Time Based Maintenance) 혹은 문제가 생긴후 교체하는 사후보전(Break Down Maintenance) 등이 적용되었으나 사고나 고장의 예방 혹은 사전예지는 할 수 없으므로 보다 높은 안전성, 신뢰성을 확보하기 위하여 예방/예지보전(Preventive/Predictive Maintenance)으로의 기대가 커짐에 따라 상태기준보전/상태감시기술(Condition Based Maintenance/Condition Monitoring Techniques)의 고도화를 위한 요소기술 개발의 중요성이 지적되고 있다.

상태기준 보전방법에서는 일정한 주기로 점검, 진단을 실시하여 이 진단결과를 기초로 보수시기가 결정된다. 즉, 시간기준보전에서는 설비를 집단으로 하는 통계학에 기초하여 신뢰성 이론으로 보수여부를 결정하는 반면, 상태기준보전에서는 최근의 계측기술이나 결정이론을 이용하여 개개 설비의 열화상태를 결정함으로서 통계에 기초한 부정확성을 배제한다.

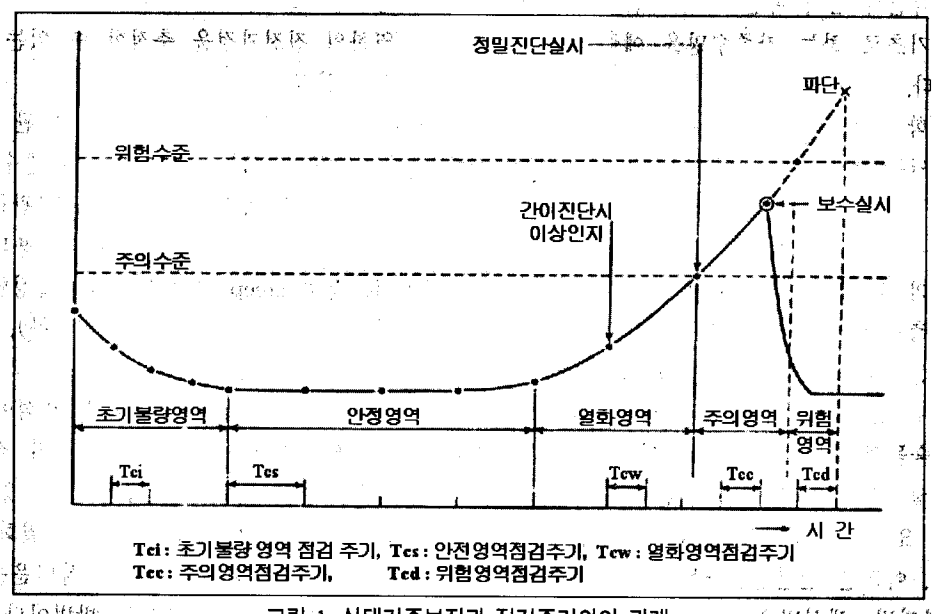


그림 1. 상태기준보전과 점검주기와의 관계

그림 1에서와 같이 이상이 발생하여 주의영역에 도달하기까지의 시간을 열화영역, 주의에서 위험수준에 이르기까지를 주의영역, 위험영역을 초월하여 파단에 이르는 시간까지를 위험영역으로 구분한다.

일반적으로 징후정도가 주의영역에 도달하는 시점에서 정밀진단을 실시하고, 잔여수명을 예측하여 보수시기를 결정하는 것이 좋다. 진단주기는 열화도의 함수로서 결정되겠지만 안전영역에서는 길게, 초기불량영역과 열화영역, 주의영역에서는 짧게 한다. 이와 같이 상태기준 보전방법에서는 진단의 결과에 기초한 보수시행이 결정되므로 진단의 시기 결정과 정도(精度)가 중요하다.

3. 열화도/잔존수명 평가기술의 현상 및 동향

플랜트의 경년열화 기구는 구성재료 및 사용조건 등에 의존하여 종류가 다양하고, 복수의 열화요인 혹은 열화기구가 복합적 내지는 경합적으로 작용하는 것도 적지 않다. 플랜트의 안전성을 확보하여 장기 안전운용을 위해서는 이들 경년열화를 적절히 감지 혹은 예지하여 이들의 정량평가를 기초로 하는 잔존수명을 예측하는 것이 필요하다.

특히, 화학 플랜트와 같이 가혹한 환경에서 소재가 겪게되는 열적, 화학적, 기계적 조건에 따라 생길 수 있는 손상과 열화는 다종다양하여 설비의 보수관리와 계획적/효율적 운용을 위해서는 재료의 열화상태를 정확하게 진단하고 잔존수명 예측을 함으로써 소재 활용의 경제성을 확보하고 설비의 예상치 않은 손상에 따른 재난을 방지할수 있는 비파괴적 감시 진단방법에 관한 요소기술들의 개발 중요성은 대단히 크다.

열화도 및 수명 진단방법에 관한 진단 대상부위와 열화 요인에 따라 진단방법을 규정할 필요가 있는데, 이러한 진단방법들을 대별한다면 파괴법, 비파괴법, 해석법으로 분류될 수 있으며, 이들 각각의 방법상의 특징과 진단하는 재료의 종류에 따라 선택 사용되는데, 우선 파괴법과 비파괴법은 대상으로 하는 실제 사용재료의 열화도와 잔존수명을 직접 평가하는 방법이다.

이중에서도 파괴법이 제일 직접적이므로 정도가 높으나 평가용 sample을 채취하여야 하기 때문에 적용에 제한되는 경우가 많다. 파괴법 중에서도 진단 정도(精度)가 가장 높은 creep 파단시험이 널리 이용되지만 두께가 두꺼운 vessel이나 header 등에도 적용이 가능하지만 실제로는 많이 사용되지 않는다.

