

K_{eq}	equivalent single pad stiffness lbs/in	W	total rotor weight lbs
K_p	pivot stiffness lbs/in	W_b	total bearing resultant load lbs
ℓ_1	x direction distance from the dynamic force to the pivot center in	W_p	pivot load lbs
ℓ_2	y direction distance from the dynamic force to the pivot center in	x, X	shaft displacement in
L	pad length in	x_d, X_d	pad displacement in
L_p	pivot length in	δ_p	pivot deflection in
$L_u = W_b/(L \times D)$	bearing unit load psi	ΔD	differential diameter in
m	pad preload	ΔD_t	differential thermal growth in
M	shaft mass lb-s ² /in	ΔT	temperature differential °F
M_d	pad mass	μ	coefficient of thermal expansion in/in °F
M_n	dynamic moment	μ_h, μ_p	housing, pivot coefficient of thermal expansion in/in °F
M_f	frictional moment	ν	poission ratio
N	journal rotational speed rpm	ν_h, ν_p	housing, pivot poission ratio
R_p	pivot radius in	σ_c	compressive strength psi
t	times	σ_m	pivot hertzian maximum contact stress psi
T	temperature °F	σ_t	tensile stress psi
T_d	pad thickness in	σ_y	yield stress psi
TIR	total indicator reading lbs	ω	journal rotational speed

보일러 수명평가를 위한 금속표면 복제기술 소개

에너지 관리공단 부장 김 승 일 042-930-0210
(주)엑셀랩 기술고문/공학박사 전 승 범 042-935-0490

1. 서 론

화력발전 설비나 석유화학 플랜트의 주요 구성품인 압력용기의 금속재료들은 일반적으로 고온등 악조건에서 장기간 노출됨에 따른 재질의 손상에 의하여 재료의 성능이 저하되거나 균열이 발생된다. 이런 현상을 검출하여 설비의 계속 사용여부 판단 및 잔여 수명을 평가하는 기술은 설비의 안전성 확보나 경제적인 운용을 위해서 매우 중요하며 특히 화학플랜트 및 화력발전 설비는 막대한 자금의 투자가 수반되므로 가동율을 높이기 위한 장기연속운전에 대응하는 안전성 확보와 적절한 보전시스템이 요구되고 있다. 특히 우리나라의 경우 1960년대부터 발전소 및 석유

화학 플랜트가 많이 건설되었기 때문에, 10만시간 이상 장시간에 걸쳐 운전되고 있는 플랜트가 점점 증가하면서 설비의 고장률이 높아지고 수리를 위한 정지 시간이 길어지며 계획정비보다는 돌발적인 고장으로 설비의 신뢰성이 낮아지며 운영자들의 어려움이 증가되고 있다. 계획정비기간에 설비에 대한 재질시험등을 통하여 돌발고장을 1회만이라도 방지한다면 고가 장비의 가동을 향상에 크게 기여할 것이다

경제성을 고려한 고장예측 및 수명평가기술은 설비재질의 비파괴시험을 통하여 확인할 수 있다. 비파괴 시험은 균열을 검출하는 비파괴 검사와 균열발생 이전의 손상을 포함한 조기손상을 검출하는 비파괴검사로 구분할 수 있으며 후자의 경우는 금속조직

학적인 방법으로 손상을 직접 검출할 수 있어서 실용성이 크고, 높은 정확도의 수명평가가 가능하기 때문에 널리 사용하고 있다. 본 글에서는 금속표면복제기술을 활용한 압력용기를 이용하는 설비의 고장예측 및 수명평가 기술에 대하여 소개하고자 한다.