Creep 파단시험은 최소한 3단계 정도의 응력(혹은 온도)에서 각 조건에서 3개의 시편으로 9점 정도의 data를 신뢰구간의 하한선을 작성하여 미사용재의 data 와 비교하여 잔존수명을 추정한다. 단, creep 파단시험은 시험조건을 가속화하여 수행하더라도 정기검사 기간내에 결과를 얻을 수 없기 때문에(통상 최대 3,000시간 정도 소요) 차기 이후의 정기검사에 반영하는 경우가 많다. 그러므로, 실제의 정기검사시 잔존수명예측에는 비파괴법이 많이 이용되고 있다.

비파괴법은 접근 용이성에 제한이 일부 있지만 정기검사를 통하여 열화를 감시 할 수 있고, 또 열화의 진전과정을 추적할 수 있는 등 유효한 면이 많다.

Boiler tube, header, 가열로관, 배관 등 creep 손상이 문제가 되는 구조재료의 잔존수명평가는 대부분의 경우 비파괴법, 특히, 조직관찰법이 이용되고 있다. 고온설비에서 흔히 사용되고 있는 Cr-Mo 강의 creep 손상평가에는 결정립 변형법(모재), creep void 법(용접 열영향부), 조직대비법 등이 이용된다.

한편, 간접평가법인 해석법은 해석에 시간과 비용이 많이드나 비파괴나 파괴법의 적용이 불가한 부위에도 평가가 가능한 면이 있으며, 또 설비의 운용형태가 변하는 경우의 열화예측에도 대응이 가능하므로 특히, 장기 설비운용계획 설정 수립에는 필수 불가결한 방법이다. Header,

drum, T/Y piece등과 같이 두께와 형상이 복잡하여 발생하는 low cycle fatigue도 문제가 되는 구조재료의 수명평가에는 creep 손상과 low cycle fatigue손상을 동시에 평가할 수 있는 해석법이 널리 사용되고 있다.

본 내용에서는 고온고압조건에서 사용되는 석유화학설비를 대상으로 현장적으로 주로 응용되는 재질형 열화와 creep현상에 대한 비파괴적/파괴적 손상 계측·평가 및 수명예측방법 중 주요한 몇가지 방법에 대하여 재료적인 측면에서 배경과 응용사례, 적용가능성 및 범위를 설명하기로 한다.

3.1 비파괴적 평가법

흔히 현장적으로 이용되고 있는 방법들로는,

1) 관 외경변화
2) 조직변화 : replica법, creep void량, 석출물량, 결정립 변형법, 조직대비법 등
3) 밀도변화
4) 경도변화

이들 변화량으로 creep 손상(파단시간 Tr에 대한 creep시간 T의 비: T/Tr)을 평가하는 방법들로 관외경 측정법은 creep 손상과 함께 증가하는 creep변형량(strain)과의 관계를 보인 것이나 측정방법과 위치의 표준화 등 지속적 data관리가 필요하나, 부식에 의한 두께감소가 생기는 경우에는 정도(精度)가 문제로 된다.

조직변화에 착안한 방법들로는 creep진행과 함께 결정립계에 발생하는 void의 정량평가, 탄화물이나 sigma상의 석출량을 정량적으로 평가하여 creep손상과 관련시킨 것들로 replica법, 입계부식법, x-ray회절법, 전기저항법, 초음파탐상법, 전기화학적 분극법 등이 있다.

밀도변화는 creep void량의 증대에 반하여 밀도감소에 착안한 것이고, 간단하게 측정할 수 있는 경도변화를 creep손상의 지표로 할 수 있는 가능성은 있으나 이러한 변화들은 조직변화에도 관련되기 때문에 강종별로 명확한 개별평가가 되어야할 필요가 있다.

이와 같이 비파괴적 방법을 적용할 경우에는 단일 방법만으로는 되지않고 복수의 방법을 병용, 상호보완하여 정도를 향상시키는 것이 중요하다.

3.2 Creep 손상계측법

3.2.1 Replica법

Creep으로 파단에 이르는 과정에는 조직이나 탄화물의 형태, 종류가 변함과 동시에 결정립 모양이 변하게 되고 cavity 혹은 void라 불리는 미소한 空孔이 입계에 발생 증식하여 crack으로 성장된다. 이러한 현상은 재료와 creep 조건에 따라 천차만별하지만 실제 사례의 정리와 실험실적 data를 충실히 하면 creep손상(잔존수명)의 계측이 가능해진다.

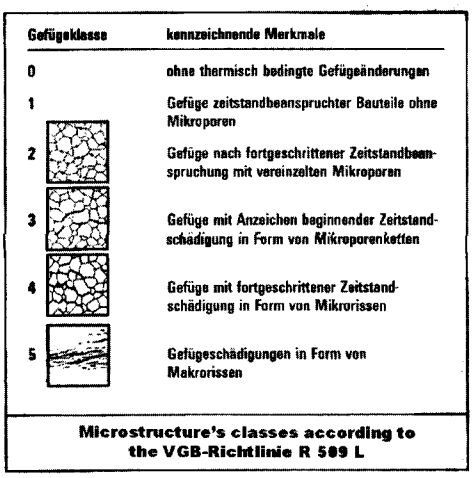
Boiler의 배관계통(주로 Cr-Mo저합금강)의 용접부는 creep손상을 받기 쉬운 대표적인 부위로, 특히 유럽(독일과 네덜란드)에서는 replica에 의한 방법이 선행되어 그림 2에 보는바와 같이 손상상태를 (1) 독립된 cavity상태, (2) 방향성이 있는 cavity상태, (3) cavity가 연결된 상태(micro crack), (4) macro crack의 분류와 함께 각각의 상태에 대한 차기검사 시기 및 조처등을 neubauer등에 의해 제안되어 규격화되고, 실용화를 위해 VGB(대형발전설비협의회)에 의해서도 개선되고 있다.

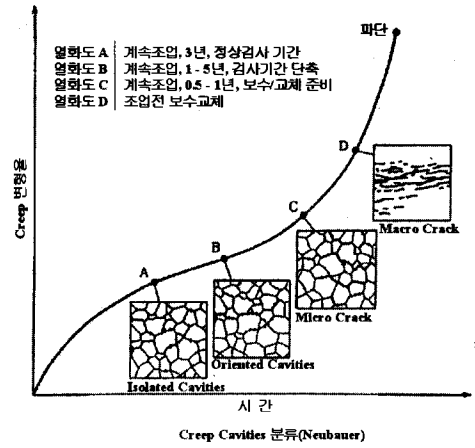
3.2.2 TRD 301/508에 의한 잔존수명 평가

(TRD : Technical Rules for Steam Boiler)

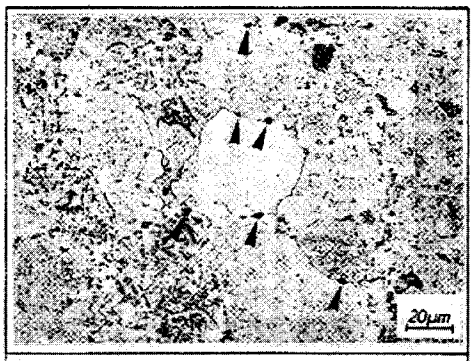
제1단계 : TRD 301/508에 의한 손상누적도 계산
제2단계 : 재료상태의 실험실적 추정
제3단계 : 실험/계산결과비교, 교체여부 결정
제4단계 : 예측기간 경과후 재평가

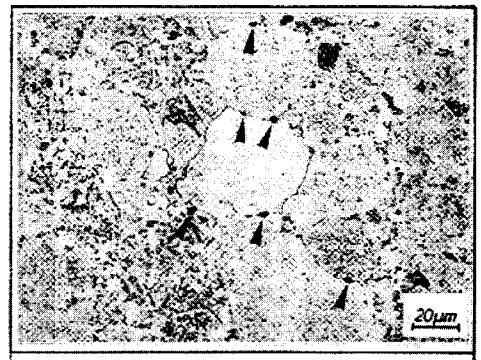
TRD 301/508에 의한 잔존수명 평가는 수명평가시까지의 과거 조업이력 기록(사용응력, 온도,





Creep Cavities 분류(Neubauer)





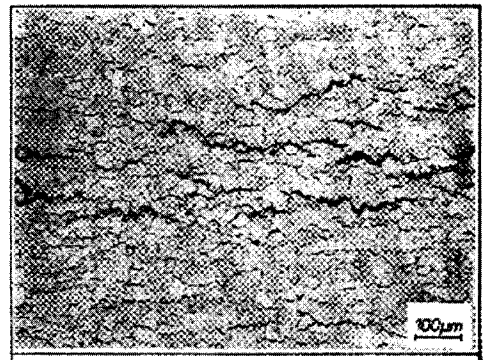


그림 2. Replica법에 의한 잔존수명평가

두께 및 치수, metal온도)을 구분하여 평가 대상 재료의 온도별 min. creep data를 활용, creep열화에 의한 수명소모율을 계산하고, 부하변동(온도와 압력변화)에 의한 수명 소모율을 계산한다.

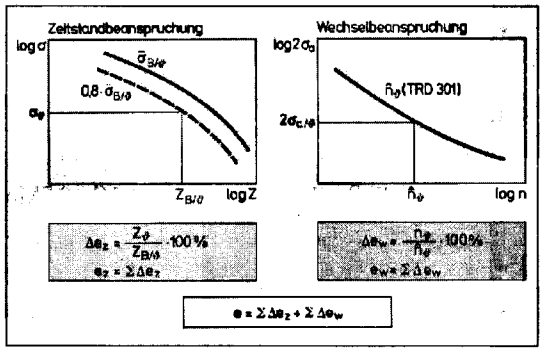


그림 3. TRD508에 의한 내열강의 총 수명소모율 계산

$$e_z = \frac{Time\ at\ Temperature\ and\ Pressure}{Expected\ life\ at\ Temperature\ and\ Pressure} \times 100$$

$$e_z = \frac{Number\ of\ cycles\ in\ Service}{Calculated\ number\ of\ cycles\ to\ Failure} \times 100$$

$e = e_z + e_w$: 총 수명 소모율*(Total Life Exhaustion)*

e 값이 60% 혹은 e_w 값이 50%에 이르게되면 비파괴적 방법(MT, PT, UT, Replica, 내면검사)이 동원되어 crack혹은 1% strain이 검출될 때까지 정기적 검사를 수행한다. e값이 100%에 이르면 검사항목을 증가시켜야 되겠지만 crack손상이 탐지되지않고, e_z와 e_w가 100%보다 작으면 검사주기를 단축시킬 필요는 없다.

교체기준(replacement of components)은

- Creep 이나 cyclic loading에 의한 crack이 발견되거나,
- e_z 혹은 e_w=100% 로서 special test와 검사주기 단축으로 안전조업 보장이 어려울때
- 조업초기단계에서 변형율이 2% 이상인 경우
- e=60% 이른 이후 변형율이 1% 이상일 때

등이다.