2. 금속표면복제 기술

2.1 금속표면 복제기술의 필요성

발전설비 및 석유화학 설비에 사용되는 재질은 용접성을 높이기 위해 저탄소 내열강을 주로 사용하는데, 이러한 재질은 물성치의 변화가 적기 때문에 많은 경우 금속조직의 변화를 관찰하여 손상의 정도를 평가한다. 그러나 이러한 고온, 고압을 받는 발전, 석유화학 설비에서 직접 시료를 채취한다는 것은 매우 어려운 일이며, 이동식 연마기와 현미경을 이용한다 해도 설비구조의 복잡성 및 여건이 여의치 않아 해상능력이 떨어지는 경우가 많다. 이러한 이유 때문에 금속조직을 다른 물질에 복제 시켜 그 물질을 실험실에서 간접적으로 관찰 분석할 수 있는 표면 복제기술을 많이 사용하고 있다. 실제적으로 Replica는 광학현미경으로 X50~X500, 주사현미경(SEM)으로 X100~X10,000이상까지 관찰이 가능하다.

2.2 Replication 및 관찰법의 규격화

Replica의 채취 및 관찰요령에 대해서는 1974년에 제정된 국제규격 ISO 3057

(Non-Destructive Testing-Metallographic Replica Techniques of Surface Examination)이 있으며, 미국의 경우에는 1987년에 ASTM ES 12의 긴급 규격이 제정되어 1990년에 ASTM E 1351(Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas)로 정식 규격화되어 있다.

2.3 표면복제법의 기본원리

어떤 관찰대상이 되는 표면에 피복 시킨 후 그 막을 떼어내어 광학 현미경이나,

주사현미경(SEM)으로 관찰하는 것으로, 1단계 Replica법, 2단계 Replica법, 추출 Replica법 등으로 구별된다.

가) 1단계 Replica법

떼어낸 막 즉, Replica의 요철이 대상표면의 요철과 반대가 되어 나타나는 것으로

개략적 그림을 Fig. 1에 나타내었다.

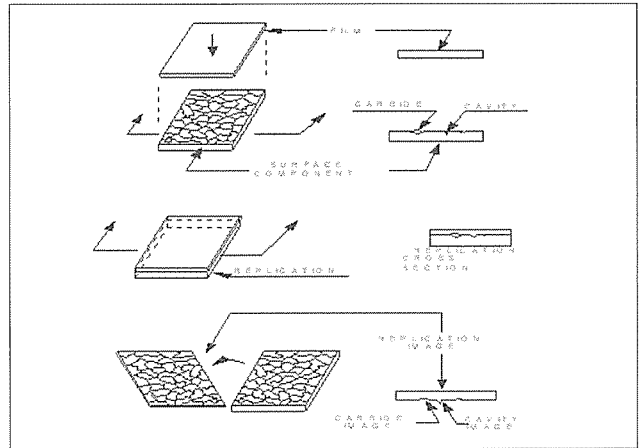


Fig. 1 표면 복제 기법

나) 2단계 Replica법

시험편의 요철이 심한 경우나 막을 손상 없이 떼어내기 힘든 경우에 플라스틱으로 두꺼운 Replica를 만든 후 이로부터 1단계의 Replica법과 같은 얇은 Replica를 만든다. 이때의 Replica의 요철은 시험편 표면과 일치한다.

다) 추출 Replica법

적당한 부식액으로 기지(matrix)를 먼저 녹여내어 석출물이나 개재물을 약간 돌출하게 하여 Replica를 만들고 떼어내기 전에 다시 기지만을 더 부식시켜 석출물이나 개재물이 Replica에 붙어서 떨어지도록 하여 이를 분석하는 방법이다.

2.4 Replica 채취법

가) Replica Film

금속조직 검사용으로 사용되는 Replica막은 acetylcellulose film과 paraffin을 조합한 것으로 0.035mm, 0.08mm 두께의 두 종류가 있다. 보통의 경우 0.035mm를 사용하며, 요철이 심하고 온도가 높아 래프리카 막이 연화하기 쉬운 경우에는 0.08mm 사용한다.

참고적으로 acetylcellulose film의 비중은 1.3, 흡수율은 24시간, 침적시 5%, 최고 사용온도 100°C, 연소성은 완전성이며, 용재로는 시약 1급 규격이상의

methylacetate를 사용한다.

나) Replica 채취요령

현장에서의 Replica 채취는 작업장소의 협소, 안전성, 석탄 및 단열재의 분진, 기타 다른 작업자들의 왕래 등 많은 요소에서 제약을 받는다.