3.2.3 조직대비법

조직이나 석출물의 분포상황의 변화를 중요시한 방법의 예로서는 일본의 조직대비법에 의한 수명평가(MLAS-Mitsubishi Metallurgical Life Assesment)로 cavity뿐만 아니라 조직 및 석출물의 상황을 분류하여, 수많은 실제의 경험과 실

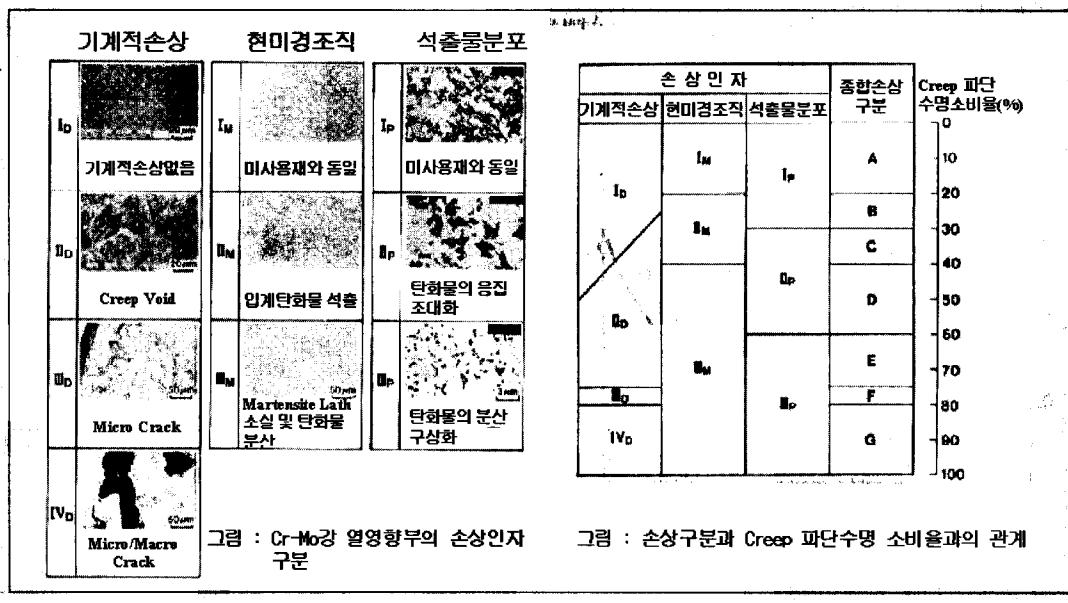


그림 : Cr-Mo강 열영향부의 손상인자 구분

그림 : 손상구분과 Creep 파단수명 소비율과의 관계

그림 4. 조직대비법에 의한 잔존수명평가

적을 근거로 표준조직을 준비하여 실제 기기의 replica관찰조직과 대비한 정성적인 평가로 수명 소비율을 구할 수 있게 하고 있다.

예로서 기계적 손상을 IID, 현미경조직을 IIIM, 석출물 분포를 IIp 로 구분하는 경우라면 creep 수명 소비율은 40~60%로 추정된다. 이 방법은 비파괴적으로 채취한 replica를 이용하여 실제 부품의 검증시험이나 비교적 정도가 높은 creep 파단 시험과의 관계도에서도 실용성이 확인되고 있다.

3.2.4 A-Parameter법

정량적인 평가방법으로 A-Parameter법으로 strain의존형 cavity성장 모델을 이용하여 손상입계수비 A와 수명비율 T/T_r을 작성하여 평가한다.

즉, $T/T_r=(1-A)n\lambda/(\lambda-1)^n$

여기서, n : Creep정수, λ : 파단연성 ε_f와 $\varepsilon_m = \varepsilon_{min} \times t_r$의 비

재료상수(n, λ)등이 있으므로 실용성에는 많은 data가 필요하다.

* 모재부 : Ferrite 조직 n = 4-6 = 5-20
Bainite 조직 n = 4-6 = 5-10
HAZ : 조대 Bainite조직 n = 4-6 = 1-3

EPRI는 수많은 data를 이용하여 1Cr-0.5Mo 및 2.25Cr-1Mo강의 열영향부에 적용할 수 있는 식을 A = 0.517 (T/Tr) - 0.186로 제안하고 있다.

Cr-Mo-V강은 turbine rotors나 주강 casing에 이용되는 연성이 낮은 재료로서 실사용 영역에서 cavity가 발생하고 creep crack으로 합체 · 성