그러나, 정밀한 분석을 위해서는 실험실에서 채취한 것과 같은 수준의 양질의 Replica가 요구되므로 상호간의 유기적인 작업협조, 상당한 숙련과 경험이 요구된다. 또한 설비 특성상 주 검사부위가 용접부이므로 연마 면적이 증가하므로 많은 시간이 소요되며 film을 붙이거나, 제거 시에도 어려움이 따른다.

다) Replica 채취순서

(1) Rough Grinding

Grinder로 약 15~20mm의 범위를 0.3~2.0mm 깊이로 연마하여 탈탄층, 가동 층 등의 변질층을 완전히 제거한다. 이 경우 기름 등에 의한 오염층도 충분히 제거하여야 한다.

(2) Fine Grinding

#100, #220, #400, #600, #800, #1200 등 연마지를 이용하여 연마한다.

각 mesh(#)마다 전 단계 연마자국이 없어질 때까지 직각 방향으로 연마하며, 한 공정이 끝날 때마다 heavy etching을 한 후 알코올로 세척 후 다음 공정을 실시 한다.

(3) Polishing

6 μ , 1 μ 까지 alumina입자나 diamond 입자를 사용하여 polishing하며, Polishing후 연마분을 충분히 제거한다. 또한, polishing 속도가 너무 빠르면 pit을 유발시킬 수 있으므로 주의해야 한다. 이때, 최후의 polishing 방향은 pipe의 경우는 길이 방향의 직각이 되도록 한다.

(4) Etching

Etching은 Replica 채취시 가장 중요한 작업중의 하나이다. Etching 정도에 따라 Cavity 관찰여부가 결정되므로 주의를 해야한다.

Etching은 재질의 열화도, 진단부위, 온도 등에 매우 민감하므로 일정한 시간으로 규정되어 있는 것이 아니고, 오로지 육안으로 판별을 해야 하기 때문에 많은 경험이 필요로 한다.

만약 Replica를 채취하여 이동식 현미경 관찰결과

Over Etching된 경우 다시 Polishing 해야 하는 번거로움이 있으므로 작업의 능률이 매우 저하된다.

참고로, Cavity를 관찰하기 위해서는 Light Etching 하는 것이 좋다. 주사현미경(SEM)으로 관찰하기 위해 Au Coating한 후 보면, Cavity는 가운데 부분이 튀어나와 전자를 많이 반사하므로 중앙부분이 하얗게 나타나며, Carbide의 경우는 가장자리가 하얗게 나타나므로 쉽게 구별된다.

그러나, Over-Etching되면 Carbide가 떨어져나가 Cavity와 구별이 어려워진다.

또한 Cavity 자체에서 Carbide가 석출되는 경우도 구분이 어려워진다.

(5) Replica 채취단계

- * 용제가 적을 시 피검면과 밀착성이 나빠져 정확한 금속조직을 복제할 수 없다.
- * 용제가 많을 시 Replica film이 녹아 기포가 발생하는 경우가 있다.
- * 특히 굴곡이 심한 HAZ부는 세심한 주의가 요구된다.
- * Replica를 떼어낼 때 완전히 마르지 않으면 오그라들거나 찌그러짐이 생긴다.
- * Replica를 떼어낼 때 속도가 너무 빠르면 줄무늬(Striation)가 발생하므로 가능한한 동일속도로 천천히 떼어낸다.

(6) Marking

- * Film을 붙인 후 마르는 시간동안 Replica 가장자리에 견출지를 이용하여 위치, Number, 부식상태, 모재부와 용접부 경계, 붙이는 방향 등을 표시하여준다.
- * Replica film에도 모재, HAZ, 용접부, HAZ, 모재부의 경계를 Marking해 두는 것이 현미경 관찰할 때 유리하다.

(7) Slide Glass에 부착

- * Slide Glass에 Replica 조직의 이면을 양면테이프를 이용하여 붙인다. 이때 Replica가 고른 면이 접착되도록 한다. 고르지 못한 경우 밑면이 떨어져 해상도가 떨어진다.

(8) 현장 Replica 채취시 필요장비 및 소모품

아래의 OMR Kit를 사용하면 현장에서 손쉽게 시편채취 없이도 금속조직을 관찰할 수 있다.



Fig 2 : OMR Kit

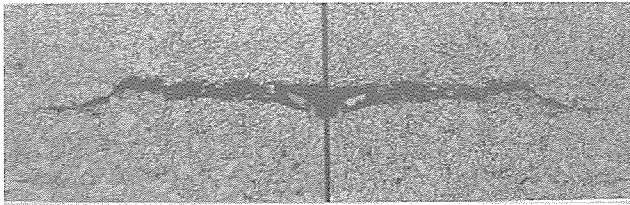


Fig.3 : 실제 및 Replica 조직 비교

3. 금속표면 복제기술을 이용한 수명 평가법

크리프 발생 온도영역에서 사용되는 발전설비나 석유화학 플랜트 요소들은 보통 저합금강(1Cr-0.5Mo, 0.5Cr-Mo-V, 2.25Cr-1Mo등)으로 제작되는데 이들 소재의 미세조직은 불림(소준)상태에서 양호한 크리프 특성을 나타내며 기공은 크리프 후반(수명의 50%) 이후에나 나타난다. 그러나 합금조성이 약간 변하거나, 용접에 의해 최고 오스테나이트 처리온도(AUSTENITIZING TEMPERATURE) 또는 냉각속도가 증가하면 미세조직은 베이나이트가 되고 초기 오스테나이트 입계가 남게된다. 열영향부(HAZ)의 조대결정립 영역(Coarse-grained region)은 결정립 크기, 경도, 강도(인장 및 크리프 강도)는 상당히 증가하지만 크리프 연성은 크게 감소되며 초기 오스테나이트 입계에서 기공이 쉽게 생성된다. 이 기공을 정량화하는 방법이 많이 알려져 있는데 대표적인 기공의 정량적 평가방법이 A-parameter법이다. 여기서 이 A-parameter 법에 대해 알아보고 이것이 어떻게 적용되는지 알아보자.

3.1 기공에 의한 손상도

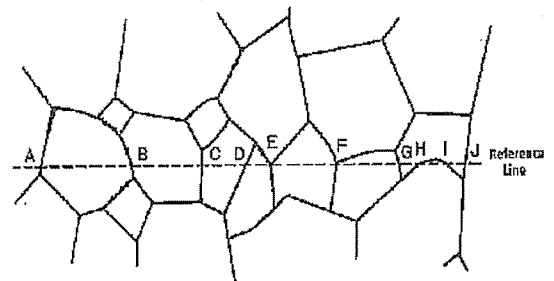
가. 정의

- A-parameter법은 영국의 ERA, CEEGB 및 미국의 EPRI에서 제안된 방법.
- 정의 : 평가 대상재의 광학현미경 조직에 최대 주응력방향으로 직선을 그어 그 직선과 입계와의 교차점($n_D + n_U$)에서 점유하고 있는 크리프 기공발생 입계 즉 손상 입계의 비율. (참조 Fig. 4)

$$A = \frac{n_D}{n_D + n_U}$$

n_U : 손상을 받지 않은 입계 수

n_D : 손상을 받은 입계 수



Grain Boundary with Void : A, B, C, E (數: n_D)
 Grain Boundary without Void : D, F, G, H, I, J (數: n_U)
 $n_D = 4$ $n_U = 6$ $A = \frac{n_D}{n_D + n_U} = 0.4$

Fig. 4 "A" Parameter 계산법

나. A-parameter의 측정법

A-parameter는 광학현미경을 이용하여 대개 400~500배로 측정하며, 결정립이 큰 경우에는 배율을 낮추어 관찰한다.

탄화물이나 비금속재물과 기공을 구별하여야 하는데 크기가 $0.5\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$ 보다 작으면 기공과 구별하기가 쉽지 않다. 정확한 결과를 얻으려면 최소한 400개 이상의 교차점을 관찰하여야 한다.