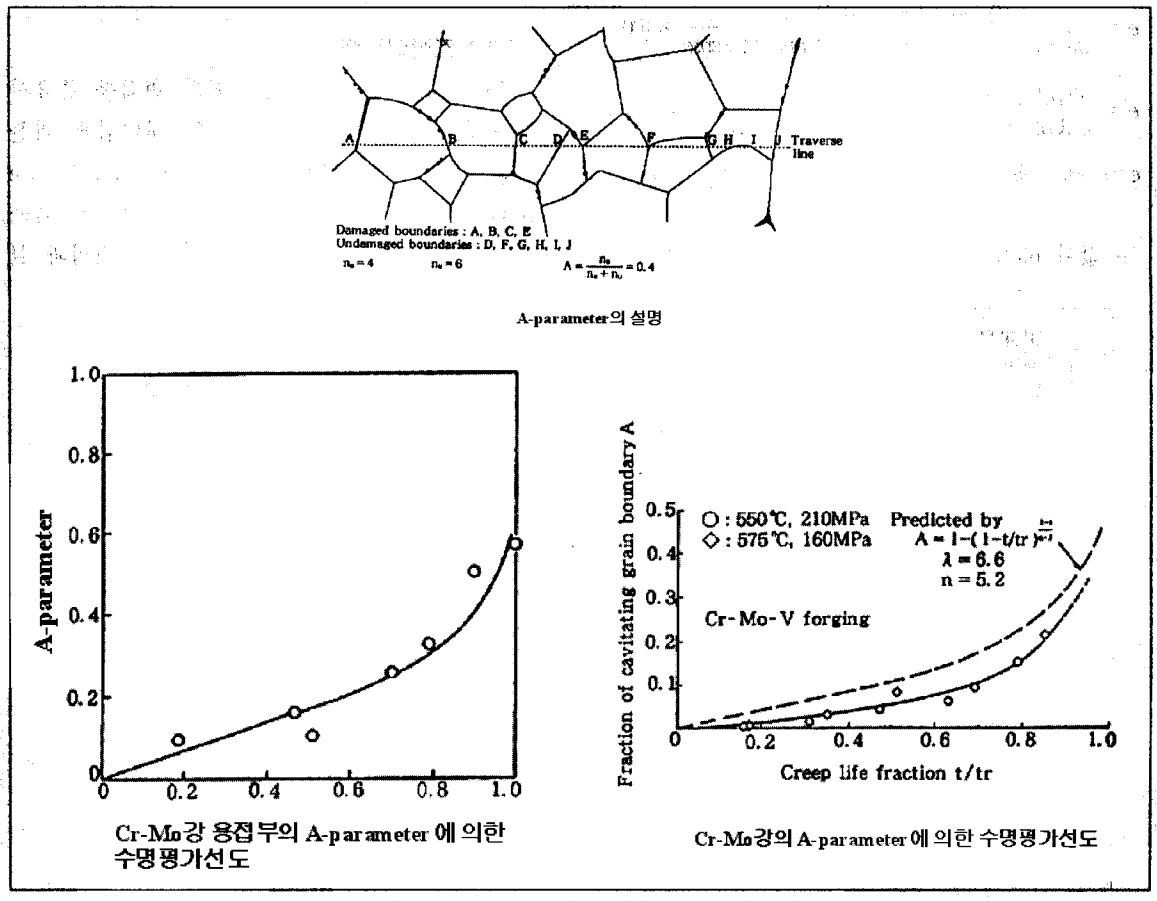


그림 5. A-Parameter 와 수명비 T/Tr의 관계 예

장되므로 A-Parameter에 의한 손상 수명 평가가 가능하다. 그러나, boiler용 Cr-Mo강 모재등에는 연성이 좋기 때문에 cavity발생이 어려워 결정립의 형상변화를 관찰하여 creep 손상율과의 관계도를 작성하는 방법이 응용된다.

한 예로서 2.25Cr-1Mo 저합금강은 고온재료로 흔히 쓰는 재료로, M_6C형 탄화물의 석출과 조대화가 creep, 고온인장강도, 인성 등 기계적 성질열화의 주 요인이 되는 것이 알려져 있으며, creep수명의 말기 단계에까지도 void 형성이 잘 되지 않아 비파괴적 방법인 A-Parameter, 전기저항법, UT, replica 등과 같은 creep손상을 void형성과정을 근거로 평가하는 방법의 적용은 어렵게 된다.

3.3 파괴적 평가법

Boiler tube 는 교체가 비교적 용이하므로 발관 sample로 파괴적 방법으로 잔존수명을 평가하는 것이 가능하다. 잔존수명 평가에서 보통 운전기록으로부터 운전시간과 사용압력은 입수가 용이하며, 사용응력을 API RP 530에 따라 관의 치수와 내압에서 평균경 공식 $\left\{\sigma=\frac{P}{2}\left(\frac{D_0}{t}-1\right)\right\}$으로 구하게된다.

잔존수명 평가시 실제로 미지수로 되는 인자는

(1) 미사용 시점에서의 관의 전수명 t_o

(2) 사용시점에서의 관의 잔존수명 t_1

(3) 관의 사용온도 T_e 들로 이들을 구하기 위해서는 다음의 data 들이 필요하다

(a) 미사용 강관재료의 creep 파단강도 특성

(b) 사용 강관재료의 creep 파단강도 특성

(c) 관의 온도 실측치(metal temperature)

이들중 적어도 둘이상의 data가 있으면 잔존수명을 구할 수 있다.

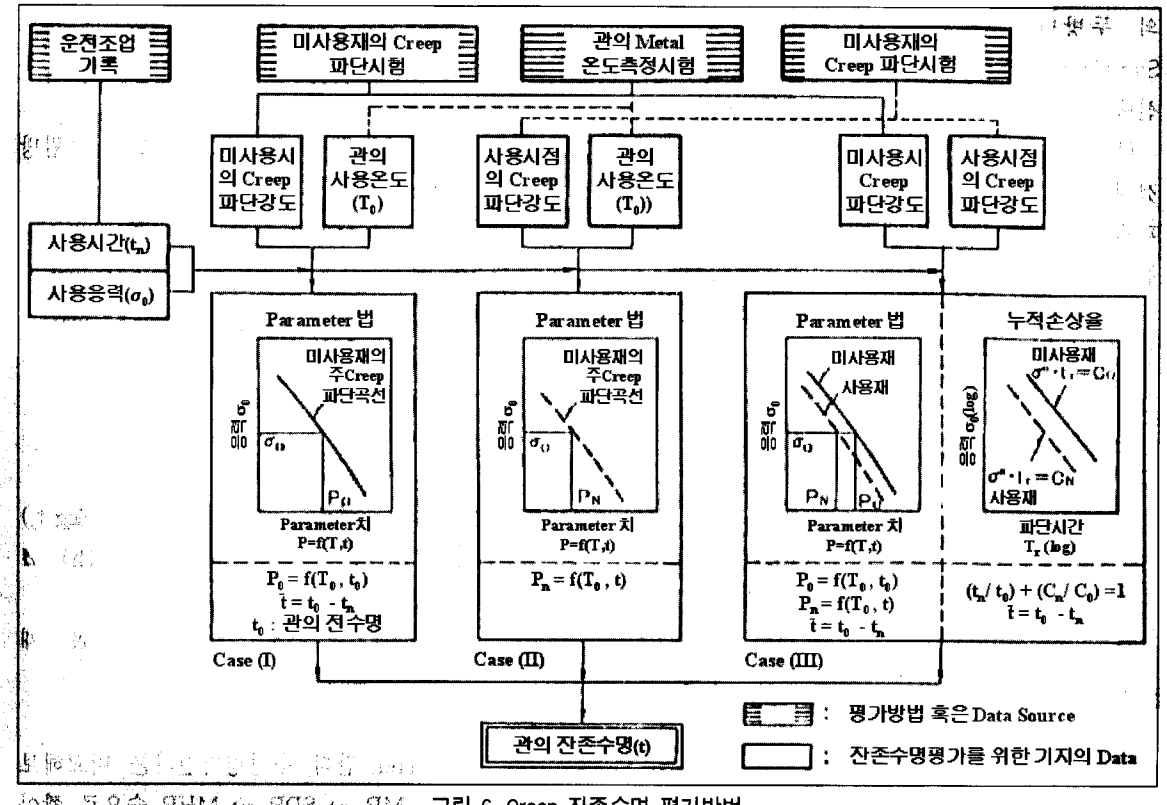


그림 6. Creep 잔존수명 평가방법

(a) data는 미사용관재료가 장기간 보존되지 않은 경우가 많으므로 직접 구할수 없으면, 동일 강종의 미사용재료의 data를 대용하는 경우가 대부분이다.

(c)의 data도 없는 경우가 많으므로 금속조직의 변화로부터 사용온도를 추정하는 시도도 있겠지만 추정 精度에 문제가 있다고 본다. Tube 관의 metal온도의 정도는 수명평가 정도에 직접적으로 큰 영향을 주게되는 중요한 인자이기 때문에 가능한 한 실측하는 것이 바람직하다.

Creep 잔존수명 평가방법은 그림 6과 같이 3가지 경우로 나눌 수 있다.

3.3.1 사용온도를 알고 있는 경우의 수명평가법(Case I & Case II)

관의 사용온도를 알고 있는 경우에는 미사용시의 creep 파단강도 특성이 없더라도 sampling한 사용관의 creep 파단강도 특성으로부터 다음의 두방법으로 잔존수명을 구할 수 있다. Sampling시에는 가장 혹심한 상태에 있는 것을 선택하는 것이 중요하다.

(1) Parameter법에 대해서는 후속으로 설명되겠지만 잔존수명 평가에 필요한 사용관의 creep 파단강도 특성은 온도와 응력을 실제의 사용조건보다도 높은 가속시험으로 구한다.

(2) 온도가속 시험법은 응력조건은 사용응력으로 정하고 온도만을 사용온도보다 높은 가속시험을 한다. 즉, 사용온도 이상의 수점의 가속시험 data를 사용온도까지 외삽하여 잔존수명을 구한다.

단, 필요 이상의 온도가속은 사용온도 상태와는 다른 조직변화나 변형, 파괴양식을 갖게 될 위험성이 있기 때문에 피하는 것이 좋다.

3.3.2 사용온도를 모를경우의 잔존수명 평가법(Case III)

관의 사용온도가 불명한 경우에는 (a)와 (b) data로부터 잔존수명을 평가할 수밖에 없다. 설비보수 대책수립 면으로 보면 단시간 내에 평가가 완료되어야 하므로 필요한 data는 단시간 파단의 가속 creep 파단시험으로 얻지 않으면 의미가 없게된다. 그러므로, 미사용/사용관 재료의 creep data 상호간의 관계를 도출하여 parameter법 혹은 누적손상율법(Life Fraction Rule)을 적용한다.

(1) Parameter법의 적용

Parameter법은 온도와 시간을 하나의 parameter 속에 포함시켜 표시하여, 응력이 주어지면 parameter 값이 하나로 결정되게 하는 것이다. 사용관/미사용관 재료의 creep파단 시험 data를 정리하여 각각의 주 creep 파단곡선(Master Curve)을 구하고, 이로부터 미사용관/사용관의 parameter 값을 구한다. 이 값의 차이는 관이 사용된 것, 즉 사용기간 중에 받은 creep손상으로 보는 것이다.

다음 그림에서와 같이 미사용관/사용관 재료의 주 creep 파단 곡선을 구하여 사용응력 σe에 대하여 각각의 parameter값 P_0, P_1을 구하면 P_0와 P_1은 다음과 같이 표현되며 이들간의 연립방정식에서 해를 구하게 된다.

$P_0=f(T_e, t_0)$ $P_1=f(Te\ t_1)$ $to=t_1+t$

t : 운전시간, t_1 : 잔존수명, t_0 : 전수명, T_e : 사용온도

대표적인 Parameter로서는

Larson-Miller Parameter $=T(c+\log t_r)$

Sherby-Dorn Parameter $=\ln t_r-\Delta H/RT$

Manson-Haferd Parameter $=(T-T_a)/(\log t_r-\log t_a)$

여기서, T : 절대온도(K) t_r : 파단시간(h) ΔH : 활성화 에너지(cal/mol)

R : 기체상수(1.987cal/mol K) C, T_a, t_a & : 재료상수

각 Parameter 간의 수명평가결과를 비교해보면, 수명은 LMP → SDP → MHP 순으로 짧아

지고, 사용온도는 같은 순으로 낮아지는 경향을 나타낸다. 관의 사용온도보다 50~100℃ 높은 온도에서 3,000시간 이내의 creep 파단시험 data를 10점 이상 구하면 parameter 법으로 10만 시간 상당의 수명은 약 1/2-2배의 精度로 평가할 수 있다.

(2) Creep 단기 가속시험

Creep시험은 다른 시험과 달리 수 만 시간의 장시간의 시험시간이 요구되지만 실제적으로 그렇게 할 수 없으므로 단기 가속시험 및 creep parameter를 사용하여 잔존수명을 예측한다. 응력을 고정시키고 조직이 변하지 않는 범위내에서 10~20도 간격으로 4~5개를 실험하여 해당 온도로 외삽하여 파단수명을 산출하는 방법인 "Isostress"법은 low alloy에서는 적용이 효과적이나 HK, HP 등의 내열 주강재료에는 사용온도가 탄화물의 용체화온도 근처이므로 온도가 높을 경우 탄화물의 재용해가 일어나므로 부적당한 방법이다.

흔히 사용되고 있는 "Larson-Miller Parameter" 법은 미사용재와 수명예측의 대상인 사용재의 각각에 대하여 creep파단시험을 통하여, 사용재/미사용재에 대한 응력- LMP curve 두곡선을 동일 그래프 상에 나타내고, 잔여수명을 구하고자 하는 응력에서 P_0와 P_1을 구한 후 컴퓨터를 이용하여 반복계산으로 T_{eq} 및 t_1을 구한다.