규칙 1 : 직선과 교차점 양쪽에 있는 최초의 입계 삼중점 사이만을 관찰대상으로 한다. 입계가 시야 밖에까지 걸쳐 있으면 입계가 시야에서 벗어나는 점을 삼중점으로 한다.

규칙 2 : 관찰대상 입계(삼중점 포함)에 1개 이상의 기공이나 미세균열이 존재하면 손상을 받은 것으로 분류하고, 그렇지 않으면 손상을 받지 않은 것으로 분류한다.

규칙 3 : 동일한 입계에 여러 교차점이 존재할 때에

는 각각 샘플을 하고, 손상 여부는 관찰 대상 입계 전체의 상태로써 결정한다.

규칙 4 : 삼중점과 일치하는 교차점은 1개로 셈하며, 손상 여부는 삼중점을 이루는 세 입계의 손상 상태를 고려하여 우세한 쪽을 택한다.

replica 에서의 기공 밀집 부분을 선택하여 최대 주 응력방향으로 직선을 그어 입계와의 교차점을 규칙에 따라 세어야 한다.

앞서 측정했던 것과 겹쳐 측정하면 안 되기 때문에 다음 측정 방향이 처음의 직선과 평행한 방향이 되도록 측정 부위를 등 간격으로 이동하며 측정한다.

3.2 A-parameter를 이용한 잔여수명 평가

측정된 "A"값으로부터 잔여수명을 평가하는 방법에는 가. 계산 모델에 의한 접근방법 나. 경험적 접근방법 다. 손상등급 분류에 의한 접근방법 등 3가지가 있으며 분석결과로 부터 계속적인 모니터링 여부나 보수 여부를 결정할 수 있고, 필요시에는 보수 시기도 결정할 수 있다.

가. 계산 모델에 의한 접근방법

영국 ERA의 Cane 박사에 의해 제안

$$t_{rem} = t \cdot \left[\left(1 - \left(1 - \frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} - 1 \right]$$

A : 기공발생 입계분율

n : 크리프 응력지수

A : ϵ_r / ϵ_s

ϵ_r : 크리프 파단 변형률

ϵ_s : $\epsilon_m \cdot t_r$

ϵ_m : 최소 크리프 속도

t_r : 크리프 파단 수명

t : 사용시간

나. 경험적 접근 방법

크리프 수명소비율과 관련된 모든 실험적 A값을 도시하여 보면 일정한 흐트러짐 폭(Scatter band)을 갖으면서 일정한 상관관계를 나타내며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_{rem} = f \cdot \left[\frac{0.522}{A + 0.036} - 1 \right]$$

t_{rem} : 잔여수명

t : 총사용시간

A에 2×(표준편차), 즉 0.15를 더하면 하한선은 다음과 같다.

$$f_{rem} = f \cdot \left[\frac{0.522}{A + 0.186} - 1 \right]$$

다. 손상등급 분류에 의한 접근 방법

1) 정성적 접근방법

이 방법은 Neubauer에 의해 제안되었는데 이 방법은 <표 2> 와 같이 크리프 기공을 다섯등급으로 분류

표.1 크리프 기공의 정성적 평가

Damage Level		Description	Comments	Action Required
Neubaur	ERA			
1	A	Undamage	No creep damage detected	None until next major scheduled maintenance outage
2	B	Isolated	Isolated cavities are observed. It is not possible to reduce the direction of maxium principal stress from the damage seen.	
3	C	Oriented	Cavities are observed, often with mutiple cavities on the same boundary. A clear alignment of damaged boundaries can be seen, indicating the axis of maximum principal stress	Replica test at specified interval
4	D	Microcracked	Cavities are observed on boundaries normal to maximum principal stress. Some boundaries have separated because cavities one them have interlinked to form microcracks	Limited service untile repair
5	E	Macrocracked	In addition to cavities and microcracks being observed, microcracks have joined and widened to from macracks many grain boundaries long	Immediated

하여 평가하며 손상 등급에 따라 필요한 조치를 취한다. 그러나 기공 평가는 요소의 수명을 평가한다기 보다는 차기 정기점검 기간까지의 안전을 보장하면 되는 것이기 때문에 너무 안전하다.