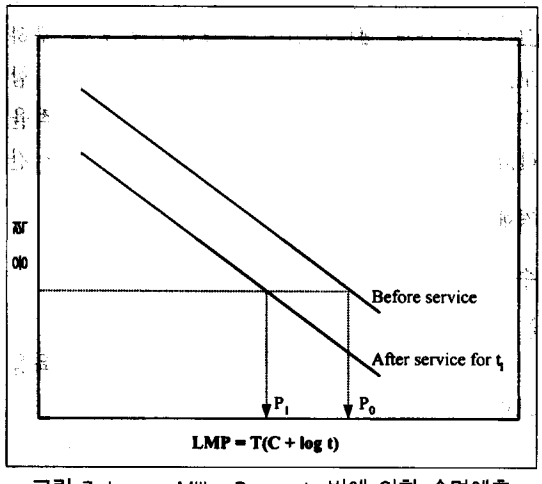


그림 7. Larson Miller Parameter법에 의한 수명예측

※ 등가온도 (Te, Equivalent Temperature) : 재료가 받는 각종 온도구간에서의 손상과 압력, fatigue 등 모든 영향을 종합적으로 고려한 운전 등가온도로서 실제 사용온도보다 높게 나타나며 재료의 metal 온도와 다른 것은 응력 결정시 표면산화 마모 등에 의한 두께 감육효과가 반영되지 않기 때문이다.

$$P_0 = T_{eq}(C+\log\ t_0) = T_{eq}(C+\log(t_1+t))$$
$$P_1 = T_{eq}(C+\log\ t_1)$$

여기서, t : 사용시간, t_1 : 잔존수명, t_0 : 전수명 $t+t_1$

이 방법을 실제로 적용할 경우, Larson Miller 곡선을 현실적으로 가능한 짧은 시간 내에 구할 필요가 있다. Creep파단시험의 시험응력을 높게 하면 작용응력에서 LM곡선이 너무 길게 외삽되는 부분으로 되어 정도(精度)가 떨어지며, 사용온도를 높게 하면 사용중에 석출되는 탄화물의 재용해가 일어날 가능성이 있어 사용중의 열화를 정확히 평가하기 어렵게 된다. 실제로는 추정되는 사용온도 근처에서 허용되는 범위 내에서 장시간 시험으로 잔여수명을 추정하고, 조직관찰, 기계적 특성변화, 기존의 creep-rupture data 등의 비교와 함께 각종 비파괴검사를 병행하면서 열화정도를 평가하여 교체시기를 결정하게 된다.

(3) 손상누적율(Life Fraction Rule)의 적용

손상누적율(Life Fraction Rule)의 적용은 관의 전수명 t_0, 운전시간을 t로 나타낼 때 수명소비율은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\Phi_0 = \int_0^t \frac{dt}{t_0}$$

여기서, t_0는 사용온도 T_e와 사용응력 σ_e의 함수로 된다. T_e, σ_e가 일정하다면, Φ_0는 다음과 같

이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_0 = \frac{t}{t_0}$$

사용재에 대한 Creep 파단시험 결과, 시험온도 T, 시험응력σ에 대한 파단시간 t_r'이 구해진다면, 같은 조건에 대하여 미사용재의 creep 파단시간 t_r에 대하여 다음 식으로 수명소비율 Φ_1을 정해진다.

$$\Phi_1 = \frac{t_r'}{t_r}$$

파단조건인 $\Phi_0 + \Phi_1 = \frac{t}{t_0} + \frac{t_r'}{t_r} = 1$로부터 전수명 t_0을 다음과 같이 구해진다.

$$t_0 = \frac{t}{1 - t_r'/t_r}$$

잔존수명 $\bar{t}$는

$$\bar{t} = t_0 - t$$

$\Phi_0 + \Phi_1 = \frac{t}{t_0} + \frac{t_r'}{t_r} = 1$에서 전수명 t_0가 일정하므로 어떤 운전시간 t에서의 수명소비율 Φ_1은 일정하게 되므로 그림 8에서와 같이 파단시간을 log축상에 나타내면, 미사용재와 사용재의 응력-파단시간 곡선은 평행하게 된다.

따라서, 본방법의 적용이 타당한 경우라면, 필요로 하는 사용재의 creep 파단시험 data 수가 parameter법에 비교해서 적어도 좋은 이점이 있다. 그러나, 수명평가 정도(精度)면에서 보면 꼭 만족할만한 결과는 아니라고 생각된다.

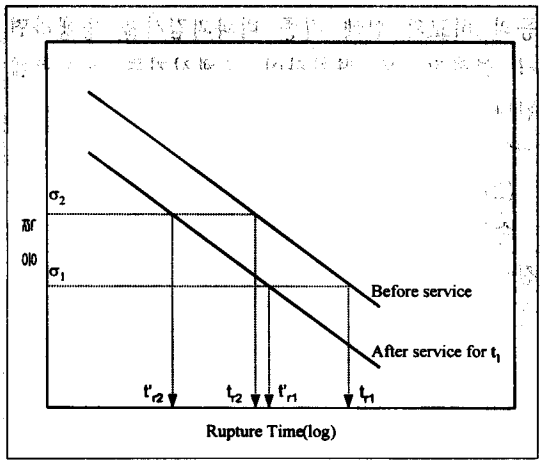


그림 8. Life Fraction Rule을 적용한 Creep 수명평가법

그런데, 위에서 설명한 방법에 있어서는 사용응력σe는 일정하다고 취급했지만 부식에 의해 감육이 생기면 응력은 점점 증가하기 때문에 이 응력 점증효과를 고려하여 평가할 필요가 있게 된다.