2) 정성적/정량적 접근방법

정성적인 손상 분류와, A-parameter - 수명소비율 관계 사이의 상관 관계를 이용한 잔여수명 예측방법이다.

손상등급과 수명소비율과의 관계로부터 직접 잔여 수명을 구하는 방법이다. 즉 손상등급이 결정된 모든 시료에 대하여 손상등급과 수명소비율과의 관계를 구하는 방법으로 Cane와 Shammas가 제안하였다. 시간 t 동안 사용하였을 경우의 수명소비율 추정값을 X (즉 $t/t_c : t_c$ 은 크리프 파단수명)라고 하면 잔여수명(t_{rem})은 다음식으로 주어진다.

$$t_{rem} = t \cdot \left(\frac{1}{X} - 1 \right)$$

손상등급과 수명소비율 범위 및 그리고 최소 최대 수명잔여율($1/X-1$)을 표 2에 나타내었다.

표에 따르면 최소잔여 수명은 손상등급에 따라 $2.7t$, $1.17t$, $0.54t$, $0.19t$ 가 된다. 이 값에 안전계수 (Safety factor) 3을 적용시키면 손상 등급에 따라 각각 $0.9t$, $0.39t$, $0.18t$, $0.06t$ 의 재검사 주기가 설정된다.

$$t_{recheck} = \frac{t_{rem}}{3} = \frac{t}{3} \cdot \left(\frac{1}{X} - 1 \right)$$

이 방법은 예측된 최소 잔여수명은 상당한 안전성을 보장할 수 있으며 동시에 최대 잔여수명의 예측도 가능하기 때문에 사용 계획 년수내에 보수가 필수적

인지의 여부를 판정할 수 있으며 향후 보수 및 교체 시기에 대한 계획 수립 시에도 반영시킬 수 있다. 또한 A-parameter 를 측정하는 것보다 훨씬 빨리 평가할 수 있으며 Replica 채취 면적이 작아도 가능하다는 장점이 있다.

4. 결 론

위에서 금속표면복제 채취법 및 표면복제를 이용한 수명평가 기법에 대하여 설명하였다. 발전설비 및 석유화학 설비에 사용되는 재료는 용접성을 높이기 위해 저탄소 내열강을 주로 사용하는데, 이러한 재료는 물성치의 변화가 적기 때문에 많은 경우 금속조직의 변화를 관찰하여 손상의 정도를 평가한다.

그러나 이러한 고온, 고압을 받는 발전, 석유화학 설비에서 직접 시료를 채취한다는 것은 매우 어려운 일이며, 이동식 연마기와 현미경을 이용한다 해도 설비구조의 복잡성 및 여건이 여의치 않아 해상 능력이 떨어지는 경우가 많다. 이와 같은 이유로 금속조직을 다른 물질에 복제시켜 관찰한다. 금속표면 복제법은 금속의 조직을 관찰하기 때문에 균열의 종류를 파악할 수 있고 금속조직의 변화를 정밀하게 측정할 수 있기 때문에 수명평가에 많이 사용되고 있다.

위험물의 경우 인명 및 재산적 피해가 크므로 파손되기 이전의 검사가 중요하게 된다. 따라서 일반적인 비파괴 검사 뿐만아니라 금속조직 검사를 활용하여 검사하면 균열 이전 금속조직의 상태를 파악할 수 있어 안전성 관리에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

표. 2 손상등급과 수명소비율 및 수명잔여율과의 관계(일반적 적용)

Damage Classification	Consumed Life Fraction Range(%)	Remaining Life Factor (1/X-1)	
		Minimum	Maximum
Undamaged	0.00 - 0.12	7.33	Unknown
Isolated Cavities	0.04 - 0.46	1.17	24.0
Oriented Cavities	0.3 - 0.5	1.0	2.33
Microcracks	0.3 - 0.84	0.19	2.33
Macrocracks	0.72 - 1.00	0(Failed)	0.39