우선 감육은 관의 외표면이 고온부식을 받아 생기는 것이고, creep 변형과 함께 내외경의 증가와 두께의 감소를 무시하면, 미사용시의 관외경을 D_0, 두께를 a_0, 사용시의 관외경을 D, 두께를 a, 감육량을 x로 하면 다음과 같다.

$$x = a_0 - a$$

$$D = D_0 - 2x$$

한편, 고온부식량은 시간에 대해 포물선 값에 따른다고 생각하면, 감육량은 운전시간에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$x = A\sqrt{t}$ (A는 사용온도 T_e에 관계되는 정수)

따라서, 감육에 따른 응력 σ의 변화는 평균경공식을 이용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = p\left\{\frac{D_0 - 2A\sqrt{t}}{2(a_0 - A\sqrt{t})} - 0.5\right\}$$

그림 9에 나타낸 예를 보면, 감육에 따른 응력이 점점 증가하는 것을 나타낸 곡선(좌측 그림)에 있어서 운전시간을 단시간 간격으로 나누고, 그 시간 간격 Δt에 있어서 평균응력 σ_n을 구하고, 그 응력에 대한 파단시간 t_r(이것은 σ_n의 함수)를 구한다. 우측 그림의 경우, 손상누적율(Life Fraction Rule)을 고려하므로서 각시간 간격에서의 수명소비율 Φ_n은 $\Phi_n = \frac{\Delta t}{t_r}$로 나타낼 수 있고, $\sum_{n=1}^{N} \Phi_n = 1$를 충족시킨 운전시간 즉 $N \cdot \Delta t$에서 관은 creep 파단하게 된다. 이 식을 만족하는 전수명을 t_0'를 구하면, 이것이 감육을 고려했을 때의 관의 전수명이 된다.

따라서, 운전시간 t에 대해 잔존수명 $\bar{t}$는 $\bar{t} = t_0' - t$가 된다.

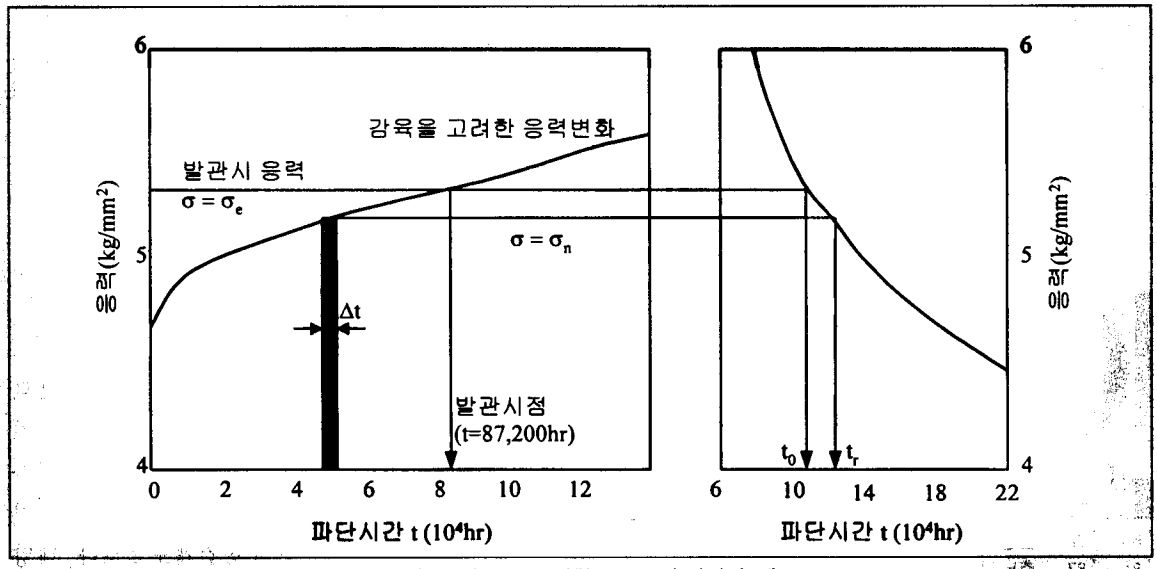


그림 9. 감육을 고려한 Creep 수명평가 예

4. 맺음말

화학 플랜트와 같이 가혹한 환경에서 소재가 겪게 되는 열적, 화학적, 기계적 조건에 따라 생길수 있는 손상과 열화는 다종다양하여 설비의 보수관리와 계획적, 효율적 운용을 위해서는 재료의 열화상태를 정확하게 진단하여 잔존수명 예측에 의하여 소재활용의 경제성을 확보하고 설비의 예상치 않은 손상에 따른 재난을 방지할 수 있는 비파괴적 감시 진단방법에 관한 요소기술들의 개발 중요성은 대단히 크다.

종래의 비파괴검사법(NDT)에서 결함탐상 위주의 UT, PT, RT등과 같은 검사범위를 떠난 비파괴평가법(NDE)을 적용하려는 시도가 많게 됨에따라 비파괴법을 이용한 열화도 계측과 평가에 대한 개념이 확대되고 있지만, 비파괴적 방법들만으로는 아직 정량성이나 정도(精度) 등에 어려움이 있으므로 잔존수명 평가법으로 확립되기까지는 ceep void를 측정하는 replica법, 경도측정법, 전기저항법, 입계부식법, 전기화학적 분극특성을 이용하는 법 등 새로운 방법의 활용과 creep 시험에 의한 평가법을 병행, 상호보완으로 수명평가 정도향상에 대한 계통적인 연구가 더 활발히 진행될 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] Plantの損傷事例と經年劣化・壽命豫測法, 總合技術 center.

[2] 北川英夫 : "劣化問題の現象と問題點"日本金屬學會, 第 58卷, 第8號, 1986.

[3] 고온설비의 잔존수명예측법 ,대한금속학회회보 Vol.7, No. 4, 1994.

[4] 火力・ 原子力および化學PLANT機器,構造部材の經年劣化と壽命豫測 Realize inc.

[5] Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries, API Standard 530.